

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.0
提出年月日	2023 年 6 月 21 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 6 月 21 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.0
提出年月日	2023年6月21日

## 目次

1. 概要
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. 評価
  - (1) 材料
  - (2) 照射効果
  - (3) 燃料温度
  - (4) 燃料棒内圧
  - (5) 応力解析
  - (6) 応力サイクル及び疲労限界
  - (7) フレッキング腐食
  - (8) 水素化
  - (9) 被覆管のクリープ圧潰
  - (10) ペレット-被覆管相互作用
  - (11) 寸法形状安定性
  - (12) 燃料体の輸送及び取扱い
6. 参考文献

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

【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.0
提出年月日	2023年6月21日

## 1. 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。

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と本資料の記載項目との関係を示す。

<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.0
提出年月日	2023 年 6 月 21 日

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) ※	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 黒：試験及び/又は実績	
	(1) 基本的設計方針	(2) 具体的設計方針				
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、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、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。	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。	(1) 燃料棒	(1) 燃料棒熱・機械設計評価	(1)材料 (2)照射効果	(10) ペレット-被覆管相互作用
4 燃料体及び反射材並びに炉心支持構造物、熱遮蔽材並びに一次冷却系統に係る容器、管、ポンプ及び弁は、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。	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バ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	(3) 燃料被覆管応力評価 -		(5) 応力解析 (7) フレッチング腐食
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を保持する設計とする。	上記のほか、被覆管の水素化、フレッチング腐食、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。	(1) 燃料棒	(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		(3) 燃料温度 (4) 燃料棒内圧 (5) 応力解析 (6) 応力サイクル及び疲労限界 (7) フレッチング腐食 (8) 水素化 (9) 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。	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。		(2) 燃料体	-		(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
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。			(2) 燃料体	-		(12) 燃料体の輸送及び取扱い
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。			(2) 燃料体	-		

※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

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.0
提出年月日	2023年6月21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、次の基本的設計方針に基づき安全設計を行う。

- 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.0
提出年月日	2023年6月21日

(2) 具体的設計方針

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、次の具体的設計方針を満足する設計とする。

- 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。
- 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。

上記のほか、被覆管の水素化、フレットニング腐食、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.0
提出年月日	2023 年 6 月 21 日

### 3. 燃料の基本仕様

GNF3 型の主要仕様を第 3-1 表及び以下に示す。また、GNF3 型の構造図を第 3-1 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、高燃焼度化に対応した適切な設計を行う観点から、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 [ ] 本としている。燃料体当たりの燃料棒本数と熱伝達面積を増加させ、平均線出力密度や平均表面熱流束を低下させる設計としている。

[ ] 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）としている。部分長燃料棒（短尺）、部分長燃料棒（長尺）は、[ ]  
[ ] に配置している。これにより、二相流部での圧損低減及び燃料上部の水対ウラン比の増加（原子炉停止余裕の改善）を図っている。

燃料棒有効長さについては、9×9 燃料（A 型）から伸長している。

以上のような燃料棒設計の結果、燃料体 1 体あたりのウラン量は 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及びペレット-被覆管相互作用の特性を考慮し、[ ] 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、核分裂生成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、核分裂生成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、実績のある従来設計の範囲の設定とし、[ ]  
[ ] MPa としている。

#### (2) 燃料体

##### a. ウォータロッド

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、[ ] 本の太径のウォー

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.0
提出年月日	2023 年 6 月 21 日

タロッドを燃料体の中央部に配し、[ ] の領域を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。

b. スペーサ

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、インコネル製の外枠、[ ] [ ] 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金製の [ ] [ ] 設計としている。

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、[ ] [ ] 圧力損失を低減させる設計としている。

下部タイプレートは、燃料体内への異物の流入を阻止するために、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損を増加させる設計とし、安定性の改善を図った構造としている。



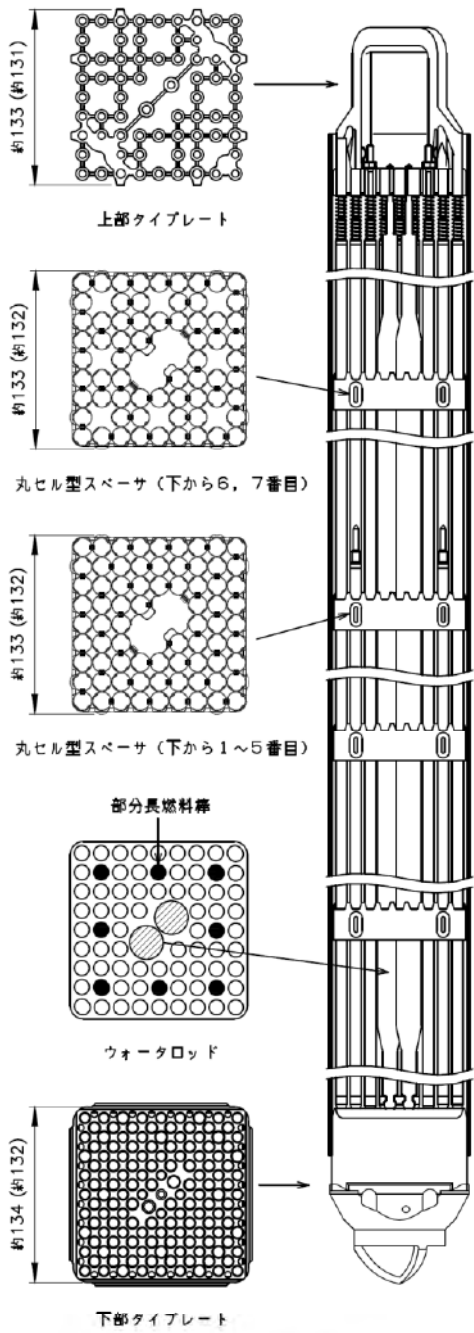
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.0
提出年月日	2023 年 6 月 21 日

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 高鉄ジルカロイ (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.0
提出年月日	2023 年 6 月 21 日

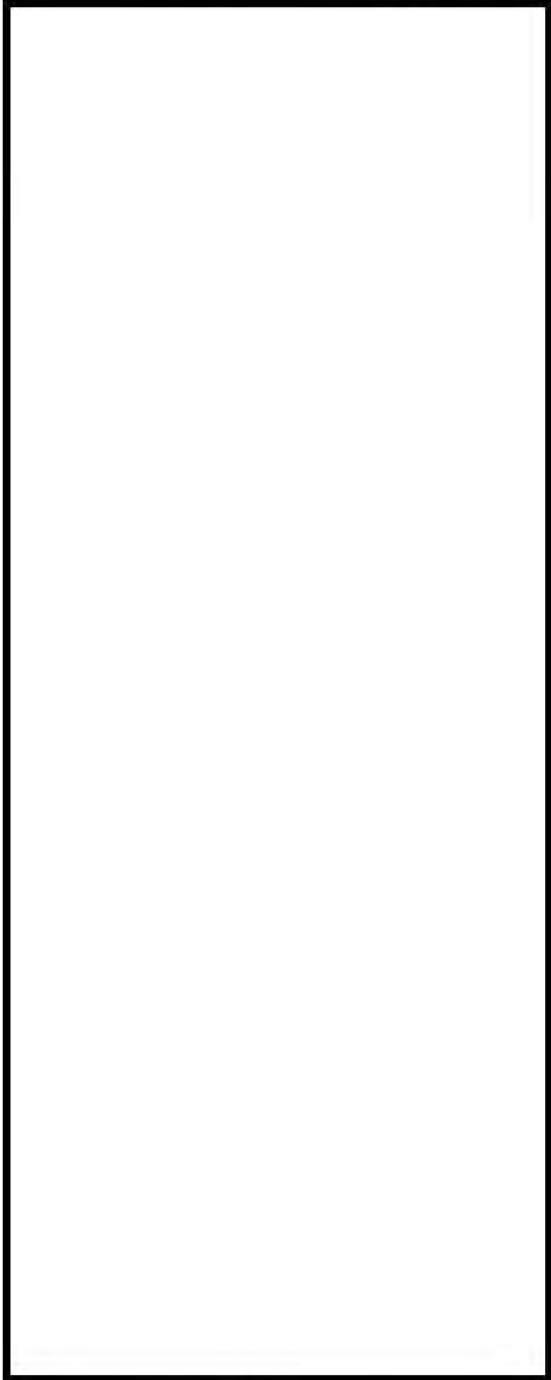
(単位: mm)



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.0
提出年月日	2023 年 6 月 21 日

#### 4. 燃料の設計手法

GNF3 型の燃料棒の運転時の健全性に係る設計手法は次の 4 つの評価からなる。

- (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

これらの各評価の基準、方法等について、次の(1)～(4)項に示す。

##### (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寿命中に経験する出力を包絡する出力履歴（以下、「設計用出力履歴」という）を用いて、被覆管円周方向 1%塑性歪に対する出力余裕、燃料棒内圧等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）<sup>[4-1]</sup>で妥当と判断され、高燃焼度 8×8 燃料および 9×9 燃料（A 型）へ適用されてきたものである。

##### a. 評価基準

平成二十五年原子力規制委員会規則第五号「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」において、第十五条第 2 項では、炉心について「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」ことが要求されている。これに対応する具体的な評価基準として、原子炉安全基準専門部会報告書「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）<sup>[4-2]</sup>に記載された「燃料被覆管の円周方向の平均塑性歪が 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. 評価方法

燃料棒熱・機械設計評価では、燃料棒熱・機械設計コード PRIME03<sup>[4-3]</sup>（以下、「PRIME」という）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> を 10.0wt%含む UO<sub>2</sub> 燃料棒の設計用出力履歴を第 4-1 図に、本評価に用いる標準燃料棒の軸方向出力分布を第 4-2 図に示す。これらに示す評価条件を用いて、被覆管の円周方向塑性歪の設計出力時点からの増分が 1%に至るまでの出力余裕<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

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

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.0
提出年月日	2023 年 6 月 21 日

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%塑性歪までの出力余裕の95%確率下限値が最大過出力値以上であることを確認する。

## (2) 燃料棒内圧評価

高燃焼度領域では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大きくなると、被覆管の外向きのクリープ変形により被覆管の径が増加し、ペレット-被覆管ギャップが拡大する現象（以下、「リフトオフ」という）が発生する可能性がある。リフトオフが発生すると、ギャップの拡大によりギャップコンダクタンスが低下し、燃料温度が上昇、更にFP ガスが放出されて燃料棒内圧が上昇し、その結果更にギャップが広がるといった、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。

サーマルフィードバックを防止する観点から、本評価では、通常運転時に燃料棒内圧が冷却材圧力を超過した場合においてもリフトオフが発生しないことを評価する。

### a. 評価基準

リフトオフが発生しない条件として、「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「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について」<sup>[4-1]</sup>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. 評価方法

本評価では通常運転時（特に燃料棒内圧が高くなる高燃焼度領域）における燃料ふるまいのうち、ペレット-被覆管ギャップへの影響が大きいペレットスエリング速度及び被覆管クリープ速度に着目し、燃料棒内圧がペレット-被覆管ギャップの拡大が開始する燃料棒内圧（以下、「限界内圧」という）に至らないことを確認する。ここでは燃料棒内圧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。燃料棒内圧及び限界内圧の評価に用いるGNF3型の設計用出力履歴及び軸方向出力分布は、上述の(1)bに示すものと同じである。内圧設計比の評価フローを第4-3図に、評価手順を次の①～④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 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（燃料棒寸法、冷却材圧力等）の統計的分布を考慮して、モンテカルロ法により一回の試行ごとに統計的分布に従ったパラメータの組み合わせを乱数により作成し、

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.0
提出年月日	2023 年 6 月 21 日

燃料棒内圧（限界内圧）の統計的分布を求める。

- ③ ①の燃料棒内圧 ( $P_i$ ) の分布及び②の限界内圧 ( $P_c$ ) の分布に基づき内圧設計比 ( $P_i/P_c$ ) の統計的分布を求める。
- ④ 内圧設計比の 95%確率上限値が 1 以下であることを確認する。

### (3) 燃料被覆管応力評価

PRIME による燃料棒内圧の解析結果及び燃料棒寸法等を用いて燃料被覆管応力評価を行う。応力評価においては、燃料被覆管のスペーサ間、スペーサ部及び下部端栓溶接部の各位置に発生する相当応力（せん断歪エネルギー説（von Mises 理論）に基づく相当応力）を計算し、当該の許容応力に対する比（応力設計比）を評価する。スペーサ間及びスペーサ部においては厚肉円筒式による応力評価を行い、統計的分布を考慮して応力設計比を評価する。一方、端栓溶接部は形状が複雑であることから有限要素法による応力評価を行い、決定論的に応力設計比を評価する。

本評価手法は上述の「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について」<sup>[4-1]</sup>において妥当と判断されており、高燃焼度 8×8 燃料および 9×9 燃料へ適用されてきたものである。

#### a. 評価基準

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における被覆管応力評価に対する評価基準は、一次応力に対して降伏応力  $S_y$ 、一次応力+二次応力に対して引張強さ  $S_u$  を適用する<sup>[4-1]</sup>。なお、ここで用いる許容応力は、使用温度及び照射の効果を考慮して設定する。

#### b. 評価方法

##### 1) スペーサ間及びスペーサ部の応力評価

スペーサ間及びスペーサ部の応力評価については、厚肉円筒式を用いた弾性解析コード FURST を用いる。FURST による解析において考慮する応力を第 4-3 表に示す。これらの応力について厚肉円筒式を用いた弾性解析により相当応力を求め、各入力変数（燃料被覆管寸法、燃料被覆管温度、燃料棒内圧、炉心条件、許容応力等）の統計的分布を考慮し、モンテカルロ法による統計評価を行う。モンテカルロ法による評価では、1 回の試行毎に乱数が用いられ、統計的分布に従い設定された入力条件から 1 つの応力設計比が得られる。この試行を繰り返すことにより応力設計比の 95%確率上限値を求める。

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.0
提出年月日	2023 年 6 月 21 日

## 2) 下部端栓溶接部の応力評価

下部端栓溶接部の応力評価については、その形状が複雑であることから有限要素法コード ANSYS を用いる。ANSYS による応力解析において考慮する荷重を第 4-4 表に示す。これらの荷重により発生する応力分布を有限要素法により求め、全発生応力から一次応力+二次応力を分類し、相当応力を評価する。なお、応力設計比の評価では、燃料被覆管温度、燃料棒内圧、炉心条件、燃料棒寸法及び許容応力の統計的分布を考慮し、それぞれの 95%確率上/下限値に基づき解析結果が保守側となるように設定した入力値を用いて決定論的評価を実施する。

## (4) 燃料被覆管疲労評価

累積損傷の法則（Miner の仮説）に基づいて燃料被覆管の疲労評価を行う。燃料被覆管疲労評価は、切り欠きと類似した形状を有し、応力集中が発生する端栓溶接部について行う。なお、本評価手法は高燃焼度 8×8 燃料および 9×9 燃料へ適用されてきたものである。

### a. 評価基準

燃料装荷から取り出しまでの炉内滞在期間中に燃料被覆管に作用すると予測される温度、圧力及び出力のサイクル（以下、予測サイクルという）による疲労累積係数が 1 以下となることを評価基準とする。

### b. 評価方法

燃料被覆管の疲労限界に対する設計基準は、累積損傷の法則（Miner の仮説）及び Langer-0' Donnell の考え方に基づく。下部端栓溶接部の疲労評価は、上述の(3)の ANSYS による応力評価で得られる応力強さ（応力集中によるピーク応力を含む）を用いて、以下の手順で実施する。

- ① 各予測サイクルによる応力振幅を評価する。
- ② ①で求めた応力振幅に対応する許容サイクル数を第 4-4 図の設計疲労曲線により求める。
- ③ 予測される繰り返し数を許容サイクルで除すことにより、疲労累積係数増分を求める。
- ④ 全ての予測サイクルに対して疲労累積係数増分を求め、その合計が 1 以下であることを確認する。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.0
提出年月日	2023 年 6 月 21 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-被覆管直径ギャップ
被覆管肉厚
燃料有効長
プレナム体積
ガドリニア濃度 (ガドリニア燃料棒のみ)
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
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

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.0
提出年月日	2023 年 6 月 21 日

第 4-3 表 スペーサ間及びスペーサ部の被覆管応力評価で考慮する応力

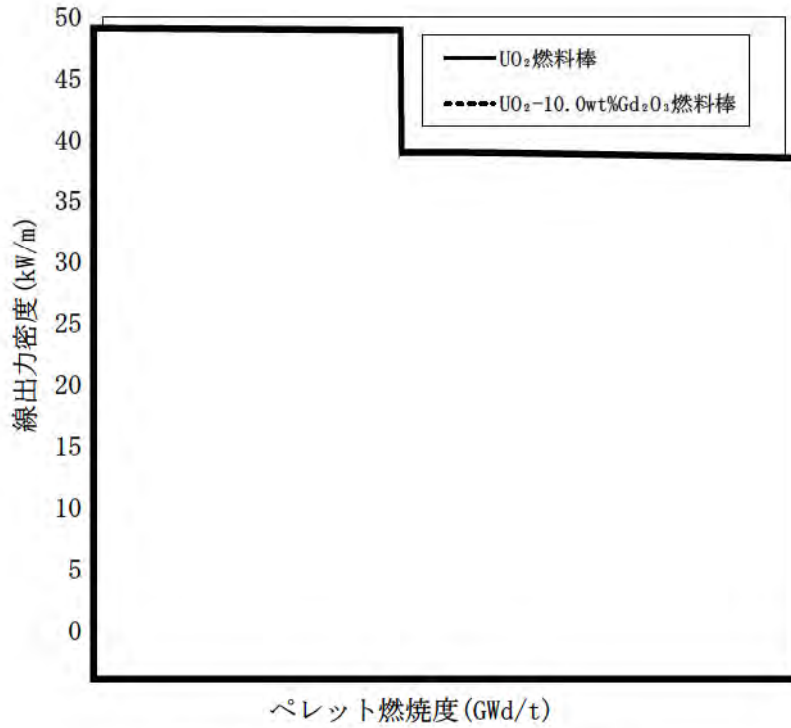
考慮する応力	応力分類
内外圧力差に基づく応力	一次応力
水力振動に基づく応力	一次応力
楕円度に基づく応力	一次応力
スペーサの接触力に基づく応力 (スペーサ部のみ)	二次応力
半径方向温度差に基づく熱応力	二次応力
円周方向温度差に基づく熱応力	二次応力
膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力	一次応力

第 4-4 表 下部端栓溶接部の応力評価で考慮する荷重

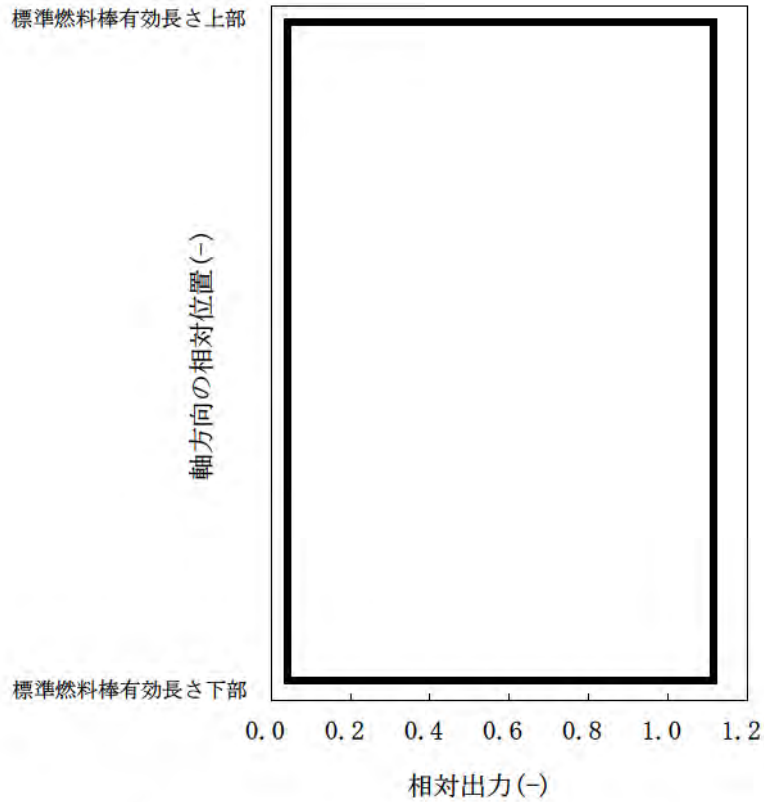
考慮する荷重
下部端栓及び被覆管部における温度分布
燃料棒内圧
冷却材圧力
内外圧力差による軸方向荷重 (軸方向応力)
膨張スプリング等による軸方向荷重 (軸方向応力)
燃料被覆管の周方向温度差及び端栓取付角公差による初期曲りに基づく曲げ荷重 (曲げ応力)



GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.0
提出年月日	2023 年 6 月 21 日



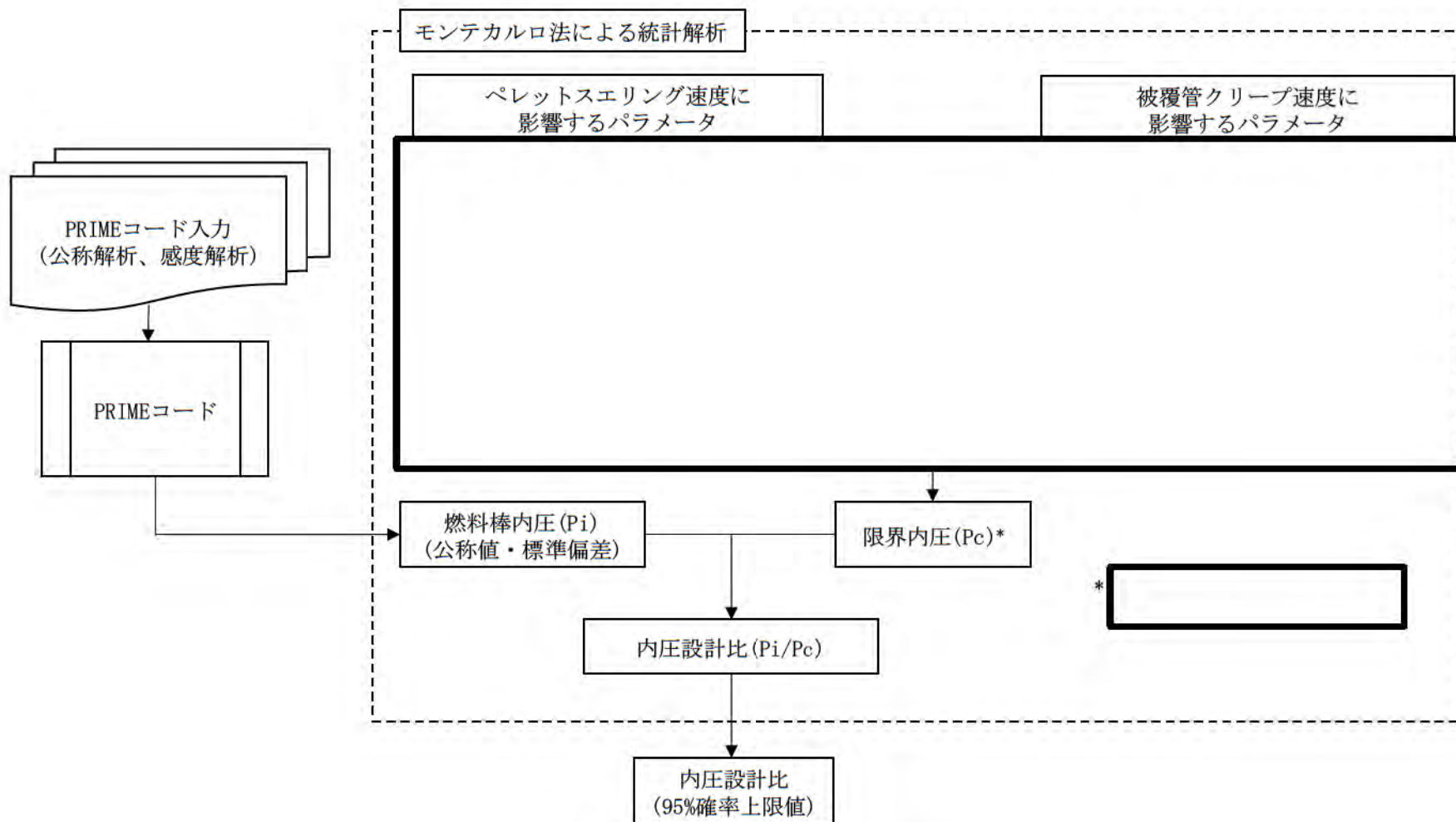
第 4-1 図 GNF3 型の設計用出力履歴



第 4-2 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

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

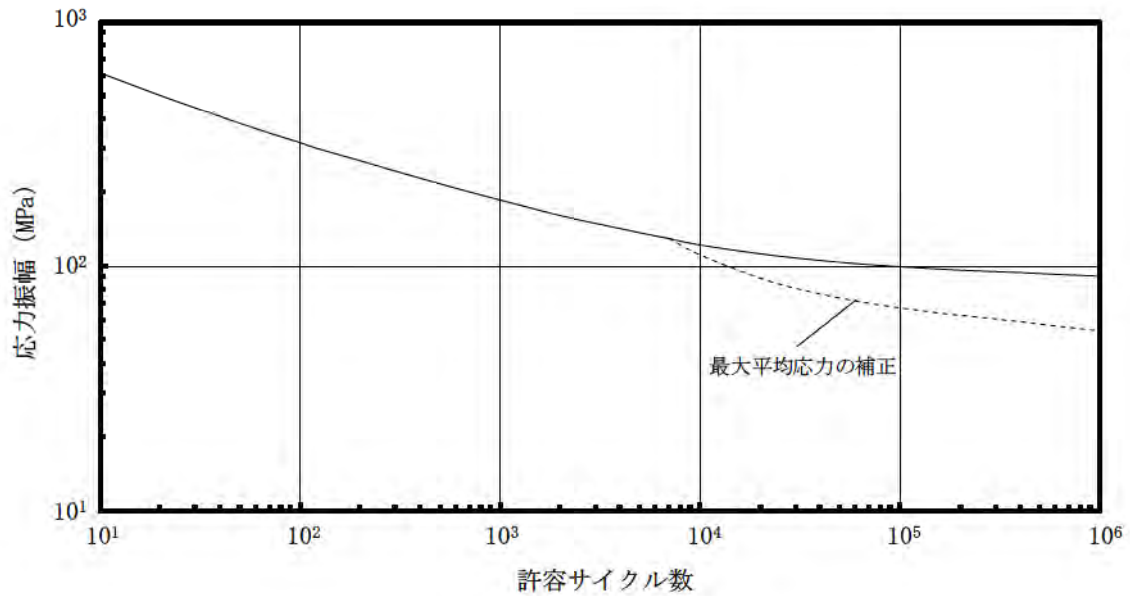
GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.0
提出年月日	2023年6月21日



第 4-3 図 内圧設計比の評価フロー

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.0
提出年月日	2023 年 6 月 21 日



第 4-4 図 ジルカロイの設計疲労曲線\*

注記\* : ジルカロイ設計疲労曲線は、参考文献[4-4]に基づき、ジルカロイ-2 の未照射材及び照射材についての疲労試験結果をベースに、ジルカロイ-4 等の機械特性及び疲労特性がジルカロイ-2 とほぼ同等であることを確認し、ジルカロイ-2、3 及び 4 共通の設計曲線として設定したものである。Langer-0' Donnell は、設計曲線を保守側に見積もるため、未照射材及び照射材それぞれについて応力を 1/2、サイクル数を 1/20 とし、未照射材及び照射材の両者の包絡線を Langer-0' Donnell の設計疲労曲線としている。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.0
提出年月日	2023年6月21日

## 6. 参考文献

- [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] 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)
- [4-2] 原子炉安全基準専門部会報告書「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)
- [4-3] 「トピカルレポート 燃料棒熱・機械設計コード PRIME03 について」(株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン、GLR-002 改訂2、平成22年4月)
- [4-4] W. J. O'Donnell and B. F. Langer, "Fatigue Design Basis for Zircaloy Components", Nuclear Science and Engineering, 20, 1-12 (1964)

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.0 付録-1
提出年月日	2023 年 6 月 21 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 のトピカルレポートからの変更点

##### 2.1 被覆管温度計算

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  $\Delta T_{jl}$ 、クラッド付着による温度上昇  $\Delta T_{cr}$ 、及び酸化膜による温度上昇  $\Delta T_{ox}$  の

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)

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

(変更後の式)

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

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.0 付録-1
提出年月日	2023 年 6 月 21 日

また、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、

## 2.2 被覆管のクリープモデル式

クリープ試験データの評価に用いた応力計算式と PRIME03 コード内での応力計算式との相違を考慮し、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。

（トピカルレポート p.5.4-9 記載の式）

$$\varepsilon_g^{irr} =$$

（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)

## 2.3 リム組織形成によるペレット体積増加率

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  $F_{\text{comp}}$  を設

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.0 付録-1
提出年月日	2023 年 6 月 21 日

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 2.1 節、2.2 節で述べた変更等を反映した後に被覆管直径変化の測定データとの照合を実施した結果、当該の寄与率を表す  $F_{comp}$  をトピカルレポート記載値の  から  に変更した。

### 3. PRIME03 コード変更による解析結果への影響

2 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 3-1～図 3-4 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 4 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、トピカルレポートに検証データとして示したものと同一である。これらの図が示すように、モデルの変更前後において、測定値と計算値との比較図にほとんど差はなく、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）は変更前（%）と同等であり、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の変更はない。

### 4. 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 4-1 に示す。表 4-1 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。

### 5. 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

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.0 付録-1
提出年月日	2023 年 6 月 21 日

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。

## 6. 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.0 付録-1
提出年月日	2023年6月21日

表 3-1 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	≤ 60	≤ 44.0
異常な過渡変化時	≤ 100	≤ 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。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 であり、トピカルレポートにおいて設定した適用範囲 73 GWd/t をわずかに超過するが、コードの妥当性確認に用いたデータの範囲として FP ガス放出率について燃料棒平均燃焼度 99 GWd/t までであることなどから、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。

\*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。

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.0 付録-1
提出年月日	2023年6月21日

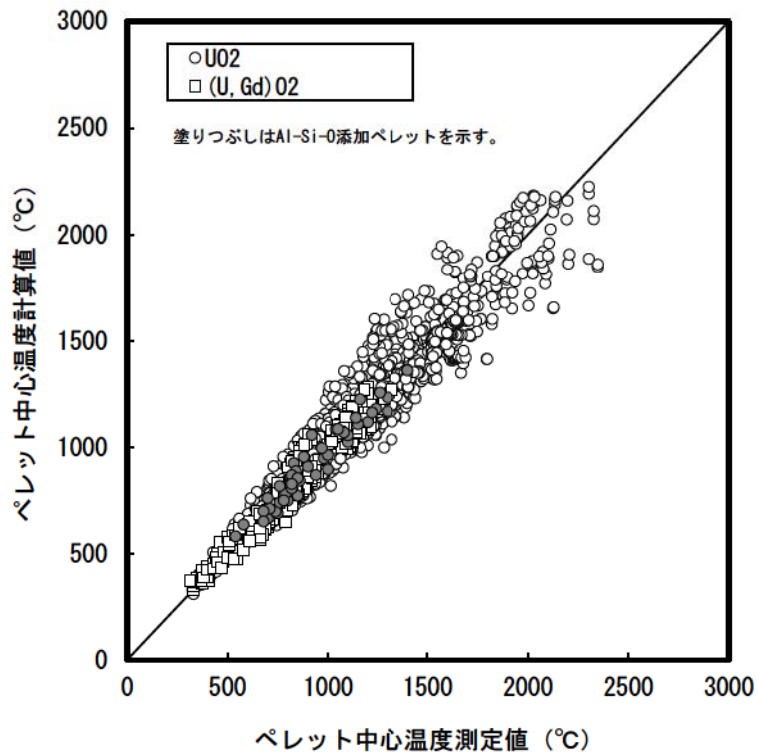
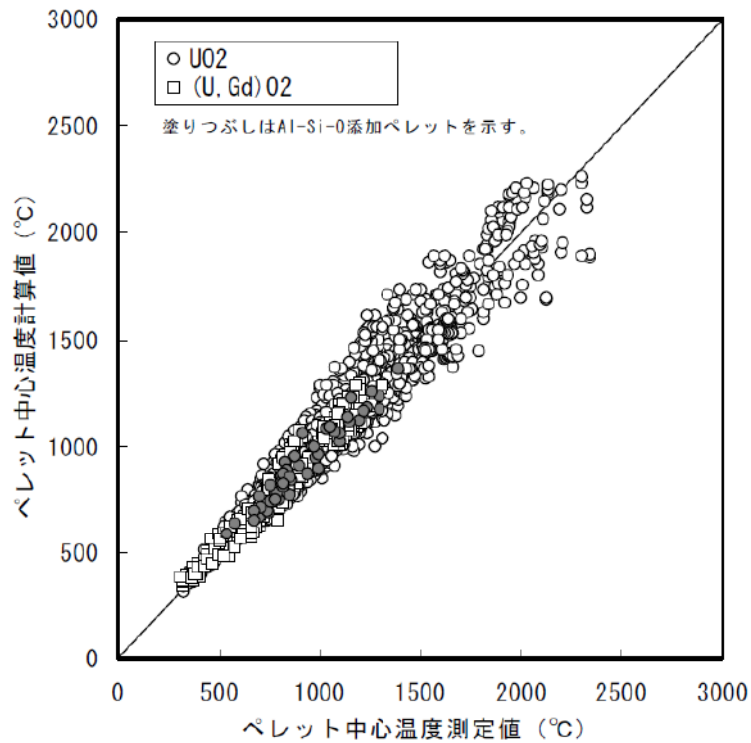


図 3-1 ペレット中心温度の測定値と計算値の比較



(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.0 付録-1
提出年月日	2023年6月21日

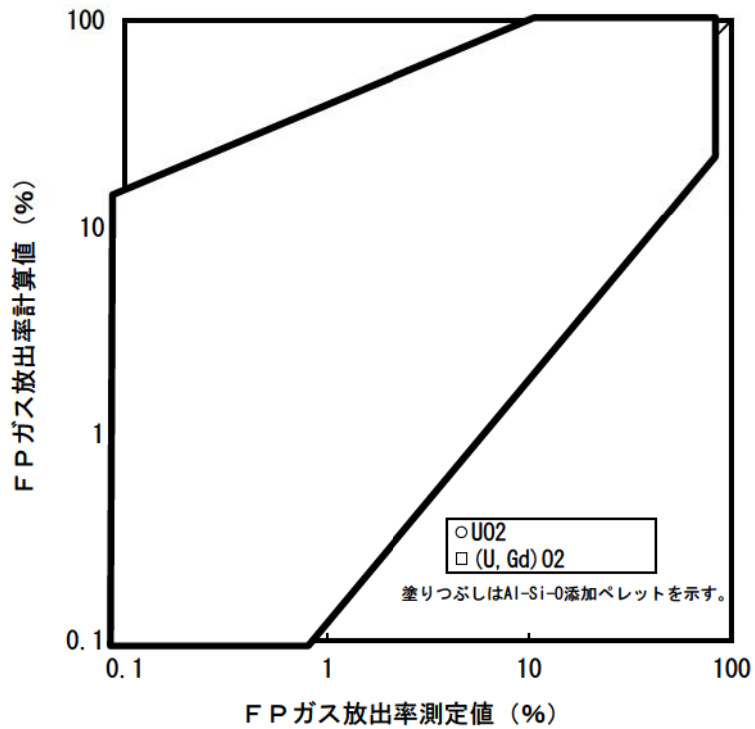
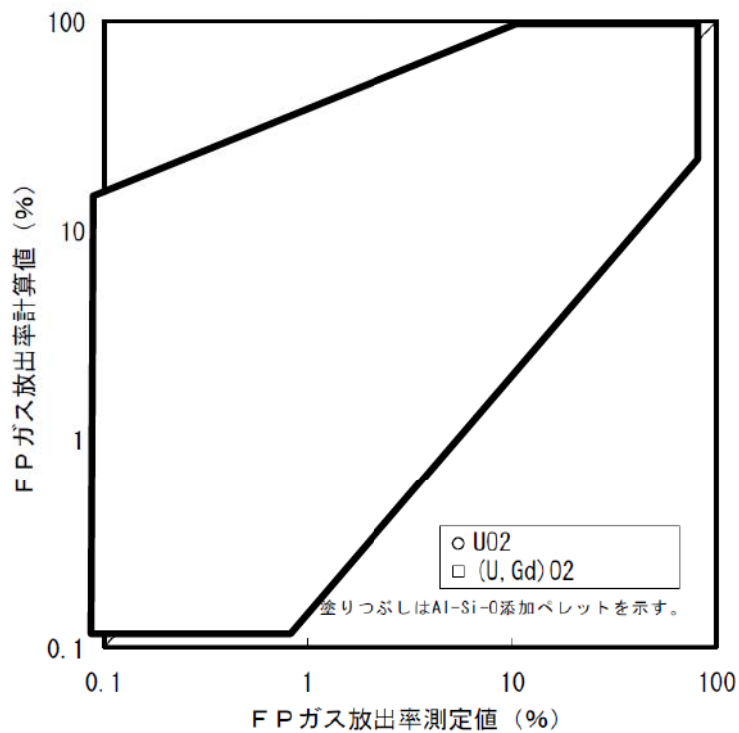


図 3-2 FP ガス放出率の測定値と計算値の比較



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

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.0 付録-1
提出年月日	2023年6月21日

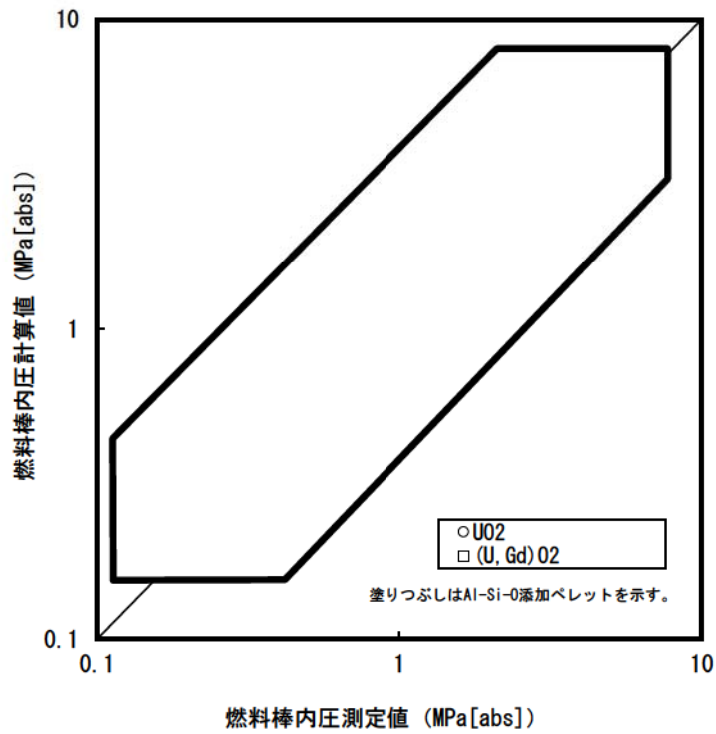
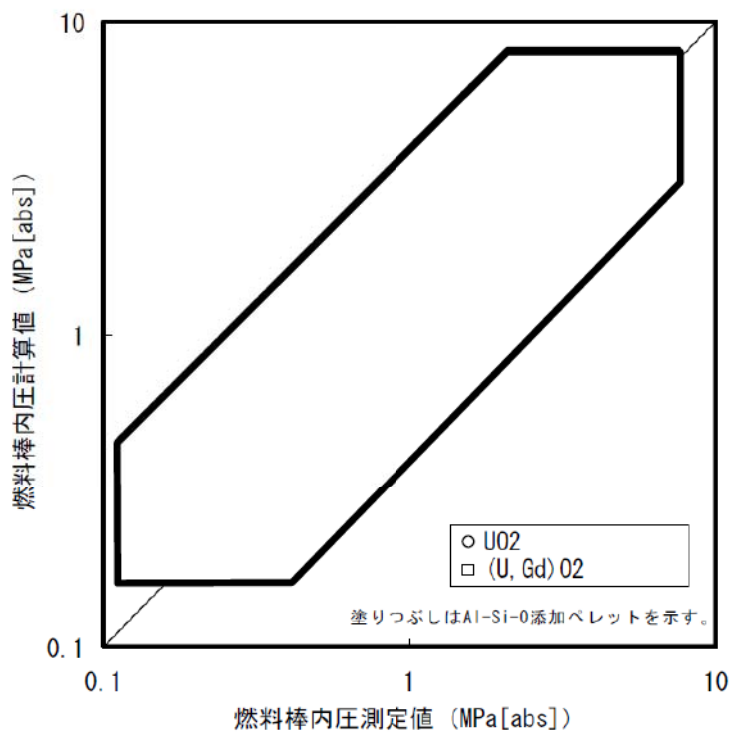


図 3-3 燃料棒内圧の測定値と計算値の比較



(参考図 3) 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>

GNF3 型式証明 審査資料	
資料番号	007N7986 Rev.0 付録-1
提出年月日	2023年6月21日

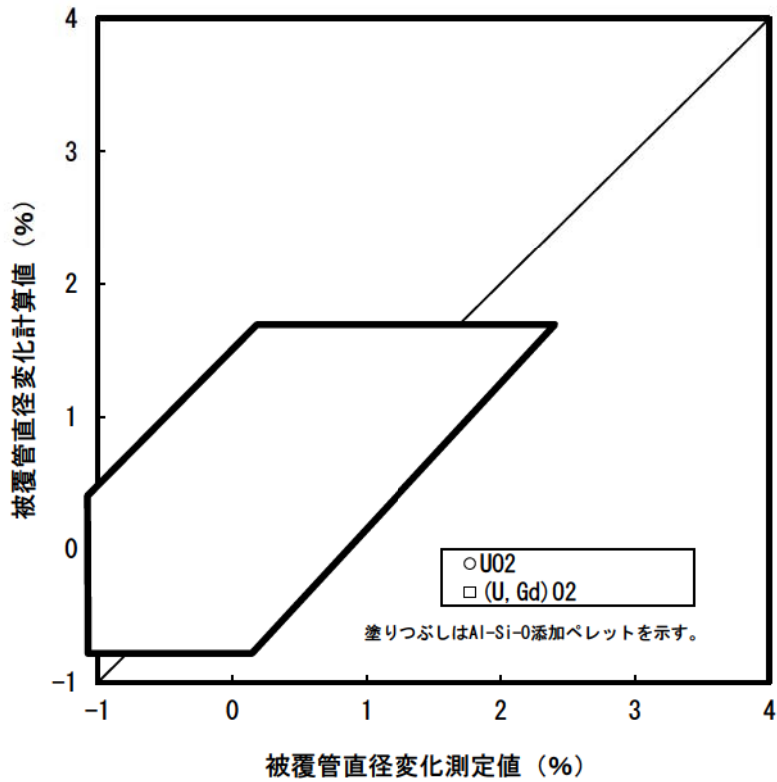
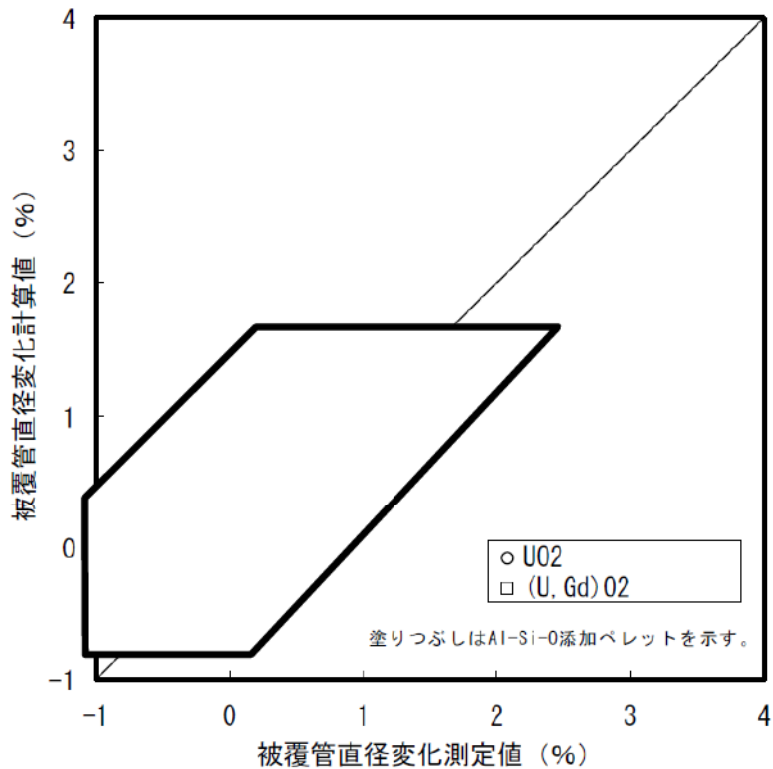


図 3-4 被覆管塑性歪の測定値と計算値の比較



(参考図 4) 被覆管塑性歪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>