

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第6号機	設計及び工事計画審査資料
資料番号	KK6 添-2-033-1-1 改0
提出年月日	2024年1月22日

VI-2-3-2-1(1) 燃料集合体の耐震性についての計算書

2024年1月
東京電力ホールディングス株式会社

(1) 燃料集合体の耐震性についての計算書

目 次

1. 概要	1
2. 一般事項	2
2.1 構造計画	2
2.2 評価方針	3
2.3 適用規格・基準等	3
2.4 記号の説明	4
2.5 計算精度と数値の丸め方	7
3. 燃料集合体の地震応答解析	8
4. 地震時の制御棒挿入性試験検討	9
5. 地震時の燃料被覆管の応力評価	10
5.1 燃料被覆管の応力評価で考慮する荷重の組合せ及び許容応力状態	10
5.2 燃料被覆管の応力評価における評価部位	10
5.3 評価対象燃料の炉内滞在期間と評価に用いる許容応力	11
5.4 スペーサ間及びスペーサ部の燃料被覆管の応力評価	11
5.4.1 スペーサ間及びスペーサ部の応力評価に用いる地震加速度及び相対変位	11
5.4.2 地震時のスペーサ間及びスペーサ部の応力評価の方法	11
5.4.3 検討内容	12
5.5 下部端栓溶接部の燃料被覆管の応力評価	13
5.5.1 下部端栓溶接部の応力評価に用いる地震加速度及び相対変位	13
5.5.2 地震時の下部端栓溶接部の応力評価の方法	13
5.5.3 下部端栓溶接部の疲労評価	14
5.5.4 検討内容	15
5.6 検討結果	16
6. 引用文献	33
付録 1 応力計算結果の応力分類処理方法	34

1. 概要

本計算書は、燃料集合体の耐震性について示すものである。

地震時において燃料集合体に要求されるのは、制御棒の挿入機能の確保、崩壊熱除去可能な形状の維持及び燃料被覆管の閉じ込め機能の維持である。

制御棒の挿入機能の確保については、原子力発電所耐震設計技術指針（重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984）（日本電気協会 電気技術基準調査委員会 昭和 59 年 9 月）に従って、地震時における制御棒の挿入性についての検討を行い、基準地震動 S_s に対し制御棒の挿入性が確保されることを、VI-2-6-2-1「制御棒の耐震性についての計算書」にて説明する。

崩壊熱除去可能な形状の維持については、VI-2-3-2-3「炉心支持構造物の応力計算書」にてその詳細を示すとおり、燃料集合体を支持している炉心支持構造物が耐震設計上の重要度分類 S クラスで設計され、その支持機能は地震時においても維持されるので、崩壊熱除去可能な形状は維持されると考えられる。燃料被覆管自体の損傷は必ずしも崩壊熱除去可能な形状の喪失を意味するわけではないが、ここではVI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している構造強度の設計方針に基づき、燃料被覆管の地震時応力を弾性解析によって求め、燃料被覆管が健全であり、崩壊熱除去可能な形状が維持されることを確認する。

燃料被覆管の閉じ込め機能の維持については、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ても、燃料被覆管に発生する応力が放射性物質の閉じ込め機能に影響しないことを確認する。

2. 一般事項

2.1 構造計画

燃料集合体の構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 燃料集合体の構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
<p>炉心は最外周部の一部を除き十字型制御棒とそれを囲む 4 体の燃料集合体を 1 セルとして構成される。</p> <p>燃料集合体の下部は下部タイプレートとの着座面が炉心支持板上の燃料支持金具に嵌合して支持され、上部はセルを構成する燃料集合体が上部格子板内で水平方向に支持される。</p> <p>上下部タイプレート、スペーサ、ウォータロッド及びタイロッドは結合又は支持により骨格を形成する。燃料集合体の上下方向は、タイロッドを下部タイプレートにねじ留めするとともに上部タイプレートにナット留めすることで結合している。4 体の燃料集合体の外側にはめたチャンネルボックスの外側が制御棒*1の通路を構成する。</p>	<p>9×9 燃料 (A 型) の燃料集合体*²は、9×9 の正方格子に配列された 74 本の燃料棒と 2 本のウォータロッドが 7 個のスペーサにより束ねられ、それらの上下端が上部タイプレート及び下部タイプレートと嵌合することにより形成される。9×9 燃料 (A 型) の 74 本の燃料棒のうち、8 本は長さの短い部分長燃料棒であり、これらは第 1 から第 5 の 5 個のスペーサにより束ね、部分長燃料棒下部を下部タイプレートにねじ留めする。</p> <p>燃料集合体を炉心に装荷する際には、外側にチャンネルボックスをはめる。</p>	

注記*1：制御棒の構造計画の詳細は、VI-2-6-2-1「制御棒の耐震性についての計算書」に示す。

*2：9×9 燃料 (A 型) 燃料集合体の詳細図を図 2-1 へ示す。

2.2 評価方針

地震時において燃料集合体に要求されるのは、制御棒の挿入機能の確保、崩壊熱除去可能な形状の維持及び燃料被覆管の閉じ込め機能の維持である。

制御棒の地震時挿入性の評価については、炉心を模擬した実物大の部分モデルによる加振時制御棒挿入試験結果から挿入機能に支障を与えない燃料集合体の最大相対変位を求め、地震応答解析から求めた燃料集合体の最大応答相対変位がその燃料集合体の最大相対変位を下回ることを確認する。制御棒の地震時挿入性の評価は、VI-2-6-2-1「制御棒の耐震性についての計算書」に示す。

崩壊熱除去可能な形状の維持については、燃料集合体を支持している炉心支持構造物の支持機能が維持され、燃料被覆管の一次応力により構造的に崩壊するような状態となることを防ぐことで崩壊熱除去可能な形状は維持されると考えられる。燃料被覆管自体の損傷は必ずしも崩壊熱除去可能な形状の喪失を意味するわけではないが、保守的に燃料被覆管の地震時応力を弾性解析で求め、原子力発電所耐震設計技術指針（重要度分類・許容応力編 JEAG 4601-1991 追補版）（日本電気協会 電気技術基準調査委員会 平成3年6月）に規定されている評価基準に従い許容応力以下であることを確認する。

燃料被覆管の地震時応力は、運転時（通常運転時及び地震によって引き起こされるおそれのある過渡変化時）に燃料被覆管に作用している荷重と地震力を組み合わせて評価する。また、運転中に燃料に生じる燃料被覆管の腐食等の照射の影響を考慮して、燃料被覆管の地震時応力を求める。

燃料被覆管の閉じ込め機能の維持については、運転時と地震時に燃料被覆管に作用する荷重を組み合わせても、燃料被覆管の応答がおおむね弾性状態に留まり、燃料被覆管に発生する応力が許容応力以下であること、地震時の繰り返し荷重により燃料被覆管に応力振幅が作用しても疲労破壊しないことを確認する。

地震時の燃料被覆管の耐震評価フローを、図2-2に示す。

崩壊熱除去可能な形状の維持に関する燃料集合体の耐震評価の方法は、平成12年5月16日付け平成12・03・29資第26号にて認可された工事計画の実績に基づいている。

2.3 適用規格・基準等

本評価において適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984（（社）日本電気協会）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版（（社）日本電気協会）
- ・発電用原子力設備規格 設計・建設規格（（社）日本機械学会，2005/2007）（以下「設計・建設規格」という。）

2.4 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A	スペーサの接触力に基づく応力計算に用いる定数	—
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
T_o	燃料被覆管の外面温度	°C
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
Gh	地震時の水平方向最大加速度	m/s ²
Gv	地震時の鉛直方向最大加速度	m/s ²
W _r	燃料棒の全質量	kg
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応答相対変位	mm
$\Delta \sigma$	地震期間中の繰り返し荷重による応力振幅（応力強さの振幅）	MPa
N	$\Delta \sigma$ に対応するジルカロイの設計疲労曲線の許容サイクル数	回
n	地震力の繰り返し回数	回
S _y	燃料被覆管（ジルカロイ）の降伏応力*3	MPa
S _u	燃料被覆管（ジルカロイ）の引張強さ*3	MPa

注記*1：

*2：燃料被覆管の ，照射に伴う腐食減肉を考慮。

*3：燃料被覆管の温度及び照射の効果を考慮。

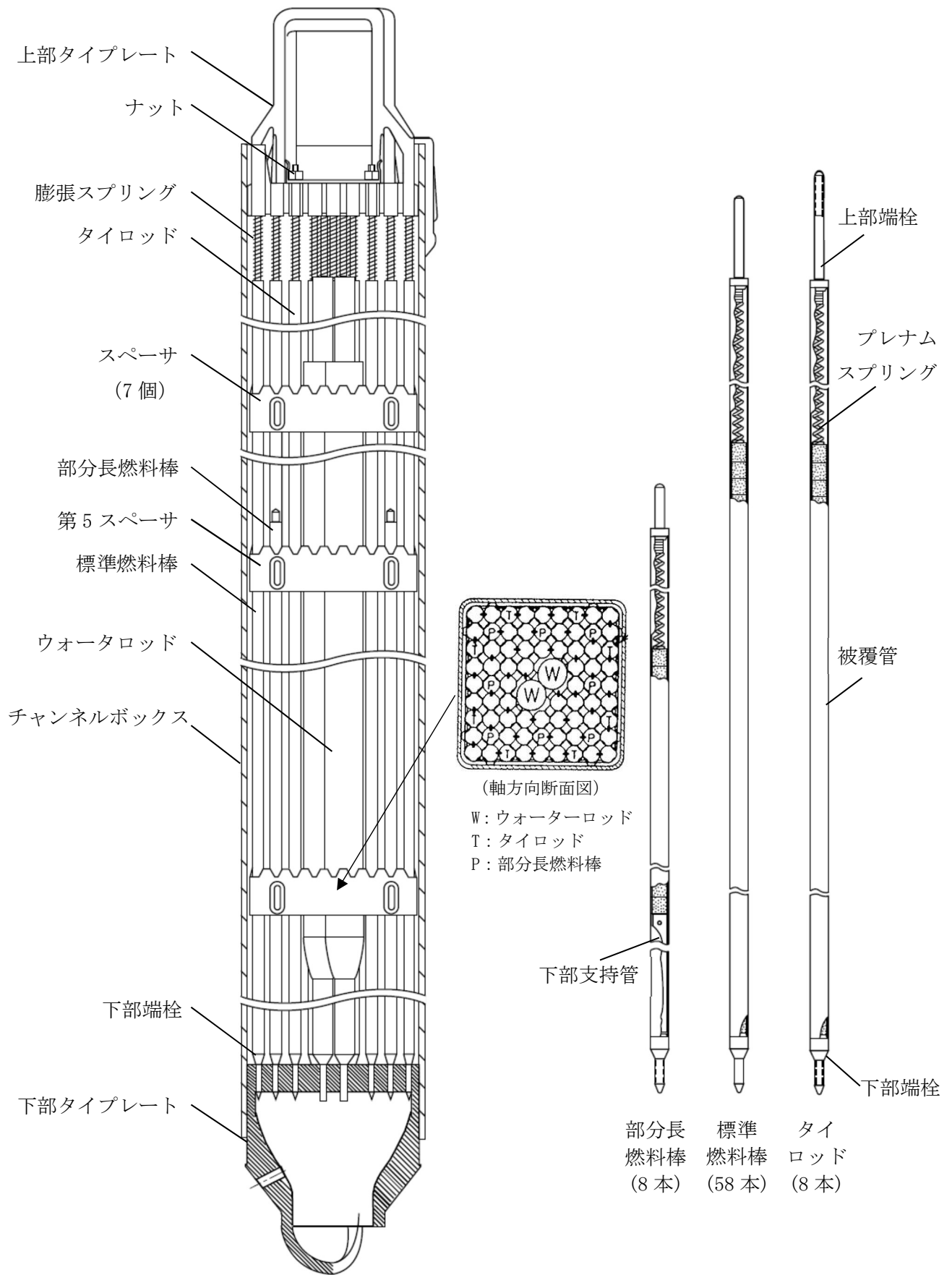


図 2-1 9×9 燃料 (A 型) 燃料集合体の詳細図

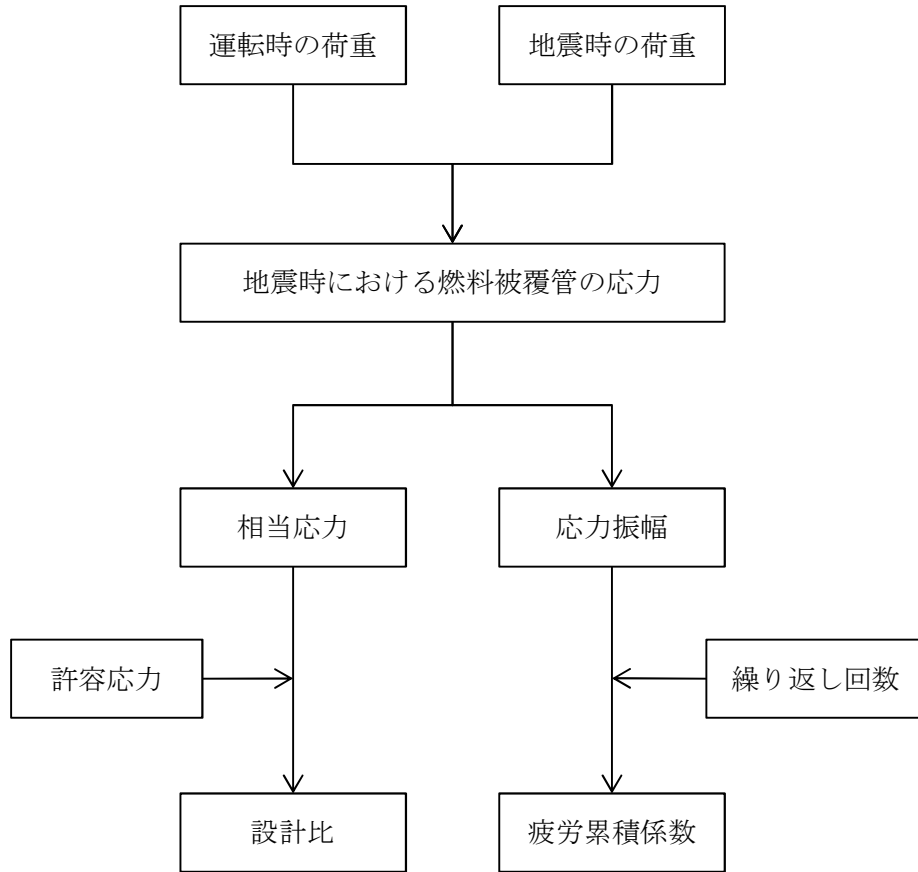


図 2-2 地震時の燃料被覆管の耐震評価フロー

2.5 計算精度と数値の丸め方

精度は、有効数字 6 桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は、表 2-2 に示すとおりである。

表 2-2 表示する数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
応力振幅	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
設計比	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
疲労累積係数	—	有効数字 5 桁	切上げ	有効数字 4 桁

3. 燃料集合体の地震応答解析

燃料集合体の地震応答解析は原子炉圧力容器内部構造物の一部として実施されており、この詳細はVI-2-3-1「炉心，原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物の地震応答計算書」に示されている。

設計用地震波としては、基準地震動 S_s を採用している。燃料集合体の質量は燃料タイプによらずほぼ同等であることから、燃料集合体の地震応答は燃料タイプによらず、VI-2-3-1「炉心，原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物の地震応答計算書」に示される地震応答解析結果が適用可能である。

応答解析は、時刻歴応答解析法を適用して建屋のNS及びEWの水平方向並びに鉛直方向について、基本ケースの他に材料物性の不確かさや地震動及び地殻変動による基礎地盤の傾斜に対する影響等を考慮した解析も実施している。

地震時に燃料集合体に要求される制御棒挿入性，崩壊熱除去可能な形状維持及び燃料被覆管の閉じ込め機能の維持の評価においては、基本ケースの最大応答相対変位及び最大応答加速度に対し、材料物性の不確かさや地震動及び地殻変動による基礎地盤の傾斜に対する影響等を考慮した最大応答相対変位 18.6mm，最大水平加速度 13.2m/s^2 及び最大鉛直加速度 10.5m/s^2 を用いる。また，下部端栓溶接部の応力評価では，水平地震加速度として下部端栓溶接部直上の下部タイププレートスペース間の燃料棒に作用する水平加速度の最大値 9.9m/s^2 を用いる。

なお，VI-2-3-1「炉心，原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物の地震応答計算書」において設定された基準地震動 S_s の基本ケースにおける燃料集合体の最大応答相対変位は 13.2mm となる。また，燃料集合体の最大応答加速度は，水平方向で 11.9m/s^2 ，鉛直方向で 10.4m/s^2 となる。

4. 地震時の制御棒挿入性試験検討

地震時における制御棒挿入性についての検討方法は、3章で設定した最大応答相対変位 18.6mm が、制御棒挿入性試験にて確認された挿入機能に支障を与えない最大燃料集合体変位を下回ることを確認する。

VI-2-6-2-1「制御棒の耐震性についての計算書」にその詳細を示すとおり制御棒挿入機能は確保される。

5. 地震時の燃料被覆管の応力評価

5.1 燃料被覆管の応力評価で考慮する荷重の組合せ及び許容応力状態

地震時に燃料集合体に要求される崩壊熱除去可能な形状の維持及び燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に関する燃料被覆管の応力評価は、表 5-1 及び表 5-2 に示す荷重の組合せにより燃料被覆管に発生する応力を弾性解析で求める。表 5-1 及び表 5-2 の地震荷重 S_d^* 及び S_s 以外の荷重については、通常運転時及び地震によって引き起こされるおそれのある過渡事象として炉心出力が上昇する（出力過渡）事象及び炉心圧力が上昇する（圧力過渡）事象において燃料集合体に作用する荷重を考慮する。また、地震荷重 S_d^* は、弾性設計用地震動 S_d 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荷重であるが、本評価では静的地震力より大きい弾性設計用地震動 S_d による地震力が対象となる。表 5-1 及び表 5-2 のそれぞれの評価で対象とする応力分類について、せん断歪エネルギー説（von Mises 理論）に基づく相当応力を計算し、当該の許容応力に対する比（設計比）を評価する。

(1) 崩壊熱除去可能な形状の維持に関する応力評価

崩壊熱除去可能な形状の維持に関する応力評価では、表 5-1 に示すように、原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1-1991 追補版）（日本電気協会 電気技術基準調査委員会 平成 3 年 6 月）に基づき一次応力を対象として、許容応力 $0.7S_u$ に対する設計比を評価する。崩壊熱除去可能な形状の維持に用いる手法は、平成 12 年 5 月 16 日付け平成 12・03・29 資第 26 号にて認可された工事計画の実績に基づいている。

(2) 燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に関する応力評価

燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に関する応力評価では、表 5-2 に基づき、静的地震力より大きい弾性設計用地震動 S_d における荷重条件に対して燃料被覆管がおおむね弾性状態に留まること、基準地震動 S_s における荷重条件に対して破断延性限界に余裕を有していることを確認するため、一次応力+二次応力を対象として、許容応力として弾性設計用地震動 S_d に対して S_y 、基準地震動 S_s に対して S_u を適用し、設計比を評価する。

なお、本計算書における燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に関する応力評価では、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、基準地震動 S_s に対して許容応力を S_y として、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評価を実施した。

5.2 燃料被覆管の応力評価における評価部位

地震時の崩壊熱除去可能な形状の維持及び燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に関する燃料被覆管の応力評価では、2.1 節に記載した燃料集合体内の燃料棒の構造より、スペーサ間及びスペーサ部並びに下部端栓溶接部（閉じ込め機能維持の評価のみ）について評価を行う。ここで、スペーサ間及びスペーサ部では、ジルカロイ-2 製の燃料被覆管の内面にジルコニウムが内張り（ジルコニウムライナ）されているが、

ジルカロイ-2 部が応力評価の対象となる。また、下部端栓の材料は燃料被覆

管と同じジルカロイ-2 であり、下部端栓と燃料被覆管の突き合せ部は溶加材を用いない T I G 溶接により溶接されており、ジルカロイ-2 部が応力評価の対象となる。

5.3 評価対象燃料の炉内滞在期間と評価に用いる許容応力

炉内には炉内滞在期間の異なる種々の燃料が混在しているが、地震時の燃料被覆管応力評価では、それらの燃料から炉内滞在期間が 0 年、2.2 年、8.0 年の燃料で代表させて、それぞれ寿命初期、寿命中期、寿命末期として、燃料棒熱・機械設計解析により個々の応力評価部位の解析条件を設定する。また、応力評価の対象であるジルカロイ-2 の許容応力には、個々の応力評価部位における燃料被覆管の温度及び照射の影響を考慮して、図 5-1 から図 5-3 の設計値を用いる。

5.4 スペーサ間及びスペーサ部の燃料被覆管の応力評価

5.4.1 スペーサ間及びスペーサ部の応力評価に用いる地震加速度及び相対変位

地震時におけるスペーサ間及びスペーサ部の応力評価では、燃料集合体の相対変位（閉じ込め機能維持の評価のみ）、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として、3 章で設定した 18.6mm 、 13.2m/s^2 及び 10.5m/s^2 を用いる。

崩壊熱除去可能な形状の維持及び燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に関するスペーサ間及びスペーサ部の応力評価に用いる地震加速度及び燃料集合体の相対変位等の解析条件を表 5-3(1)、スペーサ間及びスペーサ部の応力評価に用いる数値又は数式を表 5-3(2)に示す。

5.4.2 地震時のスペーサ間及びスペーサ部の応力評価の方法

地震時におけるスペーサ間及びスペーサ部の応力評価は、解析コード「FURST」により実施する。

なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

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 5-4 に、その詳細を以下に示す。

(1) 応力の計算

応力計算は、以下の(2)に示すように、通常運転時及び地震によって引き起こされるおそれのある過渡時の応力に地震により発生する応力を加え合わせて三軸方向（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計算する。

(2) 発生応力

通常運転時及び過渡時並びに地震時に発生する応力として、表 5-4 を考慮する。

燃料被覆管に発生する各応力については、燃料被覆管を厚肉円筒と見なし、複数のスペーサで支持された燃料棒を梁と見なして個々の応力の計算式を設定している。燃料被覆管

に発生する応力の計算式を表5-5, 燃料被覆管に発生する応力の模式図を図5-5に示す。また, 地震時の崩壊熱除去可能な形状の維持及び燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に関する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, 表5-6に示す。

(3) 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, モンテカルロ法により統計評価を行う。ここで, 燃料被覆管温度及び燃料棒内圧については, 燃料棒熱・機械設計コード「PRIME」(引用文献(1), (2)参照)による解析結果を用いる。

なお, 燃料被覆管温度及び燃料棒内圧の評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については, 別紙「計算機プログラム(解析コード)の概要」に示す。

モンテカルロ法による評価では, 1回の試行ごとに乱数を用い, 統計的分布に従い設定される入力条件から1つの設計比が得られる。この試行を繰り返すことにより設計比の統計的分布を求め, 設計比の95%確率上限値が1以下であることをもって, 燃料集合体の耐震性を確認する。

5.4.3 検討内容

崩壊熱除去可能な形状及び燃料被覆管の閉じ込め機能が維持されることを確認するため, 通常運転時及び地震によって引き起こされるおそれのある過渡変化時に燃料被覆管に作用する荷重に加えて, 地震時における水平地震加速度, 燃料集合体の相対変位(燃料被覆管の閉じ込め機能の維持の評価のみに使用)及び鉛直地震加速度を考慮した燃料被覆管応力評価を実施する。

(1) 崩壊熱除去可能な形状の維持に関する応力評価

VI-2-3-2-3「炉心支持構造物の応力計算書」にてその詳細を示すとおり, 燃料集合体を支持している炉心支持構造物は, 地震時にもその支持機能は維持されるので, 崩壊熱除去可能な形状は維持されることが考えられる。崩壊熱除去可能な形状の維持についてはさらに, 基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d による地震力並びに静的地震力に対し崩壊熱除去可能な形状が維持されることを確認するため, 燃料被覆管の地震時応力を弾性解析によって求めた結果, 設計比の95%確率上限値が1を下回る結果を得た。

地震時の崩壊熱除去可能な形状の維持に関する応力評価の結果を, 表5-7に示す。

(2) 燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に関する応力評価

燃料被覆管の閉じ込め機能が維持されることを確認するため, 基準地震動 S_s による地震力に対して許容応力を S_y として燃料被覆管の地震時応力を弾性解析によって求めた結果, 設計比の95%確率上限値が1を下回る結果を得た。

地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に関する応力評価の結果を, 表5-8に示す。

5.5 下部端栓溶接部の燃料被覆管の応力評価

5.5.1 下部端栓溶接部の応力評価に用いる地震加速度及び相対変位

地震時における下部端栓溶接部の応力評価では、燃料集合体の相対変位、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として、3章で設定した18.6mm、 9.9m/s^2 及び 10.5m/s^2 を用いる。なお、水平地震加速度 9.9m/s^2 は、下部端栓溶接部直上の下部タイプレートースペーサ間の燃料棒に作用する水平加速度である。

5.5.2 地震時の下部端栓溶接部の応力評価の方法

地震時における下部端栓溶接部の応力評価は、端栓溶接部の形状が複雑なため有限要素法による汎用の解析コード「ANSYS」を用いて発生応力を評価し、許容応力として弾性設計用地震動 S_d では S_y 、基準地震動 S_s では S_u に対する相当応力の比（設計比）を評価する。

なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

地震時の下部端栓溶接部の応力評価のフローを、図5-6に示す。

(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、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ている。

熱解析モデル及び機械解析モデルを、それぞれ図5-7及び図5-8に示す。

(2) 下部端栓溶接部の熱解析での入力データ

通常運転時及び過渡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5-9の項目を考慮している。

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。

(3) 下部端栓溶接部の応力評価で考慮する荷重

通常運転時及び過渡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5-10を考慮する。

なお、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

生ず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合わせた解析を実施する。

(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「PRIME」(引用文献(1),(2)参照)による解析結果を用いる。

応力計算は、厳しい条件となる過渡時の炉心条件に地震による荷重を加え合せて、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、燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に関する評価では、一次応力+二次応力を対象としているが、解析コード「ANSYS」での有限要素法による端栓溶接部の応力解析においては、応力集中によるピーク応力を含む結果となっている。このため、付録1に示す応力分類処理方法に従って、全発生応力から一次応力+二次応力を分類する。

燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に関する評価で要求されている許容応力は、弾性設計用地震動 S_d に対して S_y 、基準地震動 S_s に対して S_u であるが、それぞれの許容応力について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。

本計算書では、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、基準地震動 S_s に対して許容応力を S_y として、応力分類処理により得られた一次応力+二次応力の相当応力の S_y に対する比(設計比)が1以下であることをもって、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し、燃料集合体の耐震性を確認する。よって、弾性設計用地震動 S_d の評価は省略する。

5.5.3 下部端栓溶接部の疲労評価

5.5.2 項の有限要素法を用いた解析コード「ANSYS」で得られる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、地震期間中に負荷される繰り返し荷重による燃料被覆管の疲労評価を実施する。疲労評価は一次+二次+ピーク応力を評価対象とするため、ピーク応力が発生する下部端栓溶接部を評価対象部位とする。

燃料被覆管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-0¹Donnellの考え方に基づく。

燃料装荷から取り出しまでの炉内滞在期間を8年とした炉内滞在期間中に燃料被覆管に作用する温度、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、疲労累積係数が1.0以下であることを確認する。

地震時の下部端栓溶接部の疲労評価のフローを、図5-9に示す。

(1) 地震期間中の繰り返し荷重による応力振幅

地震期間中に下部端栓溶接部に負荷されるピーク応力を含む応力振幅 ($\Delta \sigma$) の評価においては、作用方向が反転する地震の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。このため、日本産業規格 J I S B 8 2 6 6「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手法に基づき、応力強さの振幅を評価する。

(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 (引用文献(3)参照) を、図 5-10 に示す。(1)の方法で評価された地震期間中の繰り返し荷重による応力振幅 (主応力の方向が変化する場合の応力強さの振幅, $\Delta \sigma$) を、図 5-10 と対比することにより、許容サイクル数 (N) を求める。

(3) 地震力の繰り返し回数に基づく疲労累積係数の評価

地震力の繰り返し回数 (n) を(2)で求めた許容サイクル数 (N) で除すことにより、地震力が繰り返された場合の疲労累積係数を評価する。なお、地震力の繰り返し回数 (n) には、200 回を用いる。

5.5.4 検討内容

燃料被覆管の閉じ込め機能が維持されることを確認するため、基準地震動 S_s による地震力に対して許容応力を S_y として下部端栓溶接部の地震時応力を解析コード「ANSYS」で求めた結果、設計比が 1 を下回る結果を得た。

地震時における下部端栓溶接部の応力評価の結果を、表 5-11 に示す。

燃料被覆管の閉じ込め機能が維持されることを確認するため、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より疲労累積係数を評価した結果、地震動による疲労累積係数増分を加えても疲労累積係数は 1 を下回る結果を得た。

地震時における下部端栓溶接部の疲労評価の結果を、表 5-12 に示す。

5.6 検討結果

通常運転時及び地震によって引き起こされるおそれのある過渡変化時に燃料被覆管に作用する荷重に加えて、水平地震加速度、燃料集合体の相対変位（閉じ込め機能維持の評価のみ）及び鉛直地震加速度を考慮した燃料被覆管応力評価を実施した。

その結果、崩壊熱除去可能な形状の維持に関する燃料被覆管の設計比が最大となるのは寿命初期で、その値は0.36であり、設計比が1を下回っていることから、地震時にも崩壊熱除去可能な形状は維持されることを確認した。

地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に関する燃料被覆管の設計比が最大となるのは寿命初期であり、スペーサ間では0.69、下部端栓溶接部では0.63で、設計比は1を下回っている。また、地震時の繰り返し荷重に基づく燃料被覆管の疲労累積係数は 2.000×10^{-4} であり、燃料の全寿命を通じた疲労累積係数（約0.003、引用文献(4)参照）に付加しても1を下回っている。これらの結果より、地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能が維持されることを確認した。

表 5-1 崩壊熱除去可能な形状維持の評価で考慮する荷重の組合せ及び許容応力

荷重の組合せ	許容応力状態	許容限界 (一次応力)
D + P + M + S _d *	Ⅲ _A S	0.7 · S _u *1, *2
D + P + M + S _s	Ⅳ _A S	

注記*1：せん断ひずみ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。

表 5-2 閉じ込め機能維持の評価で考慮する荷重の組合せ及び許容応力

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	*4 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における疲労累積係数との和が1.0以下であること。
D + P + M + S _s	Ⅳ _A S	S _u *1, *2, *3	

注記*1：せん断ひずみ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 を満足することで、許容応力状態Ⅲ_A Sに対する要求も満足することを示す。

*4：運転時の異常な過渡変化時として、運転状態Ⅲの制御棒引抜きについても考慮する。

表 5-3(1) スペーサ間及びスペーサ部の応力評価に用いる解析条件

項目	解析条件
対象燃料	9×9 燃料 (A 型)
寿命時期	寿命初期／中期／末期
評価部位	スペーサ間／スペーサ部
計算機コード	FURST
地震動	基準地震動 S _s
水平方向加速度：G _h (m/s ²)	13.2
鉛直方向加速度：G _v (m/s ²)	10.5
最大応答相対変位：Y (mm)	18.6*

注記*：燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に関する評価にのみ使用。

表 5-3(2) スペーサ間及びスピーサ部の応力評価に用いる数値又は数式

記号	単位	数値又は数式	特記事項
A	—		
P _c	MPa		圧力過渡時の冷却材圧力
P _g	MPa		燃料棒熱・機械設計解析結果
r ₁	mm	r ₂ + t	
r ₂	mm	*1	
r _m	mm	(r ₁ + r ₂)/2	
t	mm	*1*2	照射に伴う腐食減肉を考慮
d	mm		
q _{cr}	MPa		
f	N		
α	°C ⁻¹		
E	MPa		
ν	—		
ℓ	mm		
δ	mm		
T _o	°C		燃料棒熱・機械設計解析結果
ΔT ₁	°C		燃料棒熱・機械設計解析結果
ΔT ₂	°C		
F	N		
W _r	kg		
W _s	kg		
Z	mm ³	$\pi (r_1^4 - r_2^4) / (4 r_1)$	
L	mm		
S _y	MPa	図 5-1 参照*1	燃料被覆管の温度及び照射の効果を考慮
S _u	MPa	図 5-2 参照*1	燃料被覆管の温度及び照射の効果を考慮

注記*1：統計分布を考慮。

*2：寿命初期，寿命中期及び寿命末期の値。

表 5-4 燃料被覆管に発生する応力

考慮する応力	条件
内外圧力差に基づく応力	通常運転時及び過渡時
水力振動に基づく応力	
楕円度に基づく応力	
スペーサの接触力に基づく応力（スペーサ部のみ）	
半径方向温度差に基づく熱応力	
円周方向温度差に基づく熱応力	
膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力	地震時
燃料棒のたわみに基づく応力（スペーサ間及びスペーサ部）	
チャンネルボックスのたわみに基づく応力	
鉛直地震加速度に基づく応力	

表 5-5(1) スペーサ間及びスペーサ部の応力の計算式 (通常時及び過渡時)

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		
(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 5-5(2) スペーサ間及びスペーサ部の応力の計算式（地震時）

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)	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(9) スペーサ部での燃料棒のたわみに基づく応力 (一次応力)	半径方向		
	円周方向		
	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)	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(11) 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		

K6 ① VI-2-3-2-1(1) R0

表 5-6 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

解析分類	評価位置	応力分類	応力組合せ*
崩壊熱除去可能な形状の維持	スペーサ間	一次応力	(1)+(2)+(3)+(7)+(8)+(11)
	スペーサ部		(1)+(2)+(3)+(7)+(9)+(11)
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)+(10)+(11)
	スペーサ部	+二次応力	(1)+(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(9)+(10)+(11)

注記*：表 5-5 の応力の種類を示す各番号の応力の組合せを示す。

表 5-7 地震時の崩壊熱除去可能な形状の維持に関する応力評価結果

地震動	許容応力	運転条件*	寿命時期	スペーサ間 (設計比)	スペーサ部 (設計比)
				一次応力	一次応力
基準地震動 S_s	$0.7 S_u$	圧力過渡	寿命初期	0.36	0.36
			寿命中期	0.22	0.22
			寿命末期	0.23	0.23

注記*：解析対象が一次応力であるため出力過渡時に大きくなる熱応力が影響しないので圧力過渡のみを評価対象とした。

表 5-8 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に関する応力評価結果

地震動	許容応力	運転条件	寿命時期	スペーサ間 (設計比)	スペーサ部 (設計比)
				一次応力+ 二次応力	一次応力+ 二次応力
基準地震動 S_s	S_y	圧力過渡	寿命初期	0.69	0.54
			寿命中期	0.26	0.24
			寿命末期	0.22	0.21
		出力過渡	寿命初期	0.65	0.45
			寿命中期	0.27	0.26
			寿命末期	0.22	0.21

表 5-9 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-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

表 5-10 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部における温度分布 (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)	
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りに基づく曲げ荷重 (曲げ応力)	
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)	

表 5-11 地震時の下部端栓溶接部の応力評価結果

地震動	許容応力	運転条件*	寿命時期	下部端栓溶接部 (設計比)
				一次応力+ 二次応力
基準地震動 S _s	S _y	圧力過渡	寿命初期	0.63
			寿命中期	0.30
			寿命末期	0.23

注記* : 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、圧力過渡時のみを評価対象とした。

表 5-12 地震時の下部端栓溶接部の疲労評価結果

地震動	寿命時期	応力振幅 (MPa)	許容 サイクル数	地震荷重の 繰り返し回数	疲労累積係数の 増分*
基準地震動 S _s	寿命初期	38	1.0×10 ⁶	200	2.000×10 ⁻⁴
	寿命中期	37	1.0×10 ⁶	200	2.000×10 ⁻⁴
	寿命末期	38	1.0×10 ⁶	200	2.000×10 ⁻⁴

注記* : 燃料の全寿命を通した疲労累積係数 (約 0.003, 引用文献(4)参照) を付加しても 1 を下回っている。

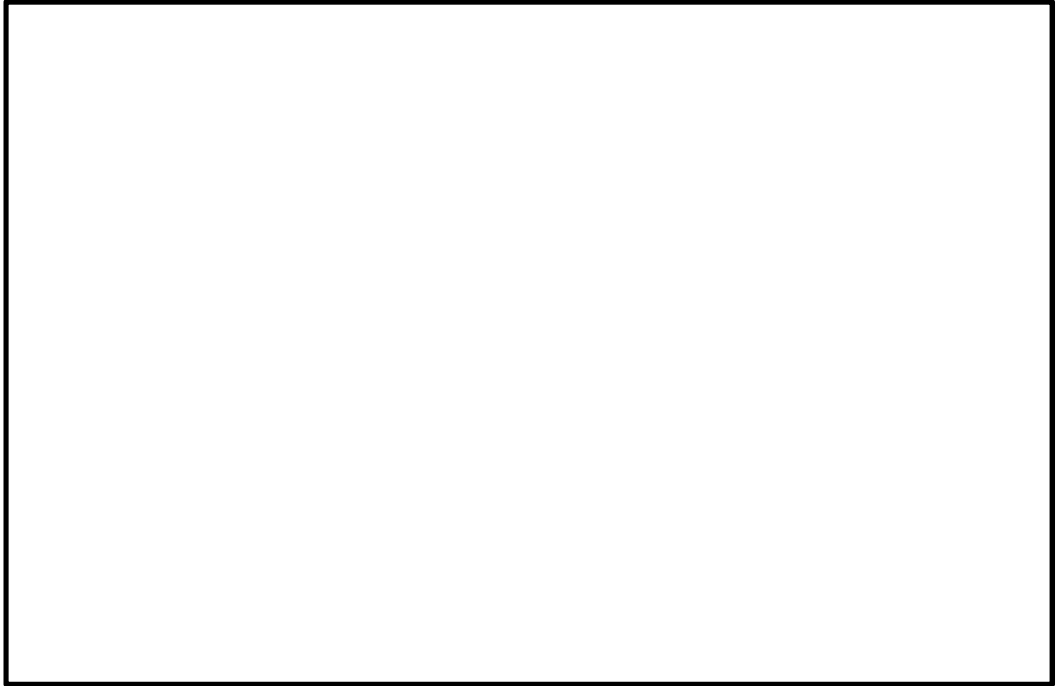


図5-1 ジルカロイ-2降伏応力の設計値（公称値*）

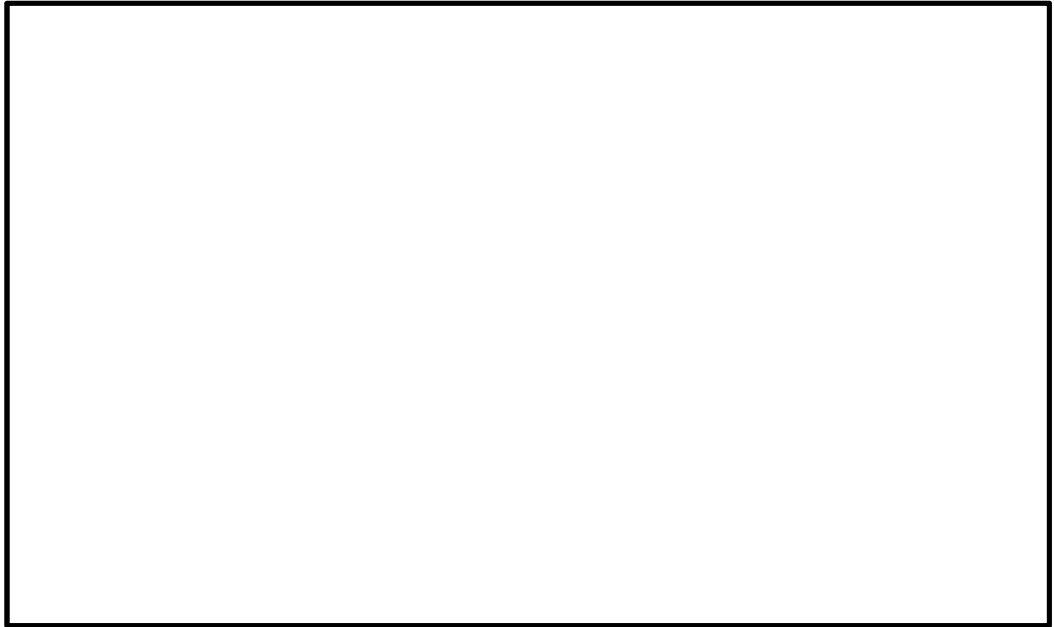


図 5-2 ジルカロイ-2 引張強さの設計値（公称値*）

注記*：データ分布上の公称値を示す。

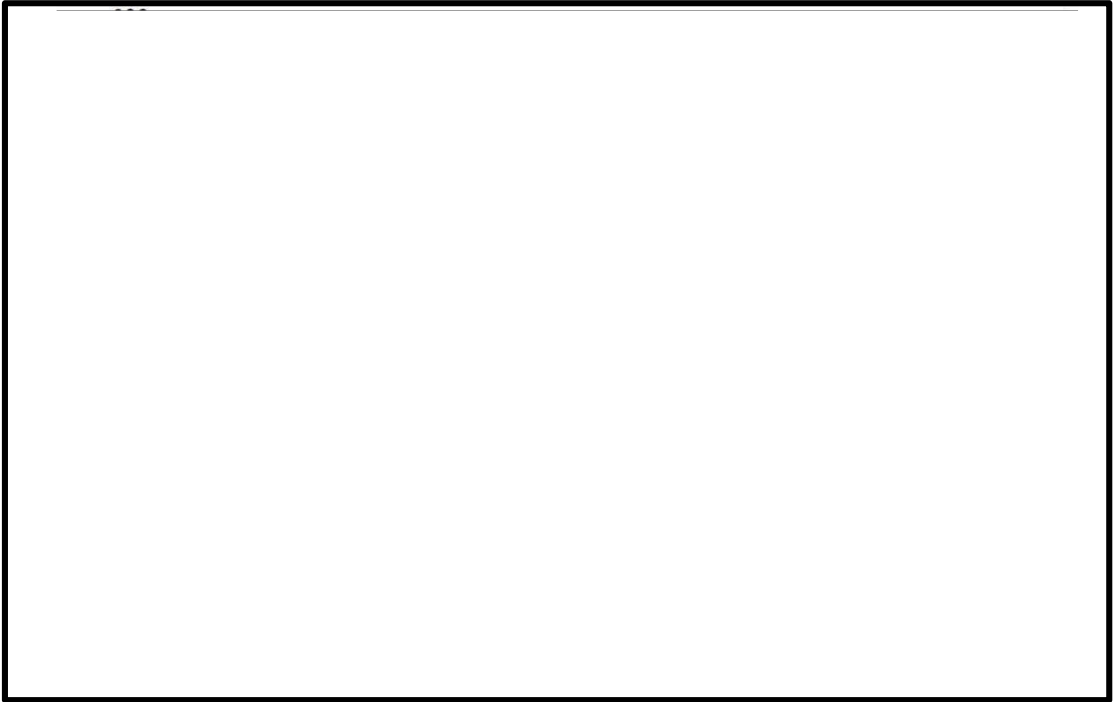


図 5-3 ジルカロイ-2 降伏応力及び引張強さの設計値 (95%確率下限値)
(下部端栓溶接部)

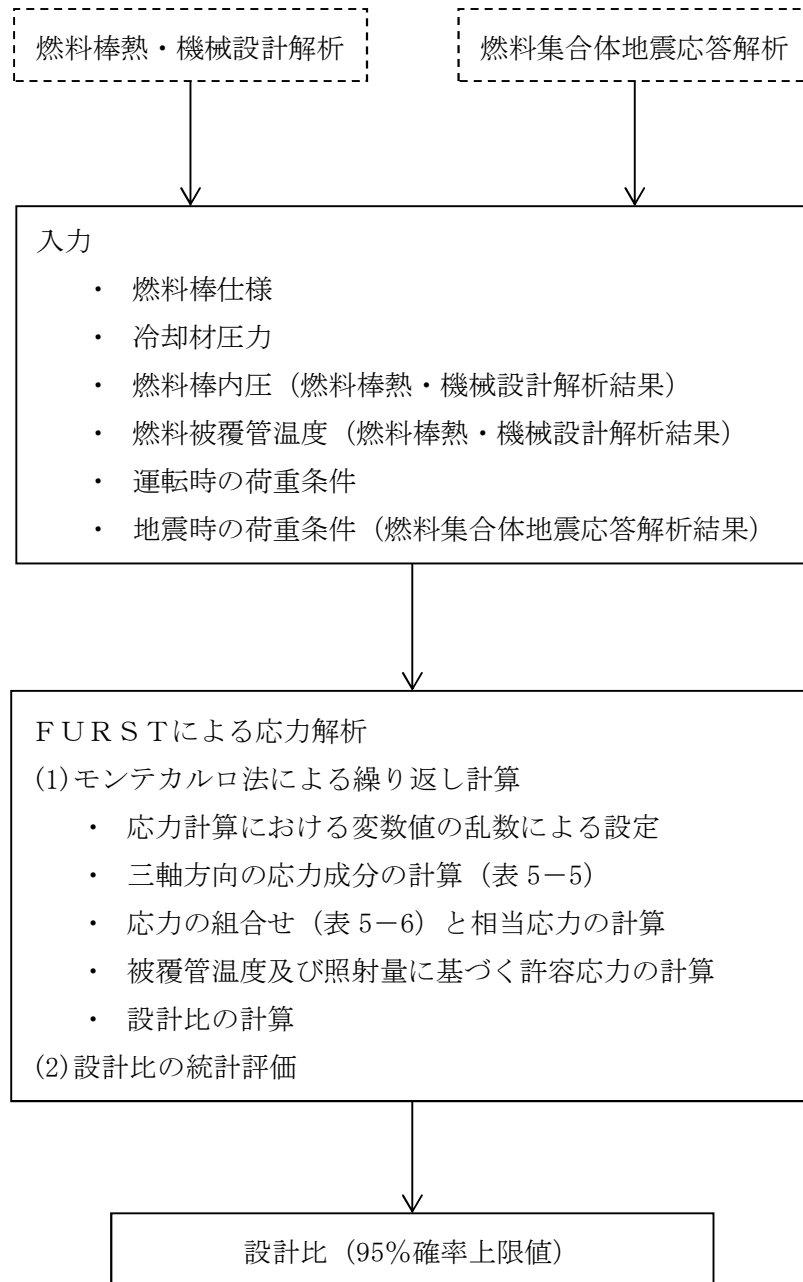


図 5-4 地震時のスペーサ間及びスペーサ部の応力評価のフロー

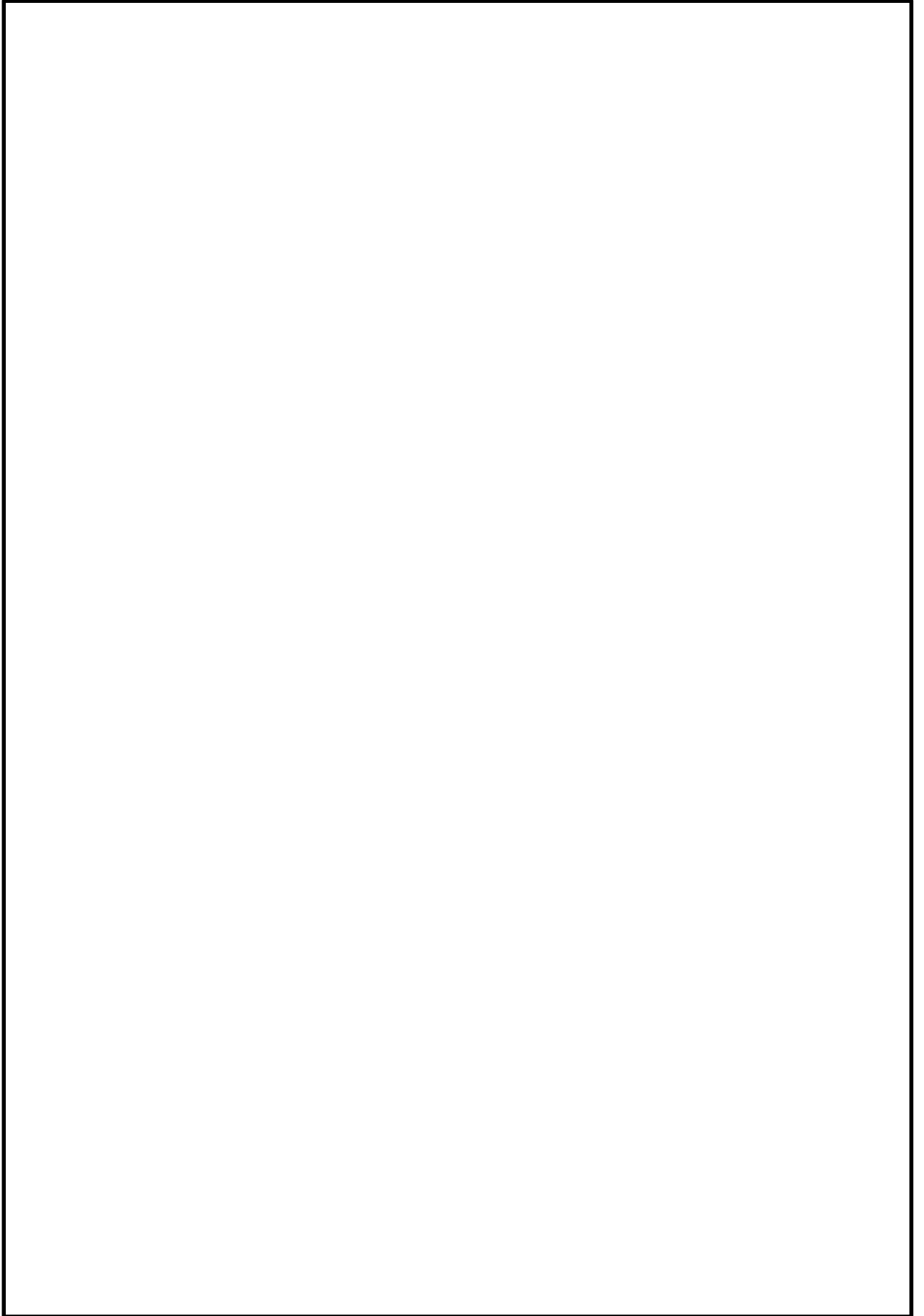


図 5-5 スペーサ間及びスペーサ部の応力の模式図

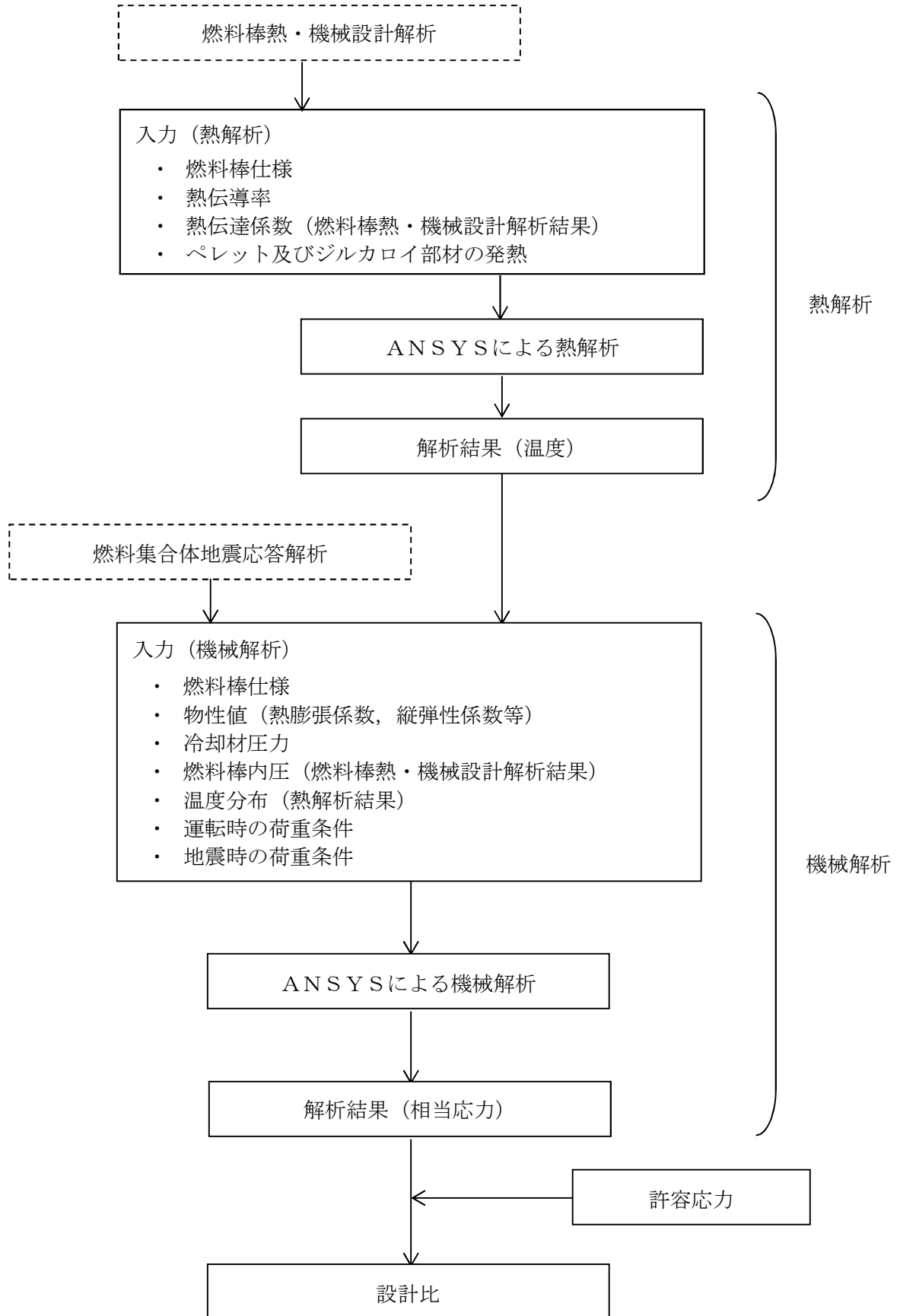


図 5-6 地震時の下部端栓溶接部の応力評価のフロー

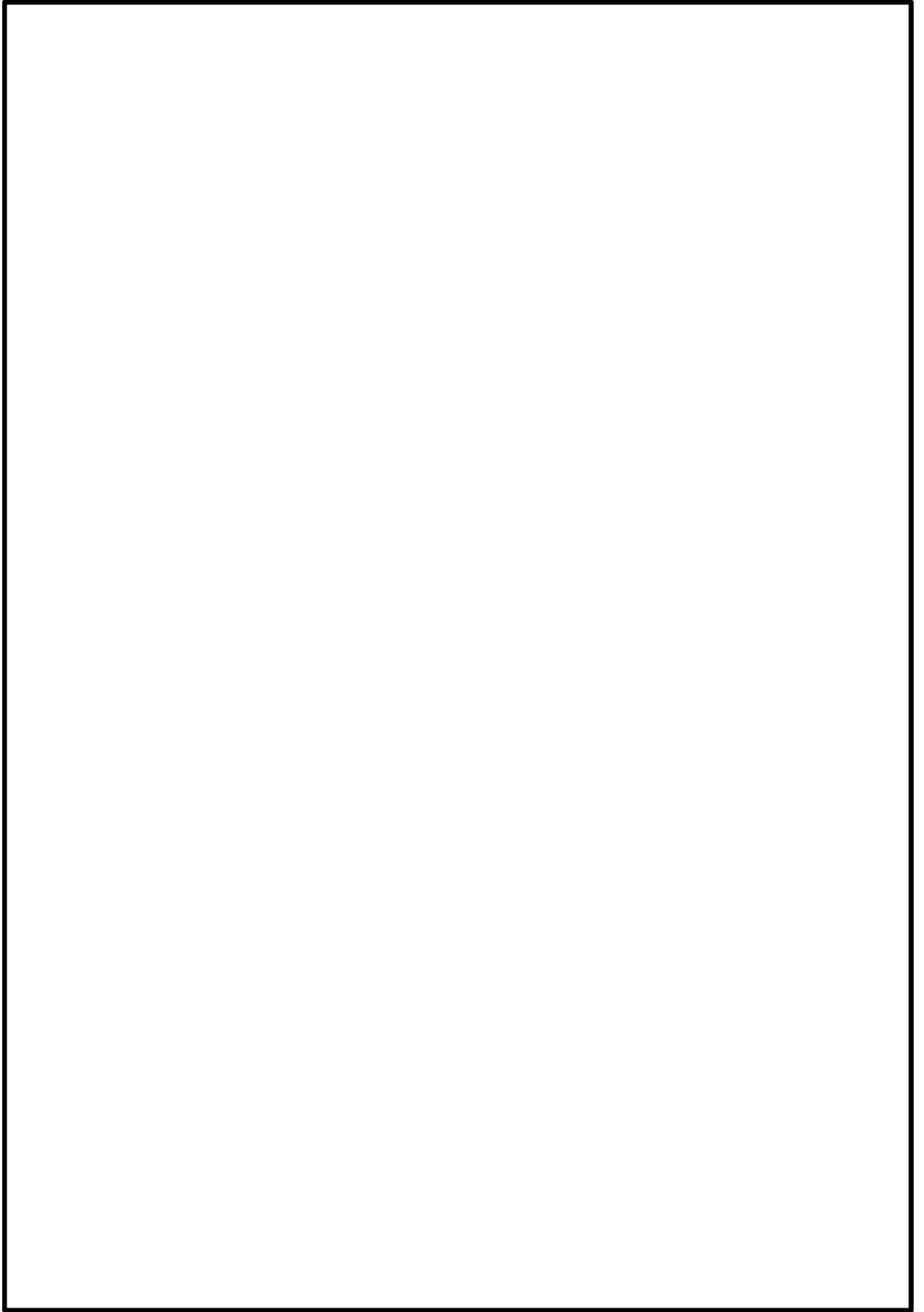


図 5-7 下部端栓溶接部の応力評価における熱解析モデル

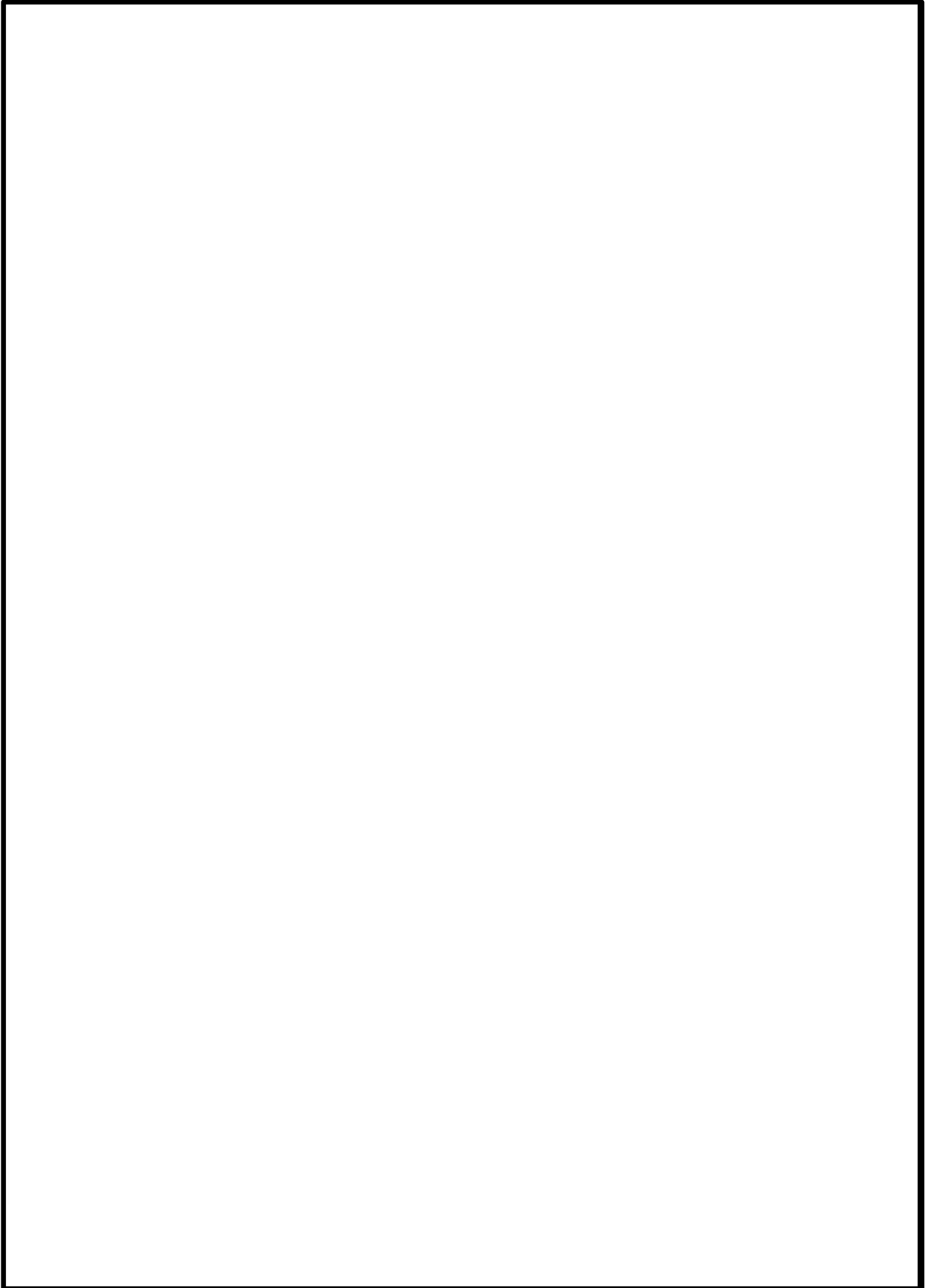


図 5-8 下部端栓溶接部の応力評価における機械解析モデル

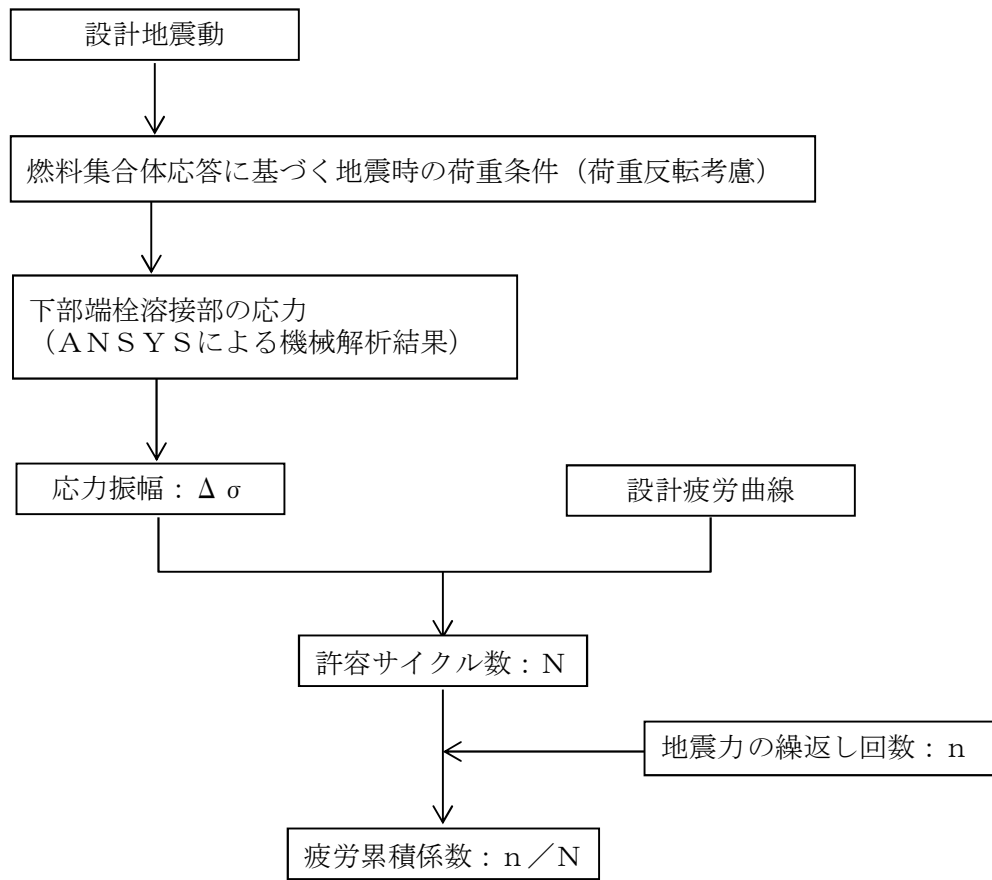


図 5-9 地震時の下部端栓溶接部の疲労評価のフロー

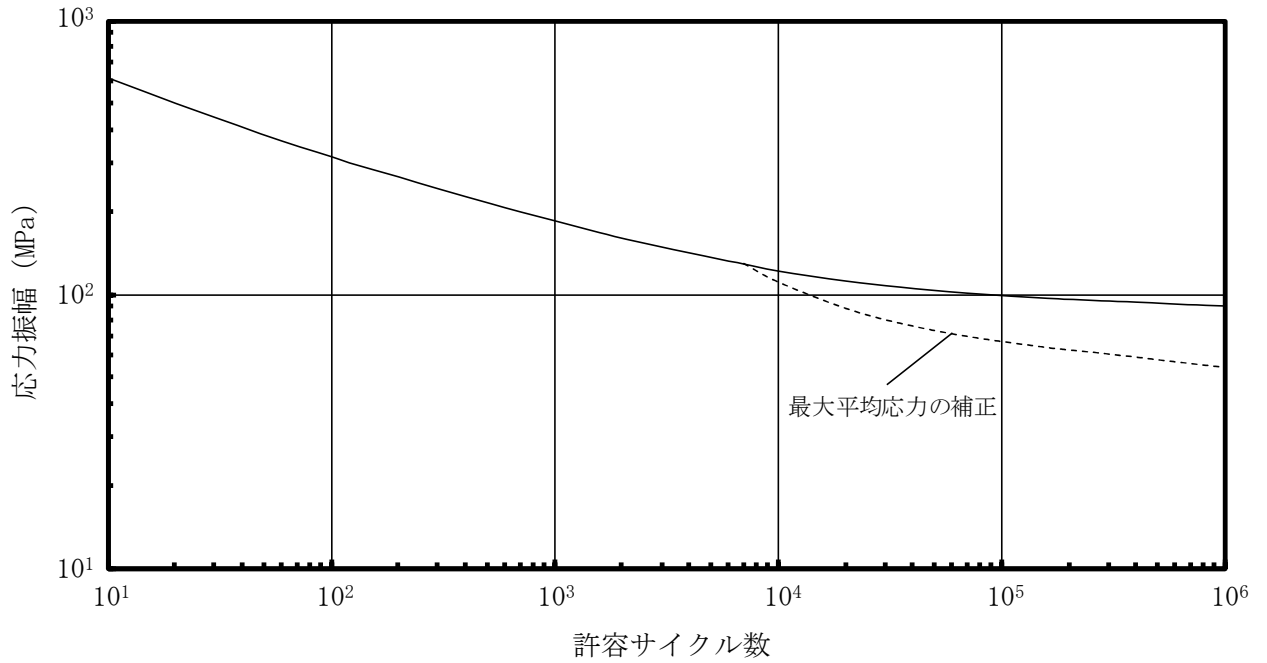


図 5-10 ジルカロイの設計疲労曲線*

注記* : ジルカロイ設計疲労曲線は、引用文献(3)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。

6. 引用文献

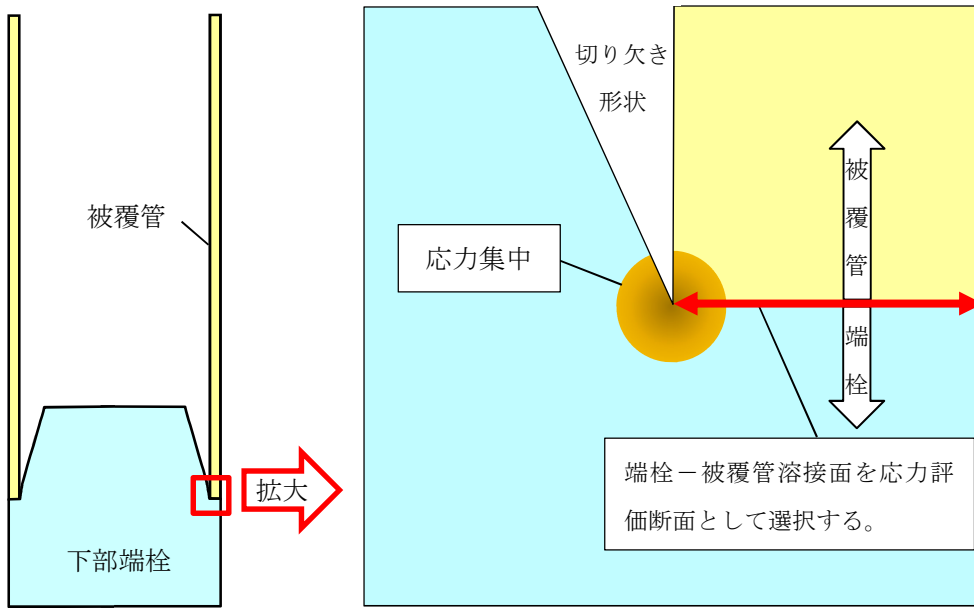
- (1) 「沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について」, 株式会社日立製作所, HLR-033 改訂 1, 平成 10 年 2 月
- (2) 「沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について」, 株式会社東芝, TLR-045 改訂 1, 平成 10 年 1 月
- (3) W. J. O'Donnell and B. F. Langer, "Fatigue Design Basis for Zircaloy Components", Nuclear Science and Engineering, 20, 1-12 (1964)
- (4) 柏崎刈羽原子力発電所第 6 号機及び第 7 号機「燃料体設計認可申請書」(GNF 燃設認第 42-A 号, 平成 24 年 9 月 7 日認可)

付録1 応力計算結果の応力分類処理方法

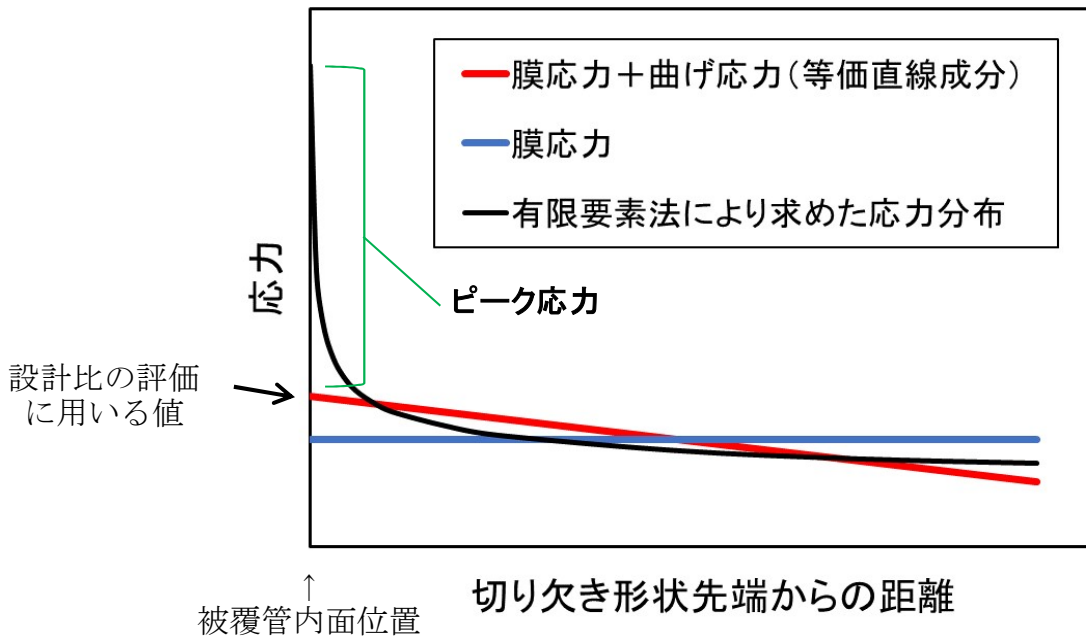
燃料被覆管下部端栓溶接部は、切り欠き形状を含む複雑な形状（付図-1 参照）であるため有限要素法を用いた解析コード「ANSYS」により発生応力を求めており、算出される応力値には（一次応力+二次応力+ピーク応力）の全応力成分が含まれる（付図-2 参照）。ピーク応力は、応力集中または局部熱応力により、一次応力または二次応力に付加される応力の増加分として定義されており、その特徴は、それによって大きな変形は起こらないが、それが繰返されると疲労破壊の原因となることがあるとされている（「設計・建設規格」参照）。原子力発電所耐震設計技術指針（重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補-1984）（日本電気協会 電気技術基準調査委員会 昭和59年9月）においてもピーク応力は疲労評価が対象とされている。よって、解析コード「ANSYS」の計算モデル中のメッシュ要素の節点での応力解析結果から、下記に示す応力分類処理を行い、一次応力+二次応力及びピーク応力を求める。

- (1) 応力評価断面として、付図-1に示す端栓-被覆管溶接面を選択する。
- (2) (1)で選んだ応力評価断面に対して、断面内の全ての節点の応力を積分し、断面平均応力（膜応力）及び断面内での曲げの釣り合いが等価となる曲げ応力の等価直線成分を求める。この膜応力と曲げ応力の等価直線成分を合計したものを一次応力+二次応力とする（付図-2 参照）。
- (3) 応力評価断面における応力分布と(2)で求めた一次応力+二次応力（膜応力と曲げ応力の等価直線成分の合計）との差をピーク応力とする（付図-2 参照）。

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、付図-2に示すように、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。



付図-1 下部端栓部の有限要素法による応力解析体系の模式図



付図-2 応力分布と応力分類処理結果の模式図