

トピカルレポート
燃料棒熱・機械設計コード PRIME03
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 . 改良ペレット及び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	10
1 . 評価の基本方針	10
2 . 評価の方法	10
評価	12
1 . コードの解析モデル	13
1.1 熱的解析モデル	13
1.2 機械的解析モデル	15
1.3 燃料の物性値及び照射挙動モデル	20
1.4 被覆管の物性値及び照射挙動モデル	23
1.5 評価	24
2 . 従来コードからの改訂モデル	26
2.1 ペレット融点	26
2.2 ペレット熱伝導率	27
2.3 ペレットリム組織形成	28
2.4 FP ガス放出	28
2.5 リロケーション	29

2.6	ペレットクリープ	30
2.7	評価	31
3	改良ペレットへの適用	32
3.1	Al-Si-O 添加ペレットの概要	32
3.2	Al-Si-O 添加ペレットの物性モデル.....	32
3.3	評価.....	40
4	改良被覆管への適用	41
4.1	GNF-Ziron 被覆管の概要	41
4.2	GNF-Ziron 被覆管の物性モデル.....	41
4.3	評価.....	47
5	コードの検証.....	48
5.1	検証データ	48
5.2	コードの調整	51
5.3	検証結果	53
5.4	コードの予測の不確かさ	56
5.5	評価.....	56
6	コードの適用範囲.....	58
6.1	適用範囲	58
6.2	検証範囲	61
6.3	適用範囲の検討.....	61
6.4	評価.....	65
7	コードの品質保証計画	66
7.1	品質保証計画の概要.....	66
7.2	評価基準	66
7.3	評価方法	67
7.4	確認結果	67
7.5	評価.....	68
8	評価のまとめ.....	71
	評価経過	73

参考文献	75
------------	----

添付 1 PRIME03 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 PRIME03 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。）の協力を得て技術的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、当該制度に基づき株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン（以下「GNF-J」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 PRIME03 について（平成 21 年 1 月 28 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

PRIME03 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 PRIME01 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

PRIME03 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、燃焼期間に亘り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 燃料の原子炉設置（変更）許可申請書（以下「設置（変更）許可申請書」という。）における燃料棒熱・機械設計評価に適用可能としている。PRIME03 コードの計算のフローと解析評価内容を図 -1 に示す。

対象とする燃料は、 UO_2 燃料、 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料（以下、両者を合わせて「無添加ペレット」という。）及び改良ペレット（アルミナシリケートを添加。以下「Al-Si-O 添加」という。）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「GNF-Ziron 被覆管」という。）である。

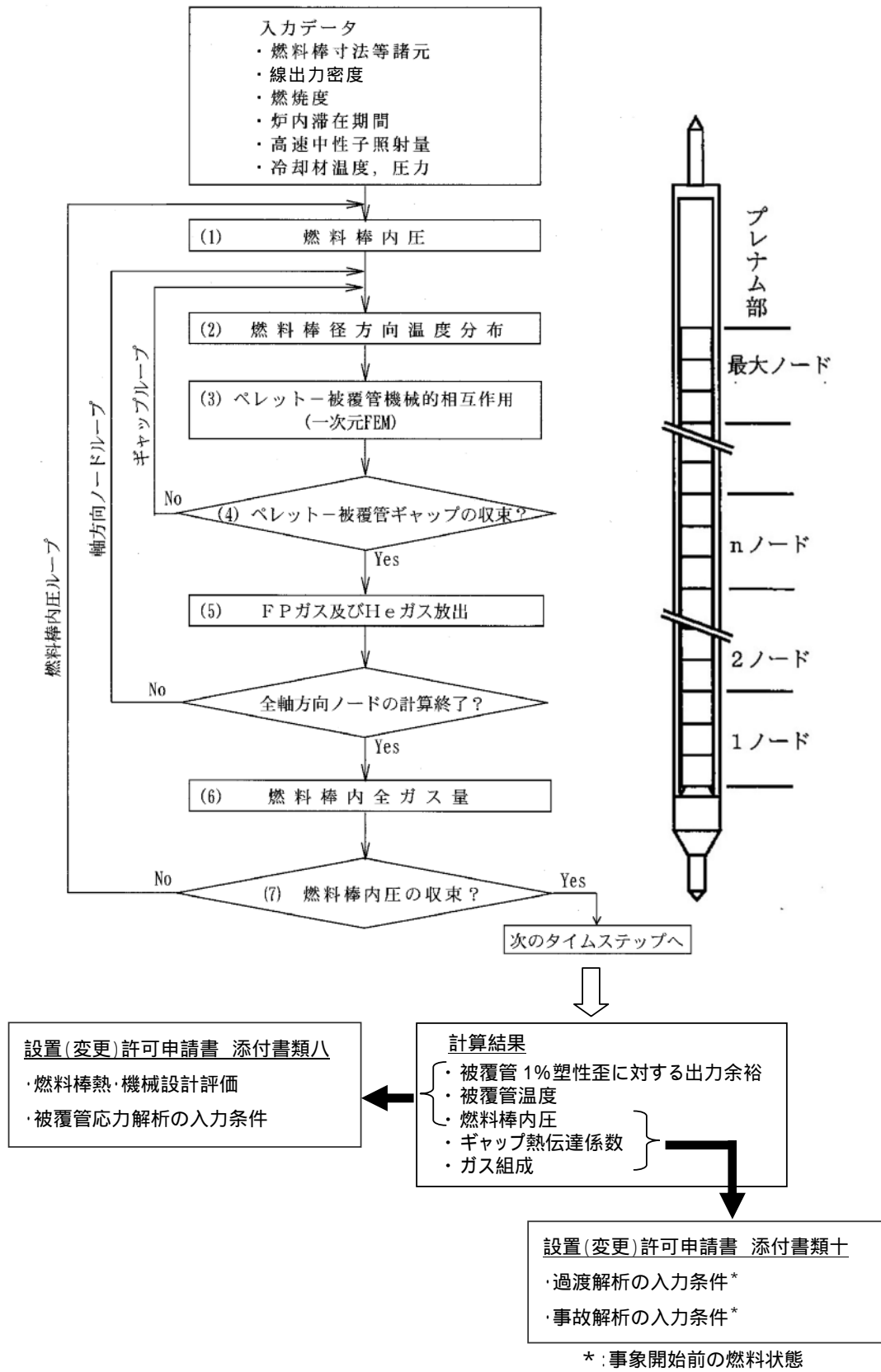


図 -1 PRIME03 コードの計算フロー及び評価内容並びに適用対象

2 . コードの構成及び計算手順

PRIME03 コードの構成及び計算手順の概略を図 2-2 に示す。PRIME03 コードは、大きく熱的解析モデル及び機械的解析モデルで構成されている。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、気体状核分裂生成物(以下「FP ガス」という。)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、燃料棒全長を対象として、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。両モデルは、ペレット - 被覆管ギャップ幅の収束計算を介して、連成問題として取り扱われる。

まず、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、出力履歴に沿ってタイムステップごとに燃料棒径方向温度分布が計算される。次に、機械的解析モデルでは、この燃料棒径方向温度分布を用いて、軸対称一次元有限要素法により、各ノードのペレット及び被覆管の変形が計算され、ギャップ幅又は接触力が求められる。この機械的解析モデルによる結果は、熱的解析モデルにおけるギャップ熱伝達にフィードバックされ、燃料棒径方向温度分布が収束するまで繰り返される(ギャップループ)。

上記の熱的及び機械的解析モデルによる計算は、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る。

ギャップ熱伝達モデルを介しての熱的フィードバック計算は、燃料棒内圧が収束するまで繰り返し行われる(燃料棒内圧ループ)。

以上の計算が終了すると次のタイムステップへと進む。

3．解析モデルの改訂

PRIME03 コードでは、最近の高燃焼度照射試験データ等から得られた最新知見が反映され、表 -1 に示すモデルが従来コードから改訂されている。

4．改良ペレット及び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。GNF-J の 10×10 燃料では、表 -2 に示す Al-Si-O 添加 UO₂ 燃料、Al-Si-O 添加 Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料を材料としたペレット（以下、両者を合わせて「Al-Si-O 添加ペレット」という。）及び GNF-Ziron 被覆管の採用が予定されており、PRIME03 コードはモデルの改訂等により、従来燃料に加え改良ペレット燃料と GNF-Ziron 被覆管に適用できるとしている。

5．コードの適用対象

PRIME03 コードでは、コードを改訂したことに伴い、PRIME03 コードの適用対象となる燃料及び被覆管は表 -3 のとおりとしている。

PRIME03 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。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、ギャップ熱伝達係数及び 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

PRIME03 コードの適用範囲は、表 -4 のとおりとしている。

7．コードの品質保証計画

PRIME03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。

表 -1 PRIME03 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
ペレット融点	<ul style="list-style-type: none"> ・UO₂ 燃料 ・Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料 ・Al-Si-O 添加 UO₂ 燃料 ・Al-Si-O 添加 Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料 	燃焼度依存性の見直し	最新知見に基づくモデルの見直し
ペレット熱伝導率		燃焼に伴うペレット熱伝導率の低下を考慮	最新知見に基づくモデルの見直し
ペレットリム組織形成		リム組織形成に伴う熱伝導率と体積増加への影響を考慮	最新知見に基づくモデルの追加
FP ガス放出		燃焼度効果の見直しと粒径効果の追加	高燃焼度データ拡充に基づくモデルの見直し
リロケーション		リロケーション量の見直し	ペレット熱伝導率の改訂に伴うモデルの調整
ペレットクリープ		<ul style="list-style-type: none"> ・Al-Si-O 添加 UO₂ 燃料 ・Al-Si-O 添加 Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料 	Al-Si-O 添加効果項を追加

表 -2 PRIME03 コードで新たに取り扱う改良ペレット及び改良被覆管

対象	新設計の採用	採用の目的
改良ペレット	<ul style="list-style-type: none"> ・Al-Si-O 添加 UO₂ 燃料 ・Al-Si-O 添加 Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料 	耐 PCI 特性の向上及び FP ガス放出の抑制
改良被覆管	GNF-Ziron	耐食性・耐水素吸収特性の改善

表 -3 PRIME03 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	無添加ペレット
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料	
	Al-Si-O 添加 UO ₂ 燃料	改良ペレット (Al-Si-O 添加ペレット)
	Al-Si-O 添加 Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料	
被覆管	ジルカロイ - 2 被覆管	
	GNF-Ziron 被覆管	改良被覆管

表 -4 PRIME03 コードの適用範囲

仕 様	適用範囲
被覆管外径 (mm)	9.0 - 13.0
被覆管肉厚 (mm)	0.50 - 0.95
ペレット外径 (mm)	8.0 - 11.0
ペレット - 被覆管ギャップ幅 (mm) (被覆管内径 - ペレット外径)	0.13 - 0.25
ペレット密度 (%TD (理論密度))	93.0 - 98.0
初期 He 封入圧 (MPa[abs])	0.1 - 1.1
ペレット燃焼度 (GWd/t)	80
燃料棒平均燃焼度 (GWd/t)	73
線出力密度 (kW/m) 通常運転時 異常な過渡変化時	60 100
ペレット材	UO ₂ 、Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 焼結体 (Al-Si-O 添加を含む)
U-235 濃縮度 (wt%)	8
Gd ₂ O ₃ 濃度 (wt%)	10
Al-Si-O 添加量 (ppm)	250 ~ 2,500
被覆材	ジルカロイ-2、GNF-Ziron (ジルコニウム内張を含む) 再結晶化焼鈍材

評価の方針

1．評価の基本方針

トピカルレポート「GNF-J 燃料棒熱・機械設計コード PRIME03」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則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) 燃料及び被覆管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) 燃料棒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) 設計コードの改良ペレット又は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、GNF-J 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、GNF-J 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（改良ペレット及び改良被覆管）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てい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、GNF-J 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) PRIME03 コードの適用範囲の妥当性に関する説明
- (2) PRIME03 コードの改良ペレットへの適用性に関する説明
- (3) PRIME03 コードの改良被覆管への適用性に関する説明
- (4) PRIME03 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
- (5) 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
- (6) PRIME03 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
- (7) 機械的解析モデルにおける径方向及び軸方向の相互作用に関する説明
- (8) ペレット熱伝導率モデルにおける照射欠陥の生成・回復に関する説明
- (9) PRIME03 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

PRIME03 コードでは、熱的解析モデル及び機械的解析モデルの間で、ペレット - 被覆管ギャップ幅の収束計算を介して連成問題として取り扱われている。熱的解析モデルの燃料棒径方向温度分布の結果を用いて機械的解析モデルでペレット及び被覆管の変形が計算され、ここで計算されたペレット - 被覆管のギャップ幅又は接触力が熱的解析モデルにフィードバックされる。

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。また、熱的解析モデルでは、機械的解析モデルで求められたペレット - 被覆管のギャップ幅又は接触力が用いられる。熱的解析モデルにおける計算の流れを図 -1 に示す。

(1) 計算体系

熱的解析モデルでは、燃料有効長が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は、燃料ペレットが径方向に円筒状リングに分割される。PRIME03 コードにおけるノード分割モデル及び燃料棒径方向温度分布計算の概要を図 -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係数により計算される。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。ギャップ熱伝達係数は、燃料棒内に蓄積したガス（ギャップガス）の熱伝導率及びペレット - 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率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求まると、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係数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ペレット - 被覆管ギャップ幅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求まると、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係数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ガス放出量が求められる。この繰り返し計算は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係数モデル

ペレット及び被覆管のギャップ熱伝達係数は、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。

$$h_g = h_s + h_f + h_r$$

ここで、 h_g ：ペレット - 被覆管ギャップ熱伝達係数

h_s ：固体接触による熱伝達成分

h_f ：ギャップガスによる熱伝達成分

h_r ：輻射による熱伝達成分

ギャップガスによる熱伝達成分 h_f は、ギャップ内の混合ガスの熱伝導率及びペレット - 被覆管のギャップ幅に依存したモデルであり、固体接触による熱伝達成分 h_s は、ペレット及び被覆管の接触力又は表面粗さに依存したモデルであるとしている。

PRIME03コードでは、ギャップ熱伝達係数の計算に用いられるペレット - 被覆管のギャップ幅又は接触力は後述の1.2項に示す機械的解析モデルによって計算される。

(4) FPガス放出モデル

PRIME03 コードの FP ガス放出モデルの概略は、後述の 2.4 項に示す。

(5) 燃料棒内圧計算

燃料棒内圧は、燃料棒内の空間体積及び空間内のガス原子モル数から理想気体の状態方程式に基づき計算される。

燃料棒内の空間体積としては、ペレット - 被覆管ギャップ部、ペレットの径方向・断面方向割れ部、ペレットディッシュ部、プレナム部、ペレットチャンファ等による空間体積が考慮される。

1.2 機械的解析モデル

機械的解析モデルでは、燃料棒全長を対象として、ペレット及び被覆管の機械的相互作用（以下「PCMI」という。）といった機械的挙動が軸対称次元有限要素法により計算される。機械的解析モデルでは、熱的解析モデルで求められた燃料棒径方向温度分布の結果が用いられる。

(1) 計算体系

機械的解析モデルでは、燃料有効長が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ペレット及び被覆管が径方向に円筒状リング要素に分割される。PRIME03 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 1-3 に示す。

(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燃料棒全長を対象として、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解いている。

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。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、ホットプレス及び照射成長によるものが考慮される。ペレットのクラックは、クラックの状態（開／閉）に応じて剛性マトリックスを変えることにより近似的に扱われている。

各要素の剛性方程式は増分形で求められ、軸方向の各ノードの剛性方程式に組み込まれる。各ノードの剛性方程式は、軸方向の機械的相互作用を考慮した外力条件及び境界条件を用いて組み立てられており、この剛性方程式に基づき各ノードにおける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収束判定条件が満足されるまで行われる。

なお、機械的解析モデルでは、径方向及び軸方向の相互作用が考慮されている。径方向の相互作用は、ギャップが開いている場合は無視できるほど小さな剛性を、ギャップが閉じている場合は非常に大きな剛性を持ったギャップ要素を用いて模擬されている。

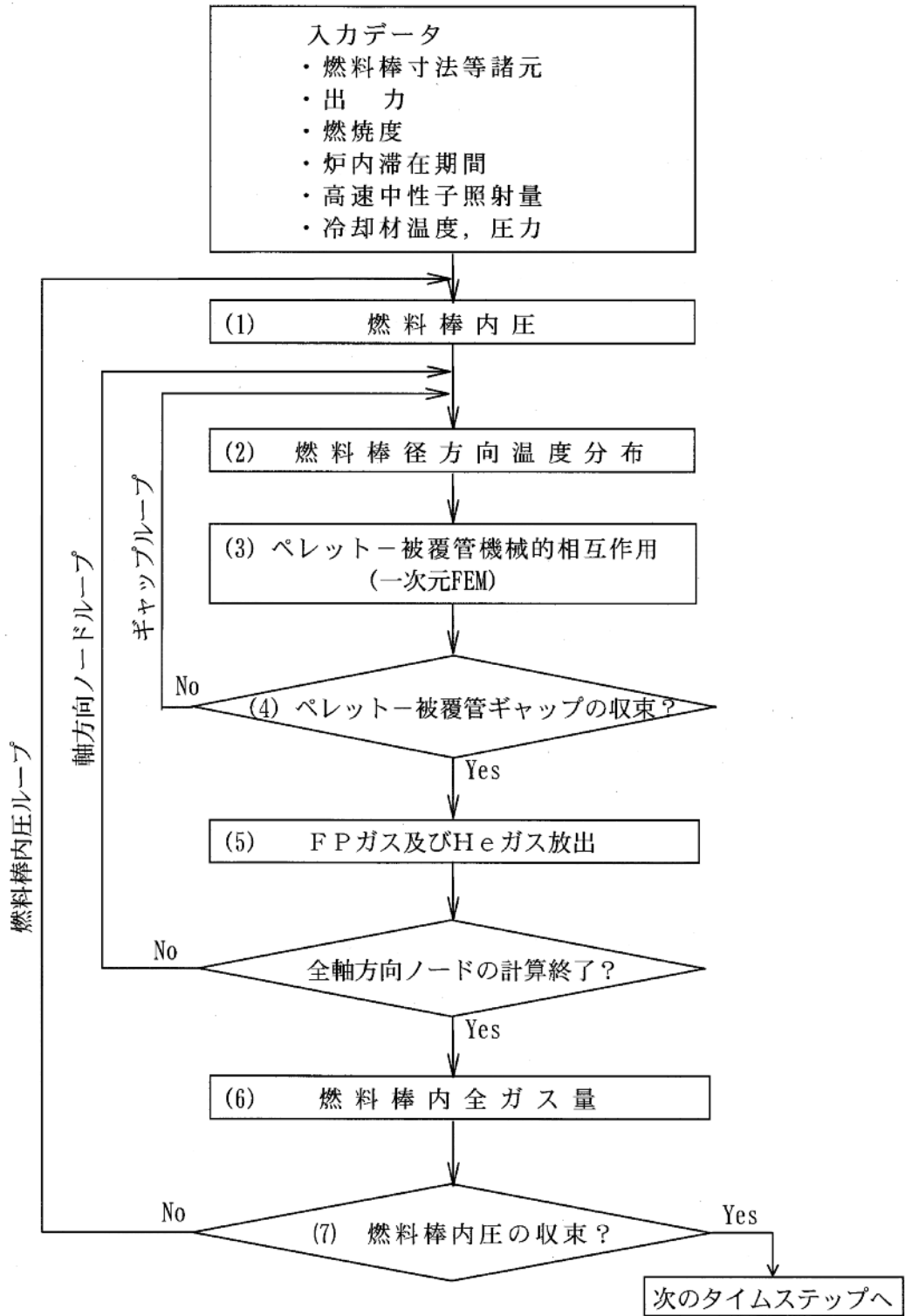


図 -1 PRIME03 コード全体及び熱的解析モデルにおける計算フロー

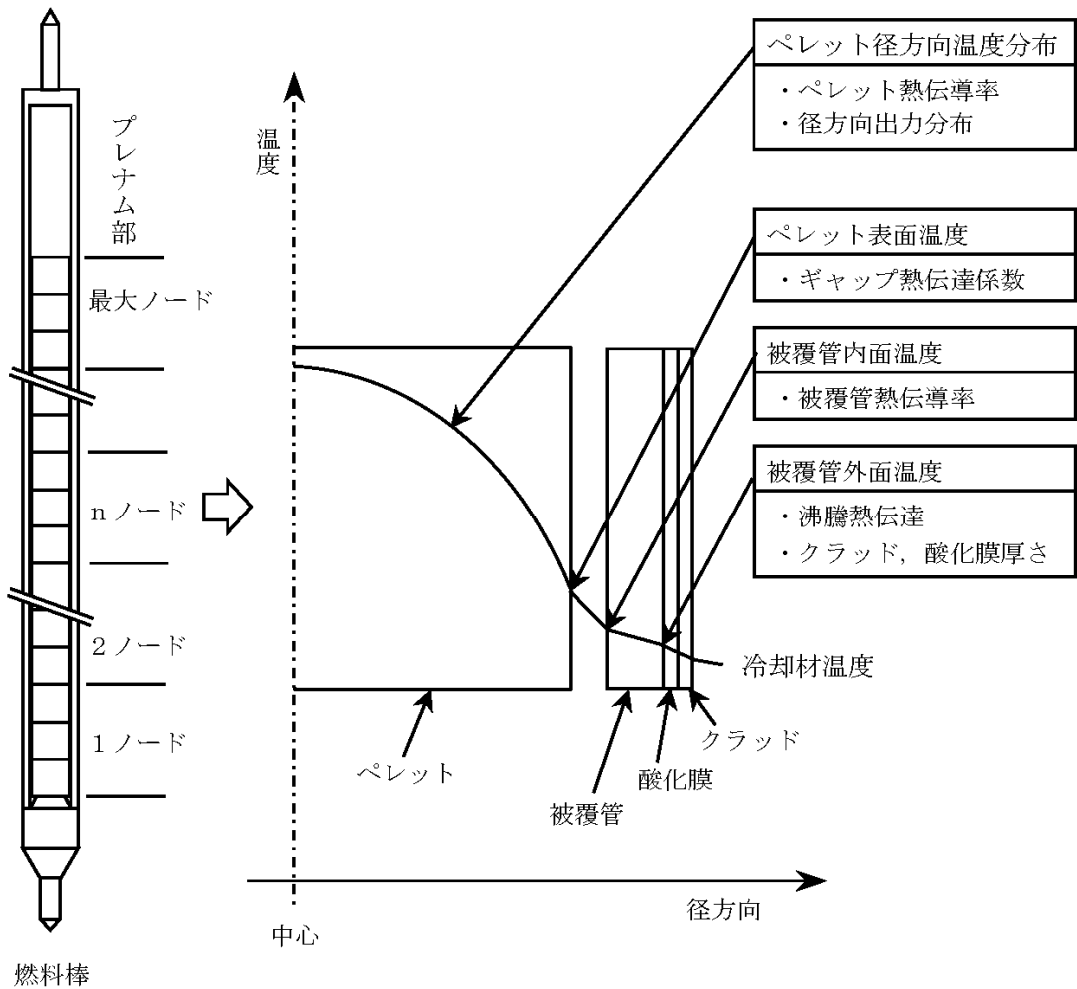


図 -2 熱的解析モデルにおける燃料棒軸方向ノード分割及び径方向温度分布計算の概要

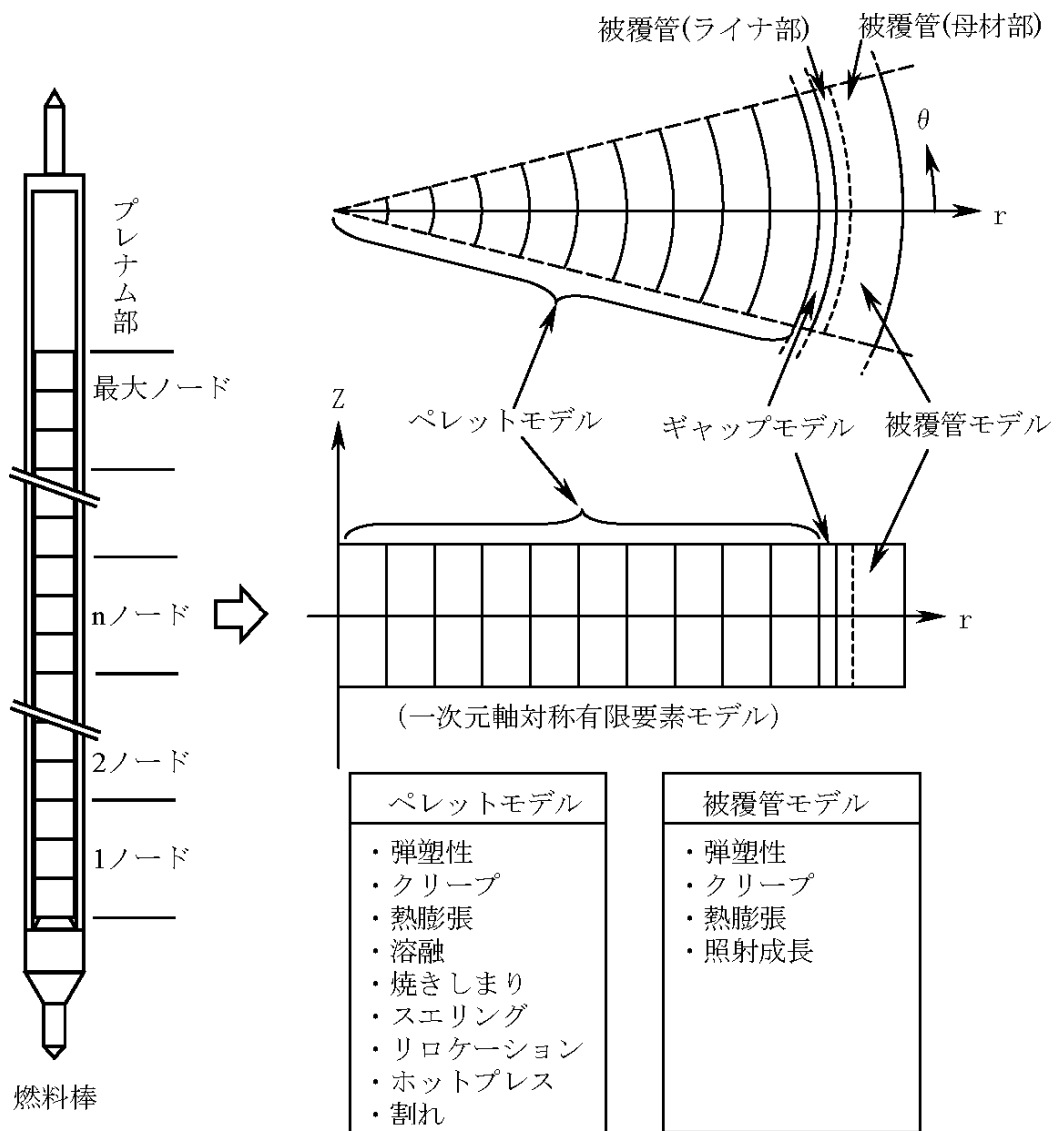


図 -3 機械的解析モデルにおける軸対称一次元有限要素分割

1.3 燃料の物性値及び照射挙動モデル

PRIME03 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、*印で示す熱伝導率、融点、リロケーション、クリープ、リム組織形成及びFPガス放出は、従来の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。

また、対象とする燃料として、Al-Si-O 添加ペレットを加えているが、その適用性については第3節で述べる。

- (1) 熱伝導率*
- (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*
- (14) FPガス放出*

PRIME03 コードで評価対象としている燃料のうち、 UO_2 燃料及び Gd_2O_3 入り UO_2 燃料について、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 PRIME03 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	燃料タイプ別モデルの取扱い		モデルの根拠
(1) 熱伝導率*	UO ₂ 燃料		・ 未照射及び照射済ペレットの炉外試験データ ^{(4),(5),(9),(10),(17)-(20),(28)} に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 未照射及び照射済ペレットの炉外試験データ ^{(4),(5),(9),(10),(17)-(20),(28)} に基づきモデル化。
(2) 融点*	UO ₂ 燃料		・ 未照射及び照射済ペレットの炉外試験データ ^{(7),(21)} に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 未照射及び照射済ペレットの炉外試験データ ^{(7),(21)} に基づきモデル化。
(3) 径方向出力分布	UO ₂ 燃料		・ 核計算コード ⁽³⁸⁾ の計算結果から設定。照射済ペレットの径方向燃焼度分布データにより検証。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 保守的に UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(4) ヤング率	UO ₂ 燃料		・ 文献データ(未照射) ⁽²²⁾ に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 文献データ(未照射) ⁽²²⁾ に基づき、ヤング率への影響が小さく、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(5) ポアソン比	UO ₂ 燃料		・ 文献データ(未照射) ⁽¹⁴⁾ に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 文献データ(未照射) ⁽¹⁴⁾ に基づき、ポアソン比への影響が小さく、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(6) 降伏応力	UO ₂ 燃料		・ 文献データ(未照射) ⁽²³⁾ に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 被覆管変形等の検証により、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(7) 熱膨張	UO ₂ 燃料		・ 文献データ(未照射) ⁽²⁷⁾ に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 文献データ(未照射) ⁽²⁷⁾ に基づき、熱膨張への影響が小さく、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

表 -1 PRIME03 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	燃料タイプ別モデルの取扱い		モデルの根拠
(8) 焼きしまり	UO ₂ 燃料		・ 照射試験データ ^{(25),(26)} に基づきモデル化。製造時炉外試験で得られる最大焼きしまり量を用いて計算。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 照射試験データに基づき、焼きしまりに 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 燃料と同一モデルを適用。
(9) スエリング	UO ₂ 燃料		・ 照射試験データ ⁽²⁴⁾ 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 ⁽²⁴⁾ 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) クリープ*	UO ₂ 燃料		・ 文献データ(炉外及び炉内) ^{(12),(29)} に基づきモデル化。 ・ 実験データにより検証。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ UO ₂ 燃料と同一モデルを適用。 ・ 実験データにより検証。
(12) ホットプレス	UO ₂ 燃料		・ クリープモデルに基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ クリープモデルに基づきモデル化。
(13) リム組織形成*	UO ₂ 燃料		・ 照射試験データ ^{(4),(32)} 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 ^{(4),(31),(33)} に基づきモデル化 (UO ₂ 燃料と同一モデルを適用)。
(14) FP ガス放出*	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 ^{(4),(5),(34)} 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

PRIME03 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。被覆管のモデルで、PRIME03 コードにおいて従来コードから改訂されたものはない。

また、対象とする被覆管として GNF-Ziron 被覆管を加えているが、その適用性については第 4 節で述べる。

- (1) 熱伝導率
- (2) 輻射率
- (3) ヤング率
- (4) ポアソン比
- (5) 降伏応力及び照射硬化
- (6) 熱膨張係数
- (7) 照射成長
- (8) クリープ

PRIME03 コードで使用されているジルカロイ-2 被覆管（以下「従来被覆管」という。）の各モデルの根拠を表 -2 に示す。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 PRIME03 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) 熱伝導率	ジルカロイ - 2	未照射材の炉外試験データに基づきモデル化。
(2) 輻射率	ジルカロイ - 2	未照射材の炉外試験データに基づきモデル化。
(3) ヤング率	ジルカロイ - 2	未照射材の炉外試験データに基づきモデル化。
(4) ポアソン比	ジルカロイ - 2	未照射材の炉外試験データに基づきモデル化。
(5) 降伏応力及び照射硬化	ジルカロイ - 2	未照射材及び照射材の炉外試験データに基づきモデル化。 文献データ ⁽⁴⁾ により妥当性を検証。
(6) 熱膨張係数	ジルカロイ - 2	未照射材の炉外試験データ ^{(35),(36)} に基づきモデル化。
(7) 照射成長	ジルカロイ - 2	照射試験データ ⁽³⁷⁾ に基づきモデル化。
(8) クリープ	ジルカロイ - 2	炉内試験データ及び未照射材の炉外試験データに基づきモデル化。

1.5 評価

PRIME03 コードの解析モデルについて、評価結果を以下に示す。

- (1) PRIME03 コードでは、燃料棒の形状のモデル化、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ごとに以下が計算される。

- ペレット及び被覆管内の温度分布
- ペレット - 被覆管ギャップ熱伝達係数
- 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 ガス放出の変化は、ギャップ熱伝達係数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、運転履歴及び燃料棒軸方向位置ごとに以下が計算される。

- 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
- ペレット及び被覆管の軸方向の変位及び応力・歪

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、ペレット - 被覆管の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、無添加ペレットを対象とした PRIME03 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。

なお、改訂モデルの妥当性評価、Al-Si-O 添加ペレット及び GNF-Ziron 被覆管に対するコードの適用性評価については、第3節及び第4節に述べる。

2．従来コードからの改訂モデル

PRIME03 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、以下に示すモデルが改訂されている。

- (1) ペレット融点
- (2) ペレット熱伝導率
- (3) ペレットリム組織形成
- (4) FP ガス放出
- (5) リロケーション
- (6) ペレットクリープ

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が、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 ペレット融点

従来コードでは、ペレット融点は Christensen の測定データ⁽⁶⁾に基づき、保守側の設定となるように燃焼初期から 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⁽²¹⁾。

PRIME03 コードでは、ペレット融点の燃焼度依存性について、Yamanouchi⁽⁷⁾、原田等による測定データ⁽⁸⁾に基づき 30GWd/t までは、燃焼度に依存しないモデルに変更し、30GWd/t 以上の高い燃焼度では、高燃焼度領域のデータの測定誤差を踏まえ保守的に Christensen の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 以上では 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 Gd_2O_3 濃度の増加に伴って融点が低下するモデルとしている。

2.2 ペレット熱伝導率

従来コードでは、ペレット熱伝導率は未照射ペレットの熱伝導率データに基づき、ペレットの温度、密度（気孔率）及び Gd_2O_3 濃度の関数として表され、燃焼度に依存しないとされていた。しかしながら、燃焼が進むと、固溶性の核分裂生成物（以下「FP」という。）及び照射欠陥がペレット中に蓄積するためペレットの熱伝導率は低下するが、温度が上昇して照射欠陥が回復すると熱伝導率が増加することが知られている。

PRIME03 コードでは、フォノン散乱因子としてFPの蓄積、照射欠陥の蓄積・回復及び Gd_2O_3 混合の影響を統一的に扱う新しい熱伝導率モデルが採用され、 Gd_2O_3 混合の影響の定式も含めて見直されており、燃焼に伴う熱伝導率の変化を表現できるとしている。

なお、未照射 UO_2 ペレットの熱伝導率モデルは、従来コードのモデルと同じとしている。

PRIME03 コードのペレット熱伝導率モデルは、照射に伴う固溶性FPの蓄積及び照射欠陥の蓄積・回復によるフォノン熱伝導率の低下・回復を定式化した Amaya/Hirai のモデル⁽⁹⁾を基にしている。照射によるフォノン熱伝導率の低下割合は、固溶性FP蓄積の寄与及び照射欠陥蓄積の寄与の和の関数としている。

固溶性FP及び照射欠陥の蓄積は、ともに燃焼度に比例すると仮定し、このうち照射欠陥については高温になると回復してその寄与が小さくなるよう照射欠陥回復率を温度の関数として定義されている。モデルの照射欠陥回復率の温度依存性は、照射ペレットを用いた昇降温の温度履歴を伴う熱伝導率測定データに基づき設定されている。

コードでは、温度の昇降のある現実的な照射履歴に対応できるよう、ペレット局所の温度履歴を記憶し、経験した温度履歴に対応した合理的な欠陥回復率を与えるとしている。すなわち、照射に伴い形成される照射欠陥は、基本的にその時の温度に応じた回復率で瞬時に回復し、形成量から回復量を差し引いた量が蓄積するとして扱われている。

気孔率が熱伝導率に及ぼす影響については、気孔の形状及び気孔率に対して広い適用性があるとされる Shulz の気孔率補正式⁽¹⁰⁾によって評価されている。

UO_2 ペレット（ペレット密度 91.4～98.5%TD）及び Gd_2O_3 入り UO_2 ペレット（ Gd_2O_3 濃度 0～10wt%）の熱伝導率の温度依存性について、PRIME03 コードの熱伝導率モデルと測定データとを比較した結果、同モデルの熱伝導率はペレット密度の異なる熱伝導率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、 UO_2 ペレット及び Gd_2O_3 入り

UO₂ペレットの熱伝導率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、UO₂ペレット及びGd₂O₃入りUO₂ペレットの熱伝導率の燃焼度依存性について、PRIME03コードの熱伝導率モデルと測定データとを比較した結果、同モデルの熱伝導率は低燃焼度から高燃焼度まで全般にわたって測定値との一致は良好であり、燃焼に伴うペレットの熱伝導率の低下を適切にモデル化したとしている。

2.3 ペレットリム組織形成

ペレット外周部には、高燃焼度においてリム組織と呼ばれる多孔質の領域が形成されることが知られている⁽³⁰⁾。従来コードでは、リム組織形成は直接モデル化されていないが、PRIME03コードでは、種々の照射後試験結果に基づき、ペレット最外周の多孔質領域幅（リム組織形成幅）及び平均リム気孔率が燃焼度の関数としてモデル化されている。PRIME03コードでは、このリム組織形成の影響を当該領域の気孔率の増加（ペレット密度の低下）による熱伝導率低下及びペレット体積の増加として考慮したとしている。

照射ペレットの金相観察から得られたリム組織形成幅とペレット平均燃焼度との関係から、リム組織形成幅の燃焼度依存性が定式化されている。同様に、リム組織の気孔率と局所燃焼度との関係からリム気孔率（リム組織の形成に伴う気孔率の増分）の燃焼度依存性が定式化されている。

2.4 FPガス放出

ペレット内部に生じたFPガス原子は結晶粒界まで拡散し、結晶粒界上に気泡を形成する。結晶粒界のガス気泡が成長し連結した後は、FPガス原子は直ちに自由空間（ギャップ）に放出されるが、拡散距離は結晶粒径程度であるため、結晶粒径はFPガス原子の放出に影響を及ぼすとしている。

粒界気泡連結に伴うFPガス放出が生じるしきい温度は、ハルデン試験炉データにより評価されVitanzaのしきい温度⁽¹¹⁾として知られているが、最近のデータでは、高燃焼度でのしきい温度はVitanzaのしきい温度より低い傾向を示している。また、商用炉で照射された燃料棒についてはそのしきい温度よりも有意に低い傾向にあるとしている。

従来コードでは、ペレットの出力（温度）及び燃焼度で整理したFPガス放出率データに基づいて作成した経験的なFPガス放出モデルを用いており、FPガス放出率は次の3項の和(F =

F0 + F1 + F2)として定式化されている。

F0： 拡散による放出項（ペレット温度に依存）

F1： リコイル及びノックアウトによる放出項（ペレット燃焼度に依存）

F2： 燃焼度により加速される放出項（ペレット温度及び燃焼度に依存）

PRIME03 コードでは、上記3項のうちF2項を、上記のようなFPガス放出の現象的解釈に基づき、以下のように改訂し、最近のFPガス放出率データを用いて検証したとしている。

F2： 結晶粒界の気泡連結による放出項（ペレット温度、燃焼度及び結晶粒径に依存）

上記F2項を、ペレット温度がしきい値を超えると放出が開始されるように定式化し、ペレット結晶粒界におけるFPガス気泡の連結によって放出が始まる現象を間接的に模擬するとしている。放出のしきい温度は、FPガス放出率データに基づき燃焼度に従い低下させている。

PRIME03 コードでは、商用炉燃料棒への適用を主としており、しきい温度はハルデン推奨値より低く設定されている。

なお、F2項は結晶粒径に依存するため、照射中の結晶粒成長が新たにモデル化されている。ここでは、結晶粒径の成長速度が粒径及び温度の関数として与えられている。結晶粒の成長モデルは、炉外及び炉内の試験データに基づき定式化されており、ペレット結晶粒径の測定値と計算値とを比較し、全燃焼度範囲にわたって良く予測できるとしている。

PRIME03 コードのFPガス放出率に対する検証結果から、改訂されたFPガス放出モデルによる計算値は、ばらつきはあるものの、全燃焼度範囲にわたって測定値を良く予測できるとしている。

2.5 リロケーション

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として設定されている。

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、コードの検証において予測精度を高める方向で最適値に調整される。

燃焼に伴うペレット熱伝導率の低下を考慮したPRIME03コードでは、従来コードに比べてペレット中の温度上昇幅を大きく評価するため、燃料中心温度の検証データとの比較から、ペレット-被覆管ギャップでの温度上昇幅が小さくなる方向にペレットのリロケーションモデル

の係数が調整されている。また、ペレット - 被覆管相互作用によって押し戻されるリロケーション量は、被覆管直径変化の検証データと照合することにより調整されている。

燃料中心温度及び被覆管直径変化の検証結果から、PRIME03 コードはそれらを精度良く予測しており、リロケーションモデルの係数の調整が適切であるとしている。

2.6 ペレットクリープ

新設計の 10×10 燃料では、Al-Si-O 添加ペレットの採用が計画されている。Al-Si-O 添加ペレットは、適量のアルミナ (Al_2O_3) 及びシリカ (SiO_2) を UO_2 粉末に混合して焼結した改良型ペレットである。

アルミナ及びシリカの混合物又は化合物としての Al-Si-O は、ペレットの結晶粒内には固溶せず結晶粒界に偏在し、照射中 PCMI 時においては、Al-Si-O が粒界すべりを促すことによってクリープ速度が増大するため、応力の緩和が期待されるとしている。炉外試験では高応力下でのクリープ速度の増大が報告されている。

Al-Si-O 添加ペレットへの PRIME03 コードの適用を図るため、物性モデルのうちペレットクリープモデルが改訂されている。それ以外の Al-Si-O 添加ペレットの物性モデルの取扱いについては、第 3 節で述べる。

PRIME03 コードのペレットクリープモデルは、従来コードと同様、Solomon 等により提唱された炉内定常クリープ速度式⁽¹²⁾をベースとした式で表されている。Al-Si-O 添加ペレットに対するクリープモデルでは、クリープ速度式に新たに Al-Si-O 添加による粒界すべりの効果の項が加えられている。

上記の Al-Si-O 添加効果の項は、コードの適用範囲内である Al-Si-O 添加量のペレットに対する単軸圧縮試験のデータを用いて較正されたものであるとしている。本圧縮試験は、無添加及び Al-Si-O 添加ペレットを対象として、Al-Si-O 添加量、 Gd_2O_3 濃度、ペレット密度、結晶粒径、ペレット温度及び荷重（応力）をパラメータとして実施されたものである。

無添加及び Al-Si-O 添加ペレットを対象とした圧縮試験の測定値と計算値とを比較した結果、Al-Si-O 添加ペレットに関するクリープ速度の計算値は、無添加ペレットの場合と同様、測定値と良く一致しているか、又は PCMI 時の評価上保守的となる過小評価となっているとしている。この結果、ペレットクリープモデルが、クリープ速度に対する Al-Si-O 添加量、ペレット密度、結晶粒径、ペレット温度及び応力の影響を適切に評価しているとしている。また、 Gd_2O_3 濃度の有意な影響は見られないとしている。

2.7 評価

PRIME03 コードの改訂モデルについて、評価結果を以下に示す。

- (1) PRIME03 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 PRIME03 コードについては、第 5 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変化に対する総合的な検証解析結果から、試験結果と解析結果が良く一致していることを確認した。

以上の結果から、PRIME03 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 . 改良ペレットへの適用

新設計の 10×10 燃料では、照射中のペレット - 被覆管相互作用(以下「PCI」という。)特性等の向上を目的に Al-Si-O 添加ペレットを用いることが計画されており、PRIME03 コードは Al-Si-O 添加ペレットの評価に適用できるとしている。Al-Si-O 添加ペレットに対しては、一部の物性モデルが無添加ペレットのモデルから改訂されている。

PRIME03 コードの Al-Si-O 添加ペレット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 Al-Si-O 添加ペレットの概要

アルミナ及びシリカの混合物又は化合物としての Al-Si-O は、ペレットの結晶粒内マトリクスには固溶せずに結晶粒界に偏在し、焼結時の結晶粒成長を促進するためにペレットは大粒径となり、FP ガスの粒内拡散距離の増加により FP ガス放出の抑制効果につながるとしている。

また、照射中の PCI 時においては、Al-Si-O が粒界すべりを促すことによってクリープ速度が増大するため、応力の緩和が期待されるとしている。炉外試験では、高応力下でのクリープ速度の増大が報告されている。

3.2 Al-Si-O 添加ペレットの物性値及び照射挙動モデル

PRIME03 コードに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。

- (1) 熱伝導率
- (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
- (14) FP ガス放出#

上記モデルのうち、#印で示すリロケーション、クリープ及びFPガス放出モデルは、これをAl-Si-O添加ペレットへ適用するため、従来モデルが改訂されている。それ以外のモデルについては、添加量2,500ppm以下の範囲では、無添加ペレットと有意な差は無く、Al-Si-O添加の燃料挙動への影響が小さいことから、無添加ペレットと同じとしている。

以下に、PRIME03コードをAl-Si-O添加ペレットへ適用するに当たって改訂されたモデルの概略及び妥当性について述べる。また、それ以外のモデルの取扱い及びその根拠を表-3に示す。

PRIME03コードで対象とする全ての燃料(UO₂、Gd₂O₃入りUO₂、Al-Si-O添加UO₂及びAl-Si-O添加Gd₂O₃入りUO₂)に対する上記モデルの燃料タイプ別の取扱い及びモデルの根拠についても表-3に示す。

(1) ペレットクリープ

PRIME03コードをAl-Si-O添加ペレットの評価に適用するため、ペレットクリープモデルが改訂されており、改訂モデルの概略及び妥当性については、前述の2.6項に示したとおりである。

(2) FPガス放出

Al-Si-O添加ペレットの大粒径化に伴うFPガス放出の抑制効果は、ハルデン試験炉における照射試験⁽¹³⁾で報告されており、その抑制効果は同程度の粒径をもつ無添加大粒径ペレット燃料の場合と同等であるとしている。

一方、JNESが実施した高燃焼度9×9型燃料信頼性実証試験⁽⁴⁾においては、Al-Si-O添加ペレット燃料のFPガス放出率が無添加ペレット燃料より大きかったことが報告されている。

以上のことから、PRIME03コードによるAl-Si-O添加ペレットのFPガス放出の評価においては、Al-Si-O添加ペレットの照射試験データが今後取得されるまでは、至近の商用炉照射試験データである高燃焼度9×9型燃料信頼性実証試験のFPガス放出率データに合わせて

FP ガス放出のしきい温度を低く補正している。

PRIME03 コードにおけるこれらの具体的な取扱いを以下に示す。

高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証試験で得られた無添加及び Al-Si-O 添加ペレットの FP ガス放出率データに基づき、Al-Si-O 添加ペレットの場合、FP ガス放出モデルの結晶粒界 FP の気泡連結に関するしきい温度を無添加ペレットに比べて低くするように補正することにより、Al-Si-O 添加ペレットの FP ガス放出率が相対的に大きくなる方向に修正している。

改訂されたモデルによる Al-Si-O 添加ペレットの FP ガス放出率の計算値を測定値と比較した結果、測定値と計算値との間のばらつきは、放出率 1 % 以上では無添加ペレットの FP ガス放出率の予測に対するばらつきの範囲内であったとしている。

なお、FP ガス放出率の評価に影響するペレット結晶粒径に関しては、Al-Si-O 添加ペレットの場合も無添加ペレットと同じモデルが用いられている。Al-Si-O 添加ペレット結晶粒径の測定値と計算値とを比較した結果、無添加ペレットの場合と同様に測定データを良く予測できるとしている。

(3) リロケーション

PRIME03 コードのリロケーションモデルでは、最初の出力上昇において生じる初期リロケーション及び燃焼に伴うリロケーションの進行が考慮されているが、Al-Si-O 添加ペレット燃料については、無添加ペレット燃料の場合と比較して、燃焼に伴うギャップの閉塞を遅くし、低・中燃焼度域におけるギャップ幅が大きくなるように、照射試験結果に基づき補正されている。これにより、ペレット温度が相対的に高くなり、Al-Si-O 添加ペレットの FP ガス放出率が相対的に大きくなる方向に修正されている。

リロケーションモデルの補正により PRIME03 コードが Al-Si-O 添加ペレットに対する燃料中心温度及び FP ガス放出率を適切に予測できることを検証したとしている。

表 -3 PRIME03 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 (1/5)

モデル	燃料タイプ別モデルの取扱い		モデルの根拠
(1) 熱伝導率*	UO ₂ 燃料		・ 未照射及び照射済ペレットの炉外試験データ ^{(4),(5),(9),(10),(17)-(20),(28)} に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 未照射及び照射済ペレットの炉外試験データ ^{(4),(5),(9),(10),(17)-(20),(28)} に基づきモデル化。
	Al-Si-O 添加 UO ₂ 燃料		・ 未照射及び照射済ペレットの炉外試験データ ⁽⁴⁾ に基づき、熱伝導率は UO ₂ 燃料と Al-Si-O 添加 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。
	Al-Si-O 添加 Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 照射済ペレットの炉外試験データ ⁽⁴⁾ に基づき、熱伝導率は Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料と Al-Si-O 添加 Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料とで大差がないとの知見から、Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(2) 融点*	UO ₂ 燃料		・ 未照射及び照射済ペレットの炉外試験データ ^{(7),(21)} に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 未照射及び照射済ペレットの炉外試験データ ^{(7),(21)} に基づきモデル化。
	Al-Si-O 添加 UO ₂ 燃料		・ 未照射ペレットの炉外試験データから Al-Si-O 添加(2500ppm)による影響はごくわずかであるため、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
	Al-Si-O 添加 Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 上記より Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(3) 径方向出力分布	UO ₂ 燃料		・ 核計算コード ⁽³⁸⁾ の計算結果から設定。 ・ 照射済ペレットの径方向燃焼度分布データ ⁽⁵⁾ により検証。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 保守的に UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
	Al-Si-O 添加 UO ₂ 燃料		・ Al-Si-O の添加は径方向出力分布には影響しないため、UO ₂ と同一のモデルを適用。
	Al-Si-O 添加 Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 上記より UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。

* :改訂モデル。 :UO₂ 燃料のモデル、 : Gd₂O₃ の効果を考慮したモデル、 : Al-Si-O の効果を考慮したモデル
:UO₂ 燃料と同一のモデルを適用、 :Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料と同一のモデルを適用、 :Al-Si-O 添加 UO₂ 燃料と同一のモデルを適用

表 -3 PRIME03 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 (2/5)

モデル	燃料タイプ別モデルの取扱い		モデルの根拠
(4) ヤング率	UO ₂ 燃料		・ 文献データ(未照射) ⁽²²⁾ に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 文献データ(未照射) ⁽²²⁾ に基づき、ヤング率への影響は小さく、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
	Al-Si-O 添加 UO ₂ 燃料		・ 添加量 2500ppm 以下の低濃度範囲では、ヤング率への影響は小さく、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
	Al-Si-O 添加 Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 添加量 2,500ppm 以下の低濃度範囲では、ヤング率への影響は小さく、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(5) ポアソン比	UO ₂ 燃料		・ 文献データ(未照射) ⁽¹⁴⁾ に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 文献データ(未照射) ⁽¹⁴⁾ に基づき、ポアソン比への影響は小さく、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
	Al-Si-O 添加 UO ₂ 燃料		・ 添加量 2500ppm 以下の低濃度範囲ではポアソン比への影響は小さく、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
	Al-Si-O 添加 Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 上記より Gd ₂ O ₃ 及び Al-Si-O の添加によるポアソン比への影響は小さく、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(6) 降伏応力	UO ₂ 燃料		・ 文献データ(未照射) ⁽²³⁾ に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 被覆管変形等の検証により、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
	Al-Si-O 添加 UO ₂ 燃料		・ 未照射ペレットの炉外試験データに基づき、Al-Si-O の降伏応力への影響は小さいとの知見から、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
	Al-Si-O 添加 Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 上記より Gd ₂ O ₃ 及び Al-Si-O の添加による降伏応力への影響は小さく、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。

* :改訂モデル。 :UO₂ 燃料のモデル、 : Gd₂O₃ の効果を考慮したモデル、 : Al-Si-O の効果を考慮したモデル
 :UO₂ 燃料と同一のモデルを適用、 :Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料と同一のモデルを適用、 :Al-Si-O 添加 UO₂ 燃料と同一のモデルを適用

表 -3 PRIME03 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 (3/5)

モデル	燃料タイプ別モデルの取扱い		モデルの根拠
(7) 熱膨張	UO ₂ 燃料		・ 文献データ(未照射) ⁽²⁷⁾ に基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 文献データ(未照射) ⁽²⁷⁾ に基づき熱膨張への Gd ₂ O ₃ の影響は小さく、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
	Al-Si-O 添加 UO ₂ 燃料		・ 添加量 2500ppm 以下の低濃度範囲では、熱膨張への影響は小さく、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
	Al-Si-O 添加 Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 上記より Gd ₂ O ₃ 及び Al-Si-O の添加によるペレット熱膨張への影響は小さく、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(8) 焼きしまり	UO ₂ 燃料		・ 照射試験データ ^{(25),(26)} に基づきモデル化。製造時炉外試験で得られる最大焼きしまり量を用いて計算。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 照射試験データに基づき、焼きしまり量に 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。
	Al-Si-O 添加 UO ₂ 燃料		・ UO ₂ 燃料と同一とし、製造時炉外試験で得られる最大焼きしまり量を用いて計算。
	Al-Si-O 添加 Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ UO ₂ 燃料と同一とし、製造時炉外試験で得られる最大焼きしまり量を用いて計算。
(9) スエリング	UO ₂ 燃料		・ 照射試験データ ⁽²⁴⁾ 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 ⁽²⁴⁾ 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。
	Al-Si-O 添加 UO ₂ 燃料		・ 文献データ ⁽¹³⁾ 及び照射試験データ ⁽⁴⁾ に基づき、スエリングに UO ₂ 燃料と Al-Si-O 添加 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。
	Al-Si-O 添加 Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 上記より Gd ₂ O ₃ 及び Al-Si-O の添加によるスエリングの有意差はなく、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。

* :改訂モデル。 :UO₂ 燃料のモデル、 : Gd₂O₃ の効果を考慮したモデル、 : Al-Si-O の効果を考慮したモデル
 :UO₂ 燃料と同一のモデルを適用、 :Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料と同一のモデルを適用、 :Al-Si-O 添加 UO₂ 燃料と同一のモデルを適用

表 -3 PRIME03 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 (4/5)

モデル	燃料タイプ別モデルの取扱い		モデルの根拠
(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。
	Al-Si-O 添加 UO ₂ 燃料		・ 照射試験データ ⁽⁴⁾ に基づきモデル化。
	Al-Si-O 添加 Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 上記より Gd ₂ O ₃ の影響はなく、Al-Si-O 添加 UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(11) クリープ*	UO ₂ 燃料		・ 文献データ(炉外及び炉内) ^{(12),(29)} に基づきモデル化。 ・ 未照射ペレットの炉外試験データにより検証。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料	-	・ UO ₂ 燃料と同一モデルを適用。 ・ 未照射ペレットの炉外試験データにより検証。
	Al-Si-O 添加 UO ₂ 燃料		・ 未照射ペレットの炉外試験データに基づきモデル化。
	Al-Si-O 添加 Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ Al-Si-O 添加 UO ₂ 燃料と同一モデルを適用。 ・ 未照射ペレットの炉外試験データにより検証。
(12) ホットプレス	UO ₂ 燃料		・ クリープモデルに基づきモデル化。
	Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ クリープモデルに基づきモデル化。
	Al-Si-O 添加 UO ₂ 燃料		・ ホットプレスにおいては、Al-Si-O 添加の影響はなく、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
	Al-Si-O 添加 Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ ホットプレスにおいては、Al-Si-O 添加の影響はなく、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。

* :改訂モデル。 :UO₂ 燃料のモデル、 : Gd₂O₃ の効果を考慮したモデル、 : Al-Si-O の効果を考慮したモデル
:UO₂ 燃料と同一のモデルを適用、 :Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料と同一のモデルを適用、 :Al-Si-O 添加 UO₂ 燃料と同一のモデルを適用

表 -3 PRIME03 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 (5/5)

モデル	燃料タイプ別モデルの取扱い		モデルの根拠
(13) リム組織形成*	UO ₂ 燃料		・ 照射試験データ ^{(4),(32)} 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 ^{(4),(31),(33)} に基づきモデル化 ・ UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
	Al-Si-O 添加 UO ₂ 燃料		・ 照射試験データ ^{(4),(13)} に基づき、リム組織形成幅に UO ₂ 燃料と Al-Si-O 添加 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。
	Al-Si-O 添加 Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 上記より Gd ₂ O ₃ 及び Al-Si-O の添加によるリム組織形成への影響に有意差はなく、UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。
(14) FP ガス放出*	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 ^{(4),(5),(34)} 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。
	Al-Si-O 添加 UO ₂ 燃料		・ 照射試験データ ⁽⁴⁾ に基づきモデル化。
	Al-Si-O 添加 Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 燃料		・ 照射試験データ ⁽⁴⁾ に基づき、FP ガス放出特性への Gd ₂ O ₃ の影響のないとの知見から、Al-Si-O 添加 UO ₂ 燃料と同一のモデルを適用。

* :改訂モデル。 :UO₂ 燃料のモデル、 : Gd₂O₃ の効果を考慮したモデル、 : Al-Si-O の効果を考慮したモデル
:UO₂ 燃料と同一のモデルを適用、 :Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料と同一のモデルを適用、 :Al-Si-O 添加 UO₂ 燃料と同一のモデルを適用

3.3 評価

PRIME03 コードの Al-Si-O 添加ペレットへの適用について、評価結果を以下に示す。

- (1) Al-Si-O 添加ペレットへの適用のため改訂されたペレットクリープモデルについては、測定データとの比較からモデルの妥当性を確認した（2.6 項参照）。
- (2) Al-Si-O 添加ペレットへの適用のため改訂された FP ガス放出モデルについては、Al-Si-O 添加ペレットに対する燃料中心温度及び FP ガス放出率の測定データとの比較からモデルの妥当性を確認した。
- (3) その他の物性値については、Al-Si-O 添加の影響は小さく、無添加ペレットと有意な差が無いことを測定データから確認した。したがって、添加量 2,500ppm 以下の範囲においては、その他の物性値を無添加ペレットと同じとして扱うことは妥当であると判断した。

以上の結果から、PRIME03 コードを Al-Si-O 添加ペレット燃料の燃料棒熱・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。

4 . 改良被覆管への適用

新設計の 10×10 燃料には、燃料被覆管材として水素吸収の抑制を図った改良ジルコニウム合金「GNF-Ziron」を用いることが計画されており、この改良被覆管が用いられる 10×10 燃料の燃料棒熱・機械設計に対しても、PRIME03 コードを適用することができるとしている。

PRIME03 コードの改良被覆管 GNF-Ziron 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。

4.1 GNF-Ziron 被覆管の概要

GNF-Ziron 被覆管は、ジルカロイ - 2 の規格から合金元素のうち鉄濃度のみをわずかに高めたジルコニウム合金である。高燃焼度燃料用の被覆管として開発されたものであり、耐食性は、ジルカロイ - 2 と同等以上で、高燃焼度領域での水素吸収量を低減することができ、高燃焼度領域での被覆管健全性への裕度を高めたものとしている。

なお、ジルコニウムライナ内張、被覆管加工フロー及び最終焼鈍温度を含め、合金組成以外の項目については、従来被覆管と同一としている。

GNF-Ziron の合金組成はジルカロイ - 2 と比較した形でトピカルレポートに示されている。合金元素のうち、Sn、Ni 及び Cr については、ジルカロイ - 2 の規格範囲内であるとともに、現在使用している被覆管と同等の組成となっている。耐水素吸収特性の改善のため、鉄濃度をジルカロイ - 2 から増加させているが、濃度増加量は 0.1wt%以下であるとしている。

また、鉄はジルコニウム中にほとんど固溶しないため、増えた鉄は金属間化合物として析出するとしている。さらに、上述のように被覆管加工フロー及び最終焼鈍温度を従来被覆管と同一としているので被覆管の集合組織も変わらないとしている。

これらのことから、合金元素のうち鉄濃度のみをわずかに高めたことによる機械的特性等への影響は小さいと考えられるとしている。

4.2 GNF-Ziron 被覆管の物性値及び照射挙動モデル

PRIME03 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) 熱伝導率

- (2) 輻射率
- (3) ヤング率
- (4) ポアソン比
- (5) 降伏応力及び照射硬化
- (6) 熱膨張係数
- (7) 照射成長
- (8) クリーブ

上記 4.1 節で述べたように、GNF-Ziron は、ジルカロイ - 2 と大きく組成の変わらないジルコニウム合金であること、被覆管加工フロー、最終焼鈍温度等も従来被覆管と同一であることから、GNF-Ziron 被覆管に対しても以下のようにジルカロイ - 2 と同一のモデルを用いている。

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) 熱伝導率

ジルコニウム合金の熱伝導率は、被覆管温度で整理されモデル化されており、合金組成の影響は小さいとしている。MATPRO-Version11⁽¹⁴⁾においても、ジルカロイ - 2 及びジルカロイ - 4 のデータを合わせた被覆管の熱伝導率モデルが作成されており、同一の式を共通に適用していることが記載されている。熱伝導率に対する合金組成の影響は小さいことから、GNF-Ziron に対してもジルカロイ - 2 と同じモデルが適用可能であるとしている。

GNF-Ziron の熱伝導率がジルカロイ - 2 と同等であることは、GNF-Ziron の熱伝導率の測定データにより検証されている。GNF-Ziron の熱伝導率は、下記の熱拡散率の測定データから評価したものである。

熱拡散率測定は、GNF-Ziron とジルカロイ - 2 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。GNF-Ziron の熱拡散率は、室温から 600 (873K) の間を約 50 間隔で測定されている。

また同時に、ジルカロイ - 2 の熱拡散率が参照用として測定されている。

被覆管熱伝導率の温度依存性について、GNF-Ziron 及びジルカロイ - 2 との測定データを比較するとともに、PRIME03 コードの熱伝導率モデルと比較している。その結果から、GNF-Ziron の熱伝導率は、ジルカロイ - 2 と同等であり、熱伝導率に合金成分の違いによる

影響は見られず、同モデルの熱伝導率は測定データと良く一致するとしている。

(2) 輻射率

被覆管内面の輻射率は、ペレット - 被覆管ギャップ熱伝達係数の輻射による熱伝達成分を評価する場合に用いられるが、通常運転状態においては輻射による熱伝達成分は非常に小さく、ペレット - 被覆管ギャップ熱伝達係数の全体に対して 0.1%程度の寄与であるとしている。

したがって、合金組成の違いによる影響はないと思われるが、仮に差があったとしてもペレット - 被覆管ギャップ熱伝達係数への影響は無視しうる程度であるとしている。

ジルコニウムライナ被覆管については、被覆管内面の輻射率としてジルコニウムの値が用いられている。

(3) ヤング率

ヤング率は、被覆管温度に依存するモデルとしている。ヤング率は、合金組成の違いにはほとんど影響を受けないことが文献⁽¹⁶⁾に示され、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、ジルコニウム基合金間での相違は認められないとしている。

したがって、ジルカロイ - 2 から鉄濃度のみを高めた GNF-Ziron のヤング率はジルカロイ - 2 と同等であると考えられるとしている。そのため、PRIME03 コードでは、ジルカロイ - 2 被覆管及びジルコニウムライナともに同一のヤング率モデルが用いられている。

(4) ポアソン比

ポアソン比は、弾性係数で表されるので、上記(3)のヤング率と同様にポアソン比も合金組成の影響はほとんどないとしている。そのため、PRIME03 コードでは、ジルカロイ - 2 被覆管及びジルコニウムライナともに同一のポアソン比が用いられている。

(5) 降伏応力、照射硬化

上記 4.1 節で述べたように、GNF-Ziron の変更点は鉄濃度をわずかに (0.1wt%以下) 増加させたものであり、鉄はジルコニウムにほとんど固溶せず極微小な金属間化合物として析出するため、機械特性に与える影響は小さいとしている。GNF-Ziron 被覆管の引張強さ及び降伏応力の測定結果⁽¹⁵⁾から、GNF-Ziron の機械的特性 (降伏応力及び照射硬化) はジルカ

ロイ - 2 と同等であることが示されている。

GNF-Ziron の引張強さ及び降伏応力の測定データは、引張試験により得られたものである。試験片は、板状の引張試験片であり、BWR の中性子源位置に設置されたフォルダ内に装荷され 6 サイクルまで照射されたものであり、最大照射量は約 $1.5 \times 10^{26} \text{m}^{-2}$ ($E > 1 \text{MeV}$) となっている。引張試験は、GNF-Ziron、ジルカロイ - 2 等の未照射材及び照射材を対象に、試験温度 27、288 及び 343 で実施されている。

引張強さ及び降伏応力の高速中性子照射量依存性について、GNF-Ziron とジルカロイ - 2 の測定データとを比較した結果、GNF-Ziron とジルカロイ - 2 とで引張強さ及び降伏応力の照射量依存性に大きな違いはなく、同等な照射硬化の傾向であるとしている。

また、室温及び高温条件においても GNF-Ziron とジルカロイ - 2 とで同等の照射硬化の傾向を示しており、引張強さ及び降伏応力の温度依存性も大きな違いはないとしている。

(6) 熱膨張係数

熱膨張係数に関しても合金組成の影響は小さく、従来コードでは同一の熱膨張係数式がジルコニウム及びジルカロイ - 2 に適用されている。

MATPRO Version11⁽¹⁴⁾においては、熱膨張係数モデルはジルカロイ - 4 のデータを基に作成されているが、ジルカロイ - 2 及びジルコニウムとも良い一致を示しており、熱膨張係数に与える合金組成の影響は小さいとしている。

(7) 照射成長

GNF-Ziron 被覆管の軸方向の照射成長は、照射試験データによって検証されている。GNF-Ziron 及びジルカロイ - 2 を対象として、試験炉において、板材の試験片を約 300、He ガス雰囲気中に装荷し、照射試験が実施されている。照射後、各試験片について照射成長歪が測定されている⁽¹⁵⁾。

本試験から、照射量約 2.5×10^{25} ~ 約 $6.5 \times 10^{25} \text{m}^{-2}$ ($E > 1 \text{MeV}$) のデータが得られており、GNF-Ziron の長手方向の照射成長量はジルカロイ - 2 と同様に、照射とともに照射成長が飽和する傾向が示されており、照射成長による歪に大きな差が見られず、横手方向もジルカロイ - 2 とほぼ同じ歪量になったとしている。

なお、GNF-Ziron の照射量約 $6.5 \times 10^{25} \text{m}^{-2}$ ($E > 1 \text{MeV}$) における軸方向照射成長による歪は 0.13%程度であり、PRIME03 コードの照射成長モデルによる被覆管照射成長と同程度

であるとしている。

(8) クリープ

GNF-Ziron 被覆管のクリープは、未照射材及び照射材を用いた内圧クリープ試験⁽¹⁵⁾によって評価されている。未照射の GNF-Ziron 及びジルカロイ - 2 の被覆管試験片を用い、内圧を負荷した内圧クリープ試験が実施され、約 80MPa 及び約 160MPa の 2 応力レベルで円周方向クリープ歪が求められている。

試験結果から、未照射の GNF-Ziron 及びジルカロイ - 2 のクリープ歪は、いずれの応力状態においても傾向、値ともに同等であるとしている。

照射クリープについては、GNF-Ziron、ジルカロイ - 2 及び高 FeNi (GNF-Ziron と同様に鉄濃度を高めた合金 (Fe:0.26 wt%及び Ni:0.10wt%)) のクリープ試験片を BWR の中性子源位置に設置したフォルダに装荷し、1 ~ 6 サイクル照射して、クリープ歪が測定されている。クリープ試験は、未照射材と同様に被覆管試験片を用いた内圧クリープ試験である。照射時の被覆管応力は、約 80MPa、約 150MPa である。

照射材の試験結果から、GNF-Ziron のクリープ歪は、高応力 (約 150MPa) 状態の高照射量 ($10 \times 10^{25} \text{m}^{-2}$ 、 $E > 1 \text{MeV}$) では、GNF-Ziron と同様に鉄濃度を高めた高 FeNi 被覆管と同等であり、ジルカロイ - 2 のクリープ歪より小さいこと、また、応力約 80MPa では、高 FeNi 被覆管のクリープ歪はジルカロイ - 2 と同等のクリープ歪となっていることから、GNF-Ziron についてはジルカロイ - 2 と同一のクリープモデルが適用できるとしている。

表 -4 PRIME03 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

モデル	被覆管タイプ別のモデルの取り扱い		モデルの根拠
(1) 熱伝導率	ジルカロイ - 2		未照射材の炉外試験データに基づきモデル化。
	GNF-Ziron		未照射材の炉外試験データに基づき、GNF-Ziron の熱伝導率はジルカロイ - 2 と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。
(2) 輻射率	ジルカロイ - 2		未照射材の炉外試験データに基づきモデル化。
	GNF-Ziron		合金組成によるペレット-被覆管ギャップ熱伝達係数への影響は無視できることから、ジルカロイ - 2 と同一のモデルを適用。
(3) ヤング率	ジルカロイ - 2		未照射材の炉外試験データに基づきモデル化。
	GNF-Ziron		文献データ(未照射) ⁽¹⁴⁾ から、ジルコニウム基合金間でヤング率に差が見られないことから、ジルカロイ - 2 と同一のモデルを適用。
(4) ポアソン比	ジルカロイ - 2		未照射材の炉外試験データに基づきモデル化。
	GNF-Ziron		ポアソン比が弾性係数で表され、ヤング率に差が見られないことから、ジルカロイ - 2 と同一のモデルを適用。
(5) 降伏応力、照射硬化	ジルカロイ - 2		未照射材及び照射材の炉外試験データに基づきモデル化。 文献データ ⁽⁴⁾ により妥当性を検証。
	GNF-Ziron		未照射材及び照射材の炉外試験データ ⁽³⁹⁾ から、ジルコニウム基合金間で降伏応力に差が見られないことから、ジルカロイ - 2 と同一のモデルを適用。
(6) 熱膨張係数	ジルカロイ - 2		未照射材の炉外試験データ ^{(35),(36)} に基づきモデル化。
	GNF-Ziron		合金組成による熱膨張係数への影響が小さいとの文献情報 ⁽¹⁴⁾ から、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 ⁽³⁷⁾ に基づきモデル化。
	GNF-Ziron		照射試験データに基づき、GNF-Ziron の照射成長による歪はジルカロイ - 2 と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。
(8) クリープ	ジルカロイ - 2		炉内試験データ及び未照射材の炉外試験データに基づきモデル化。
	GNF-Ziron		炉内試験データ及び未照射材の炉外試験データ ⁽¹⁵⁾ に基づき、GNF-Ziron のクリープ歪はジルカロイ - 2 と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

4.3 評価

PRIME03 コードの改良被覆管 GNF-Ziron への適用について、評価結果を以下に示す。

- (1) GNF-Ziron 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ジルコニウム基合金であり、ジルコニウムライナ内張、被覆管加工フロー及び最終焼鈍温度を含め、合金組成以外の項目については、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) PRIME03 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、GNF-Ziron 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。

以上の結果から、GNF-Ziron 被覆管に対し PRIME03 コードを適用することは妥当なものと判断する。

5 . コードの検証

PRIME03 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。PRIME03 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 PRIME03 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。

PRIME03 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 -4 に示す。

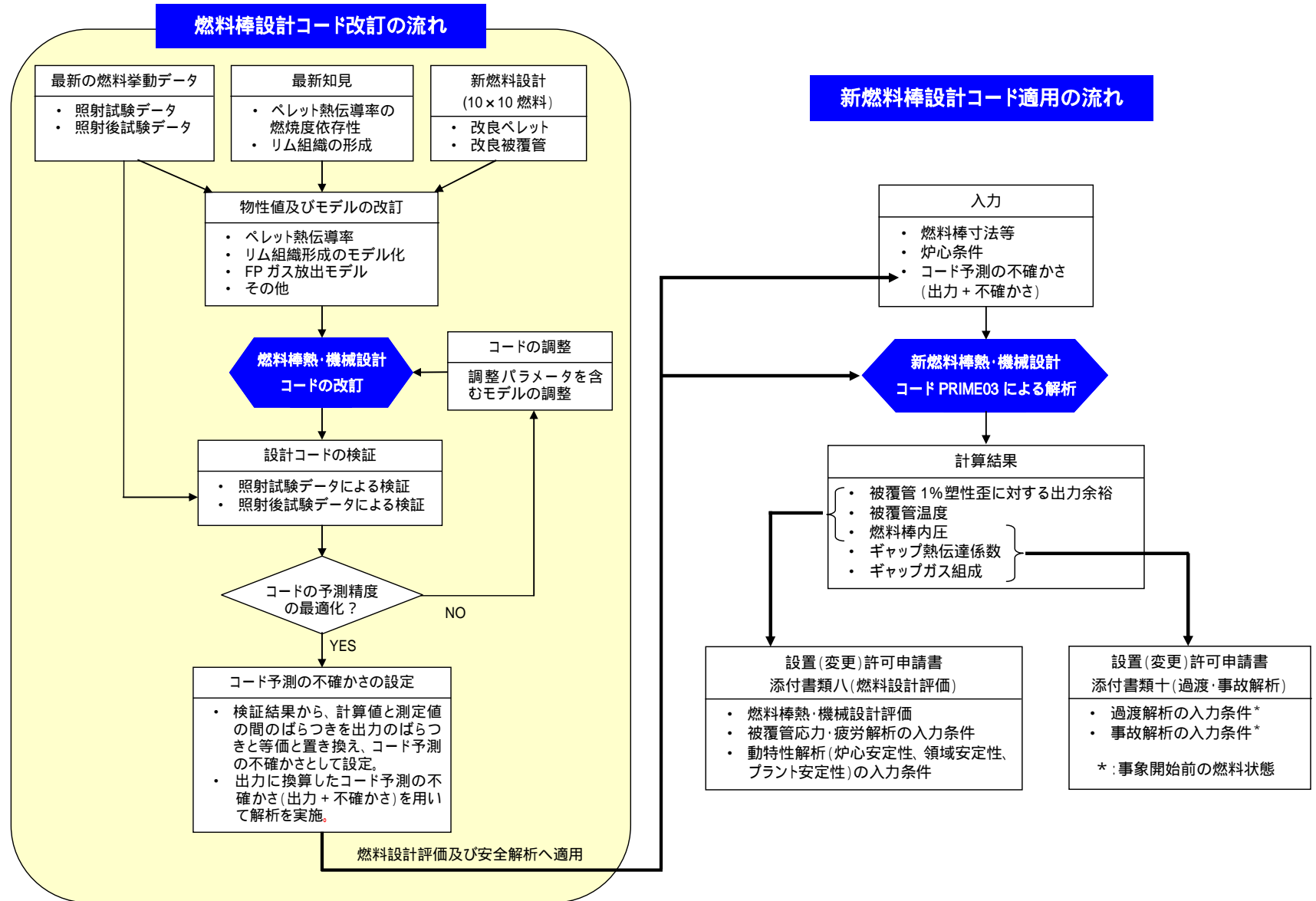
5.1 検証データ

PRIME03 コードの燃料照射挙動の予測精度は、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を表 -5 に示す。表 -5 に示すデータベースは、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 -4 PRIME03 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

表 -5 PRIME03 コードの検証データ範囲

検証項目	本数	データ範囲		データソース
		燃焼度 (GWd/t)	線出力密度 (kW/m)	
燃料中心温度	71	85 ^{*1}	73	・ハルデン試験炉データ ・RISO-3 試験
F Pガス放出率	531	99 ^{*2}	157	・商用炉データ ・ハルデン試験炉データ ・GETR 試験 ・インターランプ試験 ・スーパーランプ試験 ・オーバーランプ試験 ・RISO-試験 ・HBEP 試験 ・BR-3 試験 ・SRP 試験 ・GAIN 試験 ・Beyer-Hann
燃料棒内圧	51	67 ^{*2}	77	・ハルデン試験炉データ ・RISO-3 試験
被覆管直径変化	176	83 ^{*1}	91	・商用炉データ ・GETR 試験 ・インターランプ試験 ・スーパーランプ試験 ・BR-3 試験 ・SRP 試験 ・RISO-3 試験

*1:ペレット燃焼度、 *2:燃料棒平均燃焼度

5.2 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。

PRIME03 コードでは、従来コードに対して、以下に示す燃料のモデルが改訂されている。

- ペレット融点
- ペレット熱伝導率
- ペレットリム組織形成
- FP ガス放出
- リロケーション
- ペレットクリープ

PRIME03 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 -5 に示す。上記の改訂モデルのうち、図 -5 に示すように、以下のモデルに含まれる調整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。

- リロケーションモデルの定数の調整
- FP ガス放出モデルに含まれる定数（放出しきい温度等）の調整
- リム組織形成のスエリングへの影響の程度を表す定数の調整

上記モデルの調整は、まず、 UO_2 燃料及び Gd_2O_3 入り UO_2 燃料に対する検証データに対して満足できる精度となるまで多数回繰り返し実施し、コード全体で調整される。

次に、Al-Si-O 添加 UO_2 燃料の検証データに対して、以下のモデルについて、Al-Si-O 添加 UO_2 燃料の評価用モデルが調整される。

- FP ガス放出モデルにおける放出しきい温度の調整
- リロケーションモデルにおける燃焼度依存リロケーションの調整

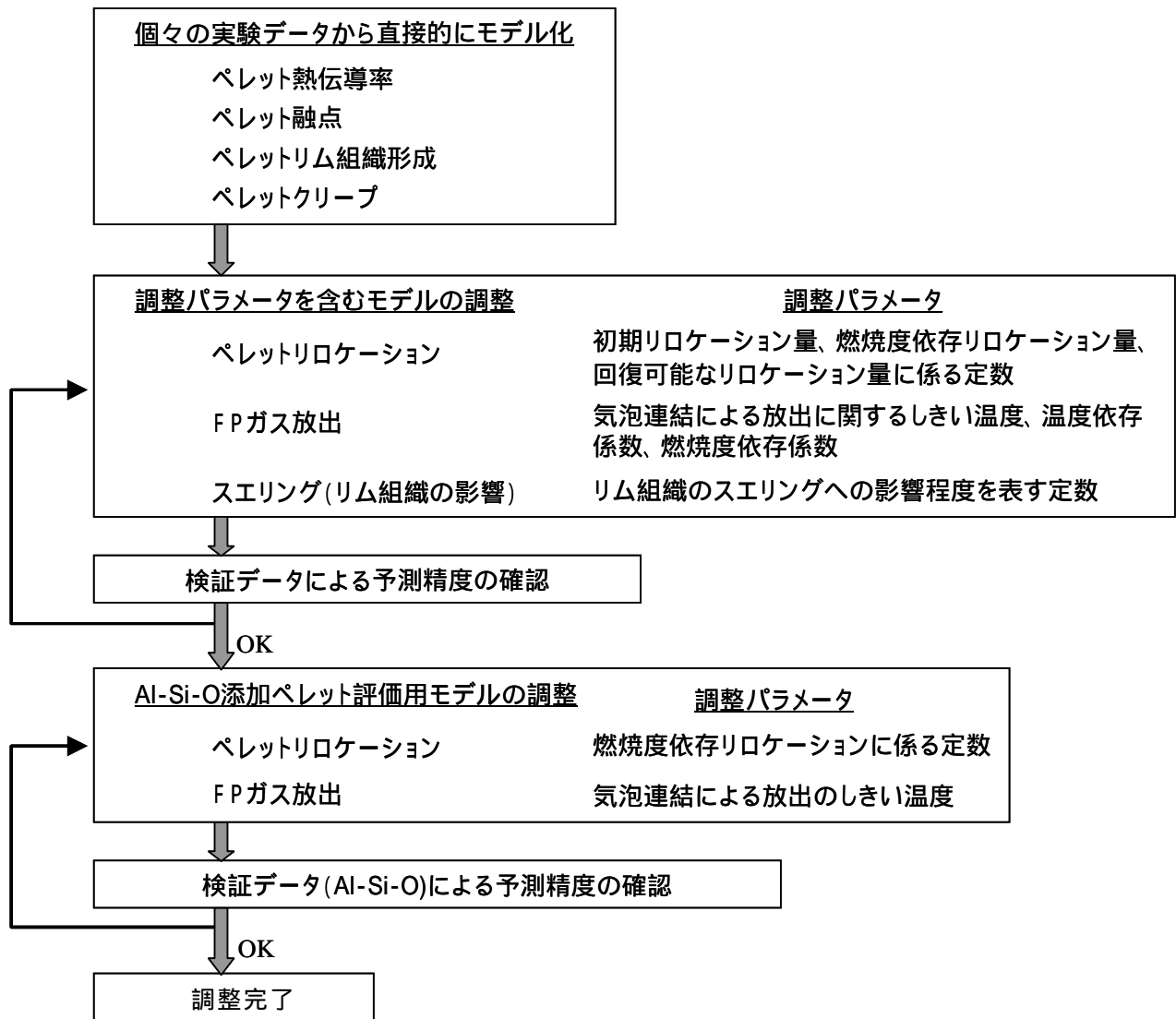


図 -5 PRIME03 コードの調整の流れ

5.3 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 5.4 で述べる。

(1) 燃料中心温度

UO₂ 燃料の中心温度に対する検証の結果を図 -6 に示すが、PRIME03 コードでは幅広い温度領域に対して測定値を適切に予測しており、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、燃焼初期における計算値と測定値との間のばらつきはやや大きいものの、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ている。

Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の中心温度に対する検証の結果を、図 -7 に示すが、UO₂ 燃料と同様に計算値は測定値を適切に予測しており、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、燃焼初期における計算値と測定値との間のばらつきはやや大きいものの、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ている。

Al-Si-O 添加 UO₂ 燃料の中心温度に対する検証結果を図 -6 に示すが、UO₂ 燃料と同様に計算値は測定値を適切に予測しており、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、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ている。

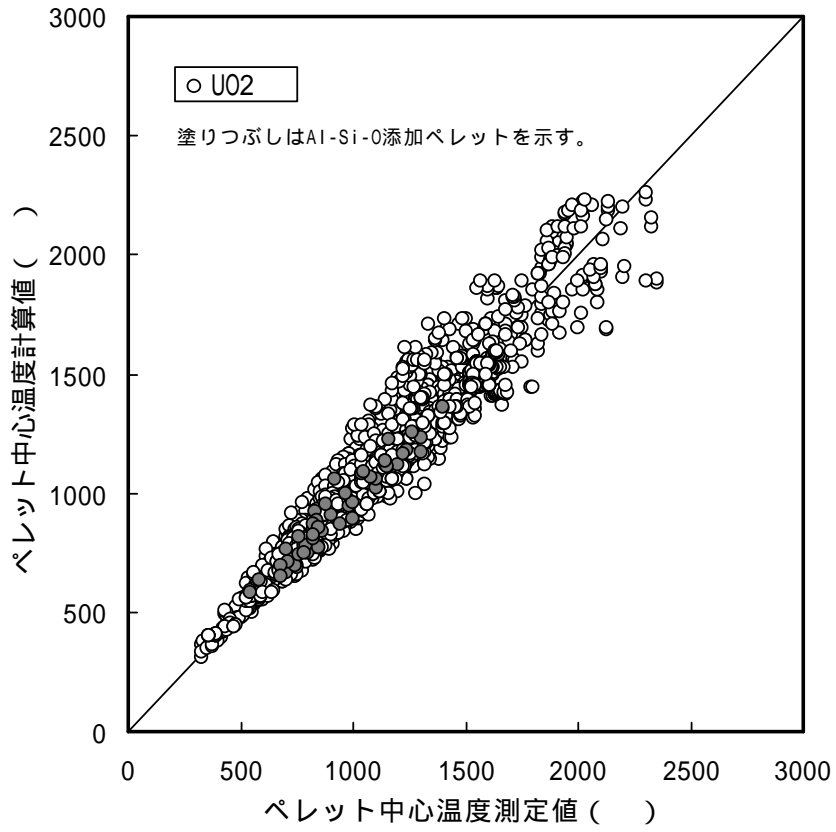


図 -6 UO₂ 燃料のペレット中心温度の測定値と計算値の比較 (PRIME03)

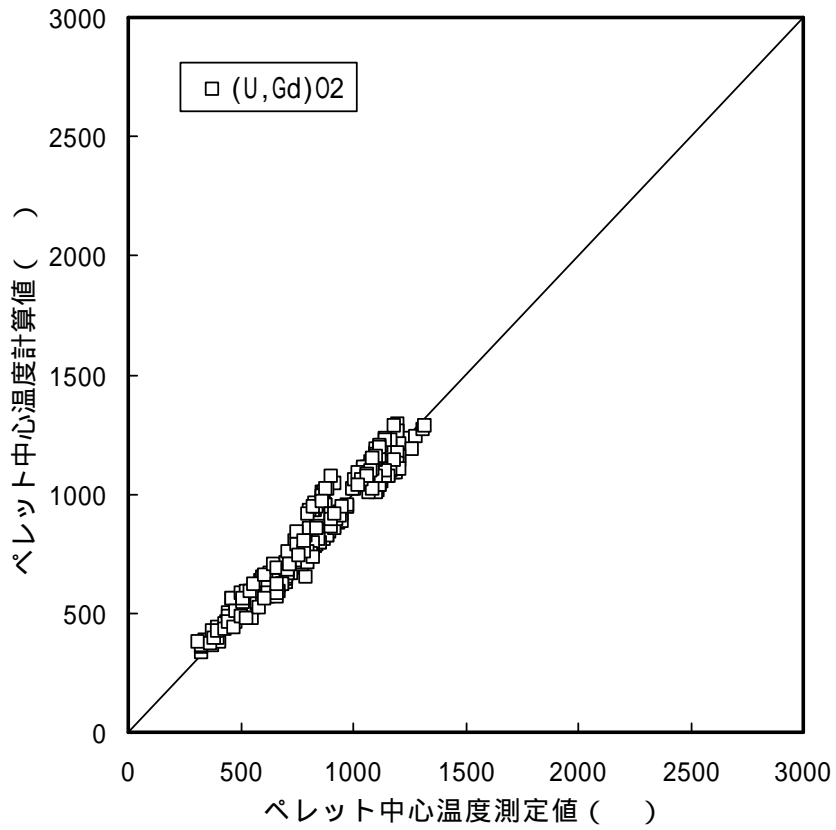


図 -7 Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料のペレット中心温度の測定値と計算値の比較 (PRIME03)

(2) FP ガス放出率

無添加ペレットのFPガス放出率に対する検証の結果から、PRIME03 コードは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、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いとしている。

Al-Si-O 添加ペレットのFPガス放出率に対する検証の結果から、PRIME03 コードは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、燃焼度に対する予測のばらつきの傾向は無添加ペレットと同様であるとしている。

(3) 燃料棒内圧

無添加ペレットの燃料棒内圧に対する検証の結果から、PRIME03 コードは燃料棒内圧の測定値を、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、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。

Al-Si-O 添加ペレットの燃料棒内圧に対する検証の結果から、PRIME03 コードは燃料棒内圧の測定値を、ばらつきはあるものの適切に予測でき、また、燃焼度に対する予測のばらつきの傾向も無添加ペレットと同様であるとしている。

(4) 被覆管直径変化

無添加ペレットの被覆管直径変化に対する検証の結果から、PRIME03 コードは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、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。

Al-Si-O 添加ペレットの被覆管直径変化に対する検証の結果から、PRIME03 コードは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、また、燃焼度に対する予測のばらつきの傾向も無添加ペレットと同様であるとしている。

5.4 コードの予測の不確かさ

PRIME03 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機械設計評価において適切に考慮される必要がある。

PRIME03 コードでは、燃料中心温度と冷却材温度との差の計算値と測定値との間のばらつきを統計的に評価し、このばらつきを機械特性評価に大きく影響する出力のばらつきと等価に置き換えるとしている。

この出力のばらつきをコード予測の不確かさとし、検証データの出力をコードの予測の不確かさの分だけ増加させた解析を行った結果、燃料中心温度、燃料棒内圧及び被覆管直径変化の検証データに対して保守側(計算値 測定値)になったとしている。

FP ガス放出率に対しても、検証データの出力をコードの予測の不確かさ分増加させるのに加え、FP ガス放出モデルにおける設定条件を変更することにより、保守側の結果となることが検証されたとしている。

以上の結果から、PRIME03 コードでは、コードの予測の不確かさは出力に換算され、検証結果のばらつきを包絡するように出力の振り幅が定量的に定められている。それに加えて、FP ガス放出モデルの設定条件が、より厳しい結果となるように変更されている。

上記で設定した PRIME03 コードの予測の不確かさは、コードを燃料棒熱・機械設計評価に適用するに当たり使用される。

5.5 評価

PRIME03 コードの検証結果について、評価結果を以下に示す。

- (1) PRIME03 コードは、幅広い温度領域及び燃焼度範囲にわたって、 UO_2 燃料、 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料、Al-Si-O 添加 UO_2 燃料及び Al-Si-O 添加 Gd_2O_3 入り UO_2 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) PRIME03 コードは、幅広い燃焼度範囲にわたって、 UO_2 燃料、 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料、Al-Si-O 添加 UO_2 燃料及び Al-Si-O 添加 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の被覆管直径変化の測定値を予測できていることを確認した。また、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(UO_2 燃料)も予測できていることを確認した。
- (3) PRIME03 コードの予測の不確かさは出力に換算され、検証結果のばらつきを包絡でき

るよう、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、それに加えて、FP ガス放出モデルの設定条件がより厳しい結果となるように変更されているため、それら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、PRIME03 コードでは、検証データによって燃料の照射挙動を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、 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料、Al-Si-O 添加 UO_2 燃料及び Al-Si-O 添加 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。

6 . コードの適用範囲

PRIME03 コードの適用範囲について、個々のモデルの検証範囲及び燃料棒挙動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の検証範囲の観点からその妥当性を評価したとしている。コードの適用範囲は、基本的にコードの検証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、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。

6.1 適用範囲

PRIME03 コードは、BWR 燃料の原子炉設置（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、 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料、Al-Si-O 添加 UO_2 燃料及び Al-Si-O 添加 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 GNF-Ziron 被覆管である。

(1) 燃料仕様の適用範囲

PRIME03 コードの適用範囲は、表 -6 に示すとおりであり、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。

(2) 設置（変更）許可申請の解析対象項目

PRIME03 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又は過渡・事故解析における入力条件の設定に適用される。PRIME03 コードによる解析対象項目を表 -7 に示す。

表 -6 PRIME03 コードの適用範囲

仕 様	適用範囲
被覆管外径 (mm)	9.0 - 13.0
被覆管肉厚 (mm)	0.50 - 0.95
ペレット外径 (mm)	8.0 - 11.0
ペレット - 被覆管ギャップ幅 (mm) (被覆管内径 - ペレット外径)	0.13 - 0.25
ペレット密度 (%TD(理論密度))	93.0 - 98.0
初期 He 封入圧 (MPa[abs])	0.1 - 1.1
ペレット燃焼度 (GWd/t)	80
燃料棒平均燃焼度 (GWd/t)	73
線出力密度 (kW/m) 通常運転時 異常な過渡変化時	60 100
ペレット材	UO ₂ 、Gd ₂ O ₃ 入り UO ₂ 焼結体 (Al-Si-O 添加を含む)
U-235 濃縮度 (wt%)	8
Gd ₂ O ₃ 濃度 (wt%)	10
Al-Si-O 添加量 (ppm)	250 ~ 2,500
被覆材	ジルカロイ-2、GNF-Ziron (ジルコニウム内張を含む) 再結晶化焼鈍材

表 -7 設置(変更)許可申請書における PRIME03 コードによる解析対象項目

申請書区分	解析対象 *1	解析対象項目
添付書類 八	<u>3.1.5 機械設計</u> ・燃料棒熱・機械設計評価 ・被覆管応力解析の入力条件 <u>3.4.2 熱水力設計</u> ・最大線出力密度	・燃料棒温度、燃料棒内圧、被覆管歪 ・被覆管温度、燃料棒内圧 ・被覆管 1%塑性歪相当線出力密度、出力余裕
	<u>3.4.3 動特性</u> 「炉心安定性」、「領域安定性」、「プラント安定性」解析の入力条件 *2	ギャップ熱伝達係数
添付書類 十	<u>2.3 過渡解析</u> ・「原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き」解析の入力条件 *2 ・「炉心内の熱発生又は熱除去の異常な変化」、「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」解析の入力条件 *2	・燃料棒内圧、ギャップ熱伝達係数、ガス組成 ・ギャップ熱伝達係数
	<u>3. 事故解析</u> 「原子炉冷却材喪失」、「原子炉冷却材流量の喪失」、「主蒸気管破断」、「制御棒落下」解析の入力条件 *2	燃料棒内圧、ギャップ熱伝達係数、ガス組成

*1: 章節項番号は最新 ABWR の例

*2: 事象開始前の燃料状態

6.2 検証範囲

(1) モデルの検証範囲

PRIME03 コードで使用されている燃料及び被覆管のモデルは、基本的に測定データに基づきモデル化されており、モデルごとに、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

PRIME03 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表 IV-6 に示すコードの適用範囲とを比較し、整理した図がトピカルレポートに示されている。

トピカルレポートの図に示すように、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。

GNF-J 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 6.3 項に示す。

6.3 適用範囲の検討

検証データの範囲を超え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おけ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、 UO_2 燃料の場合は該当するものは無く、 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の場合は、ペレット燃焼度、線出力密度及び Gd_2O_3 濃度であり、また、Al-Si-O 添加 UO_2 燃料の場合は、ペレット燃焼度、線出力密度及び Gd_2O_3 濃度である。

Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の場合について、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率である。 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の熱伝導率は、適用範囲（ $\sim 80\text{GWd/t}$ ）を超えた燃焼度まで、 Gd_2O_3 濃度は、10wt%までの適用性が熱伝導率測定データによって検証されている。また、出力の外挿範囲における燃料温度については、熱伝導率への Gd_2O_3 濃度の影響は小さく、燃料中心温度の出力依存性については、適用範囲（ $\sim 60\text{ kW/m}$ ）を超えた線出力密度まで検証されている UO_2 燃料と同様であるとしている。

以上のように、PRIME03 コードの熱伝導率モデルに、燃焼度、燃料温度及び Gd_2O_3 濃度の効果が適切に組み込まれていることから、 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。

Al-Si-O 添加ペレットの場合について、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率であり、Al-Si-O 添加ペレットの熱伝導率は、適用範囲（ $\sim 80\text{GWd/t}$ ）を超えた燃焼度まで熱伝導率測定データによって検証され、 UO_2 燃料と同等であることが示されている。また、Al-Si-O 添加ペレットの熱伝導率が UO_2 燃料と同等であることから、Al-Si-O 添加量の適用範囲内においては、 Gd_2O_3 濃度の影響も UO_2 燃料の場合と同等であると考えられるとしている。

以上のように、PRIME03 コードの熱伝導率モデルに燃焼度、燃料温度、Al-Si-O 添加量及び Gd_2O_3 濃度の効果が適切に組み込まれていることから、Al-Si-O 添加ペレットの燃料中心温度を、 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 ガス放出率評価におけ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、 UO_2 燃料の場合は該当するものは無く、 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の場合は、燃料棒平均燃焼度及び線出力密度であり、また、Al-Si-O 添加 UO_2 燃料の場合は、燃料棒平均燃焼度である。

UO_2 燃料の FP ガス放出特性は、燃料棒平均燃焼度 99GWd/t まで、線出力密度 157kW/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、従来の照射実績が

ら Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の FP ガス放出特性は、UO₂ 燃料と有意な差がないことから、Gd₂O₃ 入り UO₂ 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 UO₂ 燃料と同じであるとしている。

以上のことから、Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の FP ガス放出を UO₂ 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。

Al-Si-O 添加ペレットの FP ガス放出モデルは、燃焼度 99GWd/t まで検証されている UO₂ 燃料の FP ガス放出モデルに対して、Al-Si-O 添加ペレットの照射試験の測定データに基づき、FP ガス放出開始しきい温度を低く補正し、FP ガス放出率が大きめに評価されるようにしている。

FP ガス放出率に影響する支配パラメータはペレット温度であり、上記(1)に示されたように、Al-Si-O 添加ペレットの熱伝導率は、適用範囲（～80GWd/t）を超えた燃焼度まで測定データによって検証されており、Al-Si-O 添加ペレットの燃料中心温度を、UO₂ 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。

以上のことから、Al-Si-O 添加ペレットの FP ガス放出を UO₂ 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。

(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

燃料棒内圧評価におけ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、燃料棒平均燃焼度であり、Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の場合は、燃料棒平均燃焼度及び線出力密度である。また、Al-Si-O 添加ペレットの場合は、燃料棒平均燃焼度の適用範囲が検証データの範囲を超えている。

燃料棒内圧評価に影響する支配パラメータは、FP ガス放出率である。上記(2)に示されたように、UO₂ 燃料の FP ガス放出特性は燃料棒平均燃焼度 99GWd/t まで、線出力密度は 157kW/m まで、その適用性が検証されていることから、UO₂ 燃料の燃料棒内圧を、FP ガス放出率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 FP ガス放出特性は、上記(2)に示されたように UO₂ 燃料と同じであり、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して評価することができることから、Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料の燃料棒内圧を、UO₂ 燃料の検証範囲まで外挿して評価することができるとしている。

Al-Si-O 添加ペレットの FP ガス放出特性は、上記(2)に示されたように、UO₂ 燃料の検証

範囲まで外挿して評価することができることから、Al-Si-O 添加ペレットの燃料棒内圧を、 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。

(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おけ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、 UO_2 燃料の場合は、線出力密度であり、 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の場合は、ペレット燃焼度、線出力密度及び Gd_2O_3 濃度である。また、Al-Si-O 添加ペレットの場合は、ペレット燃焼度、線出力密度、Al-Si-O 添加量及び Gd_2O_3 濃度の適用範囲が検証データの範囲を超えている。

UO_2 燃料の場合について、被覆管直径変化に影響する支配パラメータは熱膨張である。ペレット熱伝導率及び熱膨張は、ペレット融点までの適用性が、測定データによってそれぞれ検証されている。また、 UO_2 燃料の燃料中心温度は、上記(1)に示されたように、適用範囲(~ 60 kW/m)を超えた線出力密度まで検証されている。さらに、融点を超えた領域に対しては、溶融による体積増加が考慮されており、溶融開始後の線出力密度増大に伴う溶融領域の拡大が取り扱われている。

以上のことから、 UO_2 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。

Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の被覆管直径変化に影響する支配パラメータも、 UO_2 燃料と同じように熱膨張である。 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の燃料中心温度は、上記(1)に示されたように、適用範囲の燃焼度 80GWd/t まで、 Gd_2O_3 濃度 10wt% までの範囲で適切に評価できることが示されている。 Gd_2O_3 入り UO_2 燃料の熱膨張は、測定データから Gd_2O_3 濃度 10wt% までの範囲で UO_2 燃料と有意な差が認められておらず、 UO_2 燃料と同じ熱膨張モデルが用いられるとしている。

以上のことから Gd_2O_3 入り UO_2 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。

Al-Si-O 添加ペレットの被覆管直径変化に影響する支配パラメータも、 UO_2 燃料と同じように熱膨張である。Al-Si-O 添加ペレットの燃料中心温度は、上記(1)に示されたように、適用範囲の燃焼度 80GWd/t まで、Al-Si-O 添加量 2,500ppm まで、 Gd_2O_3 濃度 10wt% までの範囲で適切に評価できることが示されている。Al-Si-O 添加 UO_2 燃料の熱伝導率及び熱膨張は、測定データから UO_2 燃料と有意な差が認められておらず、 UO_2 燃料と同じ熱伝導率及び

熱膨張モデルが用いられるとしている。

以上のことから、Al-Si-O 添加ペレット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。

6.4 評価

PRIME03 コードの適用範囲について、評価結果を以下に示す。

- (1) PRIME03 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) PRIME03 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) PRIME03 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 GNF-J 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、PRIME03 コードの適用範囲は、妥当なものと判断する。

7. コードの品質保証計画

7.1 品質保証計画の概要

PRIME03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。

7.2 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、GNF-J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。

7.3 評価方法

GNF-J 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、GNF-J 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。

7.4 確認結果

GNF-J においては、同社の全製品に関する品質保証活動を効果的に行うために、国際規格である ISO-9001（平成12年4月）の認証を取得している。

また、GNF-J においては、

- ・ 要求事項に従い、社長をトップとした品質保証体制を構築していること、社長が定めた品質方針に従い、階層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を確認していること。
- ・ QMSの適合性を確認するため、計画的に実施される内部監査、親会社による監査、及び3年に1回、ISO-9001の認証機関であるロイドの外部審査を受検していること。
- ・ QMSの有効性を確認するため、トップマネジメントである社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、GNF-J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、以下の3つの評価基準を確認した。

(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

GNF-Jにおいては、PRIME03コードを始め、同社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ていること」の確認

GNF-J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携わる者の力量管理は、他の業務の場合と同様、教育・訓練に関するQMS文書に明確にされており、PRIME03のコード開発においては、力量が高い技術者数名を中心としたチーム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、不適合が分かるような方法で識別等を行うなど、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

GNF-Jにおいては、QMS文書において、燃料設計コードに関わる新知見の収集・判断及び設計コードへ反映が必要と判断された新知見については、設計コード開発のプロセスに従い設計コードの変更を行うこと等のプロセスが明確にされていること、情報収集によって得られた新知見は、半年ごとにその期間内に収集した知見を調査記録として取りまとめ、設計上の重要性（原子炉施設の安全設計との関連性等）、設計解析（設置（変更）許可申請書記載値等）への影響度合、新知見の技術的妥当性等について検討を行い、技術者からなるレビューチームにより検証されることを確認した。

なお、得られた新知見によりコードの不適合が判明した場合には、不適合管理の処置が行われることを併せて確認した。

PRIME03 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及びそれぞれに対する確認結果を表 IV-8 に示す。

7.5 評価

GNF-J 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、設計又は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、GNF-J の品質保証計画は評価基準を満たしており、GNF-J における QMS のもと、PRIME03 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 -8 評価基準に対する着眼点及び確認結果について（GNF - J（PRIME03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"> 品質保証種を効果的に行うために、国際規格であるISO-9001:2008（平成12年4月認証取得）、JEAC4121-2009 附属書等に準拠したQMSを構築している。 品質保証種を実施するため、品質マニュアルを最上位文書とし、業務規程、共通手順書及びその下位の作業文書（手順書）からなる文書体系を構築している。
	品質保証体制が確立しているか	<ul style="list-style-type: none"> 品質保証の最高責任者である社長は、その所掌に対する品質保証責任を各センター長及び品質保証部長に分掌し、各センター長及び各部長は、その所掌範囲における品質保証責任を負うとともに、関連部門と相互協力して品質向上に努めている。 品質保証部長は、GNF-Jの全製品に関する品質保証種に責任と権限を有しており、「管理責任者」には、品質保証部長が指名されている。 社長が定めた品質方針と年度業務方針及びそれに従い作成された部門長の年度業務方針を基に、部門毎に品質目標を設定し、目標達成に向けて活動している。また、目標の達成度は毎月フォローされ、最終的にマネジメントレビュー会議で1年間の活動状況が総括される。
	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	<ul style="list-style-type: none"> QMSが効果的に実施され、維持されていること等の確認のため、計画的に内部監査が実施され、内部監査で発見された不適合事象については、所定の手順に従い、是正・予防処置がとられる。また、親会社による監査を定期的に受けるとともに、3年に1回、規格の認証機関であるロイドの更新監査を受検している。 QMSの有効性を確認するため、トップマネジメントである社長が年1回以上、マネジメントレビューを実施しており、マネジメントレビューにおいて、内部監査、第三者監査及び第三者監査の結果等がインプットされている。また、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、継続的な改善が図られている。
(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。	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QMS文書で定められており、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。
	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	<ul style="list-style-type: none"> 設計コードの変更により、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は、トピカルレポートの発行・管理を定めた手順書に則ってトピカルレポートが改訂される。また、同手順書に則って、トピカルレポート担当は、コード開発チームによる新発見に関する調査結果を参考に、新発見に照らしたトピカルレポートの改訂の要否について定期的（3年毎）に検討し、必要な新発見がコードに適切に反映されるとともにその内容がトピカルレポートに反映され改訂されていることを確認する。
(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、設計、レビュー、検証、及び妥当性確認に至るまでの一連のプロセスが構築されていること、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手順書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（モデルの作成）」、「作成（プログラミング）」、「検証/妥当性確認」、「登録・管理」、「トピカルレポート発行・改訂」、「新発見の調査・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	<ul style="list-style-type: none"> 設計コードの開発に携わる者の力量管理は、他の業務の場合と同様、品質マニュアル及び教育・訓練に関する手順書に則り、力量の明確化、教育・訓練の実施とその記録管理、教育・訓練の有効性評価等を通じて行われている。 設計コードの開発に携わる者の力量は、レベルAからCまでに3分類され、PRIME03コードは、これら力量を有する技術者により開発されている。
	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	<ul style="list-style-type: none"> PRIME03コードの開発においては、外部委託等の調達は無いが、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評価・承認し、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、手順書に一連のプロセスが明確にされている。
	設計コードの開発において発行された書類については、適切に管理されているか	<ul style="list-style-type: none"> 設計コードの開発の過程で作成された文書・記録等は、所定の手順書に従い審査を経た後、承認される。 具体的には、例えば、「計画」のプロセスにおいては、コード開発チームが「開発計画書」を作成し、内容については、レビューチームがデザインレビューにより審査し、所定の手続きにより承認される。
	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	<ul style="list-style-type: none"> 開発（変更）されたコードは、検証までの各段階が完了していることをコード管理者が確認した後、承認され、当該コードをコード管理システムへ登録するとともに、関連部門へコードの適用開始を通知する。また、適用されるコードの実行モジュールは、コード管理者の管理下に置かれ、一般ユーザーによる書き替え等を防止するとともに、常に最新版が用いられるよう措置される。
	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	<ul style="list-style-type: none"> 不適合が発見された場合、状況が放置されることを防ぐため、不適合が判るような方法で識別等を行う等、一連のプロセスが、所定の手順書に明確にされ、不適合管理のプロセスが構築されている。 設計コードの開発等で発見された不適合については、設計コード管理規程に基づき、問題点を特定してコードの是正処置を不適合報告書にまとめ、是正・予防処置規程に基づき、発生、発見した問題点に対して改善活動要求書を発行し、処置が完了するまで電子的なシステムでフォローする仕組みで是正・予防処置が実施される。
	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	<ul style="list-style-type: none"> 設計コード管理規程の下位手順書において、燃焼試験コードに関わる新発見の収集・判断、及びそのプロセスについて明確に定められており、PRIME03コードへ反映を要すると判断された新発見がある場合には、コード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。
(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"> 新たな知見については、燃焼試験部及び他部署の技術者の協力のもと、燃焼挙動等に関する新たな知見を国内外の報告から定期的に調査するとともに、試験等を計画・実施することにより、新発見の収集に努めることとしている。
	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	<ul style="list-style-type: none"> 情報収集によって得られた新発見は、半年毎にその期間内に収集した知見を調査記録として取りまとめ、PRIME03コードに反映する必要があるかどうかを、その設計上の重要性（原子炉施設の安全設計との関連性等）、設計解析（設置許可申請書記載値等）への影響度、新発見の技術的妥当性などを検討して判断される。 判断結果は、燃焼試験部及び関連部署の技術者からなるレビューチームによるデザインレビュー等により検証される。 なお、得られた新発見によりコードの不適合が判明した場合には、その知見の反映は不適合管理として処置される。

8 . 評価のまとめ

GNF-J 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 PRIME03 について（平成 21 年 1 月 28 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 PRIME03 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) PRIME03 コードでは、燃料棒に発生する諸現象は、実験データ又は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) PRIME03 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) PRIME03 コードは、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) PRIME03 コードの改訂モデルは、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) PRIME03 コードの Al-Si-O 添加ペレットへの適用性については、Al-Si-O 添加により影響を受けるモデルが改訂されており、改訂されたモデルの妥当性及び適用性を、測定データ及び検証結果によって確認した。
- (6) PRIME03 コードの GNF-Ziron 被覆管への適用性については、解析コードで取り扱う GNF-Ziron 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、GNF-Ziron 被覆管への適用が妥当であると判断した。
- (7) PRIME03 コードでは、検証結果に基づき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。
- (8) PRIME03 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。
- (9) GNF-J における QMS の下、PRIME03 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、トピカルレポート「燃料棒熱・機械設計コード PRIME03 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 -6 及び表 -7 参照）について PRIME03 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、GNF-J においては、新設計の燃料（Al-Si-O 添加 UO₂ 燃料の採用、GNF-Ziron 被覆管の採用及び 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、PRIME03 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

GNF-J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PRIME03について(平成21年1月28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PRIME03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、GNF-J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21年1月28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) 「沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について」、株式会社日立製作所、H L R - 0 3 3 訂 1、平成 10 年 2 月 .
- (2) 「沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について」、株式会社東芝、T L R - 0 4 5 改訂 1、平成 10 年 1 月 .
- (3) A. M. Ross, and R. L. Stoute, “Heat Transfer Coefficient between UO_2 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 (総合評価編)”, 07 基炉報-0002, 平成 19 年 12 月 .
- (5) 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 .
- (6) J. A. Christensen et al., “Uranium Dioxide Thermal Conductivity”, Trans. Amer. Nucl. Soc., 7, pp.390-391, (1964).
- (7) S. Yamanouchi et al., “Melting Temperature of Irradiated UO_2 and UO_2 -2wt% Gd_2O_3 Fuel Pellets up to Burnup of about 30GWd/tU”, J. Nucl. Sci. Technol., 25, 6, pp.528-533, (1988).
- (8) 原田ら、“高燃焼度燃料ペレット融点測定装置の開発”, JAERI-Tech 2000-031, (2000).
- (9) M. Amaya, M. Hirai, “Recovery Behavior of Thermal Conductivity in Irradiated UO_2 Pellets”, J. Nucl. Mater., 247, pp.76-81, (1997).
- (10) B. Schulz, “Thermal Conductivity of Porous and Highly Porous Materials”, High Temp. – High Press., 13, pp.649-660, (1981).
- (11) C. Vitanza et al., “Fission Gas Release from UO_2 Pellet Fuel at High Burnup”, ANS Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Portland, Oregon, April 29 – May 3, 1979.
- (12) A. A. Solomon et al., “Fission-Induced Creep of UO_2 and Its Significance to Fuel-Element Performance”, ANL-7857, Argonne National Laboratory, Sep. 1971.
- (13) M. Hirai et al., “Performance of Improved UO_2 Pellets at High Burnup”, pp.490-498, ANS International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Portland, Oregon, March 1997.
- (14) MATPRO-Version 11 (Rev.2), “A Handbook of Materials Properties for Use in the

- Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior”, NUREG/CR-0497 TREE-280, Rev.2, August 1981.
- (15) S. Ishimoto et al., “Improved Zr Alloys for High Burnup BWR Fuel”, Topfuel 2006, Oct. 22-26, Salamanca, Spain, 2006.
 - (16) H. E. Rosinger et al., “The Elastic Properties of Zirconium Alloy Fuel Cladding and Pressure Tubing Materials”, J. Nucl. Mater., 79, pp.170-179, (1979).
 - (17) M. F. Lyons et al., “UO₂ Pellet Thermal Conductivity from Irradiation with Central Melting”, GEAP-4624, July 1964.
 - (18) M. Amaya et al., “Thermal Conductivity of Irradiated UO₂ and (U,Gd)O₂ Pellets”, J. Nucl. Mater., 300, 57, (2002),
 - (19) Hirai et al., “Thermal Diffusivities and Thermal Conductivities of UO₂-Gd₂O₃”, J. Nucl. Sci. Technol., 28, 995, (1991).
 - (20) M. Amaya et al., “Effects of Rim Structure Formation on the Thermal Conductivity of UO₂ Pellets”, Actinides 2001, Hayama, Japan, Nov. 4-9, 2001.
 - (21) 原田ら、「高燃焼度燃料ペレットの融点測定」、(社)日本原子力学会、「2000 年秋の大会」M24, 2000.
 - (22) M. O. Marlowe, “High Temperature Isothermal Elastic Moduli of UO₂”, J. Nucl. Mater., 33, 242, (1969).
 - (23) K. C. Radford et al., “Compressive Deformation of Polycrystalline UO₂”, J. Amer. Ceram. Soc., 58, 274, (1975).
 - (24) 三島ら、「沸騰水型原子炉燃料集合体の信頼性実証試験」、(社)日本原子力学会誌、Vol. 29, No.2, (1987).
 - (25) M. O. Marlowe, “In-Reactor Densification Behavior of UO₂”, General Electric Company, NEDO-12440, July 1973.
 - (26) R. O. Meyer, “The Analysis of Fuel Densification”, NUREG-0085, July 1976.
 - (27) D. G. Martin, “Thermal Expansion of Solid UO₂ and (U,PU) mixed Oxide – A Review and Recommendations”, J. Nucl. Mater., 152, 94, (1988).
 - (28) P. G. Klemens, “Thermal Resistance due to Point Defects at High Temperature”, Phys. Rev., 119, p.507, (1960).
 - (29) P. E. Bohaboy et al., “Compressive Creep Characteristics of Stoichiometric Uranium

- Dioxide”, GEAP-10054, (1969).
- (30) M. Kinoshita et al., “High Burnup RIM Project: (III) Properties of Rim-Structured Fuel”, Proceedings of the 2004 International Meeting on LWR Fuel Performance, Orlando, Florida, Sep. 19-22, 2004.
- (31) T. Sonoda et al., “Clarification of Rim Structure Effects on Properties and Behavior of LWR UO₂ Fuels and Gadolinia Doped Fuels”, Proceedings of the 2007 International Meeting on LWR Fuel Performance, San Fransisco, California, Sep. 30-Oct. 3, 2007.
- (32) K. Une et al., “Rim Structure Formation of Isothermally Irradiated UO₂ Fuel Discs”, J. Nucl. Mater., 288, 20, (2001).
- (33) S. Vaidyanathan et al., “High Burnup BWR Fuel Pellet Performance”, Proceedings of the 1997 International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Portland, Oregon, Mar. 2-6, 1997.
- (34) K. Kogai et al., “In-Pile and Out-of-Pile Grain Growth Behavior of Sintered UO₂ and (U,Gd)O₂ Pellets”, J. Nucl. Sci. Technol., 26, 744, (1989).
- (35) B. Lustman et al., “The Metallurgy of Zirconium”, McGraw-Hill, 1955.
- (36) D. L. Douglass, “The Metallurgy of Zirconium”, Atomic Energy Review, Suppl. 1971, Vienna, 1971.
- (37) A. Rogerson, “Irradiation Growth in Zirconium and Its Alloys”, J. Nucl. Mater., 159, 43-61, (1988).
- (38) C. L. Martin, “Lattice Physics Methods”, NEDO-20913A, Feb. 1977.
- (39) S. Ishimoto et al., “Development of New Zirconium Alloys for Higher Burnup Fuel”, ENS Topfuel 2003, Wurzburg, Germany, Mar. 16-19, 2003.