

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 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 10 月 17 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.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 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

下線部：今回ご説明する部分

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.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 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 赤：解析 青：試験及び解析 緑：試験及び/又は実績
	(1) 基本的設計方針	(2) 具体的設計方針 <sup>*4</sup>			
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の第 19 条第 2 項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.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 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.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 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.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 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。

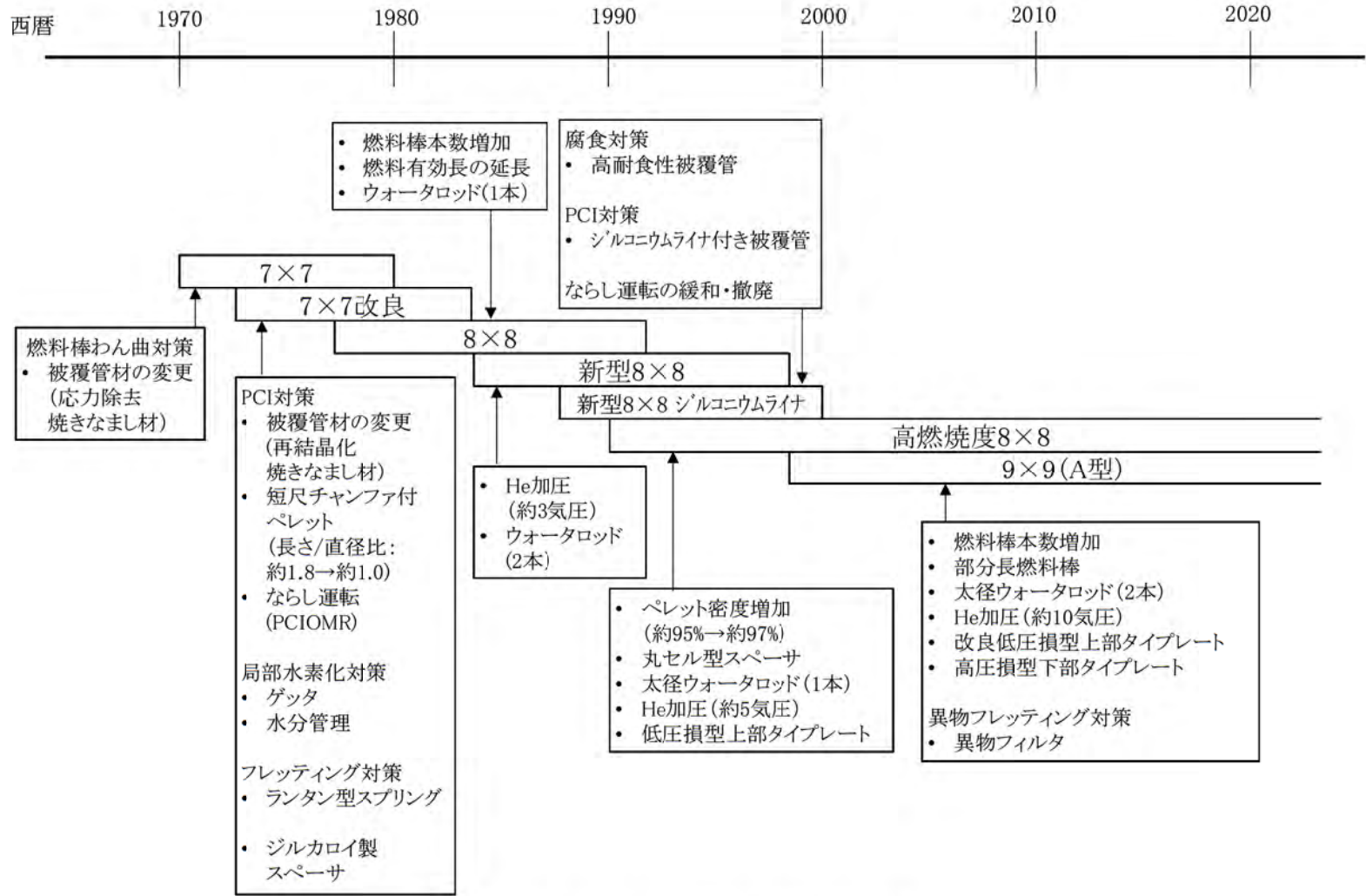
部分長燃料棒： 核熱水力安定性の改善を図るため、74 本の燃料棒のうち 8 本は標準燃料棒の約 3 分の 2 の長さとした部分長燃料棒を採用。

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.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 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<sub>く</sub>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.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 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、先行使用燃料を含めると、GNF2 においては炉内滞在期間  年を達成したものがあり、GE14 においては集合体平均燃焼度では  MWd/t、ペレット燃焼度では  MWd/t を達成したものがある。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 日

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 項目	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)
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 76ミシケート 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	←
スペーサ形状・材料					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)
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
集合体平均燃焼度実績 (LUA 実績)					~47 GWd/t <sup>[1-1]</sup>	~53.0 GWd/t <sup>[1-3]</sup>
照射期間実績(LUA 実績)					~約 5.6 年 <sup>[1-1]</sup>	~約 5.4 年 <sup>[1-3]</sup>
燃料体数実績					約 4,200 体(2022 年) <sup>[1-1]</sup>	~約 5.5 年 <sup>[1-4]</sup>
燃料タイプ別 漏えい燃料棒割合	~0.0055 % <sup>[1-2]</sup>	~0.0029 % <sup>[1-2]</sup>	~0.0016 % <sup>[1-2]</sup>	0.24 体/1000 体 <sup>[1-1]</sup> (集合体単位の割合)	追前	

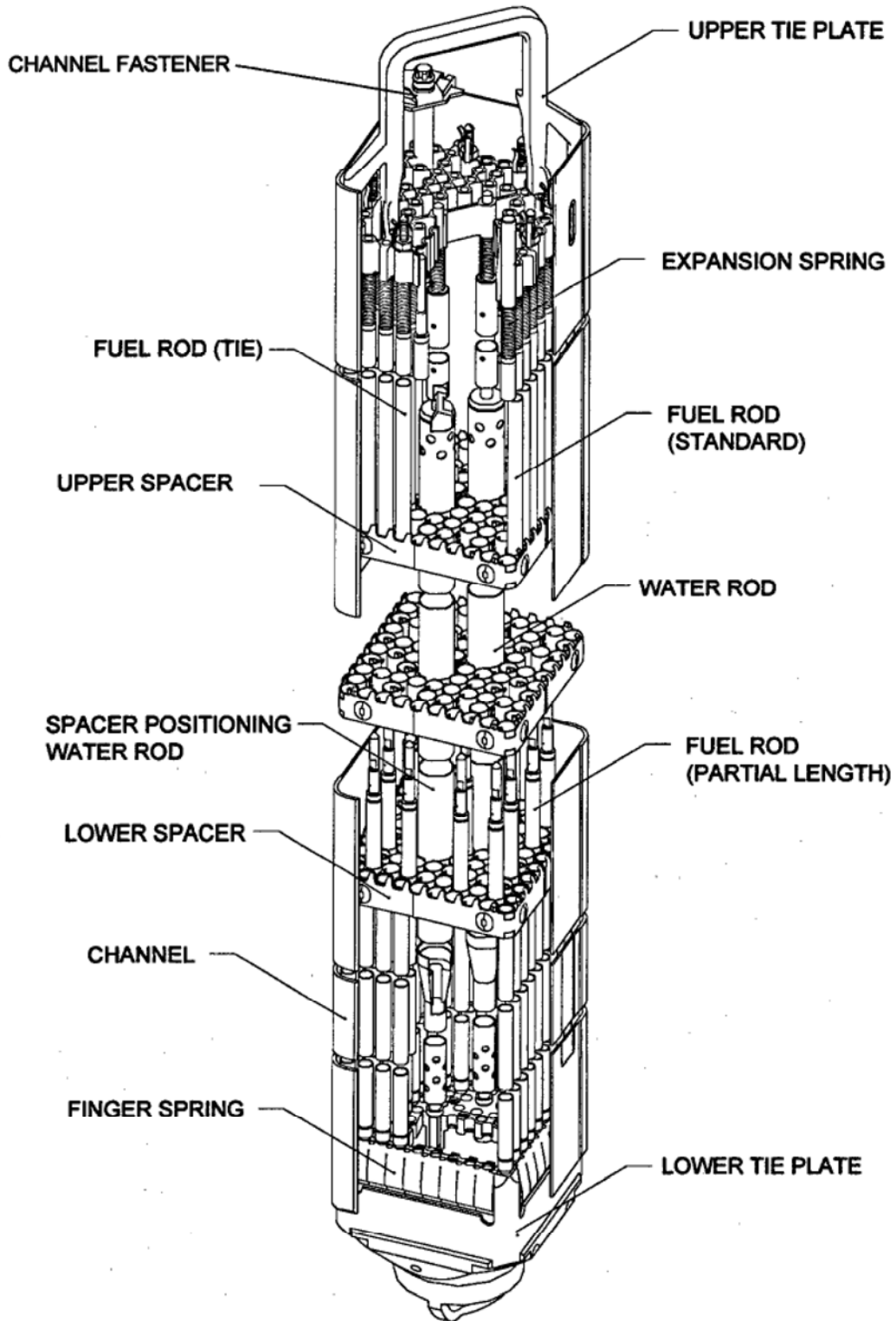
☐ 内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 日



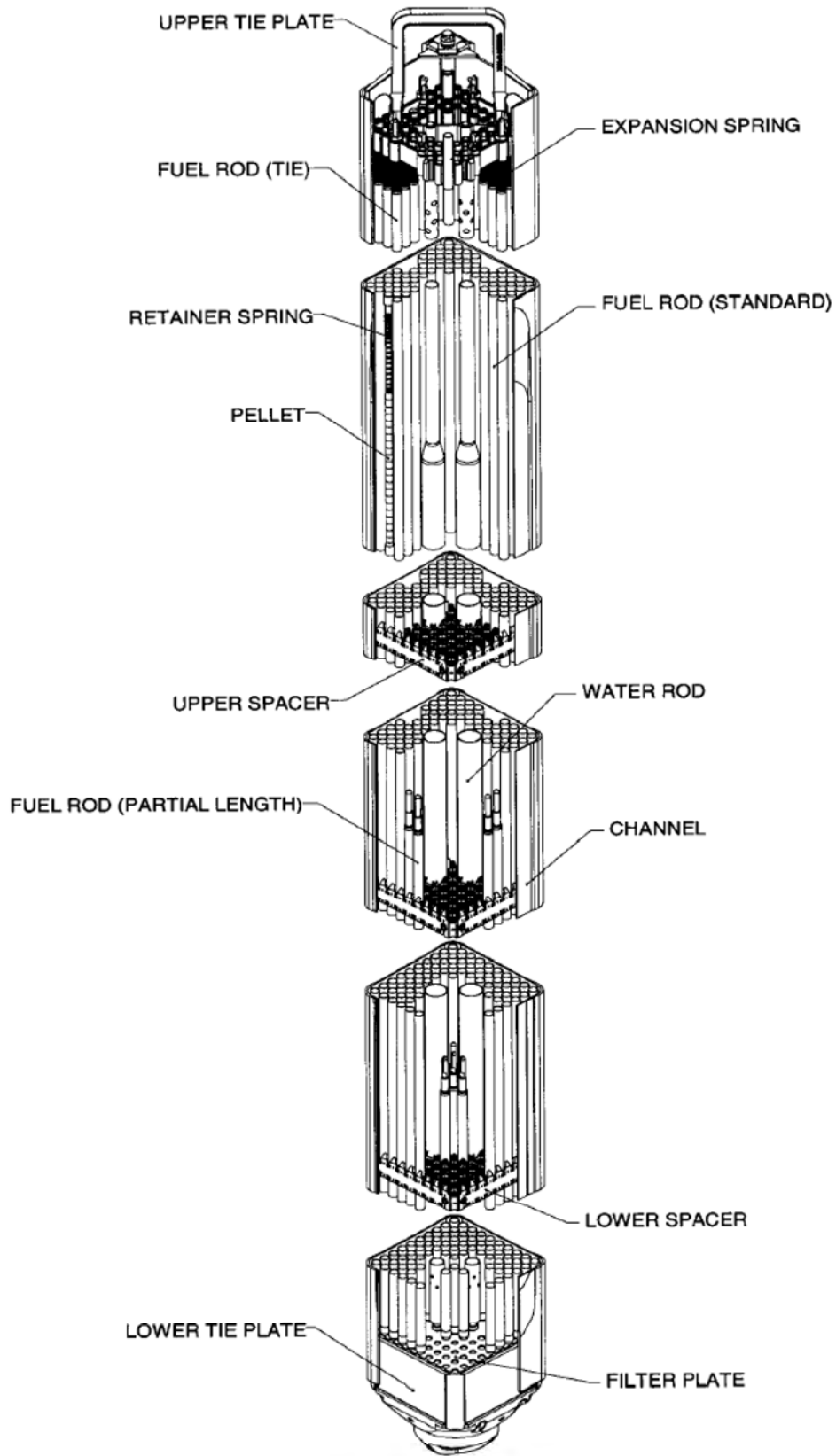
第 1-2 図 GE12 概略図

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 日



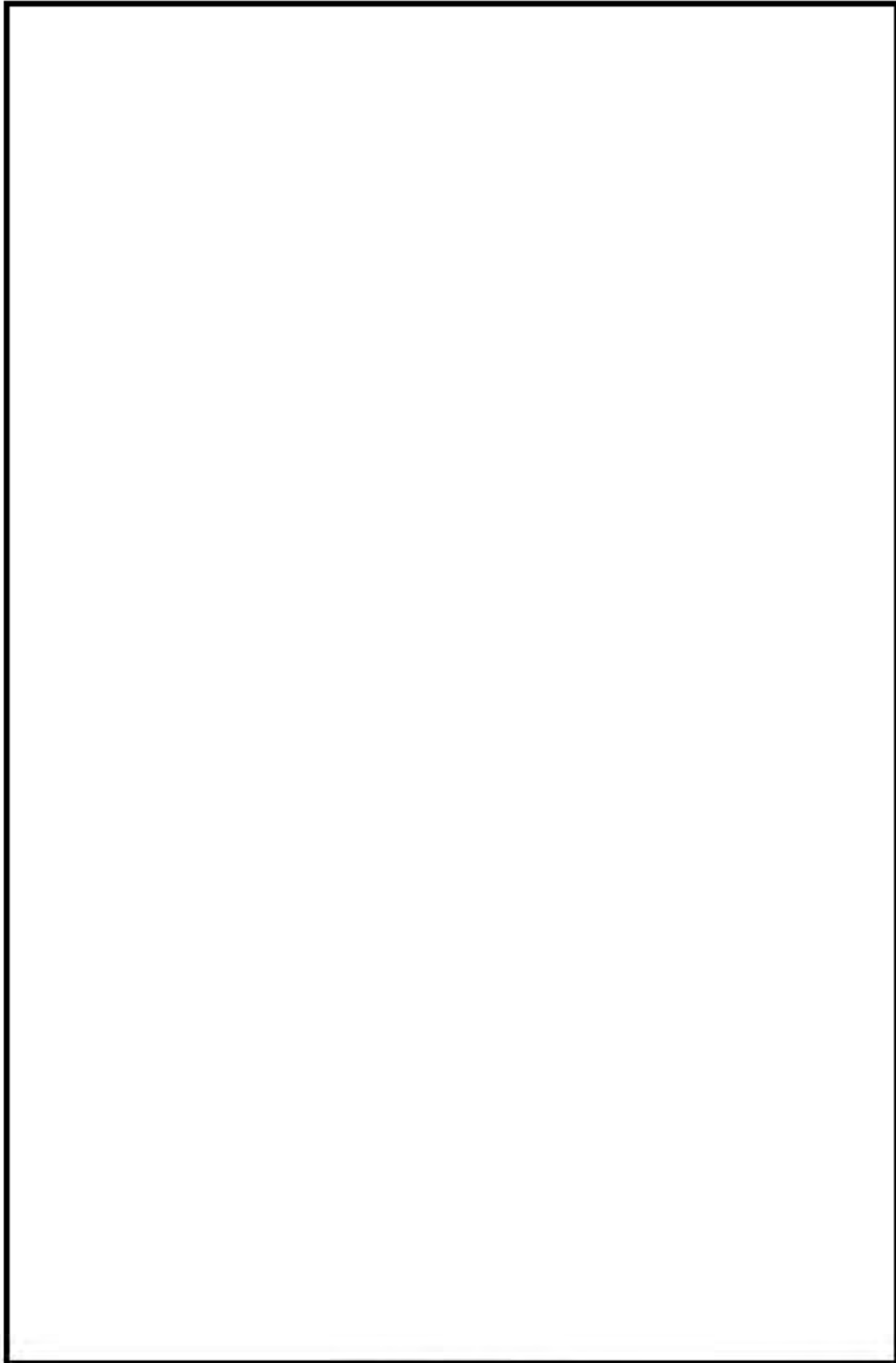
第 1-3 図 GE14 概略図

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 日



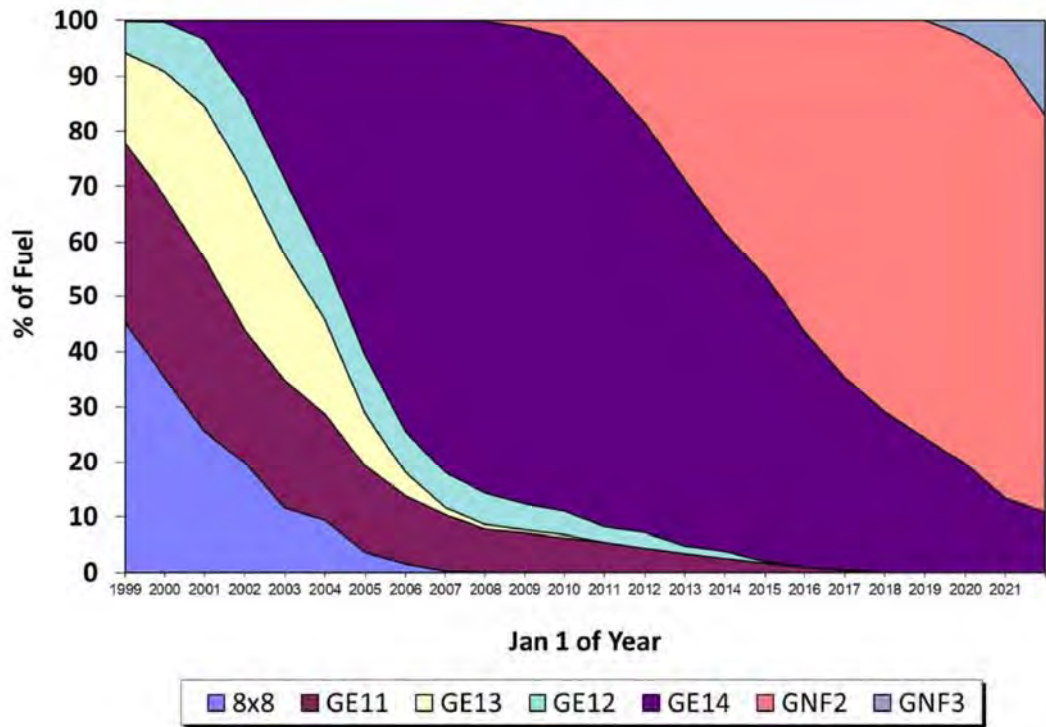
第1-4 図 GNF2 概略図

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 日

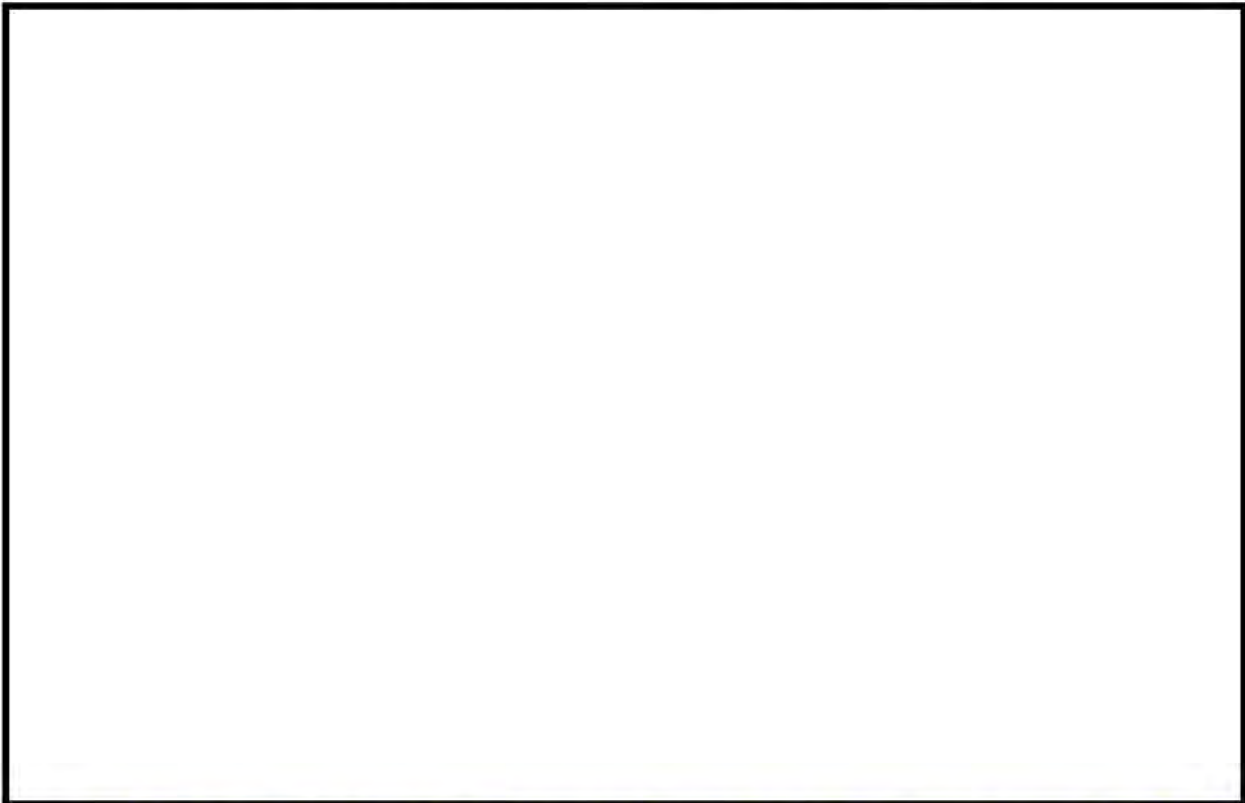


第 1-5 図 GNF3 概略図





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.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 日

## 2. 設計方針

GNF3 型は、機械設計、核設計、熱水力設計及び耐震設計に関して要求される必要な機能を有する構造とする。

なお、本申請の燃料体が使用される発電用原子炉及びその附属施設は、本型式証明申請書本文五号に示す燃料体を使用することができる発電用原子炉施設の範囲又は条件に従うものとし、本申請の燃料体の使用に係る発電用原子炉施設の設置(変更)許可申請時等において確認されるものとする。

GNF3 型は、原則として、現行国内法規に基づく次の規格及び基準等によって設計する。ただし、下記以外の規格及び基準を適用する場合には、それらの規格及び基準の適用の根拠、国内法規に基づく規格及び基準との対比並びに適用の妥当性を明らかにする。

- ・ 日本産業規格(JIS)
- ・ 日本電気協会 電気技術規程(JEAC)及び電気技術指針(JEAG)
- ・ ASTM(American Society for Testing and Materials)規格

### (1) 基本的設計方針

GNF3 型は、機械設計に関して、設置許可基準規則に適合するよう、次の基本的設計方針を満足する設計とする。

- 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、原子炉冷却系統、原子炉停止系統、反応度制御系統、計測制御系統及び安全保護回路(安全保護系)の機能と併せて機能することに**よって**燃料要素の許容損傷限界を超えない設計とする。
- 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。
- 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を保持する設計とする。
- 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。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 日

## (2) 具体的設計方針

設置許可基準規則第十五条第 2 項では、「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。」と要求されている。燃料要素の許容損傷限界のうち、機械設計に係るものとして、「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」(平成 2 年 8 月 30 日原子力安全委員会決定)における判断基準の一つである「燃料被覆管は機械的に破損しないこと。」がある。この要求については、「燃料被覆管は機械的に破損しないこと」の解釈の明確化について(昭和 60 年 7 月 18 日原子力安全委員会了承)において、「被覆管の過歪による損傷を防止する条件、即ち「被覆管の円周方向の平均塑性歪が 1% 以下であること」で代表させることによって、運転時の異常な過渡変化時の系統的な燃料損傷を防止することができると判断する。」と述べられている。被覆管の過ひずみはペレット-被覆管機械的相互作用によって生ずるものが支配的であり、ペレットの熱膨張量と関係付けられることから、熱的指標である線出力密度によって評価可能である。このことから、燃料の機械設計においては、設置許可基準規則第十五条第 2 項の要求を満たすことを確認するため、下記を具体的な設計方針として、燃料棒熱・機械設計評価を実施する。

- 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。なお、この条件が満たされることは、発電用原子炉設置(変更)許可申請等において確認される。

設置許可基準規則第十五条第 5 項では、「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。」と要求されている。また、同規則第十五条第 6 項第 1 号では、燃料体について「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。」と要求されている。燃料の機械設計においては、これらの要求を満たすことを確認するため、下記を具体的な設計方針として、解析評価を実施する。

- 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(以下「限界内圧」という。)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。

設置許可基準規則第十五条第 4 項「燃料体(中略)は、(中略)流体振動(中略)により損傷を受けないものでなければならない。」及び第 6 項第 2 号「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。」も含めて、同規則第十五条第 4 項から第 6 項の要求を満たすことを確認するため、上記の解析評価のほかに、被覆管の水素化、フレッテ

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 日

リング腐食、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 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 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.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 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.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 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.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 日

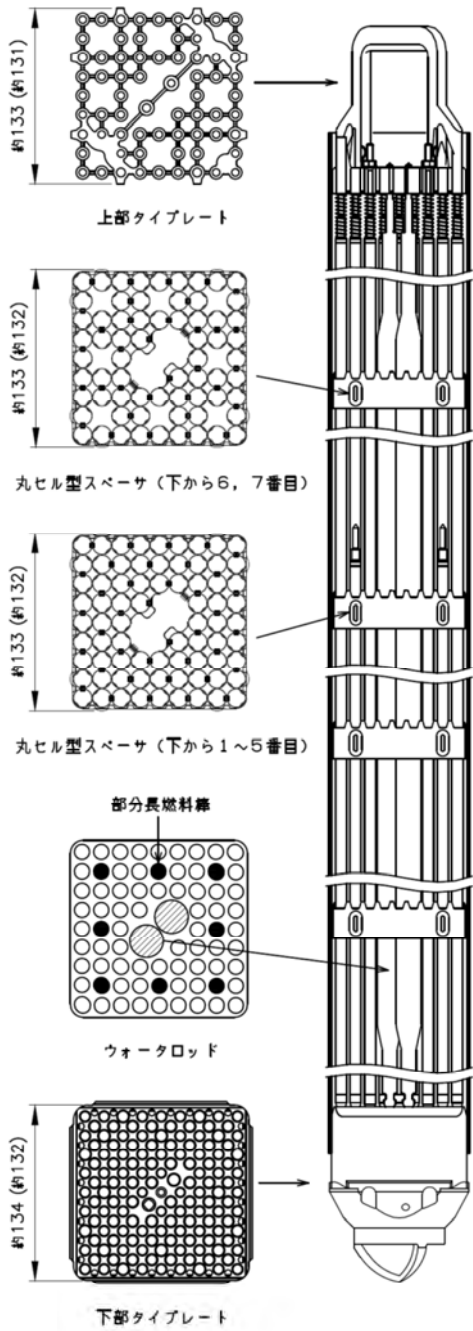
第 3-1 表 GNF3 型の基本仕様

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.2
提出年月日	2023年10月17日

(単位: mm)



9×9 燃料 (A 型)

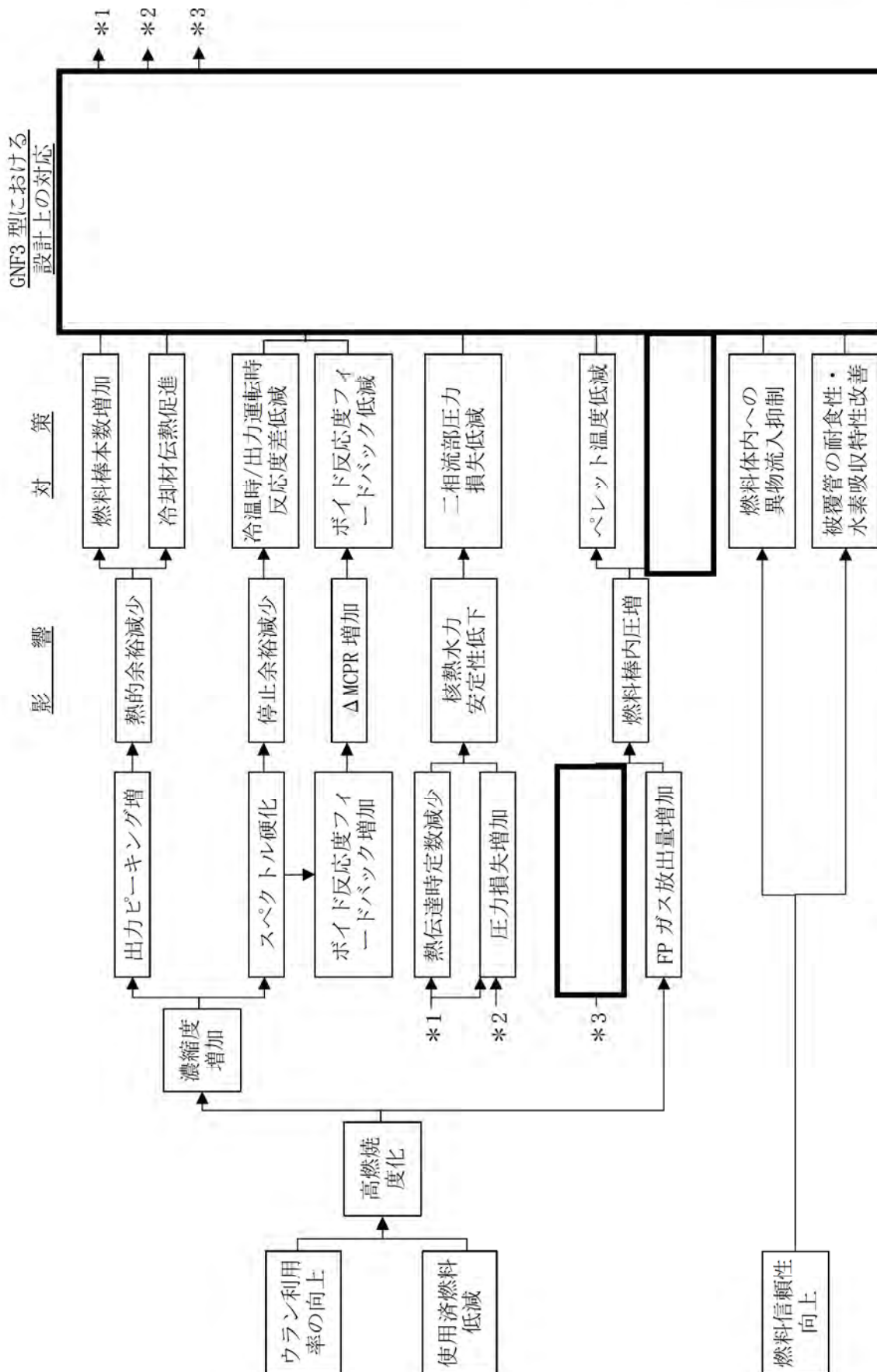
GNF3 型

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。

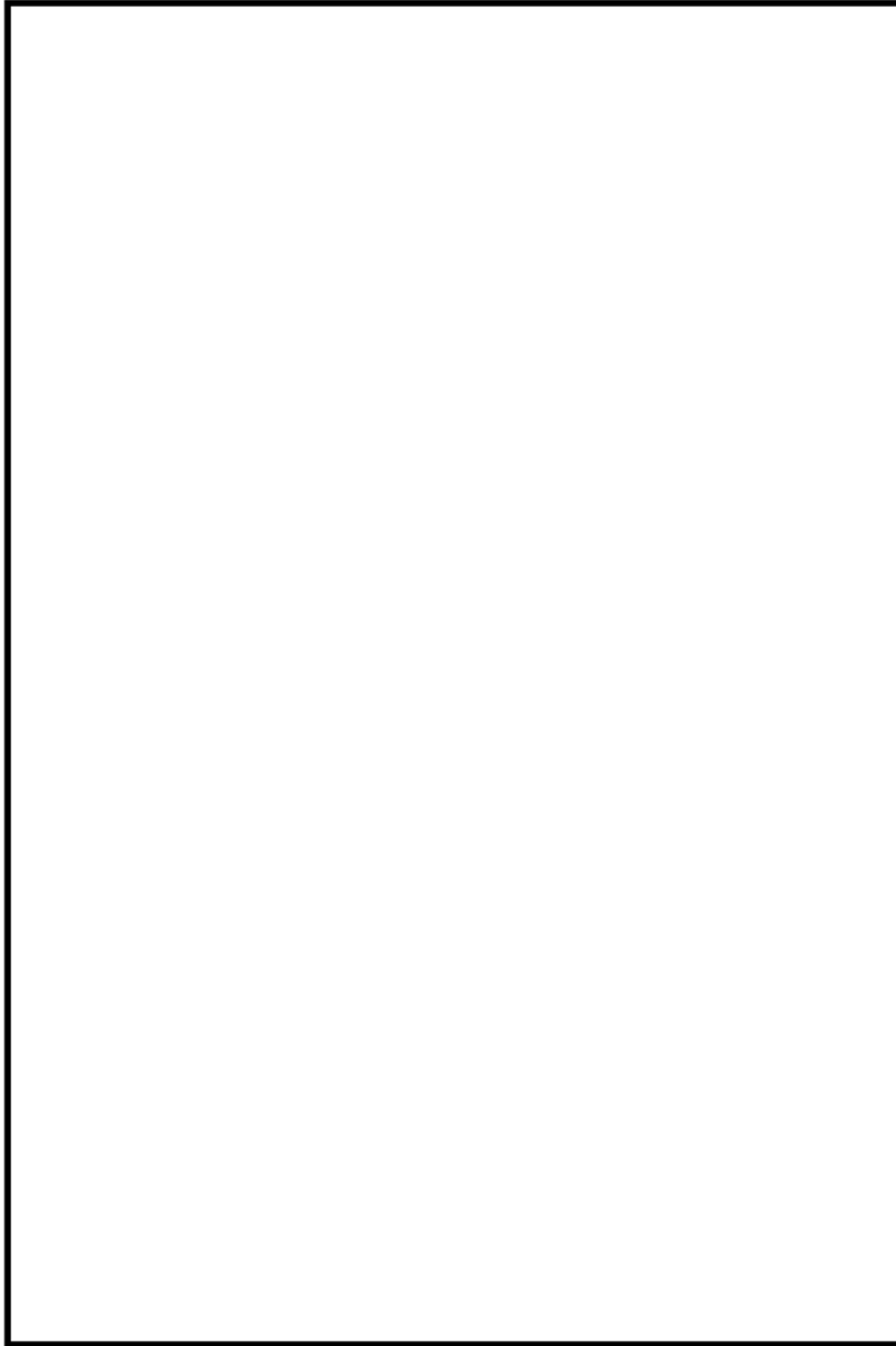
第 3-1 図 GNF3 型の構造図

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2
提出年月日	2023年10月17日



第3-2図 GNF3型の主な設計目標と対応

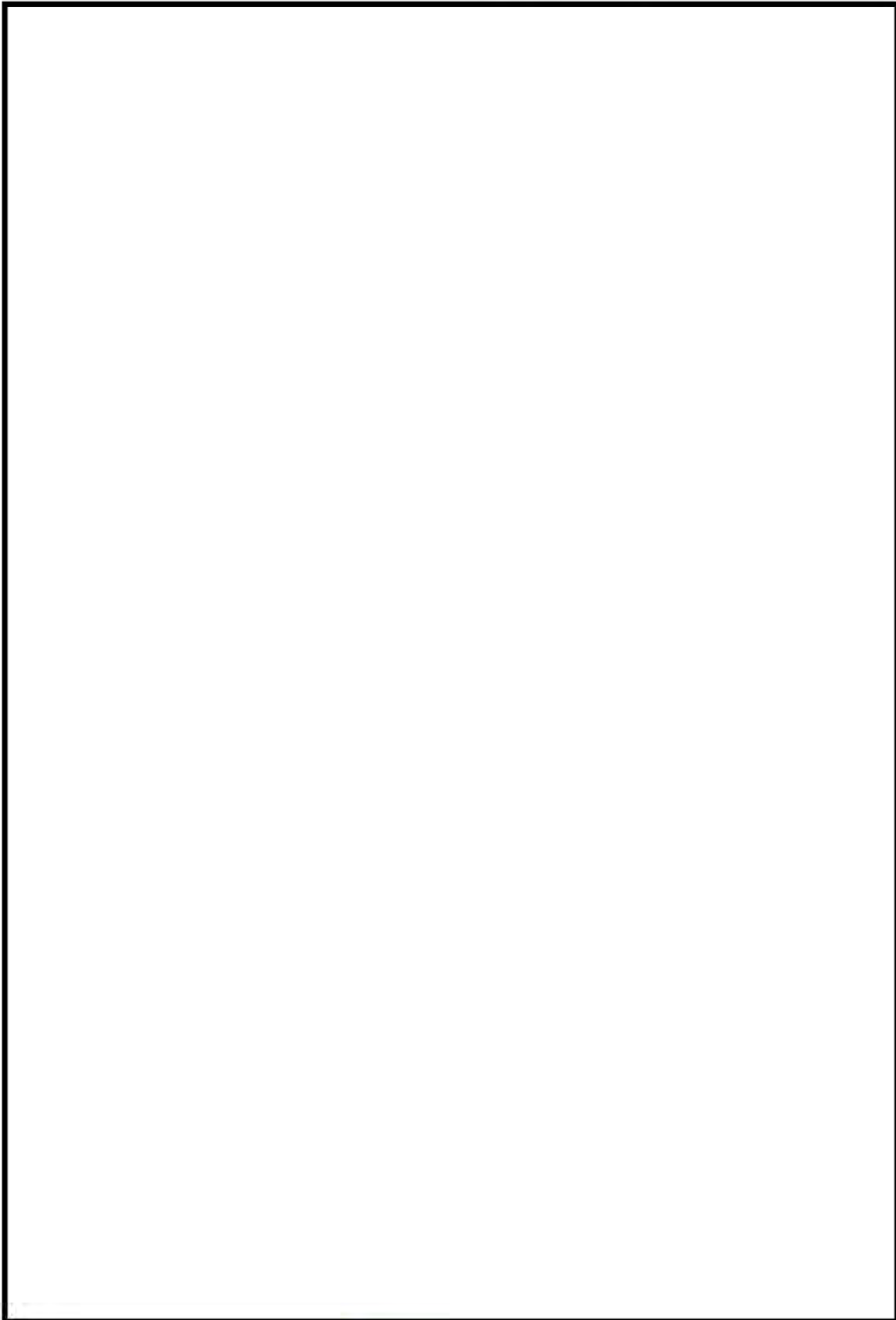
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 日



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.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 日



第 3-4 図 スペーサ



GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2
提出年月日	2023年10月17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、冷温時 (②の状態) において炉心反応度が最大となる。(冷温時と出力運転時の反応度差を冷温時－出力運転時反応度差という。)

このとき (冷温時)、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。

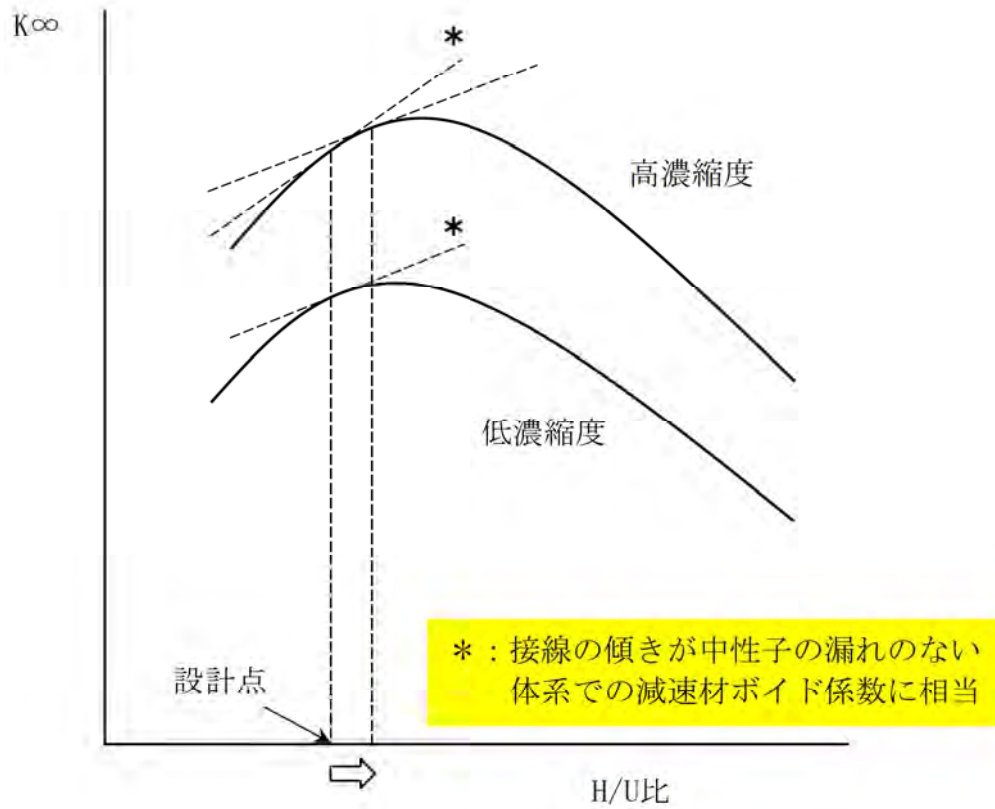
H/U 比と冷温時出力運転時反応度差の関係を第 3-7 図に示す。この図に示すとおり、高燃焼度化のため濃縮度増加を図るとき、H/U 比を増加させないと中性子スペクトルが硬化し、冷温時出力運転時反応度差が増加することとなる。このため、格子形状を変えずに高燃焼度化 (濃縮度増加) を図ると、第 3-6 図の破線に示すように原子炉の停止余裕が減少することになる。

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冷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.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 日

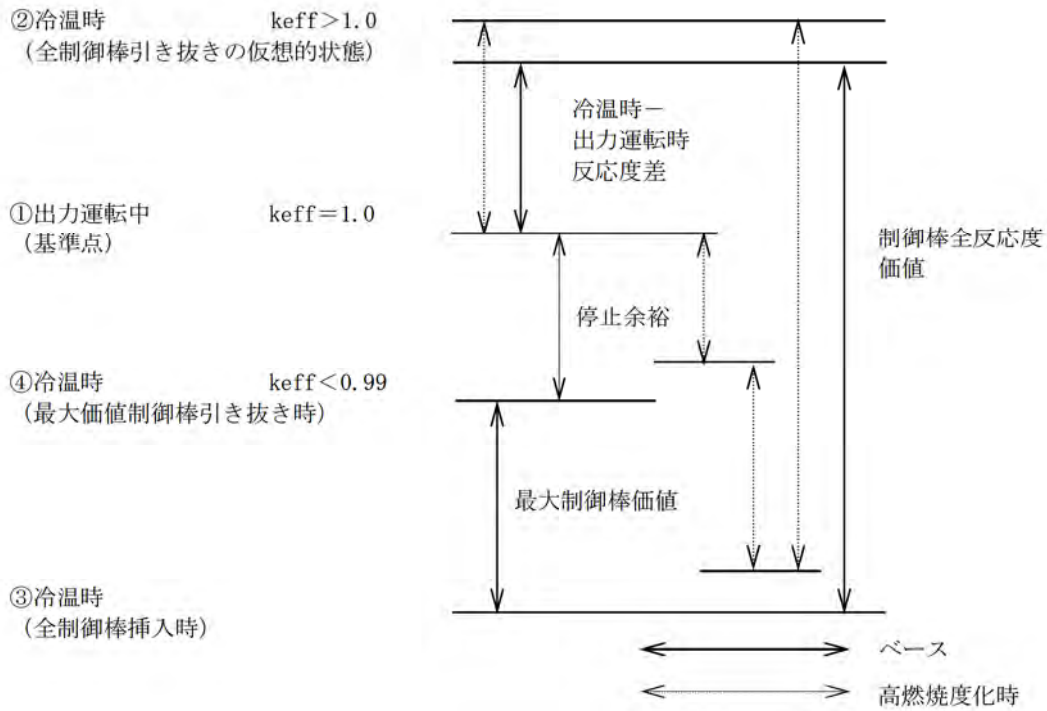
できる。したがって、  
及び部分長燃料棒を採用する GNF3 型は、9×9 燃料（A 型）と同様に燃料上部における冷温時での反応度が抑制されて、原子炉の停止余裕が改善されることになる。さらに、  
ことで、H/U 比の適正化効果をより大きくしている。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2
提出年月日	2023年10月17日

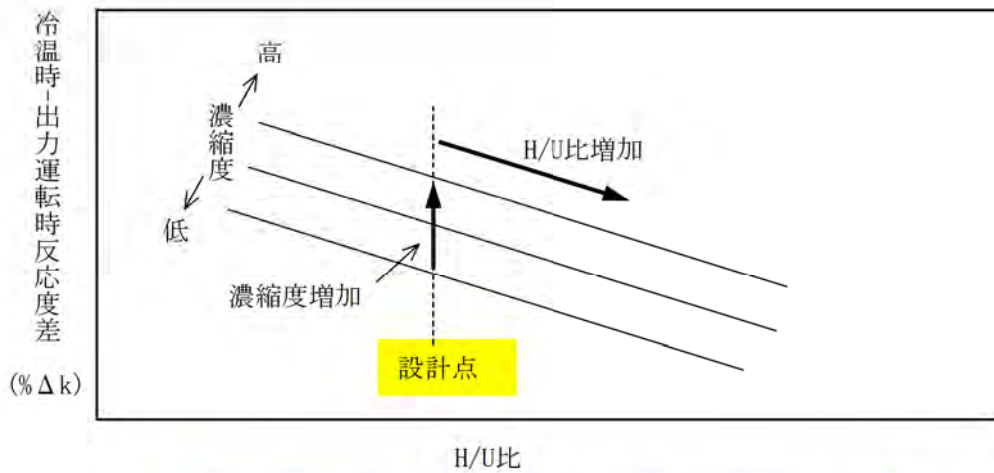


第 3-5 図 中性子の漏れのない体系での減速材ボイド係数に対する H/U 比及び濃縮度の影響

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2
提出年月日	2023年10月17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 比と冷温時-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.2
提出年月日	2023年10月17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.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 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、フレット腐食、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.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 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

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

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.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 日

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。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 日

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

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.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 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
最大線出力密度	44.0 kW/m
炉内滞在年数	8 年

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

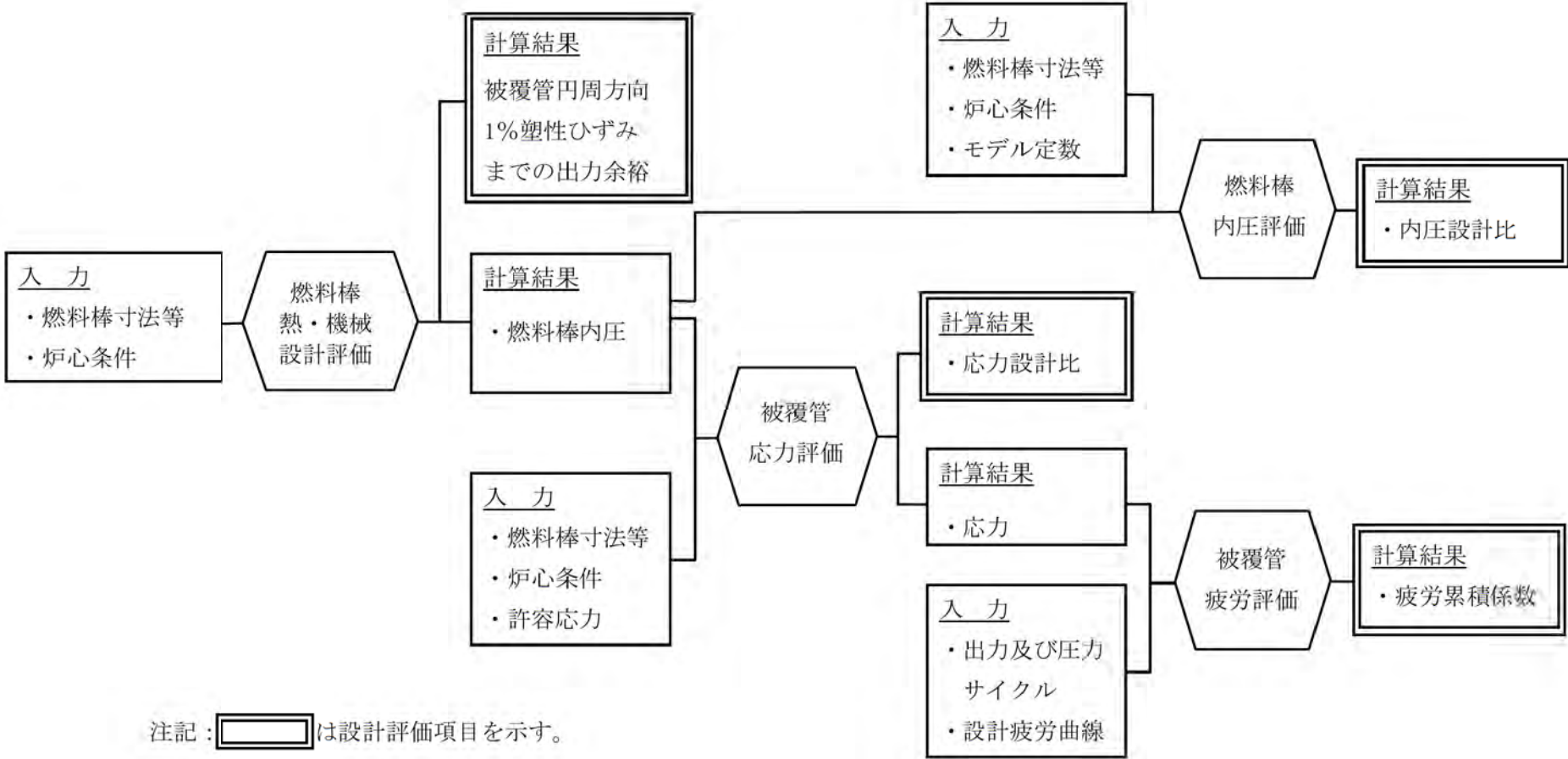
統計入力変数
コードの予測の不確かさ
冷却材圧力
ペレット-被覆管ギャップ
被覆管肉厚
燃料有効長
プレナム体積
ガドリニア濃度 <sup>*1</sup>
ペレット密度
スタック密度
ペレット焼きしまり
ペレット粒径 <sup>*2</sup>
ペレット表面粗さ
被覆管内面粗さ
ヘリウム封入圧
クラッド付着速度
酸化膜生成速度

<sup>\*1</sup> ガドリニア燃料棒の場合に適用する。

<sup>\*2</sup> 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。

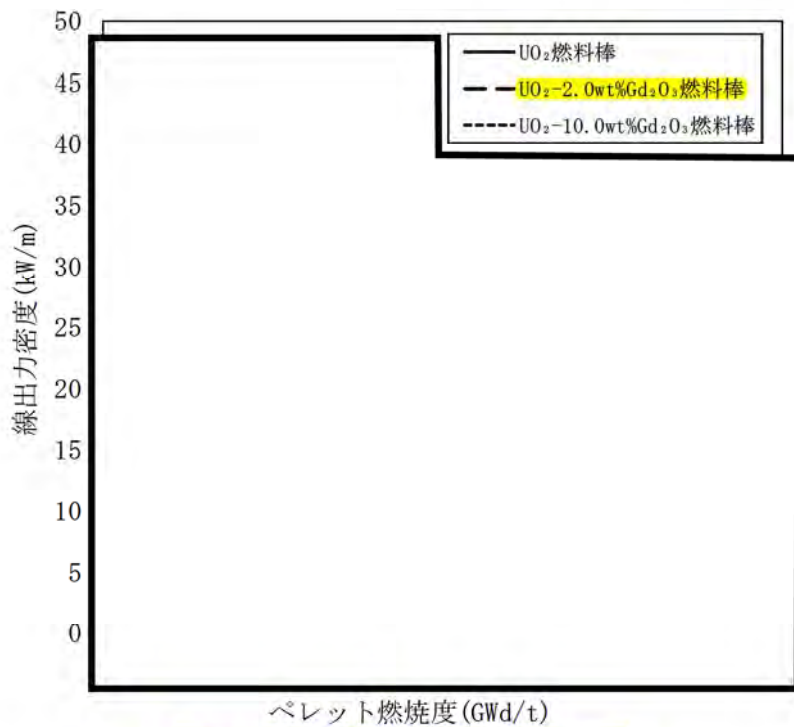
内は商業機密のため、非公開とします。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 日

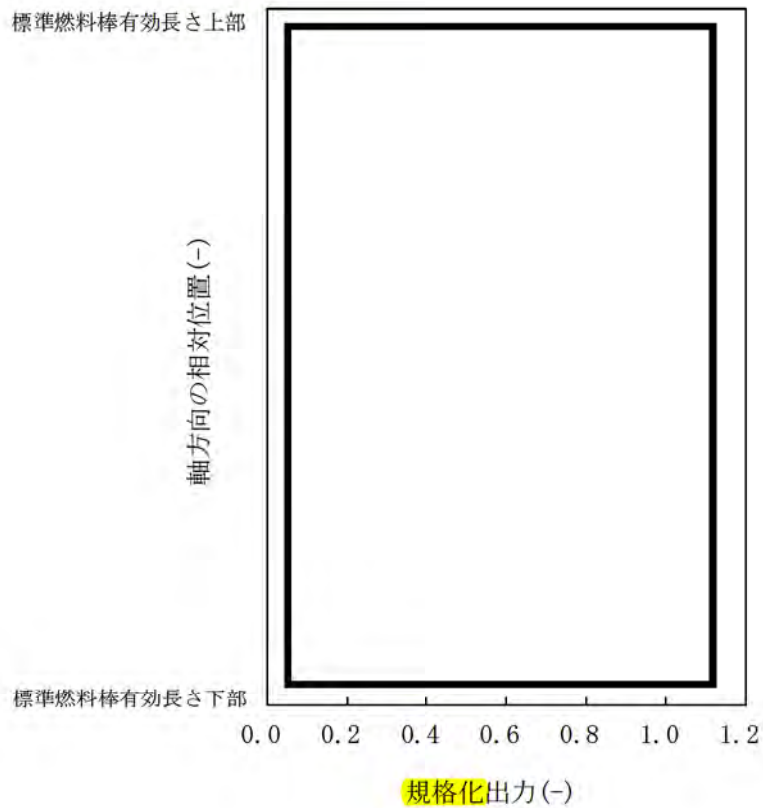


第 4-1 図 GNF3 型の燃料設計解析評価の概略フロー

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2
提出年月日	2023年10月17日



第 4-2 図 GNF3 型の設計用出力履歴

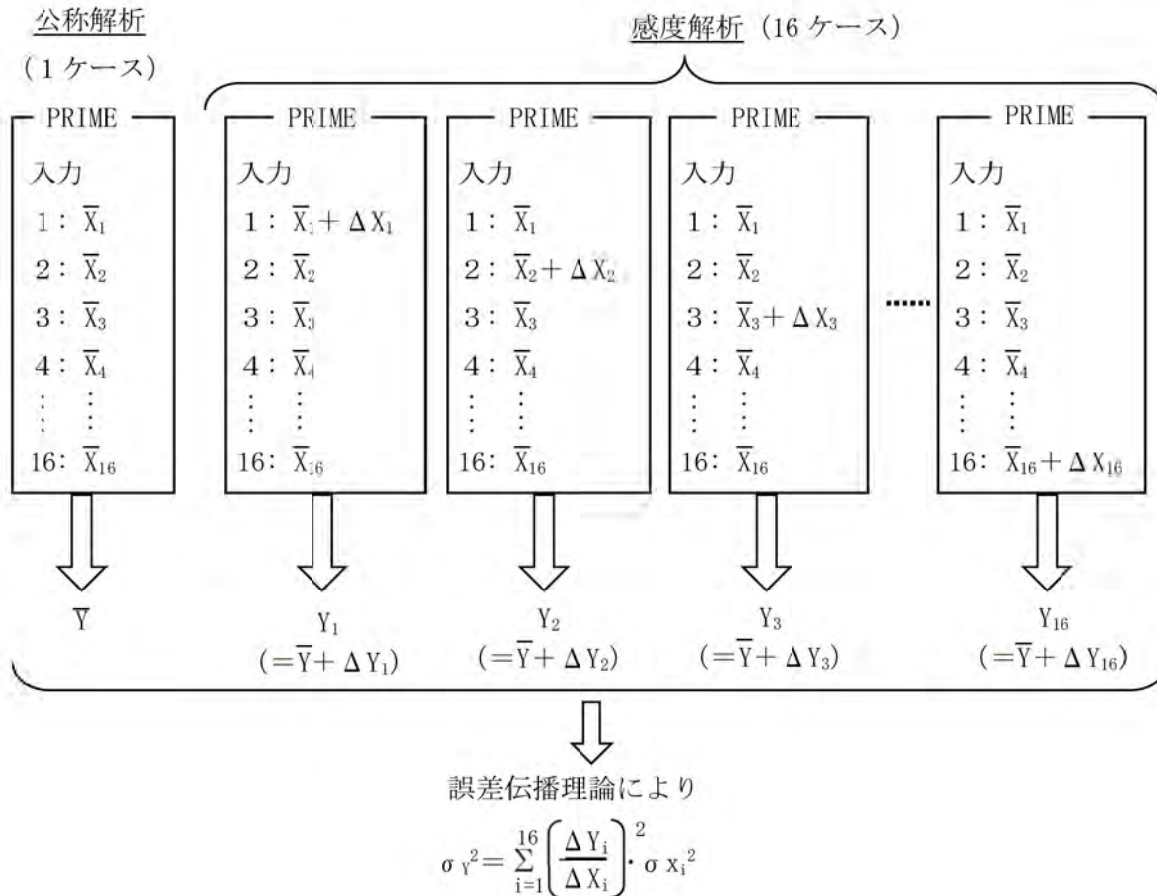


第 4-3 図 GNF3 型の燃料棒熱・機械設計評価における軸方向出力分布  
(燃料棒内圧計算)

□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.2
提出年月日	2023年10月17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。

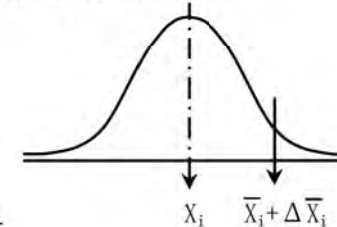
#### 入力変数 (1~16)

- (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。



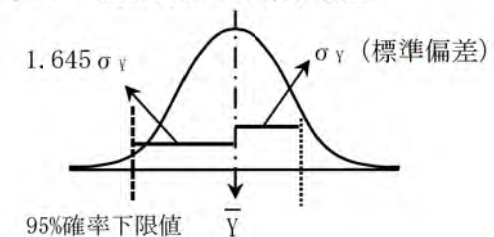
#### 解析結果

$Y$ : 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

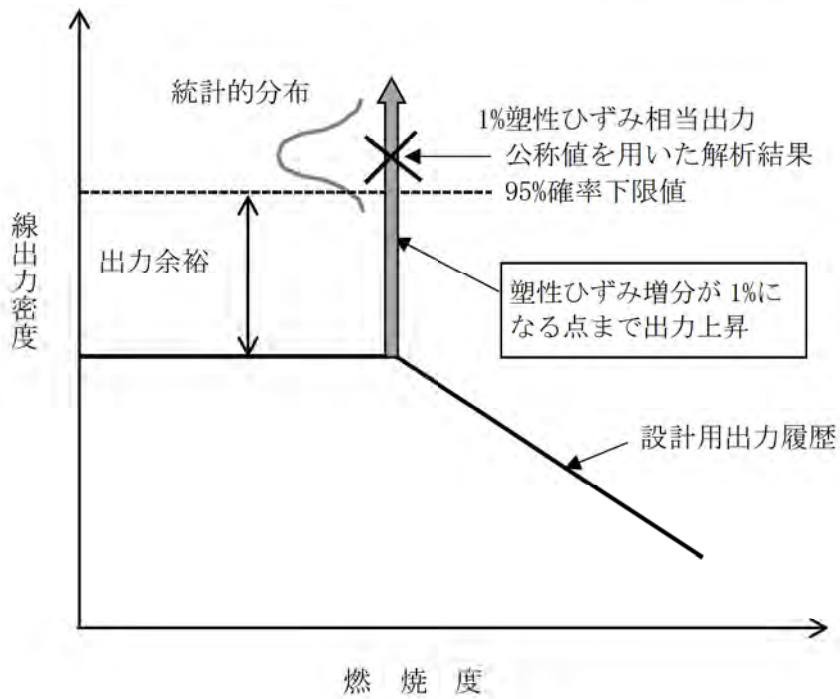
$\bar{Y}$ : 公称値

$\Delta Y_i$ : 各感度解析結果と公称解析結果との差

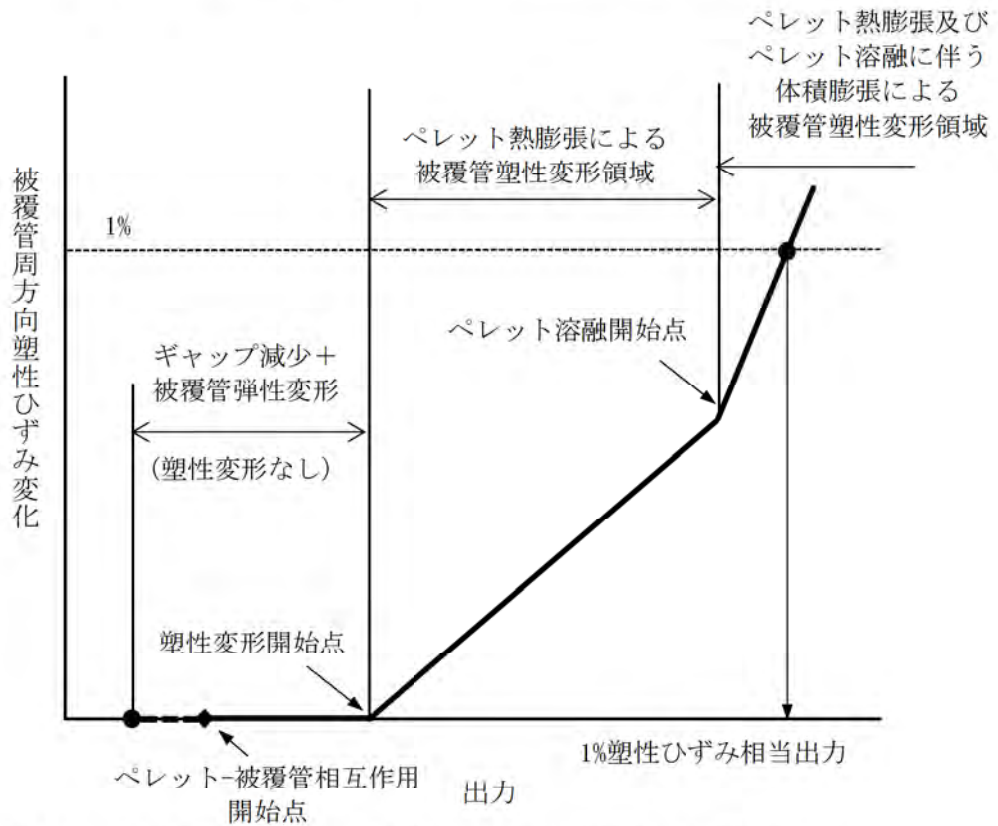
$\sigma_Y$ :  $Y$  の統計的分布の標準偏差



第 4-4 図 燃料棒熱・機械設計評価における統計評価方法



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

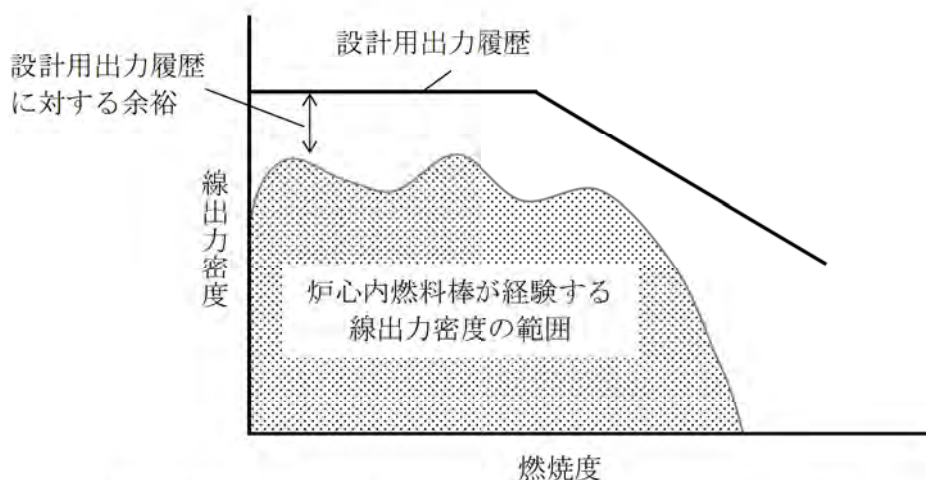
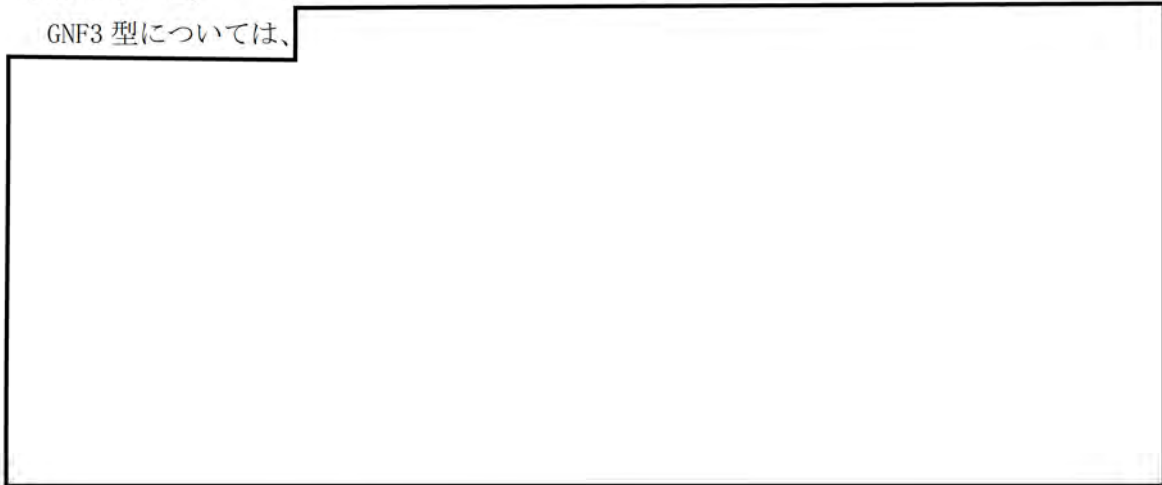
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 日

(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> 燃料棒より大きくなっていった。

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.2
提出年月日	2023 年 10 月 17 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)

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.2 付録-1
提出年月日	2023年10月17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、ペレット中心温度及び燃料棒内圧等の熱的挙動を評価するとともに、有限要素法により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ともなう低下、高燃焼度領域でペレット外周部に微細組織変化(リム組織の形成)等の知見を導入して、高燃焼度での予測精度を向上させている。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・保安院の技術審査がなされており、妥当であると判断されている<sup>(2)</sup>。

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ごく一部を変更している。これらの変更による PRIME03 解析結果への影響は小さいことを確認している。

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 コードの構成

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ウェリング)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 のトピカルレポートからの変更点

##### 3.1 被覆管径方向温度分布の計算

液相膜、クラッド、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  $\Delta T$  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  $\Delta T_{ji}$ 、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

□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.2 付録-1
提出年月日	2023 年 10 月 17 日

液相膜、クラッド、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以下に示す。

(トピカルレポート (5.2-6)式)

$$\Delta T = \boxed{\phantom{\hspace{10em}}}$$

(変更後の式)

$$\Delta T = \boxed{\phantom{\hspace{10em}}}$$

本変更は、被覆管外面温度の上昇をより保守的な評価とし、説明性を向上するために採用したものである。

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、

$\boxed{\phantom{\hspace{10em}}}$

### 3.2 被覆管のクリープモデル式

トピカルレポート発行当時の 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、

$\boxed{\phantom{\hspace{10em}}}$

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、

$\boxed{\phantom{\hspace{10em}}}$

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、モデル式の係数の見直しを行った。

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。

$\boxed{\phantom{\hspace{10em}}}$

(トピカルレポート p. 5.4-9 記載の式)

$$\varepsilon_g^{irr} =$$

$$\boxed{\phantom{\hspace{10em}}}$$

$\boxed{\phantom{\hspace{1em}}}$  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.2 付録-1
提出年月日	2023年10月17日

(変更後の式)

$$\varepsilon_g^{irr} =$$

ここで、

- $\varepsilon_g^{irr}$  : 一般化照射クリープ歪 (-)
- $T$  : 被覆管温度 (°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)

### 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

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.2 付録-1
提出年月日	2023 年 10 月 17 日

レポート記載値の [ ] から [ ] に変更した。

#### 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り、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、[ ] 寿命末期においても、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 [ ] °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り、被覆管周方向クリープ変形量は低下する方向となる。モデル式の変更による、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 [ ] % 小さくなる程度であった。

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歪への影響は、軸方向最大出力となるノードにおいて、変更前に比べ寿命末期で約 [ ] % 大きくなる程度であった。

以上より、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ことを確認した。

##### 4.2 トピカルレポート検証図への影響

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 4-1 ～ 図 4-8 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検証データとして示したものと同等である。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ほとんど差はなく、本変更による PRIME03 解析結果への影響は小さく、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 [ ] % となり変更前（ [ ] % ）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 +2σ 相当上昇させ、かつ、[ ] [ ] ）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

[ ] 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.2 付録-1
提出年月日	2023 年 10 月 17 日

び被覆管直径変化の測定値と計算値との比較を図 4-9～図 4-12 に示す。また、各項目のトピカルレポートに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 12 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ことを確認した。

#### 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り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影響を与えないことを確認した。また、GNF3 型の基本的な燃料仕様は、PRIME03 の適用範囲内にあることを確認した。

以上のことから、PRIME03 は GNF3 型に対して適用可能であることを確認した。

#### 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.2 付録-1
提出年月日	2023 年 10 月 17 日

表 4-1 PRIME03 コード検証データの内訳<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 <sup>®</sup> 試験 ・スーパーラブ <sup>®</sup> 試験 ・オーパーラブ <sup>®</sup> 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 <sup>®</sup> 試験 ・スーパーラブ <sup>®</sup> 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.2 付録-1
提出年月日	2023 年 10 月 17 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"/> *1
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*2
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 燃料棒平均燃焼度は、主として燃料棒内圧に用いる指標のため、燃料棒内圧設計比が最大となる標準燃料棒の値を示す。燃料棒平均燃焼度の PRIME03 適用範囲は、

部分長燃料棒（長尺）の寿命末期における燃料棒平均燃焼度は約  GWd/t であるが、上述のコードの妥当性確認に用いた FP ガス放出率のデータの平均燃焼度 99 GWd/t の範囲内であるため、部分長燃料棒（長尺）についても PRIME03 の適用は可能と考えられる。なお、部分長燃料棒（短尺）の寿命末期における燃料棒平均燃焼度は約  GWd/t であり、コードの適用範囲内である。

\*2 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。

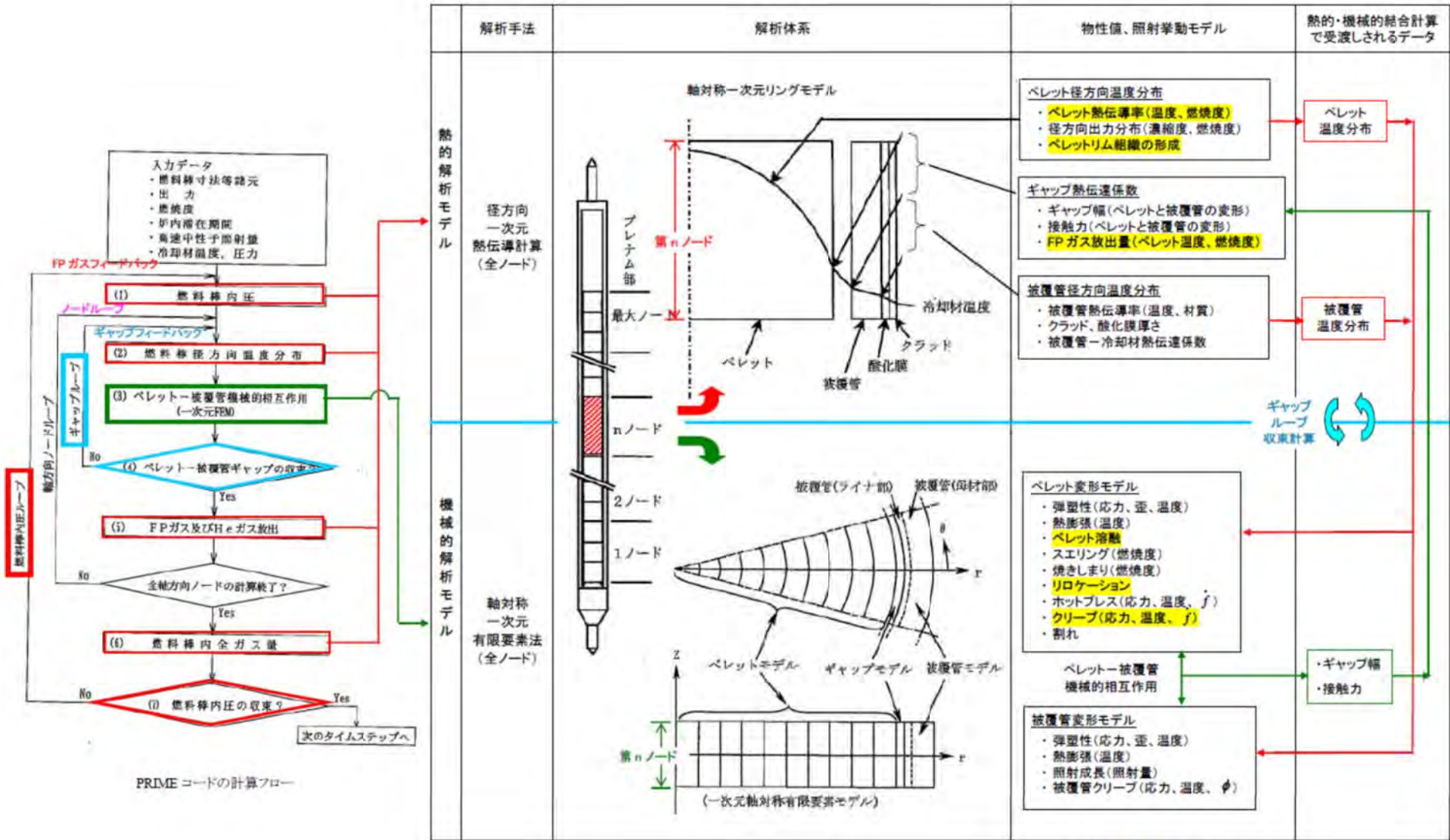


図 2-1 PRIME03 コードの構成及び計算手順<sup>(2)</sup>

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.2 付録-1
提出年月日	2023年10月17日

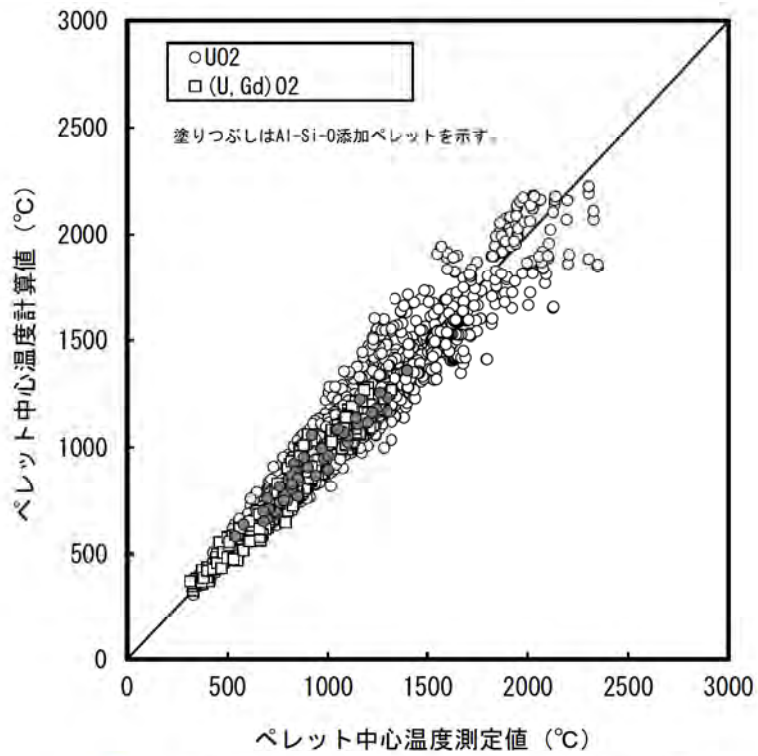
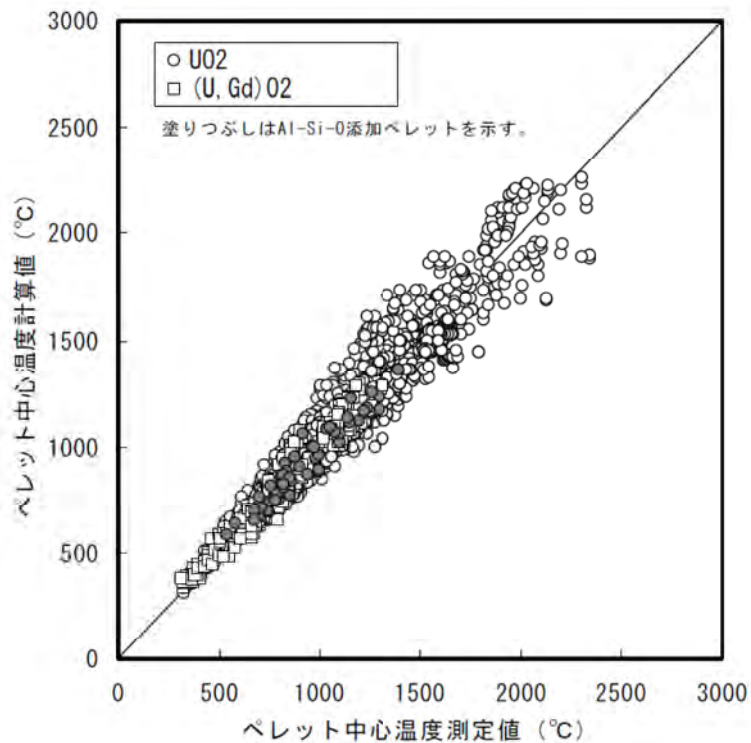


図 4-1 ペレット中心温度の測定値と計算値の比較



(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.2 付録-1
提出年月日	2023年10月17日

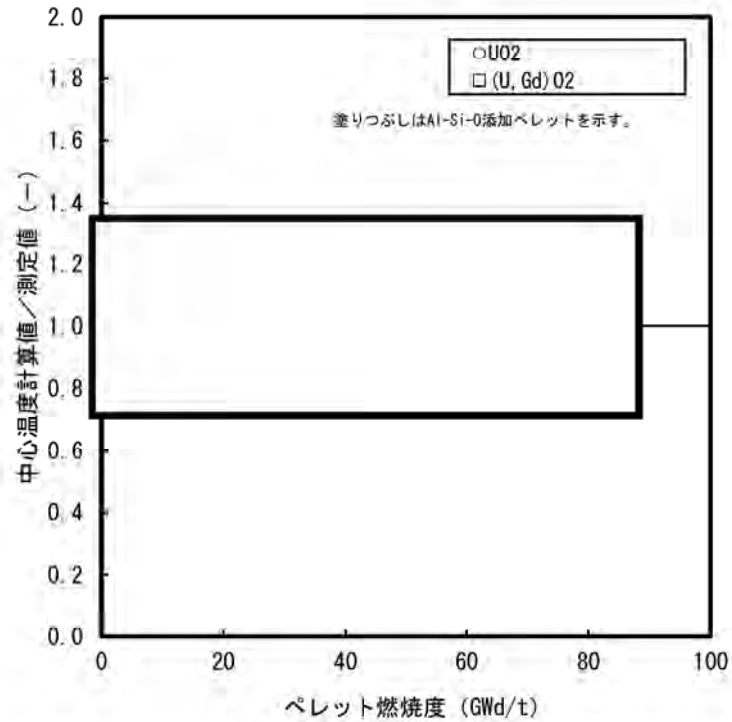
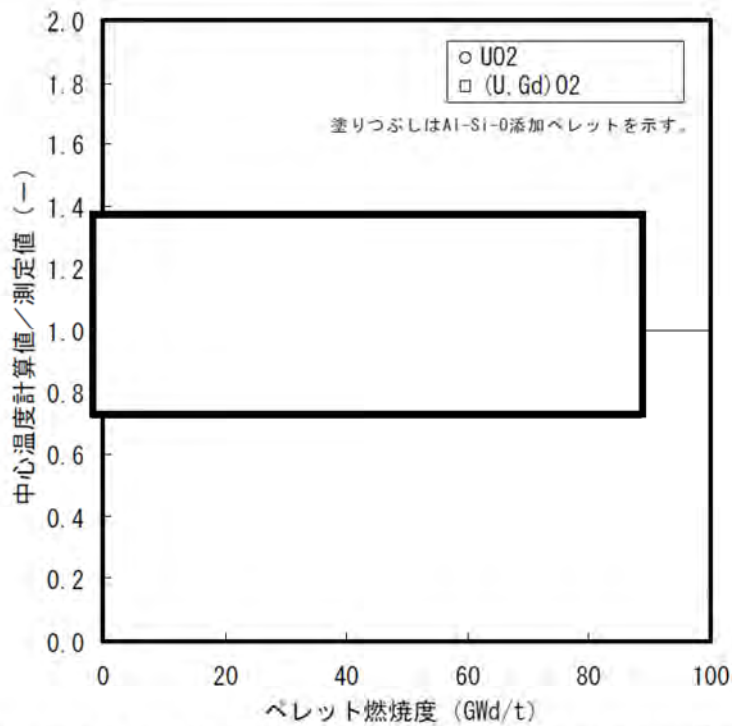


図 4-2 ペレット中心温度の測定値と計算値の比較  
(ペレット中心温度の計算値/測定値の燃焼度変化)



(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) (1)  
(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.2 付録-1
提出年月日	2023年10月17日

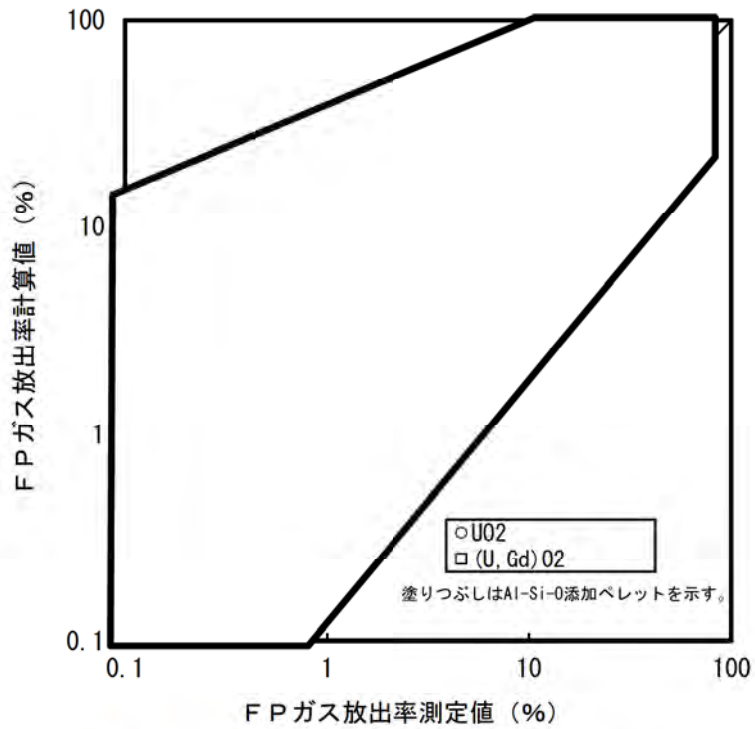
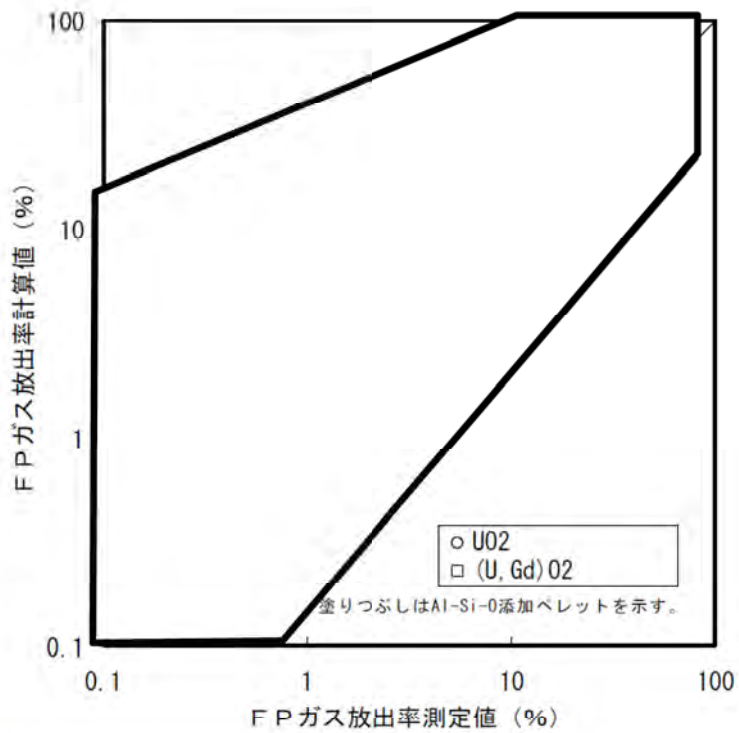


図 4-3 FP ガス放出率の測定値と計算値の比較



(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.2 付録-1
提出年月日	2023年10月17日

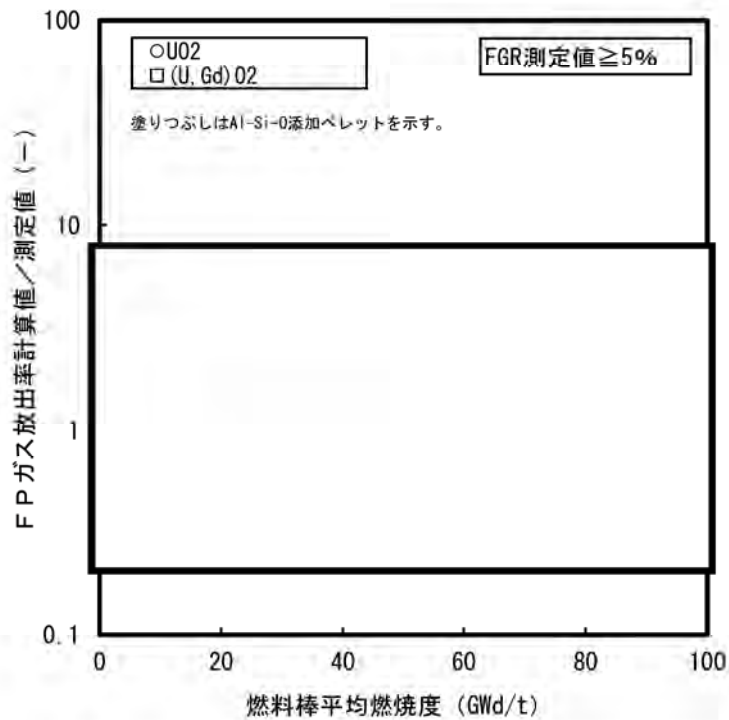
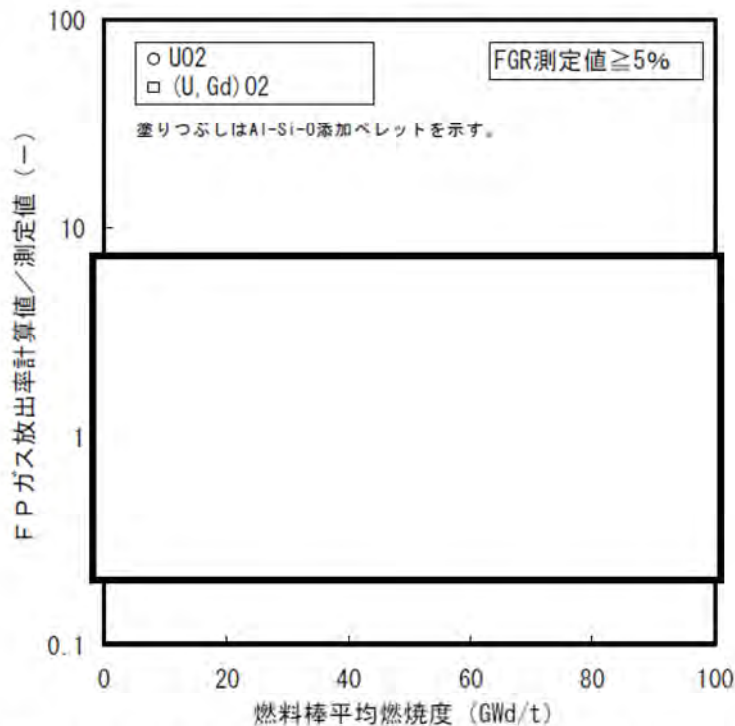


図 4-4(1) FP ガス放出率の測定値と計算値の比較  
(FP ガス放出率の計算値/測定値の燃焼度変化)



(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.2 付録-1
提出年月日	2023年10月17日

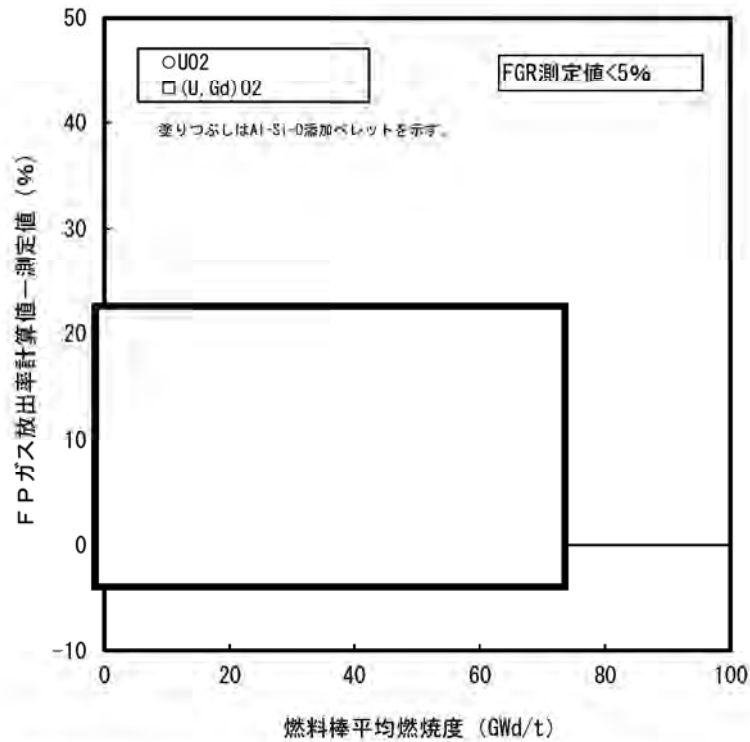
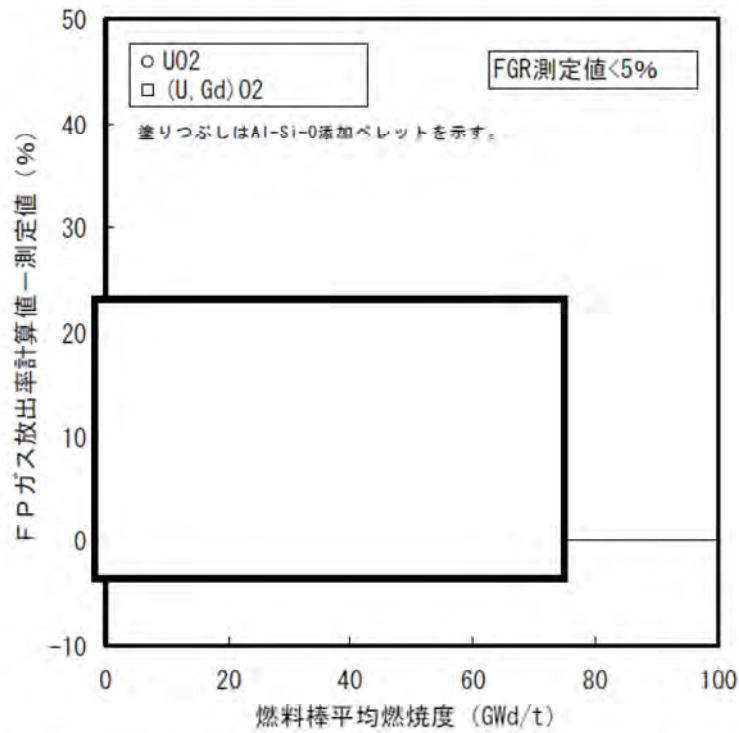


図 4-4(2) FP ガス放出率の測定値と計算値の比較  
(FP ガス放出率の (計算値-測定値) の燃焼度変化)



(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) (1)  
(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.2 付録-1
提出年月日	2023年10月17日

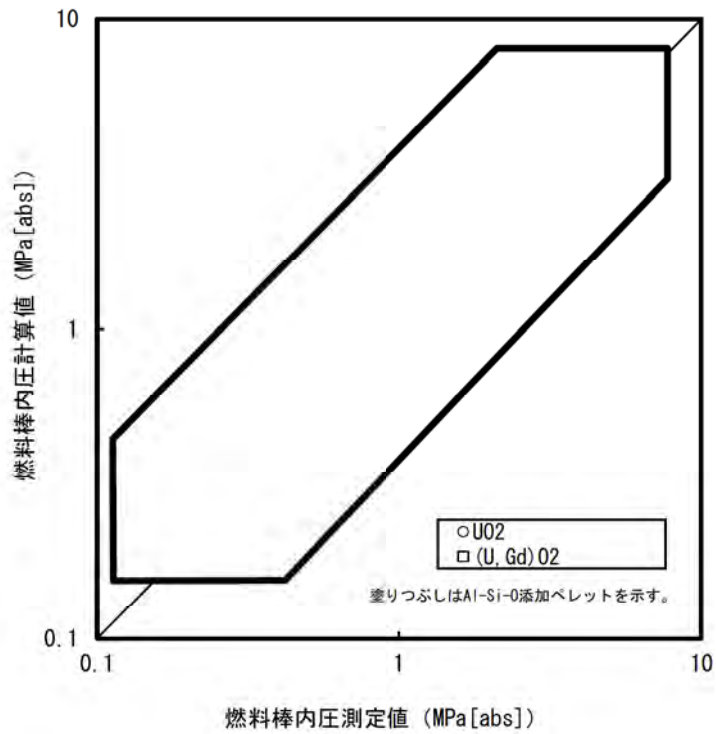
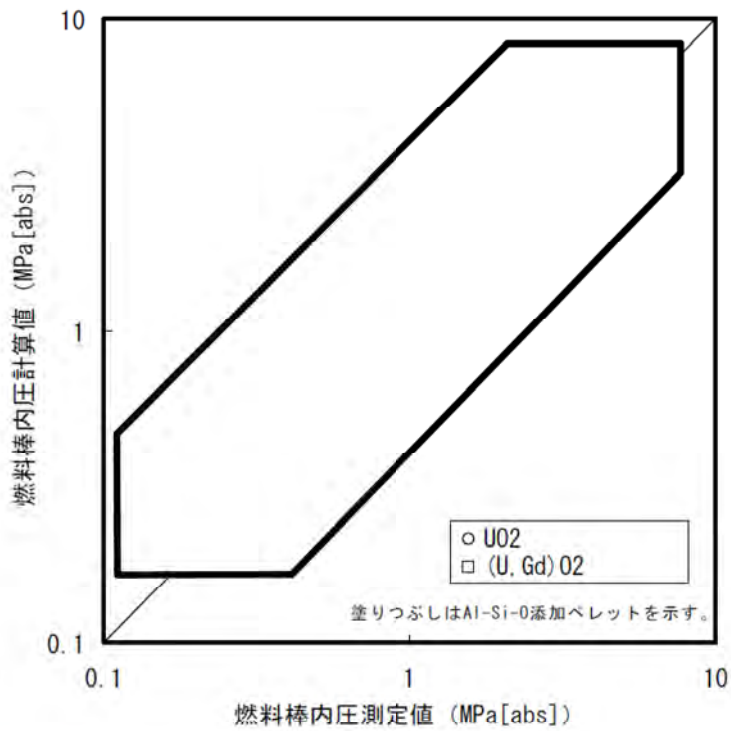


図 4-5 燃料棒内圧の測定値と計算値の比較



(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) (1)

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.2 付録-1
提出年月日	2023年10月17日

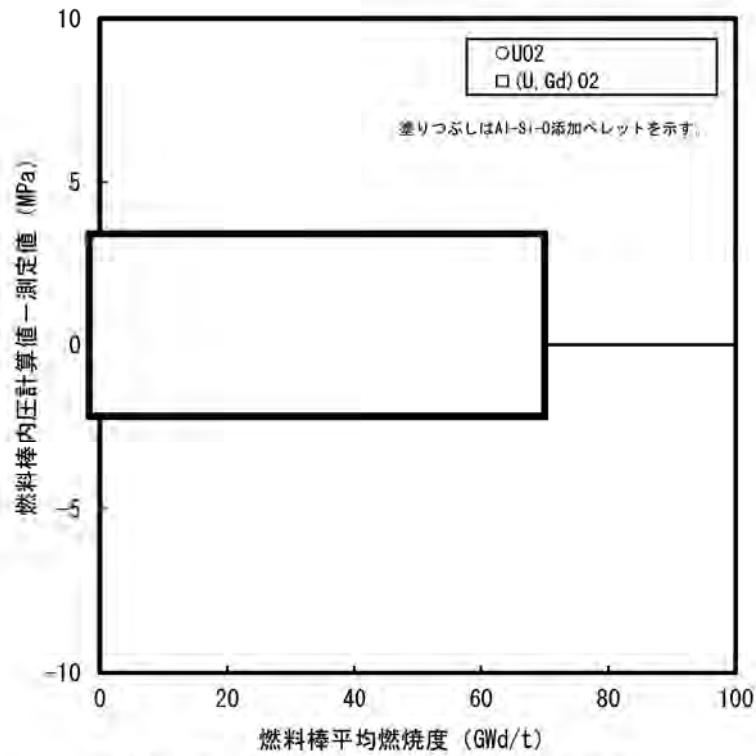
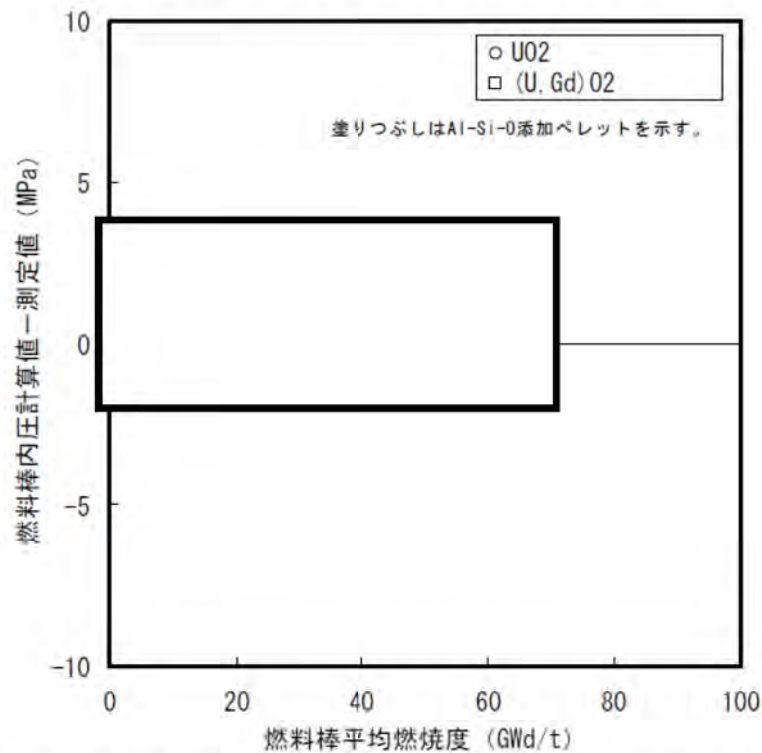


図 4-6 燃料棒内圧の測定値と計算値の比較  
(燃料棒内圧の (計算値-測定値) の燃焼度変化)



(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.2 付録-1
提出年月日	2023年10月17日

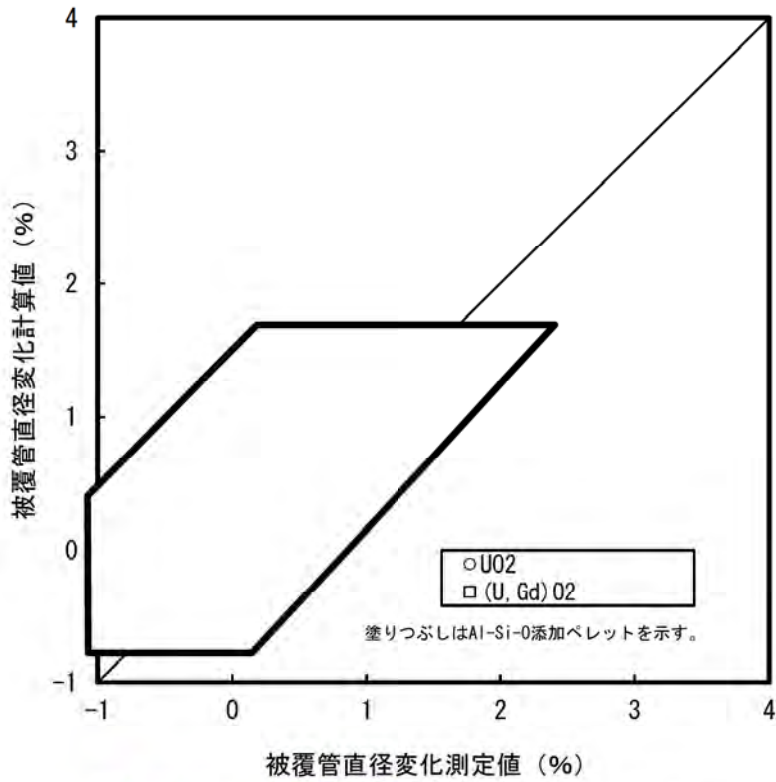
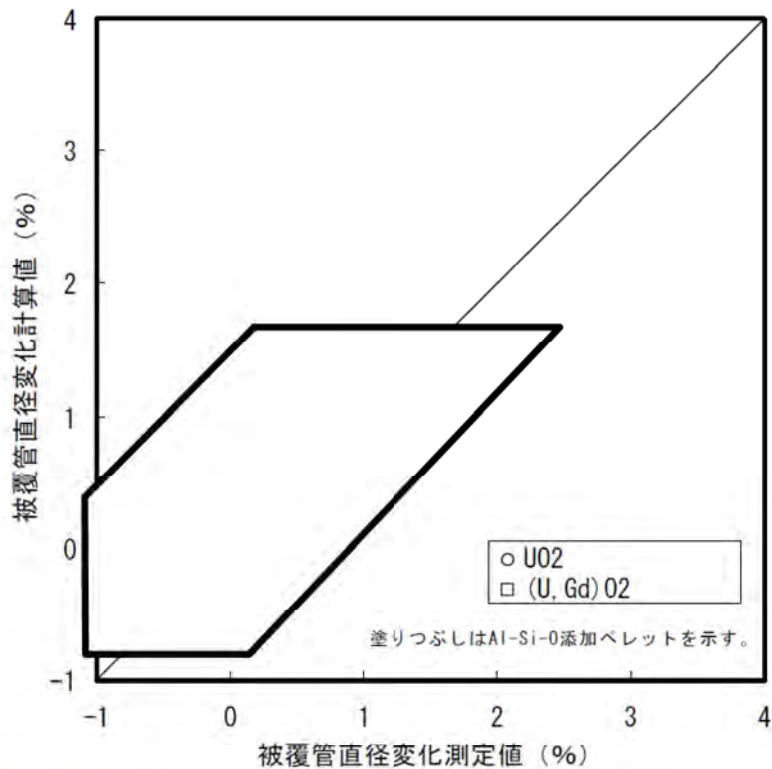


図 4-7 被覆管直径变化の測定値と計算値の比較



(参考図 7) 被覆管直径变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.2 付録-1
提出年月日	2023年10月17日

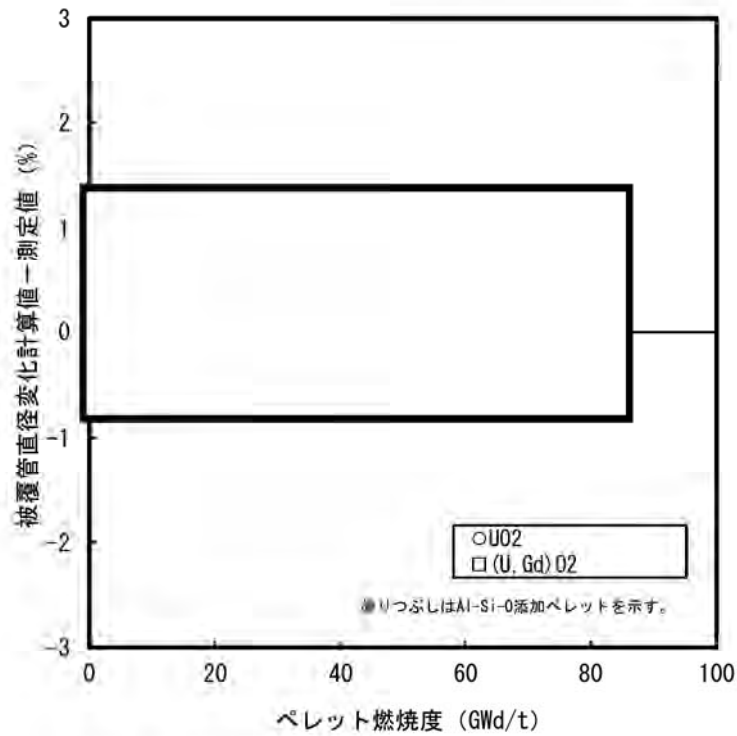
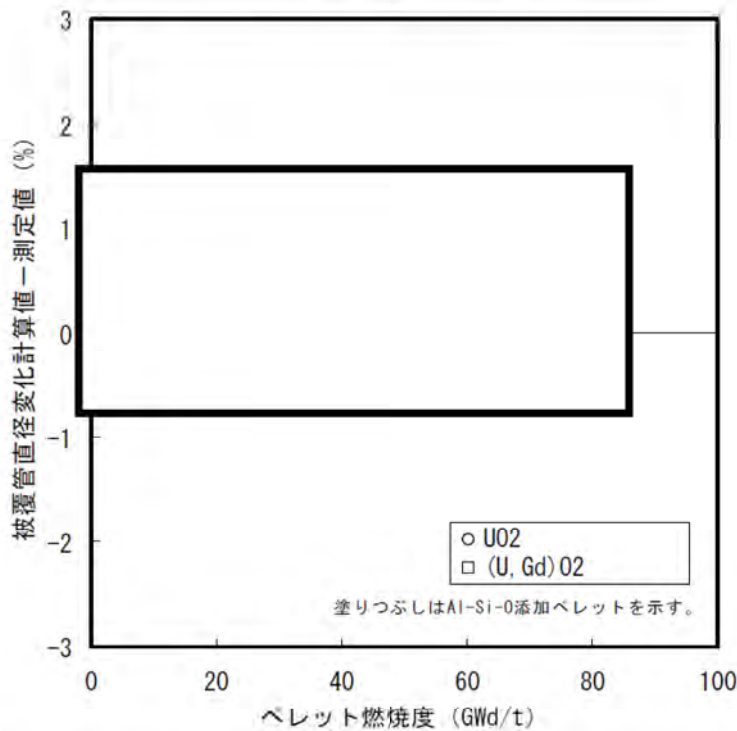


図 4-8 被覆管直径変化の測定値と計算値の比較  
(被覆管直径変化の(計算値-測定値)の燃焼度変化)



(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) (1)  
(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.2 付録-1
提出年月日	2023年10月17日

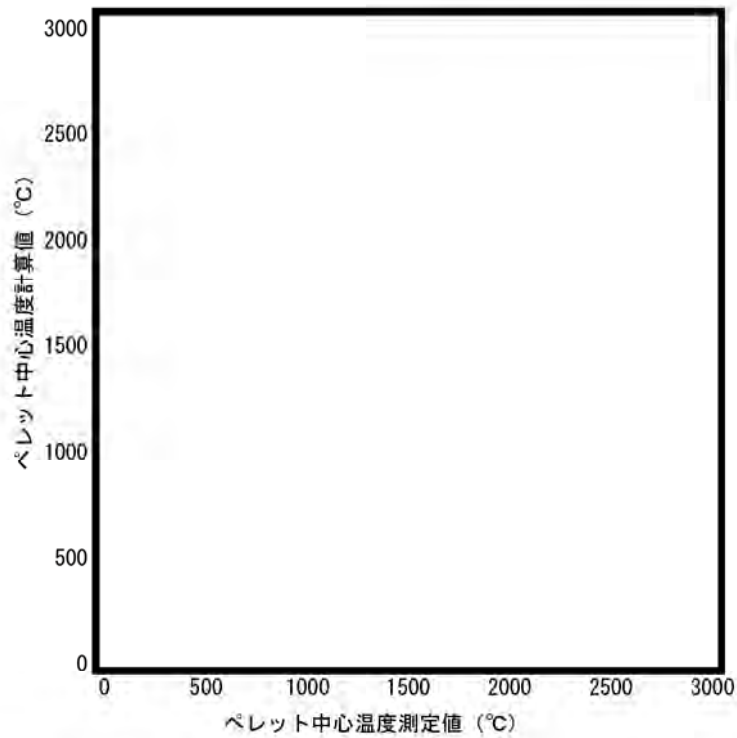
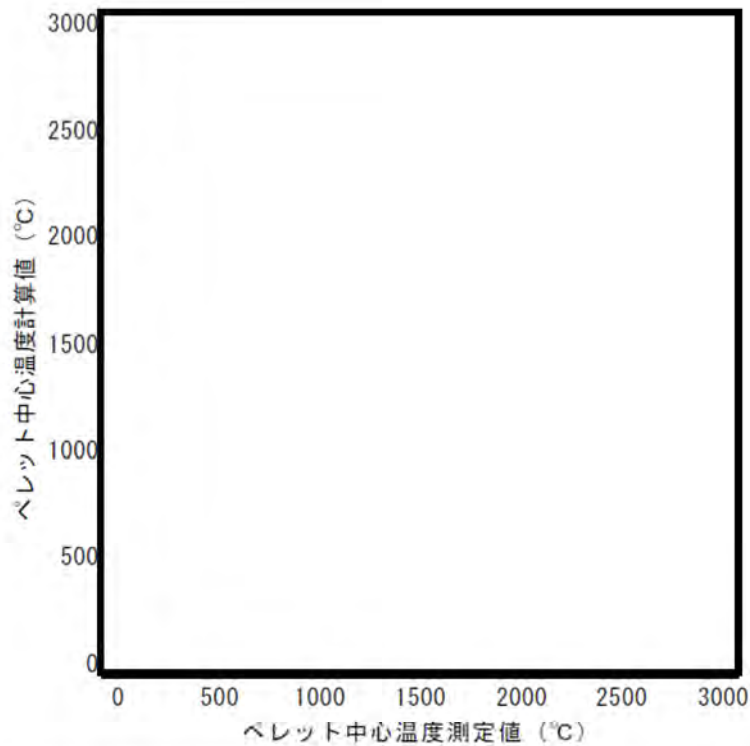


図 4-9 コードの予測の不確かさを考慮したペレット中心温度の測定値と計算値の比較



(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.2 付録-1
提出年月日	2023年10月17日

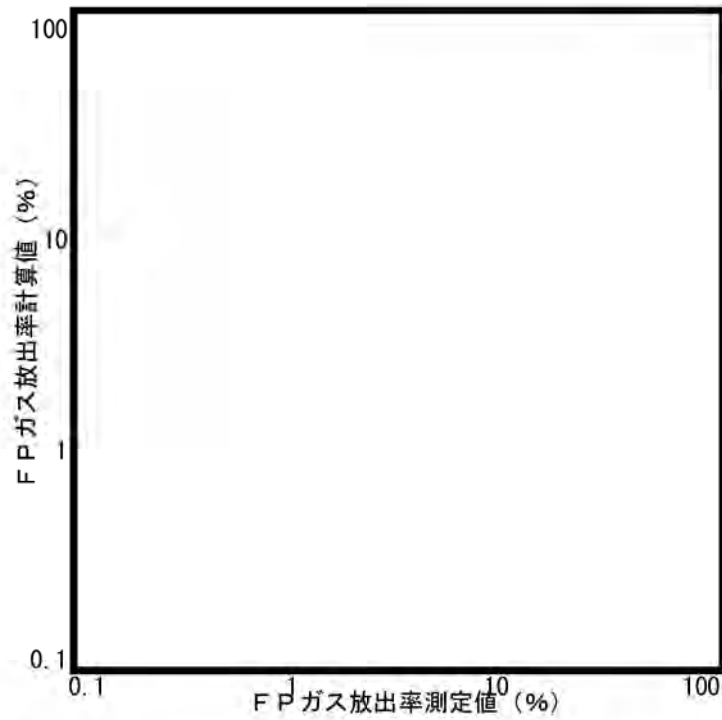
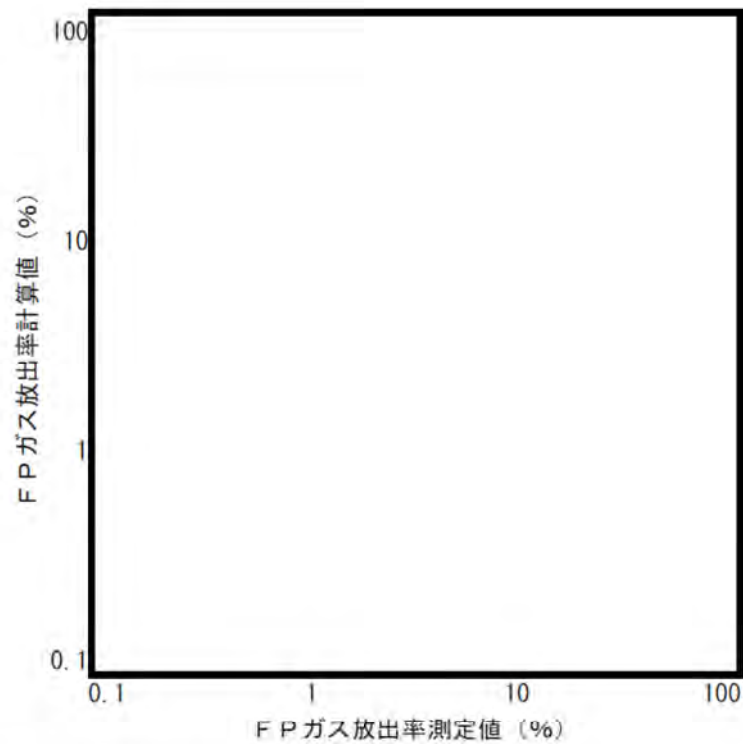


図 4-10 コードの予測の不確かさを考慮した FP ガス放出率の測定値と計算値の比較



(参考図 10) 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.2 付録-1
提出年月日	2023年10月17日

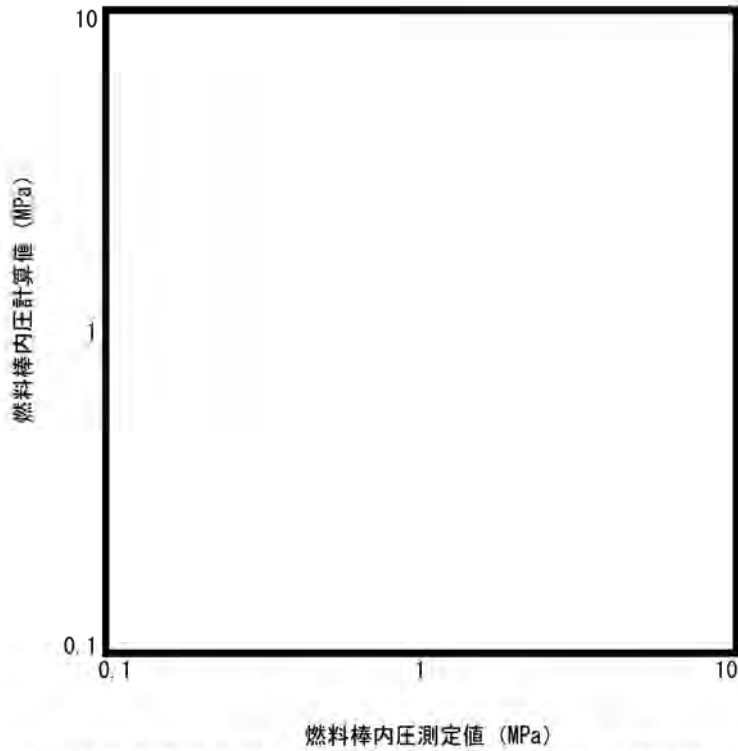
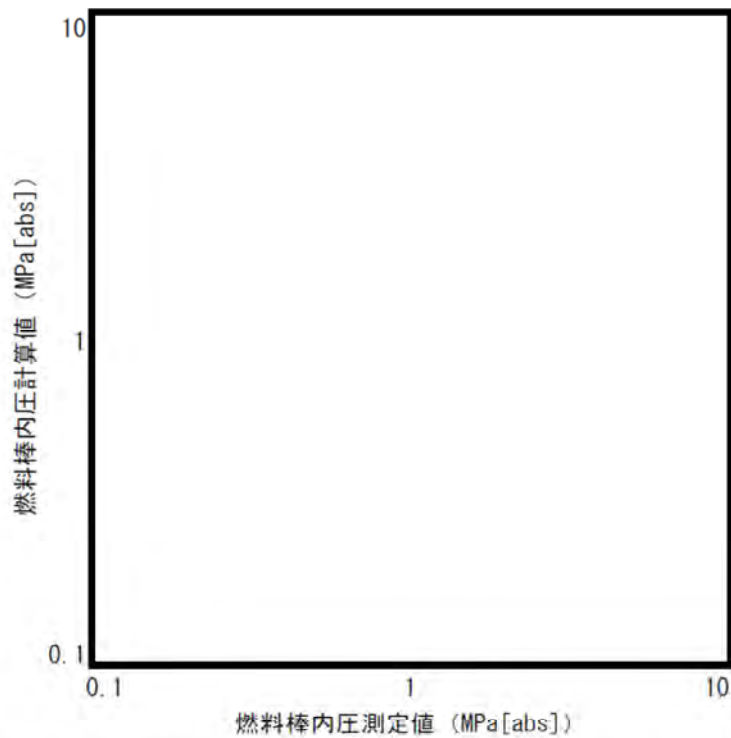


図 4-11 コードの予測の不確かさを考慮した燃料棒内圧の測定値と計算値の比較



(参考図 11) 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.2 付録-1
提出年月日	2023年10月17日

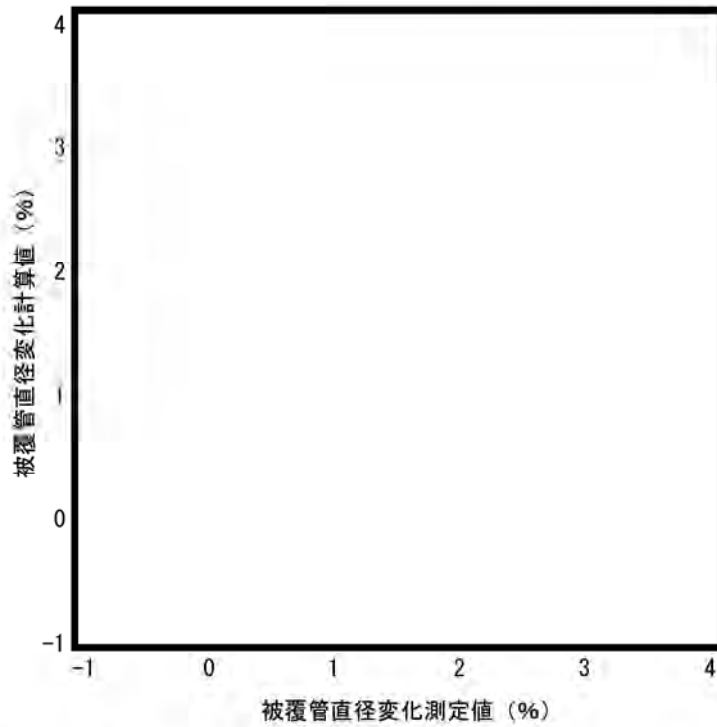
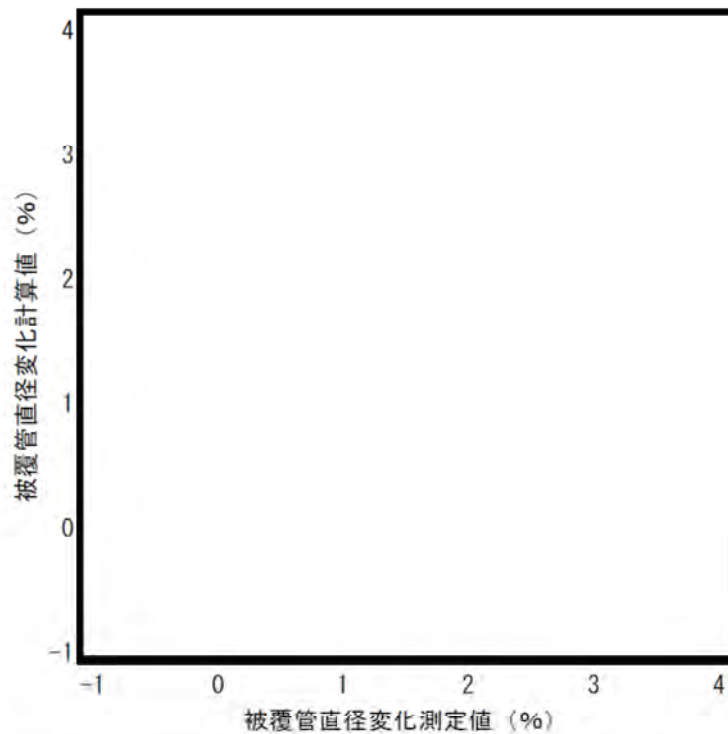


図 4-12 コードの予測の不確かさを考慮した被覆管直径変化の測定値と計算値の比較



(参考図 12) 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。