

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 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 9 月 5 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.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 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
 5. 評価
 6. 参考文献
- 付録

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、それぞれ以下の意味で用いている。

- 文章・・・ Rev. 0 から変更された箇所を示す。
- 図表タイトル・・・ 当該図表が Rev. 0 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 Rev. 0 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.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 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 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 ^{*4}			
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歪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) ベレット-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り生ずる流体振動により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。 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 ^{*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りベ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、ベレット-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	(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) ベレット-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. ベレット-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) ベレット-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、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行い、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.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 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-Ziron¹」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うえ、機械的及び熱的に十分安全であるように設計を行う。

¹ 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.1
提出年月日	2023年9月5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係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以下に示す。

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： PCI²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（PCIOMR³）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。

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

³ PCIOMR: Pre-Conditioning Interim Operating Management Recommendation

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 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良くし、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： 冷却水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

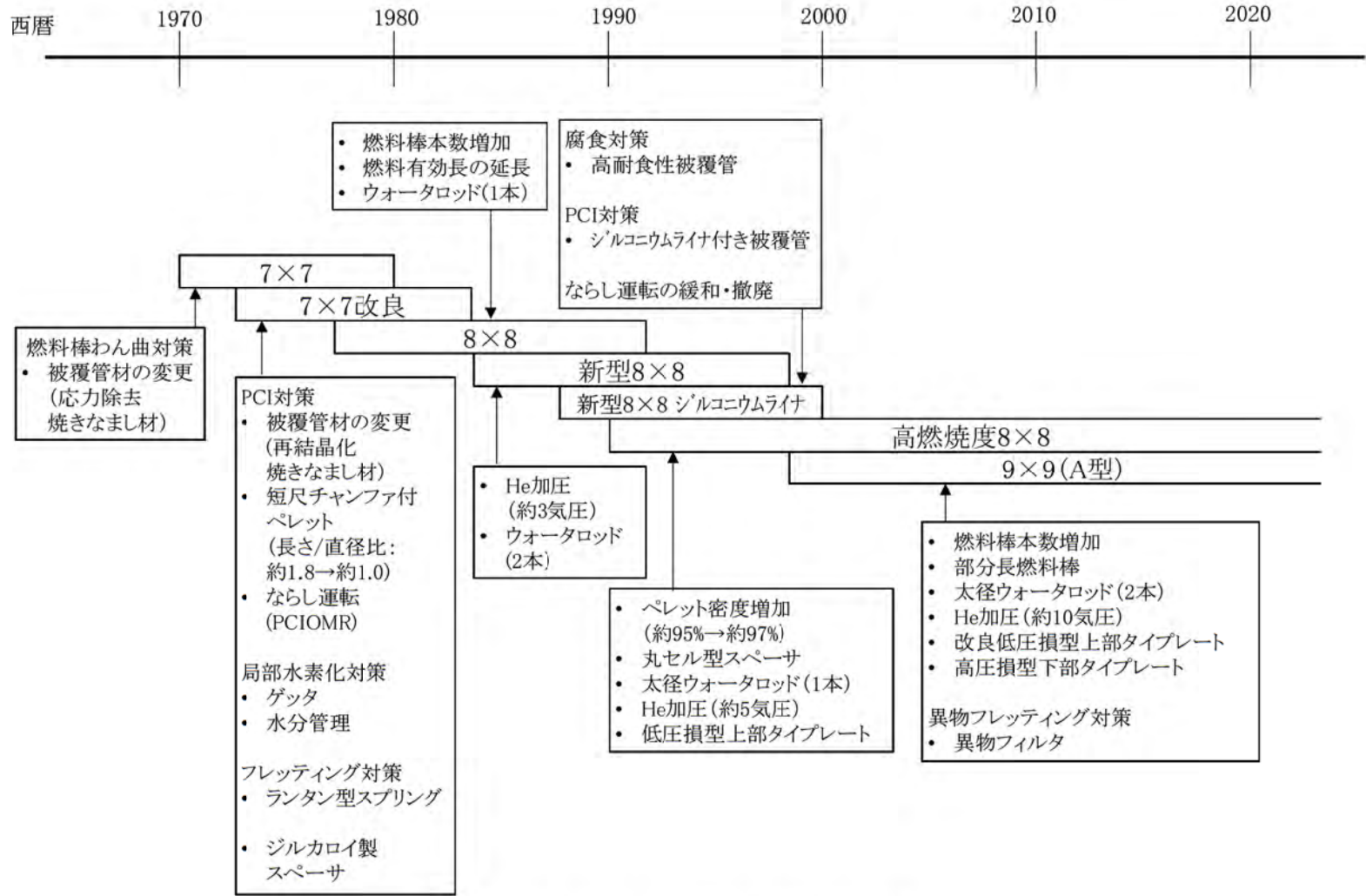
- ペレット： 熱伝導率の改善のため、ペレット密度を増加。
- スペーサ： 限界出力特性の向上を図るために、丸セル型のスペーサを採用。
- ウォータロッド： 減速材対燃料体積比を増加させるため、太径のウォータロッド 1 本を採用。
- ヘリウムガス： 燃料棒内のヘリウムガス圧を 5 気圧に加圧することによって、ペレットと被覆管の熱伝達を良くし、ペレットの温度を下げ PCI 及び FP ガス放出を低減。
- 上部タイプレート： 核熱水力安定性の改善を図るため、低圧損型の上部タイプレートを採用。

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.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 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良くし、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.1
提出年月日	2023年9月5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GE社が製造した 10×10 燃料としては、GE12、GE14、GNF2 及び GNF3 の 4 種類がある。以下に、その改良の主な経緯を示す。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)

ウォーターロッド：

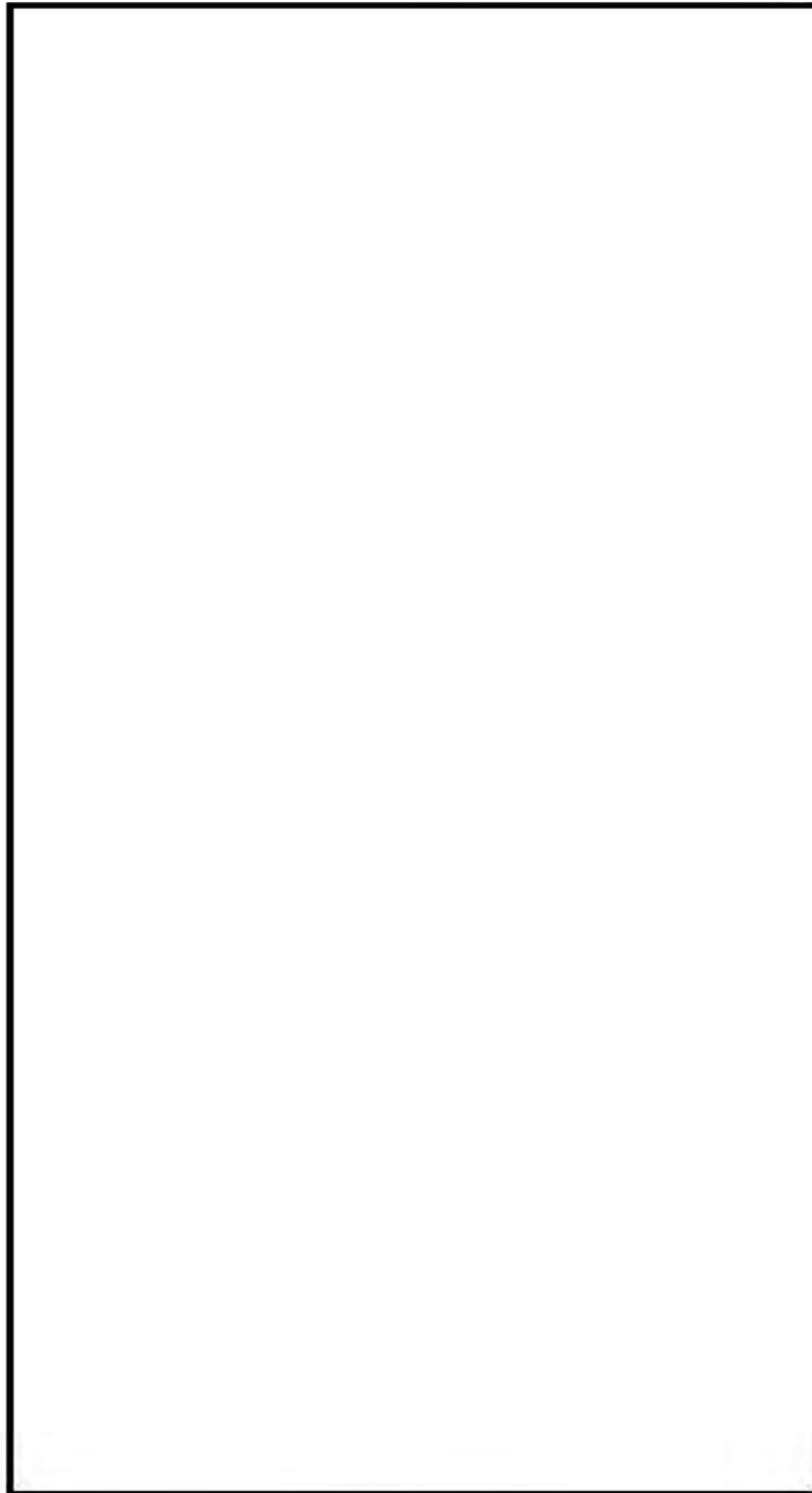
上記 4 種類の 10×10 燃料としては、2021 年時点において 体の使用実績があり、そのうち燃料棒断面形状が同一である GNF2 及び GNF3 については 体の使用実績がある。GNF3 型は 2022 年 5 月時点で 4,200 体超の使用実績がある^[1-1]。また、先行使用燃料を含めると、GNF2 においては炉内滞在期間 年を達成したものがあり、GE14 においては集合体平均燃焼度では MWd/t、ペレット燃焼度では MWd/t を達成したものがある。

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

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 日

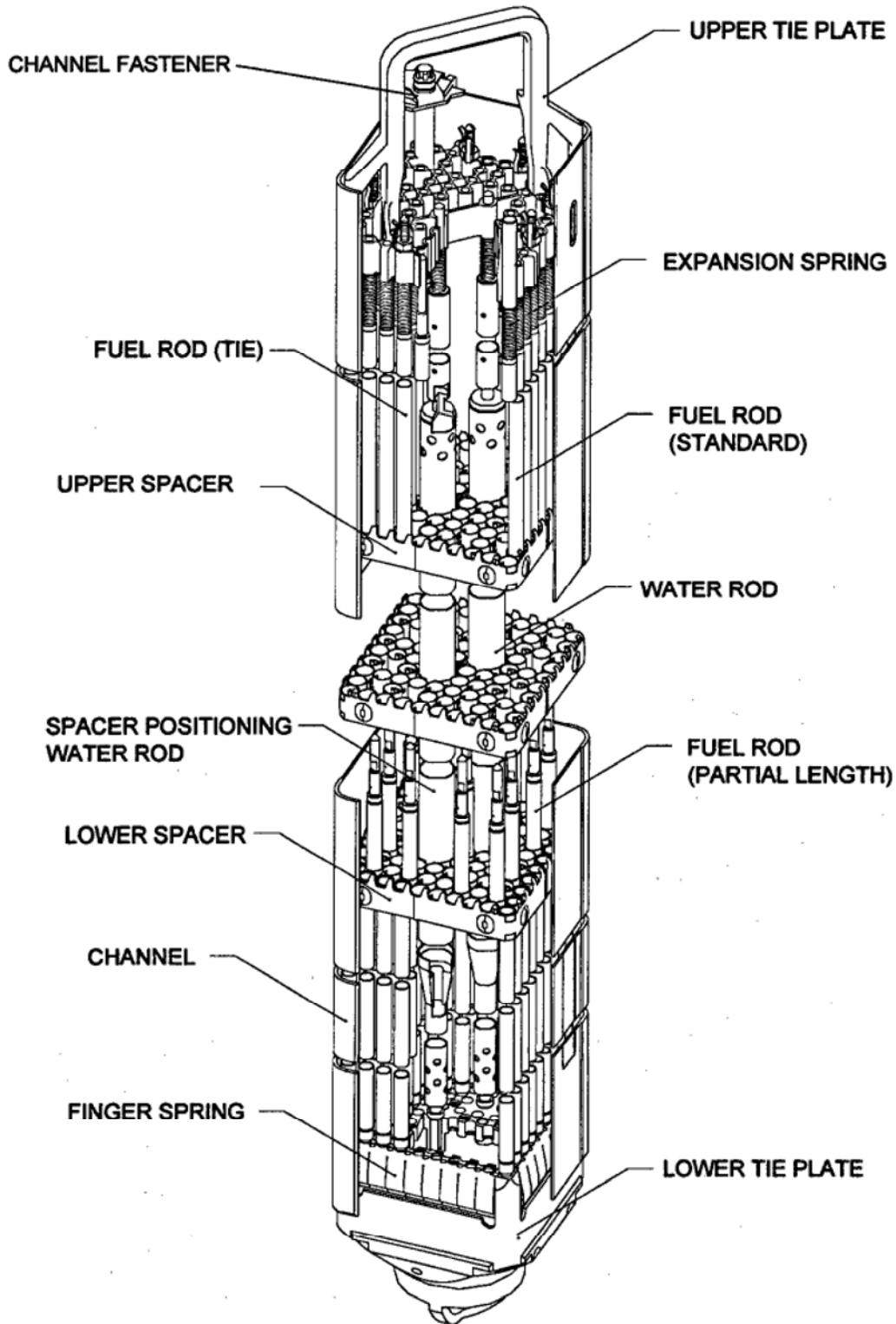
頼性を有しており、10×10 燃料の燃料破損率は 10^{-6} /本のオーダーと極めて低く、良好な実績を収めてきている。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 日



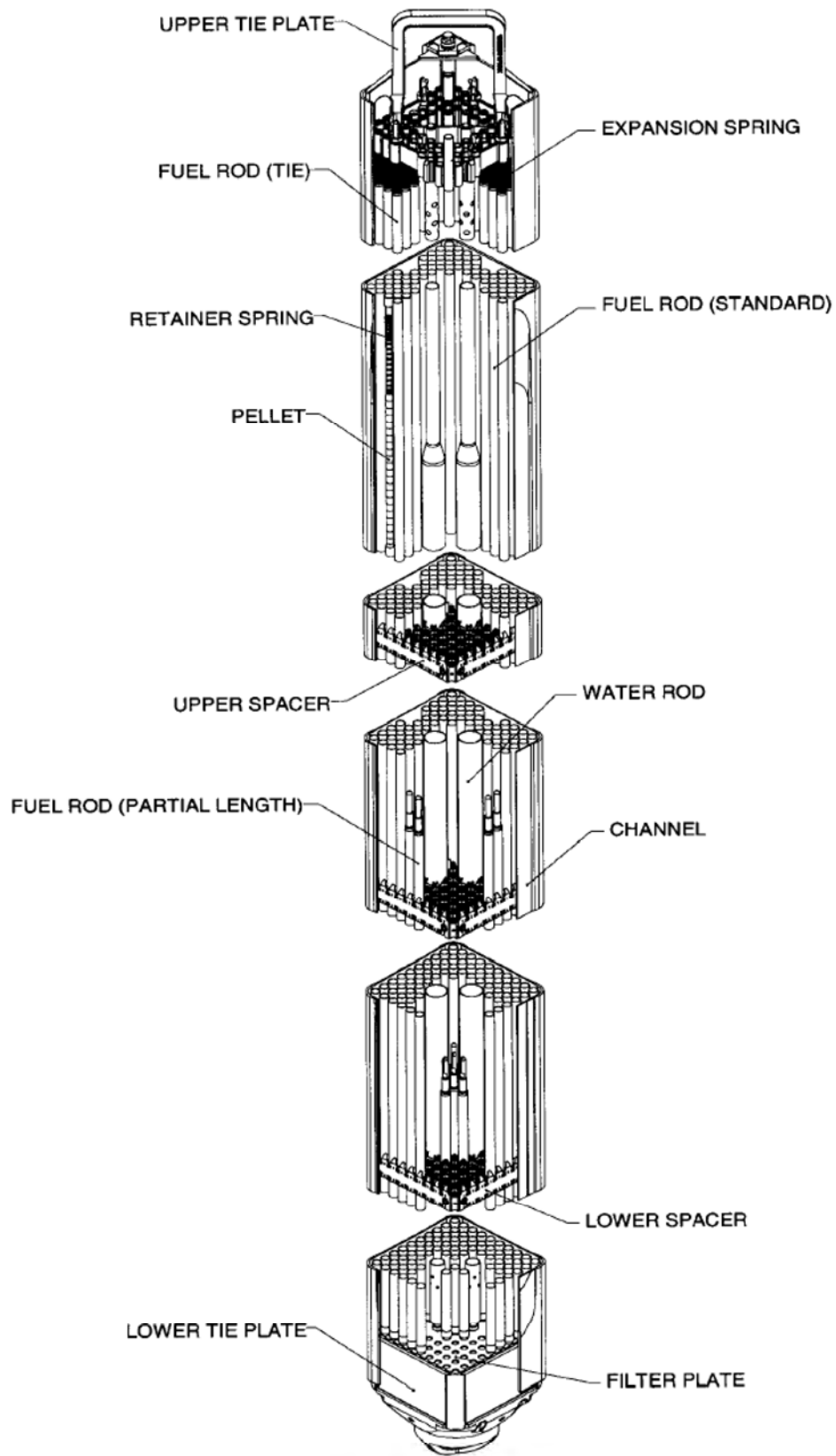
第 1-2 図 GE12 概略図

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 日



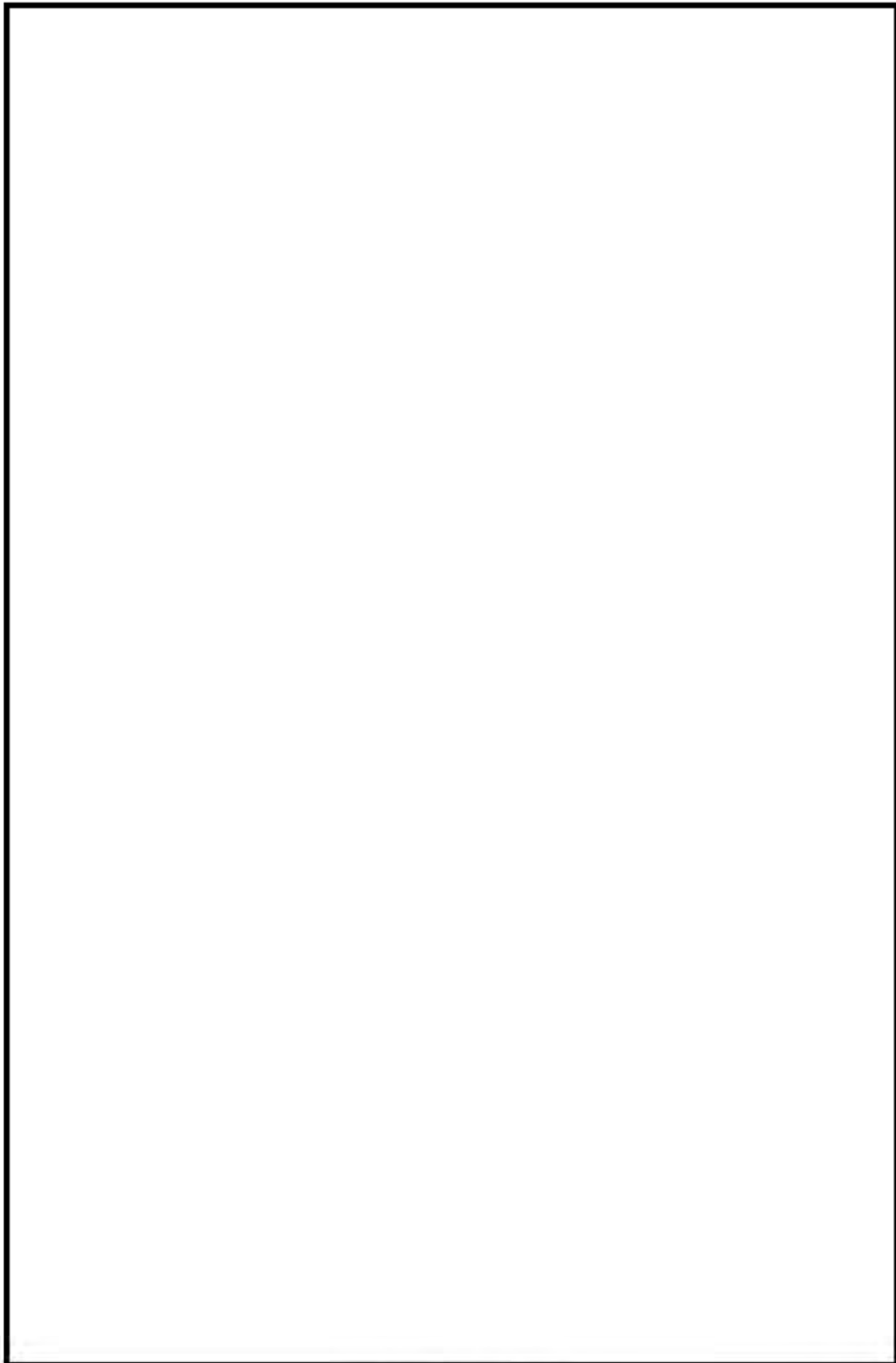
第 1-3 図 GE14 概略図

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 日

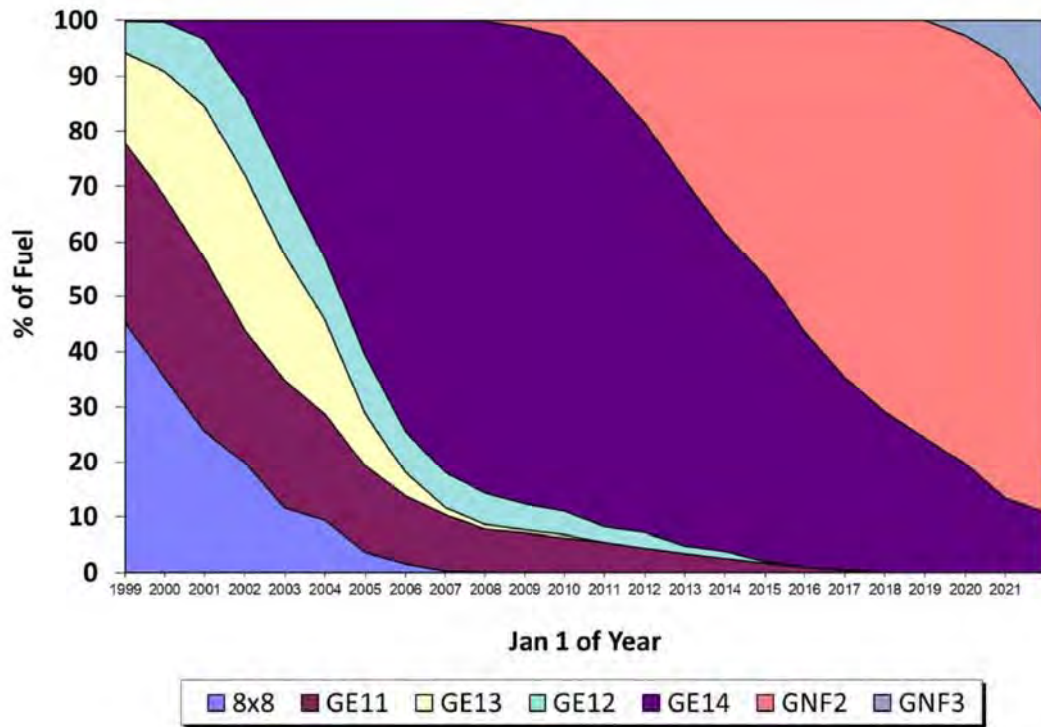


第1-4 図 GNF2 概略図

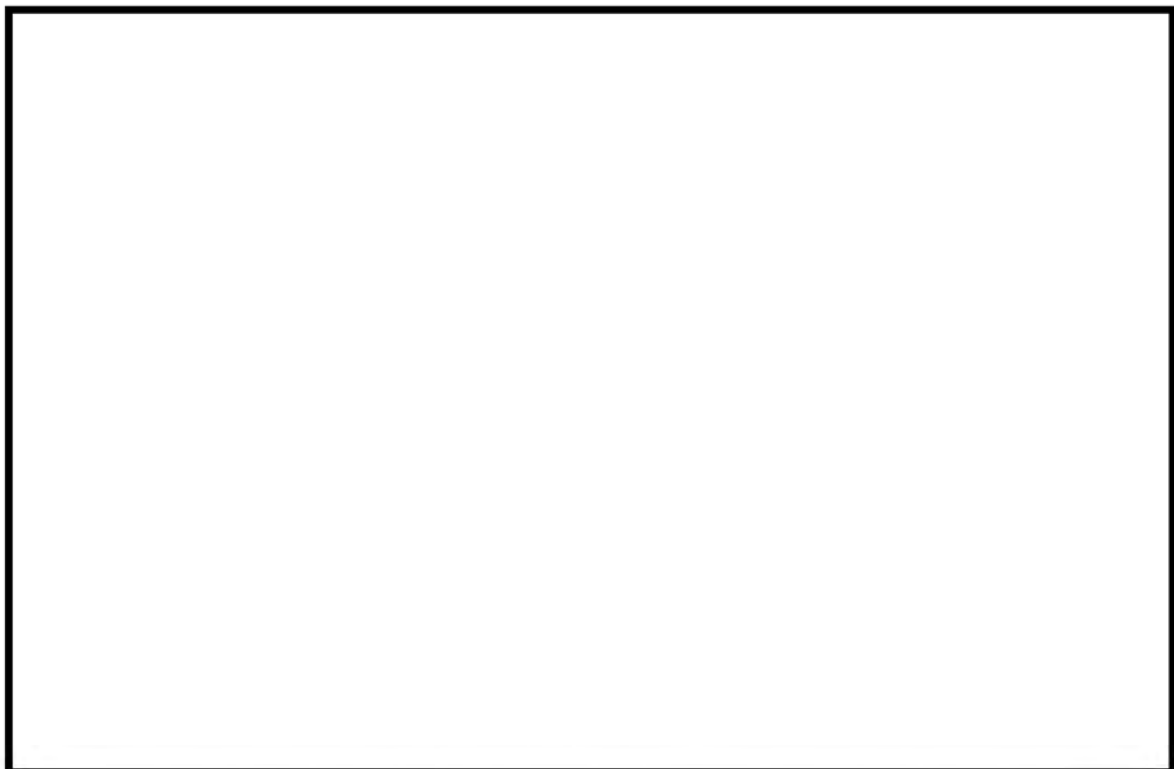
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 日



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.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 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以下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り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り生ずる流体振動により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.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 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、「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。被覆管の過歪はペレット-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歪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り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、フレタイング腐食、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.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 日

3. 燃料の基本仕様

GNF3 型の主要仕様を第 3-1 表及び以下に、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.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 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。

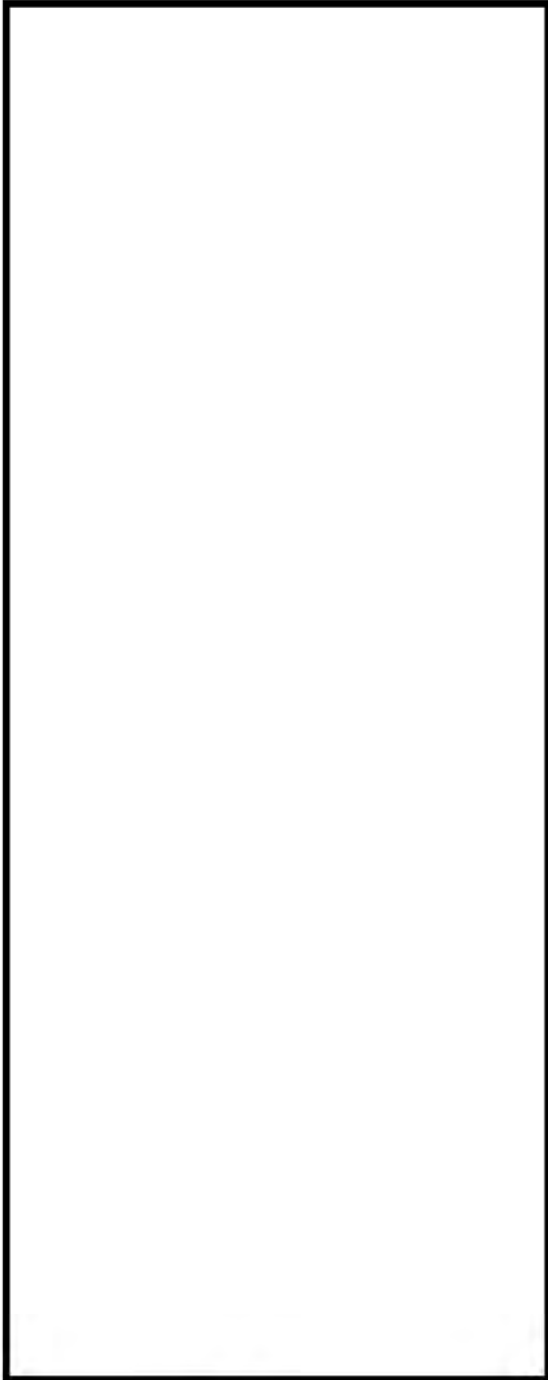
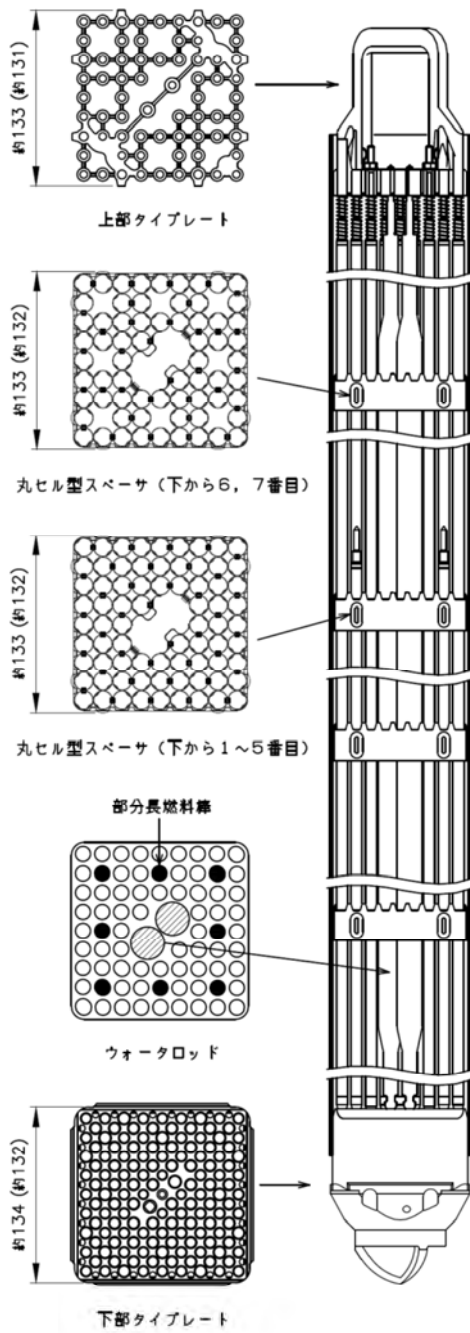
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 日

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 ₂ 、UO ₂ -Gd ₂ O ₃	UO ₂ 、UO ₂ -Gd ₂ O ₃
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.1
提出年月日	2023年9月5日

(単位: mm)



9×9 燃料 (A 型)

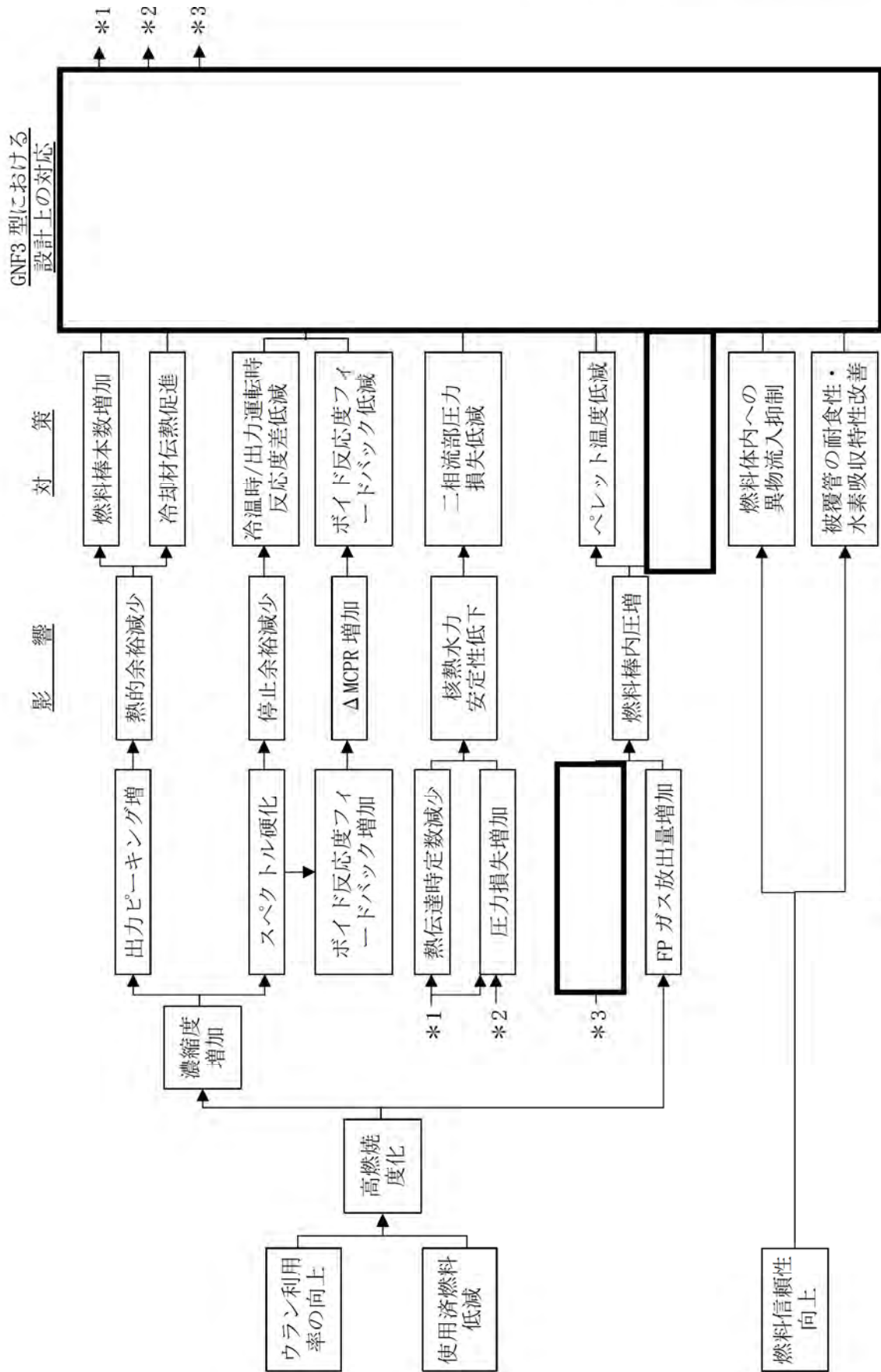
GNF3 型

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

S 格子^[3-1]炉心タイプの燃料の寸法は () 内に記載。

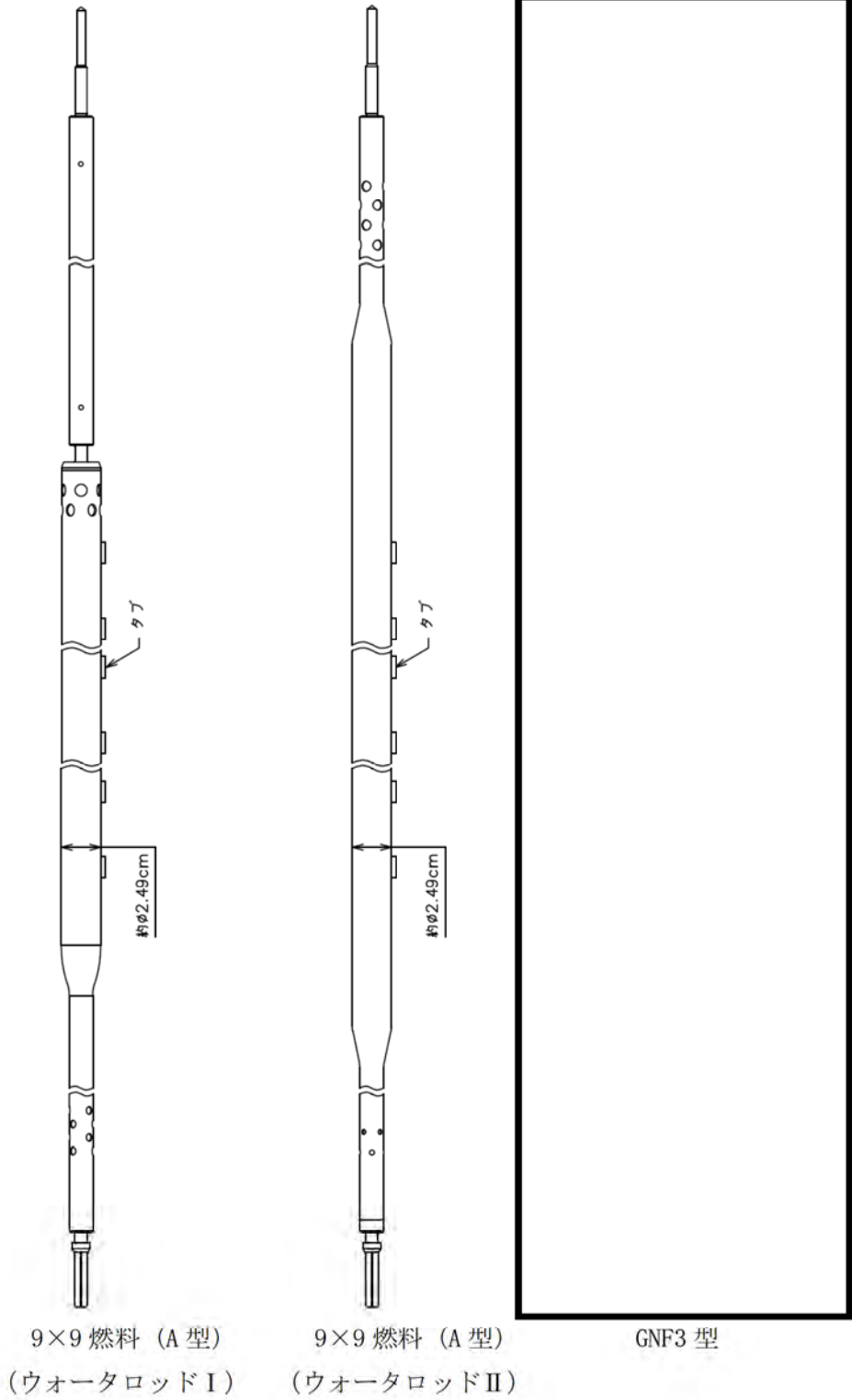
第 3-1 図 GNF3 型の構造図

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.1
提出年月日	2023年9月5日



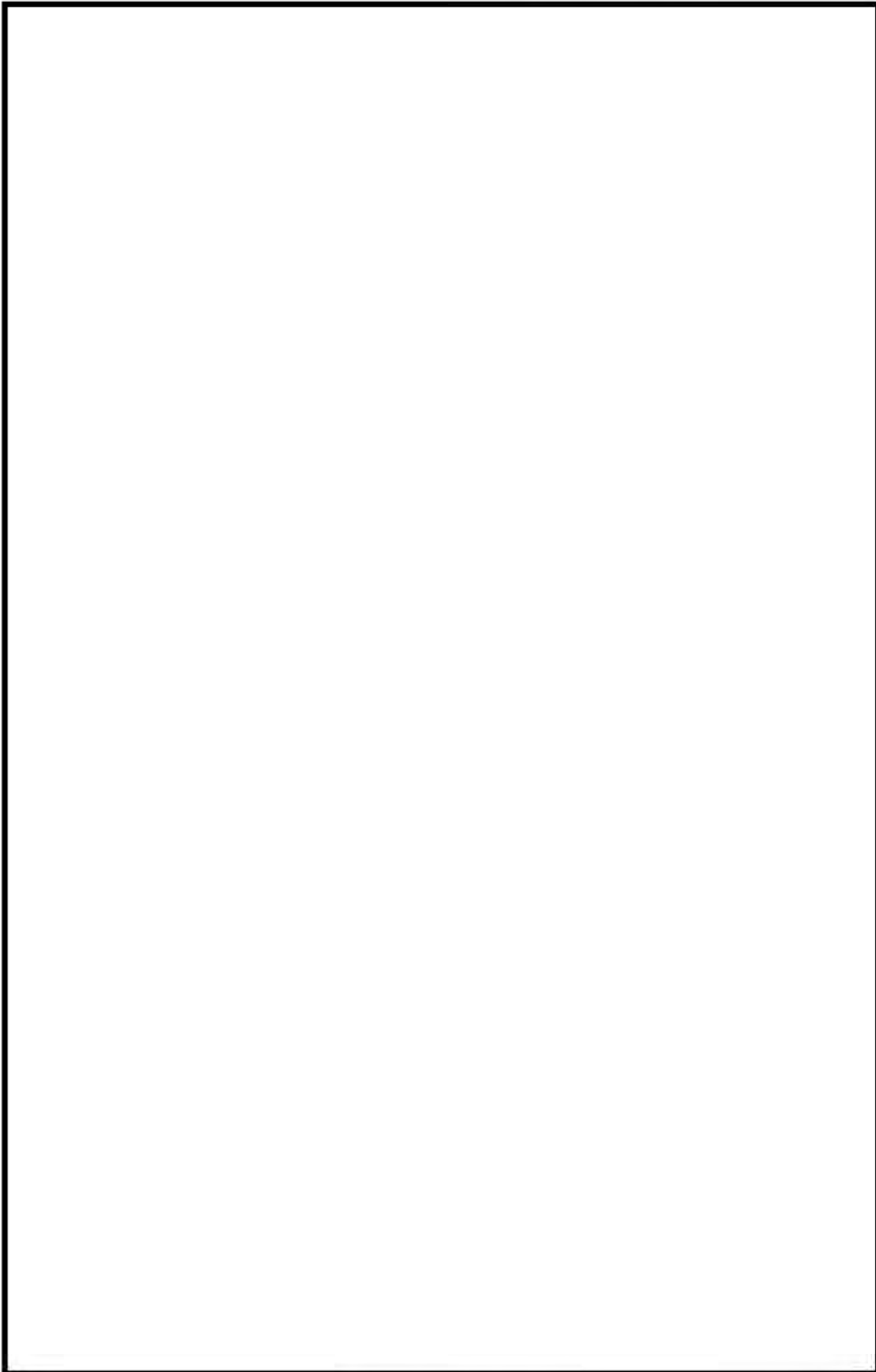
第3-2図 GNF3型の主な設計目標と対応

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 日



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.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 日



第 3-4 図 スペーサ



GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 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 [] 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、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 Δ 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。

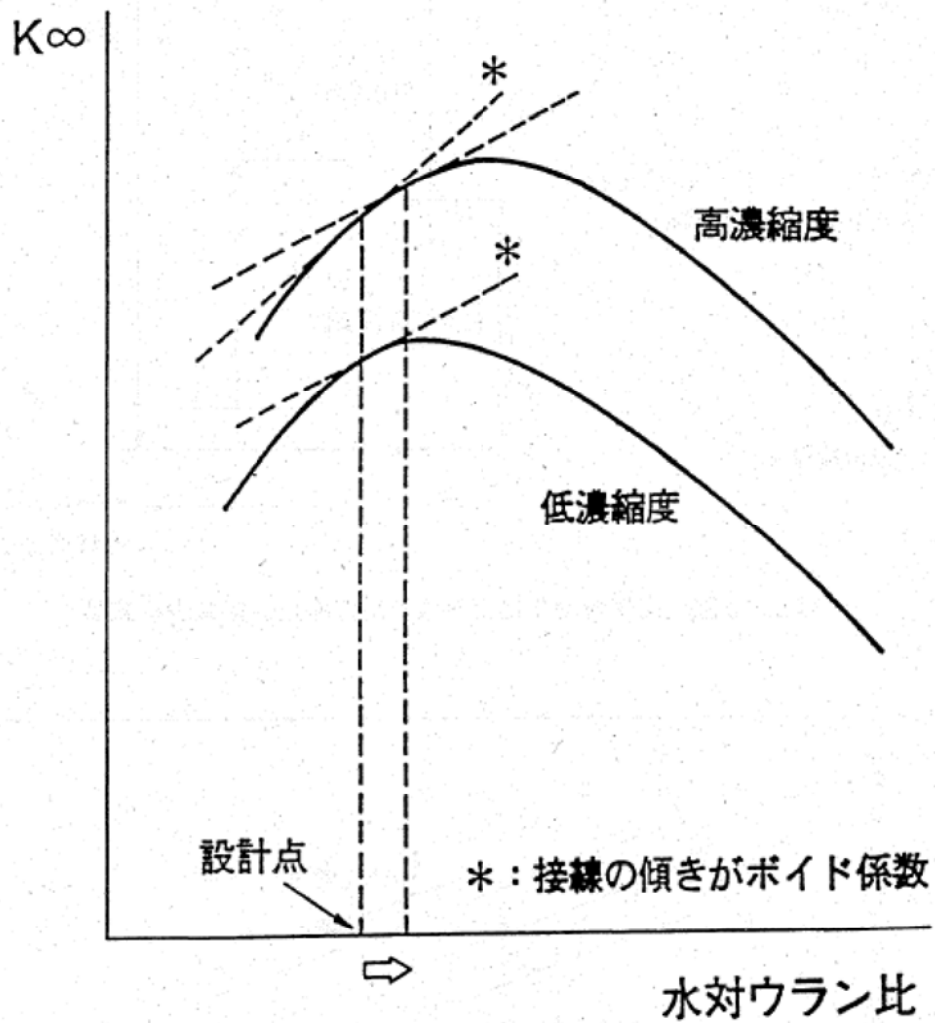
H/U 比と冷温時出力運転時反応度差の関係を第 3-7 図に示す。この図に示すとおり、高燃焼度化のため濃縮度増加を図るとき、H/U 比を増加させないと中性子スペクトルが硬化し、冷温時出力運転時反応度差が増加することとなる。このため、格子形状を変えずに高燃焼度化 (濃縮度増加) を図ると、第 3-6 図の破線に示すように原子炉の停止余裕が減少することになる。

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できる。したがって、 []

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 日

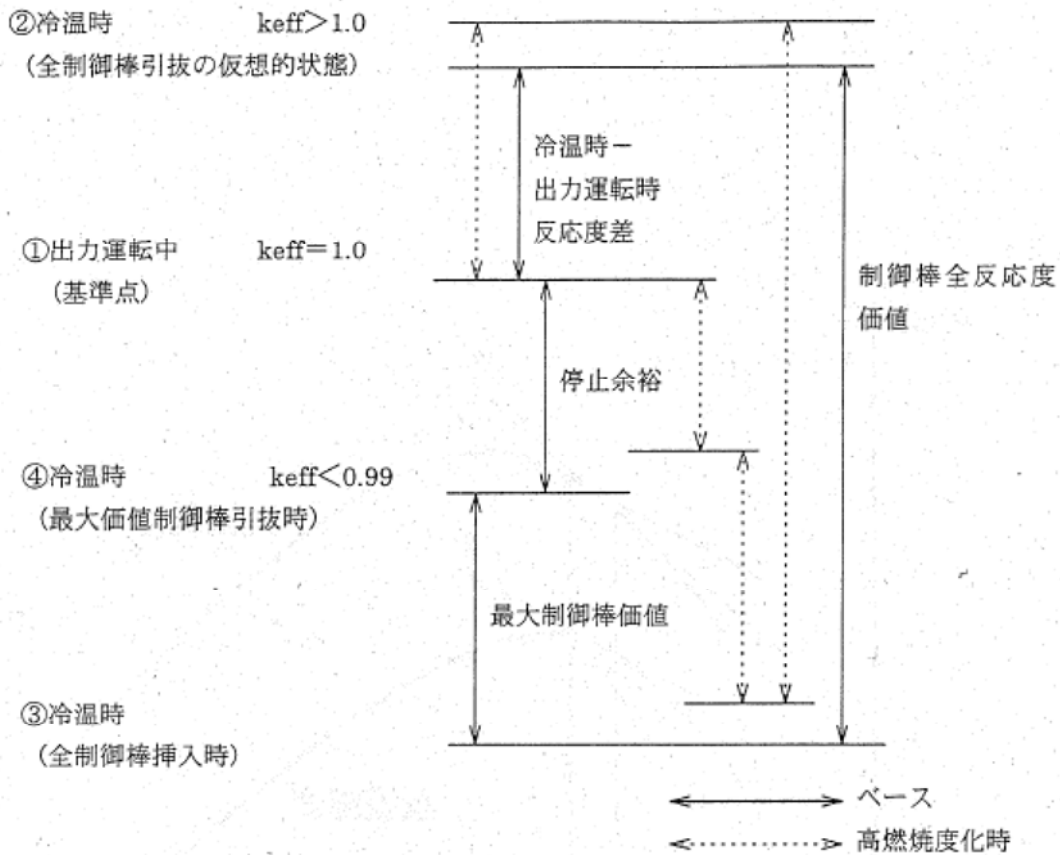
[] 及び部分長燃料棒を採用する GNF3 型は、9×9 燃料（A 型）と同様に燃料上部における冷温時での反応度が抑制されて、原子炉の停止余裕が改善されることになる。さらに、[]
[] ことで、H/U
比の適正化効果をより大きくしている。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.1
提出年月日	2023年9月5日

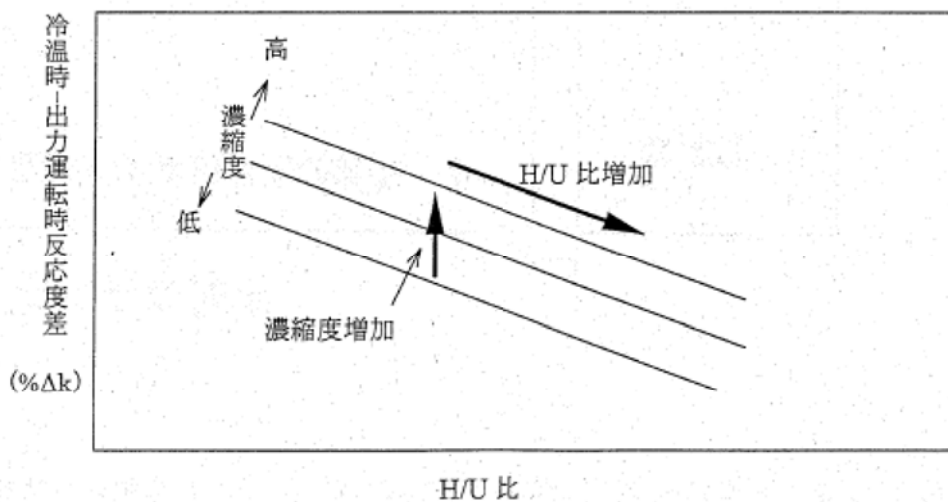


第 3-5 図 減速材ポイド係数に対する水対ウラン比及び濃縮度の影響

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.1
提出年月日	2023年9月5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.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 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.1
提出年月日	2023 年 9 月 5 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.
- [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)