

# 金属燃料高速炉の炉心・燃料設計に関する研究 (4), (5) 及び (6)

—2009-2012 年度共同研究報告書—

Fuel and Core Design Studies on Metal Fuel Sodium-cooled Fast Reactor  
(4), (5) and (6)

- Joint Research Report for JFY2009 - 2012 -

植松 眞理 マリアンヌ 杉野 和輝 川島 克之 岡野 靖  
山路 哲史 永沼 正行 大木 繁夫 大久保 努  
太田 宏一 尾形 孝成 植田 伸幸 中村 勤也  
稲垣 健太

Mari Marianne UEMATSU, Kazuteru SUGINO, Katsuyuki KAWASHIMA, Yasushi OKANO  
Akifumi YAMAJI, Masayuki NAGANUMA, Shigeo OHKI, Tsutomu OKUBO  
Hirokazu OHTA, Takanari OGATA, Nobuyuki UEDA, Kinya NAKAMURA  
and Kenta INAGAKI

次世代原子力システム研究開発部門

Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

February 2013

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

## 金属燃料高速炉の炉心・燃料設計に関する研究（４）、（５）及び（６） —2009-2012 年度共同研究報告書—

日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門

植松 眞理マリアンヌ<sup>+1</sup>、杉野 和輝<sup>+2</sup>、川島 克之<sup>+2※</sup>、岡野 靖<sup>+2</sup>、山路 哲史<sup>+2</sup>  
永沼 正行<sup>+3</sup>、大木 繁夫<sup>+2</sup>、大久保 努<sup>+2</sup>  
太田 宏一<sup>\*1</sup>、尾形 孝成<sup>\*1</sup>、植田 伸幸<sup>\*2</sup>、中村 勤也<sup>\*1</sup>、稲垣 健太<sup>\*1</sup>

(2012 年 12 月 20 日 受理)

ナトリウム冷却金属燃料炉心は MOX 燃料炉心に比べ重金属密度が高く中性子経済が良好である。こうした特徴を活かし、燃料仕様やナトリウムボイド反応度及びバンドル部圧力損失などの炉心設計条件に柔軟性を持たせることで、高燃焼度化、増殖比の向上、燃料インベントリの低減などを目指した炉心設計が可能である。また、米国では実炉の装荷燃料として使用してきた経験が豊富であり、その実用性が実証されてきていることから、高速増殖炉サイクル実用化研究開発 (FaCT) のなかで、MOX 燃料炉心に続く副概念として概念検討が実施されてきた。一方、金属燃料サイクルの実用化に向けては、金属燃料の高温・高燃焼度条件における照射試験やマイナーアクチニド・希土類含有燃料の物性などのデータ拡充や、金属燃料炉心特有の安全特性の確認、過渡時解析手法の信頼性向上などの課題が残されている。

本報では平成 21 年度から平成 24 年度に実施した日本原子力研究開発機構と電力中央研究所による共同研究「金属燃料高速炉の炉心・燃料設計に関する研究」の結果として、近年の金属燃料照射試験について報告するとともに、2010 年に年公開された核データライブラリ JENDL-4.0 を用いた金属燃料炉心解析について報告する。また、革新的金属燃料炉心として、高速炉の炉心・安全特性の向上を志向した粒子型金属燃料炉心概念についての検討結果を報告する。更に、金属燃料炉心の安全設計上の特徴を、炉心損傷時の挙動解析を踏まえて考察した結果について報告する。また、今後の金属燃料サイクルの実用化に向けた開発課題について整理した結果を示す。

---

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

+1 プロジェクト推進室

+2 炉システム開発計画室

+3 燃料材料技術開発ユニット

※ 技術開発協力員

\*1 一般財団法人 電力中央研究所

\*2 一般社団法人 原子力安全推進協会

**Fuel and Core Design Studies on Metal Fuel Sodium-cooled Fast Reactor (4), (5) and (6)  
- Joint Research Report for JFY2009 - 2012 -**

Mari Marianne UEMATSU<sup>+1</sup>, Kazuteru SUGINO<sup>+2</sup>, Katsuyuki KAWASHIMA<sup>+2※</sup>, Yasushi OKANO<sup>+2</sup>,  
Akifumi YAMAJI<sup>+2</sup>, Masayuki NAGANUMA<sup>+3</sup>, Shigeo OHKI<sup>+2</sup>, Tsutomu OKUBO<sup>+2</sup>,  
Hirokazu OHTA<sup>\*1</sup>, Takanari OGATA<sup>\*1</sup>, Nobuyuki UEDA<sup>\*2</sup>,  
Kinya NAKAMURA<sup>\*1</sup> and Kenta INAGAKI<sup>\*1</sup>

Advanced Nuclear System Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 20, 2012)

The characteristics of sodium-cooled metal fuel core compared to MOX fuel core are given by its higher heavy metal density and superior neutron economy. By taking advantage of these characteristics and allowing flexibility in metal fuel specification and core design conditions as sodium void reactivity and bundle pressure drop, core design with high burnup, high breeding ratio and low fuel inventory features will be achievable. On ground of the major achievements in metal fuels utilization as driver fuels in sodium fast reactors in U.S., the metal fuel core concept is selected as a possible alternative of MOX fuel core concept in the fast reactor cycle technology development project (FaCT). Meanwhile, substantial expansion of physical property data of minor actinide and rare earth bearing fuel as well as irradiation tests under elevated temperature and high burnup condition are required for practical use of metal fuel cycle. Furthermore, there remain issues as verification of safety features specific to the metal fuel core, and reliability improvement of transient analysis method.

This report describes the following items as a result of the joint study on ‘Reactor core and fuel design of metal fuel core of sodium-cooled fast reactor’ conducted by the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) and the Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) during 4 years from fiscal year 2009 to 2012; description of the recent metal fuel irradiation tests, results of metal fuel core analysis using the latest Japanese evaluated nuclear data library JENDL-4.0, and study on an innovative pebble type metal fuel core that is oriented to improved core characteristics and safety. Furthermore, study on safety design characteristics of metal fuel core based on behavior analysis during core disruptive accident are described. The development issues toward the practical use of metal fuel cycles are also pointed out in this report.

Keywords: Sodium-cooled Fast Reactor, Metal Fuel, Core Design, Irradiation, JENDL-4.0, Safety

---

+1 Project Promotion Office

+2 JSFR Systems Development Planning Office

+3 Fast Reactor Fuels and Materials Technology Development Unit

※ Collaborating Engineer

\*1 Central Research Institute of Electric Power Industry

\*2 Japan Nuclear Safety Institute



## 目 次

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| 1. 序論 .....                            | 1  |
| 2. 金属燃料高速炉の炉心・燃料設計の現状整理 .....          | 3  |
| 2.1 金属燃料高速炉の研究開発状況 .....               | 3  |
| 2.2 近年の金属燃料照射試験 .....                  | 4  |
| 2.2.1 照射試験の概要 .....                    | 4  |
| 2.2.2 照射後試験の概要 .....                   | 5  |
| 2.2.3 MA 核変換技術の実用化に向けた今後の課題 .....      | 10 |
| 3. 金属燃料炉心の設計検討 .....                   | 27 |
| 3.1 平成 18 年度レファレンス炉心の概要 .....          | 27 |
| 3.1.1 検討条件及び解析方法 .....                 | 27 |
| 3.1.2 設計検討 .....                       | 29 |
| 3.1.3 選定炉心の核熱特性評価 .....                | 30 |
| 3.2 JENDL-4.0 概要 .....                 | 31 |
| 3.2.1 JENDL-4.0 の評価 .....              | 32 |
| 3.2.2 JENDL-4.0 の高速炉ベンチマーク結果の概要 .....  | 33 |
| 3.2.3 JENDL-4.0 の検証結果 .....            | 33 |
| 3.3 JENDL-4.0 を用いた MOX 燃料炉心解析 .....    | 35 |
| 3.3.1 解析条件 .....                       | 35 |
| 3.3.2 解析結果 .....                       | 36 |
| 3.3.3 まとめ .....                        | 36 |
| 3.4 電中研で整備している炉心解析コードによる金属燃料炉心解析 ..... | 36 |
| 3.4.1 電中研で整備されている高速炉炉心特性解析コードの概要 ..... | 37 |
| 3.4.2 FaCT レファレンス炉心の解析 .....           | 38 |
| 3.4.3 燃料組成の変化による炉心特性への影響 .....         | 39 |
| 3.4.4 まとめ .....                        | 40 |
| 3.5 粒子型金属燃料炉心の検討 .....                 | 40 |
| 3.5.1 検討の目的・着眼点 .....                  | 40 |
| 3.5.2 炉心概念の検討 .....                    | 41 |
| 3.5.3 ULOF 時における改善効果 .....             | 41 |
| 3.5.4 まとめ .....                        | 42 |
| 4. 安全性に関する検討 .....                     | 70 |
| 4.1 金属燃料の安全上の特徴 .....                  | 70 |
| 4.1.1 酸化物燃料との比較 .....                  | 70 |
| 4.1.2 燃料－被覆管間の液相形成 .....               | 71 |
| 4.1.3 ULOF 時の事象進展予測 .....              | 71 |
| 4.1.4 金属燃料における熔融燃料挙動 .....             | 72 |

|       |                           |     |
|-------|---------------------------|-----|
| 4.2   | 金属燃料炉心損傷解析コード CANIS ..... | 73  |
| 4.2.1 | CANIS コードの概要 .....        | 73  |
| 4.2.2 | 燃料溶融、溶融キャビティモデル .....     | 74  |
| 4.2.3 | 燃料分散条件と被覆管破損モデル .....     | 74  |
| 4.2.4 | 燃料分散モデル .....             | 74  |
| 4.3   | CANIS による炉心損傷解析 .....     | 75  |
| 4.3.1 | 大型炉心の評価 .....             | 75  |
| 4.3.2 | 中型炉心の評価 .....             | 77  |
| 4.4   | 平成 18 年度レファレンス炉心の評価 ..... | 79  |
| 4.4.1 | 燃料・炉心仕様及び炉心の特徴 .....      | 79  |
| 4.4.2 | 最大投入 Na ボイド反応度の予測 .....   | 79  |
| 4.4.3 | 再臨界性の検討 .....             | 81  |
| 4.5   | まとめ .....                 | 82  |
| 5.    | 金属燃料炉心の開発課題の検討 .....      | 105 |
| 5.1   | オープンコア照射試験の検討 .....       | 105 |
| 5.1.1 | 試験目的の設定 .....             | 105 |
| 5.1.2 | 照射条件 .....                | 106 |
| 5.1.3 | 試験燃料ピンの仕様 .....           | 106 |
| 5.1.4 | 課題 .....                  | 106 |
| 5.2   | 実用化に向けた課題 .....           | 107 |
| 5.2.1 | 背景と目的 .....               | 107 |
| 5.2.2 | 金属燃料炉心の利点 .....           | 108 |
| 5.2.3 | 金属燃料炉心の課題と対策 .....        | 108 |
| 5.2.4 | SASS 有効性の検討例 .....        | 110 |
| 5.2.5 | まとめ .....                 | 111 |
| 6.    | 結論 .....                  | 119 |
|       | 参考文献 .....                | 121 |

## Contents

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introduction .....                                                         | 1  |
| 2. Current status of core and fuel design studies on metal fuel SFR .....     | 3  |
| 2.1 Development status of metal fuel SFR .....                                | 3  |
| 2.2 Latest metal fuel irradiation test.....                                   | 4  |
| 2.2.1 Outline of the irradiation test .....                                   | 4  |
| 2.2.2 Outline of the post-irradiation experiment .....                        | 5  |
| 2.2.3 Future issues for implementation of MA transmutation technologies ..... | 10 |
| 3. Conceptual design study of metal fuel core .....                           | 27 |
| 3.1 Outline of the metal fuel reference core design (2006) .....              | 27 |
| 3.1.1 Conditions and calculation method .....                                 | 27 |
| 3.1.2 Core design study.....                                                  | 29 |
| 3.1.3 Neutronics and thermal characteristics of the FaCT reference core ..... | 30 |
| 3.2 Outline of JENDL-4.0 .....                                                | 31 |
| 3.2.1 Evaluation of JENDL-4.0 .....                                           | 32 |
| 3.2.2 JENDL-4.0 benchmarking for fast reactor application .....               | 33 |
| 3.2.3 Validation of JENDL-4.0 .....                                           | 33 |
| 3.3 MOX fuel core analysis with JENDL-4.0 .....                               | 35 |
| 3.3.1 Condition of the analysis .....                                         | 35 |
| 3.3.2 Results of the analysis.....                                            | 36 |
| 3.3.3 Summary .....                                                           | 36 |
| 3.4 Metal fuel core analysis with JENDL-4.0 conducted by CRIEPI .....         | 36 |
| 3.4.1 Outline of fast reactor core analysis codes used in CRIEPI .....        | 37 |
| 3.4.2 FaCT reference core analysis .....                                      | 38 |
| 3.4.3 Effect of fuel composition change on core characteristics .....         | 39 |
| 3.4.4 Summary .....                                                           | 40 |
| 3.5 Pebble type metal fuel core .....                                         | 40 |
| 3.5.1 Scope of the study .....                                                | 40 |
| 3.5.2 Core design study .....                                                 | 41 |
| 3.5.3 Analysis of ULOF .....                                                  | 41 |
| 3.5.4 Summary .....                                                           | 42 |
| 4. Safety study on metal fuel core .....                                      | 70 |
| 4.1 Safety characteristics of metal fuel core.....                            | 70 |
| 4.1.1 Comparison with MOX fuel core .....                                     | 70 |
| 4.1.2 Fuel – cladding liquid phase formation .....                            | 71 |
| 4.1.3 Study on ULOF event sequence .....                                      | 71 |
| 4.1.4 Molten fuel behavior of metal fuel core .....                           | 72 |

|       |                                                                   |     |
|-------|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2   | Metal fuel core disruptive accident analysis code CANIS .....     | 73  |
| 4.2.1 | Outline of CANIS code .....                                       | 73  |
| 4.2.2 | Fuel melting and melt cavity model .....                          | 74  |
| 4.2.3 | Fuel dispersal condition and cladding failure model .....         | 74  |
| 4.2.4 | Fuel dispersal model .....                                        | 74  |
| 4.3   | Postulated core disruptive events analysis using CANIS code.....  | 75  |
| 4.3.1 | Study on large size metal fuel core.....                          | 75  |
| 4.3.2 | Study on medium size metal fuel core.....                         | 77  |
| 4.4   | Safety study on the metal fuel reference core design (2006).....  | 79  |
| 4.4.1 | Core and fuel design specification and core characteristics ..... | 79  |
| 4.4.2 | Maximum installed sodium void reactivity .....                    | 79  |
| 4.4.3 | Study on possibility of re-criticality .....                      | 81  |
| 4.5   | Summary .....                                                     | 82  |
| 5.    | Conceptual design study of metal fuel core .....                  | 105 |
| 5.1   | Study on open core irradiation test plan .....                    | 105 |
| 5.1.1 | Purpose of irradiation test .....                                 | 105 |
| 5.1.2 | Irradiation test condition .....                                  | 106 |
| 5.1.3 | Design of irradiation test pin .....                              | 106 |
| 5.1.4 | Issues for open-core irradiation test .....                       | 106 |
| 5.2   | Subjects toward the implementation of metal fuel core .....       | 107 |
| 5.2.1 | Scope of the study .....                                          | 107 |
| 5.2.2 | Advantage of metal fuel core .....                                | 108 |
| 5.2.3 | Issues and measures for implementation of metal fuel core .....   | 108 |
| 5.2.4 | Study case of SASS effectiveness for metal fuel core .....        | 110 |
| 5.2.5 | Summary .....                                                     | 111 |
| 6.    | Concluding remarks .....                                          | 119 |
|       | References .....                                                  | 121 |

## 表リスト

|         |                                           |
|---------|-------------------------------------------|
| 表 2.2-1 | 燃料合金の平均組成分析結果 [wt.%]                      |
| 表 2.2-2 | アクチニドの同位体組成分析結果 [wt.%]                    |
| 表 2.2-3 | 金属燃料ピンの仕様                                 |
| 表 2.2-4 | フェニックス炉における MA 含有金属燃料の計画照射条件              |
| 表 2.2-5 | MA 添加金属燃料の照射後試験で予定されている実施項目               |
| 表 2.2-6 | METAPHIX-1 および METAPHIX-2 燃料ピンのプレナムガス分析結果 |
| 表 2.2-7 | 金相観察用サンプルの組成および照射位置                       |

|         |                                |
|---------|--------------------------------|
| 表 3.1-1 | 設計検討条件                         |
| 表 3.1-2 | 被覆管最高温度評価用工学的安全係数              |
| 表 3.1-3 | 燃料ピン径のサーベイ計算結果                 |
| 表 3.1-4 | 内側・外側燃料領域境界のサーベイ計算結果           |
| 表 3.1-5 | 燃料スミア密度 1 領域化の計算結果             |
| 表 3.1-6 | 平成 18 年度レファレンス炉心主要仕様及び核特性      |
| 表 3.1-7 | 平成 18 年度レファレンス炉心の制御反応度収支       |
| 表 3.1-8 | 平成 18 年度レファレンス炉心の流量配分と熱流力特性    |
| 表 3.3-1 | 中型 MOX 燃料炉心の炉心・燃料設計検討条件        |
| 表 3.3-2 | 中型 MOX 燃料炉心の炉心燃料の主要仕様          |
| 表 3.3-3 | 検討で使用した MOX 燃料 FBR 多重リサイクル燃料組成 |
| 表 3.3-4 | 中型 MOX 燃料炉心の炉心特性評価結果           |
| 表 3.4-1 | 炉心主要諸言                         |
| 表 3.4-2 | 炉心特性解析結果                       |
| 表 3.4-3 | 炉心設計用代表燃料組成                    |
| 表 3.4-4 | 燃料組成の変化による炉心特性への影響             |
| 表 3.5-1 | 下部ガスプレナム・稠密バンドル化による炉心特性の向上     |

|         |               |
|---------|---------------|
| 表 4.1-1 | 燃料物性値の比較      |
| 表 4.3-1 | 大型炉心の炉心仕様     |
| 表 4.3-2 | 大型炉心の集合体仕様    |
| 表 4.3-3 | 大型炉心の燃料要素仕様   |
| 表 4.3-4 | 最大出力のまとめ      |
| 表 4.3-5 | 最大ネット反応度のまとめ  |
| 表 4.3-6 | 被覆管破損孔の大きさの影響 |
| 表 4.3-7 | 同時性評価の結果      |
| 表 4.3-8 | 中型炉心の主な炉心仕様   |
| 表 4.3-9 | 炉心体積割合        |

|          |                                                            |
|----------|------------------------------------------------------------|
| 表 4.3-10 | 反応度係数                                                      |
| 表 4.3-11 | Na ボイド反応度 (\$) の分布                                         |
| 表 4.3-12 | 内側炉心の出力・流量                                                 |
| 表 4.3-13 | 中間炉心の出力・流量                                                 |
| 表 4.3-14 | 外側炉心の出力・流量(1)                                              |
| 表 4.3-15 | 外側炉心の出力・流量(2)                                              |
| 表 4.3-16 | 外側炉心の出力・流量(3)                                              |
| 表 4.3-17 | 燃料破損のイベントタイミング                                             |
| 表 4.4-1  | 平成 18 年度レファレンス炉心の主要仕様                                      |
| 表 4.4-2  | 燃料集合体各領域の体積割合 [平成 18 年度レファレンス炉心]                           |
| 表 4.4-3  | 燃料スラグ、構造材及び冷却材の密度 [平成 18 年度レファレンス炉心]                       |
| 表 4.4-4  | 集合体内径方向出力ピーキング係数<br>[平成 18 年度レファレンス炉心、平衡サイクル末期での最大線出力発生時点] |
| 表 4.4-5  | 動特性パラメータ<br>[平成 18 年度レファレンス炉心、平衡サイクル末期]                    |
| 表 4.4-6  | 流量配分領域ごとの Na ボイド反応度分担マップ                                   |
| 表 4.4-7  | P/F 判断基準に対応する破損集合体数と Na ボイド反応度寄与率                          |
| 表 5.1-1  | 試験燃料要素の仕様                                                  |
| 表 5.2-1  | 金属燃料の利用によるナトリウム冷却炉の炉心性能向上                                  |
| 表 5.2-2  | Na ボイド反応度低減炉心の設計の目安と基本仕様                                   |
| 表 5.2-3  | 大型金属燃料高出口温度型炉心の基本仕様（平衡期）と特性                                |
| 表 5.2-4  | SASS 有効性実現のための課題と対策                                        |

## 図リスト

- 図 2.2-1 MA 含有金属燃料ピンの軸方向配置図
- 図 2.2-2 照射リグ中の金属燃料ピン配置
- 図 2.2-3 フェニックス炉内の METAPHIX 照射リグの装荷位置
- 図 2.2-4 照射済み金属燃料ピンの外観 Pin#1: U-19Pu-10Zr, 燃焼度~2.5at.%.
  - (a.) 金属燃料ピン#1 (U-Pu-Zr 合金装荷)
  - (b.) 金属燃料ピン#2 (U-Pu-Zr-2MA-2RE 合金装荷)
  - (c.) 金属燃料ピン#3 (U-Pu-Zr-5MA / -5MA-5RE 合金装荷)
- 図 2.2-5 METAPHIX-1 燃料ピンの被覆管外径変化量
- 図 2.2-6 METAPHIX-2 燃料ピンの被覆管外径変化量
- 図 2.2-7 METAPHIX-3 燃料ピンの被覆管外径変化量
- 図 2.2-8 METAPHIX-1 照射ピンの  $\gamma$  線分光計測結果
  - (a.) 金属燃料ピン#1 (U-Pu-Zr 合金装荷)
  - (b.) 金属燃料ピン#2 (U-Pu-Zr-2MA-2RE 合金装荷)
  - (c.) 金属燃料ピン#3 (U-Pu-Zr-5MA / -5MA-5RE 合金装荷)
- 図 2.2-9 METAPHIX-2 照射ピンの  $\gamma$  線分光計測結果
  - (a.) 金属燃料ピン#1 (U-Pu-Zr 合金装荷)
  - (b.) 金属燃料ピン#2 (U-Pu-Zr-2MA-2RE 合金装荷)
  - (c.) 金属燃料ピン#3 (U-Pu-Zr-5MA / -5MA-5RE 合金装荷)
- 図 2.2-10 METAPHIX-3 照射ピンの  $\gamma$  線分光計測結果
  - (a.) 金属燃料ピン#1 (U-Pu-Zr 合金装荷)
  - (b.) 金属燃料ピン#2 (U-Pu-Zr-2MA-2RE 合金装荷)
  - (c.) 金属燃料ピン#3 (U-Pu-Zr-5MA / -5MA-5RE 合金装荷)
- 図 2.2-11 照射による燃料スタックの軸方向スエリング
- 図 2.2-12 燃焼の進展による  $^{137}\text{Cs}$  の分布の変化
- 図 2.2-13 FP ガス放出率の燃焼度依存性
- 図 2.2-14 燃料スタック下端から~405mm の位置で照射されたサンプル#1 の金相写真
- 図 2.2-15 燃料スタック下端から~440mm の位置で照射されたサンプル#2 の金相写真
- 図 2.2-16 燃料スタック下端から~145mm の位置で照射されたサンプル#3 の金相写真
- 図 2.2-17 燃料スタック下端から~370mm の位置で照射されたサンプル#4 の金相写真
- 図 2.2-18 MA および RE を添加した U-Pu-Zr 合金燃料の金相写真
- 図 2.2-19 燃料スタック下端から~320mm の位置で照射されたサンプル#5 の金相写真
- 図 2.2-20 燃料スタック下端から~370mm の位置で照射されたサンプル#6 の金相写真
  
- 図 3.1-1 平成 18 年度レファレンス炉心の炉心配置
- 図 3.1-2 平成 18 年度レファレンス炉心の流量領域区分
- 図 3.2-1 新旧 JENDL による解析結果の比較 — 臨界性 —
- 図 3.2-2 新旧 JENDL による解析結果の比較 — 制御棒価値 —
- 図 3.2-3 新旧 JENDL による解析結果の比較
  - (1) — U-235 核分裂反応率分布 —

- (2) -U-238 核分裂反応率分布-
- (3) -U-238 捕獲反応率分布-
- 図 3.2-4 新旧 JENDL による解析結果の比較 -U-238 捕獲対 Pu-239 核分裂反応率比-
- 図 3.2-5 新旧 JENDL による解析結果の比較
  - (1) -Na ボイド反応度 (Pu 燃料炉心) -
  - (2) -Na ボイド反応度 (濃縮 U 燃料炉心) -
- 図 3.2-6 新旧 JENDL による解析結果の比較 -ドップラ反応度関連-
- 図 3.2-7 新旧 JENDL による解析結果の比較
  - ドライバ燃料照射後試験における核種毎の燃焼率-
- 図 3.2-8 新旧 JENDL による解析結果の比較
  - (1) -MA サンプル照射後試験における照射後核種組成 (Np-237 サンプル) -
  - (2) -MA サンプル照射後試験における照射後核種組成 (Am-241 サンプル) -
  - (3) -MA サンプル照射後試験における照射後核種毎組成 (Am-243 サンプル) -
  - (4) -MA サンプル照射後試験における照射後核種毎組成 (Cm-244 サンプル) -
- 図 3.3-1 内部ダクト付燃料集合体の構造概念
- 図 3.3-2 中型 MOX 燃料炉心の炉心配置
- 図 3.4-1 電中研で整備している高速炉炉心特性解析コードの概要
- 図 3.4-2 電中研解析に用いた平成 18 年度レファレンス炉心の炉心配置
- 図 3.5-1 下部ガスプレナム型炉の ULOF 解析結果
- 図 4.1-1 高温側の液相浸食試験結果
- 図 4.1-2 金属燃料炉心における ULOF 起因過程の事象推移
- 図 4.1-3 ULOF 時の熔融燃料の放出・分散
- 図 4.2-1 金属燃料炉心損傷解析コード CANIS のモデル
- 図 4.3-1 CANIS 解析用集合体グルーピング (中型炉心)
- 図 4.3-2 基準ケースの出力履歴図
- 図 4.3-3 基準ケースの反応度履歴
- 図 4.3-4 基準ケースの反応度履歴
- 図 4.3-5 基準ケースの反応度履歴 (ピーク周辺)
- 図 4.3-6 代表チャンネル 1 における冷却材と燃料反応度の推移
- 図 4.3-7 代表チャンネル 1 における燃料溶融キャビティ圧力と臨界流速の変化
- 図 4.3-8 起因過程解析結果のまとめ
- 図 4.3-9 中型炉心の炉心体系 (1/3 炉心)
- 図 4.3-10 (1)中型炉心の P/F 分布, (2)大型炉心の P/F 分布
- 図 4.3-11 解析結果：出力と反応度の推移
- 図 4.3-12 解析結果：被覆管破損温度の影響 (1)
- 図 4.3-13 解析結果：被覆管破損温度の影響 (2)



- 図 4.4-1 平成 18 年度レファレンス炉心の燃料集合体構造概念
- 図 4.4-2 中型炉心の破損進展（抜粋：先行破損チャンネル）
- 図 4.4-3 反応度変化とチャンネル保有ボイド反応度価値の比較
- 図 4.4-4 集合体分布：中型炉心の破損／非破損集合体分布、レファレンス炉心
- 図 4.4-5 レファレンス炉心の流量配分領域ごとの集合体分布、領域 1、領域 2
- 図 4.4-6 下限 P/F と Na ボイド反応度投入量の関係
  
- 図 5.1-1 オープンコア照射用金属燃料ピン
- 図 5.2-1 HIPRAC コード解析モデル

This is a blank page.

## 1. 序論

実用炉を想定した金属燃料ナトリウム冷却高速増殖炉については、実用化戦略調査研究（Feasibility study on commercialized fast reactor cycle systems : FS）のなかで、主概念である MOX 燃料ナトリウム冷却高速増殖炉と比較した場合、「技術的実現性において不確実性が高いものの、将来の社会環境によっては主概念よりもその時点の社会に柔軟に適合する可能性がある」と考える。今後、国際協力を通じ、着実に研究開発が行われることを期待する。」とされ、FS に続いて実施された高速増殖炉サイクル実用化研究開発（Fast reactor cycle technology development : FaCT）のなかでは副概念（以下、FaCT 副概念）として継続して概念検討が実施されている。FaCT 副概念の炉心設計は、プラント設計で要求される取合条件及び FBR 導入シナリオとの整合性の観点から運転サイクル長さや取出平均燃焼度などの設計要求項目を満足しつつ、MOX 燃料炉心と同等の性能を実現するものである。

核燃料サイクル開発機構（現 日本原子力研究開発機構）と一般財団法人電力中央研究所（以下、電中研と記す）は、平成 11 年度から平成 15 年度にかけて、共同研究「金属燃料高速炉の炉心燃料設計に関する研究（1）」及び「同（2）」を実施した[1-1,1-2]。また、これに引き続き、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構と記す）と電中研は、平成 19 年度から平成 20 年度にかけて「金属燃料高速炉の炉心・燃料設計に関する研究（3）」を実施した[1-3]。

これまで実施されてきた原子力機構及び電中研の共同研究においては、金属燃料設計手法を整備し、実用炉を想定した金属燃料炉心性能を定量化するとともに、燃料仕様の設定範囲に関する検討、炉心設計に関する検討、安全設計に関する検討を実施し、従来の金属燃料炉心概念を上回る炉心特性を有する金属燃料炉心概念の方向性が示された。

これら共同研究において得られた成果は、FaCT 副概念炉心の研究開発として、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCT プロジェクト）－フェーズⅠ報告書－（平成 18 年度～平成 22 年度）」の取り纏めに活用されている[1-4]。

本報では平成 21 年度から平成 24 年度に実施した原子力機構及び電中研による共同研究「金属燃料高速炉の炉心燃料設計に関する研究（4）」、「同（5）」及び「同（6）」の結果として、現在までの金属燃料サイクルに関する開発状況を整理するとともに、近年の金属燃料照射試験の実施状況について報告する。

また、2010 年 5 月に公開された国内核データライブラリ JENDL-4.0 を用い、MOX 燃料炉心解析並びに金属燃料炉心解析を実施し、解析評価における同ライブラリの主な特徴を確認するとともに、金属燃料炉心核特性を評価する。更に、従来炉心設計における安全性を損なわない範囲において、金属燃料炉心としてより魅力の高い概念を検討する観点から、従来のスラグ状金属燃料に代わり、大小の燃料粒子を燃料被覆管内で混合した粒子型金属燃料の炉心概念検討を実施する。

金属燃料炉心の安全性については、過去の「金属燃料高速炉の炉心燃料設計に関する研究」[1-3]において、FaCT 副概念炉心の安全上の特性について取り纏められている。本報告では、FaCT 副概念炉心の炉心流量喪失型スクラム失敗事象（Unprotected loss of flow : ULOF）時の炉心損傷事故（Core disruptive accident : CDA）起因過程における挙動について、炉心核特性、熱

流動設計の特徴を分析するとともに、過去の金属燃料炉心における起因過程時の挙動解析を基に、FaCT 副概念炉心における事象推移を考察する。

また、金属燃料炉心はその特性を活かした柔軟な炉心設計が可能である一方、炉心出口温度の高温化と金属燃料ピン健全性の両立、CDA 起因過程における受動的炉停止機構 (Self-actuated shutdown system : SASS) の有効性の確保等の課題が残されていることから、これまでの設計検討結果を基に今後の金属燃料炉心の開発課題について纏める。

## 2. 金属燃料高速炉の炉心・燃料設計の現状整理

金属燃料サイクルは、高増殖比あるいは低プルトニウム装荷量の炉心による柔軟なプルトニウム需要調整が可能であること、小規模な燃料サイクル施設でも経済性を確保する可能性があることなどの特長があり、将来の社会環境によっては FaCT 主概念である MOX 燃料高速炉サイクルよりも、その時点の社会に適合する可能性がある。また金属燃料サイクルの技術的課題の多くに解決の見通しが立ってきており、実用化に向けた致命的な欠陥も見出されていない。米国では核拡散抵抗性に着目して金属燃料サイクルの開発を継続しており、中国、韓国、インド等の諸国でも増殖比が高い特性を重視し研究開発を進めている。韓国、インドではすでにホット試験施設等の実験室規模から工学規模の研究を完成させており、金属燃料高速実証炉の 2020 年代の運転開始を計画している。

我が国では、金属燃料高速炉サイクルの特性や技術開発状況、国際的な開発情勢を踏まえ、金属燃料高速炉サイクルを FaCT 副概念として選定し研究開発を進めてきている。このなかで、原子力機構と電中研は「FaCT に関する研究協力覚書」を取り交わし FaCT 副概念の研究開発に協力して取り組んでいる。炉心・燃料設計に係る研究開発については、これまでに、高温条件での燃料健全性、マイナーアクチニド（Minor Actinides : MA）含有燃料の照射健全性などの確保を目指すとともに、この概念の持つ魅力を活かす炉心設計のための研究が実施されている。

本章では、第 2.1 節に我が国における金属燃料高速炉に係る研究開発状況を整理するとともに、第 2.2 節に近年の金属燃料照射試験の概要について報告する。

### 2.1 金属燃料高速炉の研究開発状況

金属燃料炉心設計に関しては、炉心出力分布の平坦化及び変動抑制と、冷却材流量配分の最適化によって、燃料被覆管最高温度 650℃の制限下で、MOX 燃料炉心と同等の炉心入口／出口温度（395℃／550℃）を達成する「ナトリウム冷却金属燃料高出口温度型炉心」等の設計検討が行われた。同検討の結果、ナトリウム冷却金属燃料高出口温度型炉心を FaCT 副概念レファレンス炉心として設定し、レファレンス炉心をベースとして、燃料ピン径や内外炉心集合体数等をパラメータとした炉心特性解析を行った。その結果、ナトリウムボイド反応度（以下、Na ボイド反応度）を大幅に低減した炉心の成立性が確認されている。更に従来概念を上回る高性能化を目的として、燃料仕様や Na ボイド反応度等の安全要求を含む炉心設計条件に柔軟性を持たせた場合を想定し、高増殖率炉心、低 Na ボイド反応度炉心等の炉心について設計検討を実施した[1-4]。その結果、ブランケットを無くした炉心で増殖比 1.3 以上を達成可能な炉心概念、炉内プルトニウム（Pu）装荷量を標準的な金属燃料炉心の約 2/3 とする炉心概念の可能性が見いだされた。

金属燃料炉心の安全評価に関しては、CDA 起因過程における SASS 有効性の確保や、即発臨界及び再臨界の回避等についての設計検討が行われ、SASS 有効性確保の観点から、Na ボイド反応度を低減した炉心設計が検討された。また FaCT 副概念レファレンス炉心を対象とした過渡解析が行われ、SASS 有効性実現のための課題と対策が示されている。

今後の金属燃料炉心の実用化を目指した開発課題としては、金属燃料の実用条件での照射健全性の確認や、金属燃料固有の安全性特性の確認が挙げられる。具体的には、MA 含有金属燃料の照射挙動確認、高温・高燃焼度の金属燃料試料の照射試験、金属燃料集合体照射試験、径方向膨張反応度効果の確認試験、CDA 起因過程時における即発臨界回避策の有効性の確認などである。

なお、近年の照射試験としては、被覆管最高温度約 650℃における金属燃料の健全性確認を目的とした「常陽」キャプセル照射試験が計画されており、国内の射出鑄造法による燃料スラグの製造技術を用い、設工認を受けて長さ 200mm、外径約 5mm のウラン-20%プルトニウム-10%ジルコニウム (U-20Pu-10Zr (重量%)) 燃料スラグを 6 本製造し、照射用金属燃料ピン 6 本の組立が完了している。また、電中研及び欧州連合超ウラン元素研究所 (Institute for Transuranium Elements: ITU) の共同研究のもと、フェニックスにおいて MA 及び希土類元素 (Rare Earth : RE) を添加したウラン-プルトニウム-ジルコニウム (U-Pu-Zr) 合金燃料の照射試験が実施されているが、本試験の詳細については第 2.2 節で述べる。

## 2.2 近年の金属燃料照射試験

近年の金属燃料照射試験として、米国 DOE による先進核燃料サイクルイニシアティブ (AFCI) プログラムの下、AFC-1 および AFC-2 試験シリーズが実施されている。AFC 照射試験では、Advanced Test Reactor (ATR) において、高濃縮ウラン (U) を用いて比較的高濃度のジルコニウム (Zr) を含有するウラン-プルトニウム-ジルコニウム (U-Pu-Zr) にアメリシウム (Am) やネプツニウム (Np) を添加した合金が燃焼度 8-10at.%(AFC-1) および 10-20at.%(AFC-2) まで照射されている。さらに、国際共同研究である FUTURIX-FTA 試験の一部として、U を含まない Pu-Am-Zr 合金や U 濃度を低減した U-Pu-Am-Np-Zr 合金が、仏国の高速炉フェニックスで照射されている。

国内では、電中研が ITU と共同で、METAPHIX 試験を実施している[2.2-1~2.2-12]。METAPHIX 試験では、U-Pu-Zr 燃料の照射データを拡充するとともに、マイナーアクチニド元素 (MA : ネプツニウム (Np)、アメリシウム (Am)、キュリウム (Cm)) や希土類元素 (RE : イットリウム (Y)、セリウム (Ce)、ネオジム (Nd)、ガドリニウム (Gd)) を添加した場合の影響を明らかにし、金属燃料による MA 燃焼特性を実証することを目的としている。照射試験は高速炉フェニックスにおいて実施され、続く照射後試験は、燃料ピンを ITU に移送して実施している。

以下では、特に MA を添加した金属燃料の照射試験の概要についてまとめる。

### 2.2.1 照射試験の概要

照射試験に先立つ炉外物性研究[2.2-1]や燃料製造試験[2.2-2, 2.2-3]の結果、通常の三元合金 : U-19Pu-10Zr の他、3 種類の MA 及び RE 含有合金 : U-19Pu-10Zr-2MA-2RE、U-19Pu-10Zr-5MA-5RE、U-19Pu-10Zr-5MA (重量%) が照射試料に設定され、仏国 CEA の協力のもと高速炉フェニックスにて照射試験が行われた。

照射試験用の燃料合金は、所定の重量に調整された各原料金属を機械的に混合した後、アー

ク溶解し、イットリア坩堝を用いてロッド状に鑄造した。鑄造後、合金試料の両端を切断し、組成分析試料とした。表 2.2-1 に製造された合金の組成分析結果の平均およびそのばらつきを、表 2.2-2 に U, Pu, Am, Cm の同位体組成比の分析結果を示す。なお Np の同位体組成は、ほぼ 100% が  $^{237}\text{Np}$  であることが確認されている。

鑄造された金属燃料合金はダイヤモンドカッターで 20-50mm の長さのロッドに切断し、窒素雰囲気のもと、金属ナトリウムとともに被覆管に装荷された。被覆管材には仏国での利用実績が豊富でフェニックス炉の炉心燃料にも採用されている 15-15Ti 鋼[2.2-13, 2.2-14, 2.2-15]が利用された。その後、被覆管を外部から加熱することで、金属ナトリウムが溶解され、熱的なボン ド材（ボン ドナトリウム）として燃料－被覆管ギャップ部に充填されている。ボン ドナトリウムのギャップ部への浸入および燃料ロッドの下端への着座を確認した後、被覆管が溶接封入された。製造された燃料ピンの仕様を表 2.2-3 に示す。

照射試験に用いられる MA 含有合金は長さが 100mm と限定されていたため、上下を長さ 100mm と 285mm の U-19Pu-10Zr 三元合金ロッドではさむことで全長 485mm の燃料スタックが製作された。図 2.2-1 に照射試験燃料ピンの模式図をフェニックス炉のドライバ燃料（酸化物燃料ピン）と比較して示す。図 2.2-1 から、本照射試験の燃料スタックが、炉心の比較的下部に装荷されていることが分かる。

照射試験用に、合計 9 本の合金燃料ピン、すなわち、#1. MA や RE を含まない U-19Pu-10Zr 三元合金燃料ピン、#2. U-19Pu-10Zr-2MA-2RE 合金を含む燃料ピン、#3. U-19Pu-10Zr-5MA および U-19Pu-10Zr-5MA-5RE 合金を含む燃料ピンがそれぞれ 3 本ずつ用意された [2.2-2]。これらの金属燃料ピン Pin#1、Pin#2 および Pin#3 は、16 本の酸化物燃料ドライバピンとともにフェニックス炉の専用照射カプセルに配置された。照射リグ中の金属燃料ピン配置を図 2.2-2 に示す。同様の照射カプセル 3 体（METAPHIX-1,2,3）が製造され、照射期間に応じてそれぞれ異なる燃焼度が達成された。すなわち、全出力換算日数（EFPD）でそれぞれ 120 EFPD（最高 2.5at.% ; METAPHIX-1）、360 EFPD（最高 7at.% ; METAPHIX-2）、600 EFPD（最高 10at.% ; METAPHIX-3）である。

全ての照射カプセルは 2003 年 10 月にフェニックス炉に装荷された。各カプセルの装荷位置や照射条件は実際の炉の出力分布を考慮した解析に基づいて決定された。その結果、図 2.2-3 に示すように METAPHIX-1 および-2 の照射カプセルは内側炉心第 4 列目に、METAPHIX-3 の照射カプセルは外側炉心第 1 列目に装荷された。また、METAPHIX-3 照射リグについては 120EFPD 照射後に装荷位置の変更が行われている。表 2.2-4 に計画照射条件を示す。2003 年 12 月の照射開始から 2008 年 5 月までに、ほぼ計画通り全ての照射が完了している。

## 2.2.2 照射後試験の概要

それぞれ目標とする期間の照射を達成し、炉から取り出された金属燃料ピンは、一定期間冷却された後、照射カプセルから取り外された。その後、フェニックス炉の照射後試験施設で非破壊試験が行われ、照射による燃料ピンの破損が生じていないことが確認された。ITU では、再度非破壊検査を行い、輸送による被覆管やピン内部の燃料破損の有無を確かめた後、詳細な



照射後破壊試験が実施される計画である。表 2.2-5 に計画されている照射後試験の項目および目的を示す。これまでにフェニックス炉で照射を受けた全ての試験燃料ピンの非破壊検査および ITU への移送が完了しており、2012 年度現在それらの詳細な破壊試験が進められている。

### 2.2.2.1 非破壊検査

図 2.2-4 に、照射済金属燃料ピンの外観を示す。いずれの燃料ピンにおいても、照射による被覆管の破損等は認められなかった。

#### (1) 被覆管外径変化

図 2.2-5、図 2.2-6 および図 2.2-7 に、それぞれ METAPHIX-1, -2 および-3 燃料ピンの被覆管外径変形量の測定結果をそれぞれ示す。なお図中の破線は、電中研で開発した U-Pu-Zr 三元合金燃料照射挙動解析コード ALFUS [2.2-16] に被覆管材（15-15Ti 鋼）の照射特性データを組み込んで評価した被覆管変形量の予測結果である。高感度な測定法に由来する多数の局所ピークが見られるが、これらは有意な外径変化を示すものではない。ただし、燃料スタック下部（横軸 -25mm および-5mm 近傍）に見られる 2 つの大きなピークは燃料製造時の溶接位置を示しており、このピーク位置から燃料スラグの下端位置を知ることができる。METAPHIX-1 ピンに関しては、有意な被覆管外径変化は観察されなかったが、燃料スタック領域の一部に 0.1%以下のわずかな変形が見られるものもあった。これは ALFUS による予測結果と矛盾するものではない。一方、METAPHIX-2 ピンでは、燃料スタック位置に最大 0.3-0.4%程度の被覆管外径変化が、さらに METAPHIX-3 ピンでは最大で 0.8-0.9%程度の被覆管外径変化が見られる。燃料スタックの中央付近（下端から 150~300mm 近傍）で ALFUS による予測がやや過大評価となっているものの、被覆管変形量は概ね予測の範囲内に収まっていると言え、それぞれ中性子照射量や照射温度に見合った被覆管の変形が発生しているものと考えられる。また、いずれの燃焼度においても MA や RE を添加したことによる有意な相違は見られなかった。

#### (2) ガンマ線強度分布

図 2.2-8、図 2.2-9 および図 2.2-10 に、それぞれ METAPHIX-1, -2 および-3 燃料から放出されるルテニウム  $^{106}\text{Ru}$ （ $\gamma$  線エネルギー：621.8 keV）およびセシウム  $^{137}\text{Cs}$ （ $\gamma$  線エネルギー：661.7 keV）の  $\gamma$  線の軸方向強度分布の測定結果を示す。測定は、燃料ピンを水平の可動台座に固定し、0.22mm 幅のウランコリメータを隔てて配置された Ge 検出器の前を 45 秒ごとに 1mm ステップで移動させることによって行われた。

Ru は燃料合金中をほとんど移動しないため、 $^{106}\text{Ru}$  の  $\gamma$  線発生位置から燃料装荷位置が分かる。図 2.2-11 に、 $^{106}\text{Ru}$  の  $\gamma$  線発生位置から求めた照射済燃料の燃焼スタック長と照射前の燃料スタック長から照射による燃料の軸方向スエリング率を評価した結果と、ALFUS による解析結果とを比較したものを示す。燃焼スタックの軸方向スエリング率は、METAPHIX-1 で 1.9-2.5%、METAPHIX-2 で 3.5-4.1%、METAPHIX-3 で 5.6-6.6%であり、低燃焼度の MATAPHIX-1 で ALFUS による解析結果が過大評価となっているものの、METAPHIX-2 および METAPHIX-3 では、ほぼ実験値を再現している。特に METAPHIX-3 では、照射量の増大によって被覆管のスエリング



が顕在化し、そこに拘束されている燃料のスエリング率が再び増加することが予測されている。一方、低燃焼度～中燃焼度の場合には、これまでに報告されている同程度の出力密度の燃料による軸方向スエリング率（～6%程度[2.2-17]）と比較して低く抑えられている。本照射試験では、図 2.2-1 に示したように燃料スタックの装荷位置が炉心下部に偏っていたことにより、高温の燃料上端付近に出力ピークが現われ、熱膨張と照射スエリングの重畳によって燃料-被覆管接触が早期に起こったため、軸方向の伸びが抑えられたものと考えられる。また、燃料ピンごとの軸方向スエリング率のバラツキ（1～3% [2.2-18, 2.2-19]）を考慮すれば、燃料合金の軸方向の伸び率に MA や RE の添加による有意な影響は見られず、いずれも ALFUS による予測の範囲内に収まると考えられる。

Cs は大半がボンドナトリウムに移行する[2.2-20]と考えられるため、 $^{137}\text{Cs}$  からの  $\gamma$  線強度はボンドナトリウムの存在量に概ね比例すると予想される。金属燃料ピンでは、合金ロッドのスエリングに伴い被覆管と合金ロッド間のギャップにあったボンドナトリウムの一部がプレナム部に排出され、一部はオープンポアやクラックに浸入する。また、残りは合金ロッドと被覆管とのギャップに残留する。図 2.2-8～図 2.2-10 に示すように METAPHIX-1 燃料ピンからの  $^{137}\text{Cs}$  の  $\gamma$  線強度分布では、燃料スタック上端から 120～140mm までの領域で強度が高く、同様に METAPHIX-2 燃料では 130～140mm、METAPHIX-3 では 137～145mm までの領域で  $\gamma$  線強度が高くなっている。この部分が、プレナム部に排出されたボンドナトリウムの存在領域と考えられ、その長さは、ALFUS による予測結果 122-129mm (METAPHIX-1)、125-132mm (METAPHIX-2)、130-136mm (METAPHIX-3) と概ね一致している。また照射前に燃料-被覆管ギャップに存在していたボンドナトリウムのプレナム部への排出率は、それぞれ 75-89% (METAPHIX-1)、82-89% (METAPHIX-2) および 87-92% (METAPHIX-3) に相当している。即ち、比較的低い燃焼度の段階で大部分のボンドナトリウムはプレナム領域に排出されると考えられる。一方、図 2.2-12 に示すように METAPHIX-3 のプレナム領域における  $^{137}\text{Cs}$  のガンマ線計数は、METAPHIX-1 のそれに比べ増加していることから、Na を介した燃料合金からプレナムへの Cs 排出は、高燃焼度燃料においても継続すると考えられる。

さらに燃料スタック領域においても、局所的に  $^{137}\text{Cs}$  の  $\gamma$  線ピークが存在し、特に METAPHIX-1 ピン（図 2.2-8）において顕著である。これは、低燃焼度燃料の場合には、製造時に装荷された長さ 20-50mm の燃料合金ロッド間の焼結が未だ不十分なため、その境界にボンドナトリウムが多く存在していることを示唆している。また、METAPHIX-1 の燃料スタック部からの  $^{137}\text{Cs}$  の  $\gamma$  線強度分布は、燃焼率分布とは異なり、燃料下部で大きくなる傾向を示している。この傾向は、Pin#2（図 2.2-8-(b)）と Pin#3（図 2.2-8-(c)）で特に著しく、METAPHIX-2 や METAPHIX-3 燃料ピンではほとんど見られない。燃料スタック部では、 $^{137}\text{Cs}$  からの  $\gamma$  線強度は燃料ロッドと被覆管とのギャップに残留するボンドナトリウム量に概ね比例すると考えれば、図 2.2-8 から、低燃焼度の METAPHIX-1 燃料においてスタック下部の残留ギャップが大きいことが示唆される。

以上のとおり、被覆管外径測定や  $\gamma$  線分光計測などの非破壊試験の結果からは、METAPHIX-1、-2、-3 のいずれも燃料組成の相違による照射挙動に有意な差はなく、MA 含有合金が装荷され

ている局所領域にも他の領域と比べて際立った変化の徴候は見られなかった。

#### 2.2.2.2 プレナムガス分析

続いて、METAPHIX-1 および METAPHIX-2 燃料ピンについて、プレナムガス分析を実施した。燃料ピン上端付近のガスプレナム領域を密閉容器内に設置してパンクチャホールを開け、そこから排出されるガス圧を測定するとともに、質量分析法によってガス組成を分析した。密閉容器内にはあらかじめ核分裂生成ガス（FP ガス）には含まれないネオンをタグガスとして封入しておき、パンクチャ前後の濃度変化を測定することでプレナム体積を求めた。表 2.2-6 に測定結果を、図 2.2-13 に ORIGEN-2 コード[2.2-21]によって計算した当該燃焼度における FP ガスの総発生量に対するプレナムへの放出率の評価結果を示す。FP ガスの放出率は、METAPHIX-1 で 46-51%、METAPHIX-2 で 63-69%であり、MA 添加の有無による有意な差は見られなかった。また、ガス放出率の燃焼度依存性も EBR-II で照射された U-Pu-Zr 試験燃料による測定値の範囲内に収まっている。

METAPHIX-1 燃料ピンの製造時にプレナム部に封入されたヘリウム（He）ガスを除く、主に  $\alpha$  崩壊によって生成した He ガスのプレナム部への放出率は、それぞれ 556%（Pin#1）、83%（Pin#2）、101%（Pin#3）であった。装荷燃料中に MA が添加されていない Pin#1 では、ほとんど  $\alpha$  崩壊が起こらず、相対的に三体核分裂によって生成する He の割合が多くなると予想される。しかしながら、Pin#1 での He 生成にその効果を考慮した場合[2.2-22]にも、350%を上回る He 放出率が見積もられる。なお、金属燃料の場合には酸素と中性子による（n,  $\alpha$ ）反応は考慮する必要がない。Pin#1 において、このように高い He 排出率となった原因は不明であるが、MA を添加した他の 2 本に関しては、Meyer らによって報告されている U-Pu-Zr-MA 燃料からの He ガス放出率（90%： $\alpha$  崩壊による生成量に対する放出割合）[2.2-23]と概ね一致する結果であった。

本試験体系では、MA 含有合金のスタック長が 100mm と短尺であったため、生成 He ガス量は製造時の封入 He ガスの 25-55%程度に収まった。一方で、全長に渡って MA 含有燃料を装荷する場合には、そこから放出される He ガス量が数倍に増加するため、He ガスによるプレナムガス圧の増大は燃料健全性を評価する上で重要となり得る。

以上の FP ガス分析の結果から、MA の添加が照射挙動に及ぼす影響は小さいことが示される。ただし、この結果は今後の破壊試験によって、各元素の再分布や相構造の生成、燃料・被覆管化学的相互作用（FCCI）による層など微視的な燃料挙動の違いが見出される可能性を否定するものではない。特に燃焼度の高い METAPHIX-3（ $\sim 10\text{at.}\%$ ）では、MA あるいは RE の再分布によって低～中燃焼度燃料では明瞭とならなかった FCCI 挙動への影響が顕在化し、巨視的な照射挙動にも有意な相違が出てくるとも考えられる。

#### 2.2.2.3 金相観察

窒素雰囲気の下、低燃焼度の METAPHIX-1 燃料ピンから MA（および RE）含有合金装荷部分を切り出し、断面の金相観察を行った。また、参照のため三元合金試料の金相観察もあわせ

で行った。表 2.2-7 に各サンプルの組成および照射位置をまとめる。

#### (1) サンプル#1: U-19Pu-10Zr

U-19Pu-10Zr 三元合金燃料の燃料スタックの下端から約 405mm の位置における金相写真を図 2.2-14 に示す。燃料断面の中心付近から外周にかけての組織分布を図 2.2-14-(b)に示す。図の燃料断面中心からやや右上に偏心した位置に非常にポーラスな高温相(図 2.2-14-(c))が観察され、その周囲を比較的密に見える相(図 2.2-14-(d))が取り囲んでいる。この高温相は、650℃以上で現れる  $\gamma$  単相に相当し、その周囲の密な相は 600-650℃で存在する  $\gamma + \zeta$  の混相領域であると推定される[2.2-20, 2.2-24, 2.2-25, 2.2-26]。周辺部には径方向に複数の大小クラックが生じている。

#### (2) サンプル#2: U-19Pu-10Zr

一方、同じ U-19Pu-10Zr 三元合金試料の燃料スタックの下端から約 440mm の位置における金相写真を図 2.2-15 に示す。比較的高い位置で照射されたサンプル#2 の断面には図 2.2-15 に示すように、中央付近のポーラスな領域が見られず、広い範囲にわたって非常に密に見える領域が広がっている。本試料では、サンプル#1 よりも照射位置が高かったにもかかわらず、何らかの理由によって燃料温度が低く、650℃以下で照射されたものと考えられる。

#### (3) サンプル#3: U-19Pu-10Zr

U-19Pu-10Zr 三元合金燃料の燃料スタックの下端から約 145mm の位置における金相写真を図 2.2-16 に示す。燃料断面の中心付近から外周にかけての組織分布を図 2.2-16-(b)に示す。燃料スタックの比較的下部で照射されたサンプル#3 では、サンプル#1 や#2 に見られるような同心円状の明確な相の違いは見られないものの、中央付近には比較的形状の整った気泡が分布しているのに対し、外周付近では燃料組織や空隙の形状が歪んでいる様子が観察される。

サンプル#1 や#2 で観察された  $\gamma + \zeta$  の混相領域と推定される密な領域が存在しないことから、中心温度は 600℃未満であったと予測される。また、燃焼度の低いこの位置では燃料-被覆管ギャップがまだ完全に閉じていないことが分かる。

#### (4) サンプル#4: U-19Pu-10Zr-2MA-2RE

U-19Pu-10Zr-2MA-2RE 燃料の燃料スタックの下端から 370mm の位置における金相写真を図 2.2-17 に示す。燃料中心付近から外周にかけての組織分布を図 2.2-17-(b)に、各径方向位置での拡大図を図 2.2-17-(c)および-(d)に示す。中央部付近における母相の様相はサンプル#2 に類似しており、密に見える領域が広がっている。ただし、本試料(サンプル#4)では、粒界に沿って細長い暗色相が帯状に析出している様子が観察される(図 2.2-17-(c))。図 2.2-18 に示す未照射試料の金相観察から、照射前には MA を含む RE の析出物が燃料合金全体にスポット状に分散していたと考えられる。したがって、照射によってそれらの析出相が粒界に沿って広がったものと予測される。一方、中間から外周領域( $r/r_0 \sim 0.3-1.0$ )には RE および MA の析出相らしき暗色相が分散している様子が観察される。

## (5) サンプル#5: U-19Pu-10Zr-5MA

U-19Pu-10Zr-5MA 燃料の燃料スタックの下端から 320mm の位置における金相写真を図 2.2-19 に示す。図 2.2-19-(a)の全体像における燃料中心付近から外周にかけての組織分布を図 2.2-19-(b) に、各径方向位置での拡大図を図 2.2-19-(c)、-(d)に示す。本試料でも中央部付近にはサンプル #2 (図 2.2-15) に類似する密に見える母相が広がっている。また、あらかじめ RE が添加されていない未照射の MA 添加合金には、析出物は観察されていなかったが、照射後には、サンプル #4 と同様の暗色相が粒界に沿って広がっている様子がみられる。また、中間から外周領域 ( $r/r_0 \sim 0.6-1.0$ )にもわずかに、析出相が観察される。

## (6) サンプル#6: U-19Pu-10Zr-5MA-5RE

U-19Pu-10Zr-5MA-5RE 燃料の燃料スタックの下端から 370mm の位置における金相写真を図 2.2-20 に示す。図 2.2-20-(a)の全体像における燃料中心付近から外周にかけての組織分布を図 2.2-20-(b)に、各径方向位置での拡大図を図 2.2-20-(c)、-(d)、および-(e)に示す。本試料の母相構造はサンプル#1 (図 2.2-14) に類似しており、中心部に非常にポーラスな高温相が観察され、その周囲を比較的密に見える相が取り囲んでいる。高温相内には  $100 \mu\text{m}$  を超える非常に大きな析出物が現れている。その周囲の密に見える領域には、サンプル#4 と同様の、粒界に沿った暗色相が析出している。また、中間から外周領域( $r/r_0 \sim 0.5-1.0$ )には RE および MA の析出相らしき暗色相が分散している様子が観察される。

光学顕微鏡による金相観察結果から、MA (および RE) を添加した金属燃料の照射挙動は以下のようにまとめられる。

- ・ 照射温度勾配によって生成する母相の分布は、通常の三元合金と同様である。
- ・  $\gamma$  単相が現れる高温領域では、非常に大きな析出相 (RE と MA の凝集物と推測される) が凝集する。
- ・  $\gamma + \zeta$  の混相領域と見られる密な相では、RE と MA と推測される凝集相が粒界に沿って薄く広がっている。
- ・ 低温相領域では、MA および RE の析出相が分散している。

MA や RE の凝集相では融点が低下するなど、局所的に燃料特性が大きく変化することが予想される。したがって、今後はこれらの凝集相や組成や燃料母相の再分布挙動を定量分析するとともに、中～高燃焼度燃料による組織観察を実施し、これらの凝集相の移動挙動や成長の推移を明らかにした上で、燃料ピンの照射健全性に与える影響を把握する必要がある。また今後、照射済み燃料内に残留する MA 組成分析によって、照射による MA 核種の変換特性を評価する予定である。

### 2.2.3 MA 核変換技術の実用化に向けた今後の課題

MA および RE 添加率 5wt%以下の U-Pu-Zr 合金燃料を製造し、仏国の高速炉フェニックスに

において 350W/cm 以下の出力で 2.0-10at.%の燃焼度を達成する照射試験を実施した。照射後の非破壊検査を終了し、2012 年度現在 ITU に移送された燃料ピンの詳細な照射後試験が進められている。これまでに実施された照射後非破壊検査や低燃焼度燃料の金相観察結果からは、MA や RE を添加したことによって、燃料健全性に重大な影響が生じる兆候は観察されていない。

今後、MA 添加燃料を用いた魅力ある金属燃料高速炉の実用化に向けた研究開発を進めるためには、より高出力（高温）かつ高燃焼度条件での照射挙動や燃料破損時の MA 挙動の解明が必要とされる。従って、本節に紹介した現在実施中の照射後試験結果を踏まえて、より厳しい条件での燃料物性値や燃料挙動、被覆管と燃料や FP 成分の化学的相互作用等の影響を確認することが望まれる。また、本照射試験では照射試験体の被覆管に仏国で開発されたオーステナイト系被覆管材 (15-15Ti) が用いられているが、中性子フルエンスの高い金属燃料高速炉では、低スエリング材であるフェライト系被覆管材の利用が想定される。従って今後、適切な被覆管材料とりわけ国産材による高温・高燃焼度での照射実績が求められると考えられる。

表 2.2-1 燃料合金の平均組成分析結果 [wt.%]

| 元素 | U-19Pu-10Zr<br>(12 試料平均)                | U-19Pu-10Zr-2MA-2RE<br>(2 試料平均) | U-19Pu-10Zr-5MA<br>(2 試料平均) | U-19Pu-10Zr-5MA-5RE<br>(2 試料平均) |
|----|-----------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| U  | 71.00 <sup>+2.03</sup> <sub>-2.16</sub> | 66.85 ± 1.55                    | 66.30 ± 1.30                | 63.50 ± 2.50                    |
| Pu | 18.93 <sup>+0.94</sup> <sub>-0.79</sub> | 19.80 ± 0.20                    | 19.35 ± 0.05                | 19.75 ± 0.55                    |
| Np | -                                       | 1.29 ± 0.09                     | 2.97 ± 0.02                 | 3.04 ± 0.16                     |
| Am | 0.03                                    | 0.67 ± 0.02                     | 1.45 ± 0.05                 | 1.52 ± 0.20                     |
| Cm | -                                       | 0.18 ± 0.02                     | 0.32 ± 0.02                 | 0.31 ± 0.14                     |
| Zr | 10.19 <sup>+5.61</sup> <sub>-3.76</sub> | 9.46 ± 1.16                     | 8.97 ± 1.17                 | 8.19 ± 1.69                     |
| Y  | -                                       | 0.12 ± 0.07                     | -                           | 0.31 ± 0.05                     |
| Ce | -                                       | 0.20 ± 0.00                     | -                           | 0.45 ± 0.11                     |
| Nd | -                                       | 1.25 ± 0.12                     | -                           | 2.30 ± 1.11                     |
| Gd | -                                       | 0.16 ± 0.03                     | -                           | 0.32 ± 0.15                     |

不純物濃度 ≤ 0.3wt.%

表 2.2-2 アクチニドの同位体組成分析結果 [wt.%]

| U 同位体            | 組成比    | Pu 同位体            | 組成比    | Am 同位体            | 組成比   | Cm 同位体            | 組成比   |
|------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|-------|-------------------|-------|
| <sup>234</sup> U | 0.001  | <sup>238</sup> Pu | 0.007  | <sup>241</sup> Am | 40.92 | <sup>244</sup> Cm | 85.66 |
| <sup>235</sup> U | 0.400  | <sup>239</sup> Pu | 95.285 | <sup>242</sup> Am | 0.29  | <sup>245</sup> Cm | 7.78  |
| <sup>236</sup> U | 0.002  | <sup>240</sup> Pu | 4.620  | <sup>243</sup> Am | 58.79 | <sup>246</sup> Cm | 6.27  |
| <sup>238</sup> U | 99.597 | <sup>241</sup> Pu | 0.084  |                   |       | <sup>247</sup> Cm | 0.29  |
|                  |        | <sup>242</sup> Pu | 0.007  |                   |       |                   |       |

表 2.2-3 金属燃料ピンの仕様

|                   |       |
|-------------------|-------|
| 燃料ピン長さ [mm]       | 1,793 |
| 被覆管外径 [mm]        | 6.55  |
| 被覆管厚さ [mm]        | 0.45  |
| 燃料スラグ長さ [mm]      | 485   |
| 燃料スラグ径 [mm]       | 4.9   |
| 初期燃料-被覆管ギャップ [mm] | 0.375 |
| 燃料スミヤ密度 [%TD]     | 75.2  |
| 初期ボンドナトリウム高さ [mm] | ~10   |
| ガスプレナム長さ [mm]     | 464   |



表 2.2-4 フェニックス炉における MA 含有金属燃料の計画照射条件

|                        | Pin #1           | Pin #2                  | Pin #3              |                         |
|------------------------|------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
| 照射合金組成                 | U-19Pu-10Zr      | U-19Pu-10Zr<br>-2MA-2RE | U-19Pu-10Zr<br>-5MA | U-19Pu-10Zr<br>-5MA-5RE |
| <b>METAPHIX-1 照射末期</b> |                  |                         |                     |                         |
| 照射期間[EFPD]             | 120              | ←                       | ←                   | ←                       |
| 最大線出力[W/cm]            | 330 <sup>1</sup> | 308 <sup>2</sup>        | 325 <sup>2</sup>    | 313 <sup>2</sup>        |
| 被覆管最高温度[°C]            | 572 <sup>3</sup> | 572 <sup>3</sup>        | 572 <sup>3</sup>    |                         |
| 最高燃焼度 [at.%]           | 2.4              | 2.5                     | 2.4                 | 2.6                     |
| <b>METAPHIX-2 照射末期</b> |                  |                         |                     |                         |
| 照射期間[EFPD]             | 360              | ←                       | ←                   | ←                       |
| 最大線出力[W/cm]            | 295 <sup>1</sup> | 276 <sup>2</sup>        | 294 <sup>2</sup>    | 282 <sup>2</sup>        |
| 被覆管最高温度[°C]            | 556 <sup>3</sup> | 556 <sup>3</sup>        | 556 <sup>3</sup>    |                         |
| 最高燃焼度 [at.%]           | 6.9              | 7.1                     | 7.0                 | 7.5                     |
| <b>METAPHIX-3 照射末期</b> |                  |                         |                     |                         |
| 照射期間[EFPD]             | 600              | ←                       | ←                   | ←                       |
| 最大線出力[W/cm]            | 268 <sup>1</sup> | 251 <sup>2</sup>        | 269 <sup>2</sup>    | 256 <sup>2</sup>        |
| 被覆管最高温度[°C]            | 543 <sup>3</sup> | 543 <sup>3</sup>        | 543 <sup>3</sup>    |                         |
| 最高燃焼度 [at.%]           | 10.9             | 11.2                    | 11.2                | 11.9                    |

1: 軸方向中性子フラックス最高位置、2: MA 含有合金試料最高位置、3: 燃料スタック最高位置

表 2.2-5 MA 添加金属燃料の照射後試験で予定されている実施項目

| 照射後試験項目                                                                                                              | 目 的                                                                                                                                                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 非破壊試験（フェニックス）<br>-目視検査<br>-燃料ピン外径変形量測定<br>-ガンマ線分光計測<br>-中性子ラジオグラフィー                                                  | 被覆管破損の有無の確認<br>被覆管の伸び、径方向変形量の定量化<br>核分裂生成物の軸方向分布、燃料スタック位置の確認<br>燃料破損の有無の確認、燃料スタック位置の可視化                                                                           |
| 非破壊試験（ITU）<br>-目視検査<br>-燃料ピン外径変形量測定<br>-ガンマ線分光計測<br>破壊試験（ITU）<br>-パンクチャ試験<br>-光学顕微鏡観察<br>-SEM 観察<br>-EPMA<br>-ICP-MS | 輸送による被覆管破損の有無の確認<br>輸送による被覆管径変形量の定量化<br>輸送による燃料破損の有無の確認<br><br>プレナムガス圧およびガス放出率の測定<br>照射燃料断面の組織観察<br>照射燃料断面の微視的組織観察<br>照射燃料断面の組成分布の定量化<br>反応率、ボンドナトリウム中への物質移行率の定量化 |

表 2.2-6 METAPHIX-1 および METAPHIX-2 燃料ピンのプレナムガス分析結果

|            |                           | 試験ピン #1<br>U-Pu-Zr | 試験ピン #2<br>U-Pu-Zr-2MA-2RE | 試験ピン #3<br>U-Pu-Zr-5MA[-5RE] |
|------------|---------------------------|--------------------|----------------------------|------------------------------|
| METAPHIX-1 | プレナムガス圧 [atm]             | 5.98               | 5.94                       | 5.07                         |
|            | プレナム体積 [cm <sup>3</sup> ] | 8.72               | 8.76                       | 8.83                         |
|            | FP ガス [mol]               |                    |                            |                              |
|            | クリプトン Kr                  | 9.53E-05           | 1.16E-04                   | 9.33E-05                     |
|            | キセノン Xe                   | 1.26E-03           | 1.38E-03                   | 1.30E-03                     |
| METAPHIX-2 | プレナムガス圧 [atm]             | 17.43              | 17.39                      | 11.63                        |
|            | プレナム体積 [cm <sup>3</sup> ] | 7.90 *             | 7.98                       | 8.29                         |
|            | FP ガス                     |                    |                            |                              |
|            | クリプトン Kr                  | 3.67E-04           | 3.72E-04                   | 3.66E-04                     |
|            | キセノン Xe                   | 4.72E-03           | 5.12E-03                   | 5.11E-03                     |

\* : 非破壊検査中に誤って被覆管上端付近（プレナム領域）に荷重をかけたため、プレナム体積は変化している。

表 2.2-7 金相観察用サンプルの組成および照射位置

|        | 初期組成                | 照射位置 <sup>1</sup> | 照射温度解析値 <sup>2</sup> |
|--------|---------------------|-------------------|----------------------|
| サンプル#1 | U-19Pu-10Zr         | ~405mm            | 550-675℃             |
| サンプル#2 | U-19Pu-10Zr         | ~440mm            | 570-685℃             |
| サンプル#3 | U-19Pu-10Zr         | ~145mm            | 460-570℃             |
| サンプル#4 | U-19Pu-10Zr-2MA-2RE | ~370mm            | 550-670℃             |
| サンプル#5 | U-19Pu-10Zr-5MA     | ~320mm            | 525-650℃             |
| サンプル#6 | U-19Pu-10Zr-5MA-5RE | ~370mm            | 550-670℃             |

1: 燃料スタック下端からの軸方向高さ

2: 燃料製造条件や照射条件のノミナル値に基づく解析結果



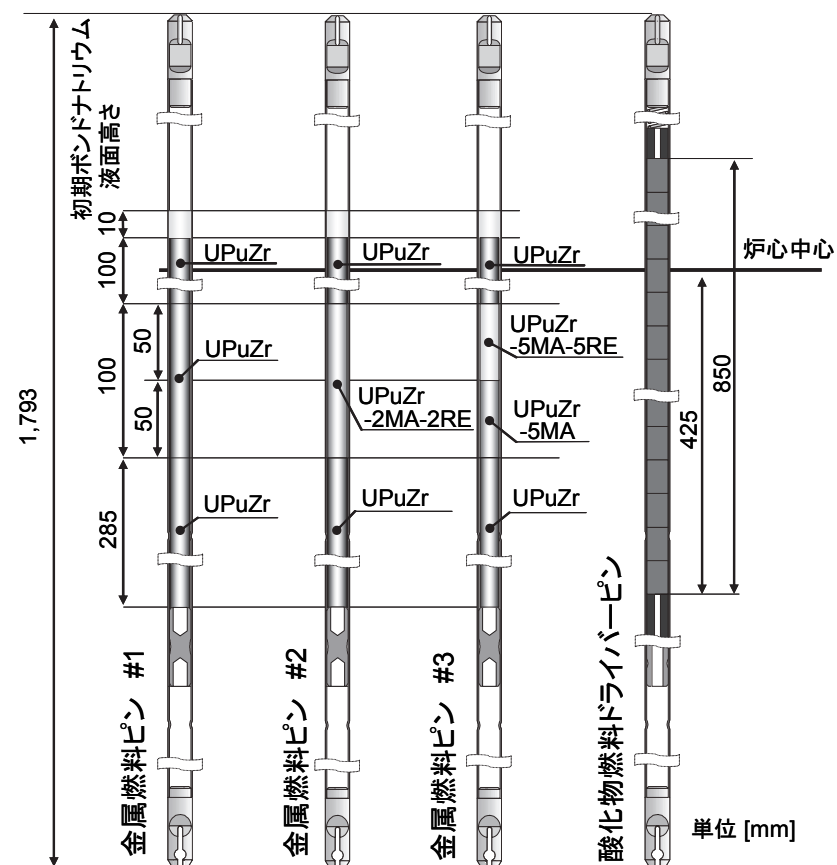


図 2.2-1 MA 含有金属燃料ピンの軸方向配置図 [2.2-6]

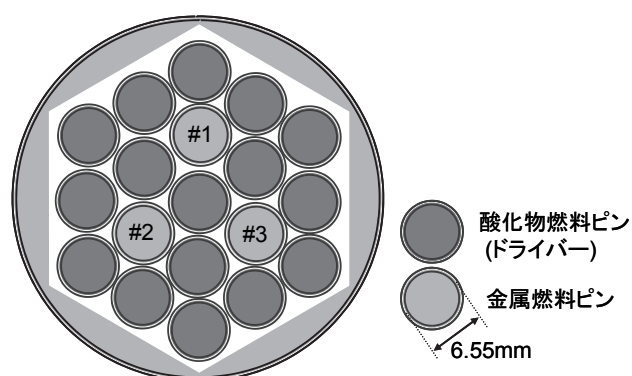


図 2.2-2 照射リグ中の金属燃料ピン配置 [2.2-6]

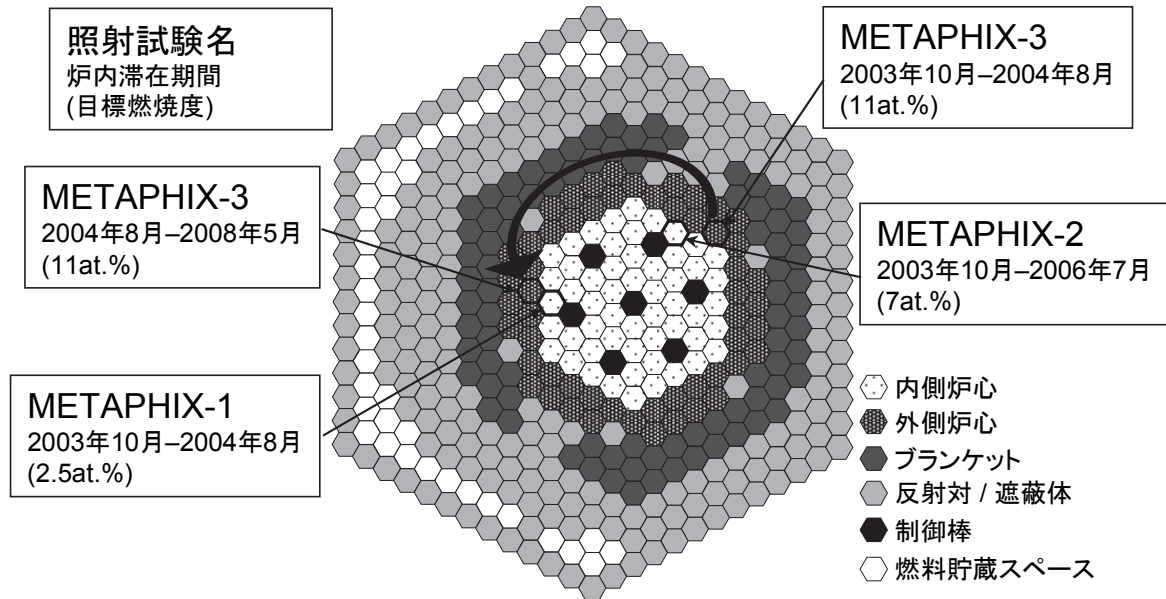


図 2.2-3 フェニックス炉内の METAPHIX 照射リグの装荷位置 [2.2-9]



図 2.2-4 照射済み金属燃料ピンの外観  
Pin#1: U-19Pu-10Zr, 燃焼度~2.5at.%. [2.2-10]

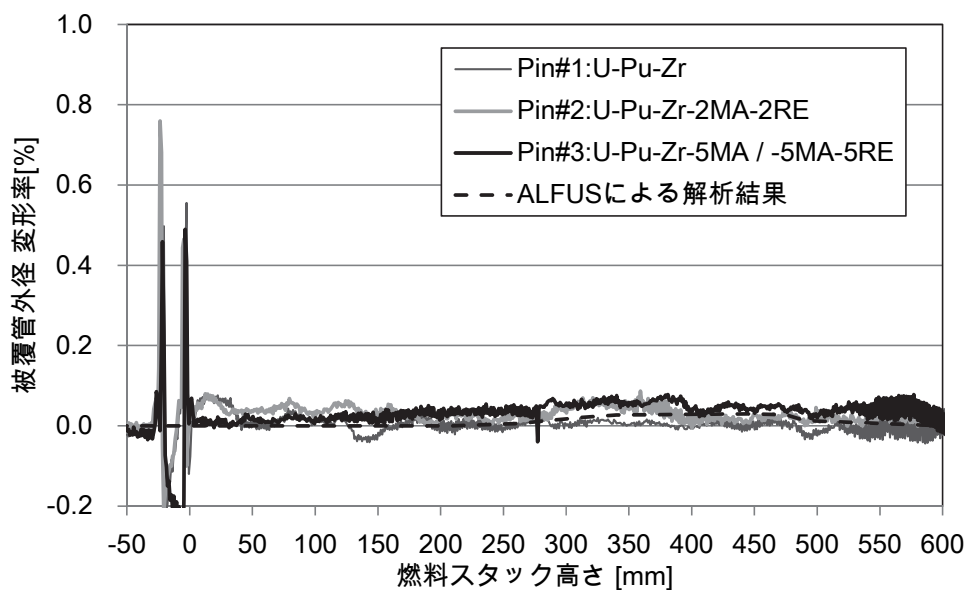


図 2.2-5 METAPHIX-1 燃料ピンの被覆管外径変化量

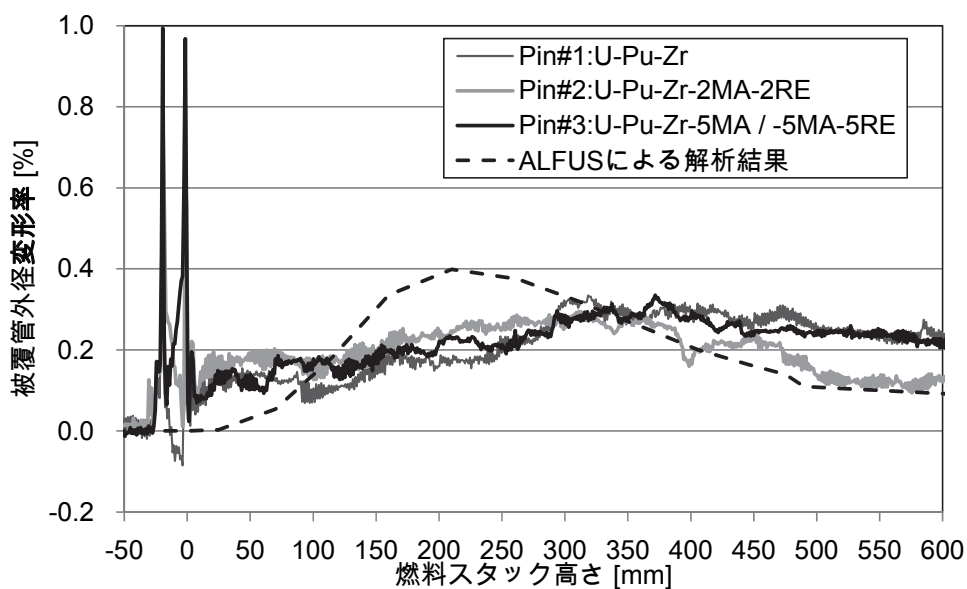


図 2.2-6 METAPHIX-2 燃料ピンの被覆管外径変化量

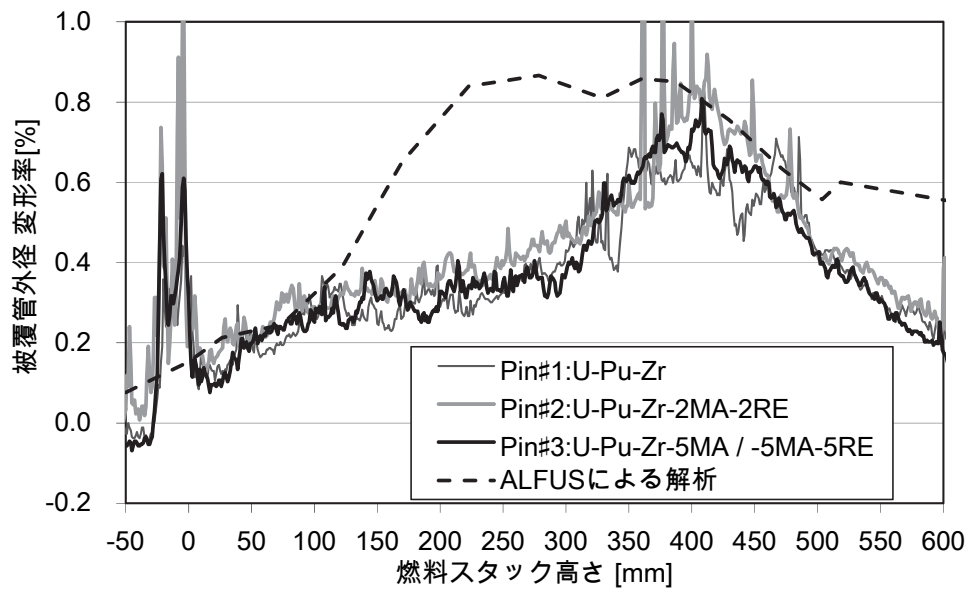
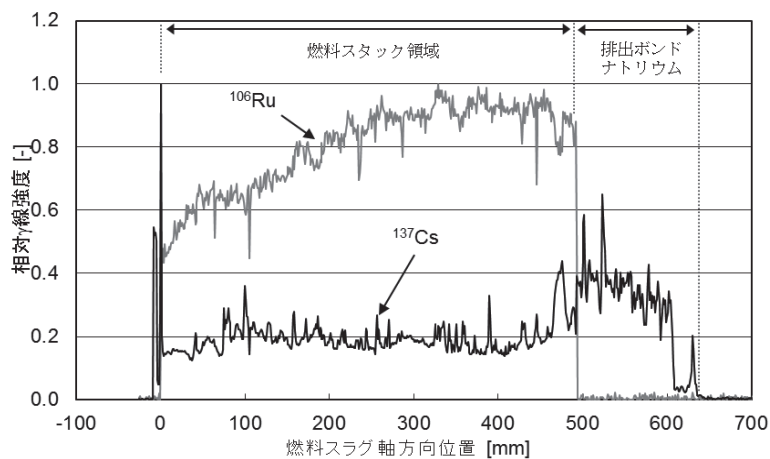
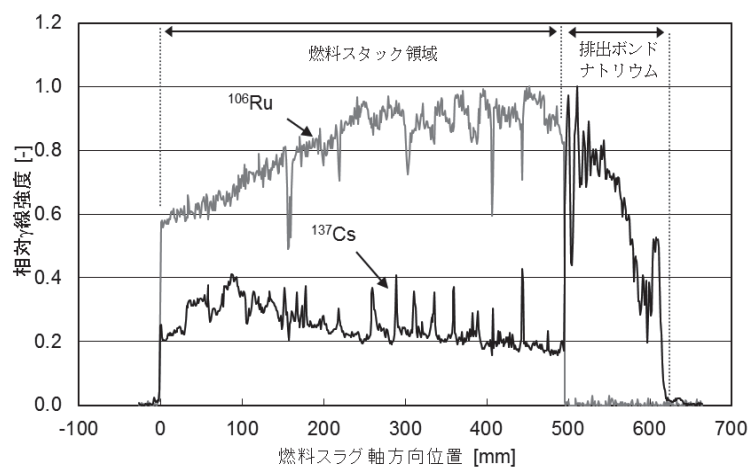


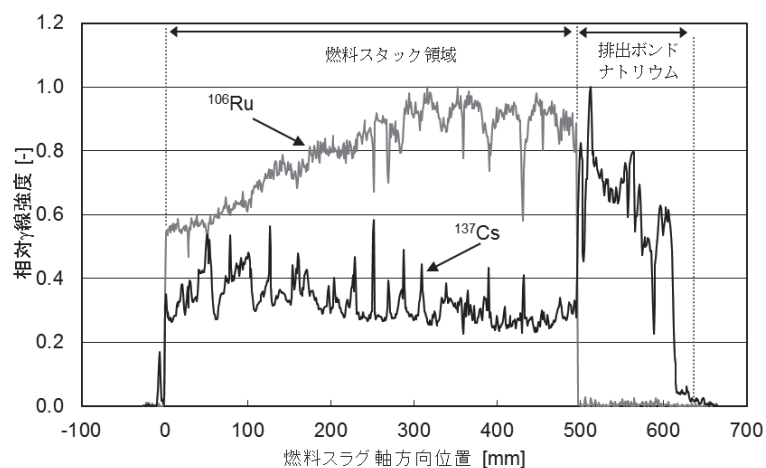
図 2.2-7 METAPHIX-3 燃料ピンの被覆管外径変化量



(a.) 金属燃料ピン#1 (U-Pu-Zr 合金装荷)

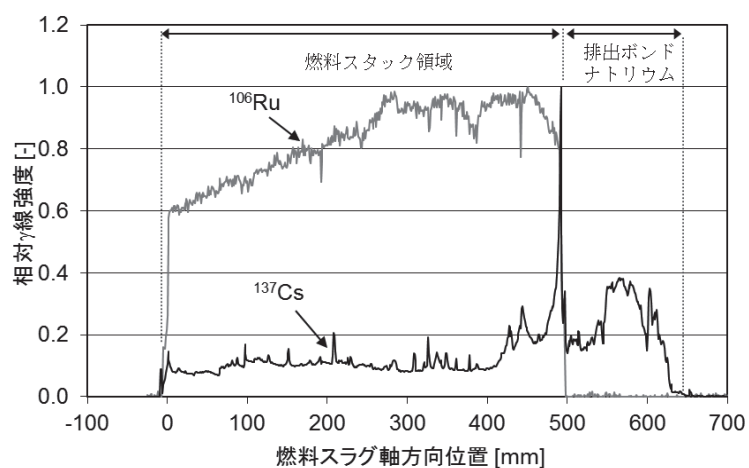


(b.) 金属燃料ピン#2 (U-Pu-Zr-2MA-2RE 合金装荷)

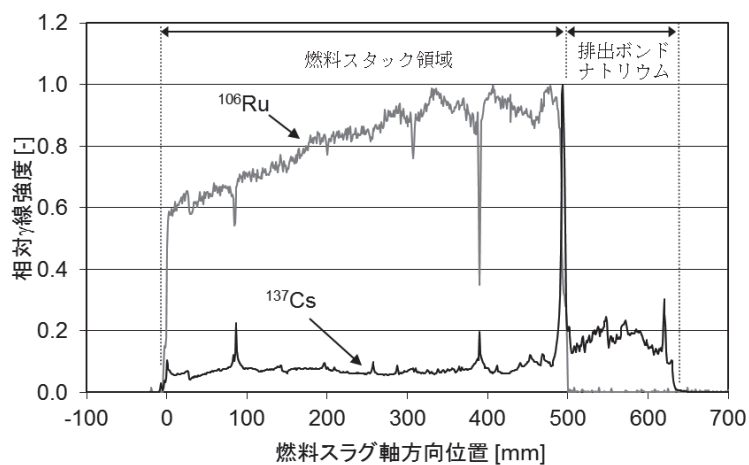


(c.) 金属燃料ピン#3 (U-Pu-Zr-5MA / -5MA-5RE 合金装荷)

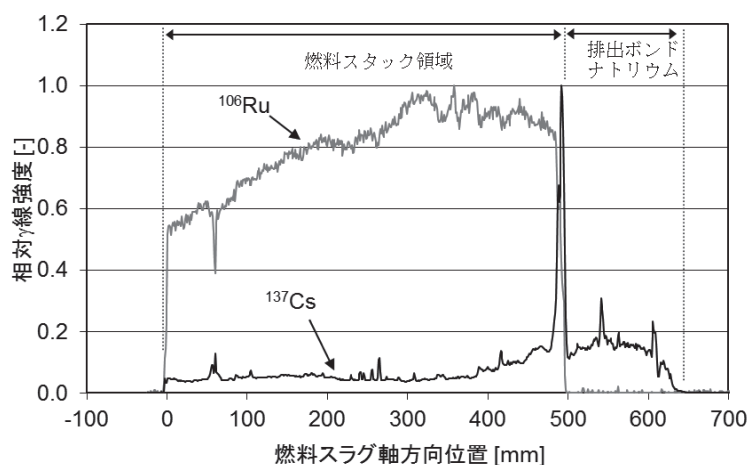
図 2.2-8 METAPHIX-1 照射ピンの  $\gamma$  線分光計測結果 [2.2-9]



(a) 金属燃料ピン#1 (U-Pu-Zr 合金装荷)

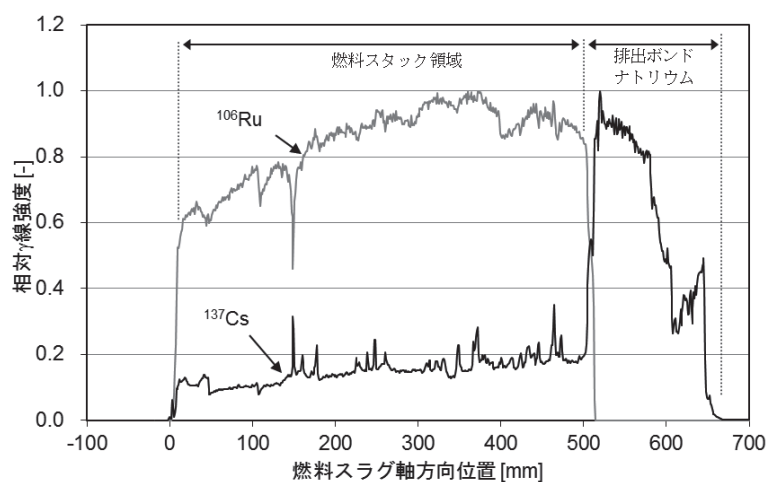


(b) 金属燃料ピン#2 (U-Pu-Zr-2MA-2RE 合金装荷)

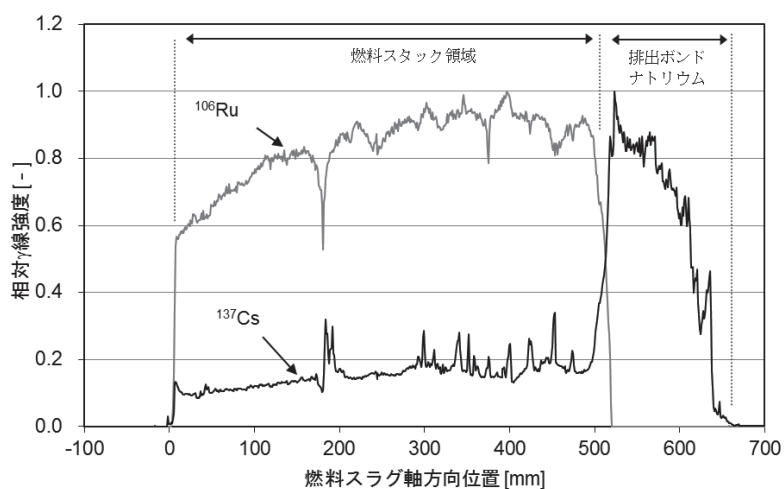


(c) 金属燃料ピン#3 (U-Pu-Zr-5MA / -5MA-5RE 合金装荷)

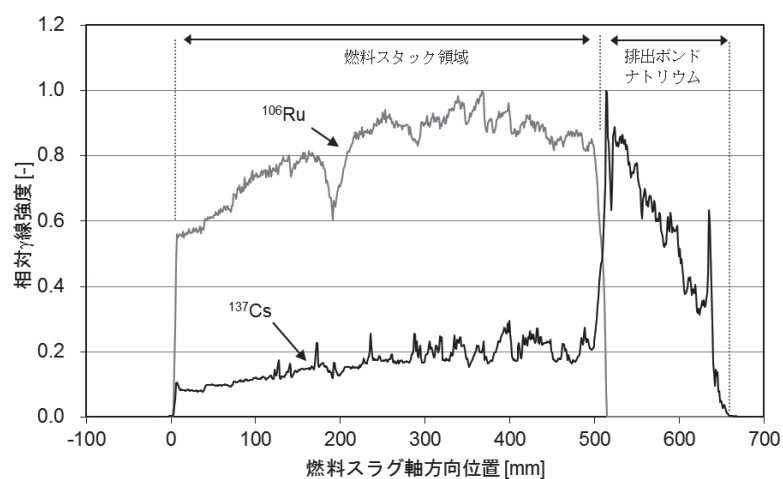
図 2.2-9 METAPHIX-2 照射ピンの  $\gamma$  線分光計測結果 [2.2-9]



(a) 金属燃料ピン#1 (U-Pu-Zr 合金装荷)



(b) 金属燃料ピン#2 (U-Pu-Zr-2MA-2RE 合金装荷)



(c) 金属燃料ピン#3 (U-Pu-Zr-5MA / -5MA-5RE 合金装荷)

図 2.2-10 METAPHIX-3 照射ピンの  $\gamma$  線分光計測結果 [2.2-12]



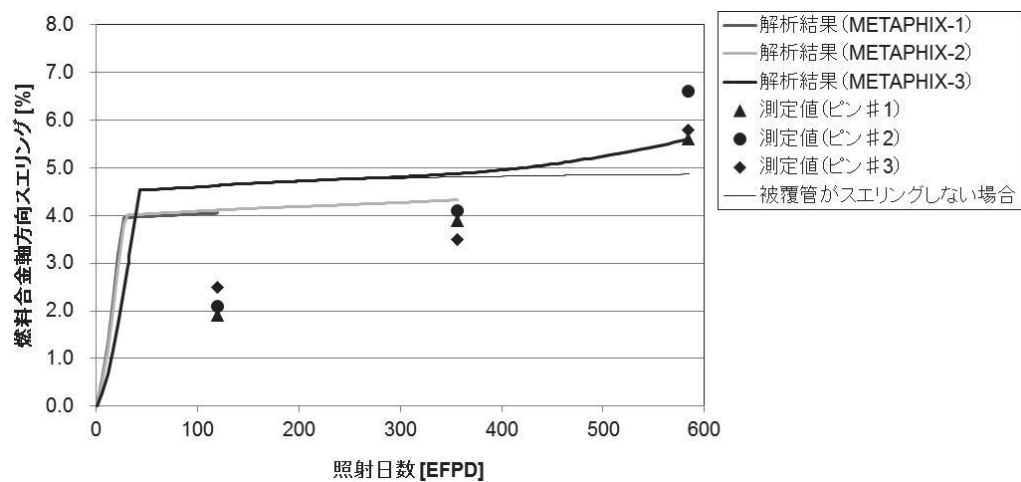


図 2.2-11 照射による燃料スタックの軸方向スエリング [2.2-12]

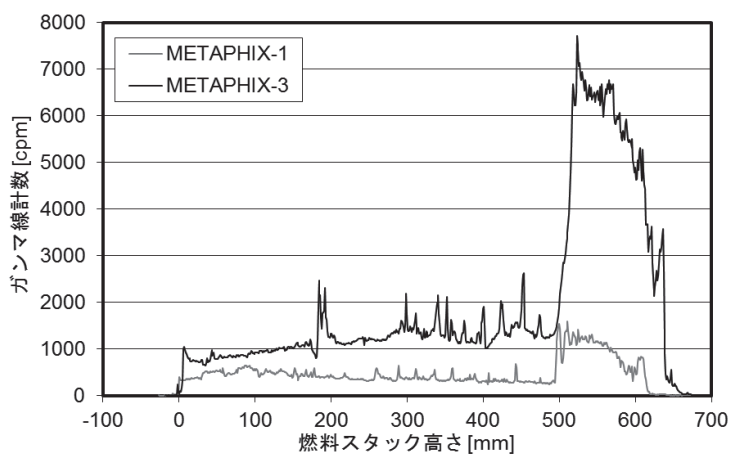
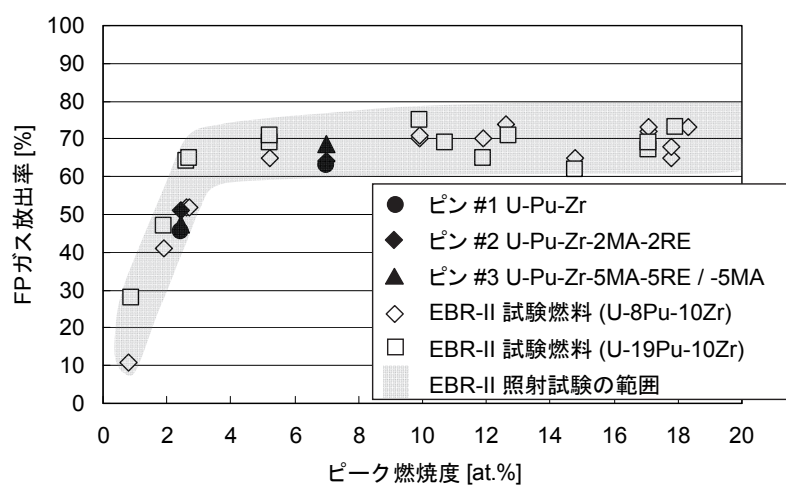
図 2.2-12 燃焼の進展による  $^{137}\text{Cs}$  の分布の変化 [2.2-12]

図 2.2-13 FP ガス放出率の燃焼度依存性 [2.2-7]

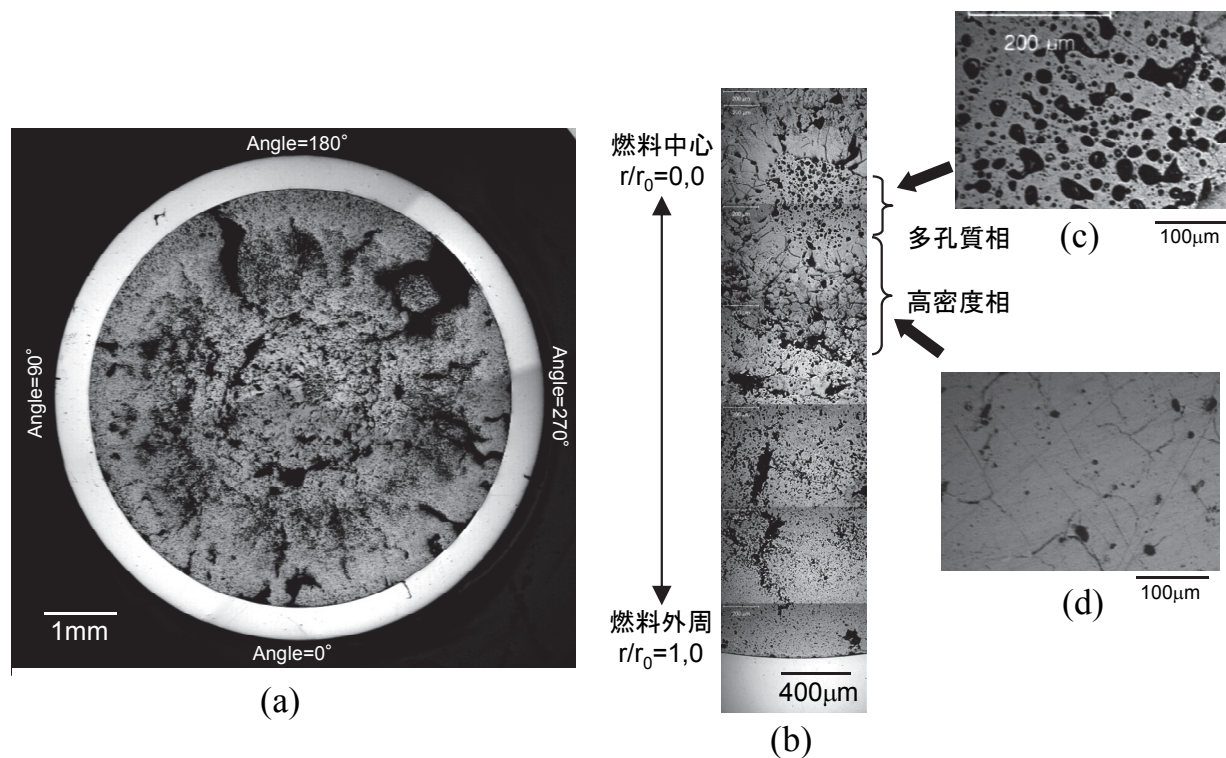


図 2.2-14 燃料スタック下端から~405mm の位置で照射されたサンプル#1: U-19Pu-10Zr 三元合金燃料の金相写真; (a) 断面全体像および (b) 255° の径方向に沿った燃料組織の分布図、(c)中央領域および(d)中間領域の拡大図 [2.2-6]

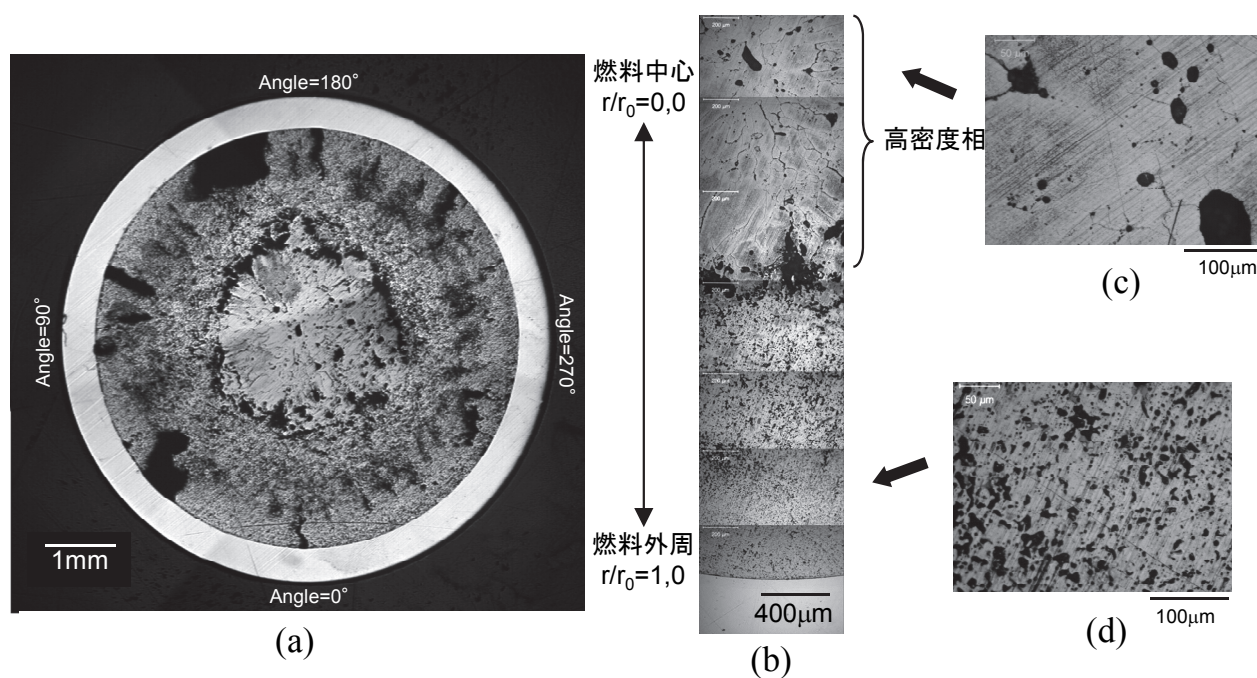


図 2.2-15 燃料スタック下端から~440mm の位置で照射されたサンプル#2: U-19Pu-10Zr 三元合金燃料の金相写真(a) 断面全体図および (b) 22° の径方向に沿った燃料組織の分布図、(c)中央領域および(d)外周領域の拡大図。 [2.2-6]



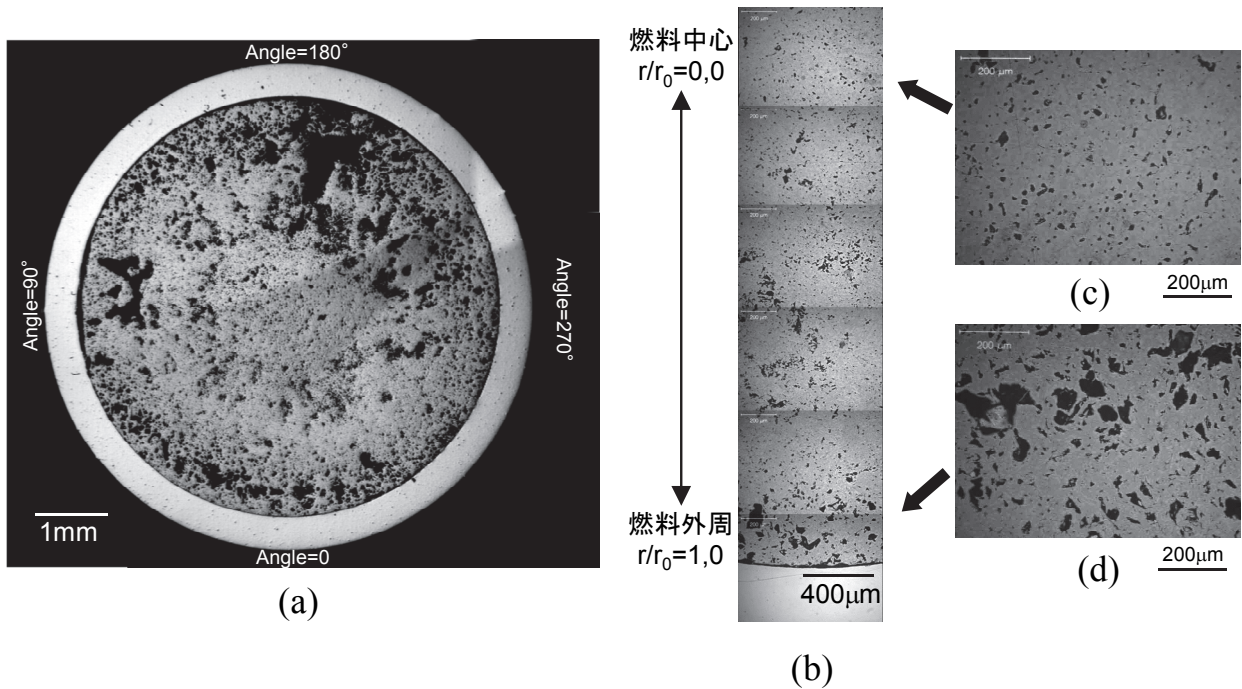


図 2.2-16 燃料スタック下端から~145mm の位置で照射されたサンプル#3 : U-19Pu-10Zr 三元合金燃料の金相写真 ; (a) 断面全体像および (b)  $120^\circ$  の径方向に沿った燃料組織の分布図、(c)中央領域および(d)外周領域の拡大図。 [2.2-6]

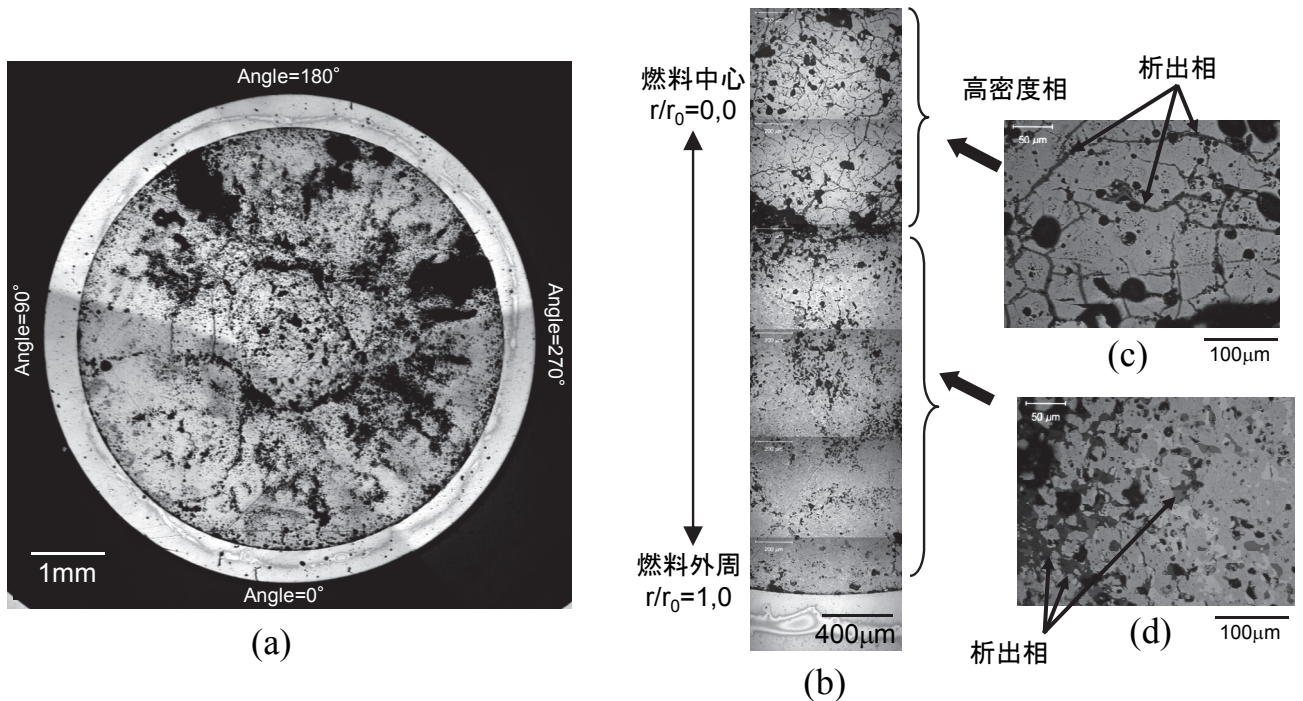


図 2.2-17 燃料スタック下端から~370mm の位置で照射されたサンプル#4 : U-19Pu-10Zr-2MA-2RE 合金燃料の金相写真 : (a) 断面全体図および (b)  $11^\circ$  の径方向に沿った燃料組織の分布図、(c)中央領域および(d)中間領域の拡大図。 [2.2-6]

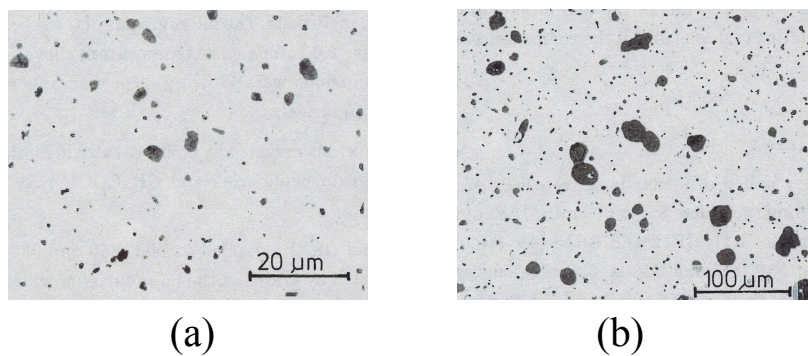


図 2.2-18 MA および RE を添加した U-Pu-Zr 合金燃料の金相写真：  
(a) U-Pu-Zr-2MA-2RE および (b) U-Pu-Zr-5MA-5RE. [2.2-6]

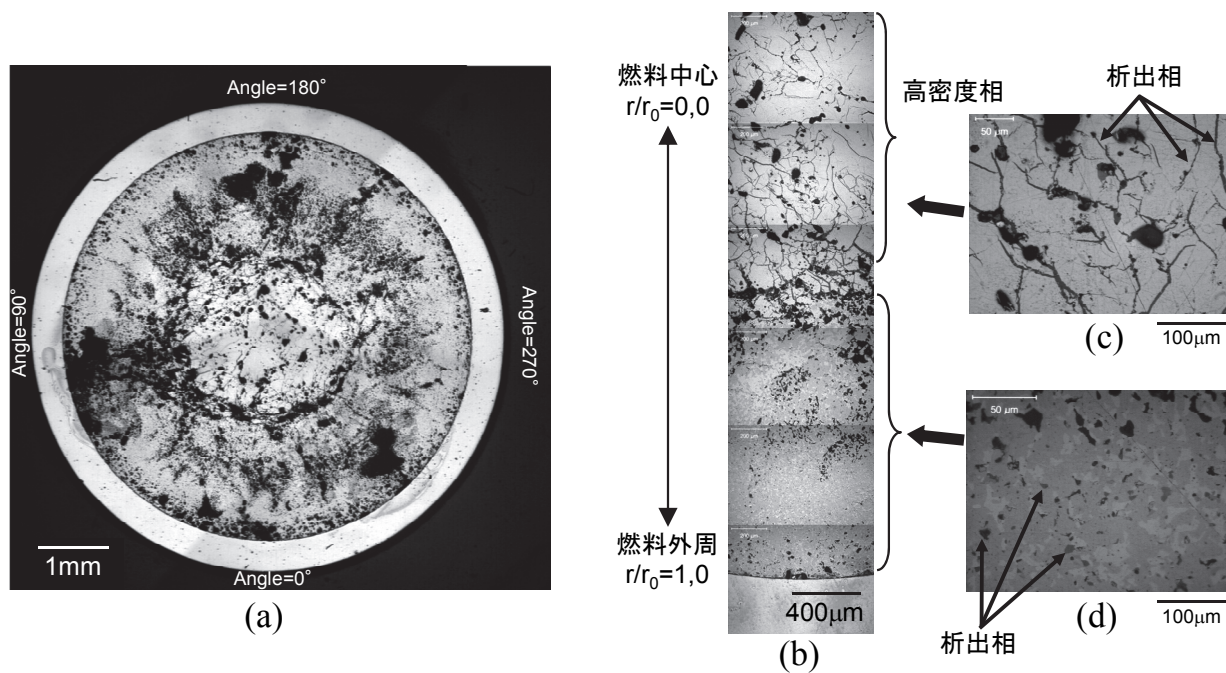


図 2.2-19 燃料スタック下端から~320mm の位置で照射されたサンプル#5：U-19Pu-10Zr-5MA 合金燃料の金相写真：(a) 断面全体図および (b) 径方向に沿った燃料組織の分布図、(c)中央領域および(d)中間領域の拡大図. [2.2-6]



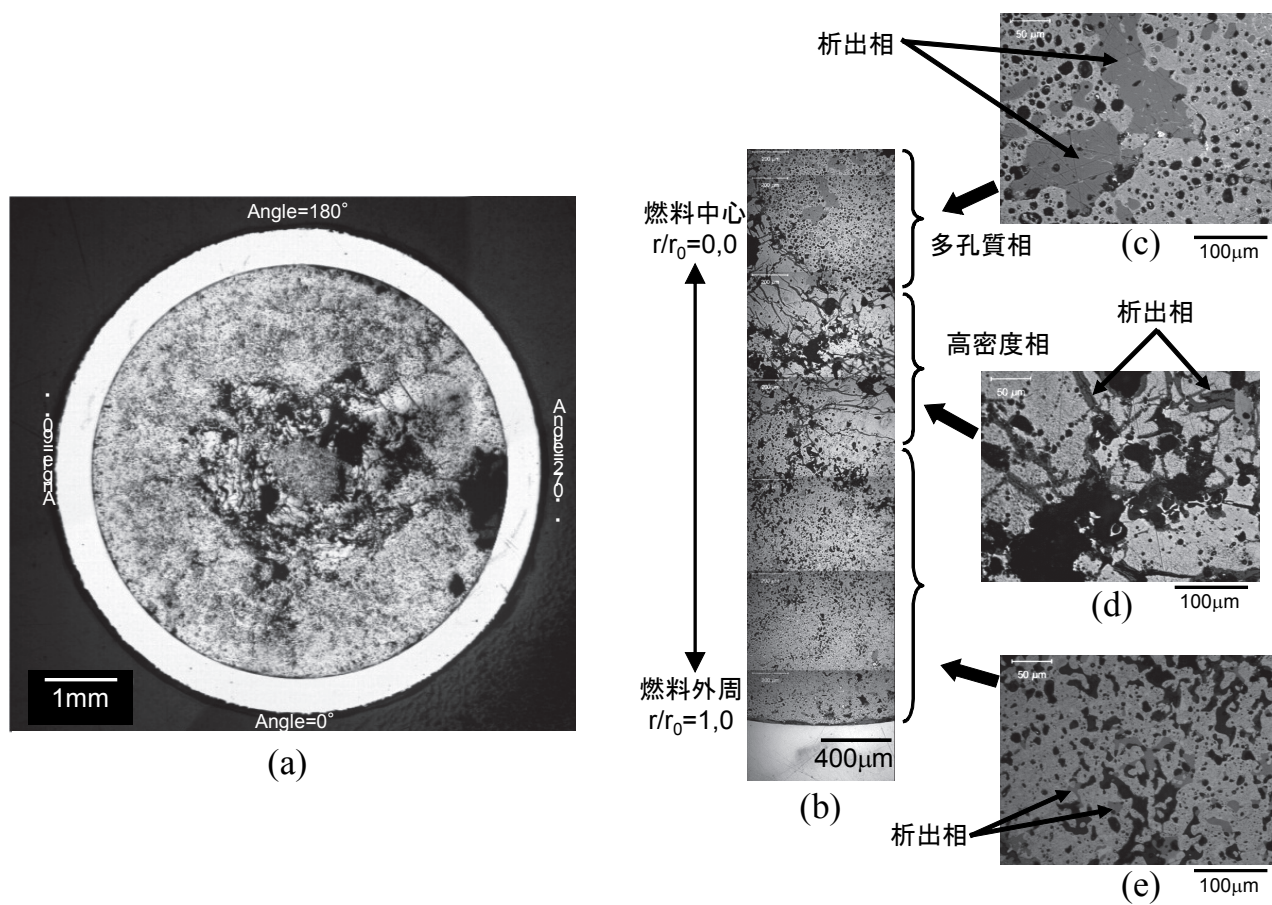


図 2.2-20 燃料スタック下端から~370mm の位置で照射されたサンプル#6：  
 U-19Pu-10Zr-5MA-5RE 合金燃料の金相写真(a) 断面全体図および (b) 径方向に沿った燃料組織  
 の分布図、(c)中央領域、(d)中間領域、および(e)外周領域の拡大図。 [2.2-6]

### 3. 金属燃料炉心の設計検討

金属燃料炉心設計については、高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCT）における副概念として、その特徴を有効活用する炉心概念を構築するとともに、主概念であるナトリウム冷却酸化物燃料と同等のプラント設計との整合性を達成することを目指し進められてきた。

本章では、FaCT 副概念である金属燃料レファレンス炉心として、第 3.1 節に平成 18 年度（2006 年度）に行われたナトリウム冷却金属燃料高出口温度型炉心設計検討の概要を報告するとともに、第 3.2 節に 2010 年に公開された最新の日本の評価済核データライブラリ JENDL-4.0 の概要を、第 3.3 節、第 3.4 節に JENDL-4.0 を用いた炉心解析について報告する。更に、第 3.5 節に金属燃料炉心において炉心特性及び安全特性の向上が期待できる概念として検討を行った、粒子型金属燃料の設計検討について報告する。

#### 3.1 平成 18 年度レファレンス炉心の概要

ナトリウム冷却金属燃料高出口温度型炉心[3.1-1]は、ナトリウム冷却酸化物燃料炉心と同等の原子炉出入口温度（550℃／395℃）を達成可能な高い性能を持つ炉心として概念が構築され、高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCT）における副概念に位置付けられている。本炉心は、金属燃料の重金属密度が高いことから転換比が約 1.0 となる Pu 富化度（12 wt%程度）が設定可能であり、単一の Pu 富化度を用いて局所的な内部転換比が炉心燃料のすべての領域で約 1.0 となるようにし、出力分布の時間的変動の抑制を可能としている。さらに、径方向の出力分布の平坦化には、内側炉心と外側炉心との間に時間的変動の差が生じることを避けるために、Pu 富化度の代わりに燃料 Zr 含有率と燃料スミア密度に違いを設けることで対応している。これらにより冷却材流量配分の最適化が可能となり、被覆管と接触した金属燃料部における液相形成を防止するための被覆管内面温度制限（650℃以下）を満足しながら、高い原子炉出口温度を達成することが可能な見通しが得られている。

しかしながら、金属燃料高出口温度型炉心では、酸化物燃料炉心に比較して冷却材温度係数が大きくドップラ係数の絶対値が小さいため、ULOOF における SASS の有効性確保が課題となっていた。そこで、平成 18 年度における設計検討において、平成 17 年度の金属燃料高出口温度型炉心[3.1-2]を基に Na ボイド反応度（冷却材温度係数の指標）を低減した炉心を構築した[3.1-3]。同炉心はその後の検討におけるレファレンスとして用いられており、平成 18 年度レファレンス炉心と呼ばれている。本節でその概要を示す。

##### 3.1.1 検討条件及び解析方法

###### (1) 検討条件

表 3.1-1 に、プラント仕様、炉心・燃料基本仕様、燃料健全性及び安全設計に係わる設計目安、他設計との取合条件、炉心性能目標を示す。

プラント仕様に関する設計条件としてはナトリウム冷却酸化物燃料炉心[3.1-4]と同一とし、電気出力が 1,500 MWe、熱出力が 3,530 MWth、原子炉出口及び入口温度がそれぞれ 550℃、395℃、

1 次系冷却材流量が 18,000 kg/s である。

炉心・燃料基本仕様は、燃料形態が U-TRU-Zr 合金金属燃料、炉心型式が均質重金属密度 2 領域炉心である。燃料の TRU 組成は金属燃料高速炉多重リサイクル組成であり、TRU 中の核分裂性 Pu の割合は 68 wt%、TRU 中の MA の割合は 3 wt% である。FP 混入率は燃料体積占有率において 0.6 vol% である。炉心材料は被覆管が ODS 鋼、ラップ管が PNC-FMS 鋼である。

設計目安としては、Na ボイド反応度、最大線出力、高速中性子照射量等がある。Na ボイド反応度については、ULOF 時の炉心崩壊事故起因過程における即発臨界回避のための安全要求として 8 \$ 程度以下があるが、SASS 有効性確保の観点から可能な限りの低減を図るものとした。最大線出力については、燃料溶融防止のための条件として 500 W/cm 程度以下があるが、被覆管温度の上昇を抑制するために平成 17 年度の金属燃料高出口温度型炉心と同等の 300 W/cm 程度以下を設計目安とした。高速中性子照射量は ODS 鋼の開発目標目安である  $5 \times 10^{23}$  n/cm<sup>2</sup> ( $E > 0.1$  MeV) である。被覆管最高温度については、金属燃料と被覆管の共晶反応、あるいは被覆管と接触した金属燃料部における液相形成を防止する目的から、内面温度を 650℃ 以下とした。なお、通常運転時の被覆管のクリープによる累積損傷和 (Cumulative Damage Function : CDF) を 0.5 以下に制限した。

燃料製造及びプラント設計との取合条件としては、燃料の Zr 含有率が 6~10 wt%、スミア密度が 70~75%TD、燃料ピンバンドル部の圧力損失が 0.2 MPa 程度以下となっている。遮へい体外接円径は、ナトリウム冷却酸化物燃料炉心の設計値を参考に 6.8 m 程度以下とした。

炉心性能目標として、増殖比は平衡期炉心に必要十分な 1.03 程度とした。本炉心では軸方向及び径方向ブランケットを装荷せずにこの増殖比を達成可能である。取出平均燃焼度と運転サイクル長さについては、平成 17 年度の金属燃料高出口温度型炉心の設計値を参考に、それぞれ 100 GWd/t 程度以上、18 ヶ月以上に設定した。

## (2) 解析方法

炉定数や解析コード及びモデル化手法は酸化物燃料炉心に対するものと基本的に同一である。ただし、燃料スラグの軸方向伸びの扱いやボンド材ナトリウムの扱いといった金属燃料炉心に特有のものがある[3.1-3]。

### a) 核特性

① 炉定数 統合炉定数 ADJ2000R[3.1-5]を用いた。

② 燃焼特性 2 次元 RZ 体系 70 群の拡散・燃焼計算により求めた。燃料交換バッチ数に 2 サイクルを加え、最後のサイクルを平衡サイクルとみなした。臨界性の基準解析値に対して、非均質効果、輸送・メッシュ効果、スエリングによる燃料スラグの軸方向伸びの効果の補正を行い、平衡サイクル末期において  $0.2\% \Delta k/k'$  の運転余裕を確保するように Pu 富化度を設定した。

③ 出力分布 3 次元 Tri-Z 体系 7 群の拡散・燃焼計算により求めた。燃料交換バッチ数 +1 サイクルの燃焼計算の後に、平衡サイクルの計算を燃料交換バッチ数分行った。最大線出力の評価においては、ラップ管発熱分を除くとともに、燃料スラグの軸方向伸び（スエリング、熱膨張）を考慮した。

④ 制御棒価値 上記③の 3 次元 Tri-Z 体系 7 群拡散・燃焼計算における平衡サイクル初期において制御棒価値を評価した。基準解析値に対して群縮約効果、非均質効果、輸送効果、メッシュ効果を補正（全補正係数 0.89）した値をノミナル評価値とし、さらに不確かさ 9% ( $3\sigma$ ) を考慮した値を設計値とした。

⑤ 反応度係数 上記②の平衡サイクル末期を対象に 2 次元 RZ 体系 70 群拡散計算により、Na ボイド反応度及びドップラ係数を求めた。ここで、ボンド材ナトリウムの扱いについては、Na ボイド反応度及びドップラ係数を保守側に評価する観点から、全量炉心外に押し出されるものとした。Na ボイド反応度には非均質効果と輸送・メッシュ効果を補正（全補正係数 0.95）した値を、ドップラ係数には非均質効果と輸送・メッシュ効果を補正（全補正係数 1.02）した値をノミナル評価値とした。実効遅発中性子割合は 2 次元 RZ 体系 70 群拡散摂動計算により求めた。

#### b) 熱流力特性

① 被覆管最高温度 サブチャンネル解析コードによりノミナル値を求め、表 3.1-2 に示す工学的安全係数を用いて各種不確かさを考慮したホットスポット値を評価した。

② 燃料ピンバンドル部圧力損失 Cheng-Todreas 式[3.1-6]を用いて評価した。

### 3.1.2 設計検討

#### (1) 燃料ピン径の太径化

Na ボイド反応度を低減するには、冷却材体積比を小さくしナトリウムの量を減らすことや、炉心の偏平化により中性子の漏洩を増加させることが考えられる。燃料ピン径を太径化すると冷却材体積比が低減されるとともに炉心高さの短縮が可能となり、Na ボイド反応度を低減することができる。

表 3.1-3 に平成 17 年度金属燃料高出口温度型炉心を出発点として、燃料ピンを太径化させた炉心サーベイ計算結果（Case-1~Case-3）を示す。燃料ピン太径化に伴い、燃料インベントリを保存するように炉心高さを低減させる。すると、燃料ピンバンドル圧力損失が低下するので、スぺーサワイヤ径を小さくすることによって燃料ピン間距離を詰め、冷却材体積比を減少させることができる。スぺーサワイヤ径は製作性の観点から最小で 1.00 mm とした。

表 3.1-3 に示すように、燃料ピンの太径化によって Na ボイド反応度の低下が見られるが、一方で、ドップラ係数の絶対値の減少が同時に起こることがわかる。ここで SASS 有効性確保に対する反応度係数の指標として、Na ボイド反応度とドップラ係数の比（相対値）を定義した。燃料ピン太径化によって Na ボイド反応度とドップラ係数の比は、SASS 有効性を高める側に変化することが確認できる。

炉心への影響としては、最大線出力の増加と遮へい体外接円径の増大が生じた。一方、最大線出力の目安 300 W/cm 程度、遮へい体外接円径の取合条件 6.8 m 程度という設計検討条件を満足し、さらには金属燃料の照射実績及び製造性を有するとの観点から、ピン径を 8.5 mm 程度以下とすれば開発課題が少ない。従って、以上の点を考慮して、燃料ピン径 8.5 mm（表 3.1-3 中の Case-2）を選択するものとした。



## (2) 内側・外側炉心境界の最適化

次に燃料ピン径 8.5 mm の炉心 (Case-2) において、内側・外側炉心領域の境界について最適化を検討した。燃料インベントリの大きな外側炉心燃料集合体数を増やし、その分、内側炉心燃料集合体数を減少させることにより、さらに炉心高さを低減させ Na ボイド反応度を低減するのが目的である。

表 3.1-4 にサーベイ計算結果を示す (Case2-1~Case-2-3)。Na ボイド反応度とドップラ係数の比を見ると、Case-2-1、Case-2-2 においてはさらなる低減が得られた。しかし、Case-2-3 まで外側炉心燃料集合体数を増やすと、Na ボイド反応度とドップラ係数の比が若干ではあるが増加に転じてしまう。炉心特性への影響としては、最大線出力の増加と最大高速中性子照射量の増加が生じる。特に Case-2-3 では最大高速中性子照射量が設計目安 ( $5 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$  程度以下) を大幅に超過する。最大線出力も設計目安 (300 W/cm 程度以下) を超過しているため、被覆管温度が制限条件を満足することを下記 3.1.3 節の熱流力特性評価において確認する必要がある。

以上より、内側炉心と外側炉心の燃料集合体数比を Case-2-2 の「内側炉心／外側炉心=0.30」とすることで設計条件を満足する範囲で SASS 有効性確保に最も有利となることから、これを選ぶものとした。

## (3) 燃料スミア密度領域数の合理化

Case-2-2 においては、内側炉心の集合体数が減少しており、外側炉心と内側炉心の最大線出力比が、従来の平成 17 年度高出口温度型炉心では 1.06 であるのに比べ 1.32 となっており、内側炉心の出力分担を増加することにより冷却材流量配分の観点で向上を図る余地のあることがわかる。

本炉心概念では、内側及び外側炉心で燃料 Zr 含有率と燃料スミア密度に違いを設けることで径方向の出力分布の平坦化を行っている。内側炉心の出力を増加させる方策として、ここでは燃料スミア密度を重金属密度の高い 75%TD に 1 領域化とすることを検討した。これにより、冷却材流量配分における向上効果のほか、燃料スラグ径が 1 種類となることから燃料製造における負担を軽減することができる。

計算結果を表 3.1-5 に示す (Case-2-2-1)。燃料スミア密度の 1 領域化によって、Na ボイド反応度とドップラ係数の比や最大線出力に大きな影響を与えることなく、外側炉心と内側炉心の最大線出力比が 1.32 から 1.17 へと低下するとともに、必要冷却材流量の指標となる規格化包絡出力が 1.070 から 1.062 に低下する結果となった。なお、平成 17 年度高出口温度型炉心では規格化包絡出力は 1.050 である。

以上のように、元々は出力分布の平坦化のために燃料スミア密度を 2 領域としていたが、安全性を改善した本炉心においては、燃料スミア密度を 1 領域とした Case-2-2-1 の方が出力分布の平坦化とそれによる必要冷却材流量の合理化に効果のあることがわかった。加えて燃料製造の負担を低減できる。これより、最終的な炉心・燃料仕様として Case-2-2-1 を選ぶものとした。

### 3.1.3 選定炉心の核熱特性評価

第 3.1.2 節における検討により、燃料ピン外径 8.5 mm、内側炉心燃料集合体 150 体、外側炉

心燃料集合体 495 体、燃料スミア密度 1 領域の炉心（Case-2-2-1）を選定した。これを平成 18 年度レファレンス炉心と呼ぶ。同炉心の核及び熱流力特性評価を行った結果をまとめる。

#### (1) 核特性評価

表 3.1-6 に炉心の主要仕様及び核特性を、図 3.1-1 に炉心配置を示す。

炉心の主要仕様としては、熱出力が 3,530 MWth、運転サイクル長さが 24.5 ヶ月、燃料交換バッチ数が 3、炉心高さが 75 cm である。

核特性は、Pu 富化度が 12.2 wt%であり、燃焼反応度が  $0.7\% \Delta k/k'$ 、増殖比が 1.03 である。最大線出力は内側炉心が 304 W/cm、外側炉心が 347 W/cm、取出平均燃焼度は 96.6 GWd/t、最大高速中性子照射量は  $5.4 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$  であり、いずれも設計条件を満足している。

Na ボイド反応度は 6.15 \$、ドップラ係数は  $-3.04 \times 10^{-3} \text{ Tdk/dT}$  であり、Na ボイド反応度は平成 17 年度高出口温度型炉心から 27%低減されている。

表 3.1-7 に制御反応度収支を示す。主及び後備炉停止系はともに十分な炉停止余裕を有しており、制御反応度収支は成立している。

#### (2) 熱流力特性評価

核設計で評価した集合体出力分布を基に、炉心の流量領域区分を設定し、燃料集合体の熱流力特性の評価を行った。

図 3.1-2 に設定した炉心流量領域区分を示す。燃料集合体流量の合計が配分可能な流量（1 次系冷却材流量の 96.4% = 17,360 kg/s）以下となるように、流量領域を内側炉心 2 領域、外側炉心 9 領域の合計 11 領域に設定した。

表 3.1-8 に各流量領域の燃料集合体流量、被覆管最高温度及び燃料ピンバンドル部の圧力損失を示す。被覆管内面最高温度及び燃料ピンバンドル部圧力損失の最大は 649 °C 及び 0.22 MPa であり設計条件を満足している。また、燃料集合体流量の合計は 17,360 kg/s であり、配分可能な流量を満足している。

以上、SASS 有効性確保の観点から Na ボイド反応度（冷却材温度係数の指標）を低減した平成 18 年度レファレンス炉心について核熱設計成立性の見通しを得ることができた。

### 3.2 JENDL-4.0 概要

2010 年 5 月に日本原子力研究開発機構とシグマ委員会（現在の JENDL 委員会）との協力により、国内 4 番目の核データライブラリとして JENDL-4.0 が公開された[3.2-1]。JENDL-4.0 は従来の核データと比較して、過去の軽水炉や高速炉の積分実験をより精度良く再現することが報告されている[3.2-2]。なお、JENDL-4.0 では、従来評価されていた軽・中核種に加えて、全アクチニドに対して共分散データが与えられていることが最大の特徴の 1 つである[3.2-3]。

### 3.2.1 JENDL-4.0 の評価

以下に、高速炉炉心解析への応用の観点から、JENDL-4.0 の核データ評価上の主な特徴をまとめる[3.2-1, 3.2-2, 3.2-3, 3.2-4]。

(1) U-235： 分離共鳴パラメータとしては、従来の核データライブラリ JENDL-3.3[3.2-5]と同様に、オークリッジ国立研究所（ORNL）の Leal らが整備したものがベースとされている。しかし、JENDL-3.3 とは異なり ORNL オリジナルの上限エネルギー2.25keVではなく、500eV が上限として採用され、それ以上のエネルギーの捕獲断面積には独自の評価が新たに行われ、第3版改訂2ライブラリ JENDL-3.2 と同様の小さな値が与えられた。これは、500eV～2.25keV のエネルギー領域における U-235 の捕獲断面積の過大評価の可能性の指摘に核データ評価者が応えたものである。すなわち、経済協力開発機構/原子力機関（OECD/NEA）傘下の Subgroup 29[3.2-6]の活動において、原子力機構の高速炉臨界実験装置（FCA）やロシア物理エネルギー研究所（IPPE）の臨界実験装置（BFS）の濃縮ウラン高速炉体系における臨界性や Na ボイド反応度に過小評価が見られることが認知され、その原因が推定され、上記の指摘につながったものである。JENDL-4.0 の非分離共鳴パラメータに関しては、米国核データライブラリ ENDF-6 フォーマット[3.2-7]の LSSF=1 オプション、即ち反応断面積（File 3）に完全な無限希釈断面積を収録、が採用されている。すなわち、JENDL-4.0 の非分離共鳴パラメータは、自己遮蔽因子の評価のみに用いなければならないことに留意する必要がある。共鳴領域以上のエネルギーでの核分裂断面積は、U-233, 235, 238 と Pu-239, 240, 241 の主要6核種の断面積測定データ及び反応率比測定データを用いて同時評価により決定された。核分裂当りの即発中性子発生数（ $\nu_p$ ）については、500eV 以下は JENDL-3.3 と同じであるが、それ以上のエネルギー領域については、最小二乗法フィッティングにより新たに評価されたが、予備的な積分実験解析結果を反映して、1keV～1MeV の  $\nu_p$  値を計算値よりも 0.2%大きめに修正された。核分裂当りの遅発中性子数（ $\nu_d$ ）は JENDL-3.3 と同じである。

(2) U-238： 分離共鳴パラメータとしては、同じく ORNL の Leal らが整備したものがベースとされている。共鳴領域以上の捕獲断面積は、JENDL-3.3 と同じである。（n,2n）反応については、CCONE コード[3.2-8]を用いて評価された値が新たに採用された。また、弾性散乱の一次ルジャンドル係数（ $P_1$ ）についても、JENDL-3.3 の値が過大であるとされていたため、CCONE コードで再評価した結果、JENDL-4.0 の  $P_1$  の値は、0.1～3MeV においてかなり JENDL-3.3 より小さめになった。共鳴領域以上のエネルギーでの核分裂断面積は同時評価の結果である。 $\nu_d$  は、JENDL-3.3 と同じである。

(3) Pu-239： 分離共鳴パラメータには、Derrien らが整備したもの[3.2-9]が採用された。共鳴領域以上のエネルギーでの核分裂断面積は同時評価の結果である。20keV 以上のエネルギー領域の  $\nu_p$  には、実験データの最小二乗法フィッティングによる結果が用いられた。 $\nu_d$  は、JENDL-3.3 と同じである。

(4) アメリシウム： Am-241, 242m, 243 の分離共鳴パラメータは JENDL-3.3 と同じである。共鳴領域以上のエネルギーの核分裂断面積については、最小二乗法フィッティングにより新たに評価された。Am-241 捕獲反応の核異性体比（ground / total）は、信頼度の高い実験値を反映

して JENDL-3.3 から大きく変更され、300keV で 0.84 となった。

(5) キュリウム： Cm-242～248 の分離共鳴パラメータは、新たに評価された。共鳴領域以上の核分裂断面積についても、最小二乗法フィッティングにより新たに評価された。

(6) Fe-56： 非弾性散乱については、第 3 励起レベルまで POD コード[3.2-10]を用いて新たに評価された。弾性散乱の角度分布についても新たに評価され、高エネルギー領域の前方散乱が JENDL-3.3 よりも大きい結果となった。

(7) O-16： 3MeV 以下の全断面積と弾性散乱断面積を、R-matrix 理論を用いて再評価した結果、1～100keV のエネルギー領域で JENDL-3.3 よりもかなり大きい値が得られている。

(8) ジルコニウム： Zr-90, 91, 94, 96 の分離共鳴パラメータが更新された。分離共鳴より上の 20MeV 以下の捕獲断面積が POD コードを用いて新たに評価された。Zr-90, 92, 94 の捕獲断面積は東京工業大学で測定されたデータを用いて規格化された。Zr-90 の捕獲断面積は JENDL-3.3 から大きめの値となった。

### 3.2.2 JENDL-4.0 の高速炉ベンチマーク結果の概要

JENDL-4.0 の高速炉核特性に対するベンチマーク体系への予測性能は、以下のように評価されている[3.2-2, 3.3-3, 3.2-4]。

(1) JENDL-4.0 は、反射体で覆われていない裸状態あるいはウラン反射体で覆われた各ロスアラモス超小型高速炉心の臨界性を良好に再現できる。ナトリウム減速の大型・中型高速炉については、約 0.5%  $\Delta k/k'$  以内で予測できる。

(2) JENDL-4.0 は、従来ライブラリに比べ、Pu-242、タングステン、ベリリウム、ステンレス鋼、銅、バナジウム、チタン、鉛を含む種々の高速炉の臨界性の予測が向上した。

(3) JENDL-4.0 は、JENDL-3.3 で見られた濃縮ウラン燃料高速炉の Na ボイド反応度の C/E 値過小評価の問題を解消した。これは、前節 3.2.1 の(1)で述べた U-235 捕獲断面積の改良によるものである。

(4) JENDL-4.0 は、ナトリウム冷却高速炉の種々の核特性（制御棒価値、ドップラ反応度、反応率分布、反応率比など）を精度良く予測できる。

(5) JENDL-4.0 は、炉心燃料の燃焼によるアクチニド核種や FP の生成量を精度良く予測できる。

### 3.2.3 JENDL-4.0 の検証結果

#### (1) 臨界性

新旧核データ間の解析結果の比較を図 3.2-1 に示す。JENDL-3.2[3.2-11]あるいは JENDL-3.3 を用いた場合には、実験値に対し解析値において系統的な過小評価が見られていたが、JENDL-4.0 では C/E 値はほぼ 1 に改善されている。

参考までに、原子力機構の高速増殖原型炉「もんじゅ」の C/E 値において、JENDL-3.2 から JENDL-3.3 への改定により改善が見られるが、これは主に Pu-240 の捕獲反応断面積の見直しによるものである。また、濃縮ウラン燃料炉心である BFS-62 炉心において、JENDL-3.3 のみに比

較的大幅な過小評価が見られるが、これは U-235 の捕獲反応断面積の見直しによるものであり、JENDL-4.0 への改定では再度の見直しが行われた。

## (2) 制御棒価値

新旧核データ間の解析結果の比較を図 3.2-2 に示す。実験値に対し解析値は系統的に過大評価となっている。また、核データ間に差異はほとんど見られない。

## (3) 反応率分布

反応率分布は出力分布及び増殖比（ブランケット寄与分）の目安となり得る。新旧核データ間の解析結果の比較を、U-235 核分裂反応率（F25）に関しては図 3.2-3(1)に、U-238 核分裂反応率（F28）については図 3.2-3(2)に、U-238 核分裂反応率（C28）については図 3.2-3(3)に、それぞれ示す。核データ間の差異は最大でも実験誤差の統計成分程度で数%と小さい。また、炉心燃料領域では C/E 値はほぼ 1 である。それに対し、ブランケット領域では F25 と F28 の双方に系統的な過小評価が見られ、主に解析手法の観点からの改善が望まれる。

## (4) U-238 捕獲対 Pu-239 核分裂反応率比（C28/F49）

C28/F49 は増殖比（内部転換比）の目安となり得る。新旧核データ間の解析結果の比較を図 3.2-4 に示す。核データ間の差異は見られないが、解析値は実験値に対して系統的な過大評価を示している。この結果は内部転換比の過大評価を示唆するものであるが、実験や解析におけるセル非均質性による不確かさが大きいことが予想されるので、注意が必要である。

## (5) Na ボイド反応度

新旧核データ間の解析結果の比較を、Pu 燃料炉心及び濃縮 U 燃料炉心それぞれについて、図 3.2-5(1)及び図 3.2-5(2)に示す。Pu 燃料炉心に関しては、核データ間で数%前後の差異が見られるが、全体的には解析値は実験値に対して過大評価傾向にある。また、ボイドステップ依存性が大きく、中性子漏洩成分の寄与の増加と共に過大評価が解消される傾向にある。濃縮 U 燃料炉心に関しては、JENDL-3.2 と JENDL-4.0 の結果は比較的良好であるが、JENDL-3.3 の結果は極端な過小評価が見られる。これは、(1) 臨界性でも述べたように U-235 捕獲反応断面積の見直しに伴うものである。

## (6) ドップラ反応度関連

サンプルドップラ反応度（ZPPR-9）及び全炉心レベルでの出力係数と等温温度係数（SEFOR）の新旧核データ間の解析結果の比較を図 3.2-6 に示す。核データ間の差異は数%程度とほとんど見られない。また、体系の膨張に伴う成分を含まないサンプルドップラ反応度と出力係数については、解析値は実験値と良い一致を示しているが、体系膨張による反応度成分を含む等温温度係数については系統的な過大評価が見られる。なお、等温温度係数における過大評価は、同じく過大評価を示している制御棒価値と Na ボイド反応度の結果とは実効遅発中性子割合を介して整合していることとなり、逆にサンプルドップラ反応度と出力係数のみが異なる傾向を示



していることになる。

#### (7) ドライバ燃料照射後試験における燃焼率

新旧核データ間の解析結果の比較を図 3.2-7 に示す。U-238 の結果は C/E 値の 1 からのずれが他と比較して大きい、これは燃焼率の絶対値が小さいことにあり、比ではなく差で比較した場合には他と同等となる。また、JENDL-3.3 における U-236 の燃焼率を除いて、核データ間の差異は小さいが、これは(1) 臨界性と(5) Na ボイド反応度で示したように U-235 捕獲反応断面積の見直しに伴うものである。

#### (8) MA サンプル照射後試験における照射後核種組成

各 MA サンプルについて、新旧核データ間の解析結果の比較を図 3.2-8(1)～8(4)に示す。核データ間で差が顕著に見られるのは、Am-241 サンプルにおける Cm-243 (Cm-242 の捕獲反応により生成)、Am-243 サンプルにおける Cm-246 (Cm-245 の捕獲反応により生成)、Cm-244 サンプルにおける Cm-247 (Cm-246 の捕獲反応により生成)である。Cm-242、245、246 の捕獲反応断面積の測定結果は少なくとも高速炉で必要となる中性子エネルギー領域では皆無であり、JENDL-4.0 の評価で行ったように MA サンプル照射後試験の結果を反映させる以外に策はないと考えられる。

なお、サンプル数が少ないことに加えて、同じメカニズムを有する複数の結果(例えば、Pu-238 捕獲反応断面積に支配される Pu-238 と Pu-239 の比)に整合性が見られない場合があることから、今後、評価データの増加などの信頼性の向上が必要である。

### 3.3 JENDL-4.0 を用いた MOX 燃料炉心解析

75 万 kWe の中型 MOX 燃料炉心の解析を例に JENDL-4.0 の炉心設計への適用性検討結果を述べる。

#### 3.3.1 解析条件

##### 3.3.1.1 設計条件

##### (1) 基本炉心仕様と検討条件[3.3-1]

経済性向上の観点から、高燃焼度、高炉心出口温度、長期運転サイクル運転を達成し、サイクルコスト低減、熱効率、稼働率向上を図る。

安全性向上の観点から、炉心損傷事故を想定した場合に、起因過程における即発臨界の回避と共に、図 3.3-1 に示すような内部ダクト付燃料集合体概念[3.3-2]を採用することにより遷移過程における熔融燃料を排出し再臨界の回避を図ることとしている。

以上から、表 3.3-1 に示す条件を設定している。

また、中型 MOX 燃料炉心の炉心燃料主要仕様を表 3.3-2 に、炉心配置を図 3.3-2 に示す。

##### (2) 燃料組成

将来の FBR 実用化像の構築を想定し、FBR 多重リサイクル燃料組成[3.3-3]を用いた場合について解析を行った。検討で使った MOX 燃料 FBR 多重リサイクル燃料組成を表 3.3-3 に示す。



### (3) 炉心

電気出力 75 万 kWe の中型 MOX 燃料炉心を対象とした[3.3-4, 3.3-5]。

#### 3.3.1.2 解析方法

##### (1) 炉定数

第 3.2 節で述べた最新の核データ JENDL-4.0 及びその 1 つ前の版である JENDL-3.3[3.3-6]を用いた。炉定数としては、それぞれの核データに基づく 70 群炉定数 JFS-3-J4.0[3.3-7]及び JFS-3-J3.3 を適用した。

##### (2) Pu 富化度調整

70 群の均質格子計算で得られた実効断面積を用いて、2 次元 RZ 体系計算により、燃焼期間にわたる臨界が維持でき、かつ、最大線出力が内側炉心と外側炉心で同等となるように反復燃焼計算により Pu 富化度の調整を行った。

##### (3) 主要炉心特性計算

70 群の実効断面積を用いて 2 次元拡散燃焼計算により主要特性を得た。非均質格子計算モデル、輸送理論相当の結果を得るための補正を行った。

#### 3.3.2 解析結果

新旧各ライブラリを用いた場合の炉心特性の解析結果を表 3.3-4 に示す。JENDL-3.3 による結果と比較して、JENDL-4.0 では Pu 富化度の低減が図られているが、これは、第 3.2 節で示したように、JENDL-3.3 と比較して JENDL-4.0 は臨界性をより高めに評価することと整合が見られる。また、それに伴い、燃焼反応度の低下、増殖比の増加、ドップラ反応度の増加といった炉心性能の向上が見られる。Na ボイド反応度については、2%弱の増加が見られるが、これは、第 3.2 節で示したように、同じ燃料組成の場合において、JENDL-4.0 の方が JENDL-3.3 よりも Na ボイド反応度を 3%以上高めに評価することが主な原因と考えられ、Pu 富化度の違いが核データ間の差を打ち消しているものと推察される。

#### 3.3.3 まとめ

新旧ライブラリを用いた場合の MOX 燃料炉心特性の解析結果から、旧ライブラリ JENLD-3.3 と比較して新ライブラリ JENDL-4.0 では炉心性能の向上と同時に Na ボイド反応度の若干の増加が確認できるが、新ライブラリを用いることが大きく炉心設計に影響することはない。従って、MOX 燃料炉心を対象とした JENDL-4.0 による解析を通じ主要な炉心特性についておよその成立性が確認された。

### 3.4 電中研で整備している炉心解析コードによる金属燃料炉心解析

第 3.1 節で述べた平成 18 年度レファレンス炉心について、第 3.3 節では原子力機構によって開発されたコードによって実施した解析について報告されている。過去に行われた共同研究「金属燃料高速炉の炉心燃料設計に関する研究 (1)」から「同 (3)」においては、原子力機構によ

って開発されたコードと電中研で開発されたコードが利用されてきている。

本節では、電中研で整備されているコードを用いて、平成 18 年度レファレンス金属燃料炉心の解析を実施し、原子力機構と電中研のコード間の整合性を確認した結果について報告する。

### 3.4.1 電中研で整備されている高速炉炉心特性解析コードの概要

電中研で高速炉用に開発・整備している金属燃料および炉心特性解析コードのうち、主要なものをその計算フローに沿って図 3.4-1 に示す。また、以下に各コードの概要を示す。基本的には UNIX 上での動作を前提に開発されているが、一部を除いて Windows 上でも動作することを確認している。

#### (1) 炉心設計コード

- a) 物性値：冷却材や構造材、酸化物燃料に関しては、公開されている標準的データをまとめて使用。金属燃料は公開データに加え、調査結果をもとにフィッティング等によってまとめたデータセットを作成し利用。窒化物燃料データも整備している。
- b) 群定数：高速炉用多群定数セット（JFS-3）を利用。
- c) 炉定数作成：SLAROM-C 旧日本原子力研究所（現在の原子力機構）が開発し、公開している SLAROM をベースに、均質化セル断面積の解析モジュールを抜き出して整備したコード。標準計算の場合には、各領域の数密度を入力として多群炉定数セットを作成して利用。ボイド反応度の評価など、非均質効果を考慮する場合には、2 重非均質効果を考慮した断面積解析も可能である。
- d) 少数群縮約：MJOINT 多群 RZ 体系計算で求めた中性子束を重みとして領域ごとに少数群に縮約する。
- e) 炉心燃焼計算：CITBURN CITATION のフラックスソルバーを核とし、入力処理（集合体イメージとして扱える）、出力分布評価（ $\gamma$  発熱を考慮）、燃焼チェーン（アクチニド及び FP）、燃料交換（分散バッチ、シャフリング化）のルーチンを開発し、統合したコード。2 次元 R-Z（1/3 炉心または 1/6 炉心）モデルおよび 3 次元 Tri-Z（1/6 炉心）モデルを整備している。
- f) 反応度係数：CITPERT CITATION のフラックスソルバーを核に、CITBURN で求めた平衡組成による燃焼ゾーンごとの 1 次摂動計算を行う。結果はまとめて炉心特性値とするとともに、多次元データのまま過渡解析コードの入力にも利用される。なお、ボイド反応度や軸・径方向形状係数は、CITBURN によって組成または形状を変化させた直接計算で求める。
- g) 定常時熱流動：SPE2 炉心内流動は実験ベースのフロースプリットモデルで解き、熱計算をサブチャンネルモデルで行う全炉心熱流動解析コード SUPERENERGY2 に工学的安全係数を考慮したホットスポット算出機能を付加したコード。炉内滞在期間中の最大出力値から必要流量を計算し、これを元に流量配分を作成・入力して、実際の出力分布による定常時の詳細解析を行う。
- h) 集合体構造・炉心湾曲：ARKAS\_cellule 運転時の温度分布や照射スエリングに伴う集合体群の変形および接触応力を有限要素法で解析するコード。集合体を 1 本のビームでモデル

化する簡易法と集合体壁面を多数の薄肉シェル要素で模擬する詳細モデルを持つ。集合体間の接触部にはジョイント要素を配し、その点での接触応力を求める。薄肉シェルモデルでは集合体剛性値を入力する必要がなく、物性値から計算される。

## (2) 燃料挙動解析コード

スエリングや FP ガス放出など金属燃料の特徴的な照射挙動を模擬できる機構論モデルを開発し、有限要素法による変形解析コードとしてまとめた、ALFUS を使用する。

## (3) 過渡解析コード

- a) 詳細熱流動：multi-COBRA COBRA-VI-I の熱・流動サブチャンネルモデルをベースに複数集合体をモデル化し、全炉心または炉心セクターの定格から自然循環、流量再配分といった過渡評価が可能である。なお、計算実施の際には十分なメモリ環境を用意する必要がある。
- b) プラント過渡解析：CERES 1 点炉動特性と多次元熱流動解析を組み合わせたコード。異常な過渡変化時のスクラム不作動事象（Anticipated transient without scram：ATWS）のような苛酷事象に限らず、炉停止後のプレナム温度成層化などの解析が可能。反応度係数は多次元で与える。炉心湾曲や制御棒位置の相対変位などを考慮する機能も持つ。

### 3.4.2 FaCT レファレンス炉心の解析

原子力機構（JAEA）で整備している高速炉用炉心解析手法（以下、JAEA 手法）と、前項 3.4.1 で示した電中研が所有しているコードを用いた解析手法（以下、電中研手法）の解析結果の整合性を確認するため、JAEA 手法によって設計された FaCT 副概念である金属燃料レファレンス炉心、即ち、第 3.1 節で報告した平成 18 年度レファレンス炉心[3.4-1]の特性解析（以下、JAEA 解析）を電中研手法によって行った（以下、電中研解析）。

解析に必要な物性値には電中研で整備しているデータを用いた。炉定数セットには、平成 18 年度レファレンス炉心における JAEA 解析では ADJ2000R [3.4-2]が用いられたが、本解析では核データライブラリ（JENDL-3.2 [3.4-3]）に基づき作成された JFS-3-J3.2R [3.4-4]と最新の核データライブラリ（JENDL-4.0 [3.4-5]）に基づき作成された JFS-3-J4.0 [3.4-6]を用いた。燃焼特性、出力分布は 3 次元 Tri-Z 体系、18 群縮約炉定数セットによる拡散・燃焼計算によって求めた。また、TRU 組成には金属燃料高速炉による多重リサイクル組成 [3.4-7]を適用した。表 3.4-1 に炉心の主要な仕様を示し、図 3.4-2 には炉心配置図を示す。

JAEA 解析および電中研解析の結果を表 3.4-2 にまとめる。電中研解析では、JFS-3-J3.2R による結果と JFS-3-J4.0 による結果を比較して示している。

JAEA 解析と電中研解析による炉心特性の結果は概ねよく一致しているが、電中研解析では、燃焼反応度が小さく、燃焼度がわずかに低い結果となった。ここで、取出平均燃焼度の相違は、構造材からの発熱の取扱いの違いによると考えられる。また、電中研解析では、全炉心 Na ボイド反応度の評価にピン非均質効果や輸送効果[3.4-8]を考慮していないため、過大評価されている。これらを考慮すれば、両者はほぼ一致すると予想される。

核データライブラリ間の比較によると、ADJ2000R に比べ、JENDL-4.0 で、臨界性が增大する傾向が見られている[3.4-9]。この傾向は本評価においても確認でき、JFS-3-J3.2R に比べ JFS-3-J4.0 では Pu 富化度が 0.3wt%程度、低減される結果となった。これは 1,500MWe 級の高速炉において、毎回の燃料交換時の Pu 装荷量がおおよそ 75kg 低減されることに相当する。

また、JENDL-4.0 では  $^{238}\text{U}$  の捕獲と  $^{239}\text{Pu}$  の核分裂の反応率比がわずかに低下する傾向が見られるものの、Pu 富化度の低下による増殖性の増大によって、燃焼反応度は低下する結果となった。

さらに JENDL-4.0 による Pu 燃料炉心の Na ボイド反応度解析値は、JENDL-3.2 に比べ増大する傾向がみられている。この傾向は本評価においても認められ、JFS-3-J4.0 において、わずかに Na ボイド反応度が大きく評価されることが確認された。

以上の結果から、炉定数セットの変更による炉心設計上の重大な変化は見られず、従来の解析結果による知見を活用することに問題はないと考えられる。ただし、アクチノイド核種の生成や変換を個別に検討した場合の影響については未検討であり、今後の課題として挙げられる。

### 3.4.3 燃料組成の変化による炉心特性への影響

軽水炉から高速炉への移行期には、様々な組成の新燃料が炉心に装荷されることが予想される。そこで、想定される新燃料組成による炉心特性への影響を検討するため、原子力機構で評価された高速炉導入期に想定される様々な炉型・燃焼度・冷却期間の軽水炉使用済燃料とその後の高速炉マルチリサイクルによる組成変化[3.4-10]を包含した新燃料組成条件による炉心特性評価を行った。表 3.4-3 に示すように、低燃焼度・短期冷却の軽水炉使用済燃料に相当する「高フィッサイル組成」と高燃焼度・長期貯蔵の軽水炉使用済燃料に相当する「低フィッサイル組成」の 2 種類の燃料による炉心特性を金属燃料高速炉による多重リサイクルを想定した「金属燃料組成」による結果と比較した。なお、ここでの評価には JFS-3-J4.0 を用いた。

ここで、新燃料中に混入する希土類元素の組成として、以下の 3 ケースを設定した。ただし「標準組成」および「金属燃料組成」の場合は、ケース I についてのみ評価した。計算上、希土類元素 (RE) は代表核種  $^{143}\text{Nd}$  によって取り扱うものとし、それぞれのケースについて以下の FP 等価係数を考慮した。

ケース I : MA と同量の RE が混入する。 $^{143}\text{Nd}$  による FP 等価係数=1.0

ケース II : 2vol.%の RE が混入する。 $^{143}\text{Nd}$  による FP 等価係数=1.5

ケース III : 0.4vol.%の RE が混入する。 $^{143}\text{Nd}$  による FP 等価係数=3.0

表 3.4-4 に主要な炉心特性解析結果を示す。「金属燃料組成」に比べ、MA や RE の混入率が高い軽水炉使用済燃料組成の場合には、いずれにおいても、Na ボイド反応度が増大することが分かる。

一方、内部転換に優れた金属燃料炉心の場合には、高フィッサイル組成かつ MA と同重量の RE が混入する場合 (ケース I) でも燃焼反応度 (+0.12%/k/kk') が過大となることはない。

さらにケース II およびケース III では、高フィッサイル組成においても燃焼反応度が負に転じる。

また、低フィッサイル組成の場合には、RE の混入率の想定によらず燃焼反応度が負を維持する。低フィッサイル組成では、MA 添加率が高いため Na ボイド反応度が大きくなるが、Na ボイド反応度の低減化を図った平成 18 年度レファレンス炉心体系では、ケース I においても  $2.83\% \Delta k/k$  (補正を考慮していない値) に収まり炉心の成立に問題となることはない。

但し、Na ボイド反応度の低減化で目標とされた\$6 程度以下を達成することは難しく、高出口温度炉心において径方向膨張による負の反応度効果を期待せず SASS の動作によって冷却材最高温度制限[3.4-11]を満足することは難しいと考えられる。

#### 3.4.4 まとめ

JAEA 解析と電中研解析による炉心特性の結果を比較すると、構造材からの発熱に関する取扱いの相違などによる不一致が見られるものの、概ね良く一致する結果が得られた。また、今回の電中研解析で考慮していないピン非均質効果や輸送効果を考慮すれば、全炉心 Na ボイド反応度も JAEA 解析とほぼ整合すると予想される。

また、JFS-3-J3.2R から JFS-3-J4.0 への炉定数セットの変更によって、それぞれのベースとなる核データライブラリの特徴を反映した変化が見られたが、炉心設計に重大な影響を及ぼす変化は見られず、従来の解析結果による知見を活用することに問題はないと考えられる。ただし、個々のアクチニド核種の生成や変換に関する変化は今後確認していく必要がある。

軽水炉から高速炉への移行期に利用されることが想定される軽水炉使用済燃料に基づく新燃料を装荷した場合にも、炉心成立に問題はないと考えられる。但し、Na ボイド反応度の低減化で目標とされた\$6 程度以下を達成することは難しく、高出口温度炉心において径方向膨張による負の反応度効果を期待せず、SASS の動作によって冷却材最高温度制限を満足するには、何らかの代替案を検討する必要があると言える。

### 3.5 粒子型金属燃料炉心の検討

He ボンド粒子型金属燃料炉心については、炉心特性及び安全特性の向上が期待できる炉心概念として、原子力機構と電中研による共同研究「金属燃料高速炉の炉心燃料設計に関する研究 (3)」(平成 19 年度～平成 20 年度)において概略検討が行われている[3.5-1, 3.5-2]。本節では、同炉心概念について、共同研究「金属燃料高速炉の炉心燃料設計に関する研究 (4)」において平成 21 年度に実施した、流量喪失型スクラム失敗事象 (Unprotected Loss-Of-Flow : ULOF) 時における炉心挙動の検討結果について報告する。

#### 3.5.1 検討の目的・着眼点

金属燃料を用いたナトリウム冷却高速炉は、例えば米国の EBR-II 等での豊富な運転実績を有する概念であり、多様な原子力利用形態のオプションのひとつとして、近年、再び着目を浴びつつある。金属燃料として成立する運転・設計パラメータ、また炉心設計に関連して安全性の



観点から制約を受ける炉心フィードバック特性に関し、それらの成立が見込めるパラメータ範囲について従来知見よりも広範に捉えることで、高速炉としてより魅力を有する概念と設計の方向性について検討を実施してきている。

これまでの原子力機構と電中研による共同研究における検討では、米国において使用実績のあるスラグ状金属燃料に代わり、大小燃料粒子を燃料被覆管内で混合した状態で用い[3.5-3]、さらに Na ボンド材に代わり He ボンド材を用いることで、下部ガスプレナム構造として燃料ピン短尺化を図る革新的概念が提案されている。本節では、この粒子型金属燃料を用いた炉心概念を構築するとともに、ナトリウム冷却高速炉のシビアアクシデントに関し炉心損傷確率の観点で重要となる ATWS、特に ULOF 時の挙動緩和効果に関して検討を行った。革新的な概念を適用した金属燃料ナトリウム冷却高速炉に対し、炉心特性および安全特性上の特長を明確化することを通じ、概念としての妥当性及検討の方向性を確認することを意図している。

### 3.5.2 炉心概念の検討

下部ガスプレナムを用いた燃料の場合、FP ガス温度を低くできることから、燃料ピンの短尺化が可能となる。すなわち、FP ガス温度が炉心出口冷却材温度（約 550℃）相当から炉心入口温度相当（約 395℃）へと低減されることから、被覆管健全性に影響を与える FP ガス圧力を上部/下部ガスプレナムで同一値とする場合、ガスプレナム体積、即ち燃料ピン径同一の場合は長さについて約 15%の削減を図ることが可能となる。これにより、バンドル部での圧力損失の低減が図られることになる。ここでは、この圧力損失への低減効果分を、高速炉としての特長を引き出す観点から、バンドル稠密化に活用することとした。すなわち短尺化による圧力低減（約 15%）に相当する分の圧力上昇をもたらすだけ、燃料ピン間ギャップを狭めることが可能となる。

このような炉心体系として、既存の炉心設計例[3.5-4, 3.5-5]に対してバンドルの稠密化により、燃料体積比の向上と Na 体積比の低減を図った。ここでは、主に Pu 富化度・炉心高さ等のパラメータ調整を行い、炉心特性向上の反映先としては増殖比の向上もしくは初装荷 Pu 重量の削減に着目することとした。これは金属燃料を用いたナトリウム冷却高速炉の大きな特長のひとつが高い増殖性能にあるという認識に基づくものである。なお、この際、燃料ピン径、燃料サイクル長・バッチ数（460 日・3 バッチ）、内側/外側炉心燃料集合体数（168/195 体）、集合体配列ピッチ（191.3mm）等のパラメータは変更しないものとした。炉心性能としては、増殖比の向上に注力した場合、1.035 から 1.049 に、初装荷 Pu 重量の削減に注力した場合、3.070 から 2.952t/GWe に向上することが可能となる。一方、安全に関わる炉心特性である Na ボイド反応度の低減効果は限定的であった。炉心性能及び特性を表 3.5-1 にまとめる。

### 3.5.3 ULOF 時における改善効果

初装荷 Pu 重量を削減した下部ガスプレナム型金属燃料を用いた炉心に対し、Na 冷却高速炉を対象としたプラント過渡解析に使用された実績[3.5-6]のあるプラント動特性解析コード HIPRAC-3D を用いて ULOF 解析を実施した。解析結果を図 3.5-1 に示す。同図には、プラント応答の比較のため、上部ガスプレナム型金属燃料炉心における ULOF 解析結果も示している。



ULOF 解析の目的は、ガスプレナムを上部から下部へと変更したことによる炉心上下方向での反応度分布の変化、さらに過渡時の金属燃料及び冷却材の温度変化に対する反応度時間応答の変化に着目し、ULOF に対する粒子型燃料の総合的な特長/欠点を明らかにする、というものである。

下部ガスプレナム型金属燃料炉心の場合、上部ガスプレナム型金属燃料炉心に比べて、ホットテストチャンネルでの Na 冷却材最高温度は、1024℃から 928℃へと約 100℃低減された。なおここで、プラント応答解析の比較検討のため、Na 冷却材の沸点を大気圧より高い圧力下でのものとしている。この低減の要因を、パラメータ解析を通じて分析すると、以下に分類できる。

- a) Na ボイド反応度係数の改善効果 (10～20℃の冷却材最高温度低下)
- b) 炉心出口から SASS までの Na 輸送遅れ時間短縮の効果 (100～120℃の冷却材最高温度低下)
- c) ガスプレナム部での負の Na ボイド反応度効果の喪失 (25～60℃の冷却材最高温度上昇)

これらの内、b) に示す Na 輸送遅れ時間の約 1.5 秒の短縮により、SASS がより早期に起動することが、ULOF での温度低下に関して大きな寄与を与えていることが分かった。

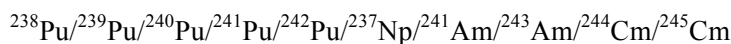
#### 3.5.4 まとめ

金属燃料ナトリウム冷却高速炉において、粒子状燃料を用い下部ガスプレナム型とした革新的概念に対し、炉心特性・安全特性の観点からの利害得失の検討を実施した。炉心特性の向上についてはその効果は限定的であったものの、シビアアクシデントに対する安全性、すなわち ULOF での冷却材温度応答挙動が大幅に緩和されることが明らかにされた。

表 3.1-1 設計検討条件

| 項 目           |                        |        | 設計検討条件                                    |
|---------------|------------------------|--------|-------------------------------------------|
| プラント<br>仕様    | 電気出力                   |        | 1,500 MWe                                 |
|               | 熱出力                    |        | 3,530 MWth                                |
|               | 原子炉出口／入口温度             |        | 550／395℃                                  |
|               | 1 次系冷却材流量              |        | 18,000 kg/s                               |
| 炉心・燃料<br>基本仕様 | 燃料形態                   |        | U-TRU-Zr 合金金属燃料                           |
|               | 炉心型式                   |        | 均質重金属密度 2 領域                              |
|               | 燃料組成                   | TRU 組成 | 金属燃料高速炉多重リサイクル組成 <sup>*1</sup>            |
|               |                        | FP 混入率 | 0.6 vol%                                  |
|               | 炉心材料                   | 被覆管    | ODS 鋼 <sup>*2</sup>                       |
|               |                        | ラッパ管   | PNC-FMS 鋼 <sup>*2</sup>                   |
| 設計目安          | Na ボイド反応度              |        | 8\$ 程度以下 <sup>*3</sup>                    |
|               | 最大線出力                  |        | 300 W/cm 程度以下 <sup>*4</sup>               |
|               | 高速中性子照射量 (E > 0.1 MeV) |        | $5 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup> 程度以下 |
|               | 被覆管内面最高温度              |        | 650℃ 以下                                   |
|               | CDF (通常運転時)            |        | 0.5 以下                                    |
| 取合条件          | 燃料 Zr 含有率              |        | 6~10 wt%                                  |
|               | 燃料スミア密度                |        | 70~75%TD                                  |
|               | 燃料ピンバンドル部圧力損失          |        | 0.2 MPa 程度以下                              |
|               | 制御棒、SASS 配置            |        | 切込み付き UIS 対応配置                            |
|               | 遮へい体外接円径               |        | 6.8 m 程度以下                                |
| 炉心性能<br>目標    | 増殖比                    |        | 1.03 程度                                   |
|               | 取出平均燃焼度                |        | 100 GWd/t 程度以上                            |
|               | 運転サイクル長さ               |        | 18 ヶ月以上                                   |

\*1 金属燃料高速炉多重リサイクル TRU 組成 [wt%]



$$= 1.1/66.0/25.2/2.4/2.4/0.4/1.6/0.5/0.4/0.1$$

\*2 炉心材料組成（核設計用代表組成）[wt%]

$$\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Ni}/\text{Mo}/\text{Mn}/\text{W} = 85.5/11.0/0.4/0.5/0.6/2.0$$

\*3 ULOF 時の炉心崩壊事故起因過程における即発臨界回避のための安全要求として 8\$ 程度以下があるが、SASS 有効性確保の観点から可能な限りの低減を図るものとした。

\*4 燃料溶融防止のためには 500 W/cm 程度以下であるが、被覆管温度の上昇を抑制するために 300 W/cm 程度以下を目安とした。

表 3.1-2 被覆管最高温度評価用工学的安全係数

| 処理       | 項 目        | 工学的安全係数         |                   |                   |
|----------|------------|-----------------|-------------------|-------------------|
|          |            | $\Delta T_{Na}$ | $\Delta T_{film}$ | $\Delta T_{clad}$ |
| 乗算<br>処理 | 出力分布誤差     | 1.025           | 1.025             | 1.025             |
|          | 炉心熱出力校正誤差  | 1.000           | 1.02              | 1.02              |
|          | 流路変形効果     | 1.026           | 1.000             | 1.000             |
|          | 集合体間流量配分誤差 | 1.04            | 1.000             | 1.000             |
|          | 原子炉出入口温度誤差 | 1.01            | 1.000             | 1.000             |
|          | ワイヤコンタクト効果 | 1.000           | 1.50              | 1.000             |
| 統計<br>処理 | 炉内流量配分誤差   | 1.026           | 1.000             | 1.000             |
|          | 物性値誤差      | 1.02            | 1.30              | 1.03              |
|          | 各部製造公差     | 1.035           | 1.07              | 1.08              |
|          | 燃料スラグ偏心効果  | 1.000           | 1.04              | 1.08              |

表 3.1-3 燃料ピン径のサーベイ計算結果

| 項 目                             |                                                                   | 平成 17 年<br>度炉心 | Case-1 | Case-2 | Case-3 |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------|--------|--------|--------|
| 炉<br>心<br>・<br>燃<br>料<br>仕<br>様 | 燃料ピン径 [mm]                                                        | 7.2            | 7.5    | 8.5    | 9.0    |
|                                 | 炉心高さ [cm]                                                         | 95             | 93     | 82     | 78     |
|                                 | スペーサワイヤ径 [mm]                                                     | 1.26           | 1.12   | 1.00   | ←      |
|                                 | 燃料 Zr 含有率<br>(内側炉心／外側炉心) [wt%]                                    | 10／6           | ←      | ←      | ←      |
|                                 | 燃料スミア密度<br>(内側炉心／外側炉心) [%TD]                                      | 70／75          | ←      | ←      | ←      |
|                                 | 集合体あたりピン本数                                                        | 331            | ←      | ←      | ←      |
|                                 | 実効燃料体積比 (内値炉心) (%)                                                | 28.4           | 29.8   | 31.9   | 32.5   |
|                                 | 冷却材体積比 (ピンバンドル部) (%)                                              | 29.3           | 27.2   | 24.5   | 23.9   |
|                                 | 燃料集合体数 (内側炉心／外側炉心)                                                | 297／348        | ←      | ←      | ←      |
|                                 | 遮へい体外接円径 [m]                                                      | 5.9            | 6.0    | 6.5    | 6.9    |
|                                 | 遮へい体厚 [m]                                                         | 0.1            | 0.1    | 0.1    | 0.1    |
| 炉<br>心<br>主<br>要<br>特<br>性      | 運転サイクル長さ [月]                                                      | 21.5           | 22.5   | 25.5   | 20.0   |
|                                 | 燃料交換バッチ数                                                          | 3              | 3      | 3      | 4      |
|                                 | Pu 富化度 [wt%]                                                      | 13.1*          | 12.5   | 12.3   | 12.3   |
|                                 | 増殖比                                                               | 1.00*          | 1.03   | 1.03   | 1.03   |
|                                 | 燃焼反応度 [% Δ k/k']                                                  | 1.3*           | 0.7    | 0.7    | 0.5    |
|                                 | 最大線出力 (2 次元 RZ 計算) [W/cm]                                         | 252            | 257    | 302    | 324    |
|                                 | 取出平均燃焼度 [GWd/t]                                                   | 98.2           | 96.9   | 97.1   | 95.2   |
|                                 | 最大高速中性子照射量<br>(E > 0.1 MeV) [10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup> ] | 5.3            | 4.9    | 5.1    | 5.1    |
|                                 | Na ボイド反応度 (平衡末期) [\$]                                             | 8.48*          | 7.83   | 6.52   | 6.12   |
|                                 | ドップラ係数 (平衡末期) [10 <sup>-3</sup> Tdk/dT]                           | -3.50*         | -3.38  | -3.12  | -3.10  |
| ボイド反応度／ドップラ係数比                  |                                                                   | 1.00<br>(基準)   | 0.96   | 0.86   | 0.81   |

\* 臨界性評価における燃料スラグの軸伸び効果の考慮や、反応度係数評価におけるボンド材ナトリウムの扱いの変更などの核設計計算手法の見直しのため、参考文献[3.1-2]記載値とは異なる。

表 3.1-4 内側・外側燃料領域境界のサーベイ計算結果

| 項 目     |                                                                   | Case-2  | Case-2-1 | Case-2-2 | Case-2-3 |
|---------|-------------------------------------------------------------------|---------|----------|----------|----------|
| 炉心・燃料仕様 | 燃料ピン径 [mm]                                                        | 8.5     | ←        | ←        | ←        |
|         | 炉心高さ [cm]                                                         | 82      | 78       | 76       | 74       |
|         | スペーサワイヤ径 [mm]                                                     | 1.00    | ←        | ←        | ←        |
|         | 燃料 Zr 含有率<br>(内側炉心／外側炉心) [wt%]                                    | 10／6    | ←        | ←        | ←        |
|         | 燃料スミア密度<br>(内側炉心／外側炉心) [%TD]                                      | 70／75   | ←        | ←        | ←        |
|         | 集合体あたりピン本数                                                        | 331     | ←        | ←        | ←        |
|         | 燃料集合体数 (内側炉心／外側炉心)                                                | 297／348 | 198／447  | 150／495  | 78／567   |
|         | 内側炉心／外側炉心 燃料集合体数比                                                 | 0.85    | 0.44     | 0.30     | 0.14     |
| 炉心主要特性  | 運転サイクル長さ [月]                                                      | 25.5    | 24.5     | 24.5     | 24.5     |
|         | 燃料交換バッチ数                                                          | 3       | 3        | 3        | 3        |
|         | Pu 富化度 [wt%]                                                      | 12.3    | 12.3     | 12.3     | 12.2     |
|         | 増殖比                                                               | 1.03    | 1.03     | 1.03     | 1.03     |
|         | 燃焼反応度 [% Δ k/k']                                                  | 0.7     | 0.7      | 0.8      | 0.8      |
|         | 最大線出力 (2 次元 RZ 計算) [W/cm]                                         | 302     | 315      | 324      | 340      |
|         | 最大線出力比 (外側炉心／内側炉心)                                                | 1.26    | 1.29     | 1.32     | 1.45     |
|         | 取出平均燃焼度 [GWd/t]                                                   | 97.1    | 95.4     | 96.7     | 97.4     |
|         | 最大高速中性子照射量<br>(E > 0.1 MeV) [10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup> ] | 5.1     | 5.1      | 5.3      | 5.6      |
|         | Na ボイド反応度 (平衡末期) [\$]                                             | 6.52    | 6.22     | 6.11     | 6.05     |
|         | ドップラ係数 (平衡末期) [10 <sup>-3</sup> Tdk/dT]                           | -3.12   | -3.08    | -3.07    | -3.02    |
|         | ボイド反応度／ドップラ係数比*                                                   | 0.86    | 0.83     | 0.82     | 0.83     |

\* 平成 17 年度高出口温度型炉心の Na ボイド反応度 8.48 \$、ドップラ係数-3.50 %Tdk/dT を基準とした相対値

表 3.1-5 燃料スミア密度 1 領域化の計算結果

| 項 目     |                                                                   | Case-2-2 | Case-2-2-1 |
|---------|-------------------------------------------------------------------|----------|------------|
| 炉心・燃料仕様 | 燃料ピン径 [mm]                                                        | 8.5      | ←          |
|         | 炉心高さ [cm]                                                         | 76       | 75         |
|         | スペーサワイヤ径 [mm]                                                     | 1.00     | ←          |
|         | 燃料 Zr 含有率<br>(内側炉心／外側炉心) [wt%]                                    | 10／6     | ←          |
|         | 燃料スミア密度<br>(内側炉心／外側炉心) [%TD]                                      | 70／75    | 75／75      |
|         | 集合体あたりピン本数                                                        | 331      | ←          |
|         | 燃料集合体数 (内側炉心／外側炉心)                                                | 150／495  | ←          |
|         | 内側炉心／外側炉心 燃料集合体数比                                                 | 0.30     | ←          |
| 炉心主要特性  | 運転サイクル長さ [月]                                                      | 24.5     | 24.5       |
|         | 燃料交換バッチ数                                                          | 3        | 3          |
|         | Pu 富化度 [wt%]                                                      | 12.3     | 12.2       |
|         | 増殖比                                                               | 1.03     | 1.03       |
|         | 燃焼反応度 [% Δ k/k <sub>k</sub> ']                                    | 0.8      | 0.7        |
|         | 最大線出力 (2 次元 RZ 計算) [W/cm]                                         | 324      | 325        |
|         | 最大線出力比 (外側炉心／内側炉心)                                                | 1.32     | 1.17       |
|         | 取出平均燃焼度 [GWd/t]                                                   | 96.7     | 96.6       |
|         | 最大高速中性子照射量<br>(E > 0.1 MeV) [10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup> ] | 5.3      | 5.4        |
|         | Na ボイド反応度 (平衡末期) [\$]                                             | 6.11     | 6.15       |
|         | ドップラ係数 (平衡末期) [10 <sup>-3</sup> Tdk/dT]                           | -3.07    | -3.04      |
|         | ボイド反応度／ドップラ係数比 <sup>*1</sup>                                      | 0.82     | 0.83       |
|         | 規格化包絡出力 <sup>*2</sup>                                             | 1.070    | 1.062      |

\*1 平成 17 年度高出口温度型炉心の Na ボイド反応度 8.48 \$、ドップラ係数 -3.50 %Tdk/dT を基準とした相対値

\*2 平衡サイクル包絡出力／定格出力： 必要冷却材流量の指標。



表 3.1-6 平成 18 年度レファレンス炉心主要仕様及び核特性

| 項 目                        |                              | 単位                                 | 仕様、設計値            |
|----------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------|
| 炉<br>心<br>主<br>要<br>仕<br>様 | 熱出力                          | MW <sub>th</sub>                   | 3,530             |
|                            | 運転サイクル長さ                     | 月                                  | 24.5              |
|                            | 燃料交換バッチ数                     | —                                  | 3                 |
|                            | 炉心高さ                         | cm                                 | 75                |
|                            | 燃料ピン径                        | mm                                 | 8.5               |
|                            | スペーサワイヤ径                     | mm                                 | 1.00              |
|                            | 集合体あたりピン本数                   | 本                                  | 331               |
|                            | 燃料 Zr 含有率（内側炉心／外側炉心）         | wt%                                | 10／6              |
|                            | 燃料スミア密度（内側炉心／外側炉心）           | %TD                                | 75／75             |
|                            | 集合体配列ピッチ                     | mm                                 | 191.8             |
|                            | 燃料集合体数（内側炉心／外側炉心／合計）         | 体                                  | 150／495／645       |
|                            | 制御棒本数（PCR／BCR／合計）            | 本                                  | 21／7／28           |
|                            | 径方向遮へい体数（ステンレス鋼／Zr-H）        | 体                                  | 96／210            |
|                            | 炉心等価直径                       | m                                  | 5.2               |
|                            | 遮へい体外接円径                     | m                                  | 6.5               |
| 核<br>特<br>性                | Pu 富化度                       | wt%-HM                             | 12.2              |
|                            | MA 含有率                       | wt%-HM                             | 0.4               |
|                            | 増殖比                          | —                                  | 1.03              |
|                            | 燃焼反応度                        | % Δ k/kk'                          | 0.7               |
|                            | 出力分担率（内側炉心／外側炉心）             | %                                  | 25.2／74.8         |
|                            | 最大線出力（内側炉心／外側炉心）             | W/cm                               | 304／347           |
|                            | 取出平均燃焼度（内側炉心／外側炉心／平均）        | GWd/t                              | 114.2／91.8／96.6   |
|                            | 最大高速中性子照射量（E > 0.1 MeV）      | 10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup> | 5.4 <sup>*1</sup> |
|                            | 初装荷核分裂性 Pu 重量（出力あたり）         | t/GW <sub>e</sub>                  | 4.7               |
|                            | 実効遅発中性子割合                    | —                                  | 0.00363           |
|                            | Na ボイド反応度（平衡末期）              | \$                                 | 6.15              |
|                            | ドップラ係数（平衡末期）                 | 10 <sup>-3</sup> Tdk/dT            | -3.04             |
|                            | ボイド反応度／ドップラ係数比 <sup>*2</sup> | —                                  | 0.83              |

\*1 2次元 RZ 計算値

\*2 平成 17 年度高出口温度型炉心の Na ボイド反応度 8.48 \$、ドップラ係数 -3.50 %Tdk/dT を基準とした相対値

表 3-1.7 平成 18 年度レファレンス炉心の制御反応度収支

[単位 : %  $\Delta k/kk'$ ]

| 項 目                         | 主炉停止系<br>[1ロットスタック] | 後備炉停止系   |          |
|-----------------------------|---------------------|----------|----------|
|                             |                     | 1ロットスタック | 全数挿入     |
| (1) 計画余剰反応度                 | 1.90                | 0.20     | 0.40     |
| a. 出力補償                     | ( 0.40 )            | ( 0.20 ) | ( 0.40 ) |
| b. 燃焼補償 * <sup>1</sup>      | ( 1.00 )            | —        | —        |
| c. 運転余裕                     | ( 0.20 )            | —        | —        |
| d. スエリングによる軸伸び効果            | ( 0.30 )            | —        | —        |
| (2) 余剰反応度の不確かさ(2 $\sigma$ ) | 0.51                | 0.07     | 0.10     |
| a. 臨界性予測誤差                  | ( 0.00 )            | —        | —        |
| b. 出力補償予測誤差                 | —                   | ( 0.07 ) | ( 0.10 ) |
| c. 燃料製作公差                   | ( 0.46 )            | —        | —        |
| d. 燃料交換余裕                   | ( 0.20 )            | —        | —        |
| (3) 事故時投入反応度                | —                   | 0.11     | 0.11     |
| (4) 必要制御反応度 [(1)+(2)+(3)]   | 2.41                | 0.38     | 0.61     |
| (5) 制御棒価値 * <sup>2</sup>    | 3.08                | 0.74     | 0.89     |
| (4) 反応度停止余裕 [(5)-(4)]       | 0.68                | 0.36     | 0.28     |
| 反応度停止余裕の設計目安                | 0.36 (1 $\beta$ )   | 0        | 0        |

\*<sup>1</sup> 燃焼反応度の不確かさとして0.3%  $\Delta k/kk'$ を考慮\*<sup>2</sup> 予測誤差 9%(3 $\sigma$ )を考慮した値

表 3-1.8 平成 18 年度レファレンス炉心の流量配分と熱流力特性

| 領域   | 流量<br>領域<br>No. | 燃料<br>体数 | 出力・流量             |                     |                    | 熱流力特性        |     |              |                  |
|------|-----------------|----------|-------------------|---------------------|--------------------|--------------|-----|--------------|------------------|
|      |                 |          | 集合体<br>出力<br>(MW) | 集合体<br>流量<br>(kg/s) | 領域<br>流量<br>(kg/s) | ホットスポット温度(℃) |     |              | バンドル部<br>圧損(MPa) |
|      |                 |          |                   |                     |                    | 冷却材          | 被覆管 |              |                  |
|      |                 |          |                   |                     |                    |              | 外面  | 内面 [HSF]     |                  |
| 内側炉心 | 1               | 87       | 6.89              | 30.7                | 2,669              | 627          | 634 | 649 [ 1.17 ] | 0.17             |
|      | 2               | 63       | 6.27              | 27.9                | 1,756              | 629          | 635 | 649 [ 1.17 ] | 0.14             |
|      | 小計              | 150      | —                 | —                   | 4,425              | —            | —   | — —          | —                |
| 外側炉心 | 3               | 48       | 7.78              | 34.8                | 1,670              | 625          | 633 | 649 [ 1.17 ] | 0.22             |
|      | 4               | 46       | 7.24              | 32.7                | 1,506              | 627          | 634 | 649 [ 1.17 ] | 0.19             |
|      | 5               | 86       | 6.97              | 30.6                | 2,634              | 629          | 636 | 649 [ 1.17 ] | 0.17             |
|      | 6               | 75       | 6.44              | 28.5                | 2,141              | 631          | 637 | 649 [ 1.17 ] | 0.15             |
|      | 7               | 78       | 5.83              | 26.4                | 2,061              | 631          | 637 | 649 [ 1.17 ] | 0.13             |
|      | 8               | 51       | 4.78              | 22.3                | 1,137              | 633          | 638 | 649 [ 1.17 ] | 0.10             |
|      | 9               | 33       | 3.98              | 19.5                | 642                | 634          | 638 | 648 [ 1.16 ] | 0.07             |
|      | 10              | 54       | 3.15              | 15.7                | 850                | 637          | 641 | 649 [ 1.16 ] | 0.05             |
|      | 11              | 24       | 2.28              | 12.3                | 294                | 636          | 640 | 647 [ 1.16 ] | 0.03             |
|      | 小計              | 495      | —                 | —                   | 12,935             | —            | —   | —            | —                |
| 合計   |                 | 645      | —                 | —                   | 17,360             | —            | —   | —            | —                |

表 3.3-1 中型 MOX 燃料炉心の炉心・燃料設計検討条件

| 項目     |                        |                                    | 設定内容                                        |
|--------|------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------|
|        | 電気出力／熱出力               |                                    | 750MWe / 1,765MWt                           |
|        | 原子炉出口／入口温度             |                                    | 550℃ / 395℃                                 |
|        | 炉心燃料集合体                |                                    | 改良内部ダクト型集合体                                 |
|        | 炉心材料 [被覆管 / ラッパ管]      |                                    | ODS鋼 / PNC-FMS鋼                             |
|        | 燃料組成                   |                                    | 高速炉多重リサイクル<br>TRU [基準]<br>軽水炉使用済燃料回収<br>TRU |
| 炉心性能目標 | 低増殖炉心                  | 増殖比 <sup>*1</sup>                  | 1.1程度 [基準]                                  |
|        |                        |                                    | 1.0程度<br>[径ブランケットなし]                        |
|        |                        | 取出平均燃焼度<br>[炉心/全炉心 <sup>*2</sup> ] | 150 GWd/t程度<br>/ 80GWd/t程度以上                |
|        | 高増殖炉心                  | 増殖比 <sup>*1</sup>                  | 1.2程度                                       |
|        |                        | 取出平均燃焼度<br>[炉心/全炉心 <sup>*2</sup> ] | 150 GWd/t程度<br>/ 60GWd/t程度以上                |
|        | 運転サイクル長さ <sup>*1</sup> |                                    | 24ヶ月以上                                      |
| 設計目安   | 最大線出力                  |                                    | 430W/cm程度以下                                 |
|        | 高速中性子照射量 [E>0.1MeV]    |                                    | $5 \times 10^{23}$ n/cm <sup>2</sup> 程度以下   |
|        | ナトリウムボイド反応度            |                                    | 6\$程度以下                                     |
|        | 被覆管最高温度 [肉厚中心]         |                                    | 700℃以下                                      |
|        | 被覆管CDF [通常運転時]         |                                    | 0.5以下                                       |
|        | 燃料バンドル部圧力損失            |                                    | 0.2MPa程度以下                                  |

\*1 基準燃料組成時

\*2 ブランケット燃料を含む取出平均燃焼度

表 3.3-2 中型 MOX 燃料炉心の炉心燃料の主要仕様

| 項 目   |               | 仕様        |
|-------|---------------|-----------|
| ラッパ管  | 外対面間距離 (mm)   | 202       |
|       | 肉厚 (mm)       | 5         |
| 燃料要素  | 本数 (本)        | 255       |
|       | 外径 (mm)       | 10        |
|       | ワイヤスペーサ径 (mm) | 1         |
|       | 炉心高さ (mm)     | 1,000     |
|       | 軸ブランケット厚 (mm) | 200 / 250 |
|       | (上 / 下)       |           |
| 内部ダクト | 外面辺長 (mm)     | 46        |
|       | 肉厚 (mm)       | 2         |

表 3.3-3 検討で使用した MOX 燃料 FBR 多重リサイクル燃料組成

| 核種      | TRU組成 |
|---------|-------|
| Pu-238  | 1.7   |
| Pu-239  | 55.9  |
| Pu-240  | 30.5  |
| Pu-241  | 3.4   |
| Pu-242  | 3.3   |
| Np-237  | 0.3   |
| Am-241  | 3.0   |
| Am-242m | 0.1   |
| Am-243  | 1.0   |
| Cm-244  | 0.6   |
| Cm-245  | 0.2   |
| Total   | 100.0 |
| Pu-f    | 59.3  |
| MA      | 5.2   |

単位: wt%

表 3.3-4 中型 MOX 燃料炉心の炉心特性評価結果

| 項目                       | 単位               | JENDL-4.0                | JENDL-3.3                |
|--------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|
| 運転サイクル長さ                 | ヶ月               | 18                       | ←                        |
| 燃料交換バッチ数<br>(炉心/ブランケット)  | —                | 6/6                      | ←                        |
| Pu富化度(内側/外側炉心)           | wt%              | 18.2 / 24.2              | 18.5 / 24.5              |
| 燃焼反応度                    | % $\Delta k/kk'$ | 1.6                      | 1.8                      |
| 増殖比<br>(炉心/ブランケット)       | —<br>—           | 1.130<br>(0.803 / 0.329) | 1.120<br>(0.793 / 0.327) |
| 最大高速中性子照射量 <sup>*1</sup> | $10^{23}n/cm^2$  | 5.1                      | 5.1                      |
| 最大線出力(内側/外側炉心)           | W/cm             | 365 / 365                | 365 / 365                |
| 取出平均燃焼度(炉心部/全炉心)         | GWd/t            | 152 / 84                 | 152 / 84                 |
| Naボイド反応度 <sup>*2</sup>   | \$               | 5.4                      | 5.3                      |
| 実効遅発中性子割合                | %                | 0.326                    | 0.328                    |
| ドップラ係数 <sup>*3</sup>     | $10^{-3}Tdk/dT$  | -5.4                     | -5.3                     |

\*1:  $E_n > 0.1\text{MeV}$ 

\*2: 補正係数0.96を考慮

\*3: 補正係数1.05を考慮



表 3.4-1 炉心主要諸言

| 項目                                | 単位    | 評価値         | 備考                  |
|-----------------------------------|-------|-------------|---------------------|
| 炉心熱出力                             | MWt   | 3,530       | 被覆管肉厚 0.5mm         |
| サイクル長                             | day   | 745         |                     |
| 燃料交換バッチ数                          | -     | 3           |                     |
| 炉心高さ                              | cm    | 75          |                     |
| 燃料ピン外径                            | mm    | 8.5         |                     |
| ワイヤ径                              | mm    | 1.0         |                     |
| 集合体ピン数                            | 本/集合体 | 331         |                     |
| 燃料スミヤ密度 [内側炉心/外側炉心]               | %     | 75/75       |                     |
| 集合体配列ピッチ                          | mm    | 191.8       |                     |
| 炉心燃料集合体数 [内側炉心/外側炉心/合計]           | 体     | 150/495/645 |                     |
| 制御棒本数 [主系/後備系/合計]                 | 本     | 21/7/28     | *原子力機構設計<br>では Zr-H |
| 径遮蔽体本数 [ステンレス鋼/B <sub>4</sub> C*] | 体     | 96/210      |                     |
| 炉心等価直径                            | m     | 5.2         |                     |
| 遮蔽体外接円径                           | m     | 6.5         |                     |

表 3.4-2 炉心特性解析結果

| 項目                        | 単位                                  | JAEA 解析         | 電中研解析           |                 |
|---------------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 炉定数セット                    | -                                   | ADJ2000R        | JFS-3-J3.2R     | JFS-3-J4.0      |
| Pu 富化度                    | wt%HM                               | 12.2            | ←               | 11.9            |
| MA 含有率 [内側炉心/外側炉心]        | wt%HM                               | 0.4/0.4         | ←               | 0.4/0.4         |
| Zr 含有率 [内側炉心/外側炉心]        | wt%                                 | 10.0/6.0        | 10.0/6.0        | 10.0/6.0        |
| 燃焼反応度                     | %Δk/kk'                             | +0.7            | +0.4            | -0.08           |
| 増殖比                       | -                                   | 1.03            | 1.03            | 1.05            |
| 出力分担率<br>[内側炉心/外側炉心/その他]  | %                                   | 25.2/74.8/-     | 25.2/72.5/2.3   | 25.6/72.2/2.2   |
| 最大高速中性子照射量<br>[E≥0.1MeV]  | ×10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup> | 5.4             | 5.3             | 5.5             |
| 最大線出力 [内側炉心/外側炉心]         | W/cm                                | 304/347         | 311/352         | 315/356         |
| 取出平均燃焼度<br>[内側炉心/外側炉心/平均] | GWd/t                               | 114.2/91.8/96.6 | 113.7/89.9/95.4 | 114.9/89.5/95.4 |
| 初装荷 Pu-f 量 [炉心合計]         | t/GWe                               | 4.7             | ←               | 4.6             |
| HM 装荷量<br>[内側炉心/外側炉心/平均]  | t/batch                             | 5.8/21.4/27.2   | 5.8/21.2/27.0   | 5.8/21.2/27.0   |
| Na ボイド反応度                 | %Δk/kk'                             | 2.25(6.2\$)     | 2.51(7.0\$)*    | 2.57(7.2\$)*    |

\* 非均質補正や輸送補正は考慮していない。

表 3.4-3 炉心設計用代表燃料組成

| 核 種     | 高フィッサイル組成 | 低フィッサイル組成 | 金属燃料組成 |
|---------|-----------|-----------|--------|
| Pu-238  | 3.1       | 3.3       | 1.0    |
| Pu-239  | 49.9      | 49.1      | 66.0   |
| Pu-240  | 23.7      | 23.9      | 25.2   |
| Pu-241  | 5.8       | 2.2       | 2.4    |
| Pu-242  | 6.3       | 6.3       | 2.4    |
| Np-237  | 4.0       | 4.4       | 0.4    |
| Am-241  | 4.9       | 8.5       | 1.6    |
| Am-242m | 0.1       | 0.2       | 0.0    |
| Am-243  | 1.5       | 1.5       | 0.5    |
| Cm-244  | 0.6       | 0.5       | 0.4    |
| Cm-245  | 0.1       | 0.1       | 0.1    |
| Puf     | 55.7      | 51.3      | 68.4   |
| MA      | 11.2      | 15.2      | 3.0    |
| Puf/Pu  | 62.7      | 60.5      | 70.5   |

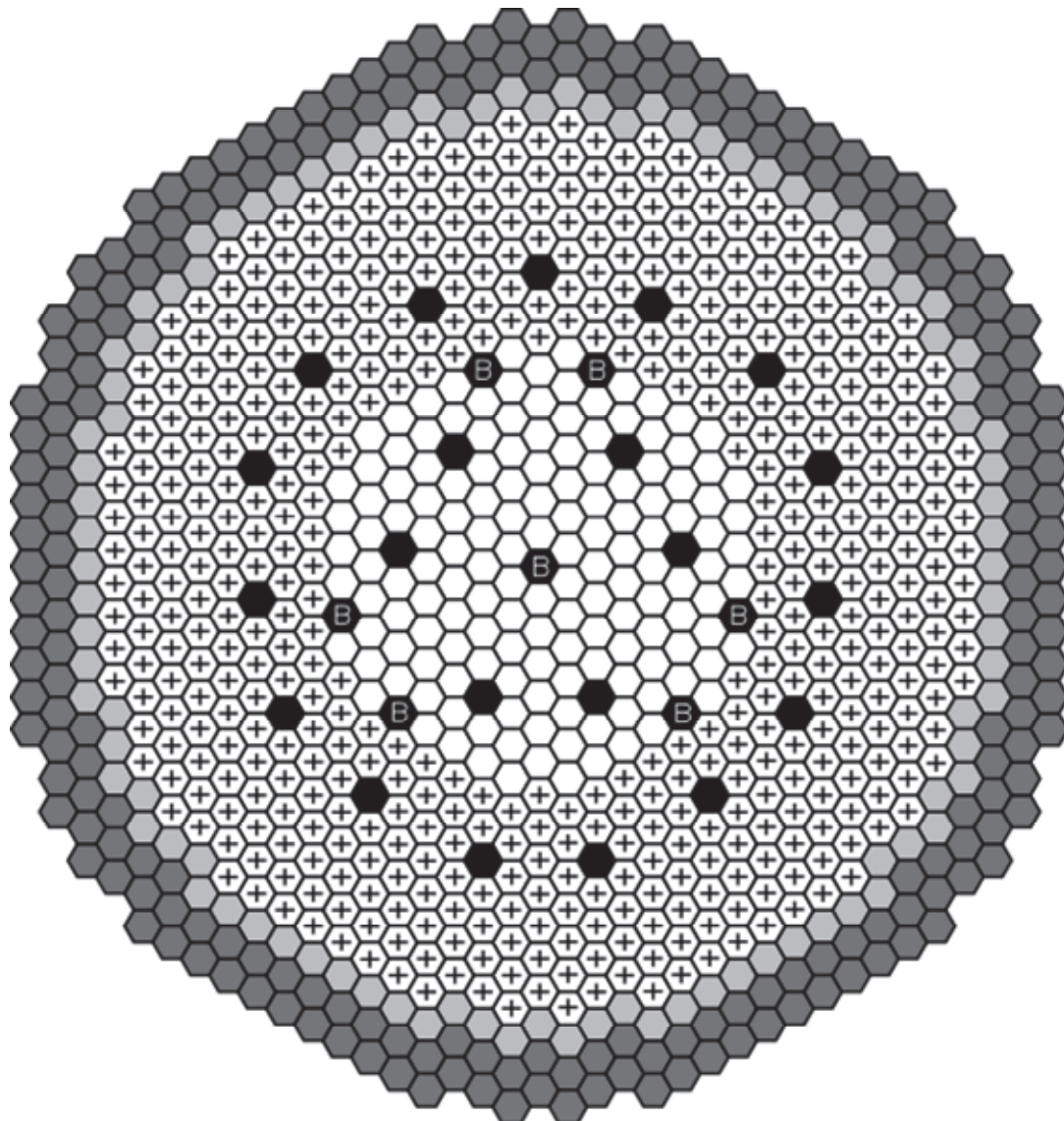
表 3.4-4 燃料組成の変化による炉心特性への影響

| 項 目                       | 高フィッサイル組成 |       |       | 低フィッサイル組成 |       |       | 金属燃料組成 |
|---------------------------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|--------|
| 希土類混入率ケース                 | I         | II    | III   | I         | II    | III   | I      |
| Pu 富化度 wt%                | 12.7      | 12.6  | 12.4  | 12.9      | 12.7  | 12.5  | 12.2   |
| MA 濃度 wt%                 | 1.6       | 1.6   | 1.6   | 2.3       | 2.3   | 2.2   | 0.3    |
| RE 混入率 vol.%              | 3.5       | 2.0   | 0.4   | 5.3       | 2.0   | 0.4   |        |
| wt%                       | 1.6       | 0.9   | 0.18  | 2.3       | 0.9   | 0.18  | 0.3    |
| 燃焼反応度% $\Delta k/kk'$     | 0.12      | -0.06 | -0.36 | -0.50     | -0.87 | -1.15 | -0.08  |
| 増殖比                       | 1.06      | 1.06  | 1.08  | 1.06      | 1.08  | 1.09  | 1.05   |
| ボイド反応度% $\Delta k/kk'$ *1 | 2.73      | 2.71  | 2.69  | 2.83      | 2.80  | 2.77  | 2.57   |

\*1：非均質補正や輸送補正は考慮していない

表 3.5-1 下部ガスプレナム・稠密バンドル化による炉心特性の向上

| 項 目   |                    | 単位               | 上部ガスプレナム型炉心 | 下部ガスプレナム型炉心 |                |
|-------|--------------------|------------------|-------------|-------------|----------------|
|       |                    |                  | 基準          | 増殖比向上ケース    | 初装荷 Pu 重量低減ケース |
| 燃料仕様等 | Zr 含有率／スミア密度       | wt%／%            | 6.0／75      | ←           | ←              |
|       | バンド材               | -                | Na          | He          | He             |
|       | ピッチ径／燃料ピッチ         | mm               | 8.0／9.5     | 8.0／9.4     | ←              |
|       | 炉心高さ               | cm               | 92          | 92          | 91             |
|       | 上部ガスプレナム高さ         | cm               | 176         | 9           | 9              |
|       | 下部ガスプレナム高さ         | cm               | 0           | 123         | 122            |
|       | 燃料ピッチ長             | cm               | 273         | 234         | 232            |
| 特性値   | 体積比：<br>燃料(実効)／冷却材 | %                | 30.5／35.9   | 31.3／34.9   | 31.3／34.9      |
|       | 炉心熱出力              | MWth             | 3,530       | ←           | ←              |
|       | 炉心出口／入口温度          | ℃                | 527／372     | ←           | ←              |
|       | 増殖比                | -                | 1.035       | 1.049       | 1.045          |
|       | 取出平均燃焼度            | GWd/t            | 93.9        | 93.9        | 95.0           |
|       | 初装荷 Pu-f 重量        | t/GWe            | 3.070       | 3.070       | 2.952          |
|       | 実効遅発中性子割合          | $\times 10^{-3}$ | 3.63        | 3.65        | 3.65           |
|       | Na 効果反応度(EOEC)     | \$               | 7.93        | 7.76        | 7.72           |
|       | ドップラ係数(EOEC)       | Tdk/dT           | -3.29E-03   | -3.42E-03   | -3.39E-03      |



|  |            |      |
|--|------------|------|
|  | 内側炉心燃料集合体  | 150体 |
|  | 外側炉心燃料集合体  | 495体 |
|  | 炉心燃料集合体合計  | 645体 |
|  | 主炉停止系制御棒   | 21体  |
|  | 後備炉停止系制御棒  | 7体   |
|  | ステンレス鋼遮へい体 | 96体  |
|  | Zr-H遮へい体   | 210体 |

図 3.1-1 平成 18 年度レファレンス炉心の炉心配置

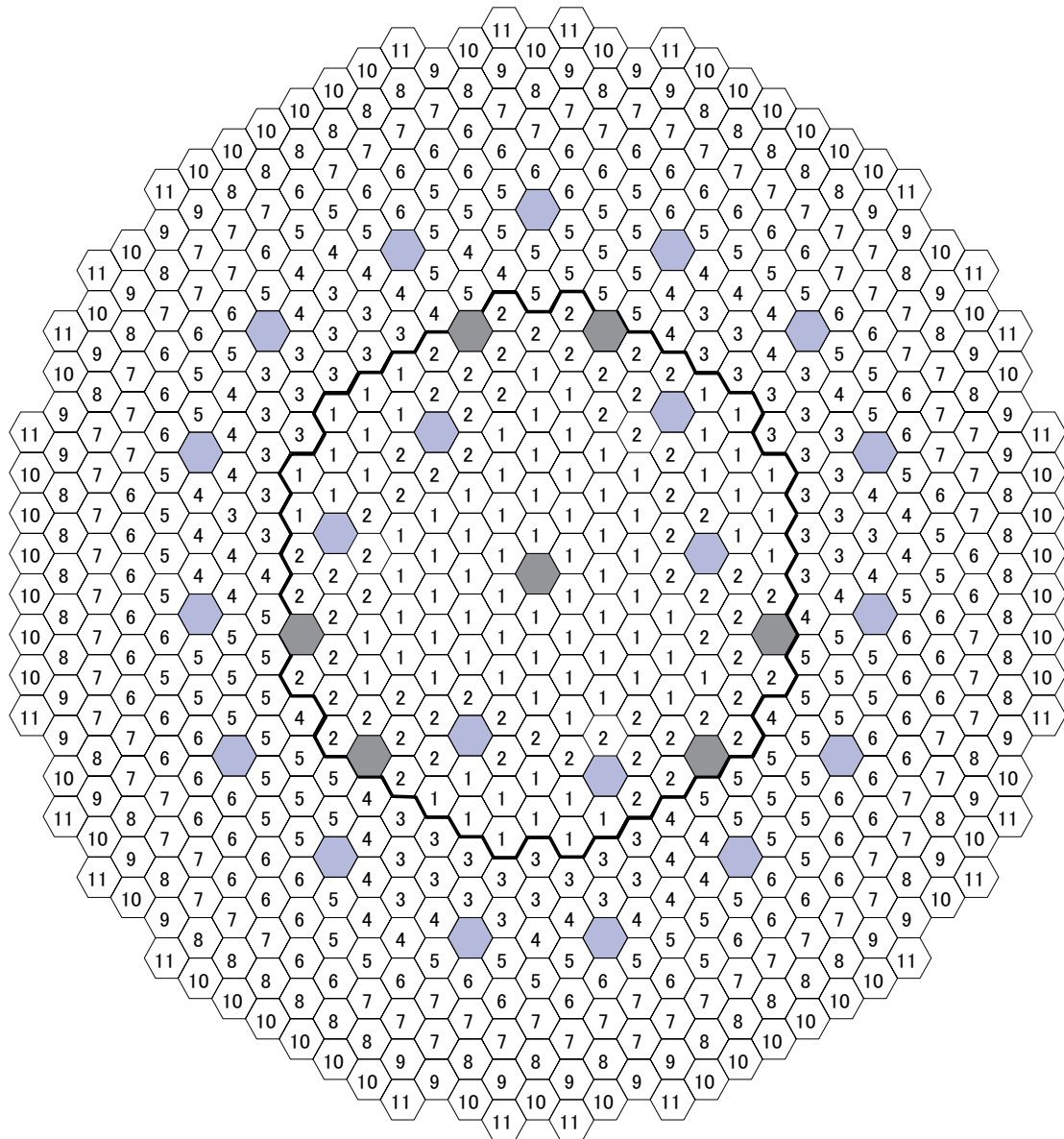


図 3.1-2 平成 18 年度レファレンス炉心の流量領域区分

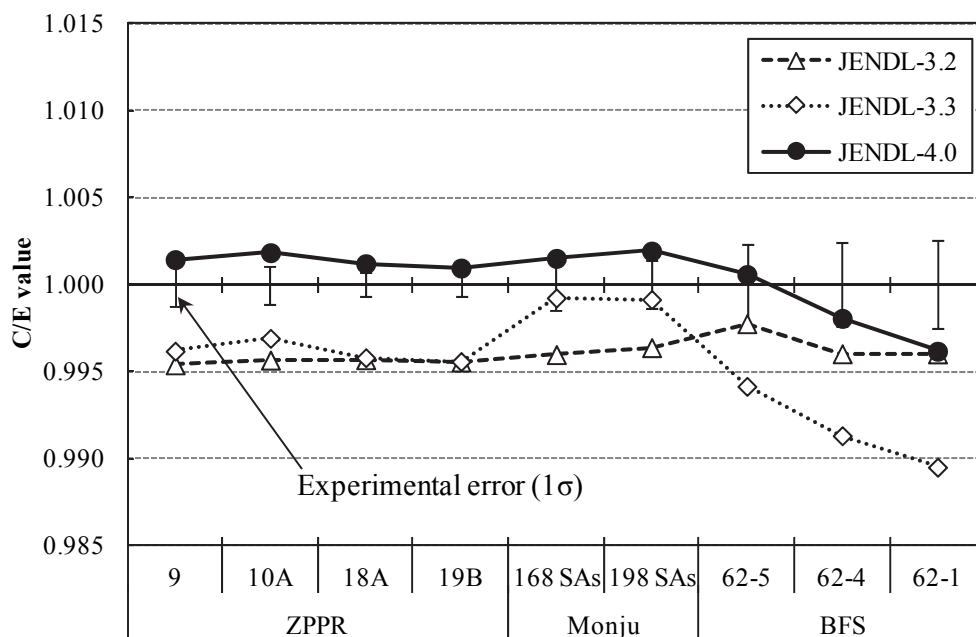


図 3.2-1 新旧 JENDL による解析結果の比較 —臨界性—

※SAs: 炉心燃料集合体数

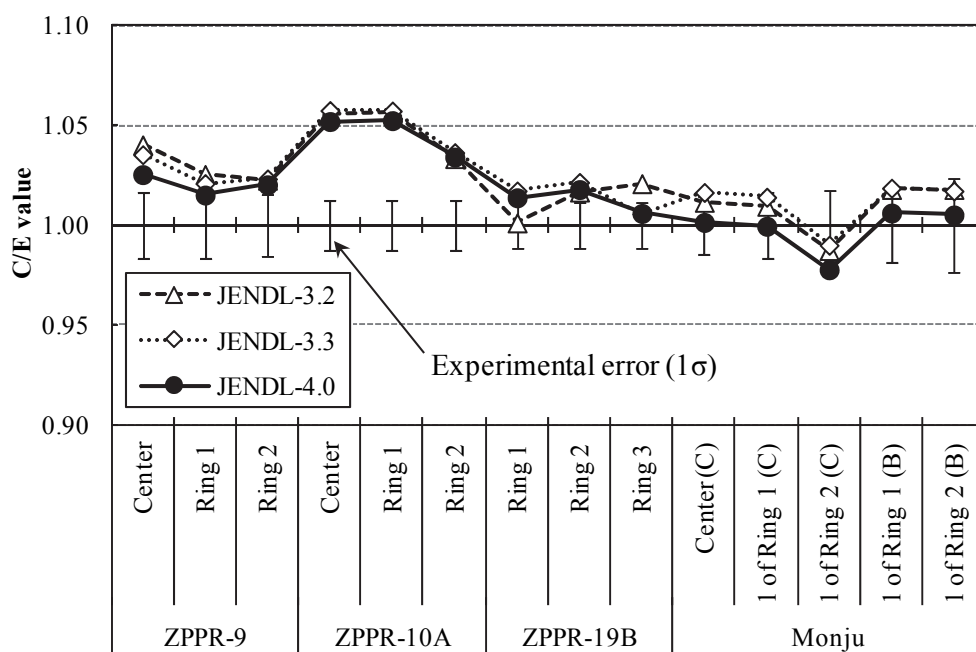


図 3.2-2 新旧 JENDL による解析結果の比較 —制御棒価値—

※(C): 主調整棒 (B-10 濃縮度 40%)

(B): 後備炉停止棒 (B-10 濃縮度 90%)



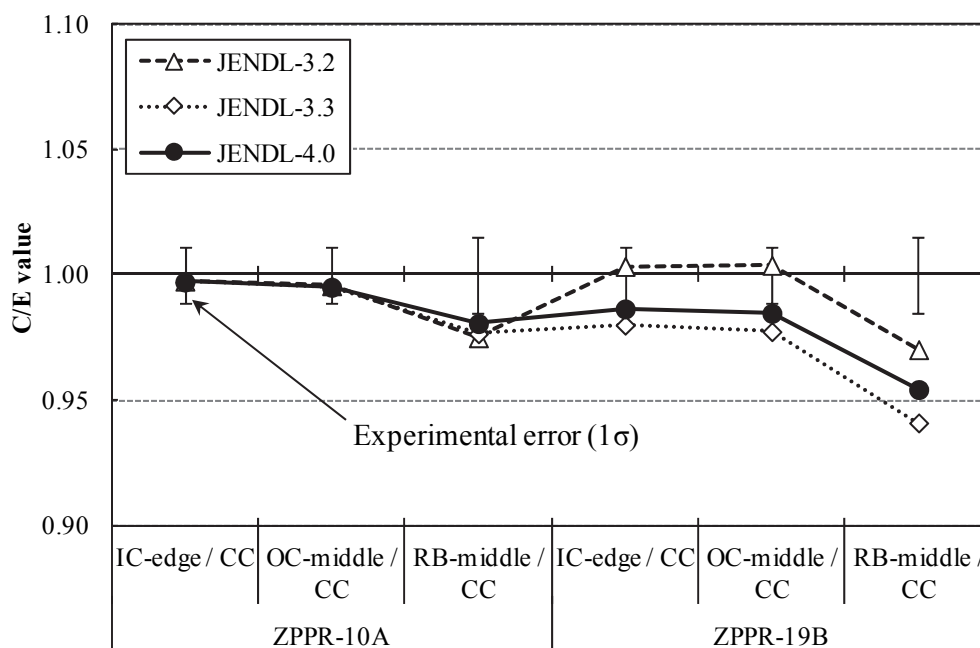


図 3.2-3(1) 新旧 JENDL による解析結果の比較 ―U-235 核分裂反応率分布―  
 ※統計処理後の中心に対するポイント毎の反応率の比  
 IC: 内側炉心、OC: 外側炉心、RB: 径ブランケット、AB: 軸ブランケット

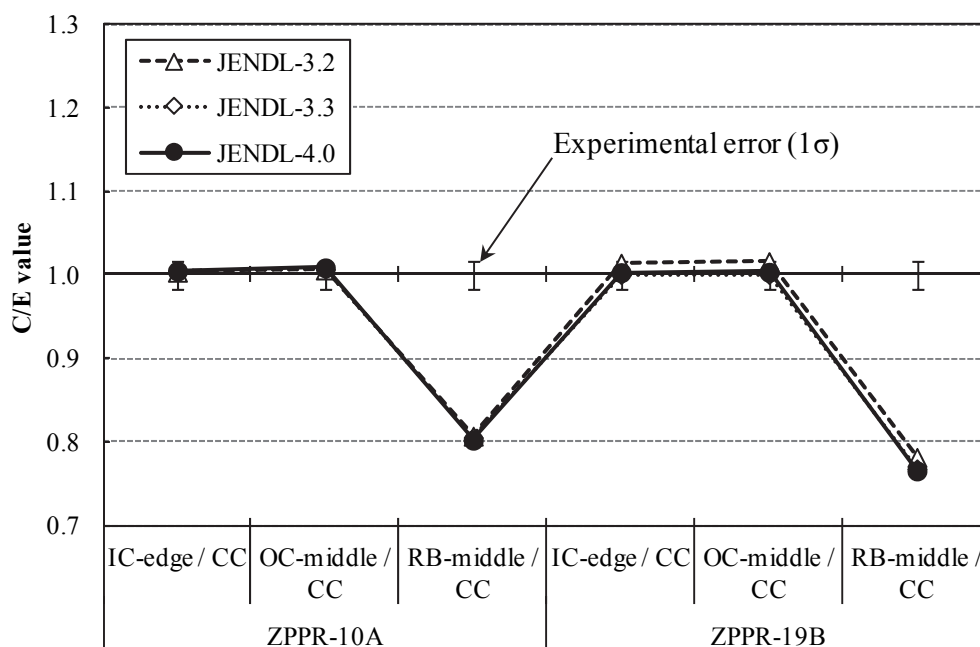


図 3.2-3(2) 新旧 JENDL による解析結果の比較 ―U-238 核分裂反応率分布―

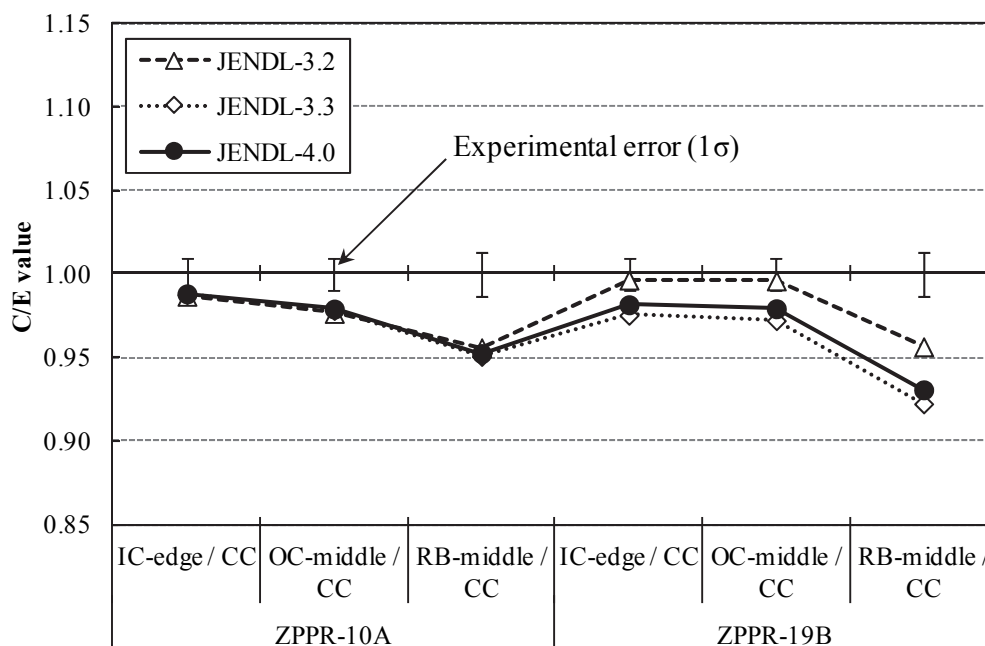


図 3.2-3(3) 新旧 JENDL による解析結果の比較 —U-238 捕獲反応率分布—

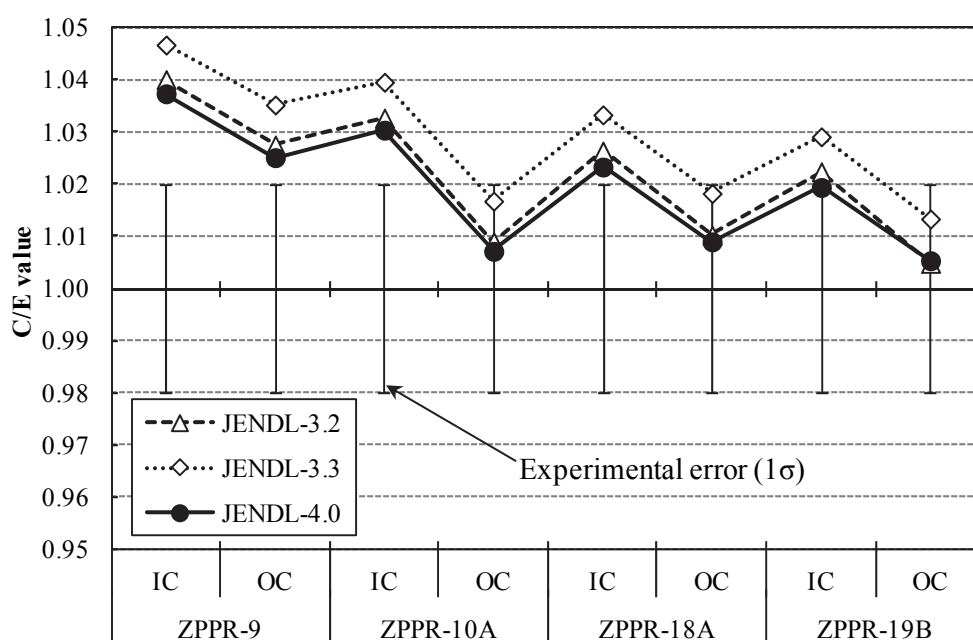


図 3.2-4 新旧 JENDL による解析結果の比較 —U-238 捕獲対 Pu-239 核分裂反応率比—

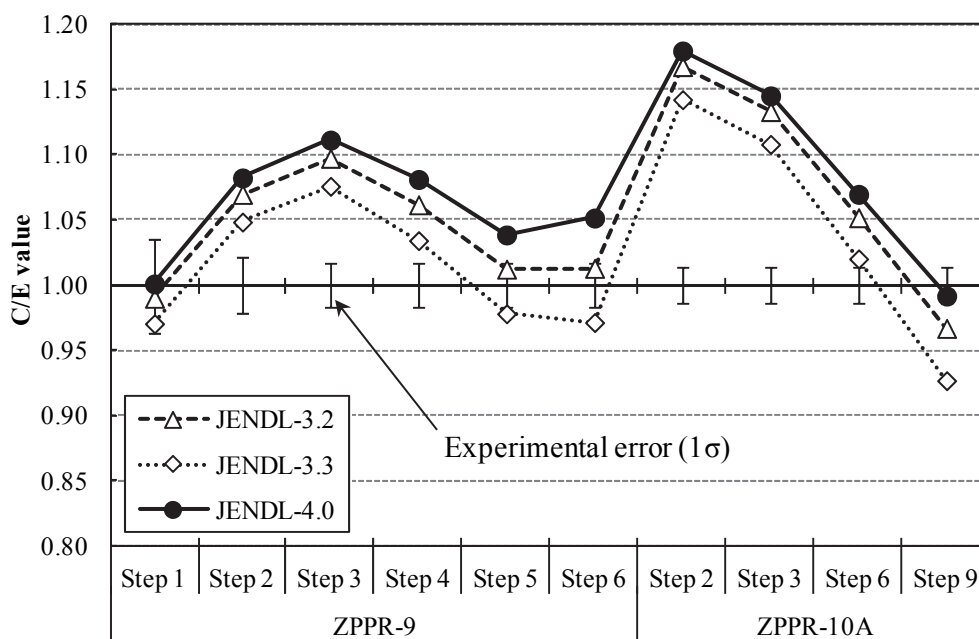


図 3.2-5(1) 新旧 JENDL による解析結果の比較 —Na ボイド反応度 (Pu 燃料炉心) —

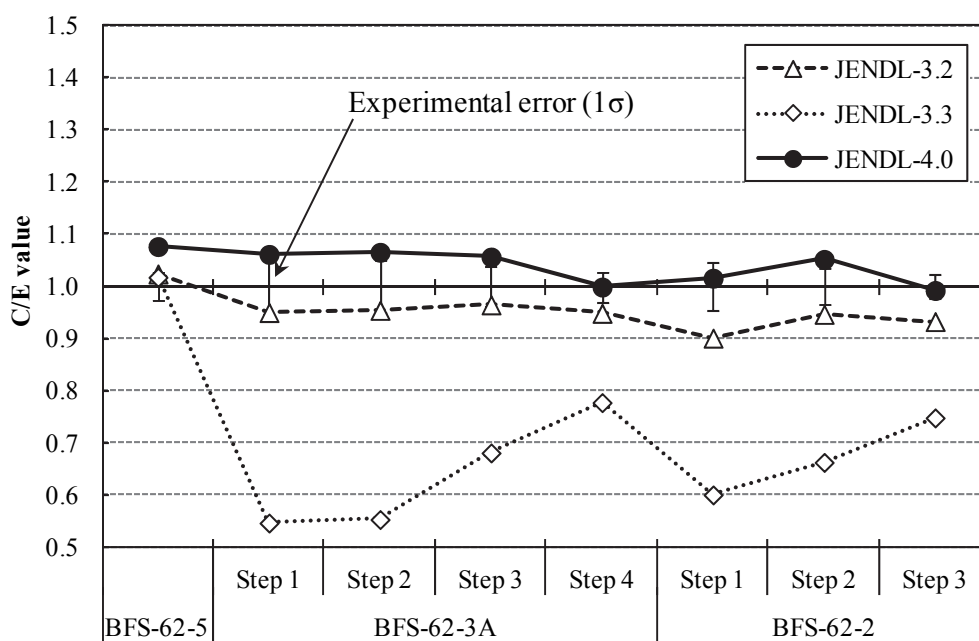


図 3.2-5(2) 新旧 JENDL による解析結果の比較 —Na ボイド反応度 (濃縮 U 燃料炉心) —

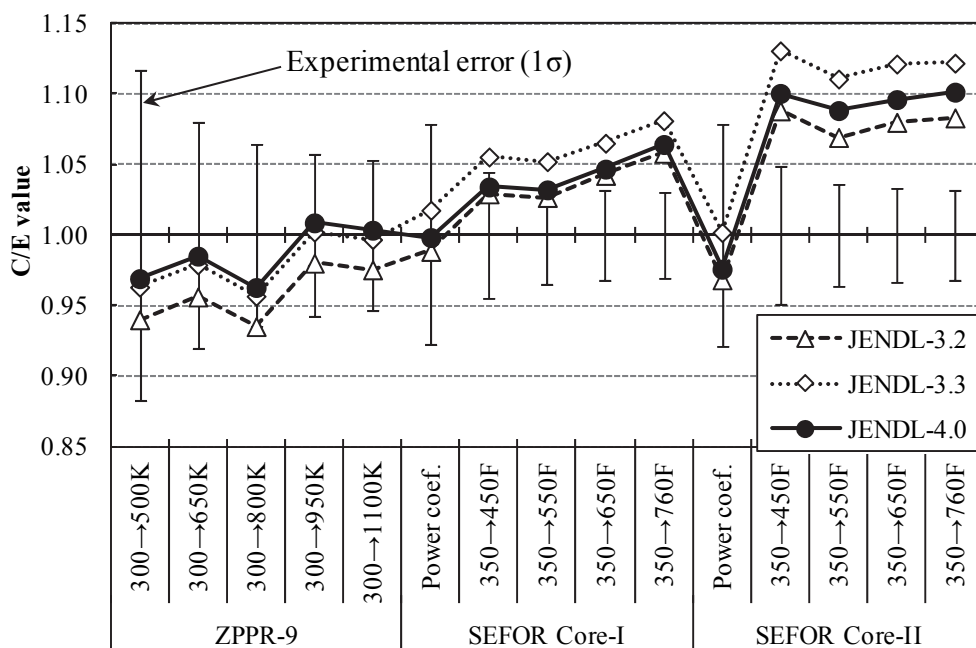


図 3.2-6 新旧 JENDL による解析結果の比較 — ドップラ反応度関連 —

※ZPPR-9: 全てサンプルドップラ反応度

SEFOR: 全炉心ドップラ反応度

Power coef.: 出力係数（熱膨張なし）、350→###F: 等温温度係数（熱膨張反応度含む）

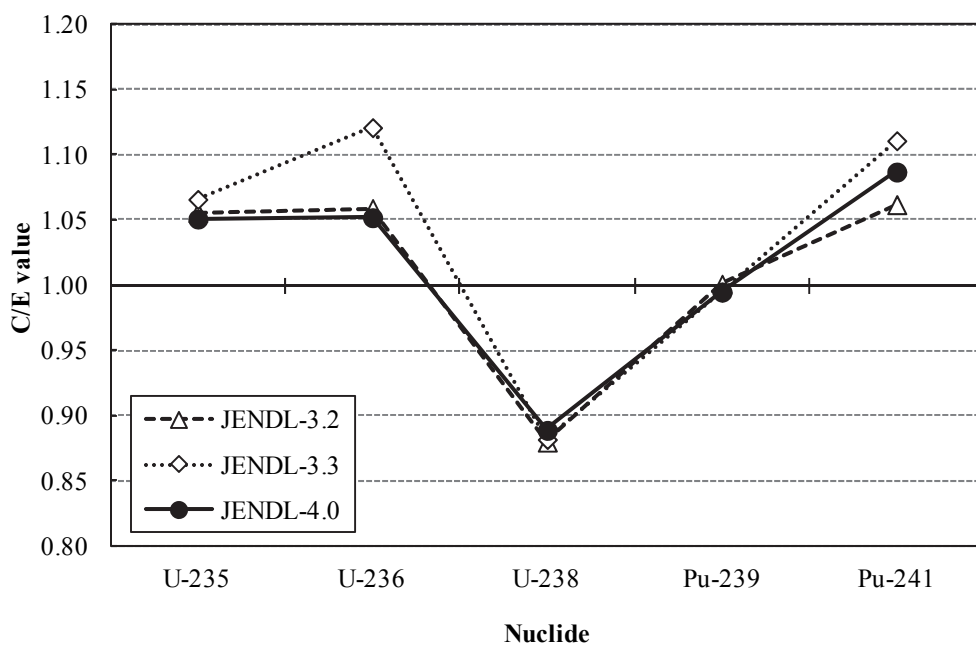


図 3.2-7 新旧 JENDL による解析結果の比較

— ドライバ燃料照射後試験における核種毎の燃焼率 —

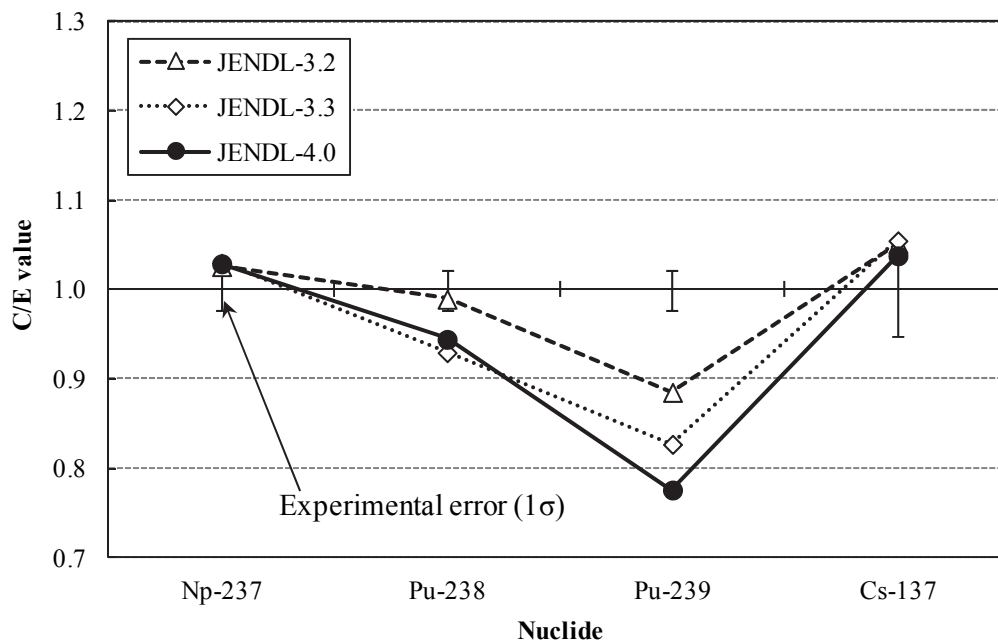


図 3.2-8(1) 新旧 JENDL による解析結果の比較

—MA サンプル照射後試験における照射後核種組成 (Np-237 サンプル) —

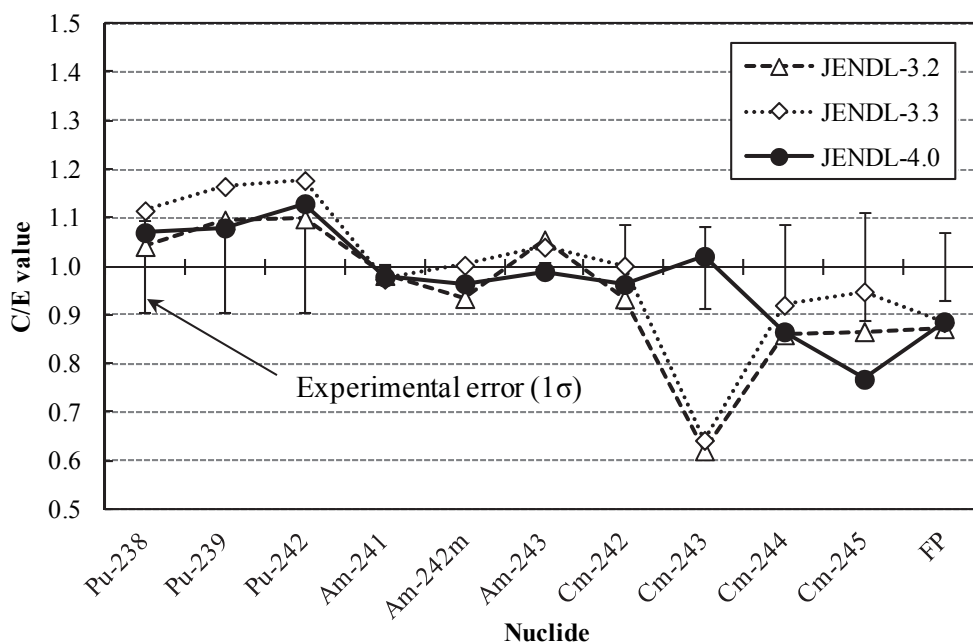


図 3.2-8(2) 新旧 JENDL による解析結果の比較

—MA サンプル照射後試験における照射後核種組成 (Am-241 サンプル) —

※Am-241 捕獲反応に伴う核異性体比は全て 0.85 と設定

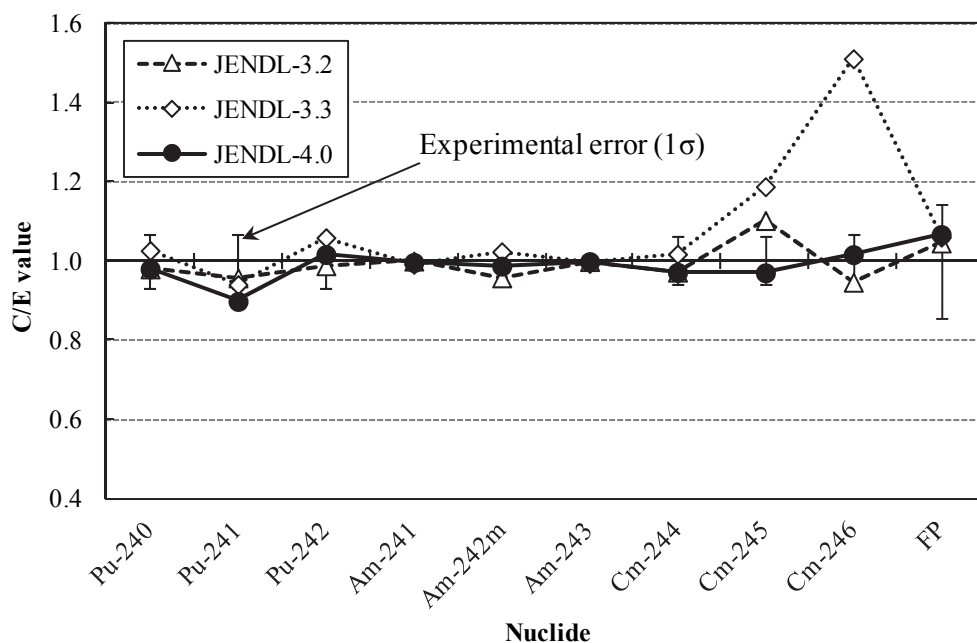


図 3.2-8(3) 新旧 JENDL による解析結果の比較

—MA サンプル照射後試験における照射後核種毎組成 (Am-243 サンプル) —

※Am-243 サンプルは Am-241 を 12%含有

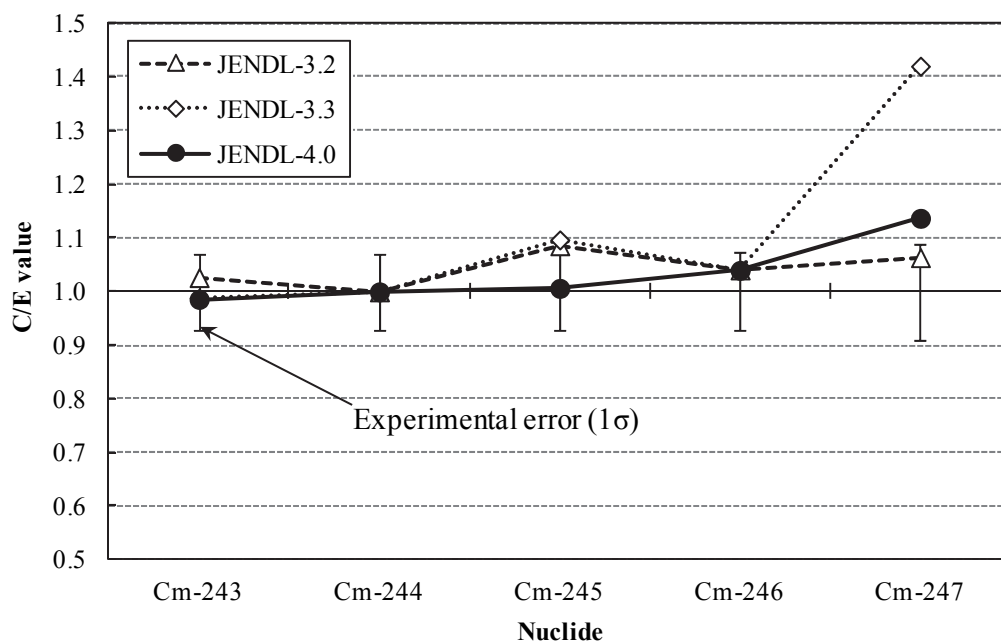


図 3.2-8(4) 新旧 JENDL による解析結果の比較

—MA サンプル照射後試験における照射後核種毎組成 (Cm-244 サンプル) —

※Cm-244 サンプルは Cm-245 と Cm-246 をそれぞれ 3%、4%含有



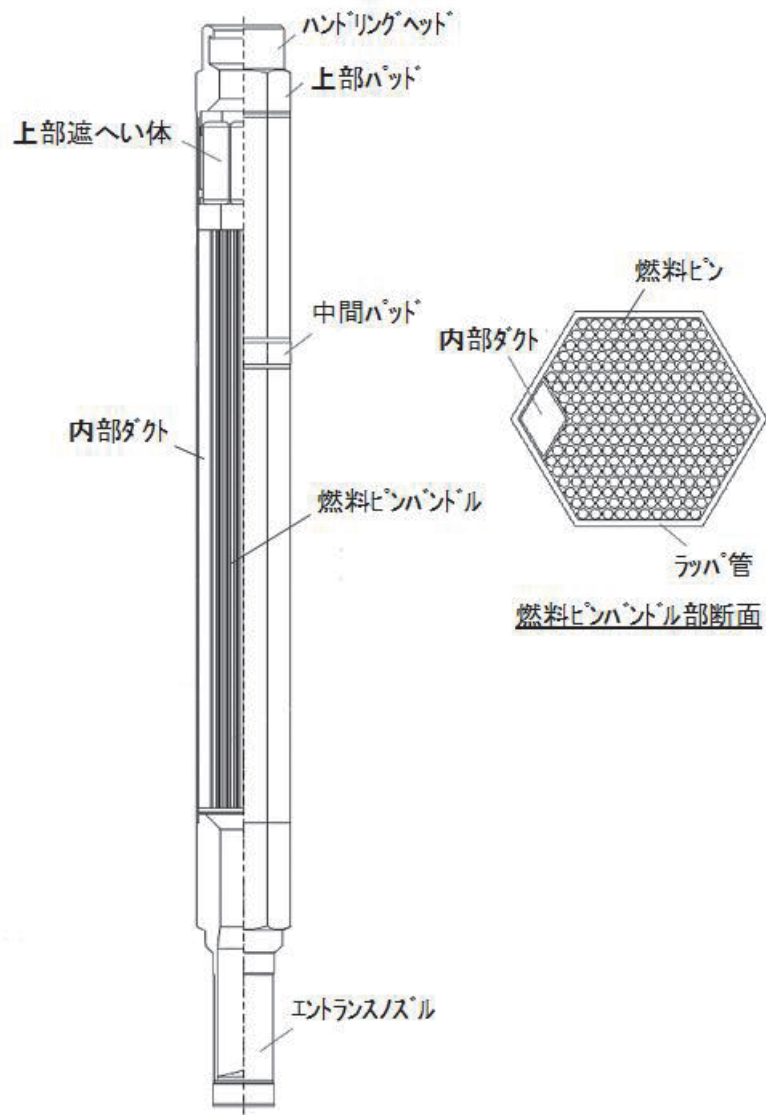
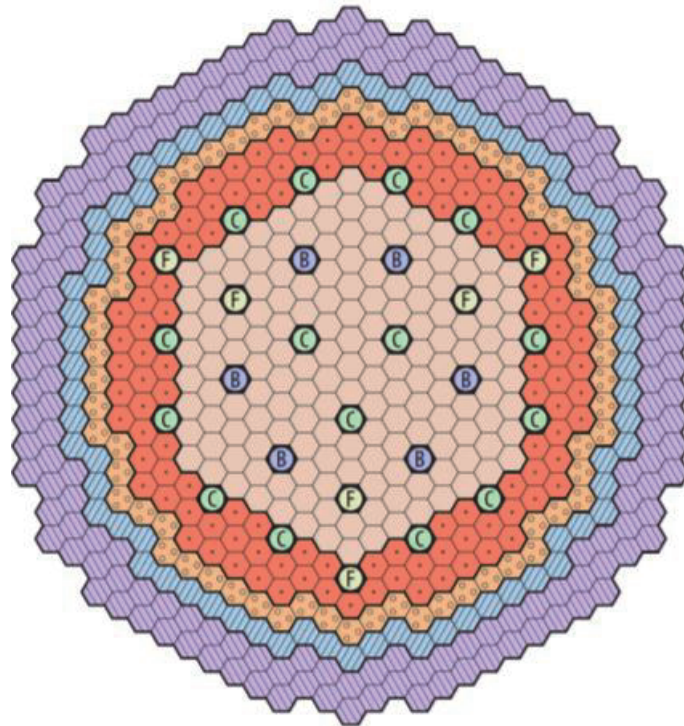


図 3.3-1 内部ダクト付燃料集合体の構造概念

## 750MWe炉心



|                                                                                     |                 |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------|
|  | 内側炉心燃料集合体       | 157体 |
|  | 外側炉心燃料集合体       | 117体 |
|  | 径方向ブランケット       | 66体  |
|  | 径方向遮へい体(ステンレス鋼) | 72体  |
|  | 径方向遮へい体(Zr-H)   | 162体 |
|  | 制御棒(粗調整棒)       | 15体  |
|  | 制御棒(微調整棒)       | 6体   |
|  | 制御棒(後備炉停止棒)     | 6体   |
| 合 計                                                                                 |                 | 601体 |

図 3.3-2 中型 MOX 燃料炉心の炉心配置

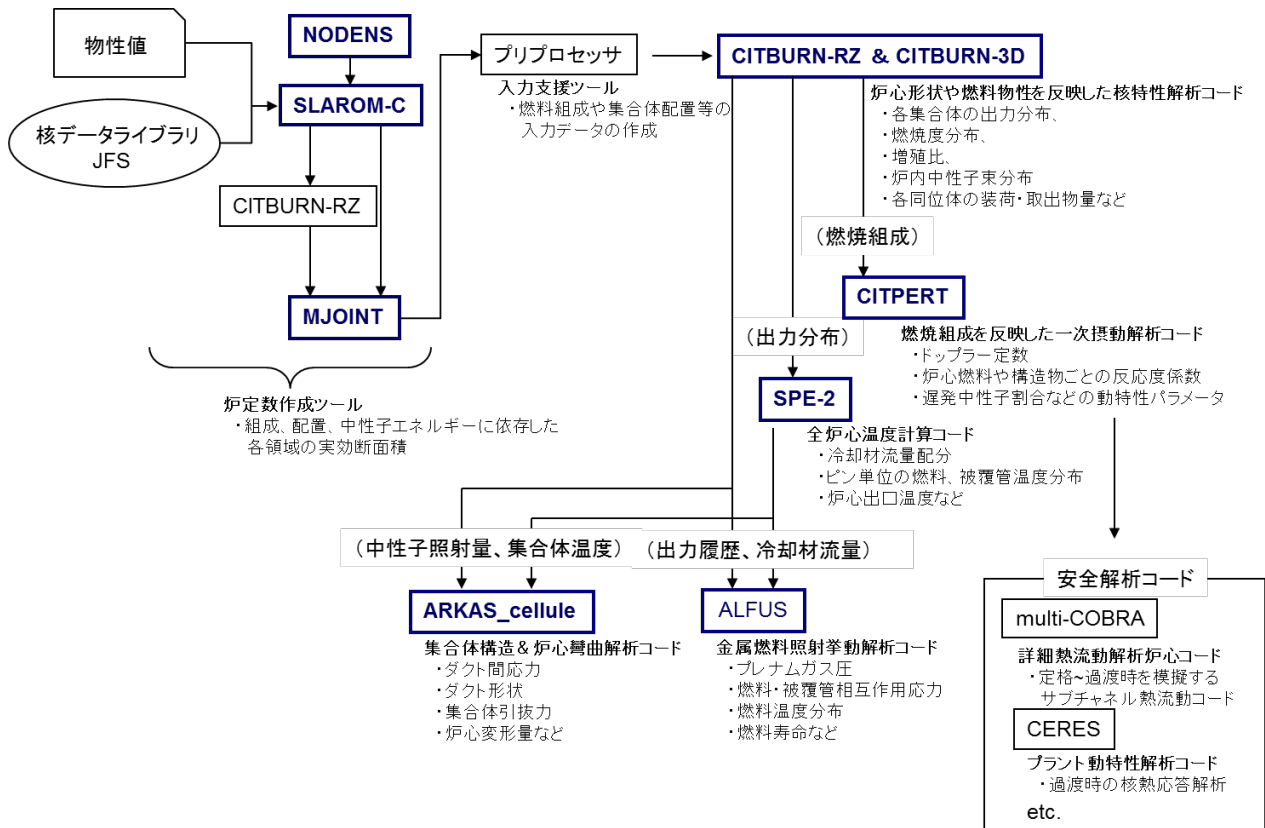


図 3.4-1 電中研で整備している高速炉炉心特性解析コードの概要

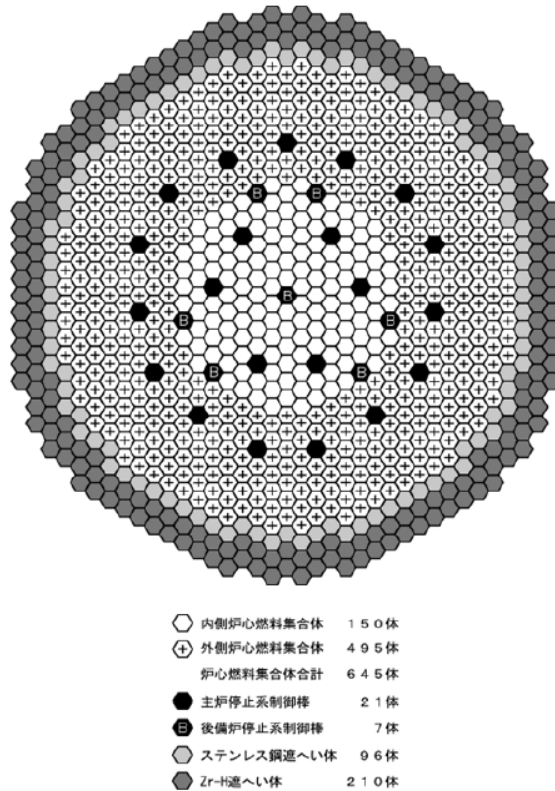


図 3.4-2 電中研解析に用いた平成 18 年度レファレンス炉心の炉心配置

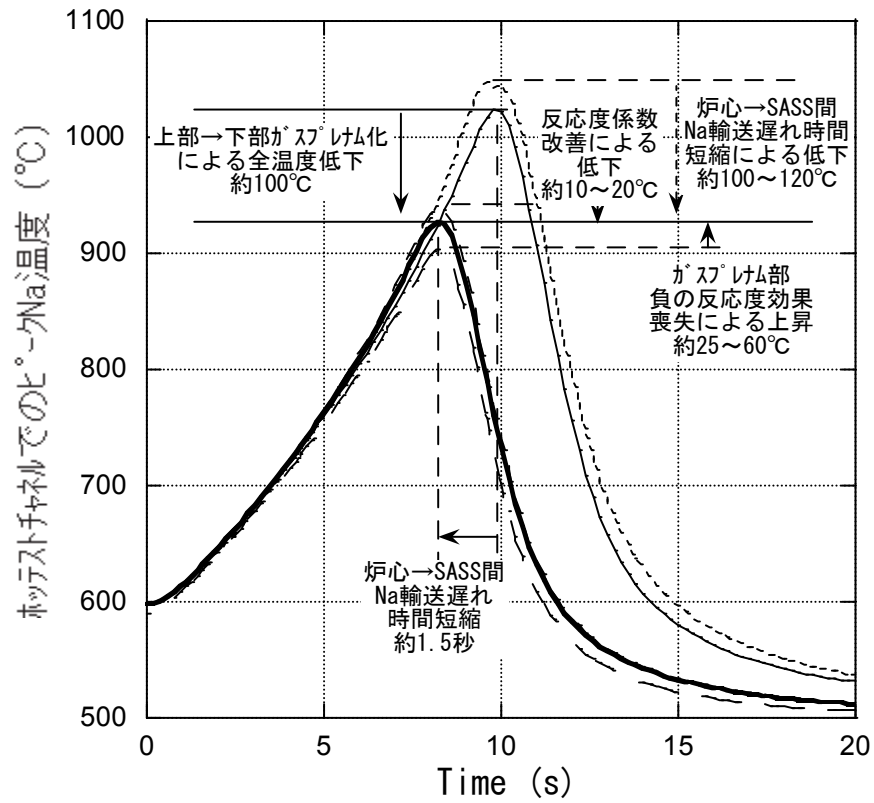


図 3.5-1 下部ガスプレナム型炉の ULOF 解析結果

## 4. 安全性に関する検討

FBR を設計する上での重要なリスク評価の対象として、仮想的炉心損傷事象（Hypothetical core disruptive accident : HCDA）があげられる。この事象は、発生頻度は極めて低いものの、プルトリウムを燃料とするナトリウム冷却高速炉の炉心が最大反応度体系にない特性に起因して、大量のエネルギーを発生する炉心損傷が生じる可能性を持つことから、リスク評価の上で重要とされてきている。金属燃料高速炉の実用化に向けては、他の高速炉と同様に、HCDA のリスクを顕在化させない設計が要求されている。

金属燃料炉心では、HCDA の起因となる ATWS に対して、主に良好な核熱特性による受動的な安全特性により、冷却材の沸騰も燃料の溶融も発生することなく、事象の終息が図られる可能性の高いことが、これまでの検討の結果示されている[4-1]。しかしながら、予測解析における物性値や反応度メカニズム、特に炉心の熱変形挙動に伴う負の反応度投入メカニズムなどに対して、大きな不確定性が予想されることから、HCDA の発生防止を決定論的に断言できる段階にはない。

金属燃料炉心の成立性を明らかにするためには、異常影響の緩和の面も含めて、炉心が損傷した状況においても、核的・熱的に安全が確保しうることを定量的に示すことが求められる。実用化のための許認可を視野に入れたとき、その過程で必要となる解析評価ツール・モデル、その根拠となる炉内・炉外試験、安全性判断条件などについて、金属燃料では多くの部分が開発の段階にある。金属燃料の HCDA については、先行炉の経験とこれまでに蓄積されている知見を基に、その事象推移と重要な挙動について分析・検討を行い、安全確保の課題を明らかにしてきた[4-2, 4-3]。

本章では、金属燃料の特徴を踏まえた炉心損傷時の挙動の把握と、それらに基づく金属燃料炉心損傷起因過程解析コード CANIS の開発、CANIS による ULOF 解析を通した炉心安全設計の上で考慮すべきことを示し、第 3.1 節に報告した平成 18 年度レファレンス炉心における炉心損傷起因過程の挙動と安全上の特徴を考察した。

### 4.1 金属燃料の安全上の特徴

#### 4.1.1 酸化物燃料との比較

$^{238}\text{U}$  を親物質とする増殖・転換炉体系で金属燃料を用いる場合、必然的に U-Pu 合金を用いることとなるが、U と Pu のみでは融点が低く実用化には向かない。そこで、U-Pu に Cr、Mo、Ti、Zr などを添加し融点を上げることが考えられた。これらの元素はいずれも融点を上げるが、中でも U-Pu-Zr 合金がステンレス被覆管との共存性の点で最も優れていると判断された。そのため、1984 年に米国アルゴンヌ国立研究所（ANL）において開始された IFR 計画では、U-Pu-Zr の 3 元合金が採用されることになり、これまでに数百本の U-Pu-Zr 試験燃料が照射された。

表 4.1-1 に 3 元合金燃料と酸化物燃料の物性値の比較を示す。金属燃料の特徴は以下のよう

- (1) 高密度：密度が酸化物燃料の約 1.5 倍であるため内部転換比が高くとれる。
- (2) ナトリウムボンド：金属燃料はナトリウムとの共存性がよく、燃料と被覆管の間のギャップを満たすボンド材に、高熱伝導のナトリウムを使用できる。
- (3) 高熱伝導：熱伝導度は酸化物の約 10 倍である。

燃料の特徴としてナトリウムボンドと高熱伝導であることから、金属燃料要素内の径方向および軸方向温度分布は、酸化物とかなり異なったものとなる。金属燃料では径方向温度勾配が小さく、燃料中心の定格時最高温度は最大出力燃料で 760℃程度となる[4.1-1]。軸方向温度分布は、酸化物燃料では中心高さ付近で最高温度が生じているのに対して、金属燃料では冷却材温度分布に大きく影響されて炉心上端付近で最高温度が生じる。

#### 4.1.2 燃料－被覆管間の液相形成

被覆管主成分である Fe は、燃料成分である U および Pu と各々約 724℃と約 410℃に共晶点を持ち、U-Pu-Fe 混合物は組成によっては溶融開始温度が 600℃台までに下がり得る。したがって、Fe がある温度以上の燃料スラグへ拡散すると、そこで燃料合金マトリクス中の U および Pu と共晶反応を起こし、液相を形成する可能性がある。

実例として、照射済燃料の一部を切り出して昇温した一連の試験では、約 660℃以上の温度において燃料スラグの外周部にて液相形成が観察された[4.1-2]。この液相形成下限温度は、定格運転時、設計基準での過渡変化時の燃料健全性に大きな影響を与える。炉心損傷時の特性に関しては、燃料の融点以上に達する事象で侵食速度が急上昇する可能性を示すデータもある(図 4.1-1[4.1-3])。破損燃料と被覆管の液相形成速度に関する実験データは限られたものであり、理論的な裏づけも十分ではない。このため、今後研究を進め、照射試験等によって液相形成の下限温度および侵食速度を実証する必要がある。

#### 4.1.3 ULOF 時の事象進展予測

FBR の HCDA を引き起こす可能性のある事象（起因事象）の一つに ATWS がある。ATWS の中でも炉心流量喪失型の ULOF は、過去の確率論的安全評価（Probabilistic Safety Assessment : PSA）の検討から、リスクへの寄与割合が高いとされている起因事象である。代表的な事象シーケンスとしては、外部電源喪失時に原子炉停止に失敗するシーケンスがある。図 4.1-2 に、金属燃料炉心での ULOF 事象の事象推移を示す。

外部電源喪失などにより、炉心冷却主ポンプが停止して炉心流量が低下すると、負の反応度フィードバックが投入され出力も低下するが、出力／流量不整合により冷却材温度が上昇する。

冷却材が沸騰するか否かは、負の投入反応度の大きさと、冷却材流量低下の速さである主ポンプ流量半減時間が支配要因となる[4-2]。炉心膨張反応度などにより、十分な負の反応度が挿入された場合には、沸騰に至る前に冷却材温度は整定する。出力整定に至らず、出力流量比 (P/F) が上昇を続けると、定格状態における P/F の大きさに依存して、先行的に沸騰する高 P/F 集合体と、未沸騰状態にある低 P/F 集合体が混在する状況が生ずる。

高 P/F 集合体では、冷却材が沸騰を開始してほぼドライアウトした後、図 4.1-3 に示すように



燃料が溶融を始め、引き続き被覆管が破損し、破損孔から溶融燃料が燃料要素外の冷却材チャンネルに分散する。燃料の溶融開始の状況は、比較的输出が大きい条件では、内部から溶融開始するが、出力が小さい条件では頂部より溶融すると予測される。低 P/F 集合体では、冷却材沸騰に伴う正の反応度投入により出力が上昇することから、過出力事象に類似した事象推移となる。

HCDA のシーケンスにおいて重要な対策は、過渡発生後の炉心の温度上昇に伴い主に冷却材反応度によって投入される正の反応度によるさらなる出力上昇を抑制し未臨界に導くことである。負の反応度として、ドップラ反応度や炉心膨張反応度だけでは出力上昇を抑制できない場合、燃料要素の破損が生じ、これに伴い燃料成分が移動することで出力上昇が収束する。燃料成分の移動は、燃料の溶融ないしは破碎による。そのため、HCDA のシーケンスにおける生成エネルギー、即ち過渡開始から終息までの積分エネルギーは、過渡開始から大きな負の反応度が投入されるまでの時間差に大きく依存する。

こうした事象進展、特に燃料破損挙動における金属燃料と酸化物燃料との一番の差異として、燃料の融点が被覆管の融点或いは被覆管の強度が失われる温度を下回るか或いは上回るか、が挙げられる。酸化物燃料では、燃料ペレットの破碎・溶融に先行して被覆管が溶融移動し、正の反応度が投入される。その後に燃料が移動する。一方、金属燃料では燃料融点が被覆管融点よりも低いことから、燃料の溶融が先行する。このため、被覆管が溶融する前に、溶融した燃料が分散する可能性が高い。また、次の第 4.1.4 項に述べるとおり、被覆管内部で燃料要素内の燃料が部分的に溶融し移動する現象 (in-pin fuel motion) である溶融燃料の軸方向上部への押出 (extrusion) が生じることで、負の反応度が投入される。

#### 4.1.4 金属燃料における溶融燃料挙動

金属燃料における溶融燃料の挙動は、大きく分けて、被覆管内での移動 (in-pin fuel motion) 即ち溶融燃料の押出 (extrusion) と被覆管外への移動 (ex-pin fuel motion) 即ち被覆管破損に伴う燃料分散 (dispersion) がある。事象推移、および、燃料の燃焼度に依存して、いずれか一方の挙動のみが起きる場合、両挙動が起きる場合がある。両挙動が発生する場合、何れの挙動が先行して発生するかの前関係は事象推移に依存する。典型的な ULOF の事象推移では、extrusion が先行する。extrusion による負の反応度効果が十分でない場合には、被覆管破損が生じて溶融燃料が分散・排出される dispersion が生じる。

extrusion は、燃料溶融により形成された溶融キャビティが燃料スラグ上端で解放されると同時に、溶融キャビティ中に存在していた FP ガス (閉バブル) が膨張と合体を繰り返し、結果として燃料がガスプレナム部へと伸びる現象である。これについては ANL での TREAT 試験結果等[4.1-4 ~ 4.1-7]をもとに、メカニズムの解明研究が進められてきている。

extrusion は炉心燃料密度を相対的に減少させ、負の反応度効果をもたらす固有の安全特性のひとつである。extrusion の規模に影響を及ぼすと考えられるのは、以下に挙げる要因である。

- ① 溶融燃料の量
- ② 溶融キャビティ中に含まれる FP ガス (閉バブル) 量
- ③ extrusion 量を抑制するガスプレナム圧



前述のように extrusion の駆動力は燃料中に含まれる FP ガス（閉バブル）の膨張と考えられるため、この FP ガス量に比例して extrusion の効果即ちガスプレナム内への膨張量も大きくなる。これに対してガスプレナム圧が比較的大きい場合には差圧が小さく、FP ガスの膨張に対する抵抗が大きくなるため、燃料の伸びは抑制される。

一方、dispersion では、生じた被覆管の破損孔から溶融燃料が冷却材流路に分散し、移動する。

被覆管の破損は、燃料温度の上昇に伴う被覆管内圧の上昇と燃料－被覆管境界で形成される液相による被覆管の減肉が相まって、被覆管に作用する応力が上昇することによりクリープ損傷が発生し、破損に至る可能性が高い。急激な温度上昇の場合には、被覆管の溶融破損の可能性はあるが、ULOF 時の温度上昇率では、クリープ損傷により被覆管が破損する。なお、液相形成による被覆管の破損孔形成の可能性も考えられるが、クリープ破損に先行してこのような破損が生ずる状況は発生しにくいと考えられる。

溶融燃料分散時の駆動力としては、溶融燃料内の FP ガス圧力即ち燃料溶融前に燃料結晶粒界に保持されていた高圧ガス気泡と、燃料要素内のボンドナトリウムの沸騰力がある。燃料分散前に、このボンドナトリウムが破損孔から流出すると、駆動力の一部が失われる。冷却材沸騰ドライアウト後は、燃料頂部より下部に残存したボンドナトリウムの沸騰圧力のみが駆動力として期待できる。

## 4.2 金属燃料炉心損傷解析コード CANIS

CANIS コードは、金属燃料の炉心損傷を評価することを目的として電中研が開発を行った、冷却材ナトリウムの沸騰と燃料の溶融・分散挙動を扱うことの出来る動特性解析コードである[4.2-1, 4.2-2]。本節では CANIS コードの概略について示す。なお、CANIS コード概要及び解析モデルの詳細については、「金属燃料高速炉の炉心・燃料設計に関する研究 (3)」報告書において報告している[1-3]。

### 4.2.1 CANIS コードの概要

CANIS コードのモデル概要を、図 4.2-1 に示す。1 次系一巡の流路モデルで、境界条件として一定温度または動特性解析コード解析結果から求めた炉心入口温度を与える。炉心は、流量・出力の観点からグルーピング（ランピング）した 1 次元ピンモデル即ち代表チャンネルを複数組み込んだ、代表チャンネル間の熱移行も考慮できるモデルとなっている。

熱流動は、1 次元二流体モデルで、冷却材ナトリウムの沸騰を扱うことができる。速度場は、溶融燃料から離脱した FP ガスを含むナトリウム気相と、それ以外（ナトリウム液相、分散燃料）の 2 速度場である。

核動特性は、1 点炉近似で Kaganove[4.2-3]の方法で中性子束を計算する。反応度係数は、ドップラ、冷却材密度、燃料の軸方向膨張に伴う燃料密度、構造材の軸方向膨張に伴う構造材密度の各反応度係数を 3 次元反応度分布で適用できる。熱流動計算で得られた温度分布をもとに、各種反応度係数に乗じて全反応度の変化を計算する。その他、燃料軸方向膨張効果と径方向炉

心膨張（湾曲）効果による反応度をモデル化している。

燃料溶融後の燃料分散駆動力は、主に燃料結晶中に蓄えられていた FP ガスであるが、燃料被覆管内のボンドナトリウムと冷却材流路のナトリウムの温度差に起因する蒸気圧差も考慮できる。燃料中の FP ガス分布は、金属燃料挙動解析コード ALFUS[4.2-4]により評価する。ALFUS の解析結果は、燃料形状、燃料組成などの情報とともに CANIS に与えられる。

以下に計算の順番を示す。

- step1：炉心形状・物性、核動特性、構造データ、計算条件等の入力。
- step2：ALFUS 解析結果（FP ガス）、燃料形状、燃料組成等の入力。
- step3：1 次系モデルにより 1 次系流量、プレナム圧力及び温度を算出。
- step4：冷却材沸騰、ドライアウト、燃料溶融、被覆管破損等を判定。
- step5：炉心領域の冷却材流路部境界条件を設定。
- step6：extrusion 量または dispersion 量を計算。
- step7：反応度、核動特性を計算。
- step8：燃料ピン温度（燃料、被覆管及びラッパー管）を計算。
- step9：炉心領域（燃料要素部、冷却材流量部）の冷却材流路部の熱流動を計算。
- step10：収束判定。収束の場合次の時間ステップへ、収束していない場合 step4 に戻る。

#### 4.2.2 燃料溶融、溶融キャビティモデル

燃料部分は、軸方向および径方向に複数のノードでモデル化され、個々の幾何形状と燃料成分は ALFUS データより与える。各燃料ノードの融点は、ノードごとに入力ないしは相関式により指定できる。各タイムステップで代表チャンネルの熱計算を行った後、各燃料ノードの温度と融点を比較し、溶融の有無を判定する。溶融していると判断された燃料ノードは結合され、溶融キャビティを形成する。溶融燃料を分散する駆動力となる FP ガスは、溶融キャビティの範囲で計算される。タイムステップごとに熱計算の結果を反映し、溶融キャビティの有無と、その特性が計算される。

#### 4.2.3 燃料分散条件と被覆管破損モデル

被覆管が破損し、燃料が冷却材流路に分散する条件として、①燃料溶融領域が被覆管内面に達した状態で被覆管破損条件に到達、②被覆管内面近傍燃料が未溶融の状態で被覆管破損条件に到達・未溶融燃料の割れからの貫通を想定、③燃料溶融領域が被覆管内面に達した状態で無条件に被覆管が破損、④燃料溶融領域が燃料スラグ頂部に達し（extrusion）且つ上端部で被覆管が破損した際に分散（dispersion）、の 4 つの破損形態を想定し、入力データで選択できるようにしている。なお、④については、現在は未対応である。

#### 4.2.4 燃料分散モデル

CANIS コードでは、被覆管内部分散（extrusion）と被覆管外部分散（dispersion）の二つの燃料分散モデルが用意されている。なお、上述のとおり、現在は extrusion と dispersion の両モデルを重ねあわせた事象は解析対象外としている。燃料分散モデルとして、extrusion を選択した

場合、溶融キャビティの進展に伴い溶融キャビティはガスプレナム内に膨張し、結果的に、燃料が疎になって膨張することにより、負の反応度が誘起される。**dispersion** を選択した場合、燃料溶融後に被覆管が破損し FP ガスと混在した溶融燃料が冷却材流路に流出する状況で、燃料ピン内及び燃料ピン外の挙動が計算される。なお、燃料ピン外に流出した溶融燃料は、冷却材とともに 2 流体モデルにより熱流動計算を行う。

### 4.3 CANIS による炉心損傷解析

本節では CANIS コードによる大型炉心、中型炉心、平成 18 年度レファレンス炉心における評価例について示す。なお、前節同様に評価例の一部については既に報告[1-3]していることから、本節では、これまでの解析結果について再整理並びに補足するとともに、平成 18 年度レファレンス炉心における評価について拡充して報告する。

#### 4.3.1 大型炉心の評価

##### (1) 燃料、炉心仕様

大型炉心の炉心損傷評価として、電気出力 150 万 kW 級の金属燃料炉心を対象とした解析を行っている。主な炉心仕様を表 4.3-1 に、集合体仕様を表 4.3-2 に、燃料仕様を表 4.3-3 にそれぞれ示す[4.3-1, 4.3-2]。本炉心設計では U-Pu-Zr 三元合金を初期燃料とするが、将来的な MA 添加も考慮した Na ボイド反応度も評価されている[4.3-1]。燃料健全性を主目的とする安全解析では、工学的安全係数等を考慮したホットテストピンを対象として評価するが、Na ボイド反応度制限を評価することを目的として行った本大型炉心の評価では、早期の燃料破損は安全側・非安全側の両効果を持ち、また、その大小関係は事象進展に依存し一意的に判断できないため、設計時の熱流力設計のノミナル値をそのまま使用している。解析は、各集合体の出力／流量比を考慮し、内側炉心、外側炉心、径方向ブランケットを 37 グループにグルーピングし、遮蔽用集合体として 1 チャンネル設置して、合計 38 の代表チャンネルで行った（図 4.3-1）。

##### (2) 解析条件

上述の大型炉心について、CDA 起因事象として ULOF を選択して起因過程解析を実施し、炉心損傷の設計成立範囲を評価している。流量半減時間は 5.5 秒である。解析上のパラメータは、Na ボイド反応度（全炉心）と被覆管破損温度である。

Na ボイド反応度は、酸化物燃料炉心の上限值目安 6\$程度を参考に、金属燃料ではこれより大きい値が許容可能との観点から 8\$ 程度の炉心設計が行われている[4.3-1]。金属燃料炉心の Na ボイド反応度上限値は過去に評価されているが[4.3-3]、その後、CANIS コードの燃料分散挙動を機構論的モデルに改良し、Na ボイド反応度上限値の再評価、及び、燃料排出量の評価が実施されている。

被覆管破損条件は被覆管肉厚中心温度とし、燃料 - 被覆管間の液相形成による減肉効果により破損するとした。高温下では、ウランリッチな組成では減肉速度が速く 1,000℃程度で破損が生ずると推定し、鉄リッチな組成でも 1,200℃程度で破損すると推定した。また、酸化物燃

料で評価されている限界破損温度が 1,250℃（被覆管融点-150℃）であることから保守ケースとして加えた。

以上から、基準ケースは Na ボイド反応度 8\$, 被覆管破損温度 1,200℃の組み合わせとし、Na ボイド反応度は 8\$, 10\$, 12\$ を、被覆管破損条件は 1,000、1,200、1,250℃をパラメータとして評価を行っている。なお、対象炉心の Na ボイド反応度の内訳は、ドライバ燃料領域で 7.4\$ である。解析にあたっては、冷却材密度係数に、評価しようとする Na ボイド反応度に相当するよう補正係数を乗じた。

### (3) 解析結果のまとめと考察

基準ケースの解析結果を図 4.3-2 から図 4.3-5 に示す。最大ネット反応度は 0.742\$, 最大出力は定格出力比 5.46 である。酸化物燃料炉心の解析例では、最大ネット反応度はほぼ 1\$ に近接し、最大出力が定格出力比の数 100 倍となるが、これに比べ大幅に小さな値となっている。

冷却材反応度の最大投入量は 7.36\$ であり、対象炉心のドライバ燃料領域の Na ボイド反応度が 7.4\$ であることから、ほぼ内側炉心の全域が沸騰していることと整合する。出力／流量比が一番大きい代表チャンネル 1 において、最初に沸騰が生じ、かつ、燃料の溶融・分散も最初に生ずる。

図 4.3-6 に、代表チャンネル 1 における冷却材と燃料の反応度の変化を示す。冷却材沸騰が盛んになり、冷却材反応度が急増するが、約 1.4 秒後に燃料分散が生じていることが解る。炉心全体の反応度変化の時系列変化は代表チャンネル 1 の時系列変化に支配される。

図 4.3-7 に、代表チャンネル 1 における燃料溶融キャビティ圧力と臨界流速の変化を示す。同図に示すように、燃料分散により大きな負の反応度が投入され、深い未臨界状態に推移し事象は終息する。

基準ケース以外を含めた最大出力と最大ネット反応度の解析結果を表 4.3-4、表 4.3-5 並びに図 4.3-8 に示す。もっとも厳しい条件である 12\$ と 1250℃の組み合わせでも、最大ネット反応度は 0.939\$ であり、最大出力は定格出力比 33.7 と、酸化物燃料炉心に比べると大幅に小さい値となっている。Na ボイド反応度については、炉心制御性の観点からの上限値があるが、本解析の結果からは、起因過程からの強い Na ボイド反応度制限はないものと考えられる。

### (4) 燃料分散条件の考察

初期の CANIS のモデルでは、燃料分散速度をアプリオリに設定していた（parametric）が、その後被覆管破損孔からの噴出速度、および、冷却材チャンネル中へ分散した後の冷却材を含めた流動解析を解くモデル（mechanistic）にモデル改良が行われている。改良前後で比較すると、最大出力は、燃料分散速度 5.0m/s 固定値の場合の  $2.0P_0$  から  $3.46P_0$  に増大している。但し、燃料分散速度固定値を用いた初期モデルではタイムステップが粗く、最大値を下回っていると予想される。反応度などの挙動からは、ほぼ同程度の推移と予測された。なお、ドライアウト条件は Na ボイド率 0.999 以上としている。

被覆管破損孔の面積については、冷却材流路断面積の 25% を基準ケースとし、加えて破損孔面積を基準ケースの 50%、10%に縮小した 2 ケースを解析している（表 4.3-6）。基準ケース



から破損孔面積を 50%に減らした場合、破損直後は分散しにくい、被覆管内の溶融キャビティの拡大と内圧の上昇により溶融燃料密度が上昇するとともに FP ガス体積が減少し、質量流速は基準ケースと同程度になったため、解析結果は基準ケースと同程度となっている。破損孔面積を更に縮小した 10% のケースでは基準ケースに比べ最大出力が約 2 倍となったが、破損孔のサイズの影響はそれほど大きくないと考えられる。

#### (5) 同時性に関する検討

Na ボイド反応度 8\$, 被覆管破損条件 1,200°Cの基準ケースにおいて、冷却材沸騰／燃料破損・分散の同時性を強め、P/F が大きいものからグルーピング範囲を設定した以下 3 ケースについて、最大出力、投入反応度の検討を行っている（表 4.3-7）。

ケース 1：18 集合体（内側炉心の 6.5%）

ケース 2：66 集合体（内側炉心の 23.9%）

ケース 3：3 領域グルーピング（内側炉心を 2 分割、外側炉心）

最大出力は同時性が強まるほど大きくなるが、グルーピングにより各チャンネルの P/F 最大値は平均化するため、これに伴い小さくなる。このため、冷却材沸騰開始時間は各ケースで 17.3 秒から、17.6 秒、18.5 秒、19.8 秒と遅れる。一方、最大出力の増大に伴い、出力上昇率は小さくなることから、ドライアウト発生前に被覆管が破損して燃料分散が生ずる。

### 4.3.2 中型炉心の評価

#### (1) 燃料、炉心仕様

本項で検討している炉心は、FS／フェーズ I の中で平成 12 年度から平成 13 年度に具体化された、炉心燃料ピン径 3 領域で、内部転換比 1 以上を達成し、高燃焼度化、出口温度高温化を図った 50 万 kW の中型炉心概念である[4.3-4]。主な炉心仕様、炉心構成の体積割合、反応度係数をそれぞれ表 4.3-8 から表 4.3-10 に示す。なお、反応度係数は各炉心領域で積分した値であり、解析ノードに対応した空間分布で評価されている。

Na ボイド反応度の分布を、表 4.3-11 に示す。炉心全体の合計で約 7.2\$, 内側炉心及び中間炉心の合計で約 5.7\$である。炉心上部半分の燃料が移動することによる投入反応度は、ドライバ部の Na ボイド反応度に比して、内側炉心で約 5 倍、中間炉心で約 6 倍であり、燃料分散後は燃料移動による投入反応度により正の反応度は十分に相殺できると予測される。なお、大型炉心でも同様に、燃料移動による投入反応度は、内側炉心の Na ボイド反応度の約 5 倍であった。

#### (2) 解析用のモデル化

中型炉心の 1/3 炉心体系（図 4.3-9）から集合体をグルーピングし代表チャンネルを作成した。なお、従来は P/F と P の傾向から複数集合体をグルーピング（ランピング）していたが、本炉心では P/F と P の傾向が類似していても集合体の位置が離れているケースがあり、集合体間熱移行を考慮する場合は問題となるため、内側炉心（20ch）及び中間炉心（20ch）は 1 集合体を 1 代表チャンネルとし、外側炉心は F で整理し 4 チャンネルとしている。表 4.3-12 から表 4.3-16 に各炉心領域の出力と流量の設計値を示す。

図 4.3-10(1),(2)に中型炉心と大型炉心の P/F 分布の比較を示す。炉心平均出口温度 510℃の大型炉心に比べ、炉心出口温度高温化を図った中型炉心では、P/F 分布が狭くなっており、冷却材温度の同時性が強くなっていることがわかる。

### (3) 燃焼データの取扱い

CANIS では、燃料分散時の駆動力である FP ガスを考慮するために、燃料挙動データの計算結果を必要とする。但しパラメトリックに燃料分散速度を与える場合は不要である。ここでは、中型炉心の燃焼計算は行わなかったため、大型炉心の計算データを用いている。大型炉心の解析では燃焼度依存性はそれほど強くなかったため、FP ガス圧が小さい第 1 バッチの内側炉心データから算出した。平均燃焼度は約 40Gwd/t で、これをもとに各領域の燃料形状にあわせて内外挿した。

### (4) 解析条件

大型炉心と同様に、ULOF を解析対象とし、流量半減時間は 5.5 秒とした。被覆管破損条件は 1,200℃とし、より厳しい条件での解析も行っている。反応度係数としては、炉心湾曲及び炉心支持版膨張は無視し、燃料の軸方向膨張は考慮するが HT-9 で模擬した被覆管の熱膨張で制限している。燃料軸方向膨張係数は燃料密度係数から外挿した。なお、燃料破損の条件としては、第 4.2.3 項で述べたタイプ①、即ち、燃料熔融領域が被覆管内面に達した状態で被覆管破損条件に到達し被覆管が破損するものとした。

### (5) 解析結果

解析の結果得られた燃料破損のイベントシーケンスを表 4.3-17 に示す。先行的に破損するのは P/F、P 共に最大の内側炉心の代表チャンネル 1 (ch.1) であり、被覆管破損時に燃料熔融は燃料外周部まで達しており、被覆管破損と同時に燃料分散が生ずる。遅れて破損する代表チャンネルでは、集合体出力が相対的に低いことから、冷却材沸騰が燃料熔融開始に先行している。

出力と全反応度の推移を図 4.3-11 に示す。代表チャンネル 1 の破損による負の燃料反応度投入から 0.032 秒遅れて、最大反応度 0.962\$ に達しており、即発臨界に近づいており、最大出力は約 46P<sub>0</sub> で、大型炉心に比べて大きな値となっている。

最大で投入される冷却材反応度、即ち最大投入 Na ボイド反応度は 4.28\$ であり、大型炉心に比較すると、全炉心 Na ボイド反応度に対する割合は小さい。即ち、大型炉心では、Na ボイド反応度のほとんどを占める内側炉心がほぼ全沸騰しているのに対し、中型炉心では事象推移が速く、中間炉心の一部と外側炉心が沸騰していない。中型炉心では、冷却材反応度の最大値は大型炉心よりも小さいが、集合体間の同時性が強いこと正の反応度投入率が大きく、最大出力が大きくなっている。

被覆管破損温度条件を 1,250℃とした場合の比較を、図 4.3-12 に示す。燃料分散のタイミングが遅延するため、正の反応度投入が継続する時間が長く、最大出力は約 80P<sub>0</sub> に達している。図 4.3-13 に、最大出力を生ずる時刻近傍の挙動を、被覆管破損温度を 1,100℃とした場合と併せて示す。なお、1,250℃の値が異なるのは、解析時の最大値をプロットできるように解析時間

ステップとプロット用出力時間ステップを細かくしたためである。

#### 4.4 平成 18 年度レファレンス炉心の評価

##### 4.4.1 燃料・炉心仕様及び炉心の特徴

評価対象とする炉心は、第 3.1 節に報告する炉心出口温度高温化を図った大型金属燃料炉心、平成 18 年度レファレンス炉心（以下、レファレンス炉心）である。主要な炉心仕様を表 4.4-1 から表 4.4-5 に、燃料集合体構造概念図を図 4.4-1 に示す。

レファレンス炉心は、ULOF 時の炉心損傷起因過程を解析する上で、①炉心高さが 75cm と低い、②被覆管最高温度部での最大線出力が 200W/cm と低い、③炉心平均出口温度高温化のため集合体間の P/F が比較的そろっている、④全炉心 Na ボイド反応度が中型炉に比べやや小さい、との特徴を持っている。

①の炉心高さが低い特徴から、レファレンス炉心では、熔融燃料分散時に排出距離の観点から有利に作用すると予測される。ただし、過去に炉心高さに関する検討を行ったことがないため、現段階でその影響の良否については断定できない。

②から④の特徴の関連については、第 4.3.2 項で報告している中型炉心での挙動解析を基に、大型炉心であるレファレンス炉心における特徴を考察した結果について、次項以降に報告する。

##### 4.4.2 最大投入 Na ボイド反応度の予測

###### (1) 中型炉心での挙動

CANIS による中型炉心の解析における最大 Na ボイド反応度に至る挙動を分析した。図 4.4-2 は、冷却材沸騰、燃料溶融、被覆管破損、燃料分散のシーケンスにより先行して破損する代表チャンネルの履歴を示したものである。冷却材の沸騰は炉心上端で開始する。ドライアウトも同様に、炉心上端から開始し、沸騰領域はほぼ炉心上部半分となっている。燃料分散開始時には、ほぼ全領域で沸騰が生じており、代表チャンネルの有する Na ボイド反応度のほぼ全量が投入されている。なお、「Na」と記したコラムが冷却材の状況を示しており、黄色が沸騰、橙色がドライアウトである。燃料分散時には、沸点に達していない領域も黄色になっているが、これは冷却材下流、即ち図 4.4-2 では上部、からのナトリウム気相が発達してきているためである。

各代表チャンネルの燃料破損の履歴に基づき、代表チャンネルそれぞれが保有する Na ボイド反応度を「ドライアウト開始」のタイミングで積算した値と、CANIS 解析による冷却材反応度との比較を、図 4.4-3 に示す。同図から、投入される Na ボイド反応度の値及び時間変化は、CANIS 解析とチャンネルごとの積算値で、同様の傾向を示していることが分かる。積算値の方が CANIS 解析に比べ、Na ボイド反応度投入の時間が早くなっているが、これは図 4.4-2 に示すように、CANIS 解析では、ドライアウト開始段階では Na ボイド領域が十分に発達していないためである。

以上の中型炉心における分析から、燃料破損までの冷却材反応度の投入推移は、代表チャンネルが保有する Na ボイド反応度寄与分の積算値で推察できるものとして、レファレンス炉心



での挙動を検討する。

なお、燃料破損までの反応度効果としては、①ドップラ反応度（負）、②構造材反応度（正）、③燃料軸方向膨張反応度（負）があるが、①と②は冷却材反応度に比べてその絶対値が小さいこと、③は解析上考慮していないことから、本検討では無視しうると判断した。

## (2) 破損集合体の条件

これまでの CANIS の解析の知見から、燃料分散による大きな負の反応度が投入されるまでに、冷却材反応度或いは Na ボイド反応度の寄与が大きい集合体は、①相対的に P/F が大きい集合体、②P/F が相対的に中位であっても出力分担の大きい集合体、であった。

図 4.4-4 左図に中型炉心における P/F 及び集合体出力と破損／非破損集合体の分布を示す。分析の結果、同時性の強い中型炉心では、②の挙動はほとんど見られず、P/F 値が支配になっていることが分かる。

レファレンス炉心における P/F 及び集合体出力を図 4.4-4 右図に示す。同図に示すように、中型炉心に比べ同時性が強くなっており、さらに高出力集合体は高 P/F 側にあることから、冷却材反応度の投入推移は P/F 値で整理できると判断した。

図 4.4-5 に、レファレンス炉心において、Na ボイド反応度分担割合の大きい、すなわち、炉心中心部に位置する流量配分領域 1 と 2 の集合体分布を示す。また、表 4.4-6 に各流量配分領域の Na ボイド反応度分担率を示す。流量配分領域毎の Na ボイド反応度分担割合は、流量配分領域 1 と 2 で、それぞれ約 35%、約 18%である。集合体出力の大きい領域である流量配分領域 3 では約 9%、流量配分領域 2 と同様の性格を有する流量配分領域 5 では約 15%である。

中型炉心の場合、破損／非破損の境界となる下限値は、P/F で約 1.1 である、即ち、P/F 値が約 1.1 以上の集合体で先行的に破損する。一方、レファレンス炉心では、P/F の最大値が約 1.1 であることからその境界は判断しにくい。とりわけ、Na ボイド反応度分担が大きい流量配分領域 1 では、P/F の分布が広いため、破損／非破損の境界がどこにあるかが最大 Na ボイド反応度投入量と相関が強い。

表 4.4-7 に、レファレンス炉心において先行的に破損する集合体を判定する基準として、破損／非破損の境界を P/F 値が 1.0、1.010、1.015、1.020、1.025 以上と仮定した場合の、破損集合体数と、破損集合体が有する Na ボイド反応度寄与割合を示す。流量配分領域 2 と 5 では、境界とした P/F 値が異なる場合でも、破損集合体数に大きな変化は見られず、破損集合体が有する Na ボイド反応度寄与割合に変化は見られない。表中の太字で示した数値は、境界とした P/F 値の違いに係らず変化しない。これは、当該流量配分領域の最小 P/F 値が大きな値のためである。

図 4.4-6 に示したように、Na ボイド反応度寄与割合は、境界とした P/F 値、即ち P/F 下限値が下がると、ほぼ線形に増加する。また、図 4.4-5 に示すように、特に流量配分領域 1 では P/F が広範に分布しており、表 4.4-7 に示すように、流量配分領域 1 のように P/F 値が広範に分布する領域が、主に、P/F 下限値の変化に対する Na ボイド反応度寄与率変化に依存している。

全炉心ボイド反応度が 6.2\$であるレファレンス炉心では、P/F 下限値を 1.01、即ち  $P/F \geq 1.01$  の集合体が先行破損すると推定した場合、最大投入 Na ボイド反応度は、第 4.2.3 項で示した中

型炉心での最大投入 Na ボイド反応度の約 4.3%とほぼ等価となる。現状では、レファレンス炉心における CANIS 解析を実施していない段階であり、明確に判断はできないが、過去の大型炉心、中型炉心での CANIS 解析経験からは、同時性の下限 P/F として 1.01 は、十分に小さな値と判断される。

### (3) 燃料分散挙動の考察

表 4.4-7 に示すように、破損が先行する燃料グループとして、流量配分領域 5 がある。これは外側炉心領域にあり、内側炉心燃料と比べ、Pu 富化度は同一であるが Zr 含有量が少なく、燃料融点が相対的に低い。

燃料分散に伴う負の反応度投入メカニズムにおいては、燃料の融点よりも、被覆管破損がドミナントである。その点では、Zr 含有量の影響は小さいと判断される。

次項 4.4.3 に示す再臨界性、即ち被覆管破損後の燃料要素分散／炉心外排出の挙動においては、被覆管破損に伴う燃料分散時の溶融割合が影響する。過去の CANIS の解析に基づくと、後から破損する燃料ほど溶融割合は小さい。流量配分領域 5 の集合体では、より先行して破損する傾向があり、これに融点が低くなる効果を加味すると、燃料分散時にはほぼ全量の燃料が被覆管外へ移動し、大きな負の反応度効果が期待できる。

### (4) 起因過程推移の推定

レファレンス炉心は、P/F 値で見た場合の同時性は強いが、個々の集合体の有する Na ボイド反応度分担を重ねてみた場合、中型炉と同程度の挙動を示すと推定される。従って、中型炉心の保守的評価、即ち被覆管破損温度を高めて燃料破損タイミングを遅らせたケース、を参照しても、レファレンス炉心の最大出力は約 100P<sub>0</sub> 程度と推定する。

#### 4.4.3 再臨界性の検討

レファレンス炉心体系での炉心損傷に至る事故、即ち溶融燃料スランピング状態での評価は行っていない段階であるが、大型炉心での検討と炉心高さの比較から、起因過程における炉心支持板上部と炉心下部での再臨界性を考察した。

レファレンス炉心の炉心高さ 75cm に対して、大型炉心は 85cm であることから、溶融燃料スランピング時の再臨界性は高い。大型炉心では、炉心支持板上部での再臨界を回避するために必要な排出燃料は約 38%と評価されている[4.4-1]。

溶融燃料から冷却材流路に分散した燃料は、炉心上部と下部から炉心領域外に排出される。大型炉心では、各集合体における燃料反応度価値と冷却材反応度はほぼ比例するが、これがほぼ比例したとする設計条件の炉心では、排出燃料割合は、全炉心 Na ボイド反応度に対する破損集合体の有する Na ボイド反応度合計にほぼ等価かやや少ない。解析上、排出される燃料は約 18%であり、溶融燃料スランピング時の再臨界回避に必要な量に満たない。この場合、再臨界を回避するためには、起因過程直後に未溶融の燃料が、崩壊熱により溶融することを防止しなければならない。

レファレンス炉心は、上記反応度比にばらつきがあるやや特殊な設計ではあるが、破損／非

破損境界を  $P/F \geq 1.02$  に仮定した場合でも、溶融燃料割合が排出必要量を十分に上回ることから、大型炉心とは異なり、起因過程段階で再臨界回避に必要な量が排出されると推察される。なお、破損／非破損境界をより低く  $P/F \geq 1.01$  とした場合には、より多くの燃料が排出される。

一方、実際は炉心上下方向に分かれて排出される燃料が、仮に炉心下部にのみ排出されると想定する場合、健全炉心形状の炉心径では、排出燃料の総量が再臨界に至る量に達する懸念が生じる。そのため、FaCT 主概念である酸化物燃料炉心と同様に、炉心入口部での排出燃料の集積がないことを示す必要がある。

#### 4.5 まとめ

平成 18 年度レファレンス炉心は、冷却材沸騰の同時性が強いとの観点からは炉心損傷の規模が大きいことが懸念されるが、①Na ボイド反応度投入分担の大きい流量配分領域 1 での同時性が弱いこと、②Na ボイド反応度分担の大きい炉心中央部の集合体の  $P/F$  が小さいことの 2 点から、ULOF 時の炉心損傷起因過程は中型炉心相当の挙動になるものと推察する。

表 4.1-1 燃料物性値の比較

| 項 目                                       | 金属                  | 酸化物   |
|-------------------------------------------|---------------------|-------|
| 融点[°C]                                    | 1,188 <sup>*)</sup> | 2,750 |
| 被覆管融点[°C]                                 | 約 1,400             |       |
| 密度[10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> ]    | 15.8                | 10.9  |
| 熱伝導度[W/m・K]                               | 27                  | 3.9   |
| 比熱[10 <sup>3</sup> J/kg・K]                | 0.12                | 0.64  |
| 融解熱[10 <sup>3</sup> J/kg]                 | 21.4                | 277   |
| 粘性係数[10 <sup>-3</sup> Pa・s]               | 6.5                 | 5.5   |
| 熱拡散率[10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s]  | 7.4                 | 0.56  |
| 動粘性係数[10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s] | 0.41                | 0.50  |
| プラントル数[-]                                 | 0.056               | 0.90  |

\*) 固相線温度

表 4.3-1 大型炉心の炉心仕様

| 項 目                        | 仕 様         |
|----------------------------|-------------|
| 熱出力[MW]                    | 3900        |
| 電気出力[MW]                   | 1500        |
| 冷却材出入口温度[°C]               | 510/355     |
| 被覆管最高温度[°C]                | 650         |
| 運転サイクル期間[年]                | 1.5 (4 バッチ) |
| 取出し平均燃焼度[GWd/t]            | 約 150       |
| 最大線出力[kW/m]                | 50          |
| 炉心配置                       | 均質 2 領域     |
| 内側／外側／径方向ブランケット[体]         | 276/138/162 |
| Pu 富化度[w/oHM] (内側／外側)      | 12.2/17.1   |
| Pu 組成[%] (239/240/241/242) | 58/24/14/4  |

表 4.3-2 大型炉心の集合体仕様

| 項 目           | 燃 料   | 径ブランケット |
|---------------|-------|---------|
| 燃料要素数 (本／集合体) | 331   | 127     |
| ダクト内対面距離[mm]  | 183.7 | ←       |
| ダクト肉厚[mm]     | 4.0   | ←       |
| ダクト間ギャップ[mm]  | 6.0   | ←       |
| 集合体配列ピッチ[mm]  | 19.77 | ←       |
| 炉心発熱部高さ[m]    | 0.85  | 1.30    |
| 上部軸ブランケット[m]  | 0.40  | —       |
| 下部軸ブランケット[m]  | 0.05  | —       |

表 4.3-3 大型炉心の燃料要素仕様

| 項 目                           | 燃 料         | 径ブランケット |
|-------------------------------|-------------|---------|
| 燃料スミア密度[%]                    | 75.0        | 85.0    |
| 要素外半径[mm]                     | 4.25        | 7.4     |
| 被覆管外半径[mm]                    | 4.25        | 7.4     |
| 被覆管内半径[mm]                    | 3.75        | 6.9     |
| 被覆管肉厚[mm]                     | 0.50        | 0.5     |
| 要素配列ピッチ[mm]                   | 9.95        | 16.02   |
| ワイヤ径[mm]                      | 1.39        | 1.21    |
| 冷却材流路面積[mm <sup>2</sup> /pin] | 30.03       | 56.93   |
| 等価水力直径[mm]                    | 3.64        | 4.12    |
| 燃料組成(wt%)                     | U-19Pu-10Zr | U-10Zr  |

表 4.3-4 最大出力のまとめ

| Na ボイド反応度 <sup>1)</sup> | 1,000℃ <sup>2)</sup> | 1,200℃ <sup>2)</sup> | 1,250℃ <sup>2)</sup> |
|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 8 \$                    | 1.85 <sup>3)</sup>   | 5.46                 | 9.44                 |
| 10 \$                   | -                    | 8.81                 | 16.6                 |
| 12 \$                   | -                    | 19.0                 | 33.7                 |

1) 対象炉心の Na ボイド反応度

2) 被覆管破損温度（被覆管肉厚中心）

3) 最大出力の定格出力比（ $P_{\max}/P_0$ ）

表 4.3-5 最大ネット反応度のまとめ

| Na ボイド反応度 <sup>1)</sup> | 1,000℃ <sup>2)</sup> | 1,200℃ <sup>2)</sup> | 1,250℃ <sup>2)</sup> |
|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 8 \$                    | 0.495 <sup>3)</sup>  | 0.742                | 0.835                |
| 10 \$                   | -                    | 0.809                | 0.879                |
| 12 \$                   | -                    | 0.900                | 0.930                |

1), 2) 表 4.3-4 に同じ, 3) 最大ネット反応度（\$）

表 4.3-6 被覆管破損孔の大きさの影響

| 被覆管破損孔面積            | 最大出力               | 燃料移動反応度投入率 |
|---------------------|--------------------|------------|
| 基準ケース <sup>1)</sup> | 3.46 <sup>2)</sup> | 約-12\$/s   |
| 基準ケースの 50%          | 3.48               | 約-12\$/s   |
| 基準ケースの 10%          | 8.20               | 約-8\$/s    |

1) 被覆管破損孔面積が冷却材流路断面積の 25%, 2) 最大出力の定格出力比（ $P_{\max}/P_0$ ）

表 4.3-7 同時性評価の結果

|                     | 最大出力               | 最大出力比             | 最大ネット反応度(\$) | 最大冷却材反応度(\$) |
|---------------------|--------------------|-------------------|--------------|--------------|
| 基準ケース <sup>1)</sup> | 3.46 <sup>2)</sup> | 1.0 <sup>3)</sup> | 0.668        | 5.12         |
| ケース 1               | 4.91               | 1.42              | 0.749        | 5.16         |
| ケース 2               | 10.1               | 2.92              | 0.825        | 6.29         |
| ケース 3               | 39.0               | 11.3              | 0.933        | 6.71         |

1) Na ボイド反応度 8\$,被覆管破損条件 1,200℃

2) 最大出力の定格出力比（ $P_{\max}/P_0$ ）

3) 基準ケースとケース 1～3 の最大出力の比



表 4.3-8 中型炉心の主な炉心仕様

| 項目          | 値                               |
|-------------|---------------------------------|
| 定格時熱出力      | 1,190 MW                        |
| 燃料要素数       | 169 本／集合体                       |
| ラッパ管内対面距離   | 152.2 mm                        |
| ラッパ管肉厚      | 5.0 mm                          |
| 集合体配列ピッチ    | 166.0 mm                        |
| ハンドリングヘッド内径 | 117 mm                          |
| 炉心部発熱高さ     | 100 cm                          |
| 上部軸ブランケット   | 無し                              |
| 下部軸ブランケット   | 無し                              |
| 集合体構造概念     | 図 4.3-9 参照                      |
| ラッパ管材質      | PNC-FMS 鋼                       |
| 被覆管材質       | ODS 鋼                           |
| 被覆管外径       | IC 9.2mm, MC 9.7mm, OC 10.3mm   |
| 被覆管肉厚       | IC 0.54mm, MC 0.57mm, OC 0.61mm |
| 燃料ピン配列ピッチ   | 11.6 mm                         |

表 4.3-9 炉心体積割合

|           | 体積割合 (%) |      |      |
|-----------|----------|------|------|
|           | 燃料       | 構造材  | 冷却材  |
| 内側炉心 (IC) | 27.5     | 21.8 | 41.5 |
| 中間炉心 (MC) | 30.6     | 23.0 | 36.3 |
| 外側炉心 (OC) | 34.4     | 24.6 | 29.6 |

表 4.3-10 反応度係数

|           | ドップラ       | 冷却材                                    | 燃料        | 構造材        |
|-----------|------------|----------------------------------------|-----------|------------|
| 内側炉心 (IC) | -1.526E-03 | -1.286E-02                             | 1.188E-01 | -2.529E-02 |
| 中間炉心 (MC) | -1.185E-03 | -8.871E-03                             | 1.039E-01 | -2.109E-02 |
| 外側炉心 (OC) | -1.185E-03 | -5.389E-03                             | 1.373E-01 | -1.665E-02 |
| [単位]      | [ Tdk/dT ] | [ $\Delta k/k' / \Delta \rho / \rho$ ] |           |            |

表 4.3-11 Na ボイド反応度 (\$) の分布

| 集合体数                     | 内側 1<br>19 | 内側 2<br>39 | 中間<br>60 | 外側<br>138 | 合計<br>256 |
|--------------------------|------------|------------|----------|-----------|-----------|
| GP <sup>1)</sup> (>20cm) | -0.0191    | -0.0377    | -0.0499  | -0.0671   | -0.1738   |
| GP (20cm)                | -0.0305    | -0.0613    | -0.0878  | -0.1083   | -0.2878   |
| ドライバ燃料領域                 | 1.2074     | 2.1264     | 2.3586   | 1.4723    | 7.1647    |
| 下部遮蔽(20cm)               | -0.0073    | -0.0139    | -0.0253  | -0.0402   | -0.0868   |
| 下部遮蔽(<20cm)              | 0.0022     | 0.0028     | -0.0003  | -0.0031   | 0.0016    |

1) 上部ガスペナム (GP)

表 4.3-12 内側炉心の出力・流量

| 内側炉心 |            |              |                    |       |
|------|------------|--------------|--------------------|-------|
|      | 出力<br>(MW) | 流量<br>(kg/s) | P/F<br>(MJ/kg) (-) |       |
| 1    | 6.10       | 25.1         | 0.243              | 1.237 |
| 2    | 5.83       | 25.1         | 0.232              | 1.183 |
| 3    | 5.97       | 25.1         | 0.238              | 1.211 |
| 4    | 5.82       | 25.1         | 0.232              | 1.181 |
| 5    | 5.70       | 25.1         | 0.227              | 1.156 |
| 6    | 5.88       | 25.1         | 0.234              | 1.193 |
| 7    | 5.89       | 25.1         | 0.235              | 1.195 |
| 8    | 5.45       | 23.9         | 0.228              | 1.161 |
| 9    | 5.62       | 23.9         | 0.235              | 1.197 |
| 10   | 5.64       | 23.9         | 0.236              | 1.202 |
| 11   | 5.61       | 23.9         | 0.235              | 1.195 |
| 12   | 5.75       | 23.9         | 0.241              | 1.225 |
| 13   | 5.17       | 22.9         | 0.226              | 1.149 |
| 14   | 5.39       | 22.9         | 0.235              | 1.198 |
| 15   | 5.44       | 22.9         | 0.238              | 1.210 |
| 16   | 5.13       | 22.9         | 0.224              | 1.141 |
| 17   | 5.18       | 22.9         | 0.226              | 1.152 |
| 18   | 5.25       | 22.9         | 0.229              | 1.167 |
| 19   | 5.53       | 22.9         | 0.241              | 1.230 |
| 20   | 5.44       | 22.9         | 0.238              | 1.210 |

表 4.3-13 中間炉心の出力・流量

| 中間炉心 |            |              |                    |       |
|------|------------|--------------|--------------------|-------|
|      | 出力<br>(MW) | 流量<br>(kg/s) | P/F<br>(MJ/kg) (-) |       |
| 21   | 5.45       | 25.3         | 0.215              | 1.097 |
| 22   | 5.73       | 25.3         | 0.226              | 1.153 |
| 23   | 5.51       | 25.3         | 0.218              | 1.109 |
| 24   | 5.58       | 25.3         | 0.221              | 1.123 |
| 25   | 5.25       | 25.3         | 0.208              | 1.057 |
| 26   | 5.71       | 25.3         | 0.226              | 1.149 |
| 27   | 5.92       | 25.3         | 0.234              | 1.191 |
| 28   | 5.68       | 25.3         | 0.225              | 1.143 |
| 29   | 4.71       | 23.5         | 0.200              | 1.020 |
| 30   | 5.11       | 23.5         | 0.217              | 1.107 |
| 31   | 5.37       | 23.5         | 0.229              | 1.163 |
| 32   | 5.43       | 23.5         | 0.231              | 1.176 |
| 33   | 5.10       | 23.5         | 0.217              | 1.105 |
| 34   | 5.17       | 23.5         | 0.220              | 1.120 |
| 35   | 4.86       | 23.5         | 0.207              | 1.053 |
| 36   | 5.11       | 23.5         | 0.217              | 1.107 |
| 37   | 5.19       | 23.5         | 0.221              | 1.124 |
| 38   | 5.42       | 23.5         | 0.231              | 1.174 |
| 39   | 5.36       | 23.5         | 0.228              | 1.161 |
| 40   | 5.07       | 23.5         | 0.216              | 1.098 |

全炉心      1190      6059      0.196

表 4.3-14 外側炉心の出力・流量(1)

| Ring No. | Row No. | Ser. No. | Power (MW) | Flow (kg/s) | P/F (MJ/kg) (-) |       | ch. No. |
|----------|---------|----------|------------|-------------|-----------------|-------|---------|
| 1        | 1       | 1        | 4.35       | 25.70       | 0.169           | 0.862 | 43      |
| 1        | 2       | 2        | 4.98       | 25.70       | 0.194           | 0.987 | 41      |
| 1        | 3       | 3        | 5.34       | 25.70       | 0.208           | 1.058 | 41      |
| 1        | 4       | 4        | 5.09       | 25.70       | 0.198           | 1.008 | 41      |
| 1        | 5       | 5        | 5.29       | 25.70       | 0.206           | 1.048 | 41      |
| 1        | 6       | 6        | 5.21       | 25.70       | 0.203           | 1.032 | 41      |
| 1        | 7       | 7        | 4.78       | 25.70       | 0.186           | 0.947 | 42      |
| 1        | 8       | 8        | 4.43       | 25.70       | 0.172           | 0.878 | 43      |
| 1        | 9       | 9        | 4.72       | 25.70       | 0.184           | 0.935 | 42      |
| 1        | 10      | 10       | 5.30       | 25.70       | 0.206           | 1.050 | 41      |
| 1        | 11      | 11       | 5.21       | 25.70       | 0.203           | 1.032 | 41      |
| 1        | 12      | 12       | 5.06       | 25.70       | 0.197           | 1.002 | 41      |
| 1        | 13      | 13       | 5.13       | 25.70       | 0.200           | 1.016 | 41      |
| 1        | 14      | 14       | 4.98       | 25.70       | 0.194           | 0.987 | 41      |

表 4.3-15 外側炉心の出力・流量(2)

| Ring No. | Row No. | Ser. No. | Power (MW) | Flow (kg/s) | P/F<br>(MJ/kg)    (-) |       | ch. No. |
|----------|---------|----------|------------|-------------|-----------------------|-------|---------|
| 2        | 1       | 15       | 3.11       | 21.70       | 0.143                 | 0.730 | 44      |
| 2        | 2       | 16       | 3.74       | 21.70       | 0.172                 | 0.878 | 43      |
| 2        | 3       | 17       | 3.92       | 21.70       | 0.181                 | 0.920 | 42      |
| 2        | 4       | 18       | 4.26       | 21.70       | 0.196                 | 1.000 | 41      |
| 2        | 5       | 19       | 4.50       | 21.70       | 0.207                 | 1.056 | 41      |
| 2        | 6       | 20       | 4.38       | 21.70       | 0.202                 | 1.028 | 41      |
| 2        | 7       | 21       | 3.91       | 21.70       | 0.180                 | 0.917 | 42      |
| 2        | 8       | 22       | 3.77       | 21.70       | 0.174                 | 0.885 | 43      |
| 2        | 9       | 23       | 3.19       | 21.70       | 0.147                 | 0.748 | 44      |
| 2        | 10      | 24       | 3.66       | 21.70       | 0.169                 | 0.859 | 43      |
| 2        | 11      | 25       | 4.24       | 21.70       | 0.195                 | 0.995 | 41      |
| 2        | 12      | 26       | 4.41       | 21.70       | 0.203                 | 1.035 | 41      |
| 2        | 13      | 27       | 4.23       | 21.70       | 0.195                 | 0.993 | 41      |
| 2        | 14      | 28       | 4.29       | 21.70       | 0.198                 | 1.007 | 41      |
| 2        | 15      | 29       | 4.03       | 21.70       | 0.186                 | 0.946 | 42      |
| 2        | 16      | 30       | 3.57       | 21.70       | 0.165                 | 0.838 | 43      |

表 4.3-16 外側炉心の出力・流量(3)

| Ring No. | Row No. | Ser. No. | Power (MW) | Flow (kg/s) | P/F<br>(MJ/kg)    (-) |       | ch. No. |
|----------|---------|----------|------------|-------------|-----------------------|-------|---------|
| 3        | 1       | 31       | 2.51       | 16.60       | 0.151                 | 0.770 | 44      |
| 3        | 2       | 32       | 2.78       | 16.60       | 0.167                 | 0.853 | 43      |
| 3        | 3       | 33       | 2.89       | 16.60       | 0.174                 | 0.886 | 43      |
| 3        | 4       | 34       | 3.21       | 16.60       | 0.193                 | 0.985 | 41      |
| 3        | 5       | 35       | 3.30       | 16.60       | 0.199                 | 1.012 | 41      |
| 3        | 6       | 36       | 3.06       | 16.60       | 0.184                 | 0.939 | 42      |
| 3        | 7       | 37       | 2.73       | 16.60       | 0.164                 | 0.837 | 43      |
| 3        | 8       | 38       | 2.50       | 16.60       | 0.151                 | 0.767 | 44      |
| 3        | 9       | 39       | 2.44       | 16.60       | 0.147                 | 0.748 | 44      |
| 3        | 10      | 40       | 2.84       | 16.60       | 0.171                 | 0.871 | 43      |
| 3        | 11      | 41       | 3.05       | 16.60       | 0.184                 | 0.935 | 42      |
| 3        | 12      | 42       | 3.28       | 16.60       | 0.198                 | 1.006 | 41      |
| 3        | 13      | 43       | 3.08       | 16.60       | 0.186                 | 0.945 | 42      |
| 3        | 14      | 44       | 3.11       | 16.60       | 0.187                 | 0.954 | 42      |
| 3        | 15      | 45       | 2.68       | 16.60       | 0.161                 | 0.822 | 43      |
| 3        | 16      | 46       | 2.46       | 16.60       | 0.148                 | 0.755 | 44      |

表 4.3-17 燃料破損のイベントタイミング

| Ch No. | P/F<br>(-) | Power<br>(MW) | F Melting<br>(sec.) | Boiling<br>(sec.) | Dryout<br>(sec.) | Broken<br>(sec.) | Disp.<br>(sec.) | C Melt.<br>(sec.) | Power<br>(Po) | Net Reactivity   |             |
|--------|------------|---------------|---------------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|---------------|------------------|-------------|
|        |            |               |                     |                   |                  |                  |                 |                   |               | ( $\Delta\rho$ ) | ( $\beta$ ) |
| 1      | 1.237      | 6.10          | 12.654              | 12.963            | 13.812           | 14.823           | 14.823          | 14.884            | 32.724        | 0.0033           | 0.9473      |
| 3      | 1.211      | 5.97          | 13.076              | 13.329            | 14.231           | 14.847           | 14.847          | 14.928            | 45.301        | 0.0033           | 0.9495      |
| 12     | 1.225      | 5.75          | 13.235              | 13.304            | 14.345           | 14.859           | 14.859          | 14.968            | 17.698        | 0.0030           | 0.8624      |
| 7      | 1.195      | 5.89          | 13.316              | 13.538            | 14.510           | 14.849           | 14.849          |                   | 33.564        | 0.0034           | 0.9628      |
| 6      | 1.193      | 5.88          | 13.346              | 13.566            | 14.558           | 14.849           | 14.849          | 14.959            | 33.564        | 0.0034           | 0.9628      |
| 19     | 1.230      | 5.53          | 13.480              | 13.386            | 14.543           | 14.867           | 14.867          |                   | 5.376         | 0.0020           | 0.5777      |
| 2      | 1.183      | 5.83          | 13.497              | 13.706            | 14.684           | 14.861           | 14.861          |                   | 14.836        | 0.0029           | 0.8289      |
| 4      | 1.181      | 5.82          | 13.527              | 13.735            | 14.702           | 14.866           | 14.866          |                   | 8.421         | 0.0025           | 0.6972      |
| 27     | 1.191      | 5.92          | 13.557              | 13.560            | 14.362           | 14.870           | 14.870          |                   | 5.866         | 0.0020           | 0.5744      |
| 10     | 1.202      | 5.64          | 13.575              | 13.609            | 14.735           | 14.857           | 14.857          |                   | 28.672        | 0.0031           | 0.8894      |
| 9      | 1.197      | 5.62          | 13.637              | 13.668            | 14.820           | 14.876           | 14.876          |                   | 3.405         | 0.0010           | 0.2884      |
| 11     | 1.195      | 5.61          | 13.668              | 13.697            | 14.846           | 14.875           | 14.875          |                   | 4.347         | 0.0014           | 0.4075      |
| 15     | 1.210      | 5.44          | 13.762              | 13.647            | 14.803           | 14.878           | 14.878          |                   | 3.968         | 0.0011           | 0.3065      |
| 20     | 1.210      | 5.44          | 13.762              | 13.647            | 14.803           | 14.878           | 14.878          |                   | 3.968         | 0.0011           | 0.3065      |
| 5      | 1.156      | 5.70          | 13.877              | 14.097            | 14.866           | 14.883           | 14.883          |                   | 2.667         | 0.0001           | 0.0296      |
| 14     | 1.198      | 5.39          | 13.908              | 13.801            | 14.830           | 14.888           | 14.888          |                   | 1.906         | -0.0014          | -0.3864     |
| 22     | 1.153      | 5.73          | 14.076              | 14.108            | 14.973           | 14.988           | 14.988          |                   | 0.337         | -0.0331          | -9.4122     |
| 8      | 1.161      | 5.45          | 14.110              | 14.199            | 15.037           | 15.093           | 15.093          |                   | 0.278         | -0.0409          | -11.6065    |
| 26     | 1.149      | 5.71          | 14.123              | 14.169            | 14.989           | 15.014           | 15.014          |                   | 0.312         | -0.0366          | -10.3952    |
| 28     | 1.143      | 5.68          | 14.189              | 14.265            | 15.007           | 15.089           | 15.089          |                   | 0.280         | -0.0407          | -11.5631    |
| 32     | 1.176      | 5.43          | 14.239              | 14.063            | 14.994           | 15.045           | 15.045          |                   | 0.295         | -0.0389          | -11.0386    |
| 18     | 1.167      | 5.25          | 14.257              | 14.260            | 15.031           | 15.117           | 15.117          |                   | 0.268         | -0.0425          | -12.0719    |
| 38     | 1.174      | 5.42          | 14.258              | 14.094            | 15.000           | 15.077           | 15.077          |                   | 0.283         | -0.0404          | -11.4912    |
| 31     | 1.163      | 5.37          | 14.336              | 14.258            | 15.023           | 15.137           | 15.137          |                   | 0.259         | -0.0442          | -12.5597    |
| 24     | 1.123      | 5.58          | 14.348              | 14.536            | 15.061           | 15.234           | 15.234          |                   | 0.232         | -0.0492          | -13.9639    |
| 39     | 1.161      | 5.36          | 14.350              | 14.289            | 15.029           | 15.143           | 15.143          |                   | 0.257         | -0.0446          | -12.6699    |
| 17     | 1.152      | 5.18          | 14.366              | 14.475            | 15.063           |                  |                 |                   |               |                  |             |
| 13     | 1.149      | 5.17          | 14.379              | 14.500            | 15.067           | 15.307           | 15.307          |                   | 0.219         | -0.0510          | -14.4892    |
| 23     | 1.109      | 5.51          | 14.425              | 14.670            | 15.116           |                  |                 |                   |               |                  |             |
| 16     | 1.141      | 5.13          | 14.426              | 14.588            | 15.104           |                  |                 |                   |               |                  |             |
| 21     | 1.097      | 5.45          | 14.477              | 14.749            | 15.127           |                  |                 |                   |               |                  |             |
| 37     | 1.124      | 5.19          | 14.515              | 14.698            | 15.131           |                  |                 |                   |               |                  |             |
| 34     | 1.120      | 5.17          | 14.529              | 14.727            | 15.138           |                  |                 |                   |               |                  |             |
| 30     | 1.107      | 5.11          | 14.568              | 14.797            | 15.163           |                  |                 |                   |               |                  |             |
| 36     | 1.107      | 5.11          | 14.568              | 14.797            | 15.163           |                  |                 |                   |               |                  |             |
| 33     | 1.105      | 5.10          | 14.573              | 14.806            | 15.167           |                  |                 |                   |               |                  |             |
| 40     | 1.098      | 5.07          | 14.589              | 14.831            | 15.180           |                  |                 |                   |               |                  |             |
| 25     | 1.057      | 5.25          | 14.595              | 14.871            | 15.195           |                  |                 |                   |               |                  |             |
| 35     | 1.053      | 4.86          | 14.675              | 14.904            | 15.281           |                  |                 |                   |               |                  |             |
| 41     |            |               | 14.696              | 14.946            | 15.337           |                  |                 |                   |               |                  |             |
| 29     |            |               | 14.714              | 14.931            | 15.326           |                  |                 |                   |               |                  |             |
| 42     |            |               | 14.804              | 15.310            |                  |                  |                 |                   |               |                  |             |
| 43     |            |               | 14.820              |                   |                  |                  |                 |                   |               |                  |             |

表 4.4-1 平成 18 年度レファレンス炉心の主要仕様

| 項目       |                                 | 値             |
|----------|---------------------------------|---------------|
| 炉心・集合体仕様 | 燃料ピン本数                          | 331 本／集合体     |
|          | ラッパ管内対面間距離                      | 176.1 mm      |
|          | ラッパ管肉厚                          | 5.0 mm        |
|          | 集合体配列ピッチ                        | 191.8 mm      |
|          | ハンドリングヘッド内径 <sup>1)</sup>       | 90 mm         |
|          | 炉心高さ                            | 75 mm         |
|          | 上部／下部軸ブランケット                    | 無し／無し         |
|          | 燃料 Zr 含有率 [内側炉心／外側炉心]           | 10wt％／6wt％    |
|          | 燃料スミア密度 [内側炉心／外側炉心]             | 75％／75％       |
|          | 集合体構造概念                         | 図 4.4-1       |
|          | ラッパ管材質                          | PNC-FMS 鋼     |
|          | 被覆管材質                           | ODS 鋼         |
|          | 被覆管外径／被覆管肉厚                     | 8.5 mm／0.5 mm |
|          | 燃料ピン配列ピッチ                       | 9.55 mm       |
|          | 燃料集合体各領域の体積割合 <sup>2)</sup>     | 表 4.4-2       |
|          | 燃料スラグ、構造材及び冷却材の密度 <sup>2)</sup> | 表 4.4-3       |
|          | 炉心熱出力                           | 3,530 MW      |
| 核特性      | 集合体内径方向出力ピーキング係数 <sup>3)</sup>  | 表 4.4-4       |
|          | 遅発中性子                           | 表 4.4-5       |
|          | 即発中性子                           |               |

1) 大型 MOX 燃料炉心の仕様

2) ドップラ係数、密度係数の単位換算で使用した値

3) 平衡サイクル末期での最大線出力発生時点

表 4.4-2 燃料集合体各領域の体積割合 [平成 18 年度レファレンス炉心]

| 領 域      |      | 体積割合(%) *1 |      |         |
|----------|------|------------|------|---------|
|          |      | 燃料         | 構造材  | 冷却材     |
| 上部ガスプレナム | 内側炉心 | －          | 23.7 | 30.4 *2 |
|          | 外側炉心 | －          | 23.7 | 30.4 *2 |
| 炉心       | 内側炉心 | 34.2       | 23.7 | 30.4 *2 |
|          | 外側炉心 | 34.2       | 23.7 | 30.4 *2 |
| 下部遮へい体   |      | －          | 70.0 | 30.0    |

\*1 集合体セル面積…………… 318.6cm<sup>2</sup>

\*2 ラッパ管間ギャップ冷却材体積割合・ 5.9%

表 4.4-3 燃料スラグ、構造材及び冷却材の密度 [平成 18 年度レファレンス炉心]

| 項 目   |      | 密度 (g/cc) |
|-------|------|-----------|
| 燃料スラグ | 内側炉心 | 15.80     |
|       | 外側炉心 | 16.89     |
| 構造材   |      | 7.87      |
| 冷却材   |      | 0.849     |

表 4.4-4 集合体内径方向出力ピーキング係数

([平成 18 年度レファレンス炉心、平衡サイクル末期での最大線出力発生時点])

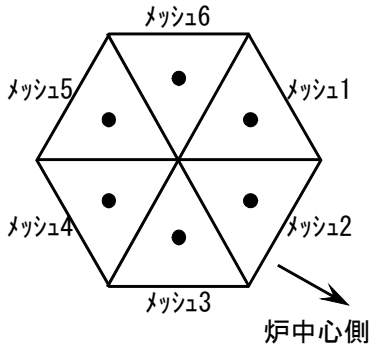
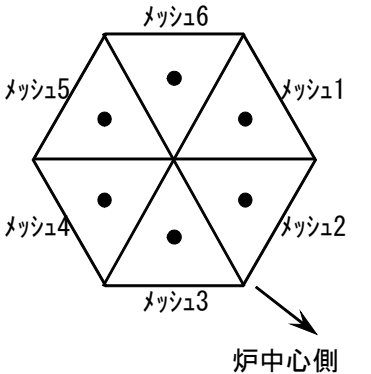
| メッシュNo. | 内側炉心                                                                                | 外側炉心                                                                                 |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | 1.010                                                                               | 1.006                                                                                |
| 2       | 1.008                                                                               | 1.006                                                                                |
| 3       | 0.994                                                                               | 1.001                                                                                |
| 4       | 0.987                                                                               | 0.993                                                                                |
| 5       | 0.993                                                                               | 0.995                                                                                |
| 6       | 1.008                                                                               | 1.001                                                                                |
| メッシュ位置  |  |  |



表 4.4-5 動特性パラメータ [平成 18 年度レファレンス炉心、平衡サイクル末期]

| 項目                        |                     | 値        |
|---------------------------|---------------------|----------|
| 即発中性子寿命 ( $10^{-6}$ sec)  |                     | 0.261    |
| 遅発中性子割合                   | $\beta 1$           | 8.12E-05 |
|                           | $\beta 2$           | 7.18E-04 |
|                           | $\beta 3$           | 6.63E-04 |
|                           | $\beta 4$           | 1.33E-03 |
|                           | $\beta 5$           | 6.39E-04 |
|                           | $\beta 6$           | 2.02E-04 |
|                           | $\beta \text{ eff}$ | 3.63E-03 |
| 遅発中性子先行核崩壊定数 ( $s^{-1}$ ) | $\lambda 1$         | 1.30E-02 |
|                           | $\lambda 2$         | 3.14E-02 |
|                           | $\lambda 3$         | 1.36E-01 |
|                           | $\lambda 4$         | 3.47E-01 |
|                           | $\lambda 5$         | 1.38E+00 |
|                           | $\lambda 6$         | 3.83E+00 |

表 4.4-6 流量配分領域ごとの Na ボイド反応度分担マップ

|    | 流量配分領域 集合体数(全数) |       |      |      |       |      |      | 核計算   | 反応度分担   |
|----|-----------------|-------|------|------|-------|------|------|-------|---------|
|    | 1               | 2     | 3    | 4    | 5     | 6    | 7    | 集合体合計 | 割合(/SA) |
| 1  | 12              |       |      |      |       |      |      | 12    | 0.738%  |
| 2  | 18              |       |      |      |       |      |      | 18    | 0.514%  |
| 3  | 18              | 6     |      |      |       |      |      | 24    | 0.368%  |
| 4  | 6               | 18    |      |      |       |      |      | 24    | 0.349%  |
| 5  | 15              | 21    |      |      |       |      |      | 36    | 0.243%  |
| 6  | 18              | 18    |      |      |       |      |      | 36    | 0.249%  |
| 7  |                 |       | 24   | 9    | 15    |      |      | 48    | 0.201%  |
| 8  |                 |       | 21   | 13   | 20    |      |      | 54    | 0.167%  |
| 9  |                 |       | 3    | 18   | 19    | 5    |      | 45    | 0.174%  |
| 10 |                 |       |      | 6    | 12    | 6    |      | 24    | 0.314%  |
| 11 |                 |       |      |      | 20    | 52   |      | 72    | 0.091%  |
| 12 |                 |       |      |      |       | 13   | 65   | 78    | 0.057%  |
| 13 |                 |       |      |      |       |      | 12   |       |         |
| 合計 | 87              | 63    | 48   | 46   | 86    | 76   | 77   |       |         |
| 寄与 | 35.0%           | 18.1% | 8.9% | 9.0% | 15.3% | 8.2% | 3.7% |       |         |
| 合計 | 98.1%           |       |      |      |       |      |      |       |         |

表 4.4-7 P/F 判断基準に対応する破損集合体数と Na ボイド反応度寄与率

| 流量配分領域 集合体数 (P/F $\geq$ 1.00) |       |       |      |      |       |      |      | 流量配分領域 集合体数 (P/F $\geq$ 1.010) |       |       |      |      |       |      |      |
|-------------------------------|-------|-------|------|------|-------|------|------|--------------------------------|-------|-------|------|------|-------|------|------|
|                               | 1     | 2     | 3    | 4    | 5     | 6    | 7    |                                | 1     | 2     | 3    | 4    | 5     | 6    | 7    |
| 1                             | 0     |       |      |      |       |      |      | 1                              | 0     |       |      |      |       |      |      |
| 2                             | 18    |       |      |      |       |      |      | 2                              | 15    |       |      |      |       |      |      |
| 3                             | 9     |       |      |      |       |      |      | 3                              | 5     |       |      |      |       |      |      |
| 4                             | 1     | 6     |      |      |       |      |      | 4                              | 1     | 6     |      |      |       |      |      |
| 5                             | 12    | 18    |      |      |       |      |      | 5                              | 9     | 18    |      |      |       |      |      |
| 6                             | 17    | 21    |      |      |       |      |      | 6                              | 15    | 21    |      |      |       |      |      |
| 7                             |       | 18    | 21   | 9    | 15    |      |      | 7                              |       | 18    | 21   | 9    | 15    |      |      |
| 8                             |       |       | 21   | 13   | 20    |      |      | 8                              |       |       | 18   | 13   | 20    |      |      |
| 9                             |       |       | 3    | 18   | 19    | 5    |      | 9                              |       |       | 3    | 15   | 19    | 5    |      |
| 10                            |       |       |      | 3    | 12    | 6    |      | 10                             |       |       |      | 3    | 12    | 6    |      |
| 11                            |       |       |      |      | 14    | 46   |      | 11                             |       |       |      |      | 14    | 46   |      |
| 12                            |       |       |      |      |       | 0    | 22   | 12                             |       |       |      |      |       | 0    | 18   |
| 13                            |       |       |      |      |       |      | 0    | 13                             |       |       |      |      |       |      | 0    |
| 寄与                            | 20.1% | 15.3% | 8.3% | 8.1% | 14.7% | 7.0% | 1.2% | 寄与                             | 15.8% | 15.3% | 7.8% | 7.5% | 14.7% | 7.0% | 1.0% |
| 合計                            | 74.6% |       |      |      |       |      |      | 合計                             | 69.1% |       |      |      |       |      |      |

| 流量配分領域 集合体数 (P/F $\geq$ 1.015) |       |       |      |      |       |      |      | 流量配分領域 集合体数 (P/F $\geq$ 1.020) |       |       |      |      |       |      |      |
|--------------------------------|-------|-------|------|------|-------|------|------|--------------------------------|-------|-------|------|------|-------|------|------|
|                                | 1     | 2     | 3    | 4    | 5     | 6    | 7    |                                | 1     | 2     | 3    | 4    | 5     | 6    | 7    |
| 1                              | 0     |       |      |      |       |      |      | 1                              | 0     |       |      |      |       |      |      |
| 2                              | 10    |       |      |      |       |      |      | 2                              | 7     |       |      |      |       |      |      |
| 3                              | 4     |       |      |      |       |      |      | 3                              | 2     |       |      |      |       |      |      |
| 4                              | 1     | 6     |      |      |       |      |      | 4                              | 1     | 6     |      |      |       |      |      |
| 5                              | 9     | 18    |      |      |       |      |      | 5                              | 8     | 18    |      |      |       |      |      |
| 6                              | 15    | 21    |      |      |       |      |      | 6                              | 15    | 21    |      |      |       |      |      |
| 7                              |       | 18    | 21   | 8    | 15    |      |      | 7                              |       | 18    | 21   | 8    | 15    |      |      |
| 8                              |       |       | 17   | 13   | 20    |      |      | 8                              |       |       | 15   | 13   | 20    |      |      |
| 9                              |       |       | 3    | 13   | 19    | 5    |      | 9                              |       |       | 0    | 12   | 19    | 5    |      |
| 10                             |       |       |      | 3    | 12    | 6    |      | 10                             |       |       |      | 3    | 12    | 6    |      |
| 11                             |       |       |      |      | 14    | 44   |      | 11                             |       |       |      |      | 13    | 41   |      |
| 12                             |       |       |      |      |       | 0    | 17   | 12                             |       |       |      |      |       | 0    | 17   |
| 13                             |       |       |      |      |       |      | 0    | 13                             |       |       |      |      |       |      | 0    |
| 寄与                             | 12.9% | 15.3% | 7.6% | 7.0% | 14.7% | 6.8% | 1.0% | 寄与                             | 10.4% | 15.3% | 6.7% | 6.8% | 14.6% | 6.5% | 1.0% |
| 合計                             | 65.2% |       |      |      |       |      |      | 合計                             | 61.3% |       |      |      |       |      |      |

| 流量配分領域 集合体数 (P/F $\geq$ 1.025) |       |       |      |      |       |      |      |
|--------------------------------|-------|-------|------|------|-------|------|------|
|                                | 1     | 2     | 3    | 4    | 5     | 6    | 7    |
| 1                              | 0     |       |      |      |       |      |      |
| 2                              | 5     |       |      |      |       |      |      |
| 3                              | 1     |       |      |      |       |      |      |
| 4                              | 0     | 6     |      |      |       |      |      |
| 5                              | 3     | 18    |      |      |       |      |      |
| 6                              | 15    | 21    |      |      |       |      |      |
| 7                              |       | 18    | 21   | 8    | 15    |      |      |
| 8                              |       |       | 11   | 13   | 20    |      |      |
| 9                              |       |       | 0    | 12   | 19    | 5    |      |
| 10                             |       |       |      | 3    | 12    | 6    |      |
| 11                             |       |       |      |      | 13    | 40   |      |
| 12                             |       |       |      |      |       | 0    | 14   |
| 13                             |       |       |      |      |       |      | 0    |
| 寄与                             | 7.4%  | 15.3% | 6.1% | 6.8% | 14.6% | 6.4% | 0.8% |
| 合計                             | 57.4% |       |      |      |       |      |      |

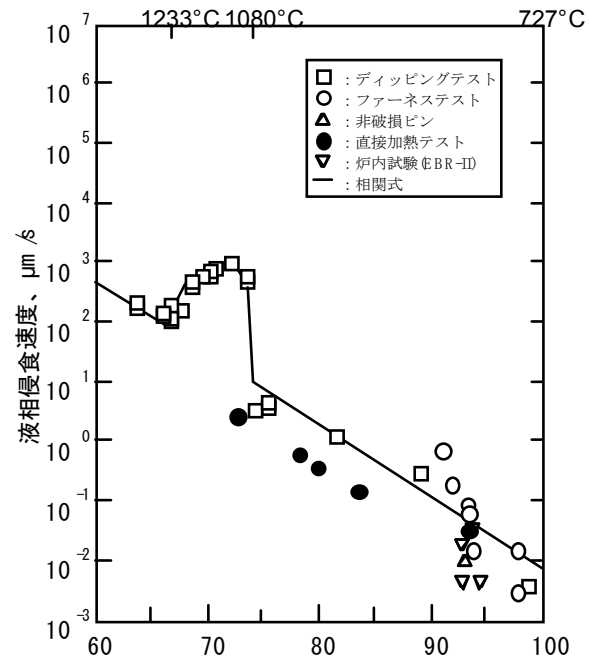


図 4.1-1 高温側の液相浸食試験結果

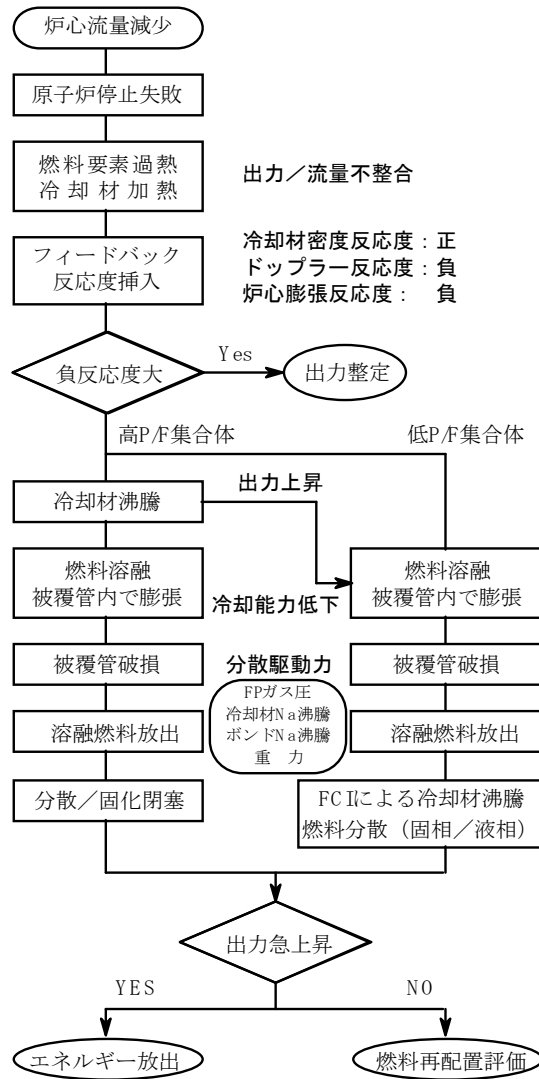


図 4.1-2 金属燃料炉心における ULOF 起因過程の事象推移

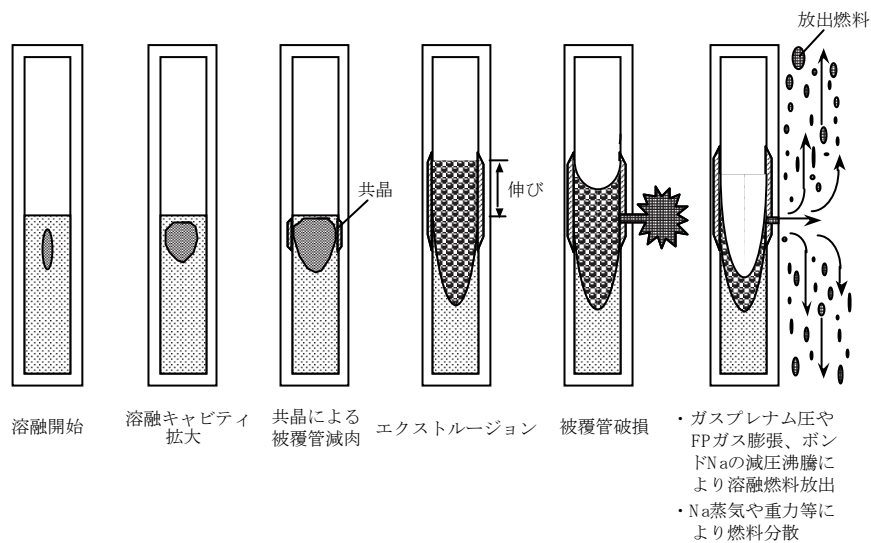


図 4.1-3 ULOF 時の溶融燃料の放出・分散

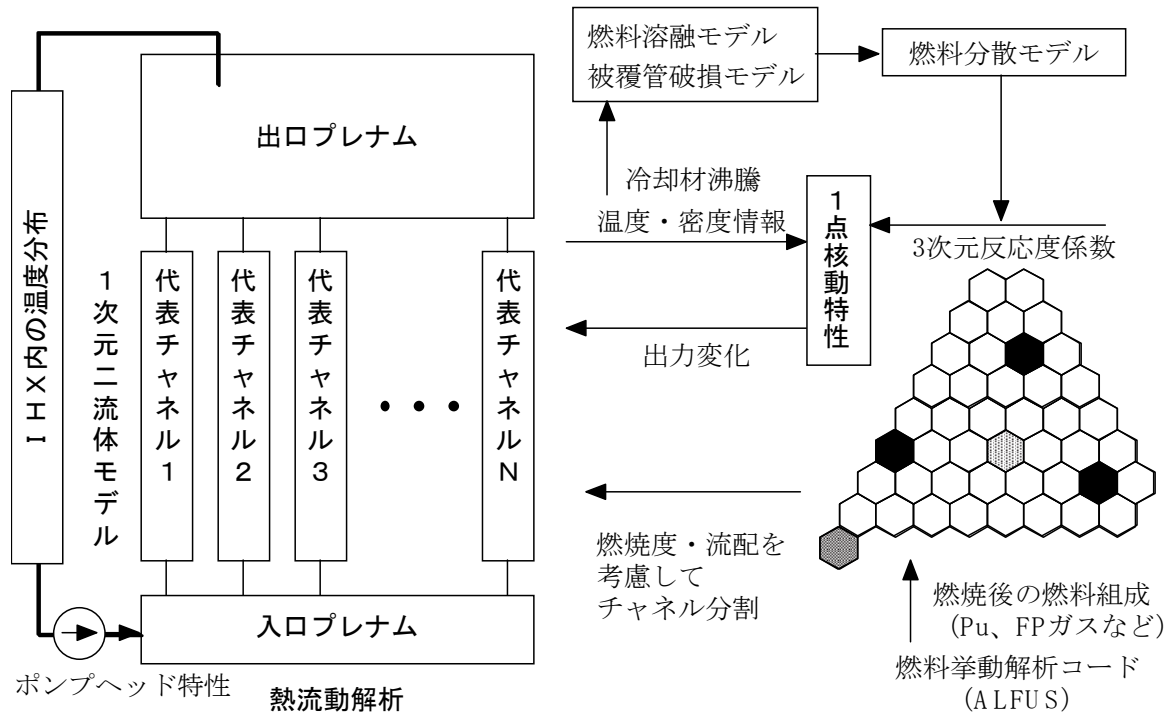


図 4.2-1 金属燃料炉心損傷解析コード CANIS のモデル

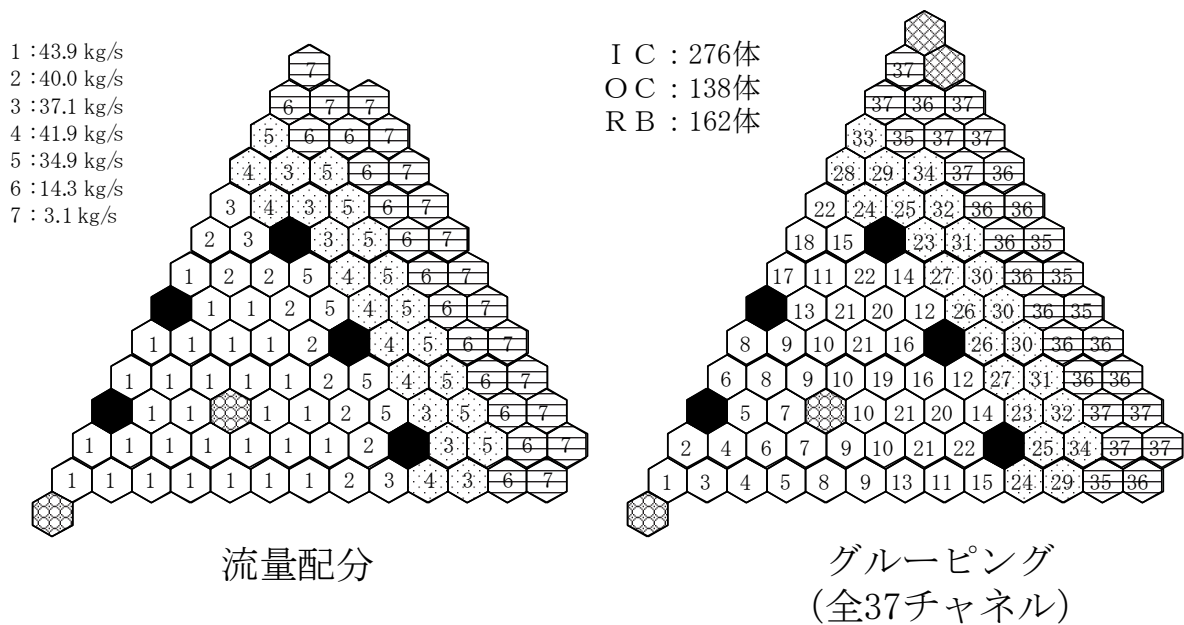


図 4.3-1 CANIS 解析用集合体グルーピング (中型炉心)

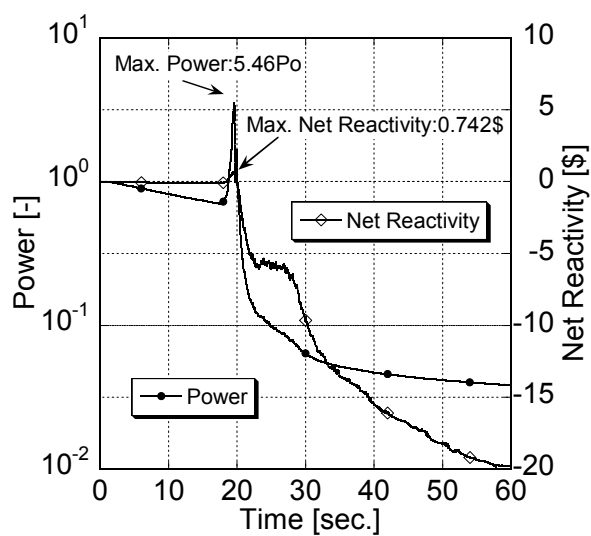


図 4.3-2 基準ケースの出力履歴図

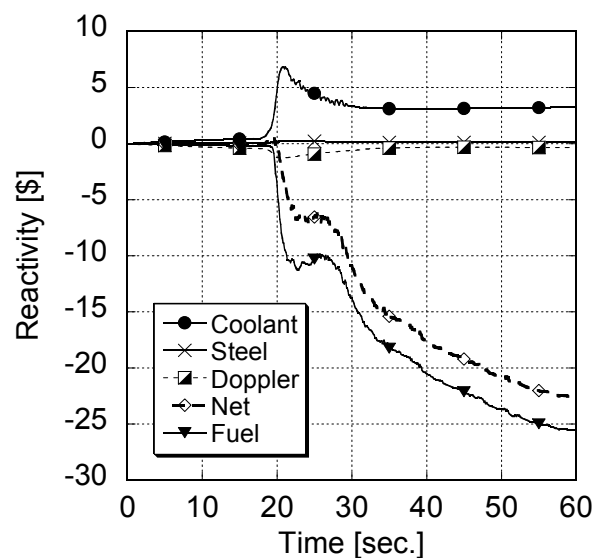


図 4.3-3 基準ケースの反応度履歴

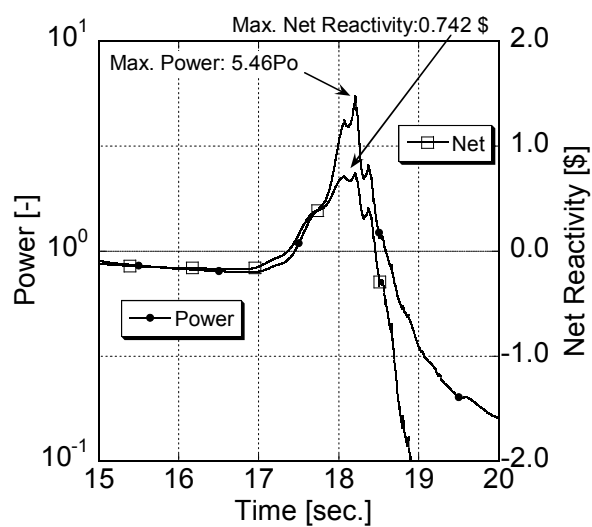
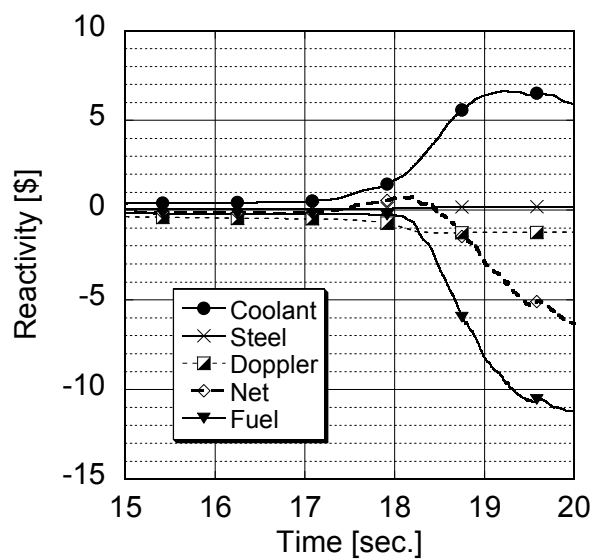


図 4.3-4 基準ケースの反応度履歴


図 4.3-5 基準ケースの反応度履歴  
(ピーク周辺)

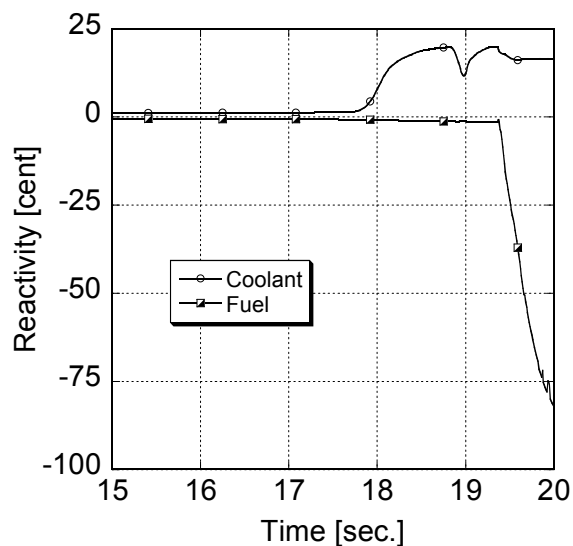


図 4.3-6 代表チャンネル 1 における冷却材と燃料反応度の推移

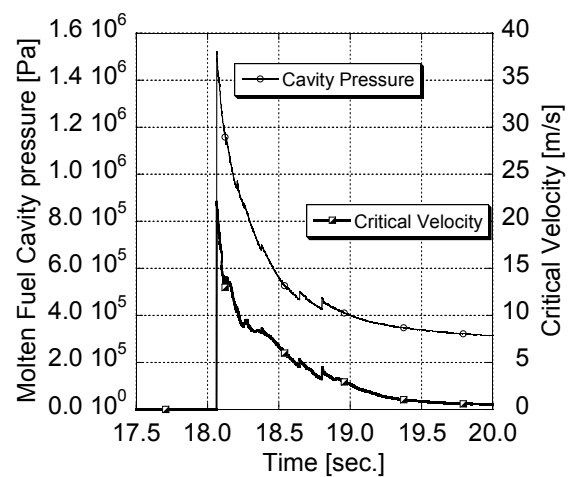


図 4.3-7 代表チャンネル 1 における燃料溶融キャビティ圧力と臨界流速の変化

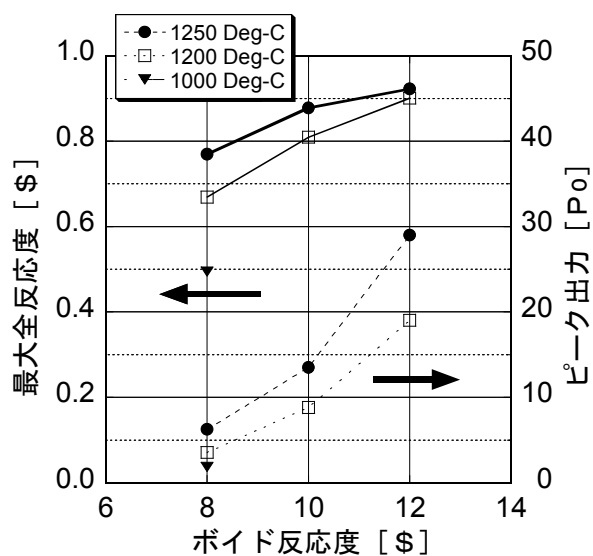


図 4.3-8 起因過程解析結果のまとめ





図 4.3-9 中型炉心の炉心体系 (1/3 炉心)

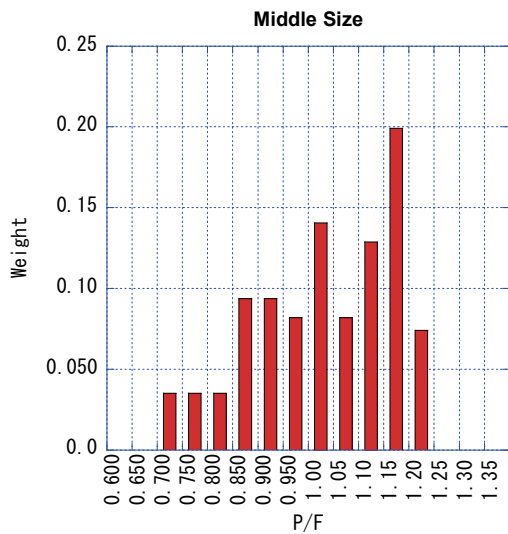


図 4.3-10 (1) 中型炉心の P/F 分布

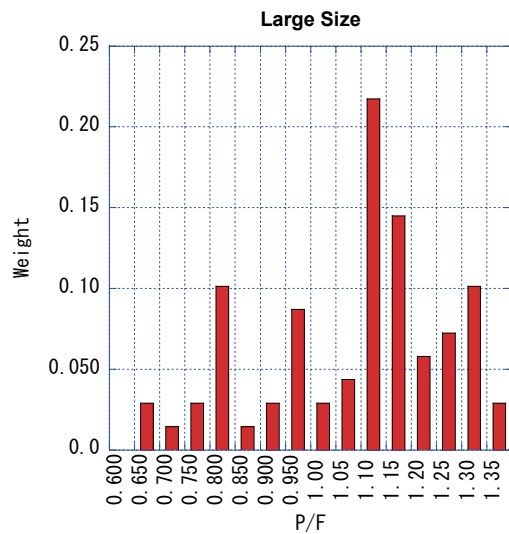


図 4.3-10 (2) 大型炉心の P/F 分布

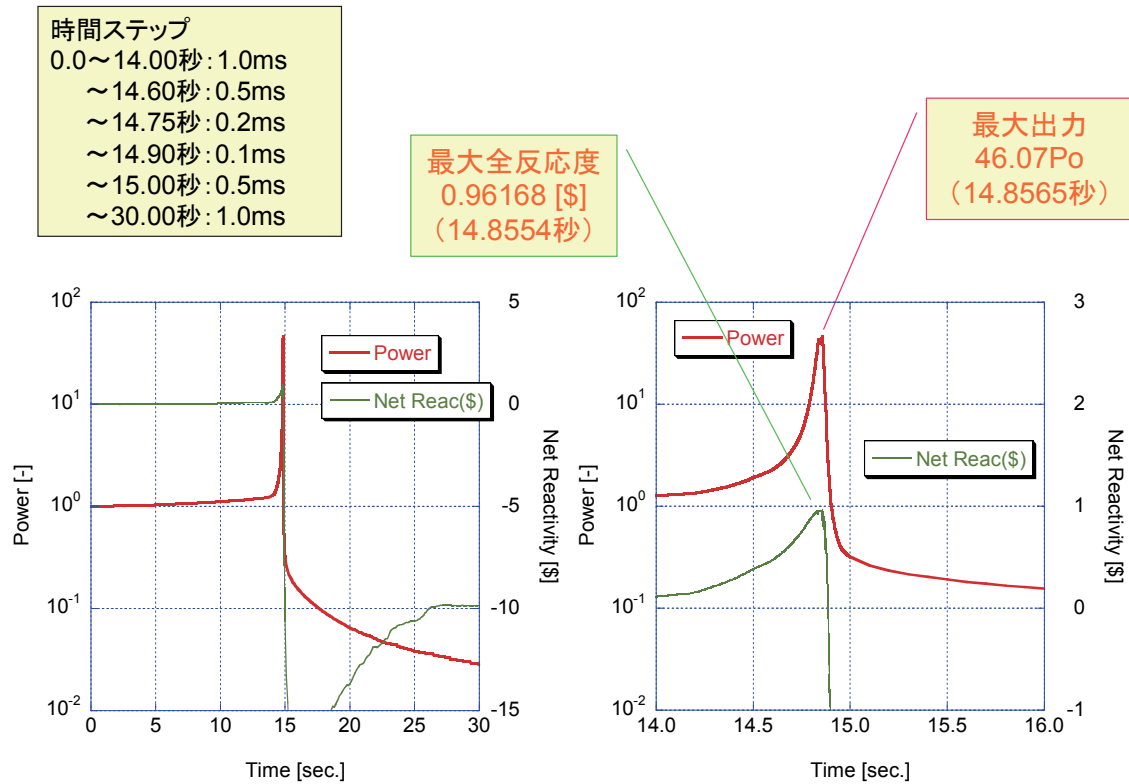


図 4.3-11 解析結果：出力と反応度の推移

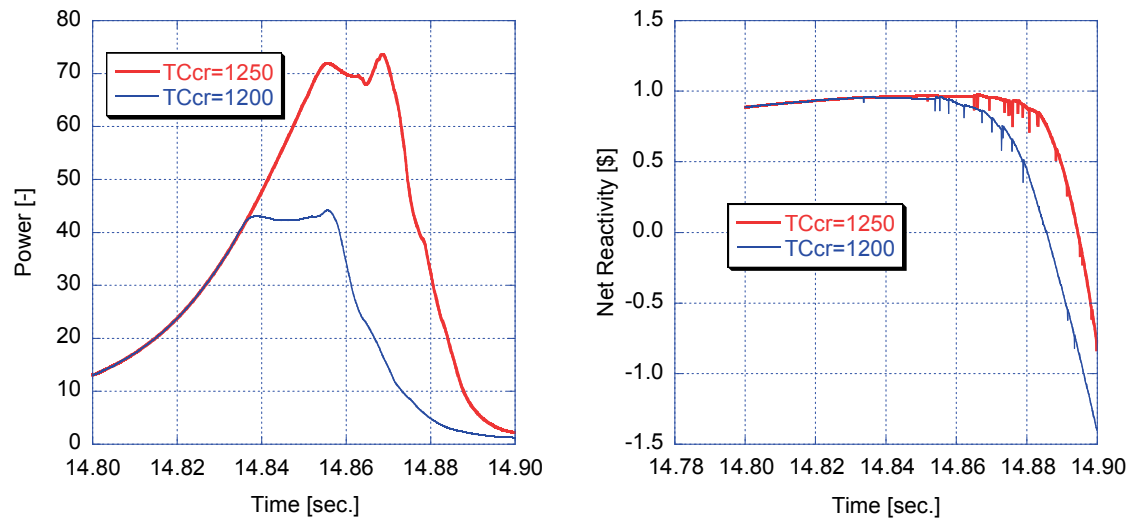


図 4.3-12 解析結果：被覆管破損温度の影響（1）

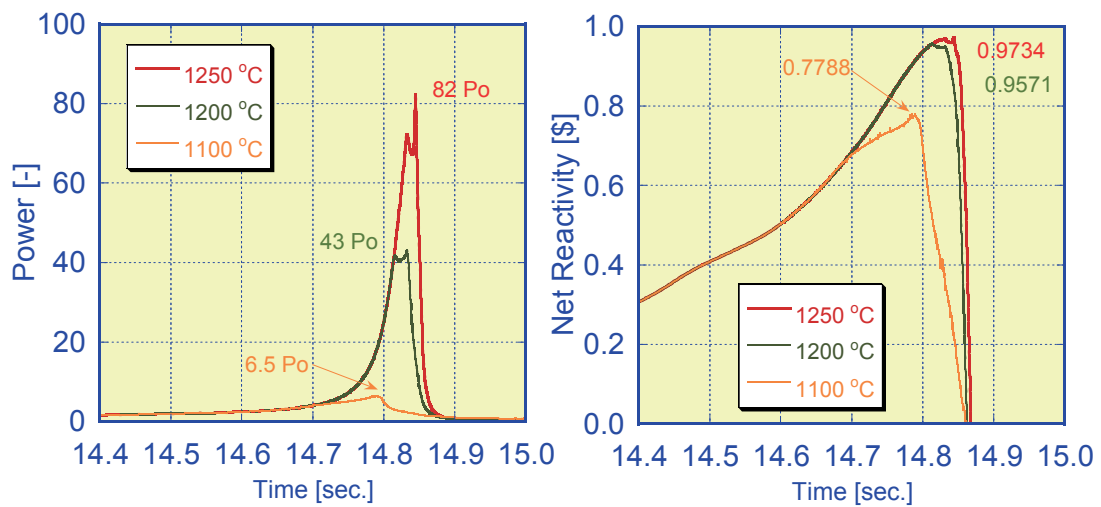


図 4.3-13 解析結果：被覆管破損温度の影響（2）

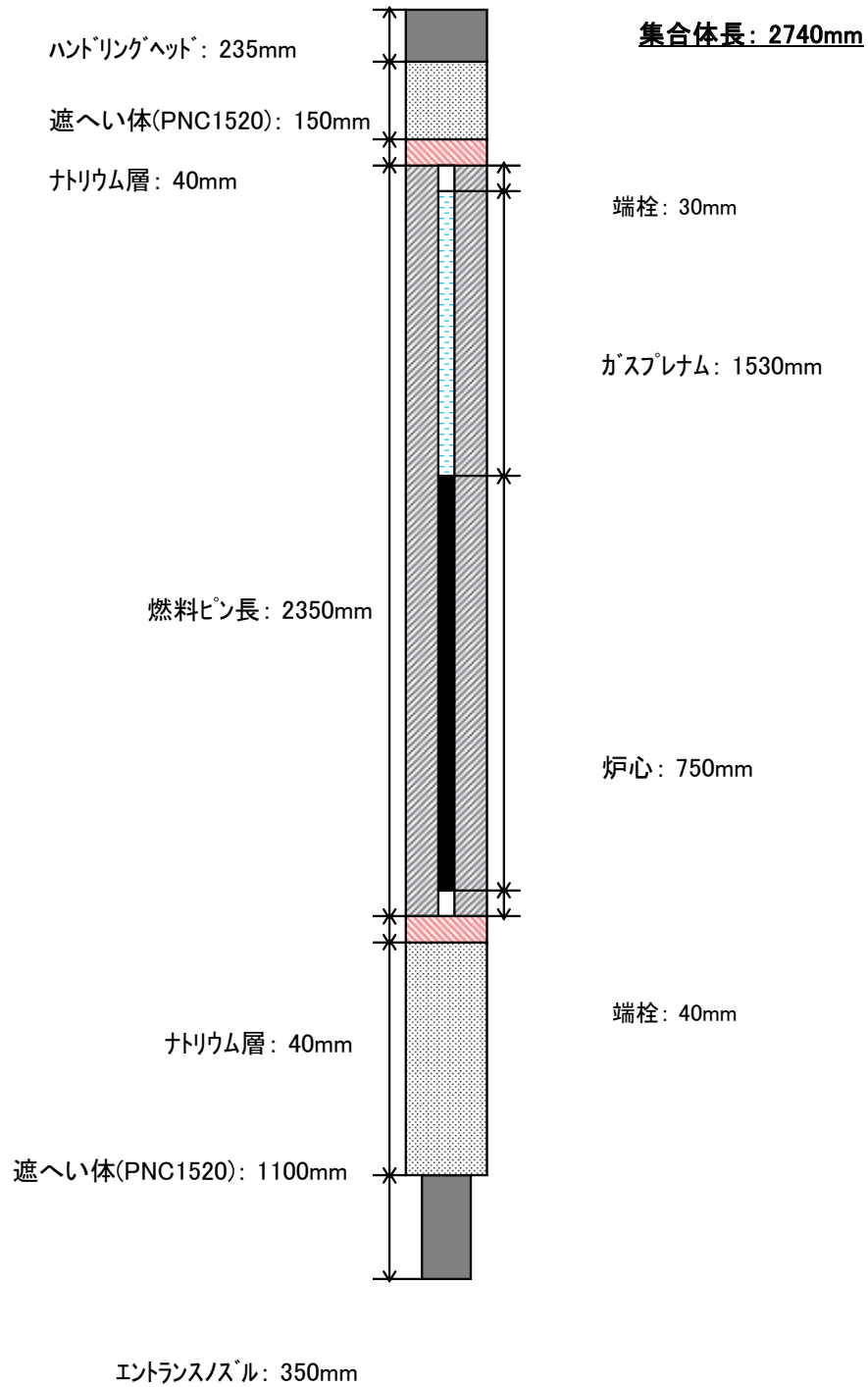


図 4.4-1 平成 18 年度レファレンス炉心の燃料集合体構造概念

|    | F1   | F2   | F3   | F4   | F5  | CA  | Na  |  | F1   | F2   | F3   | F4   | F5   | CA   | Na  |  | F1   | F2   | F3   | F4   | F5   | CA   | Na   |
|----|------|------|------|------|-----|-----|-----|--|------|------|------|------|------|------|-----|--|------|------|------|------|------|------|------|
| 1  | 1110 | 1090 | 1070 | 1040 | 984 | 974 | 956 |  | 1140 | 1120 | 1100 | 1070 | 1010 | 997  | 987 |  | 1480 | 1460 | 1440 | 1390 | 1250 | 1160 | 1160 |
| 2  | 1110 | 1090 | 1070 | 1040 | 973 | 961 | 941 |  | 1150 | 1130 | 1110 | 1080 | 1010 | 999  | 987 |  | 1520 | 1500 | 1470 | 1420 | 1280 | 1180 | 1180 |
| 3  | 1110 | 1090 | 1060 | 1030 | 958 | 944 | 923 |  | 1160 | 1140 | 1120 | 1080 | 1010 | 1000 | 988 |  | 1550 | 1530 | 1500 | 1450 | 1290 | 1190 | 1190 |
| 4  | 1110 | 1080 | 1060 | 1020 | 941 | 926 | 902 |  | 1160 | 1140 | 1120 | 1080 | 1010 | 999  | 987 |  | 1590 | 1560 | 1530 | 1480 | 1310 | 1200 | 1200 |
| 5  | 1100 | 1080 | 1050 | 1000 | 920 | 905 | 879 |  | 1150 | 1130 | 1110 | 1080 | 1020 | 1000 | 992 |  | 1620 | 1590 | 1560 | 1500 | 1320 | 1190 | 1180 |
| 6  | 1090 | 1070 | 1040 | 989  | 897 | 880 | 853 |  | 1150 | 1120 | 1100 | 1070 | 1000 | 991  | 984 |  | 1650 | 1620 | 1590 | 1520 | 1280 | 1130 | 1080 |
| 7  | 1080 | 1050 | 1020 | 969  | 870 | 853 | 824 |  | 1130 | 1110 | 1090 | 1050 | 982  | 970  | 966 |  | 1670 | 1640 | 1600 | 1520 | 1280 | 1130 | 1080 |
| 8  | 1060 | 1030 | 999  | 946  | 842 | 823 | 793 |  | 1120 | 1090 | 1070 | 1030 | 958  | 946  | 944 |  | 1690 | 1650 | 1610 | 1530 | 1280 | 1130 | 1080 |
| 9  | 1040 | 1010 | 974  | 919  | 810 | 791 | 760 |  | 1090 | 1070 | 1040 | 1000 | 931  | 919  | 918 |  | 1680 | 1650 | 1600 | 1520 | 1280 | 1130 | 1090 |
| 10 | 1020 | 986  | 949  | 891  | 776 | 757 | 726 |  | 1070 | 1040 | 1020 | 975  | 900  | 888  | 889 |  | 1670 | 1640 | 1600 | 1520 | 1280 | 1130 | 1090 |
| 11 | 990  | 955  | 917  | 859  | 741 | 722 | 690 |  | 1040 | 1010 | 983  | 942  | 867  | 855  | 857 |  | 1660 | 1620 | 1580 | 1500 | 1280 | 1130 | 1090 |
| 12 | 960  | 925  | 886  | 826  | 704 | 685 | 654 |  | 1010 | 980  | 950  | 908  | 831  | 819  | 823 |  | 1640 | 1610 | 1570 | 1490 | 1270 | 1120 | 1090 |
| 13 | 925  | 888  | 850  | 790  | 667 | 647 | 617 |  | 970  | 941  | 912  | 870  | 793  | 782  | 786 |  | 1610 | 1580 | 1540 | 1470 | 1250 | 1100 | 1070 |
| 14 | 890  | 853  | 814  | 753  | 629 | 610 | 580 |  | 932  | 903  | 873  | 831  | 753  | 743  | 747 |  | 1560 | 1530 | 1500 | 1430 | 1210 | 1060 | 1030 |
| 15 | 852  | 815  | 776  | 715  | 591 | 572 | 544 |  | 890  | 861  | 831  | 789  | 712  | 702  | 707 |  | 1510 | 1490 | 1450 | 1380 | 1160 | 1020 | 997  |
| 16 | 813  | 776  | 738  | 677  | 553 | 536 | 509 |  | 848  | 818  | 789  | 746  | 669  | 660  | 666 |  | 1460 | 1430 | 1400 | 1330 | 1100 | 972  | 954  |
| 17 | 772  | 736  | 698  | 638  | 517 | 500 | 475 |  | 803  | 774  | 744  | 702  | 626  | 618  | 625 |  | 1400 | 1370 | 1340 | 1270 | 1040 | 919  | 911  |
| 18 | 731  | 695  | 658  | 600  | 481 | 466 | 442 |  | 757  | 728  | 699  | 657  | 583  | 576  | 584 |  | 1330 | 1300 | 1270 | 1200 | 972  | 860  | 862  |
| 19 | 689  | 655  | 618  | 563  | 447 | 433 | 411 |  | 710  | 681  | 652  | 610  | 541  | 535  | 542 |  | 1250 | 1220 | 1180 | 1110 | 893  | 791  | 804  |
| 20 | 646  | 614  | 579  | 526  | 415 | 402 | 382 |  | 661  | 632  | 603  | 563  | 495  | 490  | 499 |  | 1150 | 1120 | 1080 | 1010 | 800  | 710  | 735  |

12.9秒  
冷却材沸騰開始

13.8秒  
ドライアウト開始

14.8335秒  
燃料分散開始

凡例 F1~F5: 燃料径方向ノード  
CA: 被覆管ノード  
Na: 冷却材ノード  
i(1 ≤ i ≤ 15(20)): 軸方向ノード番号 (i=1: 炉心上端、i=15(20): 炉心下端)

温度(°C)

燃料未溶融  
燃料溶融  
被覆管未破損  
被覆管破損  
冷却材未沸騰  
冷却材沸騰

図 4.4-2 中型炉心の破損進展（抜粋：先行破損チャンネル）

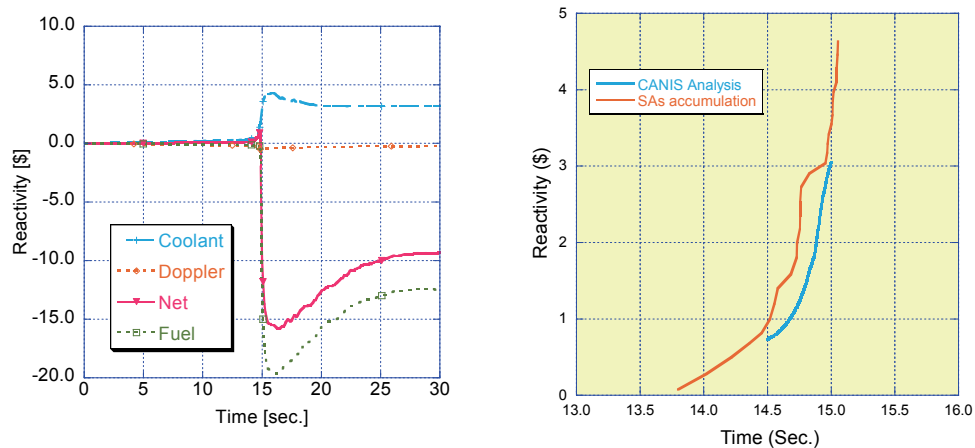


図 4.4-3 反応度変化（左）とチャンネル保有ボイド反応度値の比較（右）

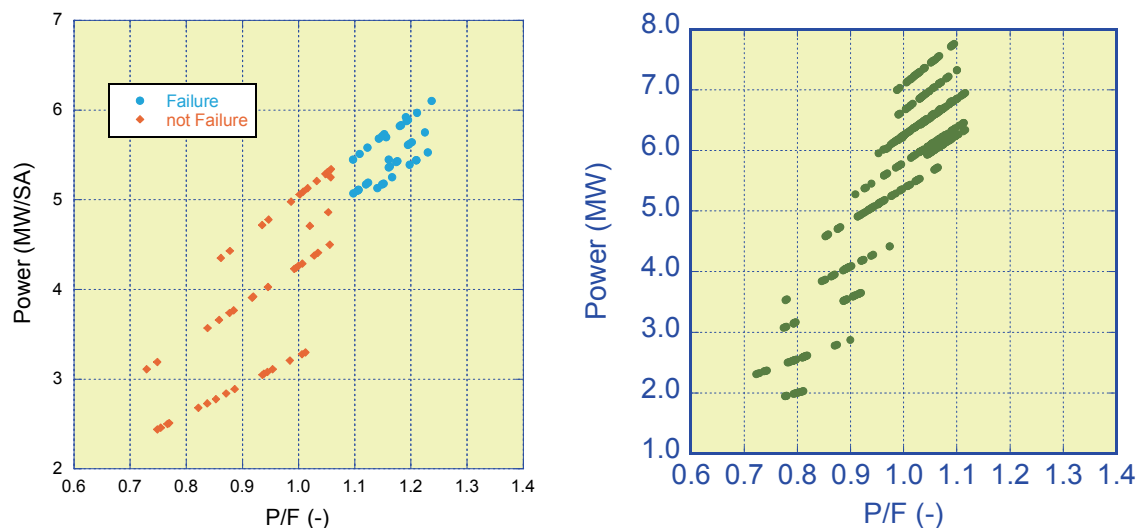


図 4.4-4 集合体分布：中型炉心の破損／非破損集合体分布（左図）、レファレンス炉心（右図）

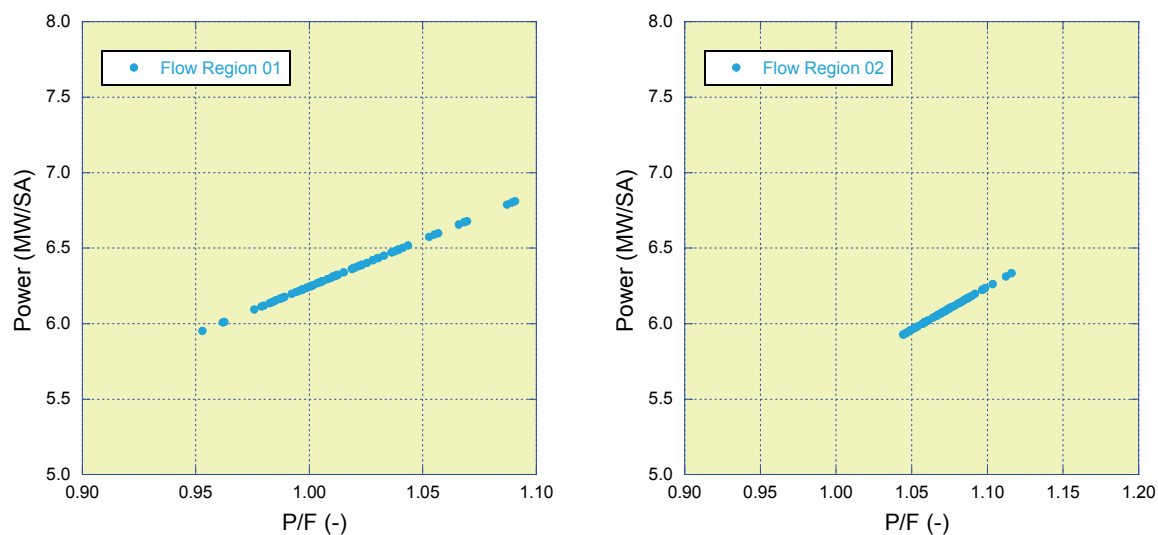


図 4.4-5 レファレンス炉心の流量配分領域ごとの集合体分布  
領域 1（左図）、領域 2（右図）

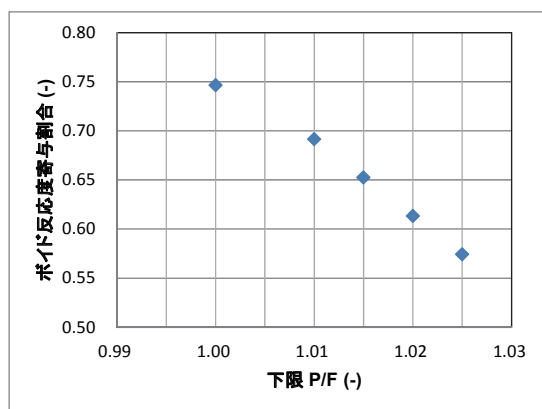


図 4.4-6 下限 P/F と Na ボイド反応度投入量の関係

## 5. 金属燃料炉心の開発課題の検討

これまで金属燃料炉心設計について、FaCT レファレンス炉心を対象に炉心特性、安全性等の検討が行われてきた。本章では、金属燃料炉心の我が国における実用化に向けて必要となる研究開発課題として、第 5.1 節に金属燃料オープンコア照射試験の検討について、第 5.2 節にこれまでの検討結果を整理するとともに今後の検討課題について報告する。

### 5.1 オープンコア照射試験の検討

現在、原子力機構と電中研は、金属燃料ピン被覆管内面温度 600℃以上における健全性確認を目的とする、国内で初めてとなる金属燃料の照射試験を、原子力機構の高速実験炉「常陽」において計画している[5.1-1, 5.1-2]。試験燃料ピンとしては、射出鋳造法により製造された U-20Pu-10Zr (wt.%) 合金燃料スラグを燃料要素とするナトリウムボンド型試験燃料ピン 6 本の組立が完了している。これら試験燃料ピンは、今後キャプセル型の B 型照射燃料集合体 (B 型リグ) に組み立てられた後、に装荷しキャプセル型照射燃料集合体による照射試験 (キャプセル照射) を実施する予定である

次フェーズの金属燃料の「常陽」における照射試験として、B 型リグ等を使用した「常陽」炉心燃料としての照射 (オープンコア照射) が考えられる。ここでは、海外における照射実績と上述の計画中のキャプセル照射試験を踏まえて、試験目的、照射条件、試験燃料ピン仕様を暫定的に設定し、許認可および試験燃料製造における課題を摘出した。

#### 5.1.1 試験目的の設定

計画中の金属燃料ピンの「常陽」照射試験 (キャプセル照射) の試験目的が達成されることを前提として、金属燃料の実用化を考える際の課題が、高被覆管内面温度条件 (内面温度 600℃以上) における燃料-被覆管間化学的相互作用 (FCCI) データの拡充と高燃焼度条件 (ピーク燃焼度 15~20at.%) における燃料-被覆管間機械的相互作用 (FCMI) 挙動の確認にあることを考慮すると、次フェーズの照射試験の目的として以下が考えられる。

- a) 実用燃料に近い燃料スラグ長 (50cm) の燃料ピンの高温かつ高燃焼度までの照射データの取得
- b) 実用燃料に近い被覆管温度と局所線出力の組み合わせにおける FCCI データの取得
- c) 設計方法および品質管理方法と組み合わせた国産金属燃料ピンの照射実績の蓄積

上記の他、FCCI 低減効果を期待できるライナー付被覆管の性能確認を目的とした試験も考えられる。ただし、ライナー付被覆管の使用は、ライナーが被覆管強度に影響しないこと、端栓溶接に問題がないことを溶接施工試験によって確認することが前提であり、設計ではライナーによる FCCI 低減を考慮しないこととなろう。ライナー材は、炉外試験で FCCI 低減の見込みが得られており、「常陽」の制御棒開発の一環としてライナー加工実績のある Cr が第一候補である。



### 5.1.2 照射条件

オープンコア照射試験は、それまでの照射実績の範囲内で実施されることになる。ここでは、計画中のキャプセル照射試験の試験目的達成を前提として、上記の試験目的を達成するための照射条件として、次の条件を狙うこととする。

- a) ピーク線出力 450～500W/cm
- b) 被覆管最高温度 620℃（肉厚中心）
- c) ピーク燃焼度 15at.%以上（燃料スラグ上端部の局所燃焼度約 7at.%以上）。

なお、計画中のキャプセル照射試験のうち、被覆管温度約 620℃（肉厚中心）でピーク燃焼度 8at.%あるいはそれ以上を狙う燃料ピンでは、被覆管温度が最も高く強度が最も低下する燃料スラグ上端部では局所燃焼度約 7at.%以上となる見通しである。

### 5.1.3 試験燃料ピンの仕様

試験燃料ピンの概略図を図 5.1-1 に示す。燃料スラグ組成は、キャプセル照射試験と同様に、中型炉から大型炉までの燃料設計における Pu 富化度をカバーできる U-20Pu-10Zr（wt.%）とする。炉心中央部付近の装荷を前提として燃料スラグ外径は 5.0 mm とし、燃料製造時の便宜を考慮して局所外径の製造公差は±0.1 mm とする。これは、被覆管の内径を 5.80 mm とする場合、スミア密度が局所的には 71%～77%の範囲でばらつきを持つことに相当する。燃料スラグの長さは、「常陽」の炉心高さと同じく 500 mm とする。そのために、長さ 200 mm の燃料スラグ 2 本と長さ 100 mm のスラグ 1 本を積み上げる。被覆管材料は、ODS 鋼が望ましいが、製管コストや端栓溶接の可能性によっては、キャプセル照射と同じく PNC-FMS とする。燃料ピン本数は、U-Pu 合金の調達負担を考慮して、3 本とする。

試験燃料ピン仕様を、キャプセル照射試験用燃料ピンと比較して、表 5.1-1 に示す。キャプセル照射用燃料ピンの仕様と異なる点は、①燃料スラグの密度の代わりに重量を規定したこと、②熱ボンド材の重量を規定したこと、③ガスプレナム長さ（ボンドナトリウム液面高さ）の仕様を緩和したこと、である。これらは、キャプセル照射用燃料ピンの製造経験に基づいて、変更が望ましいと考えられたものである。

### 5.1.4 課題

計画中のキャプセル照射試験用の燃料要素の設計・製造の経験から、オープンコア照射試験の許認可および試験燃料製造における課題として次の点がある。

#### (1) 高燃焼度までの健全性評価

計画中のキャプセル照射試験と比較して、燃料スラグ/ガスプレナム体積比が大きく、照射末期の FP ガス圧が過大となる可能性がある。一方、被覆管強度が低い燃料スラグ上端部の局所燃焼度が低いため、FCCI による被覆管内面腐食量は抑えられる。これらの効果を考慮して、ピーク燃焼度 15at.%以上の達成可能性を評価する必要がある。達成困難の場合、ガスプレナム長さの増加や被覆管肉厚の増加などの対策が必要である。

## (2) 金属燃料製造設備の改修・整備

キャプセル照射試験用燃料ピンに比べて、燃料ピン長さが 190 mm 長くなり、全長 1,240 mm 程度となる。これに対応して、既存のボンディング装置や端栓溶接設備の改修あるいは操作上の工夫が必要となる。

また、燃料製造に必要な各種分析設備（燃料研究棟）等が老朽化しており、これらの更新を含めた整備が望まれる。

## (3) 「常陽」設置変更許可申請

金属燃料ピンのオープンコア照射を実施するためには、金属燃料を炉心燃料のひとつに追加するための「常陽」設置変更許可申請が必要である。

## 5.2 実用化に向けた課題

### 5.2.1 背景と目的

ナトリウム冷却金属燃料炉心は MOX 燃料炉心に比べ重金属密度が高いことから、中性子スペクトルが硬く中性子経済性が良好という特性を有している。このため、MOX 燃料炉心に比べ、高燃焼度化（ブランケット燃料を含めた平均値）、運転サイクルの長期化、増殖比の向上、Pu 燃料インベントリの低減等の炉心性能について向上を図れる[5.2-1]。この結果、高速増殖炉の導入が急がれる場合や、原子力発電容量の増加等、将来のウラン需給が予想以上に逼迫した場合にも柔軟に対応できる能力が期待でき、FS フェーズ II までの検討を経て FaCT 副概念に選定されている。さらに、金属燃料仕様や Na ボイド反応度、バンドル部圧損等の設計条件に柔軟性を持たせることで、従来の金属燃料炉心に比べて増殖率の増加、炉心のコンパクト化、燃料インベントリの低減、Na ボイド反応度の低減等、高い炉心性能を有する炉心を追求した概念が構築されている[5.2-2]。

一方で主な課題には、原子炉出口温度の高温化と金属燃料ピン健全性の両立、CDA 起因過程における SASS 有効性の確保や、即発臨界及び再臨界の回避等が挙げられる。FS フェーズ II では、炉心出力分布の平坦化及び変動抑制と、冷却材流量配分の最適化によって、燃料被覆管最高温度 650℃の制限下で、MOX 燃料炉心と同等の炉心入口／出口温度（395℃／550℃）を達成する「ナトリウム冷却金属燃料高出口温度型炉心」等の設計検討が行われた[5.2-3]。これらの設計では、CDA 起因過程における即発臨界及び再臨界の回避策として、Na ボイド反応度は 8\$程度以下とし、軸方向ブランケットを有する設計については下部軸方向ブランケット削減型（MABLE 型）燃料集合体が採用された。

平成 18 年度にプラント動特性解析コード HIPRAC[5.2-4]が整備され、FaCT 実用化炉心については炉心設計の早い段階で過渡解析を行い、炉心設計の方向性を策定するとともに、SASS 有効性実現のための課題を摘出することとなった。平成 19 年度には、SASS 有効性確保の観点から、Na ボイド反応度を低減した炉心設計が検討された[5.2-5]。それらのうち、Na ボイド反応度の低減を図った大型金属燃料高出口温度型炉心、すなわち第 3.1 節で報告した FaCT 副概念レファレンス炉心を対象とした過渡解析が行われ、SASS 有効性実現のための課題と対策が

示された。本節では、これらの検討結果を整理し、ナトリウム冷却金属燃料炉心の得失や課題についてまとめる。

### 5.2.2 金属燃料炉心の利点

FS フェーズ II[5.2-1]でとりまとめられた主な炉心性能向上について表 5.2-1 にまとめる。

原子炉出口温度 550℃、連続運転期間 22 ヶ月の設計条件において、既存の軽水炉並の燃焼度条件で、MOX 燃料では増殖比は 1.20 程度であるのに比べ、金属燃料炉心では最高 1.26 程度の増殖比を達成可能とされている。ただし、今後、熱設計成立性の確認が必要である。また、増殖比 1.20 程度までは、MOX 燃料を用いた場合に比べ、金属燃料炉心では燃焼度が 20～50%向上し、初装荷核分裂性物質量が 10%以上低減可能とされている。軽水炉から FBR への移行に関する諸量評価では、FBR の導入時期を 2030 年開始と仮定した場合、増殖比 1.20 の MOX 燃料炉心に比べ、増殖比 1.26 の金属燃料炉心では天然ウラン累積需要量を 2 割程度削減可能と見込まれる。

さらに、金属燃料中の Zr 含有率や MA 含有率等の金属燃料仕様を幅広く検討し、Na ボイド反応度や燃料バンドル部圧損等の設計条件に柔軟性を持たせ、炉心性能の追求が検討された[5.2-2]。その結果、金属燃料中の Zr 含有率を 6 wt%として、ブランケットを装荷することなく増殖比 1.34 を達成する炉心概念が構築された。この場合、複合システム倍増時間は 29.4 年まで短縮する。さらに、Zr 含有率を 3 wt%まで低減することで、増殖比 1.40、倍増時間 25.0 年を達成できる見通しが得られた。但し、これらの設計では、原子炉出口温度がそれぞれ 519℃、515℃と、比較的に低くなる性能面でのデメリットもある。この他、炉心のコンパクト化、燃料インベントリの低減、炉心 Na ボイド反応度の低減等の追求が検討された。

### 5.2.3 金属燃料炉心の課題と対策

#### (1) 金属燃料ピンの健全性と原子炉出口温度の高温化

金属燃料ピンについては、照射挙動評価、健全性の確認及び過渡時の被覆管破損限界評価が必要である。また、金属燃料-被覆管接触部での共晶反応あるいは液相形成を回避するための制限である、金属燃料ピン被覆管内面最高温度 650℃の成立性を見極めるとともに、被覆管内面腐食などに対する MA・RE 含有燃料の照射健全性の確認が必要である。さらに、高燃焼度化する場合は、燃料被覆管の高速中性子照射量は MOX 燃料炉心の場合に比べて 7 割程度大きくなるため、高速中性子照射量増大に耐えられる燃料被覆管の開発が必要となる。

被覆管最高温度の制限は MOX 燃料ピンに比べて約 50℃低く、金属燃料炉心の炉心出口温度高温化には不利であった。そこで、FS フェーズ II ではその対策として、炉心径方向出力分布の平坦化と冷却材流量配分の最適化が図られた。すなわち、Pu 富化度領域数をそれ以前の設計の 2 領域から 1 領域に減らし、局所内部転換比を炉心燃料全ての領域で約 1.0 とすることで径方向出力分布の時間的変動を抑制するとともに、燃料の重金属密度を炉心の内側領域と外側領域の 2 領域化することで径方向出力分布の平坦化が図られた。そして、炉心冷却材を 5 領域に配分、最適化することで、原子炉出口温度をそれ以前の設計の 500～520℃から、MOX 燃料炉心と同等の 550℃に向上させた。

## (2) CDA 起因過程における即発臨界及び起因過程後における再臨界の回避

CDA 起因過程における即発臨界の回避には、投入される最大ネット反応度の低減が重要となる。代表的な事象である ULOF 時に、MOX 燃料炉心では Na ボイド反応度は 6\$ 程度であり、最大ネット反応度が 1\$ に近接して、厳しい事象となるのに対して、Na ボイド反応度を 8\$ とした金属燃料炉心の解析例では、最大ネット反応度は 0.742\$ と低く、即発臨界超過には十分な余裕がある[5.2-2]。最大ネット反応度は、Na ボイド反応度、被覆管の破損温度、沸騰・燃料破損／分散の同時性等の影響を受けるが、保守的な条件設定による評価では、Na ボイド反応度が 10\$ 程度のときに、即発臨界近くに達した。このことから、CDA 起因過程からの強い Na ボイド反応度制限はないと考えられている[5.2-2]。

金属燃料炉心は流量配分領域毎の出力流量比（P/F 比）が比較的にそろっていることから、同時性が強い。そのため、冷却材沸騰時の正の反応度投入率が大きくなるため、最大出力は大きくなることが予測されている。しかし、燃料の特性、特に線出力が小さい特徴から、燃料破損モードが被覆管破損に伴う燃料分散（dispersion）よりも熔融燃料の軸方向上部への押出（extrusion）となる可能性が高く、その場合、早期に事象は終息すると予測されている。

また、軸方向ブランケットを有する設計については下部軸方向ブランケット削減型（MABLE 型）燃料集合体が再臨界対策として検討されている。

課題としては、熔融燃料の流出挙動の確認、熔融燃料のデブリの安定冷却能力の確認、再臨界回避方策の有効性の検証等が挙げられる。

## (3) SASS の有効性確保と Na ボイド反応度の低減

FS フェーズ II までに検討された炉心を対象にした過渡解析の結果、ULOF 時の SASS の有効性確保のためには、その作動条件や炉心反応度係数の見直しが必要であることが判明し、Na ボイド反応度を低減した炉心が検討された[5.2-5]。その結果、Na ボイド反応度の低減には、燃料ピンの太径化による冷却材体積比の低減及び炉心高さの短縮、内側炉心／外側炉心燃料体数比の低減が効果的であることが明らかになった。これらの対策はいずれも、ドップラ係数の絶対値の減少を招くが、Na ボイド反応度低減の効果の方が大きい。

FS フェーズ II で検討された大型金属燃料高出口温度型炉心（FS フェーズ II レファレンス炉心）をベースにした検討では、燃料ピン径は 8.5mm と太径化、最大線出力は過渡時の燃料熔融防止の観点から 500W/cm 程度以下を設定可能である。なお、過去の設計検討で得られた知見[5.2-6]から、定格時の許容最大選出力の設計目安は 300W/cm 程度以下となっている。内側／外側燃料体数比は、ODS 鋼の開発目標の目安値、最大高速中性子照射量  $5 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$  程度以下が満たされるよう内側 150 体、外側 495 体とした。燃料スミア密度領域数は 1 領域と 2 領域が検討されたが、両ケースで炉心特性に大差無かったため、燃料製造負荷低減の観点から 1 領域とした。これらの設計の目安と基本仕様を表 5.2-2 にまとめる。また、得られた炉心の基本仕様と特性を表 5.2-3 にまとめる。Na ボイド反応度は低減前の 7.8\$ から、高速炉多重リサイクル TRU 組成で 6.2\$、軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成で 6.5\$ に低減しており、炉心性能は内側／外側炉心燃料体数比低減前の FS フェーズ II レファレンス炉心と同等となっている。



#### 5.2.4 SASS 有効性の検討例

平成 18 年度にプラント動特性解析コード HIPRAC が整備され、FaCT 実用化炉心については炉心設計の早い段階で過渡解析を行い、炉心設計の方向性を策定するとともに、SASS 有効性実現のための課題を摘出することとなった。以下にその概要をまとめる。

##### (1) 解析モデル

HIPRAC コードの炉心部の解析モデルを図 5.2-1 に示す。同図に示すように、炉心部は、炉心全体の温度挙動を模擬する炉心燃料平均チャンネル（内側炉心燃料、外側炉心燃料）及び炉心バイパスから構成される多チャンネル・単ピンモデルとし、反応度フィードバックとして、ドップラ反応度、燃料軸方向膨張反応度、冷却材・構造材の温度フィードバック反応度、炉心支持板膨張反応度を考慮する。また、SASS 感知合金の温度を求めるための SASS 隣接集合体チャンネル、燃料ペレット、冷却材などの最高温度を求めるためのノミナルホットチャンネルを設ける。なお、解析では、原子炉、1 次系及び 2 次系を解析対象範囲としている。

SASS 感知合金の温度は、SASS 隣接集合体チャンネル出口のナトリウム温度に対して、感知合金までのナトリウムの輸送遅れ（無駄時間）及び感知合金の温度応答時定数（1 次遅れ）を考慮して求める。SASS 隣接集合体出口から SASS 感知合金までの輸送遅れ時間として、定常時 1 秒を基準値とする。ULOF 事象時においては、流量低下による輸送遅れ時間の増大を考慮して、輸送遅れ時間は炉心流量の逆数に比例すると仮定する。また、感知合金の温度応答時定数として、1 秒を基準値とする。

##### (2) 検討結果

###### a) FaCT 副概念レファレンス炉心及び SiC ピン装荷型金属燃料炉心の過渡解析結果

FaCT 副概念レファレンス炉心、即ち Na ボイド反応度を 6.2\$ に低減した大型金属燃料高出口温度型炉心を対象とした過渡解析の結果、以下のような特徴が明らかになった。金属燃料炉心は Na ボイド反応度を MOX 燃料と同程度としてもドップラ反応度が小さいことから出力上昇が速く、かつ上部ガスプレナムが長く熱輸送遅れが大きいいため、安全性の判断基準を満足するには、SASS 切離し温度を MOX 燃料炉心より 40℃ 程度以上低く設定する必要がある。切離しまでの所要時間は 10～11 秒となる。但し、SASS 誤落下防止温度との整合性の観点から大幅な設計見直しが必要と考えられる。また、これらの傾向は MA 含有率の高い燃料を装荷した炉心では、さらに厳しくなる。

SiC ピン装荷型金属燃料炉心では、FaCT 副概念レファレンス炉心に比べ、反応度特性が改善され、出力上昇が緩慢になる利点が認められた。但し、検討に用いられた炉心では、レファレンス炉心よりも上部ガスプレナムがさらに長くなり（MOX 燃料炉心 124cm、金属燃料レファレンス炉心 195cm、SiC 装荷型金属燃料炉心 229cm）、熱輸送遅れが大きいいため、SASS の有効性はレファレンス炉心と同程度の結果となった。上部ガスプレナム長を短縮する設計が課題である。

以上から、SASS の有効性実現のために検討された課題と対策を表 5.2-4 にまとめた。

#### b) ULOF 過渡解析条件の見直しとその検討結果

上記の検討結果を受け、ULOF 過渡解析条件を次のように見直した。①従来のガスプレナム相当ピンモデルで熱輸送遅れが過大評価されていた燃料集合体のハンドリングヘッド等の構造領域の影響の評価のため、ガスプレナム相当ピンモデル領域の長さを 50～75%に小さくしたときの感度の確認、②反応度フィードバックにおいて従来考慮していなかったラップ管ドップラ反応度の考慮、③集合体出口～SASS 温度感知合金までの定格流量時の熱輸送遅れ時間を現行の 1 秒及び 1.25 秒で振った感度解析。

この結果、①は冷却材最高温度を 29～57℃減少、②は冷却材最高温度を 7℃減少、③は冷却材最高温度を 33℃増大した。①～③を全て取り入れた場合、ガスプレナム相当ピン領域の長さは従来の 50%、ラップ管ドップラ反応度を考慮、定格流量時の輸送遅れ時間は 1.25 秒、冷却材最高温度は現行より 35℃減少した。これにより、冷却材最高温度 1020℃に対応する SASS 切離し温度は、現行の 635℃に対して 645℃となり、10℃程度増大した。この場合、切離し温度と誤落下防止温度（610℃）との差は 35℃と、より現実的な温度範囲となった。

#### c) 下部ガスプレナム化の効果

FaCT 副概念検討より広範に捉えた研究では、ボンド材を従来の Na から He に変更し、ガスプレナムを下部に設置する設計が提案されている。この設計に対する ULOF 解析の結果、ホットストチャンネルにおける Na 最高温度は 1024℃から 928℃へと約 100℃改善されることが示された[5.2-6]。この要因としては、①Na ボイド反応度、ドップラ係数などの安全パラメータの改善効果（10～20℃の改善）、②上部ガスプレナム削減による炉心出口～SASS 温度感知部間の Na 輸送遅れ時間の改善効果（100～120℃の改善）、③上部ガスプレナム部における負の Na ボイド反応度効果による印加反応度の緩和効果が喪失した影響（25～60℃の悪化）が挙げられている。

### 5.2.5 まとめ

これらの検討結果を整理し、ナトリウム冷却金属燃料炉心の得失や課題についてまとめた。主な課題には、炉心出口温度の高温化と金属燃料ピン健全性の両立、CDA 起因過程における SASS 有効性の確保や、即発臨界及び再臨界の回避等が挙げられる。炉心出口温度の高温化には、炉心径方向出力分布の平坦化と冷却材流量配分の最適化が有効で、MOX 燃料炉心と同等の出口温度 550℃達成の見込みが得られている。即発臨界、再臨界の回避については、炉心の反応度特性や燃料特性から、十分な余裕が見込まれている。SASS 有効性の確保には課題が残るものの、Na ボイド反応度を低減した炉心設計（6\$程度）や、過渡解析条件の合理化によって、SASS 切離し温度を誤落下防止温度との差が 35℃程度となるような現実的な範囲に設定できる。SASS 有効性の確保にはその他にも、SiC ピン装荷型金属燃料炉心、下部ガスプレナム化の効果等が検討されている。

表 5.1-1 試験燃料要素の仕様

| 項目                                                                                     | 単位                | キャプセル照射   | オープンコア照射  |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------|-----------|
| <b>燃料スラグ</b>                                                                           |                   |           |           |
| 材料                                                                                     | —                 | U-Pu-Zr合金 | U-Pu-Zr合金 |
| Pu濃度                                                                                   | wt.%              | 20.0±1.0  | 20.0±1.0  |
| Zr濃度                                                                                   | wt.%              | 10.0±1.0  | 10.0±1.0  |
| <u>密度</u>                                                                              | g/cm <sup>3</sup> | 15.3～16.1 | 仕様なし      |
| 核分裂性物質含有率<br>= $(^{235}\text{U}+^{239}\text{Pu}+^{241}\text{Pu})/(\text{U}+\text{Pu})$ | wt.%              | 17.9±1.0  | 17.9±1.0  |
| U濃縮度                                                                                   | wt.%              | 0.71±0.10 | 0.71±0.10 |
| 不純物                                                                                    |                   |           |           |
| Cr                                                                                     | ppm               | ≤ 500     | ≤ 500     |
| Fe                                                                                     | ppm               | ≤ 1600    | ≤ 1600    |
| Ni                                                                                     | ppm               | ≤ 500     | ≤ 500     |
| Y                                                                                      | ppm               | ≤ 500     | ≤ 500     |
| Pt                                                                                     | ppm               | ≤ 500     | ≤ 500     |
| W                                                                                      | ppm               | ≤ 500     | ≤ 500     |
| Li                                                                                     | ppm               | ≤ 500     | ≤ 500     |
| Cl                                                                                     | ppm               | ≤ 1000    | ≤ 1000    |
| C+N+O+Si                                                                               | ppm               | ≤ 2000    | ≤ 2000    |
| 直径 (燃料スラグ I)                                                                           | mm                | 5.05±0.05 | 5.0±0.1   |
| (燃料スラグ II)                                                                             | mm                | 4.95±0.05 | 5.0±0.1   |
| 長さ (燃料スラグ I)                                                                           | mm                | 200±1     | 200±1     |
| (燃料スラグ II)                                                                             | mm                | 200±1     | 100±1     |
| <u>重量</u> (燃料スラグ I)                                                                    | g                 | 仕様なし      | 60.1～63.2 |
| (燃料スラグ II)                                                                             | g                 | 仕様なし      | 30.1～31.6 |
| <b>熱ボンド材(ボンドナトリウム)</b>                                                                 |                   |           |           |
| 材料                                                                                     | —                 | ナトリウム     | ナトリウム     |
| <u>重量</u>                                                                              | g                 | 仕様なし      | 3.8±0.05  |
| 不純物 溶存酸素                                                                               | ppm               | ≤ 100     | ≤ 100     |
| 合計                                                                                     | ppm               | ≤ 1000    | ≤ 1000    |
| <b>被覆管</b>                                                                             |                   |           |           |
| 材料                                                                                     | —                 | PNC-FMS   | PNC-FMS   |
| 外径                                                                                     | mm                | 6.86±0.02 | 7.00±0.02 |
| 肉厚                                                                                     | mm                | 0.56±0.03 | 0.60±0.03 |
| <b>試験燃料要素</b>                                                                          |                   |           |           |
| 全長                                                                                     | mm                | 1050±2    | 1240±2    |
| ガスプレナム長さ                                                                               | mm                | 440+10,-0 | 600+20,-0 |
| <u>ボンドナトリウム液面高さ</u>                                                                    | mm                | 仕様なし      | 30+0,-20  |
| <u>燃料スタック長(II×2+I)</u>                                                                 | mm                | 仕様なし      | 500±2     |
| 曲がり(全長あたり)                                                                             | mm                | ≤ 5       | ≤ 5       |



表 5.2-1 金属燃料の利用によるナトリウム冷却炉の炉心性能向上

| 増 殖 比                       |                 | 1.03 (1.03)           | 1.11 (1.10)           | 1.19 (1.20)             | 1.26               |
|-----------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|
| 初装荷炉心に必要となる核分裂性物質質量 (t/GWe) |                 | 5.1 (5.8)             | 4.9 (5.7)             | 3.9 (4.4)               | 3.9                |
| 燃焼度<br>(万 MWd/t)            | 炉心平均            | 15.3 (15.0)           | 14.9 (14.7)           | 9.5 (15.4)              | 9.6                |
|                             | 全体平均 (ブランケット含む) | 15.3 (11.5)           | 13.4 (9.0)            | 6.5 (5.5)               | 5.5                |
| 連続運転期間 (ヶ月)                 |                 | 約 22 (26)             | 約 22 (26)             | 約 22 (18)               | 約 22               |
| 特徴                          |                 | MOX 燃料に比べ 3 割平均燃焼度が高い | MOX 燃料に比べ 5 割平均燃焼度が高い | MOX 燃料に比べ 2 割程度平均燃焼度が高い | 軽水炉と同程度の燃焼度で高増殖が可能 |

( ) 内は MOX 燃料 (原子炉出口温度 550℃ の設計条件) を用いた場合の値

表 5.2-2 Na ボイド反応度低減炉心の設計の目安と基本仕様

| 項目                                    | 設計目安                                    | 考え方                                                                                                  |
|---------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Na ボイド反応度                             | 8\$程度以下                                 | ULOF 時の炉心崩壊事故 (CDA) 起因過程における即発臨界の回避                                                                  |
| 最大線出力密度                               | 可能な限り低減<br>500W/cm 以下<br>(300W/cm 程度以下) | ULOF-ATWS における SASS 有効性確保<br>燃料溶融防止の観点から 500W/cm 以下、<br>炉心出口温度高温化による被覆管内面温度制限の観点から 300W/cm 程度以下が設計目安 |
| 高速中性子照射量<br>( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) | $5 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ 程度以下  | ODS 鋼の開発目標目安                                                                                         |
| 被覆管内面最高温度                             | 650℃以下                                  | 被覆管-金属燃料接触部の液相形成防止                                                                                   |
| 項目                                    | 基本仕様                                    | 考え方                                                                                                  |
| 燃料ピン径                                 | 8.5mm                                   | 太径化による Na ボイド反応度の低減<br>上限：約 8.5mm (遮蔽体外接円径 6.8m 程度以下、最大線出力密度の目安、金属燃料照射実績、製造性)                        |
| 集合体当りのピン本数／<br>炉心燃料体数                 | 331 本/645 体<br>(遮蔽体外接円径 6.5m)           | 燃料ピン径 8.5mm の場合の基本仕様                                                                                 |
| 内側／外側燃料体数                             | 150／495                                 | 内側／外側燃料体数比の低減による Na ボイド反応度の低減<br>体数比の下限：約 0.30 (最大高速中性子照射量の目安)                                       |
| 燃料スミア密度領域数                            | 1                                       | 燃料製造負荷低減 (領域数 1 と 2 で炉心特性の差は小さい)                                                                     |

表 5.2-3 大型金属燃料高出口温度型炉心の基本仕様（平衡期）と特性

|                                              | 大型金属燃料高出口<br>温度型炉心（高速炉多<br>重リサイクル TRU :<br>FS フェーズ II レファ<br>レンス炉心） | Na ボイド反応度低減型                              |                    |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------|
|                                              |                                                                     | 高速炉多重リサ<br>イクル TRU<br>（FaCT レファレ<br>ンス炉心） | 軽水炉使用済燃<br>料回収 TRU |
| 炉心熱／電気出力（MW）                                 | 3,570／1,500                                                         | 3,530／1,500                               | ←                  |
| 原子炉入口／出口温度（℃）                                | 395／550                                                             | ←                                         | ←                  |
| 燃料ピン径（mm）                                    | 7.2                                                                 | 8.5                                       | ←                  |
| 集合体当り燃料ピン本数                                  | 331                                                                 | 331                                       | ←                  |
| 炉心燃料集合体数<br>（内側／外側／合計）                       | 297／348／645                                                         | 150／495／645                               | ←                  |
| 遮蔽体外接円径（m）                                   | 5.88                                                                | 6.5                                       | ←                  |
| 炉心高さ（cm）                                     | 95                                                                  | 75                                        | 67                 |
| 上部ガスプレナム長（cm）                                | 185                                                                 | 153（暫定）                                   | ←                  |
| Pu 富化度（wt.%）                                 | 12.4                                                                | 12.2                                      | 14.8               |
| 燃料スミア密度（内側／外側）（%TD）                          | 70／75                                                               | 75（一領域）                                   | ←                  |
| Zr 含有率（内側/外側）（%）                             | 10.0／6.0                                                            | 10.0／6.0                                  | ←                  |
| 流量領域数                                        | 5                                                                   | 11                                        | 19                 |
| 運転サイクル長（ヶ月）                                  | 21.5                                                                | 24.5                                      | 22.0               |
| 増殖比                                          | 1.03                                                                | 1.03                                      | 1.03               |
| 取出平均燃焼度（GWd/t）                               | 99.2                                                                | 96.6                                      | 96.9               |
| 燃焼反応度（%dk/kk'）                               | 0.55                                                                | 0.70                                      | 0.56               |
| 最大線出力（内側/外側）（W/cm）                           | 265／280                                                             | 304／347                                   | 336／385            |
| 最大高速中性子照射量（ $10^{23}\text{n/cm}^2\text{s}$ ） | 5.3                                                                 | 5.4                                       | 5.0                |
| Na ボイド反応度（\$）                                | 7.8                                                                 | 6.2                                       | 6.5                |
| ドップラ係数（Tdk/dT）                               | -4.2E-03                                                            | -3.0E-03                                  | -2.4E-03           |

表 5.2-4 SASS 有効性実現のための課題と対策

|   | 課 題                                | 対 策                                                                                                                    | 備 考                                                                                                                                                    |
|---|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 炉心出力増大を遅く                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>冷却材反応度係数 (Na ボイド反応度) 減</li> <li>ドップラ係数増</li> </ul>                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>SiC 装荷型炉心 (金属燃料炉心)</li> </ul>                                                                                   |
| 2 | 炉心流量減少を遅く                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>流量半減時間を大きく</li> </ul>                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>現状 6.5 秒→7.5 秒</li> </ul>                                                                                       |
| 3 | SASS の切離しを早く                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>ATWS 評価では保持力試験から求めたノミナル温度を使用</li> <li>SASS 誤落下防止温度設定条件の見直し (特に右記条件①)</li> </ul> | 構造設計側の誤落下防止温度設定条件 :<br>① 切離し温度より 40℃ 低く (実証炉、保持力 900N 確保)<br>② SASS 隣接 6 集合体平均出口温度の寿命中最高温度より高く<br>③ 安全保護系のトリップ設定温度より高く                                 |
|   | (1) SASS 切離し温度を低く                  |                                                                                                                        |                                                                                                                                                        |
|   | (2) SASS 初期温度を高く                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>SASS 隣接集合体の定常時出口温度 (6 体平均温度) を高く</li> </ul>                                     |                                                                                                                                                        |
|   | (3) SASS までの熱輸送を早く                 |                                                                                                                        |                                                                                                                                                        |
|   | ① SASS 隣接集合体炉心上端～集合体出口までの熱輸送遅れを小さく | <ul style="list-style-type: none"> <li>炉心上端～集合体出口間距離を短縮</li> <li>SASS 隣接集合体の定常時流量増</li> <li>炉心上部非発熱部の熱容量減</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>上部ガスプレナム短縮 (金属燃料炉心) 等</li> <li>SASS 隣接集合体のみ SiC ピンを燃料ピンに置換 (SiC 装荷型炉心)</li> <li>3 次元流動解析または試験による確認必要</li> </ul> |
|   | ② 集合体出口～SASS 温度感知部までの熱輸送遅れを小さく     | <ul style="list-style-type: none"> <li>SASS 隣接集合体の定常時流量増</li> <li>集合体出口～温度感知部間距離を短縮</li> </ul>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>現状定格流量時 1 秒 (実証炉、水流動試験による)</li> <li>3 次元流動解析または試験による確認必要</li> </ul>                                             |
|   | ③ SASS 温度感知部応答時定数を小さく              | <ul style="list-style-type: none"> <li>SASS 温度感知部の表面積大</li> </ul>                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>現状 1 秒 (実証炉、Na 中応答試験による)</li> </ul>                                                                             |

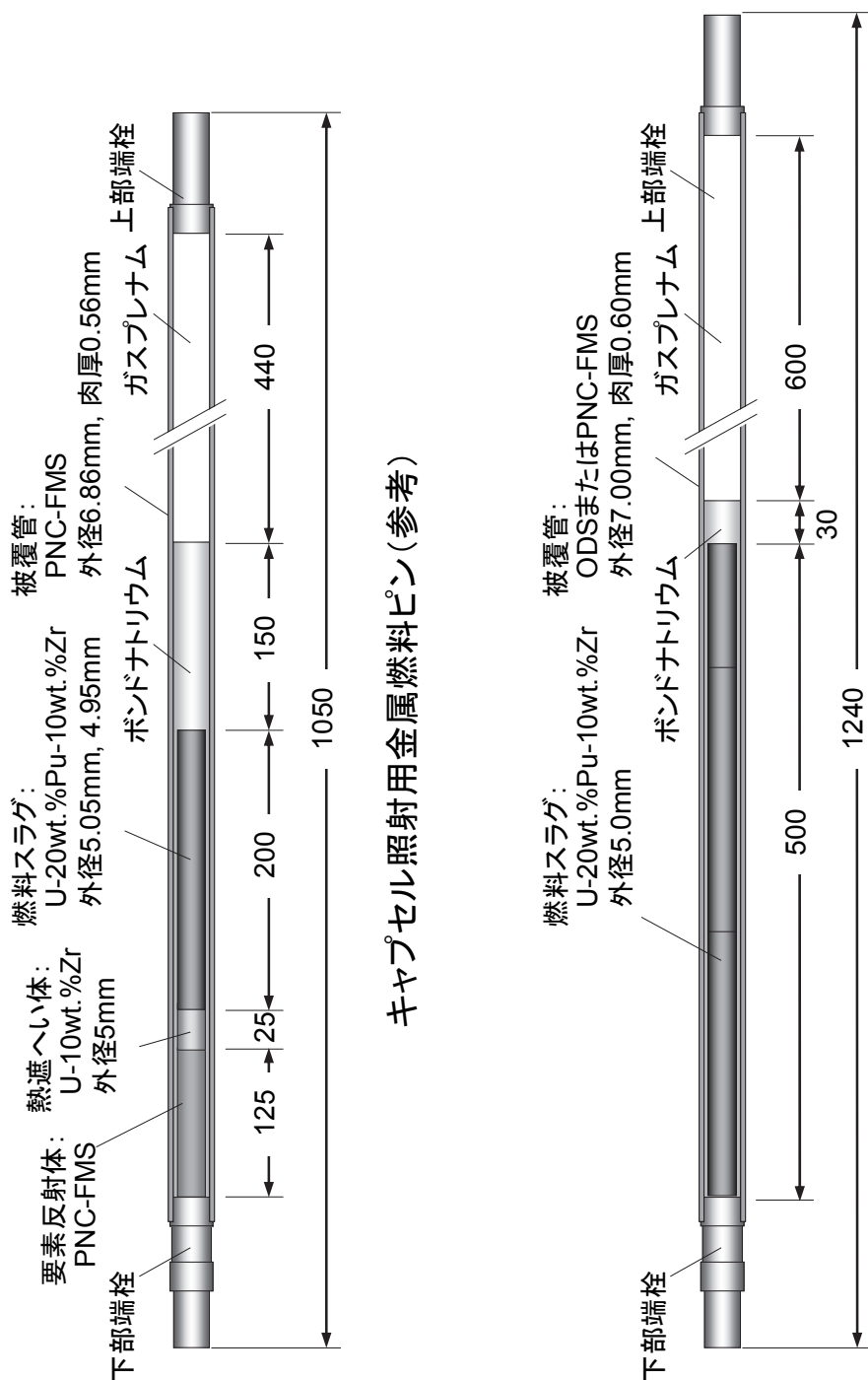


図 5.1-1 オープンコア照射用金属燃料ピン

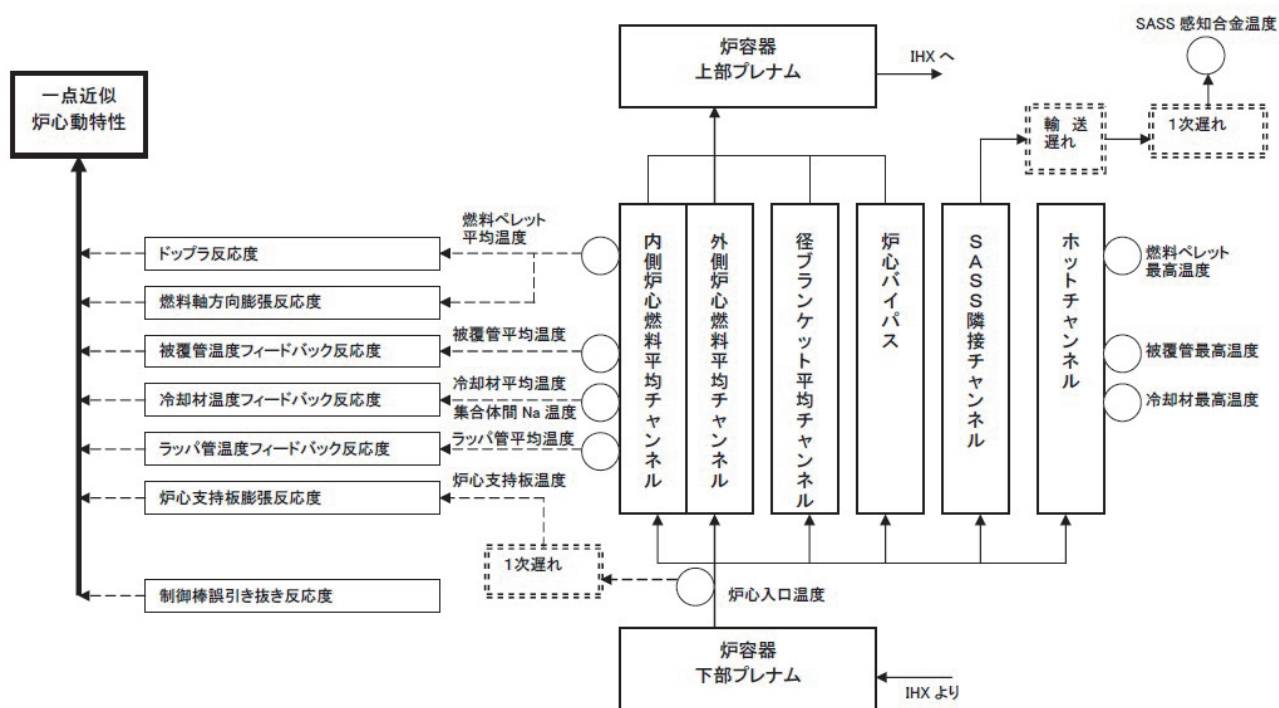


図 5.2-1 HIPRAC コード解析モデル

## 6. 結論

ナトリウム冷却金属燃料炉心は、重金属密度が高く中性子経済が良好である特徴を活かし、高燃焼度化、増殖比の向上、燃料インベントリの低減などを目指した炉心設計が可能である。我が国では、これまでに、FaCT 副概念としてナトリウム冷却金属燃料炉心の研究開発を進めてきており、FaCT 主概念である MOX 燃料炉心と同一のプラント仕様を設計条件とした高出口温度型炉心、且つ、SASS 有効性確保の観点から Na ボイド反応度を低減した、炉心概念が構築されている。また、米国においては金属燃料を実炉用燃料として使用してきた豊富な経験があり、その実用性についても実証実績がある。

一方で、金属燃料サイクルの実用化に向けては、高温・高燃焼度条件での燃料健全性や MA・RE 含有燃料の照射健全性などの実証、金属燃料炉心特有の安全特性の確認、過渡時解析手法の信頼性向上などの課題が残されている。

本報では、電中研と ITU の共同研究のもと仏国フェニックス炉で実施された MA・RE 添加金属燃料照射試験について報告しており、同試験結果から、MA・RE 添加により燃料健全性に重大な影響が生じる兆候は観察されていないことが確認されている。今後、燃料内に残留する MA 組成分析により MA 核種の変換特性が評価される。一方で、燃料に含有される MA や RE の凝集相では局所的に燃料特性が変化することが予想されるため、今後、高燃焼度化による燃料組成変化について凝集相の移動挙動や成長推移等を確認し、照射健全性への影響を把握する必要がある。また、今後の我が国における金属燃料の実用化に向けては、より高温・高燃焼度条件下かつ国産燃料を用いた照射試験が必要とされていることから、高温条件における燃料健全性確認を目的とした「常陽」でのキャプセル照射試験が計画されており、現在、設工認を受けて国内の射出鑄造法により金属燃料スラグを製造し、照射用燃料ピンの組み立てが完了している。

また、2010 年に国内 4 番目の核データライブラリとして JENDL-4.0 が公開されたことから、JENDL-4.0 を用いた炉心解析を実施した。JENDL-4.0 では、高速炉核特性に対するベンチマーク体系への予測性能評価から、臨界性を良好に再現できる、ナトリウム冷却高速炉の種々核特性（制御棒価値、ドップラ反応度、反応率分布、反応率比など）を精度良く予測できる、炉心燃料燃焼によるアクチニド核種や FP 生成量を精度良く予測できる等が確認されている。Na ボイド反応度については、Pu 燃料炉心に関して、旧核データライブラリに比べ、解析値が実験値に比べ過大評価となる度合いが強められる傾向になる。平成 18 年度レファレンス金属燃料炉心の炉心解析においては、旧核データライブラリに比べ燃焼反応度、増殖比などの炉心特性に向上が見られると同時に Na ボイド反応度解析値が増大する傾向が見られたが、炉心設計に大きく影響する範囲ではないことが確認されている。

その他、本報では炉心・安全特性の向上が期待できる炉心概念として概略検討が行われた He ボンド粒子型金属燃料炉心について、ULOF 時における炉心挙動を検討した。この結果、炉心出口から SASS までの Na 輸送遅れ時間の短縮により、SASS がより早期に起動し ULOF での冷却材温度低下に大きく寄与することが確認されている。



金属燃料炉心の安全性に関する検討については、金属燃料の特徴を踏まえた炉心損傷時の挙動の把握と、これらに基づく金属燃料炉心損傷起因過程解析コード CANIS による ULOF 解析を通じ、平成 18 年度レファレンス炉心における炉心損傷起因過程の挙動と安全上の特徴を考察した。この結果、レファレンス炉心では、冷却材沸騰の同時性が強いことから炉心損傷規模が大きいと予想される。一方、Na ボイド反応度投入分担の大きい流量領域 1 での同時性が弱いこと、及び、Na ボイド反応度分担の大きい炉心中心部集合体の P/F が小さいことから、ULOF 時の炉心損傷起因過程は中型炉心相当の挙動となると推察される。即ち、集合体間の同時性が強いと正の反応度投入率が大きく、最大出力が大きくなるが、事象推移が早いことから燃料分散時にはほぼ全量の燃料が被覆管外へ移動し、大きな負の反応度効果が期待できる。再臨界性の検討については、レファレンス炉心では熔融燃料割合は排出必要量を十分に上回ることから、大型炉心とは異なり、起因過程段階で再臨界回避に必要な量が炉外に排出されると推察される。なお、燃料は炉心上下方向に排出されるが、炉心下部にのみ排出・集積すると仮定すると再臨界が懸念されるため、集積がないことを確認する必要がある。

今後の金属燃料実用化に向けた課題としては、現在計画中の金属燃料ピンの「常陽」照射試験（キャプセル照射）の試験目的達成を前提として、更に高い線出力、被覆管温度、燃焼度の達成を目標としたオープンコア照射試験が挙げられる。オープンコア試験の実施により、実燃料長に近い燃料ピン長さを有する燃料製造実績が得られるとともに、長尺金属燃料ピンの照射挙動及び燃料健全性を確認することが可能となる。

金属燃料炉心概念の成立性については、これまでに原子炉出口温度の高温化に対しては、炉心径方向出力分布の平坦化と冷却材流量配分により金属燃料ピン健全性を確保できることを確認している。再臨界回避策については下部軸方向ブランケット削除型燃料集合体が検討されている。今後の炉心概念の成立性に向けた検討課題としては、熔融燃料の排出挙動の確認、熔融燃料のデブリ安定冷却の確保、再臨界回避策の有効性確認が挙げられる。また、CDA 起因過程における SASS 有効性確保については、Na ボイド反応度を低減した炉心設計や、過渡解析条件の合理化による SASS 切離し温度と誤落下防止温度の設定などが残されている。

## 参考文献

- [1-1] 太田宏一 他, “共同研究報告書 金属燃料高速炉の炉心燃料設計に関する研究 (平成 12 年度)”, JNC TY9400 2001-015, 核燃料サイクル開発機構 (2001).
- [1-2] “金属燃料高速炉の炉心燃料設計に関する研究 平成 13 年度－15 年度共同研究報告書”, T9800309, 核燃料サイクル開発機構, 電力中央研究所 (2004).
- [1-3] “金属燃料高速炉の炉心・燃料設計に関する研究 (3)－2007-2008 年度共同研究報告書－”, 日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部, JAEA-Research 2009-025 (2009).
- [1-4] “高速増殖炉サイクル実用化研究開発 (FaCT プロジェクト)－フェーズ I 報告書－”, 日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門, 日本原子力発電株式会社 研究開発室, JAEA-Evaluation 2011-003 (2011).
  
- [2.2-1] 倉田正輝 他, “長半減期核種の消滅処理技術の開発－超ウラン元素含有合金の製造とその特性把握－”, 電力中央研究所報告 T92005 (1992).
- [2.2-2] M. Kurata, et al., “Fabrication of U-Pu-Zr Metallic Fuel Containing Minor Actinides,” Proc. Int. Conf. Future Nuclear Systems, Challenge Towards Second Nuclear Era with Advanced Fuel Cycles (Global '97) vol. 2, pp.1384-1389 (1997).
- [2.2-3] 倉田正輝 他, “長半減期核種の消滅処理技術の開発－超ウラン元素含有金属燃料の照射試験計画－”, 電力中央研究所報告 T92028、(1993).
- [2.2-4] H. Ohta et al., “Low-Burnup irradiation Behavior of Fast Reactor Metal Fuels Containing Minor Actinides”, Nuclear Technology, Vol. 165 (2009).
- [2.2-5] H. Ohta et al., “Irradiation Experiment of Fast Reactor Metal Fuels Containing Minor Actinides up to 7at.% Burnup”, Proc. of GLOBAL2007, Boise, Idaho, September 9-13, 2007.
- [2.2-6] H. Ohta et al., “Postirradiation Examinations of Fast Reactor Metal Fuels Containing Minor Actinides- Fission Gas Release and Metallography of ~2.5at.% Burnup Fuels－”, Proc. of GLOBAL2009, Paris, France, September 6-7, 2009.
- [2.2-7] H. Ohta et al., “Development of Fast Reactor Metal Fuels Containing Minor Actinides”, J. Nucl. Sci. and Technol., Vol. 48, No. 4, pp.1-8 (2011).
- [2.2-8] H. Ohta et al., “Irradiation Experiment on Minor Actinide-Containing Metal Fuels to 10at.% Burnup”, Proc. of GLOBAL2011, Makuhari, Japan, Dec. 11-16, 2011.
- [2.2-9] 太田宏一 他, “マイナーアクチニドを含有する高速炉用金属燃料の照射試験－低・中燃焼度燃料ピンの照射後非破壊試験および照射挙動評価－” 電力中央研究所 研究報告 L08005 (2009).
- [2.2-10] 太田宏一, “将来の放射性廃棄物処分の負担を軽減するために (その 2) -高速炉用金属燃料を用いたマイナーアクチニドの燃焼試験の実施-”, 電中研ニュース 461 (2009).
- [2.2-11] 太田宏一 他, “マイナーアクチニドを含有する高速炉用金属燃料の照射試験－低燃焼度燃料のガス放出率および金相観察-” 電力中央研究所 研究報告 L09011 (2010).

- [2.2-12] 太田宏一 他、“マイナーアクチニドを含有する高速炉用金属燃料の照射試験 -10at.%燃焼度まで照射した燃料ピンの非破壊検査と照射挙動評価-” 電力中央研究所 研究報告 L10010 (2011).
- [2.2-13] J. L. Seran, et al., “Behavior under Neutron Irradiation of the 15-15Ti and EM10 Steels Used as Standard Materials of the Phenix Fuel Subassembly,” Effects of Radiation on Materials: 15th Int. Symp., ASTM Spec. Technol. Publ. 1125, pp.1209-1233 (1992).
- [2.2-14] A. Millard, et al., “Swelling and Irradiation Creep of Neutron-Irradiated 316Ti and 15-15Ti Steels”, Effects of Radiation on Materials: 16th Int. Symp., ASTM Spec. Technol. Publ. 1175, pp.824-837 (1994).
- [2.2-15] A. Fissolo, et al., “Tensile Properties of Neutron Irradiated 316Ti and 15-15Ti Steels,” Effects of Radiation on Materials: 16th Int. Symp., ASTM Spec. Technol. Publ. 1175, pp.646-663 (1994).
- [2.2-16] T. Ogata, et al., “Development and Validation of ALFUS: An Irradiation Behavior Analysis Code for Metallic Fast Reactor Fuels”, Nucl. Technol. 128, pp.113-123 (1999).
- [2.2-17] G. L. Hofman, et al., “Swelling Behavior of U-Pu-Zr Fuel”, Metallurgical Trans., 21A, pp.517-528 (1990).
- [2.2-18] R. G. Pahl, et al., “Steady-State Irradiation Testing of U-Pu-Zr Fuel to > 18 at.% Burnup”, Int. Fast Reactor Safety Meeting, Session 2, Vol. IV, pp.129-137, Snowbird (1990).
- [2.2-19] D. C. Crawford, et al., “Large-Diameter, High-Plutonium Metallic Fuel Testing in EBR-II”, Trans. Am. Nucl. Soc., 71, pp.178-179 (1994).
- [2.2-20] G. L. Hofman, et al., “Metallic Fast Reactor Fuels,” Materials Science and Technology, A Comprehensive Treatment, R. W. Cain, P. Haasen, and E. J. Kramer, Eds., in Nuclear Materials, Vol. 10A, Part 1, B. R. T. Frost, Ed., VCH Verlagsgesellschaft (1994).
- [2.2-21] A. G. Croff., “ORIGEN2 – A revised and Updated Version of Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code”, ORNL-5621 (1980).
- [2.2-22] 勝山幸三 他, “高速炉用 MOX 燃料からの He 放出挙動評価”, サイクル機構技報 No.5, pp.69-75 (1999).
- [2.2-23] M. K. Meyer, et al., “Fuel Design for the U.S. Accelerator Driven Transmutation System,” Proc. of the ANS Conf. on Accelerator Applications in the New Millennium, Reno, NV, (2001).
- [2.2-24] Y. S. Kim, et al., “Constituent Redistribution in U-Pu-Zr Fuel During Irradiation”, J. Nucl. Mater., 327, pp.27-36 (2004).
- [2.2-25] D. R. O’Boyle, et al., “The uranium-plutonium-zirconium alloy system”, Proc. of the 4th Int. Conf. on Plutonium and Other Actinides, Santa Fe, NM, Met. Soc., New York, 720 (1970).
- [2.2-26] Y. H. Sohn, et al., “Analysis of Constituent Redistribution in the  $\gamma$  (bcc) U–Pu–Zr Alloys Under Gradients of Temperature and Concentrations,” J. Nucl. Mater., 279, p.317 (2000).
- [3.1-1] K. Sugino, et al., “Advanced Metal Fuel Core Design Study for SFR in the “Feasibility Study” in Japan,” Proc. GLOBAL 2005, Paper No. 399, Tsukuba, Japan, Oct. 9-13, 2005.

- [3.1-2] 大木繁夫 他, “ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討 (金属燃料炉心) – 2005 年度報告 –”, JAEA-Research 2006-077 (2006).
- [3.1-3] 小川隆 他, “ナトリウム冷却金属燃料高出口温度型炉心の安全性向上に関する検討”, 日本原子力学会 2007 年秋の大会, 予稿集, D36 (2007).
- [3.1-4] “高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズ II 技術検討書 (1) 原子炉プラントシステム”, JAEA-Research 2006-042 (2006).
- [3.1-5] 羽様平 他, “高速炉用統合炉定数 ADJ2000R の作成”, JNC TN9400 2002-064 (2002).
- [3.1-6] S.K. Cheng, N.E. Todreas, “Hydrodynamic Models and Correlations for Bare and Wire-Wrapped Hexagonal Rod Bundles – Bundle Friction Factors, Subchannel Friction Factors and Mixing Parameters”, Nucl. Eng. Design, 92, pp.227-251 (1986).
- [3.2-1] K. Shibata, et al., “JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 48, No. 1, pp. 1-30 (2011).
- [3.2-2] G. Chiba, et al., “JENDL-4.0 Benchmarking for Fission Reactor Applications”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 48, No. 2, pp. 172-187 (2011).
- [3.2-3] O. Iwamoto, et al., “Covariance Evaluation for Actinide Nuclear Data in JENDL-4”, Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2010), Jeju Island, Korea, April 26-30, 2010.
- [3.2-4] 杉野和輝 他, “核設計基本データベースの整備(XIV) – JENDL-4.0 に基づく高速炉核特性解析の総合評価 –”, JAEA-Research 2012-013 (2012).
- [3.2-5] K. Shibata, et al., “Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 39, No. 11, pp.1125-1136 (2002).
- [3.2-6] O. Iwamoto, et al., “International Evaluation Co-operation Volume 29: Uranium-235 Capture Cross-section in the keV to MeV Energy Region”, NEA/NSC/WPEC/DOC(2011)433 (2011).
- [3.2-7] M. Herman, et al., “ENDF-6 Formats Manual: Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data Files ENDF/B-VI and ENDF/B-VII”, CSEWG Document ENDF-102, Report BNL-90365-2009 Rev.1, BNL (2010).
- [3.2-8] O. Iwamoto, “Development of a Comprehensive Code for Nuclear Data Evaluation, CCONE, and Validation Using Neutron-Induced Cross Sections for Uranium Isotopes”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 44, No. 5, pp.687-697 (2007).
- [3.2-9] H. Derrien, L. C. Leal, and N. M. Larson, 239Pu Neutron Resonance Parameters Revisited and the Covariance Matrix in the Neutron Energy Range Thermal to 2.5 keV, Proc. of Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology (ND-2007), Nice, France, April 22-27, 2007.
- [3.2-10] A. Ichihara, et al., “Program POD ; A Computer Code to Calculate Cross Sections for Neutron-Induced Nuclear Reactions”, JAEA-Data/Code 2007-012 (2007).
- [3.2-11] T. Nakagawa, et al., “Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version 3 Revision-2: JENDL-3.2”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 32, No. 12, pp.1259-1271 (1995).
- [3.3-1] “高速増殖炉サイクル実用化研究開発 (FaCT プロジェクト) – フェーズ I 報告書 –”, 日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門, 日本原子力発電株式会社

研究開発室, JAEA-Evaluation 2011-003 (2011).

- [3.3-2] T. Mizuno, et al., “Advanced MOX Core Design Study of Sodium-Cooled Reactors in Current Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle Systems in Japan”, Nucl. Tech. Vol. 146, pp. 155-163 (2004).
- [3.3-3] S. Ohki, et al., “FBR core concepts in the "FaCT" Project in Japan”, Proc. of Int. Conf. on Reactor Physics, Nuclear Power: A Sustainable Resource (PHYSOR'08), Sept. 14-19, 2008, Interlaken, Switzerland (2008).
- [3.3-4] 大久保努 他, “高速増殖実証炉に向けた炉心概念検討 (1) 全体概要”, 日本原子力学会 2010 年秋の大会, 予稿集, P30 (2010).
- [3.3-5] 小倉理志 他, “高速増殖実証炉に向けた炉心概念検討 (2) 炉心設計”, 日本原子力学会 2010 年秋の大会, 予稿集, P31 (2010).
- [3.3-6] K. Shibata, et al., “Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 39, No. 11, pp.1125-1136 (2002).
- [3.3-7] 杉野和輝 他, “JENDL-4.0 に基づく高速炉用炉定数 UFLIB.J40 及び JFS-3-J4.0 の作成”, JAEA-Data/Code 2011-017 (2011).
- [3.4-1] 小川隆 他, “ナトリウム冷却金属燃料高出口温度型炉心の安全性向上に関する検討”, 日本原子力学会 2007 年秋の大会, 予稿集, D36 (2007).
- [3.4-2] 羽様平 他, “高速炉用統合炉定数 ADJ2000R の作成”, JNC TN9400 2002-64 (2002).
- [3.4-3] T. NAKAGAWA, et al., “Japanese evaluated nuclear data library, version 3 revision-2; JENDL-3.2,” J. Nucl. Sci. Technol. 32, p.1259 (1995).
- [3.4-4] 高野秀機, “JENDL-3.2 の炉定数整備(1) 高速炉用炉定数ライブラリー JFS-3-J32 および 熱中性子炉設計コード SRAC 用ライブラリー SRACLIB-J32 の整備状況”, 核データニュース, No.52 (1995).
- [3.4-5] K. Shibata, et al., “JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 48, No. 1, pp. 1-30 (2011).
- [3.4-6] 杉野和輝 他, “JENDL-4.0 に基づく高速炉用炉定数 UFLIB.J40 及び JFS-3-J4.0 の作成”, JAEA-Data/Code 2011-017 (2011).
- [3.4-7] 太田宏一 他, “金属燃料高速炉の炉心燃料設計に関する研究 (平成 12 年度)”, 核燃料サイクル開発機構 電力中央研究所 共同研究報告書 JNC TY9400 2001-015 (2001).
- [3.4-8] 太田宏一 他, “金属燃料 FBR 炉心のボイド反応度評価”, 電力中央研究所研究報告書 T99090 (2000).
- [3.4-9] 杉野和輝 他, “核設計基本データベースの整備(XIV) – JENDL-4.0 に基づく高速炉核特性解析の総合評価 –”, JAEA-Research 2012-013 (2012).
- [3.4-10] 大久保努 他, “高速増殖実証炉に向けた炉心概念検討(1)全体計画”, 日本原子力学会 2010 年秋の大会, 予稿集, P30 (2010).
- [3.4-11] “高速増殖炉サイクル実用化研究開発 (FaCT プロジェクト) –フェーズ I 報告書–”, 日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門, 日本原子力発電株式会社 研究開発室, JAEA-Evaluation 2011-003 (2011).



- [3.5-1] “金属燃料高速炉の炉心・燃料設計に関する研究 (3) —2007-2008 年度共同研究報告書—”, JAEA-Research 2009-025 (2009).
- [3.5-2] T. Ogata, et al., "Directions of Metal Fuel Development for Fast Reactors“, Proc. Global 2009, Paris, France, Sept. 6-11 2009.
- [3.5-3] 尾形孝成 他, “粒子型金属燃料の概念”, 日本原子力学会 1999 年秋の大会, I53 (1999).
- [3.5-4] 小林登 他, “金属燃料の特性を活かした魅力的な高速炉炉心の検討(1); 一核的サーベイ検討—”, 日本原子力学会 2008 年春の年会, K40 (2008).
- [3.5-5] 小林登 他, “金属燃料の特性を活かした魅力的な高速炉炉心の検討(2); コンパクト化を追求した炉心の検討”, 日本原子力学会 2008 年秋の大会, C23 (2008).
- [3.5-6] 川島克之 他, “制御棒引抜時の出力歪に対する局所フィードバック反応度の影響検討”, 日本原子力学会 2008 年春の年会, K43 (2008).
  
- [4-1] 太田宏一 他, “金属燃料高速増殖炉における 1500Mwe 級炉心の設計検討”, 電力中央研究所研究報告, T96040 (1997).
- [4-2] 西村友宏, “金属燃料炉心の受動的安全性評価—フィードバック反応度の予測誤差による ATWS 時炉心熱応答への影響評価—”, 電力中央研究所研究報告, T91046 (1991).
- [4-3] 横尾健 他, “金属燃料炉心における安全性確保の方策と課題”, 電力中央研究所研究報告, T92007 (1992).
- [4.1-1] 横尾健 他, “金属燃料高速増殖炉の設計検討—過渡時の燃料健全性確保を考慮した炉心出口温度制限の検討—”, 電力中央研究所研究報告, T91013 (1991).
- [4.1-2] A.B. Cohen et al., "Fuel/Cladding Compatibility in U-19Pu-10Zr/HT9-clad Fuel at Elevated Temperatures", J. Nucl. Mater. Vol.204, pp.244-251 (1993).
- [4.1-3] T.H. Bauer et al., “Cladding Failure Margins for Metallic Fuel in Integral Fast Reactor”, Trans. of 9th int. Conf. on Structural Mechanics of Reactor Technology, Lausanne (1987).
- [4.1-4] T.H.Bauer et al., “Behavior of Modern Metallic Fuel in TREAT Transient Overpower Tests”, Nucl. Technol., Vol.92, p.325 (1990).
- [4.1-5] A.E.Wright et al., “Recent Metal Fuel Safety Tests in TREAT”, Proc. of Science and Technol. of Fast Reactor Safety, Guernsey, Vol.1, p.59 (1986).
- [4.1-6] E.A.Rhodes et al., “Fuel Motion in Overpower Tests of Metallic Integral Fast Reactor Fuel”, Nucl. Technol., Vol.98, p.91 (1992).
- [4.1-7] W.R.Robinson et al., “Integral Fast Reactor Tests M2 and M3 in TREAT”, Trans. Am. Nucl. Soc., 50, 352 (1985).
- [4.2-1] 植田伸幸, “金属燃料 FBR の炉心損傷解析コードの開発と冷却材ボイド反応度制限の評価”, 電力中央研究所研究報告, T01002 (2001).
- [4.2-2] 植田伸幸 他, “金属燃料炉心の炉心損傷時再臨界性評価—起因過程解析による大型炉心の評価—”, 電力中央研究所研究報告, T97004 (2004).
- [4.2-3] J.J.Kaganove, “Numerical Solution of the one-group space-independent reactor kinetics equations for neutron density given the excess reactivity”, ANL-6132 Physics and Mathematics

(TID-4500,15th Ed.)AEC Research and Development Report, (1960).

- [4.2-4] 尾形孝成 他, “金属燃料要素における燃料-被覆管機械的相互作用の解析的評価”, 電力中央研究所研究報告, T97004 (1998).
- [4.3-1] 太田宏一 他, “金属燃料 FBR 炉心のボイド反応度評価”, 電力中央研究所報告, T99090 (2000).
- [4.3-2] 横尾健 他, “1500MWe 級高燃焼度金属燃料炉心、および酸化物燃料炉心の特性評価”, 電力中央研究所報告, T97040 (1998).
- [4.3-3] 植田伸幸 他, “金属燃料炉心における ATWS 起因の燃料破損の解析的評価”, 電力中央研究所報告, T98079 (1999).
- [4.3-4] 山舘恵 他, 原子炉出口温度高温化に適合するナトリウム冷却金属燃料炉心の検討, サイクル機構技報, No. 18, pp.29-38 (2003).
- [4.4-1] 植田伸幸, “金属燃料炉心の炉心損傷時再臨界性評価 -起因過程解析による大型炉心の評価-”, 電力中央研究所報告, T03060 (2004).
  
- [5.1-1] 尾形孝成 他, “「常陽」照射試験用金属燃料の製造 ; (1) 照射試験全体計画” 日本原子力学会 2011 年春の年会, 予稿集, A01 (2011).
- [5.1-2] K. Nakamura, et al., “Fabrication of Metal Fuel Slugs for an Irradiation Test in JOYO”, Proceedings of Global 2009, Paris, France, Sept. 6-11, 2009.
- [5.2-1] “高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズ II 最終報告書”, 日本原子力研究開発機構, 日本原子力発電株式会社, JAEA-Evaluation 2006-002, (2006).
- [5.2-2] 岡野靖 他, “金属燃料高速炉の炉心・燃料設計に関する研究(3)”, 2007-2008 年度共同研究報告書, JAEA Research 2009-025 (2009).
- [5.2-3] 大木繁夫 他, “ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討 (金属燃料炉心)”, 2005 年度報告書, JAEA Research 2006-077, (2006).
- [5.2-4] 林秀行 他, “受動的安全性を強化した大型 FBR プラント”, 日本原子力学会誌 vol.39, No.11, 975 (1997).
- [5.2-5] 小川隆 他, “ナトリウム冷却金属燃料高出口温度型炉心の安全性向上に関する検討”, 日本原子力学会 2007 年秋の大会, D36 (2007).
- [5.2-6] 岡野靖 他, “金属燃料の特性を活かした魅力的な高速炉炉心の検討 (3)下部ガスプレナム型金属燃料炉心の炉心特性及び流量過渡特性に関する検討”, 日本原子力学会 2010 年春の年会, H37 (2010).



# 国際単位系（SI）

表1. SI 基本単位

| 基本量   | SI 基本単位 |     |
|-------|---------|-----|
|       | 名称      | 記号  |
| 長さ    | メートル    | m   |
| 質量    | キログラム   | kg  |
| 時間    | 秒       | s   |
| 電流    | アンペア    | A   |
| 熱力学温度 | ケルビン    | K   |
| 物質量   | モル      | mol |
| 光度    | カンデラ    | cd  |

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

| 組立量                     | SI 基本単位      |                    |
|-------------------------|--------------|--------------------|
|                         | 名称           | 記号                 |
| 面積                      | 平方メートル       | m <sup>2</sup>     |
| 体積                      | 立方メートル       | m <sup>3</sup>     |
| 速度                      | メートル毎秒       | m/s                |
| 加速度                     | メートル毎秒毎秒     | m/s <sup>2</sup>   |
| 波数                      | 数毎メートル       | m <sup>-1</sup>    |
| 密度, 質量密度                | キログラム毎立方メートル | kg/m <sup>3</sup>  |
| 面積密度                    | キログラム毎平方メートル | kg/m <sup>2</sup>  |
| 比体積                     | 立方メートル毎キログラム | m <sup>3</sup> /kg |
| 電流密度                    | アンペア毎平方メートル  | A/m <sup>2</sup>   |
| 電界の強さ                   | アンペア毎メートル    | A/m                |
| 量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度 | モル毎立方メートル    | mol/m <sup>3</sup> |
| 質量濃度                    | キログラム毎立法メートル | kg/m <sup>3</sup>  |
| 輝度                      | カンデラ毎平方メートル  | cd/m <sup>2</sup>  |
| 屈折率 <sup>(b)</sup>      | (数字の) 1      | 1                  |
| 比誘電率 <sup>(b)</sup>     | (数字の) 1      | 1                  |

- (a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

| 組立量                           | SI 組立単位               |                   |                   |                                                                |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------|
|                               | 名称                    | 記号                | 他のSI単位による表し方      | SI基本単位による表し方                                                   |
| 平面角                           | ラジアン <sup>(b)</sup>   | rad               | 1 <sup>(b)</sup>  | m/m                                                            |
| 立体角                           | ステラジアン <sup>(b)</sup> | sr <sup>(c)</sup> | 1 <sup>(b)</sup>  | m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>                                 |
| 周波数                           | ヘルツ <sup>(d)</sup>    | Hz                |                   | s <sup>-1</sup>                                                |
| 力                             | ニュートン                 | N                 |                   | m kg s <sup>-2</sup>                                           |
| 圧力, 応力                        | パスカル                  | Pa                | N/m <sup>2</sup>  | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>                             |
| エネルギー, 仕事, 熱量                 | ジュール                  | J                 | N m               | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>                              |
| 仕事率, 工率, 放射束                  | ワット                   | W                 | J/s               | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>                              |
| 電荷, 電気量                       | クーロン                  | C                 |                   | s A                                                            |
| 電位差 (電圧), 起電力                 | ボルト                   | V                 | W/A               | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>              |
| 静電容量                          | ファラド                  | F                 | C/V               | m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup> |
| 電気抵抗                          | オーム                   | Ω                 | V/A               | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>              |
| コンダクタンス                       | ジーメンズ                 | S                 | A/V               | m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup> |
| 磁束密度                          | ウェーバ                  | Wb                | Vs                | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>              |
| 磁束                            | テスラ                   | T                 | Wb/m <sup>2</sup> | kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>                             |
| インダクタンス                       | ヘンリー                  | H                 | Wb/A              | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>              |
| セルシウス温度                       | セルシウス度 <sup>(e)</sup> | °C                |                   | K                                                              |
| 光束流                           | ルーメン                  | lm                |                   | cd sr <sup>(c)</sup>                                           |
| 照射度                           | ルクス                   | lx                | lm/m <sup>2</sup> | m <sup>-2</sup> cd                                             |
| 放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>      | ベクレル <sup>(d)</sup>   | Bq                |                   | s <sup>-1</sup>                                                |
| 吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ           | グレイ                   | Gy                | J/kg              | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                 |
| 線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量 | シーベルト <sup>(g)</sup>  | Sv                | J/kg              | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                 |
| 酸素活性                          | カタール                  | kat               |                   | s <sup>-1</sup> mol                                            |

- (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
(b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
(f)放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
(g)単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

| 組立量             | SI 組立単位           |                       |                                                                                      |
|-----------------|-------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|                 | 名称                | 記号                    | SI 基本単位による表し方                                                                        |
| 粘着力のモーメント       | パスカル秒             | Pa s                  | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>                                                   |
| 表面張力            | ニュートンメートル         | N m                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>                                                    |
| 角速度             | ニュートン毎メートル        | N/m                   | kg s <sup>-2</sup>                                                                   |
| 角加速度            | ラジアン毎秒            | rad/s                 | m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>                                   |
| 熱流密度, 放射照度      | ラジアン毎秒毎秒          | rad/s <sup>2</sup>    | m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>                                   |
| 熱容量, エントロピー     | ワット毎平方メートル        | W/m <sup>2</sup>      | kg s <sup>-3</sup>                                                                   |
| 比熱容量, 比エントロピー   | ジュール毎ケルビン         | J/K                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                    |
| 比エネルギー          | ジュール毎キログラム毎ケルビン   | J/(kg K)              | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                       |
| 熱伝導率            | ジュール毎キログラム        | J/kg                  | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                                       |
| 体積エネルギー         | ワット毎メートル毎ケルビン     | W/(m K)               | m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>                                                 |
| 電界の強さ           | ジュール毎平方メートル       | J/m <sup>3</sup>      | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>                                                   |
| 電荷密度            | ボルト毎メートル          | V/m                   | m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>                                                 |
| 電荷密度            | クーロン毎立方メートル       | C/m <sup>3</sup>      | m <sup>-3</sup> sA                                                                   |
| 表面電荷            | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>-2</sup> sA                                                                   |
| 電束密度, 電気変位      | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>-2</sup> sA                                                                   |
| 誘電率             | ファラド毎メートル         | F/m                   | m <sup>-3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>                       |
| 透磁率             | ヘンリー毎メートル         | H/m                   | m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>                                                 |
| モルエネルギー         | ジュール毎モル           | J/mol                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>                                  |
| モルエントロピー, モル熱容量 | ジュール毎モル毎ケルビン      | J/(mol K)             | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>                  |
| 照射線量 (X線及びγ線)   | クーロン毎キログラム        | C/kg                  | kg <sup>-1</sup> sA                                                                  |
| 吸収線量            | グレイ毎秒             | Gy/s                  | m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>                                                       |
| 放射強度            | ワット毎ステラジアン        | W/sr                  | m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> |
| 放射輝度            | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | W/(m <sup>2</sup> sr) | m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>                |
| 酵素活性濃度          | カタール毎立方メートル       | kat/m <sup>3</sup>    | m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol                                                   |

表5. SI 接頭語

| 乗数               | 接頭語 | 記号 | 乗数                | 接頭語  | 記号 |
|------------------|-----|----|-------------------|------|----|
| 10 <sup>24</sup> | ヨタ  | Y  | 10 <sup>-1</sup>  | デシ   | d  |
| 10 <sup>21</sup> | ゼタ  | Z  | 10 <sup>-2</sup>  | センチ  | c  |
| 10 <sup>18</sup> | エクサ | E  | 10 <sup>-3</sup>  | ミリ   | m  |
| 10 <sup>15</sup> | ペタ  | P  | 10 <sup>-6</sup>  | マイクロ | μ  |
| 10 <sup>12</sup> | テラ  | T  | 10 <sup>-9</sup>  | ナノ   | n  |
| 10 <sup>9</sup>  | ギガ  | G  | 10 <sup>-12</sup> | ピコ   | p  |
| 10 <sup>6</sup>  | メガ  | M  | 10 <sup>-15</sup> | フェムト | f  |
| 10 <sup>3</sup>  | キロ  | k  | 10 <sup>-18</sup> | アト   | a  |
| 10 <sup>2</sup>  | ヘクト | h  | 10 <sup>-21</sup> | ゼプト  | z  |
| 10 <sup>1</sup>  | デカ  | da | 10 <sup>-24</sup> | ヨクト  | y  |

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

| 名称    | 記号   | SI 単位による値                                                                                |
|-------|------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 分     | min  | 1 min=60s                                                                                |
| 時     | h    | 1 h =60 min=3600 s                                                                       |
| 日     | d    | 1 d=24 h=86 400 s                                                                        |
| 度     | °    | 1°=(π/180) rad                                                                           |
| 分     | ′    | 1′=(1/60)°=(π/10800) rad                                                                 |
| 秒     | ″    | 1″=(1/60)′=(π/648000) rad                                                                |
| ヘクタール | ha   | 1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>                                     |
| リットル  | L, l | 1L=1l=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> |
| トン    | t    | 1t=10 <sup>3</sup> kg                                                                    |

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で表される数値が実験的に得られるもの

| 名称       | 記号 | SI 単位で表される数値                               |
|----------|----|--------------------------------------------|
| 電子ボルト    | eV | 1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J   |
| ダルトン     | Da | 1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg  |
| 統一原子質量単位 | u  | 1u=1 Da                                    |
| 天文単位     | ua | 1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m |

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

| 名称        | 記号   | SI 単位で表される数値                                                                                   |
|-----------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| バール       | bar  | 1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa                                                         |
| 水銀柱ミリメートル | mmHg | 1mmHg=133.322Pa                                                                                |
| オングストローム  | Å    | 1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m                                                            |
| 海里        | M    | 1 M=1852m                                                                                      |
| バイン       | b    | 1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm <sup>2</sup> )2=10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup> |
| ノット       | kn   | 1 kn=(1852/3600)m/s                                                                            |
| ネーパ       | Np   | SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。                                                                       |
| ベベル       | B    |                                                                                                |
| デジベル      | dB   |                                                                                                |

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

| 名称                    | 記号  | SI 単位で表される数値                                                                            |
|-----------------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| エルグ                   | erg | 1 erg=10 <sup>-7</sup> J                                                                |
| ダイン                   | dyn | 1 dyn=10 <sup>-5</sup> N                                                                |
| ポアズ                   | P   | 1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s                                                   |
| ストークス                 | St  | 1 St =1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> |
| スチルブ                  | sb  | 1 sb =1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> cd m <sup>-2</sup>                         |
| フォトリ                  | ph  | 1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx                                         |
| ガリ                    | Gal | 1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>                           |
| マクスウェル                | Mx  | 1 Mx = 1G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb                                          |
| ガウス                   | G   | 1 G =1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T                                           |
| エルステッド <sup>(c)</sup> | Oe  | 1 Oe ≐ (10 <sup>7</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>                                           |

- (c) 3 元素のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

| 名称        | 記号   | SI 単位で表される数値                                                     |
|-----------|------|------------------------------------------------------------------|
| キュリー      | Ci   | 1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq                                     |
| レントゲン     | R    | 1 R = 2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg                                 |
| ラド        | rad  | 1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy                                   |
| レム        | rem  | 1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv                                  |
| ガンマ       | γ    | 1 γ =1 nT=10 <sup>-9</sup> T                                     |
| フェルミ      | f    | 1フェルミ≐1 fm=10 <sup>-15</sup> m                                   |
| メートル系カラット |      | 1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 <sup>-4</sup> kg                      |
| トル        | Torr | 1 Torr = (101 325/760) Pa                                        |
| 標準大気圧     | atm  | 1 atm = 101 325 Pa                                               |
| カロリー      | cal  | 1cal=4.1858J (「15℃」カロリー) , 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J (「熱化学」カロリー) |
| ミクロン      | μ    | 1 μ =1μm=10 <sup>-6</sup> m                                      |

