

## 軽水炉MOX燃料の高度化に関する研究

－効果的なPu利用や使用済燃料削減に向けた燃料概念の検討－

Study on the Advancement of LWR MOX Fuel  
－ Study on Fuel Concept for Effective Pu Utilization and  
Reduction of Spent Fuel Assemblies –

永沼 正行 生澤 佳久 周治 愛之 鈴木 紀一  
山田 美一 紙谷 正仁

Masayuki NAGANUMA, Yoshihisa IKUSAWA, Yoshiyuki SHUJI, Kiichi SUZUKI  
Yoshikazu YAMADA and Masayoshi KAMIYA

核燃料サイクル工学研究所  
MOX燃料技術開発部

MOX Fuel Development Department  
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories

September 2025

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは国立研究開発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。本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課  
〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49  
E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section, Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

軽水炉 MOX 燃料の高度化に関する研究

－ 効果的な Pu 利用や使用済燃料削減に向けた燃料概念の検討 －

日本原子力研究開発機構

核燃料サイクル工学研究所 MOX 燃料技術開発部

永沼 正行, 生澤 佳久<sup>+1</sup>, 周治 愛之, 鈴木 紀一

山田 美一, 紙谷 正仁<sup>+2</sup>

(2025 年 5 月 21 日受理)

軽水炉 MOX 燃料の高度化に向けた研究として、既存炉で効果的なプルトニウム利用（例：プルサーマルプラントの必要基数の削減）や使用済燃料（中間貯蔵量）の削減に貢献できる燃料概念の検討を行った。具体的には、上記の目的には Pu 装荷量増加が有効であることから、PWR を対象に現行の MOX 燃料指針の範囲（Pu 含有率： $\leq 13$  wt%、燃焼度： $\leq 45$  GWd/t、MOX 燃料装荷： $\leq 1/3$ ）で Pu 装荷量増加の可能性を有する燃料の候補概念を抽出し、「炉心・燃料」、「フロントエンド」、「バックエンド」の観点で比較を行い有望な燃料概念の選定を行った。

検討の結果、Pu 装荷量増加の方策として、可燃性毒物などを集合体の外周部（主にコーナ一部）に配置し、集合体内の出力ピーキングを調整することで、外周部の燃料要素の Pu 含有率を現行 MOX 燃料より増加でき、Pu 装荷量の増加に有効であることが分かった。この方策に基づき、Pu 装荷量の増加が期待できる燃料候補概念を幾つか考案し、現行 MOX 燃料炉心と同等の臨界性・出力ピーキングを維持する燃料仕様の評価を行った。各候補の特性比較の結果、集合体のコーナ一部付近に  $UO_2$ -Gd 燃料を装荷する燃料概念では、現行 MOX 燃料炉心より 15%程度 Pu 装荷量を増加でき、かつ、開発負荷も少ないことが示され、最も有望な概念として選定された。この燃料概念について、核燃料サイクル諸量解析コードを用いた概略評価を行い、上記の Pu 装荷量の増加が、実際にプルサーマルプラントの必要基数や核燃料サイクル諸量にどの程度影響するか、定量的な見通しの確認を行った。

---

核燃料サイクル工学研究所：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 33

+1 安全・核セキュリティ統括本部 安全管理部

+2 大洗原子力工学研究所 戦略推進部

Study on the Advancement of LWR MOX Fuel  
- Study on Fuel Concept for Effective Pu Utilization and Reduction of  
Spent Fuel Assemblies -

Masayuki NAGANUMA, Yoshihisa IKUSAWA<sup>+1</sup>, Yoshiyuki SHUJI, Kiichi SUZUKI  
Yoshikazu YAMADA and Masayoshi KAMIYA<sup>+2</sup>

MOX Fuel Development Department  
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 21, 2025)

As a study for advancing LWR MOX fuel, the fuel concept that can contribute to effective plutonium utilization (e.g. reduction of the number of plu-thermal plants required) and reduction of spent fuel subassemblies (interim storage subassemblies) by using existing reactors was investigated. Specifically, since an increase of Pu loading is effective for the above purposes, MOX fuel candidate concepts with the potential to increase Pu loading in the range of the current MOX fuel guidelines (Pu content:  $\leq 13$  wt%, burnup:  $\leq 45$  GWd/t, MOX fuel loading:  $\leq 1/3$ ) for PWRs were identified and compared in terms of “core and fuel design”, “front-end”, and “back-end”, and the promising fuel concept was selected.

Consequently, it was found that placing fuel elements with burnable poisons in the periphery (mainly in the corners) and adjusting the power peaking in the subassembly can increase the Pu content of the fuel elements in the periphery compared to the existing MOX fuel, which is effective in increasing the total Pu loading. Based on this measures, several fuel candidate concepts were devised, then each fuel specification that maintain criticality and power peaking equivalent to the existing MOX fuel were evaluated. As a result of the comparison of the characteristics of each candidate, the fuel concept in which  $\text{UO}_2\text{-Gd}$  fuel is loaded near the corners was conclusively selected as the most promising concept, because it can increase Pu loading by approximately 15% compared to the existing MOX fuel core and has a lower development burden. Moreover, schematic evaluations were conducted for this fuel concept using the Nuclear Material Balance Analysis Code, confirming the quantitative prospect on how much the above increase in Pu loading would actually affect the number of required plu-thermal plants and the material balance of nuclear fuel cycle.

Keywords: Advanced MOX Fuel, Fuel Design, PWR, Plu-thermal Plant, Pu Utilization

---

+1 Safety Administration Department, Safety and Nuclear Security Administration Head Office

+2 Strategy and Management Department, Oarai Nuclear Engineering Institute

目次

1. はじめに .....	1
2. MOX 燃料高度化の燃料候補概念について .....	3
2.1 Pu 装荷量増加に向けた基本的な方策 .....	3
2.2 燃料候補概念の設定 .....	3
2.2.1 可燃性毒物 (Gd, Er) の利用を採用した燃料候補概念 .....	4
2.2.2 燃料の工夫を採用した燃料候補概念 .....	5
2.2.3 上記の検討結果を踏まえ追加で設定した燃料候補概念 .....	5
2.2.4 参考評価用の燃料概念 (事故耐性 ATF (Fe 系) 被覆管採用) .....	6
3. 有望な燃料候補概念の絞り込みに向けた評価 .....	11
3.1 炉心・燃料設計に関する評価 .....	11
3.1.1 炉心計算における解析条件 .....	11
3.1.2 炉心計算における解析手法・評価モデル .....	11
3.1.3 各燃料候補概念の仕様設定の考え方 .....	13
3.1.4 各燃料候補概念の評価 .....	14
3.1.5 炉心・燃料特性の比較評価 .....	27
3.1.6 炉心・燃料設計に関するまとめ .....	31
3.2 フロントエンドに関する評価 .....	31
3.2.1 実現性に関する影響 .....	31
3.2.2 処理能力への影響 .....	32
3.2.3 フロントエンドに関するまとめ .....	33
3.3 バックエンドに関する評価 .....	33
3.3.1 再処理性への影響 .....	33
3.3.2 ガラス固化体への影響 .....	34
3.3.3 バックエンドに関するまとめ .....	36
3.4 有望な燃料候補概念絞り込みに関するまとめ (絞り込みに向けた比較評価) .....	37
4. 選定した燃料概念に関する詳細検討 .....	109
4.1 核燃料サイクル諸量への影響に関する検討 .....	109
4.1.1 核燃料サイクル諸量評価における解析手法・条件 .....	109
4.1.2 核燃料サイクル諸量解析の評価結果 .....	110
4.1.3 核燃料サイクル諸量評価のまとめ .....	111
4.2 選定した燃料概念のフロントエンドに関する検討 .....	113
4.3 選定した燃料概念のバックエンドに関する検討 .....	113
4.4 選定した燃料概念に関するまとめ .....	114
5. 高燃焼度化を想定した場合の課題に関する検討 .....	120
5.1 高燃焼度化に向けた課題整理 .....	120

5.1.1 炉心・燃料（設計例等調査）	120
5.1.2 燃料物性・挙動・製造技術に関する研究	121
5.2 高燃焼度化による MOX 燃料仕様への影響評価	126
5.3 Pu 含有率制限に関する検討	128
5.3.1 Pu 含有率制限に関する文献調査まとめ	128
5.3.2 Pu 含有率とボイド反応度の関係（PWR）	132
5.3.3 Pu 含有率の制限に関するまとめ	133
5.4 フロントエンドの課題	134
5.5 バックエンドの課題	134
6. 全体まとめ	150
7. 今後の課題	152
7.1 主要な課題	152
7.2 課題に関する補足検討（参考）	152
参考文献	161

Table of contents

1. Introduction .....	1
2. Consideration on the advanced MOX fuel candidate concepts .....	3
2.1 Fundamental measures for increase of plutonium loading quantity .....	3
2.2 Devisal of the advanced MOX fuel candidate concepts .....	3
2.2.1 Fuel concepts adopting the use of burnable poisons (Gd, Er) .....	4
2.2.2 Fuel concepts adopting devices to the fuel itself (e.g. annular fuel) .....	5
2.2.3 Promising other fuel concepts devised based on the above results .....	5
2.2.4 Extra fuel concepts as reference evaluation (ATF cladding pin) .....	6
3. Evaluation for selection of the most promising fuel candidate concepts .....	11
3.1 Evaluation regarding the core and fuel designs .....	11
3.1.1 Analysis conditions for the core calculations .....	11
3.1.2 Analysis method and evaluation model for the core calculations .....	11
3.1.3 Approach to setting specifications for the fuel candidate concepts .....	13
3.1.4 Evaluation results for each fuel candidate concept .....	14
3.1.5 Comparative evaluation of the core and fuel properties .....	27
3.1.6 Summary of the core and fuel designs .....	31
3.2 Evaluation regarding the front-end (fuel fabrication) .....	31
3.2.1 Influence on the fuel fabrication feasibility .....	31
3.2.2 Influence on the fuel fabrication ability .....	32
3.2.3 Summary of the front-end .....	33
3.3 Evaluation regarding the back-end (fuel reprocessing and waste) .....	33
3.3.1 Influence on the reprocessing performance .....	33
3.3.2 Influence on the vitrified waste .....	34
3.3.3 Summary of the back-end .....	36
3.4 Summary for selection of the most promising fuel candidate concepts (comparative evaluation for the selection) .....	37
4. Further detailed studies on the advanced MOX fuel concept selected above .....	109
4.1 Study on material balance analysis in the nuclear fuel cycle .....	109
4.1.1 Analysis method and conditions of the material balance analysis .....	109
4.1.2 Evaluation results of the material balance analysis .....	110
4.1.3 Summary of the material balance analysis .....	111
4.2 Additional study on the front-end for the selected fuel concept .....	113
4.3 Additional study on the back-end for the selected fuel concept .....	113
4.4 Summary on the detailed studies for the selected fuel concept .....	114
5. Study on issues in case of supposing high burn-up of the MOX fuel .....	120

5.1 Investigations of issues for high burn-up of the MOX fuel .....	120
5.1.1 Core and fuel designs (e.g. investigations of design examples) .....	120
5.1.2 Investigations on property, behavior and fabrication of the high burn-up MOX fuel .....	121
5.2 Evaluations of influence to MOX fuel specifications by high burn-up .....	126
5.3 Study on the limitation of plutonium content .....	128
5.3.1 Literature survey on the limitation of plutonium content .....	128
5.3.2 Evaluation on the relationship between plutonium content and void reactivity (PWR) .....	132
5.3.3 Summary on the limitation of plutonium content .....	133
5.4 Issues of the front-end .....	134
5.5 Issues of the back-end .....	134
6. Overall summary .....	150
7. Future issues .....	152
7.1 Major issues .....	152
7.2 Additional evaluation for the issue (reference evaluation) .....	152
Reference literatures .....	161

表リスト

表 2.1	MOX 高度化燃料の候補として設定した各燃料概念の概要と特徴	7
表 3.1.1-1	今回の MOX 燃料高度化検討で用いる Pu 同位体組成（国内再処理で回収される PWR UO <sub>2</sub> 燃料の計算条件・結果）	39
表 3.1.1-2	燃料ペレットに含まれる核燃料元素核種の原子量・半減期	39
表 3.1.1-3	構造材・減速材に含まれる元素核種の原子量・存在比	40
表 3.1.1-4	被覆管材（ジルカロイ-4）成分元素の組成・密度	41
表 3.1.1-5	可燃性毒物（Gd・Er）と母材（Zr）の金属密度・酸化物密度・組成比	41
表 3.1.4(1)-1	現行 MOX 燃料（リファレンス）の物質収支（標準 Pu 組成と高次化 Pu 組成使用時の比較）	42
表 3.1.4(2)①-1	1-1：MOX 燃料固溶体型（Gd）の物質収支（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	43
表 3.1.4(2)②-1	1-1：MOX 燃料固溶体型（Er）の物質収支（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	43
表 3.1.4(2)③-1	1-2：Duplex 型（Gd）の物質収支（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	44
表 3.1.4(2)④-1	1-2：Duplex 型（Er）の物質収支（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	44
表 3.1.4(2)⑤-1	1-3：被覆管内張型（Gd）の物質収支（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	45
表 3.1.4(2)⑥-1	1-3：被覆管内張型（Er）の物質収支（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	45
表 3.1.4(3)①-1	1-4：中空ペレット燃料型の物質収支（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	46
表 3.1.4(3)②-1	1-5：UO <sub>2</sub> 燃料置き換え型の物質収支（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	46
表 3.1.4(4)①-1	1-6：UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型（Gd）の物質収支（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	47
表 3.1.4(4)②-1	1-6：UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型（Er）の物質収支（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	47
表 3.1.4(4)③-1	1-7：Gd 酸化物要素型の物質収支（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	48
表 3.1.4(4)④-1	1-7：Er 酸化物要素型の物質収支（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	48
表 3.1.4(5)①-1	2-1：ATF（Fe 系）被覆管型の物質収支（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	49
表 3.1.5-1	炉心・燃料設計に関する特性の比較評価（燃料仕様）	50
表 3.1.5-2	炉心・燃料設計に関する特性の比較評価（物質収支）	51

表 3.1.5-3	各燃料概念の崩壊熱計算結果の比較（集合体当たり）	52
表 3.1.5-4	各燃料概念の崩壊熱計算結果の比較（炉心当たり相当：炉心中の MOX・UO <sub>2</sub> 燃料集合体数比で重み付け）	53
表 3.1.5-5	炉心・燃料設計に関する特性の比較評価（使用済燃料貯蔵プールへの影響）	54
表 3.1.5-6	炉心・燃料設計に関する特性の比較評価（燃料開発の負荷（実用化時期見通し））	55
表 3.2-1	フロントエンドに関する特性の比較評価	56
表 3.3-1	再処理時における 1tHM 当たりの溶解液の発熱の比較	57
表 3.3-2	ガラス固化体の性状	59
表 3.3-3	1tHM 当たりのガラス固化体発生量の比較（FP 含有率基準）	61
表 3.3-4	ガラス固化体 1 体当たりの発熱の比較	63
表 3.3-5	バックエンドに関する特性の比較評価（再処理性）	65
表 3.3-6	バックエンドに関する特性の比較評価（ガラス固化体）	66
表 3.4-1	MOX 高度化燃料各候補概念を対象とした概略評価（炉心・燃料設計、フロントエンド、バックエンド）の結果取りまとめ表	67
表 4.1-1	各対象炉心の解析条件	115
表 4.1-2	核燃料サイクル諸量概略評価結果の比較	116
表 4.1-3	MOX 高度化燃料炉心の諸量概略評価結果のまとめ	117
表 4.1-4	追加解析ケースの解析条件（高燃焼度・高 Pu 含有）	118
表 4.1-5	追加解析ケースの核燃料サイクル諸量概略評価結果（高燃焼度・高 Pu 含有）	118
表 5.1.1-1	MOX 燃料の高燃焼度化による影響の調査結果まとめ（対象：PWR）	137
表 5.1.2-1	MOX 燃料製造方法の違いによる Pu 均質性の違い	138
表 5.1.2-2	軽水炉（重水炉及び試験研究炉含む）における MOX 燃料照射試験の実施状況調査	139
表 5.1.2-3	主な燃料仕様と照射条件	141
表 5.1.2-4	高燃焼度 MOX 燃料の NSRR の照射試験の概要	141
表 5.2-1	MOX 高度化燃料（高燃焼度燃料）の解析結果一覧（現行燃焼度燃料炉心との比較）	142
表 5.5-1	再処理時における 1tHM 当たりの溶解液の発熱量の比較 [単位：kW]	143
表 5.5-2	1 tHM 当たりのガラス固化体発生量（FP 含有率基準）の比較 [単位：体]	143
表 5.5-3	ガラス固化体 1 体当たりの発熱量の比較 [単位：kW/体]	144
表 7.1	物質収支の比較（MVP 評価仕様と MOSRA-SRAC 評価仕様の比較）	155

図リスト

図 2.2-1	現行 MOX 燃料集合体の集合体配置・燃料仕様	8
図 2.2-2	「MOX 燃料固溶体型」の燃料概念	8
図 2.2-3	「Duplex 型」の燃料概念	9
図 2.2-4	「被覆管内張型」の燃料概念	9
図 2.2-5	「中空ペレット燃料型」の燃料概念	10
図 3.1.2-1	炉心計算の体系図（集合体セル計算）	71
図 3.1.4(1)-1	集合体内燃料要素配置と仕様（現行 MOX 燃料（リファレンス））（標準 Pu 組成と高次化 Pu 組成使用時の比較）	72
図 3.1.4(1)-2	無限増倍率の燃焼度変化（現行 MOX 燃料（リファレンス））（標準 Pu 組成と高次化 Pu 組成使用時の比較）	72
図 3.1.4(1)-3	局所出力ピーキング係数の燃焼度変化（現行 MOX 燃料（リファレンス））（標準 Pu 組成と高次化 Pu 組成使用時の比較）	73
図 3.1.4(1)-4	集合体内燃料要素の局所出力分布（現行 MOX 燃料（リファレンス））（高次化 Pu 組成（Puf 割合：約 65wt%））	73
図 3.1.4(1)-5	集合体内燃料要素の局所出力分布（現行 MOX 燃料（リファレンス））（標準 Pu 組成（Puf 割合：約 68wt%））	74
図 3.1.4(2)①-1	集合体内の燃料要素配置と仕様（1-1：MOX 燃料固溶体型（Gd））	75
図 3.1.4(2)①-2	無限増倍率の燃焼度変化（1-1：MOX 燃料固溶体型（Gd））（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	75
図 3.1.4(2)①-3	局所出力ピーキング係数の燃焼度変化（1-1：MOX 燃料固溶体型（Gd））（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	76
図 3.1.4(2)①-4	集合体内燃料要素の局所出力分布（1-1：MOX 燃料固溶体型（Gd））	76
図 3.1.4(2)②-1	集合体内の燃料要素配置と仕様（1-1：MOX 燃料固溶体型（Er））	77
図 3.1.4(2)②-2	無限増倍率の燃焼度変化（1-1：MOX 燃料固溶体型（Er））（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	77
図 3.1.4(2)②-3	局所出力ピーキング係数の燃焼度変化（1-1：MOX 燃料固溶体型（Er））（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	78
図 3.1.4(2)②-4	集合体内燃料要素の局所出力分布（1-1：MOX 燃料固溶体型（Er））	78
図 3.1.4(2)③-1	集合体内の燃料要素配置と仕様（1-2：Duplex 型（Gd））	79
図 3.1.4(2)③-2	無限増倍率の燃焼度変化（1-2：Duplex 型（Gd））（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	79
図 3.1.4(2)③-3	局所出力ピーキング係数の燃焼度変化（1-2：Duplex 型（Gd））（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	80
図 3.1.4(2)③-4	集合体内燃料要素の局所出力分布（1-2：Duplex 型（Gd））	80
図 3.1.4(2)④-1	集合体内の燃料要素配置と仕様（1-2：Duplex 型（Er））	81
図 3.1.4(2)④-2	無限増倍率の燃焼度変化（1-2：Duplex 型（Er））（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）	81

図 3.1.4(2)④-3	局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-2 : Duplex 型 (Er)) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)	82
図 3.1.4(2)④-4	集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-2 : Duplex 型 (Er))	82
図 3.1.4(2)⑤-1	集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-3 : 被覆管内張型 (Gd))	83
図 3.1.4(2)⑤-2	無限増倍率の燃焼度変化 (1-3 : 被覆管内張型 (Gd)) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)	83
図 3.1.4(2)⑤-3	局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-3 : 被覆管内張型 (Gd)) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)	84
図 3.1.4(2)⑤-4	集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-3 : 被覆管内張型 (Gd))	84
図 3.1.4(2)⑥-1	集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-3 : 被覆管内張型 (Er))	85
図 3.1.4(2)⑥-2	無限増倍率の燃焼度変化 (1-3 : 被覆管内張型 (Er)) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)	85
図 3.1.4(2)⑥-3	局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-3 : 被覆管内張型 (Er)) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)	86
図 3.1.4(2)⑥-4	集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-3 : 被覆管内張型 (Er))	86
図 3.1.4(3)①-1	集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-4 : 中空ペレット燃料型)	87
図 3.1.4(3)①-2	無限増倍率の燃焼度変化 (1-4 : 中空ペレット燃料型) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)	87
図 3.1.4(3)①-3	局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-4 : 中空ペレット燃料型) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)	88
図 3.1.4(3)①-4	集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-4 : 中空ペレット燃料型)	88
図 3.1.4(3)②-1	集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-5 : UO <sub>2</sub> 燃料置き換え型)	89
図 3.1.4(3)②-2	無限増倍率の燃焼度変化 (1-5 : UO <sub>2</sub> 燃料置き換え型) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)	89
図 3.1.4(3)②-3	局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-5 : UO <sub>2</sub> 燃料置き換え型) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)	90
図 3.1.4(3)②-4	集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-5 : UO <sub>2</sub> 燃料置き換え型)	90
図 3.1.4(4)①-1	集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-6 : UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd))	91
図 3.1.4(4)①-2	無限増倍率の燃焼度変化 (1-6 : UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd)) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)	91
図 3.1.4(4)①-3	局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-6 : UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd)) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)	92
図 3.1.4(4)①-4	集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-6 : UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd))	92
図 3.1.4(4)②-1	集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-6 : UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Er))	93
図 3.1.4(4)②-2	無限増倍率の燃焼度変化 (1-6 : UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Er)) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)	93
図 3.1.4(4)②-3	局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-6 : UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Er)) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)	94
図 3.1.4(4)②-4	集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-6 : UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Er))	94

図 3.1.4(4)③-1	集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-7 : Gd 酸化物要素型) ……………	95
図 3.1.4(4)③-2	無限増倍率の燃焼度変化 (1-7 : Gd 酸化物要素型) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較) ……………	95
図 3.1.4(4)③-3	局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-7 : Gd 酸化物要素型) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較) ……………	96
図 3.1.4(4)③-4	集合体内燃料要素の局所出力分布 (Gd 酸化物要素型) ……………	96
図 3.1.4(4)④-1	集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-7 : Er 酸化物要素型) ……………	97
図 3.1.4(4)④-2	無限増倍率の燃焼度変化 (1-7 : Er 酸化物要素型) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較) ……………	97
図 3.1.4(4)④-3	局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-7 : Er 酸化物要素型) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較) ……………	98
図 3.1.4(4)④-4	集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-7 : Er 酸化物要素型) ……………	98
図 3.1.4(5)①-1	集合体内の燃料要素配置と仕様 ([参考] 2-1 : ATF (Fe 系) 被覆管型) ……………	99
図 3.1.4(5)①-2	無限増倍率の燃焼度変化 ([参考] 2-1 : ATF (Fe 系) 被覆管型) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較) ……………	99
図 3.1.4(5)①-3	局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 ([参考] 2-1 : ATF (Fe 系) 被覆管型) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較) ……………	100
図 3.1.4(5)①-4	集合体内燃料要素の局所出力分布 ([参考] 2-1 : ATF (Fe 系) 被覆管型) ……………	100
図 3.3-1	ガラス固化体 1 体当たりの発熱量 (FP 含有率基準) 及びその内訳 (FP、Am、Cm) の比較 ……………	101
図 3.4-1	MOX 高度化燃料各候補概念の燃料集合体内要素配置・仕様まとめ ……………	107
図 4.3-1	解体システムの装置イメージ ……………	119
図 5.1.2-1	UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub> 系の融点 ……………	145
図 5.1.2-2	MOX 燃料照射試験の燃焼度と Pu 含有率の関係 ……………	145
図 5.2-1	MOX 高度化燃料 (高燃焼度燃料) の燃料集合体構成 (現行燃焼度燃料との比較) ……………	146
図 5.3-1	各解析ケースにおける Pu 含有率とボイド反応度 (PWR) の関係 ……………	148
図 5.5-1	ガラス固化体 1 体当たりの発熱量 (FP 含有率基準) 及びその内訳 (FP、Am、Cm) の比較 ……………	149
図 7-1	UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd) の燃料仕様・集合体配置 (MOSRA-SRAC 評価仕様) ……………	156
図 7-2	MVP-BURN 計算体系 (4×1/4 集合体モデル) ……………	156
図 7-3	MVP-BURN による UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd) の計算結果 (無限増倍率) ……………	157
図 7-4	MVP-BURN による UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd) の計算結果 出力ピーキング係数) ……………	157
図 7-5	MVP-BURN による計算結果 (集合体内局所出力分布) (UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd) (MOSRA-SRAC 評価仕様 (見直し前))) ……………	158

図 7-6	MVP-BURN コードで評価した $\text{UO}_2$ 燃料固溶体型 (Gd) の燃料仕様・集合体配置 (MOSRA-SRAC との比較) .....	159
図 7-7	MVP-BURN による計算結果 (集合体内局所出力分布) ( $\text{UO}_2$ 燃料固溶体型 (Gd) (MVP 評価仕様 (見直し後))) .....	160

## 1. はじめに

現在、我が国では、ウラン資源の有効活用及びプルトニウムバランスの確保のため、軽水炉で使用した使用済二酸化ウラン燃料（以下、 $\text{UO}_2$  燃料）を再処理して回収されるプルトニウム（以下、Pu）について、ウラン（以下、U）と混合する混合酸化物燃料（以下、MOX 燃料）とし軽水炉で再使用するプルサーマル炉の利用を進めているところである。一方で、このプルサーマル炉の将来にわたる継続的な利用に関しては、以下のような点が主要な課題として挙げられている。

- ① 国内再処理工場の運転が開始されたとしても、その時点で稼働しているプルサーマルプラントの基数が制限されている可能性がある。
- ② プルサーマル炉で使用した MOX 燃料の使用済燃料については、プルトニウムの劣化（高次化）が生じるため、プルサーマル炉で再度利用することは困難であり、将来、高速炉が導入されるまで、保管（中間貯蔵）される使用済 MOX 燃料は増加していく。
- ③ MOX 燃料は  $\text{UO}_2$  燃料と比べ大きく製造コストが増加するため、コストの負担が大きい。

これらの課題については、これまで色々な方策が検討されてきているところであるが、そのうちの一つの有効な方策として、MOX 燃料中の Pu 装荷量を従来よりも増加することができれば、以下のように上述の課題を軽減できる可能性が期待できる。

- ① 国内再処理工場で回収される Pu について、全量を消費するプルサーマルプラントの基数を減らすことができる。
- ② 国内再処理工場で回収される Pu 量が同一でも、使用後に蓄積される使用済 MOX 燃料の集合体数を減らすことができる。
- ③ 国内再処理工場で回収される Pu 量が同一でも、製造する MOX 燃料集合体数を減らすことができ、その分コストを低減できる。

そこで、本報告では、軽水炉 MOX 燃料の高度化に向けた研究として、既存のプルサーマル炉に大きな影響を与えない範囲内で Pu 装荷量を増加することを指向し、効果的な Pu 利用（例：プルサーマルプラントの必要基数の削減）や使用済 MOX 燃料（中間貯蔵量）の削減に貢献できる燃料概念の検討を行うこととした。具体的な検討の方針としては、以下の条件を満たすことを前提に、現行の MOX 燃料指針<sup>[1-1]</sup>の制限範囲で Pu 装荷量の増加を可能とする新型の MOX 燃料の検討を行うこととした。

- ・ 既存のプルサーマル炉に適用可能（現行の MOX 燃料指針の制限範囲内）
  - Pu 含有率： 13 wt%以下
  - 燃焼度： 45 GWd/t まで
  - MOX 燃料装荷量： 炉心全体の 1/3 まで
- ・ MOX 燃料製造施設への影響が少ない
- ・ 開発負荷が大きくない（比較的早期に導入可能）

以上の方針を踏まえ、本研究の中では、まずは加圧水型軽水炉（以下、PWR）を対象に検討を行うこととし、具体的には、以下の内容の検討を行う。

- ① 現行の MOX 燃料指針の範囲内で Pu 装荷量増加の可能性を有する燃料の候補概念を検討し、幾つか有望な燃料概念の抽出を行う（2章）。
- ② それら概念を対象に簡易的な核計算（集合体セル計算ベース）を行い、現行の MOX 燃料炉心と同等の核的特性（臨界性、出力ピーキング）を維持する燃料仕様の設定を行う。そして、設定した燃料に基づき炉心・燃料設計及びフロントエンド・バックエンドに関する比較評価を行い、有望な燃料概念の絞り込みを行う（3章）。
- ③ 選定した燃料概念について、核燃料サイクル諸量に関する概略的な評価などより詳細な評価を行い、効果的なプルトニウム利用にどの程度有効となるか定量的な見通しの評価を行う。併せて、フロントエンド・バックエンドへの影響についても概略的な評価を行う（4章）。
- ④ 本研究の中では、現行の MOX 燃料指針の範囲で Pu 装荷量を増加させる燃料概念の検討を実施するが、一方、将来、Pu 装荷量の増加に伴い、高燃焼度化が必要となる場合も想定される。そのため、高燃焼度化に向けた課題について調査・検討を行う（5章）。

次章以降、これらの内容に関し評価・検討を行った結果を示していく。

## 2. MOX 燃料高度化の燃料候補概念について

### 2.1 Pu 装荷量増加に向けた基本的な方策

前章で述べたように、MOX 燃料の高度化として、現行の MOX 燃料指針の範囲で Pu 装荷量の増加を指向した燃料について検討を行う。どのような燃料概念とすることで可能となるか、まず Pu 装荷量の増加に向けたアイデアの抽出を行った。その結果として、PWR の現行 MOX 燃料では、燃料集合体中の最大 Pu 含有率は既に 12 wt%程度で、現行指針の制限 13 wt%に対し余裕がないことから、基本的には MOX 燃料集合体中に存在する低 Pu 含有率の燃料要素の Pu 含有率を高めるような方策を選択することが妥当と考えた。

PWR プルサーマル炉心の MOX 燃料集合体では、炉心が 1/3 MOX 炉心であるので、 $\text{UO}_2$  燃料集合体が隣接し、その  $\text{UO}_2$  燃料集合体からの柔らかいスペクトルの中性子<sup>1)</sup>の流入のため、外周側で燃料要素の出力が増加する傾向がある。そのため、集合体内の出力ピーキングを調整するため、図 2.2-1 に示すように、現行の MOX 燃料集合体（リファレンス）では中央領域の 12 wt%に対し、外周側には 5~7 wt%程度と Pu 含有率の低い燃料要素が装荷されている（図中、オレンジ色の領域）。この出力ピーキングの低減を Pu 含有率の低下以外の方法で調整することができれば、低 Pu 含有燃料の Pu 含有率を増加でき、全体として Pu 装荷量を増加できる可能性が考えられる。そこで、そのための方策案を色々抽出し検討を行った結果、有効なアイデアとして 2 種類の方法が考案された。一つは、ガドリニウム（以下、Gd）など可燃性毒物を利用し外周側の中性子を吸収することで調整する方法であり、もう一つは、中空ペレット燃料や  $\text{UO}_2$  燃料への置き換えなど燃料自体の工夫を行う方法である。以下に、それぞれの方法により具体的に設定した幾つかの燃料候補概念について説明を行う。

### 2.2 燃料候補概念の設定

MOX 燃料高度化の燃料候補概念として、可燃性毒物の利用や燃料の工夫を行う方法などを基本的な方策とした具体的な燃料概念を幾種類か設定した。加えて、これらの方策を採用した燃料概念の検討結果を踏まえ、より発展的な候補概念も追加で幾つか設定した。また、今回の MOX 高度化燃料の検討の範囲外であり、あくまで参考評価用であるが、Pu 装荷量は増加する方向となるため、将来、事故耐性の ATF（Fe 系 被覆管が適用された場合の燃料概念も設定することとした<sup>2)</sup>。

以下に、それぞれ設定した具体的な燃料候補概念の説明を行う。また、表 2.1 には、各燃料候補概念の概要をまとめた（表 2.1 では、各燃料候補概念の番号を設定しており、次章以降、この番号を使用する）。

<sup>1)</sup> Pu は U より熱中性子の吸収断面積が大きいため、一般的に MOX 燃料集合体の方が熱中性子の割合が少なく中性子スペクトルは固くなる（高エネルギー側になる）。そのため、隣接する  $\text{UO}_2$  燃料集合体から流入する中性子のスペクトルは、MOX 燃料で生じる中性子より柔らかく（低エネルギー側）、そのため MOX 燃料集合体の外周側で出力の増加が生じる。

<sup>2)</sup> 被覆材 SUS により熱中性子の吸収が増加するので、臨界にするため Pu 装荷量を増加させる必要がある。

### 2.2.1 可燃性毒物 (Gd, Er) の利用を採用した燃料候補概念

この燃料概念は、MOX 燃料集合体外周側の燃料要素の出力ピーキングを抑制するため、可燃性毒物入りの MOX 燃料要素を採用する概念であり、その方策として、まず以下の 3 種類、「MOX 燃料固溶型」、「Duplex 型」、「被覆管内張型」を考案した。ここで、可燃性毒物としては、軽水炉で従来から実績のある Gd に加え、使用実績はなく開発負荷はより大きくなるが、中性子の吸収断面積が Gd より小さく、核特性への影響が穏やかになることが期待できるエルビウム (以下、Er) についても対象とした。それぞれの燃料候補概念について、以下に具体的な説明を示す。

#### ① MOX 燃料固溶体型

外周側に配置する可燃性毒物入りの燃料要素として、Gd (もしくは Er) の酸化物 (酸化ガドリニウム (以下、 $Gd_2O_3$ ) もしくは酸化エルビウム (以下、 $Er_2O_3$ )) を固溶させ均一に添加した MOX 燃料ペレットを用いる燃料概念である。Gd (もしくは Er) を添加した MOX 燃料を MOX-Gd 燃料 (もしくは MOX-Er 燃料) と称することとし、その概念図を図 2.2-2 に示すが、図の集合体のように MOX-Gd 燃料 (もしくは MOX-Er 燃料) の燃料要素を出力ピーキング調整のため、集合体の外周側に配置する燃料概念である。

#### ② Duplex 型<sup>3)</sup>

外周側に配置する可燃性毒物入りの燃料要素として、中空の MOX ペレットの中心に、Gd (もしくは Er) の酸化物 ( $Gd_2O_3$  もしくは  $Er_2O_3$ ) を添加した棒材 (Gd, Er 量の調整のためジルコニア (以下、 $ZrO_2$ ) 母材中に添加) を挿入した燃料概念である。この燃料の概略図を図 2.2-3 に示すが、燃料と可燃性毒物の 2 領域に分かれることから Duplex 型と称している。

この燃料型は、かつて新型転換炉 (以下、ATR) の研究開発において、高性能化のため Gd を添加した MOX 燃料の検討を行っており、その候補の一つとして、検討されていた概念である。もともと、上述の「① MOX 燃料固溶体型」を採用すると、燃料製造時に、通常の MOX 燃料と可燃性毒物とのコンタミネーションの恐れがあり、別の専用の製造ラインを作る必要性が指摘されていた。そのため、Duplex 型は、その改善案として検討された燃料概念であり、照射試験に向け少数本製造された実績も有している<sup>[2-1]</sup>。ただし、ATR の開発中止により、結果、照射試験は未実施であり、照射挙動の把握といった課題は残っている点に留意が必要である。

ベースとなる MOX 燃料ペレットは、現行の MOX 燃料と異なる中空ペレット燃料となるが、中空ペレット燃料自体は、過去に日本原子力発電株式会社の敦賀 1 号機での先行照射試験<sup>[2-2, 2-3]</sup>や、高速炉燃料でも製造・照射の実績があり、実用化に向けては、これらの知見を活用できるものと考えられる。

#### ③ 被覆管内張型

外周側に配置する可燃性毒物入りの燃料要素として、Gd (もしくは Er) を内張りした被覆管を採用する燃料概念である。この燃料概念の概略図を図 2.2-4 に示すが、この概

<sup>3)</sup> Duplex: 「2 つの部分からなる、2 重の」という意味を持つ。

念は、MOX 燃料ペレット自体は従来燃料と同様であるため燃料製造に関する技術開発の必要性はないが、これまで Gd（もしくは Er）を内張りした実績はなく、ライニング技術や溶接技術などの燃料技術の開発や照射挙動の把握といった課題を有している点に留意が必要である。

### 2.2.2 燃料の工夫を採用した燃料候補概念

これは、MOX 集合体外周側の燃料要素の出力ピーキングを抑制するため、工夫した燃料に置き換える概念であり、その方策として、以下の 2 種類、「中空ペレット燃料型」、「UO<sub>2</sub> 燃料置き換え型」を考案し、それぞれについて検討することとした。それぞれの燃料候補概念について、以下に具体的な説明を示す。

#### ① 中空ペレット燃料型

出力ピーキング調整のため外周側に配置する燃料要素として、図 2.2-5 に示すように、中空ペレット燃料を装荷した要素を採用する燃料概念である。その理由としては、中空ペレット燃料では、中心空孔を開けることで核燃料物質の装荷量を調整でき、その効果によって外周部の燃料要素の出力を抑制できると考えてのことである。中空ペレット燃料は現行の中実 MOX 燃料と異なるが、中空ペレット燃料自体は、過去に敦賀 1 号機での先行照射試験<sup>[2-2, 2-3]</sup>や、高速炉燃料でも製造・照射の実績があり、実用化に向けては、これらの知見を活用できるものとする。また、中空ペレット燃料では、照射中の燃料中心温度が低下するため、核分裂生成物ガス（以下、FP ガス）放出率を低下（それにより、ガス内圧も低下）できることなどの効果も期待できるという利点も有している。

#### ② UO<sub>2</sub> 燃料置き換え型

出力ピーキング調整のため外周側に配置する燃料要素として、MOX 燃料の代わりに低濃縮の UO<sub>2</sub> 燃料に置き換えるタイプの燃料概念である。これは、出力の調整は全て UO<sub>2</sub> 燃料で行い、MOX 燃料は高 Pu 含有率の燃料のみとすることで、炉全体として Pu の装荷量を増加させることを意図した概念である。また、UO<sub>2</sub> 燃料は製造・使用実績があるので、開発要素がほとんどないという特長も有している。ただ、1/3 MOX 炉心といった場合、燃料要素の本数について全燃料の 1/3 にするという意味するので、MOX 集合体中に UO<sub>2</sub> 燃料要素が装荷される場合、その分 MOX 燃料集合体の製造体数は増加する点に留意が必要である。

### 2.2.3 上記の検討結果を踏まえ追加で設定した燃料候補概念

上記 2.2.1 項、2.2.2 項の燃料候補概念の検討結果は、後の章で説明するが、その検討結果を踏まえ、より発展的な燃料候補概念を追加で設定した。具体的には、上述の燃料候補概念をベースに、燃料開発やフロントエンド、バックエンドなどの点で負荷がより軽減できる可能性がある燃料概念として、以下の 2 種類、「UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型」、「Gd (Er) 酸化物要素型」を考案し、それぞれについて検討することとした。それぞれの燃料候補概念について、以下に具体的な説明を示す。

### ① $\text{UO}_2$ 燃料固溶体型

2.2.1 項の「MOX 燃料固溶体型」の検討の結果（結果の詳細は、後の章で説明する）、MOX-Gd 燃料要素を集合体中に少数本装荷するような比較的軽微な対応で、Pu 装荷量のある程度の増加が可能になる見通しが得られた。そこで、Gd を添加する燃料要素として、軽水炉で使用実績がある  $\text{UO}_2$ -Gd 燃料（沸騰水型軽水炉（以下、BWR）の MOX 燃料集合体や PWR でも  $\text{UO}_2$  燃料集合体で製造・使用実績あり）で同様の対応ができれば、開発負荷の軽減が期待できることになる。そこで、本燃料概念は、 $\text{UO}_2$ -Gd 燃料要素を MOX-Gd 燃料要素の代わりに配置することを考えた燃料概念である。また、 $\text{UO}_2$ -Er 燃料要素を採用した燃料についても、併せて検討を行うこととした。

### ② Gd (Er) 酸化物要素型

2.2.1 項の「MOX 燃料固溶体型」の検討の結果（結果の詳細は、後の章で説明する）、MOX-Gd 燃料要素を集合体中に少数本装荷するような比較的軽微な対応で、Pu 装荷量のある程度の増加が可能になる見通しが得られた。本燃料概念は、Gd を添加する燃料要素として、核燃料でない Gd（もしくは Er）の酸化物（ $\text{Gd}_2\text{O}_3$  又は  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ）の棒を MOX-Gd 燃料ペレットの代わりに装荷した燃料要素を使用する概念である。この燃料概念では、Gd 添加燃料要素が核燃料でないので、開発負荷の軽減（照射試験が材料照射試験となる）、また、製造負荷の軽減が期待できる。加えて、再処理時に溶解前に取り外せれば、再処理負荷の軽減も期待できる。ここで、Gd（もしくは Er）の酸化物（ $\text{Gd}_2\text{O}_3$  又は  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ）の棒については、Gd, Er 装荷量の調整のため  $\text{ZrO}_2$  母材中に添加することを想定した。

## 2.2.4 参考評価用の燃料概念（事故耐性 ATF (Fe 系) 被覆管採用)

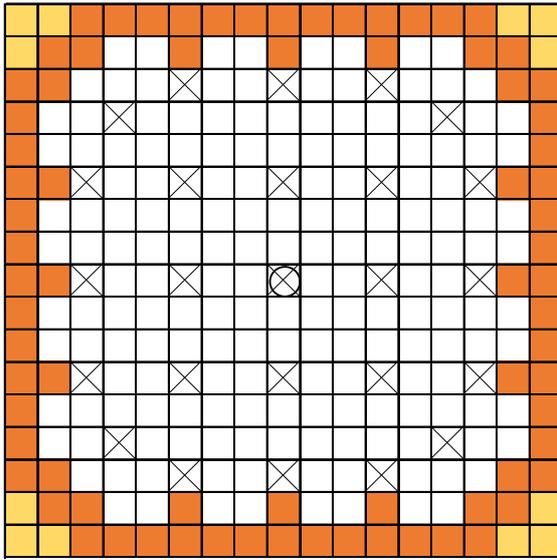
今回の MOX 高度化燃料の検討の範囲外であるが、参考として、将来、事故耐性の ATF (Fe 系) 被覆管が導入されることを想定した場合、ATF はジルカロイより中性子吸収が大きいので、Pu 装荷量にどのような影響があるか見通しを評価する燃料概念も設定することとした。以下に、この燃料概念についての具体的な説明を示す。

### ① ATF (Fe 系) 被覆管型

現在研究されている事故耐性被覆管のうち、ATF (Fe 系) 被覆管は熱中性子の吸収が大きい点が課題であり、核分裂性物質割合の増加や被覆管の厚さの低減などの対応が必要になる。ここで、核分裂性物質割合の増加は、MOX 燃料の場合、Pu 装荷量の増加にもつながるので、ATF (Fe 系) 被覆管を MOX 燃料に適用した場合、Pu 装荷量への影響がどのようになるか見通しを評価することとした。ここで、MOX 燃料の基本的なタイプとしては、現行 MOX 燃料集合体（リファレンス）の配置をベースとすることとし、ATF (Fe 系) 被覆管と組み合わせた場合、Pu 含有率の仕様への影響を評価するものとした。

表 2.1 MOX 高度化燃料の候補として設定した各燃料概念の概要と特徴

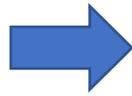
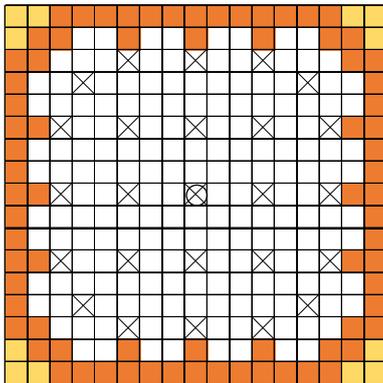
燃料候補概念		概要		特徴	
可燃性 毒物の 利用	1-1: MOX 燃料固溶体型	Gd	出力ピーキングの調整のため Gd(もしくは Er)の酸化物(Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> もしくは Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )を固溶させ均一に添加した MOX 燃料を使用。	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料製造時に通常の MOX 燃料とのコンタミネーションの恐れがあり別の製造ラインを作る必要あり。</li> <li>MOX-Gd(Er)燃料について、物性・照射試験の必要あり。</li> <li>燃料製造時に通常の MOX 燃料とのコンタミネーションの恐れは、比較的小さい。</li> <li>かつて、新型転換炉(ATR)の研究開発において検討実績あり。照射試験に向け少数製造された実績もある。ただし、照射試験は未実施であり、実用化には照射試験の必要あり。</li> <li>燃料製造に関する技術開発の必要ない。</li> <li>Gd(もしくは Er)のライニング技術や溶接技術などの被覆管の製造技術や照射挙動といった課題あり。</li> <li>敦賀 1 号機での先行照射試験や高速炉燃料でも製造・照射実績があり、これらの知見を活用できる。</li> <li>中空ペレット燃料では、照射中の燃料中心温度低下による FP ガス放出率低下などの効果も期待できる。</li> <li>UO<sub>2</sub> 燃料を利用するので開発要素はほとんどない。</li> <li>MOX 燃料集合体の製造体数は増加する。</li> <li>UO<sub>2</sub>-Gd 燃料は、BWR の MOX 燃料集合体や PWR の UO<sub>2</sub> 燃料集合体で製造・使用実績があるため、開発負荷の軽減が期待できる。</li> <li>Gd(もしくは Er) 酸化物は核燃料でないので、開発負荷の軽減(照射試験が材料照射試験となる)、また、製造負荷の軽減も期待できる。</li> <li>再処理時に溶解前に取り外せれば、再処理負荷の軽減も期待できる。</li> <li>事故耐性被覆管のうち、ATF(Fe 系)被覆管は熱中性子の吸収が大きく、核分裂性物質割合の増加が必要になる。これは Pu 装荷量の増加にもつながる(Pu 装荷量への影響がどのようになるか見通しを評価)。</li> </ul>	
		Er			
	1-2: Duplex 型	Gd	出力ピーキングの調整のため中空 MOX ペレットの中心に、Gd(もしくは Er)の酸化物(Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> もしくは Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )を添加した棒材(ZrO <sub>2</sub> )を挿入した燃料を使用。		
燃料の 工夫	1-3: 被覆管内張型	Gd	出力ピーキングの調整のため Gd(もしくは Er)を内張りした被覆管を用いた燃料を使用。	<ul style="list-style-type: none"> <li>出力ピーキングの調整のため中空ペレット燃料を装荷した燃料要素を使用。</li> <li>出力ピーキングの調整のため MOX 燃料の替わりに低濃縮 UO<sub>2</sub> 燃料に置き換え。</li> <li>1-1 の検討結果を踏まえ、MOX-Gd 燃料に替わり使用実績がある UO<sub>2</sub>-Gd 燃料で同様の対応を検討。</li> <li>UO<sub>2</sub>-Er 燃料についても、併せて検討。</li> <li>1-1 の検討結果を踏まえ、MOX-Gd 燃料に替わり核燃料でない Gd(もしくは Er)の酸化物(Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>又は Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)を添加した棒(ZrO<sub>2</sub>)を装荷した燃料要素を使用。</li> </ul>	
		Er			
	1-4: 中空ペレット燃料型	Gd	出力ピーキングの調整のため中空ペレット燃料要素を使用。		
追加の 設定	1-5: UO <sub>2</sub> 燃料置き換え型	Gd	出力ピーキングの調整のため MOX 燃料の替わりに低濃縮 UO <sub>2</sub> 燃料に置き換え。	<ul style="list-style-type: none"> <li>1-1 の検討結果を踏まえ、MOX-Gd 燃料に替わり使用実績がある UO<sub>2</sub>-Gd 燃料で同様の対応を検討。</li> <li>UO<sub>2</sub>-Er 燃料についても、併せて検討。</li> <li>1-1 の検討結果を踏まえ、MOX-Gd 燃料に替わり核燃料でない Gd(もしくは Er)の酸化物(Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>又は Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)を添加した棒(ZrO<sub>2</sub>)を装荷した燃料要素を使用。</li> </ul>	
		Er			
	1-6: UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型	Gd	出力ピーキングの調整のため MOX 燃料の替わりに低濃縮 UO <sub>2</sub> 燃料に置き換え。		
参考	2-1: ATF(Fe 系)被覆管型	Gd	出力ピーキングの調整のため MOX 燃料の替わりに低濃縮 UO <sub>2</sub> 燃料に置き換え。	<ul style="list-style-type: none"> <li>出力ピーキングの調整のため MOX 燃料の替わりに低濃縮 UO<sub>2</sub> 燃料に置き換え。</li> <li>1-1 の検討結果を踏まえ、MOX-Gd 燃料に替わり使用実績がある UO<sub>2</sub>-Gd 燃料で同様の対応を検討。</li> <li>UO<sub>2</sub>-Er 燃料についても、併せて検討。</li> <li>1-1 の検討結果を踏まえ、MOX-Gd 燃料に替わり核燃料でない Gd(もしくは Er)の酸化物(Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>又は Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)を添加した棒(ZrO<sub>2</sub>)を装荷した燃料要素を使用。</li> </ul>	
		Er			



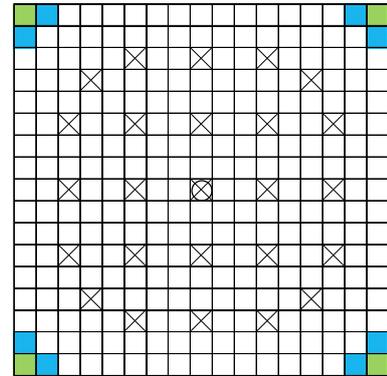
種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	ペレット密度 (%)
⊗ 炉内計装用案内シムプル	1	-	-
⊗ 制御棒案内シムプル	24	-	-
高Pu含有率MOX燃料要素	176	12.30	97
中Pu含有率MOX燃料要素	76	7.50	
低Pu含有率MOX燃料要素	12	5.44	
<合計>	<合計>	<平均>	
	264	10.61	

図 2.2-1 現行 MOX 燃料集合体の集合体配置・燃料仕様

リファレンス（従来 MOX 集合体）



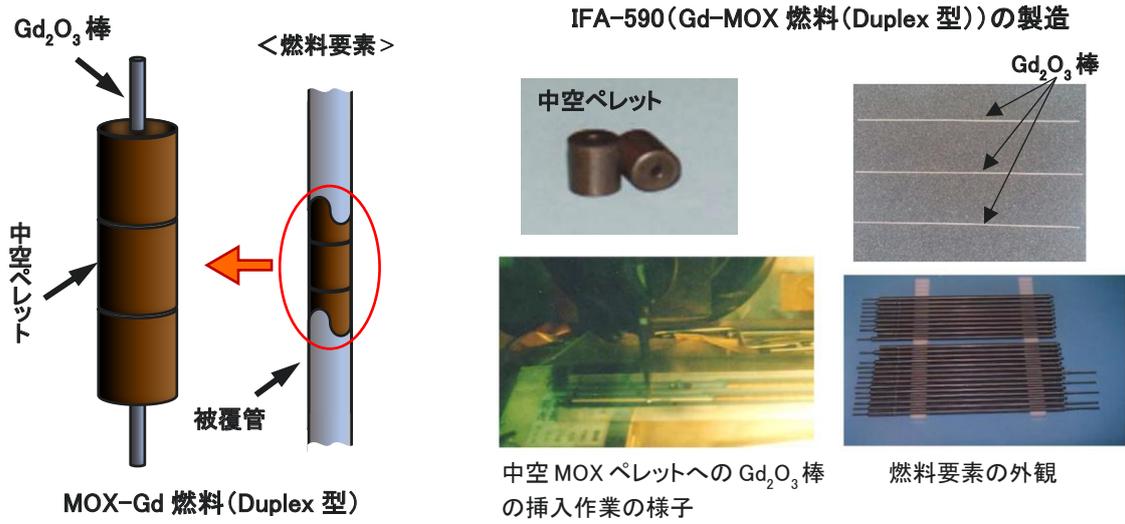
Gd, Er を固溶した MOX  
ペレットを装荷した燃料  
要素を集合体コーナー  
に装荷することで調整



種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	ペレット密度 (%)
⊗ 炉内計装用案内シムプル	1	-	-
⊗ 制御棒案内シムプル	24	-	-
高Pu含有率MOX燃料要素	176	12.30	97
中Pu含有率MOX燃料要素	76	7.50	
低Pu含有率MOX燃料要素	12	5.44	
<合計>	<合計>	<平均>	
	264	10.61	

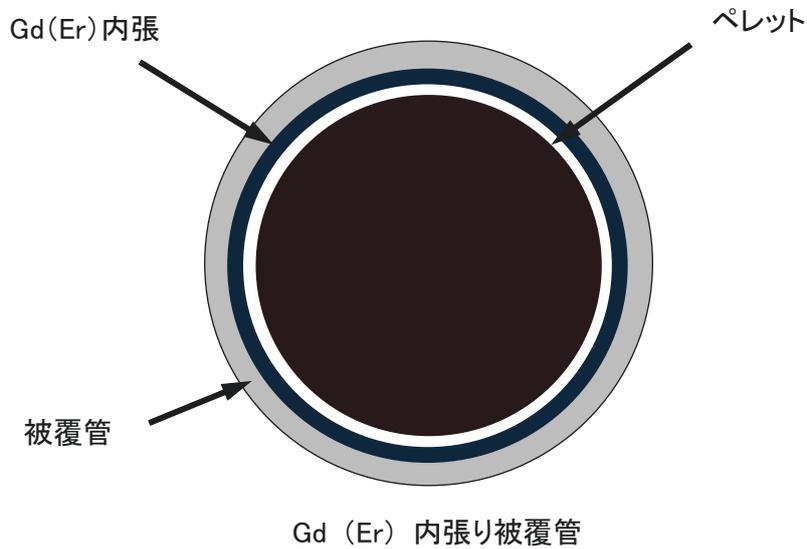
種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	Gd濃度 (wt%)
⊗ 炉内計装用案内シムプル	1	-	-
⊗ 制御棒案内シムプル	24	-	-
高Pu含有率MOX燃料要素	252	12.30	-
MOX-Gd燃料棒〔固溶体型〕①	8	12.30	5.0
MOX-Gd燃料棒〔固溶体型〕②	4	12.30	11.0
<合計>	<合計>	<平均>	
	264	12.30	

図 2.2-2 「MOX 燃料固溶体型」の燃料概念



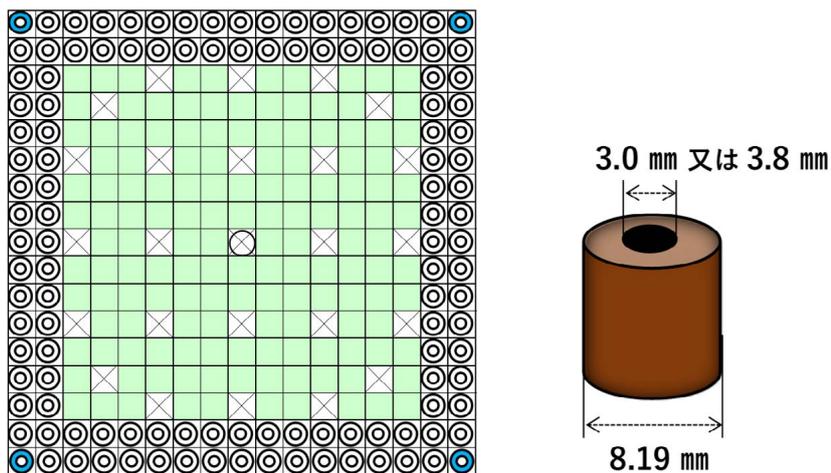
中空燃料ペレットの中央に Gd, Er の酸化物の棒を装荷した燃料 (Duplex 型) で調整。

図 2.2-3 「Duplex 型」の燃料概念<sup>[2-1]</sup>



Gd (もしくは Er) を内張りした被覆管で調整

図 2.2-4 「被覆管内張り型」の燃料概念



種 類	本数 (本)	Pu 含有率 (wt%)	中空径 (mm)
⊗ 炉内計装用案内シムル	1	—	—
⊗ 制御棒案内シムル	24	—	—
■ 高 Pu 含有率 MOX 燃料要素	144	11.28	—
⊙ MOX中空ペレット ①	116	11.28	3.0
⊙ MOX中空ペレット ②	4	11.28	3.8
	<合計>	<平均>	
	264	11.28	

中空ペレットを充填した燃料要素で調整

図 2.2-5 「中空ペレット燃料型」の燃料概念

### 3. 有望な燃料候補概念の絞り込みに向けた評価

#### 3.1 炉心・燃料設計に関する評価

ここでは、2章で設定した MOX 燃料高度化の各燃料候補概念を対象に、簡易的な炉心計算を行い、それぞれ、現行の MOX 燃料炉心（リファレンス）と同等の核的特性（臨界性、出力ピーキング）を維持する燃料仕様の設定を行う。最初に、炉心計算の条件や解析手法・評価モデル、基本的な仕様設定の考え方・成立条件を説明し、その後、各燃料候補概念それぞれの評価を行い、評価結果を比較し、有望な燃料候補概念の絞り込みを行う。

##### 3.1.1 炉心計算における解析条件

###### (1) Pu 同位体組成（アメリシウム 241（以下、Am241）を含む）

現行の PWR 用 MOX 燃料集合体（17×17 型）の仕様は、約 20 年前に設計されたものであり、当時の設計で用いられた Pu 同位体の標準組成（核分裂性 Pu 割合（以下、Puf 割合）：約 68 wt%）は、海外再処理から回収される Pu を想定していたものと考えられる。一方、本検討では、将来的に国内の再処理工場から回収される Pu の使用を想定する。そのため、新たに燃焼計算コード（ORIGEN2）を用いて計算し、Pu 同位体組成の見直しを行うこととした。

再処理する PWR の UO<sub>2</sub> 燃料の燃焼度、冷却・崩壊期間などの条件を表 3.1.1-1 に示すが、ここでは、燃焼度 45 GWd/t、冷却期間 15 年、崩壊期間 3 年を想定した（参考として、現状の標準 Pu 組成で推定される条件も記載した）。燃焼計算の結果得られた Pu 同位体組成について、表 3.1.1-1 の中に示すが、Puf 割合は約 65 wt%と、現状の標準 Pu 同位体組成より 3 wt%程度低く、高次化した組成となることを確認した。以下、この Pu 同位体組成のことを「高次化 Pu 組成」と呼ぶこととし、本報告における検討では、この組成を計算で使用することとする。

###### (2) 燃料・材料（構造材・減速材・被覆材）に関する条件

今回の炉心計算における燃料・材料（構造材・減速材・被覆材）に関する種々の条件について、まず、燃料に含まれる各核種の原子量・半減期を表 3.1.1-2<sup>[3.1-1, 2]</sup>にまとめて示した。また、構造材・減速材に含まれる元素核種の原子量・存在比を表 3.1.1-3<sup>[3.1-1, 3]</sup>に、被覆材であるジルカロイ-4 成分元素の組成・密度を表 3.1.1-4<sup>[3.1-4, 5]</sup>に示した。加えて、2.2 節で説明した燃料候補概念の中で使用される出力ピーキング調整用に添加する可燃性毒物（Gd、Er）及び酸化物の母材として用いる Zr の金属密度・酸化物密度・組成比を表 3.1.1-5<sup>[3.1-6~12]</sup>にまとめて示した。

##### 3.1.2 炉心計算における解析手法・評価モデル

###### (1) 解析手法

今回の MOX 燃料高度化炉心の検討では、燃料仕様設定のための炉心計算は、有望概念の絞り込みに向けた概略評価として、集合体セル計算ベースの簡易的な計算で行うこととした。今回の検討で使用した計算コード及び計算で用いたライブラリや燃焼チェーン、エネルギー群数に関する情報を以下に示す。

- ・ 計算コード： MOSRA-SRAC<sup>[3.1-13]</sup> (モジュラー型原子炉解析コードシステム (MOSRA) の格子計算モジュール)
- ・ 断面積ライブラリ： JENDL-4.0<sup>[3.1-14]</sup>
- ・ 燃焼チェーン： ChainJ40 (u4cm6fp119bp14T\_J40<sup>[3.1-15]</sup>)
- ・ エネルギー群数： 200 群 (高速：118 群、熱：82 群)
- ・ 境界条件： 完全反射

## (2) 評価モデル

### ① 計算体系

今回の PWR を対象とした MOX 燃料高度化の炉心計算では、既存のプルサーマル炉心と同様、MOX 燃料を全炉心の 1/4 に装荷することを想定し、MOX 燃料集合体に隣接する UO<sub>2</sub> 燃料集合体から流入する中性子の影響を考慮するため、集合体セル計算は燃料集合体 4 体を格子状に配置し、そのうちの 1 体を MOX 燃料集合体、周りの 3 体を UO<sub>2</sub> 燃料集合体とした体系で計算することとした。炉心計算 (集合体セル計算) の体系図を図 3.1.2-1 に示すが、計算の簡略化のため、燃料集合体形状は 1/4 モデルとした。

また、今回の炉心計算では、簡易的なモデルとして、実際に燃焼計算を行うのは MOX 燃料集合体のみとし、周りの 3 体の UO<sub>2</sub> 燃料集合体に関しては、平均燃焼度の組成で一定の条件で計算を行うこととした。

### ② 隣接する UO<sub>2</sub> 燃料集合体の条件

MOX 燃料集合体に隣接する UO<sub>2</sub> 燃料集合体としては、17×17 型で、平均燃焼度である 25 GWd/t 時の組成を集合体 1 体で平均化することとした。この UO<sub>2</sub> 燃料集合体の燃焼計算の主要な計算条件を以下に示す。

- ・ U 濃縮度： 4.8 wt%
- ・ 計算体系： 集合体 1 体のみ
- ・ 燃焼ステップ： 0.1、0.5、1.0、3.0、5.0、10.0、15.0、20.0、25.0、30.0 (GWd/t)  
(燃焼後の組成は FP 等を含め全部で 140 核種生成されるが、このうち 5 核種 (ニオブ 93m (Nb93m)、ロジウム 106 (Rh106)、アンチモン 126 (Sb126)、バリウム 137g (Ba137g)、プラセオジウム 144 (Pr144)) については計算結果には出力されるが、入力データとしては使用できない核種のため今回の解析では削除した。)

### ③ 燃焼ステップ

燃焼ステップは、計算ケースにより異なり、初期から末期にかけて緩やかな反応度変化の場合にはステップ間を大きくし、初期から末期にかけて反応度変化の大きい場合には燃焼ステップ間を小さくすることとした。

### 3.1.3 各燃料候補概念の仕様設定の考え方

#### (1) 基本的な考え方

現行の PWR 用 MOX 燃料集合体の仕様は、燃焼度 28 GWd/t 時点において、U 濃縮度 4.1 wt% の  $\text{UO}_2$  燃料集合体と同一の反応度が得られるよう設定されている<sup>[3.1-16]</sup>。ここで、燃焼度 28 GWd/t と U 濃縮度 4.1 wt% は、標準 3 ループ PWR における標準的な  $\text{UO}_2$  燃料集合体の濃縮度及びサイクル末期の炉心平均燃焼度である。サイクル末期の炉心平均燃焼度において反応度を一致させるということは、MOX 燃料集合体を  $\text{UO}_2$  燃料集合体に置き換えて PWR 炉心に装荷した場合、 $\text{UO}_2$  燃料集合体のみの炉心と同一の新燃料装荷体数で同一の運転が可能となることを意味する。

以上を踏まえ、今回の MOX 燃料高度化の炉心計算では、まず、現行の標準 Pu 組成 (Puf 割合：約 68 wt%) を用いた 17×17 型 PWR 用 MOX 燃料集合体をベースに、集合体内の燃料要素の配置はそのまま、Pu 組成のみ国内再処理を想定した高次化 Pu 組成 (Puf 割合：約 65 wt%) に変更し、その場合に、現行 MOX 燃料炉心と同等の炉心特性 (臨界性、出力ピーキング) を達成するよう Pu 含有率を調整したリファレンス炉心 (以下、現行 MOX 燃料 (リファレンス) 炉心) の設定を行うこととした。そして、MOX 燃料を高度化する各燃料候補概念の炉心については、この現行 MOX 燃料 (リファレンス) 炉心と比較し、同等の臨界性・出力ピーキングを達成するよう、それぞれ可燃性毒物などを混入した燃料要素の配置や仕様 (Pu 含有率、可燃性毒物割合など) についてサーベイを行い、最終的な成立性を有する仕様を設定することとした。

#### (2) 各燃料候補概念の仕様設定のための成立条件

前項で述べた満たすべき現行 MOX 燃料 (リファレンス) 炉心の炉心特性としては、臨界性に関し、サイクル末期の炉心平均燃焼度における反応度、そして、出力ピーキングに関し、運転期間中、最大となる集合体内の局所出力ピーキング係数に着目することとした。

サイクル末期の炉心平均燃焼度における反応度については、各燃料候補概念とも、高次化 Pu 組成 (Puf 割合：約 65 wt%) を使用し、燃焼度 28 GWd/t 時点において、現行 MOX 燃料 (リファレンス) 炉心と同一の無限増倍率となることを条件とした。ただ、Pu 含有率の値については、1 章で述べたように、現行の MOX 燃料指針<sup>[1-1]</sup>の制限範囲である約 13 wt% を超えないこととした。

次に、集合体内の局所出力ピーキング係数については、現行の MOX 燃料集合体より発熱が大幅に増加するような燃料要素が発生しないよう、各燃料候補概念とも、燃焼期間を通して現行 MOX 燃料 (リファレンス) 炉心と概ね同等レベルとなることを条件とした。ここで、局所出力ピーキング係数とは、平均燃料要素出力に対する値とし、局所出力ピーキング係数を計算する際の燃料要素平均出力は、計算体系で領域番号の対称性を考慮した後、燃料本数を考慮して計算する。以下に、局所出力ピーキング係数の定義を示す。

- Peaking =  $P/P_{av}$
- $P_{av} = \Sigma (\text{出力密度 (W/cm}^3) \times \text{面積 (cm}^2) \times \text{要素本数}) / \text{要素合計本数}$

※ 要素本数は計算体系の対称性を考慮しているもの

具体的な局所出力ピーキング係数の条件としては、次項の現行 MOX 燃料（リファレンス）の評価の中で計算を実施しているが、標準 Pu 組成を用いた現行 MOX 燃料炉心の値とも大きく変わることはなく 1.1 程度であることから、今回の MOX 燃料高度化の検討においては、1.14 を目安として設定することとした。

### 3.1.4 各燃料候補概念の評価

#### (1) 現行 MOX 燃料（リファレンス）

現行 MOX 燃料をベースとした今回の高度化検討におけるリファレンス炉心の燃料仕様を設定するため、標準 Pu 組成 (Puf 割合: 約 68 wt%) を用いた現行の 17×17 型 MOX 燃料集合体の要素配置はそのままに、今回の検討で用いる高次化 Pu 組成 (Puf 割合: 約 65 wt%) を適用した燃料集合体の炉心計算を行い、サイクル末期の炉心平均燃焼度における反応度が一致するとともに、局所出力ピーキング係数も同程度となる Pu 富化度の再設定を行った。

集合体要素配置と炉心計算の結果得られた各燃料要素の仕様を図 3.1.4(1)-1 に示す。この燃料集合体を用いた炉心計算による主要な炉心特性として、「無限増倍率の燃焼度変化」、「局所出力ピーキング係数の燃焼度変化」、「物質収支（標準と高次化 Pu 組成の比較）」をそれぞれ図 3.1.4(1)-2、図 3.1.4(1)-3、表 3.1.4(1)-1 に、標準 Pu 組成の場合の結果と比較して示した。加えて、「集合体内燃料要素の局所出力分布」を図 3.1.4(1)-4 に示した。また、比較のため標準 Pu 組成の場合の結果も図 3.1.4(1)-5 に示した。

図 3.1.4(1)-1 で、集合体配置は現行 MOX 燃料と同一である。MOX 燃料要素の Pu 含有率は 3 種類あり、集合体内側の白い領域で Pu 含有率は高く、外周側のオレンジ色の領域で低くなり、特に 4 隅のコーナー付近でより低くなっている。標準 Pu 組成の現行 MOX 燃料から高次化 Pu 組成に変更することで、Pu 含有率は、高 Pu 要素で 10.60 wt% → 12.30 wt%、中 Pu 要素で 6.20 wt% → 7.50 wt%、低 Pu 要素で 4.50 wt% → 5.44 wt% となり、Puf 割合が低下する分、いずれも若干増加する結果であった。

図 3.1.4(1)-2 に、両者の無限増倍率の燃焼度変化を比較して示した。いずれも燃焼度による変化の傾向は同じであり、サイクル末期の炉心平均燃焼度である燃焼度 28 GWd/t 時点で、一致していることが分かる。図 3.1.4(1)-3 には、局所出力ピーキング係数の燃焼度変化を比較して示した。いずれもピーキング係数は 1.1 程度であり、あまり影響がないことが確認された。集合体内各燃料要素の局所出力分布の燃焼度変化 (0, 15, 30, 45 GWd/t) を図 3.1.4(1)-4 に示すが、燃料要素の出力がピークとなる位置は、燃焼期間を通じて、集合体外周から 3 層目くらいであり、図 3.1.4(1)-5 に示した標準 Pu 組成の場合と同様の傾向であった。また、本燃料集合体の物質収支を表 3.1.4(1)-1 に示すが、高次化 Pu 組成を用いる今回のリファレンス炉心では、Pu 含有率は全体に増加するため、Pu 装荷量は従来の炉心に比べ 17.2 wt% 増加する結果となった。

以上、ここではまず、現行 MOX 燃料をベースに高次化 Pu 組成 (Puf 割合: 約 65 wt%) を適用した今回の検討用のリファレンス炉心の設定を行った。次項から MOX 燃料高度化の各燃料候補概念の具体的な仕様の評価を行っていくが、それぞれこのリファレンス

炉心を基準として比較を行っていく。

## (2) 可燃性毒物 (Gd, Er) の利用を採用した燃料候補概念

### ① 1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Gd)

MOX 燃料固溶体型 (Gd) は、集合体外周の燃料要素の出力ピーキングを抑制するため、Gd 酸化物を固溶した MOX-Gd 燃料ペレットを用いる燃料概念である。この燃料概念について、炉心計算に基づき、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキングを満たすサーベイを行い設定された集合体内の燃料要素の配置と仕様を図 3.1.4(2)①-1 に示す。また、炉心計算による主要な炉心特性として、「無限増倍率の燃焼度変化」、「局所出力ピーキング係数の燃焼度変化」、「集合体内燃料要素の局所出力分布」、「物質収支 (リファレンスとの比較)」をそれぞれ図 3.1.4(2)①-2、図 3.1.4(2)①-3、図 3.1.4(2)①-4、表 3.1.4(2)①-1 にまとめて示した。

図 3.1.4(2)①-1 に示すように、集合体内の燃料要素配置について、各コーナーに 3 本ずつ MOX-Gd 燃料要素が装荷された。ここで、Gd 濃度については 2 種類あり、コーナー部の要素は 11 wt%、コーナーに隣接する要素は、少し低く 5 wt%であった。MOX 燃料の Pu 含有率は、MOX-Gd 燃料要素も含めて 1 種類で 12.3 wt%であり、リファレンスと比べ集合体外周部の Pu 含有率は増加できていることが分かる。

図 3.1.4(2)①-2 には、無限増倍率の燃焼度変化を示すが、リファレンスと燃焼度による変化の傾向は同様であり、燃焼度 28 GWd/t 時点で一致していることが分かる。また、局所出力ピーキング係数の燃焼度変化を図 3.1.4(2)①-3 に示すが、リファレンスと比較し、初期で高く、その後低下していく傾向ではあるものの、ピーキング係数の値は判断目安である 1.14 を下回ることが確認された。図 3.1.4(1)①-4 には、集合体内各燃料要素の局所出力分布マップを燃焼度毎 (0, 15, 30, 45 GWd/t) に示すが、出力ピーキングが最大となる燃焼初期 (0 GWd/t のマップを見ると、Pu 含有率を低下していないため外周でピーキングは大きくなるが、コーナー付近の Gd の効果により抑制され、その結果、集合体一辺の真ん中で大きくなるものの 1.13 に抑えられていた。この出力ピーキングの位置は、燃焼とともに変わらない結果であった。

次に、物質収支について表 3.1.4(2)①-1 に示すが、外周部の Pu 含有率が増加できた効果により、Pu 装荷量はリファレンスと比較し 15.5%増加できることが認められた。

以上、この燃料概念では、各コーナーに 3 本ずつ MOX-Gd 燃料要素を装荷するような比較的軽微な対応で、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たすことができ、Pu 装荷量はリファレンスより 15%程度増加できることが分かった。

### ② 1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Er)

MOX 燃料固溶体型 (Er) は、上述の(2)①と同様のタイプであり、集合体外周の燃料要素の出力ピーキングを抑制するため、Er の酸化物を固溶した MOX-Er 燃料ペレットを用いる燃料概念である。この燃料概念について、炉心計算に基づき、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキングを満たすサーベイを行った結果設定された集合体内燃料要素の配置と仕様を図 3.1.4(2)②-1 に示す。また、炉心計算による主要な炉心特性として、「無限増倍率の燃焼度変化」、「局所出力ピーキング係数の燃焼度変化」、

「集合体内燃料要素の局所出力分布」、「物質収支（リファレンスとの比較）」をそれぞれ図 3.1.4(2)②-2、図 3.1.4(2)②-3、図 3.1.4(2)②-4、表 3.1.4(2)②-1 にまとめて示した。

図 3.1.4(2)②-1 に示すように、集合体内の燃料要素配置について、各コーナーに 3 本ずつ MOX-Er 燃料要素が装荷された。ここで、Er 濃度については 1 種類で 12 wt% であった。MOX 燃料の Pu 含有率については、MOX-Er 燃料要素も含めて 1 種類で 12.3 wt% であり、リファレンスと比べ集合体外周部の Pu 含有率は増加できていることが分かる。

図 3.1.4(2)②-2、図 3.1.4(2)②-3、図 3.1.4(1)②-4 に示すように、無限増倍率の燃焼度変化、局所出力ピーキング係数の燃焼度変化、集合体内燃料要素の局所出力分布の傾向については、上述の MOX 燃料固溶体型 (Gd) と同様の傾向であった。ただ、Er は中性子吸収が Gd よりずっと小さいため、出力の変動が小さく、出力ピーキングは抑えられる傾向であり、燃焼初期 (0 GWd/t) に集合体一辺の真ん中でピークとなるが、値は 1.11 と、MOX 燃料固溶体型 (Gd) より小さくなる傾向であった。

物質収支について表 3.1.4(2)②-1 に示すが、外周部の Pu 含有率が増加できた効果により、Pu 装荷量はリファレンスと比較し 15.2% 増加できることが分かった。

以上、上述の(2)①と同様、この燃料概念でも、各コーナーに 3 本ずつ MOX-Er 燃料要素を装荷するような比較的軽微な対応で、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たすことができ、Pu 装荷量はリファレンスより 15% 程度増加できることが分かった。

### ③ 1-2 : Duplex 型 (Gd)

Duplex 型 (Gd) は、集合体外周の燃料要素の出力ピーキングを抑制するため、中空の MOX ペレットの中心に Gd 酸化物を添加した棒材 (ZrO<sub>2</sub> 母材) を挿入した燃料概念である。この燃料概念について、炉心計算に基づき、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキングを満たすサーベイを行った結果設定された集合体燃料要素の配置と仕様を図 3.1.4(2)③-1 に示す。また、炉心計算による主要な炉心特性として、「無限増倍率の燃焼度変化」、「局所出力ピーキング係数の燃焼度変化」、「集合体内燃料要素の局所出力分布」、「物質収支（リファレンスとの比較）」をそれぞれ図 3.1.4(2)③-2、図 3.1.4(2)③-3、図 3.1.4(2)③-4、表 3.1.4(2)③-1 にまとめて示した。

図 3.1.4(2)③-1 に示すように、集合体内の燃料要素配置について、集合体の外周 1 層全部に Duplex 型の MOX-Gd 燃料要素が装荷されている。この理由としては、Duplex 型はペレットの中心に Gd 酸化物の棒が装荷されるため、外側のペレット領域で熱中性子が吸収され、Gd による中性子吸収効果は抑えられる傾向がある。そのため、臨界性を成立させるのに必要な Duplex 型燃料要素の数は、①の「1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Gd)」よりもっと多く必要になり、その結果、外周 1 層分必要になったということである。Gd 濃度については 16 wt%、Gd 酸化物の棒の直径は 3 mm であった。MOX 燃料の Pu 含有率については、Duplex 型の MOX-Gd 燃料要素も含めて 1 種類で 12.3 wt% であり、リファレンスと比べ集合体外周部の Pu 含有率は増加できている

ことが分かる。

図 3.1.4(2)③-2 には、無限増倍率の燃焼度変化を示すが、リファレンスと燃焼度による変化の傾向は概ね同様であり、燃焼度 28 GWd/t 時点で一致していることが分かる。また、局所出力ピーキング係数の燃焼度変化を図 3.1.4(2)③-3 に示すが、リファレンスと比較し、初期で高く、その後低下し一定になった後、末期側でさらに低下する傾向ではあった。ただ、初期で高くてもピーキング係数の値は、判断目安である 1.14 を下回ることが認められた。図 3.1.4(1)③-4 には、集合体内各燃料要素の局所出力分布マップを燃焼度毎 (0, 15, 30, 45 GWd/t) に示すが、出力ピーキングが最大となる燃焼初期 (0 GWd/t) のマップを見ると、Duplex 型要素の Gd の効果により、外周 1 層でピーキングはある程度抑えられるものの、コーナー部で大きくなり、最大値を示していた。ただし、最大値は 1.12 と、①の「1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Gd)」の 1.13 より若干小さく、これは Gd の中性子吸収が抑えられる効果により、出力変動が穏やかになったためと考えられる。また、出力ピーキングの位置については、燃焼とともに変わらない結果であった。

物質収支について表 3.1.4(2)③-1 に示すが、Duplex 型では中央に Gd 酸化物棒の装荷用に穴を開けた中空ペレットを使用するため、Pu 装荷量の増加は、中空部に MOX 燃料がない分若干低下し、①の「1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Gd)」の 15%程度より小さく 12.3%となる結果であった。

以上、この燃料概念では、集合体外周 1 層に Duplex 型の MOX-Gd 燃料要素を装荷することで、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たすことが分かった。ただし、Pu 装荷量の増加は、Duplex 型の燃料中空径の分だけ小さく 12%程度となる結果であった。

#### ④ 1-2 : Duplex 型 (Er)

Duplex 型 (Er) は、③の「1-2 : Duplex 型 (Gd)」と同様のタイプであり、集合体外周の燃料要素の出力ピーキングを抑制するため、中空の MOX ペレットの中心に Er の酸化物を添加した棒材 (ZrO<sub>2</sub> 母材) を挿入した燃料概念である。この燃料概念について、炉心計算に基づき、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキングを満たすサーベイを行った結果設定された集合体内の燃料要素配置と仕様を図 3.1.4(2)④-1 に示す。また、炉心計算による主要な炉心特性として、「無限増倍率の燃焼度変化」、「局所出力ピーキング係数の燃焼度変化」、「集合体内燃料要素の局所出力分布」、「物質収支 (リファレンスとの比較)」をそれぞれ図 3.1.4(2)④-2、図 3.1.4(2)④-3、図 3.1.4(2)④-4、表 3.1.4(2)④-1 にまとめて示した。

図 3.1.4(2)④-1 に示すように、集合体内の燃料要素配置について、集合体の外周 1 層に Duplex 型の MOX-Er 燃料要素が装荷されている。ただし、③「1-2 : Duplex 型 (Gd)」と比較し、Er は Gd より中性子の吸収がずっと小さいため、四隅のコーナー部の出力を十分に抑えることができず、コーナー部だけは Pu 含有率を 9 wt%まで落とした中 Pu 含有率要素を使用する必要がある結果であった。MOX-Er 燃料要素の Er 濃度は 22 wt%であり、Er 酸化物の棒の直径は 3 mm であった。MOX 燃料の Pu 含有

率については、四隅のコーナー要素を除き、Duplex 型の MOX-Er 燃料要素も含めて 12.3 wt% であり、リファレンスと比べ集合体外周部の Pu 含有率は増加できていることが分かる。

図 3.1.4(2)④-2 に示すように、無限増倍率の燃焼度変化の傾向については、上述の Duplex 型 (Gd) と同様の傾向であった。一方、図 3.1.4(2)④-3 の局所出力ピーキング係数の燃焼度変化を見ると、初期ではリファレンスより若干高いが、その後大幅に低下しリファレンスより低下する傾向であった。これは、Er の中性子吸収が小さいのに加え、Duplex 型のペレットでの吸収効果により、さらに小さくなり、出力の変動が抑えられたためと考えられる。図 3.1.4(1)④-4 に集合体内燃料要素の局所出力分布のマップを示すが、燃料要素の出力ピークは、燃焼初期 (0 GWd/t) のコーナー部で生じ、その後、コーナー部の出力は大幅に低下するため、燃焼度 30 GWd/t 以降、ピーク出力位置は集合体外周から 4 層目に変化する傾向であった。

物質収支について表 3.1.4(2)④-1 に示すが、③「1-2 : Duplex 型 (Gd)」と同様、中央に Er 酸化物棒の装荷用に穴を開けた中空ペレットを使用するため、Pu 装荷量の増加は若干低下し、①の「1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Gd)」の 15% より小さく 12.0% であった。

以上、この燃料概念では、集合体外周 1 層に Duplex 型の MOX-Er 燃料要素を装荷するとともに、コーナーの燃料要素の Pu 含有率を下げることで、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たすことが分かった。ただし、Pu 装荷量の増加は、Duplex 型の燃料中空径の分小さく 12% 程度となる結果であった。

#### ⑤ 1-3 : 被覆管内張型 (Gd)

被覆管内張型 (Gd) は、集合体外周の燃料要素の出力ピーキングを抑制するため、Gd を内張りした被覆管を採用する燃料概念である。この燃料概念について、炉心計算に基づき、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキングを満たすサーベイを行った結果設定された集合体内の燃料要素配置と仕様を図 3.1.4(2)⑤-1 に示す。また、炉心計算による主要な炉心特性として、「無限増倍率の燃焼度変化」、「局所出力ピーキング係数の燃焼度変化」、「集合体内燃料要素の局所出力分布」、「物質収支 (リファレンスとの比較)」をそれぞれ図 3.1.4(2)⑤-2、図 3.1.4(2)⑤-3、図 3.1.4(2)⑤-4、表 3.1.4(2)⑤-1 にまとめて示した。

図 3.1.4(2)⑤-2 の無限増倍率の燃焼度変化を見ると、被覆管内張型では、先程の③「1-2 : Duplex 型 (Gd)」とは逆に、Gd がペレットの外側に存在するため、Gd の中性子吸収の効果が非常に大きく、リファレンスの傾向と大きく異なり、初期の無限増倍率が非常に低く、その後、Gd の変換による減少とともに増加していき、燃焼度 28 GWd/t 時点でリファレンスと一致する燃焼度変化をとることが分かる。また、局所出力ピーキング係数の燃焼度変化についても、図 3.1.4(2)⑤-3 に示すが、同じく Gd の中性子吸収の効果が大きいことにより、燃料要素の出力変動も大きく、出力ピーキング係数が不連続となるため、非常に設計しにくい燃料概念であることが分かった。ここで、出力ピーキング係数が不連続となる理由としては、図 3.1.4(1)⑤-4 に集合体内局

所出力分布の燃焼度変化を示すが、ピーク出力をとる燃料要素が燃焼とともに変わることによるものであった。具体的には、初期 (0 GWd/t) には外から 4 層目くらいで生じているものの、30 GWd/t では外周のコーナーの隣接位置に変化している。このような特性を考慮し、本燃料概念の燃料要素配置と仕様の設定においては、Gd の影響を分散させるため全燃料要素に少しずつ装荷し、その中で Gd の内張厚さを調整することで、出力ピーキングを調整するような対応をとることとした。

結果として得られた燃料要素配置と仕様は、図 3.1.4(2)⑤-1 に示したとおり、集合体外周 1 層の Gd 内張厚さは 0.08 mm とし、それ以外の内側の Gd 内張厚さは 0.01 mm とした。MOX 燃料の Pu 含有率については、ほとんどの燃料要素で 12.3 wt% であるが、四隅のコーナー部のみ出力抑制のため 10.0 wt% と設定された。こうすることで、リファレンスと同等の臨界性と出力ピーキングを満たすことができ、かつ、リファレンスと比べ集合体外周部の Pu 含有率も増加することができる結果であった。

物質収支について表 3.1.4(2)⑤-1 に示すが、外周部の Pu 含有率が増加できた効果により、Pu 装荷量の増加は 14.2% であり、①の「1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Gd)」と同等レベルまで増加できることが分かった。

以上、この燃料概念では、Gd がペレットの外側に存在することで、中性子吸収の効果が非常に大きく、出力ピーキングの調整など設計は複雑になるものの、Gd を全燃料要素に分散することで、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たせることが分かった。また、Pu 装荷量の増加も、他の燃料概念と同様、15%程度増加できる結果であった。

#### ⑥ 1-3 : 被覆管内張型 (Er)

被覆管内張型 (Er) は、上述の⑤「1-3 : 被覆管内張型 (Gd)」と同様のタイプであり、集合体外周の燃料要素の出力ピーキング抑制のため、Er を内張りした被覆管を採用する燃料概念である。この燃料概念について、炉心計算に基づき、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキングを満たすサーベイを行った結果設定された集合体内の燃料要素配置と仕様を図 3.1.4(2)⑥-1 に示す。また、炉心計算による主要な炉心特性として、「無限増倍率の燃焼度変化」、「局所出力ピーキング係数の燃焼度変化」、「集合体内燃料要素の局所出力分布」、「物質収支 (リファレンスとの比較)」をそれぞれ図 3.1.4(2)⑥-2、図 3.1.4(2)⑥-3、図 3.1.4(2)⑥-4、表 3.1.4(2)⑥-1 にまとめて示した。

集合体内の燃料要素配置について、⑤「1-3 : 被覆管内張型 (Gd)」では、Gd がペレットの外側に存在し、中性子吸収の効果が非常に大きいため、Gd を全燃料要素に分散し調整するような配置に設定された。一方、本燃料概念では、⑤と同じく、Er はペレットの外側に存在するものの、Er の中性子吸収は Gd よりずっと小さいため、あまり大きな吸収効果はなく、そのため、Er が内張された被覆管の燃料要素の配置は、図 3.1.4(2)⑥-1 に示すように、集合体の外周 1 層のみとなった。Er 内張りの厚さについては、多くの被覆管で 0.04 mm でコーナー部のみ出力抑制のため 0.09 mm に厚肉化される結果となった。MOX 燃料の Pu 含有率については、Er 内張り被覆管の燃料要素も含めて 1 種類で 12.3 wt% であり、リファレンスと比べ集合体外周部の Pu 含有率

は増加できていることが分かる。

図 3.1.4(2)⑥-2 に、無限増倍率の燃焼度変化を示すが、リファレンスと燃焼度による変化の傾向は大きく異なることなく、燃焼度 28 GWd/t 時点で一致していることが分かる。また、局所出力ピーキング係数の燃焼度変化を図 3.1.4(2)⑥-3 に示すが、リファレンスと比較し、全体的に高く、燃焼の中期ごろにピークとなる傾向を示すものの、最大で 1.12 であり、判断目安である 1.14 を下回ることが確認された。図 3.1.4(1)⑥-4 には、集合体内燃料要素の局所出力分布マップを燃焼度毎に示すが、出力がピークとなる燃料要素は、燃焼期間を通じてコーナー位置であることが分かる。

物質収支について表 3.1.4(2)⑥-1 に示すが、外周部の Pu 含有率が増加できた効果により、Pu 装荷量の増加は 15.4% であり、①の「1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Gd)」と同等レベルまで増加できることが分かった。

以上、この燃料概念では、Er がペレットの外側に存在するものの中性子吸収が非常に大きくなることはなく、他の燃料概念と同様、集合体外周の燃料要素の Er を調整することで、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たすことが分かった。また、Pu 装荷量の増加も、他の燃料概念と同様、15%程度増加できる結果であった。

### (3) 燃料の工夫を採用した燃料候補概念

#### ① 1-4 : 中空ペレット燃料型

中空ペレット燃料型は、集合体外周の燃料要素の出力ピーキングを抑制するため、中空ペレット燃料を外周側に配置する燃料概念である。この燃料概念について、炉心計算に基づき、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキングを満たすサーベイを行った結果設定された集合体の燃料要素配置と仕様を図 3.1.4(3)①-1 に示す。また、炉心計算による主要な炉心特性として、「無限増倍率の燃焼度変化」、「局所出力ピーキング係数の燃焼度変化」、「集合体内燃料要素の局所出力分布」、「物質収支 (リファレンスとの比較)」をそれぞれ図 3.1.4(3)①-2、図 3.1.4(3)①-3、図 3.1.4(3)①-4、表 3.1.4(3)①-1 にまとめて示した。

集合体内の燃料要素配置について、中空ペレット燃料型は Gd・Er など可燃性毒物を用いていないので、初期の反応度を抑えるため、中空ペレットの燃料要素の本数を多く装荷する必要が生じた。そのため、図 3.1.4(3)①-1 に示すように、中空ペレットの燃料要素は、外周 2 層分必要であるとともに、それだけでは十分でなく、MOX 燃料の Pu 含有率も少し減らす必要があった。サーベイの結果、中空ペレットの燃料要素を含む全 MOX 燃料要素で、他の燃料候補の 12.30 wt% より若干少なく 11.28 wt% と設定した。

図 3.1.4(3)①-2 には、無限増倍率の燃焼度変化を示すが、上述のように、中空ペレットの燃料要素を外周 2 層に装荷し、Pu 含有率も若干低下させることで一致することができた (ここで、中空ペレット燃料を採用した場合、装荷時における燃料重量は中空部の分が減るため、結果として、リファレンスよりも 6.2% 減少する。この燃料重量の減少分を燃焼度に反映するため、無限増倍率はリファレンスの 28 GWd/t 時点の値と、中空ペレット採用では約 30 GWd/t (28 GWd/t の 6.2% 増) の値が、概ね同程度となる

ように設定した)。また、局所出力ピーキング係数の燃焼度変化を図 3.1.4(3)①-3 に示すが、燃焼初期で高く 1.14 であったが、判断目安は下回っていることを確認した。中空燃料型の特徴としては、可燃性毒物がないので出力ピーキング係数の変化は、他の燃料概念に比べ大きい傾向であった。図 3.1.4(3)①-4 には、集合体内燃料要素の局所出力分布マップを燃焼度毎 (0, 15, 30, 45 GWd/t) に示すが、出力ピーキングが最大となる位置は、15 GWd/t まではコーナー部であるが、30 GWd/t 以降は、外周から 3 層目となる結果であった。

物質収支について表 3.1.4(3)①-1 に示すが、中空ペレット燃料型では、臨界性を満たすため、中空ペレットの燃料要素を外周 2 層に装荷するとともに、Pu 含有率も若干低下させている。中空ペレットの装荷体数を増やすことは、中空部分の MOX 燃料が減ることを意味し、かつ、Pu 含有率も下げているので、外周部の Pu 含有率はリファレンスよりも大きいものの、集合体全体としての Pu 装荷量の増加は抑制され、結果として、Pu 装荷量の増加を見込めない（むしろ、0.3%減少する）結果であった。

以上、この燃料概念では、中空ペレットの燃料要素を外周 2 層に装荷するとともに、Pu 含有率も若干減少させることで、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たすことはできたものの、その影響により、Pu 装荷量の増加は見込めないことが分かった。

## ② 1-5 : UO<sub>2</sub>燃料置き換え型

UO<sub>2</sub>燃料置き換え型は、出力ピーキング調整のため外周に配置する燃料要素として、低 Pu 含有率の MOX 燃料の代わりに低濃縮の UO<sub>2</sub>燃料に置き換え、MOX 燃料は高 Pu 含有率の燃料のみとすることで、炉全体として Pu の装荷量を増加させることを意図した概念である。この燃料概念について、炉心計算に基づき、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキングを満たすサーベイを行った結果設定された集合体の燃料要素配置と仕様を図 3.1.4(3)②-1 に示す。また、炉心計算による主要な炉心特性として、「無限増倍率の燃焼度変化」、「局所出力ピーキング係数の燃焼度変化」、「集合体内燃料要素の局所出力分布」、「物質収支(リファレンスとの比較)」をそれぞれ図 3.1.4(3)②-2、図 3.1.4(3)②-3、図 3.1.4(3)②-4、表 3.1.4(3)②-1 にまとめて示した。

図 3.1.4(3)②-1 に示すように、集合体の燃料要素配置について、最外周の低 Pu 含有率の MOX 燃料要素を UO<sub>2</sub>燃料要素に置き換え出力ピーキングを改善することを期待したが、結局、UO<sub>2</sub>燃料要素の 1 層内側の MOX 燃料要素で出力が増加するため、結局、現行 MOX 燃料と同様、低 Pu 含有率の MOX 燃料要素が必要となる結果であった。そのため、極力、Pu 装荷量を増加する配置のサーベイを行い、結果として、各コーナー部付近の 4 本のみを UO<sub>2</sub>燃料要素に置き換え、その 1 層内側と外周に中 Pu 含有率燃料要素を装荷する配置を設定した。出力ピーキングを抑えるため、中 Pu 含有率燃料要素の含有率は、内側の 12.30 wt%に対し 7.5 wt%と設定された。

図 3.1.4(3)②-2 には、無限増倍率の燃焼度変化を示すが、燃焼度による変化の傾向はリファレンスと大きく異なることなく、燃焼度 28 GWd/t 時点で一致していることが分かる。また、局所出力ピーキング係数の燃焼度変化を図 3.1.4(3)②-3 に示すが、

リファレンスと比較し、初期で高く、すぐに若干低下するものの、その後一定となる傾向であり、ピーキング係数は判断目安である 1.14 を下回ることが確認された。図 3.1.4(3)②-4 には、集合体内燃料要素の局所出力分布マップを燃焼度毎 (0, 15, 30, 45 GWd/t) に示すが、燃焼初期 (0 GWd/t) のマップを見ると、ピーク位置はコーナー付近の  $\text{UO}_2$  燃料要素に隣接する中 Pu 含有率燃料要素で発生し、15 GWd/t 以降は外側から 1 層目の高 Pu 含有率燃料要素で発生する傾向であった。

物質収支について表 3.1.4(3)②-1 に示すが、 $\text{UO}_2$  燃料要素の内側に中 Pu 含有率燃料要素が必要になったことから、集合体当たりで Pu 装荷量は 2.0% の減少と増加は見込めない結果であった。ただ、ここで 1/4 MOX 炉心といった場合、燃料要素の本数が全燃料の 1/4 となることを意味するので、MOX 集合体中に  $\text{UO}_2$  燃料要素が装荷される場合、その分 MOX 燃料集合体の製造体数は増加することになる。その効果を考慮すると、Pu 装荷量の全炉心当たり Pu 装荷量は 5.8 wt% と増加に転じるものの、他の燃料概念と比べると増加は少なくなることを確認した。

以上、この燃料概念では、結局、 $\text{UO}_2$  燃料要素だけで出力の調整はできず、その内側に中 Pu 含有率燃料要素が必要になることが分かった。その結果、全炉心当たりの Pu 装荷量の増加は 5.8 wt% と、他の燃料概念の 15 wt% 程度と比べ低く、Pu 装荷量の大幅な増加は期待できないことが分かった。

#### (4) 上記の検討結果を踏まえ追加で設定した燃料候補概念

##### ① 1-6 : $\text{UO}_2$ 燃料固溶体型 (Gd)

(2)①の「1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Gd)」では、MOX-Gd 燃料要素を集合体コーナー部に少数本装荷するような比較的軽微な対応で、Pu 装荷量がリファレンスより 15% 増加する結果が得られた。Gd を添加した燃料要素として、軽水炉で使用実績がある  $\text{UO}_2$ -Gd 燃料で同様の対応ができれば、開発負荷の軽減が期待できることになる。そこで、本  $\text{UO}_2$  燃料固溶体型 (Gd) は、MOX-Gd 燃料要素の代わりに  $\text{UO}_2$ -Gd 燃料要素を使用し、臨界性・出力ピーキングを調整できることを期待して、追加で設定した燃料概念である。この燃料概念について、炉心計算に基づき、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキングを満たすサーベイを行った結果設定された集合体の燃料要素配置と仕様を図 3.1.4(4)①-1 に示す。また、炉心計算による主要な炉心特性として、「無限増倍率の燃焼度変化」、「局所出力ピーキング係数の燃焼度変化」、「集合体内燃料要素の局所出力分布」、「物質収支(リファレンスとの比較)」をそれぞれ図 3.1.4(4)①-2、図 3.1.4(4)①-3、図 3.1.4(4)①-4、表 3.1.4(4)①-1 にまとめて示した。

図 3.1.4(4)①-1 に示すように、集合体の燃料要素配置について、各コーナーに 3 本ずつ  $\text{UO}_2$ -Gd 燃料要素が装荷された。ただ、U は Pu より中性子吸収が少ないため、外周で若干出力のピークが高く、判断目安値を超過するため、その部分の Pu 含有率を若干低下させる対応が必要になった。具体的には、図中の緑色の燃料要素について、Pu 含有率をそれ以外の領域の 12.30 wt% から 11.00 wt% に僅かに低下させた。それでも、MOX 燃料の集合体外周部の Pu 含有率は、リファレンスと比べると増加できていることが分かる。また、コーナーに装荷した  $\text{UO}_2$ -Gd 燃料要素の Gd 濃度については、7.5 wt% とした。

図 3.1.4(4)①-2 に示すように、無限増倍率の燃焼度変化の傾向について、燃焼初期にはリファレンスより小さくなる傾向はあるものの、燃焼度 28 GWd/t 時点で一致していることが分かる。また、局所出力ピーキング係数の燃焼度変化を図 3.1.4(4)①-3 に示すが、リファレンスと比較し燃焼期間を通じて高く、ピークは燃焼初期にとるが、ピーキング係数の値は判断目安である 1.14 を下回っていることを確認した。図 3.1.4(4)①-4 には、集合体内燃料要素の局所出力分布マップを燃焼度毎 (0, 15, 30, 45 GWd/t) に示すが、燃焼初期 (0 GWd/t) では、外周で Pu 含有率を低下させた燃料要素の隣接要素でピークとなるが、燃焼度とともに徐々に低下し、30 GWd/t 以降では、コーナー付近の  $\text{UO}_2\text{-Gd}$  燃料要素の隣接要素でピークとなる傾向であった。

物質収支について表 3.1.4(4)①-1 に示すが、集合体当たりの Pu 装荷量の増加はリファレンスの 9.4%であった。ただ、この燃料概念では、MOX 燃料集合体中に  $\text{UO}_2\text{-Gd}$  燃料要素が十数本程度装荷されることから、1/4 MOX 炉心とする場合、燃料要素数が 1/4 なので、MOX 燃料集合体の体数自体が増加することになり、炉心当たりでは 15.7%の増加と、他の燃料概念と同等レベルとなる結果であった。

以上、この燃料概念では、開発負荷の軽減が期待できる  $\text{UO}_2\text{-Gd}$  燃料要素でも、比較的軽微な仕様変更で、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たすことが分かった。ただ、(2)①の「1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Gd)」と比較すると、U は Pu より中性子吸収が少ないため、外周で若干出力のピークが生じ、その部分の Pu 含有率低下など対応が必要になった。Pu 装荷量の増加については、集合体当たりであれば 10%程度の増加だが、全炉心当たりでは 15%程度と、他の燃料概念と同等レベルとなることを確認した。

## ② 1-6 : $\text{UO}_2$ 燃料固溶体型 (Er)

$\text{UO}_2$  燃料固溶体型 (Er) は、上述の(4) ①の「1-6 :  $\text{UO}_2$  燃料固溶体型 (Gd)」と同様のタイプであり、 $\text{UO}_2\text{-Er}$  燃料要素自体は使用実績がなく開発負荷が増す点に留意は必要であるが、 $\text{UO}_2\text{-Gd}$  燃料要素に替わり中性子吸収が穏やかな  $\text{UO}_2\text{-Er}$  燃料要素に変更した燃料概念である。この燃料概念について、炉心計算に基づき、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキングを満たすサーベイを行った結果設定された集合体の燃料要素配置と仕様を図 3.1.4(4)②-1 に示す。また、炉心計算による主要な炉心特性として、「無限増倍率の燃焼度変化」、「局所出力ピーキング係数の燃焼度変化」、「集合体内燃料要素の局所出力分布」、「物質収支 (リファレンスとの比較)」をそれぞれ図 3.1.4(4)②-2、図 3.1.4(4)②-3、図 3.1.4(4)②-4、表 3.1.4(4)②-1 にまとめて示した。

図 3.1.4(4)②-1 に示すように、集合体の燃料要素配置について、各コーナーに 3 本ずつ  $\text{UO}_2\text{-Er}$  燃料要素を設置するが、Er は中性子吸収が少ないため、その隣接燃料要素で判断目安を超える出力のピークが残るので、この隣接燃料要素について Pu 含有率を若干低下する必要性が生じた。具体的には、図中の水色の燃料要素について、Pu 含有率をそれ以外の領域の 12.30 wt%から 11.00 wt%に僅かに減少させた。それでも、MOX 燃料の集合体外周部の Pu 含有率は、リファレンスと比べると増加できていることが分かる。また、コーナーに装荷した  $\text{UO}_2\text{-Er}$  燃料要素の Er 濃度については、12.0

wt%とした。

図 3.1.4(4)②-2 には、無限増倍率の燃焼度変化を示した。燃焼初期には、リファレンスと同様の傾向であり、燃焼度 28 GWd/t 時点で一致していることが分かる。また、局所出力ピーキング係数の燃焼度変化を図 3.1.4(4)②-3 に示すが、リファレンスと異なり、燃焼初期でピーキング係数が大きく、燃焼とともに単純に減少していく傾向であった。燃焼初期のピーク時でも、ピーキング係数の値は判断目安である 1.14 を下回っていることを確認した。図 3.1.4(4)②-4 には、集合体内燃料要素の局所出力分布マップを燃焼度毎 (0, 15, 30, 45 GWd/t) に示すが、いずれの時点でも、Pu 含有率を若干低めた燃料要素の隣接燃料要素でピークとなる傾向であった。

物質収支について表 3.1.4(4)②-1 に示すが、集合体当たりの Pu 装荷量の増加はリファレンスの 10.4%であった。ただ、この燃料概念では、MOX 燃料集合体中に  $\text{UO}_2\text{-Er}$  燃料要素が十数本程度装荷されることから、1/4 MOX 炉心とする場合、燃料要素数が 1/4 なので、MOX 燃料集合体の体数自体が増加することになり、炉心当たりでは 16.7%の増加と、他の燃料概念と同等レベルとなる結果であった。

以上、 $\text{UO}_2\text{-Er}$  燃料要素は使用実績がないので、 $\text{UO}_2\text{-Gd}$  燃料と比較すると開発負荷は増加するが、各コーナーに 3 本ずつ  $\text{UO}_2\text{-Er}$  燃料要素を装荷するとともに、その隣接燃料要素で若干 Pu 含有率を低下させるような比較的軽微な対応で、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たすことが分かった。Pu 装荷量の増加についても、集合体当たりであれば 10%程度の増加だが、全炉心当たりでは 15%程度と、他の燃料概念と同等レベルとなることを確認した。

### ③ 1-7 : Gd 酸化物要素型

本検討における、これまでの燃料仕様サーベイの結果、出力ピークの抑制上、集合体コーナー部における中性子吸収が重要となる傾向が得られた。もし、核燃料でない可燃性毒物を装荷した要素を用い調整できれば、開発負荷の軽減が期待できることになる(照射試験が材料照射試験のみで済む)。そこで、本 Gd 酸化物要素型は、可燃性毒物の要素として核燃料でない Gd 酸化物 ( $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  想定) の適用を考え、追加で設定した燃料概念である。この燃料概念について、炉心計算に基づき、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキングを満たすサーベイを行った結果設定された集合体の燃料要素配置と仕様を図 3.1.4(4)③-1 に示す。また、炉心計算による主要な炉心特性として、「無限増倍率の燃焼度変化」、「局所出力ピーキング係数の燃焼度変化」、「集合体内燃料要素の局所出力分布」、「物質収支 (リファレンスとの比較)」をそれぞれ図 3.1.4(4)③-2、図 3.1.4(4)③-3、図 3.1.4(4)③-4、表 3.1.4(4)③-1 にまとめて示した。

図 3.1.4(4)③-1 に示すように、集合体の燃料要素配置について、各コーナーに 1 本ずつ 4 本の Gd 酸化物要素を装荷するという非常に軽微な変更だけで、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たす結果が得られた。ここで、Gd 酸化物要素については、母材の  $\text{ZrO}_2$  の中で濃度を調整しており、Gd 濃度は 34 wt%であった。MOX 燃料の Pu 含有率は 1 種類で 12.3 wt%であり、リファレンスと比べ集合体外周部の Pu 含有率は増加できている。

図 3.1.4(4)③-2 には、無限増倍率の燃焼度変化を示した。無限増倍率は、リファレンスと同様の傾向を示し、燃焼度 28 GWd/t 時点で一致していることが分かる。また、局所出力ピーキング係数の燃焼度変化を図 3.1.4(4)③-3 に示すが、リファレンスと比較し、燃焼初期は同レベルで、その後低下するものの末期側で増加し、燃焼末期で若干リファレンスを超過する傾向となるが、ピーキング係数の値は判断目安である 1.14 を下回っていることを確認した。図 3.1.4(4)③-4 には、集合体内燃料要素の局所出力分布マップを燃焼度毎 (0, 15, 30, 45 GWd/t) に示すが、燃焼初期 (0 GWd/t) では、コーナーの Gd 酸化物要素から遠い集合体外周一辺の中央の MOX 燃料要素でピークとなるが、燃焼が進み、コーナーの Gd 酸化物要素の効果が低下してくると、ピークは Gd 酸化物要素の隣接要素に移る挙動を示した。図 3.1.4(4)③-3 の末期側のピーキング係数の増加は、このためである。

物質収支について表 3.1.4(4)③-1 に示すが、外周部の Pu 含有率が増加できた効果により、Pu 装荷量の増加は 14.3%程度と、他の燃料概念と同等レベルとなることを確認した。

以上、この燃料概念では、核燃料でない Gd 酸化物を装荷した燃料要素を各コーナーに 1 本ずつ 4 本装荷するという非常に軽微な変更だけで、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たすことが分かった。核燃料でない Gd 酸化物を使用することから、開発負荷の軽減を期待できる。また、Pu 装荷量の増加についても 15%程度と、他の燃料概念と同等レベルとなることを確認した。

#### ④ 1-7 : Er 酸化物要素型

Er 酸化物要素型は、(4)③の「1-7 : Gd 酸化物要素型」と同様、臨界性・出力ピーキングの調整のため、開発負荷の少ない核燃料でない可燃性毒物として Er 酸化物 ( $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  想定) の使用を考え、追加で設定した燃料概念である。この燃料概念について、炉心計算に基づき、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキングを満たすサーベイを行った結果設定された集合体の燃料要素配置と各燃料要素の仕様を図 3.1.4(4)④-1 に示す。また、炉心計算による主要な炉心特性として、「無限増倍率の燃焼度変化」、「局所出力ピーキング係数の燃焼度変化」、「集合体内燃料要素の局所出力分布」、「物質収支 (リファレンスとの比較)」をそれぞれ図 3.1.4(4)④-2、図 3.1.4(4)④-3、図 3.1.4(4)④-4、表 3.1.4(4)④-1 にまとめて示した。

図 3.1.4(4)④-1 に示すが、集合体の燃料要素配置について、(4)③の「1-7 : Gd 酸化物要素型」と同様、各コーナーに 1 本ずつ 4 本の Gd 酸化物要素を装荷するという非常に軽微な変更だけで、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たす結果であった。ここで、Er 酸化物要素については、母材の  $\text{ZrO}_2$  の中で濃度を調整しており、Er は Gd より中性子の吸収が少ないため、Er 濃度は 50 wt% と Gd 酸化物要素型の Gd 濃度 34 wt% より大きくなる結果であった。MOX 燃料の Pu 含有率は 1 種類で 12.3 wt% であり、リファレンスと比べ集合体外周部の Pu 含有率は増加できている。

図 3.1.4(4)④-2 には、無限増倍率の燃焼度変化を示した。リファレンスと同様の傾

向を示し、燃焼度 28 GWd/t 時点で一致していることが分かる。また、局所出力ピーキング係数の燃焼度変化を図 3.1.4(4)④-3 に示すが、リファレンスと比較し若干大きい傾向であるが、燃焼期間を通じて大きく変化することなく、ピーキング係数の値は判断目安である 1.14 を下回っていることを確認した。図 3.1.4(4)④-4 には、集合体内燃料要素の局所出力分布マップを燃焼度毎 (0, 15, 30, 45 GWd/t) に示すが、出力ピークはコーナーの Er 酸化物要素の隣接燃料要素で生じており、Er の中性子吸収が穏やかなこともあり、ピーク位置は燃焼期間を通じて変化することなく、ピーキング係数の値の変動も生じない結果であった。

物質収支について表 3.1.4(4)④-1 に示すが、外周部の Pu 含有率が増加できた効果により、Pu 装荷量の増加は 14.3%程度と、他の燃料概念と同等レベルとなることを確認した。

以上、この燃料概念では、(4)③の「1-7 : Gd 酸化物要素型」と同様、各コーナーに 1 本ずつ 4 本の Er 酸化物要素を装荷するという非常に軽微な変更だけで、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たすことが分かった。また、Er の中性子吸収が穏やかなこともあり、ピーク位置は燃焼期間を通じて変化することなく、ピーキング係数の値の変動も生じない安定した挙動を示すことが分かった。また、Pu 装荷量の増加についても 15%程度と、他の燃料概念と同等レベルとなることを確認した。

## (5) 参考評価用の燃料概念

### ① 2-1 : ATF (Fe 系) 被覆管型

ATF (Fe 系) 被覆管型は、事故耐性燃料のうち被覆管に Fe 系の ATF 材料を適用した燃料概念である。これは、現行の MOX 燃料指針の制限範囲内という今回の MOX 高度化燃料の検討の範囲外であるが、ATF (Fe 系) 被覆管は熱中性子の吸収が大きいという特長があり、参考として、将来、ATF (Fe 系) 被覆管が導入された場合に、Pu 装荷量にどのような影響があるか見通しを評価することとした。ここで、集合体の配置としては、現行 MOX 燃料集合体 (リファレンス) の配置をベースとし、ATF (Fe 系) 被覆管をそのまま適用した場合、仕様中の Pu 含有率への影響を評価するものとした。被覆管肉厚についても、暫定的にリファレンスと同等とした。

この燃料概念について、炉心計算に基づき、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキングを満たすサーベイを行った結果設定された集合体燃料要素の配置と仕様を図 3.1.4(5)①-1 に示す。また、炉心計算による主要な炉心特性として、「無限増倍率の燃焼度変化」、「局所出力ピーキング係数の燃焼度変化」、「集合体内燃料要素の局所出力分布」、「物質収支 (リファレンスとの比較)」をそれぞれ図 3.1.4(5)①-2、図 3.1.4(5)①-3、図 3.1.4(5)①-4、表 3.1.4(5)①-1 にまとめて示した。

サーベイの結果、集合体の燃料要素配置については、現行 MOX 燃料集合体 (リファレンス) の配置のままであるが、ATF (Fe 系) 被覆管は熱中性子の吸収が大きいいため、Pu 含有率を高める必要があり、集合体内部の MOX 燃料要素の Pu 含有率は、リファレンスの 12.3 wt%に対し、13.0 wt%の制限を超え、14.56 wt%まで増加させる必要があることが分かった。外周側の Pu 含有率についても、7.50 wt%から 8.87 wt%、5.44 wt%から 6.44 wt%と増加が必要となる結果であった。

図 3.1.4(5)①-2 には、無限増倍率の燃焼度変化を示した。無限増倍率は、リファレンスと同様の傾向を示し、燃焼度 28 GWd/t 時点で一致していることが分かる。また、局所出力ピーキング係数の燃焼度変化を図 3.1.4(5)①-3 に示すが、ピーキング係数もリファレンスと同様の傾向を示し、ピーキング係数の値も判断目安である 1.14 を下回っていることを確認した。図 3.1.4(5)①-4 には、集合体内燃料要素の局所出力分布マップを燃焼度毎 (0, 15, 30, 45 GWd/t) に示すが、燃焼初期 (0 GWd/t) から、外周から 3 層目あたりでピーク位置を示し、これもリファレンスと同様であり、基本的な傾向はいずれも、リファレンスと同様であった。

物質収支について表 3.1.4(5)①-1 に示すが、ATF (Fe 系) 被覆管は熱中性子の吸収が大きいため、Pu 含有率は制限の 13.0 wt% を超過することから、Pu 装荷量も当然多くなり、あくまで参考値であるが 18.5 wt% も増加する結果であった。

以上、あくまで参考であるが、ATF (Fe 系) 材はジルカロイ系材に比べ熱中性子の吸収が大きいため、Pu 含有率を増加する必要がある、成立するには、Pu 含有率は現行指針の制限 13 wt% を超え 14.56 wt% まで高める必要があることが分かった。その場合、Pu 装荷量は 18.5 wt% も増加する結果であった。ただ、今回の検討では、被覆管の肉厚をリファレンスと同じとしているが、ATF (Fe 系) 被覆管はジルカロイより高強度・高耐腐食であるため、肉厚は薄くできる可能性もあり、その場合は、Pu 含有率は若干低下できるものと考えられる。

### 3.1.5 炉心・燃料特性の比較評価

3.1.4 項で設定した各燃料候補概念の炉心・燃料の特性に関して、以下の 4 点 (① 燃料仕様 (仕様の特徴)、② 物質収支 (Pu 装荷量)、③ 使用済燃料貯蔵プールへの影響 (取出後短時間崩壊熱)、④ 燃料開発の負荷 (実用化時期見通し)) に着目し、比較評価を行った。比較評価については、星取表形式 (○×△など) で行うこととし、以下に各項目について評価した結果をまとめた。

#### ① 燃料仕様 (仕様の特徴)

各燃料候補概念について、3.1.4 項で説明したように、簡易的な核計算によるサーベイによりリファレンス (現行 MOX 炉心燃料) と同等の臨界性・出力ピーキング係数を満足するような燃料仕様・集合体構成の設定を行った。その結果得られた各燃料概念の燃料集合体の特徴を以下に示すとともに、比較評価を行った結果を表 3.1.5-1 に整理しまとめた。

- ・「1-1 MOX 燃料固溶体型」は、各コーナーに 3 本ずつ Gd・Er を含有した MOX 燃料要素を装荷するような比較的軽微な対応で、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たした。
- ・「1-2 Duplex 型」はペレットの中心に Gd・Er 酸化物の棒が装荷されるため、外側のペレット領域で熱中性子が吸収され Gd・Er の中性子吸収効果は抑えられる。そのため、装荷する Duplex 型燃料要素の数は増加し、外周 1 層程度必要になる。一方、中性子吸収が抑えられる効果により、出力変動は穏やかになり、出力ピーキングは抑えられ

た。

- ・「1-3 被覆管内張型 (Gd)」は、ペレットの外側に Gd が装荷されるため、「1-2 Duplex 型」と逆に) 中性子の吸収効果が非常に強く、出力の変動が大きくなる。そのため、出力ピーキングが大きくなり設計は難しくなった。成立させるため、Gd を全燃料要素に分散させ装荷し、その中で内張厚さを調整する仕様となった。一方、「1-3 被覆管内張型 (Er)」では、Er の中性子吸収効果が小さいので、装荷する燃料要素は外周 1 層程度でリファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たした。
- ・「1-4 中空ペレット燃料型」は、Gd・Er など可燃性毒物が添加されていないので、初期の反応度を抑えるため、中空ペレットの燃料要素の本数を多く装荷する必要がある、外周 2 層必要であった。中空ペレットは、燃料の装荷量自体が中実ペレットより減るため、Pu 含有率が増加しても燃料集合体としての Pu 装荷量の増加は抑制される傾向となった。
- ・「1-5 UO<sub>2</sub> 燃料置き換え型」については、最外周の低 Pu 含有率の MOX 燃料要素を UO<sub>2</sub> 燃料要素に置き換え出力ピーキングを改善することを期待したが、結局、1 層内側の MOX 燃料要素で出力が増加するため、低 Pu 含有率の MOX 燃料要素が必要となる結果であった。
- ・「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd)」については、「1-1 MOX 燃料固溶体型」において、比較的軽微な仕様変更対応でリファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たす結果が得られたことから、BWR・PWR など軽水炉で実績があり開発要素の少ない UO<sub>2</sub>-Gd (固溶体型) でも同様の対応が可能か追加で検討を行った。結果として、U は Pu より中性子吸収が少ないため、外周で若干出力のピークが生じ、その部分の Pu 含有率低下など対応が必要になるが、概ね軽微な仕様変更で対応可能な結果が得られた。照射実績がないので開発負荷は増すが、UO<sub>2</sub>-Er (固溶体型) でも同様の対応が可能か追加の検討を行い(「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Er)」)、UO<sub>2</sub>-Gd (固溶体型) と同様の結果を得た。
- ・「1-7 Gd 酸化物要素型」については、上述のサーベイの結果、出力ピーキングの抑制には集合体コーナーにおける中性子吸収が重要となる傾向が得られたため、核燃料でなく照射試験の負荷を軽減できる Gd 酸化物の棒 (Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 棒を想定) を装荷した要素をコーナーに設置する燃料について追加で検討を行った。その結果、各コーナーに 1 本ずつの装荷でリファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たす結果が得られた。また、Er 酸化物の棒 (Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 棒を想定) でも同様の対応が可能か追加の検討を行い(「1-7 Er 酸化物要素型」)、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 棒型と同様の結果を得た。
- ・参考として、ATF (Fe 系) 被覆管を採用した燃料概念について、上述と同様の燃料仕様サーベイを行い、どの様な影響があるか評価を行った。その結果、ATF (Fe 系) 系材はジルカロイ系材に比べ熱中性子の吸収が大きいので Pu 含有率を増加する必要がある、結果として、成立するには最大の Pu 含有率は 14.6 wt%と現行指針の制限 13 wt%を超えてしまうことが確認された(ただし、今回の評価では暫定的にリファレンスと同等の肉厚としたが、薄肉化できれば Pu 含有率は下げられる)。

## ② 物質収支 (Pu 装荷量)

各燃料候補概念について、3.1.4 項で核計算を行い、仕様を設定するとともに Pu に関する物質収支の評価を行った。その結果については 3.1.4 項で示されているが、そのうち、Pu 装荷量への影響について以下に整理するとともに、比較評価を行った結果を表 3.1.5-2 に星取表形式 (○×△などで比較) で整理してまとめた。

- ・「1-1 MOX 燃料固溶体型」、「1-3 被覆管内張型」など Gd・Er を含有した MOX 燃料要素の集合体では、Pu 装荷量は概ね 15%程度増加する結果であった。ただし、「1-2 Duplex 型」では、中央に Gd・Er 酸化物棒の装荷用に穴を開けた中空ペレットを使用するため若干低下し、12%程度の増加であった。
- ・「1-4 中空ペレット燃料型」は、初期の反応度を抑えるため、中空ペレットの燃料要素の本数を多く装荷する必要がある。中空ペレットは、燃料の装荷量自体が中実ペレットより減るため、Pu 含有率が増加しても燃料集合体としての Pu 装荷量の増加は抑制され、結果として、Pu 装荷量の増加見込めない (むしろ若干低下する) 結果であった。
- ・「1-5 UO<sub>2</sub> 燃料置き換え型」については、最外周の低 Pu 含有率の MOX 燃料要素を UO<sub>2</sub> 燃料要素に置き換え出力ピーキングを改善することを期待したが、結局、1 層内側の MOX 燃料要素で出力が増加するため、低 Pu 含有率の MOX 燃料要素が必要となり、大幅な Pu 装荷量増加は見込めない結果であった。
- ・「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd)」では、MOX 燃料集合体中に UO<sub>2</sub>-Gd 燃料要素が十数本程度装荷されることから、集合体当たりの Pu 装荷量の増加は 10%程度であるが、一方、1/4 MOX 炉心とする場合、燃料要素数が 1/4 なので、MOX 燃料集合体の数は増加することになり、炉心当たりでは「1-1 MOX 燃料固溶体型」、「1-3 被覆管内張型」と同様、15%程度の増加となる結果であった。「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Er)」についても同様の結果を得た。
- ・「1-7 Gd (Er) 酸化物要素型」の燃料概念では、「1-1 MOX 燃料固溶体型」、「1-3 被覆管内張型」など Gd・Er を含有した他の燃料概念と同様、Pu 装荷量は 15%程度増加する結果であった。

## ③ 使用済燃料貯蔵プールへの影響 (取出後短時間崩壊熱)

使用済燃料貯蔵プールへの影響については、取出し後、短時間側の崩壊熱が重要となるので、各燃料候補概念について、3.1.4 項で設定した仕様に基づき燃焼計算を行い、崩壊熱の比較評価を行った。ここで、燃焼計算コードとしては ORIGEN2 を用い、燃焼度 45 GWd/t 一定の条件で、各燃料概念について比較計算を行った。燃焼計算の結果として、取出し後から 50 年後までの崩壊熱の値の履歴を表 3.1.5-3、表 3.1.5-4 に比較して示した。ここで、表 3.1.5-3 は、MOX 燃料の集合体当たりの崩壊熱を比較した結果であるのに対し、表 3.1.5-4 は、炉心中の MOX・UO<sub>2</sub> 集合体数比で重み付けして評価した炉心当たり相当の崩壊熱の比較である。MOX 燃料集合体の割合としては、現行炉の実績を参考に約 1/4 を想定した。

これらの崩壊熱の評価結果のうち、使用済燃料貯蔵プールの影響としては、炉心当たり相当の取出後短時間 (0, 0.5 年) の結果が重要である。そこで、現在のプラントの除熱

設備への影響の見通しを探るため、現行 MOX 燃料炉心（リファレンス炉心）で現行の Pu 組成（標準組成）を想定した場合の崩壊熱に対する相対値を求め、その結果を表 3.1.5-5 に整理して示した。また、表中、各燃料概念について星取表形式（○×△などで比較）で評価した結果も併せて示した。

結果として、各燃料概念とも、現行 MOX 燃料炉心（Pu：標準組成）と比較すると、「1-4 中空ペレット燃料型」など一部の燃料でごく僅かな増加は見られるが、概ね 1.00 程度以下であり、現行 MOX 燃料炉心（リファレンス炉心）の崩壊熱と同等であることが認められた。この理由としては、現行 MOX 燃料炉心と比較し各高度化燃料概念とも Pu 装荷量自体は増加するものの、一方で、Pu 組成は、現行の標準組成から国内再処理を想定した高次化組成とすることで異なっており、高次化組成では Am の割合が少なく、その分発熱が軽減される効果により、現行 MOX 燃料炉心の崩壊熱と同等となったものと考えられる。

以上の結果より、高度化燃料概念による使用済燃料貯蔵プールでの崩壊熱への影響については、現行の除熱設備で対応の可能性を有するものと考えられ、評価としては、「1-4 中空ペレット燃料型」を除き、いずれも○とすることとした。

#### ④ 燃料開発の負荷（実用化時期見通し）

各燃料候補概念について、3.1.4 項で設定した仕様に基づき、早期に実用化を期待できるかの比較のため燃料開発負荷について概略的に評価を行った。その結果について以下に特徴を整理するとともに、比較評価を行った結果を表 3.1.5-6 に星取表形式（○×△などで比較）で整理してまとめた。

- ・「1-5 UO<sub>2</sub> 燃料置き換え型」、「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型（Gd）」では、UO<sub>2</sub>、UO<sub>2</sub>-Gd（固溶体型）の燃料要素は使用実績があることから開発課題は特にならない。そのため、（燃料要素の照射試験を飛ばして）LTA（Lead Test Assembly）など集合体照射試験から始められ、比較的早期の実用化の可能性があり開発負荷は小さい。
- ・「1-4 中空ペレット燃料型」の中空ペレット燃料は、敦賀 1 号機の MOX 燃料など軽水炉の照射試験の実績があるとともに、高速炉でも多くの照射試験実績がある。そのため、集合体照射試験から始められる可能性がある（中空ペレットの量産技術・検査技術など製造に関する開発課題はあるが、日本原子力研究開発機構（以下、JAEA）がこれまで実施してきた R&D について一部利用できる可能性あり）。
- ・「1-2 Duplex 型」は、過去に実績のない燃料タイプであり、燃料要素の照射試験により照射挙動の把握が必要となる。「1-1 MOX 燃料固溶体型」についても、物性試験、照射挙動把握のための照射試験など開発負荷は比較的大きい。
- ・「1-3 被覆管内張り型」の Gd・Er 内張り被覆管の製造技術について、過去に検討例がなく、開発に期間を要するものと考えられる。また、照射挙動把握のための照射試験も必要であり、Zr-Gd 合金など耐食性にも課題がある。
- ・「1-7 Gd（Er）酸化物要素型」は、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>・Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> の物性・照射挙動を把握することが必要となる。そのため、照射試験が必要になるが、材料照射となるため燃料照射と比べると負荷は小さい。

- ・可燃性毒物の Gd と Er を比較すると、Er を使用する場合、これまでの使用実績が少なく開発負荷は大きくなる方向である（今回の星取表では、いずれも△の範囲内であるが、相対的には Er の方が負荷は大きめ）。

### 3.1.6 炉心・燃料設計に関するまとめ

以上、各燃料概念について、現行 MOX 燃料炉心（リファレンス炉心）と同等の核的特性（臨界性、出力ピーキング）を有する燃料集合体配置・仕様を設定し、Pu 装荷量、崩壊熱、開発負荷など、それぞれ比較評価を行った。以下に、評価結果について概略をまとめた。

- ・Pu 装荷量について、「1-4 中空ペレット燃料型」、「1-5 UO<sub>2</sub>燃料置き換え型」では、大きな増加は期待できない。これら以外の燃料概念では、増加量にあまり大きな差はなく、いずれも 15%程度の増加となり有望な結果が得られた。
- ・使用済燃料貯蔵プールでの崩壊熱への影響については、「1-4 中空ペレット燃料型」を除くいずれの燃料概念とも対応可能な見通しが得られた。
- ・開発負荷（早期導入性）について、「1-1 MOX 燃料固溶体型」「1-2 Duplex 型」「1-3 被覆管内張型」などは、過去に使用実績がなく、挙動把握のため多くの照射試験が必須となり、開発負荷は比較的大きい。一方、「1-6 UO<sub>2</sub>燃料固溶体型（Gd）」、「1-5 UO<sub>2</sub>燃料置き換え型」は、燃料要素レベルでは既に使用実績があり課題は少ないので開発負荷は小さい。
- ・可燃性毒物の Gd と Er を比較すると、Er は中性子の吸収が穏やかであり、設計上は望ましい傾向であったが、これまでの使用実績が少なく開発負荷はより大きくなる方向である。

## 3.2 フロントエンドに関する評価

3.1.4 項で設定した MOX 高度化の各候補概念の燃料について、従来の知見に基づく MOX 燃料製造施設を想定し、それぞれの燃料の導入による影響について検討を行うこととした。具体的には、「実現性に関する影響」、「処理能力への影響」の 2 項目について検討を行った。以下に、検討結果を記す。

### 3.2.1 実現性に関する影響

それぞれの燃料候補概念について、燃料製造の実現性に関する影響を検討した結果を以下に示す。

- ・「1-1 MOX 燃料固溶体型」では、通常の MOX ペレットと Gd（もしくは Er）を固溶した MOX-Gd（Er）ペレットの 2 種類が製造される。この際、通常の MOX ペレットの製造ラインへの Gd（Er）によるコンタミネーションを避けるため、MOX-Gd（Er）ペレット専用の製造ラインを別に整備することが必須となり、燃料製造施設への影響は大きくなる。
- ・「1-2 Duplex 型」についても、通常の MOX ペレットに加え、棒形状であるが Gd（もし

くはEr)の化合物をペレット中央に装荷した2種類のペレットが製造される。そのため、ペレット製造工程でコンタミネーションが生じる可能性は考えられ、固溶体型と同様、専用の製造ラインが必要となる可能性がある(ただし、コンタミネーションが生じにくいGd(Er)棒の材質など検討次第では、対応できる可能性もある)。

- ・「1-3 被覆管内張型」については、内張を施した被覆管の溶接に係る技術開発が課題であり、その技術が確立されれば、製造側は対応できる可能性がある。
- ・「1-4 中空ペレット燃料型」については、中空ペレットの量産技術・検査技術の開発と、これら技術を取り込んだ設備が必要となるが、JAEA がこれまで実施してきた中空ペレットの製造技術に関するR&Dが活用でき、対応できる可能性はある。
- ・「1-5 UO<sub>2</sub>燃料置き換え型」については、MOX燃料製造施設以外で製造したUO<sub>2</sub>燃料要素をMOX燃料製造施設に受け入れ、組み立てることになる。外部からの要素の受け入れは、BWRのMOX燃料集合体でも行っており、システム改修などは一部必要になるが、MOX燃料製造施設への影響はないと考える。
- ・「1-6 UO<sub>2</sub>燃料固溶体型」、「1-7 Gd(Er)酸化物要素型」についても、「1-5 UO<sub>2</sub>燃料置き換え型」と同様である。

### 3.2.2 処理能力への影響

それぞれの燃料候補概念について、処理能力への影響に関する検討を行う。ただし、例えば、年間処理量など設備の性能に依存し定量的な評価は難しいので、ここでは、燃料製造の各工程で手順が増加するかという観点で、あくまで概略的な検討を行うこととした。検討した結果を以下に示す。

- ・「1-1 MOX燃料固溶体型」については、上述の3.2.1項で燃料製造への影響が大きいと判断されており、実現は困難な見通しと考え、ここでは評価しないこととした。
- ・「1-2 Duplex型」については、中空ペレットの検査、コンタミネーション対策など工程が増えるため、処理能力は低下の見通しである。
- ・「1-3 被覆管内張型」については、Gd(Er)の内張厚さなど複数の種類の被覆管が混在し、被覆管区別の対応が必要となるが、処理能力に著しい影響を及ぼす程の工程追加とはならない見通しである。
- ・「1-4 中空ペレット燃料型」については、中空ペレットの検査工程が増えるため、処理能力は低下の見通しである。
- ・「1-5 UO<sub>2</sub>燃料置き換え型」については、外部で製造したUO<sub>2</sub>燃料要素をMOX燃料製造施設に受け入れ、組み立てることになる。外部からの要素の受け入れはBWRのMOX燃料集合体でも行っており、追加の工程は不要なので、処理能力への影響はない。一方、集合体中にMOX燃料以外の要素を混載するため、1/4 MOX炉心では、その分MOX集合体製造体数が増加することになる。ただし、今回選定した燃料仕様であれば、リファレンスより製造体数が大きく増加することはないので、問題とならない見通しである。
- ・「1-6 UO<sub>2</sub>燃料固溶体型」、「1-7 Gd(Er)酸化物要素型」についても、「1-5 UO<sub>2</sub>燃料置き換え型」と同様である。
- ・ MOX高度化の燃料概念のうち、集合体中のPu含有率の種類がリファレンスの3種類

から減るものについては、Pu 含有率切り替え時のクリーンアップ作業などを削減でき、工程期間を短縮できる可能性もある。

### 3.2.3 フロントエンドに関するまとめ

以上の検討結果を踏まえ、MOX 高度化燃料の各候補概念について、フロントエンドに関する特性の比較評価を行った結果を表 3.2-1 に星取表形式（○×△などで比較）で整理してまとめた。主要な結果として、「1-1 MOX 燃料固溶体型」については、通常 MOX 燃料ペレットへのコンタミネーション回避の点で製造施設への影響は大きく実現は困難な見通し、「1-2 Duplex 型」についてもコンタミネーションの可能性があり、低い評価となる結果であった。「1-4 中空ペレット燃料型」についても、中空ペレットの量産技術・検査技術の開発や検査工程の増加など、やや低い評価となった。それ以外の候補概念については、あまり大きな影響がない見通しであった。

## 3.3 バックエンドに関する評価

3.1.4 項で設定した MOX 高度化の各候補概念の燃料について、バックエンドに関する特性の概略的な比較評価を行う。ここでは、バックエンドに関する特性として、再処理性に関し、溶解時の崩壊熱や臨界性への影響、ガラス固化体に関し、発生数や発熱量への影響を対象とし、それぞれ評価を行うこととした。具体的な評価内容としては、各燃料概念の仕様に基づき、燃焼計算コード ORIGEN2 を用いて燃料中の各核種の物量・崩壊熱の計算を行い、その結果をベースに溶解液の発熱量やガラス固化体の発生量・発熱量などを評価し比較を行うこととした。ここで、燃焼度条件としては、最大燃焼度を想定し 45 GWd/t とした。また、溶解時の臨界性に関しては、簡易計算で概略評価を行った。以下に、各項目に対する評価結果を示す。

### 3.3.1 再処理性への影響

#### ① 崩壊熱への影響

各燃料候補概念の仕様に基づき、再処理時の溶解液の発熱量への影響について概略評価を行った。溶解液の状態に関しては、出力ピーキングの調整のために添加した Gd・Er や溶解時に未臨界とするため添加する中性子吸収物質（Gd を想定）により影響を受けるものの、その溶解挙動については、現状、十分理解されていない。そこで、今回、幾つかの再処理ケースを想定して（例：未臨界とするため添加する Gd の有無、ZrO<sub>2</sub> 挙動など）、全体として概略的な傾向の把握を行うこととした。ここで、発熱量の評価は、ORIGEN2 コードの計算結果に基づき行った。

評価結果として、表 3.3-1 に、冷却期間をパラメータ（15～50 年）とした 1 tHM 当たりの溶解液の発熱量を各候補概念比較して示した。表中、再処理想定ケースについては、「再処理時の想定」の欄に記載した。また、表中の「現行 MOX 燃料に対する比」では、現行 MOX 燃料（リファレンス燃料）の Pu 組成として、国内再処理 Pu による高次化 Pu 組成を想定した燃料の発熱量との比を記載した。

評価の結果、各燃料概念で Pu 装荷量の違いによりある程度の差は生じているが、15

年冷却時点で比べると、現行  $\text{UO}_2$  燃料と比較した場合、概ね約 3~4 倍の発熱となることが分かった。ここで、発熱の大部分は Am、Cm が担っており、FP に比べて発熱の減衰には長期の時間がかかるため、30 年冷却時点でも 15 年時点の 0.8 倍程度とあまり減少しない傾向であった。

現行 MOX 燃料（高次化 Pu 組成）と比較すると、崩壊熱にある程度の差は生じているが、最大でも 1.1 倍程度までの増加（Pu 組成として、現行の標準 Pu 組成を想定しても 1.2 倍程度の増加）であり、崩壊熱の対策は、いずれも現行 MOX 燃料の対策（ $\text{UO}_2$  燃料と混合した再処理、マイナーアクチニド（以下、MA）回収など）に大きな変更をもたらすものではないと考えられる。

## ② 臨界性への影響

各燃料概念の仕様にに基づき、再処理時の溶解液の臨界性について見通しを把握するため概略検討を行う。ここで、臨界性については、溶解槽として暫定的に六ヶ所再処理工場と同等の規模を想定し、簡易モデルにより概略的な見積りを行った。

結果として、まず、現行 MOX 燃料（高次化 Pu 組成）でも、溶解時に未臨界とするためには Gd など中性子吸収毒物の添加が必要となる見通しであった。その一方、「1-1 MOX 燃料固溶体型（Gd）」、「1-3 被覆管内張型（Gd）」、「1-6  $\text{UO}_2$  燃料固溶体型（Gd）」などについては、全ての Gd が溶出すれば、未臨界を達成するのに追加の Gd 添加は必要なく、臨界性に関して特別な対応は必要ない見通しとなった。Er 添加の燃料概念については、Er は Gd ほどの中性子吸収効果がないので、いずれも Er の溶出だけでは臨界未満とできず、追加で Gd を添加する必要がある見通しが得られた。

他方、「1-2 Duplex 型（Gd）」では、ペレット中心に充填する  $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  棒の溶解挙動が複雑となる。 $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  棒中の  $\text{ZrO}_2$  は溶解しないので、臨界性はその中で  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  がどの様な溶解挙動となるかに依存し、もし不溶となる様な場合には、未臨界とするため追加の Gd 添加が必要となる見通しである。

### 3.3.2 ガラス固化体への影響

#### ① 発生数への影響

ガラス固化体の発生量としては、国内のガラス固化技術開発施設（TVF）での組成を参考に FP 酸化物割合は 10.1 wt% とすることを基準とし<sup>[3.3-1]</sup>、FP（+放射化生成物（以下、AP））酸化物重量に基づき体数の簡易評価を行うこととした。ここで、FP（+AP）酸化物としては、FP に加え、出力ピーキングの調整のために添加した Gd・Er や溶解時に未臨界にするため添加する中性子吸収物質（Gd を想定）も考慮した。これらの溶解挙動については、現状、十分理解されていないので、今回、幾つかの再処理理想定ケースを設定し、全体としての概略的な傾向を把握することとした。評価において、使用済燃料中の各核種の量は、ORIGEN2 コードの計算結果を用いた。また、ガラス固化体の条件としては、表 3.3-2 に示す国内のガラス固化体の性状を参考に、容積 150 L、比重 2.74 kg/L、重量 411 kg/体を想定した<sup>[3.3-1, 3.3-2]</sup>。

評価結果として、表 3.3-3 に、冷却期間をパラメータ（15~50 年）とした 1tHM 当た

りのガラス固化体発生量（FP含有率基準）について、各候補概念を比較して示した。表中、再処理想定ケースについては、「再処理時の想定」の欄に記載した。

上述の3.3.1②の「臨界性への影響」で示したとおり、現行MOX燃料でも溶解時に未臨界とするためには中性子吸収毒物（Gdを想定）の添加が必要となる。そのため、ガラス固化体発生量は、Gdの分だけ10%弱程度増加することが認められた。一方、「1-1 MOX燃料固溶体型（Gd）」のように最初からGdが添加されている燃料概念では、追加のGd添加がなくても未臨界が達成できる見通しであり、結果として、溶解時にGdを追加する燃料概念とガラス固化体の量は大きく変わらないことが確認された。ただし、Er添加の燃料概念では、Erは中性子吸収が少ないため、もともとの添加量が大きいというえ、溶解時に未臨界とするため追加のGd添加も必要となることから、Gd添加の概念よりガラス固化体発生量は増加する傾向であった。

「1-2 Duplex型」など、 $Gd_2O_3-ZrO_2 \cdot Er_2O_3-ZrO_2$ を装荷している燃料概念については、 $ZrO_2$ が溶解しないことから、 $ZrO_2$ の溶解槽内の挙動次第でガラス固化体の量が大きく影響を受けることになる。仮に、 $ZrO_2$ が微細に崩壊し、ガラス固化体に移行するような場合では、ガラス固化体数が大きく増加する傾向が認められた。

また、「1-7 Gd（Er）酸化物要素型」では、核燃料でない $Gd_2O_3-ZrO_2 \cdot Er_2O_3-ZrO_2$ の要素を集合体コーナー部に配置している。これらの要素については、ガラス固化体発生量削減の点で、せん断前に取り外すことが望ましいと考える。ただし、その場合には、溶解時の未臨界確保のため中性子吸収毒物（Gd）の添加は必要となり、その分のガラス固化体は増加するものの、ガラス固化体の発生量自体は他の燃料候補と大きく変わらない傾向であった。

## ② 発熱への影響

各燃料概念の仕様に基づき、ガラス固化体の発熱への影響について概略評価を行う。ガラス固化体の仕様としては、上述の3.3.2①で各燃料概念について設定（FP含有率基準）したガラス固化体の仕様を用いた。それぞれ1体当たりの発熱量について、3.3.1①と同様、ORIGEN2コードの計算結果に基づき概略評価を行い、全体として傾向を把握することとした。

評価結果として、表3.3-4に、冷却期間をパラメータ（15～50年）としたガラス固化体1体当たりの発熱を比較して示した。表中の「現行MOX燃料に対する比」では、現行MOX燃料（リファレンス燃料）のPu組成として、国内再処理Puによる高次化組成を想定した燃料の発熱量との比を記載した。また、図3.3-1には、発熱量に加え、その内訳（FP、Am、Cm）が分かるよう比較して示した。ここで、ガラス固化体の発熱量の制限としては、暫定的に現行の平均値の制限である2.0 kW/体以下<sup>[3.3-2]</sup>を目安とし、比較の基準とした。

冷却期間15年の場合の発熱量を比較すると、いずれの燃料概念も2.5～3.0 kW/体程度であり、現行UO<sub>2</sub>燃料の2.5～3.0倍程度となる結果であった。MOX高度化燃料でPu装荷量が増えると発熱量も若干増加の傾向は見られるが、FP（+AP）酸化物重量を基準にガラス固化体を決めているので、Gdなど添加物質の移行挙動の影響も受け、移行が大

きい燃料概念では発熱は低下する傾向を示した。また、図 3.3-1 に示したように、MOX 燃料の発熱は Am、Cm の影響が大きく、冷却期間が長期化しても発熱はあまり下がらず、現状の制限目安 (2.0 kW/体) を下回るには 40~50 年の冷却期間を要する見通しが得られた。そのため、崩壊熱を低減する方策が必要と考えるが、3.3.1①と同様、現行 MOX 燃料 (高次化 Pu 組成) と比較すると、崩壊熱は最大でも 1.1 倍程度 (Pu 組成として、現行の標準 Pu 組成を想定しても 1.2 倍程度) であり、崩壊熱の対策は、いずれも現行 MOX 燃料の対策 (UO<sub>2</sub> 燃料と混合した再処理、MA 回収など) に大きな変更をもたらすものではないと考えられる。

### 3.3.3 バックエンドに関するまとめ

以上の検討結果を踏まえ、各燃料概念のバックエンドに関する特性のうち、再処理性への影響の結果を表 3.3-5 に、ガラス固化体への影響の結果を表 3.3-6 に星取表形式 (○×△などで比較) で整理してまとめた。以下に、評価について概略をまとめた。

[再処理性：崩壊熱への影響]

- ・現行 MOX 燃料 (高次化組成) と比較すると、いずれの MOX 高度化燃料概念も溶解液の崩壊熱は増加する傾向であるが、その程度は最大でも 1.1 倍程度 (Pu 組成として、現行の標準組成を想定しても 1.2 倍程度) と限定的であった。崩壊熱の対策は、現行 MOX 燃料の対策 (UO<sub>2</sub> 燃料と混合した再処理、MA 回収など) に大きな変更をもたらすものでないと考えられることから、いずれも○と評価した。

[再処理性：臨界性への影響]

- ・現行 MOX 燃料でも溶解時に未臨界とするためには中性子吸収毒物 (Gd を想定) の添加が必要であった。一方、「1-1 MOX 燃料固溶体型 (Gd)」、「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd)」など Gd を添加する燃料概念では、追加で Gd を添加しなくても未臨界を達成できる見通しであることから、高い評価 (◎) とした。
- ・「1-2 Duplex 型 (Gd)」など Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> を装荷している燃料概念では、ZrO<sub>2</sub> の溶解時の挙動次第で追加の Gd 添加が必要となることから、他の Gd の追加が必要な燃料概念と同様の評価 (○) とした。
- ・Er 添加の燃料概念について、Er は Gd ほどの中性子吸収効果がないので、いずれも Er の溶出だけでは臨界未満とできず、追加で Gd を添加することが必要となった。そのため、他の Gd の追加が必要な燃料概念と同様の評価 (○) とした。

[ガラス固化体：発生数への影響]

- ・Er 添加の燃料概念は、Er の中性子吸収が少ないため、もともとの添加量が大いいうえ、溶解時に未臨界とするため追加の Gd 添加も必要となり、ガラス固化体数が増加する傾向であった。そのため、低い評価 (△) とした。
- ・「1-2 Duplex 型」など、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>・Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> を装荷している燃料概念については、ZrO<sub>2</sub> の溶解槽内の挙動次第でガラス固化体の量が大きく増加する可能性があることから低い評価 (△) とした。

[ガラス固化体：発熱量への影響]

- ・現行 MOX 燃料と比較すると、多くの MOX 高度化燃料概念では崩壊熱は増加する傾

向であるが、その程度は最大でも 1.1 倍程度 (Pu 組成として、現行の標準組成を想定しても 1.2 倍程度) と限定的であった。崩壊熱の対策は、現行 MOX 燃料の対策 (UO<sub>2</sub> 燃料と混合した再処理、MA 回収など) に大きな変更をもたらすものでないと考えられることから、いずれも○と評価した。

### 3.4 有望な燃料候補概念絞り込みに関するまとめ (絞り込みに向けた比較評価)

2.2 節において選定した MOX 高度化燃料の各候補概念 (13 概念) について、有望概念の絞り込みに向け、① 炉心・燃料、② フロントエンド、③ バックエンドの観点で概略評価を行った。図 3.4-1 に、① 炉心・燃料で設定した各候補概念の燃料集合体内要素配置・仕様を比較して示した。また、個々の評価について、評価結果の要点の整理を行い、その結果を表 3.4-1 にまとめて示した。各観点における有望概念の絞り込みに係る重要なポイントは、それぞれ、以下のとおりである。

#### ① 炉心・燃料

- ・Pu 装荷量について、「1-4 中空ペレット燃料型」、「1-5 UO<sub>2</sub>燃料置き換え型」では、大きな増加は期待できない。これら以外の燃料概念では、増加量にあまり大きな差はなく、いずれも 15%程度の増加となり有望な結果が得られた。
- ・使用済燃料貯蔵プールでの崩壊熱への影響については、「1-4 中空ペレット燃料型」を除くいずれの燃料概念とも対応可能な見通しが得られた。
- ・開発負荷 (早期導入性) について、「1-1 MOX 燃料固溶体型」、「1-2 Duplex 型」、「1-3 被覆管内張型」などは、過去に使用実績がなく、挙動把握のため多くの照射試験が必須となり、開発負荷は比較的大きい。一方、「1-6 UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Gd)」、「1-5 UO<sub>2</sub>燃料置き換え型」は、燃料要素レベルでは既に使用実績があり課題は少ないので開発負荷は小さい。
- ・可燃性毒物の Gd と Er を比較すると、Er は中性子の吸収が穏やかであり、設計上は望ましい傾向であったが、これまでの使用実績が少なく開発負荷はより大きくなる方向である。

#### ② フロントエンド

- ・「1-1 MOX 燃料固溶体型」については、通常 MOX 燃料ペレットへのコンタミネーション回避の点で燃料製造施設への影響は大きく (別の製造ラインの設置が必須)、実現は難しい見通しである。「1-2 Duplex 型」についても、コンタミネーションの可能性を有し、低い評価となる結果となった。

#### ③ バックエンド

- ・再処理性に関する崩壊熱・臨界性への影響、ガラス固化体の崩壊熱への影響については、各燃料概念であまり差が生じない結果であった。
- ・ガラス固化体の発生量に関して、Er 添加の燃料概念は体数が増加する傾向、「1-2 Duplex 型」なども ZrO<sub>2</sub>の溶解槽内の挙動次第で増加する可能性がある結果となった。

以上の結果より、MOX 高度化燃料の有望な概念としては、「1-6 UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Gd)」

が全体的に良好な評価結果であるとともに、特に、燃料開発の点で Gd を含有する  $\text{UO}_2\text{-Gd}$  燃料要素は軽水炉での使用実績があり、開発負荷が小さいことから、総合的に最も有望な概念として選定することとした。

また、「1-7 Gd 酸化物要素型」についても、 $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  棒は核燃料でなく照射試験の負荷が比較的小さいこと（材料照射で行える）に加え、集合体のコーナー部に 4 本装荷するだけで、Pu 含有率 1 種類でも現行 MOX 燃料と同等の臨界性・出力ピーキングを維持できる見通しが示されたこと、また、燃料製造への負荷も小さいこと、せん断前に  $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  棒を取り外せば再処理の負荷も小さいことなどの特長も有し、将来的により高い特性を期待できる可能性があることから、代替候補として選定することとした。

表 3.1.1-1 今回の MOX 燃料高度化検討で用いる Pu 同位体組成  
(国内再処理で回収される PWR UO<sub>2</sub> 燃料の計算条件・結果)

	ORIGEN2 コード計算条件						計算結果 (Pu 同位体組成比 [wt%])						
	炉型	燃焼度 [GWd/t]	比出力 [W/g]	U 濃縮度 [wt%]	冷却 [年]	崩壊 [年]	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242	Am-241	Puf 割合
標準 Pu 組成	PWR	40	40	4.1	4	3	2.0	57.8	22.4	10.6	5.5	1.7	68.4
高次化 Pu 組成	PWR	45	40	4.1	15	3	2.5	58.0	24.7	6.7	7.0	1.1	64.7

表 3.1.1-2 燃料ペレットに含まれる核燃料元素核種の原子量・半減期

元素	核種	原子量	半減期 [年]
U	U-234	234.040954	$2.46 \times 10^5$
	U-235	235.043931	$7.04 \times 10^8$
	U-236	236.045570	$2.34 \times 10^7$
	U-238	238.050790	$4.47 \times 10^9$
Pu	Pu-238	238.049561	87.7
	Pu-239	239.052165	24110
	Pu-240	240.053815	6561
	Pu-241	241.056853	14.29
	Pu-242	242.058744	$3.74 \times 10^5$
Am	Am-241	241.056831	432.6

表 3.1.1-3 構造材・減速材に含まれる元素核種の原子量・存在比

番号	記号	核種	原子量	存在比 [at%]
1	H	H-1	1.0078250	99.9885
		H-2	2.0141018	0.0115
5	B	B-10	10.0129370	19.9000
		B-11	11.0093054	80.1000
6	C	C-12	12.0000000	98.9300
		C-13	13.0033548	1.0700
		O-16	15.9949146	99.7570
8	O	O-17	16.9991318	0.0380
		O-18	17.9991596	0.2050
		Al-27	26.9815386	100.0000
14	Si	Si-28	27.9769265	92.2230
		Si-29	28.9764947	4.6850
		Si-30	29.9737701	3.0920
		Ti-46	45.9526277	8.2500
22	Ti	Ti-47	46.9517588	7.4400
		Ti-48	47.9479419	73.7200
		Ti-49	48.9478656	5.4100
		Ti-50	49.9447869	5.1800
		Cr-50	49.9460416	4.3450
		Cr-52	51.9405063	83.7890
24	Cr	Cr-53	52.9406482	9.5010
		Cr-54	53.9388792	2.3650
		Mn-55	54.9380439	100.0000
26	Fe	Fe-54	53.9396090	5.8450
		Fe-56	55.9349364	91.7540
		Fe-57	56.9353929	2.1190
26	Fe	Fe-58	57.9332745	0.2820
		Ni-58	57.9353425	68.0770
28	Ni	Ni-60	59.9307859	26.2230
		Ni-61	60.9310556	1.1399
		Ni-62	61.9283454	3.6346
		Ni-64	63.9279669	0.9255
40	Zr	Zr-90	89.9046969	51.4500
		Zr-91	90.9056383	11.2200
		Zr-92	91.9050334	17.1500
		Zr-94	93.9063090	17.3800
		Zr-96	95.9082681	2.8000
		Mo-92	91.9068063	14.5300
42	Mo	Mo-94	93.9050835	9.1500
		Mo-95	94.9058374	15.8400
		Mo-96	95.9046747	16.6700
		Mo-97	96.9060167	9.6000
		Mo-98	97.9054034	24.3900
		Mo-100	99.9074736	9.8200
		Ag-107	106.9050927	51.8390
		Ag-109	108.9047556	48.1610
48	Cd	Cd-106	105.906462	1.250
		Cd-108	107.904184	0.890
		Cd-110	109.903005	12.490
		Cd-111	110.904181	12.800
48	Cd	Cd-112	111.902761	24.130
		Cd-113	112.904405	12.220
		Cd-114	113.903362	28.730
47	Ag	Cd-116	115.904759	7.490
		Er-162	161.928789	0.139
64	Gd	Er-164	163.929209	1.601
		Er-166	165.930301	33.503
		Er-167	166.932056	22.869
		Er-168	167.932378	26.978
		Er-170	169.935471	14.910
		W-180	179.946713	0.120
74	W	W-182	181.948204	26.500
		W-183	182.950223	14.310
		W-184	183.950931	30.640
		W-186	185.954363	28.430
		In-113	112.904059	4.290
		In-115	114.903879	95.710
50	Sn	Sn-112	111.904822	0.970
		Sn-114	113.902780	0.660
		Sn-115	114.903345	0.340
		Sn-116	115.901743	14.540
50	Sn	Sn-117	116.902954	7.680
		Sn-118	117.901607	24.220
		Sn-119	118.903311	8.590
		Sn-120	119.902202	32.580
		Sn-122	121.903443	4.630
		Sn-124	123.905274	5.790
64	Gd	Gd-152	151.919799	0.200
		Gd-154	153.920874	2.180
		Gd-155	154.922630	14.800
		Gd-156	155.922131	20.470
		Gd-157	156.923968	15.650
		Gd-158	157.924112	24.840
68	Er	Gd-160	159.927062	21.860
		Er-162	161.928789	0.139
		Er-164	163.929209	1.601
		Er-166	165.930301	33.503
		Er-167	166.932056	22.869
		Er-168	167.932378	26.978
74	W	Er-170	169.935471	14.910
		W-180	179.946713	0.120
		W-182	181.948204	26.500
		W-183	182.950223	14.310
		W-184	183.950931	30.640
		W-186	185.954363	28.430

表 3.1.1-4 被覆管材（ジルカロイ-4）成分元素の組成・密度

元素	組成 [%]	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]
Zr	98.19	6.55
Sn	1.5	
Fe	0.21	
Ni	—	
Cr	0.1	

表 3.1.1-5 可燃性毒物（Gd・Er）と母材（Zr）の金属密度・酸化物密度・組成比

金属	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	金属	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	金属	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]
Zr	6.506	Gd	7.90	Er	9.066
酸化物	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	酸化物	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	酸化物	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]
ZrO <sub>2</sub>	5.89	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.407	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.64
核種	組成比 [wt%]	核種	組成比 [wt%]	核種	組成比 [wt%]
Gd-152	0.20	Er-162	0.139	Er-164	1.601
Gd-154	2.18	Er-166	33.503	Er-167	22.869
Gd-155	14.80	Er-168	26.978	Er-170	14.910
Gd-156	20.47	Total	100.0	Total	100.0
Gd-157	15.65				
Gd-158	24.84				
Gd-160	21.86				

表 3.1.4(1)-1 現行 MOX 燃料（リファレンス）の物質収支  
（標準 Pu 組成と高次化 Pu 組成使用時の比較）

		現行 MOX 燃料(リファレンス) 標準 Pu 組成使用 (Puf 割合: 約 68wt%)		現行 MOX 燃料(リファレンス) 高次化 Pu 組成使用 (Puf 割合: 約 65wt%)		
		装荷時	取出時	装荷時	取出時	
Pu 重量 [kg]		41.8	32.0	49.3	38.6	
Pu+Am241 重量 [kg]		42.5	32.6	49.8	39.3	
Pu 消費量 (装荷-取出) [kg]		—	9.9	—	10.5	
Pu 同位体組成比 [wt%]		Pu-238	2.00	3.32	2.50	3.28
		Pu-239	57.80	42.09	58.00	42.50
		Pu-240	22.40	27.87	24.70	29.36
		Pu-241	10.60	15.99	6.70	14.19
		Pu-242	5.50	8.80	7.00	9.09
		Am-241	1.70	1.92	1.10	1.57
		Puf 割合	68.40	58.08	64.70	56.70
リファレンス に対する変 化率 [%]	集合体 当たり	Pu+Am241 重量			17.2%増加	20.6%増加
		取出時の Puf 割合			—	2.38%減少
		Pu 消費量 (装荷-取出)			—	6.1%増加
	炉心 当たり*	Pu+Am241 重量			17.2%増加	—

\* MOX 炉心として約 1/4 炉心を想定。ここで、MOX 燃料要素割合が 1/4 であり、燃料高度化により MOX 集合体数が増加する場合は、その影響を補正した。

表 3.1.4(2)①-1 1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Gd) の物質収支  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

		現行 MOX 燃料(リファレンス) 高次化 Pu 組成使用		1-1:MOX 燃料固溶体型(Gd)		
		装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)	装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)	
Pu 重量 [kg]		49.3	38.6	56.9	45.5	
Pu+Am241 重量 [kg]		49.8	39.3	57.5	46.2	
Pu 消費量(装荷-取出)[kg]		—	10.5	—	11.3	
Pu 同位体組成比 [wt%]		Pu-238	2.50	3.28	2.50	3.21
		Pu-239	58.00	42.50	58.00	43.93
		Pu-240	24.70	29.36	24.70	29.09
		Pu-241	6.70	14.19	6.70	13.48
		Pu-242	7.00	9.09	7.00	8.68
		Am-241	1.10	1.57	1.10	1.62
		Puf 割合	64.70	56.70	64.70	57.40
リファレンス に対する変 化率 [%]	集合体 当たり	Pu+Am241 重量			15.5%増加	17.6%増加
		取出時の Puf 割合			—	1.23%増加
		Pu 消費量 (装荷-取出)			—	7.2%増加
	炉心 当たり*	Pu+Am241 重量			15.5%増加	—

\* MOX 炉心として約 1/4 炉心を想定。ここで、MOX 燃料要素割合が 1/4 であり、燃料高度化により MOX 集合体数が増加する場合は、その影響を補正した。

表 3.1.4(2)②-1 1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Er) の物質収支  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

		現行 MOX 燃料(リファレンス) 高次化 Pu 組成使用		1-1:MOX 燃料固溶体型(Er)		
		装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)	装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)	
Pu 重量 [kg]		49.3	38.6	56.8	45.3	
Pu+Am241 重量 [kg]		49.8	39.3	57.4	46.1	
Pu 消費量(装荷-取出)[kg]		—	10.5	—	11.3	
Pu 同位体組成比 [wt%]		Pu-238	2.50	3.28	2.50	3.20
		Pu-239	58.00	42.50	58.00	43.87
		Pu-240	24.70	29.36	24.70	29.18
		Pu-241	6.70	14.19	6.70	13.44
		Pu-242	7.00	9.09	7.00	8.69
		Am-241	1.10	1.57	1.10	1.62
		Puf 割合	64.70	56.70	64.70	57.31
リファレンス に対する変 化率 [%]	集合体 当たり	Pu+Am241 重量			15.2%増加	17.3%増加
		取出時の Puf 割合			—	1.08%増加
		Pu 消費量 (装荷-取出)			—	7.5%増加
	炉心 当たり*	Pu+Am241 重量			15.2%増加	—

\* MOX 炉心として約 1/4 炉心を想定。ここで、MOX 燃料要素割合が 1/4 であり、燃料高度化により MOX 集合体数が増加する場合は、その影響を補正。

表 3.1.4(2)③-1 1-2 : Duplex 型 (Gd) の物質収支  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

		現行 MOX 燃料 (リファレンス) 高次化 Pu 組成使用		1-2: Duplex 型 (Gd)	
		装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)	装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)
Pu 重量 [kg]		49.3	38.6	55.3	44.1
Pu+Am241 重量 [kg]		49.8	39.3	55.9	44.9
Pu 消費量 (装荷-取出) [kg]		—	10.5	—	11.1
Pu 同位体組成比 [wt%]	Pu-238	2.50	3.28	2.50	3.21
	Pu-239	58.00	42.50	58.00	43.81
	Pu-240	24.70	29.36	24.70	29.14
	Pu-241	6.70	14.19	6.70	13.54
	Pu-242	7.00	9.09	7.00	8.71
	Am-241	1.10	1.57	1.10	1.59
	Puf 割合	64.70	56.70	64.70	57.35
リファレンス に対する変 化率 [%]	集合体 当たり	Pu+Am241 重量		12.3%増加	14.2%増加
		取出時の Puf 割合		—	1.15%増加
		Pu 消費量 (装荷-取出)		—	4.9%増加
	炉心 当たり*	Pu+Am241 重量		12.3%増加	—

\* MOX 炉心として約 1/4 炉心を想定。ここで、MOX 燃料要素割合が 1/4 であり、燃料高度化により MOX 集合体数が増加する場合は、その影響を補正した。

表 3.1.4(2)④-1 1-2 : Duplex 型 (Er) の物質収支  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

		現行 MOX 燃料 (リファレンス) 高次化 Pu 組成使用		1-2: Duplex 型 (Er)	
		装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)	装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)
Pu 重量 [kg]		49.3	38.6	55.2	44.0
Pu+Am241 重量 [kg]		49.8	39.3	55.8	44.7
Pu 消費量 (装荷-取出) [kg]		—	10.5	—	11.1
Pu 同位体組成比 [wt%]	Pu-238	2.50	3.28	2.50	3.20
	Pu-239	58.00	42.50	58.00	43.71
	Pu-240	24.70	29.36	24.70	29.23
	Pu-241	6.70	14.19	6.70	13.52
	Pu-242	7.00	9.09	7.00	8.73
	Am-241	1.10	1.57	1.10	1.60
	Puf 割合	64.70	56.70	64.70	57.23
リファレンス に対する変 化率 [%]	集合体 当たり	Pu+Am241 重量		12.0%増加	13.7%増加
		取出時の Puf 割合		—	0.93%増加
		Pu 消費量 (装荷-取出)		—	5.3%増加
	炉心 当たり*	Pu+Am241 重量		12.0%増加	—

\* MOX 炉心として約 1/4 炉心を想定。ここで、MOX 燃料要素割合が 1/4 であり、燃料高度化により MOX 集合体数が増加する場合は、その影響を補正した。

表 3.1.4(2)⑤-1 1-3：被覆管内張型（Gd）の物質収支  
（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）

		現行 MOX 燃料（リファレンス） 高次化 Pu 組成使用		1-3:被覆管内張型（Gd）	
		装荷時 （0 GWd/t）	取出時 （45 GWd/t）	装荷時 （0 GWd/t）	取出時 （45 GWd/t）
Pu 重量 [kg]		49.3	38.6	56.3	45.3
Pu+Am241 重量 [kg]		49.8	39.3	56.9	46.0
Pu 消費量（装荷－取出）[kg]		—	10.5	—	10.8
Pu 同位体組成比 [wt%]	Pu-238	2.50	3.28	2.50	3.21
	Pu-239	58.00	42.50	58.00	44.39
	Pu-240	24.70	29.36	24.70	28.68
	Pu-241	6.70	14.19	6.70	13.54
	Pu-242	7.00	9.09	7.00	8.56
	Am-241	1.10	1.57	1.10	1.62
	Puf 割合	64.70	56.70	64.70	57.93
リファレンス に対する変 化率 [%]	集合体 当たり	Pu+Am241 重量		14.2%増加	17.0%増加
		取出時の Puf 割合		—	2.17%増加
		Pu 消費量 （装荷－取出）		—	2.8%増加
	炉心 当たり*	Pu+Am241 重量		14.2%増加	—

\* MOX 炉心として約 1/4 炉心を想定。ここで、MOX 燃料要素割合が 1/4 であり、燃料高度化により MOX 集合体数が増加する場合は、その影響を補正した。

表 3.1.4(2)⑥-1 1-3：被覆管内張型（Er）の物質収支  
（現行 MOX 燃料（リファレンス）との比較）

		現行 MOX 燃料（リファレンス） 高次化 Pu 組成使用		1-3:被覆管内張型（Er）	
		装荷時 （0 GWd/t）	取出時 （45 GWd/t）	装荷時 （0 GWd/t）	取出時 （45 GWd/t）
Pu 重量 [kg]		49.3	38.6	56.9	45.4
Pu+Am241 重量 [kg]		49.8	39.3	57.5	46.2
Pu 消費量（装荷－取出）[kg]		—	10.5	—	11.3
Pu 同位体組成比 [wt%]	Pu-238	2.50	3.28	2.50	3.20
	Pu-239	58.00	42.50	58.00	43.92
	Pu-240	24.70	29.36	24.70	29.17
	Pu-241	6.70	14.19	6.70	13.41
	Pu-242	7.00	9.09	7.00	8.68
	Am-241	1.10	1.57	1.10	1.62
	Puf 割合	64.70	56.70	64.70	57.33
リファレンス に対する変 化率 [%]	集合体 当たり	Pu+Am241 重量		15.4%増加	17.6%増加
		取出時の Puf 割合		—	1.11%増加
		Pu 消費量 （装荷－取出）		—	7.5%増加
	炉心 当たり*	Pu+Am241 重量		15.4%増加	—

\* MOX 炉心として約 1/4 炉心を想定。ここで、MOX 燃料要素割合が 1/4 であり、燃料高度化により MOX 集合体数が増加する場合は、その影響を補正した。

表 3.1.4(3)①-1 1-4 : 中空ペレット燃料型の物質収支  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

		現行 MOX 燃料 (リファレンス) 高次化 Pu 組成使用		1-4: 中空ペレット燃料型		
		装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)	装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)	
Pu 重量 [kg]		49.3	38.6	49.1	38.5	
Pu+Am241 重量 [kg]		49.8	39.3	49.7	39.1	
Pu 消費量 (装荷-取出) [kg]		—	10.5	—	10.5	
Pu 同位体組成比 [wt%]		Pu-238	2.50	3.28	2.50	3.26
		Pu-239	58.00	42.50	58.00	42.42
		Pu-240	24.70	29.36	24.70	29.56
		Pu-241	6.70	14.19	6.70	14.16
		Pu-242	7.00	9.09	7.00	9.06
		Am-241	1.10	1.57	1.10	1.54
		Puf 割合	64.70	56.70	64.70	56.58
リファレンス に対する変 化率 [%]	集合体 当たり	Pu+Am241 重量			0.3%減少	0.5%減少
		取出時の Puf 割合			—	0.21%減少
		Pu 消費量 (装荷-取出)			—	0.0%
	炉心 当たり*	Pu+Am241 重量			0.3%減少	—

\* MOX 炉心として約 1/4 炉心を想定。ここで、MOX 燃料要素割合が 1/4 であり、燃料高度化により MOX 集合体数が増加する場合は、その影響を補正した。

表 3.1.4(3)②-1 1-5 : UO<sub>2</sub> 燃料置き換え型の物質収支  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

		現行 MOX 燃料 (リファレンス) 高次化 Pu 組成使用		1-5: UO <sub>2</sub> 燃料置き換え型		
		装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)	装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)	
Pu 重量 [kg]		49.3	38.6	48.3	38.1	
Pu+Am241 重量 [kg]		49.8	39.3	48.8	38.7	
Pu 消費量 (装荷-取出) [kg]		—	10.5	—	10.1	
Pu 同位体組成比 [wt%]		Pu-238	2.50	3.28	2.50	3.27
		Pu-239	58.00	42.50	58.00	42.61
		Pu-240	24.70	29.36	24.70	29.36
		Pu-241	6.70	14.19	6.70	14.15
		Pu-242	7.00	9.09	7.00	9.04
		Am-241	1.10	1.57	1.10	1.56
		Puf 割合	64.70	56.70	64.70	56.76
リファレンス に対する変 化率 [%]	集合体 当たり	Pu+Am241 重量			2.0%減少	1.5%減少
		取出時の Puf 割合			—	0.11%増加
		Pu 消費量 (装荷-取出)			—	4.1%減少
	炉心 当たり*	Pu+Am241 重量			5.8%増加	—

\* MOX 炉心として約 1/4 炉心を想定。ここで、MOX 燃料要素割合が 1/4 であり、燃料高度化により MOX 集合体数が増加する場合は、その影響を補正した。

表 3.1.4(4)①-1 1-6 : UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd) の物質収支  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

		現行 MOX 燃料 (リファレンス) 高次化 Pu 組成使用		1-6 : UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd)		
		装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)	装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)	
Pu 重量 [kg]		49.3	38.6	53.9	43.0	
Pu+Am241 重量 [kg]		49.8	39.3	54.5	43.8	
Pu 消費量 (装荷-取出) [kg]		—	10.5	—	10.8	
Pu 同位体組成比 [wt%]		Pu-238	2.50	3.28	2.50	3.22
		Pu-239	58.00	42.50	58.00	43.67
		Pu-240	24.70	29.36	24.70	29.16
		Pu-241	6.70	14.19	6.70	13.61
		Pu-242	7.00	9.09	7.00	8.73
		Am-241	1.10	1.57	1.10	1.60
		Puf 割合	64.70	56.70	64.70	57.28
リファレンス に対する変 化率 [%]	集合体 当たり	Pu+Am241 重量			9.4%増加	11.5%増加
		取出時の Puf 割合			—	1.02%増加
		Pu 消費量 (装荷-取出)			—	2.1%増加
	炉心 当たり*	Pu+Am241 重量			15.7%増加	—

\* MOX 炉心として約 1/4 炉心を想定。ここで、MOX 燃料要素割合が 1/4 であり、燃料高度化により MOX 集合体数が増加する場合は、その影響を補正した。

表 3.1.4(4)②-1 1-6 : UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Er) の物質収支  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

		現行 MOX 燃料 (リファレンス) 高次化 Pu 組成使用		1-6 : UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Er)		
		装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)	装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)	
Pu 重量 [kg]		49.3	38.6	54.4	43.5	
Pu+Am241 重量 [kg]		49.8	39.3	55.0	44.2	
Pu 消費量 (装荷-取出) [kg]		—	10.5	—	10.8	
Pu 同位体組成比 [wt%]		Pu-238	2.50	3.28	2.50	3.21
		Pu-239	58.00	42.50	58.00	43.80
		Pu-240	24.70	29.36	24.70	29.16
		Pu-241	6.70	14.19	6.70	13.52
		Pu-242	7.00	9.09	7.00	8.70
		Am-241	1.10	1.57	1.10	1.60
		Puf 割合	64.70	56.70	64.70	57.32
リファレンス に対する変 化率 [%]	集合体 当たり	Pu+Am241 重量			10.4%増加	12.5%増加
		取出時の Puf 割合			—	1.09%増加
		Pu 消費量 (装荷-取出)			—	2.3%増加
	炉心 当たり*	Pu+Am241 重量			16.7%増加	—

\* MOX 炉心として約 1/4 炉心を想定。ここで、MOX 燃料要素割合が 1/4 であり、燃料高度化により MOX 集合体数が増加する場合は、その影響を補正した。

表 3.1.4(4)③-1 1-7 : Gd 酸化物要素型の物質収支  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

		現行 MOX 燃料(リファレンス) 高次化 Pu 組成使用		1-7: Gd 酸化物要素型	
		装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)	装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)
Pu 重量 [kg]		49.3	38.6	56.3	44.9
Pu+Am241 重量 [kg]		49.8	39.3	56.9	45.7
Pu 消費量(装荷-取出)[kg]		—	10.5	—	11.3
Pu 同位体組成比 [wt%]	Pu-238	2.50	3.28	2.50	3.21
	Pu-239	58.00	42.50	58.00	43.83
	Pu-240	24.70	29.36	24.70	29.21
	Pu-241	6.70	14.19	6.70	13.45
	Pu-242	7.00	9.09	7.00	8.70
	Am-241	1.10	1.57	1.10	1.61
	Puf 割合	64.70	56.70	64.70	57.28
リファレンス に対する変 化率 [%]	集合体 当たり	Pu+Am241 重量		14.3%増加	16.3%増加
		取出時の Puf 割合		—	1.02%増加
		Pu 消費量 (装荷-取出)		—	6.8%増加
	炉心 当たり*	Pu+Am241 重量		14.3%増加	—

\* MOX 炉心として約 1/4 炉心を想定。ここで、MOX 燃料要素割合が 1/4 であり、燃料高度化により MOX 集合体数が増加する場合は、その影響を補正した。

表 3.1.4(4)④-1 1-7 : Er 酸化物要素型の物質収支  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

		現行 MOX 燃料(リファレンス) 高次化 Pu 組成使用		1-7: Er 酸化物要素型	
		装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)	装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)
Pu 重量 [kg]		49.3	38.6	56.3	44.9
Pu+Am241 重量 [kg]		49.8	39.3	56.9	45.6
Pu 消費量(装荷-取出)[kg]		—	10.5	—	11.3
Pu 同位体組成比 [wt%]	Pu-238	2.50	3.28	2.50	3.21
	Pu-239	58.00	42.50	58.00	43.82
	Pu-240	24.70	29.36	24.70	29.22
	Pu-241	6.70	14.19	6.70	13.44
	Pu-242	7.00	9.09	7.00	8.71
	Am-241	1.10	1.57	1.10	1.61
	Puf 割合	64.70	56.70	64.70	57.26
リファレンス に対する変 化率 [%]	集合体 当たり	Pu+Am241 重量		14.3%増加	16.0%増加
		取出時の Puf 割合		—	0.99%増加
		Pu 消費量 (装荷-取出)		—	6.9%増加
	炉心 当たり*	Pu+Am241 重量		14.3%増加	—

\* MOX 炉心として約 1/4 炉心を想定。ここで、MOX 燃料要素割合が 1/4 であり、燃料高度化により MOX 集合体数が増加する場合は、その影響を補正した。

表 3.1.4(5)①-1 2-1 : ATF (Fe 系) 被覆管型の物質収支  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

		現行 MOX 燃料 (リファレンス) 高次化 Pu 組成使用		2-1:ATF(Fe 系)被覆管型		
		装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)	装荷時 (0 GWd/t)	取出時 (45 GWd/t)	
Pu 重量 [kg]		49.3	38.6	58.4	46.9	
Pu+Am241 重量 [kg]		49.8	39.3	59.0	47.7	
Pu 消費量 (装荷-取出) [kg]		—	10.5	—	11.3	
Pu 同位体組成比 [wt%]		Pu-238	2.50	3.28	2.50	3.17
		Pu-239	58.00	42.50	58.00	44.52
		Pu-240	24.70	29.36	24.70	28.99
		Pu-241	6.70	14.19	6.70	13.12
		Pu-242	7.00	9.09	7.00	8.57
		Am-241	1.10	1.57	1.10	1.62
		Puf 割合	64.70	56.70	64.70	57.64
リファレンス に対する変 化率 [%]	集合体 当たり	Pu+Am241 重量			18.5%増加	21.4%増加
		取出時の Puf 割合			—	1.64%増加
		Pu 消費量 (装荷-取出)			—	7.0%増加
	炉心 当たり*	Pu+Am241 重量			18.5%増加	—

\* MOX 炉心として約 1/4 炉心を想定。ここで、MOX 燃料要素割合が 1/4 であり、燃料高度化により MOX 集合体数が増加する場合は、その影響を補正した。

表 3.1.5-1 炉心・燃料設計に関する特性の比較評価 (燃料仕様)

MOX 燃料固溶体型	1-1		1-2		1-3		1-4 中空ペレット 燃料型	1-5 UO <sub>2</sub> 燃料置き 換え型	1-6		1-7		2-1 (参考) ATF(Fe系)被 覆管型			
	Gd	Er	Duplex 型		被覆管内張型				中空ペレット 燃料型	UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型	Gd	Er		Gd	Er	
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>集合体の各コーナーに、それぞれ 3 本ずつ Gd・Er を含有した MOX 燃料要素 (MOX-Gd、MOX-Er) を装着するような比較的軽微な対応で、リファレンス (現行 MOX 燃料集合体) と同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たすことが可能に見通しが得られた。</li> <li>Er は中性子吸収が Gd よりずっと小さいため、出力の変動が小さく、出力ピーキングが抑えられる傾向であった。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Duplex 型は、ペレットの中心に Gd・Er 酸化物の棒が装着されるため、ペレット領域で熱中性子が吸収され Gd・Er の中性子吸収効果は抑えられる。そのため、装着する Duplex 型燃料要素の数は増加し、外周 1 層程度必要になった。</li> <li>一方、中性子吸収が抑えられる効果により、出力変動は穏やかになり、出力ピーキングは抑えられた。</li> <li>Er は中性子吸収が Gd よりずっと小さいため、出力の変動が小さく、出力ピーキングはより抑えられる傾向であった。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>被覆管内張型 (Gd) は、ペレットの外側に Gd が装着されるため、(Duplex 型と逆に) 中性子の吸収効果が非常に強く、出力の変動が大きくなる。そのため、出力ピーキングが大きくなり、設計が難しくなり、成立させるため、Gd を全燃料要素に分散させ、装着し、その中で内張厚さを調整する仕様となった。</li> <li>一方、被覆管内張型 (Er) では、Er の中性子吸収効果が小さいので、装着する燃料要素は外周 1 層程度でリファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たした。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>中空ペレットは、Gd・Er など可燃性毒物が添加されていないので、初期の反応度を抑えるため、中空ペレットの燃料要素の本数を多く装荷する必要があり、外周 2 層必要となった。</li> <li>中空ペレットは、燃料の装荷量自体が (中空領域の分だけ) 中実ペレットより減る。そのため、Pu 含有率が増加しても Pu 装荷量の増加は抑制される傾向となった。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>UO<sub>2</sub> 燃料置き換え型では、最外周の低 Pu 含有率の MOX 燃料要素を UO<sub>2</sub> 燃料要素に置き換えることで、出力ピーキングの改善を期待したが、1 層内側の MOX 燃料要素で出力が増加するため、結局、現行 MOX 燃料と同等の Pu 含有率の MOX 燃料要素が必要となる結果であった。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>1-1 の MOX 燃料固溶体型では、比較的軽微な仕様変更でリファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たす結果が得られた。BWR・PWR で実績があり開発要素の少ない UO<sub>2</sub>-Gd (固溶体型) でも同様の対応が可能か追加で検討を行った。</li> <li>U は Pu より中性子吸収が少ないため、外周が若干出力のピークが生じ、その部分の Pu 含有率低下など対応が必要になるが、概ね軽微な仕様変更で対応可能な見通しが得られた。</li> <li>Er 酸化物 (Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 想定) でも、同様の結果を得た。Er は中性子吸収が小さいため、出力ピーキングは抑えられる傾向である。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>本検討における燃料仕様サーベイの結果、集合体コーナー部における中性子吸収が重要となる傾向が得られた。そのため、核燃料でなく照射試験の負荷を軽減できる Gd 酸化物 (Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 想定) を装荷した要素をコーナーに設置する燃料について追加で検討を行った。</li> <li>各コーナーに 1 本ずつの装荷で、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たす見通しが得られた。</li> <li>Er 酸化物 (Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 想定) でも、同様の結果を得た。Er は中性子吸収が小さいため、出力ピーキングは抑えられる傾向である。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>参考として、ATF (Fe系) 被覆管を採用した燃料概念について、燃料仕様サーベイを行い、MOX 高度化燃料にどの様な影響があるか評価を行った。</li> <li>ATF (Fe系) 材はジルカロイ系材に比べ熱中性子の吸収が大きいため、最大の Pu 含有率は 14.6 wt% となり、現行指針の制限 13 wt% を超える見通しが得られた。</li> <li>今回の評価では暫定的にリファレンスと同等の肉厚として、いるが、薄肉化できれば Pu 含有率は下げられる見通しである。</li> </ul>	

表 3.1.5-2 炉心・燃料設計に関する特性の比較評価（物質収支）

燃料候補概念	0 (リアレンス) 現行 MOX 燃料 (高次化組成)	1-1		1-2		1-3		1-4	1-5	1-6		1-7	
		MOX 燃料固溶体型		Duplex 型		被覆管内張型		中空ペレット 燃料型	UO <sub>2</sub> 燃料置き 換外型	UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型		Gd(Er) 酸化物 要素型	
		Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er			Gd	Er	Gd	Er
重量 (kg)	49.8	57.5	57.4	55.9	55.8	56.9	57.5	49.7	48.8	54.5	55.0	56.9	56.9
リアレンス比	-	+15.5%	+15.2%	+12.3%	+12.0%	+14.2%	+15.4%	-0.3%	-2.0%	+9.4%	+10.4%	+14.3%	+14.3%
炉心当たり Pu 装荷量(約 1/4 炉心)	-	+15.5%	+15.2%	+12.3%	+12.0%	+14.2%	+15.4%	-0.3%	+5.8%	+15.7%	+16.7%	+14.3%	+14.3%
特徴		・Gd・Er を含有した MOX 燃料要素の集合体では、Pu 装荷量は 15%程 度の増加が可能な見通し。ただし、Duplex 型では、中央に Gd・Er 酸化 物棒の装荷用に穴を開けた中空ペレットを使用するため若干低下とな る。 ・中空ペレット・外周に装荷した UO <sub>2</sub> 燃料要素の 1 層内側 の MOX 燃料要素で出力が増加するため、低 Pu 含有率とす ても Pu 装荷量の増加は抑制され、Pu 装荷量の増加は見 込めない。 ・MOX 燃料集合体中に UO <sub>2</sub> -Gd 燃料要素が装荷されること から、集合体当たりの Pu 装荷量の増加は 10%程度。一方、 炉心当たり Pu 含有率とすると、燃料要素数で 1/4 となる よう MOX 燃料集合体の数が増加するので、15%程 度の増加となる。 ・MOX 燃料固溶体型、被覆管内張型など Gd・Er を含 有した他の燃料概念と同様、15%程度増加可能な見通し。											
評価	-	○	○	○	○	○	○	△	△	○	○	○	○

表 3.1.5-3 各燃料概念の崩壊熱計算結果の比較 (集合体当たり)

燃料候補概念		取出し後の崩壊熱 (W)												
		0	0.5	1	5	10	15	20	30	40	50			
0 (リアレンス)	現行MOX燃料 (標準組成)	崩壊熱 (W)	2.178E+06	4.005E+04	2.403E+04	6.046E+03	4.842E+03	4.462E+03	4.188E+03	3.748E+03	3.399E+03	3.116E+03		
	リアレンス比 (-)	0.99	0.98	1.00	1.15	1.19	1.20	1.21	1.22	1.23	1.24			
1-1	MOX燃料固溶体型	Gd	2.158E+06	3.926E+04	2.409E+04	6.960E+03	5.762E+03	5.360E+03	5.060E+03	4.569E+03	4.173E+03	3.849E+03		
		Er	2.163E+06	3.932E+04	2.413E+04	6.961E+03	5.761E+03	5.359E+03	5.059E+03	4.569E+03	4.173E+03	3.849E+03		
1-2	Duplex型	Gd	2.220E+06	3.980E+04	2.438E+04	6.969E+03	5.758E+03	5.356E+03	5.056E+03	4.565E+03	4.170E+03	3.845E+03		
		Er	2.216E+06	3.974E+04	2.435E+04	6.962E+03	5.750E+03	5.346E+03	5.046E+03	4.555E+03	4.159E+03	3.834E+03		
1-3	被覆管内張型	Gd	2.179E+06	3.949E+04	2.419E+04	6.962E+03	5.757E+03	5.354E+03	5.053E+03	4.561E+03	4.165E+03	3.840E+03		
		Er	2.160E+06	3.929E+04	2.411E+04	6.960E+03	5.762E+03	5.360E+03	5.060E+03	4.569E+03	4.173E+03	3.849E+03		
1-4	中空ベレット燃料型	Gd	2.306E+06	3.974E+04	2.436E+04	6.853E+03	5.586E+03	5.162E+03	4.849E+03	4.345E+03	3.944E+03	3.619E+03		
		Er	2.149E+06	3.812E+04	2.337E+04	6.562E+03	5.351E+03	4.941E+03	4.636E+03	4.145E+03	3.755E+03	3.440E+03		
1-5	UO <sub>2</sub> 燃料置き換え型	Gd	2.168E+06	3.870E+04	2.376E+04	6.835E+03	5.625E+03	5.216E+03	4.912E+03	4.419E+03	4.024E+03	3.702E+03		
		Er	2.171E+06	3.883E+04	2.384E+04	6.853E+03	5.645E+03	5.239E+03	4.937E+03	4.445E+03	4.050E+03	3.728E+03		
1-6	UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型	Gd	2.181E+06	3.946E+04	2.420E+04	6.964E+03	5.761E+03	5.359E+03	5.058E+03	4.568E+03	4.172E+03	3.847E+03		
		Er	2.182E+06	3.948E+04	2.421E+04	6.963E+03	5.760E+03	5.358E+03	5.058E+03	4.568E+03	4.172E+03	3.847E+03		
1-7	Gd (Er) 酸化物要素型	Gd	2.144E+06	3.932E+04	2.417E+04	6.991E+03	5.804E+03	5.407E+03	5.111E+03	4.624E+03	4.229E+03	3.905E+03		
		Er	2.144E+06	3.932E+04	2.417E+04	6.991E+03	5.804E+03	5.407E+03	5.111E+03	4.624E+03	4.229E+03	3.905E+03		
2-1	ATF (Fe系) 被覆管型	リアレンス比 (-)	0.98	0.98	1.01	1.16	1.20	1.21	1.22	1.23	1.24	1.25		

表 3.1.5-4 各燃料概念の崩壊熱計算結果の比較 (炉心当たり相当：炉心中のMOX・UO<sub>2</sub>燃料集合体数比で重み付け)

燃料候補概念		取出し後の崩壊熱 (W)											
		0	0.5	1	5	10	15	20	30	40	50		
0 (リファレンス)	現行MOX燃料(標準組成)	2.216E+06	2.591E+04	1.548E+04	3.405E+03	2.412E+03	2.147E+03	1.977E+03	1.715E+03	1.511E+03	1.346E+03		
	崩壊熱 (W)	2.211E+06	2.572E+04	1.550E+04	3.635E+03	2.644E+03	2.373E+03	2.196E+03	1.922E+03	1.705E+03	1.531E+03		
1-1	MOX燃料固溶体型	Gd	1.00	0.99	1.00	1.07	1.10	1.11	1.11	1.12	1.13	1.14	
		崩壊熱 (W)	2.212E+06	2.573E+04	1.551E+04	3.635E+03	2.643E+03	2.373E+03	2.196E+03	1.922E+03	1.705E+03	1.531E+03	
1-2	Duplex型	Er	1.00	0.99	1.00	1.07	1.10	1.11	1.11	1.12	1.13	1.14	
		崩壊熱 (W)	2.226E+06	2.585E+04	1.557E+04	3.637E+03	2.643E+03	2.372E+03	2.195E+03	1.921E+03	1.704E+03	1.530E+03	
1-3	被覆管内張型	Gd	1.00	1.00	1.01	1.07	1.10	1.11	1.11	1.12	1.13	1.14	
		崩壊熱 (W)	2.225E+06	2.584E+04	1.556E+04	3.635E+03	2.641E+03	2.370E+03	2.193E+03	1.918E+03	1.702E+03	1.527E+03	
1-4	中空ペレット燃料型	Er	1.00	1.00	1.01	1.07	1.09	1.11	1.11	1.12	1.13	1.13	
		崩壊熱 (W)	2.216E+06	2.577E+04	1.552E+04	3.635E+03	2.642E+03	2.371E+03	2.195E+03	1.920E+03	1.703E+03	1.529E+03	
1-5	UO <sub>2</sub> 燃料置き換え型	Gd	1.00	0.99	1.00	1.07	1.10	1.11	1.11	1.12	1.13	1.14	
		崩壊熱 (W)	2.211E+06	2.572E+04	1.550E+04	3.634E+03	2.644E+03	2.373E+03	2.196E+03	1.922E+03	1.705E+03	1.531E+03	
1-6	UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型	Er	1.00	0.99	1.00	1.07	1.10	1.11	1.11	1.12	1.13	1.14	
		崩壊熱 (W)	2.248E+06	2.584E+04	1.557E+04	3.608E+03	2.599E+03	2.323E+03	2.143E+03	1.866E+03	1.648E+03	1.473E+03	
1-7	Gd (Er) 酸化物要素型	Gd	1.01	1.00	1.01	1.06	1.08	1.08	1.08	1.09	1.09	1.09	
		崩壊熱 (W)	2.207E+06	2.577E+04	1.553E+04	3.615E+03	2.615E+03	2.339E+03	2.158E+03	1.877E+03	1.658E+03	1.482E+03	
2-1	ATF (Fe系) 被覆管型	Er	1.00	0.99	1.00	1.06	1.08	1.09	1.09	1.09	1.10	1.10	
		崩壊熱 (W)	2.212E+06	2.582E+04	1.557E+04	3.665E+03	2.667E+03	2.392E+03	2.212E+03	1.933E+03	1.713E+03	1.536E+03	
2-1	ATF (Fe系) 被覆管型	Gd	1.00	0.99	1.00	1.07	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	
		崩壊熱 (W)	2.213E+06	2.586E+04	1.559E+04	3.669E+03	2.672E+03	2.398E+03	2.218E+03	1.939E+03	1.720E+03	1.543E+03	
2-1	ATF (Fe系) 被覆管型	Er	1.00	0.99	1.00	1.07	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	
		崩壊熱 (W)	2.217E+06	2.577E+04	1.552E+04	3.635E+03	2.643E+03	2.373E+03	2.196E+03	1.922E+03	1.705E+03	1.530E+03	
2-1	ATF (Fe系) 被覆管型	Gd	1.00	0.99	1.00	1.07	1.10	1.11	1.11	1.12	1.13	1.14	
		崩壊熱 (W)	2.217E+06	2.577E+04	1.552E+04	3.635E+03	2.643E+03	2.373E+03	2.196E+03	1.922E+03	1.705E+03	1.530E+03	
2-1	ATF (Fe系) 被覆管型	Er	1.00	0.99	1.00	1.07	1.10	1.11	1.11	1.12	1.13	1.14	
		崩壊熱 (W)	2.207E+06	2.573E+04	1.552E+04	3.642E+03	2.654E+03	2.385E+03	2.209E+03	1.936E+03	1.719E+03	1.545E+03	
2-1	ATF (Fe系) 被覆管型	Gd	1.00	0.99	1.00	1.07	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	
		崩壊熱 (W)	2.207E+06	2.573E+04	1.552E+04	3.642E+03	2.654E+03	2.385E+03	2.209E+03	1.936E+03	1.719E+03	1.545E+03	

表 3.1.5-5 炉心・燃料設計に関する特性の比較評価 (使用済燃料貯蔵プールへの影響)

	1-1		1-2		1-3		1-4	1-5	1-6		1-7	
	MOX 燃料固溶体型		Duplex 型		被覆管内張型		中空ペレット燃料型	UO <sub>2</sub> 燃料置き換え型	UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型		Gd(Er) 酸化物要素型	
	Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er			Gd	Er	Gd	Er
崩壊熱*	集合体当たり	取出し後	0.99	1.02	1.00	0.99	1.06	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
		0.5 年後	0.98	0.99	0.99	0.98	0.99	0.95	0.97	0.97	0.99	0.99
	炉心当たり	取出し後	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
		0.5 年後	0.99	1.00	0.99	0.99	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99	0.99
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉心当たりの崩壊熱について現行 MOX 燃料炉心 (Pu 組成: 標準組成) と比較すると、(中空ペレット燃料型でごく僅かな増加は見られるが) 各概念とも概ね 1.00 程度以下であり、使用済燃料貯蔵プールでの崩壊熱については、現行の除熱設備で対応の可能性を有するものと考えられる。</li> <li>上記の理由としては、現行 MOX 燃料炉心と比較し各高度化燃料概念とも Pu 装荷量自体は増加するが、一方で、Pu 組成は国内再処理による高次化組成となることで、発熱の寄与が大きい Am の割合が減り、結果として、現行 MOX 燃料炉心 (Pu 組成: 標準組成) と同程度となったものと考えられる。</li> </ul>											
評価	○		○	○	○	○	△	○	○	○	○	○

\* 現行 MOX 燃料炉心 (リファレンス炉心) (Pu: 標準組成) の崩壊熱に対する比。

表 3.1.5-6 炉心・燃料設計に関する特性の比較評価 (燃料開発の負荷 (実用化時期見通し))

	1-1 燃料固溶体型		1-2 Duplex 型		1-3 被覆管内張型		1-4 中空ペレット燃料型	1-5 UO <sub>2</sub> 燃料置き換え型	1-6 UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型		1-7 Gd(Er) 酸化物要素型	
	Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er			Gd	Er	Gd	Er
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>物性試験、照射挙動把握のための照射試験が必要となる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>過去に実績のない燃料タイプであり、燃料要素の照射試験により照射挙動の把握が必要となる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gd・Er 内張り被覆管の製造技術について、過去に検討例がなく、開発に期間を要すると考えられる。</li> <li>照射挙動把握のための照射試験も必要、また、Zr-Gd合金など耐食性に課題がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>中空ペレット燃料に、中空ペレット燃料について、敦賀 1 号機の水炉での照射試験の実績があることも多く、高速炉でも多くの照射試験実績がある。そのため、LTA<sup>*1</sup> など集合体照射試験から始められる可能性がある。</li> <li>中空ペレットの量産技術・検査技術など製造に関する開発課題がある (JAEA がこれまで実施してきた R&amp;D について一部利用できる可能性あり)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>開発課題はなく、LTA<sup>*1</sup> など集合体照射試験から始められ、比較的早期の実用化の可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>UO<sub>2</sub>-Gd 燃料要素は BWR・PWR で使用実績があり、開発課題はない。燃料要素の照射試験を飛ばして LTA<sup>*1</sup> など集合体照射試験から始められ、比較的早期の実用化の可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>物性試験、照射挙動把握のための照射試験など必要となる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>・Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> の物性・照射挙動を把握することが必要となる。そのため、照射試験が必要になるが、材料照射であるため燃料の照射試験と比べると負荷は小さい。</li> </ul>				
評価	△	△	△	△	△	△	○	◎	◎	△	△	△

\*1 LTA: Lead Test Assembly (先行試験燃料集合体)

表 3.2-1 フロントエンドに関する特性の比較評価

	1-1 MOX 燃料固溶体型		1-2 Duplex 型		1-3 被覆管内張型		1-4 中空ペレット燃料型	1-5 UO <sub>2</sub> 燃料置き換え型		1-6 UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型		1-7 酸化 Er) 燃料要素型		
	Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er		Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er	
実現性に関する影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>通常の MOX ペレット製造ラインへの Gd(Er)によるコンタミネーションを避けるため、MOX-Gd(Er)ペレット専用の製造ラインを別に整備することが必須となり、燃料製造施設への影響は大きくなる。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>棒形状の Gd(Er)化合物であるが、ペレット中空部に装着するため製造工程でコンタミネーションが生じる可能性は考えられ、専用ラインが必要となる可能性がある(ただし、Gd(Er)棒の材質の検討次第では、対応できる可能性もある)。</li> <li>中空ペレットを用いており、量産技術・検査技術の開発必要(1-4と同様)。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>被覆管溶接に係る技術開発が課題であり、その技術が確立されれば、燃料製造施設への影響は小さい見通しである。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>中空ペレットの量産技術・検査技術の開発と、これら技術を取り込んだ設備が必要となるが、JAEA でこれまでに実施してきた R&amp;D が活用でき、対応できる可能性はある。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>MOX 燃料製造施設以外で製造した UO<sub>2</sub> 燃料、UO<sub>2</sub>-Gd(Er)燃料、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 棒 (Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 棒)の要素を MOX 燃料製造施設に受け入れ、組み立てることになる。外部からの要素の受け入れは BWR の MOX 燃料集合体でも行うことから、システム改修などは一部必要になるが、MOX 燃料製造施設への影響はないと考える。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>酸化 Er) 燃料要素型</li> </ul>	
	評価	x	x	△	△	○	○	△	○	○	○	○	○	○
処理能力への影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>上述の「実現性に関する影響」で、燃料製造への影響が大きいと判断されており、実現は困難な見込みであり、ここでは評価なしとした。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>中空ペレットを用いており、その検査、コンタミネーション対策などが工程が増えるため、処理能力は低下の見通しである。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Gd(Er)の内張厚さなど複数の種類の被覆管が混在し、被覆管区別の対応などが必要となるが、処理能力に著しい影響を及ぼす程の工程追加とはならない見通しである。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>中空ペレットの検査工程が増えるため、処理能力は低下の見通しである。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>外部からの要素の受け入れは BWR の MOX 燃料集合体でも行うことから、追加の工程は不要であり、処理能力への影響はない。</li> <li>一方、集合体中に MOX 燃料以外の要素を混載するため、その分 MOX 集合体の製造体数自体は増加する。ただし、今回選定した燃料仕様であれば、問題とされない見通しである。</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>酸化 Er) 燃料要素型</li> </ul>	
	評価	-	-	△	△	○	○	△	○	○	○	○	○	○

表 3.3-1 再処理時における 1tHM 当たりの溶解液の発熱の比較

燃料概念	可燃性毒物	再処理時の想定	1tHM 当たりの溶解液の発熱 [kW]					現行MOX燃料 に対する比 [-] (参考：冷却期 間 30年)	備考
			冷却期間 [年]						
			15	20	30	40	50		
[参考] 現行UO <sub>2</sub> 燃料 0 (リファレンス)：現行MOX燃料 (高次化組成)	Gd	・使用済燃料まま	1.331	1.201	1.006	0.854	0.733	-	
		・使用済燃料まま	4.997	4.693	4.202	3.811	3.495		
		・未臨界確保のため、溶解時Gd添加	4.997	4.693	4.202	3.811	3.495		
1-1：MOX燃料固溶体型	Er	・使用済燃料まま、Gd溶出	5.360	5.060	4.569	4.173	3.849	1.088	
		・使用済燃料まま、Er溶出	5.360	5.060	4.569	4.173	3.849		
		・未臨界確保のため、溶解時Gd添加	5.360	5.060	4.569	4.173	3.849		
1-2：Duplex型	Gd	・Gd溶出、ガラス固化体に移行	5.342	5.042	4.551	4.155	3.831	1.083	
		・ZrO <sub>2</sub> 不溶、被覆管とともに除去	5.342	5.042	4.551	4.155	3.831		
		・Gd溶出、ガラス固化体に移行	5.342	5.042	4.551	4.155	3.831		
1-3：被覆管内張型	Er	・Er不溶、被覆管とともに除去	5.346	5.046	4.555	4.159	3.834	1.084	・「1-1」よりGdとErで差があまり生じない見通しのため、計算省略
		・ZrO <sub>2</sub> 不溶、被覆管とともに除去	5.346	5.046	4.555	4.159	3.834		
		・Er溶出、ガラス固化体に移行	5.346	5.046	4.555	4.159	3.834		
1-4：中空ベレット燃料型	Gd	・Er溶出、ガラス固化体に移行	5.352	5.052	4.561	4.165	3.840	1.086	・「1-1」よりGdとErで差があまり生じない見通しのため、計算省略
		・ZrO <sub>2</sub> 微細に崩壊、ガラス固化体に移行	5.352	5.052	4.561	4.165	3.840		
		・Gd不溶、被覆管とともに除去	5.352	5.052	4.561	4.165	3.840		
1-5：UO <sub>2</sub> 燃料置き換え型	Er	・Gd不溶、被覆管とともに除去	5.162	4.849	4.345	3.944	3.619	1.034	・「1-1」よりGdとErで差があまり生じない見通しのため、計算省略
		・Er溶出、ガラス固化体に移行	5.162	4.849	4.345	3.944	3.619		
		・未臨界確保のため、溶解時Gd添加	5.162	4.849	4.345	3.944	3.619		
1-6：UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型	Gd	・使用済燃料まま	4.940	4.636	4.145	3.755	3.440	0.986	・「0」より溶解時Gd添加であまり差が生じない見通しのため、計算省略
		・使用済燃料まま	4.940	4.636	4.145	3.755	3.440		
		・未臨界確保のため、溶解時Gd添加	4.940	4.636	4.145	3.755	3.440		
1-7：Gd (Er) 酸化物要素型	Er	・使用済燃料まま、Gd溶出	5.216	4.912	4.419	4.024	3.702	1.052	・「1-1」よりGdとErで差があまり生じない見通しのため、計算省略
		・使用済燃料まま、Er溶出	5.216	4.912	4.419	4.024	3.702		
		・Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、溶解前に取り外し	5.216	4.912	4.419	4.024	3.702		
2-1：ATF (Fe系) 被覆管型	-	・Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、溶解前に取り外し	5.364	5.063	4.572	4.175	3.850	1.088	・「1-2(Gd)」よりZrO <sub>2</sub> がガラス固化体に移行してもあまり差が生じない見通しのため、計算省略
		・Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、溶解前に取り外し	5.364	5.063	4.572	4.175	3.850		
		・未臨界確保のため、溶解時Gd添加	5.364	5.063	4.572	4.175	3.850		
2-1：ATF (Fe系) 被覆管型	-	・Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、溶解前に取り外さず	5.407	5.111	4.624	4.229	3.905	1.100	・「1-2(Gd)」よりZrO <sub>2</sub> がガラス固化体に移行してもあまり差が生じない見通しのため、計算省略
		・Er溶出、ガラス固化体に移行	5.407	5.111	4.624	4.229	3.905		
		・ZrO <sub>2</sub> 微細に崩壊、ガラス固化体に移行	5.407	5.111	4.624	4.229	3.905		
2-1：ATF (Fe系) 被覆管型	-	・使用済燃料まま	5.407	5.111	4.624	4.229	3.905	1.100	・「0」より溶解時Gd添加であまり差が生じない見通しのため、計算省略
		・使用済燃料まま	5.407	5.111	4.624	4.229	3.905		
		・未臨界確保のため、溶解時Gd添加	5.407	5.111	4.624	4.229	3.905		

表 3.3-2 ガラス固化体の性状

高さ	約 1,340 mm
外径	約 430 mm
容器材質	ステンレス鋼(肉厚 約 5 mm)
体積	容器内容積 約 170 ℓ 固化ガラス体積 約 150 ℓ
重量	550 kg 以下 (空容器の重量は約 90 kg)
固化材	ホウケイ酸ガラス
放射エネルギー(最大)	$\alpha$ 線を放出する放射性物質: $3.5 \times 10^{14}$ Bq/本 $\alpha$ 線を放出しない放射性物質: $4.5 \times 10^{16}$ Bq/本
発熱量	最大 2.5 kW/本以下 平均 2.0 kW/本以下

This is a blank page.

表 3.3-3 1tHM 当たりのガラス固化体発生量の比較 (FP 含有率基準)

燃料概念		1tHM 当たりの FP 含有率基準 ガラス固化体発生量 [体]							現行 MOX 燃料 に対する比 [-] (参考: 冷却期 間 30 年)	備考
		冷却期間 [年]								
[参考] 現行 UO <sub>2</sub> 燃料	可燃性毒物	再処理時の想定		15	20	30	40	50	現行 UO <sub>2</sub> 燃料 に対する比 [-] (参考: 冷却期 間 30 年)	現行 MOX 燃料 に対する比 [-] (参考: 冷却期 間 30 年)
		0 (リファレンス): 現行 MOX 燃料 (高次化組成)		・使用済燃料まま	・使用済燃料まま	1.159	1.160	1.161		
1-1: MOX 燃料固溶体型	Gd	・未臨界確保のため、溶解時 Gd 添加	・未臨界確保のため、溶解時 Gd 添加	1.218	1.218	1.219	1.219	1.219	1.050	-
		・使用済燃料まま、Gd 溶出	・使用済燃料まま、Er 溶出	1.225	1.225	1.226	1.226	1.226	1.056	1.006
1-2: Duplex 型	Er	・未臨界確保のため、溶解時 Gd 添加	・未臨界確保のため、溶解時 Gd 添加	1.286	1.286	1.287	1.287	1.288	1.109	1.056
		・Gd 溶出、ガラス固化体に移行	・Gd 溶出、ガラス固化体に移行	1.364	1.365	1.365	1.366	1.366	1.176	1.120
1-3: 被覆管内張型	Gd	・ZrO <sub>2</sub> 不溶、被覆管とともに除去	・ZrO <sub>2</sub> 不溶、被覆管とともに除去	1.218	1.219	1.219	1.220	1.220	1.050	1.001
		・Gd 溶出、ガラス固化体に移行	・Gd 溶出、ガラス固化体に移行	1.648	1.648	1.649	1.649	1.650	1.420	1.353
1-4: 中空ベレット燃料型	Er	・ZrO <sub>2</sub> 微細に崩壊、ガラス固化体に移行	・ZrO <sub>2</sub> 微細に崩壊、ガラス固化体に移行	1.140	1.141	1.141	1.142	1.142	0.983	0.936
		・Er 溶出、ガラス固化体に移行	・Er 溶出、ガラス固化体に移行	-	-	-	-	-	-	-
1-5: UO <sub>2</sub> 燃料置き換え型	Gd	・ZrO <sub>2</sub> 不溶、被覆管とともに除去	・ZrO <sub>2</sub> 不溶、被覆管とともに除去	-	-	-	-	-	-	-
		・Er 溶出、ガラス固化体に移行	・Er 溶出、ガラス固化体に移行	-	-	-	-	-	-	-
1-6: UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型	Er	・未臨界確保のため、溶解時 Gd 添加	・未臨界確保のため、溶解時 Gd 添加	1.219	1.219	1.220	1.220	1.221	1.051	1.001
		・Gd 溶出、ガラス固化体に移行	・Gd 溶出、ガラス固化体に移行	1.463	1.463	1.464	1.464	1.464	1.261	1.201
1-7: Gd (Er) 酸化物要素型	Gd	・Er 不溶、被覆管とともに除去	・Er 不溶、被覆管とともに除去	-	-	-	-	-	-	-
		・Er 溶出、ガラス固化体に移行	・Er 溶出、ガラス固化体に移行	-	-	-	-	-	-	-
2-1: ATF (Fe 系) 被覆管型	-	・使用済燃料まま	・使用済燃料まま	1.232	1.232	1.233	1.233	1.234	1.062	1.012
		・未臨界確保のため、溶解時 Gd 添加	・未臨界確保のため、溶解時 Gd 添加	-	-	-	-	-	-	-
1-8: MOX 燃料固溶体型	Gd	・Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、溶解前に取り外し	・Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、溶解前に取り外し	1.140	1.141	1.141	1.142	1.142	0.983	0.937
		・未臨界確保のため、溶解時 Gd 添加	・未臨界確保のため、溶解時 Gd 添加	1.220	1.221	1.221	1.222	1.222	1.052	1.002
1-9: MOX 燃料固溶体型	Er	・Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、溶解前に取り外さず	・Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、溶解前に取り外さず	-	-	-	-	-	-	-
		・Er 溶出、ガラス固化体に移行	・Er 溶出、ガラス固化体に移行	-	-	-	-	-	-	-
1-10: MOX 燃料固溶体型	Gd	・ZrO <sub>2</sub> 微細に崩壊、ガラス固化体に移行	・ZrO <sub>2</sub> 微細に崩壊、ガラス固化体に移行	-	-	-	-	-	-	-
		・Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、溶解前に取り外し	・Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、溶解前に取り外し	-	-	-	-	-	-	-
1-11: MOX 燃料固溶体型	Er	・未臨界確保のため、溶解時 Gd 添加	・未臨界確保のため、溶解時 Gd 添加	-	-	-	-	-	-	-
		・Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、溶解前に取り外さず	・Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、溶解前に取り外さず	-	-	-	-	-	-	-
1-12: MOX 燃料固溶体型	-	・使用済燃料まま	・使用済燃料まま	1.141	1.141	1.142	1.142	1.142	0.984	0.937
		・未臨界確保のため、溶解時 Gd 添加	・未臨界確保のため、溶解時 Gd 添加	-	-	-	-	-	-	-

表 3.3-4 ガラス固化体 1 体当たりの発熱の比較

燃料概念	可燃性毒物	再処理時の想定	ガラス固化体 1 体当たりの発熱 [kW/体]						現行MOX燃料 に対する比 [-] (参考：冷却期 間 30年)	備考
			冷却期間 [年]							
			15	20	30	40	50			
[参考] 現行UO <sub>2</sub> 燃料 0 (リファレンス)：現行MOX燃料 (高次化組成)	Gd	・使用済燃料まま	0.994	0.889	0.732	0.610	0.514	-		
		・使用済燃料まま ・未臨界確保のため、溶解時Gd添加	2.838	2.625	2.293	2.041	1.847	3.132		
1-1：MOX燃料固溶体型	Er	・使用済燃料まま、Gd溶出	2.651	2.452	2.142	1.907	1.725	2.926		
		・使用済燃料まま、Er溶出 ・未臨界確保のため、溶解時Gd添加	2.723	2.535	2.240	2.013	1.836	3.060	1.046	
1-2：Duplex型	Gd	・使用済燃料まま、Er溶出 ・未臨界確保のため、溶解時Gd添加	2.594	2.415	2.134	1.918	1.749	2.915	0.996	
		・Gd溶出、ガラス固化体に移行 ・ZrO <sub>2</sub> 不溶、被覆管とともに除去	2.445	2.276	2.011	1.808	1.649	2.747	0.939	
1-3：被覆管内張型	Er	・Gd溶出、ガラス固化体に移行 ・ZrO <sub>2</sub> 不溶、被覆管とともに除去	2.737	2.547	2.250	2.021	1.842	3.073	1.050	
		・Er溶出、ガラス固化体に移行 ・ZrO <sub>2</sub> 不溶、被覆管とともに除去	2.024	1.884	1.664	1.495	1.363	2.273	0.777	
1-4：中空ベレット燃料型	Gd	・Er不溶、被覆管とともに除去 ・ZrO <sub>2</sub> 不溶、被覆管とともに除去	2.924	2.721	2.403	2.159	1.968	3.283	1.122	
		・Er溶出、ガラス固化体に移行 ・ZrO <sub>2</sub> 不溶、被覆管とともに除去	-	-	-	-	-	-	-	
1-5：UO <sub>2</sub> 燃料置き換え型	Er	・Er溶出、ガラス固化体に移行 ・ZrO <sub>2</sub> 不溶、被覆管とともに除去	-	-	-	-	-	-	-	
		・Er溶出、ガラス固化体に移行 ・ZrO <sub>2</sub> 不溶、被覆管とともに除去	-	-	-	-	-	-	-	
1-6：UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型	Gd	・Er溶出、ガラス固化体に移行 ・ZrO <sub>2</sub> 不溶、被覆管とともに除去	2.924	2.721	2.404	2.159	1.969	3.283	1.122	
		・Gd不溶、被覆管とともに除去 ・Gd溶出、ガラス固化体に移行	2.736	2.546	2.249	2.021	1.843	3.072	1.050	
1-7：Gd (Er) 酸化物要素型	Er	・Gd溶出、ガラス固化体に移行 ・未臨界確保のため、溶解時Gd添加	2.281	2.123	1.875	1.684	1.536	2.561	0.875	
		・Er不溶、被覆管とともに除去 ・Er溶出、ガラス固化体に移行	-	-	-	-	-	-	-	
2-1：ATF (Fe系) 被覆管型	-	・Er溶出、ガラス固化体に移行 ・ZrO <sub>2</sub> 不溶、被覆管とともに除去	2.903	2.684	2.345	2.088	1.890	3.204	1.095	
		・Gd溶出、ガラス固化体に移行 ・未臨界確保のため、溶解時Gd添加	2.714	2.510	2.193	1.953	1.767	2.996	1.024	
1-1：MOX燃料固溶体型	Gd	・使用済燃料まま	2.818	2.603	2.270	2.017	1.822	3.101	1.060	
		・未臨界確保のため、溶解時Gd添加	2.632	2.431	2.120	1.884	1.702	2.896	0.990	
1-2：Duplex型	Er	・使用済燃料まま、Gd溶出	2.671	2.478	2.178	1.948	1.770	2.975	1.017	
		・使用済燃料まま、Er溶出	-	-	-	-	-	-	-	
1-3：被覆管内張型	Gd	・Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、溶解前に取り外し ・Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、溶解前に取り外し	2.929	2.726	2.407	2.163	1.972	3.288	1.124	
		・未臨界確保のため、溶解時Gd添加	2.736	2.547	2.250	2.021	1.843	3.073	1.050	
1-4：中空ベレット燃料型	Er	・Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、溶解前に取り外し ・Gd溶出、ガラス固化体に移行	-	-	-	-	-	-	-	
		・ZrO <sub>2</sub> 不溶、被覆管とともに除去	-	-	-	-	-	-	-	
1-5：UO <sub>2</sub> 燃料置き換え型	Gd	・Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、溶解前に取り外し ・Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、溶解前に取り外し	-	-	-	-	-	-	-	
		・未臨界確保のため、溶解時Gd添加	-	-	-	-	-	-	-	
1-6：UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型	Er	・Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、溶解前に取り外し ・Er溶出、ガラス固化体に移行	-	-	-	-	-	-	-	
		・ZrO <sub>2</sub> 不溶、被覆管とともに除去	-	-	-	-	-	-	-	
1-7：Gd (Er) 酸化物要素型	-	・使用済燃料まま	2.929	2.732	2.420	2.180	1.992	3.306	1.130	
		・未臨界確保のため、溶解時Gd添加	-	-	-	-	-	-	-	

表 3.3-5 バックエンドに関する特性の比較評価（再処理性）

	1-1 MOX 燃料 固溶体型		1-2 Duplex 型		1-3 被覆管内張型		1-4 中空ペレット 燃料型	1-5 UO <sub>2</sub> 燃料 置き換え型	1-6 UO <sub>2</sub> 燃料 固溶体型		1-7 Gd(Er) 酸化物 要素型	
	Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er
崩壊熱 への影響	1.09	1.09	1.08	1.08	1.09	1.09	1.03	0.99	1.05	1.05	1.09	1.09
1tHM 当たりの溶解液 の発熱量(冷却期間: 30年)(現行 MOX 燃料 (高次化組成)の発熱量 に対する比)												
まとめ	・現行 MOX 燃料(Pu 組成:高次化組成)と比較すると、MOX 高度化燃料概念の溶解液の崩壊熱は概ね増加する傾向であるが、その程度は最大でも 1.1 倍程度(現行 MOX 燃料の Pu 組成として、標準組成を想定したとしても 1.2 倍程度)と限定的であった。崩壊熱の対策 (UO <sub>2</sub> 燃料と混合した再処理、MA 回収など)に大きな変更をもたらすものではないと考えられる。											
評価	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
崩壊熱 への影響	◎	○	○	○	◎	○	○	○	◎	○	○	○
まとめ	・Gd を添加する概念は、追加で Gd を添加しなくても臨界を達成できる見通し。 ・Er は Gd ほどの中性子吸収効果がないので、Er の溶出だけでは臨界未満とできず、追加で Gd を追加することが必要となる。 ・Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> を装着している燃料概念では、ZrO <sub>2</sub> の溶解時の挙動次第で追加の Gd を追加が必要となる。 ・Er は Gd ほどの中性子吸収効果がないので、Er の溶出だけでは臨界未満とできず、追加で Gd を追加することが必要となる。 ・Gd を添加する概念では、追加で Gd を添加しなくても臨界を達成できる見通し。 ・(可燃性毒物の追加がないので、共通項目以外記載なし) ・(可燃性毒物の追加がないので、共通項目以外記載なし) ・Er は Gd ほどの中性子吸収効果がないので、Er の溶出だけでは臨界未満とできず、追加で Gd を追加することが必要となる。 ・Gd を添加する概念では、追加で Gd を添加しなくても臨界を達成できる見通し。 ・Er は Gd ほどの中性子吸収効果がないので、Er の溶出だけでは臨界未満とできず、追加で Gd を追加することが必要となる。 ・Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> を装着している燃料概念では、ZrO <sub>2</sub> の溶解時の挙動次第で追加の Gd を追加が必要となる。 ・Er は Gd ほどの中性子吸収効果がないので、Er の溶出だけでは臨界未満とできず、追加で Gd を追加することが必要となる。 ・Gd を添加する概念では、追加で Gd を添加しなくても臨界を達成できる見通し。											
評価	◎	○	○	○	◎	○	○	○	◎	○	○	○

表 3.3-6 バックエンドに関する特性の比較評価 (ガラス固化体)

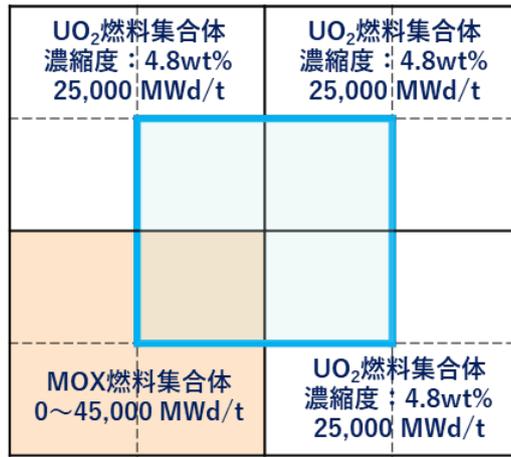
	1-1		1-2		1-3		1-4		1-5		1-6		1-7	
	MOX 燃料 固溶体型		Duplex 型		被覆管内張型		中空ペレット 燃料型		UO <sub>2</sub> 燃料置 き換え型		UO <sub>2</sub> 燃料 固溶体型		Gd(Er) 酸化物 要素型	
	Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er
発生数 への影響	<p>・現行 MOX 燃料でも溶解時に未臨界とするためには中性子吸収毒物の添加が必要となる。そのため、(Gd を想定する場合) ガラス固化体発生量は、Gd の分だけ 10% 弱程度増加する。</p>													
	<p>・Gd が添加されている燃料概念は、追加の Gd 添加がなくても未臨界とすることができる見通しであり、結果として、Gd 追加の Gd 添加量が増加する。Gd の追加は、追加の Gd 添加がなくても未臨界とすることができる見通しであり、結果として、Gd 追加の Gd 添加量が増加する。Gd の追加は、追加の Gd 添加がなくても未臨界とすることができる見通しであり、結果として、Gd 追加の Gd 添加量が増加する。</p>													
発熱量 への影響	<p>・Gd が添加されている燃料概念は、追加の Gd 添加がなくても未臨界とすることができる見通しであり、結果として、Gd 追加の Gd 添加量が増加する。Gd の追加は、追加の Gd 添加がなくても未臨界とすることができる見通しであり、結果として、Gd 追加の Gd 添加量が増加する。</p>													
	<p>・Gd が添加されている燃料概念は、追加の Gd 添加がなくても未臨界とすることができる見通しであり、結果として、Gd 追加の Gd 添加量が増加する。Gd の追加は、追加の Gd 添加がなくても未臨界とすることができる見通しであり、結果として、Gd 追加の Gd 添加量が増加する。</p>													
評価	○	△	△	△	○	△	○	△	○	○	○	△	○	○
ガラス固化体 1 体 当たりの発熱量 (冷却期間: 30 年) (現行 MOX 燃料(高 次化組成)の発熱量 に対する比)	1.05	1.00	1.05	1.12	1.12	1.12	1.12	1.10	1.06	1.02	<1.02	1.12	1.12	1.12
まとめ	<p>・現行 MOX 燃料 (Pu 組成: 高次化組成) と比較すると、多くの MOX 高度化燃料概念では崩壊熱は増加する傾向であるが、その程度は最大でも 1.1 倍程度 (現行 MOX 燃料の Pu 組成として、標準組成を想定したとしても 1.2 倍程度) と限定的であった。崩壊熱の対策は、現行 MOX 燃料の対策 (UO<sub>2</sub> 燃料と混合した再処理、MA 回収など) に大きな変更をもたらすものではないと考えられる。</p>													
評価	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

表 3.4-1(1/2) MOX 高度化燃料各候補概念を対象とした概略評価 (炉心・燃料設計、フロントエンド、バックエンド) の結果取りまとめ表

				0 (リファレンス)	1-1		1-2		1-3		1-4		1-5		1-6 (追加ケース)		1-7 (追加ケース)		2-1 (参考ケース)
				現行MOX燃料*	MOX燃料固溶体型		Duplex型		被覆管内張型		中空ペレット 燃料型	UO <sub>2</sub> 燃料置き 換え型	UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型		Gd (Er) 酸化物 要素型		ATF (Fe系) 被 覆管型		
				* Pu組成: 高次化組 成	Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er	中空ペレット 燃料型	UO <sub>2</sub> 燃料置き 換え型	Gd	Er	Gd	Er	ATF (Fe系) 被 覆管型		
燃料仕様 (リファレンスと同等の臨界性・出力ピー キング係数を満足す る仕様を設定)	MOX燃料要素	本数	284本	252本	252本	200本	204本	264本	264本	144本	248本	252本	252本	260本	260本	264本			
		Pu富化度	3種類 (12.30, 7.50, 5.44 wt%)	1種類 (12.30 wt%)	1種類 (12.30 wt%)	1種類 (12.30 wt%)	2種類 (12.30, 9.00 wt%)	2種類 (12.30, 10.00 wt%)	1種類 (12.30 wt%)	1種類 (12.30 wt%)	2種類 (12.30, 7.50 wt%)	2種類 (12.30, 11.00 wt%)	2種類 (12.30, 11.00 wt%)	1種類 (12.30 wt%)	1種類 (12.30 wt%)	3種類 (14.56, 8.87, 6.44 wt%)			
		種類	—	MOX-Gd燃料 (固溶体型)	MOX-Er燃料 (固溶体型)	Duplex型 (ペレット中 心にGd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒)	Duplex型 (ペレット中 心にEr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒)	全MOX要素、 Gd内張り 被覆管を採用	一部MOX要素、 Er内張り 被覆管を採用	MOX 中空ペレット燃料	UO <sub>2</sub> 燃料	UO <sub>2</sub> -Gd燃料 (固溶体型)	UO <sub>2</sub> -Er燃料 (固溶体型)	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒 (又はペレット)	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒 (又はペレット)	全MOX要素、ATF (Fe系) 被覆管を採用			
		本数	—	12本	12本	64本	60本	—	64本	120本	16本	12本	12本	4本	4本	—			
* Pu組成: 高次化組 成	上記以外の燃料要素、特殊 仕様燃料等	濃度等	—	Gd濃度: 2種類 (5.0, 11.0 wt%) Pu富化度: 1種類 (12.3 wt%)	Er濃度: 1種類 (12.0 wt%) Pu富化度: 1種類 (12.30 wt%)	中空径: 1種類 (3.0 mm) Gd濃度: 1種類 (16.0 wt%) Pu富化度: 1種類 (12.30 wt%)	中空径: 1種類 (3.0 mm) Er濃度: 1種類 (22.0 wt%) Pu富化度: 1種類 (12.30 wt%)	内張り厚さ: 2種類 (10, 90 μm)	内張り厚さ: 2種類 (40, 90 μm)	中空径: 2種類 (3.0, 3.8 mm) Pu富化度: 1種類 (11.28 wt%)	U濃縮度: 1種類 (2.00 wt%)	Gd濃度: 1種類 (7.5 wt%) U濃縮度: 1種類 (4.90 wt%)	Er濃度: 1種類 (12.0 wt%) U濃縮度: 1種類 (4.90 wt%)	Gd濃度: 1種類 (34.0 wt%) Er濃度: 1種類 (50.0 wt%)	材料はFeCrAl ODS合金、外径、 内径及び肉厚は、リファレンスと 同じ。				
		特徴	—	・集合体の各コーナーに、それぞれ3本ずつGd・Erを含有したMOX燃料要素 (MOX-Gd, MOX-Er) を装着するような比較的軽微な対応で、リファレンス (現行MOX燃料集合体) と同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たすことが可能な見通しが得られた。 ・Erは中性子吸収がGdよりずっと小さいため、出力の変動が小さく、出力ピーキングが抑えられる傾向であった。	・Duplex型は、ペレットの中心にGd・Er酸化物 (Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> , Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> ) の棒が装着されるため、ペレット領域で熱中性子が吸収されGd・Erの中性子吸収効果は抑えられる。そのため、装着するDuplex型燃料要素の数は増加し、集合体外周1層程度必要になった。 ・一方、中性子吸収が抑えられる効果により、出力変動は穏やかになり、出力ピーキングは抑えられた。 ・Erは中性子吸収がGdよりずっと小さいため、出力の変動が小さく、出力ピーキングはより抑えられる傾向であった。	・被覆管内張型 (Gd) は、ペレットの外側にGdが装着されるため、(Duplex型と逆) 中性子の吸収効果が非常に強く、出力の変動が大きくなり設計が難しくなり、成立させるため、Gdを全燃料要素に分散させ装着し、その中で内張り厚さを調整する仕様となった。 ・一方、被覆管内張型 (Er) では、Erの中性子吸収効果が小さいので、装着する燃料要素は集合体外周1層程度でリファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たした。	・中空ペレットは、Gd・Erなど可燃性毒物が添加されていないので、初期の反応を抑えるため、中空ペレットの燃料要素の本数を多く装着する必要があり、集合体外周2層必要となった。 ・中空ペレットは、燃料の装荷量自体が (中空領域の分だけ) 中空ペレットより減る。そのため、Pu含有率が減少し、Pu装荷量の増加は見込めない。 ・U濃縮度は、Gd・Er (固溶体型) でも同様の結果を得た。Erは中性子吸収が小さいため、出力ピーキングは抑えられる傾向である。	・UO <sub>2</sub> 燃料置き換え型では、集合体最外周の低Pu含有率のMOX燃料要素をUO <sub>2</sub> 燃料要素に置き換えることで、出力ピーキングの改善を期待したが、1層内側のMOX燃料要素で出力が増加するため、結局、現行MOX燃料と同様、低Pu含有率のMOX燃料要素が必要となる結果であった。	・1-1のMOX燃料固溶体型では、比較的軽微な仕様変更でリファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たす結果が得られた。BWR・PWRで実績があり開発要素の少ないUO <sub>2</sub> -Gd (固溶体型) でも同様の対応が可能追加で検討を行った。 ・UはPuより中性子吸収が少ないため、外周で若干出力のピークが生じ、その部分のPu含有率低下など対応が必要になるが、概ね軽微な仕様変更で対応可能な見通しが得られた。 ・開発負荷は増すが、UO <sub>2</sub> -Er (固溶体型) でも同様の結果を得た。Erは中性子吸収が小さいため、出力ピーキングは抑えられる傾向である。	・本検討における燃料仕様サバイの結果、集合体コーナー部における中性子吸収が重要となる傾向が得られた。そのため、核燃料でなく照射試験の負荷を軽減できるGd酸化物 (Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 想定) を装着した要素をコーナーに設置する燃料について追加で検討を行った。 ・各コーナーに1本ずつの装着で、リファレンスと同等の臨界性・出力ピーキング係数を満たす見通しが得られた。 ・Er酸化物 (Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 想定) でも、同様の結果を得た。Erは中性子吸収が小さいため、出力ピーキングは抑えられる傾向である。	・参考として、ATF (Fe系) 被覆管を採用した燃料概念について、燃料仕様サバイを行い、MOX高度化燃料にどの様な影響があるか評価を行った。 ・ATF (Fe系) 材はジルコイ合金、最大Pu含有率は14.6 wt%となり、現行指針の制限13 wt%を超える見通しが得られた。 ・今回の評価では暫定的にリファレンスと同等の肉厚としているが、薄肉化できればPu含有率は下げられる見通しである。								
炉心・燃料 設計	物質収支	集合体当たり	装荷時	Pu <sup>241</sup> 重量 (kg) * Pu <sup>241</sup> Am	49.8	57.5	57.4	55.9	55.8	56.9	57.5	49.7	48.8	54.5	55.0	56.9	56.9	59.0	
			取出時	Pu <sup>241</sup> 重量 (kg) * Pu <sup>241</sup> Am	39.3	46.2	46.1	44.9	44.7	46.0	46.2	39.1	38.7	43.8	44.2	45.7	45.6	47.7	
				Pu <sup>241</sup> 割合 (wt%)	58.70	17.6 %増加	17.3 %増加	14.2 %増加	13.7 %増加	17.0 %増加	17.6 %増加	-0.5 %増加	-1.5 %増加	11.5 %増加	12.5 %増加	16.3 %増加	16.0 %増加	21.4 %増加	
				Pu <sup>241</sup> 消費量 (kg) (装荷-取出) * Pu <sup>241</sup> Am	10.5	57.40	57.31	57.35	57.23	57.93	57.33	56.58	56.76	57.28	57.32	57.28	57.26	57.63	
		炉心当たり (約1/4MOX炉心)	装荷時	Pu <sup>241</sup> 重量 (kg) * Pu <sup>241</sup> Am	—	15.5 %増加	15.2 %増加	12.3 %増加	12.0 %増加	14.2 %増加	15.4 %増加	-0.3 %増加	5.8 %増加	15.7 %増加	16.7 %増加	14.3 %増加	14.3 %増加	18.5 %増加	
	特徴	—	・Gd・Erを含有したMOX燃料要素の集合体では、Pu装荷量は15%程度の増加が可能な見通し。ただし、Duplex型では、中央にGd・Er酸化物棒の装荷用穴を開けた中空ペレットを使用するため若干低下となる。	・Gd・Er内張り被覆管の製造技術について、過去に検討例がなく、開発に期間を要すると考えられる。 ・照射挙動把握のための照射試験も必要、また、Zr-Gd合金など耐食性に課題がある。	・Gd・Er内張り被覆管の製造技術について、過去に検討例がなく、開発に期間を要すると考えられる。 ・照射挙動把握のための照射試験も必要、また、Zr-Gd合金など耐食性に課題がある。	・中空ペレットは、燃料の装荷量自体が増加するため、Pu含有率が減少し、Pu装荷量の増加は見込めない。 ・集合体外周に装着したUO <sub>2</sub> 燃料要素の1層内側のMOX燃料要素で出力が増加するため、低Pu含有率とする必要が生じ、大幅なPu装荷量増加は見込めない。	・MOX燃料集合体中にUO <sub>2</sub> -Gd燃料要素が装着されることから、集合体当たりのPu装荷量の増加は10%程度。一方、炉心当たりとすると、燃料要素数で1/4となるようMOX燃料集合体の数が増加するので、15%程度の増加となる。	・MOX燃料固溶体型、被覆管内張型などGd・Erを含有した他の燃料概念と同様、15%程度増加可能な見通し。											
		評価	—	○	○	○	○	○	○	△	△	○	○	○	○	○	参考		
		使用済燃料貯蔵 プールへの影響	崩壊熱 (リファ レンスの値に対 する比率)	集合体当たり	取出時	1.00	0.99	0.99	1.02	1.02	1.00	0.99	1.06	0.99	1.00	1.00	1.00	0.98	
				冷却期間: 0.5年	1.00	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.95	0.97	0.97	0.99	0.99	0.98	
			炉心当たり (約1/4MOX 炉心)	取出時	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
冷却期間: 0.5年	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99				
特徴	—	・炉心当たりの崩壊熱について現行MOX燃料炉心 (Pu組成: 標準組成) と比較すると、(中空ペレット燃料型で) 僅かな増加は見られるが、各概念とも概ね1.00程度以下であり、使用済燃料貯蔵プールでの崩壊熱については、現行の除熱設備で対応の可能性を有するものと考えられる。 ・上記の理由としては、現行MOX燃料炉心と比較し各高度化燃料概念ともPu装荷量自体は増加するが、一方で、Pu組成は国内再処理による高次化組成となることで、発熱の寄与が大きいAmの割合が減り、結果として、現行MOX燃料炉心 (Pu組成: 標準組成) と同程度となったものと考えられる。	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	参考				
燃料開発の負荷 (実用化時期見直し)	特徴	—	・物性試験、照射挙動把握のための照射試験が必要となる。 ・過去に実績のない燃料タイプであり、燃料要素の照射試験により照射挙動の把握が必要となる。	・過去に実績のない燃料タイプであり、燃料要素の照射試験により照射挙動の把握が必要となる。 ・Gd・Er内張り被覆管の製造技術について、過去に検討例がなく、開発に期間を要すると考えられる。 ・照射挙動把握のための照射試験も必要、また、Zr-Gd合金など耐食性に課題がある。	・Gd・Er内張り被覆管の製造技術について、過去に検討例がなく、開発に期間を要すると考えられる。 ・照射挙動把握のための照射試験も必要、また、Zr-Gd合金など耐食性に課題がある。	・中空ペレットは、燃料の装荷量自体が増加するため、Pu含有率が減少し、Pu装荷量の増加は見込めない。 ・集合体外周に装着したUO <sub>2</sub> 燃料要素の1層内側のMOX燃料要素で出力が増加するため、低Pu含有率とする必要が生じ、大幅なPu装荷量増加は見込めない。	・MOX燃料集合体中にUO <sub>2</sub> -Gd燃料要素が装着されることから、集合体当たりのPu装荷量の増加は10%程度。一方、炉心当たりとすると、燃料要素数で1/4となるようMOX燃料集合体の数が増加するので、15%程度の増加となる。	・MOX燃料固溶体型、被覆管内張型などGd・Erを含有した他の燃料概念と同様、15%程度増加可能な見通し。											
	評価	—	△	△	△	△	△	△	△	○	○	○	△	△	△	参考			

表 3.4-1(2/2) MOX 高度化燃料各候補概念を対象とした概略評価 (炉心・燃料設計、フロントエンド、バックエンド) の結果取りまとめ表

	0 (リファレンス)		1-1		1-2		1-3		1-4		1-5		1-6 (追加ケース)		1-7 (追加ケース)		2-1 (参考ケース)		
			MOX燃料固溶体型		Duplex型		被覆管内型		中空ペレット 燃料型		UO <sub>2</sub> 燃料置き 換型		UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型		Gd (Er) 酸化物 要素型		ATF (Fe系) 被 覆管型		
			Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er	Gd	Er	
フロント エンド	燃料製造施設への 適用性		-		x		x		Δ		Δ		○		○		○	参考	
	実現性に関する影響		-		-		-		-		-		-		-		-	参考	
	処理量への影響		-		-		-		-		-		-		-		-	参考	
バック エンド	再処理性への 影響		-		○		○		○		○		○		○		○	参考	
	腐蝕熱 (リファ レンスの値に対 する比率)		1.00		1.07		1.07		1.07		1.07		1.03		0.99		1.04	1.08	
	*Pu組成:高次 化組成		1.00		1.09		1.09		1.08		1.08		1.09		1.03		0.99		1.10
	*Pu組成:高次 化組成		-		-		-		-		-		-		-		-	参考	
	*Pu組成:高次 化組成		-		-		-		-		-		-		-		-	参考	
	*Pu組成:高次 化組成		-		-		-		-		-		-		-		-	参考	
	*Pu組成:高次 化組成		-		-		-		-		-		-		-		-	参考	
	*Pu組成:高次 化組成		-		-		-		-		-		-		-		-	参考	
	*Pu組成:高次 化組成		-		-		-		-		-		-		-		-	参考	
	*Pu組成:高次 化組成		-		-		-		-		-		-		-		-	参考	
バック エンド	ガラス固化体へ の影響		-		○		○		○		○		○		○		○	参考	
	発生数		-		-		-		-		-		-		-		-	参考	
	*Pu組成:高次 化組成		-		-		-		-		-		-		-		-	参考	
	*Pu組成:高次 化組成		-		-		-		-		-		-		-		-	参考	
	*Pu組成:高次 化組成		-		-		-		-		-		-		-		-	参考	
まとめ	メリット		-		-		-		-		-		-		-		-	参考	
	デメリット		-		-		-		-		-		-		-		-	参考	
	総合評価		-		x		x		Δ		Δ		Δ		Δ		○	参考	



< 集合体1/4モデル >

燃焼計算はMOX燃料集合体のみ(網掛け部)  
 隣接のUO<sub>2</sub>燃料集合体は平均燃焼度の一定組成

図 3.1.2-1 炉心計算の体系図 (集合体セル計算)

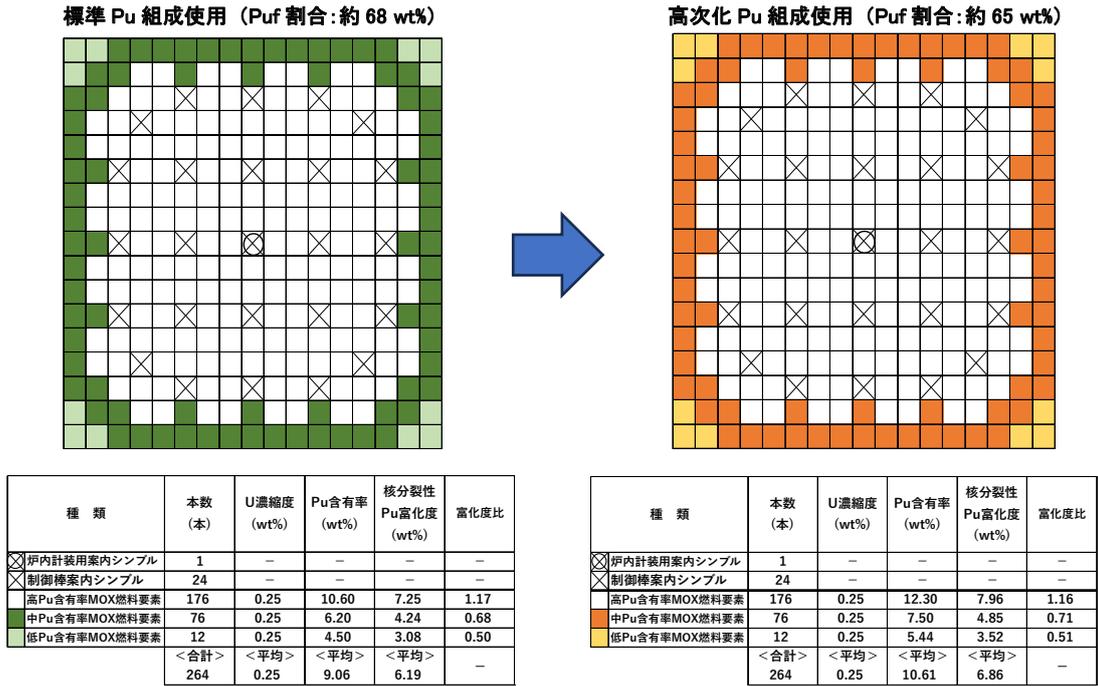


図 3.1.4(1)-1 集合体内燃料要素配置と仕様 (現行 MOX 燃料 (リファレンス))  
(標準 Pu 組成と高次化 Pu 組成使用時の比較)

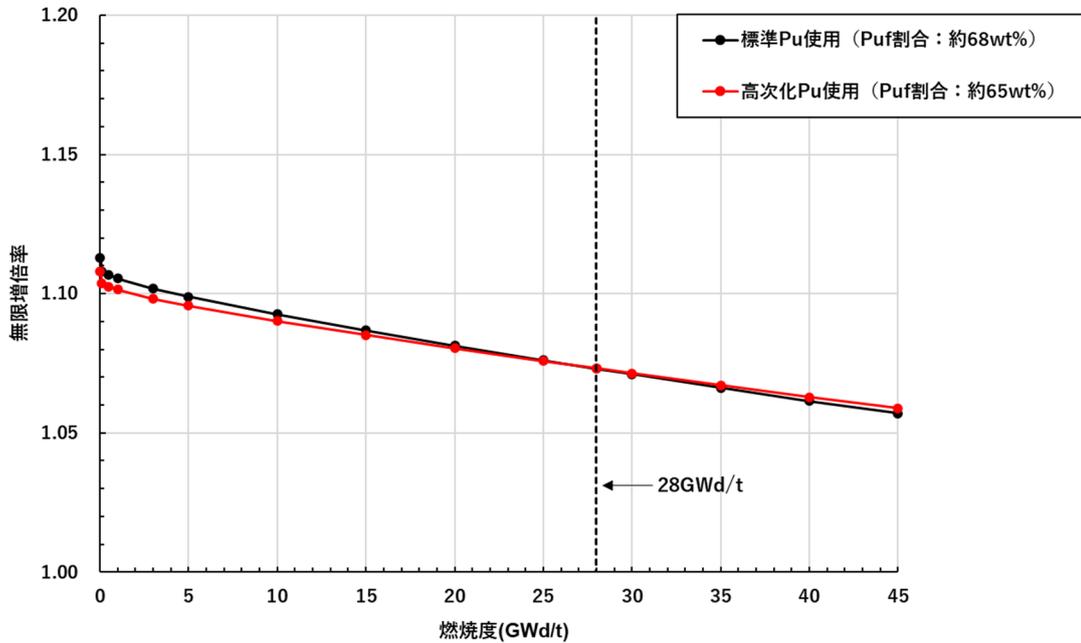


図 3.1.4(1)-2 無限増倍率の燃焼度変化 (現行 MOX 燃料 (リファレンス))  
(標準 Pu 組成と高次化 Pu 組成使用時の比較)

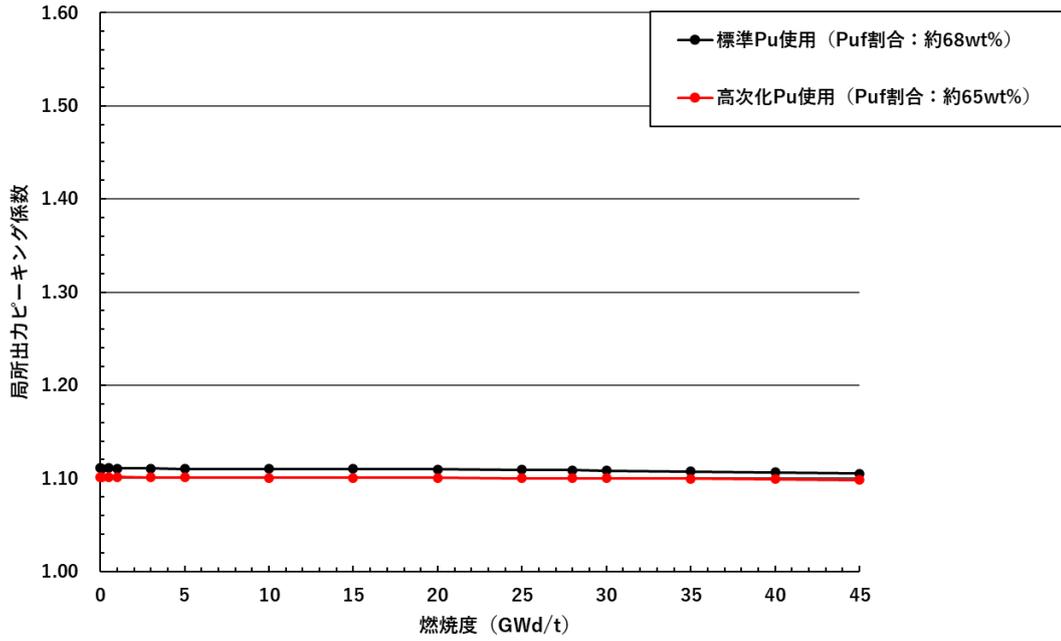


図 3.1.4(1)-3 局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (現行 MOX 燃料 (リファレンス))  
(標準 Pu 組成と高次化 Pu 組成使用時の比較)

0.96	0.95	0.95	0.96	0.95	0.94	0.97	0.85	0.95
0.87	1.06	1.07	0.87	1.06	1.03	0.81	0.87	
GT	1.07	1.07	GT	1.10	1.07	1.02		
1.05	0.99	0.99	1.06	1.10	GT			
1.05	0.99	0.99	1.06	1.04				
GT	1.05	1.05	GT			GT		
1.06	0.99	0.99						
1.05	0.99							
IT			GT			GT		

[0 GWd/t]

0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.95	0.83	0.90
0.87	1.07	1.07	0.87	1.07	1.04	0.82	0.88	
GT	1.07	1.07	GT	1.10	1.07	1.03		
1.06	1.00	1.00	1.07	1.10	GT			
1.06	1.00	1.00	1.06	1.04				
GT	1.06	1.06	GT			GT		
1.06	1.00	1.00						
1.06	1.00							
IT			GT			GT		

[15 GWd/t]

0.93	0.92	0.92	0.93	0.92	0.91	0.93	0.82	0.86
0.88	1.08	1.08	0.88	1.08	1.05	0.83	0.88	
GT	1.07	1.07	GT	1.10	1.07	1.04		
1.06	1.01	1.01	1.07	1.10	GT			
1.06	1.01	1.01	1.07	1.05				
GT	1.06	1.06	GT			GT		
1.06	1.01	1.01						
1.06	1.01							
IT			GT			GT		

[30 GWd/t]

0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.90	0.91	0.81	0.83
0.88	1.08	1.08	0.88	1.08	1.06	0.85	0.88	
GT	1.07	1.07	GT	1.10	1.08	1.05		
1.06	1.02	1.02	1.07	1.09	GT			
1.06	1.02	1.02	1.07	1.05				
GT	1.06	1.06	GT			GT		
1.06	1.02	1.02						
1.06	1.02							
IT			GT			GT		

[45 GWd/t]

IT : 計装管 GT : 制御棒案内管

図 3.1.4(1)-4 集合体内燃料要素の局所出力分布 (現行 MOX 燃料 (リファレンス))  
(高次化 Pu 組成 (Puf 割合 : 約 65wt%))

0.94	0.93	0.93	0.94	0.93	0.92	0.95	0.83	0.92
0.86	1.08	1.08	0.86	1.08	1.05	0.80	0.87	
GT	1.07	1.07	GT	1.11	1.08	1.04		
1.06	0.99	1.00	1.07	1.10	GT			
1.06	0.99	0.99	1.07	1.04				
GT	1.06	1.06	GT			GT		
1.06	1.00	0.99						
1.06	0.99							
IT			GT			GT		

[0 GWd/t]

0.92	0.92	0.91	0.92	0.91	0.91	0.93	0.81	0.87
0.86	1.09	1.09	0.86	1.08	1.06	0.82	0.87	
GT	1.08	1.08	GT	1.11	1.08	1.05		
1.06	1.01	1.01	1.07	1.10	GT			
1.06	1.00	1.01	1.07	1.05				
GT	1.06	1.06	GT			GT		
1.06	1.01	1.01						
1.06	1.00							
IT			GT			GT		

[15 GWd/t]

0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.89	0.91	0.80	0.83
0.87	1.09	1.09	0.87	1.09	1.07	0.83	0.87	
GT	1.08	1.08	GT	1.11	1.09	1.06		
1.07	1.02	1.02	1.08	1.10	GT			
1.07	1.02	1.02	1.07	1.06				
GT	1.07	1.07	GT			GT		
1.07	1.02	1.02						
1.06	1.01							
IT			GT			GT		

[30 GWd/t]

0.89	0.89	0.89	0.89	0.88	0.88	0.89	0.79	0.81
0.87	1.09	1.09	0.87	1.09	1.07	0.84	0.87	
GT	1.08	1.08	GT	1.11	1.09	1.07		
1.07	1.03	1.03	1.08	1.10	GT			
1.07	1.03	1.03	1.08	1.06				
GT	1.07	1.07	GT			GT		
1.07	1.03	1.03						
1.06	1.02							
IT			GT			GT		

[45 GWd/t]

IT : 計装管 GT : 制御棒案内管

図 3.1.4(1)-5 集合体内燃料要素の局所出力分布 (現行 MOX 燃料 (リファレンス))  
(標準 Pu 組成 (Puf 割合 : 約 68wt%))

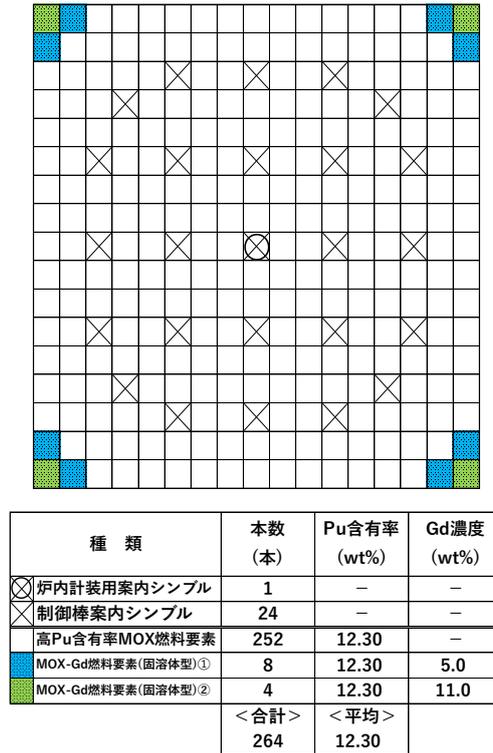


図 3.1.4(2)①-1 集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Gd))

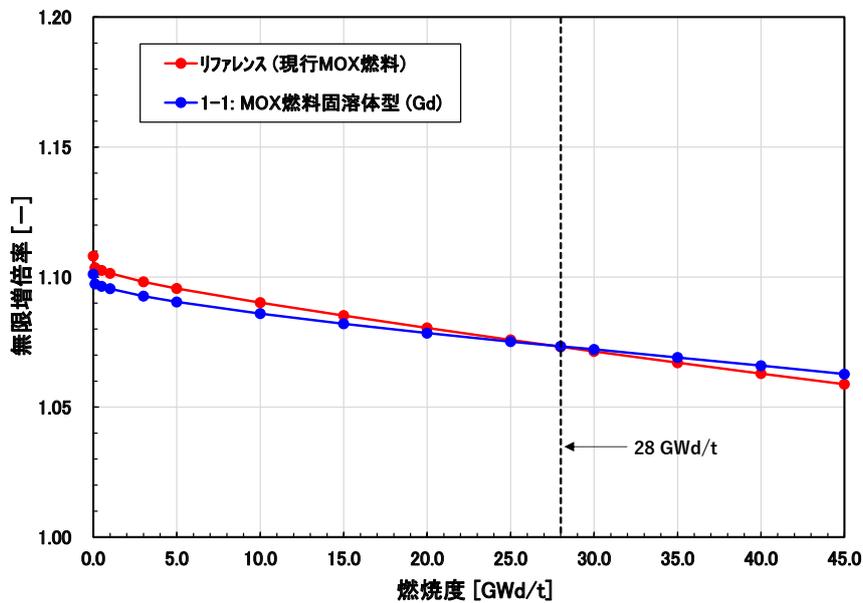


図 3.1.4(2)①-2 無限増倍率の燃焼度変化 (1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Gd))  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

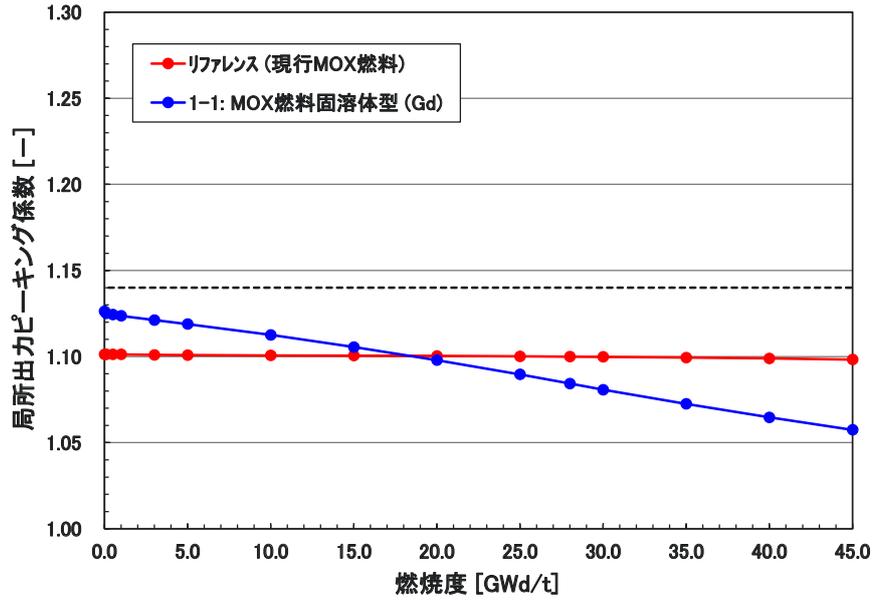


図 3.1.4(2)①-3 局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Gd))  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

1.13	1.12	1.12	1.12	1.11	1.10	1.07	0.67	0.59	
1.04	0.98	0.98	1.04	0.97	0.93	0.91	0.89		
GT	1.02	1.02	GT	1.05	1.01	0.93			
1.02	0.96	0.96	1.03	1.06	GT				
1.02	0.96	0.96	1.03	1.00					
GT	1.02	1.02	GT			GT			
1.02	0.96	0.96							
1.02	0.96								
IT			GT			GT			

[0 GWd/t]

1.11	1.10	1.10	1.10	1.10	1.08	1.07	0.79	0.70	
1.03	0.98	0.98	1.03	0.97	0.94	0.92	0.91		
GT	1.01	1.01	GT	1.04	1.01	0.94			
1.01	0.96	0.96	1.02	1.05	GT				
1.01	0.96	0.96	1.02	1.00					
GT	1.02	1.02	GT			GT			
1.02	0.96	0.96							
1.02	0.96								
IT			GT			GT			

[15 GWd/t]

1.08	1.08	1.08	1.08	1.07	1.06	1.05	0.96	0.86	
1.02	0.98	0.98	1.02	0.97	0.94	0.93	0.93		
GT	1.01	1.01	GT	1.03	1.00	0.94			
1.00	0.96	0.96	1.01	1.04	GT				
1.01	0.96	0.96	1.01	1.00					
GT	1.01	1.01	GT			GT			
1.01	0.96	0.96							
1.01	0.96								
IT			GT			GT			

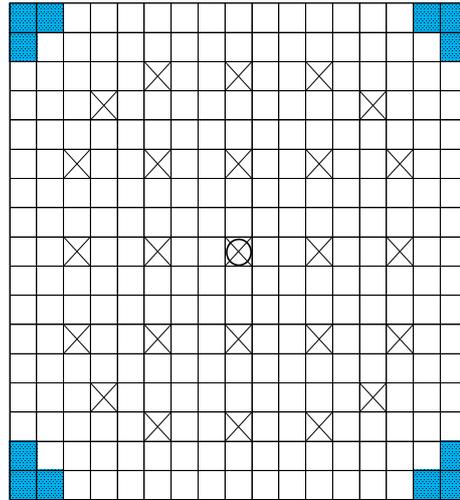
[30 GWd/t]

1.06	1.05	1.05	1.06	1.05	1.04	1.04	1.05	1.05	
1.02	0.98	0.98	1.02	0.97	0.95	0.94	0.96		
GT	1.00	1.00	GT	1.02	1.00	0.95			
1.00	0.96	0.96	1.01	1.03	GT				
1.00	0.96	0.96	1.01	0.99					
GT	1.00	1.00	GT			GT			
1.00	0.96	0.96							
1.00	0.96								
IT			GT			GT			

[45 GWd/t]

IT : 計装管 GT : 制御棒案内管

図 3.1.4(2)①-4 集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Gd))



種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	Er濃度 (wt%)
⊗ 炉内計装用案内シムプル	1	—	—
⊗ 制御棒案内シムプル	24	—	—
高Pu含有率MOX燃料要素	252	12.30	—
MOX-Er燃料要素(固溶体型)	12	12.30	12.0
<合計>	264	<平均>	12.30

図 3.1.4(2)②-1 集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Er))

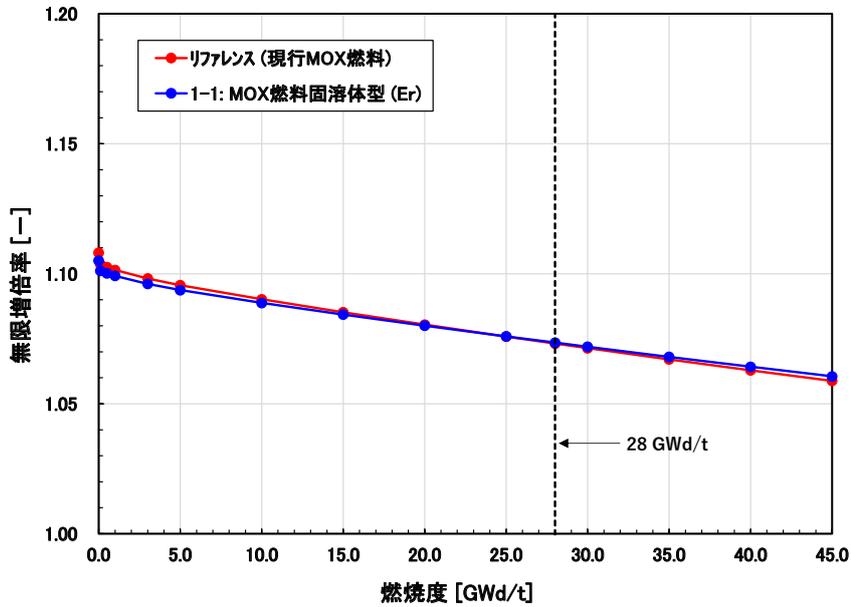


図 3.1.4(2)②-2 無限増倍率の燃焼度変化 (1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Er))  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

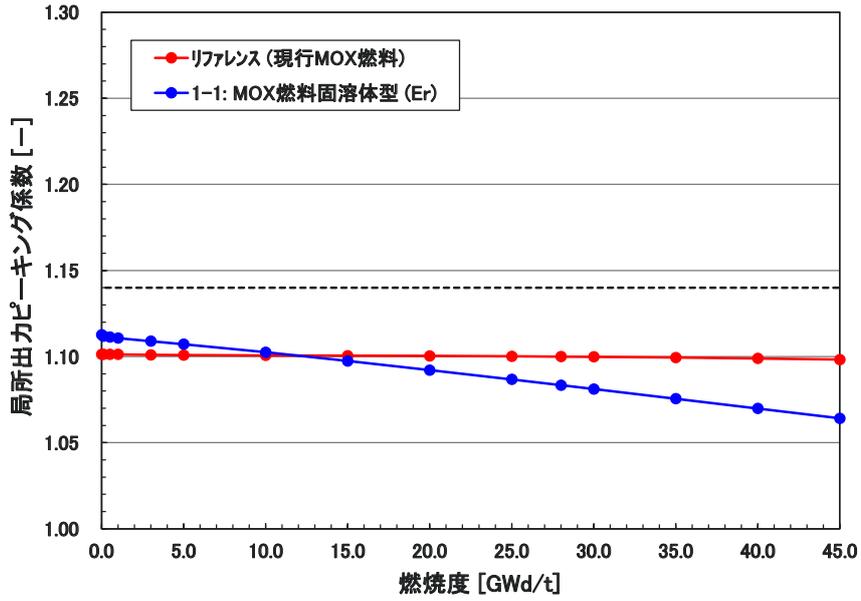


図 3.1.4(2)②-3 局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Er))  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

1.11	1.11	1.11	1.11	1.10	1.09	1.07	0.84	0.96
1.03	0.97	0.97	1.02	0.96	0.92	0.90	0.90	
GT	1.01	1.01	GT	1.04	1.00	0.93		
1.01	0.95	0.95	1.02	1.05	GT			
1.01	0.95	0.95	1.02	0.99				
GT	1.01	1.01	GT			GT		
1.01	0.95	0.95						
1.01	0.95							
IT			GT			GT		

[0 GWd/t]

1.10	1.09	1.09	1.10	1.09	1.07	1.06	0.87	0.97
1.02	0.97	0.97	1.02	0.97	0.93	0.92	0.92	
GT	1.01	1.01	GT	1.04	1.00	0.93		
1.01	0.95	0.95	1.02	1.04	GT			
1.01	0.95	0.95	1.01	0.99				
GT	1.01	1.01	GT			GT		
1.01	0.95	0.95						
1.01	0.95							
IT			GT			GT		

[15 GWd/t]

1.08	1.08	1.08	1.08	1.07	1.06	1.05	0.89	0.99
1.02	0.98	0.98	1.02	0.97	0.94	0.93	0.94	
GT	1.01	1.01	GT	1.03	1.00	0.94		
1.00	0.96	0.96	1.01	1.04	GT			
1.01	0.96	0.96	1.01	1.00				
GT	1.01	1.01	GT			GT		
1.01	0.96	0.96						
1.01	0.96							
IT			GT			GT		

[30 GWd/t]

1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.05	1.04	0.92	0.99
1.02	0.98	0.98	1.02	0.98	0.95	0.94	0.95	
GT	1.01	1.01	GT	1.03	1.00	0.95		
1.00	0.96	0.96	1.01	1.03	GT			
1.01	0.96	0.96	1.01	1.00				
GT	1.01	1.01	GT			GT		
1.01	0.96	0.96						
1.01	0.96							
IT			GT			GT		

[45 GWd/t]

IT : 計装管 GT : 制御棒案内管

図 3.1.4(2)②-4 集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-1 : MOX 燃料固溶体型 (Er))

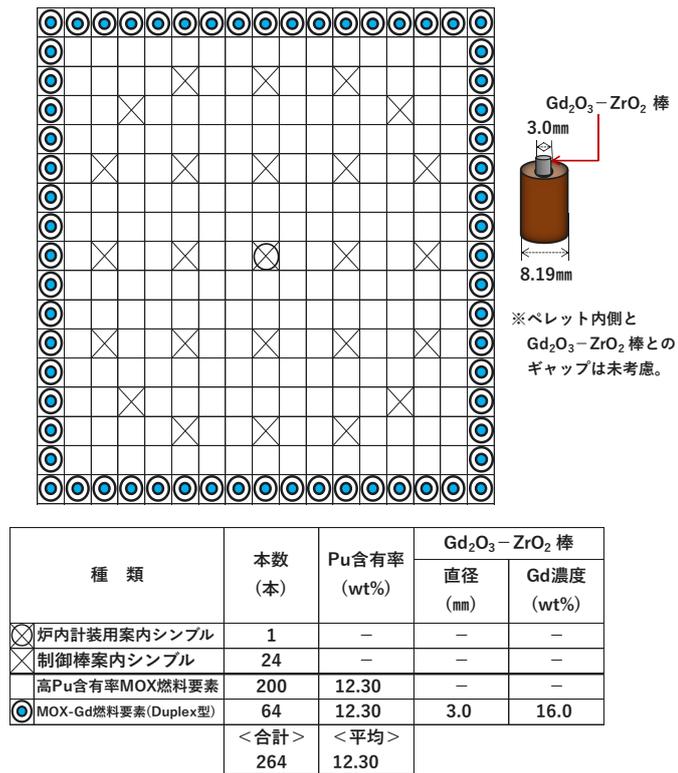


図 3.1.4(2)③-1 集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-2 : Duplex 型 (Gd))

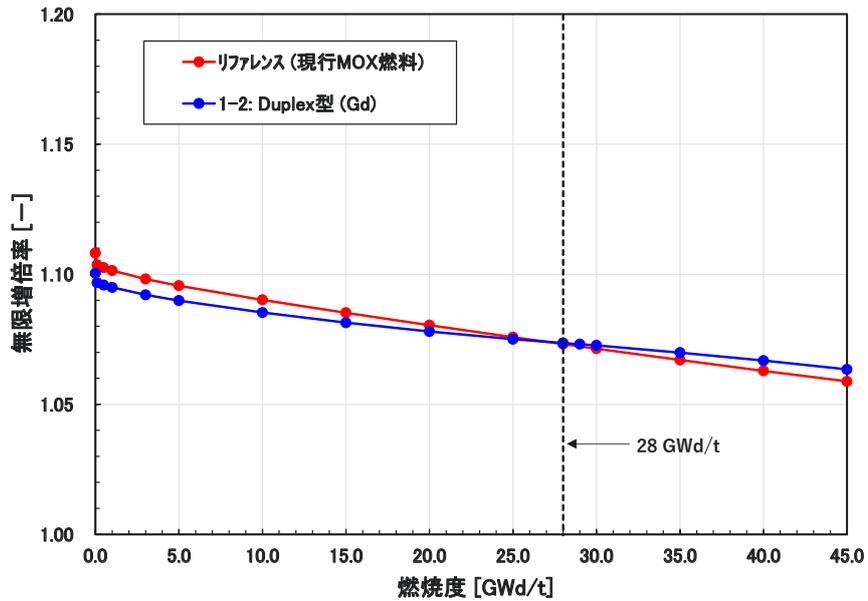


図 3.1.4(2)③-2 無限増倍率の燃焼度変化 (1-2 : Duplex 型 (Gd))  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

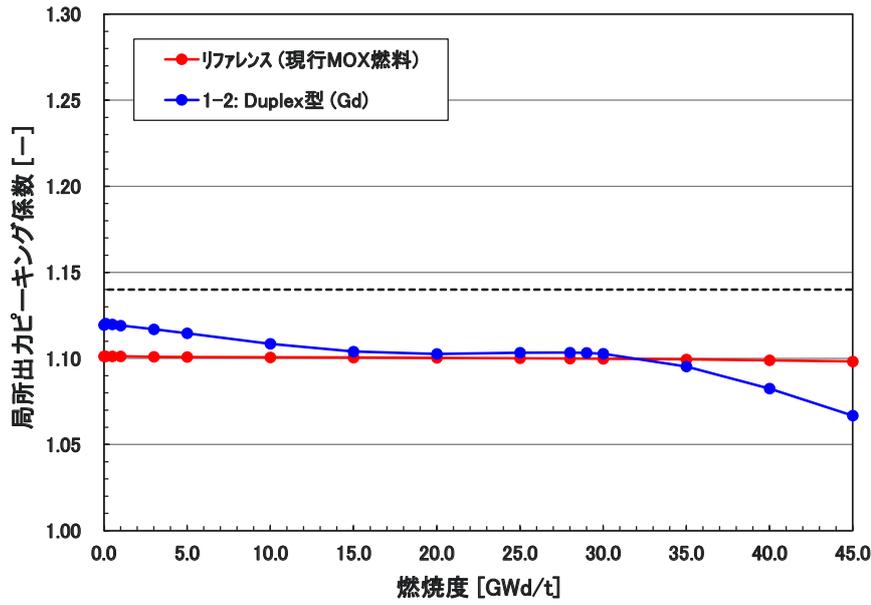


図 3.1.4(2)③-3 局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-2 : Duplex 型 (Gd))  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.96	0.98	1.12
1.04	0.98	0.98	1.04	0.98	0.94	0.93	0.94	
GT	1.03	1.03	GT	1.07	1.03	0.95		
1.03	0.97	0.97	1.04	1.07	GT			
1.03	0.97	0.97	1.04	1.02				
GT	1.04	1.03	GT			GT		
1.04	0.97	0.97						
1.04	0.97							
IT			GT			GT		

[0 GWd/t]

0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.99	1.10
1.04	0.99	0.99	1.04	0.98	0.95	0.94	0.96	
GT	1.03	1.03	GT	1.06	1.02	0.95		
1.03	0.97	0.97	1.04	1.07	GT			
1.03	0.97	0.97	1.04	1.02				
GT	1.03	1.03	GT			GT		
1.03	0.98	0.97						
1.03	0.97							
IT			GT			GT		

[15 GWd/t]

1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	1.00	1.10
1.04	0.99	0.99	1.04	0.99	0.96	0.95	0.98	
GT	1.02	1.02	GT	1.05	1.02	0.96		
1.02	0.97	0.97	1.03	1.05	GT			
1.02	0.97	0.97	1.03	1.01				
GT	1.02	1.02	GT			GT		
1.02	0.97	0.97						
1.02	0.97							
IT			GT			GT		

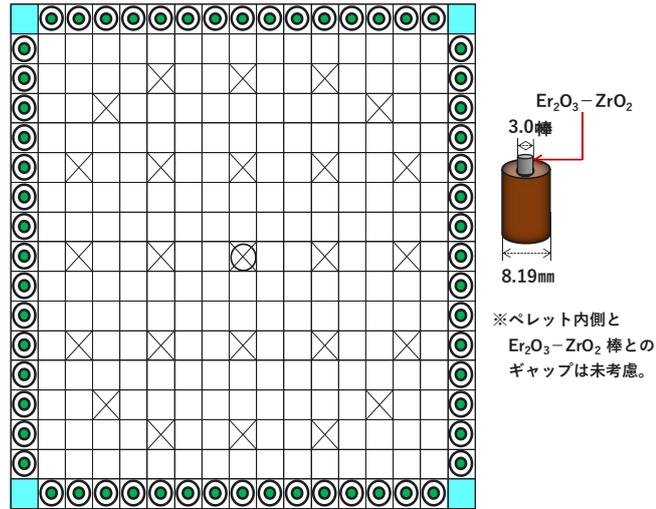
[30 GWd/t]

1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	1.00	1.07
1.04	1.00	1.00	1.04	1.00	0.97	0.97	0.99	
GT	1.02	1.02	GT	1.04	1.01	0.96		
1.01	0.97	0.97	1.02	1.04	GT			
1.01	0.97	0.97	1.02	1.01				
GT	1.01	1.01	GT			GT		
1.01	0.97	0.97						
1.01	0.97							
IT			GT			GT		

[45 GWd/t]

IT : 計装管 GT : 制御棒案内管

図 3.1.4(2)③-4 集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-2 : Duplex 型 (Gd))



種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒	
			直径 (mm)	Er濃度 (wt%)
⊗ 炉内計装用案内シムプル	1	-	-	-
⊗ 制御棒案内シムプル	24	-	-	-
高Pu含有率MOX燃料要素	200	12.30	-	-
中Pu含有率MOX燃料要素	4	9.00	-	-
⊙ MOX-Er燃料 (Duplex型)	60	12.30	3.0	22.0
	<合計>	<平均>		
	264	12.25		

図 3.1.4(2)④-1 集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-2 : Duplex 型 (Er))

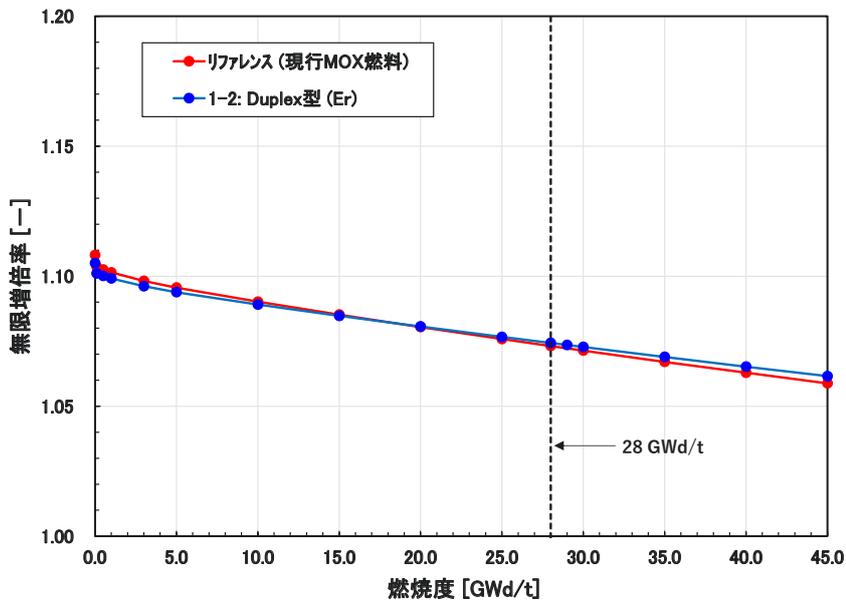


図 3.1.4(2)④-2 無限増倍率の燃焼度変化 (1-2 : Duplex 型 (Er))  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

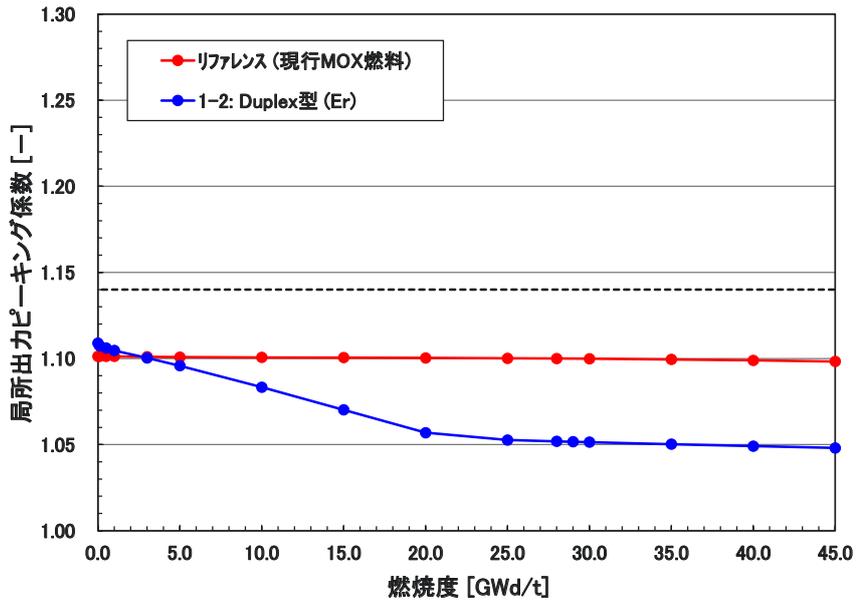


図 3.1.4(2)④-3 局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-2 : Duplex 型 (Er))  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

1.02	1.01	1.01	1.02	1.01	1.00	1.00	1.03	1.11
1.04	0.98	0.98	1.04	0.97	0.94	0.93	0.95	
GT	1.02	1.02	GT	1.05	1.01	0.94		
1.02	0.96	0.96	1.03	1.06	GT			
1.02	0.96	0.96	1.03	1.00				
GT	1.02	1.02	GT			GT		
1.02	0.96	0.96						
1.02	0.96							
IT			GT			GT		

[0 GWd/t]

1.01	1.01	1.01	1.01	1.00	0.99	0.99	1.02	1.07
1.04	0.98	0.99	1.04	0.98	0.95	0.94	0.97	
GT	1.02	1.02	GT	1.05	1.02	0.95		
1.02	0.96	0.96	1.03	1.06	GT			
1.02	0.96	0.96	1.03	1.01				
GT	1.02	1.02	GT			GT		
1.02	0.97	0.97						
1.02	0.97							
IT			GT			GT		

[15 GWd/t]

1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.99	1.01	1.03
1.04	0.99	0.99	1.04	0.99	0.96	0.95	0.98	
GT	1.02	1.02	GT	1.05	1.02	0.96		
1.02	0.97	0.97	1.03	1.05	GT			
1.02	0.97	0.97	1.03	1.01				
GT	1.02	1.02	GT			GT		
1.02	0.97	0.97						
1.02	0.97							
IT			GT			GT		

[30 GWd/t]

0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	1.00	0.99
1.04	1.00	1.00	1.04	1.00	0.97	0.97	1.00	
GT	1.02	1.02	GT	1.04	1.02	0.97		
1.02	0.97	0.98	1.03	1.05	GT			
1.02	0.98	0.98	1.03	1.01				
GT	1.02	1.02	GT			GT		
1.02	0.98	0.98						
1.02	0.98							
IT			GT			GT		

[45 GWd/t]

IT : 計装管 GT : 制御棒案内管

図 3.1.4(2)④-4 集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-2 : Duplex 型 (Er))

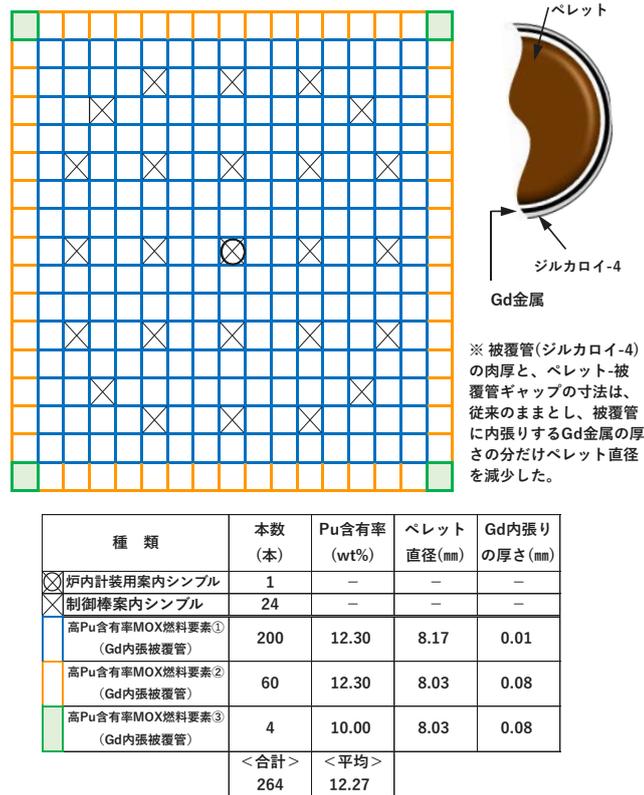


図 3.1.4(2)⑤-1 集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-3：被覆管内張型 (Gd))

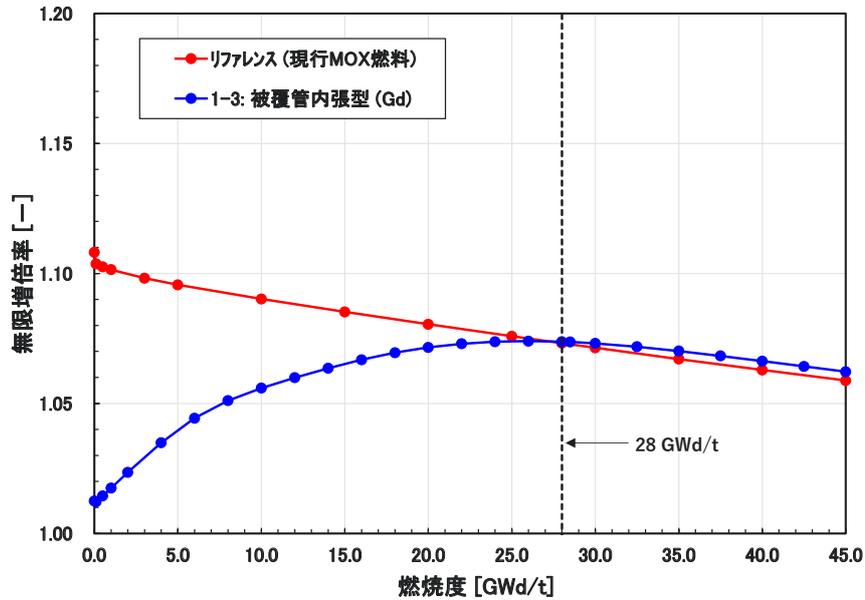


図 3.1.4(2)⑤-2 無限増倍率の燃焼度変化 (1-3：被覆管内張型 (Gd))  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

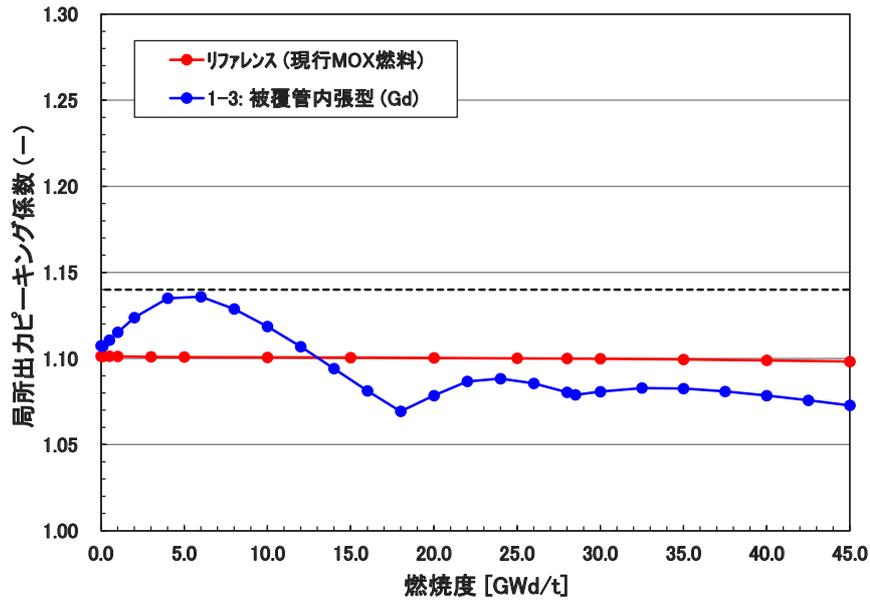


図 3.1.4(2)⑤-3 局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-3: 被覆管内張型 (Gd)) (現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

0.87	0.87	0.87	0.87	0.86	0.86	0.86	0.86	0.82
1.07	1.01	1.01	1.06	1.01	0.98	0.97	0.97	
GT	1.07	1.07	GT	1.10	1.06	0.99		
1.07	1.02	1.02	1.08	1.11	GT			
1.08	1.02	1.02	1.08	1.06				
GT	1.08	1.08	GT			GT		
1.08	1.03	1.03						
1.08	1.03							
IT			GT			GT		

[0 GWd/t]

0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.94	0.94	0.97	1.04
1.04	0.99	0.99	1.04	0.98	0.95	0.93	0.95	
GT	1.04	1.04	GT	1.07	1.04	0.96		
1.04	0.98	0.99	1.05	1.08	GT			
1.04	0.99	0.99	1.05	1.03				
GT	1.04	1.04	GT			GT		
1.05	0.99	0.99						
1.05	0.99							
IT			GT			GT		

[15 GWd/t]

1.07	1.06	1.06	1.07	1.06	1.05	1.05	1.08	1.07
1.02	0.97	0.97	1.02	0.97	0.94	0.93	0.95	
GT	1.00	1.00	GT	1.02	1.00	0.94		
1.00	0.95	0.95	1.01	1.03	GT			
1.00	0.95	0.95	1.01	0.99				
GT	1.00	1.00	GT			GT		
1.00	0.95	0.95						
1.00	0.95							
IT			GT			GT		

[30 GWd/t]

1.06	1.06	1.06	1.06	1.05	1.05	1.05	1.07	1.03
1.02	0.98	0.98	1.02	0.97	0.95	0.94	0.97	
GT	1.00	1.00	GT	1.02	1.00	0.95		
1.00	0.95	0.96	1.00	1.02	GT			
1.00	0.95	0.96	1.00	0.99				
GT	1.00	1.00	GT			GT		
1.00	0.96	0.96						
1.00	0.96							
IT			GT			GT		

[45 GWd/t]

IT : 計装管 GT : 制御棒案内管

図 3.1.4(2)⑤-4 集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-3: 被覆管内張型 (Gd))

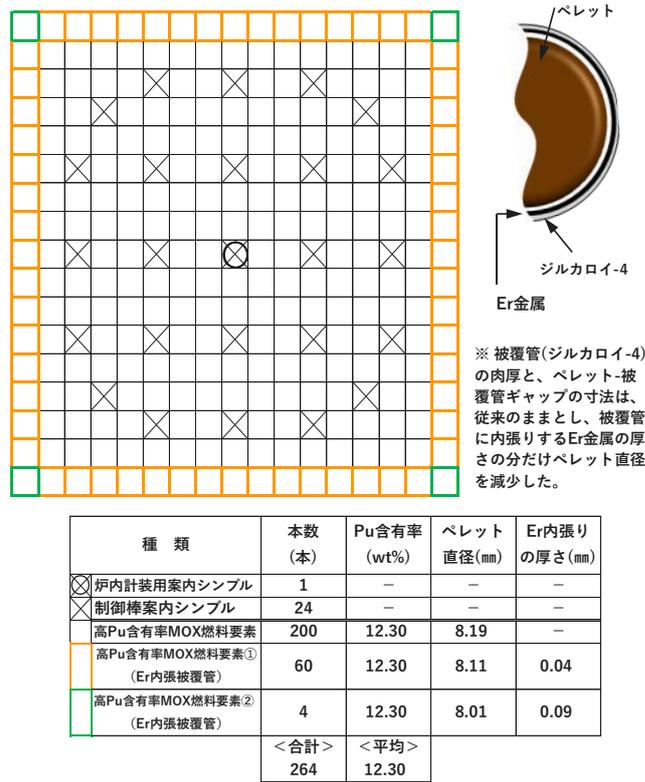


図 3.1.4(2)⑥-1 集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-3: 被覆管内張型 (Er))

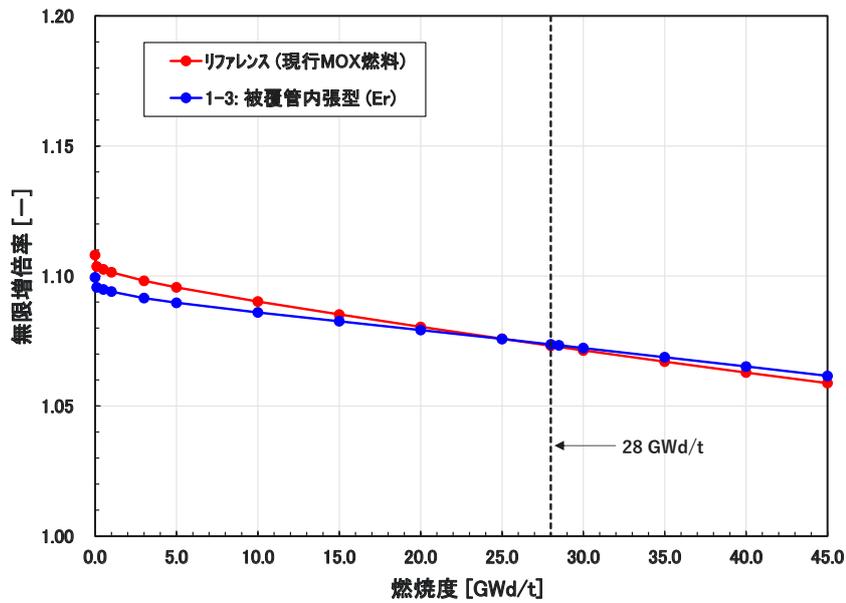


図 3.1.4(2)⑥-2 無限増倍率の燃焼度変化 (1-3: 被覆管内張型 (Er))  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

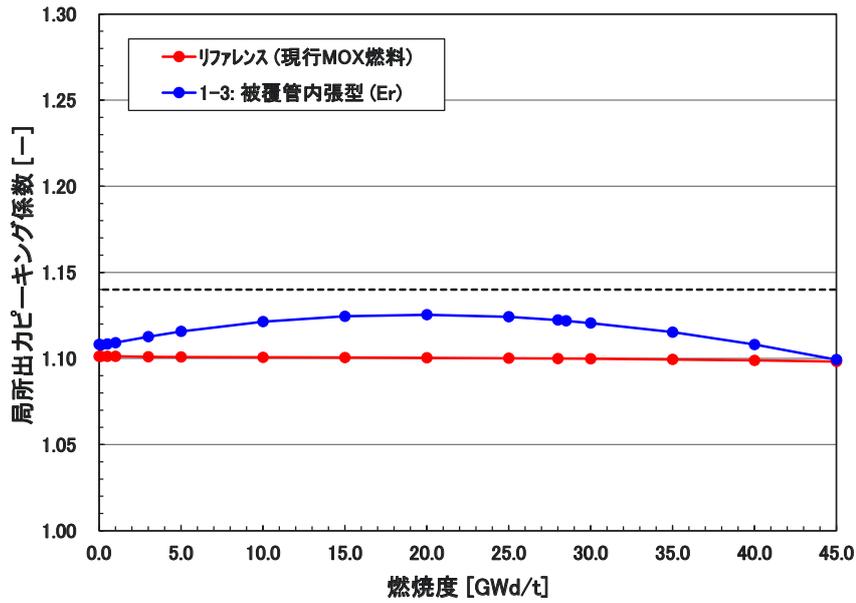


図 3.1.4(2)⑥-3 局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-3: 被覆管内張型 (Er))  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

1.04	1.04	1.04	1.04	1.03	1.02	1.02	1.03	1.11
1.02	0.96	0.96	1.02	0.96	0.92	0.91	0.92	
GT	1.02	1.02	GT	1.05	1.01	0.93		
1.02	0.95	0.96	1.03	1.06	GT			
1.02	0.96	0.96	1.03	1.00				
GT	1.02	1.02	GT			GT		
1.02	0.96	0.96						
1.02	0.96							
IT			GT			GT		

[0 GWd/t]

1.05	1.05	1.05	1.05	1.04	1.03	1.03	1.05	1.12
1.02	0.97	0.97	1.02	0.96	0.93	0.92	0.93	
GT	1.01	1.01	GT	1.04	1.00	0.93		
1.01	0.95	0.95	1.02	1.05	GT			
1.01	0.95	0.95	1.02	1.00				
GT	1.01	1.01	GT			GT		
1.01	0.96	0.96						
1.01	0.96							
IT			GT			GT		

[15 GWd/t]

1.05	1.05	1.05	1.05	1.04	1.03	1.03	1.05	1.12
1.02	0.97	0.97	1.02	0.97	0.94	0.93	0.95	
GT	1.00	1.00	GT	1.03	1.00	0.94		
1.00	0.95	0.96	1.01	1.04	GT			
1.00	0.96	0.96	1.01	0.99				
GT	1.00	1.00	GT			GT		
1.01	0.96	0.96						
1.00	0.96							
IT			GT			GT		

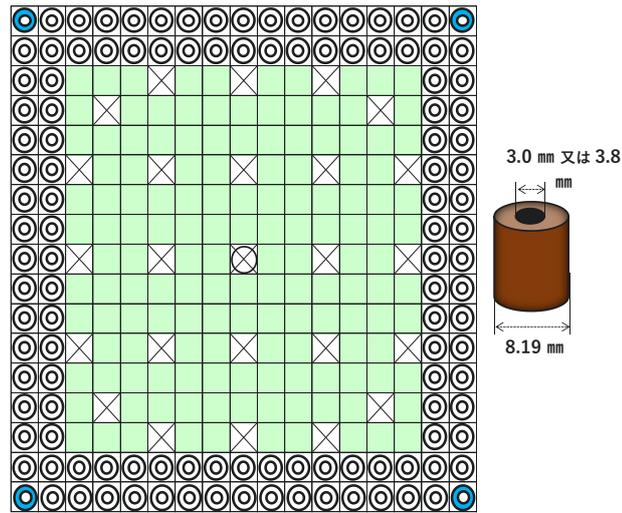
[30 GWd/t]

1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.03	1.03	1.05	1.10
1.02	0.98	0.98	1.02	0.98	0.95	0.94	0.96	
GT	1.00	1.00	GT	1.03	1.00	0.95		
1.00	0.96	0.96	1.01	1.03	GT			
1.00	0.96	0.96	1.01	0.99				
GT	1.00	1.00	GT			GT		
1.00	0.96	0.96						
1.00	0.96							
IT			GT			GT		

[45 GWd/t]

IT : 計装管 GT : 制御棒案内管

図 3.1.4(2)⑥-4 集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-3: 被覆管内張型 (Er))



種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	中空径 (mm)
⊗ 炉内計装用案内シムル	1	-	-
⊗ 制御棒案内シムル	24	-	-
■ 高Pu含有率MOX燃料要素	144	11.28	-
⊙ 中空ペレットMOX燃料要素①	116	11.28	3.0
⊙ 中空ペレットMOX燃料要素②	4	11.28	3.8
<合計>	264	<平均>	
		11.28	

図 3.1.4(3)①-1 集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-4: 中空ペレット燃料型)

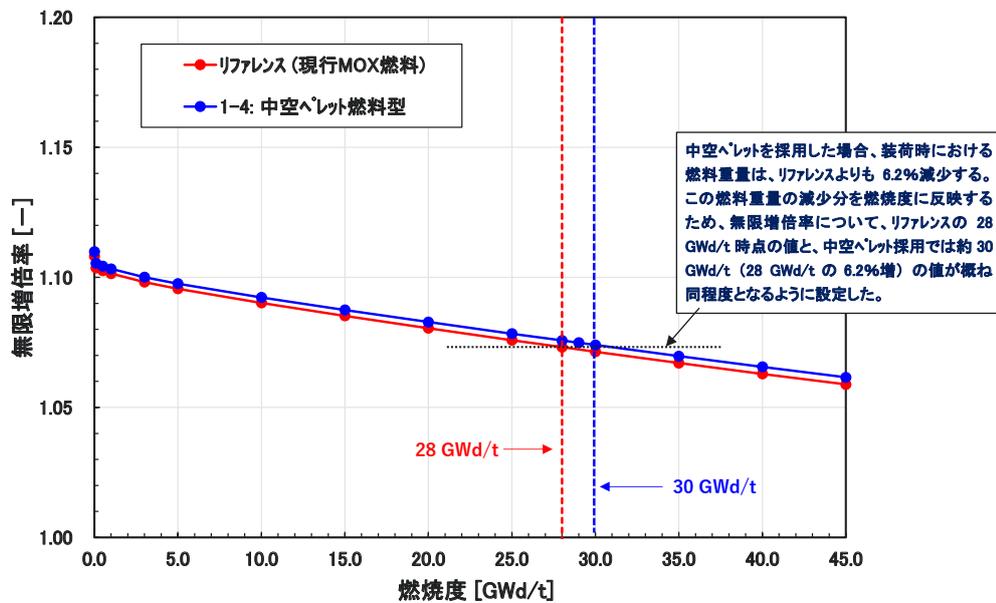


図 3.1.4(3)①-2 無限増倍率の燃焼度変化 (1-4: 中空ペレット燃料型)  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

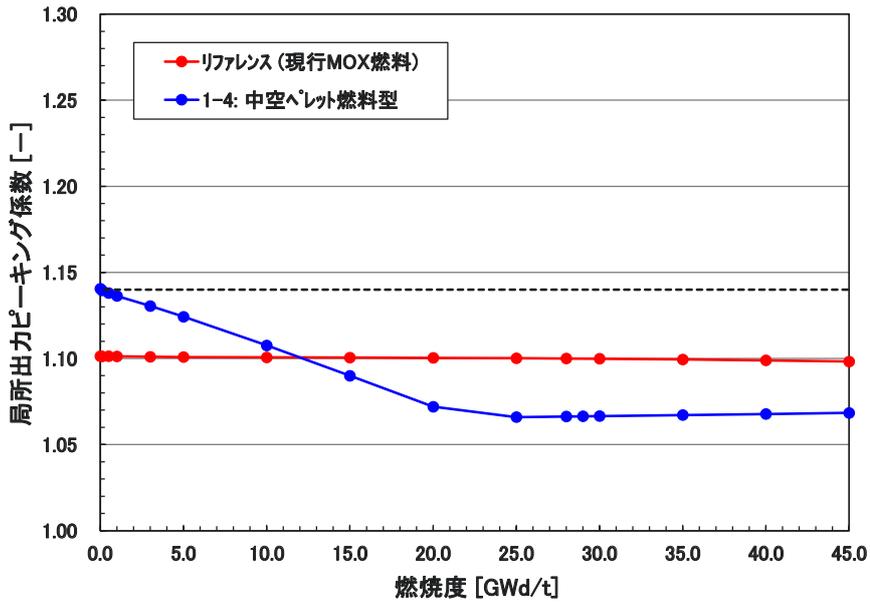


図 3.1.4(3)①-3 局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-4 : 中空ペレット燃料型)  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

1.06	1.05	1.05	1.06	1.05	1.04	1.04	1.07	1.14
0.98	0.92	0.92	0.98	0.92	0.88	0.88	0.90	
GT	1.03	1.03	GT	1.06	1.03	0.96		
1.02	0.96	0.96	1.03	1.06	GT			
1.02	0.96	0.96	1.03	1.01				
GT	1.02	1.02	GT			GT		
1.02	0.96	0.96						
1.02	0.96							
IT			GT			GT		

[0 GWd/t]

1.04	1.04	1.04	1.04	1.03	1.02	1.02	1.05	1.09
0.98	0.93	0.93	0.98	0.92	0.89	0.89	0.91	
GT	1.03	1.03	GT	1.06	1.03	0.97		
1.03	0.97	0.97	1.04	1.06	GT			
1.03	0.97	0.97	1.03	1.01				
GT	1.03	1.03	GT			GT		
1.03	0.97	0.97						
1.02	0.97							
IT			GT			GT		

[15 GWd/t]

1.02	1.02	1.02	1.02	1.01	1.01	1.01	1.03	1.03
0.97	0.93	0.93	0.97	0.93	0.90	0.90	0.92	
GT	1.04	1.04	GT	1.07	1.04	0.98		
1.03	0.98	0.98	1.04	1.06	GT			
1.03	0.98	0.98	1.04	1.02				
GT	1.03	1.03	GT			GT		
1.03	0.98	0.98						
1.03	0.98							
IT			GT			GT		

[30 GWd/t]

1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	1.01	0.98
0.97	0.94	0.94	0.97	0.94	0.91	0.91	0.93	
GT	1.05	1.05	GT	1.07	1.04	1.00		
1.03	0.99	0.99	1.04	1.07	GT			
1.03	0.99	0.99	1.04	1.03				
GT	1.03	1.03	GT			GT		
1.03	0.99	0.99						
1.03	0.99							
IT			GT			GT		

[45 GWd/t]

IT : 計装管 GT : 制御棒案内管

図 3.1.4(3)①-4 集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-4 : 中空ペレット燃料型)

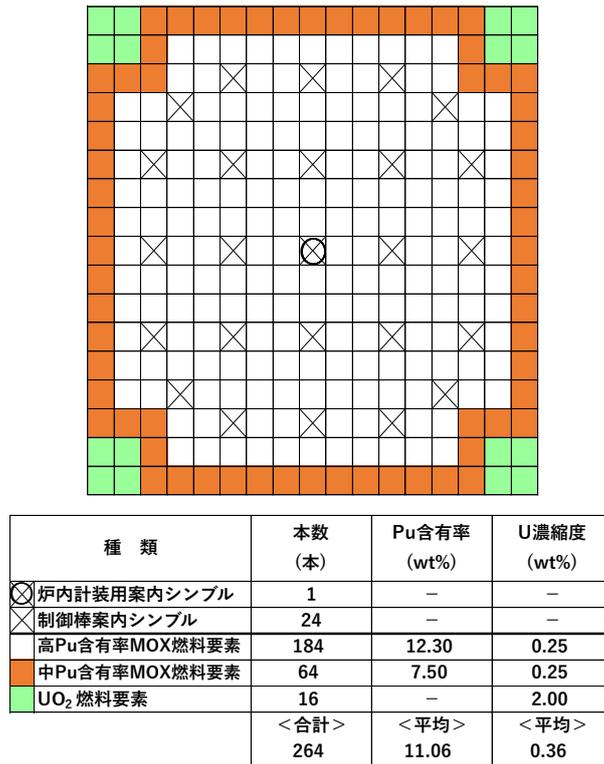


図 3.1.4(3)②-1 集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-5 : UO<sub>2</sub>燃料置き換え型)

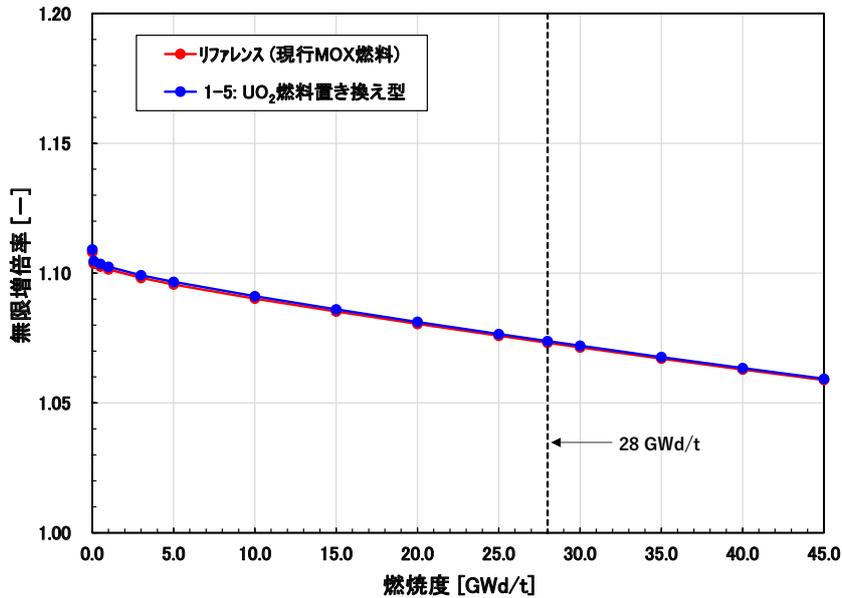


図 3.1.4(3)②-2 無限増倍率の燃焼度変化 (1-5 : UO<sub>2</sub>燃料置き換え型)  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

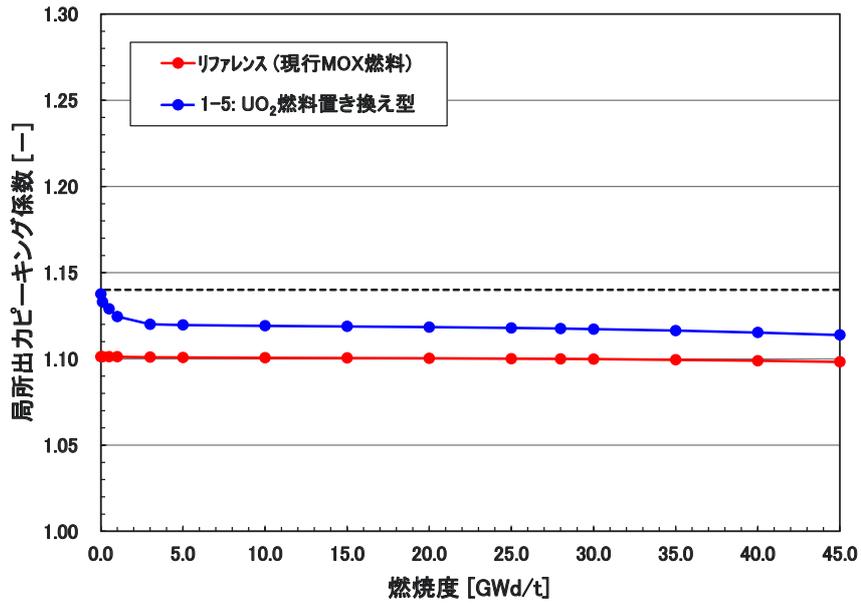


図 3.1.4(3)②-3 局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-5 : UO<sub>2</sub> 燃料置き換え型)  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

0.96	0.95	0.95	0.96	0.96	0.99	1.14	0.42	0.45
1.12	1.06	1.06	1.12	1.07	1.08	0.98	0.38	
GT	1.07	1.07	GT	1.11	1.11	0.87		
1.06	1.00	1.00	1.07	1.11	GT			
1.06	1.00	1.00	1.07	1.05				
GT	1.06	1.06	GT			GT		
1.06	1.00	1.00						
1.06	1.00							
IT			GT			GT		

[0 GWd/t]

0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.96	1.04	0.54	0.57
1.12	1.06	1.06	1.12	1.07	1.08	0.92	0.49	
GT	1.07	1.07	GT	1.11	1.10	0.86		
1.06	1.00	1.01	1.07	1.10	GT			
1.06	1.01	1.01	1.07	1.05				
GT	1.06	1.06	GT			GT		
1.07	1.01	1.01						
1.06	1.01							
IT			GT			GT		

[15 GWd/t]

0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.93	0.98	0.59	0.61
1.12	1.07	1.07	1.12	1.08	1.08	0.90	0.55	
GT	1.07	1.07	GT	1.10	1.10	0.86		
1.06	1.01	1.01	1.07	1.10	GT			
1.06	1.01	1.01	1.07	1.05				
GT	1.07	1.07	GT			GT		
1.07	1.02	1.02						
1.06	1.01							
IT			GT			GT		

[30 GWd/t]

0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.93	0.62	0.64
1.11	1.07	1.07	1.11	1.08	1.08	0.88	0.59	
GT	1.07	1.07	GT	1.10	1.10	0.86		
1.07	1.02	1.02	1.08	1.10	GT			
1.07	1.02	1.02	1.07	1.06				
GT	1.07	1.07	GT			GT		
1.07	1.02	1.02						
1.06	1.02							
IT			GT			GT		

[45 GWd/t]

IT : 計装管 GT : 制御棒案内管

図 3.1.4(3)②-4 集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-5 : UO<sub>2</sub> 燃料置き換え型)

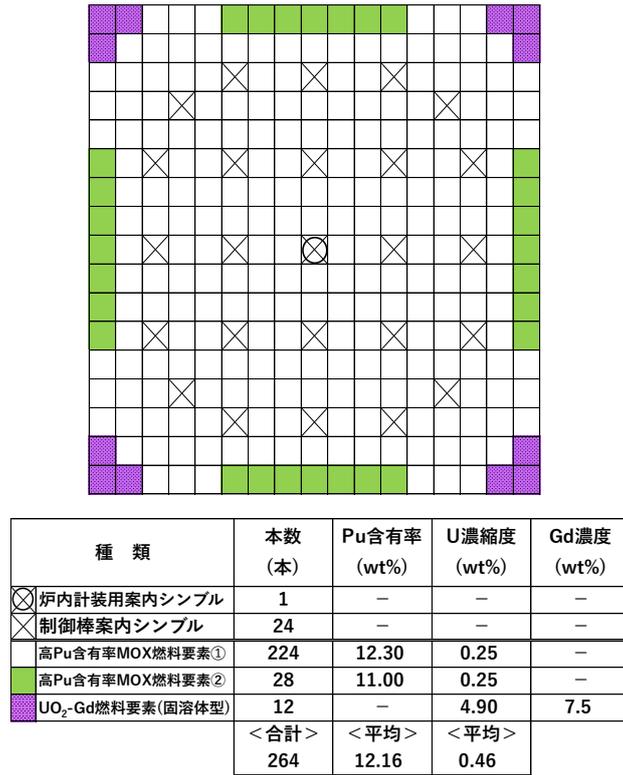


図 3.1.4(4)①-1 集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-6 : UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Gd))

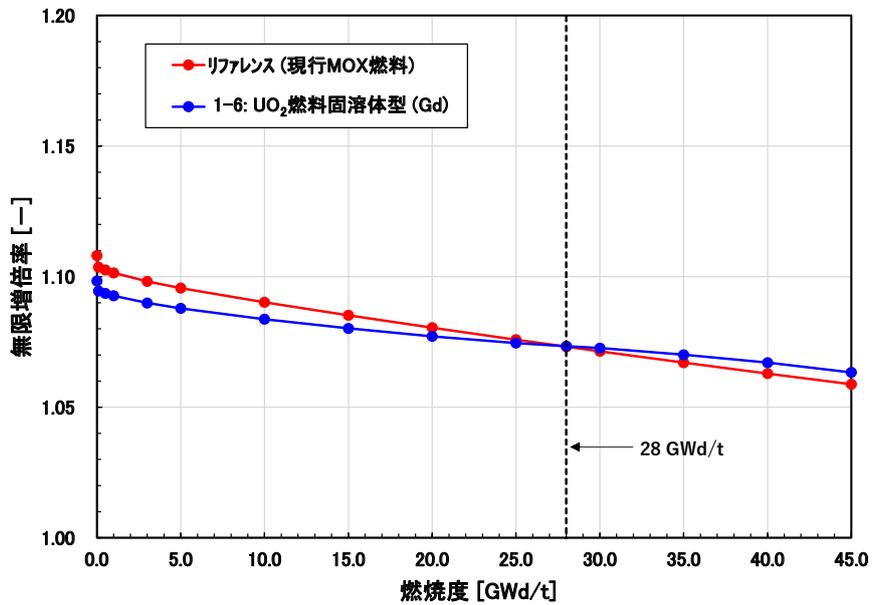


図 3.1.4(4)①-2 無限増倍率の燃焼度変化 (1-6 : UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Gd))  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

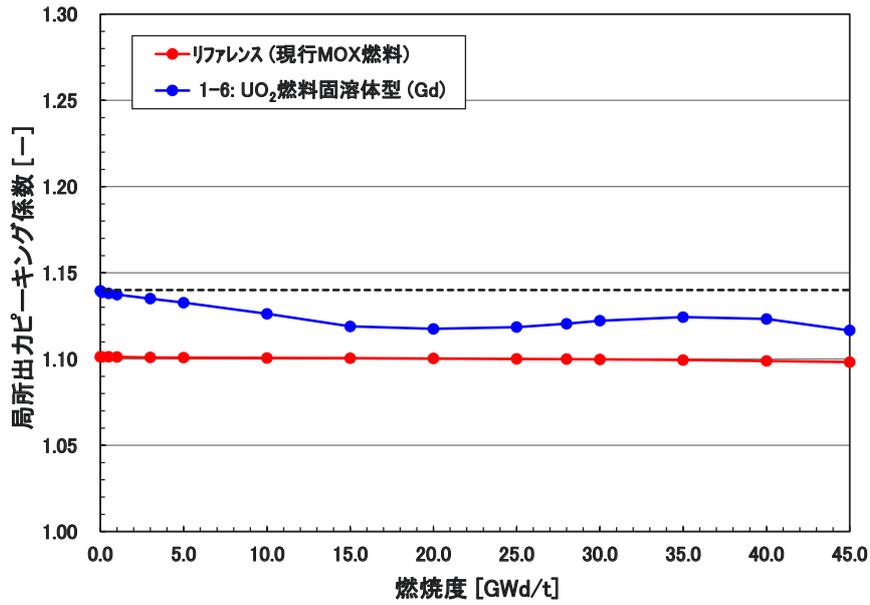


図 3.1.4(4)①-3 局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-6 : UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Gd))  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

1.10	1.09	1.09	1.09	1.14	1.12	1.12	0.30	0.30
1.07	1.00	1.00	1.06	0.99	0.95	0.94	0.95	
GT	1.04	1.04	GT	1.07	1.03	0.96		
1.04	0.98	0.98	1.05	1.08	GT			
1.04	0.98	0.98	1.05	1.02				
GT	1.04	1.04	GT			GT		
1.04	0.98	0.98						
1.04	0.98							
IT			GT			GT		

[0 GWd/t]

1.07	1.07	1.07	1.07	1.12	1.11	1.12	0.41	0.45
1.06	1.00	1.00	1.05	0.99	0.96	0.96	0.99	
GT	1.03	1.03	GT	1.06	1.03	0.96		
1.03	0.97	0.98	1.04	1.07	GT			
1.03	0.98	0.98	1.04	1.02				
GT	1.03	1.03	GT			GT		
1.03	0.98	0.98						
1.03	0.98							
IT			GT			GT		

[15 GWd/t]

1.04	1.04	1.04	1.04	1.09	1.09	1.12	0.60	0.71
1.04	1.00	1.00	1.04	0.99	0.96	0.97	1.06	
GT	1.02	1.02	GT	1.05	1.02	0.96		
1.02	0.97	0.97	1.03	1.05	GT			
1.02	0.97	0.97	1.03	1.01				
GT	1.02	1.02	GT			GT		
1.02	0.97	0.97						
1.02	0.97							
IT			GT			GT		

[30 GWd/t]

1.02	1.02	1.02	1.02	1.07	1.07	1.12	0.74	0.79
1.04	1.00	1.00	1.03	0.99	0.97	0.99	1.09	
GT	1.01	1.01	GT	1.04	1.01	0.97		
1.01	0.97	0.97	1.02	1.04	GT			
1.01	0.97	0.97	1.02	1.00				
GT	1.01	1.01	GT			GT		
1.01	0.97	0.97						
1.01	0.97							
IT			GT			GT		

[45 GWd/t]

IT : 計装管 GT : 制御棒案内管

図 3.1.4(4)①-4 集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-6 : UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Gd))

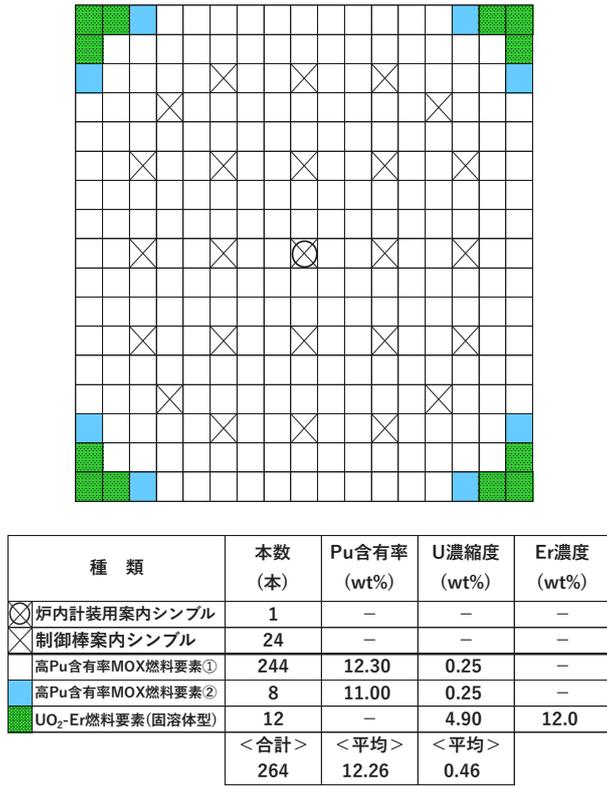


図 3.1.4(4)②-1 集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-6 : UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Er))

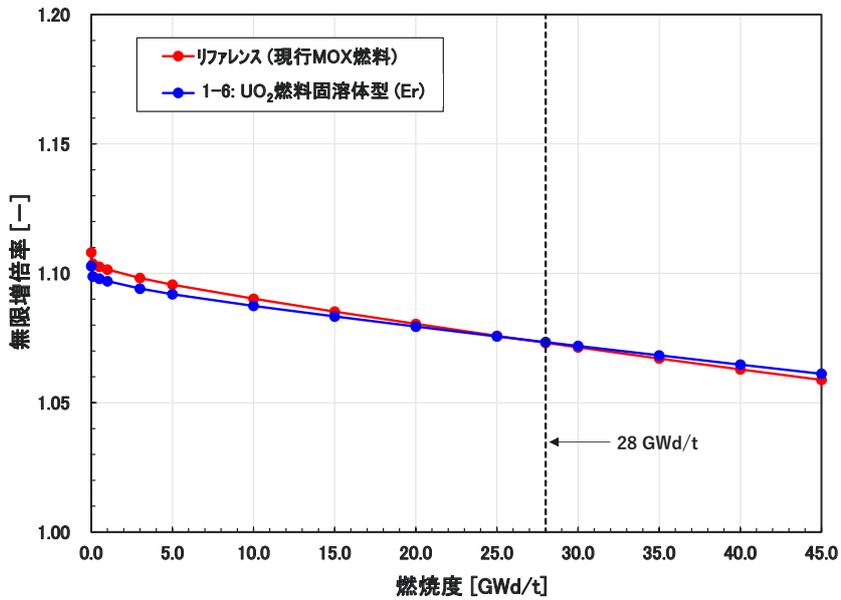


図 3.1.4(4)②-2 無限増倍率の燃焼度変化 (1-6 : UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Er))  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

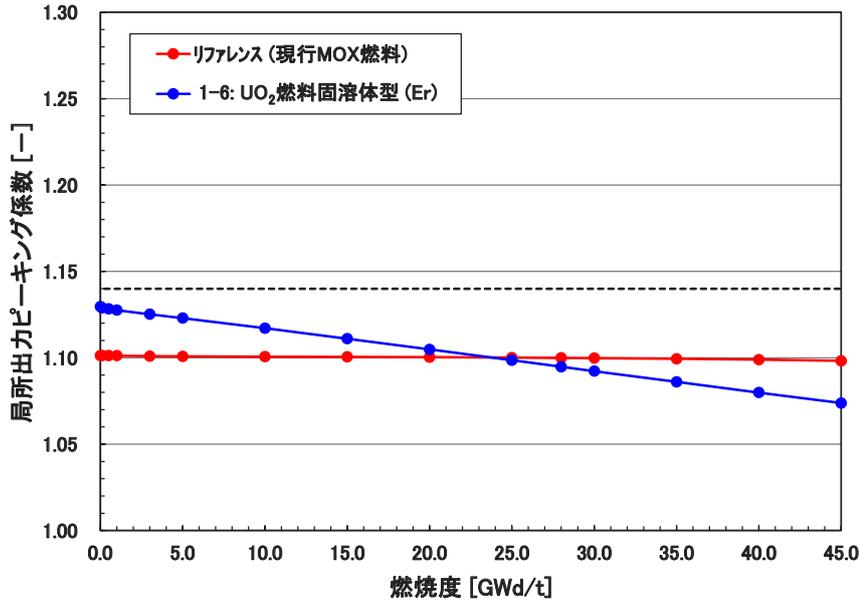


図 3.1.4(4)②-3 局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-6 : UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Er))  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

1.13	1.12	1.12	1.13	1.12	1.12	1.09	0.45	0.50
1.04	0.98	0.98	1.04	0.98	0.94	0.95	1.03	
GT	1.02	1.02	GT	1.06	1.02	0.95		
1.02	0.96	0.96	1.03	1.06	GT			
1.02	0.96	0.96	1.03	1.01				
GT	1.03	1.03	GT			GT		
1.03	0.96	0.96						
1.03	0.96							
IT			GT			GT		

[0 GWd/t]

1.11	1.11	1.11	1.11	1.10	1.10	1.07	0.53	0.59
1.04	0.98	0.98	1.04	0.98	0.95	0.96	1.04	
GT	1.02	1.02	GT	1.05	1.02	0.96		
1.02	0.96	0.96	1.03	1.06	GT			
1.02	0.96	0.97	1.03	1.01				
GT	1.02	1.02	GT			GT		
1.02	0.97	0.97						
1.02	0.97							
IT			GT			GT		

[15 GWd/t]

1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.06	0.60	0.65
1.03	0.99	0.99	1.03	0.99	0.96	0.97	1.05	
GT	1.02	1.02	GT	1.04	1.02	0.96		
1.02	0.97	0.97	1.03	1.05	GT			
1.02	0.97	0.97	1.02	1.01				
GT	1.02	1.02	GT			GT		
1.02	0.97	0.97						
1.02	0.97							
IT			GT			GT		

[30 GWd/t]

1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.04	0.64	0.69
1.03	0.99	0.99	1.03	0.99	0.97	0.99	1.06	
GT	1.02	1.02	GT	1.04	1.02	0.97		
1.01	0.97	0.97	1.02	1.04	GT			
1.02	0.97	0.97	1.02	1.01				
GT	1.02	1.02	GT			GT		
1.02	0.97	0.97						
1.02	0.97							
IT			GT			GT		

[45 GWd/t]

IT : 計装管 GT : 制御棒案内管

図 3.1.4(4)②-4 集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-6 : UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Er))

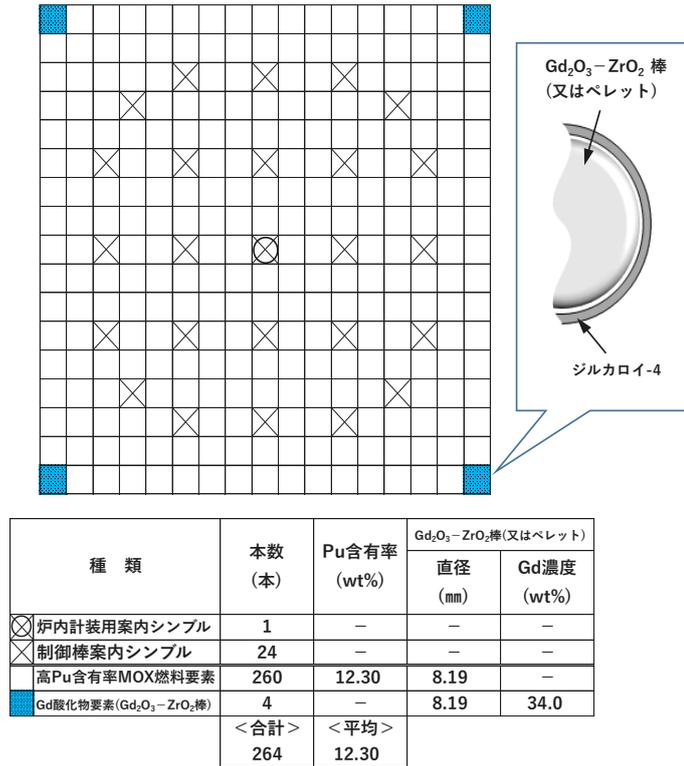


図 3.1.4(4)③-1 集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-7 : Gd 酸化物要素型)

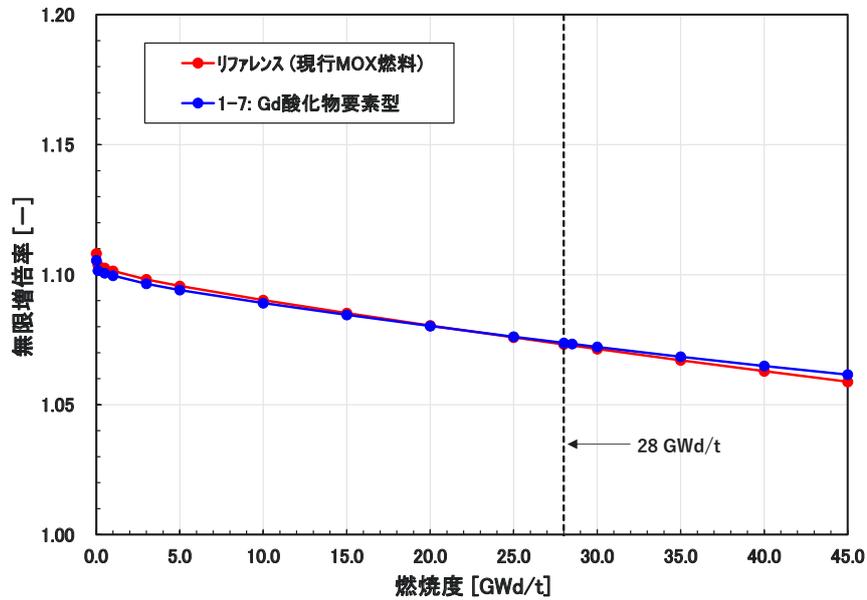


図 3.1.4(4)③-2 無限増倍率の燃焼度変化 (1-7 : Gd 酸化物要素型)  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

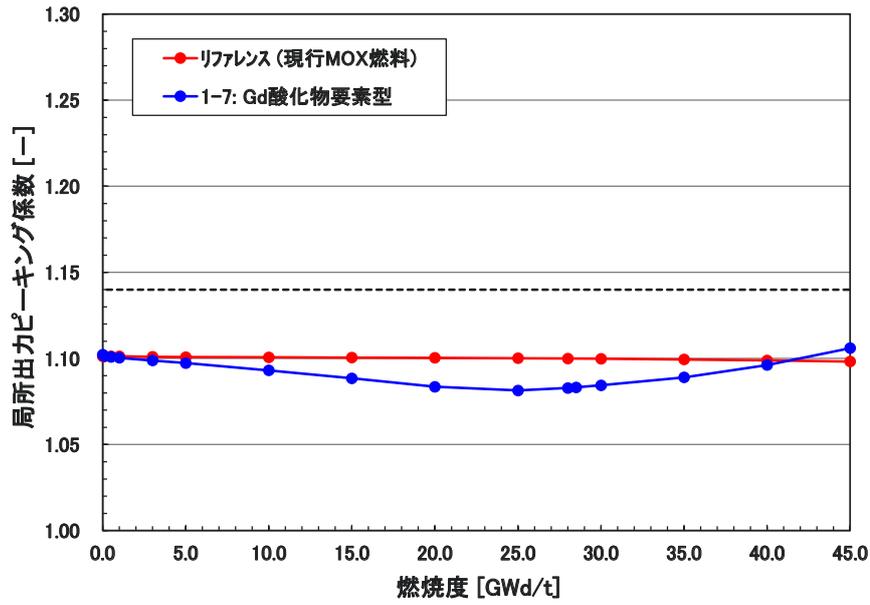


図 3.1.4(4)③-3 局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-7 : Gd 酸化物要素型)  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

1.10	1.10	1.10	1.10	1.09	1.08	1.07	1.08	Gd
1.02	0.96	0.96	1.02	0.95	0.92	0.90	0.92	
GT	1.00	1.00	GT	1.03	0.99	0.92		
1.00	0.94	0.94	1.01	1.04	GT			
1.00	0.94	0.94	1.01	0.98				
GT	1.00	1.00	GT			GT		
1.00	0.94	0.94						
1.00	0.94							
IT			GT			GT		

[0 GWd/t]

1.09	1.08	1.08	1.09	1.08	1.07	1.07	1.08	Gd
1.02	0.96	0.96	1.01	0.96	0.93	0.92	0.93	
GT	1.00	1.00	GT	1.03	0.99	0.93		
1.00	0.94	0.94	1.01	1.03	GT			
1.00	0.94	0.94	1.01	0.99				
GT	1.00	1.00	GT			GT		
1.00	0.95	0.95						
1.00	0.95							
IT			GT			GT		

[15 GWd/t]

1.07	1.07	1.07	1.07	1.06	1.06	1.06	1.08	Gd
1.02	0.97	0.97	1.01	0.97	0.94	0.93	0.95	
GT	1.00	1.00	GT	1.03	1.00	0.94		
1.00	0.95	0.95	1.01	1.03	GT			
1.00	0.95	0.95	1.01	0.99				
GT	1.00	1.00	GT			GT		
1.00	0.95	0.95						
1.00	0.95							
IT			GT			GT		

[30 GWd/t]

1.06	1.05	1.05	1.05	1.05	1.04	1.05	1.11	Gd
1.01	0.97	0.98	1.01	0.97	0.95	0.94	0.98	
GT	1.00	1.00	GT	1.02	1.00	0.95		
1.00	0.95	0.96	1.01	1.03	GT			
1.00	0.96	0.96	1.00	0.99				
GT	1.00	1.00	GT			GT		
1.00	0.96	0.96						
1.00	0.96							
IT			GT			GT		

[45 GWd/t]

IT : 計装管 GT : 制御棒案内管 Gd : Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - ZrO<sub>2</sub> 棒

図 3.1.4(4)③-4 集合体内燃料要素の局所出力分布 (Gd 酸化物要素型)

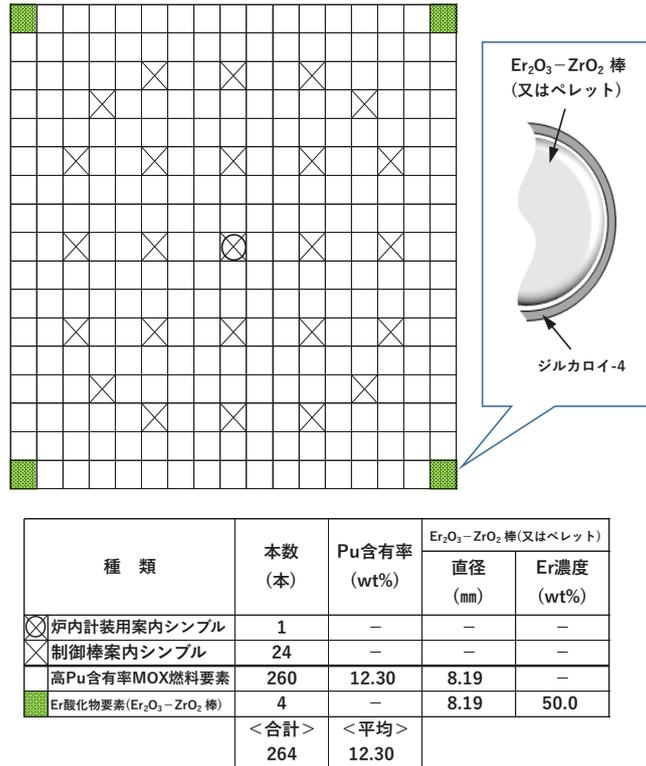


図 3.1.4(4)④-1 集合体内の燃料要素配置と仕様 (1-7 : Er 酸化物要素型)

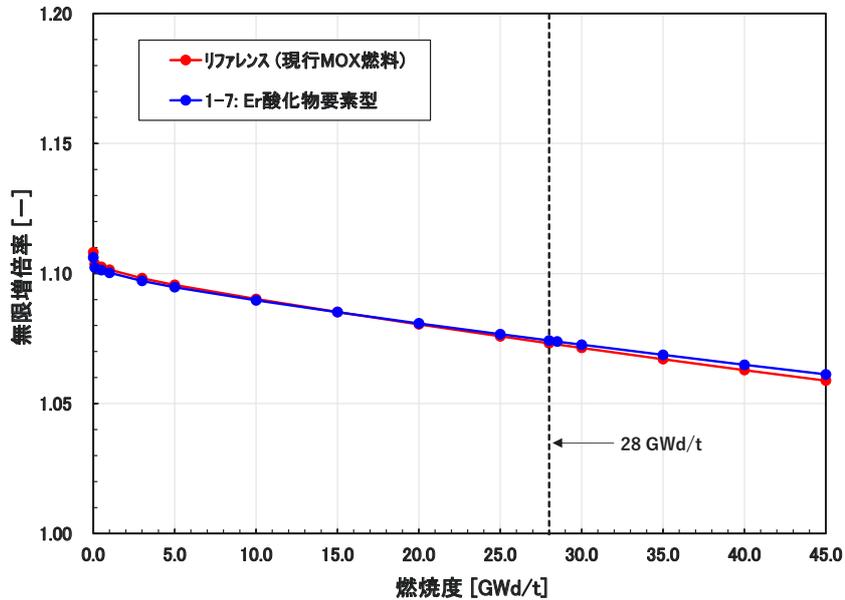


図 3.1.4(4)④-2 無限増倍率の燃焼度変化 (1-7 : Er 酸化物要素型)  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

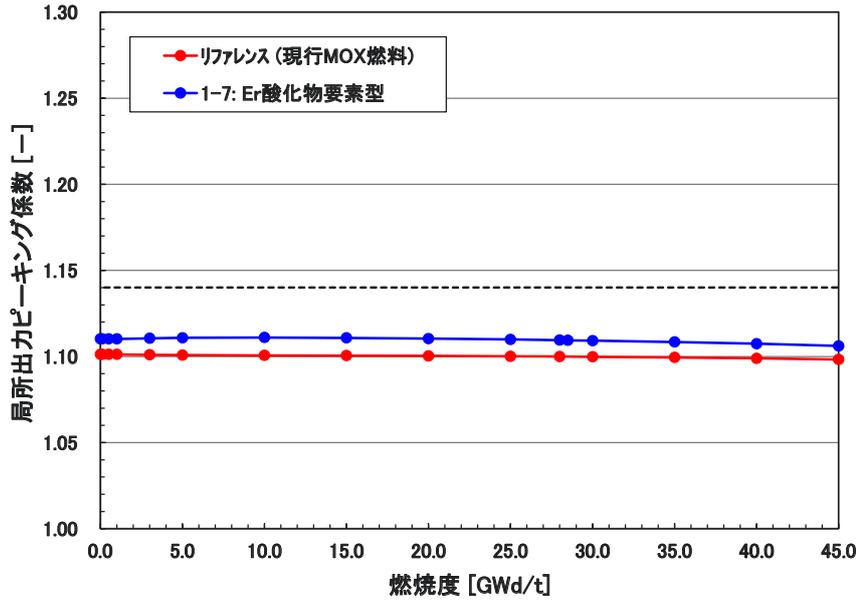


図 3.1.4(4)④-3 局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 (1-7 : Er 酸化物要素型)  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

1.10	1.10	1.10	1.10	1.09	1.08	1.08	1.11	Er
1.01	0.96	0.96	1.01	0.95	0.91	0.91	0.93	
GT	1.00	1.00	GT	1.03	0.99	0.92		
1.00	0.94	0.94	1.01	1.04	GT			
1.00	0.94	0.94	1.01	0.98				
GT	1.00	1.00	GT			GT		
1.00	0.94	0.94						
1.00	0.94							
IT			GT			GT		

[0 GWd/t]

1.09	1.08	1.08	1.08	1.08	1.07	1.07	1.11	Er
1.01	0.96	0.96	1.01	0.96	0.92	0.92	0.95	
GT	1.00	1.00	GT	1.03	0.99	0.93		
1.00	0.94	0.94	1.01	1.03	GT			
1.00	0.94	0.94	1.01	0.98				
GT	1.00	1.00	GT			GT		
1.00	0.94	0.94						
1.00	0.94							
IT			GT			GT		

[15 GWd/t]

1.07	1.07	1.07	1.07	1.06	1.06	1.06	1.11	Er
1.01	0.97	0.97	1.01	0.97	0.94	0.93	0.96	
GT	1.00	1.00	GT	1.02	0.99	0.94		
1.00	0.95	0.95	1.01	1.03	GT			
1.00	0.95	0.95	1.00	0.99				
GT	1.00	1.00	GT			GT		
1.00	0.95	0.95						
1.00	0.95							
IT			GT			GT		

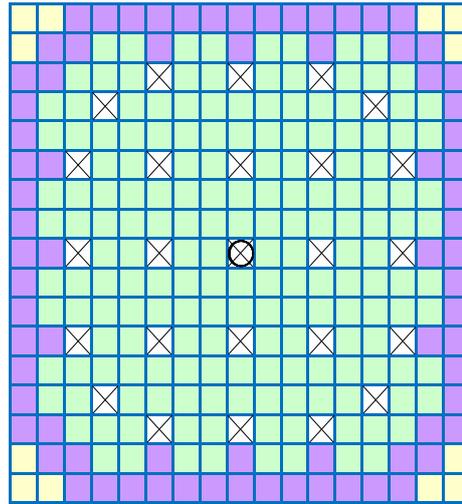
[30 GWd/t]

1.06	1.05	1.05	1.05	1.05	1.04	1.05	1.11	Er
1.01	0.97	0.97	1.01	0.97	0.95	0.94	0.98	
GT	1.00	1.00	GT	1.02	1.00	0.95		
1.00	0.95	0.96	1.01	1.03	GT			
1.00	0.96	0.96	1.00	0.99				
GT	1.00	1.00	GT			GT		
1.00	0.96	0.96						
1.00	0.96							
IT			GT			GT		

[45 GWd/t]

IT : 計装管 GT : 制御棒案内管 Er : Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - ZrO<sub>2</sub> 棒

図 3.1.4(4)④-4 集合体内燃料要素の局所出力分布 (1-7 : Er 酸化物要素型)



種 類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	Pu含有 率比	ペレット 直径(mm)	被覆管	
					材料	肉厚(mm)
⊗ 炉内計装用案内シムル	1	—	—	—	ODS鋼	0.57
⊗ 制御棒案内シムル	24	—	—	—		
高Pu含有率MOX燃料要素	176	14.56	1.16	8.19		
中Pu含有率MOX燃料要素	76	8.87	0.71			
低Pu含有率MOX燃料要素	12	6.44	0.51			
<合計>	264	<平均> 12.55				

Pu富化度の上限値「約13wt%」を超過

図 3.1.4(5)①-1 集合体内の燃料要素配置と仕様 ([参考] 2-1 : ATF (Fe 系) 被覆管型)

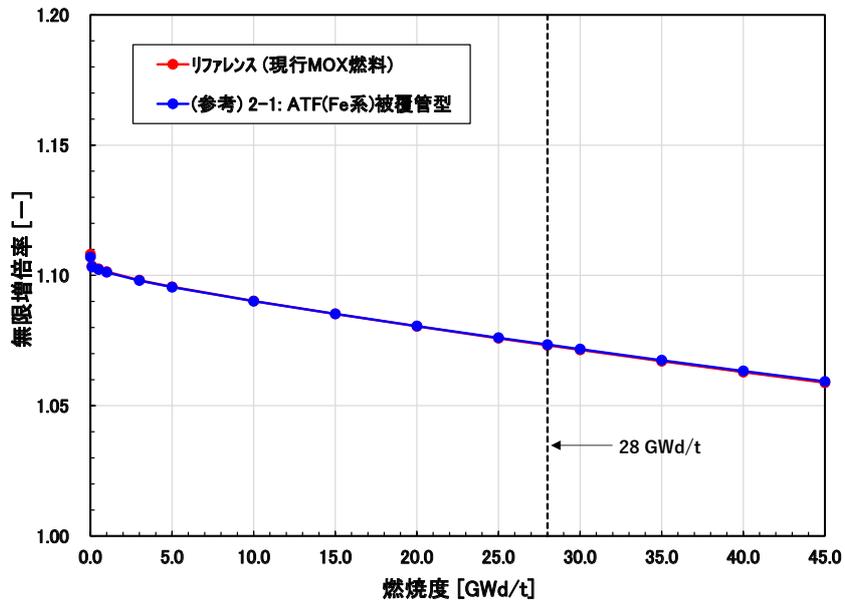


図 3.1.4(5)①-2 無限増倍率の燃焼度変化 ([参考] 2-1 : ATF (Fe 系) 被覆管型)  
(現行 MOX 燃料 (リアレンス) との比較)

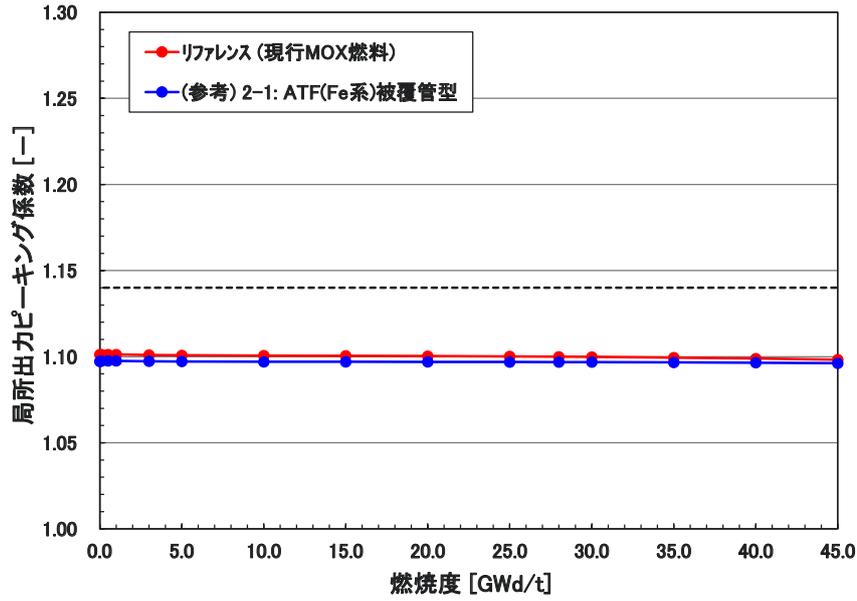


図 3.1.4(5)①-3 局所出力ピーキング係数の燃焼度変化 ([参考] 2-1 : ATF (Fe 系) 被覆管型)  
(現行 MOX 燃料 (リファレンス) との比較)

0.97	0.96	0.96	0.96	0.95	0.94	0.97	0.85	0.96
0.87	1.06	1.06	0.87	1.05	1.02	0.80	0.86	
GT	1.06	1.06	GT	1.10	1.06	1.02		
1.06	0.99	0.99	1.06	1.10	GT			
1.06	0.99	0.99	1.06	1.04				
GT	1.06	1.06	GT			GT		
1.06	1.00	1.00						
1.06	1.00							
IT			GT			GT		

[0 GWd/t]

0.95	0.94	0.94	0.95	0.94	0.93	0.95	0.84	0.92
0.87	1.06	1.06	0.87	1.06	1.03	0.81	0.87	
GT	1.07	1.07	GT	1.10	1.07	1.02		
1.06	1.00	1.00	1.07	1.10	GT			
1.06	1.00	1.00	1.07	1.04				
GT	1.06	1.06	GT			GT		
1.06	1.00	1.00						
1.06	1.00							
IT			GT			GT		

[15 GWd/t]

0.94	0.93	0.93	0.93	0.93	0.92	0.94	0.82	0.88
0.87	1.07	1.07	0.87	1.07	1.04	0.82	0.87	
GT	1.07	1.07	GT	1.10	1.07	1.03		
1.06	1.01	1.01	1.07	1.09	GT			
1.06	1.01	1.01	1.07	1.05				
GT	1.06	1.06	GT			GT		
1.06	1.01	1.01						
1.06	1.01							
IT			GT			GT		

[30 GWd/t]

0.92	0.92	0.92	0.92	0.91	0.91	0.92	0.81	0.85
0.88	1.07	1.07	0.88	1.07	1.05	0.84	0.88	
GT	1.07	1.07	GT	1.10	1.07	1.04		
1.06	1.02	1.02	1.07	1.09	GT			
1.06	1.02	1.02	1.07	1.05				
GT	1.06	1.06	GT			GT		
1.07	1.02	1.02						
1.06	1.02							
IT			GT			GT		

[45 GWd/t]

IT : 計装管 GT : 制御棒案内管

図 3.1.4(5)①-4 集合体内燃料要素の局所出力分布 ([参考] 2-1 : ATF (Fe 系) 被覆管型)

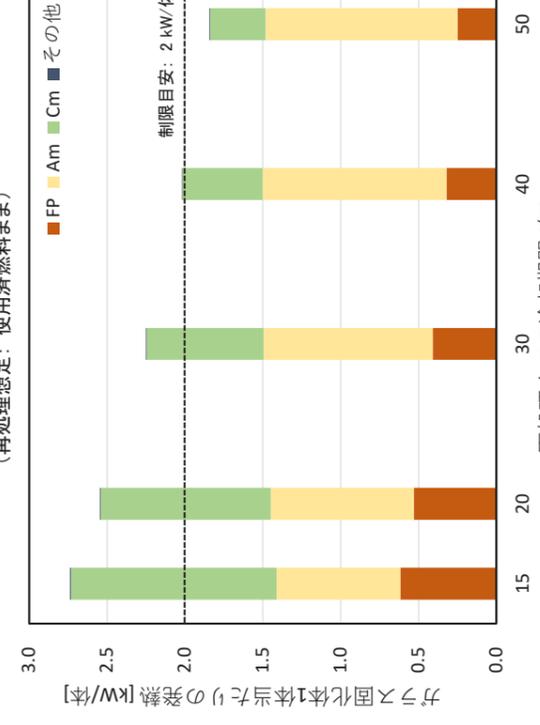
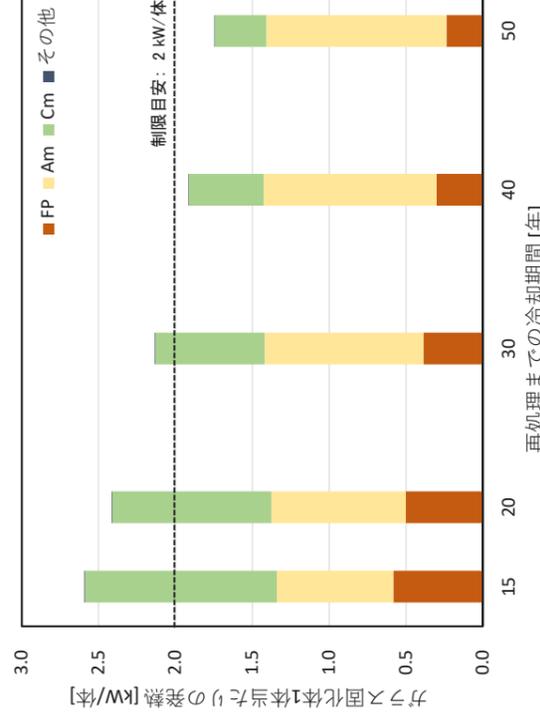
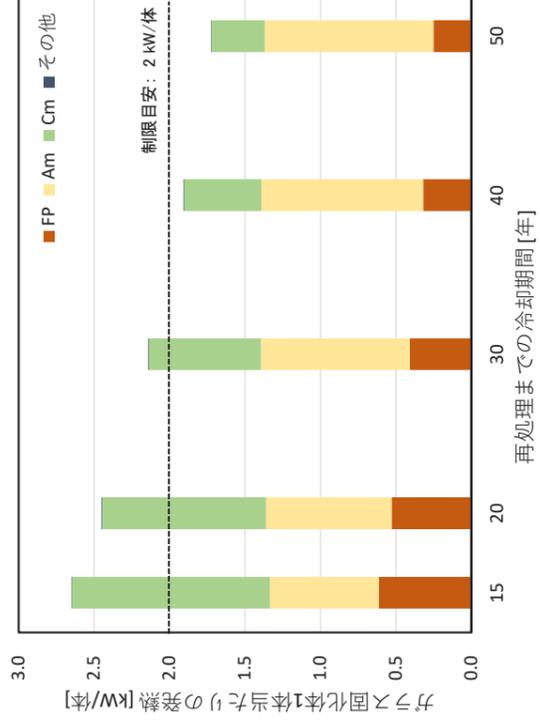
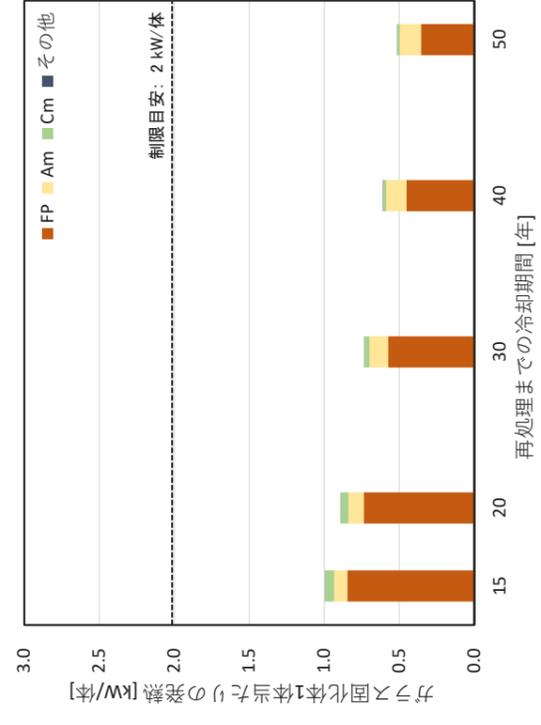
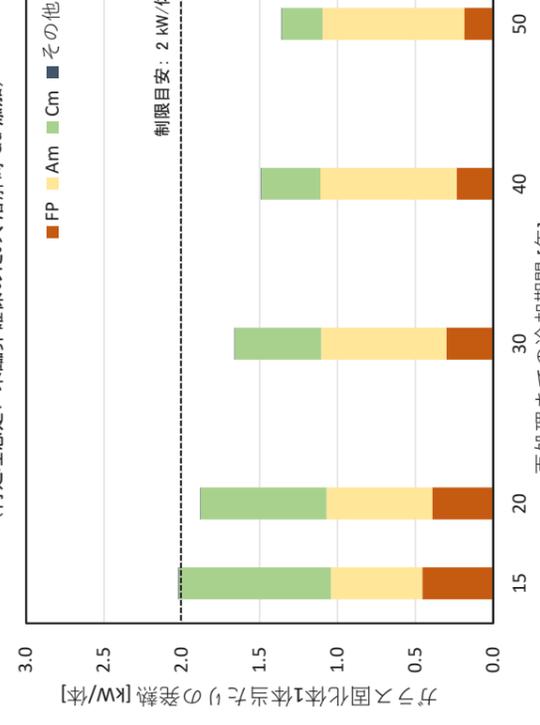
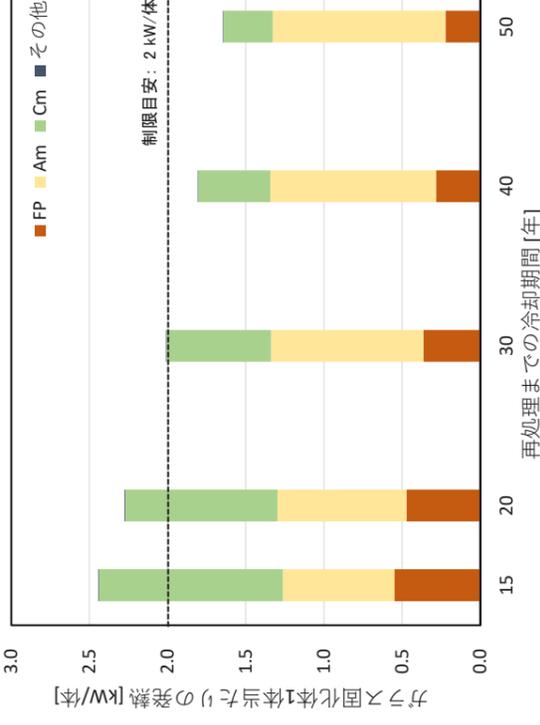
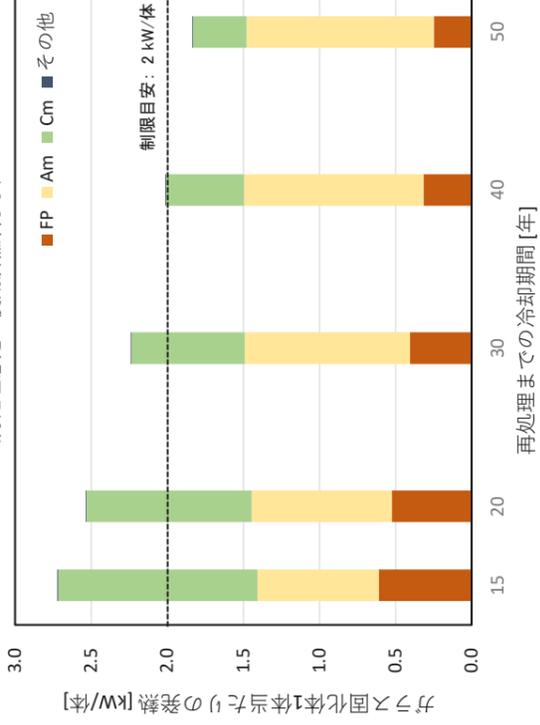
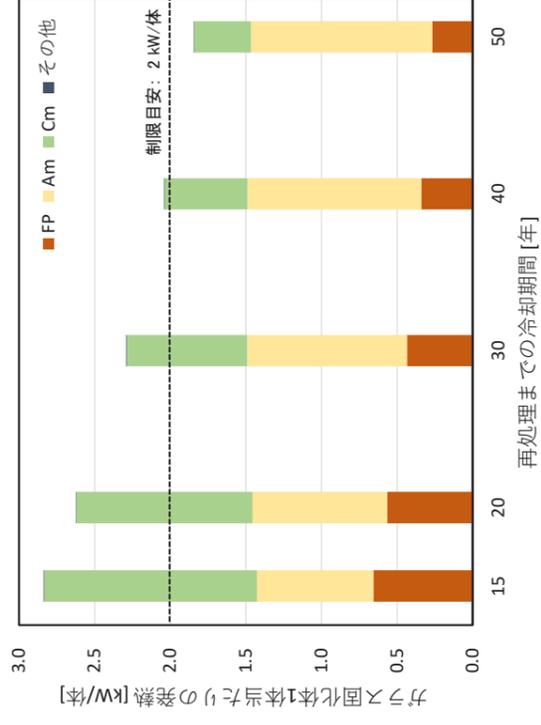


図 3.3-1 (1/3) ガラス固化体 1 体当たりの発熱量 (FP 含有率基準) 及びその内訳 (FP、Am、Cm) の比較

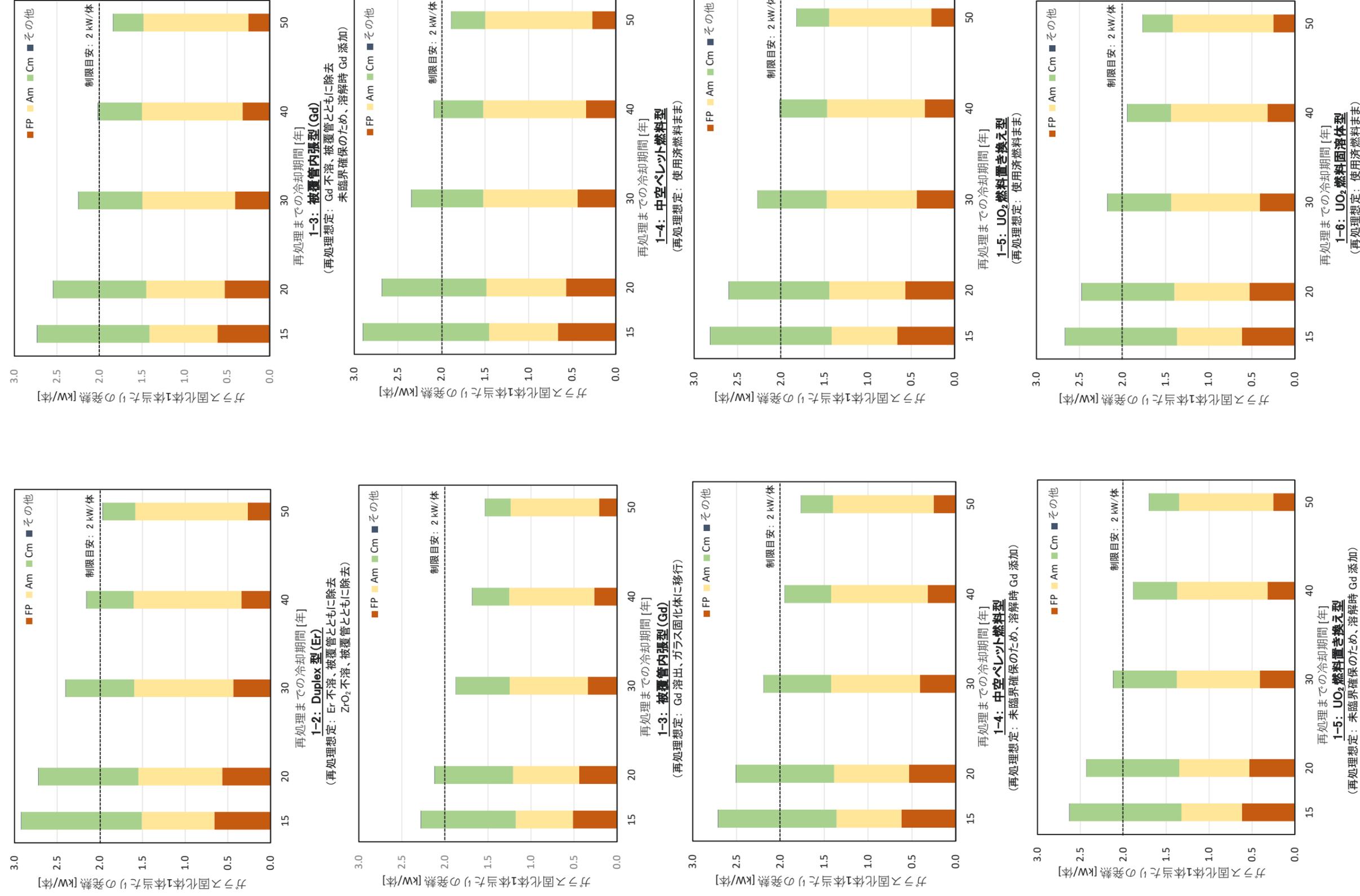


図 3.3-1 (2/3) ガラス固化体 1 体当たりの発熱量 (FP 含有率基準) 及びその内訳 (FP、Am、Cm) の比較

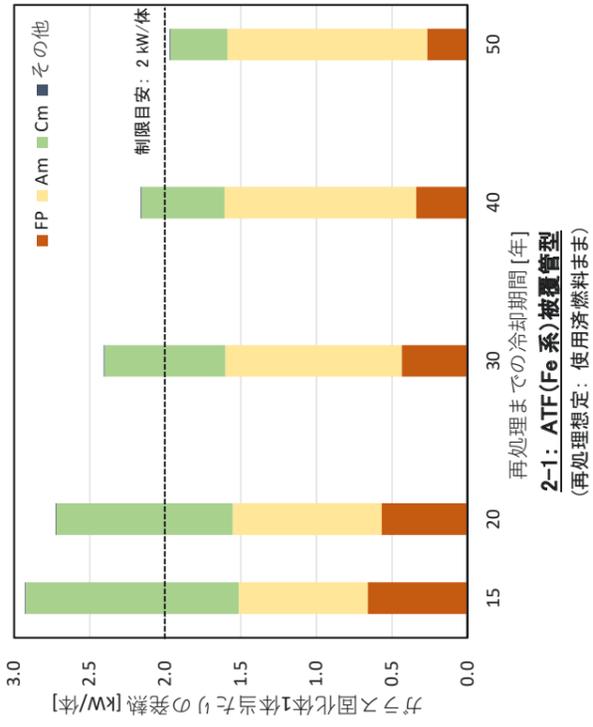
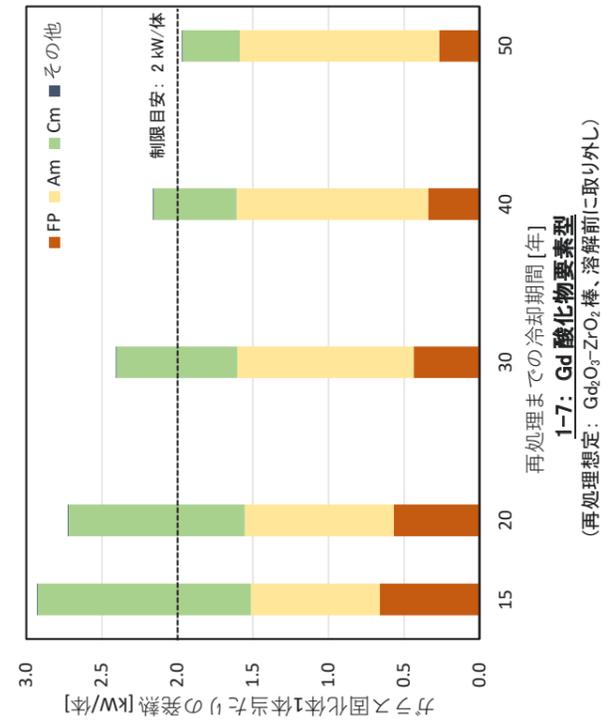
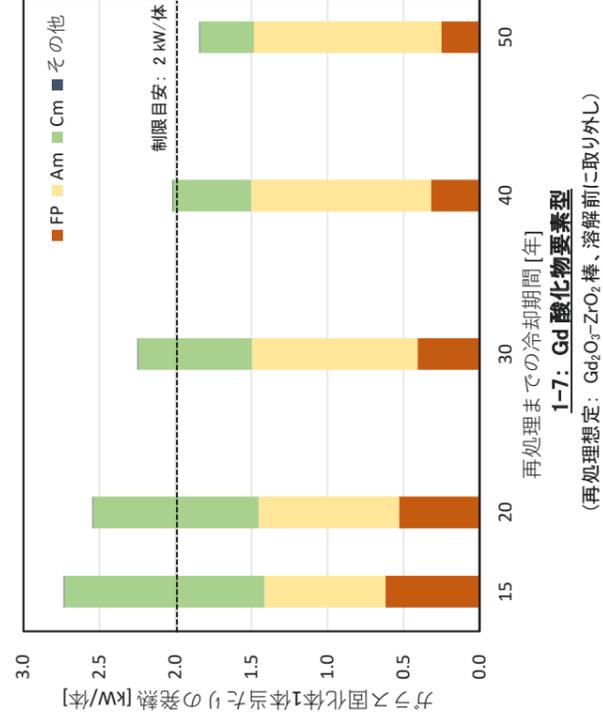
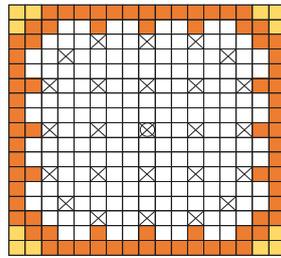


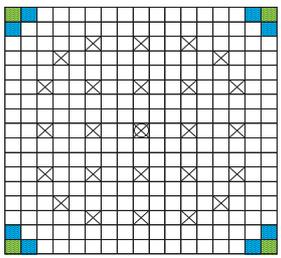
図 3.3-1(3/3) ガラス固化体 1 体当たりの発熱量 (FP 含有率基準) 及びその内訳 (FP, Am, Cm) の比較

リファレンス (現行 MOX 燃料)



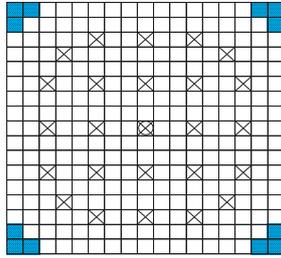
種類	本数 (本)	U濃度 (wt%)	Pu含有率 (wt%)	核分裂性 Pu濃化度 (wt%)	酸化度比
炉内計装用案内シンプル	1	—	—	—	—
制御棒案内シンプル	24	—	—	—	—
高Pu含有率MOX燃料要素	176	0.25	12.30	7.95	1.16
中Pu含有率MOX燃料要素	76	0.25	7.50	4.85	0.71
低Pu含有率MOX燃料要素	12	0.25	5.44	3.52	0.51
<合計>	264	<平均>	<平均>	<平均>	—
		0.25	10.61	6.86	—

1-1: MOX 燃料固溶体型 (Gd)



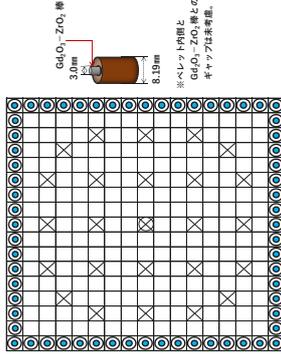
種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	Gd濃度 (wt%)
炉内計装用案内シンプル	1	—	—
制御棒案内シンプル	24	—	—
高Pu含有率MOX燃料要素	252	12.30	—
MOX-Gd燃料要素 (固溶体型)①	8	12.30	5.0
MOX-Gd燃料要素 (固溶体型)②	4	12.30	11.0
<合計>	264	<平均>	<平均>
		12.30	—

1-1: MOX 燃料固溶体型 (Er)



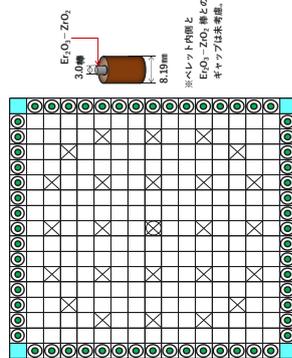
種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	Er濃度 (wt%)
炉内計装用案内シンプル	1	—	—
制御棒案内シンプル	24	—	—
高Pu含有率MOX燃料要素	252	12.30	—
MOX-Er燃料要素 (固溶体型)	12	12.30	12.0
<合計>	264	<平均>	<平均>
		12.30	—

1-2: Duplex 型 (Gd)



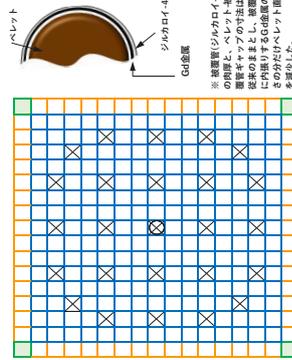
種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	Gd濃度 (wt%)	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒直径 (mm)
炉内計装用案内シンプル	1	—	—	—
制御棒案内シンプル	24	—	—	—
高Pu含有率MOX燃料要素	200	12.30	—	—
MOX-Gd燃料要素 (Duplex型)	64	12.30	16.0	3.0
<合計>	264	<平均>	<平均>	—
		12.30	—	—

1-2: Duplex 型 (Er)



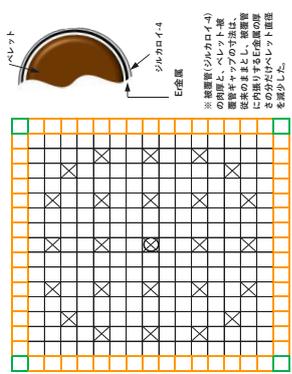
種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	Er濃度 (wt%)	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒直径 (mm)
炉内計装用案内シンプル	1	—	—	—
制御棒案内シンプル	24	—	—	—
高Pu含有率MOX燃料要素	200	12.30	—	—
中Pu含有率MOX燃料要素	4	9.00	—	—
MOX-E燃料 (Duplex型)	60	12.30	22.0	3.0
<合計>	264	<平均>	<平均>	—
		12.25	—	—

1-3: 被覆管内張型 (Gd)



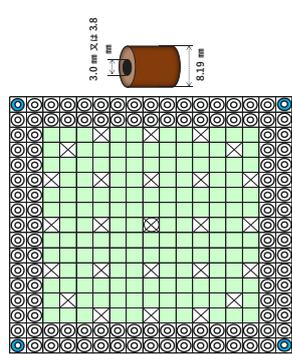
種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	ベレット直径 (mm)	Gd内張り厚さ (mm)
炉内計装用案内シンプル	1	—	—	—
制御棒案内シンプル	24	—	—	—
高Pu含有率MOX燃料要素①	200	12.30	8.17	0.01
高Pu含有率MOX燃料要素②	60	12.30	8.03	0.08
高Pu含有率MOX燃料要素③	4	10.00	8.03	0.08
<合計>	264	<平均>	<平均>	<平均>
		12.27	—	—

1-3: 被覆管内張型 (Er)



種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	ベレット直径 (mm)	Er内張り厚さ (mm)
炉内計装用案内シンプル	1	—	—	—
制御棒案内シンプル	24	—	—	—
高Pu含有率MOX燃料要素①	200	12.30	8.19	0.04
高Pu含有率MOX燃料要素②	60	12.30	8.01	0.09
高Pu含有率MOX燃料要素③	4	12.30	8.01	0.09
<合計>	264	<平均>	<平均>	<平均>
		12.30	—	—

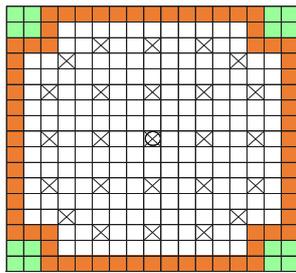
1-4: 中空ペレット燃料型



種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	中空径 (mm)
炉内計装用案内シンプル	1	—	—
制御棒案内シンプル	24	—	—
高Pu含有率MOX燃料要素	144	11.28	—
中空ペレットMOX燃料要素①	116	11.28	3.0
中空ペレットMOX燃料要素②	4	11.28	3.8
<合計>	264	<平均>	<平均>
		11.28	—

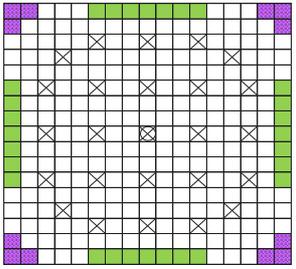
図 3.4-1(1/2) MOX 高度化燃料各候補概念の燃料集合体内要素配置・仕様まとめ

1-5: UO<sub>2</sub>燃料置き換え型



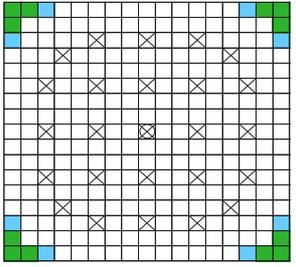
種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	U濃縮度 (wt%)
炉内計装用案内シムプル	1	—	—
制御棒案内シムプル	24	—	—
高Pu含有率MOX燃料要素	184	12.30	0.25
中Pu含有率MOX燃料要素	64	7.50	0.25
UO <sub>2</sub> 燃料要素	16	—	2.00
<合計>	264	11.06	0.36

1-6: UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Gd)



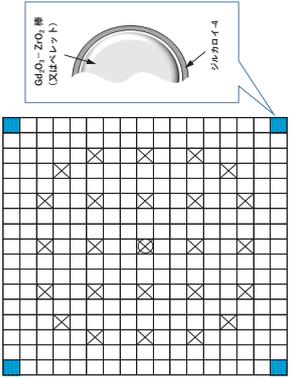
種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	U濃縮度 (wt%)	Gd濃度 (wt%)
炉内計装用案内シムプル	1	—	—	—
制御棒案内シムプル	24	—	—	—
高Pu含有率MOX燃料要素①	224	12.30	0.25	—
高Pu含有率MOX燃料要素②	28	11.00	0.25	—
UO <sub>2</sub> -Er燃料要素 (固溶体型)	12	—	4.90	7.5
<合計>	264	12.16	0.46	—

1-6: UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Er)



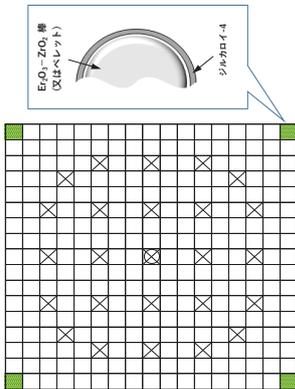
種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	U濃縮度 (wt%)	Er濃縮度 (wt%)
炉内計装用案内シムプル	1	—	—	—
制御棒案内シムプル	24	—	—	—
高Pu含有率MOX燃料要素①	244	12.30	0.25	—
高Pu含有率MOX燃料要素②	8	11.00	0.25	—
UO <sub>2</sub> -Er燃料要素 (固溶体型)	12	—	4.90	12.0
<合計>	264	12.26	0.46	—

1-7: Gd酸化物要素型



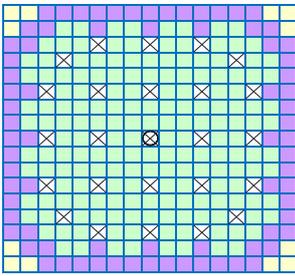
種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	Gd濃度 (wt%)
炉内計装用案内シムプル	1	—	—
制御棒案内シムプル	24	—	—
高Pu含有率MOX燃料要素	260	12.30	—
Gd酸化物要素 (Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 系)	4	—	34.0
<合計>	264	<平均>	12.30

1-7: Er酸化物要素型



種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	Er濃縮度 (wt%)
炉内計装用案内シムプル	1	—	—
制御棒案内シムプル	24	—	—
高Pu含有率MOX燃料要素	260	12.30	—
Er酸化物要素 (Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 系)	4	—	50.0
<合計>	264	<平均>	12.30

2-1: ATF (Fe系) 被覆管型



種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	Pu含有率 比率	被覆管	
				ベレット 直径 (mm)	肉厚 (mm)
炉内計装用案内シムプル	1	—	—	—	—
制御棒案内シムプル	24	—	—	—	—
高Pu含有率MOX燃料要素	176	14.56	1.16	—	0.57
中Pu含有率MOX燃料要素	76	8.87	0.71	8.19	—
低Pu含有率MOX燃料要素	12	6.44	0.51	—	—
<合計>	264	12.55	<平均>	Pu酸化物の上層膜 (約1.3wt%) を考慮	

図 3.4-1(2/2) MOX 高度化燃料各候補概念の燃料集合体内要素配置・仕様まとめ

## 4. 選定した燃料概念に関する詳細検討

### 4.1 核燃料サイクル諸量への影響に関する検討

前章で Pu 装荷量の増加を可能とする MOX 高度化燃料概念の検討を行い、「1-6 UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Gd)」が最も有望との結果となり、既存のプルサーマル炉でも 15%程度の Pu 装荷量の増加が可能となる見通しが得られた。この Pu 装荷量の 15%程度の増加について、実際にプルサーマルプラントの必要基数や核燃料サイクル諸量にどの程度影響するのかを定量的に把握する必要がある。そこで、本章では、前章で選定された 1-6 の MOX 高度化燃料概念を適用した炉心を対象に、核燃料サイクルマスバランス解析コードを用いた核燃料サイクル諸量に関する概略評価を行うこととした。

具体的な解析の内容としては、将来、国内再処理工場がフル稼働する時に想定される年間 Pu 生成量を今回選定した MOX 高度化燃料概念の炉心で全て消費することを想定し、その時のプルサーマルプラント総出力を求め、現行の MOX 燃料炉心の場合との比較を行うとともに、その出力条件における諸量の概略的な評価を行うこととした。評価においては、MOX 高度化燃料のメリットとして、MOX 燃料の製造量や中間貯蔵量への影響が重要であることから、特に、これらの項目に着目し評価を行うこととした。

#### 4.1.1 核燃料サイクル諸量評価における解析手法・条件

解析手法・条件として、今回の核燃料サイクル諸量評価で想定した年間 Pu 生成量、対象炉心、主要な解析条件、解析コードについて示す。

##### (1) 年間 Pu 生成量

将来、国内再処理工場のフル稼働を想定した時の年間 Pu 生成量は 6.6 t/y となる。これは、U 燃料を年間 800 t 処理した場合に回収される Pu 量に相当するものである。この Pu 生成量 6.6 t/y を今回選定した MOX 高度化燃料概念の炉心で全て消費することを想定し、それに必要となるプルサーマルプラント総出力を求め、その出力条件における諸量の概略評価を行う。

##### (2) 対象炉心

対象炉心について、前章で PWR の MOX 高度化燃料概念として選定した「1-6 UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Gd)」を適用した炉心を対象とする。比較のため、現行の MOX 燃料炉心（以下、MOX リファレンス燃料炉心）についても解析を行う。また、参考として、高燃焼度化による核燃料サイクル諸量への影響の把握に資するため、「MOX リファレンス燃料炉心」と「1-6 UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Gd)」をベースに高燃焼度化した炉心についても解析を行う。以上、炉心としては、以下の 4 種類を解析対象とする。

- ① MOX リファレンス燃料炉心
- ② MOX 高度化燃料炉心 (1-6 UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Gd))
- ③ (参考) MOX リファレンス高燃焼度燃料炉心
- ④ (参考) MOX 高度化高燃焼度燃料炉心 (1-6 UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Gd))

### (3) 解析条件

上記の各対象炉心について、燃焼度、MOX バッチ数、MOX 燃料割合、MOX 集合体割合、平均 Pu 含有率等の主要な解析条件を表 4.1-1 にまとめて示した。

ここで、(参考) の高燃焼度燃料炉心の③と④は、高燃焼度化による影響を調査するため、集合体セル計算ベースの評価で暫定的に設定した炉心であり、詳細は 5.2 節で紹介する。高燃焼度炉心の条件としては、本諸量評価においては、概略的に 45 GWd/t から 50 GWd/t への高燃焼度化、バッチ数は 3 バッチから 4 バッチへの増加とした。

また、MOX 燃料割合については、現状の PWR の実績から 1/4 とした。1/4 MOX 炉心の定義は、MOX 燃料要素数の割合で 1/4 である。そのため、 $\text{UO}_2\text{-Gd}$  燃料要素コーナ一設置型燃料のように MOX 集合体内に  $\text{UO}_2\text{-Gd}$  燃料要素が一部装荷される燃料では、その分 MOX 集合体の数が増加することになり、表中の MOX 集合体割合は MOX リファレンス燃料炉心の 25% から若干増加し 26% となっている。

年間 Pu 使用量としては、前述のとおり、国内再処理工場のフル稼働を想定した時の年間 Pu 生成量に対応し 6.6 t/y としている。

### (4) 解析コード

今回の核燃料サイクル諸量評価で使用する解析コードとしては、東京科学大学と JAEA で共同開発し公開されている核燃料サイクルマスバランス解析コード NMB4.0<sup>[4-1, 4-2]</sup>を使用した。解析対象の各炉心のインプットについては、NMB4.0 コードに標準で組み込まれている PWR の代表的なプルサーマル炉のデータをベースに一部書き換えて (Override) 用いることとした。具体的な対応を以下に示す。

- ・基本的な仕様・条件については、NMB4.0 コードに標準で組み込まれている PWR のプルサーマル炉の中燃焼度 (MB) のデータをベースとして、プラント関係のデータは [PlantIndex] の pPWR-MOX-MB、燃料関係のデータは [FuelIndex] の fPWR-MOX-MB の一部の仕様・条件を Override により書き換えて対応した。
- ・諸量解析の燃焼計算に用いる各核種の断面積について、高度化燃料炉心では燃料中に可燃性毒物 (Gd) を含むことから見直す必要がある。そのため、核計算コード SRAC で集合体セル計算を行い、その結果に基づき 1 群断面積を作成し、NMB4.0 コード内の断面積データである X\_PWR45-MOX のシリーズを置き換えることとした。
- ・高燃焼度のケースでは、NMB4.0 コードに標準で組み込まれている PWR のプルサーマル炉の高燃焼度 (HB) のデータである [PlantIndex] の pPWR-MOX-HB、[FuelIndex] の fPWR-MOX-HB をベースに、一部の仕様・条件を Override により書き換えて対応した。高燃焼度のケースの断面積については、上と同じく、SRAC で集合体セル計算を行い、X\_PWR60-MOX のシリーズの置き換えを行った。

#### 4.1.2 核燃料サイクル諸量解析の評価結果

核燃料サイクル諸量解析の結果を表 4.1-2 に、各炉心の結果 (① MOX リファレンス燃料炉心、② MOX 高度化燃料炉心 (1-6  $\text{UO}_2$  燃料固溶体型 (Gd))、③ (参考) MOX リファレンス高燃焼度燃料炉心、④ (参考) MOX 高度化高燃焼度燃料炉心 (1-6  $\text{UO}_2$  燃料固溶体

型 (Gd)) を比較してまとめた。

評価項目としては、Pu バランスへの影響について、プルサーマルプラント全基の出力総計である「プラント総出力」、MOX 集合体製造量への影響について「MOX 燃料製造量」、中間貯蔵への影響について「MOX 燃料中間貯蔵量 (2050 年時点)」、核燃料サイクルへの影響のうち、資源有効利用について「年間使用 U 量」、廃棄物減容・有害度低減について「使用済 MOX 中 MA 量 (2050 年時点)」と「使用済 MOX 中 FP 量 (2050 年時点)」を比較して示した。また、各評価項目について、① MOX リファレンス燃料炉心と比較した評価結果を星取表 (◎、○、△、×評価) で示した。また、表 4.1-3 には、各対象炉心における各評価項目の特徴を整理して示した。各対象炉心における主要な特徴については、以下のとおりである。

② MOX 高度化燃料炉心 (1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd))

- ・プラント総出力： Pu 装荷量の 15%の増加により 2.0 GWe 低減 (100 万 kWe プラント 2.0 基相当)。
- ・MOX 集合体製造量： Pu 装荷量の 15%の増加により 13%減少、ただし、総出力当たりの製造量ではリファレンスと同等。
- ・中間貯蔵量： 製造量と同様に 13%減少。総出力当たりの中間貯蔵量もリファレンスと同等。
- ・年間使用 U 量 (総出力当たり)： MOX 集合体割合が同等のため、年間使用 U 量も同等。
- ・MA・FP 量 (総出力当たり)： MA は Pu 装荷量増加の効果により微増、FP は同等。

③ (参考) MOX リファレンス高燃焼度燃料炉心

- ・プラント総出力： 高燃焼度化に伴い Pu 含有率は増加するが、バッチ数も増加 (3→4) するため、リファレンスと同等。
- ・MOX 集合体製造量： Pu 装荷量の 15%の増加により 10%程度減少。さらに、高燃焼度化により総出力当たりも減少。
- ・中間貯蔵量： 8%減少、総出力当たりも減少。
- ・年間使用 U 量 (総出力当たり)： MOX 集合体割合が同等のため、年間使用 U 量も同等。

MA・FP 量 (総出力当たり)： MA は Pu 装荷量増加の効果により微増、FP は同等。

④ (参考) MOX 高度化高燃焼度燃料炉心 (1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd))

- ・平均 Pu 含有率が同等であるため、諸量評価の結果は③ MOX リファレンス高燃焼度燃料炉心と同等。
- ・ただし、MOX 高度化燃料では、UO<sub>2</sub>-Gd 要素により集合体内の出力が平坦化されており、最大 Pu 含有率の低減等の効果は期待できる。

4.1.3 核燃料サイクル諸量評価のまとめ

MOX 高度化燃料概念の導入による Pu 装荷量の 15%程度の増加が、実際にプルサーマルプラントの必要基数や核燃料サイクル諸量にどの程度影響するのかを定量的に把握する

ため、核燃料サイクル諸量に関する概略評価を行った。その結果、以下の見通しが得られた。

- ・MOX 高度化燃料（「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型（Gd）」）とすることで、プルサーマルプラント総出力を MOX リファレンス燃料炉心の約 12 GWe から 2 GWe 程度低減でき（100 万 kWe プラント 2 基相当）、プラント基数の柔軟性に有効となることを定量的に確認した。
- ・MOX 集合体の製造量や中間貯蔵量は、Pu 装荷量の増加により 13%程度減少する結果となり、MOX 集合体製造量が減ることで経済性は向上し、中間貯蔵量も減少することを定量的に確認した。
- ・高燃焼度化する場合、Pu 装荷量は増えるがバッチ数も増えるため、プルサーマルプラント総出力（運転基数）低減の効果は限定的である結果であった（MOX リファレンス燃料炉心と同等）。ただし、MOX 燃料製造量（集合体数）・中間貯蔵量については削減の効果があり、将来において、プルサーマル炉の必要期間が長期化するような場合、これらの点で有効となる見通しが得られた。

#### （参考）MOX 高度化高燃焼度燃料炉心の追加ケース

④ MOX 高度化高燃焼度燃料炉心について、上述の解析では、現行の Pu 含有率制限（13 wt%）の範囲内で、③ MOX リファレンス高燃焼度燃料炉心と同程度の Pu 含有率を設定していたので、諸量評価自体には差が生じない結果であった。他方、高燃焼度化に向けて、仮に現状の Pu 含有率制限（13 wt%）を幾分緩和できれば、その場合、MOX 高度化概念が効果的に働き、高燃焼度燃料でも Pu バランスへの影響が改善され、プラント総出力を低減できる可能性が考えられる。そこで、追加ケースとして、暫定的に 15 wt%までの緩和を想定したケースの解析を行い、諸量評価への影響を調査することとした。

この追加ケースの解析条件を表 4.1-4 に示した。ここで、平均 Pu 含有率を 15.0 wt%としている。追加ケースの解析結果を表 4.1-5 に、表 4.1-2 と同様の評価項目について整理して示した。ここで、プラント総出力は、高燃焼度化に伴いバッチ数は増加するものの、13 wt%制限の場合から大きく減少し 9.5 GWe と、リファレンスとの差は 2.7 GWe と大きく増加することが確認された（100 万 kWe プラント 2.7 基相当）。また、MOX 燃料製造量や MOX 燃料中間貯蔵量の削減量についても、13 wt%制限の場合よりさらに改善される結果となることも確認された。

この様に、Pu 含有率制限を従来 of 指針（13 wt%）より緩和できれば、MOX 高度化の効果により成立性（臨界性、出力ピーキング）を有しつつ、Pu 装荷量は更なる増加の可能性を有することが確認された。一方で、Pu 含有率制限を緩和する場合、Pu 装荷量の大幅増加に伴い、高燃焼度燃料でも Pu の無駄遣い（照射後燃え残り Pu の増加）は増加することになる。もともと高燃焼度化は、MOX 燃料高度化による Pu 装荷量の増加による Pu の無駄使いを改善することを期待していたので、この点ではマイナスに働くことに留意する必要がある。

## 4.2 選定した燃料概念のフロントエンドに関する検討

3章において、最も有望な燃料概念として「1-6 UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Gd)」を選定した。また、「1-7 Gd 酸化物要素型」についても、将来的により高い特性を期待できる可能性が考えられるので、代替候補として残すことになった。このように、有望概念の検討の結果として、UO<sub>2</sub>-Gd 燃料や Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 棒など外部で製造した要素を MOX 燃料製造施設で受け入れて集合体を組み上げる概念が選定されたことから、その場合の MOX 燃料製造施設における課題について検討した。

MOX 燃料製造施設で受け入れることを考える場合、トラックでの輸送（荷下ろし場所）から燃料要素保管場所までの経路及び燃料要素保管場所から集合体組立・検査までの製造物流フローにおける課題を考える必要がある。現状では、以下の様に幾つかの項目が考えられるが、基本的には、一部管理システムの改修などは必要になるものの、燃料製造設備に大きな改造などは必要とならない見通しである。

- ・クレーン、搬送台車等にて取扱いが可能か。
- ・貯蔵マガジンへの燃料要素挿入及びその運用方法について。
- ・各経路での識別を考慮しての保管スペースを確保できるか。
- ・識別管理を要するための計算機プログラムの改修。

## 4.3 選定した燃料概念のバックエンドに関する検討

3章において、最も有望な燃料概念として「1-6 UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Gd)」を選定した。また、「1-7 Gd 酸化物要素型」についても、将来的により高い特性を期待できる可能性が考えられ、代替候補として残すことになった。ここでは、後者の「1-7 Gd 酸化物要素型」のバックエンドへの影響に関して、もう少し詳しく検討を行う。具体的には、「1-7 Gd 酸化物要素型」の再処理では、せん断前にコーナーに装荷している Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 棒を取り外すことが望ましく、この取り外し技術について簡単に検討を行った。

Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 棒について、せん断前に取り外さず、そのまま核燃料と一緒に溶解工程に投入することを想定する場合、再処理時に以下の影響が考えられる。

- ・臨界評価 (Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> の溶解性によって大きく異なる)
- ・清澄工程の処理能力 (Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> の溶解性によって大きく異なる)
- ・ガラス固化処理能力及びガラス固化体発生量への影響大

これらの影響を考慮すると、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 棒については、可能であればせん断前に取り除くことが望ましいと考える。Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 棒については、3章の仕様検討の結果から、集合体のコーナー部にそれぞれ 1 本ずつ、合計 4 本装荷されているだけである。そのため、現状の PWR 燃料集合体の構造では、9 段程度ある支持格子 (グリッド) のコーナー部を部分的に切断することで、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 棒の取り外しは可能となる。この支持格子の切断を含む集合体の解体工程に関しては、高速炉燃料再処理時の解体装置と同様な装置が利用できるものとする。この解体装置を用いた解体システムについて概略検討を行い、その結果得られたシステムイメージを図 4.3-1 に示した。

この装置を用いることで、 $Gd_2O_3-ZrO_2$  棒をせん断前に集合体から取り除くことは可能となり、上述の再処理への影響は緩和できるものとする（参考として、海外の PWR では、運転中に燃料に破損が生じた際、集合体から破損ピンを抜き出し SUS 棒に置き換えるような実績があるということであり、(上記の様な解体装置を用いなくても) 集合体の構造を一部見直すことで対応できる可能性もあるものと考えられる)。

#### 4.4 選定した燃料概念に関するまとめ

##### ① 核燃料サイクル諸量への影響に関する検討

- ・ MOX 高度化燃料（「1-6  $UO_2$  燃料固溶体型 (Gd)」) とすることで、プルサーマルプラント総出力を現行 MOX 燃料炉心（リファレンス）の約 12 GWe から 2 GWe 程度低減でき（100 万 kWe プラント 2 基相当）、プラント基数の柔軟性に有効となることを定量的に確認した。
- ・ MOX 集合体の製造量や中間貯蔵量は、Pu 装荷量の増加により 13%程度減少する結果となり、MOX 集合体製造量が減ることで経済性は向上し、中間貯蔵量も減少することを定量的に確認した。

##### ② フロントエンド

- ・ MOX 燃料製造施設の外部で製造する  $UO_2-Gd$  燃料要素・ $Gd_2O_3-ZrO_2$  棒の受入れに関し、一部管理システムの改修などは必要になるものの、燃料製造設備に大きな改造などは必要とならない見通しである

##### ③ バックエンド

- ・ MOX 高度化燃料（「1-7 Gd 酸化物要素型」) において、コーナーに設置した  $Gd_2O_3-ZrO_2$  棒を再処理前に集合体から取り除き、溶解工程への影響を緩和できる解体システムについて簡単に検討を行い、可能性を有する見通しを得た。

表 4.1-1 各対象炉心の解析条件

MOX 燃料炉心ケース	MOX リファレンス 燃料炉心	MOX 高度化 燃料炉心	(参考) MOX リファレンス高燃 焼度燃料炉心*1	(参考) MOX 高度化高燃 焼度燃料炉心*1
MOX 燃料仕様	リファレンス	高度化 (UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd) 想定)	リファレンス (リファレンス仕様をベー スに Pu 含有率調整)	高度化 (UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd) 想定)
燃焼度 [GWd/t]	45 (現行燃焼度)	45 (現行燃焼度)	50 (高燃焼度)	50 (高燃焼度)
MOX バッチ数 [-]	3	3	4	4
MOX 燃料割合 [-]	1/4	1/4	1/4	1/4
MOX 集合体割合*2 [%]	25	26	25	25
平均 Pu 含有率 [wt%] (MOX リファレンス燃料に対する比)	10.6	11.7 (1.10)	11.8 (1.11)	11.8 (1.11)
年間 Pu 使用量 [t/y] (2030 年以降)	6.6	6.6	6.6	6.6
<b>解析条件</b>				

\*1 高燃焼度炉心の目安として、集合体セル計算ベースで暫定的に設定した炉心(5.2 節参照)。

\*2 1/4 MOX 炉心では、MOX 燃料要素数の割合が 1/4 となる。PWR の「UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型(Gd)」想定燃料では、MOX 集合体内に UO<sub>2</sub>-Gd 燃料要素が一部装荷されるので MOX 集合体数はその分増加することになる。

表 4.1-2 核燃料サイクル諸量概略評価結果の比較

MOX 燃料炉心ケース		MOX リファレンス 燃料炉心	MOX 高度化 燃料炉心	(参考) MOX リファレンス高燃 焼度燃料炉心*1	(参考) MOX 高度化高燃 焼度燃料炉心*1
Pu バランスへの影響	プラント総出力*2 [GWe] (リファレンスとの差 [GWe])	12.2	10.2 (2.0)	12.1 (0.1)	12.1 (0.1)
	評価	-	◎	△	△
MOX 集合体製造量 への影響 (コストが高く経済性に影響) [参考: 集合体 1 体当たり の重金属重量 約 0.47 t]	MOX 燃料製造量 [t/y]	62.5	54.4 (5.3)	56.2 (4.6)	56.2 (4.6)
	(プラント総出力当たり[t/y/GWe]) (参考) 集合体製造体数 [体/y]	133	116	120	120
中間貯蔵への影響	MOX 燃料中間貯蔵量 [t] (2050 年時点)	927	806 (79.0)	849 (70.2)	849 (70.2)
	(プラント総出力当たり[t/GWe]) 評価	-	○	◎	◎
資源有効 利用	年間使用 U 量 [t/y]	1,810	1,493 (146)	1,859 (154)	1,859 (154)
	(プラント総出力当たり[t/GWe]) 評価	-	△	△	△
核燃料サイクル への影響	使用済 MOX 中 MA 量 [t] (2050 年時点)	5.6	5.2 (0.51)	5.8 (0.48)	5.8 (0.48)
	(プラント総出力当たり[t/GWe]) 使用済 MOX 中 FP 量 [t] (2050 年時点)	40.8	35.4 (3.5)	41.1 (3.4)	41.1 (3.4)
	(プラント総出力当たり[t/GWe]) 評価	-	△	△	△

\*1 高燃焼度炉心の目安として、集合体セル計算ベースで暫定的に設定した炉心(5.2 節参照)。

\*2 プルサーマルプラント全基の出力総計。

表 4.1-3 MOX 高度化燃料炉心の諸量概略評価結果のまとめ

	MOX 高度化燃料炉心 (UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型)	(参考)MOXリファレンス 高燃焼度燃料炉心*1	(参考)MOX 高度化 高燃焼度燃料炉心*1
<p><b>解析結果</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>プラント総出力</b>: Pu 装荷量 増により 2.0 GWe 低減(100 万 kWe プラント 2.0 基相当)</li> <li>・ <b>MOX 集合体製造量</b>: Pu 装荷量 増により 13%減少、ただし総出力当たりでは現行リファレンスと同等</li> <li>・ <b>中間貯蔵量</b>: 13%減少、総出力当たりでは現行リファレンスと同等</li> <li>・ <b>年間使用 U 量(総出力当たり)</b>: MOX 集合体割合が同等のため、年間使用 U 量も同等</li> <li>・ <b>MA・FP 量(総出力当たり)</b>: MA は Pu 装荷量 増の効果により微増、FP は同等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>プラント総出力</b>: 高燃焼度化に伴い Pu 含有率は増加するが、バッチ数も増加 (3→4) するため、現行リファレンスと同等</li> <li>・ <b>MOX 集合体製造量</b>: Pu 装荷量 増により 10%減少、高燃焼度化により総出力当たりも減少</li> <li>・ <b>中間貯蔵量</b>: 8%減少、総出力当たりも減少</li> <li>・ <b>年間使用 U 量(総出力当たり)</b>: MOX 集合体割合が同等のため、年間使用 U 量も同等</li> <li>・ <b>MA・FP 量(総出力当たり)</b>: MA は Pu 装荷量 増の効果により微増、FP は同等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>プラント総出力</b>: PWR は元々 Pu 含有率制限に対する裕度が小さいため、MOX 高度化による効果は制限、結果としてリファレンス高燃焼度炉心と同等</li> <li>・ <b>MOX 集合体製造量</b>: Pu 装荷量 増により 10%減少、高燃焼度化により総出力当たりも減少</li> <li>・ <b>中間貯蔵量</b>: 8%減少、総出力当たりも減少</li> <li>・ <b>年間使用 U 量(総出力当たり)</b>: MOX 集合体割合が同等のため、年間使用 U 量も同等</li> <li>・ <b>MA・FP 量(総出力当たり)</b>: MA は Pu 装荷量 増の効果により微増、FP は同等</li> </ul>
<p><b>まとめ</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ プルサーマルプラント運転基数の柔軟性に有効となることを定量的に確認。</li> <li>・ MOX 集合体製造量が減ることによって経済性向上、中間貯蔵量の減少も確認。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ プルサーマルプラント基数低減の効果は限定的に確認。</li> <li>・ 将来において、(高速炉導入時期が遅れるなど)プルサーマル炉の必要期間が長期化する場合、MOX 集合体製造量・中間貯蔵量の点で有効。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Pu 含有率がリファレンス高燃焼度炉心と同程度のため、プルサーマルプラント基数低減の効果は限定的。</li> <li>・ ただし、平均 Pu 含有率は同等だが、UO<sub>2</sub>-Gd 棒により出力は平坦化され最大 Pu 含有率の低減等の効果は期待できる。</li> <li>・ 将来において、(高速炉導入時期が遅れるなど)プルサーマル炉の必要期間が長期化する場合、MOX 集合体製造量・中間貯蔵量の点で有効。</li> </ul>

\*1 高燃焼度炉心の目安として、集合体セル計算ベースで暫定的に設定した炉心(5.2 節参照)。

表 4.1-4 追加解析ケースの解析条件（高燃焼度・高 Pu 含有）

MOX 燃料炉心ケース		追加解析ケース： Pu 含有率制限 緩和 (15 wt% (暫定))
解析条件	MOX 燃料仕様	高度化 (UO <sub>2</sub> -Gd 燃料要素コーナー設置型想定) ・ 高燃焼度燃料に向け、Pu 含有率制限を若干緩和できる可能性もある ・ 暫定的に 15 wt%までの緩和を想定し、MOX 高度化概念を適用し、その中で Pu 装荷量の増加を指向し設定
	燃焼度 [GWd/t]	50 (高燃焼度)
	MOX バッチ数 [-]	4
	MOX 燃料割合 [-]	1/4
	MOX 集合体割合 [%]	25
	平均 Pu 含有率 [wt%] (MOX リファレンス燃料に対する比)	15.0 (1.42)
	年間 Pu 使用量 [t/y] (2030 年以降)	6.6

表 4.1-5 追加解析ケースの核燃料サイクル諸量概略評価結果（高燃焼度・高 Pu 含有）

MOX 燃料炉心ケース		追加解析ケース： Pu 含有率制限 緩和 (15 wt% (暫定))	
Pu バランスへの影響	プラント総出力*2 [GWe] (リファレンスとの差 [GWe])	9.5 (2.7)	
	評価	◎	
MOX 集合体製造量 への影響 (コストが高く経済性に影響) [参考: 集合体 1 体当たり の重金属重量 約 0.47 t]	MOX 燃料製造量 [t/y] (プラント総出力当たり [t/y/GWe])	44.2 (4.7)	
	(参考) 集合体製造体数 [体/y]	94	
	評価	◎	
中間貯蔵への影響	MOX 燃料中間貯蔵量 [t] (2050 年時点) (プラント総出力当たり[t/GWe])	667 (70.2)	
	評価	◎	
核燃料サイクル への影響	資源有効 利用	年間使用 U 量 [t/y] (プラント総出力当たり[t/GWe])	1460 (154)
		評価	△
	廃棄物減容・ 有害度低減	使用済 MOX 中 MA 量 [t] (2050 年時点) (プラント総出力当たり[t/GWe])	5.0 (0.53)
		使用済 MOX 中 FP 量 [t] (2050 年時点) [t] (プラント総出力当たり[t/GWe])	32.3 (3.4)
		評価	×

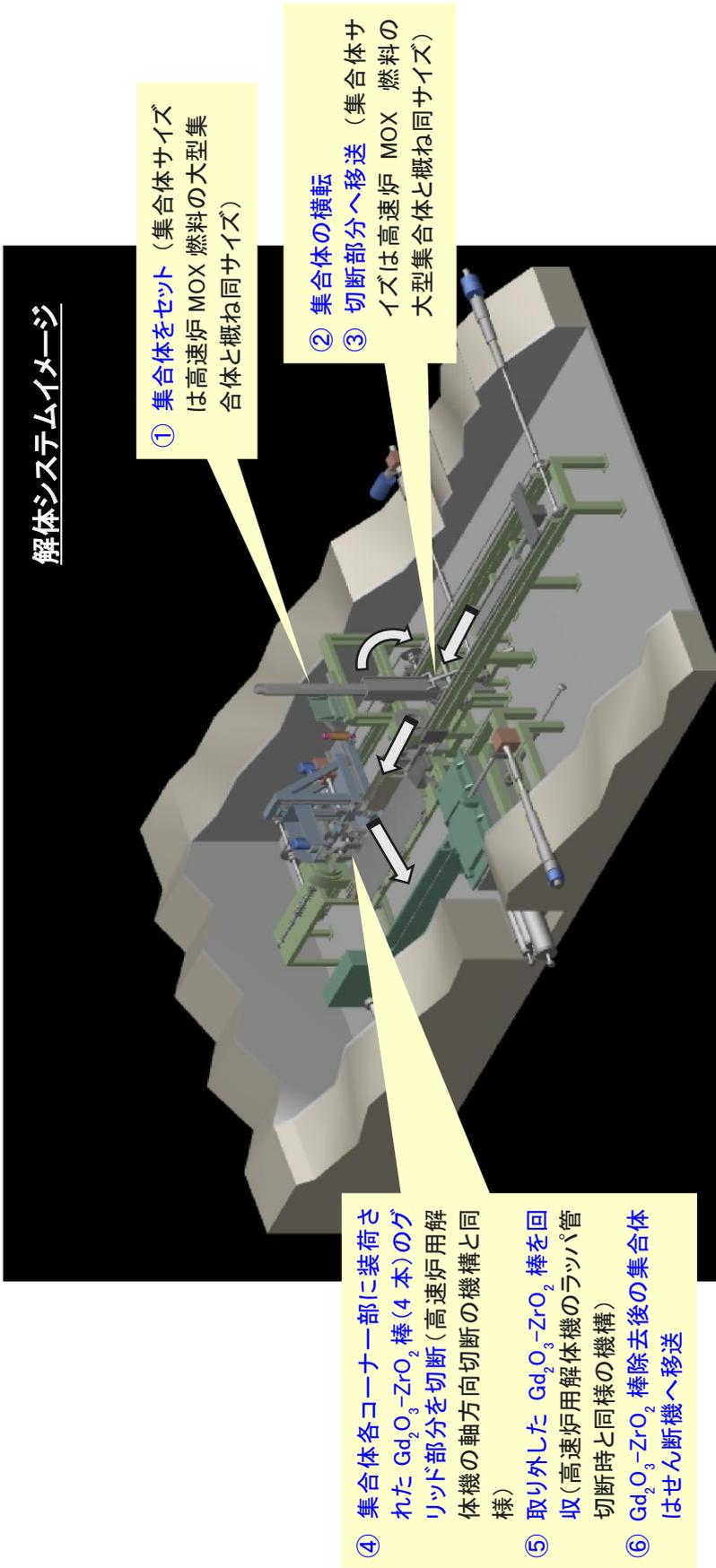


図 4.3-1 解体システムの装置イメージ

## 5. 高燃焼度化を想定した場合の課題に関する検討

### 5.1 高燃焼度化に向けた課題整理

効果的なプルトニウム利用として、現行の MOX 燃料指針の範囲（Pu 含有率： $\leq 13$  wt%、燃焼度： $\leq 45$  GWd/t、MOX 燃料装荷： $\leq 1/3$ ）で Pu 装荷量の増加させる燃料概念の検討を実施した。一方、今回のように、従来の燃焼度（45 GWd/t）のままで Pu 装荷量を増加させることは、使用後、取出し時に Pu の燃え残りが多く、Pu の無駄使いとなっているという問題がある。この Pu の無駄使いを軽減するには、高燃焼度化が必要となる。そこで、将来、高燃焼度化を求められる場合を想定し、高燃焼度化に向けた課題について調査・検討を行うこととした。具体的には、炉心・燃料の設計例の調査、燃料物性・照射試験・安全研究・燃料製造に関する調査などを行うとともに、今回選定した MOX 高度化燃料について、高燃焼度化による燃料仕様への影響の評価を行う。また、高燃焼度化の課題の一つである Pu 含有率制限について、制限緩和の見通し検討に資するため、Pu 含有率制限の根拠に関する調査・検討を行うこととした。加えて、高燃焼度化によるフロントエンド・バックエンドへの課題の調査・検討も行うこととした。以下に調査・検討結果を示す。

#### 5.1.1 炉心・燃料（設計例等調査）

MOX 燃料の高燃焼度化について、炉心・燃料設計への影響に関する文献調査を行った。調査した文献としては、主に過去の設計検討例や一般的な燃料挙動に関する文献であり、巻末の参考文献（5.1.1-1～5.1.1-13）に示した。調査結果について、炉心設計、燃料設計等に関する影響を表 5.1.1-1 にまとめて示した。その結果より、炉心設計、燃料設計それぞれに関する主要な課題としては、以下の点が挙げられる。

##### ① 炉心設計

- ・高燃焼度化に伴い Pu 含有率を増加する必要がある（現行指針の制限を超過する可能性もあり）。その影響として、炉心の制御性に関し、反応度停止余裕の低下やホウ素価値の低下など制御性は厳しい方向となる。
- ・また、安全性に関しても、高燃焼度化により高次化 Pu や MA の生成量が増加することにより、崩壊熱は増加し安全上厳しい方向に影響を受ける。

##### ② 燃料設計

- ・高燃焼度化により FP ガスの生成量が増加することに加え、Pu 含有率の増加に伴い、Pu スポットが増加し、FP ガスの放出率も増加する可能性が考えられる。
- ・また、MA の生成量も増加するため、 $\alpha$  崩壊による He ガスの生成量の増加も考えられる。
- ・加えて、MOX 燃料では、(UO<sub>2</sub> 燃料と比較し) 燃焼の進展に伴う出力低下が少なく、高燃焼度側で燃料温度は高い状態が維持され、そのこともガス内圧の増加に寄与する。いずれもガス内圧は増加し、燃料健全性上の厳しい方向となる。

### 5.1.2 燃料物性・挙動・製造技術に関する研究

MOX 燃料の高燃焼度化及びそれに伴う高 Pu 含有率化による燃料物性への影響並びに照射試験、安全研究の実施状況について調査し、課題の整理を行った。以下に、その結果を示す。

#### (1) 高燃焼度化・高 Pu 含有率化による MOX 燃料物性（熱伝導度、融点）への影響

一般的に MOX 燃料の熱伝導度や融点などの燃料物性は、高燃焼度化・高 Pu 含有率化により影響を受ける。熱伝導度は燃料設計や照射挙動評価において最も重要な燃料物性の一つであり、また、融点も設計クライテリアを設定する上で重要な燃料物性の一つである。そのため、ここでは熱伝導度と融点に着目し、高燃焼度化、高 Pu 含有率化による影響について、公開資料を基に調査し、課題の整理を行った。

##### i) 熱伝導度への影響

MOX 燃料の熱伝導度は、以下に示すフォノン伝導モデルによって定式化できる。

$$\lambda = \frac{1}{A+BT} \quad (2.1 \text{ 式})$$

$\lambda$  : 熱伝導度

A : フォノン伝導項（格子欠陥熱抵抗率）

B : フォノン-フォノン散乱項

T : 温度

このモデルは、格子振動を量子化したフォノンによって熱が輸送されるとするモデルであり、一般的に 1,600K 以下の温度領域で適用できるモデルである。様々な因子による熱伝導度への影響は、点欠陥を起因としたフォノン散乱によるものと考え、A、B それぞれの定数を実験結果に基づきフィッティングすることで、熱伝導度を定式化することができる。Pu 含有率や燃焼による熱伝導度の低下は、フォノン散乱が阻害されるためであり、この式の定数 A、B が増加することで表現することができる。また、MOX 燃料においては、Pu 含有率が周辺マトリックスよりも高い領域（以下、Pu スポット）が存在し、均質性によっても熱伝導度に影響を与えることが考えられている。このように、MOX 燃料においては均質性、Pu 含有率、燃焼が熱伝導度に影響を与えると考えられ、以下では、これらが MOX 燃料の熱伝導度へ与える影響について公開文献を基に調査し、高燃焼度化・高 Pu 含有率化による課題について整理検討する。

##### ① 均質性による影響

MOX 燃料の製造方法は、一段混合法と二段混合法に分けることができる。一段混合法は、所定の Pu 含有率となるように  $\text{UO}_2$  粉末と  $\text{PuO}_2$  粉末（もしくは MOX 粉末）をボールミルで均質化混合するものである（例、SBR 法、JNC 法）。この方法は、均質性の高いペレットが製造できる反面、原料粉末の流動性が悪くなる。二段混合法はボールミルでの均質化混合により Pu 含有率 30 wt% のマスターブレンド粉を製造し、所定の Pu 含有率になるように流動性の高い  $\text{UO}_2$  粉末に機械的に混合し、製造する方法である（例、MIMAS 法）。均質性は一段混合法よりも劣るものの原料粉末の流動性が高く、生産性が良く、商業ベースの軽水炉燃料に採用されている。

表 5.1.2-1 は、製造方法の違いによる Pu 均質性の測定結果の一例<sup>[5.1.2-1]</sup>であるが、製造方法の違いにより Pu の分布状況が異なることが分かる。

燃料製造方法による Pu スポットの分布状況が熱伝導度に与える影響については、MIMAS 法と SBR 法の MOX 燃料をレーザーフラッシュで測定した熱伝導度測定結果から、両方で差がほとんどないことが報告されている<sup>[5.1.2-2, -3]</sup>。Pu スポットの分布状況の違いによって局所的な熱伝導度に差があることが推察されるものの、これらの研究結果から燃料ペレットの全体的な熱伝導度は、燃料温度評価の点で両者において大きな差はないものと考えられる。

## ② Pu 含有率による影響

UO<sub>2</sub> 燃料に Pu を添加することにより熱伝導度は低下するが、その影響は小さいことが報告されている。Duriez らの報告<sup>[5.1.2-3]</sup>では、Pu 含有率が 3~15 wt% の範囲では Pu 含有率の依存性は無視できるとしている。Morimoto ら<sup>[5.1.2-4]</sup>は、均質性の高い高速炉燃料用 MOX 燃料 (Pu 含有率 20 wt% 以上) を対象に熱伝導度を測定しており、UO<sub>2</sub> 燃料と比較すると低くなるものの Pu 含有率 20~40 wt% の範囲で低下割合が低いことを示している。一方、非均質な MOX 燃料については Staicu らが報告している<sup>[5.1.2-5]</sup>。それによると、非均質 MOX における Pu 含有率による熱伝導度への影響は僅かということで、他文献で報告されている Pu 含有率依存の関係は過大評価とのことで、その原因は化学量論比の変動に起因するものであることを報告している。

この様に国内外の試験結果から、Pu の添加により熱伝導度は低下するもののその影響は僅かであることが明らかとなっている。高 Pu 含有率化では、程度にもよるが、現行の安全審査指針の上限である 13 wt% から数 wt% 程度増加する程度であれば、燃料設計や照射挙動への影響は小さいものと予想される。

## ③ 燃焼による影響

酸化物燃料は、固溶性 FP の蓄積により、燃焼によって熱伝導度が低下していくことが知られている。燃焼前後の UO<sub>2</sub> 及び MOX 燃料の熱伝導度に関して、北野ら<sup>[5.1.2-2]</sup>はレーザーフラッシュ法による測定結果から、MOX 燃料の均質性も含め、以下のような大小関係があることを報告している。

- ・未照射 MIMAS-MOX ≒ SBR-MOX < UO<sub>2</sub>
- ・照射後 700℃ (973K) 以下 MIMAS-MOX ≒ SBR-MOX > UO<sub>2</sub>
- 約 890K まで照射欠陥を回復後 MIMAS-MOX ≒ SBR-MOX = UO<sub>2</sub>

すなわち、未照射であれば MOX 燃料の熱伝導度は UO<sub>2</sub> 燃料よりも低いですが、照射後は同等以上となる。この理由について、北野らは以下のような考察を行っている。

- ・照射に伴う Pu 濃度の変化： 照射に伴い、MOX 燃料は製造時の Pu 濃度が低下するのに対し、UO<sub>2</sub> 燃料は Pu が生成されるため、両者の差が小さくなる。
- ・固溶性 FP の生成量の違い： 熱伝導率の低下要因となる固溶性 FP の生成量が、

UO<sub>2</sub>燃料中でMOX燃料中より多い。

- ・ 照射欠陥の消滅速度の違い：Pu原子の方がU原子より拡散定数が大きいことなどから、熱伝導率の低下要因となる照射欠陥の消滅速度が、MOX燃料において比較的大きい。

また、Nakaeらは70GWd/tを超える燃焼度のMOX燃料要素とUO<sub>2</sub>燃料要素の炉内計装に基づく照射中の燃料中心温度の結果から、MOXの熱伝導度がUO<sub>2</sub>よりも高いことを報告している[5.1.2-6]。

一方、海外においてもStaicuらは、ITUで測定してきたUO<sub>2</sub>及びMOXの熱拡散率のデータを用いて、燃焼による熱拡散率への影響を「UO<sub>2</sub>単独」、「MOX単独」及び「UO<sub>2</sub>とMOX」のデータセットを用いて評価している[5.1.2-7]。その結果、UO<sub>2</sub>とMOXで異なる式を提案することの妥当性がない、すなわち、燃焼後の熱拡散率はUO<sub>2</sub>とMOXで差がないとしている。さらに、不均質MOX燃料に対して、酸素欠陥など照射によって生成される欠陥の濃度は、不定比組成に起因する酸素欠陥と比較して高いため、不均質MOXの熱伝導率を低下させる酸素分布の効果は、照射済燃料では消失すると予想している[5.1.2-5]。

このように、燃焼したMOX燃料の熱伝導度は、UO<sub>2</sub>燃料と同等もしくは高くなるのが国内外の研究者から報告されている。燃焼後の物性データは限られており、今後もメカニズムの解明や評価式の精度向上の観点から、照射済みMOX燃料の物性データ取得は望まれるが、MOX燃料はUO<sub>2</sub>燃料よりも燃焼による熱伝導度低下割合は少ないとして取り扱うことが可能である。

#### ④ 熱伝導度への影響のまとめ

高燃焼度化・高Pu含有率化による熱伝導度への影響について、公開文献を基に調査した結果を以下に示す。

##### ・ 均質性による影響

均質性による熱伝導度への影響については、MIMAS法とSBR法のMOX燃料をレーザーフラッシュで測定した熱伝導度測定結果から差がない。

##### ・ Pu含有率による影響

Pu含有率の増加により熱伝導度は低下するものの、熱伝導度の測定結果からその影響は僅かである。また、従来の測定結果にはPu添加の影響に加え、化学量論比がずれることにより熱伝導度低下が生じていた可能性が指摘されている。

##### ・ 燃焼による影響

燃焼後のMOXサンプル測定や炉内計装での測定結果から、燃焼によるMOX燃料の熱伝導度低下はUO<sub>2</sub>よりも小さい。

MOX燃料の熱伝導度のメカニズムの解明のため、今後もデータを取得していくことが望ましいが、昨今の国内外の研究成果を踏まえると、MOX燃料の熱伝導度については高燃焼度化や高Pu含有率化を行ったとしてもその影響は限定的であり、開発に向けた懸念はないものと考えられる。

## ii) 融点への影響

融点は、燃焼度や Pu 含有率の増加により低下する。ここでは、軽水炉よりも高 Pu 含有率かつ高燃焼度の高速炉用 MOX 燃料の知見に基づき、軽水炉用 MOX 燃料の高燃焼度化・高 Pu 含有率化の課題を整理する。

未照射 MOX 燃料の融点については、加藤らが従来一般的に用いられてきたタングステン製試料容器を用いた融点測定において、高 Pu 含有率燃料では、タングステンと MOX 燃料の共晶反応により、融点が低下することを明らかにした<sup>[5.1.2-8]</sup>。そこで、加藤らはレニウム容器を用いることにより共晶反応による融点への影響を排除した測定方法を開発し、 $UO_2$  (Pu 含有率 0 wt%) から  $PuO_2$  (Pu 含有率 100 wt%) までの融点のデータを取得している (図 5.1.2-1) <sup>[5.1.2-8]</sup>。これにより、従来の MOX 燃料の融点が過小評価であることが明らかとなり、上方修正されることとなった。加藤らの結果に基づくと、同図に示すように軽水炉 MOX 燃料の Pu 含有率の範囲でも融点は上方に修正されており、このような最新の知見を取り入れることで、温度制限値の合理化が可能となる。

一方、燃焼後の MOX 燃料の融点については、高速実験炉「常陽」で照射された MOX 燃料サンプルを対象に 100 GWd/t を超える燃焼度までの融点が測定されており、低下率は約  $5^{\circ}C/10$  GWd/t と報告されている<sup>[5.1.2-9]</sup>。軽水炉 MOX 燃料の燃焼による融点低下は、Christensen の測定結果<sup>[5.1.2-10]</sup>に基づき  $32^{\circ}C/10$  GWd/t 低下としているが、このような高速炉 MOX 燃料の知見を反映することで高燃焼度での温度制限値を合理化できる可能性がある。

以上のように、融点は Pu 含有率・燃焼度の増加により低下するが、最新の知見に基づくと未照射・照射燃料ともに上方修正されており、この知見を取り入れることで温度制限値を合理化できるものと考えられる。

(2) MOX 燃料照射試験の実施状況<sup>[5.1.2-11~34]</sup>

2000 年以降に報告された軽水炉 MOX 燃料 (重水炉含む) の照射試験状況 (Pu 含有率、燃焼度) について公開論文の調査を行った (一部、RIA・LOCA 試験含む)。

表 5.1.2-2 には、PWR 燃料、BWR 燃料及び重水炉 (ふげん燃料、CANDU 炉等) 燃料の照射試験の概要に加え、安全研究 (LOCA 試験、RIA 試験) の概要も含めまとめた。また、これら試験の燃焼度と Pu 含有率の関係を図 5.1.2-2 に示した。同図には、現行の安全審査指針<sup>[5.1.2-35]</sup>の Pu 含有率、燃焼度の範囲も示しているが、この指針を超える照射データが蓄積されていることが分かる。

## (3) MOX 燃料の安全研究に関する状況

MOX 燃料の安全研究としては、国内外で LOCA 模擬試験、RIA 試験が実施されており、以下にそれぞれの概要を述べる。

i) LOCA 模擬試験<sup>[5.1.2-30]</sup>

近年、LOCA 時挙動として FFRD (Fuel Fragmentation, Relocation and Dispersal) と呼ばれる現象が  $UO_2$  燃料を中心に調査・研究されており、国内では燃焼度 73 GWd/t

までの  $\text{UO}_2$  燃料に対して LOCA 模擬試験が実施されている。一方、高燃焼度 MOX 燃料については、現時点では国内では実施されていないが、海外では MOX 燃料を対象とした LOCA 模擬試験が実施されており、以下にその概要を述べる。

高燃焼度 MOX 燃料を対象とした LOCA 模擬試験は、現時点では世界的にも実施報告例は少なく、Kjeller で炉外 LOCA 模擬試験<sup>[5.1.2-30]</sup>が行われている。主な仕様、照射条件及び試験条件を表 5.1.2-3 に示す。試験サンプルは、フランスの商業炉 Tricastin1 で照射された MOX 燃料と、スウェーデンの商業炉 Ringhals で照射された  $\text{UO}_2$  燃料より採取しており、局所燃焼度はウラン燃料で～65 GWd/t、MOX 燃料で～57 GWd/t となっている。被覆管は M5 合金が採用されている。試験条件は、初期内圧を試験パラメータとしており、40 bar (MOX 燃料要素の寿命末期内圧に相当) と 5 bar の 2 種類、He ガス中 (1 bar) で被覆管温度を最大 900°C 近くまで上昇させている。この LOCA 模擬試験の結果、MOX 燃料について特有の挙動を示す証拠は観察されなかったことが報告されている。

#### ii) RIA 試験<sup>[5.1.2-31～34]</sup>

RIA 試験に関しては、平成 30 年度から令和 3 年度にかけて行われた「原子力施設等防災対策等委託費 (燃料設計審査分野の規制研究) 事業」<sup>[5.1.2-31～34]</sup>の中で実施されている。このプロジェクトでは、フランス又はスイスで商業照射された高燃焼度 PWR-MOX 燃料 (燃焼度 59～64 GWd/t) を対象に NSRR で RIA 試験が行われた。以下に、このプロジェクトで確認された高燃焼度 MOX 燃料の RIA 時挙動及び今後の高燃焼度 MOX 燃料開発に有効と考えられる R&D 項目について述べる。

フランス又はスイスで商業照射された MOX 燃料 (燃焼度 59～64 GWd/t、Pu 含有率 5.6～7.2 wt%、被覆管材質 M5、Zircaloy-4) に対して、NSRR でパルス照射 (室温大気圧条件、高温高圧条件) を実施している。試験は、RIA 時の燃料挙動及び破損限界についてデータを取得するための試験 (CN-1、CN-2) と、高燃焼度 MOX 燃料の RIA 時 FP ガス放出挙動を把握するための実験 (BZ-3、BZ-4) が行われている。表 5.1.2-4 に試験を行った燃料概要及び NSRR での試験条件を示した。

CN-1 は、エンタルピー増分が現行しきい値を大きく上回っても PCMI 破損に至らなかったが、高燃焼度 PWR/BWR 燃料では、初めて内圧破裂型破損が観測された。この原因として、MOX 燃料及び M5 被覆管であったことなどの影響が指摘されており、PCMI による破損モードとは異なるため R&D の継続が必要としている。CN-2 は、CN-1 で観察された内圧破裂型破損の発生原因を調査するために、高温高圧条件下での RIA 模擬実験として実施され、CN-1 実験に類似した破損形態が確認された。実炉条件により近い高温高圧条件においても内圧破裂型破損が生じることが知見として得られた。

#### iii) 安全研究に関するまとめ

MOX 燃料の安全研究として、国内外で LOCA 模擬試験、RIA 試験が実施されている。これらの試験結果から、事象解明の観点で継続的な R&D は必要であるものの、現行  $\text{UO}_2$  燃料と同程度までの高燃焼度化にあたっては、直ちに対策を講じる必要のある

ような安全上の差し迫った懸念はないものと考えられる。

#### (4) 燃料製造に関する状況・課題

高燃焼度化にあたり、高 Pu 含有化する際の燃料製造上の課題について、国内外の製造実績を調査するとともに、予測される技術的な課題について整理した。

軽水炉用 MOX 燃料は、二段混合法 (MIMAS 法) により製造されている。海外における MIMAS 法による MOX 燃料の製造実績としては、MELOX プラントで、Pu 含有率 3～12 wt% まで製造<sup>[5.1.2-36]</sup>されている。また、Belgonucleaire では、Pu 含有率 14.3 wt% の製造実績があり、さらに海外炉 (BR2, BR3) で照射実績がある<sup>[5.1.2-37]</sup>。一方国内では、Pu 含有率をパラメータとした燃料製造試験が実施<sup>[5.1.2-38]</sup>されている。なお、使用済 MOX 燃料処理技術研究のため、MIMAS 法に準拠した方法で約 13 wt% MOX の溶解試験用サンプルの調整・作成がなされている<sup>[5.1.2-39]</sup>。

以上のように、Pu 含有率については、数 wt%～13 wt%程度までの製造・試験実績は豊富であるものの、より高 Pu 含有 MOX 燃料 (Pu 含有率 13wt%超) については製造・試験実績は乏しい。高 Pu 含有化の程度にもよるが、Pu 含有率が増加することにより一般的に以下の影響について製造試験等を通じて確認が必要と考える。

- ・発熱量の増加に伴う添加材の熱劣化による品質への影響
- ・希釈ウラン割合の減少による粉末流動性 (焼結後の密度・外観等) への影響
- ・マスターブレンド割合の増加による Pu スポットの均質性 (形状・分布) への影響

なお、高速炉用 MOX 燃料の製造方法 (一段混合法) は、軽水炉用 MOX 燃料との製造方法とは異なるが、より高 Pu 含有率 (～30 wt%) の豊富な製造実績<sup>[5.1.2-40]</sup>があり、軽水炉用 MOX 燃料の高 Pu 含有化への課題対策については、この知見の反映が期待される。

## 5.2 高燃焼度化による MOX 燃料仕様への影響評価

将来、MOX 高度化燃料について高燃焼度化が求められる場合、現行燃焼度の燃料仕様にとどの程度の影響があるかを把握するため、3 章で選定した MOX 高度化燃料について、高燃焼度化した燃料仕様の評価を行うこととした。ここで、高燃焼度化としては、現行の 17×17 型 UO<sub>2</sub> 燃料集合体 (U 濃縮度 4.8 wt%) と同程度までの高燃焼度化 (55 GWd/t) を想定することとし、3 章と同じく核特性 (臨界性・出力ピーキング係数) の計算を行い、燃料仕様・特性 (物量収支、崩壊熱) への影響の評価を行う。対象燃料概念としては、「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd)」、「1-7 Gd 酸化物要素型」とし、また、比較のため「リファレンス型 (現行 MOX 燃料)」についても高燃焼度化による影響評価を実施することとした。

### (1) 評価手法・条件

評価手法としては、3 章で実施した核計算と同様、集合体セル計算ベース (MOSRA-SRAC コード) の計算に基づき臨界性・出力ピーキング係数の条件を満たす燃料仕様の評価を行

う。評価モデルも3章と同様、1/4 集合体×4 体（MOX 集合体 1 体と隣接 UO<sub>2</sub> 集合体 3 体）とし、成立条件は以下のとおりとした。

- ・臨界性について、最高燃焼度 55 GWd/t の UO<sub>2</sub> 燃料の平衡サイクル末期の炉心平均燃焼度 32 GWd/t で、UO<sub>2</sub> 燃料炉心と概ね同等の反応度となるようにする。
- ・出力ピーキング係数について、燃焼期間を通して現行 MOX 燃料集合体と概ね同じ局所出力ピーキング係数以下となることとし、3章の検討と同様、1.14 以下とした。

## (2) 評価結果

評価の結果得られた各ケースの燃料集合体構成について、現行燃焼度の燃料と比較して、図 5.2-1 に示した。また、各ケースの具体的な燃料仕様について、表 5.2-1 に比較して示した。以下に、高燃焼度化による燃料仕様・物質収支・崩壊熱への影響の概略を示す。

### i) 燃料仕様

「リファレンス型」で、現行 MOX 燃料をベースに単純に 45 GWd/t → 55 GWd/t までの高燃焼度化を行う場合、燃料集合体内の構成は変わらず、Pu 含有率も3種類のままであるが、高燃焼度化する分 Pu 含有率は増加し、最大の仕様は 13.8 wt%と現行 MOX 指針の制限 13.0 wt%を超過する結果となった。

MOX 高度化燃料のうち、「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd)」では、UO<sub>2</sub>-Gd 燃料の本数は各コーナー3本の12本から各コーナー1本の4本まで減少し、Gd 濃度は若干高くなるものの、Pu 含有率の種類も2種類から1種類に削減され、最高値は 12.3 wt%と MOX 指針の制限の範囲内に収まる結果となった。また、「1-7 Gd 酸化物要素型」では、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 要素は各コーナー1本の4本のままであるが、Pu 含有率の種類は1種類から2種類に増加した。こちらも、最高値は 12.3 wt%と MOX 指針の制限の範囲内に収まる結果であった。いずれの MOX 高度化ケースも、燃料集合体の構成は高燃焼度化により大きく変更されることはないことが認められた。

このように、「リファレンス型」を単純に高燃焼度化（～55 GWd/t）すると、現行 MOX 指針の制限 13.0 wt%を超過する見通しであるが、可燃性毒物 (Gd) で出力を調整するような MOX 高度化の方策を取り入れることで、高燃焼度化しても Pu 含有率は MOX 指針の制限内に収まる可能性があることが分かった。

### ii) 物量収支

高燃焼度化による Pu 装荷量への影響について、「リファレンス型」では、55 GWd/t まで高燃焼度化する場合、Pu 装荷量（全炉心）は現行燃焼度から 12 wt%程度増加する必要がある結果であった。「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd)」では、現行燃焼度でも高度化により Pu 装荷量（全炉心）は現行燃焼度のリファレンスより 16 wt%程度増加しており、高燃焼度化する場合でも 14 wt%程度とあまり変わらないことが確認された。「1-7 Gd 酸化物要素型」についても、現行燃焼度の Pu 装荷量（全炉心）の増加は 14 wt%程度に対し、高燃焼度化でも 14 wt%程度であり、同じくあまり変わらないことが確認された。

一方、Pu<sub>f</sub> 割合への影響については、現行燃焼度の MOX 高度化燃料では、Pu 装荷量は増加するものの燃焼しないで残る分が多いので、むしろ取り出し時に 1 %程度増加し

ているのに対し、高燃焼度化することで、核分裂性 Pu がより多く燃焼するので、逆に 2%程度低下と大きく減少していることが確認された。また、高燃焼度化による Pu 消費量（装荷-取出）への影響については、現行燃焼度の MOX 高度化燃料でも「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd)」で 3 wt%程度、「1-7 Gd 酸化物要素型」で 8 wt%程度は増加していたが、高燃焼度化により、いずれも 30 wt%程度まで大きく増加することが確認できた。

以上より、55 GWd/t まで高燃焼度化することを想定すると、MOX 高度化燃料と同程度の Pu 装荷量が必要であり、そのため MOX 高度化燃料では高燃焼度化しても装荷量はあまり影響しないことが分かった。一方、高燃焼度化により、取り出し時の Pu<sub>f</sub> 割合は低下、Pu 消費量（装荷-取出）は大きく増加する傾向が定量的に確認された。

### iii) 崩壊熱

高燃焼度化による崩壊熱への影響について、「リファレンス型」では、現行燃焼度の値と比較すると、取出し後 30 年の範囲で影響が最も大きくなるのは、取出し後 5~10 年で 1.24 倍程度とかなり増加することが確認された。一方、MOX 高度化燃料の「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd)」、「1-7 Gd 酸化物要素型」では、現行燃焼度の崩壊熱でも、取出し後 30 年の範囲で「リファレンス型」の 1.05~1.09 倍と増加するものの、高燃焼度した場合に影響が最大となるのは、同じく取出し後 5~10 年で 1.24 倍程度と「リファレンス型」と同等となる結果であった。

以上、高燃焼度化による崩壊熱への影響は大きいですが、その程度は「リファレンス型」でも MOX 高度化燃料でもあまり変わらないことが確認された。

## (3) 高燃焼度化による核特性への影響のまとめ

高燃焼度化(~55GWd/t)による燃料仕様への影響評価を行った結果、「リファレンス型」の燃料を単純に高燃焼度化すると、現行 MOX 指針の Pu 含有率制限 (13 wt%) を超過する見通しが示された。一方、「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd)」、「1-7 Gd 酸化物要素型」のような MOX 高度化燃料では、可燃性毒物 (Gd) で集合体内の出力を調整することにより、Pu 含有率は現行指針の制限を満たせる可能性があることが分かった。

一方、高燃焼度化による Pu 装荷量への影響については、55 GWd/t までの高燃焼度化では、MOX 高度化燃料と同程度の Pu 装荷量となり、MOX 高度化燃料では高燃焼度化しても装荷量はあまり影響しないことが分かった。また、高燃焼度化による崩壊熱への影響については、影響は取出し後 5~10 年で現行燃焼度の 1.24 倍と大きいものの、その程度は「リファレンス型」と MOX 高度化燃料であまり変わらないことが確認された。

## 5.3 Pu 含有率制限に関する検討

### 5.3.1 Pu 含有率制限に関する文献調査まとめ

現行の MOX 燃料指針における Pu 含有率の制限は 13 wt%であるが、その制限となる根拠の調査に資するため、関係する文献の調査を行った。調査の結果、Pu 含有率の制限に関する文献としては、主に 90 年代頃、PWR を中心に海外で検討がなされており、海外における制限（例えば仏国 12 wt%）に関しては、OECD/NEA の“Physics of Plutonium

Recycling”<sup>[5.3-1, 2, 3]</sup>や IAEA Technical committee meeting の“Recycling of plutonium and uranium in water reactor fuel”<sup>[5.3-4]</sup>などで報告されていた。また、最近のプルサーマル炉での Pu マルチリサイクルに関する研究（仏国 CORAIL/MIX<sup>[5.3-5, 6, 7]</sup>、（参考）ロシア REMIX<sup>4)</sup> <sup>[5.3-8, 9]</sup>）の中でも、リサイクル回数は Pu 含有率により制限されており、それに関しても調査を行った。これらの文献調査で得られた知見について、以下に概略をまとめた。

i) OECD/NEA “Physics of Plutonium Recycling”

1992 年、OECD/NEA に WPPR (Working Party on the Physics of Plutonium Fuels) が設置され、バックエンドを含む燃料サイクルや Pu の最適な利用という点で、Pu リサイクルに関する課題の検討が幅広く行われた。その検討について、これまで、“Physics of Plutonium Recycling”のシリーズとして、PWR、BWR、FBR やその他革新炉での Pu リサイクルに関する検討（主にベンチマーク）や、PWR での Pu マルチリサイクルに関する検討など 9 件の報告書が作成されている。このうち、以下の Volume I, III, VI において、Pu 含有率の制限に関する記載があったので、以下にその内容の概略を示す。

- Volume I: Issues and Perspectives (OECD/NEA, 1995)
- Volume III: Void Reactivity Effect in Pressurised Water Reactors (OECD/NEA, 1995)
- Volume VI: Multiple Plutonium Recycling in Advanced PWRs (OECD/NEA, 2002)

① Volume I: Issues and Perspectives (OECD/NEA, 1995) <sup>[5.3-1]</sup>

- Pu 含有率に関して、これまで、減速材割合やボイドをパラメータとした核計算コードのベンチマークが行われ、その結果、ボイド反応度が負を維持し実現性のある Pu 含有率は 12±1 wt%程度であった。この報告では、将来の軽水炉で使用される Pu 組成、より高い Pu 含有率までをカバーしたベンチマークが実施された。
- ボイド反応度のベンチマークの結果、各国の核計算コードで結果にバラツキはあるものの、いずれのコードでも高 Pu 含有率（14 wt%）でボイド反応度は正となることが確認された。
- MOX 燃料の格子仕様を高減速側となるよう変更することで（減速材/燃料体積比：増加）、Pu 含有率の制限値は増加するものと推測される。
- Pu 含有率の制限について、正しい解はまだ知られていないが、この報告では、従来と同様の MOX 燃料の格子仕様を仮定する場合、10～12 wt%の範囲にあると暫定的ではあるが結論づけていた。

② Volume III: Void Reactivity Effect in Pressurised Water Reactors (OECD/NEA, 1995) <sup>[5.3-2]</sup>

- ベンチマークの計算は、UO<sub>2</sub>/MOX 集合体混合の無限体系の格子計算で実施。
- Pu 含有率については、3 ケースを想定し比較計算を実施（高 Pu 含有率 (H) : 14.4 wt%、中 Pu 含有率 (M) : 9.7 wt%、低 Pu 含有率 (L) : 5.4 wt%）。

---

<sup>4)</sup> 炉型が PWR でなくロシアの VVER であるが、参考情報として記載する。

- ・ベンチマーク計算において、各国の核計算コードの計算結果にバラツキはあるものの、MOX 燃料領域の Pu 含有率が增加すると、ボイド反応度が正になる傾向は一致していた。
- ・集合体格子計算の結果、(今回仮定した Pu 組成において) Pu 含有率 10~14 wt%の間 (H と M の間) でボイド反応度は正になった。

③ Volume VI: Multiple Plutonium Recycling in Advanced PWRs (OECD/NEA, 2002) [5.3-3]

- ・炉心設計では、安全上、ボイド反応度は重要であり、全炉心の冷却材のボイド化が生じて負のフィードバックを保証するよう、ボイド反応度は負となるようにしている。ボイド反応度は、通常の燃料仕様では負であるが、Pu 含有率が大きくなると増加していき、10~12 wt%で正になる。
- ・MOX 燃料をマルチリサイクルしていくと、Pu 含有率の増加によりボイド反応度が正になる可能性があり、それによってマルチリサイクルの回数は制限される。
- ・計算には 2 種類あり、一つは無限体系の格子計算 (中性子の漏洩なし)、もう一つはボイド条件での中性子漏洩の増加や高速中性子の有限の拡散距離を考慮する全炉心計算。前者は保守的な評価であり、前者の計算でリサイクルの世代が進んでボイド反応度が正となっても、後者であれば負を維持する可能性はある。
- ・また、PWR では MOX 燃料は炉内 (UO<sub>2</sub> 燃料中) に部分的に装荷されるため、リサイクルの世代が進んで MOX 燃料の (集合体格子計算による) ボイド反応度が正になったとしても、UO<sub>2</sub> 燃料は負なので必ずしも不可という訳ではない。

ii) IAEA Technical committee meeting “Recycling of plutonium and uranium in water reactor fuel”

1995 年、IAEA IWGFPT (International Working Group on Fuel Performance and Technology) により開催された Technical committee meeting “Recycling of plutonium and uranium in water reactor fuel”において Pu 含有率の制限に関する記載があったので、以下にその概略を示す。

① “Evaluation of the maximum content of a MOX-fueled Pressurized Water Reactor versus isotopic composition with respect to the void coefficient”[5.3-4]

- ・プルサーマル炉で、全炉心の減速材をドレインするような厳しい事故を想定しても負の反応度を維持できるよう、集合体格子計算により MOX 燃料の Pu 含有率制限の検討を行った。Pu 含有率を増加していくと、核分裂性 Pu (Puf) の割合に依存するが、Pu 含有率 12.5 (Puf 90 %) ~15 wt% (Puf 48 %) 程度まで増加するとボイド反応は正となる。保守的な結果ではあるが、制限として 12 wt%が得られた。
- ・炉内のボイド率が 0 %から増加していくと減速材の水の割合が低下するため無限増倍率 ( $k_{\infty}$ ) は低下する。さらにボイド率が増加し 60~80 %を超えると、中性子が高速化する効果により <sup>240</sup>Pu の高速核分裂や核分裂当たりの中性子数が増加し、 $k_{\infty}$  は増加に転ずる。Pu 含有率が 15 wt%では、上記の効果によりボイド率 100%時の  $k_{\infty}$  は 0 %時を超え、正の反応度となる。

iii) Pu マルチリサイクル関係

① 仏国 CORAIL/MIX<sup>[5.3-5, 6, 7]</sup>

- ・ PWR における Pu のマルチリサイクル MOX 燃料として、以下の 2 種類が検討されている。
  - CORAIL (MOX/UO<sub>2</sub> 非均質)： 集合体内の内側に濃縮 U 燃料要素、外側に MOX 燃料要素を分離配置。U 濃縮度を (~5 wt%) 一定にして、Pu 同位体組成を考慮して含有率を調整 (Pu 含有率制限： <12 wt%)。
  - MIX (MOX 均質)： 集合体内に同一タイプの MOX 燃料要素を配置。回収 Pu の高次化による Pu 組成を考慮して (Pu 含有率は制限内 (<12 wt%))、U 濃縮度を調整。リサイクルの回数が増す毎に U 濃縮度は増加。
- ・ 新燃料の Pu 含有率制限は、現状、保守的ではあるが 12 wt%。Pu 含有率が 12 wt% になると、減速材がドレインした時の反応度は正になり、これは許容されない。Pu をマルチリサイクルすると、(Puf の低下により) Pu 含有率は増加していくため、反応度が正とならない範囲でマルチリサイクルの回数は制限される。

② (参考) ロシア REMIX<sup>[5.3-8, 9]</sup>

- ・ REMIX 燃料の概念は、閉じた燃料サイクルのオプションの一つで、リサイクルした U, Pu の両方を VVER-1000, 1200 でマルチリサイクルして使用することを考えている。
- ・ REMIX 燃料として、使用済燃料の再処理に関し複数の燃料概念が検討されている。
  - REMIX-A: 使用済燃料から分離せずに回収した U/Pu 混合物に、濃縮 U (濃縮度最大 17~19 wt%) を加えて製造した MOX 燃料をリサイクル燃料として使用。
  - REMIX-B: 使用済燃料から分離した Pu に、使用済燃料から分離した U を濃縮した U と天然 U を濃縮した U を加えて製造した MOX 燃料をリサイクル燃料として使用。
  - REMIX-C: 使用済燃料から再処理した Pu に、使用済燃料から分離した U を濃縮した U を加えて製造した MOX 燃料をリサイクル燃料として使用。
  - REMIX-E: 使用済燃料から分離した Pu に、天然 U を濃縮した U を加えて製造した MOX 燃料及び使用済燃料から分離した U を濃縮した U を用いた U 燃料をリサイクル燃料として使用。
- ・ VVER の MOX 燃料を部分装荷するプルサーマル炉では、Pu 含有率の制限値は~9 wt%。

iv) Pu 含有率制限に関するまとめ

以上、Pu 含有率の制限に関する文献調査で得られた知見を以下にまとめた。

- ・ 海外 (仏国) の Pu 含有率制限 12 wt% は、ボイド反応度に関する核計算コードのベンチマークの結果 (90 年代頃) によるものであり、ボイド反応度が正とならない制限で

ある。

- ・ボイド反応度のベンチマーク計算は、無限体系の格子計算で実施されており（一部、中性子漏洩の簡易モデル適用例有り<sup>[5.3-4]</sup>）、全炉心計算を行えばボイド反応度は低下し Pu 含有率制限は増加するものと推測されるが、現状、未実施である。
- ・最近の仏国の Pu マルチリサイクル燃料の検討（CORAIL/MIX）でも、（保守的な値と認識しているが）12 wt%の Pu 含有率制限が適用されている。
- ・（参考）ロシア VVER-1000 における MOX 燃料の Pu 含有率制限は 9 wt%。REMIX 燃料もマルチリサイクルにより Pu 同位体組成は劣化し、リサイクル回数は Pu 含有率により制限される。

### 5.3.2 Pu 含有率とボイド反応度の関係（PWR）

前項の文献調査の結果、海外では、Pu 含有率についてボイド反応度が正とならない範囲としていた。そこで、本報告で選定した PWR の MOX 高度化燃料（「1-6 UO<sub>2</sub>燃料固溶体型（Gd）」、「1-7 Gd 酸化物要素型」）を対象として、Pu 含有率をパラメータとしたボイド反応度の計算を実施し、ボイド反応度が正となる Pu 含有率の評価を行うこととした。また、比較のため、現行の MOX 燃料と同じ集合体構成を想定したリファレンス燃料を対象とした計算も行い、可燃性毒物（Gd）を利用し高度化した MOX 燃料のボイド反応度への影響について調査することとした。以下に、解析手法・モデル、解析条件・ケース、評価結果を示す。

#### i) 解析手法・モデル

- ・解析モデル： 集合体格子計算（集合体単体）、無限配列体系
- ・解析コード： MOSRA-SRAC
- ・ボイド反応度： サイクル初期時点、0%ボイド→100%ボイドとして計算

#### ii) 解析条件・ケース

- ・Pu 含有率： パラメータ（低 Pu 含有率側からボイド反応度が正となるまで高 Pu 含有率化）、集合体内で均一の Pu 含有率を想定
- ・Pu 組成： 国内再処理を想定した高次化組成を想定
- ・燃焼度： 45,000 MWd/t
- ・解析ケース： MOX 燃料の仕様に関する解析ケースとして、以下の 4 ケースを想定
  - ケース① リファレンス（標準組成）： リファレンスとして現行の MOX 燃料と同じ集合体構成を想定、Pu 組成としては現行許可の標準組成を適用
  - ケース② リファレンス（高次化組成）： リファレンスとして現行の MOX 燃料と同じ集合体構成を想定、Pu 組成としては国内再処理を想定した高次化組成を適用
  - ケース③ UO<sub>2</sub>燃料固溶体型（Gd）（高次化組成）：  
高度化概念として選定された UO<sub>2</sub>-Gd 燃料要素をコーナーに設置した「1-6 UO<sub>2</sub>燃料固溶体型（Gd）」の燃料集合体の構成を想

定 (3.1.4 項参照)、Pu 組成としては国内再処理を想定した高次化組成を適用

- ケース④ Gd 酸化物要素型 (高次化組成) :

高度化概念として選定された  $Gd_2O_3-ZrO_2$  棒をコーナーに設置した「1-7 Gd 酸化物要素型」の燃料集合体の構成を想定 (3.1.4 項参照)、Pu 組成としては国内再処理を想定した高次化組成を適用

iii) 評価結果

評価結果として、MOX 燃料の各解析ケースにおける Pu 含有率とボイド反応度の関係を図 5.3-1 に示した。ボイド反応度が正となる Pu 含有率はいずれも 12~13 wt%であり、過去の PWR MOX 燃料を対象にしたベンチマークの結果<sup>[5.3-1, 2, 3, 4]</sup>と同様の傾向であることが確認できた。本報告の MOX 高度化燃料では可燃性毒物である Gd を添加しているが、可燃性毒物による影響はあまり大きくないことが認められた。この理由としては、減速材がボイド化することで中性子のスペクトルは固くなるため、Gd による吸収効果が大きく低下したことによるものと考えられる。ケース③ の  $UO_2$  燃料固溶体型 (Gd) とケース④ の Gd 酸化物要素型を比べると、ケース③の方がリファレンスからの差は幾分大きい傾向であった。一方、Pu 組成については、ケース①の標準組成とケース②の高次組成でほとんど差は生じない結果であった。

以上、PWR の MOX 燃料に関して、本報告の中で選定した MOX 高度化燃料 ( $UO_2$  燃料固溶体型 (Gd)、Gd 酸化物要素型) でも、ボイド反応度が正となる Pu 含有率について従来の MOX 燃料 (リファレンス) と差が生じない見通しが得られた。

### 5.3.3 Pu 含有率の制限に関するまとめ

- ・国内の MOX 燃料指針における制限値 13 wt%の根拠は不明であるが、海外ではボイド反応度により制限されているため、同様にボイド反応度が制限因子となる可能性は高い。
- ・ボイド反応度により制限される場合、制限値は Pu 同位体組成、燃料仕様に依存するため、組成・仕様次第では、13 wt%より若干緩和される可能性はある。
- ・ボイド反応度による Pu 含有率の制限はあくまで集合体の平均値であり、集合体内で Pu 含有率が分布する場合、最大値はこの制限値を超えて緩和できる可能性がある。
- ・ボイド反応度のベンチマーク計算は、無限体系の格子計算で実施されているため保守的な評価となっている。全炉心計算を行えば、ボイド反応度は低下し Pu 含有率の制限は増加するものと推測される。
- ・PWR の MOX 燃料に関して、本報告で選定した高度化燃料 (「1-6  $UO_2$  燃料固溶体型 (Gd)」、「1-7 Gd 酸化物要素型」) でも、ボイド反応度が正となる Pu 含有率について従来の MOX 燃料 (リファレンス) と差が生じない見通しが得られた。

#### 5.4 フロントエンドの課題

MOX 高度化燃料について、高燃焼度化によるフロントエンドに関する課題の検討に資するため、MOX 燃料製造施設での製造にどのような影響があるか検討を行った。高燃焼度化としては、現行の  $\text{UO}_2$  燃料と同等の燃焼度 (55 GWd/t) までの高燃焼度化を想定することとし、その場合、燃料仕様と構造は変更される可能性があるため、以下の項目について検討を行った。

- ① 高燃焼度化により現行 MOX 燃料指針の制限である Pu 含有率 13 wt% を超過する必要性が生じた場合の影響について
  - ・例えば、J-MOX 設備では Pu 含有率 18 wt% までを想定した設計となっており、この程度の範囲であれば、設備の面で成立する可能性はあると考える。一方、作業員の被ばく量が増えることが課題となるが、これについては被ばく低減策 (又は人員増) を図ること対応可能と考える。
- ② 高燃焼度化によるガス内圧対策として、ガスプレナム長さを確保するため燃料ピン長保存で燃料カラム長を短縮する場合、燃料製造設備への影響について
  - ・制御系の更新が必要となる他、プレナムスプリングの長さ次第では、設備の部分的な改造が必要となる可能性が考えられる。
- ③ 高燃焼度化による被覆管の腐食対策として、耐腐食性に優れた改良被覆管を採用する場合、燃料製造施設への影響について
  - ・溶接条件が変わるため、溶接棒や溶接関連部分の耐熱条件等が変更となる可能性がある。場合によっては、設備更新が必要になると考えられる。

#### 5.5 バックエンドの課題

3 章で選定した MOX 高度化燃料 (「1-6  $\text{UO}_2$  燃料固溶体型 (Gd)」、「1-7 Gd 酸化物要素型」) について、高燃焼度化によるバックエンドに関する課題の検討に資するため、5.2 節で設定した高燃焼度化燃料を対象とし、再処理性・ガラス固化体への影響の評価を行うこととした。具体的には、3.3 節でのバックエンドに関する評価と同様、再処理性に関して溶解時の崩壊熱、ガラス固化体に関して発生量・発熱量について、高燃焼度化による影響の概略評価を行った。ここで、高燃焼度化としては、現行の  $\text{UO}_2$  燃料と同等の燃焼度 (55 GWd/t) までの高燃焼度化を想定することとし、比較のため「現行 MOX 燃料」の評価も行った。評価の手法・条件については、3.3 節の評価と同様であり、各高燃焼度化燃料の仕様・条件に基づき、燃焼計算コード ORIGEN2 を用いて各核種の物量・崩壊熱の計算を行い、その結果をベースに概略評価を行った。以下に、各項目に対する評価結果を示す。

##### (1) 再処理性への影響

5.2 節で設定した各高燃焼度化燃料を対象に、再処理時における溶解液の発熱量の概略評価を行った。ここで、「1-7 Gd 酸化物要素型」については、 $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  棒はせん断前に取り外すことを想定し、「現行 MOX 燃料」、「1-7 Gd 酸化物要素型」とも溶解時に溶解炉を未臨界とするため、Gd の添加を想定した。

評価結果として、表 5.5-1 に、冷却期間をパラメータ（15～50 年）とした 1 tHM 当たりの溶解液の発熱量を比較して示した。高燃焼度化（45 GWd/t → 55 GWd/t）することで、溶解液の発熱量に増加する傾向が認められ、「現行 MOX 燃料」と比較すると、いずれの燃料も 1.2 倍程度の増加であった。冷却期間の影響はほとんどなく、若干低下の傾向は見られるが、全ての期間で概ね 1.2 倍程度であった。MOX 高度化による影響もほとんどなく、「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型（Gd）」、「1-7 Gd 酸化物要素型」とも、「現行 MOX 燃料」の増加の程度と同じく 1.2 倍程度であった。

## (2) ガラス固化体への影響

5.2 節で設定した各高燃焼度化燃料を対象に、ガラス固化体の発生量・発熱量の概略評価を行った。ガラス固化体の発生量の評価手法・条件については、3.3 節の評価と同様とし、FP 酸化物割合を 10.1 wt%とすることを基準とし、FP（+AP）酸化物重量に基づき体数の簡易評価を行った。ここで、FP（+AP）酸化物としては、FP に加え、出力ピーキングの調整のために添加した Gd や溶解時に未臨界にするため添加する Gd も考慮した。また、ガラス固化体の条件としては、表 3.3-2 に示す国内のガラス固化体の性状を参考に、容積 150 L、比重 2.74 kg/L、重量 411 kg/体を想定した<sup>[3.3-1, 3.3-2]</sup>。

評価結果として、表 5.5-2 に、冷却期間をパラメータ（15～50 年）とした 1 tHM 当たりのガラス固化体発生量を比較して示した。高燃焼度化（45 GWd/t → 55 GWd/t）することで、主に FP の生成量が増加するため、「現行 MOX 燃料」と比較すると、いずれの燃料もガラス固化体の生成量は 1 tHM 当たり 1.2 体 から 1.5 体程度まで増加する傾向であった。MOX 高度化による影響はほとんどなく、「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型（Gd）」、「1-7 Gd 酸化物要素型」とも、「現行 MOX 燃料」の増加の程度と同じく 1.5 体程度であった。

次に、ガラス固化体の発熱量について、上述のガラス固化体の仕様を用い、それぞれ 1 体当たりの発熱量について評価した。

評価結果として、表 5.5-3 に、冷却期間をパラメータ（15～50 年）としたガラス固化体 1 体当たりの発生量を比較して示した。また、図 5.5-1 には、内訳（FP、Am、Cm）が分かるよう比較して示した。ガラス固化体 1 体当たりの発熱量について、ガラス固化体は FP（+AP）酸化物重量を基準として作成し体数が増加しているため、高燃焼度化による影響はあまり大きくなく、「現行 MOX 燃料」の高燃焼度化の影響は最大でも 1.05 倍程度であった。MOX 高度化による影響はほとんどなく、「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型（Gd）」、「1-7 Gd 酸化物要素型」でも増加は最大で 1.05～1.07 倍であり、「現行 MOX 燃料」と概ね同程度であった。発熱量増加の要因としては、いずれも FP の寄与は小さく、主に Cm の発熱の増加によるものであった。

## (3) 高燃焼度化による課題

高燃焼度化による MOX 高度化燃料のバックエンドに関する影響として、再処理性に関し溶解時の崩壊熱、ガラス固化体に関し発生量・発熱量の概略評価を行い、以下の結果を得た。

- ・溶解時の崩壊熱について、高燃焼度化（45 GWd/t → 55 GWd/t）により増加する傾向が

認められ、「現行 MOX 燃料」と比較するといずれの燃料も 1.2 倍程度の増加であった。MOX 高度化による影響もほとんどなく、「1-6 UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Gd)」、「1-7 Gd 酸化物要素型」とも、「現行 MOX 燃料」の増加と同程度であった。

- ・ ガラス固化体の生成量について、高燃焼度化 (45 GWd/t → 55 GWd/t) により、いずれの燃料も 1 tHM 当たり 1.2 体 から 1.5 体程度まで増加する傾向が認められた。ガラス固化体の発熱量については、高燃焼度化により増加する傾向は見られるが影響はあまり大きくなく、最大でも 1.05~1.07 倍であった。MOX 高度化による影響もほとんどなく、「1-6 UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Gd)」、「1-7 Gd 酸化物要素型」とも、「現行 MOX 燃料」の増加と同程度であった。

以上、高燃焼度化によるバックエンドに関する影響について、溶解時の崩壊熱やガラス固化体の生成量について増加の傾向が見られ、定量的な影響の見通しを把握できた。ただし、現行 MOX 燃料と MOX 高度化燃料で概ね差が生じないことが分かり、MOX 高度化による特有の課題はないものと考えられる。

表 5.1.1.1-1 MOX 燃料の高燃焼度化による影響の調査結果まとめ (対象: PWR)

分類	項目	影響
炉心設計	Pu 含有率	高燃焼度化に伴い Pu 含有率を増加する必要がある(現行指針の制限を超過する可能性もあり)。 <sup>*</sup>
	反応度停止余裕	Pu 量の増加により低下する(制御棒価値低下のため)。
	減速材温度係数	Pu 量の増加により負側ヘシフトする(ほう素価値の低下)。
	ドップラー温度係数	Pu 量の増加により負側ヘシフトする (Pu-240 の増加)。
	最大反応度添加率	Pu 量は増加するが影響なし(燃料装荷パターンの影響が支配的)。
	出力運転時ほう素濃度	Pu 量の増加により増加する(ほう素価値の低下)。
	実効遅発中性子割合 ( $\beta_{\text{eff}}$ )	Pu 量の増加により低下する(Puの $\beta_{\text{eff}}$ はUより小のため)。
	融点	高燃焼度化、Pu 含有率の増加により 融点は低下する。
	熱伝導率	高燃焼度化、Pu 含有率の増加により 熱伝導率は低下する。ただし、Pu 含有率 3~15wt%の範囲では影響は僅か。
	クリープ速度	Pu 含有率の増加により増加するが、現在の燃料要素設計ではペレットのクリープ変形は考慮してはいない。
燃料設計	ペレット径方向出力分布	Pu 含有率に応じて変化する(ペレット周辺での出力ピーキング挙動などに影響)。
	FP ガス放出	Pu 含有率の増加により Pu スポットの影響が出やすくなる可能性がある。
	He ガス放出	Pu 含有率の増加により MA 元素の $\alpha$ 崩壊の寄与が増加する。
	焼きしまり/スエリング	微細気孔や固体 FP によるスエリング挙動に変化はないと考えられる。
	Xe/Kr 比	Pu 含有率の増加により Xe、Kr 質量は変化する(PuとUの FP 生成率の相違による)。
	ガス内圧	スエリングによるプレナム体積の減少、ペレット外への FP ガス放出増大により内圧が増大する。燃焼の進展に伴う出力低下が少なく、高燃焼度での燃料温度は高くなり内圧に影響を与える。
	腐食	炉内滞在期間が増大すると燃料被覆管の腐食が増大し、腐食に伴い水素吸着量が増大する。
	PCI	高燃焼度化により 燃料破損に対する余裕が減少する(一方で、Pu 含有率の増加はクリープ速度を増加させるので緩和の方向)。
	リム組織	ペレット・リム部に形成される微細組織の範囲は増加する方向となる。
	フロントエンド	J-MOX における Pu 含有率の制限値の範囲(～18 wt%)であれば製造可能と考えられる。
バックエンド	高次の Pu、MA 生成量の増加により、長期冷却時の崩壊熱は増加する方向となる。	

<sup>\*</sup> フランスでは、炉心燃料運用の工夫(ウラン燃料と MOX 燃料体数のバランスやサイクル長最適化等)により Pu 含有率の大幅な増加なく高燃焼度化(52 GWd/t)とする MOX パリデーを行っており、その様な設計例もある。

表 5.1.2-1 MOX 燃料製造方法の違いによる Pu 均質性の違い<sup>[5.1.2-1]</sup>

	MIMAS	OCOM 15	OCOM 30	SBR	JNC
Area Fraction of Phases (%)	75.4	66	83	98-99	99.8
Matrix Pu rich spots	24.6	34	17	1-2 <sup>a</sup>	0.2 <sup>a</sup>
Distribution of input Pu (%)	39	3	3.5	96	99
Matrix Pu rich spots	61	97	96.5	4	1

<sup>a</sup> Discrete areas containing more than 20 wt% Pu.

表 5.1.1.2-2 (1/2) 軽水炉 (重水炉及び試験研究炉含む) における MOX 燃料照射試験の実施状況調査

照射炉 ( )内は集合体	ハルデン (IFA626) 重水炉	ハルデン (IFA702) 重水炉	KWO PWR	商業炉 PWR	Beznau-1 PWR	Gösgen PWR	Advanced Test Reactor 実験炉	BR2、BR3 PWR
概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FEMAXI-8 の MOX 燃料の不均一微細構造時の FP ガス放出モデルの開発<sup>[5.1.2-11]</sup></li> <li>• 軽水炉 MOX 燃料の熱伝導度低下解析評価<sup>[5.1.2-13]</sup></li> <li>• 74 GWd/t の高燃焼度まで照射された MOX 燃料と UO<sub>2</sub> 燃料の熱的性質の変化<sup>[5.1.2-14]</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MOX 燃料の高温での FP ガス放出と微細構造の変化の評価<sup>[5.1.2-15]</sup></li> <li>• OCOM プロセスによって製造された MOX ベレットの照射後試験<sup>[5.1.2-16]</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MOX 燃料の高燃焼度組織の観察、評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SBR MOX 燃料の FP ガス放出測定と分析<sup>[5.1.2-18]</sup></li> <li>• 照射済み SBR MOX 燃料の微細構造と核分裂ガス放出との関係評価<sup>[5.1.2-19]</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高燃焼度 PWR MOX 及び UO<sub>2</sub> 燃料の同位体組成分析 (MALIBU プログラム)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 兵器由来のプルトニウムを含む MOX 燃料の照射試験</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高燃焼度、高 Pu 含有率燃料の熱物性、FP ガス放出の挙動に関する調査</li> </ul>	
燃料仕様	PWR 燃料仕様	PWR 燃料仕様	PWR 燃料仕様	PWR 燃料仕様	PWR 燃料仕様	PWR 燃料仕様	PWR 燃料仕様	PWR 燃料仕様
燃焼度 (GWd/t)	66~72 (ピーク)、63 (要素平均)	73.8~74.4 (ピーク)、70 (要素平均)	42 (ピーク)、44.5 (要素平均)	63 (ピーク)	31.2~35.6 (要素平均)	67 (ピーク)	50 (要素平均)	56.7 (ピーク)
線出力 (kW/m)	29 (要素平均)	23~26 (要素平均)	18 (要素平均)	不明	20 (要素平均)	不明	30 (要素平均)	不明
Pu 含有率 (wt%) * : Pu フィッサイ ル富化度	8.4 (平均)	8.4 (平均)、6.12* (平均)	4.47~5.1 (平均)	6 (最大)	2.92~5.54	5 (平均)	5 (平均) ガリウム金属約 1wt% 含有	14.3
被覆管	Zry-4	Zry-4	Zry-4	不明	Zry-4	不明	Zry-4 とステンレス ケーブル	Zry-4
燃料製造方法	SBR、MIMAS	SBR、MIMAS	OCOM	MIMAS	SBR	不明	不明	MIMAS
燃料形式	クラスタ型 (上下各6本)	クラスタ型	不明	クラスタ型	14×14	15×15	キャプセル型	17×17
実施国・組織	日本	日本	European Commission, Forschungszentrum Karlsruhe	フランス	イギリス	日本	アメリカ (INL)	ベルギー
実施項目	バンクチャ試験、 EPMA、計装データ: 燃料中心温度、スタック 伸び、被覆管伸び、 内圧	バンクチャ試験、 EPMA、ギャップ測定、 偏心、密度測定、計装 データ: 熱電対、圧力計	SEM、KEMS、セラモグラ フィ、X線微量分析	光学顕微鏡観察、 EPMA、SEM、SIMS	バンクチャ試験、 EPMA、SEM	燃焼度測定	外観観察、寸法測定、 ガンマスペクトル、金相 試験、被覆ガリウム分 析、FP ガス放出、燃 焼分析	バンクチャ試験、 EPMA、SEM 等
文献 No.	[5.1.2-II, -I2, -I3]	[5.1.2-11, -13, -14]	[5.1.2-15, -16]	[5.1.2-17]	[5.1.2-18, -19]	[5.1.2-20]	[5.1.2-21]	[5.1.2-22]

表 5.1.2-2 (2/2) 軽水炉（重水炉及び試験研究炉含む）における MOX 燃料照射試験の実施状況調査

照射炉 ( ) 内は集合体	ハルデン (IFA688) 重水炉	不明 BWR	CIRUS 重水炉	CANDU 重水炉	ふげん (E09) 重水炉	商業炉 PWR	商業炉 PWR
概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>ドイツ (Gundremmingen) で照射された 9×9 燃料を再計装して HBWR で照射試験</li> <li>高燃焼度 (84 GWd/t) MOX 燃料の熱伝導度変化評価<sup>[5.1.2-23]</sup></li> <li>高燃焼度 MOX 燃料ペレットの熱伝導率評価<sup>[5.1.2-24]</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>20 年間貯蔵された使用済み BWR MOX 及び PWR UO<sub>2</sub> 燃料要素の照射後試験 (PIE) を実施し、貯蔵中の燃料の健全性を評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>インドにおける燃料開発のレビュー報告</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>過去 40 年間の CANDU 炉での照射試験及び PIE 結果 (UO<sub>2</sub> 燃料と MOX 燃料の比較) のまとめ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ふげんで照射された MOX 燃料の照射後試験</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>海外で実施された UO<sub>2</sub> 燃料と MOX 燃料の LOCA 試験での比較試験結果</li> <li>NSRR で実施された MOX 燃料の RIA 試験等の評価結果</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子力規制庁の委託研究<sup>[5.1.2-31]~[34]</sup></li> <li>NSRR で実施された MOX 燃料の RIA 試験等の評価結果</li> </ul>
燃料仕様	BWR 燃料仕様	BWR 燃料仕様	重水炉燃料仕様	重水炉燃料仕様	新型転換炉実証炉燃料仕様	PWR 燃料仕様	PWR 燃料仕様
燃焼度 (GWd/t)	84 (ピーク)、83.7 (要素平均)	18~22 (要素平均)	16.3 (集合体平均)	5~49 (要素平均)	47.5 (ピーク)	~52.6 (要素平均)、~57 (局所)	59~64 (要素平均)
線出力 (kW/m)	28 (ピーク) 15~21 (要素平均)	不明	41.4 (ピーク)	67 (ピーク)	43.2 (ピーク) 36 (要素平均)	—	パルス照射時のエンタルヒ増分 (287~688 J/g)
Pu 含有率 (wt%) *: Pu フイッサイ ル富化度	5.5* (最大)	2.7 (最大)	4 (平均)	0.5~5.3	2.5~5.7	9.81	7.2、5.6
被覆管	Zry-2	不明	Zry-2	Zry-4	Zry-2	M5	M5、Zry-4
燃料製造方法	MIMAS	不明	不明	均質、MIMAS 模擬、UO <sub>2</sub> 中に Pu	JAEA 法	MIMAS	MIMAS
燃料形式	クラスタ型	6×6	クラスタ型	19~42 本クラスタ	36 本クラスタ	実験カプセル (PWR 燃料要素)	RIA 試験用の実験カプセル (17×17、14×14 燃料)
実施国・組織	日本	不明	インド	カナダ	日本	EDF (フランス)	日本
実施項目	パンクチャ試験、金相試験、計装データ; スタック伸び、被覆管伸び、内圧	パンクチャ試験、EPMA、金相試験、被覆管表面観察、被覆管強度試験、被覆管水素量等	パンクチャ試験、金相試験、被覆管観察等	各種非破壊・破壊試験	外観観察、寸法測定、パンクチャ試験、EPMA、SEM、金相試験、物性測定 等	LOCA 試験	RIA 試験
文献 No.	[5.1.2-23, -24]	[5.1.2-25]	[5.1.2-26]	[5.1.2-27]	[5.1.2-28, -29]	[5.1.2-30]	[5.1.2-31]~[34]

表 5.1.2-3 主な燃料仕様と照射条件<sup>[5.1.2-30]</sup>

燃料タイプ	UO <sub>2</sub>	MOX
ウラン濃縮度 or Pu含有率 (wt%)	3.8	9.81
被覆管	M5	M5
要素平均燃焼度/局所燃焼度 (GWd/tM)	~60.8 / ~65	~52.6 / ~57
LOCA模擬試験の初期内圧 (bar) 及びガス組成	40, 5 Ar 95% He 5%	40, 5 Ar 95% He 5%
試験カプセルの内圧 (bar) 及び封入ガス	1, He	1, He

表 5.1.2-4 高燃焼度 MOX 燃料の NSRR の照射試験の概要<sup>[5.1.2-31~34]</sup>

試験名称	CN-1	CN-2	BZ-3	BZ-4
要素平均燃焼度 (GWd/t)	64			
Pu 含有率 (wt%)	7.2			59
被覆管	M5			Zry-4
燃料形式	17×17			14×14
照射炉	シンシ B3 炉 (フランス)			ベツナウ炉 (スイス)
試験目的	RIA 時燃料挙動及び破損限界の把握			RIA 時 FP ガス放出挙動の把握
パルス照射条件	室温大気圧 (21°C、0.1 MPa)	高温高圧 (262-228°C、6.8 MPa)	高温高圧 (281°C、6.6 MPa)	室温大気圧 (22°C、0.1 MPa)

表 5.2-1 MOX 高度化燃料（高燃焼度燃料）の解析結果一覧（現行燃焼度燃料炉心との比較）

		0		1-6		1-7	
		リアレンス型		UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd)		Gd 酸化物要素型	
		現行燃焼度	高燃焼度	現行燃焼度	高燃焼度	現行燃焼度	高燃焼度
		燃焼度: 45 GWd/t (燃料集合体最高)	燃焼度: 55 GWd/t (燃料集合体最高)	燃焼度: 45 GWd/t (燃料集合体最高)	燃焼度: 55 GWd/t (燃料集合体最高)	燃焼度: 45 GWd/t (燃料集合体最高)	燃焼度: 55 GWd/t (燃料集合体最高)
① 燃料仕様	MOX 燃料要素	本数	264 本	252 本	260 本	260 本	260 本
		Pu 含有率	3 種類 5.44 wt% 7.5 wt% 12.3 wt%	2 種類 11.0 wt% 12.3 wt%	1 種類 12.3 wt%	1 種類 12.3 wt%	2 種類 10.0 wt% 12.3 wt%
		種類	—	—	—	—	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒
		上記以外の燃料要素等	—	—	—	—	—
② 物質収支	集合体当たり	装荷時	Pu 重量 (kg)	49.8	54.5	56.9	56.6
		取出時	Puf 割合 (wt%)	56.70	57.28	55.52	57.28
	炉心当たり (約 1/4 炉心)	装荷時	Pu 消費量 (kg) (装荷一取出)	10.5	10.8	13.6	11.3
		取出時	Pu 重量 (kg)	—	15.7%増加	14.3%増加	14.3%増加
③ 崩壊熱	現行 MOX 燃料集合体(表中のリアレンス型燃料集合体に対する一ス*)に対する比率 * Pu 組成: 高次化組成 (Puf 64.7 wt%)	取出時	Pu 重量 (kg)	—	15.7%増加	14.3%増加	13.6%増加
		0.5 年後	取出時	1.00	1.01	1.01	1.02
		1 年後	取出時	1.00	1.11	1.01	1.03
		5 年後	取出時	1.00	1.13	1.01	1.03
		10 年後	取出時	1.00	1.24	1.03	1.05
		30 年後	取出時	1.00	1.23	1.04	1.07
	30 年後	取出時	1.00	1.18	1.05	1.09	

表 5.5-1 再処理時における 1tHM 当たりの溶解液の発熱量の比較\* [単位：kW]

燃料概念	再処理までの冷却期間 [年]					備考
	15	20	30	40	50	
0(リファレンス)： 現行 MOX 燃料 (現行燃焼度 45 GWd/t) ・ 溶解時 Gd 添加	4.997	4.693	4.202	3.811	3.495	溶解時に臨界を避けるには、可燃性毒物の添加が必要。臨界回避に必要な量の Gd の添加を想定。
0(リファレンス)： 現行 MOX 燃料 (高燃焼度 55 GWd/t) ・ 溶解時 Gd 添加	6.065 (1.214)	5.638 (1.201)	4.963 (1.181)	4.441 (1.165)	4.029 (1.153)	
1-6: UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd) (高燃焼度 55 GWd/t)	6.114 (1.224)	5.693 (1.213)	5.024 (1.196)	4.506 (1.182)	4.095 (1.172)	UO <sub>2</sub> -Gd 燃料要素の Gd の溶解により、溶解時の臨界は回避の見込み。
1-7: Gd 酸化物要素型 (高燃焼度 55 GWd/t) ・ Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、 再処理前に取り外し ・ 溶解時 Gd 添加	6.138 (1.228)	5.717 (1.218)	5.047 (1.201)	4.528 (1.188)	4.116 (1.178)	溶解時に臨界を避けるには、可燃性毒物の添加が必要。臨界回避に必要な量の Gd の添加を想定。

\* 表中、括弧内の値は「0(リファレンス)：現行 MOX 燃料(現行燃焼度 45 GWd/t)」の発熱量に対する比

表 5.5-2 1 tHM 当たりのガラス固化体発生量 (FP 含有率基準) の比較\* [単位：体]

燃料概念	再処理までの冷却期間 [年]					備考
	15	20	30	40	50	
0(リファレンス)： 現行 MOX 燃料 (現行燃焼度 45 GWd/t) ・ 溶解時 Gd 添加	1.218	1.218	1.219	1.219	1.219	溶解時に臨界を避けるには、可燃性毒物の添加が必要。臨界回避に必要な量の Gd の添加を想定。
0(リファレンス)： 現行 MOX 燃料 (高燃焼度 55 GWd/t) ・ 溶解時 Gd 添加	1.467 (1.205)	1.467 (1.205)	1.468 (1.205)	1.468 (1.205)	1.469 (1.205)	
1-6: UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd) (高燃焼度 55 GWd/t)	1.432 (1.176)	1.432 (1.176)	1.433 (1.176)	1.433 (1.176)	1.434 (1.176)	UO <sub>2</sub> -Gd 燃料要素の Gd の溶解により、溶解時の臨界は回避の見込み。
1-7: Gd 酸化物要素型 (高燃焼度 55 GWd/t) ・ Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、 再処理前に取り外し ・ 溶解時 Gd 添加	1.466 (1.204)	1.467 (1.204)	1.468 (1.204)	1.468 (1.204)	1.468 (1.204)	溶解時に臨界を避けるには、可燃性毒物の添加が必要。臨界回避に必要な量の Gd の添加を想定。

\* 表中、括弧内の値は「0(リファレンス)：現行 MOX 燃料(現行燃焼度 45 GWd/t)」のガラス固化体発生量に対する比

表 5.5-3 ガラス固化体 1 体当たりの発熱量の比較\* [単位：kW/体]

燃料概念	再処理までの冷却期間 [年]				備考
	15	20	30	50	
0(リアレンス)： 現行 MOX 燃料 (現行燃焼度 45 GWd/t) ・ 溶解時 Gd 添加	2.651	2.452	2.142	1.907	1.725
0(リアレンス)： 現行 MOX 燃料 (高燃焼度 55 GWd/t) ・ 溶解時 Gd 添加	2.775 (1.047)	2.531 (1.032)	2.158 (1.007)	1.882 (0.987)	1.674 (0.971)
1-6: UO <sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd) (高燃焼度 55 GWd/t)	2.846 (1.074)	2.600 (1.061)	2.224 (1.038)	1.945 (1.020)	1.735 (1.006)
1-7: Gd 酸化物要素型 (高燃焼度 55 GWd/t) ・ Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒、 再処理前に取り外し ・ 溶解時 Gd 添加	2.785 (1.051)	2.546 (1.038)	2.180 (1.018)	1.908 (1.000)	1.702 (0.987)

\* 表中、括弧内の値は、「0(リアレンス)：現行 MOX 燃料(現行燃焼度 45 GWd/t)」の発熱量に対する比

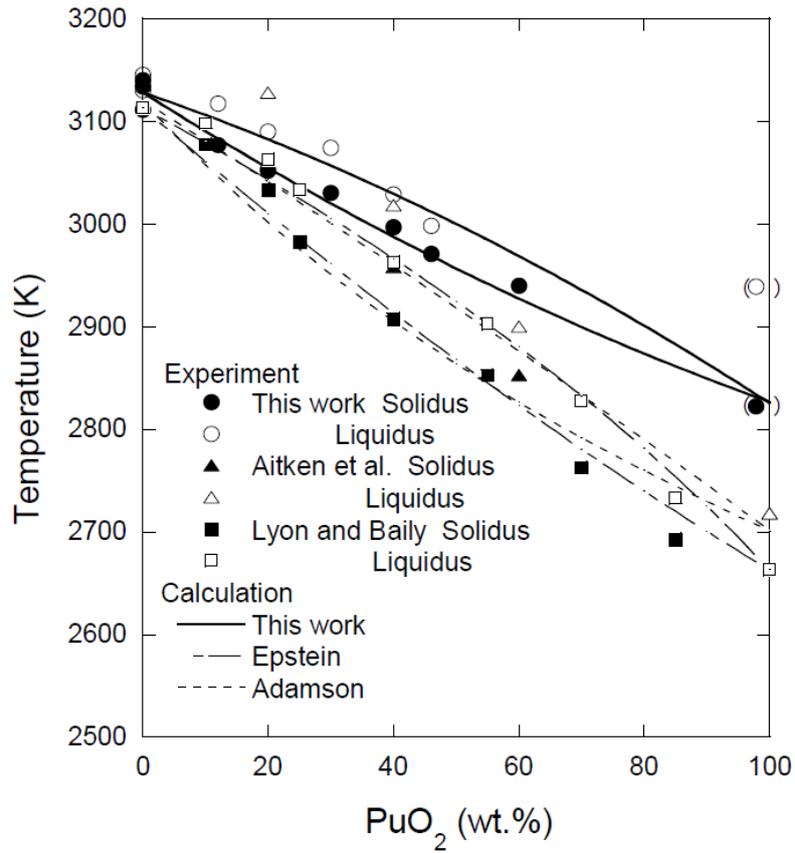


図 5.1.2-1 UO<sub>2</sub>-PuO<sub>2</sub>系の融点[5.1.2-8]

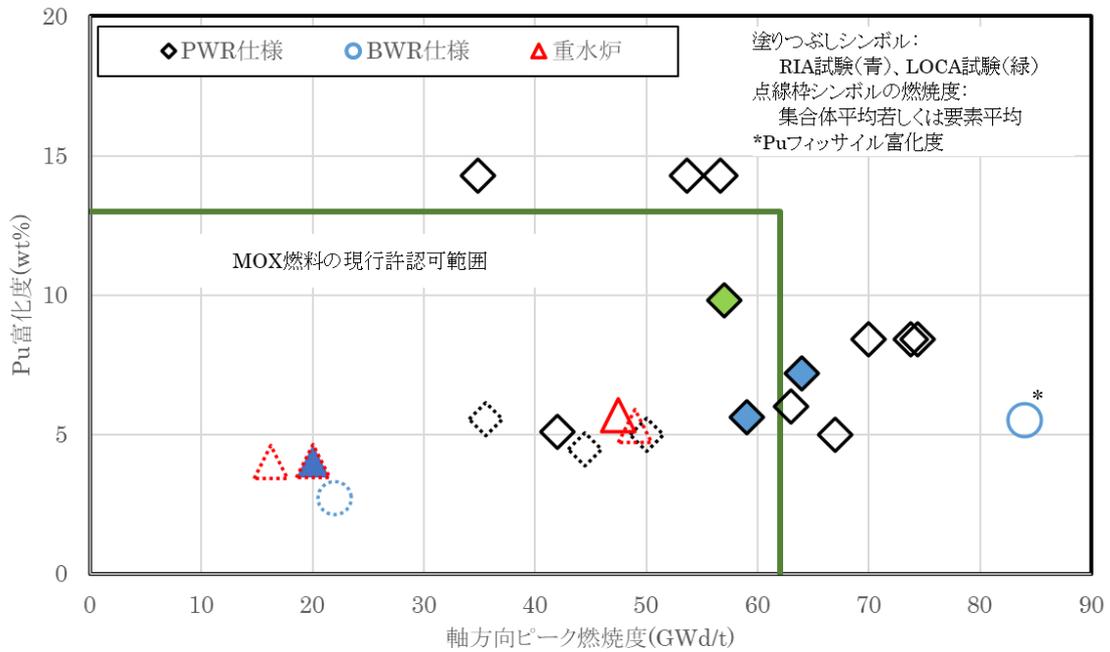
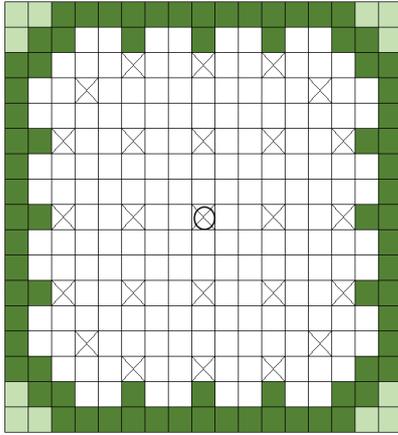


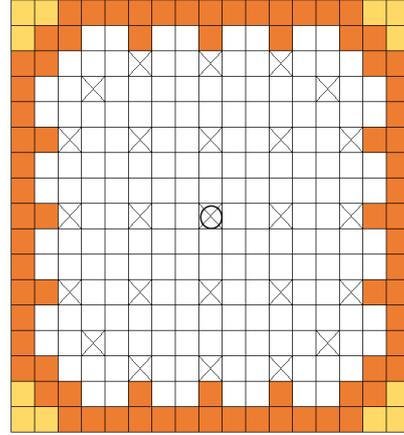
図 5.1.2-2 MOX 燃料照射試験の燃焼度と Pu 含有率の関係

**0: リファレンス型**  
(現行燃焼度 45 GWd/t)



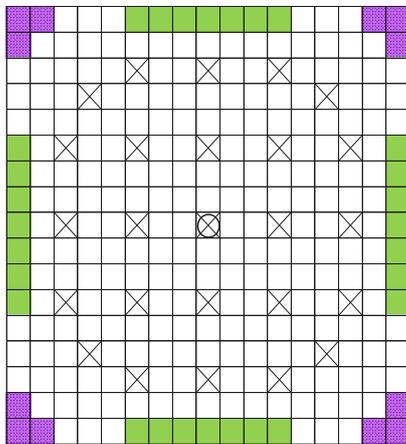
種類	本数 (本)	U濃縮度 (wt%)	Pu含有率 (wt%)	核分裂性 Pu富化度 (wt%)
⊗ 炉内計装用案内シンプル	1	-	-	-
⊗ 制御棒案内シンプル	24	-	-	-
高Pu含有率MOX燃料要素	176	0.25	10.60	7.25
中Pu含有率MOX燃料要素	76	0.25	6.20	4.24
低Pu含有率MOX燃料要素	12	0.25	4.50	3.08
<合計>	264	<平均> 0.25	<平均> 9.06	<平均> 6.19

**0: リファレンス型**  
(高燃焼度 55 GWd/t)



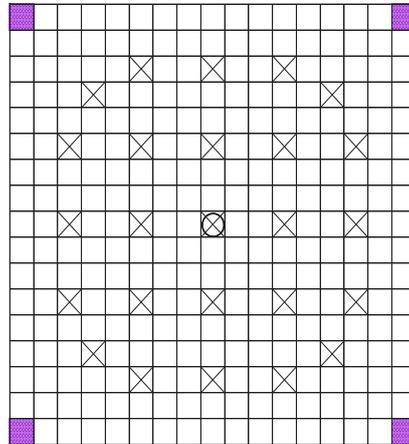
種類	本数 (本)	U濃縮度 (wt%)	Pu含有率 (wt%)	核分裂性 Pu富化度 (wt%)
⊗ 炉内計装用案内シンプル	1	-	-	-
⊗ 制御棒案内シンプル	24	-	-	-
高Pu含有率MOX燃料要素	176	0.25	13.80	8.93
中Pu含有率MOX燃料要素	76	0.25	8.20	5.31
低Pu含有率MOX燃料要素	12	0.25	5.90	3.82
<合計>	264	<平均> 0.25	<平均> 11.83	<平均> 7.65

**1-6: UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd)**  
(現行燃焼度 45 GWd/t)



種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	U濃縮度 (wt%)	Gd濃度 (wt%)
⊗ 炉内計装用案内シンプル	1	-	-	-
⊗ 制御棒案内シンプル	24	-	-	-
高Pu含有率MOX燃料要素①	224	12.30	0.25	-
高Pu含有率MOX燃料要素②	28	11.00	0.25	-
UO <sub>2</sub> -Gd燃料要素(固溶体型)	12	-	4.90	7.5
<合計>	264	<平均> 12.16	<平均> 0.46	

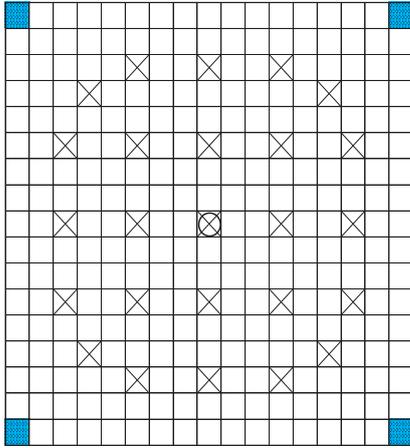
**1-6: UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd)**  
(高燃焼度 55 GWd/t)



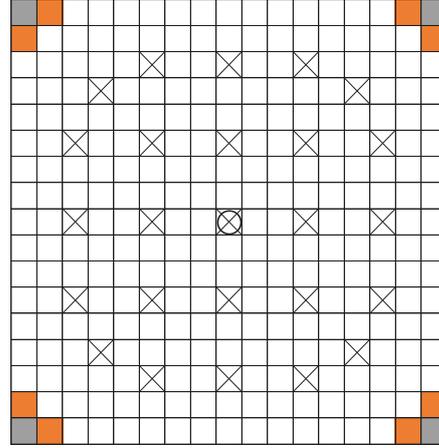
種類	本数 (本)	U濃縮度 (wt%)	Pu含有率 (wt%)	核分裂性 Pu富化度 (wt%)	Gd濃度 (wt%)
⊗ 炉内計装用案内シンプル	1	-	-	-	-
⊗ 制御棒案内シンプル	24	-	-	-	-
高Pu含有率MOX燃料要素	260	0.25	12.30	7.96	-
UO <sub>2</sub> -Gd燃料要素(固溶体型)	4	4.90	-	-	10.0
<合計>	264	<平均> 0.32	<平均> 12.30	<平均> 7.96	

図 5.2-1(1/2) MOX 高度化燃料 (高燃焼度燃料) の燃料集合体構成  
(現行燃焼度燃料との比較)

1-7: Gd 酸化物要素型  
(現行燃焼度 45 GWd/t)



1-7: Gd 酸化物要素型  
(高燃焼度 55 GWd/t)



種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒(又はペレット)	
			直径 (mm)	Gd濃度 (wt%)
⊗ 炉内計装用案内シンプル	1	-	-	-
⊗ 制御棒案内シンプル	24	-	-	-
高Pu含有率MOX燃料要素	260	12.30	8.19	-
Gd酸化物要素(Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒)	4	-	8.19	34.0
	<合計>	<平均>		
	264	12.30		

種類	本数 (本)	U濃縮度 (wt%)	Pu富化度 (wt%)	核分裂性 Pu富化度 (wt%)	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒	
					直径 (mm)	Gd濃度 (wt%)
⊗ 炉内計装用案内シンプル	1	-	-	-	-	-
⊗ 制御棒案内シンプル	24	-	-	-	-	-
高Pu含有率MOX燃料要素	252	0.25	12.30	7.96	-	-
中Pu含有率MOX燃料要素	8	0.25	10.00	6.47	-	-
Gd酸化物要素(Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 棒)	4	-	-	-	8.19	15.0
	<合計>	<平均>	<平均>	<平均>		
	264	0.25	12.23	7.91		

図 5.2-1(2/2) MOX 高度化燃料 (高燃焼度燃料の燃料集合体構成  
(現行燃焼度燃料との比較)

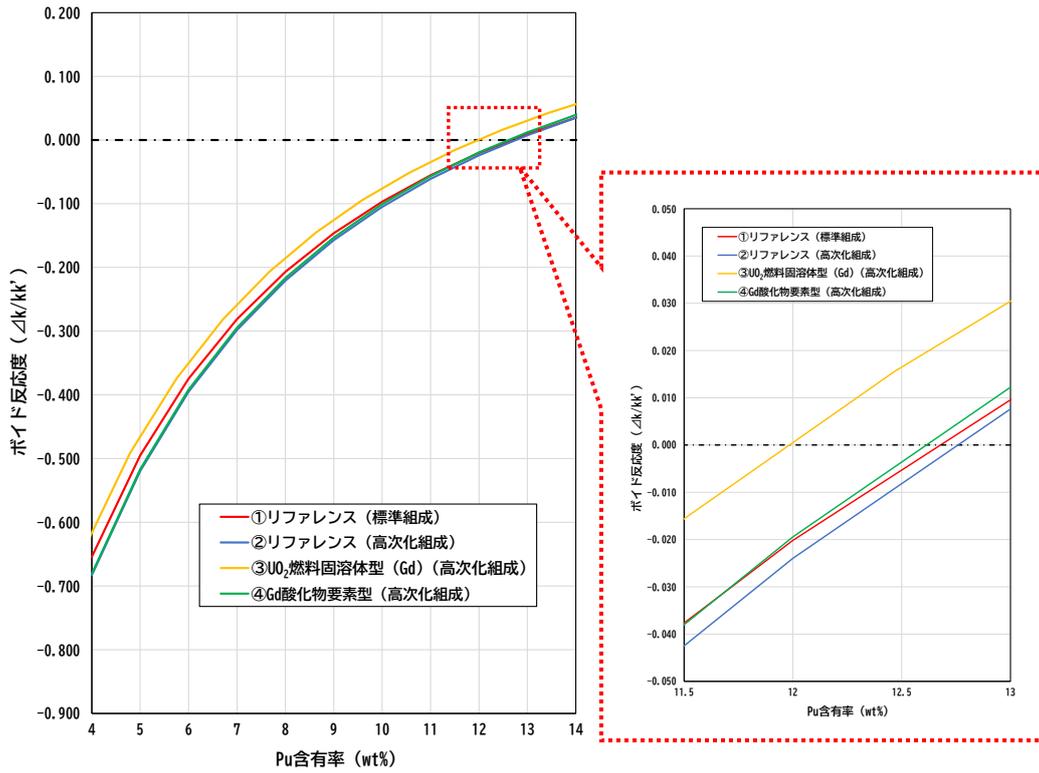


図 5.3-1 各解析ケースにおける Pu 含有率とボイド反応度の関係 (PWR)

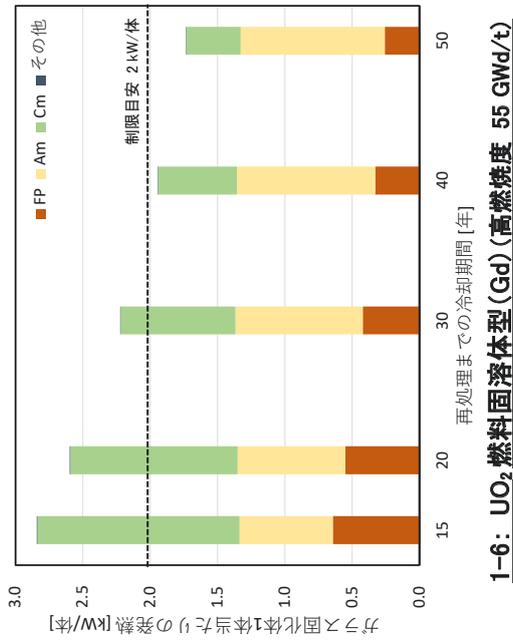
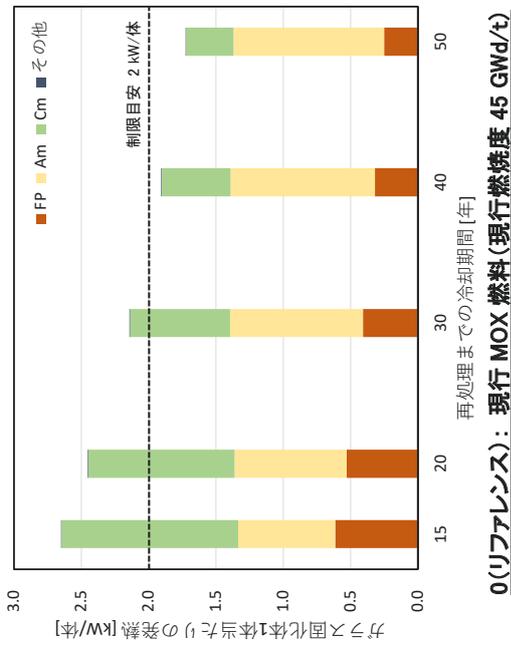
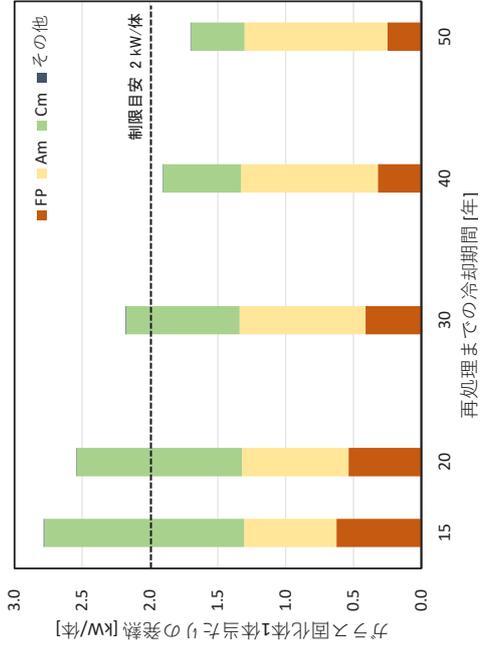
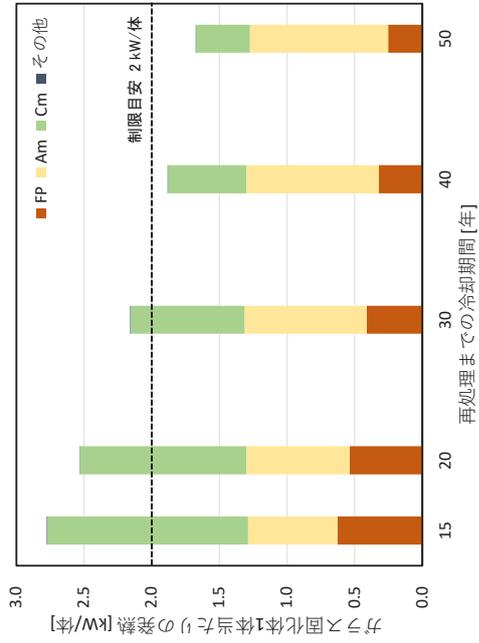


図 5.5-1 ガラス固化体 1 体当たりの発熱量 (FP 含有率基準) 及びその内訳 (FP、Am、Cm) の比較

## 6. 全体まとめ

軽水炉 MOX 燃料の高度化に向けた研究として、既存炉で効果的な Pu 利用（例：プルサーマルプラントの必要基数の削減など）や使用済燃料（中間貯蔵量）の削減に貢献できる燃料概念の検討を行った。具体的には、PWR を対象に現行の MOX 燃料指針の範囲（Pu 含有率： $\leq 13$  wt%、燃焼度： $\leq 45$  GWd/t、MOX 燃料装荷： $\leq 1/3$ ）で Pu 装荷量増加の可能性を有する燃料の候補概念を抽出し、現行の MOX 燃料と同等レベルの核的特性を維持する燃料仕様を設定し、「炉心・燃料」、「フロントエンド」、「バックエンド」の観点で比較を行い有望な燃料概念の選定を行った。そして、選定した燃料概念について、核燃料サイクル諸量に関する概略的な評価などより詳細な評価を行い、効果的な Pu 利用にどの程度有効となるか定量的な見通しを把握した。加えて、将来、効果的な Pu 利用に関連して高燃焼度化が求められる場合を想定し、高燃焼度化の課題についても調査・検討を行った。以下に、今回の検討における主要な成果の概略を示す。

### ① MOX 燃料高度化の燃料候補概念について

現状の MOX 燃料集合体では、隣接する  $UO_2$  燃料集合体からの柔らかいスペクトルの中性子流入による局所出力上昇の調整のため、外周部に低 Pu 含有率の燃料要素を装荷している。Pu 装荷量増加の方策として、この出力ピーキングの調整について可燃性毒物などを用いて行うことで、外周部の燃料の Pu 含有率を増加でき、全体として装荷量を増加させる方策が有効であることが分かった。この方策に基づき、Pu 装荷量の増加が期待できる幾つかの燃料候補概念を抽出した。

### ② 有望な燃料候補概念の選定

抽出した各燃料候補概念について、集合体セルベースの簡易的な核計算に基づき、現行 MOX 燃料炉心と同等の臨界性・出力ピーキングを維持する燃料仕様の評価を行った。得られた仕様に基づき、炉心・燃料（Pu 装荷量、燃料開発の負荷）、フロントエンド（燃料製造への影響）、バックエンド（ガラス固化体量、崩壊熱）の観点から各候補概念の比較を行い、有望概念の絞り込みを行った。結果として、Pu 装荷量増加や燃料製造性に優れるとともに、照射実績を有し開発負荷の少ない「1-6  $UO_2$  燃料固溶体型（Gd）」が有望概念として選定された。また、「1-7 Gd 酸化物要素型」についても、 $Gd_2O_3 \cdot ZrO_2$  棒は照射試験の負荷が比較的小さいこと（材料照射で行える）に加え、将来的により高い特性を期待できることから、代替候補として選定した。これらの燃料概念では、炉心当たりの Pu 装荷量について、いずれも現行の MOX 燃料炉心より 15%程度増加可能となる見通しが得られた。

### ③ 選定した燃料概念に関する詳細検討

上述の MOX 高度化燃料有望概念の導入による Pu 装荷量の 15%程度の増加が、実際にプルサーマルプラントの必要基数や核燃料サイクル諸量にどの程度影響するのかを定量的に把握するため、核燃料サイクルマシバランス解析コードを用いて概略的な諸量評価を行った。その結果、プルサーマルプラントの総出力について、現行 MOX 燃料炉心を想定した場合の約 12 GWe から約 10 GWe と 2 GWe 程度低減でき（100 万 kWe プラント 2 基相当）、プラント基数の削減に有効なことを確認した。また、MOX 燃料集合体の製造量や中間貯蔵量につ

いても、この Pu 装荷量の増加により 13%程度減少する結果となり、経済性の向上、中間貯蔵量も減少する見通しを確認した。

#### ④ 高燃焼度化の課題に関する調査・検討

効果的なプルトニウム利用に関連し、将来、高燃焼度化が求められる場合を想定し、高燃焼度化の課題について調査・検討を行った。具体的には、炉心・燃料の設計例の調査、燃料物性・照射試験・安全研究・燃料製造に関する調査などを行うとともに、今回選定した MOX 高度化燃料について、集合体セルベースの簡易的な核計算を行い高燃焼度化による燃料仕様への影響の評価を行った。また、高燃焼度化の課題の一つである Pu 含有率制限について、制限緩和の見通し検討に資するため、Pu 含有率制限の根拠に関する調査・検討を行い、結果を整理した。加えて、高燃焼度化によるフロントエンド・バックエンドへの課題の調査・検討も行い、バックエンドに関しては、高燃焼度化による崩壊熱・ガラス固化体生成量への影響の見通しを把握した。

## 7. 今後の課題

### 7.1 主要な課題

軽水炉 MOX 燃料の高度化に向けた研究として、既存炉で効果的なプルトニウム利用や使用済燃料の削減に貢献できる有望な燃料概念の検討を行った。この有望燃料の実用化に向けては、今後実施すべき多くの課題があり、主要な課題について以下にまとめた。

- ・今回選定した MOX 高度化燃料（「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd)」、 「1-7 Gd 酸化物要素型」）の成立性について、本検討では、あくまで核的成立性に関する概略的な見通し評価までであり、実用化に向けては、全炉心解析による詳細な核的成立性の評価、加えて、燃料健全性や核計装への影響、プラントの安全評価などについて確認する必要がある。
- ・今回の燃料仕様・集合体配置の評価のため行った核計算は、集合体セルベースの簡易的モデルによる計算であり、仕様を概略的に把握するため実施したものである。今後、モンテカルロ計算コードなどによる計算や、全炉心解析による集合体の運用も考慮した計算など、より詳細な核計算を行い、仕様への影響を確認する必要がある。
- ・MOX 高度化燃料の実用化に向けては、今回有望と判断した「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd)」でも、(UO<sub>2</sub>-Gd 燃料要素は実機での使用実績があるので、ピン照射試験は省略できると考えるが) LTA (先行試験燃料集合体) など集合体照射試験による実証は必要と考えられる。そのため、照射試験を含む開発計画の検討が必要である。

### 7.2 課題に関する補足検討 (参考)

前節で挙げた課題のうち、2 番目として挙げたより詳細な核計算による燃料仕様への影響及び 3 番目として挙げた照射試験を含む開発計画について、補足的に追加の検討を行ったので、参考として以下に紹介する。

#### (1) より詳細な核計算による燃料仕様への影響について

課題の 2 番目として挙げたより詳細な核計算による燃料仕様への影響について、今回の検討では、核計算コードとして MOSRA-SRAC コードを用いた簡易モデルによる計算結果に基づき、燃料仕様や集合体配置の設定を行っている。今後、より詳細な核計算を行うことで、燃料仕様に影響を与える可能性があるため、まずは参考としてモンテカルロ計算コードを用いた計算を行うことで、どの程度影響があるか評価を試みることにした。

##### i) 評価対象

評価対象としては、今回、MOX 高度化燃料として選定された「1-6 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd)」燃料を対象とした。3.1 節において、MOSRA-SRAC コードの計算結果に基づき設定した燃料の仕様・集合体配置を図 7.1 に示した (以下、MOSRA-SRAC 評価仕様)。まずは、この燃料を対象にモンテカルロ計算コードで同様の解析を行い、臨界性・出力ピーキングなど MOSRA-SRAC コードによる解析結果と比較を行う。

## ii) 計算手法・モデル

今回の比較において、モンテカルロ計算コードとしては MVP/GMVP-III を用いることとした。計算体系については、3.1 節の MOSRA-SRAC コードの計算と同様の体系とすることとし、図 7.2 に示すように、軸方向は無限長、水平方向は 1/4 集合体を 4 体分配置する 2×2 集合体カラーセットとし、MOX 燃料 1 体に対してウラン燃料 3 体を隣接配置とした。また、無限増倍率計算と出力分布計算において、発熱領域、ヒストリ数の条件を以下のとおりとした。

## ① 無限増倍率及び燃焼組成（物質収支）計算

- ・発熱領域： MOX 燃料集合体の燃料領域のみ
- ・ヒストリ数： 100 万（1 万ヒストリ/バッチ、有効バッチ数：100、捨てバッチ数：100）

## ② 出力分布及びローカルピーキング係数計算

- ・発熱領域： モデル化範囲内の全燃料
- ・ヒストリ数： 2,500 万（1 万ヒストリ/バッチ、有効バッチ数：2,500、捨てバッチ数：100）

その他、使用する核データライブラリは以下のとおりとした。

- ・核データライブラリ： JENDL-4.0

## iii) 計算結果

MVP/GMVP-III で行った計算の結果として、「1-6 UO<sub>2</sub>燃料固溶体型（Gd）」燃料（MOSRA-SRAC 評価仕様）の無限増倍率、出力ピーキング係数の燃焼度変化を図 7.3、図 7.4 にそれぞれ示した。

図 7.3 において、無限増倍率は燃焼度 28 GWD/t の時点で現行 MOX 燃料（リファレンス燃料）の値と概ね等しくなっているが、一方、図 7.4 に示したように、出力ピーキング係数については、判断目安の 1.14 を超え 1.19 程度まで増加しており、SRAC コードによる結果を大きく上回る結果であった。具体的に出力のピークが発生する燃料要素の位置を確認するため、図 7.5 に集合体内の各燃料要素のマップを燃焼度毎（0, 10, 20, 30, 40, 45 GWD/t）に示した。出力がピークとなる位置は、照射の初期側（～10 GWD/t）では、外周の一辺の中央付近に出力低下のために装荷された 7 本の低 Pu 含有率燃料に隣接する燃料要素、燃焼が進むと、コーナー付近の UO<sub>2</sub>-Gd 燃料に隣接する燃料要素であった。

この様に MVP/GMVP-III によるモンテカルロ計算では、全体的に集合体の外周の燃料要素の出力は高くなる傾向にあり、SRAC コードによる計算では、隣接する UO<sub>2</sub> 燃料集合体から流入する軟らかいスペクトルの中性子やコーナー付近の Gd による影響を十分に模擬できていなかった可能性が考えられる。

## iv) 燃料仕様・集合体配置への影響

上述のモンテカルロ計算の結果、「MOSRA-SRAC 評価仕様」の燃料では、出力ピーキング係数は判断目安を満足しない見通しが示された。そこで、この MVP/GMVP-III

を用いて、判断目安 1.14 を満たすように燃料仕様・集合体配置の見直し評価を行うこととした。

評価の結果として、図 7.6 に見直し後の変更した集合体配置（以下、MVP 評価仕様）を SRAC コードで評価した配置と比較して示した。モンテカルロ計算による集合体配置では、外周部の燃料要素の出力ピーキングを下げするため、低 Pu 含有率の燃料要素の数を増やす必要があった。その結果、外周 1 層全て低 Pu 含有率燃料とし、コーナー部のみ 2 層目も低 Pu 含有率燃料にすることで、判断目安 1.14 を満たす結果となった。図 7.7 に、集合体内の各燃料要素のマップを燃焼度毎（0, 10, 20, 30, 40, 45 GWd/t）に示した。出力ピーキングとなる燃料要素の位置は、外周辺の中央から燃焼とともにコーナー側に移動していき、最終的に  $\text{UO}_2\text{-Gd}$  燃料に隣接する位置となるが、いずれも判断目安 1.14 を下回る事が認められた。この「MVP 評価仕様」に変更することで、低 Pu 含有率燃料の仕様と数は、「MOSRA-SRAC 評価仕様」の 11.0 wt%・28 本から、10.5 wt%・52 本に変わるため、集合体中に装荷される Pu 量も低下することになる。計算の結果、集合体当たりの Pu 装荷量は、表 7.1 に示すように、「MOSRA-SRAC 評価仕様」ではリファレンスの 9.4%増加だったのが、「MVP 評価仕様」では 7.1%増加まで、2%程度低下することになった。他方、全炉心で Pu 装荷量を比較すると、MOX 燃料集合体の数が増加する効果により、「MOSRA-SRAC 評価仕様」の 15%増加から同じく 2%減り 13%増加となった。

以上より、モンテカルロ計算による詳細な核計算を導入することで、MOX 高度化燃料の仕様・集合体配置はある程度影響を受けるが、Pu 装荷量への影響としては、基本的な傾向は維持され、全炉心で 15%から 13%までの 2%程度の低下と限定的であり、今回の MOX 高度化燃料の効果は維持される見通しがあると言える。今後、隣接  $\text{UO}_2$  集合体の運用など、より詳細なモデルでの計算についても影響を確認していく必要があると考えられる。

## (2) 照射試験を含む開発計画について

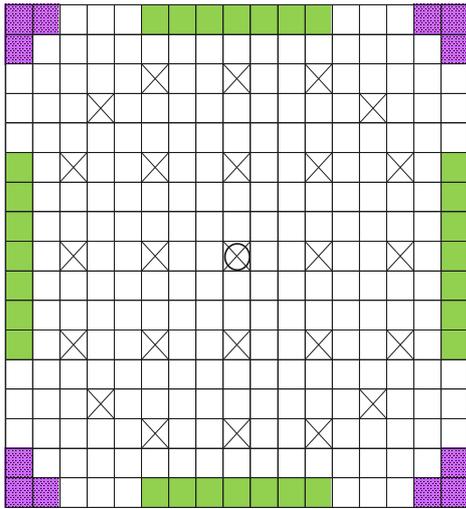
課題の 3 番目として挙げた照射試験を含む開発計画の課題について、「1-6  $\text{UO}_2$  燃料固溶体型 (Gd)」を対象に検討を行った。今回検討した  $\text{UO}_2$  燃料固溶体型 (Gd) の燃料要素仕様は、現行仕様制限の範囲内 (Pu 含有率 $\leq$ 13 wt%、 $\text{UO}_2\text{-Gd}$  Gd 濃度 $\leq$ 10 wt%) である。そのため、燃料要素の開発要素はほとんどなく、LTA (先行試験燃料集合体) など集合体照射試験から開始を実施すればよいと考えられる。LTA の実施には、以下の整備が必要であると考えられる。

- ・ MOX 燃料製造施設整備及び製造
- ・ LTA 等の規制の運用ガイダンスの整理
- ・ 設置許可変更、設工認申請等の許可・認可

LTA の実施には、燃料仕様の詳細設計に加え、上記整備も含めた計画検討が必要である。

表 7.1 物質収支の比較 (MVP 評価仕様と MOSRA-SRAC 評価仕様の比較)

	Pu 装荷量 [kg]		
	MOSRA-SRAC 評価仕様	MVP 評価仕様	リファレンス (現行 MOX 燃料)
Pu	53.9 (+9.4%)	52.8 (+7.1%)	49.3
Am	0.6 (+9.4%)	0.6 (+7.1%)	0.5
Pu+ <sup>241</sup> Am	54.5 (+9.4%)	53.4 (+7.1%)	49.8



種類	本数 (本)	Pu含有率 (wt%)	U濃縮度 (wt%)	Gd濃度 (wt%)
⊗ 炉内計装用案内シンプル	1	-	-	-
⊗ 制御棒案内シンプル	24	-	-	-
高Pu含有率MOX燃料要素①	224	12.30	0.25	-
高Pu含有率MOX燃料要素②	28	11.00	0.25	-
UO <sub>2</sub> -Gd燃料要素(固溶体型)	12	-	4.90	7.5
<合計>	264	<平均>	<平均>	
		12.16	0.46	

図 7-1 UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd) の燃料仕様・集合体配置  
(MOSRA-SRAC 評価仕様)

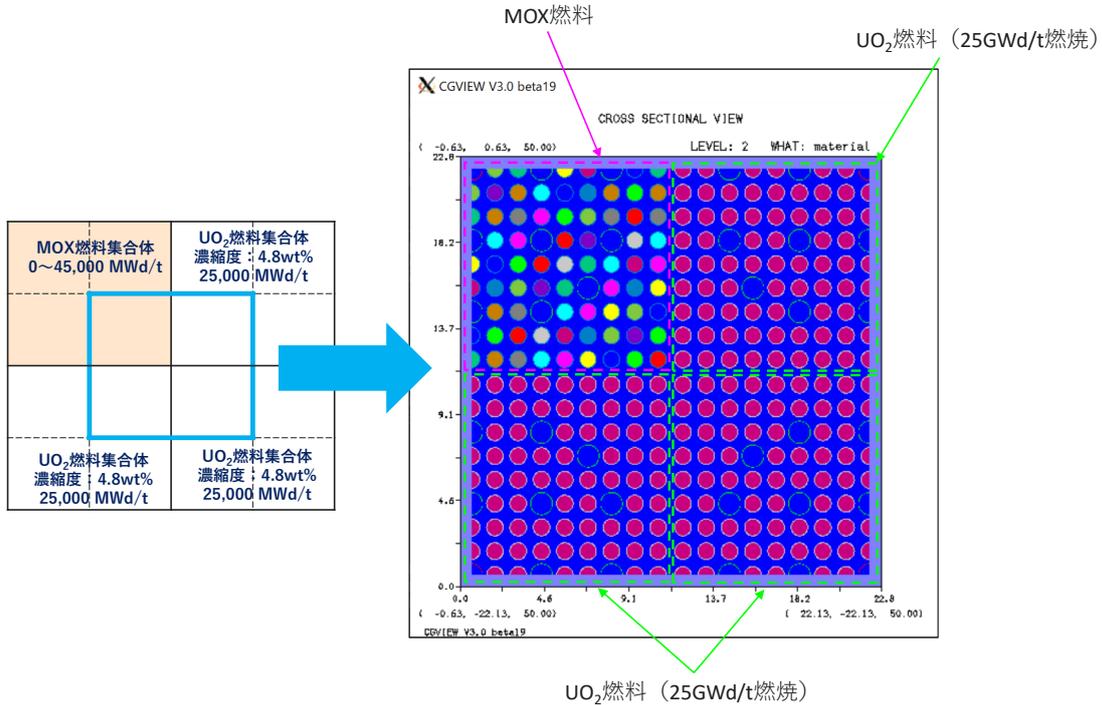


図 7-2 MVP-BURN 計算体系 (4×1/4 集合体モデル)

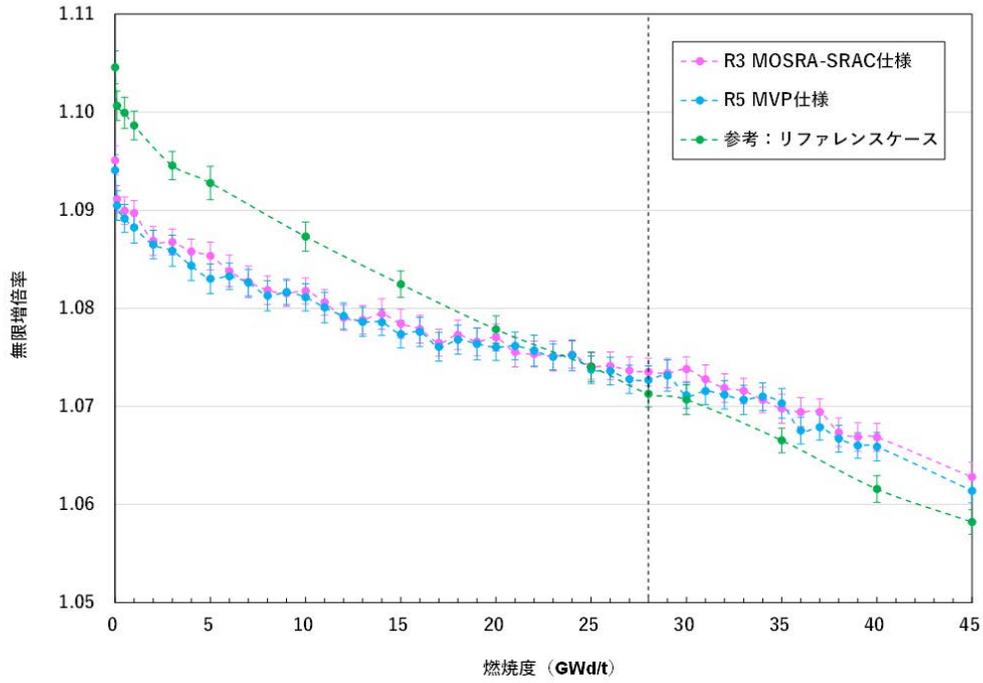


図 7-3 MVP-BURN による  $UO_2$  燃料固溶体型 (Gd) の計算結果 (無限増倍率)

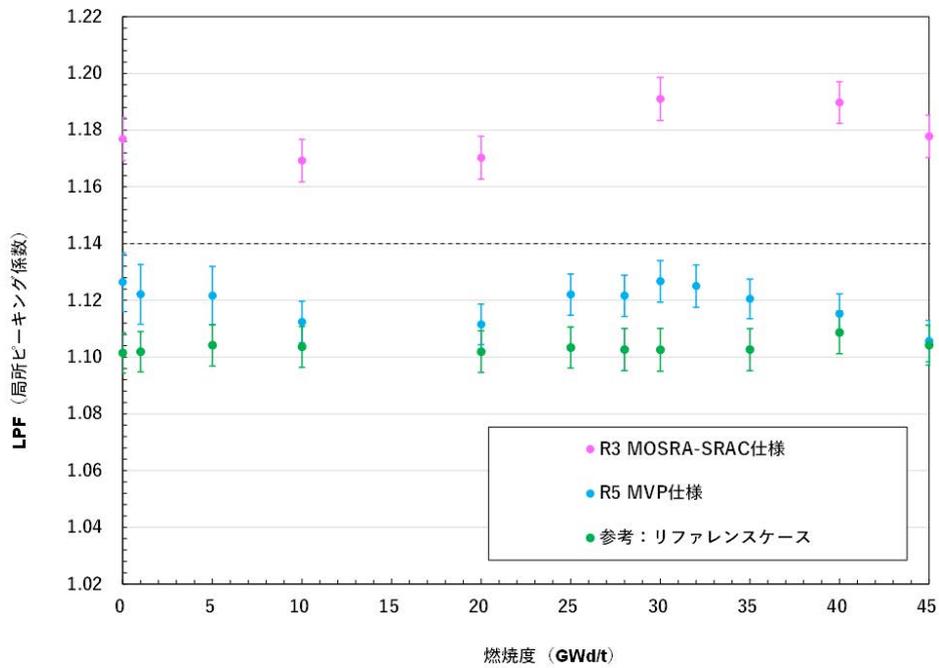
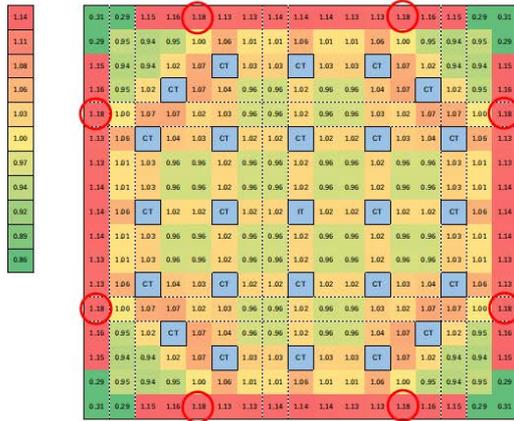
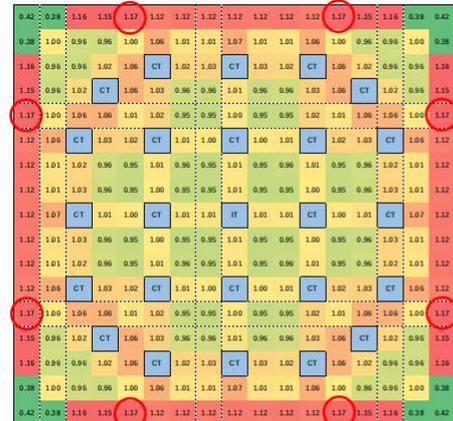


図 7-4 MVP-BURN による  $UO_2$  燃料固溶体型 (Gd) の計算結果 (出力ピーキング係数)

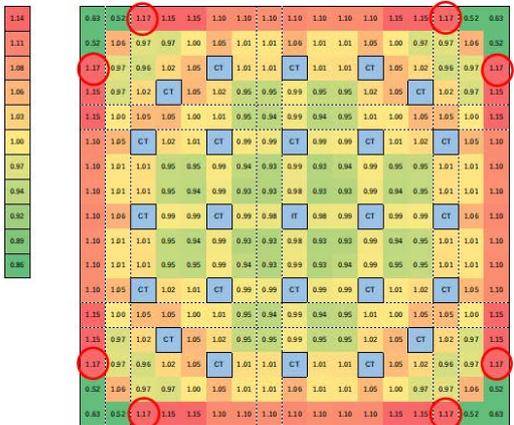


UO<sub>2</sub>-Gd燃料 [固溶体型] 採用ケース (R3 MOSRA-SRAC仕様)

[装荷初期: 0 GWd/t]

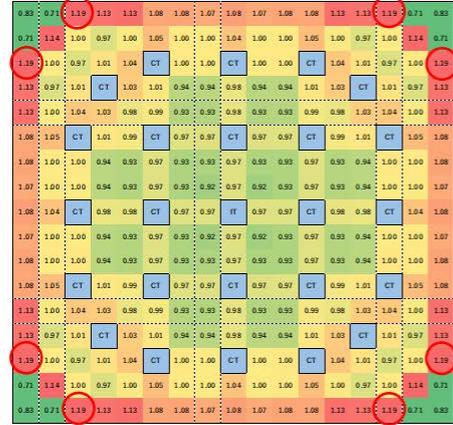


[10 GWd/t]

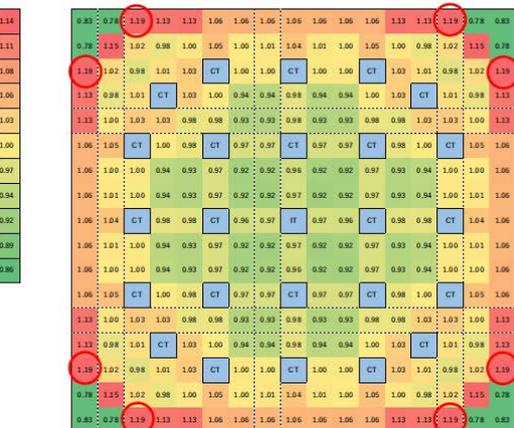


UO<sub>2</sub>-Gd燃料 [固溶体型] 採用ケース (R3 MOSRA-SRAC仕様)

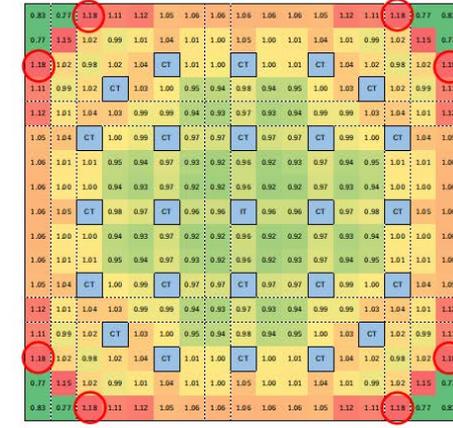
[20 GWd/t]



[30 GWd/t]



[40 GWd/t]



UO<sub>2</sub>-Gd燃料 [固溶体型] 採用ケース (R3 MOSRA-SRAC仕様)

[45 GWd/t]

図 7-5 MVP-BURN による計算結果 (集合体内局所出力分布)  
(UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Gd) (MOSRA-SRAC 評価仕様 (見直し前)))

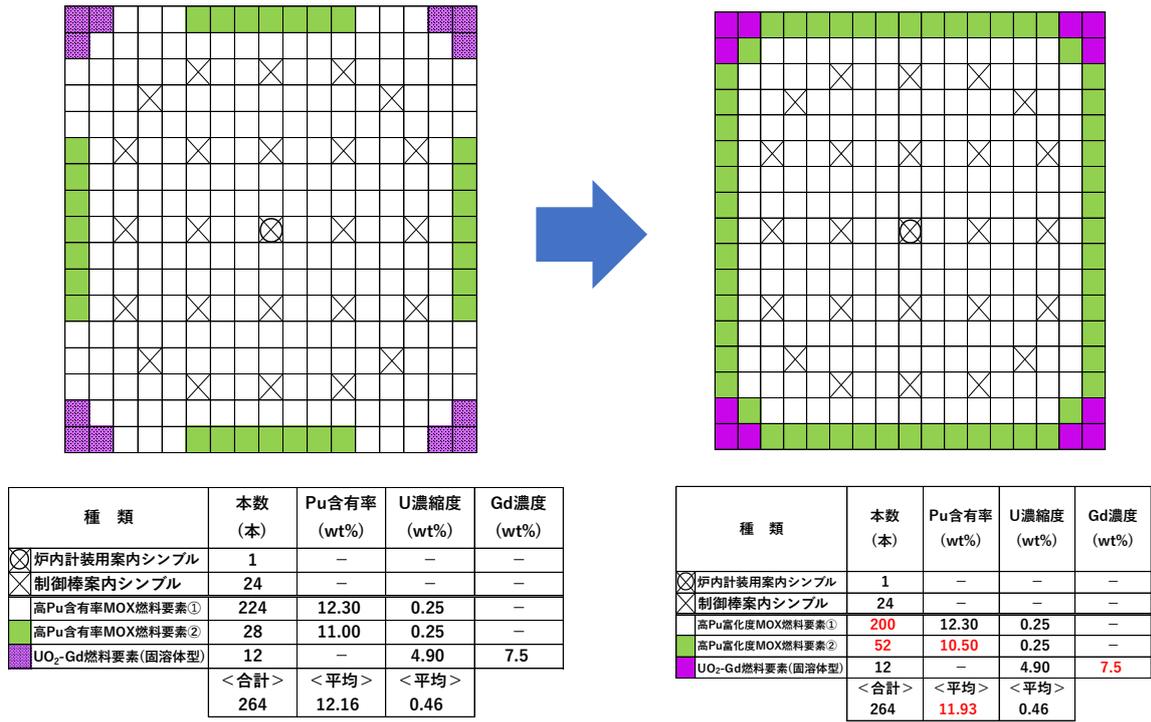


図 7-6 MVP-BURN コードで評価した UO<sub>2</sub>燃料固溶体型 (Gd) の燃料仕様・集合体配置 (MOSRA-SRAC との比較)

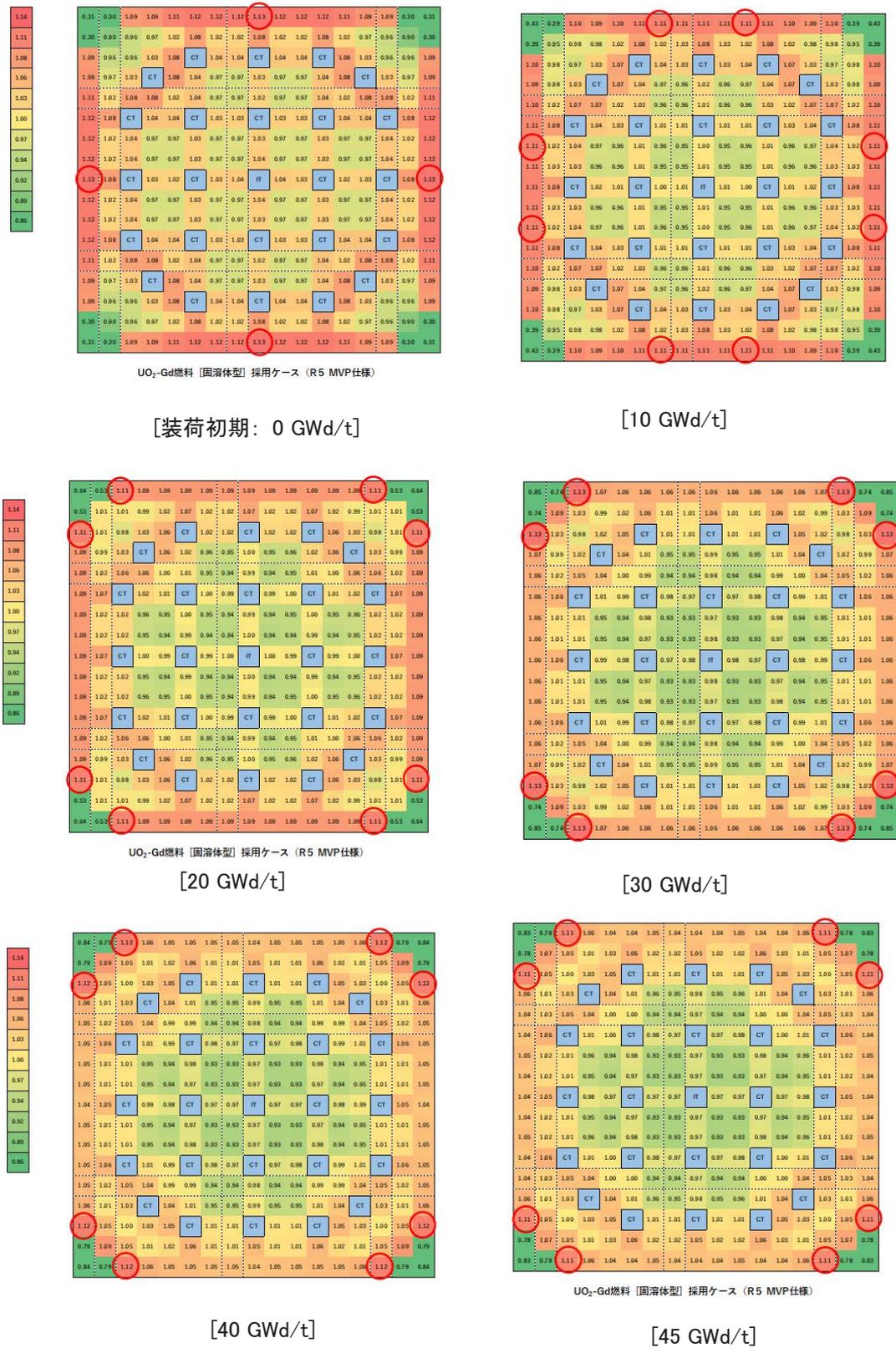


図 7-7 MVP-BURN による計算結果 (集合体内局所出力分布)  
(UO<sub>2</sub> 燃料固溶体型 (Gd) (MVP 評価仕様 (見直し後)))

## 参考文献

- 1-1 原子力安全委員会, 「発電用軽水型原子炉施設に用いられる 混合酸化物燃料について」, 平成7年6月19日.
- 2-1 加藤 正人 他, 「ハルデン炉照射試験用燃料要素の製作 -Duplex タイプの MOX-Gd 燃料の製造技術開発-」, PNC TN8410 97-065 (1997).
- 2-2 高橋 義信, 「敦賀発電所1号機における MOX 燃料照射計画」, 日本原子力学会誌, Vol.28, No.3, pp.203-208 (1986).
- 2-3 市川 達生 他, 「わが国における MOX 燃料の照射実証および照射後試験」, 日本原子力学会誌, Vol.39, No.2, pp.93-111 (1997).
- 3.1-1 Audi et al., Private Communication (2011).
- 3.1-2 JAEA, Nuclear data center, “WWW Chart of the Nuclide 2010”, <https://www.ndc.jaea.go.jp/NuC/> (参照:2024年9月5日).
- 3.1-3 M. Berglund and M. E. Wieser, Isotopic composition of the elements 2009, Pure Appl. Chem., Vol.83, No.2, pp.397-410 (2011).
- 3.1-4 原子力安全研究協会 (編), 「軽水炉燃料のふるまい 改訂新版」, 原子力安全研究協会 (1990).
- 3.1-5 「原子炉材料ハンドブック」, 日刊工業新聞社 (1977).
- 3.1-6 吉村 壽次 (編), 「化学辞典 (第2版)」, ジルコニウム, 森北出版 (2009).
- 3.1-7 吉村 壽次 (編), 「化学辞典 (第2版)」, ガドリニウム, 森北出版 (2009).
- 3.1-8 吉村 壽次 (編), 「化学辞典 (第2版)」, エルビウム, 森北出版 (2009).
- 3.1-9 ChemicalBook, 酸化ジルコニウム, 1314-23-4.
- 3.1-10 ChemicalBook, 酸化ガドリニウム, 12064-62-9.
- 3.1-11 ChemicalBook, 酸化エルビウム, 12061-16-4.
- 3.1-12 日本化学会 原子量専門委員会, 「「原子量表 (2017)」について」 (2017).
- 3.1-13 K. Okumura, “MOSRA-SRAC: Lattice Calculation Module of the Modular Code System for Nuclear Reactor Analyses MOSRA”, JAEA-Data/Code 2015-015 (2015), 162p.
- 3.1-14 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).
- 3.1-15 奥村 他, 「JENDL-4.0 に基づく燃焼チェーンデータ ChainJ40 の開発」, 日本原子力学会 2012年春の年会 E21 (2012).
- 3.1-16 三菱重工業株式会社, 「PWR 向け MOX 燃料のプルトニウム富化度について」, MHI-NES-1001 改1 (1998).
- 3.3-1 稲垣, 三ツ井 他, 「高レベル放射性廃棄物ガラス固化体ー性能評価の現状と課題ー」, JNC TN8400 2003-036 (2003), 53p.
- 3.3-2 日本原燃, 「返還されるガラス固化体について」, <https://www.jnfl.co.jp/ja/business/about/hlw/summary/return-vitrified-object.html> (参照:2025年3月1日).

- 4-1 : NMB コード公式サイト “NMB code: Fuel cycle integrator”, <https://nmb-code.jp/> (参照:2025年6月22日).
- 4-2 : 岡村, 西原 他, “NMB4.0 ユーザーマニュアル”, JAEA-Data/Code 2021-016 (2022), 43p.
- 5.1.1-1 : 原子力安全基盤機構, 「軽水炉高燃焼度 MOX 燃料等の核特性の燃焼依存性」, JNES-SS-0709 (2007).
- 5.1.1-2 : J-L. Provost, M. Debes, “MOX and UOX PWR Fuel Performances EDF Operating Experience“, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 43, No. 9, pp. 960–962 (2006).
- 5.1.1-3 : J-L. Provost, “MOX use in PWRs EDF operation experience“, Nuclear Operation Division, EDF, (2011).
- 5.1.1-4 : G. J. Schlosser et al., “Plutonium Disposition/Recycling in PWR’s-German Experience in Design, Licensing and Validation“, PHYSOR2000 (2000).
- 5.1.1-5 : IAEA, “Status and Advances in MOX fuel Technology“, Technical Report Series No. 415, (2003).
- 5.1.1-6 : 白川, 大久保 他, 「高燃焼度フル MOX-BWR 炉心の核特性の検討」, JAERI-Research 98-047 (1998), 46p.
- 5.1.1-7 : 久語, 嶋田 他, 「高燃焼度フル MOX PWR 炉心の核的検討」, JAERI-Research 98-059 (1998), 40p.
- 5.1.1-8 : 久語, 大久保 他, 「高燃焼度フル MOX PWR 炉心の核的検討 (2)」, JAERI-Research 99-057 (1999), 29p.
- 5.1.1-9 : 横堀, 長田 他, 「プルトニウム利用技術に関する調査検討 (3)」, JNC TJ9440 99-014 (1999), 73p.
- 5.1.1-10 : 平野, 笹川 他, 「Pu 利用技術に関する調査 (5) -次世代型 BWR の炉心特性調査-」 JNC TJ9440 2000-007 (2000), 43p.
- 5.1.1-11 : 高橋, 土井 他, 「高燃焼度対応改良燃料の開発 三菱重工技報」, Vol.35, No.4 (1998).
- 5.1.1-12 : 原子力安全研究協会(編), 「軽水炉燃料のふるまい (改訂第 5 版)」, 原子力安全研究協会 (2013).
- 5.1.1-13 : 「高度燃料技術」研究専門委員会(編), 「最新核燃料工学－高度化の現状と展望－」, 日本原子力学会 (2001).
- 5.1.2-1 : Y. Ikusawa et al., “Post Irradiation Examination for The FUGEN High Burn-up MOX Fuel Assembly (III) Final Report”, JNC TN8410 2005-012 (2005), 103p.
- 5.1.2-2 : 原子力規制庁, 「安全研究成果報告 混合酸化物燃料特性に関する研究」, RREP-2018-1003 (2018).
- 5.1.2-3 : C. Duriez et.al., “Thermal conductivity of hypostoichiometric low Pu content (U,Pu)O<sub>2-x</sub> mixed oxide”, Journal of Nuclear Materials, 277, pp.143–158 (2000).
- 5.1.2-4 : K. Morimoto et al., “The influence of Pu-content on thermal conductivities of (U, Pu)O<sub>2</sub> solid solution” Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Challenges and Opportunities (FR09), Kyoto, Japan, 7–11 December (2009).
- 5.1.2-5 : D. Staicu et al., “Thermal conductivity of heterogeneous LWR MOX fuels”, Journal

- of Nuclear Materials 442, pp.46–52 (2013).
- 5.1.2-6 : N. Nakae et al., “Thermal Property Change of MOX and UO<sub>2</sub> Irradiated up to High Burnup of 74 GWd/t”, Journal of Nuclear Materials, 440, pp.515–523 (2013).
- 5.1.2-7 : D. Staicu et al., “Thermal conductivity of homogeneous and heterogeneous MOX fuel with up to 44 MWd/kgHM burn-up”, Journal of Nuclear Materials 412, pp.129–137, (2011).
- 5.1.2-8 : 加藤 正人 他, 「高速炉燃料の熱物性評価; 融点と熱伝導率」, JAEA-Technology 2006-049, pp.23 (2006).
- 5.1.2-9 : K. Konno and T. Hirosawa, “Melting Temperature of Mixed Oxide Fuels for Fast Reactors”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.39, No.7, pp.771–777 (2002).
- 5.1.2-10 : J. A. Christensen et al., “Melting point of irradiated uranium dioxide” WCAP-6065 (1965).
- 5.1.2-11 : Y. Tasaki, Y. Udagawa & M. Amaya, “Development of fission gas release model for MOX fuel pellets with treatment of heterogeneous microstructure”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.59, No.3, pp.382–394 (2022).
- 5.1.2-12 : H. Fujii et al., “MOX Fuel Performance Experiment Specified for Japanese PWR Utilization in the HBWR”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.43, No.9, pp.998–1005 (2006).
- 5.1.2-13 : Y. Kosaka et al., “Thermal conductivity degradation analyses of LWR MOX fuel by the quasi two phase material model”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.49, No.10, pp.966–974 (2012).
- 5.1.2-14 : N. Nakae et al., “Thermal property change of MOX and UO<sub>2</sub> irradiated up to high burnup of 74 GWd/t”, Journal of Nuclear Materials, 440, pp.515–523 (2013).
- 5.1.2-15 : J.-Y. Colle et al., “Fission product release and microstructure changes of irradiated MOX fuel at high temperatures”, Journal of Nuclear Materials, 442, pp.330–340 (2013).
- 5.1.2-16 : H. Kleykamp, “Post-irradiation studies on LWR-MOX fuel fabricated by the optimized co-milling process”, Journal of Nuclear Materials, 324, pp.198–202 (2004).
- 5.1.2-17 : J. Noirot et al., “Detailed characterizations of high burn-up structures in oxide fuels”, Journal of Nuclear Materials, 372, pp. 318–339 (2008).
- 5.1.2-18 : R. J. White et al., “Measurement and analysis of Fission gas release from BNFL’s SBR MOX fuel”, Journal of Nuclear Materials, 288, pp. 43–56 (2001).
- 5.1.2-19 : S. B. Fisher et al., “Microstructure of irradiated SBR MOX fuel and its relationship to fission gas release”, Journal of Nuclear Materials, 306, pp. 153–172 (2002).
- 5.1.2-20 : T. Yamamoto et al., “Analysis of measured isotopic compositions of high-burnup PWR MOX and UO<sub>2</sub> fuels in the MALIBU program”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.49, No.9, pp.910–925 (2012).
- 5.1.2-21 : L. J. Ott et al., “Irradiation tests of mixed-oxide fuel prepared with weapons-derived plutonium”, Journal of Nuclear Materials, 371, pp. 314–328 (2007).

- 5.1.2-22 : 原子力規制庁, 「安全研究成果報告 混合酸化物燃料特性に関する研究」, RREP-2018-1003 (2018).
- 5.1.2-23 : J. Nakamura, M. Amaya, F. Nagase & T. Fuketa, “Thermal Conductivity Change in High Burnup MOX Fuel Pellet”, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 46, No. 9, pp.944–952 (2009).
- 5.1.2-24 : M. Amaya et al., “Thermal conductivity evaluation of high burnup mixed-oxide (MOX) fuel pellet”, Journal of Nuclear Materials, 414, pp.303–308 (2011).
- 5.1.2-25 : A. Sasahara, T. Matsumura, “Post-irradiation examinations focused on fuel integrity of spent BWR-MOX and PWR-UO<sub>2</sub> fuels stored for 20 years”, Nuclear Engineering and Design, 238, pp.1250–1259 (2008).
- 5.1.2-26 : D. N. Sah et al., “Post irradiation examination of thermal reactor fuels”, Journal of Nuclear Materials, 383, pp.45–53 (2008).
- 5.1.2-27 : S. Yatabe et al., “Canadian experience in irradiation and testing of MOX fuel”, Journal of Nuclear Materials, 502, pp.177–190 (2018).
- 5.1.2-28 : K. Tanaka et al., “Fuel - cladding chemical interaction in MOX fuel rods irradiated to high burnup in an advanced thermal reactor”, Journal of Nuclear Materials, 357, pp.58–68 (2006).
- 5.1.2-29 : Y. Ikusawa et al., “Post Irradiation Examination for The FUGEN High Burn-up MOX Fuel Assembly (III) Final Report”, JNC TN8410 2005-012 (2005).
- 5.1.2-30 : B. Baurens et al., “Fuel Fragmentation During LOCA Simulated Transients: Investigation of Irradiated MOX vs. UO<sub>2</sub> Fuel”, Top Fuel 2019, Seattle, WA, September 22-27, pp.708–716 (2019).
- 5.1.2-31 : 日本原子力研究開発機構 安全研究センター, 「平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費 (燃料設計審査分野の規制研究) 事業 (平成 30 年度分)」 (2019).
- 5.1.2-32 : 日本原子力研究開発機構 安全研究センター, 「令和 2 年度原子力規制庁委託成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費 (燃料設計審査分野の規制研究) 事業 (令和 2 年度分)」 (2022).
- 5.1.2-33 : 日本原子力研究開発機構 安全研究センター, 「平成 31 年度原子力規制庁委託成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費 (燃料設計審査分野の規制研究) 事業 (平成 31 年度分)」 (2022).
- 5.1.2-34 : 日本原子力研究開発機構 安全研究センター, 「令和 3 年度原子力規制庁委託成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費 (燃料設計審査分野の規制研究) 事業 (令和 3 年度分)」 (2022).
- 5.1.2-35 : 原子炉安全基準専門部会報告書, 「発電用軽水型原子炉施設に用いられる混合酸化物燃料について」, 平成 7 年 6 月 19 日, 原子力安全委員会了承 (1995).
- 5.1.2-36 : Orano, MOX, Recycling Nuclear Energy <https://www.orano.group/country/china/en/our-stories/mox-recycling-nuclear-energy> (参照 : 2023 年 9 月 29 日).
- 5.1.2-37 : 原子力規制庁, 「安全研究成果報告 混合酸化物燃料特性に関する研究」, RREP-2018-

1003 (2018).

- 5.1.2-38 : R. Yoshida, H. Ota, S. OSAKA and A. Oe, “Fuel Design and Fabrication Technology for LWR MOX Fuel in Japan”, 2011 Water Reactor Fuel Performance Meeting, Chengdu, China, Sept. 11-14 (2011).
- 5.1.2-39 : 竹内 正行 他, 「使用済 MOX 燃料処理技術の基盤整備研究 (1) 全体概要及び未照射 MOX 燃料の作製」, 2B18, 日本原子力学会 2023 年秋の大会 (2023).
- 5.1.2-40 : K. Suzuki, T. Okita and S. Aono, “Experiences in MOX fuel fabrication at the PFPF for the fast reactor”, Proceedings of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles; Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR-17) (USB Flash Drive), 10 Pages (2017).
- 5.3-1: M. Salvames et al., “Physics of Plutonium Recycling”, Volume I: Issues and Perspectives, OECD/NEA (1995).
- 5.3-2: D. Lutz et al., “Physics of Plutonium Recycling”, Volume III: Void Reactivity Effect in Pressurised Water Reactors, OECD/NEA (1995).
- 5.3-3: G. Palmiotti et al., “Physics of Plutonium Recycling”, Volume VI: Multiple Plutonium Recycling in Advanced PWRs, OECD/NEA (2002).
- 5.3-4: S. Aniel et. al., “Evaluation of the maximum content of a MOX-fueled Pressurized Water Reactor versus isotopic composition with respect to the void coefficient”, IAEA (1995).
- 5.3-5: G. Youinou et al., “Plutonium Multirecycling in Standard PWRs Loaded with Evolutionary Fuels”, Nucl. Sci. Eng., 151, pp.25–45 (2005).
- 5.3-6: G. Martin, M. Guyot et al., “French Scenarios toward Fast Plutonium Multi-recycling in PWR”, Proceedings of the ICAPP 2018 Conference, pp.103–112 (2018).
- 5.3-7: J. P. Grouiller, J. Y. Doriath et al., “Different possible scenarios for plutonium recycling in PWRs”, Proceedings of the Global 2001 Conference, Paper 124 (2001).
- 5.3-8: N. V. Kovalev et al., “A new approach to recycling of spent nuclear fuel in thermal reactors within the REMIX concept”, Nuclear Energy and Technology, Vol.6, No.2, pp.93-98 (2020).
- 5.3-9: D. V. Postovarova et al., “Radiation characteristics of REMIX fuel during multiple recycling in VVER-1000 reactors”, Nucl. Technol., 2, pp.119–125 (2016).

This is a blank page.



