本資料のうち，□は商業機密又は核物質防護上の観点から公開できません。

核燃料輸送物設計承認申請書

発室発第９６号
令和８年９月３０日

原子力規制委員会　殿

住所　東京都台東区上野五丁目２番１号
氏名　日本原子力発電株式会社
取締役社長　村松　衛

核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示（平成２年科学技術庁告示第５号）第41条第１項の規定により，下記のとおり申請します。

記

1　核燃料輸送物の名称
MSF-24P 型

2　輸送容器の外形寸法，重量及び主要材料
(1) 輸送容器の外形寸法　外径　3.550m（上・下部緩衝体を含む。）
長さ　6.783m（上・下部緩衝体を含む。）

(2) 輸送容器の重量　117.7 トン以下（輸送架台は含まず。）

(3) 核燃料輸送物の総重量　134.4 トン以下（輸送架台は含まず。）

(4) 輸送容器の主要材料

イ	胴	炭素鋼
ロ	外筒	炭素鋼
ハ	一次蓋	炭素鋼
ニ	二次蓋	炭素鋼
ホ	三次蓋	ステンレス鋼
ヘ	中性子遮蔽材	レジン
ト	伝熱フィン	銅
チ	バスケット	ほう素添加アルミニウム合金及びアルミニウム合金
リ	緩衝体	ステンレス鋼及び木材 ( )

(5) 輸送容器の概略を示す図

添付図-1 のとおり。

詳細形状は，本核燃料輸送物の核燃料輸送物設計承認申請書に係る別紙１の(ｲ)-第 C.1 図から(ｲ)-第 D.5 図までに示されている。

3 核燃料輸送物の種類

BM 型核分裂性輸送物

4 収納する核燃料物質等の種類，性状，重量及び放射能の量

添付表-1 のとおり。

5 輸送制限個数

(1) 輸送制限個数：制限なし

(2) 配列方法：任意

(3) 臨界安全指数：0

6 運搬中に予想される周囲の温度の範囲

-25℃から 38℃まで

7 収納物の臨界防止のための核燃料輸送物の構造に関する事項

アルミニウム合金製のバスケットプレートから構成された格子構造状のバスケットにより，個々の燃料集合体を輸送容器の所定の位置に収納するとともに，バスケット内に中性子吸収材を配置することで臨界を防止する構造としている。

8 臨界安全評価における浸水の領域に関する事項

本輸送容器は浸水及び漏水を防止する特別な措置として，二次蓋及び三次蓋による多重の防水機能を有し，密封境界である三次蓋，胴及び底板は通常輸送時，核分裂性輸送物に係る一般及び

特別の試験条件においても水が浸入する亀裂，破損が生じるおそれのない設計であることから水密性が維持されるため，臨界安全評価においては微量の浸水のみを考慮して評価している。

なお，本輸送容器の製作においては，申請書に係る別紙２に示す高度な品質管理を行う。また，発送前検査においては，申請書に係る別紙１のとおり品質管理を実施し，防水機能を有する二次蓋及び三次蓋の水密性を確認し，胴及び底板に異常がないことを確認する。

9　収納物の密封性に関する事項

輸送容器の密封境界は胴，三次蓋及びリリーフバルブカバープレートから構成されており，三次蓋と胴の上部フランジとの接合面及びリリーフバルブカバープレートと三次蓋との接合面にはＯリングが設けられている。

10 BM型輸送物にあっては，BU型輸送物の設計基準のうち適合しない基準についての説明

-40℃の周囲温度において，亀裂，破損等の生じるおそれがないことが確認されていない。

11 輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱いに関する事項

本輸送容器は輸送及び貯蔵を兼ねたキャスクであり，貯蔵予定期間における経年変化を考慮した本輸送容器の保守及び本核燃料輸送物の取扱いについては，申請書に係る別紙１のとおり。

また，本核燃料輸送物の運搬は，周囲の温度-25℃以上で専用積載にて実施する。

12 輸送容器に係る品質管理の方法等（設計に係るものに限る。）に関する事項

輸送容器に係る品質管理の方法等（設計に係るものに限る。）に関する事項については，申請書に係る別紙２のとおり。

13 その他特記事項

本輸送容器は輸送及び貯蔵を兼ねたキャスクであり，輸送容器の使用予定回数を 10 回，輸送時吊上回数を 20 回（輸送ごと），使用予定年数を 60 年及び貯蔵予定期間を 60 年としている。また，緩衝体及び三次蓋の使用予定年数を 60 年，三次蓋の使用計画回数を 600 回としており，これらは同型式の輸送容器間で共用する。

外運搬規則等の改正に伴い本輸送物に係る技術上の基準が変更となった場合及び新たな技術的知見が得られた場合は，設計への影響を評価し，必要に応じて設計変更承認申請等の手続きを行う。

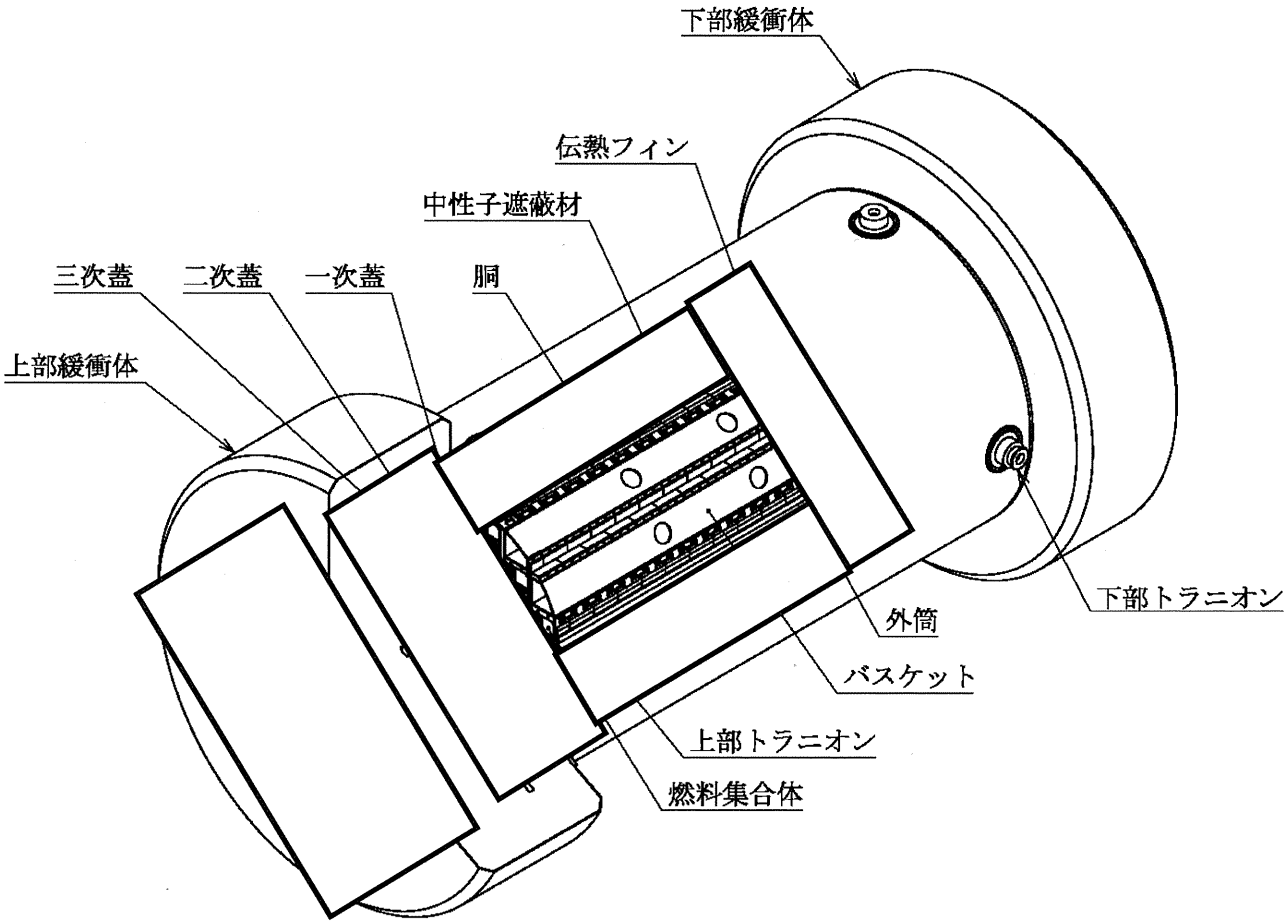
詳細については，申請書に係る別紙１のとおり。

（別紙記載事項）

別紙１　輸送容器の設計及び核燃料物質等を当該輸送容器に収納した場合の核燃料輸送物の安全性に関する説明書

イ	核燃料輸送物の説明 ……	(ｲ) 章
ロ	核燃料輸送物の安全解析 ……	(ﾛ) 章
ハ	輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱い方法 ……	(ﾊ) 章
ニ	安全設計及び安全輸送に関する特記事項 ……	(ﾆ) 章
参考	輸送容器の製作の方法の概要に関する説明 ……	参考

別紙２　輸送容器に係る品質管理の方法等（設計に係るものに限る。）に関する説明書



添付図-1　輸送物全体図（鳥瞰図）

添付表-1　輸送容器１基に収納する核燃料物質の仕様

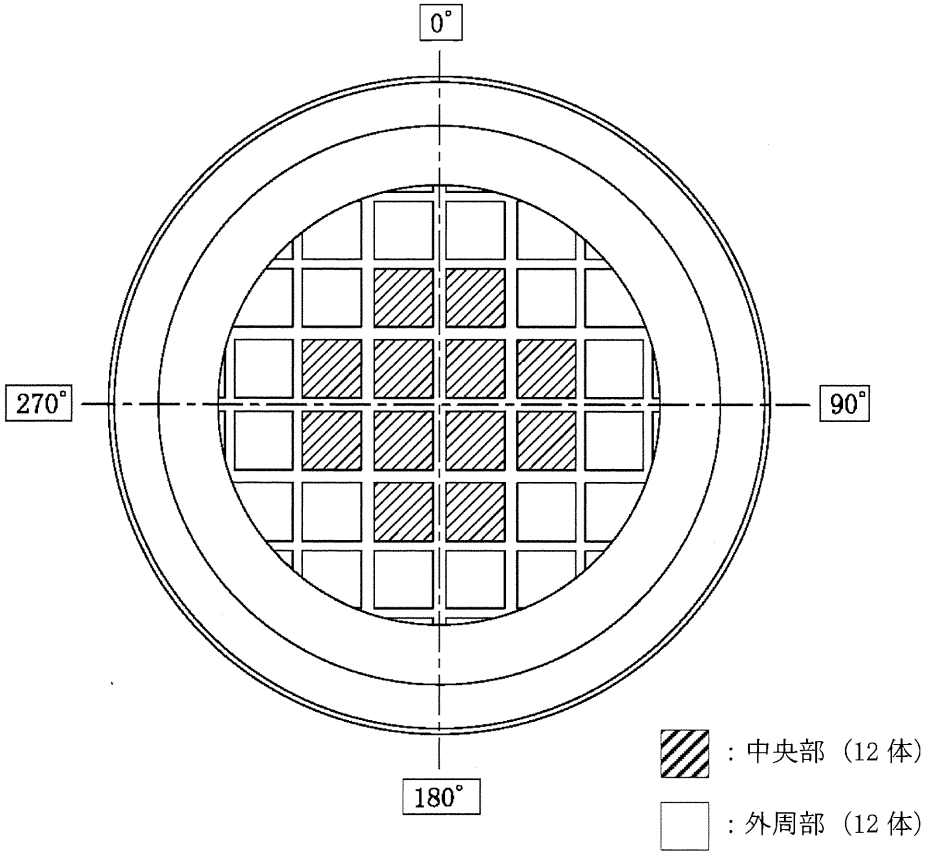
<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="4">燃料集合体の種類と型式
項　　目</td><td colspan="4">中央部</td><td colspan="4">外周部</td></tr>
<tr><td colspan="8">17×17 燃料</td></tr>
<tr><td colspan="2">48000MWd/t 型</td><td colspan="2">39000MWd/t 型</td><td colspan="2">48000MWd/t 型</td><td colspan="2">39000MWd/t 型</td></tr>
<tr><td>A型</td><td>B型</td><td>A型</td><td>B型</td><td>A型</td><td>B型</td><td>A型</td><td>B型</td></tr>
<tr><td colspan="2">種　　類</td><td colspan="8">軽水炉（PWR）使用済燃料(注 1)</td></tr>
<tr><td colspan="2">性　　状</td><td colspan="8">固体（二酸化ウラン粉末焼結体）</td></tr>
<tr><td rowspan="6">燃料集合体1体の仕様</td><td>燃料集合体重量
(kg 以下)</td><td colspan="8">680</td></tr>
<tr><td>ウラン重量
(kg 以下)</td><td colspan="8"></td></tr>
<tr><td>放射能の量
(収納物平均)
(PBq 以下)</td><td colspan="8"></td></tr>
<tr><td>初期濃縮度
(wt%以下)</td><td colspan="2">4.2</td><td colspan="2">3.7</td><td colspan="2">4.2</td><td colspan="2">3.7</td></tr>
<tr><td>最高燃焼度
(MWd/t 以下)</td><td colspan="8" rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>冷却日数
(日以上)</td></tr>
<tr><td rowspan="5">輸送容器1基当たりの仕様</td><td rowspan="2">収納体数(注 2)
(体以下)</td><td colspan="4">12</td><td colspan="4">12</td></tr>
<tr><td colspan="8">24</td></tr>
<tr><td>平均燃焼度
(MWd/t 以下)</td><td colspan="8"></td></tr>
<tr><td>放射能の量(注 3)
(PBq 以下)</td><td colspan="8"></td></tr>
<tr><td>最大発熱量
(kW 以下)</td><td colspan="8">13.9</td></tr>
<tr><td>収納物重量
（トン以下）</td><td colspan="8">16.7(注 4)</td></tr>
</table>

(注 1)表面から１メートルの距離における空気吸収線量率は１グレイ毎時を超える。
(注 2)燃料集合体は添付図-2 に示すとおり収納位置が制限される。また，バーナブルポイズン集合体を挿入した燃料集合体を収納する場合の収納位置は中央部に制限される。
なお，48000MWd/t 型及び 39000MWd/t 型並びにＡ型及びＢ型は混載可能である。

(注 3)燃料集合体 1 体における主要な核種は燃焼度ごとに次のとおりである。

主要な核種	放射能強度（TBq/体以下）	
	48000MWd/t 型	39000MWd/t 型
燃焼度		
Sr-90		
Y-90		
Cs-137		
Ba-137m		
Eu-154		

(注 4)収納物重量は，燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体（12 体：約[redacted] kg）の合計値である（バーナブルポイズン集合体：約[redacted] kg/体）。



添付図-2　燃料集合体の収納位置

以　上

ＭＳＦ－２４Ｐ型
核燃料輸送物設計承認申請書

別　紙

日本原子力発電株式会社

別紙１

輸送容器の設計及び核燃料物質等を当該輸送容器に収納した場合の核燃料輸送物の安全性に関する説明書

（ 記載事項 ）

１．核燃料輸送物の説明 …… (ｲ)章

２．核燃料輸送物の安全解析 …… (ﾛ)章

３．輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱い方法 …… (ﾊ)章

４．安全設計及び安全輸送に関する特記事項 …… (ﾆ)章

参考 輸送容器の製作の方法の概要に関する説明

注）本資料における「輸送物」は「核燃料輸送物」を指すものとする。

目　　次

(イ)章　核燃料輸送物の説明 …… (イ)-1

A.　目的及び条件 …… (イ)-1

B.　核燃料輸送物の種類 …… (イ)-4

C.　輸送容器 …… (イ)-4

D.　輸送容器の収納物 …… (イ)-28

(ロ)章　核燃料輸送物の安全解析 …… (ロ)-1

A.　構造解析 …… (ロ)-A-1

A.1　構造設計 …… (ロ)-A-1

A.1.1　概要 …… (ロ)-A-1

A.1.2　設計基準 …… (ロ)-A-2

A.2　重量及び重心 …… (ロ)-A-24

A.3　材料の機械的性質 …… (ロ)-A-25

A.4　輸送物の要件 …… (ロ)-A-41

A.4.1　化学的及び電気的反応 …… (ロ)-A-41

A.4.2　低温強度 …… (ロ)-A-43

A.4.3　密封装置 …… (ロ)-A-45

A.4.4　吊上装置 …… (ロ)-A-45

A.4.4.1　応力評価 …… (ロ)-A-45

A.4.4.2　上部トラニオンの疲労評価 …… (ロ)-A-52

A.4.5　固縛装置 …… (ロ)-A-54

A.4.6　圧力 …… (ロ)-A-60

A.4.7　振動 …… (ロ)-A-60

A.4.8　輸送物の要件に対する評価結果の要約 …… (ロ)-A-62

A.5　一般の試験条件 …… (ロ)-A-63

A.5.1　熱的試験 …… (ロ)-A-63

A.5.1.1　温度及び圧力の要約 …… (ロ)-A-63

A.5.1.2　熱膨張 …… (ロ)-A-65

A.5.1.3　応力計算 …… (¤)-A-65
A.5.1.4　許容応力との比較 …… (¤)-A-74
A.5.2　水噴霧 …… (¤)-A-74
A.5.3　自由落下 …… (¤)-A-75
A.5.3.1　落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度 …… (¤)-A-75
A.5.3.2　落下時の応力計算 …… (¤)-A-84
A.5.4　積み重ね試験 …… (¤)-A-117
A.5.5　貫通 …… (¤)-A-120
A.5.6　角又は縁落下 …… (¤)-A-121
A.5.7　結果の要約及びその評価 …… (¤)-A-121
A.6　特別の試験条件 …… (¤)-A-129
A.6.1　強度試験・落下試験Ⅰ（9m 落下時） …… (¤)-A-129
A.6.1.1　垂直落下 …… (¤)-A-132
A.6.1.2　水平落下 …… (¤)-A-141
A.6.1.3　コーナー落下 …… (¤)-A-148
A.6.1.4　傾斜落下 …… (¤)-A-150
A.6.1.5　結果の要約 …… (¤)-A-151
A.6.2　強度試験・落下試験Ⅱ（1m 落下時） …… (¤)-A-151
A.6.2.1　結果の要約 …… (¤)-A-154
A.6.3　熱的試験 …… (¤)-A-155
A.6.3.1　温度及び圧力の要約 …… (¤)-A-155
A.6.3.2　熱膨張 …… (¤)-A-157
A.6.3.3　許容応力との比較 …… (¤)-A-159
A.6.4　浸漬 …… (¤)-A-162
A.6.5　結果の要約及びその評価 …… (¤)-A-163
A.7　強化浸漬試験 …… (¤)-A-168
A.8　放射性収納物 …… (¤)-A-171
A.9　核分裂性輸送物 …… (¤)-A-172
A.9.1　核分裂性輸送物に係る一般の試験条件 …… (¤)-A-172
A.9.2　核分裂性輸送物に係る特別の試験条件 …… (¤)-A-174
A.10　付属書類 …… (¤)-A-183
A.10.1　MSF キャスクの落下試験 …… (¤)-A-183
A.10.2　CRUSH 及び ABAQUS 解析による評価手法の検証 …… (¤)-A-205
A.10.3　MSF-24P 型輸送容器の落下試験結果に基づく密封性能の検証 (¤)-A-217
A.10.4　緩衝材低温時の強度評価 …… (¤)-A-239
A.10.5　落下試験における加速度割増係数について …… (¤)-A-245

A.10.6 MSF-24P 型輸送容器のバスケットプレート用材料
アルミニウム合金（MB-A3004-H112）に関する説明書…… (¤)-A-254
A.10.7 評価に用いた設計線図…… (¤)-A-260
A.10.8 参考文献…… (¤)-A-265

B. 熱解析 …… (¤)-B-1
B.1 概要 …… (¤)-B-1
B.2 材料の熱的性質…… (¤)-B-3
B.3 構成要素の仕様…… (¤)-B-7
B.4 一般の試験条件…… (¤)-B-8
B.4.1 熱解析モデル…… (¤)-B-8
B.4.1.1 解析モデル…… (¤)-B-8
B.4.1.2 試験モデル…… (¤)-B-19
B.4.2 最高温度…… (¤)-B-19
B.4.3 最低温度…… (¤)-B-24
B.4.4 最大内圧…… (¤)-B-24
B.4.5 最大熱応力…… (¤)-B-28
B.4.6 結果の要約及びその評価…… (¤)-B-29
B.5 特別の試験条件…… (¤)-B-32
B.5.1 熱解析モデル…… (¤)-B-32
B.5.1.1 解析モデル…… (¤)-B-32
B.5.1.2 試験モデル…… (¤)-B-38
B.5.2 核燃料輸送物の評価条件…… (¤)-B-38
B.5.3 核燃料輸送物温度…… (¤)-B-39
B.5.4 最大内圧…… (¤)-B-45
B.5.5 最大熱応力…… (¤)-B-49
B.5.6 結果の要約及びその評価…… (¤)-B-50
B.6 付属書類 …… (¤)-B-53
B.6.1 解析に用いた対流熱伝達率について…… (¤)-B-53
B.6.1.1 全体モデルに用いた対流熱伝達率…… (¤)-B-53
B.6.2 混合気体の熱伝導率の計算式について…… (¤)-B-56
B.6.3 近接防止金網の温度評価について…… (¤)-B-58
B.6.4 バスケットサポートの伝熱パスについて…… (¤)-B-60
B.6.5 伝熱フィンと胴・外筒の接続について…… (¤)-B-62
B.6.6 特別の試験条件における中性子遮蔽材の焼損割合について… (¤)-B-63
B.6.7 参考文献…… (¤)-B-66

C. 密封解析 ····· (ロ)-C-1
C.1 概要 ····· (ロ)-C-1
C.2 密封装置 ····· (ロ)-C-1
C.2.1 密封装置 ····· (ロ)-C-1
C.2.2 密封装置の貫通部 ····· (ロ)-C-1
C.2.3 密封装置のガスケット及び溶接部 ····· (ロ)-C-1
C.2.4 蓋 ····· (ロ)-C-2
C.3 一般の試験条件 ····· (ロ)-C-2
C.3.1 放射性物質の漏えい ····· (ロ)-C-2
C.3.2 密封装置の加圧 ····· (ロ)-C-6
C.3.3 冷却材汚染 ····· (ロ)-C-6
C.3.4 冷却材損失 ····· (ロ)-C-6
C.4 特別の試験条件 ····· (ロ)-C-6
C.4.1 核分裂生成ガス ····· (ロ)-C-6
C.4.2 放射性物質の漏えい ····· (ロ)-C-6
C.5 結果の要約及びその評価 ····· (ロ)-C-8
C.6 付属書類 ····· (ロ)-C-9
C.6.1 参考文献 ····· (ロ)-C-9

D. 遮蔽解析 ····· (ロ)-D-1
D.1 概要 ····· (ロ)-D-1
D.2 線源仕様 ····· (ロ)-D-1
D.2.1 ガンマ線源 ····· (ロ)-D-4
D.2.2 中性子源 ····· (ロ)-D-8
D.3 モデル仕様 ····· (ロ)-D-14
D.3.1 解析モデル ····· (ロ)-D-14
D.3.2 解析モデル各領域における原子個数密度 ····· (ロ)-D-22
D.4 遮蔽評価 ····· (ロ)-D-28
D.5 結果の要約及びその評価 ····· (ロ)-D-34
D.6 付属書類 ····· (ロ)-D-36
D.6.1 線源強度の計算に用いる軸方向燃焼度分布 ····· (ロ)-D-36
D.6.2 均質化モデルの妥当性について ····· (ロ)-D-37
D.6.3 中性子遮蔽材の構成元素の原子個数密度と製造時の確認 ···· (ロ)-D-44
D.6.4 トラニオン部の線束モデル間の引継ぎ及び線量当量率の計算について ····· (ロ)-D-44
D.6.5 参考文献 ····· (ロ)-D-57

E. 臨界解析 ····· (ロ)-E-1
E.1 概要 ····· (ロ)-E-1
E.2 解析対象 ····· (ロ)-E-1
E.2.1 収納物 ····· (ロ)-E-1
E.2.2 輸送容器 ····· (ロ)-E-3
E.2.3 中性子吸収材 ····· (ロ)-E-3
E.3 モデル仕様 ····· (ロ)-E-4
E.3.1 解析モデル ····· (ロ)-E-4
E.3.2 解析モデル各領域における原子個数密度 ····· (ロ)-E-12
E.4 未臨界評価 ····· (ロ)-E-13
E.4.1 計算条件 ····· (ロ)-E-13
E.4.2 輸送物への水の浸入等 ····· (ロ)-E-13
E.4.3 計算方法 ····· (ロ)-E-14
E.4.4 計算結果 ····· (ロ)-E-14
E.5 ベンチマーク試験 ····· (ロ)-E-16
E.6 結果の要約及びその評価 ····· (ロ)-E-24
E.7 付属書類 ····· (ロ)-E-25
E.7.1 輸送容器の品質管理及び輸送前の密封性能の確認 ····· (ロ)-E-25
E.7.2 胴内の浸水量 ····· (ロ)-E-25
E.7.3 取扱い時の臨界解析 ····· (ロ)-E-27
E.7.4 参考文献 ····· (ロ)-E-33

F. 核燃料輸送物の経年変化の考慮 ····· (ロ)-F-1
F.1 考慮すべき経年変化要因 ····· (ロ)-F-1
F.2 安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価 ····· (ロ)-F-1
F.3 安全解析における経年変化の考慮内容 ····· (ロ)-F-22
F.4 付属書類 ····· (ロ)-F-35
F.4.1 燃料被覆管に発生する周方向応力について ····· (ロ)-F-35
F.4.2 参考文献 ····· (ロ)-F-37

G. 外運搬規則及び外運搬告示に対する適合性の評価 ····· (ロ)-G-1

(ハ)章 輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱い方法 ····· (ハ)-1

A. 核燃料輸送物の取扱い方法 ····· (ハ)-1
A.1 装荷方法 ····· (ハ)-1
A.1.1 発電所での空容器受取・燃料装荷準備作業 ····· (ハ)-1

A.1.2　燃料装荷作業・搬出準備作業 …… (ハ)-2
A.2　貯蔵方法 …… (ハ)-3
A.2.1　使用済燃料乾式貯蔵施設への輸送 …… (ハ)-3
A.2.2　乾式貯蔵施設での取扱い …… (ハ)-3
A.2.3　再処理工場への輸送 …… (ハ)-4
A.3　取出し方法 …… (ハ)-4
A.3.1　再処理工場での輸送物の受取・燃料取出し準備作業 …… (ハ)-4
A.3.2　燃料取出し作業 …… (ハ)-5
A.3.3　後作業 …… (ハ)-5
A.4　空容器の準備 …… (ハ)-6
A.5　核燃料輸送物の発送前検査 …… (ハ)-8
A.5.1　発電所発送前及び貯蔵期間中に実施する検査 …… (ハ)-8
A.5.2　貯蔵後発送前検査 …… (ハ)-15
A.5.3　乾式貯蔵施設において貯蔵を行わない場合に実施する
発送前検査 …… (ハ)-18
A.6　使用済燃料の長期健全性に関する状況調査 …… (ハ)-19

B.　保守条件 …… (ハ)-21
B.1　外観検査 …… (ハ)-21
B.2　耐圧検査 …… (ハ)-21
B.3　気密漏えい検査 …… (ハ)-21
B.4　遮蔽検査 …… (ハ)-21
B.5　未臨界検査 …… (ハ)-21
B.6　熱検査 …… (ハ)-21
B.7　吊上検査 …… (ハ)-21
B.8　作動確認検査 …… (ハ)-22
B.9　補助系の保守 …… (ハ)-22
B.10　密封装置の弁，ガスケット等の保守（定期保守） …… (ハ)-22
B.11　輸送容器の保管 …… (ハ)-22
B.12　記録の保管 …… (ハ)-22
B.13　その他 …… (ハ)-22

(ニ)章　安全設計及び安全輸送に関する特記事項 …… (ニ)-1

参考　輸送容器の製作の方法の概要に関する説明 …… (参)-A-1
A.　輸送容器の製作方法 …… (参)-A-1
A.1　概要 …… (参)-A-1
A.2　材料の説明 …… (参)-A-6
A.2.1　一般材料 …… (参)-A-6
A.2.2　特殊材料 …… (参)-A-6
A.3　溶接 …… (参)-A-9
B.　輸送容器の試験，検査方法 …… (参)-B-1

(ｲ)章　　核燃料輸送物の説明

(イ)章　核燃料輸送物の説明

A. 目的及び条件

1.	使用目的	軽水炉型原子力発電所(PWR)の使用済燃料を,原子力発電所,使用済燃料乾式貯蔵施設，再処理工場のそれぞれの事業所間で輸送するため。
2.	輸送容器の型名	MSF-24P 型
3.	輸送物の種類	BM 型核分裂性輸送物
4.	輸送制限個数	なし
5.	輸送指数	10 以下
6.	臨界安全指数	0
7.	輸送物の総重量	134.4 トン以下（輸送架台は含まず。）
8.	輸送容器の外形寸法	外径 3.550m，長さ 6.783m（上・下部緩衝体を含む。）
9.	輸送容器の重量	117.7 トン以下（輸送架台は含まず。）
10.	輸送容器の材質	胴―炭素鋼 外筒―炭素鋼 一次蓋―炭素鋼 二次蓋―炭素鋼 三次蓋―ステンレス鋼 中性子遮蔽材―レジン 伝熱フィン―銅 バスケット―ほう素添加アルミニウム合金及びアルミニウム合金 緩衝体―ステンレス鋼及び木材 （[redacted]）
11.	輸送容器に収納する核燃料物質の仕様	核燃料物質の仕様を(イ)-第 A.1 表に示す。
12.	輸送形態	車両による陸上輸送あるいは船による海上輸送 いずれの場合も専用積載として輸送
13.	冷却方法	自然空気冷却
14.	使用予定年数	60 年（設計評価期間）
15.	輸送容器の使用予定回数	10 回
16.	貯蔵予定期間	60 年（設計貯蔵期間）

(イ)-第A.1表　輸送容器1基に収納する核燃料物質の仕様

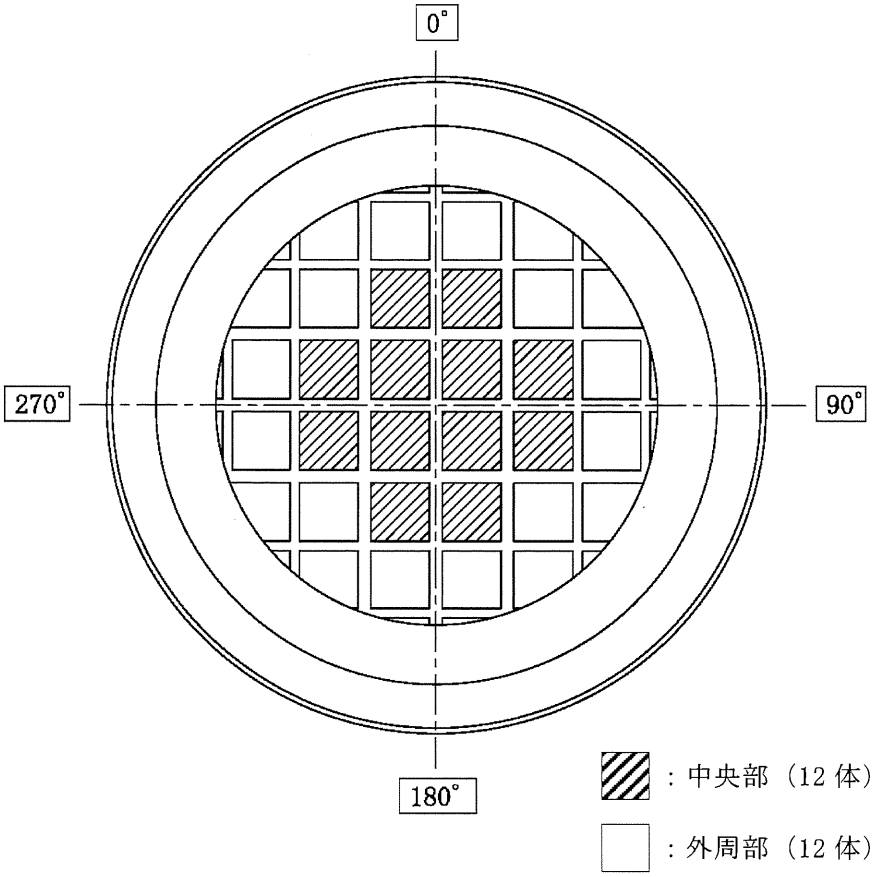
項目 ＼ 燃料集合体の種類と型式		中央部				外周部			
		17×17燃料							
		48000MWd/t型		39000MWd/t型		48000MWd/t型		39000MWd/t型	
		A型	B型	A型	B型	A型	B型	A型	B型
種類		軽水炉（PWR）使用済燃料(注1)							
性状		固体（二酸化ウラン粉末焼結体）							
燃料集合体1体の仕様	ウラン重量（kg以下）	[redacted]							
	放射能の量（収納物平均）（PBq以下）	[redacted]							
	初期濃縮度（wt%以下）	4.2		3.7		4.2		3.7	
	最高燃焼度（MWd/t以下）	[redacted]							
	冷却日数（日以上）								
輸送容器1基当たりの仕様	収納体数(注2)（体以下）	12				12			
		24							
	平均燃焼度（MWd/t以下）	[redacted]							
	放射能の量(注3)（PBq以下）	[redacted]							
	発熱量（kW以下）	13.9							

(注1)表面から1メートルの距離における空気吸収線量率は1グレイ毎時を超える。

(注2)燃料集合体は(イ)-第A.1図に示すとおり収納位置が制限される。また，バーナブルポイズン集合体を挿入した燃料集合体を収納する場合の収納位置は中央部に制限される。

なお，48000MWd/t型及び39000MWd/t型並びにA型及びB型は混載可能である。

(注3)主要な核種の放射能強度を(イ)-第A.2表に示す。



(ｲ)-第 A.1 図　燃料集合体の収納位置

(ｲ)-第 A.2 表　主要な核種の放射能強度

主要な核種	放射能強度（TBq/体以下）	
	48000MWd/t 型	39000MWd/t 型
燃焼度		
Sr-90		
Y-90		
Cs-137		
Ba-137m		
Eu-154		

B. 核燃料輸送物の種類

BM 型核分裂性輸送物

C. 輸送容器

1. 設計の概要

輸送物の全体図を(イ)-第 C.1 図に，輸送容器の断面図を(イ)-第 C.2 図に示す。

輸送容器外形は円筒形状である。輸送容器は輸送中には，(イ)-第 C.3 図に示すように輸送架台によこ置き状態に保持され，固縛装置で固定される。落下衝撃を緩和するため，容器の上部及び下部に緩衝体が取り付けられている。

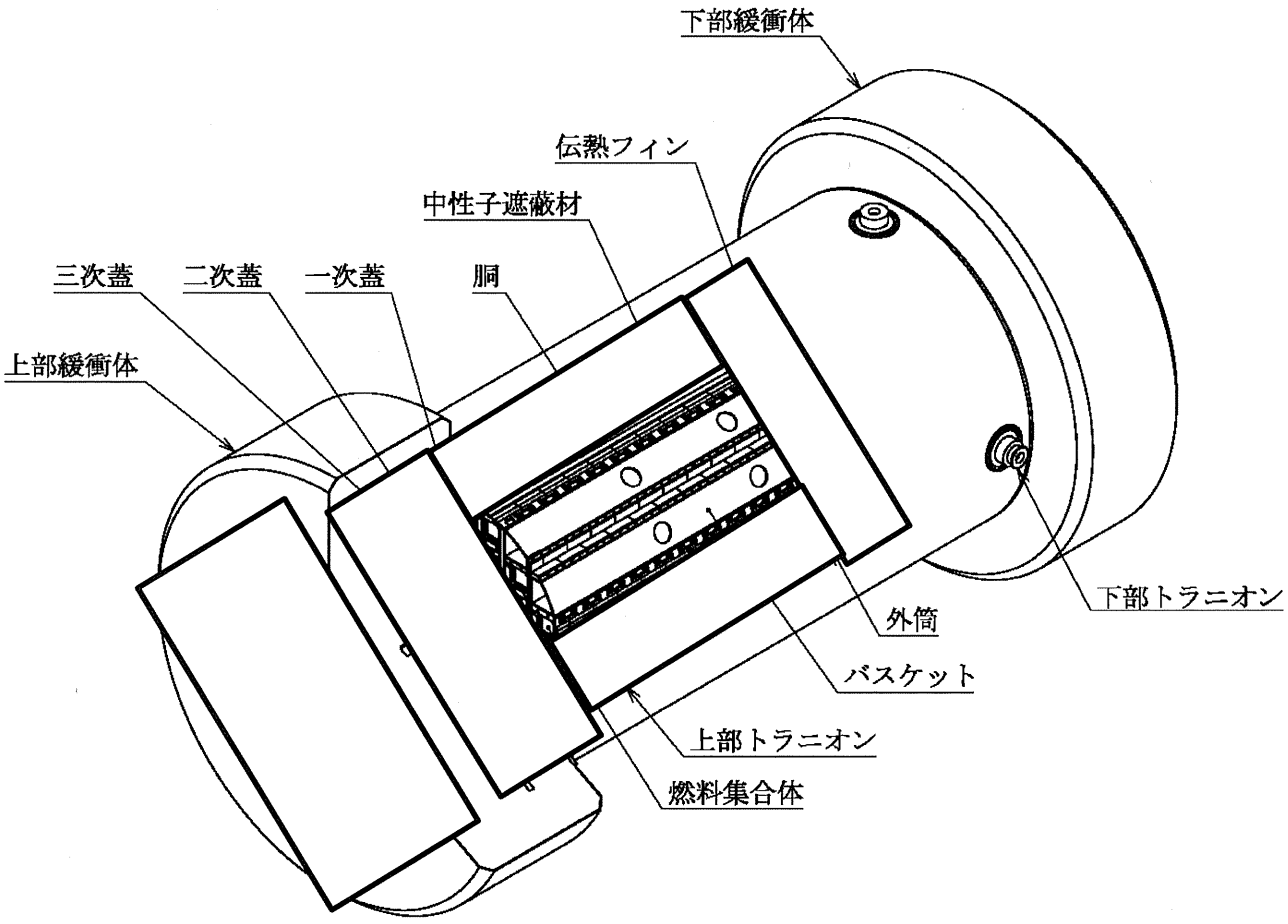
輸送容器は原子力発電所，使用済燃料乾式貯蔵施設あるいは再処理工場での取扱い時にはよこ置き又はたて置き状態に保持される。燃料集合体の出し入れは，所定場所においてたて置き状態に保持された容器の上部から行われる。輸送容器の取扱いは容器に設けられたトラニオンを使用して行われる。

輸送容器は，一次蓋，二次蓋及び三次蓋を有し，三重の密封構造となっている。輸送容器における密封装置は胴，三次蓋及びリリーフバルブカバープレートで構成され，密封境界は(イ)-第 C.4 図に示すとおりである。

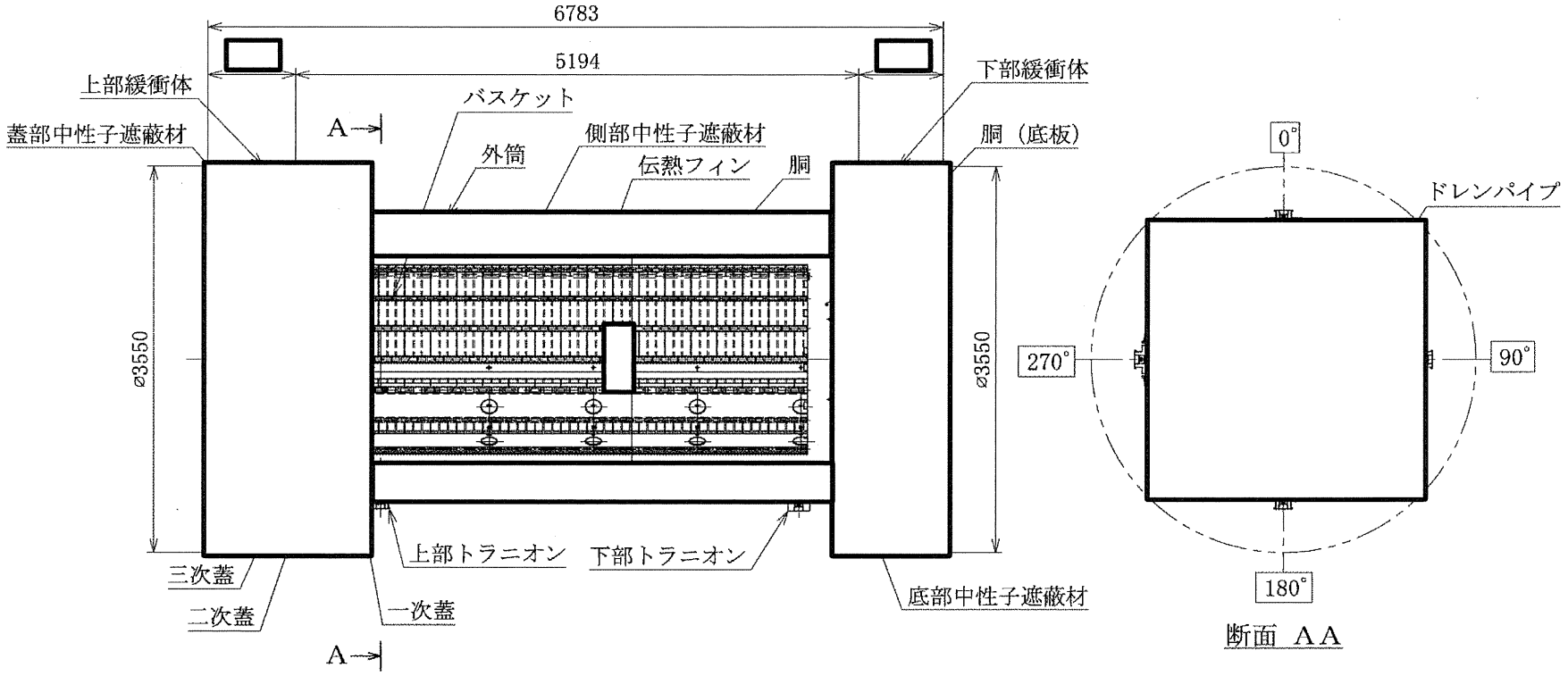
輸送容器の主な遮蔽材は，炭素鋼及びレジンである。炭素鋼は主にガンマ線遮蔽材，レジンは中性子遮蔽材として用いられている。胴と外筒の間に中性子遮蔽材であるレジンが充填されている。また，レジンはキャスク本体下部及び一次蓋部にも充填されている。

一次蓋と胴に囲まれる空間（以下「胴内」という。）には，燃料集合体より発生する崩壊熱の除去を容易にするため，ヘリウムが約 0.05MPa 充填される。また，燃料集合体を輸送中に保持するために胴内にバスケットが収納されている。

バスケットは，断面形状が中空状のアルミニウム合金製のバスケットプレートから構成された格子構造であり，個々の使用済燃料集合体がキャスク本体内部に配置されたバスケットの所定の格子内に収納される。また，使用済燃料の未臨界性を維持するために，中性子吸収材を併せて配置している。



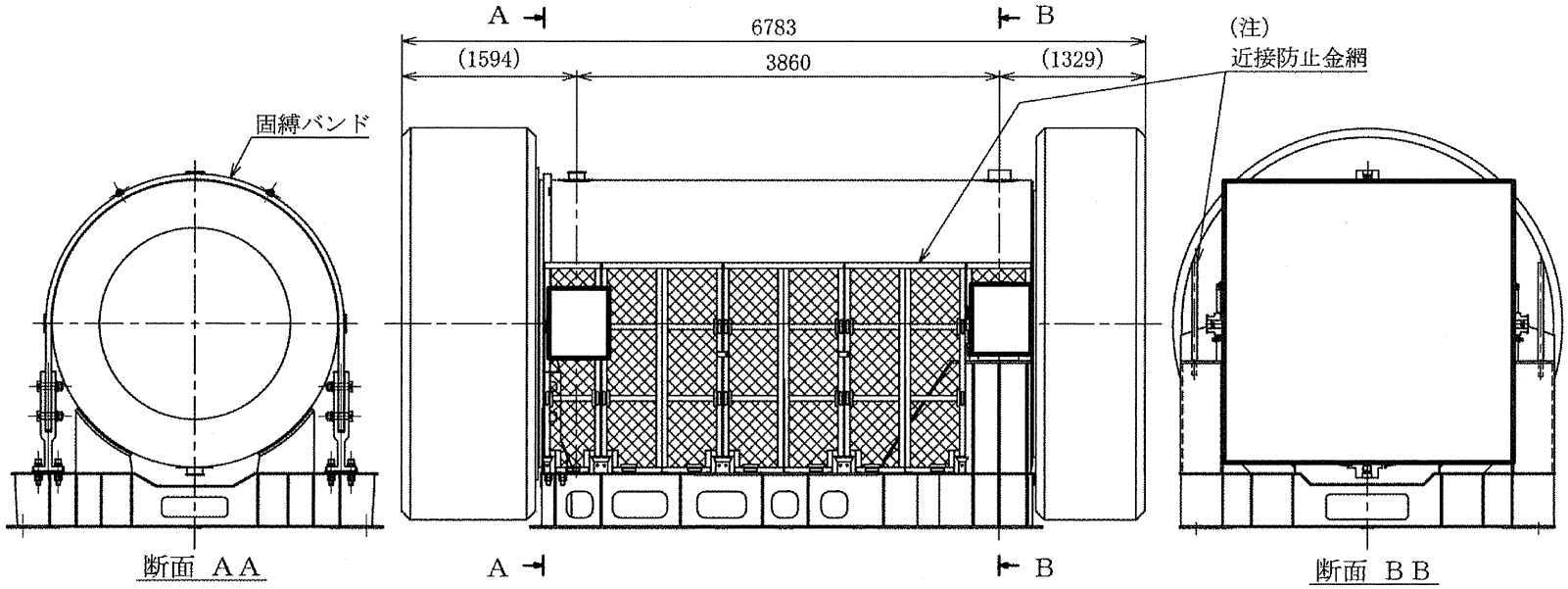
(イ)-第C.1図　輸送物全体図（鳥瞰図）



（注）各部品を一断面に集約したものであり，実際の断面形状とは異なる。

（単位：mm）

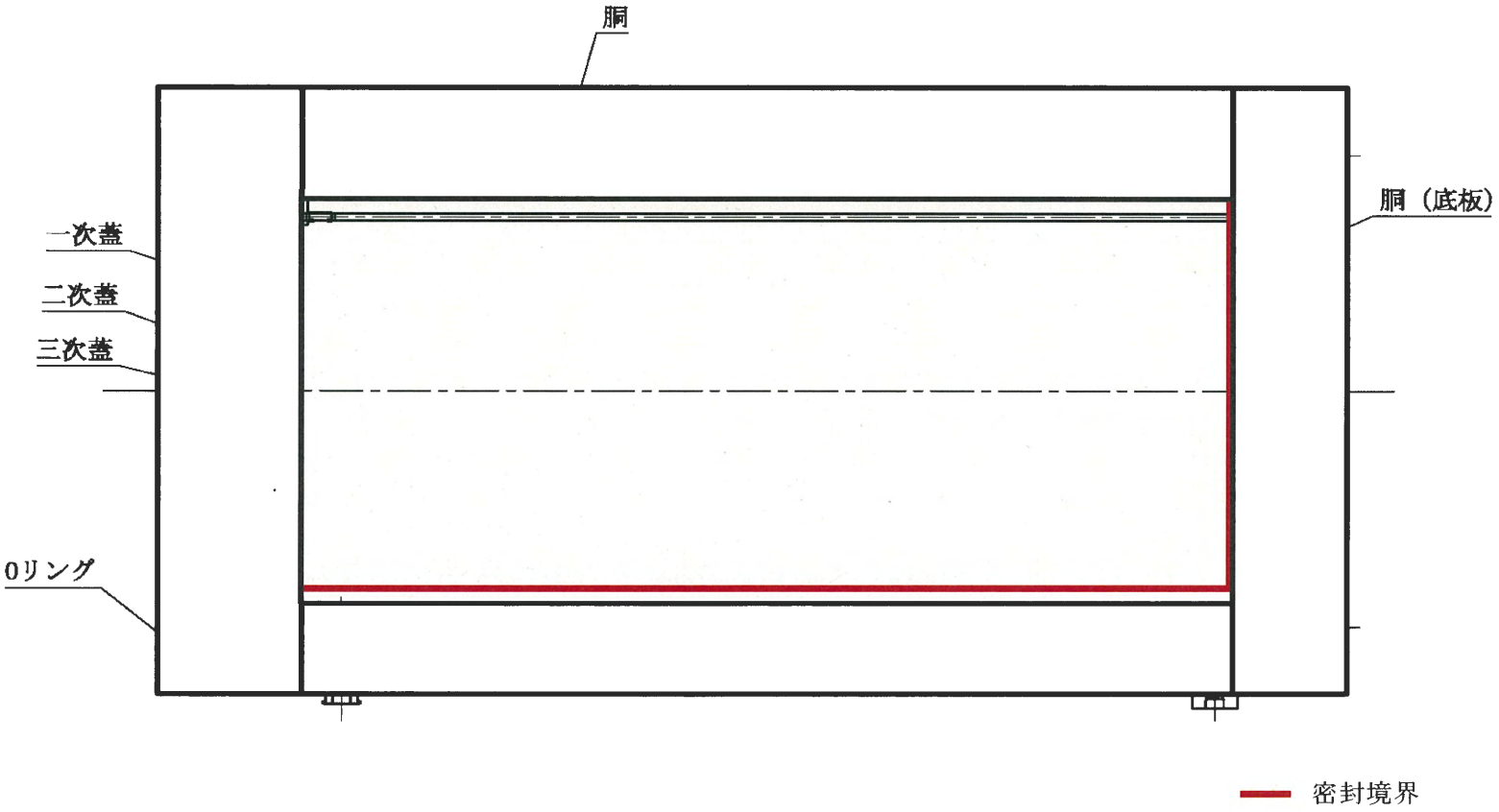
(イ)-第C.2図　輸送容器断面図



(注)取り付けない場合がある。

(単位：mm)

(イ)-第C.3図　輸送荷姿



(注)各部品を一断面に集約したものであり，実際の断面形状とは異なる。

(イ)-第C.4図　密封境界

2. 構造

輸送容器は(イ)-第C.1図及び(イ)-第C.2図に示すようにキャスク本体，一次蓋，二次蓋，三次蓋，バスケット及び緩衝体により構成される。

付属機器として，輸送架台がある。また，輸送架台には近接防止金網を取り付ける場合がある。

(1) キャスク本体

本体縦断面図を(イ)-第C.5図に，横断面図を(イ)-第C.6図に示す。

キャスク本体の主要部は胴，中性子遮蔽材，外筒等で構成されている。

輸送容器の密封境界を形成する胴は炭素鋼製の単層構造であり，胴の炭素鋼は主要なガンマ線遮蔽材である。胴内面には[redacted]，胴の表面のうち，一次蓋，二次蓋及び三次蓋との接触面には[redacted]，胴外面のうち，外気接触面には塗装が施されている。

外筒は，上部が胴に溶接され，下部は下部端板に溶接されている。外筒は炭素鋼製であり，外表面には塗装が施されている。

下部端板はステンレス鋼製であり，胴の下部に溶接され，外筒及び胴とともに中性子遮蔽材（レジン）を保持している。胴と外筒の間には除熱を促進するための伝熱フィンを設けている。

胴（底板）と底部中性子遮蔽材カバーで形成されている空間には中性子遮蔽材（レジン）が充填されている。また，使用済燃料の崩壊熱による中性子遮蔽材の温度上昇に伴う熱膨張を吸収するため，外筒内表面に膨張吸収材（アルミハニカム）を設けている。

また，胴内には，一次蓋に設けられた貫通孔を介して胴内の加圧及び水抜きが可能なようにドレンパイプが設けられている。ドレンパイプの上端部は，ゴム製のシールパッキンを介して一次蓋に設けられた貫通孔へ接続されている。

キャスク本体上部には，上部トラニオンが取り付けられている。上部トラニオンは，吊上専用のトラニオン及び吊上げ，よこ置き時の固縛に使用可能な吊上・固縛兼用のトラニオンがあり，これらのトラニオンが各一対ずつ設けられている。上部トラニオンの構造は(イ)-第C.7図に示すとおりである。

キャスク本体下部には，下部トラニオンが取り付けられている。下部トラニオンは，水平吊り，輸送架台への積載及びよこ置き時の固縛に使用する吊上・固縛兼用のトラニオン並びにたて置き時の固縛に使用可能な固縛専用のトラニオンがあり，これらのトラニオンが各一対ずつ設けられている。下部トラニオンの構造は(イ)-第C.7図に示すとおりである。

輸送容器又は輸送物は原子力発電所，使用済燃料乾式貯蔵施設あるいは再処理工場

において，垂直吊り又は水平吊りで取り扱われる。輸送船及びトレーラへの積み降ろしでは輸送架台の付いた状態で水平吊りされる。輸送時には輸送架台に固縛され，輸送架台は船倉やトレーラ荷台に固定される。

輸送容器を単体で垂直吊りする場合には，一対の上部トラニオンの外径φ140mmの部分が使用される。

輸送容器又は輸送物を単体で水平吊りする場合には，上・下部トラニオンの90°，270°方向の二対の外径φ140mmの部分が使用される。

輸送架台に固縛した輸送容器又は輸送物を水平吊りする場合には，単体の水平吊りと同様に上・下部トラニオンの90°，270°方向の二対の外径φ140mmの部分が使用される。

輸送架台への固縛は，輸送容器のキャスク本体上部及び下部トラニオンの90°，270°方向の一対の外径φ200mmの部分が使用される。

(2) 一次蓋

一次蓋の構造を(イ)-第C.8図に示す。一次蓋は炭素鋼製であり，[redacted]本の一次蓋ボルトでキャスク本体上面に取り付けられる。一次蓋の炭素鋼は，主要なガンマ線遮蔽材である。

また，一次蓋には，頭部側の中性子遮蔽のために，中性子遮蔽材（レジン）が充填されており，炭素鋼製の蓋部中性子遮蔽材カバーで覆われている。

一次蓋のシール部には金属ガスケットが取り付けられている。

胴との接触面及びシール部には[redacted]，また，その他の表面及び蓋部中性子遮蔽材カバーの外表面には[redacted]が施されている。

一次蓋には内水の排水，真空乾燥及びヘリウム充填のために貫通孔が2箇所設けられており，それぞれの貫通孔にはベントバルブ及びドレンバルブが設置されている。ベントバルブ及びドレンバルブの構造を(イ)-第C.9図に示す。これらの貫通孔上にはステンレス鋼製のカバープレートが取り付けられる。カバープレートのシール部には金属ガスケットが取り付けられている。

なお，一次蓋は外側を二次蓋に覆われており，不用意に一次蓋ボルトが外されないようになっている。

(3) 二次蓋

二次蓋の構造を(イ)-第C.10図に示す。二次蓋は炭素鋼製であり，[redacted]本の二次蓋ボルトでキャスク本体上面に取り付けられる。二次蓋の炭素鋼は，主要なガンマ線遮蔽材である。

二次蓋のシール部には金属ガスケットが取り付けられている。

胴との接触面及びシール部には[redacted]，その他の表面には[redacted]が施されている。

二次蓋には，一次蓋と二次蓋で形成される空間にヘリウムを充填するための貫通孔と，この空間の圧力を検出するための貫通孔が設けられており，それぞれの貫通孔にはモニタリングポートバルブが設置されている。モニタリングポートバルブの構造を(イ)-第C.11図に示す。輸送中はその外側にモニタリングポートカバープレートが取り付けられる。モニタリングポートカバープレートのシール部にはOリングが設けられている。

なお，二次蓋は外側を三次蓋に覆われており，不用意に二次蓋ボルトが外されないようになっている。

(4) 三次蓋

三次蓋の構造を(イ)-第C.12図に示す。三次蓋はステンレス鋼製であり，[redacted]本の三次蓋ボルトでキャスク本体上面に取り付けられる。三次蓋のステンレス鋼は，主要なガンマ線遮蔽材である。

三次蓋には，二次蓋と三次蓋で形成される空間の圧力を開放するための貫通孔が設けられており，貫通孔にはリリーフバルブが設置されている。リリーフバルブの構造を(イ)-第C.13図に示す。輸送中はその外側にリリーフバルブカバープレートが取り付けられる。

三次蓋及びリリーフバルブカバープレートのシール部には二重のOリングが設けられており，この二重のOリングの内側Oリングにより輸送中の密封境界を形成する。

なお，三次蓋は外側を緩衝体に覆われており，不用意に三次蓋ボルトが外されないようになっている。

(5) バスケット

バスケットは，個々の燃料集合体がキャスク本体内部の所定の格子内に収納できるよう設けられる。バスケットの構造を(イ)-第C.14図に示す。バスケットは，断面形状が中空状のアルミニウム合金製のバスケットプレートと，アルミニウム合金製のバスケットサポートにより構成される。また，燃料集合体の未臨界性を維持するために，ほう素添加アルミニウム合金製の中性子吸収材[redacted]を併せて配置している。

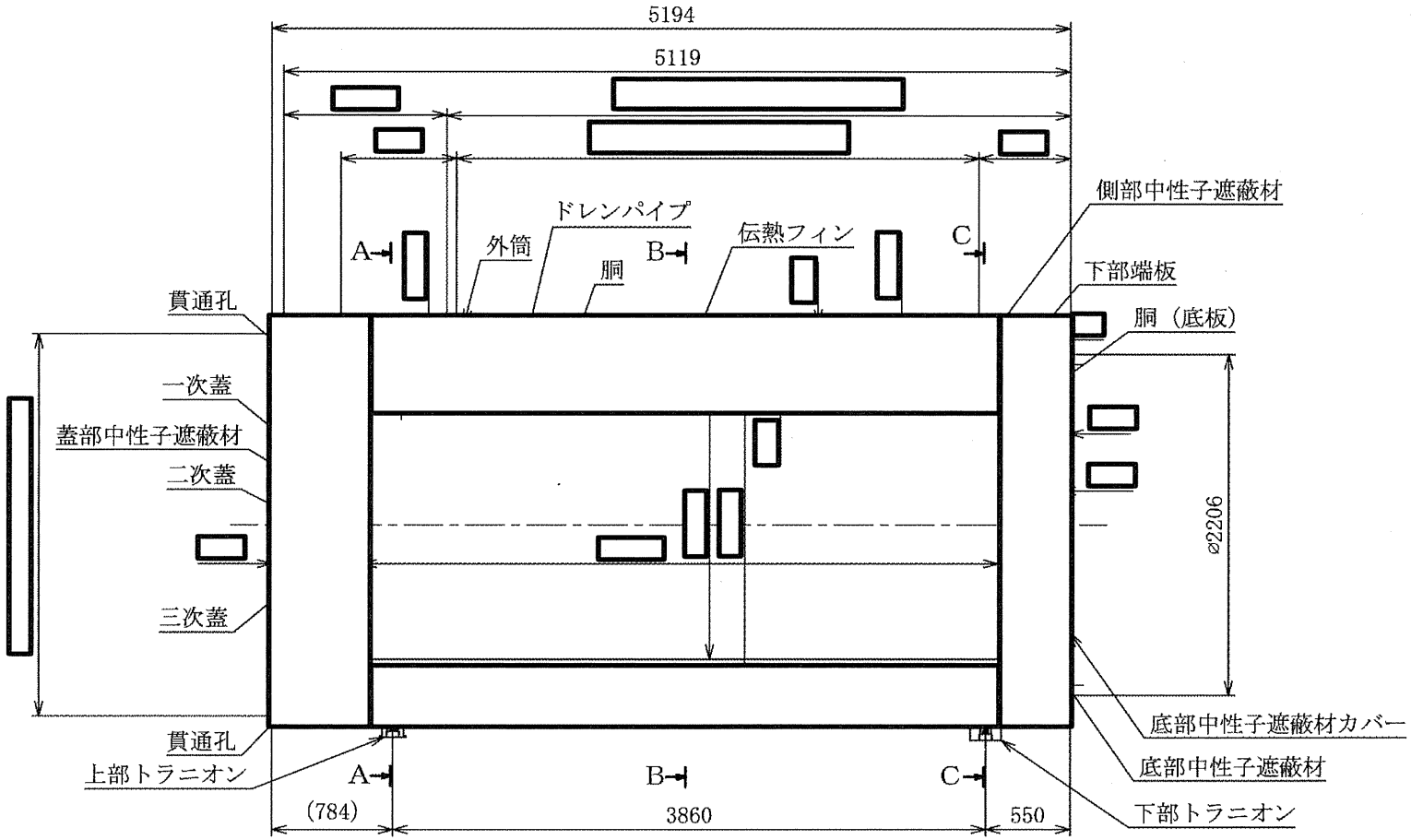
(6) 緩衝体

上部緩衝体はキャスク本体上部に，下部緩衝体はキャスク本体下部に各々[redacted]本の

ボルトで取り付けられ，落下等により輸送容器に加わる衝撃を吸収して輸送容器を保護する。

上部緩衝体を(イ)-第C.15図に，下部緩衝体を(イ)-第C.16図に示す。

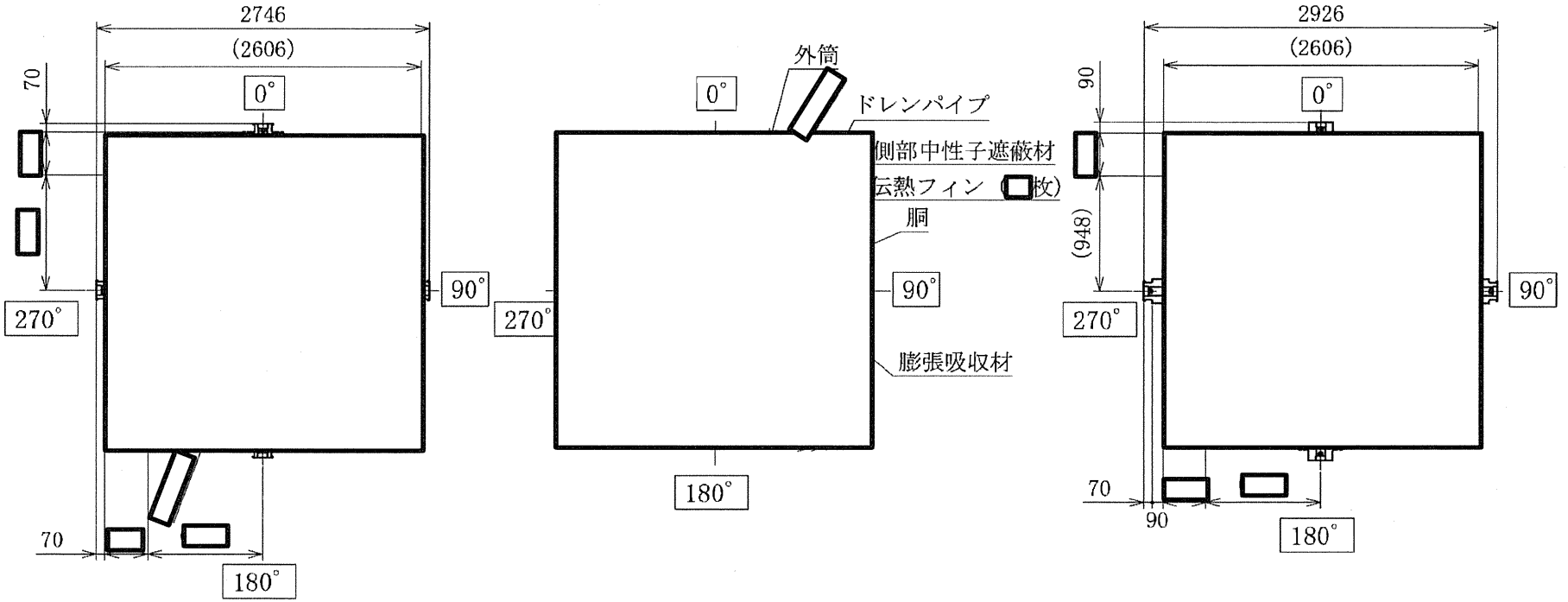
上部及び下部緩衝体は，ステンレス鋼のカバープレートとリブから構成される溶接構造物の内部に，緩衝材である木材（[redacted]）を充填したものである。



（単位：mm）

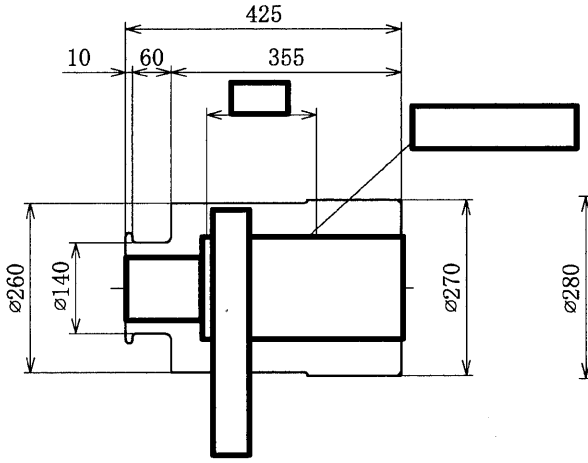
(注)各部品を一断面に集約したものであり，実際の断面形状とは異なる。

(イ)-第C.5図　本体縦断面図

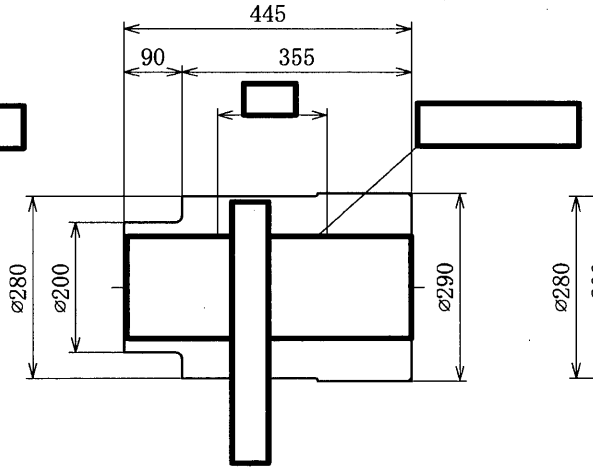


(単位 : mm)

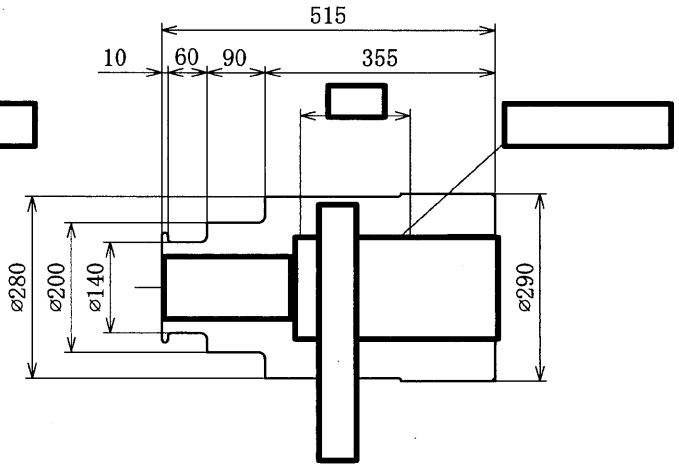
(イ)-第 C.6 図　本体横断面図



上部トラニオン（吊上専用）
(0°，180°)
及び
上部トラニオン（吊上・固縛兼用）
(90°，270°)



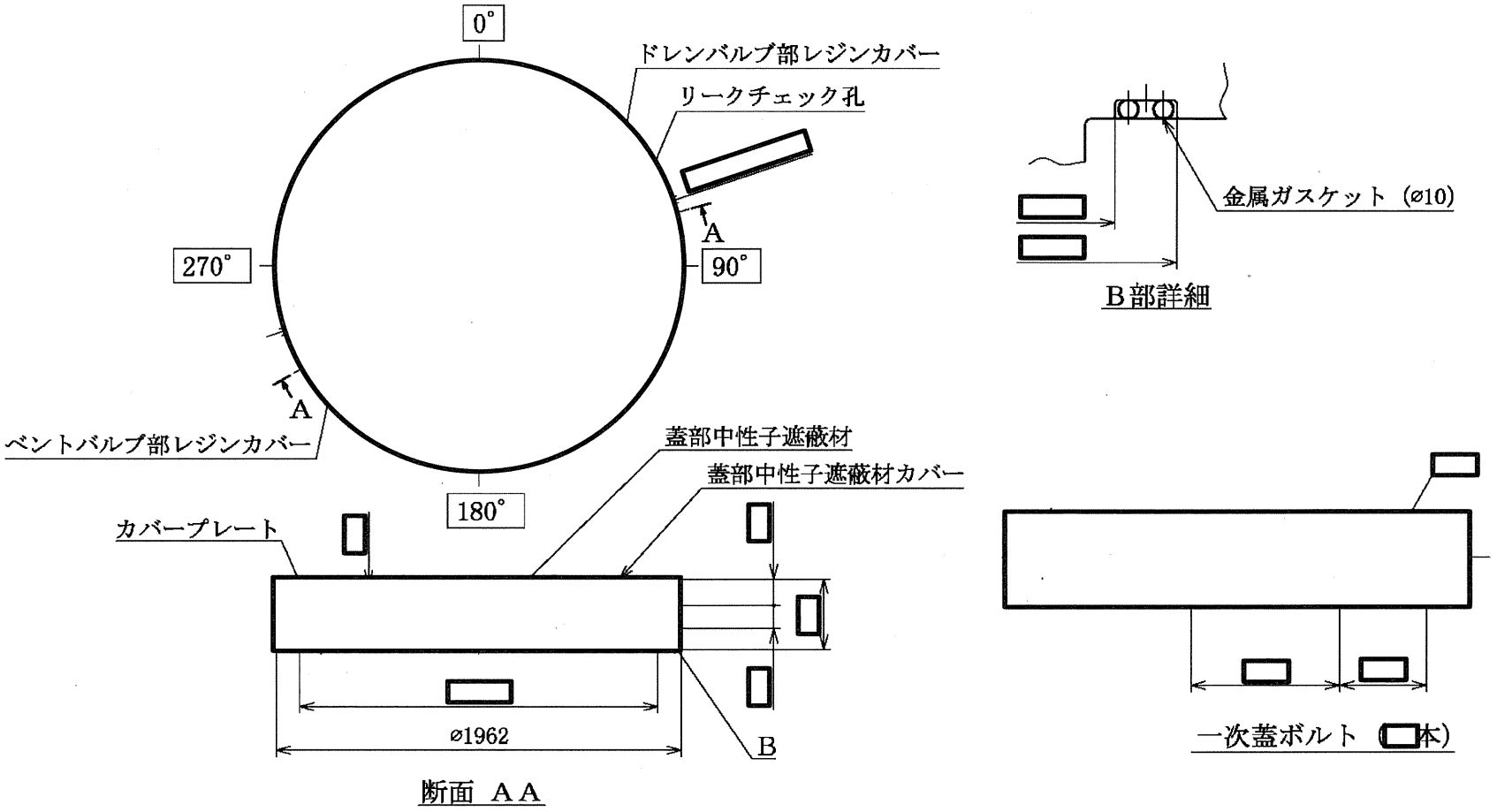
下部トラニオン（固縛専用）
(0°，180°)



下部トラニオン（吊上・固縛兼用）
(90°，270°)

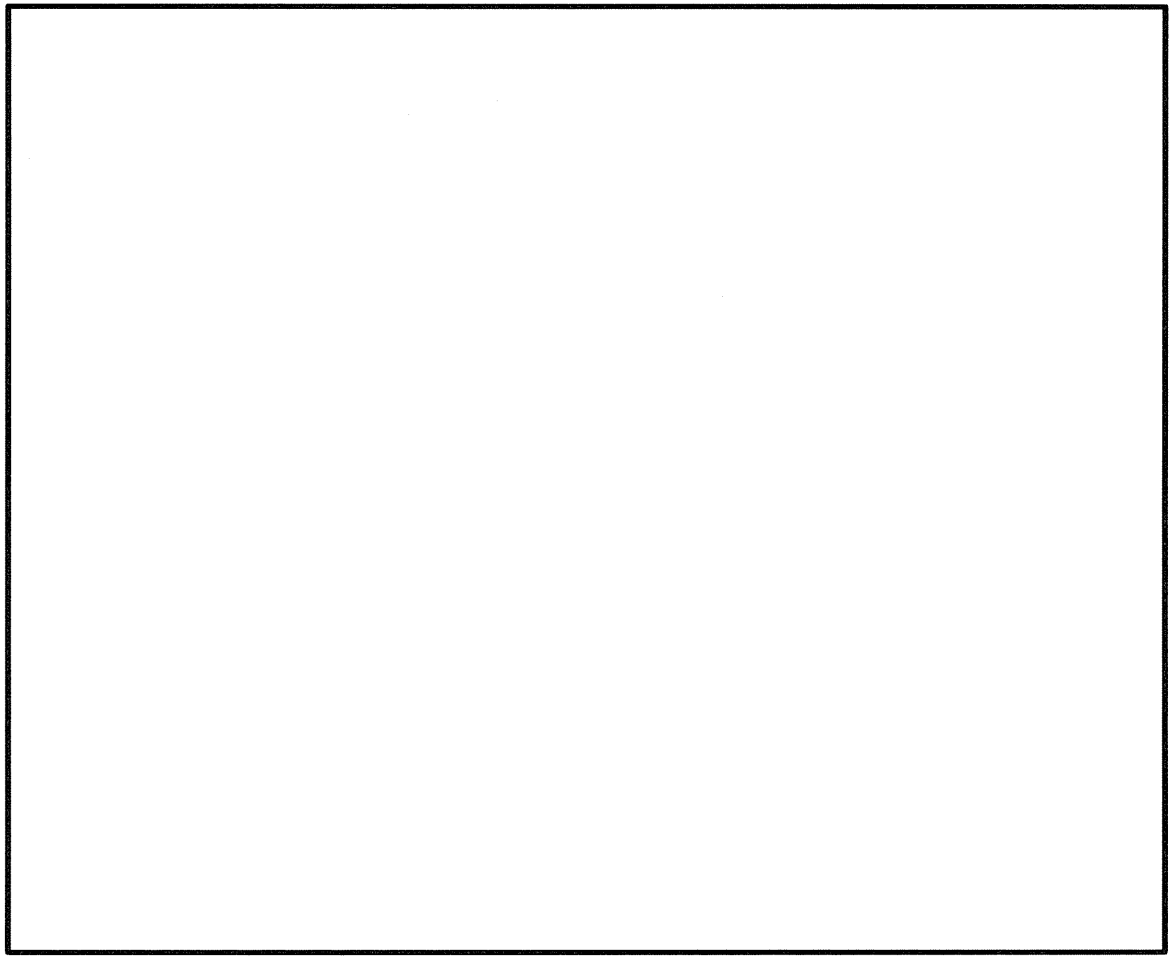
（単位：mm）

(イ)-第C.7図　トラニオン



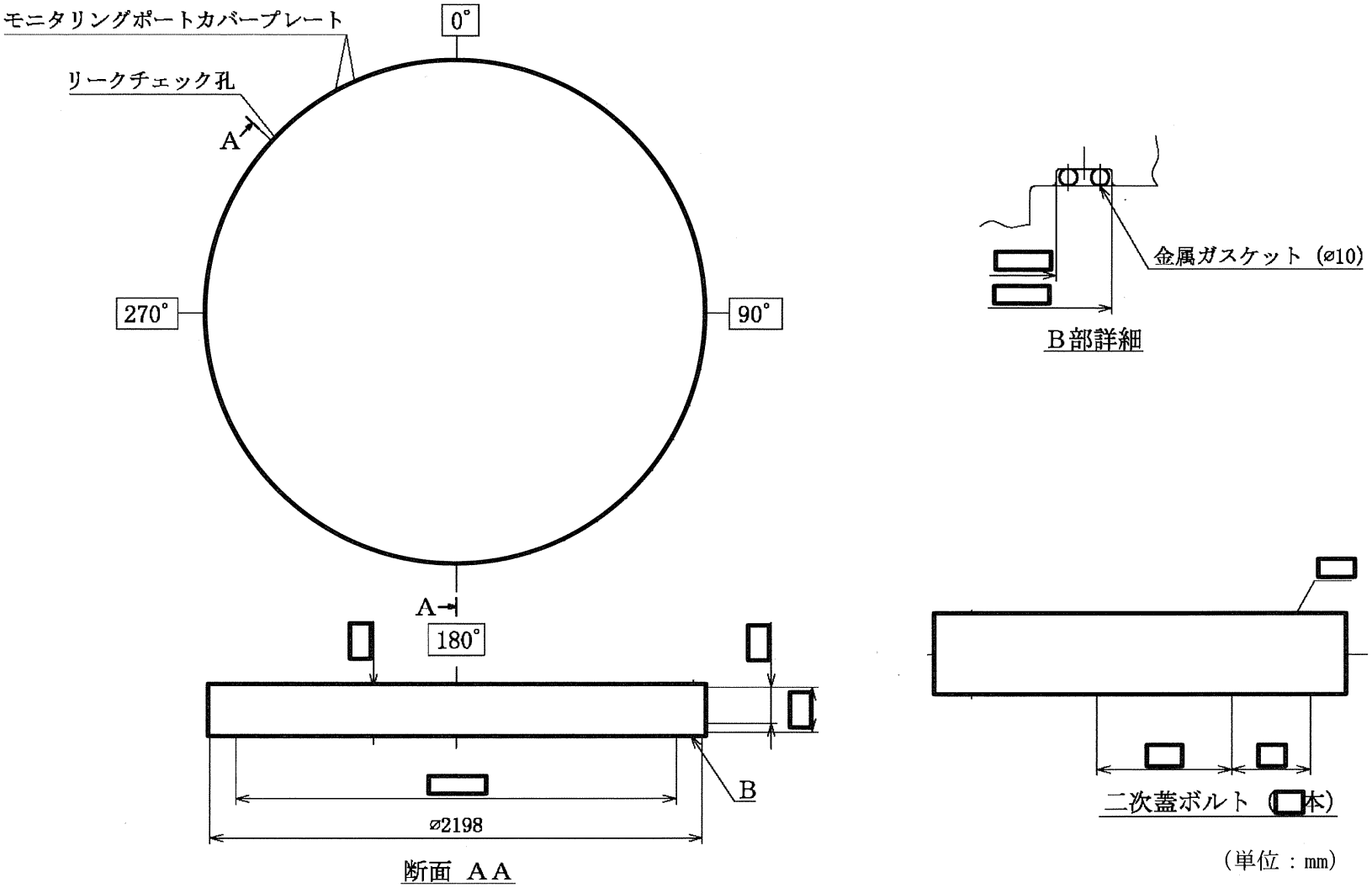
(単位：mm)

(イ)-第C.8図　一次蓋

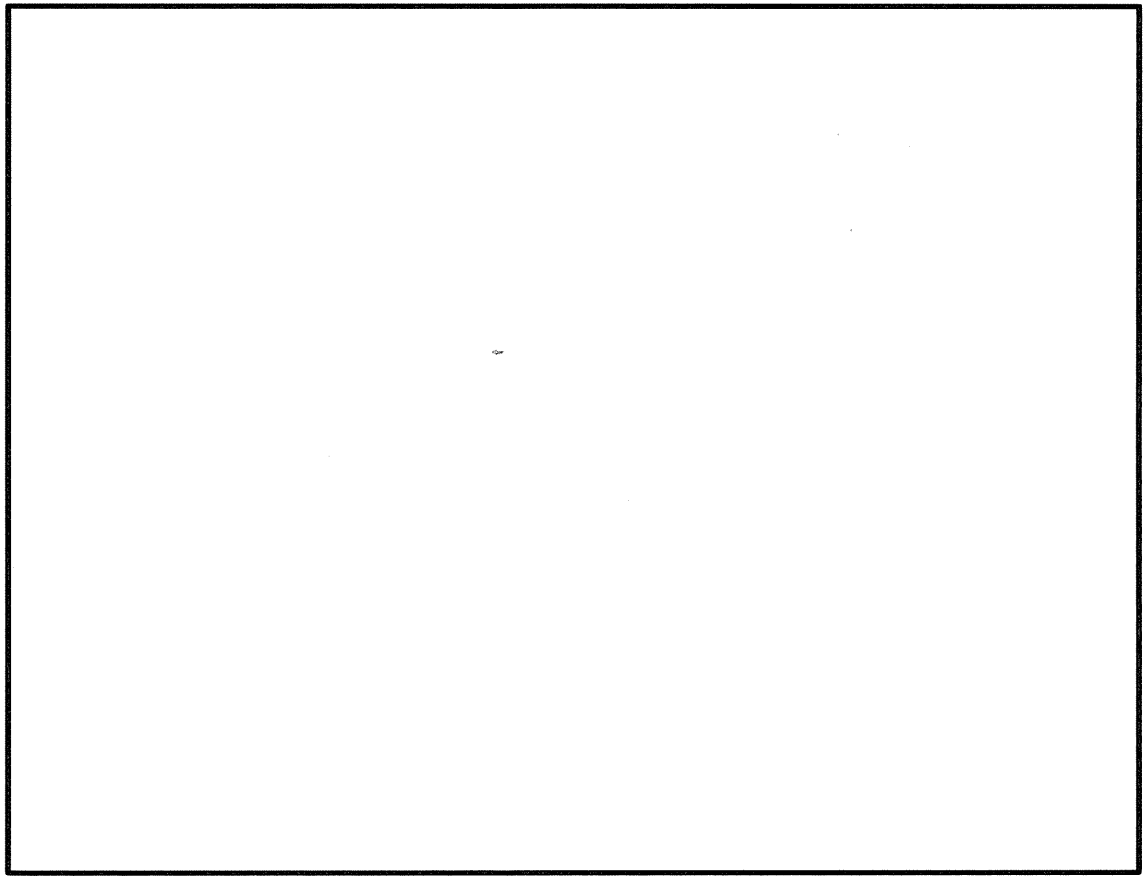


(単位：mm)

(イ)-第C.9図　一次蓋貫通孔

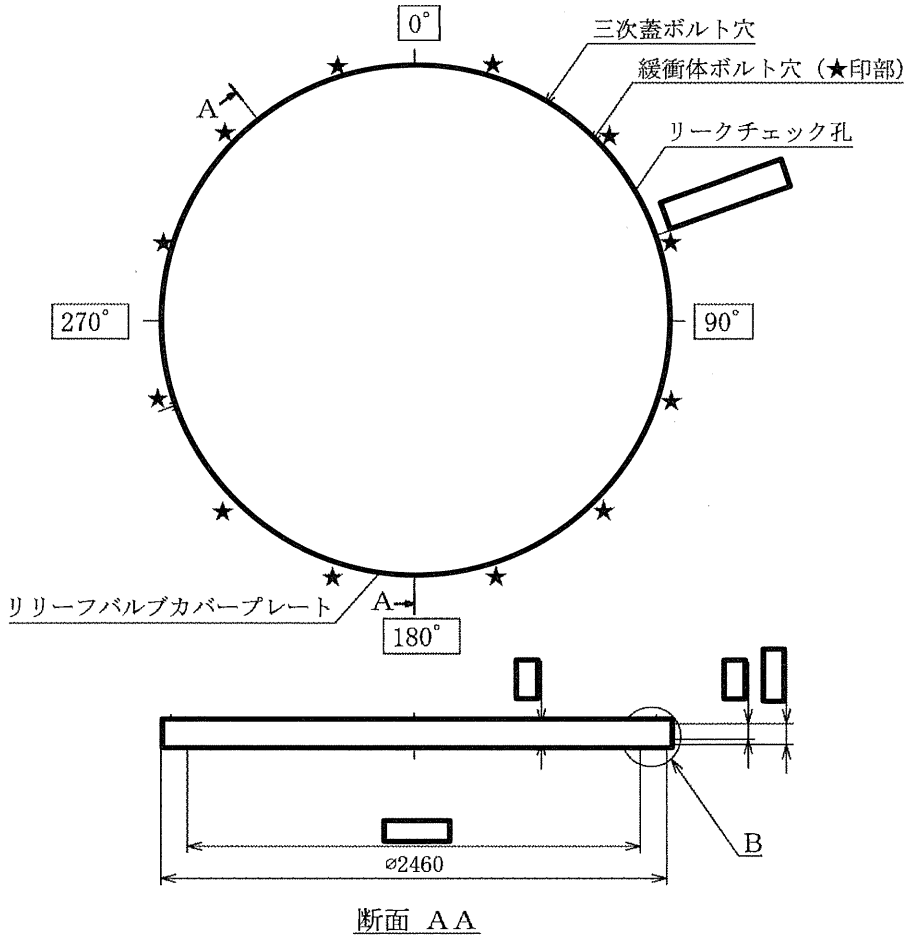

モニタリングポートカバープレート
リークチェック孔
0°
90°
180°
270°
A
A
B
ø2198
断面 AA
金属ガスケット (ø10)
B部詳細
二次蓋ボルト (□本)
(単位：mm)

(イ)-第C.10図　二次蓋

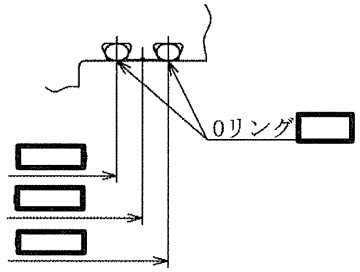


（単位：mm）

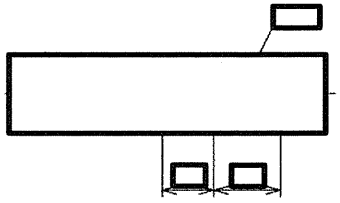
(イ)-第C.11図　二次蓋貫通孔



断面 AA



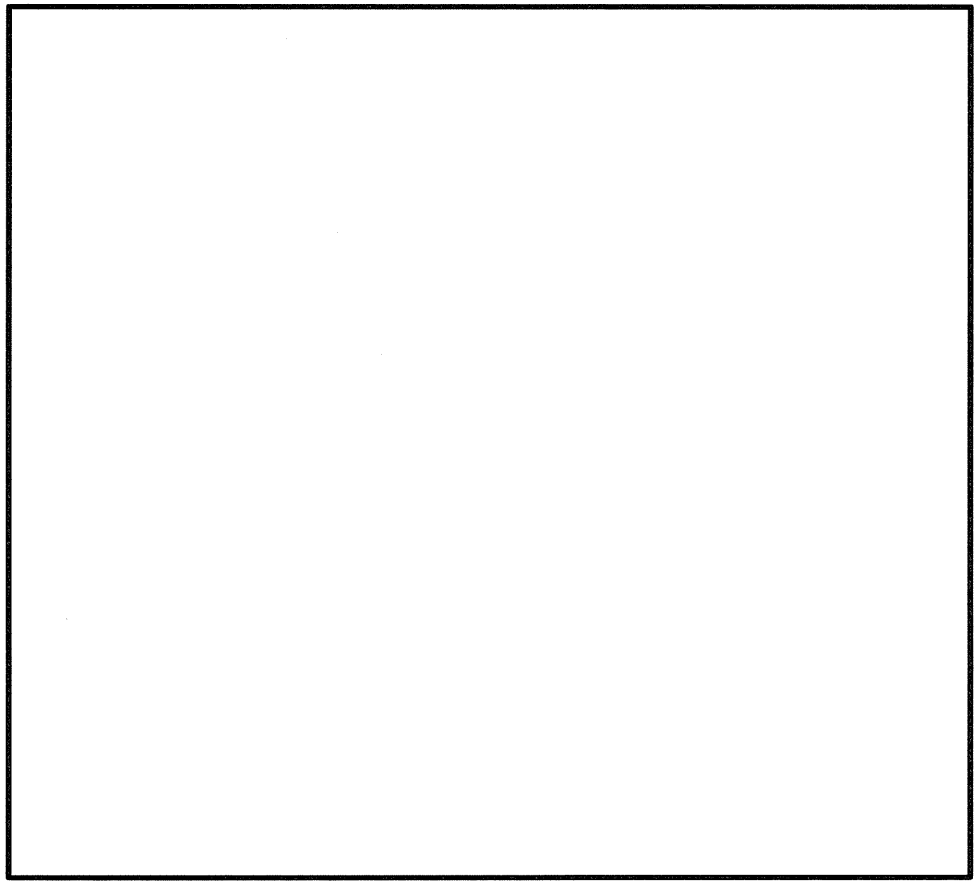
B部詳細



三次蓋ボルト（　本）

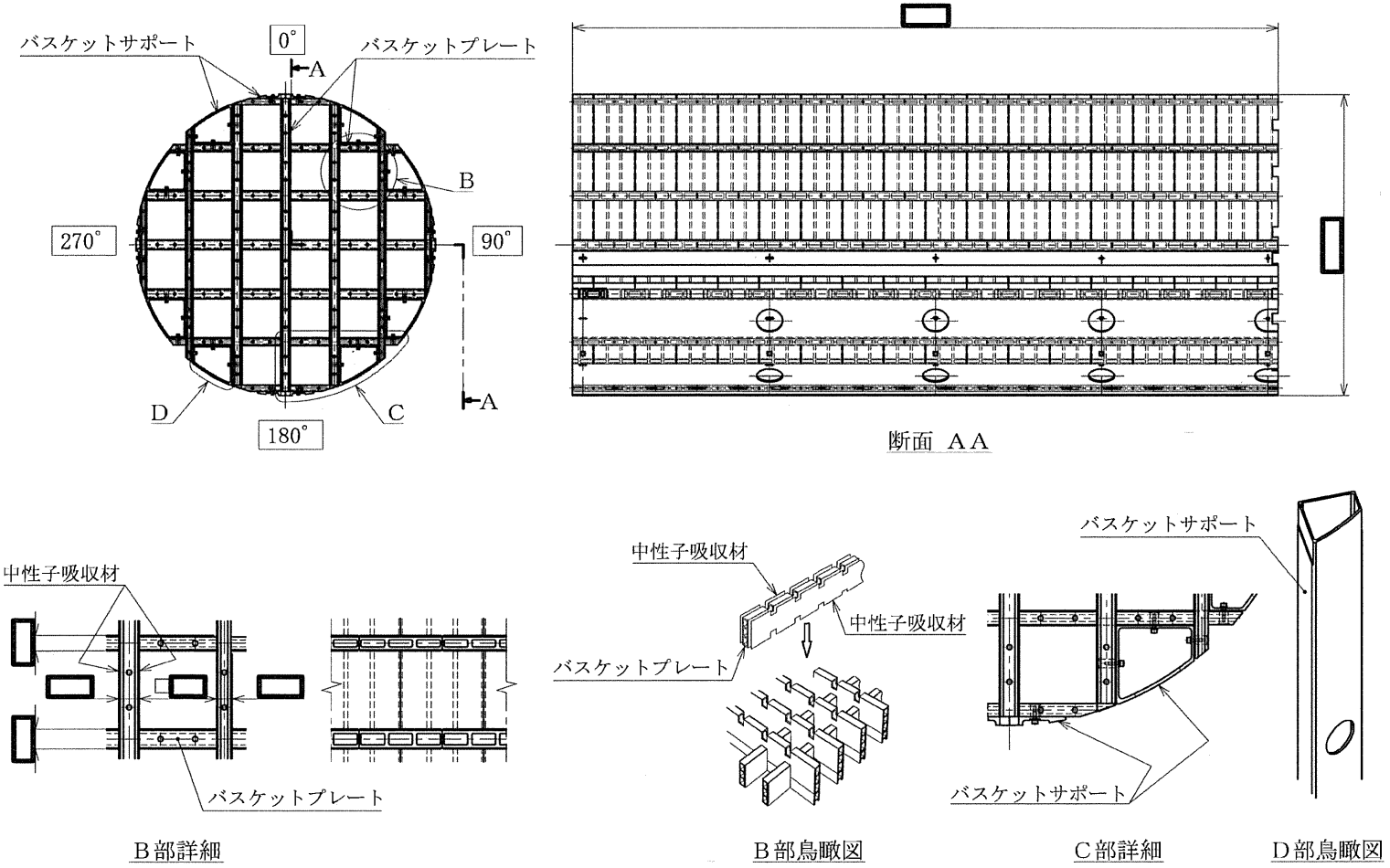
（単位：mm）

(イ)-第 C. 12 図　三次蓋



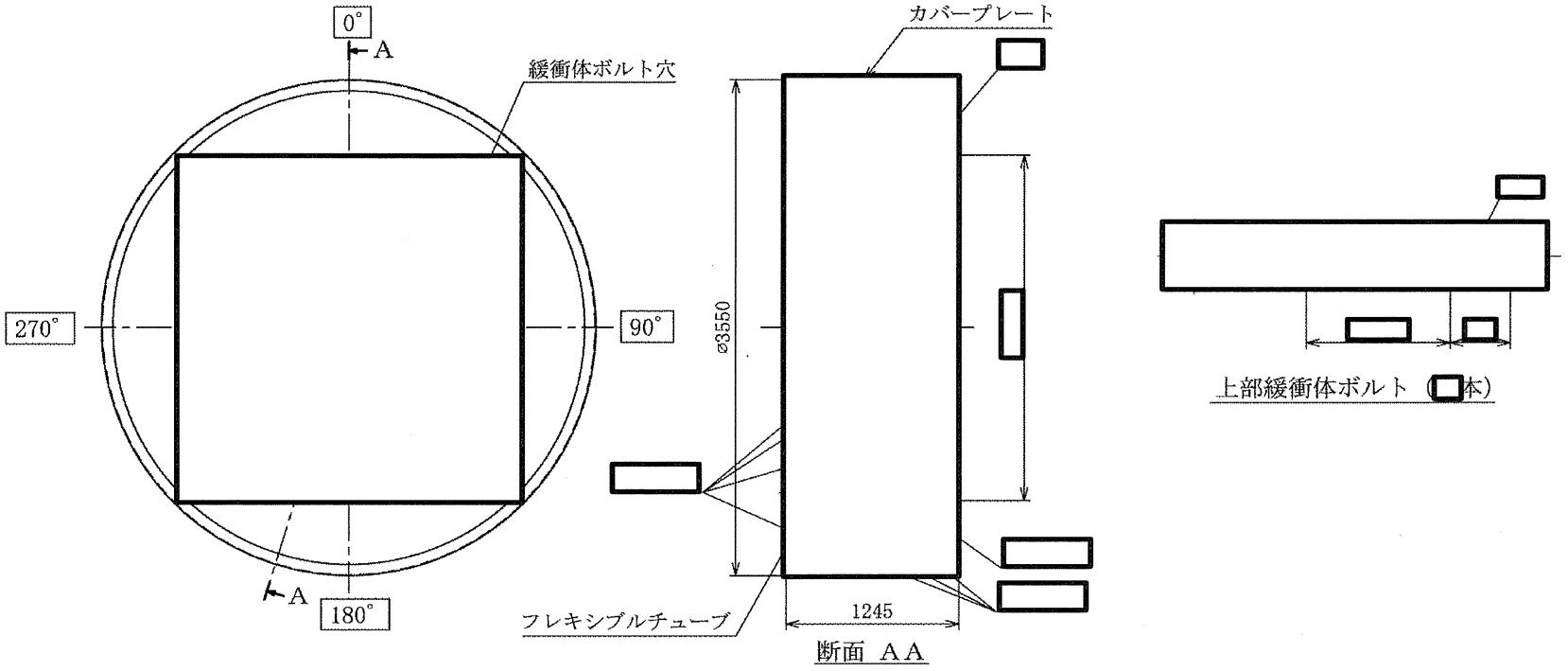
(単位：mm)

(イ)-第C.13図　三次蓋貫通孔



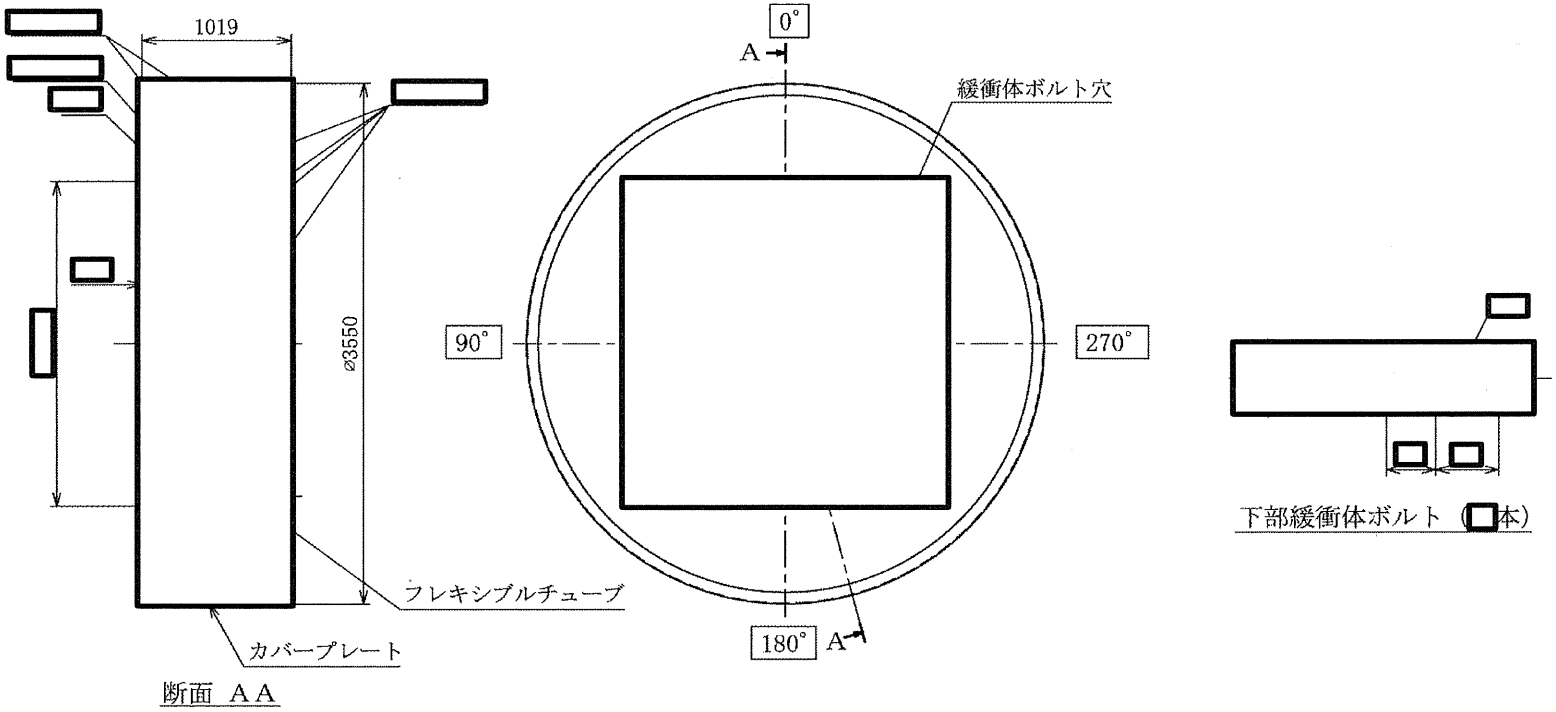
(単位：mm)

(イ)-第C.14図　バスケット



(単位：mm)

(イ)-第C.15図　上部緩衝体



(単位：mm)

(イ)-第C.16図　下部緩衝体

3. 材質

下記(イ)-第C.1表のとおりである。

(イ)-第C.1表　材質

部位	部品	材料	規格 (注1)
キャスク本体	胴	炭素鋼	[redacted]
	外筒	炭素鋼	
	下部端板	ステンレス鋼	
	側部中性子遮蔽材	レジン（エポキシ系樹脂）	—
	底部中性子遮蔽材	レジン（エポキシ系樹脂）	—
	伝熱フィン	銅	JIS H3100 C1020P[redacted] 又は JIS H3140 C1020BE[redacted]
	トラニオン	析出硬化系ステンレス鋼	JIS G 4303 SUS630-H1150
	トラニオンボルト	炭素鋼	—
	底部中性子遮蔽材カバー	ステンレス鋼	[redacted]
	膨張吸収材	[redacted]	—
	ドレンパイプ	ステンレス鋼	—
	シールパッキン	ゴム	—
一次蓋	蓋板	炭素鋼	[redacted]
	蓋部中性子遮蔽材カバー	炭素鋼	
	カバープレート	ステンレス鋼	
	蓋部中性子遮蔽材	レジン（エポキシ系樹脂）	—
	蓋ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼	[redacted]
	金属ガスケット	アルミニウム／ニッケル基合金	—
二次蓋	蓋板	炭素鋼	[redacted]
	モニタリングポートカバープレート	ステンレス鋼	
	Oリング	EPDM	JIS B 2401 EPDM-70
	蓋ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼	[redacted]
	金属ガスケット	アルミニウム／ニッケル基合金	—
三次蓋	蓋板	ステンレス鋼	[redacted]
	蓋ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼	
	リリーフバルブカバープレート	ステンレス鋼	
	Oリング	EPDM	JIS B 2401 EPDM-70
バスケット	中性子吸収材	ほう素添加アルミニウム合金	—
	バスケットプレート	アルミニウム合金	MB-A3004-H112
	バスケットサポート	アルミニウム合金	MB-A3004-H112
緩衝体	緩衝材	木材 [redacted]	—
		木材 [redacted]	—
		木材 [redacted]	—
	上部緩衝体ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼	[redacted]
	下部緩衝体ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼	
	カバープレート	ステンレス鋼	
	リブ	ステンレス鋼	

(注1) 記載の規格材料又は相当品を使用する。

4. 寸法（公称）

下記(イ)-第C.2表に各部品の代表寸法を示す。

(イ)-第C.2表　輸送容器各部の寸法

部品名	寸法(mm)	参照図
キャスク本体		(イ)-第C.5図
胴内径		(イ)-第C.6図
板厚		(イ)-第C.7図
外筒外径		
板厚		
下部端板厚さ		
側部中性子遮蔽材厚さ		
伝熱フィン板厚		
枚数		
上部トラニオン外径	140	
下部トラニオン外径（90°，270°）	140／200	
下部トラニオン外径（0°，180°）	200	
底部中性子遮蔽材厚さ		
底部中性子遮蔽材カバー厚さ		
底板厚さ		
全長	5119	
全幅	2926	
一次蓋		(イ)-第C.8図
蓋外径	1962	(イ)-第C.9図
厚さ		
蓋ボルト径		
金属ガスケット断面径	10	
蓋部中性子遮蔽材厚さ		
二次蓋		(イ)-第C.10図
蓋外径	2198	(イ)-第C.11図
厚さ		
蓋ボルト径		
金属ガスケット断面径	10	
三次蓋		(イ)-第C.12図
蓋外径	2460	(イ)-第C.13図
厚さ		
蓋ボルト径		
Oリング断面径　蓋板用		
カバープレート用		
バスケット		(イ)-第C.14図
外径		
長さ		
格子数	24個	
格子内幅		
緩衝体		(イ)-第C.15図
外径	3550	(イ)-第C.16図
上部緩衝体ボルト径		
下部緩衝体ボルト径		
上部緩衝体長さ	1245	
下部緩衝体長さ	1019	

5. 重量

本輸送物の総重量は 134.4 トン以下であり，その詳細を(イ)-第 C.3 表に示す。

(イ)-第 C.3 表　輸送物重量

輸送容器各部及び収納物	重量（トン）
A. キャスク本体	83.7 以下
B. 一次蓋	5.6 以下
C. 二次蓋	4.5 以下
D. 三次蓋	3.3 以下
E. バスケット	5.6 以下
F. 緩衝体	
①上部緩衝体	8.72 以下
②下部緩衝体	6.24 以下
G. 燃料集合体	16.7 以下
H. 輸送容器総重量 A+B+C+D+E+F	117.7 以下
I. 輸送物総重量 A+B+C+D+E+F+G	134.4 以下

D. 輸送容器の収納物

輸送容器の収納物は，使用済燃料集合体である。

輸送容器に収納可能なPWR燃料集合体の仕様を(イ)-第D.1表に示す。

(イ)-第D.1図は本輸送容器に収納する燃料集合体（17×17燃料）の代表的な全体図である。17×17燃料（A型）及び17×17燃料（B型）の断面図を(イ)-第D.2図及び(イ)-第D.3図に示す。これらの図及び表に示されているように，燃料集合体は正方配列された燃料棒で構成され，両端及び中間部数箇所が支持格子により保持されている。燃料は低濃縮のUO_2ペレットでジルコニウム合金製の被覆管の中に充填され，両端に端栓を溶接して密封されている。また，燃料には，可燃性毒物であるGd_2O_3を含むものがある。

燃料集合体は燃料集合体単独あるいは，バーナブルポイズン集合体(輸送容器 1 基当たり最大 12 体)を挿入した状態で本輸送容器に収納することができる。バーナブルポイズン集合体を挿入した燃料集合体は(イ)-第A.1図に示す中央部に収納する。バーナブルポイズン集合体の仕様例を(イ)-第D.2表に示す。

(イ)-第D.4図は，バーナブルポイズン集合体（17×17燃料用）の断面図であり，(イ)-第D.5図は，燃料集合体へのバーナブルポイズン集合体（17×17燃料用）の代表的な挿入図である。

収納物の燃焼条件及び冷却日数は，(イ)-第D.3表に示すとおりである。燃料集合体は上述のようにジルコニウム合金製の被覆管とセラミック状のUO_2ペレットが主であり，照射に伴って発生する核分裂生成ガスが被覆管内の空隙に蓄積されている。

収納物の主要な放射性核種と放射能の量（放射能強度）は(イ)-第D.4表に示すとおりである。

また，輸送容器 1 基当たりの最大崩壊熱量は(イ)-第 A.1 表に示すとおり 13.9kW に制限される。

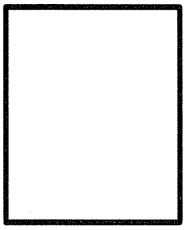
燃料集合体は(イ)-第 C.14 図に示したバスケットに格納して胴内に収納され，胴内は水抜き，乾燥された上，不活性ガスのヘリウムが充填される。

(イ)-第D.1表　燃料集合体の型式及び仕様

燃料集合体の種類と型式 ＼ 主要な燃料諸元	17×17燃料			
	48000MWd/t型		39000MWd/t型	
	A型	B型	A型	B型
材質				
燃料	UO_2 (注)	UO_2 (注)	UO_2 (注)	UO_2 (注)
被覆管	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4
燃料密度（理論密度比 %）	約95	約95	約95	約95
初期濃縮度（U-235 wt%）	4.2以下（集合体平均）	4.2以下（集合体平均）	3.7以下（集合体平均）	3.7以下（集合体平均）
形状				
集合体長さ(mm)	約4100	約4100	約4100	約4100
燃料有効長(mm)	3648	3648	3648	3648
燃料棒直径(mm)	9.5	9.5	9.5	9.5
燃料棒ピッチ(mm)	12.6	12.6	12.6	12.6
集合体幅(mm)	214	214	214	214
重量				
集合体重量(kg)	680以下	680以下	680以下	680以下
UO_2重量(kg)				
ウラン重量(kg)				

(注)可燃性毒物としてGd_2O_3を含むものがある。

(イ)-第D.2表　バーナブルポイズン集合体の仕様例

諸　元 ＼ 型　式	17×17 燃料用
①形状，全長等	
バーナブルポイズン集合体	
外　形　(mm)	161×161
全　長　(mm)	3961
バーナブルポイズン棒	
吸収材有効長 (mm)	
外　径　(mm)	
内　径　(mm)	
②重　量	
総重量　(kg)	
③材　料	
吸収材	ホウケイ酸ガラス
被覆管	ステンレス鋼
シンブルプラグ	ステンレス鋼
ホールドダウンアセンブリ	ステンレス鋼 インコネル

(イ)-第D.3表　収納物の燃焼条件

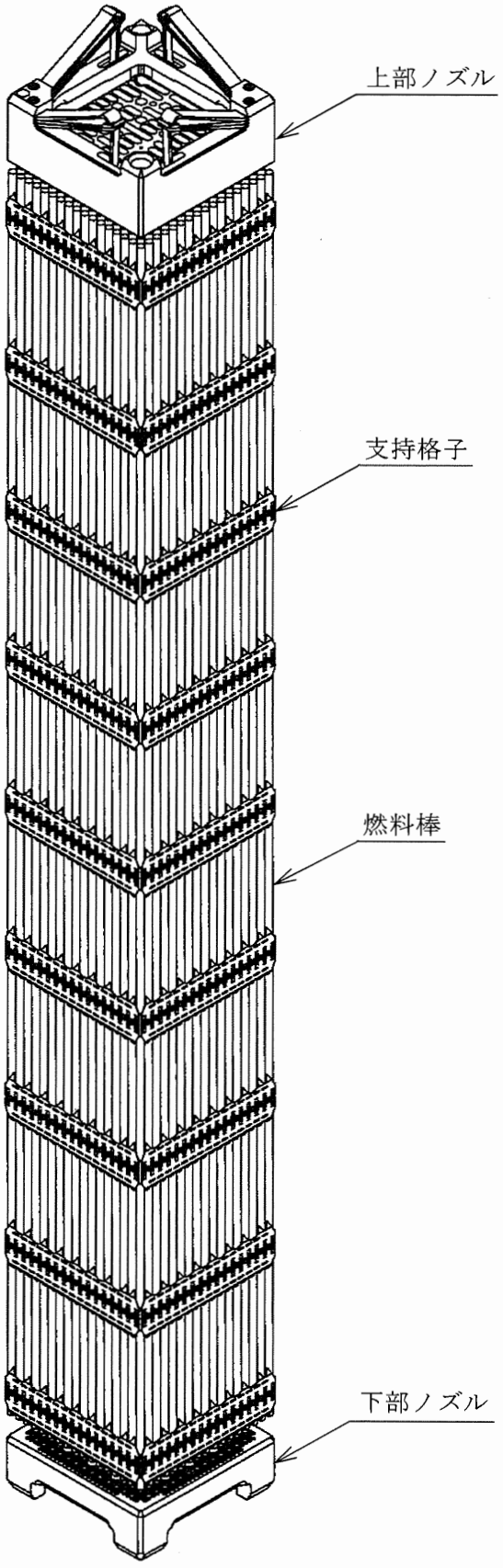
燃焼条件 ＼ 燃料集合体の種類と型式			17×17燃料			
			48000MWd/t型		39000MWd/t型	
			A型	B型	A型	B型
燃料集合体	最高燃焼度 (注1) (MWd/t)	中央部				
		外周部				
	平均燃焼度 (注2) (MWd/t)					
	平均比出力 (MW/t)		38.4			
	冷却日数					
バーナブルポイズン集合体	照射日数					
	冷却日数					

(注1)最高燃焼度は燃料集合体1体の燃焼度の最大値を示す。

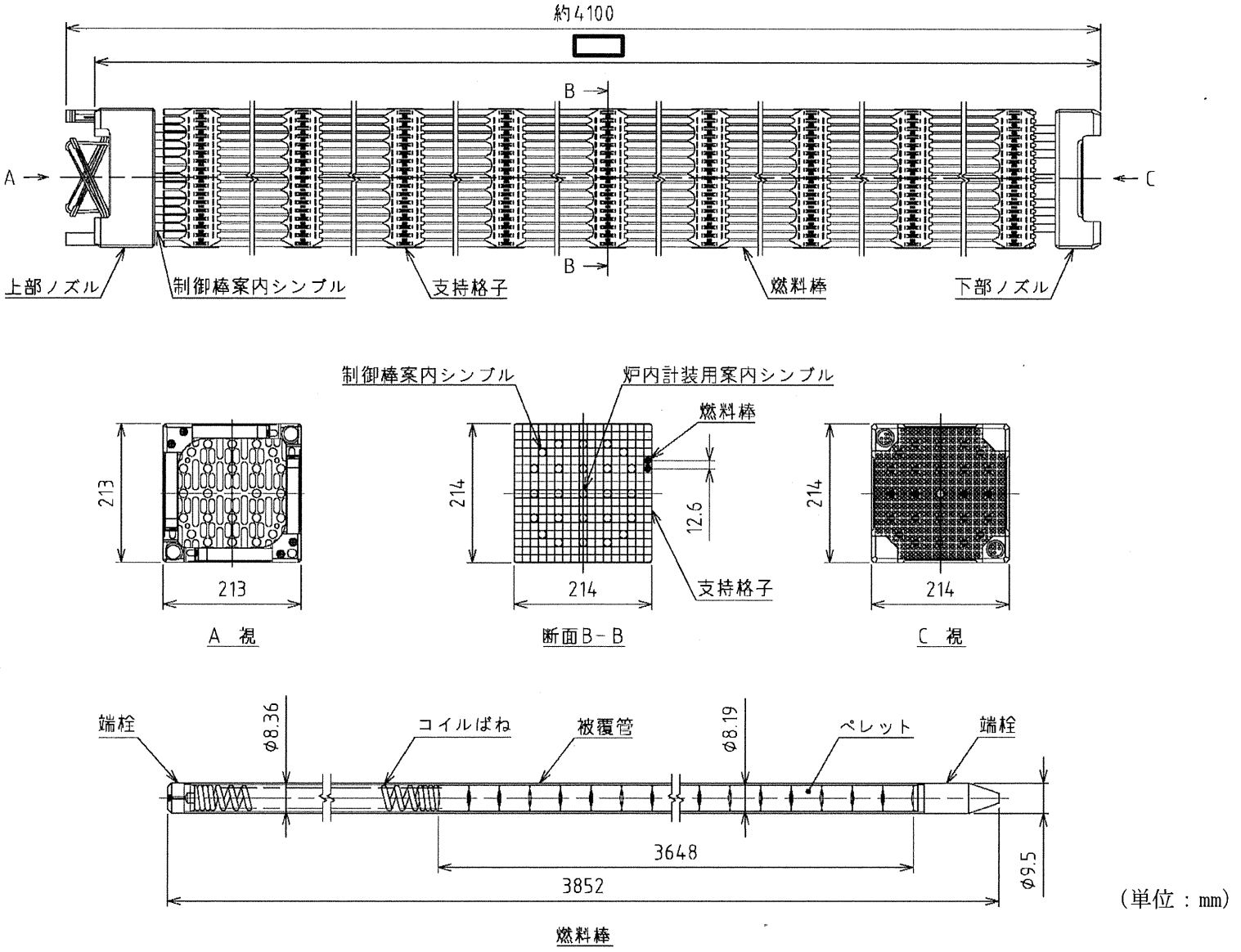
(注2)平均燃焼度は収納する全燃料集合体の燃焼度の平均値を示す。

(イ)-第D.4表　主要核種の種類及び量

燃料集合体の種類と型式 / 項目	48000MWd/t 型	39000MWd/t 型
①燃焼度（MWd/t）		
②最大放射能強度（TBq/体）		
③主要核種の放射能強度（TBq）		
（②を主要核種ごとに分類）		
［核種］		
^{79}Se		
^{90}Sr		
^{90}Y		
^{93}Zr		
^{93m}Nb		
^{99}Tc		
^{106}Ru		
^{106}Rh		
^{107}Pd		
^{113m}Cd		
^{121m}Sn		
^{125}Sb		
^{125m}Te		
^{126}Sn		
^{126}Sb		
^{126m}Sb		
^{134}Cs		
^{135}Cs		
^{137}Cs		
^{137m}Ba		
^{144}Ce		
^{144}Pr		
^{146}Pm		
^{147}Pm		
^{151}Sm		
^{152}Eu		
^{154}Eu		
^{155}Eu		
^{3}H		
^{85}Kr		
その他		
合計		
最大放射能強度（PBq）（輸送容器1基当たり）		

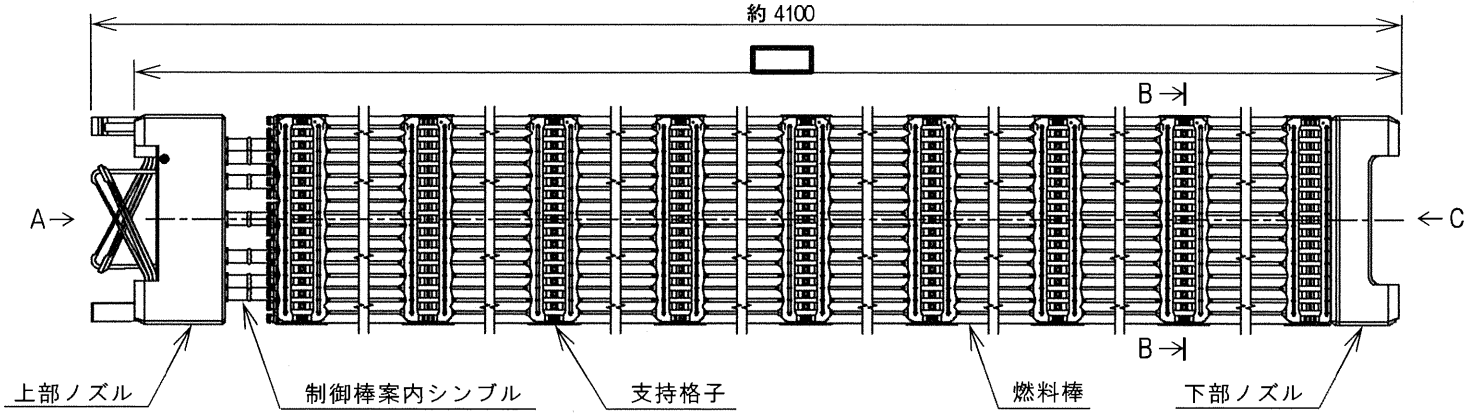


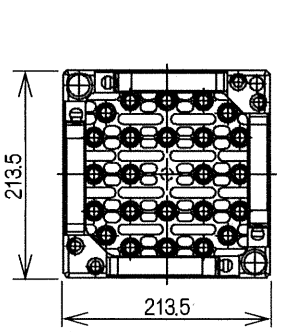
(イ)-第 D.1 図　PWR 燃料集合体全体図（17×17 燃料　代表例）



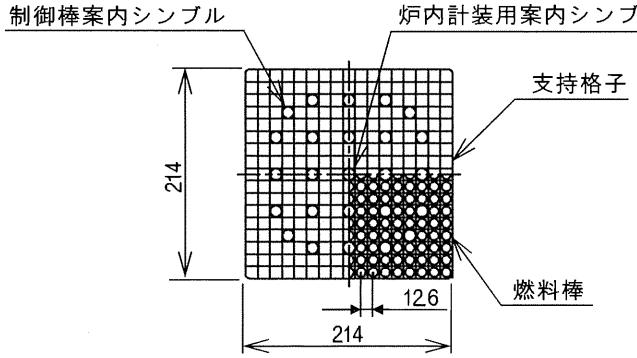
(単位：mm)

(イ)-第D.2図　PWR燃料集合体（17×17燃料（A型）　代表例）

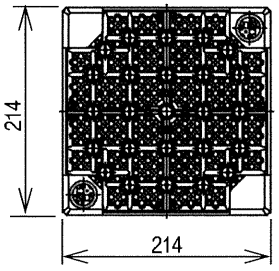




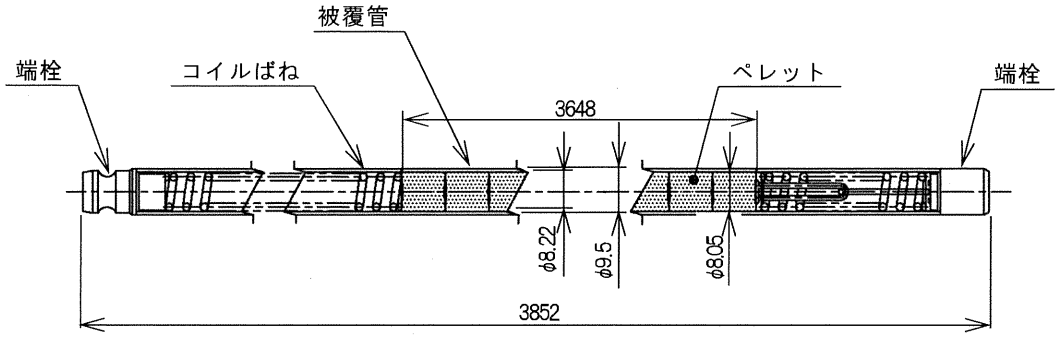
A視



断面 B-B



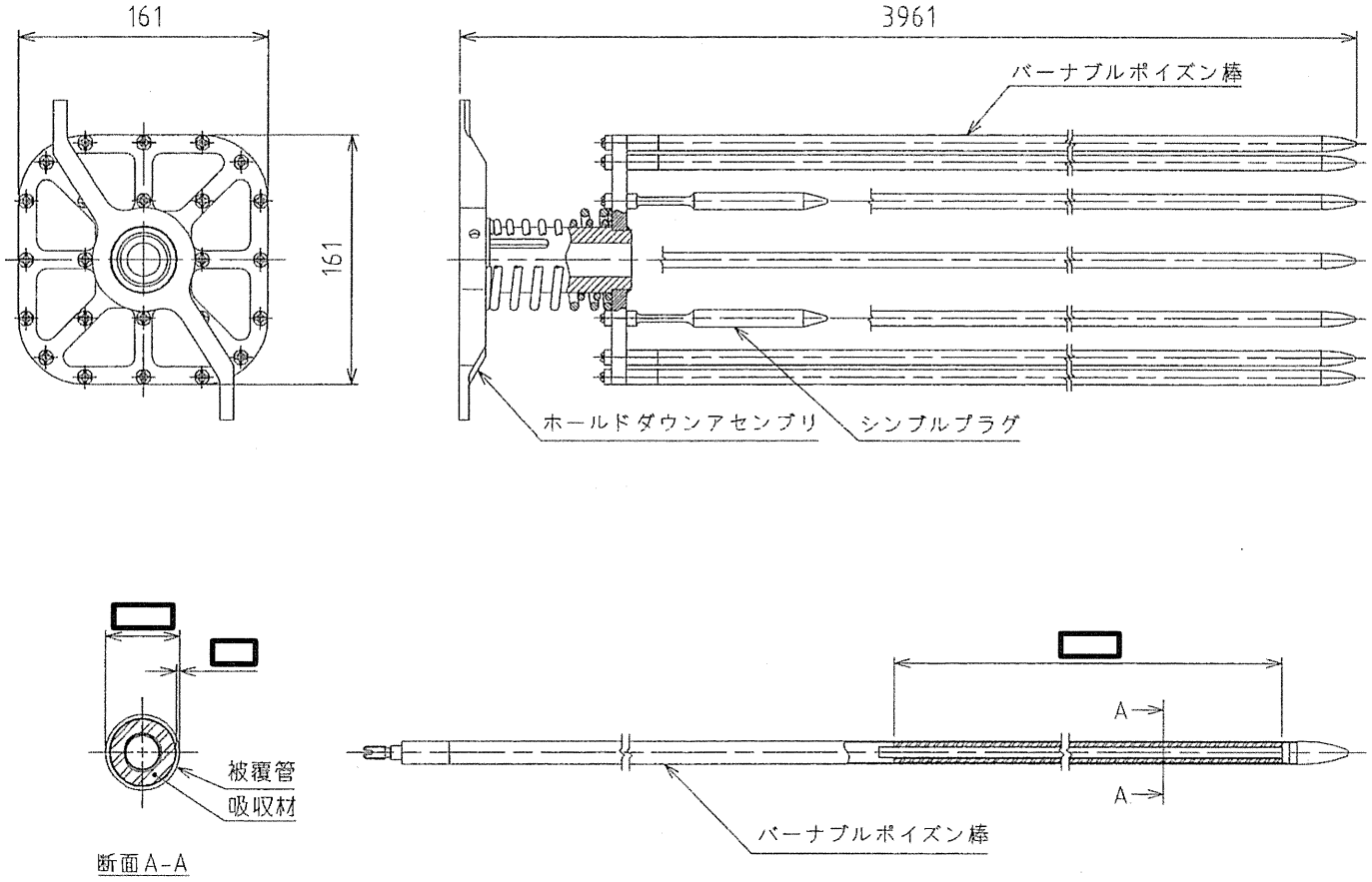
C視



燃料棒

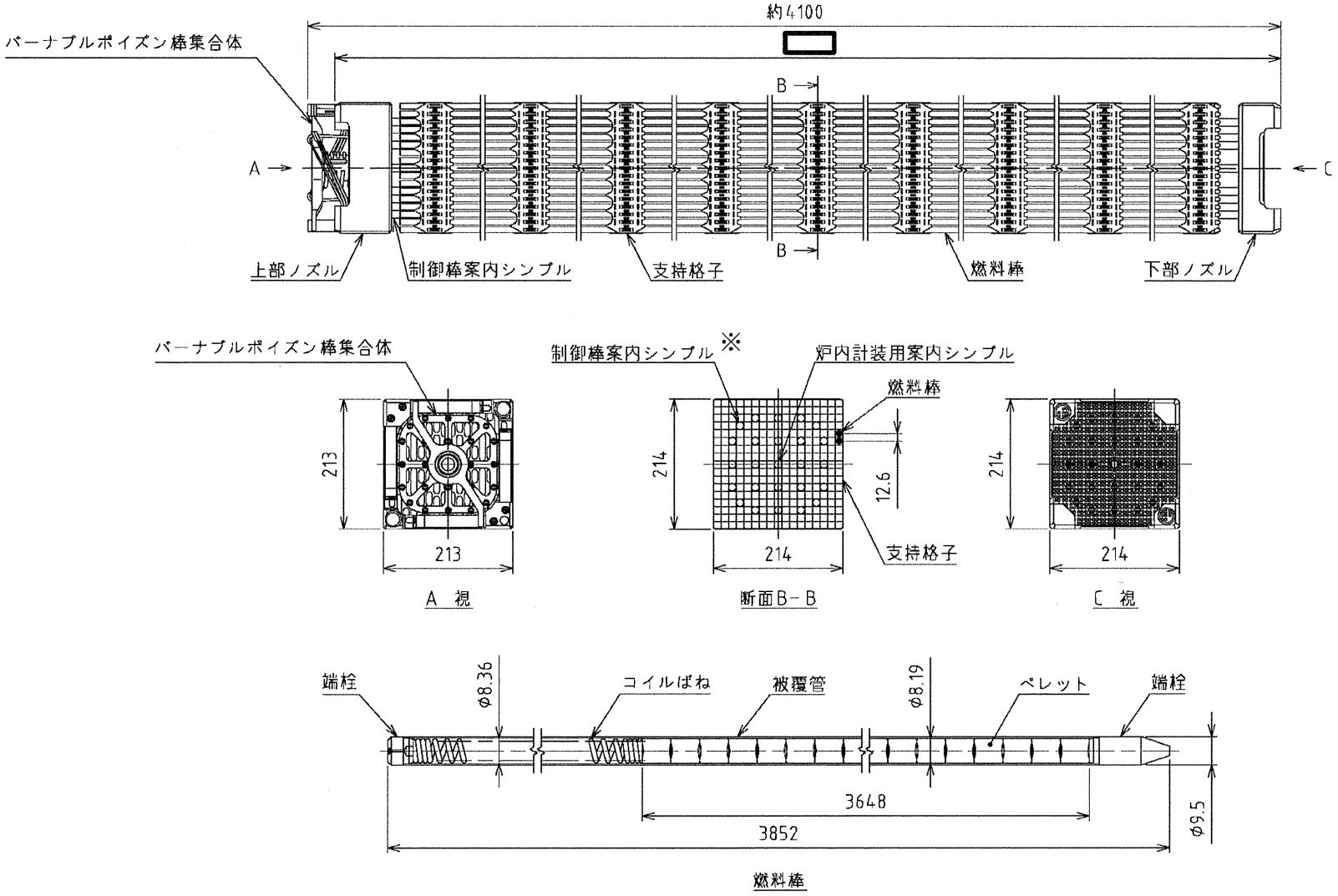
(単位：mm)

(イ)-第 D.3 図　PWR 燃料集合体（17×17 燃料（B型）　代表例）



（単位：mm）

(イ)-第D.4図　バーナブルポイズン集合体（17×17燃料用　代表例）



（単位：mm）

※バーナブルポイズン棒は，制御棒案内シンブル内に挿入される。

(イ)-第D.5図　バーナブルポイズン集合体挿入図（17×17燃料（A型）　代表例）

(ロ)章　　核燃料輸送物の安全解析

(ロ)章　核燃料輸送物の安全解析

本輸送物に関する安全解析は，本輸送物が「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則（昭和五十三年十二月二十八日付，総理府令第五十七号）」（以下「規則」という。）及び「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示（平成2年11月28日付，科学技術庁告示第5号）」（以下「告示」という。）に基づいて，経年変化を考慮した上でBM型核分裂性輸送物としての技術上の基準に適合することを示すために実施した。

本解析の概要は以下のとおりである。

A. 構造解析

構造解析では，通常輸送時において輸送物に亀裂，破損等が生じないことを確認するほか，密封解析の前提となる密封装置の健全性を一般及び特別の試験条件において示している。

また，熱及び遮蔽解析の評価条件を得るために一般及び特別の試験条件における輸送物の状態を評価している。

さらに，本輸送物はBM型核分裂性輸送物であるため，未臨界評価のために核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件における輸送物の状態についても評価している。

B. 熱解析

熱解析では，構造解析の評価結果に基づいて，一般及び特別の試験条件における輸送物各部の温度及び圧力を評価し，構成部品の温度が使用可能温度を超えないことを示すとともに，構造，密封，遮蔽及び臨界解析の評価条件を与えている。

また，一般の試験条件における輸送物の近接表面温度基準（85℃）に適合することを確認している。

C. 密封解析

密封解析では，構造及び熱解析の評価結果並びに発送前検査における気密漏えい検査の合格基準に基づいて，一般及び特別の試験条件における放射性物質の漏えい率を評価し，基準値を満足することを示している。

D. 遮蔽解析

遮蔽解析では，構造及び熱解析の評価結果に基づいて，通常輸送時並びに一般及び特別の試験条件における輸送物表面あるいは表面から1m離れた位置の線量当量率を評価し，基準値を満足することを示している。

E. 臨界解析

臨界解析では，構造解析の評価結果に基づいて，通常輸送時並びに核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件における輸送物の孤立系及び配列系の各状態のいずれの場合にも未臨界であることを示している。

F. 核燃料輸送物の経年変化の考慮

本輸送容器は，使用済燃料乾式貯蔵施設における貯蔵後の輸送にも用いられるため，設計評価期間（60 年）中の輸送容器の構成部材及び収納物の経年変化について考慮する事項を示している。

G. 外運搬規則及び外運搬告示に対する適合性の評価

以上の結果及び(ｲ)章の核燃料輸送物の説明を総合して，本輸送物の設計が規則及び告示に定める技術基準に適合していることを示している。

以下，(ﾛ)章 A～G に各解析，評価の詳細を示す。

(ロ)章A　構造解析

A. 構造解析

A.1 構造設計

A.1.1 概要

輸送容器は，(イ)-第C.1図及び(イ)-第C.2図に示すようにキャスク本体，バスケット，一次蓋，二次蓋，三次蓋等により構成される。胴は，(イ)-第C.4図に示すように三次蓋とともに密封境界を構成しており，胴内の圧力に耐えられる構造になっている。外筒は中性子遮蔽材を保持する構造になっている。輸送容器は，熱応力及び振動に対しても耐えられる構造になっている。

一次蓋は，(イ)-第C.8図に示すように一次蓋ボルトによってキャスク本体に固定される。キャスク本体との密封は金属ガスケットを用いて行い，通常の輸送時における圧力等の負荷に耐え密封性能を維持できる構造になっている。

二次蓋は，(イ)-第 C.10 図に示すように二次蓋ボルトによってキャスク本体に固定される。キャスク本体との密封は金属ガスケットを用いて行い，圧力等の負荷に耐え密封性能を維持できる構造になっている。

三次蓋は，(イ)-第 C.12 図に示すように三次蓋ボルトによってキャスク本体に固定される。キャスク本体との密封はOリングを用いて行い，密封境界として圧力等の負荷に耐えられる構造になっている。三次蓋は，(イ)-第C.2図に示すように上部緩衝体によって覆われている。

(イ)-第C.14図に示すバスケットは，胴内において燃料集合体を分散・集合させないように支持する構造になっている。

(イ)-第C.15図及び(イ)-第C.16図に示す上部及び下部緩衝体は，キャスク本体の上部及び下部にそれぞれボルトによって取り付けられる構造になっており，落下等による機械的衝撃を吸収する。

(イ)-第 C.7 図に示す上部トラニオンは，輸送容器の吊上荷重に耐えられる構造になっている。下部トラニオンは，輸送容器のたて起し及びよこ倒し時にかかる荷重に耐えられる構造になっている。また，輸送容器は(イ)-第C.3図に示すように，胴上部及び下部トラニオンにより輸送架台に固定され，輸送中の加速度に耐えられる。

A.1.2　設計基準

1. 設計で考慮する条件

本輸送容器の構造設計では「規則」及び「告示」に基づいて以下の条件等を考慮した設計を行う。

(1) 通常の輸送条件

a. 輸送容器の材質間又は輸送容器の材質と放射性収納物間において危険な物理的作用又は化学反応の生じるおそれがない設計とする。

b. 密封装置は不用意に開かれない設計とする。

c. 輸送容器の吊上装置としてのトラニオンは吊上荷重の3倍において構造健全性が維持される設計とする。

d. 固縛装置は輸送中発生する上下及び輸送方向2g並びに左右方向1gの加速度において構造健全性が維持される設計とする。

e. 輸送容器の構成部品は，運搬中に予想される周囲温度-25℃～38℃の温度範囲において，亀裂，破損等の生じるおそれがない設計とする。

f. 輸送容器は周囲圧力を60kPaとした場合において，密封性を損なうおそれがない設計とする。

g. 輸送容器は振動によって亀裂，破損等の生じるおそれのない設計とする。

(2) 一般の試験条件

次の a.～e. の各試験条件の下に置いた場合に，圧力荷重，ボルト締付力，熱荷重，衝撃荷重等の考慮すべき荷重を組合せた荷重条件において，輸送物の損傷状態を評価し，輸送容器については安全機能が維持される設計とし，臨界防止機能を担保するバスケットは臨界防止上有意な変形が生じない設計とする。また，収納物である使用済燃料についても構造健全性が維持される設計とする。

a. 38℃の環境に1週間置くこと（以下「熱的試験」という。）。

b. 50 mm/h の雨量に相当する水を1時間吹き付けること（以下「水噴霧試験」という。）。

c. 0.3m の高さから，最大破損を及ぼすように落下させること（以下「0.3m 自由落下試験」という。）。

d. 自重の5倍に相当する荷重又は鉛直投影面積に13kPaを乗じて得た値に相当する荷重のうち，いずれか大きいものを24時間加えること（以下「積み重ね試験」という。）。

e. 重量が6kgであり，直径が3.2cmの容易に破損しない棒であって，その先端が半球形のものを1mの高さから輸送物の最も弱い部分に落下させること（以下「6kg 棒

貫通試験」という。)。

(3) 特別の試験条件

次の a.～d.の各試験条件の下に置いた場合に，圧力荷重，ボルト締付力，熱荷重，衝撃荷重等の考慮すべき荷重を組合せた荷重条件において，輸送物の破損状態を評価し，輸送容器については遮蔽機能に影響を及ぼす変形又は破損が生じず，密封機能を担保する密封境界部が概ね弾性状態に留まる設計とし，臨界防止機能を担保するバスケットは臨界防止上有意な変形が生じない設計とする。

a. 9m の高さから落下させること（以下「9m 落下試験」という。)。

b. 垂直に固定した直径が 15cm であり，長さが 20cm の軟鋼丸棒であって，その上面が滑らかな水平面であり，かつ，その端部の曲率半径が 6 mm以下のものに 1m の高さから落下させること（以下「1m 貫通試験」という。)。

c. 上記の試験条件に置いた後，800℃で，かつ，平均値が最小で 0.9 の放射率を有する火炎の放射熱の条件下に 30 分置くこと（以下「火災試験」という。)。

d. 深さ 15m の水中に 8 時間浸漬（0.15MPa G の外圧）させること（以下「15m 浸漬試験」という。)。

ただし，a 及び b については最大の破損を受けるような順序で連続して行われること。

(4) 原子力規制委員会の定める量を超える放射能を有する核燃料物質等を収納した核燃料輸送物に係る追加条件

密封装置は次の試験において破損するおそれがない設計とする。

a. 深さ 200m の水中に 1 時間浸漬（2MPa G の外圧）させること（以下「強化浸漬試験」という。)。

(5) 核分裂性輸送物に係る試験条件

a. 次の核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下に置いた後の輸送物の損傷状態を評価し，輸送物は構造部に一辺 10cm の立方体を包含するようなくぼみが生じない設計とし，外接する直方体の各辺が 10cm 以上となる設計とする。

(a) 以下の連続試験

ⅰ. 水噴霧試験

ⅱ. 0.3m 自由落下試験

(b) 積み重ね試験

(c) 6kg 棒貫通試験

b. 次の核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下に，最大の破損を受ける条件で順次置いた後の輸送物の損傷状態を評価し，輸送物は臨界防止上有意な損傷が生じない設計とする。

(a) 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件

(b) (c)の条件の下で輸送物が最大の破損を受けるような順序で次の条件の下に順次置くこと。

ⅰ. 9m 落下試験

ⅱ. 1m 貫通試験

(c) 火災試験

(d) 深さ 0.9m の水中に 8 時間浸漬させること（以下「0.9m 浸漬試験」という。）。

c. 次の条件に順次置くこと。

(a) 核分裂輸送物に係る一般の試験条件

(b) 15m 浸漬試験

なお，核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件の中で機械的（強度）試験においては，本輸送物が使用される-25℃～38℃の周囲温度範囲を考慮する。

2. 設計基準

各解析項目に対して材質，温度，負荷係数等の設計条件を考慮して適用数式，要素及び解析基準を決定した。

この中で，輸送容器の胴，一次蓋，二次蓋，三次蓋，蓋ボルト，蓋密封シール部及びトラニオンに発生する応力の設計基準値は，金属キャスク構造規格[1)]を適用した。

金属キャスク構造規格[1)]に設計基準値の記載がない，外筒，下部端板，蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーは，中性子遮蔽材を保持する構造物であることを考慮し，設計・建設規格[2)] ＜第Ⅰ編　軽水炉規格＞のクラス１支持構造物の規定を適用した。アルミニウム合金製のバスケットについては，金属キャスク構造規格[1)]のバスケットの考え方を基本として設計基準値を設定した。また，燃料被覆管については，一般の試験条件における荷重負荷時の変形を防止するため，設計基準値を降伏応力以下とした。

三次蓋とキャスク本体のＯリング取付位置の相対口開き変形量については，Ｏリングが閉じ込め機能を維持できる設計基準値とした。

各試験条件に対しての応力及び変形量の設計基準値を以下に示す。また，設計条件及び解析方法の要約を(ロ)-第A.1表に示す。

(1) 通常の輸送条件（吊上装置及び固縛装置）

a. トラニオン本体は応力強さが設計降伏点以下であること。ここで，応力強さとは主応力の差の絶対値をいう。

b. トラニオン接続部は以下に示す一次支圧応力 f_p' を超えないこと。一次＋二次支圧応力については f_p' の 1.5 倍を超えないこと。

$$f_p' = 1.25S_y$$

ここで，

S_y ：金属キャスク構造規格[1)]別表第 5-8 に示される設計降伏点

c. 吊上装置については疲労評価を行うこと。

(2) 一般の試験条件（熱的試験及び自由落下試験）

a. 蓋ボルト以外の輸送容器の胴，一次蓋，二次蓋，三次蓋は発生応力を分類し，各応力が以下に示す基準値以下であること。

$$P_m \leqq S_m$$

$$P_L \leqq 1.5S_m$$

$$P_L + P_b \leqq 1.5S_m$$

$$P_L + P_b + Q \leqq 3S_m$$

ここで，

P_m ：一次一般膜応力

P_L ：一次局部膜応力

P_b ：一次曲げ応力

Q ：二次応力

S_m ：金属キャスク構造規格[1] 別表第 5-1 に示される設計応力強さ

b. 蓋ボルトに対しては以下の基準を適用する。

（平均引張応力）$\leqq 2S_m$

（平均引張応力＋曲げ応力）$\leqq 3S_m$

ここで，

S_m ：金属キャスク構造規格[1] 別表第 5-2 に示される設計応力強さ

c. 一次蓋密封シール部及び二次蓋密封シール部は発生応力を分類し，各応力が以下に示す基準値以下であること。

$P_m \leqq S_y$

$P_L \leqq S_y$

$P_L + P_b \leqq S_y$

$P_L + P_b + Q \leqq S_y$

ここで，

S_y ：金属キャスク構造規格[1] 別表第 5-8 に示される設計降伏点

d. 三次蓋とキャスク本体のＯリング取付位置での相対口開き変形量が，Ｏリングの初期締め付け代より小さいこと。

e. 外筒，下部端板，蓋部中性子遮蔽材カバー，底部中性子遮蔽材カバーにおいては以下の基準を適用する。ただし，各溶接部については，各構成部材と同じ基準を適用する。

(a) 各部位の一次引張応力は以下に示す f_t を超えないこと。一次＋二次応力については，(b)の圧縮応力との差が f_t の 3 倍を超えないこと。

$$f_t = \frac{F}{1.5}$$

ここで，

$F = MIN[0.7S_u,\ S_y]$（オーステナイト系ステンレス鋼以外）

$F = MIN[1.35S_y,\ 0.7S_u,\ S_y(RT)]$（オーステナイト系ステンレス鋼）

S_u ：金属キャスク構造規格[1] 別表 5-9 に示される設計引張強さ

S_y（RT） ：金属キャスク構造規格[1] 別表 5-8 に示される 40℃における設計降伏点

(b) 各部位の一次圧縮応力は以下に示す f_c を超えないこと。

$$f_c = \left\{1 - 0.4\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2\right\}\frac{F}{\nu}$$

ここで，

λ　：有効細長比

Λ　：限界細長比

ν　：$\nu=1.5+\frac{2}{3}\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2$

(c) 各部位の一次せん断応力は以下に示す f_s を超えないこと。一次＋二次応力については f_s の 3 倍を超えないこと。

$$f_s=\frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

(d) 各部位の一次曲げ応力は以下に示す f_b を超えないこと。一次＋二次応力については f_b の 3 倍を超えないこと。

$$f_b=\frac{F}{1.5}$$

f. バスケットにおいては，以下の基準を適用する。

(a) 各部位の応力が以下に示す基準値以下であること。

$P_m \leqq S_m$

$P_m+P_b \leqq \alpha S_m$

$\tau \leqq 0.6S_m$

（一次圧縮応力）$\leqq f_c$

$$f_c=\left\{1-0.4\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2\right\}\frac{F}{\nu}$$

ここで，

S_m　：付属書類 A.10.6 (ロ)-第 A.122 表に示される設計応力強さ

P_m　：一次一般膜応力

P_b　：一次曲げ応力

α　：純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は 1.5 のいずれかの小さい方の値

τ　：平均せん断応力

λ　：有効細長比

Λ　：限界細長比

ν　：$\nu=1.5+\frac{2}{3}\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2$

$F=MIN[0.7S_u,\ S_y]$

S_u　：付属書類 A.10.6 (ロ)-第 A.125 表に示される設計引張強さ

S_y　：付属書類 A.10.6 (ロ)-第 A.124 表に示される設計降伏点

g. 燃料被覆管については応力強さが降伏応力以下であること。

(3) 一般の試験条件（積み重ね試験及び 6kg 棒貫通試験）

a. 積み重ね試験に対しては胴に発生する応力強さが設計降伏点を超えないこと。

b. 6kg 棒貫通試験に対しては，せん断で破壊しないこと。

(4) 特別の試験条件

a. 蓋ボルト以外の輸送容器の胴，二次蓋及び三次蓋は以下の基準を適用する。

(a) 各部位について発生応力を分類し，各応力が以下に示す基準値以下であること。

ｉ）オーステナイト系ステンレス鋼以外

$P_m \leqq 2/3S_u$

$P_L \leqq S_u$

$P_L + P_b \leqq S_u$

ii）オーステナイト系ステンレス鋼

$P_m \leqq MIN[2.4S_m,\ 2/3S_u]$

$P_L \leqq MIN[3.6S_m,\ S_u]$

$P_L + P_b \leqq MIN[3.6S_m,\ S_u]$

b. 二次蓋ボルト及び三次蓋ボルトに対しては以下の基準を適用する。

（平均引張応力）$\leqq S_y$

（平均引張応力＋曲げ応力）$\leqq S_y$

c. 二次蓋密封シール部に対しては各部位について発生応力を分類し，各応力が以下に示す基準値以下であること。

$P_m \leqq S_y$

$P_L \leqq S_y$

$P_L + P_b \leqq S_y$

$P_L + P_b + Q \leqq S_y$

d. 三次蓋とキャスク本体のＯリング取付位置の相対口開き変形量が，Ｏリングの初期締め付け代より小さいこと。

e. 外筒，下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーにおいては以下の基準を適用する。ただし，各溶接部については，各構成部材と同じ基準を適用する。

(a) 各部位の一次引張応力は以下に示す f_t の 1.5 倍を超えないこと。

$$f_t = \frac{F}{1.5}$$

ここで，

$F = MIN[0.7S_u,\ 1.2S_y]$（オーステナイト系ステンレス鋼以外）

$F = MIN[1.35S_y,\ 0.7S_u,\ 1.2S_y(RT)]$（オーステナイト系ステンレス鋼）

(b) 各部位の一次圧縮応力は以下に示す f_c の 1.5 倍を超えないこと。

$$f_c = \left\{1 - 0.4\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2\right\}\frac{F}{\nu}$$

ここで,

$F = MIN[0.7S_u,\ 1.2S_y]$ (オーステナイト系ステンレス鋼以外)

$F = MIN[1.35S_y,\ 0.7S_u,\ 1.2S_y(RT)]$ (オーステナイト系ステンレス鋼)

(c) 各部位の一次せん断応力は以下に示す f_s の 1.5 倍を超えないこと。

$$f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

(d) 各部位の一次曲げ応力は以下に示す f_b の 1.5 倍を超えないこと。

$$f_b = \frac{F}{1.5}$$

f. バスケットにおいては，以下の基準を適用する。

(a) 各部位の応力が以下に示す基準値以下であること。

$P_m \leqq 2/3S_u$

$P_m + P_b \leqq 2/3\,\alpha S_u$

$\tau \leqq 1.2S_m$

(b) 各部位の一次圧縮応力は f_c*の 1.5 倍を超えないこととする。f_c*の値は，以下に示す f_c の値を算出する際に S_y とあるのを $1.2S_y$ と読み替えて算出した値。

$$f_c = \left\{1 - 0.4\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2\right\}\frac{F}{\nu}$$

ここで,

$F = MIN[0.7S_u,\ S_y]$

g. 1m 貫通試験に対しては，せん断で破断しないこと。

(5) 強化浸漬試験

a. 輸送容器の胴（底板）及び蓋部は以下の基準を適用する。

$P_L + P_b \leqq S_u$ (オーステナイト系ステンレス鋼以外)

$P_L + P_b \leqq MIN[3.6S_m,\ S_u]$ (オーステナイト系ステンレス鋼)

b. 外圧を受ける胴にあっては，外面に受ける圧力が金属キャスク構造規格 [1] に示される胴の厚さ等によって定まる許容外圧 P_a の 1.5 倍以下であること。

3. 余裕率

適用数式及び要素による結果のうち，定量的な基準のあるものについては次に示す余裕率 MS を用いて評価する。

$$\text{余裕率 (MS)} = \frac{\text{解析基準値}}{\text{解析結果}} - 1$$

したがって，余裕率は 0 以上あれば良いとする。

余裕率を用いられないものは，該当箇所にその基準等を記載した。なお，解析基準値は A.3 に示す材料の機械的性質及び(ロ)章 B に示す温度等に基づいて決定する。(注)

(注)設計降伏点，設計引張強さ，縦弾性係数等の値は，A.3 に示す引用文献中で与えられている温度依存データを内挿することによって求める。

(ロ)-第A.1表　輸送容器の構造設計の条件及び解析方法（1/13）

条件	解析項目及びその評価	設計条件						解析方法		備考
		参照図表	材質	温度	設計負荷			適用数式又は要素	解析基準	
					種類	負荷係数	要素			
通常の輸送条件	化学的及び電気的反応									
	1)化学的反応	(ロ)-第A.3表	表による	—	腐食	—	活性	活性の有無	無	
	2)電気的反応	(ロ)-第A.3表	表による	—	腐食	—	電位差	反応の有無	無	
	低温強度									
	1)構成部品	(ロ)-第A.4表	表による	—	材質	—	亀裂・破損	-25℃での亀裂・破損の有無	無	
	2)低温時の強度	(ロ)-第A.4表	表による	—	材質	—	脆性破壊	-25℃での脆化の有無	無	
	密封装置									
	三次蓋	(イ)-第C.2図	—	—	誤操作による開放	—	誤操作の可否	緩衝体等に覆われての誤操作の可否	否	

(ロ)-第A.1表　輸送容器の構造設計の条件及び解析方法（2/13）

条件	解析項目及びその評価	設計条件						解析方法		備考
		参照図表	材質	温度	設計負荷			適用数式又は要素	解析基準	
					種類	負荷係数	要素			
通常の輸送条件	吊上装置 トラニオン本体	(ロ)-第A.10図	SUS630	[redacted]	吊上荷重	3 1.3	曲げとせん断 疲労評価	$S=\sqrt{\sigma_b^2+4\tau^2}$ N_c	S_y N_a	(注1)
	トラニオン接続部 （トラニオン側）	(ロ)-第A.10図	SUS630		吊上荷重	3 1.3	支圧 疲労評価	$\sigma_P=MAX[\sigma_{P11},\ \sigma_{P12}]$ $\sigma_P=MAX[\sigma_{P11},\ \sigma_{P12}]+\sigma_{P2}$ N_c	$1.25S_y$ $1.5\times1.25S_y$ N_a	(注2)
	トラニオン接続部 （胴側）	(ロ)-第A.10図	[redacted]		同上	同上	同上	同上	同上	
	固縛装置 トラニオン本体	(ロ)-第A.14図	SUS630		上下，前後2g （下方向は自重を考慮し，3g）	1	曲げとせん断	$S=\sqrt{\sigma_b^2+4\tau^2}$	S_y	
	トラニオン接続部 （トラニオン側）	(ロ)-第A.14図	SUS630		上下，前後2g （下方向は自重を考慮し，3g）	1	支圧	$\sigma_P=MAX[\sigma_{P11},\ \sigma_{P12}]$ $\sigma_P=MAX[\sigma_{P11},\ \sigma_{P12}]+\sigma_{P2}$	$1.25S_y$ $1.5\times1.25S_y$	
	トラニオン接続部 （胴側）	(ロ)-第A.14図	[redacted]		同上	同上	同上	同上	同上	
	圧力	—	—		周囲圧力の降下	—	内圧	密封性	良	
	振動	(ロ)-第A.15図	[redacted]		振動による力	—	振動	固有振動数	加振源の振動数	(注3)

(注1) S：応力強さ，σ_b：曲げ応力，τ：せん断応力，S_y：設計降伏点，N_c：使用計画回数，N_a：許容繰返し回数

(注2) σ_P：支圧応力，σ_{P11}，σ_{P12}：吊上荷重による支圧応力（一次応力），σ_{P2}：しまり嵌め荷重による支圧応力（二次応力）

(注3) 輸送容器の胴，一次蓋及び二次蓋の材質は，[redacted]である。

(ロ)-第A.1表　輸送容器の構造設計の条件及び解析方法（3/13）

条件	解析項目及びその評価	設計条件						解析方法		備考
		参照図表	材質	温度	設計負荷			適用数式又は要素	解析基準	
					種類	負荷係数	要素			
一般の試験条件	熱的試験									
	1)　応力計算									
	胴	(ロ)-第A.17図			内圧，熱膨張及び初期締付トルク	1	応力強さ	P_m P_L P_L+P_b P_L+P_b+Q	S_m $1.5S_m$ $1.5S_m$ $3S_m$	(注4)
	胴（底板）	—			同上	1	同上	同上	同上	
	一次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上	
	三次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上	
	外筒	—			同上	1	応力	引張応力 圧縮応力 せん断応力 曲げ応力	f_t f_c f_s f_b	(注5)
	下部端板	—			同上	1	同上	同上	同上	
	蓋部中性子遮蔽材カバー	—			同上	1	同上	同上	同上	
	底部中性子遮蔽材カバー	—			同上	1	同上	同上	同上	
	一次蓋シール部（蓋）	—			同上	1	応力強さ	P_L P_L+P_b+Q	S_y S_y	
	一次蓋シール部（胴）	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋シール部（蓋）	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋シール部（胴）	—			同上	1	同上	同上	同上	
	一次蓋ボルト	—			同上	1	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m+\sigma_b$	$2S_m$ $3S_m$	(注6)
	二次蓋ボルト	—			同上	1	同上	同上	同上	
	三次蓋ボルト	—			同上	1	同上	同上	同上	
	ガスケットの密封性	—	EPDM	—	同上	1	変形量	口開き変形量	初期締付け代	

(注4) P_m：一次一般膜応力，P_L：一次局部応力，P_b：一次曲げ応力，Q：二次応力，S_m：設計応力強さ

(注5) f_t：許容引張応力，f_c：許容圧縮応力，f_s：許容せん断応力，f_b：許容曲げ応力

(注6) σ_m：平均引張応力，σ_b：曲げ応力

(ロ)-第A.1表　輸送容器の構造設計の条件及び解析方法（4/13）

条件	解析項目及びその評価	設計条件						解析方法		備考
		参照図表	材質	温度	設計負荷			適用数式又は要素	解析基準	
					種類	負荷係数	要素			
一般の試験条件	水噴霧	—		—	水噴霧	—	吸水による脆化，水溜	吸水性 水切	無 良	
	自由落下									
	1) 緩衝体の変形量と衝撃加速度									
	垂直落下	(ロ)-第A.23図 (ロ)-第A.24図		—	落下エネルギー	1	エネルギー吸収	$E_a = \Sigma\ \sigma_c V$	E_k=mgH	(注7)
	水平落下	(ロ)-第A.25図		—	落下エネルギー	1	エネルギー吸収	$E_a = \Sigma\ \sigma_c V$	E_k=mgH	
	コーナー落下	(ロ)-第A.26図 (ロ)-第A.27図		—	落下エネルギー	1	エネルギー吸収	$E_a = \Sigma\ \sigma_c V$	E_k=mgH	
	2) 垂直落下									
	胴	(ロ)-第A.28図 (ロ)-第A.29図			内圧，慣性力 熱膨張及び 初期締付トルク	1	応力強さ	P_m P_L P_L+P_b P_L+P_b+Q	S_m $1.5S_m$ $1.5S_m$ $3S_m$	
	胴（底板）	—			同上	1	同上	同上	同上	
	一次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上	
	三次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上	
	外筒	—			同上	1	応力	引張応力 圧縮応力 せん断応力 曲げ応力	f_t f_c f_s f_b	
	下部端板	—			同上	1	同上	同上	同上	
	蓋部中性子遮蔽材カバー	—			同上	1	同上	同上	同上	
	底部中性子遮蔽材カバー	—			同上	1	同上	同上	同上	

（注7）E_a：吸収エネルギー，σ_c：圧縮応力，V：変形量，E_k：輸送物の落下エネルギー，m：輸送物最大総質量，g：重力加速度，H：落下高さ

(ロ)-第A.1表　輸送容器の構造設計の条件及び解析方法（5/13）

条件	解析項目及びその評価	設計条件						解析方法		備考
		参照図表	材質	温度	設計負荷			適用数式又は要素	解析基準	
					種類	負荷係数	要素			
一般の試験条件	2)垂直落下（続き）									
	一次蓋シール部（蓋）	—			同上	1	応力強さ	P_L P_L+P_b+Q	S_y S_y	
	一次蓋シール部（胴）	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋シール部（蓋）	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋シール部（胴）	—			同上	1	同上	同上	同上	
	一次蓋ボルト	—			同上	1	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m+\sigma_b$	$2S_m$ $3S_m$	
	二次蓋ボルト	—			同上	1	同上	同上	同上	
	三次蓋ボルト	—			同上	1	同上	同上	同上	
	ガスケットの密封性	—	EPDM		同上	1	変形量	口開き変形量	初期締付け代	
	バスケット	(ロ)-第A.31図	アルミニウム合金		慣性力	1	圧縮	$\sigma_c=\frac{W_b \cdot G_v}{A}$	S_m f_c	(注8)
	燃料被覆管	—	ジルカロイ		内圧及び慣性力	1	応力強さ	S	σ_y	(注9)
	3)水平落下									
	胴	(ロ)-第A.32図			内圧，慣性力 熱膨張及び 初期締付トルク	1	応力強さ	P_m P_L P_L+P_b P_L+P_b+Q	S_m $1.5S_m$ $1.5S_m$ $3S_m$	
	胴（底板）	—			同上	1	同上	同上	同上	
	一次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上	
	三次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上	
	外筒	—			同上	1	応力	引張応力 圧縮応力 せん断応力 曲げ応力	f_t f_c f_s f_b	

(注8) W_b：バスケット合計質量，G_v：垂直落下時の衝撃加速度，A：バスケットプレートと胴の接触面積
(注9) σ_y：設計降伏点

(ロ)-第A.1表　輸送容器の構造設計の条件及び解析方法（6/13）

条件	解析項目及びその評価	設計条件						解析方法		備考
		参照図表	材質	温度	設計負荷			適用数式又は要素	解析基準	
					種類	負荷係数	要素			
一般の試験条件	3）水平落下（続き）									
	下部端板	－			同上	1	同上	同上	同上	
	蓋部中性子遮蔽材カバー	－			同上	1	同上	同上	同上	
	底部中性子遮蔽材カバー	－			同上	1	同上	同上	同上	
	一次蓋シール部（蓋）	－			同上	1	応力強さ	P_L P_L+P_b+Q	S_y S_y	
	一次蓋シール部（胴）	－			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋シール部（蓋）	－			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋シール部（胴）	－			同上	1	同上	同上	同上	
	一次蓋ボルト	－			同上	1	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m+\sigma_b$	$2S_m$ $3S_m$	
	二次蓋ボルト	－			同上	1	同上	同上	同上	
	三次蓋ボルト	－			同上	1	同上	同上	同上	
	ガスケットの密封性	－	EPDM	－	同上	1	変形量	口開き変形量	初期締付け代	
	バスケット	(ロ)-第A.33図 (ロ)-第A.34図 (ロ)-第A.35図 (ロ)-第A.36図	アルミニウム合金		慣性力	1	圧縮 曲げ せん断	$\sigma_c=(W_I+W_{II})\cdot\frac{G_H}{A\cdot N}$ $\sigma_b=\frac{M}{Z}$ $\tau=\frac{F}{A}$	S_m αS_m $0.6S_m$	(注10)
	燃料被覆管	－	ジルカロイ		内圧及び慣性力	1	応力強さ	S	σ_y	
	4）コーナー落下	－垂直及び水平落下の結果並びに特別の試験条件の結果を引用して評価－								

(注10) W_I：領域Ⅰのバスケットプレート，中性子吸収材，バスケットサポート及び燃料集合体の質量，W_{II}：領域Ⅱのバスケットプレート及び中性子吸収材の質量，G_H：水平落下時の衝撃加速度，A：断面積，N：バスケットプレートの数，M：曲げモーメント，Z：断面係数，F：せん断力，α：純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は1.5のいずれか小さい方の値

(ロ)-第 A.1 表　輸送容器の構造設計の条件及び解析方法（7/13）

条件	解析項目及びその評価	設計条件						解析方法		備考
		参照図表	材質	温度	設計負荷			適用数式又は要素	解析基準	
					種類	負荷係数	要素			
一般の試験条件	積み重ね 1) 軸に直角方向 2) 軸方向	 (ロ)-第 A.37 図 (ロ)-第 A.38 図			 輸送物質量の 5 倍 輸送物質量の 5 倍	 1 1	 曲げ 圧縮	 $\sigma_b = \frac{M_{max} d_o}{2I}$ $\sigma_c = \frac{W}{A}$	 S_y S_y	 (注 11)
	貫通	(ロ)-第 A.39 図			落下エネルギー	1	せん断	$E_s = \frac{\pi}{2} dt^2 S$	せん断エネルギー	(注 12)

(注 11) M_{max}：最大曲げモーメント，d_0：円筒外径，I：断面二次モーメント，W：荷重

(注 12) E_s：せん断エネルギー，d：直径，t：板厚，S：せん断強さ

(ロ)-第 A.1 表　輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (8/13)

条件	解析項目及びその評価	設計条件						解析方法		備考
		参照図表	材質	温度	設計負荷			適用数式又は要素	解析基準	
					種類	負荷係数	要素			
特別の試験条件	9m 落下試験									
	1) エネルギー吸収と衝撃力									
	垂直落下	(ロ)-第 A.23 図 (ロ)-第 A.24 図		—	落下エネルギー	1	エネルギー吸収	$E_a = \Sigma\ \sigma_c V$	$E_k = mgH$	
	水平落下	(ロ)-第 A.25 図		—	落下エネルギー	1	エネルギー吸収	$E_a = \Sigma\ \sigma_c V$	$E_k = mgH$	
	コーナー落下	(ロ)-第 A.26 図 (ロ)-第 A.27 図		—	落下エネルギー	1	エネルギー吸収	$E_a = \Sigma\ \sigma_c V$	$E_k = mgH$	
	2) 垂直落下									
	胴	(ロ)-第 A.40 図 (ロ)-第 A.41 図			内圧，慣性力及び初期締付トルク	1	応力強さ	P_m P_L P_L+P_b	$2/3S_u$ S_u S_u	(注 13)
	胴（底板）	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上	
	三次蓋	—			同上	1	同上	P_m P_L P_L+P_b	$MIN[2.4S_m, 2/3S_u]$ $MIN[3.6S_m, S_u]$ $MIN[3.6S_m, S_u]$	
	外筒	—			同上	1	応力	引張応力 圧縮応力 せん断応力 曲げ応力	$1.5f_t$ $1.5f_c$ $1.5f_s$ $1.5f_b$	
	下部端板	—			同上	1	同上	同上	同上	
	底部中性子遮蔽材カバー	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋シール部（蓋）	—			内圧，慣性力，熱膨張及び初期締付トルク	1	応力強さ	P_L P_L+P_b+Q	S_y S_y	
	二次蓋シール部（胴）	—			同上	1	同上	同上	同上	

(注 13) S_u：設計引張強さ

(ロ)-第 A.1 表　輸送容器の構造設計の条件及び解析方法 (9/13)

条件	解析項目及びその評価	設計条件						解析方法		備考
		参照図表	材質	温度	設計負荷			適用数式又は要素	解析基準	
					種類	負荷係数	要素			
特別の試験条件	2) 垂直落下（続き）									
	二次蓋ボルト	—	[redacted]	[redacted]	同上	1	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m+\sigma_b$	S_y S_y	
	三次蓋ボルト	—			同上	1	同上	同上	同上	
	ガスケットの密封性	—	EPDM		同上	1	変形量	口開き変形量	初期締付け代	
	バスケット	—	アルミニウム合金		慣性力	2.6	圧縮	$\sigma_c=\frac{W_b \cdot G_v}{A}$	$2/3S_u$ $1.5f_c^*$	(注 14)
	3) 水平落下									
	胴	(ロ)-第 A.42 図	[redacted]		内圧，慣性力及び初期締付トルク	1	応力強さ	P_m P_L P_L+P_b	$2/3S_u$ S_u S_u	
	胴（底板）	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上	
	三次蓋	—			同上	1	同上	P_m P_L P_L+P_b	$MIN[2.4S_u, 2/3S_u]$ $MIN[3.6S_u, S_u]$ $MIN[3.6S_u, S_u]$	
	外筒	—			同上	1	応力	引張応力 圧縮応力 せん断応力 曲げ応力	$1.5f_t$ $1.5f_c$ $1.5f_s$ $1.5f_b$	
	下部端板	—			同上	1	同上	同上	同上	
	底部中性子遮蔽材カバー	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋シール部（蓋）	—			内圧，慣性力，熱膨張及び初期締付トルク	1	応力強さ	P_L P_L+P_b+Q	S_y S_y	
	二次蓋シール部（胴）	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋ボルト	—			同上	1	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m+\sigma_b$	S_y S_y	
	三次蓋ボルト	—			同上	1	同上	同上	同上	

(注 14) f_c^*：f_c の値を算出する際に S_y とあるのを $1.2S_y$ と読み替えて算出した値

(ロ)-第A.1表　輸送容器の構造設計の条件及び解析方法（10/13）

条件	解析項目及びその評価	設計条件						解析方法		備考
		参照図表	材質	温度	設計負荷			適用数式又は要素	解析基準	
					種類	負荷係数	要素			
特別の試験条件	3) 水平落下（続き）									
	ガスケットの密封性	—	EPDM	—	同上	1	変形量	口開き変形量	初期締付け代	
	バスケット	—	アルミニウム合金	[redacted]	慣性力	1.2	圧縮 曲げ せん断	$\sigma_c=(W_I+W_{II})\cdot\frac{G_H}{A\cdot N}$ $\sigma_b=\frac{M}{Z}$ $\tau=\frac{F}{A}$	$2/3S_u$ $2/3\alpha S_u$ $1.2S_m$	
	4) コーナー落下	－垂直及び水平落下の結果を引用して評価－								
	二次蓋ボルト	—	[redacted]		内圧，慣性力，熱膨張及び初期締付トルク	1	引張	$\sigma_t=\sigma_{t1}+\phi\,\sigma_{t2}$	S_y	(注 15)
	三次蓋ボルト	—			同上	1	同上	同上	同上	
	5) 傾斜落下	－垂直及び水平落下の結果及びA.10.3項を引用して評価－								
	1m貫通試験									
	1) 垂直落下									
	三次蓋	—	[redacted]		軟鋼棒圧潰荷重	1	せん断	$F_{bar}=\sigma_u\cdot A$ $F=\pi\cdot d\cdot t\cdot S$	F	(注 16)
	底部中性子遮蔽材カバー	—			軟鋼棒圧潰荷重	1	せん断	$F_{bar}=\sigma_u\cdot A$ $F=\pi\cdot d\cdot t\cdot S$	F	
	2) 水平落下									
	胴	—			軟鋼棒圧潰荷重	1	せん断	$F_{bar}=\sigma_u\cdot A$ $F=\pi\cdot d\cdot t\cdot S$	F	

(注 15) σ_t：各荷重によりボルトに生じる引張応力，σ_{t1}：初期締付力，熱応力，胴内圧及び蓋間圧力により生じる引張応力，ϕ：ボルト内力係数，σ_{t2}：慣性力により生じる引張応力

(注 16) F_{bar}：最大荷重，σ_u：SS400の設計引張強さ，F：貫通荷重

(ロ)-第A.1表　輸送容器の構造設計の条件及び解析方法（11/13）

条件	解析項目及びその評価	設計条件						解析方法		備考
		参照図表	材質	温度	設計負荷			適用数式又は要素	解析基準	
					種類	負荷係数	要素			
特別の試験条件	熱的試験									
	1)応力計算									
	胴	(ロ)-第A.43図			内圧及び初期締付トルク	1	応力強さ	P_m P_L P_L+P_b	$2/3S_u$ S_u S_u	
	胴（底板）	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋	—			同上	1	同上	同上	同上	
	三次蓋	—			同上	1	同上	P_m P_L P_L+P_b	$MIN[2.4S_m, 2/3S_u]$ $MIN[3.6S_m, S_u]$ $MIN[3.6S_m, S_u]$	
	外筒	—			同上	1	応力	引張応力 圧縮応力 せん断応力 曲げ応力	$1.5f_t$ $1.5f_c$ $1.5f_s$ $1.5f_b$	
	下部端板	—			同上	1	同上	同上	同上	
	底部中性子遮蔽材カバー	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋シール部（蓋）	—			内圧，熱膨張及び初期締付トルク	1	応力強さ	P_L P_L+P_b+Q	S_y S_y	
	二次蓋シール部（胴）	—			同上	1	同上	同上	同上	
	二次蓋ボルト	—			同上	1	引張 引張と曲げ	σ_m $\sigma_m+\sigma_b$	S_y S_y	
	三次蓋ボルト	—			同上	1	同上	同上	同上	
	ガスケットの密封性	—	EPDM	—	同上	1	変形量	口開き変形量	初期締付け代	
	15m浸漬									
	三次蓋	(ロ)-第A.44図			外圧	1	応力強さ（曲げ）	$S=\sigma_b=0.75\frac{P\cdot a^2}{t^2}$	$MIN[3.6S_m, S_u]$	(注17)

(注17)P：差圧，a：円板の半径

(ロ)-第 A.1 表　輸送容器の構造設計の条件及び解析方法（12/13）

条件	解析項目及びその評価	設計条件						解析方法		備考
		参照図表	材質	温度	設計負荷			適用数式又は要素	解析基準	
					種類	負荷係数	要素			
使用済核燃料輸送物の追加試験条件	強化浸漬									
	1)胴	—			外圧	1	圧力	P_o	$1.5P_a$	(注 18)
	2)胴（底板）	—			外圧	1	応力強さ（曲げ）	$S=\sigma_b=0.75\frac{P\cdot a^2}{t^2}$	S_u	
	3)三次蓋	(ロ)-第 A.45 図			外圧	1	応力強さ（曲げ）	$S=\sigma_b=0.75\frac{P\cdot a^2}{t^2}$	S_u	

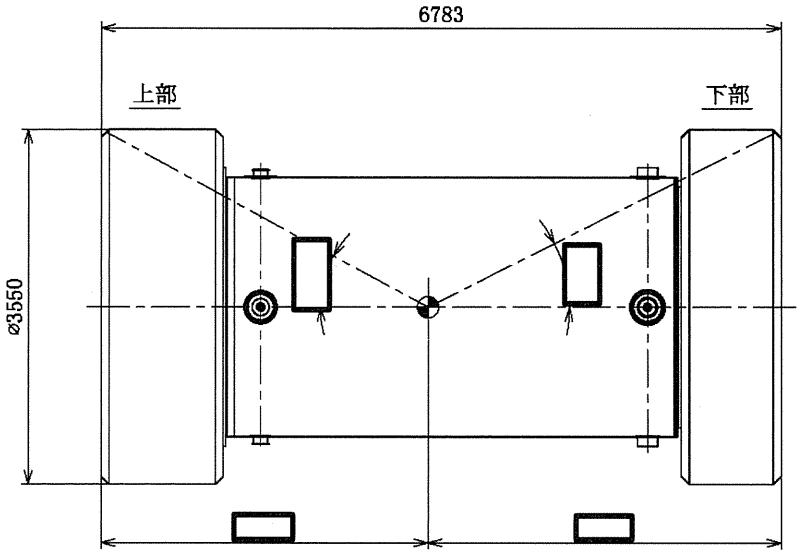
(注 18) P_o：外圧，P_a：許容外圧

(ロ)-第A.1表　輸送容器の構造設計の条件及び解析方法（13/13）

条件	解析項目及びその評価	設計条件						解析方法		備考
		参照図表	材質	温度	設計負荷			適用数式又は要素	解析基準	
					種類	負荷係数	要素			
核分裂性輸送物に係る試験条件	一般の試験条件									
	1) 水噴霧 2) 0.3m 自由落下 3) 積み重ね 4) 6kg 棒貫通		前述の一般の試験条件に対する解析結果を引用して評価							
	特別の試験条件	(ロ)-第A.46図								
	1) 9m 落下		前述の 9m 落下に対する設計条件及び解析方法と同一							
	2) 1m 落下 3) 火災試験 4) 0.9m 浸漬		前述の特別の試験条件に対する解析結果を引用して評価							
	5) 15m 浸漬試験		上記 1)～4) が最大破損条件となるため評価しない							
	二次蓋金属ガスケットの防水性									
	1) 9m 落下試験		アルミニウム／ニッケル基合金		慣性力	1	変形量	横ずれ量	3 mm	
	2) 火災試験								3 mm	

A.2　重量及び重心

通常時における輸送物の質量は，(イ)章Cの5.に記載したとおり134.4トン以下である。また，輸送物の重心の位置は，(ロ)-第A.1図に示すとおりである。



（単位：mm）

(ロ)-第A.1図　重心の位置

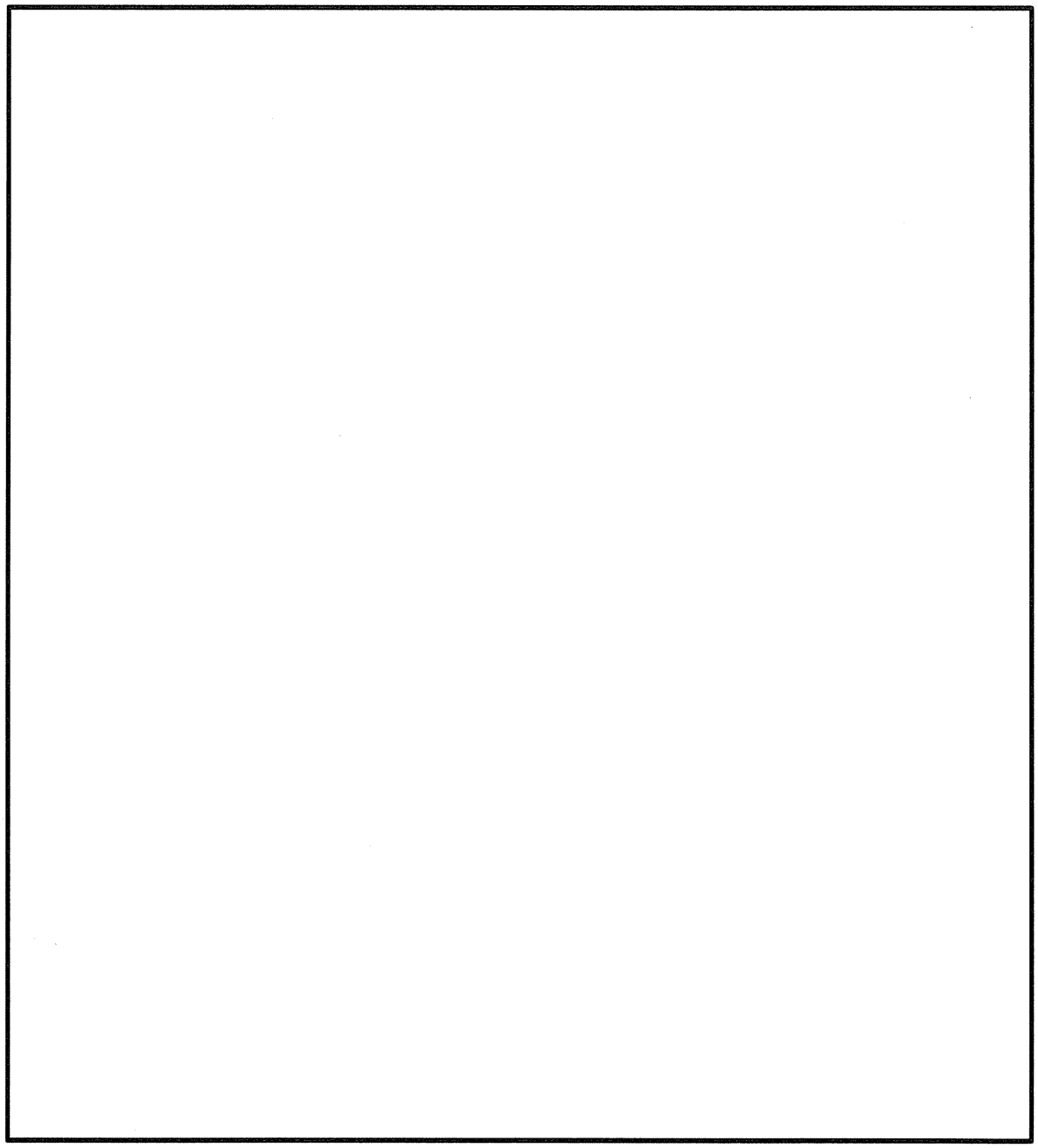
A.3　材料の機械的性質

解析に用いる材料の機械的性質を(ロ)-第A.2表に示す。ステンレス鋼，炭素鋼，析出硬化系ステンレス鋼，ニッケルクロムモリブデン鋼，アルミニウム合金及びジルカロイの温度に対する機械的性質の変化を(ロ)-第A.2図から(ロ)-第A.9図に示す。これらは，主に金属キャスク構造規格[1]より引用した。なお，緩衝体の材料の機械的性質については，A.5.3に示す。

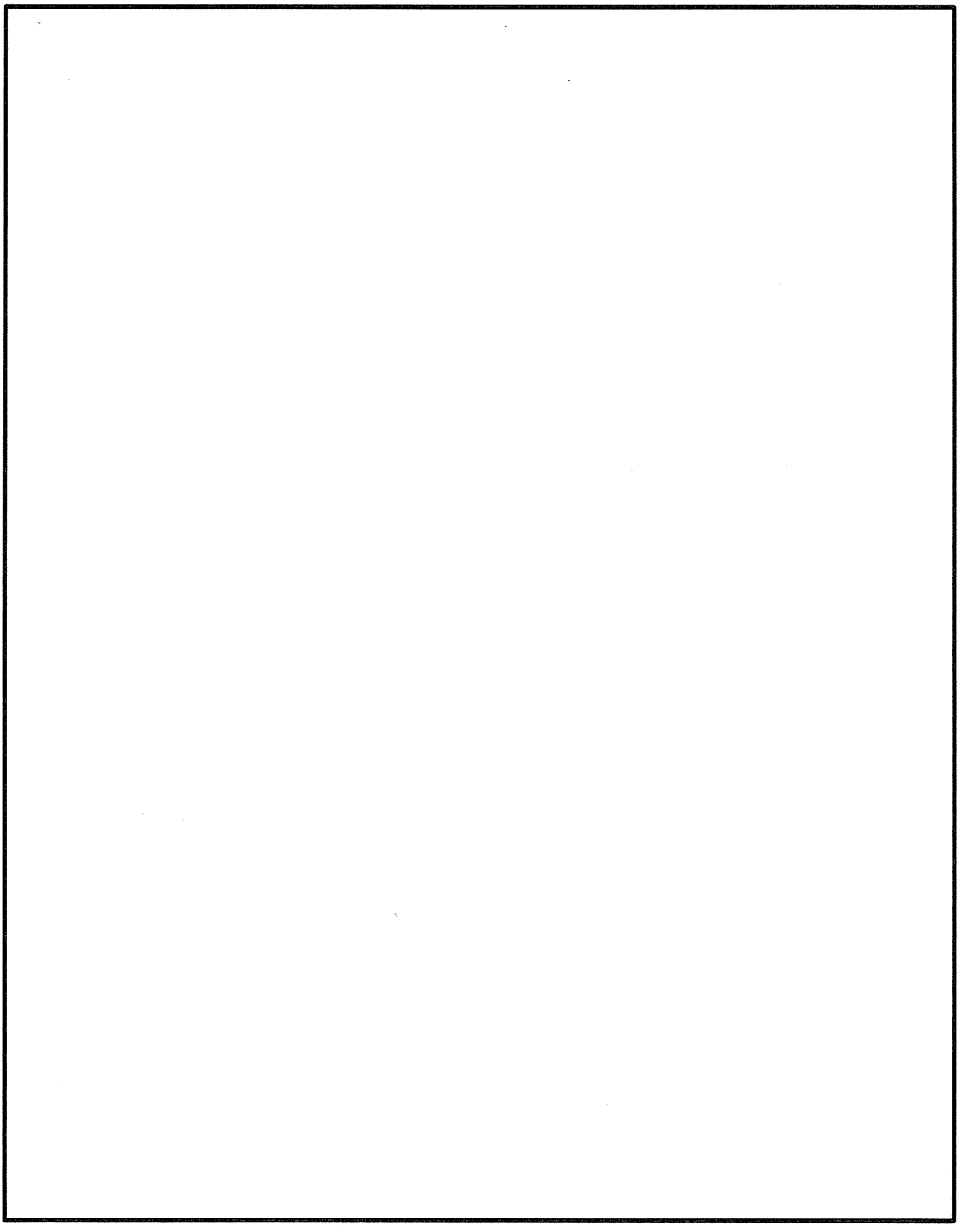
(ロ)-第A.2表　材料の機械的性質（常温）

材料	設計引張強さ (MPa)	設計降伏点 (MPa)	熱膨張係数 (mm/mm・℃)	ポアソン比	縦弾性係数 (MPa)
ステンレス鋼[1),3)] [redacted]	[redacted]			0.3	[redacted]
ステンレス鋼[1),3)] [redacted]				0.3	
炭素鋼[1),3)] [redacted]				0.3	
析出硬化系ステンレス鋼[1),3)] (SUS630-H1150)	930	725	11.10×10^{-6}	0.3	1.96×10^{5}
ニッケルクロムモリブデン鋼[1),3)] [redacted]	[redacted]			0.3	[redacted]
炭素鋼[1),3)] [redacted]				0.3	
アルミニウム合金[(注)] (MB-A3004-H112)	153	56	22.61×10^{-6}	—	7.39×10^{4}
ジルカロイ-4[4)]	—	735	—	—	—

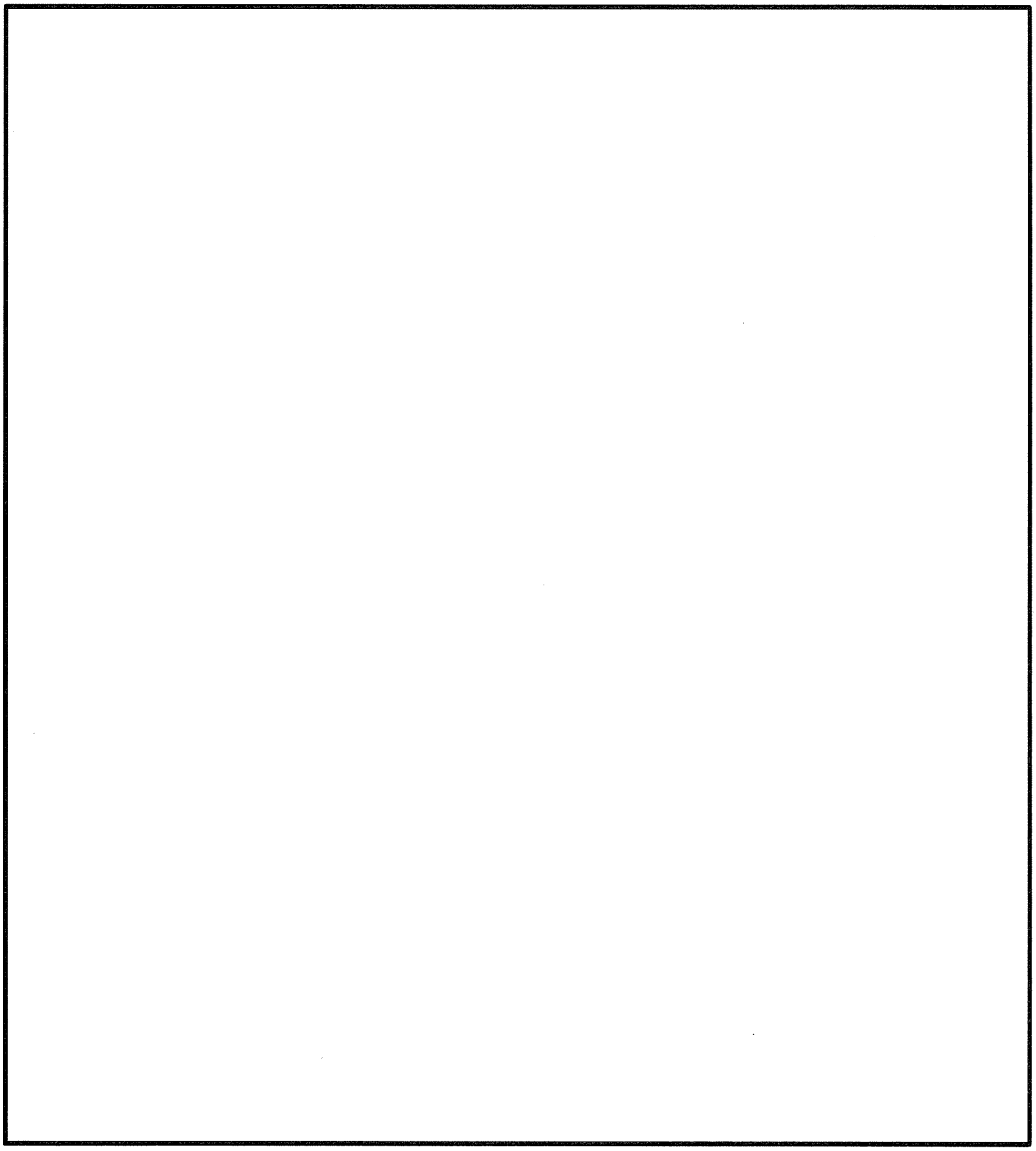
(注) アルミニウム合金の機械的性質の詳細については付属書類A.10.6を参照



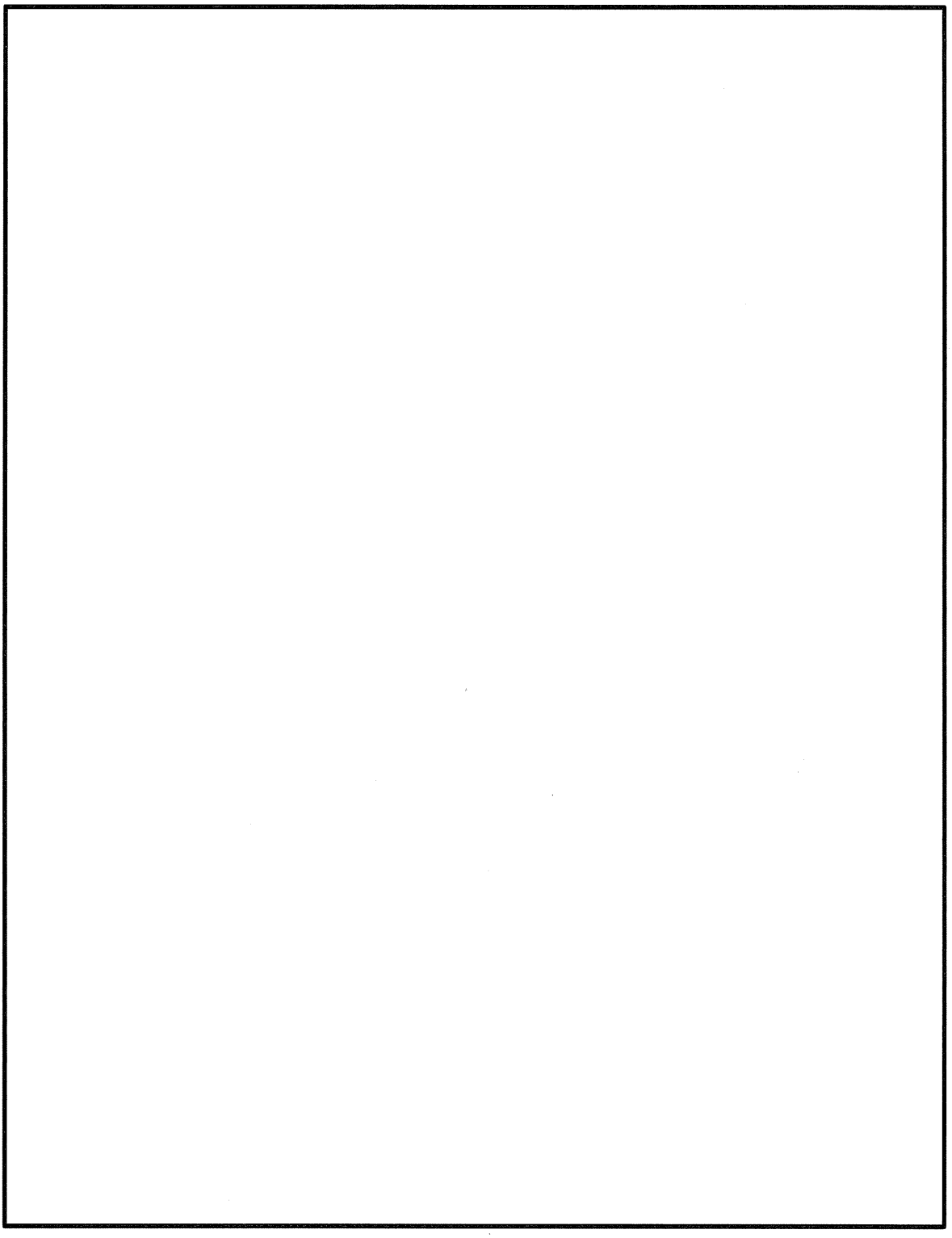
(ロ)-第A.2図　ステンレス鋼[redacted]の温度に対する機械的性質の変化(1/2) [1), 3)]



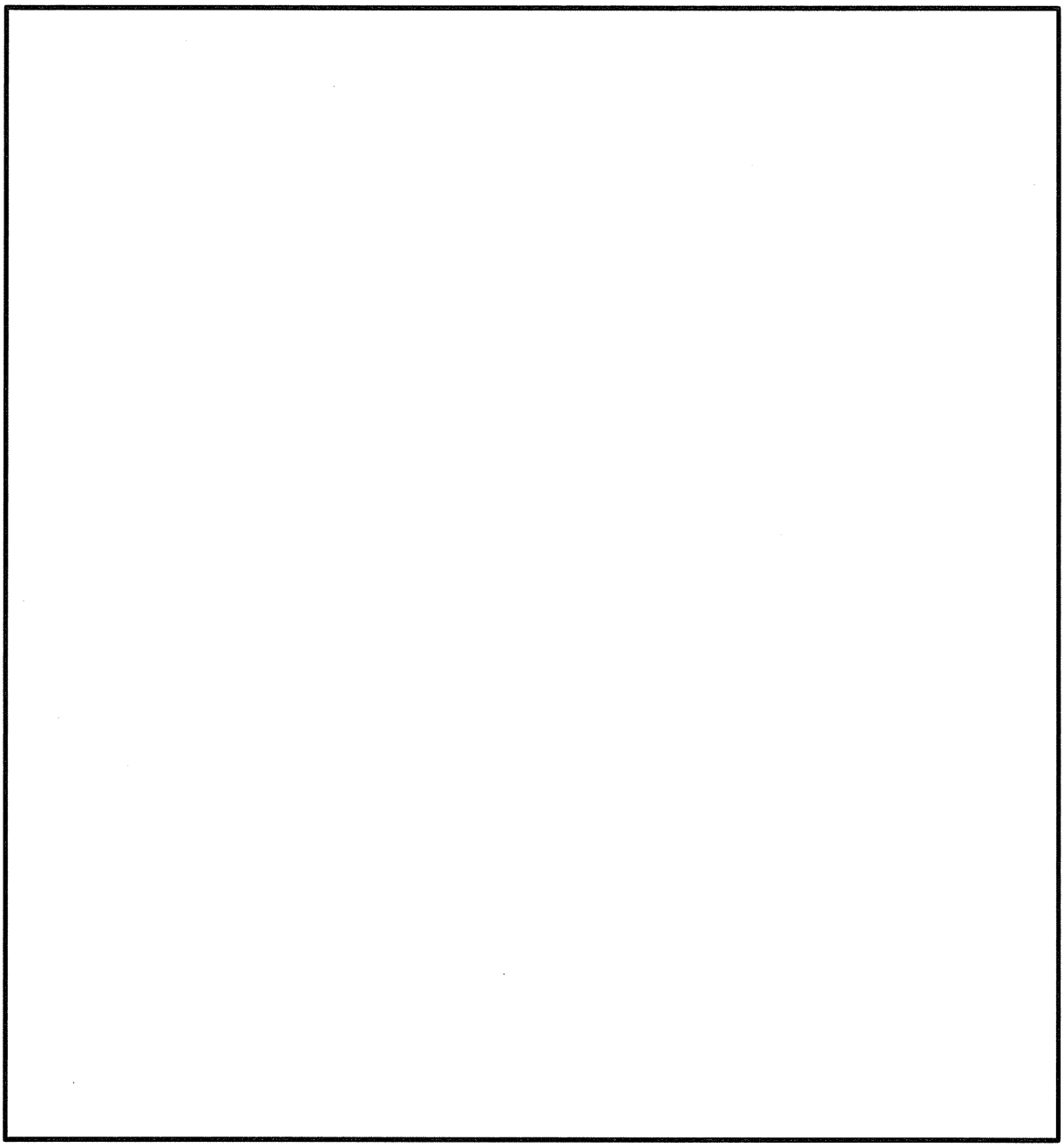
(ロ)-第A.2図　ステンレス鋼[redacted]の温度に対する機械的性質の変化(2/2) [1), 3)]



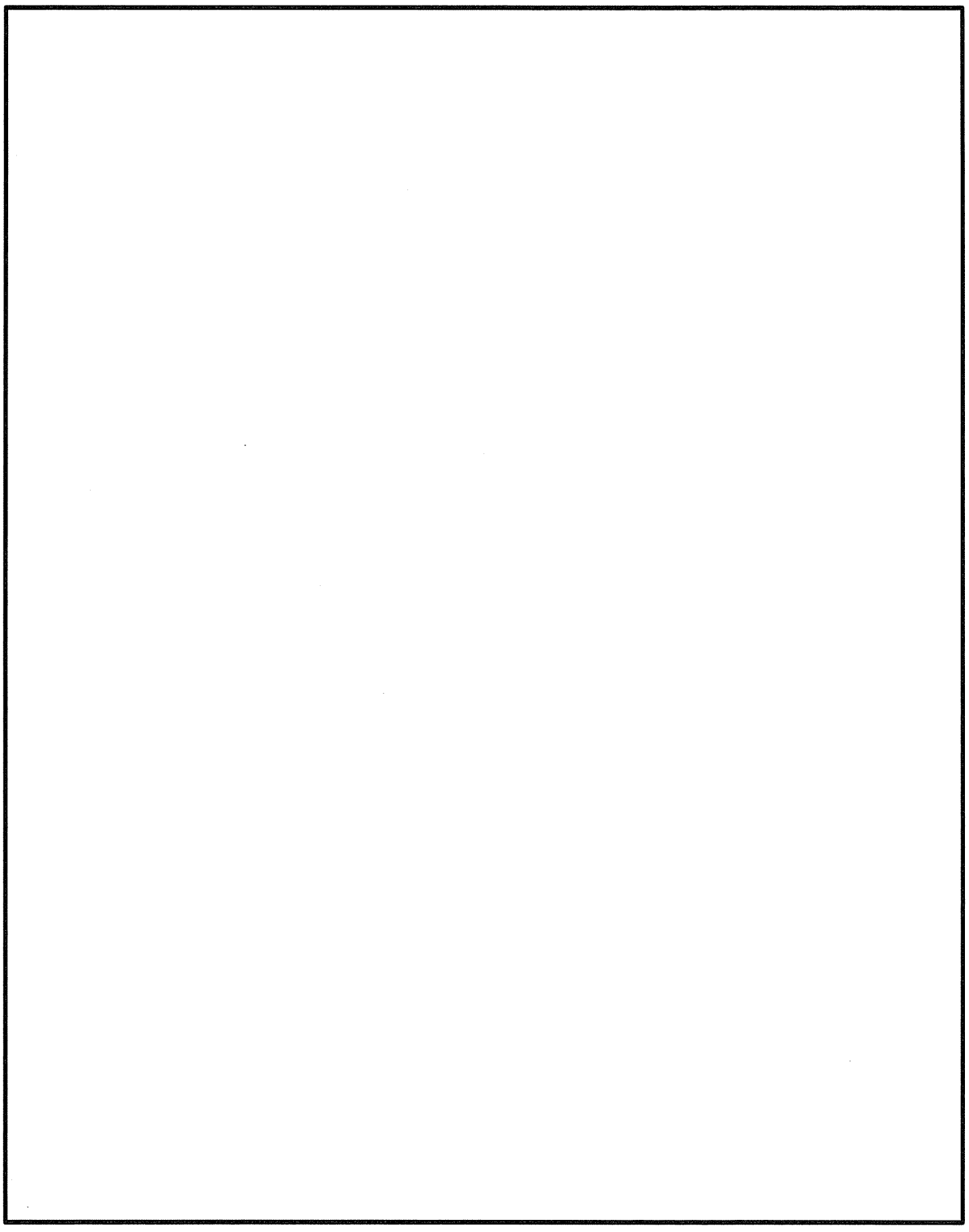
(ロ)-第 A.3 図　ステンレス鋼 [redacted] の温度に対する機械的性質の変化(1/2) [1), 3)]



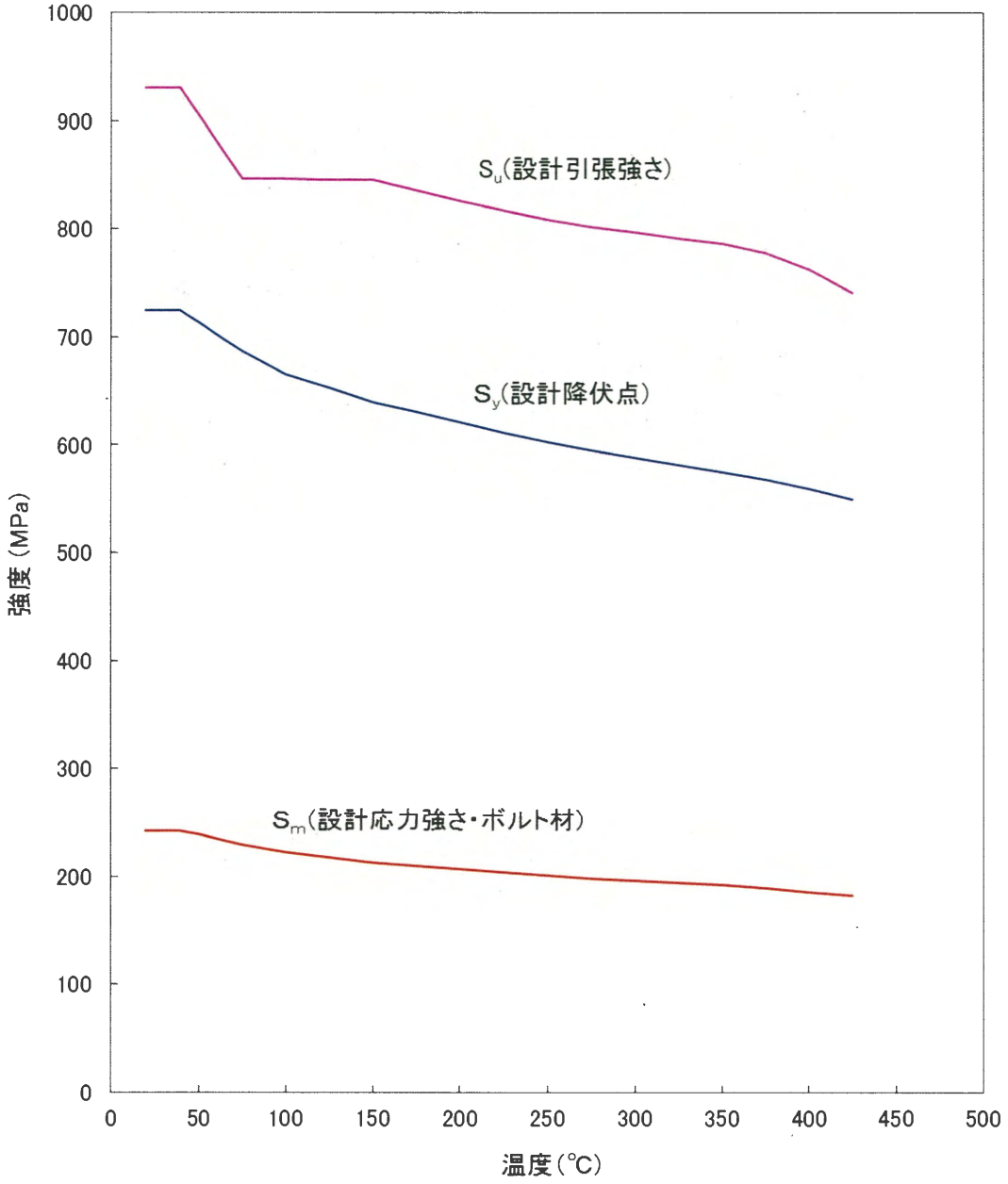
(ロ)-第 A.3 図　ステンレス鋼 [redacted] の温度に対する機械的性質の変化(2/2) [1), 3)]



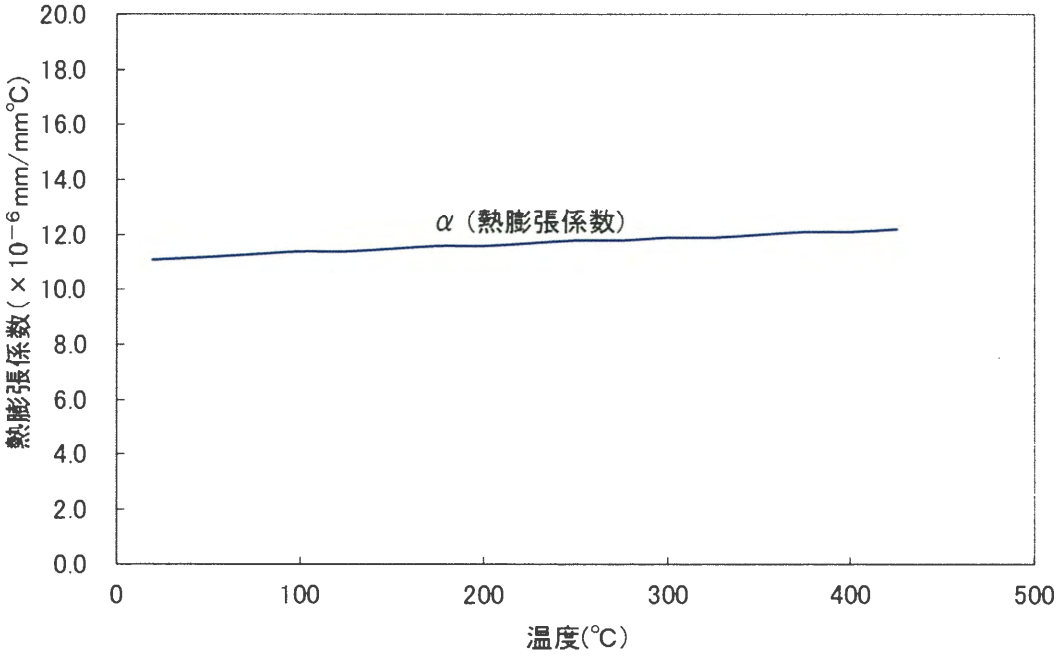
(ロ)-第 A.4 図　炭素鋼 [redacted] の温度に対する機械的性質の変化(1/2) [1), 3)]

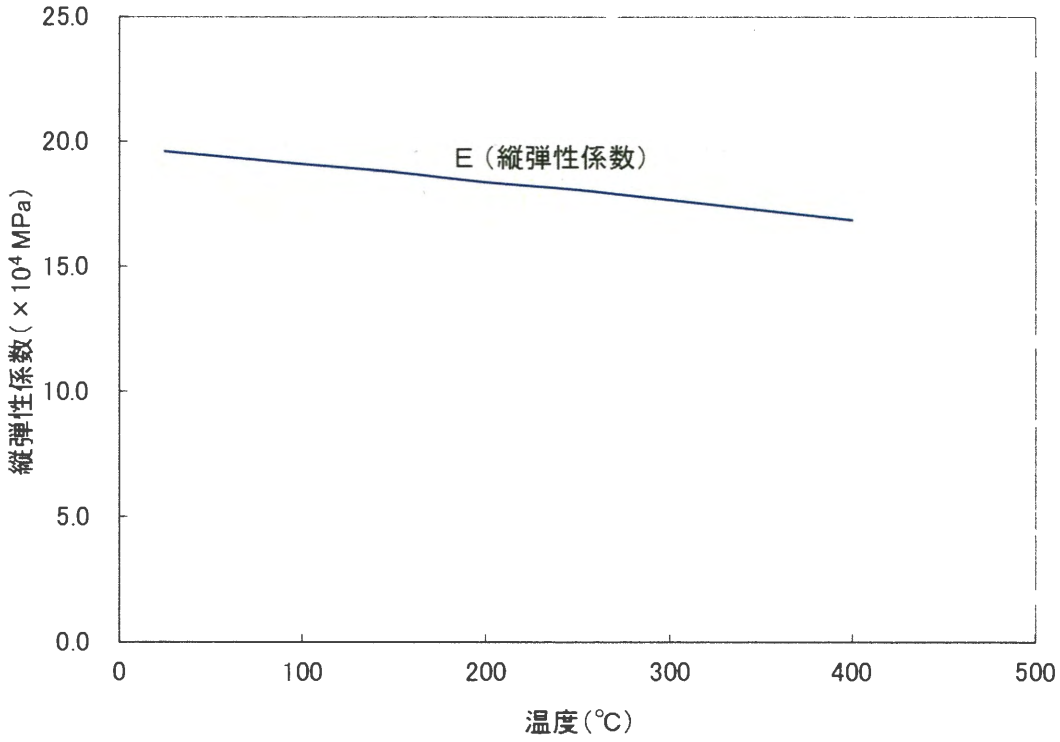


(ロ)-第 A.4 図　炭素鋼 [redacted] の温度に対する機械的性質の変化(2/2) [1), 3)]

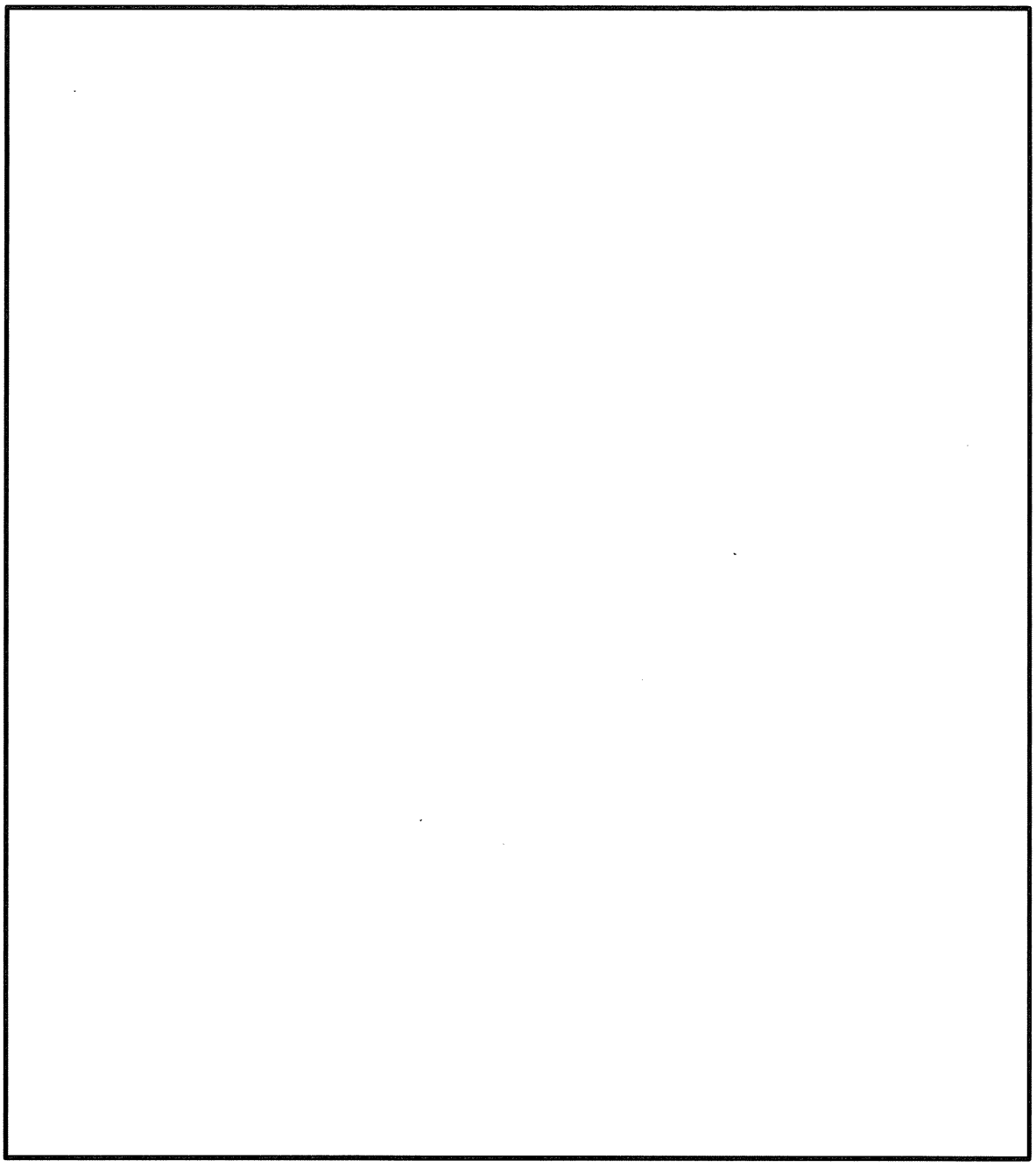


(ロ)-第 A.5 図　析出硬化系ステンレス鋼（SUS630-H1150）の温度に対する機械的性質の変化(1/2) [1), 3)]

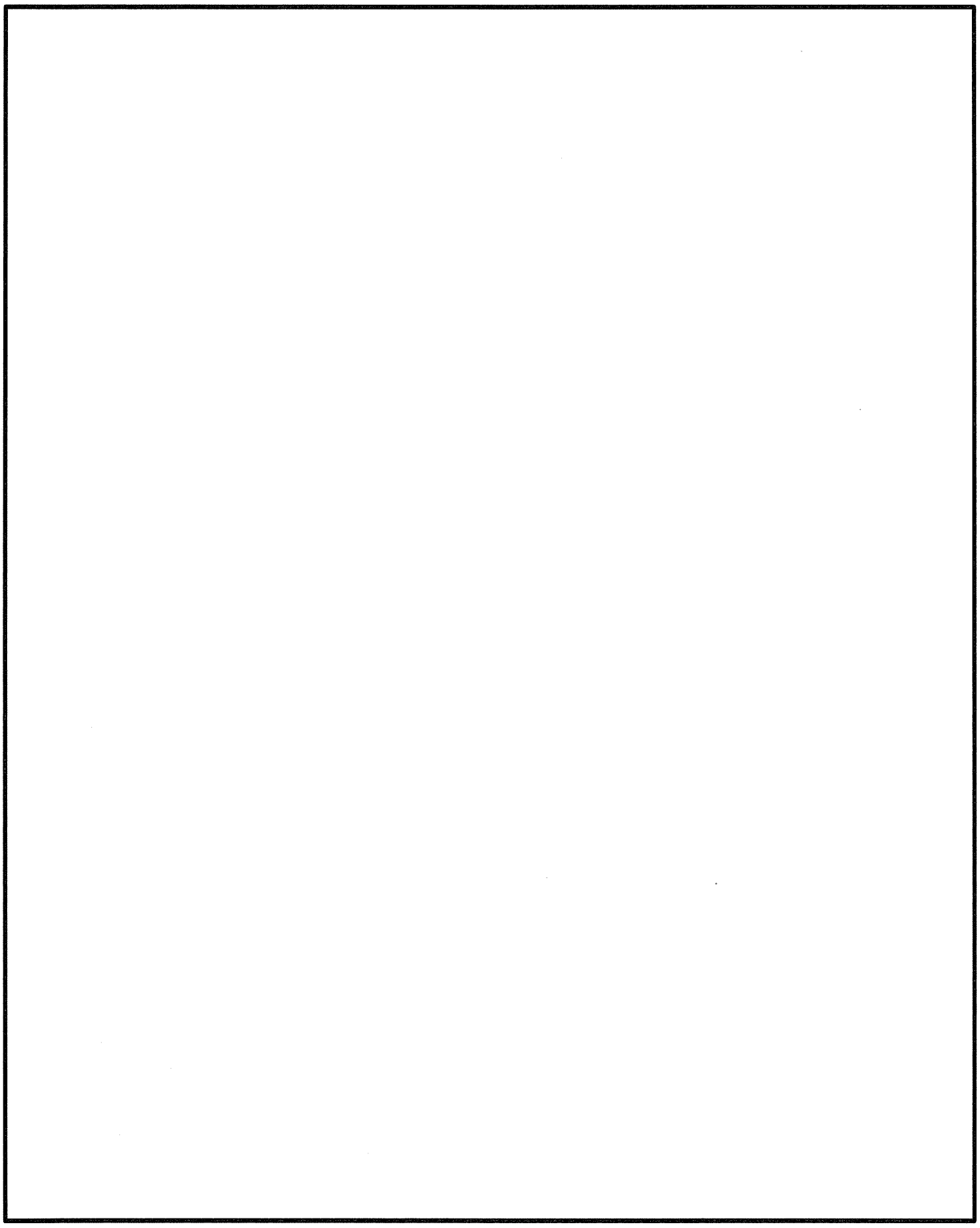




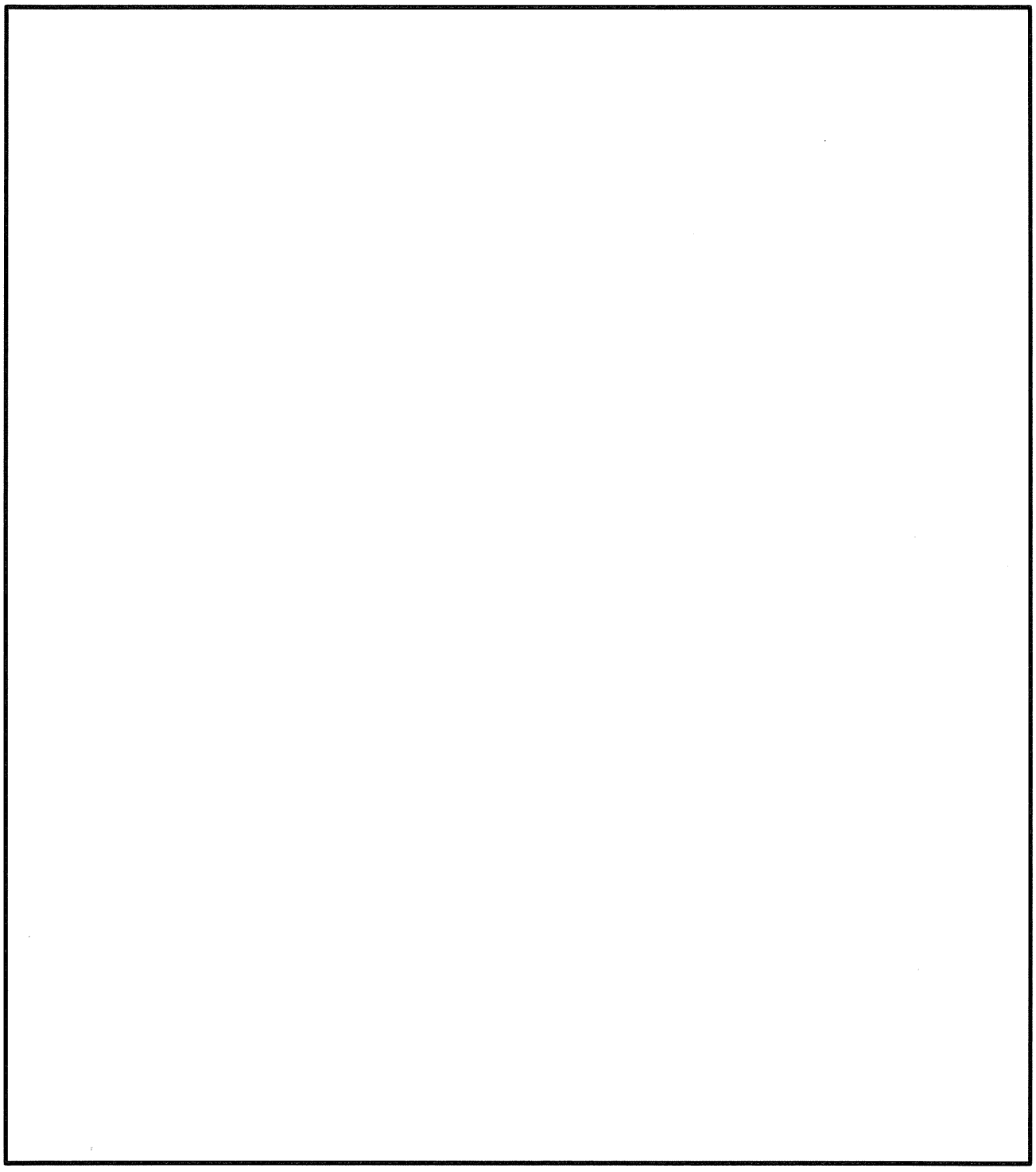
(ロ)-第 A.5 図　析出硬化系ステンレス鋼（SUS630-H1150）の温度に対する機械的性質の変化(2/2) [1), 3)]



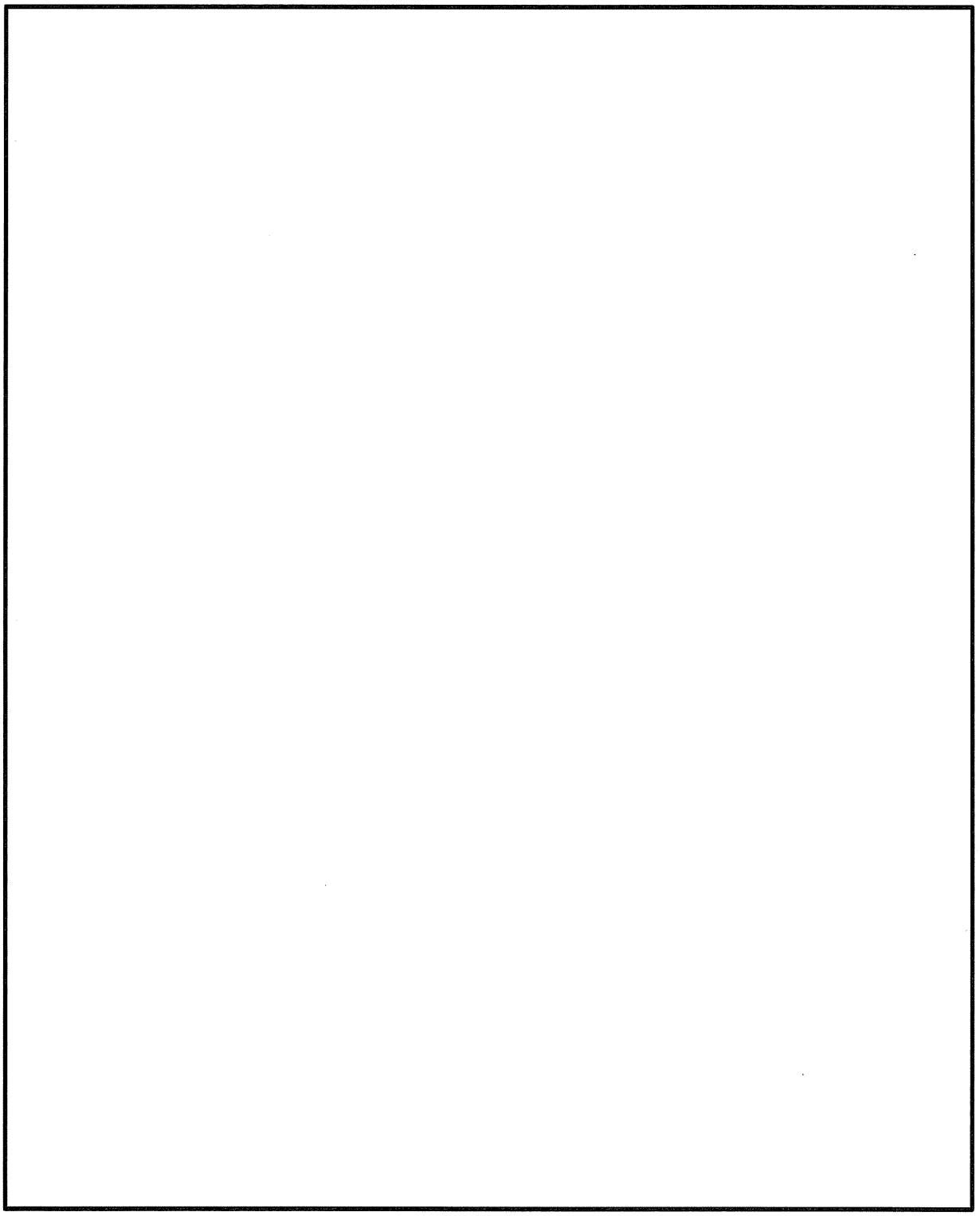
(ロ)-第A.6図　ニッケルクロムモリブデン鋼 [redacted] の
温度に対する機械的性質の変化(1/2) [1), 3)]



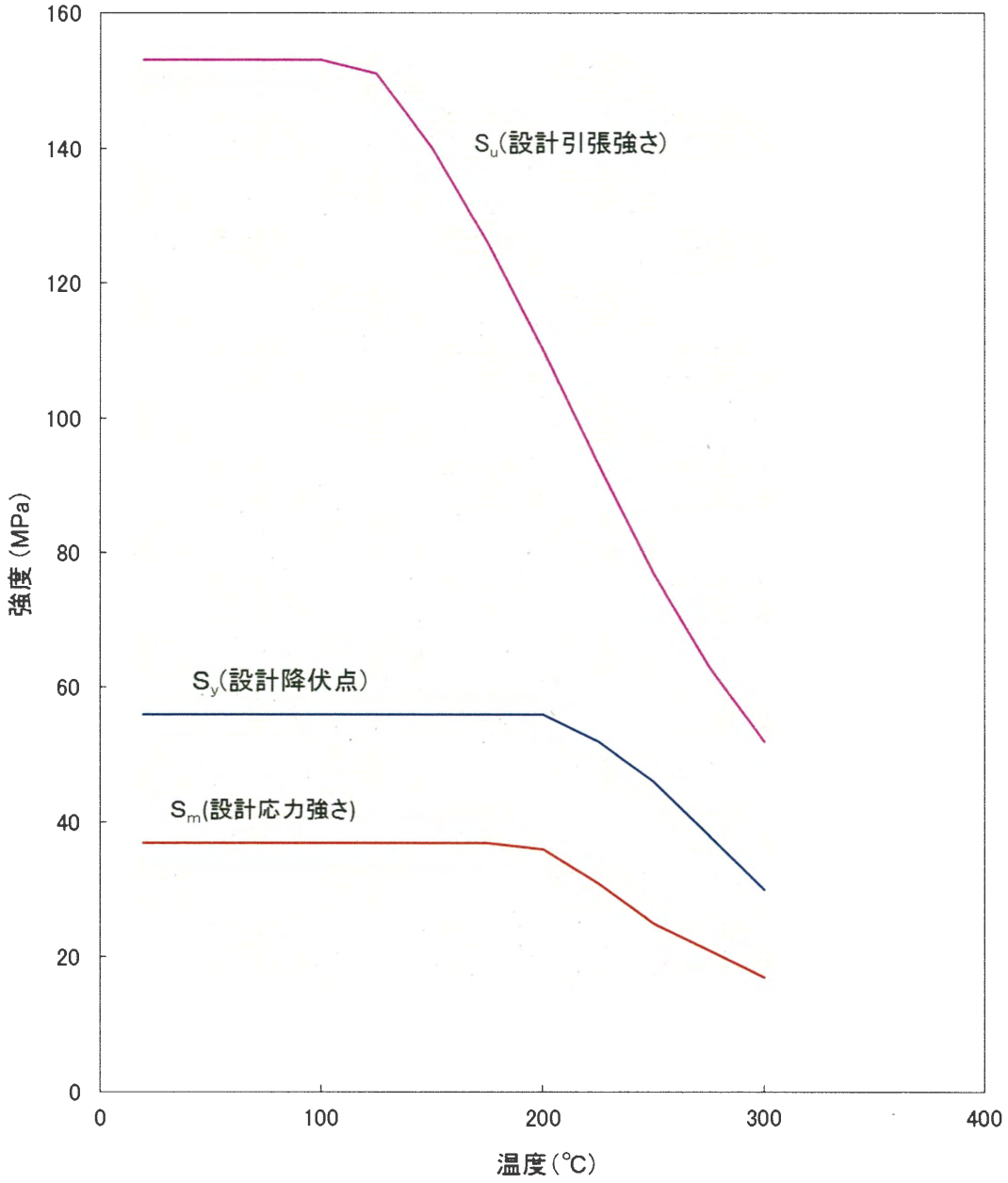
(ロ)-第A.6図　ニッケルクロムモリブデン鋼[redacted]の
温度に対する機械的性質の変化(2/2) [1), 3)]



(ロ)-第 A.7 図　炭素鋼 [redacted] の温度に対する機械的性質の変化(1/2) [1), 3)]

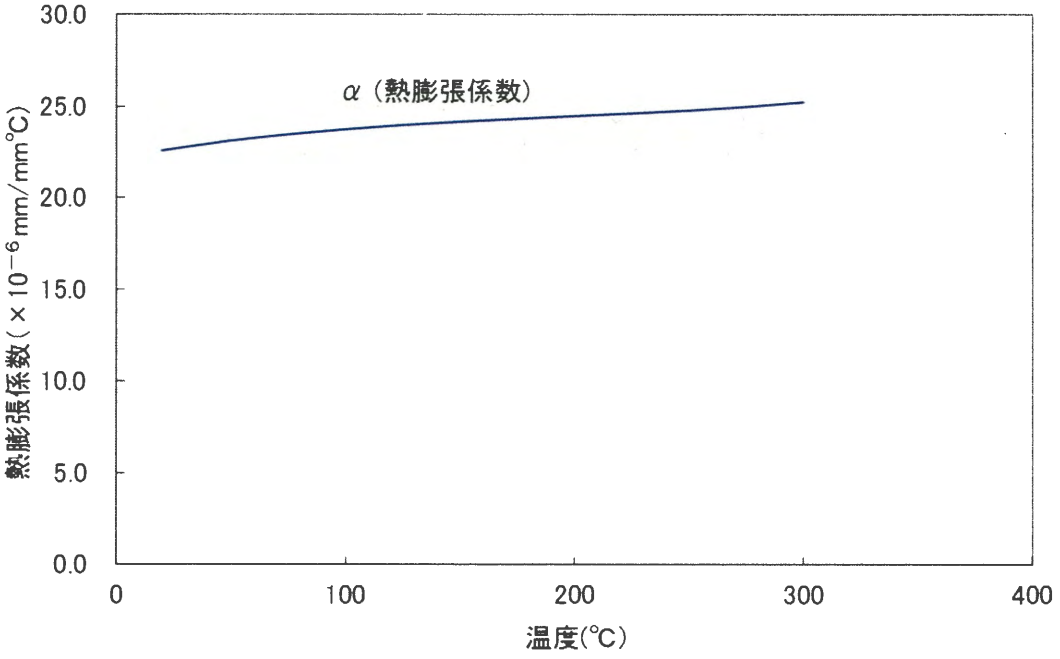


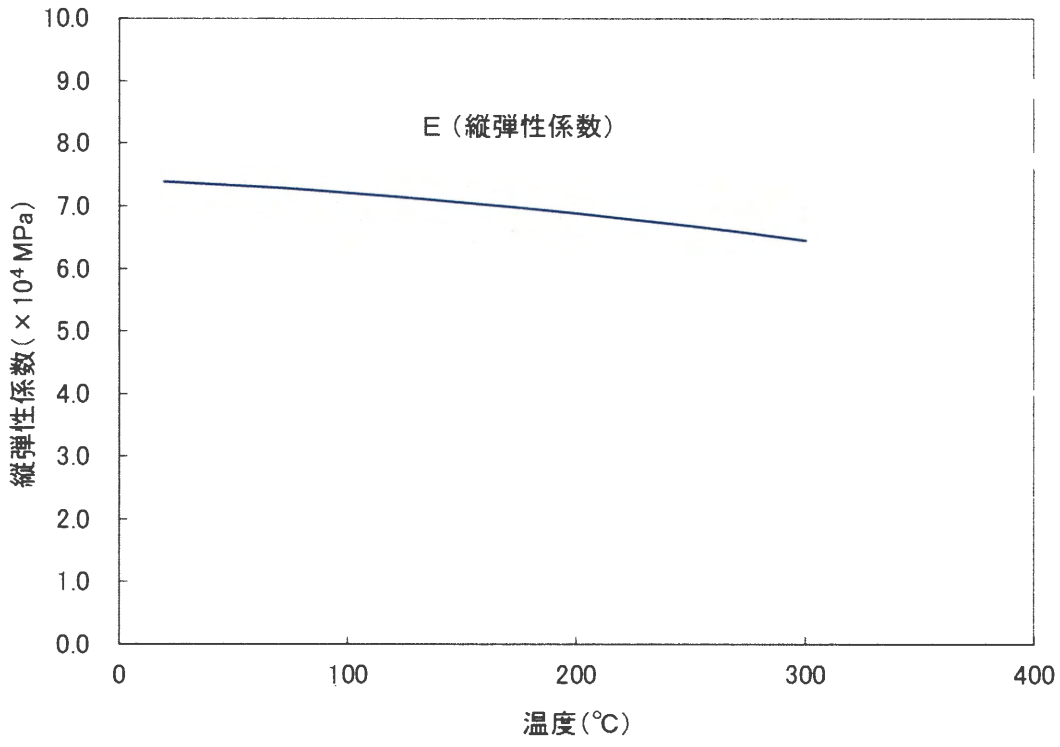
(ロ)-第 A.7 図　炭素鋼 [redacted] の温度に対する機械的性質の変化(2/2) [1), 3)]



(ロ)-第A.8図　アルミニウム合金（MB-A3004-H112）の温度に対する機械的性質の変化(1/2) (注)

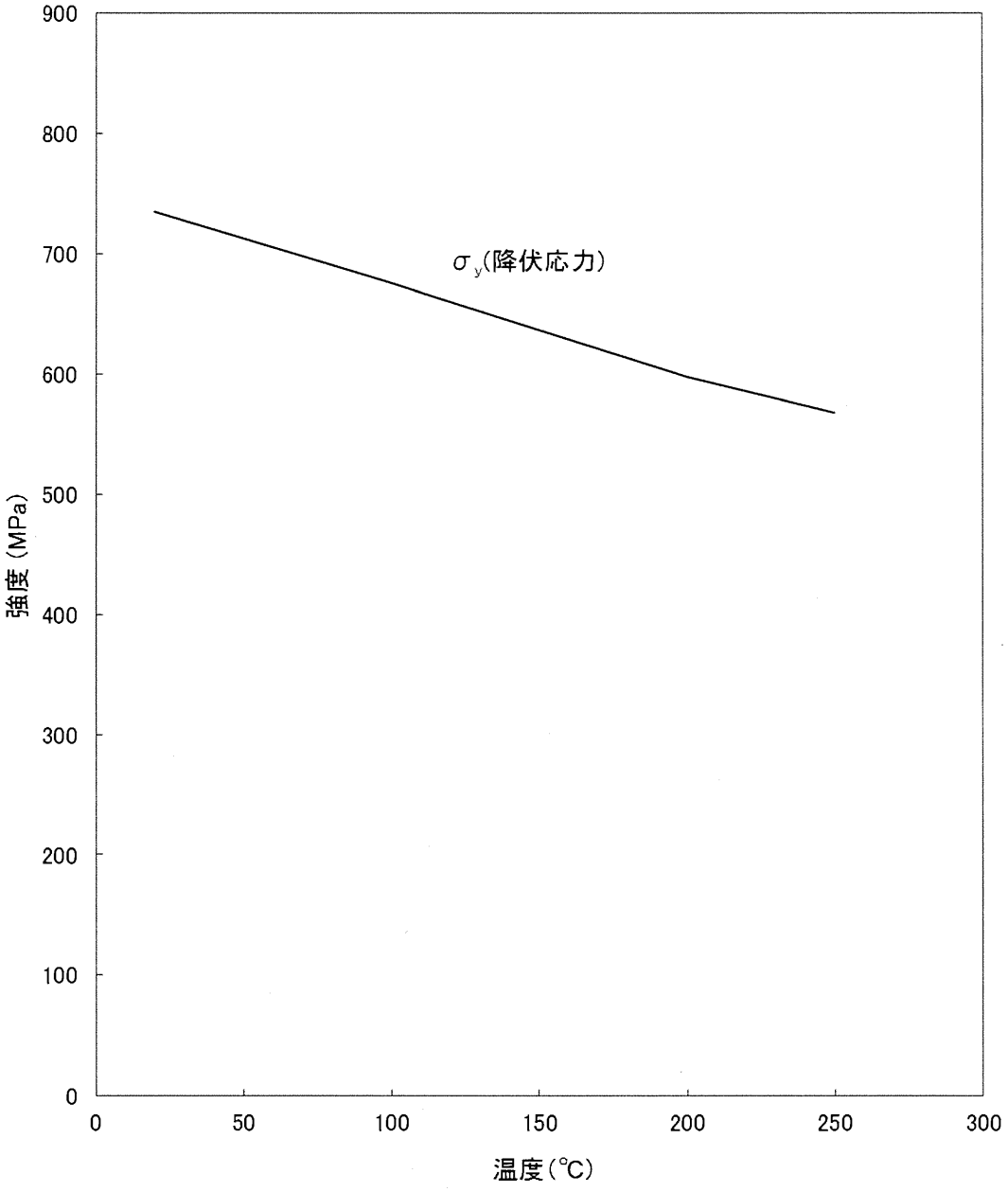
(注) アルミニウム合金の機械的性質の詳細についてはA.10.6を参照





(ロ)-第A.8図　アルミニウム合金（MB-A3004-H112）の温度に対する機械的性質の変化(2/2) (注)

(注)アルミニウム合金の機械的性質の詳細についてはA.10.6を参照



(ロ)-第A.9図　ジルカロイ-4の温度に対する機械的性質の変化 [4)]

A.4　輸送物の要件

A.4.1　化学的及び電気的反応

本輸送物は，(イ)-第C.1表に示すとおり化学的に安定した材料を使用している。また，輸送容器構成部品が相互に接触する異種材料の一覧を(ロ)-第A.3表に示す。

レジンは，一次蓋及び蓋部中性子遮蔽材カバー，底板及び底部中性子遮蔽材カバー，胴，外筒及び下部端板に密閉されて収納されており，これらの金属と化学的及び電気的に反応することはない。

一次蓋，二次蓋，三次蓋と各蓋ボルト，金属ガスケット及びOリング等の間では，化学的及び電気的に作用して問題になるような腐食を起こすことはない。

伝熱フィンと胴及び外筒の接合部は，密閉静止した淡水環境における銅が接続した鋼の腐食試験において鋼単独の場合の腐食速度と同程度になることが確認されていること及びレジンより生じる水分量は限定的であり，レジン充填空間は閉鎖環境にあって酸素が連続的に供給されないことから，異種金属接触による腐食促進の影響は小さく，化学的及び電気的な反応による腐食の影響はない。

なお，収納物は胴内でヘリウム雰囲気にあるため収納物に対する化学的影響はない。

(ロ)-第A.3表　接触する異種材料の一覧表

接触する異種材料			
材質	部位	材質	部位
炭素鋼	胴 一次蓋	レジン	中性子遮蔽材
炭素鋼	外筒 蓋部中性子遮蔽材カバー		
ステンレス鋼	底部中性子遮蔽材カバー 下部端板		
析出硬化系 ステンレス鋼	トラニオン		
銅	伝熱フィン		
炭素鋼	胴 一次蓋 二次蓋	ニッケルクロム モリブデン鋼	一次蓋ボルト 二次蓋ボルト 三次蓋ボルト
ステンレス鋼	三次蓋		
ステンレス鋼 (注)	胴 一次蓋 二次蓋	アルミニウム /ニッケル基合金	金属ガスケット
ステンレス鋼	三次蓋	EPDM	Oリング
ステンレス鋼	緩衝体カバープレート	[redacted]	緩衝体内部
炭素鋼	胴	ほう素添加 アルミニウム合金	中性子吸収材
		アルミニウム合金	バスケットプレート バスケットサポート
炭素鋼	胴	析出硬化系 ステンレス鋼	トラニオン
炭素鋼	胴	銅	伝熱フィン
炭素鋼	外筒		

(注) [redacted]

A.4.2　低温強度

本輸送物が使用される原子力発電所，使用済燃料乾式貯蔵施設及び再処理工場の事業所の敷地付近で観測された日最低気温（-22.4℃）を参考に，本輸送物は周囲温度-25℃以上で使用する。

1. 構成部品の低温特性

(イ)章Cの3.に示す本輸送容器の使用材料の低温特性を(ロ)-第A.4表に示す。同表より明らかなように，最低温度-25℃において構成部品は亀裂，破損等の生じるおそれはない。

2. 低温時の強度

構造評価に用いる主要材料は，金属キャスク構造規格[1]のじん性要求を満足するように製造するので，-25℃において低温脆性破壊を起こすことはない。

(ロ)-第 A.4 表　輸送容器使用材料の-25℃における低温特性評価

輸送容器の部品	材質	評価	引用，文献，資料
緩衝体カバープレート 緩衝体リブ ベントバルブ及びドレンバルブ バルブカバープレート モニタリングポートカバープレート 底部中性子遮蔽材カバー 下部端板 リリーフバルブ リリーフバルブカバープレート	ステンレス鋼 [redacted]	-25 ℃において 使用可能	原子力学会標準 AESJ-SC-F006 :2013 [5]
三次蓋蓋板	ステンレス鋼 [redacted]	-25 ℃において 使用可能	同上
胴 一次蓋蓋板 二次蓋蓋板	炭素鋼 [redacted]	-25 ℃において 使用可能	同上
蓋部中性子遮蔽材カバー 外筒	炭素鋼 [redacted]	-25 ℃において 使用可能	同上
蓋ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼 [redacted]	-25 ℃において 使用可能	同上
伝熱フィン	銅（C1020P-[redacted] 又は C1020BB-[redacted]	-25 ℃において 使用可能	同上
中性子吸収材	ほう素添加アルミニウム合金	-25 ℃において 使用可能	メーカ資料 [6]
バスケットプレート バスケットサポート	アルミニウム合金 (MB-A3004-H112)	-25 ℃において 使用可能	A.10.6 参照
トラニオン	析出硬化系ステンレス鋼 (SUS630-H1150)	-25 ℃において 使用可能	材料規格 [3]
金属ガスケット	アルミニウム／ ニッケル基合金	-25 ℃において 亀裂，破損なし	メーカ資料 [7]
中性子遮蔽材	レジン	-25 ℃において 亀裂，破損なし	原燃輸送株式会社 報告書 [8]
緩衝体緩衝材	[redacted]	-25 ℃において 亀裂，破損なし (注)	木材工業ハンド ブック [9]
Oリング	EPDM	-25 ℃において 亀裂，破損なし	複合材料技術集成 [10]

(注)緩衝体緩衝材の[redacted]は，-25℃では常温時に対して強度が 17%～31%上昇する。A.10.4 に示すように，-25℃の木材強度を用いた場合の自由落下試験時の衝撃加速度は，常温時の木材強度を用いて算出した(ロ)-第 A.19 表及び(ロ)-第 A.37 表に示す設計加速度に対して最大 12%増加するが，各評価部位に発生する応力は低温時の評価基準を満足するため，輸送物の構造上の健全性が損なわれることはない。

A.4.3　密封装置

輸送容器の三次蓋，三次蓋ボルト，リリーフバルブカバープレート及びそのボルトは，通常の輸送時には(ｲ)-第C.2図に示すように上部緩衝体で覆われており，かつ，[redacted]がされているので不用意に開けられることはない。そのため，リリーフバルブカバープレート内部のリリーフバルブは誤って操作されることはない。

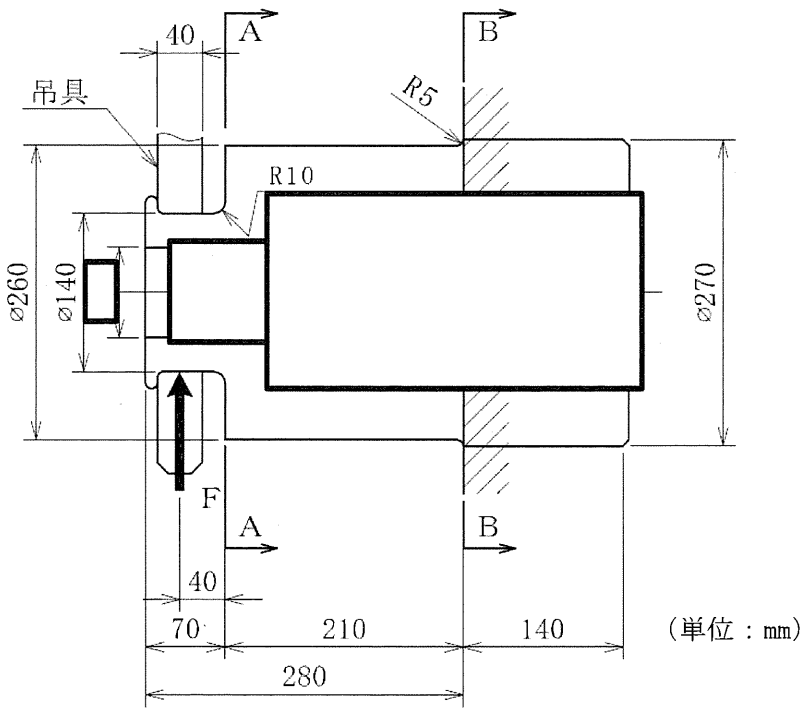
A.4.4　吊上装置

輸送容器の吊上装置は，(ｲ)-第C.5図及び(ｲ)-第C.6図に示す位置に取り付けられているトラニオンであり，その構造は(ｲ)-第C.7図に示すとおりである。トラニオンは，嵌め合いにより容器に取り付けられている。垂直吊りは上部トラニオンにより行われ，90°，270°側の一対の下部トラニオンは輸送架台上で輸送容器をたて起し又はよこ倒しする際の支点となり，上部トラニオンに作用する以上の荷重が下部トラニオンには作用しない。一方，水平吊りは上部及び下部トラニオンにより行われる。したがって，荷重が最大となる垂直吊りにおける上部トラニオンを対象とし，トラニオン本体及びトラニオン接続部の応力評価を行う。

構造解析では各トラニオンの温度を[redacted]として評価する。

A.4.4.1　応力評価

トラニオンの解析モデル図を(ﾛ)-第A.10図に示す。



(ﾛ)-第A.10図　上部トラニオン解析モデル図

垂直吊り時（緩衝体なし）の輸送物吊上質量は，119.4トン以下である。垂直吊り時には2個のトラニオンを使用するので1個のトラニオンに作用する荷重F（N）は，次式により求められる。

$$F = \frac{Wag}{n}$$

ここで，

F　：垂直吊り時のトラニオン1個に作用する荷重（N）

n　：トラニオンの数（2）

W　：容器の質量（垂直吊り時）（1.194×10^{5}kg）

a　：安全係数（3 [1)]）

g　：重力加速度（9.80665m/s^2）

したがって，

$$F = \frac{1.194\times10^{5}\times3\times9.80665}{2}$$

$$= 1.757\times10^{6}\ \mathrm{N}$$

となる。

1. トラニオン本体

(1) 曲げ応力

(ロ)-第A.10図に示すトラニオン本体の断面に発生する曲げ応力σ_b（MPa）は次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{MC}{I}$$

$$M = FX$$

ここで，

M　：曲げモーメント（N･mm）

F　：最大荷重（N）

X　：モーメントアーム（mm）

C　：中立軸からの距離（mm）

I　：断面二次モーメント（mm^4）

ここに，

$$I = \frac{\pi}{64}\left(d_o^4 - d_i^4\right)$$

d_o：トラニオン外径（mm）

d_i：トラニオン内径（mm）

(2) せん断応力

(ロ)-第 A.10 図に示すトラニオン本体の断面に発生するせん断応力 τ (MPa) は次式で与えられる。

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$A = \frac{\pi}{4}\left(d_o^2 - d_i^2\right)$$

(3) 応力強さ

上述の曲げ応力 σ_b とせん断応力 τ による応力強さ S (MPa) は次式で与えられる。

$$S = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2}$$

トラニオン本体の各断面の計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.5 表に示す。

(ロ)-第 A.5 表　トラニオン本体の応力計算条件及び計算結果

評価位置	最大荷重 : F(N)	モーメントアーム : X (mm)	中立軸からの距離 : C (mm)	トラニオン外径 : d_o (mm)	トラニオン内径 : d_i (mm)
A-A 断面	1.757×10^6	40	70	140	[redacted] (注)
B-B 断面	1.757×10^6	250	130	260	

評価位置	曲げ応力 : σ_b (MPa)	せん断応力 : τ (MPa)	応力強さ : S (MPa)	基準値 : S_y (MPa)	余裕率
A-A 断面	[redacted]		449	653	0.45
B-B 断面			304	653	1.14

(注) A-A 断面は中実であるが，近傍では中空となっているため保守的に近傍と同じ内径をもつ中空として評価

2. トラニオン接続部

(1) 吊上荷重による支圧応力（一次応力）

(ロ)-第 A.11 図に吊上時の上部トラニオンに作用する荷重の関係を示す。(ロ)-第 A.11 図に示す各荷重は以下の関係がある。

① Y 軸方向の力のつり合い

$R_1 = F + R_2$

ここで，

F　：垂直吊り時の上部トラニオン 1 個に作用する荷重（N）

R_1　：上部トラニオンに作用する反力（N）

R_2　：上部トラニオンに作用する反力（N）

② 0 点回りのモーメントのつり合い

$F \cdot L_1 - R_2 \cdot L_2 - (f_1 + f_2) \cdot d/2 = 0$

ここで，

f_1　：上部トラニオンに作用する摩擦力（N）

f_2　：上部トラニオンに作用する摩擦力（N）

L_1　：0 点から荷重作用点までの距離（mm）

L_2　：0 点から反力 R_2 の作用点までの距離（mm）

d　：上部トラニオン接続部の外径（mm）

③ 摩擦力と垂直抗力の関係

$f_1 = \mu R_1$，$f_2 = \mu R_2$

ここで，

μ　：摩擦係数（－）

①，②及び③の関係より荷重 F 作用時の反力 R_1 及び R_2 は次式で与えられる。

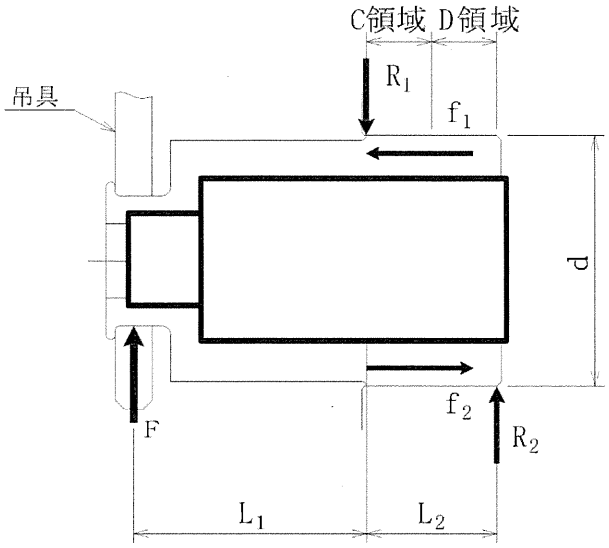
$$R_1 = \frac{FL_1 + \mu F(d/2) + FL_2}{\mu d + L_2}$$

$$R_2 = \frac{FL_1 - \mu F(d/2)}{\mu d + L_2}$$

吊上荷重による支圧応力 σ_{P11}（MPa），σ_{P12}（MPa）は次式で与えられる。

$\sigma_{P11} = R_1 / (d \cdot L_2/2)$

$\sigma_{P12} = R_2 / (d \cdot L_2/2)$



(ロ)-第A.11図　上部トラニオン解析モデル図

(2) しまり嵌め荷重による支圧応力（二次応力）

(ロ)-第A.12図にしまり嵌め荷重による支圧応力の解析モデルを示す。

しまり嵌め荷重による支圧応力は次式[11]により与えられる。

$$\sigma_{P2} = \frac{\alpha}{\left(\frac{1-\nu}{E}+\frac{1+\nu}{E'}\right)+\frac{2}{E'}\frac{d_i^2}{d_o^2-d_i^2}}$$

ここで,

ν　：ポアソン比（－）

α　：しまり嵌め比（δ/d_i）

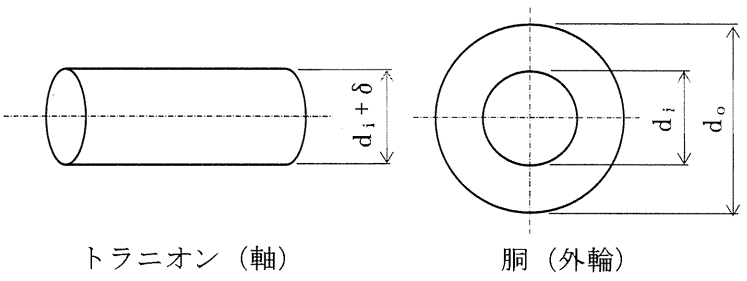
δ　：胴と上部トラニオンの締め代（直径差）

d_i　：上部トラニオン接続部の外径（mm）

d_o　：上部トラニオン接続部の外輪外径（mm）

E　：上部トラニオンの縦弾性係数（MPa）

E'　：胴の縦弾性係数（MPa）



(ロ)-第A.12図　しまり嵌め荷重による支圧応力の解析モデル

(3) 支圧応力（一次＋二次)応力

支圧応力 σ_P (MPa) は次式で与えられる。

$$\sigma_P = MAX[\sigma_{P11}, \sigma_{P12}] + \sigma_{P2}$$

支圧応力の計算条件と計算結果を(ロ)-第A.6表に示す。(ロ)-第A.6表より，上部トラニオン接続部に発生する応力は評価基準値を満たす。

(ロ)-第A.6表　上部トラニオン接続部の応力計算条件及び計算結果

評価位置	上部トラニオンに作用する荷重 : F (N)	0点から荷重作用点までの距離 : L_1 (mm)	0点から反力R_2の作用点までの距離 : L_2 (mm)	上部トラニオン接続部の外径 : d (mm)	摩擦係数 : μ (−) [15]
C領域	1.757×10^6	250	140	270	0.35
D領域	1.757×10^6	250	140	270	0.35

評価位置	上部トラニオンに作用する反力 : R_1 又は R_2 (N)	吊上荷重による支圧応力（一次応力） : σ_{P11} 又は σ_{P12} (MPa)	評価基準値 (注1) : $1.25S_y$ (MPa)	余裕率
C領域	3.277×10^6	174	231	0.32
D領域	1.520×10^6	81		1.85

(注1) 胴の方が許容応力は小さいため，胴の評価基準値を示す。

評価位置	ポアソン比 : ν (−)	胴と上部トラニオンの締め代 : δ_0 (mm)	上部トラニオン接続部の外径 : d_i (mm)	上部トラニオン接続部の外輪外径 : d_o (mm)
C及びD領域	0.3	[redacted]	270	[redacted]

(注2) d_oの大きい方がしまり嵌めによる応力を保守的に評価できるため，キャスク外径より大きいd_iの[redacted]とした。

評価位置	上部トラニオンの縦弾性係数 : E (MPa)	胴の縦弾性係数 : E' (MPa)	しまり嵌め荷重による支圧応力（二次応力） : σ_{P2} (MPa)
C及びD領域	1.90×10^5	[redacted]	45

評価位置	支圧応力（一次＋二次応力）		余裕率
	σ_P (MPa)	評価基準値 (注3) : $1.5\times1.25S_y$ (MPa)	
C領域	219	346	0.57
D領域	126		1.74

(注3) 胴の方が許容応力は小さいため，胴の評価基準値を示す。

A.4.4.2　上部トラニオンの疲労評価

上部トラニオンは垂直吊り時に荷重が作用する。

上部トラニオン段付部及び接続部の応力強さについて，応力集中を考慮し繰返しピーク応力強さによる許容繰返し回数と使用計画回数を比較して評価を行う。

1. 繰返しピーク応力強さ

上部トラニオン段付部及び接続部の繰返しピーク応力強さ S_a (MPa) はそれぞれ次式で求める。

① 上部トラニオン段付部

$$S_{a1} = \frac{SK_tK_r\frac{E_0}{E_t}}{2}$$

② 上部トラニオン接続部

$$S_{a2} = \frac{SK_t\frac{E_0}{E_t}}{2}$$

ここで，

S_{a1} ：上部トラニオン段付部の繰返しピーク応力強さ (MPa)

S_{a2} ：上部トラニオン接続部の繰返しピーク応力強さ (MPa)

S　：応力強さ（垂直吊り時） (MPa)

K_t ：応力集中係数 (-)

K_r ：表面粗さ係数 (-)

E_o ：設計疲労線図[1), 12)]の基本縦弾性係数 (MPa)

E_t ：材料の使用温度における縦弾性係数 (MPa)

上部トラニオン段付部の応力集中係数は応力集中係数線図[13)]より，表面粗さ係数は表面粗さ係数線図[12)]より，(ロ)-第A.7表に示すように与えられる。また，上部トラニオン接続部の応力集中係数は金属キャスク構造規格[1)]より4.0とする。

(ロ)-第A.7表　トラニオン段付き部の応力集中係数

評価位置	丸み半径 :r(mm)	小径部 :d(mm)	大径部 :D(mm)	2r/d	D/d	応力集中係数 :K_t(-)	表面粗さ係数 :K_r(-)
A-A 断面	10	140	260	0.14	1.86	2.0	1.24
B-B 断面	5	260	270	0.04	1.04	2.3	1.24

(1) 上部トラニオンに作用する荷重

上部トラニオンに作用する荷重 F (N) は，疲労評価については実際に作用する荷重をベースとし，クレーン構造規格より想定される負荷係数[14]を用いて，次式で求める。

$$F = \frac{Wag}{n}$$

ここで，

W ：容器の垂直吊り時の質量 (1.194×10^5kg)

n ：上部トラニオンの数 (2)

a ：負荷係数 (1.3)

g ：重力加速度 ($9.80665 m/s^2$)

したがって，

$F = 7.611\times10^5$ N

(2) 繰返しピーク応力強さ

繰返しピーク応力強さ S_a (MPa) は，A.4.4.1 と同様に求めた応力強さ S を用いて求める。

上部トラニオン段付部の各断面及び上部トラニオン接続部の計算条件並びに評価結果を(ロ)-第 A.8 表に示す。

(ロ)-第 A.8 表　トラニオンの繰返しピーク応力計算条件及び計算結果

評価位置	最大荷重 :F(N)	モーメントアーム :X (mm)	中立軸からの距離 :C(mm)	トラニオン外径 :d_o(mm)	トラニオン内径 :d_i(mm)	応力強さ :S (MPa)	基本縦弾性係数 :E_o(MPa)	縦弾性係数 :E_t(MPa)	繰返しピーク応力強さ :S_a (MPa)
A-A 断面	7.611×10^5	40	70	140	[redacted]	195	2.00×10^5	1.90×10^5	255
B-B 断面	7.611×10^5	250	130	260		132	2.00×10^5	1.90×10^5	199

(注) A-A 断面は中実であるが，近傍では中空となっているため保守的に近傍と同じ内径をもつ中空として評価

評価位置	最大荷重 :F(N)	応力強さ :S (MPa)	応力集中係数 :K_t(-)	基本縦弾性係数 :E_o(MPa)	縦弾性係数 :E_t(MPa)	繰返しピーク応力強さ :S_a (MPa)
接続部 (トラニオン側)	7.611×10^5	121	4.0	2.00×10^5	1.90×10^5	316
接続部 (胴側)	7.611×10^5	121	4.0	2.07×10^5	[redacted]	255

2. 許容繰返し回数

設計疲労線図[1),12)]より許容繰返し回数N_aは以下となる。

A-A 断面　：約 6.8×10^6 回

B-B 断面　：約 1.0×10^7 回

トラニオン接続部（トラニオン側）　：約 4.2×10^5 回

トラニオン接続部（胴側）　：約 1.0×10^4 回

3. 使用計画回数

本吊上装置の使用計画回数N_cは次のようになる。

輸送回数　：10 回

輸送時吊上回数　：20 回（輸送ごと）

裕度　：2 倍（輸送回数及び輸送時吊上回数に保守性を持たせた係数）

なお，上記の輸送時吊上回数は，(ハ)章「輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱い方法」の「A. 核燃料輸送物の取扱い方法」に示す標準的な取扱いとして想定される吊上回数であり，燃料装荷，使用済燃料乾式貯蔵施設での貯蔵，再処理工場への輸送における取扱いを含む。

したがって，

$N_c=10\times20\times2=400$ 回

以上より，使用計画回数は許容繰返し回数を十分下回っており，トラニオンの疲労強度は十分である。

A.4.5　固縛装置

本輸送物は，(イ)-第 C.3 図に示すように胴上部及び下部のトラニオンを使用して輸送架台に固定される。

上下方向及び左右方向の荷重は胴上部及び下部トラニオンが支え，前後方向の荷重を支持するのは下部トラニオンである。

固縛装置の荷重条件として，前後及び上下に各 2g[1)] の加速度が作用し，左右方向に 1g[1)] の加速度が作用する場合を考える。また，下方向は自重を考慮し 3g[1)] の加速度が作用すると考える。

1. 胴上部及び下部トラニオンに作用する荷重

胴上部及び下部トラニオンに作用する荷重は，(ロ)-第 A. 13 図に示す荷重状態図から，次のように与えられる。

$$F_V = \frac{b}{a+b} V$$

$$R_V = \frac{a}{a+b} V$$

$$R_L = H$$

$$F_T = \frac{b}{a+b} L$$

$$R_T = \frac{a}{a+b} L$$

ここで，

F_V ：胴上部に作用する上下方向荷重（N）

R_V ：下部トラニオンに作用する上下方向荷重（N）

R_L ：下部トラニオンに作用する前後方向荷重（N）

F_T ：胴上部に作用する左右方向荷重（N）

R_T ：下部トラニオンに作用する左右方向荷重（N）

V ：上下方向慣性力

$= 1.344 \times 10^5 \times 2 \times 9.80665 = 2.637 \times 10^6$ N（上方向）

$= 1.344 \times 10^5 \times 3 \times 9.80665 = 3.955 \times 10^6$ N（下方向）

H ：前後方向慣性力

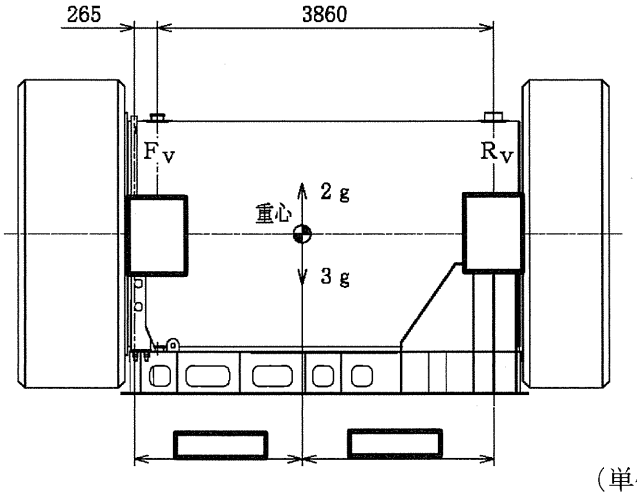
$= 1.344 \times 10^5 \times 2 \times 9.80665 = 2.637 \times 10^6$ N

L ：左右方向慣性力

$= 1.344 \times 10^5 \times 1 \times 9.80665 = 1.319 \times 10^6$ N

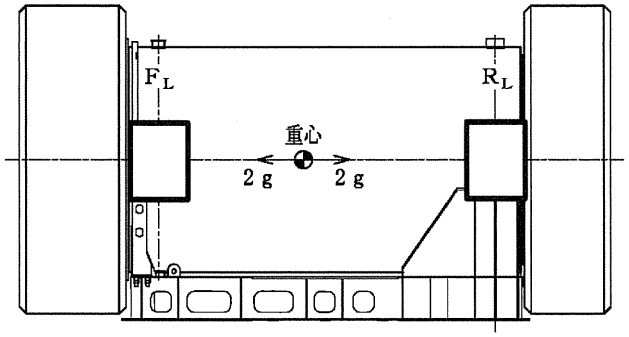
a ：重心より胴上部固縛位置中心までの距離（[redacted]mm）

b ：重心より下部トラニオン中心までの距離（[redacted]mm）

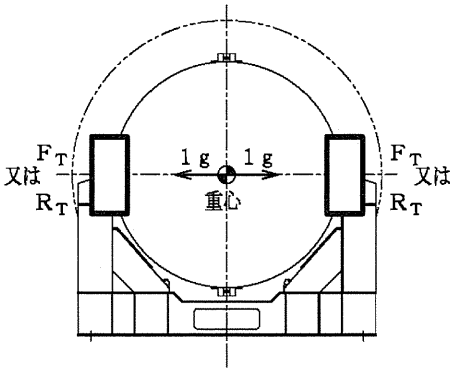


（単位：mm）

(a)　上下方向に加速度が作用する場合



(b)　前後方向に加速度が作用する場合



(c)　左右方向に加速度が作用する場合

(ロ)-第 A. 13 図　各方向に加速度が作用する場合の胴上部及び下部トラニオンに作用する荷重

(ロ)-第A.9表に以上の式を用いて求めた各方向の荷重を示す。輸送固縛時には上部トラニオンに荷重は作用せず下部トラニオンのみに荷重が作用する。また，胴上部は剛な構造であるので，下部トラニオンを対象としてトラニオン本体及びトラニオン接続部の応力評価を行う。なお，左右の加速度による荷重はトラニオン本体に直接作用しないので，評価を除外する。

(ロ)-第A.9表　胴上部及び下部トラニオンに作用する荷重

(単位：N)

荷重 (注1) / 加速度方向	上部側			下部側		
	F_V	F_L	F_T	R_V	R_L	R_T
上 (2g)						
下 (3g)						
前後 (2g) (注2)		0			2.637×10^6	
左右 (1g)						

(注1) F_V, R_V：垂直方向荷重

F_L, R_L：容器軸方向荷重

F_T, R_T：容器軸に直角な方向荷重

(注2) 胴上部は前後方向に固定していないため，胴上部に前後方向の荷重は作用しない。

2. トラニオン本体

トラニオン本体には，下方向荷重 R_V と前後方向荷重 R_L の合成荷重 F (N) が作用する。

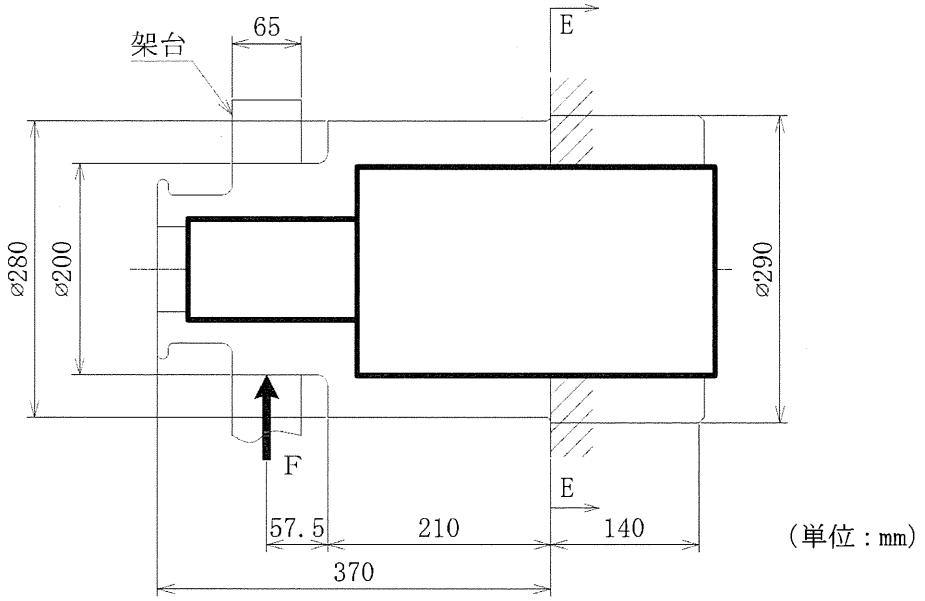
$$F=\frac{\sqrt{R_V^2+R_L^2}}{n}$$

$$=1.612\times10^6\ N$$

ここで，

n　：荷重を受けもつトラニオンの数 (2)

トラニオン本体には，(ロ)-第 A.14 図に示す断面 E-E に最大曲げ応力が生じる。曲げ応力 σ_b（MPa）は，吊上装置に対する強度評価と同様に求められる。計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.10 表に示す。



(ロ)-第 A.14 図　輸送架台固縛状態解析モデル図

(ロ)-第 A.10 表　トラニオン本体の応力計算条件及び計算結果

評価位置	最大荷重 : F(N)	モーメントアーム : X(mm)	中立軸からの距離 : C(mm)	トラニオン外径 : d_o(mm)	トラニオン内径 : d_i(mm)
E-E 断面	1.612×10^6	267.5	140	280	

評価位置	曲げ応力 : σ_b(MPa)	せん断応力 : τ(MPa)	応力強さ : S(MPa)	基準値 : S_y(MPa)	余裕率
E-E 断面			232	653	1.81

3. トラニオン接続部

下部トラニオン接続部は，上部トラニオン接続部に対する強度評価と同様に求められる（A.4.4.1の上部トラニオン接続部の評価方法について「上部トラニオン」を「下部トラニオン」に読み替える。）。計算条件と計算結果を(ロ)-第A.11表に示す。(ロ)-第A.11表より，下部トラニオン接続部の本体胴側に発生する応力は基準値を満たす。

(ロ)-第A.11表　下部トラニオン接続部の応力計算条件及び計算結果

評価位置	下部トラニオンに作用する荷重 ：F（N）	0点から荷重作用点までの距離 ：L_1（mm）	0点から反力R_2の作用点までの距離 ：L_2（mm）	下部トラニオン接続部の外径 ：d（mm）	摩擦係数 ：μ（－）[15]
C領域	1.612×10^6	267.5	140	290	0.35
D領域	1.612×10^6	267.5	140	290	0.35

評価位置	下部トラニオンに作用する反力 ：R_1又はR_2（N）	吊上荷重による支圧応力（一次応力） ：σ_{P11}又はσ_{P12}（MPa）	評価基準値(注1) ：$1.25S_y$(MPa)	余裕率
C領域	3.059×10^6	151	231	0.52
D領域	1.447×10^6	72		2.20

（注1）胴の方が許容応力は小さいため，胴の評価基準値を示す。

評価位置	ポアソン比 ：ν（－）	胴と下部トラニオンの締め代 ：δ_0（mm）	下部トラニオン接続部の外径 ：d_i（mm）	下部トラニオン接続部の外輪外径 ：d_o（mm）
C及びD領域	0.3	[redacted]	290	[redacted]

（注2）d_oの大きい方がしまり嵌めによる応力を保守的に評価できるため，キャスク外径より大きいd_iの[redacted]とした。

評価位置	下部トラニオンの縦弾性係数 ：E（MPa）	胴の縦弾性係数 ：E'（MPa）	しまり嵌め荷重による支圧応力（二次応力） ：σ_{P2}（MPa）
C及びD領域	1.90×10^5	[redacted]	44

評価位置	支圧応力（一次＋二次応力）		余裕率
	σ_P（MPa）	評価基準値(注3) ：$1.5\times1.25S_y$(MPa)	
C領域	195	346	0.77
D領域	116		1.98

（注3）胴の方が許容応力は小さいため，胴の評価基準値を示す。

A.4.6　圧力

本輸送物の一般の試験条件での胴内の最大内圧は0.0780MPaであり，外気圧が60kPa（0.060MPa）まで降下した場合には，差圧は0.0180MPa Gとなる。また，胴，二次蓋と三次蓋に囲まれた空間（以下「二三次蓋間」という。）の最大内圧は0.253MPaであり，外気圧が60kPa（0.060MPa）まで降下した場合には，差圧は0.193MPa Gとなる。

後述するように，一般の試験条件の熱的試験において，胴内と外気圧との差圧を0.101325MPa G，二三次蓋間の最大内圧と外気圧との差圧を0.19MPa Gとした条件の下で構造健全性を確認しており，十分な裕度がある。したがって，上記の圧力降下が生じた場合にも輸送容器の健全性を損なうことはない。

A.4.7　振動

本輸送物は(イ)章Cの1.で述べたように固縛装置によって2箇所で輸送架台に固定されている（(イ)-第C.3図参照）。本輸送物を(ロ)-第A.15図のとおり両端支持の梁と考えると，輸送物のn次の固有振動数f_n（Hz）は次式で示される。[15)]

$$f_n = \frac{\lambda^2}{2\pi\ell^2}\sqrt{\frac{EIg}{w}}$$

ここで，

λ　：境界条件と振動形によって定まる無次元定数（-）

E　：縦弾性係数（MPa）

I　：振動面に直交する断面主軸に関する断面二次モーメント（mm^4）

ℓ　：輸送容器支持間長さ（mm）

g　：重力加速度（mm/s^2）

w　：単位長さ当たりの荷重（N/mm）

$$w = \frac{W \times 9.80665}{L}$$

W　：輸送物質量（kg）

L　：容器本体全長（mm）

また，断面二次モーメントとしては胴のみを考えると，

$$I = \frac{\pi}{64}\left(d_2^4 - d_1^4\right)$$

ここで，

d_2　：胴外径（mm）

d_1　：胴内径（mm）

ここで，最も振動数の低い一次の固有振動数を計算する。$\lambda=\pi$（両端支持の一次固

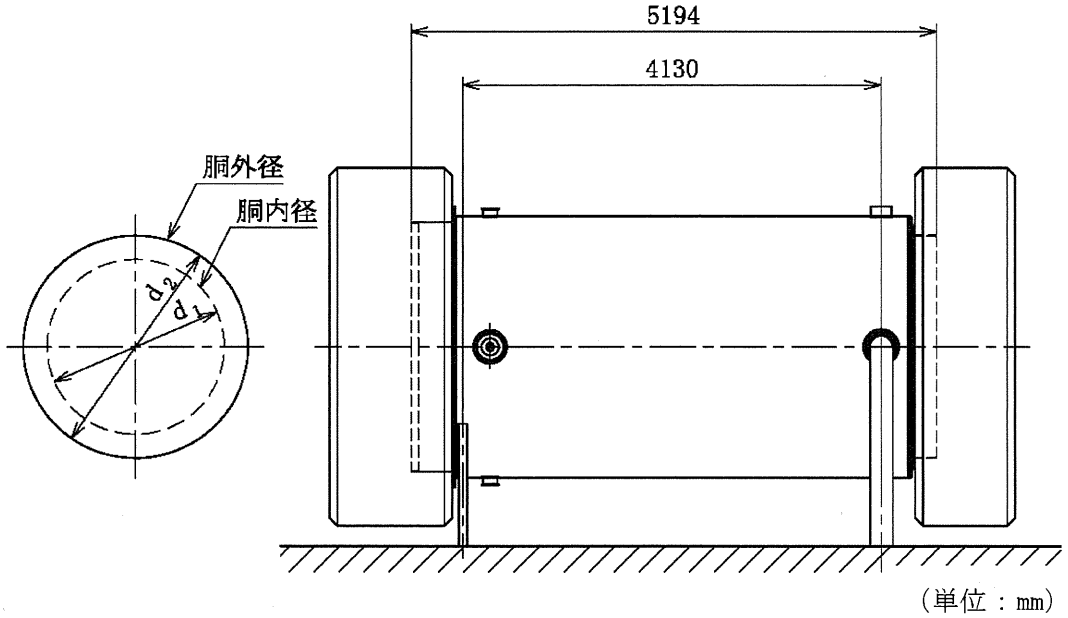
有振動に対する定数）として，計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.12 表に示す。一方，輸送中に車両の最大加速度と振動数の関係において，輸送中の振動により輸送物に作用する励振力の振動数域は大部分が 10Hz 以下であり，十分離れた固有振動数を有しているため，励振力による輸送物の応答増幅の影響はなく，輸送中の振動による荷重は A.5.3 の一般の試験条件の 0.3m 落下事象に包絡されることから，輸送物は予想される振動等によって亀裂，破損等の生じるおそれはない。

また，三次蓋は振動等により緩まないよう，A.4.5 にて考慮した左右方向加速度 1g と下方向加速度 3g による三次蓋の慣性力（1.024×10^5N）より十分大きい摩擦力 [redacted] が生じるようにボルトによって強固に締め付けられており，振動等によって緩むことはない。

(ロ)-第 A.12 表　固有振動数計算条件及び計算結果

項　目	無次元定数 : λ（－）	縦弾性係数 : E(MPa)	胴外径 : d_2(mm)	胴内径 : d_1(mm)	輸送容器支持間長さ : ℓ(mm)
数値等	π	[redacted]			4130

項　目	輸送物総質量 : W(kg)	重力加速度 : g(mm/s^2)	輸送容器本体全長 : L(mm)	固有振動数 : f_n(Hz)
数値	1.344×10^5	9.80665×10^3	5194	215



(ロ)-第 A.15 図　輸送容器振動解析モデル図

A.4.8　輸送物の要件に対する評価結果の要約

以上の結果より通常の輸送時における輸送物の要件に対する評価結果の要約を(ロ)-第A.13表に示す。

(ロ)-第A.13表　輸送物の要件に対する評価結果の要約

解析及びその詳細	解析基準	解析基準値	解析結果等	余裕率等
・化学的及び電気的反応				
化学的反応	反応のないこと	-	反応なし	基準に合致
電気的反応	反応のないこと	-	反応なし	基準に合致
・低温強度				
構成部品の低温特性	-25℃での亀裂，破損のないこと	-	亀裂，破損なし	基準に合致
低温時の強度	低温脆化温度	-25 ℃	-25℃では低温脆化なし	基準に合致
・密封装置の誤操作による開放の可能性				
三次蓋	可能性がないこと	-	可能性なし	基準に合致
・吊上装置				
1.応力評価				
トラニオン本体	S_y	653 MPa	449 MPa	0.45
トラニオン接続部				
（一次応力）	$1.25S_y$	231 MPa	174 MPa	0.32
（一次応力＋二次応力）	$1.5\times1.25S_y$	346 MPa	219 MPa	0.57
2.疲労評価				
トラニオン本体	許容繰返し回数以下であること	許容繰返し回数 6.8×10^6 回	使用計画回数 400 回	基準に合致
トラニオン接続部	許容繰返し回数以下であること	許容繰返し回数 1.0×10^4 回	使用計画回数 400 回	基準に合致
・固縛装置				
トラニオン本体	S_y	653 MPa	232 MPa	1.81
トラニオン接続部				
（一次応力）	$1.25S_y$	231 MPa	151 MPa	0.52
（一次応力＋二次応力）	$1.5\times1.25S_y$	346 MPa	195 MPa	0.77
・圧力	密封性	-	良	基準に合致
・振動	振動性	固有振動数（215Hz）と輸送による振動数（10Hz）の差が大であり，輸送物の応答増幅の影響はなく，輸送中の振動による荷重は，一般の試験条件の 0.3m 落下事象に包絡されることから，輸送物に亀裂，破損等は生じない。		

A.5　一般の試験条件

A.5.1　熱的試験

A.5.1.1　温度及び圧力の要約

1. 温度

一般の試験条件における輸送物各部の温度分布は(ロ)章 B の熱解析から求まる。各部位の最高温度と解析基準値を定める温度を(ロ)-第 A.14 表に示す。

(ロ)-第 A.14 表　一般の試験条件における最高温度の要約

(単位：℃)

部位	熱解析結果	解析基準値設定温度
胴（本体部）	121	[redacted]
胴（フランジ部）	111	
胴（底板）	133	
一次蓋	110	
二次蓋	105	
三次蓋	103	
一次蓋ボルト	109	
二次蓋ボルト	105	
三次蓋ボルト	103	
外筒	114	
下部端板	115	
蓋部中性子遮蔽材カバー	108	
底部中性子遮蔽材カバー	117	
トラニオン	118	
バスケット	177	
燃料集合体	206	

2. 圧力

(ロ)章 B の熱解析から求まる一般の試験条件における輸送容器各部の圧力及び構造解析で使用する圧力を(ロ)-第 A.15 表に示す。

(ロ)-第 A.15 表　一般の試験条件の熱解析の要約と評価

項目	熱解析結果	構造解析使用圧力	圧力設定方法
胴内圧	0.0780 MPa (-0.0233 MPa G)	0 MPa (-0.101325 MPa G)	内外圧力差が最大となるように最低圧（真空）を仮定
一二次蓋間(注)圧力	0.390 MPa (0.289 MPa G)	0.411325 MPa (0.31 MPa G)	内外圧力差が最大となるように熱解析に余裕を取った値を使用
二三次蓋間圧力	0.253 MPa (0.152 MPa G)	0.291325 MPa (0.19 MPa G)	三次蓋に対して安全側になるように熱解析結果に余裕を取った値を使用

(注)胴，一次蓋及び二次蓋に囲まれた空間をいう。

なお，蓋部，側部及び底部中性子遮蔽材充填空間は，当該空間の中性子遮蔽材の経年変化による水分放出による圧力上昇を考慮する。

蓋部中性子遮蔽材充填空間は，[redacted]MPa G ([redacted]MPa）とする。この圧力は製造時の周囲温度が仮に-25℃であった場合，温度上昇により製造時の周囲温度が常温であった場合に比べて最大 14%増加する可能性がある。この圧力上昇による蓋部中性子遮蔽材カバーの応力増加は 1MPa であり，A.5.3 の一般の試験条件の 0.3m 落下事象において解析基準値に対して 1MPa 以上の余裕を有していることを確認している。

側部中性子遮蔽材充填空間は，外筒部を[redacted]MPa G ([redacted]MPa），端板部を[redacted]MPa G ([redacted]MPa），底部中性子遮蔽材充填空間は，[redacted]MPa G ([redacted]MPa）とする。側部中性子遮蔽材充填空間及び底部中性子遮蔽材充填空間の圧力は輸送前の保守により圧力が開放される。この圧力は，圧力開放時の周囲温度が-25℃であった場合，温度上昇により圧力開放時の周囲温度が 38℃であった場合に比べて側部中性子遮蔽材充填空間の外筒部で最大 32%，端板部で最大 73%，底部中性子遮蔽材充填空間で最大 24%増加する可能性がある。この圧力上昇による応力増加は外筒で 11MPa，下部端板で 9MPa，底部中性子遮蔽材カバーで 7MPa であり，A.5.3 の一般の試験条件の 0.3m 落下事象において解析基準値に対して外筒で 11MPa，下部端板で 9MPa，底部中性子遮蔽材カバーで 7MPa 以上の余裕を有していることを確認している。

A.5.1.2　熱膨張

輸送容器には熱膨張により応力が発生する。発生応力の計算をA.5.1.3に示す。

なお，本輸送物は周囲温度-25℃～38℃の温度範囲において使用するが，当該温度範囲における輸送物の各部品の熱膨張に伴う寸法変化は十分に小さく，最も熱膨張の差の大きいバスケットと胴においても隙間が□以上あり部品同士の干渉は生じないため，周囲温度の変化により亀裂，破損等の生じるおそれはない。

A.5.1.3　応力計算

1. 容器本体

本項では，一般の試験条件におけるキャスク本体（本体（胴，外筒及び底部中性子遮蔽材カバー），一次蓋（蓋板及び蓋部中性子遮蔽材カバー），二次蓋，三次蓋及び蓋ボルトからなる構成体をいう。）各部の応力計算を行う。B.4.2に示す温度分布及び輸送容器に作用する圧力を荷重条件とし，解析は有限要素法によるABAQUSコードを用いて行う。

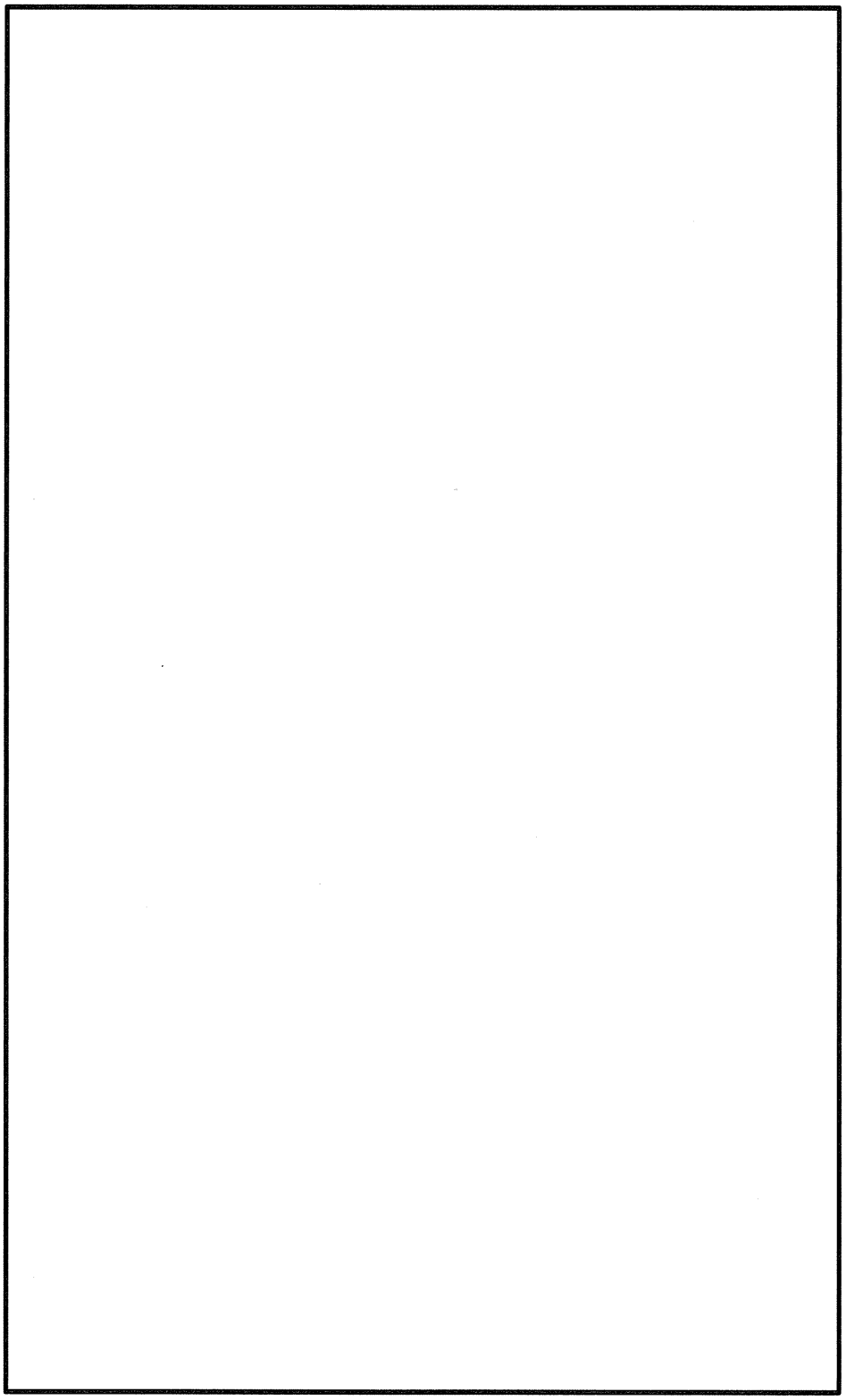
(1) 解析モデル

解析モデルとして(ｲ)-第C.5図に基づいて作成した(ﾛ)-第A.16図に示す三次元180°対称モデルを用いる。

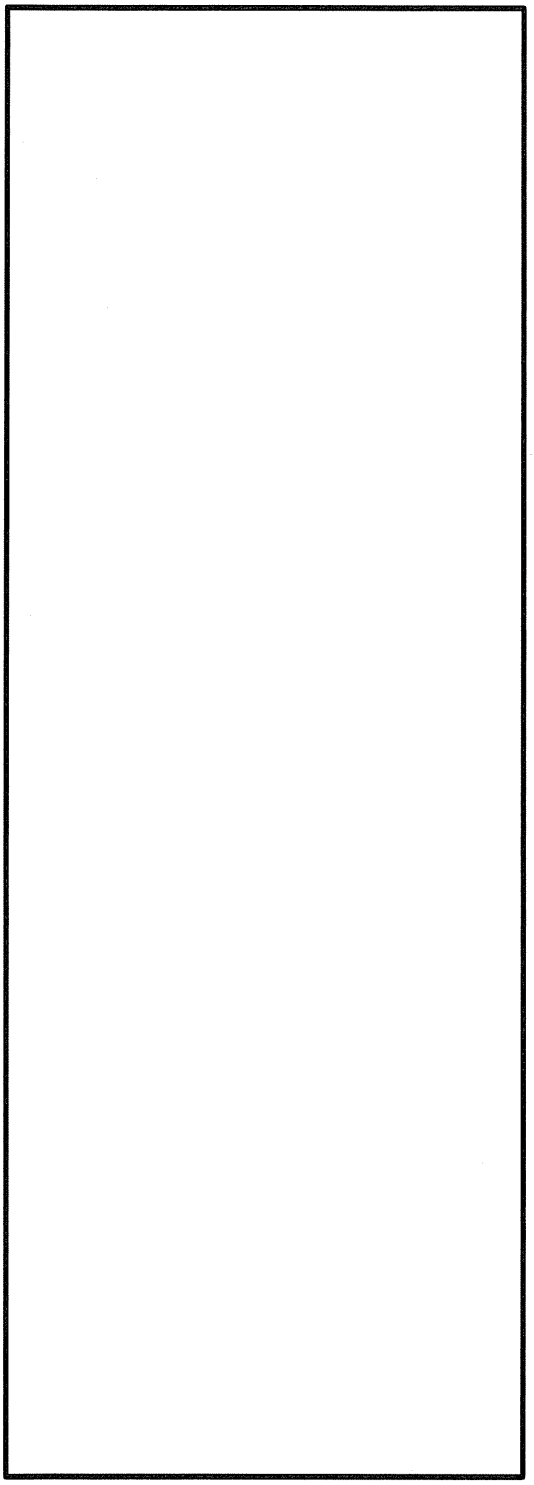
本解析モデルは，胴，外筒，下部端板，中性子遮蔽材，一次蓋，二次蓋，三次蓋，蓋部中性子遮蔽材カバー，底部中性子遮蔽材カバー等より構成される。なお，一次蓋，二次蓋及び三次蓋は蓋ボルトにより胴に接続され，蓋と胴との接触が考慮されている。

(2) 荷重条件及び境界条件

荷重条件及び境界条件を(ﾛ)-第A.17図に示す。



(ロ)-第 A. 16 図　三次元 180° 対称モデル



P_i ：胴内圧（-0.101325 MPa G）

P_{ii} ：一二次蓋間圧力（0.31 MPa G）

P_{iii} ：二三次蓋間圧力（0.19 MPa G）

P_{sr} ：側部中性子遮蔽材部（外筒側面）圧力

（ MPa G）

P_{er} ：側部中性子遮蔽材部（端板面）圧力

（ MPa G）

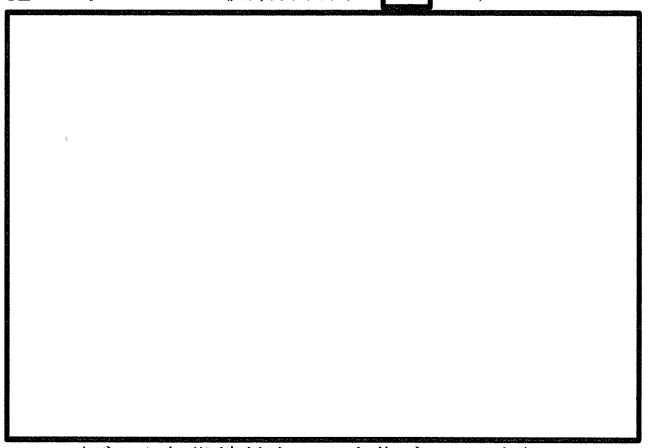
P_{tr} ：蓋部中性子遮蔽材部圧力 （ MPa G）

P_{br} ：底部中性子遮蔽材部圧力 （ MPa G）

P_{bi} ：一次蓋ボルト初期締付力 （ MPa）

P_{bii} ：二次蓋ボルト初期締付力 （ MPa）

P_{biii} ：三次蓋ボルト初期締付力 （ MPa）



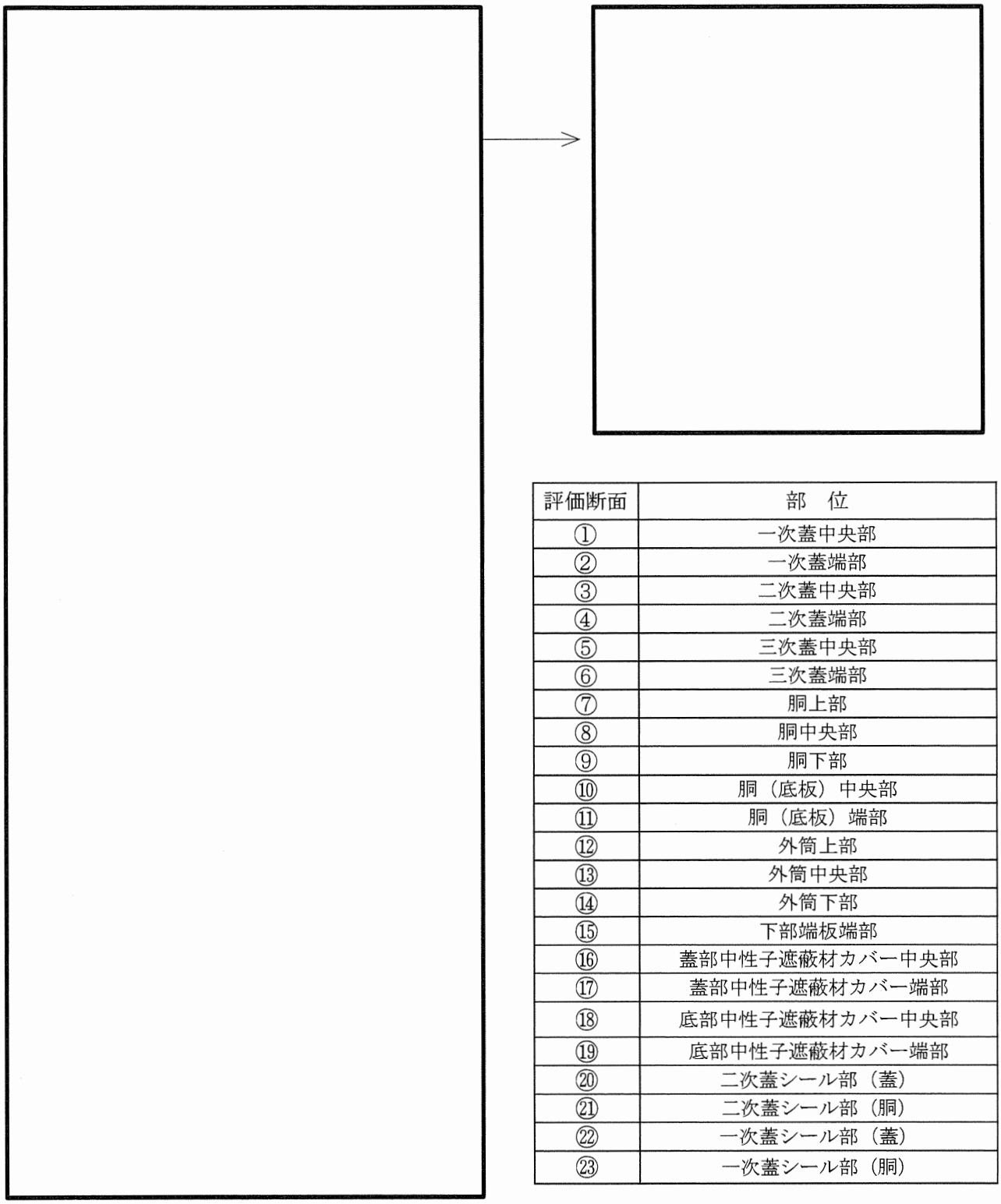
（ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例）

(ロ)-第 A.17 図　一般の試験条件の熱的試験における荷重条件及び境界条件

(3) 解析結果

a. 胴内圧等による応力解析結果

(ロ)-第 A.18 図に示す主要な評価位置における胴内圧等による応力の評価結果を(ロ)-第 A.16 表に示す。表に示すように，いずれの応力も A.1.2 に定めた解析基準値以下である。



評価断面	部　位
①	一次蓋中央部
②	一次蓋端部
③	二次蓋中央部
④	二次蓋端部
⑤	三次蓋中央部
⑥	三次蓋端部
⑦	胴上部
⑧	胴中央部
⑨	胴下部
⑩	胴（底板）中央部
⑪	胴（底板）端部
⑫	外筒上部
⑬	外筒中央部
⑭	外筒下部
⑮	下部端板端部
⑯	蓋部中性子遮蔽材カバー中央部
⑰	蓋部中性子遮蔽材カバー端部
⑱	底部中性子遮蔽材カバー中央部
⑲	底部中性子遮蔽材カバー端部
⑳	二次蓋シール部（蓋）
㉑	二次蓋シール部（胴）
㉒	一次蓋シール部（蓋）
㉓	一次蓋シール部（胴）

(注)評価断面⑨-2は下部トラニオンを取り付けていない断面を含む。

(ロ)-第A.18図　一般の試験条件の熱的試験における応力評価位置

(ロ)-第 A.16 表　一般の試験条件における圧力による容器本体の一次応力の評価（1/2）

部位	断面 No.（注 1）	応力分類（注 2）又は応力の種類	表面	応力強さ又は応力 (MPa)	温度 (℃)	解析基準値 (MPa)（注 3）	余裕率
一次蓋	①	P_m	－	1		124	123
		P_L+P_b	内	7		186	25.5
			外	6			30.0
	②	P_L	－	5		186	36.2
二次蓋	③	P_m	－	2		124	61.0
		P_L+P_b	内	11		186	15.9
			外	13			13.3
	④	P_L	－	4		186	45.5
三次蓋	⑤	P_m	－	4		137	33.2
		P_L+P_b	内	19		205	9.78
			外	18			10.3
	⑥	P_L	－	6		205	33.1
胴	⑦	P_L	－	2		186	92.0
	⑧	P_m	－	2		123	60.5
		P_L+P_b	内	3		184	60.3
			外	2			91.0
	⑨-1	P_L	－	2		184	91.0
	⑨-2	P_L	－	2			91.0
胴（底板）	⑩	P_m	－	1		122	121
		P_L+P_b	内	1		183	182
			外	1			182
	⑪	P_L	－	1		183	182
外筒	⑫	引張	－	10		156	14.6
		圧縮	－	-		156	-
		せん断	－	7		90	11.8
		曲げ	－	33		156	3.72
	⑬	引張	－	21		156	6.42
		圧縮	－	1		156	155
		せん断	－	1		90	89.0
		曲げ	－	2		156	77.0
	⑭	引張	－	6		156	25.0
		圧縮	－	2		156	77.0
		せん断	－	8		90	10.2
		曲げ	－	35		156	3.45

(注 1)(ロ)-第 A.18 図参照

(注 2)P_m：一次一般膜応力，P_L：一次局部膜応力，P_b：一次曲げ応力

(注 3)断面①～⑪の P_m に対する基準値は S_m，P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は $1.5S_m$ である。断面⑫～⑭における引張応力に対する基準値は f_t，圧縮応力に対する基準値は f_c，せん断応力に対する基準値は f_s，曲げ応力に対する基準値は f_b である。

(ロ)-第 A.16 表　一般の試験条件における圧力による容器本体の一次応力の評価 (2/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力分類 (注 2) 又は応力の種類	表面	応力強さ又は応力 (MPa)	温度 (℃)	解析基準値 (MPa) (注 3)	余裕率
下部端板	⑮	引張	—	2		136	67.0
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	3		78	25.0
		曲げ	—	12		136	10.3
蓋部中性子遮蔽材カバー	⑯	引張	—	-		157	-
		圧縮	—	1		157	156
		せん断	—	1		90	89.0
		曲げ	—	2		157	77.5
	⑰	引張	—	-		157	-
		圧縮	—	1		157	156
		せん断	—	1		90	89.0
		曲げ	—	3		157	51.3
底部中性子遮蔽材カバー	⑱	引張	—	2		136	67.0
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	3		78	25.0
		曲げ	—	8		136	16.0
	⑲	引張	—	4		136	33.0
		圧縮	—	-		136	-
		せん断	—	5		78	14.6
		曲げ	—	29		136	3.68
二次蓋シール部	⑳	P_L	—	13		186	13.3
	㉑	P_L	—	12		185	14.4
一次蓋シール部	㉒	P_L	—	33		185	4.60
	㉓	P_L	—	14		185	12.2

(注 1) (ロ)-第 A.18 図参照

(注 2) P_L : 一次局部膜応力

(注 3) 断面⑮～⑲における引張応力に対する基準値は f_t, 圧縮応力に対する基準値は f_c, せん断応力に対する基準値は f_s, 曲げ応力に対する基準値は f_b である。断面⑳～㉓の P_L に対する基準値は S_y である。

b. 圧力による応力と熱応力との組合せに対する容器本体の（一次＋二次）応力と蓋ボルトの応力評価結果

A.5.1.3で求めた圧力による応力と熱応力との組合せに対する容器本体の（一次＋二次）応力と蓋ボルトの応力評価結果を(ロ)-第A.17表に示す。この表に示すように，容器本体及び蓋ボルトはA.1.2の解析基準値以下である。

(ロ)-第A.17表　一般の試験条件における熱及び圧力による容器本体の（一次＋二次）応力及び蓋ボルトの評価（1/2）

部位	断面No.（注1）	応力の種類	表面	応力強さ又は応力（MPa）	温度（℃）	解析基準値（MPa）（注2）	余裕率
一次蓋	①	—	内	6		372	61.0
			外	9			40.3
	②	—	内	8		372	45.5
			外	9			40.3
二次蓋	③	—	内	11		372	32.8
			外	12			30.0
	④	—	内	9		372	40.3
			外	11			32.8
三次蓋	⑤	—	内	21		411	18.5
			外	15			26.4
	⑥	—	内	24		411	16.1
			外	27			14.2
胴	⑦	—	内	14		372	25.5
			外	19			18.5
	⑧	—	内	13		369	27.3
			外	9			40.0
	⑨-1	—	内	12		369	29.7
			外	14			25.3
	⑨-2	—	内	19			18.4
			外	20			17.4
胴（底板）	⑩	—	内	27		366	12.5
			外	3			121
	⑪	—	内	18		366	19.3
			外	23			14.9

(注1) (ロ)-第A.18図参照

(注2) 断面①～⑪における基準値は$3S_m$である。

(ロ)-第 A.17 表　一般の試験条件下における熱及び圧力による容器本体の

（一次＋二次）応力及び蓋ボルトの評価（2/2）

部位	断面 No.（注 1）	応力の種類（注 2）	表面	応力強さ又は応力 (MPa)	温度 (℃)	解析基準値 (MPa)（注 3）	余裕率
外筒	⑫	引張	—	47		470	9.00
		せん断	—	6		271	44.1
		曲げ	—	27		470	16.4
	⑬	引張	—	30		470	14.6
		せん断	—	2		271	134
		曲げ	—	5		470	93.0
	⑭	引張	—	82		470	4.73
		せん断	—	17		271	14.9
		曲げ	—	82		470	4.73
下部端板	⑮	引張	—	48		410	7.54
		せん断	—	24		236	8.83
		曲げ	—	109		410	2.76
蓋部中性子遮蔽材カバー	⑯	引張	—	2		472	235
		せん断	—	2		272	135
		曲げ	—	3		472	156
	⑰	引張	—	4		472	117
		せん断	—	1		272	271
		曲げ	—	2		472	235
底部中性子遮蔽材カバー	⑱	引張	—	34		410	11.0
		せん断	—	3		236	77.6
		曲げ	—	10		410	40.0
	⑲	引張	—	29		410	13.1
		せん断	—	4		236	58.0
		曲げ	—	21		410	18.5
二次蓋シール部	⑳	—	内	22		186	7.45
			外	10			17.6
	㉑	—	内	18		185	9.27
			外	16			10.5
一次蓋シール部	㉒	—	内	27		185	5.85
			外	60			2.08
	㉓	—	内	14		185	12.2
			外	15			11.3
一次蓋ボルト	—	σ_m	—	249		562	1.25
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	251		843	2.35
二次蓋ボルト	—	σ_m	—	206		564	1.73
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	219		846	2.86
三次蓋ボルト	—	σ_m	—	229		564	1.46
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	320		846	1.64

(注 1) (ロ)-第 A.18 図参照

(注 2) σ_m：平均引張応力，σ_b：曲げ応力

(注 3) 断面⑫～⑲における引張応力に対する基準値は $3f_t$，せん断応力に対する基準値は $3f_s$，曲げ応力に対する基準値は $3f_b$ である。断面⑳～㉓に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は σ_m に対して $2S_m$，$\sigma_m+\sigma_b$ に対して $3S_m$ である。なお，蓋ボルトの $2S_m$ 及び $3S_m$ の値は，S_y より小さい。

A.5.1.4　許容応力との比較

一般の試験条件の熱的試験において輸送容器に発生する応力は，A.5.1.3 に示すように解析基準値を満足しており，健全性は維持される。

なお，三次蓋ボルトは三次蓋と異なる材質のため，運搬中に予想される-25℃～38℃の周囲温度の変化により軸力が変化する。仮に周囲温度-25℃で三次蓋ボルトを締め付けた後 38℃に置かれた場合は，ステンレス鋼製の三次蓋と合金鋼製の三次蓋ボルトの熱膨張係数の差により三次蓋ボルトの軸力が約 6%増加するものの余裕率が 0.06 以上あるため，また，周囲温度 38℃で締め付けた後-25℃に置かれた場合には，軸力が約 11%低下するもののOリングを締め付けるために必要な軸力を維持しているため，三次蓋ボルトにゆるみや破損を生じることはない。一方，一次蓋ボルトと二次蓋ボルトは，それぞれ一次蓋と二次蓋との温度の差及び熱膨張係数の差が小さいため，軸力の変化は三次蓋ボルトに比べ軽微であることから，ゆるみや破損を生じることはない。

また，三次蓋とキャスク本体のOリング取付位置での相対口開き変形量は 0.08mm であり，Oリングの初期締め付け代 [redacted] mm より小さく，密封性が損なわれることはない。

次に，疲労強度について評価する。評価は，密封境界を構成する部材で発生応力が比較的高く，複数容器間で共用するため使用計画回数が最も多い三次蓋及び三次蓋ボルトを代表として行う。設計疲労線図[1)]より，三次蓋の許容繰返し回数は 1×10^{11} 回，三次蓋ボルトの許容繰返し回数は 9.3×10^{2} 回である（許容繰返し回数の算出については A.10.7 に示す。）。一方で，使用期間中に想定される 1 組の三次蓋及び三次蓋ボルトの使用計画回数は 600 回であり，許容繰返し回数を十分下回っていることから，三次蓋及び三次蓋ボルトの疲労強度は十分である。なお，三次蓋及び三次蓋ボルトの使用回数の設定については以下のとおりとした。

輸送回数	: 10 回/基
三次蓋・三次蓋ボルト 1 組	
当たりの共用基数	: 10 基/組 注)
使用回数	: 3 回/輸送
裕度	: 2 倍

$N_c=10\times10\times3\times2=600$ 回

注）輸送容器の調達基数を基に保守的に設定した使用基数

A.5.2　水噴霧

本輸送容器の外側はステンレス鋼又は塗装を施した炭素鋼であり，水噴霧に対して吸水による脆化により密封性が損なわれることはなく，また，水溜による腐食が発生することがないため線量当量率の増加等を生じることはない。

A.5.3　自由落下

A.5.3.1　落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度

ここでは，A.1.2 のうち，一般の試験条件の自由落下試験において規則及び告示に規定された輸送物の健全性について評価を行う。本輸送物の最大総質量は 134.4 トンであるため，告示により，落下高さは 0.3m となる。輸送物が 0.3m 落下した場合，その落下エネルギーは容器本体の上下部に取り付けられた緩衝体の変形によって吸収される。

本項では，自由落下試験時の緩衝体の変形量及び衝撃加速度について評価し，輸送容器の健全性を評価する。

緩衝体の変形量及び衝撃加速度の解析条件を以下に述べる。

1. 解析モデル

(1) 解析する落下姿勢

輸送物の落下姿勢として次の 3 種類を考える。（(ロ)-第 A.19 図参照）

①垂直落下

②水平落下

③コーナー落下

(2) 解析方法

① 輸送物の落下エネルギーは緩衝体の弾塑性変形によって全て吸収されるものとする。この仮定では，緩衝体を除いた輸送物及び落下試験台を剛体とし，落下エネルギーの振動及び熱等への消費を無視することになるので，落下による緩衝体の変形を大きく評価し安全側の解析となる。

② 解析に用いる輸送物の質量に関する数値は，(イ)章 C.5 で示した通常輸送時における輸送物最大総質量 134.4 トンを用いる。

落下エネルギーは次式で与えられる。

$E_K = mgH$

ここで，

E_K ：輸送物の落下エネルギー（N･mm）

m ：輸送物最大総質量（kg）

g ：重力加速度（m/s^2）

H ：落下高さ（mm）

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.18 表に示す。

(ロ)-第 A.18 表　輸送物落下エネルギー計算条件及び計算結果

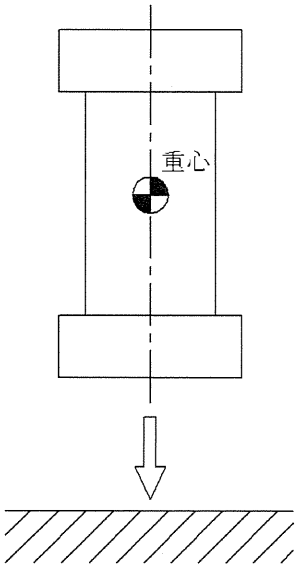
項目	輸送物最大総質量 : m(kg)	重力加速度 : g(m/s^2)	落下高さ : H(mm)	輸送物の落下エネルギー : E_K(N・mm)
数値	1.344×10^5	9.80665	300	3.955×10^8

③ 緩衝体の変形量と衝撃力の計算は CRUSH コード[16] を用いて行う。このコードにおいてはエネルギー吸収に寄与する部材は安全側に内部の木材のみとして，緩衝体の変形量を単軸変形法（UDM）により求めている。

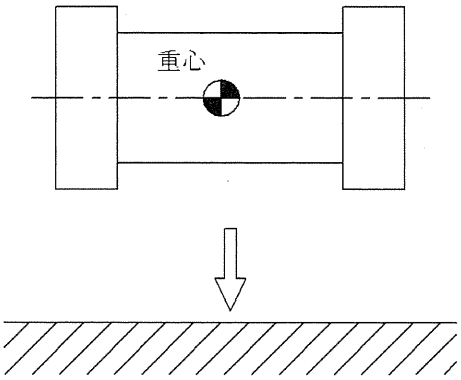
④ 衝撃力については解析と実験との比較検証により得られた誤差±20%を考慮した負荷係数 1.2[16] を③で求められる衝撃力に乗じる。

⑤ 木材は，木目（又は積層）方向と，木目（又は積層）と直角方向で圧潰特性が異なる。各々の方向における特性を(ロ)-第 A.20 図～(ロ)-第 A.22 図に示す。木目（又は積層）方向とある角度を持つ落下方向に対しては，異方性の影響を考慮する。

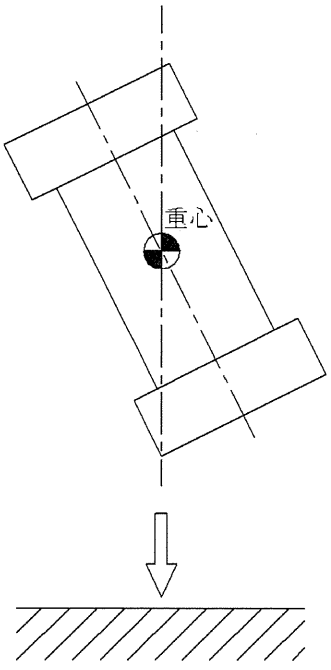
⑥ 水平落下においては，上部緩衝体と下部緩衝体の吸収エネルギー比を 50%ずつとして解析している。また，緩衝体の変形量は，上部緩衝体と下部緩衝体の変形が大きい方の値としている。



垂直落下
(頭部及び底部)



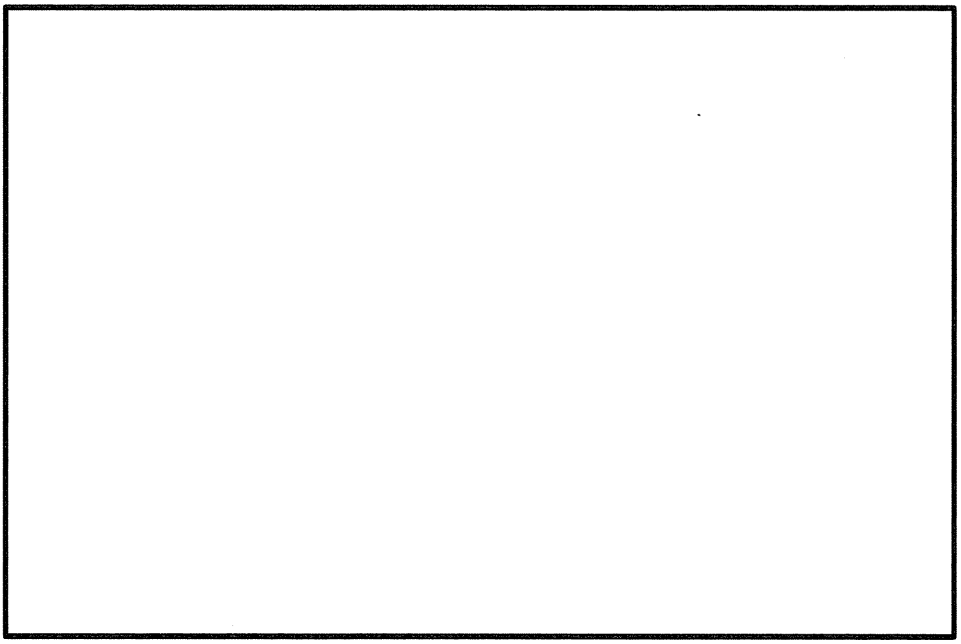
水平落下



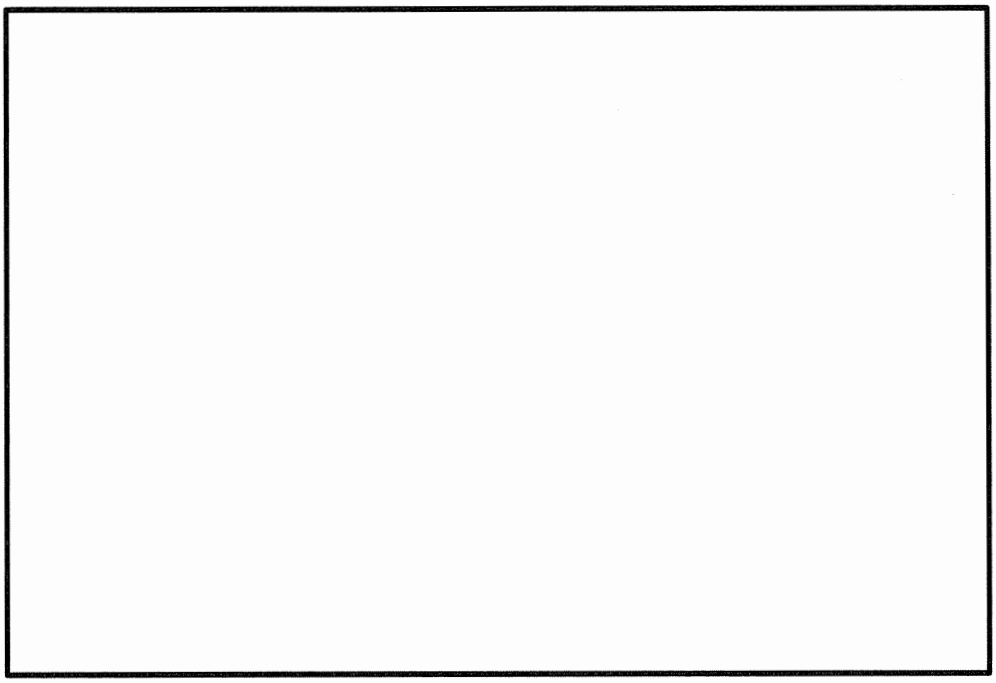
コーナー落下
(頭部及び底部)

(ロ)-第A.19図　0.3m落下試験での落下姿勢

(ロ)-第 A.20 図 [redacted] の圧潰特性



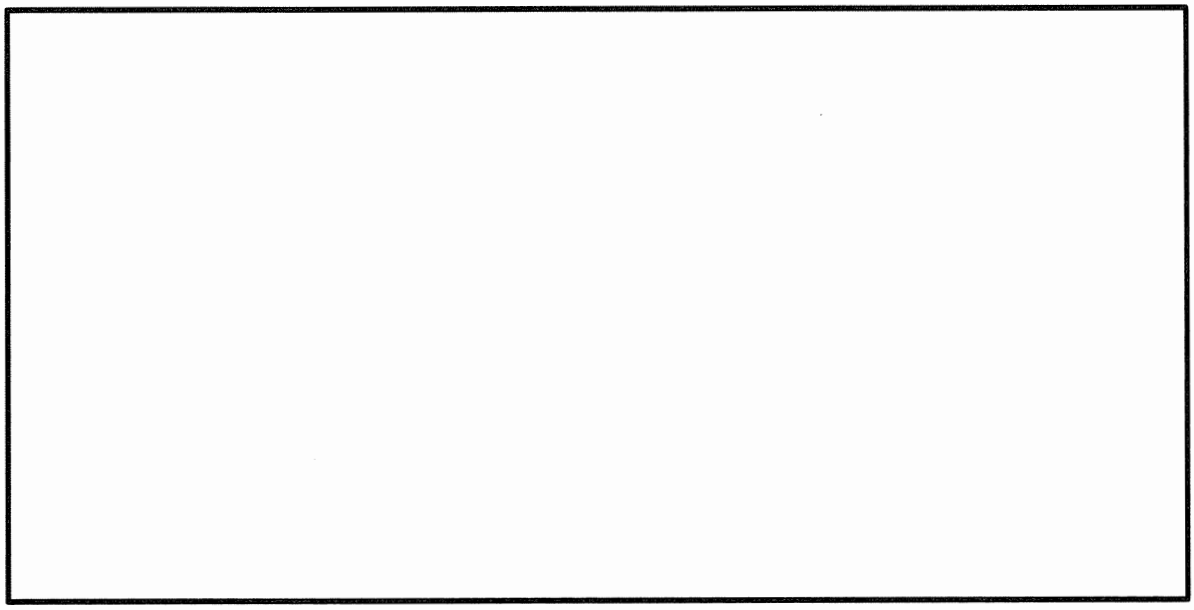
(ロ)-第 A.21 図 [redacted] の圧潰特性



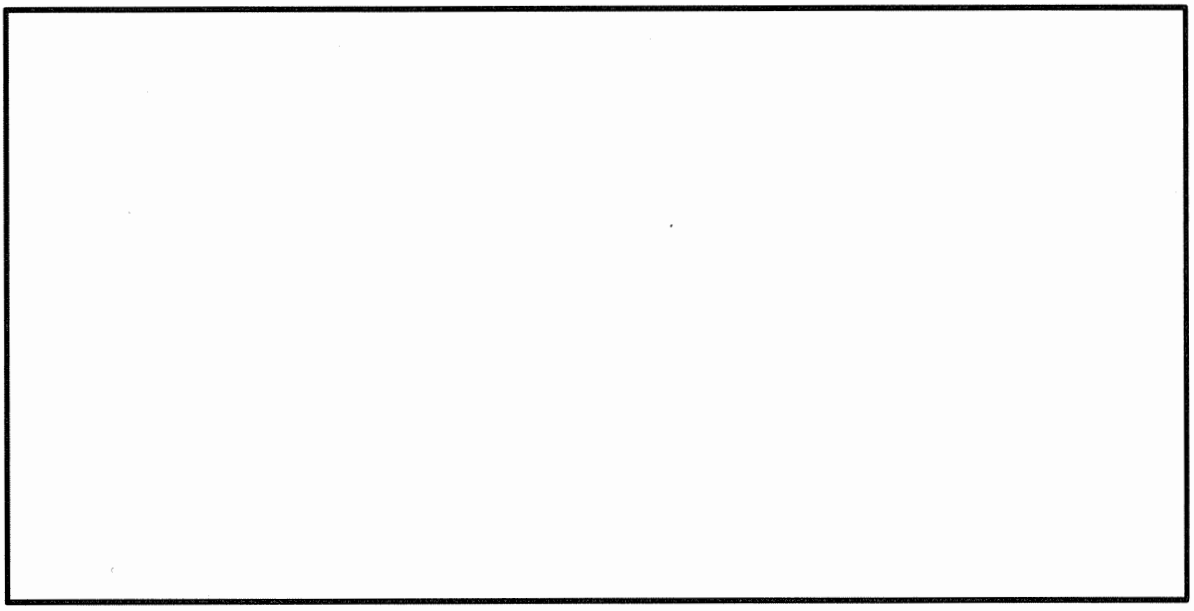
(ロ)-第 A.22 図 [redacted]の圧潰特性

(3) 各落下方向解析モデル

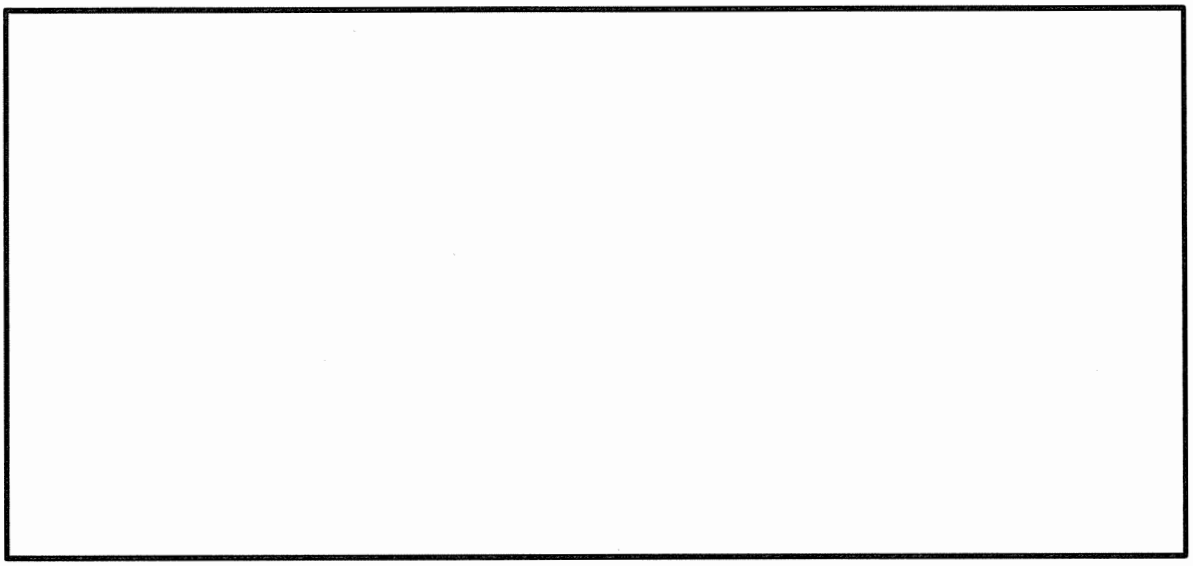
各落下方向の解析モデルを(ロ)-第 A.23 図～(ロ)-第 A.27 図に示す。斜線を施した部分,すなわち緩衝体内の木材が深さ δ だけ圧潰して落下エネルギーを吸収するものとする。



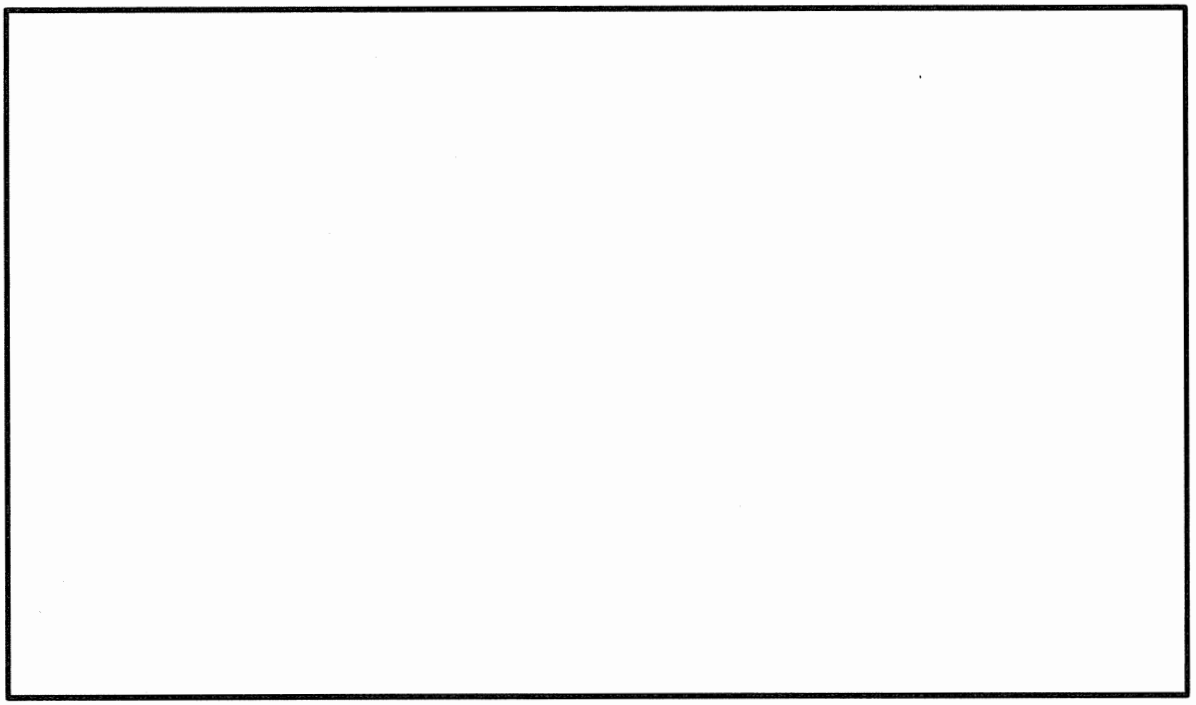
(ロ)-第 A.23 図　頭部垂直落下解析モデル



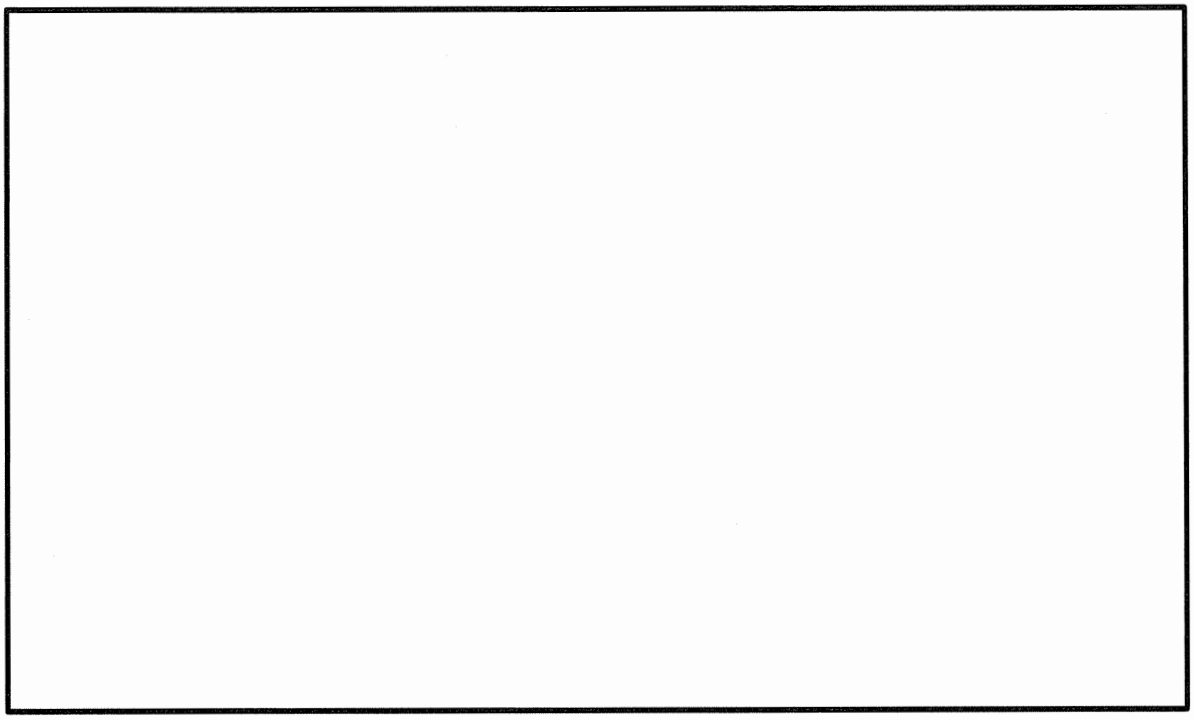
(ロ)-第 A.24 図　底部垂直落下解析モデル



(ロ)-第 A.25 図　水平落下解析モデル



(ロ)-第 A.26 図　頭部コーナー落下解析モデル



(ロ)-第 A.27 図　底部コーナー落下解析モデル

2. 落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度

1.に示した方法により求めた落下エネルギーE_Kに対応する変形量δと衝撃加速度Gを(ロ)-第A.19表に示す。

ここで，衝撃加速度Gは次式で求めている。

$$G = \frac{F}{m}$$

F　：解析で求めた衝撃力（N）

m　：輸送物最大総質量（kg）

(ロ)-第A.19表　自由落下試験時の衝撃加速度と緩衝体の変形量

落下姿勢		衝撃力 ：F(N)	衝撃加速度 G：(m/s^2)	設計加速度 (注1) (m/s^2)	緩衝体の変形量 ：δ(mm)	設計基準変形量 (注2) ：δmax(mm)
垂直落下	頭部	3.555×10^7	265	270	26	684
	底部	3.417×10^7	255	260	27	608
水平落下		2.686×10^7	200	210	42	374.5
コーナー落下	頭部	4.611×10^6	35	—	309	826
	底部	4.234×10^6	32	—	324	827

(注1)設計加速度とは，得られた衝撃加速度に裕度を考慮した値である。

(注2)設計基準変形量とは，それぞれの落下方向において衝撃力を急激に上昇させないための設計上の基準値である。

A.5.3.2　落下時の応力計算

0.3m 落下時の衝撃力に対して，容器本体は十分な強度で密封性を保持することを示す。また，胴内のバスケット及び燃料集合体が健全性を維持することを示す。

1. 垂直落下

(1) 容器本体

垂直落下時の衝撃力に対する容器本体の解析を有限要素法による ABAQUS コードにより行う。また，落下方向は頭部及び底部落下とする。

a. 解析モデル

A.5.1.3 と同様に，三次元有限要素を用いた(ロ)-第 A.16 図に示す三次元 180° 対称モデルを用いる。

b. 荷重条件及び境界条件

(a) 荷重条件

頭部垂直落下時に作用する荷重は次のとおりである。

・衝撃加速度（270m/s^2）による自重の慣性力が落下方向に働く。
・下部緩衝体の自重による慣性力が胴（底板）外面に働く。
・内部の収納物等（バスケット及び燃料集合体）の慣性力が一次蓋内面に働く。
・落下時の上部緩衝体木材反力が三次蓋外面に働く。

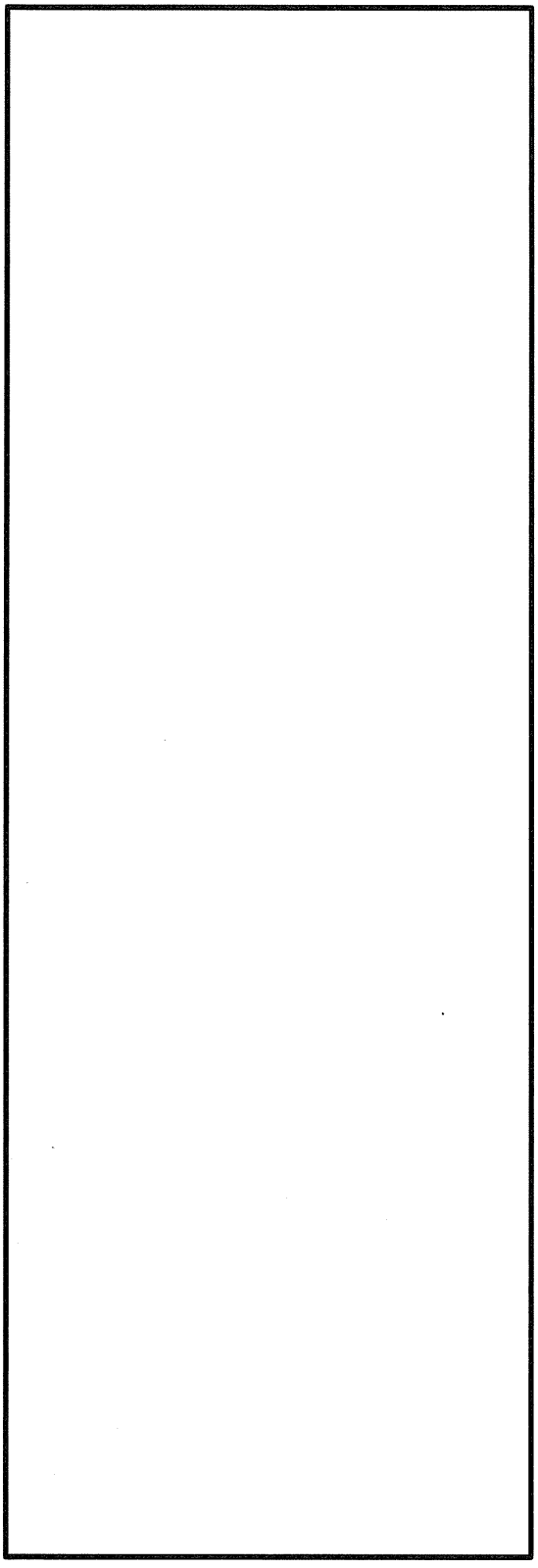
底部垂直落下時に作用する荷重は次のとおりである。

・衝撃加速度（260m/s^2）による自重の慣性力が落下方向に働く。
・上部緩衝体の自重による慣性力が三次蓋上面に働く。
・内部の収納物等（バスケット及び燃料集合体）の慣性力が胴（底板）内面に働く。

(b) 境界条件

境界条件は衝撃力を受ける面の節点の軸方向変位及び対称面上の節点の法線方向変位を拘束し，他は変位自由とした。

それぞれの落下方向に対する荷重条件及び境界条件を(ロ)-第 A.28 図及び(ロ)-第 A.29 図に示す。



F_{ab}：下部緩衝体の慣性力

P_i ：胴内圧（-0.101325 MPa G）

P_{ii}：一二次蓋間圧力（0.31 MPa G）

P_{iii}：二三次蓋間圧力（0.19 MPa G）

F_{iw}:内部の収納物等（バスケット及び燃料集合体）の慣性力

P_{sr}：側部中性子遮蔽材部（外筒側面）圧力（ MPa G）

P_{er}：側部中性子遮蔽材部（端板面）圧力（ MPa G）

P_{tr}：蓋部中性子遮蔽材部圧力（ MPa G）

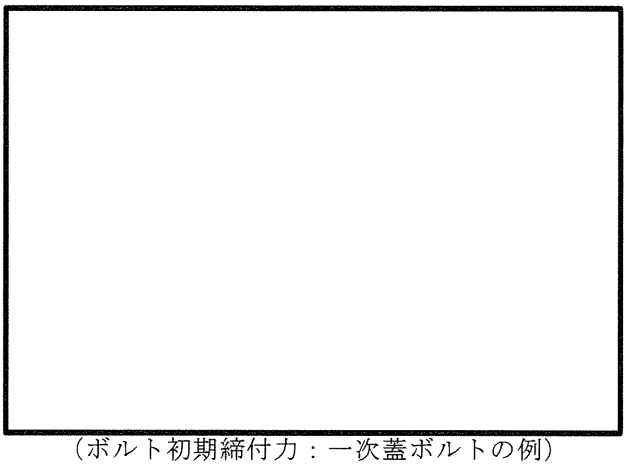
P_{br}：底部中性子遮蔽材部圧力（ MPa G）

F_{rw}：上部緩衝体木材反力

P_{bi}：一次蓋ボルト初期締付力（ MPa）

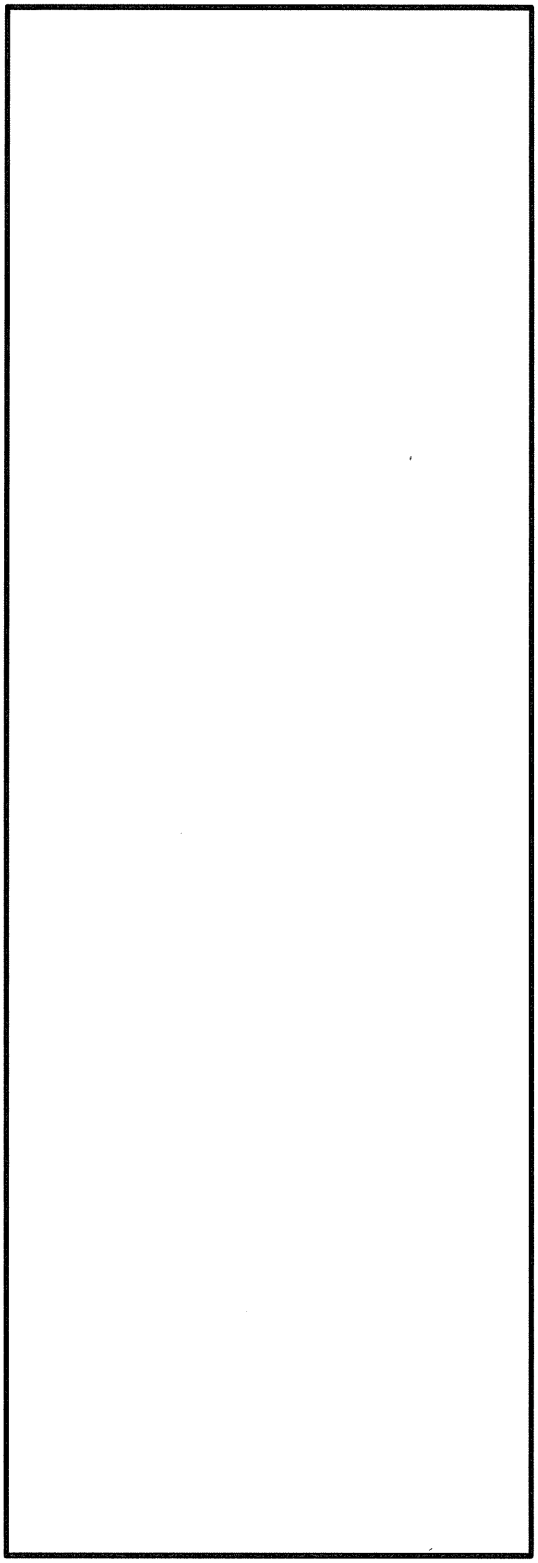
P_{bii}：二次蓋ボルト初期締付力（ MPa）

P_{biii}：三次蓋ボルト初期締付力（ MPa）



（ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例）

(ロ)-第 A.28 図　頭部 0.3m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件



F_{ab}：上部緩衝体の慣性力

P_i ：胴内圧（-0.101325 MPa G）

P_{ii} ：一二次蓋間圧力（0.31 MPa G）

P_{iii} ：二三次蓋間圧力（0.19 MPa G）

F_{iw}：内部の収納物等（バスケット及び燃料集合体）の慣性力

P_{sr}：側部中性子遮蔽材部（外筒側面）圧力（□MPa G）

P_{er}：側部中性子遮蔽材部（端板面）圧力（□MPa G）

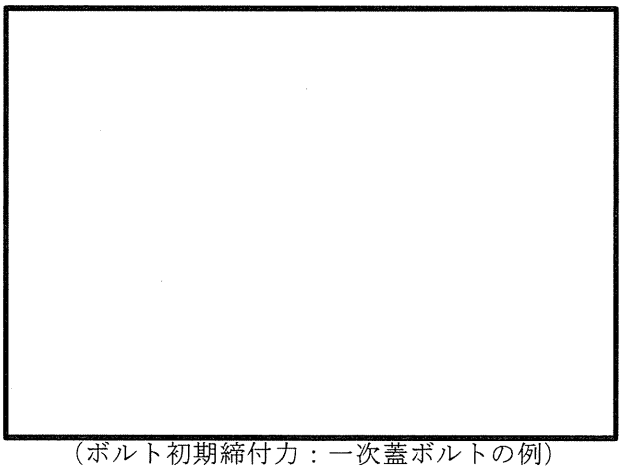
P_{tr}：蓋部中性子遮蔽材部圧力（□MPa G）

P_{br}：底部中性子遮蔽材部圧力（□MPa G）

P_{bi} ：一次蓋ボルト初期締付力（□MPa）

P_{bii} ：二次蓋ボルト初期締付力（□MPa）

P_{biii} ：三次蓋ボルト初期締付力（□MPa）



（ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例）

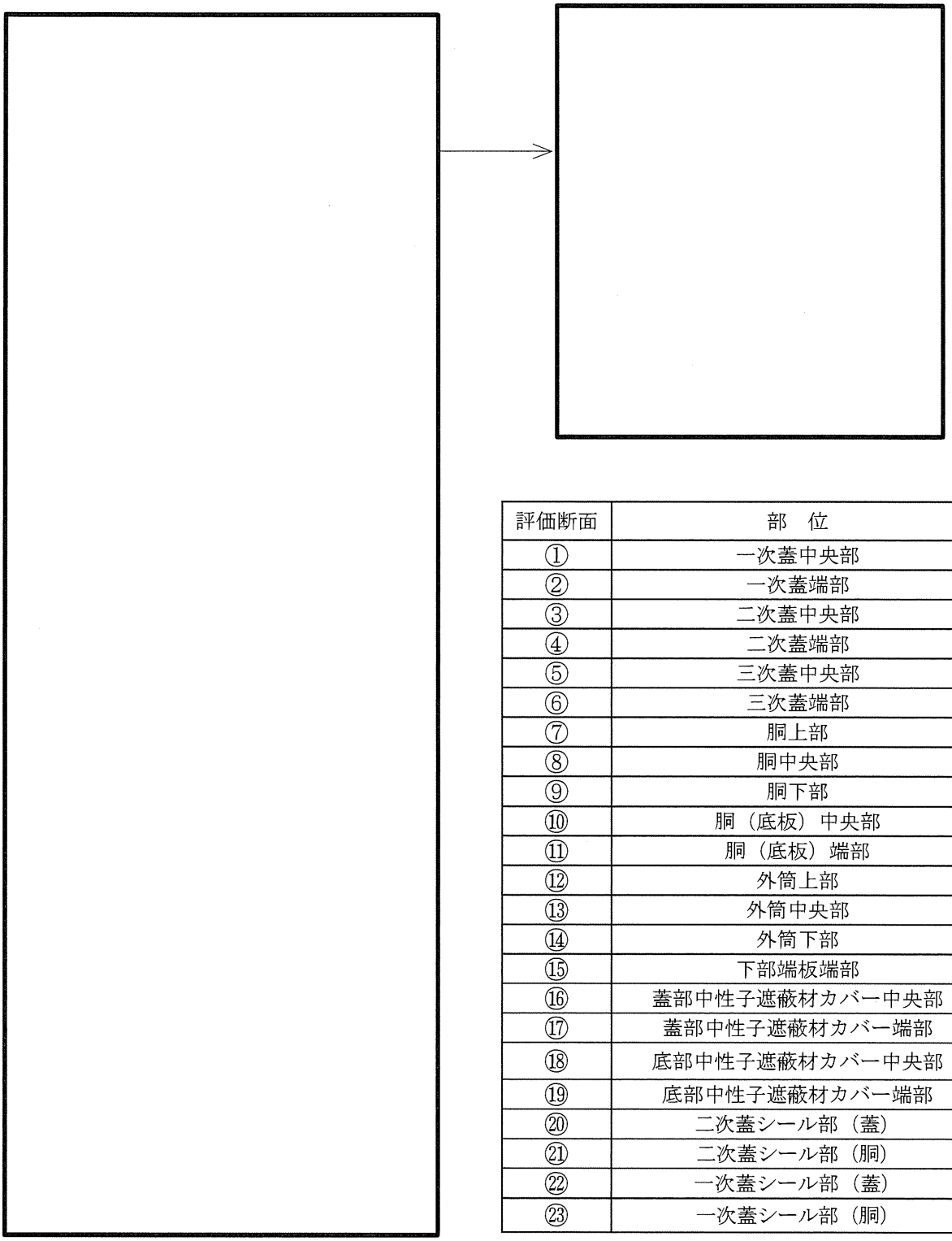
(ロ)-第 A.29 図　底部 0.3m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件

c. 解析結果

主要な位置（(ロ)-第 A.30 図参照）に対する頭部垂直落下時の一次応力の評価結果を(ロ)-第 A.20 表に，（一次＋二次）応力及び蓋ボルトの応力の評価結果を(ロ)-第 A.21 表に，また，底部垂直落下時の一次応力の評価結果を(ロ)-第 A.22 表に，（一次＋二次）応力及び蓋ボルトの評価結果を(ロ)-第 A.23 表に示す。

それぞれの表に示すように，全ての評価位置において A.1.2 に示す解析基準を満足する。

また，三次蓋とキャスク本体のＯリング取り付け位置での相対口開き変形量は 0.01mm 以下であり，Ｏリングの初期締め付け代[redacted]mm より小さく，密封性が損なわれることはない。



評価断面	部　位
①	一次蓋中央部
②	一次蓋端部
③	二次蓋中央部
④	二次蓋端部
⑤	三次蓋中央部
⑥	三次蓋端部
⑦	胴上部
⑧	胴中央部
⑨	胴下部
⑩	胴（底板）中央部
⑪	胴（底板）端部
⑫	外筒上部
⑬	外筒中央部
⑭	外筒下部
⑮	下部端板端部
⑯	蓋部中性子遮蔽材カバー中央部
⑰	蓋部中性子遮蔽材カバー端部
⑱	底部中性子遮蔽材カバー中央部
⑲	底部中性子遮蔽材カバー端部
⑳	二次蓋シール部（蓋）
㉑	二次蓋シール部（胴）
㉒	一次蓋シール部（蓋）
㉓	一次蓋シール部（胴）

(注)評価断面⑨-2は下部トラニオンを取り付けていない断面を含む。

(ロ)-第A.30図　自由落下時の応力評価位置

(ロ)-第 A.20 表　頭部 0.3m 垂直落下時の容器本体に対する一次応力の評価（1/2）

部位	断面 No.（注 1）	応力分類（注 2）又は応力の種類	表面	応力強さ又は応力 (MPa)	温度 (℃)	解析基準値 (MPa)（注 3）	余裕率
一次蓋	①	P_m	—	7		124	16.7
		P_L+P_b	内	64		186	1.90
			外	65			1.86
	②	P_L	—	33		186	4.63
二次蓋	③	P_m	—	5		124	23.8
		P_L+P_b	内	30		186	5.20
			外	34			4.47
	④	P_L	—	6		186	30.0
三次蓋	⑤	P_m	—	7		137	18.5
		P_L+P_b	内	26		205	6.88
			外	16			11.8
	⑥	P_L	—	36		205	4.69
胴	⑦	P_L	—	43		186	3.32
	⑧	P_m	—	9		123	12.6
		P_L+P_b	内	9		184	19.4
			外	9			19.4
	⑨-1	P_L	—	5		184	35.8
	⑨-2	P_L	—	6			29.6
胴（底板）	⑩	P_m	—	1		122	121
		P_L+P_b	内	6		183	29.5
			外	6			29.5
	⑪	P_L	—	5		183	35.6
外筒	⑫	引張	—	7		156	21.2
		圧縮	—	24		156	5.50
		せん断	—	14		90	5.42
		曲げ	—	45		156	2.46
	⑬	引張	—	39		156	3.00
		圧縮	—	4		156	38.0
		せん断	—	1		90	89.0
		曲げ	—	1		156	155
	⑭	引張	—	7		156	21.2
		圧縮	—	2		156	77.0
		せん断	—	9		90	9.00
		曲げ	—	37		156	3.21

(注 1)(ロ)-第 A.30 図参照

(注 2)P_m：一次一般膜応力，P_L：一次局部膜応力，P_b：一次曲げ応力

(注 3)断面①～⑪の P_m に対する基準値は S_m，P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は $1.5S_m$ である。断面⑫～⑭における引張応力に対する基準値は f_t，圧縮応力に対する基準値は f_c，せん断応力に対する基準値は f_s，曲げ応力に対する基準値は f_b である。

(ロ)-第 A.20 表　頭部 0.3m 垂直落下時の容器本体に対する一次応力の評価 (2/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力分類 (注 2) 又は 応力の種類	表面	応力強さ又は応力 (MPa)	温度 (℃)	解析基準値 (MPa) (注 3)	余裕率
下部端板	⑮	引張	—	2		136	67.0
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	4		78	18.5
		曲げ	—	12		136	10.3
蓋部中性子遮蔽材カバー	⑯	引張	—	7		157	21.4
		圧縮	—	1		157	156
		せん断	—	8		90	10.2
		曲げ	—	18		157	7.72
	⑰	引張	—	17		157	8.23
		圧縮	—	-		157	-
		せん断	—	10		90	8.00
		曲げ	—	70		157	1.24
底部中性子遮蔽材カバー	⑱	引張	—	1		136	135
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	2		78	38.0
		曲げ	—	4		136	33.0
	⑲	引張	—	2		136	67.0
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	3		78	25.0
		曲げ	—	16		136	7.50
二次蓋シール部	⑳	P_L	—	16		186	10.6
	㉑	P_L	—	31		185	4.96
一次蓋シール部	㉒	P_L	—	48		185	2.85
	㉓	P_L	—	14		185	12.2

(注 1) (ロ)-第 A.30 図参照

(注 2) P_L : 一次局部膜応力

(注 3) 断面⑮～⑲における引張応力に対する基準値は f_t, 圧縮応力に対する基準値は f_c, せん断応力に対する基準値は f_s, 曲げ応力に対する基準値は f_b である。断面⑳～㉓の P_L に対する基準値は S_y である。

(ロ)-第 A.21 表　頭部 0.3m 垂直落下時の容器本体に対する（一次＋二次）応力及び蓋ボルトの評価（1/2）

部位	断面 No.（注 1）	応力の種類	表面	応力強さ又は応力 (MPa)	温度 (℃)	解析基準値 (MPa)（注 2）	余裕率
一次蓋	①	—	内	66		372	4.63
			外	63			4.90
	②	—	内	48		372	6.75
			外	49			6.59
二次蓋	③	—	内	30		372	11.4
			外	34			9.94
	④	—	内	18		372	19.6
			外	21			16.7
三次蓋	⑤	—	内	26		411	14.8
			外	22			17.6
	⑥	—	内	85		411	3.83
			外	36			10.4
胴	⑦	—	内	76		372	3.89
			外	37			9.05
	⑧	—	内	22		369	15.7
			外	9			40.0
	⑨-1	—	内	9		369	40.0
			外	17			20.7
	⑨-2	—	内	24			14.3
			外	23			15.0
胴（底板）	⑩	—	内	21		366	16.4
			外	4			90.5
	⑪	—	内	21		366	16.4
			外	23			14.9

(注 1)(ロ)-第 A.30 図参照

(注 2)断面①～⑪における基準値は $3S_m$ である。

(ロ)-第A.21表　頭部0.3m垂直落下時の容器本体に対する（一次＋二次）応力及び蓋ボルトの評価（2/2）

部位	断面No.（注1）	応力の種類（注2）	表面	応力強さ又は応力（MPa）	温度（℃）	解析基準値（MPa）（注3）	余裕率
外筒	⑫	引張	—	28		470	15.7
		せん断	—	14		271	18.3
		曲げ	—	14		470	32.5
	⑬	引張	—	44		470	9.68
		せん断	—	1		271	270
		曲げ	—	3		470	155
	⑭	引張	—	82		470	4.73
		せん断	—	18		271	14.0
		曲げ	—	85		470	4.52
下部端板	⑮	引張	—	48		410	7.54
		せん断	—	24		236	8.83
		曲げ	—	107		410	2.83
蓋部中性子遮蔽材カバー	⑯	引張	—	8		472	58.0
		せん断	—	11		272	23.7
		曲げ	—	23		472	19.5
	⑰	引張	—	11		472	41.9
		せん断	—	8		272	33.0
		曲げ	—	64		472	6.37
底部中性子遮蔽材カバー	⑱	引張	—	35		410	10.7
		せん断	—	2		236	117
		曲げ	—	6		410	67.3
	⑲	引張	—	29		410	13.1
		せん断	—	3		236	77.6
		曲げ	—	9		410	44.5
二次蓋シール部	⑳	—	内	24		186	6.75
			外	21			7.85
	㉑	—	内	43		185	3.30
			外	38			3.86
一次蓋シール部	㉒	—	内	25		185	6.40
			外	96			0.92
	㉓	—	内	14		185	12.2
			外	14			12.2
一次蓋ボルト	—	σ_m	—	289		562	0.94
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	323		843	1.60
二次蓋ボルト	—	σ_m	—	212		564	1.66
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	323		846	1.61
三次蓋ボルト	—	σ_m	—	204		564	1.76
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	216		846	2.91

(注1)(ロ)-第A.30図参照

(注2) σ_m：平均引張応力，σ_b：曲げ応力

(注3)断面⑫～⑲における引張応力に対する基準値は$3f_t$，せん断応力に対する基準値は$3f_s$，曲げ応力に対する基準値は$3f_b$である。断面⑳～㉓に対する基準値はS_yである。蓋ボルトの基準値はσ_mに対して$2S_m$，$\sigma_m+\sigma_b$に対して$3S_m$である。なお，蓋ボルトの$2S_m$及び$3S_m$の値は，S_yより小さい。

(ロ)-第A.22表　底部0.3m垂直落下時の容器本体に対する一次応力の評価（1/2）

部位	断面No.（注1）	応力分類（注2）又は応力の種類	表面	応力強さ又は応力（MPa）	温度（℃）	解析基準値（MPa）（注3）	余裕率
一次蓋	①	P_m	—	2		124	61.0
		P_L+P_b	内	16		186	10.6
			外	15			11.4
	②	P_L	—	12		186	14.5
二次蓋	③	P_m	—	1		124	123
		P_L+P_b	内	5		186	36.2
			外	4			45.5
	④	P_L	—	5		186	36.2
三次蓋	⑤	P_m	—	8		137	16.1
		P_L+P_b	内	39		205	4.25
			外	35			4.85
	⑥	P_L	—	28		205	6.32
胴	⑦	P_L	—	6		186	30.0
	⑧	P_m	—	11		123	10.1
		P_L+P_b	内	11		184	15.7
			外	11			15.7
	⑨-1	P_L	—	16		184	10.5
	⑨-2	P_L	—	23			7.00
胴（底板）	⑩	P_m	—	5		122	23.4
		P_L+P_b	内	24		183	6.62
			外	30			5.10
	⑪	P_L	—	11		183	15.6
外筒	⑫	引張	—	12		156	12.0
		圧縮	—	-		156	-
		せん断	—	8		90	10.2
		曲げ	—	39		156	3.00
	⑬	引張	—	37		156	3.21
		圧縮	—	1		156	155
		せん断	—	1		90	89.0
		曲げ	—	1		156	155
	⑭	引張	—	12		156	12.0
		圧縮	—	5		156	30.2
		せん断	—	7		90	11.8
		曲げ	—	27		156	4.77

(注1)(ロ)-第A.30図参照

(注2)P_m：一次一般膜応力，P_L：一次局部膜応力，P_b：一次曲げ応力

(注3)断面①～⑪のP_mに対する基準値はS_m，P_L及びP_L+P_bに対する基準値は$1.5S_m$である。断面⑫～⑭における引張応力に対する基準値はf_t，圧縮応力に対する基準値f_c，せん断応力に対する基準値はf_s，曲げ応力に対する基準値はf_bである。

(ロ)-第 A.22 表　底部 0.3m 垂直落下時の容器本体に対する一次応力の評価 (2/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力分類 (注 2) 又は応力の種類	表面	応力強さ又は応力 (MPa)	温度(℃)	解析基準値 (MPa) (注 3)	余裕率
下部端板	⑮	引張	—	7		136	18.4
		圧縮	—	2		136	67.0
		せん断	—	11		78	6.09
		曲げ	—	43		136	2.16
蓋部中性子遮蔽材カバー	⑯	引張	—	-		157	-
		圧縮	—	2		157	77.5
		せん断	—	2		90	44.0
		曲げ	—	4		157	38.2
	⑰	引張	—	-		157	-
		圧縮	—	3		157	51.3
		せん断	—	2		90	44.0
		曲げ	—	9		157	16.4
底部中性子遮蔽材カバー	⑱	引張	—	13		136	9.46
		圧縮	—	1		136	135
		せん断	—	6		78	12.0
		曲げ	—	20		136	5.80
	⑲	引張	—	14		136	8.71
		圧縮	—	2		136	67.0
		せん断	—	8		78	8.75
		曲げ	—	57		136	1.38
二次蓋シール部	⑳	P_L	—	12		186	14.5
	㉑	P_L	—	14		185	12.2
一次蓋シール部	㉒	P_L	—	36		185	4.13
	㉓	P_L	—	25		185	6.40

(注 1) (ロ)-第 A.30 図参照

(注 2) P_L：一次局部膜応力

(注 3) 断面⑮～⑲における引張応力に対する基準値は f_t，圧縮応力に対する基準値は f_c，せん断応力に対する基準値は f_s，曲げ応力に対する基準値は f_b である。断面⑳～㉓の P_L に対する基準値は S_y である。

(ロ)-第A.23表　底部0.3m垂直落下時の容器本体に対する（一次＋二次）応力及び蓋ボルトの評価（1/2）

部位	断面No.（注1）	応力の種類	表面	応力強さ又は応力（MPa）	温度（℃）	解析基準値（MPa）（注2）	余裕率
一次蓋	①	—	内	15		372	23.8
			外	17			20.8
	②	—	内	22		372	15.9
			外	14			25.5
二次蓋	③	—	内	5		372	73.4
			外	4			92.0
	④	—	内	6		372	61.0
			外	8			45.5
三次蓋	⑤	—	内	37		411	10.1
			外	37			10.1
	⑥	—	内	37		411	10.1
			外	55			6.47
胴	⑦	—	内	26		372	13.3
			外	15			23.8
	⑧	—	内	24		369	14.3
			外	11			32.5
	⑨-1	—	内	13		369	27.3
			外	29			11.7
	⑨-2	—	内	21			16.5
			外	44			7.38
胴（底板）	⑩	—	内	49		366	6.46
			外	34			9.76
	⑪	—	内	20		366	17.3
			外	34			9.76

(注1)(ロ)-第A.30図参照

(注2)断面①～⑪における基準値は$3S_m$である。

(ロ)-第 A.23 表　底部 0.3m 垂直落下時の容器本体に対する（一次＋二次）応力及び蓋ボルトの評価（2/2）

部位	断面 No.（注 1）	応力の種類（注 2）	表面	応力強さ又は応力 (MPa)	温度(℃)	解析基準値 (MPa)（注 3）	余裕率
外筒	⑫	引張	—	51		470	8.21
		せん断	—	7		271	37.7
		曲げ	—	19		470	23.7
	⑬	引張	—	44		470	9.68
		せん断	—	1		271	270
		曲げ	—	3		470	155
	⑭	引張	—	87		470	4.40
		せん断	—	15		271	17.0
		曲げ	—	49		470	8.59
下部端板	⑮	引張	—	40		410	9.25
		せん断	—	11		236	20.4
		曲げ	—	58		410	6.06
蓋部中性子遮蔽材カバー	⑯	引張	—	-		472	-
		せん断	—	4		272	67.0
		曲げ	—	9		472	51.4
	⑰	引張	—	3		472	156
		せん断	—	2		272	135
		曲げ	—	11		472	41.9
底部中性子遮蔽材カバー	⑱	引張	—	33		410	11.4
		せん断	—	8		236	28.5
		曲げ	—	26		410	14.7
	⑲	引張	—	15		410	26.3
		せん断	—	9		236	25.2
		曲げ	—	61		410	5.72
二次蓋シール部	⑳	—	内	22		186	7.45
			外	9			19.6
	㉑	—	内	21		185	7.80
			外	18			9.27
一次蓋シール部	㉒	—	内	28		185	5.60
			外	63			1.93
	㉓	—	内	25		185	6.40
			外	24			6.70
一次蓋ボルト	—	σ_m	—	249		562	1.25
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	250		843	2.37
二次蓋ボルト	—	σ_m	—	196		564	1.87
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	202		846	3.18
三次蓋ボルト	—	σ_m	—	234		564	1.41
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	326		846	1.59

(注 1)(ロ)-第 A.30 図参照

(注 2) σ_m：平均引張応力，σ_b：曲げ応力

(注 3)断面⑫～⑲における引張応力に対する基準値は $3f_t$，せん断応力に対する基準値は $3f_s$，曲げ応力に対する基準値は $3f_b$ である。断面⑳～㉓に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は σ_m に対して $2S_m$，$\sigma_m+\sigma_b$ に対して $3S_m$ である。なお，蓋ボルトの $2S_m$ 及び $3S_m$ の値は，S_y より小さい。

(2) バスケット

バスケットは，頭部側と底部側で同様な構造である(ロ)-第 A.31 図参照)。設計加速度は頭部落下の方が大きいため，頭部落下の値を用いて評価する。

垂直落下時に最下段のバスケットプレートには，それより上部にあるバスケットプレートを含む自重による慣性力が作用し，圧縮による膜応力 σ_c (MPa) が生じる。

$$\sigma_c = \frac{W_b \cdot G_V}{A_1}$$

ここで，

W_b ：バスケットプレート，バスケットサポート，中性子吸収材の合計質量(kg)

G_V ：垂直落下時の衝撃加速度 (m/s^2)

A_1 ：バスケットプレートと胴の接触面積 (mm^2)

$$A_1 = (b_{A1} - b_{A2}) L_1 \cdot n_A + (b_{B1} - b_{B2}) L_1 \cdot n_B$$

b_{A1} ：バスケットプレート A 幅 1 (mm)

b_{A2} ：バスケットプレート A 幅 2 (mm)

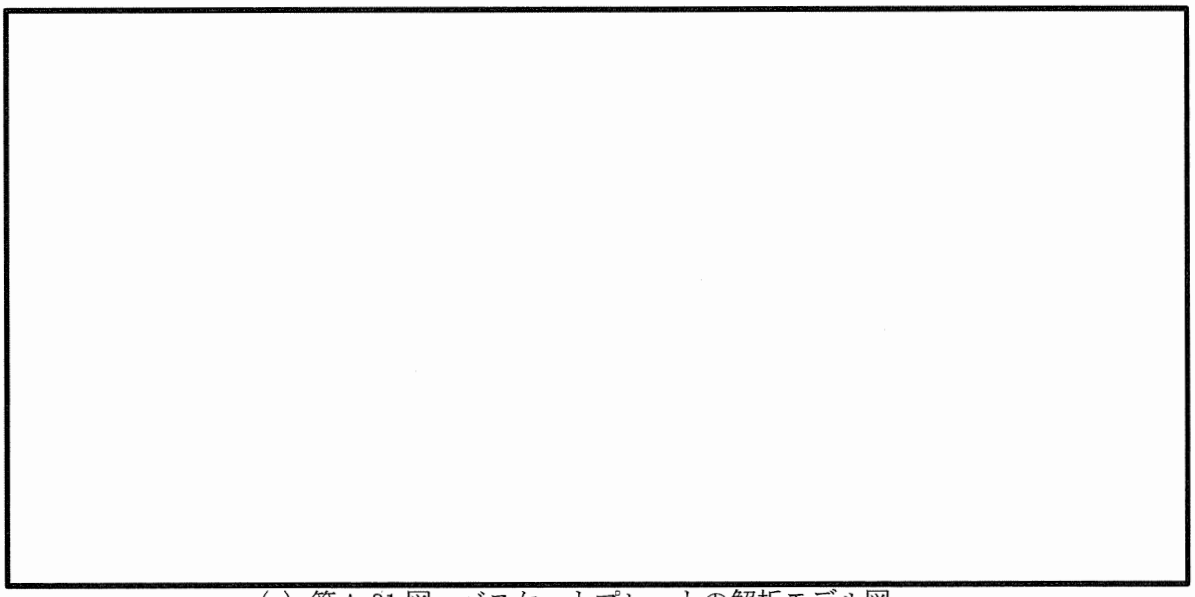
b_{B1} ：バスケットプレート B 幅 1 (mm)

b_{B2} ：バスケットプレート B 幅 2 (mm)

L_1 ：バスケットプレート長さ (mm)

n_A ：胴に接触するバスケットプレート A L_1 部の個数 (-)

n_B ：胴に接触するバスケットプレート B L_1 部の個数 (-)



(ロ)-第 A.31 図　バスケットプレートの解析モデル図

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.24 表に示す。表に示すように，評価位置において A.1.2 に示す解析基準値を満足する。なお，バスケットに生じる応力は，設計降伏点 (56MPa) より低いので，バスケットは塑性変形しない。

(ロ)-第A.24表　バスケット格子の応力計算条件及び計算結果

項目	バスケット合計質量 : W_b(kg)	垂直落下時の衝撃加速度 : G_V(m/s^2)
数値	5600	270

項目	バスケットプレートのタイプ	バスケットプレート全厚さ : b_1(mm)	バスケットプレート内幅 : b_2(mm)	バスケットプレート長さ : L_1(mm)	胴に接触するバスケットプレート L_1 部の個数 : n(-)	バスケットプレートと胴の接触面積 : A_1(mm^2)
数値	A					
	B					

項目	バスケットプレートのタイプ	圧縮応力 : σ_c(MPa)	基準値 : S_m(MPa)	余裕率
数値	A	7	36	4.14
	B	7		4.14

次に，一次圧縮応力について検討する。

バスケットプレートの有効細長比λは，次式で与えられる。

$$\lambda = \frac{\ell_k}{i}$$

ここで，

ℓ_k ：座屈長さ（一端支持，他端固定）（mm）

i　：座屈軸についての断面二次半径（mm）

$$i = \sqrt{\frac{I}{A_2}}$$

I　：断面二次モーメント（mm^4）

$$I = \frac{1}{12}\left(b_1^3 - b_2^3\right)L$$

A_2 ：バスケットプレートの断面積（mm^2）

$$A_2 = (b_1 - b_2)L$$

L　：バスケットプレート長さ（mm）

また，バスケットプレートの限界細長比Λは，次式により与えられる。

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6F}}$$

ここで，

E ：縦弾性係数（MPa）

F ：設計降伏点又は設計引張強さの 0.7 倍の値のいずれか小さい方の値（MPa）

バスケットプレートの有効細長比は，限界細長比より小さいので，許容圧縮応力 f_c は，次式で与えられる。

$$f_c = \left\{1 - 0.4\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2\right\}\frac{F}{\nu}$$

ここで，

ν ： $\nu = 1.5 + \frac{2}{3}\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2$

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.25 表に示す。なお，許容圧縮応力は，バスケットプレート B の方が小さいため，バスケットプレート B を評価対象とする。

(ロ)-第 A.25 表　バスケットプレートの一次圧縮応力の計算条件及び計算結果

項目	バスケットプレート長さ：L（mm）	バスケットプレートの断面積：A_2（mm^2）	バスケットプレートの縦弾性係数：E（MPa）
数値	[redacted]		6.94×10^4

項目	座屈長さ：ℓ_k（mm）	設計降伏点又は設計引張強さの 0.7 倍の値のいずれか小さい方の値：F（MPa）	圧縮応力：σ_c（MPa）	許容圧縮応力：f_c（MPa）	余裕率
数値	[redacted]		7	37	4.28

(3) 燃料集合体

垂直落下時に燃料被覆管に生じる応力は，落下衝撃による圧縮応力σ_c（MPa）と内圧による各方向応力σ_z，σ_r，σ_θ（MPa）である。垂直落下時において最大応力強さS（MPa）は，燃料被覆管内面に生じるので燃料被覆管内面のみ評価する。

a. 落下衝撃により生じる圧縮応力

落下衝撃により生じる圧縮応力は，次式で与えられる。

$$\sigma_c = -\frac{WG_V}{A}$$

ここで，

W　：燃料被覆管最下端における質量（kg）

G_V　：垂直落下時の衝撃加速度（m/s^2）

A　：燃料被覆管の断面積（mm^2）

$$A = \frac{\pi}{4}\left(d_o^2 - d_i^2\right)$$

d_o　：燃料被覆管の外径（mm）

d_i　：燃料被覆管の内径（mm）

b. 内圧による各方向応力

内圧P_oにより生じる各方向応力は，以下の式で与えられる。

$$\sigma_z = \frac{1}{K^2 - 1}P_o$$

$$\sigma_r = -\frac{\frac{K^2}{R^2} - 1}{K^2 - 1}P_o$$

$$\sigma_\theta = \frac{\frac{K^2}{R^2} + 1}{K^2 - 1}P_o$$

ここで，

σ_z　：軸方向応力（MPa）

σ_r　：半径方向応力（MPa）

σ_θ　：周方向応力（MPa）

$$K = \frac{b}{a}$$

b　：燃料被覆管外半径（mm）

$$b = \frac{d_o}{2}$$

a　：燃料被覆管内半径（mm）

$a=\frac{d_i}{2}$

P_o　：内圧（MPa）

$R=\frac{r}{a}$（内面においては R＝1）

r　：評価位置（a≦r≦b）

c.　応力強さ

垂直落下時に生じる圧縮応力及び内圧により生じる各方向応力から求まる応力強さは，以下の式で与えられる。

$$S=\mathrm{Max}\{|\sigma_{rL}-\sigma_{\theta L}|,\ |\sigma_{\theta L}-\sigma_{zL}|,\ |\sigma_{zL}-\sigma_{rL}|\}$$

ここで，

$\sigma_{rL}=\sigma_r$

$\sigma_{\theta L}=\sigma_\theta$

$\sigma_{zL}=\sigma_c+\sigma_z$

燃料被覆管材料（ジルカロイ-4）の□℃における照射後の降伏応力 σ_y は，589MPa[4] であるので，余裕率 MS は，次式で与えられる。

$$MS=\frac{\sigma_y}{S}-1$$

以上の式を用いて燃料に対して計算した結果を(ロ)-第 A.26 表に示す。燃料被覆管に発生する応力強さは基準値以下である。

(ロ)-第 A.26 表　垂直落下時の燃料被覆管の強度評価結果

燃料タイプ	17×17燃料 (48GWd/t, 39GWd/t)	
	A型	B型
燃料被覆管最下端における質量：W（kg）	□	
衝撃加速度：G_V（m/s^2）	270	270
燃料被覆管外径：d_o（mm）	□	
燃料被覆管内径：d_i（mm）		
内圧：P_o（MPa）		
応力強さ：S（MPa）	105	102
降伏応力：σ_y（MPa）	589	589
余裕率：MS	4.60	4.77

2. 水平落下

(1) 容器本体

水平落下時の衝撃力に対する容器本体の解析を有限要素法による ABAQUS コードにより行う。

a. 解析モデル

A.5.1.3 と同様に，三次元有限要素を用いた(ロ)-第 A.16 図に示す三次元 180° 対称モデルを用いる。

b. 荷重条件及び境界条件

(a) 荷重条件

水平落下時に作用する荷重は次のとおりである。

・衝撃加速度（210m/s^2）による自重の慣性力が落下方向に働く。

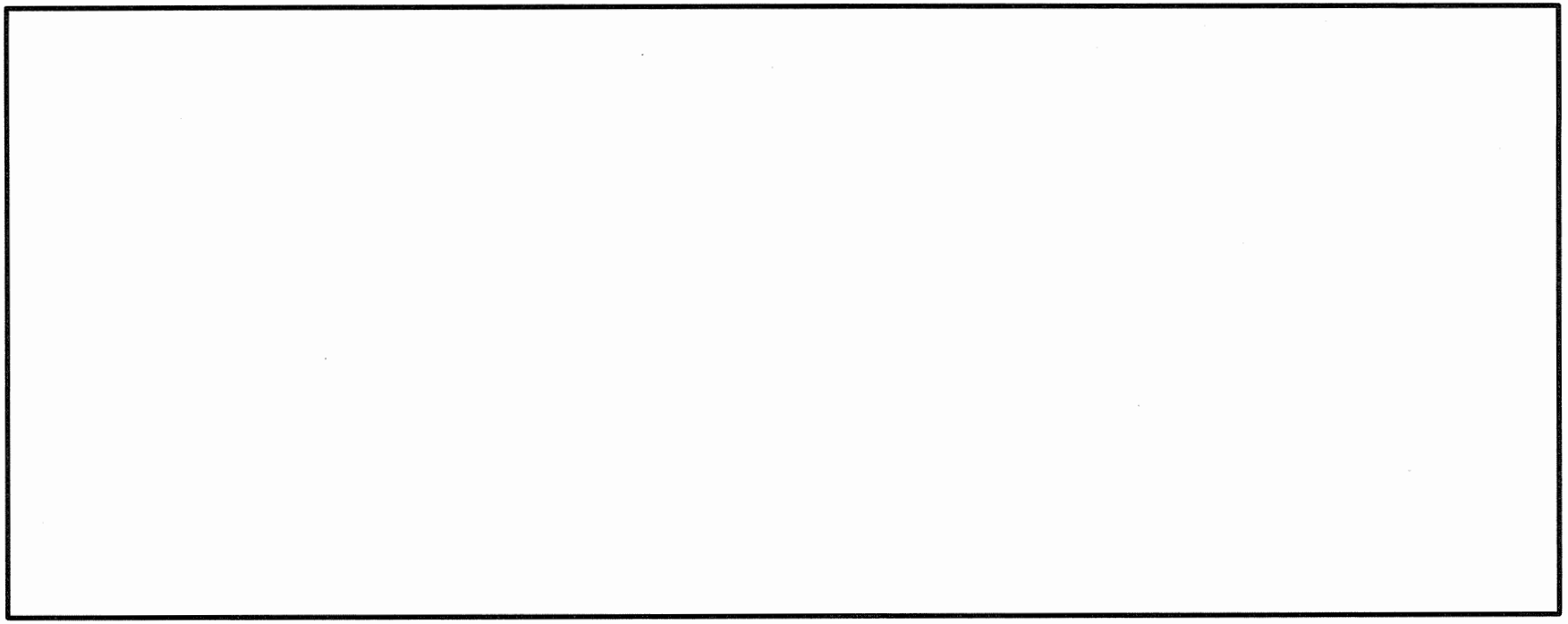
・内部の収納物等（バスケット及び燃料集合体）の慣性力が胴内面へ働く。

・落下時の上・下部緩衝体木材反力が胴フランジ面及び底板に働く。

(b) 境界条件

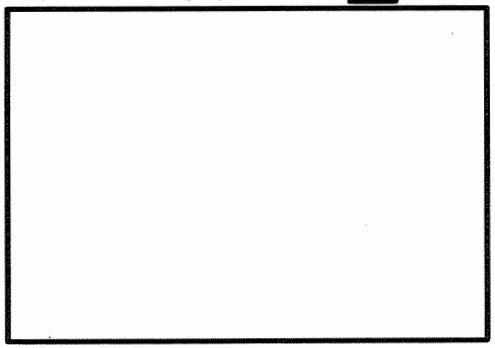
上・下部緩衝体が取り付く面（反力を受ける面）の上・下 1 箇所の Y 方向変位を拘束した。また，0° －180° 面の対称面において X 方向の変位を拘束した。

水平落下時に作用する荷重条件及び境界条件を(ロ)-第 A.32 図に示す。



P_{bi} ：一次蓋ボルト初期締付力（[redacted]MPa）
P_{bii} ：二次蓋ボルト初期締付力（[redacted]MPa）
P_{biii} ：三次蓋ボルト初期締付力（[redacted]MPa）

P_i ：胴内圧（-0.101325 MPa G）
P_{ii} ：一二次蓋間圧力（0.31 MPa G）
P_{iii} ：二三次蓋間圧力（0.19 MPa G）
P_{sr} ：側部中性子遮蔽材部（外筒側面）圧力（[redacted]MPa G）
P_{er} ：側部中性子遮蔽材部（端板面）圧力（[redacted]MPa G）
P_{tr} ：蓋部中性子遮蔽材部圧力（[redacted]MPa G）
P_{br} ：底部中性子遮蔽材部圧力（[redacted]MPa G）
F_{iw} ：内部の収納物等（バスケット及び燃料集合体）の慣性力
F_{tr} ：上部緩衝体木材反力
F_{br} ：下部緩衝体木材反力



（ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例）

(ロ)-第 A.32 図　0.3m 水平落下時の荷重及び境界条件

c. 解析結果

水平落下時の主要な位置（(ロ)-第 A.30 図参照）に対する一次応力の評価結果を(ロ)-第 A.27 表に，（一次＋二次）応力の評価結果を(ロ)-第 A.28 表に示す。表に示すように，全ての評価位置において A.1.2 に示す解析基準値を満足する。

また，三次蓋とキャスク本体のＯリング取り付け位置での相対口開き変形量は 0.18mm であり，Ｏリングの初期締め付け代[redacted]mm より小さく，密封性が損なわれることはない。

(ロ)-第A.27表　0.3m水平落下時の容器本体に対する一次応力の評価（1/2）

部位	断面No.（注1）	応力分類（注2）又は応力の種類	表面	応力強さ又は応力(MPa)	温度(℃)	解析基準値(MPa)（注3）	余裕率
一次蓋	①	P_m	—	3		124	40.3
		P_L+P_b	内	8		186	22.2
			外	10			17.6
	②	P_L	—	10		186	17.6
二次蓋	③	P_m	—	6		124	19.6
		P_L+P_b	内	15		186	11.4
			外	20			8.30
	④	P_L	—	19		186	8.78
三次蓋	⑤	P_m	—	13		137	9.53
		P_L+P_b	内	23		205	7.91
			外	22			8.31
	⑥	P_L	—	24		205	7.54
胴	⑦	P_L	—	66		186	1.81
	⑧	P_m	—	21		123	4.85
		P_L+P_b	内	20		184	8.20
			外	29			5.34
	⑨-1	P_L	—	20		184	8.20
	⑨-2	P_L	—	31			4.93
胴（底板）	⑩	P_m	—	11		122	10.0
		P_L+P_b	内	12		183	14.2
			外	13			13.0
	⑪	P_L	—	18		183	9.16
外筒	⑫	引張	—	77		156	1.02
		圧縮	—	20		156	6.80
		せん断	—	30		90	2.00
		曲げ	—	87		156	0.79
	⑬	引張	—	41		156	2.80
		圧縮	—	13		156	11.0
		せん断	—	3		90	29.0
		曲げ	—	7		156	21.2
	⑭	引張	—	14		156	10.1
		圧縮	—	18		156	7.66
		せん断	—	20		90	3.50
		曲げ	—	86		156	0.81

(注1)(ロ)-第A.30図参照

(注2)P_m：一次一般膜応力，P_L：一次局部膜応力，P_b：一次曲げ応力

(注3)断面①～⑪のP_mに対する基準値はS_m，P_L及びP_L+P_bに対する基準値は$1.5S_m$である。断面⑫～⑭における引張応力に対する基準値はf_t，圧縮応力に対する基準値はf_c，せん断応力に対する基準値はf_s，曲げ応力に対する基準値はf_bである。

(ロ)-第A.27表　0.3m水平落下時の容器本体に対する一次応力の評価（2/2）

部位	断面No.（注1）	応力分類（注2）又は応力の種類	表面	応力強さ又は応力（MPa）	温度（℃）	解析基準値（MPa）（注3）	余裕率
下部端板	⑮	引張	—	8		136	16.0
		圧縮	—	13		136	9.46
		せん断	—	16		78	3.87
		曲げ	—	63		136	1.15
蓋部中性子遮蔽材カバー	⑯	引張	—	2		157	77.5
		圧縮	—	1		157	156
		せん断	—	6		90	14.0
		曲げ	—	13		157	11.0
	⑰	引張	—	14		157	10.2
		圧縮	—	5		157	30.4
		せん断	—	6		90	14.0
		曲げ	—	24		157	5.54
底部中性子遮蔽材カバー	⑱	引張	—	5		136	26.2
		圧縮	—	30		136	3.53
		せん断	—	17		78	3.58
		曲げ	—	11		136	11.3
	⑲	引張	—	12		136	10.3
		圧縮	—	56		136	1.42
		せん断	—	16		78	3.87
		曲げ	—	67		136	1.02
二次蓋シール部	⑳	P_L	—	15		186	11.4
	㉑	P_L	—	67		185	1.76
一次蓋シール部	㉒	P_L	—	40		185	3.62
	㉓	P_L	—	57		185	2.24

（注1）(ロ)-第A.30図参照

（注2）P_L：一次局部膜応力

（注3）断面⑮～⑲における引張応力に対する基準値はf_t，圧縮応力に対する基準値はf_c，せん断応力に対する基準値はf_s，曲げ応力に対する基準値はf_bである。断面⑳～㉓のP_Lに対する基準値はS_yである。

(ロ)-第A.28表　0.3m水平落下時の容器本体に対する

（一次＋二次）応力及び蓋ボルトの評価（1/2）

部位	断面No.（注1）	応力の種類	表面	応力強さ又は応力（MPa）	温度（℃）	解析基準値（MPa）（注2）	余裕率
一次蓋	①	—	内	7		372	52.1
			外	12			30.0
	②	—	内	15		372	23.8
			外	13			27.6
二次蓋	③	—	内	14		372	25.5
			外	18			19.6
	④	—	内	54		372	5.88
			外	32			10.6
三次蓋	⑤	—	内	25		411	15.4
			外	25			15.4
	⑥	—	内	43		411	8.55
			外	64			5.42
胴	⑦	—	内	101		372	2.68
			外	78			3.76
	⑧	—	内	23		369	15.0
			外	36			9.25
	⑨-1	—	内	25		369	13.7
			外	24			14.3
	⑨-2	—	内	43			7.58
			外	32			10.5
胴（底板）	⑩	—	内	33		366	10.0
			外	11			32.2
	⑪	—	内	39		366	8.38
			外	45			7.13

(注1)(ロ)-第A.30図参照

(注2)断面①～⑪における基準値は$3S_m$である。

(ロ)-第A.28表　0.3m水平落下時の容器本体に対する
(一次＋二次) 応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

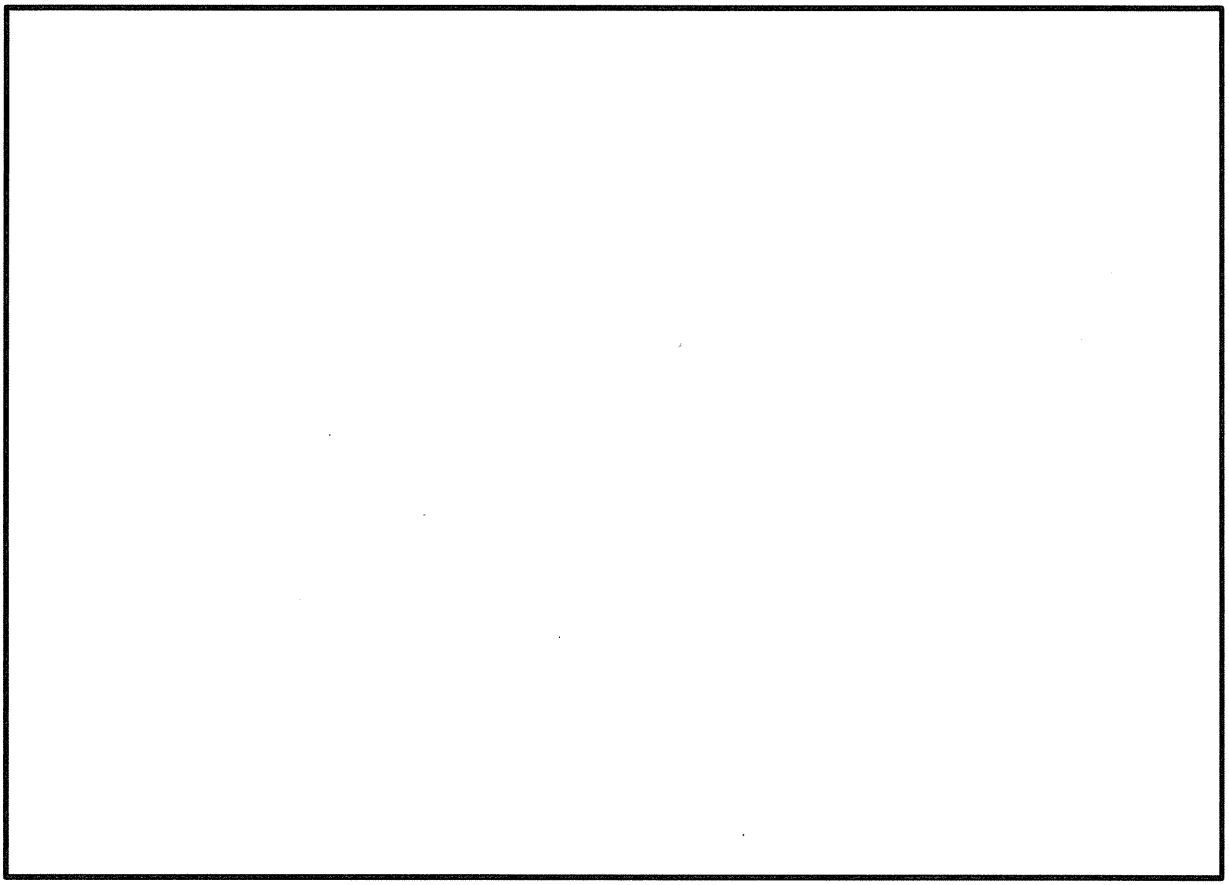
部位	断面No. (注1)	応力の種類 (注2)	表面	応力強さ又は応力 (MPa)	温度(℃)	解析基準値 (MPa) (注3)	余裕率
外筒	⑫	引張	—	99		470	3.74
		せん断	—	26		271	9.42
		曲げ	—	72		470	5.52
	⑬	引張	—	64		470	6.34
		せん断	—	3		271	89.3
		曲げ	—	5		470	93.0
	⑭	引張	—	86		470	4.46
		せん断	—	30		271	8.03
		曲げ	—	134		470	2.50
下部端板	⑮	引張	—	60		410	5.83
		せん断	—	33		236	6.15
		曲げ	—	146		410	1.80
蓋部中性子遮蔽材カバー	⑯	引張	—	3		472	156
		せん断	—	2		272	135
		曲げ	—	5		472	93.4
	⑰	引張	—	12		472	38.3
		せん断	—	6		272	44.3
		曲げ	—	25		472	17.8
底部中性子遮蔽材カバー	⑱	引張	—	64		410	5.40
		せん断	—	17		236	12.8
		曲げ	—	8		410	50.2
	⑲	引張	—	80		410	4.12
		せん断	—	16		236	13.7
		曲げ	—	59		410	5.94
二次蓋シール部	⑳	—	内	36		186	4.16
			外	25			6.44
	㉑	—	内	61		185	2.03
			外	62			1.98
一次蓋シール部	㉒	—	内	28		185	5.60
			外	70			1.64
	㉓	—	内	57		185	2.24
			外	56			2.30
一次蓋ボルト	—	σ_m	—	251		562	1.23
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	590		843	0.42
二次蓋ボルト	—	σ_m	—	241		564	1.34
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	596		846	0.41
三次蓋ボルト	—	σ_m	—	285		564	0.97
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	468		846	0.80

(注1) (ロ)-第A.30図参照
(注2) σ_m：平均引張応力，σ_b：曲げ応力
(注3) 断面⑫～⑲における引張応力に対する基準値は$3f_t$，せん断応力に対する基準値は$3f_s$，曲げ応力に対する基準値は$3f_b$である。断面⑳～㉓に対する基準値はS_yである。蓋ボルトの基準値はσ_mに対して$2S_m$，$\sigma_m+\sigma_b$に対して$3S_m$である。なお，蓋ボルトの$2S_m$及び$3S_m$の値は，S_yより小さい。

(2) バスケット

a. バスケットプレート縦板

水平落下時にバスケットプレート縦板切欠部には(ロ)-第A.33図に示すように,領域Ⅰの範囲にあるバスケットプレート，中性子吸収材，バスケットサポート及び燃料集合体の自重による慣性力並びに領域Ⅱのバスケットプレートの自重による慣性力が作用し，圧縮による膜応力σ_c（MPa）が生じる。



(ロ)-第A.33図　バスケットプレート縦板の解析モデル

$$\sigma_c = \frac{W_I + W_{II}}{A \cdot N} G_H$$

ここで,

W_I ：領域Ⅰのバスケットプレート，中性子吸収材，バスケットサポート及び燃料集合体の質量（kg）

W_{II} ：領域Ⅱのバスケットプレート及び中性子吸収材の質量（kg）

W_f ：燃料集合体の質量（kg）

N_f ：領域Ⅰの範囲にある燃料集合体の数（体）

G_H ：水平落下時の衝撃加速度（m/s^2）

N ：バスケットプレートの数（枚）

A　：断面積（mm^2）

$$A = (b_1 + b_2 \times 2) \times h_1 - (b_3 + b_4 \times 2) \times h_2$$

b_1　：バスケットプレート幅 1（mm）

b_2　：バスケットプレート幅 2（mm）

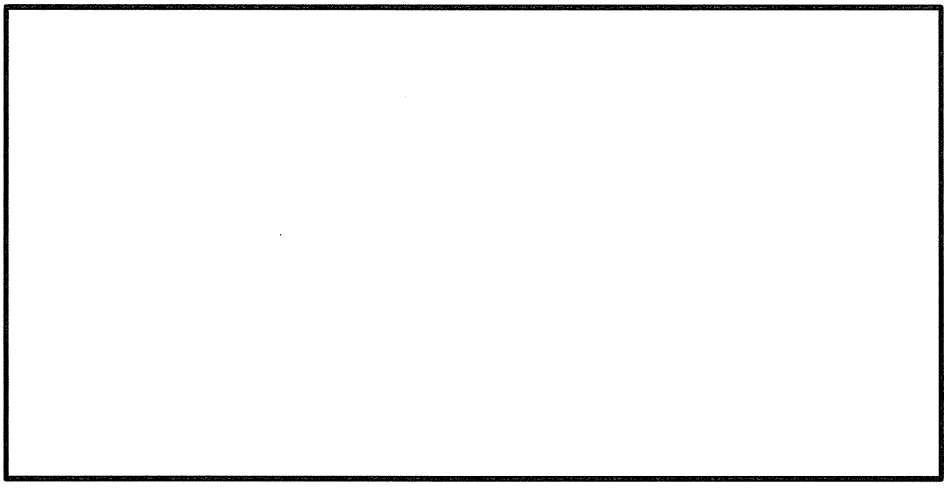
h_1　：バスケットプレート高さ 1（mm）

b_3　：バスケットプレート幅 3（mm）

b_4　：バスケットプレート幅 4（mm）

h_2　：バスケットプレート高さ 2（mm）

バスケットプレート各部の寸法は(ロ)-第 A.34 図のとおり。



(ロ)-第 A.34 図　バスケットプレート解析モデル図

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.29 表に示す。表に示すように，評価位置において A.1.2 に示す解析基準値を満足する。なお，180° 側以外の任意の角度で落下する場合も健全性は維持される。また，バスケットに生じる応力は，設計降伏点（56MPa）より低いので，バスケットは塑性変形しない。

(ロ)-第A.29表　バスケットプレート縦板の応力計算条件及び計算結果

項目	燃料集合体の質量(BP無，BP有) : W_f(kg)	領域Ⅰの範囲にある燃料集合体の数(BP無，BP有) : N_f(体)	領域Ⅰのバスケットプレート，中性子吸収材，バスケットサポート及び燃料集合体の質量(注1) : W_I(kg)	領域Ⅱのバスケットプレート及び中性子吸収材の質量(注2) : W_{II}(kg)	水平落下時の衝撃加速度 : G_H(m/s^2)
数値	680,				210

項目	バスケットプレート幅1 : b_1(mm)	バスケットプレート幅2 : b_2(mm)	バスケットプレート高さ1 : h_1(mm)	バスケットプレート幅3 : b_3(mm)	バスケットプレート幅4 : b_4(mm)	バスケットプレート高さ2 : h_2(mm)	断面積 : A(mm^2)
数値							

項目	バスケットプレートの数 : N(枚)	圧縮応力 : σ_c(MPa)	基準値 : S_m(MPa)	余裕率
数値		12	36	2.00

(注1) 領域Ⅰのバスケットプレート，中性子吸収材，バスケットサポート及び燃料集合体の各質量の内訳は，以下のとおりである。

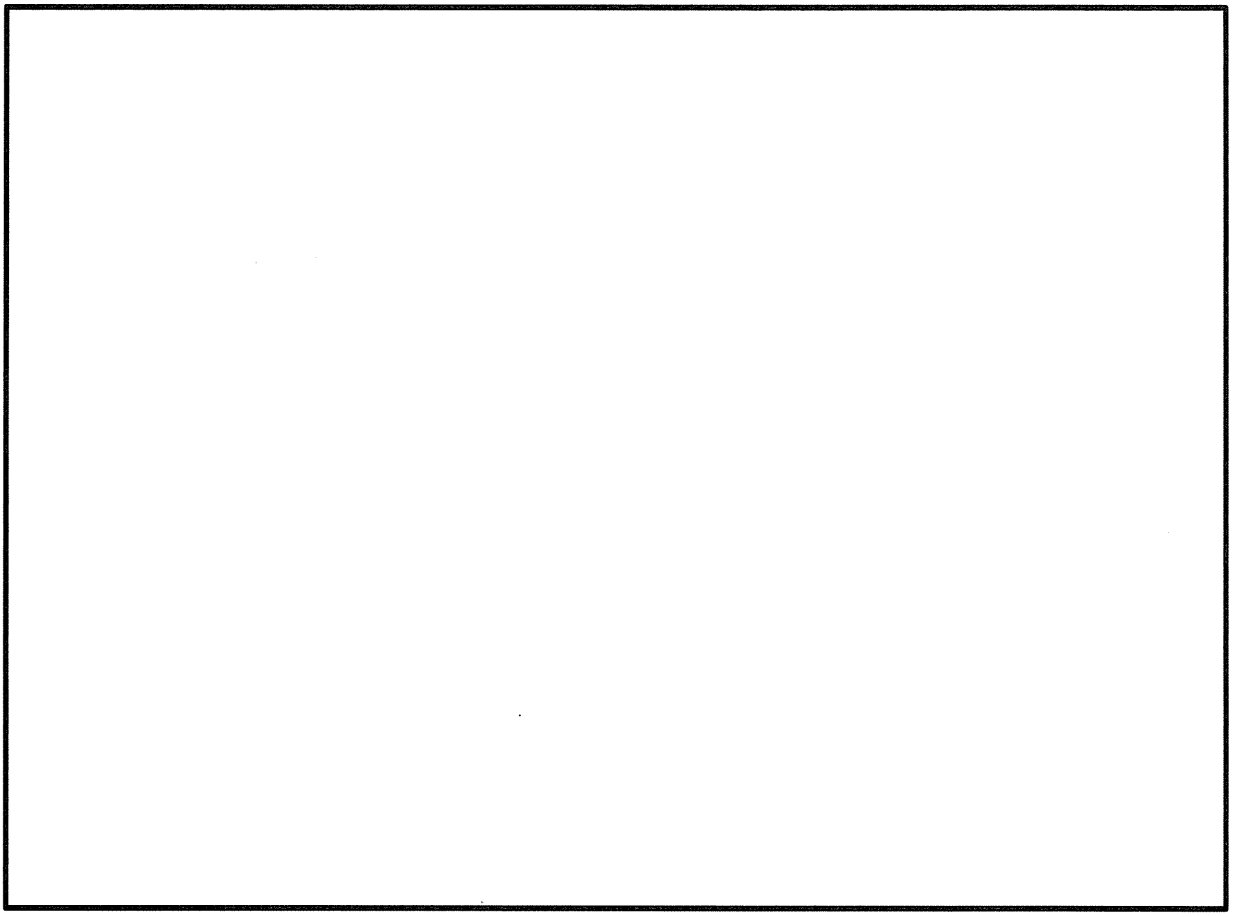
バスケットプレートの質量　:　(kg)
中性子吸収材の質量　:　(kg)
バスケットサポートの質量　:　(kg)
燃料集合体の合計質量　: 680　(kg)

(注2) 領域Ⅱのバスケットプレート及び中性子吸収材の各質量の内訳は以下のとおりである。

バスケットプレートの質量　:　(kg)
中性子吸収材の質量　:　(kg)

b. バスケットプレート横板

水平落下時にバスケットプレート横板切欠部には，(ロ)-第A.35図に示すようにバスケットプレート，中性子吸収材及び燃料集合体の自重による慣性力により曲げ応力σ_b及びせん断応力τが生じる。



(ロ)-第A.35図　バスケットプレート横板の解析モデル

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

ここで，

σ_b ：曲げ応力（MPa）

τ ：せん断応力（MPa）

M ：曲げモーメント（N･mm）

$$M = \frac{w \cdot \ell^2}{12} G_H$$

Z ：断面係数（mm^3）

$$Z=\frac{h_1^3\times b_1-h_2^3\times(b_2+b_3\times 2)}{6h_1}$$

A　：断面積（mm^2）

$A=b_1\times h_1-h_2\times(b_2+b_3\times 2)$

F　：せん断力（N）

$$F=\frac{w\times\ell}{2}\times G_H$$

w　：分布荷重（kg/mm）

$$w=\frac{W_f+W_b\times N}{\ell\times N}$$

ℓ　：バスケットセルの内幅（mm）

G_H　：水平落下時の衝撃加速度（m/s^2）

W_f　：燃料集合体の質量（kg）

W_b　：バスケットプレート及び中性子吸収材の質量（kg）

N　：バスケットプレートの数（段）

h_1　：バスケットプレート高さ1（mm）

b_1　：バスケットプレート幅1（mm）

b_2　：バスケットプレート幅2（mm）

h_2　：バスケットプレート高さ2（mm）

b_3　：バスケットプレート幅3（mm）

バスケットプレート各部の寸法は(ロ)-第A.36図のとおり。

(ロ)-第A.36図　バスケットプレート解析モデル図

計算条件と計算結果を(ロ)-第A.30表に示す。表に示すように，評価位置においてA.1.2に示す解析基準値を満足する。なお，180°側以外の任意の角度で落下する場合も健全性は維持される。なお，バスケットに生じる応力は，設計降伏点（56MPa）より低いので，バスケットは塑性変形しない。

(ロ)-第A.30表　バスケットプレート横板の応力計算条件及び計算結果

項目	燃料集合体の質量(BP有) : W_f(kg)	バスケットプレート及び中性子吸収材の質量 : W_b(kg)	バスケットプレートの数 : N(枚)	バスケットセルの内幅 : ℓ(mm)	分布荷重 : w(kg/mm)	水平落下時の衝撃加速度 : G_H(m/s^2)
数値	[redacted]					210

項目	バスケットプレート高さ1 : h_1(mm)	バスケットプレート幅1 : b_1(mm)	バスケットプレート幅2 : b_2(mm)	バスケットプレート高さ2 : h_2(mm)	バスケットプレート幅3 : b_3(mm)
数値	[redacted]				

項目	曲げモーメント : M(N・mm)	断面係数 : Z(mm^3)	曲げ応力 : σ_b(MPa)	基準値 : αS_m(MPa)	余裕率
数値	[redacted]		8	46	4.75

項目	せん断力 : F(N)	断面積 : A(mm^2)	せん断応力 : τ(MPa)	基準値 : $0.6S_m$(MPa)	余裕率
数値	[redacted]		2	21	9.50

(3) 燃料集合体

水平落下時に生じる応力は，落下衝撃による曲げ応力σ_b（MPa）と内圧による各方向応力σ_z，σ_r，σ_θ（MPa）である。水平落下時において最大応力強さS（MPa）は，外面に生じるので外面のみ評価する。

a. 落下衝撃により生じる曲げ応力

燃料被覆管は支持格子により支持される連続梁とみなすことができ，1 つの支持スパン内の部分を考えると両端固定梁となる。したがって，落下衝撃により生じる最大曲げ応力は，次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{Md_o}{2I}$$

$$M = \frac{1}{12}\left(W_f + W_c\right)\ell^2 \times G_H$$

$$I = \frac{\pi}{64}\left(d_o^4 - d_i^4\right)$$

ここで，

M ：曲げモーメント（N・mm）

G_H ：水平落下時の衝撃加速度（m/s^2）

I ：断面二次モーメント（mm^4）

W_f ：ペレット単位長さ当たり質量（kg/mm）

W_c ：燃料被覆管単位長さ当たり質量（kg/mm）

ℓ ：支持スパン（mm）

d_o ：燃料被覆管外径（mm）

d_i ：燃料被覆管内径（mm）

b. 内圧による各方向応力

内圧P_oにより生じる各方向応力は，1.(3)と同じである。

c. 応力強さ

水平落下時に生じる曲げ応力及び内圧により生じる各方向応力から求まる応力強さは，以下の式で与えられる。

$$S=\mathrm{Max}\left(\left|\sigma_{rL}-\sigma_{\theta L}\right|,\ \left|\sigma_{\theta L}-\sigma_{zL}\right|,\ \left|\sigma_{zL}-\sigma_{rL}\right|\right)$$

ここで，

$$\sigma_{rL}=\sigma_r$$

$$\sigma_{\theta L}=\sigma_\theta$$

$$\sigma_{zL}=-\sigma_b+\sigma_z$$

燃料被覆管材料(ジルカロイ-4)の□℃における照射後の降伏応力σ_yは，589MPa[4]であるので，余裕率MSは，次式で与えられる。

$$MS = \frac{\sigma_y}{S} - 1$$

以上の式を用いて各燃料に対して計算した結果を(ロ)-第A.31表に示す。燃料被覆管に発生する応力強さは基準値以下である。

(ロ)-第A.31表　水平落下時の燃料被覆管の強度評価結果

燃料タイプ	17×17燃料 (48GWd/t, 39GWd/t)	
	A型	B型
ペレット単位長さ当たり質量 : W_f (kg/mm)	□	
燃料被覆管単位長さ当たり質量 : W_c (kg/mm)		
衝撃加速度 : G_H (m/s^2)	210	210
支持スパン : ℓ (mm)	□	
燃料被覆管外径 : d_o (mm)		
燃料被覆管内径 : d_i (mm)		
内圧 : P_o (MPa)		
応力強さ : S (MPa)	141	140
降伏応力 : σ_y (MPa)	589	589
余裕率 : MS	3.17	3.20

3. コーナー落下

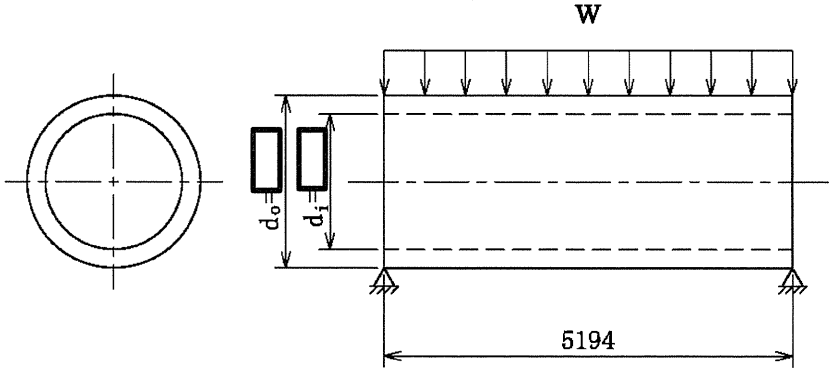
(ロ)-第A.19表に示すように，コーナー落下時の衝撃加速度は垂直落下及び水平落下時に比べて小さく，垂直及び水平落下時に比べて条件が厳しくない。ただし，頭部コーナー落下時は，頭部垂直落下時と違い蓋部に作用する緩衝体の圧潰力が蓋全面に作用せず内部の収納物等による慣性力が蓋を介して蓋ボルトに作用する。この蓋ボルトへの荷重については，より衝撃加速度の大きい特別の試験条件で評価し，蓋ボルトの応力が設計降伏点より低いことを確認している。したがって，コーナー落下時に輸送容器及び収納物の構造健全性が損なわれることはない。

A.5.4　積み重ね試験

本項の条件として，輸送物の 5 倍に相当する荷重又は鉛直投影面積に 1.3×10^{-2}MPa のいずれか厳しい方を負荷することになっている。本輸送物の場合，輸送物の構造解析上での総質量 1.344×10^{5}kg の 5 倍に相当する 6.720×10^{5}kg（6.591×10^{6}N）の荷重の方が，本輸送容器の鉛直投影面積に 1.3×10^{-2}MPa を乗じて得た値に相当する荷重より大きいので，6.720×10^{5}kg（6.591×10^{6}N）の荷重が輸送容器の軸に垂直方向にかかる場合及び軸方向にかかる場合について評価を行う。

1. 軸に垂直な方向の荷重の場合

本輸送物では，容器本体を円筒構造とみなして，最も厳しい条件として(ロ)-第 A.37 図に示すように，長さ L，外径 d_o（胴外径），内径 d_i（胴内径）の円筒（胴）をよこ置きにして両端を単純支持し，鉛直方向に 6.591×10^{6}N の等分布荷重が負荷する場合について解析する。



(ロ)-第 A.37 図　両端単純支持された容器本体の解析モデル図

この場合，荷重を受けるのは容器本体であり，緩衝体が両端支持として働く。容器本体を梁と仮定すれば，生じる最大曲げ応力 σ_b（MPa）は，次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{M_{max} d_o}{2I}$$

ここで，

M_{max}：最大曲げモーメント（N･mm）

$$M_{max} = \frac{1}{8} WL$$

L　：円筒の長さ（mm）

I　：円筒の中心軸に垂直な断面における Z 軸に関する断面二次モーメント（mm^4）

$$I = \frac{\pi}{64}\left(d_o^4 - d_i^4\right)$$

d_o　：円筒外径（mm）

d_i ：円筒内径（mm）

W ：荷重（N）

ここで，胴部をこの円筒とみなして曲げ応力を計算した場合の計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.32 表に示す。本輸送物は，軸に垂直な方向の荷重により圧潰することはない。

(ロ)-第 A.32 表　容器本体の軸に垂直方向の積み重ね応力計算条件及び計算結果

評価位置	輸送物総質量の5倍の荷重：W(N)	容器本体の全長：L(mm)	胴外径：d_o(mm)	胴内径：d_i(mm)	最大曲げ応力：σ_b(MPa)	基準値：S_y(MPa)	余裕率
容器本体	6.591×10^6	5194	[redacted]		7	184	25.2

2. 軸方向の荷重の場合

(ロ)-第A.38図に示すように，円筒をたて置きにし，円筒の軸方向に両端から等分布荷重Wをかけたときに円筒に生じる圧縮応力σ_c（MPa）は，次式で与えられる。

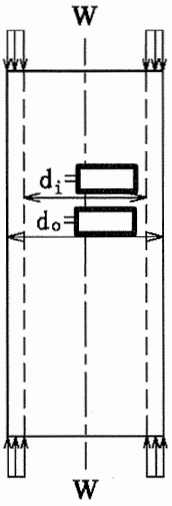
$$\sigma_c = \frac{W}{\frac{\pi}{4}\left(d_o^2 - d_i^2\right)}$$

ここで，

W　：荷重（N）

d_i　：円筒内径（mm）

d_o　：円筒外径（mm）



（単位：mm）

(ロ)-第A.38図　両端より圧縮される容器本体の解析モデル図

ここで，胴部をこの円筒とみなして圧縮応力を計算した場合の計算条件と計算結果を(ロ)-第A.33表に示す。本輸送物は，軸方向の荷重により圧潰することはない。

(ロ)-第A.33表　容器本体の軸方向の積み重ね応力計算条件及び計算結果

評価位置	輸送物総質量の5倍の荷重：W(N)	胴外径：d_o(mm)	胴内径：d_i(mm)	圧縮応力：σ_c(MPa)	基準値：S_y(MPa)	余裕率
容器本体	6.591×10^6			5	184	35.8

以上より，容器本体の構造健全性が維持されるので，密封部の健全性が維持される。なお，実際に輸送物を積み重ねた場合には緩衝体部分が積み重なり，外筒や蓋部及び底部中性子遮蔽材カバーには荷重が作用しないため，遮蔽解析に影響を及ぼすような

破損は生じない。一方，緩衝体は，最大20mm程度変形する可能性があるが，(ロ)章Dの遮蔽解析で考慮している0.3m落下で想定される変形量には包絡される。

A.5.5 貫通

本項では，質量6kg，直径3.2cmの軟鋼棒が1mの高さから本輸送物外表面で最も板厚の薄い緩衝体カバープレート（板厚 [redacted] mm）へ落下するとした場合に，緩衝体カバープレートが破断せず軟鋼棒は内部に貫通しないことを示す。

6kgの軟鋼棒が1mの高さから落下したときの落下エネルギーE（N･mm）は，次式で与えられる。

$$E = mgH$$

ここで，

m ：軟鋼棒の質量（kg）

g ：重力加速度（m/s^2）

H ：落下高さ（mm）

一方，軟鋼棒が緩衝体カバープレートへ落下した際，貫通するためには落下エネルギーが(ロ)-第 A.39 図に示すようにカバープレートのせん断に必要なエネルギーより大きい場合である。この場合のせん断に要するエネルギーE_s(N･mm)は，次式で与えられる。

$$E_s = \frac{\pi}{2} dt^2 S$$

ここで，

d ：軟鋼棒の直径（mm）

t ：緩衝体カバープレートの板厚（mm）

S ：カバープレートのせん断強さ（MPa）

（せん断強さはせん断ひずみエネルギー説に基づき，カバープレートの設計引張強さの$1/\sqrt{3}$とする。）

落下エネルギーEとせん断エネルギーE_sを比較すると，計算条件と計算結果は(ロ)-第 A.34 表に示すように$E < E_s$となり，カバープレートは軟鋼棒の落下によりせん断破壊せず，軟鋼棒は緩衝体カバープレートを貫通しない。

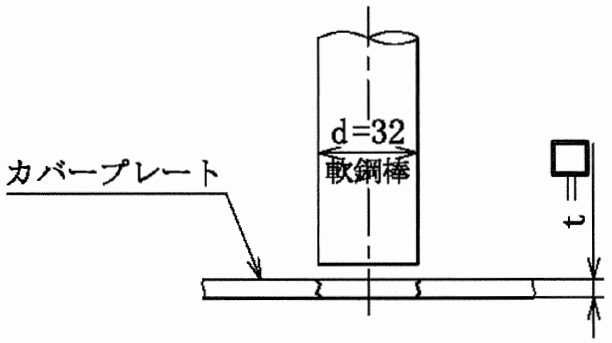
その他の箇所のせん断に要するエネルギーは，緩衝体カバープレートより大きいため，せん断破壊はおこらず，密封部の健全性が維持され，また，熱解析及び遮蔽解析への影響は無視できる。

(ロ)-第A.34表　軟鋼棒の落下エネルギー及びカバープレートせん断エネルギー

計算条件及び計算結果

項目	軟鋼棒の質量 ：m(kg)	重力加速度 ：g(m/s^2)	落下高さ ：H(mm)	落下エネルギー ：E(N･mm)
数値	6	9.80665	1000	5.884×10^4

項目	軟鋼棒の直径 ：d(mm)	緩衝体 カバープレート の板厚 ：t(mm)	カバープレート の設計引張強さ ：S_u(MPa)	カバープレート のせん断強さ ：S(MPa)	せん断 エネルギー ：E_s(N･mm)
数値	32				4.505×10^5



(単位：mm)

(ロ)-第A.39図　せん断による貫通モデル図

A.5.6　角又は縁落下

本輸送物は,鋼製の円筒形で質量は134.4トンであり,角又は縁落下は該当しない。

A.5.7　結果の要約及びその評価

1. 解析結果の要約

一般の試験条件における輸送物に対する解析結果の要約を(ロ)-第A.35表に示す。自由落下試験及び積み重ね試験により緩衝体に永久変形が生じるが，表に示すように，各試験条件下において輸送物各部はA.1.2に定めた基準を満足し，構造上の健全性が損なわれることはない。また，三次蓋の口開き変形が基準を満足していることから，密封性能も維持される。

なお，頭部 0.3m 垂直落下時には，一次蓋内面，バスケット及び燃料集合体に，底部0.3m垂直落下時には，胴底部内面，バスケット及び燃料集合体に，衝撃加速度を上回る加速度が発生すると考えられるが，それらの部材に加速度割増を考慮しても健全性に影響はない。

(注)-A.10.1に示すMSF-24P型輸送容器のプロトタイプであるMSFキャスクの9.3m頭部垂直落下試験で計測された内部収納物の加速度割増を基に，0.3m 垂直落下時には 1.4倍程度の加速度割増が生じると考えられるが,輸送物の各部材は0.4以上の余裕率を有する。

(ロ)-第A.35表　一般の試験条件における構造解析結果の要約（1/7）

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等
熱　的　試　験				
(1)容器本体 一次応力				
一次蓋　(P_L+P_b)	$1.5S_m$	186	7	25.5
二次蓋　(P_L+P_b)	$1.5S_m$	186	13	13.3
三次蓋　(P_L+P_b)	$1.5S_m$	205	19	9.78
胴　(P_L+P_b)	$1.5S_m$	184	3	60.3
胴（底板）　(P_m)	S_m	122	1	121
外筒　（引張）	f_t	156	21	6.42
外筒　（圧縮）	f_c	156	2	77.0
外筒　（せん断）	f_s	90	8	10.2
外筒　（曲げ）	f_b	156	35	3.45
下部端板　（引張）	f_t	136	2	67.0
下部端板　（圧縮）	f_c	136	1	135
下部端板　（せん断）	f_s	78	3	25.0
下部端板　（曲げ）	f_b	136	12	10.3
蓋部中性子遮蔽材カバー（引張）	f_t	157	—	—
蓋部中性子遮蔽材カバー（圧縮）	f_c	157	1	156
蓋部中性子遮蔽材カバー（せん断）	f_s	90	1	89.0
蓋部中性子遮蔽材カバー（曲げ）	f_b	157	3	51.3
底部中性子遮蔽材カバー（引張）	f_t	136	4	33.0
底部中性子遮蔽材カバー（圧縮）	f_c	136	1	135
底部中性子遮蔽材カバー（せん断）	f_s	78	5	14.6
底部中性子遮蔽材カバー（曲げ）	f_b	136	29	3.68
一次蓋密封シール部　(P_L)	S_y	185	33	4.60
二次蓋密封シール部　(P_L)	S_y	186	13	13.3
（一次＋二次）応力				
一次蓋　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	372	9	40.3
二次蓋　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	372	12	30.0
三次蓋　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	411	27	14.2
胴　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	369	20	17.4
胴（底板）　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	366	27	12.5
外筒　（引張）	$3f_t$	470	82	4.73
外筒　（せん断）	$3f_s$	271	17	14.9
外筒　（曲げ）	$3f_b$	470	82	4.73
下部端板　（引張）	$3f_t$	410	48	7.54
下部端板　（せん断）	$3f_s$	236	24	8.83
下部端板　（曲げ）	$3f_b$	410	109	2.76
蓋部中性子遮蔽材カバー（引張）	$3f_t$	472	4	117
蓋部中性子遮蔽材カバー（せん断）	$3f_s$	272	2	135
蓋部中性子遮蔽材カバー（曲げ）	$3f_b$	472	3	156
底部中性子遮蔽材カバー（引張）	$3f_t$	410	34	11.0
底部中性子遮蔽材カバー（せん断）	$3f_s$	236	4	58.0
底部中性子遮蔽材カバー（曲げ）	$3f_b$	410	21	18.5
一次蓋密封シール部（P_L+P_b+Q)	S_y	185	60	2.08
二次蓋密封シール部（P_L+P_b+Q)	S_y	186	22	7.45
一次蓋ボルト　（σ_m)	$2S_m$	562	249	1.25
一次蓋ボルト（$\sigma_m+\sigma_b$)	$3S_m$	843	251	2.35
二次蓋ボルト　（σ_m)	$2S_m$	564	206	1.73
二次蓋ボルト（$\sigma_m+\sigma_b$)	$3S_m$	846	219	2.86
三次蓋ボルト　（σ_m)	$2S_m$	564	229	1.46
三次蓋ボルト（$\sigma_m+\sigma_b$)	$3S_m$	846	320	1.64
三次蓋相対口開き変形量	—	[redacted] mm	0.08 mm	基準に合致
水噴霧試験				
	吸水性 水切り	無 有	無 有	基準に合致 基準に合致

(ロ)-第A.35表　一般の試験条件における構造解析結果の要約（2/7）

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等
自由落下試験				
1.垂直落下				
(1)容器本体（頭部垂直落下）				
一次応力				
一次蓋　(P_L+P_b)	$1.5S_m$	186	65	1.86
二次蓋　(P_L+P_b)	$1.5S_m$	186	34	4.47
三次蓋　(P_L)	$1.5S_m$	205	36	4.69
胴　(P_L)	$1.5S_m$	186	43	3.32
胴（底板）　(P_L+P_b)	$1.5S_m$	183	6	29.5
外筒　（引張）	f_t	156	39	3.00
外筒　（圧縮）	f_c	156	24	5.50
外筒　（せん断）	f_s	90	14	5.42
外筒　（曲げ）	f_b	156	45	2.46
下部端板　（引張）	f_t	136	2	67.0
下部端板　（圧縮）	f_c	136	1	135
下部端板　（せん断）	f_s	78	4	18.5
下部端板　（曲げ）	f_b	136	12	10.3
蓋部中性子遮蔽材カバー（引張）	f_t	157	17	8.23
蓋部中性子遮蔽材カバー（圧縮）	f_c	157	1	156
蓋部中性子遮蔽材カバー（せん断）	f_s	90	10	8.00
蓋部中性子遮蔽材カバー（曲げ）	f_b	157	70	1.24
底部中性子遮蔽材カバー（引張）	f_t	136	2	67.0
底部中性子遮蔽材カバー（圧縮）	f_c	136	1	135
底部中性子遮蔽材カバー（せん断）	f_s	78	3	25.0
底部中性子遮蔽材カバー（曲げ）	f_b	136	16	7.50
一次蓋密封シール部　(P_L)	S_y	185	48	2.85
二次蓋密封シール部　(P_L)	S_y	185	31	4.96
（一次＋二次）応力				
一次蓋　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	372	66	4.63
二次蓋　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	372	34	9.94
三次蓋　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	411	85	3.83
胴　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	372	76	3.89
胴（底板）　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	366	23	14.9
外筒　（引張）	$3f_t$	470	82	4.73
外筒　（せん断）	$3f_s$	271	18	14.0
外筒　（曲げ）	$3f_b$	470	85	4.52
下部端板　（引張）	$3f_t$	410	48	7.54
下部端板　（せん断）	$3f_s$	236	24	8.83
下部端板　（曲げ）	$3f_b$	410	107	2.83
蓋部中性子遮蔽材カバー（引張）	$3f_t$	472	11	41.9
蓋部中性子遮蔽材カバー（せん断）	$3f_s$	272	11	23.7
蓋部中性子遮蔽材カバー（曲げ）	$3f_b$	472	64	6.37
底部中性子遮蔽材カバー（引張）	$3f_t$	410	35	10.7
底部中性子遮蔽材カバー（せん断）	$3f_s$	236	3	77.6
底部中性子遮蔽材カバー（曲げ）	$3f_b$	410	9	44.5
一次蓋密封シール部（P_L+P_b+Q）	S_y	185	96	0.92
二次蓋密封シール部（P_L+P_b+Q）	S_y	185	43	3.30
一次蓋ボルト　（σ_m）	$2S_m$	562	289	0.94
一次蓋ボルト（$\sigma_m+\sigma_b$）	$3S_m$	843	323	1.60
二次蓋ボルト　（σ_m）	$2S_m$	564	212	1.66
二次蓋ボルト（$\sigma_m+\sigma_b$）	$3S_m$	846	323	1.61
三次蓋ボルト　（σ_m）	$2S_m$	564	204	1.76
三次蓋ボルト（$\sigma_m+\sigma_b$）	$3S_m$	846	216	2.91
三次蓋相対口開き変形量	—	[redacted] mm	0.01 mm以下	基準に合致

(ロ)-第A.35表　一般の試験条件における構造解析結果の要約（3/7）

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等
(2)容器本体（底部垂直落下）				
一次応力				
一次蓋　(P_L+P_b)	$1.5S_m$	186	16	10.6
二次蓋　(P_L+P_b)	$1.5S_m$	186	5	36.2
三次蓋　(P_L+P_b)	$1.5S_m$	205	39	4.25
胴　(P_L)	$1.5S_m$	184	23	7.00
胴（底板）　(P_L+P_b)	$1.5S_m$	183	30	5.10
外筒　（引張）	f_t	156	37	3.21
外筒　（圧縮）	f_c	156	5	30.2
外筒　（せん断）	f_s	90	8	10.2
外筒　（曲げ）	f_b	156	39	3.00
下部端板　（引張）	f_t	136	7	18.4
下部端板　（圧縮）	f_c	136	2	67.0
下部端板　（せん断）	f_s	78	11	6.09
下部端板　（曲げ）	f_b	136	43	2.16
蓋部中性子遮蔽材カバー（引張）	f_t	157	—	—
蓋部中性子遮蔽材カバー（圧縮）	f_c	157	3	51.3
蓋部中性子遮蔽材カバー（せん断）	f_s	90	2	44.0
蓋部中性子遮蔽材カバー（曲げ）	f_b	157	9	16.4
底部中性子遮蔽材カバー（引張）	f_t	136	14	8.71
底部中性子遮蔽材カバー（圧縮）	f_c	136	2	67.0
底部中性子遮蔽材カバー（せん断）	f_s	78	8	8.75
底部中性子遮蔽材カバー（曲げ）	f_b	136	57	1.38
一次蓋密封シール部　(P_L)	S_y	185	36	4.13
二次蓋密封シール部　(P_L)	S_y	185	14	12.2
（一次＋二次）応力				
一次蓋　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	372	22	15.9
二次蓋　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	372	8	45.5
三次蓋　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	411	55	6.47
胴　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	369	44	7.38
胴（底板）　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	366	49	6.46
外筒　（引張）	$3f_t$	470	87	4.40
外筒　（せん断）	$3f_s$	271	15	17.0
外筒　（曲げ）	$3f_b$	470	49	8.59
下部端板　（引張）	$3f_t$	410	40	9.25
下部端板　（せん断）	$3f_s$	236	11	20.4
下部端板　（曲げ）	$3f_b$	410	58	6.06
蓋部中性子遮蔽材カバー（引張）	$3f_t$	472	3	156
蓋部中性子遮蔽材カバー（せん断）	$3f_s$	272	4	67.0
蓋部中性子遮蔽材カバー（曲げ）	$3f_b$	472	11	41.9
底部中性子遮蔽材カバー（引張）	$3f_t$	410	33	11.4
底部中性子遮蔽材カバー（せん断）	$3f_s$	236	9	25.2
底部中性子遮蔽材カバー（曲げ）	$3f_b$	410	61	5.72
一次蓋密封シール部　(P_L+P_b+Q)	S_y	185	63	1.93
二次蓋密封シール部　(P_L+P_b+Q)	S_y	186	22	7.45
一次蓋ボルト　（σ_m）	$2S_m$	562	249	1.25
一次蓋ボルト（$\sigma_m+\sigma_b$）	$3S_m$	843	250	2.37
二次蓋ボルト　（σ_m）	$2S_m$	564	196	1.87
二次蓋ボルト（$\sigma_m+\sigma_b$）	$3S_m$	846	202	3.18
三次蓋ボルト　（σ_m）	$2S_m$	564	234	1.41
三次蓋ボルト（$\sigma_m+\sigma_b$）	$3S_m$	846	326	1.59
三次蓋相対口開き変形量	—	[redacted] mm	0.01 mm以下	基準に合致

(ロ)-第A.35表　一般の試験条件における構造解析結果の要約（4/7）

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等
(3)バスケット バスケットプレート（σ_c）	S_m f_c	36 37	7 7	4.14 4.28
(4)燃料集合体 燃料被覆管	σ_y	589	105	4.60

(ロ)-第A.35表　一般の試験条件における構造解析結果の要約（5/7）

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等
2.水平落下				
(1)容器本体				
一次応力				
一次蓋　(P_L+P_b)	$1.5S_m$	186	10	17.6
二次蓋　(P_L+P_b)	$1.5S_m$	186	20	8.30
三次蓋　(P_L)	$1.5S_m$	205	24	7.54
胴　(P_L)	$1.5S_m$	186	66	1.81
胴（底板）　(P_L)	$1.5S_m$	183	18	9.16
外筒　（引張）	f_t	156	77	1.02
外筒　（圧縮）	f_c	156	20	6.80
外筒　（せん断）	f_s	90	30	2.00
外筒　（曲げ）	f_b	156	87	0.79
下部端板　（引張）	f_t	136	8	16.0
下部端板　（圧縮）	f_c	136	13	9.46
下部端板　（せん断）	f_s	78	16	3.87
下部端板　（曲げ）	f_b	136	63	1.15
蓋部中性子遮蔽材カバー（引張）	f_t	157	14	10.2
蓋部中性子遮蔽材カバー（圧縮）	f_c	157	5	30.4
蓋部中性子遮蔽材カバー（せん断）	f_s	90	6	14.0
蓋部中性子遮蔽材カバー（曲げ）	f_b	157	24	5.54
底部中性子遮蔽材カバー（引張）	f_t	136	12	10.3
底部中性子遮蔽材カバー（圧縮）	f_c	136	56	1.42
底部中性子遮蔽材カバー（せん断）	f_s	78	17	3.58
底部中性子遮蔽材カバー（曲げ）	f_b	136	67	1.02
一次蓋密封シール部　(P_L)	S_y	185	57	2.24
二次蓋密封シール部　(P_L)	S_y	185	67	1.76
（一次＋二次）応力				
一次蓋　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	372	15	23.8
二次蓋　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	372	54	5.88
三次蓋　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	411	64	5.42
胴　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	372	101	2.68
胴（底板）　(P_L+P_b+Q)	$3S_m$	366	45	7.13
外筒　（引張）	$3f_t$	470	99	3.74
外筒　（せん断）	$3f_s$	271	30	8.03
外筒　（曲げ）	$3f_b$	470	134	2.50
下部端板　（引張）	$3f_t$	410	60	5.83
下部端板　（せん断）	$3f_s$	236	33	6.15
下部端板　（曲げ）	$3f_b$	410	146	1.80
蓋部中性子遮蔽材カバー（引張）	$3f_t$	472	12	38.3
蓋部中性子遮蔽材カバー（せん断）	$3f_s$	272	6	44.3
蓋部中性子遮蔽材カバー（曲げ）	$3f_b$	472	25	17.8
底部中性子遮蔽材カバー（引張）	$3f_t$	410	80	4.12
底部中性子遮蔽材カバー（せん断）	$3f_s$	236	17	12.8
底部中性子遮蔽材カバー（曲げ）	$3f_b$	410	59	5.94
一次蓋密封シール部（P_L+P_b+Q)	S_y	185	70	1.64
二次蓋密封シール部（P_L+P_b+Q)	S_y	185	62	1.98
一次蓋ボルト　（σ_m)	$2S_m$	562	251	1.23
一次蓋ボルト（$\sigma_m+\sigma_b$)	$3S_m$	843	590	0.42
二次蓋ボルト　（σ_m)	$2S_m$	564	241	1.34
二次蓋ボルト（$\sigma_m+\sigma_b$)	$3S_m$	846	596	0.41
三次蓋ボルト　（σ_m)	$2S_m$	564	285	0.97
三次蓋ボルト（$\sigma_m+\sigma_b$)	$3S_m$	846	468	0.80
三次蓋相対口開き変形量	—	[redacted] mm	0.18 mm	基準に合致

(ロ)-第 A.35 表　一般の試験条件における構造解析結果の要約 (6/7)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等
(2)バスケット				
バスケットプレート縦板(σ_C)	S_m	36	12	2.00
バスケットプレート横板(σ_b)	αS_m	46	8	4.75
バスケットプレート横板(τ)	$0.6S_m$	21	2	9.50
(3)燃料集合体				
燃料被覆管	σ_y	589	141	3.17

(ロ)-第 A.35 表　一般の試験条件における構造解析結果の要約（7/7）

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等
3. コーナー落下	衝撃加速度が垂直落下及び水平落下に比べ小さいので，垂直落下及び水平落下の結果より厳しくない。			
積み重ね試験				
半径方向	S_y	184	7	25.2
軸方向	S_y	184	5	35.8
貫通				
緩衝体	せん断エネルギー	4.505×10^5 N·mm	5.884×10^4 N·mm	基準に合致

A.6　特別の試験条件

本節では輸送物が規則及び告示に規定された特別の試験条件下において，A.1.2 に示す基準を満足することを示す。

特別の試験は強度試験に引き続いて火災試験が行われるとする。火災試験に影響を及ぼす強度試験による変形は，輸送物の熱的性能に関係する緩衝体の変形である。9m 落下試験と 1m 貫通試験の試験順序の違いによってこれらの破損又は変形に有意な差は生じないので，これらに引き続く火災試験においては，強度試験の順序の違いは輸送物に影響を与えない。したがって，強度試験は 9m 落下試験に続いて 1m 貫通試験が行われるとして解析する。

A.6.1　強度試験・落下試験Ⅰ（9m 落下時）

連続しておこる特別の試験条件の第 1 番目は，輸送物が最大破損を受けるよう，平らな降伏しない落下試験台上に 9m の高さから輸送物を落下させるものである。

本項では輸送物が 9m 落下した場合，その落下エネルギーが，容器本体端部に取り付けられた緩衝体の変形によって吸収され，輸送物に加わる衝撃力が十分緩和されることを示し，それに対する輸送物の健全性を検討する。

1. 解析モデル

(1) 解析する落下姿勢

輸送物が最大破損を受ける落下方向としては次の 4 種類を考える。

① 垂直落下

② 水平落下

③ コーナー落下（落下点が輸送物の重心を通る鉛直線上にある場合）

④ 傾斜落下

(2) 解析方法

緩衝体の変形量と衝撃力の計算方法はA.5.3.1の1.に示す方法と同様に行う。

落下エネルギーの計算条件と計算結果を(ロ)-第A.36表に示す。

(ロ)-第A.36表　輸送物落下エネルギー計算条件及び計算結果

項目	輸送物最大総質量 :m(kg)	重力加速度 :g(m/s^2)	落下高さ :H(mm)	輸送物の落下エネルギー :E_K(N・mm)
数値	1.344×10^5	9.80665	9000	1.187×10^{10}

(3) 各落下方向解析モデル

各落下方向の解析モデルは(ロ)-第A.23図～(ロ)-第A.27図に示したとおりである。

2. 落下時の緩衝体の変形量と衝撃加速度

落下エネルギーE_Kに対応する変形量δと衝撃加速度Gは(ロ)-第A.37表に示すようになる。

なお，衝撃加速度Gは次式で求めている。

$$G=\frac{F}{m}$$

ここで，

F　：解析で求めた衝撃力 (N)

m　：輸送物最大総質量 (kg)

(ロ)-第A.37表に示すとおり，9m落下試験時において輸送物の緩衝体に圧潰変形が生じる。

(ロ)-第 A.37 表　9m 落下試験時の衝撃加速度と緩衝体の変形量

落下姿勢		衝撃力 ：F(N)	衝撃加速度： G(m/s²)	設計加速度 (注 1) (m/s²)	緩衝体の変形量 δ (mm)	設計基準変形量 (注 2) δ_{max} (mm)
垂直落下	頭部	7.449×10^7	555	600	262	684
	底部	6.472×10^7	482	500	302	608
水平落下		9.299×10^7	692	710	273	374.5
コーナー落下	頭部	6.130×10^7	457	480	760	826
	底部	6.057×10^7	451	—	754	827

(注 1)設計加速度とは，得られた衝撃加速度に裕度を考慮した値である。

(注 2)設計基準変形量とは，それぞれの落下方向において衝撃力を急激に上昇させないための設計上の基準値である。

A.6.1.1　垂直落下

9m 垂直落下時の衝撃力に対して，容器本体は十分な強度で密封性を保持し，かつ，遮蔽評価に影響を及ぼすような塑性変形が生じないことを示す。また，胴内のバスケットは破損しないことを示す。

1. 容器本体

垂直落下時の衝撃力に対する容器本体の解析を有限要素法による ABAQUS コードにより行う。また，落下方向は頭部及び底部落下とする。

(1) 解析モデル

A.5.3.2 と同様に，三次元有限要素を用いた(ロ)-第 A.16 図に示す三次元 180° 対称モデルを用いる。

(2) 荷重条件及び境界条件

a. 荷重条件

頭部垂直落下時に作用する荷重は次のとおりである。

・容器本体には，衝撃加速度（600m/s^2）による自重の慣性力が落下方向に働く。
・下部緩衝体の自重による慣性力が底板外面に働く。
・一次蓋内面には，衝撃加速度（600m/s^2）に加速度割増係数として 2.6 [17]を乗じた加速度による内部収納物等（バスケット及び燃料集合体）の慣性力が働く。
・落下時の上部緩衝体反力が蓋部に働く。

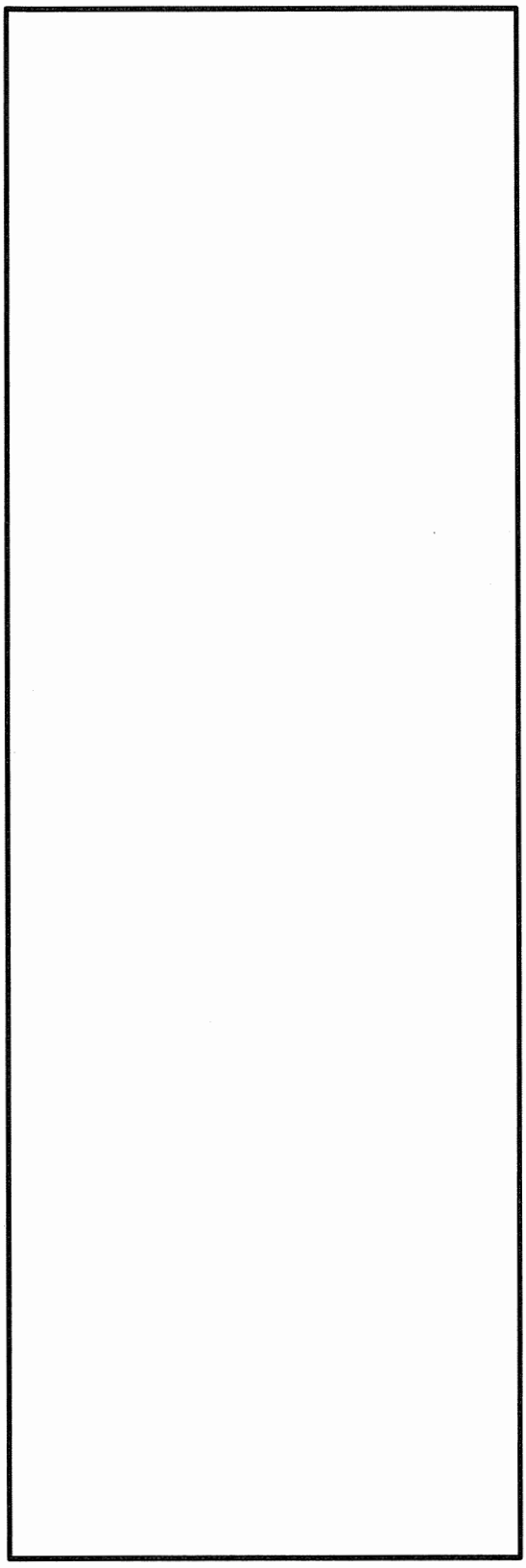
底部垂直落下時に作用する荷重は次のとおりである。

・容器本体には，衝撃加速度（500m/s^2）による自重の慣性力が落下方向に働く。
・上部緩衝体の自重による慣性力が三次蓋外面に働く。
・胴底部内面には，衝撃加速度（500m/s^2）に加速度割増係数として 2.6 [17]を乗じた加速度による内部収納物等（バスケット及び燃料集合体）の慣性力が働く。

b. 境界条件

境界条件は緩衝体の衝撃力を受ける面の節点の軸方向変位及び対称面上の節点の法線方向変位を拘束し，他は変位自由とした。

それぞれの落下方向に対する荷重条件及び境界条件を(ロ)-第 A.40 図及び(ロ)-第 A.41 図に示す。



F_{ab} ：下部緩衝体の慣性力

P_i ：胴内圧（-0.101325 MPa G）

P_{ii} ：一二次蓋間圧力（0.31 MPa G）

P_{iii} ：二三次蓋間圧力（0.19 MPa G）

F_{iw} ：内部の収納物等（バスケット，燃料集合体）の慣性力

P_{sr} ：側部中性子遮蔽材部（外筒側面）圧力（ MPa G）

P_{er} ：側部中性子遮蔽材部（端板面）圧力（ MPa G）

P_{tr} ：蓋部中性子遮蔽材部圧力（ MPa G）

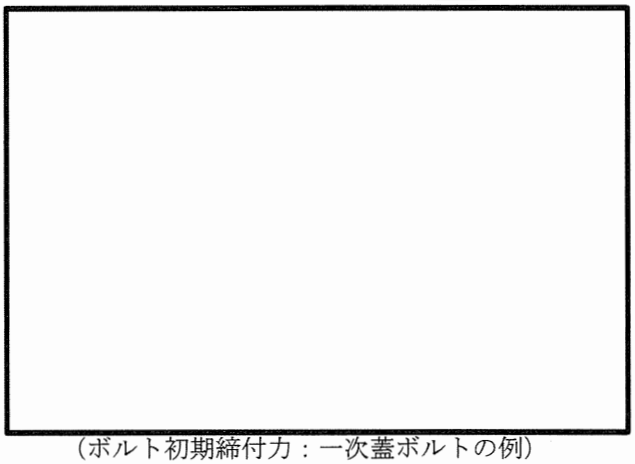
P_{br} ：底部中性子遮蔽材部圧力（ MPa G）

F_{rw} ：上部緩衝体反力

P_{bi} ：一次蓋ボルト初期締付力（ MPa）

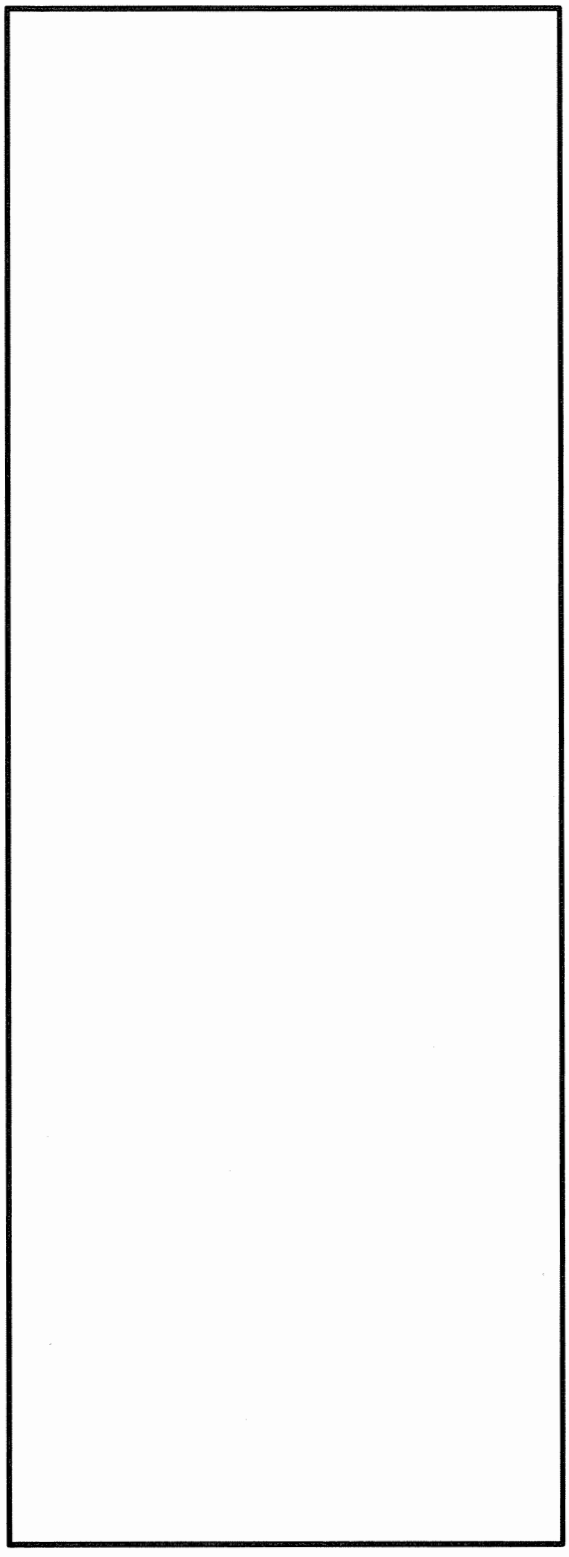
P_{bii} ：二次蓋ボルト初期締付力（ MPa）

P_{biii} ：三次蓋ボルト初期締付力（ MPa）



（ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例）

(ロ)-第 A.40 図　頭部 9m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件



F_{ab}：上部緩衝体の慣性力

P_i ：胴内圧（-0.101325 MPa G）

P_{ii} ：一二次蓋間圧力（0.31 MPa G）

P_{iii} ：二三次蓋間圧力（0.19 MPa G）

F_{iw}：内部の収納物等（バスケット，燃料集合体）の慣性力

P_{sr}：側部中性子遮蔽材部（外筒側面）圧力（□ MPa G）

P_{er}：側部中性子遮蔽材部（端板面）圧力（□ MPa G）

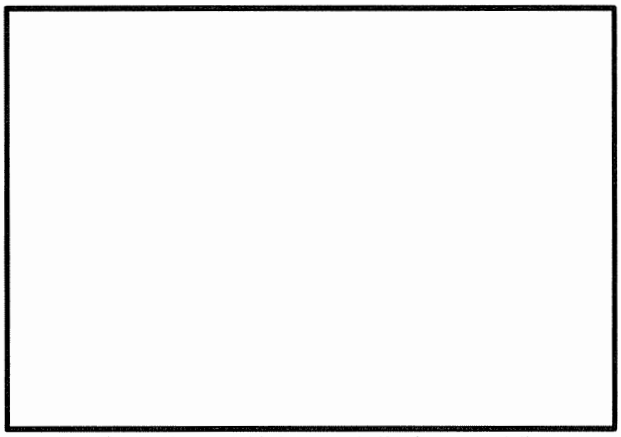
P_{tr}：蓋部中性子遮蔽材部圧力（□ MPa G）

P_{br}：底部中性子遮蔽材部圧力（□ MPa G）

P_{bi} ：一次蓋ボルト初期締付力（□MPa）

P_{bii} ：二次蓋ボルト初期締付力（□MPa）

P_{biii} ：三次蓋ボルト初期締付力（□MPa）



（ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例）

(ロ)-第 A.41 図　底部 9m 垂直落下時の荷重条件及び境界条件

(3) 解析結果

主要な位置（(ロ)-第 A.30 図参照）に対する頭部垂直落下時の一次応力及び蓋ボルトの評価結果を(ロ)-第 A.38 表に，また，底部垂直落下時の一次応力及び蓋ボルトの評価結果を(ロ)-第 A.39 表に示す。

それぞれの表に示すように，全ての評価位置において A.1.2 に示す解析基準を満足する。

また，三次蓋とキャスク本体のOリング取り付け位置での相対口開き変形量は 0.01mm 以下であり，Oリングの初期締め付け代[redacted]mm より小さく，密封性が損なわれることはない。

(ロ)-第 A.38 表　頭部 9m 垂直落下時の容器本体に対する

一次応力及び蓋ボルトの評価（1/2）

部位	断面 No.（注 1）	応力分類（注 2）又は応力の種類	表面	応力強さ又は応力（MPa）	温度（℃）	解析基準値（MPa）（注 3）	余裕率
二次蓋	③	P_m	—	22		251	10.4
		P_L+P_b	内	91		377	3.14
			外	124			2.04
	④	P_L	—	18		377	19.9
三次蓋	⑤	P_m	—	26		270	9.38
		P_L+P_b	内	39		406	9.41
			外	78			4.20
	⑥	P_L	—	86		406	3.72
胴	⑦	P_L	—	106		377	2.55
	⑧	P_m	—	19		251	12.2
		P_L+P_b	内	20		377	17.8
			外	18			19.9
	⑨-1	P_L	—	11		377	33.2
	⑨-2	P_L	—	13			28.0
胴（底板）	⑩	P_m	—	2		251	124
		P_L+P_b	内	13		377	28.0
			外	12			30.4
	⑪	P_L	—	9		377	40.8
外筒	⑫	引張	—	25		282	10.2
		圧縮	—	50		282	4.64
		せん断	—	45		162	2.60
		曲げ	—	170		282	0.65
	⑬	引張	—	99		282	1.84
		圧縮	—	7		282	39.2
		せん断	—	1		162	161
		曲げ	—	3		282	93.0
	⑭	引張	—	11		282	24.6
		圧縮	—	3		282	93.0
		せん断	—	14		162	10.5
		曲げ	—	62		282	3.54

(注 1)(ロ)-第 A.30 図参照

(注 2)P_m：一次一般膜応力，P_L：一次局部膜応力，P_b：一次曲げ応力

(注 3)断面③～④及び⑦～⑪の P_m に対する基準値は $2/3S_u$，P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は S_u である。断面⑤及び⑥の P_m に対する基準値は $MIN[2.4S_m, 2/3S_u]$，P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は $MIN[3.6S_m, S_u]$ である。断面⑫～⑭に示す引張応力に対する基準値は $1.5f_t$，圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$，せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$，曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。

(ロ)-第A.38表　頭部9m垂直落下時の容器本体に対する

一次応力及び蓋ボルトの評価（2/2）

部位	断面No.（注1）	応力分類（注2）又は応力の種類	表面	応力強さ又は応力（MPa）	温度(℃)	解析基準値（MPa）（注3）	余裕率
下部端板	⑮	引張	—	3		218	71.6
		圧縮	—	1		218	217
		せん断	—	8		126	14.7
		曲げ	—	26		218	7.38
底部中性子遮蔽材カバー	⑱	引張	—	-		217	-
		圧縮	—	1		217	216
		せん断	—	1		125	124
		曲げ	—	2		217	107
	⑲	引張	—	1		217	216
		圧縮	—	2		217	107
		せん断	—	1		125	124
		曲げ	—	1		217	216
二次蓋シール部	⑳	P_L+P_b+Q	内	72		186	1.58
		P_L+P_b+Q	外	77			1.41
	㉑	P_L+P_b+Q	内	79		185	1.34
		P_L+P_b+Q	外	72			1.56
二次蓋ボルト	—	σ_m	—	311		848	1.72
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	663		848	0.27
三次蓋ボルト	—	σ_m	—	180		848	3.71
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	216		848	2.92

(注1)(ロ)-第A.30図参照

(注2)P_L：一次局部膜応力，P_b：一次曲げ応力，Q：二次応力，σ_m：平均引張応力，σ_b：曲げ応力

(注3)断面⑮，⑱及び⑲における引張応力に対する基準値は$1.5f_t$，圧縮応力に対する基準値は$1.5f_c$，せん断応力に対する基準値は$1.5f_s$，曲げ応力に対する基準値は$1.5f_b$である。断面⑳及び㉑に対する基準値はS_yである。蓋ボルトの基準値はS_yである。

(ロ)-第 A.39 表　底部 9m 垂直落下時の容器本体に対する

一次応力及び蓋ボルトの評価 (1/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力分類 (注 2) 又は応力の種類	表面	応力強さ又は応力 (MPa)	温度 (℃)	解析基準値 (MPa) (注 3)	余裕率
二次蓋	③	P_m	—	7		251	34.8
		P_L+P_b	内	52		377	6.25
			外	50			6.54
	④	P_L	—	17		377	21.1
三次蓋	⑤	P_m	—	5		270	53.0
		P_L+P_b	内	21		406	18.3
			外	22			17.4
	⑥	P_L	—	50		406	7.12
胴	⑦	P_L	—	10		377	36.7
	⑧	P_m	—	20		251	11.5
		P_L+P_b	内	21		377	16.9
			外	20			17.8
	⑨-1	P_L	—	31		377	11.1
	⑨-2	P_L	—	60			5.28
胴（底板）	⑩	P_m	—	17		251	13.7
		P_L+P_b	内	100		377	2.77
			外	123			2.06
	⑪	P_L	—	49		377	6.69
外筒	⑫	引張	—	17		282	15.5
		圧縮	—	-		282	-
		せん断	—	9		162	17.0
		曲げ	—	43		282	5.55
	⑬	引張	—	53		282	4.32
		圧縮	—	1		282	281
		せん断	—	1		162	161
		曲げ	—	2		282	140
	⑭	引張	—	27		282	9.44
		圧縮	—	15		282	17.8
		せん断	—	20		162	7.10
		曲げ	—	85		282	2.31

(注 1)(ロ)-第 A.30 図参照

(注 2)P_m：一次一般膜応力，P_L：一次局部膜応力，P_b：一次曲げ応力

(注 3)断面③～④及び⑦～⑪の P_m に対する基準値は $2/3S_u$，P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は S_u である。断面⑤及び⑥の P_m に対する基準値は $MIN[2.4S_m, 2/3S_u]$，P_L 及び P_L+P_b に対する基準値は $MIN[3.6S_m, S_u]$ である。断面⑫～⑭に示す引張応力に対する基準値は $1.5f_t$，圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$，せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$，曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。

(ロ)-第 A.39 表　底部 9m 垂直落下時の容器本体に対する

一次応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力分類 (注 2) 又は応力の種類	表面	応力強さ又は応力 (MPa)	温度(℃)	解析基準値 (MPa) (注 3)	余裕率
下部端板	⑮	引張	—	18		218	11.1
		圧縮	—	7		218	30.1
		せん断	—	26		126	3.84
		曲げ	—	107		218	1.03
底部中性子遮蔽材カバー	⑱	引張	—	42		217	4.16
		圧縮	—	1		217	216
		せん断	—	14		125	7.92
		曲げ	—	44		217	3.93
	⑲	引張	—	43		217	4.04
		圧縮	—	6		217	35.1
		せん断	—	14		125	7.92
		曲げ	—	99		217	1.19
二次蓋シール部	⑳	P_L+P_b+Q	内	30		186	5.20
		P_L+P_b+Q	外	19			8.78
	㉑	P_L+P_b+Q	内	45		185	3.11
		P_L+P_b+Q	外	35			4.28
二次蓋ボルト	—	σ_m	—	200		848	3.24
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	209		848	3.05
三次蓋ボルト	—	σ_m	—	302		848	1.80
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	436		848	0.94

(注 1) (ロ)-第 A.30 図参照

(注 2) P_L：一次局部膜応力，P_b：一次曲げ応力，Q：二次応力，σ_m：平均引張応力，σ_b：曲げ応力

(注 3) 断面⑮，⑱及び⑲における引張応力に対する基準値は $1.5f_t$，圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$，せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$，曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。断面⑳及び㉑に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は S_y である。

2. バスケット

垂直落下時にバスケットに生じる応力はA.5.3.2と同様に求める。ここで，垂直落下時の衝撃加速度には，加速度割増係数として2.6[17]を衝撃加速度（600m/s^2）に乗じる。計算条件と計算結果を(ロ)-第A.40表及び(ロ)-第A.41表に示す。表に示すように，評価位置においてA.1.2に示す解析基準値を満足する。なお，バスケットに生じる応力は，設計降伏点（56MPa）より低いのでバスケットは塑性変形しない。

(ロ)-第A.40表　バスケットの応力計算条件及び計算結果

項目	バスケット合計質量 : W_b(kg)	垂直落下時の衝撃加速度 : G_V(m/s^2)
数値	5600	1560

項目	バスケットプレートのタイプ	バスケットプレート全厚さ : b_1(mm)	バスケットプレート内幅 : b_2(mm)	バスケットプレート長さ : L_1(mm)	胴に接触するバスケットプレートL_1部の個数 : n(-)	バスケットプレートと胴の接触面積 : A_1(mm^2)
数値	A					
	B					

項目	バスケットプレートのタイプ	圧縮応力 : σ_c(MPa)	基準値 : $2/3S_u$(MPa)	余裕率
数値	A	38	79	1.07
	B	38		1.07

(ロ)-第A.41表　バスケットプレートの一次圧縮応力の計算条件及び計算結果

項目	バスケットプレート長さ : L (mm)	バスケットプレートの断面積 : A_2(mm^2)	バスケットプレートの縦弾性係数 : E(MPa)
数値			6.94×10^4

項目	座屈長さ : ℓ_k(mm)	設計降伏点の1.2倍の値又は設計引張強さの0.7倍の値のいずれか小さい方の値 : F(MPa)	圧縮応力 : σ_c(MPa)	許容圧縮応力 : $1.5f_c^*$(MPa)	余裕率
数値			38	66	0.73

A.6.1.2　水平落下

9m 水平落下時の衝撃力に対して，容器本体は十分な強度で密封性を保持し，かつ，遮蔽評価に影響を及ぼすような塑性変形が生じないことを示す。また，胴内のバスケットは破損しないことを示す。

1. 容器本体

水平落下時の衝撃力に対する容器本体の解析を有限要素法による ABAQUS コードにより行う。

(1) 解析モデル

A.5.3.2 と同様に，三次元有限要素を用いた(ロ)-第 A.16 図に示す三次元 180° 対称モデルを用いる。

(2) 荷重条件及び境界条件

a. 荷重条件

水平落下時に作用する荷重は次のとおりである。

・容器本体には，衝撃加速度（710m/s^2）による自重の慣性力が落下方向に働く。

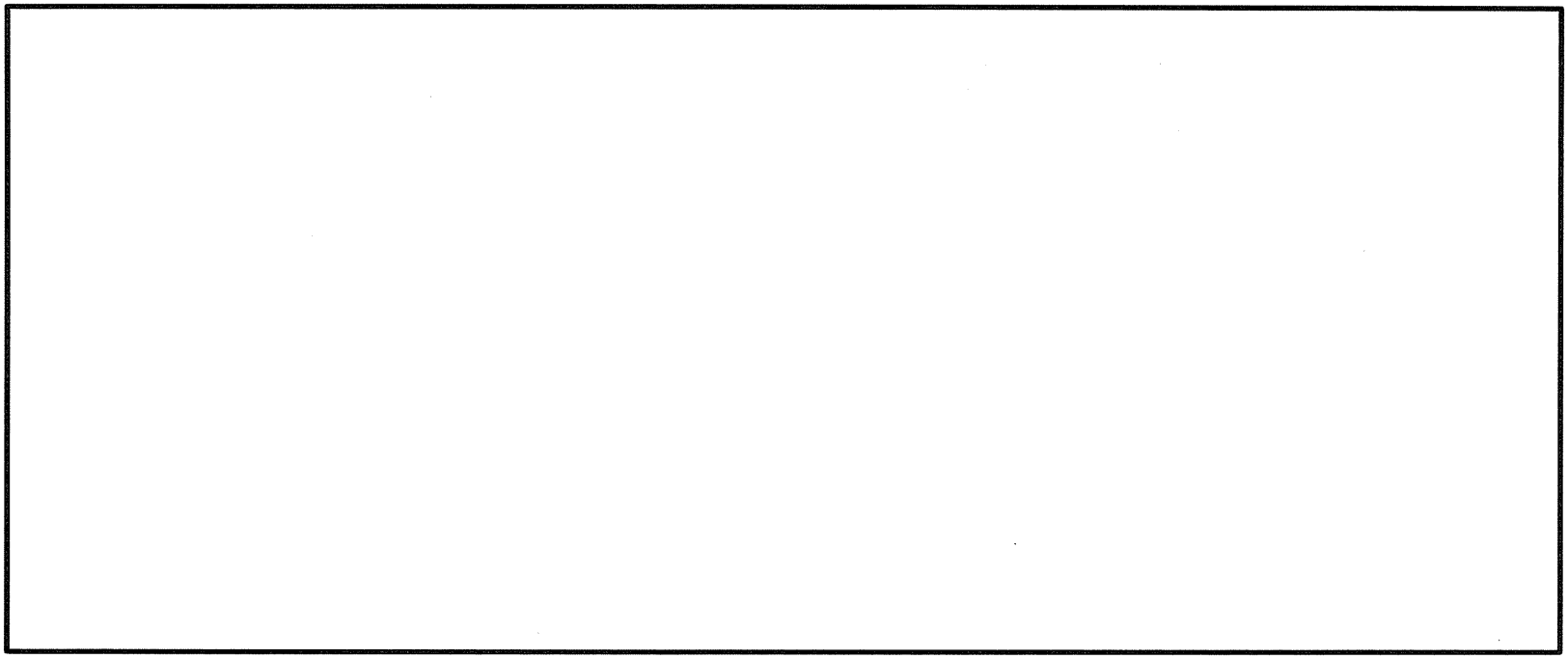
・胴内面には，衝撃加速度（710m/s^2）に加速度割増係数として 1.2 [17] を乗じた加速度による内部収納物等（バスケット及び燃料集合体）の慣性力が働く。

・落下時の上・下部緩衝体木材反力が胴フランジ面及び底板へ働く。

b. 境界条件

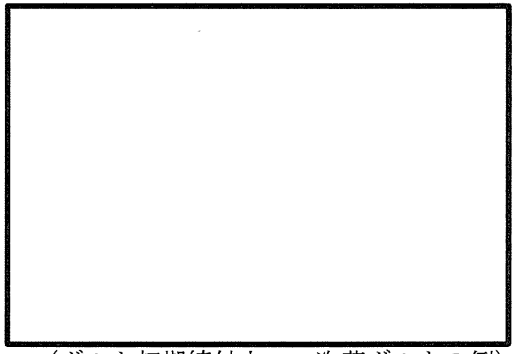
上・下部緩衝体が取り付く面（反力を受ける面）の上・下 1 箇所の Y 方向変位を拘束した。また，0° －180° 面の対称面において X 方向の変位を拘束した。

水平落下時に作用する荷重条件及び境界条件を(ロ)-第 A.42 図に示す。



P_i ：胴内圧（-0.101325 MPa G）
P_{ii} ：一二次蓋間圧力（0.31 MPa G）
P_{iii} ：二三次蓋間圧力（0.19 MPa G）
P_{sr} ：側部中性子遮蔽材部（外筒側面）圧力（ MPa G）
P_{er} ：側部中性子遮蔽材部（端板面）圧力（ MPa G）
P_{tr} ：蓋部中性子遮蔽材部圧力（ MPa G）
P_{br} ：底部中性子遮蔽材部圧力（ MPa G）
F_{iw} ：内部収納物等（バスケット，燃料集合体）の慣性力
F_{tr} ：上部緩衝体反力
F_{br} ：下部緩衝体反力

P_{bi} ：一次蓋ボルト初期締付力（ MPa）
P_{bii} ：二次蓋ボルト初期締付力（ MPa）
P_{biii} ：三次蓋ボルト初期締付力（ MPa）



（ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例）

(ロ)-第 A.42 図　9m 水平落下時の荷重条件及び境界条件

(3) 解析結果

水平落下時の主要な位置（(ロ)-第 A.30 図参照）に対する一次応力の評価結果を(ロ)-第 A.42 表に示す。表に示すように，全ての評価位置において A.1.2 に示す解析基準値を満足する。

また，三次蓋とキャスク本体のOリング取り付け位置での相対口開き変形量は 0.39mm であり，Oリングの初期締め付け代[redacted]mm より小さく，密封性が損なわれることはない。

(ロ)-第A.42表　9m水平落下時の容器本体に対する一次応力及び蓋ボルトの評価（1/2）

部位	断面No.（注1）	応力分類（注2）又は応力の種類	表面	応力強さ又は応力(MPa)	温度(℃)	解析基準値(MPa)（注3）	余裕率
二次蓋	③	P_m	—	18		251	12.9
		P_L+P_b	内	29		377	12.0
			外	40			8.42
	④	P_L	—	57		377	5.61
三次蓋	⑤	P_m	—	48		270	4.62
		P_L+P_b	内	45		406	8.02
			外	76			4.34
	⑥	P_L	—	60		406	5.76
胴	⑦	P_L	—	172		377	1.19
	⑧	P_m	—	67		251	2.74
		P_L+P_b	内	66		377	4.71
			外	94			3.01
	⑨-1	P_L	—	68		377	4.54
	⑨-2	P_L	—	108			2.49
胴（底板）	⑩	P_m	—	27		251	8.29
		P_L+P_b	内	28		377	12.4
			外	38			8.92
	⑪	P_L	—	56		377	5.73
外筒	⑫	引張	—	185		282	0.52
		圧縮	—	51		282	4.52
		せん断	—	95		162	0.70
		曲げ	—	174		282	0.62
	⑬	引張	—	119		282	1.36
		圧縮	—	53		282	4.32
		せん断	—	7		162	22.1
		曲げ	—	18		282	14.6
	⑭	引張	—	33		282	7.54
		圧縮	—	50		282	4.64
		せん断	—	69		162	1.34
		曲げ	—	205		282	0.37

(注1)(ロ)-第A.30図参照

(注2)P_m：一次一般膜応力，P_L：一次局部膜応力，P_b：一次曲げ応力

(注3)断面③～④及び⑦～⑪のP_mに対する基準値は$2/3S_u$，P_L及びP_L+P_bに対する基準値はS_uである。断面⑤及び⑥のP_mに対する基準値は$MIN[2.4S_m, 2/3S_u]$，P_L及びP_L+P_bに対する基準値は$MIN[3.6S_m, S_u]$である。断面⑫～⑭に示す引張応力に対する基準値は$1.5f_t$，圧縮応力に対する基準値は$1.5f_c$，せん断応力に対する基準値は$1.5f_s$，曲げ応力に対する基準値は$1.5f_b$である。

(ロ)-第 A.42 表　9m 水平落下時の容器本体に対する

一次応力及び蓋ボルトの評価 (2/2)

部位	断面 No. (注 1)	応力分類 (注 2) 又は応力の種類	表面	応力強さ又は応力 (MPa)	温度(℃)	解析基準値 (MPa) (注 3)	余裕率
下部端板	⑮	引張	—	22		218	8.90
		圧縮	—	35		218	5.22
		せん断	—	41		126	2.07
		曲げ	—	171		218	0.27
底部中性子遮蔽材カバー	⑱	引張	—	5		217	42.4
		圧縮	—	89		217	1.43
		せん断	—	46		125	1.71
		曲げ	—	21		217	9.33
	⑲	引張	—	36		217	5.02
		圧縮	—	142		217	0.52
		せん断	—	47		125	1.65
		曲げ	—	140		217	0.55
二次蓋シール部	⑳	P_L+P_b+Q	内	127		186	0.46
		P_L+P_b+Q	外	63			1.95
	㉑	P_L+P_b+Q	内	149		185	0.24
		P_L+P_b+Q	外	155			0.19
二次蓋ボルト	—	σ_m	—	314		848	1.70
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	809		848	0.04
三次蓋ボルト	—	σ_m	—	420		848	1.01
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	767		848	0.10

(注 1) (ロ)-第 A.30 図参照

(注 2) P_L：一次局部膜応力，P_b：一次曲げ応力，Q：二次応力，σ_m：平均引張応力，σ_b：曲げ応力

(注 3) 断面⑮，⑱及び⑲における引張応力に対する基準値は $1.5f_t$，圧縮応力に対する基準値は $1.5f_c$，せん断応力に対する基準値は $1.5f_s$，曲げ応力に対する基準値は $1.5f_b$ である。断面⑳及び㉑に対する基準値は S_y である。蓋ボルトの基準値は S_y である。

2. バスケット

水平落下時にバスケットに生じる応力はA.5.3.2と同様に求める。ここで，水平落下時の衝撃加速度には加速度割増係数として1.2[17]を衝撃加速度（710m/s²）に乗じる。計算条件と計算結果を(ロ)-第A.43表及び(ロ)-第A.44表に示す。表に示すように，評価位置においてA.1.2に示す解析基準値を満足する。なお，180°側以外の任意の角度で落下する場合も健全性は維持される。また，バスケットに生じる応力は，設計降伏点(56MPa)より低いので，バスケットは塑性変形しない。

(ロ)-第A.43表　バスケットプレート縦板の応力計算条件及び計算結果

項目	燃料集合体の質量(BP無，BP有) : W_f(kg)	領域Iの範囲にある燃料集合体の数(BP無，BP有) : N_f(体)	領域Iのバスケットプレート，中性子吸収材，バスケットサポート及び燃料集合体の質量(注1) : W_I(kg)	領域IIのバスケットプレート及び中性子吸収材の質量(注2) : W_{II}(kg)	水平落下時の衝撃加速度 : G_H(m/s²)
数値	680,[redacted]	[redacted]			852

項目	バスケットプレート幅1 : b_1(mm)	バスケットプレート幅2 : b_2(mm)	バスケットプレート高さ1 : h_1(mm)	バスケットプレート幅3 : b_3(mm)	バスケットプレート幅4 : b_4(mm)	バスケットプレート高さ2 : h_2(mm)	断面積 : A(mm²)
数値	[redacted]						

項目	バスケットプレートの数 : N(枚)	圧縮応力 : σ_c(MPa)	基準値 : (2/3)S_u (MPa)	余裕率
数値	[redacted]	46	79	0.71

(注1) 領域Iのバスケットプレート，中性子吸収材，バスケットサポート及び燃料集合体の各質量の内訳は，以下のとおりである。

バスケットプレートの質量　：[redacted] (kg)
中性子吸収材の質量　：[redacted] (kg)
バスケットサポートの質量　：[redacted] (kg)
燃料集合体の合計質量　：680[redacted] (kg)

(注2) 領域IIのバスケットプレート及び中性子吸収材の各質量の内訳は以下のとおりである。

バスケットプレートの質量　：[redacted] (kg)
中性子吸収材の質量　：[redacted] (kg)

(ロ)-第A.44表　バスケットプレート横板の応力計算条件及び計算結果

項目	燃料集合体の質量(BP有) : W_f(kg)	バスケットプレート及び中性子吸収材の質量 : W_b(kg)	バスケットプレートの数 : N(枚)	バスケットセルの内幅 : ℓ(mm)	分布荷重 : w(kg/mm)	水平落下時の衝撃加速度 : G_H(m/s^2)
数値	[redacted]					852

項目	バスケットプレート高さ1 : h_1(mm)	バスケットプレート幅1 : b_1(mm)	バスケットプレート幅2 : b_2(mm)	バスケットプレート高さ2 : h_2(mm)	バスケットプレート幅3 : b_3(mm)
数値	[redacted]				

項目	曲げモーメント : M(N・mm)	断面係数 : Z(mm^3)	曲げ応力 : σ_b(MPa)	基準値 : (2/3) αS_u(MPa)	余裕率
数値	[redacted]		32	103	2.21

項目	せん断力 : F(N)	断面積 : A(mm^2)	せん断応力 : τ(MPa)	基準値 : 1.2S_m(MPa)	余裕率
数値	[redacted]		8	43	4.37

A.6.1.3　コーナー落下

(ロ)-第 A.37 表に示すように，コーナー落下時の衝撃加速度は垂直落下及び水平落下に比べて小さい。

したがって，コーナー落下時の輸送容器の各部の応力は垂直落下及び水平落下時の結果よりも厳しくなることはない。ただし，頭部コーナー落下時は，頭部垂直落下時と違い蓋部に作用する緩衝体の圧潰力が蓋全面に作用せず内部の収納物等による慣性力が蓋を介して蓋ボルトに作用するため蓋ボルトの健全性を評価する。

1. 二次蓋ボルト

頭部コーナー落下時に，二次蓋ボルトには，二次蓋自重及び蓋間圧力による引張応力が生じる。ここで，初期締付トルク，熱応力及び蓋間圧力によってボルト引張力とフランジ部とは釣り合った状態になっているが，コーナー落下時，二次蓋ボルトには二次蓋自重の慣性力が外力として加わる。

(1) 初期締付力，熱応力，胴内圧及び蓋間圧力により生じる引張応力

初期締付力，熱応力，胴内圧及び蓋間圧力により二次蓋ボルトに生じる引張応力 σ_{t1} (MPa) は，[redacted] MPa である。

(2) 慣性力により生じる引張応力

慣性力によりボルトに生じる引張応力 σ_{t2} (MPa) は，次式で与えられる。

$$\sigma_{t2}=\frac{WG_C\cos\theta}{\frac{\pi}{4}d^2n}$$

ここで，

W　：二次蓋の質量 (kg)

G_C　：衝撃加速度 (m/s^2)

θ　：落下角度 (°)

d　：ボルト軸径 (mm)

n　：ボルトの数 (本)

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.45 表に示す。

(ロ)-第 A.45 表　慣性力によりボルトに生じる引張応力計算条件及び計算結果

項目	二次蓋の質量：W(kg)	衝撃加速度：G_C(m/s^2)	落下角度：θ (°)	ボルト軸径：d(mm)	ボルトの数：n(本)	引張応力：σ_{t2}(MPa)
数値	4.5×10^3	480	28.6	[redacted]		44

(3) ボルトに生じる引張応力

各荷重によりボルトに生じる引張応力 σ_t (MPa) の合計は，次式で与えられる。

$$\sigma_t = \sigma_{t1} + \phi\ \sigma_{t2}$$

ここで，

ϕ ：ボルト内力係数(-)

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.46 表に示す。

(ロ)-第 A.46 表　ボルトに生じる引張応力計算条件及び計算結果

項目	初期締付力，熱応力，胴内圧及び蓋間圧力により生じる引張応力：σ_{t1}(MPa)	ボルト内力係数：ϕ (-)	慣性力により生じる引張応力：σ_{t2}(MPa)	ボルトに生じる引張応力：σ_t(MPa)	解析基準値：S_y(MPa)	余裕率
数値	[redacted]		44	214	848	2.96

2. 三次蓋ボルト

頭部コーナー落下時に，三次蓋ボルトには，三次蓋自重及び蓋間圧力による引張応力が生じる。ここで，初期締付トルク，熱応力及び蓋間圧力によってボルト引張力とフランジ部とは釣り合った状態になっているが，コーナー落下時，三次蓋ボルトには三次蓋自重の慣性力が外力として加わる。

(1) 初期締付力，熱応力及び蓋間圧力により生じる引張応力

初期締付力，熱応力及び蓋間圧力により三次蓋ボルトに生じる引張応力 σ_{t1} (MPa) は，(ロ)-第 A.17 表より 229MPa である。

(2) 慣性力により生じる引張応力

慣性力によりボルトに生じる引張応力 σ_{t2} (MPa) は，W を三次蓋の質量として二次蓋と同様に求める。

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.47 表に示す。

(ロ)-第 A.47 表　慣性力によりボルトに生じる引張応力計算条件及び計算結果

項目	三次蓋の質量：W(kg)	衝撃加速度：G_C(m/s^2)	落下角度：θ (°)	ボルト軸径：d(mm)	ボルトの数：n(本)	引張応力：σ_{t2}(MPa)
数値	3.3×10^3	480	28.6	[redacted]		47

(3) ボルトに生じる引張応力

各荷重によりボルトに生じる引張応力 σ_t (MPa) の合計は，二次蓋と同様に求める。

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.48 表に示す。

(ロ)-第 A.48 表　ボルトに生じる引張応力計算条件及び計算結果

項目	初期締付力，熱応力及び蓋間圧力により生じる引張応力 : σ_{t1}(MPa)	ボルト内力係数 : ϕ (-)	慣性力により生じる引張応力 : σ_{t2}(MPa)	ボルトに生じる引張応力 : σ_t(MPa)	解析基準値 : S_y(MPa)	余裕率
数値	[redacted]		47	236	848	2.59

A.6.1.4　傾斜落下

傾斜落下については，落下方向がコーナー落下と垂直落下との間の場合とコーナー落下と水平落下との間の場合がある。

前者の場合は，落下エネルギーの一部が輸送物を垂直方向に回転させるのに費やされるので，エネルギーの吸収は垂直落下とコーナー落下よりも小さくなり，これらのいずれよりも条件が厳しくなることはない。

一方，後者の場合，細長い輸送物では落下エネルギーの一部が輸送物の回転運動エネルギーとなり二次衝撃側の吸収エネルギーが増加する。特に，蓋密封部が二次衝撃側となる場合，密封性能を損なうおそれがあるため，二次衝撃側の衝撃加速度の影響を評価する必要がある。A.10.3 に示すように，落下試験結果を基にした密封性能の評価の結果，傾斜落下時に輸送物の健全性が損なわれることはない。

A.6.1.5　結果の要約

1. 結果の要約

9m 落下試験の衝撃加速度と緩衝体変形量の要約は(ロ)-第 A.37 表のとおりである。なお，緩衝体変形量は設計基準変形量以下であり，容器本体に発生する衝撃加速度が急激に上昇することはない。

また，本試験では，緩衝体は変形するが，緩衝体は容器本体から外れることはない。

2. 結果の検討

9m 落下試験による塑性変形は，緩衝体に生じるが，容器本体及びバスケットの構造上の健全性が損なわれることはない。

以上の解析及び評価は周囲温度 38℃の高温側の環境下に対して行った。低温側の環境下に対しては，A.4.2 に示すように低温になっても材料は脆化等がなく，機械的性質が低下することがないので，輸送物の構造上の健全性は維持される。

A.6.2　強度試験・落下試験Ⅱ（1m 落下時）

本項では，9m 落下試験に引き続いて 1m 貫通試験が起こるとして輸送物が 1m 高さから直径 150mm の軟鋼棒へ落下した場合に対して，輸送物の構造の健全性を解析によって示す。

1m 貫通試験は，輸送物が最大破損を受けるよう垂直及び水平方向に落下し，衝突時に輸送物の重心の真下に軟鋼棒があるとして解析した。

これ以外の落下は，落下エネルギーが回転モーメントとして作用するので輸送物に対して上記落下より大きな破損を生じることはない。

解析は垂直方向落下において蓋部及び底部について行う。また，水平方向落下においては胴について行う。

なお，三次蓋のリリーフバルブカバープレート上への垂直方向落下及び三次蓋シール部への垂直方向落下又は水平方向落下では，過大な圧縮力により塑性変形が生じ，Oリングと三次蓋又は胴フランジのシール面との間に生じた隙間が原因で密封性能を損なうおそれがあるが，MSF-24P 型輸送容器のプロトタイプである MSF キャスクの落下試験モデルの緩衝体は，A.10.1 に示すとおり当該部への直接的な荷重入力を防止するために緩衝体内部のカバープレートの剛性を高める設計としており，1m 貫通試験で密封性能が維持されることを確認している。MSF-24P 型の緩衝体は落下試験モデルと同じ緩衝体内部のカバープレートの剛性を高める構造（カバープレートの厚さ［　　］及び衝撃荷重を支持する胴フランジの厚さ［　　］の合計の厚さ［　　］はプロトタイプの合計厚さ［　　］に比べて同等以上の厚さを有している。）を採用しており，かつ，A.10.3 に示すとおり MSF-24P 型は落下試験モデルに比べ高い密封性能を有しているため，1m 貫通試験による三次蓋密封部への直接的な荷重に対しても密封性能が損なわれることはない。

1. 垂直落下

(1) 蓋部の貫通強度

蓋部については，三次蓋が貫通しないことを示す。

落下時に軟鋼棒が圧潰することにより輸送容器に加わる最大荷重 F_{bar} (N) は以下のとおり求められる。

$$F_{bar}=\sigma_u A$$

ここで，

σ_u ：軟鋼棒の設計引張強さ (MPa)

A ：軟鋼棒の断面積 (mm^2)

$$A=\frac{\pi}{4}d^2$$

d ：軟鋼棒の直径 (mm)

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.49 表に示す。

(ロ)-第 A.49 表　輸送容器に加わる最大荷重計算条件及び計算結果

項目	軟鋼棒直径 : d(mm)	軟鋼棒の設計引張強さ : σ_u(MPa)	最大荷重 : F_{bar}(N)
数値	150	400	7.068×10^6

押抜きせん断によって板にせん断破壊を引き起すのに必要な力 F (N) は，次式で表わされる。

$$F=\pi dtS$$

ここで，

d ：軟鋼棒直径 (mm)

t ：板厚 (mm)

S ：せん断強さ (MPa)

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.50 表に示す。三次蓋が貫通されることはない。したがって，これらに覆われる二次蓋，これに付属するモニタリングポートカバープレート，二次蓋に覆われる一次蓋及びバルブカバープレートは貫通されることなく健全性は担保される。また，三次蓋は胴フランジ部に押付けられ，Oリング取り付け位置での口開きは生じない。

(ロ)-第 A.50 表　せん断破壊を引き起こすのに必要な力の計算条件及び計算結果

項目	軟鋼棒直径 ：d(mm)	板厚 ：t(mm)	せん断強さ ：S(MPa)	せん断破壊に 必要な力：F(N)	最大荷重 ：F_{bar}(N)	余裕率
数値	150	[redacted](注 1)	[redacted](注 2)	1.323×10^{7}	7.068×10^{6}	0.87

(注 1) [redacted]

(注 2) せん断強さはせん断ひずみエネルギー説に基づき設計引張強さ S_u の $1/\sqrt{3}$ とする。ここで，(ロ)-第 A.2 図及び(ロ)-第 A.3 図より上部緩衝体カバープレートの材料 [redacted] の [redacted] MPa であるので，低い方の設計引張強さ [redacted] MPa を使用し，せん断強さ S は，S＝[redacted] MPa。

(2) 底部（底部中性子遮蔽材カバー）の貫通強度

底部については底部中性子遮蔽材カバーが貫通しないことを蓋部と同様に示す。

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.51 表に示す。底部（底部中性子遮蔽材カバー）が貫通されることはない。

(ロ)-第 A.51 表　せん断破壊を引き起こすのに必要な力の計算条件及び計算結果

項目	軟鋼棒直径 ：d(mm)	板厚 ：t(mm)	せん断強さ ：S(MPa)	せん断破壊に 必要な力：F(N)	最大荷重 ：F_{bar}(N)	余裕率
数値	150	[redacted](注 1)	[redacted](注 2)	7.596×10^{6}	7.068×10^{6}	0.07

(注 1) [redacted]

(注 2)

2. 水平落下

(1) 胴の貫通強度

水平落下の場合，軟鋼棒には外筒が衝突して変形し，破損する可能性がある。したがって，水平落下では胴に対して検討する。

押抜きせん断によって胴がせん断破壊を引き起こすのに必要な力 F (N) は，1.(1)と同様の式で与えられる。計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.52 表に示す。胴が貫通されることはない。

(ロ)-第 A.52 表　せん断破壊を引き起こすのに必要な力の計算条件及び計算結果

項目	軟鋼棒直径 : d(mm)	板厚 : t(mm)	せん断強さ : S(MPa)	せん断破壊に必要な力 : F(N)	最大荷重 : F_{bar}(N)	余裕率
数値	150	[redacted]	[redacted](注)	2.403×10^{7}	7.068×10^{6}	2.39

(注) [redacted] であるので，せん断強さ S は，

S = [redacted] MPa。

A.6.2.1　結果の要約

1m 貫通試験においては緩衝体，外筒及び側部中性子遮蔽材に貫通又は変形が生じるおそれがあるが，容器本体に破損が生じることはない。

以上の解析及び評価は周囲温度 38℃の高温側の環境下に対して行った。低温側の環境下に対しては，A.4.2 に示すように低温になっても材料は脆化等がなく，機械的性質が低下することがないので，輸送物の構造上の健全性に問題はない。

A.6.3　熱的試験

A.6.3.1　温度及び圧力の要約

1. 温度

輸送物各部の最高温度は(ロ)章 B の熱解析から求まる。各部位の最高温度と解析基準値を定める温度を(ロ)-第 A.53 表に示す。

(ロ)-第 A.53 表　特別の試験条件における最高温度の要約

（単位：℃）

部位	熱解析結果	解析基準値設定温度
胴（本体部）	206	
胴（フランジ部）	224	
胴（底板）	175	
二次蓋	137	
三次蓋	186	
二次蓋ボルト	137	
三次蓋ボルト	153	
外筒	714	
下部端板	655	
底部中性子遮蔽材カバー	161	

2. 圧力

(ロ)章 B の熱解析から求まる特別の試験条件における輸送容器各部の圧力及び構造解析で使用する圧力を(ロ)-第 A.54 表に示す。

(ロ)-第 A.54 表　特別の試験条件の熱解析の要約と評価

項目	熱解析結果	構造解析使用圧力	圧力設定方法
胴内圧	0.307 MPa (0.206 MPa G)	0.351325 MPa (0.25 MPa G)	内外圧力差が最大となるように熱解析結果に余裕を取った値を使用
一二次蓋間圧力	0.420 MPa (0.319 MPa G)	0.441325 MPa (0.34 MPa G)	内外圧力差が最大となるように熱解析結果に余裕を取った値を使用
二三次蓋間圧力	0.272 MPa (0.171 MPa G)	0.371325 MPa (0.27 MPa G)	三次蓋に対して安全側となるように熱解析結果(二三次蓋間圧力)に余裕を取った値を使用

なお，蓋部中性子遮蔽材充填空間については，当該空間の水の存在による圧力上昇を考慮して，[redacted]MPa G ([redacted]MPa) とする。

側部中性子遮蔽材充填空間は，外筒部を[redacted]MPa G ([redacted]MPa)，端板部を[redacted]MPa G ([redacted]MPa) とする。底部中性子遮蔽材充填空間は，[redacted]MPa G ([redacted]MPa) とする。

A.6.3.2　熱膨張

1. 応力計算

本項では，特別の試験条件下における容器本体各部の熱応力と胴内圧による応力の計算を行う。B.5.3 及びB.5.4 に示す温度分布と胴内圧を荷重条件とし，解析は有限要素法による ABAQUS コードを用いて行う。

(1) 解析モデル

A.5.1.3 と同様に，三次元有限要素を用いた(ロ)-第 A.16 図に示す三次元 180° 対称モデルを用いる。

(2) 荷重条件及び境界条件

a. 荷重条件

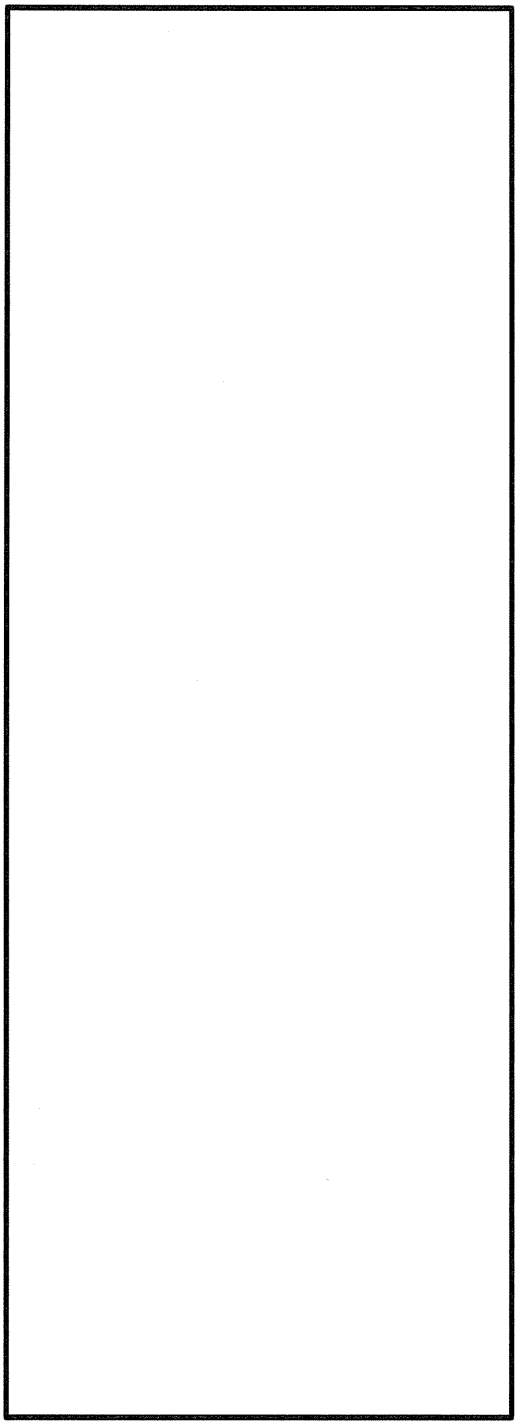
B.5.3 に示される容器本体の温度差が一番大きくなる火災後 30 分における温度分布((ロ)-第 B.12 図参照)，胴内圧（0.25MPa G），一二次蓋間圧力（0.34MPa G），二三次蓋間圧力（0.27MPa G）を荷重条件とする。

蓋部中性子遮蔽材充填空間は，当該空間の水の存在による圧力上昇を考慮して，[redacted]MPa G とする。

側部中性子遮蔽材充填空間は，外筒部を[redacted]MPa G，端板部を[redacted]MPa G，底部中性子遮蔽材充填空間は，[redacted]MPa G とする。

b. 境界条件

(ロ)-第 A.43 図に示すように，底部の 1 箇所の軸方向変位及び対称面の法線方向変位を拘束し，他は変位自由とする。



P_i ：胴内圧 (0.25 MPa G)

P_{ii} ：一二次蓋間圧力 (0.34 MPa G)

P_{iii} ：二三次蓋間圧力 (0.27 MPa G)

P_{sr} ：側部中性子遮蔽材部（外筒側面）圧力

(MPa G)

P_{er} ：側部中性子遮蔽材部（端板面）圧力

(MPa G)

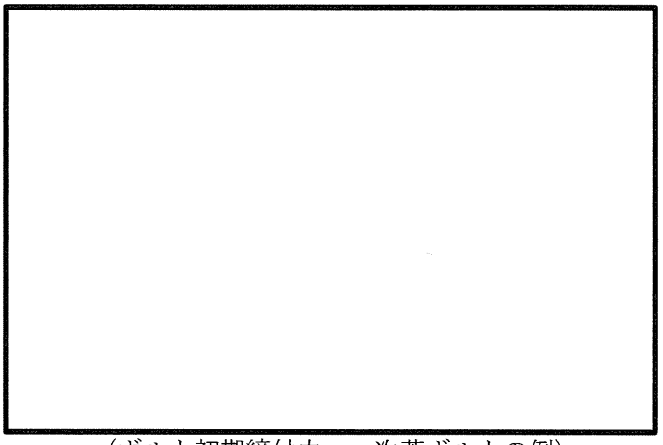
P_{tr} ：蓋部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

P_{br} ：底部中性子遮蔽材部圧力 (MPa G)

P_{bi} ：一次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{bii} ：二次蓋ボルト初期締付力 (MPa)

P_{biii} ：三次蓋ボルト初期締付力 (MPa)



(ボルト初期締付力：一次蓋ボルトの例)

(ロ)-第 A.43 図　特別の試験条件の熱的試験における荷重条件及び境界条件

A.6.3.3　許容応力との比較

1. 容器本体各部

(ロ)-第 A.30 図に示す容器本体の主要な評価位置における一次応力及び蓋ボルトの応力の評価結果を(ロ)-第 A.55 表に示す。表に示すように，いずれの応力も A.1.2 に定めた解析基準値以下である。

なお，三次蓋ボルトは三次蓋と異なる材質のため，運搬中に予想される-25℃～38℃の周囲温度の変化により軸力が変化する。仮に周囲温度-25℃で三次蓋ボルトを締め付けた後，特別の試験条件下に置かれた場合は，ステンレス鋼製の三次蓋と合金鋼製の三次蓋ボルトの熱膨張係数の差により三次蓋ボルトの軸力が約 6%増加するものの余裕率が 0.06 以上あるため，また，周囲温度 38℃で締め付けた後，特別の試験条件下に置かれた場合には，軸力が約 3%低下するもののOリングを締め付けるために必要な軸力を維持しているため，三次蓋ボルトにゆるみや破損を生じることはない。一方，一次蓋ボルトと二次蓋ボルトは，それぞれ一次蓋と二次蓋との温度の差及び熱膨張係数の差が小さいため，軸力の変化は三次蓋ボルトに比べ軽微であることから，ゆるみや破損を生じることはない。

また，三次蓋とキャスク本体のOリング取り付け位置での相対口開き変形量は 0.32mm であり，Oリングの初期締め付け代[redacted]mm より小さく，密封性が損なわれることはない。

(ロ)-第A.55表　特別の試験条件における胴内圧による容器本体に対する一次応力及び蓋ボルトの評価（1/2）

部位	断面No.（注1）	応力分類又は応力の種類（注2）	表面	応力強さ又は応力（MPa）	温度（℃）	解析基準値（MPa）（注3）	余裕率
二次蓋	③	P_m	—	2		251	124
		P_L+P_b	内	8		377	46.1
			外	9			40.8
	④	P_L	—	4		377	93.2
三次蓋	⑤	P_m	—	6		251	40.8
		P_L+P_b	内	28		377	12.4
			外	26			13.5
	⑥	P_L	—	8		377	46.1
胴	⑦	P_L	—	2		377	187
	⑧	P_m	—	1		251	250
		P_L+P_b	内	1		377	376
			外	1			376
	⑨-1	P_L	—	2		377	187
	⑨-2	P_L	—	2			187
胴（底板）	⑩	P_m	—	1		251	250
		P_L+P_b	内	2		377	187
			外	3			124
	⑪	P_L	—	1		377	376
外筒	⑫	引張	—	11		124	10.2
		圧縮	—	—		124	—
		せん断	—	8		72	8.00
		曲げ	—	34		124	2.64
	⑬	引張	—	21		124	4.90
		圧縮	—	1		124	123
		せん断	—	1		72	71.0
		曲げ	—	2		124	61.0
	⑭	引張	—	6		124	19.6
		圧縮	—	1		124	123
		せん断	—	8		72	8.00
		曲げ	—	35		124	2.54

(注1)(ロ)-第A.30図参照

(注2)P_m：一次一般膜応力，P_L：一次局部膜応力，P_b：一次曲げ応力

(注3)断面③～④及び⑦～⑪のP_mに対する基準値は$2/3S_u$，P_L及びP_L+P_bに対する基準値はS_uである。断面⑤及び⑥のP_mに対する基準値は$MIN[2.4S_m, 2/3S_u]$，P_L及びP_L+P_bに対する基準値は$MIN[3.6S_m, S_u]$である。断面⑫～⑭に示す引張応力に対する基準値は$1.5f_t$，圧縮応力に対する基準値は$1.5f_c$，せん断応力に対する基準値は$1.5f_s$，曲げ応力に対する基準値は$1.5f_b$である。

(ロ)-第A.55表　特別の試験条件における胴内圧による容器本体に対する一次応力及び蓋ボルトの評価（2/2）

部位	断面No.（注1）	応力分類（注2）又は応力の種類	表面	応力強さ又は応力(MPa)	温度(℃)	解析基準値(MPa)（注3）	余裕率
下部端板	⑮	引張	—	2		144	71.0
		圧縮	—	1		144	143
		せん断	—	3		83	26.6
		曲げ	—	12		144	11.0
底部中性子遮蔽材カバー	⑱	引張	—	3		201	66.0
		圧縮	—	1		201	200
		せん断	—	6		116	18.3
		曲げ	—	19		201	9.57
	⑲	引張	—	8		201	24.1
		圧縮	—	—		201	—
		せん断	—	11		116	9.54
		曲げ	—	70		201	1.87
二次蓋シール部	⑳	P_L+P_b+Q	内	27		183	5.77
		P_L+P_b+Q	外	20			8.15
	㉑	P_L+P_b+Q	内	115		174	0.51
		P_L+P_b+Q	外	112			0.55
二次蓋ボルト	—	σ_m	—	307		833	1.71
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	766		833	0.08
三次蓋ボルト	—	σ_m	—	391		825	1.10
		$\sigma_m+\sigma_b$	—	669		825	0.23

(注1)(ロ)-第A.30図参照

(注2)P_L：一次局部膜応力，P_b：一次曲げ応力，Q：二次応力，σ_m：平均引張応力，σ_b：曲げ応力

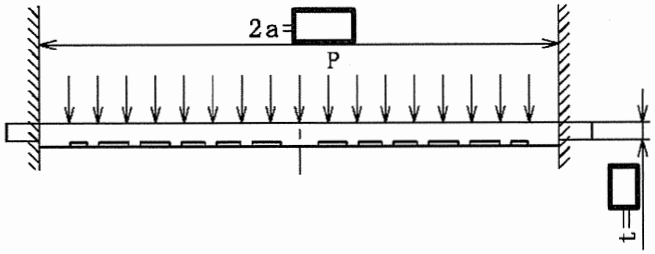
(注3)断面⑮，⑱及び⑲における引張応力に対する基準値は$1.5f_t$，圧縮応力に対する基準値は$1.5f_c$，せん断応力に対する基準値は$1.5f_s$，曲げ応力に対する基準値は$1.5f_b$である。断面⑳及び㉑に対する基準値はS_yである。蓋ボルトの基準値はS_yである。

A.6.4　浸漬

本輸送物の収納物は，最大放射能量が A_2 値の 10 万倍を超えるので，A.7 において 200m 浸漬に相当する水頭圧で解析を行い，胴，底板及び三次蓋に破損のないことを確認している。

特別の試験条件の 15m 浸漬試験においては，200m 浸漬試験の負荷条件より厳しくないため密封装置は A.1.2 で定めた基準を満足するが，「規則」及び「告示」に基づいて 15m 浸漬試験における三次蓋の強度を確認する。

三次蓋の強度解析モデルを(ロ)-第 A.44 図に示す。



(単位：mm)

(ロ)-第 A.44 図　三次蓋の強度解析モデル図

三次蓋を端部固定の円板としてモデル化すると，その最大曲げ応力 σ_b（MPa）は，次式で与えられる。[15)]

$$\sigma_b = 0.75\frac{Pa^2}{t^2}$$

ここで，

a　：円板の半径（mm）

P　：差圧（MPa）

t　：板厚（mm）

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.56 表に示す。三次蓋は，外圧に対して十分な強度を有する。なお，上記の発生応力値は□℃における三次蓋の材料の設計降伏点（166MPa）より低く，また，外圧は蓋を胴に押し付けるように作用するので蓋Oリングの密封性能は 15m 浸漬時において保持される。

(ロ)-第 A.56 表　三次蓋の曲げ応力計算条件及び計算結果

項目	円板の半径 ：a(mm)	差圧 ：P(MPa)	板厚 ：t(mm)	最大曲げ応力 ：σ_b(MPa)	三次蓋の温度(℃)	基準値 ：MIN[3.6S_m, S_u] (MPa)	余裕率
数値	□	0.251325	□	41	□	406	8.90

また，外筒及び底部中性子遮蔽材カバーは内部空間にそれぞれ[redacted]MPa G及び[redacted]MPa Gの内圧が生じているが，水深15mの水圧（0.15MPa）が外圧として負荷されることで差圧が緩和されるため，遮蔽解析に影響を及ぼすような破損は生じない。

A.6.5　結果の要約及びその評価

1. 解析結果の要約

特別の試験条件における輸送物に対する評価結果の要約を(ロ)-第A.57表に示す。表に示すように，各試験条件下において輸送物各部はA.1.2に定めた基準を満足し構造上の健全性が損なわれることはない。

(ロ)-第A.57表　特別の試験条件における構造解析結果の要約（1/4）

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等
9m落下試験				
1.垂直落下				
(1)容器本体（頭部垂直落下）				
二次蓋　(P_L+P_b)	S_u	377	124	2.04
三次蓋　(P_L)	S_u	406	86	3.72
胴　(P_L)	S_u	377	106	2.55
胴（底板）　(P_L+P_b)	S_u	377	13	28.0
外筒　(引張)	$1.5f_t$	282	99	1.84
外筒　(圧縮)	$1.5f_c$	282	50	4.64
外筒　(せん断)	$1.5f_s$	162	45	2.60
外筒　(曲げ)	$1.5f_b$	282	170	0.65
下部端板　(引張)	$1.5f_t$	218	3	71.6
下部端板　(圧縮)	$1.5f_c$	218	1	217
下部端板　(せん断)	$1.5f_s$	126	8	14.7
下部端板　(曲げ)	$1.5f_b$	218	26	7.38
底部中性子遮蔽材カバー　(引張)	$1.5f_t$	217	1	216
底部中性子遮蔽材カバー　(圧縮)	$1.5f_c$	217	2	107
底部中性子遮蔽材カバー　(せん断)	$1.5f_s$	125	1	124
底部中性子遮蔽材カバー　(曲げ)	$1.5f_b$	217	2	107
二次蓋密封シール部　(P_L+P_b+Q)	S_y	185	79	1.34
二次蓋ボルト　(σ_m)	S_y	848	311	1.72
二次蓋ボルト　($\sigma_m+\sigma_b$)	S_y	848	663	0.27
三次蓋ボルト　(σ_m)	S_y	848	180	3.71
三次蓋ボルト　($\sigma_m+\sigma_b$)	S_y	848	216	2.92
三次蓋相対口開き変形量	—	[redacted]mm	0.01 mm以下	基準に合致

(ロ)-第 A.57 表　特別の試験条件における構造解析結果の要約 (2/4)

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等
(2)容器本体（底部垂直落下）				
二次蓋　(P_L+P_b)	S_u	377	52	6.25
三次蓋　(P_L)	S_u	406	50	7.12
胴　(P_L)	S_u	377	60	5.28
胴（底板）　(P_L+P_b)	S_u	377	123	2.06
外筒　(引張)	$1.5f_t$	282	53	4.32
外筒　(圧縮)	$1.5f_c$	282	15	17.8
外筒　(せん断)	$1.5f_s$	162	20	7.10
外筒　(曲げ)	$1.5f_b$	282	85	2.31
下部端板　(引張)	$1.5f_t$	218	18	11.1
下部端板　(圧縮)	$1.5f_c$	218	7	30.1
下部端板　(せん断)	$1.5f_s$	126	26	3.84
下部端板　(曲げ)	$1.5f_b$	218	107	1.03
底部中性子遮蔽材カバー　(引張)	$1.5f_t$	217	43	4.04
底部中性子遮蔽材カバー　(圧縮)	$1.5f_c$	217	6	35.1
底部中性子遮蔽材カバー　(せん断)	$1.5f_s$	125	14	7.92
底部中性子遮蔽材カバー　(曲げ)	$1.5f_b$	217	99	1.19
二次蓋密封シール部　(P_L+P_b+Q)	S_y	185	45	3.11
二次蓋ボルト　(σ_m)	S_y	848	200	3.24
二次蓋ボルト　($\sigma_m+\sigma_b$)	S_y	848	209	3.05
三次蓋ボルト　(σ_m)	S_y	848	302	1.80
三次蓋ボルト　($\sigma_m+\sigma_b$)	S_y	848	436	0.94
三次蓋相対口開き変形量	—	[redacted]mm	0.01 mm以下	基準に合致
(3)バスケット				
バスケットプレート　(σ_c)	$2/3S_u$	79	38	1.07
	$1.5f_c$*	66	38	0.73

(ロ)-第A.57表　特別の試験条件における構造解析結果の要約（3/4）

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等
2. 水平落下				
(1) 容器本体				
二次蓋 (P_L)	S_u	377	57	5.61
三次蓋 (P_L+P_b)	S_u	406	76	4.34
胴 (P_L)	S_u	377	172	1.19
胴（底板） (P_L)	S_u	377	56	5.73
外筒 (引張)	$1.5f_t$	282	185	0.52
外筒 (圧縮)	$1.5f_c$	282	53	4.32
外筒 (せん断)	$1.5f_s$	162	95	0.70
外筒 (曲げ)	$1.5f_b$	282	205	0.37
下部端板 (引張)	$1.5f_t$	218	22	8.90
下部端板 (圧縮)	$1.5f_c$	218	35	5.22
下部端板 (せん断)	$1.5f_s$	126	41	2.07
下部端板 (曲げ)	$1.5f_b$	218	171	0.27
底部中性子遮蔽材カバー (引張)	$1.5f_t$	217	36	5.02
底部中性子遮蔽材カバー (圧縮)	$1.5f_c$	217	142	0.52
底部中性子遮蔽材カバー (せん断)	$1.5f_s$	125	47	1.65
底部中性子遮蔽材カバー (曲げ)	$1.5f_b$	217	140	0.55
二次蓋密封シール部 (P_L+P_b+Q)	S_y	185	155	0.19
二次蓋ボルト (σ_m)	S_y	848	314	1.70
二次蓋ボルト ($\sigma_m+\sigma_b$)	S_y	848	809	0.04
三次蓋ボルト (σ_m)	S_y	848	420	1.01
三次蓋ボルト ($\sigma_m+\sigma_b$)	S_y	848	767	0.10
三次蓋相対口開き変形量	—	[redacted] mm	0.39 mm	基準に合致
(2) バスケット				
バスケットプレート 縦板 (σ_c)	$2/3S_u$	79	46	0.71
バスケットプレート 横板 (σ_b)	$2/3\alpha S_u$	103	32	2.21
(τ)	$1.2S_m$	43	8	4.37
3. コーナー落下				
二次蓋ボルト	S_y	848	214	2.96
三次蓋ボルト	S_y	848	236	2.59
1 m貫通試験				
(1) 垂直落下				
蓋部	許容貫通強度	1.323×10^7 N	7.068×10^6 N	0.87
底部	許容貫通強度	7.596×10^6 N	7.068×10^6 N	0.07
(2) 水平落下				
胴	許容貫通強度	2.403×10^7 N	7.068×10^6 N	2.39

(ロ)-第A.57表　特別の試験条件における構造解析結果の要約（4/4）

項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	解析結果等 (MPa)	余裕率等
熱的試験				
二次蓋　(P_L+P_b)	S_u	377	9	40.8
三次蓋　(P_L+P_b)	S_u	377	28	12.4
胴　(P_L)	S_u	377	2	187
胴（底板）　(P_L+P_b)	S_u	377	3	124
外筒　(引張)	$1.5f_t$	124	21	4.90
外筒　(圧縮)	$1.5f_c$	124	1	123
外筒　(せん断)	$1.5f_s$	72	8	8.00
外筒　(曲げ)	$1.5f_b$	124	35	2.54
下部端板　(引張)	$1.5f_t$	144	2	71.0
下部端板　(圧縮)	$1.5f_c$	144	1	143
下部端板　(せん断)	$1.5f_s$	83	3	26.6
下部端板　(曲げ)	$1.5f_b$	144	12	11.0
底部中性子遮蔽材カバー　(引張)	$1.5f_t$	201	8	24.1
底部中性子遮蔽材カバー　(圧縮)	$1.5f_c$	201	1	200
底部中性子遮蔽材カバー　(せん断)	$1.5f_s$	116	11	9.54
底部中性子遮蔽材カバー　(曲げ)	$1.5f_b$	201	70	1.87
二次蓋密封シール部　(P_L+P_b+Q)	S_y	174	115	0.51
二次蓋ボルト　(σ_m)	S_y	833	307	1.71
二次蓋ボルト　($\sigma_m+\sigma_b$)	S_y	833	766	0.08
三次蓋ボルト　(σ_m)	S_y	825	391	1.10
三次蓋ボルト　($\sigma_m+\sigma_b$)	S_y	825	669	0.23
三次蓋相対口開き変形量	—	[redacted] mm	0.32 mm	基準に合致
15 m浸漬				
三次蓋	S_u	406	41	8.90

2. 破損の要約

特別の試験条件における輸送物の主な破損の要約を(ロ)-第A.58表に示す。

各解析で考慮するこれらの影響の具体的評価は，(ロ)章各項で検討する。

(ロ)-第A.58表　特別の試験条件における輸送物破損の評価

試験＼部位	本体	緩衝体	バスケット	備考
9m落下試験	—	○	—	・緩衝体が塑性変形する。最大変形は頭部コーナー落下時に上部緩衝体に生じ，最大760mm圧潰する。緩衝体は変形するが，容器本体から外れることはない。 なお，特別の試験条件時の熱解析では，垂直落下及び水平落下における緩衝体の変形量の解析誤差を考慮して，解析モデルの緩衝体の変形量を設定する。（A.10.2 1.参照）
1m貫通試験	○	○	—	・緩衝体及び外筒には貫通又は変形が生じる。
熱的試験	—	—	—	—
浸漬試験	—	—	—	—

(注)○印は破損有り，—印は破損無し。

A.7　強化浸漬試験

1. 外圧に対する胴の耐圧強度

本輸送物の収納物は，最大放射能量が A_2 値の 10 万倍を超えるので，200m 浸漬に相当する水頭圧で解析を行う。

金属キャスク構造規格 [1] においては，本試験条件における円筒の許容外圧 $1.5P_a$(MPa)は，次の式のいずれか小さい方で与えられる。

$$1.5P_{a1}=1.5\times\left(\frac{2.167t}{D_o}-0.0833\right)B$$

$$1.5P_{a2}=1.5\times\frac{2St}{D_o}\left(1-\frac{t}{D_o}\right)$$

ここで，

t　：胴板厚（mm）

D_o　：胴外径（mm）

B　：L/D_o，D_o/t 及び温度で定まる値（MPa）

L　：胴支持間隔（mm）

S　：設計応力強さの 1.5 倍又は設計降伏点の 0.9 倍の小さい方(MPa)

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.59 表に示す。胴の耐圧強度は十分である。

(ロ)-第 A.59 表　胴の許容外圧計算条件及び計算結果

項目	胴板厚 ：t(mm)	胴外径 ：D_o(mm)	L/D_o，D_o/t 及び温度で定まる値 ：B(MPa)	胴支持間隔 ：L(mm)	許容外圧 ：$1.5P_a$ (MPa)	外圧 ：P_o (MPa)	余裕率
数値	[redacted]		90 (注 1)	[redacted]	19 (注 2)	2.101325	8.04

(注 1)金属キャスク構造規格 [1] 別図 7-1 と別図 7-2（A.10.7 参照）により，[redacted]℃における炭素鋼に対する B 値は，L/D_o=[redacted]，D_o/t=[redacted]であるから，B=90 MPa

(注 2)[redacted]であり，$1.5P_{a1}$=[redacted]MPa，$1.5P_{a2}$=[redacted]MPa となるため，[redacted]を許容外圧 $1.5P_a$ として採用

2. 外圧に対する底板の強度

胴（底板）を端部固定の円板にモデル化すると，その最大曲げ応力 σ_b（MPa）は，次式で与えられる。 [15]

$$\sigma_b=0.75\frac{Pa^2}{t^2}$$

ここで，

a　：円板の半径（mm）

P　：差圧（MPa）

t　：板厚（mm）

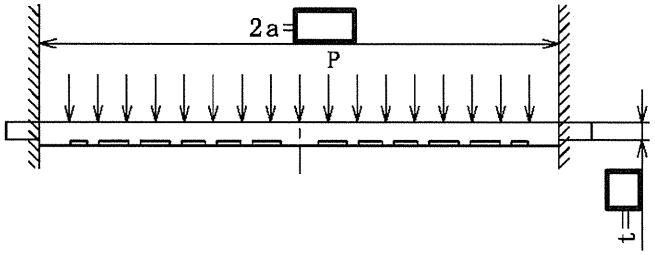
計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.60 表に示す。胴（底板）は，外圧に対して十分な強度を有する。

(ロ)-第 A.60 表　胴（底板）の曲げ応力計算条件及び計算結果

項目	円板の半径 ：a(mm)	差圧 ：P(MPa)	板厚 ：t(mm)	最大曲げ応力 ：σ_b(MPa)	胴（底板）の温度 (℃)	設計引張強さ ：S_u(MPa)	余裕率
数値	[redacted]	2.101325	[redacted]	29	[redacted]	377	12.0

3. 外圧に対する三次蓋の強度

三次蓋の強度解析モデルを(ロ)-第 A.45 図に示す。なお，計算条件の差圧は二三次蓋間圧力を真空と仮定して保守的に設定する。



(単位：mm)

(ロ)-第 A.45 図　外圧に対する三次蓋の解析モデル

三次蓋の最大応力は蓋端部に生じる。この半径方向曲げ応力 σ_b（MPa）は次式で与えられる。

$$\sigma_b = 0.75\frac{Pa^2}{t^2}$$

ここで，

a　：三次蓋半径（mm）

P　：差圧（MPa）

t　：板厚（mm）

計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.61 表に示す。三次蓋は，外圧に対して十分な強度を有する。なお，リリーフバルブカバープレート板厚は[redacted]mm であり三次蓋板厚の[redacted]程度であるが，リリーフバルブカバープレート半径は[redacted]mm であり三次蓋半径の[redacted]以下であることから，負荷される応力は，(ロ)-第 A.61 表に示す応力より小さいことから影響はない。

(ロ)-第A.61表　三次蓋の曲げ応力計算条件及び計算結果

項目	三次蓋半径 ：a(mm)	差圧 ：P(MPa)	板厚 ：t(mm)
数値	[redacted]	2.101325	[redacted]

項目	最大曲げ応力 ：σ_b(MPa)	三次蓋の 温度(℃)	基準値 ：MIN[3.6S_m, S_u] (MPa)	余裕率
数値	340	[redacted]	406	0.19

A.8　放射性収納物

本輸送物の放射性収納物は，PWR 使用済燃料集合体であり，PWR 燃料集合体の構造図を(イ)-第 D.1 図に示す。

各収納物の構造的特徴及び仕様は(イ)章 D に示すとおりである。

燃料集合体の強度解析については，一般の試験条件である 0.3m 落下時に輸送容器と等しく落下衝撃を受けるものとして行っている。その結果，燃料被覆管の強度上の余裕は十分あり，燃料被覆管内の核分裂生成物は，外部に放散されることはない。

なお，特別の試験条件において，燃料集合体の強度評価は行っていないが，9m 落下時には上・下部ノズル及び燃料棒の変形が想定される[18]ことから，特別の試験条件では各安全解析における燃料集合体の状態を(ロ)-第 A.62 表に示すように設定して評価を行う。

(ロ)-第 A.62 表　各安全解析における燃料集合体の設定

解析項目	解析における燃料集合体の設定
熱解析	燃料棒ピッチの変化及び上・下部ノズルの変形が輸送容器及び燃料棒の温度に与える影響は小さいので，変形を無視する。ただし，保守的に全ての燃料棒の密封機能が失われたと仮定し，容器内部のガスの熱伝導率に核分裂生成ガスの影響を考慮する。
密封解析	全燃料棒の密封性が失われたと仮定する。
遮蔽解析	燃料棒ピッチの変化や燃料有効部の移動の可能性があるが，線量当量率の最大値は 1m 貫通落下による側部中性子遮蔽材の損傷により本体側部に生じ，これらの燃料の変形等が影響を与えないため，考慮しない。

A.9　核分裂性輸送物

本輸送物は核分裂性輸送物に該当する。したがって，本項では，(ロ)章 E 臨界解析において想定する輸送物の損傷状態を，以下の試験条件に対して評価する。

なお，本輸送物は周囲温度-25℃以上で使用し，A.4.2 に示すとおり，周囲温度-25℃～38℃の温度条件で亀裂，破損等の生じるおそれはない。

A.9.1　核分裂性輸送物に係る一般の試験条件

核分裂性輸送物に係る一般の試験条件は，告示により次の 3 種類が定められており，(ｉ)については連続条件となる。

(ｉ) 落下試験

①　水噴霧

②　0.3m 自由落下

(ii) 積み重ね試験

(iii) 6kg 棒貫通試験

(ロ)章 E 臨界解析における評価方法を考慮して，影響する輸送物の損傷状態を A.5 の解析結果をもとに評価すると次のようになる。

1. 落下試験

(1) 水噴霧

A.5.2 と同一であり，輸送物に損傷はない。

(2) 0.3m 自由落下

A.5.3 と同一であり，緩衝体に変形が生じるがそれ以外の部位に損傷はない。

2. 積み重ね試験

A.5.4 と同一であり，輸送容器に損傷はない。

3. 6kg 棒貫通試験

A.5.5 と同一であり，軟鋼棒は緩衝体カバープレートを貫通しない。

以上の結果より，核分裂性輸送物に係る一般の試験条件における輸送物の損傷状態は(ロ)-第 A.63 表のようにまとめられる。本輸送物は，(ロ)-第 A.64 表に示すように，核分裂性輸送物に係る一般の試験条件において，規則及び告示に定められている核分裂性輸送物としての要件を満足する。

(ロ)-第 A.63 表　核分裂性輸送物に係る一般の試験条件における輸送物の損傷状態

試験条件		輸送物の損傷状態	備考
落下試験	水噴霧	損傷なし	－
	0.3m落下	緩衝体の変形	緩衝体は臨界解析では無視する。
積み重ね		緩衝体の変形	緩衝体は臨界解析では無視する。
6kg棒貫通		損傷なし	－

(ロ)-第 A.64 表　核分裂性輸送物に係る一般の試験条件における適合性評価

核分裂性輸送物としての要件	評価
構造部に一辺10cmの立方体を包含するようなくぼみが生じないこと及び外接する直方体の各辺が10cm以上であること。	緩衝体が変形するが，一辺が10cmの立方体を包含するようなくぼみが生じる変形ではない。また，外接する直方体の各辺は10cm以上である。

A.9.2　核分裂性輸送物に係る特別の試験条件

A.9.1 の一般の試験条件に続いて 15m 浸漬試験が実施される場合には，A.6.4 に示すように本輸送物の損傷が拡大することはないので，本輸送物に関する核分裂性輸送物に係る特別の試験条件は最大破損条件となる以下の順序で実施する。

① A.9.1 の一般の試験条件

② 9m 落下試験

③ 1m 貫通試験

④ 熱的試験（火災）

⑤ 0.9m 浸漬試験

ここで，核分裂性輸送物に係る一般の試験条件としては(ロ)-第 A.63 表に示すように損傷がある落下試験を採用する。

(ロ)章 E 臨界解析における評価方法を考慮して，影響する輸送物の損傷状態を評価すると次のようになる。

1. 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件のうち落下試験

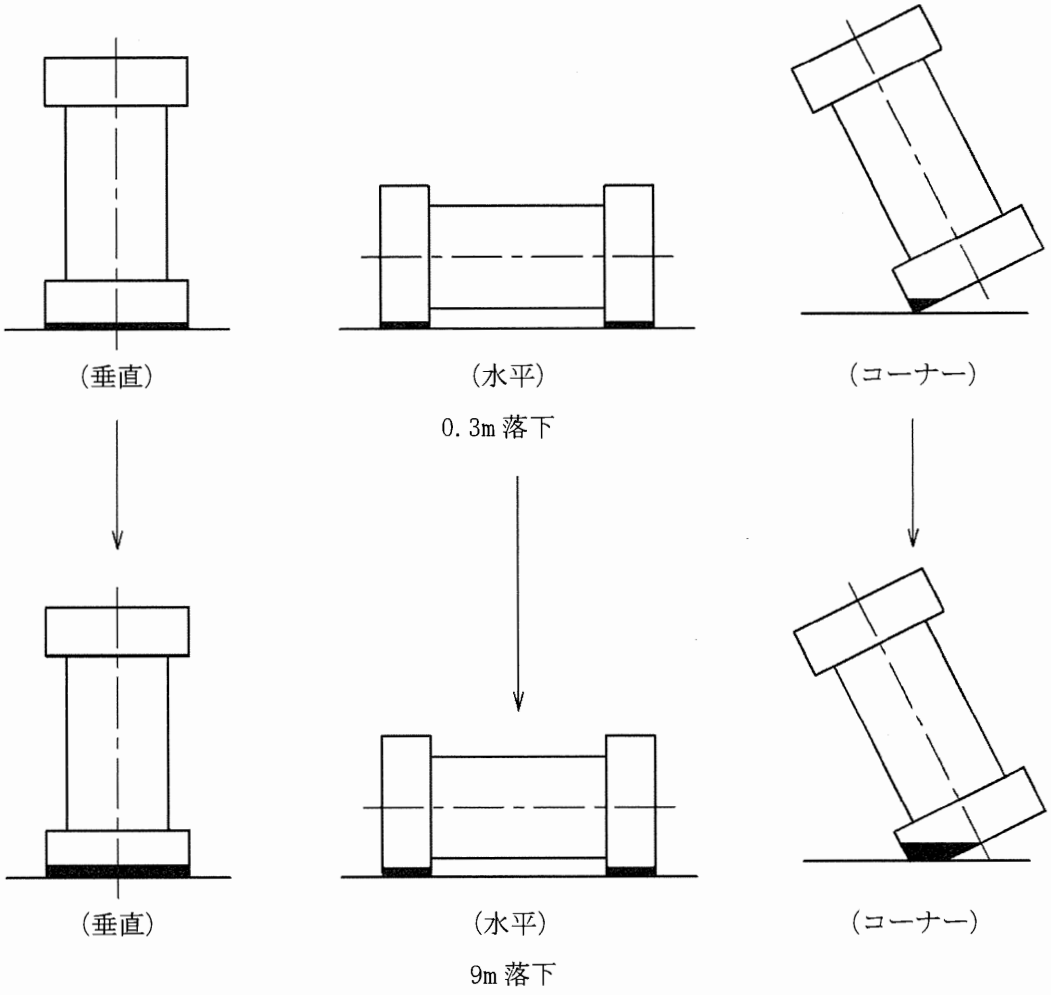
本試験条件における輸送物の損傷状態は(ロ)-第 A.63 表に示すとおりである。

2. 9m 落下試験

(1) 落下姿勢と落下試験の順序

(ロ)-第 A.46 図に落下姿勢と落下試験の順序を示す。

A.9.1 の 0.3m 落下と 9m 落下の落下方向が同一の場合に緩衝体の変形量が最大になると考えられるので，この場合について検討を行う。



(ロ)-第 A.46 図　落下姿勢と試験の順序

(2) 9m 落下試験時の変形量と衝撃加速度

落下高さとしては，0.3m 落下と 9m 落下の合計 9.3m を与える。A.6.1 の 1.と同様に，落下エネルギーE_Kは与えられる。計算条件と計算結果を(ロ)-第 A.65 表に示す。

(ロ)-第 A.65 表　輸送物落下エネルギー計算条件及び計算結果

項目	輸送物 最大総質量 ：m(kg)	重力加速度 ：g(m/s^2)	落下高さ ：H(mm)	輸送物の 落下エネルギー ：E_K(N・mm)
数値	1.344×10^5	9.80665	9300	1.226×10^{10}

A.6.1 の 1.に示す手法を用いて，変形量δ及び衝撃加速度 G を求める。評価結果の緩衝体の累積変形量及び最大衝撃加速度は(ロ)-第 A.66 表に示すとおりである。

(ロ)-第 A.66 表　9 m 落下試験における緩衝体の累積変形量と衝撃加速度

落下姿勢		緩衝体の 累積変形量 (mm)	設計基準 変形量 (注) (mm)	衝撃加速度 (A) (m/s^2)	9 m 落下試験時 設計加速度 (B) (m/s^2)	加速度の 比 (A/B)
垂直落下	頭部	268	684	568	600	0.95
	底部	309	608	490	500	0.98
水平落下		279	374.5	704	710	0.99
コーナー落下	頭部	766	826	469	480	0.98
	底部	760	827	464	—	—

(注)設計基準変形量とは，それぞれの落下方向において衝撃力を急激に上昇させないための設計上の基準値である。

(3) 容器本体及びバスケットの構造健全性評価

本落下試験時の衝撃加速度は，(ロ)-第 A.66 表に示すように A.6.1 の設計加速度との比が 1 以下であり，A.6.1 の評価より小さい。また，累積変形量は，設計基準変形量以下であるので，本落下試験においても容器本体及びバスケットの構造健全性は維持される。

(4) 三次蓋Oリングの密封性能の評価（ひずみレベルの評価）

(ロ)-第A.57表に示したように，9m落下試験のOリング位置での蓋とキャスク本体との相対口開き変形量は基準値に対して十分な余裕を有しており，本試験条件においても密封性能が損なわれることはない。

(5) 二次蓋防水機能の評価

(ロ)-第A.67表に示すように，特別の試験条件における二次蓋金属ガスケットの横ずれ量は基準値に対して十分な余裕を有しており，また，二次蓋ボルトに生じる応力は設計降伏点以下で締付力は維持されており二次蓋の残留口開きは生じない。このため，本試験条件においても，密封性を保証するために必要な金属ガスケットの残留線荷重1.6kN/cmを超える線荷重（7.2kN/cm）が維持されるため防水機能が損なわれることはない。9m落下試験時のフランジ部の押え力及び密封性については，(6)及び(7)のとおりである。なお，二次蓋貫通孔のモニタリングポートカバープレートはOリングで密封されており，本落下試験条件においても防水機能が維持される。

(ロ)-第A.67表　特別の試験条件における二次蓋部金属ガスケットの密封性能の評価

条件		二次蓋ガスケットの横ずれ量(mm)	密封性能（5×10^{-3} ref cm^3/s）を維持する基準値(mm) [17), 19)]
9m落下	垂直落下	0.66	3
	水平落下	0.34	3
熱的試験		0.46	3

(6) ボルトに荷重がかかった際のフランジ部の押え力について

二次蓋金属ガスケットの密封機能は，二次蓋及びフランジシール面に，金属ガスケットが十分な荷重（線荷重）で押し付けられることによって得られる。密封機能が損なわれる原因として，経年劣化によるリラクゼーションによって線荷重が低下すること及び蓋部に衝撃荷重が作用することによって二次蓋が口開きする方向に変位が生じ，線荷重が低下することの2つの要因が考えられる。

経年変化については，想定する貯蔵期間と温度を考慮して算出される金属ガスケットのラーソン・ミラー・パラメータ（以下「LMP」という。）の値が，密封機能が損なわれる可能性のある限界のLMPとして基準とする値7375より小さいことから，経年変化による密封機能への影響はない。一方で，衝撃荷重の影響については，9m頭部垂直落下時の二次蓋ボルト締結部について，ボルトの内力係数も考慮した二次蓋ボルト及び二次蓋の変形量を評価し，二次蓋の口開きがないことを評価する。

a. 二次蓋ボルト締結部の荷重と変形量

ボルトによって被締結体が締結されている状態で，ボルトに外荷重が作用した場合のボルト及び被締結体の荷重と変形部の概略図を(ロ)-第A.47図に示す。

① ボルト締結時

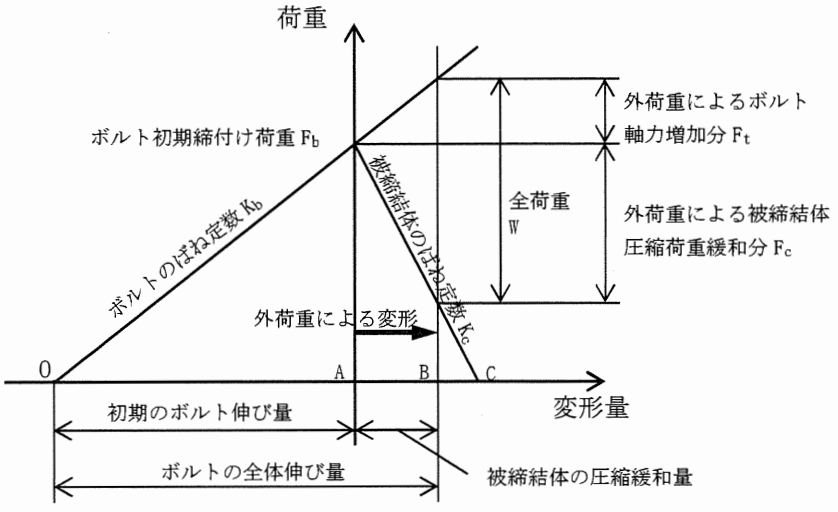
二次蓋ボルトによって二次蓋を締結するとボルトの変形量は点0（変形量ゼロ）から点Aに移動し，二次蓋締付荷重F_bが作用する。かつ，被締結体である二次蓋も，荷重F_bによって圧縮変形する。

② 衝撃荷重作用時

この状態で，落下によって二次蓋に外荷重が作用すると，二次蓋ボルトにさらに引張側の軸力F_tが作用して点Aから点Bまで延び，同じ変形量分だけ二次蓋の圧縮変形が緩和される。この時の二次蓋の圧縮荷重の緩和量をF_cとすると，F_cが初期の圧縮荷重（二次蓋ボルト初期締付荷重に等しい）F_bより小さければ，二次蓋はなお圧縮された状態であり，二次蓋をフランジに押し付ける荷重が残留していることになり，口開きはない。

③ 衝撃荷重解除（除荷）後

続いて，衝撃荷重により二次蓋ボルトに塑性変形がない場合には，衝撃荷重が除荷されると，外力により二次蓋ボルトに作用していた引張側の軸力F_tが緩和され，点Aの状態に戻る。かつ，被締結体である二次蓋の圧縮変形が解除されることにより，圧縮荷重が点Aの状態に戻る。



(ロ)-第A.47図　ボルトによる締結体の外力による変形の概要図

b. 落下時の二次蓋ボルト締結部の変形量の評価

二次蓋ボルトによって二次蓋を締め付けると，金属ガスケットの初期締付け代が押しつぶされることにより金属ガスケットからの線荷重が発生し，密封性能が発揮される。この時，二次蓋ボルトは引張変形し，逆に二次蓋側は圧縮変形した状態で，二次蓋フランジに押し付けられた状態となり，(ﾛ)-第A.47図の点Aに相当する状態となる。この状態で落下による衝撃荷重が二次蓋に作用すると，衝撃荷重によって二次蓋ボルトはさらに引張変形し，同時に二次蓋の圧縮変形が緩和され，(ﾛ)-第A.47図の点Bに相当する状態となる。以下に，落下時の衝撃荷重によって二次蓋ボルト及び二次蓋に作用する荷重と変形量について(ﾛ)-第A.47図をもとに評価し，二次蓋の口開きの有無を評価する。9m頭部垂直落下時の衝撃荷重が二次蓋を開く方向に作用する最も大きな荷重であることから，9m頭部垂直落下時を対象とする。ここで，落下時の内部収納物の慣性力は一次蓋に作用するため，二次蓋には二次蓋の自重による慣性力のみが作用するものとする。

落下前の状態での二次蓋ボルトの初期締付荷重F_bは次式により計算される。

$$F_b = \sigma_b \cdot A_b$$

ここで，

σ_b：二次蓋ボルト初期締付による応力（MPa）

A_b　：二次蓋ボルト最小断面積（mm^2）

9m頭部垂直落下時の二次蓋の慣性力によって，二次蓋ボルト1本に作用する外荷重Wは次式により計算される。

$$W = M_1 \cdot G/n$$

ここで，

M_1　：二次蓋質量（kg）

G　：9m頭部垂直落下時の設計加速度（m/s^2）

n　：二次蓋ボルト本数（本）

上記の外荷重Wに対して，二次蓋ボルトと二次蓋の縦弾性係数によって決まる内力係数を考慮して，外荷重Wによる二次蓋の圧縮荷重緩和量F_cは，次式により計算される。

$$F_c = K_c/(K_b + K_c) \cdot W$$

ここで，

K_b　：二次蓋ボルトのばね定数（N/mm）

$K_b = A_b \cdot E_b/L$

（フックの法則$\sigma_b = E_b \cdot \varepsilon$より，$A_b \cdot \sigma_b = A_b \cdot E_b \cdot \sigma/L$であり，$A_b \cdot E_b/L$がばね定数に相当）

K_c　：二次蓋のばね定数（N/mm）

$K_c = A_c \cdot E_c / L$

E_b ：二次蓋ボルト［　　］の縦弾性係数（MPa）

E_c ：二次蓋［　　］の縦弾性係数（MPa）

A_c ：二次蓋が圧縮変形する部分の断面積（mm^2）

（二次蓋ボルト頭部の座面の面積とする。）

L ：二次蓋及び二次蓋ボルトのばね部の長さ（mm）

上記に従い計算した結果を(ロ)-第A.68表に示す。同表に示すとおり，二次蓋の圧縮荷重緩和量F_cは，初期の二次蓋圧縮荷重F_bより小さい。この結果は9m頭部垂直落下時にも二次蓋がまだ圧縮された状態であることを示し，二次蓋の口開きはない。

(ロ)-第A.68表　外荷重Wによる二次蓋の圧縮荷重緩和量について

項目	単位	数値
二次蓋ボルトの初期締付力F_b	N	［　　］
二次蓋ボルト初期締付による応力σ_b	MPa	206
二次蓋ボルト最小断面積A_b	mm^2	1.04×10^3
二次蓋ボルト1本に作用する外荷重W	N	6.43×10^4
二次蓋質量M_1	kg	4500
9m頭部垂直落下時の設計加速度G	m/s^2	600
二次蓋ボルト本数n	本	［　　］
外荷重Wによる二次蓋の圧縮荷重緩和量F_c	N	［　　］
二次蓋ボルトのばね定数K_b	N/mm	1.75×10^6
二次蓋のばね定数K_c	N/mm	3.45×10^6
二次蓋ボルト［　　］の縦弾性係数E_b	MPa	［　　］
二次蓋［　　］の縦弾性係数E_c	MPa	［　　］
二次蓋が圧縮変形する部分の断面積A_c	mm^2	1.94×10^3
二次蓋及び二次蓋ボルトのばね部の長さL	mm	111

(7)　特別の試験条件における二次蓋ガスケットの密封性評価について

(ロ)-第A.67表に示すように，9m垂直落下，9m水平落下及び熱的試験における二次蓋部金属ガスケットの横ずれ量は，金属ガスケットの動的横ずれ試験から設定した密封性能（5×10^{-3} ref cm^3/s）を維持する基準値3mm以下である。また，(5)及び(6)で示したように特別の試験条件後も二次蓋ボルトに生じる応力は設計降伏点以下で締付力が維持されるため，密封性を保証するために必要な残留線荷重1.6kN/cm以上が維持されている。さらに，衝撃荷重が二次蓋を開く方向に作用する最も大きな荷重である9m頭部垂直落下時においても二次蓋の口開きはなく，密封性を保証するために必要な残留線荷重1.6kN/cm以上が維持さ

れている。以上より，特別の試験条件において，二次蓋ガスケットの密封性を保証するために必要な線荷重が維持されており，密封性が維持される。

3. 1m 貫通試験

1. 及び 2. の落下試験において緩衝体が変形するが，これらは A.6.2 に示すように 1m 貫通試験に対する評価において関係しない。したがって，本試験における輸送物の損傷状態は A.6.2 の結果（A.6.5 に示す要約参照）と同一である。

4. 熱的試験

1. 及び 2. の落下試験における緩衝体の累積変形量は，A.6.1 に示す 9m 落下試験の各落下試験時の変形量に対して若干増加しているが，特別の試験条件の熱解析モデルに考慮する緩衝体変形量（(ロ)章 B.5.2 参照）は，1. 及び 2. の落下試験における緩衝体の累積変形量を包絡した値としている。したがって，本熱的試験における輸送物の損傷評価は A.6.5 の 2. と同一となる。

5. 0.9m 浸漬試験

0.9m 浸漬試験の条件及び評価結果は，A.6.4 に示す 15m 浸漬試験の条件及び評価結果に包絡されるため，0.9m 浸漬試験において輸送物は損傷が拡大することはない。

6. 輸送物の損傷状態の要約

(ロ)-第 A.69 表に特別の試験条件における輸送物の損傷状態の要約を示す。なお，特別の試験条件において燃料集合体の強度評価は行っていないが，9m 落下時には，上・下部ノズルの変形及び燃料棒の変形が想定される[18]ことから，燃料集合体については，臨界解析において(ロ)-第 A.70 表に示すように条件を設定する。

(ロ)-第 A.69 表　核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下の輸送物の損傷状態

条件	輸送物の損傷状態	備考
9m落下	緩衝体の変形	緩衝体は臨界解析では無視する。
1m貫通	緩衝体，外筒及び中性子遮蔽材の変形	緩衝体及び中性子遮蔽材は臨界解析では無視する。
熱的試験 (火災時)	中性子遮蔽材の一部焼損 各部位の温度が上昇	臨界解析上は中性子遮蔽材を無視し，燃料温度を20℃としている。
0.9m浸漬	損傷なし	密封装置及び二次蓋の密封性が健全であるので，胴内に浸水することはない。

(ロ)-第 A.70 表　臨界解析における燃料集合体の設定

解析項目	解析における燃料集合体の設定
臨界解析	支持格子1スパン間の燃料棒ピッチの拡大及び縮小を仮定する。

A.10　付属書類

A.10.1　MSF キャスクの落下試験

1. 試験目的

本試験は，MSF-24P 型輸送容器のプロトタイプである MSF キャスクの落下試験モデルを用いて 9.3m 落下試験（垂直及び傾斜）及び 1m 貫通試験を実施し，容器の胴及び蓋に取り付けた加速度計によりデータを取得するとともに，落下後の緩衝体の変形量等を測定した。

なお，MSF-24P 型のプロトタイプである MSF キャスクの落下試験モデルの緩衝体は，当該部への直接的な荷重入力を防止するために緩衝体内部のカバープレートの剛性を高める設計としている。A.6.2 の記載及び(ロ)-第 A.65 図のとおり，MSF-24P 型の緩衝体内部のカバープレート及び胴フランジ部は落下試験モデルと同一の構造，かつ，同等の剛性であることから，落下試験モデルの試験結果を MSF-24P 型へ適用可能である。

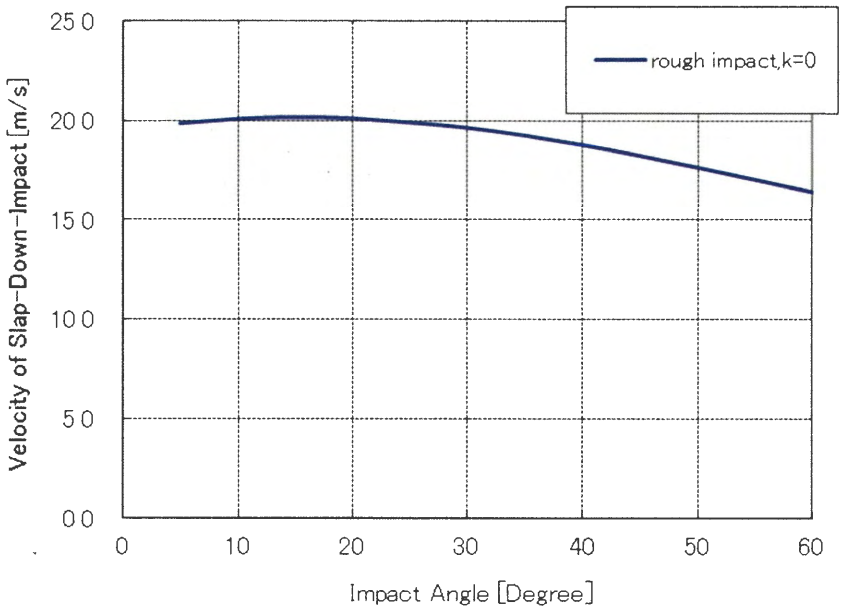
2. 試験項目

(1) 頭部垂直落下

9.3m の高さから落下試験モデル頭部を下側にして，垂直姿勢にて落下させた。

(2) 傾斜落下

9.3m の高さから 10° 傾斜させた状態で水平方向に落下させる。傾斜落下の調査に係る BAM 報告書 [20] では，(ロ)-第 A.48 図のとおり，傾斜角度と二次衝突速度の関係が示されており，10° ～20° の間で二次側衝突速度が最大約 20m/s で一定となることから傾斜角度 10° を代表とした。なお，底部側が一次衝突，頭部側が二次衝突するよう傾斜させ，落下させた。



(ロ)-第 A.48 図　試験モデルの傾斜角度と二次衝突速度の関係

(3) 1m 貫通試験

1m の高さから水平状態で貫通棒に落下させる。なお，貫通棒が蓋側面に衝突するよう落下させた。

3. 試験装置

(1) 落下試験モデル

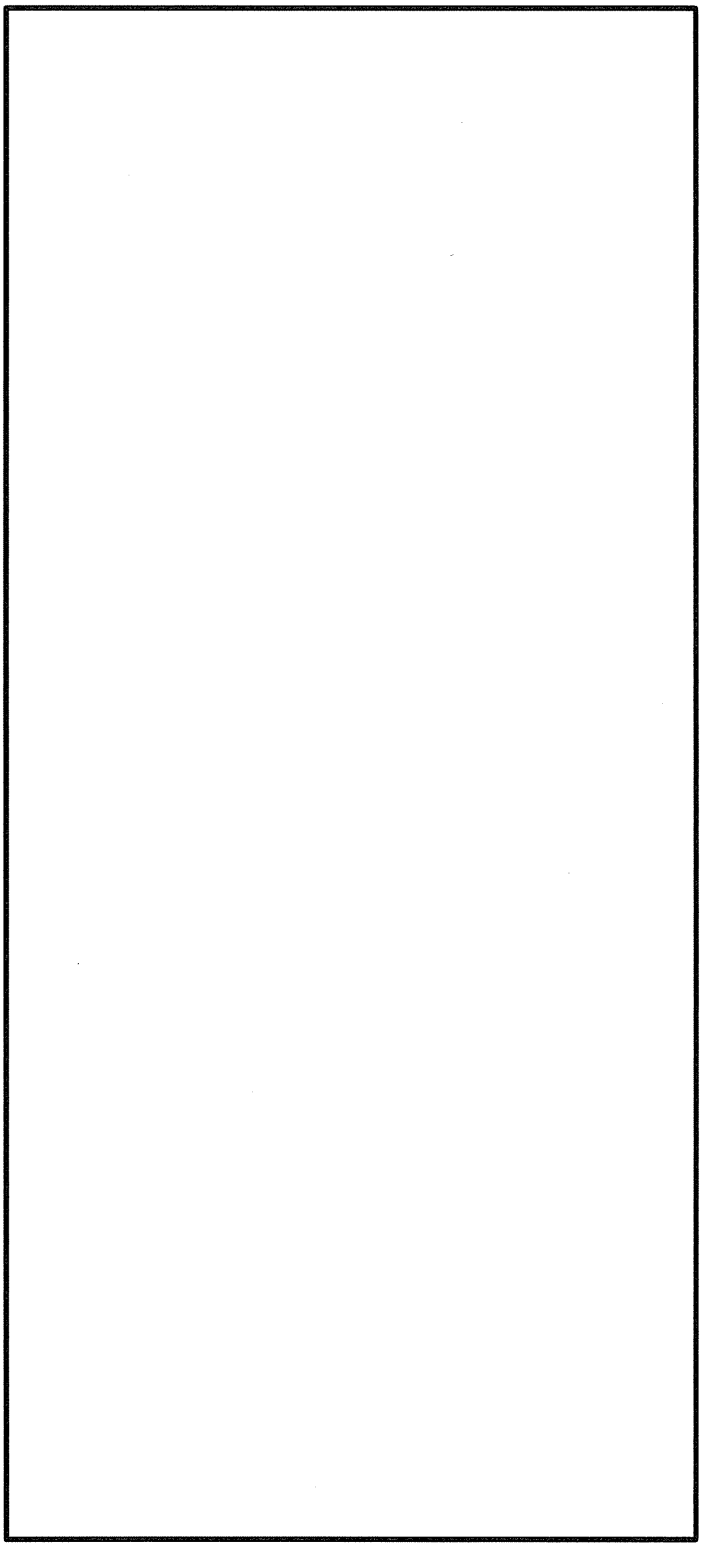
落下試験モデルは，BWR 燃料集合体を 69 体収納する設計である。本体は，胴（鍛造材），中性子遮蔽材及び外筒（炭素鋼）から構成され，胴と外筒の間には銅製の伝熱フィンが溶接されている。

蓋部は，一次蓋と二次蓋の二重構造とし，本体胴フランジに，金属ガスケットを取り付けた一次蓋及び二次蓋をボルトにより締結することで密封性を維持する構造としている。

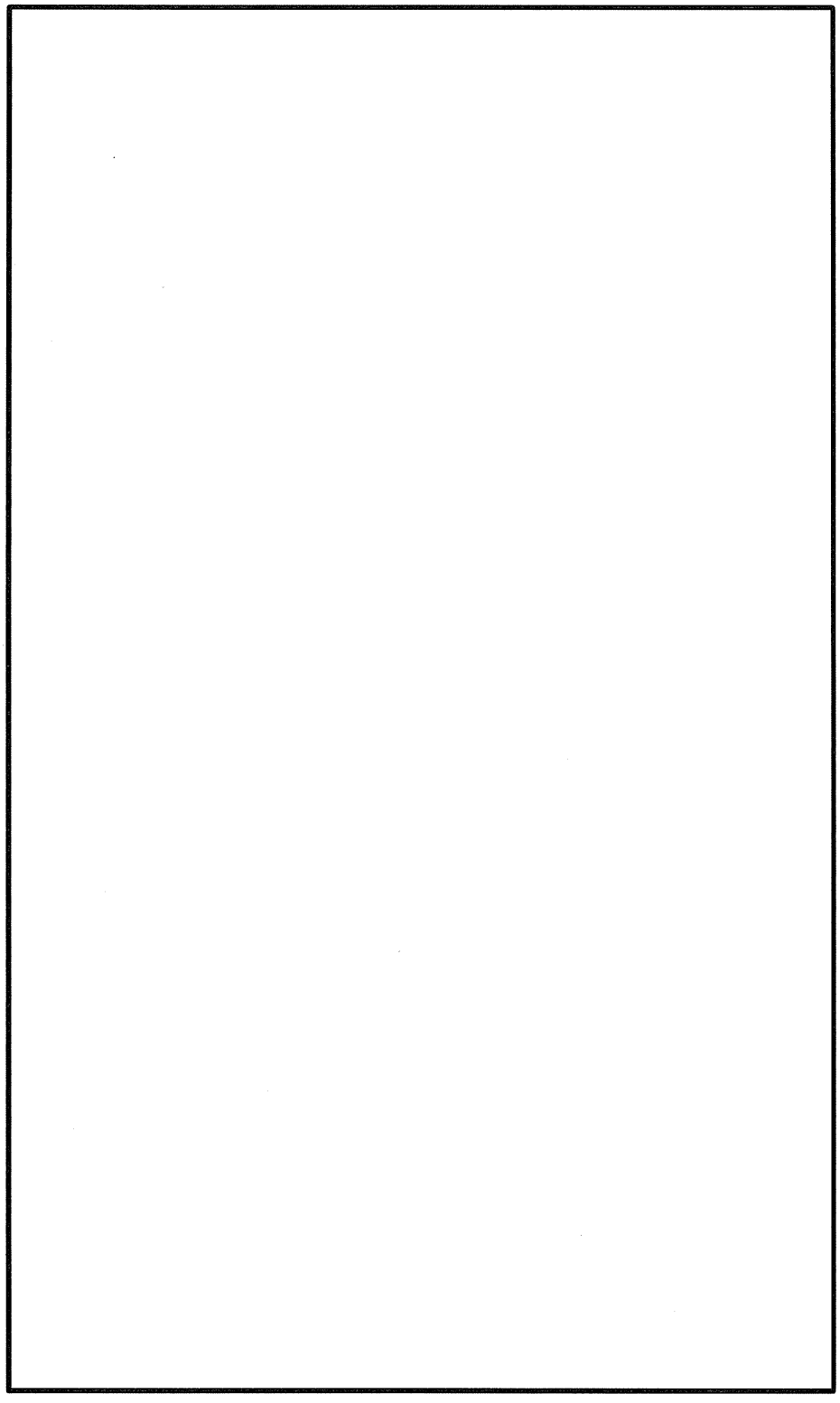
バスケットはアルミニウム合金の角パイプからなる構造とし，キャビティ内において燃料集合体を分散・集合させないように支持する構造としている。落下試験時には，独立した 69 個のバスケットセルに燃料集合体を模擬した重量体を挿入した。

材質は基本的に実機と同じ又は相当材である。また，胴内，一二次蓋間は計装配線の関係から開放されており，大気圧である。

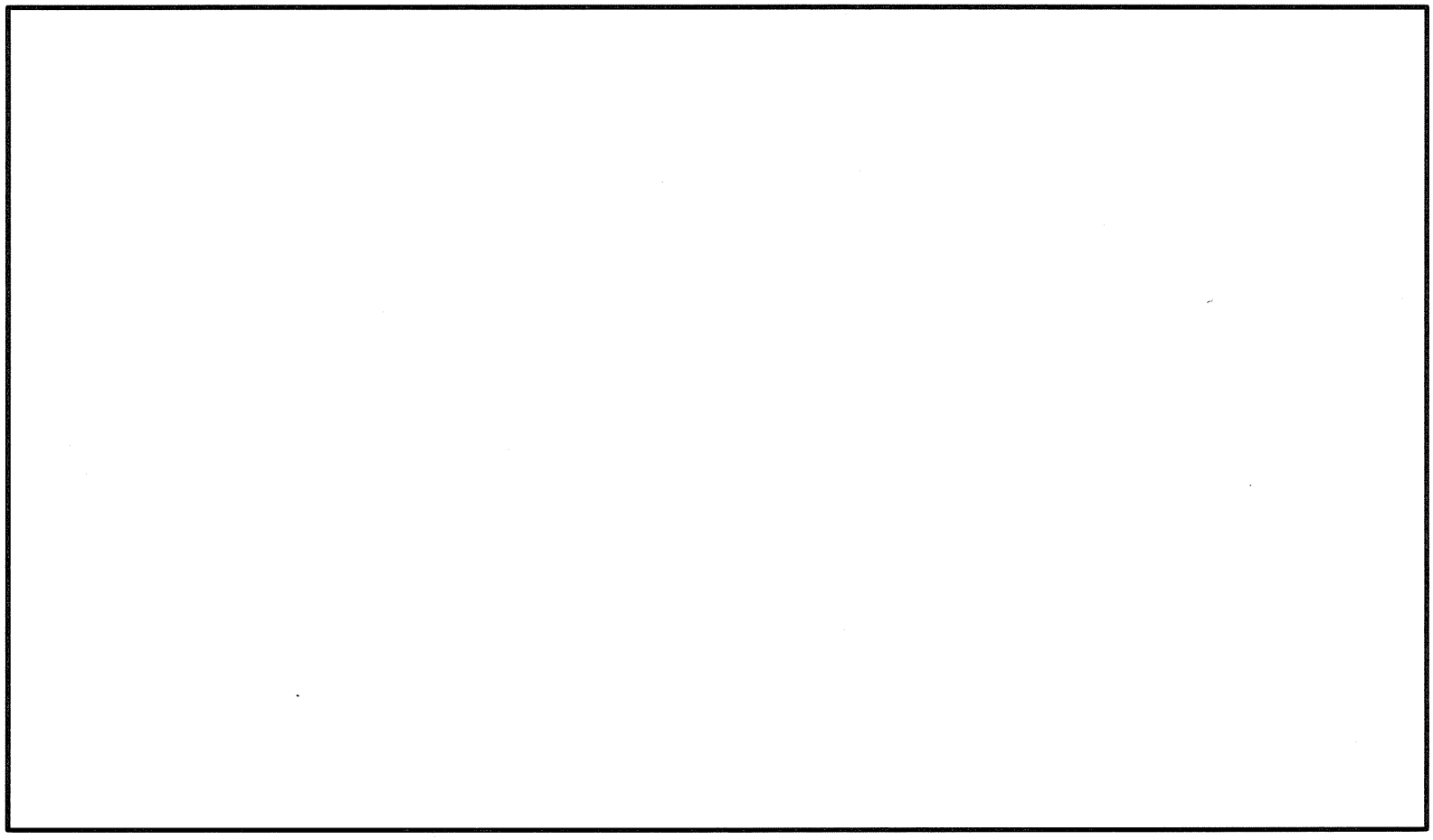
落下試験モデルの概要図を(ロ)-第 A.49 図～(ロ)-第 A.53 図に示す。



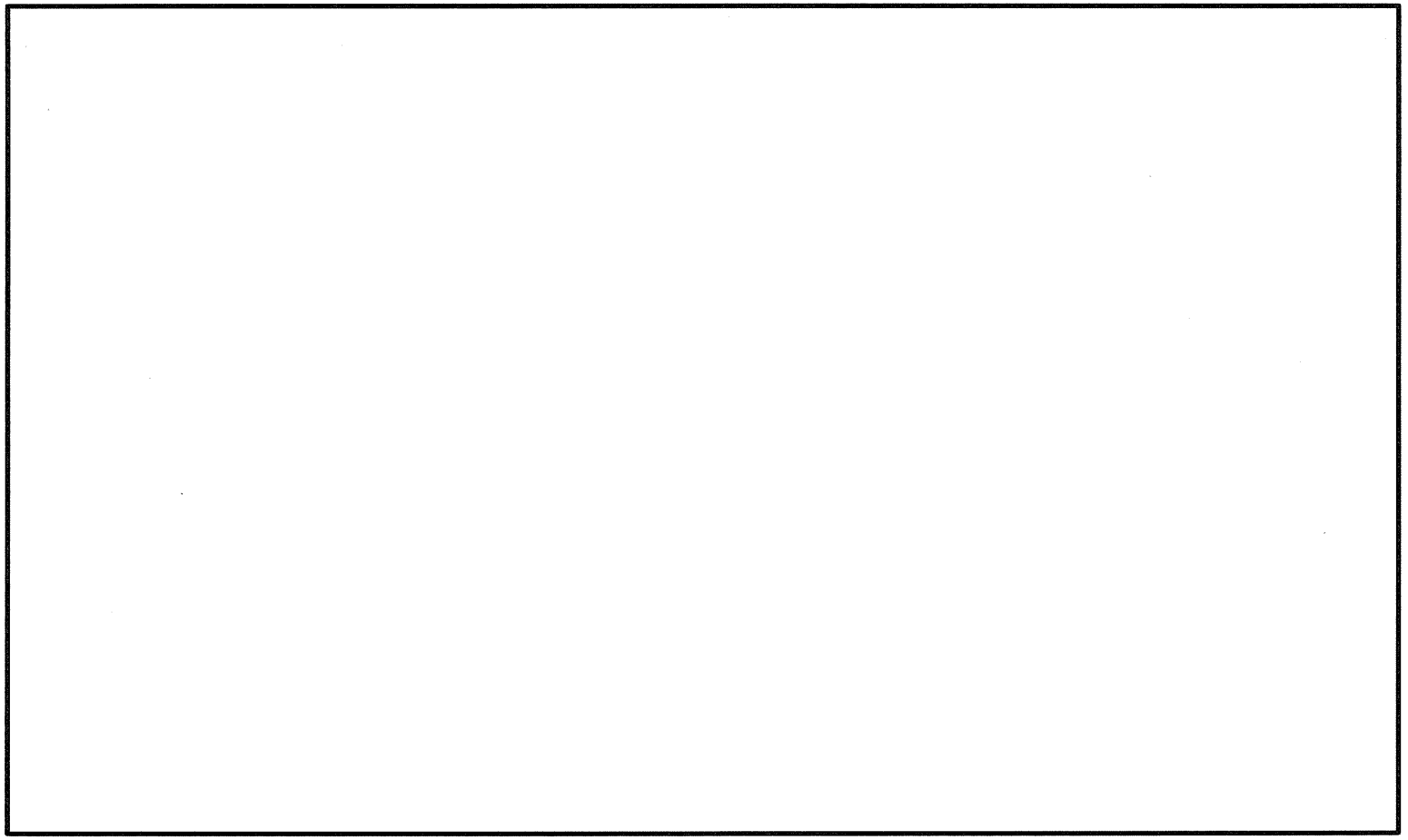
(ロ)-第 A.49 図　落下試験モデル全体図



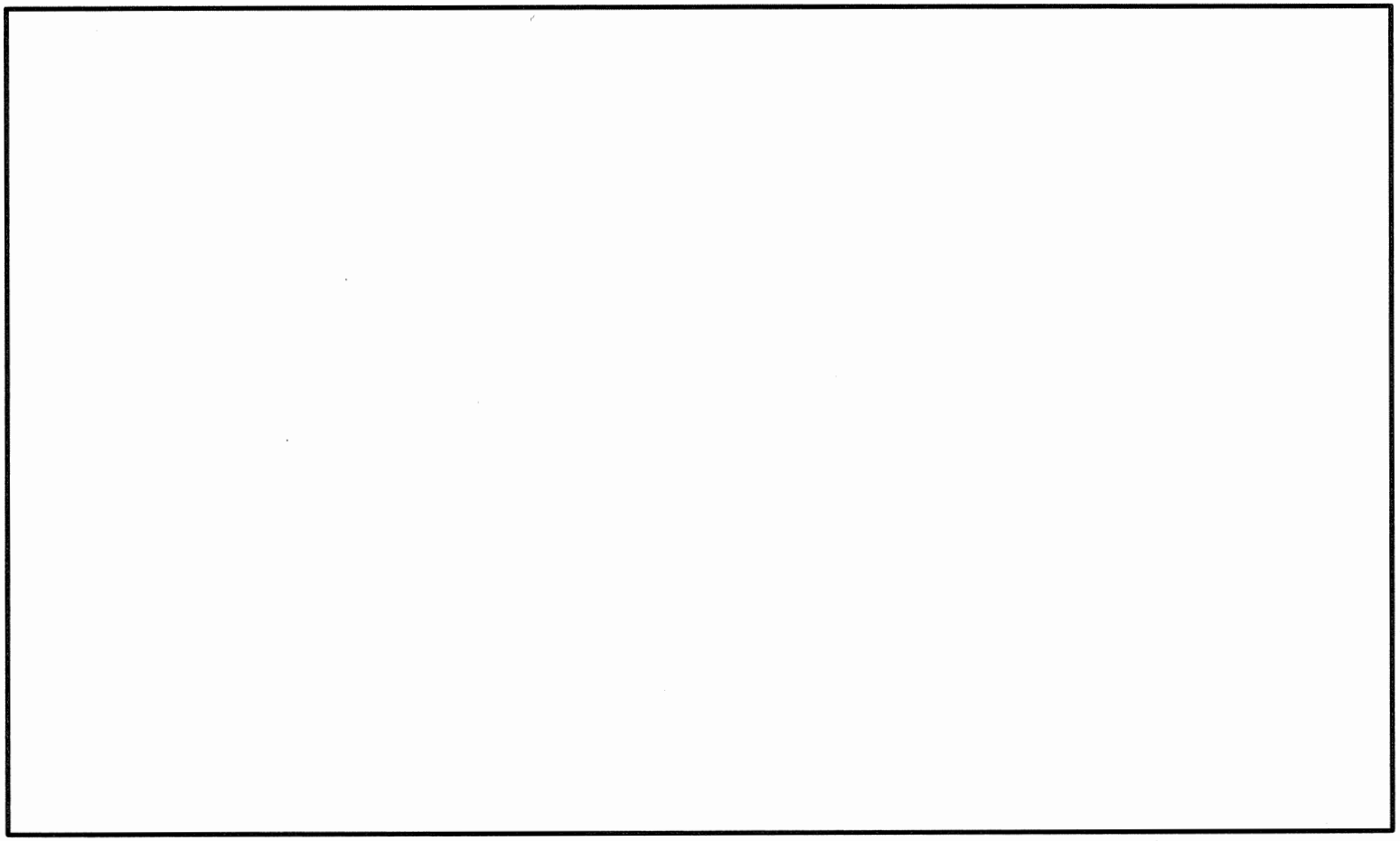
(ロ)-第A.50図　一次蓋（落下試験モデル）



(ロ)-第A.51図　二次蓋（落下試験モデル）



(ロ)-第 A.52 図　上部緩衝体（落下試験モデル）



(ロ)-第 A.53 図　下部緩衝体（落下試験モデル）

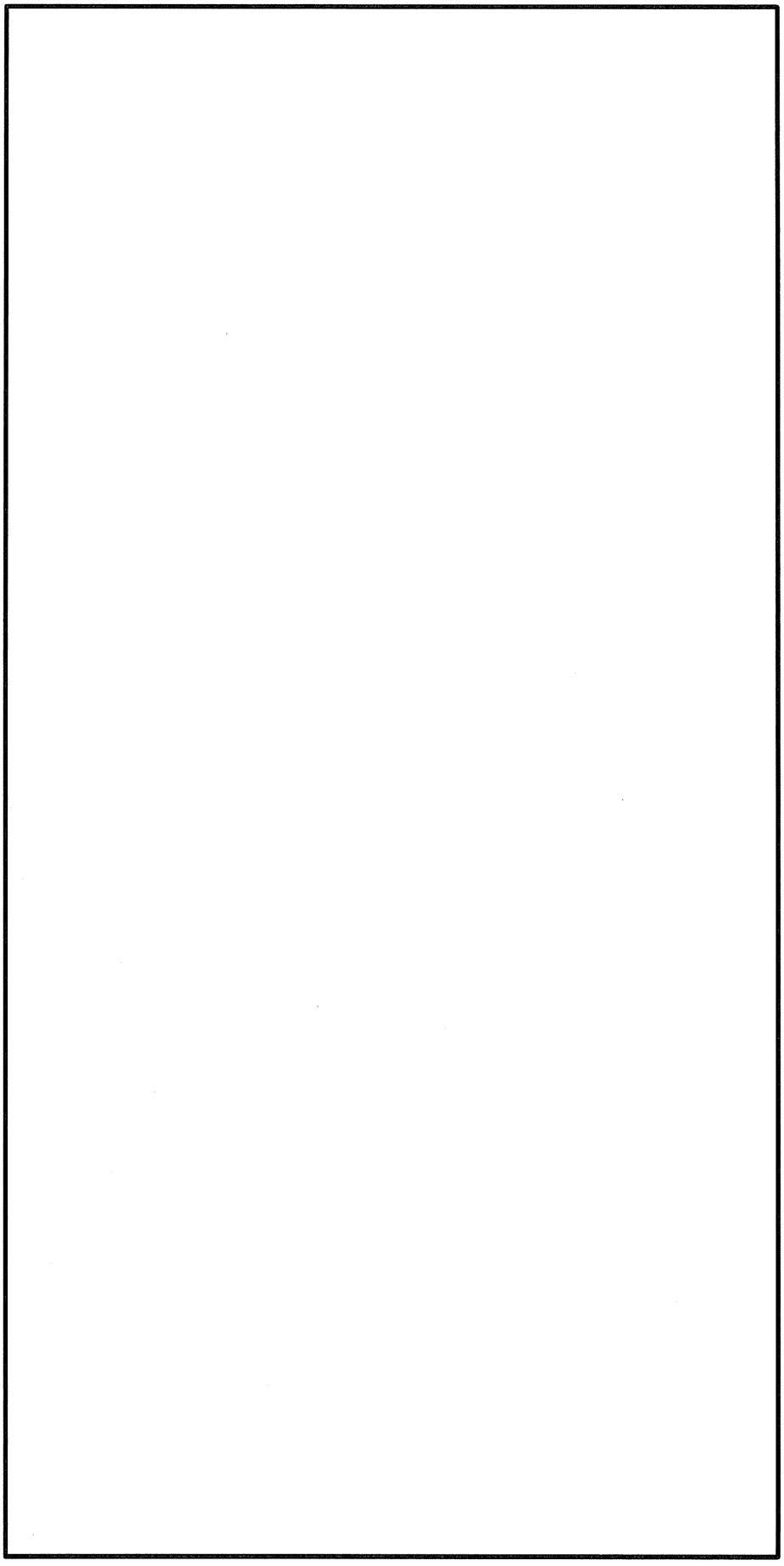
(2) 測定項目及び測定方法

a. 測定項目

落下試験モデルを用いた落下試験において測定した主な測定項目と測定部位，測定器等について(ロ)-第 A. 71 表に示す。また，加速度計及びひずみゲージの取付位置を(ロ)-第 A. 54 図に示す。

(ロ)-第 A. 71 表　落下試験における主な測定項目

測定項目	測定部位	測定器等
緩衝体変形量	上部・下部緩衝体	スケール
加速度	胴，一次蓋，二次蓋	加速度計
ひずみ （参考値）	一次蓋ボルト，二次蓋ボルト	ひずみゲージ
蓋の横ずれ （参考値）	一次蓋，二次蓋	隙間ゲージ デプスゲージ



(ロ)-第A.54図　加速度計及びひずみゲージの取付位置

4. 試験結果

(1) 頭部 9.3m 垂直落下

(ロ)-第 A.55 図に頭部 9.3m 垂直落下試験前後の落下試験モデルの写真を示す。以下に頭部 9.3m 垂直落下試験結果の概要を示す。

a. 緩衝体変形量

(ロ)-第 A.72 表に緩衝体変形量を示す。緩衝体変形量は，許容変形量を満足している。

b. 加速度履歴

(ロ)-第 A.56 図に胴中央の加速度履歴を示す。(ロ)-第 A.73 表に各部位の最大加速度を示す。

c. 蓋の横ずれ量（参考値）

(ロ)-第 A.74 表に各蓋の横ずれ量を示す。一次蓋については蓋の横ずれが確認され，横ずれ量は最大 0.24mm であった。二次蓋については，蓋の横ずれは生じなかった。

d. ボルトに作用する応力（参考値）

(ロ)-第 A.75 表に各ボルトに作用する最大応力を示す。なお，応力は，落下衝撃負荷時にボルトに生じたひずみから算出した。一次蓋ボルト，二次蓋ボルトともに，基準値に対して十分に余裕があった。

e. 落下試験前後の漏えい率（参考値）

(ロ)-第 A.76 表に落下試験前後の一次蓋及び二次蓋の漏えい率を示す。一次蓋の落下試験後の漏えい率は，落下試験前に比べ 2～3 桁程度増加したが，密封性能を維持する基準値(5×10^{-4}Pa・m^3/s[=5×10^{-3}ref cm^3/s])を満足した。また，二次蓋の漏えい率は落下試験前後で同程度であった。

(ロ)-第 A.72 表　9.3m 頭部垂直落下時の緩衝体変形量

部位	変形量 (mm)	許容変形量 (mm)
上部緩衝体	259	

(ロ)-第 A.73 表　9.3m 頭部垂直落下時の最大加速度

計測位置	方向	最大加速度 (G)
胴上部 (0°)	落下方向	59
胴上部 (180°)	落下方向	63
胴中央	落下方向	72
一次蓋	落下方向	448
二次蓋	落下方向	533

(ロ)-第 A.74 表　9.3m 頭部垂直落下時の蓋の横ずれ量（参考値）

部位	位置	横ずれ量 (注) (mm)
一次蓋	0° 側	-0.24
	90/270° 側	0.02 / -0.15
	180° 側	-0.04
二次蓋	0° 側	0.0
	90/270° 側	0.0 / 0.0
	180° 側	0.0

（注）横ずれ量の符号は，各蓋が胴フランジに対し，内側へずれる場合を+，外側へずれる場合を-として示す。

(ロ)-第A.75表　9.3m頭部垂直落下時の最大応力（参考値）

部位	位置	応力成分	最大応力 (注1) (MPa)	基準値 (注2) (MPa)
一次蓋ボルト	0° 側	膜	468	890
		曲げ	164	890
	90° 側	膜	508	890
		曲げ	216	890
	180° 側	膜	413	890
		曲げ	201	890
二次蓋ボルト	0° 側	膜	-29	890
		曲げ	14	890
	90° 側	膜	-27	890
		曲げ	11	890
	180° 側	膜	-50	890
		曲げ	32	890

(注1)膜応力の符号は，引張を+，圧縮を-として示す。

(注2)一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトの基準値は，S_y(RT)とした。

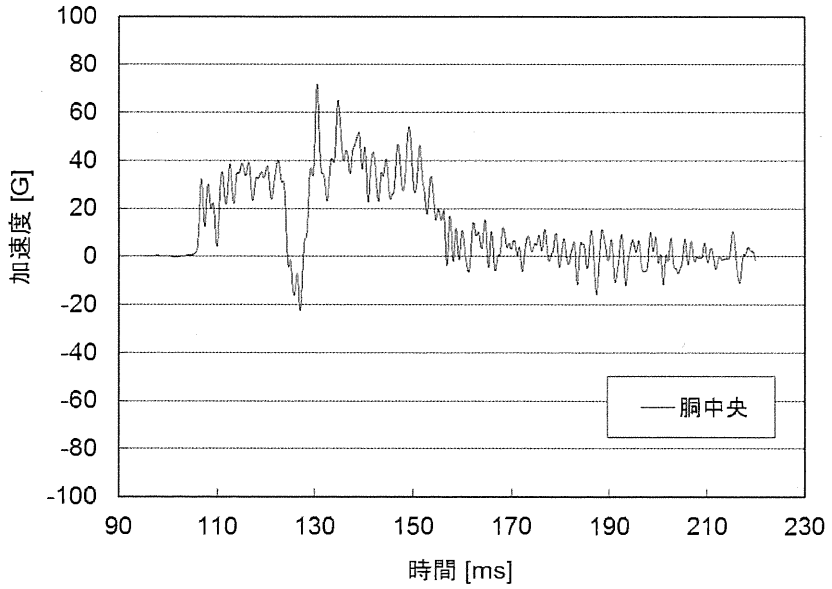
(ロ)-第A.76表　9.3m頭部垂直落下時の落下試験前後の漏えい率（参考値）

部位	落下試験前 (Pa・m³/s)	落下試験後 (Pa・m³/s)
一次蓋	1.0×10^{-8}	3.9×10^{-6}
二次蓋	2.0×10^{-11}	1.7×10^{-11}

(1) 落下試験前

(2) 落下試験後

(ロ)-第 A.55 図　9.3m 頭部垂直落下試験時の落下試験モデル写真



(ロ)-第 A.56 図　9.3m 頭部垂直落下時の落下方向加速度履歴

(2) 9.3m 傾斜落下

(ロ)-第 A.57 図に 9.3m 傾斜落下試験前後の落下試験モデルの写真を示す。以下に 9.3m 傾斜落下試験結果の概要を示す。

a. 緩衝体変形量

(ロ)-第 A.77 表に各緩衝体変形量を示す。緩衝体変形量は，許容変形量を満足している。

b. 加速度履歴

(ロ)-第 A.58 図に胴上部，胴中央及び胴下部の加速度履歴を示す。(ロ)-第 A.78 表に各部位の最大加速度を示す。

c. 蓋の横ずれ量（参考値）

(ロ)-第 A.79 表に各蓋の横ずれ量を示す。一次蓋及び二次蓋ともに落下側及び反落下側のずれ量が大きく，最大の横ずれ量は一次蓋の落下側の 0.81mm であった。

d. ボルトに作用する応力（参考値）

(ロ)-第 A.80 表に各ボルトに作用する最大応力を示す。なお，応力は，落下衝撃負荷時にボルトに生じたひずみから算出した。一次蓋ボルト，二次蓋ボルトともに，基準値に対して十分に余裕があった。

e. 落下試験前後の漏えい率（参考値）

(ロ)-第 A.81 表に落下試験前後の一次蓋及び二次蓋の漏えい率を示す。一次蓋の漏えい率は落下試験前後で同程度であった。二次蓋の落下試験後の漏えい率は，落下試験前に比べ 2～3 桁程度増加したが，密封性能を維持する基準値(5×10^{-4}Pa・m^3/s[$=5\times10^{-3}$ref cm^3/s])を満足した。

(ロ)-第 A.77 表　9.3m 傾斜落下時の緩衝体変形量

部位	変形量 (mm)	許容変形量 (mm)
上部緩衝体	253	
下部緩衝体	174	

(ロ)-第 A.78 表　9.3m 傾斜落下時の最大加速度

計測位置	方向	最大加速度 (G)
胴上部 (0°)	落下方向	150
胴中央	落下方向	85
胴下部	落下方向	77
一次蓋	落下方向	149
二次蓋	落下方向	148

(ロ)-第 A.79 表　9.3m 傾斜落下時の蓋の横ずれ量（参考値）

部位	位置	横ずれ量 (注) (mm)
一次蓋	落下側	-0.81
	側面	0.14 / 0.21
	反落下側	-0.07
二次蓋	落下側	0.09
	側面	0.02 / -0.01
	反落下側	-0.79

(注) 横ずれ量の符号は，各蓋が胴フランジに対し，内側へずれる場合を+，外側へずれる場合を-として示す。

(ロ)-第 A.80 表　9.3m 傾斜落下時の最大応力（参考値）

部位	位置	応力成分	最大応力 (注 1) (MPa)	基準値 (注 2) (MPa)
一次蓋ボルト	反落下側	膜	-5	890
		曲げ	4	890
	側面	膜	3	890
		曲げ	21	890
	落下側	膜	74	890
		曲げ	82	890
二次蓋ボルト	反落下側	膜	-14	890
		曲げ	141	890
	側面	膜	-18	890
		曲げ	181	890
	落下側	膜	178	890
		曲げ	243	890

(注 1)膜応力の符号は，引張を+，圧縮を-として示す。

(注 2)一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトの基準値は，S_y(RT)とした。

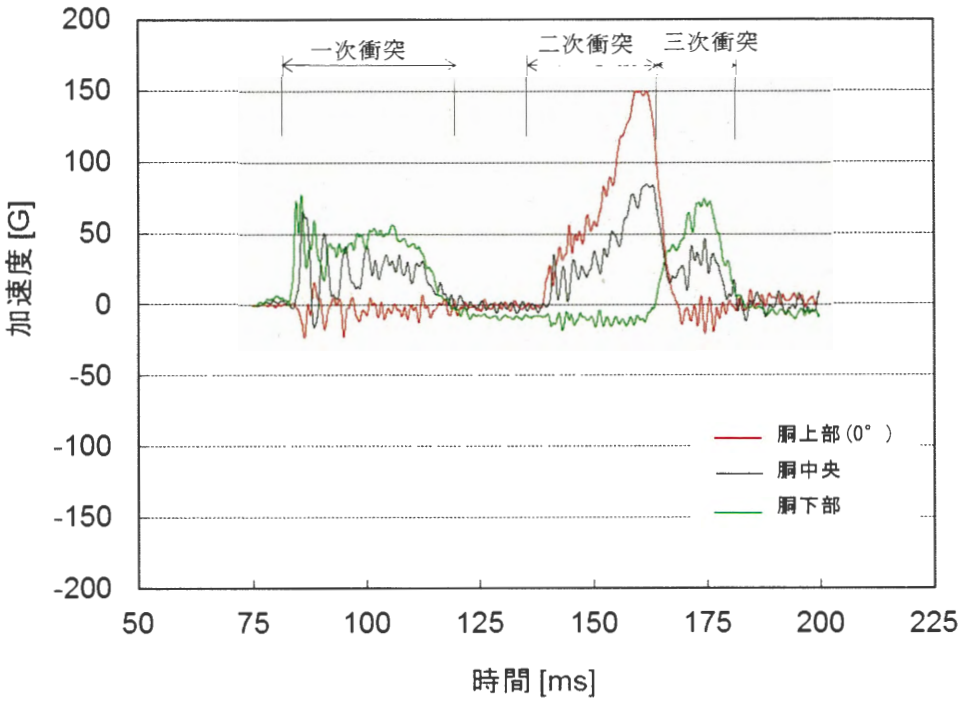
(ロ)-第 A.81 表　9.3m 傾斜落下時の落下試験前後の漏えい率（参考値）

部位	落下試験前 ($Pa \cdot m^3/s$)	落下試験後 ($Pa \cdot m^3/s$)
一次蓋	$< 1 \times 10^{-11}$	$< 1 \times 10^{-11}$
二次蓋	7.4×10^{-9}	1.6×10^{-6}

(1) 落下試験前

(2) 落下試験後

(ロ)-第 A.57 図　9.3m 傾斜落下試験時の落下試験モデル写真



(ロ)-第 A.58 図　9.3m 傾斜落下時の落下方向加速度履歴

(3) 1m 貫通試験

(ロ)-第 A.59 図に 1m 貫通落下試験前後の落下試験モデルの写真を示す。以下に 1m 貫通落下試験結果の概要を示す。

a. 加速度履歴

(ロ)-第 A.60 図に胴上部，胴中央及び胴下部の加速度履歴を示す。(ロ)-第 A.82 表に各部位の最大加速度を示す。

b. 蓋の横ずれ量（参考値）

(ロ)-第 A.83 表に各蓋の横ずれ量を示す。一次蓋及び二次蓋ともに落下側及び反落下側のずれ量が大きく，最大の横ずれ量は一次蓋の落下側の 0.81mm であった。この 1m 貫通試験後の横ずれ量は，9.3m 傾斜落下試験の横ずれ量（0.81mm）を含んでいることから，1m 貫通試験では横ずれが 0.0mm であったと推定される。また，二次蓋の横ずれ量も 0.0mm であったことから，1m 貫通試験では一次蓋及び二次蓋ともに蓋のずれはなかった。

c. ボルトに作用する応力（参考値）

(ロ)-第 A.84 表に各ボルトに作用する最大応力を示す。なお，応力は，落下衝撃負荷時にボルトに生じたひずみから算出した。一次蓋ボルト，二次蓋ボルトともに，

基準値に対して十分に余裕があった。

d. 落下試験前後の漏えい率（参考値）

(ロ)-第A.85表に落下試験前後の一次蓋及び二次蓋の漏えい率を示す。一次蓋及び二次蓋ともに漏えい率は落下試験前後で同程度であり，密封性能を維持する基準値（5×10^{-4}Pa・m^3/s[=5×10^{-3}ref cm^3/s]）を満足した。

(ロ)-第A.82表　1m貫通試験時の最大加速度

計測位置	方向	最大加速度 (G)
胴上部 (0°)	落下方向	23
胴中央	落下方向	20
胴下部	落下方向	8
一次蓋	落下方向	24
二次蓋	落下方向	28

(ロ)-第A.83表　1m貫通試験時の蓋の横ずれ量（参考値）

部位	位置	横ずれ量（mm）
一次蓋	落下側	-0.81 (注)
	側面	0.14 / 0.21 (注)
	反落下側	-0.07 (注)
二次蓋	落下側	0.0
	側面	0.0
	反落下側	0.0

（注）一次蓋の横ずれ量は，9.3m傾斜落下の横ずれ量を含む。

(ロ)-第 A.84 表　1m 貫通試験時の最大応力（参考値）

部位	位置	応力成分	最大応力 (注 1) (MPa)	基準値 (注 2) (MPa)
一次蓋ボルト	反落下側	膜	-1	890
		曲げ	1	890
	側面	膜	-1	890
		曲げ	1	890
	落下側	膜	6	890
		曲げ	4	890
二次蓋ボルト	反落下側	膜	-2	890
		曲げ	1	890
	側面	膜	2	890
		曲げ	4	890
	落下側	膜	56	890
		曲げ	41	890

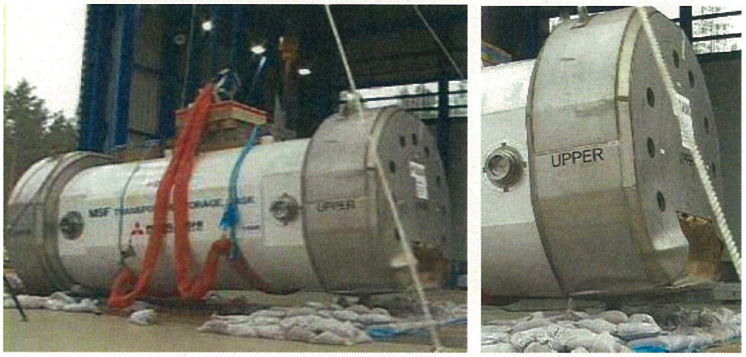
(注 1)膜応力の符号は，引張を+，圧縮を-として示す。

(注 2)一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトの基準値は，S_y(RT)とした。

(ロ)-第 A.85 表　1m 貫通試験時の落下試験前後の漏えい率（参考値）

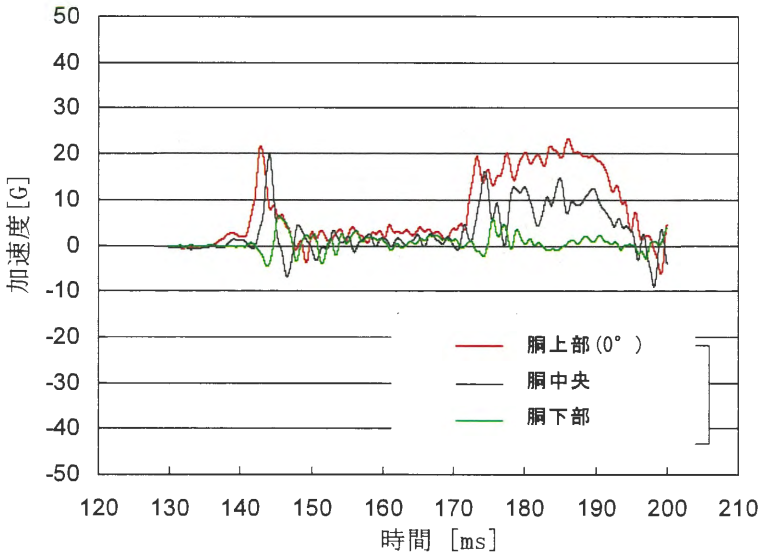
部位	落下試験前 (Pa･m³/s)	落下試験後 (Pa･ m³/s)
一次蓋	< 1×10^{-11}	2.0×10^{-11}
二次蓋	1.6×10^{-6}	7.8×10^{-7}

(1) 落下試験前



(2) 落下試験後

(ロ)-第 A.59 図　1m 貫通試験時の落下試験モデル写真



(ロ)-第 A.60 図　1m 貫通試験の落下方向加速度履歴

A.10.2　CRUSH 及び ABAQUS 解析による評価手法の検証

MSF-24P 型輸送容器の構造設計は，緩衝体性能及び密封性能の維持の観点から，落下試験モデルをベースに，基本構造が同様となるよう設計している。

本項では，上述の落下試験で得られた試験結果（A.10.1　4.参照）に基づき，MSF-24P 型輸送容器の落下解析で使用している CRUSH 及び ABAQUS 解析による評価手法の妥当性を確認した。

1. CRUSH 解析手法の検証

実機大スケール落下試験モデルの落下試験結果（A.10.1　4.参照）と CRUSH 解析の結果を比較し，CRUSH 解析による評価手法の妥当性を確認した。比較結果を(ロ)-第 A.86 表及び(ロ)-第 A.87 表に示す。参考として，1/2.5 スケールモデルの水平落下試験結果と，CRUSH による解析結果との比較による検証も実施した。ここで，水平落下の比較については，CRUSH 解析とのスケール差を考慮し，落下試験結果の最大衝撃加速度は 1/2.5 倍，緩衝体変形量は 2.5 倍した数値を用いる。CRUSH による加速度及び緩衝体変形量の解析結果は落下試験と同等であり，CRUSH 解析による評価手法の妥当性を確認した。

CRUSH 解析による一次衝突及び二次衝突のエネルギー吸収割合は以下のとおりである。

(ロ)-第 A.61 図に実機大スケール落下試験モデルの 9.3m 傾斜落下時の胴中央及び二次蓋の加速度時刻歴を示す。85ms～120ms に一次衝突（下部緩衝体が地面と衝突）し，120ms～165ms に二次衝突（上部緩衝体が地面と衝突）したことが図から読み取れる。

次に，(ロ)-第 A.61 図に示す加速度時刻歴を積分して落下方向速度の時刻歴を算出した結果を(ロ)-第 A.62 図に示す。胴中央の落下方向速度は，85ms～120ms の一次衝突において［　　］に減速し，120ms～165ms の二次衝突において［　　］に減速しており，落下エネルギーが吸収されていることが読み取れる。二次蓋の落下方向速度は，85ms～120ms の一次衝突に伴う回転運動により［　　］に加速している。ここで，二次蓋の落下方向速度と胴中央の落下方向速度の差が胴中央を回転中心とした二次蓋の回転速度であり，実機大スケール落下試験モデルが回転運動していることが読み取れる。

さらに，(ロ)-第 A.62 図に示す速度から落下エネルギー及び回転エネルギーを算出した結果を(ロ)-第 A.63 図に示す。ここで，「落下エネルギー＋回転エネルギー＝全運動エネルギー」となる。(ロ)-第 A.63 図の全運動エネルギーの図より，初期の全運動エネルギー E_0＝［　　］，一次衝突での吸収エネルギー E_1＝［　　］であり，一次衝突でのエネルギー吸収割合は［　　］（＝E_1/E_0），二次衝突でのエネルギー吸収割合は［　　］（＝$1-E_1/E_0$）となる。

9.3m 傾斜落下の CRUSH 解析では，二次衝突時のエネルギー吸収割合について上記計算結果を，密封性能を保守的に評価するため［　　］として評価を行っている。

以上より，(ロ)-第A.86表及び(ロ)-第A.87表に示すように容器の回転の影響を受けない9.3m頭部垂直落下及び9.3m水平落下において，最大衝撃加速度及び緩衝体変形量は試験結果と解析結果が概ね一致しており，また，9.3m傾斜落下においても二次衝突を対象とした衝撃加速度及び緩衝体変形量も同様に概ね一致していることから，CRUSH解析による評価手法は妥当である。なお，9.3m水平落下時の緩衝体変形量の落下試験における結果が，解析値に比べて7%大きい結果となっているものの，熱解析及び遮蔽解析の評価モデルは，この誤差以上の裕度を持って緩衝体変形量を設定していることから，MSF-24P型の安全評価に影響を与えることはない。

(ロ)-第A.86表　落下試験結果とCRUSHコードの比較(最大衝撃加速度)

試験条件	最大衝撃加速度 (m/s^2)	
	落下試験	CRUSH
9.3m頭部垂直落下	598 (61 g) (注1)	618 (63 g)
9.3m傾斜落下	1451 (148 g) (注1)	1510 (154 g)
9.3m水平落下	852 (87 g) (注2)	937 (96 g)

(注1)落下試験での計測結果 (A.10.1　4.参照)

・9.3m頭部垂直落下　：胴上部の落下方向加速度の平均値

・9.3m傾斜落下　　：二次蓋の落下方向加速度

(注2)1/2.5スケール落下試験での計測結果を1/2.5倍した数値

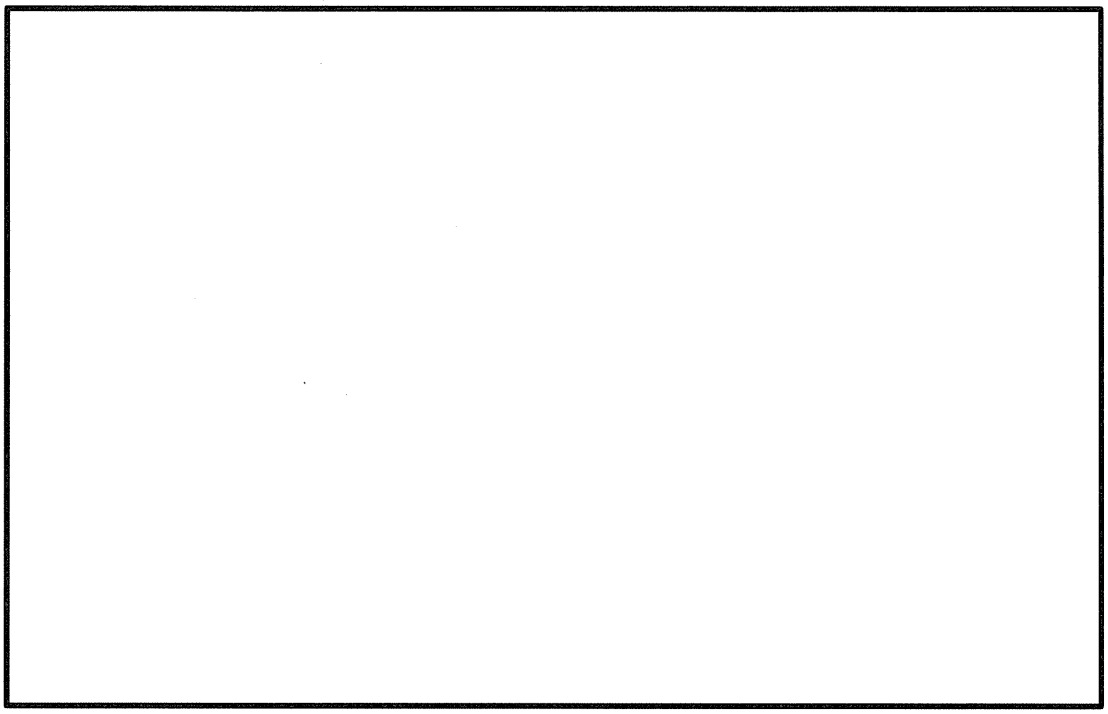
・9.3m水平落下　　：胴中央の落下方向加速度

(ロ)-第A.87表　落下試験結果とCRUSHコードの比較(緩衝体変形量)

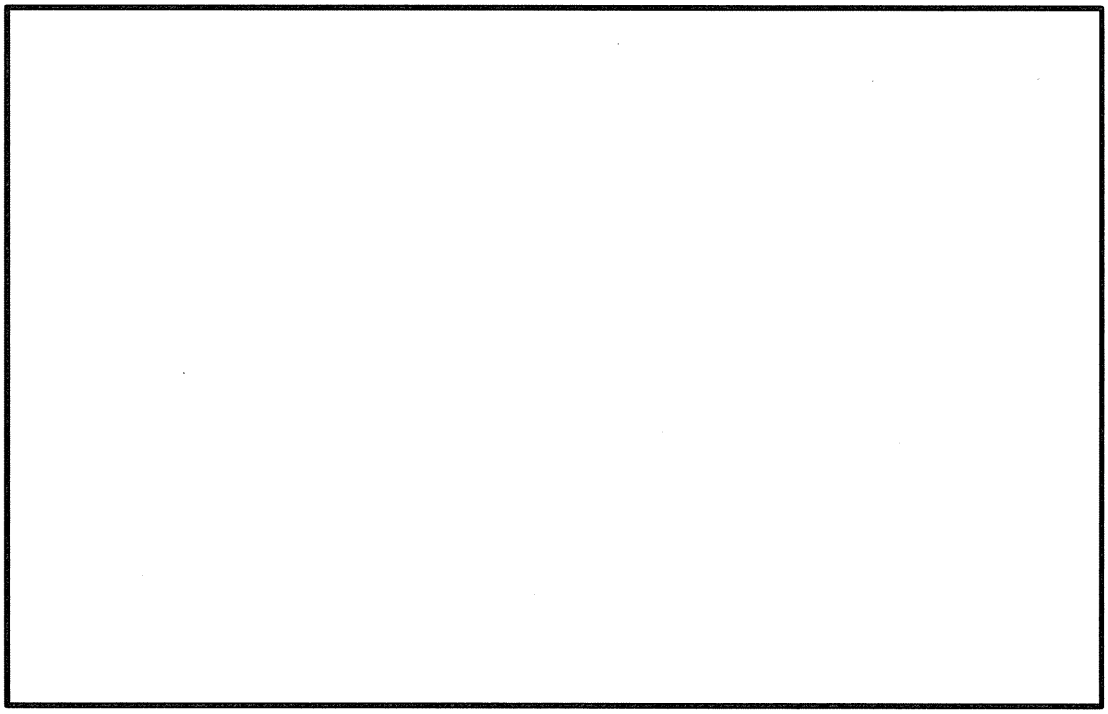
試験条件	緩衝体変形量 (mm)	
	落下試験	CRUSH
9.3m頭部垂直落下	259 (注1)	308
9.3m傾斜落下	253 (注1)	314
9.3m水平落下	227 (注2)	212

(注1)落下試験での計測結果 (A.10.1　4.参照)

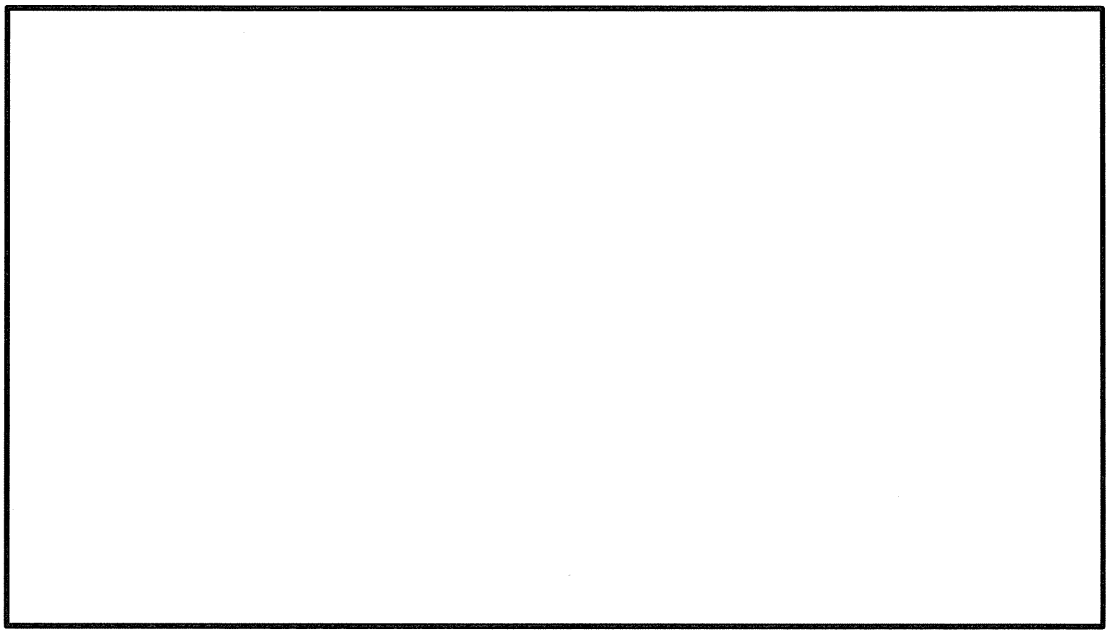
(注2)1/2.5スケール落下試験での計測結果を2.5倍した数値



(ロ)-第 A.61 図　実機大スケール落下試験モデル　9.3m 傾斜落下時の加速度時刻歴
（胴中央及び二次蓋）



(ロ)-第 A.62 図　実機大スケール落下試験モデル　9.3m 傾斜落下時の速度時刻歴
（胴中央，二次蓋及び二次蓋－胴中央）



(ロ)-第 A.63 図　実機大スケール落下試験モデル　9.3m 傾斜落下時のエネルギー時刻歴

2. 実機大スケール落下試験モデルでの試験結果の適用性について

傾斜落下では，重力による自由落下（並進運動）に加え，一次衝突によりキャスク本体が回転を開始し，キャスクが重心周りに回転（回転運動）を伴いながら二次衝突が発生する。並進運動による落下速度は，重力と落下高さにより決定されるため，キャスクの質量や形状に影響を受けない。一方で，回転運動による衝突速度は，角速度とキャスクの長さや径などの回転体の慣性モーメントにより影響を受ける。そこで，プロトタイプと MSF-24P 型の慣性モーメントに関わる諸元について比較を行う。また，参考として，BAM 論文[21]に基づき評価した最大二次衝突速度を比較する。

MSF-24P 型の慣性モーメントに影響するキャスク質量，全長及び胴外径を含め，慣性モーメントと最大二次衝突速度の評価結果を(ロ)-第 A.88 表に示す。キャスク質量，全長及び胴外径は，プロトタイプに対して最大 8%程度の誤差があり，MSF-24P 型の慣性モーメントの誤差は 6%であるが，最大二次衝突速度は一致していることから，二次衝突時の運動エネルギーの割合は，プロトタイプと相対的に一致していると判断できる。

以上より，プロトタイプでの試験結果で設定した二次衝突時の運動エネルギーの吸収割合は MSF-24P 型へ適用可能である。

(ロ)-第 A.88 表　各容器の慣性モーメントと最大二次衝突速度

項目	プロトタイプ	MSF-24P 型
キャスク質量[kg]	127300	134400 [1.06]
キャスク全長[mm]	6810	6783 [1.00]
胴外径[mm]	2409	2596 [1.08]
慣性モーメント[kg･m^2] （直円柱の式を適用）	5.38×10^5	5.72×10^5 [1.06]
最大二次衝突速度[m/s]	20.1	20.0 [1.00]

[ ]内の数値は，プロトタイプとの比率

3. ABAQUS 解析手法の検証

落下試験で計測された蓋部のひずみを基に，MSF-24P 型輸送容器と落下試験モデルの寸法差等を考慮して算出した MSF-24P 型輸送容器に発生する応力と，A.6.1 に記載される ABAQUS 解析結果とを比較し，ABAQUS 解析による評価手法の妥当性を検証した。また，参考として，応力評価式を用いて算出した応力と，解析結果との比較による検証も実施した。

(1) 検証手順

以下に ABAQUS による解析手法の検証手順を示す。（(ロ)-第 A.64 図参照）

a. MSF-24P 型輸送容器と落下試験モデルの蓋部を構成する各部位の寸法を抽出する。
b. 各部位の設計条件（材質，設計温度，縦弾性係数）を抽出する。
c. 抽出した寸法及び設計条件を基に，MSF-24P 型輸送容器と落下試験モデルの各部位の強度比を算出する。
d. 落下衝撃力を決定する設計条件（キャスク質量，落下時の衝撃加速度）を抽出し，MSF-24P 型輸送容器と落下試験モデルの落下時に作用する荷重比を算出する。
e. 荷重比，各部位の強度比及び落下試験モデルの各部位に作用した応力（落下試験で計測したひずみから算出）を用いて，MSF-24P 型輸送容器の各部位に作用する応力を算出する。
f. e.で算出した応力と，解析結果を比較し，ABAQUS による解析手法を検証する。

(2) 評価結果及びまとめ

9m 頭部垂直落下時及び 9m 水平落下時に MSF-24P 型輸送容器に発生する応力について，落下試験結果より算出した結果と解析結果の比較を(ロ)-第 A.89 表及び(ロ)-第 A.90 表に示す。

9m 頭部垂直落下時及び 9m 水平落下時の各蓋ボルトの応力は，落下試験結果より算出した応力が解析結果より小さく，ABAQUS 解析による評価手法は妥当である。

(ロ)-第A.89表　9.3m頭部垂直落下時の各蓋ボルトの応力評価結果

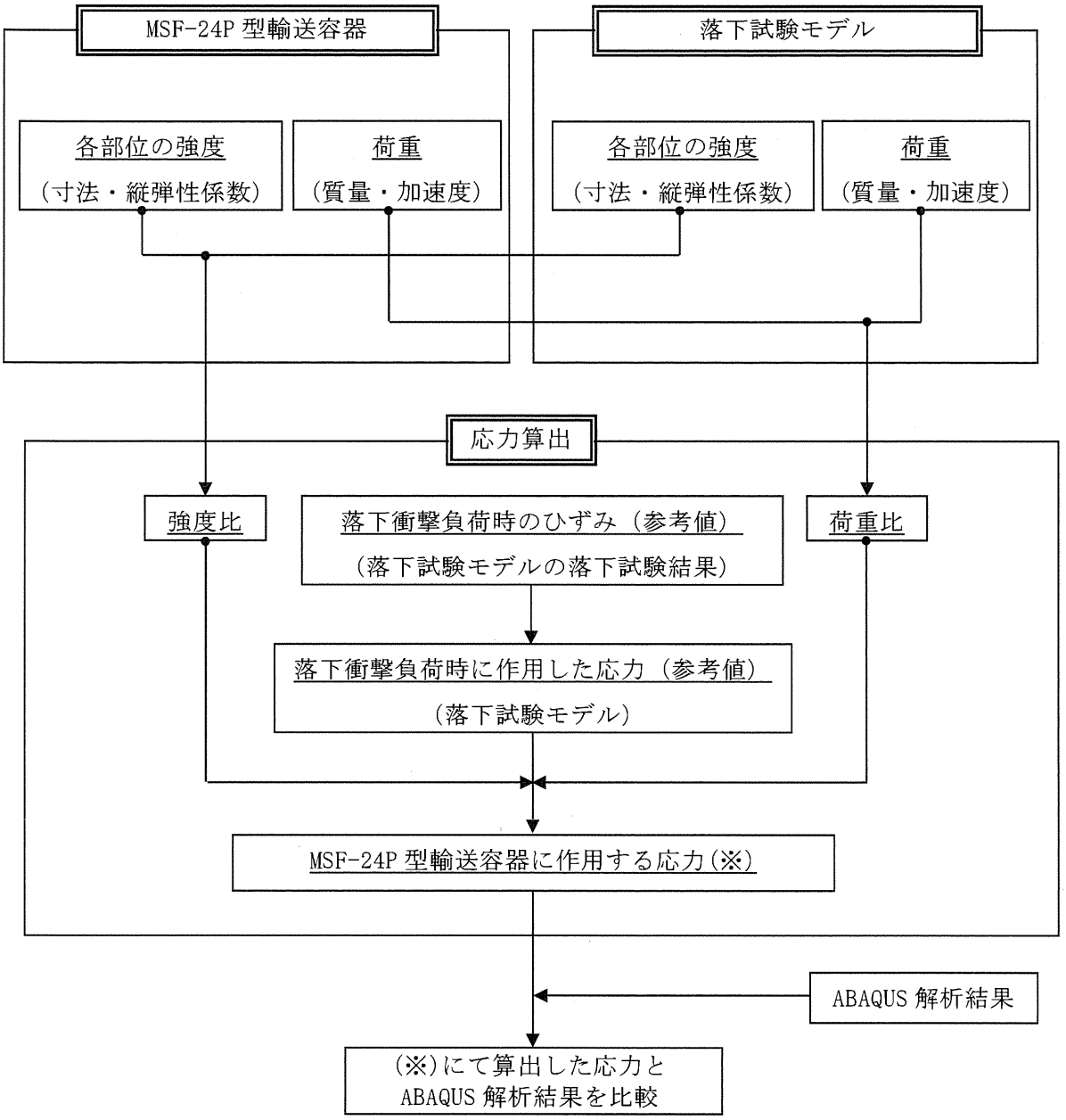
部位	変形モード	試験結果より算出した応力 (MPa)	ABAQUS解析結果 (注) (MPa)	評価基準 (MPa)
二次蓋ボルト	引張＋曲げ	47	201	848
三次蓋ボルト	引張＋曲げ	51	53	848

(注)落下試験結果のひずみ測定位置が蓋ボルトの中央位置（軸方向）であるため，解析結果に記載する応力も蓋ボルトの中央位置(軸方向)の応力とした。また，落下試験結果は，蓋ボルト締付後のひずみを0として測定しているが，ABAQUS解析結果には初期締付力が含まれているため，記載する値は解析結果と初期締付力の差とした。

(ロ)-第A.90表　9.3m水平落下時の各蓋ボルトの応力評価結果

部位	変形モード	試験結果より算出した応力 (MPa)	ABAQUS解析結果 (注) (MPa)	評価基準 (MPa)
二次蓋ボルト	引張＋曲げ	92	181	848
三次蓋ボルト	引張＋曲げ	273	368	848

(注)落下試験結果のひずみ測定位置が蓋ボルトの中央位置（軸方向）であるため，解析結果に記載する応力も蓋ボルトの中央位置(軸方向)の応力とした。また，落下試験結果は，蓋ボルト締付後のひずみを0として測定しているが，ABAQUS解析結果には初期締付力が含まれているため，記載する値は解析結果と初期締付力の差とした。



(ロ)-第 A.64 図　ABAQUS 解析手法の落下試験を基にした検証手順

(3) 応力評価式との比較

0.3m 落下時にキャスク代表部位に発生する応力について，解析結果と応力評価式を用いて算出した応力を比較した結果を，(ロ)-第 A.91 表，(ロ)-第 A.92 表，(ロ)-第 A.93 表及び(ロ)-第 A.94 表に示す。解析結果と応力評価式による算出結果は概ね一致しており，ABAQUS 解析による評価手法は妥当である。

a. 頭部垂直落下

（ｉ）一次蓋中央

一次蓋中央の応力は，円板，周辺単純支持，同心円内に等分布荷重の式を用いて評価する。評価式を以下に示す。

$$\sigma_r = \mp \frac{3pb^2}{8h^2}\left\{4(1+\nu)\ln\frac{a}{b} + 4 - (1-\nu)\frac{b^2}{a^2} - (3+\nu)\frac{r^2}{a^2}\right\}$$

ここで，

p：等分布荷重（MPa）［落下方向を正の値とする］

$$p = (m_1+m_2+m_3)\times 10^3 \times acc / (\pi \times b^2) + p_1 + p_2$$

(ロ)-第 A.91 表　解析結果と応力評価式による計算条件及び計算結果

（0.3m 頭部垂直落下時 一次蓋中央）

項目		記号	単位	数値
質量	一次蓋	m_1	ton	
	バスケット	m_2	ton	
	燃料集合体	m_3	ton	
圧力	胴内圧	p_1	MPa G	
	一二次蓋間圧力	p_2	MPa G	
衝撃加速度		acc	m/s^2	
寸法	蓋中央厚さ	h	mm	
	インロー径	2b	mm	
	ボルトPCD	2a	mm	
	評価位置（中心からの距離）	r	mm	
ポアソン比		ν	—	
等分布荷重		p	MPa	
径方向応力（応力評価式）		σ_r	MPa	68
解析結果	内	S_i	MPa	64
	外	S_o	MPa	65

（ⅱ）一次蓋ボルト

一次蓋ボルトの応力は，収納物及び蓋自重による慣性力が，均一に作用するものとして評価する。評価式を以下に示す。

$$\sigma_t = \sigma_0 + \phi \times \left\{ F \Big/ \left(\frac{\pi}{4} \times d^2 \times n \right) \right\}$$

ここで，

F：作用荷重（N）

$$F = (m_1 + m_2 + m_3) \times 10^3 \times acc$$

(ロ)-第 A.92 表　解析結果と応力評価式による計算条件及び計算結果

（0.3m 頭部垂直落下時 一次蓋ボルト）

項目		記号	単位	数値
質量	一次蓋	m_1	ton	
	バスケット	m_2	ton	
	燃料集合体	m_3	ton	
衝撃加速度		acc	m/s^2	
寸法他	ボルト断面径	d	mm	
	本数	n	本	
	初期締付力	σ_0	MPa	
	内力係数	ϕ	—	
ポアソン比		ν	—	
作用荷重		F	N	
引張応力（応力評価式）		σ_t	MPa	282
解析結果		S	MPa	289

b. 底部垂直落下

底板中央の応力は，円板，周辺固定，等分布荷重の式を用いて評価する。評価式を以下に示す。

$$\sigma_r = 0.75\frac{pa^2}{h^2}$$

ここで，

p：等分布荷重（MPa）［落下方向を正の値とする］

$$p=(m_1+m_2+m_3)\times 10^3 \times acc / (\pi \times a^2)+p_1+p_2$$

(ロ)-第 A.93 表　解析結果と応力評価式による計算条件及び計算結果

（0.3m 底部垂直落下時 底板中央）

項目		記号	単位	数値
質量	底板	m_1	ton	
	バスケット	m_2	ton	
	燃料集合体	m_3	ton	
圧力	胴内圧	p_1	MPa G	
	底部中性子遮蔽材部圧力	p_2	MPa G	
衝撃加速度		acc	m/s^2	
寸法	底板中央厚さ	h	mm	
	底板外径	2a	mm	
等分布荷重		p	MPa	
径方向応力（応力評価式）		σ_r	MPa	23
解析結果	内	S_i	MPa	24
	外	S_o	MPa	30

c．水平落下

胴中央の応力は，梁，両端支持，部分的に等分布荷重の式を用いて評価する。評価式を以下に示す。

$$M_{max}=\frac{w\ell_3}{\ell}\left(\ell_2+\frac{\ell_3}{2}\right)\left(\ell_1+\frac{2\ell_2\ell_3+\ell_3^2}{4\ell}\right)$$

$$\sigma_b=M_{max}\Big/\left(I\Big/\frac{d_o}{2}\right)$$

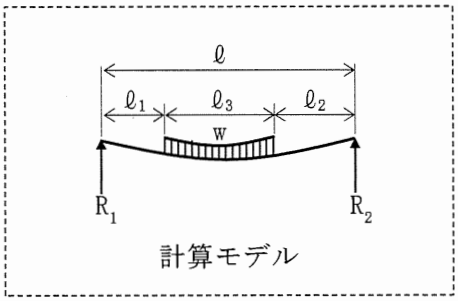
ここで，

w：等分布荷重（MPa）

$$w=(m_1+m_2+m_3)\times10^3\times acc\Big/\ell_3$$

I：断面二次モーメント（mm^4）

$$I=\pi\Big/64\times\left(d_o^4-d_i^4\right)$$



計算モデル

(ロ)-第 A.94 表　解析結果と応力評価式による計算条件及び計算結果

（0.3m 水平落下時 胴中央）

項目		記号	単位	数値
質量	胴	m_1	ton	
	バスケット	m_2	ton	
	燃料集合体	m_3	ton	
衝撃加速度		acc	m/s^2	
寸法	胴長さ	ℓ	mm	
	胴外径	d_o	mm	
	胴内径	d_i	mm	
	支点から荷重作用位置までの距離（上部側）	ℓ_1	mm	
	支点から荷重作用位置までの距離（下部側）	ℓ_2	mm	
	荷重作用位置（バスケット長さ）	ℓ_3	mm	
等分布荷重（線荷重）		w	N/mm	
曲げモーメント		M_{max}	N･mm	
断面二次モーメント		I	mm^4	
曲げ応力（応力評価式）		σ_b	MPa	27
解析結果	内	S_i	MPa	20
	外	S_o	MPa	29

A.10.3　MSF-24P 型輸送容器の落下試験結果に基づく密封性能の検証

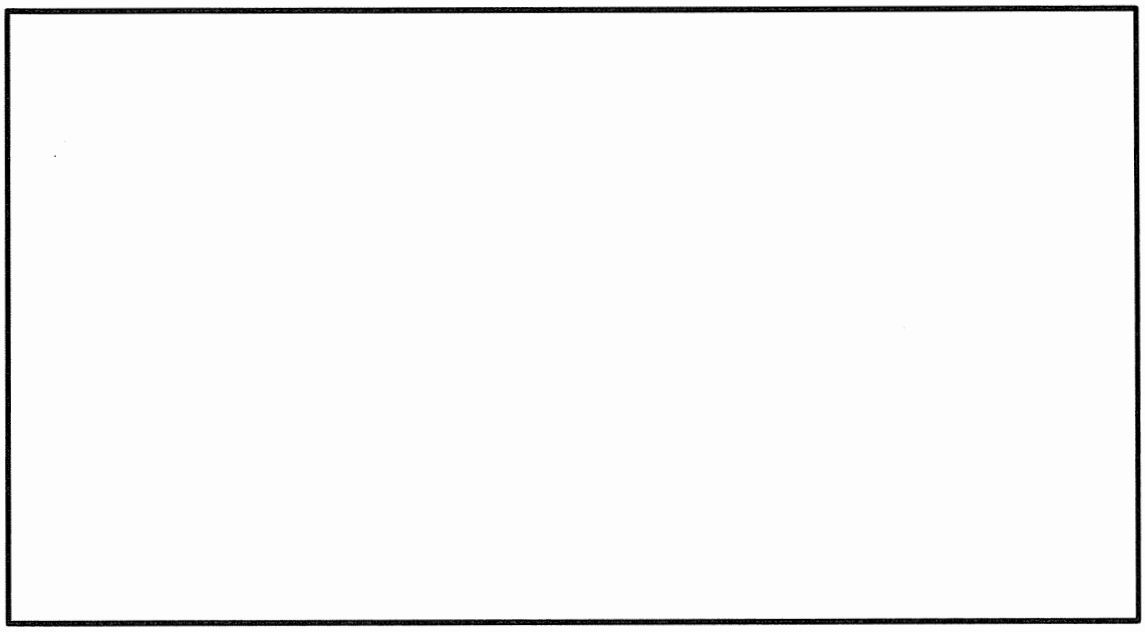
MSF-24P 型輸送容器の 9.3m 傾斜落下条件下における密封性能について落下試験結果に基づき評価・検証を行った。

1. MSF-24P 型輸送容器の密封設計

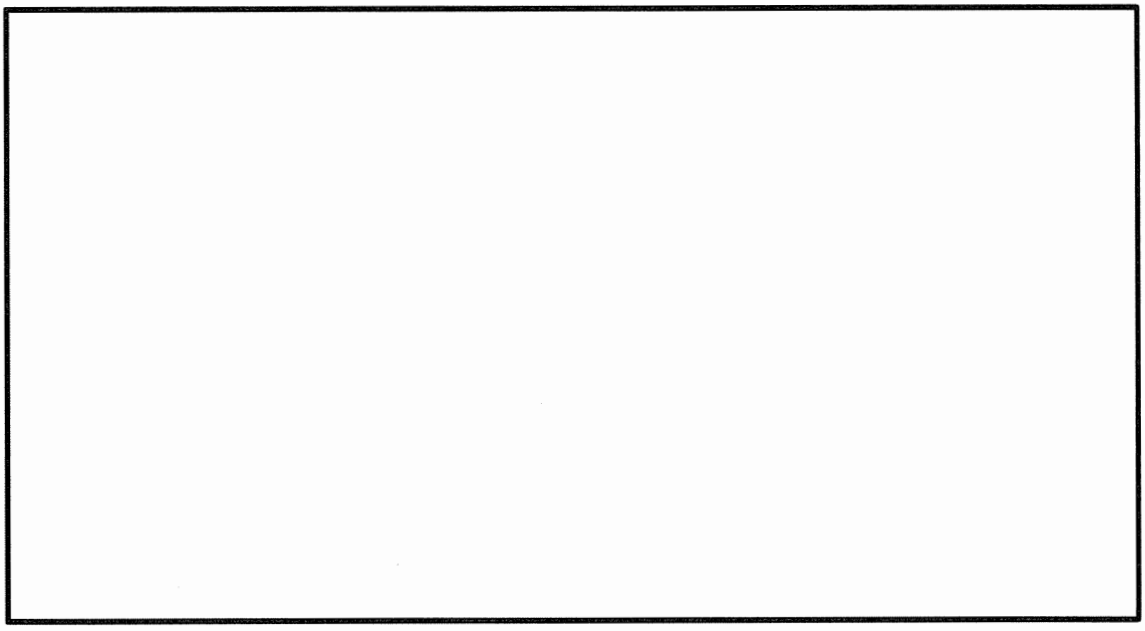
落下試験結果に基づき落下時の蓋密封部挙動について考察し，蓋密封部の漏えいメカニズムを分析した。それら結果に基づき，MSF-24P 型輸送容器の蓋密封部設計に反映した項目を(ロ)-第 A.95 表に示す。また，(ロ)-第 A.65 図に MSF-24P 型輸送容器及び落下試験モデルの蓋部構造の比較を示す。

(ロ)-第 A.95 表　MSF-24P 型輸送容器の蓋密封部設計に反映した項目

部位	落下試験等の結果	蓋密封部設計に反映した項目
蓋密封部	(1)落下衝撃荷重が胴フランジ及び蓋側面に作用し，胴フランジ，二次蓋及び二次蓋ボルトが曲げ及び引張変形し，蓋の横ずれ及び口開きが生じた。 (2)上記(1)により，落下試験では，二次蓋(最外蓋)の 9.3m 落下試験後の漏えい率は基準値を満足したものの，試験前より 2～3 桁程度増加した。	以下に示す反映により，落下試験モデルよりも密封性能を向上させる。 (1)胴フランジ，一次蓋及び二次蓋の剛性を落下試験モデルよりも高めることで蓋密封部の変形量を低減させる。 (2)落下試験モデルの二次蓋（最外蓋）に加えて三次蓋(最外蓋)を追加し，密封機能の向上を図る。
緩衝体	(1)緩衝体の厚肉内鋼板構造による木材保持機能が有効に機能したため，緩衝体の変形量は許容量以下であることを確認した（ただし，許容変形量に対する余裕は小さい)。	(1)緩衝体の厚肉内鋼板構造による木材保持機能を維持するため，輸送容器の緩衝体構造は，落下試験により検証された基本構造を採用する。 (2)緩衝材高温時の強度低下を考慮した上で，比較的固い木材を適用し，外形制限寸法内の範囲内で緩衝体を径方向に大型化し，緩衝性能を向上させる。



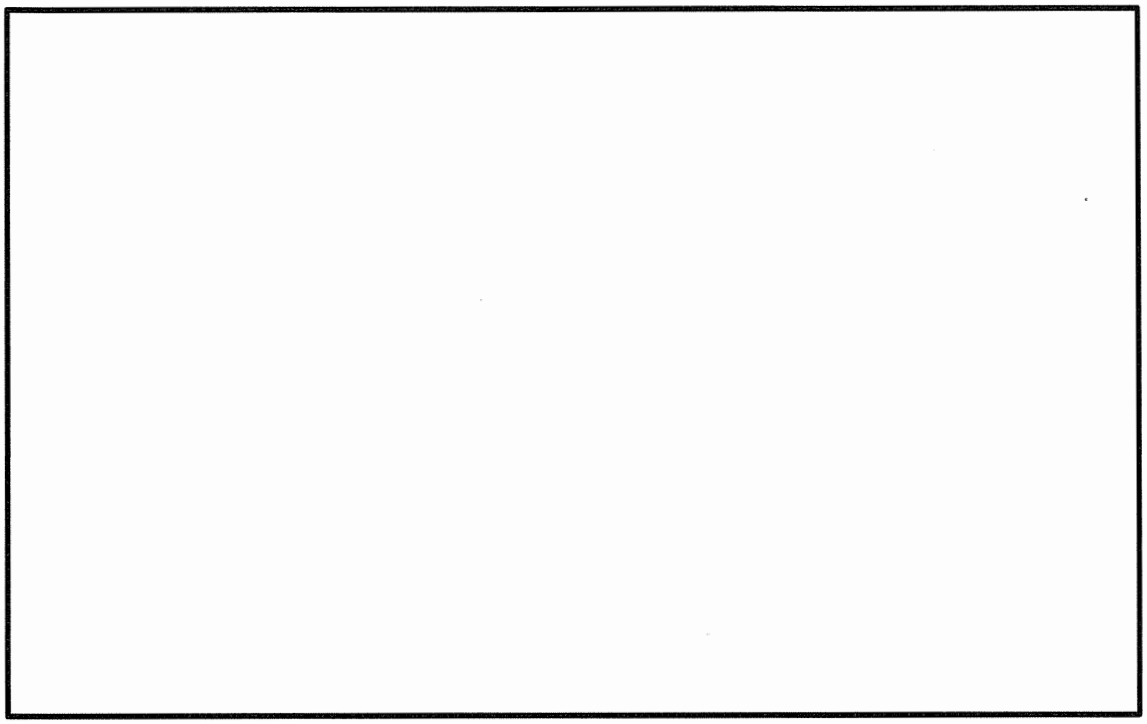
MSF-24P 型輸送容器



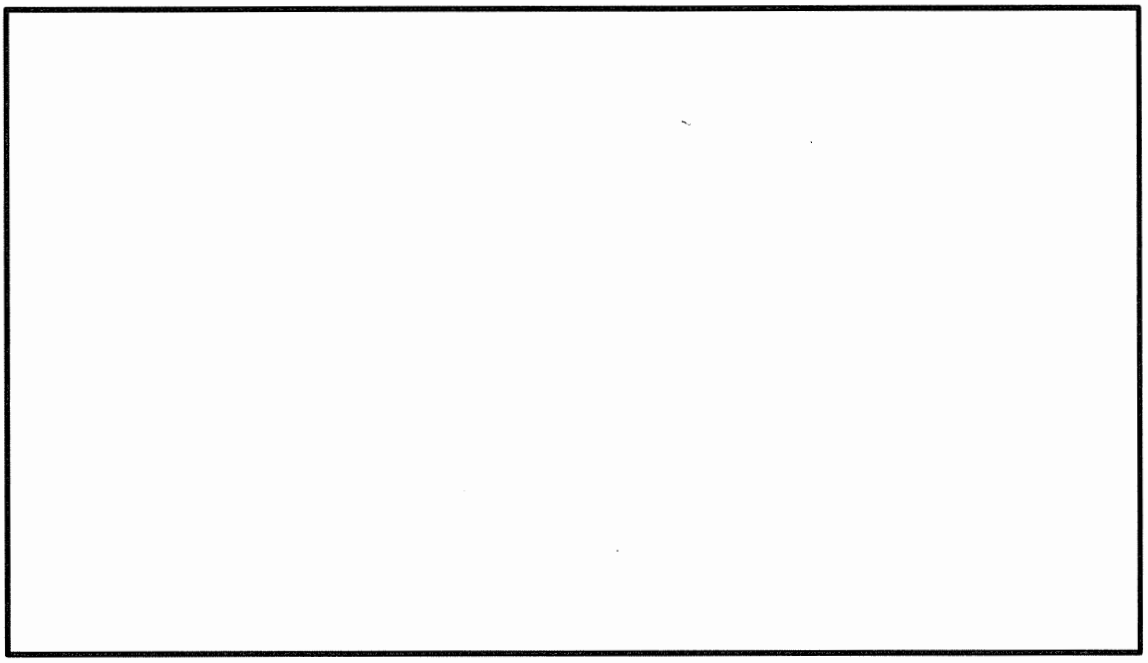
落下試験モデル

（単位：mm）

(ロ)-第 A.65 図　MSF-24P 型輸送容器及び落下試験モデルの
キャスク全体及び蓋密封部構造の比較（1/2）



MSF-24P 型輸送容器



落下試験モデル

（単位：mm）

(ロ)-第 A.65 図　MSF-24P 型輸送容器及び落下試験モデルの
キャスク全体及び蓋密封部構造の比較（2/2）

2. 衝撃加速度の算出方法について

落下試験モデルのMSF-24P型の評価への適用性については，A.10.2のとおり二次衝突時の運動エネルギーの割合は，プロトタイプと相対的に一致しており，プロトタイプでの試験結果で設定した二次衝突時の運動エネルギーの吸収割合はMSF-24P型へ適用可能である。

MSF-24P型輸送容器の9.3m傾斜落下時の衝撃加速度は，CRUSHコードで算出した水平落下時の衝撃加速度に，傾斜落下試験時の二次衝突時の加速度と水平落下試験の加速度比1.6倍（3.参照）を乗じて算出した。9.3m傾斜落下時の衝撃加速度を(ロ)-第A.96表に示す。なお，MSF-24P型輸送容器の評価においては，水平落下時の衝撃加速度として，保守的に9m落下試験時設計加速度を適用した。

二次衝突時のエネルギー吸収割合について，プロトタイプの傾斜落下試験で得られた値を保守的に切り上げた□として，CRUSHコードを用いて評価した。この評価では，二次衝突時の荷重を仮想的に評価するため，□の高さからの水平落下として，A.6.1の手法を用いて落下時の衝撃加速度を評価した。評価結果を(ロ)-第A.97表に示す。CRUSHコードを用いてMSF-24P型に対して傾斜落下時の衝撃加速度を評価した結果，水平落下時の加速度に対して傾斜落下時の加速度は約□倍となった。この結果より，3.で示した落下試験の結果で得られた水平落下と傾斜落下の加速度比1.6倍を適用することは保守的であると判断できる。

(ロ)-第A.96表　9.3m傾斜落下時の衝撃加速度

	MSF-24P型輸送容器	実機大スケール落下試験モデル
9.3m水平落下時衝撃加速度(m/s^2)	704	—
9m水平落下試験時設計加速度(m/s^2)	710	—
9.3m傾斜落下時衝撃加速度(m/s^2)	1136 (注1)	1451 (148g) (注2)

(注1) 9.3m傾斜落下時の衝撃加速度は，9m水平落下試験時の設計加速度に対して，傾斜落下時の二次衝突時の加速度と水平落下の加速度比1.6倍を考慮した値を用いた。

(注2) 9.3m傾斜落下試験時における二次蓋の最大加速度（計測値）

(ロ)-第 A.97 表　CRUSH コードを用いた 9.3m 傾斜落下時の衝撃加速度

	衝撃加速度(m/s²)
9.3m水平落下　[A]	704
9.3m傾斜落下　[B]	
[B]/[A]	

3. 水平落下と傾斜落下の加速度比ついて

水平落下と傾斜落下の加速度の比は，実機大スケール落下試験モデルの 1/2.5 スケールプロトタイプモデル（以下「1/2.5 モデル」という。）の落下試験結果から評価した。水平落下における加速度は，試験体全体の剛体加速度とするため，胴上部，胴中央及び胴下部の平均値を用いた。傾斜落下における加速度は，密封境界部近傍である胴上部，一次蓋及び二次蓋における二次衝突時の最大加速度を用いた。1/2.5 モデルにおける傾斜落下と水平落下の加速度計測値を(ロ)-第 A.98 表に，また，傾斜落下と水平落下の加速度比を(ロ)-第 A.99 表に示す。水平落下時の剛体加速度に対して，傾斜落下時のそれぞれの部位の加速度比を算出し，それらの平均値は約 1.6 となった。

したがって，MSF-24P 型輸送容器に対する傾斜落下と水平落下の加速度比は 1.6 を用いた。

(ロ)-第 A.98 表　1/2.5 モデルにおける傾斜落下と水平落下の加速度（計測値）

計測位置	方向	最大加速度(G) (注 1)	
		9m 傾斜落下 (注 2)	9.3m 水平落下
胴上部	落下方向	380	344
胴中央	落下方向	137	217
胴下部	落下方向	149	199
一次蓋	落下方向	414	350
二次蓋	落下方向	405	330

(注 1) 1250Hz のローパスフィルター処理をした結果

(注 2) 1/2.5 モデルでは 9.3m 傾斜落下を実施していないため，0.3m 傾斜落下後に 9m 傾斜落下を実施した結果を示す。

(ロ)-第 A.99 表　1/2.5 モデルにおける傾斜落下と水平落下の加速度比

計測位置	方向	最大加速度 (G) (注 1)		加速度比
		9m 傾斜落下	9.3m 水平落下	
胴上部	落下方向	380	253 (注 2) (胴平均加速度)	1.50
一次蓋	落下方向	414		1.64
二次蓋	落下方向	405		1.60
平均値				1.6

(注 1) 1250Hz のローパスフィルター処理をした結果

(注 2) 胴上部，胴中央及び胴下部の平均値

4. MSF-24P 型輸送容器の密封性能評価

9.3m 傾斜落下において，MSF-24P 型輸送容器の密封性能が維持することを，落下試験により密封性能が維持することが実証されている落下試験モデル及びその落下試験結果を用いて検証する。

落下後の漏えい率の増加は蓋に取り付けられた金属ガスケット又はOリングと胴フランジ面との口開き量の増加，金属ガスケットの相対横ずれ量の増加，金属ガスケット又はOリングの圧縮量の増加及び蓋ボルトの締付力の低下に起因するリークパスの発生とガスケット線力の低下が原因である。したがって，蓋部の変形量を抑えることが密封性能の維持につながる。そこで，MSF-24P 型輸送容器の蓋，胴フランジ及び蓋ボルトの変形量が落下試験モデルに比べて小さいことを示すことにより，MSF-24P 型輸送容器の密封性能を検証する。

また，MSF-24P 型輸送容器の三次蓋構造に対して落下試験モデルは二次蓋構造であるが，荷重の伝達経路と蓋密封部の構造について，MSF-24P 型輸送容器の三次蓋周辺部（最外の蓋）と落下試験モデルの二次蓋周辺部（最外の蓋）は同様であり，MSF-24P 型輸送容器の二次蓋周辺部及び一次蓋周辺部（内側の蓋）と落下試験モデルの一次蓋周辺部（内側の蓋）で同様である。したがって，MSF-24P 型輸送容器の蓋密封部（三次蓋）は落下試験モデルの蓋密封部（二次蓋）と，MSF-24P 型輸送容器の蓋密封部（二次蓋及び一次蓋）は落下試験モデルの蓋密封部（一次蓋）と比較する。

(1) 評価手順

密封性能評価方法の手順を以下に示す。（(ロ)-第 A.66 図参照）

a. MSF-24P 型輸送容器と落下試験モデルの蓋部を構成する各部位（胴フランジ，一次蓋，一次蓋ボルト，二次蓋，二次蓋ボルト，三次蓋，三次蓋ボルト）の各変形モード（曲げ，圧縮，引張，オーバル変形）の剛性に影響する寸法を抽出する。

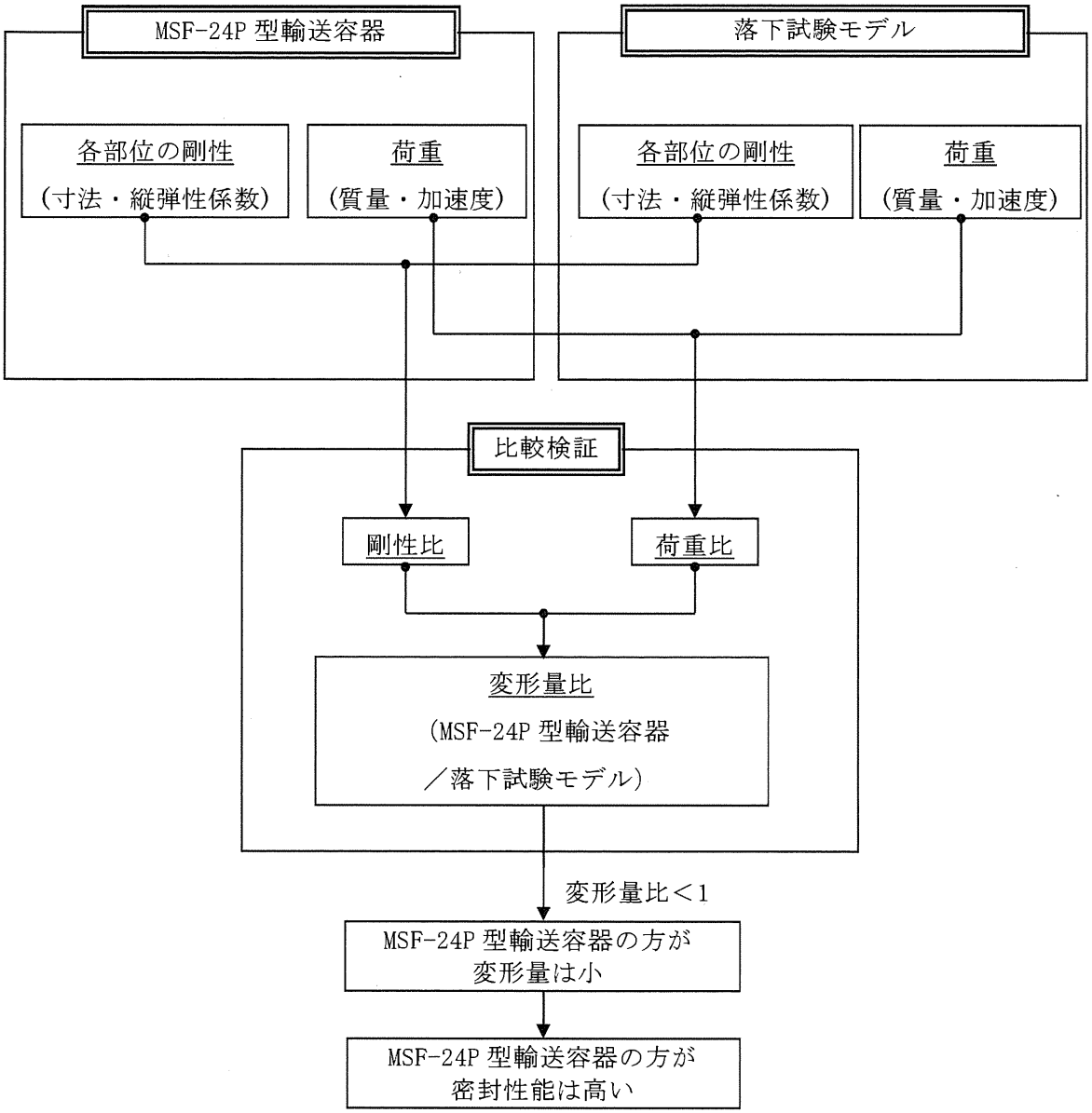
b. 各部位の剛性に影響する設計条件（材質，設計温度，縦弾性係数）を抽出する。

c. 抽出した寸法及び設計条件を基に，MSF-24P 型輸送容器と落下試験モデルの各部位の剛性比を算出する。

d. 落下衝撃力を決定する設計条件（キャスク重量，落下時の衝撃加速度）を抽出し，MSF-24P 型輸送容器と落下試験モデルの落下時に作用する荷重比を算出する。

e. 各部位の剛性比と落下時に作用する荷重比から，落下衝撃負荷時の変形量比を算出する。

f. e.で算出した変形量比が 1 以下（MSF-24P 型輸送容器の方が小さい）であれば，落下試験モデルに比べて，より高い密封性能を有していることが示される。



(ロ)-第 A.66 図　密封性能評価手順

(2) 荷重比，剛性比及び変形量比の算出方法について

MSF-24P 型輸送容器の傾斜落下時評価に使用する荷重は，各部位の質量及び落下時の衝撃加速度を用いて算出した。MSF-24P 型輸送容器及び実機大スケール落下試験モデルの各部位の質量を(ロ)-第 A.100 表に示す。MSF-24P 型輸送容器及び実機大スケール落下試験モデルに対して，これらの質量及び衝撃加速度を用いて荷重を算出し，胴フランジ部，蓋部及び蓋ボルト部の荷重比を評価した。

以下に荷重比，剛性比及び変形量比の算出方法を記載する。

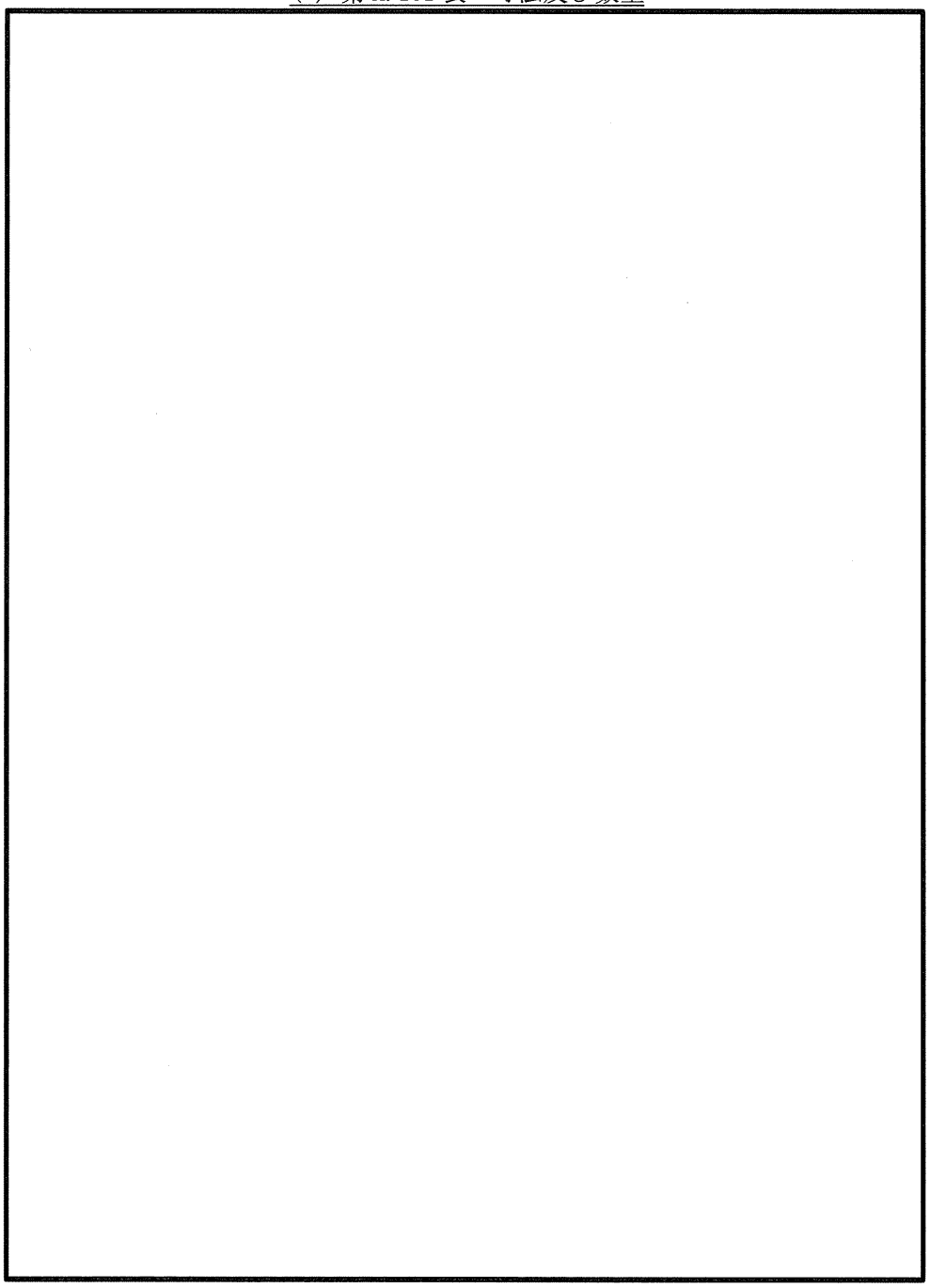
(ロ)-第 A.100 表　各容器の各部位の質量

項目	MSF-24P型 輸送容器（kg）	実機大スケール 落下試験モデル （kg）
一次蓋	5600	4500
二次蓋	4500	2900
三次蓋	3300	—
輸送物総質量	134400	127300

① 寸法

MSF-24P 型輸送容器及び実機大スケール落下試験モデルの蓋密封部を構成する各部位(胴フランジ，蓋，蓋ボルト)の各変形モード(曲げ，圧縮，オーバル変形)の剛性に影響する寸法及び数量を(ロ)-第 A.101 表に，構造図を(ロ)-第 A.65 図に示す。

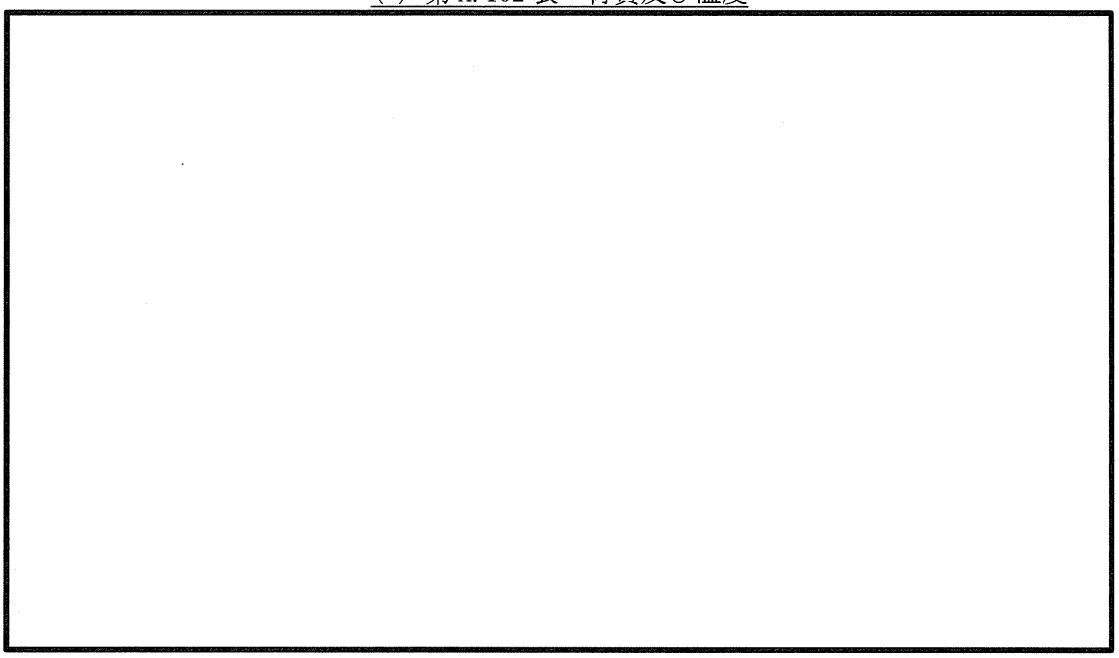
(ロ)-第 A.101 表　寸法及び数量



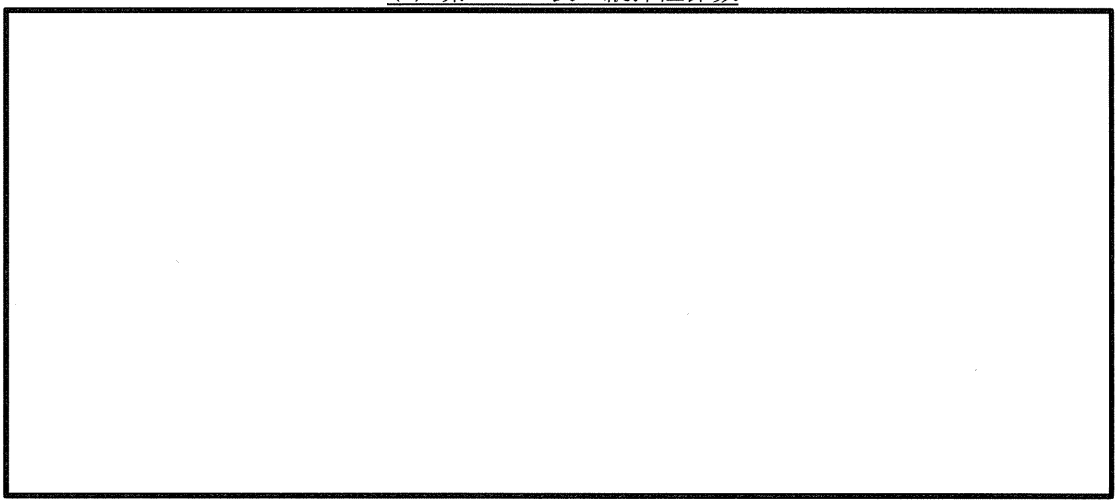
② 縦弾性係数

MSF-24P 型輸送容器及び実機大スケール落下試験モデルの各部位の材質及び温度を(ロ)-第 A.102 表に示す。また，(ロ)-第 A.102 表の条件より決定される各部位の縦弾性係数を(ロ)-第 A.103 表に示す。

(ロ)-第 A.102 表　材質及び温度



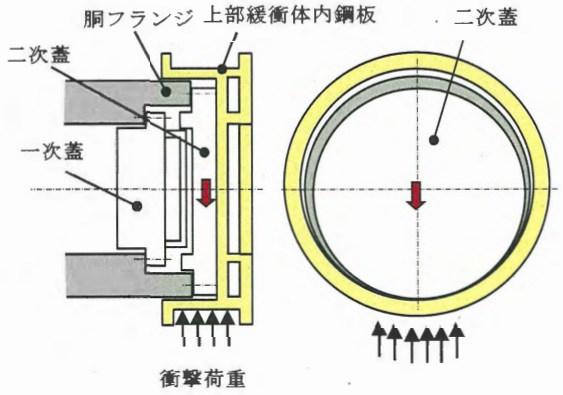
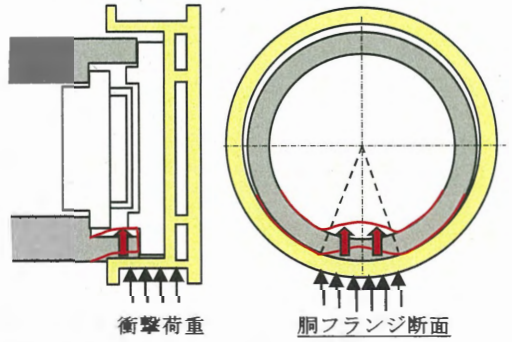
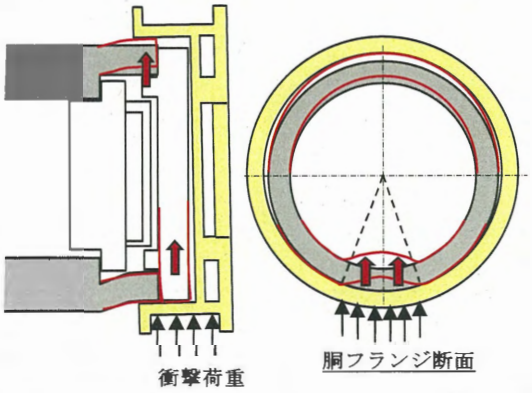
(ロ)-第 A.103 表　縦弾性係数



(3) 傾斜落下時評価

9.3m 傾斜落下時の蓋密封部の挙動分析から，胴フランジ及び蓋の曲げ変形並びに蓋ボルトの引張及び曲げ変形が生じていると考えられる。蓋密封部の漏えいを防止するためには，これらの変形を抑制する必要がある（(ロ)-第 A.67 図参照）。したがって，胴フランジ，蓋及び蓋ボルトの変形について評価を行う。

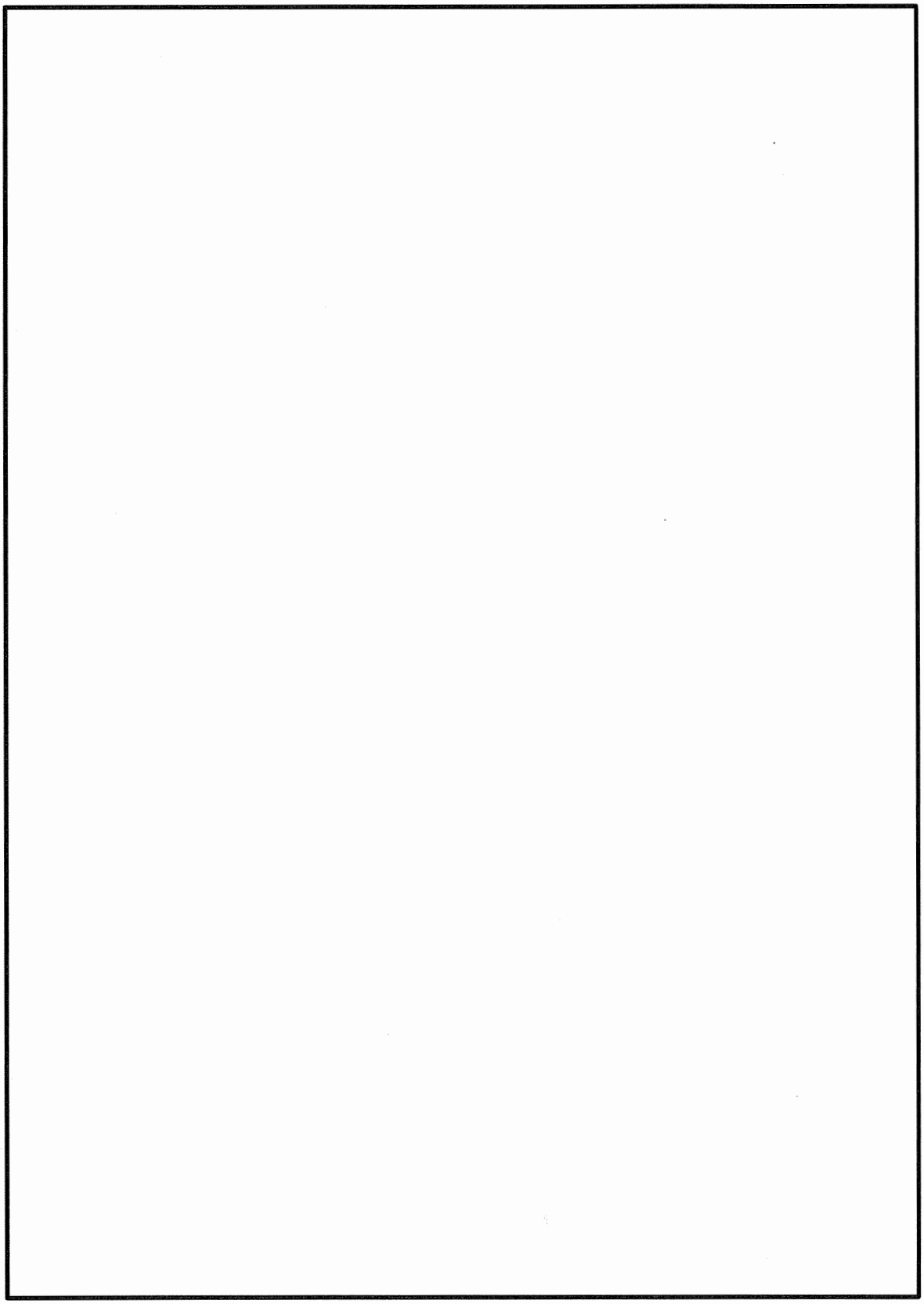
MSF-24P 型輸送容器と実機大スケール落下試験モデルの各部の荷重比，剛性比及び変形量比の算出方法を以下に示す。

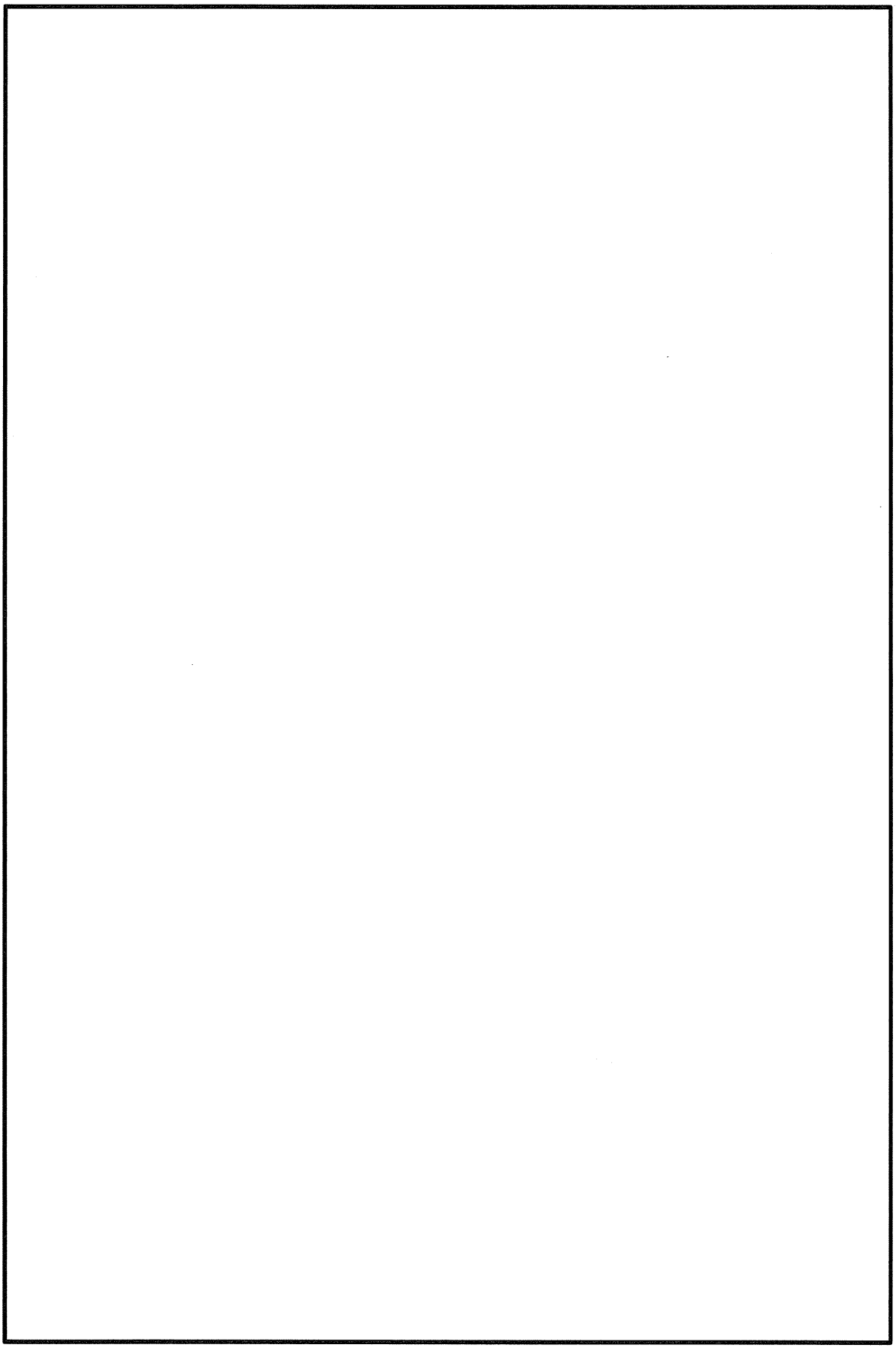
Step	二次蓋，二次蓋ボルト及び胴フランジの挙動	挙動の説明
1	緩衝体内鋼板から胴フランジに荷重が伝達。  	傾斜落下時の二次衝突に伴い，二次蓋に作用する慣性力によって二次蓋が落下方向側にずれ，二次蓋ボルトに曲げひずみが発生。
2	胴フランジが半径方向に変形。  	緩衝体からの衝撃荷重が落下側の胴フランジを局所的に半径方向へ曲げ，胴フランジが二次蓋を押し上げる。
3	緩衝体内鋼板が落下側の二次蓋角部に接触し，二次蓋をずらす。  	二次蓋（インロー部）が落下逆側の胴フランジを押し上げるとともに，緩衝体内鋼板が二次蓋に接触。二次蓋端部に曲げが発生するとともに，落下側の二次蓋ボルトには引張り変形が発生。

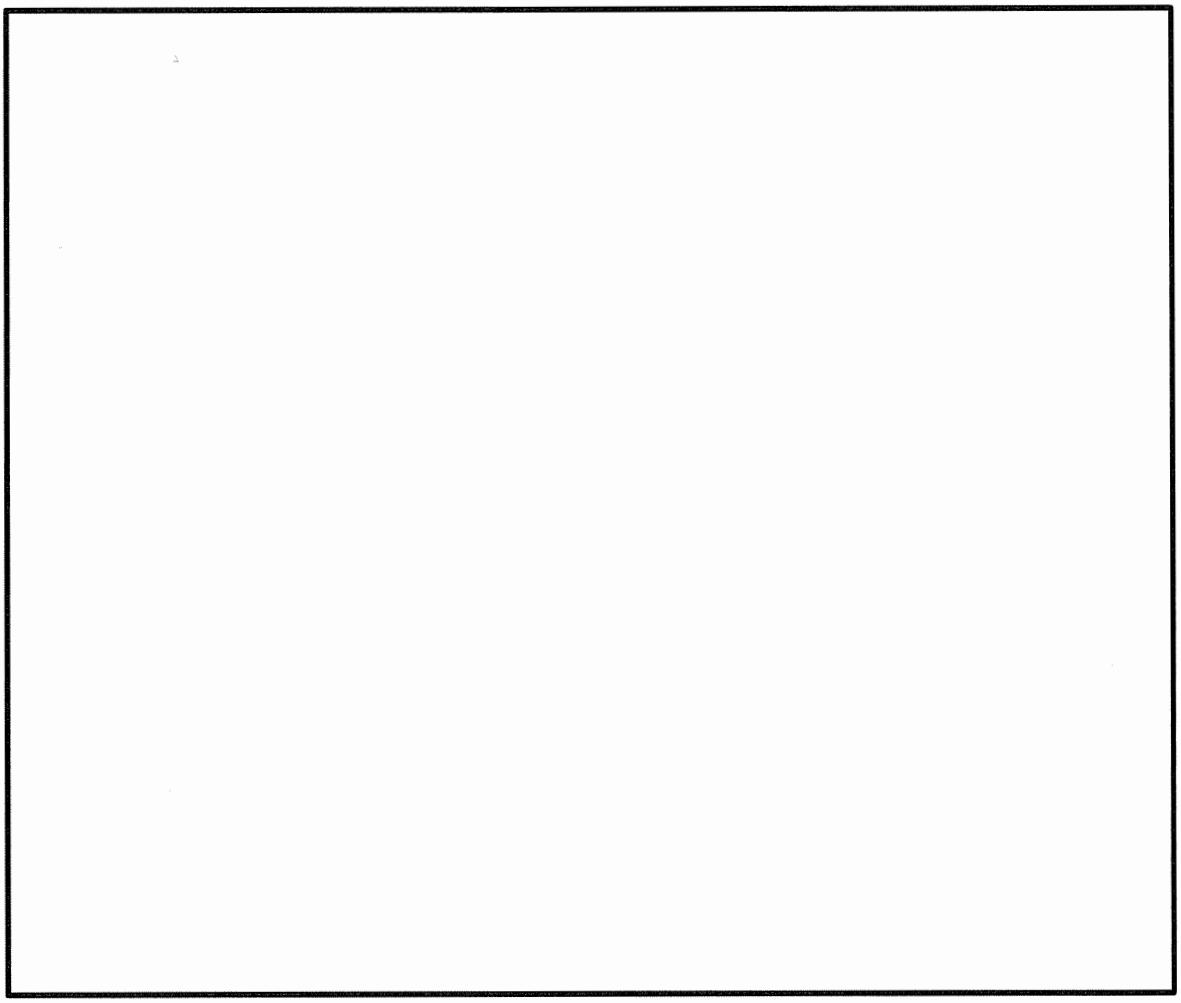
(ロ)-第 A.67 図　傾斜落下時の二次蓋，二次蓋ボルト及び胴フランジの挙動の詳細

a. 胴フランジ部

胴フランジの曲げ変形に対する荷重比，剛性比及び変形量比の算出方法を以下に示す。

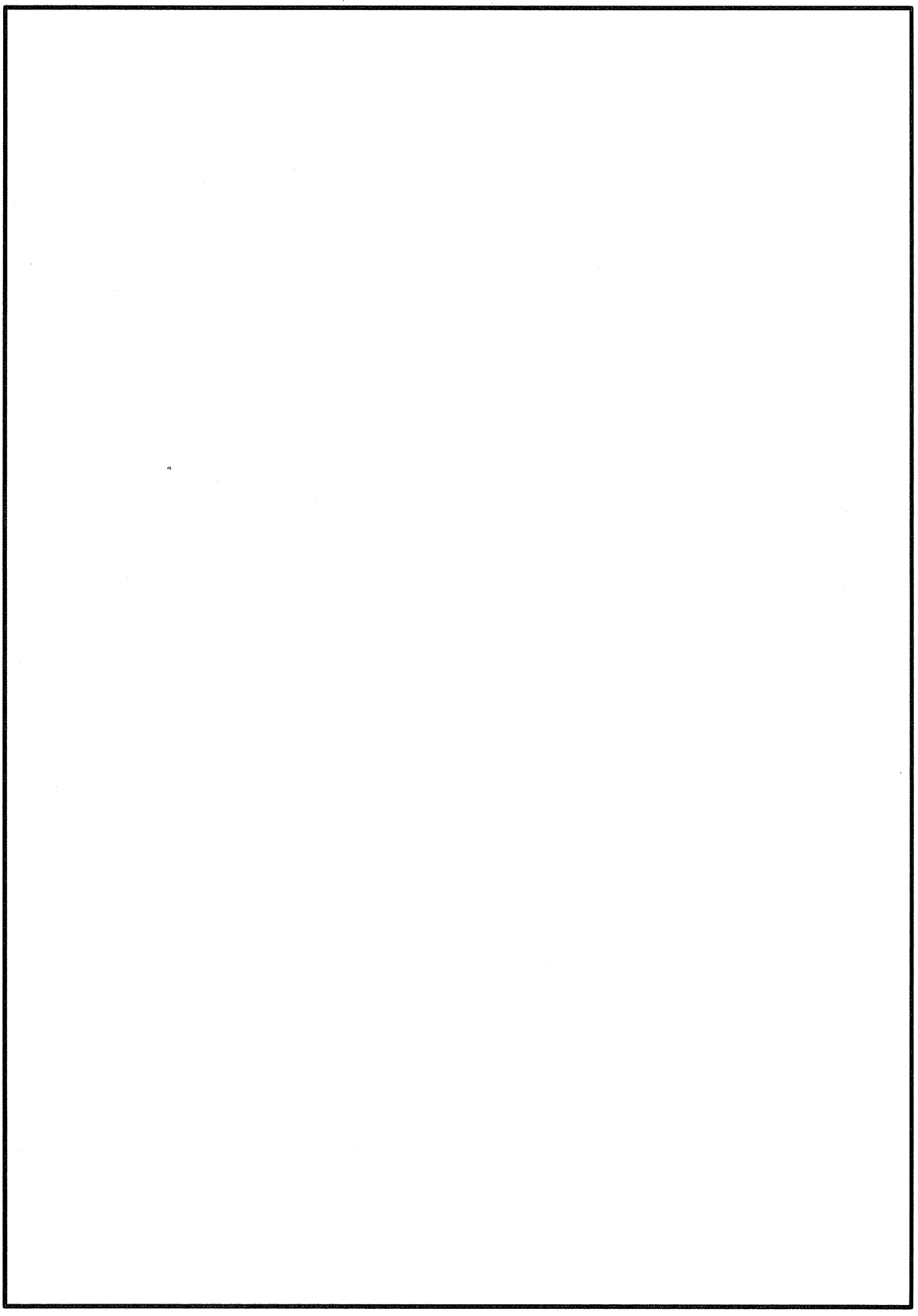


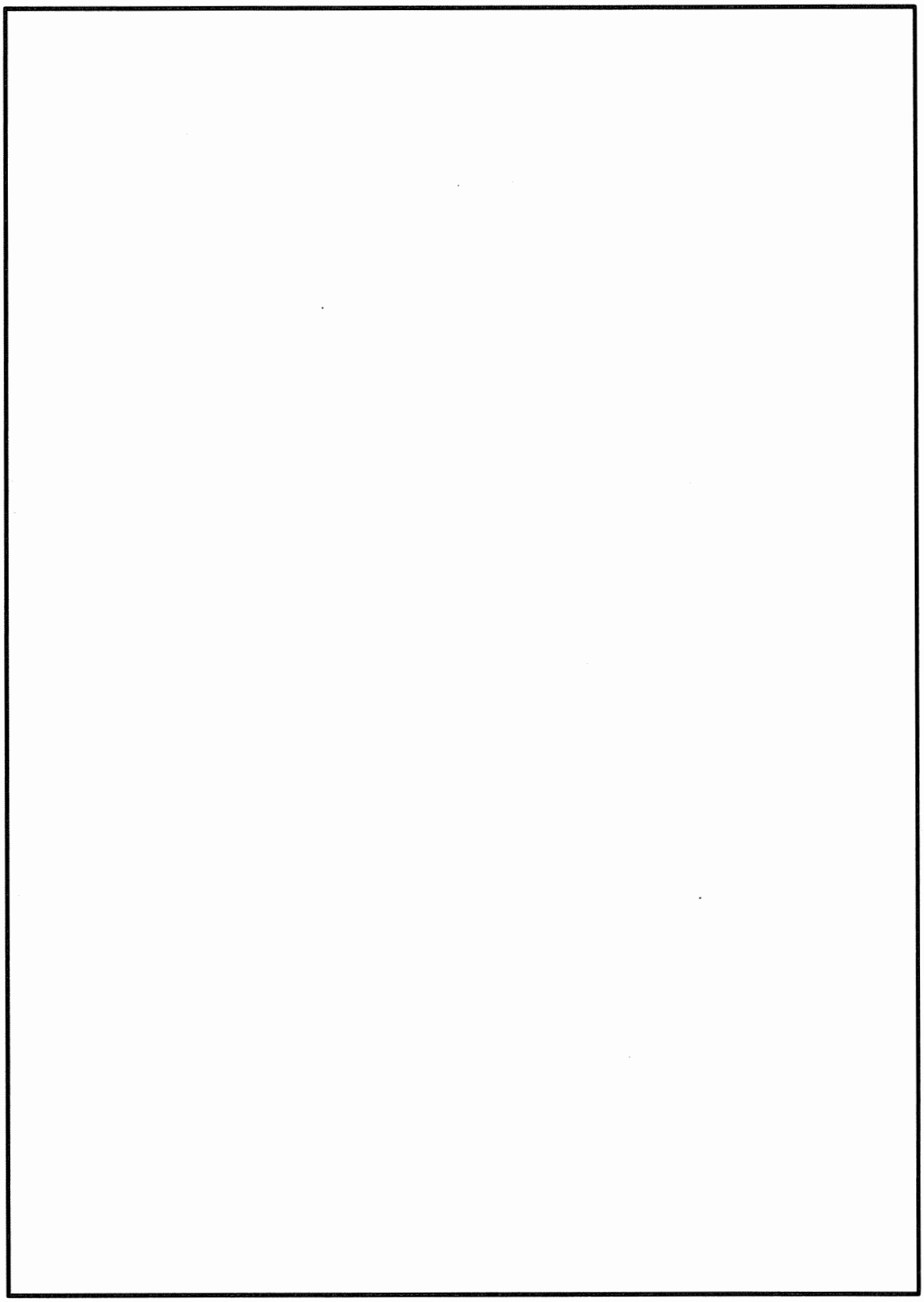


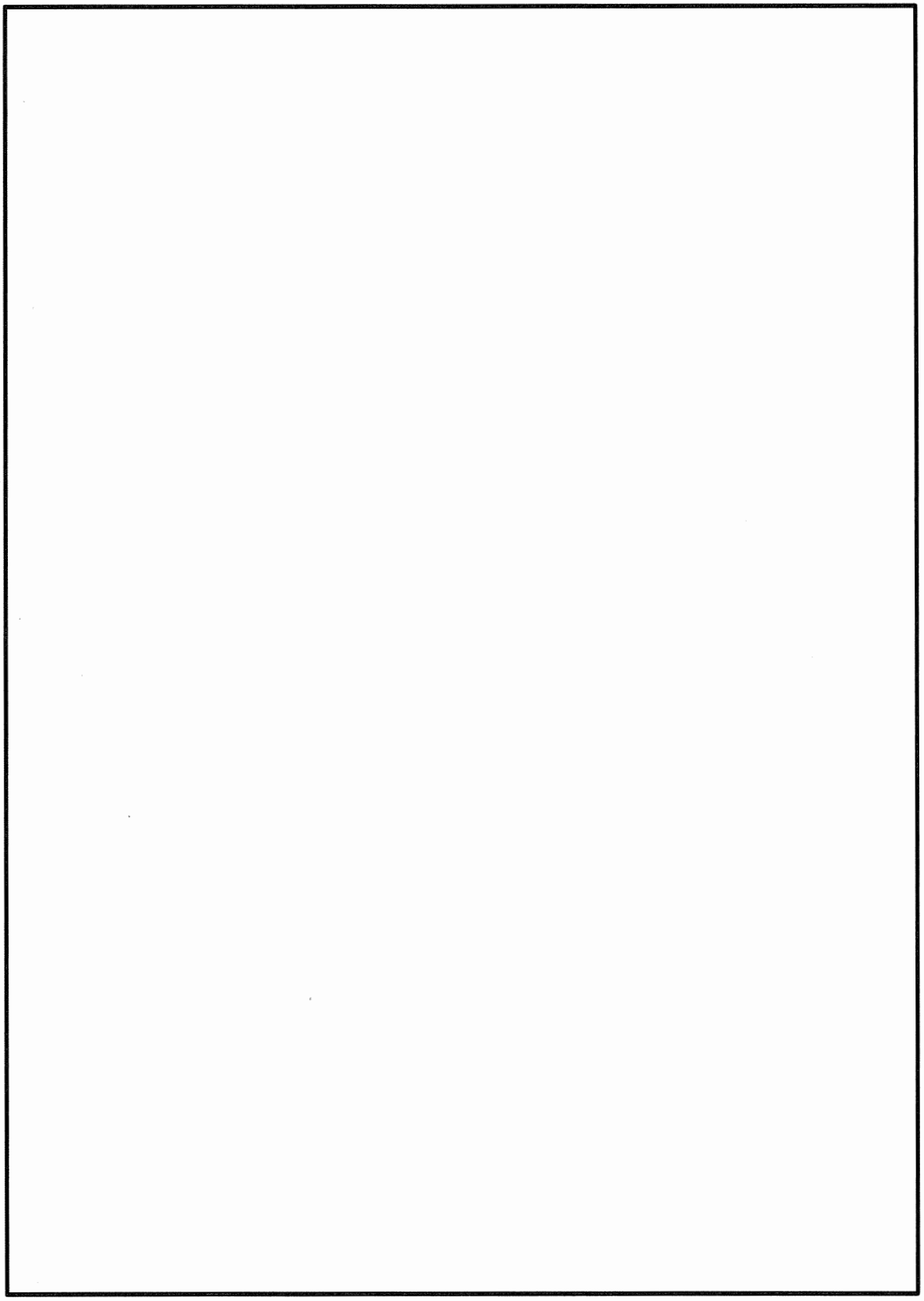


b. 蓋部

蓋の曲げ変形に対する荷重比，剛性比及び変形量比の算出方法を以下に示す。

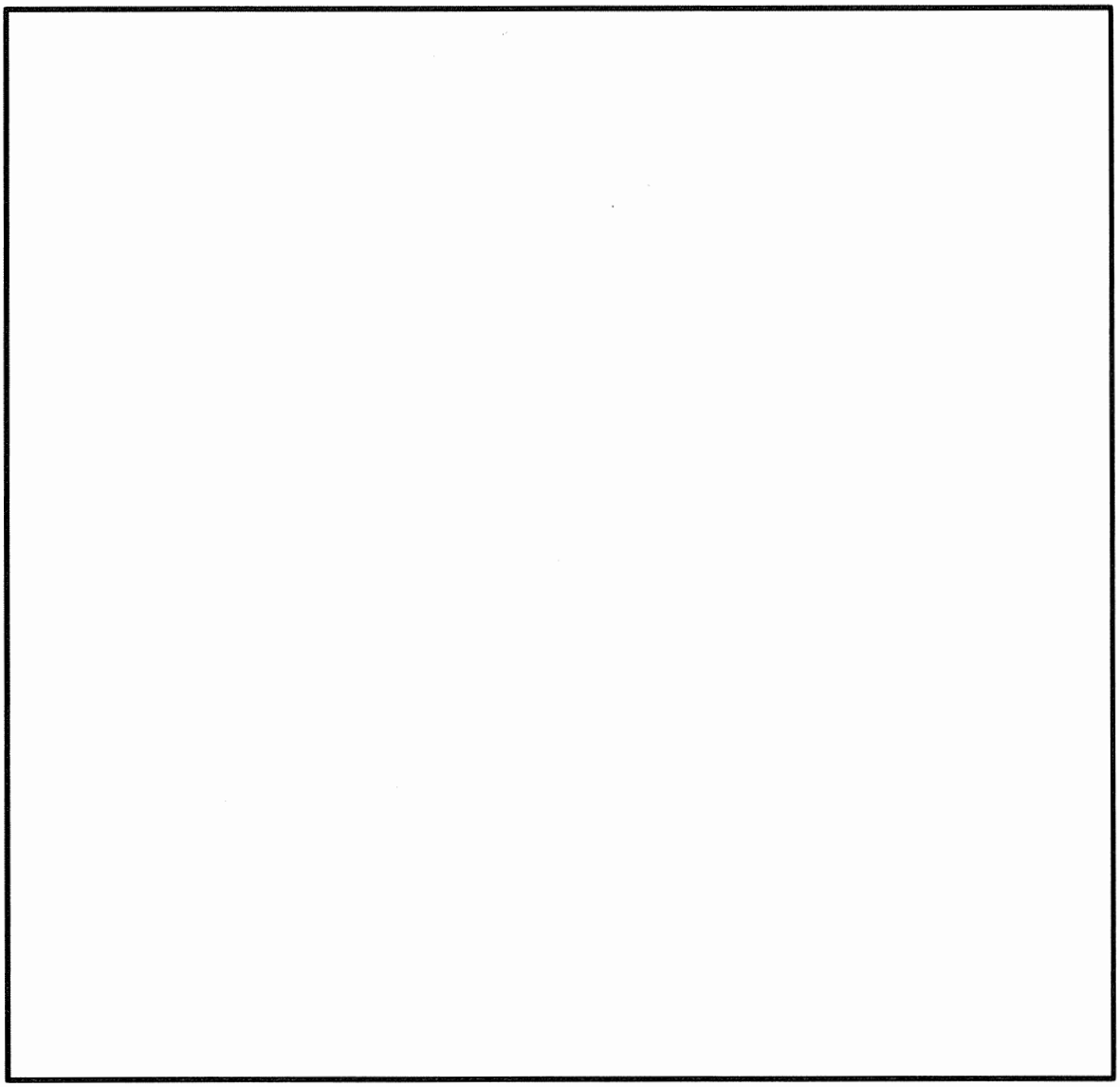


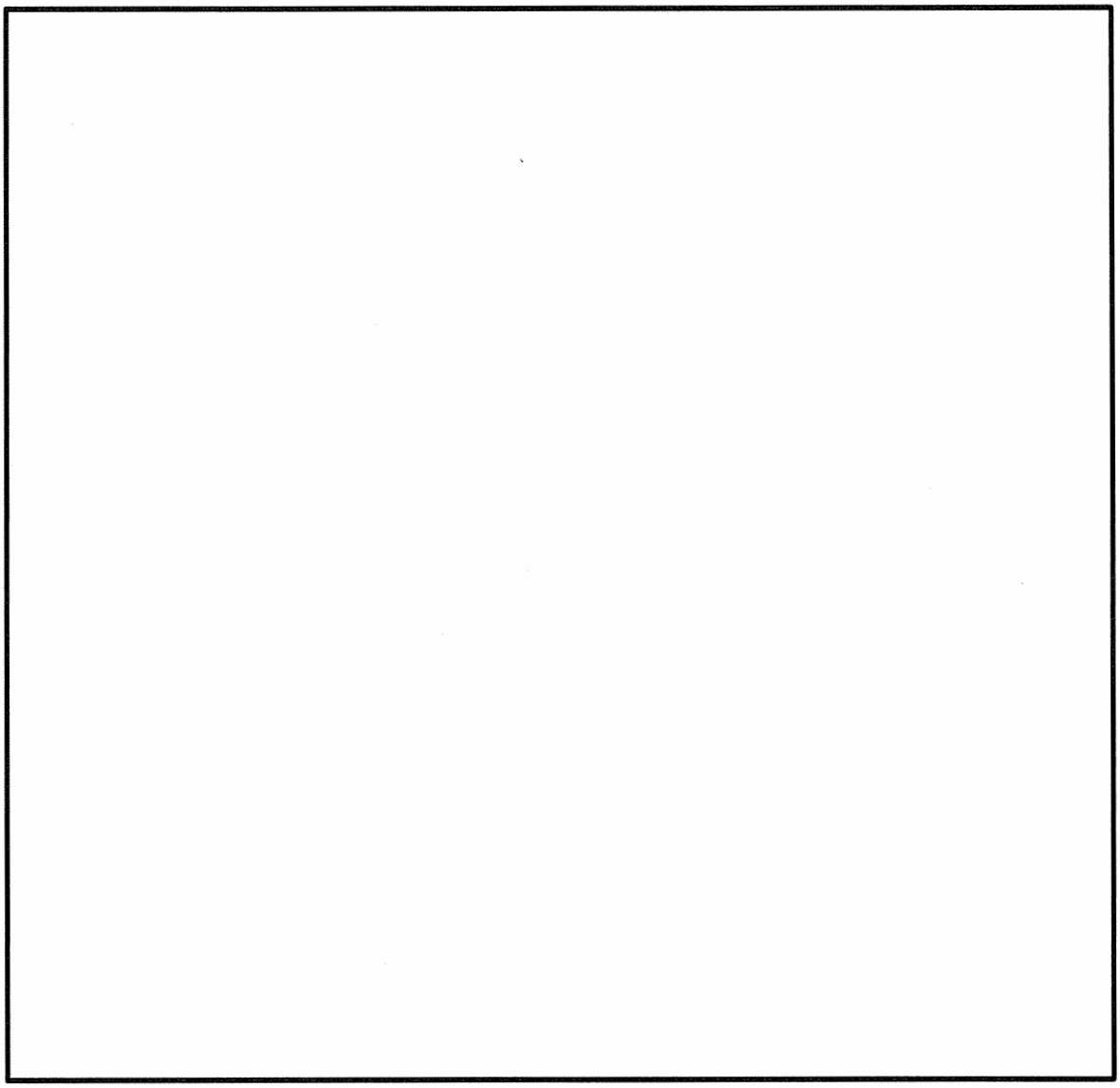


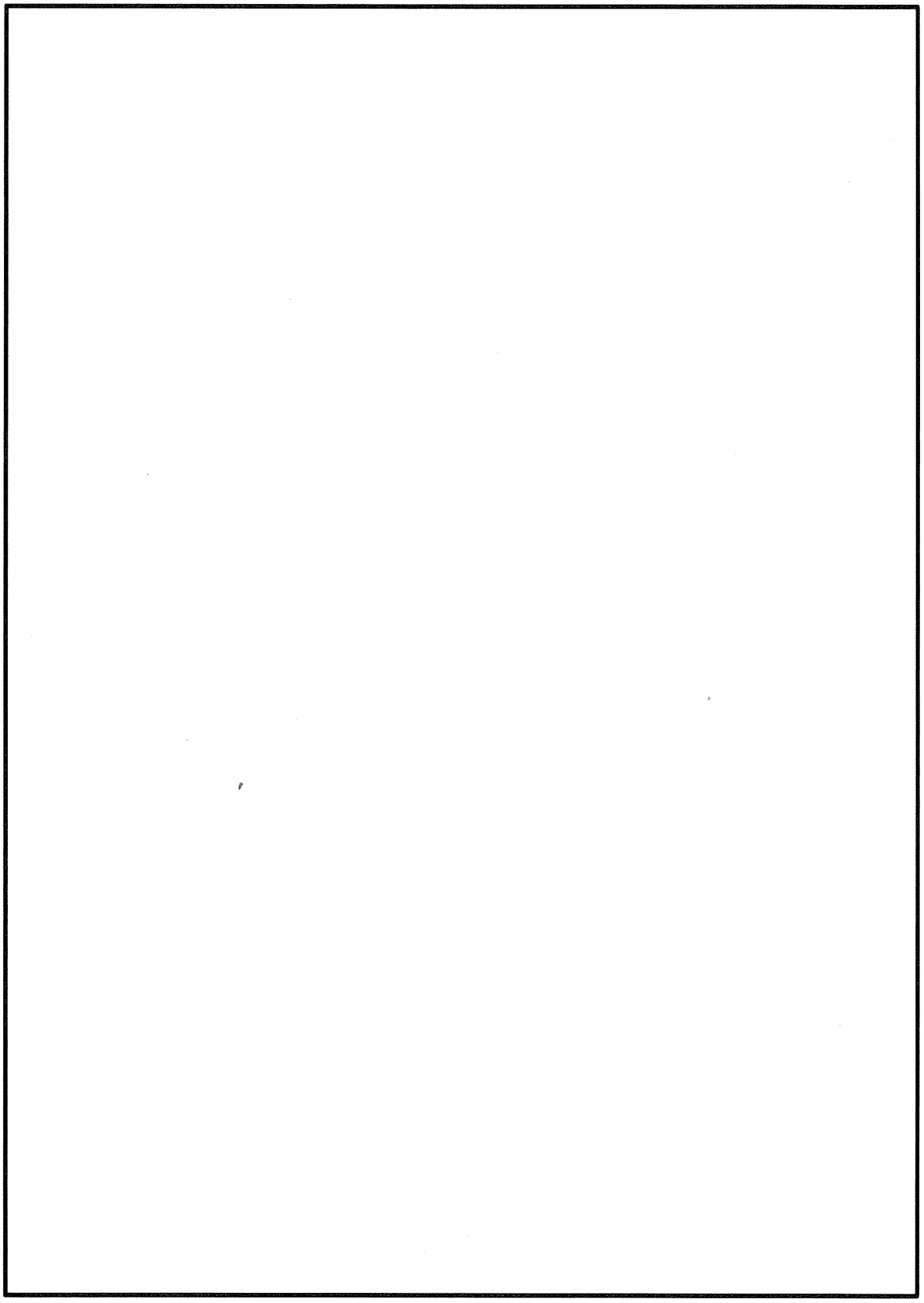


c. 蓋ボルト部

蓋ボルトの引張及び曲げに対する荷重比，剛性比及び変形量比の算出方法を以下に示す。







(4) 評価結果及びまとめ

9m 傾斜落下において，MSF-24P 型輸送容器の密封性能が維持されていることを落下試験結果を用いて検証した。検証結果を以下に示す。

a. 9m 傾斜落下

9m 傾斜落下時の蓋部の変形量比較結果を(ロ)-第 A.109 表に示す。全ての評価部位において変形量比は 1 以下であり，MSF-24P 型輸送容器の蓋部の変形量は落下試験モデルに比べ小さい。したがって，MSF-24P 型輸送容器は，落下試験モデルに比べて高い密封性能を有している。

(ロ)-第 A.109 表　9m 傾斜落下時の蓋部の変形量評価結果

部位 (注 1)	変形モード	荷重比 (注 2)	剛性比 (注 2)	変形量比 (注 2)
一次蓋	曲げ	0.57	1.58	0.36
一次蓋ボルト	引張	0.57	0.98	0.58
	曲げ	0.57	0.98	0.58
二次蓋	曲げ	0.46	3.86	0.12
二次蓋ボルト	引張	0.46	0.86	0.53
	曲げ	0.46	0.86	0.53
三次蓋	曲げ	0.52	0.53	0.98
三次蓋ボルト	引張	0.52	1.00	0.52
	曲げ	0.52	1.41	0.37
胴フランジ (二次蓋側)	曲げ	0.83	1.16	0.71
胴フランジ (三次蓋側)	曲げ	0.83	1.25	0.66

(注 1)部位は，MSF-24P 型輸送容器の各部位を示す。

(注 2)荷重比，剛性比及び変形量比は全て，落下試験モデルに対する MSF-24P 型輸送容器の比を示す。

A.10.4　緩衝材低温時の強度評価

MSF-24P 型輸送容器の緩衝体緩衝材には木材[redacted]を適用している。緩衝材である各木材は，使用最低温度である-25℃では常温時に対して強度が 17%～31%上昇する。-25℃の木材強度を用いて評価を行った場合にキャスクへ発生する衝撃加速度は，(ロ)-第 A.19 表及び(ロ)-第 A.37 表に示す設計加速度（常温時の解析結果に裕度を考慮した値）に対して増加する。本項では，その衝撃加速度の増加を考慮しても，キャスクの各部位に発生する応力は評価基準を満足することを確認した。

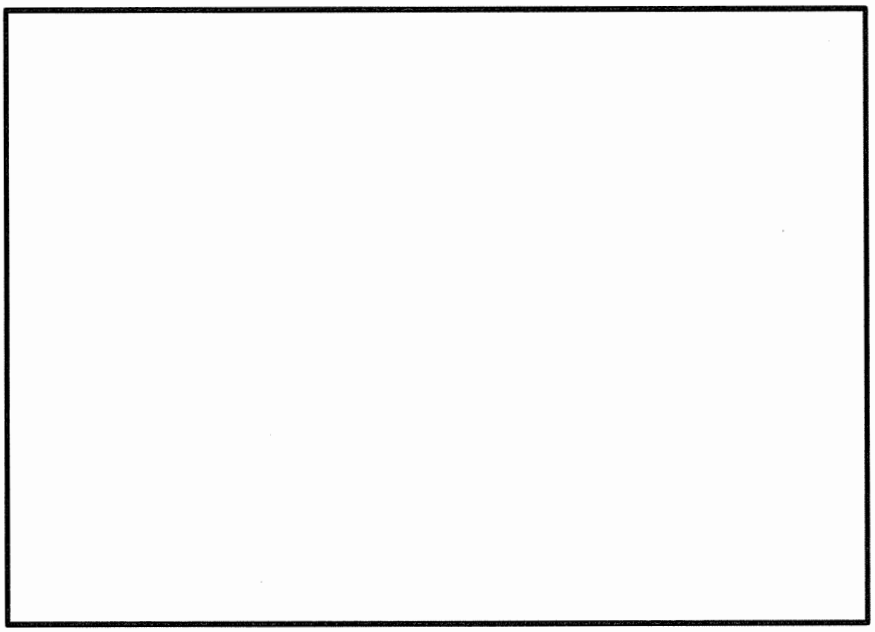
1. -25℃における木材強度の上昇割合

木材は温度が低くなると強度が上昇する。その特性を CRUSH 解析で考慮するために，温度係数として緩衝材の応力-ひずみ特性に考慮する。各木材の温度と温度係数の関係を(ロ)-第 A.71 図～(ロ)-第 A.73 図に示す。

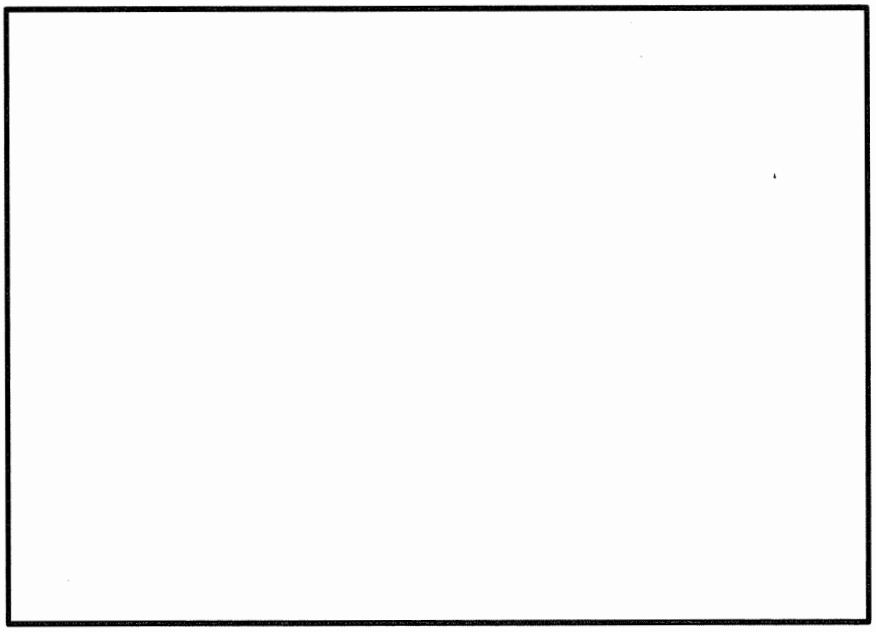
その関係式から，木材の温度を本輸送物の周囲温度-25℃とした場合の温度係数を求めた。木材低温時に木材の応力-ひずみ特性に考慮する温度係数を(ロ)-第 A.110 表に示す。

(ロ)-第 A.110 表　木材の応力-ひずみ特性に考慮する温度係数（低温時：-25℃）

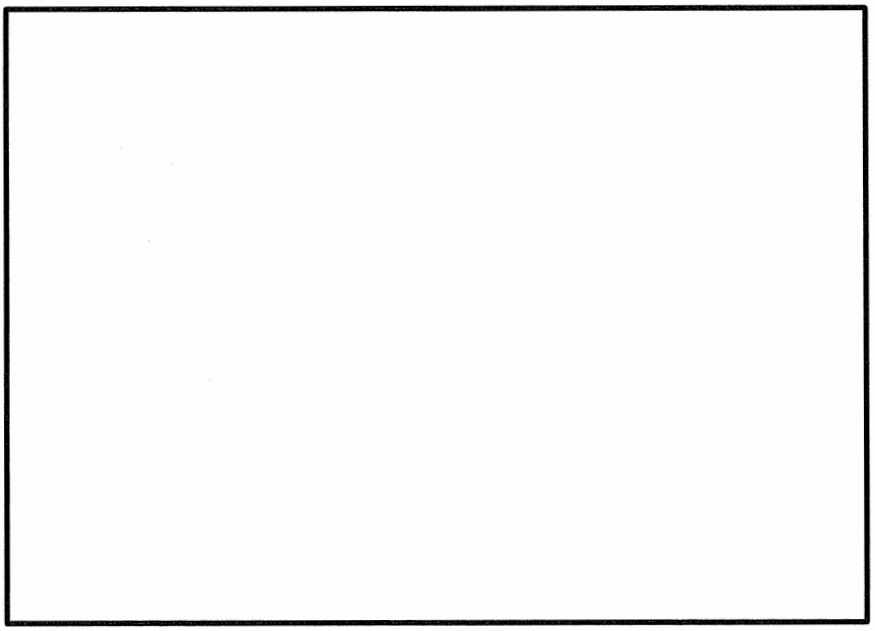
木材種	温度係数



(ロ)-第 A.71 図　温度と温度係数の関係 [redacted]



(ロ)-第 A.72 図　温度と温度係数の関係 [redacted]



(ロ)-第 A.73 図　温度と温度係数の関係

2. -25℃における衝撃加速度

1.に示す木材強度の上昇割合を考慮して CRUSH 解析を行った結果を(ロ)-第 A.111 表（0.3m 落下時）及び(ロ)-第 A.112 表（9m 落下時）に示す。その他解析条件は A.5.3.1 及び A.6.1 に示す条件と同様である。

木材温度が低くなると木材の強度は上昇するため，(ロ)-第 A.111 表及び(ロ)-第 A.112 表に示すとおり，落下時の衝撃加速度は常温時に比べて大きくなる。

(ロ)-第 A.111 表　0.3m 落下時の衝撃加速度計算結果

落下姿勢	木材温度	衝撃加速度 (m/s²)		
		計算結果 (注) (A)	設計加速度 (注) (B)	(A)/(B)
頭部垂直	常温	265	270	0.99
	低温	301		1.12
底部垂直	常温	255	260	0.99
	低温	290		1.12
水平	常温	200	210	0.96
	低温	221		1.06
頭部コーナー	常温	35	—	—
	低温	37		—
底部コーナー	常温	32	—	—
	低温	34		—

(注) 計算結果（常温）と設計加速度は，(ロ)-第 A.19 表に記載する値。

(ロ)-第 A.112 表　9m 落下時の衝撃加速度計算結果

落下姿勢	木材温度	衝撃加速度 (m/s²)		
		計算結果 (注) (A)	設計加速度 (注) (B)	(A)/(B)
頭部垂直	常温	568	600	0.95
	低温	622		1.04
底部垂直	常温	490	500	0.98
	低温	552		1.11
水平	常温	704	710	1.00
	低温	768		1.09
頭部コーナー	常温	469	480	0.98
	低温	482		1.01
底部コーナー	常温	464	—	—
	低温	474		—

(注) 計算結果（常温）と設計加速度は，(ロ)-第 A.66 表に記載する値（落下高さを 0.3m 落下と 9m 落下の合計 9.3m とした場合の解析結果）。また，計算結果（低温）は，落下高さを 0.3m 落下と 9m 落下の合計 9.3m とした場合の解析結果。

3. 衝撃加速度の上昇が構造評価に与える影響

木材常温時に対する木材低温時における衝撃加速度の上昇が構造評価に与える影響について以下に示す。

(ロ)-第 A.111 表及び(ロ)-第 A.112 表に示すとおり，木材低温時の衝撃加速度は，(ロ)-第 A.19 表及び(ロ)-第 A.37 表に示す設計加速度（構造評価に入力する加速度）から増加する。ここで，余裕率が最も小さい部位について，木材低温時の衝撃加速度において発生する応力を評価する。評価式を以下に示す。

$$\sigma_1 = (\sigma_2 - \sigma_f) \times \frac{\alpha_1}{\alpha_2} + \sigma_f \quad \text{（蓋ボルトの評価式）}$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 \times \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad \text{（蓋ボルト以外の評価式）}$$

ここで，

σ_1：木材低温時の 0.3m 又は 9m 落下時に評価部位に発生する応力（MPa）

σ_2：0.3m 又は 9m 落下時の設計加速度において評価部位に発生する応力（MPa）

σ_f：二次蓋ボルト又は三次蓋ボルトの初期締付応力（MPa）

α_1：木材低温時の衝撃加速度(m/s^2)

α_2：0.3m 又は 9m 落下時の設計加速度(m/s^2)

評価条件及び評価結果を(ロ)-第 A.113 表及び(ロ)-第 A.114 表に示す。(ロ)-第 A.113 表及び(ロ)-第 A.114 表に示すとおり余裕率が最も小さい部位へ発生する応力は評価基準を満足する。

(ロ)-第 A.113 表　0.3m 落下時の強度評価

落下姿勢	0.3m頭部垂直落下		0.3m底部垂直落下		0.3m水平落下	
評価部位	一次蓋シール部	一次蓋ボルト	底部中性子遮蔽材カバー	一次蓋ボルト	外筒	二次蓋ボルト
σ_2	96 MPa	289 MPa	57 MPa	249 MPa	87 MPa	596 MPa
σ_f	－	250 MPa	－	250 MPa	－	200 MPa
α_1	301 m/s^2		290 m/s^2		221 m/s^2	
α_2	270 m/s^2		260 m/s^2		210 m/s^2	
σ_1	108 MPa	294 MPa	64 MPa	249 MPa	92 MPa	617 MPa
評価基準(注)	203 MPa (S_y : □℃)	590 MPa ($2S_m$: □℃)	136 MPa (f_b : □℃)	590 MPa ($2S_m$: □℃)	168 MPa (f_b : □℃)	888 MPa ($3S_m$: □℃)

(注) 評価基準を設定する温度（キャスク各部位の低温時温度）は，木材温度と同程度低下（木材温度:38℃から-25℃へ約 65℃低下）するとし,「低温時温度＝(設計温度)-65℃」とした。

(ロ)-第 A.114 表　9m 落下時の強度評価

落下姿勢	9m頭部垂直落下		9m底部垂直落下		9m水平落下		9mコーナー落下
評価部位	外筒	二次蓋ボルト	下部端板	三次蓋ボルト	二次蓋シール部	二次蓋ボルト	三次蓋ボルト
σ_2	170 MPa	663 MPa	107 MPa	436 MPa	155 MPa	809 MPa	236 MPa
σ_f	－	200 MPa	－	190 MPa	－	200 MPa	190 MPa
α_1	622 m/s^2		552 m/s^2		768 m/s^2		482 m/s^2
α_2	600 m/s^2		500 m/s^2		710 m/s^2		480 m/s^2
σ_1	177 MPa	680 MPa	119 MPa	462 MPa	168 MPa	859 MPa	237 MPa
評価基準(注)	303 MPa ($1.5f_b$: □℃)	887 MPa (S_y : □℃)	246 MPa ($1.5f_b$: □℃)	887 MPa (S_y : □℃)	201 MPa (S_y : □℃)	887 MPa (S_y : □℃)	887 MPa (S_y : □℃)

(注) 評価基準を設定する温度（キャスク各部位の低温時温度）は，木材温度と同程度低下（木材温度:38℃から-25℃へ約 65℃低下）するとし,「低温時温度＝(設計温度)-65℃」とした。

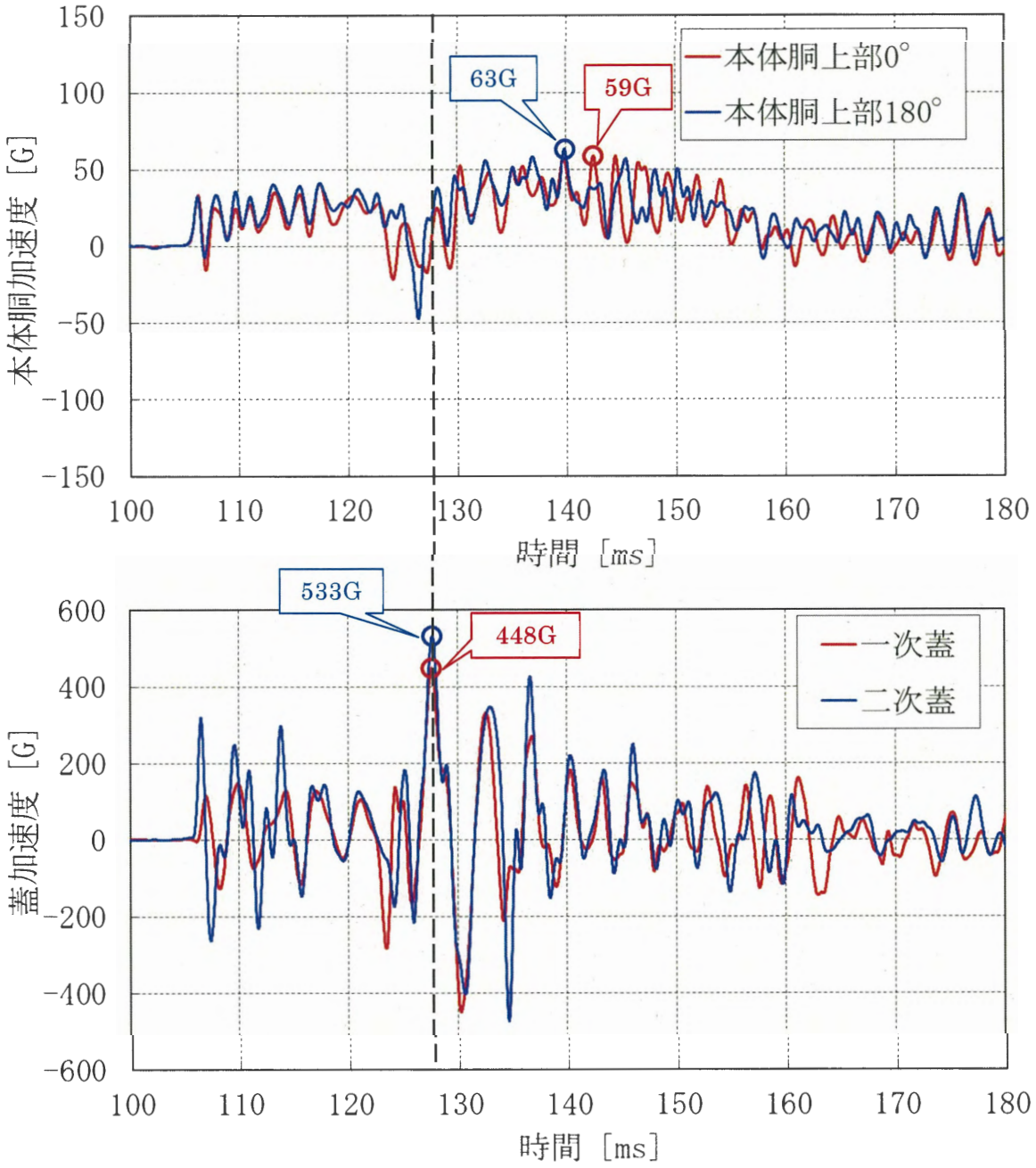
A.10.5　落下試験における加速度割増係数について

1. 加速度割増係数の設定

落下試験モデルによる落下試験は，落下時の全体運動及び各部位の挙動把握並びに動的解析の検証ために実施した。そのため，(ロ)-第 A.73 表に記載している一次蓋及び二次蓋の最大加速度は，(ロ)-第 A.74 図に示すように内部収納物衝突後に蓋鉛直方向の振動が含まれている。

内部収納物の遅れ衝突による加速度割増係数を設定する場合は，各部の振動成分を除去した上で，「金属キャスク貯蔵技術確証試験報告書　1/3　最終報告」((独)原子力安全基盤機構)（以下「実規模落下試験」という。）に示されるように内部収納物が蓋に与える外力を定めるために内部収納物と本体胴の加速度比から設定する必要がある。

特別の試験条件における MSF-24P 型の垂直落下時及び水平落下時の構造評価では，実規模落下試験結果で得られた加速度割増係数を適用している [17]。実規模落下試験結果から得られた係数を適用した理由は，縮尺モデルを用いた試験の場合，内部収納物の遅れ落下の影響を過小評価する可能性があるため，実規模大の供試体の結果を用いて評価することが推奨 [24] されているためである。(ロ)-第 A.115 表に実規模落下試験結果と落下試験モデルによる試験結果を示す。落下試験モデルの頭部垂直落下試験による加速度割増係数 2.3 に比べて，実規模落下試験結果で得られた加速度割増係数 2.6 は保守側の数値である。



(ロ)-第 A.74 図　本体胴及び蓋の加速度時刻履歴（9.3m 頭部垂直落下）
（プロトタイプモデルによる落下試験）

(ロ)-第A.115表　落下試験の加速度について

試験供試体	落下試験条件	平均加速度(G) (注1)		収納物加速度割増係数 (②／①)
		胴（中央） (①)	収納物 (②)	
実規模落下試験体 17)	9m頭部垂直	60.2	159.1	2.6
	9m水平	50.8	61.5	1.2
プロトタイプモデル（実機大スケール） (注2)	9.3m頭部垂直	60	137	2.3

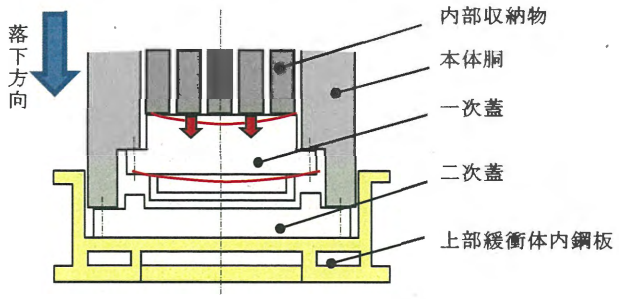
（注1） 本評価では，加速度の最大値による比較を目的とするため，遮断周波数は加速度の細かい振動を拾いにくい100Hz(実機大スケール)とした。

（注2）プロトタイプモデル（実機大スケール）の試験概要はA.10.1に示す。

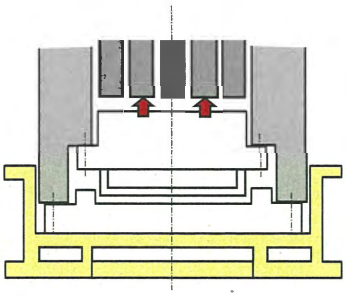
2. 加速度割増について，プロトタイプモデルでの落下試験の結果が，MSF-24P型へ適用できることについて

(1) 内部収納物の遅れ落下による加速度増倍のメカニズムについて

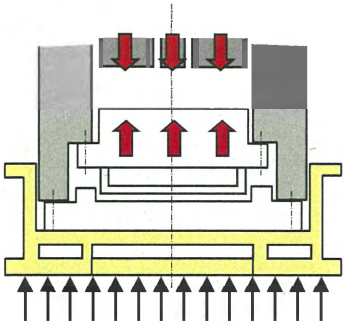
頭部垂直落下における内部収納物の遅れ衝突及び加速度増倍のメカニズムを(ロ)-第A.75図に示す。本体側が落下開始するタイミングにおいて，内部収納物の質量に伴う一次蓋の変形が解放されることにより，内部収納物が落下逆方向に浮き上げられる。そのため，内部収納物はキャスク本体（一次蓋）に遅れて落下を開始することで，緩衝体及びキャスク本体側が着地後，本体側が減速される段階で内部収納物が一次蓋内面に衝突する。この際，内部収納物と本体側の相対速度が大きくなるため，内部収納物の加速度は本体側に比べ大きくなる。落下高さが高い場合，つまり，本体側の地面への衝突タイミングと内部収納物の衝突タイミングの時間差が大きいほど増倍の影響は大きくなる。なお，衝突時の加速度は，衝突物（内部収納物）と被衝突物（一次蓋）の剛性が高い方が加速度が大きくなると考えられる。



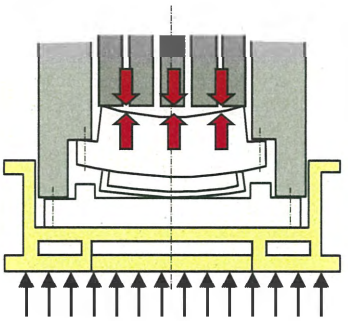
①（切り離し前）内部収納物の質量により一次蓋が落下方向へ僅かに変形。



②（切り離し直後）本体側は自由落下を開始。一次蓋の変形が解放され，内部収納物は落下逆方向へ浮上り，本体側から遅れて自由落下を開始。内部収納物と一次蓋との隙間は落下高さが高いほど大きくなる。



③（本体側が着地）本体側は落下逆側へ減速。内部収納物は落下中。



④（内部収納物と一次蓋が衝突）本体側が減速された状態で衝突するため，内部収納物の衝撃加速度は胴側に比べ大きい。

(ロ)-第 A.75 図 落下時の内部収納物の遅れ衝突及び内部収納物加速度増倍のメカニズム（プロトタイプモデルでの例）

(2) MSF-24P 型の 9m 頭部垂直落下時の内部収納物の加速度増倍

プロトタイプモデルでの 9.3m 頭部垂直落下試験結果を基に，MSF-24P 型の 9m(9.3m)頭部垂直落下における内部収納物の加速度増倍を評価する。

(1)で示した加速度増倍のメカニズムに基づけば，衝撃加速度，内部収納物の剛性及び一次蓋の剛性が高く，内部収納物の浮上り量が大きい方が，加速度増倍の影響は大きくなる。

プロトタイプモデルと MSF-24P 型の諸元比較を(ロ)-第 A.116 表に示す。ここで，(ロ)-第 A.75 図に示すように内部収納物と一次蓋は直列ばね，内部収納物である燃料とバスケットは並列ばねの関係として全体の剛性を算出した。(ロ)-第 A.116 表に示すように，プロトタイプモデルの内部収納物と一次蓋の剛性を合成した全体の剛性及び内部収納物の浮上り量は，MSF-24P 型より大きいことから，プロトタイプの内部収納物に発生する加速度が最も高く，加速度増倍も最も大きいと考えられる。したがって，MSF-24P 型の内部収納物の加速度割増係数はプロトタイプモデルの 2.3 ((ロ)-第 A.115 表参照) と同等以下であることから，保守的に 2.6 を適用している。

(ロ)-第 A.116 表 内部収納物の加速度増倍に影響する諸元の比較

項目	加速度増倍への影響	プロトタイプモデル	MSF-24P型
衝撃加速度 (m/s^2)	衝撃加速度が大きいと衝突時の相対速度が大きくなり加速度増倍は大きい。	598 (注1)	555 (注2)
内部収納物の剛性 (N/m)	内部収納物の剛性が大きいと衝突時の反発が大きくなり加速度増倍は大きい。		
一次蓋の剛性 (N/m)	一次蓋の剛性が大きいと衝突時の反発が大きくなり加速度増倍は大きい。		
全体の剛性 (N/m)	内部収納物と一次蓋の全体の剛性が大きい方が加速度が大きくなる。つまり，増倍も大きくなる。	1.662×10^{10}	7.484×10^{9}
内部収納物の浮上り量 (mm)	浮上り量が大きいと被衝突物側(一次蓋)の減速時間が長く，相対速度が大きくなり加速度増倍は大きい。	(燃料) 40 (ﾊﾞｽｹｯﾄ)40 (注3)	(燃料) 23.0 (ﾊﾞｽｹｯﾄ)13.1 (注4)

(注 1) (ロ)-第 A.86 表に示す値

(注 2) (ロ)-第 A.37 表に示す値

(注 3) バスケットの浮上り量は，衝突時間の差(20ms)及びその際の胴中央の平均加速度により算出。ここで，燃料の加速度は未計測であるため，燃料はバスケットに比べ剛性が高く浮上りやすい条件であること，バスケットの浮上り量が胴内全隙間量に対応する 40mm であったことから，燃料の浮上り量も胴内全隙間量である 40mm とした。

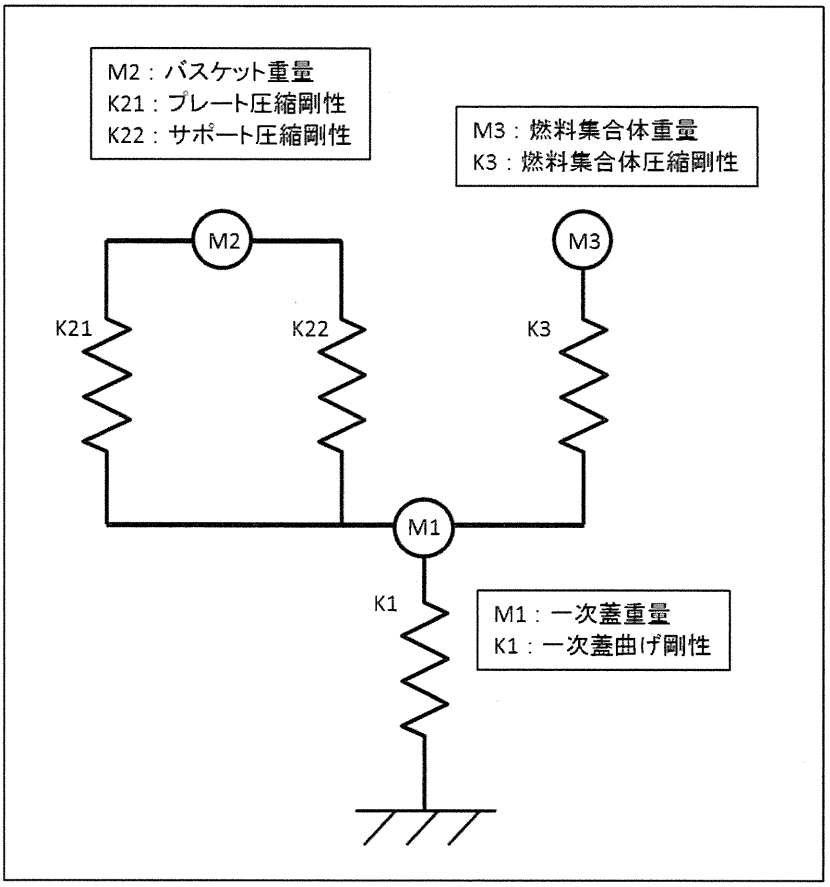
(注 4) 別添 1 に算出方法及び算出結果を示す。

（別添 1）頭部垂直落下時の浮上り量

キャスクが吊り下げられた状態から切り離され垂直自由落下する際に，吊り下げられた際の内部収納物が接触する一次蓋のたわみ量が自由落下時に開放され，そのエネルギーが内部収納物の浮上りとなる。ここでは，頭部垂直落下での浮上り量をバネ-質点モデルを用いて評価した。

(1) 評価条件

(ロ)-第 A. 76 図に示すバネ-質点モデルを用いて浮上り量を評価する。初期に重力加速度による各質点のたわみ量を計算し，その後，重力加速度を除き，浮上り量を評価する。(ロ)-第 A. 117 表に計算諸元を示す。



(ロ)-第 A. 76 図　頭部垂直落下の内部収納物浮上り評価モデル

(ロ)-第 A.117 表　頭部垂直落下の内部収納物浮上り計算緒元

項目	部位	記号	数値	備考
重量	蓋（一次蓋）	M_1	5600 kg	—
	バスケット	M_2	5600 kg	
	燃料集合体	M_3	16700 kg	
バネ剛性	蓋（一次蓋）	K_1	3.828×10^{10} N/m	(注 1)
	バスケットプレート	K_{21}	3.980×10^{9} N/m	(注 2)
	バスケットサポート	K_{22}	1.312×10^{9} N/m	(注 3)
	燃料集合体	K_3	5.322×10^{9} N/m	(注 4)

(注 1)　蓋のバネ剛性

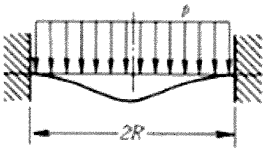
周辺固定の円板と仮定し，バネ剛性を算出。

$$\omega_{max}=\frac{R^4p}{64D}=\frac{R^4\cdot F/\pi R^2}{64}\cdot\frac{12(1-\nu^2)}{Et^3}$$

よって，

$$K=F/\omega_{max}=F/\left[\frac{R^4\cdot F/\pi R^2}{64}\cdot\frac{12(1-\nu^2)}{Et^3}\right]=\frac{16}{3}\cdot\frac{\pi Et^3}{R^2(1-\nu^2)}$$

E　：縦弾性係数
t　：一次蓋板厚
R　：一次蓋半径
ν　：ポアソン比



(注 2)　バスケットプレートのバネ剛性

K＝EA/L

E：縦弾性係数
A：バスケットプレート接触面積
L：全長

(注 3)　バスケットサポートのバネ剛性

K＝EA/L

E：縦弾性係数
A：接触面積
L：全長

(注 4)　燃料集合体（上部ノズル部）のバネ剛性（収納体数分）

(2) 評価結果

(ロ)-第 A.118 表に落下高さと内部収納物の浮上り量の関係を示す。

(ロ)-第 A.118 表　頭部垂直落下時の内部収納物の浮上り量

落下高さ [m]	浮上り量[mm]	
	バスケット	燃料集合体
9.3	13.1	23.0

（別添 2）　プロトタイプモデルのバネ剛性

プロトタイプモデルの内部収納物及び一次蓋のバネ剛性の算出結果を(ロ)-第 A.119 表に示す。

(ロ)-第 A.119 表　プロトタイプモデルの内部収納物及び一次蓋のバネ剛性

部位	記号	数値	備考
一次蓋	K_1	[redacted]	(注 1)
バスケットセル	K_2		(注 2)
模擬燃料集合体	K_3		(注 3)

(注 1)　一次蓋のバネ剛性

周辺固定の円板と仮定しバネ剛性を算出

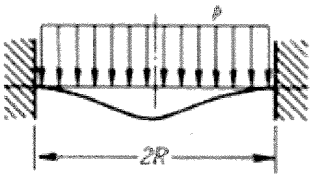
$$\omega_{max}=\frac{R^4 p}{64D}=\frac{R^4\cdot F/\pi R^2}{64}\cdot\frac{12(1-\nu^2)}{Et^3}$$

よって,

$$K=F/\omega_{max}=F\Big/\left[\frac{R^4\cdot F/\pi R^2}{64}\cdot\frac{12(1-\nu^2)}{Et^3}\right]=\frac{16}{3}\cdot\frac{\pi Et^3}{R^2(1-\nu^2)}$$

E：縦弾性係数
t：一次蓋板厚
R：一次蓋半径
ν：ポアソン比

[redacted]



(注 2)　バスケットセルのバネ剛性（収納体数分）

K＝EA/L

E：縦弾性係数 [redacted]
A：バスケットセル断面積 [redacted]
L：バスケットセル全長

(注 3)　模擬燃料集合体のバネ剛性（収納体数分）

K＝EA/L

E：縦弾性係数 [redacted]
A：模擬燃料集合体断面積 [redacted]
L：模擬燃料集合体の断面積 A 部の長さ [redacted]

A.10.6　MSF-24P 型輸送容器のバスケットプレート用材料アルミニウム合金（MB-A3004-H112）に関する説明書

1. 概要

本説明書は，MSF-24P 型輸送容器のバスケットプレートに適用するアルミニウム合金（MB-A3004-H112）の材料規定及び製造管理規定について説明するものである。なお，本材料は，「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」第四十三条の二十六の三第１項の規定により，使用済燃料貯蔵施設に係る型式設計特定容器等の型式の指定（原規規発第 1709261 号，指定の番号：T-DPC17001）を受けた金属製の乾式キャスク（MSF-21P 型）のバスケットプレートに適用するアルミニウム合金（MB-A3004-H112）と同じである。

2. 適用範囲

本材料を MSF-24P 型のバスケットプレートに適用するに当たり，本材料及びこれを使用するバスケットは以下の事項に適合すること。

(1) 供用期間は 60 年以下であること。

(2) バスケットが収納されるキャスク本体内部には，ヘリウムを封入し，不活性ガス雰囲気が維持されていること。

(3) バスケットは耐圧構造でないこと。

(4) バスケットは溶接部がない構造とすること。

(5) 本材料はボルト材として使用しないこと。

(6) 供用状態によらずバスケットプレートの発生応力は，弾性範囲内であること。

(7) 供用状態によらずバスケットは長期間にわたる熱応力を生じない構造とすること。

3. 材料規定

本規定は，設計評価に適用する材料規定である。なお，本規定を適用する材料は，4. に示す製造管理規定を満足しなければならない。

(1) 材料名称

材料の規定名称は(ロ)-第 A.120 表に示すものであること。

(2) 化学成分

化学成分は(ロ)-第 A.121 表に示す百分率の値の範囲内にあること。

(3) 設計応力強さ

設計応力強さは(ロ)-第 A.122 表の規定によること。

(4) 許容引張応力

許容引張応力は(ロ)-第 A.123 表の規定によること。

(5) 設計降伏点

設計降伏点は(ロ)-第 A.124 表の規定によること。

(6) 設計引張強さ

設計引張強さは(ロ)-第 A.125 表の規定によること。

(7) 縦弾性係数

縦弾性係数は(ロ)-第 A.126 表の規定によること。

(8) 熱膨張係数

熱膨張係数は(ロ)-第 A.127 表の規定によること。

4. 製造管理規定

本規定は，製造管理に係る規定である。

(1) 化学成分は，(ロ)-第 A.121 表に示す百分率の値の範囲内にあること。この場合において，化学成分は溶湯成分分析によること。化学成分の分析試験は，JIS H 4100「アルミニウム及びアルミニウム合金の押出形材」（以下「JIS H 4100」という。）によること。

(2) 材料の製造は，(ロ)-第 A.77 図に示す製造フローに従い，熱間押出成形加工されたものであること。

(3) 材料は，熱間押出成形加工後，熱処理は行わず，空冷されたものであること。熱間加工によって得られるか又はごくわずかな冷間加工を加えただけの状態であること。質別 H112 は，JIS H 0001「アルミニウム，マグネシウム及びそれらの合金－質別記号」によること。

(4) 機械的性質は，(ロ)-第 A.128 表に示す値に適合すること。

(5) 製品の寸法の許容差は，以下及び JIS H 4100 によること。これを逸脱する寸法を適用する場合，機械的性質が(ロ)-第 A.128 表を満足することを確認すること。

・肉厚　　：16mm 以下

・押出比 (注)　：10 以上

（注）ビレットの押出方向に垂直な断面積と押出材の押出方向に垂直な断面積の比

(6) 本材料は，耐食性向上等を目的として表面処理を行う場合がある。表面処理を行う場合，機械的性質が(ロ)-第 A.128 表を満足することを確認すること。

(7) 本材料は，(ロ)-第 A.77 図の製造フローの各段階において，(ロ)-第 A.129 表に示す品質管理を行う。

(8) 上記規定以外の規定については，JIS H 4100 又は EN 755-1「Aluminium and aluminium alloys- Extruded rod/bar, tube and profiles - Part 1: Technical conditions for inspection and delivery」によること。

(ロ)-第 A.120 表　材料の規定名称

材料の名称	記号	質別
バスケットプレート用材料 アルミニウム合金（MB-A3004-H112）	MB-A3004	H112

(ロ)-第 A.121 表　化学成分規定

記号	化学成分（mass%）											
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ga, V, Ni, B, Zr など	Ti	その他		Al
										個々	合計	
MB-A3004	0.30 以下	0.7 以下	0.25 以下	1.1 以上 1.5 以下	1.0 以上 1.3 以下	—	0.25 以下	—	—	0.05 以下	0.15 以下	残部

(ロ)-第 A.122 表　材料の各温度における設計応力強さ S_m (注 1), (注 2)

単位：MPa

記号	温　度（℃）										
	-40 ～40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	37	37	37	37	37	37	36	31	25	21	17

(注 1)温度の中間における値は，比例法によって計算する。

(注 2)時効による強度低下を考慮した値である。

(ロ)-第 A.123 表　材料の各温度における許容引張応力 S (注 1), (注 2)

単位：MPa

記号	温　度（℃）								
	-40 ～40	75	100	125	150	175	200	225	250
MB-A3004	37	37	37	37	29	21	15	11	8

(注 1)温度の中間における値は，比例法によって計算する。

(注 2)時効による強度低下を考慮した値である。

(ロ)-第 A.124 表　材料の各温度における設計降伏点 S_y (注 1), (注 2)

単位：MPa

記号	温　度（℃）										
	-40 ～40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	56	56	56	56	56	56	56	52	46	38	30

(注 1)温度の中間における値は，比例法によって計算する。

(注 2)時効による強度低下を考慮した値である。

(ロ)-第 A.125 表　材料の各温度における設計引張強さ S_u (注 1), (注 2)

単位：MPa

記号	温　度（℃）										
	-40 ～40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	153	153	153	151	140	126	110	93	77	63	52

(注 1)温度の中間における値は，比例法によって計算する。

(注 2)時効による強度低下を考慮した値である。

(ロ)-第 A.126 表　材料の各温度における縦弾性係数 (注)

単位：MPa

記号	温　度（℃）											
	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	73900	73300	72800	72100	71400	70600	69800	68900	67900	66900	65800	64600

(注)温度の中間における値は，比例法によって計算する。

(ロ)-第 A.127 表　材料の各温度における熱膨張係数 (注 1)

単位：$\times 10^{-6}$ mm／mm・℃

記号	区分 (注 2)	温　度（℃）											
		20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
MB-A3004	A	22.75	23.52	24.02	24.42	24.76	25.05	25.35	25.68	26.06	26.54	27.14	27.91
	B	22.61	23.14	23.48	23.76	23.99	24.17	24.33	24.48	24.63	24.79	24.99	25.24

(注 1)温度の中間における値は，比例法によって計算する。

(注 2)区分 A は瞬時熱膨張係数，区分 B は常温から当該温度までの平均熱膨張係数を表す。

(ロ)-第 A.128 表　機械的性質 (注 1)

記号	引張試験（試験温度：常温）			シャルピー衝撃試験 (注 2)（試験温度：-40℃）
	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)	吸収エネルギー (J)
MB-A3004	185 以上	85 以上	15 以上	41 以上

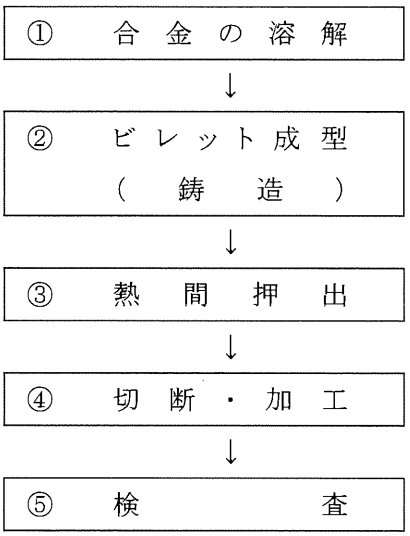
(注 1)時効による強度低下を考慮しない供用開始前の製造管理値である。

(注 2)吸収エネルギーの規定は JIS Z 2242 の V ノッチ試験で得られる押出方向に平行な L 方向及び垂直な T 方向各 3 試験片の個々の値である。

(ロ)-第 A.129 表　管理程度表

製造工程 (注)	管理項目		材料保証（規定）	製造管理（参考）
①合金の溶解	材料特性（初期材）	化学成分（溶湯）	○	—
⑤検査		引張強度特性	—	○
		シャルピー衝撃特性	—	○
		組織観察	—	○
③熱間押出	製造条件	押出比	○	—
		押出条件	—	○
		押出冷却条件	—	○
		整直条件	—	○
		質別	○	—

(注)製造工程は(ロ)-第 A.77 図の製造フローに対応する。



(ロ)-第 A.77 図　製造フロー

A.10.7　評価に用いた設計線図

1. 三次蓋及び三次蓋ボルトの疲労評価における許容繰返し回数の算出

A.5.1.4 で示した三次蓋及び三次蓋ボルトの許容繰返し回数は以下のとおり算出した。

(1) 三次蓋

繰返しピーク応力強さ S_a は次式で求める。

$$S_a=\frac{1}{2}\cdot S\cdot K_t\cdot\frac{E_0}{E_t}$$

ここで,

S_a：繰返しピーク応力強さ（MPa）

S：応力強さ（MPa）

K_t：疲労強度減少係数又は応力集中係数（-）

E_0：設計疲労線図の基本縦弾性係数（MPa）

E_t：材料の使用温度における縦弾性係数（MPa）

一般の試験条件下において発生する最大応力強さは，(ロ)-第 A.17 表より 27MPa である。この値を保守的に疲労評価における応力強さ S とし，繰返しピーク応力強さ S_a 及び許容繰返し回数 N_a を計算した結果を(ロ)-第 A.130 表に示す。

(ロ)-第 A.130 表　三次蓋の繰返しピーク応力強さ許容繰返し回数の計算結果

項目	記号	単位	数値
応力強さ	S	MPa	27
疲労強度減少係数又は応力集中係数	K_t	—	5
設計疲労線図の基本縦弾性係数	E_0	MPa	195000
材料の使用温度における縦弾性係数	E_t	MPa	
繰返しピーク応力強さ	S_a	MPa	71
許容繰返し回数 (注)	N_a	回	1×10^{11}

(注)許容繰返し回数算出における設計疲労線図 [1)]を(ロ)-第 A.78 図に示す（曲線 A を適用）。

(ロ)-第 A.78 図　設計疲労線図による三次蓋の許容繰返し回数の算出

(2) 三次蓋ボルト

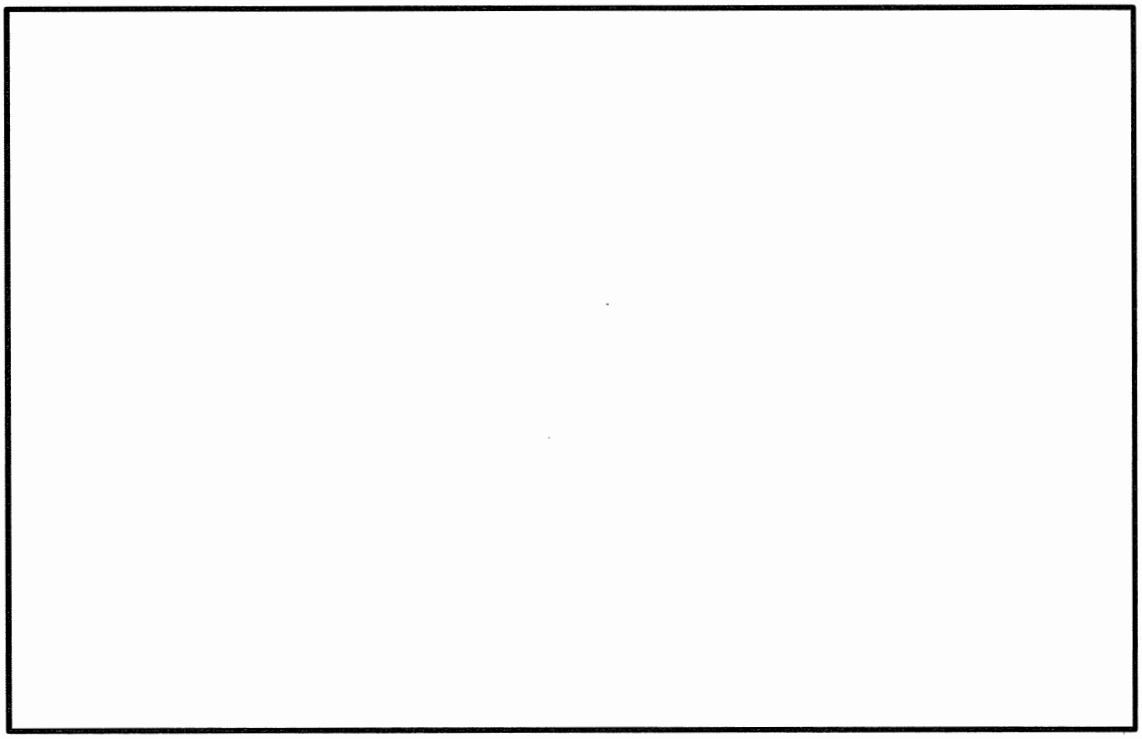
繰返しピーク応力強さを(1)と同様に求める。

一般の試験条件下において発生する最大応力強さは，(ロ)-第 A.17 表より 320MPa である。この値を保守的に疲労評価における応力強さ S とし，繰返しピーク応力強さ S_a 及び許容繰返し回数 N_a を計算した結果を(ロ)-第 A.131 表に示す。

(ロ)-第 A.131 表　三次蓋ボルトの繰返しピーク応力強さ及び許容繰返し回数の計算結果

項目	記号	単位	数値
応力強さ	S	MPa	320
疲労強度減少係数又は応力集中係数	K_t	—	4
設計疲労線図の基本縦弾性係数	E_0	MPa	207000
材料の使用温度における縦弾性係数	E_t	MPa	
繰返しピーク応力強さ	S_a	MPa	713
許容繰返し回数 (注)	N_a	回	9.3×10^2

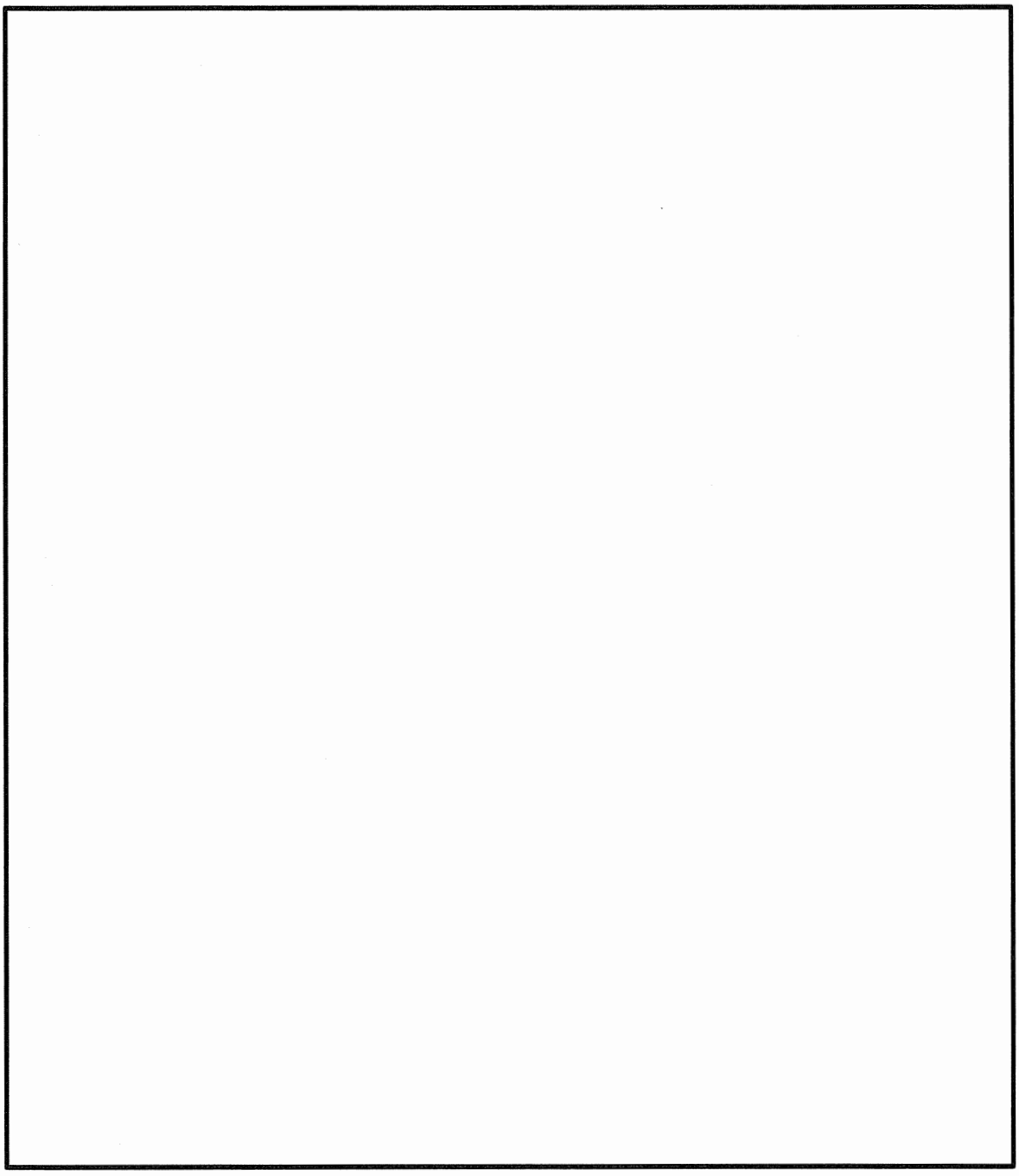
(注)許容繰返し回数算出における設計疲労線図を(ロ)-第 A.79 図に示す（曲線 1 を適用）。



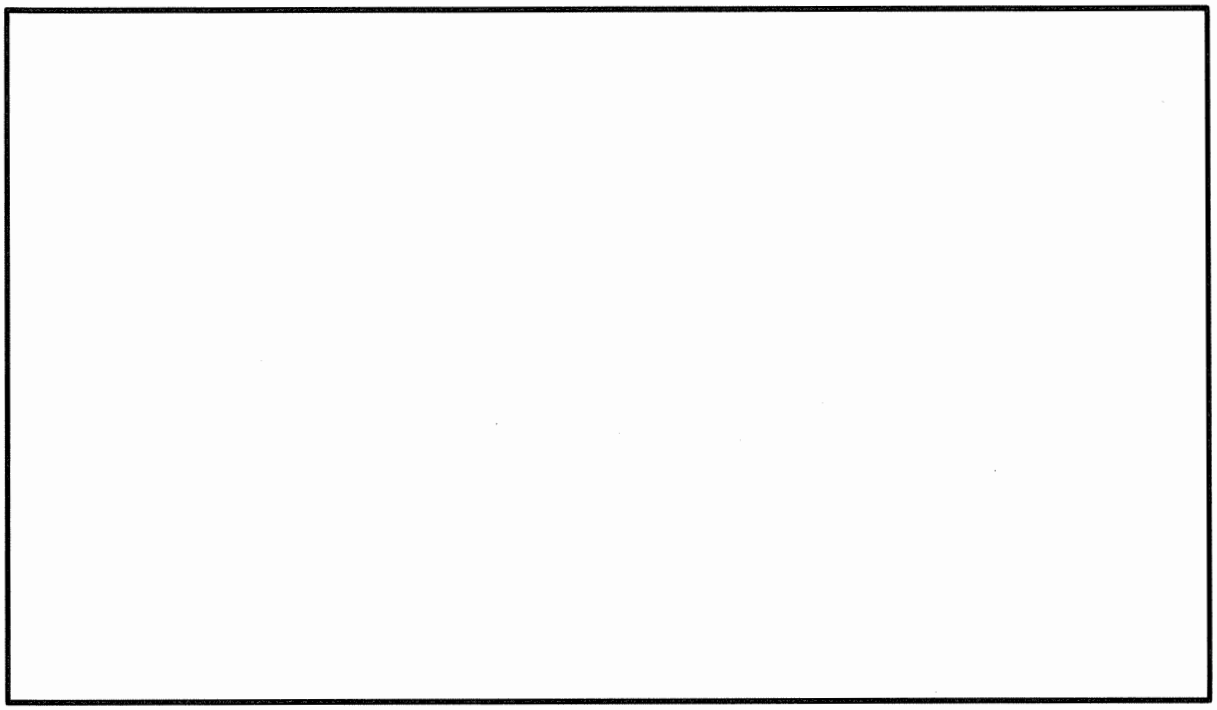
(ロ)-第 A.79 図　設計疲労線図による三次蓋ボルトの許容繰返し回数の算出

2. 強化浸漬試験における胴の耐圧強度の評価式のBの算出

A.7に示した外圧に対する胴の耐圧強度の評価に用いたL/D_o，D_o/t及び温度で定まる値Bについて，(ロ)-第A.80図，(ロ)-第A.81図に基づき算出した。



(ロ)-第A.80図　金属キャスク構造規格[1)]別図7-1



(ロ)-第 A.81 図　金属キャスク構造規格 [1]別図 7-2
（炭素鋼（最小降伏点が 165MPa 以上 210MPa 未満のもの））

A.10.8　参考文献

1) (一社)日本機械学会，「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格（JSME S FA1-2007)」，(2007).

2) (一社)日本機械学会,「発電用原子力設備規格　設計・建設規格(JSME S NC1-2012)」，(2012).

3) (一社)日本機械学会，「発電用原子力設備規格　材料規格（JSME S NJ1-2012）」，(2012).

4) “Proving Test on the Reliability for PWR 15×15 Fuel Assemblies Through Three Reactor Cycles in Japan”, Proceedings of the International Topical Meeting on LWR Fuel Performance April 17-20, (1988).

5) (一社)日本原子力学会,「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物　輸送容器の安全設計及び検査基準（AESJ-SC-F006:2013）」，(2014).

6)

7)

8) 原燃輸送株式会社，「高性能使用済燃料輸送容器の安全性に関する技術調査（PWR）H5年度上半期（最終報告書）」，(1993).

9) 木材工業ハンドブック編集委員会，「木材工業ハンドブック，改訂3版」，(1982).

10) 産業技術センター，「複合材料技術集成」(1976).

11) 機械設計便覧編集委員会,「機械設計便覧（第3版）」，(1992).

12) The American Society of Mechanical Engineers, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code, SectionⅧ Division3”, (2015).

13) 西田正孝，「応力集中　増補版」,(1973).

14) 「クレーン構造規格」，平成7年労働省告示第134号，(1995).

15) (一社)日本機械学会編，「機械工学便覧 新版」，(1984).

16) 幾島，浅田，「放射性物質輸送容器の衝突解析用簡易計算コードの開発　（Ⅰ）緩衝体付き輸送容器衝突計算コードCRUSH」，日本原子力学会誌 Vol.33 No.4，(1991)．

17) (独)原子力安全基盤機構,「金属キャスク貯蔵技術確証試験報告書 1/3 最終報告」，(2004).

18) International Atomic Energy Agency, “Spent Fuel Performance Assessment and Research, Final Report of a Coordinated Research Project on Spent Fuel Performance Assessment and Research (SPAR-Ⅲ) 2009-2014”, (2015).

19) (独)原子力安全基盤機構,「中間貯蔵施設健全性評価手法等調査報告書最終報告」，(2005).

20) T. Quercetti, V. Ballheimer, G. Wieser ; Analytical, Numerical and Experimental Investigations on the Impact Behaviour of Packagings for the Transport of

Radioactive Material under Slap Down, 12200 Berlin, Germany, (2001).

21) T.Quercetti, V.Ballheimer, G.Wieser, "Analytical, Numerical and Experimental Investigations on the Impact Behaviour of Packagings for the Transport of Radioactive Material under Slap Down Conditions", Journal of Nuclear Materials Management, (2002).

22) Warren C. Young , Richard G . Budynas , " Roark' s Formulas For Stress and Strain Seventh edition " , the McGraw-Hill Companies, (2002) .

23) (一社)日本機械学会編, 「機械工学便覧 基礎編 α3 材料力学」, (2005).

24) T. Quercetti, K. Müller, S. Schubert, Comparison of experimental results from drop testing of spent fuel package design using full scale prototype model and reduced scale model, The 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (2007).

(ロ)章B　熱解析

B. 熱解析

B.1 概要

1. 輸送物の熱設計

本輸送物の熱放散システムは次のとおりであり，自然冷却にて使用済燃料の崩壊熱を除熱している。

・胴内に収納された使用済燃料より発生する崩壊熱は，主に胴内に充填されたヘリウムの熱伝導と放射によりバスケットに伝えられる。
・バスケットに伝えられた熱は主に熱伝導によってバスケット外面に伝わり，ヘリウムの熱伝導と放射により胴内面に伝えられる。
・胴内面に伝えられた熱は，熱伝導によって胴外面に伝えられる。
・胴外面に伝えられた熱は，主に胴と外筒の間に設けられた銅製の伝熱フィンの熱伝導によって外筒に伝えられる。
・外筒に伝えられた熱は，放射と空気の自然対流により大気に放散される。

(ロ)章 B 熱解析では，一般の試験条件における輸送物各部の温度を求め，構成部品の温度が使用可能温度を超えないことを示すとともに，他の解析への条件を示す。また，一般の試験条件において人の近づきうる表面の最高温度が 85℃以下であることを示す。

さらに，特別の試験条件における輸送物各部の温度を求め，構成部品の健全性に与える影響を示すとともに，他の解析への条件を示す。

上記に加え，一般及び特別の試験条件における輸送物各部の圧力を求め，他の解析への条件を示す。

2. 熱解析の条件

熱解析は，(ロ)-第 B.1 表に示す条件で行う。

輸送物の最大崩壊熱量は，(イ)-第 A.1 表に示したように 13.9kW 以下であるが，熱解析ではこれに余裕をみた設計崩壊熱量とする。

(ロ)-第B.1表　熱解析の主な条件及び方法

項目＼条件		一般の試験条件			特別の試験条件		
		最高温度評価条件	人の近づきうる表面の最高温度評価条件	最低温度評価条件	火災前	火災時	火災後
設計崩壊熱量	17×17 燃料	18.1 kW	18.1 kW	0 kW	18.1 kW	18.1 kW	18.1 kW
環境条件	周囲温度	静止空気 38 ℃	静止空気 38 ℃	静止空気-25 ℃	静止空気 38 ℃	火災 30 分間 800 ℃	静止空気 38 ℃
	太陽熱放射	あり	なし	なし	あり	あり	あり
	周囲吸収率	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9 (注)	1.0
計算モデル	輸 送 物	三次元 180 ° 対称全体モデル（燃料領域は均質化領域としてモデル化）					
	燃料集合体	燃料集合体モデル					
温度分布計算プログラム		ABAQUS [1] コード					

(注)火炎の放射率を示す。

B.2　材料の熱的性質

熱解析で用いた材料の熱的性質を(ロ)-第B.2表，(ロ)-第B.3表及び(ロ)-第B.4表に示す。

(ロ)-第B.2表　材料の熱的性質（固体）（1/3）

材料	密度 (kg/m³)	放射率 (−)	温度		熱伝導率 (W/(m·K))	比熱 (kJ/(kg·K))
			(K)	(℃)		
ステンレス鋼 [redacted] 2)	7.92×10³	0.15	300	26.85	16.0	0.499
			400	126.85	16.5	0.511
			600	326.85	19.0	0.556
			800	526.85	22.5	0.620
			1000	726.85	25.7	0.644
析出硬化系ステンレス鋼 (SUS630) 3)	7.75×10³	−	293.15	20	17.3	0.465
			398.15	125	18.9	0.501
			498.15	225	20.7	0.547
			598.15	325	22.2	0.592
			698.15	425	23.3	0.649
			798.15	525	23.9	0.743
			898.15	625	24.5	0.914
			973.15	700	25.1	0.841
炭素鋼 [redacted] 2)	7.85×10³	−	300	26.85	43.0	0.465
			500	226.85	38.6	0.528
			800	526.85	27.7	0.622
炭素鋼 [redacted] 2)	7.85×10³	−	300	26.85	43.0	0.465
			500	226.85	38.6	0.528
			800	526.85	27.7	0.622
ニッケルクロムモリブデン鋼 [redacted] 3)	7.75×10³	−	293.15	20	36.3	0.445
			398.15	125	37.0	0.492
			498.15	225	37.2	0.529
			598.15	325	36.5	0.569
			698.15	425	35.0	0.614
			798.15	525	33.3	0.675
			898.15	625	31.5	0.774
			973.15	700	30.1	0.923
中性子吸収材 4)	[redacted]	0.20	293.15	20	[redacted]	
			398.15	125		
			473.15	200		
アルミニウム合金 3)	2.72×10³	0.055 (酸化面：0.33)	293.15	20	162.1	0.888
			398.15	125	170.1	0.936
			473.15	200	173.6	0.966

(ロ)-第B.2表　材料の熱的性質（固体）（2/3）

材料	密度 (kg/m³)	放射率 (−)	温度 (K)	温度 (℃)	熱伝導率 (W/(m·K))	比熱 (kJ/(kg·K))
二酸化ウラン 2), 5)	[redacted] (注1)	−	300	26.85	2.00 (注2)	0.237
			500	226.85		0.286
			800	526.85		0.300
			1300	1026.85		0.322
			1800	1526.85		0.369
ジルカロイ 2), 6)	6.55×10^3	0.8	273	−0.15	12.4	0.275
			300	26.85	12.7	0.281
			400	126.85	14.0	0.302
			600	326.85	16.5	0.326
			1000	726.85	21.6	0.366
インコネル 2)	8.25×10^3	−	300	26.85	12.0	0.425
銅 2)	8.88×10^3	−	150	−123.15	428	0.322
			250	−23.15	404	0.376
			300	26.85	398	0.386
			600	326.85	383	0.425
			800	526.85	371	0.447
			1000	726.85	357	0.471
			1200	926.85	342	0.492
中性子遮蔽材（レジン） 7)	1.67×10^3	−	常温		0.646	1.00
[redacted] 3)	[redacted] (注3)	−	300	26.85	[redacted]	
			400	126.85		
			500	226.85		
			600	326.85		
			700	426.85		
			800	526.85		
			900	626.85		
			1000	726.85		
			1100	826.85		
[redacted] 3)	[redacted]	−	300	26.85	[redacted]	
			400	126.85		
			500	226.85		
			600	326.85		
			700	426.85		
			800	526.85		
			900	626.85		
			1000	726.85		
			1100	826.85		

(注1)文献値に理論密度比を乗じた値

(注2)照射を考慮した値

(注3)[redacted]の値

(ロ)-第 B.2 表　材料の熱的性質（固体）（3/3）

材料	密度 (kg/m³)	放射率 (−)	温度 (K)	温度 (℃)	熱伝導率 (W/(m·K))	比熱 (kJ/(kg·K))
[redacted] 8)	[redacted]	—	300	26.85	[redacted]	
			400	126.85		
			500	226.85		
			600	326.85		
			700	426.85		
			800	526.85		
			900	626.85		
			1000	726.85		
			1100	826.85		

(ロ)-第 B.3 表　材料の熱的性質（気体）

材料	温度 (K)	温度 (℃)	密度 (kg/m³)	熱伝導率 (W/(m·K))	比熱 (注 1) (kJ/(kg·K))	動粘性係数 (mm²/s)	粘性係数 (μPa·s)	プラントル数 (−)
ヘリウム 2)	200	−73.15	0.16253	0.1150 (注 2)	3.116	—	15.35	0.693
	300	26.85		0.1527 (注 2)		—	19.93	0.678
	400	126.85		0.1882 (注 2)		—	24.29	0.670
	500	226.85		0.2212 (注 2)		—	28.36	0.666
	600	326.85		0.2523 (注 2)		—	32.21	0.663
	700	426.85		0.2780 (注 2)		—	35.89	0.670
	800	526.85		0.3040 (注 2)		—	39.43	0.670
	1000	726.85		0.3540 (注 2)		—	46.16	0.680
空気 2)	200	−73.15	1.1763	0.01810	0.7220	7.58	—	0.747
	300	26.85		0.02614	0.7200	15.83	—	0.717
	400	126.85		0.03305	0.7280	26.39	—	0.715
	500	226.85		0.03951	0.7440	38.58	—	0.710
	600	326.85		0.04560	0.7650	52.36	—	0.710
	700	426.85		0.05130	0.7890	67.70	—	0.715
	800	526.85		0.05690	0.8120	84.50	—	0.719
	900	626.85		0.06250	0.8350	102.70	—	0.722
	1000	726.85		0.06720	0.8550	122.10	—	0.732
	1100	826.85		0.07170	0.8730	143.00	—	0.742
キセノン 2), 9)	300	26.85	—	0.00562	0.09502	—	23.30	—
	400	126.85	—	0.00728		—	30.29	—
	500	226.85	—	0.00881		—	36.80	—
	600	326.85	—	0.01025		—	42.81	—

(注 1)文献記載の定圧比熱を定積比熱に換算して求めた値

(注 2)圧力を考慮しても常圧の値と有意な差がないため，常圧の値を設定している。

(ロ)-第B.4表　材料の熱的性質（その他）

材料	放射率 [2)] (—)	吸収率 [10)] (—)
塗装面	0.8	0.5

B. 3　構成要素の仕様

1. 三次蓋Oリング

EPDM

使用可能温度　：　-60℃～150℃ [11] /一般の試験条件

：　-60℃～300℃ [12] /特別の試験条件

耐久時間　：　48 時間/300℃ [12]/特別の試験条件

2. 一次蓋及び二次蓋金属ガスケット

アルミニウム，ニッケル基合金

使用可能温度　：　130℃ [13] /一般の試験条件

：　190℃ [14] /特別の試験条件

耐久時間　：　50 時間/190℃ [14]/特別の試験条件

3. 中性子遮蔽材

レジン

使用可能温度　：　149℃ [7] /一般の試験条件

：　180℃ [15] /特別の試験条件

耐久時間　：　5000 時間/180℃ [15]/特別の試験条件

B. 4　一般の試験条件

B. 4. 1　熱解析モデル

B. 4. 1. 1　解析モデル

輸送物の熱解析は，ABAQUS コードを用いた有限要素法により行った。解析に用いるモデル及び解析条件を以下に示す。

1. 解析に用いる各モデル

一般の試験条件における本輸送物の各部位の温度を算出するために，解析モデルとして以下の 2 種類のモデルを適用した。

・三次元 180° 対称全体モデル（以下「全体モデル」という。）

・燃料集合体モデル

各解析モデルにおける温度算出部位は次のとおりである。

全体モデル ・・・・・・・・・・・・上・下部緩衝体表面，胴，外筒，下部端板，一次蓋，二次蓋，三次蓋，一次蓋金属ガスケット，二次蓋金属ガスケット，三次蓋Oリング，一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，三次蓋ボルト，蓋部中性子遮蔽材，底部中性子遮蔽材，側部中性子遮蔽材，蓋部中性子遮蔽材カバー，底部中性子遮蔽材カバー，バスケット(注)，伝熱フィン，トラニオン

燃料集合体モデル ・・・・・・燃料集合体

(注)バスケットは，アルミニウム合金製のバスケットプレート，ほう素添加アルミニウム合金製の中性子吸収材，アルミニウム合金製のバスケットサポートで構成される。本評価におけるバスケットの最高温度は，これらの構成部材の最高温度とする。

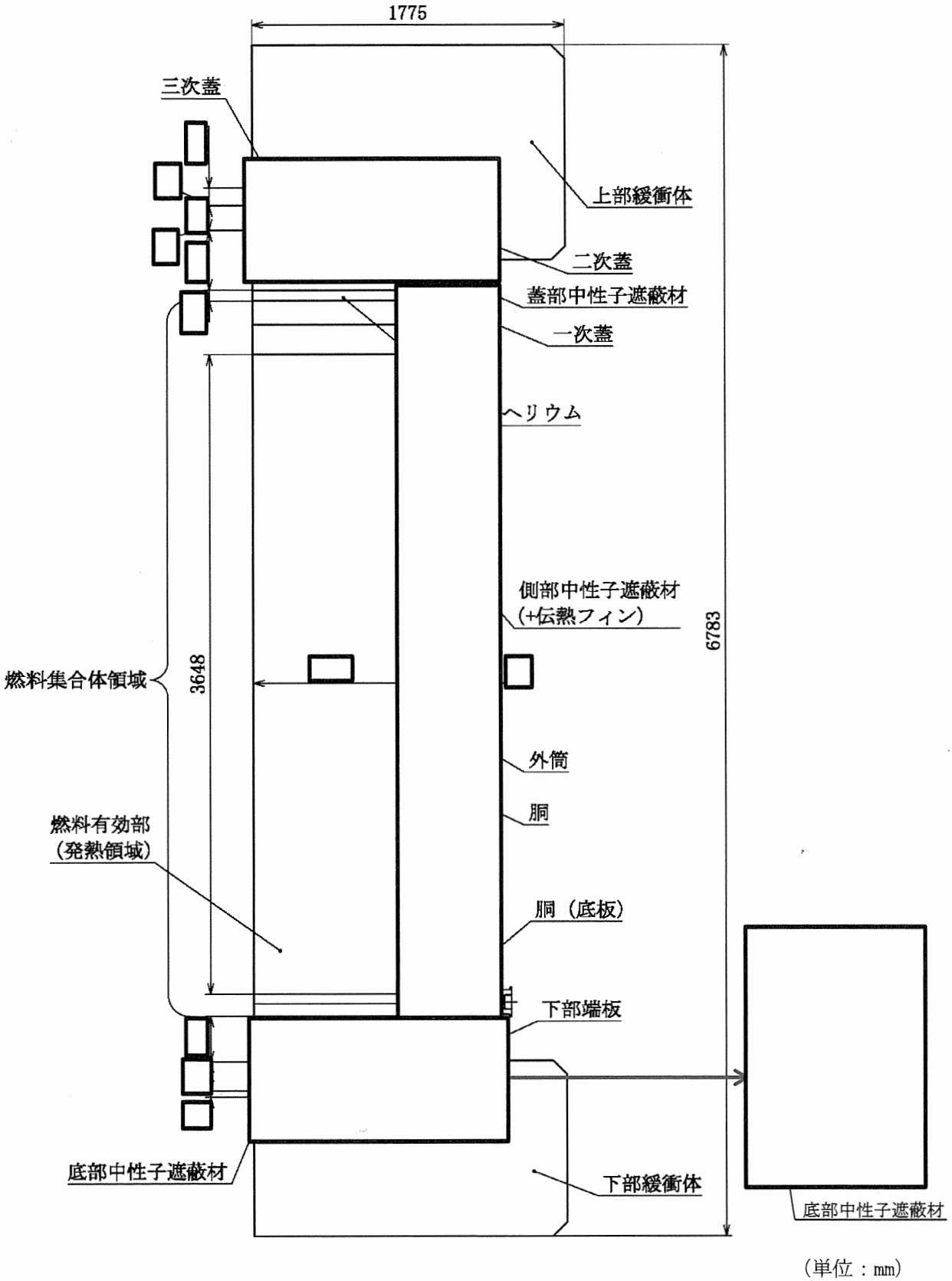
全体モデルでは，バスケット格子の内側の領域（以下「燃料集合体領域」という。）を燃料集合体構成部材（ジルカロイ，二酸化ウラン，ステンレス鋼，インコネル）及び充填気体（ヘリウム）の均質化領域としてモデル化する。燃料集合体領域の平均密度及び軸方向の平均熱伝導率は体積平均値とし，平均比熱は重量平均値とする。また，径方向の平均熱伝導率については，燃料有効部のみ燃料集合体モデルの解析結果を基に設定した等価熱伝導率とし，それ以外の領域においては体積平均値とする。

全体モデルに入力する崩壊熱量は，軸方向の燃焼度分布を考慮する。

燃料集合体の最高温度については，燃料集合体モデルで算出する。燃料集合体モデルでは，燃料棒の領域を構成部材（二酸化ウラン，ジルカロイ）及び封入されていた気体（ヘリウム）の均質化領域としてモデル化する。燃料棒の均質化領域における平均熱伝導率は体積平均値とする。また，制御棒案内シンブル及び炉内計装用案内シンブルについては，燃料棒と同じように均質化領域としてモデル化する。制御棒案内シンブル及び炉内計装用案内シンブルは，燃料棒と同じ形状及び物性値を入力しているが，崩壊熱量は入力しない。

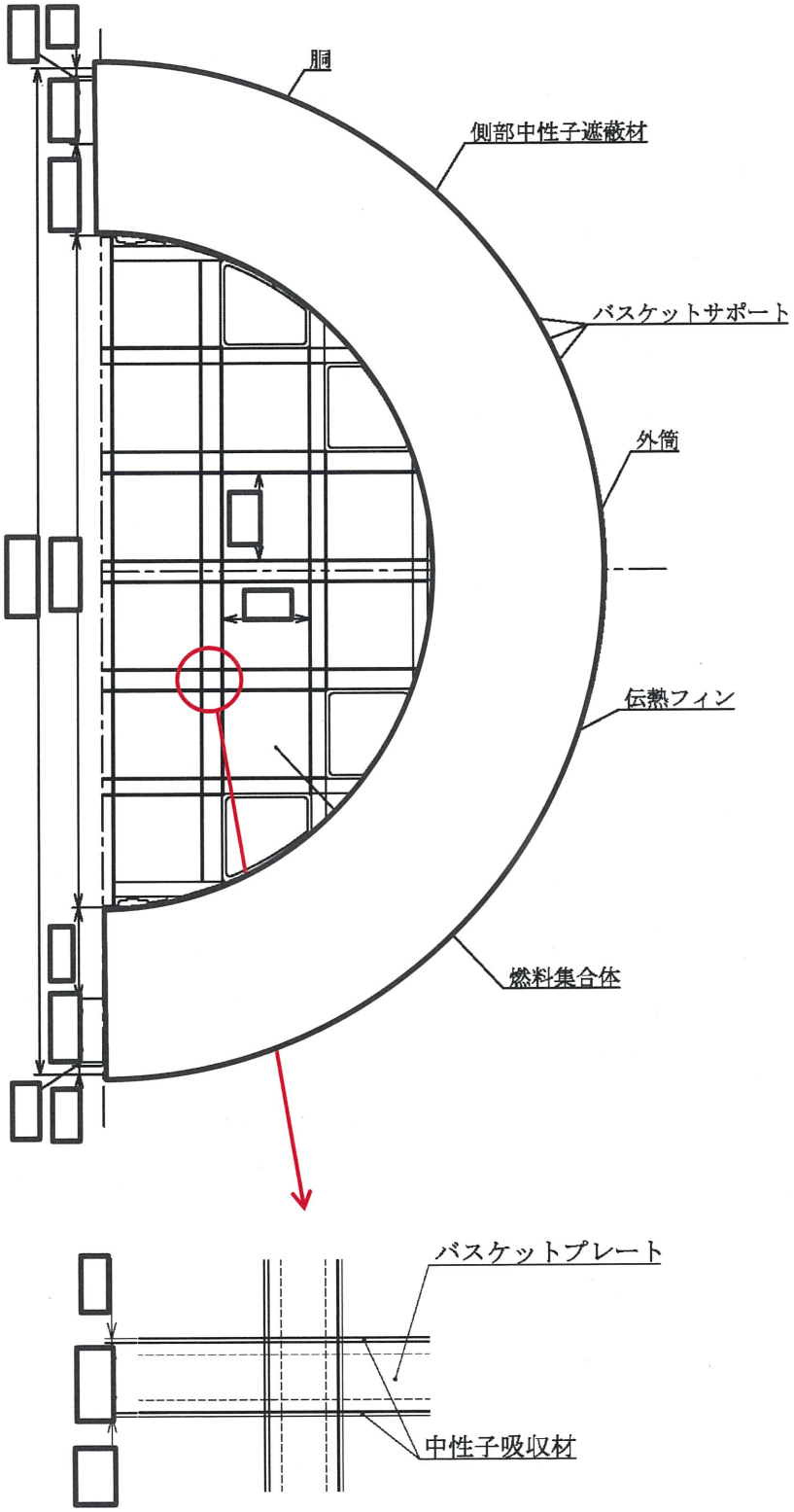
一般の試験条件のうち，水噴霧試験では輸送物は変形しないが，自由落下試験，積み重ね試験及び貫通試験では緩衝体に変形が生じる。ただし，一般の試験条件では，緩衝体が変形しないものとする方が収納物の温度及び緩衝体最高温度を高く評価できることを確認したことから，一般の試験条件の熱解析では，輸送物の変形は考慮しない。

各解析モデルの形状及び要素分割図を(ロ)-第B.1図から(ロ)-第B.4図に示す。



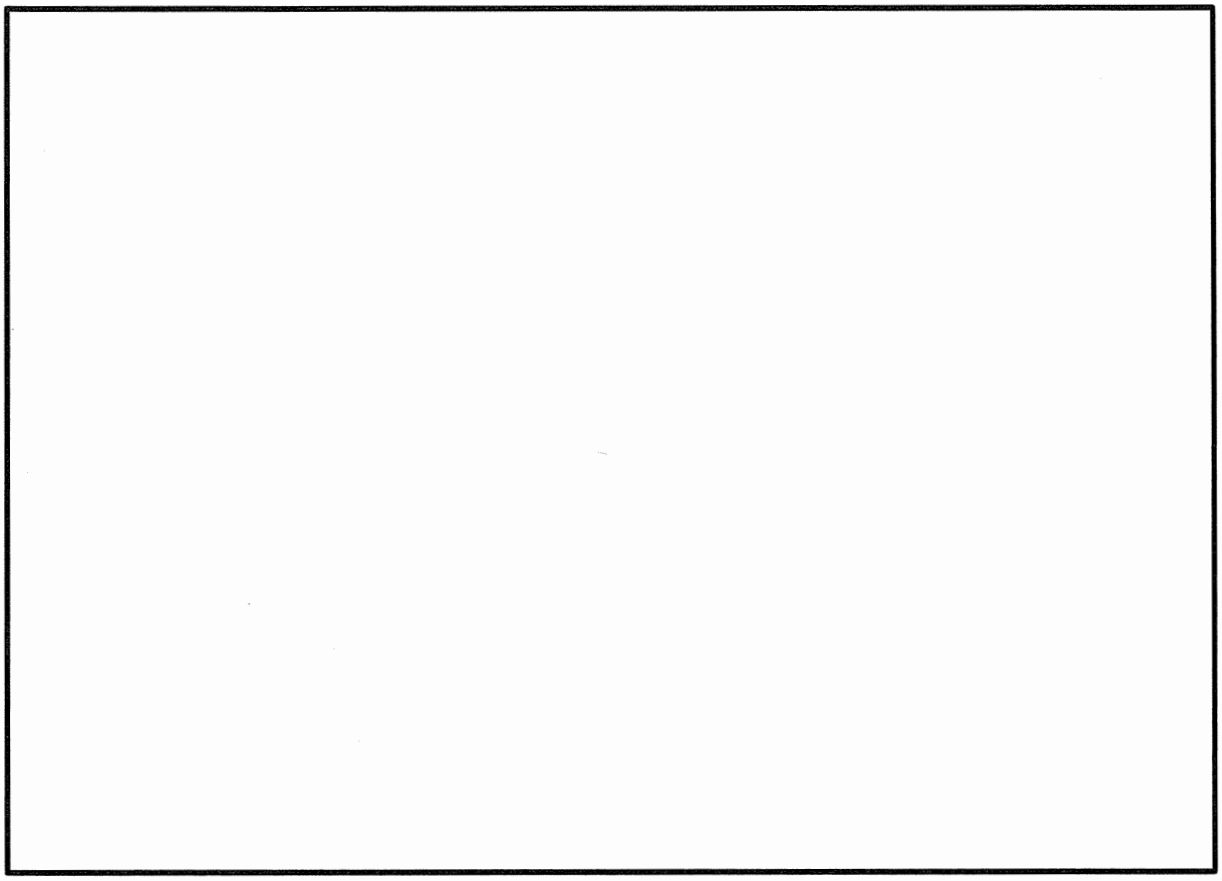
（単位：mm）

(ロ)-第 B.1 図　一般の試験条件の全体モデル形状図（1/2）（縦断面図）



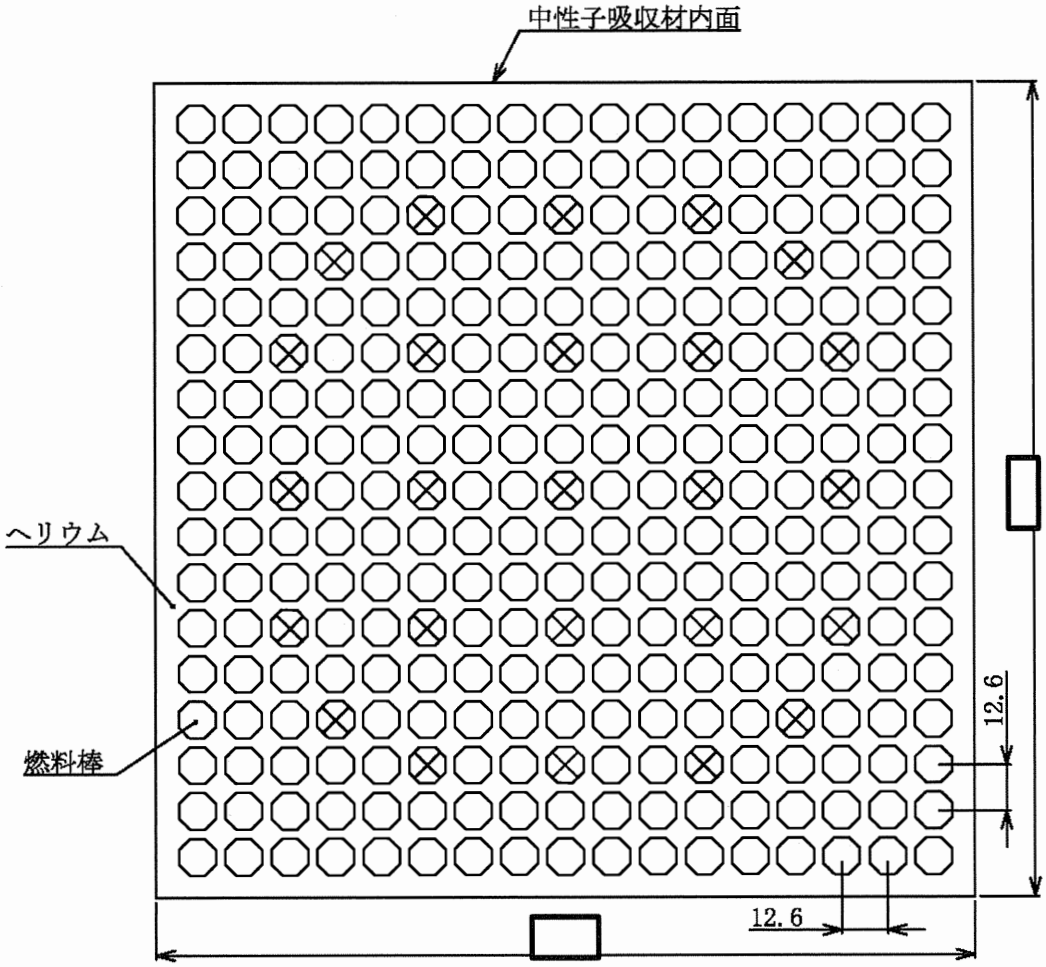
（単位：mm）

(ロ)-第 B.1 図　一般の試験条件の全体モデル形状図（2/2）（横断面図）



（モデル全体）　　（バスケット）　　（燃料集合体領域）

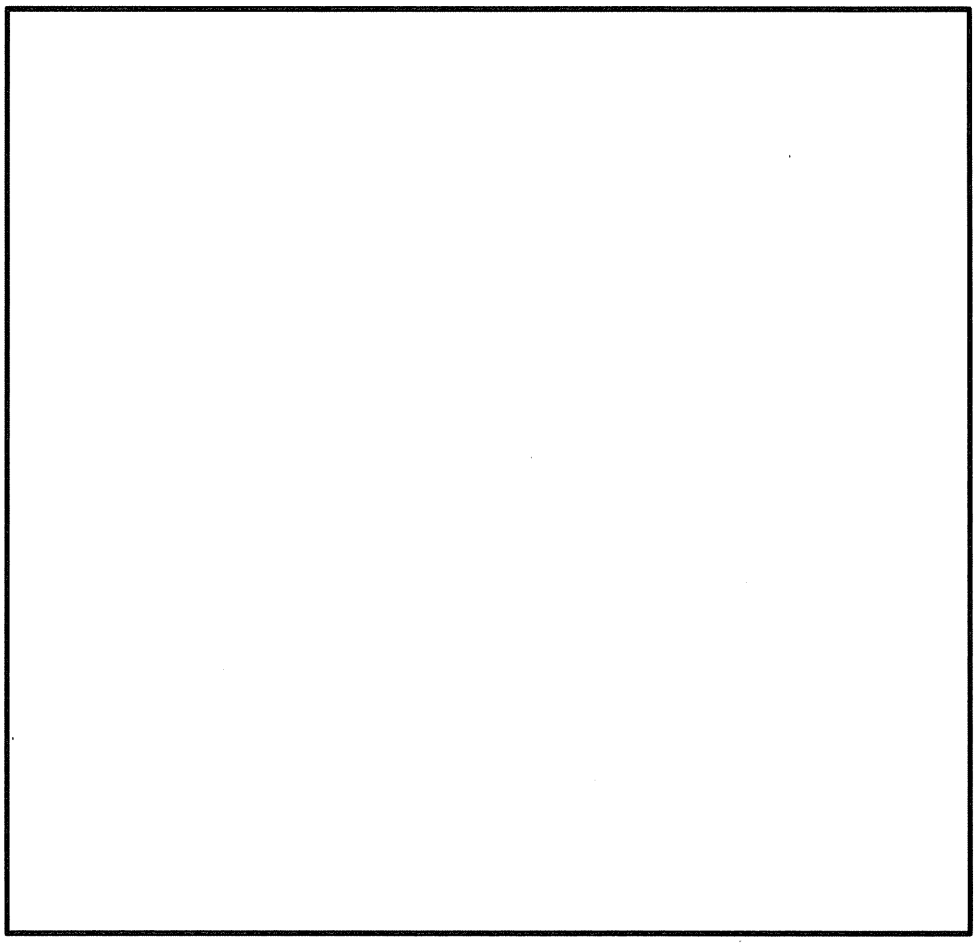
(ロ)-第 B.2 図　一般の試験条件の全体モデル要素分割図



（単位：mm）

（注）⊗は制御棒案内シンブル等であり，発熱はない。

(ロ)-第 B.3 図　燃料集合体モデル形状図



(ロ)-第 B.4 図　燃料集合体モデル要素分割図

2. 解析条件

一般の試験条件における解析条件を(ロ)-第 B.5 表に示す。また，太陽熱放射を(ロ)-第 B.6 表に示す。各モデルにおいて考慮した解析条件は次のとおりである。

・全体モデルにおいては，燃料集合体の軸方向の発熱分布を考慮するために，燃料有効部の範囲を[redacted]領域に分割した。また，各領域の崩壊熱量については，軸方向崩壊熱量分布を考慮した設計崩壊熱量を入力した。燃料集合体 24 体当たりの燃料有効部における軸方向崩壊熱量分布を(ロ)-第 B.5 図に示す。

・全体モデルにおいては，中央領域 12 体に最高燃焼度の崩壊熱量を入力した。一方，外周部 12 体には，キャスクに収納する 24 体の崩壊熱量が平均燃焼度の崩壊熱量 24 体分となるように調整した崩壊熱量を入力した。径方向の崩壊熱量設定を(ロ)-第 B.6 図に示す。

・全体モデルにおいては，周囲温度を境界条件として，自然対流熱伝達と放射による放熱を考慮した。

・燃料集合体モデルにおいては，全体モデルで算出したバスケット内面温度を境界温度とした。また，崩壊熱量については，燃料棒における単位体積当たりの崩壊熱量を設定した。

(ロ)-第 B.5 表　一般の試験条件の熱解析条件

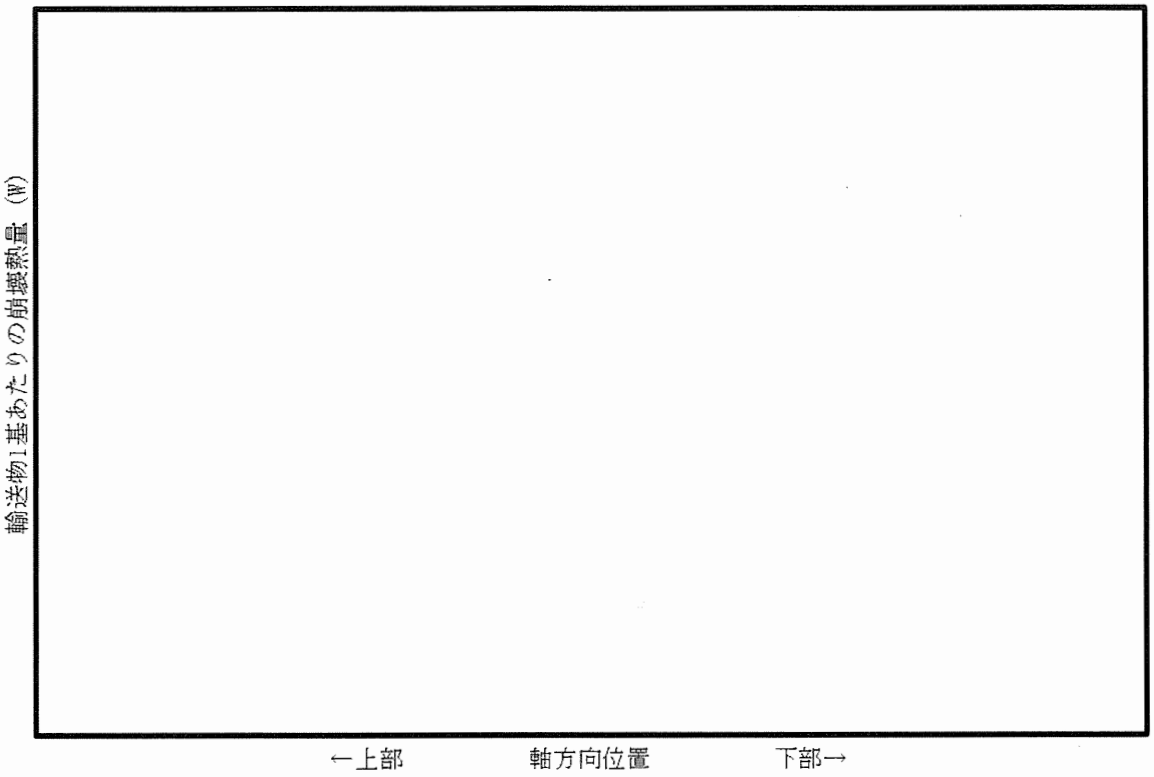
項目			最高温度評価条件	人の近づきうる表面の最高温度評価条件	最低温度評価条件
設計崩壊熱量	全体モデル	中央部	[redacted]		0 W/体
		外周部			0 W/体
	燃料集合体モデル				0 W/mm³/本
環境条件	周囲温度		38 ℃		-25 ℃
	太陽熱放射		あり	なし	
	周囲吸収率		1.0		
輸送容器表面	放射率		0.8		
	吸収率		0.5	—	
緩衝体，トラニオン表面	放射率		0.15		
	吸収率		0.5	—	

(ロ)-第 B.6 表　太陽熱放射データ

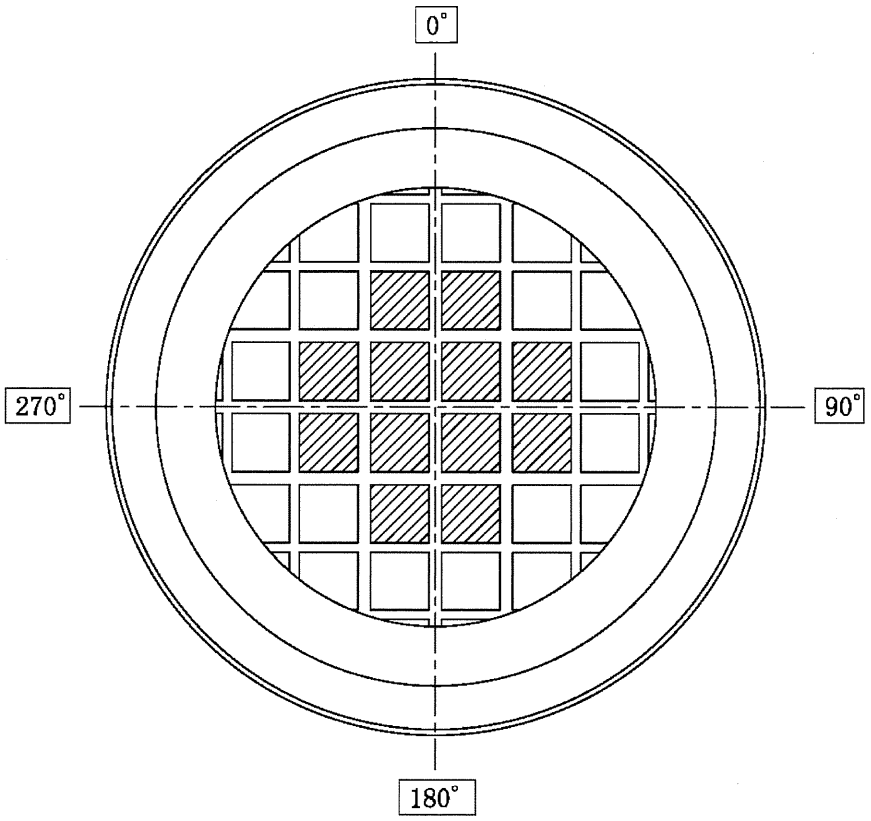
表面の形状及び位置の区分	太陽の熱放射 (注 1) (W/m²)
垂直に輸送される表面	200
その他の表面（曲面）(注 2)	400

(注 1) 技術基準上は一日につき 12 時間の負荷であるが，解析上は連続照射とする。

(注 2) 技術基準上は「水平に輸送されない下向きの表面」に対しては 200W/m² であるが，解析上は安全側に全ての曲面に対して 400W/m² とする。



(ロ)-第 B.5 図　燃料集合体 24 体当たりの軸方向崩壊熱量分布



：最高燃焼度の崩壊熱量(中央部 12 体)

：平均燃焼度の崩壊熱量（24 体分）から中央部の最高燃焼度の崩壊熱量（12 体分）を差し引き，外周部の収納体数（12 体）で平均化した崩壊熱量

(ロ)-第 B.6 図　径方向の崩壊熱量設定

B.4.1.2　試験モデル

該当なし

B.4.2　最高温度

一般の試験条件における，B.4.1 に記載した解析モデル及び条件に基づいて求めた輸送物各部の最高温度を(ロ)-第 B.7 表に示す。

また，一般の試験条件において太陽熱放射のある場合の輸送物とその収納物の各部の温度分布を(ロ)-第 B.7 図及び(ロ)-第 B.8 図に示す。さらに，太陽熱放射のない場合の輸送物各部の温度分布を(ロ)-第 B.9 図に示す。

一般の試験条件において，各部の温度は B.3 に示す使用可能温度を超えることはない。一方，太陽熱放射のない場合に人が容易に近づきうる表面としては，(ロ)-第 B.7 表に示すように緩衝体表面は 82℃であり，基準値の 85℃以下であるが，外筒外面及びトラニオン温度はそれぞれ 90℃及び 103℃であり 85℃を超える。ただし，外筒及びトラニオン部には必要に応じ近接防止金網（66℃以下（B.6.3 参照））を取り付けて輸送するため(注)，人が容易に近づきうる表面の温度は全て 85℃以下である。

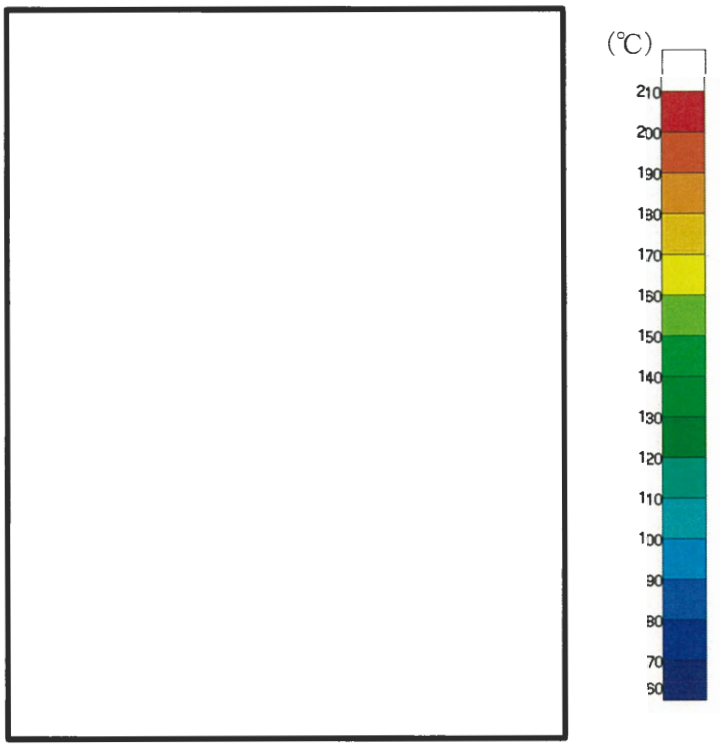
なお，B.4.1 に示すとおり，一般の試験条件においては収納物及び緩衝体の最高温度を高く評価するために緩衝体の変形を考慮していないが，(ロ)-第 A.19 表に示す緩衝体の変形量を考慮した緩衝体表面積の減少分が全て緩衝体表面温度上昇に寄与すると保守的に仮定した場合，一般の試験条件の垂直落下，水平落下及びコーナー落下の緩衝体変形を包含する形状を考慮すると，上部緩衝体の表面積は 16.3%，下部緩衝体の表面積は 18.2% 減少する。この場合，緩衝体表面最高温度は下部緩衝体で 92℃となり，技術上の基準に定める 85℃を超えるが，この表面最高温度は，近接防止金網及び輸送架台により人が容易に近づけない部位である。一方，人が容易に近づきうる緩衝体表面である上面及び側面における最高温度は，上部緩衝体で 45℃であり，緩衝体表面積減少による温度上昇を考慮しても，最高でも上部緩衝体表面で 47℃であるため，人が近づきうる表面の温度は 85℃以下である。

(注) 輸送中の衝撃等により近接防止金網の脱落等が生じた場合，再取付けをする等の対策を施した上で，輸送に供するものとする。

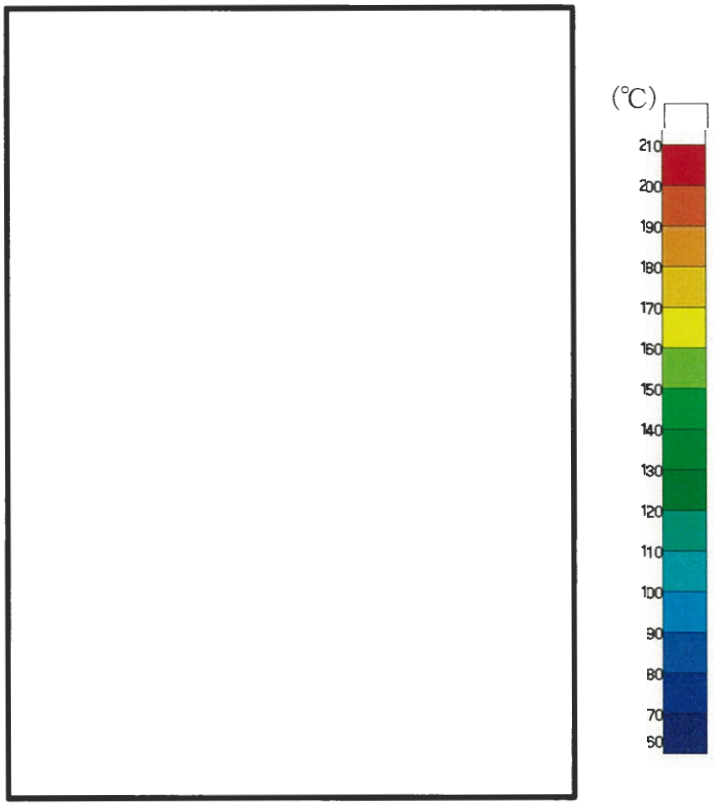
(ロ)-第B.7表　一般の試験条件における最高温度　（単位：℃）

部位	最高温度評価条件 （太陽熱放射あり）	人の近づきうる表面の 最高温度評価条件 （太陽熱放射なし）
緩衝体表面	99	82
緩衝体木材	113	98
外筒	114	90 (注)
下部端板	115	99
伝熱フィン	115	100
側部中性子遮蔽材	117	102
蓋部中性子遮蔽材	110	94
底部中性子遮蔽材	127	111
胴（底板）	133	118
胴（本体部）	121	106
胴（フランジ部）	111	95
一次蓋	110	94
二次蓋	105	89
三次蓋	103	87
一次蓋ボルト	109	94
二次蓋ボルト	105	89
三次蓋ボルト	103	87
上部緩衝体ボルト	103	87
下部緩衝体ボルト	115	99
一次蓋金属ガスケット	109	93
二次蓋金属ガスケット	105	89
三次蓋Oリング	103	86
蓋部中性子遮蔽材カバー	108	92
底部中性子遮蔽材カバー	117	101
トラニオン	118	103
バスケット	177	163
燃料集合体	206	193

(注)外筒外面の最高温度

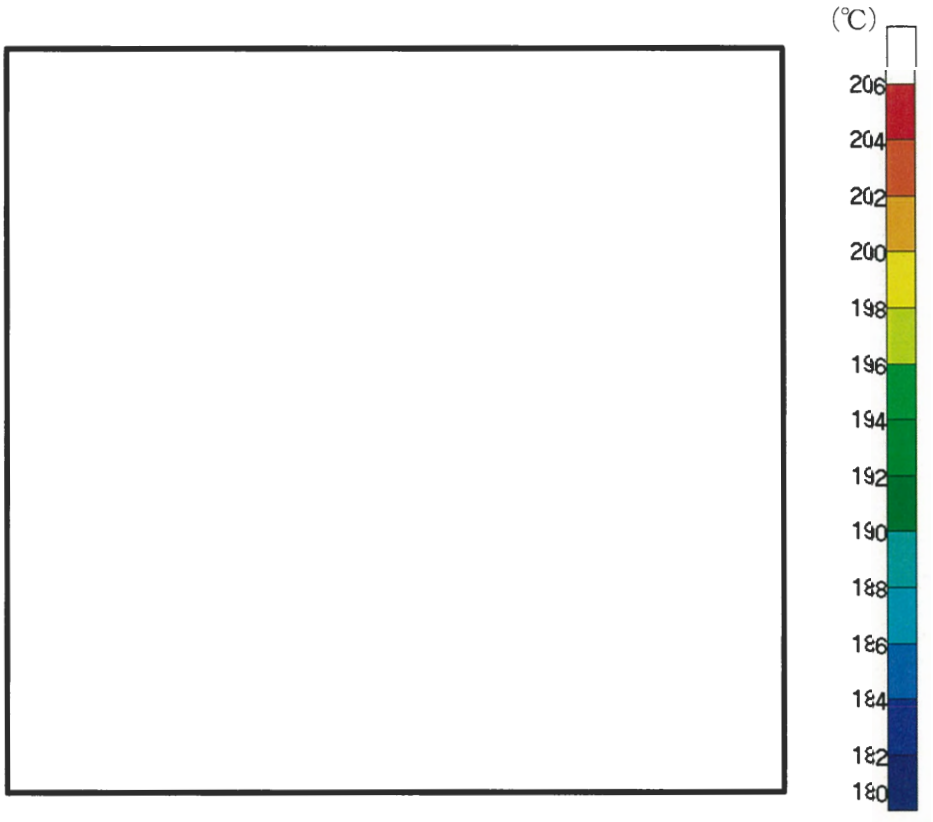


(全体)

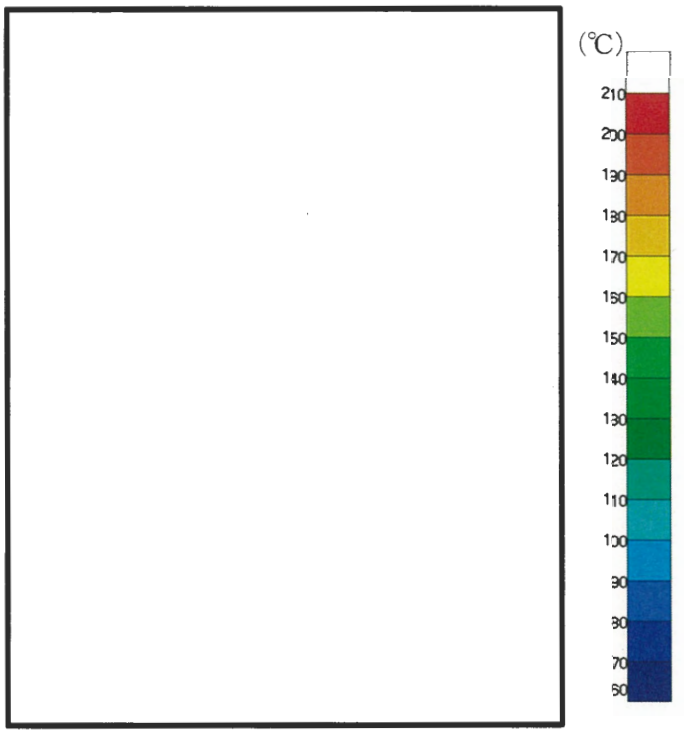


(燃料集合体最高温度位置断面)

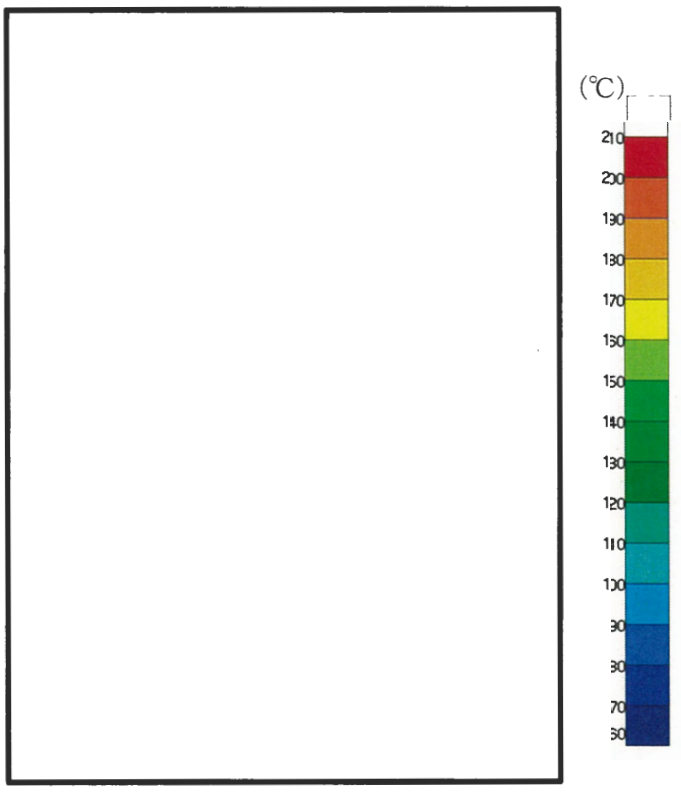
(ロ)-第 B.7 図　一般の試験条件の全体モデル温度分布（最高温度評価条件）



(ロ)-第 B. 8 図　一般の試験条件の燃料集合体モデル温度分布（最高温度評価条件）



（全体）



（燃料集合体最高温度位置断面）

(ロ)-第 B. 9 図　一般の試験条件における全体モデル温度分布
（人の近づきうる表面の最高温度評価条件）

B.4.3　最低温度

本輸送物の最低温度評価条件は，(ロ)-第 B.5 表で示したとおり，周囲温度が-25℃であり，また，太陽熱放射がなく崩壊熱量が 0kW であるため，輸送物の全ての部位が-25℃に達するが，輸送物の健全性に問題はない。また，本輸送物は乾式であり，胴内はヘリウムが充填されるため凍結することはない。

B.4.4　最大内圧

一般の試験条件において輸送物に最大内圧が生じる条件は，(ロ)-第 B.5 表で示した最高温度評価条件であり，この条件における一次蓋と胴で構成される空間の圧力（以下「胴内圧」という。），一次蓋と二次蓋で構成される空間の圧力（以下「一二次蓋間圧力」という。），二次蓋と三次蓋で構成される空間の圧力（以下「二三次蓋間圧力」という。），及び三次蓋と胴で構成される密封装置の圧力（以下「三次蓋－胴内圧力」という。）の計算方法及び計算結果を以下に示す。

なお，(ロ)章 A.5 にて述べたように，燃料棒は一般の試験条件において破損しないため，燃料棒の破損による圧力上昇はない。

1. 胴内圧

輸送物の内部には，輸送に先立ち燃料集合体を収納した後，所定の圧力となるまでヘリウムが充填される。一般の試験条件におけるヘリウムの温度を保守側に燃料集合体最高温度とすると，胴内圧は以下のとおり求められる。

$$P_0 = P_{c0} \frac{T_{0nor}}{T_{c0}}$$

ここで，

P_0　　：一般の試験条件における胴内圧（MPa）

P_{c0}　：胴内ヘリウムの初期充填圧力（MPa）

T_{0nor}　：一般の試験条件における胴内ヘリウムの温度（燃料集合体最高温度）（K）

T_{c0}　：胴内ヘリウムの初期温度（K）

計算条件と計算結果を(ロ)-第 B.8 表に示す。なお，設計評価期間における一二次蓋間ヘリウムの胴内への漏えいは十分に小さいため，漏えいを考慮しても胴内圧は負圧が維持される。

(ロ)-第 B.8 表　一般の試験条件における胴内圧計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	数値
胴内ヘリウムの初期充填圧力	P_{c0}	MPa	0.0477
一般の試験条件における胴内ヘリウムの温度	T_{0nor}	K	479.15 (206 ℃)
胴内ヘリウムの初期温度	T_{c0}	K	293.15 (20 ℃)
一般の試験条件における胴内圧	P_0	MPa	0.0780 (-0.0233 MPa G)

2. 一二次蓋間圧力

一次蓋と二次蓋の間には，二次蓋取付け後，所定の圧力となるまでヘリウムが充填される。一般の試験条件におけるヘリウムの温度を保守側に一二次蓋間ヘリウムの最高温度とすると，一二次蓋間圧力は以下のとおり求められる。

$$P_1 = P_{10} \frac{T_{1nor}}{T_{10}}$$

ここで，

P_1　：一般の試験条件における一二次蓋間圧力 (MPa)

P_{10}　：一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)

T_{1nor}　：一般の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度
(一二次蓋間ヘリウムの最高温度) (K)

T_{10}　：一二次蓋間ヘリウムの初期温度 (K)

計算条件と計算結果を(ロ)-第 B.9 表に示す。

(ロ)-第 B.9 表　一般の試験条件における一二次蓋間圧力計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	数値
一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力	P_{10}	MPa	0.300
一般の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度	T_{1nor}	K	381.15 (108 ℃)
一二次蓋間ヘリウムの初期温度	T_{10}	K	293.15 (20 ℃)
一般の試験条件における一二次蓋間圧力	P_1	MPa	0.390 (0.289 MPa G)

3. 二三次蓋間圧力

三次蓋取付け時における二三次蓋間の雰囲気は常温，大気圧の空気とし，一般の試験条件における空気の温度は，保守側に二三次蓋間空気の最高温度とする。また，保守側に二次蓋の密封性が失われ一二次蓋間ヘリウムが二三次蓋間に漏えいすると仮定すると，二三次蓋間圧力は以下のとおり求められる。

$$P_2 = \frac{P_{10}V_1\frac{T_{1nor}}{T_{10}} + P_{20}V_2\frac{T_{1nor}}{T_{20}}}{V_1 + V_2}$$

ここで，

P_2 ：一般の試験条件における二三次蓋間圧力（MPa）

P_{10} ：一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力（MPa）

P_{20} ：二三次蓋間空気の初期圧力（大気圧）（MPa）

V_1 ：一二次蓋間体積（m^3）

V_2 ：二三次蓋間体積（m^3）

T_{1nor} ：一般の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度（一二次蓋間ヘリウムの最高温度）（K）

T_{10} ：一二次蓋間ヘリウムの初期温度（K）

T_{20} ：三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度（K）

計算条件と計算結果を(ロ)-第 B.10 表に示す。なお，この圧力は三次蓋取付け時の周囲温度が仮に-25℃であった場合には空気の密度が大きくなるため，約 5%増加する可能性があるが，構造評価は保守的にこれを包絡する圧力で評価している。

(ロ)-第 B.10 表　一般の試験条件における二三次蓋間圧力計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	数値
一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力	P_{10}	MPa	0.300
二三次蓋間空気の初期圧力（大気圧）	P_{20}	MPa	0.101325
一二次蓋間体積	V_1	m^3	[redacted]
二三次蓋間体積	V_2	m^3	[redacted]
一般の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度	T_{1nor}	K	381.15（108 ℃）
一二次蓋間ヘリウムの初期温度	T_{10}	K	293.15（20 ℃）
三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度	T_{20}	K	293.15（20 ℃）
一般の試験条件における二三次蓋間圧力	P_2	MPa	0.253（0.152 MPa G）

4. 三次蓋－胴内圧力

保守側に一次蓋及び二次蓋の密封性が失われ，一二次蓋間に充填されたヘリウム及び二三次蓋間空気が胴内に漏えいすると仮定すると，三次蓋－胴内圧力は，以下のとおり求められる。

$$P_3 = \frac{P_{10}V_1\frac{T_{0nor}}{T_{10}} + P_{20}V_2\frac{T_{0nor}}{T_{20}} + P_{c0}V_c\frac{T_{0nor}}{T_{c0}}}{V_1 + V_2 + V_c}$$

ここで，

P_3 ：一般の試験条件における三次蓋－胴内圧力（MPa）

P_{10} ：一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力（MPa）

P_{20} ：二三次蓋間空気の初期圧力（大気圧）（MPa）

P_{c0} ：胴内ヘリウムの初期充填圧力（MPa）

V_1 ：一二次蓋間体積（m^3）

V_2 ：二三次蓋間体積（m^3）

V_c ：胴内体積（m^3）

T_{0nor} ：一般の試験条件における胴内ヘリウムの温度（燃料集合体最高温度）（K）

T_{10} ：一二次蓋間ヘリウムの初期温度（K）

T_{20} ：三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度（K）

T_{c0} ：胴内ヘリウムの初期温度（K）

計算条件と計算結果を(ロ)-第B.11表に示す。

(ロ)-第 B. 11 表　一般の試験条件における三次蓋－胴内圧力計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	数値
一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力	P_{10}	MPa	0.300
二三次蓋間空気の初期圧力（大気圧）	P_{20}	MPa	0.101325
胴内ヘリウムの初期充填圧力	P_{c0}	MPa	0.0477
一二次蓋間体積	V_1	m^3	[redacted]
二三次蓋間体積	V_2	m^3	[redacted]
胴内体積	V_c	m^3	[redacted]
一般の試験条件における 胴内ヘリウムの温度	T_{0nor}	K	479.15（206 ℃）
一二次蓋間ヘリウムの初期温度	T_{10}	K	293.15（20 ℃）
三次蓋取付け時における 二三次蓋間空気の初期温度	T_{20}	K	293.15（20 ℃）
胴内ヘリウムの初期温度	T_{c0}	K	293.15（20 ℃）
一般の試験条件における 三次蓋－胴内圧力	P_3	MPa	0.0822（-0.0191 MPa G）

B. 4. 5　最大熱応力

一般の試験条件においては輸送物に熱応力が生じるが，(ロ)章 A. 5. 1 に示すようにいずれも評価基準を下回る。

B. 4. 6　結果の要約及びその評価

一般の試験条件における熱解析結果の要約及びその評価を(ロ)-第 B. 12 表に示す。本輸送物は以下のとおり一般の試験条件の基準を満足している。

・最高温度評価条件において，三次蓋Oリングの最高温度は 103℃であり，使用可能温度 150℃を超えることはない。

・最高温度評価条件において，一次蓋金属ガスケット及び二次蓋金属ガスケットの最高温度はそれぞれ 109℃及び 105℃であり，使用可能温度 130℃を超えることはない。

・最高温度評価条件において，側部中性子遮蔽材，蓋部中性子遮蔽材及び底部中性子遮蔽材の最高温度は 127℃であり，使用可能温度である 149℃を超えることはない。

・最高温度評価条件において，上記を除く構成材料についても，健全性に悪影響を及ぼすような温度には到達しない。

・人が近づきうる表面の最高温度評価条件において，容易に人が近づきうる部位としての緩衝体表面の最高温度は 82℃であり，基準値の 85℃を超えることはない。一方，外筒外面及びトラニオン温度はそれぞれ 90℃及び 103℃であり 85℃を超えているが，外筒及びトラニオン部には必要に応じ近接防止金網を取り付けて輸送するため，人が容易に近づきうる表面の温度は 85℃以下である。

・最低温度評価条件において，周囲温度が-25℃で，太陽熱放射がなく崩壊熱量が 0kW であるため，全ての部位が-25℃に達するが，輸送物の健全性に問題はない。

(ロ)-第 B. 12 表　一般の試験条件の熱解析結果の要約及びその評価（1/2）

項目	結果 (℃)	基準値 (℃)	評価	他の解析への条件
最高温度				
燃料集合体	206	275 [16]	基準値以下	構造解析では [redacted] ℃を使用 (注 1)
バスケット	177	250 [17]	基準値以下	構造解析では [redacted] ℃を使用 (注 1)
中性子遮蔽材	127 (注 2)	149 [7]	基準値以下	－
一次蓋金属ガスケット	110 (注 3)	130 [13]	基準値以下	－
二次蓋金属ガスケット	105 (注 4)	130 [13]	基準値以下	－
三次蓋Oリング	103 (注 5)	150 [11]	基準値以下	－
外筒	114	350 [18]	基準値以下	構造解析では [redacted] ℃を使用 (注 1)
胴	133	350 [18]	基準値以下	構造解析では [redacted] ℃を使用 (注 1)
近接表面 (注 6)	82 (注 7)	85	基準値以下	－
最低温度	輸送物の全ての部位が-25 ℃	胴内の凍結なし	胴内雰囲気がヘリウムであるため凍結しない	－

(注 1)構造解析における熱応力算出では，容器全体の温度分布を入力するが，(ロ)-第 B. 12 表には，許容値及び内圧計算に使用する温度を代表として示している。なお，この温度は熱解析結果に裕度をみて設定した温度である。

(注 2)蓋部中性子遮蔽材，底部中性子遮蔽材及び側部中性子遮蔽材のうち，最高となる温度

(注 3)保守側に評価するため，一次蓋の最高温度とする。

(注 4)保守側に評価するため，二次蓋の最高温度とする。

(注 5)保守側に評価するため，三次蓋の最高温度とする。

(注 6)一般の試験条件のうち，人が近づきうる表面の最高温度評価条件における評価結果である。なお，外筒外面及びトラニオン温度はそれぞれ 90℃及び 103℃であり 85℃を超えているが，外筒及びトラニオン部には必要に応じ近接防止金網（66℃以下（B. 6. 3 参照））を取り付けて輸送するため，人が容易に近づきうる表面の温度は 85℃以下である。

(注 7)緩衝体表面の最高温度

(ロ)-第B.12表　一般の試験条件の熱解析結果の要約及びその評価（2/2）

項目	結果 (MPa)	基準値 (MPa)	評価	他の解析への条件
最大内圧				
胴内圧	0.0780 (-0.0233 MPa G)	—	設計評価期間中のヘリウムの内部への漏えいを考慮しても0.097 MPa(注)未満	構造解析では-0.101325 MPa Gを使用
一二次蓋間圧力	0.390 (0.289 MPa G)	—	—	構造解析では0.31 MPa Gを使用
二三次蓋間圧力	0.253 (0.152 MPa G)	—	—	構造解析では0.19 MPa Gを使用
三次蓋ー胴内圧力	0.0822 (-0.0191 MPa G)	—	設計評価期間中のヘリウムの内部への漏えいを考慮しても0.097 MPa(注)未満	—

(注)気象変化による圧力変動（±0.004MPa）を考慮した大気圧

B.5　特別の試験条件

B.5.1　熱解析モデル

輸送物の熱解析は，ABAQUS コードを用いた有限要素法により行った。以下に解析に用いるモデル及び解析条件について示す。

B.5.1.1　解析モデル

1. 解析に用いる各モデル

一般の試験条件と同様に，本輸送物の各部位の温度を算出するために，解析モデルとして以下の 2 種類のモデルを適用した。

・全体モデル

・燃料集合体モデル

各解析モデルにおける温度算出部位は次のとおりである。

全体モデル ・・・・・・・・・・・・上・下部緩衝体表面，胴，外筒，下部端板，一次蓋，二次蓋，三次蓋，一次蓋金属ガスケット，二次蓋金属ガスケット，三次蓋Oリング，一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，三次蓋ボルト，蓋部中性子遮蔽材，底部中性子遮蔽材，側部中性子遮蔽材，蓋部中性子遮蔽材カバー，底部中性子遮蔽材カバー，バスケット(注)，伝熱フィン，トラニオン

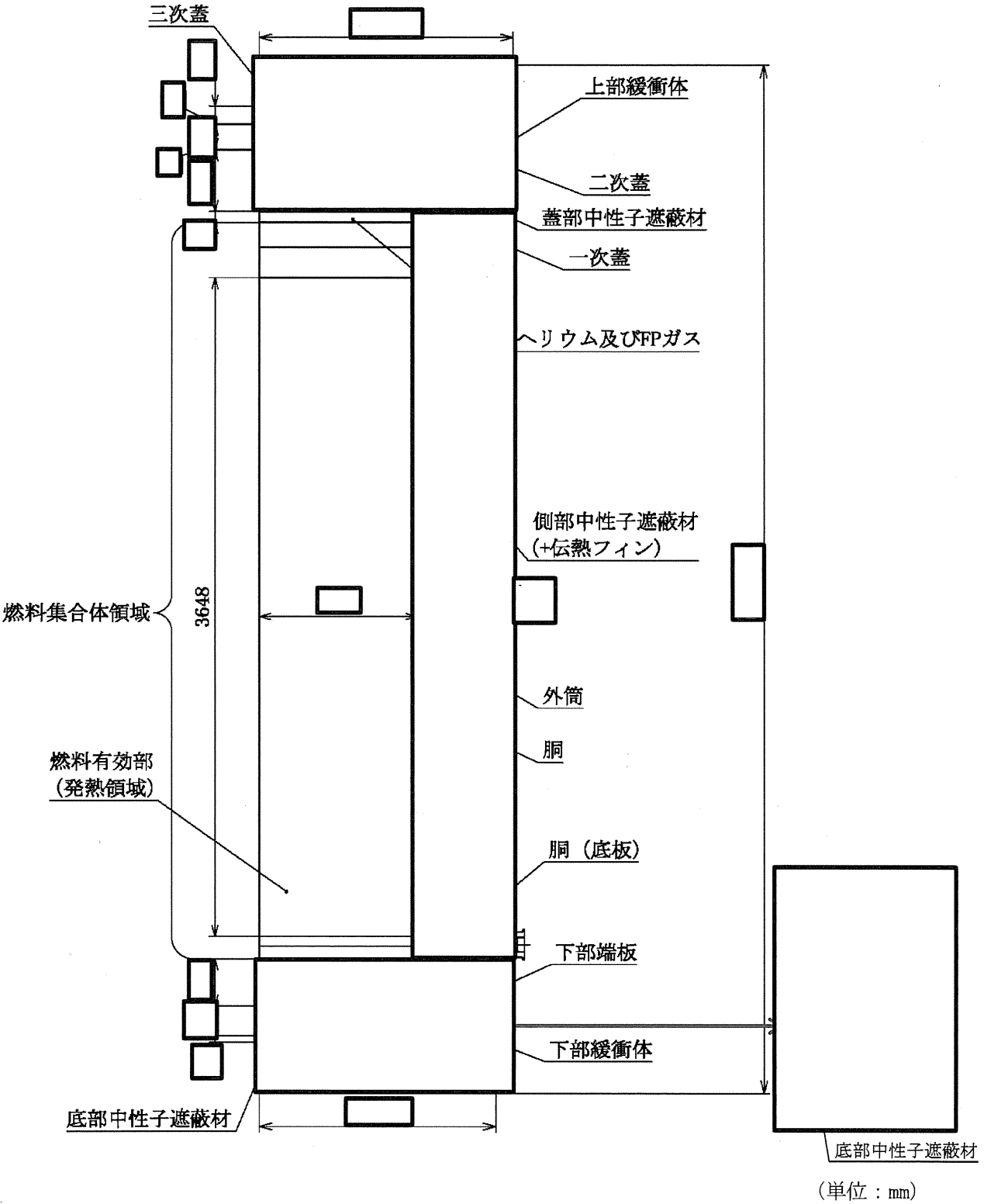
燃料集合体モデル ・・・・・・燃料集合体

(注)バスケットは，アルミニウム合金製のバスケットプレート，ほう素添加アルミニウム合金製の中性子吸収材，アルミニウム合金製のバスケットサポートで構成される。本評価におけるバスケットの最高温度は，これらの構成部材の最高温度とする。

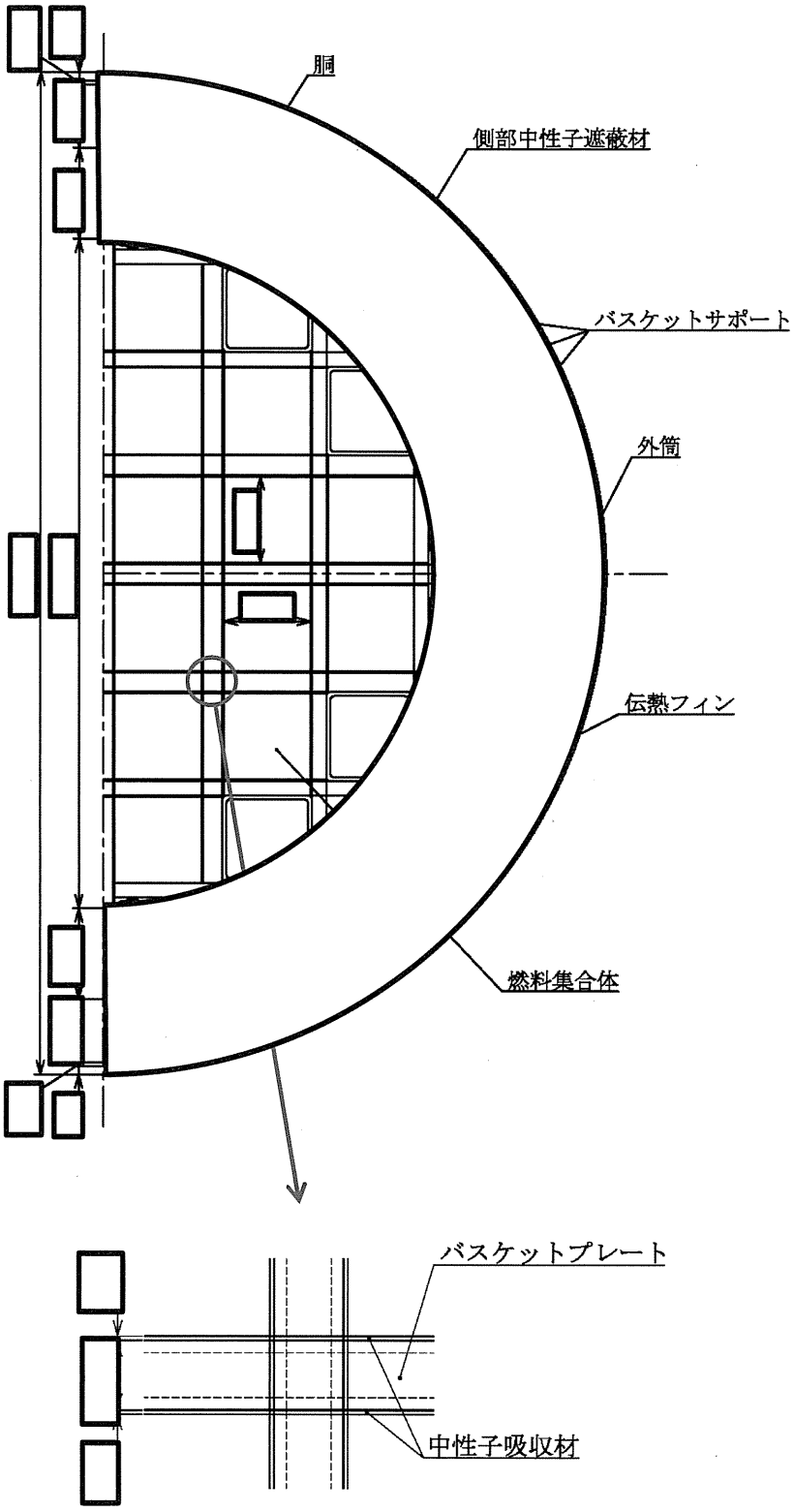
特別の試験条件の熱解析は，輸送物が強度試験（9m 落下試験及び 1m 貫通試験）条件に引き続いて，火災事故条件下に置かれるものとし，落下試験等の影響を以下のように考慮した。

- 9m 落下試験により緩衝体が変形するため，変形後の形状をモデルに考慮した。
- 1m 貫通試験における輸送物の変形は外筒，側部中性子遮蔽材及び緩衝体に生じる変形である。外筒及び側部中性子遮蔽材には直径 150mm の範囲の変形が生じるが，熱解析結果への影響は無視しうるものであることから，解析モデルでは外筒及び側部中性子遮蔽材が変形しないものとした。また，緩衝体に穴があく可能性があるが，局所的であり断熱効果への影響は無視しうるものであることから，解析モデルでは緩衝体が変形しないものとした。
- 9m 落下試験により全燃料棒からヘリウム及び FP ガスが放出されるものと仮定し，胴内ガスの熱伝導率の低下を考慮した。

以上の条件を考慮した特別の試験条件における，全体モデルの形状及び要素分割図を(ロ)-第 B. 10 図及び(ロ)-第 B. 11 図にそれぞれ示す。また，燃料集合体モデルの形状及び要素分割図を(ロ)-第 B. 3 図及び(ロ)-第 B. 4 図にそれぞれ示す。なお，燃料集合体モデルにおけるバスケットセル内の充填気体は，全体モデルと同様にヘリウムと FP ガスの混合気体である。

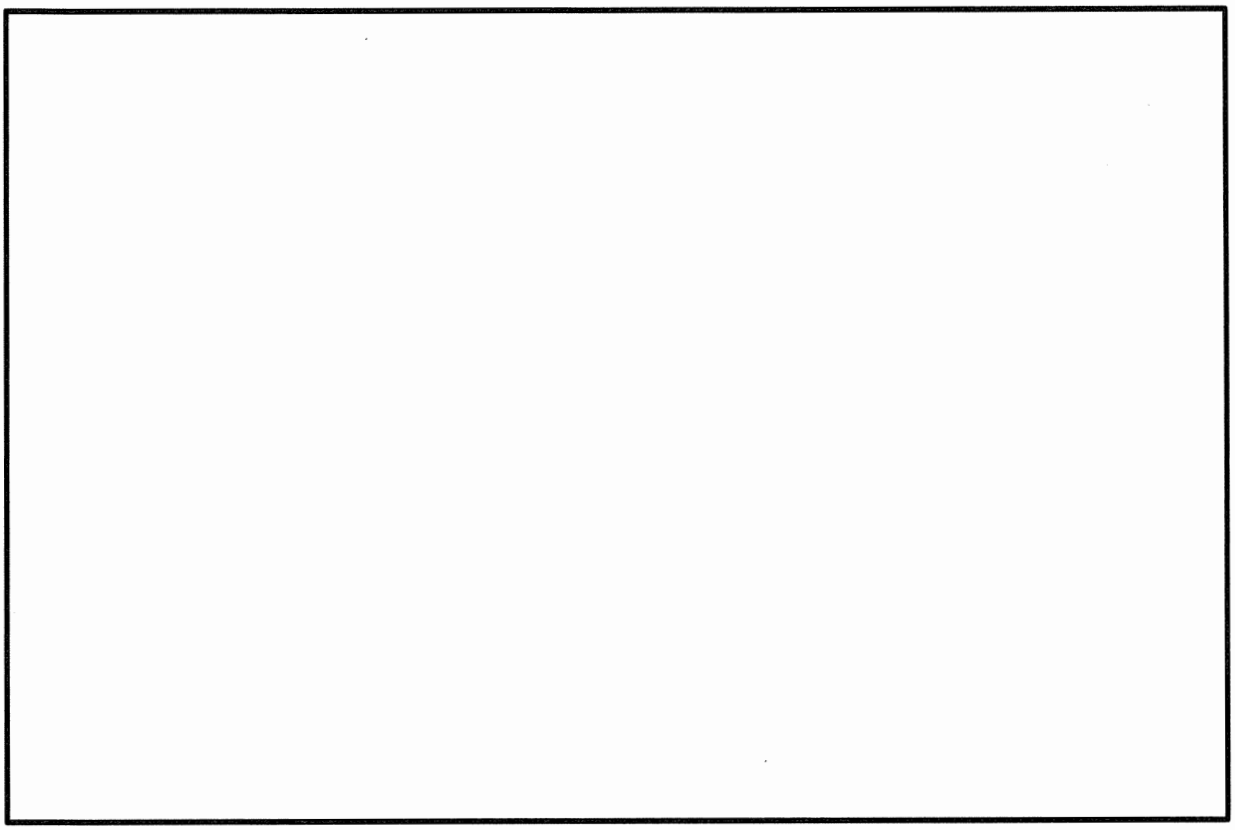


(ロ)-第 B.10 図　特別の試験条件の全体モデル形状図（1/2）（縦断面図）



(単位：mm)

(ロ)-第 B.10 図　特別の試験条件の全体モデル形状図 (2/2)　(横断面図)



（モデル全体）　　（バスケット）　　（燃料集合体領域）

(ロ)-第 B. 11 図　特別の試験条件の全体モデル要素分割図

2. 解析条件

特別の試験条件における熱解析条件を(ロ)-第 B.13 表に示す。火災時は火炎の放射による入熱が主となる。また，太陽熱放射の条件は(ロ)-第 B.6 表に示したとおりである。さらに，各モデルにおいて考慮した解析条件は次のとおりである。

・特別の試験条件における胴内ガス（ヘリウム及び FP ガス）の熱伝導率は，FP ガス放出後の胴内のヘリウム及び FP ガスのモル分率を考慮して，混合気体の熱伝導率の計算式[2)]を用いて算出した。特別の試験条件における胴内ガスの熱伝導率を(ロ)-第 B.14 表に示す。

・塗装は火災中に焼損するため，火災後の容器表面に鋼の酸化面の放射率を用いるとともに，火災後に延焼しないとした。

・各モデルのその他の解析条件は一般の試験条件と同じである。

(ロ)-第 B.13 表　特別の試験条件における熱解析条件

項目			火災前	火災時	火災後
設計崩壊熱量	全体モデル	中央部			
		外周部			
	燃料集合体モデル				
環境条件	周囲温度		38 ℃	800 ℃ (30 分間)	38 ℃
	太陽熱放射		あり	あり	あり
	周囲吸収率		1.0	0.9 (注)	1.0
容器表面	放射率		0.8	0.8	0.64
	吸収率		0.5	0.8 [20)]	1.0 [21)]
緩衝体，トラニオン表面	放射率		0.15	0.8	0.15
	吸収率		0.5 [19)]	0.8 [20)]	1.0 [21)]

(注)火炎の放射率を示す。

(ロ)-第 B.14 表　特別の試験条件における胴内ガスの熱伝導率

温度		熱伝導率 (W/(m·K))
(K)	(℃)	
300	26.85	0.0937
400	126.85	0.115
500	226.85	0.134
600	326.85	0.153

B.5.1.2　試験モデル

該当なし

B.5.2　核燃料輸送物の評価条件

9m 落下試験における輸送物の変形は緩衝体に生じる変形である。解析においては，垂直落下，水平落下及びコーナー落下の変形後の形状を包絡する以下の変形量にて緩衝体をモデル化した。

・頭部垂直落下　：□mm
・底部垂直落下　：□mm
・頭部水平落下　：□mm
・底部水平落下　：□mm
・頭部コーナー落下　：□mm
・底部コーナー落下　：□mm

1m 貫通試験における輸送物の変形は緩衝体，外筒及び側部中性子遮蔽材に生じる変形である。緩衝体は落下時に穴があく可能性があるが，局所的であるため，断熱効果に大きな変化はない。

外筒及び側部中性子遮蔽材の最大変形は直径 150mm の範囲の変形である。この変形は局所的であるため，輸送物の熱的性能に影響を及ぼすことはない。

B.5.3　核燃料輸送物温度

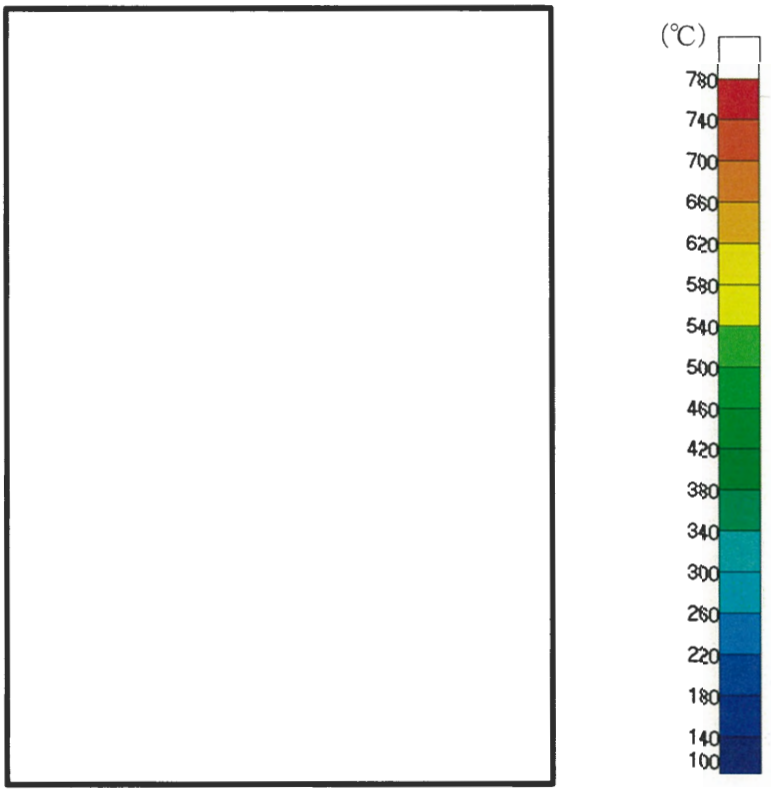
特別の試験条件におけるB.5.1に記載した解析モデル及び条件に基づいて求めた輸送物各部の最高温度及び火災事故発生時を基準とした最高温度算出時間を(ロ)-第 B.15 表に示す。

火災事故発生から30分後の輸送物各部の温度分布を(ロ)-第B.12図に示す。また，燃料集合体温度が最も高くなる火災事故発生から25.1時間後における温度分布を(ロ)-第B.13図及び(ロ)-第B.14図に，さらに，時刻歴温度変化を(ロ)-第B.15図に示す。

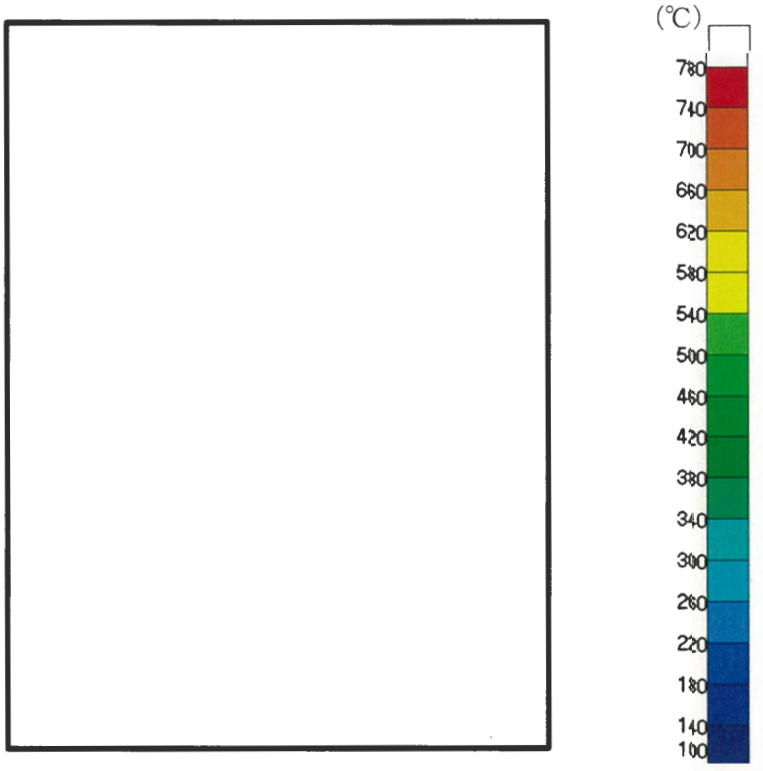
(ロ)-第B.15表　特別の試験条件における最高温度

部位	温度(℃)	最高温度算出時間(h) (注)
緩衝体表面	783	0.500
外筒	714	0.500
下部端板	655	0.500
伝熱フィン	491	0.502
側部中性子遮蔽材	701	0.502
蓋部中性子遮蔽材	138	31.1
底部中性子遮蔽材	160	3.92
胴（底板）	175	2.22
胴（本体部）	206	0.559
胴（フランジ部）	224	0.524
一次蓋	139	31.1
二次蓋	137	5.35
三次蓋	186	1.32
一次蓋ボルト	139	13.3
二次蓋ボルト	137	5.35
三次蓋ボルト	153	3.11
一次蓋金属ガスケット	137	19.1
二次蓋金属ガスケット	135	7.73
三次蓋Oリング	149	3.56
蓋部中性子遮蔽材カバー	137	22.1
底部中性子遮蔽材カバー	161	3.83
トラニオン	742	0.500
バスケット	218	22.1
燃料集合体	254	25.1

(注)火災事故発生時を基準とした最高温度算出時間である。

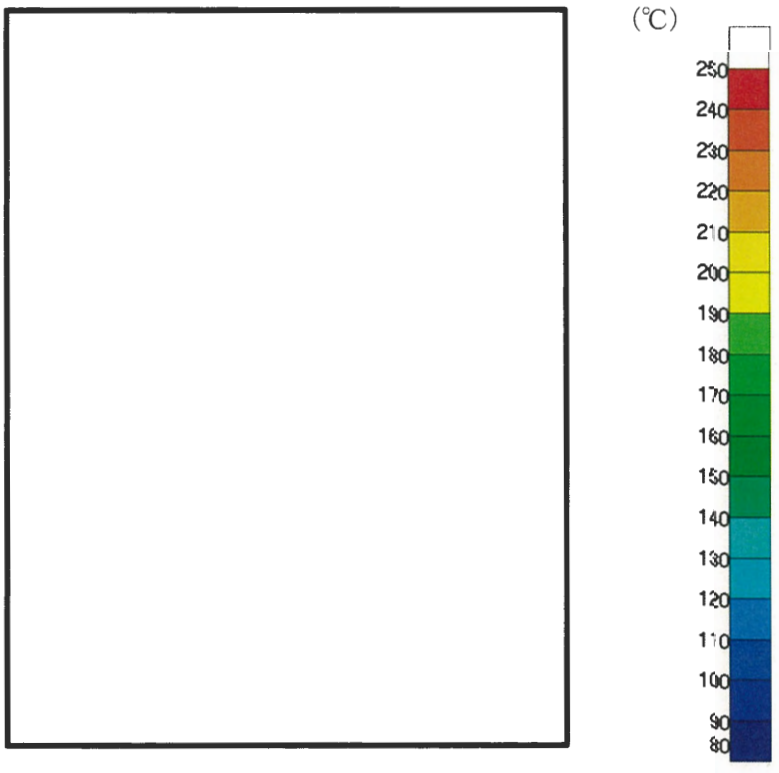


（全体）

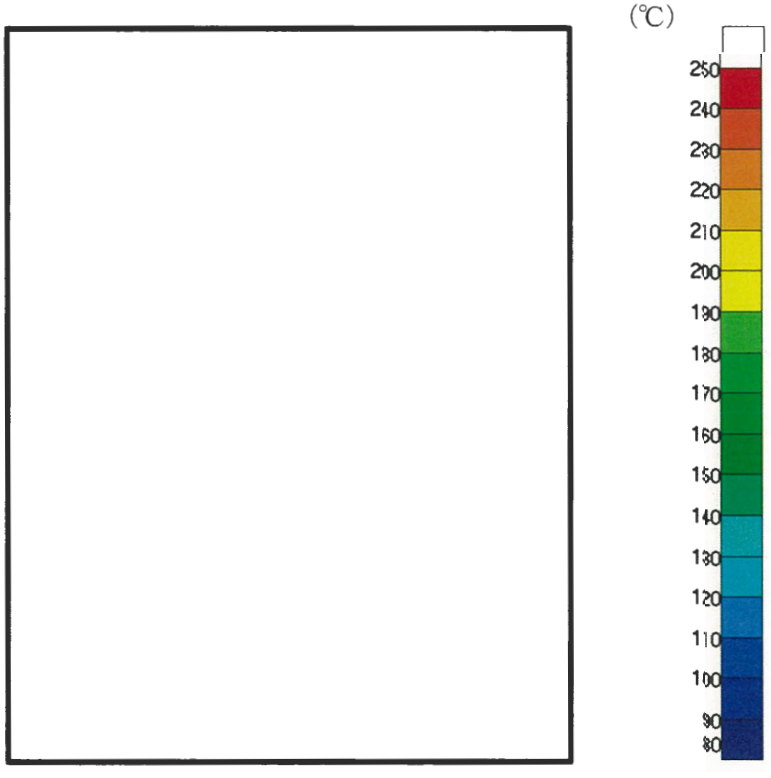


（燃料集合体最高温度位置断面）

(ロ)-第 B. 12 図　特別の試験条件の全体モデル温度分布（火災事故発生から 30 分後）
（燃料最高温度位置断面）

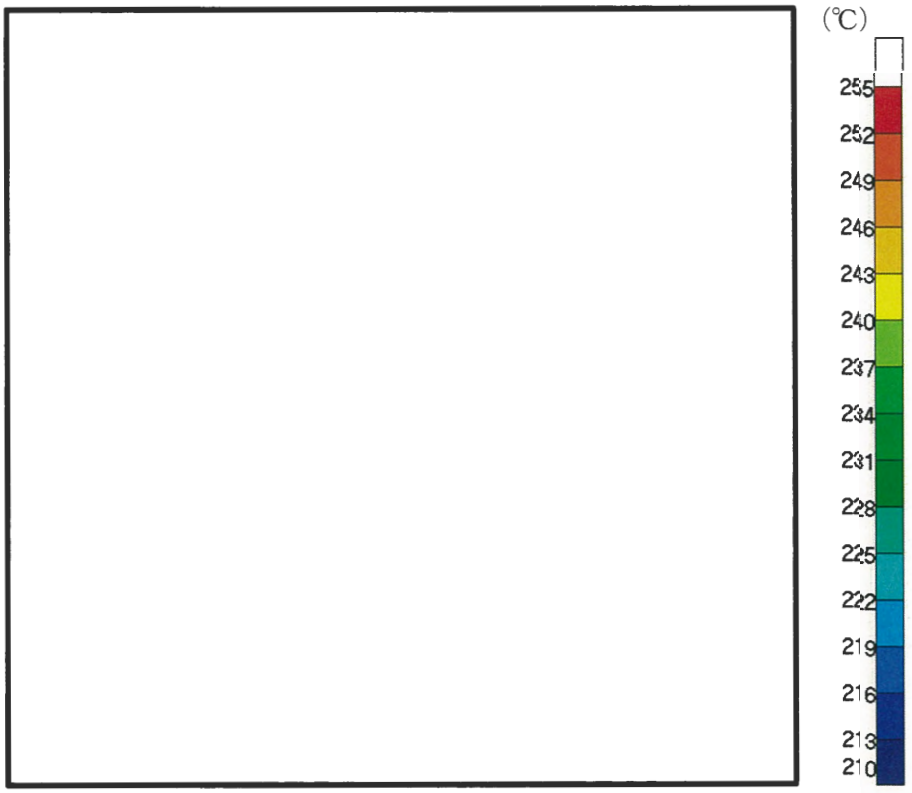


（全体）

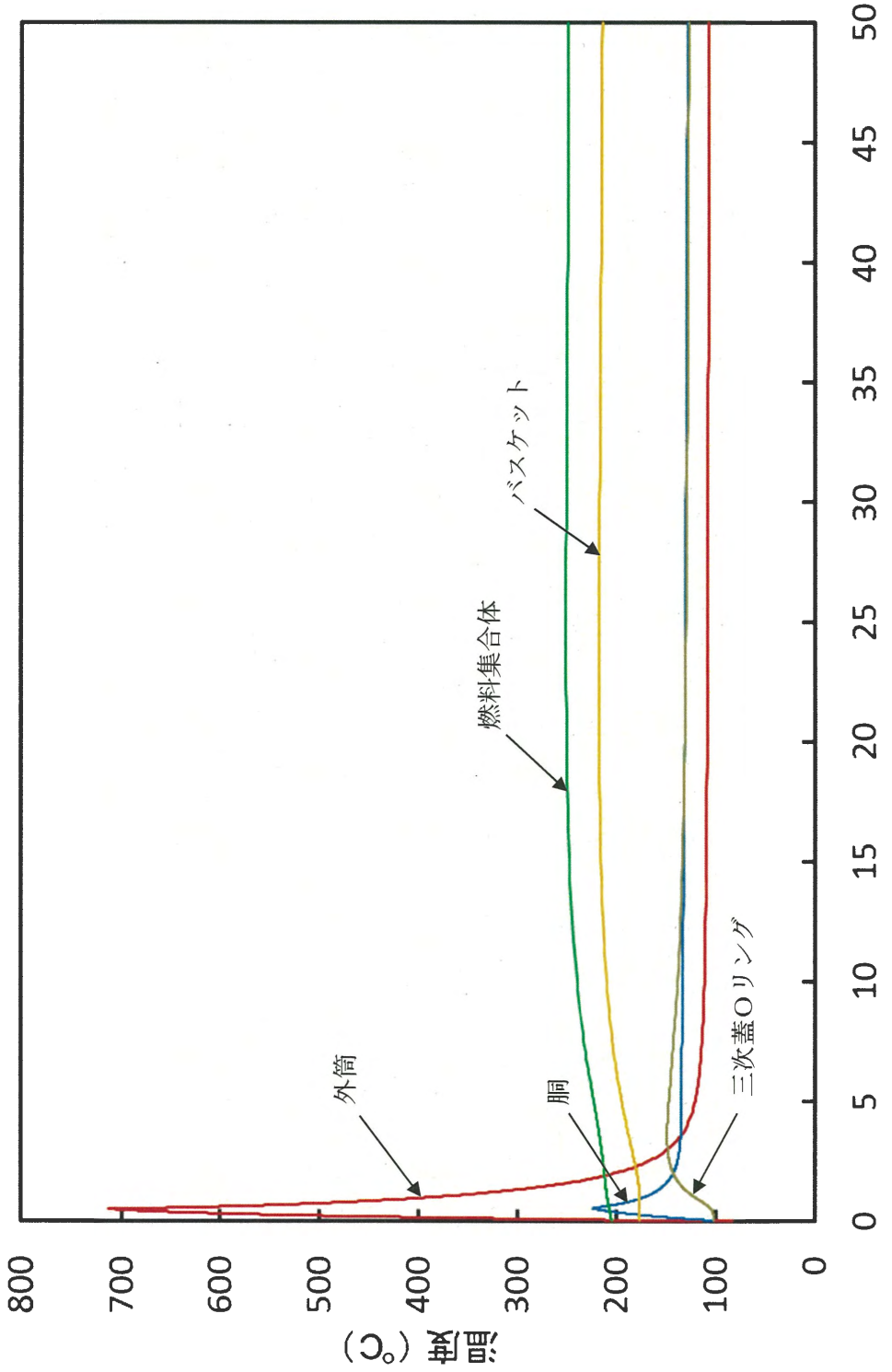


（燃料集合体最高温度位置断面）

(ロ)-第 B.13 図　特別の試験条件の全体モデル温度分布（火災事故発生から 25.1 時間後）
（燃料最高温度位置断面）



(ロ)-第 B.14 図　特別の試験条件の燃料集合体モデルの温度分布（火災事故発生から 25.1 時間後）



(ロ)-第 B. 15 図　特別の試験条件の時刻歴温度変化

B.5.4　最大内圧

輸送物の熱解析から，特別の試験条件における輸送物の胴内圧は，胴内のヘリウム及びFP ガスの温度が最高となる時，つまり燃料集合体の温度が最高となる火災事故発生から25.1時間後に最大となる。また，一二次蓋間圧力は，一二次蓋間ヘリウムの温度が最高となる火災事故発生から 5.87 時間後に最大となる。さらに，二三次蓋間圧力は，二三次蓋間空気の温度が最高となる火災事故発生から 3.56 時間後に最大となる。胴内圧，一二次蓋間圧力，二三次蓋間圧力及び三次蓋－胴内圧力の計算方法及び計算結果を以下に示す。

1. 胴内圧

胴内圧の算出には，全燃料棒の密封機能が失われたと仮定して，燃料棒内に封入されていたヘリウム及び FP ガス放出による圧力上昇を考慮する。特別の試験条件におけるヘリウム及び FP ガスの温度を保守側に燃料集合体最高温度とすると，胴内圧は，以下のとおり求められる。

$$P_0' = \frac{P_0 V_c \frac{T_{0acc}}{T_{0nor}}}{V_c + V_p} + P_{FP}$$

ここで，

P_0'　：特別の試験条件における胴内圧力（MPa）

P_0　：一般の試験条件における胴内圧力（MPa）

P_{FP}　：胴内に放出されたヘリウム及び FP ガス圧力（MPa）

V_c　：胴内体積（m^3）

V_p　：全燃料棒内部の体積（m^3）

T_{0acc}　：特別の試験条件における胴内ガス温度（燃料集合体最高温度）（K）

T_{0nor}　：一般の試験条件における胴内ガス温度（燃料集合体最高温度）（K）

計算条件と計算結果を(ロ)-第 B.16 表に示す。

(ロ)-第 B.16 表　特別の試験条件における胴内圧計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	数値
一般の試験条件における胴内圧力	P_0	MPa	0.0780
胴内に放出されたヘリウム及び FP ガス圧力	P_{FP}	MPa	0.223
胴内体積	V_c	m^3	[redacted]
全燃料棒内部の体積	V_p	m^3	[redacted]
特別の試験条件における胴内ガス温度	T_{0acc}	K	527.15 (254 ℃)
一般の試験条件における胴内ガス温度	T_{0nor}	K	479.15 (206 ℃)
特別の試験条件における胴内圧力	P_0'	MPa	0.307 (0.206 MPa G)

2. 一二次蓋間圧力

特別の試験条件におけるヘリウムの温度を保守側に一二次蓋間ヘリウムの最高温度とすると，一二次蓋間圧力は以下のとおり求められる。

$$P_1' = P_{10} \frac{T_{1acc}}{T_{10}}$$

ここで，

P_1'　：特別の試験条件における一二次蓋間圧力 (MPa)

P_{10}　：一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力 (MPa)

T_{1acc}　：特別の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度 (一二次蓋間ヘリウムの最高温度) (K)

T_{10}　：一二次蓋間ヘリウムの初期温度 (K)

計算条件と計算結果を(ロ)-第 B.17 表に示す。

(ロ)-第 B.17 表　特別の試験条件における一二次蓋間圧力計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	数値
一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力	P_{10}	MPa	0.300
特別の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度	T_{1acc}	K	410.15 (137 ℃)
一二次蓋間ヘリウムの初期温度	T_{10}	K	293.15 (20 ℃)
特別の試験条件における一二次蓋間圧力	P_1'	MPa	0.420 (0.319 MPa G)

3. 二三次蓋間圧力

特別の試験条件における空気の温度を保守側に二三次蓋間空気の最高温度とする。また，一般の試験条件と同様に，保守側に二次蓋の密封性が失われ一二次蓋間ヘリウムが二三次蓋間に漏えいすると仮定すると，二三次蓋間圧力は以下のとおり求められる。

$$P_2' = \frac{P_{10}V_1\frac{T_{1acc}}{T_{10}} + P_{20}V_2\frac{T_{1acc}}{T_{20}}}{V_1 + V_2}$$

ここで，

P_2' ：特別の試験条件における二三次蓋間圧力（MPa）

P_{10} ：一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力（MPa）

P_{20} ：二三次蓋間空気の初期圧力（大気圧）（MPa）

V_1 ：一二次蓋間体積（m^3）

V_2 ：二三次蓋間体積（m^3）

T_{1acc} ：特別の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度（一二次蓋間ヘリウムの最高温度）（K）

T_{10} ：一二次蓋間ヘリウムの初期温度（K）

T_{20} ：三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度（K）

計算条件と計算結果を(ロ)-第 B.18 表に示す。なお，この圧力は三次蓋取付け時の周囲温度が仮に-25℃であった場合には空気の密度が大きくなるため，約 5%増加する可能性があるが，構造評価は保守的にこれを包絡する圧力で評価している。

(ロ)-第 B.18 表　特別の試験条件における二三次蓋間圧力計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	数値
一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力	P_{10}	MPa	0.300
二三次蓋間空気の初期圧力（大気圧）	P_{20}	MPa	0.101325
一二次蓋間体積	V_1	m^3	[redacted]
二三次蓋間体積	V_2	m^3	[redacted]
特別の試験条件における一二次蓋間ヘリウムの温度	T_{1acc}	K	410.15（137 ℃）
一二次蓋間ヘリウムの初期温度	T_{10}	K	293.15（20 ℃）
三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度	T_{20}	K	293.15（20 ℃）
特別の試験条件における二三次蓋間圧力	P_2'	MPa	0.272（0.171 MPa G）

4. 三次蓋－胴内圧力

密封解析に使用する三次蓋－胴内圧力は，設計評価期間中の一次蓋の漏えいを考慮して一般の試験条件の胴内圧を 0.0970MPa と仮定し，また，全燃料棒の密封機能が失われたと仮定して，燃料棒内に封入されていたヘリウム及び FP ガス放出による圧力上昇を考慮する。さらに，一次蓋及び二次蓋の密封性が失われたと仮定し，特別の試験条件における胴内ガスの温度上昇に伴う圧力上昇を考慮すると，三次蓋－胴内圧力は，以下のとおり求められる。

$$P_3' = \frac{P_{10}V_1\frac{T_{0acc}}{T_{10}} + P_{20}V_2\frac{T_{0acc}}{T_{20}} + \left(P_c\frac{T_{0acc}}{T_{0nor}} + P_{FP}\right)\left(V_c + V_p\right)}{V_1 + V_2 + V_c + V_p}$$

ここで，

P_3' ：特別の試験条件における三次蓋－胴内圧力（MPa）

P_{10} ：一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力（MPa）

P_{20} ：二三次蓋間空気の初期圧力（大気圧）（MPa）

P_c ：設計評価期間中の一次蓋の漏えいを考慮した一般の試験条件の胴内圧（MPa）

P_{FP} ：胴内に放出されたヘリウム及び FP ガス圧力（MPa）

V_1 ：一二次蓋間体積（m^3）

V_2 ：二三次蓋間体積（m^3）

V_c ：胴内体積（m^3）

V_p ：全燃料棒内部の体積（m^3）

T_{0acc} ：特別の試験条件における胴内ヘリウム及び FP ガスの温度（燃料集合体最高温度）（K）

T_{0nor} ：一般の試験条件における胴内ヘリウムの温度（燃料集合体最高温度）（K）

T_{10} ：一二次蓋間ヘリウムの初期温度（K）

T_{20} ：三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度（K）

計算条件と計算結果を(ロ)-第 B.19 表に示す。

(ロ)-第 B.19 表　特別の試験条件における三次蓋－胴内圧力計算条件及び計算結果

項目	記号	単位	数値
一二次蓋間ヘリウムの初期充填圧力	P_{10}	MPa	0.300
二三次蓋間空気の初期圧力（大気圧）	P_{20}	MPa	0.101325
設計評価期間中の一次蓋の漏えいを考慮した一般の試験条件胴内圧	P_c	MPa	0.0970
胴内に放出されたヘリウム及び FP ガス圧力	P_{FP}	MPa	0.223
一二次蓋間体積	V_1	m^3	[redacted]
二三次蓋間体積	V_2	m^3	[redacted]
胴内体積	V_c	m^3	[redacted]
全燃料棒内部の体積	V_p	m^3	[redacted]
特別の試験条件における胴内ヘリウム及び FP ガスの温度	T_{0acc}	K	527.15（254 ℃）
一般の試験条件における胴内ヘリウムの温度	T_{0nor}	K	479.15（206 ℃）
一二次蓋間ヘリウムの初期温度	T_{10}	K	293.15（20 ℃）
三次蓋取付け時における二三次蓋間空気の初期温度	T_{20}	K	293.15（20 ℃）
特別の試験条件における三次蓋－胴内圧力	P_3'	MPa	0.330（0.229 MPa G）

B.5.5　最大熱応力

特別の試験条件において輸送物に生じる熱応力は，(ロ)章 A.6.3 で説明したように容器各部位が熱膨張を拘束しあうことで生じ，最大熱応力については，温度差が最大になる火災事故発生から 30 分後に生じる。

ただし，(ロ)章 A.6.3 で示したとおり，容器に生じる最大熱応力は小さく，容器の構造健全性に問題はない。

B.5.6　結果の要約及びその評価

特別の試験条件における熱解析結果の要約及びその評価を(ロ)-第 B.20 表に示す。本輸送物の状態は以下のとおりであり，損傷については他の解析に反映している。

・密封境界となる三次蓋Oリングの最高温度は 186℃であり，使用限度 48 時間における使用可能温度である 300℃を超えることはない。したがって，特別の試験条件において密封性能が失われることはない。

・蓋部中性子遮蔽材及び底部中性子遮蔽材の最高温度はそれぞれ 138℃及び 160℃であり，使用可能温度 180℃を超えることはない。一方，側部中性子遮蔽材の最高温度は 701℃であり，使用可能温度を超えるが全て失われることはない。

・遮蔽解析においては，中性子遮蔽材の欠損を密度減少量として考慮する。なお，側部中性子遮蔽材だけでなく，蓋部中性子遮蔽材及び底部中性子遮蔽材についても密度減少を考慮している。

・臨界解析においては，外筒までをモデル化し，中性子遮蔽材は全て失われるとしてモデル化しないことにより，中性子吸収効果を無視し，保守側の解析を行う。

・その他の構成材料については，輸送物の健全性に対し悪影響を及ぼす温度には到達しない。

(ロ)-第 B.20 表　特別の試験条件における熱解析結果の要約及びその評価（1/2）

項目	結果（℃）	基準値（℃）	評価	他の解析への条件
最高温度				
燃料集合体	254	—	—	—
バスケット	218	250 [17]	基準値以下	—
中性子遮蔽材	701 (注 1)	180 [15]	蓋部，底部：基準値以下 (注 2) 側部：基準値を超過 (注 2)	遮蔽解析では密度減少量として考慮 臨界解析では保守側にモデル化しない
二次蓋金属ガスケット	137 (注 3)	190 [14]	基準値以下	—
三次蓋Oリング	186 (注 4)	300 [12]	基準値以下	—
胴	224	350 [18]	基準値以下	構造解析では [redacted]℃を使用 (注 5)

(注 1)蓋部中性子遮蔽材，底部中性子遮蔽材及び側部中性子遮蔽材のうち，最高となる温度

(注 2)蓋部中性子遮蔽材及び底部中性子遮蔽材の最高温度はそれぞれ 138℃及び 160℃であり，使用可能温度 180℃を超えることはない。一方，側部中性子遮蔽材の最高温度は 701℃であり，使用可能温度を超えるが全て失われることはない。

(注 3)保守側に評価するため，二次蓋の最高温度とする。

(注 4)保守側に評価するため，三次蓋の最高温度とする。

(注 5)構造解析における熱応力算出では，容器全体の温度分布を入力するが，(ロ)-第 B.20 表には，許容値及び内圧計算に使用する温度を代表として示している。

(ロ)-第 B.20 表　特別の試験条件における熱解析結果の要約及びその評価 (2/2)

項目	結果 (MPa)	基準値 (MPa)	評価	他の解析への条件
最大内圧				
胴内圧	0.307 (0.206 MPa G)	—	—	構造解析では 0.250 MPa G を使用
一二次蓋間圧力	0.420 (0.319 MPa G)	—	—	構造解析では 0.340 MPa G を使用
二三次蓋間圧力	0.272 (0.171 MPa G)	—	—	構造解析では 0.270 MPa G を使用
三次蓋－胴内圧力	0.330 (0.229 MPa G)	—	—	密封解析では 0.330 MPa を使用

B.6　付属書類

B.6.1　解析に用いた対流熱伝達率について

B.6.1.1　全体モデルに用いた対流熱伝達率

1. 輸送物表面と周囲の熱伝達率

(1) 外筒表面の自然対流熱伝達率

外筒表面の自然対流熱伝達率は，水平円筒表面の自然対流熱伝達率を表わす次のSchutzの式[2)]を用いる。

$$h = 0.1\lambda\left(\frac{g\beta\,\Delta t}{\nu^2}P_r\right)^{1/3}$$

ここで，

h　：熱伝達率（W/(m²･K)）

λ　：熱伝導率（W/(m･K)）

g　：重力加速度（9.80665m/s²）

β　：体積膨張係数（K⁻¹）

ν　：動粘性係数（m²/s）

P_r　：プラントル数

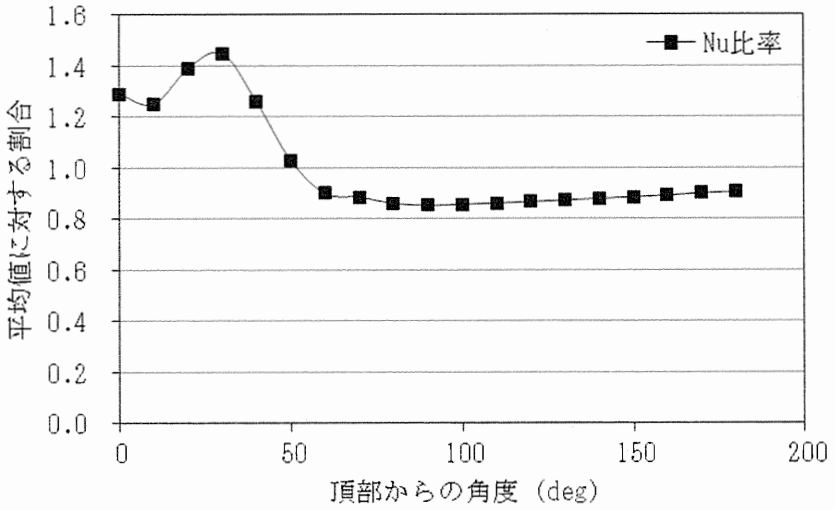
Δt　：温度差（K）

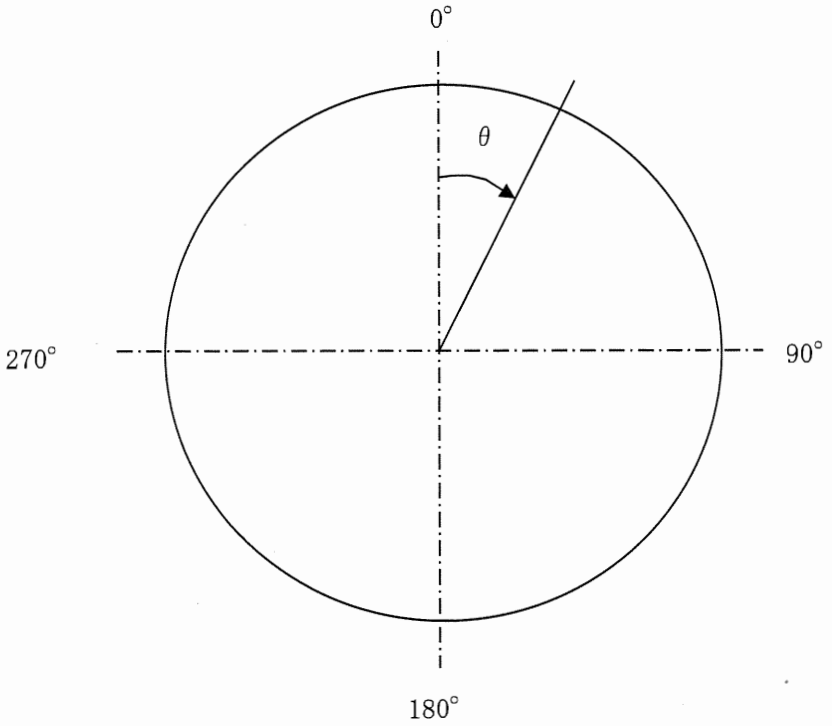
各温度に対して求めた熱伝達率を(ロ)-第B.付1表に示す。

ここで，実際に用いた熱伝達率としては，(ロ)-第B.付1図に示される水平円筒外表面の周方向分布を考慮して，0°～180°の平均値に対する割合のうち，90°～180°の割合を平均化して算出した係数（0.87）を(ロ)-第B.付1表の値に乗じた値を保守側に設定した。ただし，火災時に対しては入熱が多くなるよう(ロ)-第B.付1表の値を設定した。

(ロ)-第B.付1表　外筒表面の自然対流熱伝達率

温度(℃)	熱伝達率(W/(m²･K))
-20	$1.33\Delta t^{1/3}$
0	$1.26\Delta t^{1/3}$
20	$1.20\Delta t^{1/3}$
100	$1.02\Delta t^{1/3}$
200	$0.863\Delta t^{1/3}$
300	$0.760\Delta t^{1/3}$
400	$0.682\Delta t^{1/3}$
600	$0.577\Delta t^{1/3}$
800	$0.500\Delta t^{1/3}$





(ロ)-第 B.付 1 図　外表面における自然対流熱伝達率の周方向分布 [22)]

(2) 緩衝体円筒表面の自然対流熱伝達率

緩衝体円筒面に対しては外筒表面の自然対流熱伝達率にて使用したSchutzの式を用いる。(ロ)-第B.付1表に示す値に周方向分布を考慮した係数0.87を乗じて保守的な値を設定した。ただし，火災時に対しては入熱が多くなるように(ロ)-第B.付1表の値を設定した。

(3) 緩衝体垂直面の自然対流熱伝達率

緩衝体垂直表面の自然対流熱伝達率は，垂直平板に対する次のJakobの式[23]を用いる。

$$h = 0.129\lambda\left(\frac{g\beta\Delta t}{\nu^2}P_r\right)^{1/3}$$

ここで，

h　：熱伝達率（W/(m²･K)）

λ　：熱伝導率（W/(m･K)）

g　：重力加速度（9.80665m/s²）

β　：体積膨張係数（K⁻¹）

ν　：動粘性係数（m²/s）

P_r　：プラントル数

Δt　：温度差（K）

各温度に対して求めた熱伝達率を(ロ)-第B.付2表に示す。

(ロ)-第B.付2表 垂直面の自然対流熱伝達率

温度(℃)	熱伝達率(W/(m²･K))
-20	$1.72\Delta t^{1/3}$
0	$1.63\Delta t^{1/3}$
20	$1.55\Delta t^{1/3}$
100	$1.31\Delta t^{1/3}$
200	$1.11\Delta t^{1/3}$
300	$0.980\Delta t^{1/3}$
400	$0.880\Delta t^{1/3}$
600	$0.744\Delta t^{1/3}$
800	$0.645\Delta t^{1/3}$

(4) 緩衝体と輸送容器本体との間の熱伝達

緩衝体と輸送容器本体との間には取合いの関係上ギャップがあり，この間の熱伝達は空気の熱伝導及び放射によるものとした。

B.6.2 混合気体の熱伝導率の計算式について

特別の試験条件における胴内ガスの熱伝導率は，ヘリウム及びFPガス放出後の胴内のヘリウム及びFPガスのモル分率を考慮して，混合気体の熱伝導率の計算式[2)]を用いて算出する。なお，FPガスは生成量の多いキセノンとした。

$$\lambda_m = \frac{\lambda_1}{1+\phi_{12}\frac{x_2}{x_1}} + \frac{\lambda_2}{1+\phi_{21}\frac{x_1}{x_2}}$$

$$\phi_{ij} = \frac{1}{4}\left\{1+\left[\frac{\eta_i}{\eta_j}\left(\frac{M_j}{M_i}\right)^{3/4}\frac{1+\frac{S_i}{T}}{1+\frac{S_j}{T}}\right]^{1/2}\right\}^2\left(\frac{1+\frac{S_{ij}}{T}}{1+\frac{S_i}{T}}\right)$$

$S_i = 1.5T_{bi}$

$S_{ij} = \sqrt{S_i S_j}$

ここで，

λ_m ：混合ガスの熱伝導率 (W/(m·K))

λ_1 ：ヘリウムの熱伝導率 (W/(m·K))

λ_2 ：核分裂生成ガスの熱伝導率 (W/(m·K))

x_1 ：ヘリウムのモル分率

x_2 ：核分裂生成ガスのモル分率

η_1 ：ヘリウムの粘性率 (Pa·s)

η_2 ：核分裂生成ガスの粘性率 (Pa·s)

M_1 ：ヘリウムの分子量 (g/mol)

M_2 ：核分裂生成ガスの分子量 (g/mol)

S ：Sutherland定数

T ：胴内ガスの温度 (K)

T_{b1} ：ヘリウムの標準沸点 (K)

T_{b2} ：核分裂生成ガスの標準沸点 (K)

計算条件と計算結果を(ロ)-第B.付3表に示す。

(ロ)-第B.付3表　胴内ガスの熱伝導率計算条件及び計算結果

項目		記号	単位	T：温度(K)			
				300	400	500	600
熱伝導率	ヘリウム	λ_1	W/(m·K)	0.1527	0.1882	0.2212	0.2523
	キセノン	λ_2	W/(m·K)	0.00562	0.00728	0.00881	0.01025
モル分率	ヘリウム	x_1	−	0.840			
	キセノン	x_2	−	0.160			
粘性率	ヘリウム	η_1	μPa·s	19.93	24.29	28.36	32.21
	キセノン	η_2	μPa·s	23.30	30.29	36.80	42.81
分子量	ヘリウム	M_1	g/mol	4.002602			
	キセノン	M_2	g/mol	131.293			
標準沸点	ヘリウム	T_{b1}	K	4.21			
	キセノン	T_{b2}	K	164.1			
混合気体の熱伝導率		λ_m	W/(m·K)	0.0937	0.115	0.134	0.153

B. 6. 3　近接防止金網の温度評価について

以下の考え方に基づき近接防止金網の温度を評価した。（(ロ)-第 B. 付 2 図参照）

①近接防止金網温度に対応する規則要件は 38℃の日陰における近接可能な容器表面最高温度を 85℃以下とすることであるから，太陽熱放射を考慮しない。

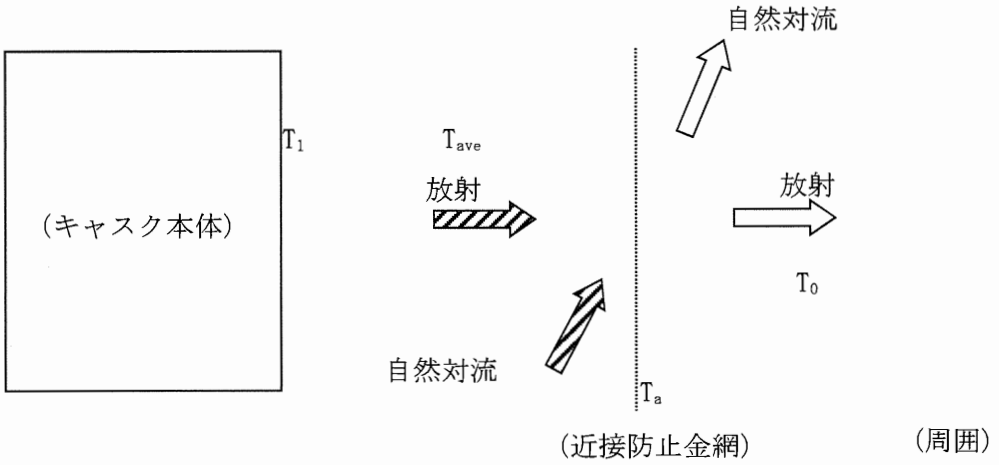
②近接防止金網は，当該輸送容器を架台上に設置した際に近接可能な外筒領域及びトラニオン領域を覆うように取り付けられている。

③近接防止金網は容器周りに垂直平板状に設けられているため，厚さを持たない板として考える。

④近接防止金網は輸送容器と周囲の自然対流を阻害しない形状とすることにより熱伝達を干渉しないものと仮定する。したがって，近接防止金網温度を求めるために使用する輸送容器表面の温度は一般の試験条件（人の近づきうる表面の最高評価条件）で得られた結果を用いる。

⑤温度を求めるに当たっては，自然対流と放射を考慮する。自然対流熱伝達率は垂直平板の自然対流熱伝達率を用いて評価する。これらを考慮して，容器から近接防止金網への入熱量と近接防止金網から大気への放熱量がつりあうように近接防止金網温度を定める。

⑥容器と近接防止金網間にある空気の自然対流の評価において，容器と近接防止金網の間の空気の温度は近接防止金網温度と容器表面温度の平均温度であるとする。



(ロ)-第 B. 付 2 図　近接防止金網周りの伝熱モデル

以上より，キャスク本体から近接防止金網への入熱量 Q_{in} 及び近接防止金網から大気への放熱量 Q_{out} は，それぞれ以下の式で表わされ，近接防止金網温度 T_a は，$Q_{in}=Q_{out}$ を満たす T_a を求める。

$$\begin{cases} Q_{in}=h_1(T_{ave}-T_a)+\sigma F_\varepsilon\{(T_1+273.15)^4-(T_a+273.15)^4\} \\ Q_{out}=h_0(T_a-T_0)+\sigma\ \varepsilon_2\{\ (T_a+273.15)^4-(T_0+273.15)^4\} \\ F_\varepsilon=1/\{(1/\varepsilon_1)+(1/\varepsilon_2)-1\} \end{cases}$$

ここで，

Q_{in} ：近接防止金網への入熱量（W/m^2）

Q_{out} ：近接防止金網から大気への放熱量（W/m^2）

h_1 ：入熱の境界膜温度における垂直平板の自然対流熱伝達率（$W/(m^2\cdot K)$）
（(ロ)-第 B.付 4 表参照）

h_0 ：放熱の境界膜温度における垂直平板の自然対流熱伝達率（$W/(m^2\cdot K)$）
((ロ)-第 B.付 4 表参照）

T_1 ：キャスク本体外表面温度（103℃）
（キャスク本体外表面において最も温度が高いトラニオンの温度）

T_{ave} ：キャスク本体外表面と近接防止金網の平均温度（℃）

T_a ：近接防止金網温度（℃）

T_0 ：周囲温度（38℃）

σ ：ステファン・ボルツマン定数（$5.670367\times10^{-8}W/(m^2\cdot K^4)$）

F_ε ：形態係数

ε_1 ：キャスク本体外表面の放射率（0.8）

ε_2 ：近接防止金網の放射率（0.33：アルミニウムの酸化面）

(ロ)-第 B.付 4 表　垂直平板の自然対流熱伝達率

境界膜温度 (℃)	垂直平板の自然対流熱伝達率 ($W/(m^2\cdot K)$)
20	$1.55\Delta T^{1/3}$
100	$1.31\Delta T^{1/3}$
200	$1.11\Delta T^{1/3}$

入熱の境界膜温度：T_{ave}

放熱の境界膜温度：$(T_a+T_0)/2$

容器表面各部位近傍に設けられた近接防止金網温度を(ロ)-第B.付5表に示す。容器表面に設けられた近接防止金網の温度は基準値（85℃）より低い。

(ロ)-第B.付5表　近接防止金網の温度評価結果

評価条件（℃）		評価結果（℃）
キャスク本体外表面温度（T_1）	周囲温度（T_0）	近接防止金網温度（T_a）
103	38	66

B.6.4　バスケットサポートの伝熱パスについて

バスケットサポートは，バスケットと胴の隙間の伝熱機能を補うため，バスケットと胴の間に設置されている。熱解析モデルにおける伝熱形態を(ロ)-第B.付3図に示す。

バスケットサポートは，バスケットプレートとボルトで締結しているが，全面接触しないと考えられることから，熱抵抗として，バスケットサポートとバスケットプレートの間に厚み0.5mmの均一なヘリウム層を解析上模擬し，式①により算出した熱伝達率を設定している（ふく射は保守側に考慮しない）。

$$h=\lambda/0.5 \quad \cdots\cdots \text{式①}$$

ここで，

h　：接触熱伝達率（W/(mm²・K)）

λ　：ヘリウムの熱伝導率（W/(mm・K)）

一方で，バスケットサポートは押出形材であることから，JIS H 0410に記載の普通級の平らさ（0.008×224=1.792mm以下）の仕様にて製作される。よって，最大隙間は解析条件0.5mmより大きくなる可能性があるが，ボルト締結により一部は接触することから，式②により接触熱伝達率が計算できる。

$$h=\left(\lambda_{Al}\times\alpha+\lambda_{He}\times(1-\alpha)\right)/d \quad \cdots\cdots \text{式②}$$

ここで，

h　：接触熱伝達率（W/(mm²・K)）

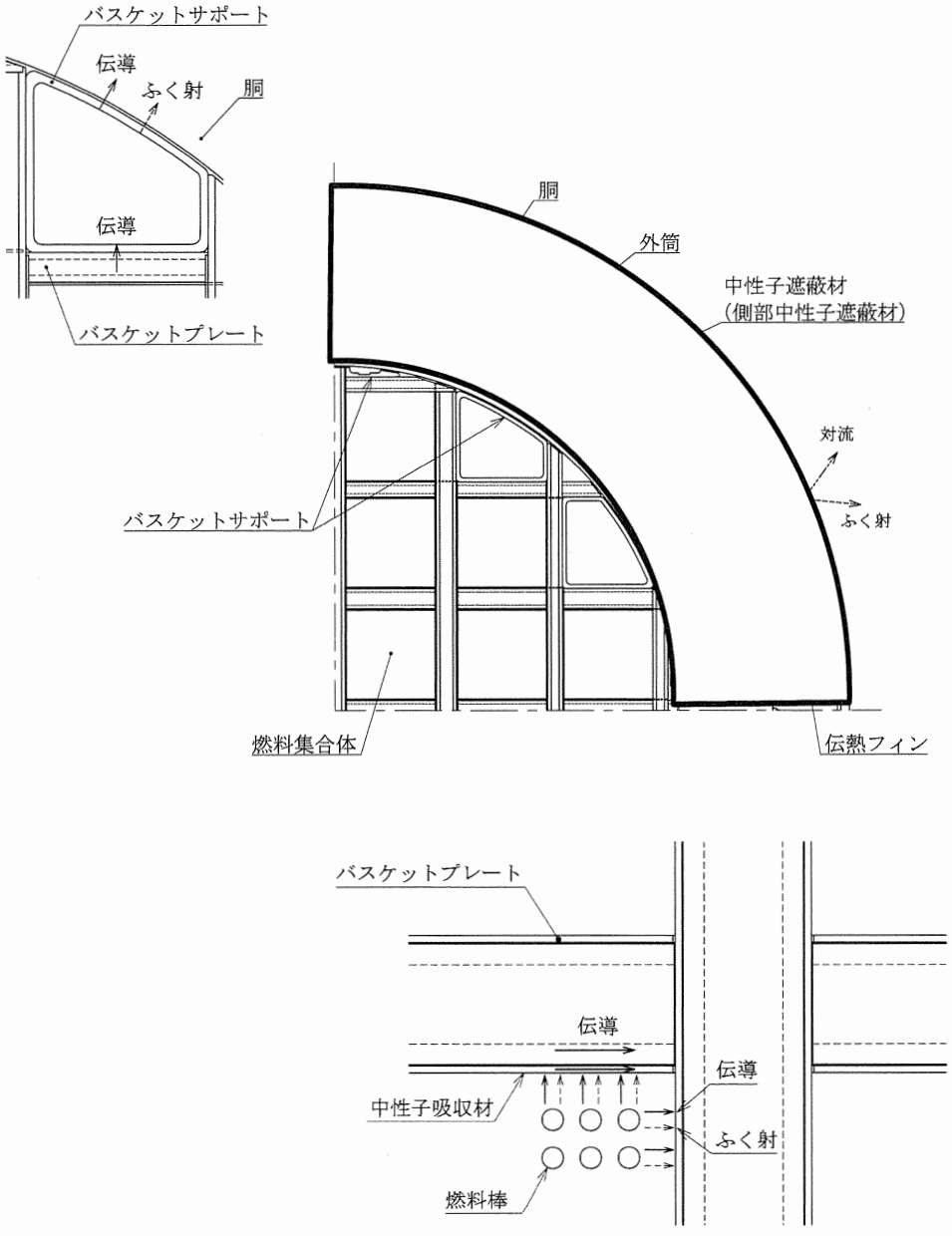
λ_{Al}　：バスケットサポートの熱伝導率（W/(mm・K)）

λ_{He}　：ヘリウムの熱伝導率（W/(mm・K)）

α　：バスケットサポートとバスケットプレートの接触面積率（-）

d　：バスケットサポートとバスケットプレートの最大隙間（mm）

式②にて，最大隙間 d を製作仕様の平らさの最大値(1.792mm)を切り上げた 2mm とした場合，接触面積比率 α が 1%以上であれば，接触熱伝達率 h が式①の算出値よりも大きくなる。バスケット組立時には，バスケットサポートとバスケットプレートは 5 箇所に渡ってボルトで締結し，前述のとおり JIS H 0410 に則った平らさで製作されるとともにバスケットプレート及びバスケットサポートはあらかじめ定められた公差内の寸法で製作されることから接触面積比率は確実に 1%以上確保されるため，本解析の条件設定は，実際の製品よりも伝熱性能を低く設定しており，燃料被覆管及びバスケットプレートの温度を保守側に評価可能なモデルといえる。



(ロ)-第 B. 付 3 図　伝熱形態図

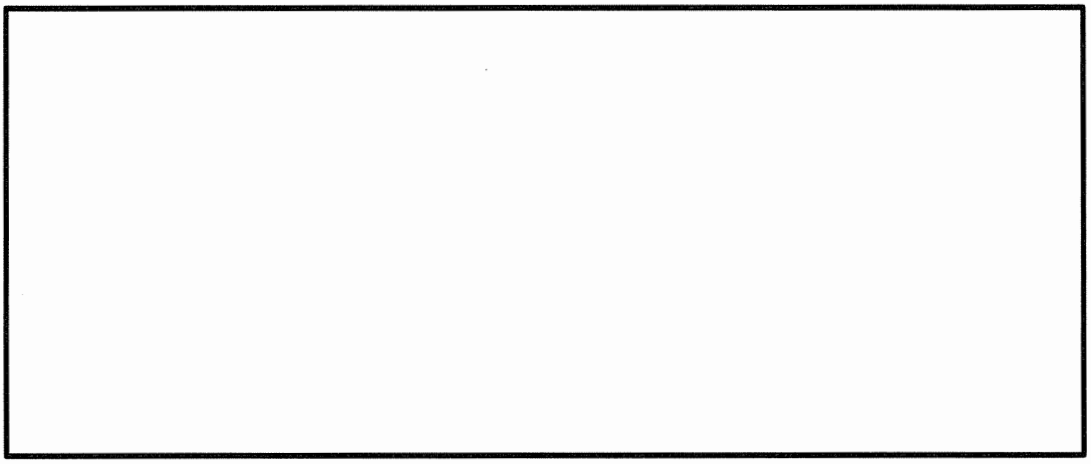
B.6.5　伝熱フィンと胴・外筒の接続について

伝熱フィン溶接部の構造及び熱解析モデルを(ロ)-第B.付4図に示す。

伝熱フィンは，側部中性子遮蔽材の伝熱機能を補うために，胴と外筒の間に設置され，胴と外筒に溶接されている。

熱解析において，伝熱フィンと外筒及び胴の溶接状態については，(ロ)-第B.付6表に示すとおり保守側に設定している。

なお，製造時にこれらの接続状態が確保されていることについては，溶接部の外観検査によって確認する。



（伝熱フィン溶接部の構造）　　（熱解析モデル）

(ロ)-第B.付4図　伝熱フィン溶接部の構造及び熱解析モデル

(ロ)-第B.付6表　熱解析モデルにおける伝熱フィンの接続状態

伝熱フィンの溶接部	熱解析モデルにおける設定
胴（外面）-伝熱フィン	溶接部で胴（外面）及び外筒（内面）と接続していると設定。ただし，実際は両側溶接に対し，保守的に，鋭角側の溶接部のみをモデル化し，溶接部ののど厚を最小値 [redacted] とする。
伝熱フィン-外筒（内面）	

B. 6. 6　特別の試験条件における中性子遮蔽材の焼損割合について

特別の試験条件における 800℃/30 分の火災試験での中性子遮蔽材の焼損について，中性子遮蔽材の耐火試験を実施している[24]。試験供試体には，(ロ)-第 B. 付 5 図に示す φ150mm の貫通孔を模擬した供試体 1 と模擬しない供試体 2 を用いた。いずれの供試体も上面以外の面は断熱材で，上面は貫通孔を除いて実機同様に鋼板で覆っている。

800℃/30 分の耐火試験で炉から取り出した直後の状況を(ロ)-第 B. 付 6 図に示す。貫通孔を模擬した供試体 1 は炉から取り出した直後には燃焼状態が続いたが，やがて中性子遮蔽材に含まれる水酸化アルミニウムの効果により自然に炎が消えたことを確認している。

試験後の中性子遮蔽材の供試体断面を(ロ)-第 B. 付 7 図に示す。貫通孔を模擬した(a)の供試体 1 では，直接火炎にさらされた φ150mm の貫通孔付近で炭化が進み，空隙も生じているため，それらを含め最大 φ250mm 付近まで焼損していると考えられる。一方，鋼板に覆われていた上面の損傷は比較的影響が少なく焼損した厚さは最大で 17mm であった。

貫通孔を模擬しない(b)の供試体 2 では，中性子遮蔽材の表面が一部焼損していたが，健全な部分が大部分を占めており，溶融などの形状変化も見られなかった。焼損した厚さは初期の試験体寸法 160mm と比較して最大で 28mm であったことから，割合にして約 18%であった。

特別の試験条件（800℃/30 分火災試験）の熱解析結果より，火災後 30 分の温度分布を示す(ロ)-第 B. 付 8 図において，側部中性子遮蔽材が使用可能温度の 200℃を超える箇所の割合を算出したところ，約 32%であった。ここで，200℃は，同等品(NS-4-FR)の示差熱分析の結果，200℃程度の温度までは有意な化学変化及び形態変化が起こらないことが確認されている温度である。[25]

以上から，(ロ)章 D 遮蔽解析における特別の試験条件における中性子遮蔽材の焼損割合について，密度を半分（50%）にすることは耐火試験結果及び熱解析結果を包絡する十分に保守的な設定である。

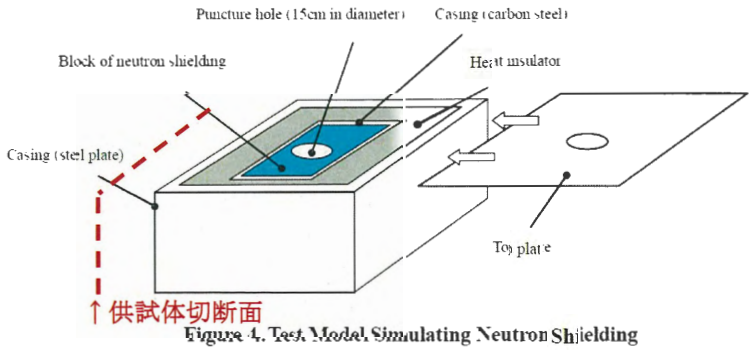
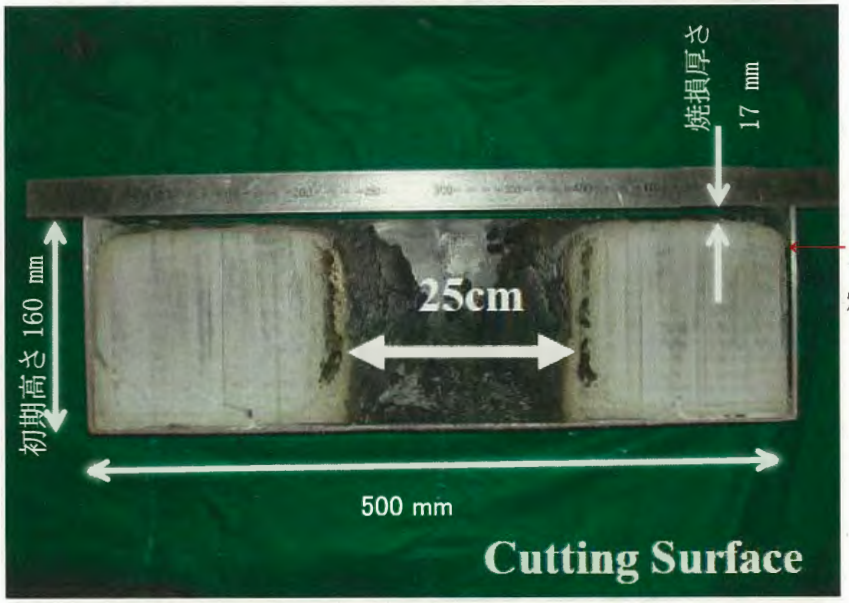


Figure 4. Test Model Simulating Neutron Shielding

(ロ)-第 B. 付 5 図　中性子遮蔽体耐火試験供試体(貫通孔あり)

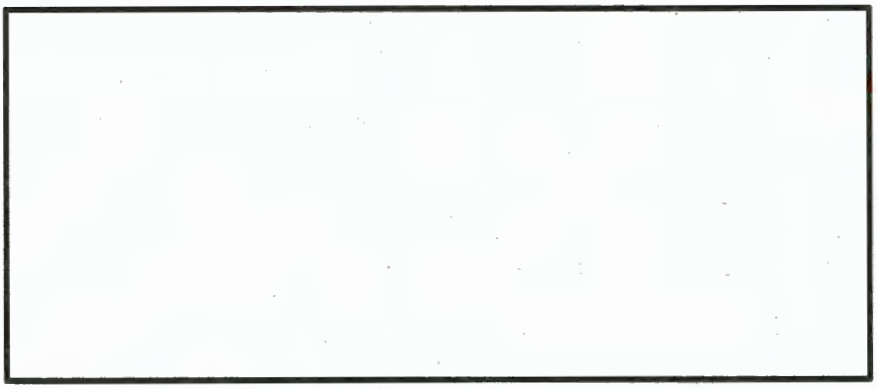
(ロ)-第 B. 付 6 図 中性子遮蔽体耐火試験 取出し直後



焼損した表面

焼損厚さ：17mm

(a) 供試体 1 （貫通孔あり）



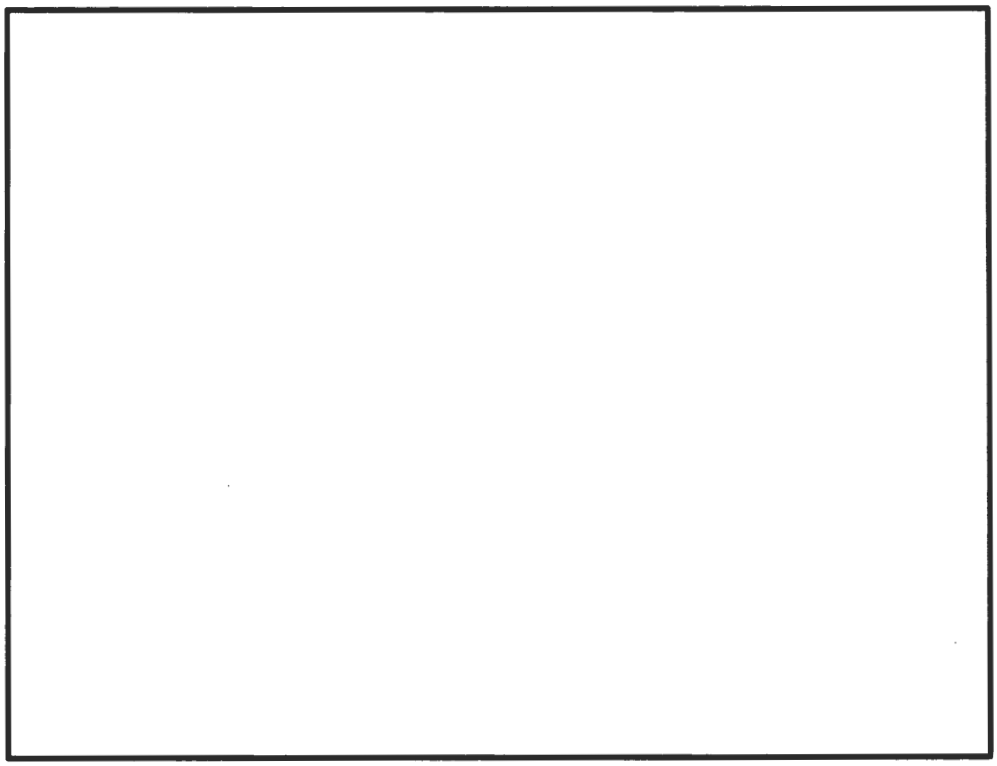
焼損した表面

初期 H-残存 H＝焼損 H

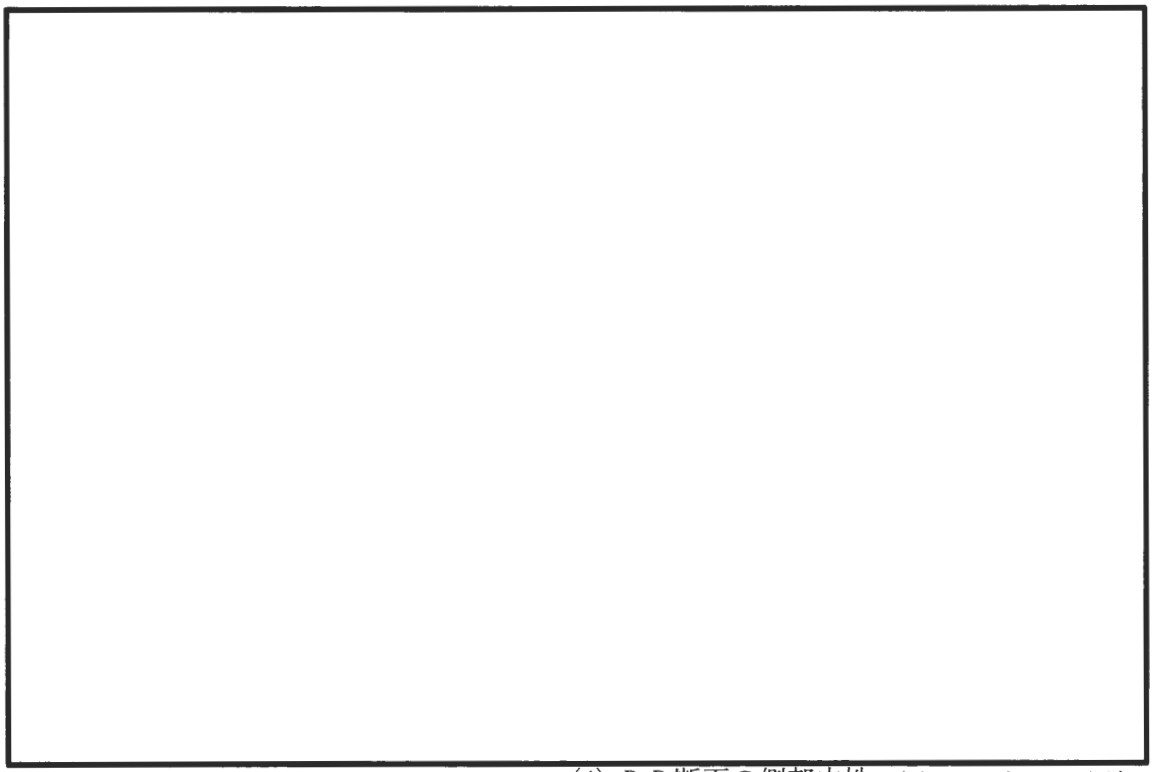
(160-a-b＝28mm)

(b) 供試体 2 （貫通孔なし）

(ロ)-第 B. 付 7 図 耐火試験後の中性子遮蔽材の断面状況



(1) 鳥瞰図　　(2) 45° 縦断面図



(4) B-B 断面の側部中性子遮蔽材温度分布（伝熱フィン近傍）

(5) C-C 断面の側部中性子遮蔽材温度分布（伝熱フィン間）

(ロ)-第 B. 付 8 図　側部中性子遮蔽材の温度分布（火災事故発生から 30 分後）

B.6.7 参考文献

1) Dassault Systèmes, “ABAQUS Analysis User's Manual(6.12)”, (2012).

2) (一社)日本機械学会, 「伝熱工学資料 改訂第4版」, (1986).

3) American Society of Mechanical Engineers, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section Ⅱ Part D Properties (Metric)”, (2010).

4) 中性子吸収材メーカ資料

5) (公財)原子力安全研究協会, 「軽水炉燃料のふるまい 改訂第5版」, (2013).

6) D. L. Hagrman, G. A. Reymann, R. E. Mason, “MATPRO-Version 11(Rev.2) A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior,” EG&G Idaho Inc., (1981).

7) BISCO PRODUCTS, Inc., “NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material”, (1986).

8) 木材工業ハンドブック編集委員会, 「木材工業ハンドブック 改訂3版」, (1982).

9) (公社)日本化学会, 「化学便覧 基礎編 改訂5版」, (2004).

10) 三菱重工業(株), 「化学試験報告書 エポキシ系樹脂の熱特性測定結果」, (2006).

11) 産業技術センター, 「複合材料技術集成」, (1976).

12) (一財)電力中央研究所, 「輸送キャスク密封装置の耐熱限界性能の評価」, (1998).

13) (一財)電力中央研究所, 「平成20年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(中間貯蔵設備等長期健全性等試験のうち貯蔵設備長期健全性等調査) 報告書」, (2009).

14) (独)原子力安全基盤機構, 「金属キャスク貯蔵技術確証試験 報告書 1/3 最終報告」, (2004).

15) Y. Momma, et al., “Evaluation Test on the Thermal Stability of Resin as Neutron Shielding Material for Spent Fuel Transport Cask”, The 12th International Conference on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (1998).

16) (独)原子力安全基盤機構, 「平成18年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料長期健全性等確証試験に関する試験最終成果報告書)」, (2007).

17) 三菱重工業(株), 「型式設計特定容器等の型式指定申請書 本文及び添付書類の一部補正について」, (2017).

18) (一社)日本機械学会,「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格(JSME S FA1-2007)」, (2007).

19) F. P. Incropera, D. P. Dewitt, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Third Edition”, John Wiley & Sons, Inc., (1990).

20) 平成二年十一月二十八日科学技術庁告示第五号, 「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示」.

21) (一社)日本機械学会，「伝熱工学資料　改訂第3版」，(1975).
22) 三角利之，鈴木幸治，北村健三，「大きな水平加熱円柱まわりの自然対流の流動と伝熱（空気の場合）」，(一社)日本機械学会，(1999).
23) M. Jakob, “Heat Transfer. Volume 1”, John Wiley & Sons, Inc., (1949).
24) T. Ichihashi, D. Ishiko, A. Ogawa, M. Morishima, “Verification Tests of Neutron Shielding Materials and Shielding Assessment”, Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (2007).
25) 原燃輸送（株），「使用済燃料等の輸送容器に用いられる中性子しゃへい材(NS-4-FR)の連続加熱評価試験」，NFT-TR-97001, (1997).

(ロ)章C　密封解析

C. 密封解析

C.1 概要

本輸送物は，(ロ)章 B.4.6 に示すように一般の試験条件において密封境界の内部は負圧である。したがって，一般の試験条件における放射性物質の漏えいはないが，仮に密封境界の内部の圧力が大気圧になる場合を想定し，漏えい試験によって求めた密封境界からの漏えい率に基づいて放射性物質の密封境界外への漏えい率を評価し，その漏えい率が一般の試験条件における放射性物質漏えい率の基準を満足することを示す。また，特別の試験条件においては，密封境界の内部が正圧になる可能性があるため，同様に，漏えい試験によって求めた密封境界からの漏えい率に基づいて放射性物質の密封境界外への漏えい率を評価し，その漏えい率が特別の試験条件下における放射性物質漏えい率の基準を満足することを示す。

なお，本評価における収納放射能量は，ORIGEN2.2UPJ コードを用いて求めた。また，データライブラリは PWRU50 ライブラリを用いた。

C.2 密封装置

C.2.1 密封装置

輸送容器の密封境界を構成する密封装置は，(イ)-第 C.4 図に示すように収納物を収納する胴，三次蓋及びリリーフバルブカバープレートから構成される。また，密封装置の材質は(イ)-第 C.1 表に示すとおりである。なお，三次蓋及びリリーフバルブカバープレートは，共に上部緩衝体で覆われているため，不用意に取り外されることはない。また，緩衝体の取付部には□を施すことができるようになっている。

C.2.2 密封装置の貫通部

密封装置には，(イ)-第 C.13 図に示すように，三次蓋にリリーフバルブを設けるための貫通部が設けられている。リリーフバルブは二三次蓋間と外部との圧力を同圧にするために用いられる。

C.2.3 密封装置のガスケット及び溶接部

1. ガスケット

三次蓋及びリリーフバルブカバープレートには，(イ)-第 C.12 図及び(イ)-第 C.13 図に示すようにガスケットとして EPDM 製のOリングが同心円状に設けられている。ガスケットの寸法は(イ)-第 C.2 表に示すとおりである。

ガスケットは輸送容器の製作中に気密漏えい試験を行ってその健全性が確認される。

EPDM 製のOリングは，その耐熱性((ロ)章 B.4.6 及び(ロ)章 B.5.6)及び耐寒性((ロ)章 A.4.2)により，一般及び特別の試験条件並びに最低使用温度でも蓋の密封性を保つことができる。

2. 溶接部（胴と底板を溶接する場合）

密封境界に係る溶接部は，胴と底板である。胴と底板は，金属キャスク構造規格等に準拠して実施した溶接施工法確認試験に合格した施工法に従って溶接施工される。

溶接部は製作中に放射線透過試験又は浸透探傷試験等を行ってその健全性が確認される。

C.2.4　蓋

三次蓋には，一般及び特別の試験条件の温度，圧力に耐える強度を備え，かつ，密封性を保つことができるOリングを設けている。三次蓋の密封性を保つため，蓋ボルトを適切なトルクで締付ける。

C.3　一般の試験条件

一般の試験条件において密封装置の構造強度が維持され機能が損なわれないことは(ロ)章A.5により確認している。また，(ロ)章B.4.6に示すように一般の試験条件における三次蓋と胴で構成される密封容器の圧力（以下「三次蓋－胴内圧力」という。）は，0.0822MPaであり，設計評価期間中のヘリウムの内部への漏えいを考慮しても0.097MPa未満である。したがって，一般の試験条件において密封装置の加圧を考慮しても三次蓋－胴内圧力は負圧である。また，一般の試験条件において密封装置は健全であり漏えいはない。このように漏えいはないが，仮に密封境界の内部の圧力が大気圧の上限値0.105MPa，外気圧が大気圧の下限値0.097MPaであると仮定し，一般の試験条件における放射性物質漏えい率の基準を満足することを確認する。

C.3.1　放射性物質の漏えい

1. 核分裂生成ガス

一般の試験条件において燃料棒の破損がないことは(ロ)章A.5により確認されているが，ここでは全収納物の0.1%の燃料棒の密封性が失われたとし，燃料が有する放射性物質が(ロ)-第C.1表に示す割合及び量で三次蓋－胴内雰囲気中に放出されると仮定する。なお，密封解析の対象とする燃料は，(イ)-第D.4表に示す放射能強度とする。

(ロ)-第C.1表　放射性物質の放出率

主要核種	収納放射能量 (TBq)	破損率 (%)	放出率 (%)	A_2値 (TBq)	放出放射能量 (A_2値比)	放射性物質濃度 (注) (A_2値比/ref cm^3)
^{3}H	[redacted]	0.1	10 [1)]	40	[redacted]	8.53×10^{-11}
^{85}Kr				10		5.03×10^{-9}
合計		—	—	—		5.11×10^{-9}

(注) 三次蓋－胴内ガス体積は[redacted] ref cm^{3}である。

2. 一般の試験条件におけるガス漏えい率

一般の試験条件におけるガス漏えい率は，漏えい試験における許容漏えい率 L_{Rt} に基づいて求める。

(1) 漏えい試験における許容漏えい率

密封解析の設計基準として設定した許容漏えい率 L_{Rt} は，輸送容器の三次蓋の被検査部の漏えい率として(ロ)-第C.2表に示す値とする。なお，表中の各項目の添え字の0は，漏えい試験条件を示す。

(ロ)-第C.2表　許容漏えい率及び漏えい試験条件

項目		密封境界 (三次蓋及びリリーフバルブカバープレート)
L_{Rt}：許容漏えい率(ref cm^3/s)		2×10^{-3}
圧力条件	$P_{u,0}$：上流側圧力(MPa abs)	0.760
	$P_{d,0}$：下流側圧力(MPa abs)	0.101
T_0：温度(K)		298.15
$L_{u,0}$：漏えい試験時のガス漏えい率 (cm^3/s at $P_{u,0}$, T_0)		2.66×10^{-4}

(2) 一般の試験条件におけるガス漏えい率

密封装置の漏えい孔径は，許容漏えい率に基づいて，以下の漏えい計算式により求める。なお，(1)～(6)式中の添え字の i は試験条件を表し，i=0：漏えい試験条件，i=1：一般の試験条件を表す。

$$L_{u,i}=\left(F_{c,i}+F_{m,i}\right)\left(P_{u,i}-P_{d,i}\right)\left(\frac{P_{a,i}}{P_{u,i}}\right)\ ^{2)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1)$$

ここで，

$L_{u,i}$　：圧力$P_{u,i}$における漏えい率 (cm^3/s at $P_{u,i}$, T_i)

$F_{c,i}$　：連続流の流動伝導係数 (cm^3/(MPa･s))

$$F_{c,i}=\frac{\pi}{128}\times\frac{D_i^{\,4}}{a_i\mu_i}\ ^{2),\,3)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2)$$

$F_{m,i}$　：自由分子流の流動伝導係数（$cm^3/(MPa \cdot s)$）

$$F_{m,i} = \frac{\sqrt{2\pi R_0}}{6} \times \frac{D_i^3 \sqrt{\frac{T_i}{M}}}{a_i P_{a,i}} \quad [2), 3)] \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3)$$

$P_{u,i}$　：上流側の圧力（MPa）

$P_{d,i}$　：下流側の圧力（MPa）

$P_{a,i}$　：流れの平均圧力（MPa）

$$P_{a,i} = \frac{1}{2}\left(P_{u,i} + P_{d,i}\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4)$$

ただし，

D_i　：漏えい孔径（cm）

a_i　：漏えい孔長（cm）

μ_i　：粘性係数（MPa・s）

R_0　：気体定数（$8.3144598 \times 10^7 erg/(mol \cdot K)$）[4)]

T_i　：流体の温度（K）

M　：流体の分子量

また，漏えい試験条件において，$L_{u,i}$ は次式で与えられる。

$$L_{u,i} = L_{Rt}\left(\frac{P T_{s\,i}}{P_{u,i} T_s}\right) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5)$$

ここで，

L_{Rt}　：許容漏えい率(2 箇所)（ref cm^3/s）

P_s　：基準圧力（0.101MPa）

T_s　：基準温度（298.15K）

一般の試験条件におけるガス漏えい率は，漏えい孔が漏えい試験時の漏えい孔径を維持するとして，上記の漏えい計算式により求める。

また，次式により上記のガス漏えい率（$L_{u,i}$）を 25℃，0.101MPa の標準状態における漏えい率 $L_{x,i}$ に換算する。

$$L_{x,i} = L_{u,i}\left(\frac{P_{u,i} T_s}{P_s T_i}\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

一般の試験条件におけるガス漏えい率を(ロ)-第 C.3 表に示す。

(ロ)-第C.3表　一般の試験条件におけるガス漏えい率

項目(注1)　部位		密封境界	
		三次蓋	リリーフバルブ カバープレート
$P_{u,1}$ ：	上流側圧力 (MPa)	0.105	
$P_{d,1}$ ：	下流側圧力 (MPa)	0.097	
T_1 ：	流体の温度 (K)	383.15 (注2)	
a_1 ：	漏えい孔長 (cm)	[redacted] (注3)	[redacted] (注3)
D_1 ：	漏えい孔径 (cm)	[redacted]	
$L_{u,1}$ ：	一般の試験条件におけるガス漏えい率 (cm^3/s at $P_{u,1}$, T_1)	5.95×10^{-6}	6.50×10^{-6}
$L_{x,1}$ ：	一般の試験条件におけるガス漏えい率 (cm^3/s at 0.101 MPa, 25 ℃)	4.82×10^{-6} (1.73×10^{-2} cm^3/h)	5.26×10^{-6} (1.89×10^{-2} cm^3/h)

(注1)各項目の添え字の1は，一般の試験条件（i=1）を示す。

(注2)三次蓋ガスケット部温度

(注3)Oリングの断面直径を採用

3. 一般の試験条件における放射性物質の漏えい率

一般の試験条件における放射性物質の漏えい率は，(ロ)-第C.1表に示す密封装置内にガス状で存在する核種の放射性物質濃度と前項で求めた一般の試験条件におけるガス漏えい率（$L_{x,1}$）を乗じて求められる。

なお，ここでは保守的に漏えい率の大きいリリーフバルブカバープレートにおけるガス漏えい率を用いて評価する。

一般の試験条件における放射性物質濃度を用いて求めたガス中の放射性物質の漏えい率，基準値A_2値$\times10^{-6}$/h及び漏えい率と基準値との比率を(ロ)-第C.4表に示す。密封装置からの放射性物質の1時間当たりの漏えい量と各核種の基準値A_2値$\times10^{-6}$/hとの比率の合計は1よりも小さい。

(ロ)-第C.4表　一般の試験条件におけるガス中の放射性物質の漏えい率

核種	放射性物質漏えい率 (Bq/h)	基準値：A_2値$\times10^{-6}$/h (Bq/h)	比率
^{3}H	6.46×10^{1}	4×10^{7}	1.62×10^{-6}
^{85}Kr	9.52×10^{2}	1×10^{7}	9.52×10^{-5}
		合計	9.68×10^{-5}

C.3.2　密封装置の加圧

密封装置の加圧は，密封装置内のガスの温度上昇及び設計評価期間中の一次蓋と二次蓋間に充填されているヘリウムのキャスク本体内部への漏えいにより生じる。さらに，全収納物の 0.1%の燃料棒の密封機能が失われ核分裂生成ガスがキャスク本体内部に放出されたと仮定しても，三次蓋と胴で構成される密封装置内の圧力は負圧に維持される。

C.3.3　冷却材汚染

輸送容器は，冷却水を用いない乾式タイプであり，冷却材は使用しない。

C.3.4　冷却材損失

輸送容器は，冷却水を用いない乾式タイプであり，冷却材は使用しない。したがって，冷却材の損失はない。また，密封装置にはベント装置はない。

C.4　特別の試験条件

特別の試験条件において密封装置の構造強度が維持され機能が損なわれないことは(ロ)章 A.6 により確認している。また，(ロ)章 B.5.6 に示すように特別の試験条件における三次蓋－胴内圧力は，0.330MPa である。

C.4.1　核分裂生成ガス

特別の試験条件において，安全側に全燃料棒の密封性が失われたと仮定し，燃料が有する放射性物質が(ロ)-第 C.5 表に示す割合及び量で三次蓋－胴内雰囲気中に放出されると仮定する。

(ロ)-第 C.5 表　放射性物質の放出率

主要核種	収納放射能量 (TBq)	放出率(%)	A_2 値 (注 1) (TBq)	放出放射能量 (A_2 値比)	放射性物質濃度 (注 2) (A_2 値比/ref cm^3)
^{3}H		10 1)	40		2.96×10^{-8}
^{85}Kr			100		1.75×10^{-7}
合計		—	—		2.04×10^{-7}

(注 1) ^{85}Kr については A_2 値の 10 倍である。

(注 2) 三次蓋－胴内ガス体積は [　　] ref cm^3 である。

C.4.2　放射性物質の漏えい

1. 特別の試験条件におけるガス漏えい率

特別の試験条件におけるガス漏えい率は，(1)～(6)式に特別の試験条件下の圧力，温度条件，ガス物性値及び漏えい孔寸法を代入して求められる。

特別の試験条件におけるガス漏えい率を(ロ)-第C.6表に示す。

(ロ)-第C.6表　特別の試験条件におけるガス漏えい率

項目 (注1) ＼ 部位	密封境界	
	三次蓋	リリーフバルブ カバープレート
$P_{u,2}$ ： 上流側圧力 (MPa)	0.330	
$P_{d,2}$ ： 下流側圧力 (MPa)	0.097	
T_2 ： 流体の温度 (K)	468.15 (注2)	
a_2 ： 漏えい孔長 (cm)	[redacted] (注3)	[redacted] (注3)
D_2 ： 漏えい孔径 (cm)	[redacted]	
$L_{u,2}$ ： 特別の試験条件におけるガス漏えい率 (cm^3/s at $P_{u,2}$, T_2)	8.96×10^{-5}	9.50×10^{-5}
$L_{x,2}$ ： 特別の試験条件におけるガス漏えい率 (cm^3/s at 0.101 MPa, 25 ℃)	1.87×10^{-4} (1.13×10^{2} cm^3/week)	1.98×10^{-4} (1.20×10^{2} cm^3/week)

(注1)各項目の添え字の2は，特別の試験条件（i=2）を示す。

(注2)三次蓋ガスケット部温度

(注3)Oリングの断面直径を採用

2. 特別の試験条件における放射性物質の漏えい率

特別の試験条件における放射性物質の漏えい率は，(ロ)-第C.5表に示す密封装置内にガス状で存在する核種の放射性物質濃度と前項で求めた特別の試験条件におけるガス漏えい率（$L_{x,2}$）を乗じて求められる。

なお，ここでは保守的に漏えい率の大きいリリーフバルブカバープレートにおけるガス漏えい率を用いて評価する。

特別の試験条件における放射性物質濃度を用いて求めたガス中の放射性物質の漏えい率，基準値A_2値/week及び漏えい率と基準値との比率を(ロ)-第C.7表に示す。密封装置からの放射性物質の1週間当たりの漏えい量と各核種の基準値A_2値/weekとの比率の合計は1よりも小さい。

(ロ)-第C.7表　特別の試験条件におけるガス中の放射性物質の漏えい率

核種	放射性物質漏えい率 (Bq/week)	基準値：A_2値/week (Bq/week)	比率
^{3}H	1.42×10^{8}	4×10^{13}	3.55×10^{-6}
^{85}Kr	2.09×10^{9}	1×10^{14}	2.09×10^{-5}
		合計	2.45×10^{-5}

C.5　結果の要約及びその評価

密封解析の評価結果は以下に示すとおりであり，輸送容器の密封性能は規則及び告示に定められるBM型輸送物に係る技術上の基準に適合する。

1. 密封装置

輸送容器の主な密封装置は，胴，三次蓋及びリリーフバルブカバープレートで構成されている。この密封装置は，一般及び特別の試験条件に対して十分な強度を有し，また，ガスケットの密封機能が損なわれることはない。

2. 一般の試験条件

(1) 放射性物質の漏えい

輸送物は一般の試験条件では負圧を維持するため，放射性物質の環境への漏えいはないが，三次蓋－胴内圧力が大気圧上限値まで上昇し，その後大気圧下限値の環境下に置かれたとしても，一般の試験条件における放射性物質の漏えい率と基準値との比率の合計は最大9.68×10^{-5}であり，放射性物質の漏えい率は基準値A_2値$\times10^{-6}$/hを満足する。

(2) 密封装置の加圧

密封装置の加圧は，主に密封装置の内部ガスの温度上昇による。(ロ)章A.5に示したようにこの加圧により密封機能が損なわれるような変形は生じない。

3. 特別の試験条件

特別の試験条件における放射性物質の漏えい率と基準値との比率の合計は最大2.45×10^{-5}であり，放射性物質の漏えい率は基準値A_2値/weekを満足する。

C.6　付属書類

C.6.1　参考文献

1)　(一社) 日本原子力学会，「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準 (AESJ-SC-F006:2013) ：2013」，(2014).

2)　American National Standards Institute, Inc.，“American National Standard for Radioactive Materials－Leakage Tests on Packages for Shipment”，ANSI N14.5-2014, (2014).

3)　International Organization for Standardization，“Safe transport of radioactive materials - Leakage testing on packages”，ISO 12807, (1996).

4)　自然科学研究機構　国立天文台，「理科年表 (平成 28 年度版)」，(2015).

(ロ)章D　遮蔽解析

D. 遮蔽解析

D.1 概要

本輸送容器の主要なガンマ線遮蔽材は,(イ)-第C.5図及び(イ)-第C.6図に示すとおり,側部方向の胴及び外筒の炭素鋼並びに軸方向の胴（底部）及び蓋の炭素鋼等である。主要な中性子遮蔽材は，側部方向の胴と外筒間のレジン並びに軸方向の底部及び蓋部のレジンである。また，側部方向の胴及び外筒の炭素鋼並びに軸方向の胴（底部）及び蓋の炭素鋼等もその役目をする。

線源としては核分裂生成物，アクチノイドによる線源及び構造材の放射化による線源を考えた。線源強度は，ORIGEN2.2UPJ コード[1] 及び放射化計算式により連続照射を仮定して求めた。また，ORIGEN2.2UPJ コードによる線源強度計算で用いるライブラリは，ORIGEN2.2UPJ コード内蔵の PWRU50 及び PWRU のデータを使用した。

一般の試験条件下及び特別の試験条件下においては，想定される輸送容器及び収納物の状態を考慮して線量当量率を評価した。

線量当量率の計算には，DOT3.5 コード[2] を用いた。また，線量当量率評価で用いる断面積ライブラリは,JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリ MATXSLIB-J33(以下「MATXSLIB-J33」という。）のデータ[3] を使用した。

これらの計算から得られた線量当量率は,規則及び告示で定められた基準を満足する。

D.2 線源仕様

線源強度の計算に用いる燃焼度，照射日数，初期濃縮度及び冷却日数を(ロ)-第 D.1 表に示す。

線源強度の計算は(ロ)-第 D.1 表に示した平均比出力で連続照射したものとして行った。なお，バーナブルポイズン集合体は中央部 12 体に挿入されているものとした。

(ロ)-第 D.2 表に燃料集合体の種類と型式ごとの線源強度を示す。(ロ)-第 D.2 表より燃料有効部ガンマ線源強度及び燃料有効部中性子源強度が高い下記に示す使用済燃料集合体を収納した場合を対象として遮蔽解析を実施した。

・中央部及び外周部共に 17×17 燃料，48000MWd/t 型（A型）

(ロ)-第D.1表　収納物の線源計算条件

条件 ＼ 燃料集合体の種類と型式		中央部				外周部			
		17×17 燃料							
		48000MWd/t 型		39000MWd/t 型		48000MWd/t 型		39000MWd/t 型	
		A型	B型	A型	B型	A型	B型	A型	B型
燃焼度 (MWd/t)									
照射日数 (日)	使用済燃料集合体								
	バーナブルポイズン集合体								
平均比出力 (注1) (MW/t)									
初期濃縮度 (注2) (wt%)									
冷却日数 (日)	使用済燃料集合体								
	バーナブルポイズン集合体								
ウラン重量 (kg/体)									

(注1)平均比出力は定格出力に相当する炉平均値を用いた。

(注2)初期濃縮度は最低濃縮度とした。

(ロ)-第D.2表　燃料集合体の種類と型式ごとの線源強度

（輸送物1基当たり）

燃料集合体の種類と型式 / 放射線種類	17×17燃料 48000MWd/t型 (注1)		17×17燃料 39000MWd/t型 (注2)	
	A型	B型	A型	B型
燃料有効部ガンマ線 (photons/s)	1.073×10^{17}	1.007×10^{17}	9.067×10^{16}	8.518×10^{16}
構造材放射化ガンマ線 (注3) (^{60}Co TBq)	5.922×10^{2}	6.024×10^{2}	5.801×10^{2}	5.736×10^{2}
燃料有効部中性子 (注4) (n/s)	1.205×10^{10}	1.120×10^{10}	8.408×10^{9}	7.811×10^{9}

(注1) 中央部12体の燃焼度を［　　］MWd/t，外周部12体の燃焼度を［　　］MWd/tとした輸送物1基当たりの線源強度である。

(注2) 中央部12体及び外周部12体の燃焼度を全て［　　］MWd/tとした輸送物1基当たりの線源強度である。

(注3) バーナブルポイズン集合体の放射化線源を考慮した値である。

(注4) 記載値は中性子実効増倍率を考慮した全中性子源強度とした。

D.2.1　ガンマ線源

1. 燃料有効部のガンマ線源

燃料有効部のガンマ線源は，核分裂生成物及びアクチノイドによるものである。ガンマ線源強度の計算は，ORIGEN2.2UPJ コードを用いて行った。計算においては，付属書類D.6.1 に示す軸方向の燃焼度分布を考慮した。

燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線源強度を(ロ)-第 D.3 表に示す。

(ロ)-第D.3表　燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線源強度

（輸送物1基当たり）

エネルギー群数	平均エネルギー (MeV)	燃料有効部 (photons/s)		
		中央部	外周部	合計
1	0.01	1.433×10^{16}	1.337×10^{16}	2.770×10^{16}
2	0.025	2.888×10^{15}	2.710×10^{15}	5.599×10^{15}
3	0.0375	3.729×10^{15}	3.445×10^{15}	7.174×10^{15}
4	0.0575	2.903×10^{15}	2.725×10^{15}	5.628×10^{15}
5	0.085	1.636×10^{15}	1.528×10^{15}	3.165×10^{15}
6	0.125	1.581×10^{15}	1.445×10^{15}	3.027×10^{15}
7	0.225	1.363×10^{15}	1.275×10^{15}	2.637×10^{15}
8	0.375	5.802×10^{14}	5.452×10^{14}	1.125×10^{15}
9	0.575	2.481×10^{16}	2.278×10^{16}	4.759×10^{16}
10	0.85	1.142×10^{15}	1.003×10^{15}	2.145×10^{15}
11	1.25	7.743×10^{14}	6.784×10^{14}	1.453×10^{15}
12	1.75	2.373×10^{13}	2.089×10^{13}	4.463×10^{13}
13	2.25	1.395×10^{10}	1.289×10^{10}	2.684×10^{10}
14	2.75	6.962×10^{9}	5.818×10^{9}	1.278×10^{10}
15	3.5	6.777×10^{8}	5.046×10^{8}	1.182×10^{9}
16	5.0	2.157×10^{8}	1.477×10^{8}	3.634×10^{8}
17	7.0	2.487×10^{7}	1.703×10^{7}	4.190×10^{7}
18	9.5	2.857×10^{6}	1.957×10^{6}	4.814×10^{6}
合計		5.576×10^{16}	5.152×10^{16}	1.073×10^{17}

2. 放射化線源

燃料集合体構造材の放射化によるガンマ線源のうち，容器外部の線量当量率に寄与するものは，構造材中に含まれる ^{59}Co の（n, γ）反応により生じる ^{60}Co が大部分である。

^{60}Co の放射化線源強度は次式を用いて求めた。

$$A = No\,\sigma\,\phi\,\{1-\exp(-\lambda T_1)\}\times\exp(-\lambda T_2)$$

ここで，

A ：放射化核種（^{60}Co）の放射能（Bq）

No ：ターゲット核種（^{59}Co）の個数（atoms）

σ ：2200m/s の中性子による ^{59}Co の（n, γ）反応断面積（cm^2）

（37.2barn＝$37.2\times10^{-24}cm^2$）[4)]

φ ：炉内照射熱中性子束（n/（cm^2・s））(注)

λ ：^{60}Co の崩壊定数（3.6001×10^{-4}/日）

T_1 ：照射日数（日）

T_2 ：冷却日数（日）

線源強度の計算に当たって，燃料集合体構造材のガンマ線源強度は，上部ノズル部，上部プレナム部，燃料有効部，下部プレナム部及び下部ノズル部の 5 領域に分けて求める。

^{60}Co の放射化線源強度計算結果を(ロ)-第 D.4 表に示す。

なお，^{60}Co は 1 崩壊で 1.17MeV と 1.33MeV のガンマ線を 1 個ずつ放出するものとした。

(注)炉設計コードによる炉心計算で求められた軸方向炉内中性子束分布の典型例により放射化評価部位での熱中性子束を求めた。

(ロ)-第D.4表　燃料集合体構造材の放射化によるガンマ線源強度

（輸送物1基当たり）

モデル化領域	熱中性子束 (n/cm²・s)	^{59}Co 含有量 (g/体)	燃料集合体構造材の線源強度 (^{60}Co TBq)		
			中央部 (注)	外周部	合計
上部ノズル部			9.676×10^{0} (5.339×10^{0})	4.046×10^{0}	1.372×10^{1} (5.339×10^{0})
上部プレナム部			4.126×10^{1} (6.583×10^{0})	3.235×10^{1}	7.361×10^{1} (6.583×10^{0})
燃料有効部			3.356×10^{2} (1.939×10^{2})	1.322×10^{2}	4.678×10^{2} (1.939×10^{2})
下部プレナム部			6.278×10^{0}	5.857×10^{0}	1.214×10^{1}
下部ノズル部			1.288×10^{1}	1.201×10^{1}	2.489×10^{1}

(注)燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン集合体の放射化によるガンマ線源強度の合計値

（（ ）内はバーナブルポイズン集合体の放射化によるガンマ線源強度）

D.2.2　中性子源

燃料中には中性子源となるアクチノイドが生成される。これらの核種から中性子が発生する反応は，自発核分裂及び（α,n）反応である。一次中性子源強度の計算は，ORIGEN2.2UPJ コードを用いて行った。計算においては，付属書類 D.6.1 に示す軸方向の燃焼度分布を考慮した。

体系の増倍効果を考慮した全中性子源強度（Ns）は次式で求めた。

Ns＝No/(1-keff)

ここで，

No　　：輸送物 1 基当たりの一次中性子源強度

keff　：使用済燃料を収納した場合の輸送物の中性子実効増倍率

ここでは乾燥状態において使用済燃料を収納した場合の輸送物の keff を考慮した。

解析に用いた中性子源強度を(ロ)-第 D.5 表に示す。

上記の中性子源強度のうち大部分は，^{244}Cm の自発核分裂線源並びに増倍による ^{235}U 及び ^{239}Pu の核分裂線源であり，（α,n）反応による線源はわずかである。

そこで，計算に用いる線源のエネルギースペクトルは，線源強度に支配的な核分裂線源のうち最もスペクトルが硬い ^{239}Pu の核分裂スペクトルとした。計算に使用する ^{239}Pu の核分裂スペクトルを(ロ)-第 D.6 表に示す。

(ロ)-第 D.5 表　中性子源強度

（輸送物 1 基当たり）

		燃料有効部		
		中央部	外周部	合計
一次中性子源強度 No (n/s)	（α,n）反応	9.369×10^{7}	7.472×10^{7}	1.684×10^{8}
	自発核分裂	4.909×10^{9}	3.360×10^{9}	8.269×10^{9}
	合計	5.003×10^{9}	3.435×10^{9}	8.437×10^{9}
輸送物の中性子実効増倍率 keff (注)		0.30		
全中性子源強度 Ns (n/s)		7.147×10^{9}	4.907×10^{9}	1.205×10^{10}

(注)ORIGEN2.2UPJ コードにより，燃焼に伴う核分裂性物質の減少及び可燃性毒物となる核分裂生成物の生成量を求め，これらを考慮した核種組成を用いて臨界解析に示す手法と同一手法（KENO-VI コード）により評価して得られた値である。

(ロ)-第D.6表　中性子源スペクトル（1/5）

エネルギー群数	上限エネルギー（eV）	スペクトル (注)
1	1.964×10^{7}	0.0
2	1.733×10^{7}	7.107×10^{-6}
3	1.691×10^{7}	7.117×10^{-6}
4	1.649×10^{7}	2.368×10^{-5}
5	1.568×10^{7}	3.835×10^{-5}
6	1.492×10^{7}	2.686×10^{-5}
7	1.455×10^{7}	3.351×10^{-5}
8	1.419×10^{7}	4.165×10^{-5}
9	1.384×10^{7}	5.111×10^{-5}
10	1.350×10^{7}	1.392×10^{-4}
11	1.284×10^{7}	1.018×10^{-4}
12	1.252×10^{7}	1.017×10^{-4}
13	1.221×10^{7}	2.917×10^{-4}
14	1.162×10^{7}	4.082×10^{-4}
15	1.105×10^{7}	5.613×10^{-4}
16	1.051×10^{7}	7.571×10^{-4}
17	1.000×10^{7}	1.002×10^{-3}
18	9.512×10^{6}	1.303×10^{-3}
19	9.048×10^{6}	1.668×10^{-3}
20	8.607×10^{6}	2.101×10^{-3}
21	8.187×10^{6}	2.608×10^{-3}
22	7.788×10^{6}	3.191×10^{-3}
23	7.408×10^{6}	3.853×10^{-3}
24	7.047×10^{6}	4.592×10^{-3}
25	6.703×10^{6}	1.708×10^{-3}
26	6.592×10^{6}	3.698×10^{-3}
27	6.376×10^{6}	6.293×10^{-3}
28	6.065×10^{6}	7.243×10^{-3}
29	5.770×10^{6}	8.251×10^{-3}
30	5.488×10^{6}	9.302×10^{-3}
31	5.221×10^{6}	1.039×10^{-2}
32	4.966×10^{6}	1.151×10^{-2}
33	4.724×10^{6}	1.263×10^{-2}
34	4.493×10^{6}	2.859×10^{-2}
35	4.066×10^{6}	3.286×10^{-2}

(注)^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXSLIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

(ロ)-第D.6表　中性子源スペクトル (2/5)

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル (注)
36	3.679×10^{6}	3.674×10^{-2}
37	3.329×10^{6}	1.965×10^{-2}
38	3.166×10^{6}	2.042×10^{-2}
39	3.012×10^{6}	2.108×10^{-2}
40	2.865×10^{6}	2.165×10^{-2}
41	2.725×10^{6}	2.214×10^{-2}
42	2.592×10^{6}	2.252×10^{-2}
43	2.466×10^{6}	1.517×10^{-2}
44	2.385×10^{6}	3.833×10^{-3}
45	2.365×10^{6}	3.812×10^{-3}
46	2.346×10^{6}	7.657×10^{-3}
47	2.307×10^{6}	1.535×10^{-2}
48	2.231×10^{6}	2.310×10^{-2}
49	2.123×10^{6}	2.312×10^{-2}
50	2.019×10^{6}	2.305×10^{-2}
51	1.921×10^{6}	2.290×10^{-2}
52	1.827×10^{6}	2.267×10^{-2}
53	1.738×10^{6}	2.236×10^{-2}
54	1.653×10^{6}	2.200×10^{-2}
55	1.572×10^{6}	2.160×10^{-2}
56	1.496×10^{6}	2.115×10^{-2}
57	1.423×10^{6}	2.059×10^{-2}
58	1.353×10^{6}	2.010×10^{-2}
59	1.287×10^{6}	1.947×10^{-2}
60	1.225×10^{6}	1.892×10^{-2}
61	1.165×10^{6}	1.827×10^{-2}
62	1.108×10^{6}	3.460×10^{-2}
63	1.003×10^{6}	1.367×10^{-2}
64	9.616×10^{5}	1.834×10^{-2}
65	9.072×10^{5}	1.502×10^{-2}
66	8.629×10^{5}	1.437×10^{-2}
67	8.209×10^{5}	1.372×10^{-2}
68	7.808×10^{5}	1.309×10^{-2}
69	7.427×10^{5}	1.247×10^{-2}
70	7.065×10^{5}	1.186×10^{-2}

(注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXSLIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

(ロ)-第D.6表　中性子源スペクトル（3/5）

エネルギー群数	上限エネルギー（eV）	スペクトル(注)
71	6.721×10^{5}	1.127×10^{-2}
72	6.393×10^{5}	1.070×10^{-2}
73	6.081×10^{5}	1.014×10^{-2}
74	5.784×10^{5}	9.605×10^{-3}
75	5.502×10^{5}	9.086×10^{-3}
76	5.234×10^{5}	8.591×10^{-3}
77	4.979×10^{5}	1.576×10^{-2}
78	4.505×10^{5}	1.401×10^{-2}
79	4.076×10^{5}	6.397×10^{-3}
80	3.877×10^{5}	6.017×10^{-3}
81	3.688×10^{5}	1.097×10^{-2}
82	3.337×10^{5}	9.670×10^{-3}
83	3.020×10^{5}	1.040×10^{-3}
84	2.985×10^{5}	3.887×10^{-4}
85	2.972×10^{5}	7.998×10^{-4}
86	2.945×10^{5}	2.159×10^{-3}
87	2.873×10^{5}	4.115×10^{-3}
88	2.732×10^{5}	7.463×10^{-3}
89	2.472×10^{5}	3.378×10^{-3}
90	2.352×10^{5}	3.160×10^{-3}
91	2.237×10^{5}	2.955×10^{-3}
92	2.128×10^{5}	2.763×10^{-3}
93	2.024×10^{5}	2.581×10^{-3}
94	1.926×10^{5}	2.411×10^{-3}
95	1.832×10^{5}	2.254×10^{-3}
96	1.742×10^{5}	2.100×10^{-3}
97	1.657×10^{5}	1.964×10^{-3}
98	1.576×10^{5}	1.828×10^{-3}
99	1.500×10^{5}	1.709×10^{-3}
100	1.426×10^{5}	1.590×10^{-3}
101	1.357×10^{5}	1.485×10^{-3}
102	1.291×10^{5}	1.384×10^{-3}
103	1.228×10^{5}	1.287×10^{-3}
104	1.168×10^{5}	1.202×10^{-3}
105	1.111×10^{5}	2.653×10^{-3}

(注)^{239}Puの核分裂スペクトルをMATXSLIB-J33の中性子175群構造に振り分けたものである。

(ロ)-第D.6表　中性子源スペクトル（4/5）

エネルギー群数	上限エネルギー（eV）	スペクトル（注）
106	9.804×10^{4}	2.219×10^{-3}
107	8.652×10^{4}	7.446×10^{-4}
108	8.250×10^{4}	5.458×10^{-4}
109	7.950×10^{4}	1.324×10^{-3}
110	7.200×10^{4}	7.861×10^{-4}
111	6.738×10^{4}	1.744×10^{-3}
112	5.656×10^{4}	6.216×10^{-4}
113	5.248×10^{4}	8.958×10^{-4}
114	4.631×10^{4}	7.457×10^{-4}
115	4.087×10^{4}	8.384×10^{-4}
116	3.431×10^{4}	2.982×10^{-4}
117	3.183×10^{4}	3.831×10^{-4}
118	2.850×10^{4}	1.659×10^{-4}
119	2.700×10^{4}	1.020×10^{-4}
120	2.606×10^{4}	1.347×10^{-4}
121	2.479×10^{4}	6.373×10^{-5}
122	2.418×10^{4}	6.142×10^{-5}
123	2.358×10^{4}	1.712×10^{-4}
124	2.188×10^{4}	2.461×10^{-4}
125	1.931×10^{4}	3.741×10^{-4}
126	1.503×10^{4}	2.577×10^{-4}
127	1.171×10^{4}	7.100×10^{-5}
128	1.060×10^{4}	1.066×10^{-4}
129	9.119×10^{3}	1.222×10^{-4}
130	7.102×10^{3}	8.411×10^{-5}
131	5.531×10^{3}	5.787×10^{-5}
132	4.307×10^{3}	2.564×10^{-5}
133	3.707×10^{3}	1.416×10^{-5}
134	3.355×10^{3}	1.219×10^{-5}
135	3.035×10^{3}	1.050×10^{-5}
136	2.747×10^{3}	4.685×10^{-6}
137	2.613×10^{3}	4.348×10^{-6}
138	2.485×10^{3}	7.778×10^{-6}
139	2.249×10^{3}	6.696×10^{-6}
140	2.035×10^{3}	1.294×10^{-5}

(注)^{239}Puの核分裂スペクトルをMATXSLIB-J33の中性子175群構造に振り分けたものである。

(ロ)-第D.6表　中性子源スペクトル（5/5）

エネルギー群数	上限エネルギー（eV）	スペクトル（注）
141	1.585×10^{3}	8.896×10^{-6}
142	1.234×10^{3}	6.116×10^{-6}
143	9.611×10^{2}	4.204×10^{-6}
144	7.485×10^{2}	2.890×10^{-6}
145	5.830×10^{2}	1.986×10^{-6}
146	4.540×10^{2}	1.365×10^{-6}
147	3.536×10^{2}	9.385×10^{-7}
148	2.754×10^{2}	6.450×10^{-7}
149	2.145×10^{2}	4.433×10^{-7}
150	1.670×10^{2}	3.047×10^{-7}
151	1.301×10^{2}	2.094×10^{-7}
152	1.013×10^{2}	1.439×10^{-7}
153	7.889×10^{1}	9.893×10^{-8}
154	6.144×10^{1}	6.799×10^{-8}
155	4.785×10^{1}	4.673×10^{-8}
156	3.727×10^{1}	3.201×10^{-8}
157	2.902×10^{1}	2.218×10^{-8}
158	2.260×10^{1}	1.517×10^{-8}
159	1.760×10^{1}	1.043×10^{-8}
160	1.371×10^{1}	7.168×10^{-9}
161	1.068×10^{1}	4.925×10^{-9}
162	8.315×10^{0}	3.385×10^{-9}
163	6.476×10^{0}	2.327×10^{-9}
164	5.044×10^{0}	1.599×10^{-9}
165	3.928×10^{0}	1.099×10^{-9}
166	3.059×10^{0}	7.657×10^{-10}
167	2.382×10^{0}	5.087×10^{-10}
168	1.855×10^{0}	3.568×10^{-10}
169	1.445×10^{0}	2.452×10^{-10}
170	1.125×10^{0}	1.686×10^{-10}
171	8.764×10^{-1}	1.158×10^{-10}
172	6.826×10^{-1}	7.961×10^{-11}
173	5.316×10^{-1}	5.472×10^{-11}
174	4.140×10^{-1}	1.060×10^{-10}
175	1.000×10^{-1}	1.427×10^{-11}

(注)^{239}Puの核分裂スペクトルをMATXSLIB-J33の中性子175群構造に振り分けたものである。

D.3　モデル仕様

D.3.1　解析モデル

遮蔽解析モデルは二次元（R-Z）モデルとし，トラニオンのない方向の断面をモデル化した。

各試験条件下におけるモデル化は以下に示す条件を考慮した。

1. 通常輸送時及び一般の試験条件下

通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデルは，一般の試験条件下において 0.3m 落下における緩衝体の変形を考慮すること以外は同一とし，以下の条件とした。

解析モデルを(ロ)-第 D.1 図に示す。

① 胴内での燃料集合体の軸方向の移動を考慮し，安全側に蓋方向，底部方向に移動したモデルとした。

② 緩衝体は，安全側に空気に置き換え，距離のみ考慮した。

③ 各部寸法はノミナル値とし，寸法公差は密度係数として考慮した。

④ 蓋部中性子遮蔽材，側部中性子遮蔽材及び底部中性子遮蔽材については保守側の仮定として，中性子遮蔽材の 2.5%の質量減損を考慮した。

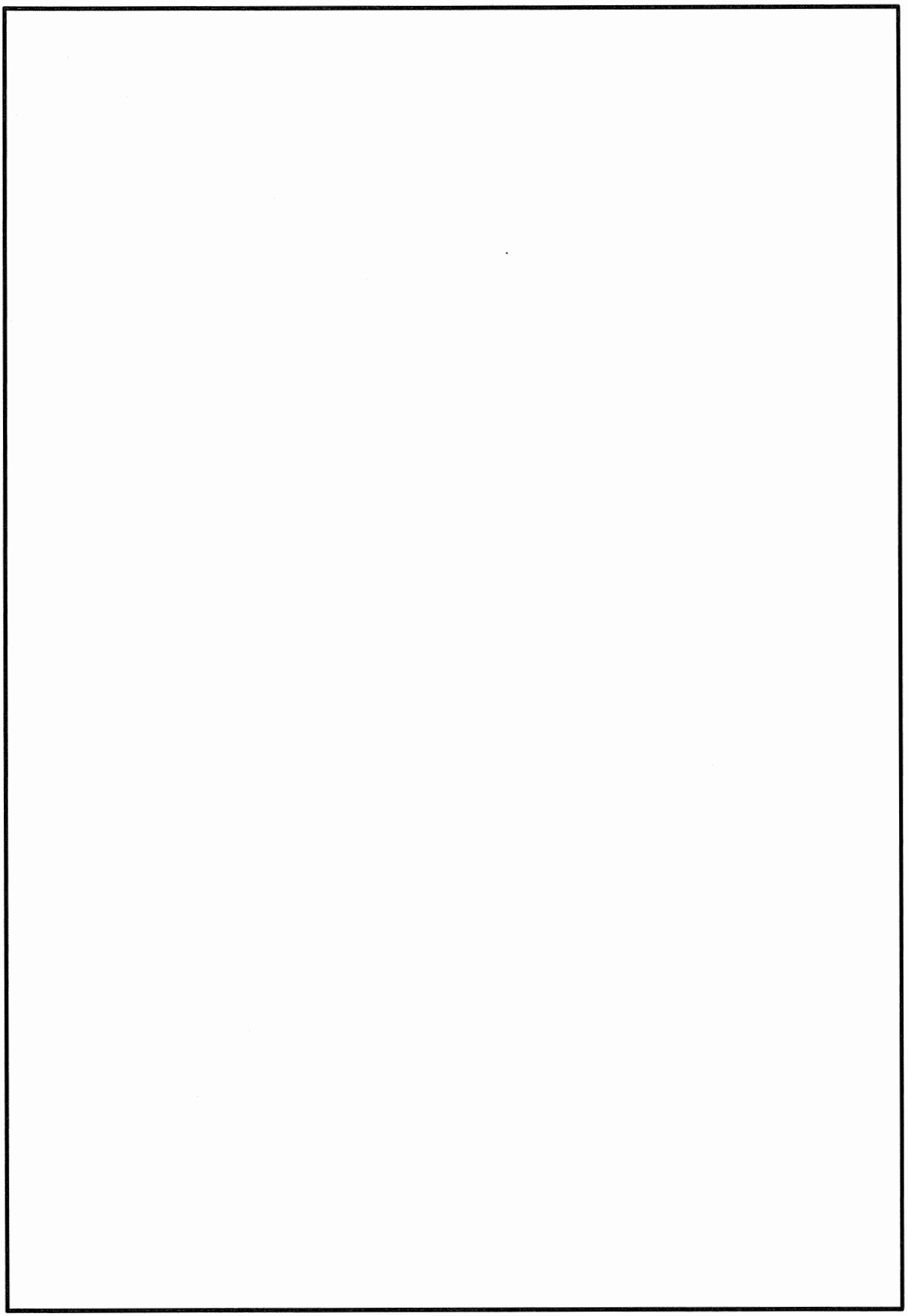
⑤ 燃料はバスケットと均質化した。ただし，上部ノズル部の上側についてはバスケット上端より露出するため，バスケットと均質化しない。

⑥ 径方向のバスケットの外周部及び中性子遮蔽材の領域は均質化した。

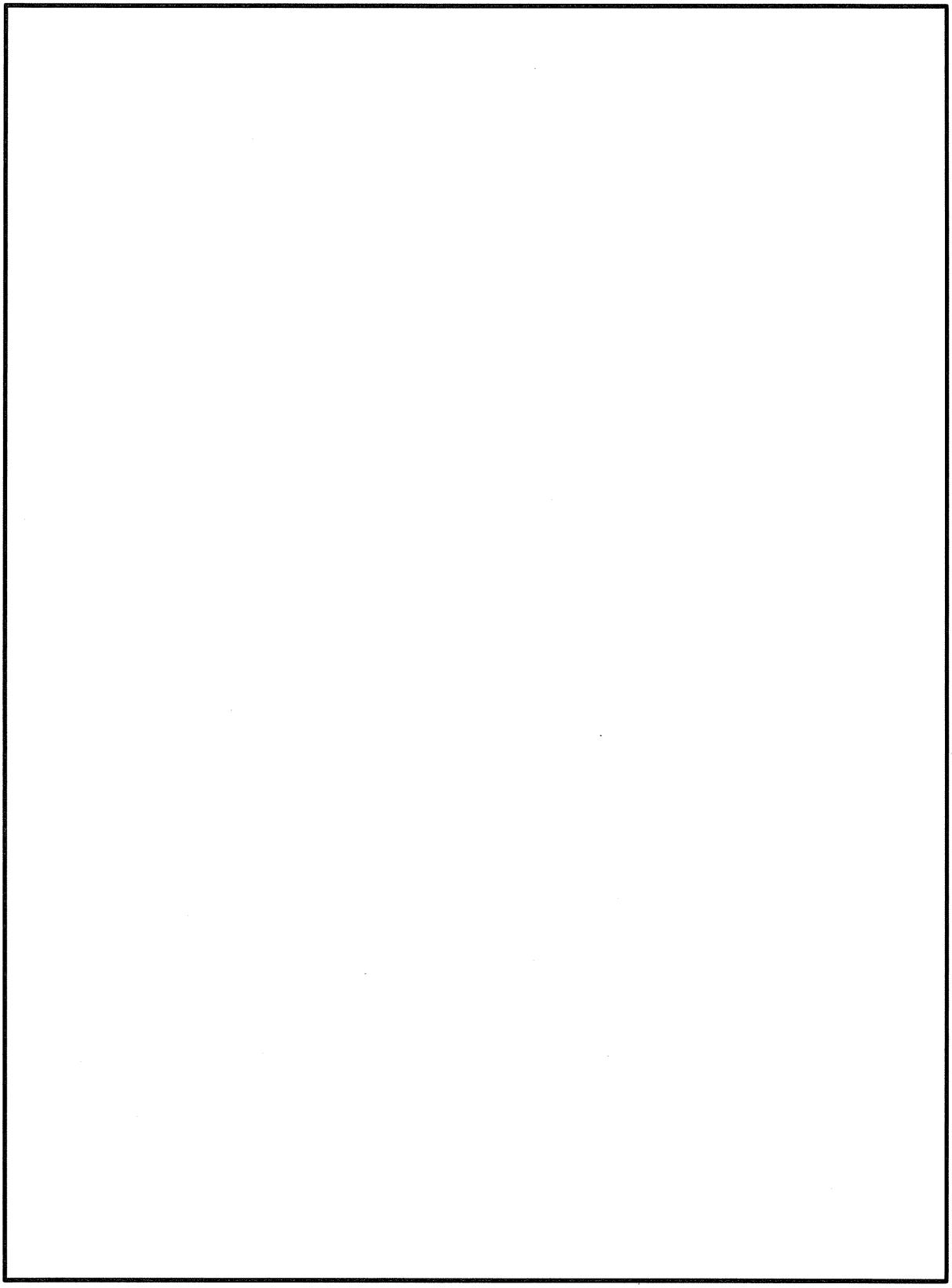
⑦ バーナブルポイズン集合体の物性値は安全側に考慮しないモデルとした。

解析モデルでの均質化モデルの妥当性については，付属書類 D.6.2 に示す。

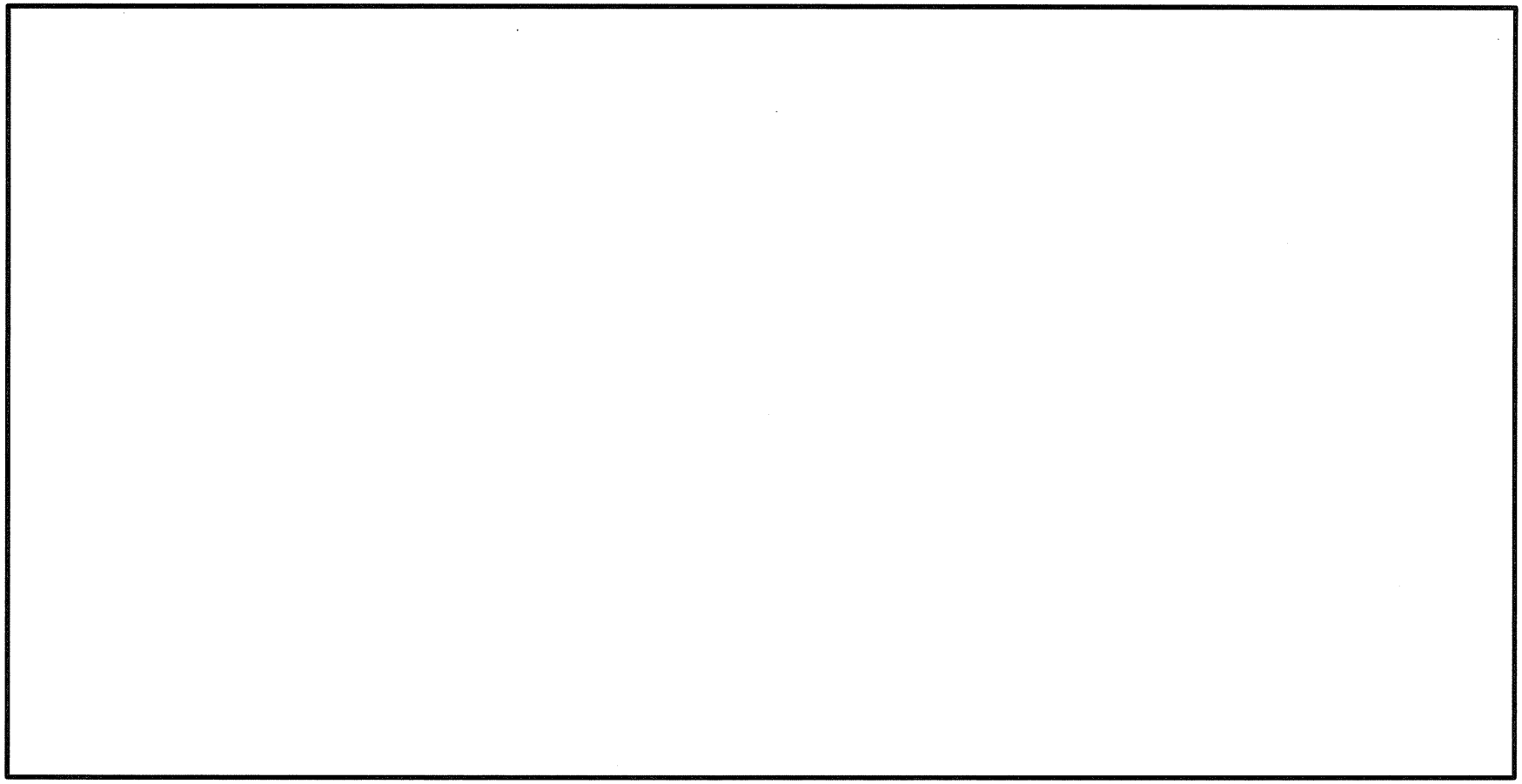
本輸送容器では，上部，下部トラニオンが燃料有効部近傍にあり，中性子ストリーミング箇所となっている。この箇所は上述のモデルに含まれないため，頭部及び底部モデルの当該部近傍の線束を用いて，トラニオン部を模擬したモデルとの線束接続計算により解析を行った。トラニオン部モデルを(ロ)-第 D.2 図に示す。



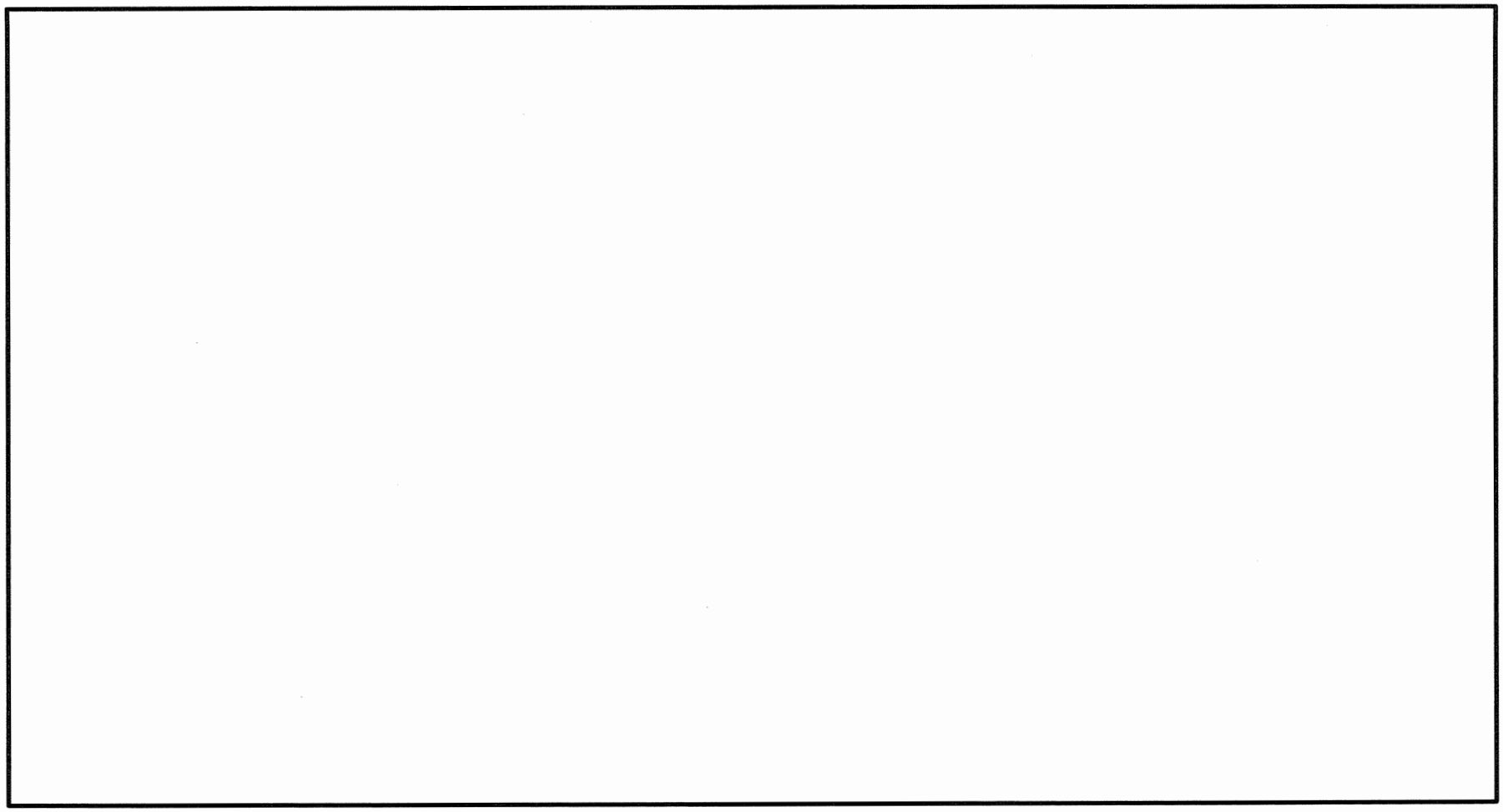
(ロ)-第 D.1(a)図　通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル（頭部）



(ロ)-第D.1(b)図　通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル（底部）



(ロ)-第D.2(a)図　通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル（上部トラニオン部）



(ロ)-第D.2(b)図　通常輸送時及び一般の試験条件下の解析モデル（下部トラニオン部）

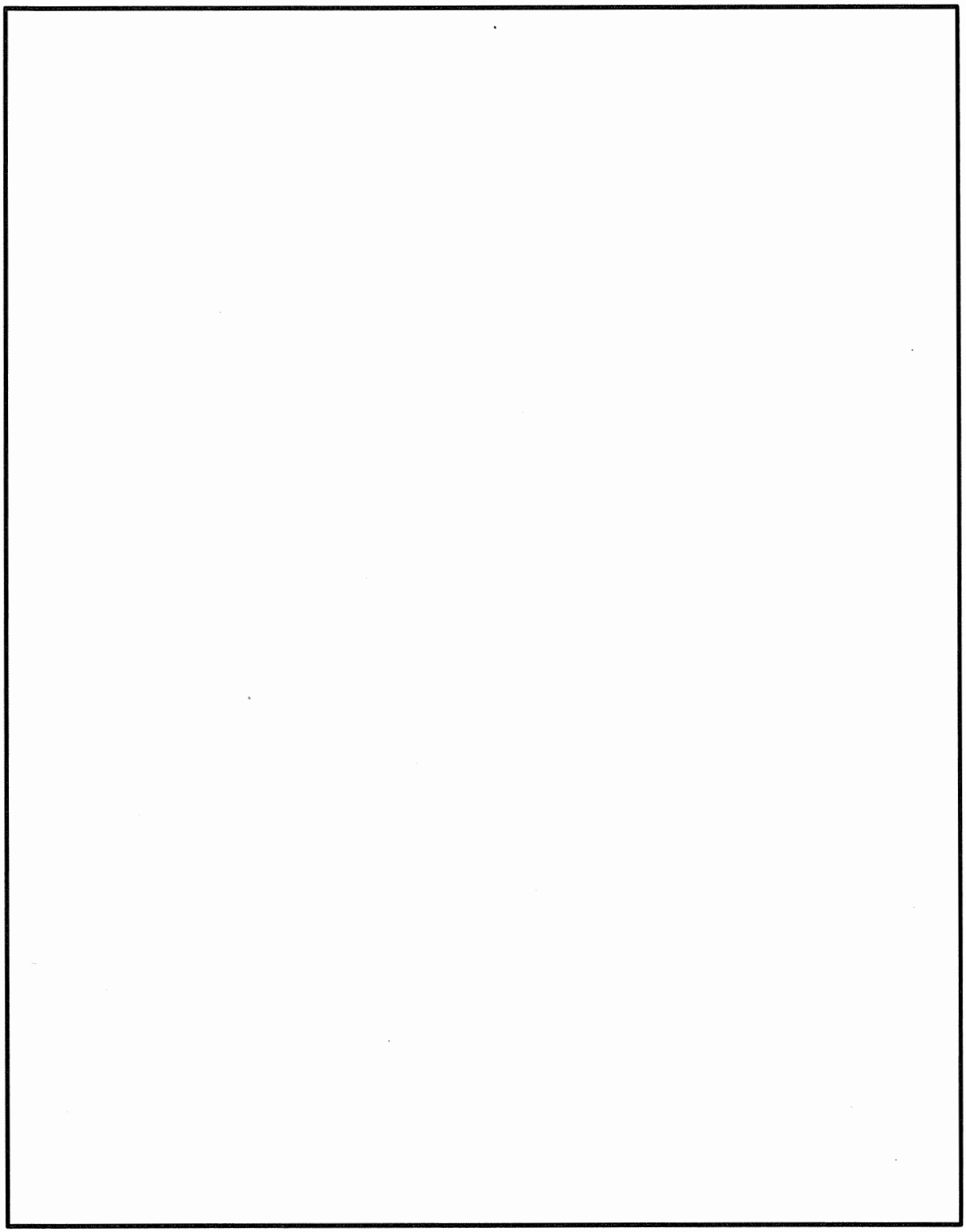
2. 特別の試験条件下

特別の試験条件下における解析モデルは一般の試験条件下の場合と次の点で異なる。解析モデルを(ロ)-第D.3図に示す。

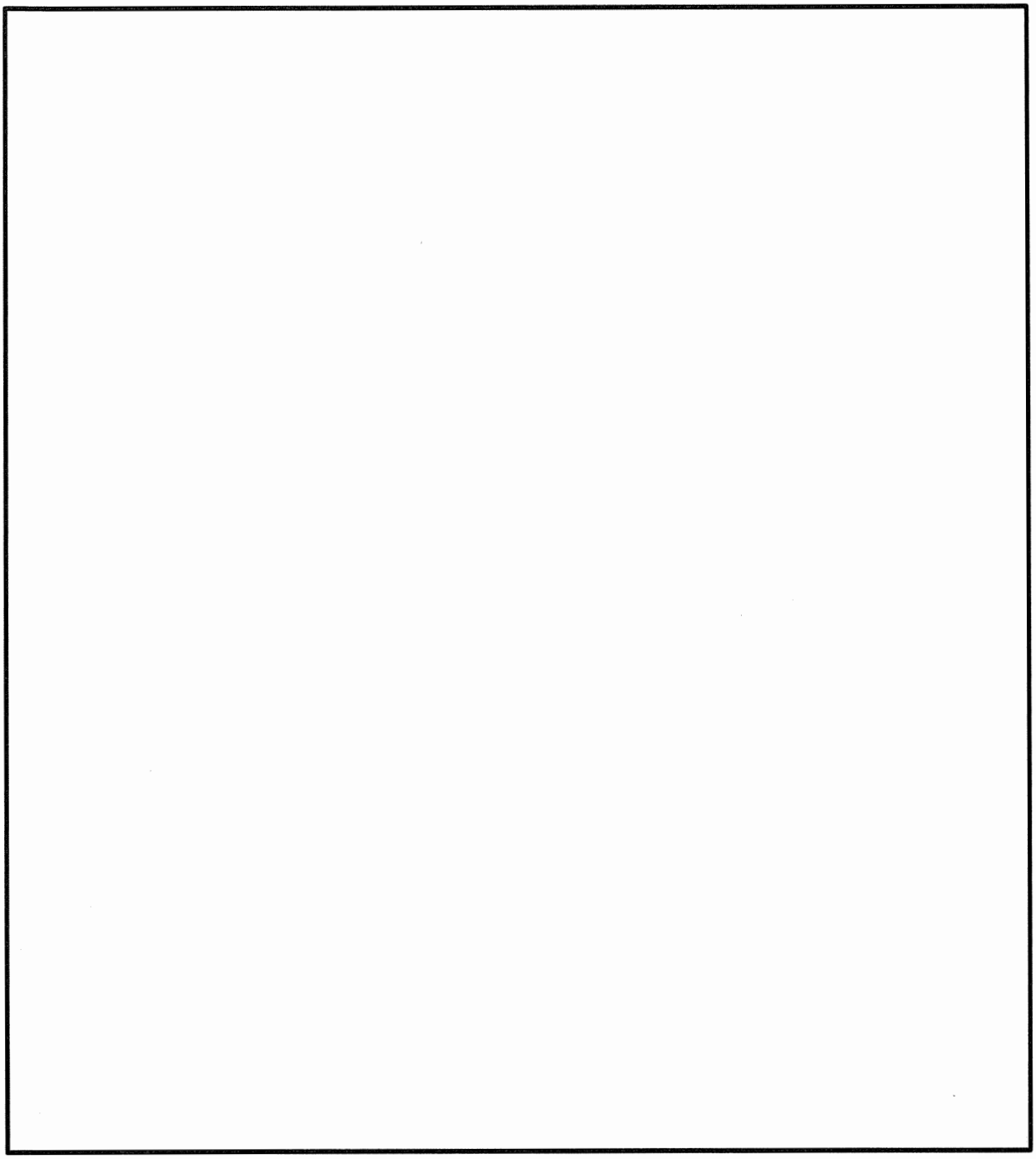
① 熱解析の結果では耐火試験により蓋部中性子遮蔽材，側部中性子遮蔽材，底部中性子遮蔽材及びトラニオン部中性子遮蔽材が著しく焼損することはないが，安全側にその密度が半分に減少するものとした。

② 1m貫通試験により外筒，側部中性子遮蔽材が部分的に変形することが考えられるので，安全側に貫通すると仮定して外筒，側部中性子遮蔽材に貫通孔を模擬した。

③ 落下試験により緩衝体は大幅に変形するので，無視するものとした。



(ロ)-第 D.3(a)図　特別の試験条件下の解析モデル（頭部）



(ロ)-第 D.3(b)図　特別の試験条件下の解析モデル（底部）

D.3.2　解析モデル各領域における原子個数密度

遮蔽解析に用いた均質化領域の構成物質体積比を(ロ)-第D.7表に示す。また，遮蔽解析に用いた各領域の原子個数密度を(ロ)-第 D.8 表に，各部位の材料密度と密度係数を(ロ)-第 D.9 表に示す。

(ロ)-第D.7表　解析に用いた均質化領域の構成物質体積比

構成物質＼領域		均質化領域						
		燃料領域						レジン＋伝熱フィン
		上部ノズル部（上側）	上部ノズル部（下側）	上部プレナム部	燃料有効部	下部プレナム部	下部ノズル部	
燃料集合体	UO_2							—
	Zr							—
	ステンレス鋼							—
	インコネル							—
バスケット	アルミニウム合金							—
	ほう素添加アルミニウム合金							—
中性子遮蔽材（レジン）		—	—	—	—	—	—	
伝熱フィン（銅）		—	—	—	—	—	—	
ボ　イ　ド								—

(ロ)-第D.8表　解析に用いた各領域の原子個数密度（1/2）

（単位：10^{24} atoms/cm^3）

領域 / 元素	均質化領域					
	燃料領域					
	上部ノズル部（上側）	上部ノズル部（下側）	上部プレナム部	燃料有効部	下部プレナム部	下部ノズル部
H						
^{10}B						
C						
N						
O						
Al						
Cr						
Fe						
Ni						
Cu						
Zr						
^{235}U						
^{238}U						

(ロ)-第D.8表　解析に用いた各領域の原子個数密度 (2/2)

(単位：10^{24} atoms/cm^3)

領域 / 元素	バスケット外周部	ステンレス鋼	析出硬化系ステンレス鋼	炭素鋼	中性子遮蔽材(注)		空気
					レジン＋伝熱フィン	レジン	
H							
^{10}B							
C							
N							
O							
Al							
Cr							
Fe							
Ni							
Cu							

(注) ( ) 内は特別の試験条件下の値である。

(ロ)-第D.9表　各部位の材料密度と密度係数（1/2）

部位	材質	材料密度 (g/cm^3)	密度係数
胴	炭素鋼		
胴（底部）			
胴（フランジ部）			
外筒			
一次蓋			
蓋部中性子遮蔽材カバー（蓋板）			
蓋部中性子遮蔽材カバー（側板）			
二次蓋			
下部端板	ステンレス鋼		
底部中性子遮蔽材カバー			
三次蓋			
トラニオン	析出硬化系ステンレス鋼		
側部中性子遮蔽材	レジン		
底部中性子遮蔽材			
蓋部中性子遮蔽材			
トラニオン部中性子遮蔽材			
伝熱フィン	銅		
バスケット（バスケット外周部）	アルミニウム合金		
	ほう素添加アルミニウム合金		

(ロ)-第D.9表　各部位の材料密度と密度係数（2/2）

部位	材質	材料密度 (g/cm^3)	密度係数
燃料領域	UO_2	[redacted]	—
	Zr		—
	ステンレス鋼		—
	インコネル		—
	アルミニウム合金		—
	ほう素添加 アルミニウム合金		—

D.4 遮蔽評価

輸送物の外部の指定場所でガンマ線量当量率，中性子線量当量率を評価するために使用した基本手法とコードについて以下に説明する。

1. 基本手法

遮蔽計算はガンマ線，中性子ともにDOT3.5コードを用いて行った。

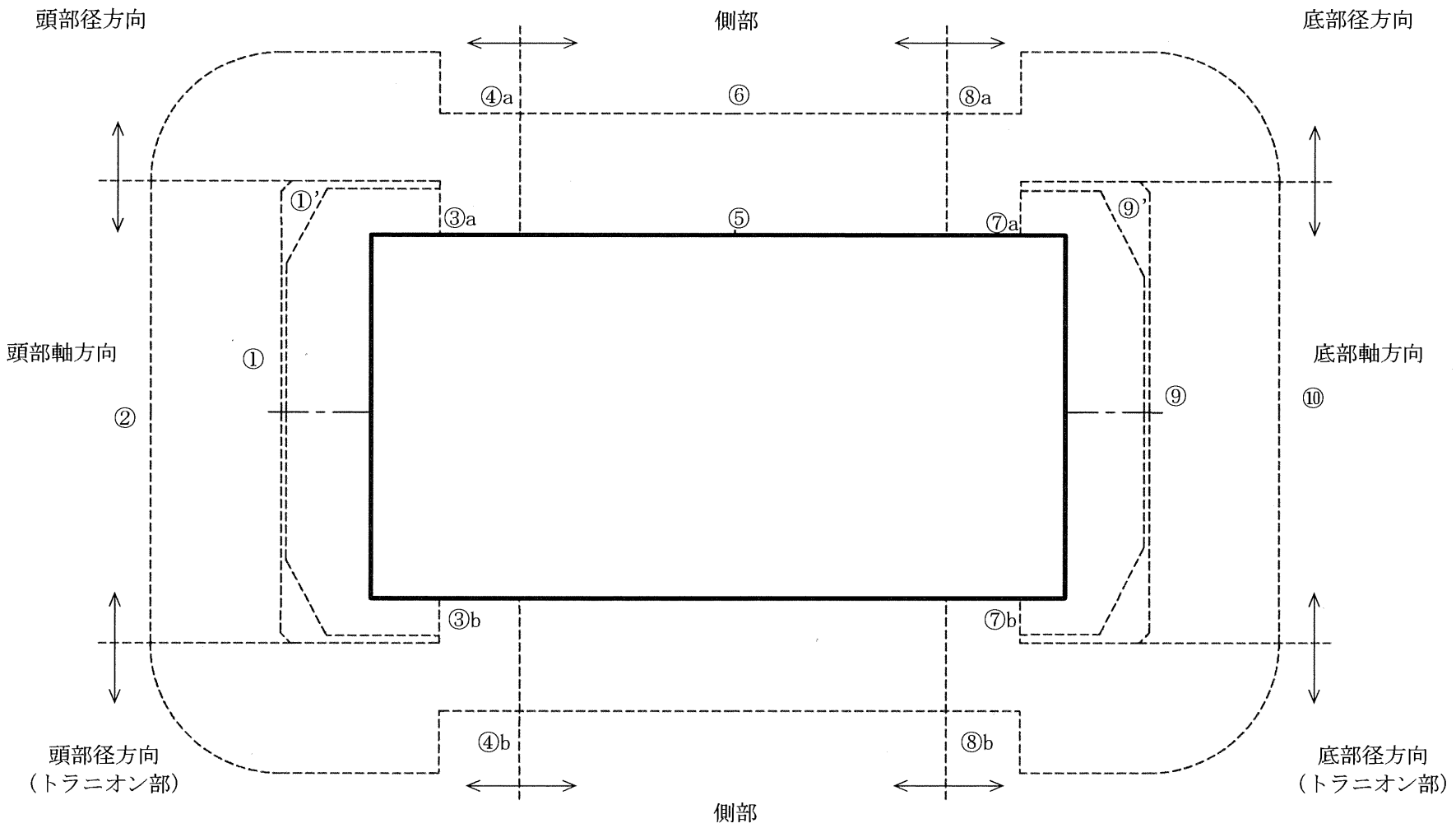
線束から線量当量率への変換係数はICRP Pub.74[5]の1cm線量当量率変換係数に基づくMATXSLIB-J33の中性子175群，ガンマ線42群構造に対する値を用いた。

2. 計算結果

各モデルにおける主要部位でのガンマ線量当量率及び中性子線量当量率の計算結果を(ロ)-第D.4図，(ロ)-第D.5図及び(ロ)-第D.10表から(ロ)-第D.12表に示す。

ここでは，頭部，側部及び底部の各エリアにおいて，輸送物表面及び表面から1mで線量当量率が最大となる位置での線量当量率の合計値及びその内訳を記載している。

また，(ロ)-第D.10表及び(ロ)-第D.11表に示すように一般の試験条件下に置かれた輸送物表面の最大線量当量率は，著しく増加することはない。



（注）①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示しており，その結果を(ロ)-第D.10表及び(ロ)-第D.11表に示す。

(ロ)-第D.4図　通常輸送時及び一般の試験条件下の線量当量率評価位置

(ロ)-第D.10表　通常輸送時の線量当量率

(単位：μSv/h)

評価点			頭部			側部	底部		
			軸方向	径方向	径方向（トラニオン部）		径方向	径方向（トラニオン部）	軸方向
			①	③a	③b	⑤	⑦a	⑦b	⑨
表面	ガンマ線	燃料有効部	＜0.1	＜0.1	8.0	100.7	5.9	5.4	6.0
		構造材放射化	0.2	0.6	103.0	25.9	15.0	13.4	35.9
		二次ガンマ線	0.2	1.1	5.7	25.7	4.4	4.8	4.6
	中性子		41.7	389.3	753.8	45.1	258.6	1108.3	25.2
	合計(注)		42.2	391.1	870.5	197.4	283.9	1131.9	71.7
評価点			②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩
表面から1m	ガンマ線	燃料有効部	＜0.1	22.5	22.6	44.8	25.8	25.1	2.6
		構造材放射化	＜0.1	20.1	20.9	12.5	14.6	12.8	14.8
		二次ガンマ線	＜0.1	5.4	5.4	10.4	5.8	5.7	1.7
	中性子		20.9	24.5	34.0	18.4	15.2	26.3	15.8
	合計(注)		21.2	72.5	82.9	86.1	61.4	69.9	34.9

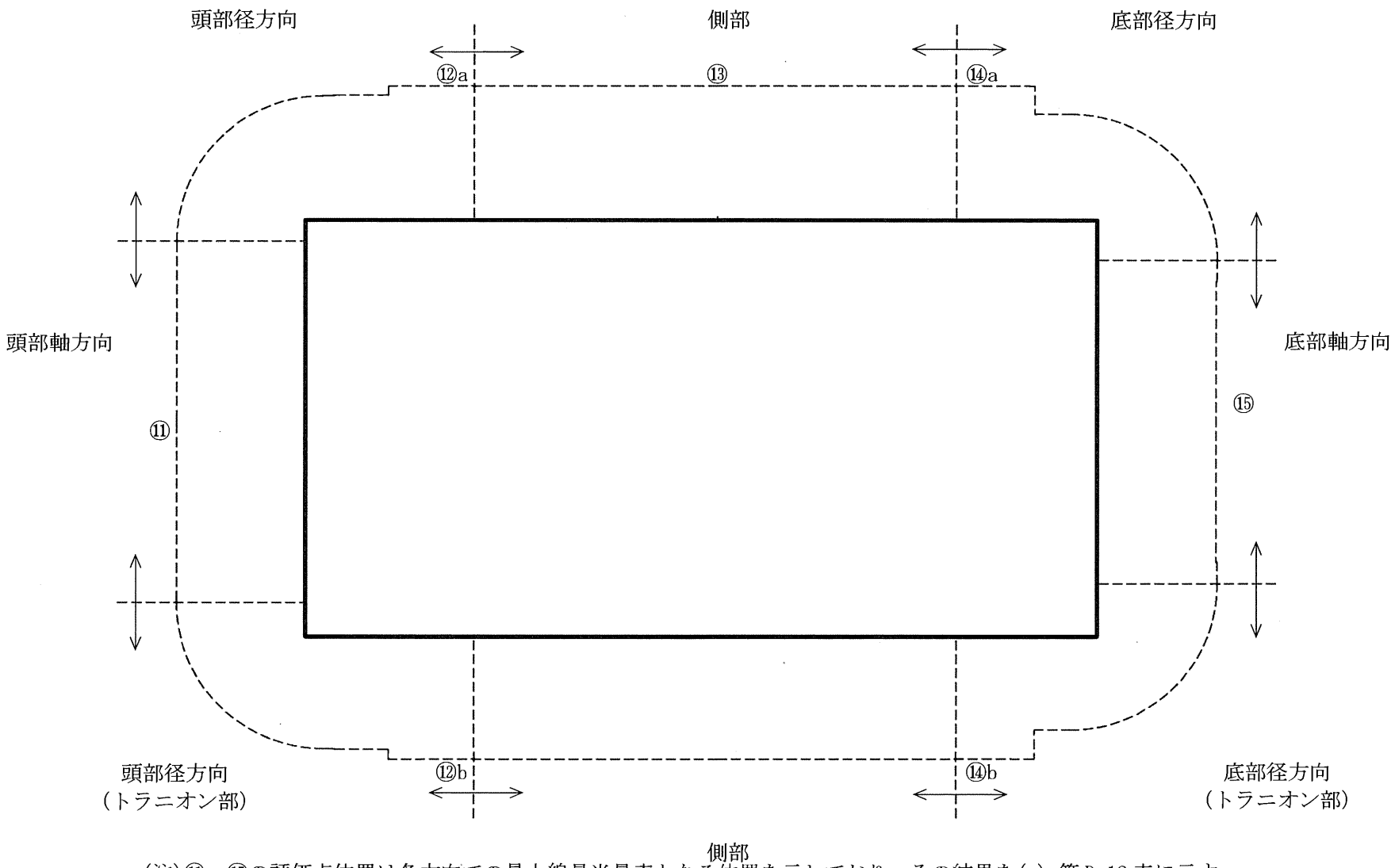
(注)0.1未満の値は0.1として合計に考慮した。

(ロ)-第D.11表　一般の試験条件下の線量当量率

(単位：μSv/h)

評価点			頭部			側部	底部		
			軸方向	径方向	径方向（トラニオン部）		径方向	径方向（トラニオン部）	軸方向
			①’	③a	③b	⑤	⑦a	⑦b	⑨’
表面	ガンマ線	燃料有効部	0.5	＜0.1	8.0	100.7	5.9	5.4	1.5
		構造材放射化	0.6	0.6	103.0	25.9	15.0	13.4	2.2
		二次ガンマ線	0.4	1.1	5.7	25.7	4.4	4.8	1.2
	中性子		43.3	389.3	753.8	45.1	258.6	1108.3	93.9
	合計 (注)		44.8	391.1	870.5	197.4	283.9	1131.9	98.8

(注)0.1未満の値は0.1として合計に考慮した。



(注)⑪～⑮の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示しており，その結果を(ロ)-第D.12表に示す。

(ロ)-第D.5図　特別の試験条件下の線量当量率評価位置

(ロ)-第D.12表　特別の試験条件下の線量当量率

（単位：μSv/h）

評価点			頭部			側部	底部		
			軸方向	径方向	径方向（トラニオン部）		径方向	径方向（トラニオン部）	軸方向
			⑪	⑫a	⑫b	⑬	⑭a	⑭b	⑮
表面から1m	ガンマ線	燃料有効部	＜0.1	44.1	44.3	137.1	50.6	48.8	8.3
		構造材放射化	0.3	37.9	38.2	36.5	28.5	24.1	50.1
		二次ガンマ線	0.5	12.0	11.9	21.7	13.1	12.9	6.9
	中性子		77.2	135.4	143.9	681.3	132.3	142.1	116.9
	合計(注)		78.1	229.4	238.3	876.6	224.5	227.9	182.2

(注)0.1未満の値は0.1として合計に考慮した。

D.5　結果の要約及びその評価

通常輸送時，一般及び特別の試験条件下の遮蔽解析条件の要約を(ロ)-第 D.13 表に示す。

また，計算から得られた最大線量当量率の要約は(ロ)-第 D.14 表に示すとおりであり，規則及び告示で定められた基準を満足する。

(ロ)-第 D.13 表　遮蔽解析条件の要約

条件／項目		通常輸送時	一般の試験条件下	特別の試験条件下
線源		軸方向の移動を考慮し，頭部方向評価モデルでは蓋方向に，底部方向評価モデルでは底方向に移動した状態を模擬した。		
遮蔽体	本体	胴，蓋，外筒，中性子遮蔽材		同左 ただし，外筒，側部中性子遮蔽材（レジン）の貫通孔を考慮。 また，中性子遮蔽材密度については半分とする。
	緩衝体	空気に置換し，距離のみ考慮	変形を考慮した上で，空気に置換し，距離のみ考慮	無視

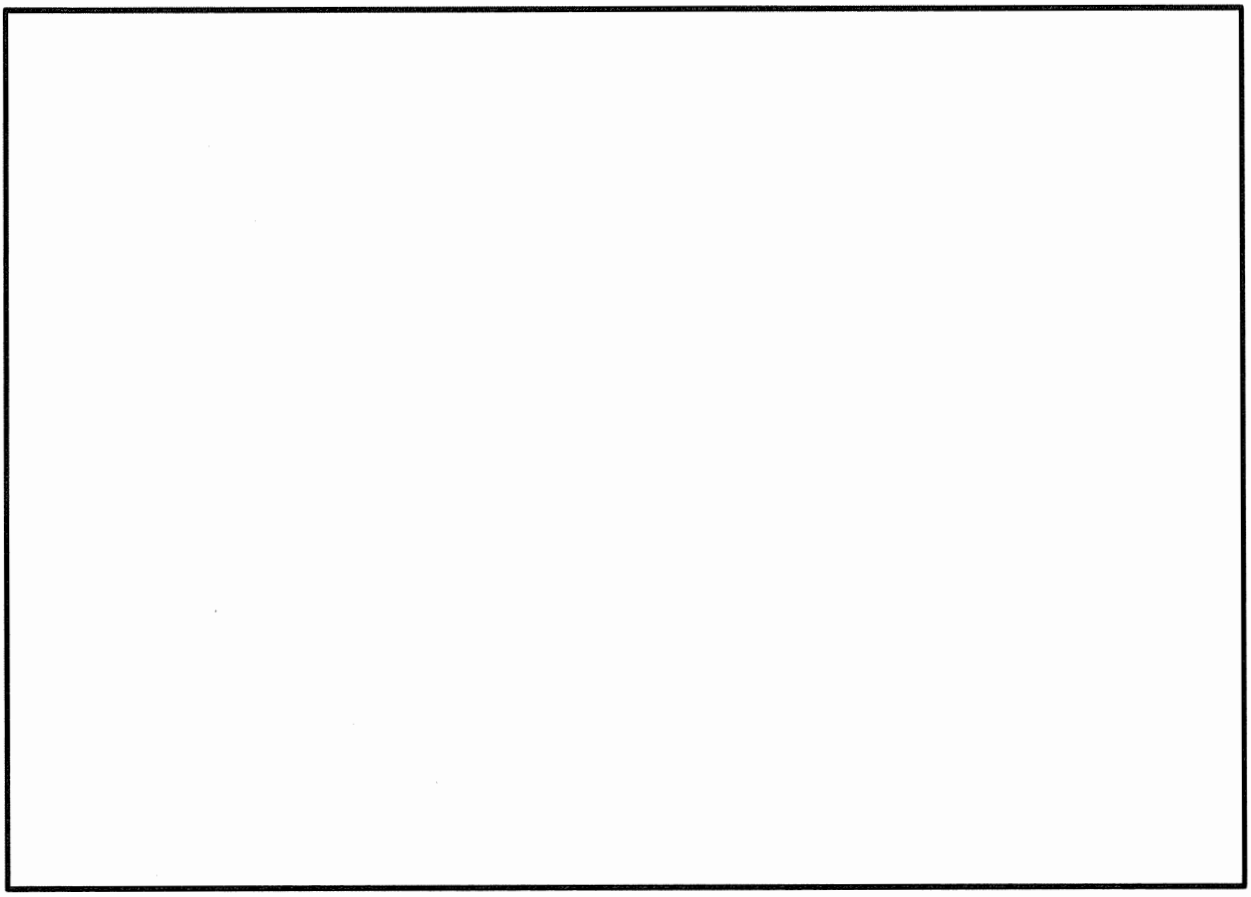
(ロ)-第D.14表　最大線量当量率の要約

項目＼部位	輸送物表面（μSv/h）					表面から1m（μSv/h）				
	頭部		側部	底部		頭部		側部	底部	
	軸方向	径方向		径方向	軸方向	軸方向	径方向		径方向	軸方向
通常輸送時										
ガンマ線	0.5	116.7	152.3	23.6	46.5	0.3	48.9	67.7	43.6	19.1
中性子	41.7	753.8	45.1	1108.3	25.2	20.9	34.0	18.4	26.3	15.8
合計	42.2	870.5	197.4	1131.9	71.7	21.2	82.9	86.1	69.9	34.9
一般の試験条件下										
ガンマ線	1.5	116.7	152.3	23.6	4.9					
中性子	43.3	753.8	45.1	1108.3	93.9					
合計	44.8	870.5	197.4	1131.9	98.8					
特別の試験条件下										
ガンマ線						0.9	94.4	195.3	85.8	65.3
中性子						77.2	143.9	681.3	142.1	116.9
合計						78.1	238.3	876.6	227.9	182.2
基準値										
通常輸送時	2000					100				
一般の試験条件下	2000					—				
特別の試験条件下	—					10000				

D.6　付属書類

D.6.1　線源強度の計算に用いる軸方向燃焼度分布

線源強度の計算に用いる軸方向燃焼度分布を(ロ)-第D.付1図に示す。



(ロ)-第D.付1図　軸方向燃焼度分布

D.6.2　均質化モデルの妥当性について

遮蔽解析における二次元(R-Z)モデルで採用している均質化モデルの妥当性を示す。

(1) 径方向

本輸送容器は円筒形状であることから，二次元輸送計算コードを用いた円筒形状でモデル化している。円筒形状での入力において，本輸送容器の径方向において複数の材質が存在する空間は，線量当量率評価の観点で保守的となる材質の選択又は均質化を行う必要がある。本輸送容器の燃料領域，バスケット外周部及び中性子遮蔽材部は複数の材質が存在しており，これらの領域については均質化モデルを採用した。燃料領域については等価な断面積となる円（円筒）でモデル化し，使用済燃料集合体とバスケットを均質化した物性値を設定している（(ロ)-第D.付2図参照）。

側部中性子遮蔽材部は，レジンと伝熱フィンのノミナル値に寸法公差を考慮して保守的に均質化領域の遮蔽材密度を小さく設定している。バスケット外周部の均質化に当たっては，円周方向に不均一であるバスケット実形状を水平断面 X-Y モデルで模擬して計算した最大線量当量率を包絡するようにバスケット外周部の密度係数を調整した均質化円筒モデルを採用している（(ロ)-第 D.付 3 図参照）。ここで，最大線量当量率は，表面から 1m 位置の線量当量率は表面位置に比べて基準値に対して裕度が小さいため，表面から 1m 離れた位置での線量当量率の最大値を用いた。

本遮蔽解析のモデルの妥当性の確認のため，本輸送容器に対して三次元モンテカルロコード MCNP5 での実形状を模擬した三次元モデル解析（以下「MCNP 解析」という。）と DOT3.5 での二次元モデル解析（以下「DOT3.5 解析」という。）の結果比較を確認した。側部中央周方向の表面について DOT3.5 解析の解析結果が MCNP 解析の解析結果を包絡していることが確認（(ロ)-第 D.付 4 図参照）され，本モデルの径方向に対する均質化モデルは妥当であることが確認できる。

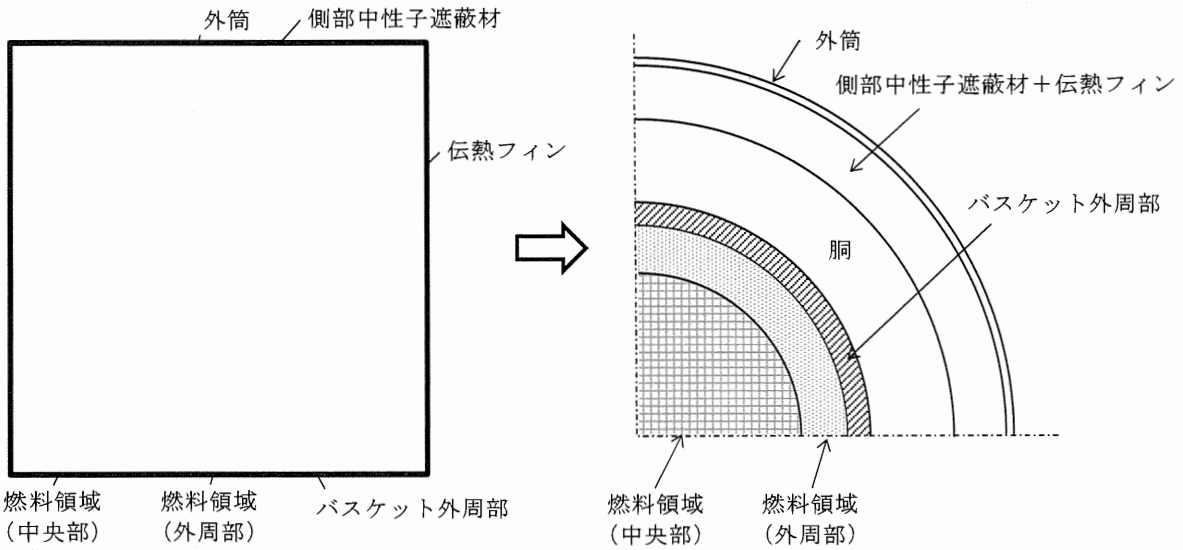
(2) 軸方向

本輸送容器は円筒形状であることから，二次元輸送計算コードを用いた円筒形状でモデル化している。円筒形状での入力において，本輸送容器の軸方向において複数の材質が存在する空間は，線量当量率評価の観点で保守的となる材質を選択するか又は均質化を行う必要がある。本輸送容器の燃料有効部，燃料上部構造材及び燃料下部構造材はボイド領域を含む複数の材質が存在しており，これらの領域については均質化モデルを採用し，それぞれの領域でボイド領域と構造材で均質化している。均質化モデルを採用するに当たり，線源となる使用済燃料集合体の位置は，(ロ)-第 D.1 図に示すとおり，輸送容器の蓋部及び底部に接した状態

でのモデルとし，線源と線量当量率評価点までの距離が近い保守的なモデルとした。

本遮蔽解析のモデルの妥当性確認のため，本輸送容器を対象に，燃料集合体ごとにモデル化（以下「詳細モデル」という。）して三次元モンテカルロコードMCNP5を用いて軸方向の線量当量率を評価した結果と均質化モデルに対して二次元輸送計算コードで軸方向の線量当量率を評価した結果の比較を確認した。(ロ)-第D.付5図及び(ロ)-第D.付6図に示すとおり，比較の結果，均質化モデルと詳細モデルは同等であり，均質化モデルは妥当であることが確認できる。

なお，本遮蔽解析モデルでは，バーナブルポイズン集合体は放射化線源強度のみを考慮して，構造材としての遮蔽効果は無視しているため保守的な設定となっている。

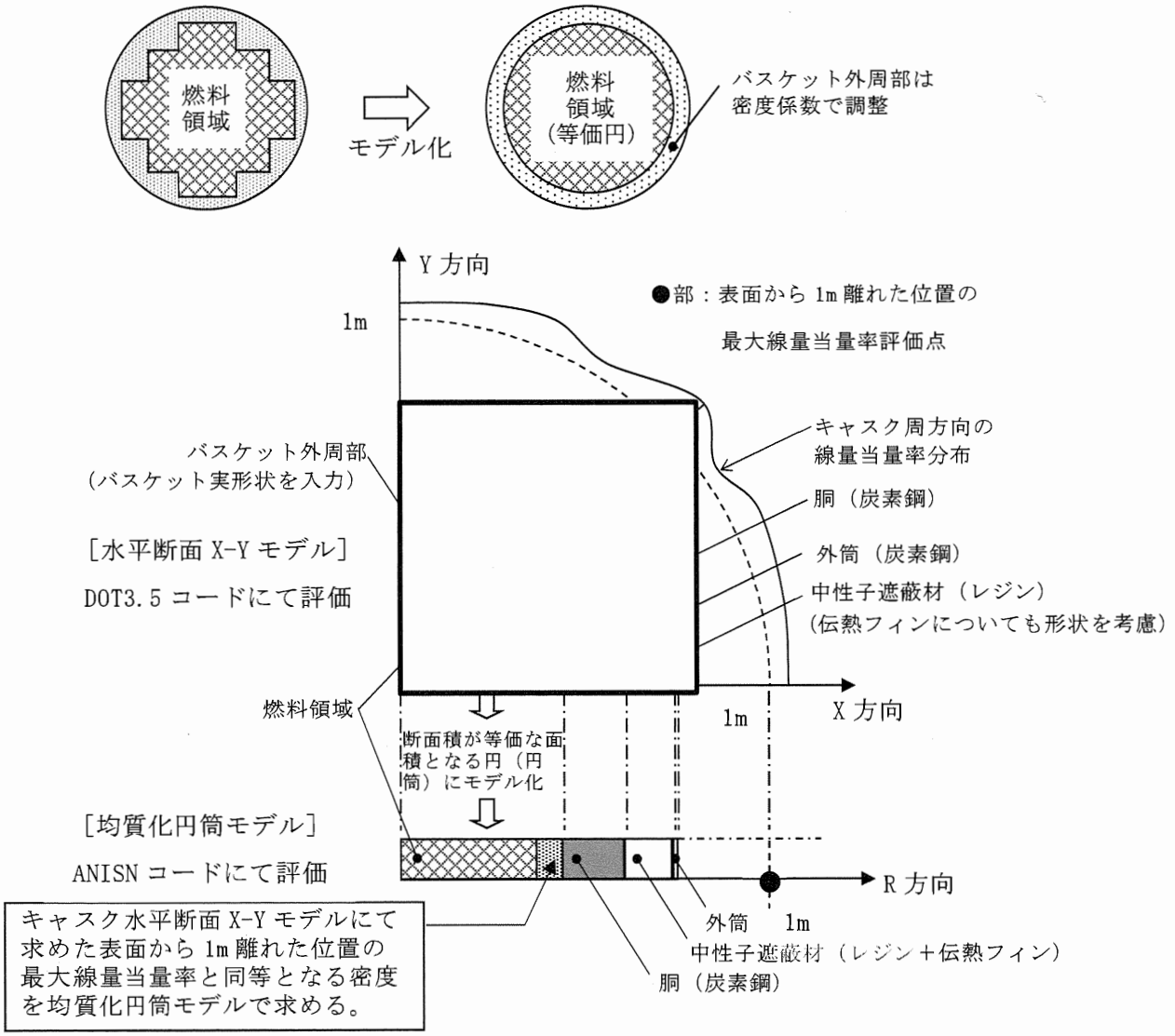


［キャスク断面］　　［均質化］

遮蔽解析モデルへの入力

二次元モデルの解析では，円筒形状での入力となるため，燃料領域の断面積と等価な面積となる円（円筒）にモデル化している。その際，燃料領域は使用済燃料集合体とバスケットを均質化した物性値を設定した。

(ロ)-第 D.付 2 図　燃料領域のモデル化（水平断面）



径方向の均質化（バスケット外周部，中性子遮蔽材部）

バスケット外周部は円周方向に不均一な厚さの構造であり，中性子遮蔽材部はレジンと伝熱フィンが存在する不均質な構造であることから，本体モデルでは下記に示す手法により，径方向の密度を設定している。

中性子遮蔽材部：

レジンと伝熱フィンそれぞれの寸法（ノミナル値，寸法公差）を考慮して密度を設定する。

バスケット外周部：

(i)水平断面 X-Y モデル遮蔽解析

水平断面 X-Y モデルによる表面から 1m 離れた位置での最大線量当量率を算出する。

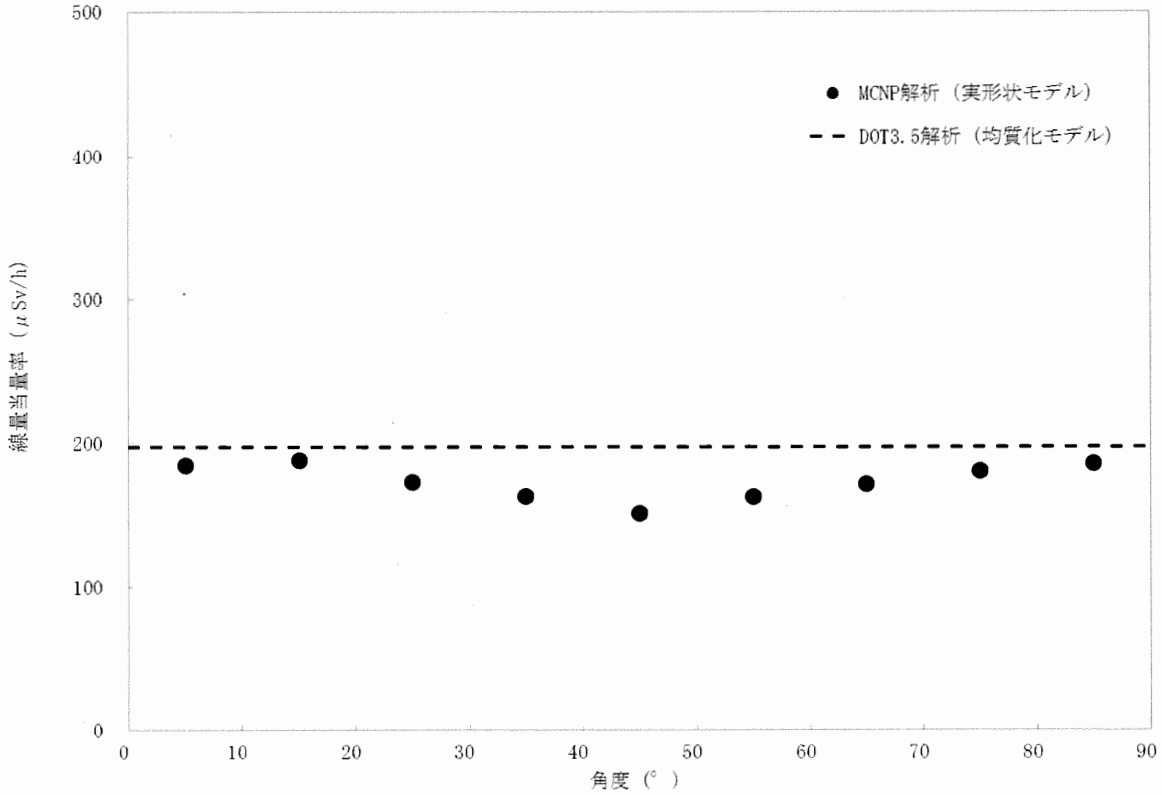
※算出位置を表面から 1m 離れた位置としているのは，表面位置に比べ，基準線量当量率に対する裕度が少ないためである。

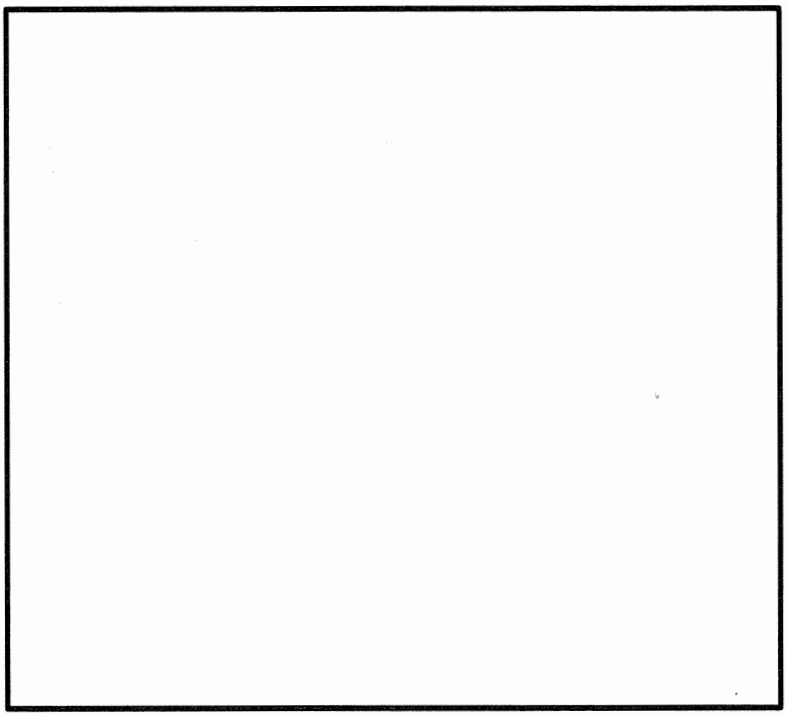
(ii)均質化円筒モデル遮蔽解析

均質化モデルにて，表面から 1m 離れた位置での線量当量率が(i)で算出した最大線量当量率と同等となるバスケット外周部の密度係数を算出する。

中性子遮蔽材部の密度係数に加え，(ii)にて算出したバスケット外周部の密度係数を用いることで，実形状の最大線量当量率を包絡する結果を得ることができる。

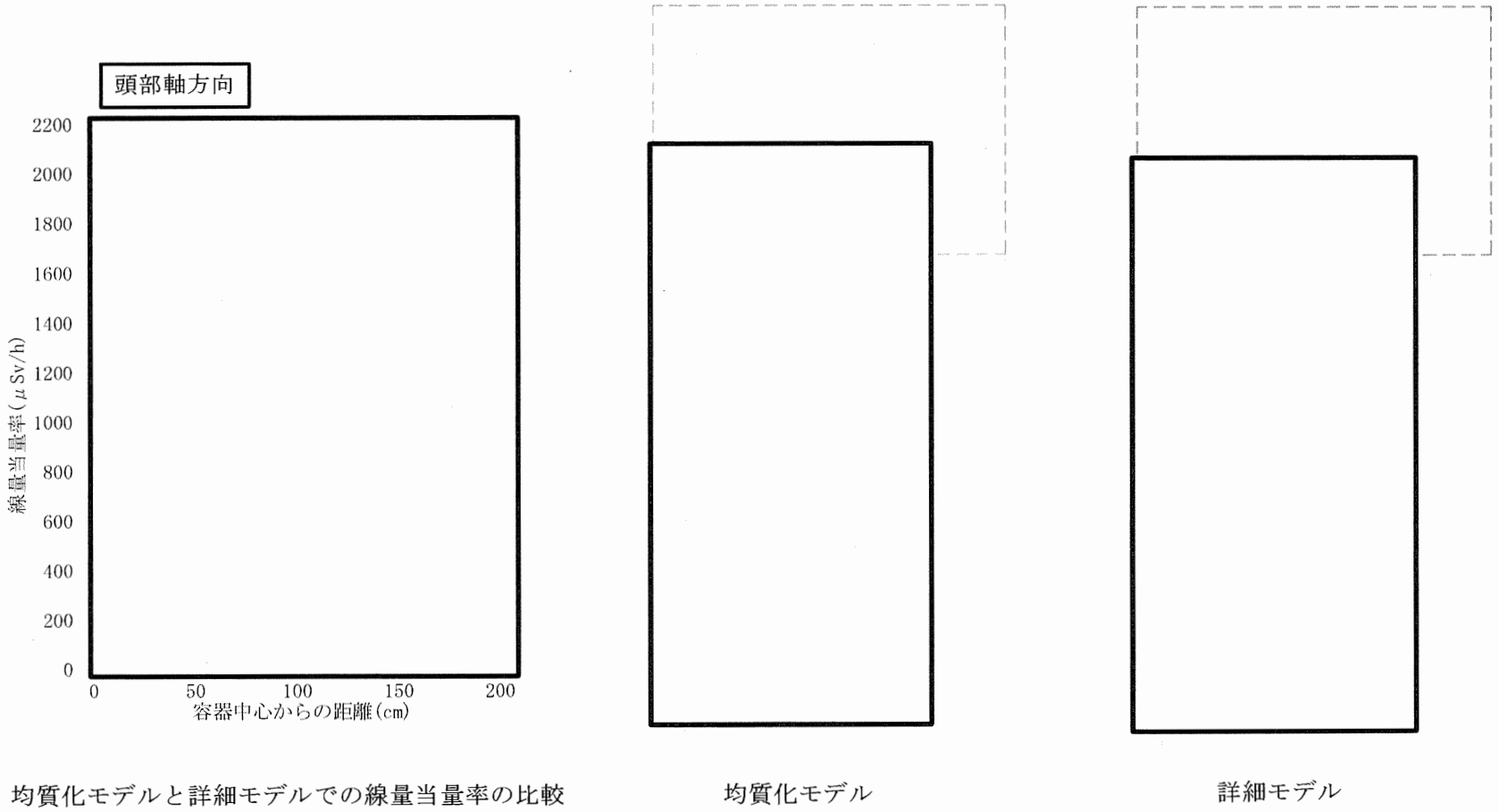
(ロ)-第 D.付 3 図　燃料領域及び側部中性子遮蔽材と伝熱フィン領域のモデル化の詳細



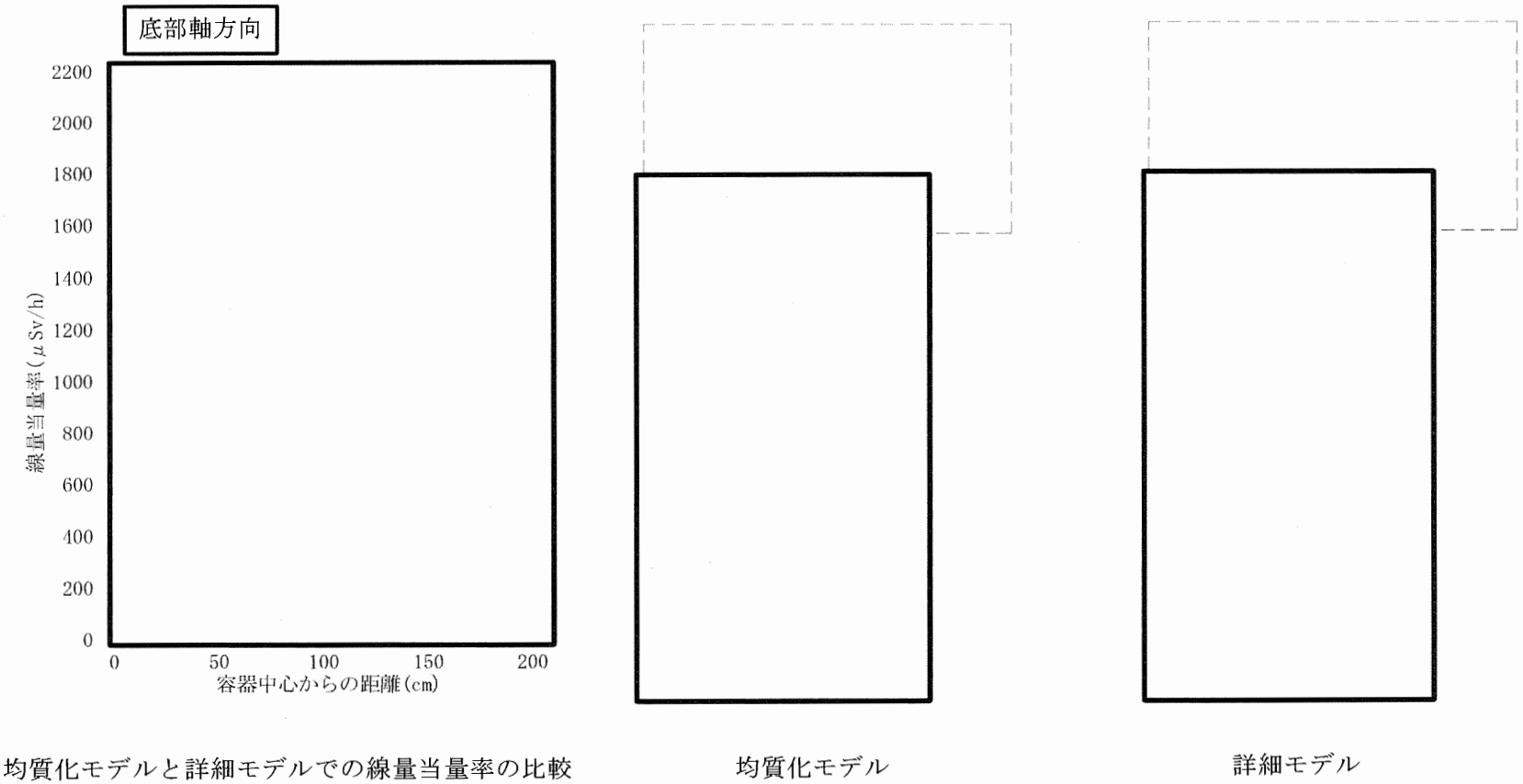


（注）赤色部は評価点位置を示す。

(ロ)-第D.付4図　側部中央周方向の線量当量率分布比較



(ロ)-第 D.付 5 図　均質化モデル（DOT3.5）と詳細モデル（MCNP5）表面の線量当量率分布の比較（頭部軸方向）



(ロ)-第 D.付 6 図　均質化モデル（DOT3.5）と詳細モデル（MCNP5）表面の線量当量率分布の比較（底部軸方向）

D.6.3　中性子遮蔽材の構成元素の原子個数密度と製造時の確認

(ロ)-第 D.8 表に記載の解析に用いる中性子遮蔽材の構成元素の原子個数密度は，中性子遮蔽材の元素組成と，製品仕様としての中性子遮蔽材の密度，水素及び B_4C 含有量の最低値から算出した。

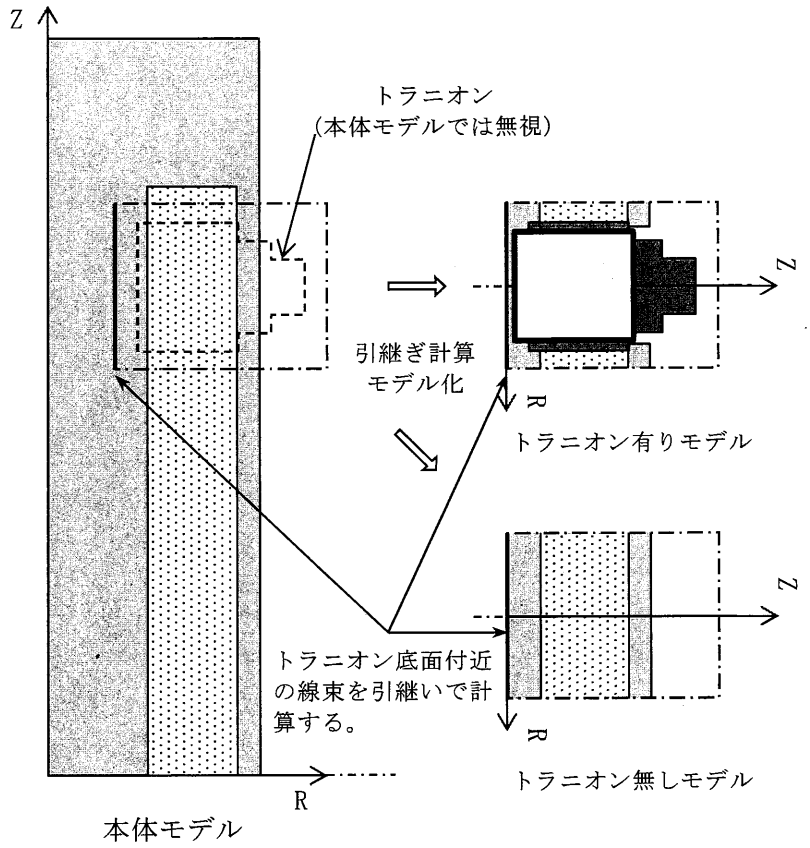
製造時には，中性子遮蔽材の元素組成については，中性子遮蔽材が所定の銘柄又はその相当品であることを確認し，中性子遮蔽材の密度，水素及び B_4C 含有量については，サンプルによる中性子遮蔽材の密度測定記録及び成分分析記録を確認する。

D.6.4　トラニオン部の線束モデル間の引継ぎ及び線量当量率の計算について

1. トラニオン部の線束のモデル間の引継ぎ及び線量当量率の計算

トラニオン部については，実形状を模擬して別途モデル化し，評価している。(ロ)-第D.付7図に示すとおり，トラニオンを無視した本体モデルにて得られたトラニオン底面付近の線束を別途モデル化したトラニオン R-Z 軸対称モデルに引き継いでいる。トラニオン部は，トラニオン中心を通る断面でトラニオン底面及びキャスク本体の一部を含めモデル化している。

なお，トラニオン部の線量当量率は，トラニオン有りモデルとトラニオン無しモデルの計算結果より，線種ごとの計算結果の比を線量当量率補正値として求め，本体モデルの線量当量率にその補正値を考慮して評価している。トラニオン部モデルの詳細及び引継ぎ計算の妥当性について以下に示す。



トラニオン部の線量当量率＝（本体モデル）×（トラニオン有りモデル）／（トラニオン無しモデル）

(ロ)-第 D.付 7 図　トラニオン部の線束引継ぎ計算の概略図

2. トラニオン部モデルの詳細及び引継ぎ計算の妥当性について(注)

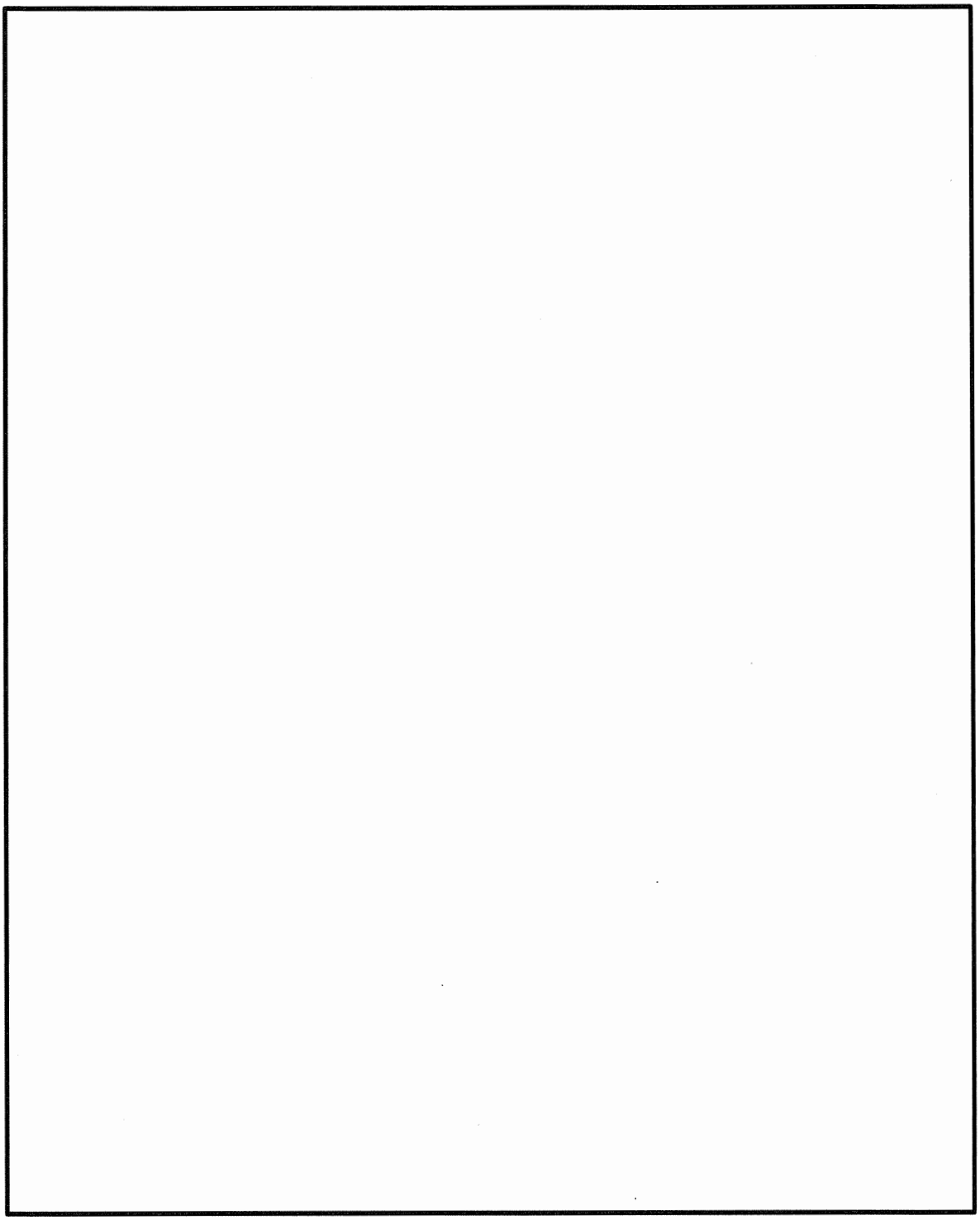
(1)計算条件

a. 本体モデルからトラニオン部モデルへの線束引継ぎ位置の詳細を(ロ)-第 D.付 8 図及び(ロ)-第 D.付 9 図に示す。

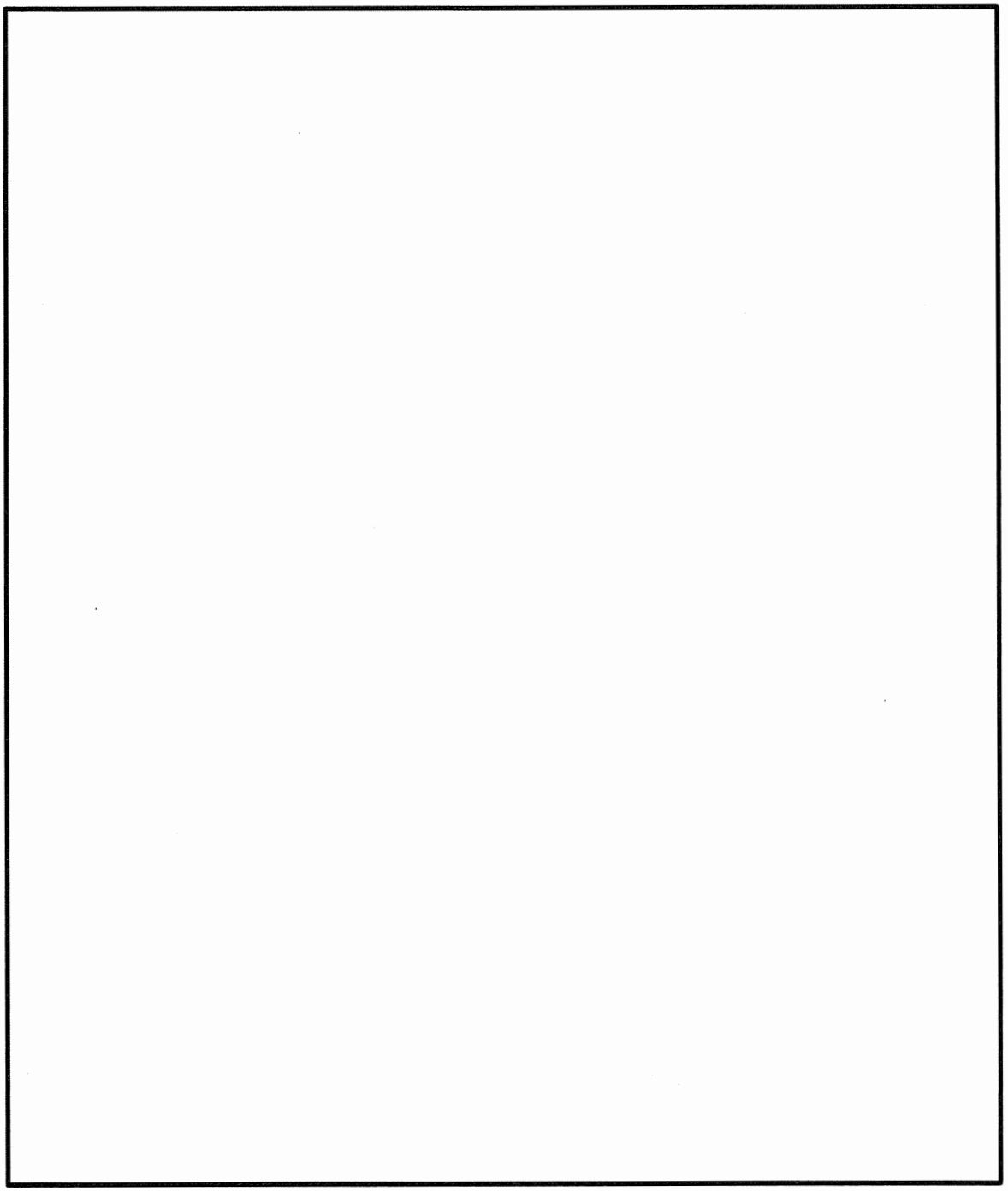
b. 線束引継ぎの範囲は，トラニオン中心位置より燃料有効部側に設定し，保守的な線束を引継ぐ条件とする。

c. その他条件（計算コード，断面積ライブラリ，物性値等）は本体モデルと同じとする。

(注) 本説明については，貯蔵時（緩衝体及び三次蓋が無い状態）の解析モデルを用いて行う。



(ロ)-第 D.付 8 図　頭部の解析モデル（本体モデル，トラニオン引継ぎ位置明示）



(ロ)-第 D.付 9 図　底部の解析モデル（本体モデル，トラニオン引継ぎ位置明示）

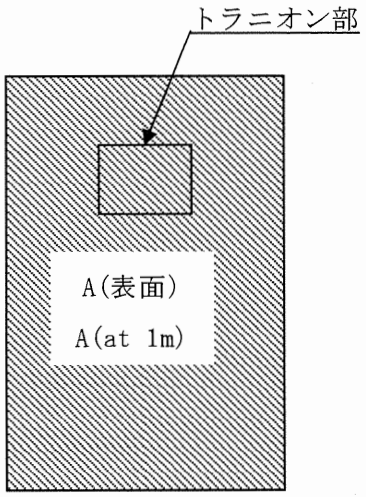
(2) トラニオン部の線量当量率評価方法

トラニオン部の線量当量率評価では，トラニオン部の線量当量率に対する影響比を別途トラニオン有りモデル/無しモデルで算出し考慮している。

その影響比は以下の手順で評価している。

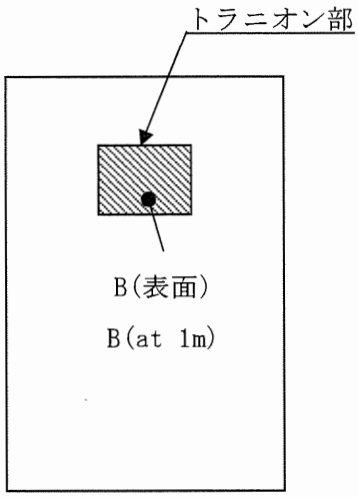
ステップー1

キャスク本体のモデルから(ロ)-第D.付10図のようにトラニオン部が線量当量率に寄与する範囲を定義する。本評価においては，当該範囲をトラニオン中心から約100 cmと設定した。



キャスクR−Zモデル

キャスク全体からの線量当量率寄与A



キャスクR−Zモデル

トラニオン部の線量当量率寄与B

(ロ)-第D.付10図　トラニオン部の範囲の設定イメージ

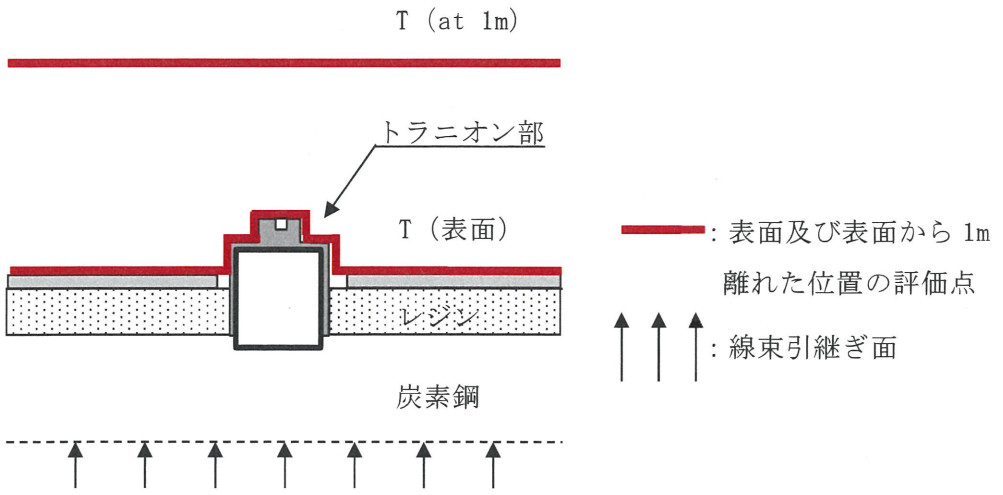
ステップー2

線束の引継ぎ計算モデルを(ロ)-第D.付11図のとおり設定し，表面及び表面から1m離れた位置についてトラニオン有りモデルとトラニオン無しモデルで線量当量率の比（トラニオン部による線量当量率への影響比）を算出する。

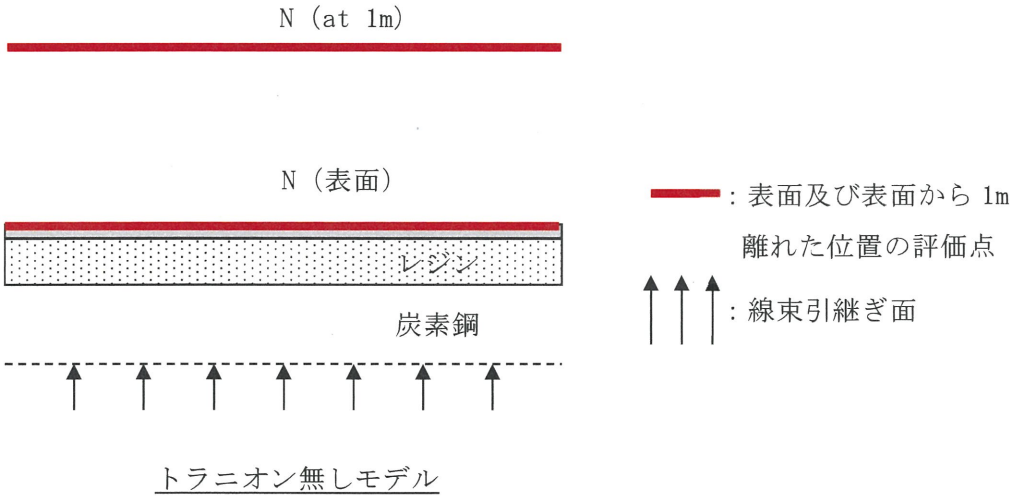
それぞれのモデルの線量当量率を以下のとおりとした。

トラニオン有りモデル：表面の線量当量率をT(表面)
表面から1m離れた位置の線量当量率をT(at 1m)

トラニオン無しモデル：表面の線量当量率をN(表面)
表面から1m離れた位置の線量当量率をN(at 1m)



トラニオン有りモデル



トラニオン無しモデル

(ロ)-第 D.付 11 図　トラニオン計算結果処理方法の詳細

ステップ－３

ステップ－１，２の結果から下式により線量当量率を算出。

表面線量当量率は評価点近傍からの寄与で決まるため，以下のとおり影響比を考慮する。

トラニオン部表面の線量当量率：A(表面)×（T(表面)／N(表面)）

表面から 1m 離れた位置の線量当量率はキャスク全体からの寄与で決まるため，以下のとおり影響比を考慮する。

トラニオン部表面から1m離れた位置の線量当量率：

A(at 1m)－B(at 1m)＋（B(at 1m)×（T(at 1m)／N(at 1m)））

3. 線束引継ぎの妥当性

本体モデル，トラニオン有りモデル，トラニオン無しモデルの線束の等高線図を，(ロ)-第D.付12図から(ロ)-第D.付17図に示す。

トラニオン部の線束引継ぎ計算のモデルは，トラニオン中心位置から100cm程度の範囲までモデル化しており，線束はその範囲で引継いでいる。本体モデル，トラニオン有りモデル，トラニオン無しモデルのトラニオンから離れた位置の線束は同程度となっていることから，トラニオン有りモデル及びトラニオン無しモデルへの線束引継ぎは妥当である（モデル化範囲外からの線束の影響はない）。

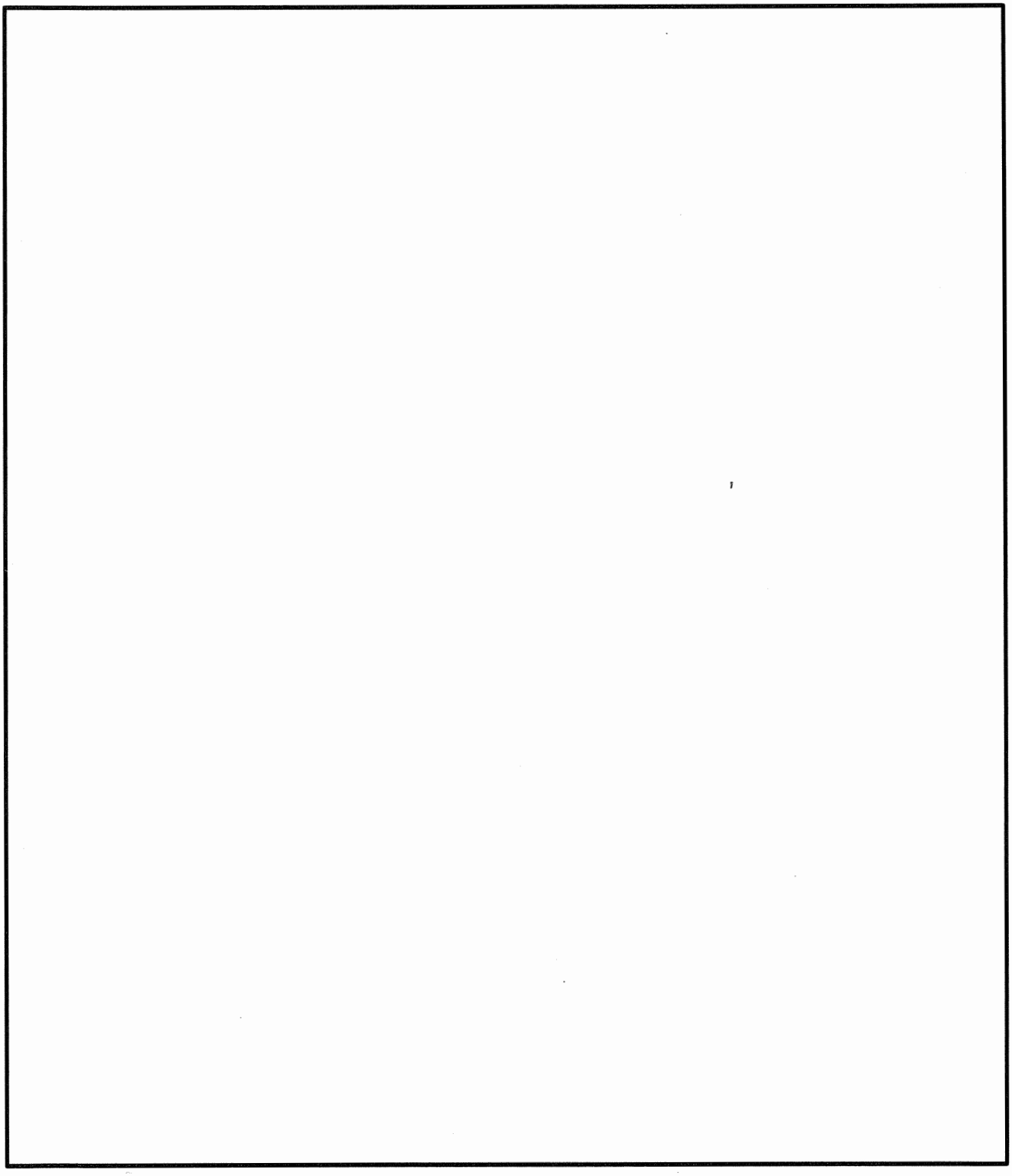
また，トラニオンの有無によって線束が影響を受けるトラニオン付近を除き，トラニオン有りモデルとトラニオン無しモデルの線束は一致しており，トラニオン無しモデルによる線量当量率評価結果がトラニオン有りモデルに対して相対的に高い結果(注1)とならないことを確認している。

以上から，トラニオン部の線束引継ぎ計算方法は妥当である。

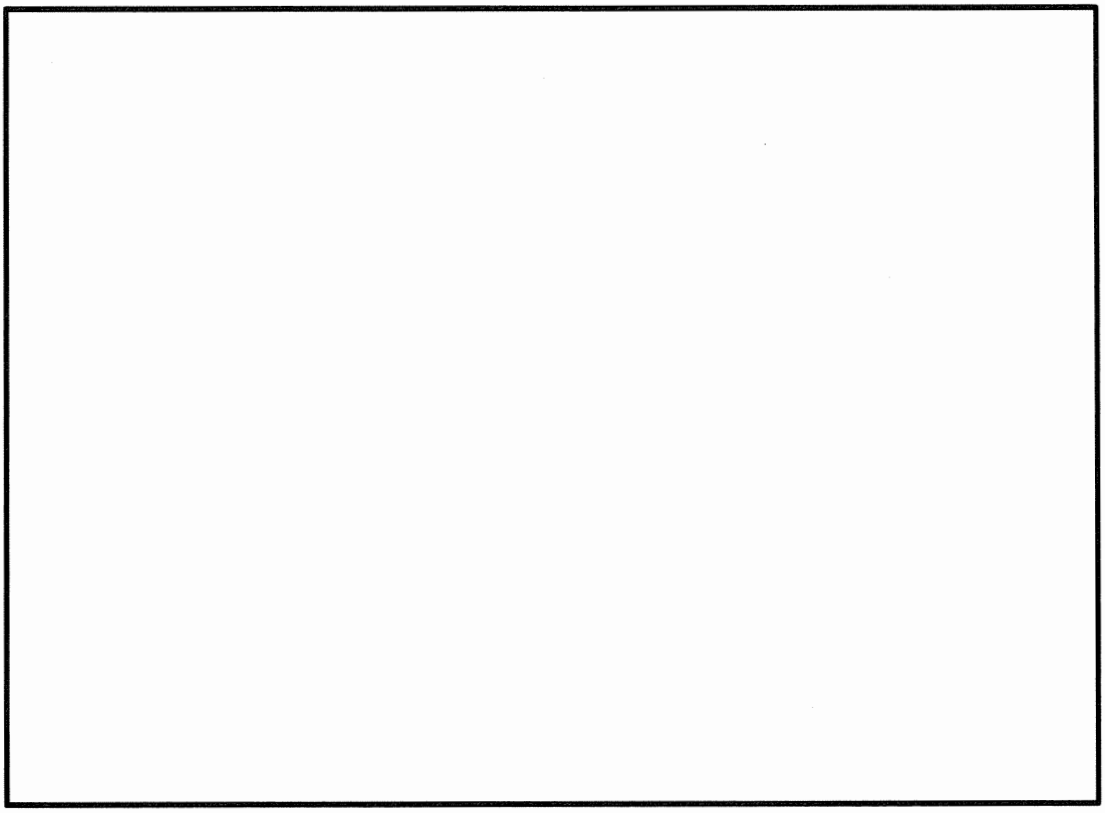
（注1）トラニオン部の線量当量率は次の式で評価されるため，トラニオン無しモデルの線量当量率評価結果がトラニオン有りモデルに対して相対的に高い場合，トラニオン部の線量当量率を過小評価することとなる。

トラニオン部の線量当量率＝

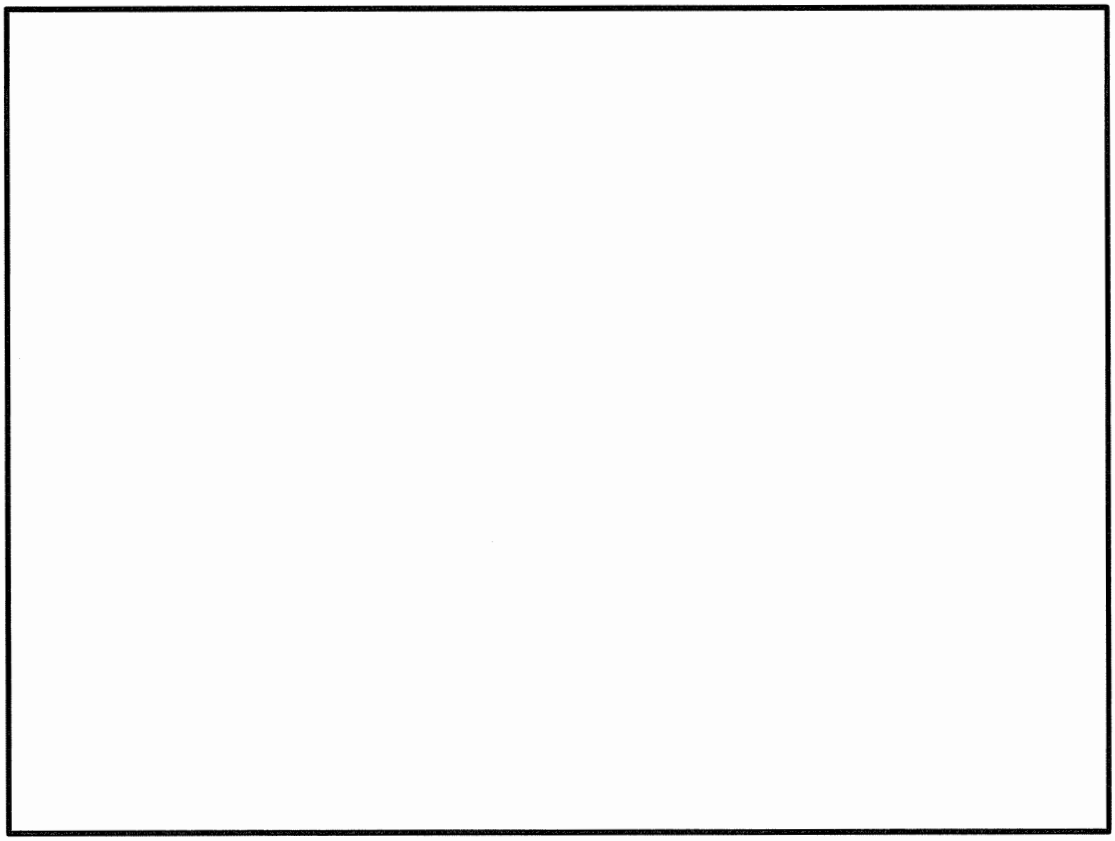
（本体モデル）×（トラニオン有りモデル）／（トラニオン無しモデル）



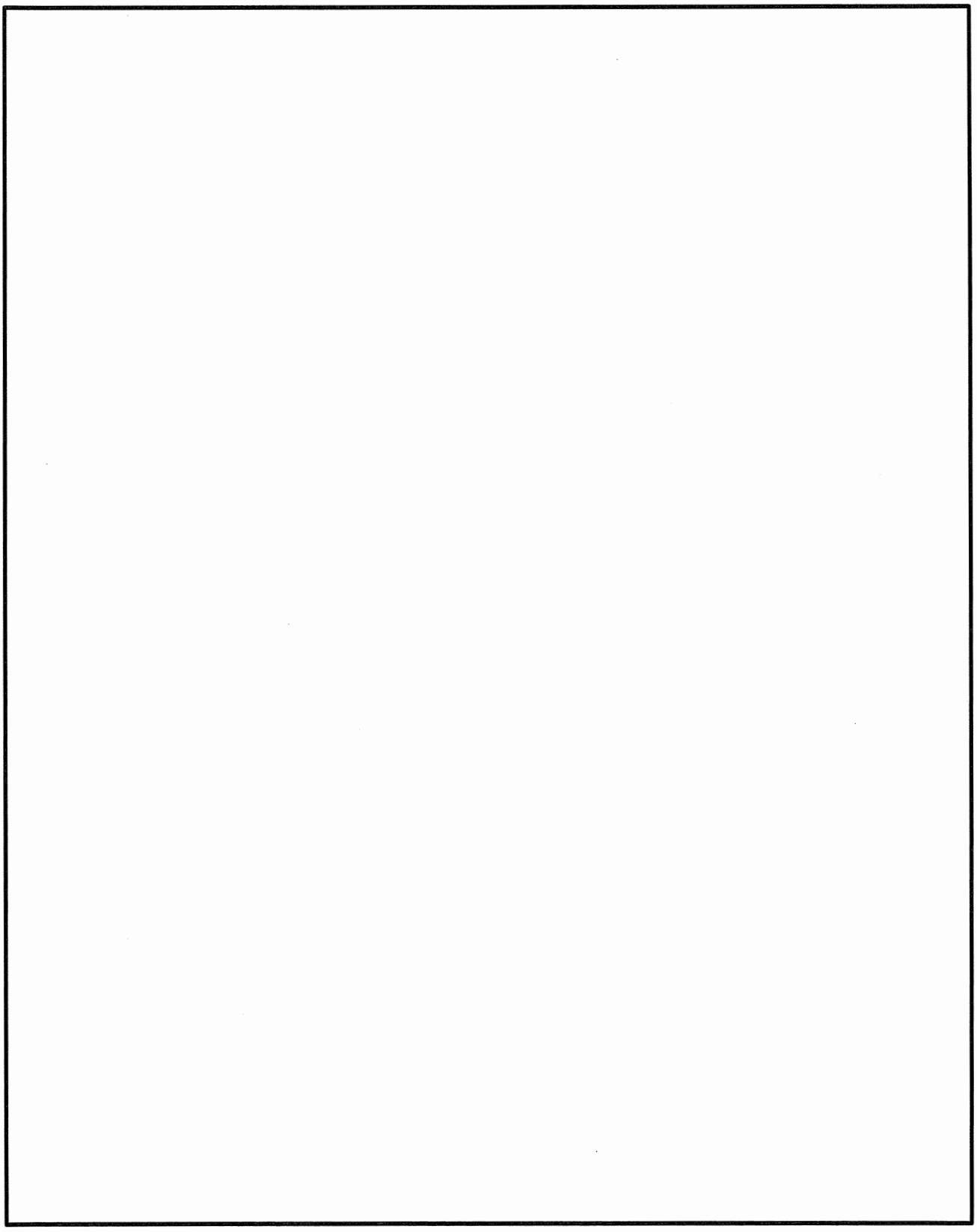
(ロ)-第 D.付 12 図　ガンマ線　線束等高線図　本体モデル（頭部）



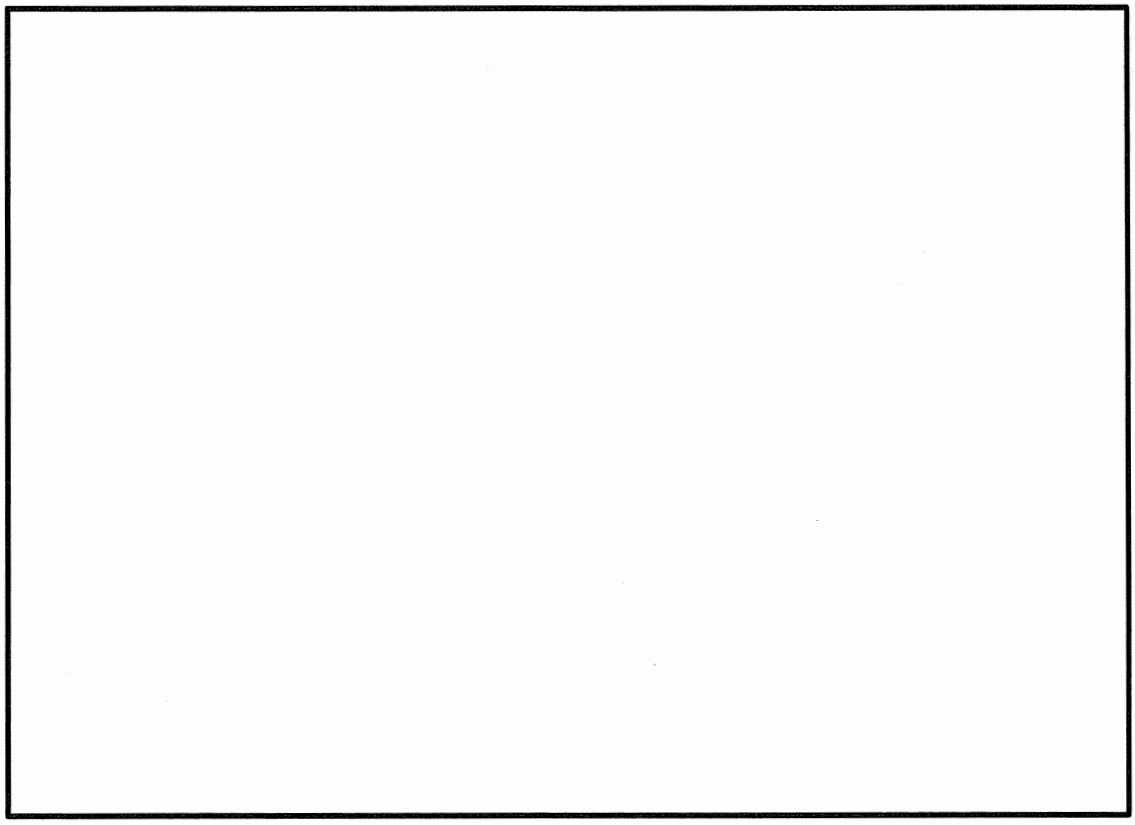
(ロ)-第 D.付 13 図　ガンマ線　線束等高線図　トラニオン有りモデル



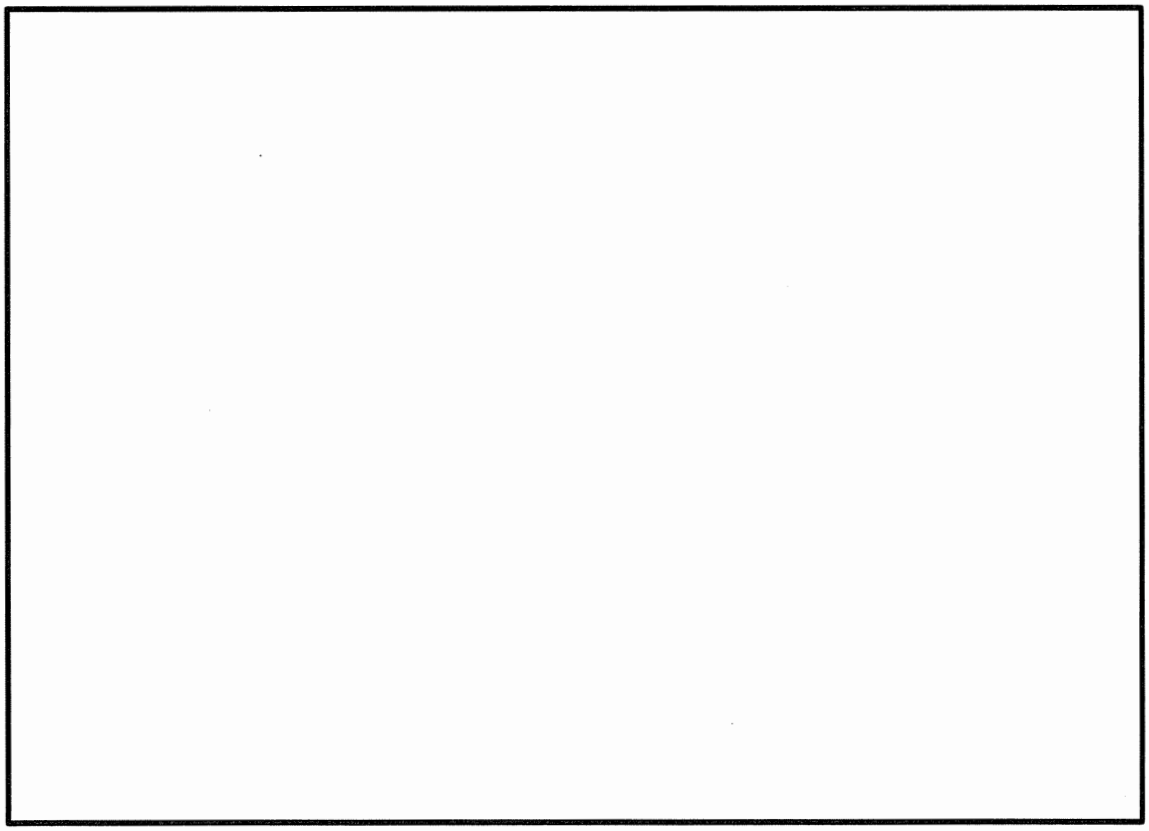
(ロ)-第 D.付 14 図　ガンマ線　線束等高線図　トラニオン無しモデル



(ロ)-第 D.付 15 図　中性子　線束等高線図　本体モデル（頭部）



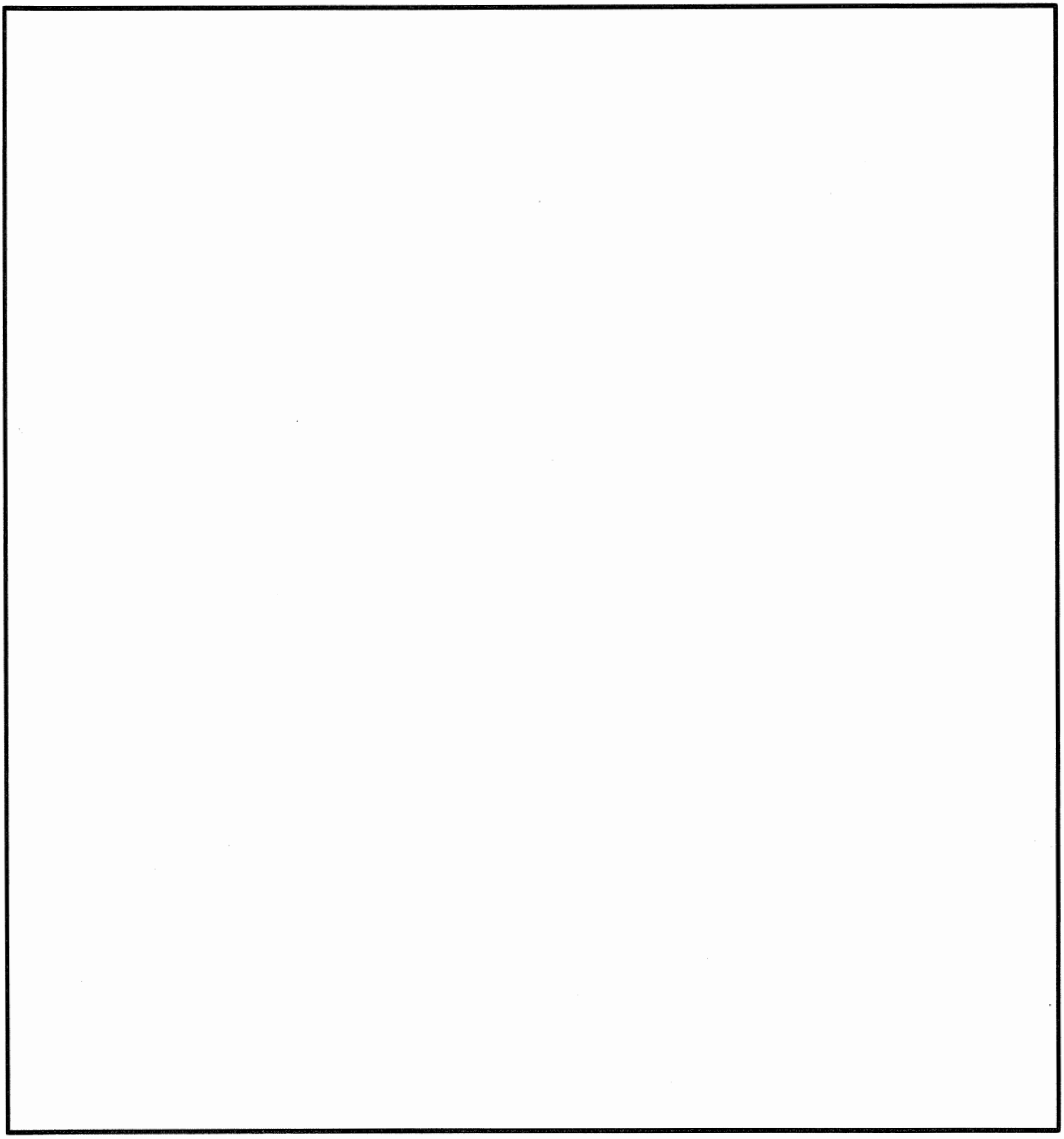
(ロ)-第 D.付 16 図　中性子　線束等高線図　トラニオン有りモデル



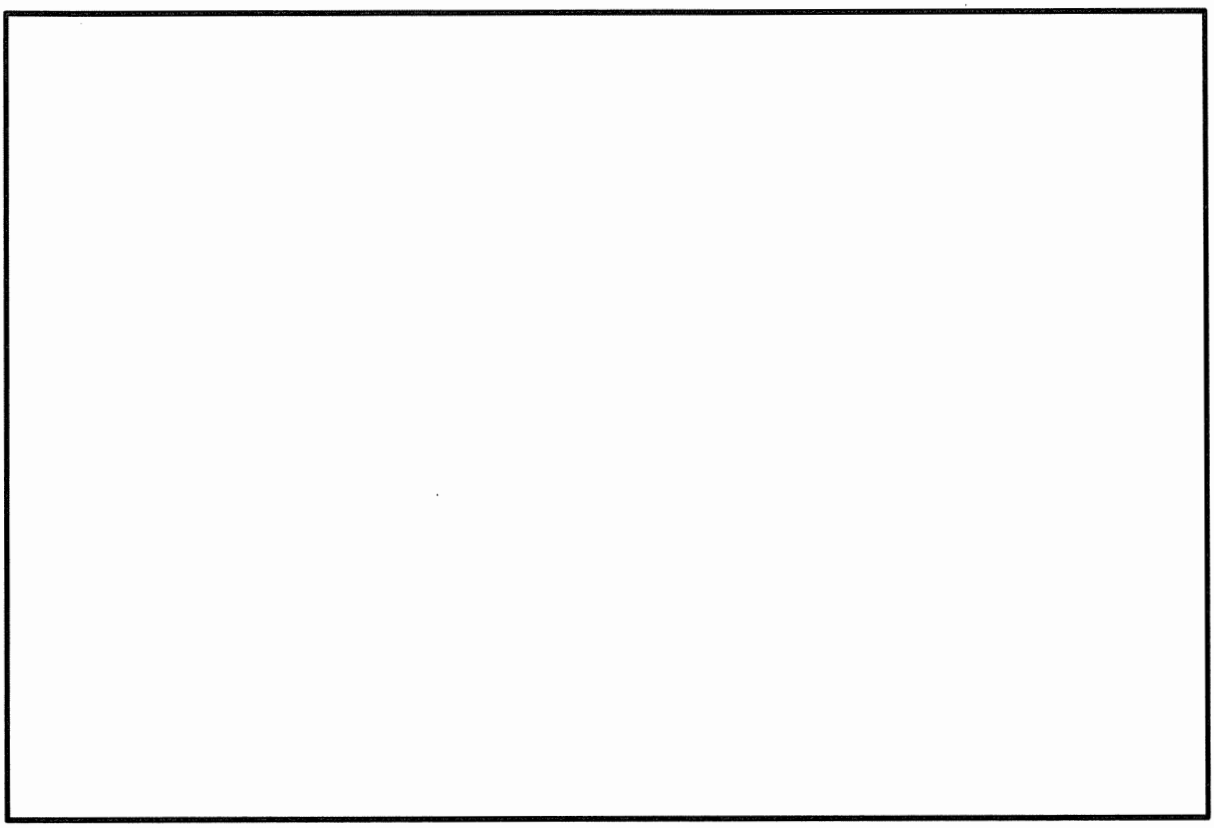
(ロ)-第 D.付 17 図　中性子　線束等高線図　トラニオン無しモデル

4. トラニオン部の線束引継ぎの保守性

線束引継ぎ計算に使用するキャスク本体モデルの線束は，トラニオン中心高さより燃料有効部側（(ロ)-第 D.付 8 図及び(ロ)-第 D.付 9 図参照）をトラニオンモデルの底面境界位置に設定している。トラニオン中心高さより上部の境界位置の線束は現実的な線束より高い値となるため，保守的な設定である（(ロ)-第 D.付 18 図及び(ロ)-第 D.付 19 図参照）。



(ロ)-第 D.付 18 図　線束引継ぎ計算の概要図



(ロ)-第 D.付 19 図　線束引継ぎの保守性概要図

D.6.5 参考文献

1) M. Ishikawa, T. Jin, J. Katakura, M. Kataoka, H. Matsumoto, Y. Ohkawachi, S. Ohki, A. Onoue, A. Sasahara, K. Suyama, H. Yanagisawa, "ZZ-ORIGEN2.2-UPJ, A Complete Package of ORIGEN2 Libraries Based on JENDL-3.2 and JENDL-3.3", OECD/NEA Databank, (2006).

2) Oak Ridge National Laboratory, "DOT3.5-Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code", CCC-276, (1977).

3) K. Kosako, N. Yamano, T. Fukahori, K. Shibata and A. Hasegawa, "The Libraries FSXLIB and MATXSLIB Based on JENDL-3.3", JAERI-Data/Code 2003-011, (2003).

4) Brookhaven National Laboratory, "Neutron Cross Sections", BNL-325 Third Edition, (1973).

5) ICRP, "Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation", ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26(3-4), (1996).

(ロ)章E　臨界解析

E. 臨界解析

E.1 概要

本輸送容器のバスケットは，断面形状が中空状であるアルミニウム合金製のバスケットプレートで構成された格子構造であり，個々の燃料集合体が輸送容器の所定の位置に収納される。また，バスケットプレートと中性子吸収材を併せて配置することで臨界を防止する構造としている。

本輸送容器は燃料集合体を収納後，内部水が排出され，さらに真空乾燥が行われる。また，密封性能を有した複数の蓋を有しており，核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件下においても胴内に水が浸入することはない。したがって，胴内を告示第 25 条第 1 号のただし書きに記載されている「浸水及び漏水を防止する特別な措置が講じられた部分」とし，胴内を水で満たさない条件で臨界解析を行うこととする。

本臨界解析では，核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下における輸送容器及び燃料集合体の変形を考慮し，境界条件として完全反射を仮定することにより，以下の条件より厳しい評価とする。

① 通常輸送時

② 輸送物を孤立系の条件に置く場合

③ 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置いた輸送物を孤立系の条件に置く場合

④ 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の下に置いた輸送物を孤立系の条件に置く場合

⑤ 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置いた輸送物を配列系の条件に置く場合

⑥ 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の下に置いた輸送物を配列系の条件に置く場合

臨界解析には，SCALE コードシステム [1] を用い，中性子実効増倍率（keff）の計算は多群モンテカルロ法による KENO-VIコード [1] を用いて行った。その結果，中性子実効増倍率は標準偏差（σ）の 3 倍を加えても十分未臨界である。

したがって，本輸送物は上記①～⑥のいずれの条件においても未臨界である。

E.2 解析対象

E.2.1 収納物

本輸送容器には PWR 燃料集合体を 24 体収納する。

本輸送容器に収納する燃料集合体の型式と仕様は(イ)-第 A.1 表に示したとおりであり，17×17 燃料を全数収納した場合の臨界解析を実施する。臨界解析の対象燃料は，中性子実効増倍率が最も大きくなる 17×17 燃料 48000MWd/t 型（A型）とする。燃料集合体の仕様を(ロ)-第 E.1 表に示す。

本輸送容器に収納する燃料集合体は照射済のものであるが，^{235}U 濃縮度は未照射のままの減損していない値をとり，安全側の仮定とする。また，燃料集合体には可燃性毒物としてガドリニウムを添加した燃料棒が含まれる場合があるが，ガドリニウムの存在を無

視する。さらに，燃料集合体はバーナブルポイズン集合体を挿入した状態で収納される場合があるが，バーナブルポイズン集合体を無視する。

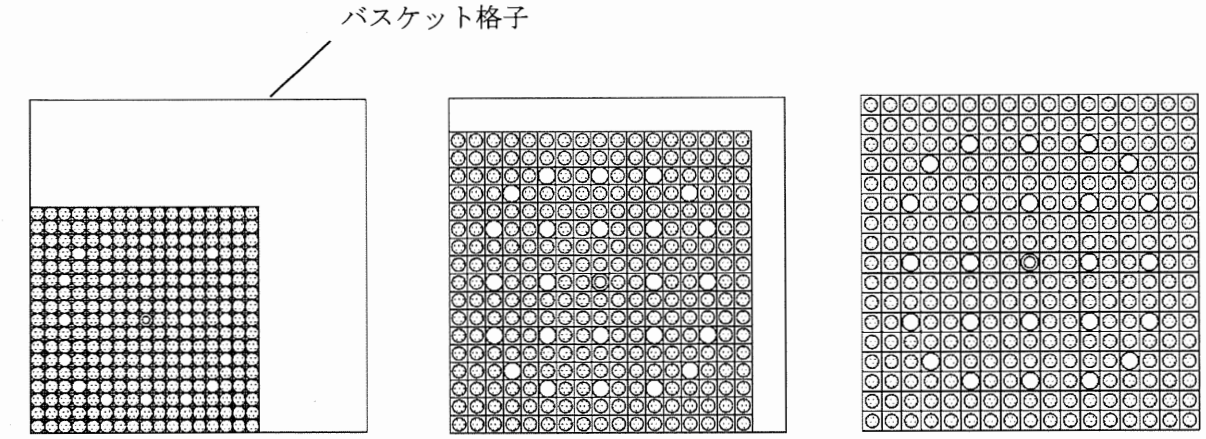
また，核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下における燃料集合体の変形を考慮し，輸送容器に収納される全燃料集合体について支持格子1スパン間の燃料棒ピッチの変化を仮定する。燃料棒ピッチ変化の中性子実効増倍率への影響を確認するため，燃料棒ピッチが変形前のピッチである場合に加えて，燃料棒ピッチが最小（燃料棒直径と等しい）の場合及び燃料棒がバスケット格子内で均一に拡がった場合について評価する。(ロ)-第E.1図にピッチ変化部位の燃料モデルを示す。

(ロ)-第E.1表　臨界解析に用いる燃料集合体の仕様

項　目	単位	17×17燃料 48000MWd/t型 A型
燃料材質	—	二酸化ウラン
被覆管材質	—	ジルカロイ-4
燃料密度	%理論密度	95
燃料棒直径	cm	0.95
ペレット直径	cm	0.819
被覆管肉厚	cm	0.057
燃料有効長	cm	364.8
燃料棒配列	—	17×17
燃料集合体当たりの燃料棒数	本	264
燃料棒ピッチ	cm	1.26 (注1)
燃料集合体の幅	cm	21.42 (注2)
初期濃縮度	wt%	4.2

(注1)燃料棒ピッチ変化なしの場合

(注2)（燃料棒ピッチ）×（燃料棒配列数）を臨界解析上の集合体の幅とする。



(ロ)-第 E.1 図　燃料モデル（ピッチ変化部位）

E.2.2　輸送容器

輸送容器の形状は，(イ)-第 C.2 図等に示すとおりである。

本輸送容器は(ロ)章 A.9 に示すとおり核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下において，臨界評価に影響する構造物の形状変化は生じない。

また，核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下において，臨界評価に影響するものとして，外筒が 1m 貫通試験により損傷し，熱的試験において側部中性子遮蔽材のレジンの一部が焼損するが，臨界解析では中性子遮蔽材を無視している。

E.2.3　中性子吸収材

(イ)-第 C.14 図にバスケットの構造を示す。

バスケットプレートは，アルミニウム合金製であり，ほう素添加アルミニウム合金製の中性子吸収材が併せて配置される。ほう素添加アルミニウム合金の原子個数密度を E.3.2 に示す。

核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下において，バスケットプレートは変形しないため，中性子吸収材の配置に変化はない。

E.3　モデル仕様

E.3.1　解析モデル

(ロ)-第E.2図に臨界解析モデルを示す。解析モデルは安全側の評価となるよう以下の条件を考慮した。

・輸送物が無限に配列している体系とする。

・中性子遮蔽材を無視する。

・緩衝体及び三次蓋を無視する。

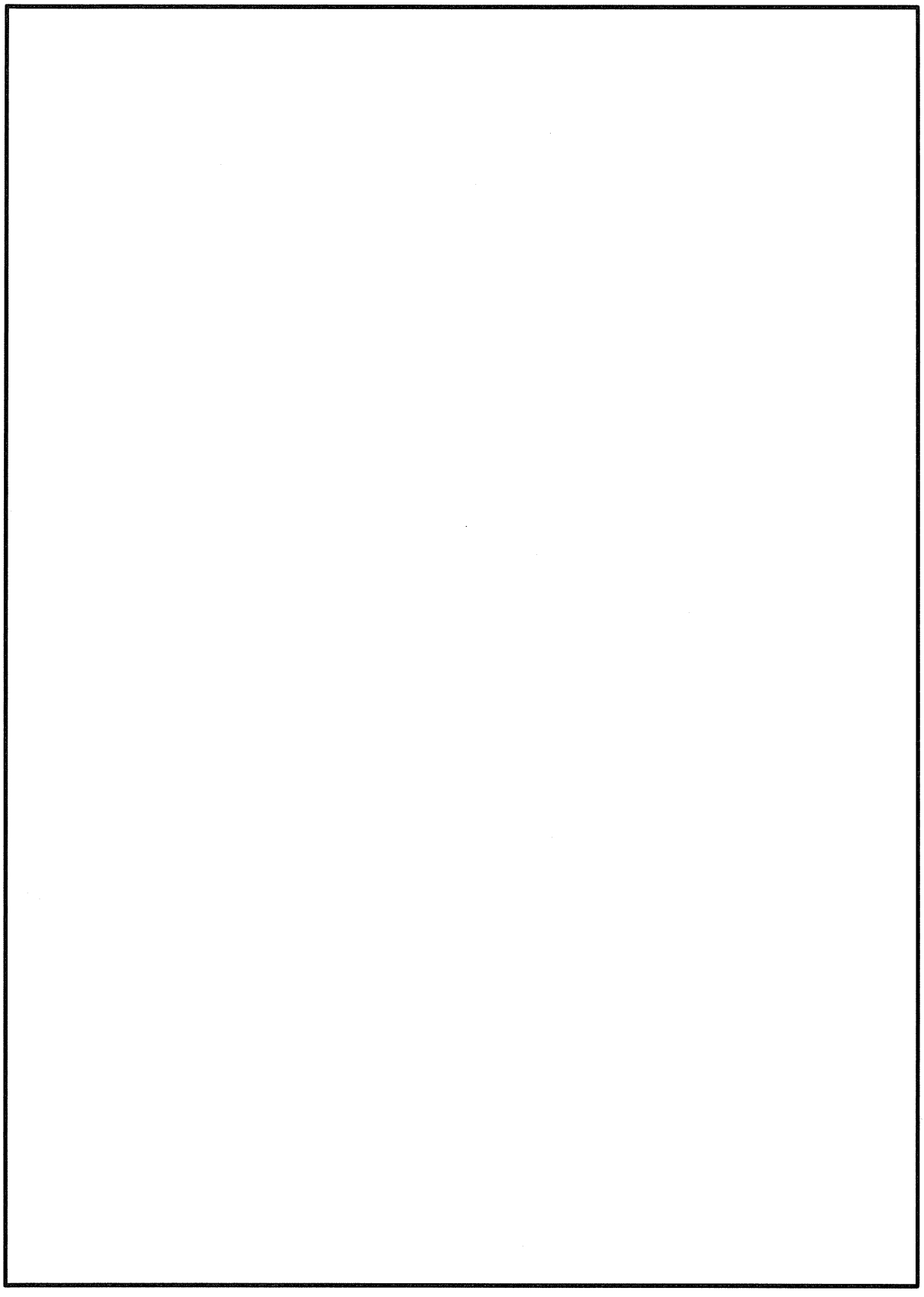
・中性子実効増倍率が最大となるように，バスケットプレート板厚，バスケットプレート内幅，中性子吸収材板厚及びバスケット格子内のりの公差を考慮する。

・バスケット格子内の燃料集合体は，中性子実効増倍率が最大となるように配置する。（燃料棒ピッチを拡大しない場合）

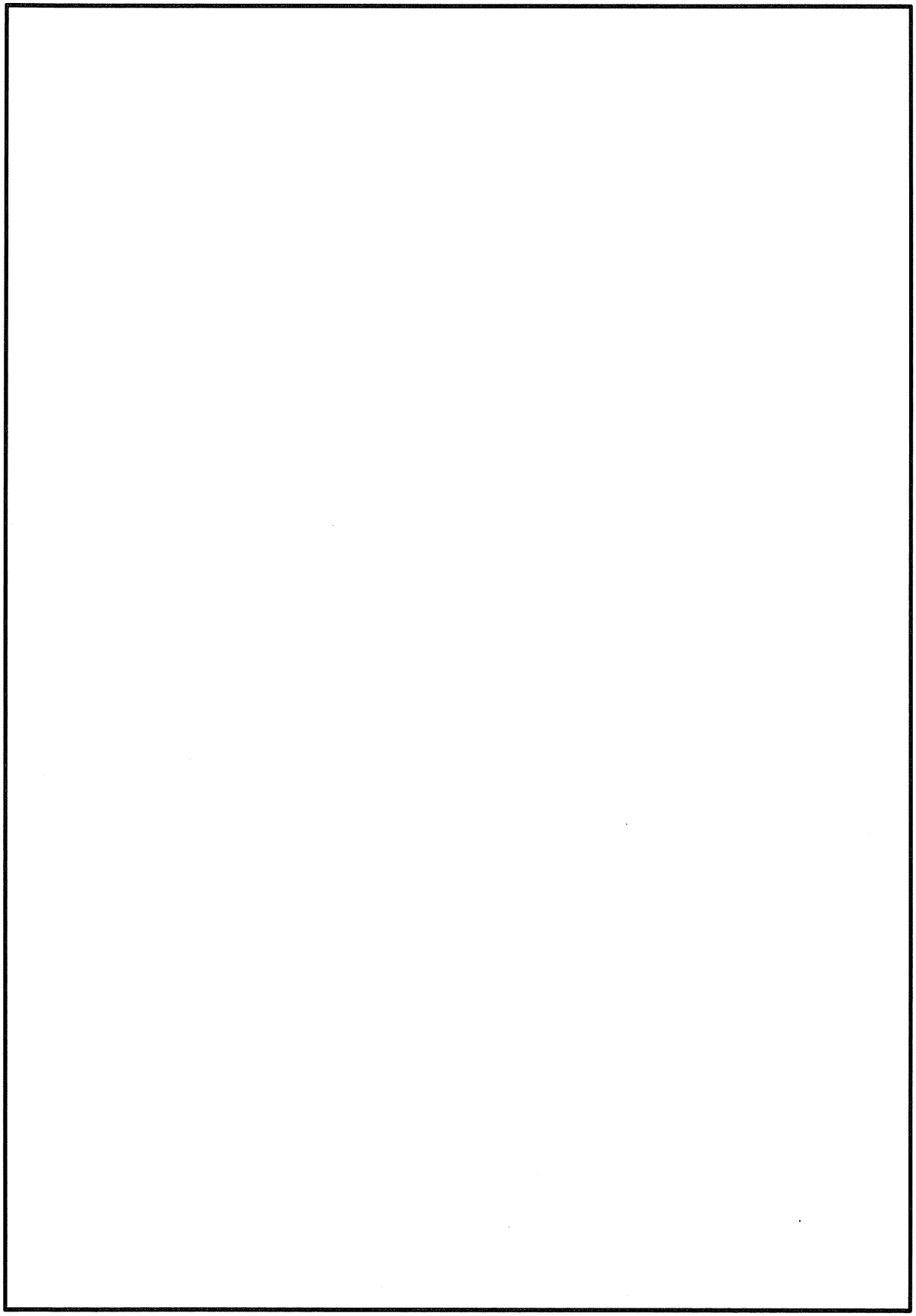
・支持格子1スパン間の燃料棒ピッチの変化を考慮する。

・安全側に胴内には5000cm^{3}の水が均一に分散していると仮定する。

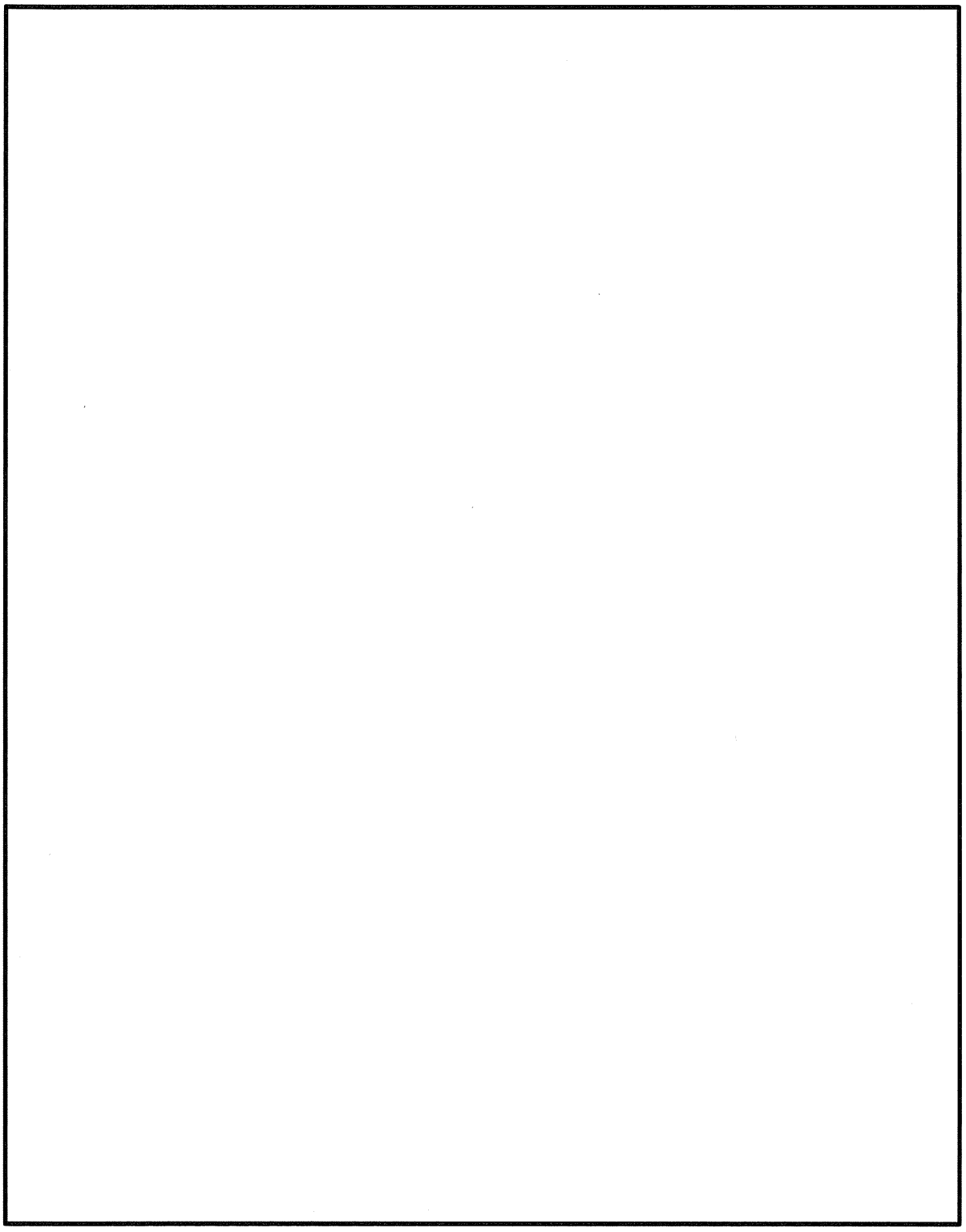
・バスケットプレート及び中性子吸収材は，中性子の吸収が小さくなるように，実在する部分は燃料有効部に相当する部分のみと仮定し，それ以外の部分は無視する。



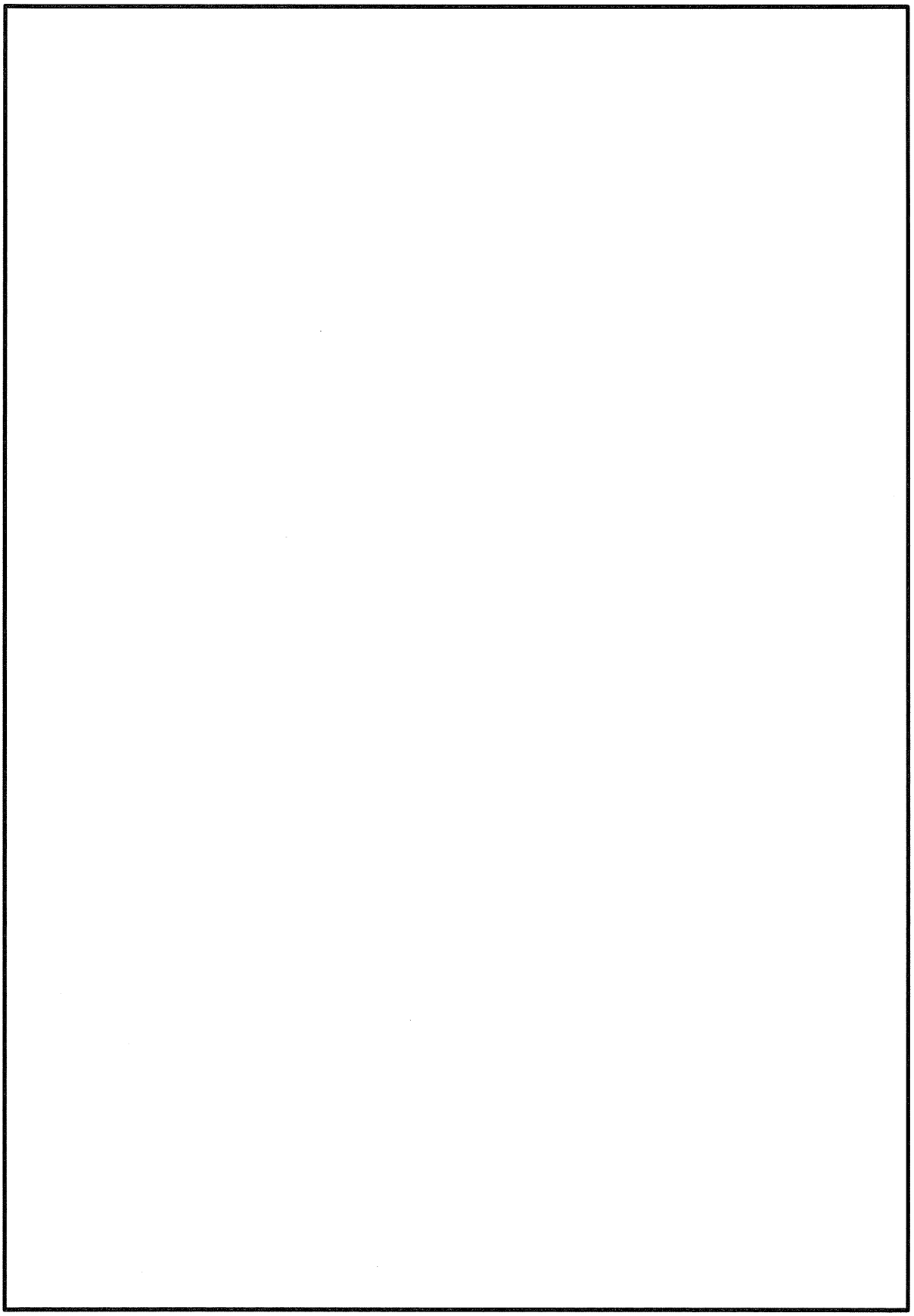
(ロ)-第 E.2 図(a)　臨界計算モデル（縦断面図）



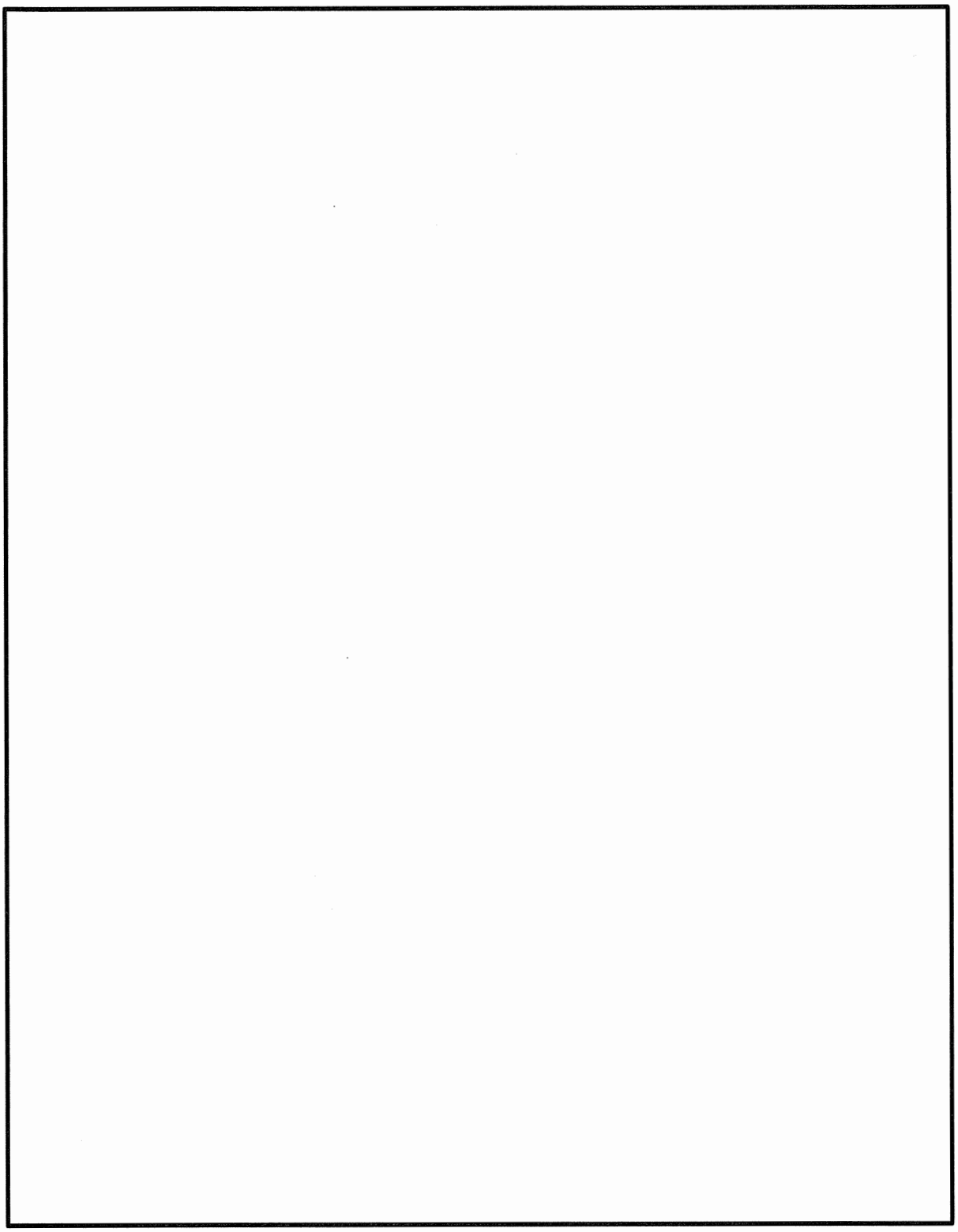
(ロ)-第 E.2 図(b-1)　臨界計算モデル（燃料領域横断面図）（燃料棒ピッチ最小）



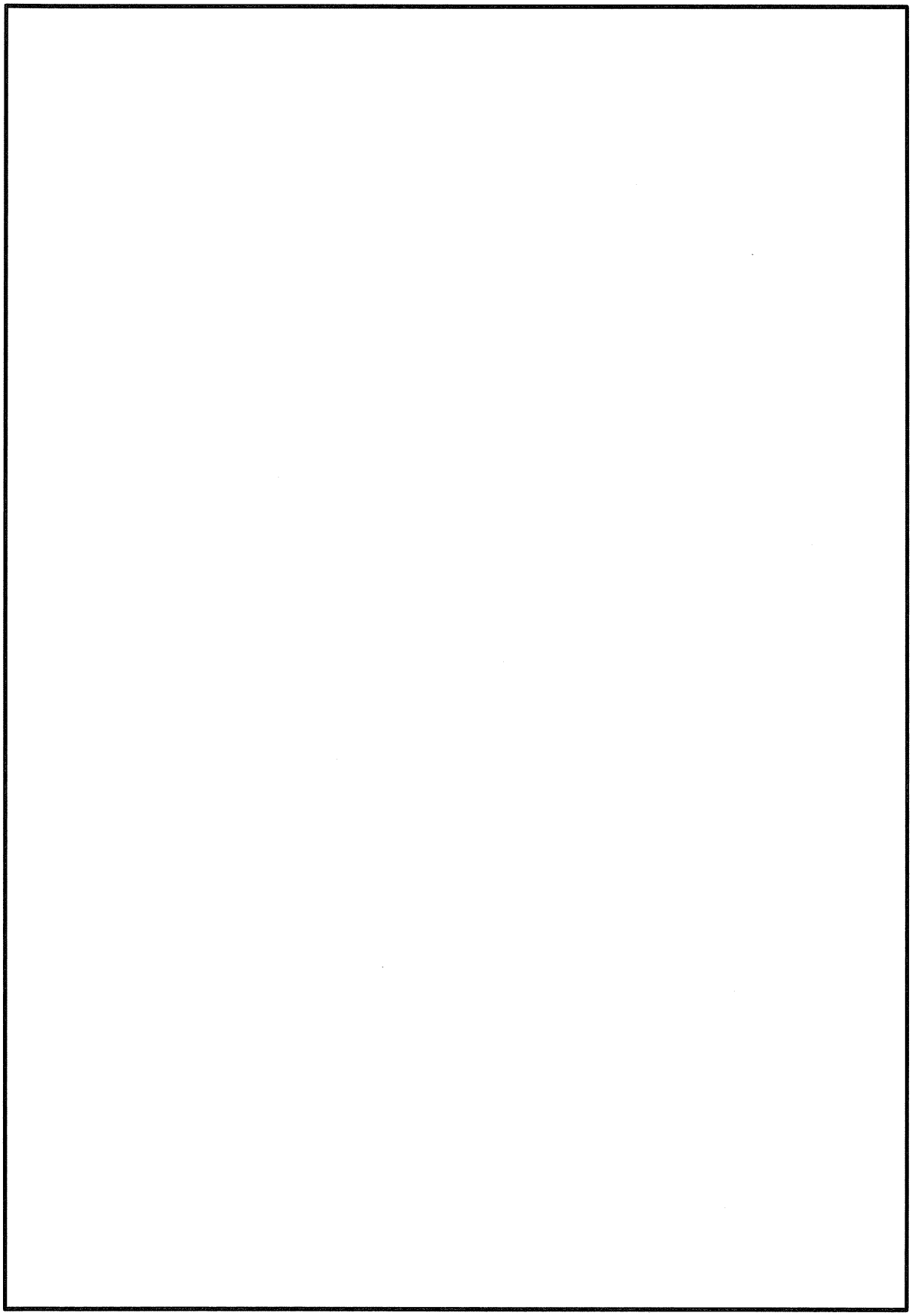
(ロ)-第 E.2 図(b-2)　臨界計算モデル（燃料領域拡大図）　(燃料棒ピッチ最小)



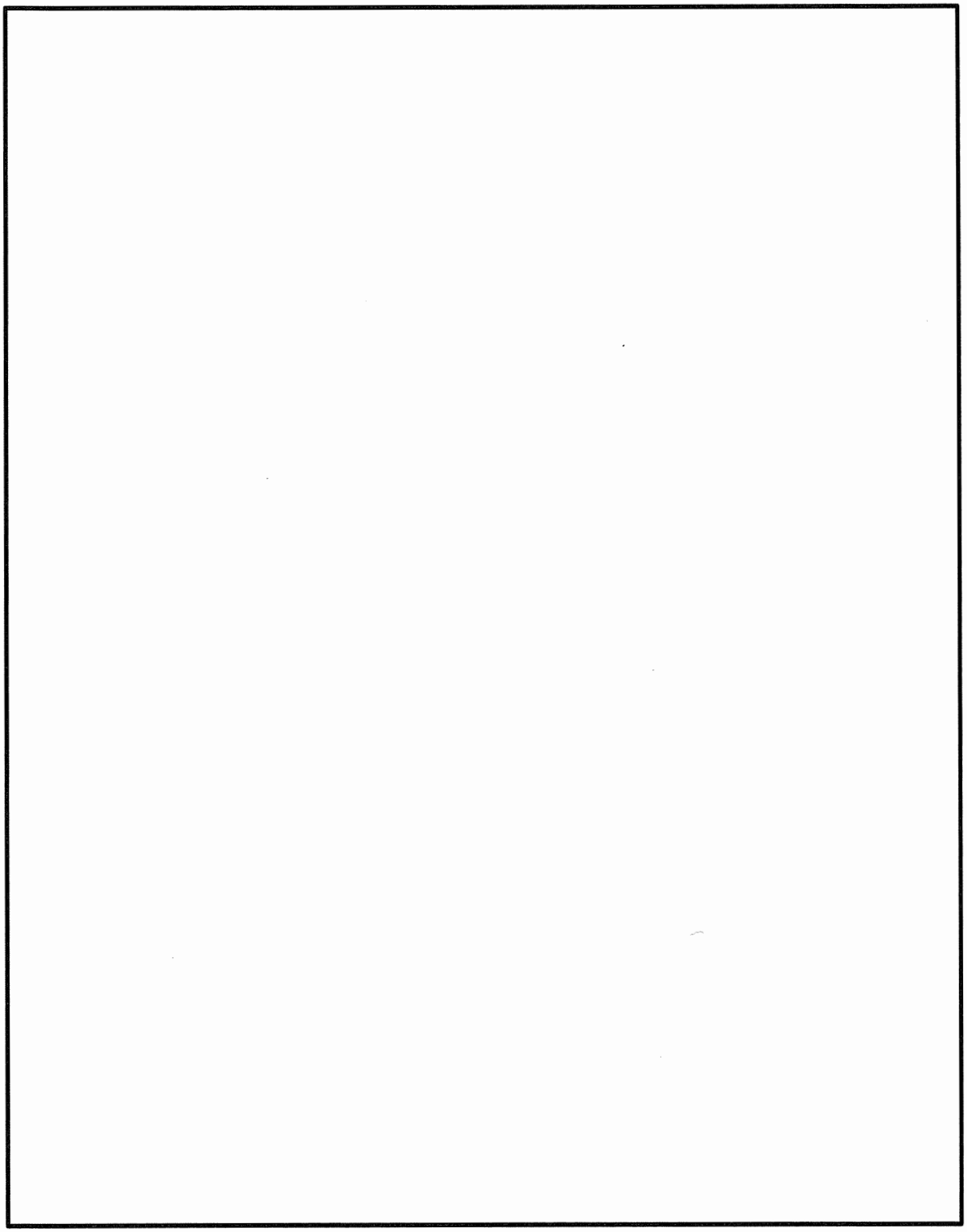
(ロ)-第 E. 2 図(b-3)　臨界計算モデル（燃料領域横断面図）（燃料棒ピッチ変化なし）



(ロ)-第 E.2 図(b-4)　臨界計算モデル（燃料領域拡大図）　（燃料棒ピッチ変化なし）



(ロ)-第 E.2 図(b-5)　臨界計算モデル（燃料領域横断面図）（燃料棒ピッチ均一拡大）



(ロ)-第 E.2 図(b-6)　臨界計算モデル（燃料領域拡大図）（燃料棒ピッチ均一拡大）

E.3.2　解析モデル各領域における原子個数密度

本臨界解析で用いた輸送物各領域の構成物質の原子個数密度を(ロ)-第E.2表に示す。

(ロ)-第E.2表　輸送物各領域の原子個数密度

領域		密度 (g/cm^3)	元素	原子個数密度 (10^{24} atoms/cm^3)
燃料領域	UO_2	[redacted]	^{235}U	[redacted]
			^{238}U	
			O	
	燃料棒被覆管 制御棒案内管 計装用案内管	[redacted]	Zr(注)	[redacted]
	胴内ガス	[redacted]	H	[redacted]
			O	
ほう素添加 アルミニウム合金		[redacted]	^{10}B	[redacted]
			^{11}B	
			C	
			Al	
炭素鋼		[redacted]	Fe	[redacted]
ステンレス鋼		[redacted]	Cr	[redacted]
			Fe	
			Ni	
アルミニウム合金		[redacted]	Al	[redacted]

(注) 実際の仕様はジルコニウム合金（ジルカロイ-4）であるが，解析上は純度100%のジルコニウムとして扱う。なお，他の合金成分（スズ等）は中性子吸収効果がジルコニウムより大きいため，この取扱いは保守的である。

E.4　未臨界評価

E.4.1　計算条件

1. 収納物

解析の対象とした(ロ)-第E.1表に示す燃料仕様はE.2.1に示すとおり中性子実効増倍率が最も大きくなる仕様である。

核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下における燃料集合体の変形を考慮し，支持格子1スパン間の燃料棒ピッチを縮小及び拡大させている。

なお，中性子実効増倍率が最大となるように，バスケット格子内の燃料集合体配置を考慮している。（燃料棒ピッチを拡大しない場合）

2. 輸送容器

本臨界解析では，安全側に緩衝体及び三次蓋が存在しないモデルとし，輸送容器の外側で完全反射境界条件とする。

また，胴内には核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下においても浸水はないため水が存在しないが，安全側に浸水量を仮定し，水は胴内に均一に存在するものとする。

3. 中性子吸収材

本臨界解析では，中性子吸収材に含まれるほう素添加量を仕様上の下限値としている。また，胴内中性子束が小さいのでほう素添加アルミニウム合金が使用期間中に中性子を吸収して効果を失うことはない。

E.4.2　核燃料輸送物への水の浸入等

輸送物への水の浸入等に関しては次のとおりである。

- (ロ)章A.9に示したように核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下においても密封装置の健全性及び二次蓋の防水性能は保たれるので，輸送物内部への水の浸入はない。ただし，臨界解析モデルでは15m浸漬における浸水量に基づいて安全側に胴内の水量を5000cm^3とし，この水が均一に分散していると仮定した。
- 本臨界解析では緩衝体を無視し，輸送容器の外側で完全反射境界条件としているので，輸送物の配列変化による接近により中性子実効増倍率がより大きくなることはない。
- 燃料集合体は最も中性子実効増倍率が大きくなるようにバスケット格子内に配置しているので，収納物の再配列により中性子実効増倍率がより大きくなることはない。
- 本臨界解析では輸送容器の外側で完全反射境界条件としているので，水中又は雪中への浸漬によって中性子実効増倍率がより大きくなることはない。
- 本臨界解析では胴内の水量を上述のように仮定しているので，温度変化の水密度への影響はなく，中性子実効増倍率への影響はない。

・浸水及び漏水を防止する特別な措置に係る品質管理及び取扱いについては，E.7.1 に示す。

E.4.3　計算方法

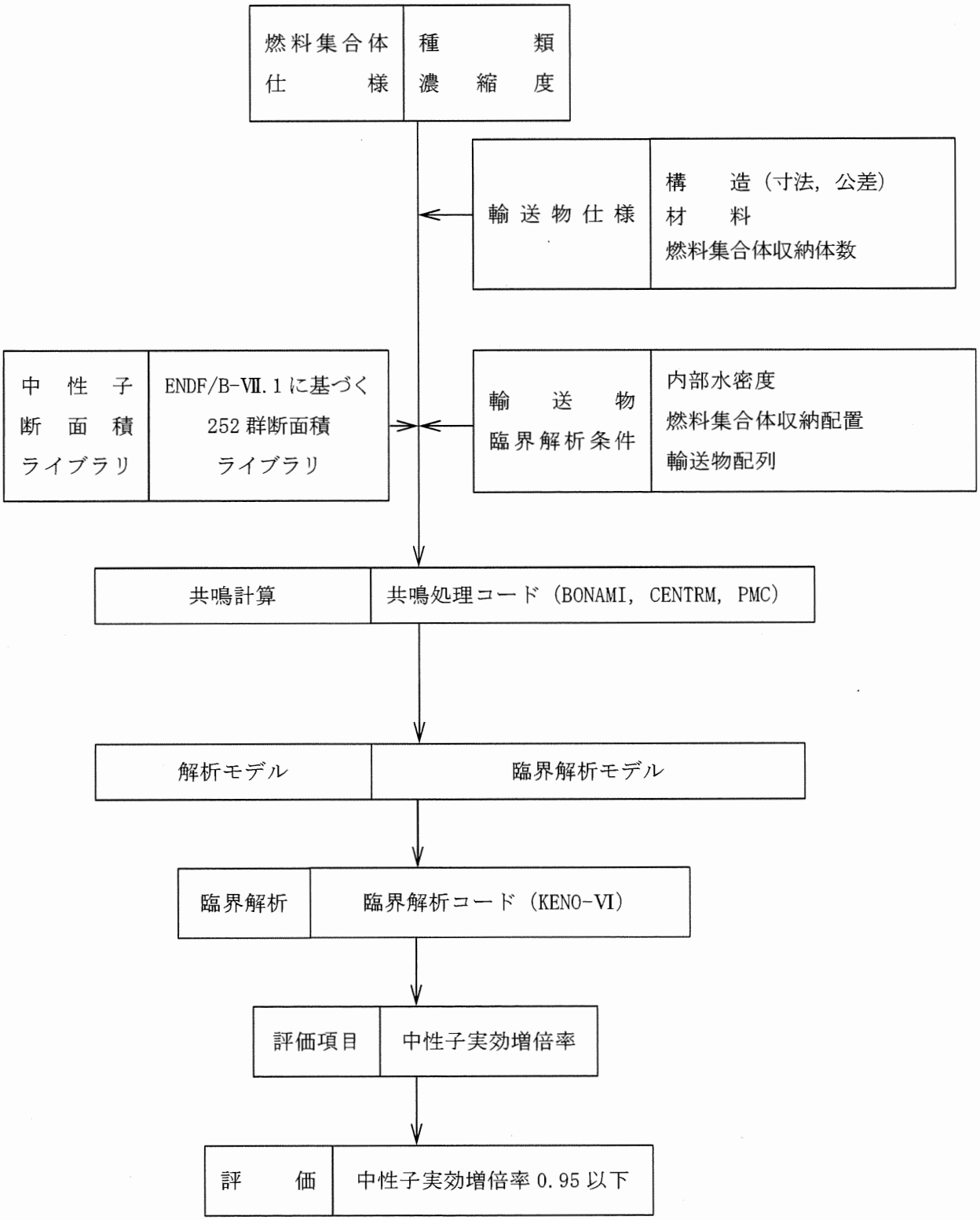
臨界計算には，米国オークリッジ国立研究所で，原子力関連許認可評価用に開発された SCALE [1] (Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation) コードシステムを用いた。中性子実効増倍率の計算には，KENO-VI コードを用いた。各領域の群定数計算には共鳴処理コード BONAMI，CENTRM 及び PMC を用い，核データライブラリは SCALE コードシステムの内蔵ライブラリデータの一つである ENDF/B-VII.1 に基づく 252 群断面積ライブラリを用いた。計算の流れを(ロ)-第 E.3 図に示す。本計算コードを用い，(ロ)-第 E.2 図のモデルに対して臨界計算を行った。

E.4.4　計算結果

臨界解析の結果を(ロ)-第 E.3 表に示す。本計算は通常輸送時並びに核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件下に置かれた輸送物の孤立系及び配列系の各状態よりも厳しい条件での計算結果であり，中性子実効増倍率は標準偏差(σ)の 3 倍を加えても十分未臨界である。

(ロ)-第 E.3 表　臨界計算結果

項目	keff	σ	keff＋3σ
燃料棒ピッチ最小	0.38706	0.00013	0.38745
燃料棒ピッチ変化なし	0.38666	0.00013	0.38704
燃料棒ピッチ均一拡大	0.38646	0.00015	0.38689



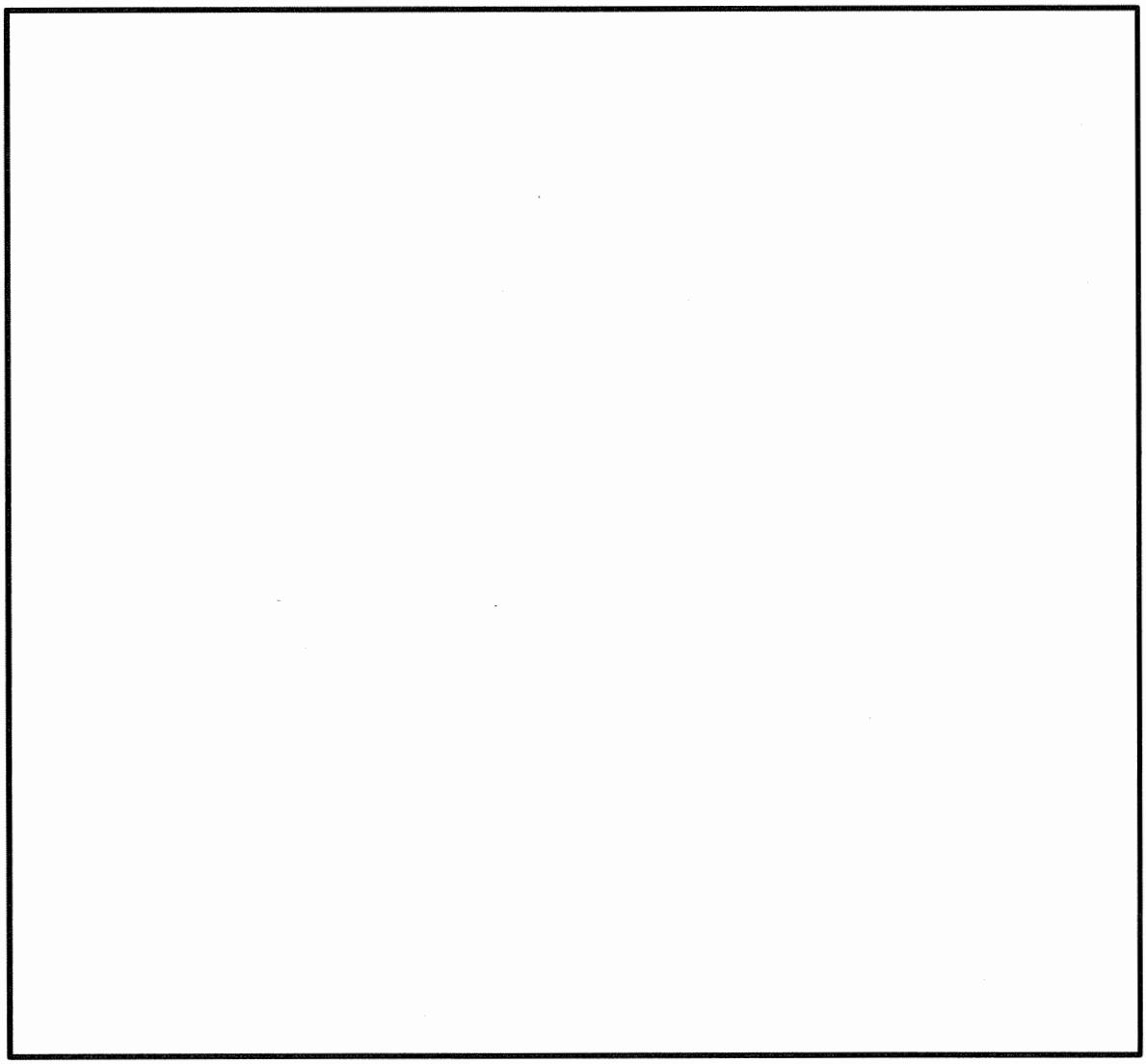
(ロ)-第E.3図　臨界計算の流れ

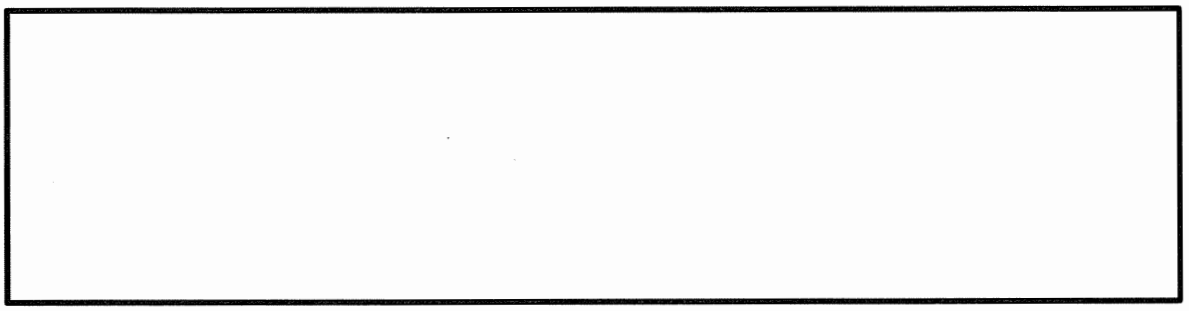
E.5　ベンチマーク試験

本輸送物の臨界解析に用いた計算方法及び核データの妥当性を確認するため，OECD/NEA にて評価・収集された臨界実験に関わる国際ベンチマークデータベース [2] から，収納対象である燃料集合体の仕様及び下記の輸送時の取扱いに関わる条件を考慮し，臨界解析を行う臨界実験を選定する。

① 燃料棒を配列した集合体が水中に単独で存在する場合
② 複数の集合体が近接して配列する場合
③ この集合体の配列の間に鋼板，中性子吸収材（ほう素）を含む板が存在する場合
④ 集合体に近接して反射体（鋼板，鉛）を配置した場合
⑤ 水中に中性子吸収材（ほう素）が溶解している場合
⑥ 乾式貯蔵の条件を模擬し，減速材を用いない場合

以上より，次の 3 つの機関により実施された臨界実験より，合計□ケースを選定した。



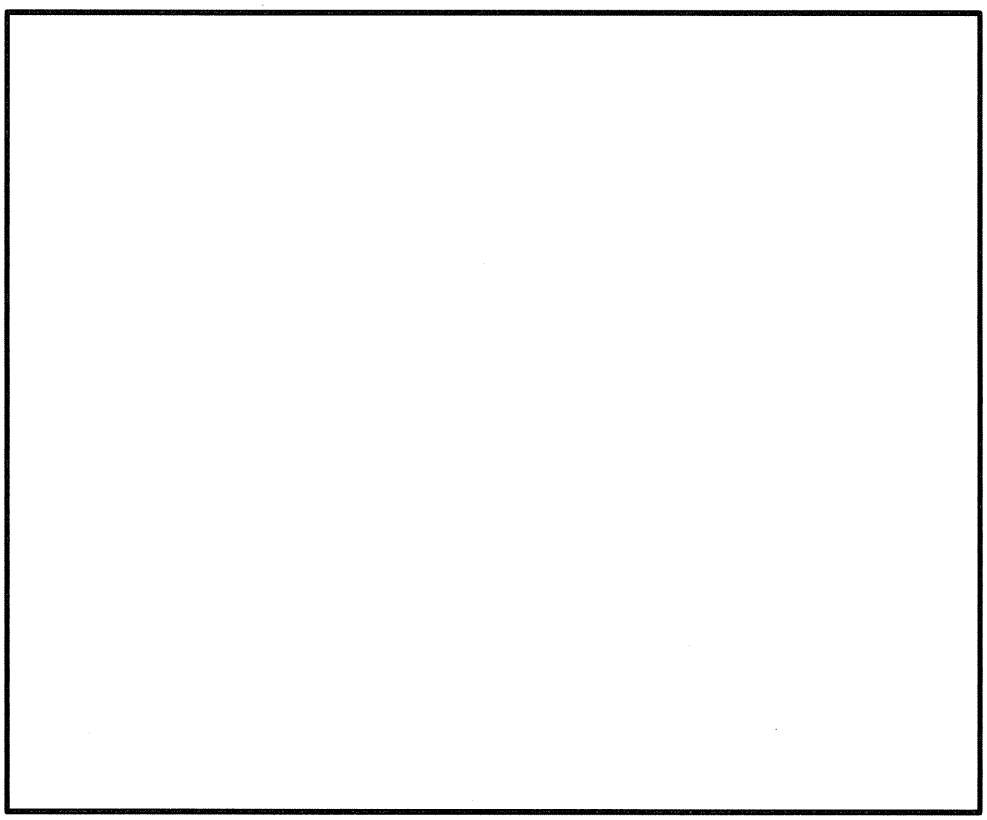


解析結果を(ロ)-第E.4表に示す。ベンチマーク解析の結果，本輸送物の臨界解析に用いた計算コード及び核データは妥当な結果を与えるといえる。

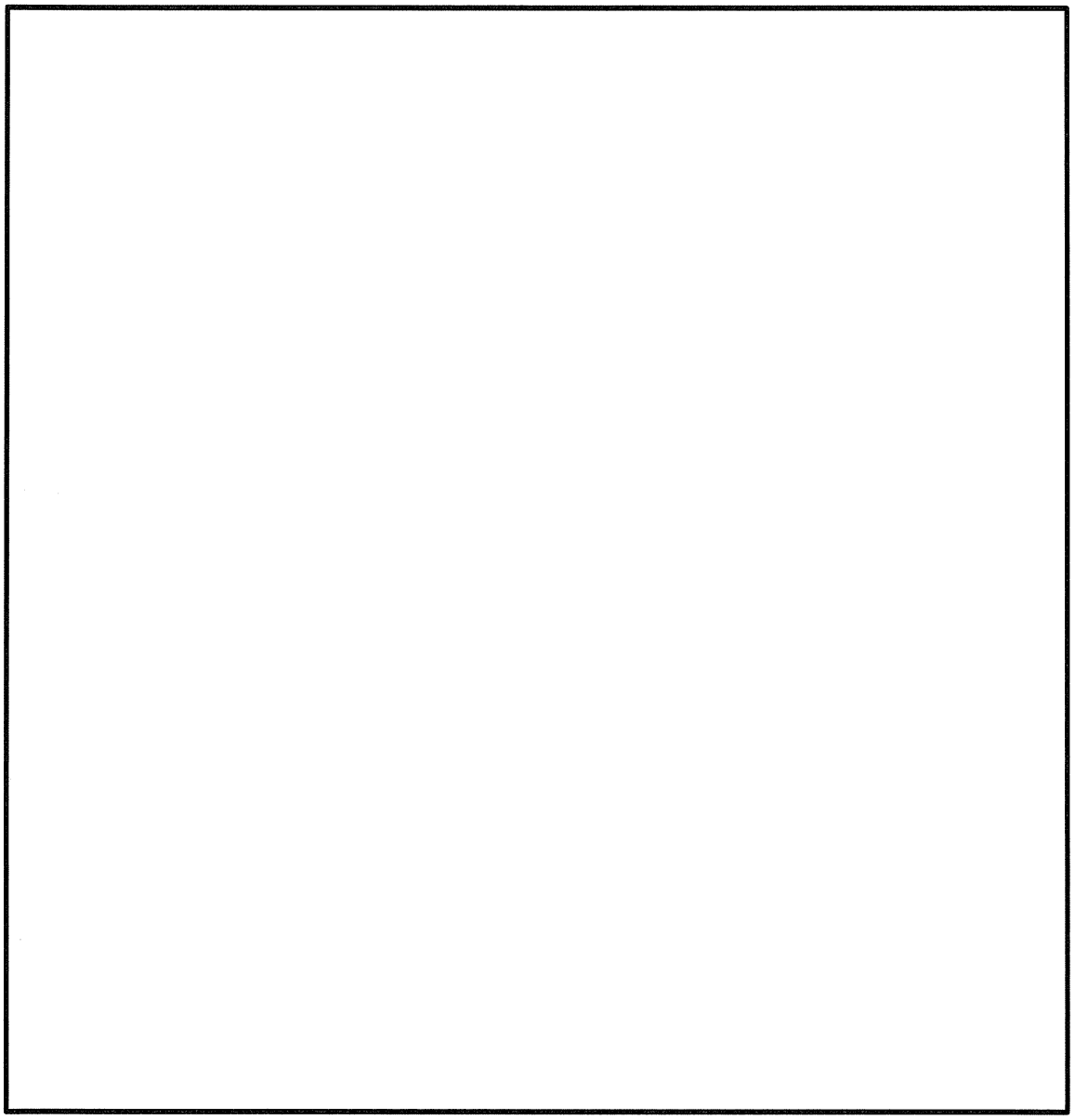
(ロ)-第E.4表　臨界解析結果（ベンチマーク解析）

	ケース数	中性子 実効増倍率 平均値	標準偏差 (注)	中性子 実効増倍率 最大値	中性子 実効増倍率 最小値
臨界実験(1)	[redacted]	0.99961	0.00304	1.01172	0.99651
臨界実験(2)		0.99776	0.00264	1.00055	0.99363
臨界実験(3)		1.00279	0.00259	1.00452	0.99981
合計		0.99940	0.00309	1.01172	0.99363

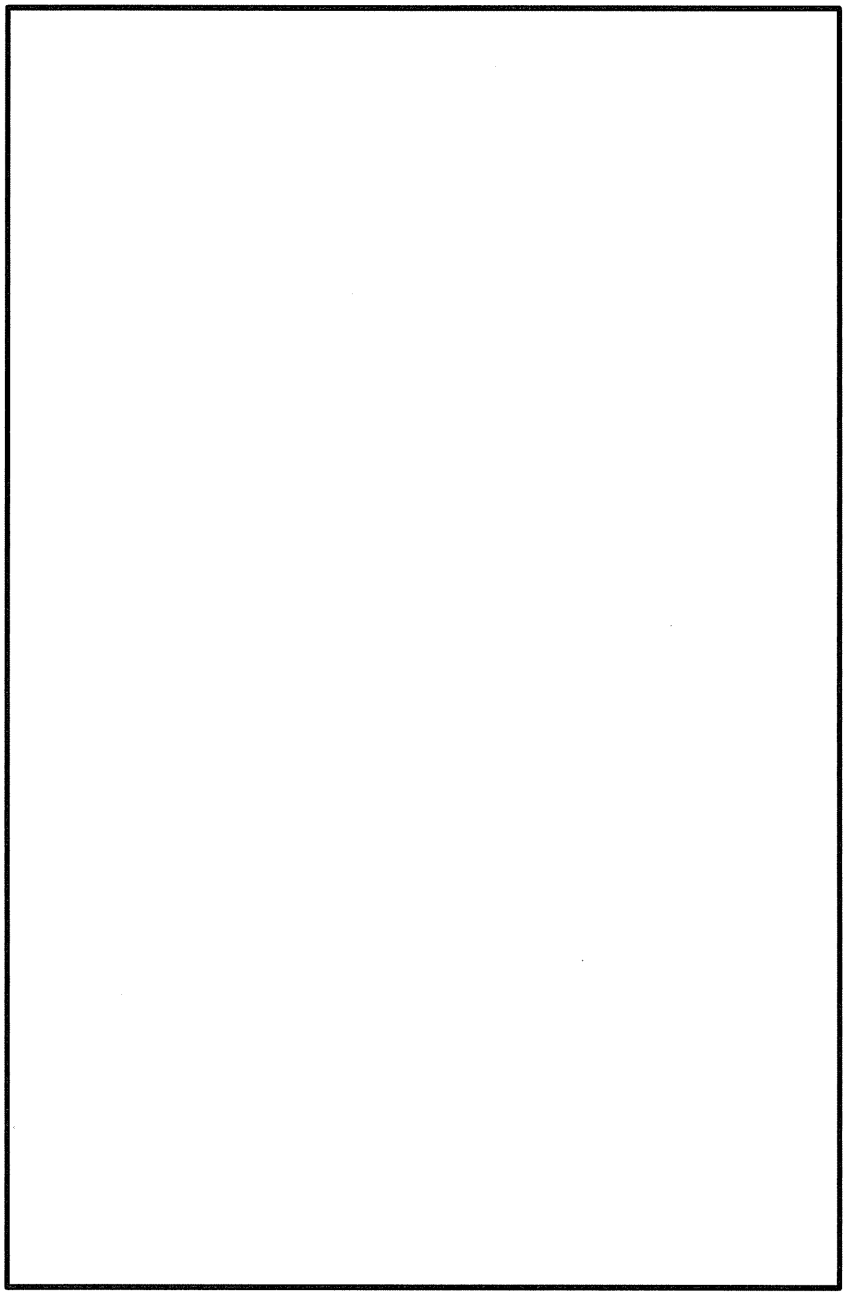
(注) この標準偏差は各臨界実験での複数のベンチマーク解析結果（中性子実効増倍率）に対する標準偏差である。



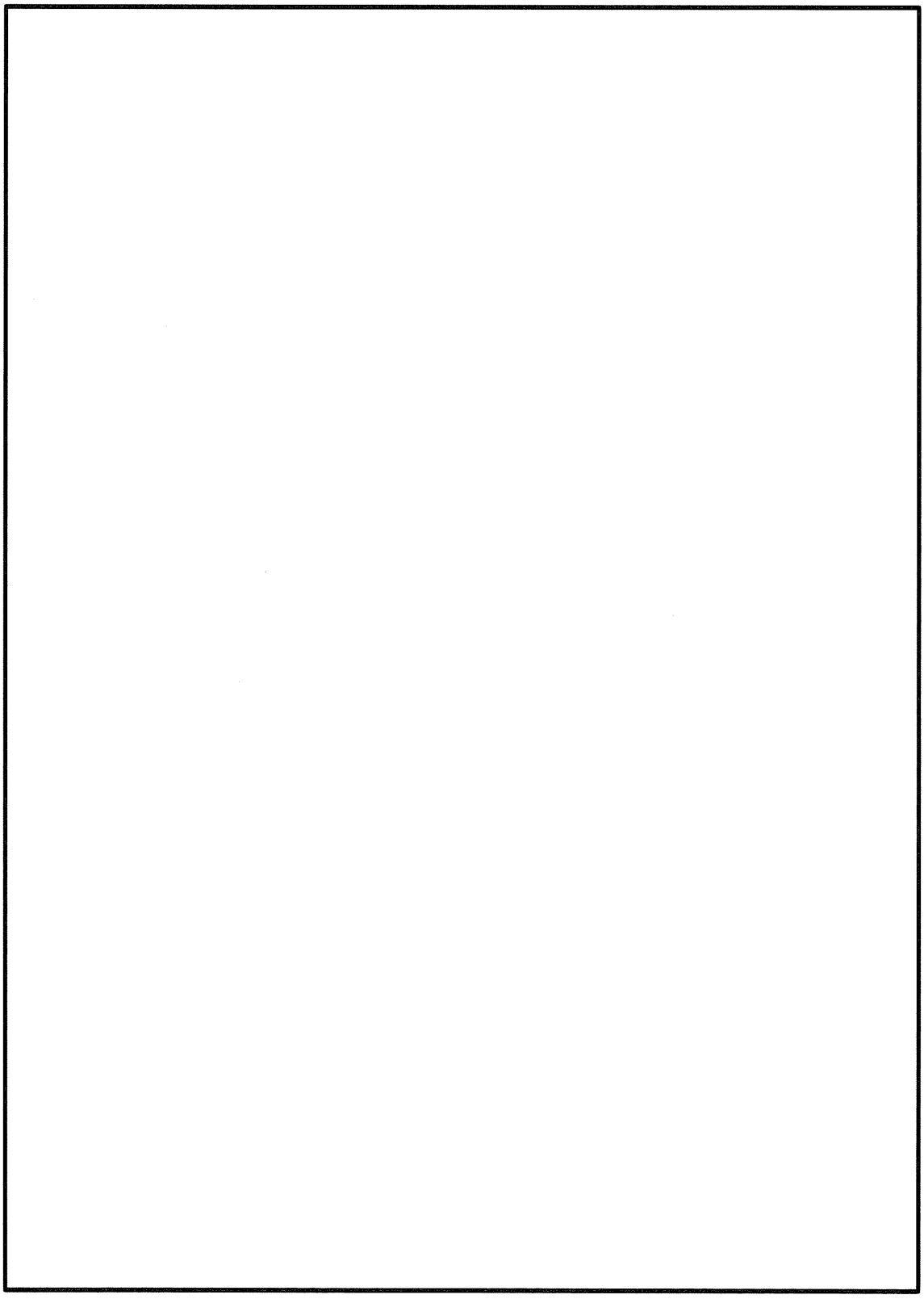
(ロ)-第E.4図(a)　[redacted]臨界実験に用いた燃料棒



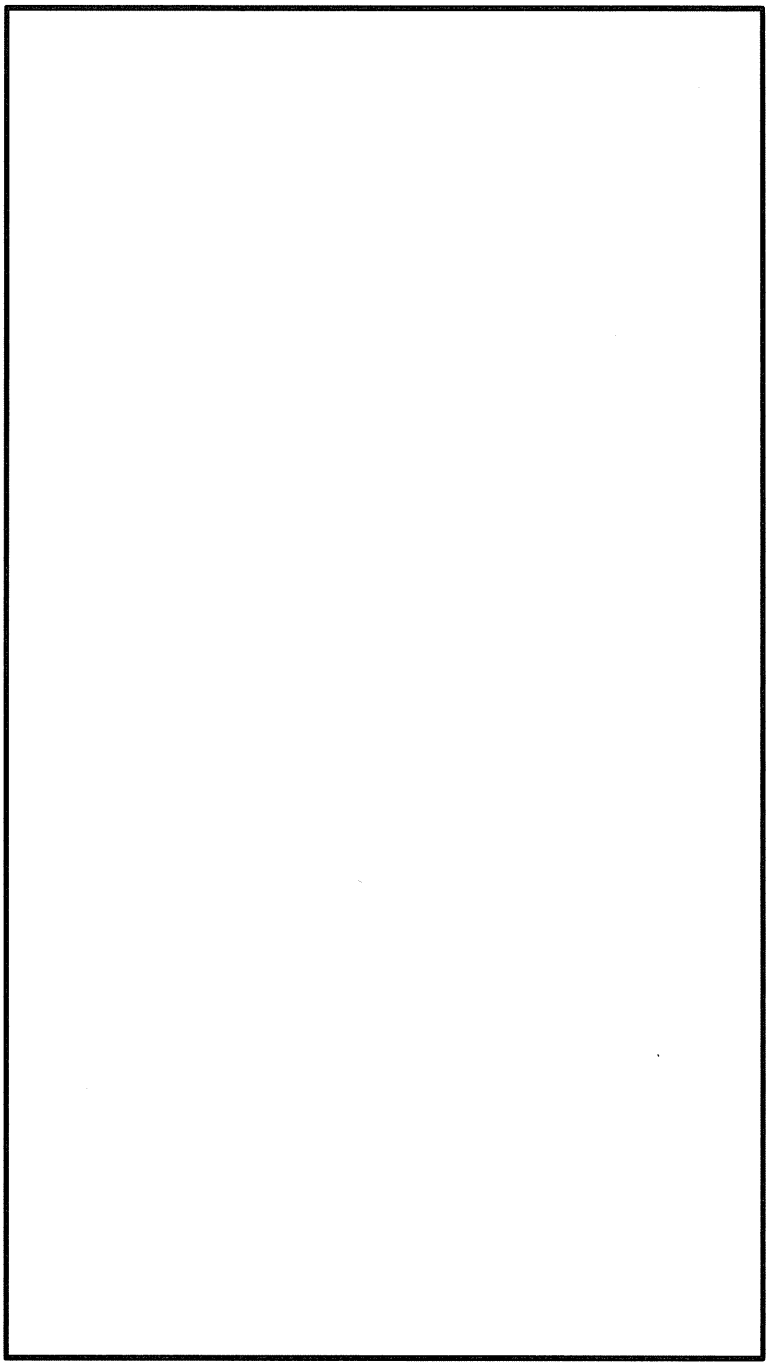
(ロ)-第E.4図(b) [redacted]臨界実験体系(1)



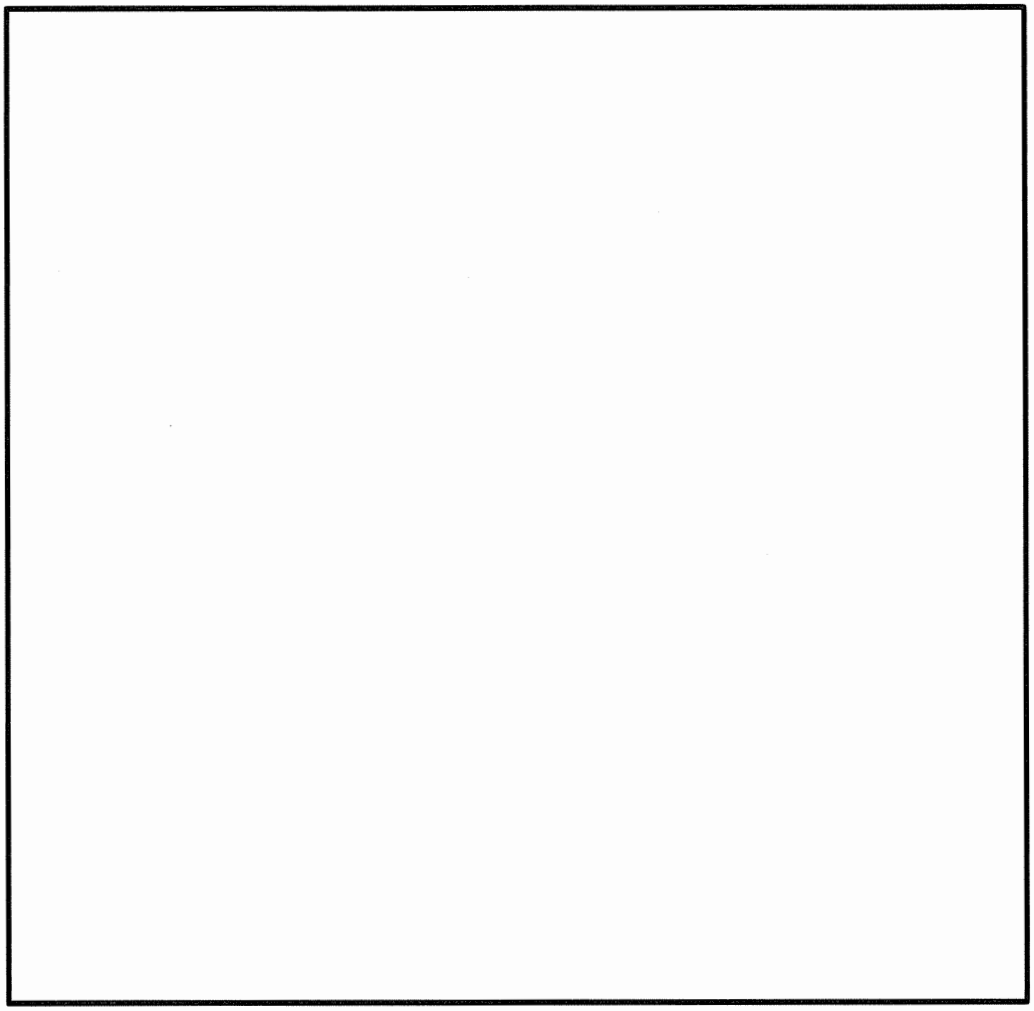
(ロ)-第E.5図 [redacted]臨界実験体系(2)



(ロ)-第E.6図 [redacted]臨界実験体系(1)



(ロ)-第E.7図 [redacted]臨界実験体系(2)



(ロ)-第E.8図 [redacted]臨界実験体系 [redacted]

E.6　結果の要約及びその評価

本輸送容器のバスケットは，断面形状が中空状であるアルミニウム合金製のバスケットプレートで構成された格子構造であり，個々の燃料集合体が輸送容器内部の所定の位置に収納される。また，バスケットプレートと中性子吸収材を併せて配置することで臨界を防止する構造としている。

本輸送物の臨界解析は，通常輸送時並びに核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件下に置かれた輸送物の孤立系及び配列系のいずれの条件より厳しい条件で行い，結果は十分未臨界であった。したがって，上記のいずれの条件においても未臨界が維持される。

E.7　付属書類

E.7.1　輸送容器の品質管理及び輸送前の密封性能の確認

本輸送容器については，保安規定に基づく品質マネジメントシステムにより品質管理が行われ，参考に示すように，製作中及び製作完了時に十分な検査が行われる。また，(ハ)章に示す保守により性能が維持される。

輸送前には，(ハ)章に示すように発送前検査において三次蓋及び二次蓋の気密漏えい試験が実施され密封性能が確認される。

E.7.2　胴内の浸水量

本輸送容器は燃料集合体を収納後，内部水が排出され，さらに真空乾燥が行われる。また，(ロ)章 A.9.2 の 2. に示すように，核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下においても，輸送容器の三次蓋及び二次蓋は密封性能を維持し，二重の防水機能が維持されるため，胴内が水で満たされることはない。しかし，ここでは仮想的に，胴内への浸水としては，浸漬試験において胴内に浸入する水を仮定する。

本輸送容器の防水機能である三次蓋及び二次蓋の密封性能は(ロ)-第 E.付 1 表に示すとおりである。胴内への浸水量を，三次蓋の密封性を安全側に無視して，二次蓋に対して 15m 浸漬の水圧がかかったとして評価する。

(ロ)章 C に示した手法により二次蓋のガスケットからの浸水率を求めた結果を(ロ)-第 E.付 2 表に示す。1 ヶ月間の浸水量は 2000cm^3 程度である。

上記の 15m 浸漬における浸水量に基づいて安全側に胴内の水量としては 5000cm^3 を考慮し，この水が均一に分散していると仮定した。

(ロ)-第 E.付 1 表　防水機能の密封性能

部位	漏えい率 (ref cm^3/s)	備考
三次蓋	1×10^{-3}	気密漏えい試験の基準値
二次蓋	5×10^{-3}	核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の影響を考慮した金属ガスケットの漏えい率 [3)]

(ロ)-第E.付2表　15m浸漬の水圧による浸水率

項目＼部位	密封境界（蓋部）
P_u ：上流側圧力 (MPa)	0.251325
P_d ：下流側圧力 (MPa)	0.0
T ：流体の温度 (K)	383.15 (注1)
a ：漏えい孔長 (cm)	
D ：漏えい孔径 (cm)	
L ：15m浸漬の水圧による浸水率 (cm^3/s) (注3)	7.32×10^{-4} (1.90×10^3 cm^3/月)

(注1)ガスケット部温度

(注2)ガスケットの接触幅を採用

(注3)水の計算においては(ロ)章Cの(1)式に替えて次式で求めた。

$$L=F_c\times(P_u-P_d)$$ 4)

E. 7. 3　取扱い時の臨界解析

輸送物の取扱い時においては，胴内に水が満たされる。ここでは，胴内に水が満たされる場合の臨界解析を行う。

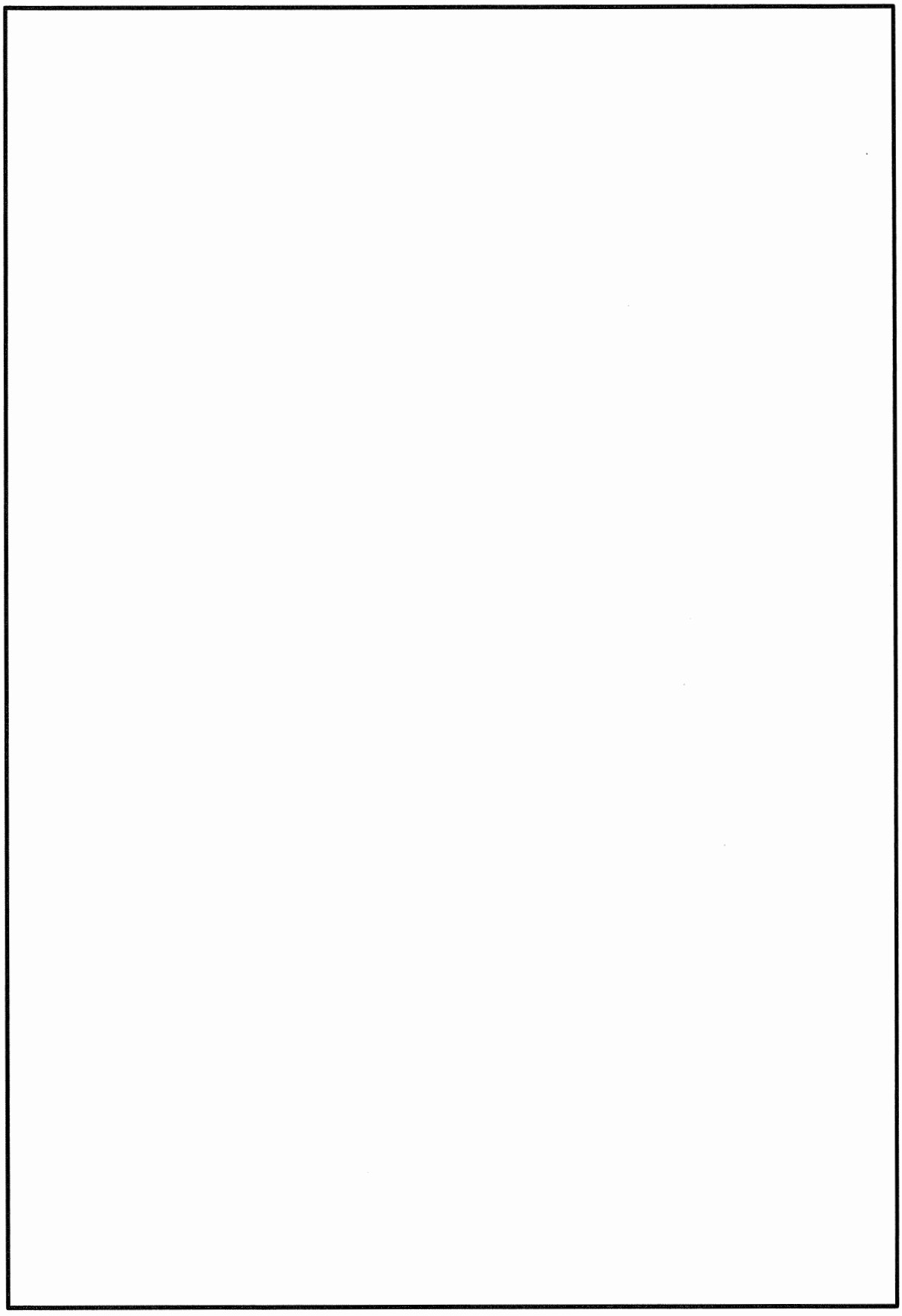
1. 解析モデル

(ロ)-第 E. 付 1 図に臨界解析モデルを示す。解析モデルは安全側の評価となるよう以下の条件を考慮した。

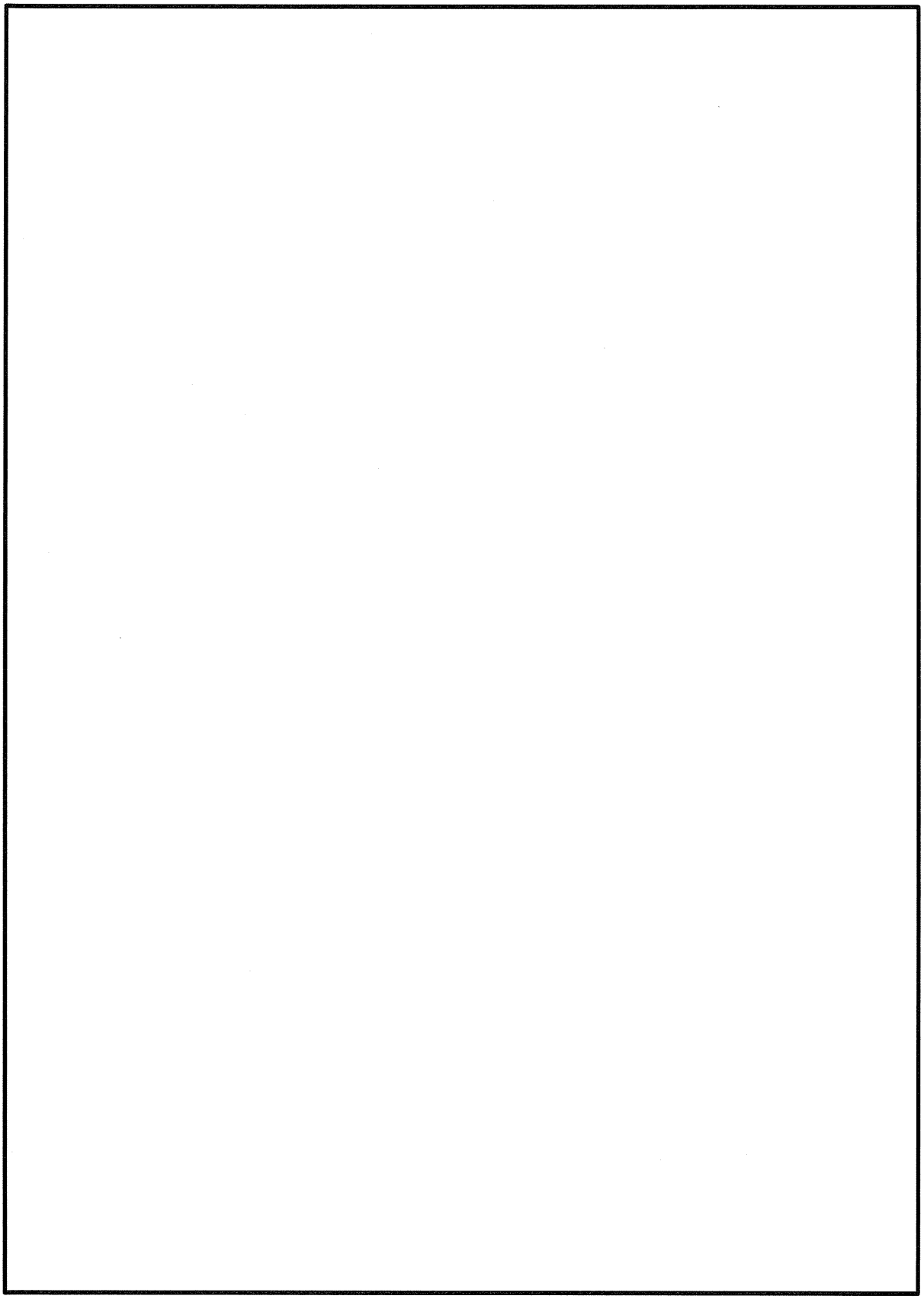
・輸送物が無限に配列している体系とする。
・中性子遮蔽材を無視する。
・緩衝体及び三次蓋を無視する。
・中性子実効増倍率が最大となるように，バスケットプレート板厚，バスケットプレート内幅，中性子吸収材板厚及びバスケット格子内のりの公差を考慮する。
・バスケット格子内の燃料集合体は，中性子実効増倍率が最大となるように配置する。
・胴内には水が存在するものとする。
・バスケットプレート及び中性子吸収材は，実在する部分は燃料有効部に相当する部分のみと仮定し，それ以外の部分は水に置き換える。

本臨界解析で用いた輸送物各領域の構成物質の原子個数密度を(ロ)-第 E. 付 3 表に示す。

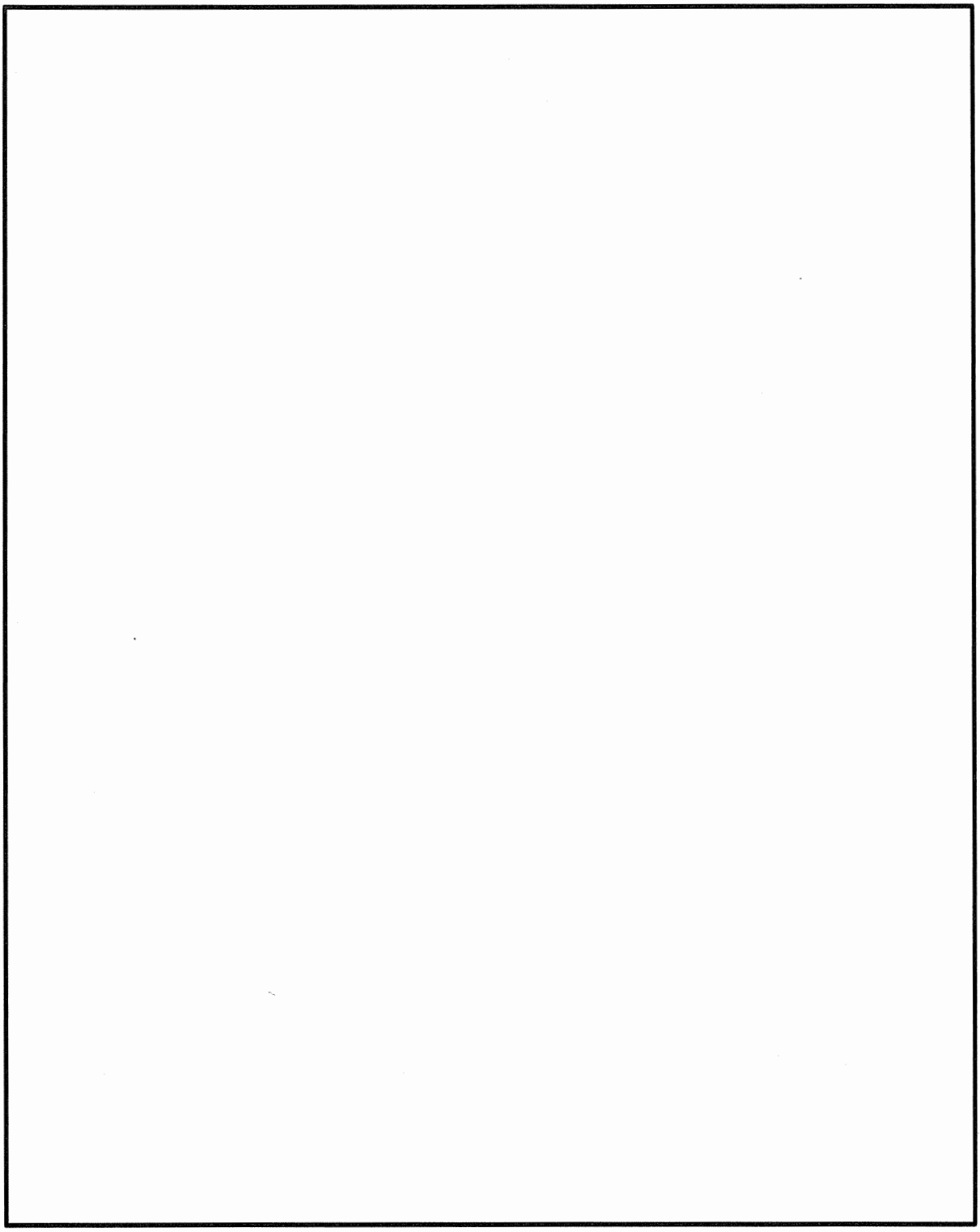
輸送物の中性子実効増倍率を最も大きく評価するために，胴内の水の密度は 1. 0g/cm^3 とした。



(ロ)-第 E.付 1 図(a)　臨界計算モデル（縦断面図）



(ロ)-第 E. 付 1 図(b-1)　臨界計算モデル（燃料領域横断面図）



(ロ)-第 E.付 1 図(b-2)　臨界計算モデル（燃料領域拡大図）

(ロ)-第 E.付 3 表　輸送物各領域の原子個数密度

領域		密度 (g/cm^3)	元素	原子個数密度 (10^{24} atoms/cm^3)
燃料領域	UO_2		^{235}U	
			^{238}U	
			O	
	燃料棒被覆管 制御棒案内管 計装用案内管		Zr(注)	
	水		H	
			O	
ほう素添加 アルミニウム合金			^{10}B	
			^{11}B	
			C	
			Al	
炭素鋼			Fe	
ステンレス鋼			Cr	
			Fe	
			Ni	
アルミニウム合金			Al	

(注) 実際の仕様はジルコニウム合金（ジルカロイ-4）であるが，解析上は純度 100%のジルコニウムとして扱う。なお，他の合金成分（スズ等）は中性子吸収効果がジルコニウムより大きいため，この取扱いは保守的である。

2. 計算方法

臨界計算には，E.4.3 と同様に SCALE コードシステムを用いた。

3. 計算結果

(ロ)-第 E.付 4 表に臨界計算の結果を示す。本計算は E.4.4 に示した臨界計算結果より中性子実効増倍率が大きくなるが，標準偏差（σ）の 3 倍を加えても十分未臨界である。

(ロ)-第 E.付 4 表　臨界計算結果

項目	keff	σ	keff＋3σ
24体収納時	0.91053	0.00045	0.91187

E.7.4 参考文献

1) B. T. Rearden and M. A. Jessee, Eds., "SCALE Code System", ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.1, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee (2016).

2) "International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments.", NEA/NSC/DOC(95)03 (2006).

3) (独) 原子力安全基盤機構,「平成 16 年度 中間貯蔵施設健全性評価手法等調査 最終報告」, (2005).

4) American National Standards Institute, Inc., "American National Standard for Radioactive Materials - Leakage Tests on Packages for Shipment", ANSI N14.5-2014, (2014).

(ロ)章Ｆ　　核燃料輸送物の経年変化の考慮

F. 核燃料輸送物の経年変化の考慮

本輸送容器は，使用済燃料乾式貯蔵施設における貯蔵後の輸送にも用いられる。ここでは，使用予定期間中（60 年）の輸送容器の構成部材及び収納物の経年変化について，(ロ)章の安全解析で考慮する事項について示す。

F. 1　考慮すべき経年変化要因

本核燃料輸送物において想定される使用条件（使用予定期間 60 年及び使用予定回数 10 回）を踏まえ，輸送容器の構成部材及び収納物に対して考慮すべき経年変化の要因を以下に示す。

(1) 熱的劣化

高温での材料組成・材料組織の変化，強度・延性・脆性・クリープ・その他物性値の変化及び質量減損

(2) 放射線照射による劣化

中性子照射及びガンマ線照射による材料組成・材料組織の変化及び強度・弾性・延性・脆性・その他物性値の変化

(3) 化学的劣化

全面腐食，応力腐食割れ，異種材料接触部の化学的反応及び燃料被覆管材料における水素吸収・酸化

(4) 疲労による劣化

繰返し荷重の作用による疲労破壊

F. 2　安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価

(1) 経年変化の考慮の必要性の評価条件

F. 1 において抽出した経年変化要因を踏まえ，経年変化の考慮の必要性について以下の考えで評価した。

a. 使用予定期間中（60 年）継続して使用される輸送物の各構成部材については，発電所から使用済燃料乾式貯蔵施設への輸送，万が一貯蔵中に一次蓋から漏えいがあった場合の発電所への輸送，発電所での一次蓋密封部の修繕後の使用済燃料乾式貯蔵施設への輸送及び貯蔵後の発電所又は再処理工場への輸送の最大 4 回の輸送に加え，貯蔵終了後に再利用で使用する可能性を踏まえ，輸送回数を最大 10 回として，使用予定期間中（60 年）に想定される最大の温度，累積照射量，負荷の繰返し回数を用いて経年変化の影響を評価した。

b. 吊上装置については，最も吊上回数が多くなると想定される発電所での以下の取

扱いを想定して，使用回数を設定した。

①発電所岸壁で運搬船から車両への積み付けのための吊上げ

②管理区域内の作業エリア（除染ピット）にキャスクをたて置きするための吊上げ

③SFP への沈め込みのための吊上げ

④燃料装荷後 SFP から作業エリアへの移動のための吊上げ

⑤発送前検査の吊上検査のための吊上げ

⑥管理区域内での仮置きのための吊上げ（必要に応じ）

⑦車両への積み付けのための吊上げ

⑧発電所岸壁で車両から運搬船への移動のための吊上げ

万が一の一次蓋漏えい時に使用済燃料乾式貯蔵施設から発電所へ返送した場合，上記③と④の間に以下の吊上作業が必要となる。

・燃料取出し後 SFP から作業エリアへの移動のための吊上げ

・一次蓋密封部の修繕後 SFP への沈め込みのための吊上げ

その他発電所での取扱い訓練などで吊上げを複数回行うことがある。

以上から 1 回の輸送当たり 10 回前後の吊上げが想定されることから，保守的に吊上回数を 20 回/輸送として，さらにこれを 2 倍して経年変化の影響を評価した。

c. 放射線照射による劣化については，非金属材料であるレジン及び木材について中性子及びガンマ線に対して影響評価を行った。一方，金属材料については，主に原子のはじき出しにより照射脆化が生じるが，ガンマ線に起因するはじき出しが生じる確率は中性子と比較して 2 桁以上小さいため[1)]，ガンマ線に起因する照射脆化への影響は中性子による影響と比較して十分小さい。したがって，金属材料の放射線照射による劣化の影響評価を中性子に対して行った。

d. 輸送時のみに使用される三次蓋・緩衝体の構成部材については，以下のとおり評価した。なお，EPDM 製の三次蓋Ｏリングは，輸送の都度交換する部材であるため，評価から除外している。

・三次蓋については，上記の使用予定期間中（60 年）継続して使用される輸送物の構成部材と同様に評価した。

・緩衝材については，使用済燃料の輸送実績から想定される輸送容器が通常使用される条件での緩衝材の温度評価及び過去に使用済燃料の輸送に供された輸送容器から採取した木材の試験結果を基に評価した。放射線照射による劣化，化学的劣化については，上記の使用予定期間中（60 年）継続して使用される輸送物の構成部材と同様に評価した。

e. 輸送容器の疲労については，輸送の都度吊上げによる荷重を繰返し受けるトラニオン，運搬中の内外圧差による荷重，熱膨張，蓋ボルトの締付けによる荷重を繰返し受ける三次蓋及び三次蓋ボルトに対し評価した。

f. ドレンパイプの端部に取り付けるゴム製のシールパッキンは熱及び放射線照射によって貯蔵後の再冠水作業において硬化している可能性があるが，シールパッキンは一次蓋とドレンパイプに挟まれており，ひび割れ等の傷が生じても構造上脱落しない。また，万が一シールパッキンの脱落により閉塞が生じてもベントバルブから注水作業が行え，運用に支障が生じないことから，ドレンパイプとシールパッキンは評価から除外している。

ここで，使用予定期間中（60 年）継続して使用される輸送物の各構成部材に係る熱的劣化については，(ロ)-第 F.1 表に示すとおり貯蔵時及び輸送時（一般の試験条件下の太陽熱放射ありの条件）の最高温度のうち高い温度が 60 年間継続する際の影響を評価する。なお，貯蔵時における核燃料輸送物の各構成部材の温度は，外筒の表面温度が設計上の最高温度以下であることを監視することにより，(ロ)-第 F.1 表に示す値以下であることが確認できる。

また，放射線照射，化学変化の評価に対しても，60 年の連続使用を考慮する。ここで，累積照射量は，保守的に放射能強度の減衰を考慮しない値を評価に使用する。

一方，疲労の評価において，上部トラニオンの使用計画回数は輸送回数（10 回）×吊上回数（20 回）の所を保守的に 2 倍の 400 回，三次蓋及び三次蓋ボルトの使用計画回数は，輸送回数（10 回）×1 組の三次蓋・三次蓋ボルトで共用する基数（10 基/組）×使用回数（3 回/輸送）の所を保守的に 2 倍の 600 回を考慮する。

(2) 経年変化の考慮の必要性の評価結果

経年変化を考慮する本輸送物の構成部品として，安全機能を担う構成部品とその使用材料を(ロ)-第 F.2 表に示す。

収納物の経年変化考慮の必要性を評価した結果を(ロ)-第 F.3 表に示す。また，輸送容器の構成部材のうち使用予定期間中（60 年）継続して使用される輸送容器の構成部材であるキャスク本体，バスケット，一次蓋及び二次蓋の経年変化考慮の必要性を評価した結果を(ロ)-第 F.4 表に，輸送時のみに使用される三次蓋及び緩衝体の経年変化考慮の必要性を評価した結果を(ロ)-第 F.5 表に示す。

(ロ)-第F.1表　使用予定期間中（60年）継続して使用される輸送物の各構成部材における貯蔵時及び輸送時の最高温度の比較

構成部材	最高温度（℃）	
	貯蔵時(注1)	輸送時
緩衝体木材	—	113
燃料被覆管	219	206
胴（本体部）	137	121
胴（フランジ部）	112	111
胴（底板）	147	133
一次蓋	109	110
一次蓋ボルト	110	109
二次蓋	99	105
二次蓋ボルト	101	105
三次蓋	—	103
三次蓋ボルト	—	103
上部緩衝体ボルト	—	103
下部緩衝体ボルト	—	115
外筒	129	114
下部端板	129	115
蓋部中性子遮蔽材カバー	106	108
底部中性子遮蔽材カバー	126	117
トラニオン(注2)	132	118
バスケット	191	177
伝熱フィン	131	115
金属ガスケット（一次蓋）	109	109
金属ガスケット（二次蓋）	99	105
中性子遮蔽材（蓋部，底部，側部）	136	127

(注1)貯蔵時の最高温度は，本輸送容器と同型である特定兼用キャスク（型式指定の番号：T-DPC26001）の「添付書類5　使用済燃料等の除熱に関する説明書」の評価結果を引用している。

(注2)トラニオンボルトを含む。

(ロ)-第F.2表　安全機能を担う構成部品とその使用材料

輸送物の構成部品	材料
燃料被覆管	ジルカロイ
胴 一次蓋 二次蓋 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバー トラニオンボルト	炭素鋼
一次蓋ボルト 二次蓋ボルト 三次蓋ボルト 緩衝体ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼
トラニオン	析出硬化系ステンレス鋼
下部端板 底部中性子遮蔽材カバー 三次蓋	ステンレス鋼
バスケットプレート バスケットサポート	アルミニウム合金
中性子吸収材	ほう素添加アルミニウム合金
伝熱フィン	銅
中性子遮蔽材	レジン
金属ガスケット	アルミニウム／ニッケル基合金
緩衝材	木材

(ロ)-第 F.3 表　収納物の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価（1/2）

収納物（材料）	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化の考慮の必要性
燃料被覆管（ジルカロイ）	熱	クリープひずみの進行による燃料被覆管の破損，照射硬化の回復による燃料被覆管強度の低下，燃料被覆管中の水素化物再配向による燃料被覆管の脆化及び応力腐食割れについて評価する必要がある[2)]。 クリープひずみの進行については，予測式に基づく累積クリープひずみが 1%以下となるよう制限することで防止できる[2)]ことが示されており，後述する燃料被覆管中の水素化物再配向を防止する基準以内では，クリープひずみが 1%を超えることはない。 照射硬化の回復については，国内の軽水炉で照射された PWR 燃料の燃料被覆管を用いた照射硬化回復試験の結果では，硬化の回復のしきい値は 300℃近傍[2)]であり，しきい値以下であれば照射硬化の回復の可能性は小さく，燃料被覆管の温度を制限することにより防止できる。 燃料被覆管中の水素化物再配向については，国内の軽水炉で照射された PWR 燃料の燃料被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械的特性試験の結果，被覆管の周方向機械的特性が低下しない燃料被覆管の温度及び周方向応力は，それぞれ 275℃以下及び 100MPa 以下[2)]と求められており，燃料被覆管温度と周方向応力を上記基準以内に制限することによって，機械的特性の劣化を防止できる。 上記に示すとおり，燃料被覆管中の水素化物再配向を防止することにより，他の発生も同時に防ぐことができる。使用予定期間中の燃料被覆管の最高温度及び最高温度における周方向応力は，運転中に生じる酸化被膜に起因する減肉を考慮し，それぞれ 219℃及び 94MPa で水素化物再配向を防止する基準以内であることから，燃料被覆管の機械的特性に影響は受けない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で熱による経年変化を考慮する必要はない。	無し

(ロ)-第F.3表　収納物の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価（2/2）

収納物（材料）	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化の考慮の必要性
燃料被覆管（ジルカロイ）	照射	使用予定期間中の累積中性子照射量が 1.5×10^{15} n/cm^2 であり，炉内の中性子照射量（10^{21} n/cm^2～10^{22} n/cm^2）に対して十分低いことから，放射線照射による影響は無視し得る[2)]。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	化学	応力腐食割れについては，燃料ペレットの温度上昇による腐食性核分裂生成ガスの放出はなく，また，原子炉運転中に燃料ペレットから放出されたよう素はヨウ化セシウムとして安定に存在することから応力腐食割れが発生する化学的雰囲気となっていない[2)]。なお，腐食性雰囲気の整った条件下での応力腐食割れ試験でジルコニウム合金の応力腐食割れのしきい応力は200MPaであり，使用済燃料貯蔵時の応力はこれに比べて十分低い[2)]。 また，残留水分が10wt%以下の不活性ガス雰囲気にある燃料被覆管の酸化量及び水素吸収量は無視し得るほど小さい[3)]ため，燃料被覆管の健全性に影響はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	疲労	内外圧差や取扱いに起因する繰返し応力は発生しても変動が小さいため，疲労による経年変化は発生しない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で疲労による経年変化の考慮は必要ない。	無し

(ロ)-第F.4表　使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価（1/10）

構成部材（材料）	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化の考慮の必要性
胴 一次蓋 二次蓋 トラニオンボルト (炭素鋼) 一次蓋ボルト 二次蓋ボルト (ニッケルクロムモリブデン鋼)	熱	高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられるが，使用予定期間中の最高温度（147℃）は，最も厳しい条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲（融点(K)の三分の一[4]である300℃以下）である。また，設計用強度・物性値が規定[5),6)]されている温度範囲において構造健全性を確認しているため，熱的劣化を考慮する必要はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で熱による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	照射	中性子照射量が 10^{16} n/cm^2 オーダーまでは，顕著な機械的特性変化は見られない[7)]ことが示されており，最も中性子照射量が高くなる箇所においても，使用予定期間中の累積中性子照射量は 5.9×10^{14} n/cm^2 であることから照射脆化の影響はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。	無し

(ロ)-第F.4表　使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価（2/10）

構成部材（材料）	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化の考慮の必要性
胴 一次蓋 二次蓋 トラニオンボルト (炭素鋼) 一次蓋ボルト 二次蓋ボルト (ニッケルクロムモリブデン鋼)	化学	輸送容器の使用済燃料を閉じ込める空間は，使用済燃料収納時にその空間を真空乾燥するとともに，不活性ガスであるヘリウムを適切に封入し，使用済燃料を貯蔵する設計としている。一方で，炭素鋼は，淡水に完全に浸漬した条件においても腐食速度は十分に小さいことが示されている[8]。したがって，残留水分（10wt%）を考慮しても腐食の影響はない。また，使用済燃料貯蔵時の温度条件において，仮に燃料破損率1%相当の燃料棒内ガスの存在を考慮しても，腐食の影響はない[9]。 一次蓋と二次蓋の間の空間部（以下「蓋間空間」という。）には不活性ガスであるヘリウムを適切に封入し，不活性雰囲気が維持されるため，腐食の影響はない。また，中性子遮蔽材（レジン）に接する部材には中性子遮蔽材の熱的劣化により水分が生じるが，中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり，酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。なお，大気に触れる部分については，塗装等の防錆措置により腐食を防止する。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	疲労	内外圧差や取扱いに起因する繰返し応力は発生しても変動が小さいため，疲労による経年変化は発生しない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で疲労による経年変化の考慮は必要ない。	無し

(ロ)-第F.4表　使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価（3/10）

構成部材（材料）	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化の考慮の必要性
バスケットプレート バスケットサポート （アルミニウム合金） 中性子吸収材 （ほう素添加アルミニウム合金）	熱	アルミニウム合金は，高温環境下では組織変化による強度低下（過時効の効果含む）が考えられる。加えて，高温環境下で応力が長期作用する場合はクリープによる変形が考えられる。このため，組織変化による強度低下及びクリープによる変形の影響を考慮することとし，貯蔵開始時の温度（191℃）が60年間継続する際の材料特性を反映した設計用強度・物性値[10]を基に，構造解析を実施する。なお，貯蔵時にバスケットプレートに発生する応力は1MPa未満と小さく，使用予定期間中のバスケットプレートのクリープ変形量は無視し得る。 また，高温環境下では，中性子吸収材内に存在する炭化ほう素の溶融及びアルミニウム合金の溶融による臨界防止機能低下が考えられるが，最高温度（191℃）は，最も厳しい条件となるアルミニウム合金の溶融しない範囲（約600℃以下[8]）であるため，臨界防止機能への影響はない。	有り
	照射	アルミニウム合金は，中性子照射量が10^{16} n/cm^{2}オーダーまでは，顕著な機械的特性変化は見られない[10]ことが示されており，最も中性子照射量が高くなる箇所においても，使用予定期間中の累積中性子照射量は1.5×10^{15} n/cm^{2}であることから照射脆化の影響はない。また，ほう素添加アルミニウム合金については，中性子吸収材中のほう素の使用予定期間中の減損割合は10^{-5}程度であり，無視し得るほど小さいため，臨界防止機能への影響はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。	無し

(ロ)-第F.4表　使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価（4/10）

構成部材（材料）	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化の考慮の必要性
バスケットプレート バスケットサポート （アルミニウム合金）	化学	バスケットが置かれた空間は，使用済燃料収納時にその空間を真空乾燥するとともに，不活性ガスであるヘリウムを適切に封入する設計としている。したがって，不活性雰囲気が維持されるため，残留水分（10wt%）を考慮しても腐食の影響はない[3),9)]。 また，使用済燃料貯蔵時の温度条件において，仮に燃料破損率1%相当の燃料棒内ガスの存在を考慮しても，腐食の影響はない[9)]。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。	無し
中性子吸収材（ほう素添加アルミニウム合金）	疲労	内外圧差や取扱いに起因する繰返し応力は生じないため，疲労による経年変化は発生しない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で疲労による経年変化の考慮は必要ない。	無し

(ロ)-第F.4表　使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価（5/10）

構成部材（材料）	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化の考慮の必要性
トラニオン（析出硬化系ステンレス鋼）	熱	高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられるが，使用予定期間中の最高温度（132℃）は，最も厳しい条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲（融点(K)の三分の一[4]である280℃以下）である。また，設計用強度・物性値が規定[5),6)]されている温度範囲において構造健全性を確認しているため，熱的劣化を考慮する必要はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で熱による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	照射	中性子照射量が10^{17} n/cm^{2}オーダーまでは，顕著な機械的特性変化は見られない[11)]ことが示されており，最も中性子照射量が高くなる箇所においても，使用予定期間中の累積中性子照射量は5.9×10^{14} n/cm^{2}であることから照射脆化の影響はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	化学	トラニオンの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接しており，中性子遮蔽材の熱的劣化により水分が生じる。ここで，淡水中におけるステンレス鋼は不動態膜を形成するため，全面腐食の程度が不動態膜のない炭素鋼と比較して小さく，また，塩化物を含む環境であれば局部腐食が問題となるが[12)]，中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり，酸素及び塩化物が連続的に供給されないため腐食の影響はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	疲労	取扱時に荷重が負荷され繰返し応力が発生するため，経年変化についての考慮が必要となる。 上部トラニオンに発生する繰返し応力を，F.2 で示したとおり保守側に設定した使用回数に基づいて疲労評価を行う（(ロ)章A「構造解析」のA.4.4.2参照）。	有り

(ロ)-第F.4表　使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価（6/10）

構成部材（材料）	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化の考慮の必要性
外筒 蓋部中性子遮蔽材カバー （炭素鋼）	熱	高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられるが，使用予定期間中の最高温度（129℃）は，最も厳しい条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲（融点(K)の三分の一[4]である300℃以下）である。また，設計用強度・物性値が規定[5),6)]されている温度範囲において構造健全性を確認しているため，熱的劣化を考慮する必要はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で熱による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	照射	中性子照射量が 10^{16} n/cm^2 オーダーまでは，顕著な機械的特性変化は見られない[7)]ことが示されており，最も中性子照射量が高くなる箇所においても，使用予定期間中の累積中性子照射量は外筒では 3.3×10^{12} n/cm^2，また，蓋部中性子遮蔽材カバーでは 5.9×10^{14} n/cm^2 であることから照射脆化の影響はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	化学	外筒の内面及び蓋部中性子遮蔽材カバーの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接しており，中性子遮蔽材の熱的劣化により水分が生じる。一方，炭素鋼の腐食速度は，水中に溶存した酸素濃度に比例して増大するが[12)]，中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり，酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。また，蓋間空間には不活性ガスであるヘリウムを封入し，蓋部中性子遮蔽材カバーの外面は不活性雰囲気が維持されるため，腐食の影響はない。 なお，外筒の外面については，塗装等の防錆措置により腐食を防止する。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	疲労	内外圧差や取扱いに起因する繰返し応力は発生しても変動が小さいため，疲労による経年変化は発生しない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で疲労による経年変化の考慮は必要ない。	無し

(ロ)-第F.4表　使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価（7/10）

構成部材（材料）	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化の考慮の必要性
下部端板 底部中性子遮蔽材カバー （ステンレス鋼）	熱	高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられるが，使用予定期間中の最高温度（129℃）は，最も厳しい条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲（融点(K)の三分の一[4]である280℃以下）である。また，設計用強度・物性値が規定[5),6)]されている温度範囲において構造健全性を確認しているため，熱的劣化を考慮する必要はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で熱による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	照射	中性子照射量が10^{17} n/cm^{2}オーダーまでは，顕著な機械的特性変化は見られない[11)]ことが示されており，最も中性子照射量が高くなる箇所においても，使用予定期間中の累積中性子照射量は8.2×10^{13} n/cm^{2}であることから照射脆化の影響はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	化学	下部端板の内面及び底部中性子遮蔽材カバーの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接しており，中性子遮蔽材の熱的劣化により水分が生じる。ここで，淡水中におけるステンレス鋼は不動態膜を形成するため，全面腐食の程度が不動態膜のない炭素鋼と比較して小さく，また，塩化物を含む環境であれば局部腐食が問題となるが[12)]，中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり，酸素及び塩化物が連続的に供給されないため腐食の影響はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	疲労	内外圧差や取扱いに起因する繰返し応力は発生しても変動が小さいため，疲労による経年変化は発生しない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で疲労による経年変化の考慮は必要ない。	無し

(ロ)-第F.4表　使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価（8/10）

構成部材（材料）	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化の考慮の必要性
中性子遮蔽材（レジン）	熱	高温環境下では含有する水分が放出されることによる質量減損及び中性子遮蔽材部の圧力上昇が生じることが考えられる。このため，質量減損の影響を考慮することとし，貯蔵開始時の温度（136℃）が60年間継続する際の質量減損量を基に遮蔽解析を実施する。また，圧力上昇については，中性子遮蔽材部の圧力にレジンから放出された水分の飽和蒸気圧を考慮の上で構造解析を実施する。	有り
	照射	中性子照射量が 10^{15} n/cm^2 オーダーまで，ガンマ線照射量が 3.9×10^4 Gy 程度までは，顕著な質量減損は見られないことが示されており [9), 13), 14)]，中性子照射量又はガンマ線照射量が最も高くなる箇所においても，使用予定期間中の累積中性子照射量は 1.6×10^{14} n/cm^2 又は累積ガンマ線照射量は 9.0×10^3 Gy であることから質量減損の影響はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	化学	熱的影響に併せて記載	有り
	疲労	内外圧差や取扱いに起因する繰返し応力は生じないため，疲労による経年変化は発生しない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で疲労による経年変化の考慮は必要ない。	無し

(ロ)-第F.4表　使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価（9/10）

構成部材（材料）	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化の考慮の必要性
金属ガスケット（アルミニウム／ニッケル基合金）	熱	高温環境下ではニッケル基合金製のコイルスプリング並びにニッケル基合金及びアルミニウム製の被覆材のリラクゼーションに伴う，落下時の密封性能の低下が考えられる。このため，リラクゼーションの影響を考慮することとし，貯蔵開始時の温度（109℃）が 60 年間継続する際の密封性能の低下を考慮しても保証できる漏えい率[15),16)]を用いて，15m 浸漬における 1 か月間の浸水量を基に臨界解析を実施する。	有り
	照射	アルミニウム／ニッケル基合金は，中性子照射量がそれぞれ 10^{19} n/cm^2 オーダー又は 10^{17} n/cm^2 オーダーまでは，顕著な機械的特性変化は見られない[17),18)]ことが示されており，最も中性子照射量が高くなる箇所においても，使用予定期間中の累積中性子照射量は 2.0×10^{14} n/cm^2 であることから照射脆化の影響はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	化学	蓋間空間には不活性ガスであるヘリウムを適切に封入し，その圧力を監視する設計としている。一次蓋の金属ガスケット及び二次蓋の金属ガスケットの内側は不活性雰囲気にあり，腐食を考慮する必要はない。大気と接触する二次蓋金属ガスケットの外側については，約 3 年間の塩水噴霧試験を実施し，実機の使用環境より厳しい塩水噴霧環境においても漏えい率に変化のないことが示されている[19)]。また，10 年間海浜条件で大気ばく露させた際の平均浸食深さ及び最大孔食深さが示されており[8)]，使用予定期間中の浸食深さ及び孔食深さを評価した結果，それぞれ約 0.025mm 及び約 0.33mm であり，外被材の製造公差[(注)]を含めても，板厚 0.5mm より小さいため，閉じ込め機能に影響はない。 （注）製造公差の例（ノミナル寸法：0.5mm，製造公差：[redacted]） 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	疲労	内外圧差や取扱いに起因する繰返し応力は生じないため，疲労による経年変化は発生しない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で疲労による経年変化の考慮は必要ない。	無し

(ロ)-第F.4表　使用予定期間中継続して使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価（10/10）

構成部材（材料）	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化の考慮の必要性
伝熱フィン（銅）	熱	高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられるが，使用予定期間中の最高温度（131℃）は，最も厳しい条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲（融点(K)の三分の一[4]である170℃以下）である。また，設計用強度・物性値が規定[20]されている温度範囲において構造健全性を確認しているため，熱的劣化を考慮する必要はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で熱による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	照射	中性子照射量が10^{16} n/cm^{2}オーダーまでは，顕著な機械的特性変化は見られない[21]ことが示されており，最も中性子照射量が高くなる箇所においても，使用予定期間中の累積中性子照射量は1.6×10^{14} n/cm^{2}であることから照射脆化の影響はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	化学	銅の電極電位は炭素鋼に比べて高く，イオン化傾向の低い金属である[12]ことから，銅は腐食することはなく，炭素鋼が選択的に腐食される。また，中性子遮蔽材（レジン）に接しており，中性子遮蔽材の熱的劣化により水分が生じるが，酸化鉄の生成により酸素の拡散障壁が形成されること及び中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり，酸素が連続的に供給されないことから，腐食の影響はない。 伝熱フィン並びに胴及び外筒の接合部において，異種金属接触により胴及び外筒の腐食が促進される可能性があるが，閉鎖環境かつ淡水環境では，銅が接続された鋼の腐食速度が鋼単独の場合と同程度になる[22]ことが示されている。また，中性子遮蔽材の熱的劣化により生じる水分量は限定的であることに加え，中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり，酸素が連続的に供給されないため，異種金属接触による接合部への腐食促進の影響は小さく，腐食の影響はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	疲労	内外圧差や取扱いに起因する繰返し応力は発生しても変動が小さいため，疲労による経年変化は発生しない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で疲労による経年変化の考慮は必要ない。	無し

(ロ)-第F.5表　輸送時のみに使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価（1/4）

構成部材（材料）	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化の考慮の必要性
三次蓋（ステンレス鋼）	熱	高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられるが，運搬中の最高温度（103℃）は，最も厳しい条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲（融点(K)の三分の一[4]である280℃以下）である。また，設計用強度・物性値が規定[5),6)]されている温度範囲において構造健全性を確認しているため，熱的劣化を考慮する必要はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で熱による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	照射	中性子照射量が10^{17} n/cm^{2}オーダーまでは，顕著な機械的特性変化は見られない[11)]ことが示されており，最も中性子照射量が高くなる箇所においても，使用予定期間中の累積中性子照射量は1×10^{14} n/cm^{2}を下回ることから照射脆化の影響はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	化学	耐食性に優れたステンレス鋼を使用するため，実用上問題となる腐食は生じない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	疲労	内外圧力差により繰返し応力が発生するため，経年変化についての考慮が必要となる。 内圧変化による荷重が負荷される三次蓋に発生する繰返し応力を，F.2 で示したとおり保守側に設定した使用回数に基づいて疲労評価を行う（(ロ)章A「構造解析」のA.5.1.4参照）。	有り

(ロ)-第F.5表　輸送時のみに使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価（2/4）

構成部材（材料）	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化の考慮の必要性
三次蓋ボルト 緩衝体ボルト （ニッケルクロムモリブデン鋼）	熱	高温環境下では組織変化による強度低下及びクリープによる変形が考えられるが，運搬中の最高温度（三次蓋ボルト：103℃，緩衝体ボルト：115℃）は，最も厳しい条件となるクリープによる変形を考慮する必要のない範囲（融点(K)の三分の一[4]である300℃以下）である。また，設計用強度・物性値が規定[5),6)]されている温度範囲において構造健全性を確認しているため，熱的劣化を考慮する必要はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で熱による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	照射	中性子照射量が10^{16} n/cm^{2}オーダーまでは，顕著な機械的特性変化は見られない[7)]ことが示されており，最も中性子照射量が高くなる箇所においても，使用予定期間中の累積中性子照射量は1×10^{14} n/cm^{2}を下回ることから照射脆化の影響はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	化学	めっき処理等の防錆措置を実施するため，実用上問題となる腐食は生じない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	疲労	内外圧力差により繰返し応力が発生するため，経年変化についての考慮が必要となる。 内圧変化による荷重が負荷される三次蓋ボルトに発生する繰返し応力を，F.2 で示したとおり保守側に設定した使用回数に基づいて疲労評価を行う（(ロ)章A「構造解析」のA.5.1.4参照）。	有り

(ロ)-第 F.5 表　輸送時のみに使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価（3/4）

構成部材（材料）	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化の考慮の必要性
緩衝材（木材）	熱	木材は，熱による経年変化として，高温環境下での強度低下が考えられる。 本輸送容器では，緩衝材の最高温度は，通常輸送条件よりも保守的な一般の試験条件下（環境温度 38℃，太陽熱放射あり）であっても 113℃（平均温度 83℃）であり，実輸送時の条件では平均温度は約 70℃である。 木材温度が 200℃に達すると木材の熱分解が進む[23]との文献が確認できたものの，直接参照できる文献は乏しい状況にある。一方で，緩衝材として木材が広く使用されていることを踏まえ，本輸送容器を含め現在国内事業者が使用又は使用予定の輸送容器について，これまでの実輸送時の条件をもとに収納物による設計上の最大入熱を考慮した輸送容器の緩衝材の平均温度を評価した結果，約 40℃～70℃程度であること，使用済燃料輸送実績のある輸送容器を廃棄する際に採取した木材の圧潰強度及び密度測定の結果，木材の衝撃吸収性能は健全であり，性能劣化はなかったことから，これまでの実績と同様の使用環境であれば，木材の熱的劣化は生じないと考えられる（注）。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で熱による経年変化の考慮は必要ない。 なお，輸送に際しては，都度，輸送容器の使用履歴を蓄積し，輸送前に，輸送容器の使用履歴，収納物の発熱量及び輸送時に想定される環境温度を踏まえ，木材温度が，概ね実績のある温度の範囲内であることを確認した後に輸送を行う。	無し
	照射	中性子照射量が 10^{16} n/cm^2 オーダーまで，ガンマ線照射量が 1.0×10^{5} Gy までは，顕著な機械的特性変化は見られない[24]ことが示されており，中性子照射量又はガンマ線照射が最も高くなる箇所においても，使用予定期間中の累積中性子照射量は 9.8×10^{12} n/cm^2 又は累積ガンマ線照射量は 6.0×10^{1} Gy であることから照射脆化の影響はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で放射線による経年変化の考慮は必要ない。	無し

（注）参考資料：第 12 回輸送容器及び使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器に関する審査会合（令和 4 年 4 月 25 日）　資料 1 別紙「緩衝材（木材）の熱的劣化について」

(ロ)-第 F.5 表　輸送時のみに使用される輸送容器の構成部材の安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価（4/4）

構成部材（材料）	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の評価	経年変化の考慮の必要性
緩衝材（木材）	化学	緩衝材の充填空間はステンレス鋼製のカバープレートに覆われた閉鎖環境にあり，酸素が連続的に供給されないため，腐朽しない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で化学的要因による経年変化の考慮は必要ない。	無し
	疲労	内外圧差や取扱いに起因する繰返し応力は生じないため，疲労による経年変化は発生しない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で疲労による経年変化の考慮は必要ない。	無し

F.3　安全解析における経年変化の考慮内容

(ロ)-第F.3表から(ロ)-第F.5表に示す経年劣化の考慮の必要性の評価結果に基づき，(ロ)章では，バスケット（アルミニウム合金），中性子遮蔽材（レジン），金属ガスケット，上部トラニオン，三次蓋及び三次蓋ボルトの経年変化を考慮する。

取扱時に荷重が負荷される上部トラニオンの疲労評価については(ロ)章 A「構造解析」のA.4.4.2において，内圧変化による荷重が負荷される三次蓋及び三次蓋ボルトの疲労評価についてはA.5.1.4において実施している。

また，バスケット，中性子遮蔽材及び金属ガスケットについては，以下のとおり経年変化を考慮した上で，安全解析を実施している。

(1) バスケット

バスケットに使用されるアルミニウム合金については，構造解析において，(ロ)章A「A.10.6　MSF-24P型輸送容器のバスケットプレート用材料アルミニウム合金（MB-A3004-H112）に関する説明書」に示す，高温での60年間の熱ばく露後の材料特性を反映した設計用強度・物性値を使用する。

設計用強度は，長時間時効処理した供試材及び完全焼きなまし処理した供試材を用いて機械的強度を取得し，(ロ)-第F.6表及び(ロ)-第F.7表（S_y，S_uの例）に示すとおり，温度変化による強度変化をASMEのトレンドカーブ法を用いるとともに，時効後強度のトレンドカーブを併せて考慮して設定した。

完全焼きなまし処理は，長時間過時効熱処理に代わる方法として，高温焼鈍後に冷却中の各温度での平衡状態（固溶，析出）を維持しながら常温付近まで徐冷（制御冷却）することで，供用期間中に失われる固溶強化，加工硬化，結晶組織微細化の強化機構が平衡状態に達した，強度的にも安定な材料を得る熱処理方法である。設計用強度は，強化機構が平衡状態に達し，強度が最も低く安定した完全焼きなまし処理したデータを含めて設定していることから妥当であると判断される。

物性値は，長時間時効処理した供試材より設定した。

なお，貯蔵時にバスケットプレートに発生する応力は1MPa未満と小さく，使用予定期間中のバスケットプレートのクリープ変形量は無視し得る。

(ロ)-第 F.6 表　各温度における設計降伏点 S_y

温度(℃) / 項目	-40～40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325 (注 1)	350 (注 1)
常温における耐力規定値 S_{Y0} (MPa)	85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
耐力比 R_Y (トレンドカーブ)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.963	0.901	0.814	0.705	0.582	0.459	0.356	0.298
時効後強度比率 A_Y (トレンドカーブ)	0.668	0.683	0.684	0.691	0.704	0.722	0.742	0.760	0.773	0.783	0.791	0.806	0.843
$S_{Y0}\times R_Y\times A_Y$ (MPa) (=設計降伏点 S_y, 時効後)	56	56	56	56	56	56	56	52	46	38	30	24	21

(注 1) 325 ℃, 350 ℃の値は最高温度での評価値であり，規定値ではない。

R_Y：耐力比（温度トレンドカーブ（1.0 を超える分は 1.0 へ修正））

$=5.79491\times10^{-13}T^5-1.66013\times10^{-10}T^4-8.26469\times10^{-8}T^3+2.25276\times10^{-5}T^2$
$-1.41233\times10^{-3}T+1.02372$

S_{Y0}：常温における耐力規定値（MPa）

時効後強度比率 A_Y：初期材に対する時効後の 0.2 %耐力の比（最小値トレンドカーブ）

$=1.12046\times10^{-12}T^5-1.01355\times10^{-9}T^4+3.26910\times10^{-7}T^3-4.40188\times10^{-5}T^2$
$+2.62581\times10^{-3}T+0.625057$

(ロ)-第 F.7 表　各温度における設計引張強さ S_u

温度(℃) / 項目	-40～40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325 (注 1)	350 (注 1)
常温における引張強さ規定値 S_T(MPa)	185	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
引張強さ比 R_T (トレンドカーブ)	1.000	0.999	1.000	0.983	0.932	0.852	0.750	0.636	0.522	0.421	0.341	0.284	0.245
時効後強度比率 A_T (トレンドカーブ)	0.828	0.859	0.849	0.834	0.817	0.803	0.796	0.796	0.804	0.818	0.837	0.857	0.871
$S_T\times R_T\times A_T$ (MPa) (=設計引張強さ S_u, 時効後)	153	153	153	151	140	126	110	93	77	63	52	44	39

(注 1) 325 ℃, 350 ℃の値は最高温度での評価値であり，規定値ではない。

R_T：引張強さ比（温度トレンドカーブ（1.0 を超える分は 1.0 へ修正））

$=-1.95417\times10^{-12}T^5+2.10725\times10^{-9}T^4-7.74787\times10^{-7}T^3+1.06151\times10^{-4}T^2$
$-5.69199\times10^{-3}T+1.09402$

S_T：常温における引張強さ規定値（MPa）

時効後強度比率 A_T：初期材に対する時効後の引張強さの比（最小値トレンドカーブ）

$=-1.41195\times10^{-10}T^4+1.22362\times10^{-7}T^3-3.33818\times10^{-5}T^2+3.03301\times10^{-3}T$
$+0.771645$

(2) 中性子遮蔽材

a. 構造解析における中性子遮蔽材部の圧力上昇

蓋部，側部及び底部中性子遮蔽材部には，レジンが充填されており，その空間部には空気が大気圧で封入されている。側部中性子遮蔽材部及び底部中性子遮蔽材部には可溶栓が設置されており，輸送前にはそれらの交換などの容器の保守で一時的に圧力が開放されるが，通常は大気と遮断された環境にある。可溶栓部の大きさは外筒及び底部中性子遮蔽材カバー全表面に対して十分小さく，かつ，中性子遮蔽材部にはレジンが充填されていることから空隙部は十分小さいため，可溶栓が一時的に開放されたとしても，可溶栓の周囲の限定的な範囲の空気が一時的に置換されるのみであることから，酸素が連続して供給されない閉鎖環境に影響はない。また，蓋部中性子遮蔽材部は，圧力が開放されることはなく，常時閉鎖されている。

中性子遮蔽材に用いるエポキシ系レジンについて，貯蔵期間を考慮した経年劣化評価試験が実施されており[14),25)~27)]，長期貯蔵後の中性子遮蔽材部の気相部分の成分は主に水，二酸化炭素及び窒素と考えられる。

水については，水の存在による圧力上昇を飽和水蒸気圧として考慮する。二酸化炭素については，初期に空間部分に存在する酸素によるレジンの酸化反応により発生するため，二酸化炭素は初期に存在した酸素と同量の物質量に設定する。また，窒素は，不活性ガスであることからレジンへの吸収がないものとし，初期に存在した物質量とする。したがって，空間部分の水を除くガスの物質量は変化しないものとし，初期に存在する空気として評価する。

構造解析では中性子遮蔽材部の気相部分の圧力上昇として，空気温度の上昇，レジンの熱膨張による空気体積の減少及び飽和水蒸気圧を考慮した。

中性子遮蔽材部の圧力P（MPa）は，以下のとおり求められる。なお，外筒内面の膨張吸収材（[redacted]）が取り付けられる面には以下の式によって求めた中性子遮蔽材部圧力に，膨張吸収材の圧縮による圧力[redacted]を加えて圧力を設定した。

$$P = P_W + P_G$$

ここで，

P_W　：温度tの飽和水蒸気圧（MPa）

P_G　：温度tの空気の分圧（MPa）

$$P_G = P_0 \times \frac{t + 273.15}{20 + 273.15} \times \frac{V - V_{RO}}{V_V}$$

P_0　：大気圧（0.101325MPa）

t　：一般又は特別の試験条件における中性子遮蔽材温度(℃)

V　：中性子遮蔽材部の全容積（m^3）

V_{R0}　：初期の中性子遮蔽材の体積（m^3）

V_V　：温度ｔの空気の体積（m^3）

$$V_V = V - V_{R0} \times (1 + \alpha(t - 20))^3$$

α　：温度ｔの中性子遮蔽材の熱膨張係数（m/m･℃）

一般の試験条件及び特別の試験条件における中性子遮蔽材部圧力の計算条件及び計算結果を(ﾛ)-第F.8表に示す。なお，特別の試験条件において，側部中性子遮蔽材部の圧力は可溶栓によって開放される。

(ロ)-第F.8表　中性子遮蔽材部圧力の計算条件及び計算結果

部位	試験条件	中性子遮蔽材部の全容積：V (m^3)	初期の中性子遮蔽材の体積：V_{RO} (m^3)	中性子遮蔽材温度：t (℃) (注1)	温度tの空気の体積：V_V (m^3)	温度tの空気の分圧：P_G (MPa)	温度tの飽和水蒸気圧：P_W (MPa)	中性子遮蔽材部圧力：P (MPa)
蓋部	一般							
	特別							
側部	一般 (注3)							
	特別 (注4)							
底部	一般 (注3)							
	特別 (注5)							

(注1)一般の試験条件又は特別の試験条件における平均温度

(注2)20 ℃における体積

(注3)

(注4)特別の試験条件において，下部端板に設けられた可溶栓が熱により溶融し，側部中性子遮蔽材部は大気圧となるが，一般の試験条件と同じ圧力とする。

(注5)底部中性子遮蔽材部の特別の試験条件における計算においては，飽和水蒸気圧に加え，一般の試験条件における圧力に対し，空気温度の上昇及びレジンの熱膨脹による空気体積の減少による圧力上昇を考慮する。

(注6)一般の試験条件での中性子遮蔽材温度（平均温度）における体積

(注7)外筒内側の膨張吸収材（　　）が取り付けられている面には，表中に記載の圧力に加えて膨張吸収材の圧縮による圧力　　を考慮する。

b. 遮蔽解析における質量減損

使用予定期間経過後の中性子遮蔽材の質量減損率の評価を行い，経年劣化を考慮した原子個数密度を遮蔽解析に用いている。

MSF-24P 型キャスクへ使用するレジン（MREX）の経年変化による質量減損率は，(財)原子力発電技術機構の報告書[13]に記載の評価式を用いて設定している。この評価式は，エポキシ系レジン（NS-4-FR）を対象として実施した加熱劣化試験のデータから設定されたものであるが，(ロ)-第 F.9 表に示すとおり NS-4-FR と MREX の仕様及び測定値は合致している。また，NS-4-FR と同様に MREX の加熱劣化試験でのデータを(ロ)-第 F.1 図に示す。(ロ)-第 F.1 図は，(財)原子力発電技術機構の報告書のデータに MREX の試験データを重ね合わせたものである。(ロ)-第 F.1 図に示すとおり，MREX の質量減損は NS-4-FR の試験結果と同等である。

質量減損率は，劣化パラメータにより次式で表される。

$$\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \times E_p - 19.2 \quad [13]$$

ここで，

Δw：中性子遮蔽材の質量減損率（%）

E_p ：劣化パラメータ

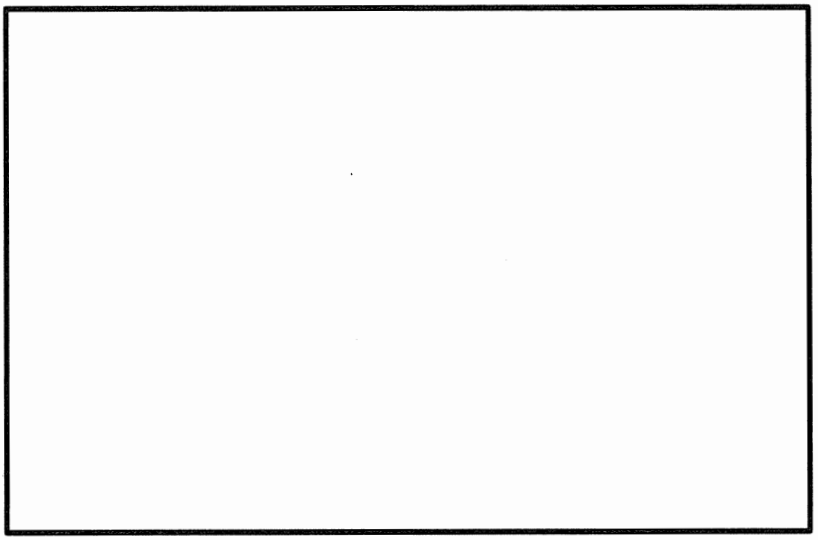
$$E_p = T \times (77.6 + \ln(t))$$

T ：中性子遮蔽材温度（K）

t ：中性子遮蔽材加熱時間（h）

(ロ)-第 F.9 表　NS-4-FR と MREX の要求仕様と測定値の比較

NS-4-FR の仕様	MREX の仕様	MREX の測定値
エポキシ系レジン	同左	エポキシ系レジン
難燃性，自己消火性を有すること	同左	難燃性，自己消火性有
線膨張係数：1.1×10^{-4} 以下（150℃）	同左	0.9×10^{-4}（150℃）
使用可能温度：-40～149℃	同左	-40～150℃
密度：$1.67\pm0.05 g/cm^3$	同左	$1.66 g/cm^3$
B_4C 含有量：$0.0194 g/cm^3$ 以上	同左	$0.02 g/cm^3$
H 含有量：$0.096 g/cm^3$ 以上	同左	$0.10 g/cm^3$



(ロ)-第 F.1 図　レジン（MREX 及び NS-4-FR）の質量減損

貯蔵中は，使用済燃料の崩壊熱量の低下に伴い，中性子遮蔽材の温度も低下するが，使用予定期間経過後の中性子遮蔽材の質量減損率算定においては，保守的に貯蔵開始直後の中性子遮蔽材の最高温度が使用予定期間にわたり一定として質量減損率を算定する。使用予定期間初期の中性子遮蔽材の最高温度を(ロ)-第 F.10 表に示す。

上記を基にすれば，使用予定期間経過後の劣化パラメータは，温度の高い底部中性子遮蔽材で約 38000 となり，質量減損率は約 2.0%と算定される。遮蔽解析ではこれを切り上げて 2.5%の質量減損があるとして評価する。

なお，中性子遮蔽材から放出される成分は水が支配的であり，水よりも水素含有率が高いガス成分はわずかである[14),25)~27)]。したがって，遮蔽解析においては，中性子の遮蔽性能を安全側に設定するため，中性子遮蔽材の質量減損の成分を全て水とし，この質量減損分を遮蔽体として無視している。

(ロ)-第 F.10 表　使用予定期間初期の中性子遮蔽材の最高温度(注)

蓋部（℃）	側部（℃）	底部（℃）
109	133	136

(注)最高温度の主な算出条件を以下に示す。

- キャスクの貯蔵方式：たて置き貯蔵
- 環境温度：50℃
- キャスクのピッチ：3.5m

(3) 金属ガスケット

a. 金属ガスケットの横ずれ／口開き量と漏えい率の関係性

高温で長期間使用する金属ガスケットについては，構造解析において，これまでの知見に基づき経年変化を考慮した金属ガスケットの横ずれ基準値を設定する。

金属ガスケットについては，貯蔵後の輸送時密封性能に関する要素試験として，長期貯蔵後の劣化状態を模擬した静的口開き試験，静的横ずれ試験，動的口開き試験，動的横ずれ試験が実施されている。当試験では静的口開きと横ずれが同時に発生した場合に，(ロ)-第F.2図に示す輸送時の基準漏えい率を確保するための横ずれ量と有効復元量（許容口開き量）の相関関係が得られている[9]。(ロ)-第F.2図から，95×95信頼度下限での推定線（120℃温度条件）を用いると，有効復元量（許容口開き量)を0mmとした場合の基準漏えい率を確保するための許容横ずれ量が6mmと読み取れる。なお，(ロ)-第F.3図にラーソン・ミラー・パラメータ（以下「LMP」という。）に対する残留線荷重の関係を，(ロ)-第F.4図に静的横ずれ量と漏えい率の関係を示す。(ロ)-第F.3図及び(ロ)-第F.4図から，1.6kN/cm程度の線荷重が残留していれば，6mmの静的横ずれがあった場合でも3.0×10^{-6} Pa･m^3/s程度の密封性能が維持されることが示されている[9]。また，落下試験を想定した動的横ずれと漏えい率の関係についてまとめられ，(ロ)-第F.5図に示す統計誤差を考慮した安全側の評価線が示されている[28]。

本輸送容器で使用する金属ガスケットは上述の試験に用いられたものと，外被，内被及びコイルスプリングの材料は同等であり，断面径も10mmと等しい。また，貯蔵終了時（使用予定期間（60年））のLMPは7340であり，上述の試験に用いられた試験体のLMP 7375を下回っているので，上述の試験以上の密封性能が期待できる[注1)]。ただし，本輸送容器で使用する金属ガスケットのフープ径は上述の試験の約10倍であるので，漏えい率は試験における漏えい率の10倍として評価する。

注 1) 本輸送物では，輸送時における一般の試験条件下の温度（105℃：防水機能を維持する二次蓋金属ガスケットの温度）の方が貯蔵時の温度より高いが，保守的に，貯蔵前に一般の試験条件の温度が1年間継続するものと仮定してもLMPは6790であり，上述の試験以上の密封性能が維持できることに変わりはない。

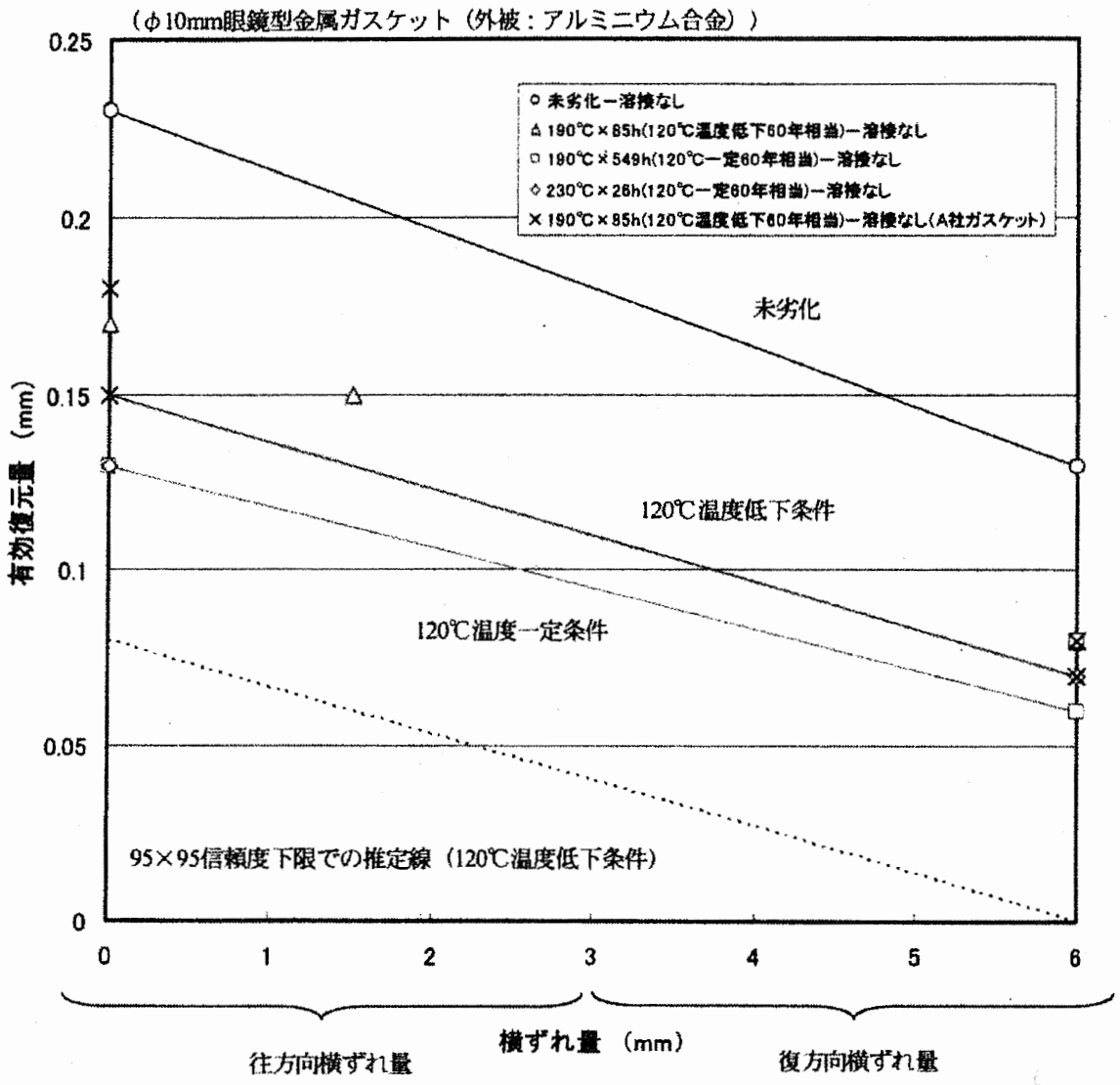
上述の試験に基づき，核分裂性輸送物に係る特別の試験条件に対しては，十分な防水機能が得られる密封性能（5×10^{-3} ref cm^3/s）となるよう，構造解析の基準値を設定した。具体的には，(ロ)-第 F.2 図に示す横ずれ量と有効復元量（許容口開き量）の関係より，95×95 信頼度下限での推定線（120℃温度条件）を用いると，上述のとおり有効復元量（許容口開き量）を 0mm とした場合の基準漏えい率を確保するための許容横ずれ量は 6mm であることから，静的横ずれに対して 3mm を設定した。

また，(ロ)-第 F.5 図に示す動的横ずれと漏えい率の関係より，試験データのばらつき（3σ）を考慮して設定した漏えい率評価のための上限線を用いると，5×10^{-3} ref cm^3/s に相当する 5×10^{-5} $Pa\cdot m^3/s$ 注 2)に対応する動的横ずれ量が 3mm であることから，動的横ずれに対して 3mm と設定した。

b. 漏水量評価に使用する二次蓋金属ガスケットの密封性能

構造解析において，a. で定めた基準を満たすことを確認できたことから，核分裂性輸送物に係る特別の試験条件における二次蓋金属ガスケットの密封性能を 5×10^{-3} ref cm^3/s と設定し，(ロ)章 E 臨界解析 E.7 にて胴内の浸水量を評価した。

注 2) 5×10^{-3} ref cm^3/s は標準状態（大気圧，常温）条件における漏えい率であり，試験圧条件では 5×10^{-4} $Pa\cdot m^3/s$ である。これに金属ガスケットのフープ径の比（約 10 倍）を考慮すると，試験結果で引用する漏えい率 5×10^{-3} ref cm^3/s に相当する漏えい率は，5×10^{-5} $Pa\cdot m^3/s$ と求められる。

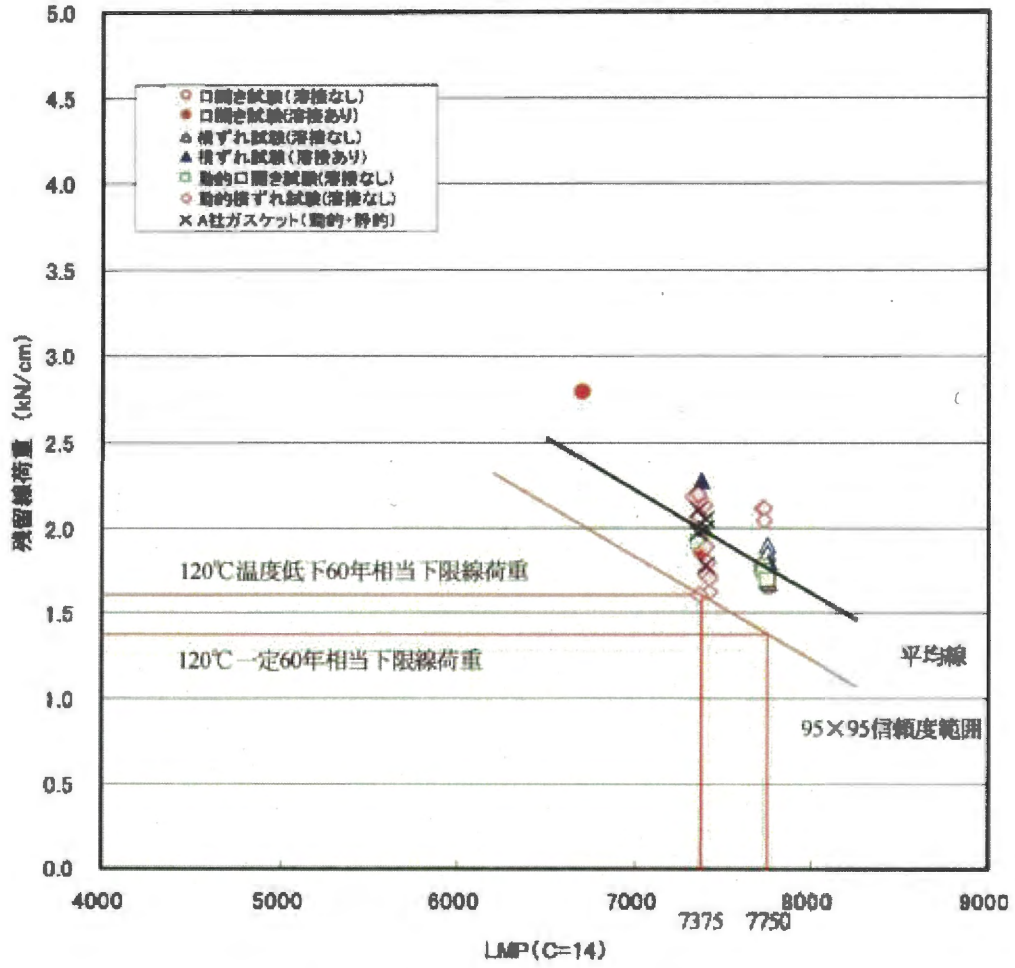


注1：図中のラインは，横ずれ後の口開き試験を行ったデータにつき，劣化条件ごとでの下限線を示す。

注2：破線で示す値及びラインは全データでの95×95信頼度下限値の値(0.08mm)と120℃温度低下条件での下限ラインと平行に引いた場合の想定線である。

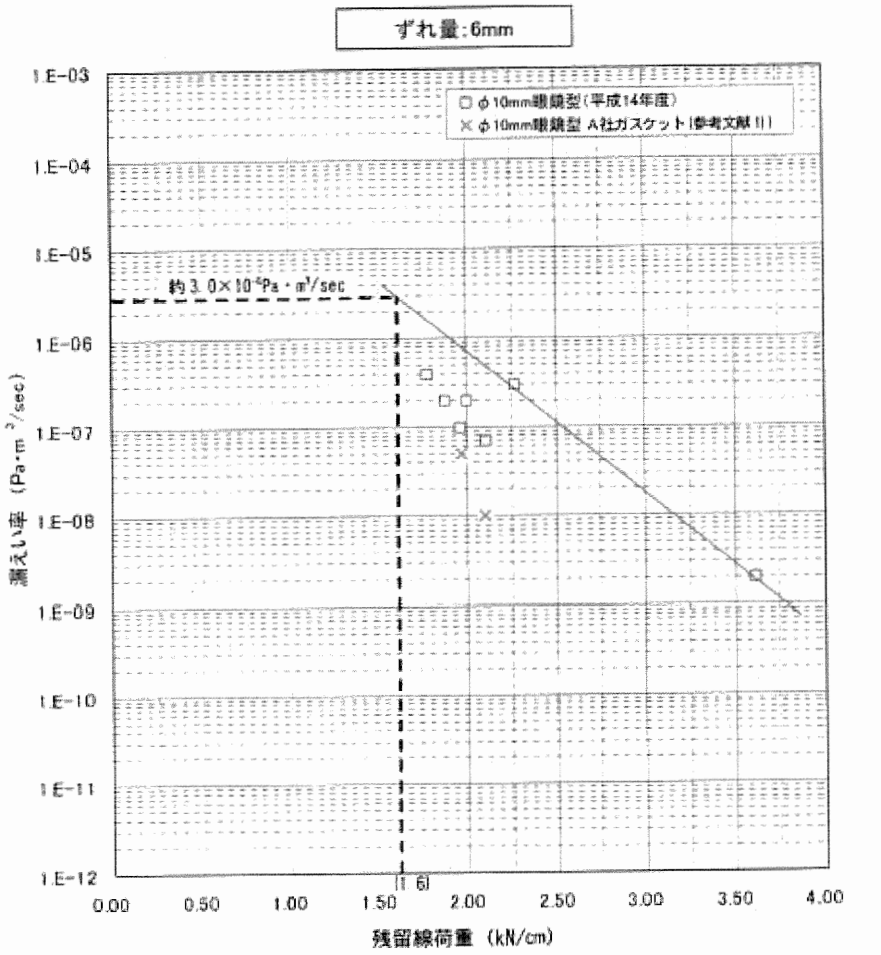
(ロ)-第F.2図　静的横ずれ変位と口開き変位が同時に起こった場合の許容量推定図[9)]

（基準漏えい率に対する有効復元量）

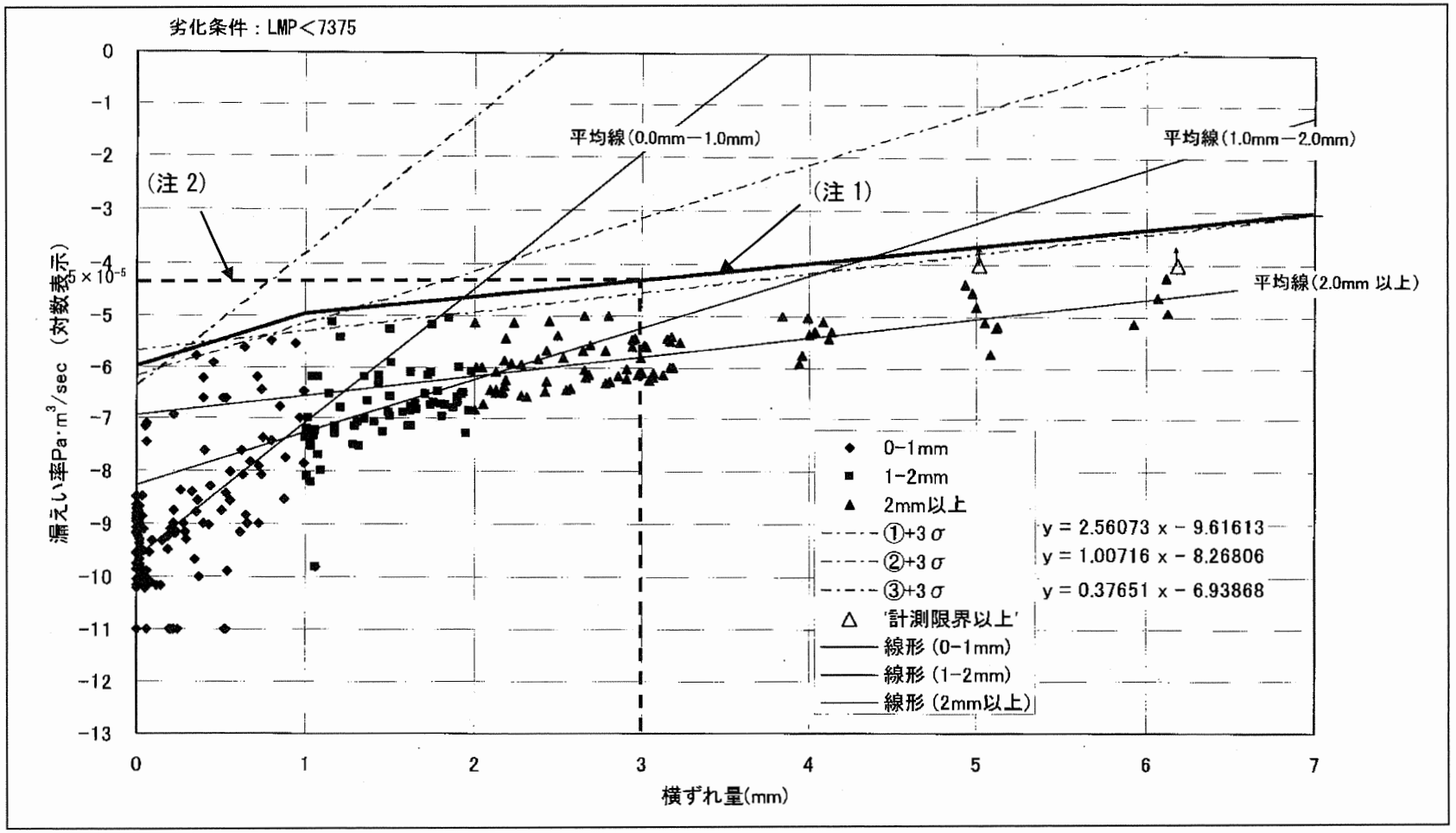


(ロ)-第F.3図　LMPに対する残留線荷重の関係[9)]

(φ10mmアルミ外被眼鏡型ガスケット)



(ロ)-第 F.4 図　静的横ずれ量と漏えい率の関係（横ずれ：6mm）[9)]



(注 1)試験データのばらつき（3σ）を考慮して設定した漏えい率評価のための上限
(注 2)元図に横ずれ 3mm のときの漏えい率読み取り補助線等を追記

(ロ)-第 F.5 図　金属ガスケット動的横ずれの整理 [28)]

F.4　付属書類

F.4.1　燃料被覆管に発生する周方向応力について

燃料被覆管中の水素化物再配向については，国内の軽水炉で照射されたPWR燃料の燃料被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械的特性試験の結果，被覆管の周方向機械的特性が低下しない条件として，PWR燃料では燃料被覆管の温度が275℃以下，周方向応力が100MPa以下[2)]と求められており，燃料被覆管温度と周方向応力を上記基準以内に制限することによって，機械的特性の劣化を防止できる。

MSF-24P型キャスクの輸送時及び貯蔵時の燃料被覆管の最高温度は(ロ)-第F.1表のとおりである。最も温度が高く周方向応力が最大となる貯蔵時における燃料被覆管の周方向応力は，(ロ)-第F.付1表に示すとおり94MPaであり，水素化物再配向を防止する基準以内であることから，熱による経年変化を考慮する必要はない。燃料被覆管周方向応力の計算詳細を次に示す。

燃料被覆管を円筒とみなすと，燃料被覆管周方向応力σ_θは次式で計算される。

$$\sigma_\theta = \frac{PD}{2t}$$ （内圧を受ける薄肉円筒の式）

ここで，

σ_θ ：燃料被覆管周方向応力(MPa)

P　：燃料棒内圧(MPa)

D　：燃料被覆管平均径(mm)

t　：燃料被覆管肉厚(mm)

また，燃料被覆管平均径Dは，次式で計算される。

$D = d + t$

ここで，

d　：燃料被覆管内径(mm)

(ロ)-第F.付1表　周方向応力の計算条件及び計算結果

	項目	記号	数値
			17×17 燃料
計算条件	燃料被覆管内径(mm)	d	
	燃料被覆管肉厚(mm)(注1)	t	
	燃料棒内圧(MPa)	P	
計算結果	燃料被覆管周方向応力(MPa)	σ_θ	94

(注1) 燃料被覆管肉厚は，照射後の腐食減肉として保守的に10%の腐食減肉を考慮する。

(注2) PWR燃料の燃料被覆管内圧は，PWR燃料の燃料体設計認可において用いられている燃料棒設計計算コード（FINEコード）[29]を用いて，通常の3サイクル運転の履歴を考慮して通常運転後の内圧を計算し，次にその通常運転後の内圧に貯蔵時の燃料被覆管温度を考慮（軸方向の温度分布を考慮）して算出した。なお，燃料被覆管内圧の評価では，不確定性を考慮している。

F.4.2 参考文献

1) D. E. Alexander, L. E. Rehn, “Analysis of Gamma Ray Displacement Damage in Light Water Reactor Pressure Vessels”, ANL/MSD/CP-86640, Argonne National Laboratory, (1995).

2) 総合資源エネルギー調査会　原子力安全・保安部会　核燃料サイクル安全小委員会　中間貯蔵ワーキンググループ　輸送ワーキンググループ,「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」, (2009).

3) (一社)日本原子力学会標準委員会,「使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準：2024(AESJ-SC-F002：2024)」, (2024).

4) 田中良平,「耐熱鋼のクリープ特性の評価について」, 圧力技術, 第16巻, 第2号, p.87-95, (1978).

5) (一社)日本機械学会,「使用済燃料貯蔵施設規格　金属キャスク構造規格（JSME S FA1-2007)」, (2007).

6) (一社)日本機械学会,「発電用原子力設備規格　材料規格（2012年版）(JSME S NJ1-2012)」, (2012).

7) K. Farrell, S. T. Mahmood, R. E. Stoller, L. K. Mansur, “An Evaluation of Low Temperature Radiation Embrittlement Mechanisms in Ferritic Alloys”, Journal of Nuclear Materials, Vol. 210, (1994).

8) (一社)日本アルミニウム協会,「アルミニウムハンドブック第7版」, (2007).

9) (独)原子力安全基盤機構,「平成15年度　金属キャスク貯蔵技術確証試験　報告書　最終報告」, (2004).

10) 三菱重工業(株),「型式設計特定容器等の型式指定申請書　本文及び添付書類の一部補正について」, (2017).

11) 土肥謙次, 秀耕一郎, 黛正己, 恩地健雄, 大岡紀一,「304ステンレス鋼のSCC特性に及ぼす中性子照射効果（その2）－熱鋭敏化材のSCC感受性に及ぼす照射影響－」, (一財)電力中央研究所, (1997).

12) (公社)腐食防食協会編,「腐食・防食ハンドブック CD-ROM版 第2版」, 丸善（株）, (2005).

13) (財)原子力発電技術機構,「平成14年度　リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等（金属キャスク貯蔵技術確証試験）　報告書」, (2003).

14) T. Ichihashi, D. Ishiko, A. Ogawa, M. Morishima, “Verification Tests of Neutron Shielding Materials and Shielding Assessment”, Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (2007).

15) 加藤治, 伊藤千浩, 三枝利有,「使用済燃料貯蔵キャスクの長期密封性能評価手法の開発」, 日本原子力学会誌, Vol.38, No.6, (1996).

16) (一財)電力中央研究所,「平成21年度　リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等報告書」, (2010).

17) H. Yoshida, et al., “Reactor Irradiation Effects on Al 1100”, Proc. Jpn. Congr. Mater. Res., Vol.24, (1981).
18) T.S.Byun, K.Farrell, “Tensile Properties of Inconel 718 after Low Temperature Neutron Irradiation”, Journal of Nuclear Materials, 318, (2003).
19) 小崎明朗,「使用済燃料貯蔵中の耐久性に関する海外動向他」,(株) 日本原子力情報センター主催セミナー「使用済燃料貯蔵技術の現状と課題」, (1998).
20) (一財)日本規格協会, 「圧力容器の設計 (JIS B 8267 : 2015)」, (2015).
21) S. J. Zinkle, G. L. Kulcinski, “Low-Load Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys”, ASTM STP888, (1986).
22) 能登谷武紀,「密閉系淡水における鋼-銅系のガルバニック腐食」, 伸銅技術研究会誌 33 巻, (1994).
23) 岡野健, 祖父江信夫,「木材科学ハンドブック」, 朝倉書店, (2006).
24) 三菱重工業(株),「発電用原子炉施設に係る特定機器の設計の型式証明申請書 (特定兼用キャスク) 本文及び添付書類の一部補正について」, (2021).
25) 原燃輸送(株),「使用済燃料等の輸送容器に用いられる中性子しゃへい材(NS-4-FR)の連続加熱評価試験」, NFT-TR-97001, (1997).
26) (財)原子力発電技術機構,「平成 13 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術確証試験 (金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書」, (2002).
27) (財)原子力発電技術機構,「平成 15 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書」, (2003).
28) (独)原子力安全基盤機構,「平成 16 年度 中間貯蔵施設健全性評価手法等調査 報告書 (1/2) 最終報告」, (2005).
29) 三菱原子力工業株式会社,「MAPI-1019 三菱 PWR の燃料設計計算コードの概要 改 1」, (1988).

(ロ)章 G　　外運搬規則及び外運搬告示に対する適合性の評価

<table>
<tr><th>規則の項目</th><th>告示の項目</th><th>説明</th><th>申請書記載
対応項目</th></tr>
<tr><td>(核燃料輸送物としての核燃料物質等の運搬)
第３条
第１項第１号</td><td>(L 型輸送物として運搬できる核燃料物質等)
第３条</td><td>該当しない。</td><td></td></tr>
<tr><td></td><td>(A 型輸送物として運搬できる核燃料物質等の放射能の量の限度)</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>第２号</td><td>第４条</td><td>該当しない。</td><td></td></tr>
<tr><td>第３号</td><td></td><td>本輸送物の収納物は下記のとおりであり，原子力規制委員会の定める量を超える量の放射能を有する核燃料物質等に該当するので BM 型輸送物として輸送する。</td><td>(ｲ)-A,
(ｲ)-D</td></tr>
</table>

		中央部		外周部	
		17×17 燃料			
		A型	B型	A型	B型
燃料集合体の種類		軽水炉（PWR） 使用済燃料			
性状		固体 （二酸化ウラン粉末焼結体）			
ウラン重量 （kg 以下）					
放射能の量 （PBq 以下）					
初期濃縮度 （wt％以下）		4.2			
燃焼度	収納物最高 （MWd/t 以下）				
	収納物平均 （MWd/t 以下）				
発熱量 （kW 以下）		13.9			
冷却日数 （日以上）					
収納体数 （体以下）		12		12	

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
第3条 第2項		該当しない。	
第3項		輸送容器の構成部材及び収納物の経年変化を以下のとおり考慮した上で，第6条の技術上の基準に適合していることを確認している。 a. 本輸送物に想定される使用状況及びそれに伴い考慮すべき経年変化の要因は以下のとおり。 (1) 使用状況 貯蔵（保管），再処理工場又は発電所への輸送の用途で，使用予定年数を60年，使用予定回数を10回と想定する。 (2) 経年変化の要因 熱的劣化，放射線照射による劣化，化学的劣化及び疲労による劣化とする。 b. 「a.」を踏まえ，経年変化の考慮の必要性及び考慮の方法について，以下のとおり評価した。 (1) 熱的劣化については，貯蔵又は輸送時における除熱解析結果（最高温度評価結果）を基に評価した結果，安全解析において以下の構成部材の熱的劣化を考慮することとした。 ・バスケット（アルミニウム合金）については，高温環境下では組織変化による強度低下（過時効の効果含む）が考えられるため，貯蔵開始時の温度が60年間継続する際の材料特性を反映した設計用強度・物性値を基に強度評価を行う。 ・中性子遮蔽材（レジン）については，高温環境下では含有する水分が放出されることによる質量減損が考えられるため，貯蔵開始時の温度が60年間継続する際の質量減損量を評価した結果，約2.0%となったことから，遮蔽解析では，保守的に2.5%の質量減損を考慮する。	(ロ)-F

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
		・金属ガスケット（アルミニウム／ニッケル基合金）については，高温環境下ではリラクゼーション（応力緩和）による落下時の密封性能低下が考えられるため，構造解析では，経年変化を考慮した密封性能を維持する基準として横ずれ量を設定する。また，貯蔵開始時の温度が 60 年間継続する際の密封性能の低下を考慮しても保証できる漏えい率を用いて 15m 浸漬における 1 か月間の浸水量を評価した結果，約 2 リットルとなったことから，臨界解析では，保守的に 5 リットルの浸水を考慮する。 また，緩衝材として用いる木材については，実輸送時における緩衝材の温度及び使用済燃料輸送実績のある輸送容器を廃棄する際に採取した木材の試験結果より，これまでの実績と同様の使用環境であれば，木材の熱的劣化は生じないと考えられる。 その他の部材については，最高温度がクリープによる変形を考慮する必要のない温度以下である等の理由により安全解析において考慮すべき経年変化は生じない。 (2) 放射線照射による劣化については，中性子照射及びガンマ線照射による強度，弾性，脆化等の機械的性質への影響が考えられるが，使用予定期間中の累積照射量が機械的特性変化を考慮する必要のない照射量に比べて小さい等の理由により安全解析において考慮すべき経年変化は生じない。 (3) 化学的劣化に関しては，腐食による強度の低下が考えられるが，不活性ガス雰囲気下にある，又は酸素が連続的に供給されない閉鎖環境下にある等の理由により安全解析において考慮すべき経年変化は生じない。 (4) 疲労による劣化に関しては，内外圧差と吊上げあるいはボルト締付けの繰返し荷重による疲労破壊が考えられるため，構造解析に	

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
		おいて，上部トラニオン，三次蓋及び三次蓋ボルトについて，影響を評価し，いずれも，使用予定期間中に想定される繰返し回数を包含する保守的な使用計画回数を設定した上で疲労を評価する。 c. 以上より，安全解析においては，上記で抽出されたバスケット（アルミニウム合金），中性子遮蔽材（レジン）及び金属ガスケットの熱的劣化による影響並びに上部トラニオン，三次蓋及び三次蓋ボルトの疲労を考慮した評価を実施し，第 6 条の技術上の基準に適合していることを確認した。	
(BM 型輸送物に係る技術上の基準) 第 6 条第 1 号		後述のとおり第 5 条第 1 号～第 8 号までに定める基準に適合している。ただし，第 6 号に定められる要件は該当しない。	
（第 5 条第 1 号）		後述のとおり第 4 条第 1 号～第 5 号，第 8 号及び第 10 号に定める基準に適合している。	
（第 4 条第 1 号）		本輸送物は，以下に示すように容易に，かつ，安全に取扱うことができる。 a. 輸送物は，キャスク本体にトラニオンがあり，吊上げ，吊下しは専用吊具を用い，クレーンを使用して容易に行える。また，輸送物は専用の輸送架台を用いて車両又は船舶に強固に積付けられる等，安全に取り扱えるものである。 b. 輸送物の吊上装置であるトラニオンは，公式を用いた計算により，取扱時を考慮して安全係数を 3 とし，収納物の最大収納体数を考慮した輸送物の吊上げ荷重の負荷時にも設計降伏点を下回るよう設計しており，急激な吊上げに耐えられるものである。	(ｲ)-C (ﾛ)-A. 4. 4

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
		c. 輸送物には，トラニオンを除いて輸送物を吊上げるおそれのある吊手はない。また，輸送物は，専用吊具によって容易に，かつ，安全に取り扱うことができる。	(イ)-C
		d. 輸送物の表面は滑らかに仕上げており，雨水が溜らない構造となっている。	(イ)-C
(第4条第2号)		本輸送物は，以下に示すように運搬中に予想される温度（-25℃～38℃）及び内圧の変化，振動等により，亀裂，破損等の生じるおそれはない。	
		a. 運搬中に予想される輸送物各部の最低温度は一律-25℃とし，最高温度は一般の試験条件の熱的試験と同様に周囲温度 38℃及び太陽放射熱を保守的に連続で負荷した条件の下で，軸方向燃焼度分布を考慮した上で，収納物の崩壊熱量の最大値に裕度を見た18.1kWとして輸送物各部の温度をABAQUSコードを用いて解析評価している。収納物の最高温度は206℃であり，制限温度275℃より低いため，燃料被覆管の機械的特性に影響はない。 本輸送物の主要な中性子遮蔽材であるレジンの温度は127℃であり，使用可能温度149℃より低いため，遮蔽性能が低下することはない。また，二次蓋金属ガスケット温度は105℃であり，金属ガスケットの使用可能温度130℃より低く，三次蓋Oリング温度は103℃であり，Oリングの使用可能温度150℃より低いため，密封性能が低下することはない。	(ロ)-B.4.6
		b. 運搬中に予想される温度の変化に対して，輸送物は周囲温度-25℃～38℃の温度の範囲において，各部品の熱膨張に伴う寸法変化は十分小さく，部品同士の干渉が生じないため，亀裂，破損等の生じるおそれはない。また，発生する熱応力に対しても，耐える強度をもつことから，構造健全性は維持される。	(ロ)-A.5.1.2
		c. 運搬中に予想される内圧の変化に対して，輸送物の運搬中に予想される最大内圧は胴内圧	(ロ)-A.5.1

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
		が0.078MPa，一二次蓋間が0.39MPa，二三次蓋間が0.253MPaであり，構造解析ではその圧力条件を上回る差圧を胴内，一二次蓋間及び二三次蓋間に設定した条件で，熱応力を含めた各部の応力をABAQUSコードを用いて解析評価している。また，中性子遮蔽材充填空間においても温度上昇に伴う圧力上昇を考慮している。運搬中の温度変化により予想される容器本体各部の温度差による熱応力や内圧の変化による荷重が負荷されても各部が設計応力強さ等基準値を下回り，構造健全性が維持され，亀裂，破損等の生じるおそれはない。また，三次蓋の口開き変形量はOリングの初期締め付け代より小さく，密封性を損なうことはない。	
		d. 本輸送物の胴内は，真空置換によりヘリウムを充填するため残留水はなく，水の放射線分解によってガスが発生しないため，内圧を高めることはなく，密封性を損なうことはない。	(ロ)-B.4.4
		e. 三次蓋は輸送時の振動等により緩まないよう，三次蓋ボルトにより強固に締付けられており，運搬中の温度及び内圧の変化を考慮しても，開くことはない。また，輸送物のキャスク本体と三次蓋の接合部の密封境界にはOリングを設けており，密封を保っている。	(ロ)-A.4.7，(ロ)-A.5.1，(ロ)-C.2.4
		f. 固縛装置であるトラニオンは，公式を用いた計算により，輸送物最大重量を考慮した上で，輸送中発生する上下及び前後方向加速度2g並びに左右方向加速度1gの負荷時にも設計降伏点を下回るように設計されているため，構造健全性は維持される。また，本輸送物は固有振動数（215Hz）と輸送による振動数（10Hz）の差が大きく，励振力による輸送物の応答増幅の影響はなく，輸送中の振動による荷重は0.3m落下事象に包絡される。よって，輸送物は予想される振動等によって，亀裂，破損等の生じるおそれはない。	(ロ)-A.4.5，(ロ)-A.4.7

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
（第４条第３号）		輸送物表面には，取扱い時に使用するトラニオン以外には不要な突起物がなく，また，輸送物表面はステンレス鋼もしくは塗装を施した炭素鋼面であり，滑らかに仕上げていることから，除染は容易である。	(ｲ)-C
（第４条第４号）		本輸送物には，炭素鋼，ステンレス鋼等化学的に安定した材料を使用しており，以下に示すように各々の材料相互の間及び収納物との間では，危険な物理的作用又は化学反応を起こすおそれはない。	
		a. 構成部品同士の熱膨張による干渉はないことから，材料相互の接触による，亀裂，破損等を生じるおそれはない。	(ﾛ)-A.5.1.2
		b. レジンを外筒等に密閉する，また，胴内をヘリウム雰囲気にする等，材料相互で腐食等が生じない設計としている。	(ﾛ)-A.4.1
		c. レジン及びＯリングは金属と接触しても化学反応を起こすおそれはない。	(ﾛ)-A.4.1
		d. 伝熱フィンと胴及び外筒の接合部は，異種金属接触による電気的な腐食促進の影響は小さい。	(ﾛ)-A.4.1
（第４条第５号）		三次蓋に設置されるリリーフバルブにはリリーフバルブカバープレートを設け，運搬中は覆われる設計としており，誤って操作されることはない。	(ﾛ)-A.4.3
（第４条第６号）		該当しない。	
（第４条第７号）		該当しない。	

<table>
<tr><th>規則の項目</th><th>告示の項目</th><th>説明</th><th>申請書記載
対応項目</th></tr>
<tr><td>（第４条第８号）</td><td>（表面密度限度）
第９条</td><td>本輸送物の表面の放射性物質の密度は，発送前に表面密度限度以下であることを確認した上で，発送される。
<table><tr><th>放射性物質の区分</th><th>密　　度
(Bq/cm^2)</th></tr><tr><td>アルファ線を放出する放射性物質</td><td>0.4</td></tr><tr><td>アルファ線を放出しない放射性物質</td><td>4</td></tr></table></td><td>(ハ)-A</td></tr>
<tr><td>（第４条第９号）</td><td></td><td>該当しない。</td><td></td></tr>
<tr><td>（第４条第10号）</td><td></td><td>本輸送物には，収納物以外のものが収納されていないことを確認した上で蓋をするので，本輸送物の安全性を損なうおそれのあるものを収納することはない。</td><td>(ハ)-A</td></tr>
</table>

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
(第5条第2号)		本輸送容器の仕様は外径3550mm，長さ6783mmの円筒型容器であり，外接する直方体の各辺は10cm以上である。	(イ)-C
(第5条第3号)		本輸送物の三次蓋は，三次蓋ボルトで強固に締め付けられており，輸送の際には上部緩衝体で覆われるため，不用意に三次蓋ボルトが外されることはない。また，上部緩衝体は取付後[redacted]されるので，開放された場合はそれが明らかとなる。	(ロ)-C.2, (ハ)-A
(第5条第4号)		本輸送物は，周囲温度-25℃～38℃で使用する。 本輸送容器の構成部品は，-25℃から運搬中に予想される最高温度の範囲で脆化，著しい強度の低下等，材料強度への影響はなく，構成部品に亀裂，破損等を生じるおそれはない。	(ロ)-A.3, (ロ)-A.4.2, (ロ)-B.4.6
(第5条第5号)		本輸送物の密封装置は，周囲圧力が60kPaの場合を考慮した差圧を胴内及び二三次蓋間に設定した解析により，密封装置の健全性を損なうことがないことを規則第4条第2号の熱解析及び構造解析においてABAQUSコードを用いて確認しているため，放射性物質の漏えいはない。	(ロ)-A.4.6
(第5条第6号)		該当しない。	

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
（第5条第7号）		本輸送物は，以下を考慮して保守的な条件を設定し，DOT3.5コードにて解析した結果，通常輸送時の輸送物表面の最大線量当量率は 1131.9μSv/h であり，基準値の 2mSv/h を超えることはない。 a. 線源として保守的に中央部に全てバーナブルポイズン集合体を装荷した最高燃焼度の燃料12体を，外周部に全て平均燃焼度の燃料12体を収納するとしている。 b. 燃料の燃焼条件を包絡する軸方向燃焼度分布を考慮している。 c. 燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体の放射化を考慮している。 d. 解析モデルについては遮蔽材の最小寸法を使用し，中性子遮蔽材については規則第3条第3項の技術上の基準に対する適合性において説明のとおり，熱的劣化を考慮し，その質量が2.5%減損したとしている。	(ロ)-D.4, (ロ)-D.5
（第5条第8号）		本輸送物は，上記と同じ条件にて解析した結果，通常輸送時の輸送物の表面から 1m 離れた位置における最大線量当量率は 86.1μSv/h であり，基準値の 100μSv/h を超えることはない。	(ロ)-D.4, (ロ)-D.5
（第5条第9号）		該当しない。	
（第5条第10号）		該当しない。	

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
	(BM 型輸送物に係る一般の試験条件)		
第 6 条第 2 号	第 14 条		
	別記第 4 第 1 号	一般の試験条件の下での本輸送物の各部温度評価として，規則第 4 条第 2 号 a. の熱解析において，周囲温度 38℃及び太陽放射熱を保守的に連続で負荷した条件にて定常状態に達した温度を評価し，各部が使用可能温度を超えないことを確認している。続いて，上記で評価した各部の温度分布を引き継いだ ABAQUS コードによる構造解析において，各部が設計応力強さ等基準値を下回ることを確認しているため，輸送物の構造健全性及び密封性を損なうことはない。	(ロ)-B. 4. 1. 1, (ロ)-A. 5. 1
	第 2 号	以下のとおり別記第 3 第 1 号の条件の下に置いて評価している。	
	別記第 3 第 1 号	一般の試験条件 イ. 水噴霧試験 本輸送物の表面はステンレス鋼もしくは塗装を施した炭素鋼面であり，水切りは極めてよく，本試験の実施によっても輸送物の構造健全性及び密封性を損なうことはない。	(ロ)-A. 5. 2

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
第6条第2号	第14条 別記第3第1号	ロ.(1) 自由落下 本輸送物の重量は134.4トン以下であるため，落下高さは0.3mであり，落下時に輸送物が最大損傷を受けるよう，垂直，水平及びコーナーの各姿勢についてCRUSHコードを用いて，緩衝体を除いた輸送物と落下試験台を剛体とし，緩衝体の変形量及び落下試験との比較検証結果を踏まえ保守的に設定した負荷係数1.2を考慮して衝撃荷重を解析し，保守的な設計加速度を設定している。緩衝体の最大変形量は底部コーナー落下時における324mmである。 また，この時の容器本体各部の応力をABAQUSコードを用いて解析評価し，バスケット及び燃料被覆管については公式を用いた計算により評価している。ここで，バスケットについては規則第3条第3項の技術上の基準に対する適合性において説明のとおり，熱的劣化を考慮した設計用強度・物性値を基に評価している。容器本体，バスケット及び燃料被覆管は，自由落下による衝撃力が負荷されても各部に生じる応力が設計応力強さ等基準値を下回ることから，容器本体，バスケット及び燃料被覆管の構造健全性並びに容器本体の密封性を損なうことはない。 (2) 該当しない。 (3) 積み重ね試験 自重の5倍に相当する荷重は6.591×10^{6}Nであり，鉛直投影面積に13kPaを乗じて得た値に相当する荷重より大きいので，これを解析している。 解析は，公式を用いた計算により，輸送物の垂直方向の圧縮強度及び水平方向の曲げ強度について行っており，本試験の実施によっても設計降伏点を下回り，容器本体の構造健全性を損なうことはなく，密封部の健全性が維持	(ロ)-A.5.3 (ロ)-A.5.4

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
		される。 なお，輸送物を積み重ねた場合，緩衝体部分が積み重なるので，外筒や蓋部及び底部中性子遮蔽材カバーには荷重が作用しないため，遮蔽解析に影響する破損は生じない。 一方，緩衝体は最大 20mm 程度変形する可能性があるが，(ロ)章 D の遮蔽解析で考慮している 0.3m 落下で想定される変形量に包絡される。 (4) 貫通試験 貫通試験は重量 6kg，直径 3.2cm の棒を輸送物の最も弱い部分に 1m の高さから落下させるとしている。試験棒は軟鋼とし，衝撃荷重は輸送物が受け持つものとして公式を用いた計算を行った結果，本試験の実施によっても棒の落下エネルギーは本輸送物外表面で最も板厚の薄い緩衝体カバープレートのせん断エネルギーよりも小さいため，容器本体の構造健全性を損なうことはない。 また，遮蔽解析に影響する破損も生じない。	(ロ)-A.5.5
	第 2 号	該当しない。	
イ		本輸送物を一般の試験条件下に置いた場合，緩衝体に変形が生じることを踏まえ，第 5 条第 7 号の通常輸送時の評価条件に基づき，CRUSH コードにより得られた緩衝体の各落下方向の変形を重畳させた保守的なモデルを用いて，DOT3.5 コードにて解析した結果，一般の試験条件下の輸送物表面の最大線量当量率は 1131.9μSv/h であり，基準値の 2mSv/h を超えることはない。 なお，この緩衝体の変形を考慮しても，通常輸送時に比べ本輸送物の最大線量当量率の著しい増加はない。	(ロ)-D.4, (ロ)-D.5

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
第6条第2号	(BM 型輸送物に係る一般の試験条件の下における漏えい量)		
ロ	第15条	本輸送物は，一般の試験条件下に置いた場合でも規則第6条第2号の ABAQUS コードを用いた熱解析で三次蓋Oリングの健全性が，また，同号の構造解析で蓋密封部の健全性が確認されており，密封性を損なうことはない。本輸送物は，一般の試験条件下では負圧を維持するため，放射性物質の環境への漏えいはないが，全燃料棒の 0.1%の燃料棒の密封性が失われ，核分裂生成ガスが胴内に放出された上で，胴内圧が大気圧上限値まで上昇し，その後大気圧下限値の環境下に置かれたと仮定して公式を用いた放射性物質（^{3}H 及び ^{85}Kr）の漏えい計算をしても，1時間当たりの漏えい量と各核種の基準値 $A_2\times10^{-6}$Bq/h との比率の合計は，9.68×10^{-5} で，1より小さく，基準値 $A_2\times10^{-6}$Bq/h を超えることはない。	(ロ)-C.3.1
ハ		本輸送物は，専用積載として運搬する。収納物の最大崩壊熱量に余裕をみた 18.1kW を収納したとして，一般の試験条件下に置いた場合の輸送物の温度を高く評価する条件のもとで周囲温度 38℃の日陰に置いた場合の輸送物の表面温度を ABAQUS コードを用いて解析した結果，外筒外面及びトラニオン温度が 85℃を超えるが，必要に応じて近接防止金網を取り付けて輸送するとともに，上記を除いた部位の最高表面温度は緩衝体表面の 82℃となることから，輸送中に人が容易に接近し得る部分の最高温度は日陰において基準値の温度 85℃を超えることはない。（近接防止金網の温度は 66℃以下）	(ロ)-B.4.1, (ロ)-B.4.6

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
第6条第2号			
ニ	第9条	本輸送物は，一般の試験条件下に置いた場合でも密封性を損なうことはないことを規則第6条第2号のABAQUSコード等を用いた構造解析の結果より確認している。また，輸送物表面の放射性物質の密度を発送前検査においても測定により確認するため，表面密度限度を超えることはない。	(ロ)-A.5.1, (ロ)-C.3.1, (ハ)-A
	(BM型輸送物に係る特別の試験条件) 第16条		
第3号	別記第5第1号	強度試験 イ．落下試験Ⅰ 本輸送物は，一般の試験条件と同様の方法で最大損傷を受けるよう，垂直，水平及びコーナー方向に剛体平面である落下試験台上に9m高さから落下するとしてCRUSHコードを用いて緩衝体変形量及び衝撃荷重を解析している。また，この時の容器本体各部の応力をABAQUSコードを用いて解析評価し，バスケットについては公式を用いた計算により評価している。ここで，バスケットについては規則第3条第3項の技術上の基準に対する適合性において説明のとおり，熱的劣化を考慮した設計用強度・物性値を基に評価している。容器本体及びバスケットは，落下試験Ⅰによる衝撃力（内部収納物には，加速度割増係数として垂直落下時2.6，水平落下時1.2を考慮）が負荷されても容器本体各部に生じる応力が設計引張強さ等基準値を下回ることから，容器本体及びバスケットの構造健全性並びに容器本体の密封性を損なうことはない。 さらに，本輸送物が傾斜落下するとして，蓋密封部が二次衝撃側となる場合について評価している。落下試験結果を基にした密封性能の評価を行った結果，本輸送物の蓋部の変形量は落下試験で密封健全性維持が確認された落	(ロ)-A.6.1, (ロ)-A.10.3

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
		下試験モデルに比べて小さいことから，傾斜落下時に容器本体の密封性を損なうことはない。	
第6条第3号	第16条 別記第5第1号	ㄆ．落下試験Ⅱ 9m落下試験に引き続いて，以下のように1m貫通試験が起こるとした場合，外筒及び中性子遮蔽材に貫通又は変形が生じるおそれがあるが，公式を用いた計算により，蓋部，底部及び胴にせん断が生じないことを確認しているため，容器本体に破損が生じることはなく，密封性を損なうことはない。 ⅰ．本輸送物は，最大損傷を受けるよう，垂直方向及び水平方向に輸送物の重心が軟鋼棒直上となる1mの高さから落下するとして解析している。 ⅱ．軟鋼棒の長さは，輸送物に最大の破損を与えるように十分長いものとして解析している。 また，三次蓋のリリーフバルブカバープレート及び三次蓋シール部への垂直方向又は水平方向落下に対しても，密封性能維持が確認された落下試験モデルと同じ緩衝体内部構造を適用しており，密封性を損なうことはない。	(ㄆ)-A.6.2

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
第6条第3号	第16条 別記第5第2号	熱的試験（火災試験） ⅰ．本輸送物は，落下試験Ⅰ，Ⅱの落下順序を考慮して火災による入熱量を大きく評価するように，落下試験Ⅰの緩衝体の各落下方向の変形を重畳させた保守的なモデルで解析している。 ⅱ．これらの試験は，最大崩壊熱量に余裕をみた18.1kWの設計崩壊熱量があるという条件でABAQUSコードを用いて輸送物各部の温度を解析している。 ⅲ．解析の結果，一部の側部中性子遮蔽材は使用可能温度を超えるが著しく焼損することはない。また，密封境界の三次蓋Oリングやその他の構成部材の温度は，使用可能温度を下回り，熱的健全性及び密封性を損なうことはない。 ⅳ．また，この時の各部の応力をABAQUSコードを用いて解析評価している。容器本体は火災による胴内圧及び熱応力が負荷されても各部が設計引張強さ等基準値を下回り，容器本体は破損しない。	(ロ)-A.6.3, (ロ)-B.5

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
第6条第3号	第16条 別記第5第3号	浸漬試験（15m） 本輸送物は，より厳しい強化浸漬試験に対して評価し，胴，底板及び三次蓋に破損はないことを確認している。また，三次蓋については，公式を用いた計算により 0.251325MPa の差圧を負荷しても発生する応力は設計降伏点を下回ることを確認している。容器本体に破損が生じることはなく，また，外圧が蓋を押し付ける方向に作用するため○リングの密封性能は維持されることから，本輸送物の密封性を損なうことはない。 また，外筒及び底部中性子遮蔽材カバーは内部空間にそれぞれ[redacted]MPa G 及び[redacted]MPa G の内圧が生じているが，水深 15m の水圧（0.15MPa）が外圧として負荷されることで差圧が緩和されるため，遮蔽解析に影響する破損も生じない。	(ロ)-A.6.4
イ		本輸送物は，特別の試験条件下に置いた場合，構造解析の結果から緩衝体に変形，中性子遮蔽材に貫通変形及び燃料集合体に変形が生じる可能性がある。そのため，緩衝体の全部及び中性子遮蔽材の一部をモデルから除いて DOT3.5 コードにて遮蔽解析を行っている。また，熱解析で一部の中性子遮蔽材が使用可能温度を超えることから，規則第 3 条第 3 項の技術上の基準に対する適合性において説明のとおり，熱的劣化を考慮しその質量が 2.5%減損したとした上で，さらにその密度が保守的に半減するものとしている。なお，燃料集合体の変形は遮蔽解析結果に有意な影響を与えないため考慮していない。その場合でも輸送物の表面から 1m 離れた位置での最大線量当量率は 876.6μSv/h であり，基準値の 10mSv/h を超えることはない。	(ロ)-D.4, (ロ)-D.5

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
	(BM 型輸送物に係る特別の試験条件の下における漏えい量)		
第 6 条第 3 号 ロ	第 17 条	本輸送物は，特別の試験条件下に置いた場合，緩衝体及び中性子遮蔽材に変形が生じるが，密封装置は健全であり，火災試験を経た後も輸送容器の密封性は保持できる。ここで安全側に一次蓋，二次蓋及び全燃料棒の密封性が失われたと仮定し，燃料が有するヘリウム及び核分裂生成ガスが三次蓋－胴内雰囲気中に放出されると仮定している。この条件で，公式を用いた放射性物質（^{3}H 及び ^{85}Kr）の漏えい計算をしても，1 週間当たりの漏えい量と各核種の基準値 A_2 Bq/week との比率の合計は，2.45×10^{-5} で，1 より小さく，基準値 A_2 Bq/week を超えることはない。	(ロ)-C.4
第 4 号		本輸送物は，周囲温度-25℃以上で使用する。本輸送容器の材料は，-25℃の低温下においても機械的性能が低下することはない。また，規則第 4 条第 2 号 a. の熱解析において，周囲温度 38℃で収納物の崩壊熱量の最大値に裕度を見た 18.1kW のときの輸送物の各部温度を評価している。続いて，上記で評価した各部の温度分布を引き継いだ構造解析において，各部が設計応力強さ等基準値を下回り，輸送物の構造健全性を損なうことがないことを確認している。なお，落下解析においては，低温時の木材の強度上昇及び高温時の木材の強度低下の影響を考慮している。したがって，本輸送物は-25℃～38℃までの運搬中に予想される温度変化に対しても亀裂，破損等の生じるおそれはない。	(ロ)-A.4.2, (ロ)-A.5.1, (ロ)-A.10.4, (ロ)-B.4.6

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
	(原子力規制委員会の定める量を超える放射能を有する核燃料物質等を収納した核燃料輸送物に係る試験条件)		
第6条第5号	第18条 別記第6	強化浸漬試験（200m） 本輸送物の収納物は，使用済燃料であり，最大放射能量は A_2 値の 10 万倍を超える。公式を用いた計算により 2.101325MPa の水圧下に置かれたとしても，胴，底板及び三次蓋は許容外圧や設計引張強さ等の基準を下回るので，密封装置は破損しない。	(ロ)-A.7
第7条～第10条		該当しない。	

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
(核分裂性物質に係る核燃料輸送物の技術上の基準) 第11条	(核分裂性輸送物とならない核燃料輸送物) 第23条 第1号	本輸送物に収納する核分裂性物質量は，^{235}Uが約□kgであり，本輸送物は核分裂性輸送物として輸送する。 輸送容器の構成部材及び収納物の経年変化を，規則第3条第3項の技術上の基準に対する適合性における説明のとおり考慮した上で，規則第11条第2号の技術上の基準に対する適合性において後述するように，通常輸送時に比べてより保守的な条件で臨界解析を行った結果においても臨界に達することはないことから，本輸送物は輸送中において臨界に達することはない。また，経年変化を考慮した上で，本条第1号から第3号の技術上の基準に適合していることを確認している。	(イ)-A, (イ)-B, (ロ)-E.4.4, (ロ)-F
第1号	(核分裂性輸送物に係る一般の試験条件) 第24条 別記第11	本輸送物は，核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下に置いた場合，規則第6条第2号の構造解析により0.3m落下及び積み重ね試験では緩衝体の変形が生じるが，一辺が10cmの立方体を包含するようなくぼみが生じる変形ではない。また，他の試験条件も含めそれ以外の部位に損傷はない。以上より，構造部に一辺が10cmの立方体を包含するようなくぼみを生じることはなく，かつ，外接する直方体の各辺は10cm以上である。	(ロ)-A.9.1

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
第11条第2号 イ，ロ，ハ，ニ，ホ	（核分裂性輸送物に係る孤立系の条件） 第25条 第1，2，3号 （核分裂性輸送物に係る特別の試験条件） 第26条 別記第12 （核分裂性輸送物に係る配列系の条件） 第27条	規則第6条第2号の熱解析及び負荷係数1.2を考慮した衝撃加速度に対し保守的な設計加速度を設定することで，0.3m落下後の9m落下の衝撃力をも考慮できている規則第6条第3号の構造解析の結果より，本輸送容器は，経年変化を考慮した上で，落下試験等においてもバスケットの臨界解析モデルに影響を与えるような物理的･化学的変化はないが，燃料集合体は落下試験において変形する可能性がある。 また，水密境界となる二次蓋の金属ガスケットについては規則第3条第3項の技術上の基準に対する適合性において説明のとおり経年変化を考慮することとし，貯蔵開始時の温度が60年間継続する際の密封性能の低下を考慮しても保証できる漏えい率を用いて，15m浸漬における1か月間の浸水量を評価した結果，約2リットルとなった。 以上を踏まえ，臨界解析ではSCALEコードシステムを用い，規則第11条第2号のイ，ロ，ハ，ニ及びホに要求される評価条件のいずれよりも厳しい条件とした以下の保守的な条件で実効増倍率を求めた結果，0.38745となり，いずれの評価条件に置かれた場合にも臨界に達しない。 ・保守的に，三次蓋の存在を無視した上で，胴内への5リットルの水の浸入を考慮する。 ・燃料集合体の下部側支持格子1スパン間の拡大／縮小変形を考慮する。 ・燃料のウラン濃縮度は保守的に減損していない未照射の値とし，一部の燃料に添加されているガドリニウムや収納する可能性のあるバーナブルポイズンの効果は考慮しない。 ・収納物の温度は常温（20℃）とし，収納物は容器中央に最も近接して配置する。	(ロ)-E.2.2, (ロ)-E.3.1, (ロ)-E.4.1, (ロ)-E.4.2, (ロ)-E.4.4, (ロ)-E.6

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載対応項目
		・中性子遮蔽材，三次蓋及び上・下部緩衝体が存在しない保守的なモデルで，周囲が完全反射の条件で評価する。	
第 11 条第 3 号		本輸送物は，周囲温度-25℃以上で使用する。本輸送容器の材料は，-25℃の低温下においても機械的性能が低下することはない。また，規則第 4 条第 2 号 a.にて前述するように，周囲温度 38℃で収納物の崩壊熱量の最大値に裕度を見た 18.1kW のときの輸送物の各部温度の評価結果及び同じく前述する構造解析において，各部が設計応力強さ等基準値を下回り，輸送物の構造健全性及び密封性を損なうことはない。なお，落下解析においては，低温時の木材の強度上昇及び高温時の木材の強度低下の影響を考慮している。したがって，本輸送物は，-25℃～38℃までの運搬中に予想される温度変化に対しても亀裂，破損等の生じるおそれはない。	(ロ)-A. 9, (ロ)-B. 4. 6, (ロ)-A. 5. 1, (ロ)-A. 10. 4

(ハ)章　　輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱い方法

(ハ)章　輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱い方法

輸送物の安全設計に合致した標準的な取扱い方法について記述するとともに，保守条件を記述する。

A.　核燃料輸送物の取扱い方法

輸送物の標準的な取扱いは，以下の方法により行われる。輸送物の取扱いの流れの例を(ハ)-第A.1図に示す。

A.1　装荷方法

輸送容器への燃料装荷は，以下の方法により行われる。

A.1.1　発電所での空容器受取り・燃料装荷準備作業

輸送容器は，建屋内作業場に移動し，蓋を取り外して，クレーンにより燃料プールに吊り下ろし，燃料装荷準備を行う。

(1) 水切作業

岸壁クレーン及び水平吊具を用いて，輸送容器を運搬船から吊り上げ，輸送車両上に固縛する。

(2) 搬入作業

a. 輸送車両を建屋内に搬入する。

b. 上・下部緩衝体を取り外す。

(3) 除染場への移動

a. クレーン及び垂直吊具を用いて，輸送容器をたて起こす。

b. 輸送容器を吊り上げ，除染場へ移動してたて置き設置する。

(4) 燃料プールへの移動

a. クレーン及び蓋吊具を用いて，一次蓋，二次蓋及び三次蓋を取り外す。

b. 輸送容器のフランジ面に異常がないこと及びバスケットに異常がないこと（未臨界検査），かつ，異物がないことを確認する。

c. 燃料プール入水のための養生を行う。

d. 輸送容器に純水を入れる。

e. クレーン及び垂直吊具を用いて，輸送容器を吊り上げ，燃料プール上に移動する。

f. 輸送容器を燃料プールに吊り下ろす。

A.1.2　燃料装荷作業・搬出準備作業

燃料取扱装置を用いて，輸送容器に使用済燃料集合体を 1 体ずつバスケット内へ装荷する。装荷燃料の収納配置の確認を行う。

使用済燃料を装荷後，輸送容器に一次蓋の取付け，胴内の真空乾燥，胴内のヘリウム充填，二次蓋及び三次蓋の取付け，輸送容器表面の除染を行う。その後，建屋内作業場より移動し，上・下部緩衝体を取り付ける。

(1) 蓋取付け及び輸送容器除染場への移動

a. クレーン及び垂直吊具を用いて，一次蓋を吊り上げ，一次蓋を燃料プール上に移動する。

b. 一次蓋を吊り下ろし，輸送容器に取り付ける。

c. 輸送容器を除染場に移動する。

(2) 除染場内作業

a. 一次蓋ボルトを規定トルクにて取り付ける。

b. 燃料プール入水のための養生を取り外し輸送容器の仮除染を行う。

c. 胴内水の排水を行う。

d. 排水後，真空乾燥を行い，胴内の湿度が規定値以下であることを確認する。

e. 胴内にヘリウムを規定量充填する。

f. 一次蓋密封部の漏えい率を測定する。

g. 一次蓋の除染を行う。

h. 二次蓋を輸送容器に取り付ける。

i. 一二次蓋間にヘリウムを規定量充填する。

j. 二次蓋密封部の漏えい率を測定する。

k. 三次蓋を輸送容器に取り付ける。

l. 三次蓋密封部の漏えい率を測定する。

m. 輸送容器の除染を行う。

(3) 搬出作業

a. クレーン及び垂直吊具を用いて，輸送容器を移動し，輸送車両上の輸送架台へ設置し，固縛する。

b. 上・下部緩衝体を取り付ける。

c. 輸送容器に［　　］を施す。

d. 近接防止金網を取り付ける。

e. 輸送車両を建屋外に搬出する。

A.2　貯蔵方法

A.2.1　使用済燃料乾式貯蔵施設への輸送

使用済燃料乾式貯蔵施設（以下「乾式貯蔵施設」という。）への輸送容器の輸送は以下の方法により行われる。

(1) 乾式貯蔵施設への輸送

a. 輸送車両によって，岸壁まで輸送する。

b. 近接防止金網を取り外す。

c. 岸壁クレーン及び水平吊具を用いて，輸送物を吊り上げ，専用運搬船の指定船倉内に積み込む。

d. 船内にて輸送物を固縛する。

e. 近接防止金網を取り付ける。

f. 専用運搬船によって，乾式貯蔵施設まで輸送する。

(2) 水切作業

a. 近接防止金網を取り外す。

b. 岸壁クレーン及び水平吊具を用いて，輸送物を専用運搬船から吊り上げ，輸送車両上に固縛する。

c. 近接防止金網を取り付ける。

A.2.2　乾式貯蔵施設での取扱い

(1) 乾式貯蔵施設での輸送物の受取り

乾式貯蔵施設での輸送物の受取りは，以下の方法により行われる。

a. 乾式貯蔵施設建屋内のトレーラエリアに，輸送車両により輸送物を搬入する。

b. 近接防止金網を取り外す。

c. 乾式貯蔵施設建屋内の所定の場所に，輸送物を仮置きする。

d. 輸送物から[redacted]を解き，上・下部緩衝体を取り外した後，建屋内検査場に移動し，三次蓋を取り外す。

e. 輸送容器へ監視計器を取り付け，貯蔵エリアに移動する。

f. 輸送容器を所定の貯蔵場所に据え付ける。

(2) 乾式貯蔵施設での輸送容器の貯蔵

乾式貯蔵施設での輸送容器の貯蔵は，以下の方法により行われる。

a. 貯蔵場所に据え付けられた輸送容器に対し，適宜貯蔵期間中検査を実施する。

(3) 乾式貯蔵施設での輸送物の発送前準備

乾式貯蔵施設での貯蔵後，輸送物の発送前準備は，以下の方法により行われる。

a. 取扱いエリアの建屋内検査場に移動し，輸送容器から監視計器を撤去する。

b. 三次蓋を取り付け，気密漏えい検査を行う。

c. 輸送容器をよこ倒し，上・下部緩衝体を取り付けた後，[redacted]を施す。

d. クレーン及び水平吊具を用いて，輸送容器を移動し，輸送車両上の輸送架台へ設置し，固縛する。

e. 近接防止金網を取り付ける。

f. 輸送車両を建屋外に搬出する。

A.2.3 再処理工場への輸送

本輸送物は発電所又は乾式貯蔵施設から再処理工場に，あるいは乾式貯蔵施設から発電所に輸送される。ここでは，再処理工場に輸送される場合を標準的な例として以下に記述する。

(1) 再処理工場への輸送

a. 輸送車両によって，岸壁まで輸送する。

b. 近接防止金網を取り外す。

c. 岸壁クレーン及び水平吊具を用いて，輸送物を吊り上げ，専用運搬船の指定船倉内に積み込む。

d. 船内にて輸送物を固縛する。

e. 近接防止金網を取り付ける。

f. 専用運搬船によって，再処理工場まで輸送する。

A.3 取出し方法

輸送容器からの使用済燃料の取出しは，以下の方法により行われる。

A.3.1 再処理工場での輸送物の受取り・燃料取出し準備作業

(1) 水切作業

a. 近接防止金網を取り外す。

b. 岸壁クレーン及び水平吊具を用いて，輸送物を専用運搬船から吊り上げ，輸送車両上に固縛する。

c. 近接防止金網を取り付ける。

(2) 輸送物受入・保管

a. 輸送容器管理建屋内のトレーラエリアに，輸送車両により輸送物を搬入する。

b. 近接防止金網を取り外す。

c. クレーン及び水平吊具を用いて，輸送物を輸送車両より吊り上げ，輸送容器受入エリア内移送台車上に設置する（近接防止金網を取り付ける場合もある。）。

d. 移送台車にて，輸送物を輸送容器保管エリアの所定の保管場所へ移送し，保管する。

(3) 輸送容器搬送室への移送

a. 移送台車にて，輸送物を輸送容器保管エリアより輸送容器搬送室に移送する。

b. 近接防止金網を取り外す。

c. 輸送容器に取り付けられている[redacted]を解除する。

d. 上・下部緩衝体を取り外す。

e. クレーン及び垂直吊具を用いて，輸送容器をたて起こす。

f. 輸送容器を吊り上げ，燃料取出準備室に移送し，所定の位置に設置する。

(4) 燃料取出準備室内作業

a. 三次蓋及び二次蓋を取り外す。

b. 輸送容器内を再冠水する。

c. 燃料プール入水のための養生を行う。

d. 一次蓋ボルトを取り外す。

(5) 燃料取出し準備

a. クレーン及び垂直吊具を用いて，輸送容器を燃料取出準備室より燃料取出ピット上へ移送する。

b. クレーン及び垂直吊具を用いて，輸送容器を燃料取出ピット中の燃料取出し位置に吊り下ろす。

c. クレーン及び蓋吊具を用いて，一次蓋を取り外す。

d. 一次蓋を蓋置場へ移動し，除染を行った後仮置きする。

A.3.2 燃料取出し作業

燃料取出装置を用いて，輸送容器から使用済燃料集合体を取出し，所定の燃料ラックに収納する。

A.3.3 後作業

燃料取出し後，輸送容器を燃料取出ピットから吊り出し，輸送容器の除染を行う。

(1) 後作業

a. クレーン及び垂直吊具を用いて，輸送容器を燃料取出ピットから吊り上げる。

b. クレーン及び垂直吊具を用いて，輸送容器を空容器返却準備室へ移送する。

c. 燃料プール入水のための養生等を取り外す。

d. 一次蓋を取り付ける。

e. 輸送容器内水の排水を行う。

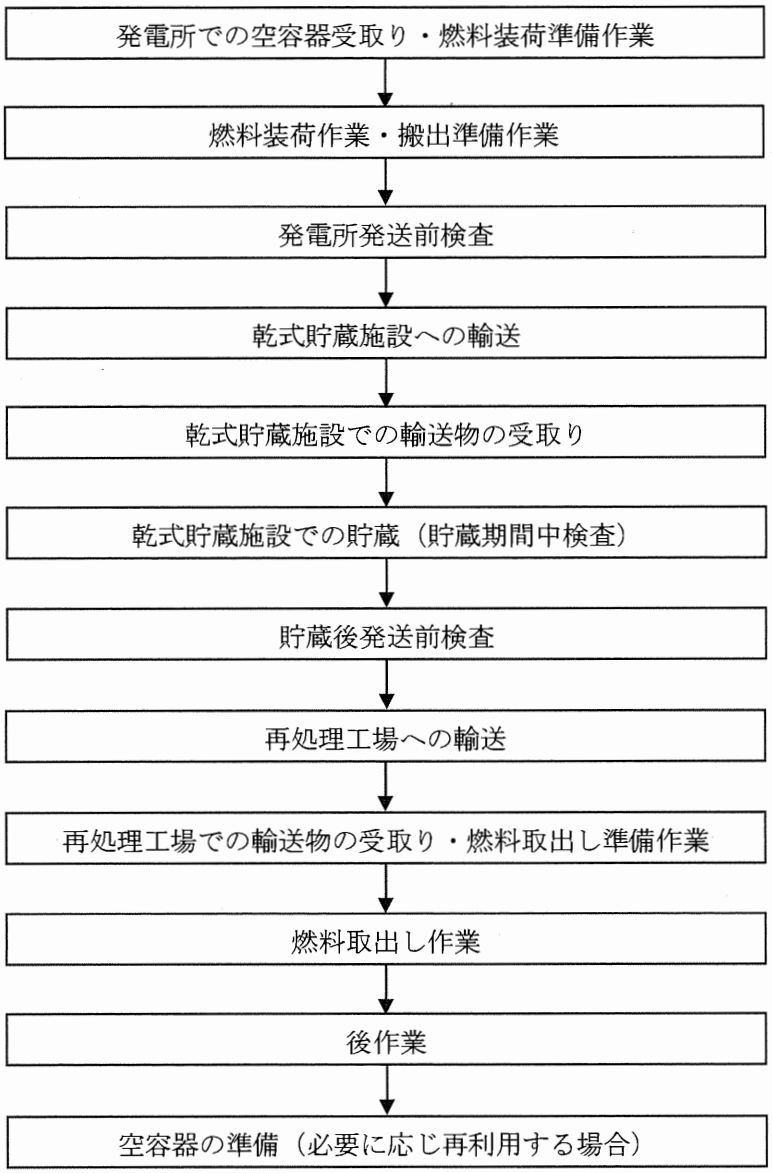
f. クレーン及び蓋吊具を用いて，二次蓋及び三次蓋を取り付ける。

g. 三次蓋密封部の漏えい率を測定する。

h. 輸送容器の除染を行う。

A.4 空容器の準備

燃料取出し後の輸送容器を再使用する場合は，次の輸送のために適切に保管し，空容器搬出前には適切に発送準備を行い，発電所まで輸送する。



(ハ)-第 A.1 図　標準的な輸送物の取扱いの流れ

A.5　核燃料輸送物の発送前検査

A.5.1　発電所発送前及び貯蔵期間中に実施する検査

本輸送容器は，乾式貯蔵施設における使用済燃料の貯蔵後の輸送に使用することから，貯蔵後発送前検査に先立ち，「使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準：2024（AESJ-SC-F002：2024，(一社)日本原子力学会標準委員会)」を基に設定した(ハ)-第A.1表に示す検査を実施する。また，輸送に係る検査の詳細は以下のとおり。

(1) 発電所発送前検査

燃料収納後，乾式貯蔵施設まで輸送する前に(ハ)-第A.2表に示す発電所発送前検査を行う。

(2) 貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）

貯蔵期間中に，貯蔵時に必要な基本的安全機能及び構造強度を維持していることを確認するために(ハ)-第A.3表に示す貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）を外観検査，二重蓋間圧力検査，未臨界検査，表面温度検査及び収納物検査については1年に1回以上，遮蔽性能検査及び熱検査については10年に1回以上実施する。

(3) 貯蔵期間中検査（輸送機能維持確認検査）

貯蔵期間中に，輸送時に必要な基本的安全機能及び構造強度を維持していることを確認するために(ハ)-第A.4表に示す貯蔵期間中検査（輸送機能維持確認検査）を外観検査，気密漏えい検査，未臨界検査及び吊上検査については1年に1回以上，遮蔽性能検査及び熱検査については10年に1回以上実施する。

(ハ)-第A.1表　輸送容器に係る検査の一覧

検査		発電所発送前検査	貯蔵前検査	貯蔵期間中検査※		貯蔵後発送前検査
確認項目	検査で確認する機能 / 検査項目	輸送	貯蔵	貯蔵	輸送	輸送
全般	外観検査	◎	◎	◎	○	◎
密封	気密漏えい検査	◎	○		○	◎
	圧力測定検査	◎	○			○
	二重蓋間圧力検査		◎	○		
遮蔽	遮蔽性能検査			□	○	
	線量当量率検査	◎	◎			◎
臨界	未臨界検査	◎	○	○	○	○
除熱	熱検査			□	○	
	温度測定検査	◎	◎			◎
	表面温度検査		◎	○		
構造強度	吊上検査	◎	◎		○	◎
	重量検査	○	○			○
	据付検査		◎			
その他	収納物検査	◎	○	○		○
	表面密度検査	◎	◎			◎

◎：直接確認するもの　　□：代表容器にて直接確認するもの　　○：記録確認によるもの

※　貯蔵期間中検査については，貯蔵機能に係る検査（貯蔵機能維持確認検査）及び輸送機能に係る検査（輸送機能維持確認検査）を実施する。

(ハ)-第A.2表　発電所発送前検査の項目，検査方法及び合格基準（1/2）

No.	検査項目	検査方法	合格基準
1	外観検査	輸送物の外観を目視で検査する。	基本的安全機能及び構造強度に影響する汚れ，傷，変形又は損傷のないこと。輸送物の[redacted]が施されていること。
2	吊上検査	輸送物を吊り上げた後の状態において，トラニオン部の外観を目視で検査する。	トラニオン部の性能に影響を与えるような傷，変形又は損傷のないこと。
3	重量検査	輸送容器及び収納物の合計重量を製造時の重量検査記録及び発電所発送前検査の収納物検査記録により確認する。	134.4トン以下であること。
4	表面密度検査	スミヤ法により輸送物の表面密度を測定する。	α線を放出する放射性物質：0.4Bq/cm^2 α線を放出しない放射性物質：4Bq/cm^2 をそれぞれ超えないこと。
5	線量当量率検査	輸送物の表面及び表面から1mの距離におけるガンマ線量当量率及び中性子線量当量率をサーベイメータで測定する。	ガンマ線量当量率及び中性子線量当量率の合計が 表面：2mSv/h 表面から1mの距離：100μSv/h をそれぞれ超えないこと。
6	未臨界検査	使用済燃料集合体を装荷する前の状態において，輸送容器内に収納されたバスケットの外観を目視により検査する。	臨界防止機能に影響するバスケットの変形又は破損がないこと。
7	収納物検査	① 使用済燃料集合体の仕様，数量及び収納配置を原子炉での運転中のデータ及び燃料装荷作業記録により検査する。 ② 使用済燃料集合体の健全性を目視及び真空乾燥時における漏えいモニタリングにより検査する。	① 使用済燃料集合体の仕様，数量及び収納配置が輸送認可条件のとおりであること。(注1) ② 使用済燃料集合体の外観に異常がなく，燃料被覆管からの漏えいがないこと。
8	温度測定検査	温度計により輸送物の表面温度を測定し，周囲温度38℃での値に補正する。	輸送中人が容易に近づくことができる表面の温度が日陰において85℃を超えないこと。

(ハ)-第A.2表　発電所発送前検査の項目，検査方法及び合格基準（2/2）

No.	検査項目	検査方法	合格基準
9	気密漏えい検査	① 三次蓋密封部の漏えい率を加圧法又は真空法により測定する。	① 三次蓋密封部の漏えい率が 2×10^{-3} ref cm^3/s を超えないこと。
		② 二次蓋密封部の漏えい率をヘリウムリーク試験，加圧法又は真空法により測定する。	② 二次蓋金属ガスケット密封部の漏えい率が 2.52×10^{-6} Pa・m^3/s，Oリング密封部の漏えい率が 2×10^{-3} ref cm^3/s を超えないこと。(注2)
10	圧力測定検査	① 残留水分：輸送容器内部の真空乾燥後の真空度又は内部ガス充填後の湿度を，二重蓋間については脱水されていることを輸送容器仕立て作業記録により確認する。	① 輸送容器内部は，残留水分が10%を超えないこと。二重蓋間については，水分が除去されていること。
		② ガス成分及び充填量：内部ガス，二重蓋間ガスの種類，純度及び充填量を輸送容器仕立て作業記録により確認する。	② 充填ガスが純度99%以上のヘリウムであり，内部ガス充填量が検査要領書に規定する充填量範囲にあること。
		③ 圧力：圧力計による実測結果又はガス充填量と充填部体積に基づく計算結果を輸送容器仕立て作業記録により確認する。	③ 輸送容器内部圧力及び二重蓋間圧力がそれぞれ(ロ)-第F.1表に示す貯蔵時最高温度の状態で0.08MPa abs以下及び0.41MPa abs以下であること。

(注1)　(イ)-第A.1表に示す使用済燃料集合体の仕様のうち，冷却日数，初期濃縮度，輸送容器1基当たりの平均燃焼度等の条件にて輸送容器1基当たりの発熱量上限を評価した場合，型式指定申請書[1]の設計仕様の発熱量と同じく15.8kWとなるが，本輸送容器における発熱量上限は乾式貯蔵施設側の制限である13.9kWとしている。

(注2)・二次蓋金属ガスケット密封部の漏えい率は，型式指定申請書[1] 添付書類4の閉じ込め評価において示された二次蓋金属ガスケット密封部の基準漏えい率（2.52×10^{-6} Pa・m^3/s）。
・二次蓋Oリング密封部の漏えい率は，同じOリングに対する漏えい試験の許容漏えい率である三次蓋密封部に対する漏えい試験における許容漏えい率（2×10^{-3} ref cm^3/s）を適用。

[1]：三菱重工業株式会社，型式設計特定容器等の型式指定申請書（金属製の乾式キャスク），Doc.No.L5-95MY101 Rev.0，令和8年（2026年）3月13日.

(ハ)-第 A.3 表　貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の項目，検査方法及び合格基準（1/2）

No.	検査項目	検査方法	合格基準
1	外観検査	輸送容器の外観を目視で検査する。	基本的安全機能及び構造強度に影響する汚れ，傷，変形又は損傷のないこと。
2	二重蓋間圧力検査	二重蓋間圧力のモニタリング記録により測定値が検査要領書に規定する圧力範囲にあることを確認する。	二重蓋間圧力が検査要領書に規定する圧力範囲にあること。
3	遮蔽性能検査	代表容器の表面におけるガンマ線量当量率及び中性子線量当量率をサーベイメータで測定し，代表容器の収納物仕様及び貯蔵期間に基づいた線量当量率解析値と比較する。	測定値が解析値と比較して妥当であること。
4	未臨界検査	① 発電所発送前検査の未臨界検査記録を確認する。 ② 貯蔵前検査の収納物検査記録を確認する。 ③ 貯蔵期間中検査(貯蔵機能維持確認検査)の二重蓋間圧力検査記録を確認する。 ④ 貯蔵期間中検査(貯蔵機能維持確認検査）の表面温度検査記録を確認する。 ⑤ 貯蔵期間中検査(貯蔵機能維持確認検査）の外観検査記録を確認する。	① バスケットに臨界防止機能に影響する変形又は破損が生じていないこと。 ② 収納物の仕様及び貯蔵期間が設計評価条件内であること。 ③ 輸送容器の密封機能が健全であり，バスケットの腐食防止環境が維持されていること。 ④ バスケットの形状，寸法及び強度に影響する輸送容器の表面温度の異常がないこと。 ⑤ バスケットの形状，寸法及び強度に影響する輸送容器の変形又は破損がないこと。
5	熱検査	代表容器について温度計にて各部温度を測定するか又は貯蔵期間中の表面温度検査記録を確認し，代表容器の収納物仕様，貯蔵期間及び貯蔵環境に基づいた表面温度解析値と比較する。	測定値又は記録値が解析値と比較して妥当であること。

(ハ)-第 A.3 表　貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の項目，検査方法及び合格基準（2/2）

No.	検査項目	検査方法	合格基準
6	表面温度検査	表面温度のモニタリング記録により測定値が検査要領書に規定する温度範囲にあることを確認する。	検査要領書に規定する温度範囲（129℃以下）にあること。
7	収納物検査	① 発電所発送前検査の収納物検査記録を確認する。 ② 貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の二重蓋間圧力検査記録を確認する。 ③ 貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の外観検査記録及び表面温度検査記録を確認する。	① 収納前の使用済燃料が健全であること。 ② 輸送容器の密封機能が健全であり使用済燃料が腐食防止環境にあること。 ③ 設計仕様書で規定する異常事象を超える外力及び外部からの熱の作用がないこと。

(ハ)-第 A.4 表　貯蔵期間中検査（輸送機能維持確認検査）の項目，検査方法及び合格基準

No.	検査項目	検査方法	合格基準
1	外観検査	貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の外観検査記録を確認する。	輸送容器に，基本的安全機能及び構造強度に影響する汚れ，傷，変形又は損傷がないこと。
2	気密漏えい検査	貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の二重蓋間圧力検査記録を確認する。	二重蓋間圧力が検査要領書に規定する圧力範囲にあること。
3	遮蔽性能検査	代表容器の貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の遮蔽性能検査記録を確認する。	代表容器が遮蔽機能を維持していること。
4	未臨界検査	貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の未臨界検査記録を確認する。	バスケットの外観，寸法に影響する輸送容器の異常がないこと。また，収納物の仕様及び貯蔵期間が設計評価条件内であること。
5	熱検査	代表容器の貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の熱検査記録を確認する。	代表容器が除熱機能を維持していること。
6	吊上検査	貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の外観検査記録により，トラニオン部に異常がないことを確認する。	トラニオン部の性能に影響を与えるような傷，変形又は損傷のないこと。

A.5.2　貯蔵後発送前検査

乾式貯蔵施設から再処理工場又は発電所へ輸送物を発送する前に(ハ)-第 A.5 表に示す輸送物の貯蔵後発送前検査を行う。

この際の未臨界検査及び収納物検査については，一次蓋及び二次蓋を開放してバスケット又は使用済燃料の外観を目視等にて検査することなく，記録の確認によって行う。

(ハ)-第A.5表　貯蔵後発送前検査の項目，検査方法及び合格基準（1/2）

No.	検査項目	検査方法	合格基準
1	外観検査	輸送物の外観を目視で検査する。	基本的安全機能及び構造強度に影響する汚れ，傷，変形又は損傷のないこと。 輸送物の[redacted]が施されていること。
2	吊上検査	輸送物を吊り上げた後の状態において，トラニオン部の外観を目視で検査する。	トラニオン部の性能に影響を与えるような傷，変形又は損傷のないこと。
3	重量検査	輸送容器及び収納物の合計重量を，製造時の重量検査記録及び発電所発送前検査の収納物検査記録により確認する。	134.4トン以下であること。
4	表面密度検査	スミヤ法により輸送物の表面密度を測定する。	α線を放出する放射性物質：0.4Bq/cm^2 α線を放出しない放射性物質：4Bq/cm^2 をそれぞれ超えないこと。
5	線量当量率検査	輸送物の表面及び表面から1mの距離におけるガンマ線量当量率及び中性子線量当量率をサーベイメータで測定する。	ガンマ線量当量率及び中性子線量当量率の合計が 表面：2mSv/h 表面から1mの距離：100μSv/h をそれぞれ超えないこと。
6	未臨界検査	発電所発送前検査及び貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の未臨界検査(注1)記録並びに貯蔵後発送前検査の外観検査記録を確認する。	① 貯蔵期間中に臨界防止機能が維持されていること(注1)。 ② 臨界防止機能に影響する輸送容器の変形又は破損がないこと。
7	収納物検査	発電所発送前検査及び貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の収納物検査(注2)，(注3)記録並びに貯蔵後発送前検査の外観検査記録を確認する。	① 使用済燃料集合体の仕様，数量及び収納配置が，輸送認可条件のとおりであること(注2)。 ② 貯蔵期間中に使用済燃料集合体の健全性が維持されていること(注3)。 ③ 使用済燃料集合体の健全性に影響する輸送容器の変形又は破損がないこと。

(ハ)-第A.5表　貯蔵後発送前検査の項目，検査方法及び合格基準（2/2）

No.	検査項目	検　査　方　法	合　格　基　準
8	温度測定検査	温度計により輸送物の表面温度を測定し，周囲温度38℃での値に補正する。	輸送中人が容易に近づくことができる表面の温度が日陰において85℃を超えないこと。
9	気密漏えい検査	① 三次蓋密封部の漏えい率を加圧法又は真空法により測定する。	① 三次蓋密封部の漏えい率が 2×10^{-3} ref cm^3/s を超えないこと。
		② 二次蓋密封部の漏えい率をヘリウムリーク試験，加圧法又は真空法により測定する。	② 二次蓋金属ガスケット密封部の漏えい率が 2.52×10^{-6} Pa・m^3/s，Oリング密封部の漏えい率が 2×10^{-3} ref cm^3/s を超えないこと。(注4)
10	圧力測定検査	① 残留水分：発電所発送前検査の圧力測定検査記録により確認する。	① 輸送容器内部は，残留水分が10%を超えないこと。二重蓋間については，水分が除去されていること。
		② ガス成分及び充填量：発電所発送前検査の圧力測定検査記録により確認する。	② 充填ガスが純度99%以上のヘリウムであり，内部ガス充填量が検査要領書に規定する充填量範囲にあること。
		③ 圧力：輸送容器内部圧力は発電所発送前検査の圧力測定検査記録により確認する。また，二重蓋間圧力は貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の二重蓋間圧力検査記録により確認する。	③ 輸送容器内部圧力及び二重蓋間圧力がそれぞれ(ロ)-第F.1表に示す貯蔵時最高温度の状態で0.08MPa abs以下及び0.41MPa abs以下であること。
		④ 残留水分，ガス成分及び充填量並びに輸送容器内部圧力が維持されていることを貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の二重蓋間圧力検査記録により確認する。	④ 貯蔵期間中の二重蓋間圧力が0.105 MPa abs以上であること。

(注1)・発電所発送前検査の未臨界検査記録によりバスケットに臨界防止機能に影響する変形又は破損が生じていないこと。
・貯蔵前検査の収納物検査記録により収納物の仕様及び貯蔵期間が設計評価条件内であること。
・貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の二重蓋間圧力検査記録により輸送容器の密封機能が健全であり，バスケットの腐食防止環境が維持されていること。
・貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の表面温度検査記録により輸送容器の表面温度が129 ℃以下であることで，バスケットの温度が(ロ)章Fの熱影響で評価した範囲内であること。輸送容器の表面温度129℃は，輸送物の各部が(ロ)-第F.1表に示す貯蔵時最高温度の状態における温度であり，129℃以下であれば輸送物の各部は健全性を維持している。
・貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の外観検査記録によりバスケットの形状，寸法及び強度に影響する輸送容器の変形又は破損がないこと。

(注2)・発電所発送前検査の収納物検査記録により使用済燃料集合体の仕様，数量及び収納配置が輸送認可条件のとおりであること。

(注3)・発電所発送前検査の収納物検査記録により使用済燃料集合体の外観に異常がなく，燃料被覆管からの漏えいがないこと。

・貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の二重蓋間圧力検査記録により輸送容器の密封機能が健全であり使用済燃料が腐食防止環境にあること。

・貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の外観検査記録により設計仕様書で規定する異常事象を超える外力の作用がないこと。

・貯蔵期間中検査（貯蔵機能維持確認検査）の表面温度検査記録により輸送容器の表面温度が129℃以下であることで，燃料被覆管の温度及び周方向応力が(ロ)章Fの熱影響で評価した範囲内であること。

(注4)・二次蓋金属ガスケット密封部の漏えい率は，型式指定申請書[1] 添付書類4の閉じ込め評価において示された二次蓋金属ガスケット密封部の基準漏えい率（2.52×10^{-6} Pa・m^3/s）。

・二次蓋Oリング密封部の漏えい率は，同じOリングに対する漏えい試験の許容漏えい率である三次蓋密封部に対する漏えい試験における許容漏えい率（2×10^{-3} ref cm^3/s）を適用。

A.5.3　乾式貯蔵施設において貯蔵を行わない場合に実施する発送前検査

乾式貯蔵施設において貯蔵を行わず，燃料装荷後に発電所から再処理工場へ直接搬出する場合は，輸送物を発送する前に(ハ)-第A.2表に示す発電所発送前検査と同様の輸送物の発送前検査を行う。

A.6　使用済燃料の長期健全性に関する状況調査

本輸送容器に収納した使用済燃料は，乾式貯蔵施設において貯蔵する場合，長期の貯蔵を行った後に輸送することとなる。

乾式貯蔵施設から輸送物を発送する前に行う輸送物の貯蔵後発送前検査の収納物検査については，一次蓋及び二次蓋を開放して使用済燃料の外観を目視等にて検査することなく，記録の確認によって行うことから，国内外で実施されている以下のような使用済燃料の長期健全性に関する試験の実施状況を調査し，知見の蓄積を図る。なお，本輸送容器の安全性に影響する新たな技術的知見が得られた場合の対応については(ニ)章に示す。

(1) 米国の貯蔵試験

米国アイダホ国立研究所において，使用済 PWR 燃料の 15 年乾式貯蔵後の試験結果（INEEL/EXT-01-001837 Revision 1, NUREG/CR-6831）等のレポートがある。同研究所における使用済燃料の長期健全性の調査は，乾式貯蔵容器の内部ガスのサンプリングにより，漏えい燃料の有無を確認している。判定において着目する核種は ^{85}Kr としている。また，過去調査では，使用済燃料の外観確認，抜き取った燃料１体に対するクリープ，水素化物再配向，照射硬化回復等に関する詳細調査を実施している。

米国アイダホ国立研究所では，15×15 型 PWR 燃料を貯蔵している。貯蔵している使用済燃料について(ハ)-第 A.6 表に示す。

(2) 国内の貯蔵試験

国内研究施設においても使用済燃料の中間貯蔵期間中の状態を模擬した使用済 PWR 燃料の貯蔵試験の計画が発表され，現在実施中である（N Irie, et.al “Demonstration Test Program for Long-term Dry Storage of PWR Spent Fuel”, PATRAM 2016, Kobe, #5047）。同試験においては試験容器の内部ガスのサンプリングにより，漏えい燃料の有無を米国試験と同様に ^{85}Kr に着目して確認している。同試験に使用される使用済燃料の仕様等について(ハ)-第 A.7 表に示す。

(ハ)-第 A.6 表　米国アイダホ国立研究所で乾式貯蔵されている使用済燃料(注 1), (注 2)

項目	アイダホ国立研究所（サリー2 号炉燃料）
燃料タイプ	15×15 型 PWR 燃料
貯蔵燃料の燃焼度	～約 35700MWd/t
冷却期間	約 2～4 年
貯蔵期間 (注 3)	約 32 年
被覆管の材質	ジルカロイ-4

(注 1)貯蔵後 10 年目（1995 年度）の測定でクリプトンガスが検出されているが，サンプル容器の汚染又は分析準備中の汚染が原因とされている。

(注 2)燃料被覆管温度（ベンチマーク試験時/貯蔵初期/状況調査時）は，約 415℃/約 344℃/約 155℃である。

(注 3)貯蔵期間は，貯蔵開始（1985 年）から 2018 年 2 月時点での経過年数を示す。

(ハ)-第 A.7 表　国内での貯蔵試験に使用する使用済燃料

項目	高浜 3 号機燃料
燃料タイプ	17×17 型 PWR 燃料
冷却期間	約 24 年
貯蔵燃料の燃焼度	約 42800MWd/t
被覆管の材質	ジルカロイ-4

(注)既に PIE 試験に供した燃料であり，燃料棒が 15 本程度抜き取られた状態で試験に供されている。

B. 保守条件

貯蔵中の輸送容器の健全性の維持に関し，B. 1，B. 3～B. 7 及び B. 13 については，貯蔵期間中検査（輸送機能維持確認検査）の記録により確認する。

B. 1　外観検査

貯蔵期間中検査（輸送機能維持確認検査）の外観検査記録を確認し，輸送容器に，基本的安全機能及び構造強度に影響する汚れ，傷，変形又は損傷のないことを確認する。

B. 2　耐圧検査

貯蔵中に発生する応力レベルは低く，かつ，変動がほとんどないことから，供用期間中に耐圧検査を実施する必要はなく，該当しない。

B. 3　気密漏えい検査

貯蔵期間中検査（輸送機能維持確認検査）の気密漏えい検査記録を確認し，二重蓋間圧力が検査要領書に規定する圧力範囲にあることを確認する。

B. 4　遮蔽検査

代表容器の貯蔵期間中検査（輸送機能維持確認検査）の遮蔽性能検査記録を確認し，代表容器が遮蔽機能を維持していることを確認する。

B. 5　未臨界検査

貯蔵期間中検査（輸送機能維持確認検査）の未臨界検査記録を確認し，バスケットの外観，寸法に影響する輸送容器の異常がないこと，また，収納物の仕様及び貯蔵期間が設計評価条件内であることを確認する。

B. 6　熱検査

代表容器の貯蔵期間中検査（輸送機能維持確認検査）の熱検査記録を確認し，代表容器が除熱機能を維持していることを確認する。

B. 7　吊上検査

貯蔵期間中検査（輸送機能維持確認検査）の吊上検査記録により，トラニオン部に異常がないことを確認し，トラニオン部の性能に影響を与えるような汚れ，傷，変形又は損傷のないことを確認する。

B.8　作動確認検査

弁はなく該当しない。

B.9　補助系の保守

補助系はなく該当しない。

B.10　密封装置の弁，ガスケット等の保守（定期保守）

三次蓋用Oリングは，(ハ)-第B.1表に示す交換頻度に従い使用する。

(ハ)-第B.1表　部品交換頻度

部品名	交換頻度	備考
三次蓋用 Oリング	輸送の都度	密封境界に係る部位とする

B.11　輸送容器の保管

使用済燃料が装荷されていない保管中の輸送容器は，内部に不活性ガスを充填する等の腐食防止措置を講じ，屋内に保管するか，又は屋外に保管する場合には養生を行う。

B.12　記録の保管

製造時検査記録，発電所発送前検査記録，貯蔵前検査記録，貯蔵期間中検査記録，貯蔵後発送前検査記録及び定期自主検査記録（補修記録や部品交換履歴を含む。）は，当該輸送容器存続中保存する。

B.13　その他

(1) 乾式貯蔵施設での貯蔵中の定期自主検査

乾式貯蔵施設で貯蔵中の輸送容器については(ハ)-第B.2表に示す定期自主検査を貯蔵期間中検査(輸送機能維持確認検査)の記録を確認することにより1年に1回以上実施する。

(ハ)-第B.2表　乾式貯蔵施設で貯蔵中の輸送容器の定期自主検査の項目，検査方法及び合格基準

No.	検査項目	検査方法	合格基準
1	外観検査 (注)	貯蔵期間中検査（輸送機能維持確認検査）の外観検査記録を確認する。	輸送容器に，基本的安全機能及び構造強度に影響する汚れ，傷，変形又は損傷のないこと。
2	気密漏えい検査	貯蔵期間中検査（輸送機能維持確認検査）の気密漏えい検査記録を確認する。	二重蓋間圧力が検査要領書で規定する圧力範囲にあること。
3	未臨界検査	貯蔵期間中検査（輸送機能維持確認検査）の未臨界検査記録を確認する。	バスケットの外観，寸法に影響する輸送容器の異常がないこと。また，収納物の仕様及び貯蔵期間が設計評価条件内であること。
4	吊上検査	貯蔵期間中検査（輸送機能維持確認検査）の吊上検査記録により，トラニオン部に異常がないことを確認する。	トラニオン部の性能に影響を与えるような傷，変形又は損傷のないこと。

(注)緩衝体及び三次蓋については，保管期間中検査として，1年に1回以上の頻度で目視により外観検査を行い，異常のないことを確認する。また，これらの使用に当たっては，使用開始検査として目視により外観検査を行い，異常のないことを確認する。なお，緩衝材の充填空間はカバープレートに覆われた閉鎖環境であること，また，緩衝体は常温環境下に保管するため劣化環境にないことから，緩衝材に有意な経年劣化は生じない。

(2) 使用済燃料を装荷したことのある輸送容器の定期自主検査

使用済燃料を装荷したことのある輸送容器については，(ハ)-第B.3表に示す定期自主検査を1年に1回以上実施する。

(ハ)-第B.3表　使用済燃料を装荷したことのある輸送容器の定期自主検査の項目，検査方法及び合格基準

No.	検査項目	検査方法	合格基準
1	外観検査	輸送容器の外観を目視で検査する。	基本的安全機能及び構造強度に影響する汚れ，傷，変形又は損傷のないこと。
2	気密漏えい検査	①三次蓋密封部の漏えい率を加圧法又は真空法により測定する。 ②二次蓋密封部の漏えい率をヘリウムリーク試験，加圧法又は真空法により測定する。	①三次蓋密封部の漏えい率が検査要領書に規定する漏えい率を超えないこと。 ②二次蓋密封部の漏えい率が検査要領書に規定する漏えい率を超えないこと。
3	未臨界検査	輸送容器内に収納されたバスケットの外観を目視で検査する。	臨界防止機能に影響するバスケットの変形又は破損がないこと。
4	吊上検査	輸送容器を吊り上げた後の状態において，トラニオンの外観を目視で検査する。	トラニオン部の性能に影響を与えるような傷，変形又は損傷のないこと。

(3) 保管中の輸送容器の定期自主検査

a. 使用済燃料を装荷したことのない保管中の輸送容器の定期自主検査

使用済燃料を装荷したことのない保管中の輸送容器については，内部に不活性ガスを充填する等の腐食防止措置を講じ，屋内に保管するか，又は屋外に保管する場合には養生を行い，(ハ)-第 B.4 表に示す定期自主検査を 1 年に 1 回以上実施する。

当該輸送容器の保管が終了し，使用済燃料を装荷する前には，(ハ)-第 B.3 表と同じ検査を実施する。

(ハ)-第 B.4 表　使用済燃料を装荷したことのない保管中の輸送容器の定期自主検査の項目，検査方法及び合格基準

No.	検査項目	検査方法	合格基準
1	外観検査	輸送容器の外観を目視で検査する。	基本的安全機能及び構造強度に影響する汚れ，傷，変形又は損傷のないこと。

b. 使用済燃料を装荷したことのある保管中の輸送容器の定期自主検査

使用済燃料を装荷したことのある輸送容器について，当面の再利用計画がない等の理由により保管措置を講ずる場合は，保管する前に(ハ)-第 B.3 表と同じ検査を実施する。

また，保管に当たっては，内部に不活性ガスを充填する等の腐食防止措置を講じ，屋内に保管するか，又は屋外に保管する場合には養生を行い，保管中は(ハ)-第 B.4 表に示す定期自主検査を 1 年に 1 回以上実施する。

当該輸送容器の保管が終了し，使用済燃料を装荷する前には，(ハ)-第 B.3 表と同じ検査を実施する。

(ニ)章　安全設計及び安全輸送に関する特記事項

(ニ)章　安全設計及び安全輸送に関する特記事項

本輸送物の安全設計，安全輸送に関する特記事項は以下のものとする。

1. 近接防止金網の装着

本輸送物は発送前の温度測定検査で，太陽熱放射のない条件において輸送中に人が容易に近づくことができる表面温度が85℃を超える場合は，近接防止金網を装着して輸送するものとする。

2. 三次蓋及び緩衝体の取扱いについて

本輸送物の三次蓋及び緩衝体は同型式の輸送容器間で共用する。

また，安全性向上の観点から，緩衝材として使用する木材の経年変化に関する知見の拡充の取り組みの一環として，緩衝体の使用に際しては，都度，輸送容器の使用履歴を蓄積し，輸送前に，輸送容器の使用履歴，収納物の発熱量及び輸送時に想定される環境温度を踏まえ，木材温度が，概ね実績のある温度の範囲内であることを確認した後に輸送を行う。

3. 技術基準が変更となった場合及び新たな技術的知見が得られた場合の対応について

外運搬規則等の改正に伴い本輸送物に係る技術上の基準が変更となった場合及び新たな技術的知見が得られた場合は，設計への影響を評価し，必要に応じて設計変更承認申請等の手続きを行う。

4. 型式指定との安全解析の解析条件の相違について

(1) 運搬中に予想される周囲の温度の範囲について

特定兼用キャスク（型式指定の番号：D-SE-2305311）においては，運搬中に予想される周囲の温度のうち最低温度を-20℃と設定しているのに対し，本輸送物は使用済燃料乾式貯蔵施設へ輸送することから，気象データの実績を踏まえ-25℃として評価を実施している。評価結果については，いずれも輸送物の健全性に問題はないことを確認している（(ロ)章A，B参照）。

(2) 使用計画回数について

特定兼用キャスク（型式指定の番号：D-SE-2305311）においては，トラニオンの使用計画回数を200回，三次蓋及び三次蓋ボルトの使用計画回数を60回として評価しているのに対し，本輸送物は燃料装荷，使用済燃料乾式貯蔵施設での貯蔵及び再処理工場への輸送において使用することから，トラニオンの使用計画回数を400回，三次蓋及び三次蓋ボルトの使用計画回数を600回として評価している。評価結

果については,いずれも使用計画回数が許容繰返し回数を十分下回っていることを確認している（(ロ)章A参照）。

参考　　輸送容器の製作の方法の概要に関する説明

参考　輸送容器の製作の方法の概要に関する説明

輸送容器は，(ロ)章「核燃料輸送物の安全解析」に述べられた構造，熱，密封，遮蔽，臨界の各解析及びそれらにより決定される寸法，構造等を満足するように，参考A.「輸送容器の製作方法」に従って製作し，それらが上記各設計条件を満足していることを，参考B.「輸送容器の試験，検査方法」に説明する各種検査により確認する。

A. 輸送容器の製作方法

A.1　概要

輸送容器の製作手順例を(参)-第A.1図に示す。

以下，(参)-第A.1図に従い，製作手順及び方法の概要について述べる。

1. キャスク本体の製作

(1) 胴部の機械加工

胴部は炭素鋼製の鍛造品であり，内外面及び溶接開先部の機械加工を行う。なお，胴部及び底部は一体鍛造で製造する場合がある。

(2) 底部の機械加工

底部は炭素鋼製の鍛造品であり，内外面及び溶接開先部の機械加工を行う。なお，胴部及び底部は一体鍛造で製造する場合がある。

(3) 胴部と底部の組立溶接

胴部と底部の組立溶接（周継手）を行う。なお，胴部を2つ以上の部材として鍛造する場合は，上記の作業が1つ以上追加となる。また，胴部及び底部を一体で製造する場合は，本作業が省略される。

(4) 胴の機械加工

胴部と底部の組立溶接（周継手）部外面の機械加工を行う。なお，胴部を2つ以上の部材として鍛造し溶接する場合は，上記の作業が1つ以上追加となる。また，胴部及び底部を一体で製造する場合は，本作業が省略される。

(5) 胴の[redacted]

胴のフランジ面に[redacted]底部中性子遮蔽材カバー及び下部端板を溶接する部位に[redacted]を行う。

(6) 胴の熱処理

胴の組立溶接（周継手），[redacted]に対し溶接後熱処理を行う。

(7) 胴の機械加工

胴のネジ穴部等の機械加工を行う。

(8) 伝熱フィン及び外筒の組立溶接

伝熱フィン及び外筒の組立溶接を行う。

(9) 中性子遮蔽材（レジン）の充填

胴側部中性子遮蔽材部及び底部中性子遮蔽材部に中性子遮蔽材（レジン）を充填する。

(10) 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーの組立溶接

下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーの組立溶接を行う。

(11) キャスク本体の機械加工

キャスク本体のフランジ面等の機械加工を行う。

(12) [redacted]

キャスク本体の内面に[redacted]を行う。

(13) キャスク本体の塗装

キャスク本体外面に塗装を施す。

2. 蓋の製作

2.1 一次蓋

(1) 蓋板の機械加工

蓋板は炭素鋼製の鍛造品であり，外面の機械加工を行う。

(2) 蓋板の[redacted]

蓋板のキャスク本体と接する部位に[redacted]を行う。

(3) 蓋板の熱処理

蓋板溶接部の溶接後熱処理を行う。

(4) 側板の組立溶接

側板の組立溶接を行う。

(5) 中性子遮蔽材（レジン）の充填

中性子遮蔽材（レジン）を充填する。

(6) 蓋部中性子遮蔽材カバーの組立溶接

蓋部中性子遮蔽材カバーの組立溶接を行う。

(7) 蓋板の機械加工

[redacted]等の機械加工を行う。

(8) [redacted]

蓋板表面に[redacted]を行う。

(9) バルブ，カバープレートの組立て

バルブ，カバープレート等の蓋への取付けを行う。

2.2 二次蓋

(1) 蓋板の機械加工

蓋板は炭素鋼製の鍛造品であり，外面の機械加工を行う。

(2) 蓋板の[redacted]

蓋板のキャスク本体と接する部位及び圧力センサー取付け部に[redacted]

[redacted]を行う。

(3) 蓋板の熱処理

蓋板溶接部の溶接後熱処理を行う。

(4) 蓋板の機械加工

[redacted]等の機械加工を行う。

(5) [redacted]

蓋板表面に[redacted]を行う。

(6) バルブ，カバープレートの組立て

バルブ，カバープレート等の蓋への取付けを行う。

2.3 三次蓋

(1) 蓋板の機械加工

蓋板はステンレス鋼製の鍛造品又は板材であり，外面の機械加工を行う。

(2) 蓋板の機械加工

カバープレート部等の機械加工を行う。

(3) バルブ，カバープレートの組立て

バルブ，カバープレート等の蓋への取付けを行う。

3. バスケットの製作

(1) 部材加工

アルミニウム合金製のバスケットプレート及びバスケットサポート並びにほう素添加アルミニウム合金製の中性子吸収材を所定の寸法・形状に加工する。

(2) 組立

所定の寸法・形状に加工された部材等の組立を行う。

4. 上部及び下部緩衝体の製作

(1) 部材加工

ステンレス鋼板を所定の寸法・形状に加工（切断，機械加工，曲げ加工等）する。

(2) 組立溶接

所定の寸法・形状に加工された部材の組立溶接を行う。

(3) 緩衝材の組込み

[redacted]を行う。缶体に緩衝材([redacted])を組込む。

(4) 組立溶接

緩衝材の組込みを完了した缶体にカバープレートの溶接を行う。

(5) 緩衝材の組込み

缶体に緩衝材([redacted])を組込む。

(6) 組立溶接

緩衝材の組込みを完了した缶体にカバープレートの溶接を行う。

(7) 機械加工

容器との当り面等の機械加工を行う。

5. 輸送容器の組立

完成した胴にバスケット及びドレンパイプの組込み並びにトラニオン，蓋，上・下部緩衝体の取付けを行い，輸送容器を組立てる。

(参)-第A.1図　輸送容器全体製作手順図（例）

A.2　材料の説明

A.2.1　一般材料

輸送容器には，(参)-第A.1表に示す規格の材料又はその相当品を使用する。

A.2.2　特殊材料

前記一般材料の他に，(参)-第A.2表に示す特殊材料を使用する。

(参)-第A.1表　材料適用規格（板，棒，押出，鍛造及びボルト材）

使用部位	材料区分	適用規格 (注1)	備考
1. キャスク本体			
胴	鍛造材		炭素鋼
外筒	板材		炭素鋼
下部端板	板材		ステンレス鋼
伝熱フィン	板材	JIS H 3100 C1020P	銅
		又は JIS H 3140 C1020BB	
トラニオン	棒材	JIS G 4303 SUS630-H1150 (注2)	析出硬化系ステンレス鋼
底部中性子遮蔽材カバー	板材		ステンレス鋼
2. 蓋			
(1) 一次蓋			
蓋板	鍛造材		炭素鋼
蓋部中性子遮蔽材カバー	板材		炭素鋼
カバープレート	棒材		ステンレス鋼
	又は板材		
蓋ボルト	ボルト材		ニッケルクロムモリブデン鋼
(2) 二次蓋			
蓋板	鍛造材		炭素鋼
モニタリングポート	棒材		ステンレス鋼
カバープレート	又は板材		
蓋ボルト	ボルト材		ニッケルクロムモリブデン鋼
(3) 三次蓋			
蓋板	鍛造材		ステンレス鋼
	又は板材		
リリーフバルブカバー	棒材		ステンレス鋼
プレート	又は板材		
蓋ボルト	ボルト材		ニッケルクロムモリブデン鋼
3. バスケット			
バスケットプレート	押出材	MB-A3004-H112 (注2)	アルミニウム合金
バスケットサポート	押出材	MB-A3004-H112 (注2)	アルミニウム合金
4. 緩衝体			
カバープレート	板材		ステンレス鋼
リブ	板材		ステンレス鋼

(注1)記載の規格材料又はその相当品を用いる。

(注2)破壊じん性試験を行う。

(参)-第A.2表　特殊材料

使用目的	材料名	適用規格(注)	備 考
中性子遮蔽材	レジン	メーカー標準	
中性子吸収材	ほう素添加アルミニウム合金	メーカー標準	
緩衝材		メーカー標準	
シール材 （Oリング）	EPDM （三次蓋シール部等）	JIS B 2401 EPDM-70	硬さ(Hs) :70±5
金属 ガスケット	ニッケル基合金及び アルミニウム （一次蓋及び二次蓋 シール部）	メーカー標準	ヘリコフレックス又は相当品 ｺｲﾙｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ：ニッケル基合金 内側被覆 ：ニッケル基合金 外側被覆 ：アルミニウム 許容漏えい率(Pa･m³/s)： 1.0×10^{-8}以下

(注)記載の規格材料又は相当品を用いる。

A.3　溶接

容器の溶接は，日本機械学会の「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格」及び「発電用原子力設備規格 溶接規格」に準拠した施工法により行う。

溶接方法の例を(参)-第A.3表に示す。

(参)-第 A.3 表　適用する溶接方法（例）

適用継手	溶接方法 (注)
胴部と底部の突合せ溶接	サブマージアーク溶接（SAW）
	被覆アーク溶接（SMAW）
	ティグ溶接（GTAW）
伝熱フィンと胴又は外筒の溶接	ティグ溶接（GTAW）
	ミグ溶接（GMAW）
胴と下部端板及び 胴と底部中性子遮蔽材カバーの溶接	被覆アーク溶接（SMAW）
	ティグ溶接（GTAW）
	フラックスコアードアーク溶接（FCAW）
外筒同士の溶接及び 外筒と下部端板の溶接	被覆アーク溶接（SMAW）
	ティグ溶接（GTAW）
	ミグ溶接（GMAW）
ステンレス鋼同士の溶接	被覆アーク溶接（SMAW）
	ティグ溶接（GTAW）
	フラックスコアードアーク溶接（FCAW）
	サブマージアーク溶接（SAW）

(注) 上記は代表例であり変更となる場合がある。また，同等であれば他の溶接方法を用いることができる。

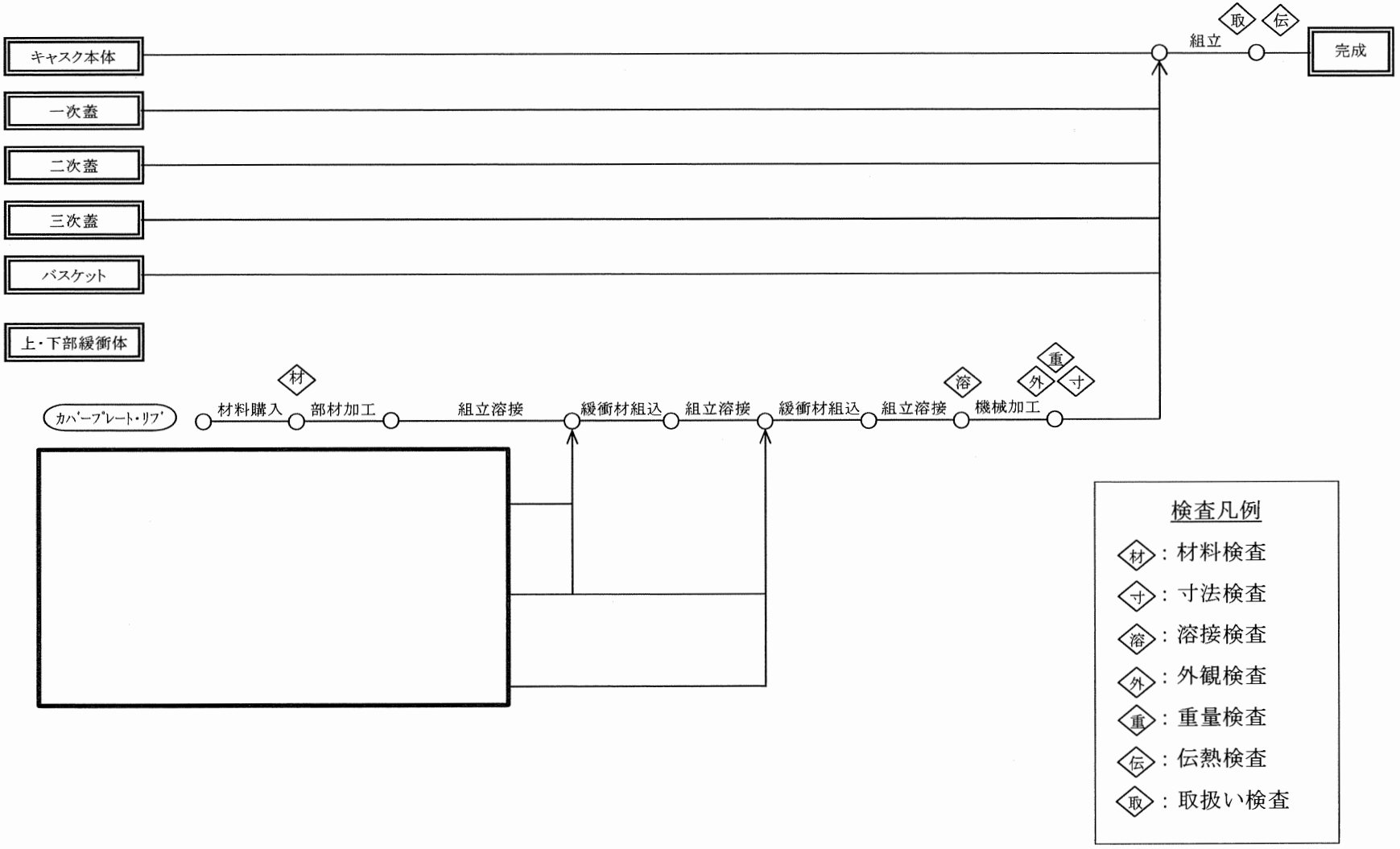
B. 輸送容器の試験，検査方法

(ロ)章で述べられた各解析に対応する設計条件を満たすように製造されていることを確認するために，日本原子力学会標準「使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準」に準じて(参)-第B.1表に示す検査を実施する。

(参)-第B.1表　検査項目一覧表

検査項目	容器（蓋を含む。）		バスケット		緩衝体(注)	
	実施区分	実施時期	実施区分	実施時期	実施区分	実施時期
材料検査	○	製作中（材料受取時）	○	製作中（材料受取時）	○	製作中（材料受取時）
寸法検査	○	製作中及び製作完了時	○	製作中及び製作完了時	○	製作完了時
溶接検査	○	製作中	－	－	○	製作中
外観検査	○	製作完了時	○	製作完了時	○	製作中及び製作完了時
耐圧検査	○	製作中	－	－	－	－
気密漏えい検査	○	製作中及び製作完了時	－	－	－	－
遮蔽性能検査	○	製作中	－	－	－	－
遮蔽寸法検査	○	製作中	－	－	－	－
伝熱検査	○	製作完了時	○	製作完了時	○	製作完了時
吊上荷重検査	○	製作完了時	－	－	－	－
重量検査	○	製作完了時	○	製作完了時	○	製作完了時
未臨界検査	－	－	○	製作中及び製作完了時	－	－
作動確認検査	○	製作完了時	－	－	－	－
取扱い検査	○	製作完了時	○	製作完了時	○	製作完了時

（注）緩衝体に係る検査実施時期を(参)-第B-1図に示す。



(参)-第 B-1 図　緩衝体検査実施時期（例）

別紙２

輸送容器に係る品質管理の方法等（設計に係るものに限る。）に関する説明書

（記載事項）

１．　輸送容器に係る品質管理の方法等（設計に係るものに限る。）に関する説明

・・・(ｲ)章

(ｲ)章　輸送容器に係る品質管理の方法等（設計に係るものに限る。）に関する説明

(イ)章　輸送容器に係る品質管理の方法等（設計に係るものに限る。）に関する説明

(イ)-A　品質マネジメントシステム

当社は，「原子力施設の保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の基準に関する規則」及び「原子力施設の保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の基準に関する規則の解釈」に基づき，輸送容器及び核燃料輸送物の設計，製作，取扱い，保守等全般に係る保安活動等を実施するため，品質マネジメントシステムを確立し，品質マネジメントシステム計画に定め，実施するとともに，その実効性を維持する。本申請に係る品質保証活動は，この品質マネジメントシステムに基づき，品質保証に係る体制を確保し，実施する。

A.1　品質マニュアル

1.　組織は，品質マニュアルに次に掲げる事項を定める。

(1)　品質マネジメントシステムの運用に係る組織に関する事項

(2)　保安活動等の計画，実施，評価及び改善に関する事項

(3)　品質マネジメントシステムの適用範囲

(4)　品質マネジメントシステムのために作成した手順書等の参照情報

(5)　品質マネジメントシステムのプロセス間の相互関係

A.2　文書管理

1.　組織は，品質マネジメント文書を，次の事項を含め管理する。ただし，記録は文書の一種ではあるが，A.3 品質記録の管理に定める要求事項に従って管理する。

(1)　組織として承認されていない文書の使用又は適切ではない変更の防止

(2)　文書の組織外への流出等の防止

(3)　品質マネジメント文書の発行及び改訂に係る審査の結果，当該審査の結果に基づき講じた措置並びに当該発行及び改訂を承認した者に関する情報の維持

2.　組織は，要員が判断及び決定をするに当たり，適切な品質マネジメント文書を利用できるよう，品質マネジメント文書に関する次の事項を社内規程に定め，管理する。これには，文書改訂時等の必要な時に当該文書作成時に使用した根拠等の情報が確認できることを含む。

(1)　品質マネジメント文書を発行するに当たり，その妥当性を審査し，発行を承認すること。

(2)　品質マネジメント文書の改訂の必要性について評価するとともに，改訂に当たり，その妥当性を審査し，改訂を承認（前号と同様に改訂の妥当性を審査し，承認することをいう。）すること。

(3)　品質マネジメント文書の審査及び評価には，その対象となる文書に定められた活動を実施する部門の要員を参画させること。

(4)　品質マネジメント文書の改訂内容及び最新の改訂状況を識別できるようにすること。

(5)　改訂のあった品質マネジメント文書を利用する場合においては，当該文書の適切な制定版又は改訂版が利用しやすい体制を確保すること。

(6)　品質マネジメント文書を，読みやすく容易に内容を把握することができるようにすること。

(7)　組織の外部で作成された品質マネジメント文書を識別し，その配付を管理すること。

(8)　廃止した品質マネジメント文書が使用されることを防止すること。この場合において，当該文書を保持するときは，その目的にかかわらず，これを識別し，管理すること。

A.3　品質記録の管理

1.　組織は，個別業務等要求事項への適合及び品質マネジメントシステムの実効性を実証する記録を明確にするとともに，当該記録を，読みやすく容易に内容を把握することができ，かつ，検索することができるように作成し，保安活動の重要度に応じてこれを管理する。

2.　組織は，前項の記録の識別，保存，保護，検索及び廃棄に関し，所要の管理の方法を社内規程に定め管理する。

(イ)-B　申請者の責任

1.　経営責任者の原子力の安全等のためのリーダーシップ

社長は，原子力の安全等のためのリーダーシップを発揮し，責任を持って品質マネジメントシステムを確立させ，実施させるとともに，その実効性を維持していることを，次に掲げる業務を行うことによって実証する。

(1)　品質方針を定めること。

(2)　品質目標が定められているようにすること。

(3)　要員が，健全な安全文化を育成し，及び維持すること，並びに核セキュリティ文化を醸成することに貢献できるようにすること（要員が健全な安全文化を育成し，及び維持する，並びに核セキュリティ文化を醸成する取組みに参画できる環境を整えていることをいう。）。

(4)　マネジメントレビューを実施すること。

(5)　資源が使用できる体制を確保すること。

(6)　関係法令を遵守することその他原子力の安全等を確保することの重要性を要員に周知すること。

(7)　保安活動等に関する担当業務を理解し，遂行する責任を有することを，要員に認識させること。

(8)　全ての階層で行われる決定が，原子力の安全等の確保について，その優先順位及び説明する責任を考慮して確実に行われるようにすること。

2.　原子力の安全等の確保の重視

社長は，組織の意思決定に当たり，機器等及び個別業務が個別業務等要求事項に適合し，かつ，原子力の安全等がそれ以外の事由により損なわれないようにする。

3.　品質方針

社長は，品質方針（健全な安全文化を育成し，及び維持することに関するもの（この場合において，技術的，人的及び組織的要因並びにそれらの間の相互作用が原子力の安全に対して影響を及ぼすものであることを考慮し，組織全体の安全文化のあるべき姿を目指して設定していること。）を含む。）が次に掲げる事項に適合しているようにする。

(1)　組織の目的及び状況に対して適切なものであること（組織運営に関する方針と整合的なものであることを含む。）。

(2)　要求事項への適合及び品質マネジメントシステムの実効性の維持に社長が責任を持って関与していること。

(3)　品質目標を定め，評価するに当たっての枠組みとなるものであること。

(4)　要員に周知され，理解されていること。

(5)　品質マネジメントシステムの継続的な改善に社長が責任を持って関与していること。

4.　計画

4.1　品質目標

(1)　社長は，組織内のしかるべき室所及び階層に品質目標（個別業務等要求事項への適合のために必要な目標を含む。）を設定させる。これには，品質目標を達成するための計画として，次の事項を含める。

①実施事項

②必要な資源

③責任者

④実施事項の完了時期

⑤結果の評価方法

(2)　社長は，品質目標が，その達成状況を評価し得る（品質目標の達成状況を監視測定し，その達成状況を評価できる状態にあること。）ものであって，かつ，品質方針と整合的なものとなるようにする。

(3)　組織は，品質目標の設定に係る事項を社内規程に定め，管理する。

4.2　品質マネジメントシステムの計画

(1)　社長は，品質マネジメントシステムの計画が品質マネジメントシステムに係る要求事項を満たすように策定されているようにする。

(2)　社長は，プロセス及び組織の変更（累積的な影響が生じ得るプロセス及び組織の軽微な変更を含む。）を含む品質マネジメントシステムの変更が計画され，それが実施される場合においては，当該品質マネジメントシステムが不備のない状態に維持されている

ようにする。この場合において，保安活動の重要度に応じて，次に掲げる事項を適切に考慮する。

①品質マネジメントシステムの変更の目的及び当該変更により起こり得る結果（当該変更による原子力の安全等への影響の程度の分析及び評価並びに当該分析及び評価の結果に基づき講じた措置を含む。）

②品質マネジメントシステムの実効性の維持

③資源の利用可能性

④責任及び権限の割当て

5.　責任，権限及びコミュニケーション

5.1　責任及び権限

社長は，組織における責任（担当業務に応じて，組織の内外に対し保安活動等の内容について説明する責任を含む。）及び権限並びに部門相互間の業務の手順（部門間で連携が必要な業務のプロセスにおいて，業務（情報の伝達を含む。）が停滞し，断続することなく遂行できる仕組みをいう。）を社内規程に定めさせ，関係する要員が責任を持って業務を遂行できるようにする。

5.2　品質マネジメントシステム管理責任者

(1)　社長は，安全室を担当する取締役を実施部門の品質マネジメントシステム管理責任者（以下「実施部門管理責任者」という。）として，考査・品質監査室長を監査部門の品質マネジメントシステム管理責任者（以下「監査管理責任者」という。）として，発電管理室を担当する取締役を核物質防護部門の品質マネジメントシステム管理責任者（以下「核物質防護部門管理責任者」という。）として任命する。

(2)　社長は，品質マネジメントシステム管理責任者に，次に掲げる業務に係る責任及び権限を与える。

①プロセスが確立され，実施されるとともに，その実効性が維持されているようにすること。

②品質マネジメントシステムの運用状況及びその改善の必要性について，社長に報告すること。

③健全な安全文化を育成し，及び維持すること，並びに核セキュリティ文化を醸成することにより，原子力の安全等の確保についての認識が向上するようにすること。

④関係法令を遵守すること。

5.3　管理者

(1)　社長は，次に掲げる業務を社内規程に定める本店の各室長，東海第二発電所の所長及び各室長，敦賀発電所の所長及び各室長（以下「管理者」という。）に，当該管理者が管理監督する業務に係る責任及び権限を与える。なお，管理者に代わり，業務のプロセスを管理する責任者を置いて，その業務を行わせることができる。この場合において，

当該責任者の責任及び権限は，文書で明確に定める。

また，社長は，管理者を補佐する者として品質保証担当を任命する。

①個別業務のプロセスが確立され，実施されるとともに，その実効性が維持されているようにすること。

②要員の個別業務等要求事項についての認識が向上するようにすること。

③個別業務の実施状況に関する評価を行うこと。

④健全な安全文化を育成し，及び維持すること，並びに核セキュリティ文化を醸成すること。

⑤関係法令を遵守すること。

(2) 管理者は，前項の責任及び権限の範囲において，原子力の安全等のためのリーダーシップを発揮し，次に掲げる事項を確実に実施する。

①品質目標を設定し，その目標の達成状況を確認するため，業務の実施状況を監視測定すること。

②要員が，原子力の安全等に対する意識を向上し，かつ，原子力の安全等への取組みを積極的に行えるようにすること。

③原子力の安全等に係る意思決定の理由及びその内容を，関係する要員に確実に伝達すること。

④常に問いかける姿勢及び学習する姿勢を要員に定着させるとともに，要員が，積極的に原子力施設の保安又は特定核燃料物質の防護に関する問題の報告を行えるようにすること。

⑤要員が，積極的に業務の改善に対する貢献を行えるようにすること。

(3) 管理者は，管理監督する業務に関する自己評価（安全文化及び核セキュリティ文化についての弱点のある分野及び強化すべき分野に係るものを含む。）を，あらかじめ定められた間隔（品質マネジメントシステムの実効性の維持及び継続的な改善のために保安活動等として取り組む必要がある課題並びに当該品質マネジメントシステムの変更を考慮に入れて設定された間隔をいう。）で行う。

5.4 組織の内部の情報の伝達

(1) 社長は，組織内部の情報が適切に伝達される仕組みが確立されているようにする（品質マネジメントシステムの運営に必要となるコミュニケーションが必要に応じて行われる場や仕組みを決め，実行することをいう。）とともに，品質マネジメントシステムの実効性に関する情報が確実に伝達されるようにする。

(2) 社長は，品質保証委員会，品質保証運営委員会，核物質防護委員会及び核物質防護運営委員会をとおして，品質マネジメントシステムの実効性に関しての情報交換が行われていることを，マネジメントレビューにて確認する。

(3) 前項の委員会について，委員長は次に掲げる事項のとおりとする。

①品質保証委員会

社長が指名する副社長

②品質保証運営委員会

開発計画室においては開発計画室長，東海発電所，東海第二発電所及び敦賀発電所においては発電所長

③核物質防護委員会

発電管理室長

④核物質防護運営委員会

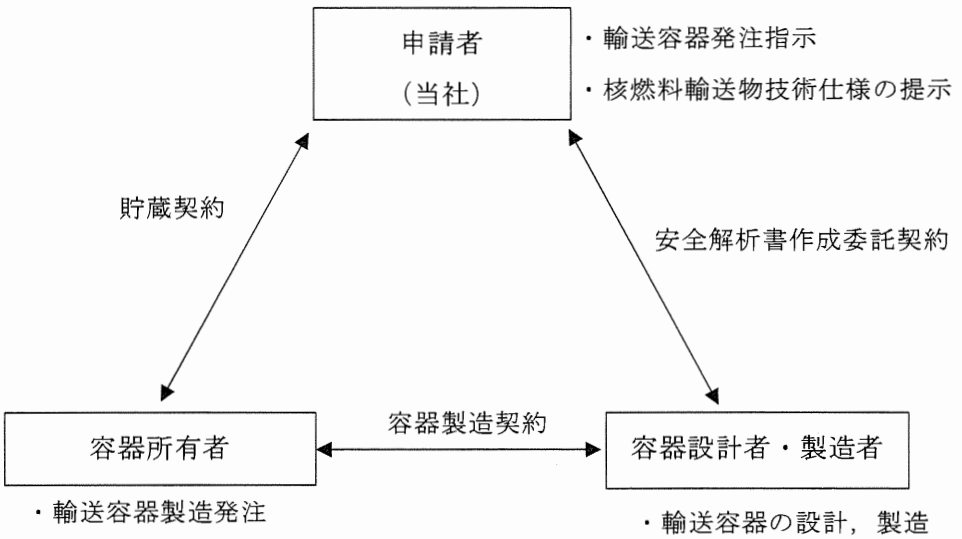
東海第二発電所及び敦賀発電所において発電所長

6. マネジメントレビュー

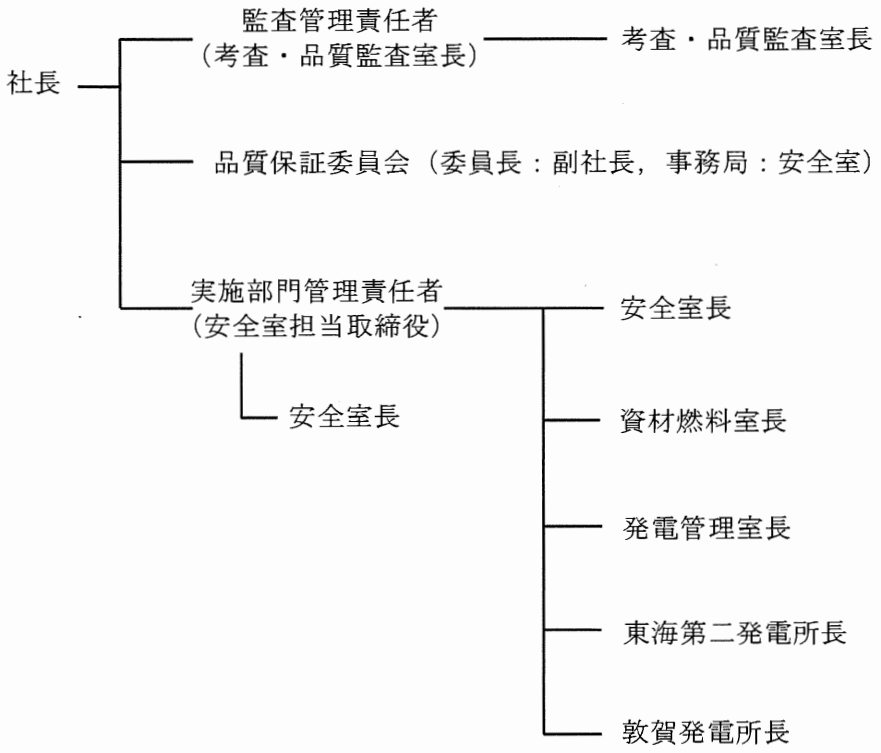
社長は，品質マネジメントシステムの実効性を評価するとともに，改善の機会を得て，保安活動等の改善に必要な措置を講ずるため，品質マネジメントシステムの評価（以下「マネジメントレビュー」という。）を，あらかじめ定められた間隔（品質マネジメントシステムの実効性の維持及び継続的な改善のために保安活動等として取り組む必要がある課題並びに当該品質マネジメントシステムの変更を考慮に入れて設定された間隔をいう。）で行うことを社内規程に定める。

7. 組織

MSF-24P 型キャスクの設計承認申請における品質マネジメントシステム遂行に係る申請者，容器製造者等の組織についての責任体制図を(イ)-第 B.1 図に示す。また，当社の体制図を(イ)-第 B.2 図に示す。



(イ)-第 B.1 図　設計承認に係る申請者及び容器製造者等の品質マネジメントシステム遂行に係る体制図



(イ)-第 B.2 図　設計承認申請に係る当社の体制図

(イ)-C　教育・訓練

1.　組織は，個別業務の実施に必要な技能及び経験を有し，意図した結果を達成するために必要な知識及び技能並びにそれを適用する能力（組織が必要とする技術的，人的及び組織的側面に関する知識を含む。以下「力量」という。）が実証された者を要員に充てる。

2.　組織は，要員の力量を確保するために，保安活動の重要度に応じて次に掲げる事項を社内規程に定める。

(1)　要員にどのような力量が必要かを明確に定めること。

(2)　要員の力量を確保するために教育訓練その他の措置（必要な力量を有する要員を新たに配属し，又は雇用することを含む。）を講ずること。

(3)　教育訓練その他の措置の実効性を評価すること。

(4)　要員が自らの個別業務について，次に掲げる事項を認識しているようにすること。

①品質目標の達成に向けた自らの貢献

②品質マネジメントシステムの実効性を維持するための自らの貢献

③原子力の安全等に対する当該個別業務の重要性

(5)　要員の教育訓練及び力量について該当する記録を作成し，これを管理すること。

(イ)-D　設計管理

1.　設計開発の計画

組織は，輸送容器が設計要求事項に適合することを確実にするため，社内規程を定め，次の事項を実施する。

(1)　組織は，設計開発（専ら原子力施設において用いるための設計開発に限る。）の計画（以下「設計開発計画」という。）を策定する（不適合及び予期せぬ事象の発生等（機器等の故障若しくは通常想定されない事象（設計上考慮していない又は考慮していても発生し得る事象（人的過誤による作業の失敗等）をいう。））の発生又は保安活動が不適切に計画され，若しくは実行されたことにより起こり得る影響を未然に防止するための活動を行うことを含む。）とともに，設計開発を管理することを社内規程に定める。

この設計開発には，設備，施設，ソフトウェア及び手順書等に関する設計開発を含む。この場合において，原子力の安全等のために重要な手順書等の設計開発については，新規制定の場合に加え，重要な変更がある場合にも行う必要がある。

(2)　組織は，設計開発計画の策定において，次に掲げる事項を明確にする。

①設計開発の性質，期間及び複雑さの程度

②設計開発の各段階における適切な審査，検証及び妥当性確認の方法並びに管理体制

③設計開発に係る部門及び要員の責任及び権限

④設計開発に必要な組織の内部及び外部の資源

(3)　組織は，実効性のある情報の伝達並びに責任及び権限の明確な割当てがなされるようにするために，設計開発に関与する各者間の連絡を管理する。

(4)　組織は，(1)の規定により策定された設計開発計画を，設計開発の進行に応じて適切に変更する。

2.　設計開発に用いる情報

(1)　組織は，個別業務等要求事項として設計開発に用いる情報であって，次に掲げるものを明確に定めるとともに，当該情報に係る記録を作成し，これを管理する。

①機能及び性能に関する要求事項

②従前の類似した設計開発から得られた情報であって，当該設計開発に用いる情報として適用可能なもの

③関係法令

④その他設計開発に必要な要求事項

(2)　組織は，設計開発に用いる情報について，その妥当性を評価し，承認する。

3.　設計開発の結果に係る情報

(1)　組織は，設計開発の結果に係る情報を，設計開発に用いた情報と対比して検証することができる形式により管理する。

(2)　組織は，設計開発の次の段階のプロセスに進むに当たり，あらかじめ，当該設計開発

の結果に係る情報を承認する。

(3) 組織は，設計開発の結果に係る情報を，次に掲げる事項に適合するものとする。

①設計開発に係る個別業務等要求事項に適合するものであること。

②調達，機器等の使用及び個別業務の実施のために適切な情報を提供するものであること。

③合否判定基準を含むものであること。

④機器等を安全かつ適正に使用するために不可欠な当該機器等の特性が明確であること。

4. 設計開発のレビュー

(1) 組織は，設計開発の適切な段階において，設計開発計画に従って，次に掲げる事項を目的とした体系的な審査（以下「設計開発レビュー」という。）を実施する。

①設計開発の結果の個別業務等要求事項への適合性について評価すること。

②設計開発に問題がある場合においては，当該問題の内容を明確にし，必要な措置を提案すること。

(2) 組織は，設計開発レビューに，当該設計開発レビューの対象となっている設計開発段階に関連する部門の代表者及び当該設計開発に係る専門家を参加させる。

(3) 組織は，設計開発レビューの結果の記録及び当該設計開発レビューの結果に基づき講じた措置に係る記録を作成し，これを管理する。

5. 設計開発の検証

(1) 組織は，設計開発の結果が個別業務等要求事項に適合している状態を確保するために，設計開発計画に従って検証を実施する（設計開発計画に従ってプロセスの次の段階に移行する前に，当該設計開発に係る個別業務等要求事項への適合性の確認を行うことを含む。）。

(2) 組織は，設計開発の検証の結果の記録，及び当該検証の結果に基づき講じた措置に係る記録を作成し，これを管理する。

(3) 組織は，当該設計開発を行った要員に当該設計開発の検証をさせない。

6. 設計開発の妥当性確認

(1) 組織は，設計開発の結果の個別業務等要求事項への適合性を確認するために，設計開発計画に従って，当該設計開発の妥当性確認（以下「設計開発妥当性確認」という。）を実施する（機器等の設置後でなければ妥当性確認を行うことができない場合において，当該機器等の使用を開始する前に，設計開発妥当性確認を行うことを含む。）。

(2) 組織は，機器等の使用又は個別業務の実施に当たり，あらかじめ，設計開発妥当性確認を完了する。

(3) 組織は，設計開発妥当性確認の結果の記録及び当該設計開発妥当性確認の結果に基づき講じた措置に係る記録を作成し，これを管理する。

7.　設計開発の変更の管理

(1)　組織は，設計開発の変更を行った場合においては，当該変更の内容を識別することができるようにするとともに，当該変更に係る記録を作成し，これを管理する。

(2)　組織は，設計開発の変更を行うに当たり，あらかじめ，審査，検証及び妥当性確認を行い，変更を承認する。

(3)　組織は，設計開発の変更の審査において，設計開発の変更が原子力施設に及ぼす影響の評価（当該原子力施設を構成する材料又は部品に及ぼす影響の評価を含む。）を行う。

(4)　組織は，(2)の審査，検証及び妥当性確認の結果の記録並びにその結果に基づき講じた措置に係る記録を作成し，これを管理する。

(イ)-E　輸送容器の製造発注

組織（本項において「容器所有者」のことをいう。）は，輸送容器が調達要求事項に適合することを確実にするため，社内規程を定める。

組織は，調達する物品（輸送容器）又は役務（以下「調達物品等」という。）が，自ら規定する調達物品等に係る要求事項（以下「調達物品等要求事項」という。）に適合するために必要な事項を社内規程に定め，実施する。

組織は，保安活動の重要度に応じて，調達物品等の供給者及び調達物品等に適用される管理の方法（調達物品等が調達物品等要求事項に適合していることを確認する適切な方法（機器単位の検証，調達物品等の妥当性確認等の方法）をいう。）及び程度を定める。管理の方法及び程度には，力量を有する者を組織の外部から確保する際に，外部への業務委託の範囲を品質マネジメント文書に明確に定めることを含む。

この場合において，一般産業用工業品については，調達物品等の供給者から必要な情報を入手し，当該一般産業用工業品が調達物品等要求事項に適合していることを確認できるように，管理の方法及び程度を定める。

(1)　容器製造者の評価

①組織は，調達物品等要求事項に従い，調達物品等を供給する能力を根拠として調達物品等の供給者を評価し，選定する。

②組織は，調達物品等の供給者の評価及び選定に係る判定基準を社内規程に定める。

③組織は，①の評価の結果の記録及び当該評価の結果に基づき講じた措置に係る記録を作成し，これを管理する。

④組織は，調達物品等を調達する場合には，個別業務計画において，適切な調達の実施に必要な事項（当該調達物品等の調達後におけるこれらの維持又は運用に必要な技術情報の取得及び当該情報を他の原子力事業者等と共有するために必要な措置に関する事項を含む。）を定める。

(2)　容器製造者への品質マネジメントシステム要求事項

①組織は，調達物品等に関する情報に，次に掲げる調達物品等要求事項のうち，該当するものを含める。

A. 調達物品等の供給者の業務のプロセス及び設備に係る要求事項

B. 調達物品等の供給者の要員の力量に係る要求事項

C. 調達物品等の供給者の品質マネジメントシステムに係る要求事項

D. 調達物品等の不適合の報告（偽造品又は模造品等の報告を含む。）及び処理に係る要求事項

E. 調達物品等の供給者が健全な安全文化を育成し，及び維持するために必要な要求事項

F. 一般産業用工業品を機器等に使用するに当たっての評価に必要な要求事項

G. その他調達物品等に関し必要な要求事項

②組織は，調達物品等要求事項として，組織が調達物品等の供給者の工場等において使用前事業者検査等その他の個別業務を行う際の原子力規制委員会の職員による当該工場等への立入りに関することを含める。

③組織は，調達物品等の供給者に対し調達物品等に関する情報を提供するに当たり，あらかじめ，当該調達物品等要求事項の妥当性を確認する。

④組織は，調達物品等を受領する場合には，調達物品等の供給者に対し，調達物品等要求事項への適合状況を記録した文書を提出させる。

(3) 輸送容器の製作に係る検査及び品質監査による検証

①組織は，調達物品等が調達物品等要求事項に適合しているようにするために必要な検証の方法を定め，実施する。

②組織は，調達物品等の供給者の工場等において調達物品等の検証を実施することとしたときは，当該検証の実施要領及び調達物品等の供給者からの出荷の可否の決定の方法について調達物品等要求事項の中で明確に定める。

(イ)-F 取扱い及び保守

組織は，当社発電所における輸送容器の取扱い及び保守については原子炉施設保安規定に基づき，手順書を定め実施する。

使用済燃料を貯蔵中の輸送容器の取扱い及び保守については容器所有者の使用済燃料貯蔵施設保安規定に基づき実施される。

(イ)-G 測定，分析及び改善

G.1 内部品質監査

1. 組織は，品質マネジメントシステムについて，次に掲げる要件への適合性を確認するために，保安活動の重要度に応じて，あらかじめ定められた間隔で，客観的な評価を行う監査部

門による内部監査を実施する。

(1) 社内規程に基づく品質マネジメントシステムに係る要求事項

(2) 実効性のある実施及び実効性の維持

2. 組織は，内部監査の判定基準，監査範囲，頻度，方法及び責任を定める。

3. 組織は，内部監査の対象となり得る部門，個別業務，プロセスその他の領域（以下「領域」という。）の状態及び重要性並びに従前の監査の結果を考慮して内部監査の対象を選定し，かつ，内部監査の実施に関する計画（以下「内部監査実施計画」という。）を策定し，及び実施することにより，内部監査の実効性を維持する。

4. 組織は，内部監査を行う要員（以下「内部監査員」という。）の選定及び内部監査の実施においては，客観性及び公平性を確保する。

5. 組織は，内部監査員又は管理者に自らの個別業務又は管理下にある個別業務に関する内部監査をさせない。

6. 組織は，内部監査実施計画の策定及び実施並びに内部監査結果の報告並びに記録の作成及び管理について，その責任及び権限（必要に応じ，内部監査員又は内部監査を実施した部門が内部監査結果を社長に直接報告する権限を含む。）並びに内部監査に係る要求事項を社内規程に定める。

7. 組織は，内部監査の対象として選定された領域に責任を有する管理者に内部監査結果を通知する。

8. 組織は，不適合が発見された場合には，前項の通知を受けた管理者に，不適合を除去するための措置及び是正処置を遅滞なく講じさせるとともに，当該措置の検証を行わせ，その結果を報告させる。

G.2 不適合の管理

1. 組織は，個別業務等要求事項に適合しない機器等が使用され，又は個別業務が実施されることがないよう，当該機器等又は個別業務を特定し，これを管理する（不適合が確認された機器等又は個別業務が識別され，不適合が全て管理されていることをいう。）。

2. 組織は，不適合の処理に係る管理（不適合を関連する管理者に報告することを含む。）並びにそれに関連する責任及び権限を社内規程に定める。

3. 組織は，次に掲げる方法のいずれかにより，不適合を処理する。

(1) 発見された不適合を除去するための措置を講ずること。

(2) 不適合について，あらかじめ定められた手順により原子力の安全等に及ぼす影響について評価し，機器等の使用又は個別業務の実施についての承認を行うこと（以下「特別採用」という。）。

(3) 機器等の使用又は個別業務の実施ができないようにするための措置を講ずること。

(4) 機器等の使用又は個別業務の実施後に発見した不適合については，その不適合による

影響又は起こり得る影響に応じて適切な措置を講ずること。

4. 組織は，不適合の内容の記録及び当該不適合に対して講じた措置（特別採用を含む。）に係る記録を作成し，これを管理する。

5. 組織は，3.(1)の措置を講じた場合においては，個別業務等要求事項への適合性を実証するための検証を行う。

6. 組織は，原子力施設の保安の向上に役立たせる観点から，公開基準に従い，不適合の内容をニューシアへ登録することにより，情報の公開を行う。

G.3 是正処置及び予防処置

1. 組織は，個々の不適合その他の事象が原子力の安全等に及ぼす影響に応じて，次に掲げるところにより，速やかに適切な是正処置を講じる。

(1) 是正処置を講ずる必要性について次に掲げる手順により評価を行う。

①不適合その他の事象の分析（情報の収集及び整理並びに技術的，人的及び組織的側面等の考慮を含む。）及び当該不適合の原因の明確化（必要に応じて，日常業務のマネジメントや安全文化の弱点のある分野及び強化すべき分野との関係を整理することを含む。）

②類似の不適合その他の事象の有無又は当該類似の不適合その他の事象が発生する可能性の明確化

(2) 必要な是正処置を明確にし，実施する。

(3) 講じた全ての是正処置の実効性の評価を行う。

(4) 必要に応じ，計画において決定した保安活動等の改善のために講じた措置（品質方針に影響を与えるおそれのある組織の内外の課題を明確にし，当該課題に取り組むことを含む。）を変更する。

(5) 必要に応じ，品質マネジメントシステムを変更する。

(6) 原子力の安全に及ぼす影響の程度が大きい不適合（単独の事象では原子力の安全に及ぼす影響の程度は小さいが，同様の事象が繰り返し発生することにより，原子力の安全に及ぼす影響の程度が増大するおそれのあるものを含む。）に関して，根本的な原因を究明するために行う分析の手順を，社内規程に確立し，実施する。

(7) 講じた全ての是正処置及びその結果の記録を作成し，これを管理する。

2. 組織は，前項に掲げる事項について，社内規程に定める。

3. 組織は，手順書等に基づき，複数の不適合その他の事象に係る情報から類似する事象に係る情報を抽出し，その分析を行い，当該類似の事象に共通する原因を明確にした上で，適切な措置を講じる（1.のうち，必要なものについて実施することをいう。）。

4. 組織は，原子力施設その他の施設の運転経験等の知見（BWR事業者協議会及びPWR事業者連絡会で取り扱う技術情報及びニューシア登録情報を含む。）を収集し，自らの組織で起こ

り得る不適合(原子力施設その他の施設における不適合その他の事象が自らの施設で起こる可能性について分析を行った結果，特定した問題を含む。）の重要性に応じて，次に掲げるところにより，適切な未然防止処置を講じる。

(1)　起こり得る不適合及びその原因を調査する。

(2)　未然防止処置を講ずる必要性について評価する。

(3)　必要な未然防止処置を明確にし，実施する。

(4)　講じた全ての未然防止処置の実効性の評価を行う。

(5)　講じた全ての未然防止処置及びその結果の記録を作成し，これを管理する。

5.　組織は，前項に掲げる事項について，社内規程に定める。