

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 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 1 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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 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
6. 参考文献

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

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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 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) ※1	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※4			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線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※2。	c. 被覆管応力は、許容応力以下であること。	(1) 燃料棒 (2) 燃料体	(3) 燃料被覆管 応力評価	(5) 応力解析
		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。	(5) その他健全性 評価等	(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※3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。	(1) 燃料棒	(2) 燃料棒内圧 評価	(4) 燃料棒内圧
		c. 被覆管応力は、許容応力以下であること。	(1) 燃料棒 (2) 燃料体	(3) 燃料被覆管 応力評価	(5) 応力解析
		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。	(1) 燃料棒 (2) 燃料体	(4) 燃料被覆管 疲労評価	(6) 応力サイクル及び疲労限界
		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	(5) その他健全性 評価等	(1) 材料 (2) 照射効果
			(1) 燃料棒 (2) 燃料体	(1) 燃料棒熱・ 機械設計評価	(3) 燃料温度
			(1) 燃料棒 (2) 燃料体	(5) その他健全性 評価等	(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
			(1) 燃料棒 (2) 燃料体		(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。	(1) 燃料棒 (2) 燃料体	(3) 燃料被覆管 応力評価	(5) 応力解析
		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。	(1) 燃料棒 (2) 燃料体	(4) 燃料被覆管 疲労評価	(6) 応力サイクル及び疲労限界
		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。	(1) 燃料棒	(5) その他健全性 評価等	(10) ペレット-被覆管相互作用
		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。	(2) 燃料体	(5) その他健全性 評価等	(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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 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。

スペーサ： フレッシ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ペーサから、中性子吸収が少ないジルカロイ製スペーサに変更。

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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 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

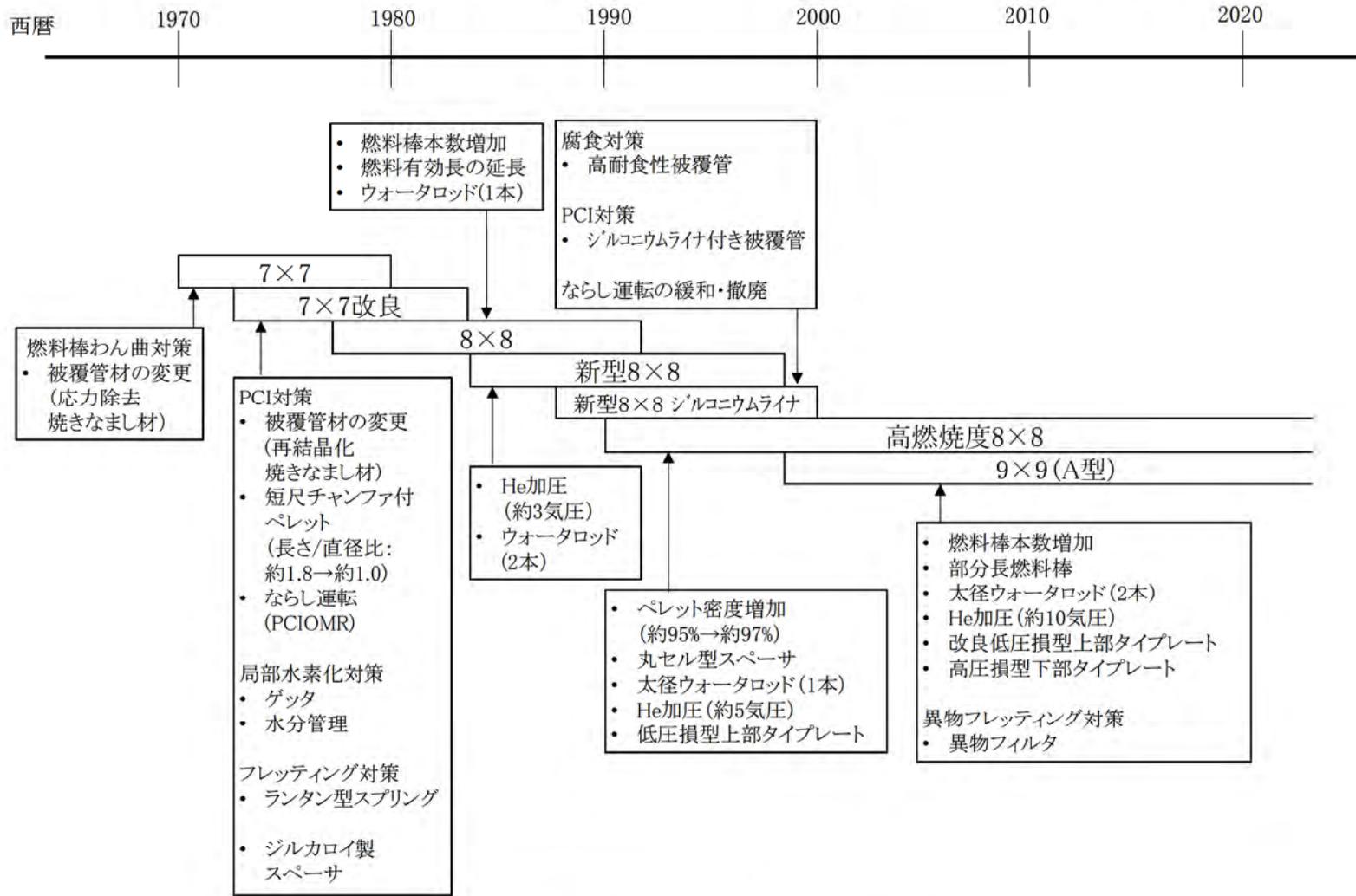
- ペレット： 熱伝導率の改善のため、ペレット密度を増加。
- スペーサ： 限界出力特性の向上を図るために、丸セル型のスペーサを採用。
- ウォータロッド： 減速材対燃料体積比を増加させるため、太径のウォータロッド 1 本を採用。
- ヘリウムガス： 燃料棒内のヘリウムガス圧を 5 気圧に加圧することによって、ペレットと被覆管の熱伝達をよくし、ペレットの温度を下げ PCI 及び FP ガス放出を低減。
- 上部タイプレート： 核熱水力安定性の改善を図るため、低圧損型の上部タイプレートを採用。

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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 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、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、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 [ ] 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。

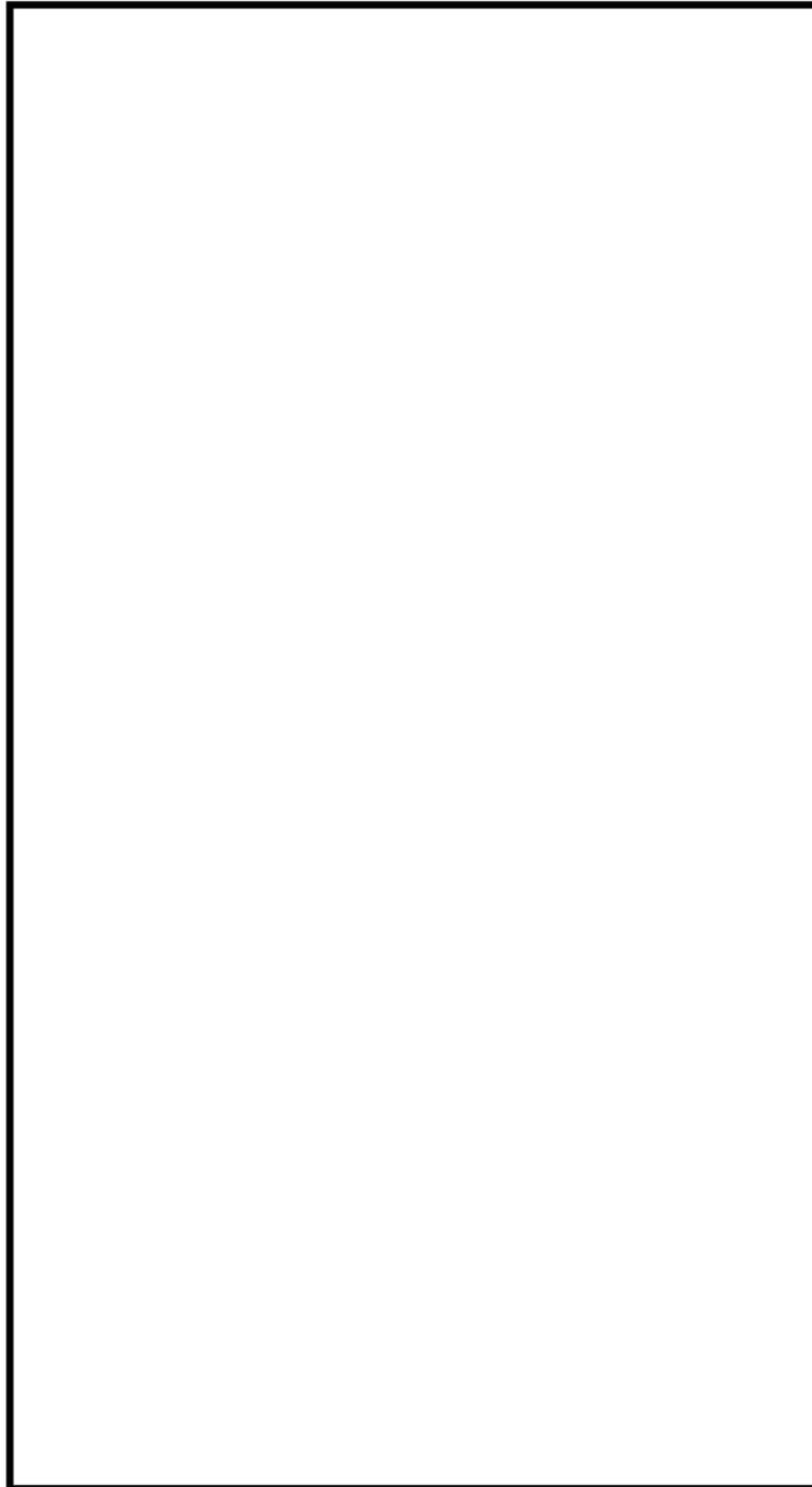
GNF-A 社/GE 社製燃料の燃料タイプ別の使用割合の推移及び燃料破損実績を第 1-6 図及び第 1-7 図にそれぞれ示す。現在までに使用されている GNF-A 社/GE 社製燃料は十分に高い信頼性を有しており、10×10 燃料の年間の燃料破損率は  $10^{-6}$ /本のオーダーと極めて低く、良好な実績を収めてきている。

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 標準燃料棒			(代表値) 約 3.71 m	(代表値) 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	←	丸セル型ジルカロイスペーサ (スペーサリンク : 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 (スペーサリンク : インコネル)		
スペーサ形状・材料						
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	
上部タイププレート				改良型	従来型	
下部タイププレート (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)				□	~69.4 GWd/t	~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 %

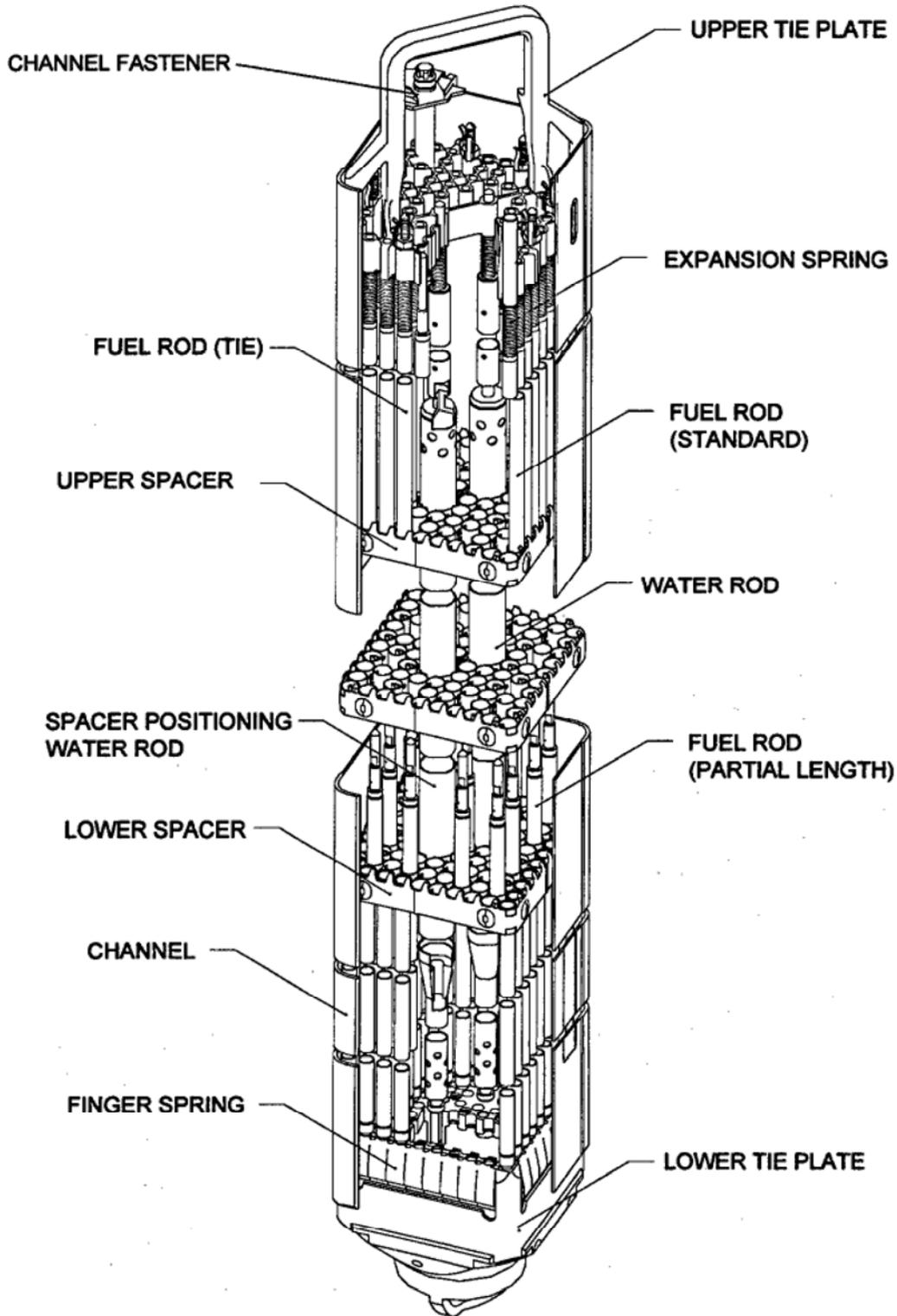
□ 内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日



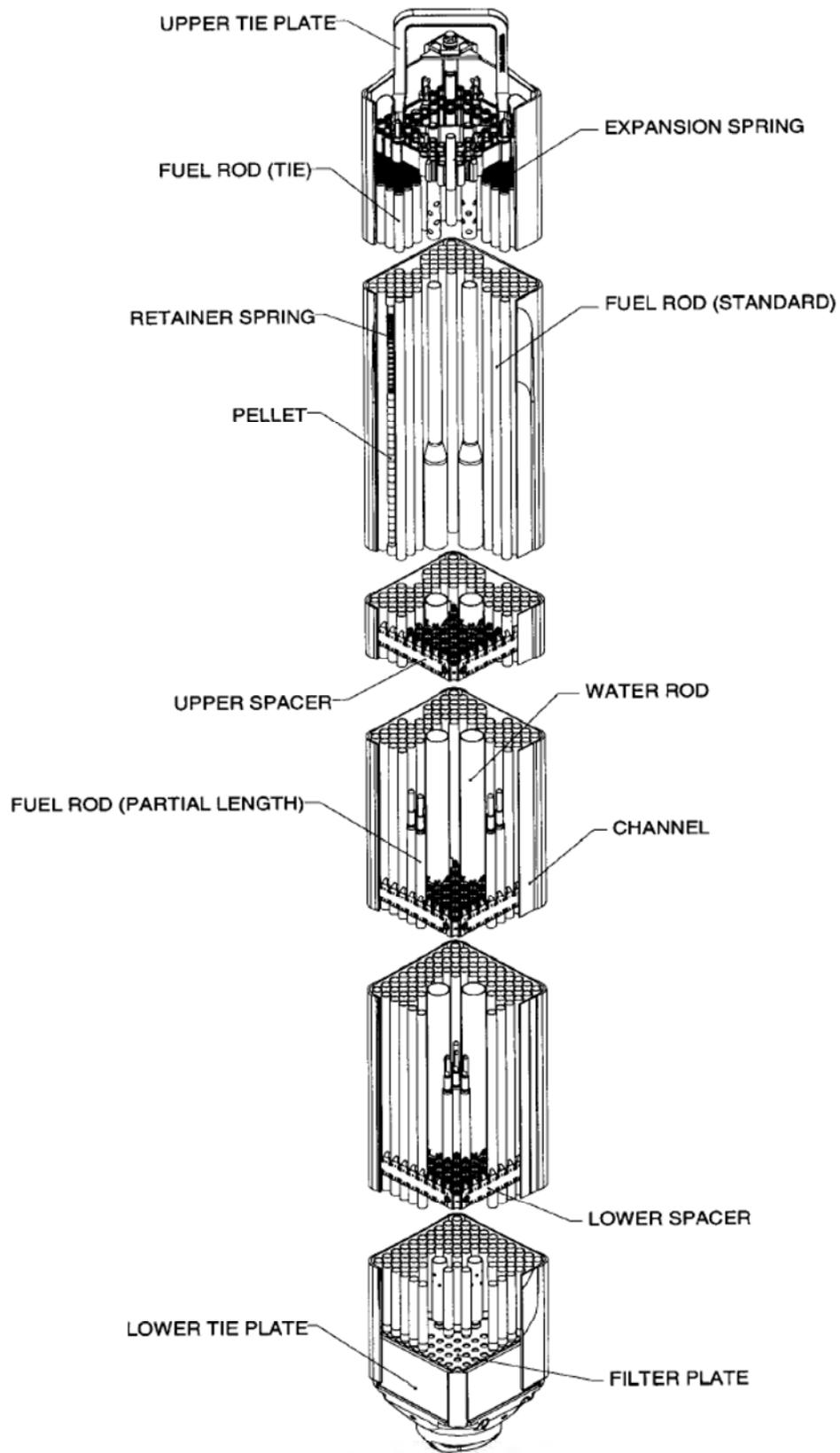
第 1-2 図 GE12 概略図

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日



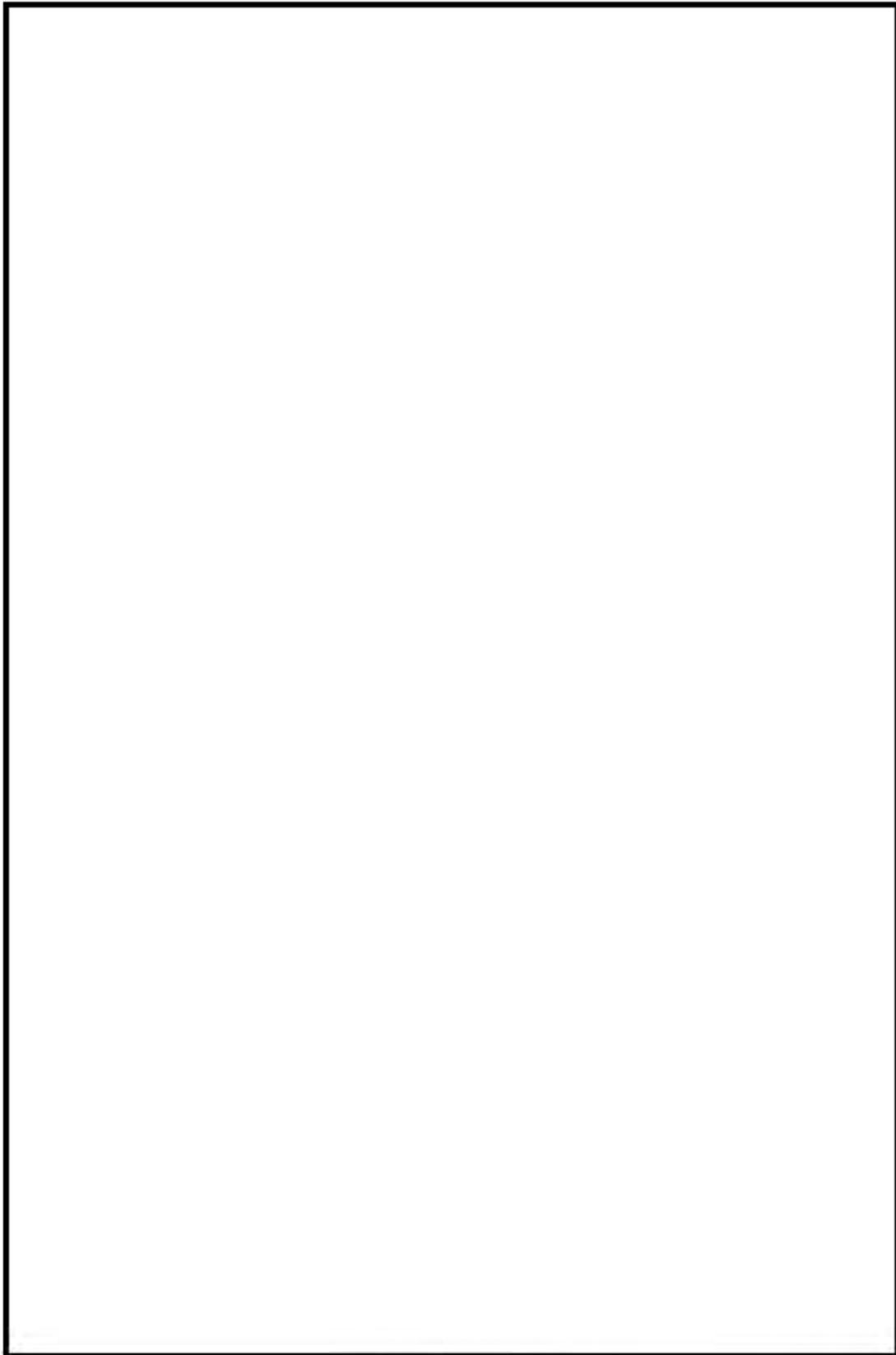
第 1-3 図 GE14 概略図

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日



第1-4図 GNF2 概略図

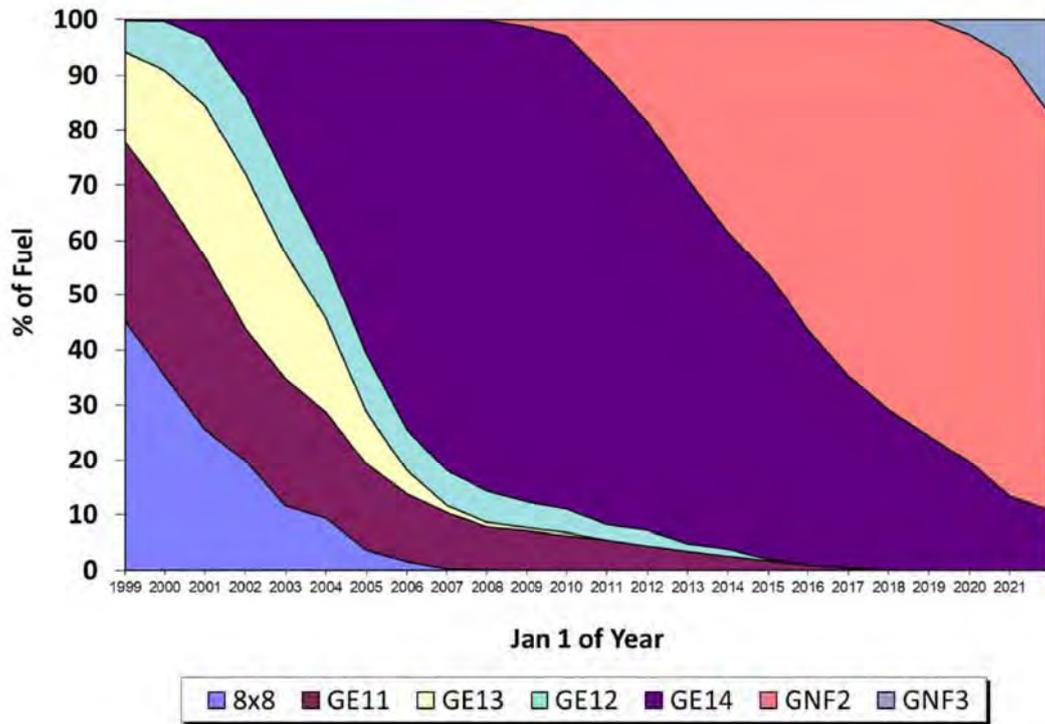
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日



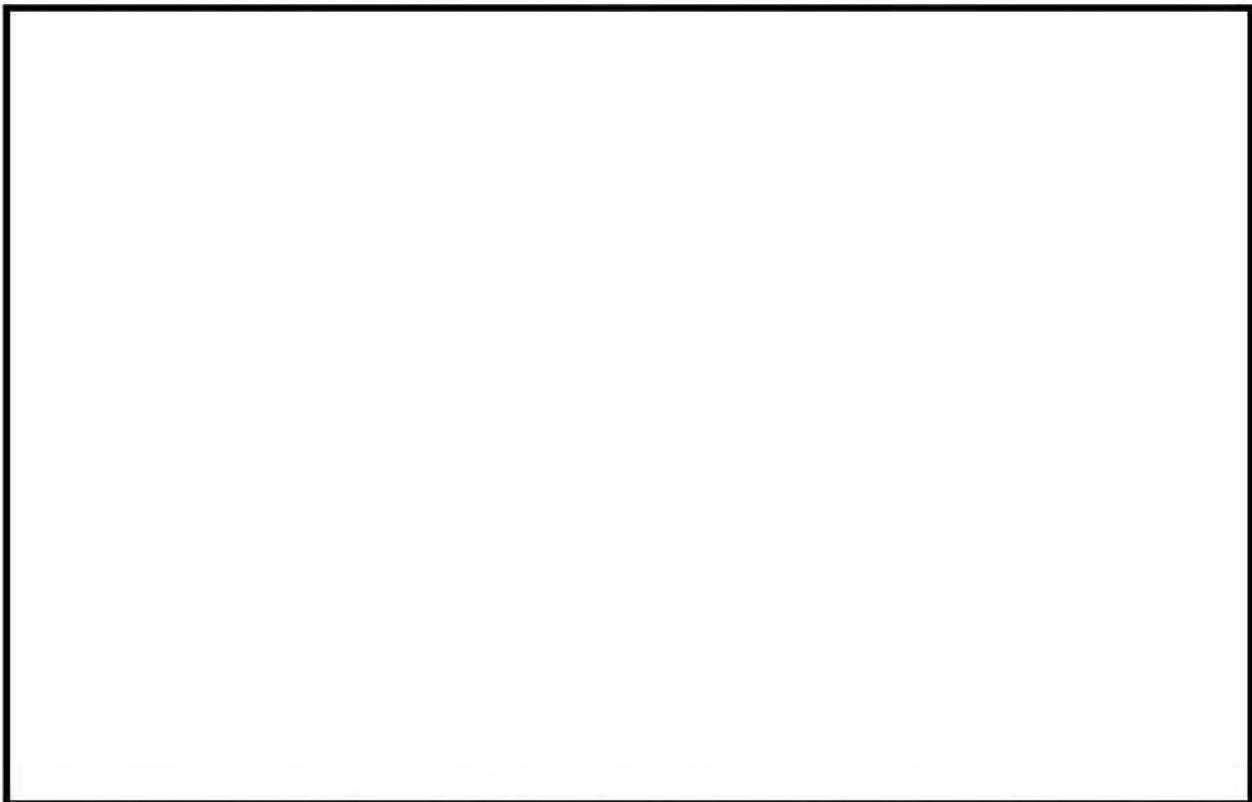
第 1-5 図 GNF3 概略図



GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3
提出年月日	2023年12月1日



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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 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。

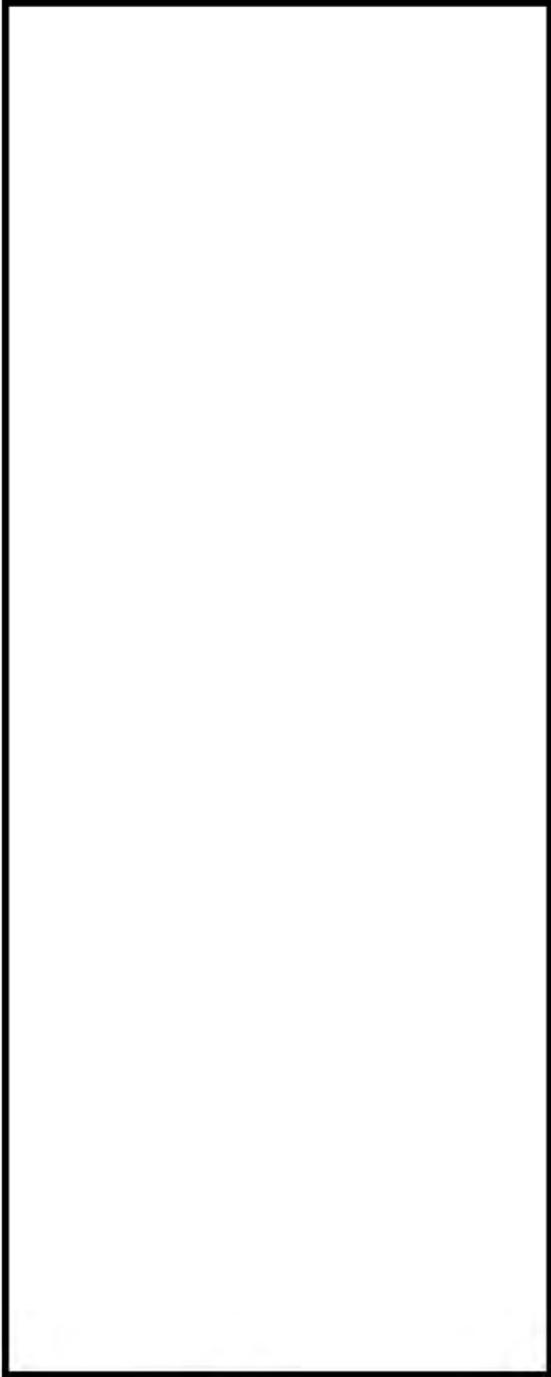
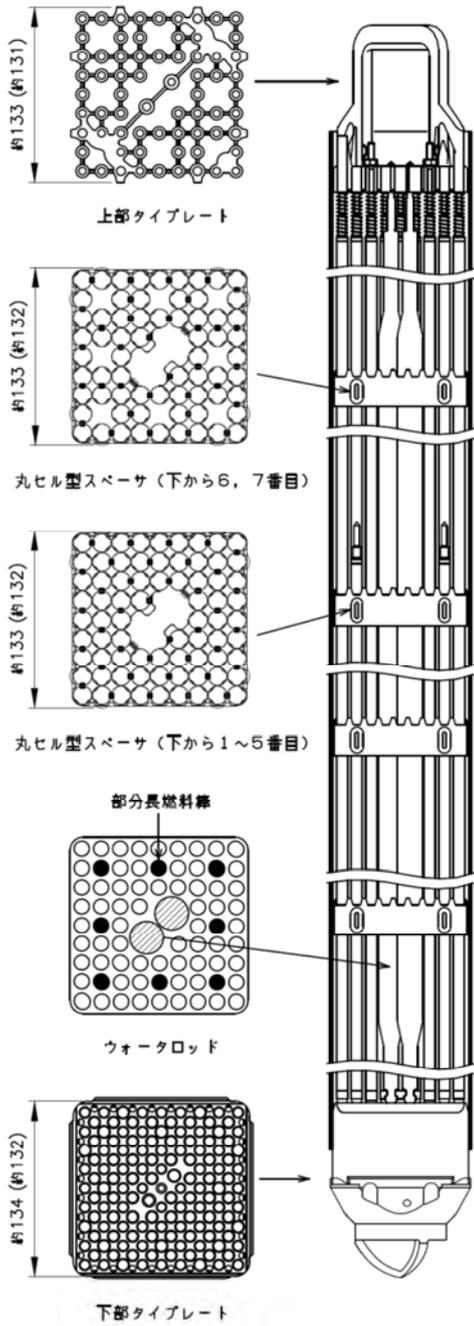
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日

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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日

(単位：mm)



9×9 燃料 (A 型)

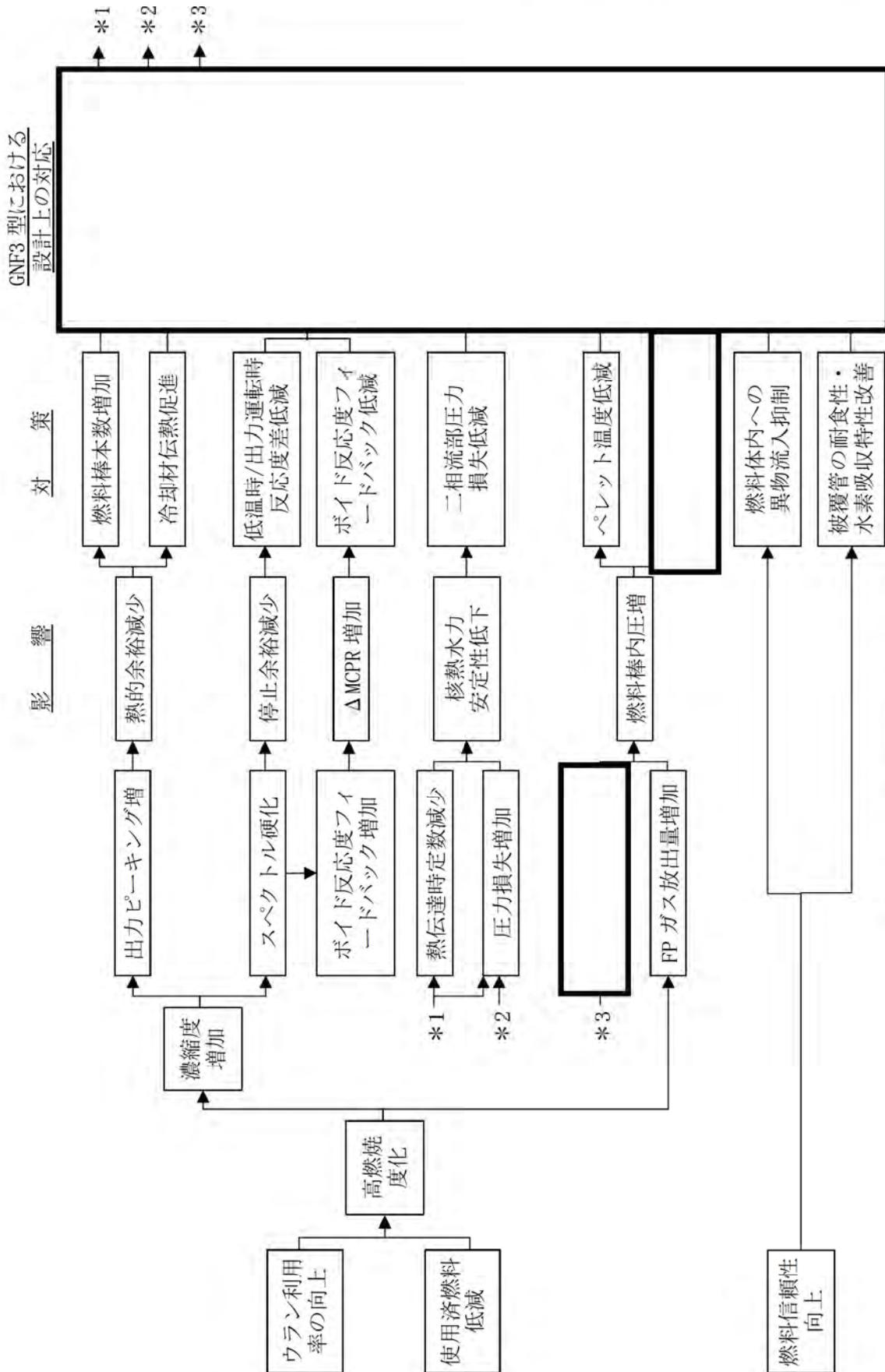
GNF3 型

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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日



第 3-2 図 GNF3 型の主な設計目標と対応

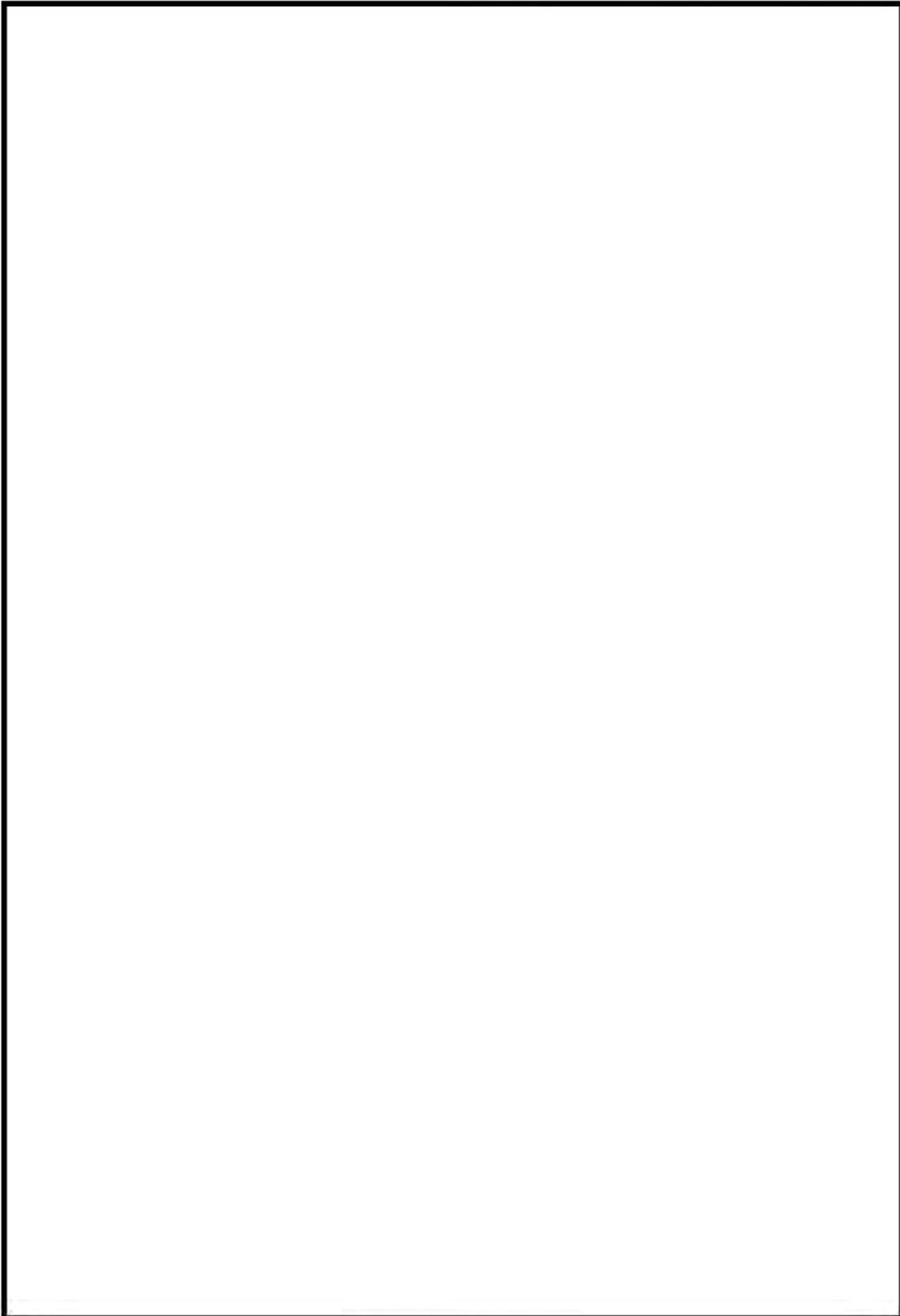
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日



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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日



第 3-4 図 スペーサ



GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 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るようにしている。

#### 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

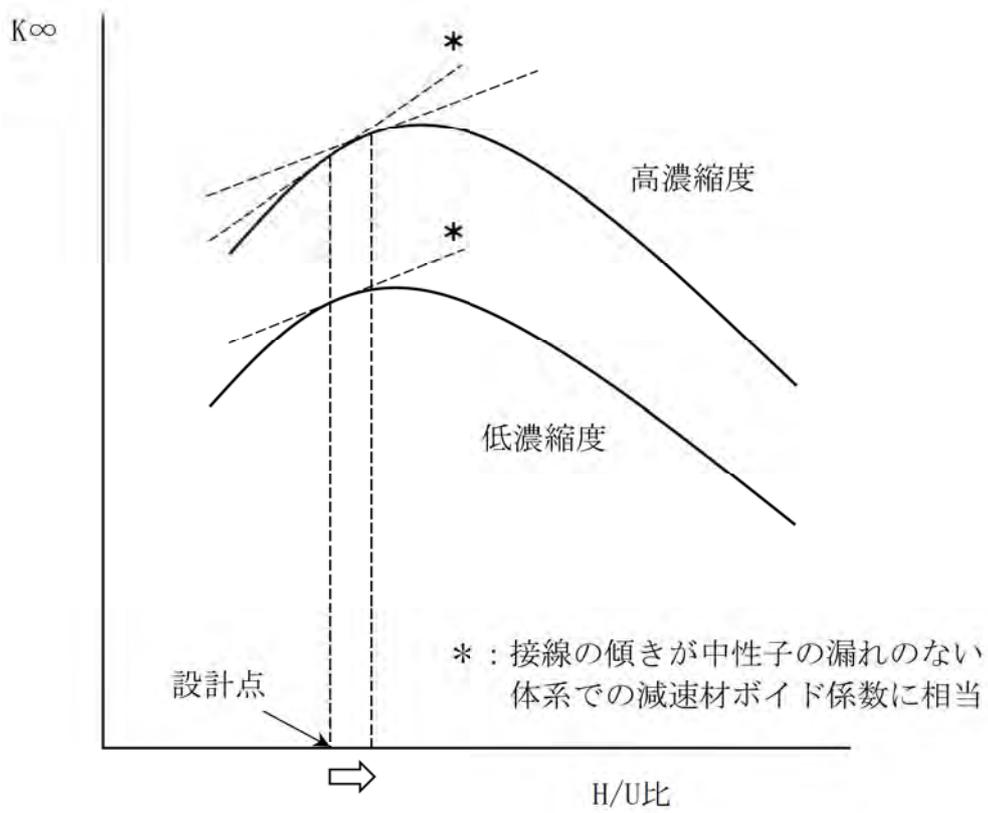
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日

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、

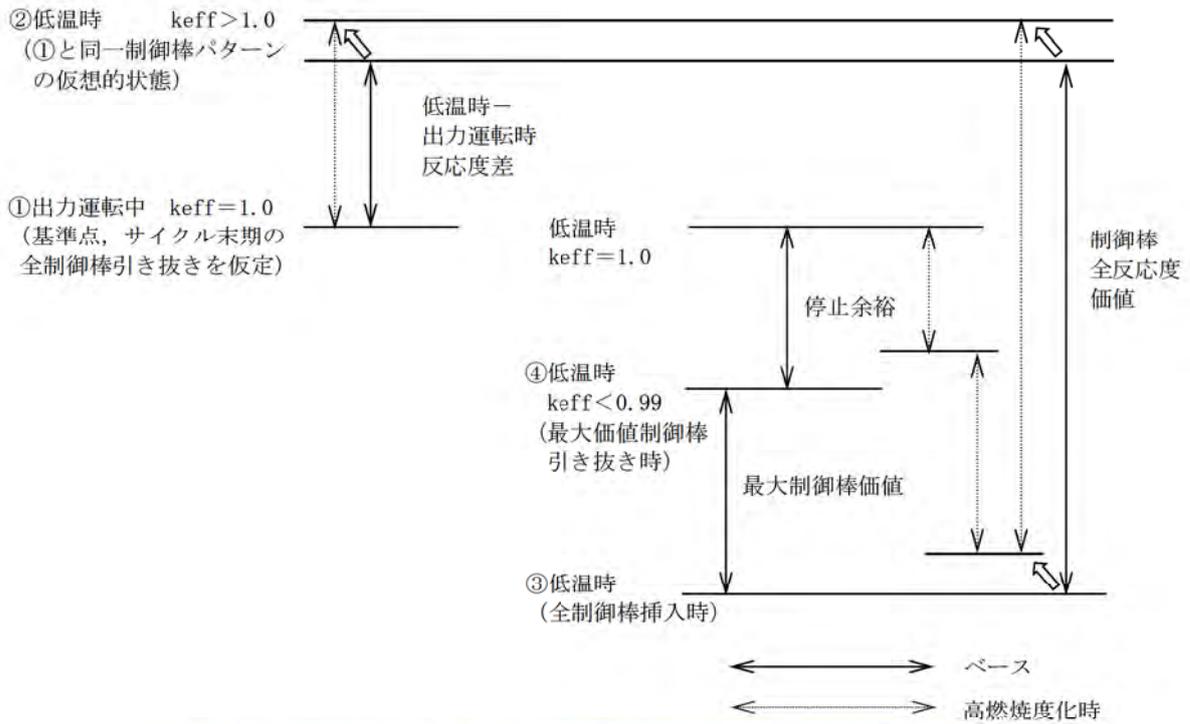
ことで、H/U 比の適正化効果をより大きくしている。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日

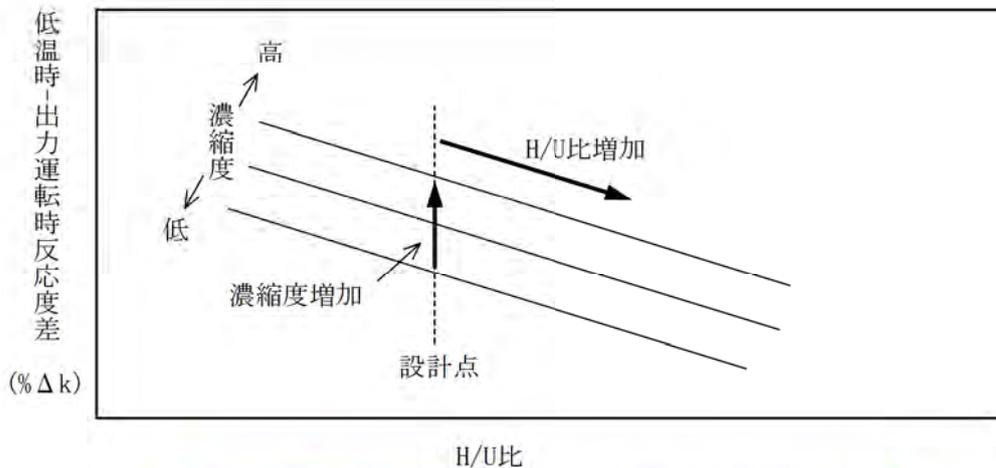


第 3-5 図 中性子の漏れのない体系での減速材ボイド係数に対する H/U 比及び濃縮度の影響

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3
提出年月日	2023年12月1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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日

#### 4. 燃料の設計手法

##### (2) 燃料棒内圧評価

燃料棒内圧評価では、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（以下「P/C ギャップ」という。）が増加（以下「リフトオフ」という。）し始める燃料棒内圧（以下「限界内圧」という。）を評価し、(1)燃料棒熱・機械設計評価にて設計用出力履歴などの設計条件下で評価した燃料棒内圧と比較することによって、設計で想定する条件においてリフトオフが発生しないことを評価（以下、「リフトオフ評価」という）する<sup>(注)</sup>。

限界内圧を評価する方法としては、P/C ギャップに影響を与えるペレット径及び被覆管径の増加速度をそれぞれ計算し、両者が等しくなる内圧を求め、これを限界内圧とする方法を用いる。

このとき、PRIME を用いて限界内圧を求めるには、所定の条件（ペレットの燃焼度、線出力密度及び軸方向位置）を設定した上で燃料棒内圧を徐々に増加させて長時間保持し、（ペレット径の増加速度） $\geq$ （被覆管径の増加速度）となる範囲での最大の燃料棒内圧を限界内圧とする方法を採用することになる。

しかし、PRIME を用いるこの方法では、解析 1 ケースあたりの計算時間が長く、ペレット径及び被覆管径の増加速度に影響する種々のパラメータ（被覆管の形状・寸法、熱伝導度、酸化膜、クラッド厚さなど）の統計的なばらつきの影響評価を行い、かつ、燃焼度の設計範囲及びペレット軸方向位置を網羅させなければならないため、手順が複雑、かつ、計算時間が膨大になり、効率的で信頼性のある設計評価を行うことができない。

そこで、より現実的な限界内圧の求め方として、リフトオフが想定される状況において P/C ギャップに影響を与える因子を取捨選択し、限界内圧を計算式から求めることができる方法を考案した。この方法では、後述のとおり、リフトオフ評価上ではペレット径及び被覆管径の増加速度が、それぞれ、ペレットスエリング速度と被覆管クリープ速度だけで代表できるとする。これにより、PRIME モデルで限界内圧を評価する場合に必要なペレット及び被覆管のふるまいに係る多くの不確かさを、ペレットスエリング速度及び被覆管クリープ速度に係る不確かさに限定できる。これにより、ペレット径及び被覆管径の増加速度に影響する種々のパラメータの統計的なばらつきを考慮しつつ、燃焼度の設計範囲及びペレット軸方向位置を網羅した限界内圧の評価が可能となった。さらに、高燃焼度域のペレットスエリング速度を合理的かつ保守的に設定することで、PRIME モデルを用いる場合に比べて保守的な計算結果を得ることが可能となった。

(注) リフトオフ評価の目的についての補足

高燃焼度領域では FP ガス放出量増加に伴い燃料棒内圧が上昇し、その結果として通常運転時において燃料棒内圧が冷却材圧力を超える可能性がある。燃料棒内圧が顕著に

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日

大きくなると、被覆管の外向きのクリープ変形によって被覆管の径が増加し、リフトオフが発生する可能性がある。リフトオフが発生すると、第 4-8 図に示すように、P/C ギャップの増加によってギャップ熱伝達係数が低下し、ペレット温度が上昇、更に FP ガスが放出されて燃料棒内圧が上昇し、その結果更に P/C ギャップが増加するといった、いわゆるサーマルフィードバックを起こす可能性がある。一方で、燃料棒内圧が冷却材圧力を超えたとしても、リフトオフが発生しない範囲であれば、これに伴うサーマルフィードバックも起きないこととなる。すなわち、リフトオフ評価の目的は、燃料棒内圧の増加に起因するサーマルフィードバックが起きないことを確認することである。

#### a. 評価基準

リフトオフ評価の基準として、「燃料棒の内圧は、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り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。」を用いる。なお、この基準は、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）において、PWR 燃料の燃料棒内圧基準として妥当と判断されている。

#### b. 評価条件

評価対象は GNF3 型燃料の標準燃料棒、長尺部分長燃料棒及び短尺部分長燃料棒とする。また、適用する設計用出力履歴及び軸方向出力分布は、上述の(1)b に示したものと同一である。なお、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 入り燃料棒については、(1)b に示したとおり、UO<sub>2</sub> 燃料棒に比べて設計用出力を抑制した履歴を採用していることから、燃料棒内圧が低くなる。そのため、リフトオフ評価においては、UO<sub>2</sub> 燃料棒で代表させることとした。

#### c. 評価方法

リフトオフ評価では燃料棒内圧が限界内圧を超えないことを評価する。具体的には、燃料棒内圧  $P_i$  と限界内圧  $P_c$  の比  $P_i/P_c$  を内圧設計比と定め、さらに  $P_i$  及び  $P_c$  の統計的分布を考慮し、内圧設計比の 95% 確率上限値が 1 以下になることを評価する。燃料棒内圧は PRIME 評価結果を用い、限界内圧は次に示す方法で評価する。

##### i) P/C ギャップに影響を与える因子について

限界内圧は P/C ギャップが増加し始める燃料棒内圧であるため、限界内圧の評価に先立ち P/C ギャップに影響を与える燃料のふるまいについて整理する。P/C ギャップに影響を与える因子として PRIME モデルで考慮しているものを第 4-3 表及び第 4-4 表に示す。これらの因子のうち、リフトオフ評価で想定する状況（通常運転時、高燃焼度域、PCMI が作用しない）において影響するものを選定する。例え

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日

ば、リフトオフは燃料棒内圧が冷却材圧力を上回る高燃焼度域で想定される事象であるため、低燃焼度域で起こるペレットの焼きしまりはリフトオフ評価では対象外とする。また、ペレットの割れ・リロケーション及び被覆管の照射成長については P/C ギャップを減少させる因子であるので、保守的な評価となるようこれらの因子は考慮していない。

以上のように、第 4-3 表及び第 4-4 表に記載した PRIME の評価モデルをそのまま使用せず、リフトオフが想定される状況において考慮すべき要因として、P/C ギャップへの影響が大きいペレットスエリング及び被覆管クリープ（二次クリープ）だけに着目した評価を行う。

#### ii) 限界内圧について

本リフトオフ評価では、i) で述べたとおり、被覆管クリープ（二次クリープ）及びペレットスエリングに着目し、被覆管クリープ速度及びペレットスエリング速度が等しくなる時の内圧を限界内圧として求める。被覆管クリープ速度、ペレットスエリング速度及び限界内圧の計算方法について、以下に詳細を示す。

##### ① 被覆管クリープ速度の計算方法

被覆管クリープ速度の計算には PRIME で使用されているモデル式の内、二次クリープを用いる。付録-1 に示すとおり、低応力状態における照射誘起のクリープひずみは次のとおりである。なお、式(1)は(1)燃料棒熱・機械設計評価において燃料棒内圧を評価する際に用いられる式と同じである。

$$\varepsilon_g^{irr} = \boxed{\phantom{\varepsilon_g^{irr} = \dots}} \dots (1)$$

ここで、

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

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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日

設定している。ペレットスエリング速度の計算式及びペレットスエリング速度定数の設定に係る詳細は付録-2 に示す。

### ③ 限界内圧の計算方法

被覆管クリープ速度とペレットスエリング速度が等しくなる ( $V_C = V_S$ ) と  
き、式(3)及び式(4)より次の式が成り立つ。

$$\boxed{\phantom{P_c}} \cdots (5)$$

また、限界内圧  $P_c$ (MPa)における被覆管肉厚中央の周方向応力 $\sigma_\theta$ は、厚肉円筒の式から次の式で表される。

$$\sigma_\theta = \boxed{\phantom{P_c}} \cdots (6)$$

ここで、

$P_o$ : 冷却材圧力 (MPa)

式(5)及び式(6)に基づき、 $P_c$  について整理すると、次のとおり限界内圧が求まる。

$$P_c = \boxed{\phantom{P_c}} \cdots (7)$$

なお、式(2)、式(4)及び式(7)に用いられているパラメータの設定方法をまとめたものを第 4-3 表に示す。被覆管温度については、その計算に使用するパラメータも併せて示す。

### iii) 内圧設計比の評価手順

ここでは燃料棒内圧 (PRIME 評価値) を限界内圧で除した値を「内圧設計比」と称し、統計的手法を用いて内圧設計比の 95%確率上限値が 1 を超えないことを確認する。内圧設計比の評価フローを第 4-9 図に、評価手順を次の①～⑦に示す。

- ① PRIME を用いた上記(1)の燃料棒熱・機械設計評価によって、燃料棒内圧の統計的分布 (公称値及び標準偏差) を求める。
- ② ①の公称値及び標準偏差に基づく乱数を用いて、試行回数ごとの燃料棒内圧  $P_i$  を定める。
- ③ 被覆管クリープ速度及びペレットスエリング速度に影響するパラメータのうち、第 4-9 図に示す統計変数 ( $X_{1,n} \sim X_{10,n}$ ) に対し、統計的分布に従った乱数を

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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日

用いて試行回数ごとのパラメータの組み合わせを作成する。

- ④ ③で求めたパラメータの組み合わせに基づき、被覆管クリープ速度とペレットスエリング速度が等しくなるときの燃料棒内圧（限界内圧  $P_c$ ）を求める。
- ⑤ ②及び④で求めた燃料棒内圧 ( $P_i$ ) と限界内圧 ( $P_c$ ) から内圧設計比 ( $P_i/P_c$ ) を求める。
- ⑥ ②～⑤を1セットとして  回繰り返すことにより、内圧設計比が  個得られる。得られた内圧設計比の統計的分布から 95%確率上限値を求める。
- ⑦ 内圧設計比の 95%確率上限値が 1 以下であることをもってリフトオフが発生しないことを確認する。

iv) リフトオフ評価手法の妥当性について

ハルデンプロジェクトにおいて BWR  $UO_2$  燃料を対象として実施されたリフトオフ試験 IFA-610.10<sup>[4-4]</sup><sup>[4-5]</sup> に対し、本リフトオフ評価手法で再現解析を行い、リフトオフが生じる過圧力の評価結果が試験結果から推定される過圧力に比べて低く、保守側の結果となることを確認している。詳細は付録-2 に示す。

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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日

第 4-3 表 P/C ギャップに影響を与える被覆管の挙動

炉内でのふるまい	P/C ギャップへの影響 (括弧内は影響度)	本評価での取扱い	本評価での取扱いに関する説明
熱膨張	P/C ギャップ増加 (小)	考慮しない	通常運転時における被覆管温度の変化は小さく、熱膨張による被覆管径の変化は小さい。
照射成長	P/C ギャップ減少 (小)	考慮しない	燃料棒の照射成長は、被覆管の高速中性子照射によって生じた格子欠陥が蓄積することによって、ジルカロイ結晶（六方晶）が c 軸方向に縮み、a 軸方向に広がることである。被覆管は、c 軸が管軸と垂直になるような集合組織としているため、照射成長により被覆管は伸び、径方向に縮む。照射成長のギャップ幅への寄与はスエリング速度と比較して小さく、また、ギャップ幅を狭める方向への変形であることから、考慮しない方が保守的な取り扱いとなる。
ペレット-被覆管機械的相互作用 (PCMI)	影響なし	考慮しない	P/C ギャップが増加してリフトオフが生じる状況においては、ペレットと被覆管は接触せず PCMI は生じないため、考慮する必要はない。
被覆管クリープ (一次クリープ)	P/C ギャップ増加 (小)	考慮しない	通常運転時は被覆管温度及び燃料棒内圧の変化は小さい。また、これらの変化に伴って一次クリープが生じたとしても、時間経過とともに収束し、継続的な P/C ギャップの増加に寄与しないため考慮しない。
被覆管クリープ (二次クリープ)	P/C ギャップ増加 (大)	考慮する	通常運転時において、照射により一定速度で継続的に変形が進行する二次クリープを考慮する。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日

第 4-4 表 P/C ギャップに影響を与えるペレットの挙動

炉内でのふるまい	P/C ギャップへの影響 (括弧内は影響度)	本評価での取扱い	本評価での取扱いに関する説明
熱膨張	P/C ギャップ減少 (中)	考慮しない	ペレット温度が上昇して熱膨張量が増加すると、P/C ギャップ幅は縮小し、サーマルフィードバックを遅らせる方向に寄与するため、考慮しないことは保守的な取扱いになる。
焼きしまり	P/C ギャップ増加 (中)	考慮しない	焼きしまりは製造時の小さな気泡が照射下における核分裂片の衝突による消滅等で、ペレット密度が増加する現象であり、低燃焼度領域において発生する。リフトオフが問題となるのは高燃焼度領域であることから、焼きしまりを考慮する必要はない。
割れ・リロケーション	P/C ギャップ減少 (中)	考慮しない	ペレットの割れ・リロケーションは、ペレットが熱応力によって割れ、外側に移動する現象である。通常運転中に P/C ギャップが開いていれば割れ・リロケーションが進行するが、ギャップを狭める方向に作用するため、考慮しないことは保守的な取扱いになる。
ペレットスエリング	P/C ギャップ減少 (大)	考慮する	核分裂生成物の蓄積による固体スエリングと高燃焼度領域におけるリムスエリングがあり、リフトオフが厳しくなる高燃焼度ペレットのスエリングを対象にする。
ペレット-被覆管機械的相互作用 (PCMI)	影響なし	考慮しない	P/C ギャップが増加してリフトオフが生じる状況においては、ペレットと被覆管は接触せず PCMI は生じないため、考慮する必要はない。
クリープ変形 (ホットプレス)	P/C ギャップ増加 (小)	考慮しない	P/C ギャップが開いている状況では燃料棒内圧によるペレットのクリープ変形 (ホットプレス) が生じるが、ホットプレスによるペレット直径変形への寄与はスエリング速度と比較して小さく、考慮しないこととした。

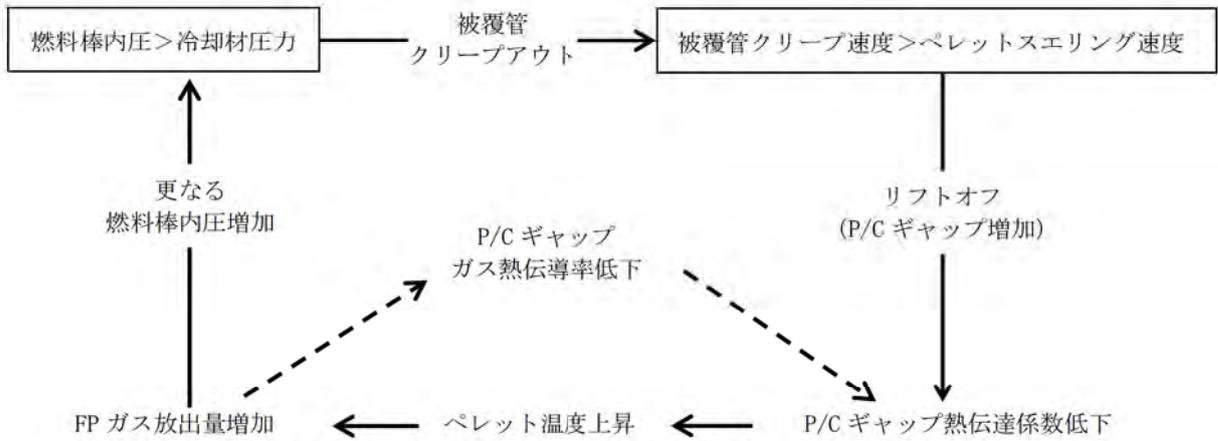
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日

第 4-5 表 限界内圧の算出に係るパラメータ

パラメータ	設定方法
被覆管クリープ速度に係るパラメータ	
ペレットスエリニング速度に係るパラメータ	

内は商業機密のため、非公開とします。

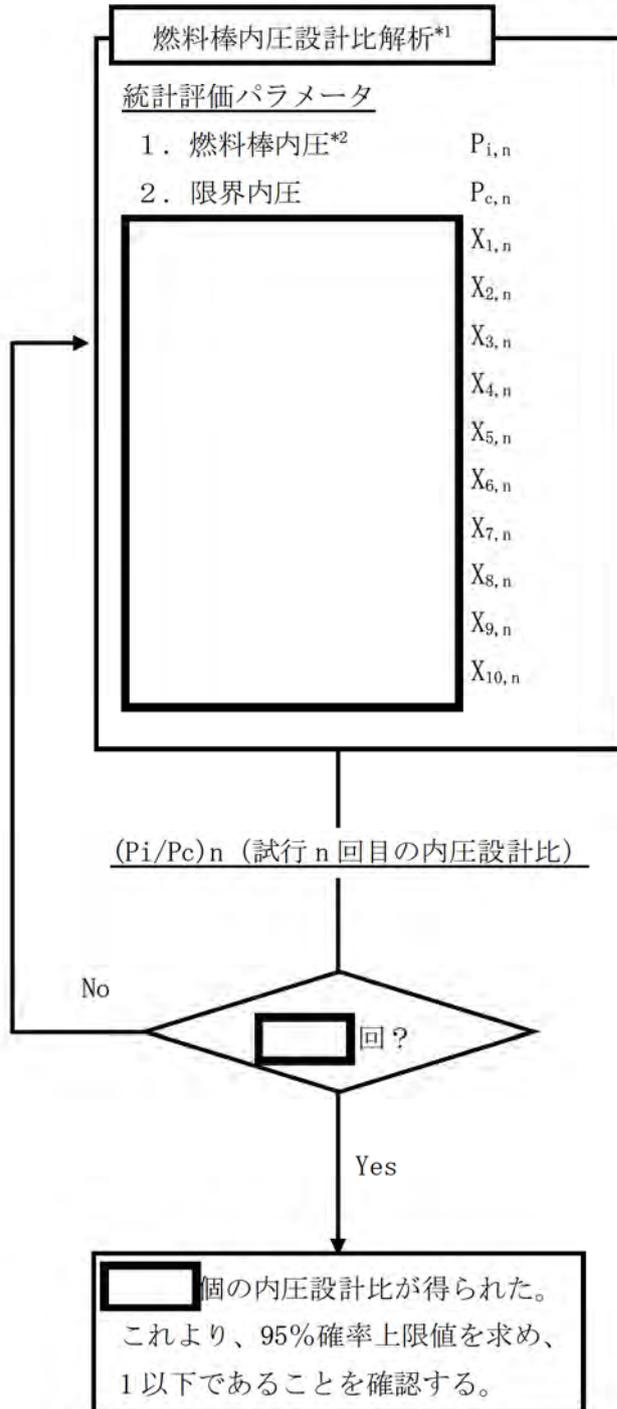
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 日



第 4-8 図 リフトオフによるサーマルフィードバック

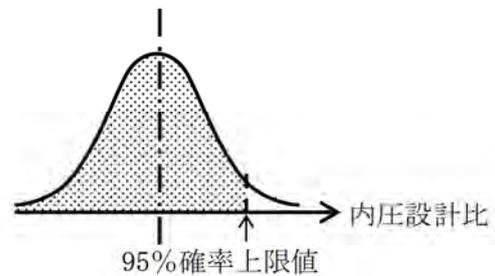
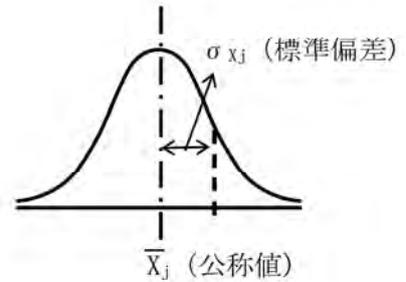
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3
提出年月日	2023年12月1日

燃料棒内圧評価における統計解析（モンテカルロ法）



$P_i$  及び  $X_{1,n} \sim X_{10,n}$  については 1 回の解析試行ごとに乱数が用いられ、統計的分布に従い設定される。すなわち、乱数発生により下式の  $\alpha_{j,n}$  が求められ、 $X_{j,n}$  が設定される ( $j=1 \sim 10$ )。

$$X_{j,n} = \bar{X}_j + \alpha_{j,n} \times \sigma_{Xj}$$



(注記)  
 \*1 n はモンテカルロ法の試行回数を表す  
 \*2 PRIME 統計解析結果（公称値及び標準偏差）を使用

第 4-9 図 内圧設計比の評価フロー

[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.3
提出年月日	2023 年 12 月 1 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
- [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).

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3 付録-2
提出年月日	2023 年 12 月 1 日

## 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

本付録は燃料棒内圧評価（リフトオフ評価）に係る次の項目について説明するものである。

- ペレットスエリング速度の計算方法の詳細
- リフトオフ評価手法の妥当性確認について

#### 1. ペレットスエリング速度の計算方法の詳細

##### (1) ペレットスエリングの計算式

PRIME のスエリングモデルでは核分裂生成物の蓄積によるスエリング（以下「固体スエリング」という。）に加え、高燃焼度域においては、多孔質のリム組織の形成による付加的なスエリング（以下「リムスエリング」という。）を考慮しており、固体スエリングとリムスエリングはそれぞれ別の方法で求められている。固体スエリングによる体積増加率は積算核分裂密度の関数であるため、積算核分裂密度を体積平均核分裂速度に置き換えるだけで容易にスエリング速度の計算式に変換可能である。一方、リムスエリングによる体積増加率は、ペレット平均燃焼度に依存するリム組織形成幅及びペレット局所燃焼度に依存するリム気孔率から求めており、スエリング速度の計算式に変換することが難しい。

そのため、本リフトオフ評価では、スエリング速度の計算式を体積平均核分裂速度の関数とし、高燃焼度域のスエリング速度と合うように固体スエリングとリムスエリングの両方の影響が含む比例定数を設定した。この設定により、スエリングによるペレット直径の増加速度（スエリング速度） $V_s$  (mm/s) は次の式で表される。

$$V_s = \square$$

$r_p$  : ペレット半径(mm)

$\alpha$  : ペレットスエリング速度定数( $\Delta V/V$  per fission/cm<sup>3</sup>)

$F$  : 体積平均核分裂速度(fission/(cm<sup>3</sup> · s))

##### (2) ペレットスエリング速度定数の設定方法

ペレットスエリング速度定数の設定においては、GNF3 型のペレットと焼結密度が同等のペレットが用いられている高燃焼度 8×8 燃料（高燃焼度確証燃料）<sup>[付 2-1]</sup>及び 9×9 燃料(A 型)<sup>[付 2-2]</sup>のペレット体積変化率データを用いた。図 1-1 にペレット体積変化率の測定データとペレット燃焼度の関係を整理したものを示す。また、参考として 9×9 燃料(B 型)<sup>[付 2-3]</sup>の測定データも併せて示す。高燃焼度 8×8 燃料及び 9×9 燃料(A 型)のそれぞれに対し、30GWd/t 以上のデータから一次近似直線を作成し、傾きがより

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.3 付録-2
提出年月日	2023 年 12 月 1 日

小さい<sup>1</sup>高燃焼度 8×8 燃料のデータを選定した上で、この一次近似直線の傾きからペレットスエリング速度定数  ( $\Delta V/V$  per fission/cm<sup>3</sup>) (=  per 10Gwd/t に相当)を設定した。

### (3) ペレットスエリング速度定数の保守性について

#### i) PRIME モデルとの比較

PRIME モデルに基づくペレット体積変化率とペレット燃焼度の関係を図 1-1 に併せて示す。PRIME モデルでは燃焼度が進むにつれリムスエリングの寄与が大きくなりグラフの傾きが急になる。本評価手法と PRIME モデルでスエリング速度を比較すると、燃料棒内圧が高くなる高燃焼度域 (60Gwd/t 以降) において本評価手法の方がグラフの傾きが小さくなっていることから、本評価手法の方が保守側の条件といえる。

#### ii) 試験データとの比較

PWR 燃料<sup>[付 2-4]</sup>及びハルデン炉<sup>[付 2-5]</sup>でのペレット密度変化のデータから求めた値と比較を行った。

PWR 燃料での 30Gwd/t 超のペレット密度減少は 1 % per 10Gwd/t<sup>[付 2-4]</sup>であり、本評価手法で設定した条件の方が保守側である。また、ハルデン炉での標準粒径 (IFA (standard)) のデータから、ペレット燃焼度が 30-60Gwd/t の領域でのスエリング速度は約 0.8 % per 10Gwd/t であり、ペレット燃焼度が 60-80 Gwd/t の領域ではスエリング速度は約 1.6 % per 10Gwd/t である。ペレット燃焼度が 30-60 Gwd/t の領域でのスエリング速度は本評価で適用するスエリング速度と同等であり、60-80 Gwd/t の領域では本評価手法の方が保守側の条件となっている。

<sup>1</sup> 近似直線の傾きが小さい方がペレットスエリング速度を小さく評価することとなり、リフトオフ評価の観点から保守側の条件である。

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.3 付録-2
提出年月日	2023年12月1日

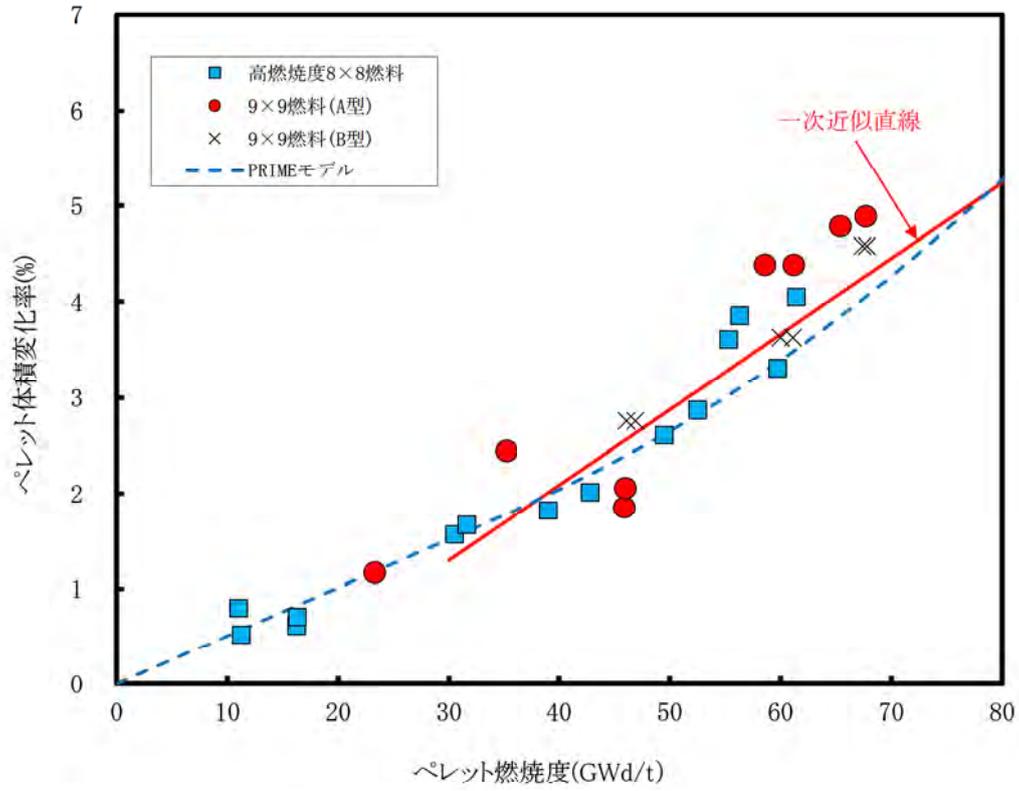


図 1-1 ペレット体積変化率とペレット燃焼度の関係 [付 2-1][付 2-2][付 2-3]

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3 付録-2
提出年月日	2023 年 12 月 1 日

## 2. リフトオフ評価手法の妥当性確認について

本評価手法の妥当性確認のため、ハルデンプロジェクトにおいて BWR UO<sub>2</sub> 燃料を対象として実施されたリフトオフ試験 IFA-610.10<sup>[付 2-5][付 2-6]</sup>（以下「リフトオフ試験」という。）について、本評価手法での再現解析を行った。以下にその詳細を示す。

### (1) リフトオフ試験の概要

リフトオフ試験では、燃料棒内圧を段階的に高くし、各段階において一定時間保持し、ペレットの中心温度変化が測定されている。なお、使用された BWR UO<sub>2</sub> 燃料被覆管はジルカロイ-2 材であり、肉厚は GNF3 型とほぼ同等である。ペレット中心温度上昇速度（保持時間 500h 超）と過圧力の関係を図 2-1 に示す。

### (2) リフトオフの発生とペレット中心温度上昇速度の関係について

リフトオフ試験ではペレットと被覆管のギャップが直接測定されているわけではないため、リフトオフの発生とペレット中心温度上昇速度の関係について評価する必要がある。そこで、PRIME を用いて、IFA-610.10 の試験燃料がリフトオフ試験に先立って商用 BWR にて経験したベース照射の再現解析を行い、その後、リフトオフ試験を模擬した過圧力 (10~25 MPa) となるように燃料棒内圧をパラメータとして一定時間保持し、ペレット中心温度の感度解析を実施した。その結果を図 2-1 に併せて示す。過圧力 23MPa を境にペレット中心温度上昇速度が急激に上昇しており、リフトオフが発生したと推定される。一方、過圧力 10~22MPa の範囲においてはほぼ一定の上昇速度となっているが、これは燃焼に伴うペレット熱伝導率の低下及び PCMI の低下による接触熱伝達率の低下が要因であり、リフトオフが発生したものではないと推定される。

以上の感度解析の結果から、リフトオフ試験で実際にリフトオフが生じた過圧力は、20MPa 以上と推定される。

### (3) 再現解析

本評価手法を用いてリフトオフ試験の再現解析を行い、リフトオフが生じる過圧力を評価した。表 2-1 及び図 2-1 に本評価手法とリフトオフ試験結果を比較して示す。本評価手法を用いた過圧力の評価結果は 18.5 MPa となり、試験結果より過圧力を小さく評価する結果となった。

この結果から、本評価手法によるリフトオフが生じる過圧力の評価結果は試験結果より保守側となっており、本評価手法は妥当であることを確認した。

表 2-1 リフトオフが生じる過圧力の解析結果 (IFA610.10 リフトオフ試験の再現)

本評価手法	IFA610.10 試験結果
18.5MPa	20MPa 以上 (推定値)

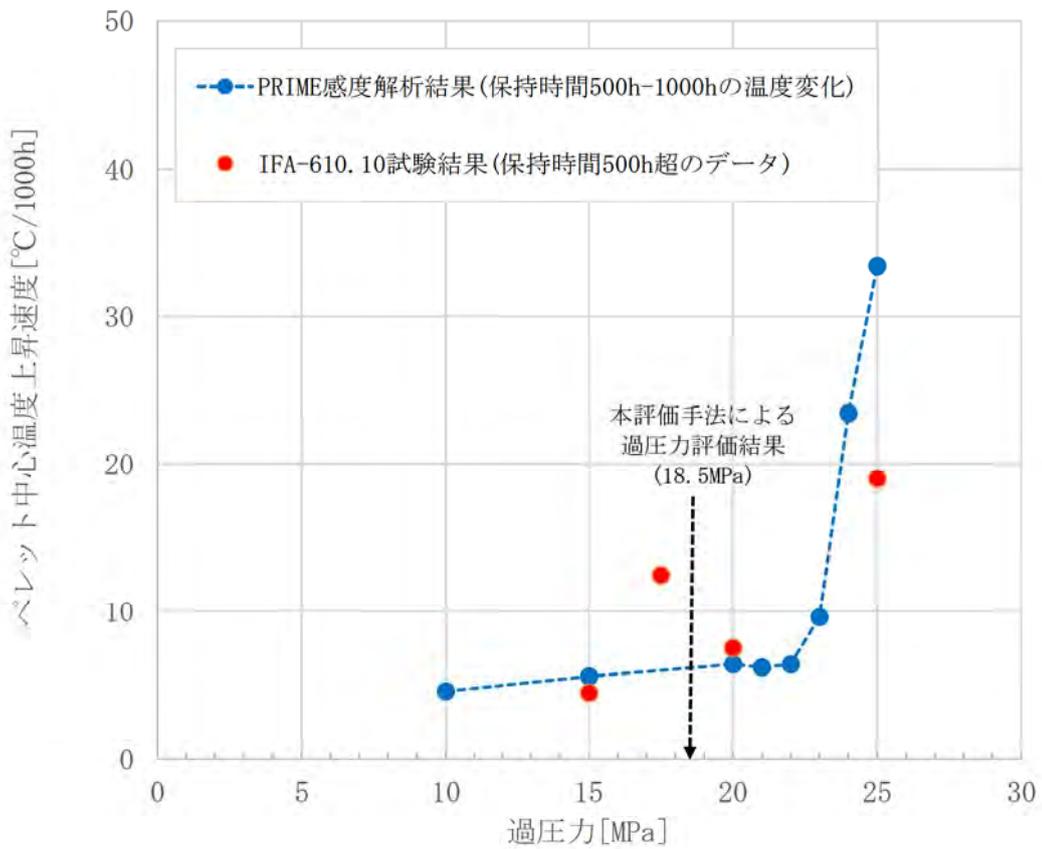


図 2-1 ペレット中心温度上昇速度と過圧力の関係

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.3 付録-2
提出年月日	2023 年 12 月 1 日

### 3. 参考文献

- [付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
- [付2-2] 「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 × 9 A 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
- [付2-3] 「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 2 (9 × 9 B 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
- [付2-4] R. Manzel et al., "HIGH BURNUP FUEL MICROSTRUCTURE AND ITS EFFECT ON FUEL ROD PERFORMANCE", Int. Topical Mtg. on LWR Fuel Performance, Park City, Utah, April 2000
- [付2-5] K. Une et al., "Rim structure formation and high burnup fuel behavior of large-grained UO<sub>2</sub> fuel", J. Nucl. Mat. 278 (2000) 54-63
- [付2-6] S. Watanabe, "The Lift-Off Experiment IFA-610.10 with BWR Fuel Rod, In-Pile Data Evaluation", OECD Halden Reactor Project HWR-919 (2010)
- [付2-7] 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)