

本資料のうち、枠囲みの内容は営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

資料 1 - 2

東海第二発電所

地震時における燃料被覆管の
閉じ込め機能の維持について

2019 年 5 月

日本原子力発電株式会社

目 次

1. はじめに
2. 基本方針
 - 2.1 要求事項の整理
 - 2.2 追加要求事項への適合性に係る設計方針
3. 追加要求事項に係る評価項目の選定
4. 地震時の燃料被覆管閉じ込め機能評価方針
5. 追加要求事項を踏まえた燃料被覆管応力評価条件
6. 評価手法
 - 6.1 応力評価手法
 - 6.2 疲労評価手法
7. 評価結果
8. ま と め

添付資料 1 : 燃料被覆管の応力評価に考慮する応力について

添付資料 2 : 下部端栓溶接部における応力の取扱いについて

添付資料 3 : 地震による応力を考慮した燃料被覆管応力評価（閉じ込め機能の維持）について

添付資料 4 : 地震による繰り返し荷重を考慮した燃料被覆管疲労評価（閉じ込め機能の維持）について

添付資料 5 : 燃料被覆管応力評価における許容応力について

添付資料 6 : 9 × 9 燃料（B 型）における地震時鉛直方向加速度の考慮方法について

添付資料 7 : 燃料被覆管応力評価におけるモンテカルロ法による統計処理について

添付資料 8 : 下部端栓溶接部の応力評価に使用する有限要素法解析コードについて

添付資料 9 : 評価部位の選定理由について

参考資料 : 発電用原子炉設置変更許可申請書添付書類八「安全設計の方針」「設置許可基準規則 第十五条(炉心等)」における BWR と PWR の相違について

1. はじめに

燃料被覆管の応力評価に関しては、燃料の健全性を確認する観点から、原子炉設置（変更）許可申請書添付書類Ⅷ及び燃料体設計認可申請書添付書類Ⅱ（応力解析）において、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に発生する内外圧差による応力、熱応力などを考慮し、解析コードを用いて燃料被覆管の応力設計比の評価を行っている。また、工事計画認可申請書及び燃料体設計認可申請書添付書類Ⅱ（耐震解析）において、崩壊熱除去可能な形状の維持の観点から、地震時の一次応力も考慮した応力評価を実施している。

一方、平成 29 年 8 月 30 日の原子力規制委員会において、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（以下「設置許可基準規則」という。）及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という。）の改正が決定、平成 29 年 9 月 11 日に施行され、地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持についての要求が追加された。

本資料では、地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る設計方針及び基準地震動等に対する基準適合性の見通しについて説明する。なお、詳細評価については、工事計画認可申請で説明する。

2. 基本方針

2.1 要求事項の整理

設置許可基準規則第 4 条及び設置許可基準規則第 4 条の解釈の記載を第 2.1-1 表に示す。また、技術基準規則第 5 条及び技術基準規則第 5 条の解釈の記載を第 2.1-2 表に示す。

なお、本規則改正に伴う要求事項については、「実用発電用原子炉の燃料体に対する地震の影響の考慮について（平成 29 年 2 月 15 日、

原子力規制庁)」において以下のとおり示されている。

『・・・地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る評価として、より精緻化する観点から、地震力並びに地震力と重畳する可能性のある1次応力及び2次応力を加味した評価を実施することを求める必要がある。

よって、原子力規制庁としては、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に、基準地震動 S_s の地震が発生した場合でも、燃料被覆管の閉じ込め機能は維持できることを新たに要求し、耐震重要度分類Sクラスの耐震設計の考え方にならって、その判断基準として、基準地震動 S_s の地震による1次応力を加味した運転状態における応力が設計引張強さを下回ること、また、弾性設計用地震動 S_d の地震による1次応力を加味した運転状態における応力が設計降伏点を下回ることとしたい。』

第 2.1-1 表 設置許可基準規則第 4 条及び設置許可基準規則第 4 条
の解釈

設置許可基準規則 第 4 条（地震による損傷防止）	設置許可基準規則の解釈 第 4 条（地震による損傷防止）	備考
<p>設計基準対象施設は、地震力に十分に耐えることができるものでなければならない。</p>	<p>一 第 1 項に規定する「地震力に十分に耐える」とは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と、弾性設計用地震動による地震力（本規程別記 2 第 4 条第 4 項第 1 号に規定する弾性設計用地震動による地震力をいう。）又は静的地震力（同項第 2 号に規定する静的地震力をいい、S クラスに属する機器に対し算定されるものに限る。）のいずれか大きい方の地震力を組み合わせた荷重条件に対して、炉心内の燃料被覆材の応答が全体的におおむね弾性状態に留まることをいう。</p>	<p>解釈 追記</p>
<p>2 前項の地震力は、地震の発生によって生ずるおそれがある設計基準対象施設の安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度に応じて算定しなければならない。</p>	<p>—</p>	<p>変更 なし</p>
<p>3 耐震重要施設は、その供用中に当該耐震重要施設に大きな影響を及ぼすおそれがある地震による加速度によって作用する地震力（以下「基準地震動による地震力」という。）に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。</p>	<p>—</p>	<p>変更 なし</p>

第 2.1-1 表 設置許可基準規則第 4 条及び設置許可基準規則第 4 条
の解釈（続き）

設置許可基準規則 第 4 条（地震による損傷防止）	設置許可基準規則の解釈 第 4 条（地震による損傷防止）	備考
4 耐震重要施設は、前項の地震の発生によって生ずるおそれがある斜面の崩壊に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。	—	変更なし
5 炉心内の燃料被覆材は、基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込めの機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。	二 第 5 項に規定する「基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込めの機能が損なわれるおそれがない」とは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動による地震力を組み合わせた荷重条件により塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し、放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさないことをいう。	追加 要求 事項

第 2.1-2 表 技術基準規則第 5 条及び技術基準規則第 5 条の解釈

技術基準規則 第 5 条（地震による損傷防止）	技術基準規則の解釈 第 5 条（地震による損傷防止）	備考
<p>設計基準対象施設は、これに作用する地震力（設置許可基準規則第四条第二項の規定により算定する地震力をいう。）による損壊により公衆に放射線障害を及ぼさないように施設しなければならない。</p>	<p>—</p>	<p>変更なし</p>
<p>2 耐震重要施設は（設置許可基準規則第三条第一項に規定する耐震重要施設をいう。以下同じ。）は、基準地震動による地震力（設置許可基準規則第四条第三項に規定する基準地震動による地震力をいう。以下同じ。）に対してその安全性が損なわれるおそれがないように施設しなければならない。</p>	<p>—</p>	<p>変更なし</p>
<p>3 耐震重要施設が設置許可基準規則第四条第三項の地震により生ずる斜面の崩壊によりその安全性が損なわれるおそれがないよう、防護措置その他の適切な措置を講じなければならない。</p>	<p>—</p>	<p>変更なし</p>
<p>4 炉心内の燃料被覆材は、基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込め機能が損なわれるおそれがないように施設しなければならない。</p>	<p>5 第 4 項に規定する「基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込めの機能が損なわれるおそれがない」とは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動による地震力を組み合わせた荷重条件により塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し、放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさないことをいう。</p>	<p>追加 要求 事項</p>

2.2 追加要求事項への適合性に係る設計方針

燃料被覆管については、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と、弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力を組み合わせた荷重条件に対して、炉心内の燃料被覆管の応答が全体的におおむね弾性状態にとどまる設計とする。

また、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動による地震力を組み合わせた荷重条件により塑性歪が生じる場合であっても、その量が小さいレベルにとどまって破断延性限界に対し十分な余裕を有し、放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさない設計とする。

3. 追加要求事項に係る評価項目の選定

BWR燃料集合体は「沸騰水型原子炉に用いられる8行8列型の燃料集合体について（昭和49年12月25日、原子炉安全専門審査会）」に従い、構造強度設計で以下を考慮している。なお、損傷限界は1%塑性歪及び沸騰遷移であり、それぞれ最大線出力密度と最小限界出力比を通常運転時の熱的制限値として管理することで損傷限界に至らないことを確認しており、地震の影響は問題とならない。

- (1) 被覆管にかかる応力は、設計応力強さ限界を超えないこと。
- (2) 累積疲労サイクル数は、設計疲労寿命を超えないこと。
- (3) 使用中に燃料棒の変形等による過度の寸法変化を生じないこと。

上記のうち、(3)の燃料集合体に異常な寸法形状変化を生じさせないための以下の配慮は地震の影響が問題とならないことから評価対

象としない。

- ・燃料被覆管製造時における残留応力除去
- ・スペーサによる燃料棒の間隔保持及び燃料棒の軸方向伸縮を拘束しない接触圧保持
- ・上部タイ・プレートを通して燃料棒の軸方向伸びを自由に逃げられるようにすること
- ・スペーサ等によるウォータ・ロッドと燃料棒の軸方向伸びの差への処置

地震動により燃料被覆管に外力として応力が作用し、また、地震動が継続する間、繰り返し応力として作用するため、(1)及び(2)について地震影響を考慮した評価を行う。

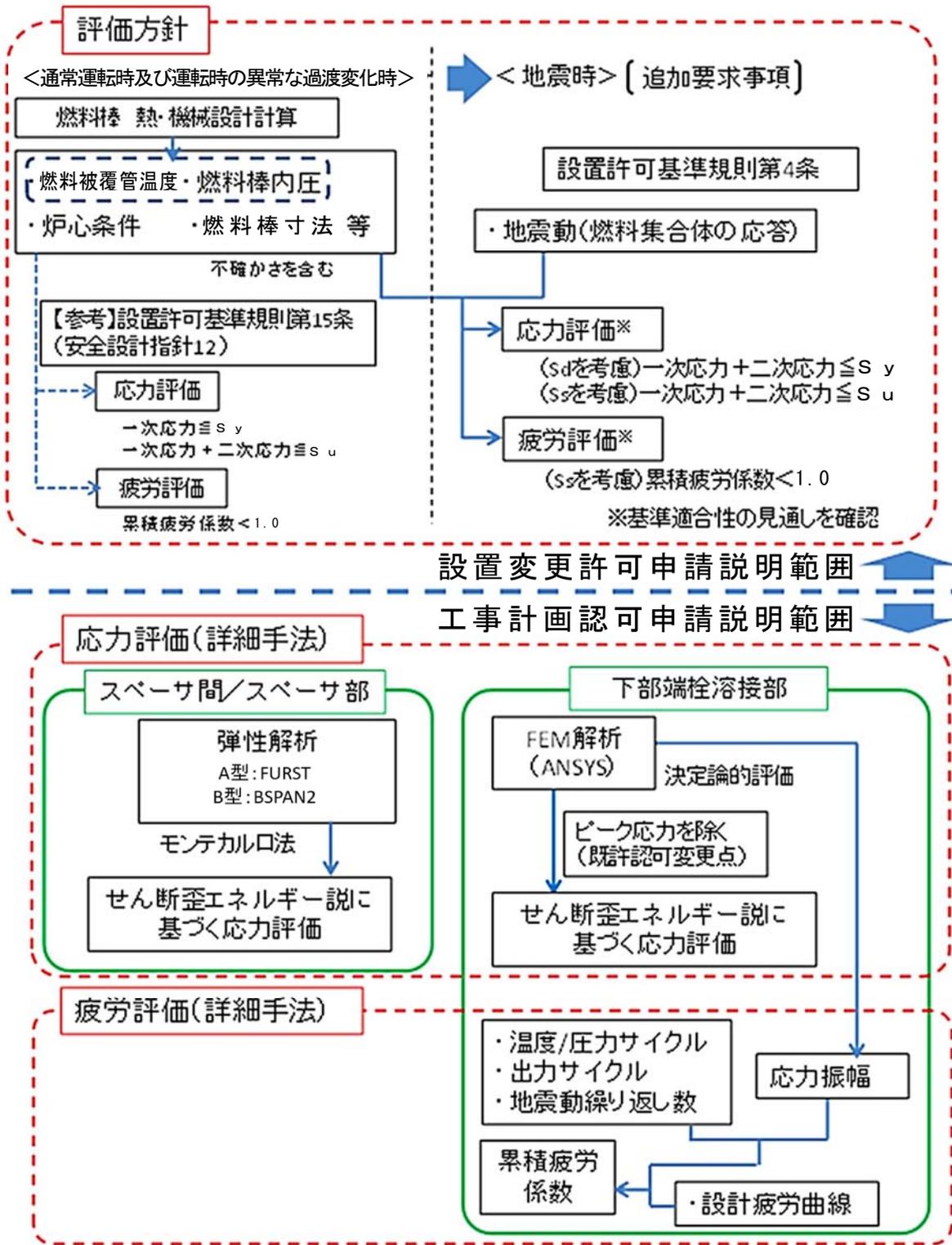
4. 地震時の燃料被覆管閉じ込め機能評価方針

第 4-1 図に燃料被覆管閉じ込め機能評価フロー、第 4-2 図に評価対象部位（スペーサ間、スペーサ部及び下部端栓溶接部）を示す。

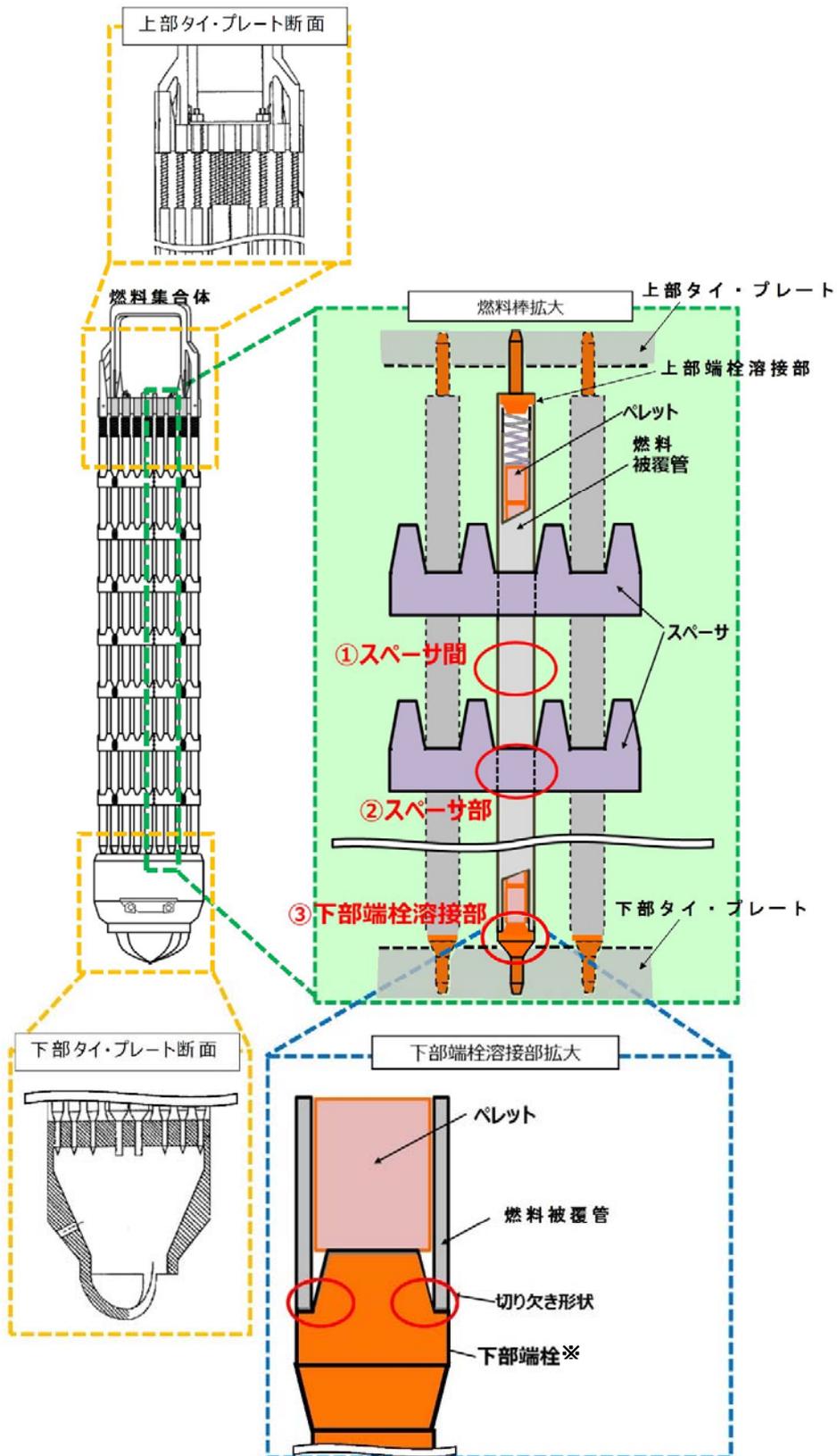
燃料被覆管閉じ込め機能の評価は、燃料棒熱・機械設計解析コードから得られる燃料被覆管温度、燃料棒内圧、炉心条件、燃料棒寸法等及び地震動に対する燃料集合体の応答加速度等を入力値とした応力評価及び疲労評価により行う。燃料被覆管温度、燃料棒内圧、炉心条件、燃料棒寸法等については不確かさを考慮した値を用いる。なお、基準地震動等を用いた応力評価及び疲労評価の詳細手法については工事計画認可申請で説明する。

また、冷却材による流体力、水平方向加速度（10G）、鉛直方向加速度（2G）においても、浮き上がりの影響はない（燃料支持金具から外れない）ことが過去の解析評価により確認されている^[1]。

上記に加え，制御棒挿入時の突き上げや燃料集合体と上部炉心格子板との摩擦を考慮した場合においてもほぼ同様の結果となることが別の試験及び解析で確認されている^[2]。



第 4-1 図 燃料被覆管閉じ込め機能評価フロー



※下部端栓の材料は燃料被覆管と同じジルコニウム合金（ジルカローイ-2）を使用。溶加材を用いずに付き合い溶接により燃料被覆管と溶接しており、異種の溶接金属は使用していない。

第 4-2 図 評価対象部位（イメージ）

5. 追加要求事項を踏まえた燃料被覆管応力評価条件

「実用発電用原子炉の燃料体に対する地震の影響の考慮について（平成 29 年 2 月 15 日，原子力規制庁）」を踏まえた燃料被覆管の応力評価条件を第 5-1 表に示す。

評価対象燃料は，発電用原子炉設置変更許可済の 9 × 9 燃料（A 型），9 × 9 燃料（B 型）とする。

第 5-1 表 燃料被覆管の応力評価条件

要求機能	考慮する応力と地震動※	許容応力
燃料被覆管の閉じ込め機能	一次応力（ S_d を考慮）	降伏応力 （ S_y ）
	+ 二次応力（ S_d を考慮）	
	一次応力（ S_s を考慮）	引張強さ （ S_u ）
	+ 二次応力（ S_s を考慮）	

※：評価に当たって考慮する地震動を（ ）内に示す。燃料被覆管応力評価の許容応力については，上記表のとおりであるが，基準地震動 S_s により生じる燃料被覆管応力は弾性設計用地震動 S_d により生じる応力を包含するため，本評価においては基準地震動 S_s により発生する応力を加えた上で，降伏応力 S_y 以下となることを確認することにより，弾性設計用地震動 S_d に対する要求も満足することを示す。

6. 評価手法

6.1 応力評価手法^[3]

燃料被覆管応力評価は，燃料被覆管のスペーサ間，スペーサ部及び下部端栓溶接部の各位置において，せん断歪エネルギー説（von

Mises 理論) に基づき燃料被覆管の相当応力を求め応力設計比^{*}を評価することにより行う。応力計算は、燃料被覆管に発生する全ての応力を三軸方向(半径方向、円周方向及び軸方向)について解析し、それらより相当応力を評価する。燃料被覆管の応力評価に考慮する応力を添付資料 1 に示す。

スペーサ間及びスペーサ部における応力評価では、燃料被覆管に発生する各応力についての厚肉円筒式を用いた弾性解析により、厚肉円筒式の入力変数の統計的分布に基づくモンテカルロ法(添付資料 7 参照)による統計評価を行う。このため、応力設計比は、燃料被覆管温度、燃料棒内圧、炉心条件、燃料棒寸法、許容応力等の統計的入力変数の関数となる。入力変数の統計的分布は、製造実績、実機運転データ等を考慮して設定した値を用いる。モンテカルロ法による評価では、1 回の試行ごとに乱数が用いられ、統計的分布に従い設定された入力条件から 1 つの応力設計比が得られる。この試行を繰り返すことにより応力設計比の 95% 確率上限値を求める。応力設計比の 95% 確率上限値が 1 以下であることで燃料の健全性を確認する。

下部端栓溶接部における応力評価については、形式が複雑であることから、有限要素法による決定論的評価を実施し、一次応力+二次応力と許容応力を比較して応力設計比が 1 以下であることを確認している。なお、既許認可における下部端栓溶接部の応力評価では簡便な扱いとしてピーク応力を含んだ値を用いていたが、今回の申請ではピーク応力を含まない一次応力+二次応力にて応力評価を行う(添付資料 2 参照)。入力変数については、保守的な条件(変数の 95% 確率上下限值)を使用している。

※：応力設計比＝発生応力（通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時にかかる応力＋地震時にかかる応力（地震を考慮する場合））
 ／許容応力

6.2 疲労評価手法

燃料の疲労限界に対する設計基準は、累積損傷の法則（Miner の仮説）及び Langer-0' Donnell の考え方に基づく。具体的には 9 × 9 燃料（A 型）及び 9 × 9 燃料（B 型）について、炉内滞在期間 8 年を仮定した温度、圧力及び出力の予測サイクル*による疲労に加え、地震動による繰り返し荷重を考慮し、累積疲労係数が 1.0 未満であることを確認する。疲労評価においては、一次応力と二次応力に加えてピーク応力を考慮する。また、地震荷重の繰り返し回数は、基準地震動に対する原子炉建屋－炉内構造物系連成の地震応答解析により算出された等価繰り返し回数を踏まえ、160 回として影響を確認する。なお、詳細評価は工事計画認可申請にて行う。

※：予測サイクルを以下に示す。（発電用原子炉設置（変更）許可申請書添付書類八より）

サイクル条件	予測サイクル
室温から 100%出力	～4／年
高温待機状態から 100%出力	～12／年
50%出力から 100%出力	～60／年
75%出力から 100%出力	～250／年
100%出力から 120%出力	～0.5／年

7. 評価結果

燃料被覆管応力評価結果を添付資料 3 に示す。通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に発生する応力に加えて地震による応力を考慮した場合でも、応力設計比は最大で 0.70 (9×9 燃料 (A 型)) 及び 0.71 (9×9 燃料 (B 型)) であり、1.0 より小さいことを確認した。

燃料被覆管疲労評価結果を添付資料 4 に示す。基準地震動 S_s による地震力が繰り返された場合の応力振幅と繰り返し回数、ジルカロイの設計疲労曲線を用いて評価された疲労係数の増分は 0.00016 (9×9 燃料 (A 型)) 及び 9×9 燃料 (B 型)) となった。よって、全寿命を通じた累積疲労係数 (約 0.003^[4] (9×9 燃料 (A 型)) 及び約 0.006^[5] (9×9 燃料 (B 型))) に、地震動による疲労係数の増分を加えても累積疲労係数は 1.0 より十分小さいことを確認した。

8. まとめ

地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る設計方針を示すとともに、基準に適合する見通しであることを確認した。なお、詳細評価については工事計画認可申請で説明する。

参考文献

- [1] 平成 17 年度原子炉施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査機器耐力 その 2 (BWR 制御棒挿入性) に係る報告書 (平成 18 年 9 月, 原子力安全基盤機構)
- [2] 浜岡原子力発電所 3, 4 号機「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改定に伴う耐震安全性評価に関わる報告のうち耐震設計上重要な機器・配管系の耐震安全性評価 (補足説明資料) (平成 19 年 10 月 23 日, 中部電力株式会社)
- [3] 発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について (昭和 63 年 5 月 12 日, 原子力安全委員会了承)
- [4] 東海第二発電所「燃料体設計認可申請書」(GNF 燃設認第 36 号, 平成 21 年 11 月 5 日認可)
- [5] 東海第二発電所「燃料体設計認可申請書」(20 原燃東第 794 号, 平成 20 年 9 月 12 日認可)

燃料被覆管の応力評価に考慮する応力について

各評価部位において考慮する応力を添付 1-1 表に, 評価対象部位 (ス
ペーサ間, スペーサ部及び下部端栓溶接部) を添付 1-1 図に示す。ま
た, 燃料集合体の構造図 (9×9 燃料 (A 型)) を添付 1-2 図に, 燃料
集合体の構造図 (9×9 燃料 (B 型)) を添付 1-3 図に示す。9×9 燃
料 (A 型) には 2 本の太径のウォータ・ロッドがあるが, 9×9 燃料
(B 型) では 1 本の角管のウォータ・チャンネルであり, また, 9×9
燃料 (A 型) のみに部分長燃料棒が存在するといった違いがある。

添付 1-1 表 各評価部位において考慮する応力

考慮する応力	スペーサ間	スペーサ部	下部端栓 溶接部
(1) 内外圧差に基づく応力	○	○	○
(2) 水力振動に基づく応力	○	○※ ¹	—
(3) 楕円度に基づく応力	○	○	—
(4) スペーサの接触力に基づく応力	—	○	—
(5) 半径方向温度差に基づく応力	○	○	○
(6) 円周方向温度差に基づく応力	○	○	○※ ¹
(7) 膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力	○	○	○※ ¹
(8) ウォータ・チャンネルと燃料被覆管の熱膨張差による応力	○※ ²	○※ ²	—
(9) 端栓取付角公差による曲がりに基づく応力	—	—	○※ ¹
(10) スペーサ間の水平地震力による燃料被覆管のたわみに基づく応力※ ³	○	○	○
(11) チャンネル・ボックスの水平地震動によるたわみに基づく応力※ ³	○	○	○
(12) 鉛直方向地震加速度に基づく応力※ ³	○	○	○

※¹ : 9 × 9 燃料 (A 型) の場合に考慮

※² : 9 × 9 燃料 (B 型) の場合に考慮

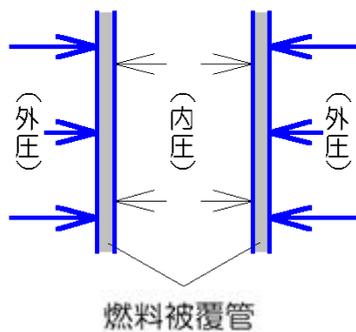
※³ : 地震動を考慮する場合に新たに加わる応力

[解説]

運転中（通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時）に発生する応力

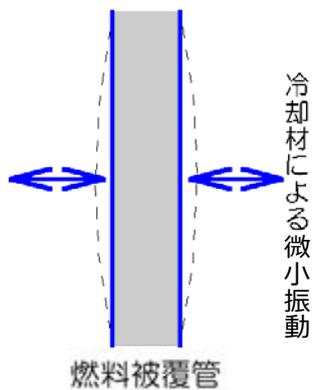
(1) 内外圧差に基づく応力

燃料被覆管内部ガス圧力と冷却材圧力の差圧により発生する応力。



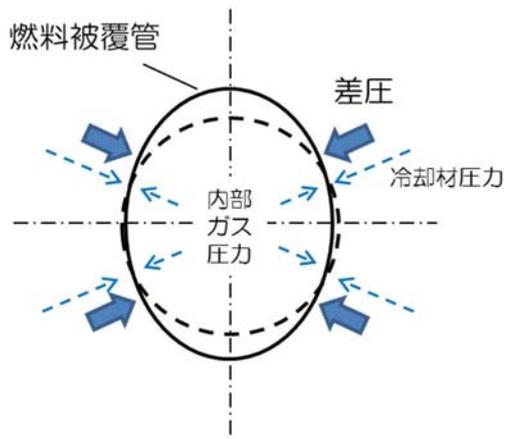
(2) 水力振動に基づく応力

冷却材の流れによって生じる燃料被覆管の微小振動に基づき発生する応力。



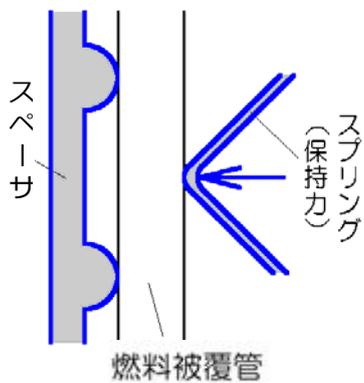
(3) 楕円度に基づく応力

燃料被覆管製造時に生じる真円からの僅かな歪みにより，燃料被覆管内部ガス圧力と冷却材圧力の差圧により発生する応力。



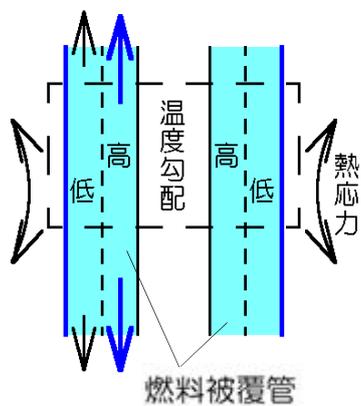
(4) スペーサの接触力に基づく応力

スペーサのばね押圧により、スペーサ部に発生する応力。



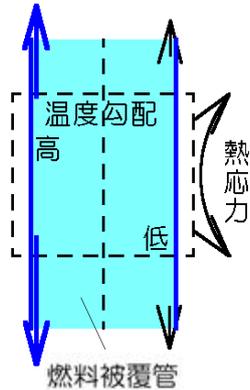
(5) 半径方向温度差に基づく応力

燃料被覆管内外面の温度差に基づく熱膨張差が拘束されることにより発生する応力。



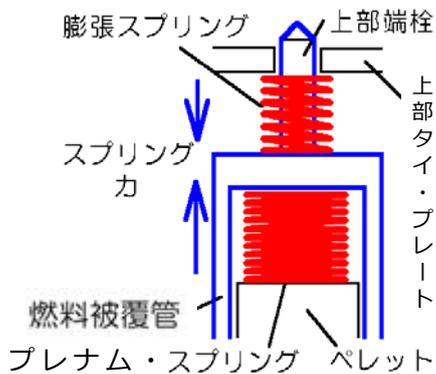
(6) 円周方向温度差に基づく応力

燃料被覆管の円周方向温度分布の不均一による燃料被覆管の湾曲がスペーサにより拘束されることで発生する応力（9×9燃料（B型）の熱湾曲矯正による応力も同様の応力）。



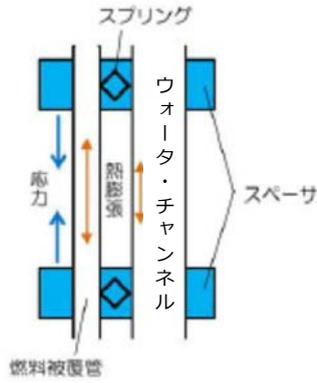
(7) 膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力

膨張スプリング及びプレナム・スプリング（内部スプリング）による発生する応力（9×9燃料（A型）については、燃料自重による応力も含む）。



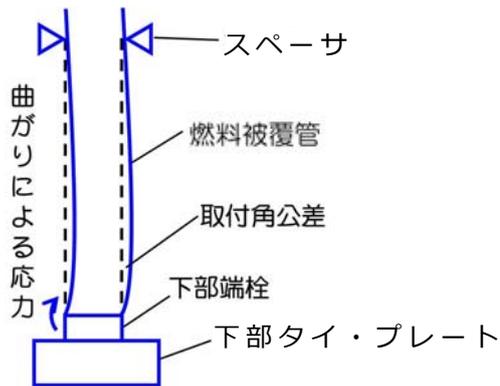
(8) ウォータ・チャンネルと燃料被覆管の熱膨張差による応力

ウォータ・チャンネルと燃料被覆管の熱膨張差により燃料被覆管の伸びが拘束されることにより発生する応力（9×9燃料（B型））。



(9) 端栓取付角公差による曲がりに基づく応力

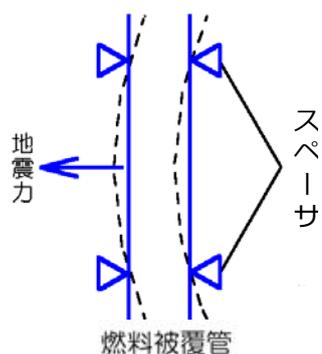
下部端栓の取付角の公差により，下部端栓とスペーサとの間で燃料被覆管に曲げが生じることにより発生する応力（9×9燃料（A型））。



地震時に付加される応力

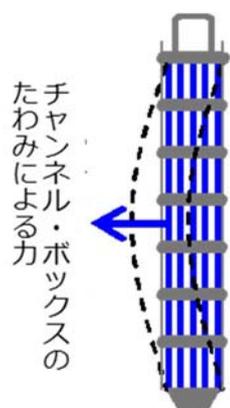
(10) スペーサ間の水平地震力による燃料被覆管のたわみに基づく応力

水平地震荷重により，スペーサを支持点として燃料被覆管がたわむことにより発生する応力。



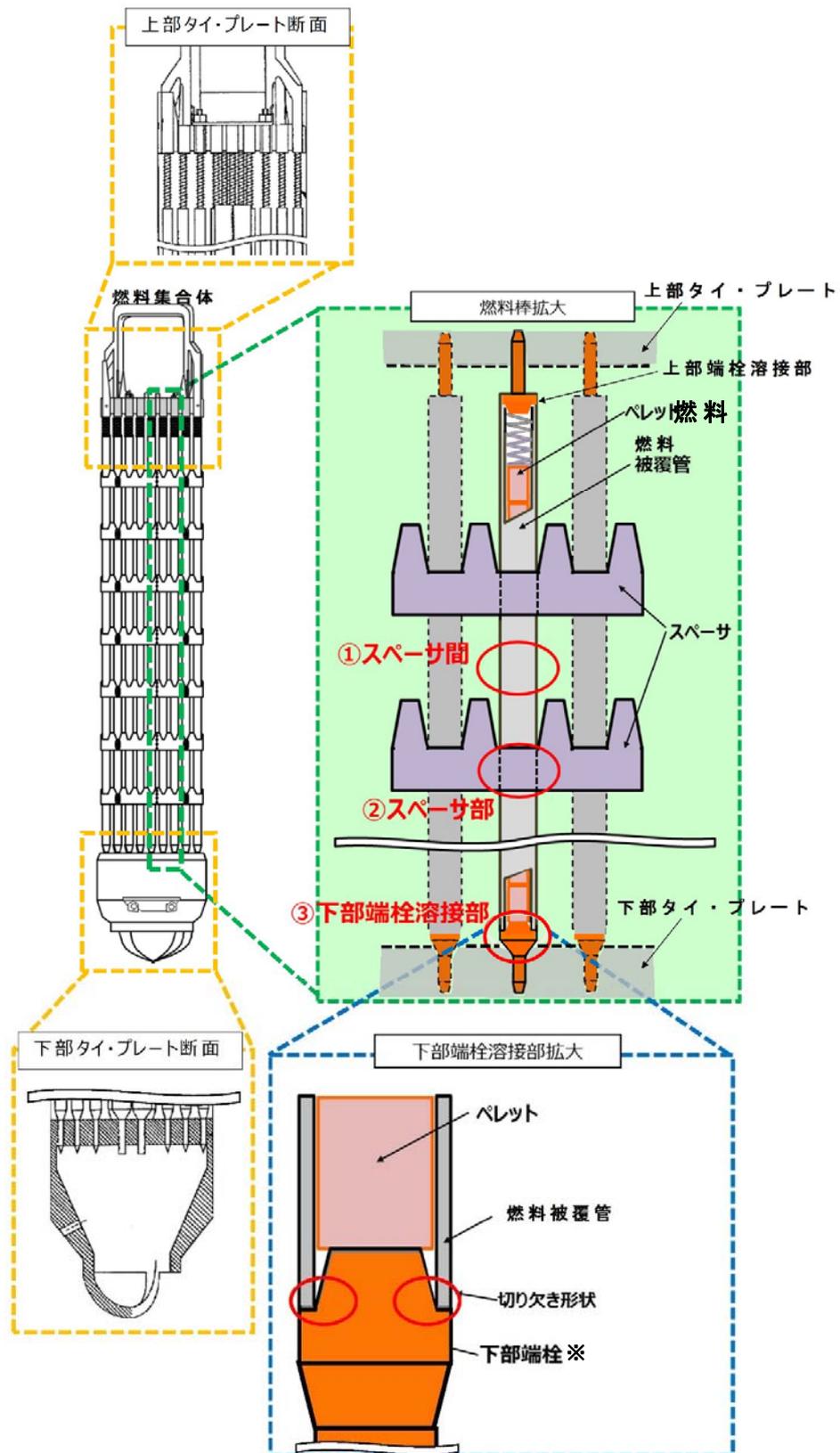
(11) チャンネル・ボックスの水平地震力によるたわみに基づく応力

水平地震荷重によるチャンネル・ボックスのたわみに従って、燃料被覆管がたわむことにより発生する応力。



(12) 鉛直方向地震加速度に基づく応力

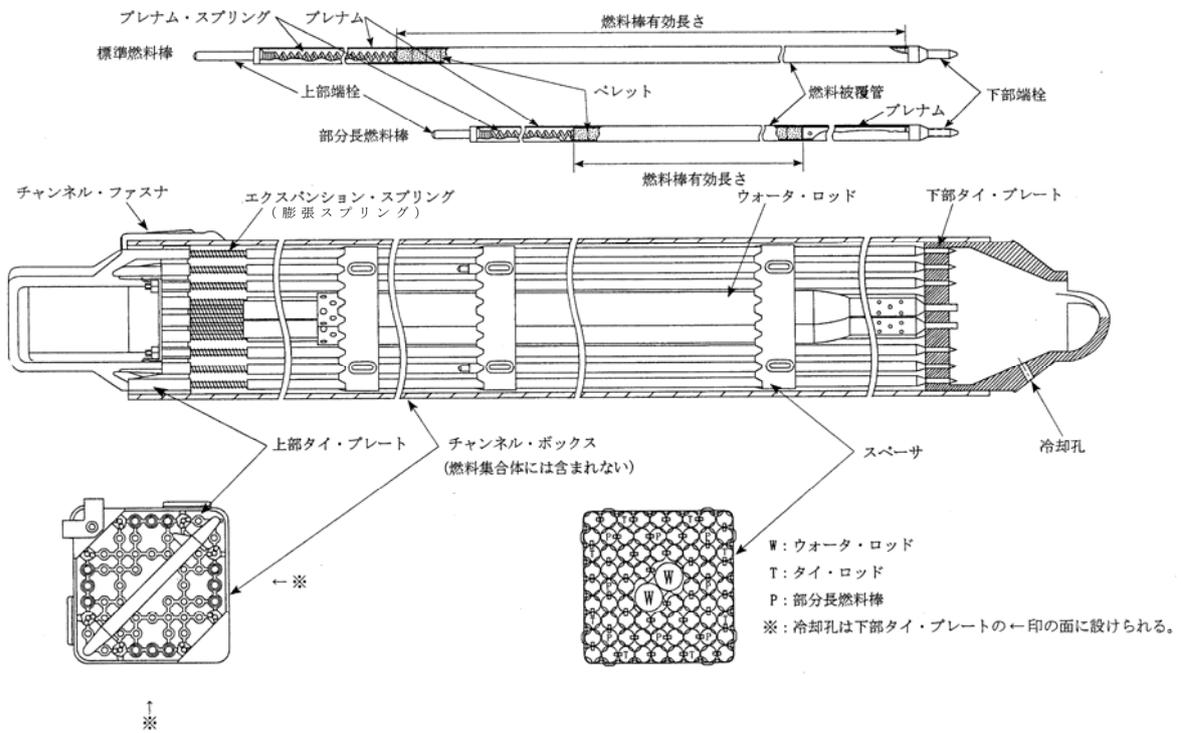
鉛直方向地震加速度により、燃料被覆管に見掛けの質量が軸方向に付加されることにより発生する応力。なお、 9×9 燃料（B型）では「(10)スペーサ間の水平地震力による燃料被覆管のたわみに基づく応力」に加味する形で考慮している。



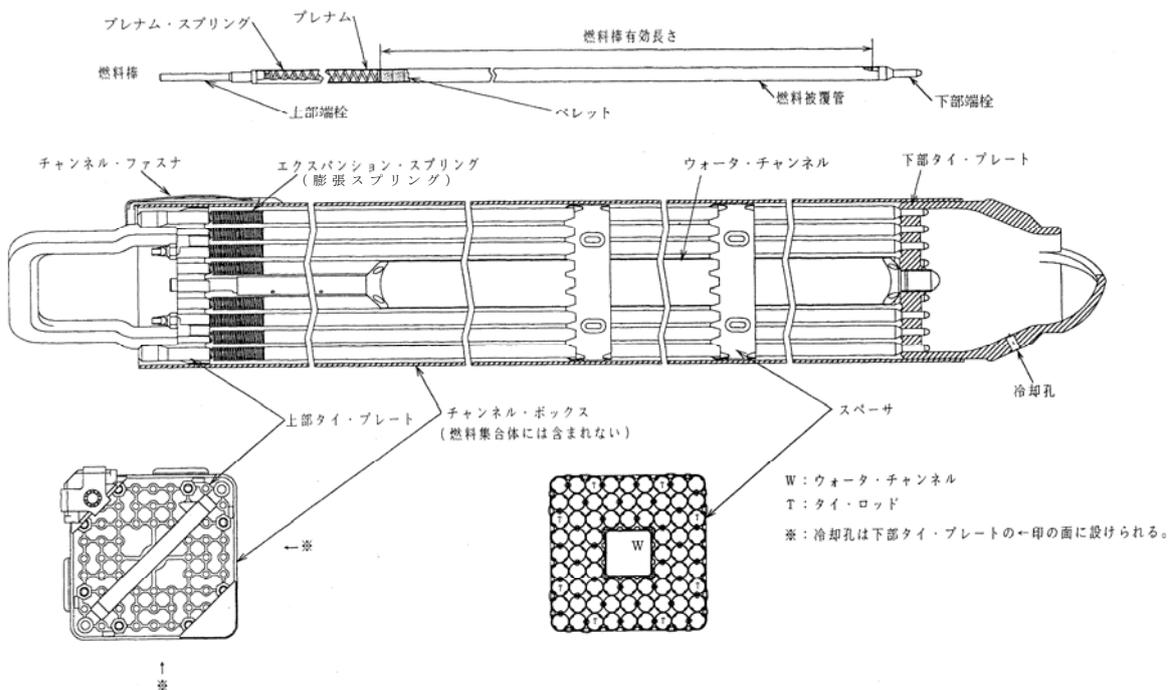
※下部端栓の材料は燃料被覆管と同じジルコニウム合金（ジルカロイ-2）を使用。溶加材を用いずに付き合い溶接により燃料被覆管と溶接しており、異種の溶接金属は使用していない。

添付 1-1 図 評価対象部位（イメージ）【第 4-2 図再掲】

添付 1-8



添付1-2図 燃料集合体の構造図 (9×9燃料 (A型))



添付1-3図 燃料集合体の構造図 (9×9燃料 (B型))

添付1-9

下部端栓溶接部における応力の取扱いについて

下部端栓溶接部は、切り欠き形状を含む複雑な形状（添付 2-1 図参照）であるため有限要素法（以下「FEM」という。）を用いた解析により発生応力を求めており、得られる評価（解析）結果には（一次応力＋二次応力＋ピーク応力）の全応力成分が含まれる（添付 2-2 図参照）。ピーク応力は、荷重の繰り返しがなければ直ちに破損につながることはなく^[1]、J E A G 4601・補-1984^[2]においてもピーク応力は疲労評価が対象とされている（添付 2-1 表参照）。よって、等価線形処理により FEM 解析結果から一次応力＋二次応力を求め、応力設計比の計算を行う。

等価線形処理は FEM 解析で得られた応力分布を膜応力、曲げ応力の等価直線成分及び曲げ応力の非直線成分に数値処理により分離する手法であり、圧力容器などのプラント機器の応力解析に適用されている。膜応力は肉厚方向に分布する応力の平均値に等しい応力成分、曲げ応力の等価直線成分は肉厚方向に分布する応力による正味の曲げモーメントと等しいモーメントによって生じる応力成分であり、これらが一次応力＋二次応力に相当する。これらと元の応力成分との差である曲げ応力の非線形成分がピーク応力に相当する。

応力の考え方の模式図^[3]を添付 2-3 図に示す。応力が最も厳しい条件となるのはピーク応力の方向と正味の曲げモーメントの方向が一致するケースであり、下部端栓溶接部の応力解析では燃料被覆管内面位置が該当する。よって、応力設計比の評価には燃料被覆管内面位置での応力を用いる。

参考文献

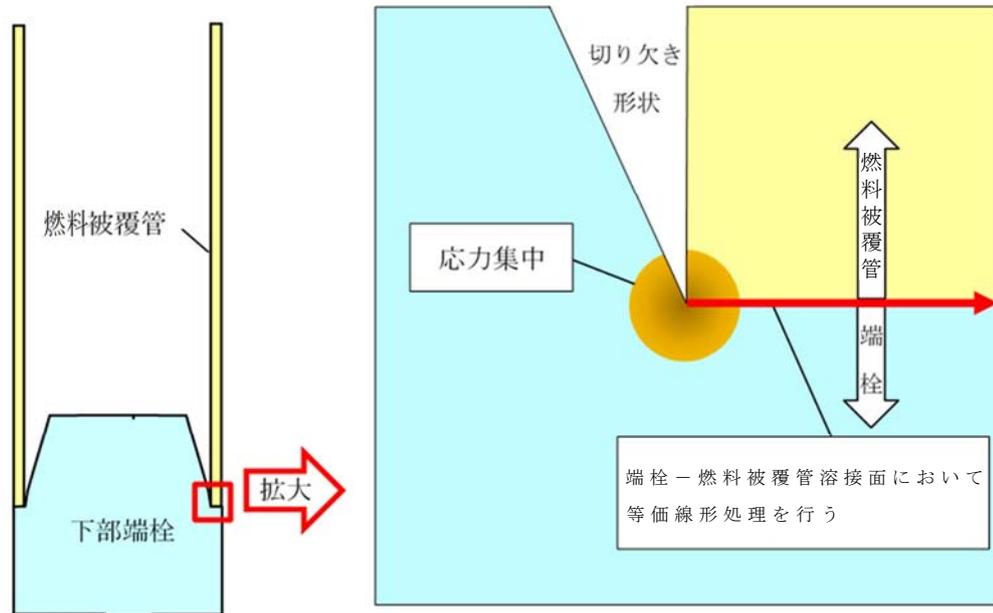
- [1] 「構造解析のための有限要素法実践ハンドブック」, 森北出版, 第1版第6刷, 2012年
- [2] J E A G 4601・補-1984「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編」, (社) 日本電気協会
- [3] J S M E S N C 1-2005/2007「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005年版 (2007年追補版含む))」 <第1編軽水炉規格>, 2007年9月, 日本機械学会

添付2-1表 第1種容器の許容応力（J E A G 4601・補-1984^[2]から抜粋）

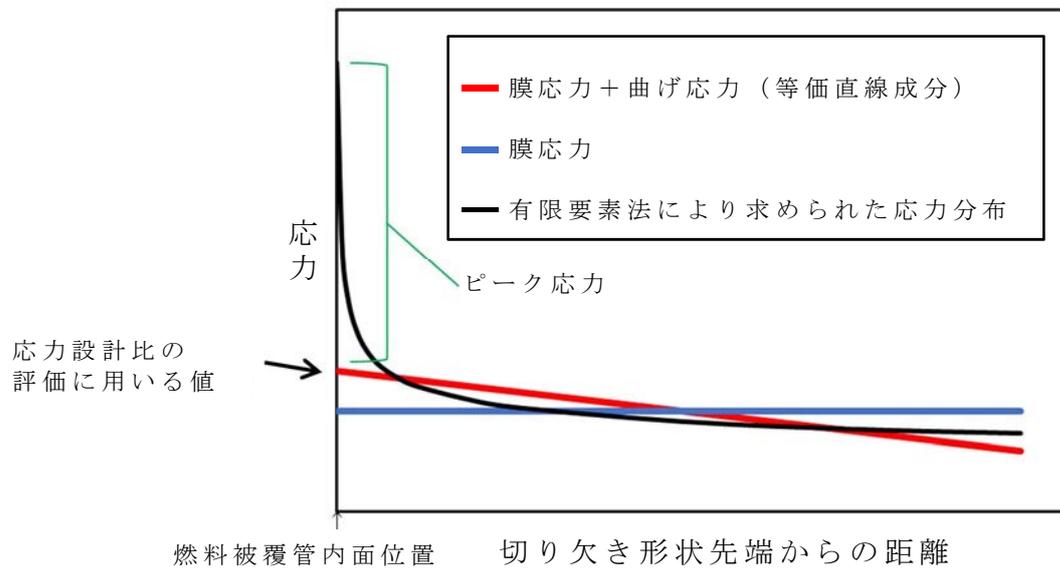
2.1.1 第1種容器の許容応力

第1種容器の許容応力を次に示す。

応力分類 許容 応力状態	1次一般膜応力	1次膜応力+ 1次曲げ応力	1次+2次応力	1次+2次+ ピーク応力	特別な応力限界	
					純せん断 応力	支圧応力
設計条件	S_m	$1.5 S_m$	—	—	—	—
I _A	—	—	(1) $3 S_m$	(2) 運転状態 I 及び II における荷重 の組合せについ て疲れ解析を行 い疲れ累積係数 が1.0 以下であ ること。	(7) $0.6 S_m$	(8)(9) S_y ($1.5 S_y$)
II _A	—	—			(7) $0.6 S_m$	(8)(9) S_y ($1.5 S_y$)
III _A	S_y と $2/3 S_u$ の 小さい方。ただ しオーステナイト 系ステンレス鋼 及び高ニッケル 合金については $1.2 S_m$ とする。	左欄の1.5 倍の値	—	—	(7) $0.6 S_m$	(8)(9) S_y ($1.5 S_y$)
IV _A	$2/3 S_u$ 。ただし オーステナイト 系ステンレス鋼 及び高ニッケル 合金については $2/3 S_u$ と $2.4 S_m$ の小さい方。	左欄の1.5 倍の値	—	—	—	—
III _{A S}	S_y と $2/3 S_u$ の 小さい方。ただ しオーステナイト 系ステンレス 鋼及び高ニッケ ル合金について は $1.2 S_m$ とする。	左欄の1.5 倍の値 ⁽³⁾	(4) $3 S_m$ 〔 S_1 又は S_2 地震動のみ による応力 振幅につい て評価する。〕	(5)(6) S_1 又は S_2 地震 動のみによる疲 れ解析を行い疲 れ累積係数を求 め、運転状態 I, II における疲れ 累積係数との和 が1.0 以下であ ること。	$0.6 S_m$	(9) S_y ($1.5 S_y$)
IV _{A S}	$2/3 S_u$ 。ただし オーステナイト 系ステンレス鋼 及び高ニッケル 合金については $2/3 S_u$ と $2.4 S_m$ の小さい方。	左欄の1.5 倍の値			(9) $0.4 S_u$	(9) S_u ($1.5 S_u$)



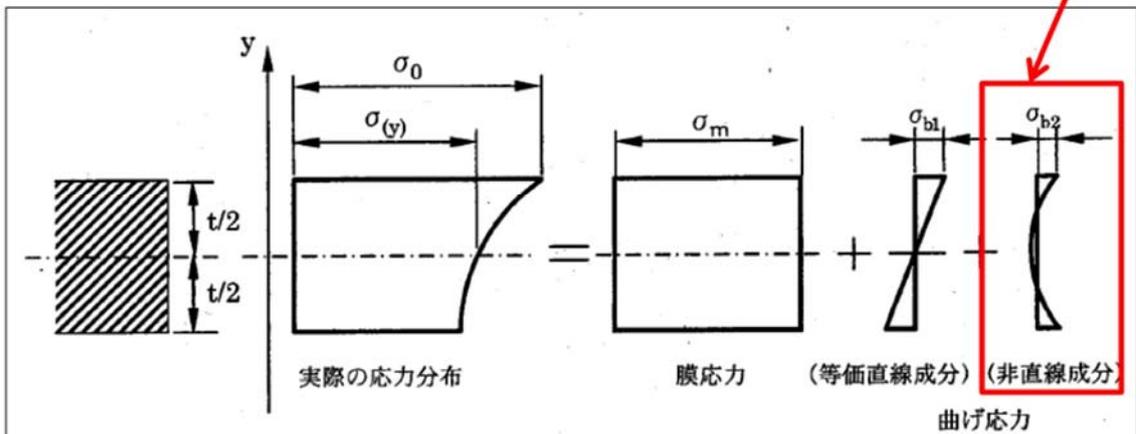
添付2-1図 下部端栓溶接部の有限要素法による応力解析体系（模式図）



添付2-2図 応力分布と等価線形処理結果の模式図

添付 2-4

ピーク応力に相当



解説図 GNR-2130-1 膜応力と曲げ応力の考え方

解説図 GNR-2130-1 において、

膜応力(σ_m)

$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_{-t/2}^{t/2} \sigma(y) dy \quad (\text{解説 GNR-1.1})$$

曲げ応力の等価直線成分(σ_{b1})

$$\sigma_{b1} = \frac{6}{t^2} \int_{-t/2}^{t/2} y \sigma(y) dy \quad (\text{解説 GNR-1.2})$$

曲げ応力の非直線成分(σ_{b2})

$$\sigma_{b2} = \sigma_0 - \sigma_m - \sigma_{b1} \quad (\text{解説 GNR-1.3})$$

添付2-3図 応力の考え方の模式図 (J S M E S NC1-2005/2007^[3]から抜粋)

地震による応力を考慮した燃料被覆管応力評価
 (閉じ込め機能の維持) について

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に燃料被覆管に発生する
 応力に加え地震による応力を考慮した燃料被覆管の応力評価結果を以
 下に示す。

1. 9×9燃料(A型)の評価結果(添付3-1表)

(1) 評価部位：スペーサ間，スペーサ部，下部端栓溶接部

(2) 解析コード：

<スペーサ間，スペーサ部>

弾性解析コード F U R S T Ver. 5^{*1} (設置許可，設計認可と同じ)

<下部端栓溶接部>

有限要素法解析コード A N S Y S Ver. 14^{*2} (添付資料8参照)

(3) 評価点：燃料寿命初期，中期，末期

(4) 運転状態：出力過渡(120%出力(出力運転中の制御棒の異常な引
 き抜き))又は圧力過渡(冷却材圧力 \square MPa[abs](負
 荷の喪失))

ただし，下部端栓溶接部の評価では，下部端栓部の燃料
 棒の出力は低く，出力過渡時に発生する応力は圧力過
 渡時の応力より小さいため，圧力過渡時を評価対象と
 する。

(5) 考慮する応力：評価部位については添付1-1表参照。

①内外圧差に基づく応力(一次応力)

添付3-1

\square は，営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

- ②水力振動に基づく応力（一次応力）
- ③楕円度に基づく応力（一次応力）
- ④スペーサの接触圧に基づく応力（二次応力）
- ⑤半径方向温度差に基づく応力（二次応力）
- ⑥円周方向温度差に基づく応力（二次応力）
- ⑦膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力（一次応力）
- ⑧端栓取付角公差による曲がりに基づく応力（二次応力）

地震動を考慮する場合は下記応力を追加する。ここで燃料集合体の加速度（水平方向）は燃料集合体軸方向で分布を持つが、スペーサ間及びスペーサ部については最大値を固定値として入力する。

- ⑨スペーサ間の水平地震力による燃料被覆管のたわみに基づく応力（一次応力）
- ⑩チャンネル・ボックスの水平地震力によるたわみに基づく応力（二次応力）
- ⑪鉛直地震加速度に基づく応力（一次応力）

(6) 許容応力： 添付資料 5 参照。

基準地震動において、一次応力＋二次応力に対して降伏応力
 基準地震動において、一次応力＋二次応力に対して引張強さ
 ここで、基準地震動により生じる燃料被覆管応力は弾性設計用地震動により生じる応力を包含するため、基準地震動により発生する応力を加えた場合でも降伏応力以下となることを確認することにより、弾性設計用地震動に対する要求も満足することを示す。

(7) 入力値：

<スペーサ間， スペーサ部>

水平加速度 2.02G（ S_s 応答加速度）

添付 3-2

鉛直加速度 1.24G (同上)

燃料集合体相対変位 16.8mm (S_s応答変位)

<下部端栓溶接部>

水平加速度 1.43G (S_s応答加速度)

鉛直加速度 1.24G (同上)

燃料集合体相対変位 16.8mm (S_s応答変位)

ここで、燃料集合体に作用する水平地震加速度及び鉛直地震加速度、燃料集合体の相対変位として、基本ケースの最大応答加速度に対し、材料特性の不確かさ等を考慮した値を用いる。

※1：地震時に燃料被覆管に発生する応力は、燃料被覆管を梁モデルに置換し、水平方向の加速度による燃料被覆管のたわみに基づく応力の計算式、チャンネル・ボックスのたわみにより強制変位を受けた際の応力計算式及び燃料被覆管に鉛直方向地震力が加わった場合に燃料被覆管断面にかかる圧縮及び引張応力の計算式で計算する。これは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に発生する応力の計算式を材料力学に基づいて設定していることと同様であり、応力計算方法は同じである。

FURSTはこれらを組み合わせて計算することが可能である。

※2：下部端栓溶接部の切り欠き形状の先端近傍では応力集中が生じるがピーク応力は荷重の繰り返しがなければ直ちに破損につながることはないため、一次応力＋二次応力を評価している。

添付 3-1 表 燃料被覆管応力の評価結果（9×9燃料（A型））

地震動 と許容 応力	運転 条件	評価点	スペーサ間 (応力設計比)	スペーサ部 (応力設計比)	下部端栓 溶接部 (応力設計比)
			一次応力+ 二次応力	一次応力+ 二次応力	一次応力+ 二次応力
基準地 震動 S_s に対し て降伏 応力 S_y	圧力 過渡	寿命初期	<u>0.70</u>	0.54	0.63
		寿命中期	0.26	0.24	0.30
		寿命末期	0.22	0.21	0.23
	出力 過渡	寿命初期	0.65	0.45	—
		寿命中期	0.27	0.25	—
		寿命末期	0.22	0.21	—
基準地 震動 S_s に対し て引張 強さ S_u	圧力 過渡	寿命初期	0.39	0.29	0.34
		寿命中期	0.24	0.22	0.27
		寿命末期	0.20	0.19	0.22
	出力 過渡	寿命初期	0.38	0.25	—
		寿命中期	0.24	0.23	—
		寿命末期	0.19	0.18	—

2. 9×9燃料（B型）の評価結果（添付 3-2 表）

(1) 評価部位：スペーサ間，スペーサ部，下部端栓溶接部

(2) 解析コード：

<スペーサ間，スペーサ部>

弾性解析コード B S P A N 2 Ver. 2.2^{*1}（設置許可，設計認可と

同じ)

< 下部端栓溶接部 >

有限要素法解析コード ANSYS Ver.13^{※2}

(3) 評価点：燃料寿命初期，中期，末期

(4) 運転状態：出力過渡（120%出力（出力運転中の制御棒の異常な引き抜き）又は圧力過渡（冷却材圧力 \square MPa[abs]（負荷の喪失））

ただし，下部端栓溶接部の評価では，下部端栓部の燃料棒の出力は低く，出力過渡時に発生する応力は圧力過渡時の応力より小さいため，圧力過渡時を評価対象とする。

(5) 考慮する応力：評価部位については添付 1-1 表参照。

- ①冷却材による外圧及び燃料被覆管内圧によって生じる応力（一次応力）
- ②燃料被覆管橢円度による曲げ応力（一次応力）
- ③水力振動による応力（一次応力）
- ④スペーサでの保持力による応力（二次応力）
- ⑤燃料被覆管の径方向温度勾配による応力（二次応力）
- ⑥燃料被覆管の周方向温度勾配による応力（二次応力）
- ⑦熱湾曲矯正による応力（二次応力）
- ⑧ウォータ・チャンネルと燃料被覆管の熱膨張差による応力（二次応力）
- ⑨膨張スプリング及び内部スプリングによる応力（二次応力）

地震動を考慮する場合は下記応力を追加する。ここで燃料集合体の加速度（水平方向）は燃料集合体軸方向で分布を持つが，スペーサ間及
添付 3-5

\square は，営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

びスペーサ部については最大値を固定値として入力する。

⑩ スペーサ間の水平地震力によるたわみに基づく応力（一次応力）

⑪ チャンネル・ボックスの水平地震力によるたわみに基づく応力（二次応力）

鉛直方向の地震加速度は燃料要素単位長質量に加速度を考慮することで見掛けの質量増加として扱い、⑩に加味することで計算する。なお、水平方向の地震加速度がおおよそ G を超える範囲において、地震時鉛直軸方向加速度を直接軸方向応力として作用させる手法に対して本手法が保守的な評価となることを確認している（添付資料 6 参照）。

(6) 許容応力：添付資料 5 参照。

基準地震動において、一次応力＋二次応力に対して降伏応力

基準地震動において、一次応力＋二次応力に対して引張強さ

ここで、基準地震動により生じる燃料被覆管応力は弾性設計用地震動により生じる応力を包含するため、基準地震動により発生する応力を加えた場合でも降伏応力以下となることを確認することにより、弾性設計用地震動に対する要求も満足することを示す。

(7) 入力値：

< スペーサ間， スペーサ部 >

水平加速度 2.02G（ S_s 応答加速度）

鉛直加速度 1.24G（同上）

燃料集合体相対変位 16.8mm（ S_s 応答変位）

< 下部端栓溶接部 >

水平加速度 1.43G（ S_s 応答加速度）

鉛直加速度 1.24G（同上）

燃料集合体相対変位 16.8mm（ S_s 応答変位）

添付 3-6

は、営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

ここで、燃料集合体に作用する水平地震加速度及び鉛直地震加速度、燃料集合体の相対変位として、基本ケースの最大応答加速度に対し、材料特性の不確かさ等を考慮した値を用いる。

※ 1 : 地震時に燃料被覆管に発生する応力は、燃料被覆管を梁モデルに置換し、水平方向の加速度による燃料被覆管のたわみに基づく応力の計算式、チャンネル・ボックスのたわみにより強制変位を受けた際の応力計算式及び燃料被覆管に鉛直方向地震力が加わった場合に燃料被覆管断面にかかる圧縮及び引張応力の計算式で計算する。これは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に発生する応力の計算式を材料力学に基づいて設定していることと同様であり、応力計算方法は同じである。

B S P A N 2 はこれらを組み合わせて計算することが可能である。

※ 2 : 下部端栓溶接部の切り欠き形状の先端近傍では応力集中が生じるがピーク応力は荷重の繰り返しがなければ直ちに破損につながることはないため、一次応力＋二次応力を評価している。

添付 3-2 表 燃料被覆管応力の評価結果（9×9燃料（B型））

地震動 と許容 応力	運転 条件	評価点	スペーサ間 (応力設計比)	スペーサ部 (応力設計比)	下部端栓 溶接部 (応力設計比)
			一次応力+ 二次応力	一次応力+ 二次応力	一次応力+ 二次応力
基準地 震動 S_s に対し て降伏 応力 S_y	圧力 過渡	寿命初期	0.66	<u>0.71</u>	0.62
		寿命中期	0.32	0.28	0.49
		寿命末期	0.26	0.25	0.47
	出力 過渡	寿命初期	0.63	0.66	—
		寿命中期	0.34	0.29	—
		寿命末期	0.25	0.23	—
基準地 震動 S_s に対し て引張 強さ S_u	圧力 過渡	寿命初期	0.38	0.41	0.34
		寿命中期	0.28	0.24	0.31
		寿命末期	0.23	0.22	0.30
	出力 過渡	寿命初期	0.38	0.38	—
		寿命中期	0.29	0.24	—
		寿命末期	0.22	0.21	—

地震による繰り返し荷重を考慮した燃料被覆管疲労評価

(閉じ込め機能の維持) について

地震による振動サイクルを考慮した燃料被覆管疲労評価結果を以下に示す。評価部位は、切り欠き形状を有し応力集中が発生する下部端栓溶接部とする。

1. 9×9燃料 (A型) の評価結果 (添付 4-1 表)

- (1) 評価部位：下部端栓溶接部
- (2) 解析コード：有限要素法解析コード ANSYS Ver.14
- (3) 評価点：燃料寿命初期，中期，末期
- (4) 運転状態：評価上厳しい条件として圧力過渡 (冷却材圧力 MPa[abs])
- (5) 地震荷重の繰り返し回数：160 回^[1]
- (6) 許容サイクル数：最大応力振幅からジルカロイ設計疲労曲線 (添付 4-1 図参照) に基づき設定
- (7) 入力値：
 - 水平加速度 1.43G (S_s 応答加速度)
 - 鉛直加速度 1.24G (同上)
 - 燃料集合体相対変位 16.8mm (S_s 応答変位)

添付 4-1

は、営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

添付 4-1 表 地震による振動サイクルに伴う累積疲労係数

(9 × 9 燃料 (A 型))

地震動	評価点	応力振幅 (N/mm ²)	許容 サイクル数	地震荷重の 繰り返し回数	疲労係数 の増分
基準	寿命初期	38	1.0 × 10 ⁶	160	0.00016
地震動	寿命中期	38	1.0 × 10 ⁶	160	0.00016
S _s	寿命末期	38	1.0 × 10 ⁶	160	0.00016

2. 9 × 9 燃料 (B 型) の評価結果 (添付 4-2 表)

- (1) 評価部位：下部端栓溶接部
- (2) 解析コード：有限要素法解析コード ANSYS Ver.13
- (3) 評価点：燃料寿命初期，中期，末期
- (4) 運転状態：評価上厳しい条件として圧力過渡（冷却材圧力
MPa[abs]）
- (5) 地震荷重の繰り返し回数：160 回^[1]
- (6) 許容サイクル数：最大応力振幅からジルカロイ設計疲労曲線（添
 付 4-1 図参照）に基づき設定
- (7) 入力値：
 - 水平加速度 1.43G (S_s 応答加速度)
 - 鉛直加速度 1.24G (同上)
 - 燃料集合体相対変位 16.8mm (S_s 応答変位)

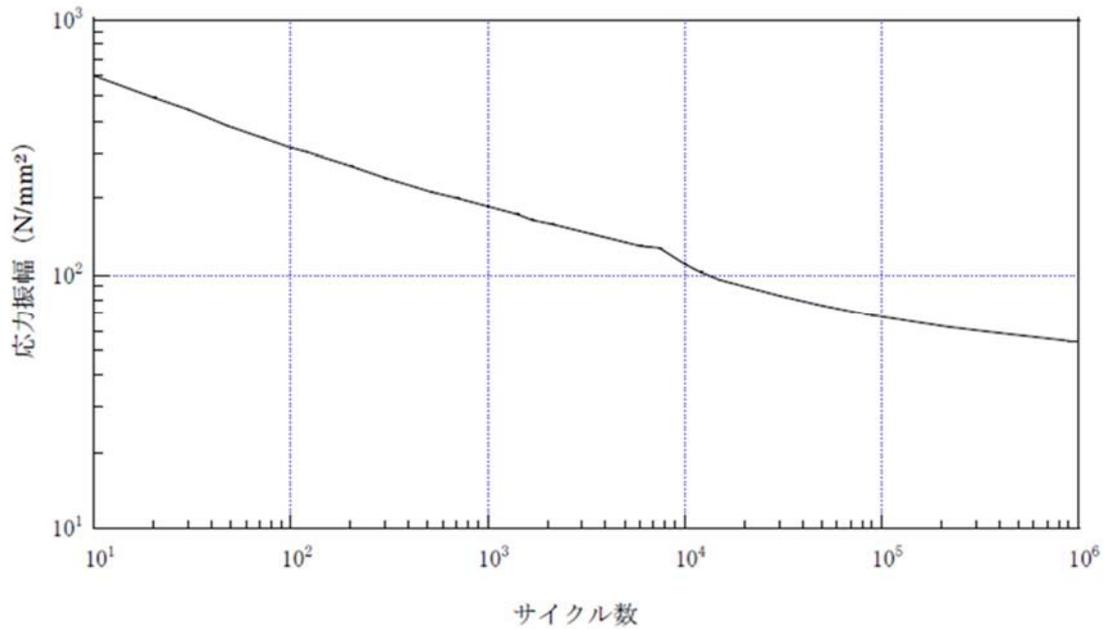
添付 4-2

は、営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

添付 4-2 表 地震による振動サイクルに伴う累積疲労係数

(9 × 9 燃料 (B 型))

地震動	評価点	応力振幅 (N/mm ²)	許容 サイクル数	地震荷重の 繰り返し回数	疲労係数 の増分
基準	寿命初期	45	1.0 × 10 ⁶	160	0.00016
地震動	寿命中期	45	1.0 × 10 ⁶	160	0.00016
S _s	寿命末期	44	1.0 × 10 ⁶	160	0.00016



添付4-1図 ジルカロイの設計疲労曲線※¹

※ 1 : ジルカロイ設計疲労曲線は，ジルカロイ-2の未照射材及び照射材についての疲労試験結果をベースに，ジルカロイ-4等の機械特性及び疲労特性がジルカロイ-2とほぼ同等であることを確認し，ジルカロイ-2，3及び4共通の設計曲線として設定したものである。Langer-0' Donnellは，設計曲線を保守的に見積もるため，未照射材及び照射材それぞれについて応力を $1/2$ ，サイクル数を $1/20$ とし，未照射材及び照射材の両者の包絡線を Langer-0' Donnell の設計疲労曲線^[2]としている。ここで，異なる高速中性子照射量に対する疲労試験結果から，疲労特性の照射量依存性は小さいことが示されており，また，過去の研究^[3]において，高速中性子照射量約 $1.3 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ までのジルカロイ-2燃料被覆管の疲労試験データが採取され，Langer-0' Donnell の照射材疲労試験データに包絡されることが確認されている。なお，BWRの燃料被覆管はジルカロイ-2を用い

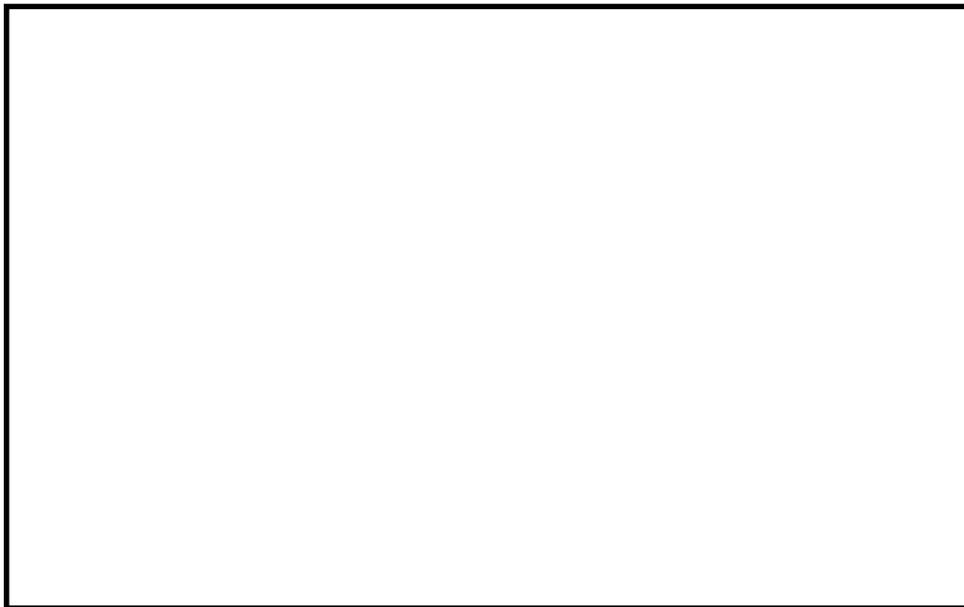
ており，疲労評価の対象部位である下部端栓溶接部の寿命末期に相当する高速中性子照射量は，上記疲労試験^{[2] [3]}の範囲内にある。

参考文献

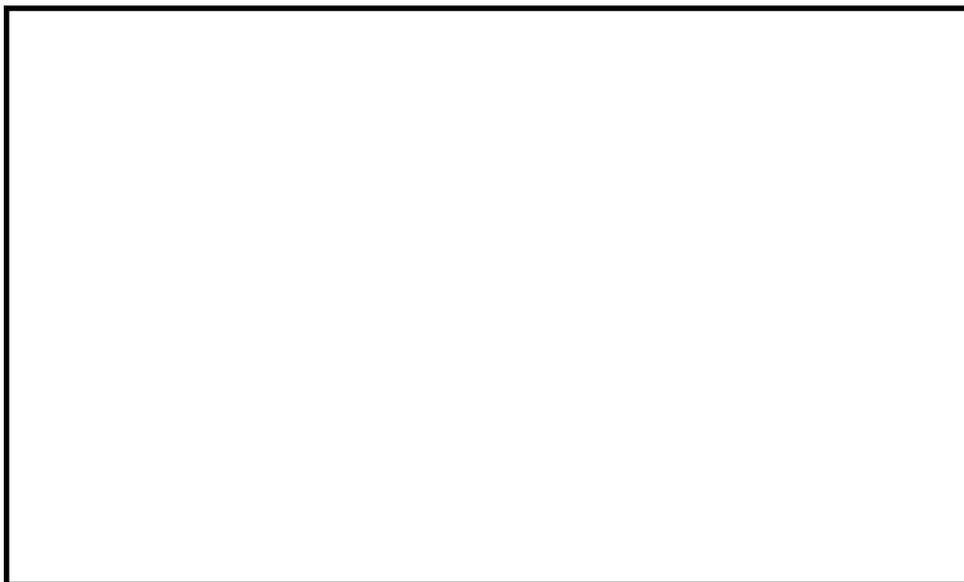
- [1] 東海第二発電所工事計画認可申請書（平成 30 年 10 月 18 日認可）
添付書類「V-2-1-9 機能維持の基本方針」
- [2] W. J. O'Donnell and B. F. Langer, “Fatigue Design Basis for Zircaloy Components”, Nuclear Science and Engineering, 20, 1-12 (1964)
- [3] S. ISHIMOTO, et al., “IMPROVED ZR ALLOYS FOR HIGH BURNUP BWR FUEL”, Top_Fuel 2006 (2006 INTERNATIONAL MEETING ON LWR FUEL PERFORMANCE, 22-26 October 2006, Salamanca, Spain)

燃料被覆管応力評価における許容応力について

燃料被覆管の許容応力（降伏応力及び引張強さ）は，放射線照射量と燃料被覆管温度に依存するため，燃料メーカーごとの試験結果に基づき，添付 5-1～5-4 図のように設定している。



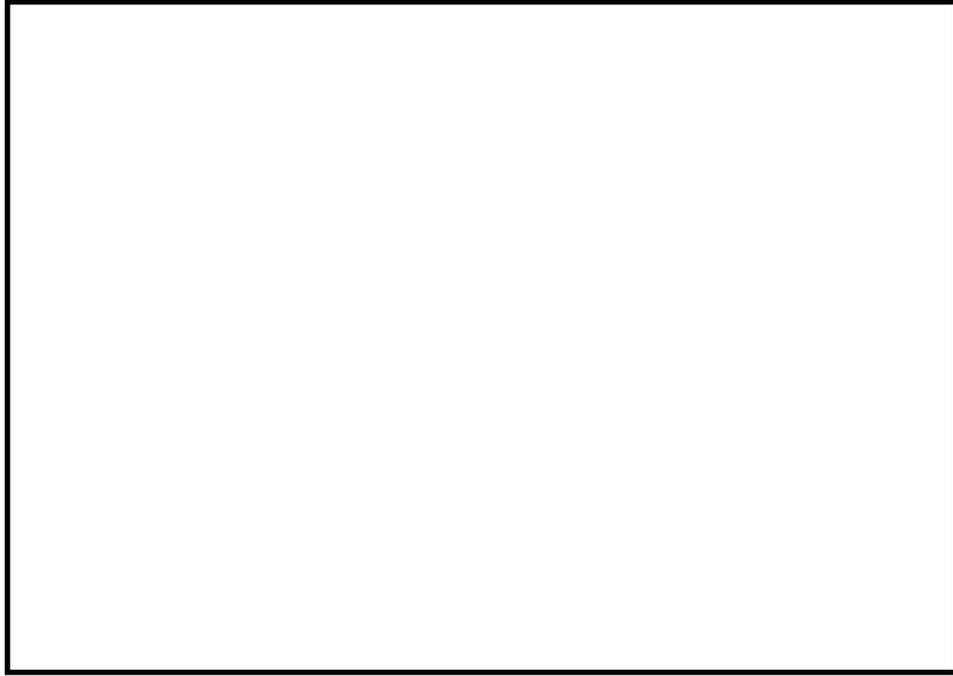
添付 5-1 図 9 × 9 燃料（A 型）燃料被覆管の降伏応力設計値（公称値）



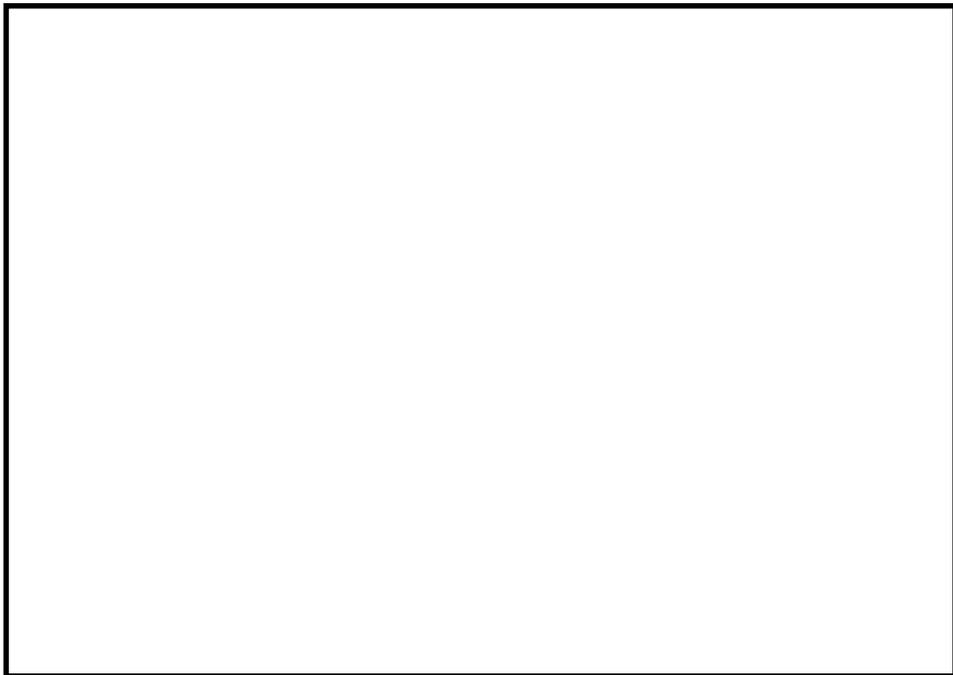
添付 5-2 図 9 × 9 燃料（A 型）燃料被覆管の引張強さ設計値（公称値）

添付 5-1

 は，営業秘密又は防護上の観点から公開できません。



添付 5-3 図 9 × 9 燃料（B 型）燃料被覆管のスペーサ間，
スペーサ部の引張強さ及び降伏応力設計値（公称値）



添付 5-4 図 9 × 9 燃料（B 型）燃料被覆管の下部端栓溶接部の
引張強さ及び降伏応力設計値（95% 確率下限値）

添付 5-2

 は、営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

9 × 9 燃料 (B 型) における地震時鉛直方向加速度の考慮方法について

9 × 9 燃料 (B 型) では、地震時鉛直方向加速度を地震時水平方向加速度によるスペーサ間たわみにより発生する軸方向応力 σ_2 (式 (1)) における質量増加として考慮している。

$$\boxed{\phantom{\sigma_2 = \frac{W_0 l G_h}{I D_0}}} \dots (1)$$

ただし、 W_0 : 燃料要素単位長質量、 l : スペーサ間距離、 G_h : 地震時水平方向加速度、 I : 断面二次モーメント、 D_0 : 燃料被覆管外径とする。

なお、地震時鉛直方向加速度による見掛けの質量増加を式 (2) のように定めている。

$$\boxed{} \dots (2)$$

ただし、 W : 実際の燃料要素単位長質量、 G_v : 地震時鉛直方向加速度、 g : 重力加速度とする。

式 (1) 及び式 (2) より、式 (3) が得られる。

$$\boxed{\phantom{\sigma_2 = \frac{W l G_h}{I D_0} (1 + G_v / g)}} \dots (3)$$

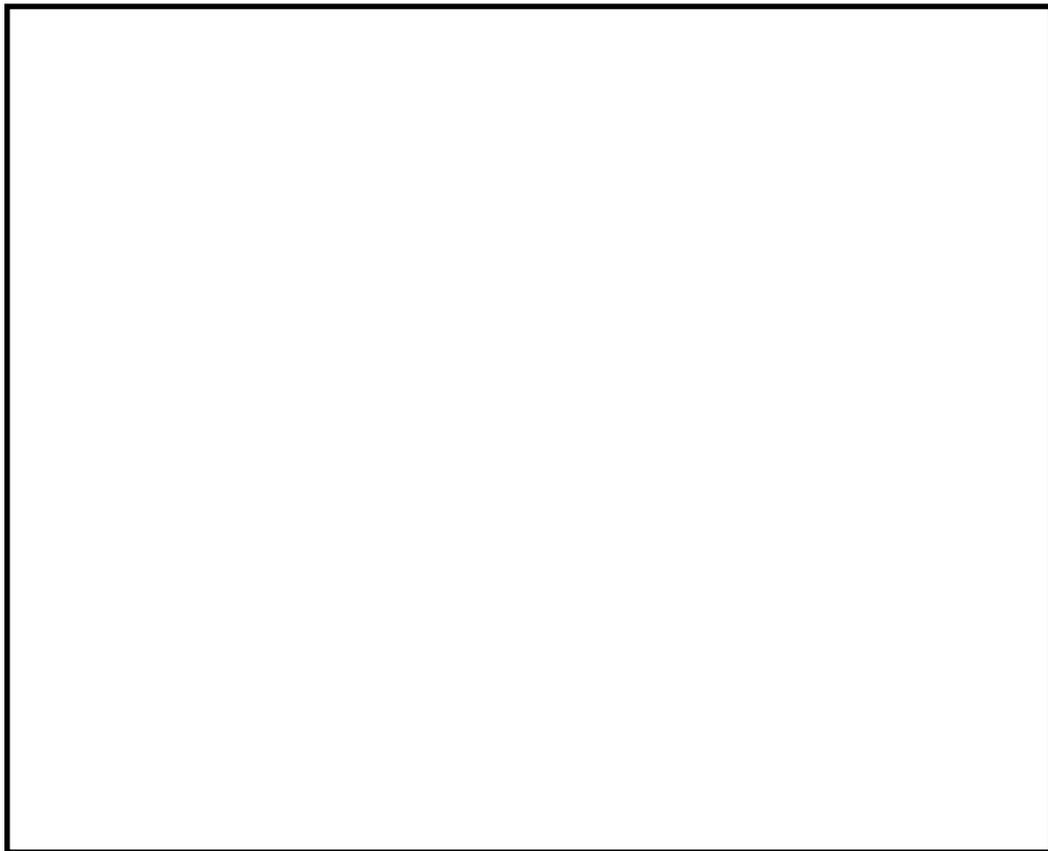
式 (3) の右辺第二項が地震時鉛直方向加速度による応力に相当する。

一方で、地震時鉛直方向加速度が慣性力として直接軸方向応力 σ_1 として作用すると考えると式 (4) の計算式となる (9 × 9 燃料 (A 型) の評価方法)。

$$\boxed{} \cdot \cdot \cdot (4)$$

ただし、 W_r ：燃料棒総質量， D_1 ：燃料被覆管内径とする。

9×9燃料（B型）の地震時鉛直方向加速度の考慮方法（式（3）右辺第二項）では、地震時水平方向加速度が約 $\boxed{}G$ を超える条件において、直接軸方向応力として考慮する場合（式（4））よりも保守的な評価となる（添付6-1図）。東海第二発電所では、評価に用いた炉心内の燃料集合体の地震時水平方向加速度が2.02Gであり $\boxed{}G$ よりも十分大きいことから、地震時鉛直方向加速度に対する評価として十分保守的な評価となっていることを確認した。



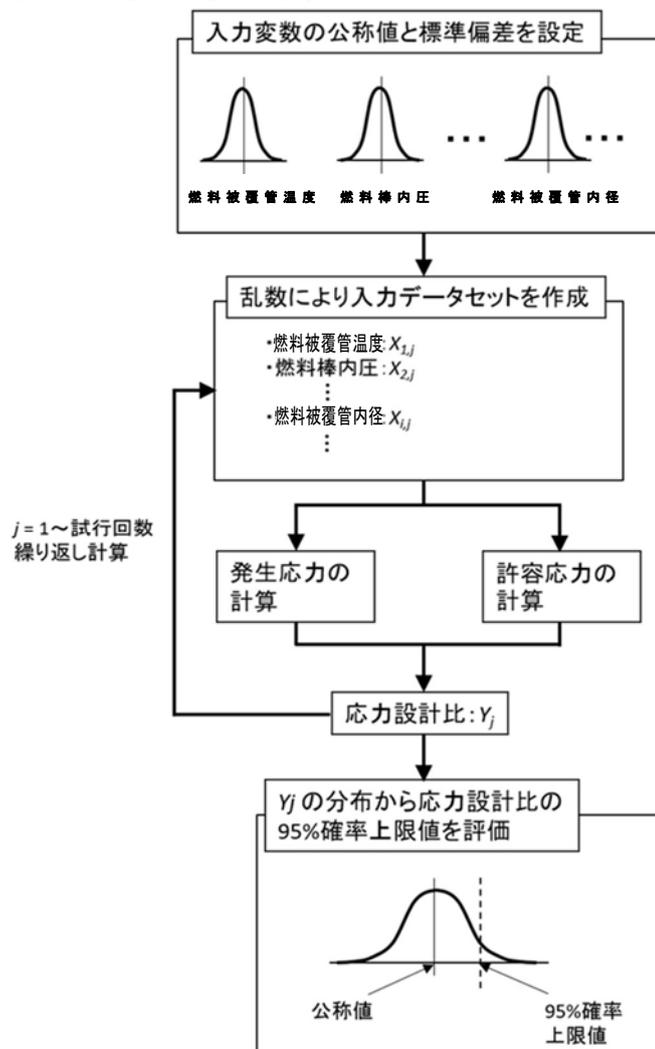
添付 6-1 図 9×9燃料（B型）の地震時鉛直方向加速度考慮方法の保守性

添付 6-2

$\boxed{}$ は、営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

燃料被覆管応力評価におけるモンテカルロ法による統計処理について

燃料被覆管応力評価におけるモンテカルロ法による統計処理の概要フローを添付 7-1 図に示す。モンテカルロ法による統計処理では，入力変数に公称値と標準偏差を定め，1 回の試行ごとに統計的分布に従った入力データセットを乱数により作成し，応力設計比を求める。本試行を繰り返すことで応力設計比の統計的分布を求め，95% 確率上限値が 1 以下であることを確認する。



添付 7-1 図 モンテカルロ法による統計処理の概要フロー

添付 7-1

下部端栓溶接部の応力評価に使用する有限要素法解析コードについて

下部端栓溶接部の応力評価は、端栓溶接部が切り欠き形状を含む複雑形状のため有限要素法を用いる。9×9燃料（A型）の下部端栓溶接部の応力評価に使用する有限要素法解析コードについては、既認可の評価^[1]ではMARCを使用しているが、本評価においてはANSYSを使用している。いずれのコードも様々な分野の構造解析に広く利用されている汎用の解析コードであり、ANSYSは9×9燃料（B型）の下部端栓溶接部の応力評価や工事計画認可申請書における応力解析等、これまで多くの構造解析に対し使用実績がある。今回、9×9燃料（A型）の評価では、汎用有限要素法解析コードの集約化のためANSYSを使用するものである。

本資料は、9×9燃料（A型）の評価にANSYSを適用するにあたり、既認可の9×9燃料（A型）の下部端栓溶接部応力解析において使用されたMARCと同等な入力条件（有限要素モデル、ペレットやジルカロイ被覆管の物性値、荷重条件及び境界条件）を設定可能なこと、MARCと本解析コードとで同等な解析結果となることを説明する。

1. コードの概要

本解析コードは、スワンソン・アナリシス・システムズ（現、アンシス）により開発された有限要素法による計算機プログラムである。本解析コードは、広範囲にわたる多目的な有限要素法による計算機

プログラムであり、伝熱、構造、流体、電磁界及びマルチフィジックス解析を実施するものである。

本解析コードは、I S O 9001 及び A S M E NQA-1 の認証を受けた品質保証システムのもとで開発され、アメリカ合衆国原子力規制委員会による 10CFR50 並びに 10CFR21 の要求を満たしており、数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、機械、建築、土木等の様々な分野の構造解析に広く利用されている。また、9×9 燃料（B 型）の原子炉設置（変更）許可申請書や燃料体設計認可申請書における下部端栓溶接部の応力評価に対し使用実績がある。

本解析コードを適用するにあたり、以下の確認を行っている。

- ・ 開発元のリリースノートの例題集において、多くの解析例に対する理論解と解析結果との比較により検証されている。
- ・ 本解析コード配布時に同梱された ANSYS Mechanical APDL Verification Testing Package を入力とした解析により、上記例題集の検証を再現できることを確認している。

本解析コードの運用環境について、開発元から提示された要件を満足していることを確認している。

2. 下部端栓溶接部の応力評価の方法

本再現解析は、M A R C による既存の解析結果と A N S Y S による解析結果を比較するため、従来の下部端栓部応力評価と同等の入力条件にて M A R C と A N S Y S の応力設計比の比較を行った。添付 8-1 図に応力評価のフローを示す。

2.1 下部端栓溶接部の応力評価モデル

下部端栓溶接部の応力評価では，最初に下部端栓溶接部近傍の下部端栓，被覆管及びペレットをモデル化し，有限要素法を用いた熱解析により下部端栓溶接部近傍での温度分布を評価する。次に，熱解析で得られた下部端栓溶接部近傍の温度分布を読み込み，熱膨張差による熱応力の分布，通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における荷重条件に基づき発生する応力分布を，有限要素法を用いた機械解析により評価する。

2.2 下部端栓溶接部の熱解析での入力データ

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における下部端栓溶接部近傍の温度分布を評価するため，以下の項目を入力している。

- ・ ペレットの発熱
- ・ ジルカロイ部材の γ 発熱
- ・ ペレット－被覆管ギャップ熱伝達
- ・ 被覆管表面熱伝達係数
- ・ ペレット及びジルカロイ部材の熱伝導率

なお，解析モデル上下端は断熱の境界条件とし，ペレット－下部端栓接触面には熱抵抗がないものとして，上記の保守側の入力と合わせて，下部端栓溶接部近傍の温度分布による熱応力が大きくなるような解析を実施する。

添付 8-3

は，営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

2.3 下部端栓溶接部の応力評価で考慮する荷重

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に下部端栓溶接部に作用する荷重として、

- ・ 下部端栓及び被覆管部における温度分布（熱解析結果を読み込む）
- ・ 燃料棒内圧
- ・ 冷却材圧力
- ・ 内外圧力差による軸方向荷重（軸方向応力）
- ・ 被覆管周方向温度差及び端栓取付角公差による初期曲がりに基づく曲げ荷重（曲げ応力）

を考慮する。

2.4 設計比の評価

設計比の評価では、燃料被覆管温度、燃料棒内圧、炉心条件、燃料棒寸法及び許容応力の統計的分布を考慮し、それぞれの95%確率上/下限値に基づき解析結果が保守側となるように設定した入力値を用いて決定論的評価を実施する。ここで、燃料被覆管温度、燃料棒内圧については、燃料棒熱・機械設計コードによる解析結果を用いる。応力計算は、下部端栓溶接部に発生する三軸方向（半径方向、円周方向及び軸方向）の応力を解析し、それらより相当応力を計算する。また、許容応力については下部端栓溶接部の温度及び照射の影響を考慮した保守側の95%確率下限値を用いる。

3. 解析条件

以下に、解析条件を示す。また、MARC及びANSYSによる下

添付 8-4

は、営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

部端栓溶接部の応力評価における解析入力値の比較を添付 8-1 表にまとめる。同表に示すとおり，M A R C と A N S Y S の解析入力値は，一部の物性値について温度依存性を関数式で入力するかテーブル形式で入力するかの差があることを除いては全て同一であり，同等な入力条件を設定可能である。

(1) 燃料タイプ：9 × 9 燃料（A 型）

(2) 評価部位：下部端栓溶接部

(3) 解析コード：

①有限要素法解析コード M A R C Ver. K4

②有限要素法解析コード A N S Y S Ver. 14

(4) 評価点：燃料寿命初期，中期，末期^{※1}

(5) 運転状態：圧力過渡（冷却材圧力 MPa[abs]（公称値））^{※2}

(6) 考慮する荷重：2.3 のとおり。

(7) 許容応力：引張強さ（ s_u ）

※1：燃料寿命初期，中期，末期は，燃料棒熱・機械解析で設定された評価点を引き継ぎ，炉内滞在期間がそれぞれ 0 年，2.2 年及び 8 年に相当する評価点。

※2：下部端栓部の燃料棒の出力は低く，出力過渡時に発生する応力は圧力過渡時の応力より小さいため，圧力過渡時を評価対象とする。

4. 解析結果

添付 8-2 表に解析結果を示す。M A R C と A N S Y S による同等な入力条件に基づく解析結果の差分は 0.02 であり，判定基準（応力

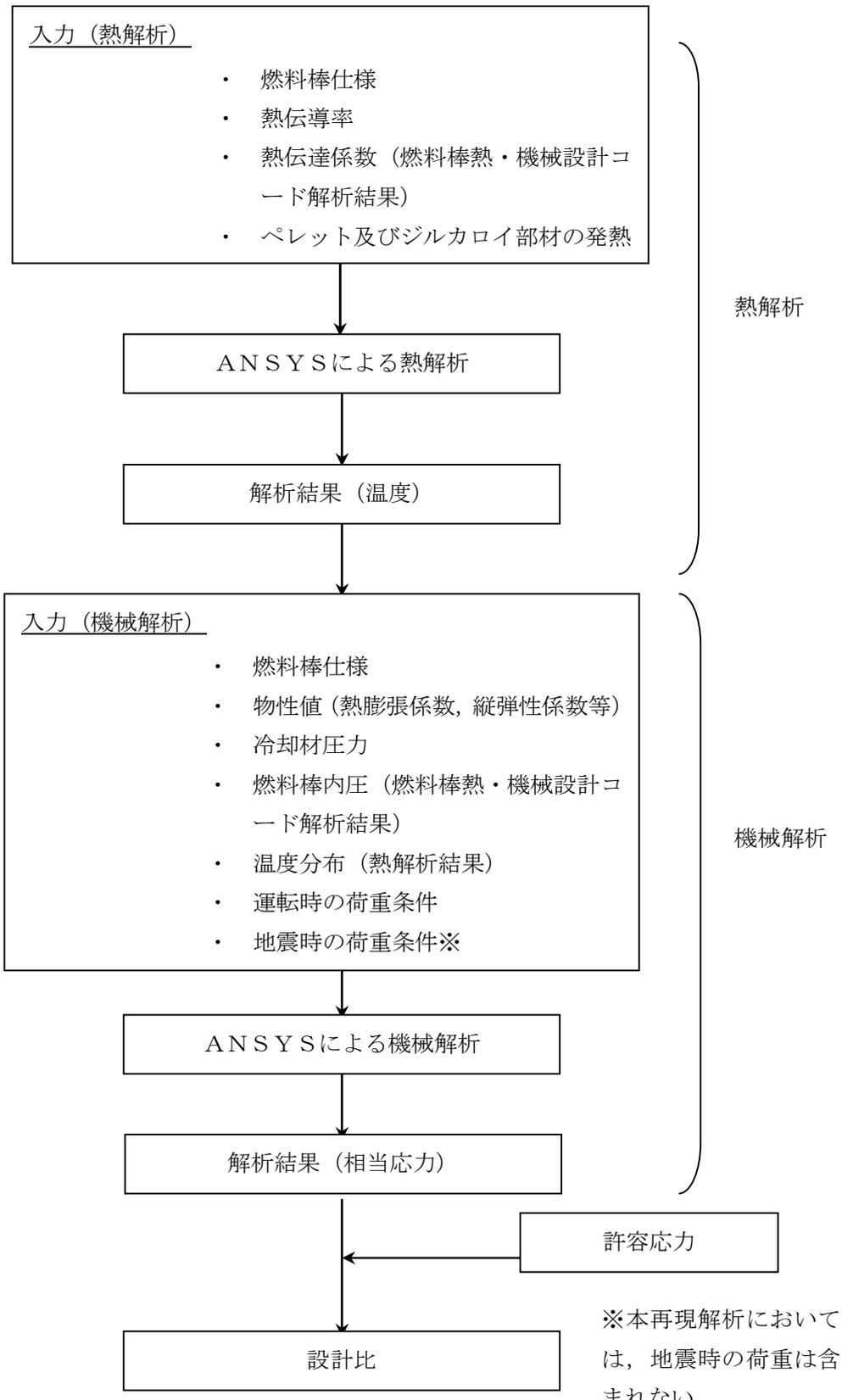
添付 8-5

は，営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

設計比が1以下であること)に対し十分小さく同等な結果が得られ、下部端栓溶接部の応力評価への適用に支障はないものとする。

参考文献

- [1] 東海第二発電所「燃料体設計認可申請書」(GNF燃設認第36号,平成21年11月5日認可)



添付8-1図 下部端栓溶接部の応力評価のフロー

添付 8-1 表 MARC 及び ANSYS による下部端栓溶接部の
応力評価における解析入力値 (1/2)

解 析	項 目	M A R C へ の 入 力	A N S Y S へ の 入 力

添付 8-8

は、営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

添付 8-1 表 MARC 及び ANSYS による下部端栓溶接部の
応力評価における解析入力値 (2/2)

解 析	項 目	M A R C へ の 入 力	A N S Y S へ の 入 力

添付 8-9

は、営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

添付 8-2 表 再現解析結果

解析コード	運転条件	許容応力	応力設計比		
			寿命初期	寿命中期	寿命末期
M A R C	圧力過渡	S_u	0.39	0.42	0.28
A N S Y S	同上	同上	0.40	0.40	0.27

評価部位の選定理由について

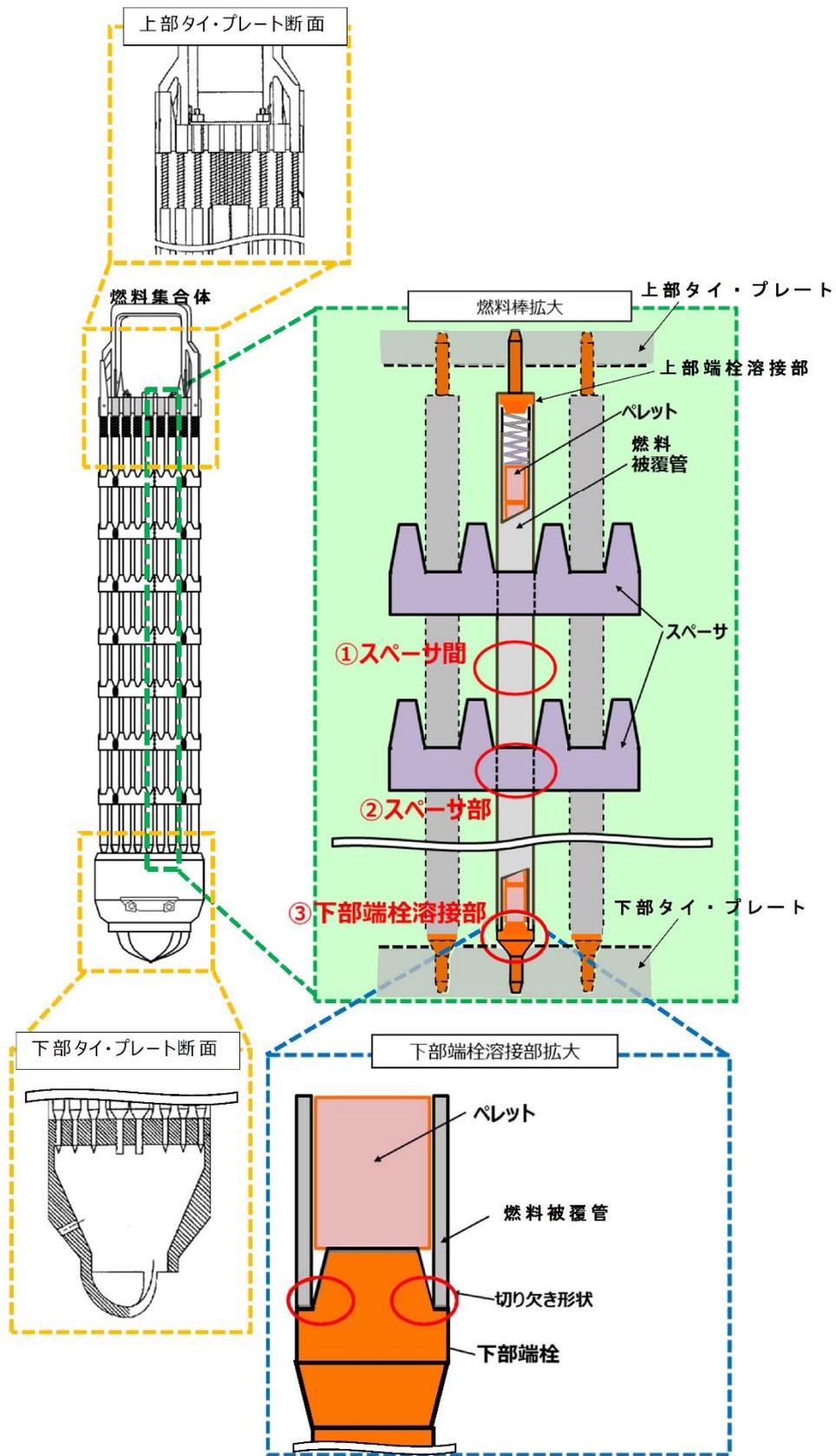
燃料被覆管はその構造から管部、上部端栓溶接部及び下部端栓溶接部に分類することができる。管部についてはスペーサと接触しない部分（スペーサ間）とスペーサと接触する部分（スペーサ部）があり、いずれもその軸方向位置によらず同じ形状である。上部端栓溶接部は中空のプレナム領域を含み重量が小さいことから地震によるたわみに基づく曲げ応力が小さいこと及び発熱部から離れており熱応力が小さいことから下部端栓溶接部の評価結果に包絡される。これらを踏まえ、スペーサ間、スペーサ部及び下部端栓溶接部を評価部位とする。評価部位の概要図を添付 9-1 図に示す。

燃料被覆管応力評価は、J E A G 4601-1987^[1]に基づき基準地震動 S_s により生じる燃料集合体位置の加速度及び燃料集合体の相対変位を用いて応力値を算出している。添付 9-2 図及び添付 9-3 図に応答算出に用いた地震応答解析モデル^[2]を示す。

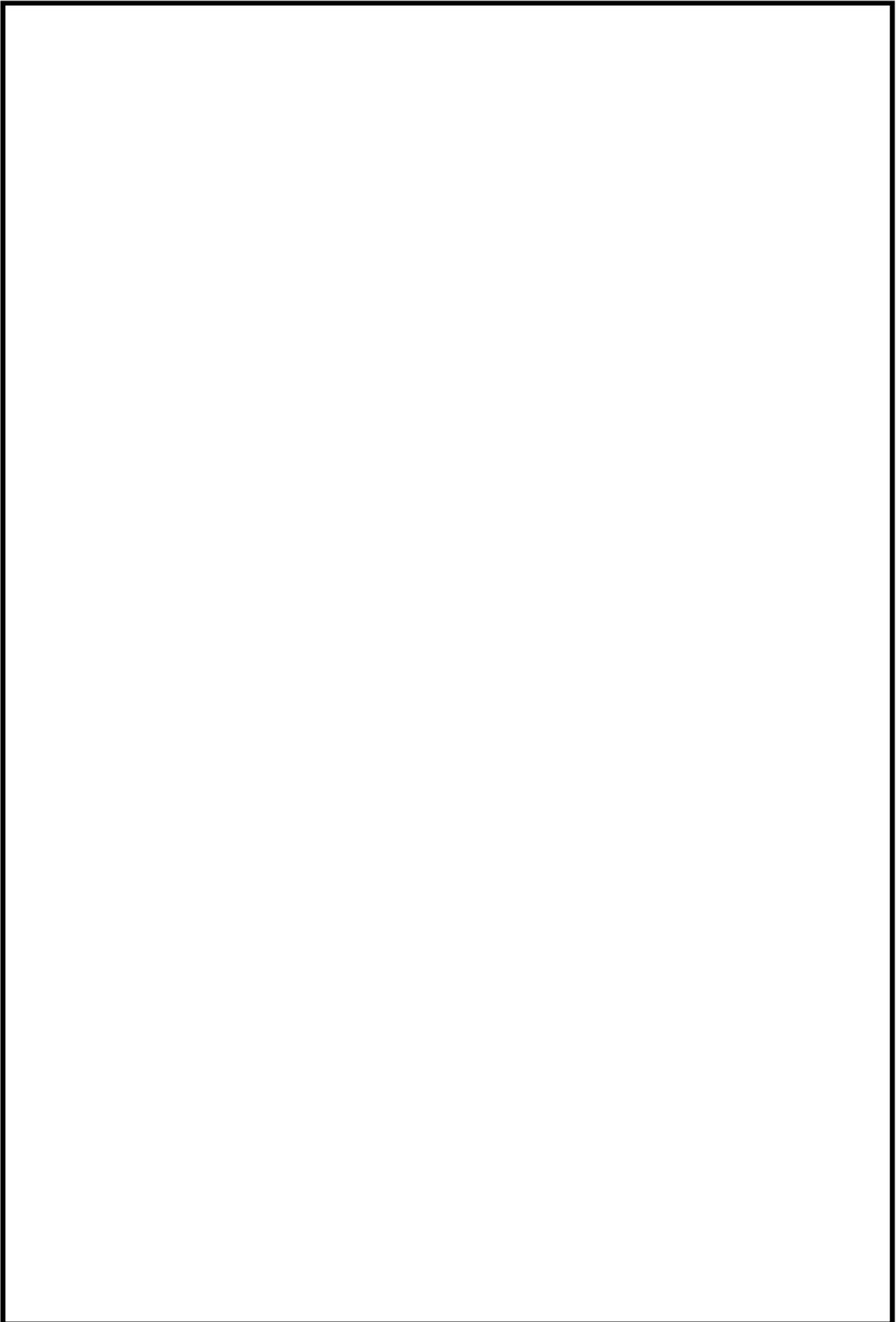
基準地震動 S_s により生じる水平方向加速度については、各質点での値の差が大きいため、スペーサ間、スペーサ部及び下部端栓溶接部とも評価部位位置の値を使用しており、スペーサ間及びスペーサ部は複数存在することから最厳値を使用している。また、鉛直加速度については、各質点での値の差が比較的小さいため、スペーサ間、スペーサ部及び下部端栓溶接部とも全質点中の最厳値を使用している（添付 9-1 表参照）。

参考文献

- [1] J E A G 4601-1987「原子力発電所耐震設計技術指針」, (社) 日本電気協会
- [2] 東海第二発電所工事計画認可申請書 (平成 30 年 10 月 18 日認可) 添付書類「V-2-3-2 炉心, 原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」



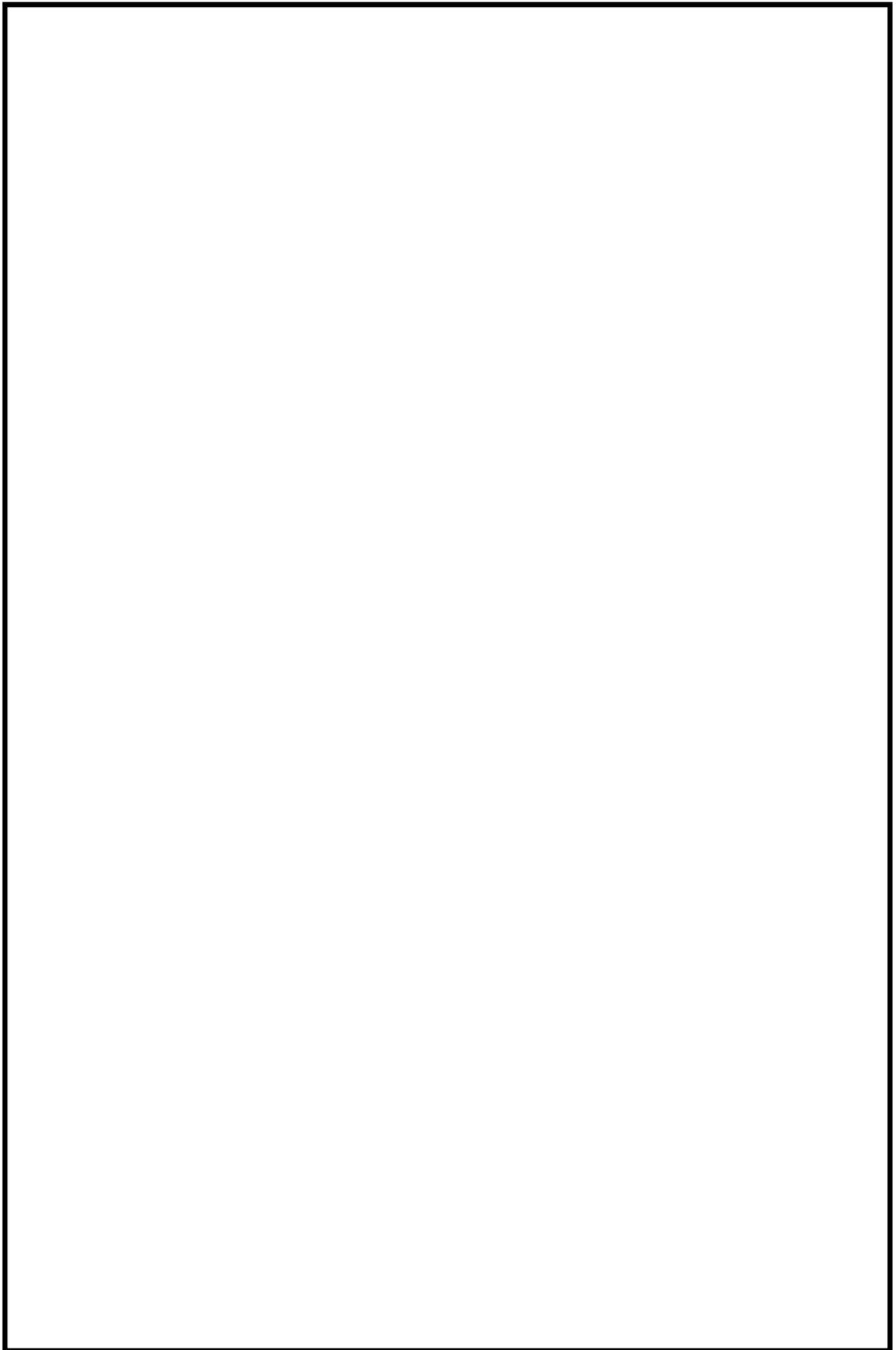
添付 9-1 図 評価部位の概要図



添付 9-2 図 大型機器系地震応答解析モデル（水平方向）

添付 9-4

 は、営業秘密又は防護上の観点から公開できません。



添付 9-3 図 大型機器系地震応答解析モデル（鉛直方向）

添付 9-5

 は、営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

添付 9-1 表 基準地震動 S_s による燃料集合体の評価用加速度

方向	質点番号	評価用加速度 (G)	適用評価部位
水平方向	96	1.92	
	97	1.65	—
	98	1.81	—
	99	<u>2.02</u>	スペーサ間及びスペーサ部
	100	1.84	—
	101	<u>1.43</u>	下部端栓溶接部
	102	1.25	—
鉛直方向	1	<u>1.24</u>	スペーサ間、スペーサ部及び下部端栓溶接部
	2	<u>1.24</u>	
	3	<u>1.24</u>	
	4	1.23	—
	5	1.22	—
	6	1.21	—
	7	1.20	—

発電用原子炉設置変更許可申請書添付書類八「安全設計の方針」「設置許可基準規則 第十五条（炉心等）」におけるBWRとPWRの相違について

1. 発電用原子炉設置変更許可申請書添付書類八「安全設計の方針」「設置許可基準規則 第十五条（炉心等）」に関する表記

東海第二発電所（以下「東二」という。）と四国電力株式会社伊方発電所3号炉（以下「伊方3」という。）の申請書は、以下のとおり表記が異なっている。

<東二の今回の表記>

燃料体は、発電用原子炉内における使用期間中を通じ、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時においても、燃料棒の内外圧差、燃料棒及び他の材料の照射、負荷の変化により起こる圧力・温度の変化、化学的効果、静的・動的荷重、燃料ペレットの変形、燃料棒内封入ガスの組成の変化等を考慮して、各構成要素が、十分な強度を有し、その機能が保持できる設計とし、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における発電用原子炉内の圧力、自重、附加荷重、核分裂生成物の蓄積による燃料被覆材の内圧上昇、熱応力等の荷重に耐える設計とする。

燃料体には燃料棒を保護する機能を持つチャンネル・ボックスをかぶせる。

<PWR（伊方3）の例>

燃料体は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における発電用原子炉内の圧力、自重、附加荷重、核分裂生成物の蓄積による燃料被覆材の内圧上昇、熱応力等の荷重に耐える設計とする。

このため、燃料要素は所要の運転期間において、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に、以下の基準を満足できる設計とする。

- (1) 燃料中心最高温度は、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン及びウラン・プルトニウム混合酸化物それぞれの溶融点未満であること。
- (2) 燃料要素内圧は、通常運転時において、燃料被覆材の外向きのクリープ変形により燃料材と燃料被覆材のギャップが増加する圧力を超えないこと。
- (3) 燃料被覆材応力は、燃料被覆材の耐力以下であること。
- (4) 燃料被覆材に生じる円周方向引張歪の変化量は、各過渡変化に対して1%以下であること。
- (5) 累積疲労サイクルは、設計疲労寿命以下であること。

以上のとおり、BWR（東二）は法令の表記を記述し、そのとおり設計する旨表現しており、PWRはいわゆる5基準を記述している。

2. 記述の相違の技術的内容

BWR及びPWRの燃料の安全設計の方針においては、従来からそれぞれ異なる指針に基づいて設計されている。BWRについては「沸騰水型原子炉に用いられる8行8列型の燃料集合体について」（昭和49年12月25日、原子炉安全専門審査会）（以下「①8×8燃料設計指針」という。）、「沸騰水型原子炉に用いられる9行9列型の燃料集合体について」（平成6年3月3日原子力安全委員会）（以下「②9×9燃料設計指針」という。）及び「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について」（昭和63年5月12日原子力安全委員会）（以下「③軽水炉燃料設計指針」という。）等に、PWRについては「加圧水型原子炉に用いられる17行17列型の燃料集合体について」（昭和51年2月16日、原子炉

安全専門審査会) (以下「④17×17燃料設計指針」という。), ③軽水炉燃料設計指針等に基づく。

このことから、記述の相違については問題ないと考えられるが、1. における③軽水炉燃料設計指針及び④17×17燃料設計指針に基づくPWRの5基準について、①8×8燃料設計指針、②9×9燃料設計指針及び③軽水炉燃料設計指針に基づくBWRの基準と比較すると、以下のとおりとなる。

- (1) 燃料中心最高温度は、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン及びウラン・プルトニウム混合酸化物それぞれの溶融点未満であること。

「燃料被覆管は機械的に破損しないこと」の解釈の明確化について(昭和60年7月18日 原子力安全委員会了承, 一部改訂 平成2年8月30日 原子力安全委員会)により、「PWRにおいては、運転時の異常な過渡変化について「燃料中心最高温度は二酸化ウランの溶融点未満であること」を動的解析により確認しているが、これを満足すれば、被覆管の円周方向平均塑性歪の変化量が1%に到らないので、この評価方法は妥当であると判断する。」とされている。一方、BWRにおいては、同資料により、「BWRにおいては、被覆管に1%塑性歪を与える線出力密度を損傷限界線出力密度とし、運転時の異常な過渡変化の解析によって得られる最大線出力密度が損傷限界線出力密度を超えないことを確認している。運転時の異常な過渡変化時に発生する最大線出力密度は、過渡変化の動的解析によって得られる被覆管の表面熱流束の最大値が定常的に発生しているものと仮定して、これを線出力密度に換算して求めている。

この評価法の妥当性について検討した結果、最大表面熱流束が、定常的に発生しているとする仮定は、熱流束が非定常に変化する場合に比較してペレット温度を高く評価し、保守性が確保されるので、妥当であると判断する。」とされ

ている。すなわち、PWRと比べて方法（最大線出力密度の管理）は異なるものの、同等の安全設計を実現している。

(2) 燃料要素内圧は、通常運転時において、燃料被覆材の外向きのクリープ変形により燃料材と燃料被覆材のギャップが増加する圧力を超えないこと。

④ 17×17燃料設計指針により「燃料棒内圧は、機械的破損の観点からは被覆管応力基準により制限されており、また燃料温度の過大な上昇防止の観点からは新しい燃料棒内圧基準によりサーマルフィードバックの発生が防止されている。」とされており、機械的破損については、(3)被覆管応力基準に集約される。燃料温度の過大な上昇防止については、PWRは③軽水炉燃料設計指針により「通常運転時には、燃料棒の燃焼初期において燃料棒の内圧は外圧を下回っており、被覆管は内向きのクリープ変形により径が減少しペレットとの接触に至る。その後燃焼中期以降放出FPガスの蓄積により内圧が増加し、高燃焼度領域では内圧が外圧を超える可能性がある。このような内圧支配に至った状態では被覆管は外向きのクリープ変形により径が増加し、一旦接触したペレットと被覆管にギャップが生じる可能性がある。このギャップが開くことによりギャップコンダクタンスが低下し燃料温度が上昇すると、更にFPガスが放出され内圧が上昇し、その結果更にギャップが広がるといったいわゆるサーマルフィードバックを起こす可能性がある。」とされている。一方、BWRは②9×9燃料設計指針により「9×9型燃料集合体の寿命末期の燃料棒内圧はA型、B型ともに外圧を超えておらず」とされていることからサーマルフィードバックが問題となることはない。

(3) 燃料被覆材応力は、燃料被覆材の耐力以下であること。

(2)とともに被覆管応力に関する基準であり、BWRでは①8×8燃料設計指針において「2.2 構造強度設計」の「(1)被覆管にかかる応力は、設計応力強さ限界を超えないこと。」により記述されている。なお、「実用発電用原子炉の燃料体に対する地震の影響の考慮について（平成29年2月15日原子力規制庁）」を踏まえた被覆管の応力評価条件は、「基準地震動 S_s の地震による1次応力を加味した運転状態における応力が設計引張強さを下回ること、また、弾性設計用地震動 S_d の地震による1次応力を加味した運転状態における応力が設計降伏点を下回ること」となっておりPWR燃料に対する要求と同じになっている。

(4) 燃料被覆材に生じる円周方向引張歪の変化量は、各過渡変化に対して1%以下であること。

PWRについては④17×17燃料設計指針において「照射実績に基づいており、妥当なものと判断する。」とされており、BWRについては①8×8燃料設計指針に損傷限界「1%の周方向塑性歪」に関する記述として「この損傷限界は、GEがこれまで行ったひずみとり焼なまし材の照射後の高温内圧破裂試験の結果に基づいて定められたものである。

この試験結果によれば、1%の全周平均塑性歪以下で破裂した試験片は実際にはないが、試験結果の統計的分布からは1%以下の全周平均塑性歪であっても破裂する可能性は小さいながらもあることが示されている。しかしながら、8×8型燃料集合体の被覆管に用いられることになっている再結晶焼なまし材の照射後試験結果では、現在のところひずみとり焼なまし材よりも高い内圧破裂伸びを示しており、さらにその伸びのバラツキは小さくなっている。

これらのことから、燃料の損傷限界として、全周伸び平均として周方向塑性歪 1%を選定することは、妥当であると判断する。」とされている。すなわち、BWRは上記試験結果に基づき周方向塑性歪 1%を破損の判断基準としており、(1)で担保している。

(5) 累積疲労サイクルは、設計疲労寿命以下であること。

BWRについても①8×8燃料設計指針において「2.2 構造強度設計」「(2) 累積疲労サイクル数は設計疲労寿命を超えないこと。」とされており、同等である。

以上より、PWRの「安全設計の方針」の記述については、BWRにおける①8×8燃料設計指針の「2.2 構造強度設計」の記述に、(1)、(2)及び(4)の記述が加わっているが、(1)及び(4)については、最大線出力密度の管理により1%塑性歪を防止し燃料の損傷を起こさないことに集約され、東二の法令要求の記載によっても表現できていると考えられる。(2)のサーマルフィードバックの防止という観点ではBWRは問題となることはない(表参-1参照)。

なお、同様の内容は、設置許可添付書類八の3章において詳述している。

以 上

表 参-1 PWR燃料設計5基準とBWR燃料設計の比較

PWR燃料設計の考え方	BWR燃料設計の考え方
<p>(1) 【燃料中心温度】</p> <ul style="list-style-type: none"> 燃料の機械的破損防止の観点から、燃料中心温度がペレット溶融点未満であることを確認している。 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料の機械的破損防止の観点から、損傷限界線出力密度を超えないことを確認している。
<p>(2) 【燃料棒内圧】</p> <ul style="list-style-type: none"> 機械的破損の観点からは被覆管応力に集約されている。 高燃焼度領域で内圧が外圧を超える可能性があり、サーマルフイードバックを避けるための内圧基準を設け、その内圧基準を超えないことを確認している。 	<ul style="list-style-type: none"> 機械的破損の観点からは被覆管応力に集約されている。 内圧が外圧を超えることはないため、サーマルフイードバックを避けるための内圧基準を設ける必要はない。
<p>(3) 【被覆管応力】</p> <ul style="list-style-type: none"> 被覆管にかかる応力が許容応力以下であることを確認している。 	<ul style="list-style-type: none"> 被覆管にかかる応力が許容応力以下であることを確認している。
<p>(4) 【被覆管歪】</p> <ul style="list-style-type: none"> 照射実績により、1%塑性歪を超えないことで機械的破損を防止できることを確認している。 燃料中心温度がペレット溶融点未満であれば1%塑性歪に至らないので、保守的に燃料中心温度がペレット溶融点未満であることを確認している。 	<ul style="list-style-type: none"> 照射実績により、1%塑性歪を超えないことで機械的破損を防止できることを確認している。 1%塑性歪を与える線出力密度を損傷限界線出力密度とし、最大線出力密度が損傷限界線出力密度を超えないことを確認している。
<p>(5) 【被覆管疲労】</p> <ul style="list-style-type: none"> 累積疲労サイクルは、設計疲労寿命以下であることを確認している。 	<ul style="list-style-type: none"> 累積疲労サイクル数は設計疲労寿命を超えないことを確認している。