

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 補足-028-10-27 改0
提出年月日	2024年1月22日

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

2024年1月

東京電力ホールディングス株式会社

27. 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	2
3. 下部端栓溶接部の応力評価の方法	2
4. 再現解析の条件	6
5. 再現解析の結果	9
6. 検討結果	9
7. 引用文献	9

1. 概要

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、「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。

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。

表1-1 MARCとANSYSの概要

項目		MARC	ANSYS
開発元		ペドロ・マーサル (Pedoro 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

2. ジルカロイ設計疲労曲線の適用性

ANSYSは、スワンソン・アナリシス・システムズ（現、アンシス）により開発された多目的有限要素法解析コードで、構造、振動、伝熱、電磁場、圧電、音響、熱流体、落下衝突等での解析、またこれらを組み合わせた連成解析機能を有している。

ANSYSは、アメリカ合衆国連邦規則 10CFR50 Appendix-B 並びに 10CFR21, ASME NQA-1 及び ISO9001 の要求に基づく品質保証システムのもとで開発され、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、解析例に対する理論解と解析結果との比較を実施することにより検証している。
- ・ 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運用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の応力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3-2に、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燃料棒熱・機械設計コード「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。

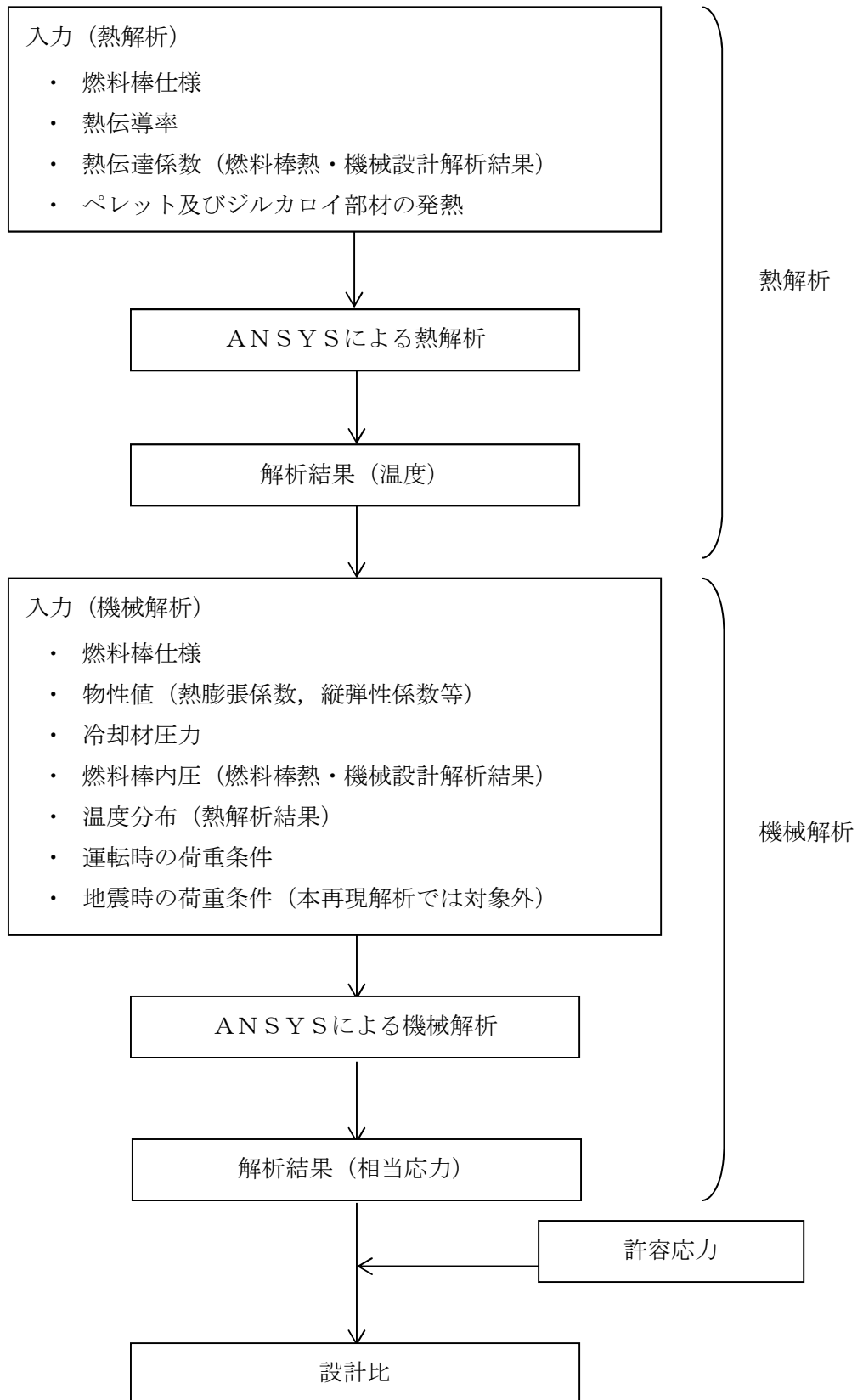
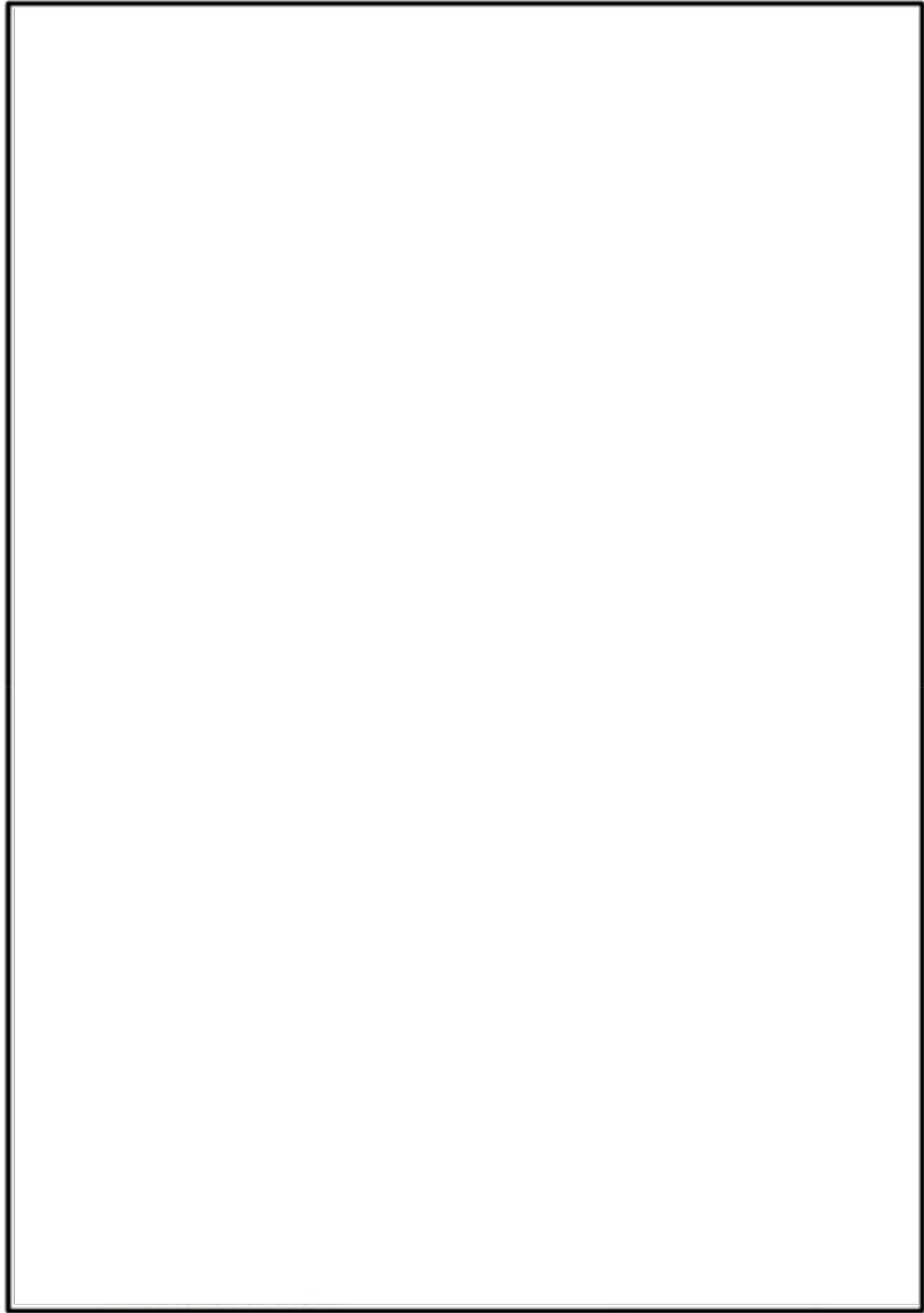


図 3-1 下部端栓溶接部の応力評価フロー



(1) 熱解析

(2) 機械解析

図 3-2 再現解析で使したANSYSの熱解析及び機械解析モデル

(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。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。

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による端栓溶接部の応力評価における解析入力値の比較を表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)の通り。
- (7) 許容応力 : 設計引張強さ (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年及び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。

表 4-1 MARC及びANSYSによる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 4-1 MARC及びANSYSによる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

5. 再現解析の結果

表 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（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た。

表 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	応力設計比		
			寿命初期	寿命中期	寿命末期
MARC	圧力過渡	設計引張強さ (S _u)	0.39	0.43	0.28
ANSYS	同上	同上	0.40	0.41	0.27

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が含まれていないが、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、下部端栓部の地震時の応力評価への ANSYS の適用は支障ないものと考えられる。

7. 引用文献

- [1] 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)