

トピカルレポート
燃料棒熱機械設計コード CARO - NA
評価報告書（案）

平成22年4月

経済産業省 原子力安全・保安院
独立行政法人 原子力安全基盤機構

目次

はじめに	1
トピカルレポートの概要	1
1 . コードの概要	1
2 . コードの構成及び計算手順.....	3
3 . 解析モデルの改訂	5
4 . 改良被覆管への適用	5
5 . コードの適用対象	5
6 . コードの適用範囲	5
7 . コードの品質保証計画	5
評価の方針	8
1 . 評価の基本方針	8
2 . 評価の方法	8
評価	10
1 . コードの解析モデル	11
1.1 熱的解析モデル	11
1.2 機械的解析モデル	13
1.3 燃料の物性値及び照射挙動モデル.....	18
1.4 被覆管の物性値及び照射挙動モデル.....	22
1.5 評価	23
2 . 従来コードからの改訂モデル.....	25
2.1 ペレット熱伝導度	25
2.2 ペレット融点.....	27
2.3 被覆管の照射硬化	27
2.4 ペレット熱膨張	28
2.5 焼きしまり	29

2.6	スエリング	29
2.7	ペレットリム組織形成	30
2.8	FP ガス放出	31
2.9	評価	31
3	改良被覆管への適用	33
3.1	HiFi 被覆管の概要	33
3.2	HiFi 被覆管の照射試験の概要	33
3.3	HiFi 被覆管の物性モデル	35
3.4	評価	41
4	コードの検証	42
4.1	検証データ	42
4.2	コードの調整	44
4.3	検証結果	46
4.4	コードの予測の不確かさ	47
4.5	評価	47
5	コードの適用範囲	49
5.1	適用範囲	49
5.2	検証範囲	52
5.3	適用範囲の検討	52
5.4	評価	55
6	コードの品質保証計画	56
6.1	品質保証計画の概要	56
6.2	評価基準	56
6.3	評価方法	57
6.4	確認結果	57
6.5	評価	59
7	評価のまとめ	61
	評価経過	63

参考文献65

添付1 CARO-NA コードのトピカルレポートへの指摘事項と対応の結果添 1-1

添付2 CARO-NA コードに関するコメント回答添 2-1

はじめに

経済産業省 原子力安全・保安院は、安全審査の実効性の向上を目的として、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律に基づく実用発電用原子炉施設の設置（変更）許可申請書（以下「設置（変更）許可申請書」という。）において、その参考文献となる燃料の機械設計等の原子炉施設共通事項について取りまとめられた技術文書（トピカルレポート）について、（独）原子力安全基盤機構（以下「JNES」という。）の協力を得て技術評価する制度を平成 20 年 12 月に「トピカルレポートの技術評価について（内規）」として定めた。

本報告書は、当該制度に基づき原子燃料工業株式会社（以下「原燃工」という。）から提出されたトピカルレポート「燃料棒熱機械設計コード CARO-NA について（平成 20 年 12 月 24 日付提出、平成 22 年 月 日付改訂）」について、技術評価を行った結果を取りまとめたものである。

これにより、今後提出される設置（変更）許可申請において当該レポートが参照された場合、本報告書を活用することにより安全審査の着眼点を最新の知見の反映状況に集中できる等、安全審査の実効性の向上を図ることが可能となる。

トピカルレポートの概要

CARO-NA コードは、沸騰水型原子炉（以下「BWR」という。）燃料の熱機械設計への適用の妥当性が確認された従来の CARO コード^{(1)、(2)}（以下「従来コード」という。）を最新の知見に基づき改訂したものである。

1. コードの概要

CARO-NA コードは、燃料棒の形状寸法データ、プラントデータ等を入力し、燃焼期間にわたって燃料の照射中の熱的及び機械的挙動を解析するものであり、BWR 燃料の設置（変更）許可申請書における燃料棒熱機械設計評価に適用可能としている。CARO-NA コードの計算のフロー及び解析評価内容を図 -1 に示す。

対象とする燃料は、 UO_2 燃料及び Gd_2O_3 入り UO_2 燃料であり、被覆管はジルカロイ-2 被覆管及び改良被覆管（ジルカロイ-2 の仕様以上に鉄濃度を高めたジルコニウム合金。以下「HiFi 被覆管」という。）である。

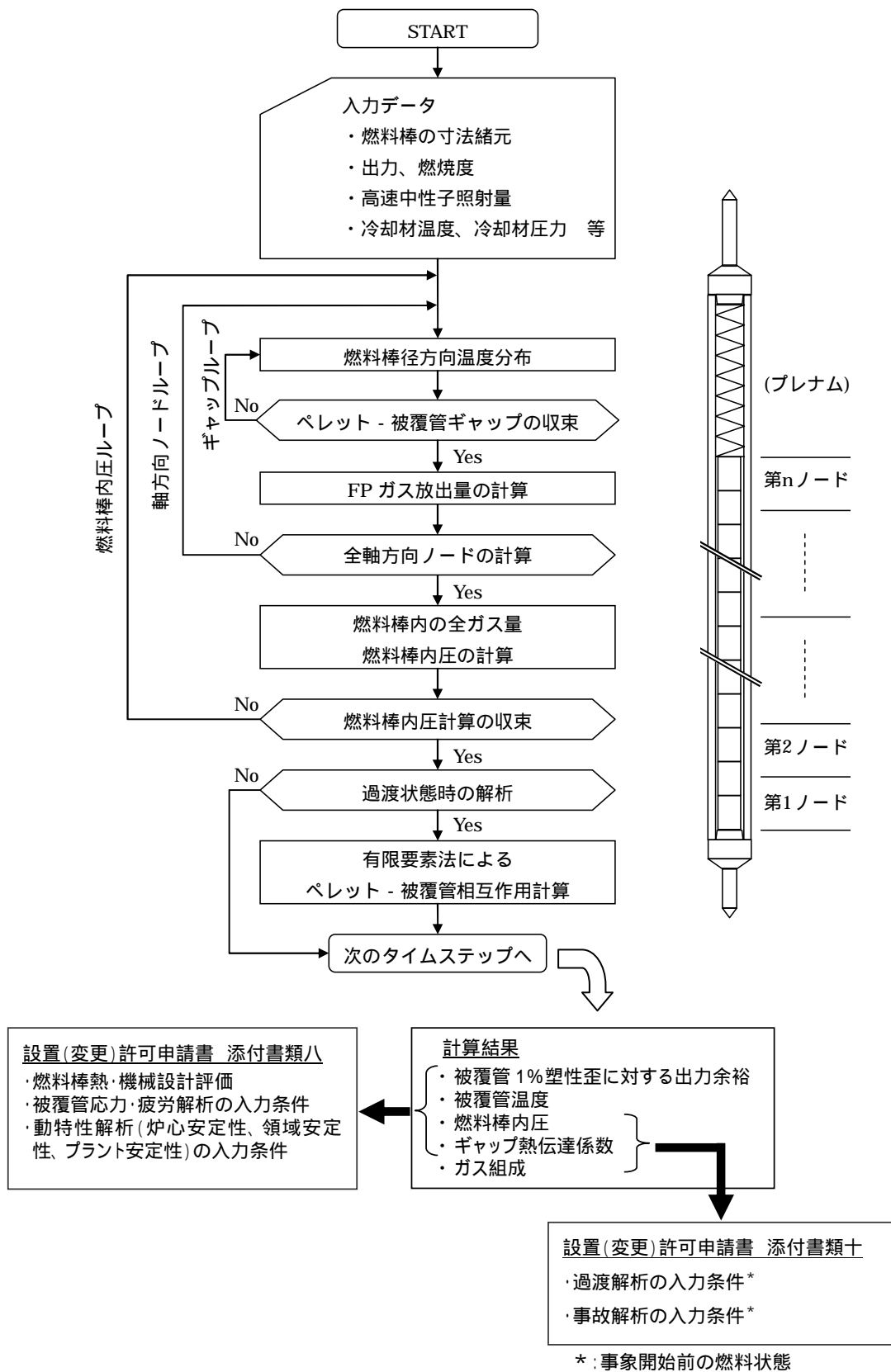


図 -1 CARO-NA コードの計算フロー及び評価内容並びに適用対象

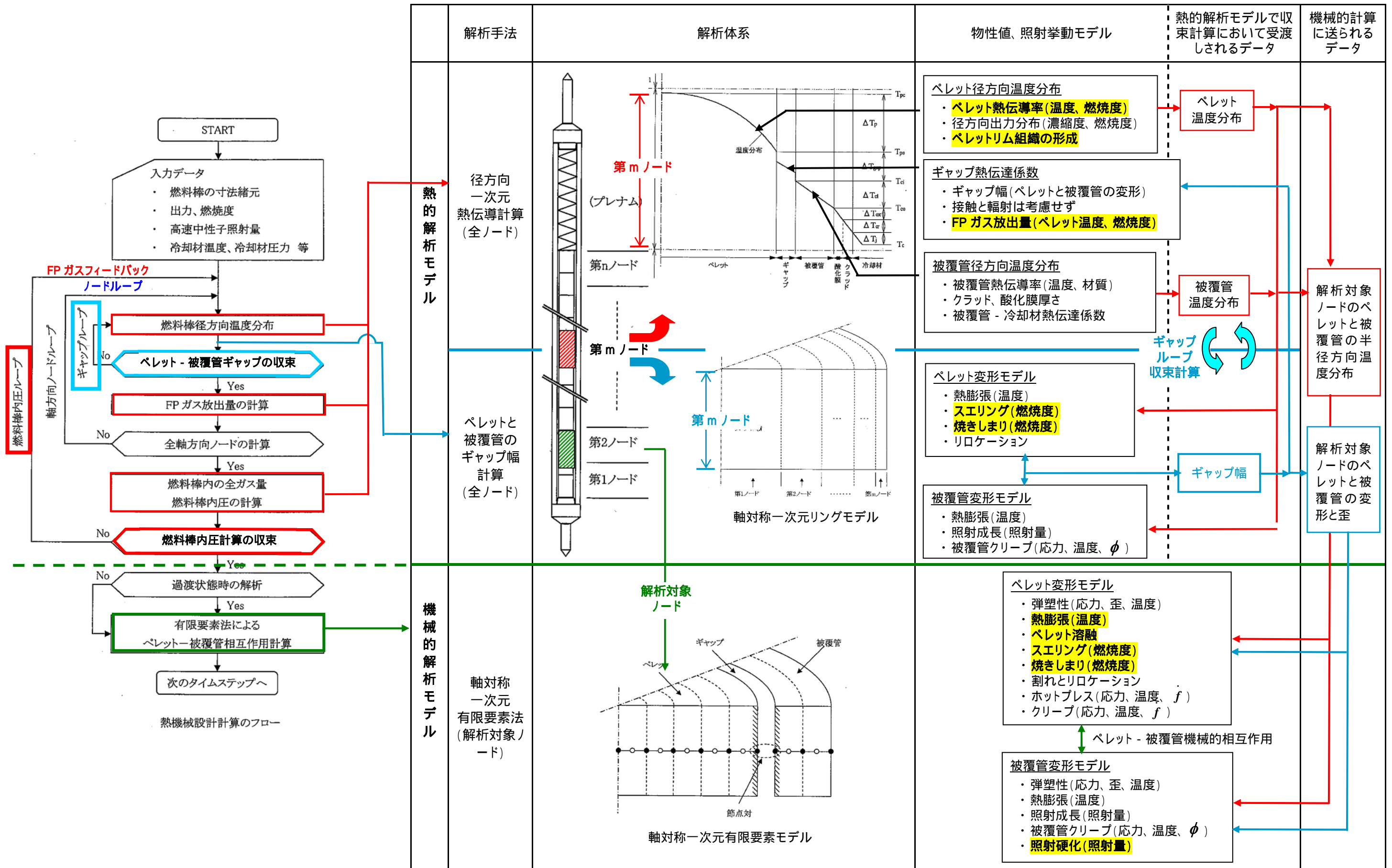
2 . コードの構成及び計算手順

CARO-NA コードの構成及び計算手順の概略を図 -2 に示す。CARO-NA コードは大きく熱的解析モデル及び機械的解析モデルから構成される。熱的解析モデルでは、燃料棒全長を対象として、ペレット及び被覆管の温度分布、気体状核分裂生成物(以下「FP ガス」という。)の放出、燃料棒内圧等の熱的挙動が計算され、機械的解析モデルでは、燃料棒の一部分(軸方向の指定したノード)を対象として、ペレット及び被覆管の力学的相互作用等の機械的挙動が計算される。

熱的解析モデルでは、軸方向に分割した各ノードについて、出力履歴に沿って各タイムステップで径方向温度分布が計算される。この計算に基づきペレット及び被覆管のギャップ幅変化が求められ、これをギャップ熱伝達にフィードバックした状態でペレット及び被覆管の温度分布を求め、温度分布が収束するまで繰り返し計算が行われる(ギャップループ)。この計算は、全軸方向ノードについて行われ(軸方向ノードループ)、FP ガス放出量、燃料棒内圧等が求められ、熱的フィードバックが燃料棒全長にわたって収束するまで繰り返し計算が行われる(燃料棒内圧ループ)。

機械的解析モデルでは、燃料棒の一部分(軸方向の指定したノード)を対象として、高出力時(1% 塑性歪相当出力時)におけるペレット及び被覆管の機械的相互作用(PCMI)が軸対称次元有限要素法により計算される。機械的解析モデルにおける出力上昇開始時のペレット及び被覆管の形状寸法等は熱的解析モデルの結果を初期状態として引き継ぐとともに、出力上昇時のペレット及び被覆管の温度分布等は熱的解析モデルで求められる値を用いている。

図 -2 CARO-NA コードの構成と計算手順



注) 黄色の網掛け は改訂モデルを示す。

3．解析モデルの改訂

CARO-NA コードでは、最近の高燃焼度燃料照射試験データ等から得られた最新知見が反映され、燃料及び被覆管の物性モデルのうち、表 -1 に示すモデルが従来コードから改訂されている。

4．改良被覆管への適用

国内 BWR では、燃料棒を 10 行 10 列に配列して熱的余裕を向上させた 10×10 燃料（以下、「10×10 燃料」という。）の採用が計画されている。原燃工の 10×10 燃料では、耐食性・耐水素吸収特性を改善した HiFi 被覆管の採用が予定されており、CARO-NA コードはモデルの改訂等により HiFi 被覆管に適用できるとしている。

5．コードの適用対象

CARO-NA コードでは、HiFi 被覆管に対応できるようにコードを改訂したことに伴い、CARO-NA コードの適用対象の燃料及び被覆管は表 -2 のとおりとしている。

CARO-NA コードは、燃料棒の寸法、炉心条件（冷却材温度、圧力、燃焼度等）及び線出力密度を入力とし、設置（変更）許可申請書の添付書類八に係る燃料温度、燃料棒内圧及び燃料損傷を防止するための許容設計限界となる被覆管 1% 塑性歪相当出力等を計算・評価するものである。計算された燃料温度及び燃料棒内圧は、被覆管応力評価の統計解析の入力として用いられる。

また、計算された燃料棒内圧、ギャップ熱伝達率及び FP ガス組成は、設置（変更）許可申請書の添付書類十の運転時の異常な過渡変化及び事故解析における初期条件として与えられる。

6．コードの適用範囲

コードの適用範囲は、表 -3 のとおりとしている。

7．コードの品質保証計画

CARO-NA コードは、品質マネジメントシステム（以下「QMS」という。）の下、設計開発が行われている。コードの設計開発に当たっては、QMSを規定した品質マニュアル及びその下位規程（以下「QMS 文書」という。）に基づき、定められた組織体制及びプロセスに従い実施されるとともに、定期的な内部監査及び外部機関による監査によりプロセスの有効性を確認するとしている。

また、コードの継続的な改善を図るため、所定の QMS 文書に基づき、当該コードに関連する新知見を常に調査・収集し、コードに反映すべき知見が得られた場合にはコードの変更管理を実施するとしてい

る。

表 -1 CARO-NA コードにおいて改訂されたモデル

モデル	対象	変更内容	変更理由
ペレット熱伝導度	・UO ₂ 燃料	燃焼に伴うペレット熱伝導度の低下を考慮	最新知見に基づくモデルの見直し
	・Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料のペレット熱伝導度の見直し	データ拡充に基づくモデルの見直し
ペレット融点	・UO ₂ 燃料 ・Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料	燃焼度依存性の見直し	データ拡充に基づくモデルの見直し
被覆管照射硬化	・ジルカロイ-2 被覆管 ・HiFi 被覆管*	照射による被覆管耐力の増大を考慮	モデルの見直し
ペレット熱膨張	・UO ₂ 燃料 ・Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料	ペレット溶融後の熱膨張について、軸方向へは膨張せず径方向へのみ膨張するモデルに変更	モデルの見直し
焼きしまり	・UO ₂ 燃料 ・Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料	モデルの燃焼度及び気孔率に係る係数の見直し	データ拡充に基づくモデルの見直し
ペレットリム組織形成	・UO ₂ 燃料 ・Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料	リム組織形成に伴う熱伝導度への影響を考慮	最新知見に基づくモデルの追加
		高燃焼度でのスエリング増加を考慮	最新知見に基づくモデルの見直し
FP ガス放出	・UO ₂ 燃料 ・Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料	温度及び燃焼度依存性の見直し	・ペレット熱伝導度の改訂に伴うモデルの調整 ・データ拡充に基づくモデルの見直し

*：ジルカロイ-2 の仕様以上に鉄濃度を高めたジルコニウム合金

表 -2 CARO-NA コードの適用対象の燃料及び被覆管

材料	タイプ	備考
燃料	UO ₂ 燃料	
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料	
被覆管	ジルカロイ-2 被覆管	
	HiFi 被覆管*	耐水素吸収特性の改善のため、改良被覆管を採用。

*：ジルカロイ-2 の仕様以上に鉄濃度を高めたジルコニウム合金

表 -3 CARO-NA コードの適用範囲

項目		適用範囲
用途		沸騰水型軽水炉用燃料棒の熱機械設計
使用条件	ペレット燃焼度	0 ~ 80GWd/t
	燃料棒平均燃焼度	0 ~ 70GWd/t
	線出力密度	0 ~ 44kW/m(通常運転時) 0 ~ 80kW/m(運転時の異常な過渡変化時)
燃料棒仕様	燃料棒外径	10.2 ~ 12.4mm
	封入ガス	ヘリウム
	加圧量	0.4 ~ 1.1MPa(abs)
	ペレット-被覆管ギャップ (被覆管内径 - ペレット外径)	0.1 ~ 0.3mm
被覆管仕様	被覆管材質	ジルカロイ - 2、HiFi 再結晶化焼鈍材 (ジルコニウムライナ内張)
	被覆管肉厚	0.50 ~ 0.95mm
燃料材仕様	燃料材料	UO ₂ 、Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 焼結体
	²³⁵ U 濃縮度	0.2 ~ 5.0wt%
	ペレット密度	95.0 ~ 98.5%TD(理論密度)
	ペレット外径	8.8 ~ 10.5mm
	Gd ₂ O ₃ 濃度	0 ~ 10wt%

* : 運転時の異常な過渡変化時における解析条件は、1%塑性歪に達する線出力密度までであり、適用範囲としての 80kW/m は、燃焼初期において1%塑性歪に達する、おおよその線出力密度を示している。

評価の方針

1．評価の基本方針

トピカルレポート「原燃工 燃料棒熱機械設計コード CARO-NA」についての技術評価においては、設計コードが燃料棒の機械設計（被覆管の1%塑性歪、被覆管温度、燃料棒内圧等）の評価への適用が妥当であること及び最新の知見が品質保証計画の考え方にのっとり当該レポートに反映され管理されることを確認する。具体的な評価項目を以下に示す。

- (1) 燃料の物性及び照射挙動が適切にモデル化され、解析モデルの適用範囲内での適用性が検証されていること。
- (2) 燃料の熱的挙動及び機械的挙動が適切にモデル化され、設計コードの適用範囲内での適用性が検証されていること。
- (3) 従来コードから改訂された解析モデルについて、適用範囲内での適用性が検証されていること。
- (4) 設計コードの改良被覆管への適用については、その妥当性が検証されていること。
- (5) 設計コードの燃料設計評価項目に対する予測の不確かさが適切に設定されていること。
- (6) 設計コードの適用範囲が適切に設定されていること。
- (7) 設計コードの品質保証計画が適切に規定されていること。

2．評価の方法

- (1) 技術評価は、原燃工が提出したトピカルレポートに基づいて行う。
- (2) 技術評価に当たっては、原燃工から説明を求める。
- (3) 技術評価は、原子力安全・保安院が定めた「トピカルレポートの技術評価について（内規）」により定めた「燃料設計（機械設計）トピカルレポート評価要領」に基づくとともに、最新の知見、諸外国の評価方法等も参考とする。
- (4) 評価報告書は、経済産業省 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 原子炉安全小委員会に設置された燃料ワーキンググループ（燃料トピカルレポート）の審議を経た上で取りまとめるとともに、その過程においては意見公募手続（以下「パブリックコメント」という。）を実施する。

なお、今回の評価に当たっての留意点は、次のとおりである。

- ・ 改訂前のコードが、通商産業省原子力発電技術顧問会 高燃焼度化検討会での検討を経た後、現

在の設置（変更）許可申請で適用されていることを踏まえた上で、新たに改訂されたモデルを含めてコード全体を評価する。

- ・ 設計コードの適用対象としている新材料(HiFi 被覆管)については、設計コードに用いられている物性・モデルの適用の妥当性を確認する。
- ・ 設計コードの品質保証計画については、最新の知見が評価され、それらが適切に反映され管理されること等を確認する。

評価

技術評価では、評価に必要な技術情報について、原燃工に対して追加の説明を求めた。主な内容は次のとおりである。

なお、技術評価の過程での指摘事項及び対応の結果を本報告書の添付 1 に示す。

- (1) CARO-NA コードの適用範囲の妥当性に関する説明
- (2) CARO-NA コードの改良被覆管への適用性に関する説明
- (3) CARO-NA コードで用いる物性値及び照射挙動モデルに関する根拠データ、出典等に関する説明
- (4) 改訂コード及び従来コードによる解析結果及び検証結果の比較に関する説明
- (5) CARO-NA コードにおけるモデルの変更及びコード全体の調整に関する説明
- (6) 溶融後のペレット熱膨張の取扱いに関する説明。
- (7) 機械的解析モデルにおける数値解析手法に関する説明
- (8) 熱的解析モデルにおけるペレット及び被覆管の変形計算に関する説明
- (9) CARO-NA コードの品質保証計画に関する説明

技術評価結果に関する燃料ワーキンググループ（燃料トピカルレポート）における指摘事項等については、本評価報告書及びトピカルレポートに反映されている。

また、燃料ワーキンググループの審議でのコメントに対する回答を、本報告書の添付 2 に示す。

1 . コードの解析モデル

1.1 熱的解析モデル

熱的解析モデルでは、燃料棒全長を対象として、燃料棒径方向温度分布、FP ガス放出、燃料棒内圧等の熱的挙動が計算される。熱的解析モデルにおける燃料棒径方向温度分布の計算の流れを図 -1 に示す。

(1) 計算体系

熱的解析モデルでは、燃料有効長は軸方向に任意の等間隔のノードに分割され、それぞれのノードで燃料ペレットは径方向に任意の円筒状リングに分割される。CARO-NA コードにおけるノード分割モデル及びペレットの径方向リング分割モデルを図 -2 に示す。

(2) 燃料棒径方向温度分布計算

燃料棒径方向温度分布は、軸方向に分割された各ノードにおいて、軸対称一次元熱伝達理論に基づき計算される。温度分布は、冷却材からペレット中心に向かって、被覆管外面温度、被覆管内面温度、ペレット表面温度及びペレット径方向温度分布の順に計算される。

まず、被覆管内面の温度は、運転履歴として与えられる線出力密度、冷却材温度及び圧力に基づき、燃料棒外表面の温度が沸騰熱伝達により求められ、酸化膜及びクラッドの付着による温度増加並びに被覆管内での熱伝導によって計算される。

次に、ペレット - 被覆管ギャップ熱伝達によるペレット表面と被覆管内面との温度差が、ペレット表面熱流束及びギャップ熱伝達率により計算される。ペレット - 被覆管ギャップによる温度上昇を被覆管内面温度に加えて、ペレット表面温度が求まる。ギャップ熱伝達率は、燃料棒内に蓄積したガス（ギャップガス）の熱伝導度及びペレット - 被覆管のギャップ幅に基づき計算される。ギャップ幅は、ペレットの熱膨張、割れによるリロケーション、焼きしまり、スエリング、被覆管の熱膨張、クリープ変形等を考慮して計算される。

ペレット内温度分布は、径方向にリング分割された各リングについて、一次元定常熱伝導方程式を解くことによって計算される。ペレット内温度分布は、ペレットの燃焼度及び濃縮度に応じて与えられるペレット内の径方向出力分布から求まる各リングの発熱密度、燃焼の進捗、 Gd_2O_3 等の添加物によって低下するペレット熱伝導度の温度依存性を考慮して計算される。

燃料棒径方向温度分布が計算されると、これに基づきペレット - 被覆管のギャップ幅が更新され、これがギャップ熱伝達率にフィードバックされて再度、温度分布が計算される。この繰り返し計算は、温度分布が収束するまで行われる（ギャップループ）。

燃料棒径方向温度分布の計算は、全軸方向ノードについて行われ（軸方向ノードループ）、FP ガス放出量及び燃料棒内圧が求められる。FP ガス放出量及び燃料棒内圧が計算されると、これに基づきギャップガス組成、燃料棒内圧等が更新され、これがギャップ熱伝達率にフィードバックされて再度、各ノードで温度分布が計算され、全軸方向ノードについて FP ガス放出量が計算される。この繰り返し計算は、燃料棒全長にわたって燃料棒内圧が収束するまで行われる（燃料棒内圧ループ）。

(3) ペレット - 被覆管ギャップ熱伝達率モデル

ペレット及び被覆管のギャップ熱伝達率は、Ross & Stoute により提案されたモデル⁽³⁾が用いられている。同モデルの妥当性は、様々な条件（ガス成分、ギャップ幅等）における燃料中心温度の検証結果により確認されている。同モデルは、次の3つの成分の和として与えられる。

$$h_g = h_f + h_s + h_r$$

ここで、 h_g : ペレット - 被覆管ギャップ熱伝達率

h_f : ギャップガスによる熱伝達成分

h_s : 固体接触による熱伝達成分

h_r : 輻射による熱伝達成分

CARO-NA コードでは、固体接触による熱伝達成分及び輻射による熱伝達成分の効果については試験炉における燃料中心温度の検証等の結果から、これらの効果を見捨てても解析結果に与える影響が小さいことから、これらを考慮しないとしている。

したがって、ペレット及び被覆管のギャップ熱伝達率は、ギャップガスによる熱伝達率のみによって表わされる。ギャップガスによる熱伝達率は、ギャップ内の混合ガスの熱伝導度及びペレット - 被覆管のギャップ幅に依存したモデルである。

ギャップ熱伝達率の計算に用いられるペレット - 被覆管のギャップ幅の計算モデルについて (4)に示す。

(4) ペレット - 被覆管ギャップ幅計算

CARO-NA コードでは、ペレット - 被覆管ギャップ幅は以下のように計算される。

ペレットの径方向変位は、熱膨張、リロケーション、焼きしまり及びスエリングを考慮して計算される。

ペレットの径方向変位は、各同心円筒における径方向変位の和として求められる。

ペレットは、等方的に膨張する。

被覆管の熱膨張、弾性変形及びクリープによる径方向変位は、薄肉円筒モデルによって計算される。

ペレット - 被覆管ギャップ幅は、 r_{cl} の被覆管の径方向変位を加えた被覆管内径と r_{pe} のペレットの径方向変位を加えたペレット外径との差で与えられる。

(5) FP ガス放出モデル

CARO-NA コードの FP ガス放出モデルについては、後述の 2.8 節に示す。

(6) 燃料棒内圧計算

燃料棒内圧は、FP ガス放出モデルにより算出された FP ガス及び揮発性不純物ガス並びに製造時に封入されるヘリウムガスが理想気体として燃料棒内自由空間に蓄積されるものとして扱われ、理想気体の状態方程式に基づき計算される。

燃料棒内圧は、燃料棒内で一様であり、全ガスのモル数、各ノードの自由空間体積及び各部でのガス温度を用いて燃料棒内圧が計算される。燃料棒内の自由空間体積には、上部プレナム体積、ペレット - 被覆管のギャップ体積、ペレット内のクラック体積、ペレットディッシュ体積、ペレット中心孔体積及びペレット表面のオープンポア（表面に通じている気孔）の寄与がそれぞれ考慮される。

1.2 機械的解析モデル

機械的解析モデルでは、燃料棒の一部（軸方向の指定したノード）を対象として、高出力時（1% 塑性歪相当出力時）におけるペレット及び被覆管の機械的相互作用（PCMI）が軸対称一次元有限要素法により計算される。出力上昇開始時のペレット及び被覆管の形状寸法等は、熱的解析モデルの結果を初期状態として引き継ぎ、出力上昇時の燃料棒径方向温度分布等は熱的解析モデルで求められる。

機械的解析モデルにおけるペレット及び被覆管の機械的挙動計算の流れを図 -3 に示す。

(1) 計算体系

機械的解析モデルでは、熱的解析における軸方向の指定したノードを対象として、燃料ペレット及び被覆管は径方向に任意の円筒状リング要素に分割される。図 -4 に CARO-NA コードにおける燃料ペレット及び被覆管の径方向リング分割モデルを示す。

(2) 軸対称次元有限要素法による機械的挙動計算

燃料棒の機械的挙動は、軸方向の指定したノードを対象として、軸対称次元有限要素法により解析される。塑性又はクリープといった温度、応力及び時間がパラメータとして含まれる非弾性挙動を解くため、増分解法を用いることにより、微小区間を線形関係で置き換えて弾性解析と同様な手法で計算される。

有限要素としては、3 節点アイソパラメトリック要素が採用されており、各リング要素は節点ごとに変位の連続性及び力のつり合い条件によって他の要素と結合されている。リング要素では径方向の変位のみが考慮され、軸方向の変位は扱われていない。

各リング要素について、次の 3 つの方程式に基づき要素の剛性方程式が求められる。

- 外力と内力との関係を表す平衡方程式
- 歪と変位との関係を表す適合方程式
- 応力と歪との関係を表す構成方程式

構成方程式は、増分形で記述され、歪としては、弾塑性、クリープ、熱膨張、リロケーション、焼きしまり、スエリング及びホットプレスによるものが考慮されている。ペレットの割れ及び割れたペレットの剛性回復は、ペレットの弾性係数をペレット及び被覆管の接触状態に応じて変化させることにより近似的に扱われている。ホットプレスといった圧縮性の塑性及びクリープ現象については、降伏条件及びクリープ則に静水圧の項を含めることにより扱われている。

各要素の剛性方程式は、増分形で求められ、解析対象とするノード全体の剛性方程式に組み込まれる。全体の剛性方程式は、外力条件及び境界条件を用いてペレット及び被覆管の径方向の変位増分が求められる。変位増分が求まると、上記の関係式から要素内の応力・歪増分が計算され、要素の剛性方程式が更新され、繰り返し計算が行われる。この繰り返し計算

は、応力・歪の値が収束するまで行われる。

収束値が得られるとペレット及び被覆管の接触状態の変化が調べられる。接触状態が変化していない場合には次の計算に進み、接触状態が非接触から接触又はその逆に変化した場合には、接触状態を更新して上記の計算を接触状態が収束するまで繰り返して行われる。ペレット及び被覆管の接触問題には、直接法が適用されている。

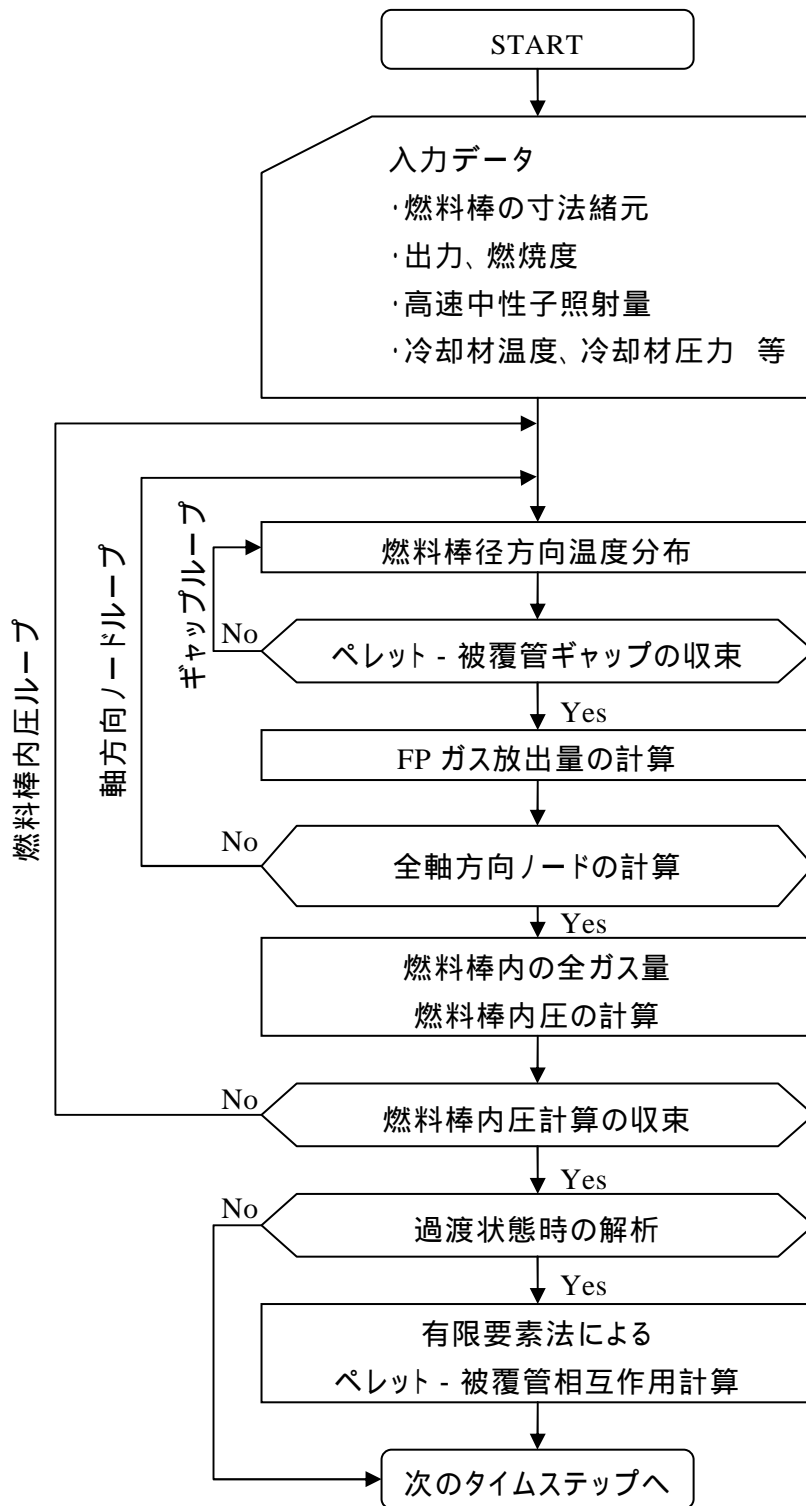


図 -1 熱的解析モデルにおける計算フロー

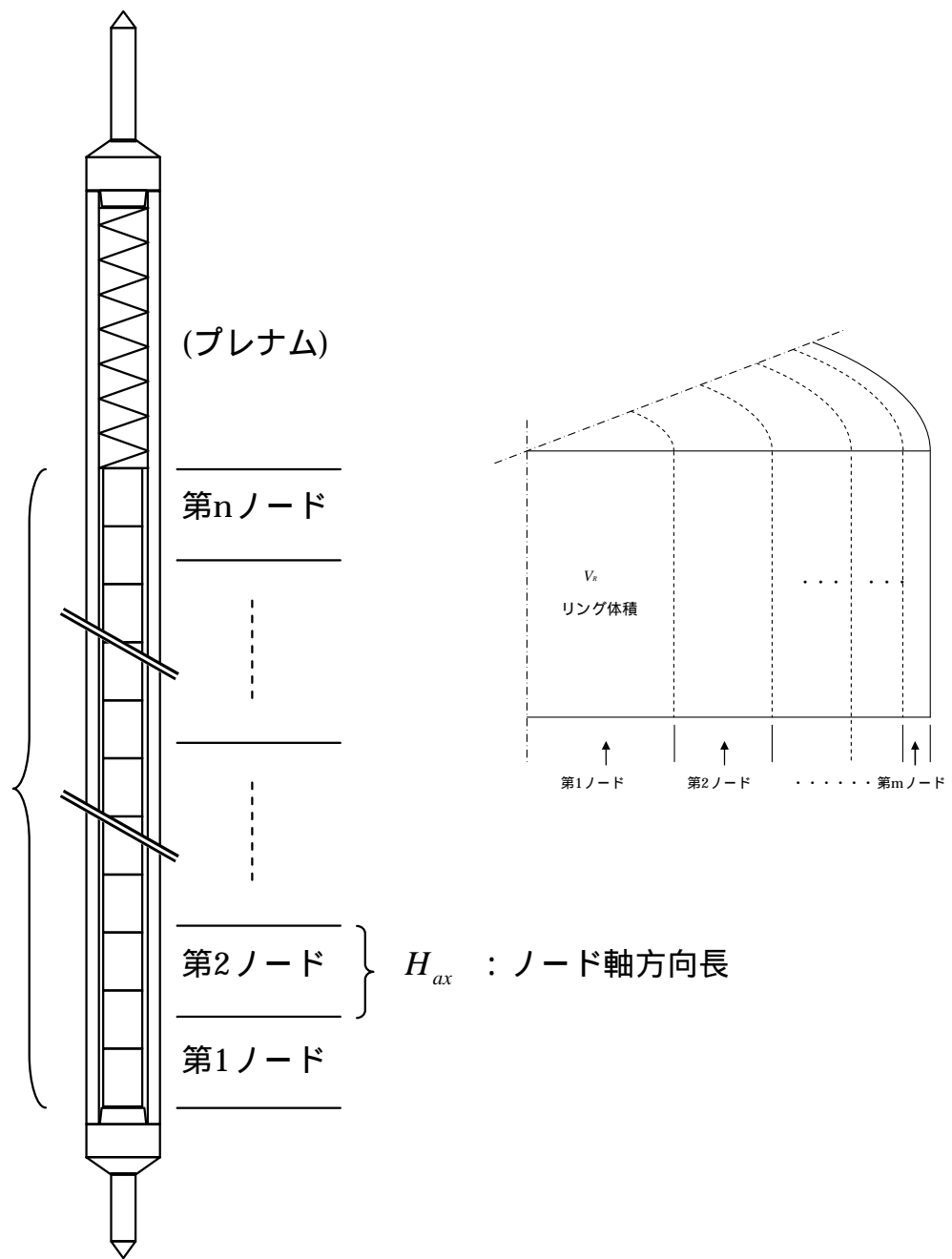


図 -2 熱的解析モデルにおける燃料棒軸方向ノード分割及び径方向リング分割

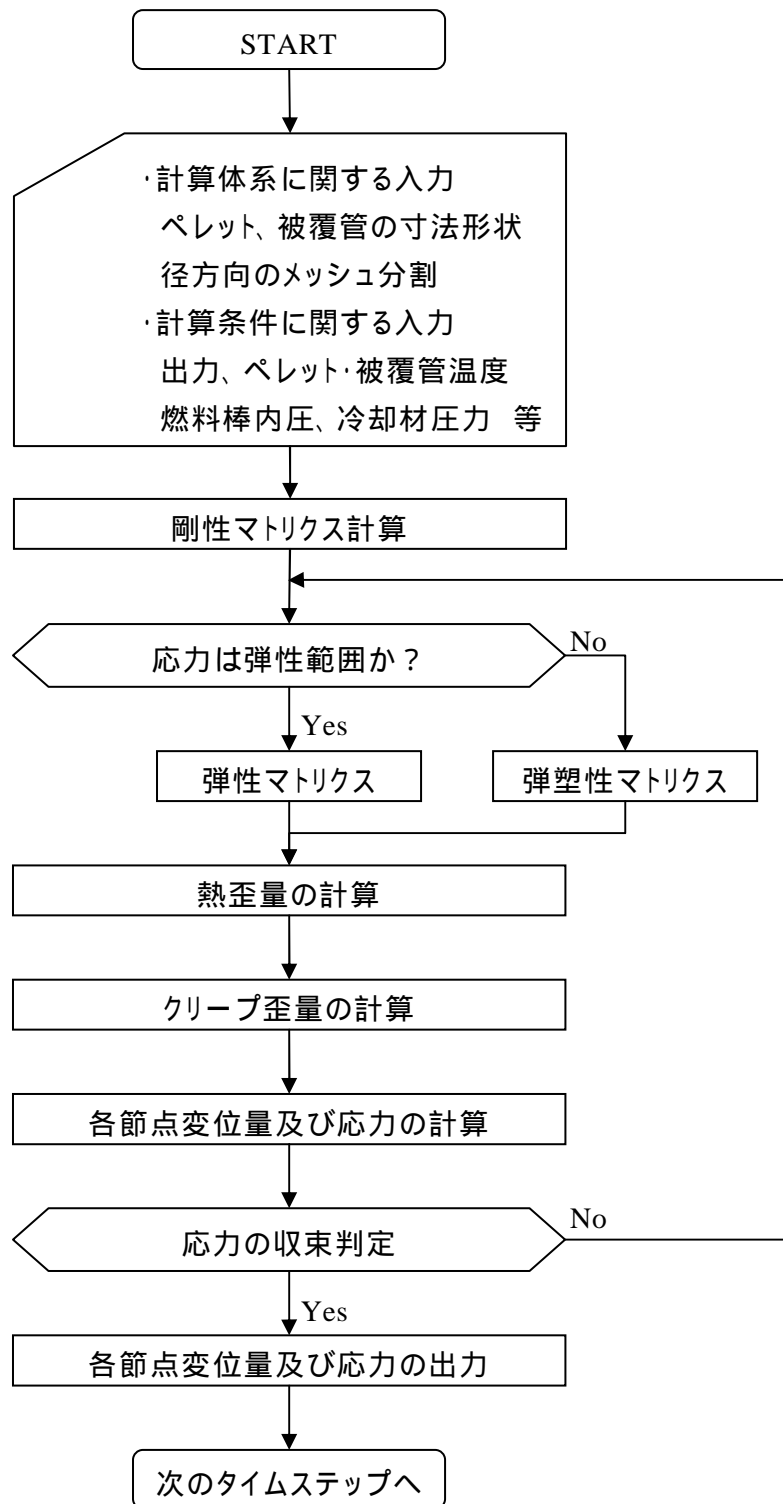


図 -3 有限要素法によるペレット - 被覆管機械的相互作用の計算フロー

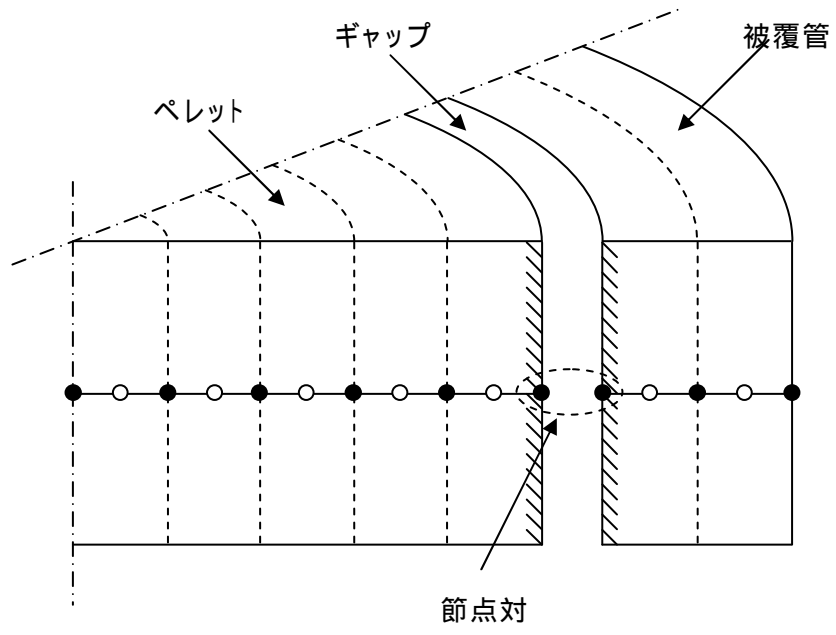


図 -4 機械的解析モデルにおける軸対称一次元有限要素分割

1.3 燃料の物性値及び照射挙動モデル

CARO-NA コードで使用されている燃料の物性値及び照射挙動モデルは、以下のとおりである。このうち、*印で示す熱伝導度、融点、熱膨張等は、従来コードから改訂されたモデルであり、これらモデルの妥当性及び適用性は第2節で述べる。

- (1) 熱伝導度*
- (2) 融点*
- (3) 径方向出力分布
- (4) ヤング率
- (5) ポアソン比
- (6) 降伏応力
- (7) 熱膨張*
- (8) 焼きしまり*
- (9) スエリング*
- (10) リロケーション
- (11) クリープ
- (12) ホットプレス
- (13) リム組織形成モデル*
- (14) FP ガス放出モデル*

CARO-NA コードで対象としている燃料は、 UO_2 燃料及び Gd_2O_3 入り UO_2 燃料であり、上記モデルの燃料タイプ別の取扱い及びモデルの根拠を表 -1 にまとめて示す。

上記モデルは、基本的に測定データに基づきモデル化されており、各モデルの妥当性及び適用性は、個々の物性値の測定データ、照射挙動データ等との比較により検証したとしている。

リロケーションは、割れたペレットが径方向に移動し、ギャップを埋める現象であるが、これをペレットの径方向移動量でモデル化し、リロケーションパラメータ（ペレット - 被覆管ギャップの閉塞率）として設定している。リロケーションパラメータは、コード全体を調整するパラメータの一つであり、コードの検証を踏まえて調整したとしている。

表 -1 CARO-NA コードにおける燃料物性値及び照射挙動モデルの
燃料タイプ別の取扱い及びモデルの根拠

(1/2)

モデル	燃料タイプ別のモデルの取扱い		モデルの根拠
(1) 熱伝導度*	UO ₂ 燃料		<ul style="list-style-type: none"> 未照射の UO₂ 燃料の熱伝導度測定データ⁽¹⁹⁾⁻⁽²³⁾に基づきモデル化。 照射 UO₂ 燃料の熱伝導度測定データ^{(4),(24),(25),(26)}により妥当性を検証。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		<ul style="list-style-type: none"> 未照射の Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の熱伝導度測定データ^{(27),(61)-(63)}に基づきモデル化。 照射 Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の熱伝導度測定データ^{(4),(26)}により妥当性を検証。
(2) 融点*	UO ₂ 燃料		<ul style="list-style-type: none"> 文献データ^{(4),(11),(28)-(30)}に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		<ul style="list-style-type: none"> 未照射 Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の融点測定データに基づきモデル化。
(3) 径方向出力分布	UO ₂ 燃料		<ul style="list-style-type: none"> 核計算コードの計算結果から設定。照射試験データにより妥当性を検証。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		<ul style="list-style-type: none"> 保守的に UO₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(4) ヤング率	UO ₂ 燃料		<ul style="list-style-type: none"> 文献データ⁽³¹⁾⁻⁽³³⁾に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		<ul style="list-style-type: none"> ヤング率への Gd₂O₃ (10wt%まで)の影響はわずかであるとしており、UO₂ と同一のモデルを適用。
(5) ポアソン比	UO ₂ 燃料		<ul style="list-style-type: none"> 文献データ⁽⁶⁴⁾に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		<ul style="list-style-type: none"> ポアソン比への Gd₂O₃ (10wt%まで)の影響はわずかであるとの知見から、UO₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(6) 降伏応力	UO ₂ 燃料		<ul style="list-style-type: none"> 文献データ⁽³⁴⁾に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		<ul style="list-style-type: none"> 公開コード⁽¹⁸⁾に倣い、UO₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(7) 熱膨張*	UO ₂ 燃料		<ul style="list-style-type: none"> 文献データ^{(13),(35),(36)}に基づきモデル化。照射試験データ^{(14),(37)-(41)}により妥当性を検証。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		<ul style="list-style-type: none"> 熱膨張への Gd₂O₃ (10wt%まで)の影響がないという知見から⁽⁴⁴⁾、UO₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(8) 焼きしまり*	UO ₂ 燃料		<ul style="list-style-type: none"> 照射試験データ^{(5),(43),(44)}に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		<ul style="list-style-type: none"> 照射試験データ⁽⁵⁾に基づき、焼きしまり量に UO₂ 燃料と Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料とで大差がないという知見から、UO₂ 燃料と同一のモデルを適用。

* : 従来コードからの改訂モデル。

: UO₂ 燃料のモデル、 : Gd₂O₃ の効果を考慮したモデル、 : UO₂ 燃料と同一のモデルを適用

表 -1 CARO-NA コードにおける燃料物性値及び照射挙動モデルの
燃料タイプ別の取扱い及びモデルの根拠

(2/2)

モデル	燃料タイプ別のモデルの取扱い		モデルの根拠
(9) スエリング*	UO ₂ 燃料		・ 照射試験データ ^{(5),(43),(44)} に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 照射試験データ ⁽⁵⁾ に基づき、スエリングに UO ₂ 燃料と Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料とで大差がないとの知見から、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(10) リロケーション	UO ₂ 燃料		・ 経験的なモデル。コード全体の検証によって設定。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 経験的なモデル。コード全体の検証によって UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(11) クリーブ	UO ₂ 燃料		・ 文献データ ⁽¹⁶⁾ に基づきモデル化。文献のモデルは未照射及び照射試料を用いた測定データに基づいている。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 文献 ⁽⁶⁵⁾ によれば Gd ₂ O ₃ 入り燃料と UO ₂ 燃料のクリーブ速度の差異はわずかであるとの知見から、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(12) ホットプレス	UO ₂ 燃料		・ 文献データ ⁽⁶⁶⁾ に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ ホットプレスはペレットの体積変化を伴う塑性変形現象であり、降伏応力と同様に UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用している。
(13) リム組織形成モデル*	UO ₂ 燃料		・ 照射試験データ ^{(43),(45)-(47)} に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ リム組織が形成される高燃焼度領域でのスエリング等の挙動に UO ₂ 燃料と Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料とで大差がないとの知見から、リム組織形成のモデルについても UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(14) FP ガス放出モデル*	UO ₂ 燃料		・ 現象論に基づく半経験的なモデル。モデルに含まれる係数は FP ガス放出率測定データ ⁽⁵⁾ との検証によって設定。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 照射試験データ ⁽⁵⁾ に基づき、FP ガス放出特性への Gd ₂ O ₃ の影響がないとの知見から、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。

*： 従来コードからの改訂モデル。

： UO₂ 燃料のモデル、 ： Gd₂O₃ の効果を考慮したモデル、 ： UO₂ 燃料と同一のモデルを適用

1.4 被覆管の物性値及び照射挙動モデル

CARO-NA コードで使用されている被覆管の物性値及び照射挙動モデルは、以下のとおりである。このうち、*印で示す照射硬化は、従来コードから改訂されたモデルであり、その妥当性は第2節で述べる。

また、対象とする被覆管として、HiFi 被覆管を加えているが、その適用性については、第3節で述べる。

- (1) 熱伝導度
- (2) ヤング率
- (3) ポアソン比
- (4) 降伏応力
- (5) 照射硬化*
- (6) 熱膨張
- (7) 照射成長
- (8) クリープ

CARO-NA コードで使用されている上記の各モデルの根拠を表 2-2 にまとめて示す。上記モデルは測定データに基づきモデル化されており、各モデルの妥当性及び適用性は個々の物性値の測定データ、照射挙動データ等との比較により検証したとしている。

表 -2 CARO-NA コードにおける被覆管物性値及び照射挙動モデルの根拠

モデル	被覆管タイプ	モデルの根拠
(1) 熱伝導度	ジルカロイ - 2	文献データ ⁽⁴⁸⁾⁻⁽⁵³⁾
(2) ヤング率	ジルカロイ - 2	文献データ ^{(16),(54),(55)}
(3) ポアソン比	ジルカロイ - 2	文献データ ^{(50),(54)}
(4) 降伏応力	ジルカロイ - 2	未照射試料を用いた測定データ
(5) 照射硬化 [*]	ジルカロイ - 2	文献データ ^{(5),(56),(57)}
(6) 熱膨張	ジルカロイ - 2	文献データ ^{(50),(58),(59),(64)}
(7) 照射成長	ジルカロイ - 2	照射試験データ ^{(4),(8)}
(8) クリープ	ジルカロイ - 2	文献データ ⁽⁶⁷⁾ 照射試験データ

*：従来コードからの改訂モデル。

1.5 評価

CARO-NA コードの解析モデルについて、評価結果を以下に示す。

- (1) CARO-NA コードでは、燃料棒に発生する諸現象のモデル化、形状のモデル化、熱的挙動のモデル化、機械的挙動のモデル化及び諸現象の相互作用のモデル化が行われていることを確認した。
- (2) 燃料棒に発生する諸現象は、基本的に個々の実験データに基づきモデル化されていることを確認した。
- (3) 形状のモデル化では、燃料棒全長を解析対象とし、燃料棒軸方向を複数のノードに分割することにより軸方向の出力分布の効果を、また、燃料ペレット径方向を複数のリングに分割することにより径方向の発熱分布の効果をとり扱えるモデルになっていることを確認

した。

(4) 熱的解析モデルでは、運転履歴及び燃料棒軸方向位置の関数として以下のことが計算される。

- ペレット及び被覆管内の温度分布
- ペレットの熱膨張、リロケーション、焼きしまり及びスエリングによる径方向変位
- 被覆管の熱膨張、弾性変形及びクリープによる径方向変位
- ペレット - 被覆管ギャップ熱伝達率
- FP ガス放出量及び燃料棒内圧

熱的挙動のモデル化では、燃料棒の温度が熱変形（ギャップ幅）及びFP ガス放出に影響し、熱変形（ギャップ幅）及びFP ガス放出の変化がギャップ熱伝達率を通して燃料棒の温度に影響するといった相互の熱的フィードバック効果を取り扱えるモデルになっていることを確認した。

(5) 機械的解析モデルでは、ペレット - 被覆管機械的相互作用を考慮して、以下のことが出力の関数として計算される。

- ペレット及び被覆管の径方向の変位分布
- ペレット及び被覆管内の径方向の応力・歪分布

機械的挙動のモデル化では、軸対称次元有限要素法に基づき、弾塑性、クリープ、熱膨張等が増分形で適切にモデル化されており、高出力時のペレット - 被覆管機械的相互作用に伴う燃料棒の機械的挙動を計算できることを確認した。

以上の評価結果から、CARO-NA コードの解析モデルは妥当であり、燃料棒の照射挙動を運転履歴に従って適切に計算できるものと判断する。

2．従来コードからの改訂モデル

CARO-NA コードでは、最近の高燃焼度燃料照射試験データ等から得られた最新知見を反映し、従来コードからペレット及び被覆管の物性・照射挙動モデルのうち、以下に示すモデルが改訂されている。

- (1) ペレット熱伝導度
- (2) ペレット融点
- (3) 被覆管照射硬化
- (4) ペレット熱膨張
- (5) 焼きしまり
- (6) スエリング
- (7) ペレットリム組織形成
- (8) FP ガス放出

改訂モデルの変更内容及び変更理由は、前述の表 -1 に示すとおりである。改訂モデルの概略及び妥当性については、以下のように述べられている。

2.1 ペレット熱伝導度

近年の照射試験技術の進歩により高燃焼度領域で信頼性の高いペレット熱伝導度の測定が可能となり、ペレット熱伝導度の燃焼度依存性に関する知見が拡充されてきた。この拡充された知見^{(4),(24),(25),(26)}に基づき、CARO-NA コードのペレット熱伝導度を、燃焼に伴うペレット熱伝導度の低下を考慮したモデルに改訂したとしている。

また、近年の高燃焼度まで照射した燃料の照射後試験の結果から、ペレットの外周部においてペレット結晶粒の細粒化及び気泡の増大を伴った組織変化、いわゆるリム組織の形成が報告されている⁽⁴⁵⁾⁻⁽⁴⁷⁾。リム組織の気泡の熱伝導に対する影響は、製造時に生じる気孔又は照射中にFPガス気泡の連結等によって生じる気孔とは異なるとし⁽⁴⁵⁾、CARO-NA コードでは、リム領域の気泡の特徴を考慮した熱伝導度補正式によってペレット熱伝導度モデルを補正としている。これについては、後述の2.7項に示す。

CARO-NA コードの熱伝導度モデルは、フォノン（格子振動）による熱伝導及び高温領域で

の電子による熱伝導の寄与を考慮した式を基本として、燃焼に伴う熱伝導度の低下及び Gd_2O_3 等の添加による熱伝導度の低下がモデル化されたものである。

燃焼に伴う熱伝導度の低下は、固溶性 FP の蓄積による熱伝導度低下因子、照射欠陥の蓄積による熱伝導度低下因子及びアニーリングによる照射欠陥の回復因子によって表わされる⁽²⁴⁾としている。CARO-NA コードではこれらの効果を取り入れるため、フォノンによる熱伝導を表す項が補正されている。また、 Gd_2O_3 の効果についても同様にフォノンによる熱伝導を表す項が補正されている。

一方、熱伝導度に対するペレット密度の効果は、一般的な Loeb の式⁽⁹⁾によって補正されている。ペレット密度の変化には、焼きしまり、スエリング等の照射による気孔の生成・消滅に伴う変化が考慮されている。なお、熱伝導度に対するペレット密度の効果は、気孔の存在率による影響として考慮され、 UO_2 ペレットと Gd_2O_3 入り UO_2 ペレットとでは差が無いとしている。したがって、ペレット密度変化による効果は、 UO_2 ペレット及び Gd_2O_3 入り UO_2 ペレットともに Loeb の式によって補正されている。

未照射 UO_2 ペレット（ペレット密度 90～99%TD）の熱伝導度の温度依存性について、CARO-NA コードの熱伝導度モデルと測定データとを比較した結果、同モデルの熱伝導度はペレット密度の異なる試料について、熱伝導度の測定値に対して低温領域から高温領域まで全般にわたって良く一致しており、未照射 UO_2 ペレットの熱伝導度の温度依存性及びペレット密度依存性を適切にモデル化したとしている。また、照射済み UO_2 ペレットの熱伝導度の温度依存性について、CARO-NA コードの熱伝導度モデルと測定データとを比較した結果、同モデルの熱伝導度は低温領域から高温領域まで全般にわたって測定値と良く一致しており、照射済み UO_2 ペレットの熱伝導度の温度依存性を適切にモデル化したとしている。

さらに、照射済み UO_2 ペレットの熱伝導度の燃焼度依存性について、CARO-NA コードの熱伝導度モデルと測定データ^{(4),(24),(25),(26)}とを比較した結果、同モデルの熱伝導度は低燃焼度から高燃焼度まで全般にわたって測定値と良く一致しており、燃焼に伴うペレットの熱伝導度の低下を適切にモデル化したとしている。

次に、未照射 Gd_2O_3 入り UO_2 ペレット（ Gd_2O_3 濃度 3～10wt%）の熱伝導度の温度依存性について、CARO-NA コードの熱伝導度モデルと測定データとを比較した結果、同モデルの熱伝導度は低温領域から高温領域まで全般にわたって測定値と良く一致しており、未照射 Gd_2O_3 入り UO_2 ペレットの熱伝導度の温度依存性を適切にモデル化したとしている。また、照射済み Gd_2O_3 入り UO_2 ペレット（ Gd_2O_3 濃度 4.5～5.0wt%）の熱伝導度の温度依存性について、

CARO-NA コードの熱伝導度モデルと測定データ^{(4)・(26)}とを比較した結果、同モデルの熱伝導度は低温領域から高温領域まで全般にわたって測定値と良く一致しており、照射済み Gd₂O₃ 入り UO₂ ペレットの熱伝導度の温度依存性を適切にモデル化したとしている。

2.2 ペレット融点

従来コードでは、ペレット融点は Christensen の測定データ⁽¹⁰⁾に基づき、燃焼初期から 10GWd/t 当たり 32 低下するモデルとしていた。ペレット融点の燃焼度依存性については、近年、高燃焼度まで照射したペレットのデータが拡充されており、最新のデータとしては JNES の実証試験で得られた最高燃焼度約 70GWd/t までのデータ⁽⁴⁾があり、燃焼に伴う融点の低下は大きくないことが示されている。また、他の文献のデータにおいても燃焼に伴う融点の低下は見られていないとしている。

CARO-NA コードでは、ペレット融点の燃焼度依存性について、Yamanouchi⁽¹¹⁾、原田⁽¹²⁾等による測定データに基づき、30GWd/t までは燃焼度に依存しないモデルに変更され、30GWd/t 以上の高い燃焼度では、Christensen が提唱した燃焼度増加 10GWd/t 当たり 32 低下するモデルに改訂されている。

また、Gd₂O₃ 入り UO₂ ペレットの融点の燃焼度依存性についても UO₂ ペレットと同様に、30GWd/t までは融点が低下しないものとし、ペレット燃焼度 30GWd/t 以上で 10GWd/t 当たり 32 低下するモデルに改訂されている。

なお、Gd₂O₃ 入り UO₂ ペレットの融点の Gd₂O₃ 濃度依存性については従来どおりで変更はなく、測定データに基づき Gd₂O₃ 濃度の増加に伴って融点が低下するモデルとされている。

2.3 被覆管の照射硬化

被覆管の降伏応力は、温度の増加に伴い低下する。未照射被覆管の降伏応力の温度依存性は、原燃工が取得した被覆管降伏応力の測定データに基づきモデル化されている。

一方、被覆管は、中性子の照射に伴いその強度（降伏応力）が増加し、一定の照射量を超えると飽和する特性（照射硬化）を有している。照射硬化は、中性子の照射による金属組織の格子欠陥がその要因であるが、高温になることで欠陥が消滅し照射材の機械強度が低下する傾向を示すことが一般的に知られている。

従来コードでは、この照射硬化はモデルに取り入れられておらず、照射被覆管に対しても未照射被覆管と同じ降伏応力が用いられていた。

CARO-NA コードでは、被覆管の降伏応力モデルにこの照射硬化に係る知見を考慮し、モデルが改訂されている。

CARO-NA コードの被覆管の照射硬化モデルにおける照射被覆管の降伏応力の温度依存性は、国内で取得された照射被覆管の引張試験結果と比較して保守的に定められている。

なお、データが取得された範囲を超える温度では、未照射材の降伏応力となるようにモデル化されている。

被覆管の照射硬化モデルにおける降伏応力の高速中性子照射量依存性は、照射被覆管の引張試験結果と比較して保守的に定められたものであり、一定の照射量を超えると降伏応力は飽和するように設定されている。

2.4 ペレット熱膨張

CARO-NA コードでは、ペレットの熱膨張を Conway 等のデータ⁽¹³⁾に基づきモデル化されている。また、融点を越え、溶融したペレットの体積膨張率は、文献データ⁽³⁵⁾に基づき設定されている。

当初、CARO-NA コードのペレット溶融時の熱膨張モデルは、従来コードと同様に等方的であるとしてモデル化されていた。しかしながら、トピカルレポートの技術評価の過程でペレット溶融時の熱膨張は非等方的ではないかとの指摘に基づき、ペレット溶融時の熱膨張解析についてカナダ原子力公社(AECL)の試験研究炉 NRX において実施された、燃料棒体系におけるペレット溶融に関する一連の照射試験データ⁽¹⁴⁾との比較検討を行った。

本試験は、ペレット溶融時の被覆管の変形挙動を調査することを目的とし、外径約 17.3 ~ 20.6mm、有効長約 69 ~ 308mm の未照射短尺燃料棒を NRX の照射ループにおいて、ペレット溶融が生じる出力条件(~ 約 130kW/m)まで照射されたものである。

これら一連の試験において、溶融時のペレットの径方向及び軸方向の膨張量が評価されており、本試験での評価結果から、ペレット溶融後の径方向への膨張量は軸方向への膨張量に対して大きい傾向があることが示唆されている。

また、溶融後のペレットが理想的な液体として振る舞うものと仮定した場合、薄肉の円筒内部の液体に圧力がかかった体系と同等とみなすことができ、この時、周方向にかかる応力は軸方向にかかる応力の 2 倍になると計算される。

以上のように、ペレット溶融後の径方向への膨張量が軸方向への膨張量に対して大きい傾向があることが示唆されていることから、CARO-NA コードのペレット溶融時の熱膨張モデルに

については、等方的であるとしていたモデルを非等方モデルに変更することとなった。

その結果、実燃料体系においては、ペレットの拘束等の条件の違いにより径方向への膨張率は変化すると考えられるが、CARO-NA コードでは最も保守的な条件を想定し、ペレット溶融時の体積膨張について、軸方向へは膨張せずに径方向へのみ膨張すると仮定し、溶融後の熱膨張を非等方とする保守的なモデルに改訂された。

CARO-NA コードによるペレット溶融後の熱膨張率を文献データ⁽³⁵⁾と比較した結果、熱膨張を等方的として取り扱っている MATPRO モデル⁽⁶⁴⁾又は文献データに比べてペレット径方向の熱膨張率をより大きく評価しており、改訂されたペレット熱膨張モデルは溶融後のペレット熱膨張率を保守的に評価するとしている。

また、CARO-NA コードによるペレットの径方向熱膨張量と前述の NRX 炉照射試験データとを比較した結果、同コードのペレット熱膨張モデルによる溶融後のペレット熱膨張は、ばらつきの大きい測定データであるが、溶融後の熱膨張の傾きを概ね模擬しており CARO-NA コードのペレット熱膨張モデルが燃料棒体系におけるペレット溶融後の熱膨張を適切に評価するとしている。

2.5 焼きしまり

焼きしまりは、照射下のウラン原子の拡散等により気孔が収縮又は消滅し、ペレットが収縮する現象であり、燃焼初期において見られるのが特徴である。ペレットが焼きしまることによりペレット - 被覆管のギャップ幅及び自由空間体積が増大し、燃料温度、内圧等に影響を及ぼす。

CARO-NA コードでは、ペレットの焼きしまりは体積変化率で表されており、焼きしまり量は製造時の気孔率に依存するモデルとしている。

近年の高密度ペレットの照射データに基づき、この焼きしまり量を定めている定数が測定データをより良く再現できるように変更されている。改訂されたモデルでは、従来のモデルに比べて焼きしまり量を小さく評価するとしている。

2.6 スエリング

ペレットは、燃焼の進行と共に FP の蓄積によって、体積が徐々に増加していく。このようなペレットの体積増加はスエリングと呼ばれ、種々のペレット体積膨張率の測定データが報告されている^{(5),(43),(44)}。

燃料の照射試験の結果から高燃焼度領域におけるペレットのスエリング率は、低燃焼度領域に比べて増大することが示されている⁽⁴³⁾。これは、高燃焼度領域における FP ガス気泡の増大又は高燃焼度ペレットの外周部で顕在化してくる微細気泡の生成を伴ったリム組織の形成がその要因であるとしている。

CARO-NA コードでは、測定データに基づき、高燃焼度領域においてスエリング率が増加するモデルに改訂されている。

なお、低燃焼度領域におけるスエリング率は従来のもので、変更しないものとしている。

2.7 ペレットリム組織形成

近年、高燃焼度まで照射したペレットの外周部において結晶粒の細粒化及び気泡の増大を伴った組織変化、いわゆるリム組織の形成が報告⁽⁴⁵⁾⁻⁽⁴⁷⁾されており、リム形成により発生した気泡がペレットの熱伝導度及びスエリングに影響を及ぼすことが知られている。

リム形成により生じる気泡の形状は、ペレット製造時に生じる気孔又は照射中に FP ガス気泡の連結等によって生じる不定形の気孔とは異なり、球形に近いことが報告されている。球形の気泡は表面積が小さいため、リム形成により発生した気泡は、不定形な気孔よりも熱伝導度の低下に及ぼす影響は小さいと考えられていることから、CARO-NA コードでは、リム領域における気泡のペレット熱伝導度に対する影響は、不定形な気孔に比べて小さいと考え、前述の 2.1 節の Loeb の式による熱伝導度の補正を行わず、リム領域の気泡の特徴を考慮した熱伝導度補正式を適用するとしている。この補正式は、照射後試験で取得したリム組織の走査型電子顕微鏡（以下「SEM」という。）観察画像から作成した有限要素モデルを用いた熱解析結果から導出されている。

リム領域の気泡による熱伝導度の補正式で用いられるリム領域の気泡率は、照射された燃料の金相写真及び SEM 写真の画像解析によって評価された気泡率測定データに基づき、ペレット局所燃焼度の関数としてモデル化されている。

また、リム組織形成幅については、照射された燃料の電子線マイクロアナライザによる測定結果に基づき、ペレット平均燃焼度の関数としてモデル化されている。

また、CARO-NA コードの熱伝導度モデルによるリムが形成されたペレットの熱伝導度は、測定値と良く一致することが示されたとしている。

なお、上記 2.6 項で述べた高燃焼度領域におけるスエリング率は、リム組織形成による体積増加を考慮して変更されている。

2.8 FP ガス放出

燃料の燃焼に伴いペレット内には FP ガスが生成される。生成した FP ガスの一部は、燃料棒内の自由空間に放出される。

核分裂によって生成された FP ガスは、ある一定の濃度まではペレットの結晶粒内に気泡として保持されるが、それを超えると結晶粒界に移動・蓄積し、自由空間（ギャップ）に放出される。結晶粒内で生成される FP ガスの粒界への移動は、温度が高いほど速く、経過時間が長い（燃焼度が進む）ほど多くなる。したがって、結晶粒内の FP ガスの飽和濃度は、温度及び燃焼度に依存するモデルとして与えられている。

一方、粒界に移動した FP ガスは、ガスバブルとして蓄積し、ガスバブルの成長・連結に伴い自由空間（ギャップ）に放出される。ガスバブルの成長・連結は、粒界での FP ガスが多いほど、また、温度が高いほど促進される。したがって、粒界からの FP ガス放出係数は、温度が高いほど放出される FP ガスが多くなるように設定されている。

CARO-NA コードの FP ガス放出モデルは、上述のような結晶粒内又は粒界での FP ガスの蓄積又は移動といった FP ガス放出機構を考慮した経験的なモデルとなっている。同モデルにおける結晶粒内の FP ガスの飽和濃度及び粒界からの FP ガス放出係数は、温度及び燃焼度に依存する係数として与えられている。

具体的なモデル係数は、近年の高燃焼度まで照射された燃料の照射試験等で得られた FP ガス放出率の測定値を適切に予測できるように見直され、モデルが改訂されている。

なお、FP ガス放出モデルは、コード全体の調整パラメータの一つである。

2.9 評価

CARO-NA コードの改訂モデルについて、評価結果を以下に示す。

- (1) CARO-NA コードにおいて改訂されたモデルは、それぞれ測定データ又は検証データに基づきモデル化されており、各モデルが妥当であることを検証結果から確認した。
- (2) 改訂モデルを組み込んだ CARO-NA コードについては、第4節に示すとおり燃料中心温度、FP ガス放出率、燃料棒内圧及び被覆管直径の試験データに対する総合的な検証解析結果から、試験結果及び解析結果が良く一致していることを確認した。
- (3) 熔融後のペレット熱膨張モデルは、技術評価における指摘を受け、等方的モデルから非等

方モデルへ改訂された。この結果、溶融後のペレット熱膨張モデルはペレット径方向の熱膨張率を保守的に評価することを確認した。

以上の結果から、CARO-NA コードの改訂モデルを、 UO_2 燃料及び Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の燃料棒熱機械特性の評価に適用することは妥当なものと判断する。

3 . 改良被覆管への適用

新設計の 10×10 燃料では、燃料被覆管材として水素吸収の抑制を目的に HiFi 被覆管を用いることが計画されており、CARO-NA コードは HiFi 被覆管に適用できるとしている。

CARO-NA コードの HiFi 被覆管への適用の妥当性については、以下のように述べられている。

3.1 HiFi 被覆管の概要

原燃工が高燃焼度燃料用材料として開発した HiFi とジルカロイ - 2 との合金成分の比較がトピカルレポートに示されている。

HiFi は、水素吸収の抑制の観点から、加工性を損なわない範囲で鉄濃度を高め、ジルカロイ - 2 と比較して鉄成分を約 0.4 wt%まで高めて、鉄以外の成分についてはジルカロイ - 2 と同等であるとしている。

また、熱処理については従来燃料に適用している材料と同じく再結晶化焼鈍材としている。

なお、HiFi は、ジルカロイ-2 から鉄濃度のみを高めているが、ジルコニウム中の鉄は母材にほとんど固溶せず金属間化合物として析出するため、HiFi とジルカロイ-2 とで母材の基本的物性は同一であるとしている。

3.2 HiFi 被覆管の照射試験の概要

HiFi の機械的特性を評価するため、HiFi を対象とした各種照射試験が実施されている。それら照射試験の概要を表 -3 に示す。

表 -3 改良ジルコニウム合金 HiFi に関する照射試験の概要

測定データ	概要	試験内容
クーポン材(柏崎刈羽 5 号機) ⁽¹⁷⁾	ジルカロイ-2 及び HiFi のクーポン材を、東京電力柏崎刈羽原子力発電所 5 号機において照射し、照射後試験は JAEA ホットラボにて実施した。	<ul style="list-style-type: none"> ・酸化膜厚測定/水素分析(1,2,4,6cycle) ・引張試験(1,4,6cycle) ・クリープ試験(4cycle)
クーポン材(ドイツ BWR)	ジルカロイ-2 及び HiFi のクーポン材を、ドイツ商用炉 KKP-1 において照射し、照射後試験はドイツのホットラボにて実施した。	<ul style="list-style-type: none"> ・酸化膜厚測定/水素分析(1,2cycle)
試験燃料棒(Halden 試験炉)	ジルカロイ-2 及び HiFi の短尺試験燃料棒を、ノルウェー ハルデン炉において照射し、照射後試験を実施した。	<ul style="list-style-type: none"> ・酸化膜厚測定
10 × 10 燃料(ドイツ BWR) (実機燃料棒)	ジルカロイ-2 及び HiFi 被覆管を組み込んだ 10 × 10 燃料集合体を、ドイツ グンドレミンゲン炉において照射し、照射後試験は発電所のプールサイド及びドイツのホットラボにて実施した。	<ul style="list-style-type: none"> ・水素分析(4cycle) ・酸化膜厚測定(2,4,5cycle) ・燃料棒伸び測定(4cycle)

3.3 HiFi 被覆管の物性モデル

CARO-NA コードで使用されている被覆管の物性値及び照射挙動モデルは、以下のとおりである。

- (1) 熱伝導度
- (2) ヤング率
- (3) ポアソン比
- (4) 降伏応力
- (5) 照射硬化
- (6) 熱膨張
- (7) 照射成長
- (8) クリープ

CARO-NA コードでは、HiFi 被覆管の諸特性は、水素吸収特性以外はジルカロイ - 2 被覆管と同等であるとし、HiFi 被覆管では、上記の各物性モデルに対してジルカロイ - 2 被覆管と同一のモデルを用いるとしている。その妥当性が以下のように述べられている。

なお、上記モデルの被覆管タイプ別の取扱い及びモデルの根拠を表 -4 に示す。

(1) 熱伝導度

CARO-NA コードの被覆管熱伝導度モデルは、温度依存性を考慮したモデルとしている。HiFi の熱伝導度を測定した結果から、HiFi の熱伝導度はジルカロイ-2 及びジルカロイ-4 と同等であることが示されている。HiFi の熱伝導度は、下記の熱拡散率の測定値から評価されたものである。

熱拡散率測定は、ジルカロイ-2 及び HiFi の円形平板状試料を対象とし、熱定数測定装置を用いてレーザーフラッシュ法により実施されている。測定は、真空中で、温度 100 ~ 500 で実施されたものである。

被覆管熱伝導度の温度依存性について、ジルカロイ-2 及びジルカロイ-4 の文献データ並びに原燃工が取得したジルカロイ-2 及び HiFi の測定データを比較するとともに、これらのデータと CARO-NA コードの熱伝導度モデルによる評価値が比較されている。

その結果から、HiFi の熱伝導度はジルカロイ-2 及びジルカロイ-4 と同等であり、熱伝導度に合金成分の違いによる影響は見られず、同モデルの熱伝導度は測定データと良く一致することが示されたとしている。

(2) ヤング率

CARO-NA コードのヤング率モデルは、純ジルコニウム単結晶、ジルカロイ-2 及びジルカロイ-4 について測定されたデータに基づくモデル式である。合金成分の違いによるヤング率への影響は小さいこと、また、ジルコニウム、ジルカロイ-2、ジルカロイ-4 及び Zr-2.5%Nb のヤング率に関する文献データから、これらの間では相違は認められないことから、ジルカロイ-2 から鉄濃度のみを高めた HiFi のヤング率は、ジルカロイ-2 と同等であるとしている。

(3) ポアソン比

ポアソン比の温度に対する特定の傾向は観測されておらず、増加及び減少傾向が報告されており、測定データによって差がある。また、純ジルコニウム単結晶及びジルカロイ-4 の文献データから、合金成分の違いによるポアソン比への明確な影響は捉えられていない。

以上から、CARO-NA コードでは HiFi のポアソン比はジルカロイ-2 と同一とし、温度に依存しない一定値としている。

(4) 降伏応力

CARO-NA コードにおける被覆管の降伏応力は、原燃工が取得したジルカロイ-2 の降伏応力測定データに基づきモデル化されている。HiFi 被覆管の降伏応力の測定結果から、HiFi の降伏応力はジルカロイ-2 と同等であることが示されている。

HiFi の降伏応力測定データは、引張試験により得られたものである。引張試験は、未照射の管材を対象としており、JIS Z-2201 に規定する第 11 号試験片（標点間距離 50mm）を用いて、温度条件 250 ~ 450 で実施されている。

被覆管降伏応力の温度依存性について、ジルカロイ-2 と HiFi の測定データとを比較するとともに、CARO-NA コードの被覆管降伏応力モデルと比較した結果、HiFi の降伏応力はジルカロイ-2 とほぼ同等であること、また、同モデルはジルカロイ-2 及び HiFi の降伏応力の測定データと同等であることが示されたとしている。

(5) 照射硬化

CARO-NA コードでは、被覆管の照射硬化について、HiFi の降伏応力の高速中性子照射量依存性が測定データによって評価されている。

降伏応力の測定データは、東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所第5号機において照射されたジルカロイ-2及びHiFiのクーポン材に対して実施した引張試験⁽¹⁷⁾により得られている。本試験は、炉内の中性子源位置において1、4、6サイクル照射されたジルカロイ-2及びHiFiについて実施されたものである。試験試料は、管材より切り出し、JIS Z-2201に規定する第7号試験片に準拠するものとし、引張試験は、室温及び343℃で実施されたものである。

降伏応力の高速中性子照射量依存性について、HiFiとジルカロイ-2の測定データとを比較した結果、HiFiとジルカロイ-2とで降伏応力の照射量依存性に大きな違いはないことが示されたとしている。

また、他のジルカロイ-2の降伏応力データと比較した結果、室温及び高温条件においてHiFiとジルカロイ-2とで同等の傾向を示しており、降伏応力の温度依存性に大きな違いはないことが示されたとしている。

(6) 熱膨張

CARO-NAコードの被覆管熱膨張モデルとジルカロイ-2及びジルカロイ-4の熱膨張測定データとを比較した結果、合金成分の違いによる被覆管熱膨張への影響は見られておらず、また、MATPRO⁽¹⁶⁾ではジルカロイ-2とジルカロイ-4とで熱膨張に差はないとしている。さらに、HiFiでは添加した鉄がジルコニウムにほとんど固溶しないため、原理的に熱膨張への影響は小さいと推測されるとしている。

以上から、CARO-NAコードではHiFiの熱膨張はジルカロイ-2と同一としている。

(7) 照射成長

HiFi被覆管の軸方向の照射成長は、照射試験データによって評価されている。HiFiの照射成長データは、ドイツのBWRにおいて4サイクル照射された10×10燃料集合体に組み込まれたHiFi被覆管の燃料棒長さ測定により得られている。

測定は、ドイツグンドレミンゲン炉において、高燃焼度まで照射された燃料集合体中の14本（HiFi被覆管（6本）、ジルカロイ-2被覆管（8本））の燃料棒を対象として実施されている。

燃料棒軸方向伸びの集合体平均高速中性子照射量依存性について、ジルカロイ-2とHiFiの測定データを比較した結果から、照射成長に有意な差がないことが分かったとしている。

(8) クリープ

HiFi 被覆管のクリープは、照射試験データによって評価されている。HiFi のクリープデータは、東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所第 5 号機において照射されたジルカロイ-2 及び HiFi に対して実施されたクリープ試験⁽¹⁷⁾により得られている。

本試験では、ジルカロイ-2 及び HiFi 管材にヘリウムガスを封入し上下部を密封溶接した試料を、炉内の中性子源位置において 4 サイクル照射し、取り出し後試料の外径を、直径測定装置により測定することでクリープ歪が評価されている。

なお、測定試料は、ヘリウム封入圧 4.1 ~ 8.8 MPa の 5 試料である。

実炉で照射された HiFi 及びジルカロイ-2 のクーポン材のクリープ歪を比較した結果から、HiFi 及びジルカロイ-2 のクリープ特性は同等であり、有意な差がないことが分かったとしている。

表 -4 CARO-NA コードにおける被覆管物性値及び照射挙動モデルの被覆管タイプ別の取扱い及びモデルの根拠 (1/2)

モデル	被覆管タイプ別のモデルの取扱い		モデルの根拠
(1) 熱伝導度	ジルカロイ - 2		文献データ ⁽⁴⁸⁾⁻⁽⁵³⁾ 及び未照射試料を用いた測定データに基づきモデル化。
	HiFi		未照射試料を用いた測定データに基づき、HiFi の熱伝導度はジルカロイ-2 と同等との知見から、ジルカロイ-2 と同一のモデルを適用。
(2) ヤング率	ジルカロイ - 2		文献データ ^{(16),(54),(55)} に基づきモデル化。
	HiFi		文献データ ⁽⁶⁰⁾ から、ジルコニウム合金間でヤング率に差が見られないとの知見から、ジルカロイ-2 と同一のモデルを適用。
(3) ポアソン比	ジルカロイ - 2		文献データ ^{(50),(54)} に基づきモデル化。
	HiFi		文献データ ^{(50),(54)} から、純ジルコニウム結晶とジルカロイ-4 で合金成分によるポアソン比へ明確な傾向が見られないことから、HiFi についてもジルカロイ-2 と同一のモデルを適用。
(4) 降伏応力	ジルカロイ - 2		未照射試料を用いた測定データに基づきモデル化。
	HiFi		未照射試料を用いた測定データ ⁽¹⁷⁾ に基づき、降伏応力がジルカロイ-2 とほぼ同等との知見から、ジルカロイ-2 と同一のモデルを適用。
(5) 照射硬化*	ジルカロイ - 2		照射試験データ ^{(5),(56),(57)} に基づきモデル化。
	HiFi		照射試験データ ⁽¹⁷⁾ に基づき、室温及び高温条件の照射材の降伏応力がジルカロイ-2 と同等の傾向を示すとの知見から、ジルカロイ-2 と同一のモデルを適用。

* : 従来コードからの改訂モデル。 : ジルカロイ - 2 のモデル、 : ジルカロイ - 2 と同一のモデルを適用

表 -4 CARO-NA コードにおける被覆管物性値及び照射挙動モデルの被覆管タイプ別の取扱い及びモデルの根拠 (2/2)

モデル	被覆管タイプ別のモデルの取扱い		モデルの根拠
(6) 熱膨張	ジルカロイ - 2		文献データ ^{(50),(58),(59),(64)} に基づきモデル化。
	HiFi		文献データ ^{(50),(58),(64)} から、純ジルコニウム結晶とジルカロイ-4 で合金成分による熱膨張への影響が小さいこと、また、HiFi では添加した鉄がジルコニウムにほとんど固溶しないため原理的に熱膨張への影響が小さいと推測できることから、HiFi についてもジルカロイ-2 と同一のモデルを適用。
(7) 照射成長	ジルカロイ - 2		照射試験データ ^{(4),(8)} に基づきモデル化。
	HiFi		照射試験データに基づき、照射成長がジルカロイ-2 と有意な差がないとの知見から、ジルカロイ-2 と同一のモデルを適用。
(8) クリープ	ジルカロイ - 2		文献データ ⁽⁶⁷⁾ に基づきモデル化。 照射試験により妥当性を検証。
	HiFi		照射試験データに基づき、クリープ特性がジルカロイ-2 とほぼ同等であるとの知見から、ジルカロイ-2 と同一のモデルを適用。

：ジルカロイ - 2 のモデル、 ：ジルカロイ - 2 と同一のモデルを適用

3.4 評価

CARO-NA コードの改良被覆管 HiFi への適用について、評価結果を以下に示す。

- (1) HiFi 被覆管は、合金元素のうち鉄濃度のみをジルカロイ - 2 の規格からわずかに高めたものであり、鉄以外の成分についてはジルカロイ - 2 と同等であり、また、熱処理についても従来のジルカロイ - 2 被覆管と同一であることを確認した。
- (2) CARO-NA コードで使用されている被覆管の物性値及び照射挙動に関する各モデルについて、合金組成の違いが被覆管の熱的及び機械的特性に及ぼす影響を測定データ、文献データ等に基づきそれぞれ評価・検討し、HiFi 被覆管の各特性がジルカロイ - 2 と同等であることを確認した。

以上のとおり、HiFi 被覆管の熱的・機械的特性がジルカロイ - 2 と同等であることが確認できたことから、CARO-NA コードを HiFi 被覆管に適用することは妥当なものと判断する。

4 . コードの検証

CARO-NA コードでは、従来コードに対し、高燃焼度燃料への適用を目的として、最新知見を反映するとともに、データの拡充に伴いモデルが改訂又は追加されている。CARO-NA コードは、燃料棒の熱機械特性を改訂したモデルを含め、多くのモデルの相互の関連を考慮し、繰り返し計算によって運転時の燃料の熱的及び機械的挙動を解析するものである。

このため、改訂された CARO-NA コードの燃料棒熱機械特性解析について、以下を目的としてコードの検証が行われている。

- コード全体として燃料照射挙動を適切に予測できること。
- 調整パラメータを含む一部のモデルのパラメータを調整し、コードの予測が全検証データに対して総合的に満足できる精度となること。
- コード全体の調整によって最適化されたコードの予測の不確かさの定量化。

CARO-NA コードにおけるモデルの改訂及びそれに伴うコード全体の調整並びに改訂されたコードの設置（変更）許可申請解析への適用の流れを図 -5 に示す。

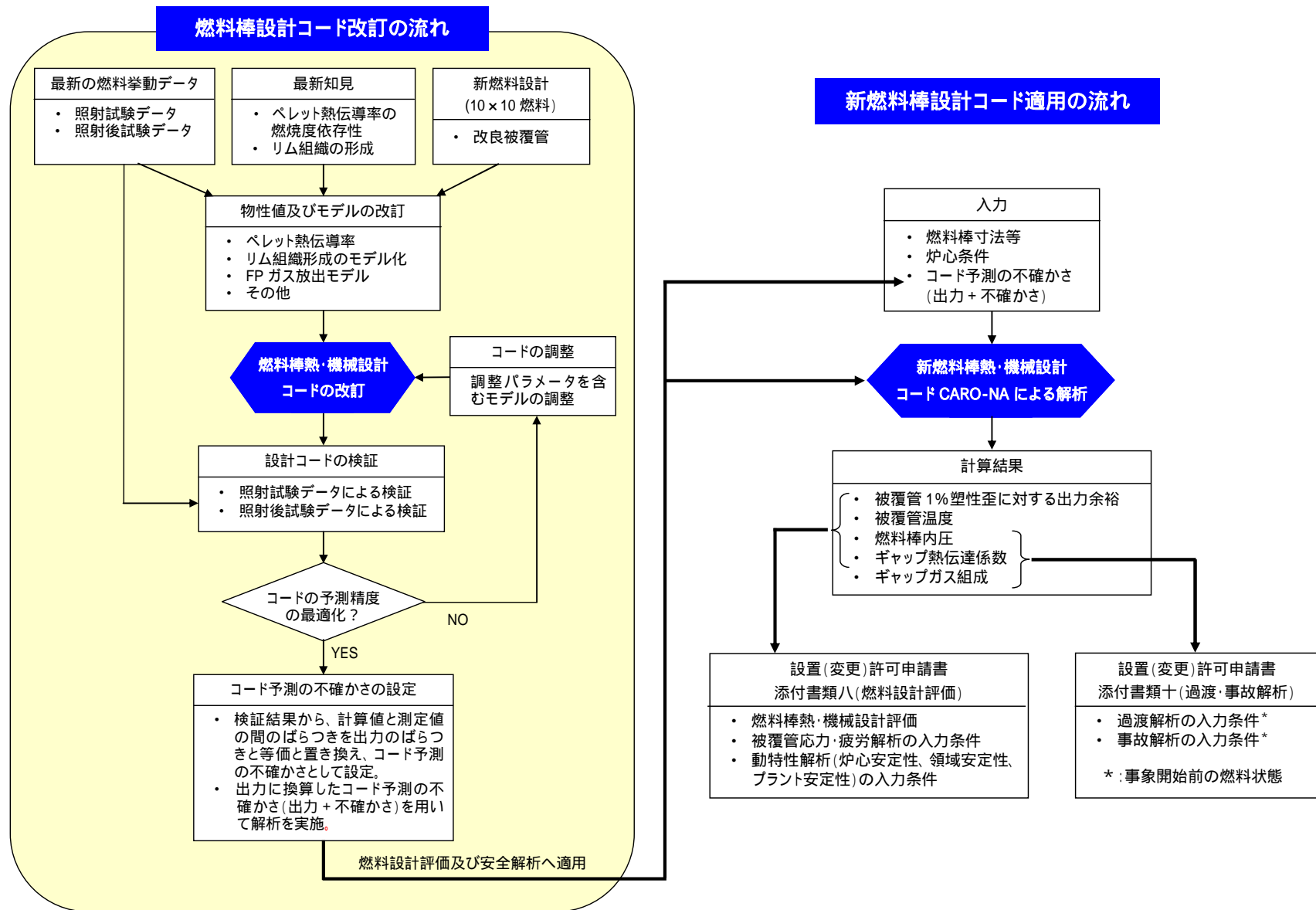
4.1 検証データ

CARO-NA コードの燃料照射挙動の予測精度は、国内外の多数の照射試験及び照射後試験で得られた以下の測定データによって検証されている。

- 燃料中心温度
- FP ガス放出率
- 燃料棒内圧
- 被覆管直径変化

上記検証項目に関するデータベースは、以下の照射試験データからなっている。

- ハルデン試験炉データ
- 国際共同研究データ
- 商用炉試験データ
- その他の試験炉データ等



注) 網掛けは、燃料棒熱・機械設計コードのトピカルレポートの評価範囲を示す。

図 -5 CARO-NA コード改訂及びコードの検証並びに設置(変更)許可申請解析への適用の流れ

4.2 コードの調整

コードの検証では、全検証データ（燃料中心温度、FP ガス放出率、燃料棒内圧及び被覆管直径変化）に対して、コードの予測が総合的に満足できる精度となるように、調整パラメータを含む一部のモデルのパラメータ値が設定され、コード全体が調整されている。

CARO-NA コードは、従来コードに対して、以下に示す燃料及び被覆管の物性モデルが改訂されている。

- ペレット熱伝導度
- ペレット融点
- 被覆管照射硬化
- ペレット熱膨張
- 焼きしまり
- スエリング
- ペレットリム組織形成
- FP ガス放出

CARO-NA コードにおけるモデルの改訂及びそれに伴うコード全体の調整並びに検証の概要を図-6に示す。図-6に示すように、コードの調整では上記の改訂モデルのうち、FP ガス放出モデルに含まれるFP ガスの飽和濃度及び放出係数における温度及び燃焼度に依存するパラメータを調整することによって、コード全体の予測精度が最適化されている。

なお、コードの調整モデルとしてペレットのリロケーションが挙げられるが、CARO-NA コードでは、同モデルのパラメータを調整することなく予測精度が確保されるとしている。

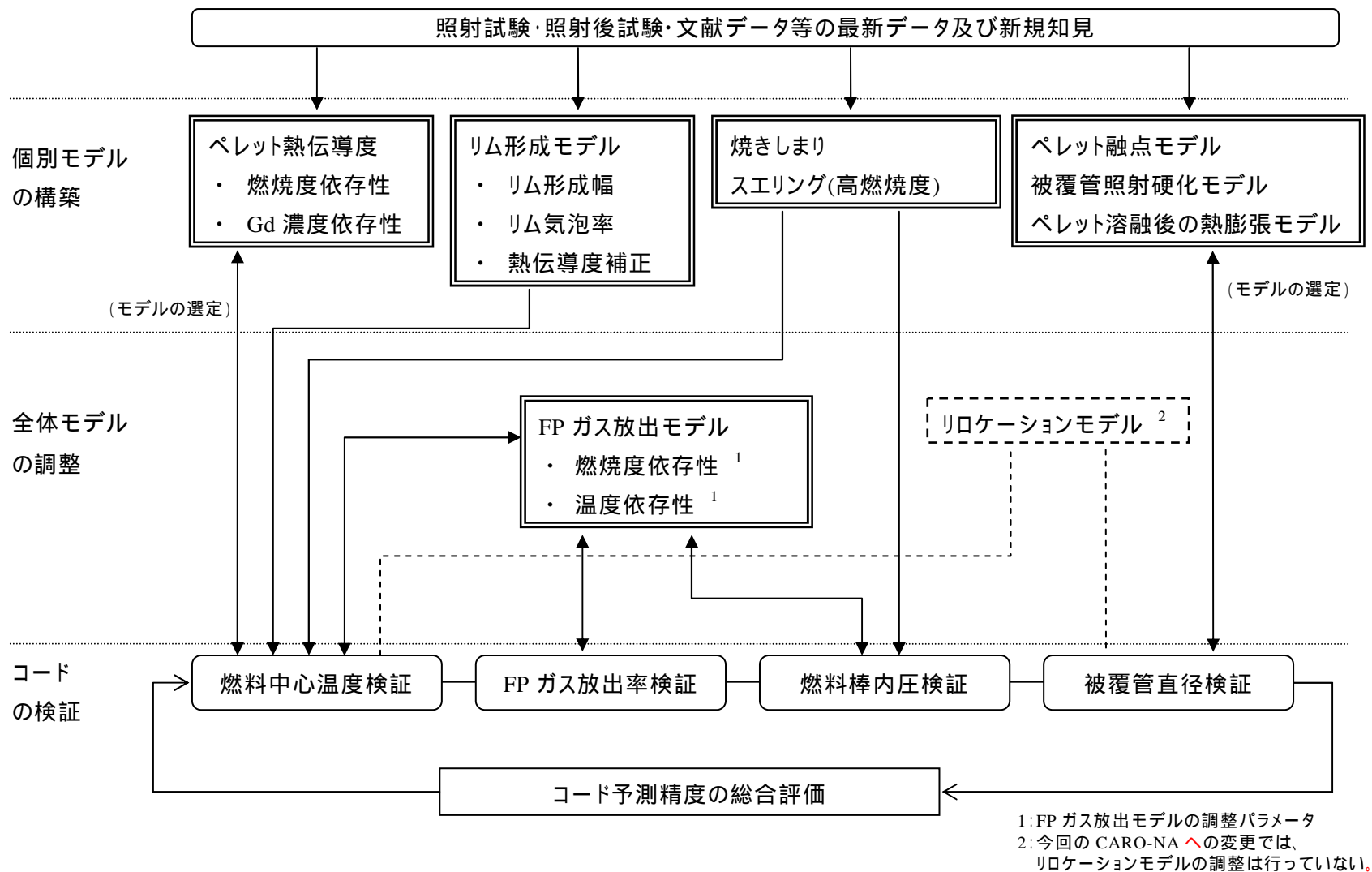


図 -6 CARO-NA コードにおけるモデル変更及びコード全体の構築の概要

4.3 検証結果

燃料中心温度、FP ガス放出率、燃料棒内圧及び被覆管直径変化についての検証結果について以下のように整理されている。解析による予測の不確かさについては、次項 4.4 で述べる。

(1) 燃料中心温度

CARO-NA コードでは、 UO_2 燃料及び Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の中心温度に対する検証の結果から、幅広い温度領域に対して測定値を適切に予測できるとしている。

また、長期にわたる燃焼期間中の燃料中心温度の測定値と計算値とを比較した結果から、幅広い燃焼度範囲にわたって燃料中心温度を適切に予測できるとしている。

(2) FP ガス放出率

CARO-NA コードでは、 UO_2 燃料及び Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の FP ガス放出率に対する検証の結果から、FP ガス放出率の測定値を、ばらつきはあるものの適切に予測できるとしている。

また、CARO-NA コードでは、幅広い燃焼度範囲にわたって FP ガス放出率の測定値を適切に予測でき、燃焼度に対する予測のばらつきに特定の傾向は見られなかったとしている。

(3) 燃料棒内圧

CARO-NA コードでは、 UO_2 燃料及び Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の燃料棒内圧に対する検証の結果から、燃料棒内圧の測定値を適切に予測できるとしている。

また、計算値は幅広い燃焼度範囲にわたって燃料棒内圧の測定値を適切に予測しており、燃焼度に対する予測のばらつきに特定の傾向は見られなかったとしている。

(4) 被覆管直径変化

CARO-NA コードでは、 UO_2 燃料の被覆管直径変化に対する検証の結果から、通常運転時及び高出力時（1% 塑性歪相当出力時）の被覆管直径変化の測定値を、ばらつきはあるものの適切に予測できるとしている。

また、CARO-NA コードでは幅広い燃焼度範囲にわたって被覆管直径変化の測定値を、ばらつきはあるものの適切に予測できるとしており、燃焼度に対する予測のばらつきに特定の傾向は見られなかったとしている。

なお、CARO-NA コードでは、高出力時（1%塑性歪相当出力時）の被覆管直径変化を、測定値に比べて過大に評価する傾向にあり、1%塑性歪相当出力の評価に対しては保守的な結果になるとしている。

一方、Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の場合については、被覆管直径変化の検証データがないが、CARO-NA コードを Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の被覆管直径変化評価に適用することの妥当性について検討されており、その内容については 5.3 項に示す。

4.4 コードの予測の不確かさ

CARO-NA コードの検証では、全検証データ（燃料中心温度、FP ガス放出率、燃料棒内圧及び被覆管直径変化）に対して、コードの予測が総合的に満足できる精度となるように、調整パラメータを含むモデルのパラメータ値を設定し、コード全体の調整がなされている。

その結果、測定値と最適化された計算値との間のばらつきがコードの予測の不確かさであり、コードの予測の不確かさは燃料棒熱機械設計評価において適切に考慮される必要がある。

CARO-NA コードでは、すべての検証結果（燃料中心温度、FP ガス放出率、燃料棒内圧及び被覆管直径変化）のばらつきを包絡するための出力の振り幅が、コードの予測の不確かさとして定量的に求められている。

各検証項目について、コードの予測の不確かさを考慮した出力を用いて解析した結果、CARO-NA コードによる計算結果は全検証データ（燃料中心温度、FP ガス放出率、燃料棒内圧及び被覆管直径変化）を包絡しており、コードの予測の不確かさの設定が妥当であることが示されたとしている。

4.5 評価

CARO-NA コードの検証結果について、評価結果を以下に示す。

- (1) CARO-NA コードは、幅広い温度領域及び燃焼度範囲にわたって、UO₂ 燃料及び Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の燃料中心温度、FP ガス放出率及び燃料棒内圧の測定値を予測できていることを確認した。
- (2) CARO-NA コードは、幅広い燃焼度範囲にわたって、通常運転時及び高出力時（1%塑性歪相当出力時）における UO₂ 燃料の被覆管直径変化の測定値を予測できていること、また、Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料については、5.2 項に示すように燃料の直径変化を支配する燃

料温度と熱膨張を適用範囲内で評価できることから、 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の被覆管直径変化を評価できることを確認した。

- (3) CARO-NA コードでは、検証結果のばらつきを包絡するための出力の振り幅がコードの予測の不確かさとして定量的に求められており、それをを用いた評価が保守的な結果を与えることを確認した。

以上のとおり、CARO-NA コードは検証データによって燃料の照射挙動を適切に予測できることを確認できたことから、コードの予測の不確かさを適切に考慮することを条件として、同コードを UO_2 燃料及び Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の燃料棒熱・機械特性の評価に適用することは妥当なものと判断する。

また、コードの検証範囲は通常運転時の使用条件を包絡していることから、同コードを過渡及び事故解析の初期条件設定に適用することは妥当なものと判断する。

5 . コードの適用範囲

CARO-NA コードの適用範囲について、燃料中心温度等の評価項目ごとにその妥当性評価を行ったとしている。コードの適用範囲は、基本的には、燃料棒のふるまいである燃料中心温度、FP ガス放出率、燃料棒内圧及び被覆管直径変化に係る検証データがその範囲内にあることが望まれるが、適用範囲が検証データの範囲を超えて外挿されているものもあるため、それについては外挿領域における適用性を検証したとしている。

5.1 適用範囲

CARO-NA コードは、BWR 燃料の設置（変更）許可申請書において、燃料棒の熱機械設計解析に適用される。対象とする燃料は UO_2 燃料及び Gd_2O_3 入り UO_2 燃料であり、被覆管はジルカロイ-2 被覆管及び HiFi 被覆管である。

(1) 燃料仕様の適用範囲

CARO-NA コードの適用範囲は表 -5 に示すとおりである。

(2) 設置（変更）許可申請書の解析における適用範囲

CARO-NA コードは、設置（変更）許可申請書の添付書類八に係る燃料棒熱機械特性評価並びに添付書類八及び添付書類十に係る動特性解析並びに運転時の異常な過渡変化解析及び事故解析における入力条件の設定に適用される。CARO-NA コードによる解析対象項目を表 -6 に示す。

表 -5 CARO-NA コードの適用範囲

項目		適用範囲
用途		沸騰水型軽水炉用燃料棒の熱機械設計
使用条件	ペレット燃焼度	0 ~ 80GWd/t
	燃料棒平均燃焼度	0 ~ 70GWd/t
	線出力密度	0 ~ 44kW/m(通常運転時) 0 ~ 80* kW/m(運転時の異常な過渡変化時)
燃料棒仕様	燃料棒外径	10.2 ~ 12.4mm
	封入ガス	ヘリウム
	加圧量	0.4 ~ 1.1MPa(abs)
	ペレット-被覆管ギャップ (被覆管内径 - ペレット外径)	0.1 ~ 0.3mm
被覆管仕様	被覆管材質	ジルカロイ - 2、HiFi 再結晶化焼鈍材 (ジルコニウムライナ内張)
	被覆管肉厚	0.50 ~ 0.95mm
燃料材仕様	燃料材料	UO ₂ 、Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 焼結体
	²³⁵ U 濃縮度	0.2 ~ 5.0wt%
	ペレット密度	95.0 ~ 98.5%TD(理論密度)
	ペレット外径	8.8 ~ 10.5mm
	Gd ₂ O ₃ 濃度	0 ~ 10wt%

* : 運転時の異常な過渡変化時における解析条件は、1%塑性歪に達する線出力密度までであり、適用範囲の 80kW/m は、燃焼初期において1%塑性歪に達する、およびその線出力密度を示している。

表 -6 原子炉設置(変更)許可申請における CARO-NA コードによる解析対象項目

	分類	用途	解析対象項目
添付書類八	機械設計	機械設計に関わる評価	・燃料中心温度 ・燃料棒内圧 ・被覆管 1%塑性歪相当出力
		応力・疲労解析の入力条件	・被覆管温度 ・燃料棒内圧
	動特性	炉心安定性、領域安定性、プラント安定性 の入力条件	・ギャップ熱伝達率
添付書類十	過渡解析	炉心内の反応度又は出力分布の異常な変化(原子炉起動における制御棒の異常な引き抜き)の入力条件	・ガス組成 ・燃料棒内圧
		炉心内の熱発生又は熱除去の異常な変化の入力条件	・ギャップ熱伝達率
		原子炉冷却材圧力又は原子炉冷却材保有量の異常な変化の入力条件	・ギャップ熱伝達率
	事故解析	原子炉冷却材の喪失又は炉心冷却状態の著しい変化(原子炉冷却材喪失、原子炉冷却材流量の喪失、原子炉冷却材ポンプ軸固着)の入力条件	・ギャップ熱伝達率 ・燃料棒内圧 ・FP ガス量 ・自由空間体積
		反応度の異常な投入又は原子炉出力の急激な変化(制御棒落下)の入力条件	・ガス組成 ・燃料棒内圧
		環境への放射性物質の異常な放出(主蒸気管破断)の入力条件	・ギャップ熱伝達率

5.2 検証範囲

(1) モデルの検証範囲

CARO-NA コードで使用されている燃料及び被覆管のモデルは、基本的には測定データに基づきモデル化されており、モデルごとに、モデルに影響するパラメータ、検証範囲及びモデルの妥当性の根拠がトピカルレポートに示されている。

(2) コードの検証範囲

CARO-NA コードの燃料挙動の予測精度は、国内外の照射試験及び照射後試験で得られた以下の測定データによって検証されている。

- 燃料中心温度
- FP ガス放出率
- 燃料棒内圧
- 被覆管直径変化

上記検証項目別のデータベースの燃料仕様及び照射条件等のデータ範囲は、トピカルレポートに示されている。

また、検証項目別に主要なパラメータのデータ取得範囲とコードの適用範囲とを比較し、整理したものがトピカルレポートに示されている。検証解析に用いたデータベースの燃料仕様及び照射条件の組合せは、コードの適用範囲をほぼ包絡している。

しかし、各検証項目において、一部のパラメータで、その適用範囲が検証データの範囲を超え、外挿されて設定されているものがある。

原燃工は、検証データの範囲を超えて外挿されている評価項目について、評価項目ごとに外挿領域でその挙動を支配する要因を分析し、上記(1)で述べた各モデルの検証範囲等を考慮して外挿性を検討しており、その結果を第 5.3 項に示す。

5.3 適用範囲の検討

検証データの範囲を超えて外挿されている評価項目については、項目ごとに外挿領域でその挙動を支配するパラメータを分析し、それらの支配パラメータの検証範囲等を考慮することで、その外挿性が検討されている。

(1) 燃料中心温度評価パラメータの適用範囲の外挿性について

燃料中心温度評価に用いられる主要パラメータのうち、その適用範囲が検証データの範囲を超えているものは、 UO_2 燃料の場合はペレット密度であり、 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の場合はペレット燃焼度、ペレット密度及び Gd_2O_3 濃度である。

UO_2 燃料及び Gd_2O_3 入り UO_2 燃料について、燃料中心温度に影響する支配パラメータはペレットの熱伝導度である。 UO_2 燃料の熱伝導度はペレット燃焼度 96GWd/t まで、ペレット密度 90～99%TD まで熱伝導度測定データによって検証されていることから、 UO_2 燃料の熱伝導度は検証範囲において適用可能であり、また、前述の 2.1 項に示されるように、 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の熱伝導度の燃焼度依存性及び密度依存性が UO_2 燃料と同等であることから、 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の熱伝導度も UO_2 燃料の熱伝導度の検証範囲まで外挿することができるとしている。また、 Gd_2O_3 濃度の依存性については熱伝導度測定データによって 10wt% までの適用性が検証されている。

以上のことに加え、CARO-NA のペレット熱伝導度モデルに、燃焼度、ペレット密度及び Gd_2O_3 濃度の効果が適切に組込まれていることから、 UO_2 燃料の燃料中心温度を支配パラメータの検証範囲まで、 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の燃料中心温度を UO_2 燃料の検証範囲まで外挿して評価することができるとしている。

(2) FP ガス放出率評価パラメータの適用範囲の外挿性について

FP ガス放出率評価に用いられる主要なパラメータのうち、その適用範囲が検証データの範囲を超えているものは、 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の場合は燃料棒平均燃焼度、ペレット燃焼度、最大線出力密度及び Gd_2O_3 濃度であり、 UO_2 燃料の場合は超えているものは無い。

UO_2 燃料の FP ガス放出特性は、燃料棒平均燃焼度 70GWd/t まで、ペレット燃焼度は 80GWd/t まで、最大線出力密度は 44kW/m まで、その適用性が測定データとの対比によって検証されている。一方、従来照射実績から Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の FP ガス放出特性は、 UO_2 燃料と有意な差がないことから、 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の FP ガス放出特性の燃焼度及び温度（線出力密度）の依存性は UO_2 燃料と同じであるとしている。

以上のことから、 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の FP ガス放出を UO_2 燃料の検証範囲まで外挿でき、また、上記(1)に示されたように、 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の燃料中心温度が Gd_2O_3 濃度 10wt% の適用範囲まで検証されていることから、 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の FP ガス放出も Gd_2O_3 濃度 10wt% まで外挿して評価することができるとしている。

(3) 燃料棒内圧評価パラメータの適用範囲の外挿性について

燃料棒内圧評価に用いられる主要なパラメータのうち、その適用範囲が検証データの範囲を超えているものは、Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の場合は燃料棒平均燃焼度、ペレット燃焼度、最大線出力密度及び Gd₂O₃ 濃度であり、UO₂ 燃料の場合は超えているものは無い。

Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の燃料棒内圧評価に影響する支配パラメータは FP ガス放出である。上記(2)に示されたように、Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の FP ガス放出特性が UO₂ 燃料と同じであるため、Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の FP ガス放出を UO₂ 燃料の燃料棒平均燃焼度及び線出力密度の検証範囲まで外挿できること、Gd₂O₃ 濃度については 10wt%まで検証されていることから、Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の燃料棒内圧を UO₂ 燃料の検証範囲及び Gd₂O₃ 濃度 10wt%まで外挿して評価することができるとしている。

(4) 被覆管直径変化評価パラメータの適用範囲の外挿性について

被覆管直径変化評価に用いられる主要なパラメータのうち、その適用範囲が検証データの範囲を超えているものは、UO₂ 燃料の場合は、ペレット燃焼度及び最大線出力密度である。

一方、Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の場合は、被覆管直径変化の検証データがないことから、CARO-NA コードを Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の被覆管直径変化評価に適用することの妥当性について、被覆管直径変化評価に影響する主要な支配パラメータに基づき検討されている。

UO₂ 燃料の被覆管直径変化に影響する支配パラメータはペレットの熱膨張である。ペレットの熱膨張は、1% 塑性歪相当出力を評価するに当たって十分な燃料温度である 3,000 までの適用性が、測定データによって検証されている。また、ペレットの熱膨張に影響する UO₂ 燃料の燃料中心温度評価はペレット燃焼度 80GWd/t まで検証されている。

以上のことから、UO₂ 燃料の被覆管直径変化を、支配パラメータの検証範囲まで外挿して評価することができるとしている。

Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の被覆管直径変化に影響する支配パラメータはペレットの熱膨張である。Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の熱膨張は、測定データから Gd₂O₃ 濃度 10wt%までの範囲で UO₂ 燃料と有意な差がなく、上記のように 3,000 までの適用性が検証されている UO₂ 燃料と同じ熱膨張モデルを用いることができるとしている。また、上記に示されたように、UO₂ 燃料の熱膨張は 3,000 までの適用性が検証されている。

以上のことから、Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の被覆管直径変化を、UO₂ 燃料と同様に支配パラメ

ータの検証範囲まで外挿して評価することができるとしている。

5.4 評価

CARO-NA コードの適用範囲について、評価結果を以下に示す。

- (1) CARO-NA コードの適用範囲は、燃料設計の仕様範囲を考慮して、モデルの検証範囲及びコードの検証範囲に基づき設定されていることを確認した。
- (2) CARO-NA コードは、国内外の照射試験及び照射後試験で得られた測定データによって検証されており、また、その結果に基づいてコードの予測の不確かさが求められている。これらの検証解析に用いられたデータベースの燃料仕様及び照射条件の範囲は、コードの適用範囲をほぼ包絡していることを確認した。
- (3) CARO-NA コードの評価項目のうち検証データの範囲を超えるものの外挿性について、評価項目に対する支配パラメータの検証範囲等を考慮した原燃工の検討結果は、論理構成及びそれを裏付ける検証データから妥当なものであると判断した。

以上のとおり、CARO-NA コードの適用範囲は、妥当なものと判断する。

6. コードの品質保証計画

6.1 品質保証計画の概要

CARO-NAコードは、QMSのもと、設計開発が行われている。

コードの設計開発に当たっては、QMS文書に基づき、定められた組織体制及びプロセスに従い実施するとともに、定期的な内部監査及び外部機関による監査を実施することで、プロセスの有効性が確認されるとしている。

また、コードの設計開発時に不適合が見いだされた場合は、所定のQMS文書に従い、当該コードの修正を確実にを行うとともに、その不適合が設計解析に影響する場合には、その是正処置及び予防処置を実施するとしている。

さらに、コードの設計開発後においても、コードの継続的な改善を図るため、所定のQMS文書に基づき、当該コードに関連する新知見を常に調査・収集し、コードに反映すべき知見が得られた場合にはコードの変更管理を実施するとしている。

6.2 評価基準

評価の基本方針「 評価の方針 1. 評価の基本方針」の「(7)設計コードの品質保証計画が適切に規定されていること」に基づき、原燃工東海事業所の品質保証活動の評価に際しては、QMSとして、計画、実施、評価及び改善という一連のPlan-Do-Check-Actionサイクルが全体として機能しているか確認を行うとともに、個々のプロセスである「設計コードの開発プロセス」について、実効性ある仕組みが構築され、継続的な改善活動が行われていることを以下の評価基準に基づき確認する。

- (1) トピカルレポートが、品質保証計画の下で継続的に品質が維持されること。
- (2) 品質保証計画において、設計管理、文書管理、入出力データ管理、ソフトウェア管理及びこれらの是正措置が適切に規定されていること。
- (3) 新たな知見が評価され、適切に設計及び設計評価手法に反映される仕組みが構築されていること。

6.3 評価方法

原燃工東海事業所の品質保証活動の評価に当たっては、各評価基準に対し着眼点を設定し、原燃工東海事業所の品質保証に係る規定類等を確認するとともに、その活動状況について説明を求め、これらの結果を精査した上で評価を行う。

6.4 確認結果

原燃工においては、品質保証に関するすべての責任及び権限は社長にあるが、事業個別の製品の品質保証については、各事業の責任者を指名し、責任及び権限を委譲し、品質保証活動を統括及び指揮させている。

CARO-NAコードの設計開発を所管する原燃工東海事業所においては、社長から責任及び権限の委譲を受け、東海事業所長をトップとした品質保証体制を構築し、BWR燃料及びその構成部品に関する設計・開発等に関する品質保証活動を効果的に行うため、国際規格であるISO-9001の認証を取得（平成10年9月）している。

また、原燃工東海事業所においては、

- ・東海事業所長が定めた品質方針に従い、部門ごとに品質目標を定め、定期的に進捗よく状況及び目標達成状況を確認していること。
- ・QMSの適合性を確認するため、あらかじめ定められた間隔で内部監査が実施されるとともに、3年に1回、ISO-9001の認証機関であるロイドの更新審査を受けていること。
- ・QMSの有効性を確認するため、トップマネジメントである東海事業所長が定期的にマネジメントレビューを実施していること。

等を確認した。

以上、原燃工東海事業所のQMSが全体として機能していることの確認を踏まえ、個々のプロセスである「設計コードの開発プロセス」について、3つの評価基準について確認を行った。

(1)「トピカルレポートが、品質保証計画の下で継続的に品質が維持されること」の確認

原燃工東海事業所においては、CARO-NAコードを始め、原燃工東海事業所で開発された設計コードに対し、新たな知見等を反映し継続的に改善するプロセスが構築されているとともに、これらがQMS文書において明確にされており、設計コードの改善等でトピカルレポートの記載内容を変更する必要がある場合には、QMS文書に基づき改訂

等の必要な処置がとられることを確認した。

- (2) 「品質保証計画において、設計管理、文書管理、入出力データ管理、ソフトウェア管理及びこれらの是正措置が適切に規定されること」の確認

原燃工東海事業所においては、設計コードの開発のため、計画、開発、検証及びレビューに至るまでの一連のプロセスが構築されているとともに、これらが効果的に運用されていることを示すための記録がQMS文書において明確にされていることを確認した。

また、設計コードの開発においては、これに従事する職員の教育・訓練及び資格認定についてQMS文書に明確にされており、CARO-NAコードの開発においては、力量が高い設計員を含む複数の設計員で開発されていること、設計コード開発時に要求事項に適合しない不適合事象が発生した場合は、状況が放置されることを防ぐため、識別、分離、処理等の一連のプロセスが、所定のQMS文書に明確にされ、不適合管理のプロセスが構築されていることを確認した。

- (3) 「新たな知見が評価され、設計及び設計評価手法に反映される仕組みが構築されていること」の確認

原燃工東海事業所においては、QMS文書において、設計コードに関する新たな知見を収集するための手法及び設計コードへの反映の要否を検討するための基準及び設計コードへの反映が必要と判断された事象については、設計・開発のプロセスに従い設計コードの変更を行うこと等が明確にされている。

具体的には、新たな知見については、設計コードの開発に携わる設計員が日々の業務及び新たに公開された論文、電力・大学・研究機関等との共同研究等の情報を収集することとし、情報収集によって得られた知見は、「緊急に対応が必要なもの」、「緊急性は無いが継続して検討する必要があるもの」又は「対応が不要なもの」に分類され、分類の適切性は、所定の審議が行われること、「緊急に対応が必要なもの」に分類された知見は、速やかに「設計コード開発のプロセス」に従い設計コードへの反映を行うこと等を確認した。

CARO-NA コードの品質保証計画について、評価基準に対する着目点とそれぞれに対する確認結果を表 IV-7 に示す。

6.5 評価

原燃工東海事業所の品質保証計画について、評価結果を以下に示す。

- (1) トピカルレポートに記載されているコードが、品質保証計画の下で継続的に品質が維持されることを確認した。
- (2) 品質保証計画において、設計管理、文書管理、入出力データ管理、ソフトウェア管理及びこれらの是正措置が適切に規定されていることを確認した。
- (3) 新たな知見が評価され、設計及び設計評価手法に反映される仕組みが構築されていることを確認した。

以上のように、原燃工東海事業所の品質保証計画は評価基準を満たしており、当該事業所における QMS のもと、CARO-NA コード及び当該トピカルレポートが適切に管理されることから、妥当なものと判断する。

表 -7 評価基準に対する着眼点及び確認結果について（原燃工東海事業所（CARO-NAコード）に係る品質保証の確認結果）

評価基準	着眼点	確認結果
QMSが全体として機能しているか	QMSが構築されているか。	<ul style="list-style-type: none"> ・BWR燃料及びその構成部品に関する設計・開発等の品質保証活動について、国際規格であるISO-9001（以下「規格」という）の認証を取得している（平成10年9月）。 ・規格の要求事項を満足するため、品質マニュアルを最上位文書とし、その下位文書として管理標準、技術標準、記録類からなる文書体系を構築している。 ・規格の要求事項を満足するため、社長から責任と権限の委譲を受けた東海事業所長が原燃工東海事業所のQMSのトップマネジメントとなり、BWR燃料の品質保証活動を指揮・統括している。 ・東海事業所長は、QMSの管理責任者として品質保証部長を任命し、東海事業所における各部長が、所掌業務における品質保証の責任を有している。 ・東海事業所長が定めた品質方針に従い、各部門ごとに品質目標を定め、定期的に進捗状況及び目標達成状況が確認される。 ・QMSの適合性を確認するため、あらかじめ定められた間隔で内部監査が実施され、内部監査で指摘された不適合については、適切に是正処置がとられる。 ・3年に1回、規格の認証機関であるロイドの更新審査を受けている。 ・QMSの有効性を確認するため、トップマネジメントである東海事業所長が定期的にマネジメントレビューを実施している。 ・マネジメントレビューにおいて、監査の結果等がインプットされ、マネジメントレビューを通して、QMSの構築状況又は運営状況を把握し、継続的改善が図られる。
	品質保証体制が確立しているか。	
	内部監査等によりQMSの確認がなされ、その結果が継続的な改善に活かされているか。	
(1)トピカルレポートが、品質保証計画の下で継続的に品質が維持されること。	トピカルレポートについて、継続的に改善がなされる仕組みが構築されているか。	<ul style="list-style-type: none"> ・設計コードは、継続的に改善がなされることが管理標準で定められており、設計コードの改善等でトピカルレポートの記載内容に変更がある場合には改訂等の必要な処置がとられる。 ・解析で使用する計算モデルをトピカルレポート記載のモデルから変更する場合又はコードの適用範囲を変更する場合等、トピカルレポートの記載内容に変更がある場合には、所定の管理標準に従い変更される。
	トピカルレポートの変更について適切に管理されているか。	
(2)品質保証計画において、設計管理、文書管理、入出力データ管理、ソフトウェア管理及びこれらの是正措置が適切に規定されていること。	設計コードの開発のため、計画、開発、検証、レビューに至るまでの一連のプロセスが構築されているか。	<ul style="list-style-type: none"> ・設計コードの開発のため、計画、開発、検証、レビューに至るまでの一連のプロセスが構築され、また、これらが効果的に運用されていることを示すための記録が管理標準において明確にされている。 ・具体的には、設計コード開発のプロセスは、「計画」、「設計・開発」、「検証」、「妥当性確認」、「コードの登録管理」、「トピカルレポートの発行」、「新知見等の情報収集」及び「コード変更要否検討」として構築されている。 ・設計コードの開発に従事する職員の教育・訓練及び資格認定は、管理標準にて定められており、これに従事する職員は、資格認定が課せられている。 ・設計コードの開発に従事する職員は、所定の教育を受け、業務に必要な知識等を習熟していると設計部門長が判断した場合は、設計員として認定される。 ・設計員の資格は、レベル1から3までの3段階に分類され、CARO-NAコードの開発では、力量が高いレベル3の設計員を含む複数の設計員により開発が行われている。 ・CARO-NAコードの開発においては、外部委託等の調達はないが、調達のプロセスとして、調達先については、過去の実績又は品質調査等を基に選定・認定され、調達に際しては、購買文書（購入仕様書、発注仕様書等）に要求事項を明確する等、管理標準に一連のプロセスが明確にされる。 ・設計コードの開発の過程で作成された文書・記録等は、所定の管理標準に従い審議を経た後、審査・承認される。 ・具体的には、「計画」のプロセスにおいては、計画を記載した所定の文書を作成し、その内容については、所定の審議を経て審査・承認される。 ・設計・開発が完了したコードは、バージョン番号が付され登録され、登録した旨が関係者に周知徹底される。また、登録した設計コードを実行すると出力ファイル中にどのバージョンが実行されたか記録されるため、誤って古いバージョンの設計コードを使用していないことを確認できる。 ・要求事項に適合しない不適合事象が発生した場合は、その状況が放置されることを防ぐため、識別、分離、処理等の一連のプロセスが、所定の管理標準に明確にされており、不適合管理のプロセスが構築されている。 ・東海事業所の全職員を対象とした不適合事例の紹介等を実施し、不適合の発生防止に努めている。 ・設計コードの開発等で発見された不適合については、所定の管理標準に従い、所定の文書を発行し、原因を究明し、是正処置を立案し処置される。その上で、是正処置結果、効果についての確認が行われ、一連の活動については記録される。 ・潜在的な不適合（予想される不適合）については、各職員の気付き事項、関連する不適合事例等の情報源から、起こり得る不適合を防止するための予防処置が取られる。
	設計コードの開発に携わる職員の力量は、適切に管理されているか、また、力量基準等は、明確にされているか。	
	設計コードの開発において、外部委託等の調達がある場合は、構築された調達プロセスに従い、調達要求事項を満たすための一連の活動（調達仕様書の作成、調達製品の検証等）が適切に実施されているか。	
	設計コードの開発において発行された文書類については、適切に管理されているか。	
	設計コードは、適切に登録管理され、誤って古いバージョンの設計コードを使用することなどが無いよう管理されているか。	
	設計コードの開発において発生した不適合は、適切に処理されるか。	
	設計コードの開発において発生した不適合は、適切に処理されるか。	
(3)新たな知見が評価され、設計及び設計評価手法に反映される仕組みが構築されていること。	新たな知見を収集、評価、反映する仕組みが構築されているか。	<ul style="list-style-type: none"> ・管理標準において、新たな知見を収集するための手法、得られた情報について設計コードへの反映の要否を検討するための基準が明確にされている。また、評価手法、設計コードへの反映が要と判断された事象については、設計・開発のプロセスに従い設計コードの変更を行うことが明確にされている。 ・新たな知見については、設計コードの開発に携わる設計員が日々の業務又は新たに公開された論文、電力・大学・研究機関等との共同研究等の情報を継続的に収集することとしている。 ・情報収集によって得られた知見は、「緊急に対応が必要なもの」、「緊急性は無いが継続して検討する必要があるもの」及び「対応が不要なもの」に分類され、また、その分類の適切性について所定の審議が行われる。 ・「緊急に対応が必要なもの」に分類された知見は、速やかに「設計コード開発のプロセス」に従い設計コードへの反映が行われる。 ・技術検討会では、「緊急性は無いが継続して検討する必要があるもの」に対する検討の実施状況、新たな知見に対する情報収集状況についても審議が行われる。
	新たな知見を収集するための手法が明確か。	
	収集された知見について、評価基準、評価手法が明確か。また、評価結果は、記録として維持されているか。	

7. 評価のまとめ

原燃工から提出されたトピカルレポート「燃料棒熱機械設計コード CARO-NA について（平成 20 年 12 月 24 日付提出、平成 22 年 月 日付改訂）」に基づき、燃料棒熱機械設計コード CARO-NA に関する熱的挙動解析モデル、機械的挙動解析モデル、物性値、照射挙動モデル、検証結果、コード予測の不確かさ、適用範囲及び品質保証計画について評価した結果を以下に示す。

- (1) CARO-NA コードでは、燃料棒に発生する諸現象は、実験データ、照射試験データ等に基づきモデル化され、各モデルの妥当性及び適用範囲内での適用性が示されていることを確認した。
- (2) CARO-NA コードでは、燃料棒に発生する諸現象のモデル化、形状のモデル化、熱的挙動のモデル化、機械的挙動のモデル化及び諸現象の相互作用のモデル化が適切になされていることを確認した。
- (3) CARO-NA コードが、燃料棒の照射挙動をコードの適用範囲内で適切に予測できることを、コードの検証結果によって確認した。
- (4) CARO-NA コードの改訂モデルが、測定データ等に基づき適切にモデル化されていることを確認し、改訂モデルの妥当性及び適用範囲内での適用性を、測定データ及び検証結果によって確認した。
- (5) CARO-NA コードの HiFi 被覆管への適用性については、解析コードで取り扱う HiFi 被覆管の熱的・機械的特性がジルカロイ - 2 と同等であることを、測定データ又は文献データによって確認し、HiFi 被覆管への適用が妥当であると判断した。
- (6) CARO-NA コードでは、検証結果に基づくコードの予測の不確かさが適切に求められていることを確認した。
- (7) CARO-NA コードの適用範囲は、モデルの検証範囲及びコードの検証範囲に基づき適切に設定されていることを確認した。
- (8) 原燃工東海事業所における QMS の下、CARO-NA コード及び当該トピカルレポートが適切に管理されるものと判断した。

以上のとおり、当該申請のトピカルレポート「燃料棒熱機械設計コード CARO-NA について」を評価した結果、BWR 燃料の燃料棒熱機械特性の評価に関し、トピカルレポートに記載された

適用範囲内で解析対象項目（それぞれ本報告書表 -5 及び表 -6 参照）について CARO-NA コードを適用することは妥当なものと判断する。

なお、今後の設置（変更）許可申請において当該トピカルレポートが参照された場合においては、当該トピカルレポートに示された解析コードの予測の不確かさが燃料棒の熱機械解析に適切に取入られていることを確認する必要がある。

また、原燃工においては、新設計の燃料（HiFi 被覆管の採用、10 行 10 列型燃料）を含め燃料の使用経験、試験・研究等により、多くの知見が蓄積されるが、これらについては品質保証計画に基づき、必要に応じ当該トピカルレポートに適宜反映されるべきものである。この点についても、個別の安全審査において、今回の評価以降において得られた知見が、必要に応じ適宜当該トピカルレポートに反映されていることについて確認する必要がある。

本評価は、CARO-NA コードを当該トピカルレポートに記載された適用範囲内で解析対象項目の評価に用いることについて評価を行ったものであり、燃料棒の材料特性及び中性子照射特性のうち燃料棒熱機械設計コードでモデル化がなされていない項目（例えば、被覆管の腐食・水素吸収、水素吸収に伴う機械特性の変化ほか）、燃料棒の機械設計の手法等は対象としておらず、これらについては個別の安全審査において確認する必要がある。

評価経過

原燃工の燃料設計(機械設計)トピカルレポートに関し、同社が提出したトピカルレポート「燃料棒熱機械設計コード CARO-NA について(平成 20 年 12 月 24 日付提出、平成 22 年 月 日付改訂)」に基づき、燃料棒熱機械設計コード CARO-NA に関する熱的挙動解析モデル、機械的挙動解析モデル、物性値、照射挙動モデル、検証結果、コードの予測の不確かさ、適用範囲及び品質保証計画について評価した。

評価の過程においては、原燃工に対するヒアリングを実施し、検討状況及び評価結果について、経済産業省 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 原子炉安全小委員会に設置された燃料ワーキンググループ(燃料トピカルレポート)の審議を経るとともに、その過程においては、意見公募を実施した。

燃料ワーキンググループ(燃料トピカルレポート)の委員構成は次のとおりである。

平成 22 年 3 月 17 日現在

主査 所属

寺井 隆幸 国立大学法人東京大学大学院 教授

委員 所属

出光 一哉 国立大学法人九州大学大学院 教授

小無 健司 国立大学法人東北大学 准教授

古田 照夫 財団法人原子力安全研究協会 研究参与

前田 誠一郎 独立行政法人日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター プルトニウム
燃料技術開発センター 燃料技術部 設計解析課長

(敬称略、五十音順)

(参考) 検討経緯

トピカルレポートの提出（平成 20 年 12 月 24 日）

原子炉安全小委員会（第 23 回）（平成 21 年 1 月 27 日）

- ・原子炉安全小委員会燃料ワーキンググループ（燃料トピカルレポート）の設置

第 1 回会合（平成 21 年 6 月 26 日）

- ・トピカルレポート技術評価
- ・BWR 燃料棒熱・機械設計コードの技術評価

第 2 回会合（平成 21 年 9 月 4 日）

- ・BWR 燃料棒熱・機械設計コードの技術評価

第 3 回会合（平成 21 年 11 月 2 日）

- ・BWR 燃料棒熱・機械設計コードの技術評価

第 4 回会合（平成 22 年 1 月 13 日）

- ・コメント回答
- ・BWR 燃料棒熱・機械設計コードに係る品質保証計画

第 5 回会合（平成 22 年 3 月 17 日）

- ・コメント回答
- ・トピカルレポートの改訂（案）
- ・トピカルレポート 燃料棒熱・機械設計コード評価報告書（案）

トピカルレポート改訂版の提出（平成 22 年 4 月 21 日）

意見公募（平成 22 年 月 日から 月 日）

- ・御意見 件

参考文献

- (1) 「沸騰水型軽水炉用燃料の設計手法について」、原子燃料工業株式会社、N L R - 1 4、昭和 62 年 12 月。
- (2) 「BWR 燃料の熱機械設計」、原子燃料工業株式会社、N L R - 1 1、昭和 62 年 12 月。
- (3) A. M. Ross, and R. L. Stoute, “Heat Transfer Coefficient between UO₂ and Zircaloy-2”, CRFD-1015, AECL-1552, (1962).
- (4) 独立行政法人 原子力安全基盤機構、“平成 18 年度 高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証成果報告書 付録 2 (9×9B 型燃料照射後試験結果)”, 07 基炉報-0002 付録 2, 平成 19 年 12 月。
- (5) 独立行政法人 原子力安全基盤機構、“平成 18 年度 高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証成果報告書 (総合評価編)”, 07 基炉報-0002, 平成 19 年 12 月。
- (6) 独立行政法人 原子力安全基盤機構、“平成 17 年度 高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証成果報告書”, 06 基炉報-003, 平成 18 年 7 月。
- (7) 独立行政法人 原子力安全基盤機構、“平成 16 年度 高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証成果報告書”, 05 基炉報-003, 平成 17 年 7 月。
- (8) 財団法人 原子力発電技術機構、“平成 13 年度 高燃焼度等燃料安全試験に関する報告書(BWR 高燃焼度燃料 総合評価編)”, 平成 14 年 3 月。
- (9) A. L. Loeb, “Thermal Conductivity: VIII, A Theory of Thermal Conductivity of Porous Materials”, J. Amer. Ceram. Soc., 38-2, pp.96-99, (1954).
- (10) J. A. Christensen et al., “Melting Point of Irradiated Uranium Dioxide”, Trans. Amer. Nucl. Soc., 7, pp.390-391, (1964).
- (11) S. Yamanouchi et al., “Melting Temperature and Thermal Conductivity of Irradiated UO₂ and UO₂-2wt%Gd₂O₃ Fuel Pellets up to Burnup of about 30GWd/t”, J. Nucl. Sci. Technol., 25, 6, pp.528-533, (1988).
- (12) 原田他、“高燃焼度燃料ペレット融点測定装置の開発”, JAERI-Tech 2000-031, (2000).
- (13) J. B. Conway et al., “The Thermal Expansion and Heat Capacity of UO₂ to 2,200 °C”, Trans. Amer. Nucl. Soc., 6, 1, pp.153, (1963).
- (14) M. J. F. Notley et al., “Zircaloy Sheathed UO₂ Fuel Elements Irradiated at Values of $\int kd\theta$ Between 40 and 83 W/cm”, AECL-1676, (1962).
- (15) M. Hoch and A. C. Momin, “High Temperature Thermal Expansion of UO₂ and ThO₂”,

- High Temp. – High Press., 1,4, pp.401-407, (1969).
- (16) MATPRO-09, “A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior”, USNRC TREE NUREG-1005, (1976).
- (17) K. Ohira et al., “Recent Experience and Development of BWR Fuel at NFI”, 2005 Water Reactor Fuel performance Meeting, Kyoto, Oct. 2, 2005.
- (18) 軽水炉燃料解析コード FEMAXI-6 (Ver.1) 詳細構造とユーザーズマニュアル、JAERI-Data/Code 2003-19, (2003).
- (19) A. D. Feith, “Thermal Conductivity of Several Ceramic Materials to 2500 °C”, GE-TM-64-10-4, (1964).
- (20) J. L. Bates, “High Temperature Thermal Conductivity of ‘Round Robin’ Uranium Dioxide”, BNWL-1431, (1970).
- (21) M. F. Lyons et al., DOCKET-50331, pp.3.2-11, (1967).
- (22) L. A. Goldsmith et al., “Measurements of the Thermal Conductivity of Uranium Dioxide at 670-1270K”, J. Nucl. Mater., 38, pp.31-42, (1973).
- (23) I. C. Hobson et al., “Effect of Porosity and Stoichiometry on the Thermal Conductivity of Uranium Dioxide”, J. Phys. Sec. D: Appl. Phys., 7, pp. 1003-1015, (1974).
- (24) K. Ohira et al., “Thermal Conductivity Measurement of High Burnup UO₂ Fuel Pellet and a Benchmark Calculation of Fuel Center Temperature”, ANS International Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance, p.541, Portland, USA, (1997).
- (25) K. Minato et al., “Thermal Conductivities of Irradiated UO₂ and (U,Gd)O₂”, J. Nucl. Mater., 288, pp.57-65, (2001).
- (26) M. Amaya et al., “Thermal Conductivities of Irradiated UO₂ and (U,Gd)O₂ Pellets”, J. Nucl. Mater., 300, pp.57-64, (2002).
- (27) M. Hirai et al., “Thermal Diffusivities and Thermal Conductivities of UO₂-Gd₂O₃”, J. Nucl. Sci. Technol., 28, No.11, pp.995-1000, (1991).
- (28) H. Hausner, “Determination of the Melting Point of Uranium Dioxide”, J. Nucl. Mater., 15, 3, pp.179-183, (1965).
- (29) W. L. Lyon et al., “The Solid-Liquid Phase Diagram of the UO₂-PuO₂ System”, J. Nucl. Mater., 22, pp.332-339, (1967).
- (30) E. A. Aitken et al., “A Thermodynamic Data Program Involving Plutonium and Urania

at High Temperature”, GEAP-5672, (1968).

- (31) A. Padel et al., “Constants Elastiques des Carbures, Nitures et Oxydes d’Uranium et de Plutonium”, J. Nucl. Mater., 33, pp.40-51, (1969).
- (32) A. R. Hall, “Elastic Moduli and Internal Friction of Some Uranium Ceramics”, J. Nucl. Mater., 37, pp.314-323, (1970).
- (33) J. Belle et al., “Properties of Uranium Dioxide”, Fuel Element Conference, Paris, France, Nov. 18-23, 1957, TID-7546, pp.480-481, (1958).
- (34) T. Tachibana et al., “Dependence on Strain Rate and Temperature Shown by Yield Stress of Uranium Dioxide”, J. Nucl. Sci. Technol., 13, pp.497-502, (1976).
- (35) J. A. Christensen et al., “Thermal Expansion and Change in Volume of Uranium Dioxide on Melting”, J. Amer. Ceram. Soc., 46, 12, pp.607-608, (1963).
- (36) M. T. Hutchings, “High-Temperature Studies of UO₂ and ThO₂ using Neutron Scattering Techniques”, J. Chem. Soc. Faraday Trans. II, 83, pp.1083-1103, (1987).
- (37) M. J. F. Notley, W. D. C. Fitzsimmons, “The Irradiation of Hydraulic Rabbit Specimens to Study Sheath Deformation”, AECL-1664, (1962).
- (38) R. D. Macdonald, A. S. Bain, “Irradiation of Zircaloy-2 Clad UO₂ to Study Sheath Deformation”, AECL-1685, (1962).
- (39) M. J. F. Notley, “The Thermal Conductivity of Columnar Grains in Irradiated UO₂ Fuel Elements”, AECL-1822, (1963).
- (40) M. J. F. Notley et al., “The Effect of Uranium Dioxide Density on Fission Product Gas Release and Sheath Expansion”, AECL-2230, (1965).
- (41) A. S. Bain, “Irradiation of UO₂ Specimens with Molten Cores in a Pressurized Water Loop Test X-2-x”, AECL-1464, (1961).
- (42) T. Wada et al., “Behavior of UO₂ – Gd₂O₃ Fuel”, Nuclear Fuel Performance, British Nuclear Energy Society Conference, London England, Oct. 1973.
- (43) R. Manzel et al., “High Burnup Fuel Microstructure and Its Effect on Fuel Rod Performance”, ANS International Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance, Park City, Utah, (2000).
- (44) J. Kamimura et al., “High Burnup Fuel (Pellet Burnup 80GWd/t) Behavior – Fission Gas Release, Pellet Swelling, Micro-Structure –”, ENS Topfuel 2006, Salamanca, Spain,

2006.

- (45) N. Ikatsu et al., "Influence of RIM Effect on Fuel Center Temperature", IAEA Technical Committee Meeting on Fuel Chemistry and Pellet-Clad Interaction Related to High Burnup Fuel", Nykoping, Sweden, 1998.
- (46) M. E. Cunningham et al., "Development and Characteristics of the Rim Region in High Burnup UO₂ Fuel Pellets", J. Nucl. Mater., 188, pp.19-27, (1992).
- (47) K. Lassmann et al., "Modeling the High Burnup Fuel UO₂ Structure in LWR Fuel", J. Nucl. Mater., 226, pp.1-8, (1995).
- (48) J. N. Chirigos et al., "Development of Zircaloy-4" , Fuel Element Fabrication, New York Academic Press, pp.19-55, (1961).
- (49) A. D. Feith, "Thermal Conductivity and Electrical Resistivity of Zircaloy-4", GEAP-669, (1966).
- (50) B. Scott, "Physical and Mechanical Properties of Zircaloy 2 and 4", WCAP-3269-41, pp.5-9, (1965).
- (51) W. K. Anderson et al., "Zirconium Alloys", Reactor Structural Materials: Engineering Properties as Affected by Nuclear Reactor Service, ASTM STP-314, pp.62-93, (1962).
- (52) C. F. Lucks et al., "Progress Relating to Civilian Applications During June 1958: Thermal Conductivity of Uranium and UO₂", USAEC Report BMI-1273, pp.1-62, (1958).
- (53) A. E. Powers, "Application of the Ewing Equation for Calculating Thermal Conductivity from Electrical Conductivity", USAEC KAPL-2146, (1961).
- (54) E. S. Fisher et al., "Single-Crystal Elastic Moduli and the hcp-bcc Transformation in Ti, Zr, and Hf", Phy. Rev., pp. A482-494, (1964).
- (55) H. E. Rosinger et al., "The Elastic Properties of Zirconium Alloy Fuel Cladding and Pressure Tubing Materials", J. Nucl. Mater., 79, 1, pp.170-179, (1979).
- (56) T. Fujibayashi et al., "Proving Test on the Reliability for BWR 8x8 Fuel Assemblies in Japan", IAEA Specialists' Meeting on Post Irradiation Examination and Experience, Tokyo, Japan, (1984).
- (57) F. H. Megerth, "Zirconium-Clad UO₂ Fuel Rod Evaluation Program", GEAP-10079, (1969).
- (58) J. J. Kearns, "Thermal Expansion and Preferred Orientation in Zircaloy",

WAPD-TM-472, (1965).

- (59) R. L. Mehan et al., "Mechanical Properties of Zircaloy-2", KAPL-2110, (1961).
- (60) 日本機械学会編、「ジルコニウム合金ハンドブック」、日刊工業新聞社、1997年
- (61) F.Sontheimer et al., "A fuel thermal conductivity correlation based on the latest experimental results", Proceedings of the Technical Committee Meeting, Nykoping, Sweden, 169-176 (1998)
- (62) Y.Kosaka et al., "Thermal Properties and Irradiation Behavior of Gd Fuel", Proceedings of the Technical Committee meeting, Tokyo, Japan, 219-230 (1996)
- (63) K.Goto et al., "Update on the Development of Japanese Advanced PWR Fuels", Proceedings of the International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Park City, Utah, USA, (2000)
- (64) MATPRO – VERSION 11 A HANDBOOK OF MATERIALS PROPERTIES FOR USE IN THE ANALYSIS OF LIGHT WATER REACTOR FUEL ROD BEHAVIOR, NUREG/CR-0497, TREE-1280, 1979
- (65) M.Peehs et al., "Zur Wärmeleitfähigkeit und Plastizität von UO₂ mit Gd-Zusätzen", Journal of Nuclear Materials, 106 (1982) 221-230
- (66) FEMAXI- - 軸対称有限要素法による燃料ふるまいコード, JAERI-M 9251 (1981)
- (67) G. Senski, A. Kunick, "A Phenomenological Thermal and Irradiation Creep Model for Zircaloy", 5th SMiRT Conf., Berlin (1979), paper C3/3