

柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉

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1月

東京電力ホールディングス株式会社

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 : 燃料被覆管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 : 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

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)許可申請書添付八及び燃料体設計認可申請書添付書類（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力差による応力、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（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 条の解釈を第 2.1-1 表に、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が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 (地震による損傷の防止)	設置許可基準規則の解釈 第 4 条 (地震による損傷の防止)	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
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

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（地震による損傷の防止）	設置許可基準規則の解釈 第 4 条（地震による損傷の防止）	備考
<p>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。</p>	<p>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。</p>	<p>追加 要求 事項</p>

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（地震による損傷の防止）	技術基準規則の解釈 第 5 条（地震による損傷の防止）	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>	-	変更なし
<p>2 耐震重要施設（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>	-	変更なし
<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>	-	変更なし
<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の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>4 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>	追加 要求 事項

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留まる設計とする。

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。

- (1) 燃料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。

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返し応力として作用するため、上記の内、(1) 及び (2) について地震影響を考慮した評価を行う。なお、(3) は燃料集合体に異常な寸法形状変化を生じさせないため、燃料被覆管製造時における残留応力除去、上下部タイプレート及びスペーサによる燃料棒の保持等、設計及び製造上考慮されている項目であり、地震時の被覆管の閉じ込め機能には影響しないことから評価対象としない。

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被覆管温度や燃料棒内圧のほか、炉心条件、地震動¹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。被覆管温度、燃料棒内圧、炉心条件、被覆管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 S_s 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、燃料集合体の浮き上がりの可能性については、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、浮き上がりの影響がない（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と上部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]。

1：平成 29 年 12 月 27 日柏崎刈羽原子力発電所の発電用原子炉の設置変更（6 号及び 7 号原子炉施設の変更）許可取得時の弾性設計用地震動 Sd 及び基準地震動 Ss

5. 追加要求事項を踏まえた燃料被覆管応力評価条件

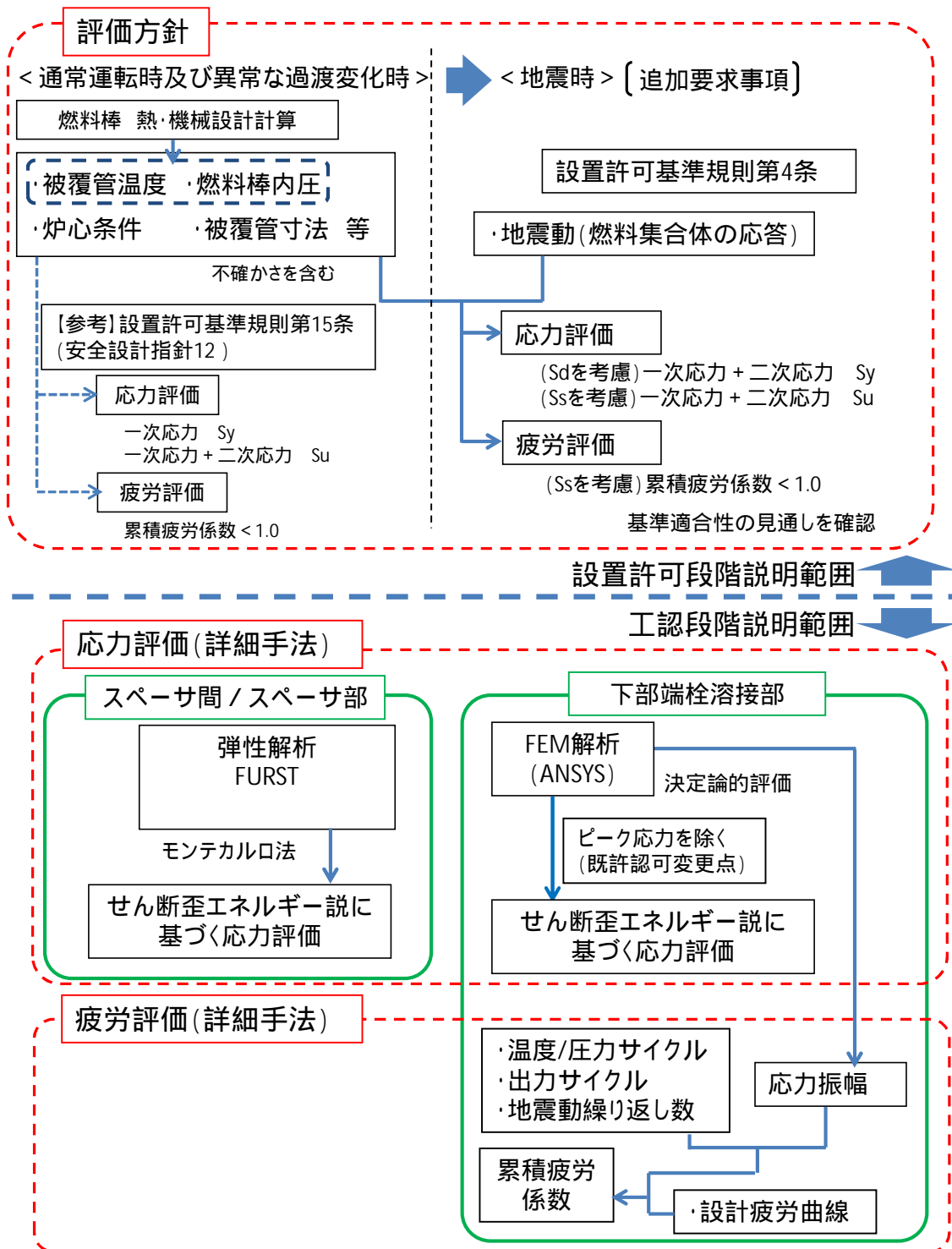
「実用発電用原子炉の燃料体に対する地震の影響の考慮について（平成 29 年 2 月 15 日，原子力規制庁）」を踏まえた燃料被覆管の応力評価条件を第 5-1 表に示す。

評価対象燃料は，代表として原子炉設置変更許可済の 9×9 燃料（A 型）とする。なお，6 号炉と 7 号炉はおおむね同一構造であること及び両炉の燃料集合体は同一設計であることから，7 号炉を代表で評価する。

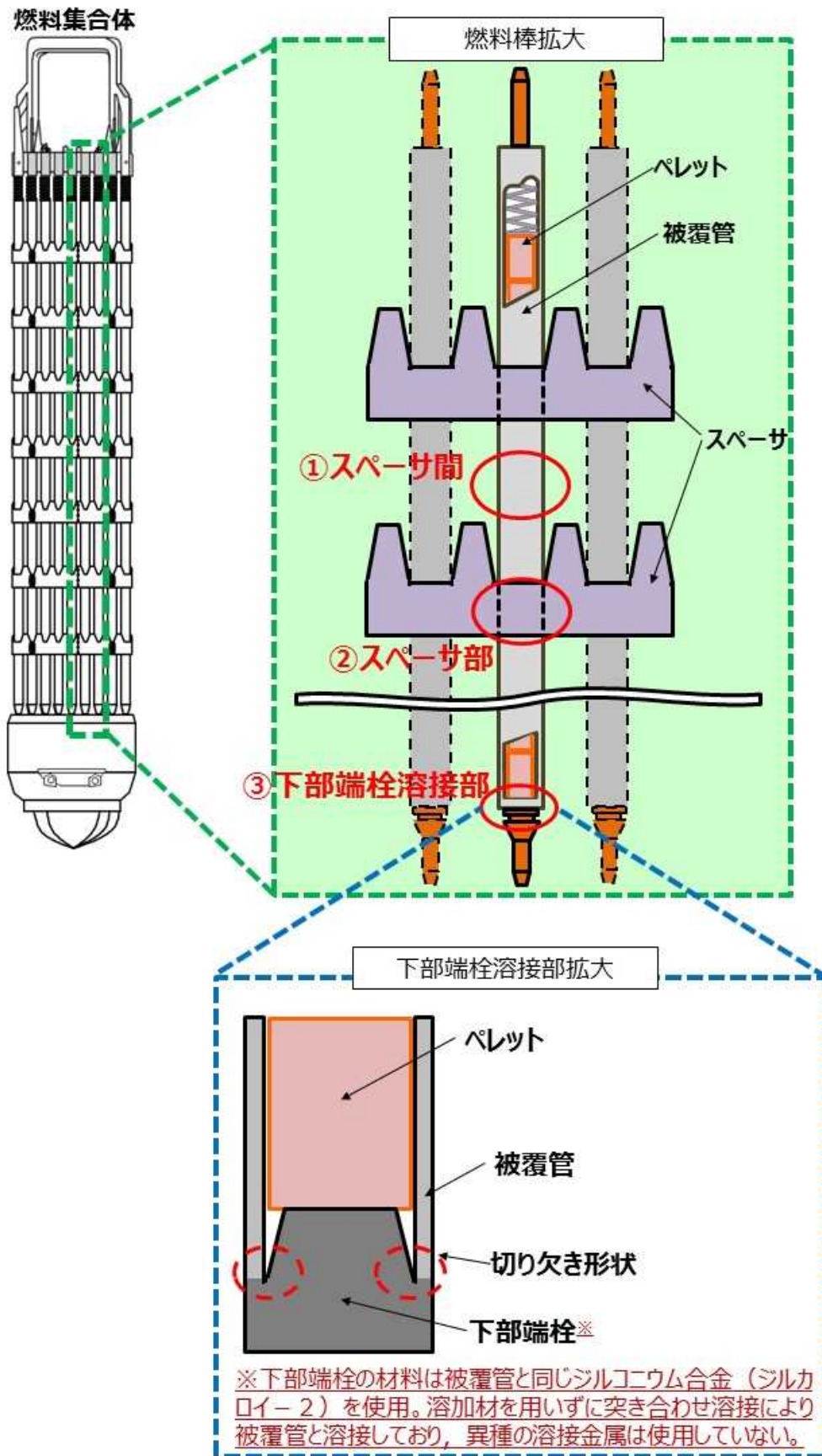
第 5-1 表 燃料被覆管の応力評価条件

要求機能	考慮すべき応力と地震動 ²	許容応力
燃料被覆管の閉じ込め機能	一次応力（Sd を考慮） +二次応力（Sd を考慮）	降伏応力 （Sy）
	一次応力（Ss を考慮） +二次応力（Ss を考慮）	引張強さ （Su）

2：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，弾性設計用地震動 Sd に対して降伏応力（Sy），基準地震動 Ss に対して設計引張強さ（Su）であるが，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，本評価においては，基準地震動による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。



第 4-1 図 燃料被覆管閉じ込め機能評価フロー



第 4-2 図 評価対象部位（イメージ）

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³ 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すべ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による統計評価を行う。このため応力設計比は、被覆管寸法、被覆管温度、燃料棒内圧、炉心条件、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された値を用いる。モンテカルロ法による評価では、1 回の試行毎に乱数が用いられ、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 2 参照)。また、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。

3: 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) / 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。具体的には炉内滞在期間 8 年を仮定して温度・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、地震荷重の繰返し数は、基準地震動 Ss に対する建屋 - 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返し回数をふまえ、200 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。

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においても、応力設計比は最大で 0.76 となり、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 0.00043 となった。よって、全寿命を通した累積疲労係数(約 0.003^[4])に、地震動による疲労係数増分を加えても累積疲労係数は 1.0 より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 年度原子力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」の改訂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] 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)

燃料被覆管の応力評価に考慮する応力について

各評価対象部位において考慮する応力を添付 1-1 表に示す。

添付 1-1 表 各評価対象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)内外圧力差に基づく応力			
(2)水力振動に基づく応力			
(3)楕円度に基づく応力			
(4)スペーサ(支持格子)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			
(7)膨張スプリング等による軸方向荷重に 基づく応力			
(8)端栓取付角公差による曲がりに基づく 応力			
(9)スペーサ(支持格子)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 ¹			
(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 ¹			
(11)鉛直方向地震加速度に基づく応力 ¹			

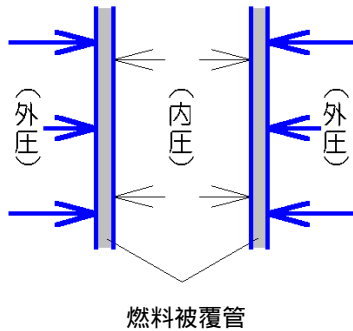
1：地震動を考慮する場合に新たに加わる応力

[解 説]

1. 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

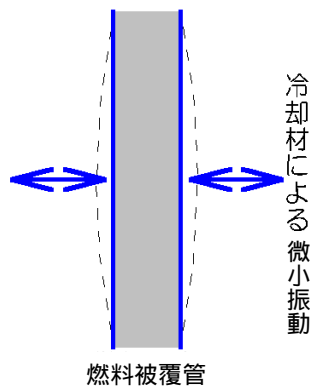
(1)内外圧力差に基づく応力

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。



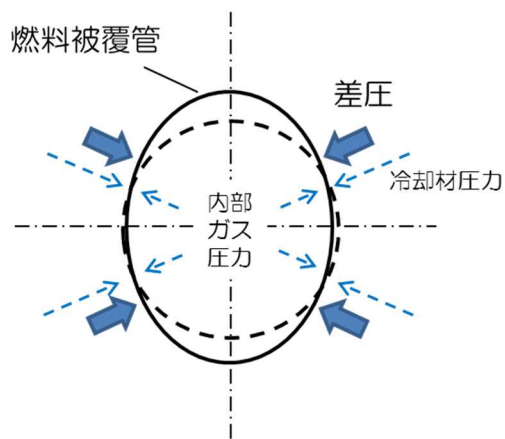
(2)水力振動に基づく応力

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。



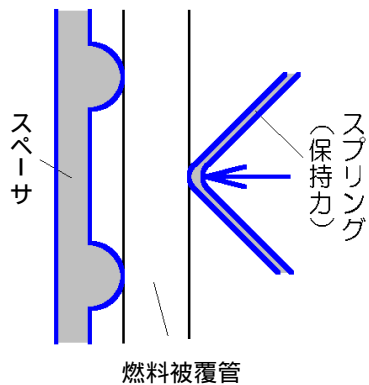
(3)楕円度に基づく応力

燃料被覆管製作時に生じる真円からのわずかな歪みにより，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。



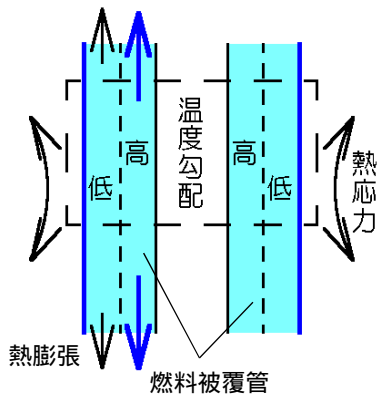
(4) スペース（支持格子）の接触力に基づく応力

スペース（支持格子）のばね押圧により，スペース部に発生する応力。



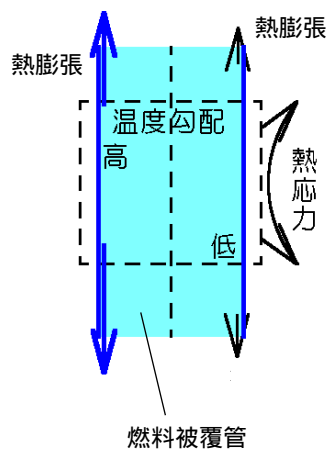
(5) 半径方向温度差に基づく応力

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。



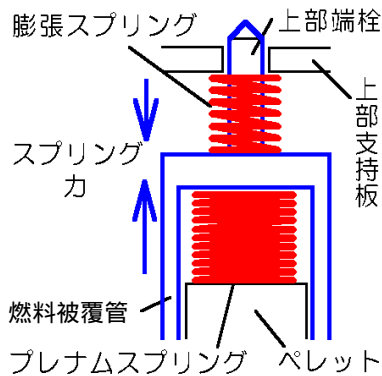
(6) 円周方向温度差に基づく応力

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ス（支持格子）により拘束されることで発生する応力。



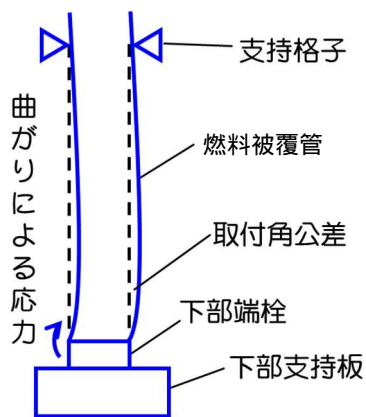
(7) 膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力

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)により発生する応力。
燃料自重による応力も含む。



(8) 端栓取付角公差による曲がりに基づく応力

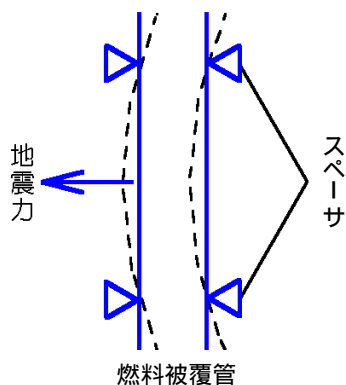
下部端栓の取付角の公差により、下部端栓とスペーサ(支持格子)との間で燃料被覆管に曲げが生じることにより発生する応力。



2. 地震時に付加される応力

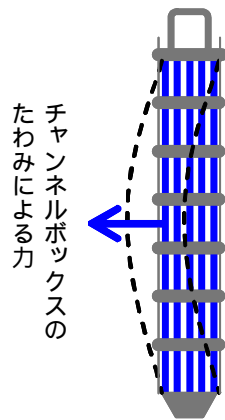
(9) スペーサ(支持格子)間の水平地震力による燃料被覆管のたわみに基づく応力

水平地震荷重により、スペーサ(支持格子)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。



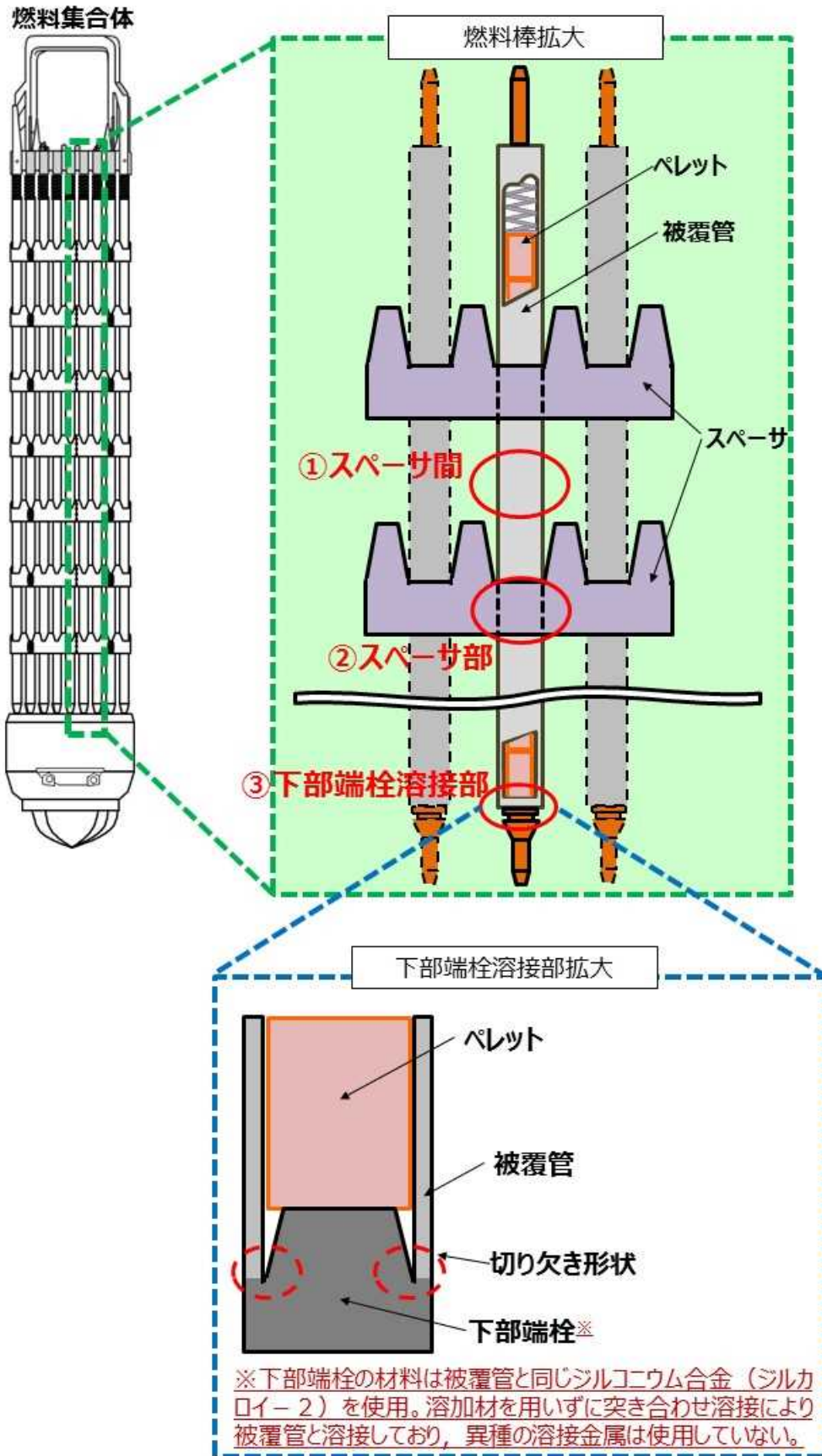
(10)チャンネルボックスの水平地震力によるたわみに基づく応力

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。



(11)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、燃料被覆管に見か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。



添付 1-1 図 評価対象部位（イメージ）【第 4-2 図再掲】

燃料被覆管下部端栓溶接部における応力の取扱いについて

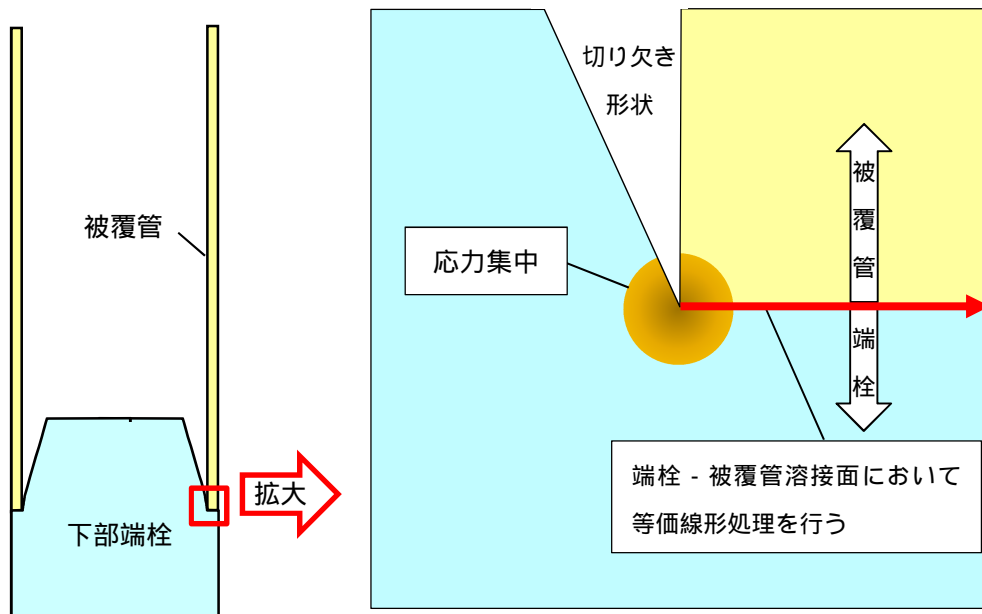
燃料被覆管下部端栓溶接部は、切り欠き形状を含む複雑な形状（添付 2-1 図参照）であるため有限要素法（以下、「FEM」という）を用いた解析により発生応力を求めており、得られる応力値には（一次応力＋二次応力＋ピーク応力）の全応力成分が含まれる（添付 2-2 図参照）。ピーク応力は、荷重の繰り返しがなければ直ちに破損につながることはなく^[1]、JEAG 4601・補-1984^[2]においてもピーク応力は疲労評価が対象とされている（添付 2-1 表参照）。よって、等価線形処理により FEM 解析結果から一次応力＋二次応力を求め、応力設計比の計算を行う。

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。これらと元の応力分布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。

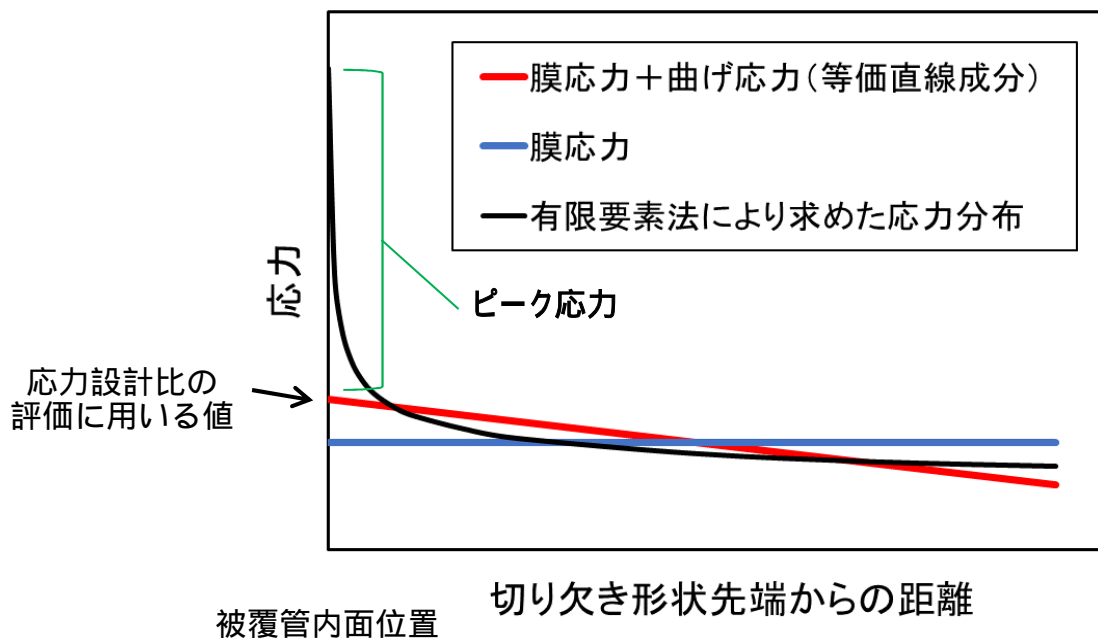
応力の考え方の模式図を添付 2-3 図に示す。応力が最も厳しい条件となるのはピーク応力の方向と正味の曲げモーメントの方向が一致するケースであり、下部端栓溶接部の応力解析では燃料被覆管内面位置が該当する。よって、応力設計比の評価には燃料被覆管内面位置での応力を用いる。

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] JEAG 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] JSME S NC1-2005/2007 「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 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

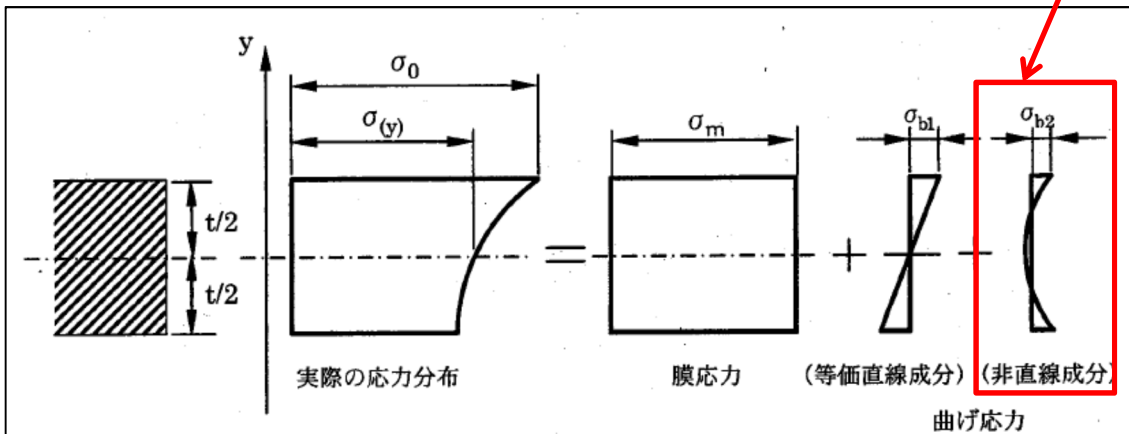
添付 2-1 表 第 1 種容器の許容応力 (JEAG 4601・補-1984^[2]からの抜粋)

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	—	—	$3 S_m$ ⁽¹⁾	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。 ⁽²⁾	$0.6 S_m$ ⁽⁷⁾	S_y ⁽⁸⁾⁽⁹⁾ ($1.5 S_y$)
II _A	—	—			$0.6 S_m$ ⁽⁷⁾	S_y ⁽⁸⁾⁽⁹⁾ ($1.5 S_y$)
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	—	—	$0.6 S_m$ ⁽⁷⁾	S_y ⁽⁸⁾⁽⁹⁾ ($1.5 S_y$)
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⁾	$3 S_m$ ⁽⁴⁾ 〔 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。〕	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。 ⁽⁵⁾⁽⁶⁾	$0.6 S_m$	S_y ⁽⁹⁾ ($1.5 S_y$)
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			$0.4 S_u$	S_u ⁽⁹⁾ ($1.5 S_u$)

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 (JSME S NC1-2005/2007^[3]からの抜粋)

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)燃料タイプ：9×9 燃料（A型）
- (2)評価部位：スペーサ間，スペーサ部，下部端栓溶接部
- (3)解析コード：<スペーサ間，スペーサ部>
弾性解析コード FURST Ver.5¹（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.14²
- (4)評価点：燃料寿命初期，中期，末期
- (5)運転状態：出力過渡（120%出力）または圧力過渡（冷却材圧力 MPa[abs]）
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した。
- (6)考慮する応力： 内外圧力差に基づく応力（一次応力）
水力振動に基づく応力（一次応力）
楕円度に基づく応力（一次応力）
スペーサの接触力に基づく応力（スペーサ部評価のみ）（二次応力）
半径方向温度差に基づく熱応力（二次応力）
円周方向温度差に基づく熱応力（二次応力）
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）
端栓取付角公差による曲がりに基づく応力（二次応力）

地震による影響を評価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。

- スペーサ間の水平地震力による燃料棒被覆管のたわみに基づく応力（一次応力）
- 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）
- 鉛直地震加速度に基づく応力（一次応力）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(7)許容応力：基準地震動（Ss）において，一次+二次応力に対して降伏応力（Sy）
基準地震動（Ss）において，一次+二次応力に対して引張強さ（Su）

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，基準地震動による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。

(8)入力値：<スパーサ間，スパーサ部>

水平加速度 2.71G（Ss 応答加速度）

鉛直加速度 0.90G（同上）

燃料集合体相対変位 31.6mm（Ss 応答変位）

<下部端栓溶接部>

水平加速度 1.45G（Ss 応答加速度）

鉛直加速度 0.90G（同上）

燃料集合体相対変位 31.6mm（Ss 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値を用いる。

1：地震時に被覆管に発生する応力は，燃料棒を梁モデルに置換し水平方向の加速度及びチャンネルボックスの曲がりによる強制変位を受けた際の応力計算式，鉛直方向に燃料棒が加振された場合に燃料棒断面にかかる圧縮及び引張り応力の計算式で計算する。これは，運転時及び過渡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：燃料被覆管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+二次応力を評価に用いる。

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 Ss に対して降伏応力 Sy	圧力過渡	寿命初期	0.76	0.61	0.69
		寿命中期	0.28	0.26	0.33
		寿命末期	0.24	0.23	0.25
	出力過渡	寿命初期	0.73	0.52	-
		寿命中期	0.30	0.28	-
		寿命末期	0.25	0.24	-
基準地震動 Ss に対して引張強さ Su	圧力過渡	寿命初期	0.43	0.33	0.38
		寿命中期	0.26	0.24	0.29
		寿命末期	0.22	0.22	0.24
	出力過渡	寿命初期	0.42	0.29	-
		寿命中期	0.27	0.25	-
		寿命末期	0.23	0.21	-

地震による繰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。燃料被覆管疲労解析の評価部位は、切欠きと類似した形状を有し応力集中が発生する端栓溶接部とする。

- (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：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
- (5)運転状態：評価上最も厳しい条件として圧力過渡（冷却材圧力 MPa[abs]）
- (6)地震荷重の繰返し数：200 回
- (7)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に基づき評価
- (8)入力値：水平加速度 1.45G（Ss 応答加速度）

鉛直加速度 0.90G（同上）

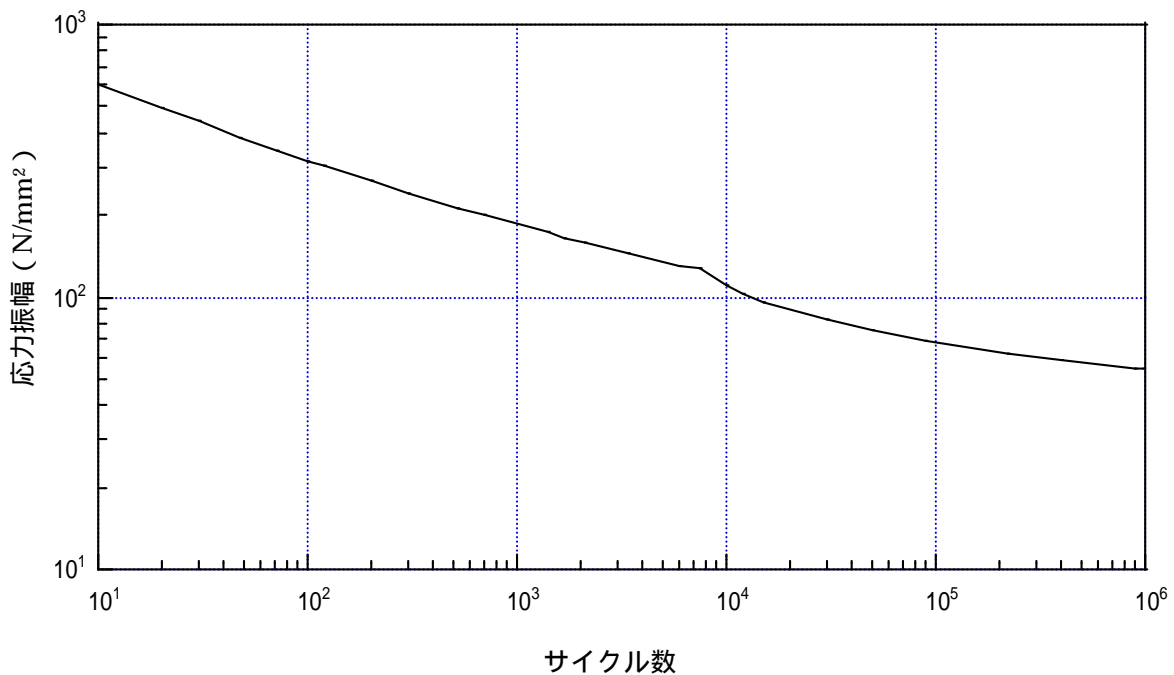
燃料集合体相対変位 31.6mm（Ss 応答変位）

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値を用いる。

添付 4-1 表 被覆管疲労評価結果（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 繰返し数	疲労係数の 増分
基準地震 動 Ss	寿命初期	58	4.6 × 10 ⁵	200	0.00043
	寿命中期	58	4.6 × 10 ⁵	200	0.00043
	寿命末期	58	4.6 × 10 ⁵	200	0.00043

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



添付4-1図 ジルカロイの設計疲労曲線¹

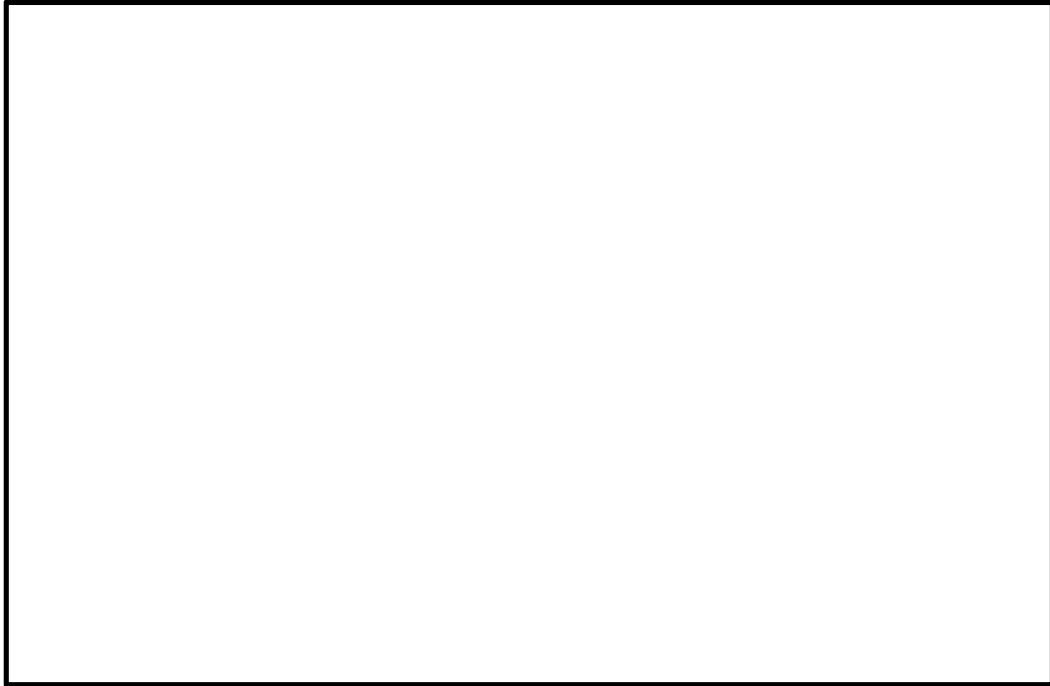
1: ジルカロイ設計疲労曲線は, ジルカロイ - 2 の未照射材及び照射材についての疲労試験結果をベースに, ジルカロイ - 4 等の機械特性及び疲労特性がジルカロイ - 2 とほぼ同等であることを確認し, ジルカロイ - 2, 3 及び 4 共通の設計曲線として設定したものである。Langer-0 ' Donnell は, 設計曲線を保守側に見積もるため, 未照射材及び照射材それぞれについて応力を $1/2$, サイクル数を $1/20$ とし, 未照射材及び照射材の両者の包絡線を Langer-0 ' Donnell の設計疲労曲線^[1]としている。ここで, 異なる高速中性子照射量に対す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^[2]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 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^[1,2]の範囲内にある。

参考文献

- [1] W. J. O'Donnell and B. F. Langer, "Fatigue Design Basis for Zircaloy Components", Nuclear Science and Engineering, 20, 1-12 (1964)
- [2] 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，燃料メーカーの試験結果に基づき，添付 5-1 図、添付 5-2 図のように設定している。



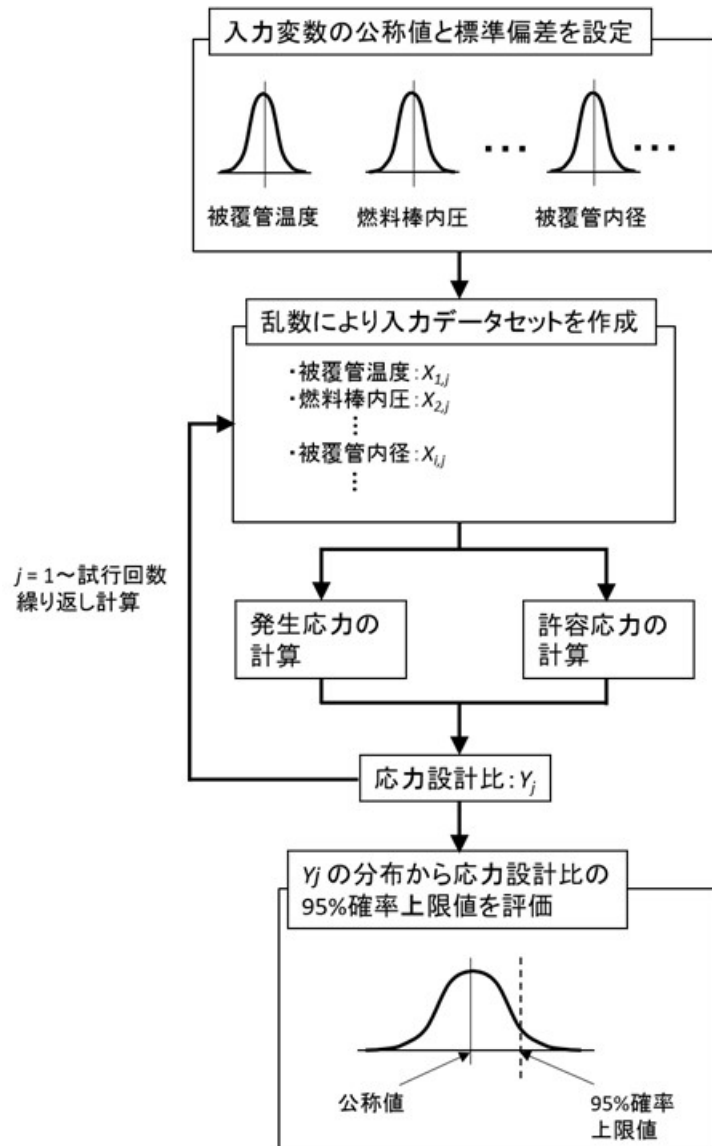
添付5-1図 ジルカロイ-2降伏応力の設計値（公称値）（9×9燃料（A型））



添付5-2図 ジルカロイ-2引張強さの設計値（公称値）（9×9燃料（A型））

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 6-1 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，一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6-1図 モンテカルロ法による統計処理の概要フロー