

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

発電用原子炉施設に係る特定機器の  
設計の型式証明申請

GNF3 型の機械設計について

< 補足説明資料 >

2023 年 12 月 22 日

株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン

本資料のうち、太枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

## 目 次

1. 概要
  - (1) GNF3 型の概要
  - (2) 国内 BWR 燃料設計の改良の経緯について
  - (3) 海外における 10×10 燃料の実績について
2. 設計方針
  - (1) 基本的設計方針
  - (2) 具体的設計方針
3. 燃料の基本仕様
  - (1) 燃料棒
  - (2) 燃料体
4. 燃料の設計手法
  - (1) 燃料棒熱・機械設計評価
  - (2) 燃料棒内圧評価
  - (3) 燃料被覆管応力評価
  - (4) 燃料被覆管疲労評価
  - (5) その他健全性評価等
5. 評価
  - (1) 材料
  - (2) 照射効果
  - (3) 燃料温度
  - (4) 燃料棒内圧
  - (5) 応力解析
  - (6) 応力サイクル及び疲労限界
  - (7) フレッチング腐食
  - (8) 水素化
  - (9) 被覆管のクリープ圧潰
  - (10) ペレット-被覆管相互作用
  - (11) 寸法形状安定性
  - (12) 燃料体の輸送及び取扱い
6. 参考文献

下線部：今回ご説明する部分、下破線部：今回の資料に含む部分

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

## 目 次 (つづき)

付録-1 GNF3 型への燃料棒熱・機械設計コード PRIME03 の適用性について

付録-2 燃料棒内圧評価に係る評価条件の詳細及び妥当性確認について

付録-3 追而

付録-4 追而

付録-5 追而

付録-6 GNF-Ziron について

下線部：今回ご説明する部分、下破線部：今回の資料に含む部分

なお、本資料中の文章、図表タイトル及びページ番号の一部に黄色マーキングを付けているが、それぞれ次の意味で用いている。

- 文章又は図表の一部・・・ 前回から変更された箇所を示す。
- 図表タイトル・・・ 当該図表が前回から変更されていることを示す。
- ページ番号・・・ 当該ページの内容が前回から新たに追加されたものであることを示す。

【免責条項】本資料の目的以外の使用は認められていません。本資料の目的外の使用に対して、株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパンは、(1) (i) 本資料に含まれる情報に関して、あるいは、(ii) 目的外の使用により第三者が個人的に有する権利を侵害しないこと、を明示的であると黙示的であるとを問わず、如何なる保証または表明も行わず、また、(2) 目的外の使用に起因する如何なる種類の義務または損害賠償に対する責任も負いません。

【著作権】本資料の著作権は株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパンに帰属します。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

## 1. 概要

本資料では、GNF3 型の機械設計について、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（以下「設置許可基準規則」という。）第十五条第 2 項、第 4 項、第 5 項及び第 6 項の要求事項に対する適合性を示す。第 1-1 表に設置許可基準規則第十五条の各条項と本資料記載項目（本型式証明申請における設計方針、燃料の基本仕様、燃料の設計手法及び評価）との関係を示す。

第 1-1 表 設置許可基準規則第十五条と本資料記載項目との関係

設置許可基準規則 第十五条(炉心等) <sup>*1</sup>	2. 設計方針		3. 燃料の 基本仕様	4. 燃料の 設計手法	5. 評価
	(1) 基本的設計方針	(2) 具体的設計方針 <sup>*4</sup>			赤：解析 青：試験及び解析 緑：試験及び/又は実績
2 炉心は、通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時に発電用原子炉の運転に支障が生ずる場合において、(中略)燃料要素の許容損傷限界を超えないものでなければならない。	a. GNF3 型は、通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時に発電用原子炉の運転に支障が生ずる場合において(中略)燃料要素の許容損傷限界を超えない設計とする。	a. GNF3 型は、運転時の異常な過渡変化時において、(中略)燃料の許容損傷限界の一つである被覆管に 1%の円周方向平均塑性ひずみが生じる繰出力密度を超えないこと。(後略)	(1)燃料棒	(1) 燃料棒熱・機械設計評価	(10) ペレット-被覆管相互作用
4 燃料体(中略)は、一次冷却材又は二次冷却材の循環、沸騰その他の一次冷却材又は二次冷却材の挙動により生ずる流体振動又は温度差のある流体の混合その他の一次冷却材又は二次冷却材の挙動により生ずる温度変動により損傷を受けないものでなければならない。	b. GNF3 型は、原子炉冷却材の循環、沸騰その他の原子炉冷却材の挙動によって生ずる流体振動によって損傷を受けない設計とする <sup>*2</sup> 。	c. 被覆管応力は、許容応力以下であること。 e-1. 被覆管のフレット腐食について考慮し、総合的に燃料の健全性を評価する。	(1)燃料棒 (2)燃料体	(3) 燃料被覆管 応力評価  (5) その他健全性 評価等	(5) 応力解析  (7) フレット腐食
5 燃料体は、通常運転時における圧力、温度及び放射線に起因する最も厳しい条件において、必要な物理的及び化学的性質を保持するものでなければならない。	c. GNF3 型は、通常運転時における圧力、温度及び放射線に起因する最も厳しい条件において、必要な物理的及び化学的性質 <sup>*3</sup> を保持する設計とする。	b. 燃料棒内圧は、通常運転時において、被覆管の外向きのクリープ変形によってペレットと被覆管のギャップが増加する圧力を超えないこと。 c. 被覆管応力は、許容応力以下であること。 d. 設計応力サイクル条件及びサイクル数から計算された疲労の累積係数は 1 以下であること。 e-2. 被覆管の水素化、フレット腐食、ペレット-被覆管相互作用及び使用中の燃料棒の変化等による燃料体の過度の寸法変化等について考慮し、総合的に燃料の健全性を評価する。	(1)燃料棒 (1)燃料棒 (2)燃料体 (1)燃料棒 (1)燃料棒 (2)燃料体 (1)燃料棒 (2)燃料体	(2) 燃料棒内圧 評価  (3) 燃料被覆管 応力評価 (4) 燃料被覆管 疲労評価 (5) その他健全性 評価等  (1) 燃料棒熱・ 機械設計評価  (5) その他健全性 評価等	(4) 燃料棒内圧  (5) 応力解析  (6) 応力サイクル及び疲労限界  (1) 材料 (2) 照射効果  (3) 燃料温度  (7) フレット腐食 (8) 水素化 (9) クリープ圧潰 (10) ペレット-被覆管相互作用 (11) 寸法形状安定性
6 燃料体は、次に掲げるものでなければならない。 一 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における発電用原子炉内の圧力、自重、附加荷重その他の燃料体に加わる負荷に耐えるものとする。 二 輸送中又は取扱中において、著しい変形を生じないものとする。	d. GNF3 型は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における発電用原子炉内の圧力、自重、附加荷重その他の燃料体に加わる負荷に耐えるものとし、輸送中又は取扱中において、著しい変形を生じない設計とする。	c. 被覆管応力は、許容応力以下であること。 d. 設計応力サイクル条件及びサイクル数から計算された疲労の累積係数は 1 以下であること。 e-3. ペレット-被覆管相互作用について考慮し、総合的に燃料の健全性を評価する。 e-4. 燃料体の輸送及び取扱い時の健全性について考慮し、総合的に燃料の健全性を評価する。	(1)燃料棒 (2)燃料体 (1)燃料棒 (2)燃料体	(3) 燃料被覆管 応力評価 (4) 燃料被覆管 疲労評価 (5) その他健全性 評価等 (5) その他健全性 評価等	(5) 応力解析  (6) 応力サイクル及び疲労限界  (10) ペレット-被覆管相互作用  (12) 燃料体の輸送及び取扱い

\*1 第十五条第 1 項及び第 3 項は本型式証明申請の範囲外であるため記載していない。

\*2 設置許可基準規則第十五条第 4 項にある「温度変動により損傷を受けないものでなければならない。」については、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈 第 19 条 2 において記載されているように、配管の高サイクル熱疲労に対して考慮されるものであり、本申請では対象外としている。

\*3 「必要な物理的及び化学的性質」とは、物理的性質については耐放射線性、寸法安定性、耐熱性及び核性質等をいい、化学的性質については耐食性及び化学的安定性等をいう。本型式証明申請においては、具体的設計方針 b、c、d 及び e-2 への適合を確認することで、基本的設計方針 c に適合することが確認される。

\*4 燃料体の機械的設計においては、燃料材料、使用温度、圧力条件及び照射効果を考慮し、具体的設計方針を満足する設計とする。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

(1) GNF3 型の概要

GNF3 型は、軽水減速、軽水冷却、沸騰水型原子炉(以下「BWR」という。)で使用する燃料体である。

GNF3 型は、多数の二酸化ウランペレット(一部の燃料棒についてはガドリニア入り二酸化ウランペレット)をジルカロイ-2 又はジルカロイ-2 の合金成分のうち鉄濃度を高めたジルコニウム合金 (以下「GNF-Ziron<sup>1</sup>」という。) 製の燃料被覆管(いずれもジルコニウムを内張りしたもの)に入れた燃料棒を組み立てたものである。GNF3 型の燃料棒の配列は、10 行 10 列(10×10)であり、 本の燃料棒と 本の太径のウォータロッド(内部に燃料が入っていない)からなり、このうち 本の燃料棒は標準燃料棒の の長さの部分長燃料棒(短尺)であり、 本の燃料棒は標準燃料棒の の長さの部分長燃料棒(長尺)である。

GNF3 型は、その受ける熱、放射線、水力学的影響等を十分考慮の上、機械的及び熱的に十分安全であるように設計を行う。

<sup>1</sup> 本型式証明申請書における「高鉄ジルカロイ」を指す。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

(2) 国内 BWR 燃料設計の改良の経緯について

国内 BWR 燃料設計の変遷及び主要な改良点を燃料に関わる炉心の運転方法の改良と合わせて第 1-1 図に示す。また、9×9 燃料までの各燃料設計における改良の経緯を次に示す。

a. 7×7 燃料

被覆管： 冷間加工の被覆管を用いた燃料棒がわん曲する現象が見られたため、応力除去焼きなまし材に変更。

b. 7×7 改良燃料

被覆管： PCI<sup>2</sup>による燃料漏えい対策として、延性に優れ、そのばらつきが少ない再結晶化焼きなまし材を採用。

ペレット： PCI 応力緩和のため、ペレットの長さ対直径比を小さくし、面取り（チャンファ）を採用。

運転方法： PCI による燃料漏えいを低減するための運転管理面での対策として、ならし運転方法（PCIOMR<sup>3</sup>）を採用。

ゲッタ： ペレットの表面等に付着している微量の水分が被覆管と反応して発生する局部水素化物による漏えいを防止するため、燃料棒内のプレナム部に水分ゲッタを配置。また、製造工程において燃料棒内の水分管理を実施。

スパーサ： フレッチング特性改善のため、インコネル製のランタン型スプリングを採用。また、中性子経済をよくするため、ステンレスワイヤ製のスパーサから、中性子吸収が少ないジルカロイ製スパーサに変更。

c. 8×8 燃料

燃料棒本数： 燃料棒本数の増加によって、燃料棒の熱負荷（線出力密度）を軽減。

燃料有効長： 燃料有効長を従来の 3,660 mm から 3,710 mm に変更（BWR-5 に適用する場合）。

ウォータロッド： 減速材対燃料体積比の改善のため、燃料棒と同じ直径のウォータロッド 1 本を採用。

<sup>2</sup> PCI: Pellet-Clad Interaction (ペレット-被覆管相互作用)

<sup>3</sup> PCIOMR: Pre-Conditioning Interim Operating Management Recommendation

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

d. 新型 8×8 燃料

- ヘリウムガス： 燃料棒内に 3 気圧程度のヘリウムガスを封入することによって、ペレットと被覆管の熱伝達をよくし、ペレットの温度を下げ PCI 及び核分裂生成ガス（以下「FP ガス」という。）放出を低減。
- ウォータロッド： 減速材対燃料体積比の改善のため、ウォータロッド 2 本を採用。

e. 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料

- 被覆管①： 冷却材による被覆管の腐食特性を改善するために、熱処理を改善した高耐食性被覆管を採用。
- 〃 ②： 被覆管にジルコニウムの内張を施して PCI による応力を緩和するジルコニウムライナ被覆管を採用。
- 運転方法： ジルコニウムライナ被覆管の採用による、ならし運転の緩和・撤廃。

f. 高燃焼度 8×8 燃料

- ペレット： 熱伝導率の改善のため、ペレット密度を増加。
- スペーサ： 限界出力特性の向上を図るために、丸セル型のスペーサを採用。
- ウォータロッド： 減速材対燃料体積比を増加させるため、太径のウォータロッド 1 本を採用。
- ヘリウムガス： 燃料棒内のヘリウムガス圧を 5 気圧に加圧することによって、ペレットと被覆管の熱伝達をよくし、ペレットの温度を下げ PCI 及び FP ガス放出を低減。
- 上部タイプレート： 核熱水力安定性の改善を図るため、低圧損型の上部タイプレートを採用。

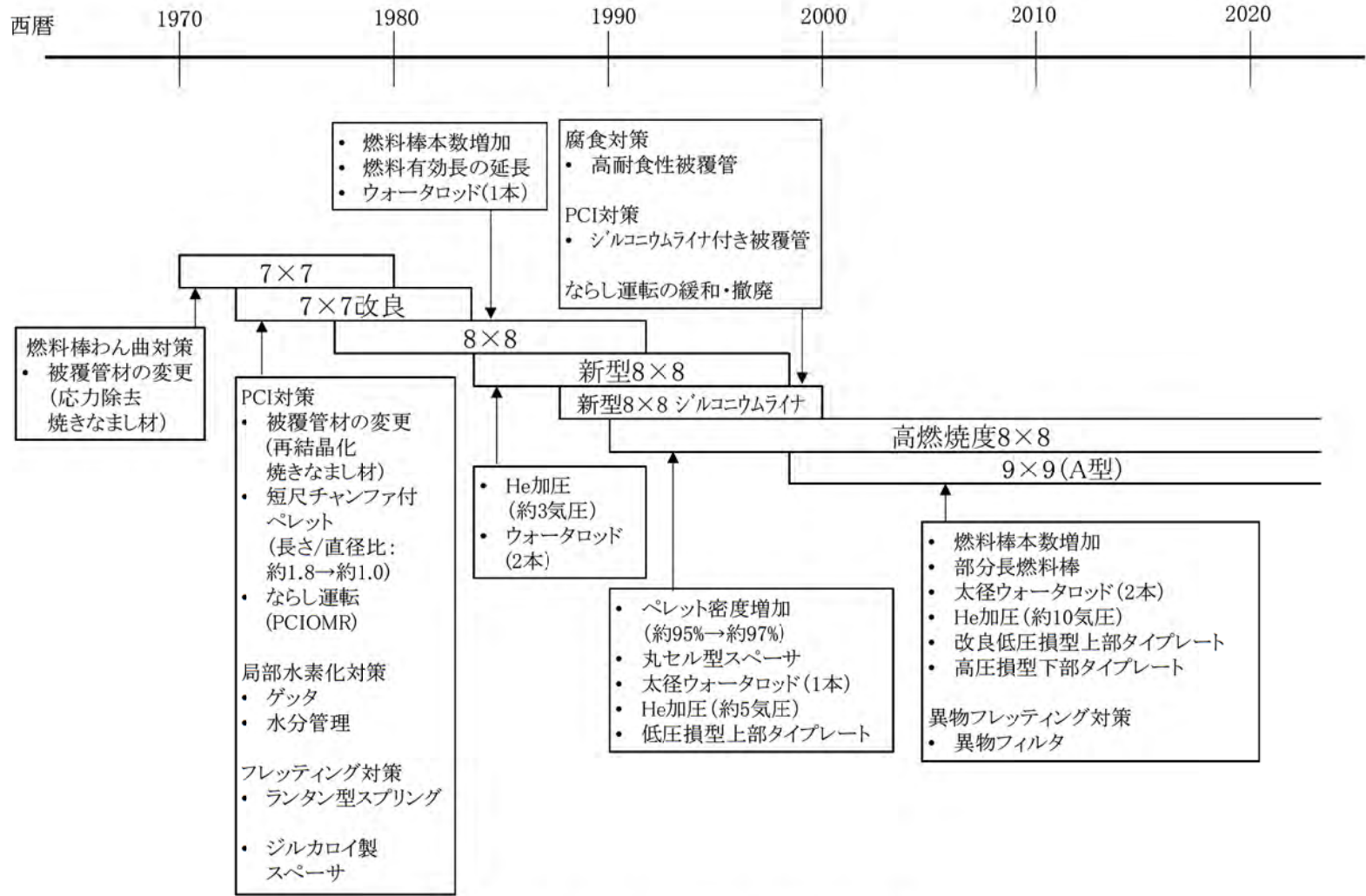
g. 9×9 燃料 (A 型)

- 燃料棒本数： 燃料棒本数の増加によって、平均線出力密度を低下させるとともに、核設計の自由度を増加。
- 部分長燃料棒： 核熱水力安定性の改善を図るため、74 本の燃料棒のうち 8 本は標準燃料棒の約 3 分の 2 の長さとした部分長燃料棒を採用。
- ウォータロッド： 減速材対燃料体積比の改善のため、太径のウォータロッド 2 本を採用。



GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

- ヘリウムガス： 燃料棒内のヘリウムガス圧を 10 気圧に加圧することによって、ペレットと被覆管の熱伝達をよくし、ペレットの温度を下げ PCI 及び FP ガス放出を低減。
- 上部タイププレート： 核熱水力安定性の改善を図るため、改良低圧損型上部タイププレートを採用。
- 下部タイププレート： 核熱水力安定性の改善を図るため、高圧損型の下部タイププレートを採用。また、異物の燃料体内への流入を防ぐため、異物フィルタを採用。



第 1-1 図 国内 BWR の燃料設計及び運転方法改良

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

(3) 海外における 10×10 燃料の実績について

海外においてグローバル・ニュークリア・フュエル・アメリカズ社(以下「GNF-A 社」という。)又はゼネラル・エレクトリック社(以下「GE 社」という。)が製造した 10×10 燃料としては、GE12、GE14、GNF2 及び GNF3 の 4 種類がある。その改良の主な経緯を第 1-2 表及び次に示す。また、これらの燃料体の概略図を第 1-2 図から第 1-5 図にそれぞれ示す。なお、本申請の GNF3 型の基本仕様は、GNF-Ziron の燃料被覆管等への適用を除き、米国で用いられているものと同等である。

a. GE12

燃料棒： 燃料棒本数の増加 (9 行 9 列から 10 行 10 列に変更)  
 スペーサ：   
  
 下部タイプレート： 異物フィルタの採用

b. GE14

スペーサ：

c. GNF2

部分長燃料棒： 長尺部分長燃料棒及び短尺部分長燃料棒の採用  
 (長尺 8 本、短尺 6 本)  
 被覆管：   
 ペレット：   
 スペーサ：

d. GNF3

標準燃料棒： 標準燃料棒本数の増加 (78 本から  本)  
 部分長燃料棒： 本数の変更 (長尺  本、短尺  本)  
 ウォータロッド：

上記 4 種類の 10×10 燃料としては、2021 年時点において  体の使用実績があり、そのうち燃料棒断面形状が同一である GNF2 及び GNF3 については  体の使用実績がある。GNF3 型は 2022 年 5 月時点で 4,200 体超の使用実績がある<sup>[1-1]</sup>。また、先行使用燃料(以下「LUA」という。)を含めると、ジルカロイ-2 被覆管を用いた GE12LUA においては、集合体平均燃焼度では  MWd/t を達成したものがある。ジルカロイ-2 及び GNF-Ziron 被覆管を用いた GE14LUA においては、集合体平均燃焼度  MWd/t、ペレット燃焼度  MWd/t 及び炉内滞在期間  年を達成したものがある。GNF2LUA にお

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

いては、ジルカロイ-2 被覆管を用いたものの場合、集合体平均燃焼度では [ ] MWd/t、ペレット燃焼度では [ ] MWd/t 及び炉内滞在期間では [ ] 年を達成したものがあり、GNF-Ziron 被覆管を用いたもの場合、集合体平均燃焼度では [ ] MWd/t、ペレット燃焼度では [ ] MWd/t 及び炉内滞在期間では [ ] 年を達成したものがある。GNF3LUA においてはジルカロイ-2 被覆管だけを用いており、集合体平均燃焼度 約 47,000 MWd/t、ペレット燃焼度 [ ] MWd/t 及び炉内滞在期間 約 5.6 年を達成したものがある [1-1]。

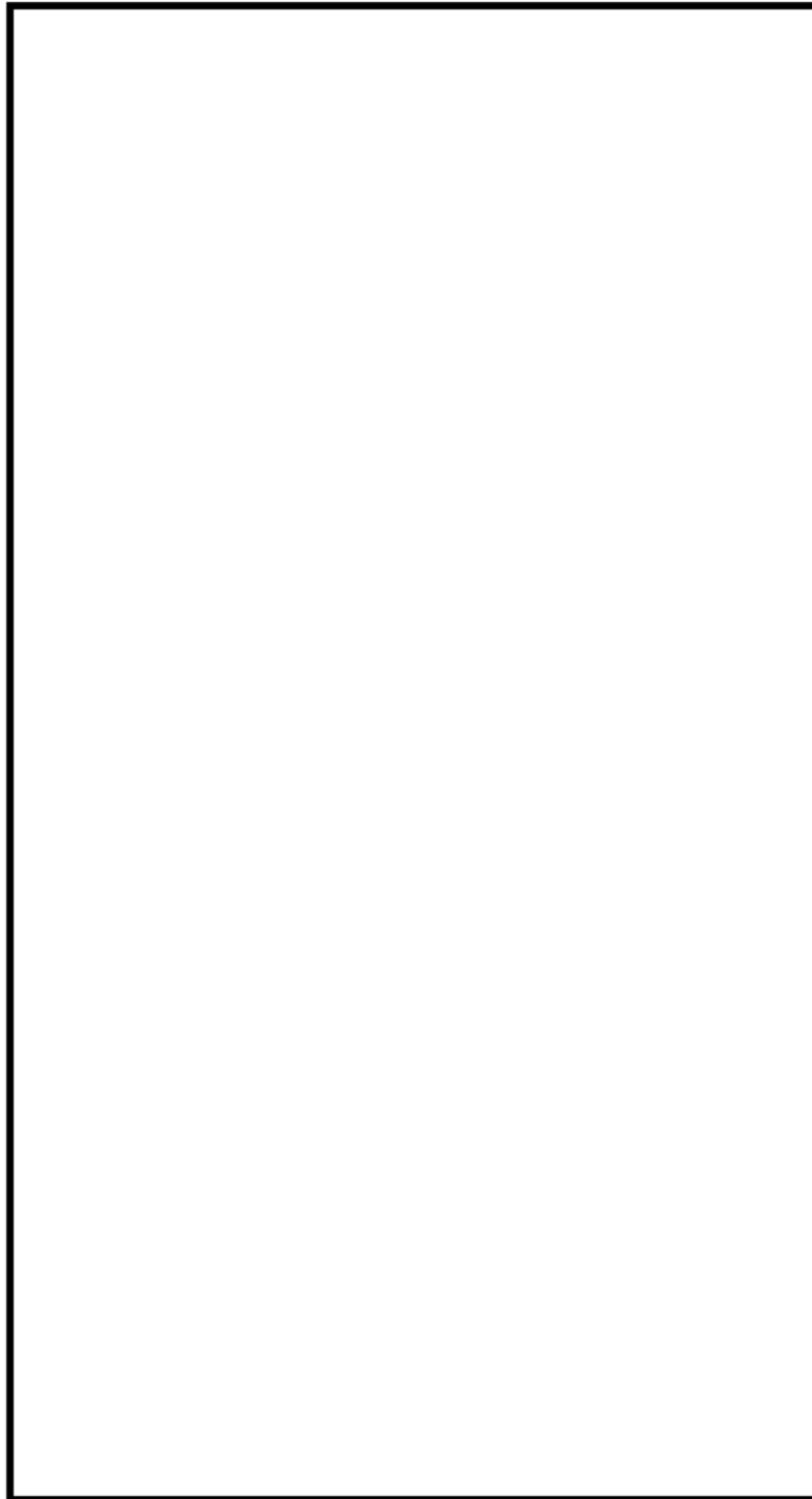
GNF-A 社/GE 社製燃料の燃料タイプ別の使用割合の推移及び燃料破損実績を第 1-6 図及び第 1-7 図にそれぞれ示す。現在までに使用されている GNF-A 社/GE 社製燃料は十分に高い信頼性を有しており、10×10 燃料の年間の燃料破損率は  $10^{-6}$ /本のオーダーと極めて低く、良好な実績を収めてきている。

第 1-2 表 海外 10×10 燃料及び国内既認可燃料の基本仕様及び各種実績

分類	海外				国内		
	GE12	GE14	GNF2	GNF3	9×9 燃料(A 型) (参考)	高燃焼度 8×8 燃料(参考)	
項目	GE12	GE14	GNF2	GNF3	9×9 燃料(A 型) (参考)	高燃焼度 8×8 燃料(参考)	
燃料タイプ	10×10	←	←	←	9×9	8×8	
燃料棒本数		←	←		74 本	60 本	
標準燃料棒本数		←	←		66 本	60 本	
部分長燃料棒本数		←	長尺: 8 本、短尺: 6 本		8 本	0 本	
被覆管材料	ジルカロイ-2	ジルカロイ-2 (LUA には GNF-Ziron を含む)	←	ジルカロイ-2 (国内用は GNF-Ziron も含む)	ジルカロイ-2	←	
ジルコニウム内張			あり	←	あり	←	
燃料被覆管外径					約 1.12 cm	約 1.23 cm	
燃料被覆管厚さ					約 0.71 mm うちジルコニウム 内張約 0.1 mm	約 0.86 mm うちジルコニウム 内張約 0.1 mm	
ペレット-燃料被覆管間隙					約 0.20 mm	←	
ペレット			UO <sub>2</sub> 、UO <sub>2</sub> -Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	←	UO <sub>2</sub> 、UO <sub>2</sub> -Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (LUA にはアルミナリケート 添加ペレットを含む)	UO <sub>2</sub> 、UO <sub>2</sub> -Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
ペレット直径					約 0.96 cm	約 1.04 cm	
ペレット密度					理論密度の約 97 %	←	
燃料棒有効長さ					(代表値)	(代表値)	
標準燃料棒					約 3.71 m	約 3.71 m	
部分長燃料棒					約 2.16 m		
ヘリウム封入圧					約 1.0 MPa	約 0.5 MPa	
スペーサ個数					7 個	←	
スペーサ形状・材料					丸セル型ジルカロイスペーサ (スプーサリング: インコネル) (GNF-Ziron の適用例あり)	丸セル型ジルカロイスペーサ (スプーサリング: インコネル)	
ウォータロッド本数・材料					2 本・ジルカロイ	1 本・ジルカロイ-2	
上部タイプレート					改良型	従来型	
下部タイプレート (異物フィルタ実績)			異物フィルタ有りのみ	←	異物フィルタ有りも含む	異物フィルタ無しのみ	
装荷開始年					2015	1996	1989
集合体平均燃焼度実績 (LUA 実績)					~約 47 GWd/t <sup>[1-1]</sup> (被覆管: ジルカロイ-2)	~53.0 GWd/t <sup>[1-3]</sup>	~47.9 GWd/t <sup>[1-4]</sup>
ペレット最高燃焼度実績 (LUA 実績)						~約 69 GWd/t <sup>[1-6]</sup>	~約 61 GWd/t <sup>[1-4]</sup>
照射期間実績(LUA 実績)					~約 5.6 年 <sup>[1-1]</sup> (被覆管: ジルカロイ-2)	~約 5.4 年 <sup>[1-3]</sup>	~約 5.5 年 <sup>[1-4]</sup>
燃料体数実績					約 4,200 体(2022 年) <sup>[1-1]</sup>	約 19,000 体	約 21,000 体
燃料タイプ別 漏えい燃料棒割合	約 0.0055 % <sup>[1-2]</sup>	約 0.0029 % <sup>[1-2]</sup>	約 0.0016 % <sup>[1-2]</sup>	0.24 体/1000 体 <sup>[1-1]</sup> (集合体単位の割合)	約 0.0006 %	約 0.0006 %	

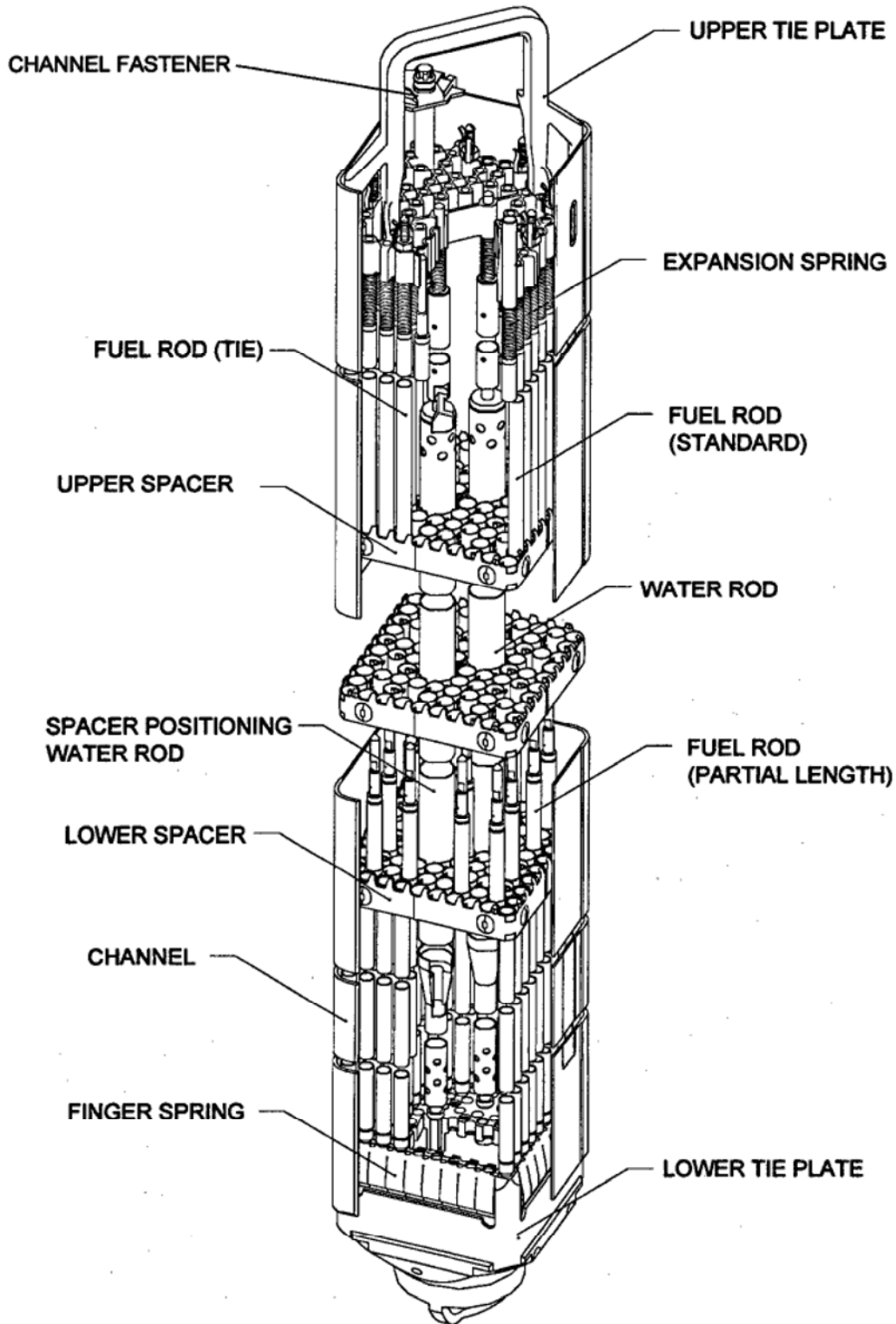
☐ 内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日



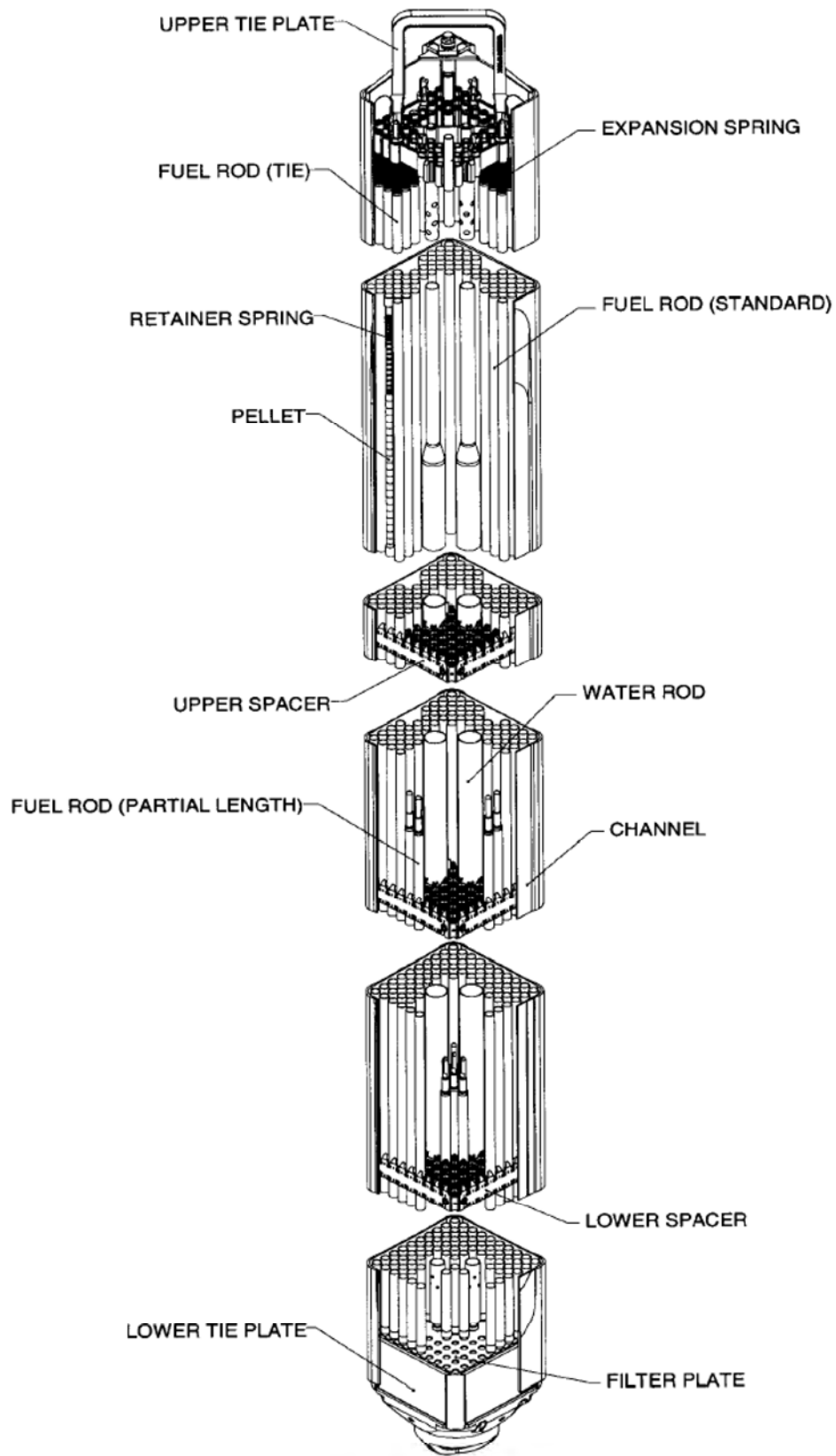
第 1-2 図 GE12 概略図

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日



第 1-3 図 GE14 概略図

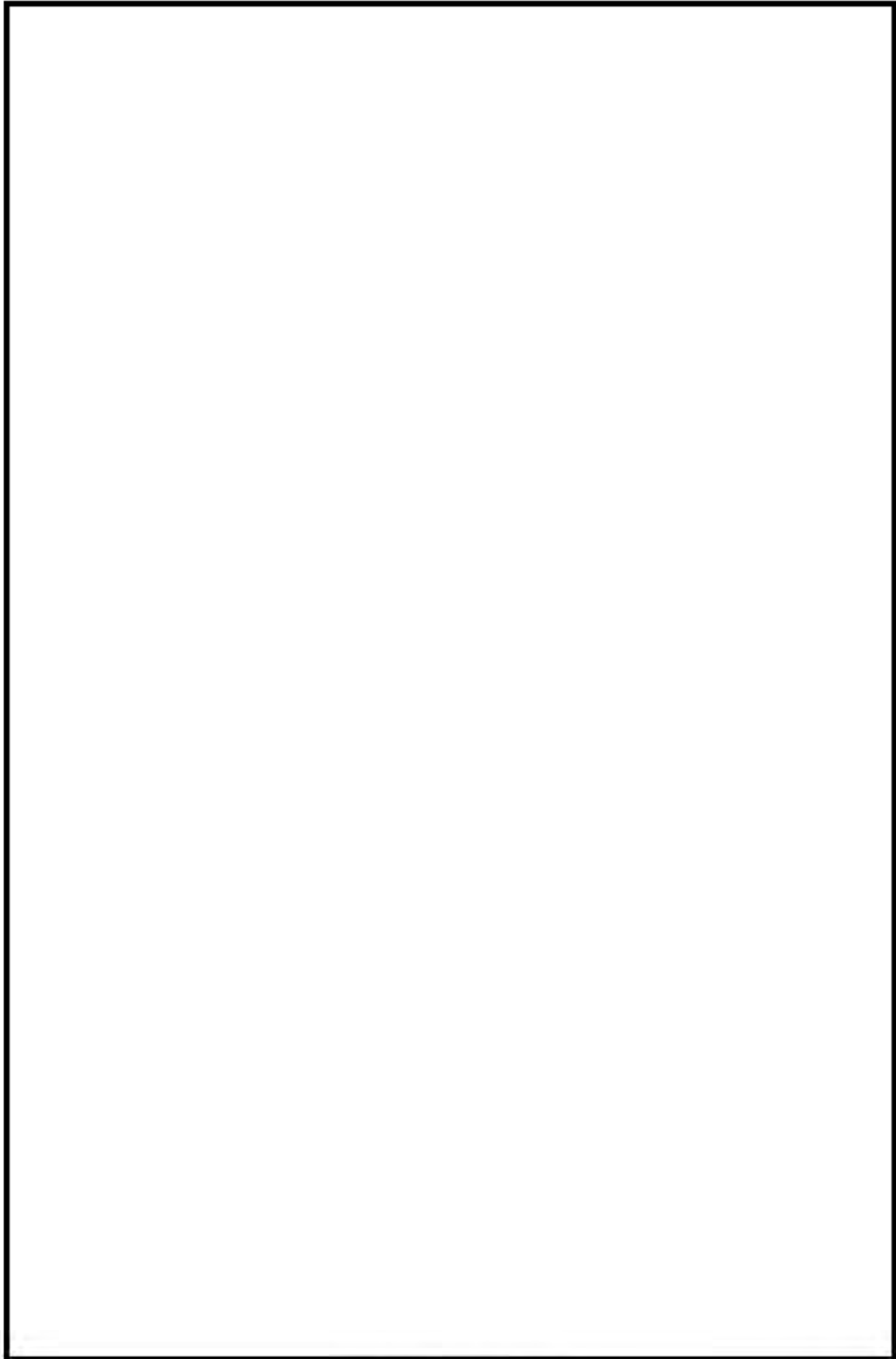
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日



第 1-4 図 GNF2 概略図

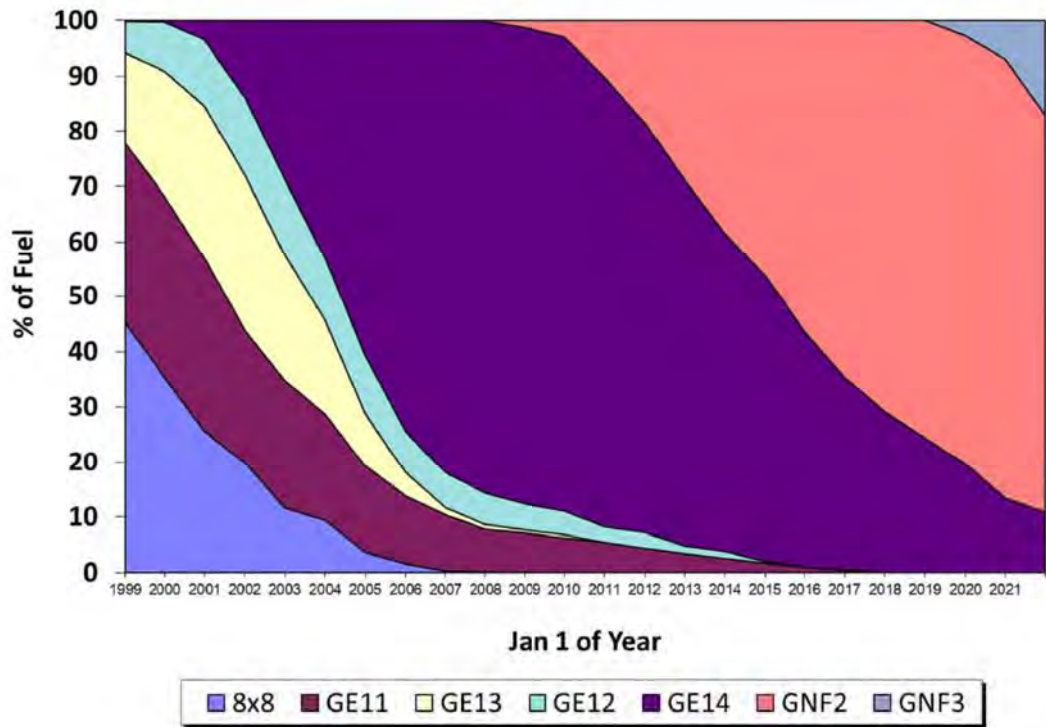


GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

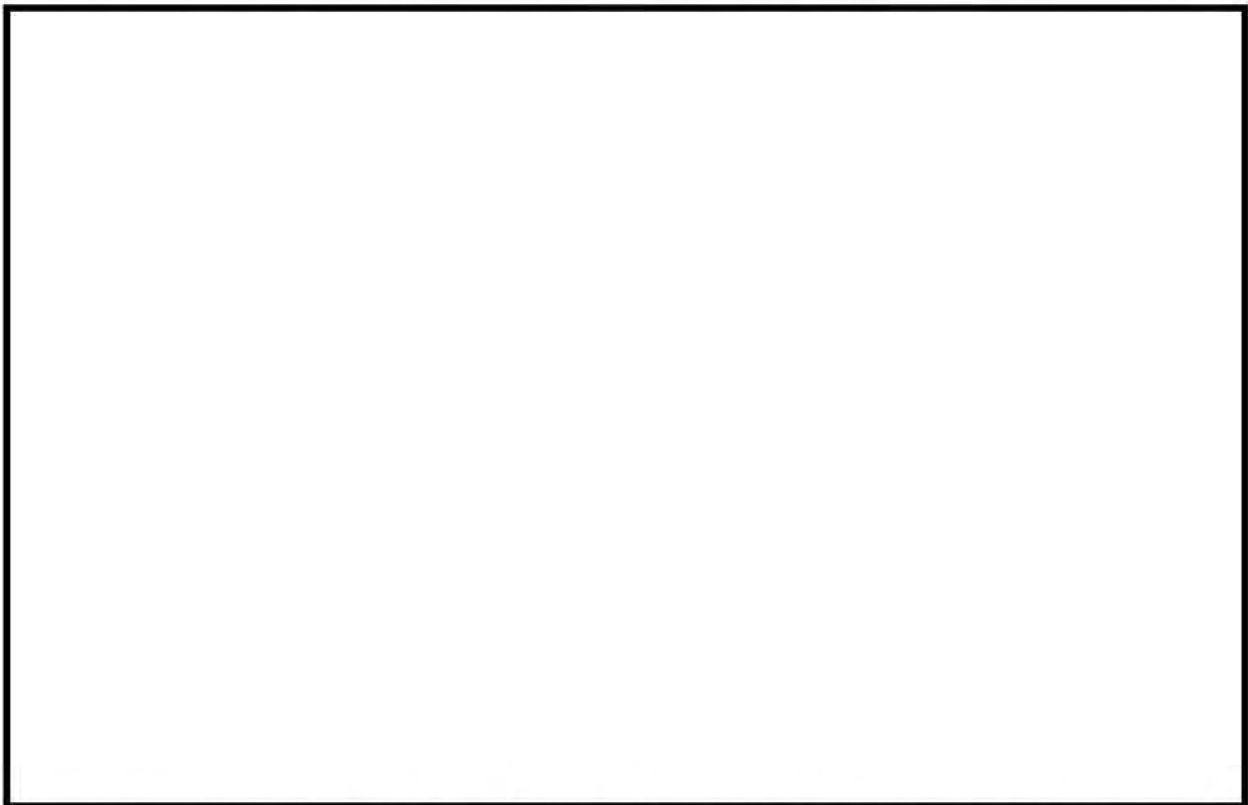


第 1-5 図 GNF3 概略図





第 1-6 図 海外における GNF-A 社/GE 社製 10×10 燃料等の燃料タイプ別の使用割合の推移  
(GE11 及び GE13 は 9×9 燃料、GE12 以降は 10×10 燃料)



第 1-7 図 海外における GNF-A 社/GE 社製燃料の破損実績 (破損の主要因も併記)

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

### 3. 燃料の基本仕様

GNF3 型の主要仕様を(1)、(2)及び第 3-1 表に、GNF3 型の構造図を第 3-1 図に示す。また、GNF3 型の主な設計目標及びそれに対する主な対応を第 3-2 図に示す。なお、燃料体平均濃縮度（ウラン 235 濃縮度）は 5.0 wt%以下である。

#### (1) 燃料棒

##### a. 燃料棒の配列及び本数

GNF3 型では、ウラン利用率の向上及び使用済燃料の低減を目的に、高燃焼度化を達成するために濃縮度を高めているが、これに伴う熱的余裕の減少、原子炉の停止余裕の減少などの影響に対応する観点から、種々の設計上の対応を加えている。熱的余裕の減少に対しては、燃料棒を 10 行 10 列（10×10）に配列し燃料体当たりの燃料棒本数を [ ] 本とすること、燃料有効長を 9×9 燃料（A 型）よりも長くすることで燃料体 1 体当たりの熱伝達面積を増加させ、平均線出力密度及び平均表面熱流束を低下させる設計としている。

原子炉の停止余裕の減少及びボイド反応度フィードバックの増加に対しては、[ ] 本の燃料棒のうち、[ ] 本は標準燃料棒の [ ] の長さの部分長燃料棒（短尺）、[ ] 本は標準燃料棒の [ ] の長さの部分長燃料棒（長尺）とし、部分長燃料棒（短尺）、部分長燃料棒（長尺）を、[ ] に配置し、燃料上部の減速材対燃料体積比を増加させることで対応している。また、燃料棒本数が増えることで圧力損失が増加するが、部分長燃料棒を配置すること及び後述する [ ] 二相流部での圧力損失を低減し、燃料体全体の圧力損失を 9×9 燃料（A 型）と同等にしている。

また、以上のような燃料棒設計の結果、燃料体 1 体当たりのウラン量は 9×9 燃料（A 型）よりも増加している。

##### b. 燃料棒の寸法

GNF3 型の燃料被覆管は、10 行 10 列の燃料棒配列に対応した寸法とし、外径は [ ] mm、厚さは [ ] mm（うち、ジルコニウム内張 [ ] mm）としている。

ペレット－燃料被覆管間隙は、ペレットから被覆管への熱伝達を高めてペレット温度を低減するため、ペレット－被覆管間の機械的相互作用の特性が過大とならない範囲で [ ] mm としている。

##### c. 初期ヘリウム封入圧

GNF3 型の燃料棒内には、FP ガスの放出に伴うペレット－被覆管の間隙における熱伝達の低下を抑えるとともに、FP ガスの蓄積による燃料棒内圧の上昇を緩和するため、熱伝導性の高いヘリウムガスを加圧充てんする。初期ヘリウム封入圧は [ ] MPa

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

とし、従来の燃料設計で実績のある範囲で、

(2) 燃料体

a. ウォータロッド

GNF3 型のウォータロッドの概略図を第 3-3 図に示す。

GNF3 型では、適切な減速材対燃料体積比を設定する観点から、本の太径の管状のウォータロッドを燃料体の中央部に配し、

の領域を管状のウォータロッドで置換する設計としている。  
内部を冷却材が通過する構造と  
 している。

を採用している。

なお、第 3-3 図に示す 9×9 燃料 (A 型) のウォータロッド I では、

GNF3 型   
  
  
  
と考えられる。

b. スペーサ

GNF3 型のスペーサの概略図を第 3-4 図に示す。

GNF3 型では、燃料体軸方向に  個のスペーサを配置している。

を採用している。  
  
設計としている。

スペーサは、外枠、と  
 し、その 燃料棒間の間隙を保つ役割を果たして  
 いる。  
設計としている。

スペーサの材料には、全ての部品において、高温強度が高く、耐食性、耐熱性に優れたインコネルを採用している。インコネルは 9×9 燃料 (A 型) のスペーサのスプリングに採用されている材料と同じである。9×9 燃料 (A 型) におけるジルコニウム合

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

金製の [ ]  
[ ]

c. タイプレート

タイプレートは、10 行 10 列の燃料棒配列に対応した構造としている。

上部タイプレートは、 [ ]

[ ] とすることによって、圧力損失を低減させている。

下部タイプレートは、燃料体内への異物の流入を抑制するために、異物フィルタを備えた設計としている。また、9×9 燃料（A 型）と同様に下部タイプレートの圧力損失を増加させる設計とし、核熱水力安定性の改善を図った構造としている。

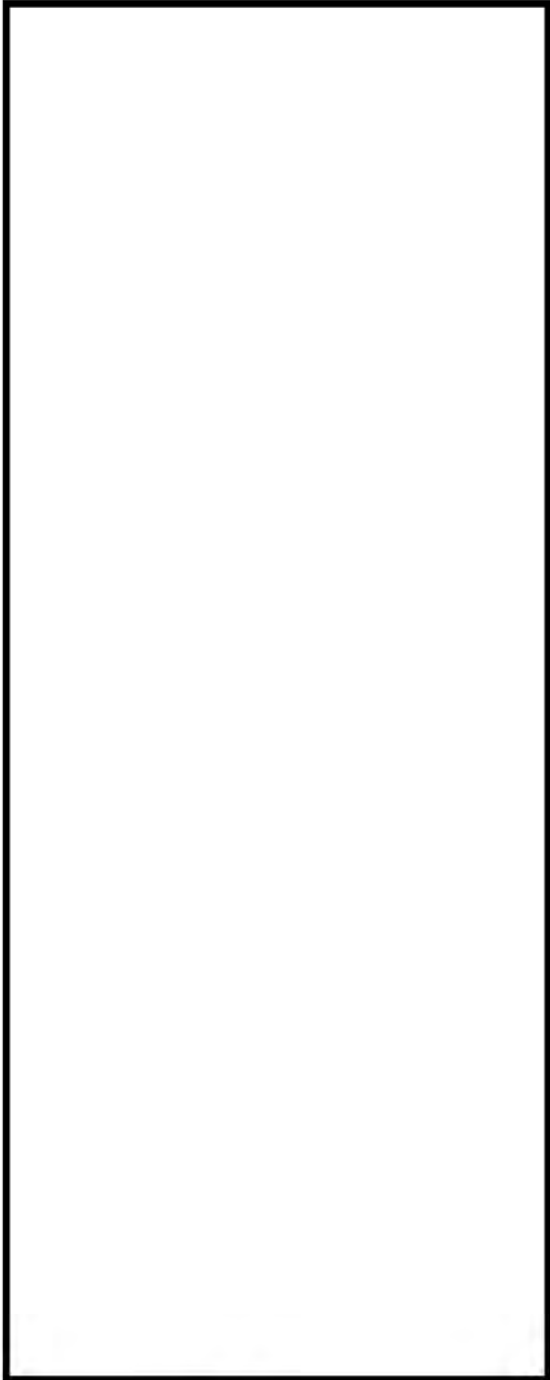
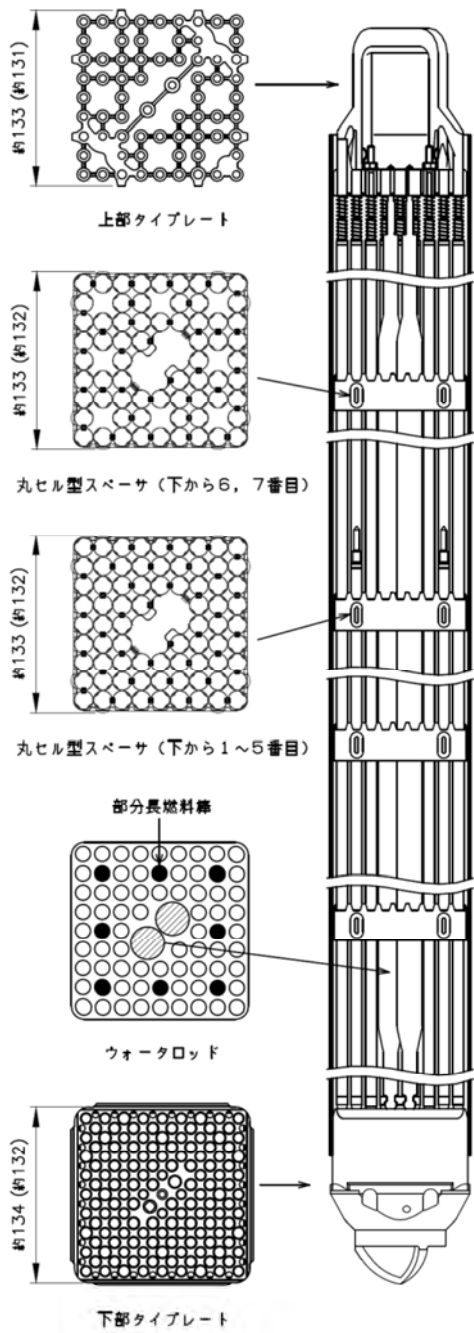
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

第 3-1 表 GNF3 型の基本仕様

項目	GNF3 型	9×9 燃料 (A 型) (参考)
ペレット直径	<input type="text"/> cm	約 0.96 cm
ペレット長さ	<input type="text"/> cm	約 1.0 cm
ペレット密度	理論密度の <input type="text"/> %	理論密度の約 97 %
ペレット材	UO <sub>2</sub> 、UO <sub>2</sub> -Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	UO <sub>2</sub> 、UO <sub>2</sub> -Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
燃料被覆管外径	<input type="text"/> cm	約 1.12 cm
燃料被覆管厚さ	<input type="text"/> mm (うちジルコニウム内張 <input type="text"/> mm)	約 0.71 mm (うちジルコニウム内張 約 0.1 mm)
燃料被覆管材料	ジルカロイ-2 (ジルコニウム内張) 又は GNF-Ziron (ジルコニウム内張)	ジルカロイ-2 (ジルコニウム内張)
燃料体全長 (つかみ部分を含む)	<input type="text"/> m	約 4.47 m
燃料棒有効長さ 標準燃料棒 部分長燃料棒	<input type="text"/> m 長尺: <input type="text"/> m 短尺: <input type="text"/> m	約 3.71 m 約 2.16 m
ペレット-燃料被覆管間隙	<input type="text"/> mm	約 0.20 mm
プレナム体積比 標準燃料棒 部分長燃料棒	<input type="text"/> 長尺/短尺: <input type="text"/>	約 0.1 約 0.2
ウラン濃縮度(燃料体平均)	5.0 wt%以下	5.0 wt%以下
ペレット最高燃焼度	<input type="text"/> MWd/t	約 75,000 MWd/t
最大線出力密度	44.0 kW/m	44.0 kW/m
ヘリウム封入圧	<input type="text"/> MPa	約 1.0 MPa
ガドリニア濃度	約 10 wt%以下	約 10 wt%以下
ウォータロッド外径	<input type="text"/> cm	約 2.49 cm

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

(単位：mm)



9×9 燃料 (A 型)

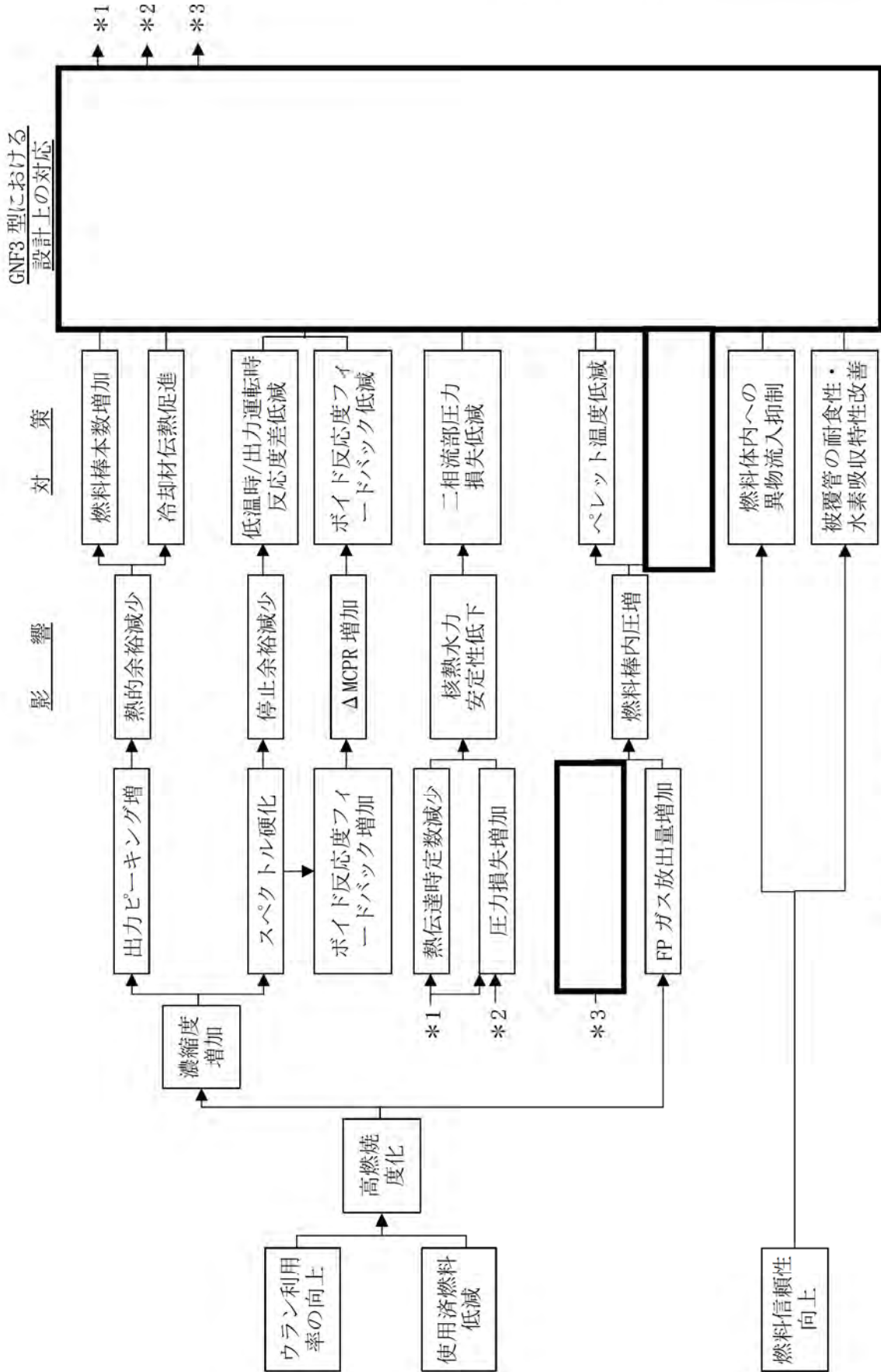
GNF3 型

注記：図中の寸法は、N 格子<sup>[3-1]</sup>及びC 格子<sup>[3-1]</sup>炉心タイプの燃料をベースに記載。

S 格子<sup>[3-1]</sup>炉心タイプの燃料の寸法は ( ) 内に記載。

第 3-1 図 GNF3 型の構造図

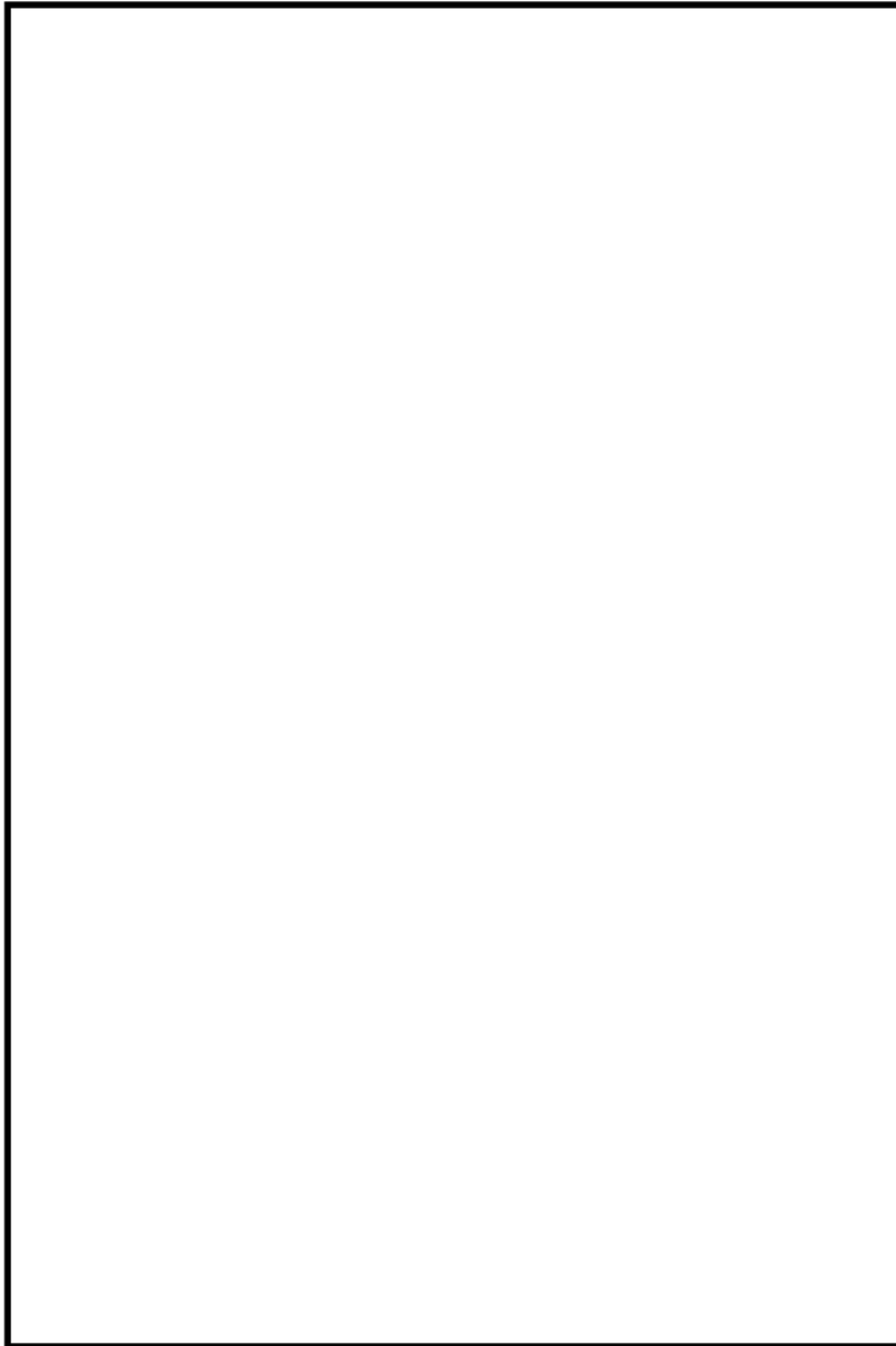
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日



第 3-2 図 GNF3 型の主な設計目標と対応



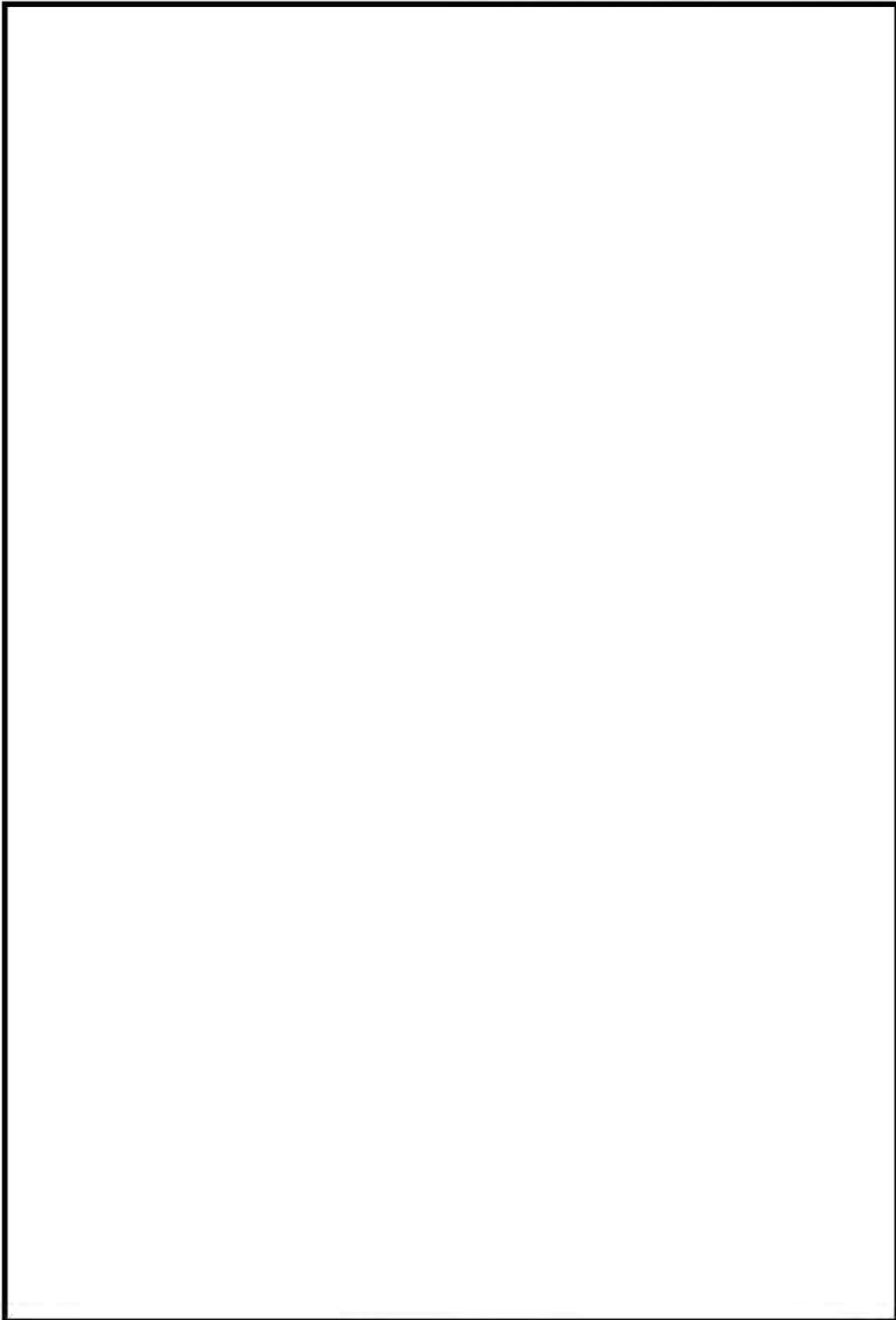
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日



9×9 燃料 (A 型)      9×9 燃料 (A 型)      GNF3 型  
(ウォータロッド I)      (ウォータロッド II)

第 3-3 図 ウォータロッド

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日



第 3-4 図 スペーサ

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023年12月22日

(参考) 減速材対燃料体積比の適正化について

燃料の高燃焼度化のためには、一般に濃縮度を増加させる必要があるため、中性子スペクトルの硬化によるボイド反応度フィードバックの増加、原子炉の停止余裕の減少が生じる。

そこで、GNF3 型では、部分長燃料棒及びウォータロッドの設計を改良し、減速材対燃料体積比 (H/U 比) を適正化することで炉心特性の改善を図っている。

#### a. ボイド反応度フィードバック

一般に燃料の濃縮度を増加させると、燃料の無限増倍率は増加し、そのピークを与える H/U 比の大きな側へ移動する (第 3-5 図参照)。また、ボイド反応度フィードバックは、中性子の漏れの効果を考えない場合、無限増倍率の H/U 比の感度、すなわち図中の接線の傾きに相当するため、燃料格子設計を変更せずに濃縮度を増加すると、ボイド反応度フィードバックは大きくなる。ボイド反応度フィードバックの増加は、加圧過渡事象などの運転時の異常な過渡変化における  $\Delta$ MCPR の増加及び核熱水力安定性上の余裕を減少させる原因となる。

このため、GNF3 型では、

燃料上部の H/U 比を増加させ、ボイド反応度フィードバックが過度に大きくならないようにしている。

#### b. 原子炉の停止余裕

第 3-6 図に、高燃焼度化に伴う原子炉の停止余裕の減少についての概念図を示す。

BWR では、出力運転中 (①の状態) にはボイドの発生によって大きな負の反応度フィードバックが生じるため、低温時 (②の状態) において炉心反応度が最大となる。(低温時と出力運転時の反応度差を低温時－出力運転時反応度差という。)

このとき (低温時)、全ての制御棒が炉心内にあるとすると、炉心の反応度は制御棒の反応度価値分だけ低下して、③の状態になる。この状態から、最大反応度価値をもつ制御棒が引き抜かれているとすると、炉心の実効増倍率は④の状態となる。この状態における未臨界度 (①と④の状態における実効増倍率の差) が原子炉の停止余裕になる。

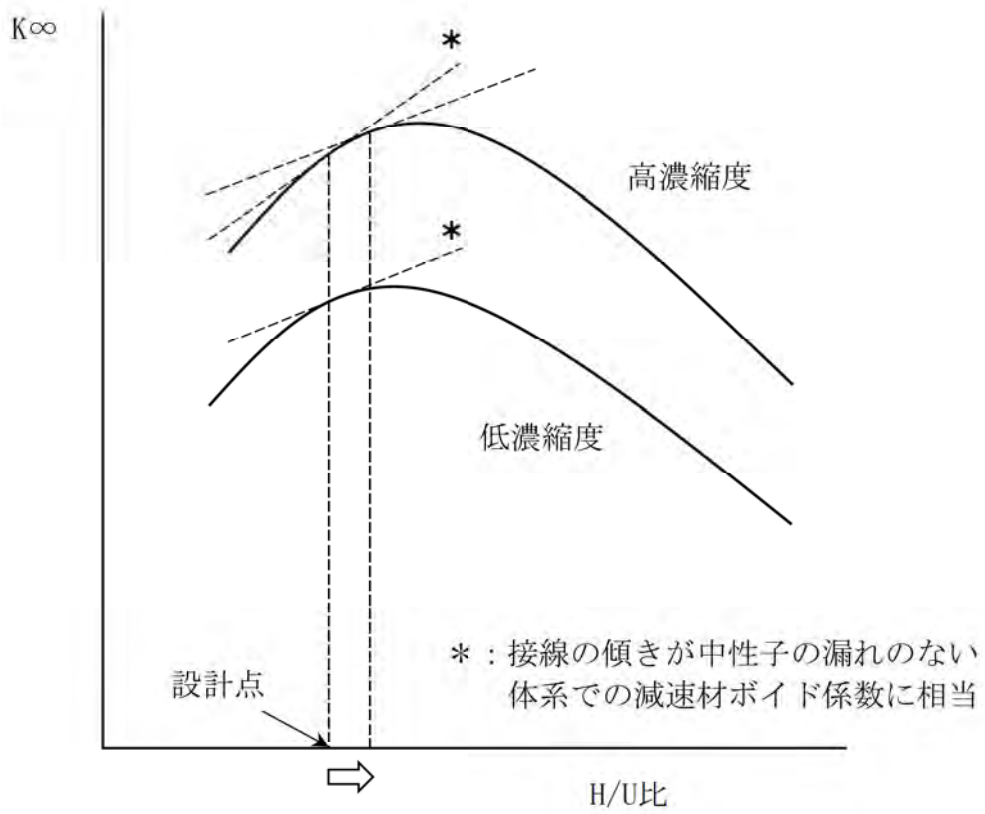
H/U 比と低温時－出力運転時反応度差の関係を第 3-7 図に示す。この図に示すとおり、高燃焼度化のため濃縮度増加を図るとき、H/U 比を増加させないと中性子スペクトルが硬化し、低温時－出力運転時反応度差が増加することとなる。このため、格子形状を変えずに高燃焼度化 (濃縮度増加) を図ると、第 3-6 図の破線に示すように②の状態、③の状態での実効増倍率は高くなり、④の状態の原子炉の停止余裕が減少することになる。

一般に、BWR では出力運転時 (ボイドのある状態) にある程度軸方向出力分布が平坦化するような核設計がされるため、ボイドが存在しない低温時には出力分布は上部ピークとなることから、上部について H/U 比を適正化することで原子炉の停止余裕を改善することが

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

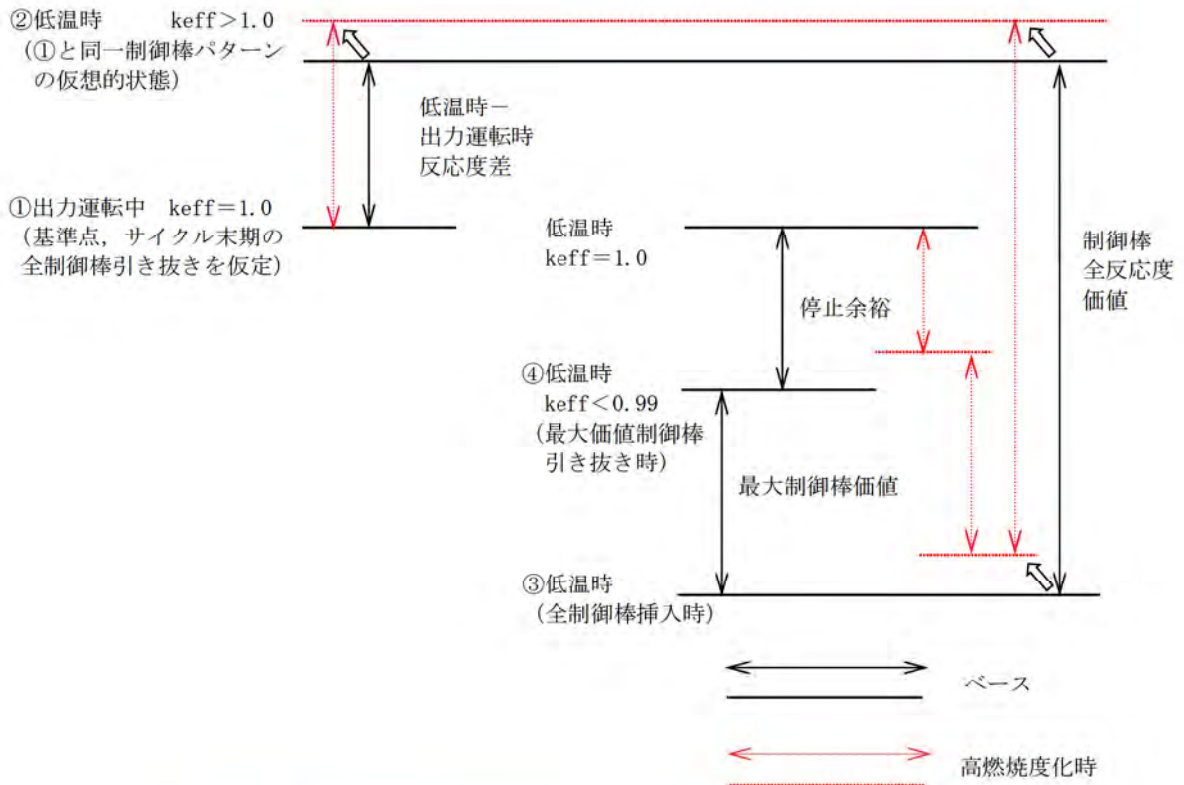
できる。したがって、  
及び部分長燃料棒を採用する GNF3 型は、9×9 燃料（A 型）と同様に燃料上部における低温時での反応度が抑制されて、原子炉の停止余裕が改善されることになる。さらに、  
ことで、H/U 比の適正化効果をより大きくしている。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023年12月22日

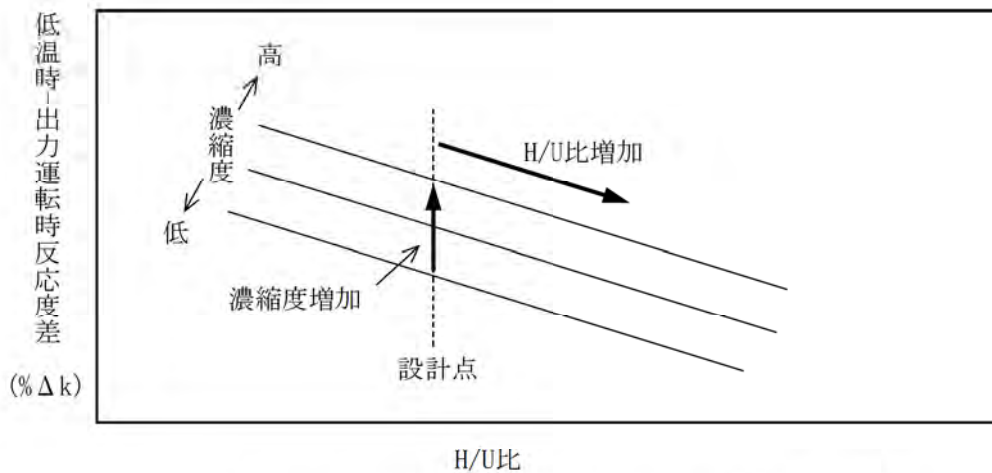


第 3-5 図 中性子の漏れのない体系での減速材ボイド係数に対する H/U 比及び濃縮度の影響

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023年12月22日



第 3-6 図 高燃焼度化による原子炉の停止余裕減少の概念図



第 3-7 図 H/U 比と低温時—出力運転時反応度差の関係

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

(参考) 熱的特性の改善対策について

燃料の高燃焼度化のためには、一般に濃縮度を増加させる必要があるため、燃料体間の出力の相違が増加し、結果として熱的余裕が減少する。

そこで、GNF3 型では、10 行 10 列燃料棒配列の採用、スペーサ設計の改良によって、熱的特性の改善を図っている。

a. 10 行 10 列燃料棒配列の採用

GNF3 型では、燃料棒配列を 10 行 10 列に変更し、燃料有効長を増加することによって伝熱面積を増やすことで、平均線出力密度を低下させるとともに、表面熱流束を減少させることでドライアウト（燃料棒を覆う液膜の消失）が生じにくくしている。なお、10 行 10 列に変更することで圧力損失が増加するが、圧力損失の大きい上部に燃料棒がない部分長燃料棒を採用し、圧力損失を低減している。

b. スペーサ設計の改良

スペーサには冷却材の流れの乱れを大きくし、冷却材の伝熱を促進することで限界出力を改善する効果がある。GNF3 型では、燃料体軸方向に [ ] 個のスペーサを配置し、また、ドライアウトは燃料体上部側で発生しやすいことから、 [ ] [ ] 設計としている。 [ ] 個のスペーサを配置することで圧力損失が増加するが、 [ ] [ ]

また、高燃焼度 8×8 燃料及び 9×9 燃料（A 型）で採用されている丸セル型スペーサにおいては、スペーサの外枠の上部にフロータブと称する突起が設置され、冷却材流を偏向させることによって燃料棒表面への冷却材液相供給を増加する役割を果たしているが、同様の設計は GNF3 型でも踏襲されている。GNF3 型では [ ] スペーサを採用したため、 [ ] [ ] [ ]

[ ] GNF3 型の限界出力の改善に寄与している。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

#### 4. 燃料の設計手法

燃料の設計においては、2. (2) で上述したとおり、次の具体的設計方針を満足できる設計とする。

- a. GNF3 型は、運転時の異常な過渡変化時において、発電用原子炉施設の各系統とあいまって、燃料の許容損傷限界の一つである被覆管に 1%の円周方向平均塑性ひずみが生じる線出力密度を超えないこと。
- b. 燃料棒内圧は、通常運転時において、被覆管の外向きのクリープ変形によってペレットと被覆管のギャップが増加する圧力(限界内圧)を超えないこと。
- c. 被覆管応力は、許容応力以下であること。
- d. 設計応力サイクル条件及びサイクル数から計算された疲労の累積係数は 1 以下であること。

また、2. (2) で前述したとおり、被覆管の水素化、フレタィング腐食、ペレット-被覆管相互作用、使用中の燃料棒の変化等による燃料体の過度の寸法変化、燃料体の輸送及び取扱い時の健全性等についても考慮し、総合的に燃料の健全性を評価する。

GNF3 型においては、後段で詳述する個別の設計手法を用いて次の(1)～(4)の解析評価を実施することによって、上記の具体的設計方針を満足する設計であることを確認する。また、次の(5)のその他燃料健全性評価等によって、総合的に燃料健全性が維持されることを確認する。

- (1) 燃料棒熱・機械設計評価
- (2) 燃料棒内圧評価
- (3) 燃料被覆管応力評価
- (4) 燃料被覆管疲労評価
- (5) その他健全性評価等

各評価の方法等について、次の(1)～(5)項に示す。また、(1)～(4)の解析評価の概略フローを第 4-1 図に示す。

##### (1) 燃料棒熱・機械設計評価

燃料棒熱・機械設計評価では、炉心内の全ての燃料棒が燃料の寿命中に経験する出力を包絡し、かつ、これに余裕を見た出力として設計用出力履歴を定め、これを用いて被覆管円周方向 1%塑性ひずみに対する出力余裕及び燃料棒内圧を統計的に評価する。本評価手法は、原子炉安全基準専門部会報告書「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について」（昭和 63 年 5 月 12 日原子力安全委員会了承）で妥当と判断され、高燃焼度 8×8 燃料及び 9×9 燃料（A 型）へ適用されてきたものである。GNF3 型は後述のとおり燃料棒熱・機械設計コード



GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

PRIME03<sup>[4-1]</sup> (以下、「PRIME」という) を評価に適用できるため、本燃料設計手法を GNF3 型に適用できると考えられる。

a. 評価基準

「燃料被覆管の円周方向の平均塑性ひずみが 1%以下であること」を運転時の異常な過渡変化時に対する燃料棒熱・機械設計評価に適用する評価基準とする。

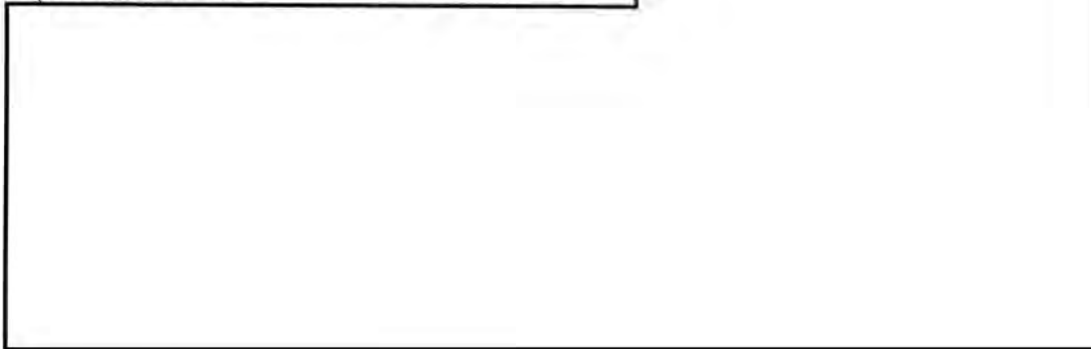
b. 評価条件

燃料棒熱・機械設計評価では、燃料棒熱・機械設計コード PRIME を用いる。PRIME の GNF3 型への適用性については付録-1 に示す。

本評価に適用する GNF3 型の主要な熱・機械設計評価条件を第 4-1 表に示す。また、UO<sub>2</sub> 燃料棒及び Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 入り燃料棒の設計用出力履歴を第 4-2 図に示す。Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 入り燃料棒は、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加によってペレット熱伝導率が低下するため、UO<sub>2</sub> 燃料棒と同じ設計出力履歴を適用した場合、UO<sub>2</sub> 燃料棒に比べペレット温度が上昇する傾向となり、設計上の余裕が小さくなる。このため、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 入り燃料棒に適用する設計用出力履歴は、

第 4-2 図には代表例として、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加濃度 2.0 wt%及び 10.0 wt%の Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 入り燃料棒の設計用出力履歴を示している。

本章(2)項で述べる燃料棒内圧評価においては、PRIME の内圧解析結果を入力条件として適用する。燃料棒内圧の計算においては、運転サイクル中における燃料の軸方向出力分布の変化を考慮した設定としている。燃料棒内圧計算に用いる標準燃料棒の軸方向出力分布を第 4-3 図に示す。運転サイクルは



c. 評価方法

上述した評価条件を用いて、評価対象とする代表的な燃焼度点における被覆管の円周方向塑性ひずみの設計出力時点からの増分が 1%に至るまでの出力 (以下、「1%塑性ひずみ相当出力」という)、出力余裕<sup>(注)</sup> 及び後述の評価に用いる燃料棒内圧につい

$$(\text{注}) \text{ 出力余裕 (\%)} = \left( \frac{\text{1\%塑性ひずみ相当出力}}{\text{設計出力}} - 1 \right) \times 100$$

内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023年12月22日

て、第 4-2 表に示す入力変数（燃料棒仕様、炉心条件等）の統計的分布及びコードの予測の不確かさを考慮し、誤差伝播理論に基づき統計的に評価する。ここで得られた 1%塑性ひずみまでの出力余裕の 95%確率下限値が設置（変更）許可申請書の添付書類十における運転時の異常な過渡変化の解析で評価される最大過出力値より大きいことを確認する。なお、この条件が満たされることは、設置（変更）許可申請等において確認される。

燃料棒熱・機械設計評価における統計評価方法の概略図を第 4-4 図に示す。また、1%塑性ひずみ相当出力の評価方法の模式図を第 4-5 図に、燃料の出力上昇に伴う被覆管塑性ひずみ増加の模式図を第 4-6 図にそれぞれ示す。

#### i) 誤差伝播理論について

燃料棒熱・機械設計評価において用いている誤差伝播理論について説明する。Y が、Y に影響を及ぼす互いに独立な入力変数  $X_1, X_2, \dots, X_n$  の連続である任意の関数で表される場合を考える。

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

この場合、Y の入力変数  $X_i$  に対する感度を  $\frac{\partial f}{\partial X_i}$  とすると、入力変数  $X_i$  がそれぞれ

$\delta X_i$  だけ変動したとき、Y に波及する量  $\delta Y$  は

$$\delta Y = \frac{\partial f}{\partial X_1} \delta X_1 + \frac{\partial f}{\partial X_2} \delta X_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial X_n} \delta X_n$$

と表せる。

このとき、Y の標準偏差  $\sigma_Y$  は、 $X_i$  の標準偏差  $\sigma_{X_i}$  を用いて次のように書ける。

$$\sigma_Y^2 = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial X_i} \right]^2 \cdot \sigma_{X_i}^2$$

#### ii) PRIME を用いた統計評価方法

PRIME コードを用いて、1%塑性ひずみまでの出力余裕、燃料棒内圧、燃料温度等の燃料棒特性の統計的分布（公称値及び標準偏差）を次のように評価する。

- 入力項目のうち、統計的分布（公称値  $\bar{X}_i$  及び標準偏差  $\sigma_{X_i}$ ）をもった入力変数  $X_i$  として燃料棒寸法、炉心条件等の入力を選定する。これらの入力変数の標準偏差は、製造仕様値、実機運転実績データ等に基づいて設定する。コードの予測の不確かさについては、PRIME を用いた計算値と測定値との間のばらつきの統計評価結果によって標準偏差を設定する<sup>[4-1]</sup>。これらの入力変数の統計的分布は正規分布を仮定する。
- 入力変数  $X_i$  の全ての値を公称値  $\bar{X}_i$  とすることによって、燃料棒特性の公称値  $\bar{Y}$  を得る（公称解析）。
- 一つの入力変数  $X_i$  を公称値  $\bar{X}_i$  から  $\Delta X_i$  だけ変化させて、燃料棒特性の公称値  $\bar{Y}$  から

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

の変化  $\Delta Y_i$  を求める。これを全ての入力変数一つ一つに対して評価する（感度解析）。

- 誤差伝播理論に基づき入力変数  $X_i$  の標準偏差  $\sigma_{x_i}$  を用いて、次式によって燃料棒特性  $Y$  の標準偏差  $\sigma_Y$  を計算する。

$$\sigma_Y^2 = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\Delta Y_i}{\Delta X_i} \right]^2 \cdot \sigma_{X_i}^2$$

以上によって燃料棒特性（1%塑性ひずみまでの出力余裕、燃料棒内圧、燃料温度等）の統計的分布（公称値  $\bar{Y}$  及び標準偏差  $\sigma_Y$ ）が求まる。これを用いて 1%塑性ひずみまでの出力余裕の 95%確率下限値（ $1.645 \sigma_Y$  に相当）を評価し、それが最大過出力値より大きいことを確認する。

また、この方法によって得られた燃料棒内圧の統計的分布は、後述の燃料棒内圧評価及び被覆管応力評価の統計的入力とする。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

第 4-1 表 GNF3 型の主要な燃料棒熱・機械設計評価条件

項目	設定値
ペレット最高燃焼度	<input type="text"/> GWd/t *1
最大線出力密度	44.0 kW/m
炉内滞在年数	8 年

\*1 GNF3 型の申請範囲は  GWd/t までとするが、解析は  GWd/t まで実施している。

第 4-2 表 GNF3 型の燃料棒熱・機械設計評価に用いる統計入力変数

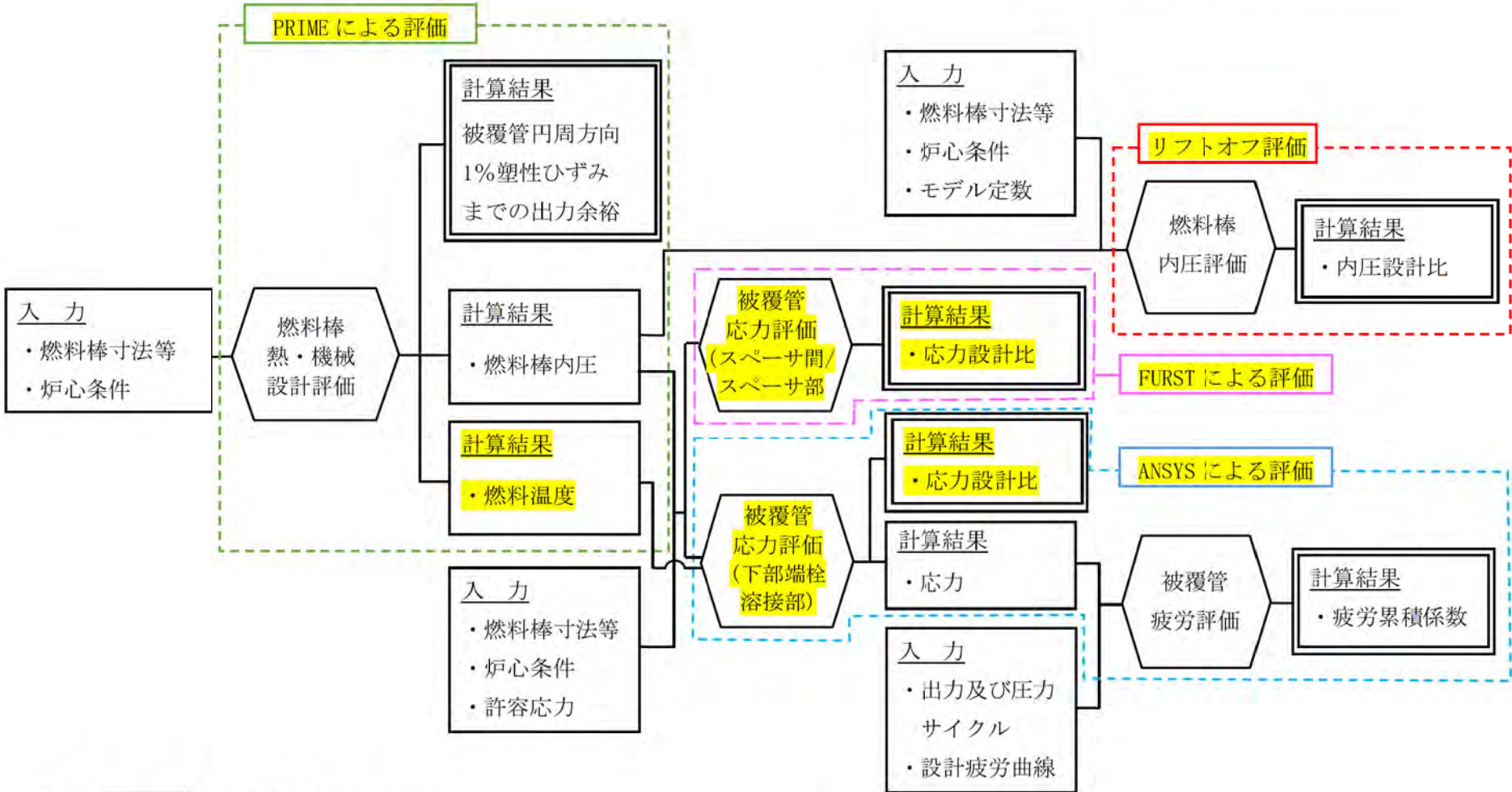
統計入力変数
コードの予測の不確かさ
冷却材圧力
ペレット-被覆管ギャップ
被覆管肉厚
燃料有効長
プレナム体積
ガドリニア濃度*1
ペレット密度
スタック密度
ペレット焼きしまり
ペレット粒径*2
ペレット表面粗さ
被覆管内面粗さ
ヘリウム封入圧
クラッド付着速度
酸化膜生成速度

\*1 ガドリニア燃料棒の場合に適用する。

\*2 PRIME03 コードの FP ガス放出モデルはペレット粒径に依存するため、GNF3 型において追加した統計入力変数。

内は商業機密のため、非公開とします。

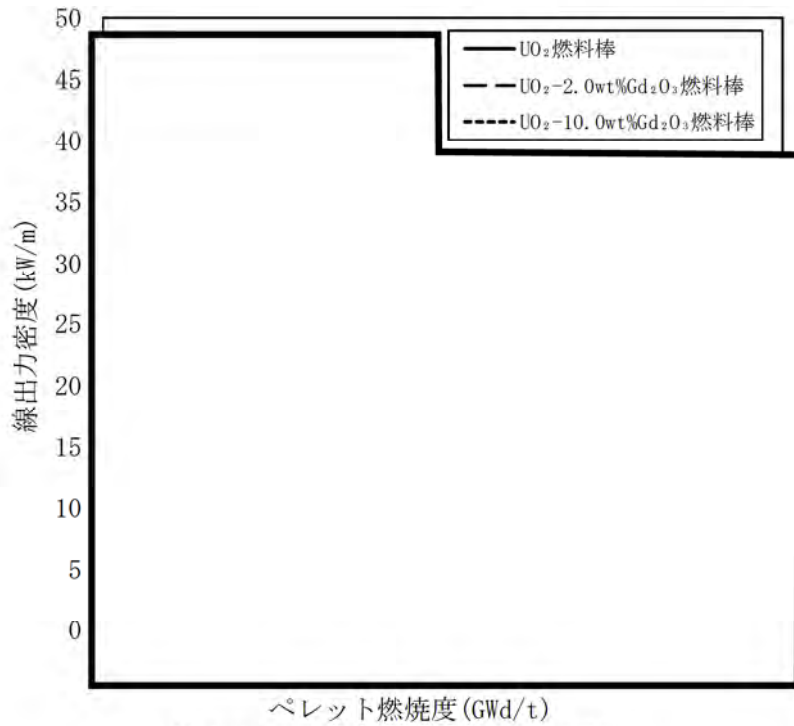
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023年12月22日



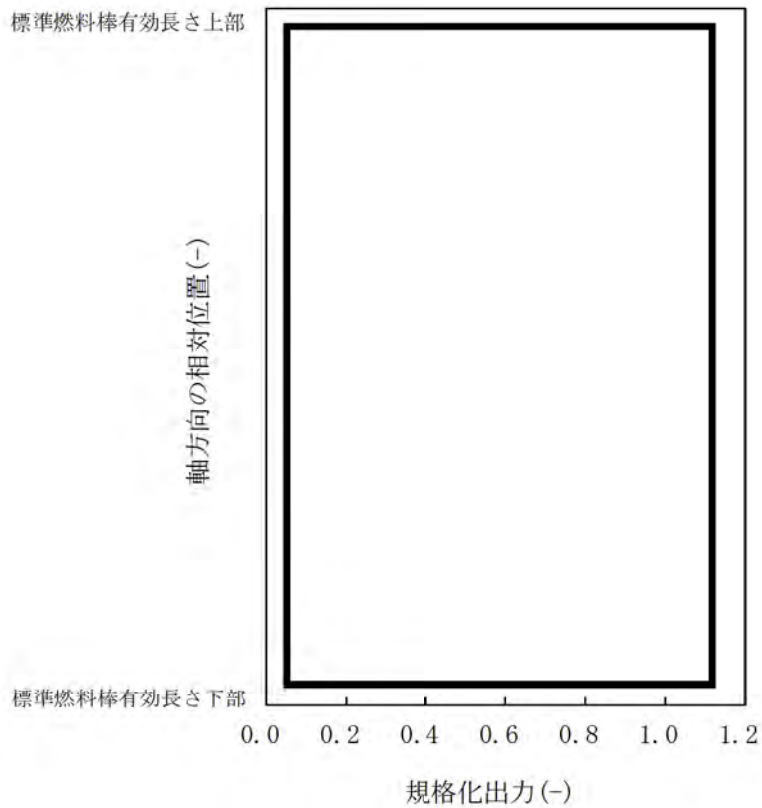
注記：   は設計評価項目を示す。

第 4-1 図 GNF3 型の燃料設計解析評価の概略フロー

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023年12月22日



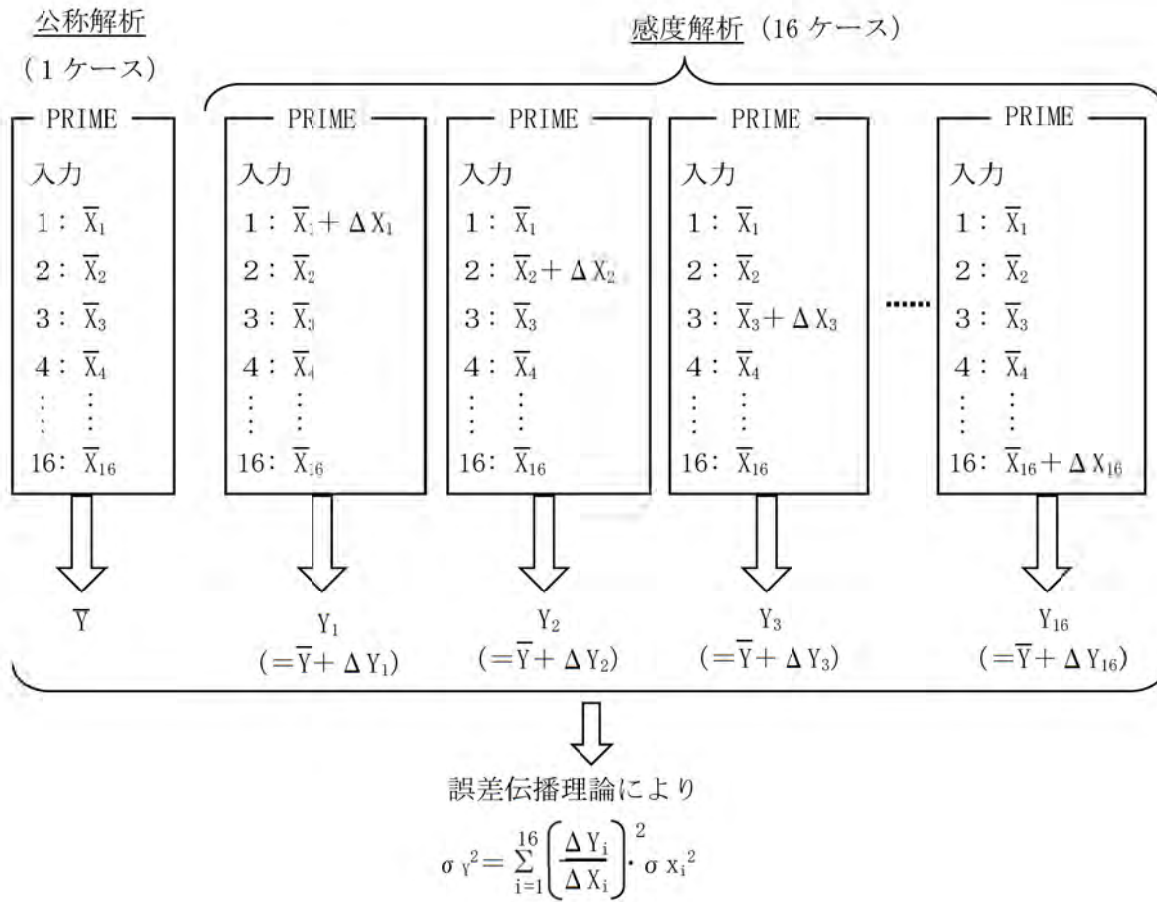
第 4-2 図 GNF3 型の設計用出力履歴



第 4-3 図 GNF3 型の燃料棒熱・機械設計評価における軸方向出力分布  
(燃料棒内圧計算)

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023年12月22日



以上により、燃料棒特性 (1%塑性ひずみに対する出力余裕及び燃料棒内圧) の統計分布の公称値  $\bar{Y}$  と標準偏差 ( $\sigma_Y$ ) が得られる。これを用いて 1%塑性ひずみに対する出力余裕の 95%確率下限値を評価する。燃料棒内圧については、燃料棒内圧評価及び被覆管応力評価の統計的入力とする。

入力変数 (1~16)

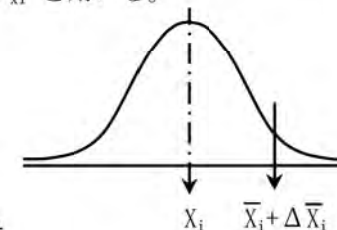
- (1) コードの予測の不確かさ
- (2) 冷却材圧力
- (3) ペレット-被覆管ギャップ
- (4) 被覆管肉厚
- (5) 燃料有効長
- (6) プレナム体積
- (7) ガドリニア濃度
- (8) ペレット密度
- (9) スタック密度
- (10) ペレット焼きしまり
- (11) ペレット粒径
- (12) ペレット表面粗さ
- (13) 被覆管内面粗さ
- (14) ヘリウム封入圧
- (15) クラッド付着速度
- (16) 酸化膜生成速度

各入力変数について  $X_i^-$ : 公称値

$\sigma_{X_i}$ : 標準偏差 を設定する。

なお、左記の感度解析では、寸法等の公差を  $2\sigma$  と仮定し、公差の最大値又は最小値を用いて解析するため、

$\Delta X_i = 2 \times \sigma_{X_i}$  を用いる。



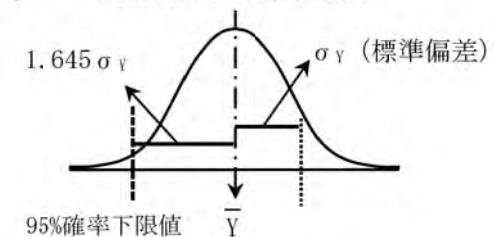
解析結果

$Y$ : 燃料棒特性 (1%塑性ひずみに対する出力余裕及び燃料棒内圧) の解析結果

$\bar{Y}$ : 公称値

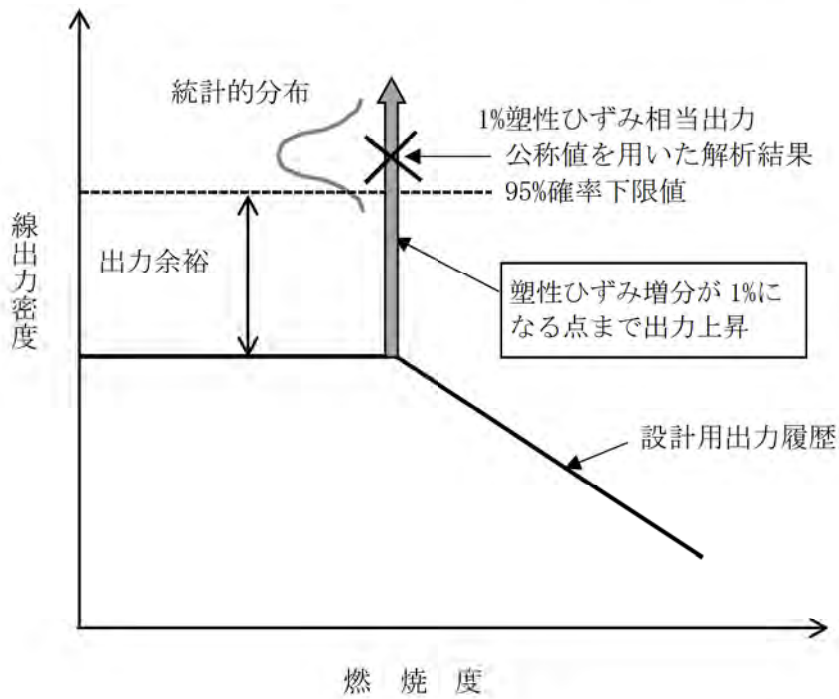
$\Delta Y_i$ : 各感度解析結果と公称解析結果との差

$\sigma_Y$ :  $Y$  の統計的分布の標準偏差

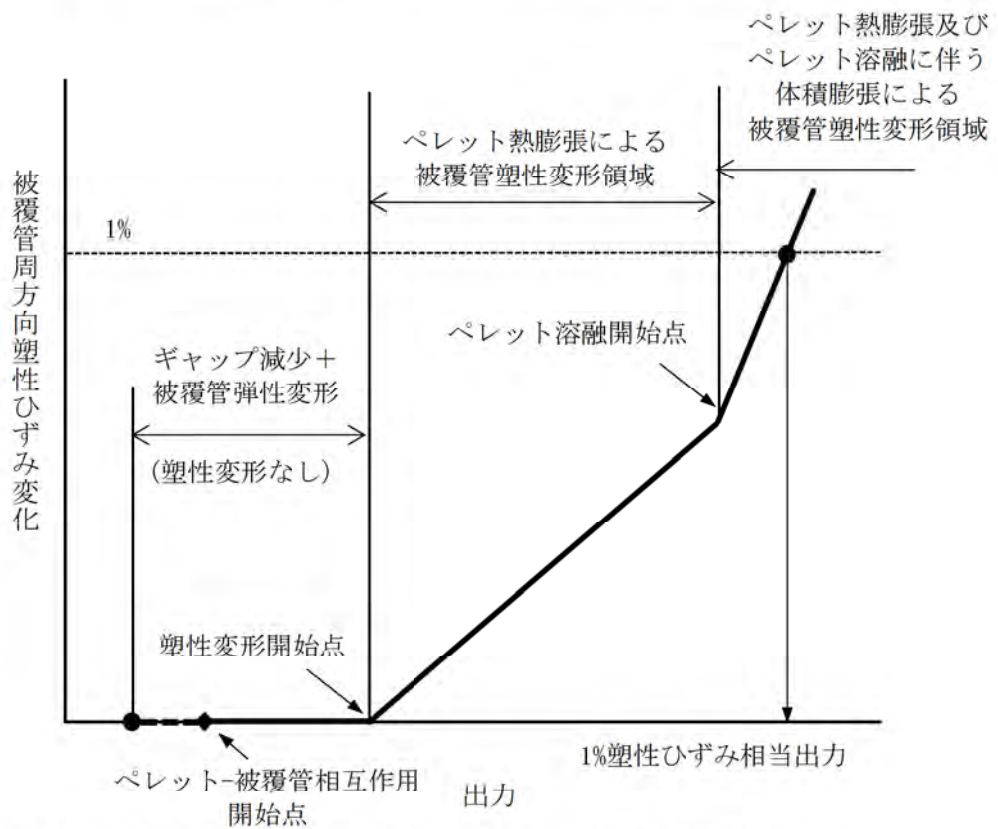


第 4-4 図 燃料棒熱・機械設計評価における統計評価方法

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023年12月22日



第 4-5 図 1%塑性ひずみ相当出力の評価方法の模式図



第 4-6 図 燃料の出力上昇に伴う被覆管塑性ひずみ増加の模式図



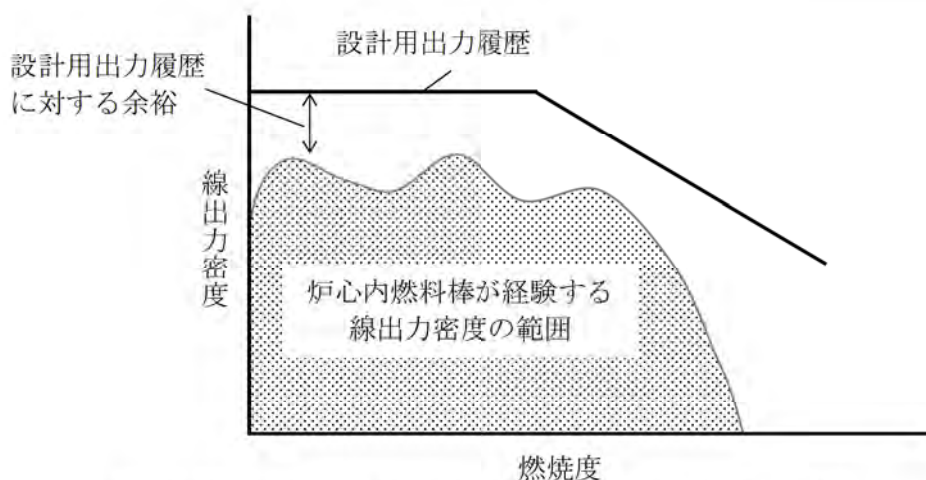
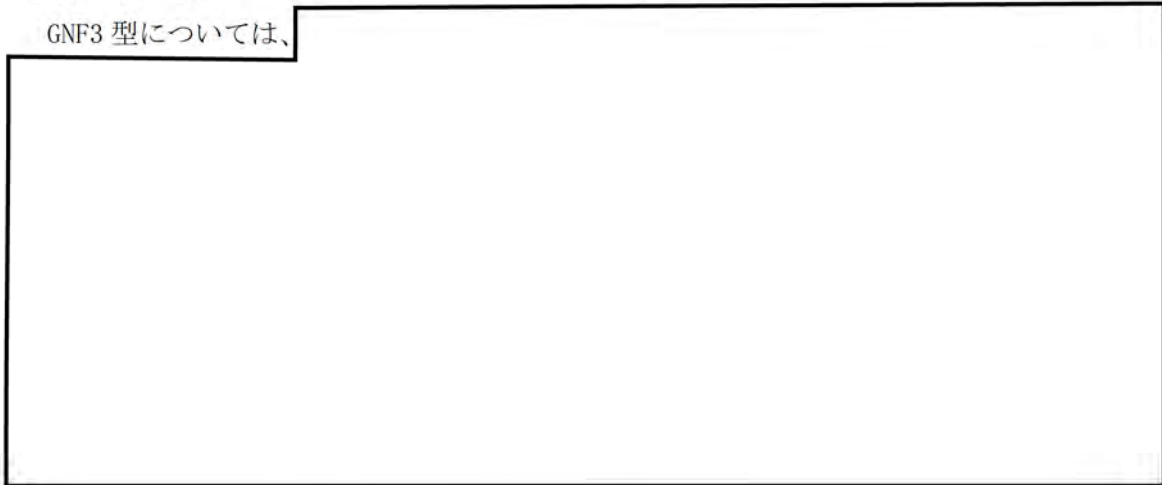
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

(参考) 設計用出力履歴の設定方法について

UO<sub>2</sub> 燃料棒の設計用出力履歴は、炉心内の全ての燃料棒が燃料の寿命中に経験する出力を包絡し、かつ、これに余裕を見た出力として設定する。設計用出力履歴の設定方法の概略図を第 4-7 図に示す。

9×9 燃料 (A 型) の Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 入り燃料棒の設計用出力履歴は、単位燃料集合体核計算コードの計算結果から燃料集合体内の最大出力 UO<sub>2</sub> 燃料棒と Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 入り燃料棒との局所出力ピーキング及び局所燃焼度ピーキングを求め、出力、燃焼度についてそれぞれの比を算出し、その比の分だけ UO<sub>2</sub> 燃料棒の設計用出力履歴から低下させることによって作成していた。このように核設計ごとに Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 入り燃料棒の最大出力に基づき設計出力履歴を設定することで出力抑制が大きくなっていったため、被覆管 1%塑性ひずみまでの出力余裕は UO<sub>2</sub> 燃料棒より小さくなっていった。

GNF3 型については、



第 4-7 図 UO<sub>2</sub> 燃料棒の設計用出力履歴の設定方法の概略図

□内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

## 5. 評価

### (1) 材料

#### (a) 材料の使用実績

燃料体に使用する主要材料は、ジルカロイ-2、GNF-Ziron、ジルコニウム、ステンレス鋼、インコネル及び二酸化ウラン(以下「UO<sub>2</sub>」という。一部 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 入り)である。これらの材料は、第 1-2 表に示すとおり、現在までに米国での GNF3 型燃料をはじめとする BWR 燃料としての使用実績があり、(b) 項以降に記載する評価内容と合わせて、本申請における GNF3 型燃料の材料として問題となることはない。

なお、GNF-Ziron の特性及び実績については付録-6 に整理して示す。

#### (b) 燃料被覆管酸化膜厚さ

酸化膜厚さについて設計基準は定められていないが、燃料設計評価においては、燃料温度及び燃料被覆管応力に係る評価に反映されている。

具体的には、以下のとおりである。

- ・ 燃料棒の熱・機械解析において、酸化膜の生成による被覆管温度の上昇を考慮している。
- ・ 燃料被覆管の応力解析では、酸化膜を強度部材に加えず、減肉した被覆管を対象として評価している。

上記評価に用いる酸化膜厚さに関しては、第 5(1)-1 図<sup>[5(1)-1]~[5(1)-7]</sup>に示すとおり、設計期間において高耐食性被覆管(本項(参考 1)参照)については概ね  μm 以下、スペーサスプリング対向部で局所的に大きな値となった場合(本項(参考 2)参照)でも  μm よりも小さい。このため、酸化膜厚さは被覆管肉厚と比較し十分小さいことから燃料被覆管表面からの酸化膜が肉厚を貫通することによって燃料健全性が失われることはなく、また、上記評価における酸化膜厚さに関する設定条件のうち酸化膜が最も厚くなる寿命末期においても、被覆管の寿命中の最高温度及び被覆管応力設計比は、設計基準を満足している。したがって、被覆管表面酸化が燃料健全性上問題となることはない。

#### (参考 1) 熱処理工程の改善と高耐食性被覆管について

BWR 燃料被覆管に特徴的なレンズ状のノジュラー腐食の発生を抑制することを目的として製造時の熱処理工程が改善され、新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料から高耐食性被覆管として採用されている。

第 5(1)-2 図<sup>[5(1)-1]</sup>に熱処理工程改善前の被覆管及び高耐食性被覆管の典型的な酸化膜形態を示す。熱処理工程の改善は次のようなものである。ジルカロイは、高温で熱処理すると、明瞭な微細組織の変化が生じる。温度が α + β 領域を超えると Fe、Ni、Cr の析出物は全て固溶し、β 組織を形成するが、冷却中に新たな析出物が発生する。この析出物を固溶化する

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

ことによりジルカロイの耐食性が向上することが知られており、熱処理による耐食性向上はこの効果を利用したものである。このため、素管の製造工程において、1000℃以上に加熱処理後急冷するβ焼入れが従来から実施されていた。高耐食性被覆管の製造では、製品被覆管の状態での熱処理の効果を更に発揮できるようにする観点から、β焼入れにおける熱処理効果の均一化のためのピレット形状の設定、及びβ焼入れ後の加工工程においても効果が損なわれることを防ぐための熱処理温度設定の最適化が適用されている。

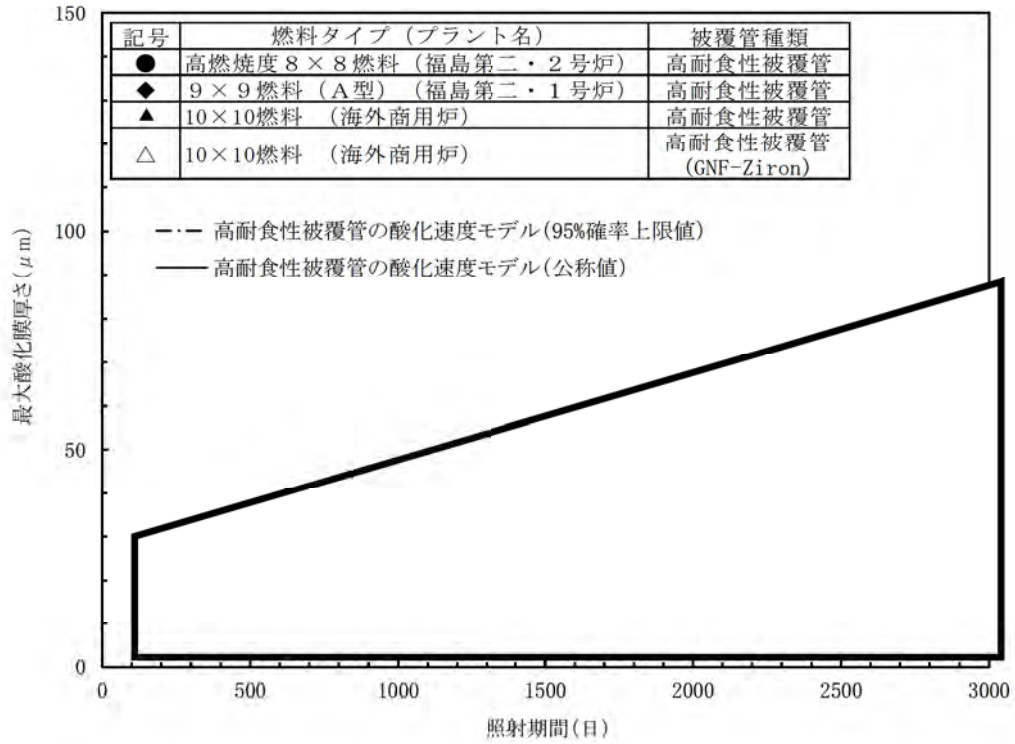
#### (参考2) シャドウ腐食について

GNF3 型燃料の被覆管はジルカロイ-2 又は GNF-Ziron 製であり、スペーサはインコネル製である。炉内で被覆管と近接するスペーサ部材とが対向して配置される場合(すなわち、スペーサに燃料棒が挿入され被覆管外表面がスペーサの格子板内面又はスペーサスプリングに隣接して向かいあっている場合)、ジルカロイ-2 及び GNF-Ziron を含むジルコニウム合金側で腐食量が増加する現象、いわゆるシャドウ腐食が観察されている。

シャドウ腐食のメカニズムについて、高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証成果報告書<sup>[5(1)-8]</sup>では、ガルバニック腐食説<sup>[5(1)-9]</sup>が提案されている旨が記載がされている。このガルバニック腐食説では、ジルカロイと対向する材料の間の電位差に起因すると説明されている。スペーサスプリングのインコネルは電気化学的に貴であり、それに対して卑であるジルカロイが近接するとその電位差によって電子の移動が活発化して腐食が促進されると考えられている。模式図を第 5(1)-3 図に示す。同モデルではジルカロイとインコネルが最も近接している条件で腐食が大きくなると考えられ、第 5(1)-1 図中で最も大きな酸化膜厚さはいずれもスペーサのインコネルと最も近接する部位で局所的に観察されている。また、第 5(1)-4 図に、米国の BWR で  照射された GNF2 燃料(ジルカロイ-2 被覆管及びインコネルスペーサ)のスペーサ位置における燃料被覆管外観写真を示す。同図では特に酸化膜剥離等の外観上の異常は見られない。加えて、現在までの米国実績において同燃料のシャドウ腐食に起因する破損は発生していないことが報告されている<sup>[5(1)-10]</sup>。

したがって、スペーサの材質が全てインコネルである条件においても、被覆管の酸化膜厚さは設計で考慮している範囲内である。

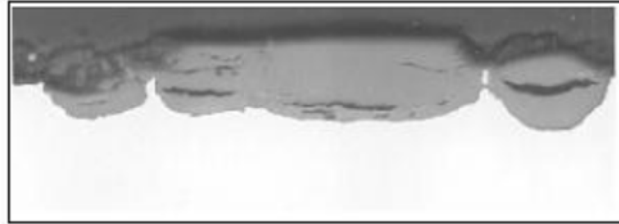
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023年12月22日



第 5(1)-1 図 照射期間に対する被覆管最大酸化膜厚さの変化 (金相観察) [5(1)-1]~[5(1)-7]

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023年12月22日

実証試験燃料



樹脂  
酸化膜  
Zry2

高性能燃料



樹脂  
酸化膜  
Zry2

高燃焼度確証用燃料



樹脂  
酸化膜  
Zry2

80 μm

5mm

写真3.1.4-5 実証試験燃料、高性能燃料、高燃焼度確証用燃料の燃料要素外観及び金相写真の比較  
(試料燃焼度；約40GWd/t)

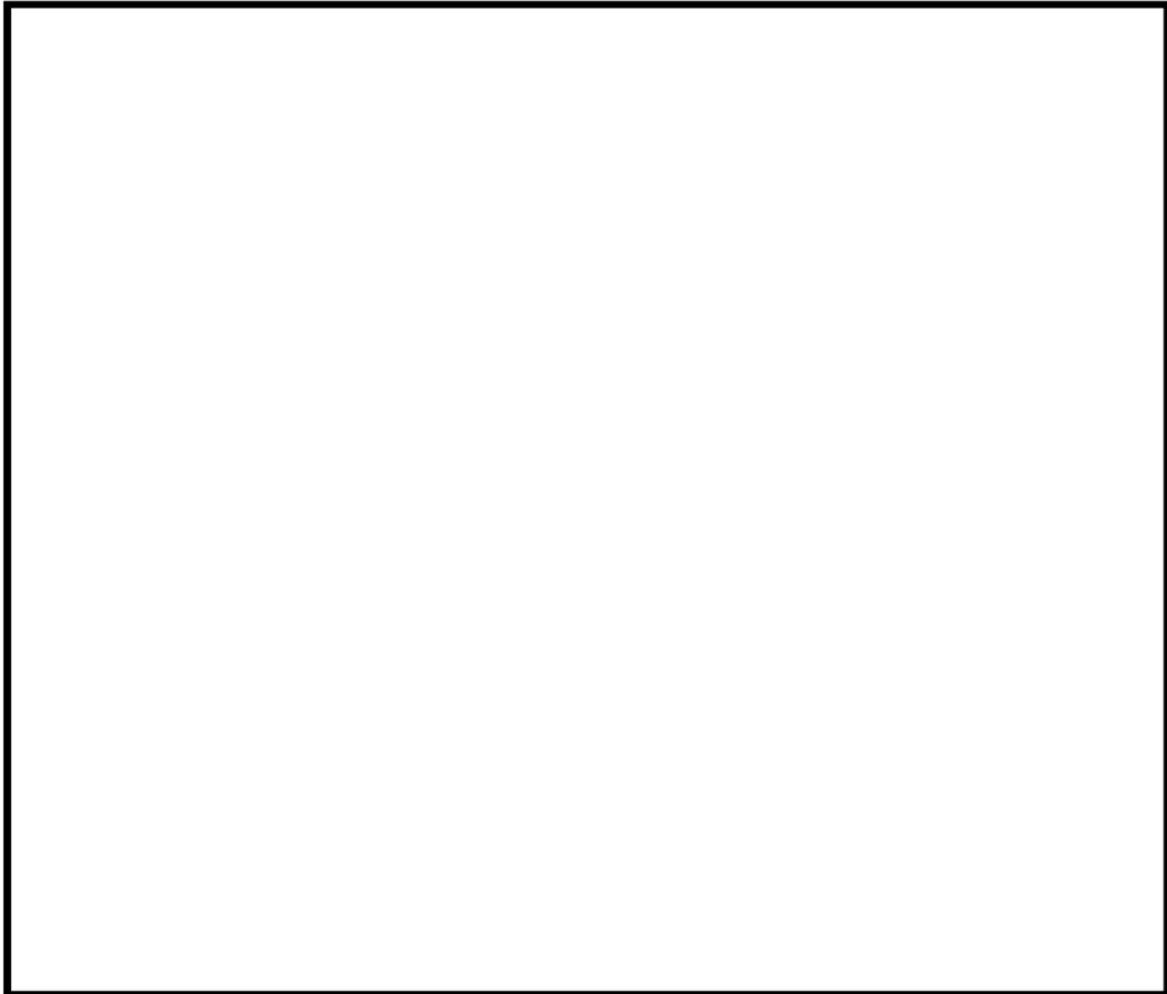
第5(1)-2 図 非高耐食性被覆管 (図中の実証試験燃料、高性能燃料) 及び高耐食性被覆管 (図中の高燃焼度確証用燃料) の典型的な酸化膜形態<sup>[5(1)-1]</sup>

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日



第 5(1)-3 図 シャドウ腐食の模式図<sup>[5(1)-9]</sup>

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日



第 5(1)-4 図 インコネルスペーサにおけるジルカロイ-2 被覆管の  
スペーサ対抗部における外観観察代表例

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

(c) 被覆管クラッド付着

燃料棒表面に付着したクラッド付着厚さの測定結果を第 5(1)-5 図<sup>[5(1)-2][5(1)-11]</sup>に示す。燃料被覆管に付着するクラッドには、ソフトクラッドとハードクラッドがある。

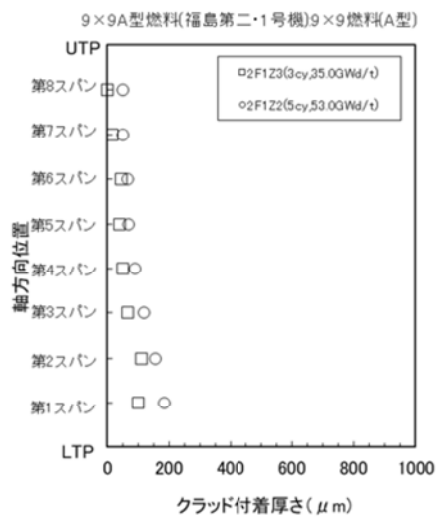
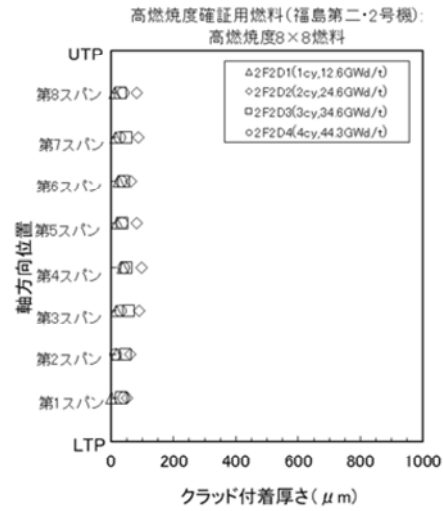
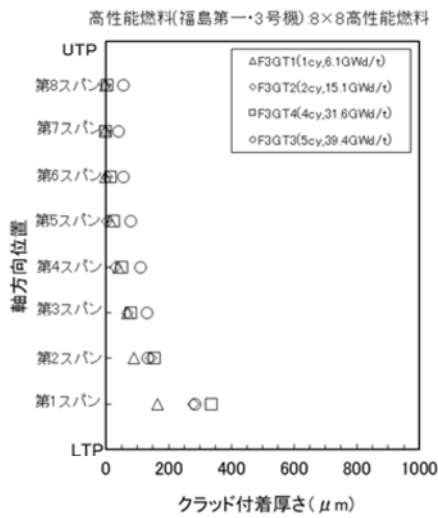
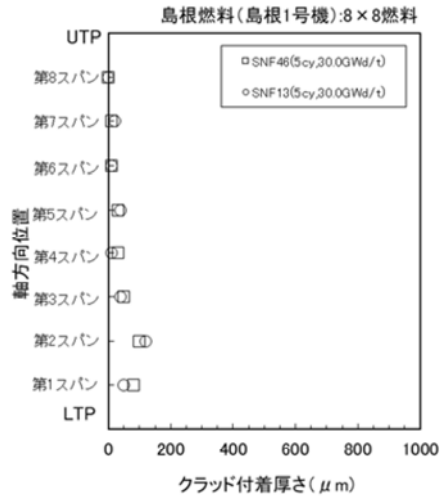
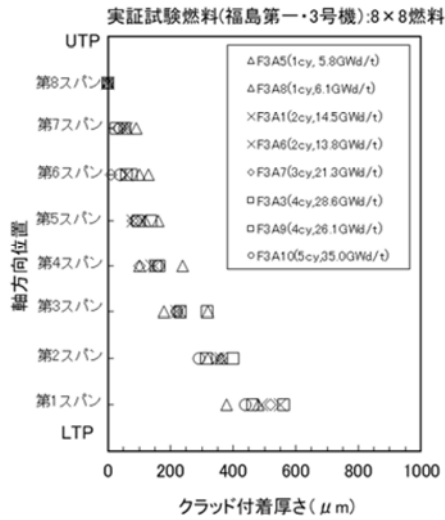
ソフトクラッドに関しては、第 5(1)-6 図<sup>[5(1)-12]</sup>に示すモデルのとおり、冷却材は毛細管状の空隙から被覆管表面に安定して提供され、クラッドが付着していないときと同様に被覆管表面で沸騰が生じ、発生した蒸気はクラッド中の Boiling Channel と呼ばれる直径が数  $\mu\text{m}$  の孔を通して放出されるため、燃料被覆管と冷却材の熱伝達には影響しないことが知られている<sup>[5(1)-12][5(1)-13]</sup>。

ハードクラッドに関しては、国内燃料の照射後試験として実施された金相観察の結果、高燃焼度確証用燃料（高燃焼度 8×8 燃料）では、5 サイクル燃焼後のハードクラッドの付着厚さは最大でも約 5  $\mu\text{m}$  程度であったと報告されている<sup>[5(1)-1]</sup>。また、高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証試験でもハードクラッドが観察され、9×9 燃料（A 型）では、3 サイクル燃焼後及び 5 サイクル燃焼後の燃料被覆管にハードクラッドの付着が観察されており、付着厚さは文献<sup>[5(1)-2]</sup>に記載されていないが、金相写真によると、高燃焼度確証用燃料などの従来燃料と同程度であり、従来データから予測される範囲内であった。なお、この程度のハードクラッド付着による燃料被覆管の温度上昇は問題にならない程度である。

付着するクラッドの上述した特性に対する燃料被覆管の寸法及び材料の影響は十分小さいと考えられることから、GNF3 型燃料のクラッド特性も上記同様であり、クラッド付着によって燃料健全性が失われることはない。

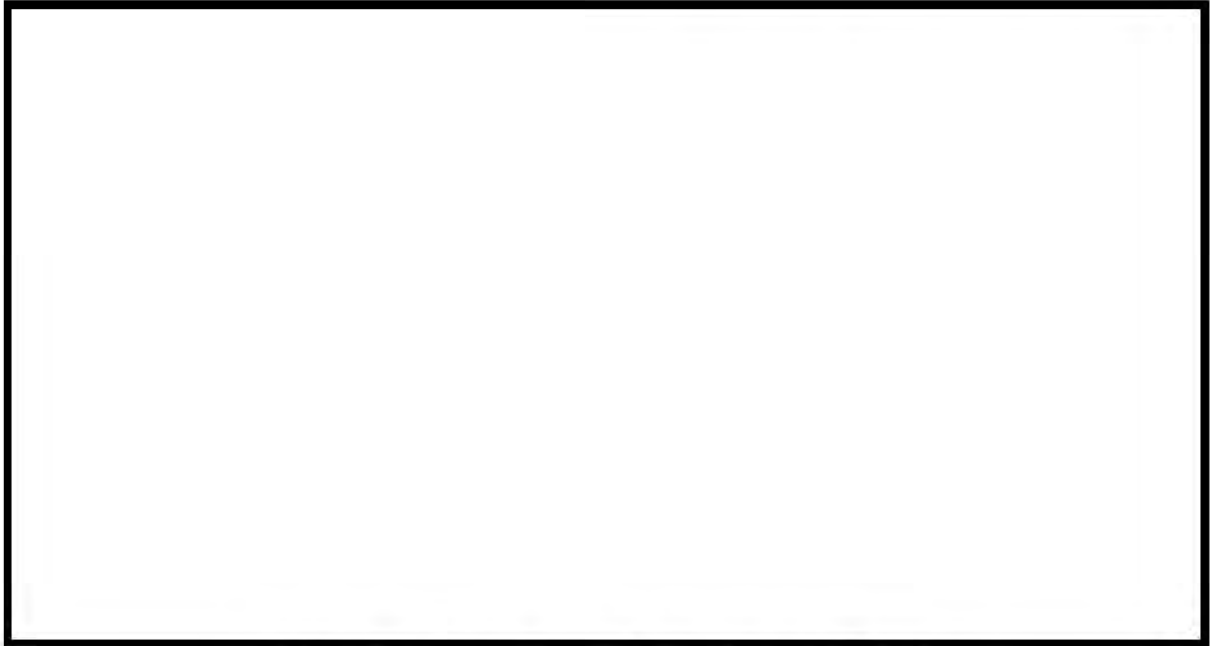


GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023年12月22日



第5(1)-5 図 燃料棒表面クラッド付着量の軸方向分布 (燃料棒間隔差から算出) [5(1)-2][5(1)-11]

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日



第 5(1)-6 図 “Wick Boiling” モデル<sup>[5(1)-12]</sup>の概念図

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023年12月22日

(d) 被覆管水素吸収に関する挙動及び機械特性への影響

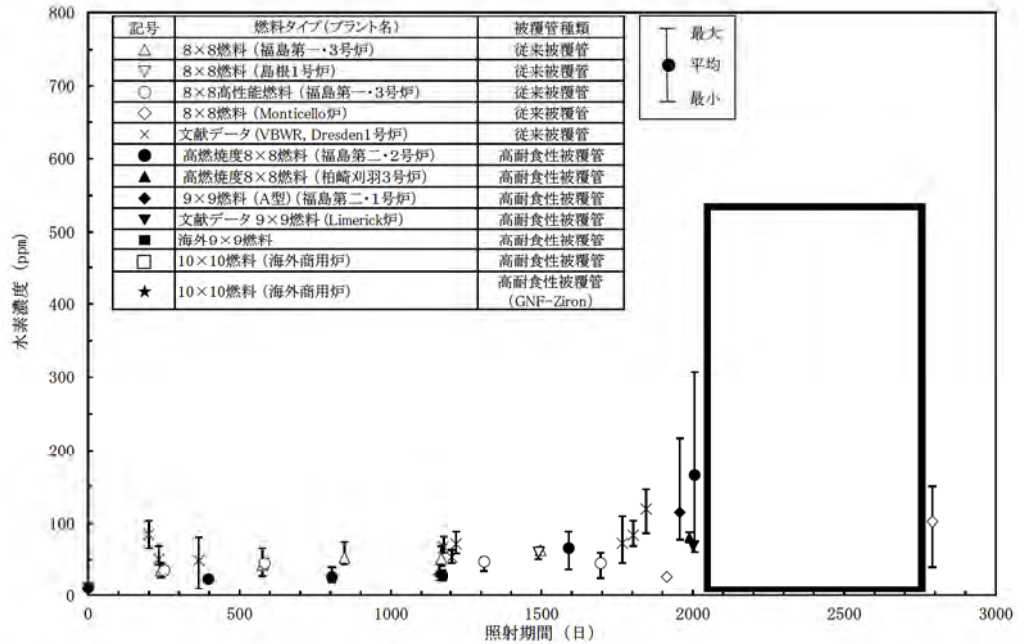
ジルカロイ-2 及び GNF-Ziron 製被覆管の水素吸収は、主には炉内運転期間中の燃料被覆管の酸化に伴い発生する水素が被覆管に吸収されることで進行することから、照射期間で整理される。第 5(1)-7 図に、被覆管水素濃度と照射期間の関係を示す<sup>[5(1)-1]~[5(1)-7], [5(1)-14]~[5(1)-25]</sup>。また、参考までに、参考図 5(1)-1 に被覆管水素濃度と燃料集合体平均燃焼度の関係を示す<sup>[5(1)-1]~[5(1)-7], [5(1)-14]~[5(1)-16], [5(1)-20]~[5(1)-25]</sup>。従来実績を考慮すると、GNF3 型燃料被覆管の水素濃度は、運転期間最長 8 年間 (2920 日) の条件でも、後述する材料強度の低下が発生する場合がある約 800 ppm を超えることはないと考えられる。

被覆管中水素濃度と機械特性の関係については、一般に、燃料被覆管水素濃度が 800ppm までは、燃料被覆管の強度及び延性が確保できるとされている<sup>[5(1)-26] [5(1)-27]</sup>。第 5(1)-8 図<sup>[5(1)-5]</sup>にジルカロイ-2 被覆管の強度と水素濃度の関係を示すとおり、水素濃度 400ppm まで材料強度の低下は見られていない。また、第 5(1)-9 図<sup>[5(1)-5]</sup>にジルカロイ-2 被覆管の延性と水素濃度の関係を示すとおり、現在までに国内商用炉で照射された照射まま被覆管を用いた内圧破裂試験では、水素濃度 400ppm までの試験片について全て 1%以上の周伸びが測定されている。更に、照射被覆管に水素を添加した試験片 (水素濃度約 700ppm) について、1%以上の破断ひずみが測定された試験結果が報告されている<sup>[5(1)-28]</sup>。

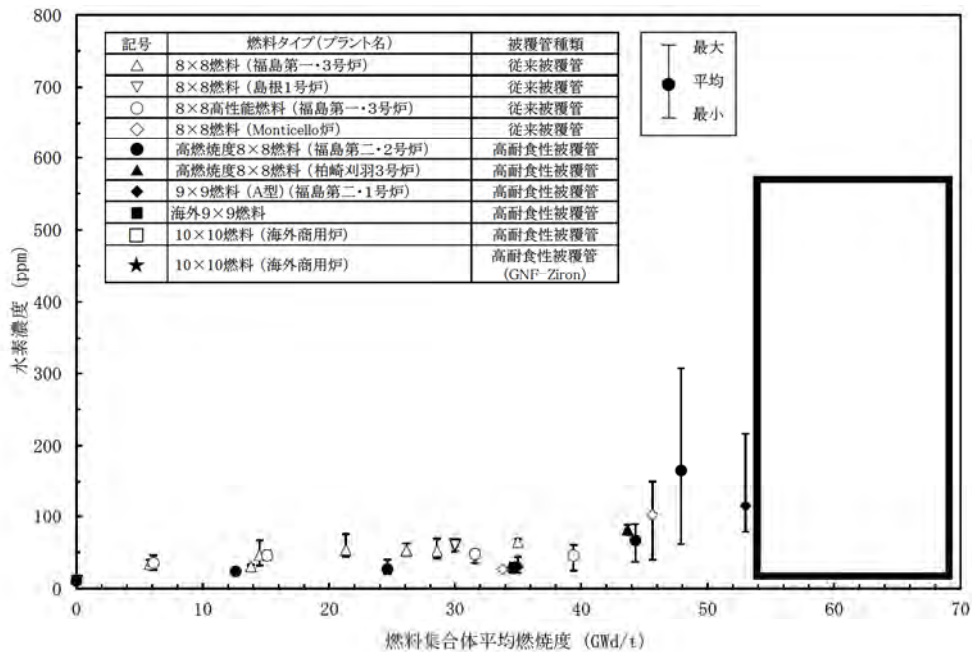
したがって、運転中の被覆管水素吸収に起因して燃料健全性が損なわれることはない。

(参考) 径方向水素化物の形成について

燃料棒内圧が外圧を大きく上回り被覆管に周方向引張応力が作用した場合には、水素化物が析出する際にその方位が半径方向に変化し、被覆管の延性に影響を及ぼす可能性がある。GNF3 型燃料においては、燃料棒内圧の最高値  MPa を想定しても燃料棒の内外圧差に起因する被覆管の周方向応力は  MPa 以下となる。これは、米国の原子力規制委員会 (Nuclear Regulatory Commission) により径方向水素化物の形成を考慮して提示されている乾式貯蔵時の被覆管の周方向応力 90MPa<sup>[5(1)-29]</sup> よりも小さい。また第 5(1)-10 図<sup>[5(1)-11] [5(1)-2] [5(1)-22]</sup>に示す試験結果等を基に検討された径方向水素化物が析出する周方向応力条件としては、70 MPa までは機械特性に影響を及ぼすほどの径方向水素化物は形成しないと報告されており<sup>[5(1)-22] [5(1)-23]</sup>、乾式貯蔵に関する原子力学会標準における水素化物再配向による制限としても周方向応力 70 MPa が記載されている<sup>[5(1)-30]</sup>。第 5(1)-11 図に GNF-Ziron 製燃料被覆管 (  ) の水素化物析出状態を示す。同図においても径方向水素化物は観察されていない。GNF-Ziron 製被覆管については、水素化物の析出方位に影響すると考えられる被覆管集合組織もジルカロイ-2 と同じ管理値で管理されることから、水素化物析出挙動はジルカロイ-2 と変わらないと考えられ、第 5(1)-11 図及び 5 章(10)項に後掲する試験結果もこれと矛盾しない。したがって、GNF3 型燃料で燃料棒内外圧差に起因して形成される程度の径方向水素化物は、燃料の健全性に影響しない。



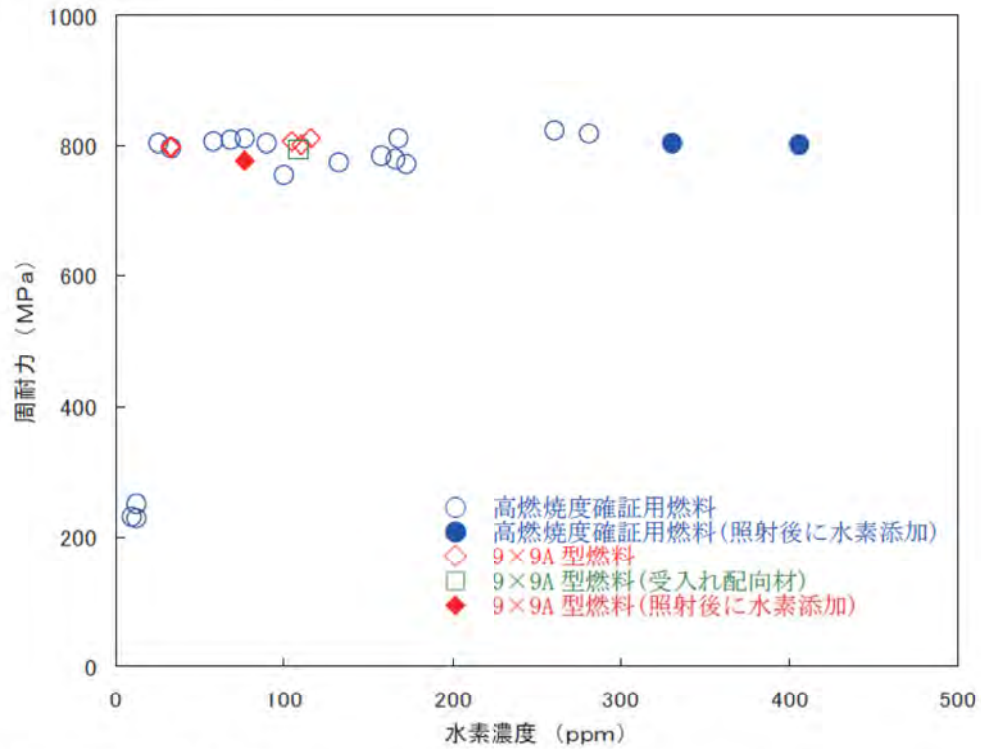
第5(1)-7図 被覆管水素濃度と照射期間の関係 [5(1)-1]~[5(1)-7], [5(1)-14]~[5(1)-25]



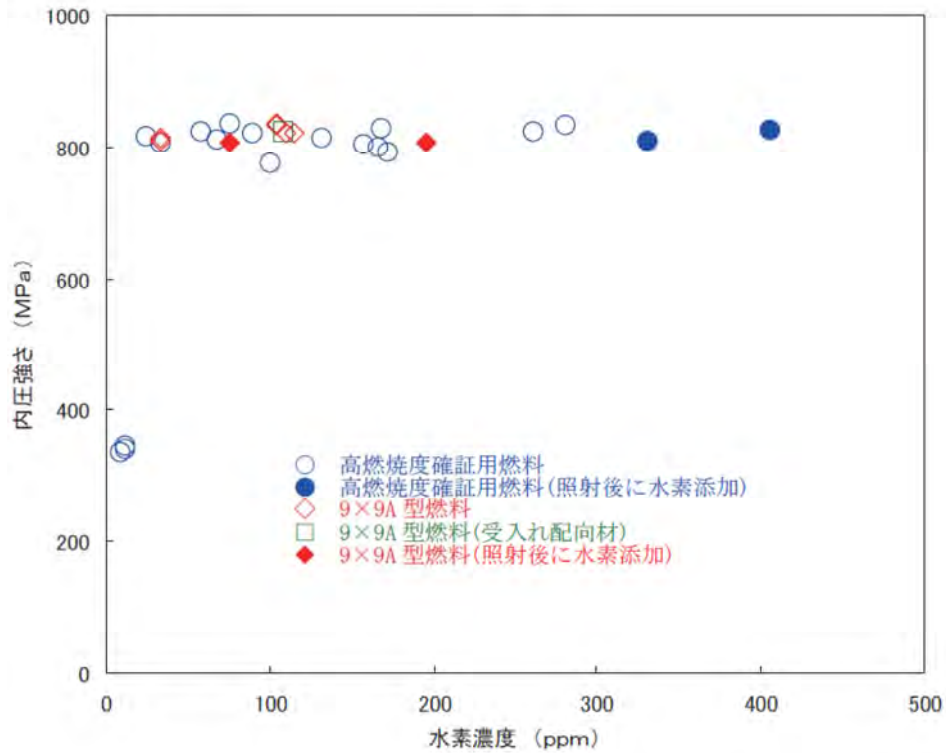
(参考図 5(1)-1) 被覆管水素濃度と燃料集合体平均燃焼度の関係 [5(1)-1]~[5(1)-7], [5(1)-14]~[5(1)-16], [5(1)-20]~[5(1)-25]

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023年12月22日

(a) 300°C周耐力<sup>[5(1)-5]</sup>

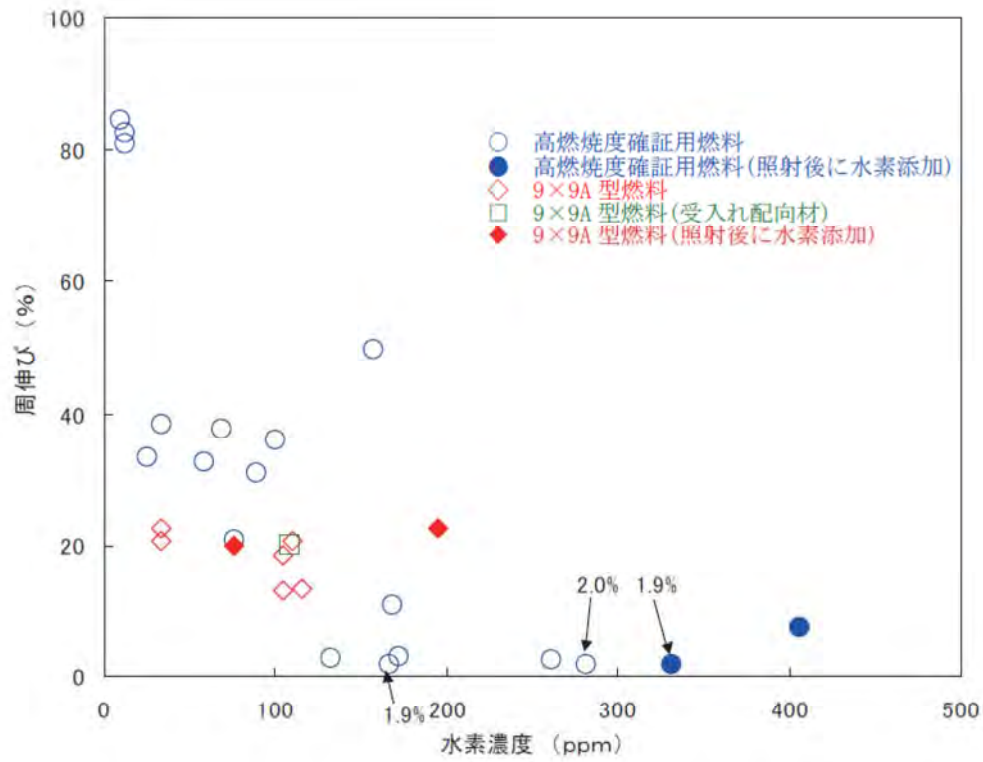


(b) 300°C内圧強さ<sup>[5(1)-5]</sup>



第 5(1)-8 図 ジルカロイ-2 被覆管の強度と水素濃度の関係(300°C内圧破裂試験)<sup>[5(1)-5]</sup>

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023年12月22日

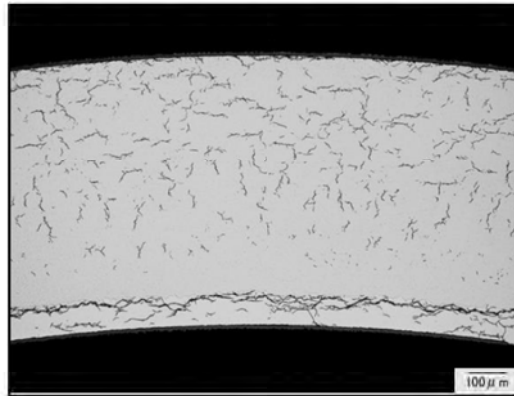


第 5(1)-9 図 ジルカロイ-2 被覆管の延性と水素濃度の関係(300℃内圧破裂試験) <sup>[5(1)-5]</sup>

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

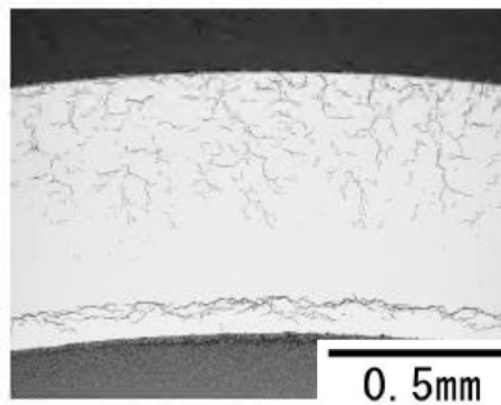
(a) 水素化物再配向試験後被覆管の水素化物析出状態

(300 °C、71 MPa、30 °C/h 条件、9×9 燃料(A 型)、集合体平均燃焼度約 53 GWd/t)



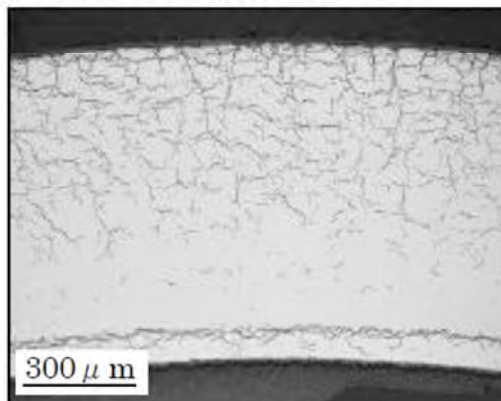
(b) 照射まま被覆管の水素化物析出状態

(9×9 燃料(A 型)、集合体平均燃焼度約 53 GWd/t)



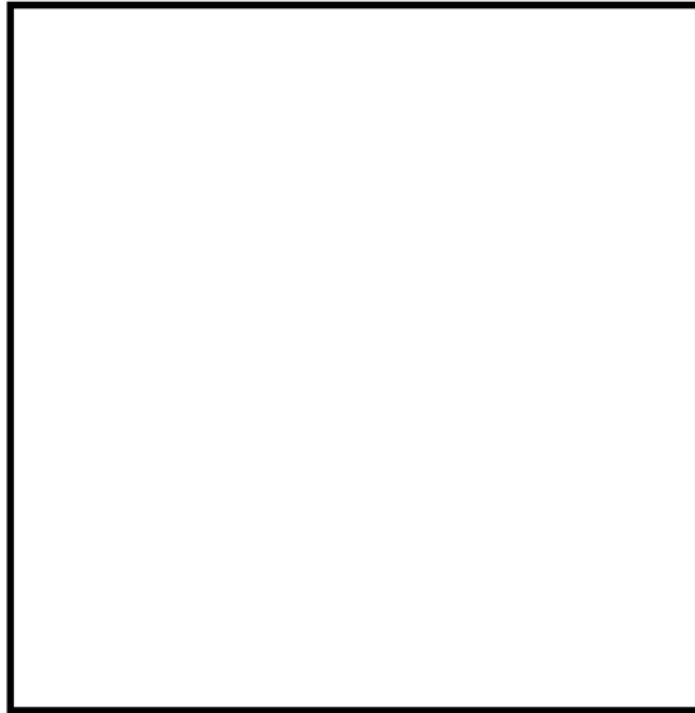
(c) 照射まま被覆管の水素化物析出状態

(高燃焼度 8×8 燃料、集合体平均燃焼度約 48 GWd/t)



第 5(1)-10 図 照射後被覆管を用いた水素化物再配向試験結果<sup>[5(1)-1][5(1)-2][5(1)-22]</sup>

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日



第 5(1)-11 図 GNF-Ziron 被覆管における水素化物析出状態



GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

(e) ステンレス鋼及びインコネルの腐食について

ジルカロイ-2 又は GNF-Ziron 以外に冷却材中に露出される材質としては、上部及び下部タイププレート、等に使用されるステンレス鋼と、スパーサ、エクспанションスプリング等に使用されるインコネルがある。ステンレス鋼は炉内構造物にも多く使用され、その耐食性は十分に実証されている。インコネルは、ステンレス鋼よりも耐食性が優れており、GNF3 型のスパーサでは、従来の燃料と同様に時効硬化熱処理時に酸化処理し、表面に酸化被膜を形成させ、耐食性を高めた設計としている。また、従来の燃料の使用実績において、水素吸収が問題になったことはない。したがって、GNF3 型において、ステンレス鋼及びインコネルの耐食性及び水素吸収が問題になることはない。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023年12月22日

## (2) 照射効果

燃料の燃焼が進むと燃料ペレット及び被覆管の材料特性が影響を受ける。

燃料ペレットについては、燃焼の初期段階においてわずかながら体積が減少する、焼きしまりが発生する。GNF3 型燃料においても、従来の燃料と同様に照射中の焼きしまりを小さくするため、理論密度の  に焼結する設計とされている。このため、ペレットの焼きしまりがあっても、ペレットと燃料被覆管の間隙は適切な熱伝達を確保できる範囲内に保たれる。また、燃焼が進むと気体状及び固体状の核分裂生成物がペレット内に蓄積することによりペレット体積が増加する照射スエリングが発生する。核分裂生成物の蓄積・放出は、ペレットの融点及び熱伝導率、並びに被覆管とペレットの間隙中のガスの熱伝導率にも影響を及ぼす。GNF3 型燃料は、従来の燃料と同様に、燃料寿命を通じてその性能に影響を与える燃料ペレットの照射効果による材料特性の変化を考慮した設計としている。

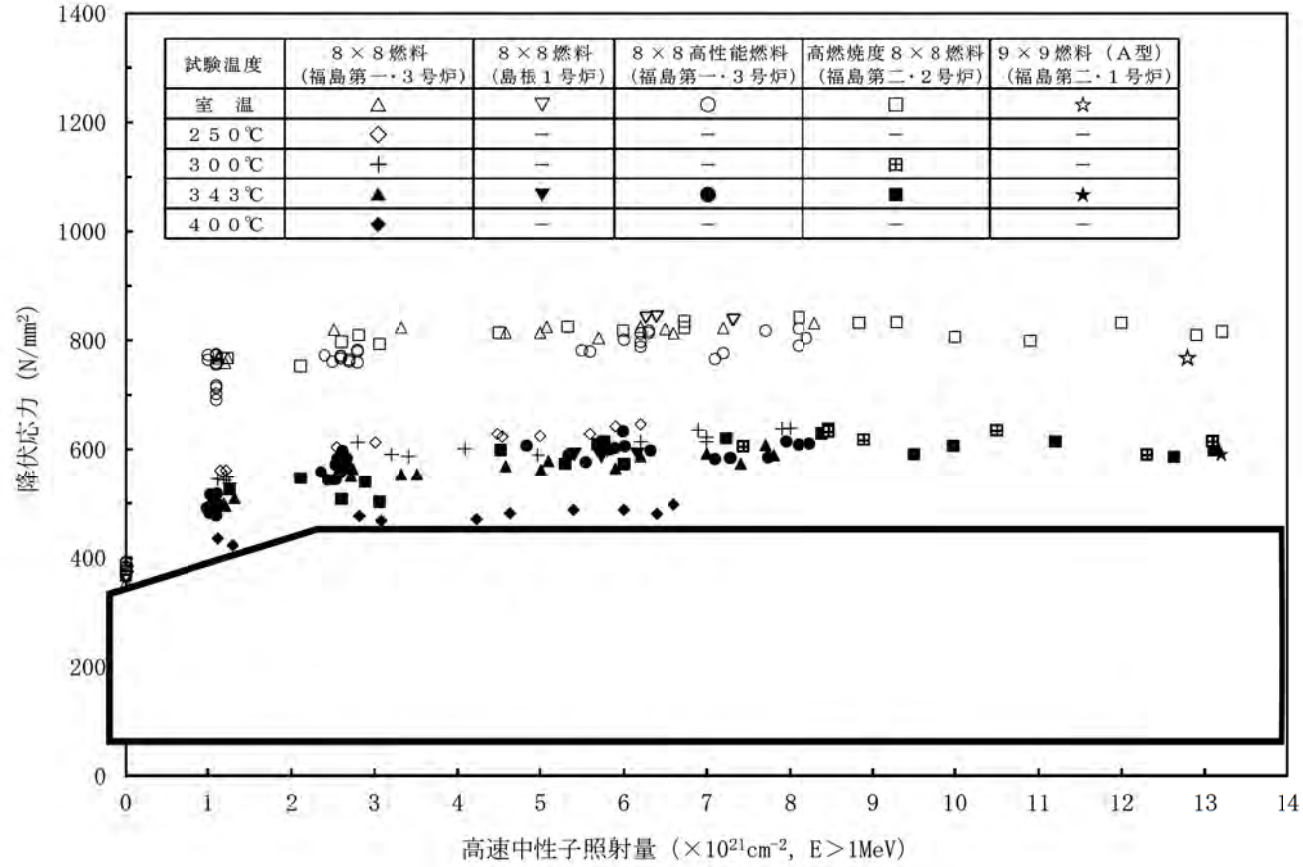
従来から BWR 燃料被覆管に用いられてきたジルカロイ-2 の降伏応力の照射量依存性を第 5(2)-1 図に、また、ジルカロイ-2 引張強さの照射量依存性を第 5(2)-2 図に示す<sup>[5(2)-1][5(2)-2][5(2)-3]</sup>。いずれも商用炉で燃料棒として照射された後の被覆管の照射後試験結果であるが、これら図に示すとおり、燃料被覆管の降伏応力及び引張強さは、照射が進むにつれて増加し、照射量が約  $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  で飽和する傾向にあることが確認されている。設計では、このような測定値に対して保守的に小さな値を使用している。

第 5(2)-3 図<sup>[5(2)-1][5(2)-3][5(2)-4][5(2)-5]</sup>に示すとおり、照射後試験の結果から、ジルカロイ-2 燃料被覆管の円周方向の延性は約  $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  の照射量では未照射被覆管のものと比較して低下し、約  $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  以上の照射量においては、図中のデータ全体の傾向としては明瞭な上昇又は低下の傾向はみられずばらつきが大きい。このばらつきの中において特に低い値である高照射量領域（第 5(2)-3 図中の A 部拡大）のデータについても、破断伸びは 1% 以上であり、燃料被覆管の損傷限界基準である 1% 塑性歪を上回る延性が維持されている。

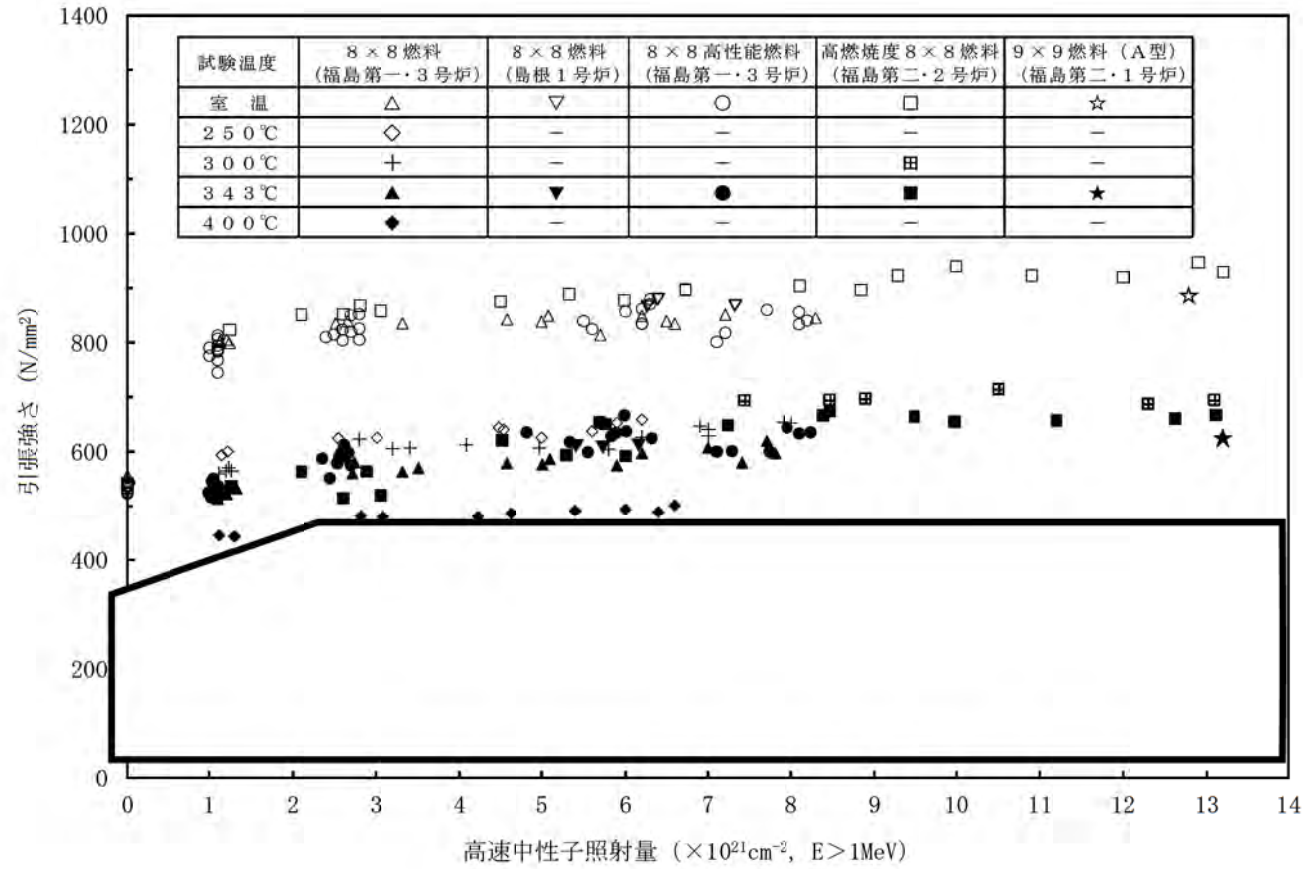
GNF3 型燃料の被覆管に用いられる GNF-Ziron の強度についても、付録-6 に示すとおり、国内商用炉で実施した材料照射試験の結果に基づき、降伏応力及び引張強さについては、ジルカロイ-2 と同じ評価値を用いて問題ないことが、燃料棒熱・機械設計コード PRIME03 のトピカルレポートに関する技術評価において報告されている<sup>[5(2)-6]</sup>。GNF-Ziron の延性においても、付録-6 の図 2-1 に示すとおり 288°C 以上では約  $15 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  以上の高照射量領域においても 1% 以上の延性を保持している。このような高速中性子照射に起因する強度・延性の変化は、材質に依存し材料の寸法は影響しないことから、GNF3 型燃料被覆管の評価に用いることができる。

したがって、GNF3 型燃料は、照射効果を考慮しても燃料健全性が失われることはない。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

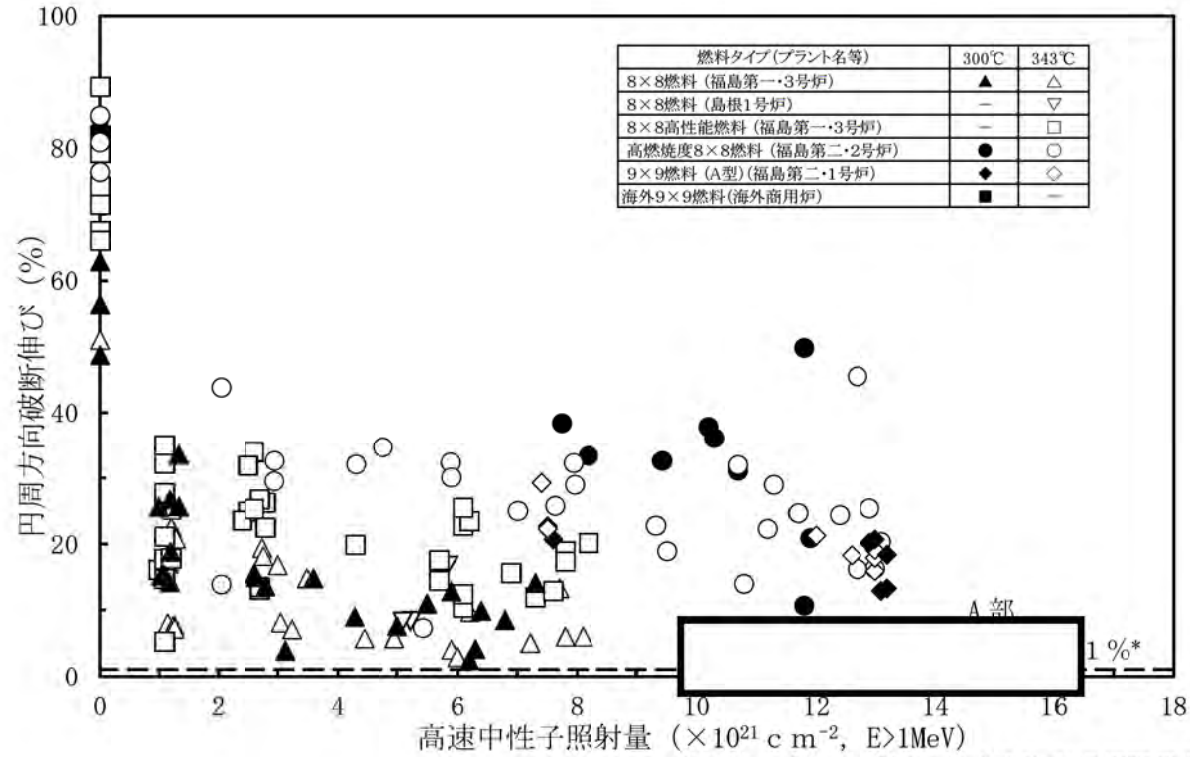


第 5(2)-1 図 ジルカロイ-2 降伏応力の照射量依存性<sup>[5(2)-1][5(2)-2][5(2)-3]</sup>

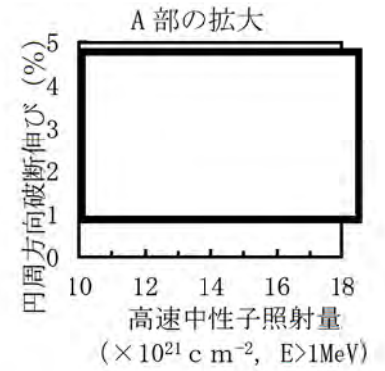


第5(2)-2図 ジルカロイ-2 引張強さの照射量依存性<sup>[5(2)-1][5(2)-2][5(2)-3]</sup>

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023年12月22日



\* : 燃料棒の機械的損傷に対する許容損傷限界基準



第 5(2)-3 図 ジルカロイ-2 伸びの照射量依存性<sup>[5(2)-1][5(2)-3][5(2)-4][5(2)-5]</sup>

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

## 6. 参考文献

- [1-1] R. Schneider, “GNF Fuel Reliability and Experience: 2022 Update”, Proceedings of TopFuel 2022 Light Water Reactor Fuel Performance Conference, Raleigh, NC, October 9-13, 2022, Pages 516-519.
- [1-2] R. Schneider, D. Lutz, and P. Cantonwine, “GNF Fuel and Channel Performance: 2016 Update”, Proceedings of TopFuel 2016, Boise, ID, September 11-16, 2016, Pages 1389-1396.
- [1-3] 「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)」、(独) 原子力安全基盤機構、平成 19 年 12 月
- [1-4] 「平成 13 年度 高燃焼度等安全試験に関する報告書 (BWR 高燃焼度燃料総合評価編)」、(財)原子力発電技術機構、平成 14 年 3 月
- [1-5] 「平成 18 年度高燃焼度燃料信頼性実証成果報告書 付録 1(9×9A 型燃料照射後試験結果)」、(独) 原子力安全基盤機構、平成 19 年 12 月
- [3-1] 「沸騰水型原子力発電所 炉心燃料格子形状」(株式会社日立製作所、HLR-049、平成 6 年 4 月)
- [4-1] 「トピカルレポート 燃料棒熱・機械設計コード PRIME03 について」(株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン、GLR-002 改訂 2、平成 22 年 4 月)
- [4-2] 「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)」、(財) 原子力発電技術機構、平成 14 年 3 月
- [4-3] 「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 1 (9×9A 型燃料照射後試験結果)」、独立行政法人原子力安全基盤機構、平成 19 年 12 月
- [4-4] S. Watanabe, “The Lift-Off Experiment IFA-610.10 with BWR Fuel Rod, In-Pile Data Evaluation”, OECD Halden Reactor Project HWR-919 (2010).
- [4-5] G. Ledergerber, “Characterisation of KKL BWR Fuel for Test Series in IFA-610, IFA-629 and IFA-650”, OECD Halden Reactor Project HWR-1033 Rev. 2 (2015).
- [5(1)-1] 「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)」、(財) 原子力発電技術機構、平成 14 年 3 月
- [5(1)-2] 「平成 18 年度高燃焼度燃料信頼性実証成果報告書 付録 1(9×9A 型燃料照射後試験結果)」、(独) 原子力安全基盤機構、平成 19 年 12 月
- [5(1)-3] 「平成 14 年度 燃料集合体信頼性実証に関する報告書 (高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証編)」、(財) 原子力発電技術機構、平成 15 年 3 月
- [5(1)-4] 「平成 17 年度 高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証成果報告書」、(独) 原子力安全基盤機構、平成 18 年 7 月
- [5(1)-5] 「平成 18 年度高燃焼度燃料安全裕度確認試験成果報告書」、(独) 原子力安全基盤機構、平成 19 年 11 月

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

- [5(1)-6] 「平成 19 年度高燃焼度燃料破損限界試験成果報告書」、(独) 原子力安全基盤機構、平成 20 年 12 月
- [5(1)-7] 「平成 21 年度中間貯蔵施設基準体系整備事業 (燃料健全性に関する調査報告書)」、(独) 原子力安全基盤機構、平成 22 年 10 月
- [5(1)-8] 「平成 18 年度高燃焼度燃料信頼性実証成果報告書 (総合評価編)」、(独) 原子力安全基盤機構、平成 19 年 12 月
- [5(1)-9] G. Lysell et al., "Shadow Corrosion Mechanism of Zircaloy" Journal of ASTM International, June 2005, vol. 2, No. 6.
- [5(1)-10] R. Schneider, "GNF Fuel Reliability and Experience: 2022 Update", The Proceedings of TopFuel 2022.
- [5(1)-11] 「平成 15 年度 高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証成果報告書」、(独) 原子力安全基盤機構、平成 16 年 6 月
- [5(1)-12] R. V. Macbeth, "Boiling on surfaces overlaid with a porous deposit", AEEW-R711(1971).
- [5(1)-13] J. Thomazet, et. al., "In-reactor corrosion and crud deposition data on FRAGEMA fuel", Proc. ANS Topical Mtg. On LWR Fuel Performance. Orland, Florida, Apr. 21-24, 1985.
- [5(1)-14] 「平成 17 年度 高燃焼度燃料安全裕度確認試験成果報告書 (その 1) 燃料の破損事例等の調査、被覆管特性評価試験 (BWR) 及び計算科学評価」、(独) 原子力安全基盤機構、平成 18 年 7 月
- [5(1)-15] "BWR Fuel Bundle Extended Burnup Program", DOE/ET/34031-18, December 1984.
- [5(1)-16] "VNC Hotcell Examination of Six High Exposure Fuel Rods from the Monticello Power Reactor Topical Report", DOE/ET/34031-13, March 1983.
- [5(1)-17] "AEC Fuel Cycle Program Examination of Zircaloy Clad UO<sub>2</sub> Fuel Rods Operated in the VBWR to 10,000Mwd/tU, GEAP-4597, June 1965.
- [5(1)-18] "Zircaloy-Clad UO<sub>2</sub> Fuel Rod Evaluation Program Final Report November 1967-June 1971", GEAP-10371, June 1971.
- [5(1)-19] H. Tsai and M. C. Billone, "Characterization of High-Burnup PWR and BWR Rods", Nuclear Safety Research Conference 2002, October 28-30, 2002, Washington D. C.
- [5(1)-20] 「平成 17 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (貯蔵燃料長期健全性等確認試験 (BWR 使用済燃料への水素化物影響等に関する試験及び評価に関する試験成果報告書) )」、(独) 原子力安全基盤機構、平成 17 年 10 月
- [5(1)-21] 「平成 17 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (貯蔵燃料長期健全性等確認試験に関する試験成果報告書)」、(独) 原子力安全基盤機構、平成 18 年 3 月

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

- [5(1)-22] 「平成 18 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等（貯蔵燃料長期健全性等確認試験に関する試験最終成果報告書）」、(独)原子力安全基盤機構、平成 19 年 3 月
- [5(1)-23] 「平成 19 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等（貯蔵燃料健全性等調査に関する試験成果報告書）」、(独) 原子力安全基盤機構、平成 20 年 3 月
- [5(1)-24] 「平成 21 年度高燃焼度燃料破損限界試験成果報告書」、(独) 原子力安全基盤機構、平成 23 年 3 月
- [5(1)-25] 「平成 22 年度高燃焼度燃料破損限界試験成果報告書」、(独) 原子力安全基盤機構、平成 24 年 12 月
- [5(1)-26] S. B. Wisner, and R. B. Adamson, “Combined Effects of Radiation Damage and Hydrides on the Ductility of Zircaloy-2”, Nuclear Engineering and Design, Vol.185, pp33-49, 1998.
- [5(1)-27] B. Watkins, A. Cowan, G. W. Parry, and E. W. Pickles, “Embrittlement of Zircaloy-2 Pressure Tubes”, Applications-Related Phenomena for Zirconium and Its Alloys, ASTM STP 458, 1969.
- [5(1)-28] A. Yamauchi, K. Ogata, “A study on macroscopic fuel cladding ductile-to-brittle transition at 300°C induced by radial hydrides”, Journal of Nuclear Science and Technology, 2019.
- [5(1)-29] “Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems and Facilities Final Report”, U. S. NRC, NUREG-2215, 2020.
- [5(1)-30] 「使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準：2021」、(一社) 日本原子力学会、2021 年 12 月
- [5(2)-1] 「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)」、(財) 原子力発電技術機構、平成 14 年 3 月
- [5(2)-2] 三島ら、「沸騰水型原子炉燃料集合体の信頼性実証試験」、日本原子力学会誌、第 29 巻、第 2 号(1987)
- [5(2)-3] 「平成 18 年度高燃焼度燃料信頼性実証成果報告書 付録 1(9×9A 型燃料照射後試験結果)」、(独) 原子力安全基盤機構、平成 19 年 12 月
- [5(2)-4] 「平成 14 年度 燃料集合体信頼性実証に関する報告書(高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証編)」、(財) 原子力発電技術機構、平成 15 年 3 月
- [5(2)-5] 「平成 17 年度 高燃焼度燃料安全裕度確認試験成果報告書(その 1) 燃料の破損事例等の調査、被覆管特性評価試験(BWR)及び計算科学評価」、(独)原子力安全基盤機構、平成 18 年 7 月
- [5(2)-6] 「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」、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、平成 22 年 6 月



GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

## 付録-1

### GNF3 型への燃料棒熱・機械設計コード PRIME03 の適用性について

#### 1. 概要

GNF3 型の燃料棒熱・機械設計評価には PRIME Ver. 3 コード<sup>(1)</sup> (以下、「PRIME03」という) を適用する。PRIME03 は、出力履歴に対応したペレットと被覆管のギャップ幅及びガスの熱伝導率の変化に基づき、ペレットと被覆管のギャップ熱伝達係数を求め、ペレット中心温度、燃料棒内圧等の熱的挙動を評価するとともに、有限要素法によってペレットと被覆管の相互作用等の機械的挙動を評価する。PRIME03 は、9×9 燃料から更なる高燃焼度化を目標とした 10×10 型を含む新燃料の設計・許認可に適用することを目的に開発されたものであり、ペレット熱伝導率の照射に伴う低下、高燃焼度領域でのペレット外周部の微細組織変化（リム組織の形成）等の知見を導入して、高燃焼度での予測性能を向上させている。コードの妥当性確認として、ハルデン炉の試験燃料データ等との比較における計算値と測定値の差異のばらつきを評価しており、得られたコードの予測の不確かさを用いた統計評価を実施することによって燃料棒熱・機械設計評価で考慮している。PRIME03 のウラン燃料への適用については、トピカルレポート<sup>(1)</sup> に対して旧原子力安全・保安院による技術評価がなされており、トピカルレポートに記載された適用範囲に対して、ウラン燃料の燃料棒熱・機械特性評価に適用することは妥当であると判断されている<sup>(2)</sup>。(以降、ここで妥当であると判断されたコードを「TR 版」という。)

本トピカルレポート発行から 2023 年までの間に、PRIME03 コードのモデルについて、トピカルレポートに記載されたモデルから、2 章及び 3 章に示すように一部を変更している。(以降、この変更後の PRIME03 コードを「変更版」という。)

本資料は、PRIME03 のトピカルレポートからの変更点、その解析結果への影響、及び GNF3 型への適用性について説明するものである。

#### 2. PRIME03 の構成及び TR 版からの変更点

PRIME03 コードの構成及び計算手順の概略図を参考図書(2)から引用し、図 2-1 に示す。同図に示す物性値、照射挙動モデルのうち、熱的解析モデルでは、被覆管径方向温度分布計算（被覆管熱伝導率及び被覆管-冷却材の温度差の計算方法）について、トピカルレポートから変更している。また、機械的解析モデルでは、ペレット変形モデル（リム組織変形による付加的なスエリング）及び被覆管変形モデル（被覆管クリープモデル式）についてトピカルレポートから変更している。これらの変更点の詳細について次章に示す。

#### 3. PRIME03 の TR 版からの変更点の詳細

##### 3.1 被覆管径方向温度分布の計算

燃料棒表面熱伝達、クラッド及び酸化膜の熱抵抗に起因する被覆管外面と冷却材の温度

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

差 $\Delta T$ について、Jens-Lottesの式に基づくフィルム熱伝達係数より求まる温度上昇 $\Delta T_{jl}$ 、クラッド付着による温度上昇 $\Delta T_{cr}$ 、及び酸化膜による温度上昇 $\Delta T_{ox}$ の

燃料棒表面熱伝達、クラッド及び酸化膜の熱抵抗に起因する被覆管外面と冷却材の温度差 $\Delta T$ の計算について、トピカルレポートに記載された式及び変更後の式を次に示す。

(トピカルレポート (5.2-6)式)

(変更後の式)

$$\Delta T = \boxed{\phantom{\Delta T = \text{[ ]}}}$$

$$\Delta T = \boxed{\phantom{\Delta T = \text{[ ]}}}$$

変更後の式は、PRIME03 にオプションとして組み込まれていたものであり、GNF3 型の熱・機械設計評価にあたり、被覆管外面温度の上昇をより高く評価する上記の変更後の式を採用した。

一方、ジルコニウムを内張りした燃料被覆管の温度評価においては、実態に合わせた被覆管内面温度を計算するため、より詳細な解析モデルに変更し、

### 3.2 被覆管のクリープモデル式

TR 版の PRIME03 コードに組み込まれた被覆管の照射誘起の二次クリープ（定常クリープ）モデルは、

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{\theta} = \\ \sigma_z = \\ \sigma_r = \end{array} \right\} \text{(3.2-1) 式}$$

ここで、

$\sigma_r$  : 径方向応力 (MPa)

$\sigma_{\theta}$  : 周方向応力 (MPa)

$\sigma_z$  : 軸方向応力 (MPa)

$r_i$  : 被覆管内半径 (mm)

$r_o$  : 被覆管外半径 (mm)

内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

一方、PRIME03 コードにおける有限要素法を用いた被覆管の応力計算では、

[Redacted]

被覆管クリープ速度の低応力状態における照射誘起の二次クリープ（定常クリープ）モデルについて、モデル式の係数の変更を行った計算式をオプションとして追加した。

低応力状態における照射誘起の二次クリープモデルの変更前後の式を以下に示す。また、変更後の式における変更箇所を二重下線で示す。

[Redacted]

（トピカルレポート p. 5. 4-9 記載の式）

$$\varepsilon_g^{irr} =$$

[Redacted]

（変更後の式）

$$\varepsilon_g^{irr} =$$

[Redacted]

ここで、

- $\varepsilon_g^{irr}$  : 一般化照射クリープひずみ (-)
- $T$  : 被覆管温度 (°C)
- $\sigma$  : 一般化応力 (MPa) (注1)
- $\phi$  : 高速中性子束 (1 MeV 以上) ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
- $t$  : 時間 (s)

GNF3 型の熱・機械設計評価においては、より実現象に則した評価を行うことと目的として、変更後の式を採用した。

(注1) [Redacted]

[Redacted] 内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

### 3.3 リム組織形成による付加的なスエリング係数の見直し

高燃焼度領域で被覆管直径変化に影響を与える因子である、リム組織形成による付加的なスエリングモデル係数について、TR 版からの見直しを行った。これは、トピカルレポート発行後に見いだされた PRIME03 コードの被覆管変形に係わるプログラムの誤りの修正を行った結果、被覆管直径変化の測定値と計算値の比較において、特に高燃焼度領域で TR 版に上記のプログラムの誤りの修正を行ったコードの計算値が過小評価する傾向にあったためである。

PRIME03 では核分裂生成物の蓄積による固体スエリングに加え、リム組織形成によるペレット外周部の気孔率増加に伴うペレットの体積増加が考慮される。リム組織形成による体積増加は、 被覆管直径変化の測定データとの照合の結果からリム組織形成による体積増加への寄与率を表す定数  $F_{comp}$  を設定している。リム組織形成による付加的なスエリング計算式（トピカルレポート p. 5. 4-17 記載）を以下に示す。

$$\varepsilon_{rim} = \frac{1}{3} \cdot \left( F_{comp} \cdot \frac{\Delta V}{V_{total}} \right)$$

ここで、

- $\varepsilon_{rim}$  : リム組織形成による付加的なスエリング (-)
- $F_{comp}$  : リム組織形成によるペレット体積増加への寄与率 (-)
- $\Delta V/V_{total}$  : リム領域のペレット全体に対する体積増加率 (-)

上記 3.1 節、3.2 節で述べた変更及び上記のプログラムの誤りの修正を反映した後に被覆管直径変化の測定データとの照合を実施した結果、当該の寄与率を表す  $F_{comp}$  をトピカルレポート記載値の  から  に変更した。本変更の詳細については（参考）に示している。なお、本変更は PRIME03 コードにのみ適用されるものであり、燃料棒内圧評価に用いるペレットスエリング速度には影響しない。

## 4. PRIME03 コード変更による解析結果への影響

### 4.1 燃料棒熱・機械解析結果への影響

設計用出力履歴を用いた GNF3 型について、3 章で述べた各モデルの変更前後による熱・機械解析を行い、解析結果を比較した。

3.1 節で述べた被覆管温度計算の変更による被覆管内外面温度の解析結果への影響を図 4.1-1 に示す。低燃焼度領域では、 軸方向最大出力となるノードでは被覆管内面温度は変更前に比べ  °C ほど低下した。高燃焼度領域では、

内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

寿命末期において、軸方向最大出力となるノードの被覆管内面温度は変更前に比べ約  $\square$  °C 高くなる程度であった。

3.2 節で述べた被覆管のクリープモデル式の変更によって、被覆管周方向クリープ変形量は低下する方向となる。クリープモデル式の変更による被覆管周方向クリープひずみの解析結果への影響を軸方向最大出力ノードについて図 4.1-2 に示す。軸方向最大出力となるノードにおける被覆管周方向クリープひずみの差は、寿命末期において  $\square$  %程度であった。

3.3 節で述べたリム組織形成による付加的なスエリング係数の見直しによる被覆管周方向塑性ひずみへの影響は、軸方向最大出力となるノードにおけるノードにおいて、変更前に比べ寿命末期で約  $\square$  %大きくなる程度であった。

上記の 3.1 節～3.3 節で述べた変更前後による燃料棒内圧及びギャップコンダクタンスへの影響を図 4.1-3 及び図 4.1-4 に示す。燃料棒内圧の差は最大で  $\square$  MPa 程度であった。燃料棒内圧の最大値 (約  $\square$  MPa) に比べてこの差は小さく、有意な差ではないと考えられる。ギャップコンダクタンスの差は、ギャップコンダクタンスが最大となる約  $\square$  W/(m<sup>2</sup>·K) の付近で最も大きくなり、約  $\square$  W/(m<sup>2</sup>·K) であった。図 4.1-4 に示す通り、寿命を通してギャップコンダクタンスに有意な差はなく、熱・機械設計評価において有意な影響はないと考えられる。

以上のことから、3 章で述べた各モデルの変更前後による設計用出力履歴を用いた GNF3 型の熱・機械解析結果への影響は小さいと考えられる。

#### 4.2 トピカルレポートの妥当性確認図への影響

3 章で述べた変更点を考慮した PRIME03 によるペレット中心温度、FP ガス放出率、燃料棒内圧及び被覆管直径変化の測定値と計算値との比較を、各項目についてそれぞれ図 4.2-1～図 4.2-8 に示す。また、各項目のトピカルレポートにおける測定値と計算値の比較を参考図 1～参考図 8 に示している。これらの図に示す測定値は、ハルデン炉における試験、インターランプ試験等の国際共同研究、商用炉燃料棒の照射後試験等で得られたデータに基づくものであり、表 4-1 に示すトピカルレポートに妥当性確認用データとして示したものと同一である。これらの図が示すように、モデルの変更前後において、測定値と計算値との比較図に有意な差はないことから、変更版の PRIME03 はトピカルレポートにおいて示したものと同等の予測性能をもっている。また、モデル変更後におけるペレット中心温度と冷却材温度との差の計算値と測定値のばらつき (標準偏差) は  $\square$  % となり変更前 ( $\square$  %) と同等であったため、燃料棒熱・機械設計評価に用いるコードの予測の不確かさについてはトピカルレポートから変更しないこととした。コードの予測の不確かさを考慮 (出力履歴を +2 $\sigma$  相当上昇させ、かつ、 $\square$ ) した場合の PRIME03 のペレット中心温度、FP ガス放出率、燃料棒内圧及び被覆管直径変化の測定値と計算値との比較を図 4.2-9～図 4.2-16 に示す。また、各項目のトピカルレポートに

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

おける同条件での測定値と計算値の比較を参考図 9～参考図 16 に示す。

#### 5. 燃料仕様の適用範囲

PRIME03 の適用範囲と GNF3 型の仕様の比較を表 5-1 に示す。表 5-1 に示すとおり、GNF3 型の基本的な燃料仕様は PRIME03 の適用範囲内にある。

#### 6. まとめ

燃料棒熱・機械設計コード PRIME03 について、平成 22 年に技術評価を受けたトピカルレポートにおいて説明したモデルから、ごく一部のモデルについてその取扱い又は定数に変更を加えているが、これらの変更によるコードの解析結果への影響は小さく、コードの予測性能に有意な影響を与えない。また、GNF3 型の基本的な燃料仕様は、PRIME03 の適用範囲内にある。

以上のことから、PRIME03 は GNF3 型に対して適用可能であると考えられる。

#### 7. 参考文献

- (1) GLR-002 改訂 2 「燃料棒熱・機械設計コード PRIME03 について」、株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン、平成 22 年 4 月
- (2) 「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」、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、平成 22 年 6 月

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

表 4-1 PRIME03 コードの妥当性確認用データの内訳<sup>(1)</sup>

検証項目	本数	データ範囲										データソース		
		被覆管外径 (mm)	被覆管肉厚 (mm)	ペレット径 (mm)	キャップ幅 (mm)	ペレット密度 (%TD)	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 濃度 (wt%)	Al-Si-O 濃度 (ppm)	He 封入圧 (MPa)	燃焼度 (GWd/t)	線出力密度 (kW/m)			
ペレット 中心温度	71											≤85 <sup>*1</sup>	≤73	・ハルデン炉試験 ・RISO-3 試験
F P ガス 放出率	531											≤99 <sup>*2</sup>	≤157	・商用炉データ ・ハルデン炉試験 ・GETR 試験 ・インターラブ試験 ・スーパーラブ試験 ・オーパーラブ試験 ・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 <sup>*2</sup>	≤77	・ハルデン炉試験 ・RISO-3 試験
被覆管 直径変化	176											≤83 <sup>*1</sup>	≤91	・商用炉データ ・GETR 試験 ・インターラブ試験 ・スーパーラブ試験 ・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

内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

表 5-1 PRIME03 の適用範囲と GNF3 型の仕様の比較

仕 様	PRIME03 適用範囲 <sup>(1)(2)</sup>	GNF3 型
被覆管外径 (mm)	9.0 - 13.0	<input type="text"/>
被覆管肉厚 (mm)	0.50 - 0.95	<input type="text"/>
ペレット直径 (mm)	8.0 - 11.0	<input type="text"/>
ペレット-被覆管ギャップ幅 (直径ギャップ) (mm)	0.13 - 0.25	<input type="text"/>
ペレット密度 (%TD (理論密度))	93.0 - 98.0	<input type="text"/>
初期 He 封入圧 (MPa[abs])	0.1 - 1.1	<input type="text"/>
ペレット燃焼度 (GWd/t)	≤ 80	<input type="text"/>
燃料棒平均燃焼度 (GWd/t)	≤ 73	<input type="text"/>
線出力密度 (kW/m) 通常運転時 異常な過渡変化時	≤ 60 ≤ 100	≤ 44.0 ≤ 71*1
ペレット材	UO <sub>2</sub> 、Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 入り UO <sub>2</sub> 焼結体 (Al-Si-O 添加を含む)	UO <sub>2</sub> 、Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 入り UO <sub>2</sub> 焼結体
U 濃縮度 (wt%)	≤ 8	≤ 5
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 濃度 (wt%)	≤ 10	≤ 10
Al-Si-O 添加量 (ppm)	250 - 2500	-
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	同左

\*1 被覆管に 1%の円周方向平均塑性歪が生じる線出力密度。

内は商業機密のため、非公開とします。



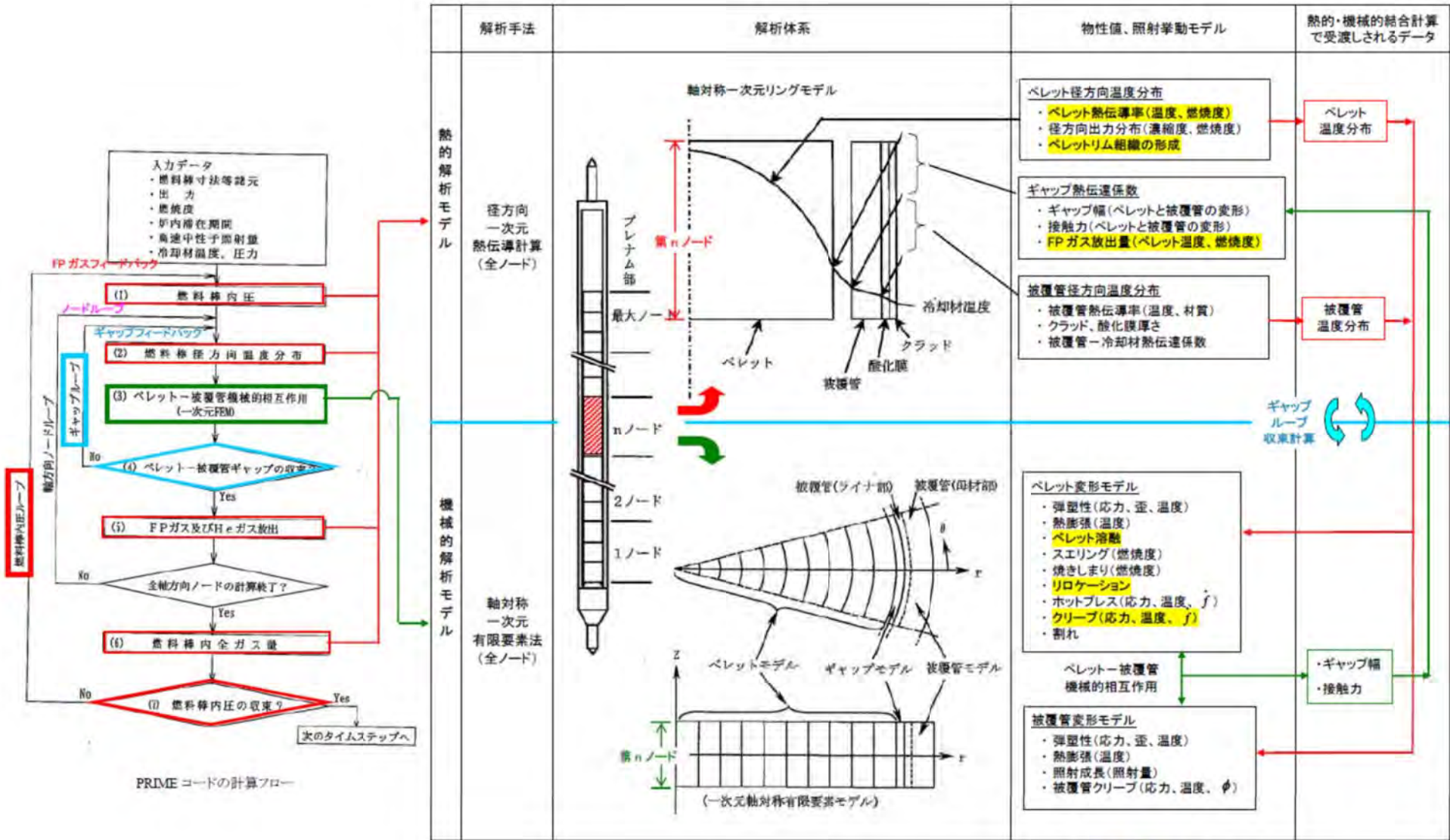


図 2-1 PRIME03 コードの構成及び計算手順<sup>(2)</sup>

補足) 黄色の網掛けは PRIME01 から PRIME03 へのコード改訂にあたり改訂されたモデルである。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

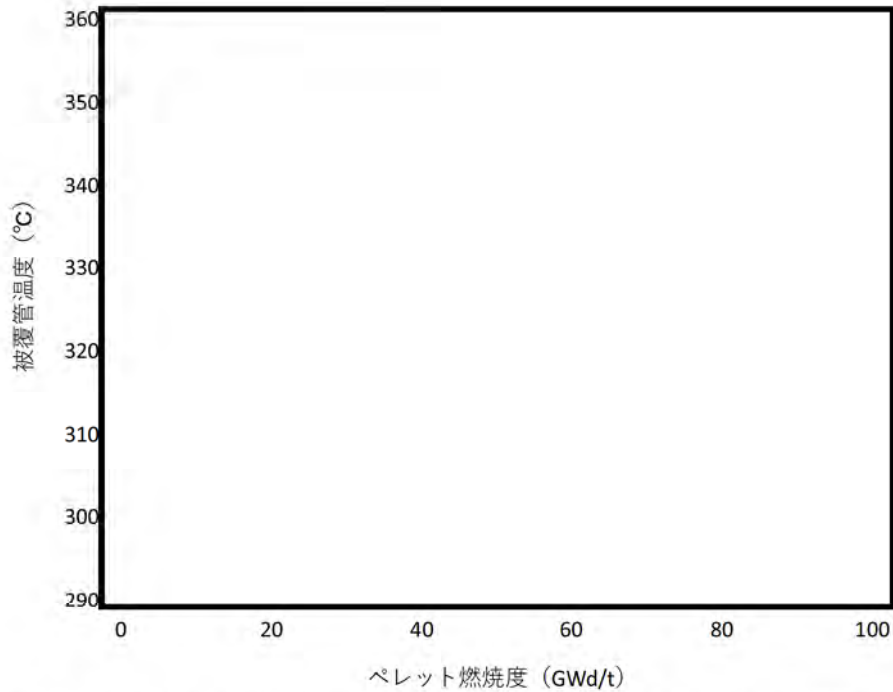


図 4.1-1 被覆管温度計算モデル変更による被覆管温度解析結果への影響  
(実線は被覆管内面温度、破線は被覆管外面温度を示す。)

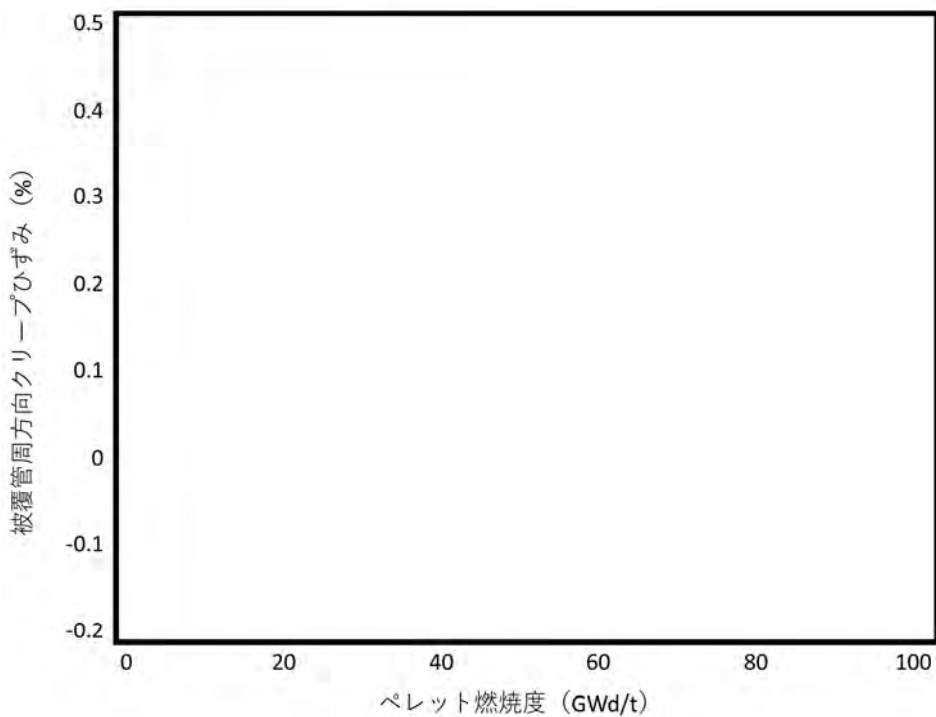


図 4.1-2 被覆管クリープモデル変更による被覆管周方向クリープひずみの  
解析結果への影響

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

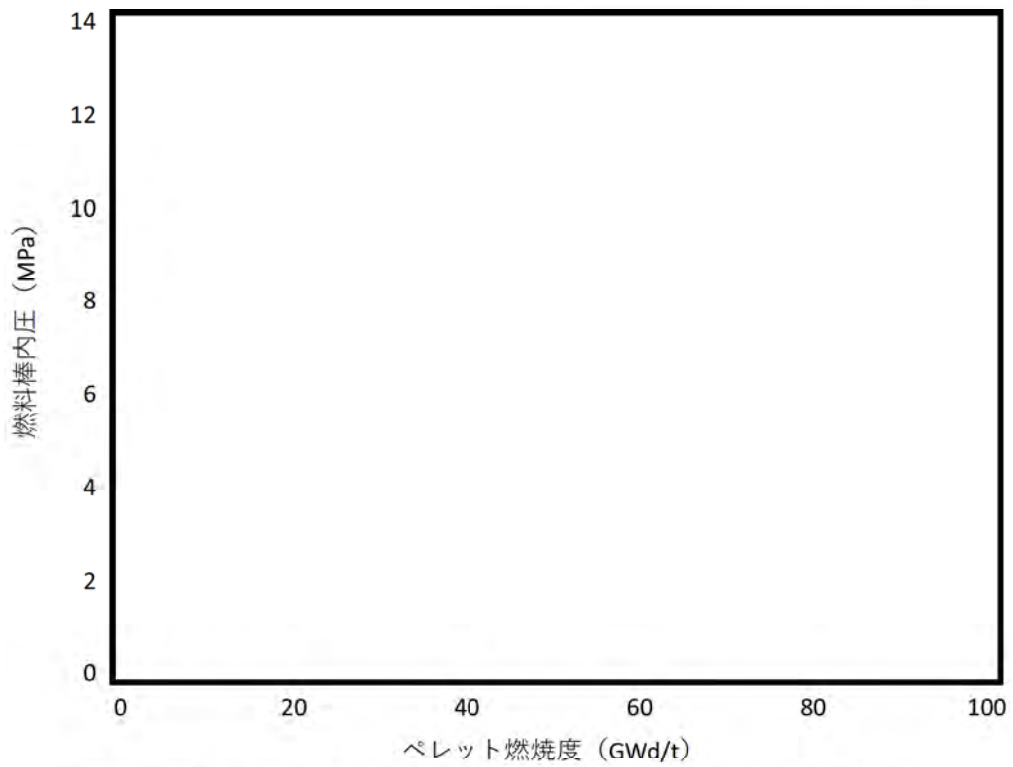


図 4.1-3 PRIME03 コード変更による燃料棒内圧の解析結果への影響

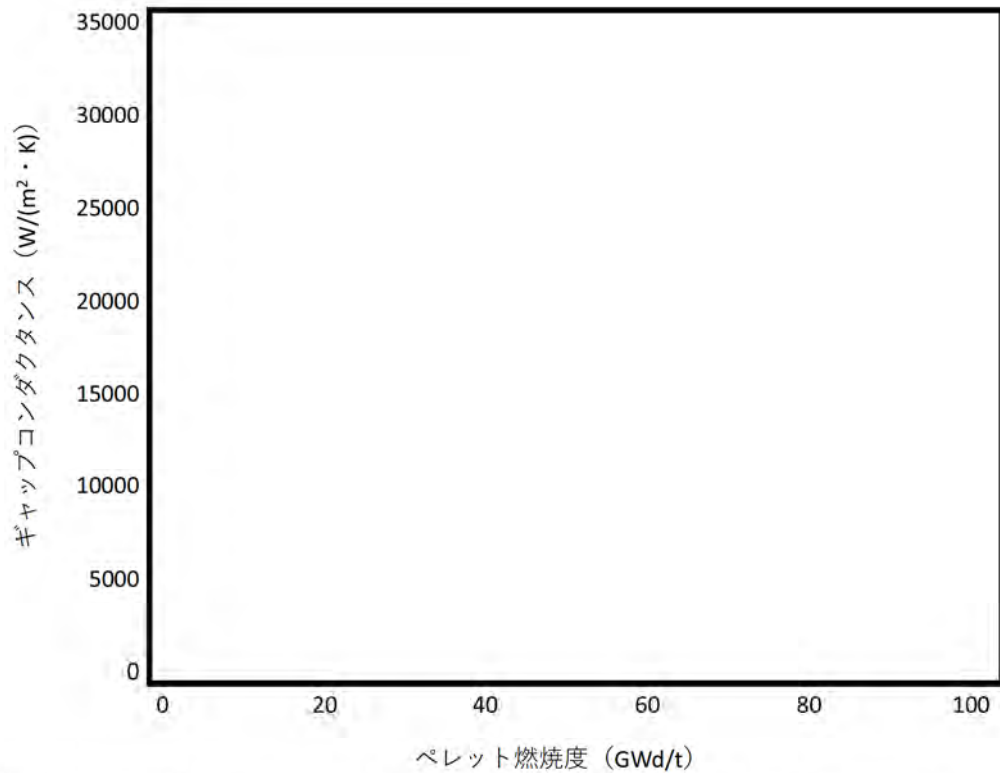


図 4.1-4 PRIME03 コード変更によるギャップコンダクタンスの解析結果への影響

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

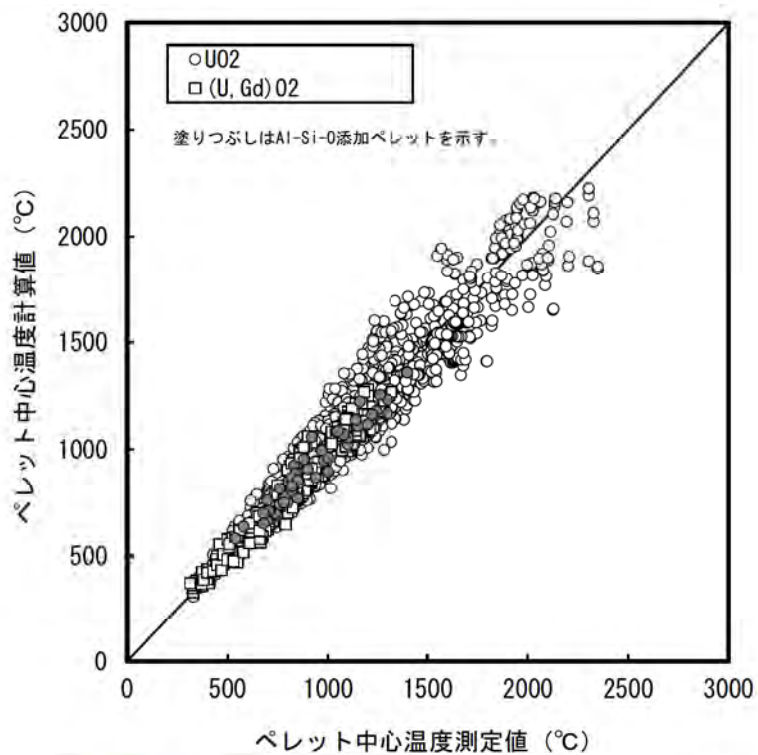
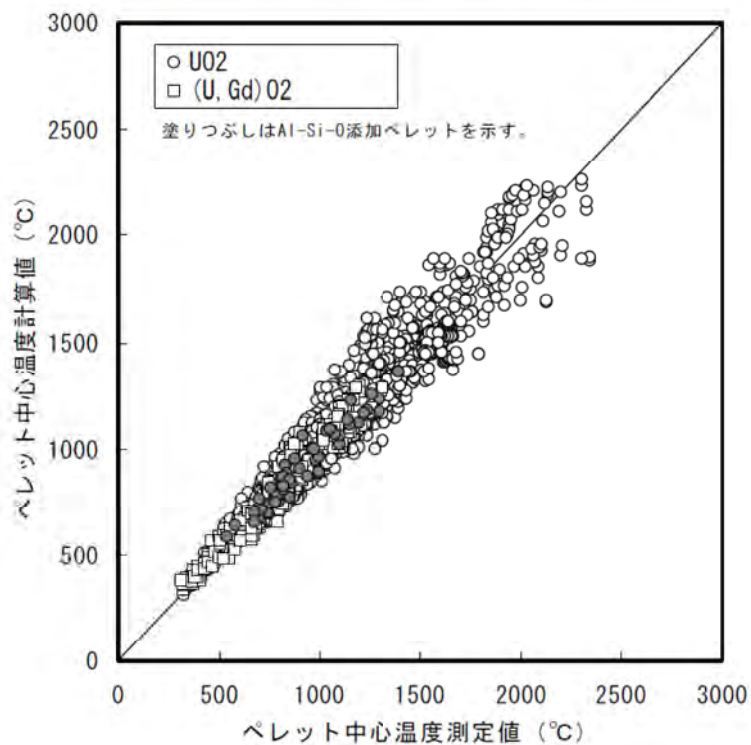


図 4.2-1 ペレット中心温度の測定値と計算値の比較



(参考図 1) ペレット中心温度の測定値と計算値の比較 (トピカルレポート報告図) <sup>(1)</sup>

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

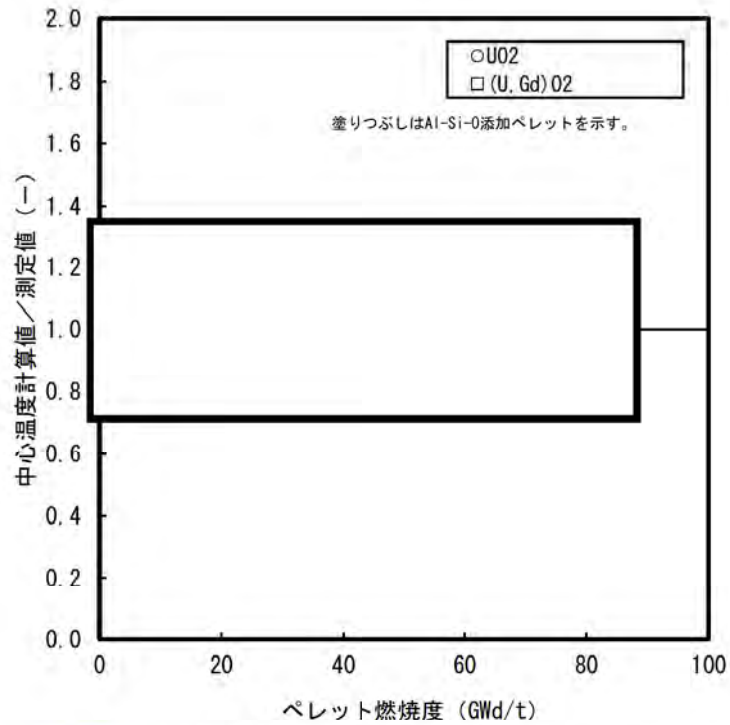
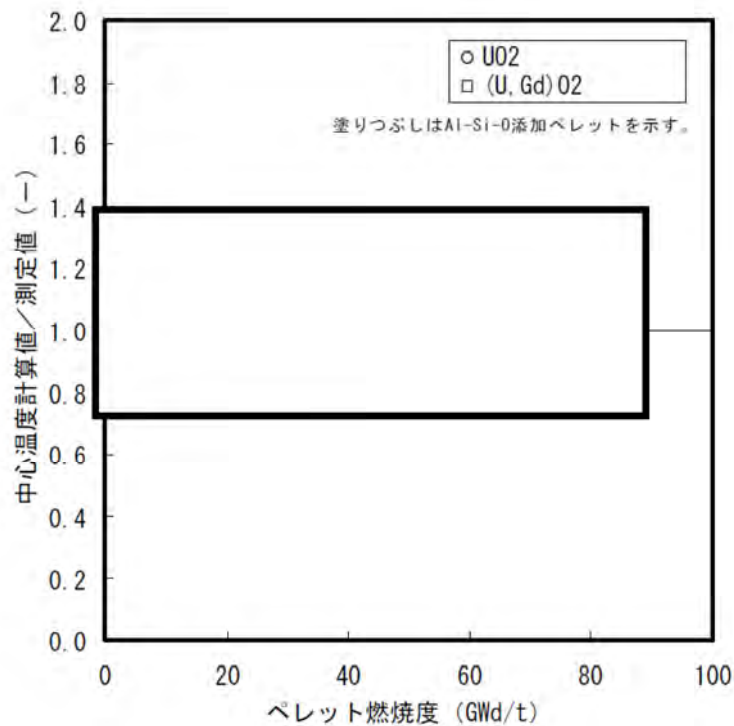


図 4.2-2 ペレット中心温度の測定値と計算値の比較  
(ペレット中心温度の計算値／測定値の燃焼度変化)



(参考図 2) ペレット中心温度の測定値と計算値の比較 (トピカルレポート報告図) <sup>(1)</sup>  
(ペレット中心温度の計算値／測定値の燃焼度変化)

内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

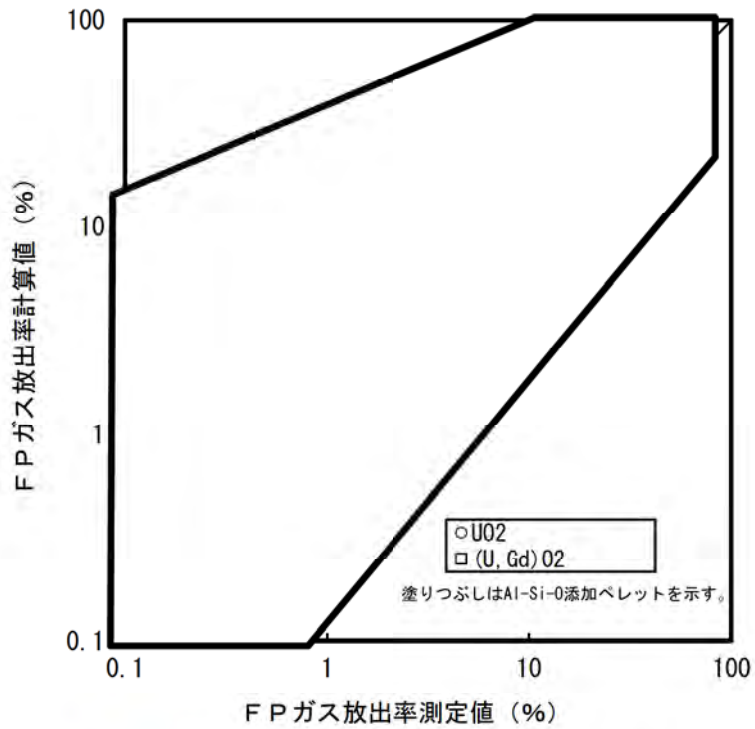
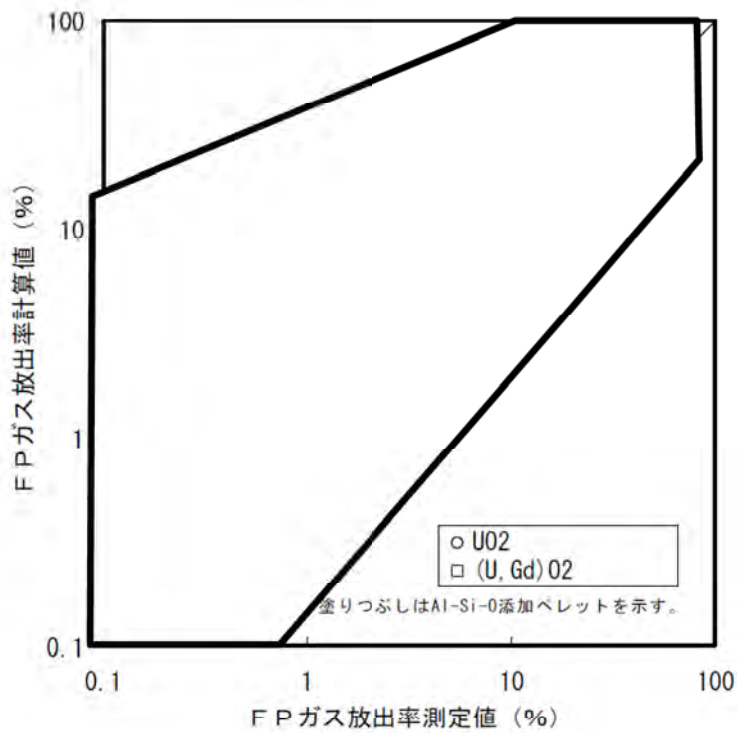


図 4.2-3 FP ガス放出率の測定値と計算値の比較



(参考図 3) FP ガス放出率の測定値と計算値の比較 (トピカルレポート報告図) <sup>(1)</sup>

内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

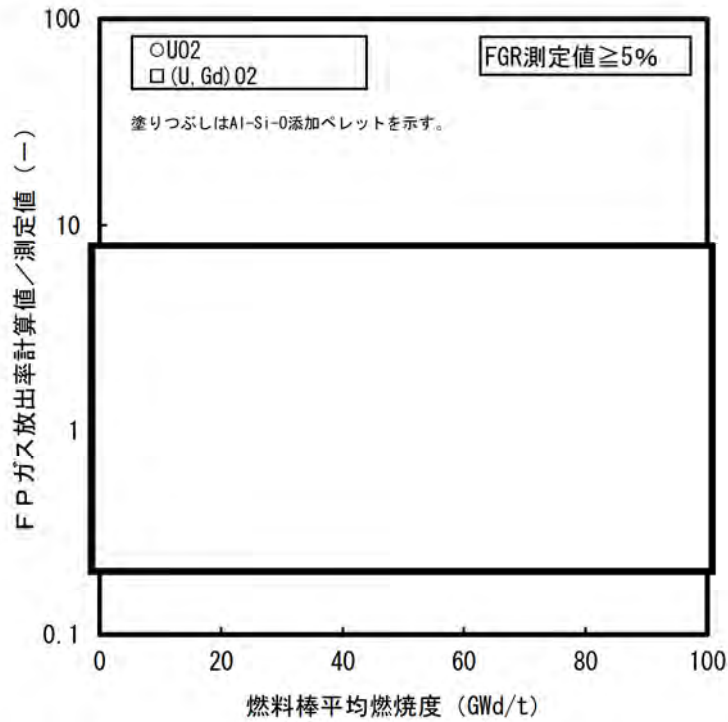
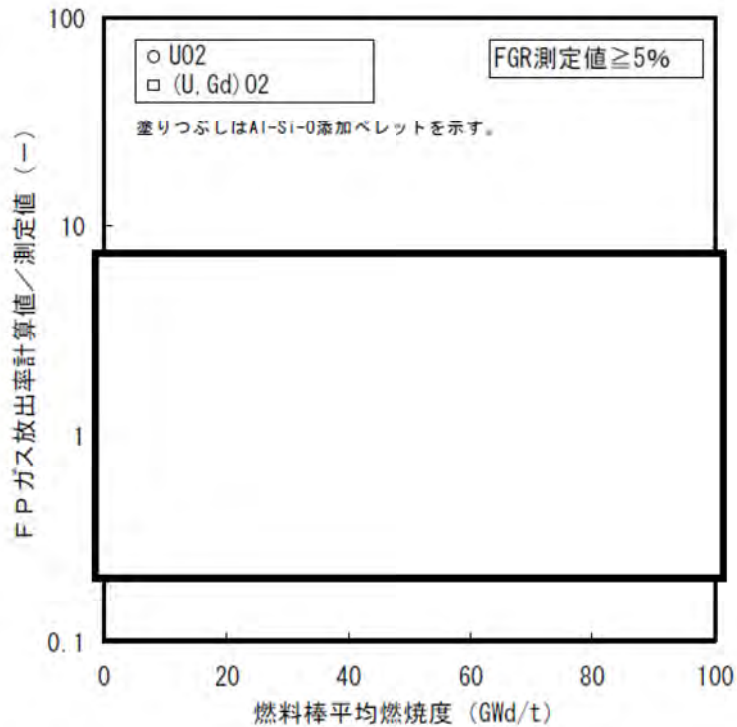


図 4.2-4(1) FP ガス放出率の測定値と計算値の比較  
(FP ガス放出率の計算値/測定値の燃焼度変化)



(参考図 4(1)) FP ガス放出率の測定値と計算値の比較 (トピカルレポート報告図) <sup>(1)</sup>  
(FP ガス放出率の計算値/測定値の燃焼度変化)

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

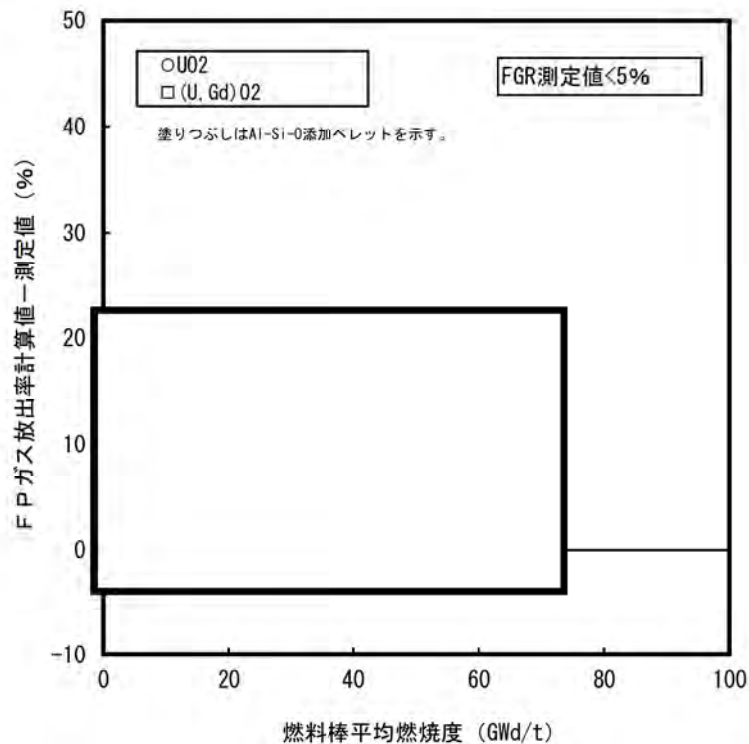
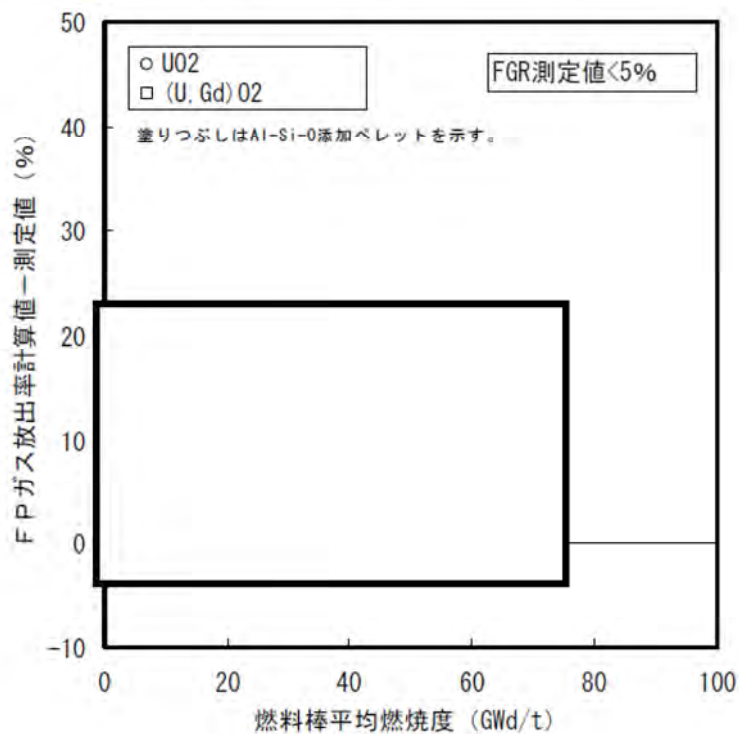


図 4.2-4(2) FP ガス放出率の測定値と計算値の比較  
(FP ガス放出率の (計算値-測定値) の燃焼度変化)



(参考図 4(2)) FP ガス放出率の測定値と計算値の比較 (トピカルレポート報告図) <sup>(1)</sup>  
(FP ガス放出率の (計算値-測定値) の燃焼度変化)

内は商業機密のため、非公開とします。



GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

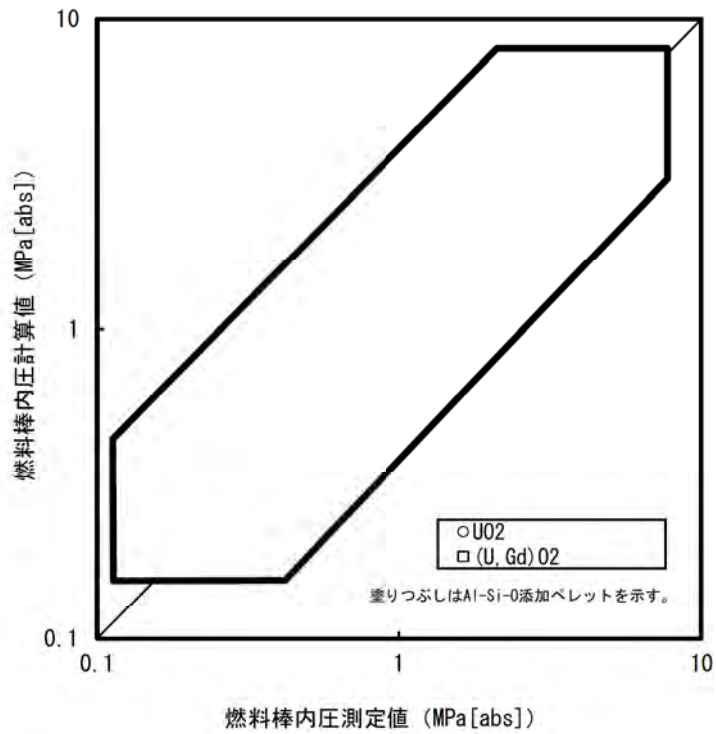
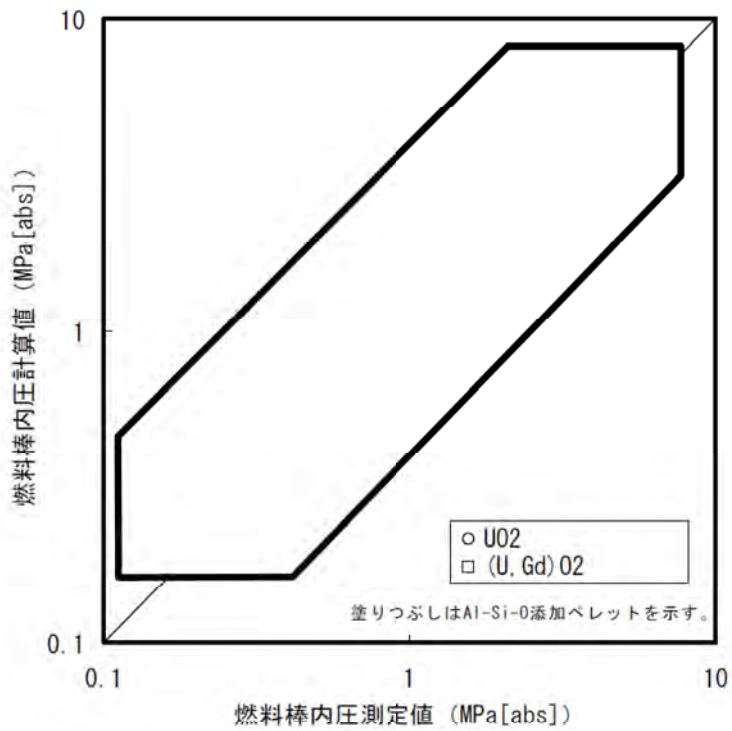


図 4.2-5 燃料棒内圧の測定値と計算値の比較



(参考図 5) 燃料棒内圧の測定値と計算値の比較 (トピカルレポート報告図) <sup>(1)</sup>

内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

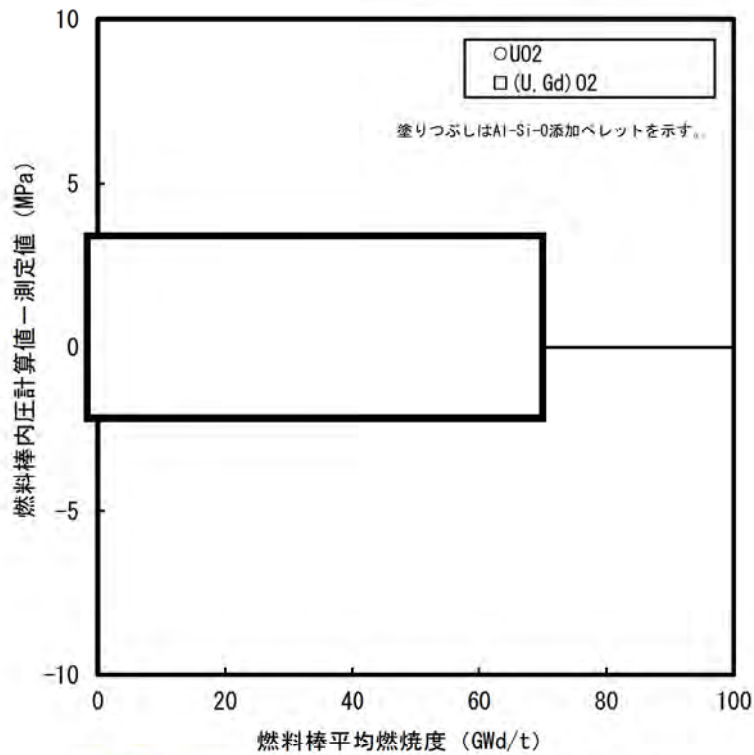
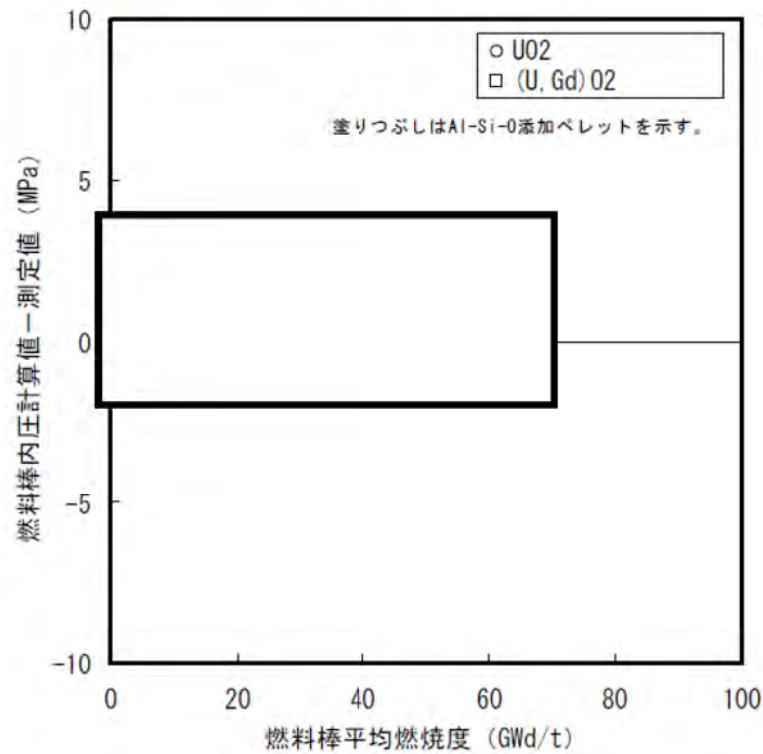


図 4.2-6 燃料棒内圧の測定値と計算値の比較  
(燃料棒内圧の (計算値-測定値) の燃焼度変化)



(参考図 6) 燃料棒内圧の測定値と計算値の比較 (トピカルレポート報告図) <sup>(1)</sup>  
(燃料棒内圧の (計算値-測定値) の燃焼度変化)

内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

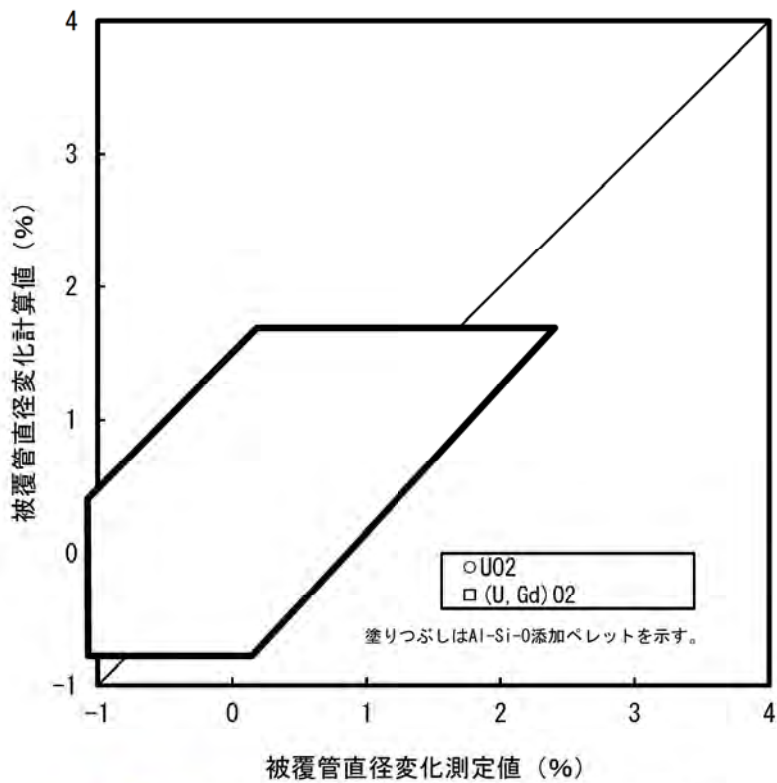
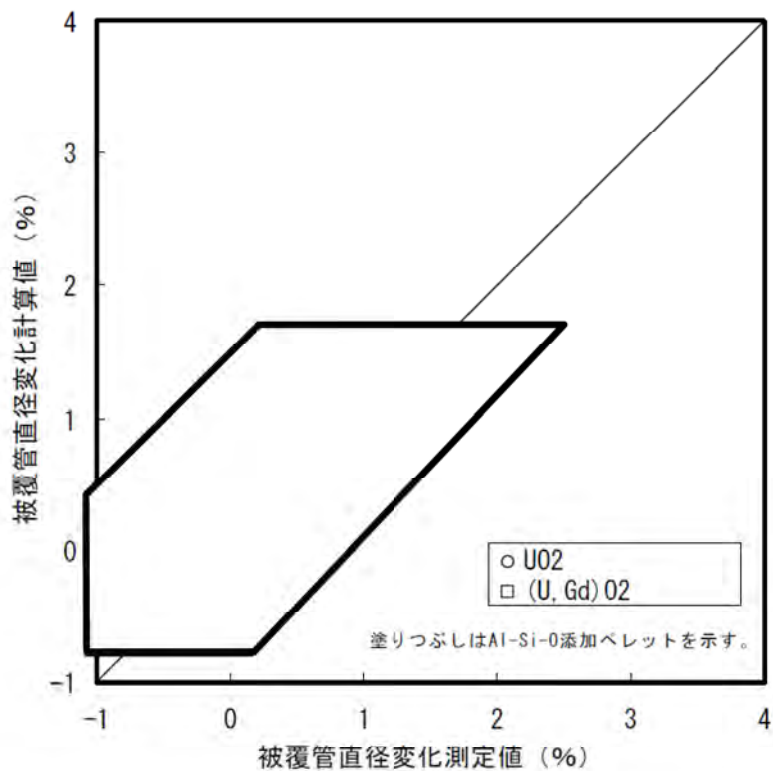


図 4.2-7 被覆管直径変化の測定値と計算値の比較



(参考図 7) 被覆管直径変化の測定値と計算値の比較 (トピカルレポート報告図) <sup>(1)</sup>

内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

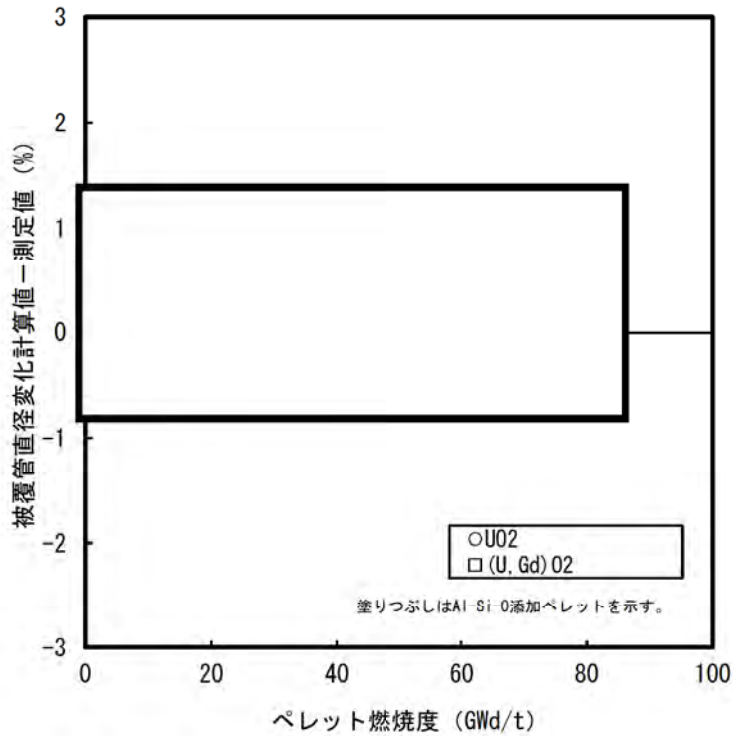
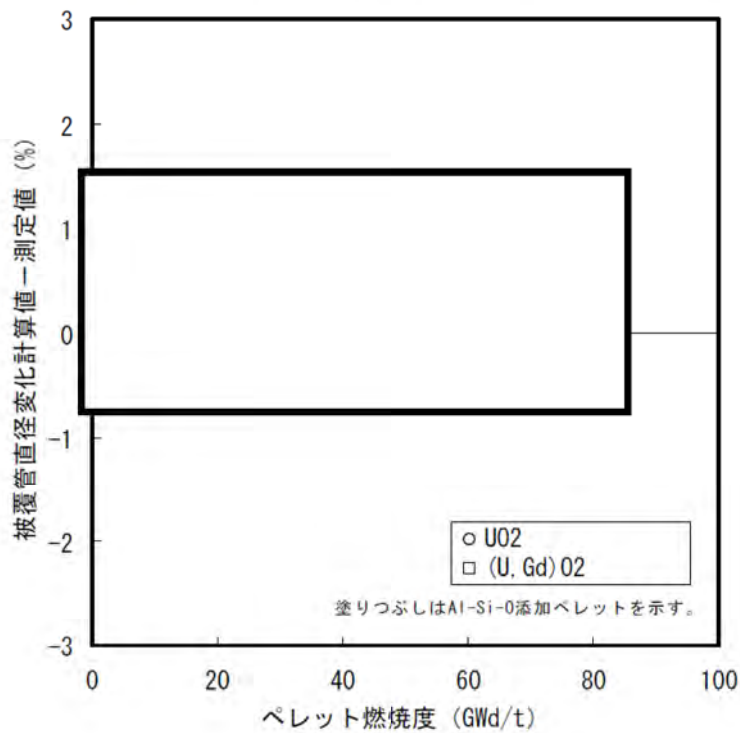


図 4.2-8 被覆管直径変化の測定値と計算値の比較  
(被覆管直径変化の (計算値-測定値) の燃焼度変化)



(参考図 8) 被覆管直径変化の測定値と計算値の比較 (トピカルレポート報告図) <sup>(1)</sup>  
(被覆管直径変化の (計算値-測定値) の燃焼度変化)

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

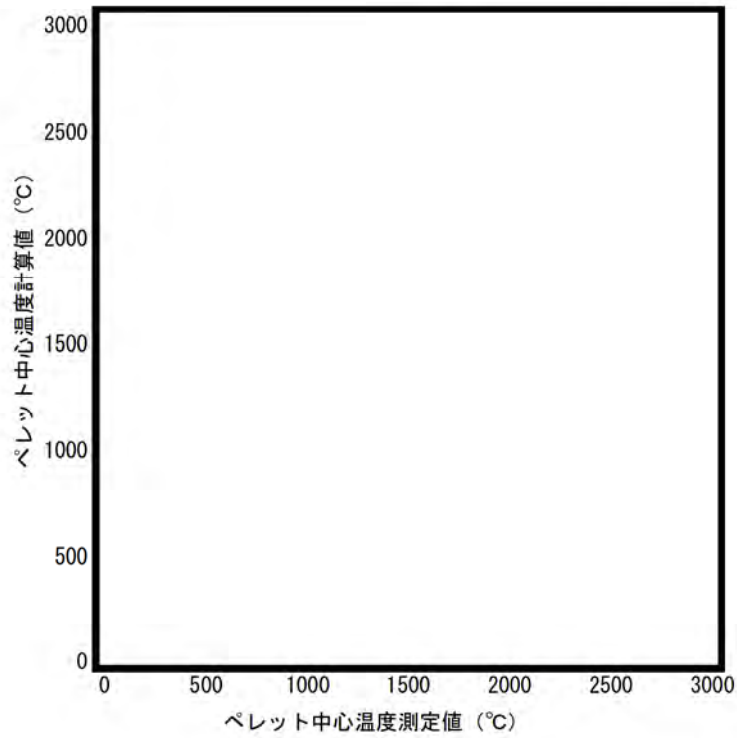
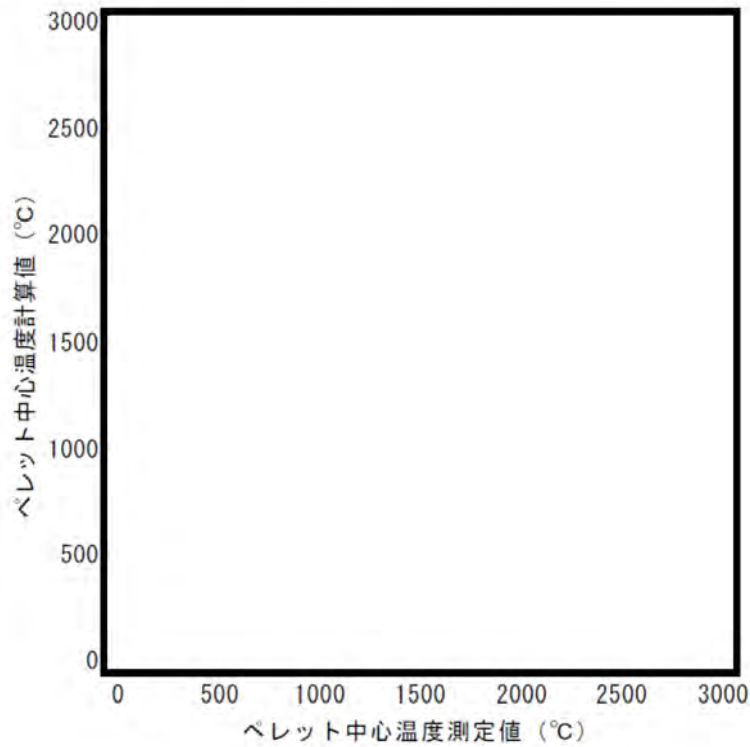


図 4.2-9 コードの予測の不確かさを考慮したペレット中心温度の測定値と計算値の比較



(参考図 9) コードの予測の不確かさを考慮したペレット中心温度の測定値と計算値の比較  
(トピカルレポート版 PRIME03 による解析結果)

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

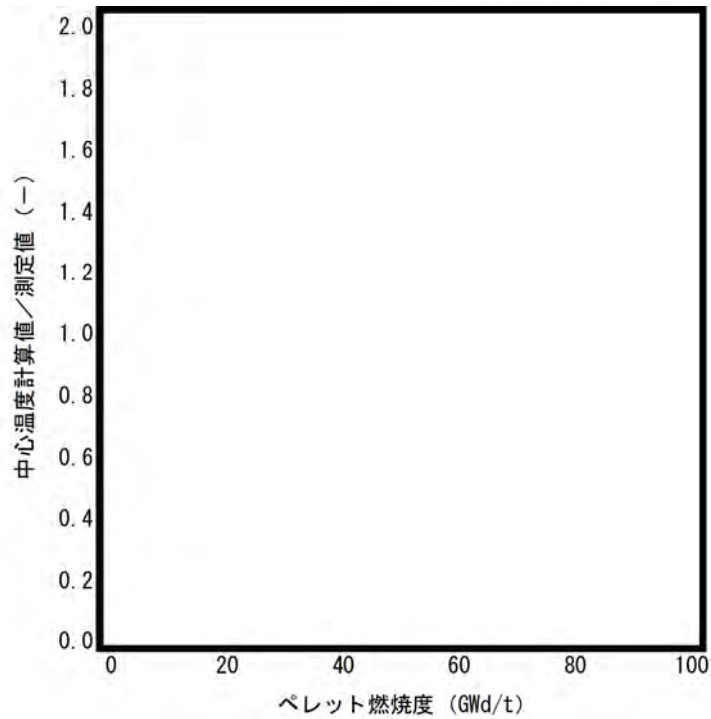
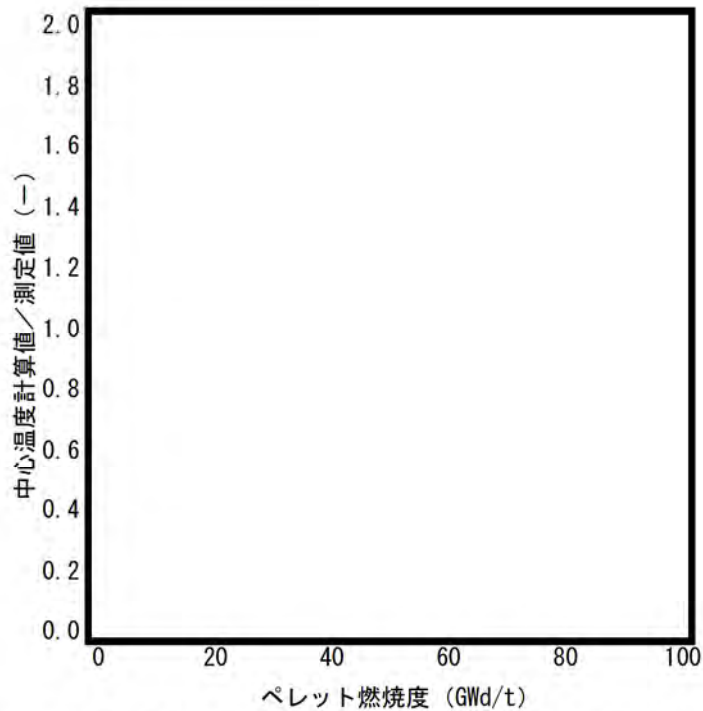


図 4.2-10 コードの予測の不確かさを考慮したペレット中心温度の測定値と計算値の比較  
(ペレット中心温度の計算値/測定値の燃焼度変化)



(参考図 10) コードの予測の不確かさを考慮したペレット中心温度の測定値と計算値の比較  
(ペレット中心温度の計算値/測定値の燃焼度変化)  
(トピカルレポート版 PRIME03 による解析結果)

☐ 内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

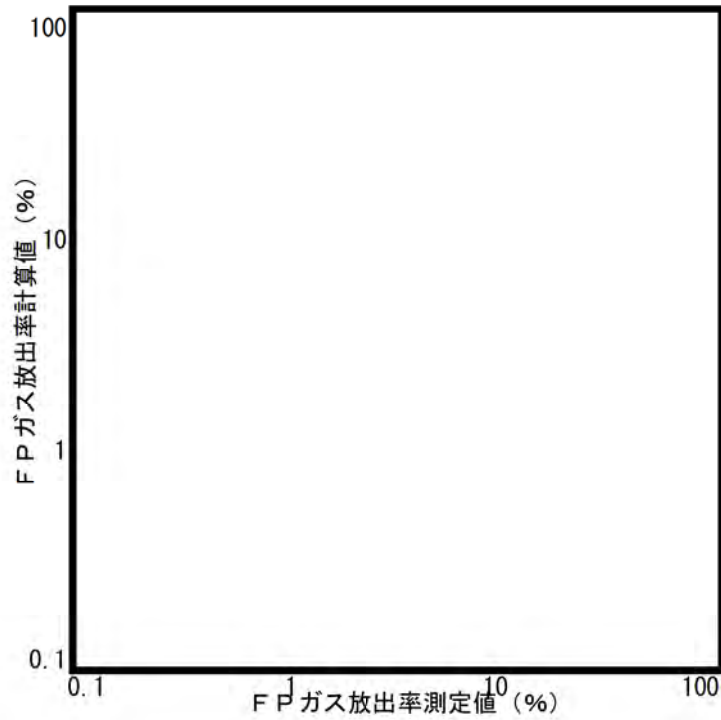
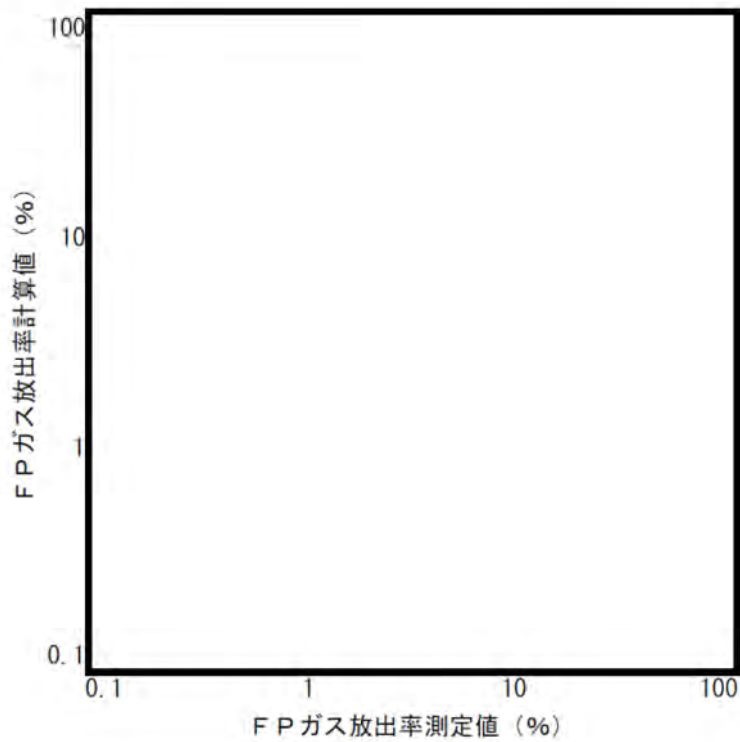


図 4.2-11 コードの予測の不確かさを考慮した FP ガス放出率の測定値と計算値の比較



(参考図 11) コードの予測の不確かさを考慮した FP ガス放出率の測定値と計算値の比較  
(トピカルレポート版 PRIME03 による解析結果)

内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

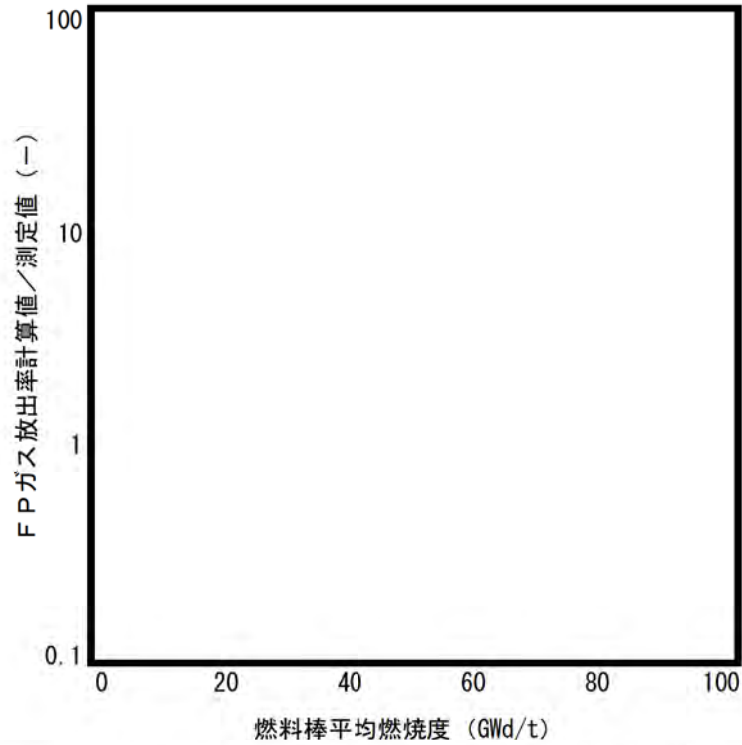
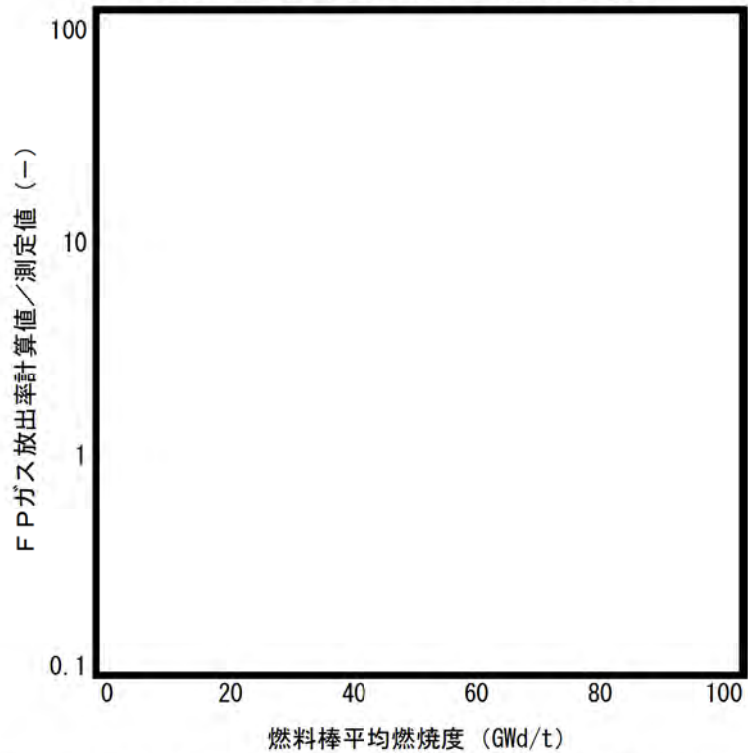


図 4.2-12(1) コードの予測の不確かさを考慮した FP ガス放出率の測定値と計算値の比較  
(FP ガス放出率の計算値/測定値の燃焼度変化)



(参考図 12(1)) コードの予測の不確かさを考慮した FP ガス放出率の測定値と計算値の比較  
(FP ガス放出率の計算値/測定値の燃焼度変化)  
(トピカルレポート版 PRIME03 による解析結果)

☐ 内は商業機密のため、非公開とします。



GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

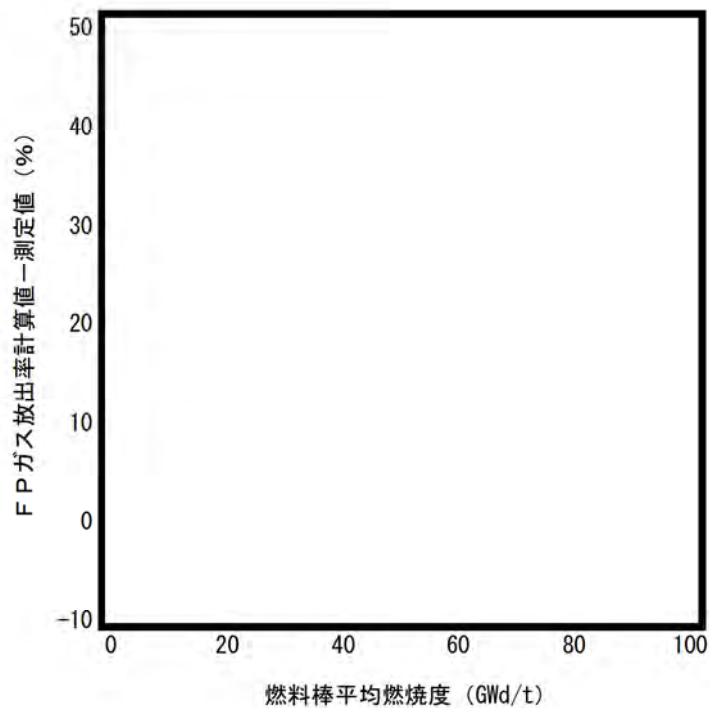
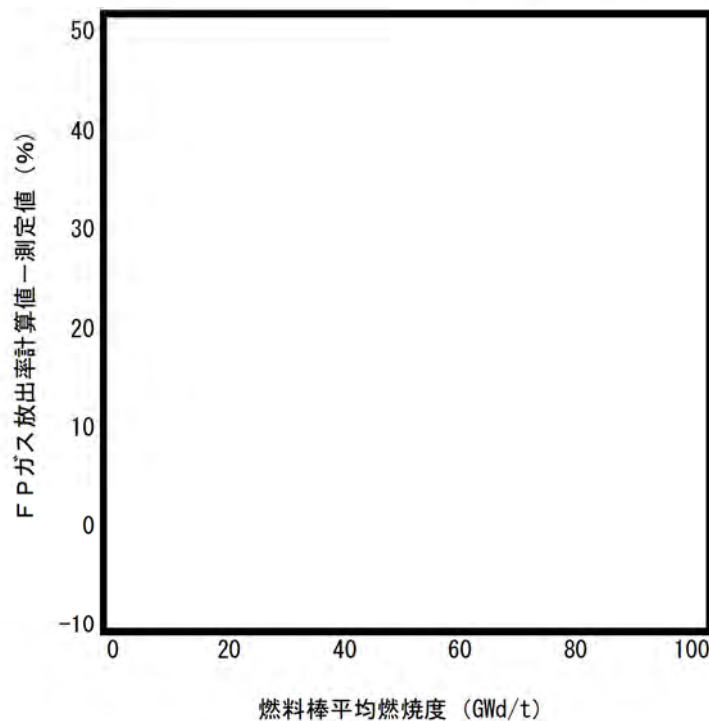


図 4.2-12(2) コードの予測の不確かさを考慮した FP ガス放出率の測定値と計算値の比較  
(FP ガス放出率の (計算値-測定値) の燃焼度変化)



(参考図 12(2)) コードの予測の不確かさを考慮した FP ガス放出率の測定値と計算値の比較  
(FP ガス放出率の (計算値-測定値) の燃焼度変化)  
(トピカルレポート版 PRIME03 による解析結果)

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

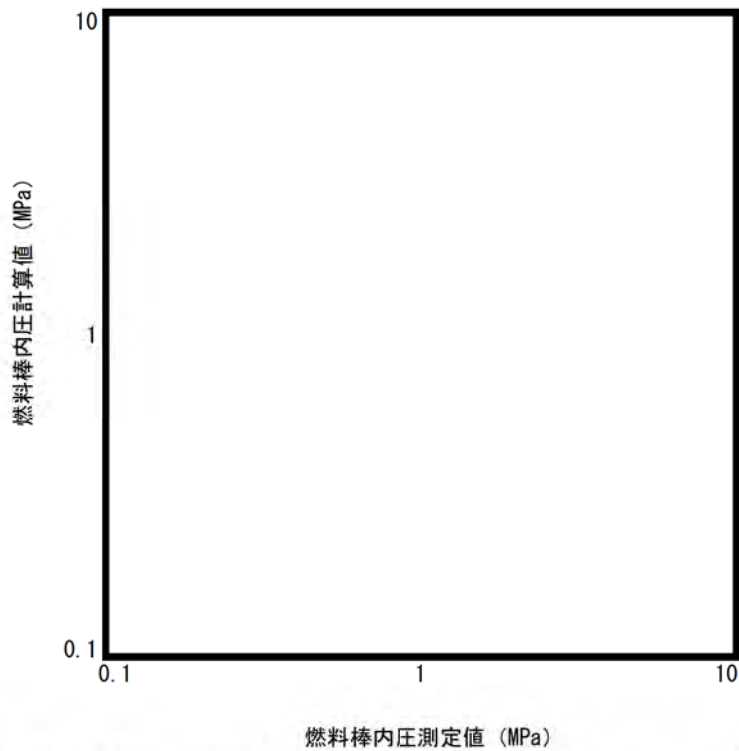
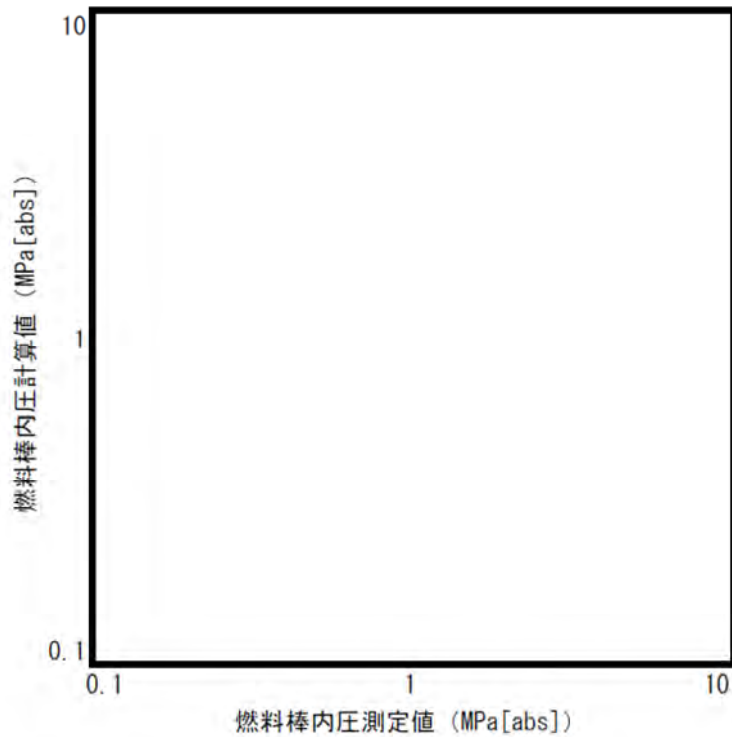


図 4.2-13 コードの予測の不確かさを考慮した燃料棒内圧の測定値と計算値の比較



(参考図 13) コードの予測の不確かさを考慮した燃料棒内圧の測定値と計算値の比較  
(トピカルレポート版 PRIME03 による解析結果)

□内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

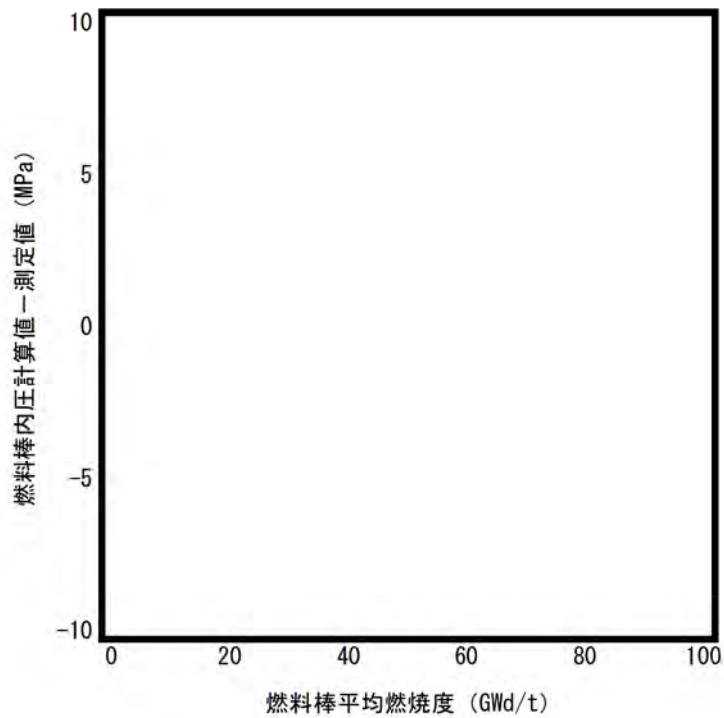
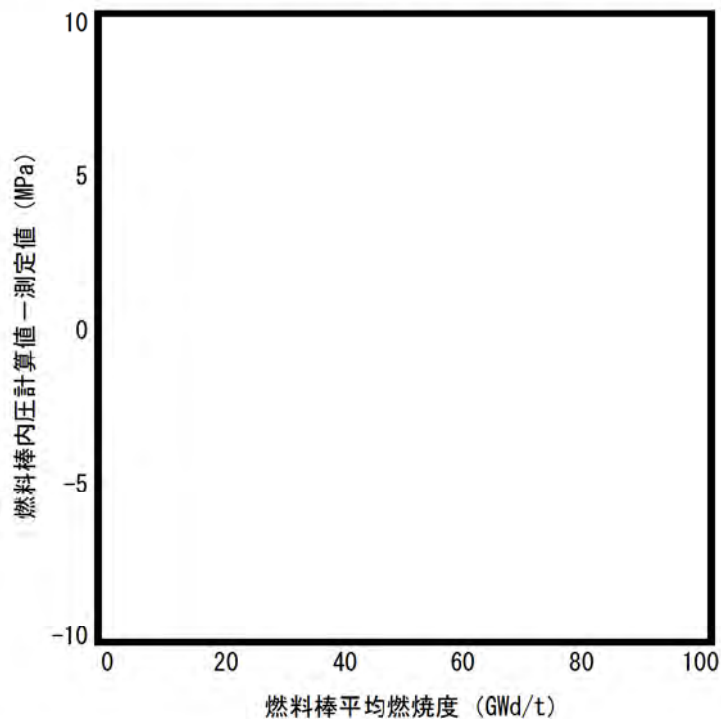


図 4.2-14 コードの予測の不確かさを考慮した燃料棒内圧の測定値と計算値の比較  
(燃料棒内圧の(計算値-測定値)の燃焼度変化)



(参考図 14) コードの予測の不確かさを考慮した燃料棒内圧の測定値と計算値の比較  
(燃料棒内圧の(計算値-測定値)の燃焼度変化)  
(トピカルレポート版 PRIME03 による解析結果)

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

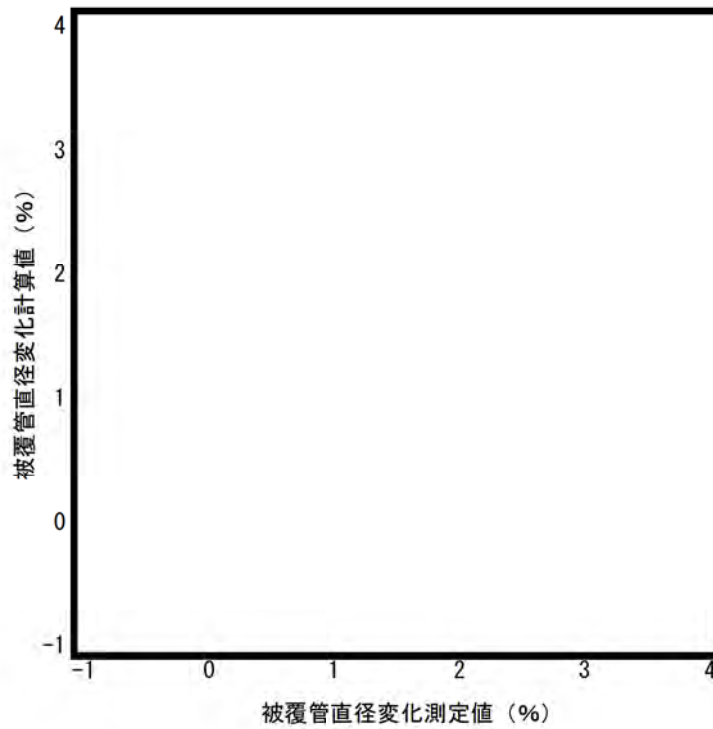
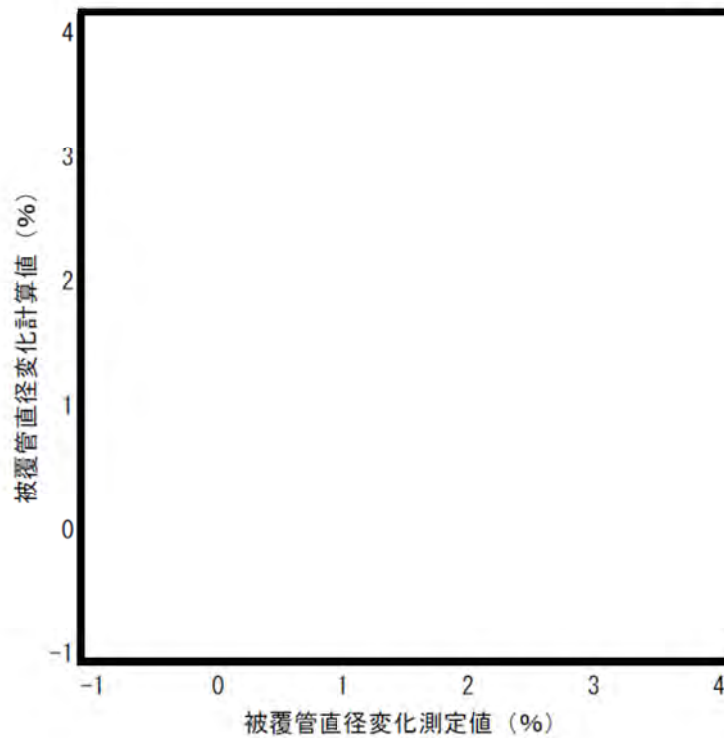


図 4.2-15 コードの予測の不確かさを考慮した被覆管直径変化の測定値と計算値の比較



(参考図 15) コードの予測の不確かさを考慮した被覆管直径変化の測定値と計算値の比較  
(トピカルレポート版 PRIME03 による解析結果)

内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

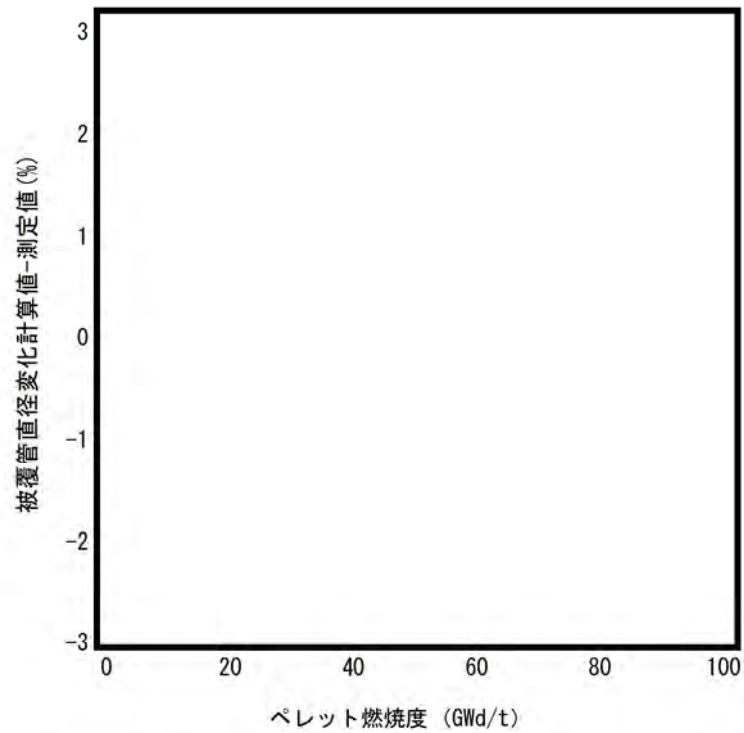
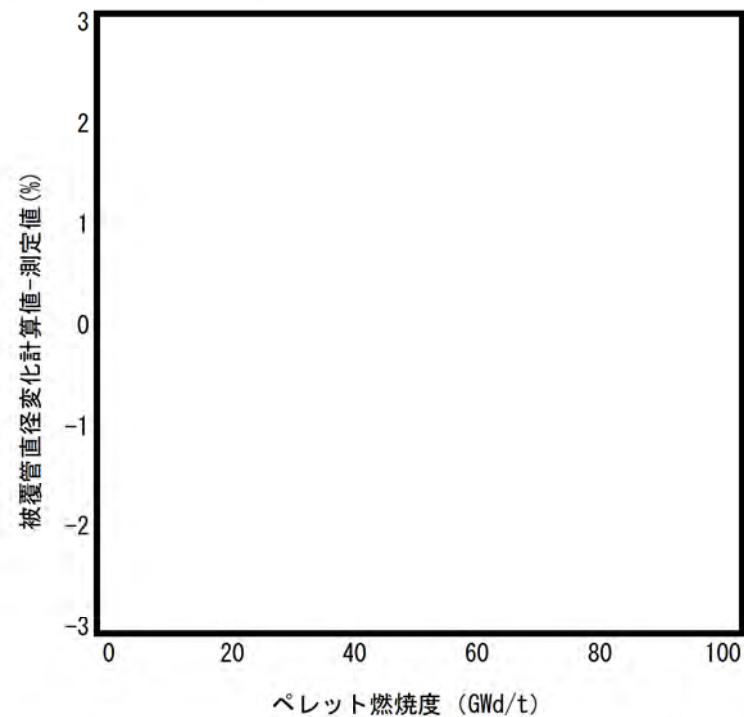


図 4.2-16 コードの予測の不確かさを考慮した被覆管直径変化の測定値と計算値の比較  
(被覆管直径変化の(計算値-測定値)の燃焼度変化)



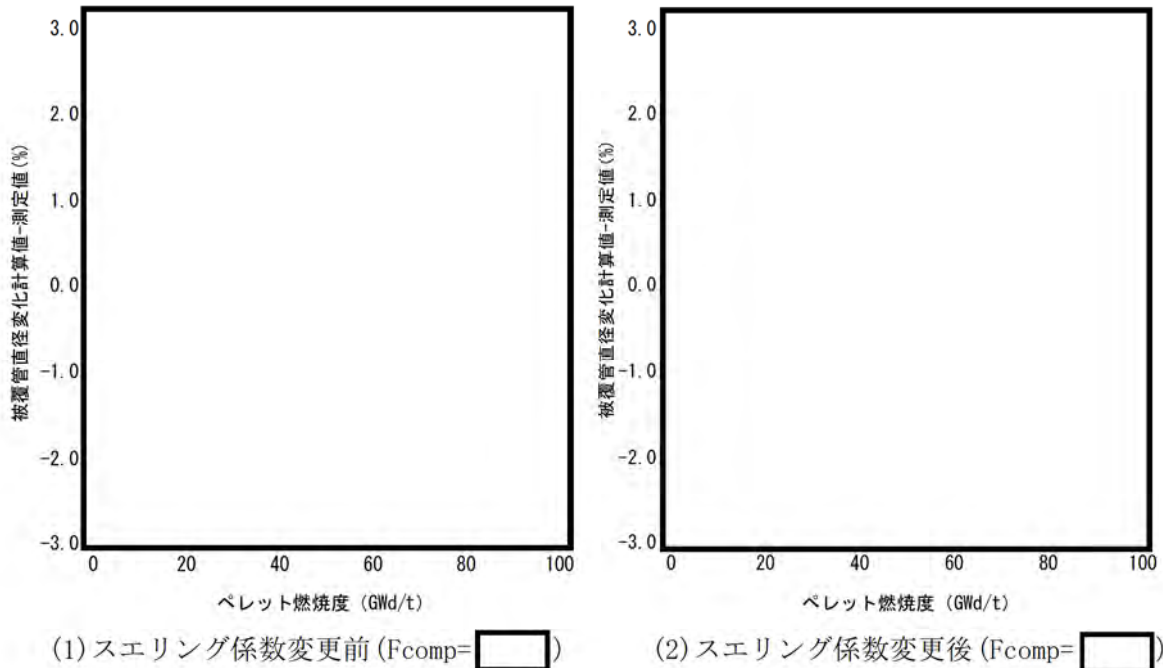
(参考図 16) コードの予測の不確かさを考慮した被覆管直径変化の測定値と計算値の比較  
(被覆管直径変化の(計算値-測定値)の燃焼度変化)  
(トピカルレポート版 PRIME03 による解析結果)

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-1
提出年月日	2023年12月22日

(参考) リム組織形成による付加的なスエリング係数の設定について

トピカルレポート発行後の被覆管変形に係わるプログラムの誤りの修正を行った PRIME03 コードを用いた、付加的なスエリング係数の変更前後における、コードの予測の不確かさを考慮した被覆管直径変化の測定値と計算値の比較（被覆管直径変化の（計算値-測定値）の燃焼度変化）を参図 1 に示す。なお、同図には直径変化が 0.1%以上のデータのみを示している。参図 1(1)に示す付加的なスエリング係数の変更前 (Fcomp= ) の比較図では、高燃焼度領域で過小評価しているデータが多いことがわかる。参図 1(2)に示すように、付加的なスエリング係数を  に変更することによって、トピカルレポート版の PRIME03 と同等の予測性能が得られた。



参図 1 コードの予測の不確かさを考慮した被覆管直径変化の測定値と計算値の比較  
 （被覆管直径変化の（計算値-測定値）の燃焼度変化）  
 （注：直径変化が 0.1%以上のデータのみを示す。）

内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-6
提出年月日	2023年12月22日

付録-6

GNF-Ziron について

1. 概要

燃料体については、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（以下「設置許可基準規則」という。）第十五条（炉心等）第5項において、必要な物理的及び化学的性質を保持することが要求されている。また、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という）第二十三条（炉心等）第1項においても同様の要求があり、技術基準規則の解釈における別記-10（以下「別記-10」という。）にその具体的な仕様が規定されている。

本型式証明申請対象の燃料体はGNF3型であり、燃料被覆管及び燃料部材の一部には別記-10に規定されたジルコニウム合金管（日本産業規格H4751(2016)）の一つであるジルカロイ-2に加え、ジルカロイ-2とは異なるGNF-Ziron<sup>[付6-1] [付6-2]</sup>も使用する設計としている<sup>1</sup>。

GNF-Zironは、高燃焼度燃料用の被覆管材料として開発されたものであり、ジルカロイ-2の合金元素のうち鉄濃度を高めたジルコニウム合金である。GNF-Zironの合金組成をジルカロイ-2と比べて表1-1に示す。

表 1-1 GNF-Ziron 及びジルカロイ-2 の合金組成

(単位：wt%)

合金元素	GNF-Ziron	ジルカロイ-2 (JIS H4751 ZrTN802D)
錫		1.20 ~ 1.70
鉄		0.07 ~ 0.20
クロム		0.05 ~ 0.15
ニッケル		0.03 ~ 0.08

本型式証明申請においては、上で述べた設置許可基準規則第十五条第5項に加え、同規則第十五条第2項の一部（本資料2.設計方針(2)に記載した「燃料被覆管は機械的に破損しないこと。」の要求）、第4項及び第6項も申請条文としている。GNF-Zironは熱的・機械的特性には影響ない範囲でジルカロイ-2の合金成分のうち鉄濃度を高くすることによって、耐食性及び耐水素吸収特性をジルカロイ-2と同等以上に改善したものであり、本申請における設計方針の設定に関してGNF-Zironの適用による影響はなく、GNF3型にGNF-Zironを用いる場合でもジルカロイ-2に対する評価結果が適用可能である。

<sup>1</sup> GNF-Zironは、本型式証明申請書中では従来許認可と整合させるため「高鉄ジルカロイ」と記載している。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-6
提出年月日	2023年12月22日

GNF-Ziron の特性についての主な関連情報を次に示す。

- 燃料棒熱・機械設計に用いられる PRIME Ver. 3 コード(以下、「PRIME03」という)のトピカルレポート<sup>[付 6-3]</sup>に対する旧原子力安全・保安院の技術評価<sup>[付 6-4]</sup>において、PRIME03 に用いられる燃料被覆管の熱的・機械的特性に関し、GNF-Ziron がジルカロイ-2 と同等であることが確認されている<sup>2</sup>。なお、GNF-Ziron の鉄濃度範囲に関し、  
  
 上限の変更はない。
- 後述する GNF-Ziron とジルカロイ-2 の国内商用炉での材料照射試験データから、GNF-Ziron の延性及び疲労特性は、ジルカロイ-2 と GNF-Ziron で同様の傾向である。また照射日数約 2500 日(約 6.8 年)での GNF-Ziron の腐食増量及び水素吸収量はジルカロイ-2 に比較して有意に低い<sup>[付 6-1]</sup>。
- GNF-Ziron の合金組成はジルカロイ-2 と異なるものの、製法、品質管理及び検査はジルカロイ-2 と変わるものではなく、製法、品質管理及び検査に起因する GNF-Ziron の物理的性質及び化学的性質への影響はない。
- GNF-Ziron を用いた LUA としては、GE14LUA として 2 つの海外 BWR プラントで  体、GNF2LUA として 3 つの海外 BWR プラントで  体の実績があり、GNF-Ziron に起因する異常は報告されていない。

ジルカロイ-2 について整理すべき燃料被覆管の物理的性質及び化学的性質は本申請書に記載の項目で網羅されるが、GNF-Ziron については、技術基準規則の解釈で記載されている内容も参考とし、表 1-2 に示す確認項目及び GNF-Ziron の実績について、本資料にその内容を整理することとした。

<sup>2</sup> 参考として末尾に PRIME03 トピカルレポートの GNF-Ziron 関連部分を添付した。



GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-6
提出年月日	2023年12月22日

表 1-2 GNF-Ziron の物理的性質及び化学的性質に係る確認内容

性質	確認項目	確認内容	
物理的性質	耐放射線性	機械的特性 【PRIME03 トピカルレポート Appendix-B 3.3(5)】 【本資料 2.1.1】	GNF-Ziron の機械的特性のうち、引張強さ及び降伏応力については PRIME03 トピカルレポートの技術評価においてジルカロイ-2 と同等であることが確認されている。また、GNF-Ziron の延性及び疲労特性について、ジルカロイ-2 と同様の傾向であることを確認している。
		照射成長 【PRIME03 トピカルレポート Appendix-B 3.3(7)】	GNF-Ziron の照射成長については PRIME03 トピカルレポート技術評価においてジルカロイ-2 と同等であることが確認されている。
	寸法安定性	クリープ特性 【PRIME03 トピカルレポート Appendix-B 3.3(8)】	GNF-Ziron についてのこれらの確認項目は PRIME03 トピカルレポートの技術評価においてジルカロイ-2 と同等であることが確認されている。また、GNF-Ziron の製法はジルカロイ-2 と変わるものではなく、製造時における残留応力の除去についても両者で同等である。
		照射成長 【PRIME03 トピカルレポート Appendix-B 3.3(7)】	
	耐熱性	耐熱性 【本資料 2.3】	ジルカロイ-2 から GNF-Ziron への鉄濃度増加量は融点の低下に影響するものではないこと、GNF-Ziron の相変態温度は [ ] であることを確認している。
	核性質	—	核分裂するウランを含むペレットにおいて考慮する事項であるため、燃料被覆管としては考慮不要。
化学的性質	耐食性	腐食 【本資料 3.1.1】	未照射材の炉外腐食試験データ並びに海外試験炉及び国内商用炉での材料照射試験データから、GNF-Ziron の耐食性はジルカロイ-2 と同等以上であることを確認している。
		水素吸収 【本資料 3.1.1】	未照射材の炉外腐食試験データ及び国内商用炉での材料照射試験データから、GNF-Ziron の耐水素吸収特性はジルカロイ-2 と同等以上であることを確認している。
	化学的安定性	ペレットと燃料被覆管との反応 【本資料 3.2】	GNF-Ziron でもジルコニウムを内張することから、ペレットとの反応は、GNF-Ziron 燃料被覆管とジルカロイ-2 燃料被覆管で同等であることを確認している。
その他の性質	耐 PCI 性 【本資料 4.1】		GNF-Ziron でもジルコニウムを内張すること及び本資料での整理結果から GNF-Ziron を用いる場合でもジルカロイ-2 に対する耐 PCI 性の評価結果が適用可能と判断される。
	高温特性 【本資料 4.2】		昇温内圧破裂試験及び高温酸化試験の結果から GNF-Ziron の高温特性はジルカロイ-2 と同様であると判断される。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-6
提出年月日	2023年12月22日

## 2. GNF-Ziron の物理的性質

### 2.1 耐放射線性

#### 2.1.1 機械的特性

GNF-Ziron の照射硬化（引張強さ及び降伏応力の照射による変化）については PRIME03 トピカルレポートの技術評価<sup>[付6-4]</sup>においてジルカロイ-2 と同等であることが確認されている。また、GNF-Ziron の延性及び疲労特性については、図 2-1 及び図 2-2 に示す破断伸び及び疲労特性のデータからジルカロイ-2 と同様の傾向であることを確認している。

#### 2.1.2 照射成長

GNF-Ziron の照射成長については PRIME03 トピカルレポートの技術評価においてジルカロイ-2 と同等であることが確認されている<sup>[付6-4]</sup>。

### 2.2 寸法安定性

#### 2.2.1 クリーブ特性及び照射成長

寸法安定性は、燃料被覆管のクリープ特性と照射成長によって確認されるが、GNF-Ziron についてのこれらの確認項目は PRIME03 トピカルレポートの技術評価においてジルカロイ-2 と同等であることが確認されている<sup>[付6-4]</sup>。

また、GNF-Ziron の製法はジルカロイ-2 と変わるものではなく、製造時における残留応力の除去についても両者で同等であり、燃料被覆管の集合組織は両者で変わらないことから、寸法安定性について GNF-Ziron はジルカロイ-2 と同等である。

### 2.3 耐熱性

ジルコニウムと鉄の二元系状態図を踏まえると、ジルカロイ-2 から GNF-Ziron への鉄濃度の増加は融点を低下させる方向に作用すると考えられるが、鉄濃度増加量は融点の低下に影響するほどではないことから、GNF-Ziron の融点はジルカロイ-2 と同等と判断できる。

GNF-Ziron の  $\alpha$  相から  $\alpha + \beta$  混合相への相変態温度は、

であることを確認している。

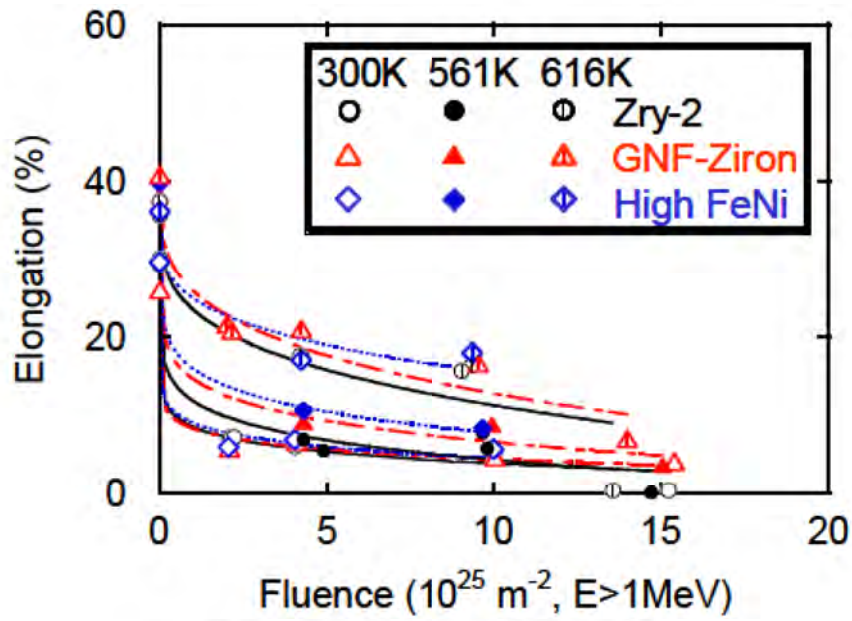


図 2-1 破断伸びの照射量依存性<sup>[付 6-1]</sup>

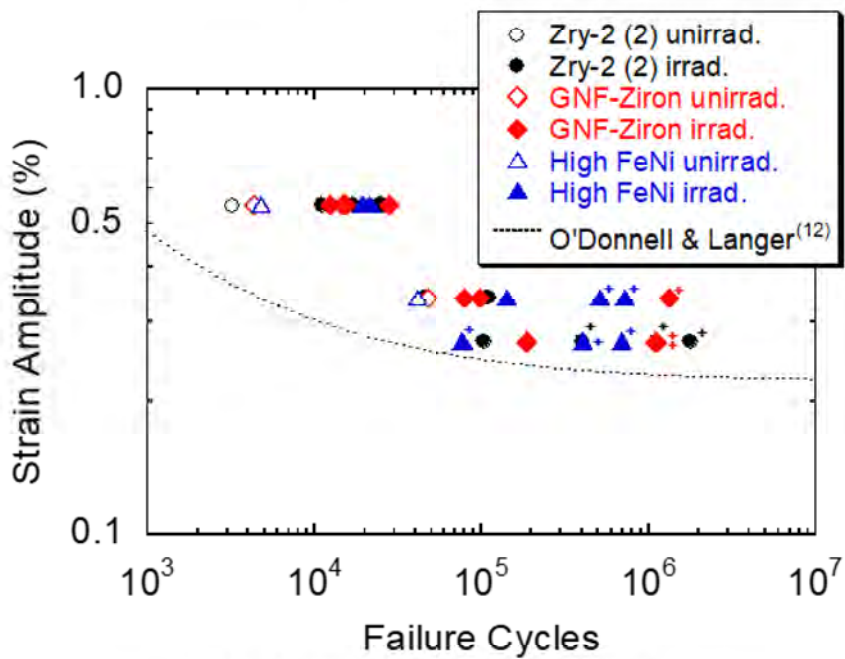


図 2-2 GNF-Ziron の疲労試験結果<sup>[付 6-1]</sup>

(図中の+は疲労試験で破損しなかったことを示す)

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-6
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

### 3. GNF-Ziron の化学的性質

#### 3.1 耐食性

##### 3.1.1 腐食及び水素吸収

図 3-1 に GNF-Ziron を用いた高温水中での炉外腐食試験結果を示す<sup>[付 6-1]</sup>。試験結果から、GNF-Ziron の腐食増量、水素吸収量及び及び水素吸収率はいずれもジルカロイ-2 より減少しており、GNF-Ziron の耐食性及び耐水素吸収特性がジルカロイ-2 と同等以上であることを確認している。

図 3-2 に GNF-Ziron を用いた高温水蒸気中での炉外腐食試験結果を示す<sup>[付 6-5]</sup>。試験結果から、GNF-Ziron の腐食増量はジルカロイ-2 と概ね同程度であり、水素吸収量は全ての条件でジルカロイ-2 より減少しており、GNF-Ziron の耐食性及び耐水素吸収特性がジルカロイ-2 と同等以上であることを確認している。

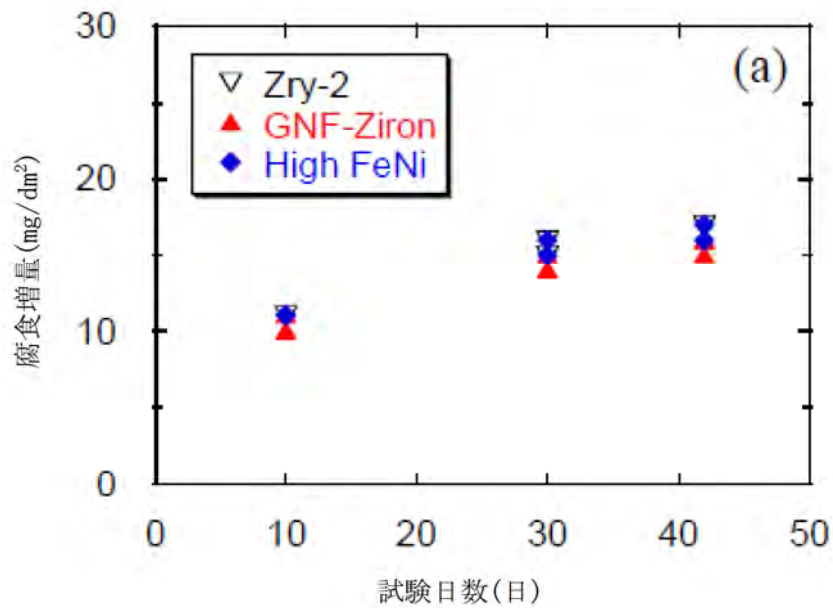
図 3-3 に、試験炉での腐食試験結果の代表例を示す<sup>[付 6-6]</sup>。比較用ジルカロイ-2 (図中の記号 B) では一部の条件でノジュラー腐食が見られたが、GNF-Ziron (図中の記号 E) ではいずれの条件でもノジュラー腐食は見られず、GNF-Ziron の耐食性はジルカロイ-2 と同等以上であることを確認している。

図 3-4 に、国内 BWR の中性子源位置における材料照射試験として実施した、ジルカロイ-2 及び GNF-Ziron の腐食増量、水素吸収量及び水素吸収率の結果をそれぞれ示す<sup>[付 6-7]</sup>。これらの結果から、GNF-Ziron の耐食性及び耐水素吸収特性はジルカロイ-2 と同等以上であることを確認している。

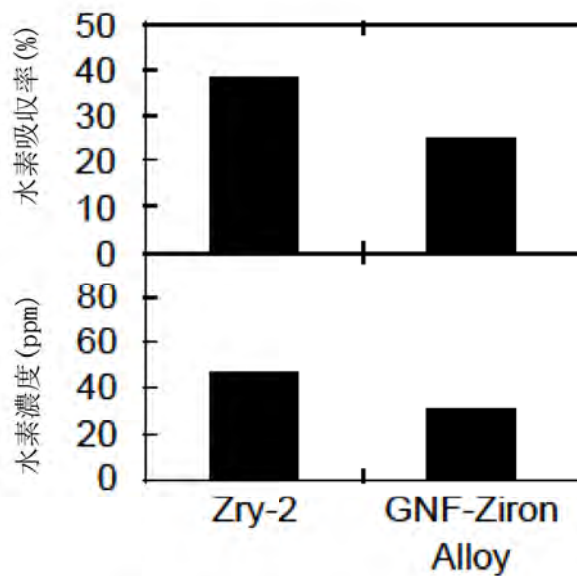
#### 3.2 化学的安定性

##### 3.2.1 ペレットと燃料被覆管との反応

化学的安定性についてはペレットと燃料被覆管との反応が挙げられる。GNF3 型においてジルコニウム内張は燃料被覆管の材質によらず同等であることから、ペレットと燃料被覆管との反応は本資料本文 5 章(10)ペレット-被覆管相互作用におけるジルカロイ-2 の評価結果と同等である。



(1) 腐食特性



(2) 水素吸収特性 (42 日後)

図 3-1 GNF-Ziron 等の炉外腐食試験の結果<sup>[付 6-1]</sup>

(316°C高温水中腐食試験結果)

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-6
提出年月日	2023年12月22日

△	海外商用炉 2サイクル
□	海外商用炉 4サイクル
●	国内商用炉 6サイクル
■	400℃水蒸気中 (105日間, 管材)
■	400℃水蒸気中 (105日間, 板材)
▲	475℃超臨界水中 (24日間, 板材)
●	290℃LiOH水溶液中 (6日間, 板材)

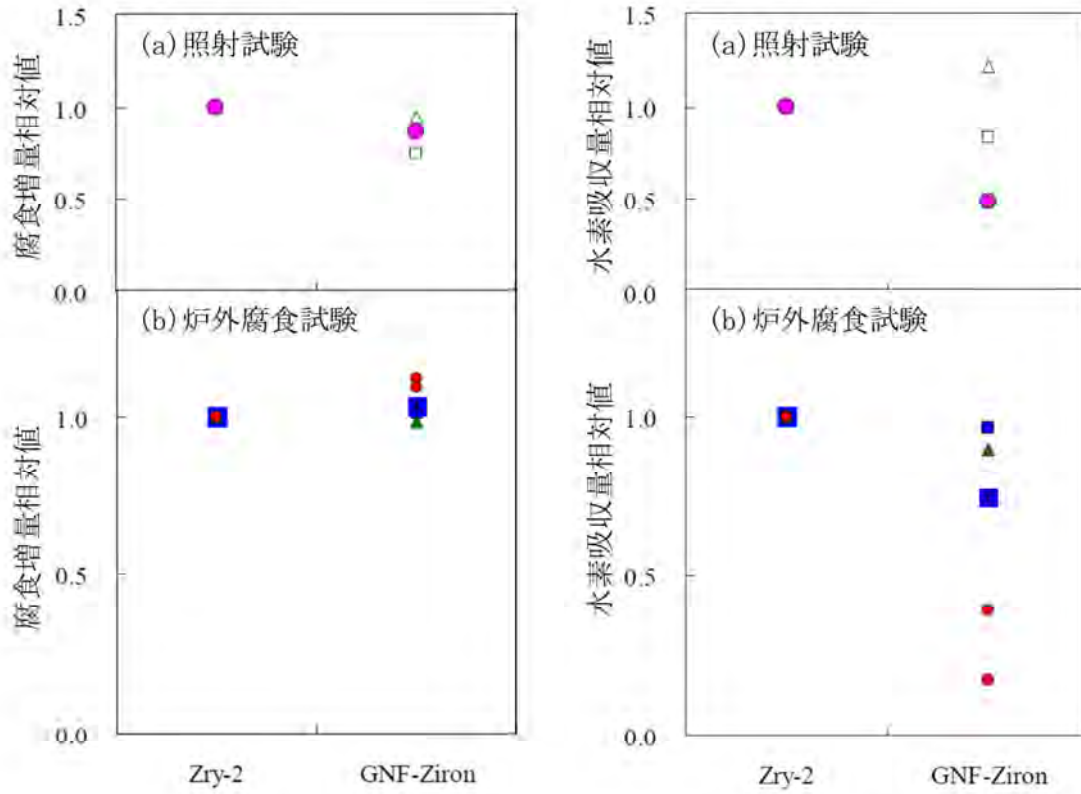
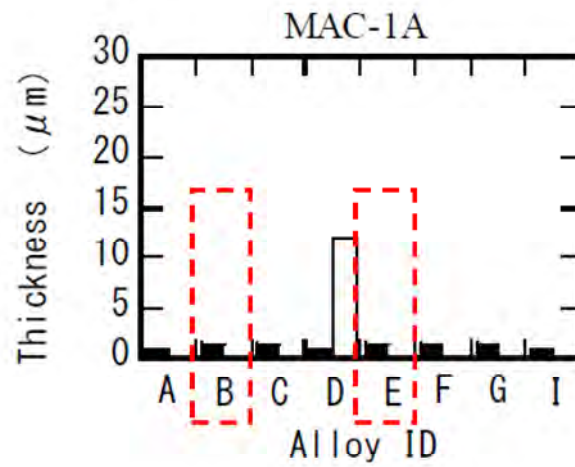
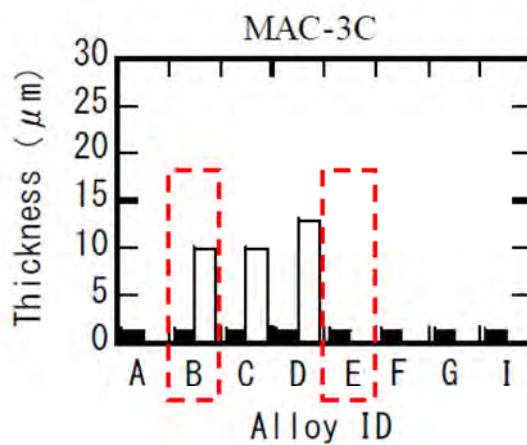


図 3-2 ジルカロイ-2 及び GNF-Ziron の照射試験及び炉外腐食試験の結果<sup>[付 6-5]</sup>



(a) 設定条件 : 250ppb O<sub>2</sub>/30ppb H<sub>2</sub>



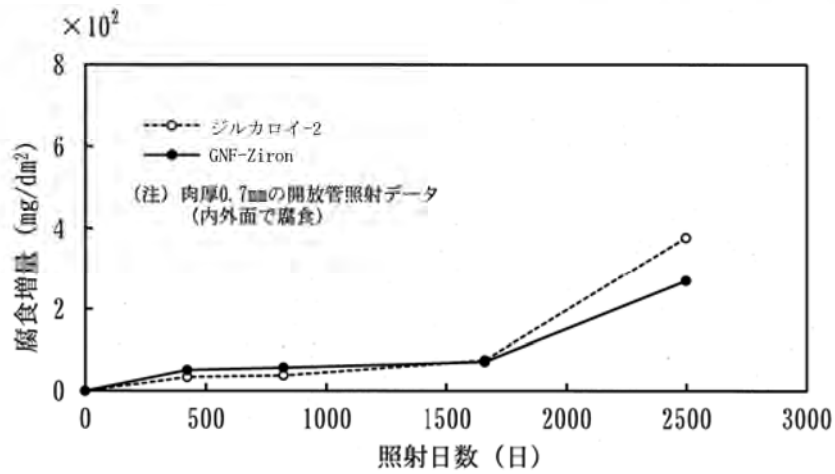
(b) 設定条件 : 1300ppb O<sub>2</sub>

図 3-3 試験炉での腐食試験後のジルコニウム合金表面の酸化膜厚さ<sup>[付 6-6]</sup>

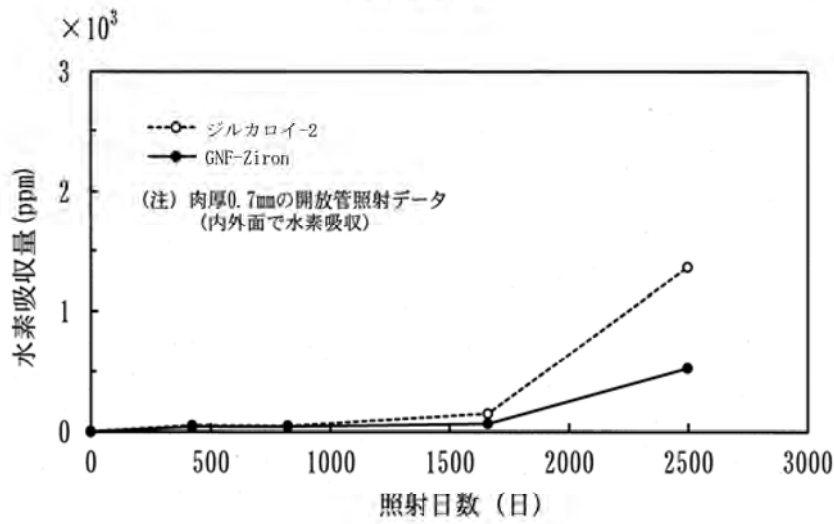
B : 比較用ジルカロイ-2、E : GNF-Ziron

黒塗り : 一様酸化膜厚さ 白抜き : ノジュラー酸化膜厚さ

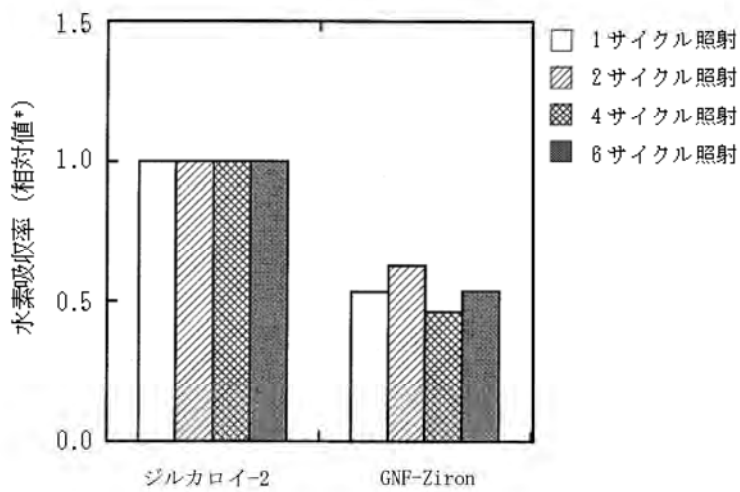
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-6
提出年月日	2023年12月22日



(1) 腐食増量



(2) 水素吸収量



(3) 水素吸収率

図 3-4 国内 BWR での材料照射試験結果<sup>[付 6-7]</sup>



GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-6
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

#### 4. GNF-Ziron のその他の性質

##### 4.1 耐 PCI 性

ジルコニウム内張は燃料被覆管の材質によらず同等であり、また本資料で整理したように、GNF-Ziron は熱的・機械的特性には影響ない範囲でジルカロイ-2 の合金成分のうち鉄濃度を高くすることによって、耐食性及び耐水素吸収特性をジルカロイ-2 と同等以上に改善したものであり、GNF-Ziron を用いる場合でもジルカロイ-2 に対する耐 PCI 性の評価結果が適用可能と判断される。

##### 4.2 高温特性

図 4-1 に GNF-Ziron 燃料被覆管試験片を用いた昇温内圧破裂試験結果を示す。内圧の増加とともにバースト温度が低下する傾向は過去のジルカロイのデータ<sup>[付 6-8]</sup>と同様であると判断される。

図 4-2 に GNF-Ziron 燃料被覆管試験片を用いた高温酸化試験結果を示す。GNF-Ziron の高温酸化試験での反応 Zr 金属重量はジルカロイ-2 と同程度であり、GNF-Ziron の高温酸化挙動はジルカロイ-2 と同様であると判断される。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-6
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

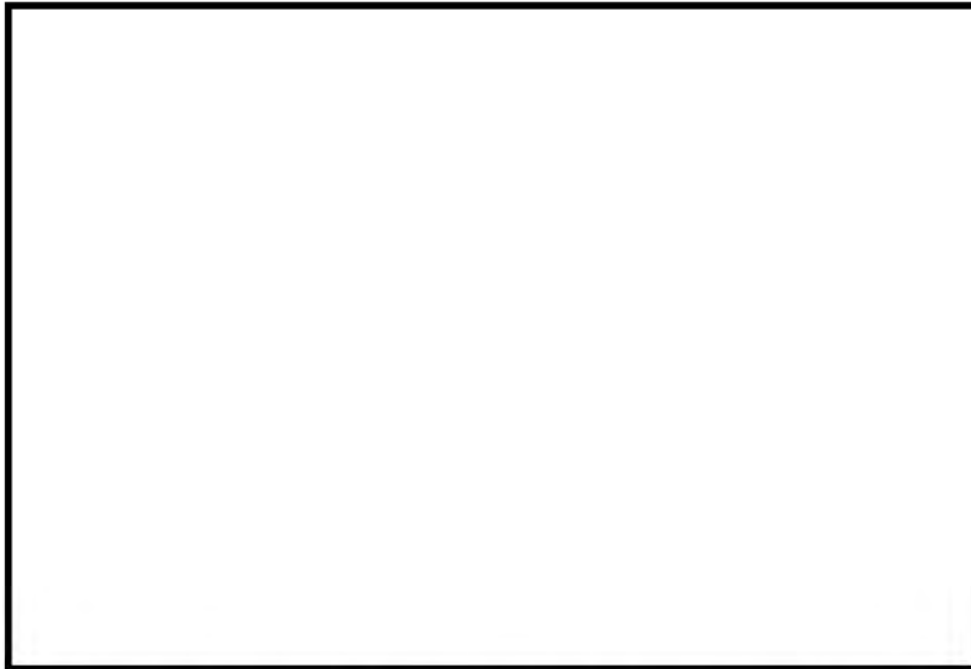


図 4-1 GNF-Ziron 燃料被覆管試験片を用いた昇温内圧破裂試験結果

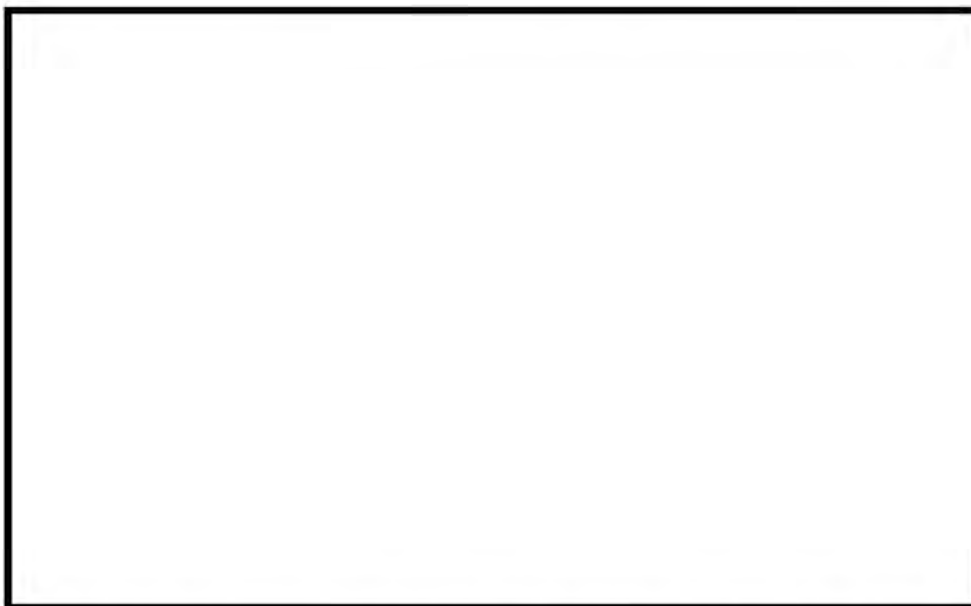


図 4-2 GNF-Ziron 燃料被覆管試験片を用いた高温酸化試験結果

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-6
提出年月日	2023年12月22日

5. GNF-Ziron の製造実績及び照射実績について

製造実績としては、GNF-Ziron の照射試験及び LUA 用の GNF-Ziron 用に 6 種類のインゴットを製造した実績がある。これらのうち GNF-Ziron 燃料被覆管を用いた先行使用燃料（以下、「LUA」という。）の照射実績を表 5-1 に示す。このうち一部の LUA については照射後試験によってデータを取得し、本申請書に反映している。

表 5-1 GNF-Ziron 燃料被覆管を用いた LUA の海外商用炉での照射実績

燃料タイプ	プラント (商用炉)	LUA 体数 <sup>注1</sup>	照射年数	集合体 平均燃焼度	ペレット 最高燃焼度	備考
GE14	プラント G					
	プラント H					
GNF2	プラント V					
	プラント F					
	プラント H					

注1 括弧内の体数はその上段の LUA のうち更に継続して照射された体数を示す。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-6
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

## 6. 参考文献

- [付 6-1] S. Ishimoto, Y. Etoh, T. Matsumoto, D. Lutz, A. Takagi, “Improved Zr alloys for High Burnup BWR Fuel”, Top Fuel 2006, 22-26 October 2006, Salamance, Spain.
- [付 6-2] Global Nuclear Fuel-Americas, LLC, NEDO-33353, Revision 1, Application of GNF-Ziron to GNF Fuel Designs, 2019 – Non-Proprietary Information – Class I (Public).
- [付 6-3] 「トピカルレポート 燃料棒熱・機械設計コード PRIME03 について」(株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン, GLR-002 改訂 2, 平成 22 年 4 月).
- [付 6-4] 「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」、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、平成 22 年 6 月.
- [付 6-5] M. Aomi, Y. Etoh, S. Ishimoto, K. Une and K. Ito, “The Hydrogen Pick-up Behavior for Zirconium-based Alloys in Various Out-of-pile Corrosion Test Conditions”, Proceedings of Top Fuel 2009, Paris, France, September 6-10, 2009, Paper 2077.
- [付 6-6] S. Shimada, B. Cheng, D. Lutz, O. Kubota, N. Ichikawa, H. Ibe, “In-Core Tests of Effects of BWR Water Chemistry Impurities on Zircaloy Corrosion”, Fourteenth International Symposium: Zirconium in the Nuclear Industry, ASTM STP 1467, 2005, pp. 418-444.
- [付 6-7] S. Ishimoto, T. Kubo, O. Kubota, “Development of New Zirconium Alloys for Higher Burnup Fuel”, ENS Top Fuel 2003, 16-19 March 2003, Wurzburg, Germany.
- [付 6-8] U. S. NRC, NUREG-0630, “Cladding Swelling and Rupture Models for LOCA Analysis”, 1980.
- [付 6-9] M. Aomi, M. Nakatsuka, S. Komura, T. Hirose, T. Anegawa, “Behavior of Irradiated BWR Fuel Cladding Tubes Under Simulated LOCA Conditions”, The proceedings of International Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance, Park City, Utah, April 10-13, 2000.

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.4 付録-6
提出年月日	2023 年 12 月 22 日

添付

PRIME03 トピカルレポート Appendix-B

「PRIME03 コードの改良ペレットと改良被覆管への適用」から抜粋（GNF-Ziron 部分）

### 3. GNF-Ziron 被覆管

#### 3.1 概要

GNF-Ziron 被覆管<sup>[3-1]</sup>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カロイである。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である。

GNF-Ziron の合金組成をジルカロイ-2と比べて表 3-1 に示す。なお、ジルコニウムライナ内張、被覆管加工フロー、最終焼鈍温度を含め、合金組成以外の項目については、現行被覆管と同一である。

表 3-1 GNF-Ziron の合金組成

(単位 : wt%)

合金元素	GNF-Ziron	ジルカロイ-2 (JIS H4751 ZrTN802D)
Sn		1.20 ~ 1.70
Fe		0.07 ~ 0.20
Cr		0.05 ~ 0.15
Ni		0.03 ~ 0.08

合金元素のうち、Sn、Ni、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。Fe濃度のみをジルカロイ-2の規格を超えた範囲に設定している。ジルカロイ-2からの鉄濃度増加量はわずか 0.1wt%以下であり、ジルカロイ-2規格における鉄濃度範囲 0.13wt% (0.07~0.20wt%) より小さい増加量である。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ことになる。さらに前述のように被覆管加工フロー、最終焼鈍温度を同一としているので被覆管の集合組織も変わらない。これらのことから機械的特性等への影響は小さいと考えられる。

### 3.2 PRIME 被覆管モデル

PRIME コードで使用している被覆管物性モデル及び照射挙動モデルは以下である。

- (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、照射硬化
- (6) 熱膨張係数
- (7) 照射成長
- (8) クリープ

前述のように、GNF-Ziron はジルカロイ-2 と大きく組成の変わらないジルカロイであること、被覆管加工フロー、最終焼鈍温度なども現行被覆管と同一であることから、PRIME03 コードにおいては GNF-Ziron 被覆管についてもジルカロイ-2 と同一のモデルを用いる。それぞれのモデルへの影響について個別に以下に示す。

### 3.3 被覆管物性および照射挙動モデル

#### (1) 熱伝導率 【PRIME モデル：GLR-002 改訂 2 の図 5.2-1】

ジルカロイの熱伝導率は、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ことが知られている。MATPRO-Version11<sup>[3-2]</sup>においても、ジルカロイ-2、ジルカロイ-4 のデータをあわせて被覆管の熱伝導率モデルが作成されており、ジルカロイ-2、ジルカロイ-4 の差がないことから同一の式を共通に適用していることが記載されている。GNF-Ziron も同様にジルカロイ-2 と同じモデルが適用可能と考えられる。

GNF-Ziron 熱拡散率測定データをもとに熱伝導率を評価した結果を図 3-1 に示す。室温から 600°C (873K) の間を約 50°C 間隔で GNF-Ziron の熱拡散率を測定した。参照用として同時に測定を行ったジルカロイ-2 については、約 200°C (473K)、400°C (673K) の 2 点について測定を実施

しその結果を図中に表示している。また、図中では熱伝導率測定値とPRIMEの被覆管熱伝導率モデルとを比較している。GNF-Zironの熱伝導率は、同時に測定したジルカロイ-2の値、及びPRIMEに採用している熱伝導率モデルと同等であることが分かる。

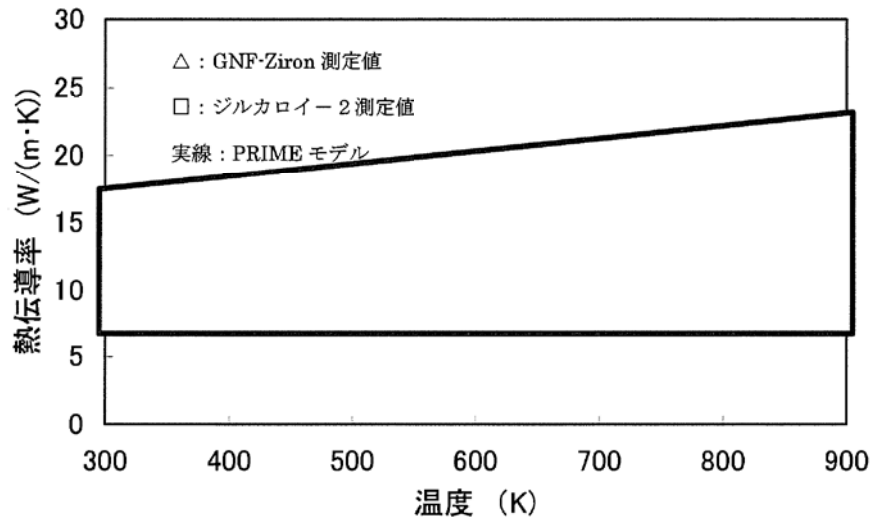


図 3-1 GNF-Ziron の熱伝導率測定データ

図 3-1 の熱伝導率は、熱拡散率の測定データに密度、比熱をかけることにより求められた。熱拡散率の測定方法を以下に示す。(この方法による熱拡散率測定精度は±3%以内。)

- ・測定用試料：φ 10mm 平板（縦割りした管を圧延機で平板としたもの）
- ・測定方法：レーザーフラッシュ法

円盤状試料を電気炉内に設置し真空雰囲気です定の温度に保持する。この状態で試料表面にレーザー光を瞬時的（1 msec 以下）に照射して熱エネルギーを与える。これと同時に試料裏面の温度変化を赤外線検出器で測定し、熱拡散率を算出する。



(2) 輻射率 【PRIME モデル：GLR-002 改訂 2 の 5.2.2.3 項】

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時に用いられるが、燃料の熱・機械設計での状態で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%程度の寄与しかない。

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する程度であることから、GNF-Ziron の輻射率モデルはジルカロイ-2 と同一のものを用いる。

なお、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る。

(3) ヤング率 【PRIME モデル：GLR-002 改訂 2 の 5.3.1.1 項】

ヤング率は被覆管温度に依存するモデルとなっている。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示されている。<sup>[3-3] [3-4]</sup> 文献では、Zircaloy-2、Zircaloy-4、Zr-2.5Nb、Crystal bar zirconium が用いられており、ジルカロイであれば添加元素によってヤング率はほとんど変化しないと言える。(ただし、被覆管の集合組織、酸素濃度が大きく変わらない範囲で。)

(4) ポアソン比 【PRIME モデル：GLR-002 改訂 2 の 5.3.1.2 項】

ポアソン比は弾性係数で表されるので、(3)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言える。

なお、PRIME ではヤング率、ポアソン比については、ジルカロイ被覆管、ジルコニウムライナともに同一の式を用いている。

(5) 降伏応力、照射硬化【PRIME モデル：GLR-002 改訂 2 の 5.3.1.3 項】

3.1 節で記載したように、GNF-Ziron の変更点は鉄濃度を 0.1wt%以下増加させただけであり、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。

未照射材及び照射材の引張試験結果を図 3-2<sup>[3-1]</sup>に示す。本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る。最大照射量は約  $1.5 \times 10^{26} \text{ m}^{-2} (\text{E} > 1 \text{ MeV})$  となっている。引張試験は、GNF-Ziron、ジルカロイ-2、GNF-Ziron と同様に鉄濃度を高めた High FeNi (Fe:0.26、Ni:0.10wt%) について、試験温度 300K (27°C)、561K (288°C)、616K (343°C) で実施している。図 3-2 は引張強さ (UTS) の結果を示している。GNF-Ziron の引張強さはジルカロイ-2 と同等な照射硬化の傾向を示し、照射初期に照射硬化が進み、その後飽和傾向で最大照射量は約  $1.5 \times 10^{26} \text{ m}^{-2} (\text{E} > 1 \text{ MeV})$  まで推移している。GNF-Ziron の引張強さはジルカロイ-2 と同等 (本試験では若干高目) であり、ジルカロイ-2 と同一の強度モデルを用いることに問題はないといえる。

なお、本文献では引張強さの結果が示されているが、降伏応力も含めて図示したものを図 3-3、図 3-4 に示す。これらは図 3-2 と同一の試験で 4 サイクル照射までのデータでまとめられているものである。(本図中では GNF-Ziron は High Fe と表記されている。)

降伏応力と引張強さは同様な傾向であり、GNF-Ziron とジルカロイ-2 の機械特性は同等であることを示している。

なお、強度の参考となる硬さ測定結果を図 3-5 に示す。照射硬化の傾向、及び GNF-Ziron とジルカロイ-2 との関係は引張強さ、降伏応力と同様な結果となっている。

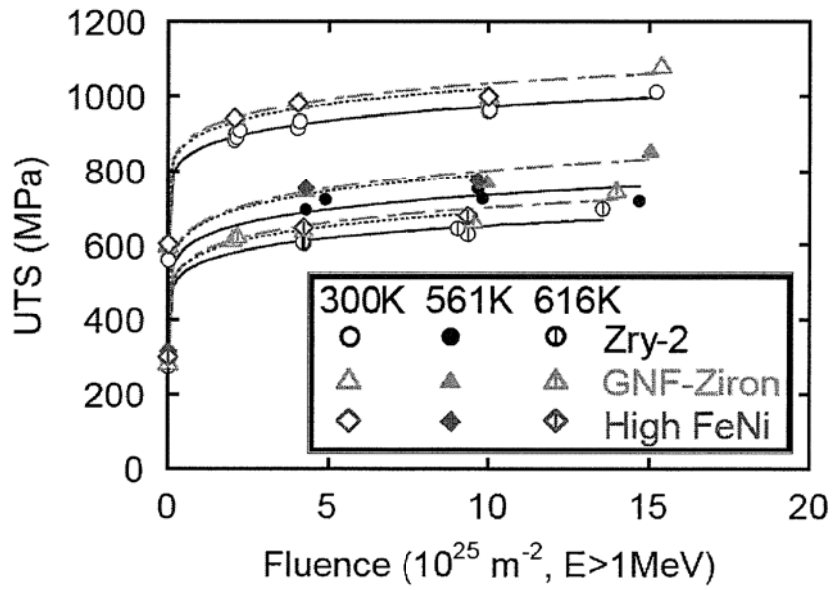


図 3-2 引張試験結果 (引張強さ) <sup>[3-1]</sup>

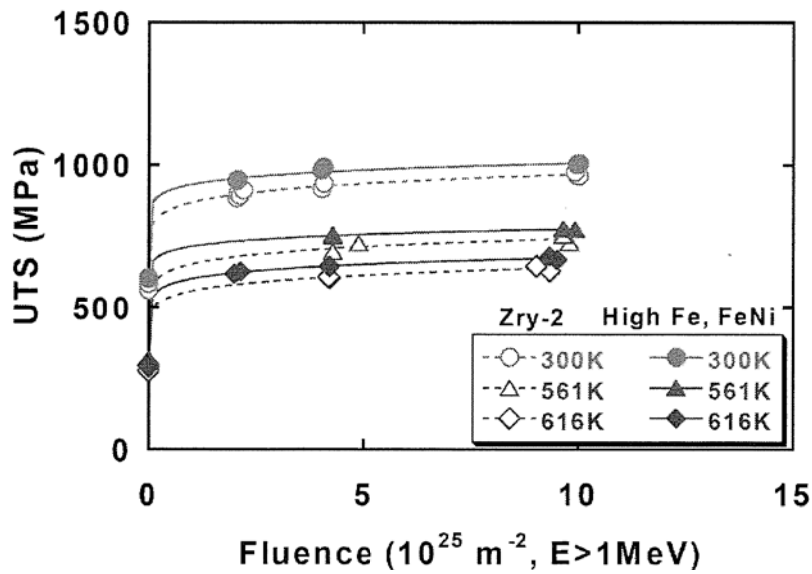


図 3-3 引張試験結果 (引張強さ) <sup>[3-5]</sup>

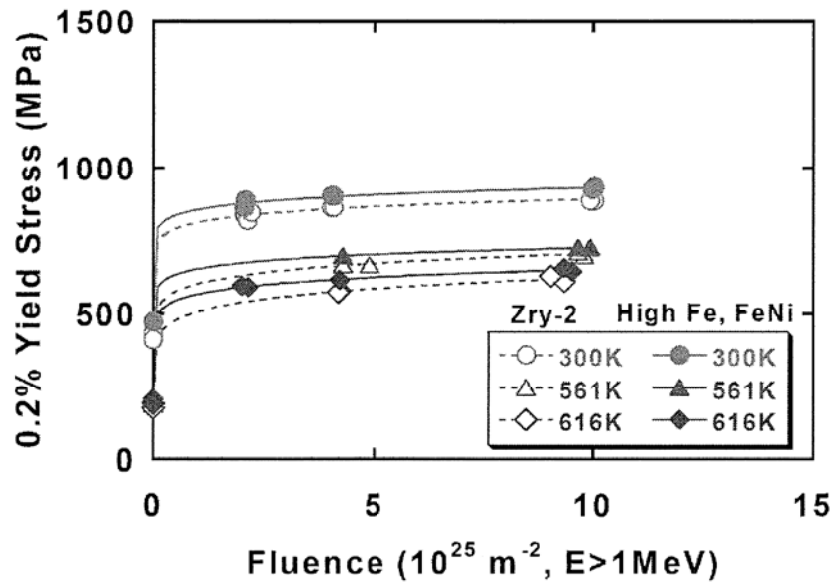


図 3-4 引張試験結果 (降伏応力) <sup>[3-5]</sup>

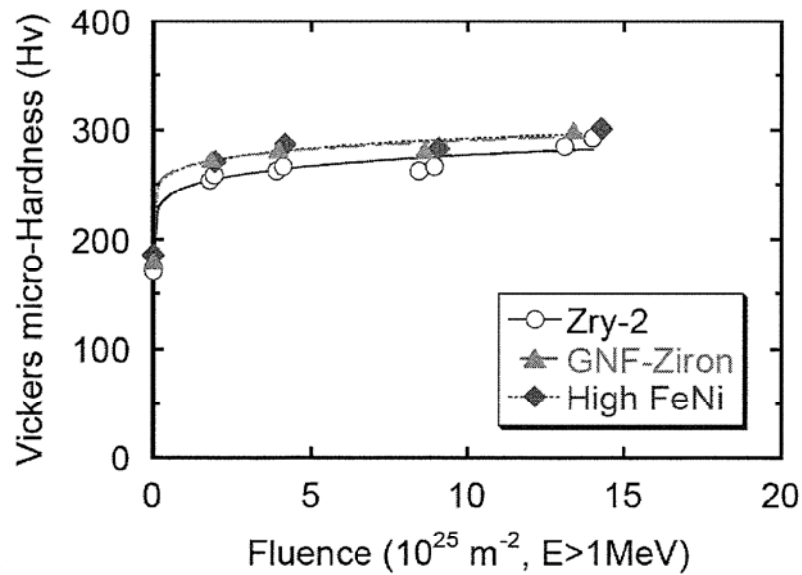


図 3-5 硬さ測定結果<sup>[3-1]</sup>

(6) 熱膨張係数 【PRIME モデル：GLR-002 改訂 2 の 5.4.1.1 項】

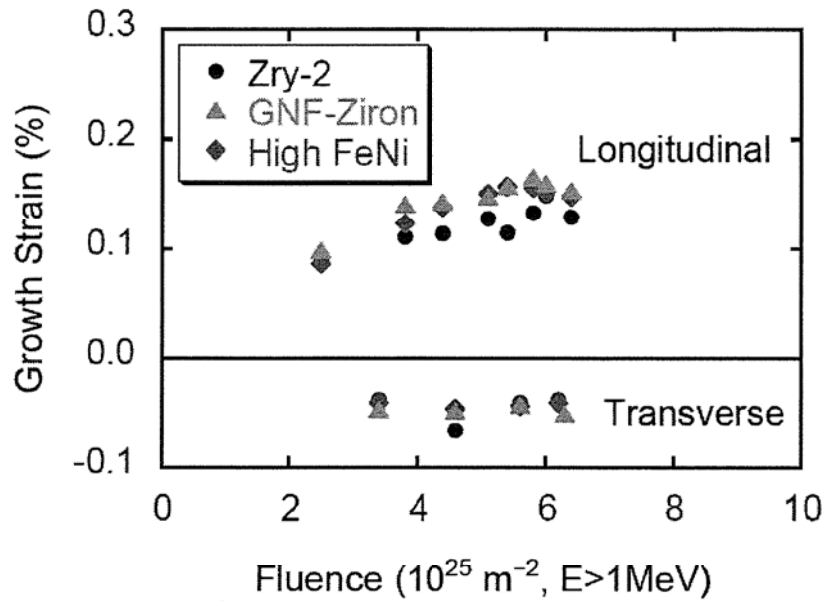
熱膨張係数に関しても合金組成の影響は小さく、PRIME では同一の熱膨張係数式をジルコニウム及びジルカロイ-2に適用している。

MATPRO Version11<sup>[3-2]</sup>においては、熱膨張係数モデルは Zircaloy-4 のデータをもとに作成されたが、Zircaloy-2、Zirconium とともに良い一致を示していると記載されており、熱膨張係数に合金組成の影響が小さいことが示されている。これらのことから GNF-Zircaloy 被覆管にも同じ熱膨張係数モデルを適用できる。

(7) 照射成長 【PRIME モデル：GLR-002 改訂 2 の 5.4.1.2 項】

図 3-6 に板状の試験片の照射試験から得られた照射成長データを示す。試験炉において、板材（長さ約 38mm×幅約 6mm×厚さ約 0.7mm）を約 300℃、He ガス雰囲気装荷し照射が実施された。照射後、各試験片について照射成長歪を測定した。

照射量約  $2.5 \times 10^{25} \sim 6.5 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$  ( $E > 1 \text{ MeV}$ ) のデータが得られており、GNF-Zircaloy 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を示しており、また照射成長による歪に大きな差が見られていない。横手方向はジルカロイ-2とほぼ同じ歪となっている。GNF-Zircaloy 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、PRIME モデルによる被覆管照射成長と同程度となっている。(PRIME モデル：GLR-002 改訂 2 の図 5.4-2)

図 3-6 照射成長データ<sup>[3-1]</sup>

## (8) クリープ 【PRIME モデル：GLR-002 改訂 2 の 5.4.1.3 項】

未照射材のクリープ試験結果を図 3-7 に示す。被覆管試験片を用い内圧を負荷した内圧クリープ試験として実施され、約 80MPa、約 160MPa の 2 応力レベルで約 400 時間までの円周方向クリープ歪を求めた。GNF-Ziron とジルカロイ 2 とのクリープ歪は、いずれの応力状態においても傾向、値とも同等であることが示された。

照射クリープの結果を図 3-8 に示す。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、照射後、クリープ歪を測定している。クリープ試験は、未照射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。GNF-Ziron については、応力約 80MPa での測定が実施されていないので、参考として同じく鉄濃度を高めた高 FeNi 被覆管（図中は High FeNi と表示）の結果も含めて図示している。横軸は高速中性子照射量とし円周方向クリープ歪を示している。GNF-Ziron のクリープ歪は、高応力（約 150MPa）状態の高照射量 ( $10 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ ,  $E > 1 \text{ MeV}$ ) でジルカロイ 2 のクリープ歪より小さくなっているが、その他はほぼ同等とな

っている。低応力（約 80MPa）状態での High FeNi の試験結果ではジルカロイ-2 と同等のクリープ歪となっている。

これらの未照射材クリープ試験、照射クリープ試験の結果から、GNF-Ziron についてもジルカロイ-2 と同一のクリープモデルを適用できる。

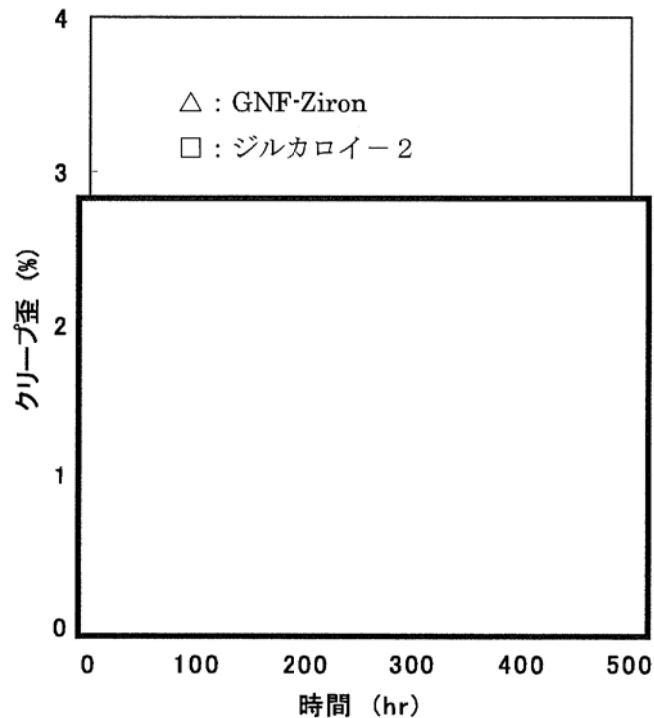


図 3-7 クリープ試験結果（未照射材）

図 3-7 のクリープ試験は、内圧封入方式の内圧クリープ試験片を用いて行った。試験片は、被覆管（外径：約 11mm、肉厚：約 0.7mm、長さ：約 80mm）の両端に端栓を溶接した後、試験温度で所定圧力に達する He ガスを室温において片端に設けた封入口から充填し、その封入口を密封溶接して製作した。この内圧クリープ試験片を電気炉に入れ、所定の時間（最大 400 時間）経過後、電気炉から取出しマイクロメータを用いて試験片の外径測定を実施しクリープ歪を算出している。本試験では、温度 400℃・応力約 160MPa、及び温度 400℃・応力約 80MPa の 2 条件で試験を実施した。

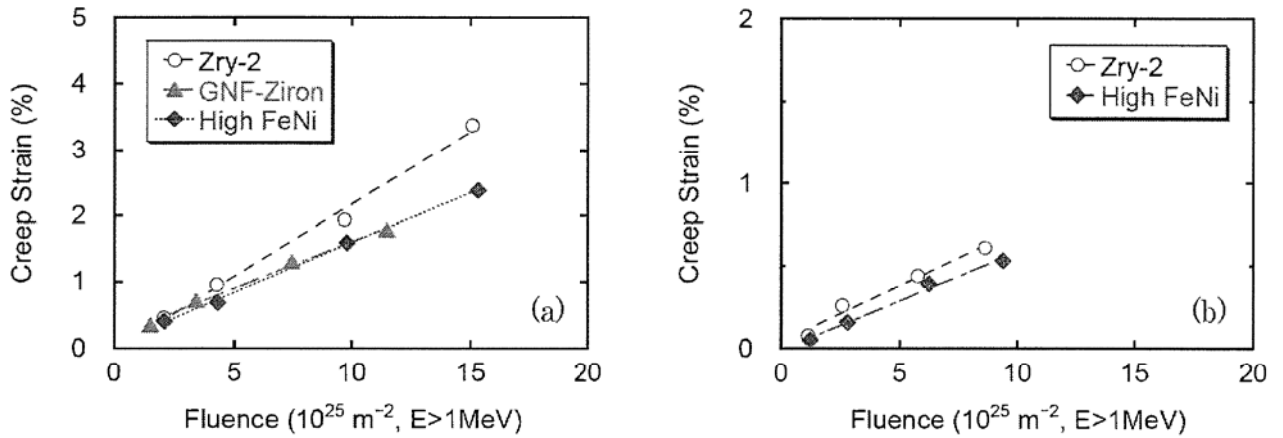


Fig. 19 Creep strain of creep specimen in irradiation test #3 as a function of fast neutron fluence (a) 150 MPa, (b) 80 MPa in circumferential stress at irradiation temperature (Zry-2: Zry-2(2))

図 3-8 炉内クリープ歪データ<sup>[3-1]</sup>

### 3.4 参考文献

- [3-1] S. Ishimoto et al., "Improved Zr alloys for High Burnup BWR Fuel", Top\_Fuel 2006, 22-26 October 2006, Salamanca, Spain
- [3-2] MATPRO-VERSION11(REVISION2) A HANDBOOK OF MATERIALS PROPERTIES FOR USE IN THE ANALYSIS OF LIGHT WATER REACTOR FUEL ROD BEHAVIOR, NUREG/CR-0497 TREE-1280, Rev.2, August 1981
- [3-3] D.O.Northwood et al., "Elastic constants of zirconium alloys", J.Nucl. Mater., 55, 299 (1975)
- [3-4] H.E.Rosinger et al., "The elastic properties of zirconium alloy fuel cladding and pressure tubing materials", J.Nucl. Mater., 79, 170 (1979)
- [3-5] S. Ishimoto et al., "Development of New Zirconium Alloys for Higher Burnup Fuel", ENS Topfuel 2003, 16-19 March 2003, Wurzburg, Germany