

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0600-15_改0
提出年月日	2021年2月12日

補足-600-15 【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】

2021年 2月

東北電力株式会社

- I ジルカロイ設計疲労曲線の高燃焼度燃料への適用性について
- II 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
- III 下部端栓溶接部の有限要素法を用いた解析モデルについて
- IV 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
- V 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

I ジルカロイ設計疲労曲線の高燃焼度燃料への適用性について

目 次

1. はじめに	1
2. ジルカロイ設計疲労曲線の適用性.....	1
3. 検討結果	2
4. 引用文献	2

1. はじめに

地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能維持の評価項目として、下部端栓溶接部応力解析より得られた応力振幅と Langer-0' Donnell のジルカロイ設計疲労曲線⁽¹⁾に基づく疲労評価を実施している。この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に基づくものであるが、試験に供された照射材の照射量は $1.5 \times 10^{21} \text{cm}^{-2} \sim 5.5 \times 10^{21} \text{cm}^{-2}$ ($> 0.625 \text{eV}^*$) であり、疲労特性の照射量依存性は小さいと報告されている。

その後実施された研究⁽²⁾において、高速中性子照射量 $1.3 \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$ 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ている。

本資料は、Langer-0' Donnell のジルカロイ設計疲労曲線の 9×9 燃料の被覆管疲労評価への適用性について、過去の研究で実施されたジルカロイ-2 被覆管の疲労試験のデータに基づいて検討した結果を示すものである。

2. ジルカロイ設計疲労曲線の適用性

Langer-0' Donnell のジルカロイ設計疲労曲線⁽¹⁾は、ジルカロイ-2 の未照射材及び照射材の疲労試験結果をベースに、未照射材及び照射材のベストフィット曲線について最大平均応力の補正を施した上で、応力を 1/2 倍した曲線及びサイクル数を 1/20 倍した曲線の 4 つの曲線の包絡線を設計疲労曲線としたものである。(図 I-1)

未照射材の疲労試験では室温及び 316°C (600° F) における、ジルカロイ-2 平滑材 (圧延-焼鈍材及び溶接材) を用いた軸方向引張・圧縮及び曲げの完全交番試験 (平均ひずみが 0) による定ひずみ振幅データ (ひずみの負荷方向は圧延方向, 圧延直角方向, 溶接方向及び溶接直角方向) が得られている。ここで、疲労試験結果の縦軸は、仮想的な弾性挙動を仮定した下記の式を用いて、疲労試験におけるひずみ振幅から応力振幅に換算されたものである。

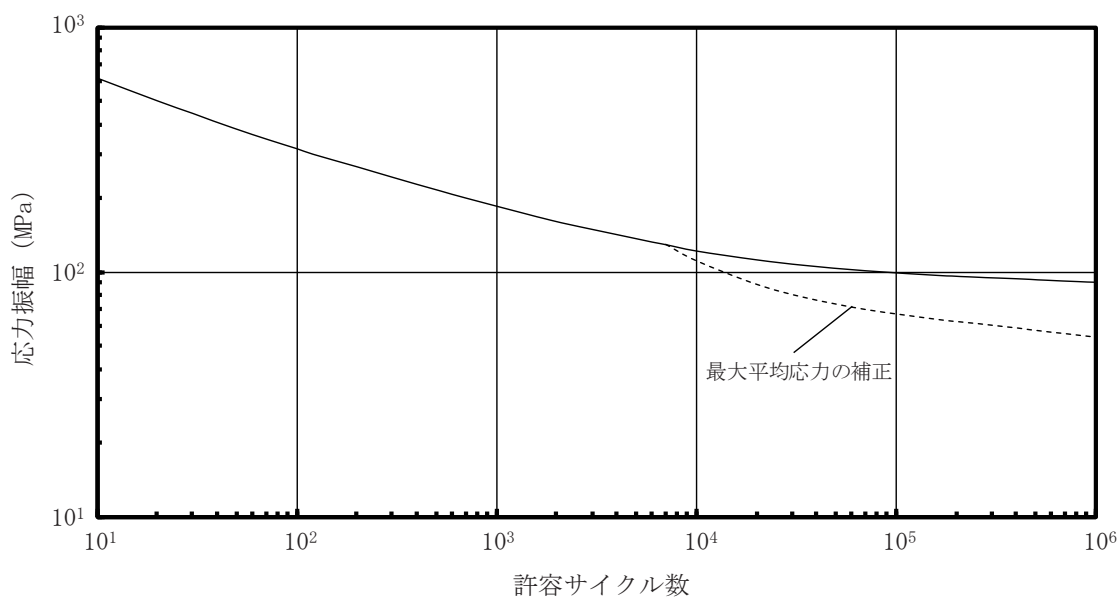


図 I-1 ジルカロイ設計疲労曲線

$$S_a = E \cdot \epsilon_a = E \cdot \epsilon_t / 2$$

ここで、 S_a : 応力振幅 (psi)

E : ヤング率 (室温 ; 14.0×10^6 psi, 316°C ; 11.5×10^6 psi)

ϵ_a : 全ひずみ振幅 (-)

ϵ_t : ひずみ範囲 (ピーク-ピークの変化幅)

照射材の疲労試験は、照射量 $1.5 \times 10^{21} \text{cm}^{-2}$ ~ $5.5 \times 10^{21} \text{cm}^{-2}$ ($>0.625 \text{eV}^*$) の供試材を用いて、 316°C における軸方向引張・圧縮及び曲げの完全交番試験が行われており、約 $1.0 \times 10^{21} \text{cm}^{-2}$ 以上では照射による疲労特性への影響は小さいと報告されている。

また、過去の研究⁽²⁾において、実機的设计条件を超える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、 9×9 燃料の燃料被覆管応力解析に係わる設計パラメータの高速中性子照射量は $1.2 \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$ (9×9 燃料 (A 型))⁽³⁾及び $1.3 \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$ (9×9 燃料 (B 型))⁽⁴⁾であり、上記疲労試験^{(1), (2)}の範囲内にある。

3. 検討結果

9×9 燃料の燃料被覆管応力解析に係わる設計パラメータの高速中性子照射量 $1.2 \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$ (9×9 燃料 (A 型))⁽³⁾及び $1.3 \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$ (9×9 燃料 (B 型))⁽⁴⁾以上の $1.3 \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$ まで照射されたジルカロイ-2 被覆管を用いた疲労試験データを Langer-0' Donnell のジルカロイ設計疲労曲線⁽¹⁾と比較し、ジルカロイ設計疲労曲線は、高照射量の被覆管の疲労試験データに対して十分な余裕を有しており、 9×9 燃料に適用可能と判断された。

4. 引用文献

- (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)
- (3) 「沸騰水型原子力発電所 9×9 燃料について」, 株式会社グローバル・ニュークリア・フューエル・ジャパン, GLR-001, 平成 15 年 4 月
- (4) 「BWR の 9×9 燃料について」, 原子燃料工業株式会社, NLR-15 改訂 4, 平成 22 年 2 月

注記* : 熱中性子を除く高エネルギー領域 ($>0.625 \text{eV}$ の中性子束は、高速中性子束 ($\geq 1 \text{MeV}$) の約 4 倍)

II 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

目 次

1. 概要	1
2. ANSYSの概要	1
3. 下部端栓溶接部の応力評価の方法.....	1
4. 再現解析の条件	3
5. 再現解析の結果	3
6. 検討結果	3
7. 引用文献	4

1. 概要

下部端栓溶接部の応力評価は、端栓溶接部が切欠き形状を含む複雑形状のため有限要素法を用いている。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、「燃料集合体の耐震性についての計算書」に記載した応力評価においては、ANSYSを使用している。MARCとANSYSの概要を比較して、表Ⅱ-1-1に示す。MARCとANSYSは、ほぼ同年代に開発され、その後40年以上の実績を有した汎用の有限要素法解析コードである。また、両者とも伝熱解析や構造解析だけでなく幅広い解析機能を有した同等の解析が可能な解析コードである。いずれのコードも様々な分野の構造解析に広く使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の応力解析等、これまで多くの構造解析に対し使用実績がある。

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ANSYSとで同等な解析結果となることを説明する。

2. ANSYSの概要

ANSYS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解析コードである。

ANSYSは広範囲にわたる多目的有限要素法解析コードであり、伝熱、構造、流体、電磁界、マルチフィジックス解析を実施するものである。

ANSYS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及び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。

ANSYS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。
- ・ANSYS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。
- ・ANSYS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。

3. 下部端栓溶接部の応力評価の方法

MARCによる既認可の解析結果とANSYSによる解析結果を比較するため、MARCによる下部端栓部応力評価と同等の入力条件に基づきANSYSによる解析（再現解析）を実施し、MARCとANSYSの設計比の比較を行った。

(1) 下部端栓溶接部の応力評価モデル

図Ⅱ-3-1に、下部端栓溶接部の応力評価のフローを示す。また図Ⅱ-3-2に、再現解析で使用したANSYSの熱解析及び機械解析のモデルを示す。

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、通常運転時及び過渡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。

なお、ペレット及び被覆管等の物性値については、燃料棒熱・機械設計コード「PRIME」に組み込まれている物性モデル（以下、PRIMEモデルという）を用い、物性値以外の燃料棒特性についてはPRIMEにより別途解析される燃料棒熱・機械解析における統計解析結果に基づいて入力値を設定する。

(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、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 [REDACTED]
- ・被覆管表面熱伝達係数 [REDACTED]
- ・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。

(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に下部端栓溶接部に作用する荷重として、以下を考慮する。

- ・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 [REDACTED]
- ・冷却材圧力 [REDACTED]
- ・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りに基づく曲げ荷重（曲げ応力）

(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的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。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

限值を用いる。

4. 再現解析の条件

以下に、再現解析の条件を示す。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Ⅱ-4-1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すべて同一であり、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：3. (3)のとおり。

(7) 許容応力：引張強さ（Su）

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，8.0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した。

5. 再現解析の結果

表Ⅱ-5-1に再現解析結果を示す。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，判定基準（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た。

6. 検討結果

MARCとANSYSによる同等な入力条件が設定可能であり，同等な入力に基づく再現解析で，下部端栓溶接部の解析モデルに負荷した温度分布と機械的荷重の重畳した変形挙動に基づく応力について同等な結果が得られた。

これらの解析の機械的荷重には地震時の荷重は含まれていないが，被覆管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及び内外圧力差による軸方向荷重が地震時の荷重と同様に解析モデル上端に負荷されていることから，負荷する荷重は増大するが地震時の荷重についても同様に解析可能と考えられる。

以上のことから，下部端栓溶接部の地震時の応力評価へのANSYSの適用は支障ないものとする。

7. 引用文献

- (1) 女川原子力発電所第2号機「燃料体設計認可申請書」(GNF 燃設認第35号, 平成21年10月16日認可)

表 II-1-1 MARC と ANSYS の概要

項目		MARC	ANSYS
開発元		ペドロ・マサル (Pedro Marcal) 博士 MARC Co. → MSC Software Co. (米国)	Swanson Analysis Systems, Inc. → ANSYS, Inc. (米国)
開発時期		1960 年代後半	1970 年
離散化手法		有限要素法	同左
解析機能	伝熱解析	定常／非定常解析	同左
	構造解析	線形／非線形静解析，動解析	同左
	その他	電磁場，流体，音響及び連成解析等	同左

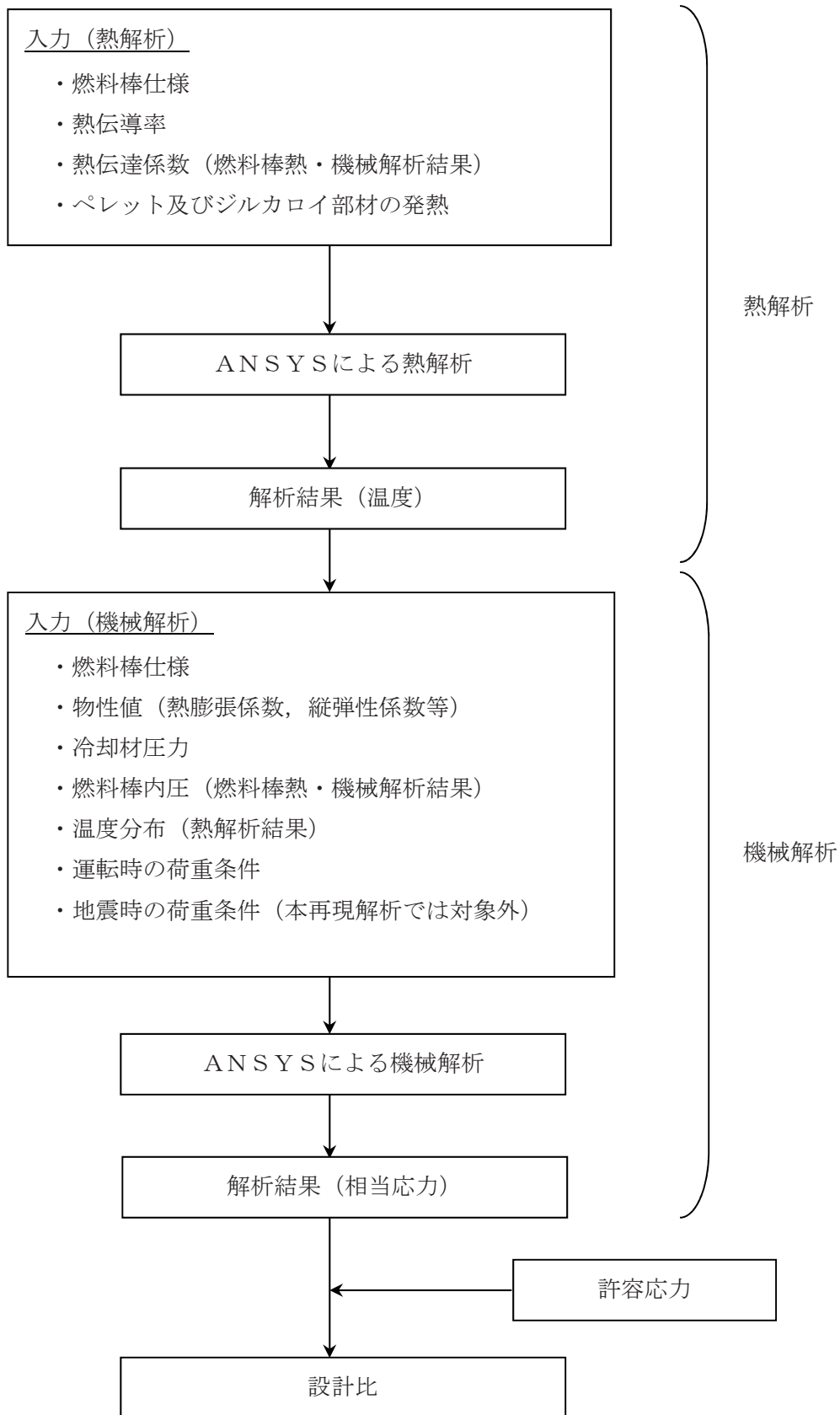
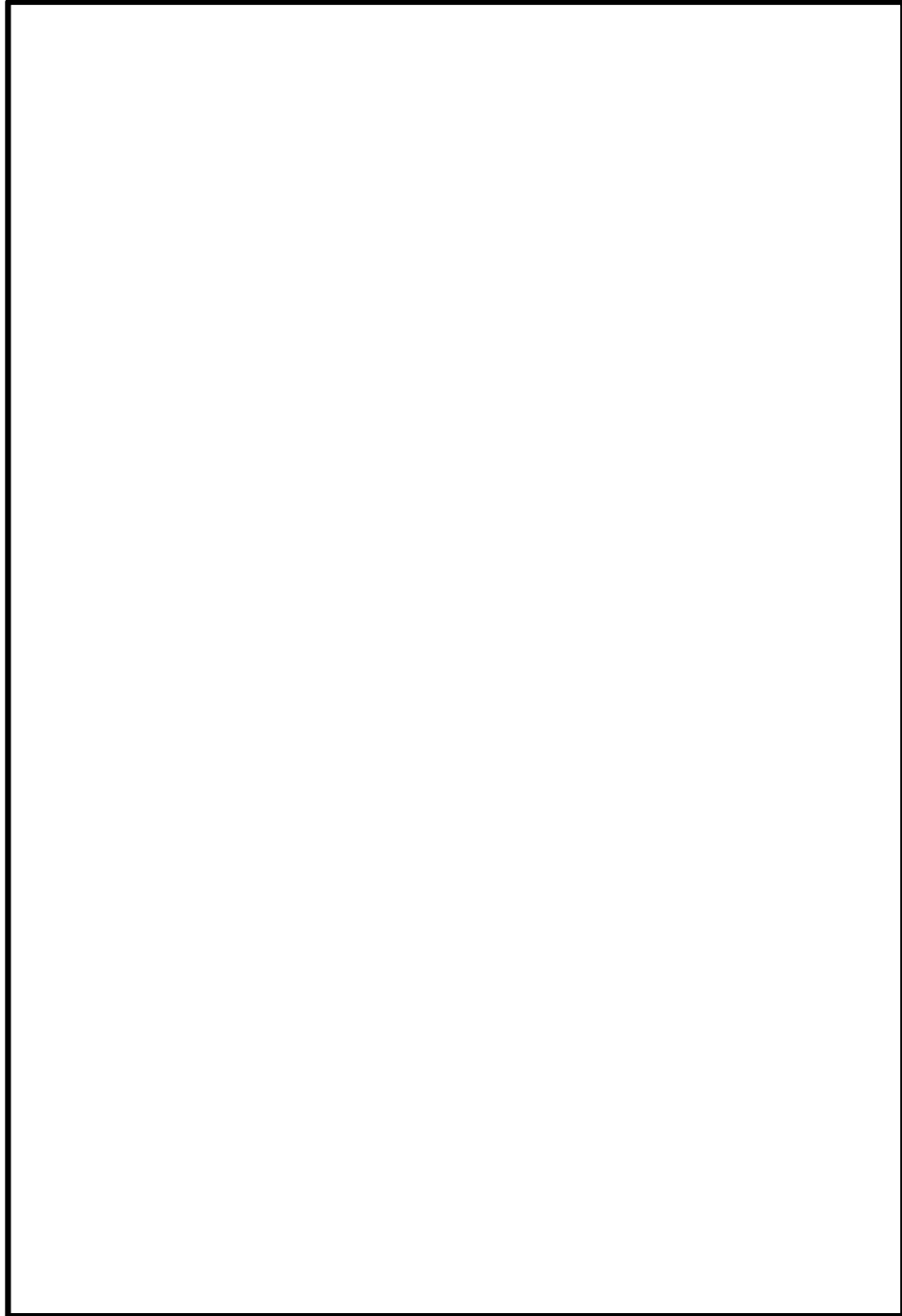


図 II-3-1 下部端栓溶接部の応力評価のフロー



図Ⅱ-3-2 再現解析で使⽤したANSYSの熱解析及び機械解析の解析モデル

表 II-4-1 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 (1/2)

解析	項目	MARC への 入力	ANSYS への 入力

表 II-4-1 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 (2/2)

解析	項目	MARC への 入力	ANSYS への 入力

表 II-5-1 下部端栓溶接部の再現解析結果

解析コード	運転条件	許容応力	設計比		
			寿命初期	寿命中期	寿命末期
MARC	圧力過渡	S _u	0.39	0.42	0.28
ANSYS	同上	同上	0.40	0.40	0.27

Ⅲ 下部端栓溶接部の有限要素法を用いた解析モデルについて

目 次

1. 概要	1
2. 下部端栓溶接部の応力解析モデルの設定の考え方.....	1
2.1 9×9 燃料 (A 型)	1
2.1.1 熱解析モデル	1
2.1.2 機械解析モデル	2
2.1.3 解析モデルにおける要素の形状及び大きさについて.....	2
2.2 9×9 燃料 (B 型)	3
2.2.1 解析モデル	3
2.2.2 解析モデルにおける要素の形状及び大きさについて.....	4

1. 概要

「燃料集合体の耐震性についての計算書」の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に関する下部端栓溶接部の燃料被覆管応力評価においては、図Ⅲ-1-1に示すように、下部端栓溶接部が切欠き形状を含む複雑な形状であることから有限要素法による解析を実施している。

本資料は、有限要素法を用いた下部端栓溶接部の応力解析モデルの設定の考え方について説明するものである。

2. 下部端栓溶接部の応力解析モデルの設定の考え方

図Ⅲ-1-1に示すように、下部端栓のペDESTAL部はペレットと直接接触しており、ペレットで発生した熱がペDESTAL部に流入するため燃料被覆管の溶接部より高温となる。このため、下部端栓の熱膨張量は燃料被覆管より大きく、下部端栓が燃料被覆管を内側から押し上げるため、熱応力が発生する。また、下部端栓溶接部は切欠き形状を有しており、熱応力だけでなく種々の機械的荷重に起因する応力についても応力集中が発生する。このような特徴を考慮し、下部端栓溶接部近傍の温度分布及び応力分布を詳細に解析するため、有限要素法による熱解析及び機械解析を実施している。以下に、下部端栓溶接部の有限要素法を用いた解析モデルの設定の考え方を説明する。

2.1 9×9燃料 (A型)

2.1.1 熱解析モデル

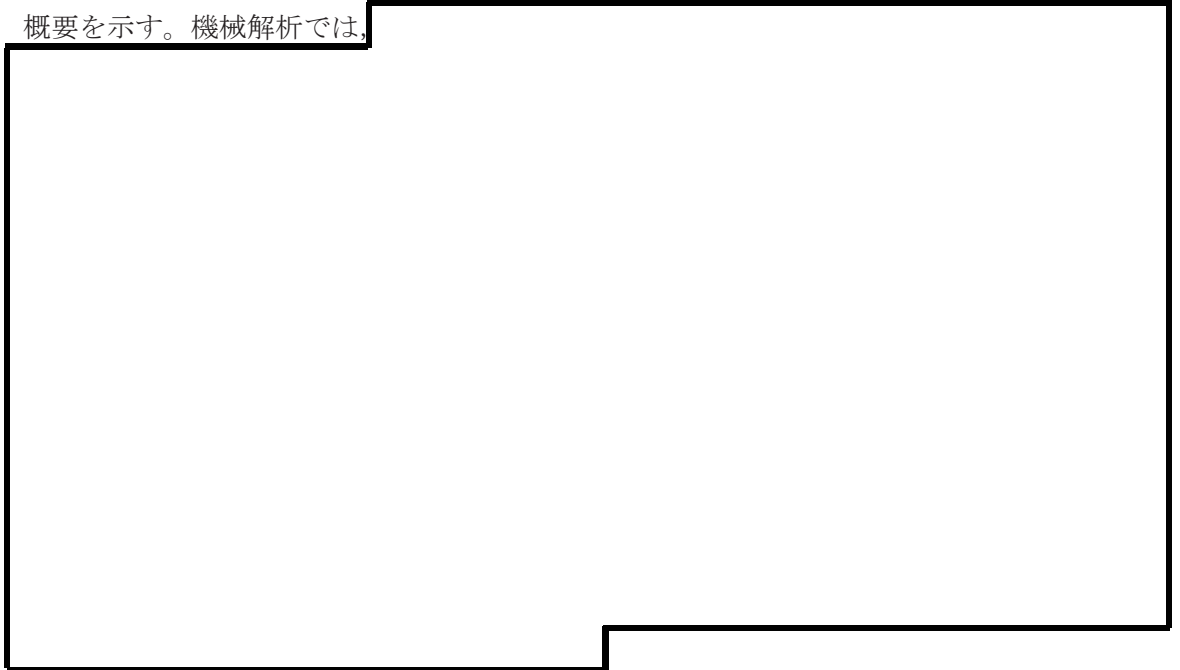
図Ⅲ-2-1に9×9燃料 (A型) の下部端栓溶接部の応力評価における熱解析モデルの概要を示す。熱解析では、

熱解析における有限要素モデルの作成においては、

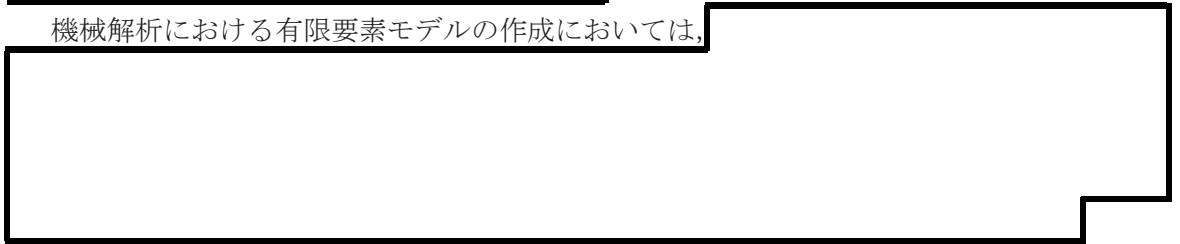
また、熱解析における有限要素モデルの範囲は、

2.1.2 機械解析モデル

図Ⅲ-2-2に、9×9燃料（A型）の下部端栓溶接部の応力評価における機械解析モデルの概要を示す。機械解析では、



機械解析における有限要素モデルの作成においては、



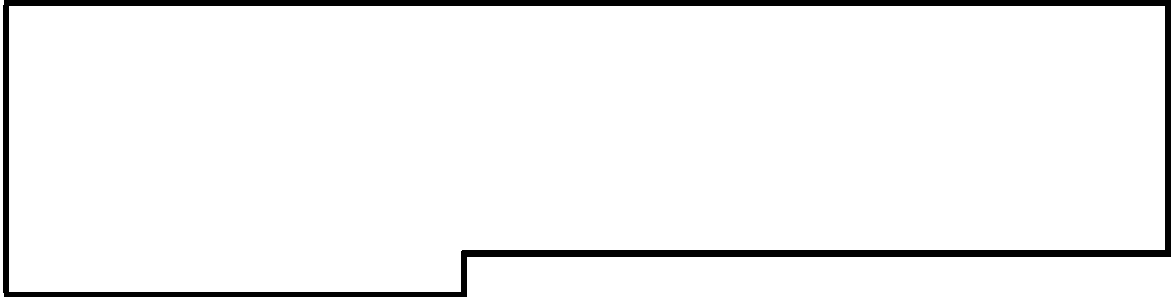
注記*



2.1.3 解析モデルにおける要素の形状及び大きさについて

燃料棒下部端栓溶接部の応力評価における解析モデルでは、





2.2 9×9 燃料 (B 型)

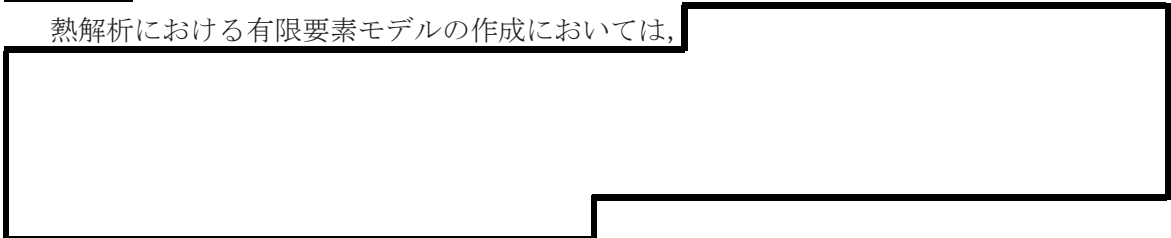
2.2.1 解析モデル

図Ⅲ-2-3 に 9×9 燃料 (B 型) の下部端栓溶接部の応力評価における熱解析モデル及び機械解析モデルの概要を示す。

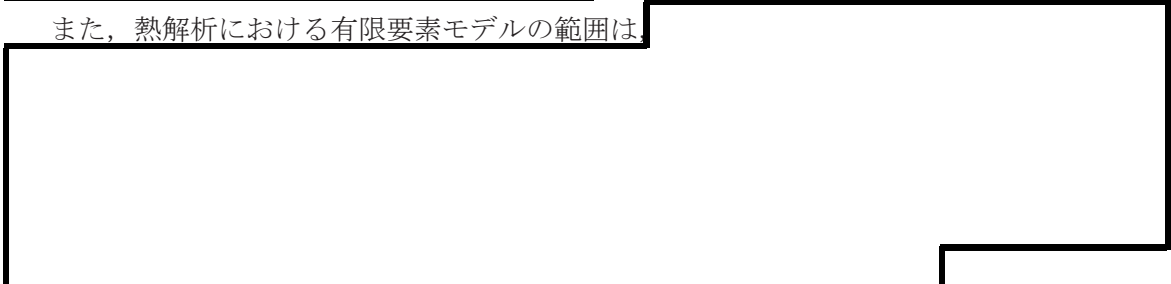
熱解析では、



熱解析における有限要素モデルの作成においては、



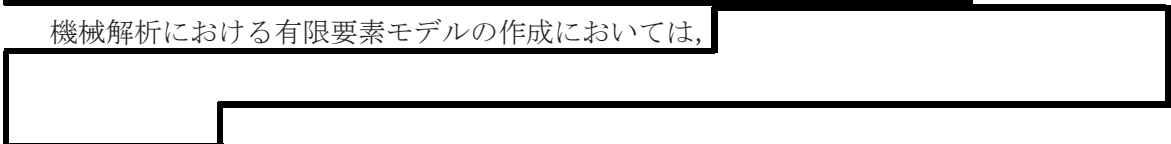
また、熱解析における有限要素モデルの範囲は、



機械解析では、



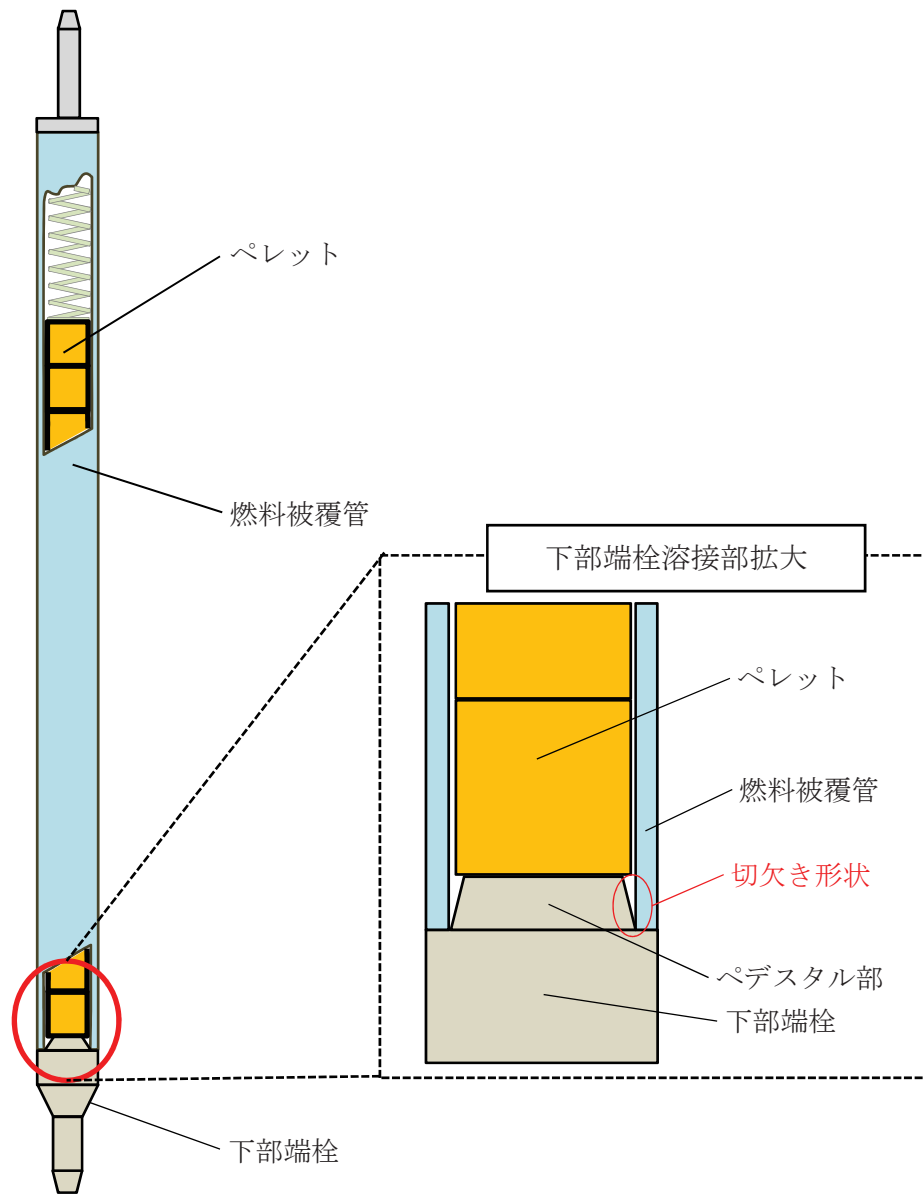
機械解析における有限要素モデルの作成においては、



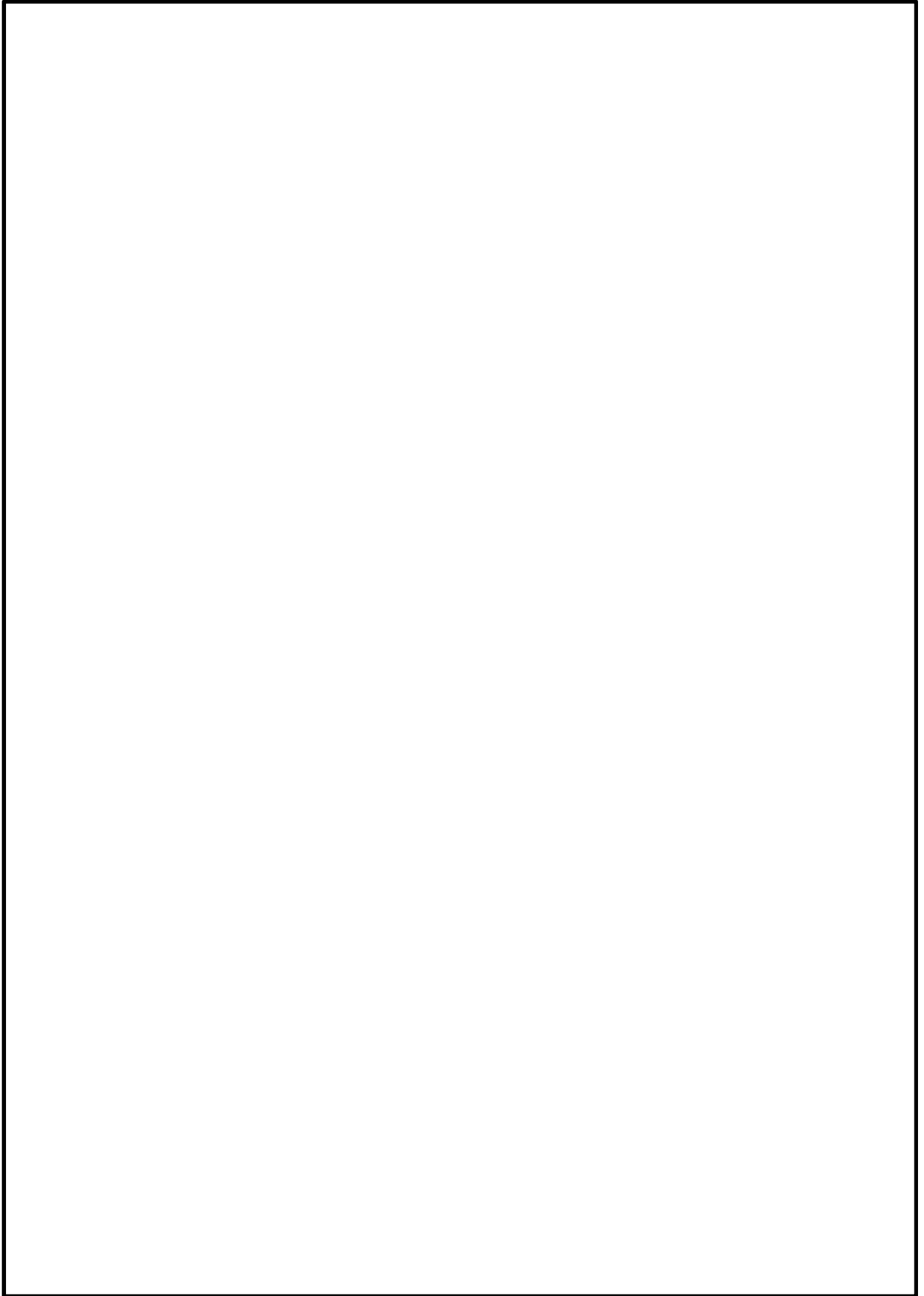
注記*

2.2.2 解析モデルにおける要素の形状及び大きさについて

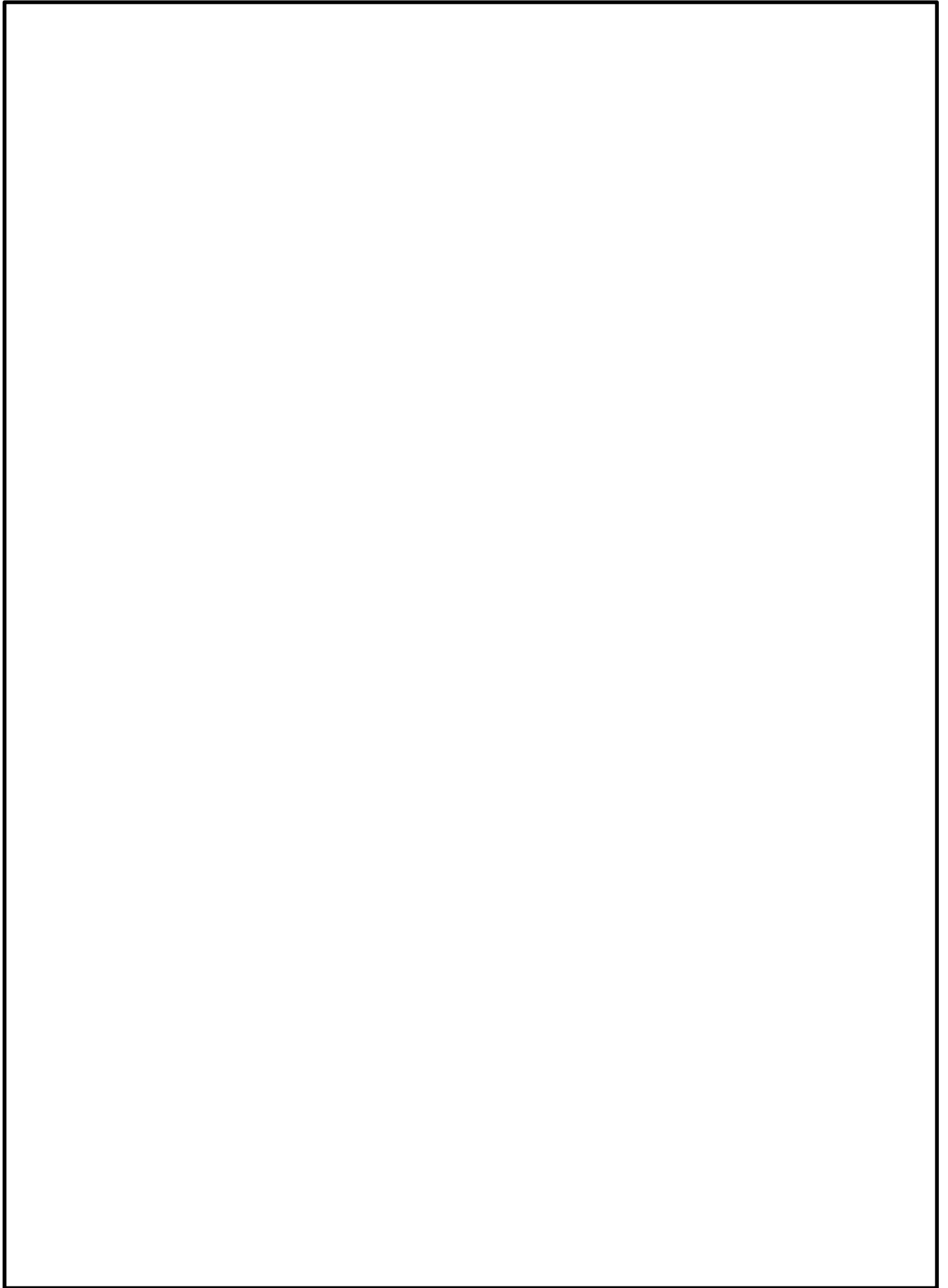
燃料棒下部端栓溶接部の応力評価における解析モデルでは、



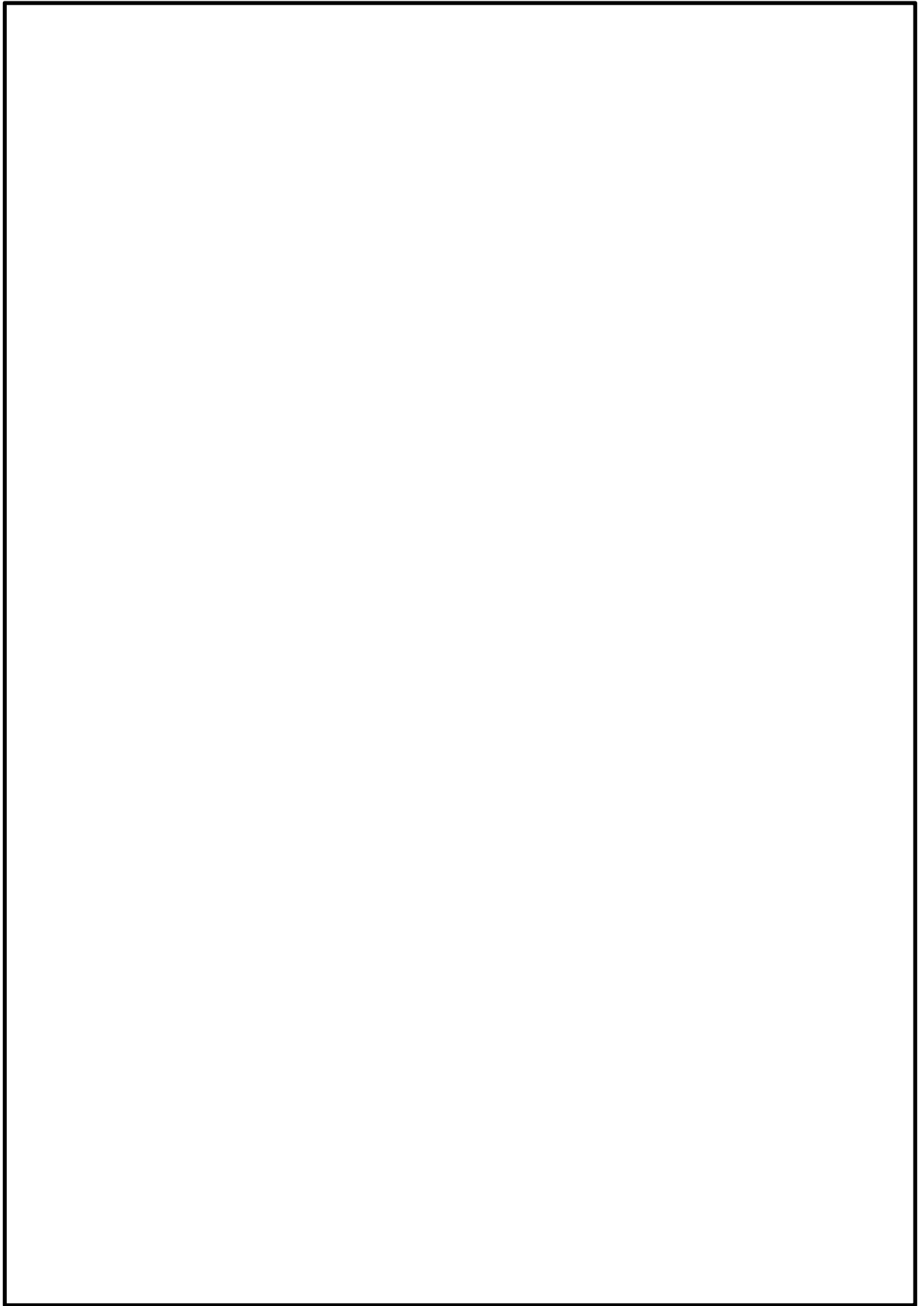
図III-1-1 下部端栓溶接部の拡大図



図Ⅲ-2-1 9×9 燃料 (A 型) の下部端栓溶接部の応力評価における熱解析モデルの概要



図Ⅲ-2-2 9×9 燃料 (A 型) の下部端栓溶接部の応力評価における機械解析モデルの概要



図Ⅲ-2-3 9×9 燃料 (B 型) の下部端栓溶接部の応力評価における熱解析及び機械解析モデルの概要

IV 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

目 次

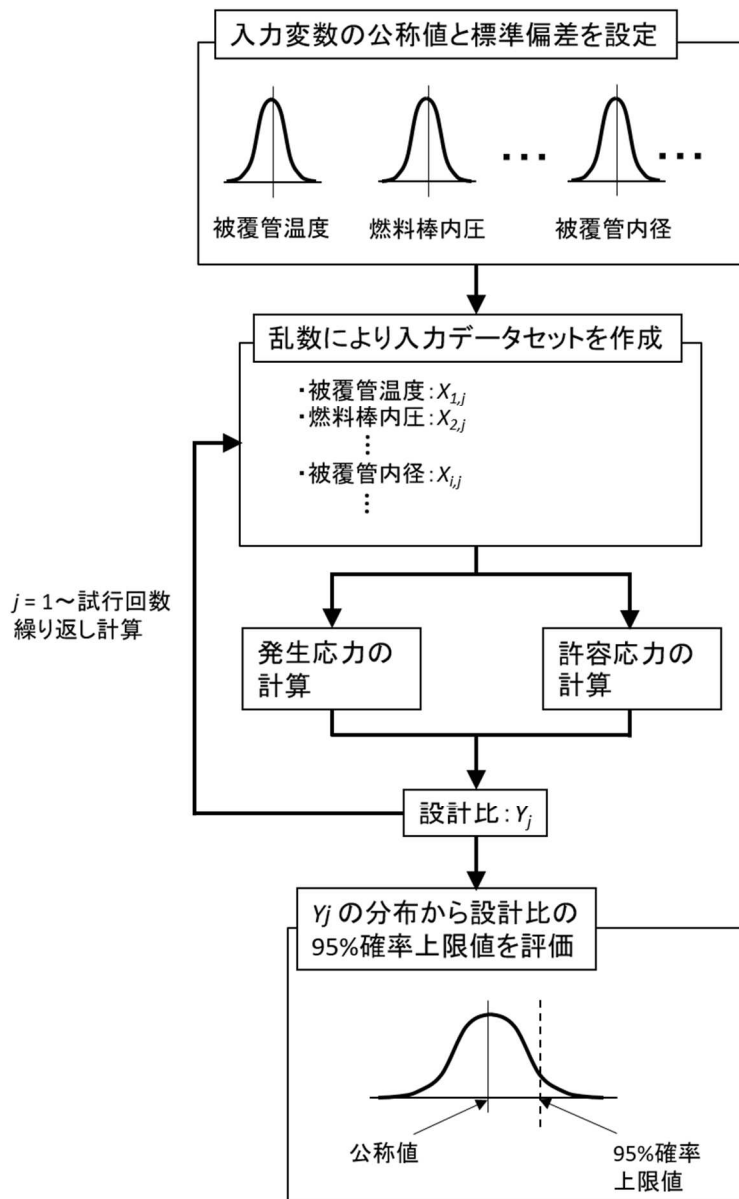
1. 概要 1
2. 燃料被覆管応力評価におけるモンテカルロ法による統計処理について..... 1

1. 概要

「燃料集合体の耐震性についての計算書」で実施して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説明するものである。

2. 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IV-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、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、設計比を求める。本試行を繰り返すことで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IV-1 モンテカルロ法による統計処理の概要フロー

V 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

目 次

1. 概要 1
2. 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..... 1

1. 概要

「燃料集合体の耐震性についての計算書」で実施している9×9燃料（B型）の地震時鉛直方向加速度の考慮方法における評価の保守性について説明するものである。

2. 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。

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

ただし、 W_0 ：燃料要素単位長重量、 l ：スペーサ間距離、 G_h ：地震時の水平方向最大加速度、 I ：燃料被覆管の断面二次モーメント、 D_o ：燃料被覆管の外径とする。

なお、地震時鉛直方向加速度による見かけの質量増加を式(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 ：地震時の鉛直方向最大加速度、 g ：重力加速度とする。

式(1)及び式(2)より、式(3)が得られる。

$$\boxed{\phantom{\sigma_2 = \frac{W_0}{I} (1 + G_h D_o) (1 + G_v / g)}} \dots (3)$$

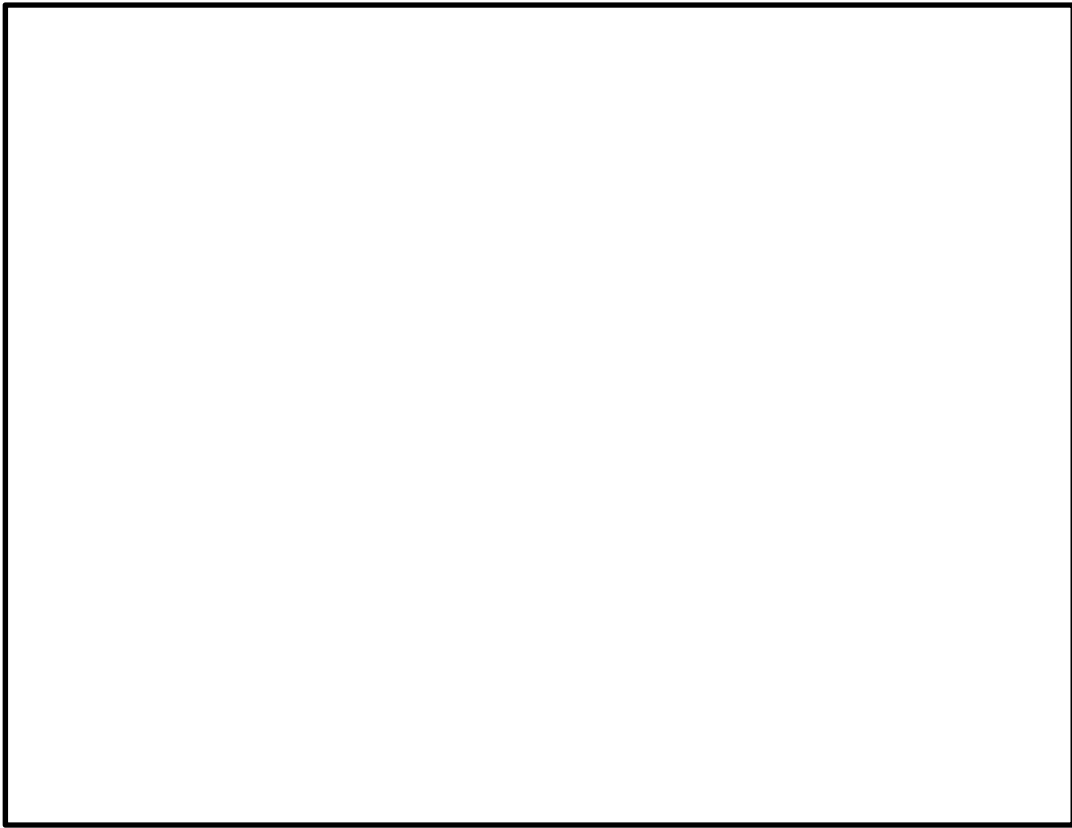
式(3)の右辺第二項が地震時鉛直方向加速度による応力に相当する。

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）。

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

ただし、 W_r ：燃料棒の全質量、 D_i ：燃料被覆管の内径とする。

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 $\boxed{}$ m/s^2 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（図V-1）。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 $56.3m/s^2$ （S s）、 $34.1m/s^2$ （S d）であり $\boxed{}$ m/s^2 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。



図V-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