

本資料のうち、枠囲みの内容は、営業秘密あるいは防護上の観点から公開できません。

資料 1

東海第二発電所

工事計画に係る補足説明資料

【地震時における燃料被覆管の 閉じ込め機能の維持に係る補足説明資料】

2019 年 9 月

日本原子力発電株式会社

目 次

1. 概 要
2. 規則改正内容と規則改正に伴う対応方針
 - 2.1 規則改正内容
 - 2.2 発電用原子炉設置変更許可
 - 2.3 工事計画変更認可申請の概要
 - 2.4 地震時の燃料被覆管閉じ込め機能評価方針
3. 燃料被覆管応力評価手法及び評価結果
 - 3.1 燃料被覆管に発生する応力
 - 3.2 燃料被覆管の応力評価における地震加速度
 - 3.3 燃料被覆管応力評価手法
 - 3.4 燃料被覆管応力評価手法の保守性
 - 3.5 燃料被覆管応力評価結果
4. 燃料被覆管疲労評価手法及び評価結果
 - 4.1 燃料被覆管疲労評価手法
 - 4.2 燃料被覆管疲労評価手法の保守性
 - 4.3 燃料被覆管疲労評価結果
5. ま と め

添付資料 1：地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能維持に係る工事計画変更認可申請に該当する技術基準規則の条文整理について

添付資料 2：工事計画変更認可申請書添付書類及び本申請における添付の要否について

添付資料 3：工事計画認可申請書及び燃料体設計認可申請書における応力評価等の対象について

添付資料 4：9×9 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 5：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 6：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 7：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

1. 概 要

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、発電用原子炉設置（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、2017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、2017年9月11日に施行され、地震時の燃料被覆材の閉じ込め機能の維持についての要求が追加された。

上記改正後の設置許可基準規則へ適合するための燃料被覆材の設計方針を発電用原子炉設置変更許可申請書に追記し、2019年7月24日に許可を受けた。

本資料では、発電用原子炉設置変更許可及び技術基準規則改正に伴い、地震時の燃料被覆材の閉じ込め機能維持に係る詳細評価について説明する。

2. 規則改正内容と規則改正に伴う対応方針

2.1 規則改正内容

設置許可基準規則第4条及び設置許可基準規則第4条の解釈の記載を表2.1-1に示す。また、技術基準規則第5条及び技術基準規則第5条の解釈の記載を表2.1-2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（2017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。』

表 2.1-1 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
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。	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。	解釈 追記
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。	—	変更 なし
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。	—	変更 なし

表 2.1-1 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

表 2.1-2 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
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。	—	変更 なし
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。	—	変更 なし
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。	—	変更 なし
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。	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

2.2 発電用原子炉設置変更許可

設置許可基準規則及びその改正を受け、本規則等改正に係る要求事項を満足し、本規則への適合性を示すため、地震時の燃料被覆材の閉じ込め機能に係る設計方針を定め、発電用原子炉設置変更許可申請書に以下のとおり追記し、2019年7月24日許可を受けた。

炉心内の燃料被覆材（燃料被覆管）の放射性物質の閉じ込め機能については、以下のとおり設計する。

- ・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に対して、炉心内の燃料被覆管の応答がおおむね弾性状態にとどまるように設計する。
- ・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に影響を及ぼさないように設計する。

（本申請の発電用原子炉設置変更許可申請書 本文五号 ロ．発電用原子炉施設の一般構造 （1）耐震構造 （i）設計基準対象施設の耐震設計）

（3）荷重の組合せ b．機器・配管系 （e）

炉心内の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込めの機能の確認においては、通常運転時の状態で燃料被覆管に作用する荷重及び運転時の異常な過渡変化時の状態のうち地震によって引き起こされるおそれのある事象によって燃料被覆管に作用する荷重と地震力を組み合わせる。

（4）許容限界 b．機器・配管系 （d）燃料被覆管

炉心内の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込めの機能については、以下のとおりとする。

i）弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力との組合せに対する許容限界

応答が全体的におおむね弾性状態にとどまることとする。

ii）基準地震動による地震力との組合せに対する許容限界

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とど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とする。

（本申請の発電用原子炉設置変更許可申請書 添付書類八 1. 安全設計 1.3 耐震設計 1.3.1.4 荷重の組合せと許容限界）

なお、許可までの経緯は以下のとおりである。

- ・ 2019 年 1 月 18 日 発電用原子炉設置変更許可申請
- ・ 2019 年 2 月 21 日 審査会合（初回）
- ・ 2019 年 4 月 19 日 発電用原子炉設置変更許可申請の補正
- ・ 2019 年 5 月 9 日 審査会合（2 回目）
- ・ 2019 年 6 月 20 日 発電用原子炉設置変更許可申請の補正
- ・ 2019 年 7 月 24 日 発電用原子炉設置変更許可

2.3 工事計画変更認可申請の概要

2.1 及び 2.2 に示す規則改正及び発電用原子炉設置変更許可に伴い、2019 年 7 月 26 日に工事計画変更認可申請を行った。本項では工事計画変更認可申請書の概要について述べる。

技術基準規則の要求に対する今回申請の審査対象条文は添付資料 1 に示すとおり、第 5 条のみである。また、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」の別表第二に基づく工事計画変更認可申請書及び本申請における添付の要否についての検討結果を添付資料 2 に示す。

なお、本申請において、設備や運用の変更は伴わないことから、保安規定の変更は必要ない。

(1) 基本設計方針への反映

工事計画認可申請書本文に、地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る基本設計方針を、以下のとおり追加する。

なお、本基本設計方針は、2.2 で示した発電用原子炉設置変更許可における設計方針と同じである。

原子炉冷却系統施設 (1) 基本設計方針

2. 自然現象 2.1 地震による損傷の防止 2.1.1 耐震設計

(1) 耐震設計の基本方針

1. 炉心内の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込めの機能については、以下のとおり設計する。

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ように設計する。

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に影響を及ぼさないように設計する。

(4) 荷重の組合せと許容限界 c. 荷重の組合せ (b) 機器・配管系 ト

炉心内の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込めの機能の確認においては、通常運転時の状態で燃料被覆管に作用する荷重及び運転時の異常な過渡変化時の状態のうち地震によって引き起こされるおそれのある事象によって燃料被覆管に作用する荷重と地震力を組み合わせる。

d. 許容限界 (b) 機器・配管系 ヘ

炉心内の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込めの機能については、以下のとおりとする。

i) 弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力との組合せに対する許容限界

応答が全体的におおむね弾性状態にとどまることとする。

ii) 基準地震動による地震力との組合せに対する許容限界

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とど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とする。

なお、燃料被覆管以外の発電用原子炉施設に関する耐震設計の基本方針は、本工事計画変更認可申請において変更は行わない。

(2) 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る設計方針

燃料の機械設計においては、燃料被覆管応力、累積疲労サイクル、過度の寸法変化防止に対する設計方針を満足するように燃料要素の設計を行うが、(1)の設計方針を満足させるための設計に当たっては、これらのうち燃料被覆管への地震力の影響を考慮すべき項目として、燃料被覆管応力及び累積疲労サイクルを評価項目とする。

また、評価においては、内外圧差による応力、熱応力、水力振動による応力等の他、地震による応力を考慮し、設計疲労曲線としては、Langer-0' Donnell の曲線を使用する。

(3) 評価対象燃料

東海第二発電所で使用する既認可燃料体を対象とする。具体的には、 9×9 燃料 (A 型) 及び 9×9 燃料 (B 型) を評価対象とする (添付資料 3)。

(4) 荷重の組合せと許容限界

(2)で示した、燃料被覆管閉じ込め機能評価において地震動の影響を考慮すべき項目である「燃料被覆管応力」及び「燃料被覆管疲労」の評価に対して考慮する荷重の組合せ及び許容限界は表 2.3-1 のとおりである。

また、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。

表 2.3-1 考慮する荷重の組合せ及び許容限界

荷重の組合せ	許容応力 状態	許容限界	
		一次＋二次応力	一次＋二次＋ピーク応力
$D + P + M + S_d$	Ⅲ _A S	$S_y^{*1, *2, *3}$	S_d 又は S_s 地震動のみによる疲労解析を行い、運転状態Ⅰ，Ⅱ ^{*4} における累積疲労係数との和が 1.0 未満であること。
$D + P + M + S_s$	Ⅳ _A S	$S_u^{*1, *2, *3}$	

注記 *1：せん断歪エネルギー説に基づく相当応力に対して評価する。

*2：使用温度及び照射の効果を考慮して許容値を設定する。

*3：許容応力状態Ⅳ_A Sにおける応力評価で許容応力 S_y を満足することを示してもよい。

*4：運転時の異常な過渡変化時として、運転状態Ⅲの制御棒引抜き及び再循環停止ループ誤起動（冷）も考慮する。

2.4 地震時の燃料被覆管閉じ込め機能評価方針

図 2.4-1 に燃料被覆管閉じ込め機能評価フロー，図 2.4-2 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。

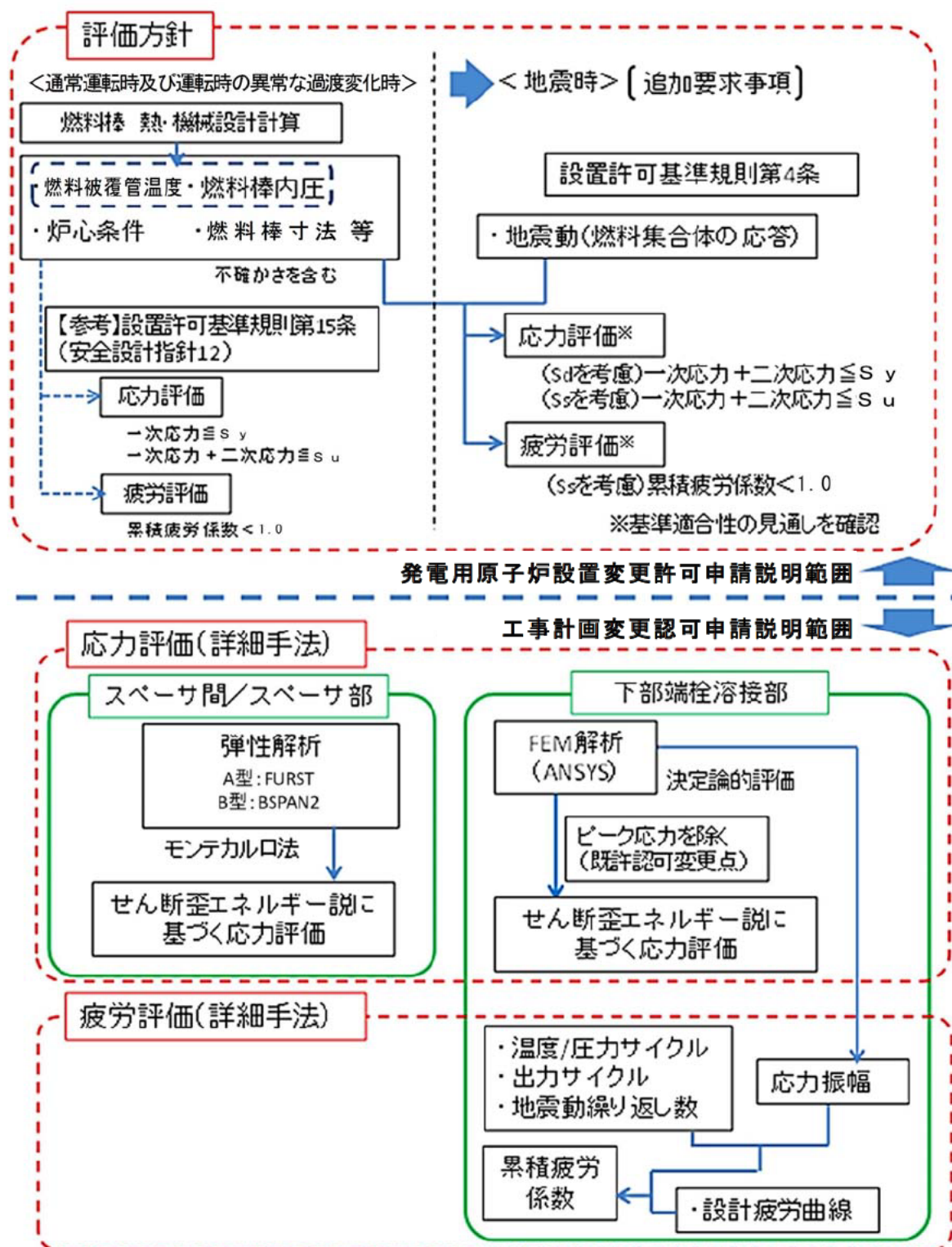
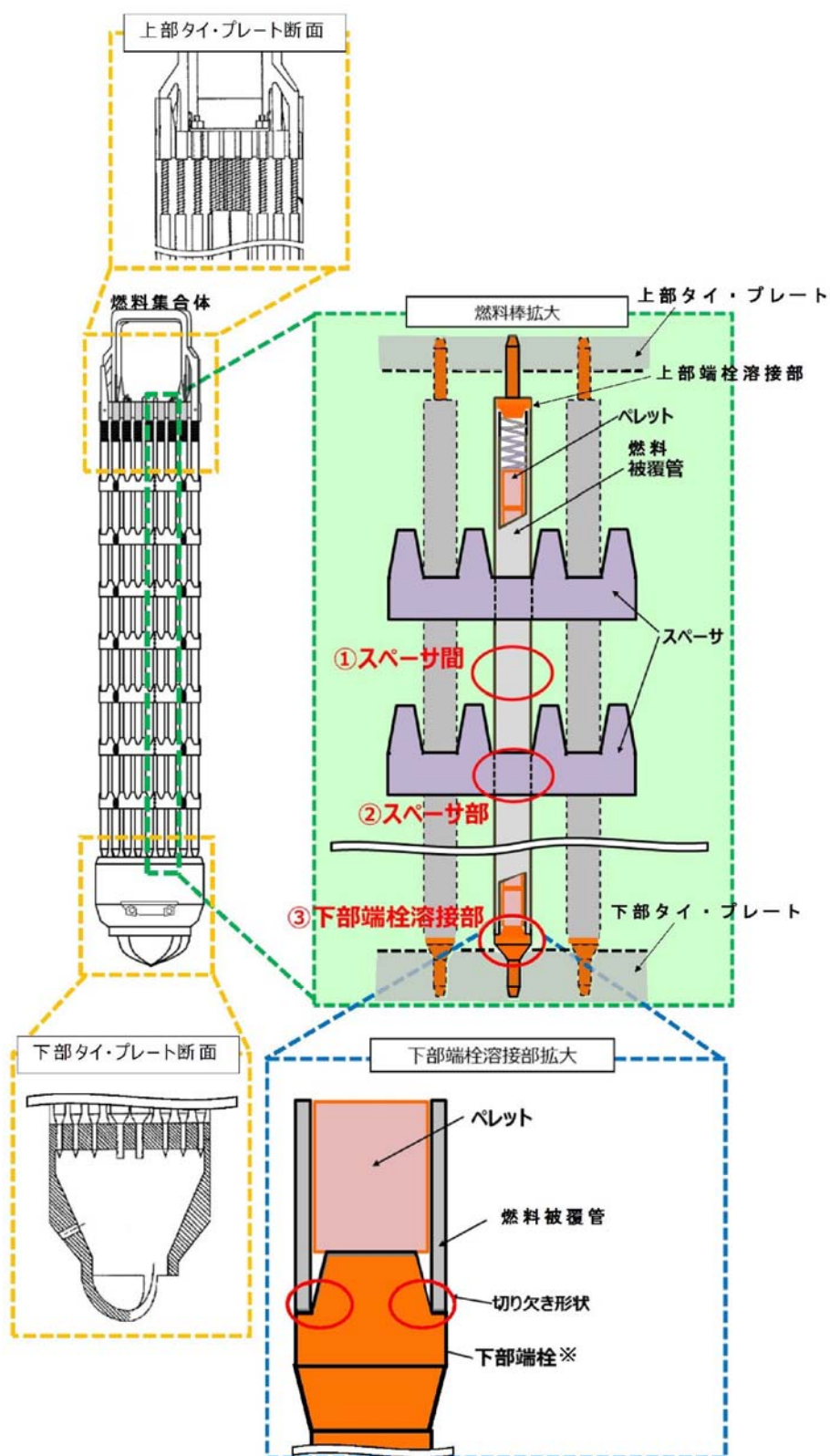


図 2.4-1 燃料被覆管閉じ込め機能評価フロー



※下部端栓の材料は燃料被覆管と同じジルコニウム合金（ジルカロイ-2）を使用。溶加材を用いずに付け合わせ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。

図 2.4-2 評価対象部位（イメージ）

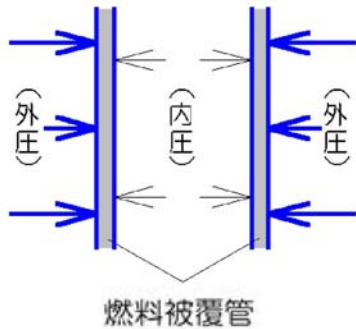
3. 燃料被覆管応力評価手法及び評価結果

3.1 燃料被覆管に発生する応力

各評価部位において発生する応力として以下の要因を考慮している。ここで、(1)～(9)は運転中（通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時）に発生する応力であり、(10)～(12)は地震時に付加される応力である。

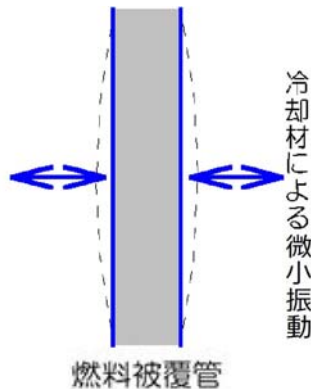
(1) 内外圧差に基づく応力（一次応力）

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



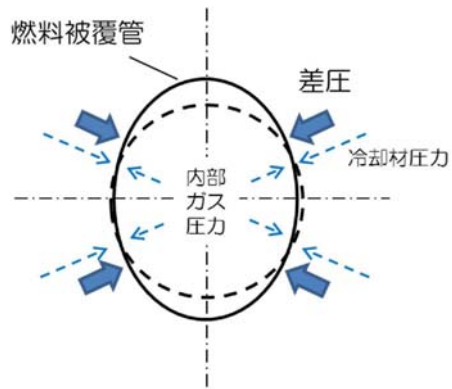
(2) 水力振動に基づく応力（一次応力）

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



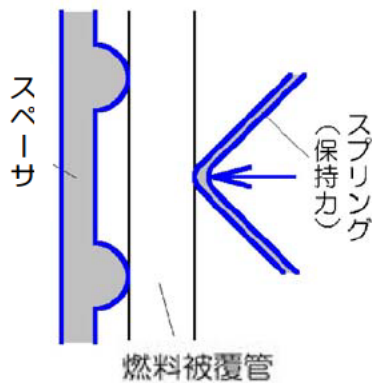
(3) 楕円度に基づく応力（一次応力）

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



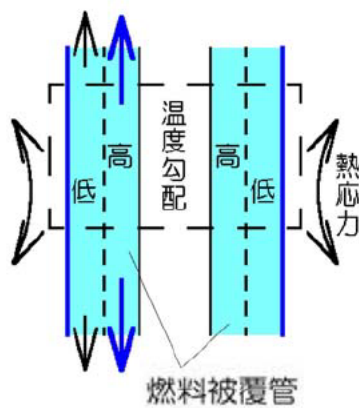
(4) スペーサの接触力に基づく応力（二次応力）

スペーサのばね押圧により，スペーサ部に発生する応力



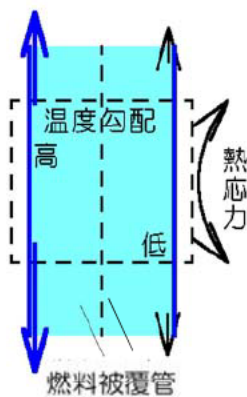
(5) 半径方向温度差に基づく応力（二次応力）

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



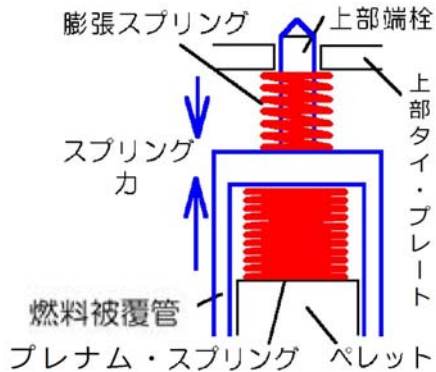
(6) 円周方向温度差に基づく応力（二次応力）

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）



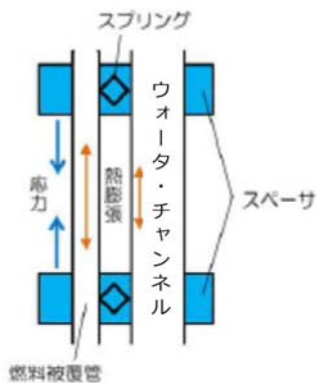
- (7) 膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力（一次応力）

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）



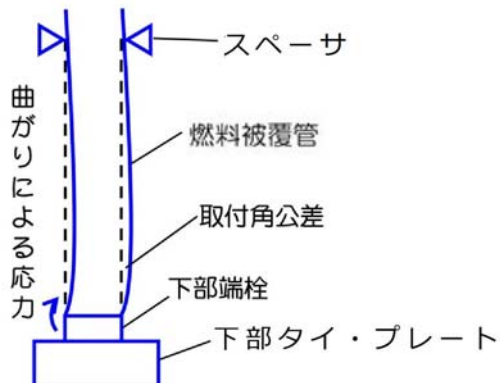
- (8) ウォータ・チャンネルと燃料被覆管の熱膨張差による応力（二次応力）

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））



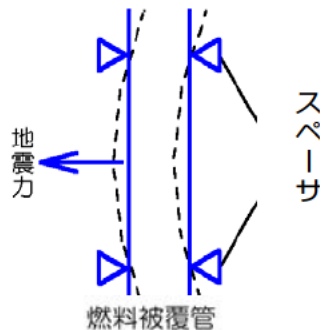
- (9) 端栓取付角公差による曲がりに基づく応力（二次応力）

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））



(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（一次応力）

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（二次応力）

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（一次応力）

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おり、本手法の保守性については添付資料 4 に示す。

3.2 燃料被覆管の応力評価における地震加速度

地震時における燃料被覆管の応力評価においては、2018 年 10 月 18 日付原規規発第 1810181 号にて認可された燃料集合体の地震応答解析により得られた水平方向及び鉛直方向の最大応答加速度を 1.5 倍した値を用いる。スペーサ間及びスペーサ部の応力評価では、燃料集合体に作用する応答相対変位、水平加速度及び鉛直加速度として、それぞれ、16.8 mm、 19.8 m/s^2 及び 12.2 m/s^2 を用いる。また、下部端栓溶接部の応力評

価では、燃料集合体に作用する応答相対変位、水平加速度及び鉛直加速度として、それぞれ、16.8 mm、14.0 m/s² 及び 12.2 m/s² を用いる。

3.3 燃料被覆管応力評価手法

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。

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による統計処理（添付資料 5 参照）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、燃料棒寸法及び許容応力等の統計的入力変数の関数となる。ここで、燃料被覆管及び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。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。地震時のスペーサ間及びスペーサ部の応力評価のフローを、図 3.3-1 に示す。

9×9 燃料（A 型）及び 9×9 燃料（B 型）について、スペーサ間及びスペーサ部に発生する応力の計算式を、それぞれ表 3.3-1～表 3.3-2 及び表 3.3-5～表 3.3-6 に示す。また、使用した記号の説明をそれぞれ、表 3.3-3 及び表 3.3-7 に示す。さらに、スペーサ間及びスペーサ部の地震時の応力評価における応力の組合せを 9×9 燃料（A 型）及び 9×9 燃料（B 型）についてそれぞれ、表 3.3-4 及び表 3.3-8 に示す。

地震時のスペーサ間及びスペーサ部の応力評価に用いる解析コードは、9×9 燃料（A 型）については「F U R S T」、9×9 燃料（B 型）については「B S P A N 2」を用いる。

下部端栓溶接部における応力評価については、形状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 6 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。

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、燃料被覆

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、熱膨張差による熱応力の分布、運転時及び地震時の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。機械解析では、

を用いた発生応力が大きくなる解析モデルを用いる。

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、表 3.3-9 の項目を考慮している。なお、
 表 3.3-9 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。

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時並びに地震時に下部端栓溶接部に作用する荷重として表 3.3-10 を考慮する。地震時には水平地震加速度、燃料集合体の相対変位及び鉛直地震加速度により発生する軸方向荷重が反転することを考慮して、軸方向の引張応力及び圧縮応力の絶対値が個々に大きくなるように組み合わせた解析を実施する。

地震時の下部端栓溶接部の応力評価のフロー、熱解析モデル及び機械解析モデルをそれぞれ図 3.3-2 及び図 3.3-3～図 3.3-5 に示す。

地震時の下部端栓溶接部の応力評価解析コードは、9×9 燃料（A 型）及び 9×9 燃料（B 型）ともに「ANSYS」（添付資料 7 参照）を用いる。

燃料被覆管の許容応力は、放射線照射量と燃料被覆管温度に依存するため、燃料メーカー毎の試験結果に基づき図 3.3-6～図 3.3-9 のように設定する。

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

表 3.3-1 スペーサ間及びスペーサ部の応力の計算式
(通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時)(9×9燃料(A型))

応力の種類	応力の成分	外面	内面
(1)内外圧力差に基づく応力 (一次応力)	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(2)水力振動に基づく応力 (一次応力)	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(3)楕円度に基づく応力 (一次応力)	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(4)スペーサの接触力に基づく応力 (二次応力)	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(5)半径方向温度差に基づく熱応力 (二次応力)	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(6)円周方向温度差に基づく熱応力 (二次応力)	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		

表 3.3-1 スペーサ間及びスペーサ部の応力の計算式
(通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時)(9×9燃料(A型))(続き)

応力の種類	応力の成分	外面	内面
(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)	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		

表 3.3-2 スペーサ間及びスペーサ部の応力の計算式(地震時)
(9×9燃料(A型))

応力の種類	応力の成分	外面	内面
(8)スペーサ間での燃料棒のたわみに基づく応力 (一次応力) (スペーサ間)	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(スペーサ部)	軸方向		
(9)チャンネル・ボックスのたわみに基づく応力 (二次応力)	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(10)鉛直地震加速度に基づく応力 (一次応力)	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		

表 3.3-3 スペーサ間及びスペーサ部の応力計算式の記号の説明（9×9燃料（A型））

記号	記号の説明	単位
A	定数	—
P_c	冷却材圧力	MPa
P_g	燃料棒内圧 ^{*1}	MPa
r_1	燃料被覆管の外半径 ^{*2}	mm
r_2	燃料被覆管の内半径 ^{*2}	mm
r_m	燃料被覆管の平均半径 ^{*2}	mm
t	燃料被覆管の肉厚 ^{*2}	mm
d	燃料被覆管の楕円度	mm
q_{cr}	燃料被覆管の臨界座屈荷重	MPa
f	スペーサ接触力	N
α	燃料被覆管の熱膨張率	°C ⁻¹
E	燃料被覆管の縦弾性係数	MPa
ν	燃料被覆管のポアソン比	—
ℓ	スペーサ間距離	mm
δ	水力振動による燃料棒の振幅	mm
ΔT_1	燃料被覆管の内外面温度差	°C
ΔT_2	燃料被覆管の円周方向温度差	°C
F	膨張スプリング等による軸方向荷重に基づき燃料棒に作用する力	N
G _h	地震時の水平方向最大加速度	m/s ²
W _s	スペーサ間距離当たりの燃料棒質量	kg
Z	燃料被覆管の断面係数 ^{*2}	mm ³
L	燃料棒の全長	mm
Y	地震時の燃料集合体の最大変位	mm
W _r	燃料棒の全質量	kg
G _v	地震時の鉛直方向最大加速度	m/s ²

注記 *1：外圧支配条件において評価結果が厳しくなる寿命初期の内圧を使用。

*2：燃料被覆管のライナ部を無視し、照射に伴う腐食減肉を考慮。

表 3.3-4 スペーサ間及びスペーサ部の地震時の応力評価における応力の組合せ

(9×9 燃料 (A 型))

解析分類	評価位置	応力分類	応力組合せ*
閉じ込め機能の 維持	スペーサ間	一次応力	(1)+(2)+(3)+(5)+(6)+(7)+(8)+(9)+(10)
	スペーサ部	+ 二次応力	(1)+(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)+(9)+(10)

注記 * : 表 3.3-1, 表 3.3-2 の応力の種類を示す各番号の応力の組合せを示す。

表 3.3-5 スペーサ間及びスペーサ部の応力の計算式

(通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時)(9×9燃料(B型))

応力の種類	応力の成分	内 面	外 面
(1) 冷却材外圧及び燃料要素内圧によって生じる応力 (一次応力)	円周方向		
	半径方向		
	軸方向		
(2) 燃料被覆管楕円度による曲げ応力 (一次応力)	円周方向		
	半径方向		
	軸方向		
(3) 水力振動による応力 (一次応力)	円周方向		
	半径方向		
	軸方向		
(4) 支持格子保持力による応力 (二次応力)	円周方向		
	半径方向		
	軸方向		
(5) 燃料被覆材径方向温度勾配による応力 (二次応力)	円周方向		
	半径方向		
	軸方向		

表 3.3-5 スペーサ間及びスペーサ部の応力の計算式

(通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時)(9×9燃料(B型))(続き)

応力の種類	応力の成分	内 面	外 面
(6) 燃料被覆材周方向温度勾配による応力 (二次応力)	円周方向		
	半径方向		
	軸方向		
(7) ウォータ・チャンネルと燃料要素の熱膨張差による応力 (二次応力)	円周方向		
	半径方向		
	軸方向		
(8) 膨張スプリング及びプレナムスプリングによる応力 (二次応力)	円周方向		
	半径方向		
	軸方向		

表 3.3-6 スペーサ間及びスペーサ部の応力の計算式(地震時)(9×9燃料(B型))

応力の種類	応力の成分	内 面	外 面
(9) 支持格子間たわみによる応力 (二次応力)	円周方向		
	半径方向		
	軸方向		
(10) チャンネル・ボックスのたわみに基づく応力 (二次応力)	円周方向		
	半径方向		
	軸方向		

表 3.3-7 スペーサ間及びスペーサ部の応力計算式の記号の説明（9×9 燃料（B 型））

記号	記号の説明	単位
P_i	燃料棒内圧	MPa
P_o	冷却材圧力	MPa
r_i	燃料被覆管の内半径	mm
r_o	燃料被覆管の外半径	mm
r_m	燃料被覆管の平均半径	mm
D_o	燃料被覆管の外径	mm
D_i	燃料被覆管の内径	mm
$D_{i\max}$	燃料被覆管の最大内径	mm
$D_{i\min}$	燃料被覆管の最小内径	mm
t	燃料被覆管の肉厚	mm
ν	燃料被覆管のポアソン比	—
E	燃料被覆管の縦弾性係数	MPa
I	燃料被覆管の断面二次モーメント $I = \frac{\pi}{64}(D_o^4 - D_i^4)$	mm ⁴
ω	$\omega = \frac{1}{4} \cdot (D_{i\max} - D_{i\min})$	mm
P_{cr}	$P_{cr} = \frac{E}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{r_m}\right)^3$	MPa
l	スペーサ間距離	mm
A	水力振動による燃料棒の振幅	mm
L	燃料棒の全長	mm
W_o	燃料要素単位長重量*	kg/mm
G_h	地震時の水平方向最大加速度	m/s ²
Y	地震時の燃料集合体の最大変位	mm
$C_1 \sim C_7$	定数	—
ΔT	燃料被覆管の内外面温度差	℃
ΔT_i	燃料被覆管の内面周方向最大温度差	℃
ΔT_o	燃料被覆管の外周方向最大温度差	℃
ΔT_m	$\Delta T_m = \frac{\Delta T_i + \Delta T_o}{2}$	℃
δ	燃料被覆管の外径と内径の比	—
α_r	燃料被覆管の半径方向熱膨張係数	℃ ⁻¹
α_z	燃料被覆管の軸方向熱膨張係数	℃ ⁻¹
P	燃料要素と支持格子の接触力	N
N_1	燃料体当たりの支持格子数	—
N_2	タイ・ロッド燃料要素数	—
N_3	標準燃料要素数	—
μ	支持格子－燃料要素間の摩擦係数	—

表 3.3-7 スペーサ間及びスペーサ部の応力計算式の記号の説明（9×9 燃料（B 型））
（続き）

記号	記号の説明	単位
S	燃料被覆材断面積 $S = \pi \cdot (r_o^2 - r_i^2)$	mm ²
F _i	内部スプリング力	N
F _e	膨張スプリング力	N

注記 *：鉛直地震加速度に基づく応力は，地震時鉛直方向最大加速度を見掛けの質量増加として扱い，燃料要素単位長質量 W_0 で考慮している。

表 3.3-8 スペーサ間及びスペーサ部の地震時の応力評価における応力の組合せ
（9×9 燃料（B 型））

解析分類	評価位置	応力分類	応力組合せ*
閉じ込め機能の 維持	スペーサ間	一次応力	(1)+(2)+(3)+(5)+(6)+(7)+(8)+(9)+(10)
	スペーサ部	+二次応力	(1)+(2)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)+(9)+(10)

注記 *：表 3.3-5，表 3.3-6 の応力の種類を示す各番号の応力の組合せを示す。

表 3.3-9 下部端栓溶接部の熱解析で考慮する項目

考慮する項目	
ペレットの発熱	
ジルカロイ部材の γ 発熱*	
ペレットー被覆管ギャップ熱伝達	
被覆表面熱伝達係数	
ペレット及びジルカロイ部材の熱伝導率	

注記 * : 9×9 燃料 (A 型) の場合に考慮

表 3.3-10 下部端栓溶接部の応力評価で考慮する荷重

考慮する荷重	条件
下部端栓及び被覆管の温度分布 (熱解析結果を読み込む)	通常運転時及び過渡時
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)	
膨張スプリング等による軸方向荷重 (軸方向応力) * 1	
燃料被覆管の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) * 1	
燃料棒のたわみに基づく曲げ荷重 (曲げ応力)	地震時
チャンネル・ボックスのたわみに基づく曲げ荷重 (曲げ応力)	
鉛直地震加速度に基づく軸方向荷重 (軸方向応力) * 2	

注記 * 1 : 9×9 燃料 (A 型) の場合に考慮

* 2 : 9×9 燃料 (B 型) の場合, 鉛直方向地震加速度は地震時にかかる荷重への見掛けの質量増加として考慮

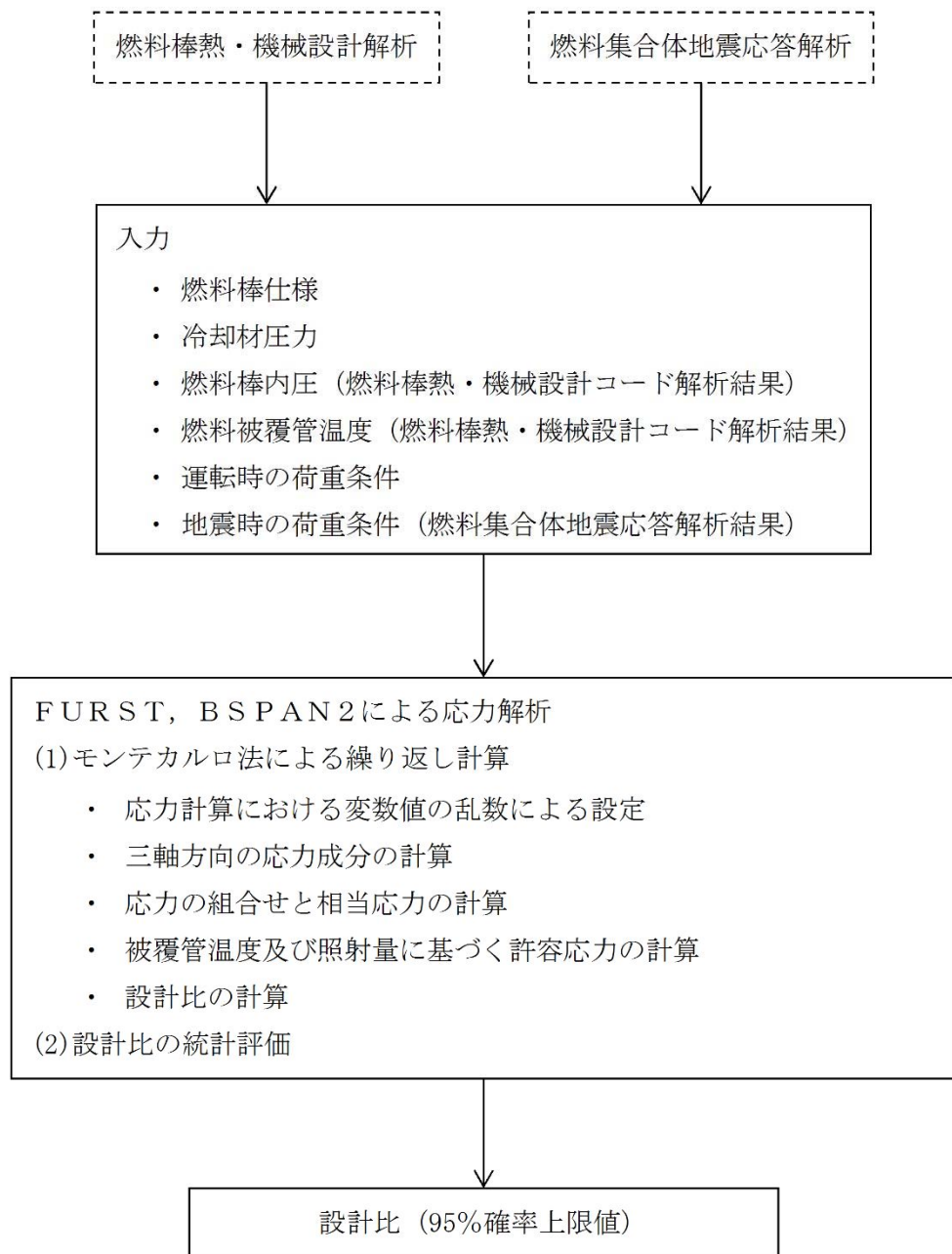


図 3.3-1 地震時のスペーサ間及びスペーサ部の応力評価のフロー

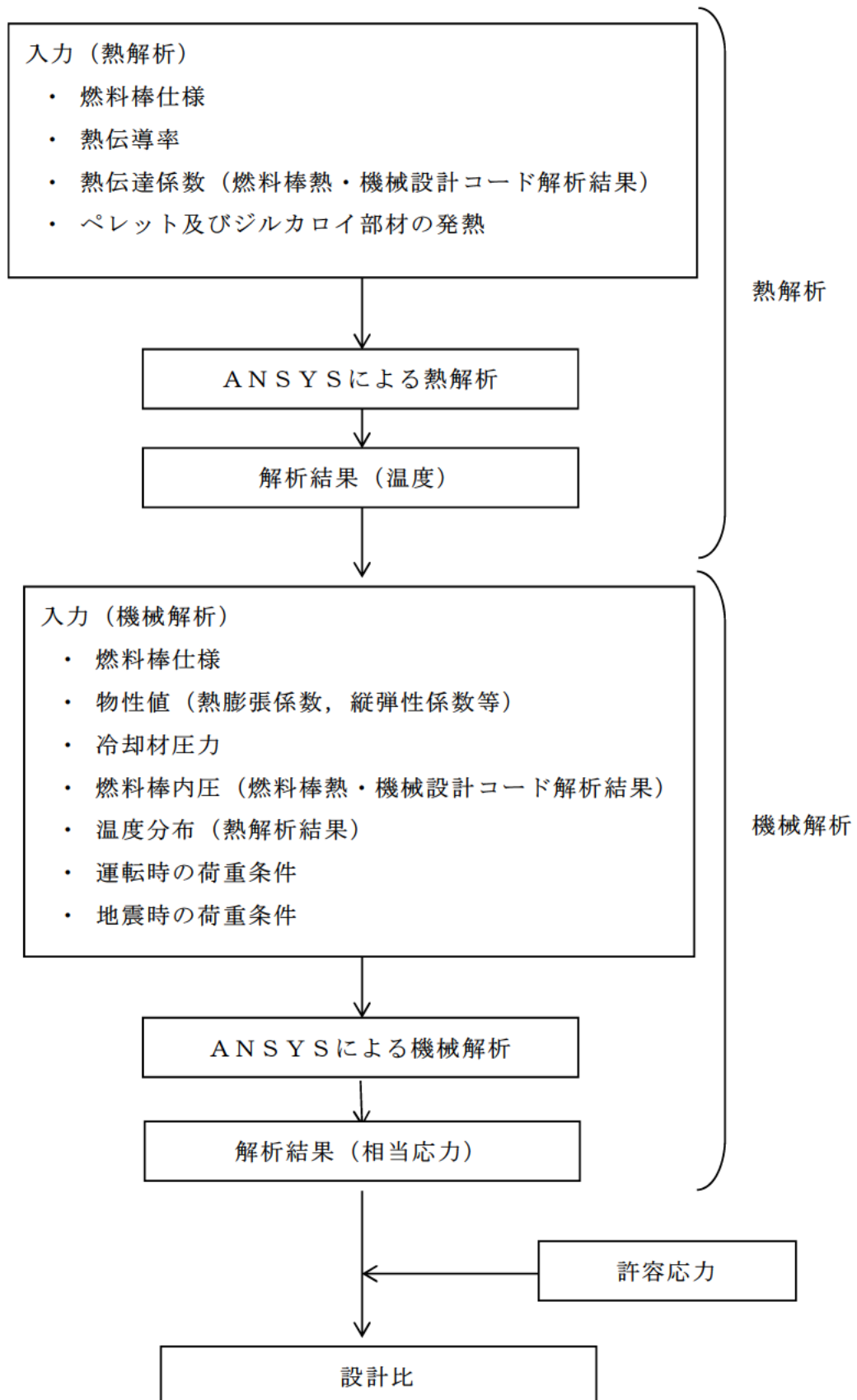


図 3.3-2 地震時の下部端栓溶接部の応力評価のフロー

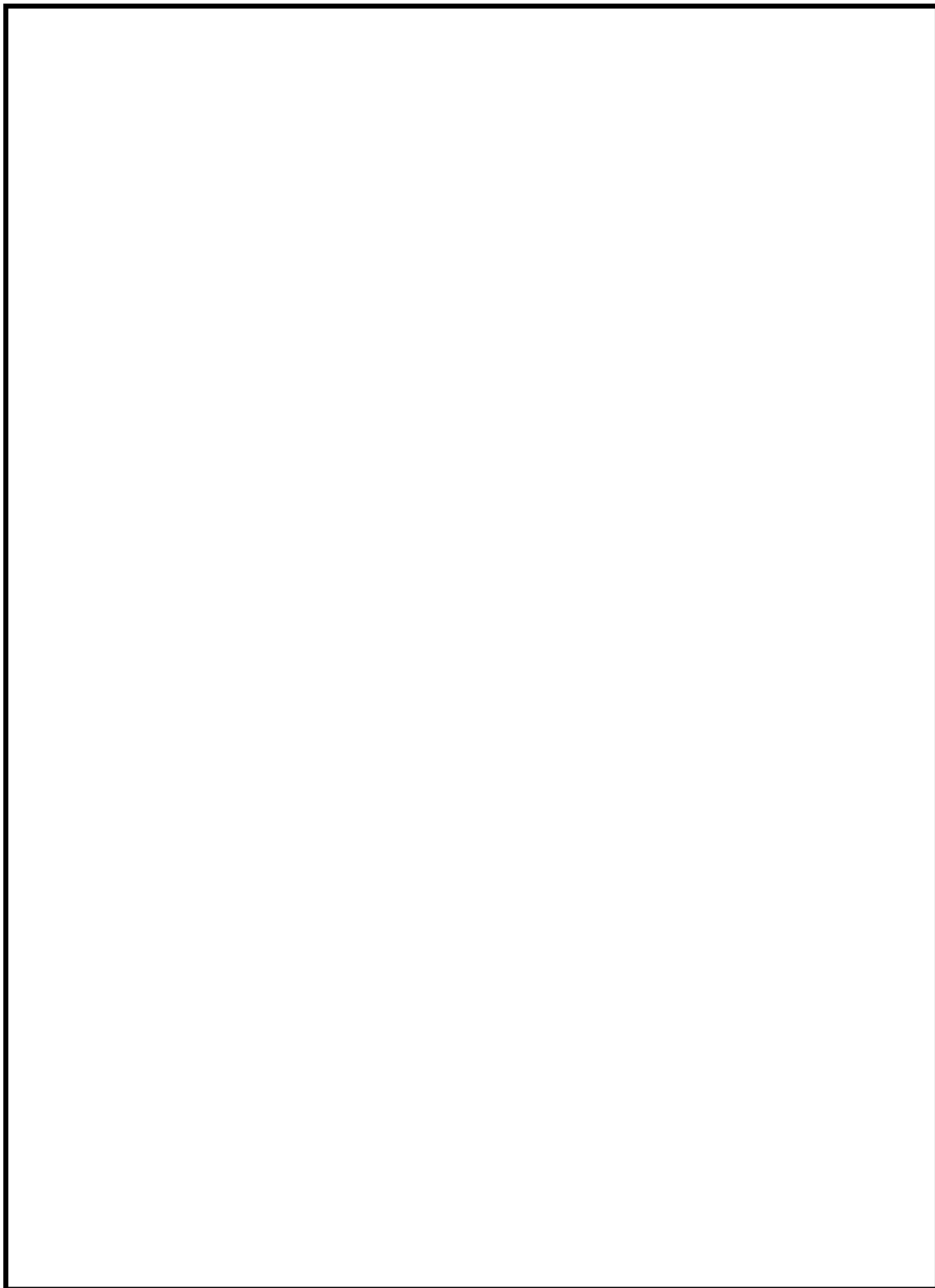


図 3.3-3 下部端栓溶接部の応力評価における熱解析モデル（9 × 9 燃料（A 型））

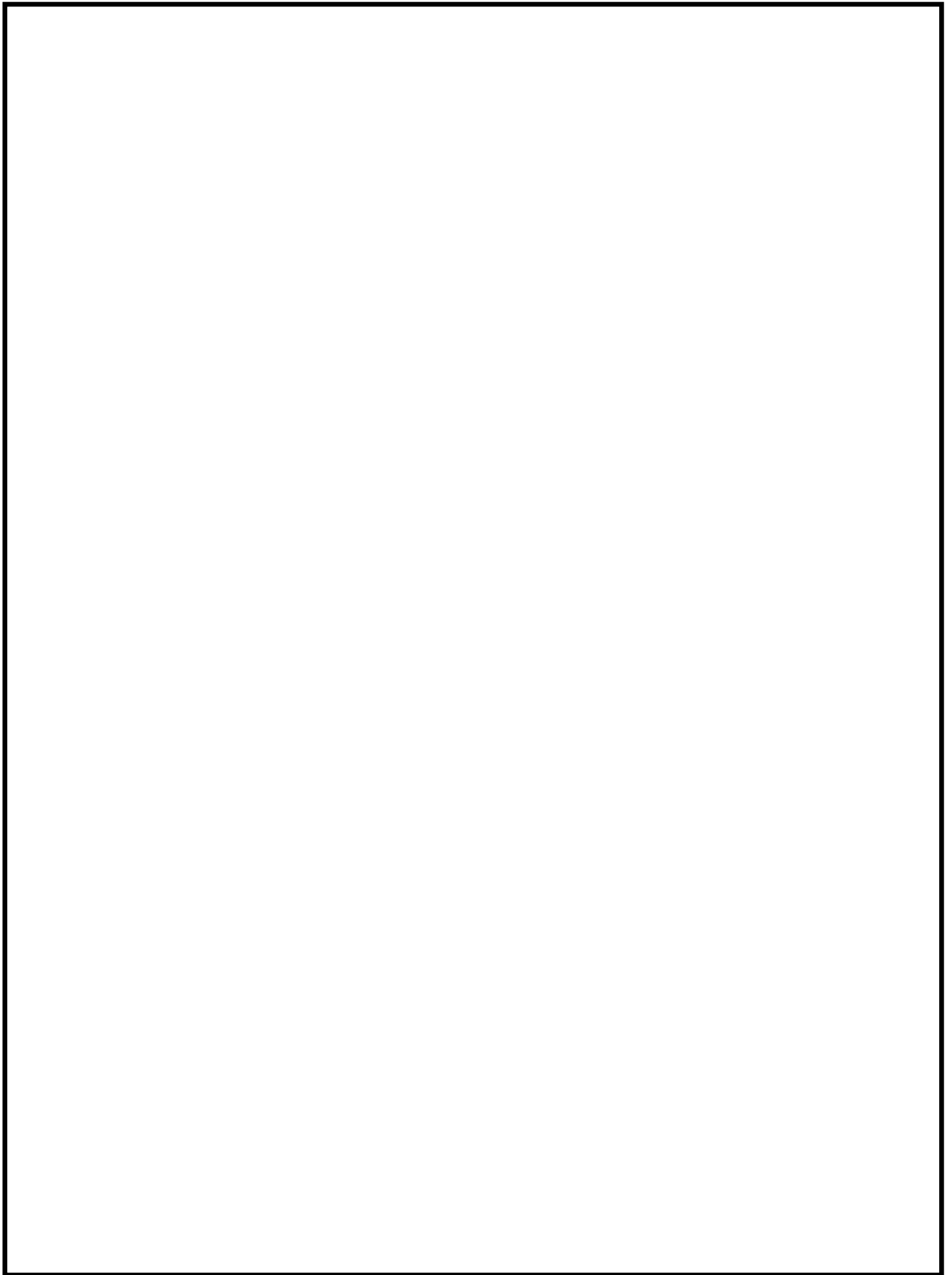


図 3.3-4 下部端栓溶接部の応力評価における機械解析モデル（9 × 9 燃料（A 型））

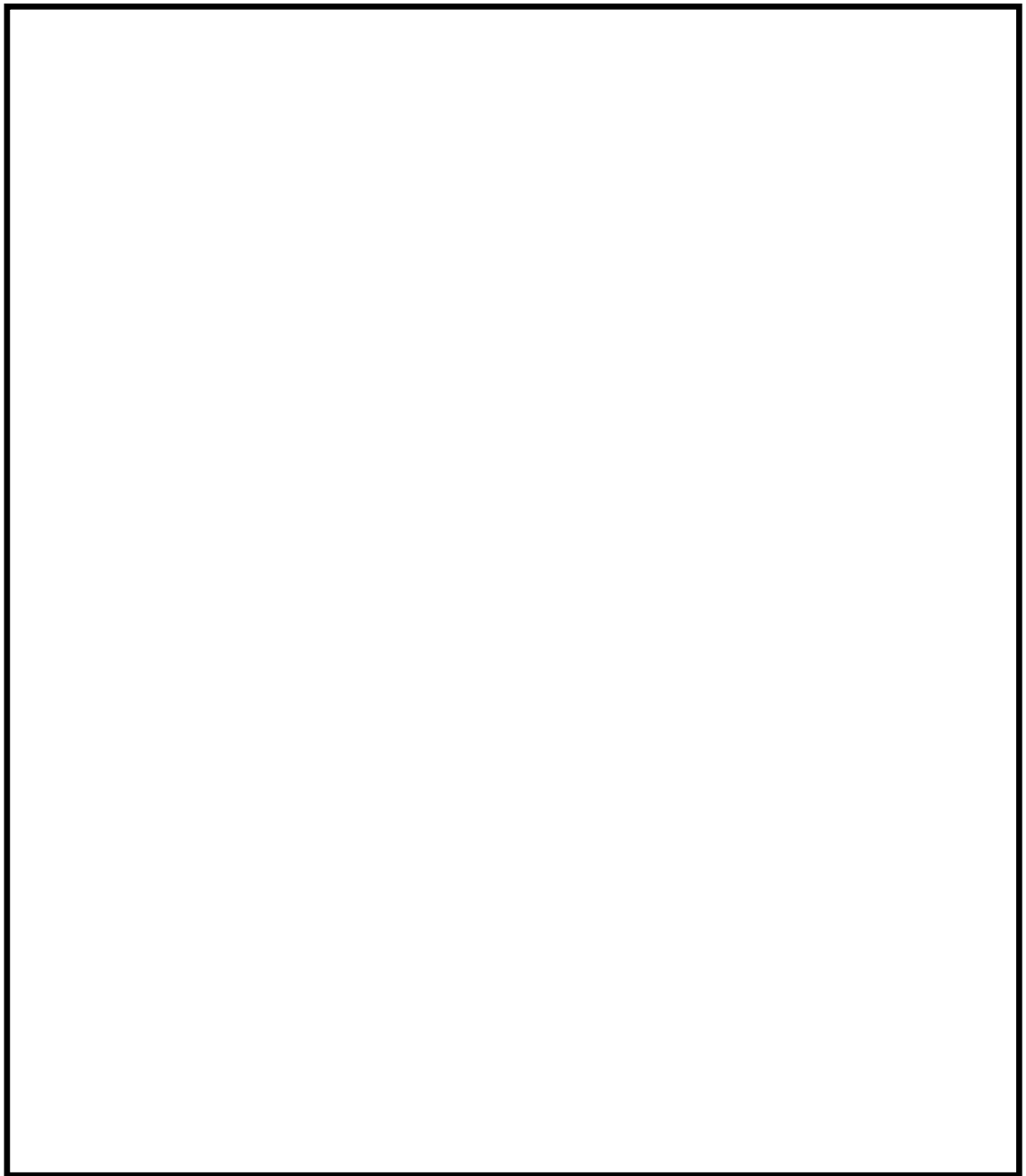


図 3.3-5 下部端栓溶接部の応力評価における熱・機械解析モデル
(9 × 9 燃料 (B 型))

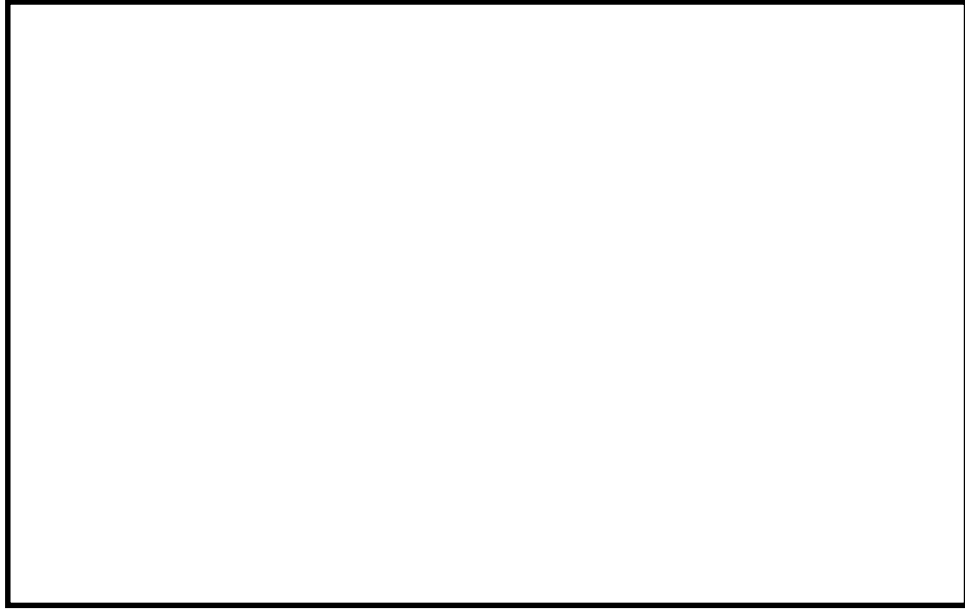


図 3.3-6 9×9 燃料（A型）燃料被覆管の降伏応力設計値（公称値）

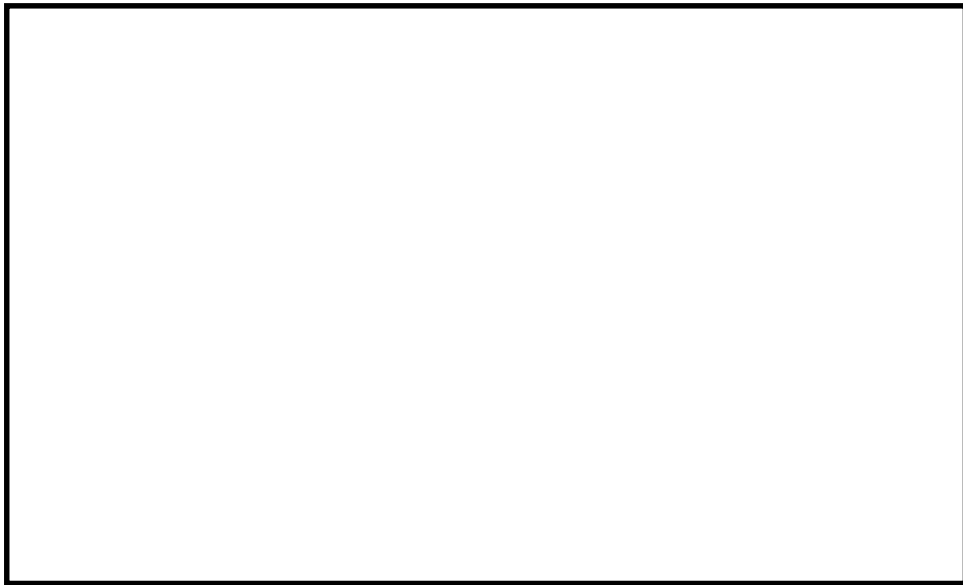


図 3.3-7 9×9 燃料（A型）燃料被覆管の引張強さ設計値（公称値）

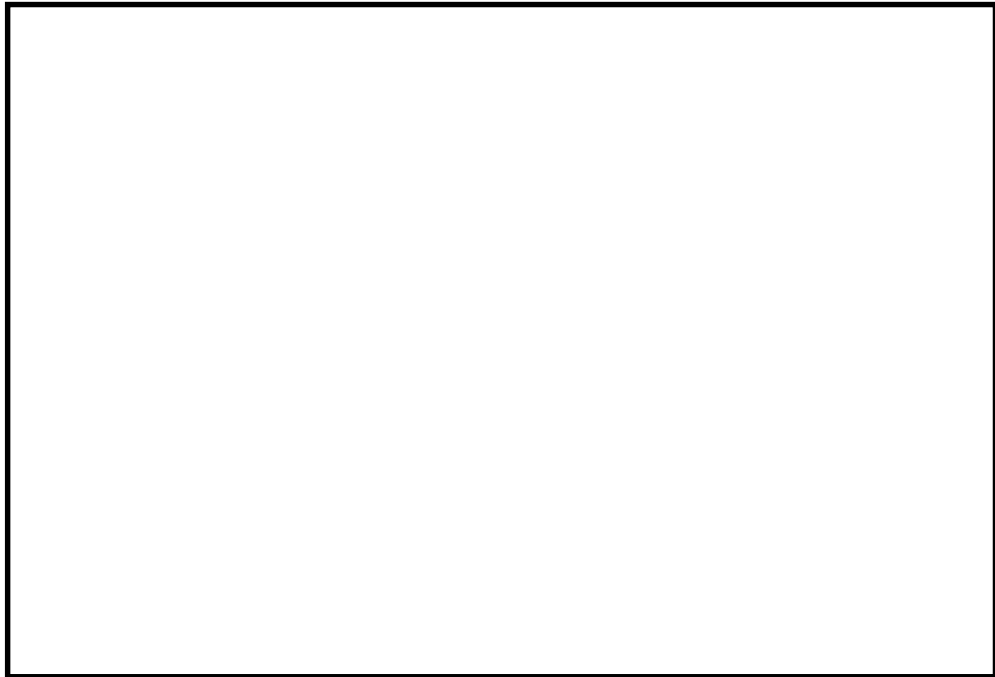


図 3.3-8 9 × 9 燃料（B 型）燃料被覆管のスペーサ間，
スペーサ部の引張強さ及び降伏応力設計値（公称値）

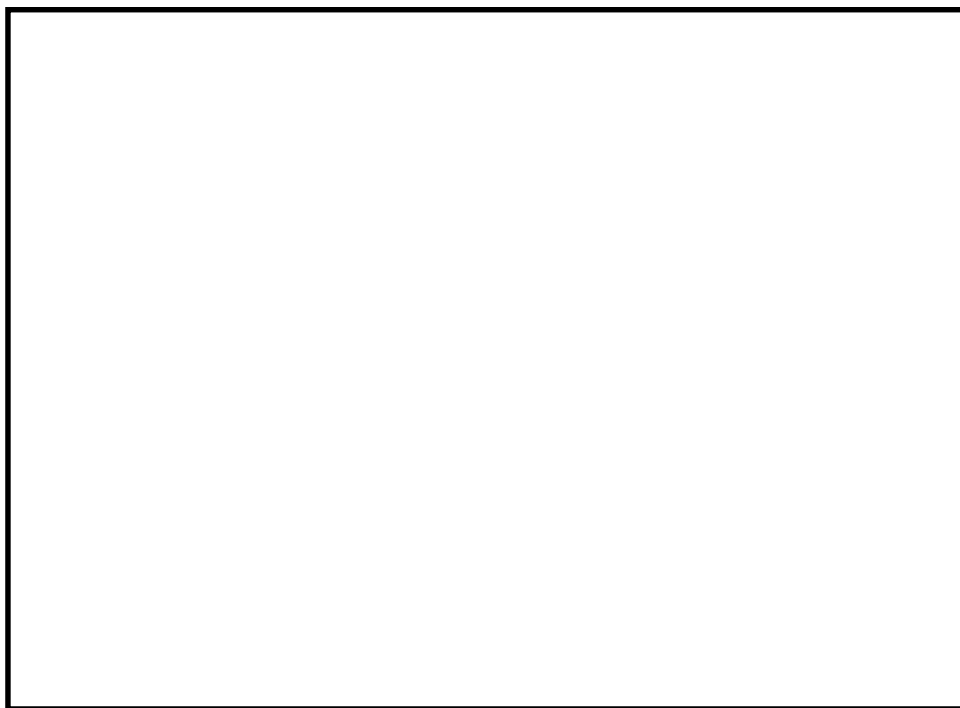


図 3.3-9 9 × 9 燃料（B 型）燃料被覆管の下部端栓溶接部の
引張強さ及び降伏応力設計値（公称値）

3.4 燃料被覆管応力評価手法の保守性

燃料被覆管応力評価に当たっては、各応力に対し、下記のとおり厳しい条件に基づき評価を行っており、保守性を有している

(1) 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時荷重の評価条件

- ・運転時の異常な過渡変化事象として、様々な事象の中から燃料被覆管応力が厳しくなる2事象（圧力過渡：負荷の喪失，出力過渡：出力運転中の制御棒の異常な引き抜き*）を選定している。

注記 *：運転状態Ⅲの事象であり地震によって引き起こされる事象ではないが，出力過渡における最大過出力を与える事象として，保守側に対象とした事象。

- ・通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時について，寿命初期／中期／末期を対象に評価を行い，燃料タイプ毎に最も厳しい条件においても判断基準を満足することを確認している。
- ・通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の燃料被覆管応力評価で用いる出力履歴は炉内で経験する最大線出力密度を上回る履歴として設定しており，燃料体設計認可等と同じ保守性を持っている。

(2) 設計地震荷重の評価条件

- ・複数の S_s 地震動を包絡する評価用震度を1.5倍した加速度を用いている。
- ・地震による応力の評価に当たっては，運転期間中における燃料集合体の照射の影響も考慮している。

(3) 各応力最大値の軸方向位置の取扱い

- ・燃料被覆管（スペーサ間及びスペーサ部）の最大応力が発生する軸方向位置は，各応力で異なるが，同一の軸方向位置で発生すると仮定し，各応力の引張／圧縮方向を考慮した全ての組合せのうちで最大となる応力を用いて評価している。

(4) 許容応力の保守性

- ・基準地震動 S_s に対し，本評価においては許容応力として引張強さ S_u ではなく降伏応力 S_y を用いている。
- ・降伏応力 S_y は，放射線照射量と燃料被覆管温度に依存するため，燃料メーカー毎の試験結果に基づき，試験結果のばらつきによる不確定性を考慮して保守的に設定している。

3.5 燃料被覆管応力評価結果

東海第二発電所で使用する既認可燃料体の 9×9 燃料（A型）及び 9×9 燃料（B型）を対象とした燃料被覆管応力評価結果をそれぞれ表 3.5-1 及び表 3.5-2 に示す。

表 3.5-1 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 (設計比)	スペーサ部 (設計比)	下部端栓 溶接部*1 (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*2	寿命初期	0.70	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*3	寿命初期	0.65	0.45	—
		寿命中期	0.27	0.25	—
		寿命末期	0.22	0.21	—

注記 *1：下部端栓溶接部の評価では，下部端栓溶接部の燃料棒の出力が低く，出力過渡時に発生する応力は圧力過渡時に発生する応力より小さいため，圧力過渡時を評価対象とする。

*2：冷却材圧力 MPa[abs]（負荷の喪失）

*3：120 %出力（出力運転中の制御棒の異常な引き抜き）

表 3.5-2 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 (設計比)	スペーサ部 (設計比)	下部端栓 溶接部* ¹ (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* ²	寿命初期	0.66	0.71	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* ³	寿命初期	0.63	0.66	—
		寿命中期	0.34	0.29	—
		寿命末期	0.25	0.23	—

注記 *1：下部端栓溶接部の評価では，下部端栓溶接部の燃料棒の出力が低く，出力過渡時に発生する応力は圧力過渡時に発生する応力より小さいため，圧力過渡時を評価対象とする。

*2：冷却材圧力 MPa[abs]（負荷の喪失）

*3：120 %出力（出力運転中の制御棒の異常な引き抜き）

4. 燃料被覆管疲労評価手法及び評価結果

4.1 燃料被覆管疲労評価手法

解析コード「ANSYS」で得られた応力集中によるピーク応力を含む下部端栓溶接部の応力強さに基づき、地震荷重の繰り返し回数により燃料被覆管の疲労評価を実施する。地震時の下部端栓溶接部の疲労評価フローを図 4.1-1 に示す。

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-O'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一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。

(1) 地震時の繰り返し荷重による応力振幅

9×9 燃料（A 型）については、作用方向が反転する繰り返し荷重により三軸方向の応力成分の大小関係が大きく変化するため主応力の方向が有意に変化することから、J I S B 8266「圧力容器の構造－特定規格 附属書 8（規定）圧力容器の応力解析及び疲労解析」の 3.2.1 a) 2) の主応力方向が変動する場合の応力強さ振幅の算出方法に基づき、応力強さの振幅を評価する。 9×9 燃料（B 型）については、延性材料に対する評価においてよく一致することが知られている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の振幅を評価する。

(2) ジルカロイの設計疲労曲線

燃料被覆管の疲労評価に用いるジルカロイの設計疲労曲線を図 4.1-2 に示す。(1)の方法で評価された地震時の繰り返し荷重による応力強さの振幅を、図 4.1-2 と対比することにより、許容サイクル数を求める。

(3) 地震荷重の繰り返し回数に基づく累積疲労係数の評価

地震荷重の繰り返し回数 160 回を(2)で評価される許容サイクル数で除することにより、地震荷重が繰り返された場合の累積疲労係数を評価する。

注記 *：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

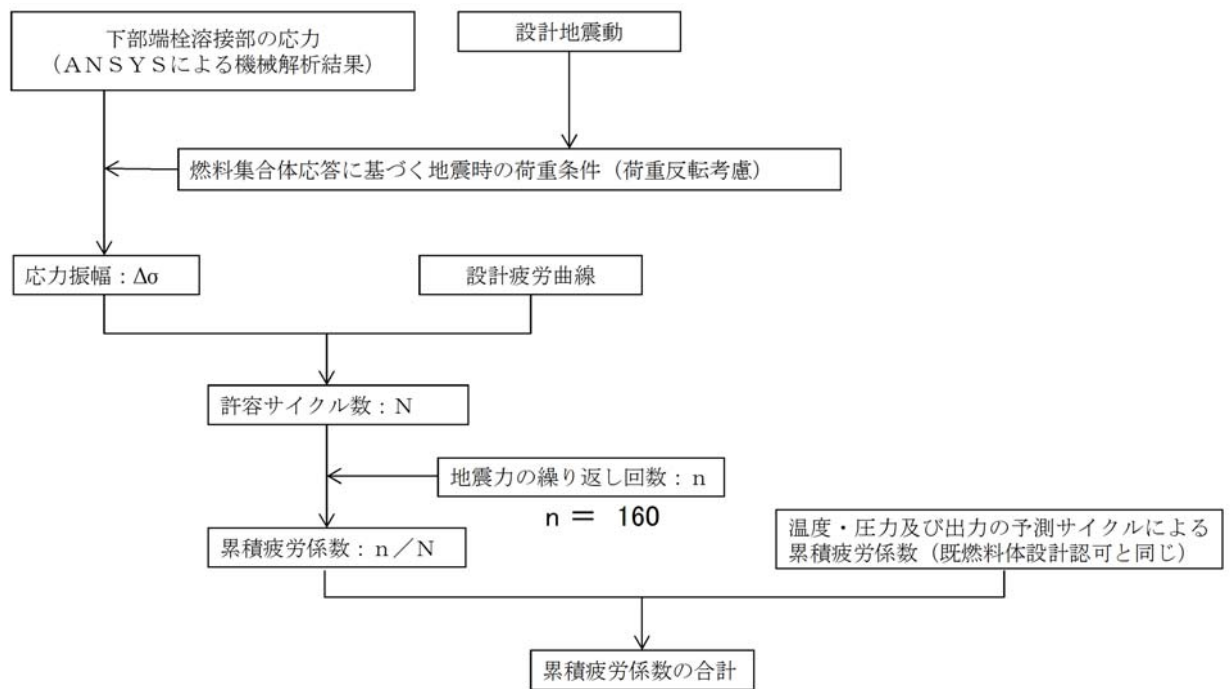


図 4.1-1 地震時の下部端栓溶接部の疲労評価のフロー

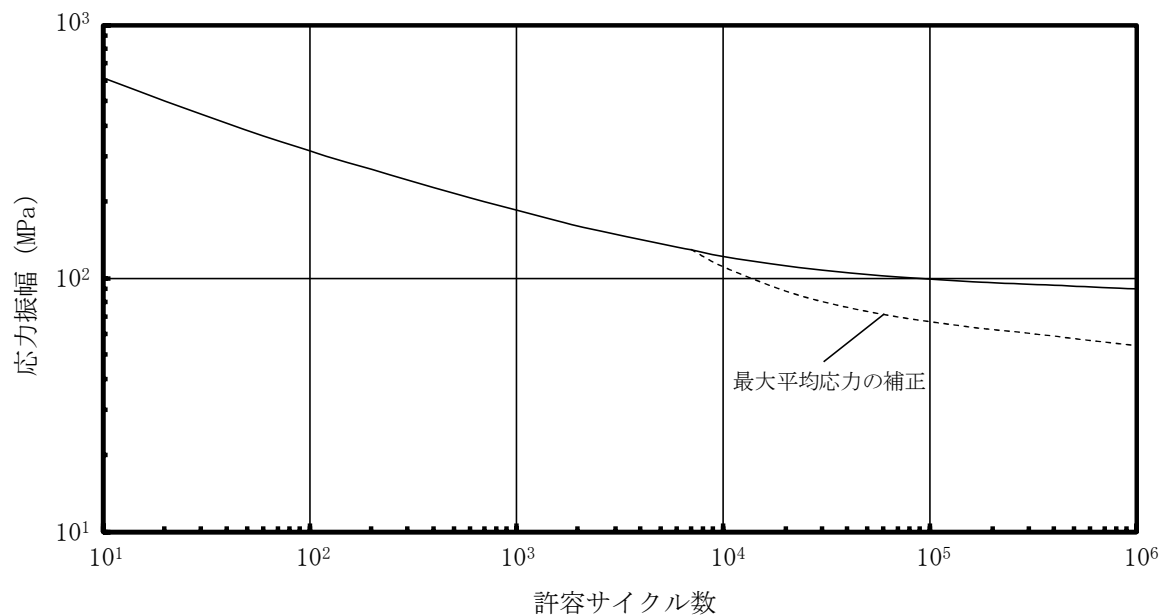


図 4.1-2 ジルカロイの設計疲労曲線*

注記 * : ジルカロイ設計疲労曲線は、参考文献[1]に基づき、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、設計曲線を保守側に見積もるため、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 の設計疲労曲線としている。

4.2 燃料被覆管疲労評価手法の保守性

燃料被覆管疲労評価に当たっては、各応力に対し、下記のとおり厳しい条件に基づき評価を行っており、保守性を有している。

(1) 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時荷重の評価条件

- ・ 保守的に通常運転時の起動・停止回数を多く設定している。
- ・ 運転時の異常な過渡変化事象として、様々な事象の中から燃料被覆管応力が厳しくなる事象（地震時の疲労評価は圧力過渡：負荷の喪失，全寿命を通した疲労評価は出力過渡：出力運転中の制御棒の異常な引き抜き）を選定している。
- ・ 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の燃料被覆管応力評価で用いる出力履歴は炉内で経験する最大線出力密度を上回る履歴として設定しており，燃料体設計認可等と同じ保守性を持っている。

(2) 設計地震荷重の評価条件

- ・ 複数の S_s 地震動を包絡する評価用震度を 1.5 倍した加速度を用いて算出した最大応力が作用すると想定している。

(3) その他保守性

- ・ Langer-0' Donnell は，設計曲線を保守側に見積もるため，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 の設計疲労曲線としている。
- ・ 地震時の応力繰り返し回数（160 回）については，ピーク応力法により，繰り返し回数を計測し，160 回を下回ることを既工認で確認している。

4.3 燃料被覆管疲労評価結果

東海第二発電所において東海第二発電所で使用する既認可燃料体の 9×9 燃料（A 型）及び 9×9 燃料（B 型）を対象とした燃料被覆管疲労評価結果をそれぞれ表 4.3-1 及び表 4.3-2 に示す。

全寿命を通した累積疲労係数（約 $0.003^{[2]}$ （ 9×9 燃料（A 型））及び約 $0.006^{[3]}$ （ 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。

表 4.3-1 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 (MPa)	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 (A)	全寿命を通した 累積疲労係数 (B)	合計 (A+B)
基準 地震動 S _s	寿命 初期	38	1.0×10^6	160	0.00016	0.003^{*1}	0.004^{*2}
	寿命 中期	38	1.0×10^6	160	0.00016	0.003^{*1}	0.004^{*2}
	寿命 末期	38	1.0×10^6	160	0.00016	0.003^{*1}	0.004^{*2}

注記 *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，2009 年 11 月 5 日認可）の記載値を小数点以下第 4 位で切り上げた値。

*2：地震動による疲労係数の増分及び全寿命を通した累積疲労係数をそれぞれ小数点以下第 4 位で切り上げ，足した値。

表 4.3-2 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 (MPa)	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 (A)	全寿命を通した 累積疲労係数 (B)	合計 (A+B)
基準 地震動 S _s	寿命 初期	45	1.0×10^6	160	0.00016	0.006^{*1}	0.007^{*2}
	寿命 中期	45	1.0×10^6	160	0.00016	0.006^{*1}	0.007^{*2}
	寿命 末期	44	1.0×10^6	160	0.00016	0.006^{*1}	0.007^{*2}

注記 *1：東海第二発電所「燃料体設計認可申請書」（20 原燃東第 794 号，2008 年 9 月 12 日認可）の記載値を小数点以下第 4 位で切り上げた値。

*2：地震動による疲労係数の増分及び全寿命を通した累積疲労係数をそれぞれ小数点以下第 4 位で切り上げ，足した値。

5. ま と め

東海第二発電所において、使用する既認可燃料体に対し、地震時における燃料被覆管の放射性物質の閉じ込め機能維持の要求事項に対する評価を実施することにより、改正後の技術基準規則に適合するものであることを確認した。

参考文献

- [1] O'Donnell, W.J., and Langer, B.F., “Fatigue Design Basis for Zircaloy Components”, Nuclear Science and Engineering, 20, 1-12(1964)
- [2] 東海第二発電所「燃料体設計認可申請書」(GNF 燃設認第 36 号, 2009 年 11 月 5 日認可)
- [3] 東海第二発電所「燃料体設計認可申請書」(20 原燃東第 794 号, 2008 年 9 月 12 日認可)

地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能維持に係る工事計画変更認可申請に該当する
技術基準規則の条文整理について

地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能維持に係る工事計画変更認可申請に該当する技術基準規則の条文整理結果について，設計基準対象施設分を表-添 1-1，重大事故等対処施設分を表-添 1-2 にそれぞれ示す。

表-添 1-1 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能維持に係る工事計画変更認可申請に該当する技術基準規則の条文整理（設計基準対象施設）

技術基準規則	適用条文	本申請の内容に 関係あるもの	審査対象 条文	理 由
(第四条) 設計基準対象施設の地盤	○	×	×	設計基準対象施設の地盤については、既工事計画において適合性が確認されている。今回の申請は、設備の設置場所を変更するものではなく、設計基準対象施設の地盤に係る設計に影響を与えるものではないことから、審査対象条文ではない。
(第五条) 地震による損傷の防止	○	○	○	「実用発電用原子炉及びその附属設備の技術基準の一部改正」への適合を確認する必要があるため、変更の工事の内容（本申請内容）に関連し、審査対象条文である。
(第六条) 津波による損傷の防止	○	×	×	津波による損傷の防止については、既工事計画において適合性が確認されている。今回の申請は、対象設備の設置場所の変更や津波防護施設等を変更するものではなく、津波による損傷の防止に係る設計に影響を与えるものではないことから、審査対象条文ではない。
(第七条) 外部からの衝撃による損傷の防止	○	×	×	外部からの衝撃による損傷の防止については、既工事計画において適合性が確認されている。今回の申請は、対象設備の設置場所等を変更するものではなく、外部からの衝撃による損傷の防止に係る設計に影響を与えるものではないことから、審査対象条文ではない。
(第八条) 立ち入りの防止	○	×	×	立ち入りの防止については、既工事計画において適合性が確認されている。今回の申請は、対象設備の設置場所等を変更するものではなく、立ち入りの防止に係る設計に影響を与えるものではないことから、審査対象条文ではない。
(第九条) 発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止	○	×	×	発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止については、既工事計画において適合性が確認されている。今回の申請は、対象設備の設置場所等を変更するものではなく、発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止に係る設計に影響を与えるものではないことから、審査対象条文ではない。
(第十条) 急傾斜地の崩壊の防止	×	×	×	東海第二発電所において急傾斜地崩壊危険区域に指定された箇所はないため、審査対象条文ではない。
(第十一条) 火災による損傷の防止	○	×	×	火災による損傷の防止については、既工事計画において適合性が確認されている。今回の申請は、対象設備の設置場所等を変更するものではなく、火災による損傷の防止に係る設計に影響を与えるものではないことから、審査対象条文ではない。
(第十二条) 発電用原子炉施設内における溢水等による損傷の防止	○	×	×	発電用原子炉施設内における溢水等による損傷の防止については、既工事計画において適合性が確認されている。今回の申請は、対象設備の設置場所等を変更するものではなく、発電用原子炉施設内における溢水等による損傷の防止に係る設計に影響を与えるものではないことから、審査対象条文ではない。
(第十三条) 安全避難通路等	○	×	×	安全避難通路等については、既工事計画において適合性が確認されている。今回の申請は、対象設備の設置場所等を変更するものではなく、安全避難通路等に係る設計に影響を与えるものではないことから、審査対象条文ではない。
(第十四条) 安全設備	○	×	×	安全設備については、既工事計画において適合性が確認されている。今回の申請は、安全設備に係る設計に影響を与えるものではないことから、審査対象条文ではない。
(第十五条) 設計基準対象施設の機能	○	×	×	設計基準対象施設の機能については、既工事計画において適合性が確認されている。今回の申請は、設計基準対象施設の機能に影響を与えるものではないことから、審査対象条文ではない。
(第十六条) 全交流動力電源喪失対策設備	×	×	×	全交流動力電源喪失対策設備に対する要求であり、対象設備は、全交流電源喪失対策設備に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第十七条) 材料及び構造	○	×	×	容器、管、ポンプ、弁若しくはこれらの支持構造物又は炉心支持構造物に対する要求であり、対象設備は、容器、管、ポンプ、弁若しくはこれらの支持構造物又は炉心支持構造物に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第十八条) 使用中の亀裂等による破壊の防止	○	×	×	クラス機器等の使用中の亀裂等による破壊の防止に対する要求であり、対象設備はクラス機器等に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第十九条) 流体振動等による損傷の防止	○	×	×	流体振動等による損傷の防止については、既工事計画において適合性が確認されている。今回の申請は、対象設備の流体振動等による損傷の防止に係る設計に影響を与えるものではないことから、審査対象条文ではない。
(第二十条) 安全弁等	×	×	×	安全弁等に対する要求であり、対象設備は安全弁等に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第二十一条) 耐圧試験等	○	×	×	耐圧試験等については、耐圧試験等を設計段階で行うものではなく、使用前検査段階での要求であることから、審査対象条文ではない。
(第二十二条) 監視試験片	○	×	×	容器の中性子照射による劣化に対する要求であり、対象設備は、容器の中性子照射による劣化に影響しないため、審査対象条文ではない。
(第二十三条) 炉心等	○	×	×	炉心等については、既工事計画において適合性が確認されている。今回の申請は、対象設備の材料等を変更するものではなく、炉心等に係る設計に影響を与えるものではないことから、審査対象条文ではない。
(第二十四条) 熱遮蔽材	×	×	×	熱遮蔽材に対する要求であり、熱遮蔽材は設けない設計であるため、審査対象条文ではない。
(第二十五条) 1次冷却材	×	×	×	1次冷却材に対する要求であり、対象設備は1次冷却材に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第二十六条) 燃料取扱設備及び燃料貯蔵設備	×	×	×	燃料取扱設備及び燃料貯蔵設備に対する要求であり、対象設備は、燃料取扱設備及び燃料貯蔵設備に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第二十七条) 原子炉冷却材圧力バウンダリ	○	×	×	原子炉冷却材圧力バウンダリに対する要求であり、対象設備は原子炉冷却材圧力バウンダリに該当しないため、審査対象条文ではない。
(第二十八条) 原子炉冷却材圧力バウンダリの隔離装置等	×	×	×	原子炉冷却材圧力バウンダリの隔離装置・検出装置に対する要求であり、対象設備は、原子炉冷却材圧力バウンダリの隔離装置・検出装置に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第二十九条) 1次冷却材処理装置	×	×	×	1次冷却材処理装置に対する要求であり、対象設備は1次冷却材処理装置に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第三十条) 逆止め弁	×	×	×	逆止め弁に対する要求であり、対象設備は逆止め弁に該当しないため、審査対象条文ではない。

表-添 1-1 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能維持に係る工事計画変更認可申請に該当する技術基準規則の条文整理（設計基準対象施設）（続き）

○：対象となる条文
×：対象外の条文

技術基準規則	適用条文	本申請の内容に 関係あるもの	審査対象 条文	理 由
(第三十一条) 蒸気タービン	×	×	×	蒸気タービンに対する要求であり、対象設備は蒸気タービンに該当しないため、審査対象条文ではない。
(第三十二条) 非常用炉心冷却設備	×	×	×	非常用炉心冷却設備に対する要求であり、対象設備は非常用炉心冷却設備に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第三十三条) 循環設備等	×	×	×	循環設備等に対する要求であり、対象設備は循環設備等に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第三十四条) 計測装置	×	×	×	計測装置に対する要求であり、対象設備は計測装置に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第三十五条) 安全保護装置	×	×	×	安全保護装置に対する要求であり、対象設備は安全保護装置に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第三十六条) 反応度制御系統及び原子炉停止系統	×	×	×	反応度制御系統及び原子炉停止系統に対する要求であり、対象設備は、反応度制御系統及び原子炉停止系統に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第三十七条) 制御材駆動装置	×	×	×	制御材駆動装置に対する要求であり、対象設備は制御材駆動装置に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第三十八条) 原子炉制御室等	×	×	×	原子炉制御室等に対する要求であり、対象設備は原子炉制御室等に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第三十九条) 廃棄物処理設備等	×	×	×	廃棄物処理設備等に対する要求であり、対象設備は廃棄物処理設備等に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第四十条) 廃棄物貯蔵設備等	×	×	×	廃棄物貯蔵設備等に対する要求であり、対象設備は廃棄物貯蔵設備等に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第四十一条) 放射性物質による汚染の防止	○	×	×	放射性物質による汚染の防止に対する要求であり、対象設備は、人が頻繁に出入りする建物の内部の壁、床その他の放射性物質により汚染されるおそれがある部分であって、人が触れるおそれがある部分、工場等外に排水を排出するものに該当しないため、審査対象条文ではない。
(第四十二条) 生体遮蔽等	×	×	×	生体遮蔽等に対する要求であり、対象設備は生体遮蔽等に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第四十三条) 換気設備	×	×	×	換気設備に対する要求であり、対象設備は換気設備に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第四十四条) 原子炉格納施設	×	×	×	原子炉格納施設に対する要求であり、対象設備は原子炉格納施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第四十五条) 保安電源設備	×	×	×	保安電源設備に対する要求であり、対象設備は保安電源設備に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第四十六条) 緊急時対策所	×	×	×	緊急時対策所に対する要求であり、対象設備は緊急時対策所に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第四十七条) 警報装置等	×	×	×	警報装置等に対する要求であり、対象設備は警報装置等に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第四十八条) 準用	×	×	×	補助ボイラー、電気設備等の準用が適用される設備に対する要求であり、対象設備は、補助ボイラー、電気設備等の準用が適用される設備に該当しないため、審査対象条文ではない。

表-添 1-2 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能維持に係る工事計画変更認可申請に該当する技術基準規則の条文整理（重大事故等対処施設）

○：対象となる条文
×：対象外の条文

技術基準規則	適用条文	本申請の内容に 関係あるもの	審査対象 条文	理 由
(第四十九条) 重大事故等対処施設の地盤	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十条) 地震による損傷の防止	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十一条) 津波による損傷の防止	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十二条) 火災による損傷の防止	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十三条) 特定重大事故等対処施設	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十四条) 重大事故等対処設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十五条) 材料及び構造	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十六条) 使用中の亀裂等による破壊の防止	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十七条) 安全弁等	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十八条) 耐圧試験等	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十九条) 緊急停止失敗時に発電用原子炉を 未臨界にするための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十条) 原子炉冷却材圧力バウンダリ 高圧 時に発電用原子炉を冷却するた めの設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十一条) 原子炉冷却材圧力バウンダリを減 圧するための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十二条) 原子炉冷却材圧力バウンダリ 低圧 時に発電用原子炉を冷却するた めの設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十三条) 最終ヒートシンクへ熱を輸送する ための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十四条) 原子炉格納容器内の冷却等のた めの設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十五条) 原子炉格納容器の過圧破損を防止 するための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十六条) 原子炉格納容器下部の熔融炉心を 冷却するための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十七条) 水素爆発による原子炉格納容器の 破損を防止するための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十八条) 水素爆発による原子炉建屋等の損 傷を防止するための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十九条) 使用済燃料貯蔵槽の冷却等のた めの設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第七十条) 工場等外への放射性物質の拡散を 抑制するための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第七十一条) 重大事故等の収束に必要となる水 の供給設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第七十二条) 電源設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第七十三条) 計装設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第七十四条) 原子炉制御室等	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第七十五条) 監視測定設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第七十六条) 緊急時対策所	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第七十七条) 通信連絡を行うために必要な設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第七十八条) 準用	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。

工事計画変更認可申請書添付書類及び本申請における添付の要否について

工事計画変更認可申請書添付書類及び本申請における添付の要否について、検討結果を表-添 2-1 に示す。

表-添 2-1 工事計画変更認可申請書添付書類及び本申請における添付の要否について

実用発電用原子炉の設置、 運転等に関する規則 別表第二添付書類	添付の要否 (○・×)	理 由
各発電用原子炉施設に共通		
送電関係一覧図	×	本申請内容は、送電設備に影響を与えないため、既工事計画に変更がなく不要。
急傾斜地崩壊危険区域内において行 う制限工事に係る場合は、当該区域 内の急傾斜地の崩壊の防止措置に関 する説明書	×	急傾斜地崩壊危険区域の設定はないため対象外。
工場又は事業所の概要を明示した地 形図	×	本申請内容は、地形図に影響を与えないため、既工事計画に変更がなく不要。
主要設備の配置の状況を明示した平 面図及び断面図	×	本申請内容は、主要設備の配置に影響を与えないため、既工事計画に変更がなく不要。
単線結線図	×	本申請内容は、単線結線図に影響を与えないため対象外。
新技術の内容を十分に説明した書類	×	本申請内容は、新技術に該当しないため対象外。
発電用原子炉施設の熱精算図	×	本申請内容は、発電用原子炉施設の熱精算に影響を与えないため不要。
熱出力計算書	×	本申請内容は、熱出力に影響を与えないため不要。
発電用原子炉の設置の許可との整合 性に関する説明書	○	本申請では、設置許可との整合性を説明するため添付する。
排気中及び排水中の放射性物質の濃 度に関する説明書	×	本申請では該当する設備はないため不要。
人が常時勤務し、又は頻繁に出入す る工場又は事業所内の場所における 線量に関する説明書	×	本申請では該当する設備はないため不要。
発電用原子炉施設の自然現象等によ る損傷の防止に関する説明書	×	本申請内容は、自然現象等による損傷の防止に影響を与えないため、既工事計画に変更がなく不要。
排水監視設備及び放射性物質を含む 排水を安全に処理する設備の配置の 概要を明示した図面	×	本申請では該当する設備はないため不要。
取水口及び放水口に関する説明書	×	本申請では該当する設備はないため不要。
設備別記載事項の設定根拠に関する 説明書	×	本申請内容は、設定根拠に影響を与えないため、既工事計画変更に変更がなく不要。
環境測定装置の構造図及び取付箇所 を明示した図面	×	本申請では該当する設備はないため不要。
クラス1機器及び炉心支持構造物の 応力腐食割れ対策に関する説明書	×	本申請内容は、応力腐食割れ対策に影響を与えないため、既工事計画に変更がなく不要。
安全設備及び重大事故等対処設備が 使用される条件の下における健全性 に関する説明書	×	本申請では該当する設備はないため不要。
発電用原子炉施設の火災防護に関す る説明書	×	本申請内容は、火災防護に関する設計に影響を与えないため、既工事計画に変更がなく不要。
発電用原子炉施設の溢水防護に関す る説明書	×	本申請内容は、溢水防護に関する設計に影響を与えないため、既工事計画に変更がなく不要。
発電用原子炉施設の蒸気タービン、 ポンプ等の損壊に伴う飛散物による 損傷防護に関する説明書	×	本申請では該当する設備はないため不要。
通信連絡設備に関する説明書	×	本申請では該当する設備はないため不要。
通信連絡設備に関する説明通信連絡 設備の取付箇所を明示した図面	×	本申請では該当する設備はないため不要。
安全避難通路に関する説明書	×	本申請では該当する設備はないため不要。
安全避難通路を明示した図面	×	本申請では該当する設備はないため不要。
非常用照明に関する説明書	×	本申請では該当する設備はないため不要。
非常用照明の取付箇所を明示した図 面	×	本申請では該当する設備はないため不要。
原子炉本体		
耐震性に関する説明書	○	本申請では規則改正内容を踏まえた地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に関して説明する ため添付する。
強度に関する説明書	×	本申請内容は、構造強度に影響を与えないため、既工事計画に変更がなく不要。
構造図	×	本申請内容は、構造強度に影響を与えないため、既工事計画に変更がなく不要。
原子炉本体の基礎に関する説明書及び その基礎の状況を明示した図面	×	本申請内容は、構造に影響を与えないため、既工事計画に変更がなく不要。
監視試験片の取付箇所を明示した図 面	×	本申請では該当する設備はないため不要。
原子炉（圧力）容器の脆性破壊防止 に関する説明書	×	本申請では該当する設備はないため不要。
設計及び工事に係る品質管理の方法 等に関する説明書	○	変更における「設計」に関する品質管理の方法等を示す必要があるため添付する。

工事計画認可申請書及び燃料体設計認可申請書における応力評価等の対象について

1. 燃料タイプ

BWR 燃料集合体の工事計画認可申請書（以下「工認」という。）及び燃料体設計認可申請書（以下「設認」という。）における燃料タイプの分類は同じであり、 9×9 燃料（A 型）に対して 2 種類、 9×9 燃料（B 型）に対して 2 種類となっている。燃料集合体は、二酸化ウラン燃料棒（以下「U 燃料棒」という。）及びガドリニア入り U 燃料棒（以下「Gd 燃料棒」という。）からなり、Gd 燃料棒の数によって分類している。東海第二発電所の燃料タイプは表-添 3-1 のとおりである。

表-添 3-1 東海第二発電所において使用する燃料タイプ

No.	燃 料	燃料タイプ	Gd 燃料棒の数		応力評価対象
1	9×9 燃料（A 型）	タイプ I			U 燃料棒
2		タイプ II			
3	9×9 燃料（B 型）	タイプ I			U 燃料棒
4		タイプ II			

2. 応力評価等の対象

従来、工認及び設認における燃料被覆管の応力評価及び疲労評価においては、Gd 燃料棒の数によらず、燃料毎に集合体平均濃縮度（約 3.7%）の U 燃料棒を代表として評価の対象としている。

3. 対象燃料棒の選定の考え方

燃料棒は濃縮度が異なる複数の種類からなり、応力評価で用いる出力履歴は、燃料棒内の濃縮度の違いを考慮した上で、炉内で経験する最大線出力密度を寿命全体にわたって上回るよう設定している。濃縮度の違いによりペレットの径方向出力分布に差が生じるが、応力評価の入力に影響のあるペレット温度及び燃料棒内圧に対して、ペレット径方向出力分布の差による影響は非常に小さいことから応力評価への影響は無視できる。したがって、応力評価において燃料棒内の濃縮度の違いを考慮する必要はなく、代表として集合体平均濃縮度を評価の対象としている。

従来より、BWR 燃料棒の応力評価における U 燃料棒と Gd 燃料棒の評価式は同じで、入力条件については、Gd の有無に起因する燃料棒内圧や燃料被覆管の内外面温度差等が異なるのみである。評価式に公称値を入力することにより、U 燃料棒と Gd 燃料棒の応力設計比を試算した結果は表-添 3-2 の通りであり、U 燃料棒の応力設計比が最大値となる寿命初期について、評価値に大きな差異はないことを確認した。

なお、Gd 燃料棒は寿命中期で出力が最大となるが、熱応力の増加分よりも、ジルカロイ材の照射硬化による許容応力の増加の影響が大きく、応力設計比としては減少することから、Gd 燃料棒においても U 燃料棒と同様に応力設計比は寿命初期が最大となる。

今回の評価結果の最大値が 9 × 9 燃料（A 型）は 0.70、9 × 9 燃料（B 型）は 0.71 であることから、十分に余裕をもって基準である 1.0 を下回っており、また、寿命初期の試算により Gd 燃料棒との応力設計比の差が僅かであることから、燃料集合体平均濃縮度の U 燃料棒を代表として選定できることを確認した。

表-添 3-2 U 燃料棒及び Gd 燃料棒の応力設計比試算結果（公称値）

いずれも評価点は寿命初期	U 燃料棒(試算)	Gd 燃料棒(試算) *
9 × 9 燃料（A 型）【スペーサ間】	0.62	0.50
9 × 9 燃料（B 型）【スペーサ部】	0.54	0.54

注記 * : Gd 濃度としては、最も濃度が高い 5% を対象とした。

..... (1)

$$\square \dots (2)$$

$$\left[\begin{array}{c} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{array} \right] \cdot \cdot \cdot (3)$$

□ . . . (4)



図-添 4-1 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

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図-添 5-1 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。

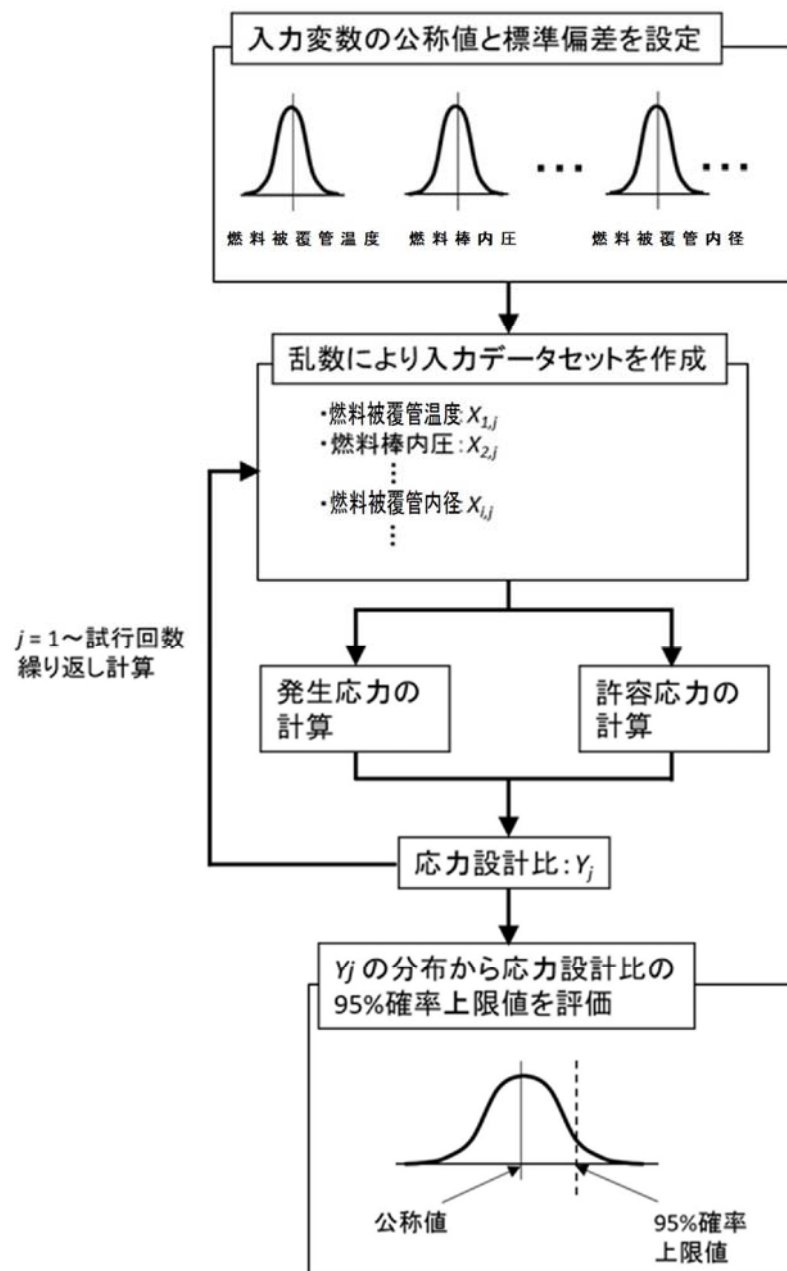


図-添 5-1 モンテカルロ法による統計処理の概要フロー

下部端栓溶接部における応力の取扱いについて

1. 等価線形処理

下部端栓溶接部は、切り欠き形状を含む複雑な形状（図-添 6-1 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（図-添 6-2 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（表-添 6-1 参照）。また，J E A G 4601-1987^[3]において，一次応力＋二次応力＋ピーク応力を面積で平均化することにより一次応力を求める等価線形処理が示されており，燃料設計以外においても等価線形処理を用いて行った評価の例として，平成 30 年 10 月 18 日付原規規発第 1810181 号にて認可された東海第二発電所の工事計画の添付書類「V-2-3-4-1 原子炉圧力容器本体の耐震性についての計算書」等が挙げられる。

2. 等価線形処理の適用について

BWR 燃料被覆管の応力評価については，等価線形処理を踏襲し J E A G 4601-1991 追補版^[4]「第 6 章 機器・配管系の耐震設計 4. 燃料被覆管の地震時許容基準」（以下「規格」という。表-添 6-2 参照）のとおり評価している。ただし，従来，下部端栓溶接部の通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時（表-添 6-2 における「許容応力状態 I_A，II_A」）の一次応力＋二次応力の計算については，評価の簡便化のため，等価線形処理を省いてピーク応力を加えたままの全応力成分が含まれる値を用い，評価を実施してきた。一方，この全応力成分が含まれる評価は過度に保守的であることから，今回の法令改正に伴う地震時の燃料被覆管閉じ込め機能の維持に係る要求が追加された条件（表 2.3-1 参照）においては，規格のとおり等価線形処理を用いて評価を行う。なお，評価結果の内訳は表-添 6-3 のとおりである。

3. 応力設計比の評価位置

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^[3]，^[5]であり，压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直線成分がピーク応力に相当する。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 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
- [4] J E A G 4601-1991 追補版「原子力発電所耐震設計技術指針」，（社）日本電気協会
- [5] 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

表-添 6-1 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	特別な応力限界					
	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	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			$0.4 S_u$	(9) S_u ($1.5 S_u$)

表-添 6-2 燃料被覆管の許容応力（J E A G 4601・補-1991^[4]から抜粋）

応力分類 許容 応力状態	1 次 応 力	1 次+ 2 次応力	1 次 + 2 次 + ピーク 応力
許容応力状態 I _A , II _A	S_y	S_u	疲労評価
許容応力状態 III _A S, IV _A S	$0.7 S_u$	—	—

今回、等価線形処理により
一次応力+二次応力を評価

従来より、一次応力+二次応力
にピーク応力を加えて評価

表-添 6-3 下部端栓溶接部における地震時燃料被覆管応力

燃料	応力分類	相当応力 [MPa]	降伏応力 (S_y) [MPa]	応力設計比
9 × 9 燃料 (A型)	一次応力 + 二次応力			0.63
9 × 9 燃料 (B型)	一次応力 + 二次応力			0.62

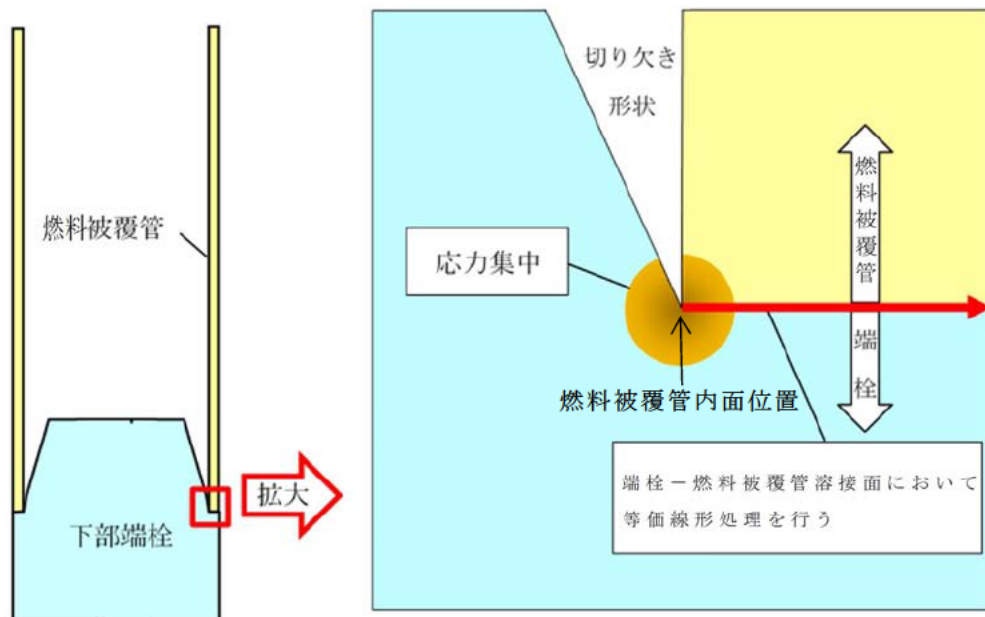


図-添 6-1 下部端栓溶接部の有限要素法による応力解析体系 (模式図)

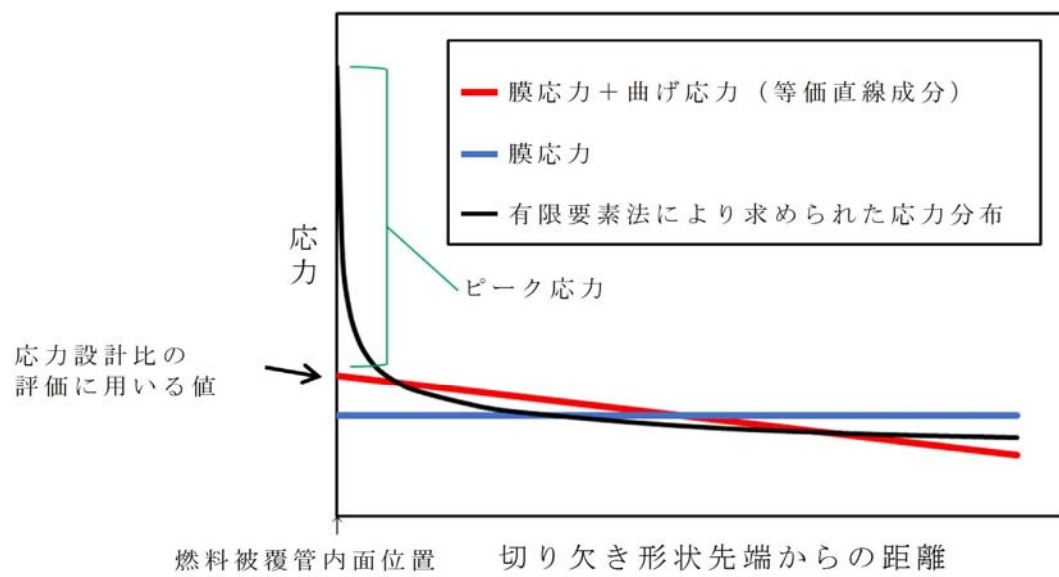


図-添 6-2 応力分布と等価線形処理結果の模式図

構造強度評価の体系

	設計・建設規格 (例：クラス1 容器)	燃料被覆管	
		(既工認)	バックフィット
延性破壊評価	一次応力に対する評価 ○延性破壊防止を目的に、<u>評価断面全体</u>が降伏強さを超えないことを規程。 ○各供用状態における一次応力強さ（膜応力、曲げ応力）が、PVB-3110 ボルト以外の応力評価に定める応力強さの限界以下となることを確認する。 ○GNR-2130（応力解析に関する用語）に定義されている一次応力強さを用いる。	○地震時の制御棒挿入性及び崩壊熱除去可能な形状維持を目的に、J E A G 4601-1991 追補版「4. 燃料被覆管の地震時許容基準」に定める応力制限を満足することを確認。 ○運転状態Ⅰ、Ⅱ（許容応力状態Ⅰ_A、Ⅱ_A）、運転状態Ⅰ、Ⅱ + S₁、S₂（Ⅲ_AS、Ⅳ_AS）において、一次応力が許容応力を満足することを確認。	—
弾性計算の妥当性	一次＋二次応力に対する評価 ○繰り返し負荷に対して構造物の<u>評価断面全体</u>が弾性的に変形していることを確認。 ○供用状態A、Bにおける一次＋二次応力強さ（膜応力と曲げ応力）が、PVB-3110 に定める3 S_mを超えないことを確認する。 ○GNR-2130（応力解析に関する用語）に定義されている二次応力を用いる。	○運転状態Ⅰ、Ⅱ（許容応力状態Ⅰ_A、Ⅱ_A）において、一次＋二次応力が許容応力を満足することを確認。 ⇒ただし、既工認では評価の簡便化のため全応力強さ（一次＋二次＋ピーク応力）を用いて評価。	○地震時の閉じ込め機能維持を目的に、許容応力状態Ⅲ_AS、Ⅳ_ASにおいて、一次＋二次応力がそれぞれS_y、S_u以下となることを確認。
疲労評価	一次＋二次＋ピーク応力に対する評価 ○疲労破壊防止を目的に、<u>構造不連続部等</u>に発生するピーク応力を含む全応力強さによる疲労評価を規程。 ○供用状態A、Bにおける一次＋二次＋ピーク応力により求める繰返しピーク応力強さと設計疲労線図から疲労累積係数を求め、その総和が1を超えないことを確認する。 ○GNR-2130（応力解析に関する用語）に定義されているピーク応力を用いる。	○運転状態Ⅰ、Ⅱ（許容応力状態Ⅰ_A、Ⅱ_A）において、一次＋二次＋ピーク応力強さと設計疲労線図から疲労累積係数を求め、その総和が1を超えないことを確認する。	○許容応力状態Ⅲ_AS、Ⅳ_ASにおいて、一次＋二次＋ピーク応力強さと設計疲労線図から疲労累積係数を求め、その総和が1を超えないことを確認する。

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を適用するに当たり、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、ISO9001及びASME 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当たり、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、MARCによる既存の解析結果とANSYS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MARCとANSYSの応力設計比の比較を行った。図-添 7-1 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、燃料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
- ・ ペレットー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、ペレットー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。

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、

- ・ 下部端栓及び燃料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等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による下部端栓溶接部の応力評価における解析入力値の比較を表-添 7-1 にまとめる。同表に示すとおり、MARCとANSYS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 MARC Ver.K4

②有限要素法解析コード ANSYS 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 ）

注記 *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

表-添 7-2 に解析結果を示す。MARCとANSYS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、判断基準（応力設計比が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考ええる。

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，2009 年 11 月 5 日認可）

表-添 7-1 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

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

表-添 7-1 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（続き）

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

表-添 7-2 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

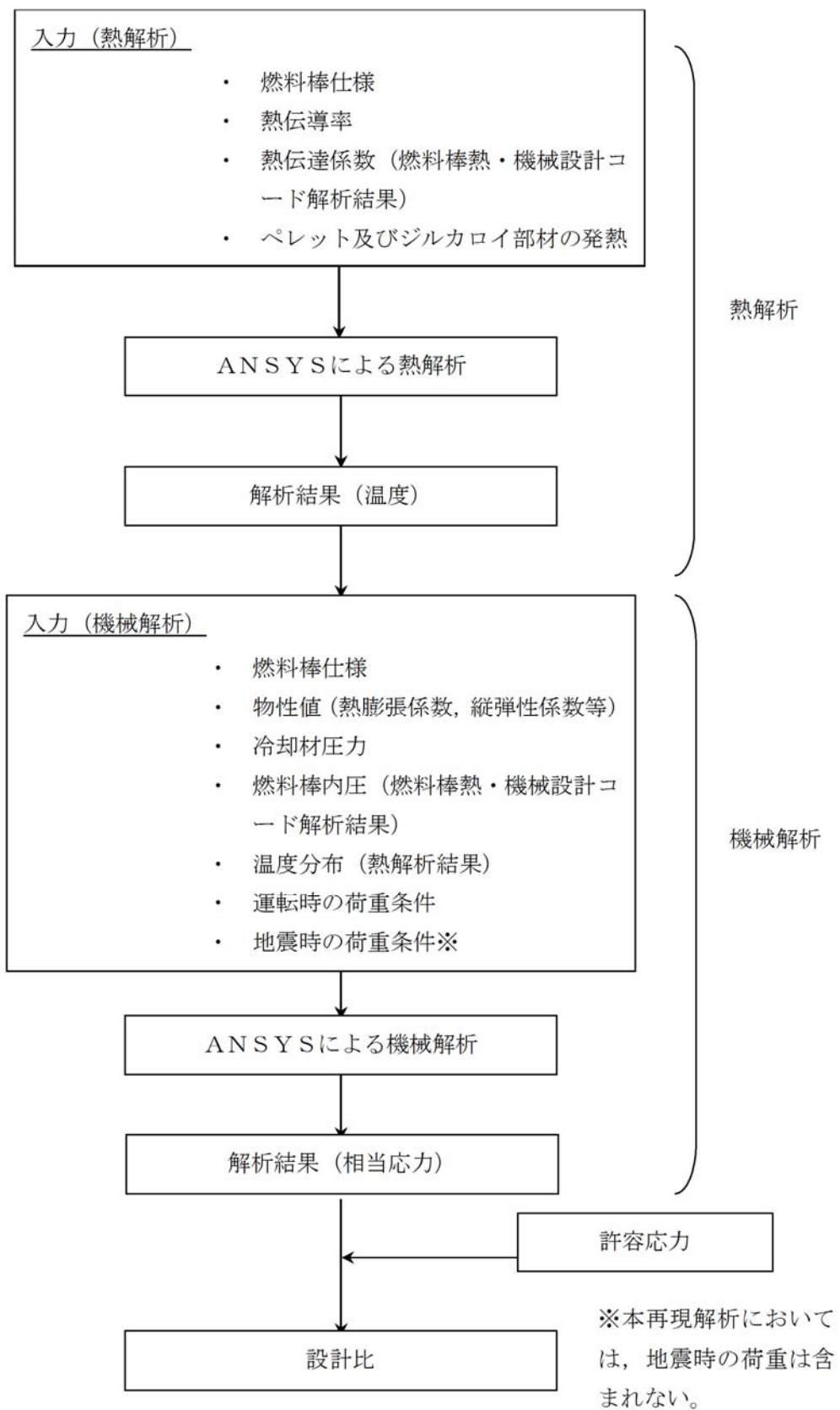


図-添 7-1 下部端栓溶接部の応力評価のフロー