

ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討 (MOXおよび金属燃料炉心)

—2004年度報告—

(研究報告)

2005年9月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122 (代表)

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2005

ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討 (MOX および金属燃料炉心)

—2004 年度報告— (研究報告)

永沼 正行¹⁾ 杉野和輝¹⁾ 相田 達也²⁾小川 隆¹⁾ 水野 朋保¹⁾

要 旨

実用化戦略調査研究の候補概念であるナトリウム冷却炉 (MOX および金属燃料炉心) についての 2004 年度の炉心・燃料設計に関する検討結果を報告する。

2004 年度の MOX 燃料炉心の設計検討は、改良内部ダクト型燃料集合体を採用した炉心を対象として行った。改良内部ダクト型燃料集合体は集合体のコーナ部に内部ダクトを設置した新たな設計である。改良内部ダクト型は ABLE 型より CDA 時の熔融燃料排出能力に優れ、製造に係る課題の少ない燃料集合体である。検討内容は改良内部ダクト型燃料集合体の熱流力特性評価を含む構造設計と改良内部ダクト型燃料集合体を採用した炉心の設計である。炉心の設計検討は 2003 年度と同様に 2 つの炉心概念を対象として行った。検討対象とした炉心概念は従来設計で適用されてきた「コンパクト型」と全炉心取出平均燃焼度 (ブランケット燃料を含む) を高めることにより燃料サイクルコスト低減を狙った「高内部転換型」である。検討により高内部転換型炉心はコンパクト型炉心に比較して、全炉心取出平均燃焼度が高く、長期運転サイクルが可能であり、燃料サイクルコストの低減と稼働率の向上が可能であるとの結果を得た。このことから、高内部転換型炉心を FS フェーズ II としての大型炉 (1500MWe) と中型炉 (750MWe) の代表炉心として選定した。炉心性能としては、大型炉代表炉心が全炉心取出平均燃焼度 90~115GWd/t、運転サイクル長さ約 26 ヶ月、中型炉代表炉心が全炉心取出平均燃焼度 86~104GWd/t、運転サイクル長さ 26~27 ヶ月である。これらの炉心性能は、炉心に対する性能要求である 18 ヶ月以上と 60GWd/t 以上を大幅に超えて達成している。

金属燃料炉心の検討は、経済性向上の観点からナトリウム冷却 MOX 燃料炉心と同等の原子炉出入口温度 (550°C/395°C) を目指した高出口温度型炉心を対象として行った。高出口温度型炉心の構築においては、Pu 富化度及びピン径を単一とし、新しい出力分布平坦化方策として、燃料の Zr 含有率とスミア密度を多段階化し、かつ、燃料製造性を従来より悪化させないために Zr 含有率を 10wt%以下とする方法を適用した。このような炉心仕様を採用することにより、MOX 燃料コンパクト型炉心よりも更に小さいサイズの炉心を構築することができた。熱特性解析として、原子炉出入口温度 550°C/395°C の条件で開発課題の少ないワイヤ型スペーサを適用して冷却材流量配分計画を策定し

た。その結果、被覆管内面最高温度について、大型炉心では 650℃、中型炉心では 652℃とほぼ制限の 650℃を満足できる結果が得られた。工学的安全係数の合理化により更なる原子炉出口温度の向上が期待できる。

-
- 1) 大洗工学センター システム技術開発部 炉心・燃料システムグループ
 - 2) 日本原子力発電(株)からの派遣者

本報告書は、「高速増殖炉システムの実用化調査研究に関する協力協定」に基づき実施した JNC と原電（9 電力会社、電源開発株式会社及び原電の代表）との共有成果である。

Design Study on Core and Fuel Properties of Sodium Cooled Fast Reactor (Mixed Oxide and Metal Fuel Core)

— Results in JFY2004 —

Masayuki NAGANUMA¹⁾, Kzuteru SUGINO¹⁾,
Tatuya AIDA²⁾, Takashi OGAWA¹⁾, Tomoyasu MIZUNO¹⁾

Abstract

Sodium cooled fast reactor (mixed oxide and metal fuel core) is one of promising candidates in Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle System in Japan (FS). Its design study has been conducted thorough FS.

In JFY2004's mixed oxide fuel core design study, a core with improved FAIDUS (Fuel Assembly with Inner Duct Structure) type fuel assemblies was examined. The improved FAIDUS type fuel assembly is newly designed, and the inner duct is installed at corner of wrapper tube. That is expected to have superior performance for molten fuel release at CDA to usual ABLE type and have less issue for fabrication. The structural design including thermal hydraulic characteristics evaluation for the improved FAIDUS type fuel assembly and design studies for the core with improved FAIDUS type fuel assembly were carried out. In the core design study, two types of core concepts were examined as well as JFY2003's study. One is "Compact type" that follows a conventional type core and the other is "High internal conversion type (HIC type)" that aims to reduce fuel cycle cost by increasing total discharge average burn-up (including blankets).

As a result, the HIC type core is revealed to attain higher total discharge average burn-up and longer operation cycle length compared with the "Compact type" core, which decreases the fuel cycle cost and increases the availability factor. The HIC type core was selected from this as representatives of large scale (1500MWe) and medium scale (750MWe) reactors of FS phase II. The HIC type large scale core is able to attain the total discharge average burn-up of 90-115GWd/t and the operation cycle length of about 26 months. The HIC type medium scale core is able to attain the total discharge average burn-up of 86-104GWd/t and the operation cycle length of 26-27 months. These results indicate that HIC type cores (large and medium scale cores) have capability to achieve sufficiently main design requirements of FS such as the total discharge average burn-up (60GWd/t) and the operation cycle length (18 months).

In the metal fuel core design study, a core with "High core outlet temperature type" was investigated for improving economics. "High core outlet temperature" core is aimed at achieving the identical core outlet and inlet temperatures to those of sodium cooled mixed oxide fuel cores (550°C /395°C). In the new measure for flattening the radial power distribution, Pu-enrichment and fuel pin-diameter are unified and the levels of Zr-contents and fuel smeared densities of metal fuel are changed in the radial direction. For avoiding the difficulty in the fuel fabrication compared with

conventional core, the Zr-content was set less than 10wt%. This new measure produced cores with smaller core size compared with the mixed oxide fuel "Compact type" cores. The core flow distribution design was performed by thermal hydraulic analysis under the condition of outlet/inlet temperatures of 550°C /395°C with adoption of the wire-type spacer because of its less development issues. The results of maximum cladding temperature were 650°C for large-scale core and 652°C for middle-scale core, which nearly satisfied the design limit of 650°C. Rationalization of hot spot factor has a potential for further increase of the core outlet temperature.

-
- 1) Fuel and Core System Engineering Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center
 - 2) Attached from The Japan Atomic Power Company (JAPC)

This report is the outcome of collaborative study between JNC and JAPC (that is the representative of 9 electric utilities, Electric Power Development Company and JAPC) in the accordance with "The Agreement About The Development of A Commercialized Fast Breeder Reactor Cycle System".

目 次

1. はじめに	1
2. MOX燃料炉心	3
2.1 改良内部ダクト型燃料集合体の構造設計	3
2.2 代表炉心概念の選定	69
2.2.1 検討条件	69
2.2.2 評価手法	70
2.2.3 大型炉の検討	70
2.2.4 中型炉の検討	71
2.3 代表炉心概念の設計検討	80
2.3.1 大型炉の設計検討	80
2.3.2 中型炉の設計検討	85
2.3.3 代替被覆管材採用炉心の検討	89
2.4 まとめ	138
3. 金属燃料炉心	140
3.1 代表炉心の設計検討	140
3.1.1 大型炉	140
3.1.2 中型炉	145
3.2 高燃焼度化炉心の設計検討	192
3.2.1 大型炉	192
3.2.2 中型炉	193
3.3 更なる高温化方策の検討	209
3.4 まとめ	217
4. おわりに	218
5. 謝辞	220
6. 参考文献	221
付録A. 改良内部ダクト型燃料集合体炉心の核特性非均質効果の解析	222

表リスト

表 2.1-1	周辺流れ係数評価結果	18
表 2.1-2	ダクトの周方向温度差と冷却材最高温度	19
表 2.1-3	熱自由湾曲解析の結果	20
表 2.1-4	照射湾曲解析の結果	21
表 2.1-5	過渡時を想定した熱湾曲解析の結果	21
表 2.2-1	MOX 燃料の代表炉心概念検討に用いた主要な条件	73
表 2.2-2	大型 MOX 燃料高内部転換型炉心(導入期)の主要仕様および核特性	74
表 2.2-3	大型 MOX 燃料コンパクト型炉心(導入期)の主要仕様および核特性	75
表 2.2-4	大型 MOX 燃料高内部転換型炉心とコンパクト型炉心(導入期)の炉心・燃料仕様および核特性の比較	76
表 2.2-5	中型 MOX 燃料高内部転換型炉心(平衡期)の主要仕様および核特性	77
表 2.2-6	中型 MOX 燃料コンパクト型炉心(平衡期)の主要仕様および核特性	78
表 2.2-7	中型 MOX 燃料高内部転換型炉心とコンパクト型炉心(平衡期)の炉心・燃料仕様および核特性の比較	79
表 2.3-1	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の設計検討条件	91
表 2.3-2	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の主要目 (導入期炉心)	92
表 2.3-3	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心・燃料仕様 (導入期炉心)	93
表 2.3-4	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の主要核特性 (導入期炉心)	94
表 2.3-5	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の物量収支(導入期炉心)	95
表 2.3-6	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の制御反応度収支(導入期炉心)	97
表 2.3-7	軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成モデルケース	98
表 2.3-8	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心における TRU 組成変動の核特性への影響(導入期炉心)	99
表 2.3-9	被覆管最高温度評価用ホットスポットファクタ	100
表 2.3-10	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の流量配分計画と熱流力特性(導入期炉心)	100
表 2.3-11	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の CDF 評価対象燃料ピンの出力履歴および燃焼度(導入期炉心)	101
表 2.3-12	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の CDF 評価対象燃料ピンの被覆管温度履歴(導入期炉心)	101
表 2.3-13	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の CDF(導入期炉心)	102
表 2.3-14	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の主要目 (平衡期炉心)	103
表 2.3-15	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心・燃料仕様 (平衡期炉心)	104
表 2.3-16	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の主要核特性 (平衡期炉心)	105
表 2.3-17	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の物量収支(平衡期炉心)	106
表 2.3-18	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の設計検討条件	108
表 2.3-19	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の主要目 (平衡期炉心)	109

表 2.3-20	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心・燃料仕様 (平衡期炉心)	110
表 2.3-21	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心特性 (平衡期炉心)	111
表 2.3-22	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の物量収支(平衡期炉心)	112
表 2.3-23	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の制御反応度収支(平衡期炉心)	114
表 2.3-24	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の熱流力特性(平衡期炉心)	114
表 2.3-25	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の CDF 評価対象燃料ピンの出力履歴 および燃焼度(平衡期炉心)	115
表 2.3-26	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の CDF 評価対象燃料ピンの被覆管最 高温度履歴(平衡期炉心)	115
表 2.3-27	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の CDF(平衡期炉心)	116
表 2.3-28	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の主要目 (導入期炉心)	117
表 2.3-29	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心・燃料仕様 (導入期炉心)	118
表 2.3-30	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心特性 (導入期炉心)	119
表 2.3-31	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の物量収支(導入期炉心)	120
表 2.3-32	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心における TRU 組成変動の核特性への 影響(導入期炉心)	122
表 2.3-33	代替燃料材炉心検討用の主要な燃料仕様	123
表 2.3-34	炉心流量配分値および熱流力特性	124
表 2.3-35	燃料要素被覆管肉厚中心温度履歴	124
表 2.3-35	PNC-FMS 鋼炉心の CDF 値	125
表 3.1-1	大型金属燃料高出口温度型炉心の設計条件	150
表 3.1-2	大型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の燃料ピン径サーベイ結果	151
表 3.1-3	大型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の炉心仕様サーベイ結果	152
表 3.1-4	大型金属燃料高出口温度型炉心の主要燃料仕様	153
表 3.1-5	大型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の主要核特性	154
表 3.1-6	大型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の重金属物量収支	155
表 3.1-7	大型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の制御反応度収支	157
表 3.1-8	大型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の長期運転サイクル化検討 結果	158
表 3.1-9	大型金属燃料高出口温度型炉心 (運転サイクル長期化平衡期) の制御反応 度収支	158
表 3.1-10	金属燃料炉心用工学的安全係数 (ワイヤスペーサ型集合体)	159
表 3.1-11	大型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の冷却材流量配分結果	160
表 3.1-12	大型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の代表燃料要素出力履歴	161
表 3.1-13	大型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の代表燃料要素被覆管温度 履歴	161
表 3.1-14	大型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の燃料健全性評価結果	162
表 3.1-15	大型金属燃料高出口温度型炉心 (導入期) の主要核特性	163
表 3.1-16	大型金属燃料高出口温度型炉心 (導入期) の TRU 組成変動影響評価結果	164

表 3.1-17	中型金属燃料高出口温度型炉心の設計条件	165
表 3.1-18	中型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の燃料ピン径サーベイ結果	166
表 3.1-19	中型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の炉心仕様サーベイ結果	167
表 3.1-20	中型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の主要燃料仕様	168
表 3.1-21	中型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の主要核特性	169
表 3.1-22	中型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の重金属物量収支	170
表 3.1-23	中型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の制御反応度収支	172
表 3.1-24	中型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の長期運転サイクル化検討結果	173
表 3.1-25	中型金属燃料高出口温度型炉心 (長期運転サイクル化平衡期) の制御反応度収支	173
表 3.1-26	中型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の冷却材流量配分結果	174
表 3.1-27	中型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の代表燃料要素出力履歴	174
表 3.1-28	中型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の燃料健全性概略評価結果	175
表 3.1-29	中型金属燃料高出口温度型炉心 (導入期) の主要核特性	176
表 3.2-1	大型金属燃料高出口温度型炉心 (高燃焼度化) のピン径保存時の主要仕様・特性	194
表 3.2-2	大型金属燃料高出口温度型炉心 (高燃焼度化) の主要燃料仕様	195
表 3.2-3	大型金属燃料高出口温度型炉心 (高燃焼度化) の主要核特性	196
表 3.2-4	大型金属燃料高出口温度型炉心 (高燃焼度化平衡期) の重金属物量収支	197
表 3.2-5	中型金属燃料高出口温度型炉心 (高燃焼度化) の主要燃料仕様	201
表 3.2-6	中型金属燃料高出口温度型炉心 (高燃焼度化平衡期) の主要核特性	202
表 3.2-7	中型金属燃料高出口温度型炉心 (高燃焼度化平衡期) の重金属物量収支	203
表 3.3-1	要求に対する更なる高温化方策と検討対象選定	211
表 3.3-2	中型金属燃料高出口温度型炉心 (更なる高温化平衡期) の主要燃料仕様	212
表 3.3-3	中型金属燃料高出口温度型炉心 (更なる高温化平衡期) の主要核特性	213
表 3.3-4	中型金属燃料高出口温度型炉心 (更なる高温化平衡期) の冷却材流量配分結果	214

図リスト

図 2.1-1	改良内部ダクト型集合体の形状	22
図 2.1-2	サブチャンネル解析メッシュ・番号図	23
図 2.1-3	炉心上端における冷却材温度分布	24
図 2.1-4	炉心上端における冷却材流量分布	25
図 2.1-5	炉心上端における冷却材流速分布	26
図 2.1-6	炉心上端における冷却材温度分布	27
図 2.1-7	ワイヤ位相に伴うクロスフローの変化(改良内部ダクト型体系)	28
図 2.1-8	出力勾配と内部ダクトの相対位置関係	29
図 2.1-9(1/4)	ピン番号、及び、サブチャンネル番号図(CASE-1)	30
図 2.1-9(2/4)	ピン番号、及び、サブチャンネル番号図(CASE-2)	31
図 2.1-9(3/4)	ピン番号、及び、サブチャンネル番号図(CASE-3)	32
図 2.1-9(4/4)	ピン番号、及び、サブチャンネル番号図(CASE-4)	33
図 2.1-10(1/4)	径方向出力分布の相対値(CASE-1)	34
図 2.1-10(2/4)	径方向出力分布の相対値(CASE-2)	35
図 2.1-10(3/4)	径方向出力分布の相対値(CASE-3)	36
図 2.1-10(4/4)	径方向出力分布の相対値(CASE-4)	37
図 2.1-11(1/3)	冷却材温度分布 [炉心中心] (CASE-1)	38
図 2.1-11(2/3)	冷却材温度分布 [炉心上端] (CASE-1)	39
図 2.1-11(3/3)	冷却材温度分布 [バンドル上端] (CASE-1)	40
図 2.1-12(1/3)	冷却材温度分布 [炉心中心] (CASE-2)	41
図 2.1-12(2/3)	冷却材温度分布 [炉心上端] (CASE-2)	42
図 2.1-12(3/3)	冷却材温度分布 [バンドル上端] (CASE-2)	43
図 2.1-13(1/3)	冷却材温度分布 [炉心中心] (CASE-3)	44
図 2.1-13(2/3)	冷却材温度分布 [炉心上端] (CASE-3)	45
図 2.1-13(3/3)	冷却材温度分布 [バンドル上端] (CASE-3)	46
図 2.1-14(1/3)	冷却材温度分布 [炉心中心] (CASE-4)	47
図 2.1-14(2/3)	冷却材温度分布 [炉心上端] (CASE-4)	48
図 2.1-14(3/3)	冷却材温度分布 [バンドル上端] (CASE-4)	49
図 2.1-15	ダクト温度分布(周辺サブチャンネル温度分布)(CASE-1)	50
図 2.1-16	ダクト温度分布(周辺サブチャンネル温度分布)(CASE-2)	50
図 2.1-17	ダクト温度分布(周辺サブチャンネル温度分布)(CASE-3)	51
図 2.1-18	ダクト温度分布(周辺サブチャンネル温度分布)(CASE-4)	51
図 2.1-19	ダクト温度分布(周辺サブチャンネル温度分布)(CASE-0 : 271 ピン体系)	52
図 2.1-20	燃料集合体の構造解析モデル	53
図 2.1-21	燃料集合体水平方向温度分布	54
図 2.1-22	燃料集合体軸方向温度分布	55
図 2.1-23	熱湾曲解析結果(パターン 1 : 温度差 100 ° C)	56

図 2.1-24	熱湾曲解析結果(パターン 2: 温度差 100 ° C)	57
図 2.1-25	熱湾曲解析結果(パターン 3: 温度差 100 ° C)	58
図 2.1-26	熱湾曲解析結果(パターン 4: 温度差 100 ° C)	59
図 2.1-27	集合体パッド部変位と集合体水平方向温度差の関係	60
図 2.1-28	内部ダクト溶接部せん断力と集合体水平方向温度差の関係	60
図 2.1-29	溶接部せん断応力比と集合体水平方向温度差の関係	61
図 2.1-30	溶接ピッチとせん断応力比の関係	61
図 2.1-31	高速中性子束軸方向分布	62
図 2.1-32	照射湾曲解析結果(照射初期)(パターン 4: 温度差 100 ° C、湾曲拘束条件)	63
図 2.1-33(1)	照射湾曲解析結果(照射末期)(パターン 4: 温度差 100 ° C、湾曲拘束条件)	64
図 2.1-33(2)	照射湾曲解析結果(照射末期)(パターン 4: 温度差 100 ° C、湾曲拘束条件)	65
図 2.1-33(3)	照射湾曲解析結果(照射末期)(パターン 4: 温度差 100 ° C、湾曲拘束条件)	66
図 2.1-34	内部ダクト溶接部反力の分布(せん断応力)(冷却材温度急昇事象)	67
図 2.1-35	内部ダクト溶接部反力の分布(せん断応力)(冷却材温度急冷事象)	67
図 2.1-36	溶接部直径(ナゲット径)とせん断応力比の関係	68
図 2.3-1	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の燃料集合体概念図(導入期炉心)	126
図 2.3-2	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心配置(導入期炉心)	127
図 2.3-3	軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成モデルケースの Pu 組成	128
図 2.3-4	軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成モデルケースの MA 組成	128
図 2.3-5	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の流量領域区分(導入期炉心)	129
図 2.3-6	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の CDF 評価対象燃料ピンの被覆管 最高温度履歴(導入期炉心)	130
図 2.3-7	大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心配置(平衡期炉心)	131
図 2.3-8	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心配置(平衡期炉心)	132
図 2.3-9	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の燃料ピン最大出力と流量領域区分 (平衡期炉心)	133
図 2.3-10	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の流量領域区分(平衡期炉心)	134
図 2.3-11	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の CDF 評価対象燃料ピンの被覆管 最高温度履歴(平衡期炉心)	135
図 2.3-12	中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心配置(導入期炉心)	136
図 2.3-13	クリープ強度特性の比較 (ODS 鋼-PNC-FMS 鋼、環境効果未考慮)	137
図 3.1-1	高出口温度型金属燃料炉心における径方向出力分布の特徴	177
図 3.1-2	包絡熱出力の概念	178
図 3.1-3	大型金属燃料高出口温度型炉心の包絡熱出力サーベイ結果	179
図 3.1-4	大型金属燃料高出口温度型炉心の増殖比と Pu 富化度との関係	179
図 3.1-5	大型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の配置図	180
図 3.1-6	大型金属燃料コンパクト型炉心の配置図	181
図 3.1-7	大型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) のワンロッドスタック制御 棒位置	182

図 3.1-8	大型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の冷却材流量領域区分図	183
図 3.1-9	中型金属燃料高出口温度型炉心（導入期）の配置図	184
図 3.1-10	大型金属燃料高出口温度型炉心（導入期）の TRU 組成変動による 余剰反応度燃焼変化への影響	185
図 3.1-11	中型金属燃料高出口温度型炉心の包絡熱出力サーベイ結果	186
図 3.1-12	中型金属燃料高出口温度型炉心の増殖比と Pu 富化度との関係	186
図 3.1-13	中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の配置図	187
図 3.1-14	中型金属燃料コンパクト型炉心の配置図	188
図 3.1-15	中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）のワンロッドスタック制御 棒位置	189
図 3.1-16	中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の冷却材流量領域区分図	190
図 3.1-17	中型金属燃料高出口温度型炉心（導入期）の配置図	191
図 3.2-1	大型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化平衡期）のピン径保存時の炉 心配置図	205
図 3.2-2	大型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化平衡期）の配置図	206
図 3.2-3	大型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化導入期）の配置図	207
図 3.2-4	中型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化平衡期）の配置図	208
図 3.3-1	2003 年度中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の炉心配置図	215
図 3.3-2	鉛及びニッケル反射体適用時の径方向出力分布の比較	216

1. はじめに

実用化戦略調査研究（以下、FS）フェーズⅡにおける本年度（2004年度）の炉心・燃料に関する設計検討では、ナトリウム冷却炉について魅力ある炉心概念の創出を目標としたMOXおよび金属燃料炉心の検討を行い、2005年度のフェーズⅡまとめとしての代表炉心（大型炉および中型炉）を構築した。

MOX燃料炉心の設計検討では、昨年度のフェーズⅡ中間まとめにおいて再臨界回避方策にABLE型燃料集合体を採用した大型炉と中型炉の代表炉心を構築した。代表炉心概念の選定は高内部転換型炉心とコンパクト型炉心を対象とした仕様、特性および性能の比較を基に行った。両炉心概念の比較において、高内部転換型炉心はコンパクト型炉心に比較して全炉心取出平均燃焼度（ブランケット燃料を含めた燃焼度）が高く、燃料サイクルコストの大幅低減が可能であるとの見通しを得た。このことから、中型炉については高内部転換型炉心を代表炉心概念として選定したが、大型炉は高内部転換型炉心の遮へい体外接円径がプラント設計側との取合条件を超えることから、コンパクト型炉心を選定した^{[1],[2]}。

本年度は、安全設計側から示された新たな再臨界回避方策である改良内部ダクト型燃料集合体の構造を具体化し、この燃料集合体を採用した炉心の設計検討を行いフェーズⅡまとめとしての代表炉心を構築した。代表炉心概念は昨年度までの検討結果を踏まえ、高内部転換型炉心とコンパクト型炉心の2つの概念を対象とした炉心・燃料仕様および性能の比較により選定した。なお、検討にはプラント設計（大型炉の遮へい体外接円径の取合条件）、MOX燃料再処理システム（FP移行率）、FBR導入シナリオ（増殖性能要求）等に係る検討の進捗を反映した条件を適用した。

金属燃料炉心に関しては、MOX燃料炉心と同様にPu富化度2領域型仕様を有したいわゆる従来型炉心（以下、コンパクト型炉心）に代わる革新的な炉心概念として、高出口温度型金属燃料炉心の検討を行っている^{[3],[4],[5]}。この概念は、ロシアのBREST炉心概念（鉛冷却窒化物燃料炉心）の特徴である重金属密度が高いこと、重金属密度による多領域型炉心であること、単一Pu富化度であること、といった基本仕様をナトリウム冷却金属燃料炉心へ応用したものである。このような炉心仕様を採用することにより、出力分布の時間的変動を抑制し、冷却材流量を合理化でき、原子炉出口温度を高めることが可能となる。高出口温度型炉心は、単一Pu富化度でかつ内部転換比が1近傍となるようにPu富化度を設定することにより、出力分布の変動を抑制している。MOX燃料炉心よりも約50℃厳しい被覆管内面温度制限650℃の下で、MOX燃料炉心と同等の出入口温度を達成できる見通しが得られている。本炉心の検討では、被覆管最高温度650℃の条件でMOX燃料炉心並みの原子炉出入口温度達成に主眼をおき、高速中性子照射量制限を満足する炉心を構築する。出力分布平坦化のための重金属密度の段階化の手段として、ピン径は一定で、燃料スラグのZr含有率とスミア密度を調整し、炉心内側へ行くに従い重金属密度を高くする方法を採用している。この方策では、ピン径が1種類となるので、冷却材体積比は径方向に一様となり、ナトリウムボイド反応度の低減につながり、燃料製造性も従来のPu富化度多領域型炉心と同等となることが期待できる。

以上示したコンパクト型炉心及び高出口温度型炉心について、F/SフェーズⅡ最終まとめに向けて、金属燃料炉心概念のデータベースをそろえる目的から、出力規模（大型炉と中型

炉)、FBR 導入シナリオを想定した増殖性能 (導入期炉心と平衡期炉心)、経済性向上を目指した高燃焼度化に関する評価も行った。

2. MOX 燃料炉心

2.1 改良内部ダクト型燃料集合体の構造設計

2.1.1 はじめに

平成 15 年度検討の FS フェーズ II 中間まとめ^[1]では、MOX 燃料炉心の集合体概念として、再臨界回避の観点から、内部ダクト型集合体(FAIDUS(Fuel Assembly with Inner Duct Structure)型集合体)と ABLE (Axial BLanket partial Elimination) 型集合体の 2 概念が考案され、両者の核特性・安全特性・製造性等について比較検討が行われた。ここで、内部ダクト型集合体は、集合体中央部に熔融燃料の分散を促進するパスとして内部ダクトを設置した集合体概念であり、一方、ABLE 型集合体は、再臨界回避と核特性の両立のため、熔融燃料のパスとして軸方向ブランケットの一部のみを削除した集合体概念である。炉心・燃料設計に関する比較の結果、内部ダクト型集合体では、外部ダクトと内部ダクトの湾曲モードを同一にする観点から、グリッド型スペーサの適用が必須となり製造性に困難を伴うこと、ABLE 型集合体に比べ核特性に劣ること等から、ABLE 型集合体を有望と考え、中間まとめでは、代表炉心に適用することとした。その一方、中間まとめの安全評価の結果、ABLE 型集合体は、過酷事象時に燃料熔融の放出能力が十分でない可能性が示された^[1]。そこで、集合体概念について再度検討が行われ、内部ダクト型集合体をベースに、製造性を改善すべく、集合体 6 角断面のコーナー部に内部ダクトを設置した「改良内部ダクト型集合体」の概念が考案された。

本節では、この「改良内部ダクト型集合体」が従来に無い構造概念を有していることから、設計成立性の判断に資するため、特に、熱流動特性・構造健全性に着目し予備的な評価を行うこととした。なお、核特性については、付録 A で言及することとする。

2.1.2 改良内部ダクト型燃料集合体の構造概念

最初に、改良内部ダクト型集合体の基本的な構造概念を説明する。図 2.1-1 に、改良内部ダクト型集合体の軸方向断面、及び、水平方向断面の形状を示した(ここで、図中の寸法は、平成 15 年度検討の大型炉(FS フェーズ II 中間まとめ炉心)の集合体形状^[2]をベースに設定したものであり、(後で説明するが)本項の解析では、全てこの形状条件を想定することとする)。

本改良内部ダクト型集合体は、製造性の観点から、ひし形形状の内部ダクトを集合体 6 角断面のコーナー部に設置した構造を採用しており、その結果、ワイヤスペーサの適用が可能となっている。内部ダクトの断面積は、安全評価の結果、燃料ピン 16 本を包絡する断面積が必要との結果を得ており、同結果に従い、4×4 列のひし形の断面を想定した。また、内部ダクトの下端は、バンドル下端と同レベルで閉じられている構造であり、そのため、内部ダクト下端位置には、燃料交換時のドレン性を考慮し、集合体外側にドレン孔を設ける構造とした。

2.1.3 集合体内熱流動特性

本項では、改良内部ダクト型集合体の集合体内熱流動特性として、燃料ピン温度評価に影響する周辺流れ係数の評価、及び、次項の構造強度評価に向けた内外

ダクト温度分布(温度差)の評価を行う。

(1) 周辺流れ係数評価

(i) 検討条件

改良内部ダクト型集合体を対象に、燃料ピン温度評価に影響する周辺流れ係数の評価を行う。本検討で想定した条件として、集合体の形状、集合体仕様、集合体出力、集合体流量、摩擦係数、サブチャンネル解析メッシュを以下に示す。

① 集合体形状

基本的な集合体構造は図 2.1-1 の通りであり、形状条件として、平成 15 年度検討の大型炉(FS フェーズⅡ中間まとめ炉心)の集合体形状^[2]をベースとし、燃料ピン 16 本相当の断面積を有する内部ダクトを想定した。

② 集合体仕様

ピン径・ダクト等の基本仕様は、平成 15 年度検討の大型炉(FS フェーズⅡ中間まとめ炉心)の仕様^[2]と同様とした。本解析で想定した具体的な寸法を以下にまとめた。

・燃料ピン径	10.4 mm
・ピン配列ピッチ	11.49 mm
・ワイヤ径	1.03 mm
・ワイヤ巻きピッチ	200 mm
・バンドル全長	2460 mm
・ラップ管内対面間距離	191.6 mm
・燃料ピン本数	255 本/集合体 (271 本 - 16 本(内部ダクト相当))
・ラップ管肉厚	5.0 mm
・内部ダクト対角間距離(短軸側内面)	41.34 mm
・内部ダクト肉厚	2.0 mm
・内部ダクト軸長(=燃料要素全長)	2460.0 mm
・中間パッド位置	2440.0 mm(集合体下部支持点より中間パッド中央までの長さ)

③ 集合体出力

集合体出力条件は、平成 15 年度検討の大型炉(FS フェーズⅡ中間まとめ炉心)を想定し、最大発熱条件を有する第 1 流量領域の集合体の出力条件(集合体積分出力 8.81 MW)^[2]に、ピン数比の補正を考慮した。また、径方向出力分布としては、最大発熱集合体は炉心中央付近で発生するので、フラットな分布とした。以下に、具体的に設定した集合体出力条件を示す。

・集合体積分出力	8.29 MW
・径方向出力分布	フラット

④ 集合体流量

集合体流量条件は、平成 15 年度検討の大型炉(FS フェーズⅡ中間まとめ炉心)を想定し、最大発熱条件を有する第 1 流量領域の集合体の流量条

件(集合体流量 35.1 kg/s)^[2]に、ピン数比の補正を考慮した。以下に、具体的に設定した集合体流量条件を示す。

・集合体流量 33.0 kg/s

⑤ 摩擦係数

改良内部ダクト型集合体について、熱流動に関する実験データは存在しないことから、本解析では、摩擦係数として、以下の考え方にに基づき設定した値を適用することとした。

まず、平成 15 年度検討の大型炉(FS フェーズ II 中間まとめ炉心)において評価された通常バンドル体系(271 ピン)での値(周辺流れ係数 1.110、バンドル圧損 0.180 MPa)を満足するよう、熱流動解析コードのサブチャンネル毎の摩擦係数を調整する。そして、その値を改良内部ダクト型集合体の解析についても、適用することとした。調整後のサブチャンネル毎の摩擦係数として、具体的に以下の値を適用した(ここで、Re は各サブチャンネルのレイノルズ数)。

・内側チャンネル	$0.1443 \times Re^{-0.18}$
・外側チャンネル	$0.1722 \times Re^{-0.18}$
・コーナーチャンネル	$0.2320 \times Re^{-0.18}$

⑥ サブチャンネル解析メッシュ

本解析では、改良内部ダクト型体系について、図 2.1-2 に示すサブチャンネル解析メッシュ、及び、番号図を適用した。

(ii) 検討結果

調整後の摩擦係数を用いて改良内部ダクト型集合体の周辺流れ係数とバンドル圧損の評価を行った。評価の結果を、摩擦係数調整用の従来型集合体体系(271 ピン)の結果と併せて、表 2.1-1 にまとめた。ここで、改良内部ダクト型集合体の周辺流れ係数は、通常バンドル(271 ピン)体系での値(周辺流れ係数 1.110)から僅かに増大し、1.117 と評価された。この周辺流れの増大は、改良内部ダクト型体系では通常バンドル体系と比べ相対的に内側チャンネル数が減少するためと考えられる。本検討の熱設計においては、保守側に丸めて周辺流れ係数として 1.12 を適用することとする。

熱流動解析の結果として、炉心上端位置での対辺間・コーナー間方向の分布を図 2.1-3 に、炉心上端位置での各サブチャンネルの流量分布、流速分布、温度分布を図 2.1-4～図 2.1-6 に示した。また、改良内部ダクト型集合体のクロスフローの状況をワイヤの位相について比較した結果を図 2.1-7 に示した。改良内部ダクト型集合体でも、通常バンドル同様、ダクト内面に沿ったいわゆるスワールフローが見られるが、内部ダクトのバンドル中心側コーナー付近では流れがイレギュラーとなるため、ワイヤの位相によっては滑らかなスワールフローとならない断面が生じていることがわかる。

(2) 集合体内温度分布評価

(i) 検討条件

次項の構造強度評価に向けた内外ダクト温度差を設定するため、集合体内熱流動解析を行い、内外ダクト温度分布の評価を行う。本検討で想定した条件として、集合体の形状、集合体仕様、集合体出力、集合体流量、摩擦係数、サブチャンネル解析メッシュを以下に示す。

① 集合体形状

集合体形状は、前項(2.1.3.1)の周辺流れ係数評価と同様の条件を用いた。

② 集合体仕様

集合体仕様として、前項(2.1.3.1)の周辺流れ係数評価と同様の条件を用いた。

③ 集合体出力

集合体出力条件は、平成 15 年度検討の大型炉(FS フェーズⅡ 中間まとめ炉心)を想定し、集合体内温度差が最も大きくなる(集合体内出力ピーキングが最も大きい)外側炉心第 6 流量領域の条件を参考に設定した^[2]。集合体出力については、集合体出力 3.85 MW をベースに、燃料ピン本数比で補正を行った。集合体内出力分布については、平成 15 年度検討のピーキング 1.366 を採用し、直線的な出力勾配を与えることとした。具体的な集合体出力条件は、以下の通りである。

・ 集合体積分出力	3.62 MW
・ 集合体内出力ピーキング	1.366

④ 集合体流量

集合体流量としては、上記③の集合体出力条件に対応し、平成 15 年度検討大型炉の外側炉心第 6 流量領域の集合体流量 18.7 kg/s をベースに、燃料ピン本数比で補正して設定した。具体的な集合体流量条件は、以下の通りである。

・ 集合体流量	17.6 kg/s
---------	-----------

⑤ 摩擦係数

摩擦係数として、前項(2.1.3.1)の周辺流れ係数評価と同様の条件を用いた。

⑥ サブチャンネル解析メッシュ

出力勾配と内部ダクトの相対位置について、図 2.1-8 に示す 4 ケースを想定することとした。4 ケースの温度評価に対するサブチャンネル解析メッシュ、及び番号図を図 2.1-9 に示した。

(ii) 検討ケース

検討ケースとして、解析条件⑥のサブチャンネル解析メッシュで述べた 4 つの出力勾配・内部ダクトの相対位置ケース(図 2.1-8、CASE-1~CASE-4)を想定した。ここで、各ケースの集合体内径方向出力分布については、解析条件③の集合体出力で示した 271 ピン体系のピーキング係数 1.366 を直線分布とし、内部ダクト領域に相当する 16 ピンを除き、255 ピンの平均出力

を 1.0 とすることで設定した。図 2.1-10 に各ケース(CASE-1~CASE-4)の集合体内径方向出力分布を示す。

(iii) 検討結果

解析結果として、出力勾配・内部ダクトの相対位置ケース CASE-1~CASE-4 について、軸方向 3 断面(炉心中心、炉心上端、バンドル上端)での各サブチャンネルにおける温度分布を図 2.1-11~図 2.1-14 に示すとともに、ダクトの周方向温度分布(ダクトに沿う周辺サブチャンネル冷却材温度)をプロットした結果を図 2.1-15~図 2.2-18 に示した(ここで、参考として、271 ピン体系の結果も併せて図 2.1-19 に示した)。これら結果に基づき、各ケースの軸方向 3 断面(炉心中心、炉心上端、バンドル上端)でのダクトの周方向温度差と冷却材最高温度を整理した結果を表 2.1-2 に示す(表中には、内部ダクト壁面での周方向温度差も示した)。

この表 2.1-2 より、ダクト温度差が一番厳しいケースは CASE-2 であり、その条件での外部ダクト対辺間温度差は 80°C 強、内部ダクト対辺間温度差は 30°C 強であることがわかった。この結果に基づき、次節の集合体構造強度評価では、上記のダクト温度条件を想定し評価を行うこととする。

2.1.4 集合体構造強度特性

本項では、非等方構造体系である改良内部ダクト型集合体の基本的な変形挙動を把握するため、自由熱湾曲の評価を行うとともに、上記の結果、内部ダクト支持部の応力が最も厳しくなる条件を想定し、隣接集合体からの拘束を考慮した照射変形(熱弾性クリープ・スエリング解析)の評価を行う。

(1) 自由熱湾曲時の検討

(i) 検討条件

集合体単体に着目した自由熱湾曲(熱弾性)の評価を行う。評価は、前項(2.1.3(2)項)の集合体内温度分布評価の結果を考慮し温度荷重条件を想定し行う(集合体水平方向温度差として、50°C と 100°C の 2 ケース想定)。

① 集合体仕様

集合体仕様として、前項(2.1.3 項)の熱流動解析と同様の平成 15 年度検討の大型炉の集合体・燃料要素バンドル仕様^[2]をベースに設定した(図 2.1-1 参照)。

② 幾何形状モデル

モデルは構造全体を 3 次元 Shell 要素でモデル化することとし、図 2.1-20 に集合体の有限要素法解析モデルを示した。ここで、燃料要素バンドル部、上部遮へい体、及び、炉心支持板より下部側の集合体構造はモデル化を省略することとする。モデル作成上の留意点としては、内部ダクトの支持点(溶接固定点)を詳細に記述することとし、想定する負荷に対する支持点の応力を評価することとする。外部ダクトと内部ダクトの溶接点は、各節点自由度を結合して記述する。溶接点は 1 接面あたり等間隔に 3 点(コーナ部より溶接ピッチの 1/2 内側から 3 点設定)とする。また、軸方向には 100mm ピッチと 200mm ピッチの 2 ケースを検討する。本報告書

において、内部ダクトを設置するコーナーを「基準コーナー」と称することとする。

③ 境界条件

集合体モデルは上端フリー、下端は完全固定支持とし、エントランスノズルと炉心支持板の球面座における接触挙動は省略することとする。

④ 荷重条件

温度荷重について、集合体水平方向温度差として 50℃と 100℃の 2 ケースを検討する。また、集合体水平方向の温度荷重パターンについて、炉心中心に対する内部ダクトの位置関係から、図 2.1-21 に示す 4 パターンを想定することとする。なお、内部ダクトの温度分布は各軸方向位置において水平方向一様とする。また、内部ダクトと接する外部ダクトの接面領域の温度は内部ダクトと同一とする。軸方向の温度勾配は、図 2.1-22 に示したようにモデル下端から下部ブランケット領域下端までを 395℃、上部ブランケット上端の水平方向平均温度 550℃とし、その間は線形分布を仮定することとする。

冷却材圧力について、冷却材流路側のバンドル相当領域で、冷却材圧力損失相当の面圧(最大 0.2 MPa)を負荷することとする。圧力の軸方向分布はバンドル出口部をゼロとし線形分布を仮定する。

⑤ 物性値

外部ダクト、内部ダクト及びその他の構造材は PNC-FMS 鋼^[6]を想定することとする。

(ii) 溶接部健全性条件

内部ダクトの溶接部は、通常運転中の異常過渡を含む荷重負荷状態にあっても塑性歪の発生を防止し、溶接部の破断を防止する必要がある。この観点から、溶接部の健全性評価では、以下の応力制限値を目安とすることとした。

$$1 \text{ 次} + 2 \text{ 次} \text{ 応力} < 0.57 S_y \quad (S_y : \text{設計降伏点})$$

ここで、制限目安値は、溶接部の純せん断に対する塑性ひずみの発生を防止する観点から、 $S_y/\sqrt{3}=0.57 S_y$ と暫定した。また、適用する S_y は、溶接部の強度が母材と同等の強度を有すると仮定し、PNC-FMS 鋼の設計降伏応力とした(温度依存性考慮)。

(iii) 検討結果

集合体水平方向温度差 100℃、軸方向溶接ピッチ 100 mm の場合を代表ケースとして、集合体水平方向の温度荷重 4 パターンについて熱湾曲解析を行い、各パターンの熱湾曲特性の比較を行った。以下に、解析結果に基づく集合体変形、応力分布、溶接部反力の特性を示す。

① パターン 1

集合体全体と内部ダクトの変形、ラッパ管と内部ダクトの Mises 相当応力の分布、内部ダクトの溶接反力のうち、せん断方向の反力の分布を、

図 2.1-23 に示した。各項目の特徴を以下にまとめた。

[集合体変形]

- ・内部ダクトが存在する側の対向側が高温であるため、集合体全体の湾曲は内部ダクト側に向かった湾曲モードとなる。
- ・集合体全体の湾曲に従い、内部ダクトは上端で最大変位を示す。

[応力分布]

- ・最大応力は、内部ダクトが存在するコーナの下部側で発生し、ダクト内面側で最大 42.1 MPa である。
- ・内部ダクトは、下部側の溶接部で最大応力が発生し、ダクト内面側で 34.0 MPa である。
- ・内部ダクトが存在するコーナ下部側で応力が高くなる原因としては、外部ダクトの内圧による弾性膨張が内部ダクト溶接部で拘束されるためであり、内圧が高い下部側ほど応力値が高くなる。

[溶接部反力]

- ・ダクト平板部の各溶接点 3 点のうち、反力が顕著に現われる点はコーナ部から最も離れた点であり、コーナに近い溶接点で反力は小さくなる傾向を示す。
- ・溶接部せん断力の最大値は、内部ダクト最下部の溶接点で発生し、最大せん断力は 495.9 N である。

② パターン 2

集合体全体と内部ダクトの変形、ラップ管と内部ダクトの Mises 相当応力の分布、内部ダクトの溶接反力のうち、せん断方向の反力の分布を、図 2.1-24 に示した。各項目の特徴を以下にまとめた。

[集合体変形]

- ・内部ダクトが存在する側が高温側であるため、集合体全体の湾曲は内部ダクトが存在する側から反対側に向かった湾曲モードとなる。
- ・温度荷重パターン 1 と同様、集合体全体の湾曲に従い、内部ダクトは上端で最大変位を示す。

[応力分布]

- ・最大応力は、内部ダクトが存在するコーナの下部側で発生し、ダクト内面側で最大 46.7 MPa である。
- ・内部ダクトは、下部側の溶接部で最大応力が発生し、ダクト内面側で 34.0 MPa である。
- ・内部ダクトが存在するコーナ下部側で応力が高くなる原因は、パターン 1 と同様に外部ダクトの内圧による膨張が内部ダクト溶接部で拘束されるためである。

[溶接部反力]

- ・温度荷重パターン 1 と同様に、ダクト平板部の各溶接点 3 点のうち、反力が顕著に現われる点はコーナ部から最も離れた点である。
- ・溶接部のせん断力は、内部ダクト最下部の溶接点で発生し、最大せん

断力は 504.0 N である。

③ パターン 3

集合体全体と内部ダクトの変形、ラップ管と内部ダクトの Mises 相当応力の分布、内部ダクトの溶接反力のうち、せん断方向の反力の分布を、図 2.1-25 に示した。各項目の特徴を以下にまとめた。

[集合体変形]

- ・温度荷重パターン 3 の場合、全体座標系 (図 2.1-21 参照) を基準とする第 2 象限のコーナ部が高温であるため、集合体全体は第 4 象限の方向に湾曲する。
- ・内部ダクトの変形は、パターン 1 と同様に集合体全体の湾曲に従ったモードとなるが、当該パターンの場合、内部ダクトは対辺間方向に湾曲する。

[応力分布]

- ・外部ダクトの応力は、パターン 1、2 と同様に冷却材圧力(バンドル入口で最高値 0.2 MPa)による膨張が内部ダクト溶接部で拘束される下部側コーナ部で高い値を示す。
- ・内部ダクトは、外部ダクトとの接合面のうち、高温側に位置する面の軸方向上部で最大応力が発生し、ダクト内面側で 36.8 MPa である。

[溶接部反力]

- ・溶接部のせん断力は内部ダクト上部で発生し、最大せん断力は高温側のコーナ部から離れた溶接点に現われ、1294.5 N である。

④ パターン 4

集合体全体と内部ダクトの変形、ラップ管と内部ダクトの Mises 相当応力の分布を、内部ダクトの溶接反力のうち、せん断方向の反力の分布を、図 2.1-26 に示した。各項目の特徴を以下にまとめた。

[集合体変形]

- ・全体座標系(図 2.1-21 参照)を基準とする第 1 象限のコーナ部が高温であるため、集合体全体は第 3 象限の方向に湾曲する。
- ・パターン 3 と同様に外部ダクトの湾曲に従った湾曲モードとなり、集合体全体の湾曲方向から内部ダクトは対辺間方向に湾曲する。

[応力分布]

- ・外部ダクトの応力は、パターン 3 と同様に冷却材圧力(バンドル入口で最高値 0.2MPa)による膨張が内部ダクト溶接部で拘束される下部側コーナ部で高い値を示す。
- ・内部ダクトは、外部ダクトとの接合面のうち、高温側に位置する面の軸方向上部で最大応力が発生し、ダクト内面側で 41.2 MPa である。

[溶接部反力]

- ・溶接部のせん断力は内部ダクト上部で発生し、最大せん断力は高温側の面のコーナ部から離れた溶接点に現われ 1609.3 N である。

(iv) 自由熱湾曲のまとめ

集合体水平方向温度差、及び、軸方向溶接ピッチをパラメータとした熱湾曲解析の結果を表 2.1-3 にまとめて示した。表中のパッド部変位は、パッド面法線方向(隣接集合体パッドの方向)の最大変位量を記載したものである。また、溶接部垂直力は引張力のみを記載した。溶接点の応力は、溶接部面積 20 mm^2 (ナゲット径 $\phi 5.0 \text{ mm}$) を想定した場合の値を記載した。結果として、内部ダクト支持部(溶接部)のせん断応力は、内部ダクトが対辺方向に湾曲するパターン 4 の温度勾配を与えた場合に最も厳しくなることがわかった。以下に、パッド部変位、溶接部反力、溶接部健全性について、特徴をまとめた。

[パッド部変位]

図 2.1-27 に、軸方向溶接ピッチ 100 mm の場合の集合体パッド部変位と水平方向温度差の相関を示す。上部パッド変位量は、何れの温度荷重パターンも概ね同程度であるが、パターン 3 の場合は他のケースより小さいことがわかる。中間パッド部の変位は何れのケースも同程度であった。

[溶接部反力]

図 2.1-28 に、溶接部せん断力と水平方向温度差の相関を示す。せん断力は、内部ダクトが対辺方向に湾曲する温度荷重パターン 4、3 の順に大きく、内部ダクトが頂角方向に湾曲するパターン 1、2 では、水平方向温度差に対する感度が小さくなり、反力も低いレベルに留まる。パターン 3、4 では、溶接ピッチが短いほどせん断力は小さくなる傾向が認められた。せん断力に関しては、外部ダクトと内部ダクトの熱膨張差が溶接点で拘束されることで発生するため、溶接(拘束)点が多いほどせん断力は分散されて小さくなっている。従って、溶接ピッチが短いほど、せん断力は小さくなる傾向を示している。

[溶接部健全性評価]

図 2.1-29 に、内部ダクト溶接部のせん断応力比と水平方向温度差の相関を示す。ここで、せん断応力比は、上述した $0.57 S_y$ で除した値である。集合体水平方向の温度差が $100 \text{ }^\circ\text{C}$ の場合であっても、軸方向溶接ピッチが 100 mm の場合も 200 mm の場合も制限値目安値(せん断応力比 = 1.0)以下である。

図 2.1-30 には、内部ダクト溶接部のせん断応力比と軸方向溶接ピッチの相関を示す。内部ダクトの対辺方向に湾曲を受けるケース(パターン 3、4)では、溶接間隔の狭窄化は、せん断応力の低下に若干効果が認められるが、内部ダクト対角方向に湾曲を受けるケースでは、溶接ピッチへの依存性が認められないことがわかる。これは、せん断応力の主因が湾曲ではなく、内部ダクトと外部ダクトの熱膨張差に起因するためと考えられる。

(2) 照射湾曲時の検討

(i) 検討条件

炉内での照射湾曲について、隣接集合体から受ける湾曲拘束を考慮して評価を行う。評価は、前項(2.1.4(1))の結果、内部ダクト接合部のせん断応力

が最も厳しくなる温度荷重パターンであるパターン 4 を対象に行う。また、照射時期としては、比較のため、照射初期と照射末期の 2 ケースを想定することとする。

① 燃料集合体仕様

前項(2.1.4(1))の自由熱湾曲時の検討における仕様と同様とした。

② 幾何形状モデル

前項(2.1.4(1))の自由熱湾曲時の検討における幾何形状モデルと同様とした。ただし、温度荷重パターンは、溶接部反力が最も厳しくなるパターン 4 を想定し、軸方向溶接ピッチは 100 mm とした。また、拘束位置は解析モデル上、下記の 2 箇所の軸位置とし(図 2.1-20 参照)、初期ギャップは何れも室温で 1.0 mm とした。パッド部での接触は点接触を想定した。

上部パッド	3,445 mm
中間パッド	2,440 mm

③ 境界条件

前項(2.1.4(1))の自由熱湾曲時の検討における境界条件と同様とした。ただし、集合体上部、及び、中間パッド位置で、湾曲方位に対して拘束条件を設定し、集合体の湾曲拘束を行うこととした。

④ 荷重条件

温度荷重、冷却材圧力については、前項(2.1.4(1))の自由熱湾曲時の検討における境界条件と同様とした。ただし、集合体水平方向温度差としては、100 °C を想定した。

照射条件については、比較のため、照射初期と照射末期の 2 ケースを想定することとした。ここで、高速中性子については、集合体内温度勾配(出力勾配)と同一方向の勾配とし、温度荷重と同様のパターンを考慮することとした。水平方向の分布は、集合体内熱流動特性評価で適用された、集合体径方向出力分布の相対値を適用する。一方、高速中性子束の軸方向分布は、下部ブランケット下端から上部ブランケット下端の区間に対し、核計算結果に基づく分布を適用することとした。解析で用いた高速中性子束の軸方向分布を図 2.1-31 に示す。また、照射末期ケースの炉内滞在期間としては、26.3 ヶ月×4 バッチ(3,200 日)を想定することとし、高速中性子束は 1.8×10^{15} n/cm²s ($E > 0.1$ MeV) とした。

⑤ 物性値

前項(2.1.4(1))の自由熱湾曲時の検討における物性値と同様とした。

(ii) 溶接部健全性条件

前項(2.1.4(1))の自由熱湾曲時の検討における健全性条件と同様とし、以下を想定することとした。

$$1 \text{ 次} + 2 \text{ 次応力} < 0.57 S_y$$

(iii) 検討結果

① 照射初期湾曲拘束

解析結果として、集合体全体・内部ダクトの変形、ラップ管・内部ダクトの Mises 相当応力の分布、内部ダクトの溶接反力のうち、せん断方向の反力の分布を図 2.1-32 に示した。以下に各項目の特徴をまとめた。

[変形図]

- ・集合体は、頂部が水平方向温度勾配の低温側で、中間パッド部は高温側で変位拘束を受けるため、自由湾曲に比べ各部の変形量は小さくなる。

[応力分布]

- ・外部ダクトの応力は、接触面側の中間パッド部付近で接触による比較的高い応力領域が認められる。
- ・内部ダクトの応力は、湾曲拘束により、(自由熱湾曲時の)内部ダクト高温側のコーナ部で認められた比較的高い応力領域が緩和していることがわかる。
- ・ダクトの最大応力は、自由湾曲に比べ若干低下し 49.9 MPa である。

[溶接部反力]

- ・溶接部のせん断力は、自由湾曲の場合と同様な分布を示すが、最大せん断力は自由湾曲に比べ約 50 % 低下しており、937.3 N であった。
- ・溶接部面積を 20 mm^2 (ナゲット径 $\Phi 5.0 \text{ mm}$) と想定した場合、最大せん断応力は 46.9 MPa である。これは、溶接部の強度が母材と同等の強度を有するものと仮定した場合の応力制限値 $0.57 S_y$ と比較すると、制限値 (262.0 MPa) を十分に下回る (せん断応力比 0.18) 結果である。

[接触反力]

- ・湾曲拘束点における最大接触反力は、それぞれ以下の値である。
 上部パッド 1229.7 N
 中間パッド 1172.9 N

② 照射末期湾曲拘束

解析結果として、集合体全体・内部ダクトの変形、ラップ管・内部ダクトの Mises 相当応力の分布、内部ダクトの溶接反力のうち、せん断方向の反力の分布を図 2.1-33 に示した。以下に各項目の特徴をまとめた。

[変形図]

- ・外部ダクト平板部で、バルジグ変形が認められる。また、内部ダクトでは、軸方向において高速中性子束が高い炉心領域で、平板部のダクト内側への変形が認められる。
- ・内部ダクトの変形は、外部ダクトのバルジグ変形の影響を受けていることがわかる。
- ・内部ダクトのバンドル側平板部(高温側の平板部)は、溶接部コーナを基準とした相対変位量が、平板部中央で 0.98 mm、バンドル側のコーナ部で 1.64 mm であり、内部ダクト内側への変形が認められる。

【応力分布】

- ・照射初期の応力分布と比較すると、熱膨張差に起因した内部ダクト接合部上部の応力が、照射クリープにより緩和している様子が認められる。

【非弾性ひずみ分布】

- ・クリープ歪みの最大値は、炉心領域下方に現われ約 0.6 %、スエリング歪みも炉心領域下方に現われ約 0.3 %である。

【溶接部反力】

- ・照射初期の反力と比較すると、内部ダクト上部の熱膨張差に起因する反力は、クリープ緩和により緩和され、何れの方法も 1/2 程度に低下している。

【接触反力】

- ・照射末期における拘束点の反力は、クリープ緩和により緩和され、上部パッド、中間パッド部ともに零となる。

(iv) 照射湾曲のまとめ

炉内での照射湾曲を、隣接集合体から受ける湾曲拘束を考慮して評価した結果を表 2.1-4 にまとめて示す。

照射初期に溶接部に発生する最大せん断応力は 46.9 MPa であり、応力制限目安値(262.0 MPa)に対し十分に小さいことがわかった。また、照射末期では、クリープ緩和により溶接部の最大応力は緩和する傾向が得られた。従って、通常運転時における内部ダクト溶接部の健全性は、寿命を通して確保できる見通しがあると考えられる。また、内部ダクトは高速中性子束が高く温度が比較的低い炉心領域下部において、平板部のダクト内側への変形が認められることがわかった。このことから、内部ダクトに接するバンドル外周部の流路面積が増大する可能性があり、今後、詳細な熱流動解析による熱的評価が必要と考えられる。

(3) 異常過渡時の検討

(i) 検討条件

通常運転時の異常な過渡事象のうち、集合体内の冷却材温度が急激に上昇する事象(LOF 型事象)の場合、内部ダクトは冷却材に接する面が高温となり、外部ダクトとの接合部は熱応答の遅れから相対的に低温となる。このため、内部ダクトは外部ダクト側に曲がろうとする曲げモーメントが発生し、外部ダクトから拘束を受ける。一方、集合体内の冷却材温度が急激に降下する事象(手動トリップや過流量事象)の場合、内部ダクトは冷却材に接する面が低温となり、内部ダクトを集合体中心側に曲げようとするモーメントが発生し、接合部には引張力が発生すると考えられる。そこで、これらの温度状態を単純化した温度分布を模擬し、内部ダクト接合部の応力評価を行うこととした。

① 燃料集合体仕様

2.1.4(1)の自由熱湾曲時の検討における仕様と同様とした。

② 幾何形状モデル

2.1.4(1)の自由熱湾曲時の検討における幾何形状モデルと同様とした。ただし、温度荷重パターンは、溶接部反力が最も厳しくなるパターン4を想定し、軸方向溶接ピッチは100 mmとした。また、隣接集合体からの拘束は考慮することとし、拘束条件は前項(2.1.4(2))の照射湾曲時の検討と同様とした。

③ 境界条件

2.1.4(1)の自由熱湾曲時の検討における境界条件と同様とした。

④ 荷重条件

冷却材温度急昇条件(LOF型事象模擬)のケースでは、ダクト最高温度を発熱領域上端で800℃と仮定することとした。一方、内部ダクトと外部ダクトの接合面は、内部ダクト上端で515℃一定と仮定した。従って、内部ダクト上端では、冷却材に接する面が715℃、外部ダクトに接する面が515℃で、内部ダクト対角方向に200℃の温度差が存在することとした。

冷却材温度急冷条件(手動トリップ事象模擬)のケースでは、冷却材温度は急激な出力降下により100℃低下し、発熱領域上端の最高温度が500℃となると想定した。一方、内部ダクトと外部ダクトの接合面は、内部ダクト上端で515℃一定を仮定した。従って、内部ダクト上端では冷却材に接する面が415℃、外部ダクトに接する面が515℃で、内部ダクト対角方向に100℃の温度差が存在することとした。

⑤ 物性値

2.1.4(1)の自由熱湾曲時の検討における境界条件と同様とした。

(ii) 溶接部健全性条件

2.1.4(1)の自由熱湾曲時の検討における健全性条件と同様とし、以下を想定することとした。

$$1 \text{ 次} + 2 \text{ 次} \text{ 応力} < 0.57 \text{ Sy}$$

(iii) 検討結果

① 冷却材温度急昇条件

図 2.1-34 に、内部ダクト溶接部の垂直方向、及び、せん断力方向の反力の分布を示した。せん断力の最大値は、内部ダクト最上部で認められ、値は6654.8 Nであった。内部ダクト溶接部の最大せん断応力は、溶接面積20 mm²を想定すると、以下となる。

$$\text{最大せん断応力} \quad 332.7 \text{ MPa}$$

溶接部最大応力発生部位の温度は515℃であるので、暫定した制限目安値0.57 Syは296.9 MPaとなり、最大せん断応力は制限目安値を超える結果となった。

② 冷却材温度急冷条件

図 2.1-35 に、内部ダクト溶接部の垂直方向、及び、せん断力方向の反

力の分布を示した。せん断力の最大値は、内部ダクト最上部で認められ、値は 1614.2 N であった。内部ダクト溶接部のせん断応力は、溶接面積 20 mm² を想定すると、以下でとなる。

最大せん断応力 80.7 MPa

溶接部最大応力発生部位の温度は 515℃ であることから、 $0.57 S_y = 296.9 \text{ MPa}$ となり、最大せん断応力は、制限目安値以下となる見通しが得られた。

(iv) 熱過渡事象のまとめ

炉内での照射湾曲を、隣接集合体から受ける湾曲拘束を考慮して評価した結果を表 2.1-5 にまとめて示す。

冷却材温度急昇事象を単純化した温度分布で評価した結果、最大せん断応力は制限目安値を超える結果を示したが、評価に適用した荷重条件が保守側の設定である点、また、溶接面積(ナゲット径)の増加や、最大応力発生部位近傍での溶接を避けるなどの構造設計対応の余地がある点を考慮すると、溶接部の健全性について、確保できる見通しはあるもの考えられる。構造対応の例として、ナゲット径を増大させた場合の溶接部せん断応力比の変化を図 2.1-36 に示した。この結果、本検討条件であるナゲット径 約 5 mm を 1 mm 以上大きくすることができれば、制限目安値を下回ることは可能であることがわかる。

2.1.5 設計成立性のまとめ

改良内部ダクト型集合体の設計成立性の検討に資するため、熱流動特性・構造健全性に関する予備的な評価を行った。

熱流動特性について、集合体内の基本的な温度特性、冷却材流動特性の把握を行った。その結果、改良内部ダクト型集合体の周辺流れ係数は 1.117 であり、通常バンドル体系の値 1.110 より増加する傾向にあるが、その程度は僅かであることがわかった。熱設計においては、この値を保守側にまらめた 1.12 を適用することとした。また、改良内部ダクト型集合体のダクト温度評価を行った結果、集合体内径方向出力ピーキングが最も大きい外側炉心相当条件において、外部ダクト周方向温度差の最大値は 80℃ 強、内部ダクト周方向温度差の最大値は 30℃ 強であるとの結果を得た(この結果を、構造健全性評価に反映)。

構造健全性について、集合体の炉内装荷方位から定まる温度荷重パターンを 4 パターン想定し、自由熱湾曲の解析を行うとともに、自由熱湾曲時の溶接部応力が最大となる温度荷重パターンを設定し、隣接集合体からの拘束を考慮した照射湾曲解析を行った。また、通常運転中の異常な熱過渡事象に関して、冷却材温度急昇事象と冷却材温度急冷事象を(単純な温度分布で保守的に)想定した熱湾曲解析を行い、溶接部に発生する最大せん断応力の評価を行った。評価結果を、以下にまとめた。

- ・溶接部の強度制限値について、今後、溶接部材による強度試験等による評価が必要であるが、本検討では、暫定的に溶接部が母材と同等の強度を有するもの

として、接合部のせん断応力について、以下の制限目安値を想定した。

$$1 \text{ 次} + 2 \text{ 次} \text{ 応力} < 0.57 S_y$$

- ・自由熱湾曲に関する溶接部のせん断応力は、内部ダクトが対角間方向に湾曲する場合よりも、対辺間方向に湾曲する場合の方が厳しく、特に、内部ダクトが低温側に位置する場合にせん断応力は最大となることがわかった。ただし、(熱流動解析の結果得られた)通常運転時の集合体水平方向温度差を包絡する条件(100℃)を想定しても、接合部の応力は、制限目安値を十分に下回ること(制限比 0.32)がわかった。
- ・隣接集合体との接触を考慮した場合、接合部の応力は自由湾曲に比べ約 1/2 に低下する結果となった。また、照射末期では、照射クリープによる応力緩和により、接合部の応力は更に低下する傾向が認められた。結果として、通常運転条件での内部ダクト接合部の応力は、照射寿命期間を通じて制限目安値以下(制限比 0.18)となり、溶接部の健全性を確保できる見通しを有するものと考えられる。
- ・通常運転時の異常な熱過渡として、冷却材温度急冷事象と冷却材温度急昇事象を想定し評価を行った。その結果、冷却材温度急冷事象では、上記の制限目安値を下回る結果(制限比 0.27)であったが、冷却材温度急昇事象では、制限目安値を超える結果となった(制限比 1.12)。ただし、内部ダクト支持部の溶接面積の増大や、溶接位置の変更などの構造対応を想定することにより、溶接部の健全性を確保できる見通しを有するものと考えられる。内部ダクト溶接部の支配的応力要因は、内部ダクトとラップ管の膨張差であり、今後の課題として過渡時を含め接合部近傍の詳細な温度評価が重要であると考えられる。

以上の改良内部ダクト型集合体に関する予備評価の結果、現状の評価の範囲では、本改良内部ダクト型集合体の設計成立性について、明確な問題点は認められなかった。そのため、本集合体概念は、今後も継続的に設計成立検討を進める価値のある概念と考えられる。今後の課題として、内部ダクト溶接部の支配的応力要因は、内部ダクトとラップ管の膨張差であることから、過渡時を含め、接合部近傍の詳細な温度評価が重要であると考えられる。

表 2.1-1 周辺流れ係数評価結果

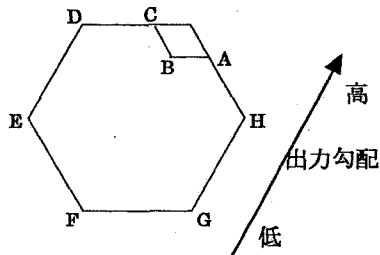
集合体形状	集合体出力 (MW)	集合体流量 (kg/s)	集合体内径方向出力分布	内側チャンネル摩擦係数	外側チャンネル摩擦係数	コーナーチャンネル摩擦係数	周辺流れ係数	バンドル圧損 (MPa)	備考
従来型集合体体系 (271 t/s)	8.81	35.1	フラット	$0.1443 \times Re^{-0.18}$	$0.1722 \times Re^{-0.18}$	$0.2320 \times Re^{-0.18}$	1.110	0.180	周辺流れ係数 1.11、バンドル圧損 0.18MPa になるように摩擦係数を調整
改良内部ダクト型体系 (255 t/s)	8.29	33.0	フラット	$0.1443 \times Re^{-0.18}$	$0.1722 \times Re^{-0.18}$	$0.2320 \times Re^{-0.18}$	1.117	0.178	改良内部ダクト型体系に、調整後のチャンネル摩擦係数を適用

表 2.1-2 ダクトの周方向温度差と冷却材最高温度

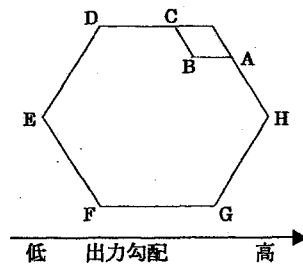
CASE	温度 (°C)	ダクト全体			内部ダクト壁面			冷却材最高温度 (°C)
		炉心中心	炉心上端	バンドル上端	炉心中心	炉心上端	バンドル上端	
CASE-0 (271トン体系)	最大値	469.4	548.6	559.8	—	—	—	618.8
	最小値	429.5	469.1	470.5	—	—	—	
	温度差	39.9	79.5	83.3	—	—	—	
CASE-1	最大値	466.9	545.8	557.9	466.9	545.8	557.9	609.8
	最小値	430.4	471.1	478.6	460.7	536.0	547.2	
	温度差	36.5	74.7	79.3	6.2	9.8	10.7	
CASE-2	最大値	470.4	550.8	562.2	463.6	532.1	540.8	621.9
	最小値	430.1	470.5	477.9	450.3	506.0	510.7	
	温度差	40.3	80.3	84.3	13.3	26.1	30.1	
CASE-3	最大値	469.2	548.3	559.4	448.6	500.7	510.0	618.0
	最小値	429.5	469.0	476.4	435.3	474.9	481.1	
	温度差	39.7	79.3	83.0	13.3	25.8	28.9	
CASE-4	最大値	468.5	546.8	557.9	440.3	486.1	498.0	616.1
	最小値	432.8	476.0	484.0	432.8	476.0	484.0	
	温度差	35.7	70.8	73.9	7.5	10.1	14.0	

(注) 各ケースにおける内部ダクトと出力勾配の関係は、以下のとおりである。

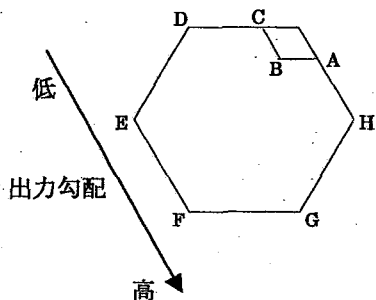
CASE-1



CASE-2



CASE-3



CASE-4

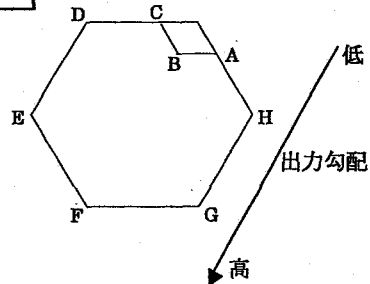


表 2.1-3 熱自由湾曲解析の結果

温度 荷重 パターン	溶接 ヒッチ [mm]	集合体 水平方向 温度差 [°C]	上部ハット 変位 ^{*1} [mm]	中間ハット 変位 ^{*1} [mm]	フラッグ 最大応力 [N/mm ²]	溶接点 垂直力 (F _v) ^{*2} [N]	溶接点 せん断力 (F _d) ^{*2} [N]	内部が外 温度 [°C]	溶接点 垂直応力 (σ _v) ^{*3} [N/mm ²]	溶接点 せん断応力 (σ _d) ^{*3} [N/mm ²]	設計降伏点 (S _y) ^{*4} [N/mm ²]	応力制限 目安値 0.57S _y [N/mm ²]	せん断 応力比 ^{*5} [-]
1		100	6.73	1.58	46.8	115	496	508	5.8	24.8	529.3	301.7	0.08
		50	3.69	1.11	46.7	41	498	529	2.1	24.9	502.0	286.1	0.09
2		100	6.80	1.62	46.7	69	504	592	3.4	25.2	404.3	230.5	0.11
		50	3.76	1.14	46.7	34	502	571	1.7	25.1	439.6	250.5	0.10
3		100	6.30	1.51	33.9	35	1294	557	1.7	64.7	461.6	263.1	0.25
		50	3.50	1.09	46.7	27	635	554	1.3	31.7	466.8	266.1	0.12
4		100	6.96	1.64	41.1	163	1609	515	8.1	80.5	520.5	296.7	0.27
		50	3.81	1.14	46.7	65	781	533	3.2	39.0	497.3	283.4	0.14
1		100	6.74	1.59	50.0	90	510	508	4.5	25.5	529.3	301.7	0.08
		50	3.69	1.11	49.9	29	510	529	1.5	25.5	502.0	286.1	0.09
2		100	6.81	1.62	49.9	32	508	592	1.6	26.4	404.3	230.5	0.11
		50	3.77	1.15	49.9	29	509	571	1.4	26.4	439.6	250.5	0.10
3		100	6.31	1.52	49.8	31	1449	557	1.6	72.5	461.6	263.1	0.28
		50	3.51	1.09	49.9	28	696	554	1.4	34.8	466.8	266.1	0.13
4		100	6.97	1.64	52.8	137	1895	515	6.9	94.7	520.5	296.7	0.32
		50	3.82	1.14	49.9	52	906	533	2.6	45.3	497.3	283.4	0.16

*1:ハット面法線方向の変位を示す。

*2:引張力のみ表示。

*3:溶接面積は 20mm²(ががット径役 5mm)を想定した。

*4:PNC-FMS 鋼の内部が外温度における設計降伏点。

*5:せん断応力/0.57S_y

表 2.1-4 照射湾曲解析の結果

評価 時点	温度 荷重 パター	溶接 ヒッチ [mm]	集合体 水平方向 温度差 [°C]	上部パット 変位 ^{*1} [mm]	中間パット 変位 ^{*1} [mm]	コア管 最大応力 [N/mm ²]	溶接点 垂直力 (F _v) ^{*2} [N]	溶接点 せん断力 (F _t) ^{*2} [N]	溶接点 せん断力 (σ _σ) ^{*3} [N/mm ²]	溶接点 せん断応力 (σ _σ) ^{*3} [N/mm ²]	溶接点 せん断応力 (σ _σ) ^{*3} [N/mm ²]	設計降伏点 (S _y) ^{*4} [N/mm ²]	応力制限 目安値 0.57S _y [N/mm ²]	せん断 応力比 ^{*5} [-]
BOL	4	100	100	1.0	1.0	49.9	113.2	987.3	515	5.7	46.9	459.6	262.0	0.18
EOL				1.0	1.0	60.0	55.6	419.7	515	2.8	21.0	205.8	117.3	0.18

*1: パット面法線方向の変位を示す。

*2: 引張力のみ表示。

*3: 溶接面積は 20mm²(ガット径役 5mm)を想定した。

*4: PNC-FMS 鋼の内部ガット温度における設計降伏点。

*5: せん断応力/0.57S_y

表 2.1-5 過渡時を想定した熱湾曲解析の結果

想定事象	拘束条件	温度 荷重 パターン	溶接 ヒッチ [mm]	集合体 水平方向 温度差 [°C]	溶接点 垂直力 (F _v) ^{*2} [N]	溶接点 せん断力 (F _t) ^{*2} [N]	内部ガット 温度 [°C]	溶接点 垂直応力 (σ _σ) ^{*3} [N/mm ²]	溶接点 せん断応力 (σ _σ) ^{*3} [N/mm ²]	設計降伏点 (S _y) ^{*4} [N/mm ²]	応力制限 目安値 0.57S _y [N/mm ²]	せん断 応力比 ^{*5} [-]
冷却材温度急上昇	湾曲拘束	4	100	100	945	6655	515	47.3	332.7	520.8	296.9	1.12
冷却材温度急降下					675	1614	515	33.8	80.7	520.8	296.9	0.27

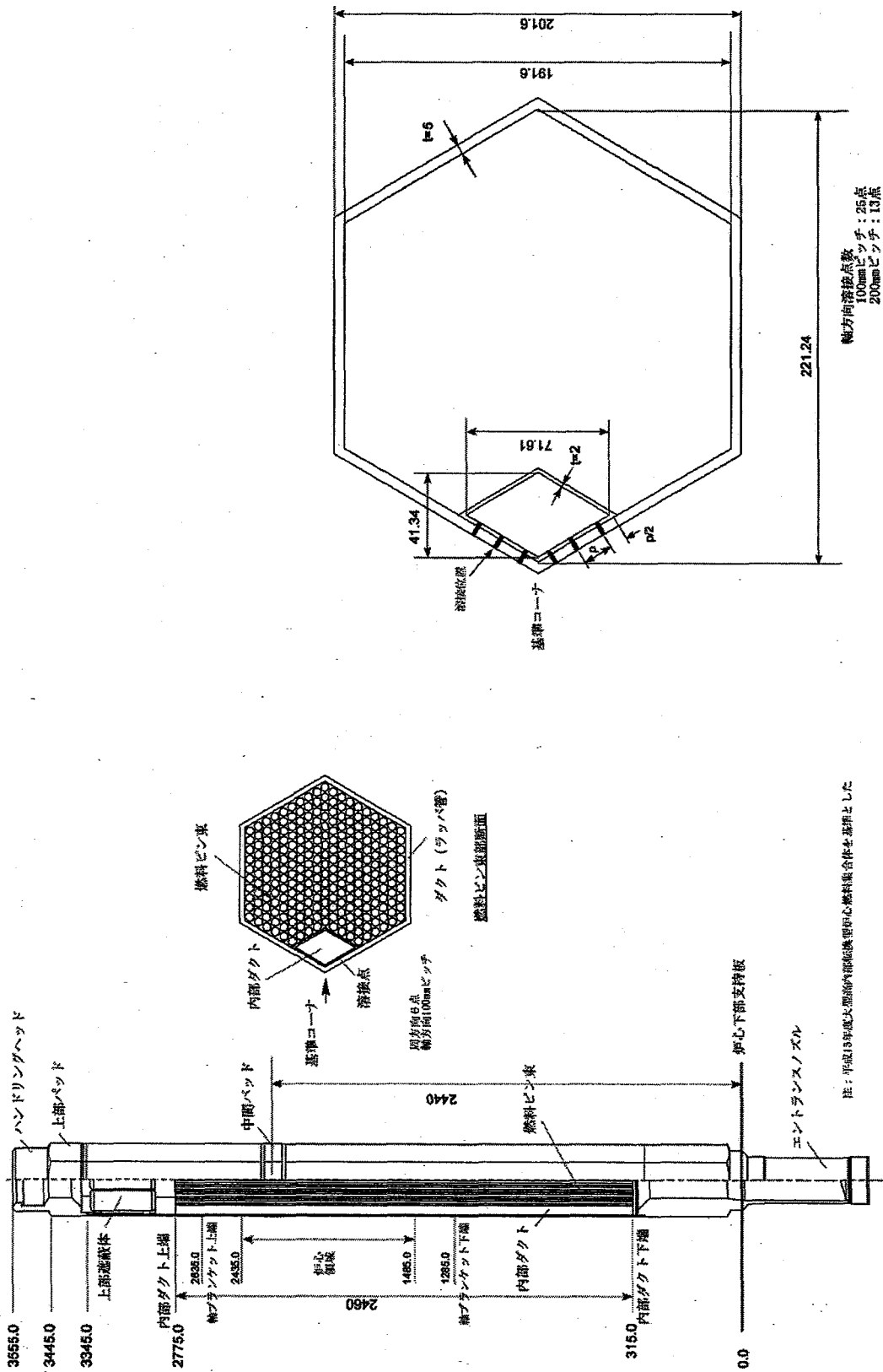
*1: パット面法線方向の変位を示す。

*2: 引張力のみ表示。

*3: 溶接面積は 20mm²(ガット径役 5mm)を想定した。

*4: PNC-FMS 鋼の内部ガット温度における設計降伏点。

*5: せん断応力/0.57S_y



[水平方向断面]

[軸方向断面]

図 2.1-1 改良内部ダクト型集合体の形状

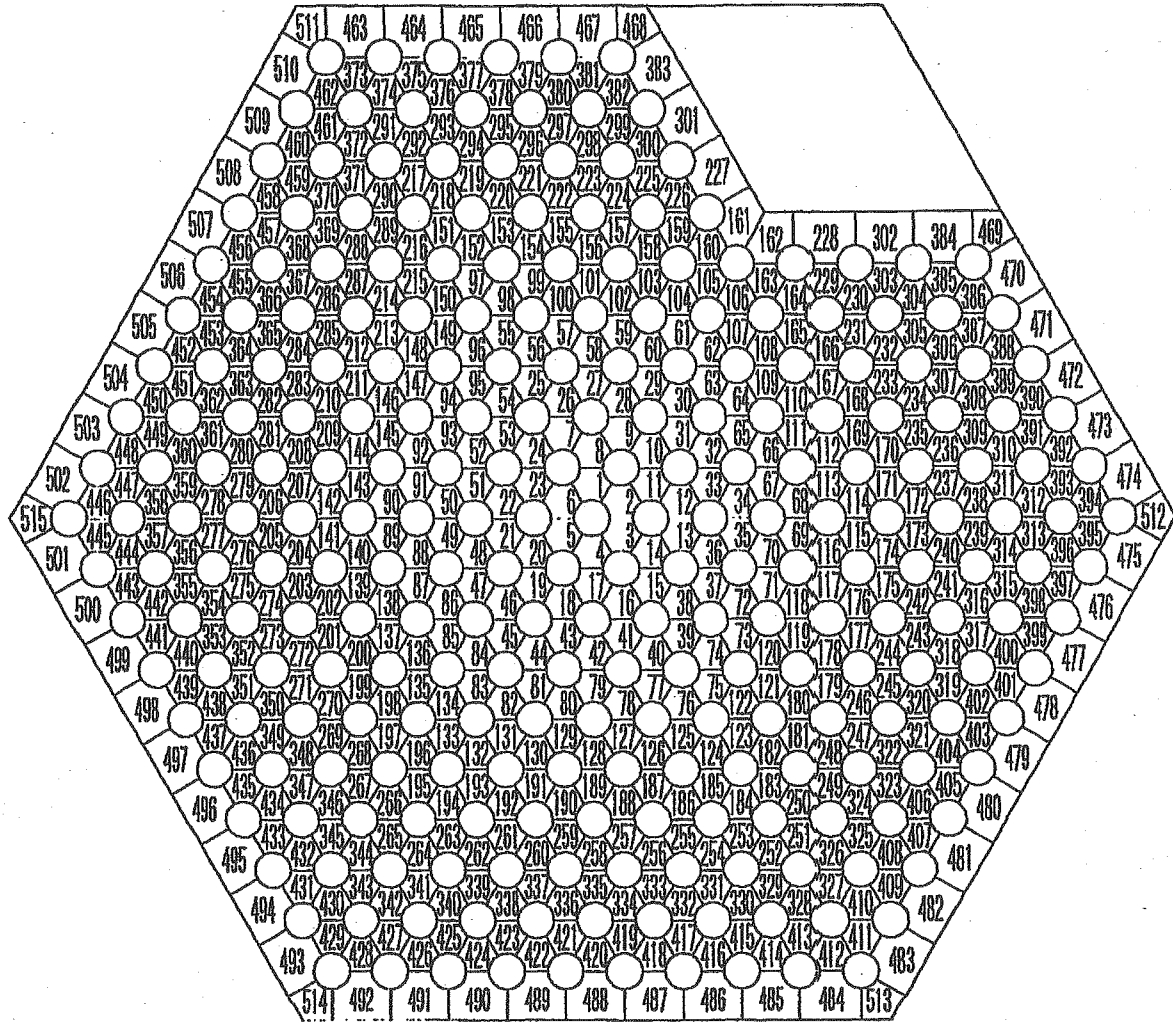
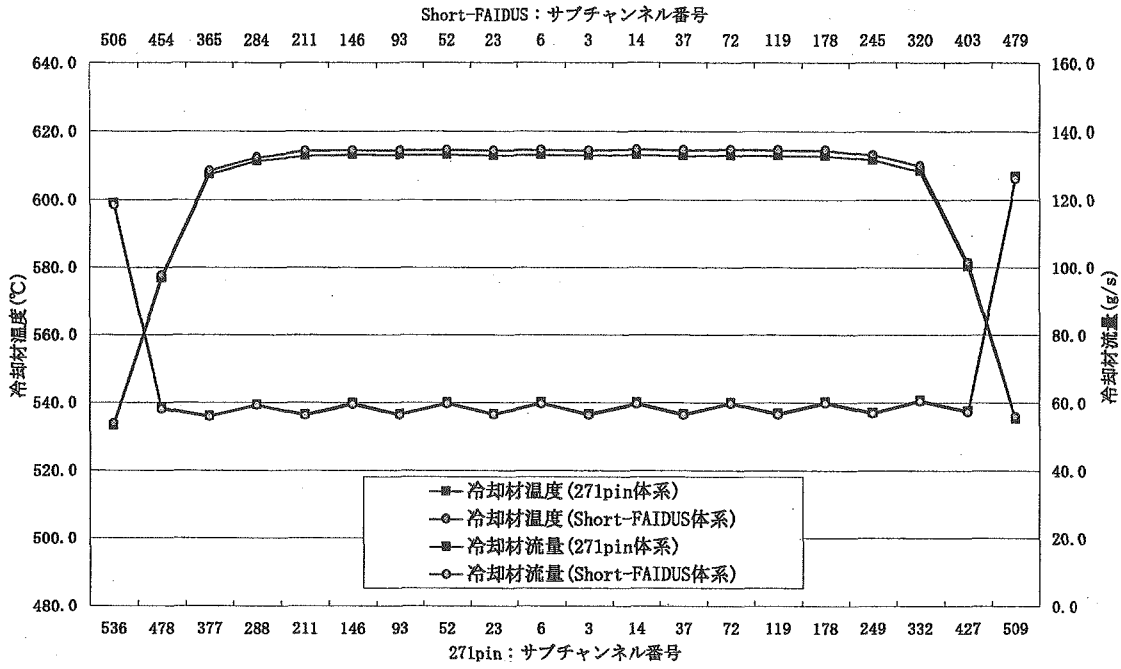
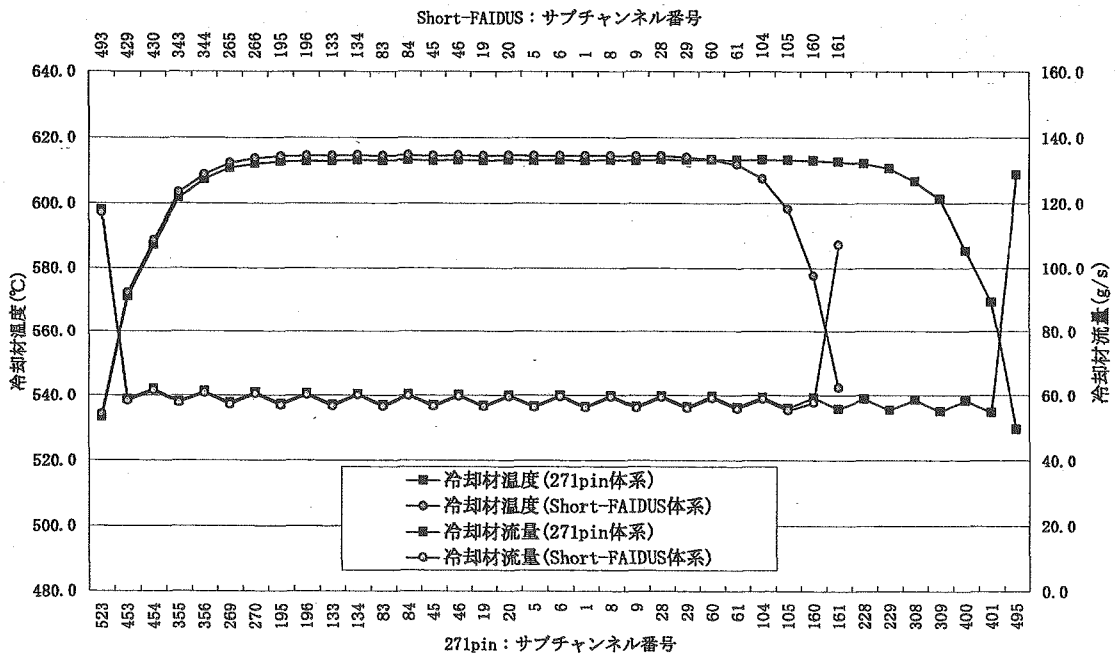


図 2.1-2 サブチャンネル解析メッシュ・番号図

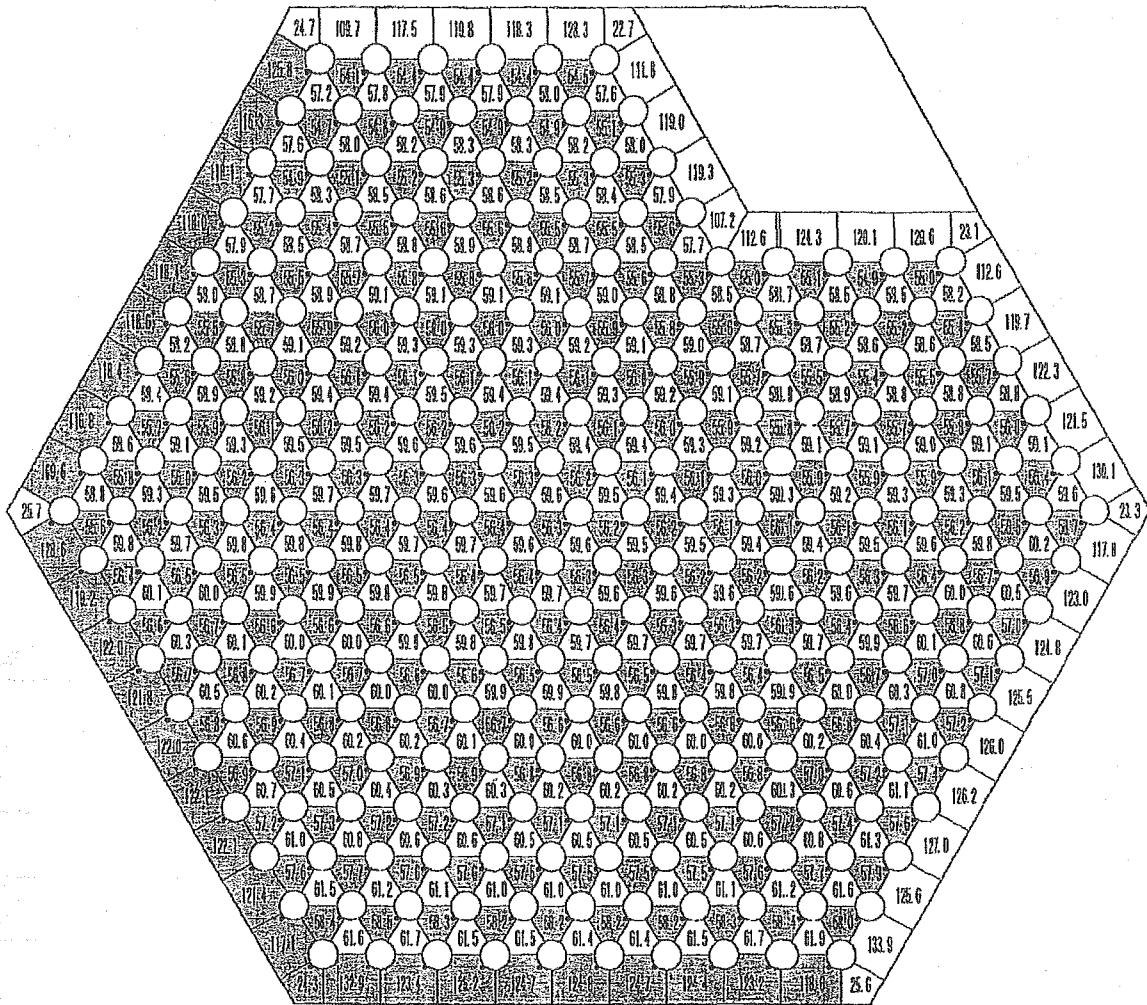


【対辺間】



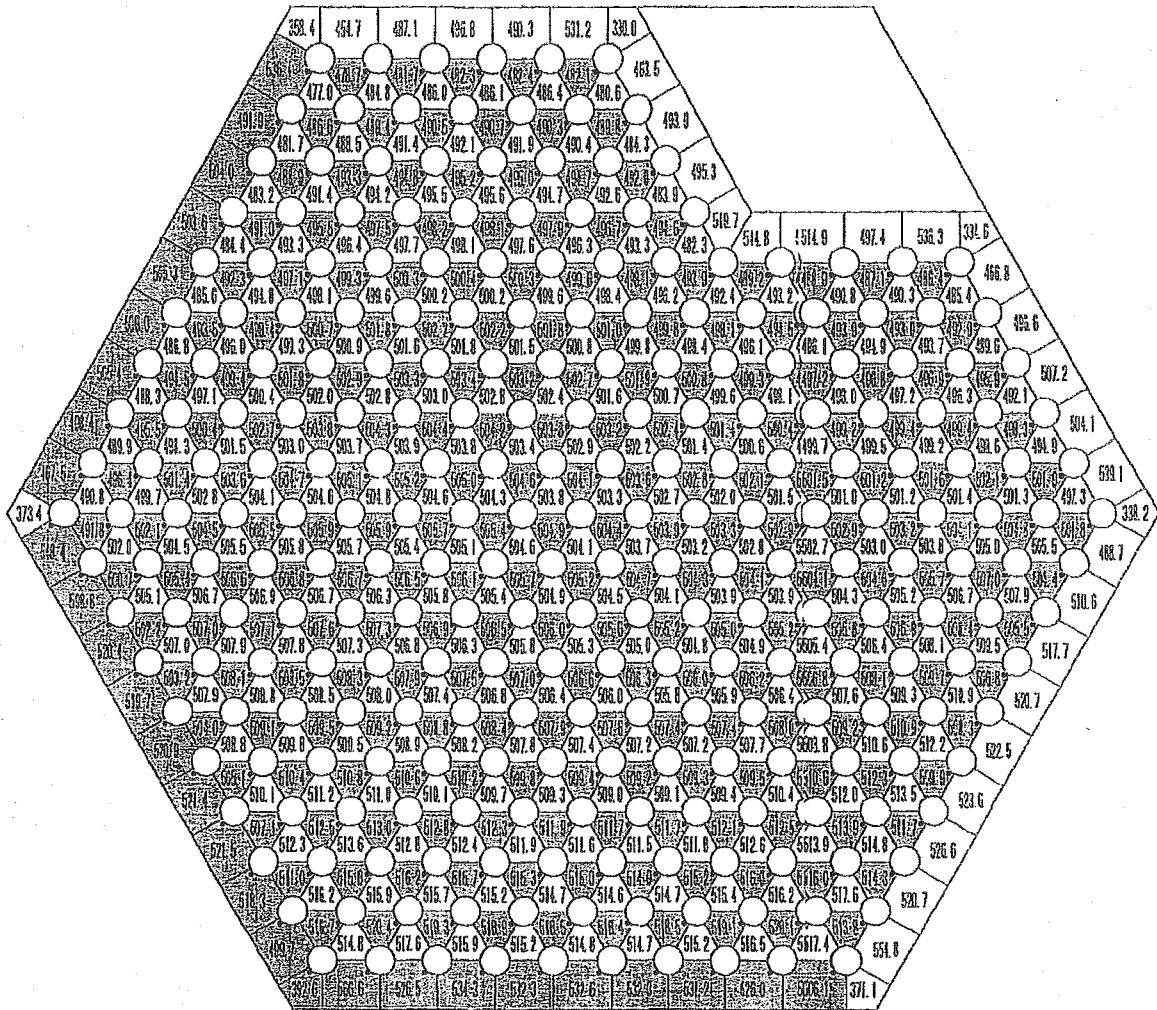
【コーナー間】

図 2.1-3 炉心上端における冷却材温度分布



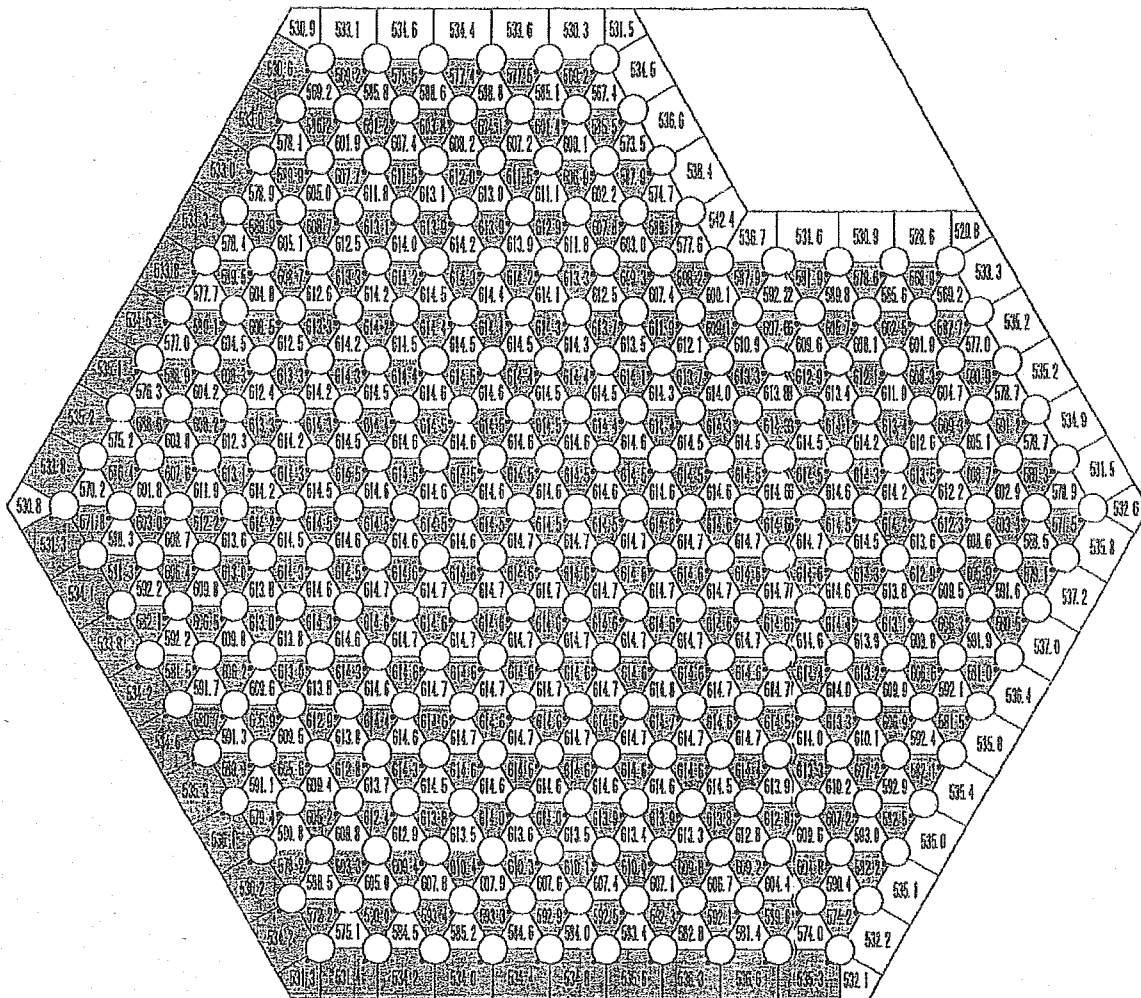
(単位：g/s)

図 2.1-4 炉心上端における冷却材流量分布



(単位：cm/s)

図 2.1-5 炉心上端における冷却材流速分布



(単位 : °C)

図 2.1-6 炉心上端における冷却材温度分布

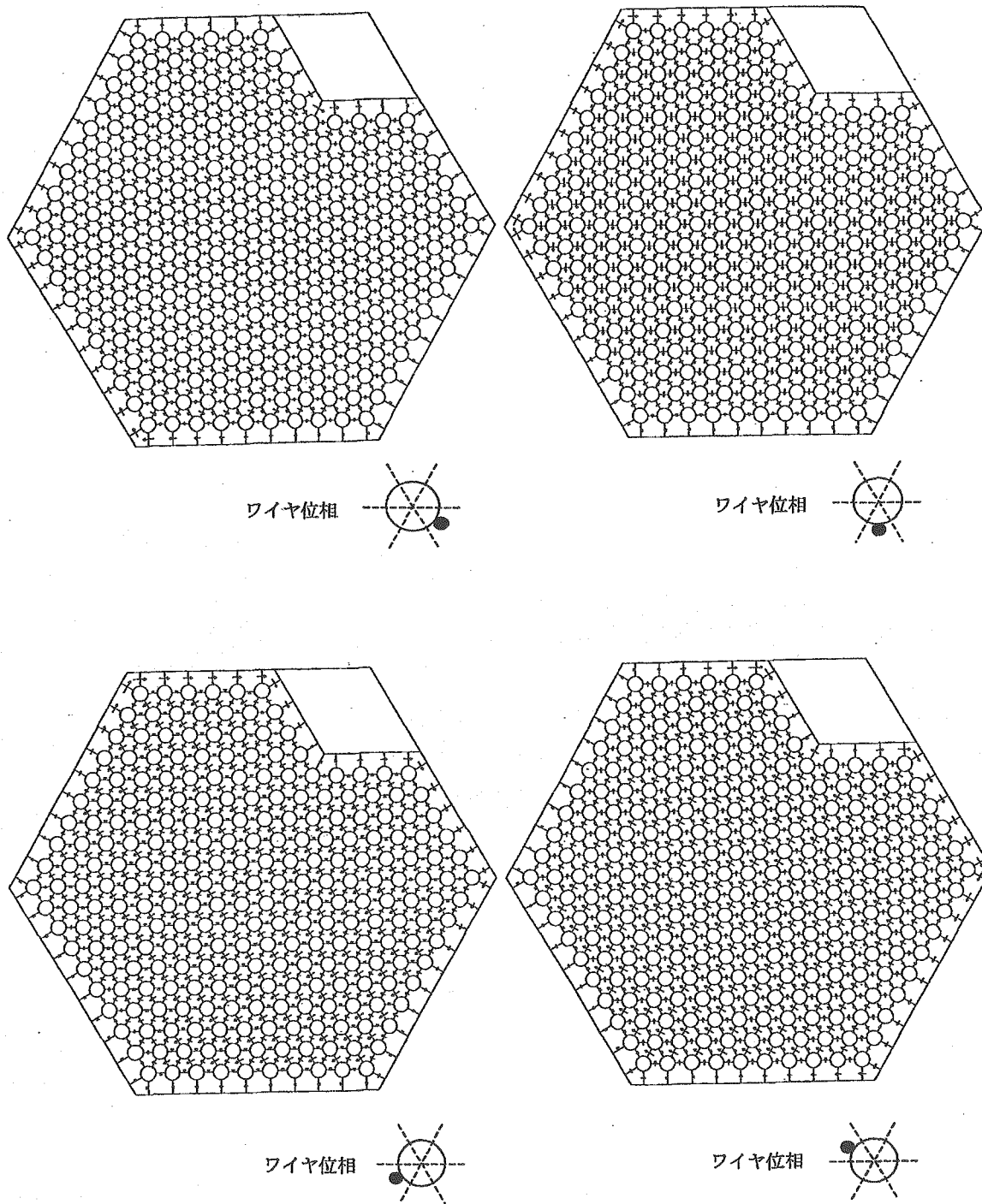
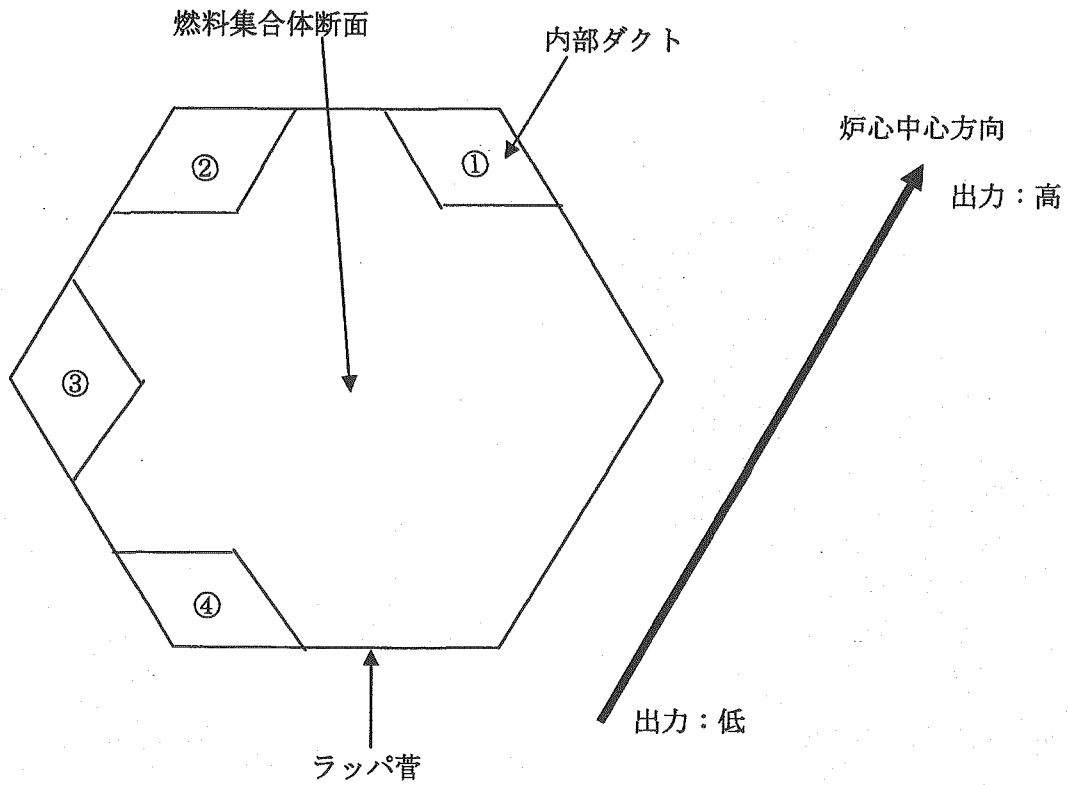


図 2.1-7 ワイヤ位相に伴うクロスフローの変化 (改良内部ダクト型体系)



①～④の位置に各々内部ダクトがある場合の集合体内温度評価を実施し、ラッパー管及び内部ダクトの温度を評価する。

図 2.1-8 出力勾配と内部ダクトの相対位置関係

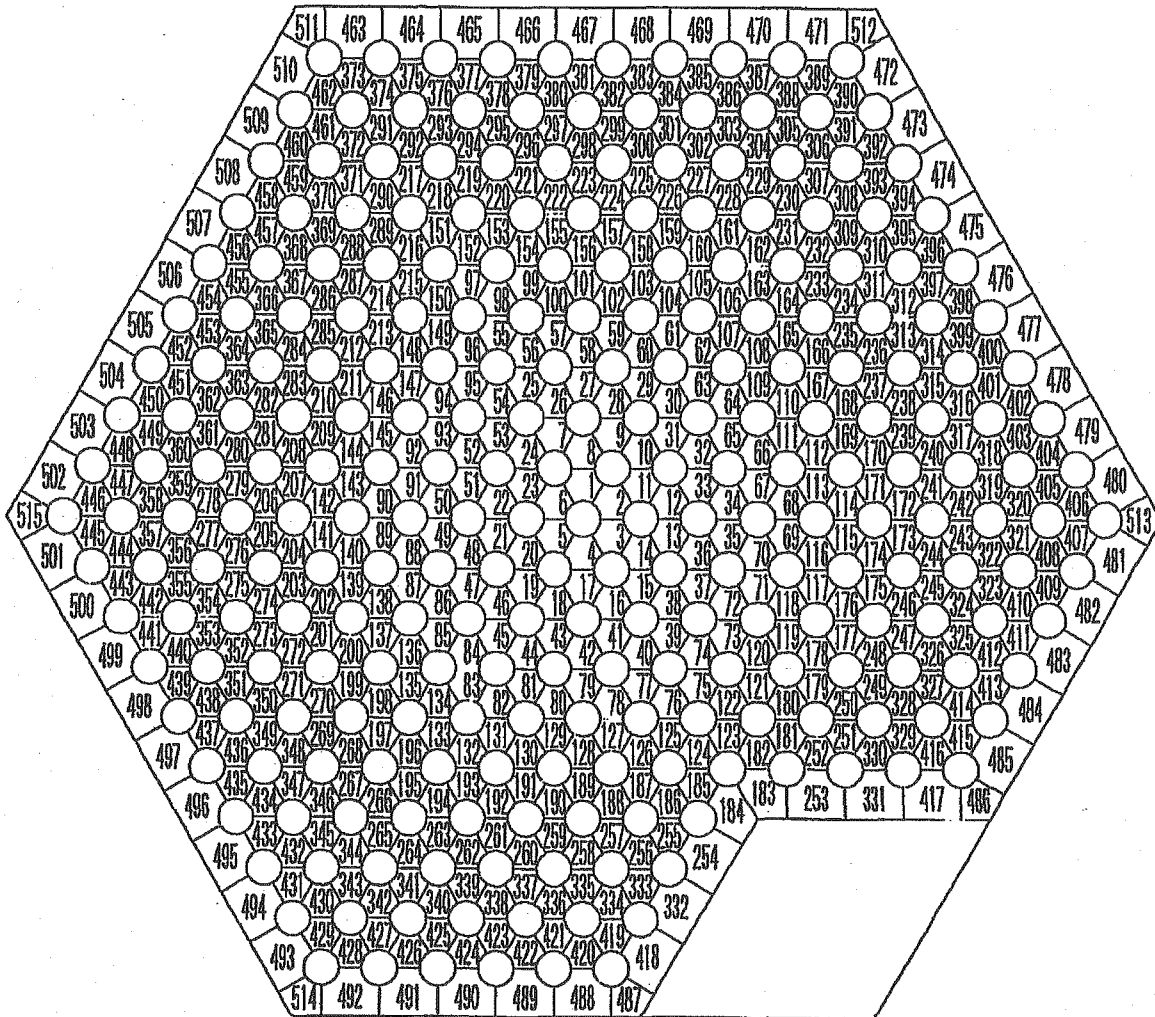


図 2.1-9(1/4) ピン番号、及び、サブチャンネル番号図 (CASE-1)

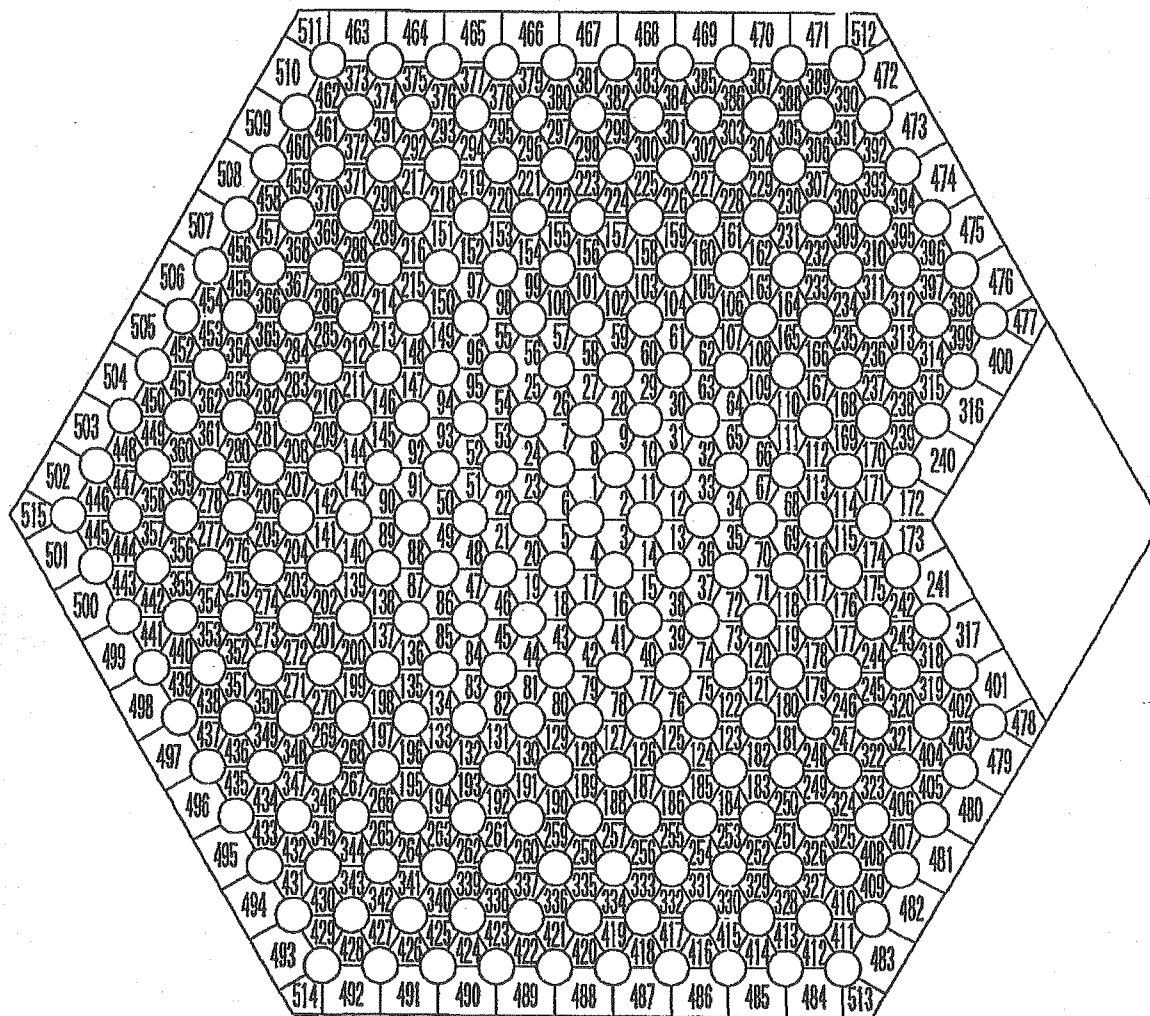


図 2.1-9(2/4) ピン番号、及び、サブチャンネル番号図 (CASE-2)

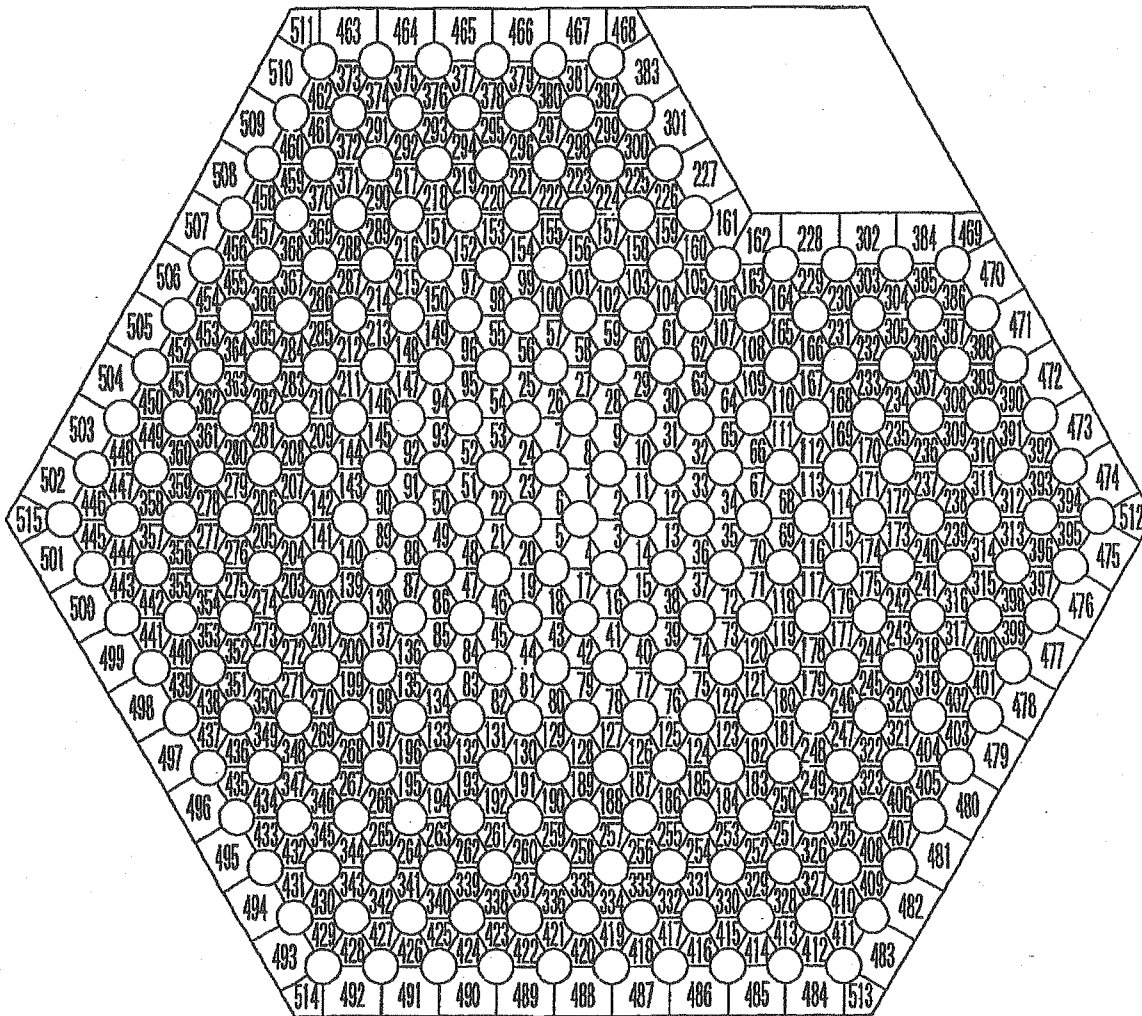


図 2.1-9(3/4) ピン番号、及び、サブチャンネル番号図 (CASE-3)

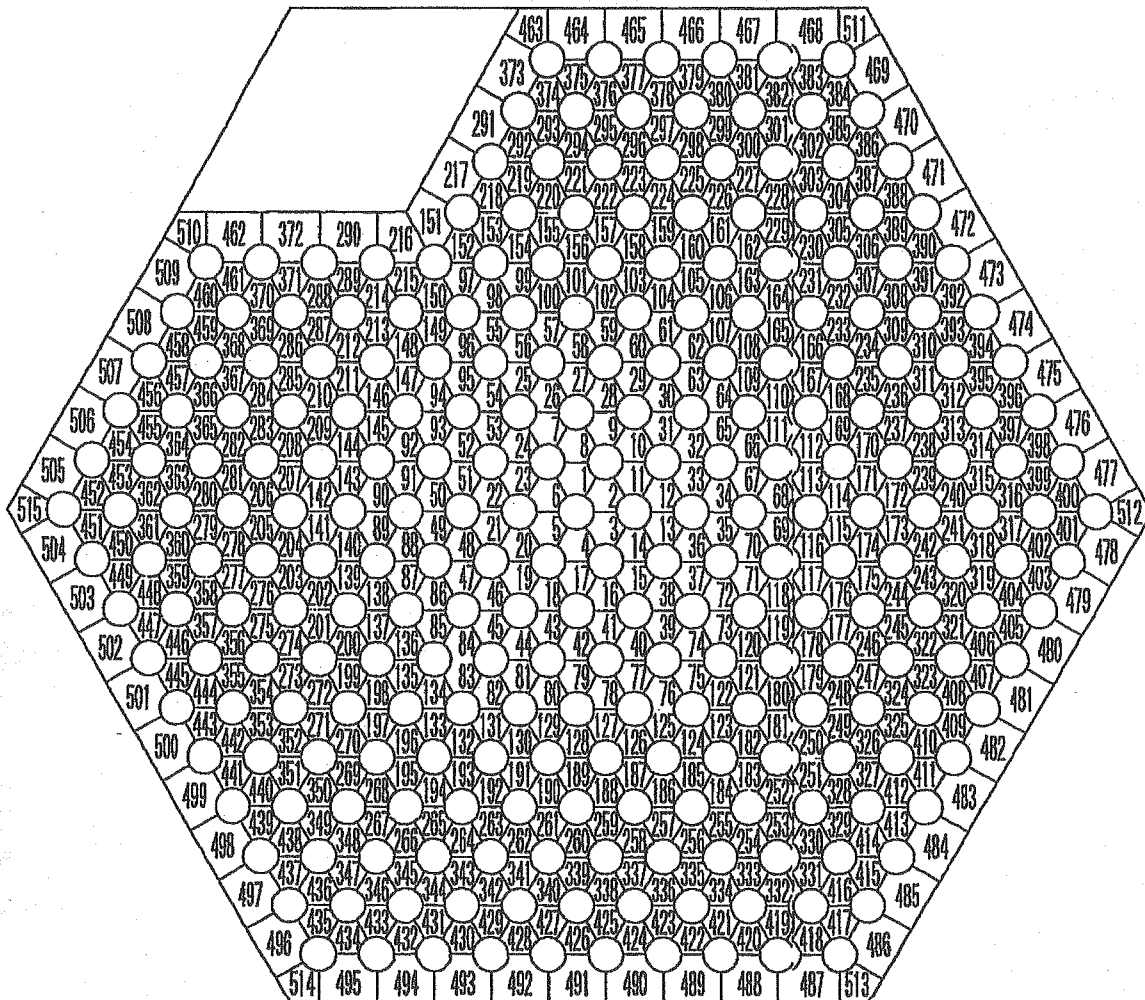


図 2.1-9(4/4) ピン番号、及び、サブチャンネル番号図 (CASE-4)

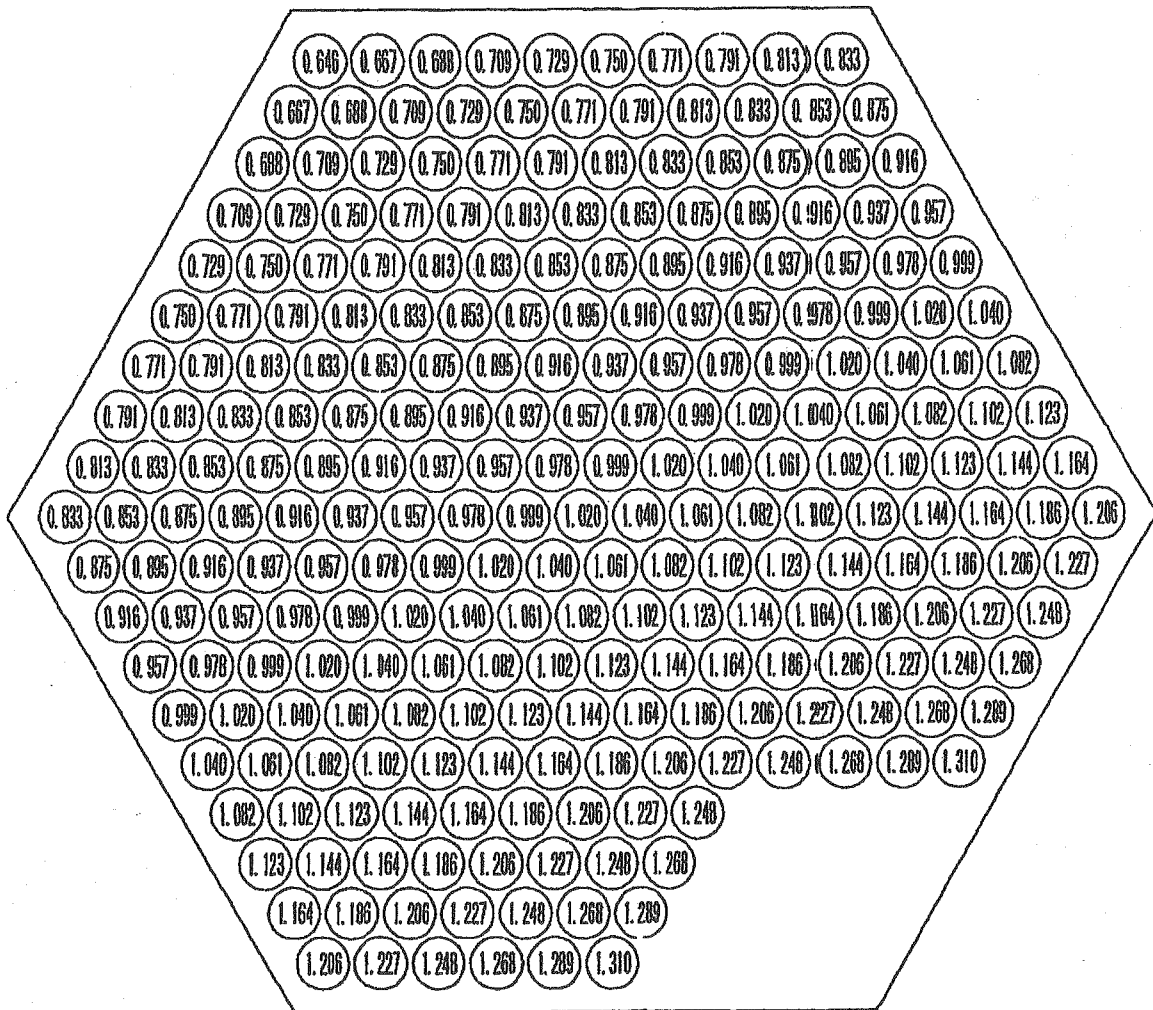


図 2.1-10(1/4) 径方向出力分布の相対値 (CASE-1)

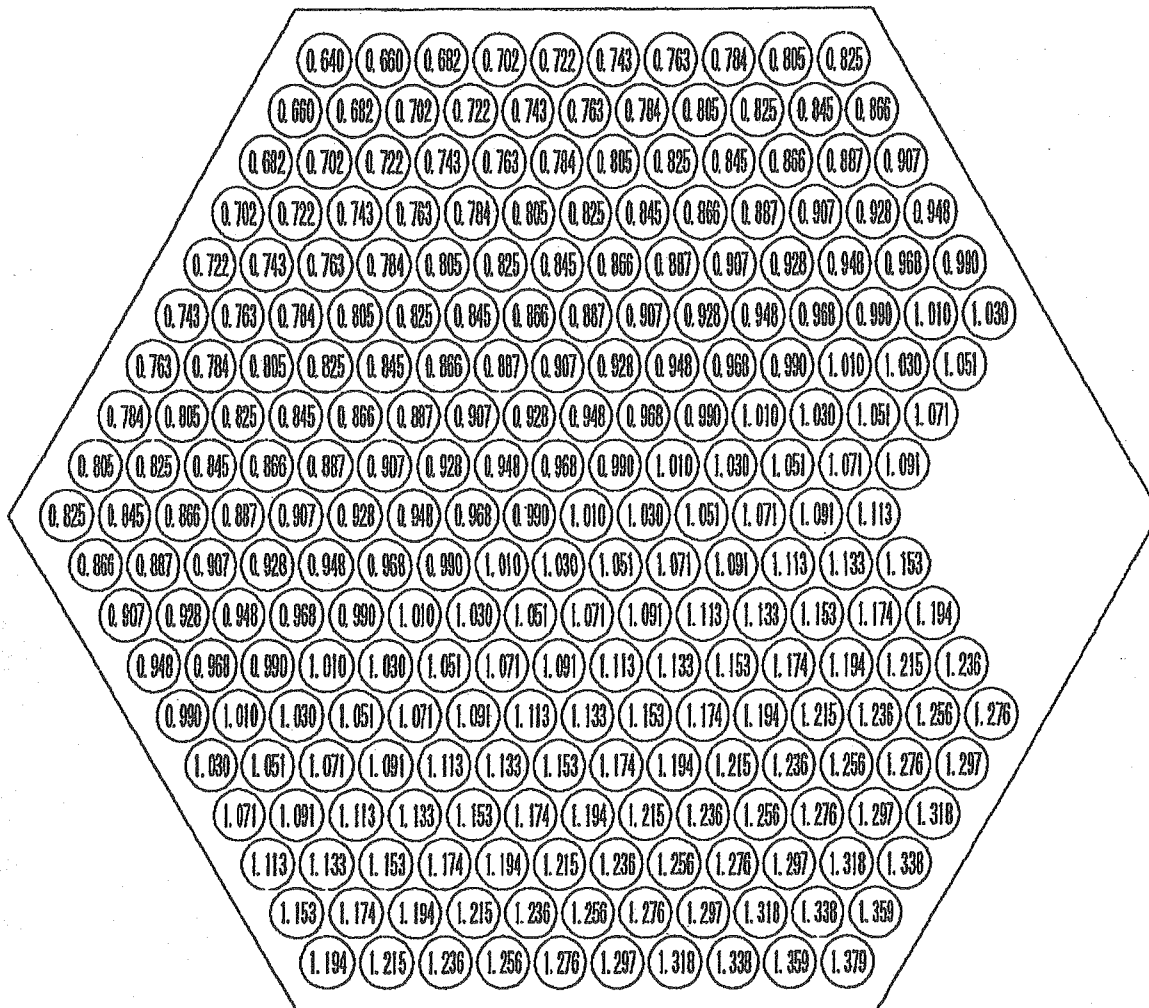


図 2.1-10(2/4) 径方向出力分布の相対値 (CASE-2)

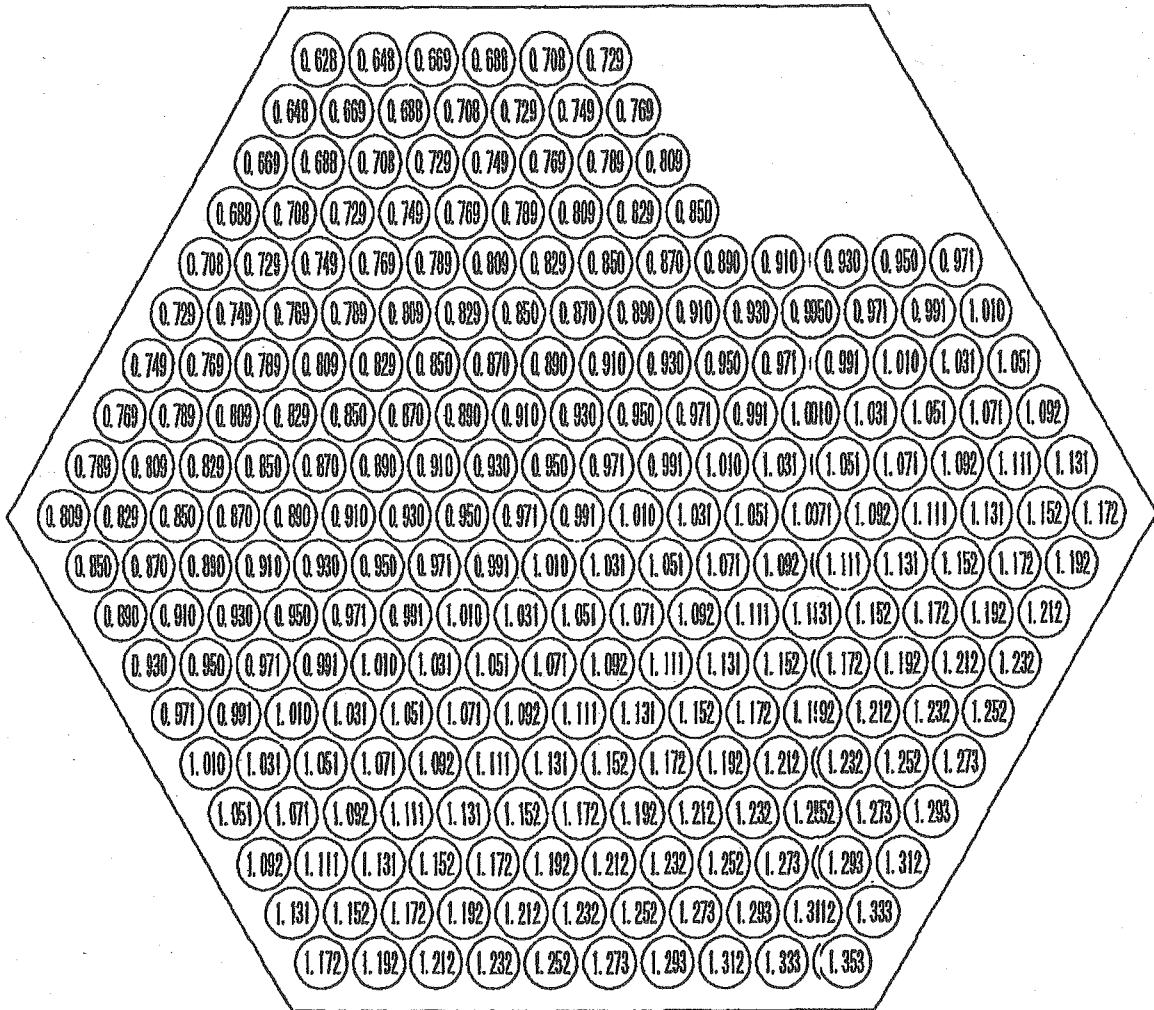


図 2.1-10(3/4) 径方向出力分布の相対値 (CASE-3)

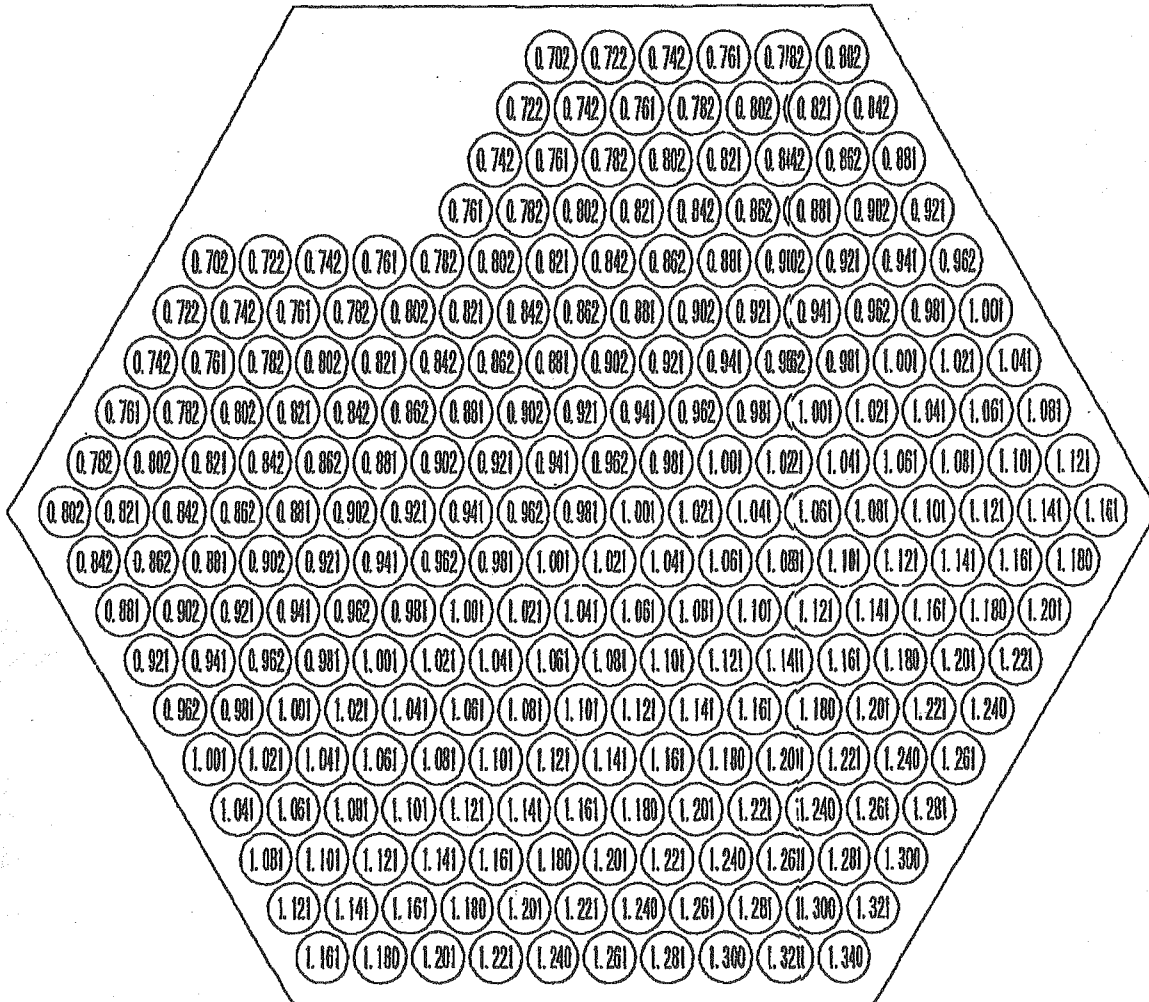
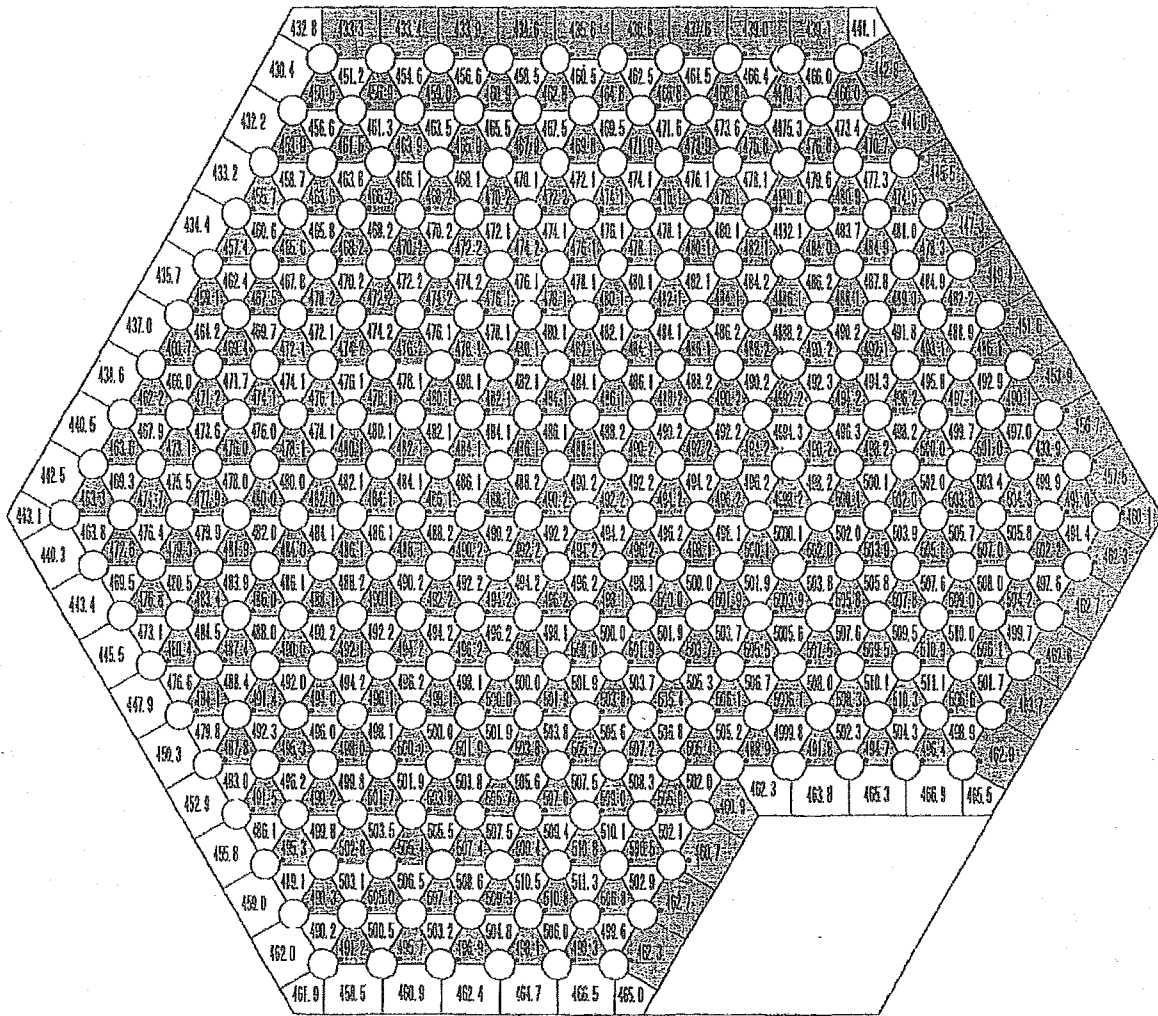
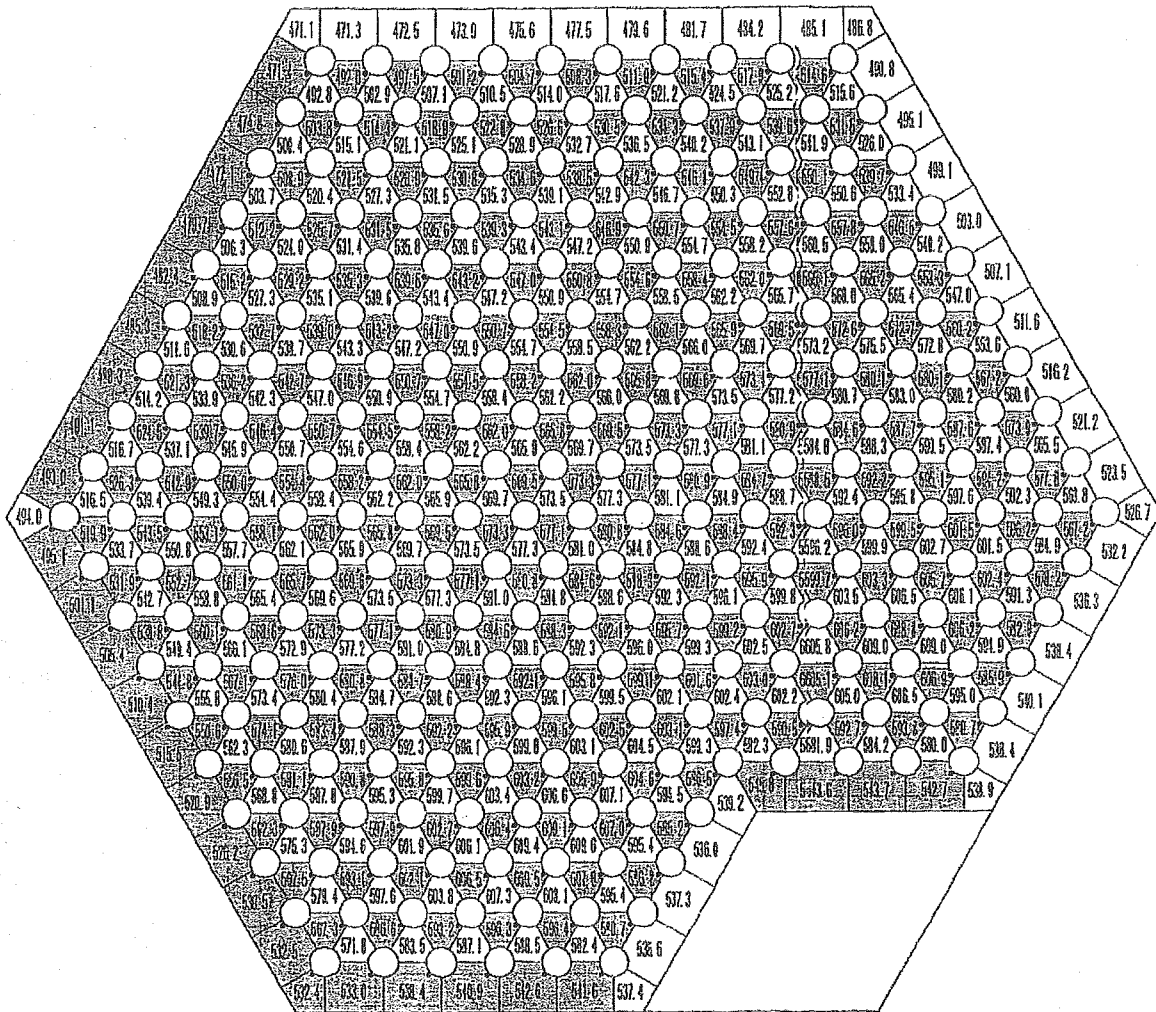


図 2.1-10(4/4) 径方向出力分布の相対値 (CASE-4)



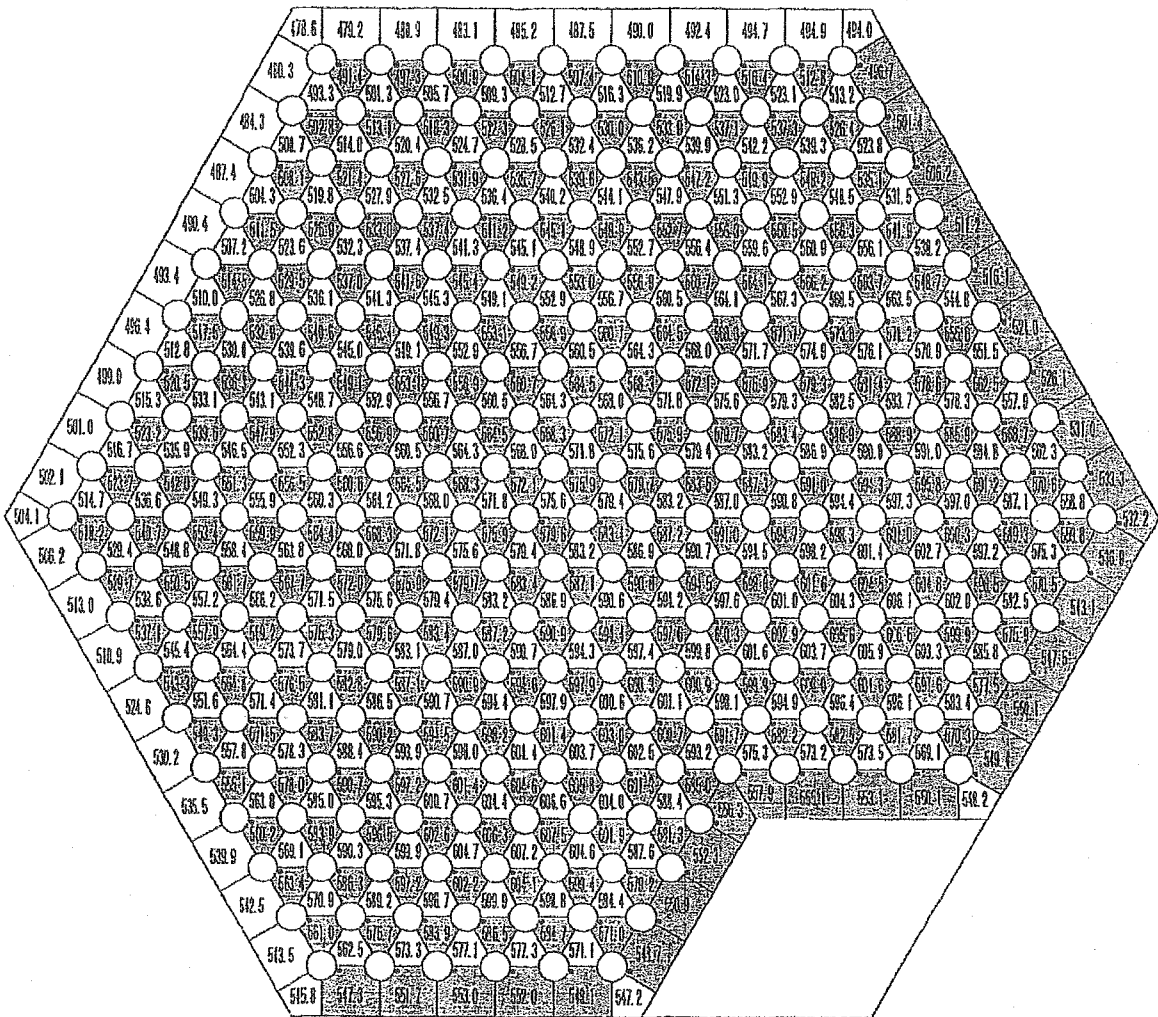
(单位：℃)

图 2.1-11(1/3) 冷却材温度分布[炉心中心] (CASE-1)



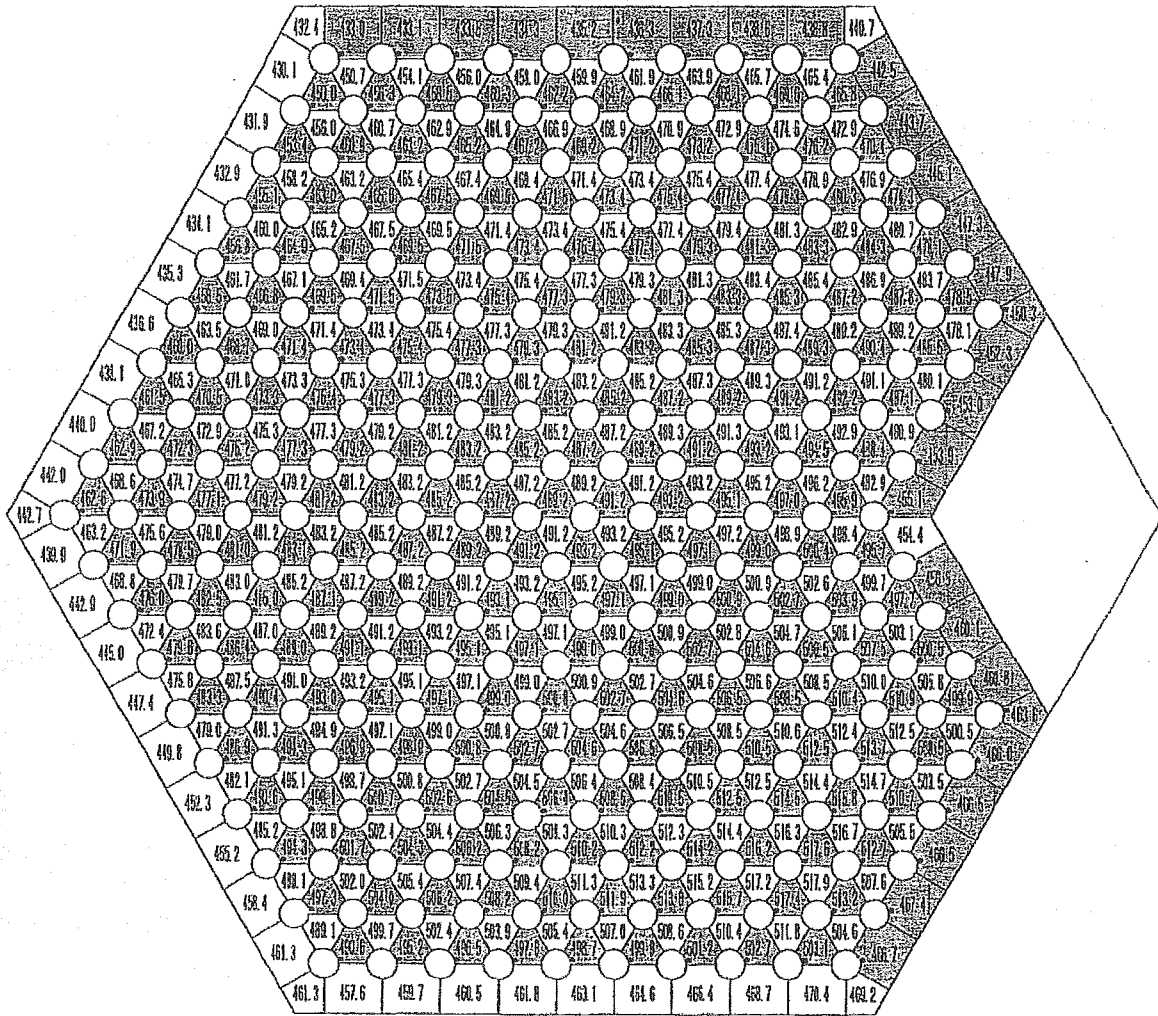
(单位：℃)

图 2.1-11(2/3) 冷却材温度分布[炉心上端] (CASE-1)



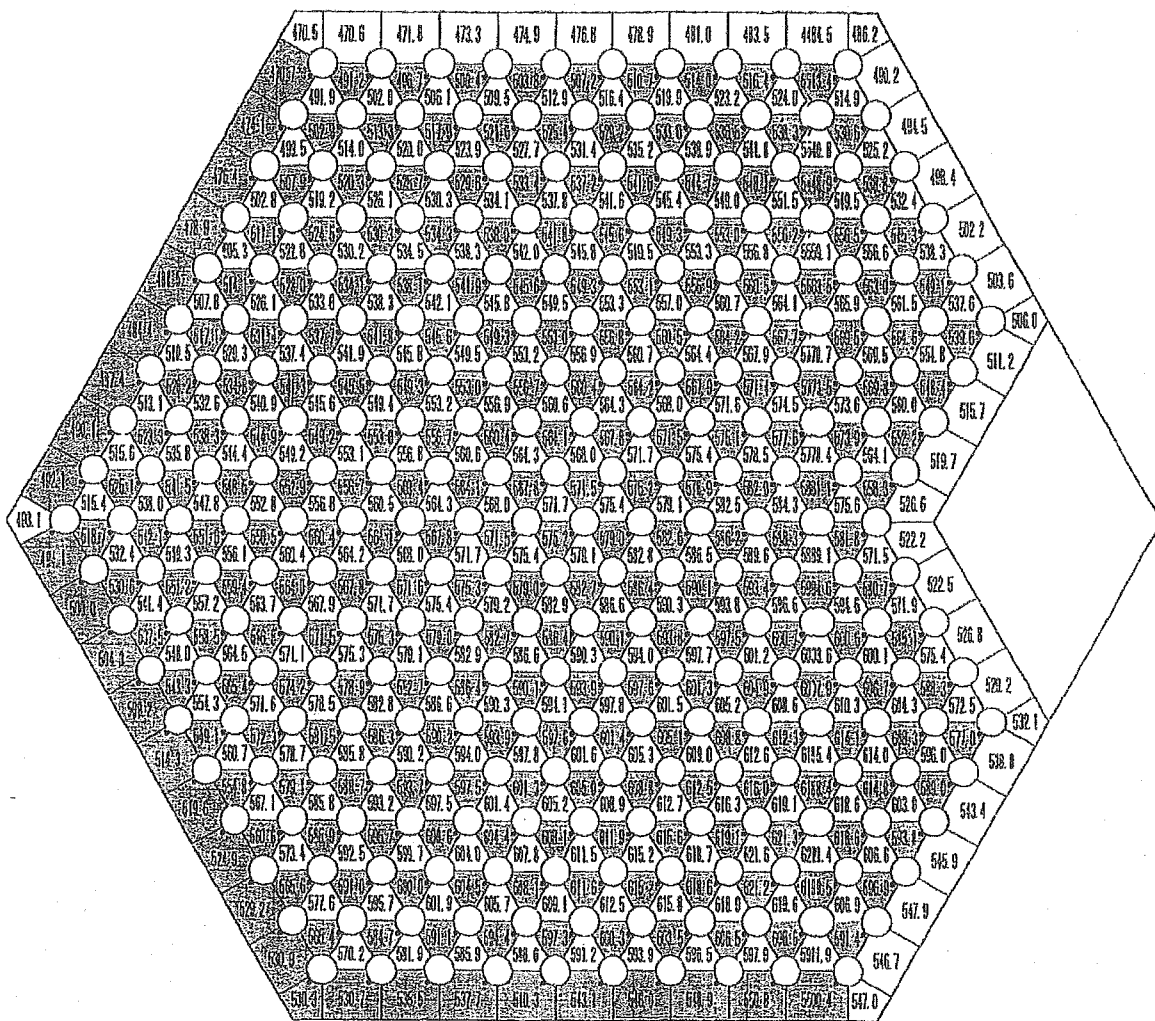
(単位：℃)

図 2.1-11(3/3) 冷却材温度分布[バンドル上端] (CASE-1)



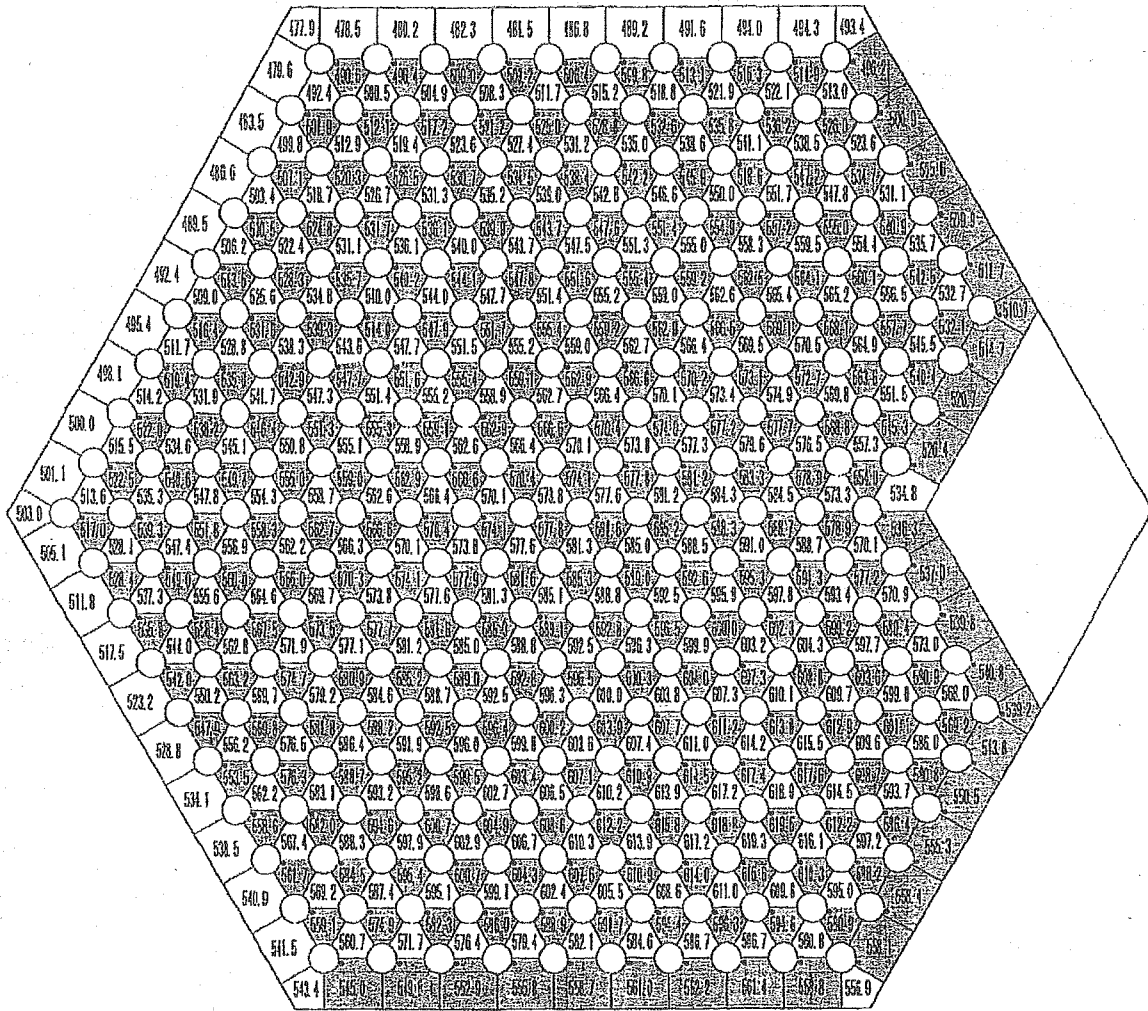
(単位：℃)

図 2.1-12(1/3) 冷却材温度分布[炉心中心] (CASE-2)



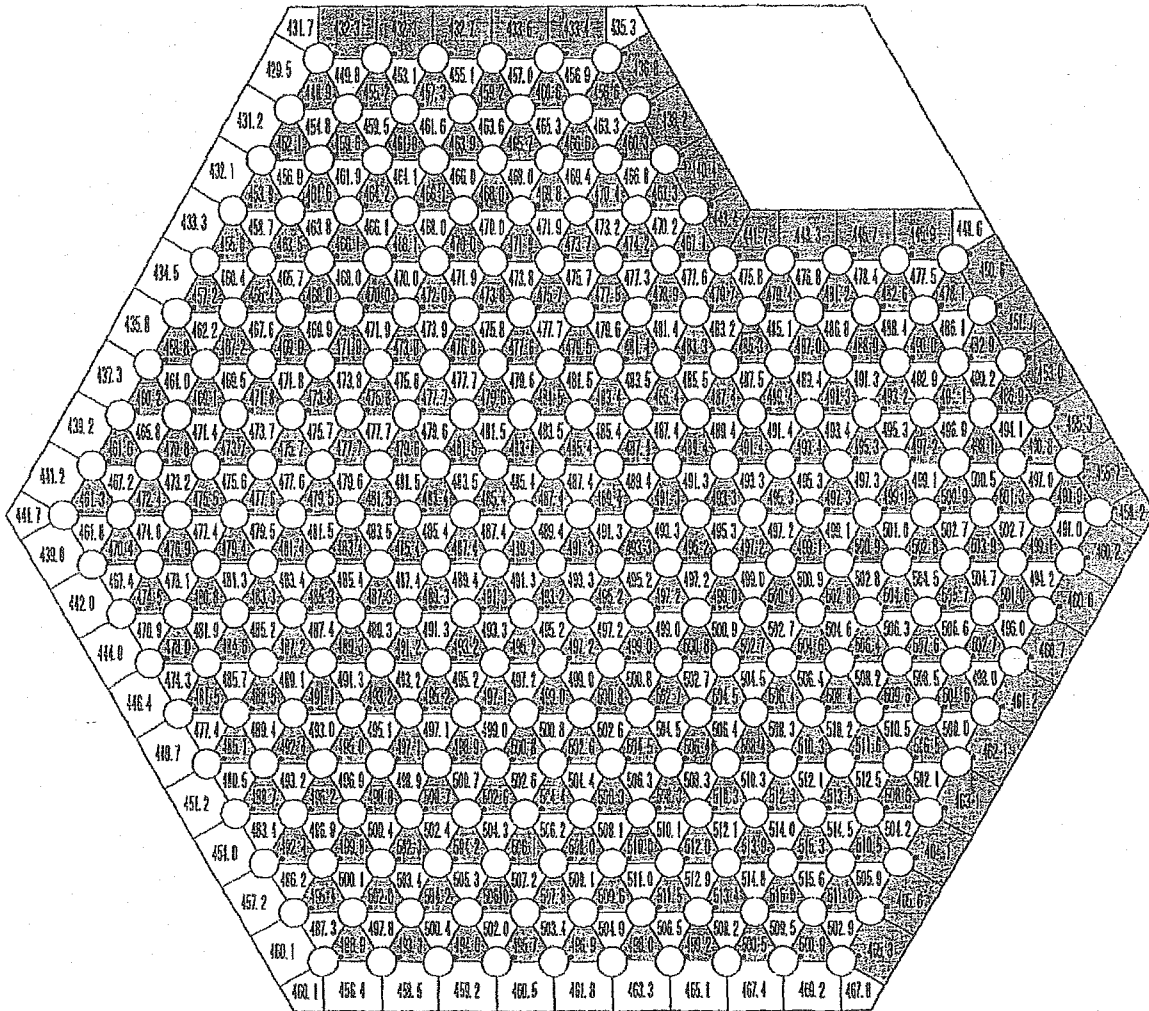
(単位：℃)

図 2.1-12(2/3) 冷却材温度分布[炉心上端] (CASE-2)



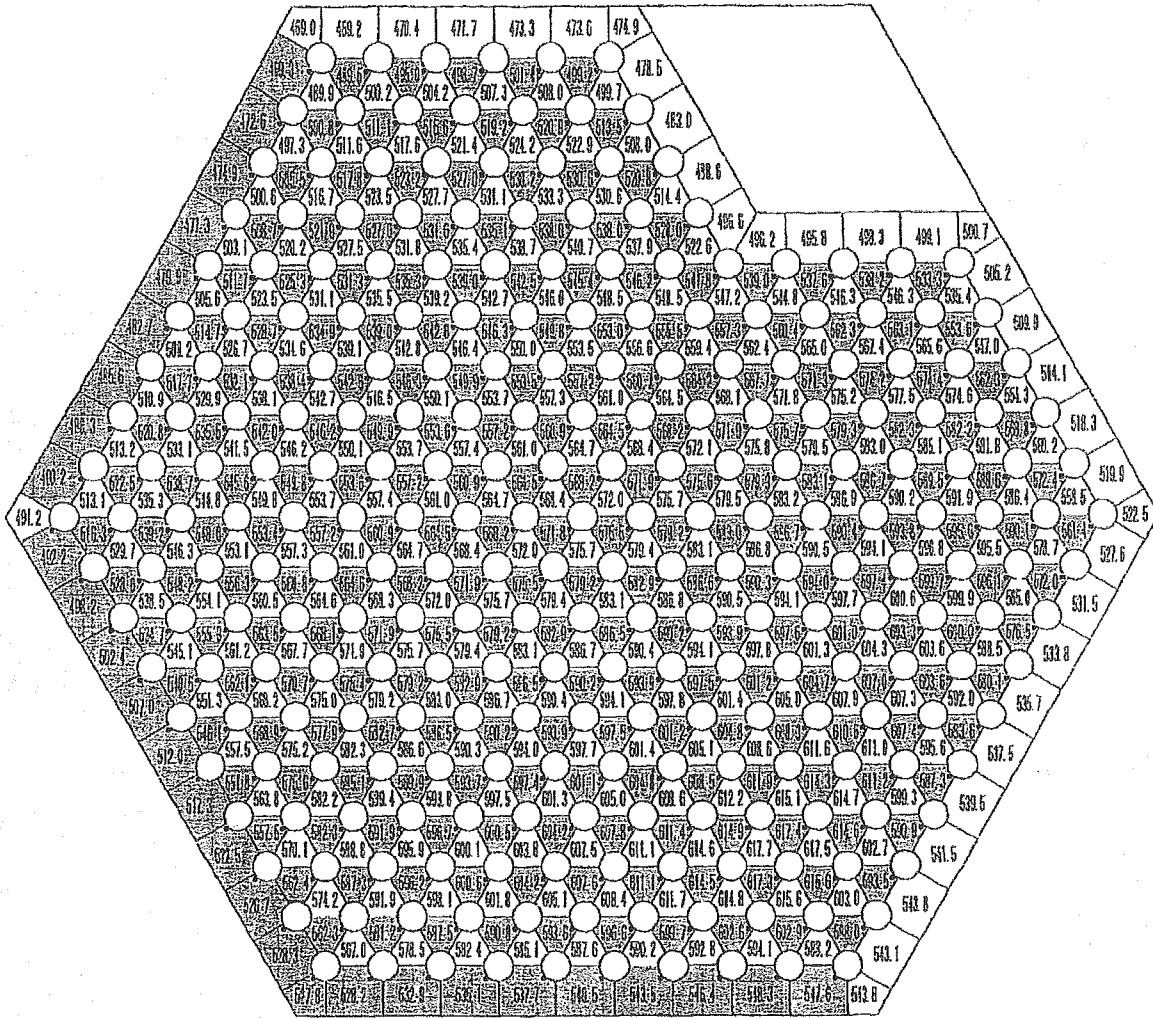
(単位：℃)

図 2.1-12(3/3) 冷却材温度分布[バンドル上端] (CASE-2)



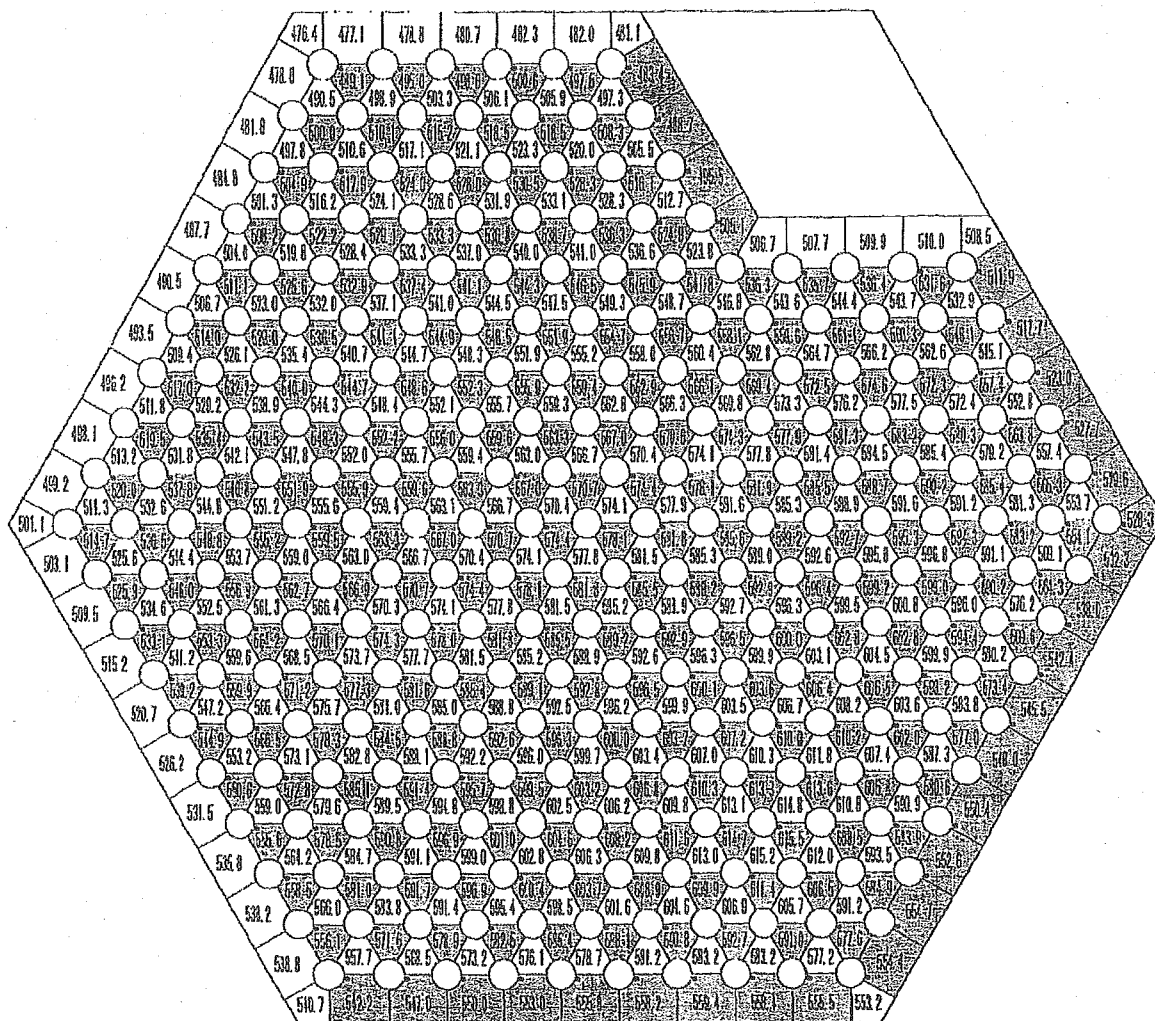
(单位：℃)

图 2.1-13(1/3) 冷却材温度分布[炉心中心] (CASE-3)



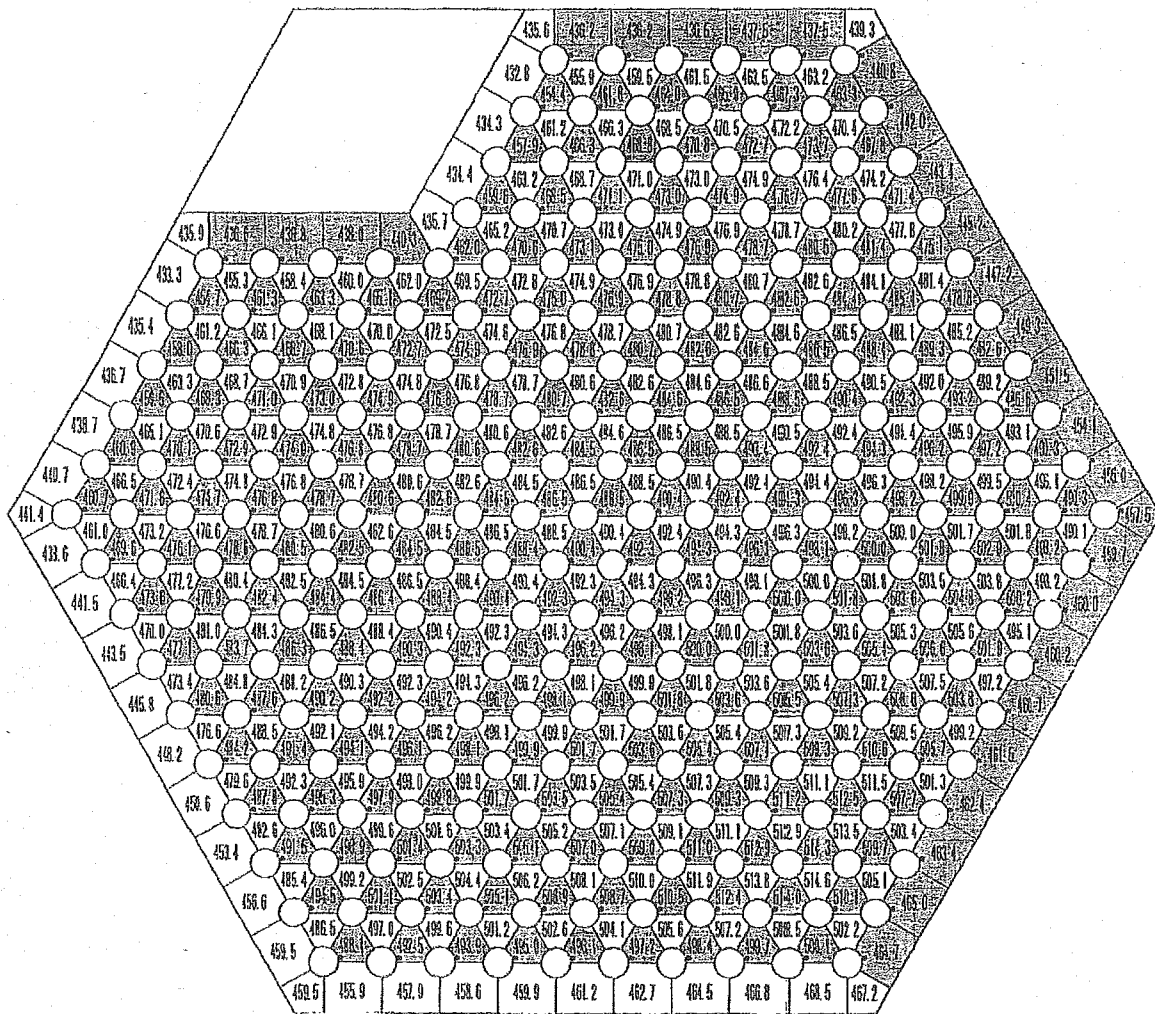
(单位：℃)

图 2.1-13(2/3) 冷却材温度分布[炉心上端] (CASE-3)



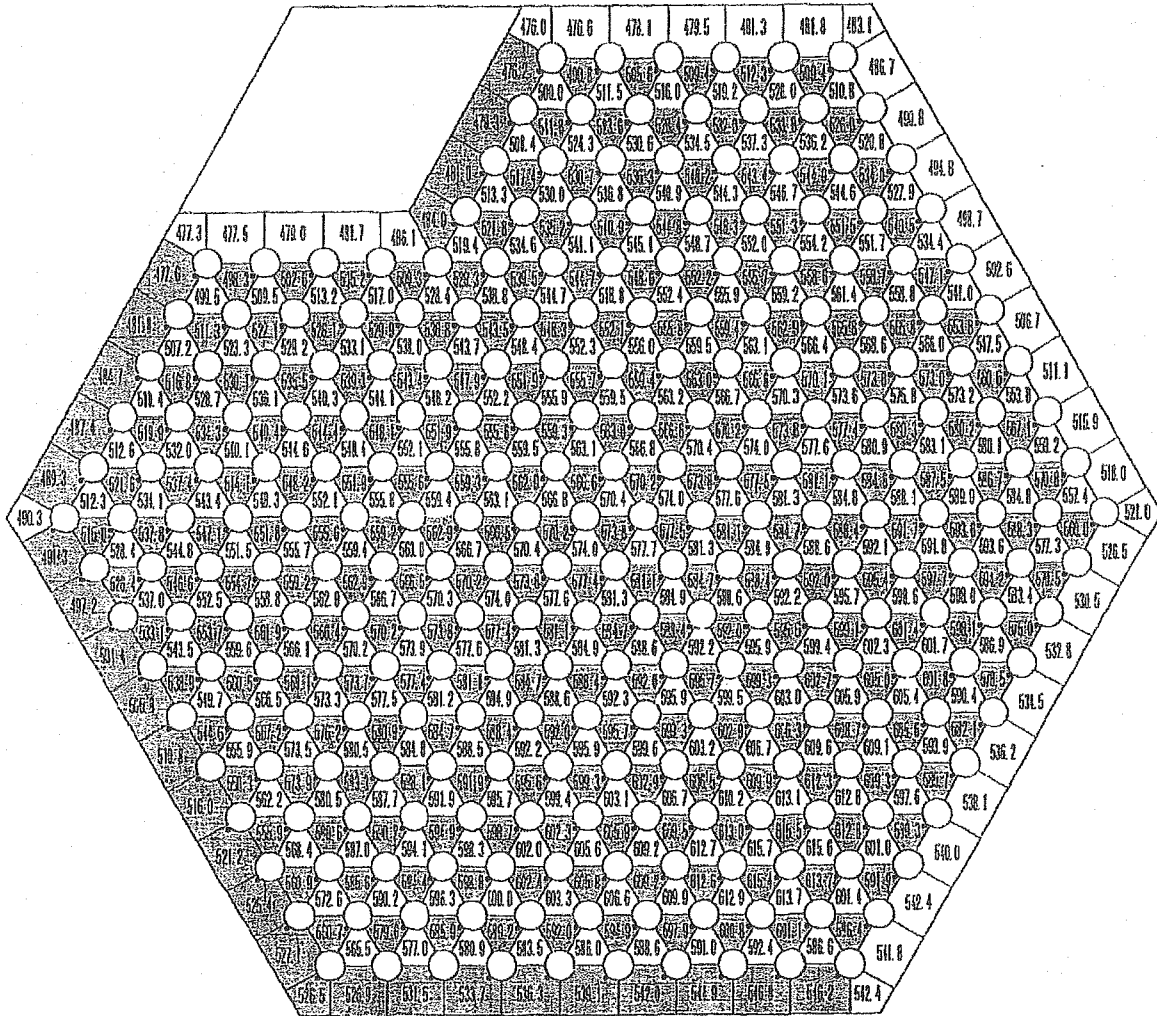
(単位：℃)

図 2.1-13(3/3) 冷却材温度分布[バンドル上端] (CASE-3)



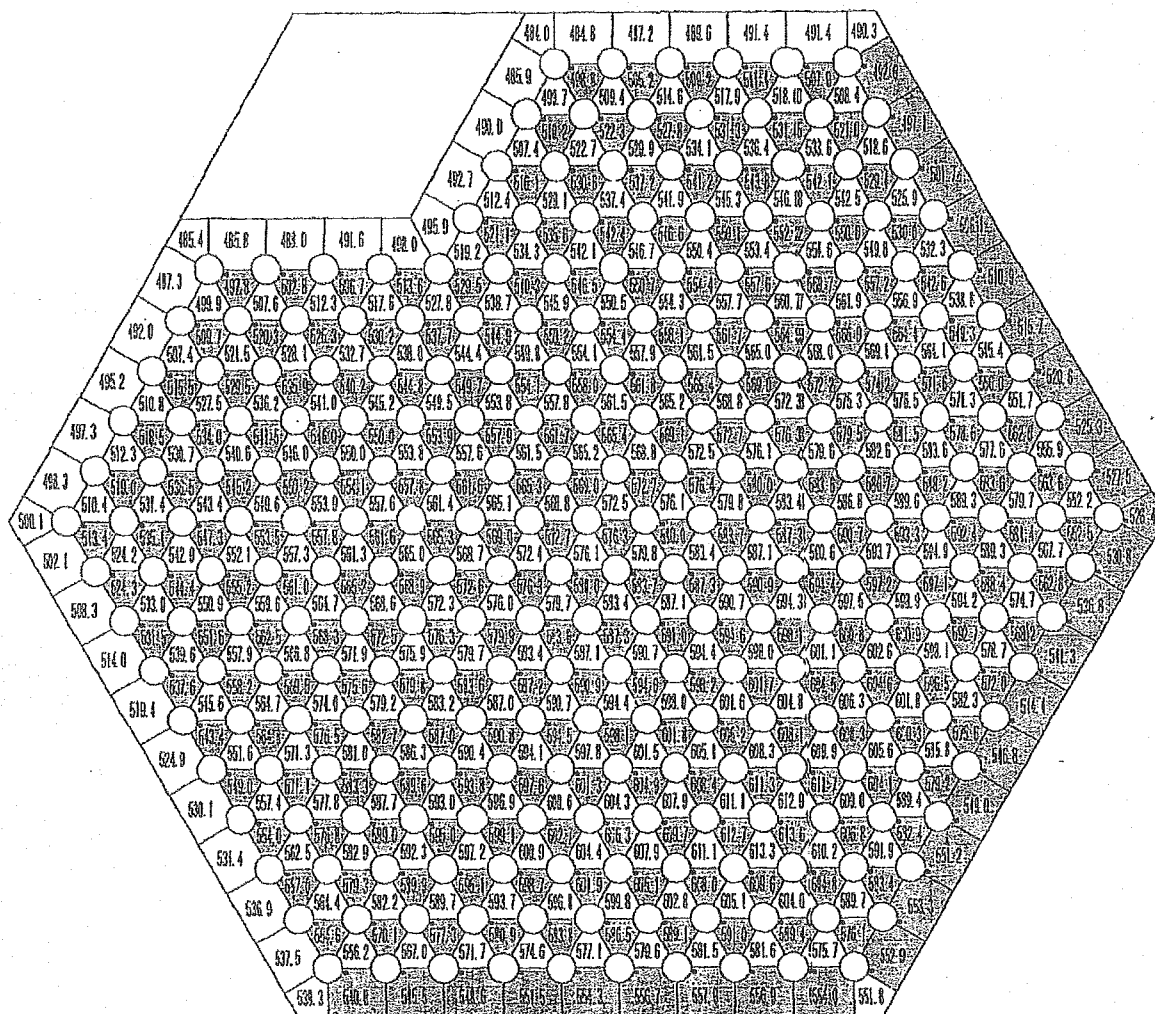
(単位：℃)

図 2.1-14(1/3) 冷却材温度分布[炉心中心] (CASE-4)



(単位：℃)

図 2.1-14(2/3) 冷却材温度分布[炉心上端] (CASE-4)



(単位：℃)

図 2.1-14(3/3) 冷却材温度分布[バンドル上端] (CASE-4)

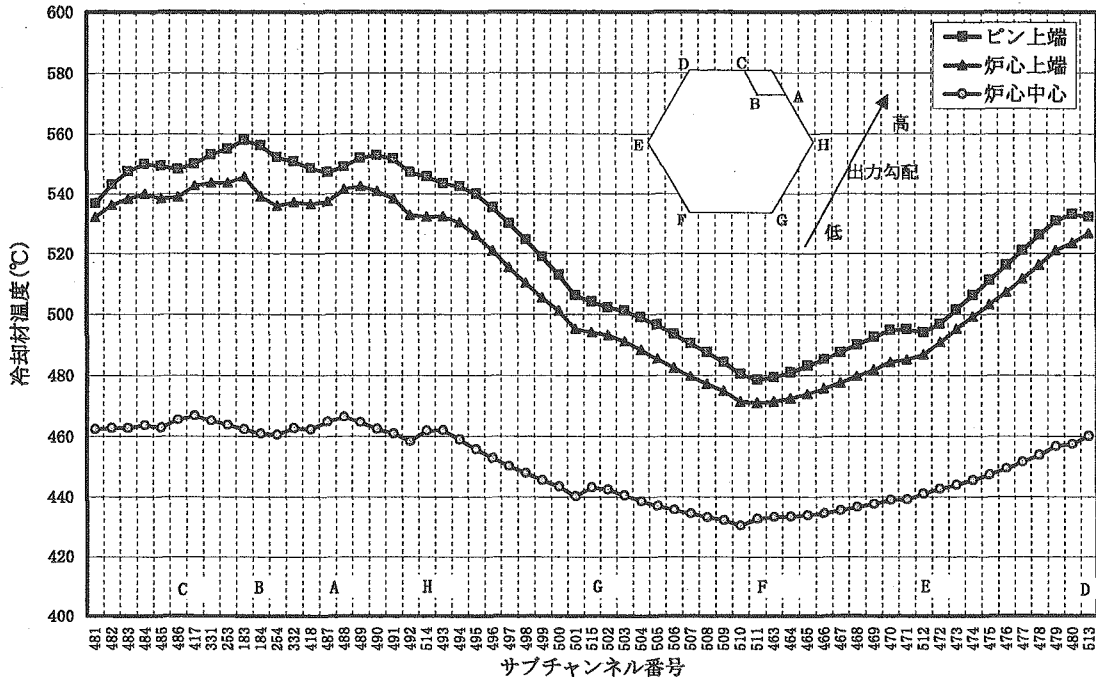


図 2.1-15 ダクト温度分布(周辺サブチャンネル温度分布) (CASE-1)

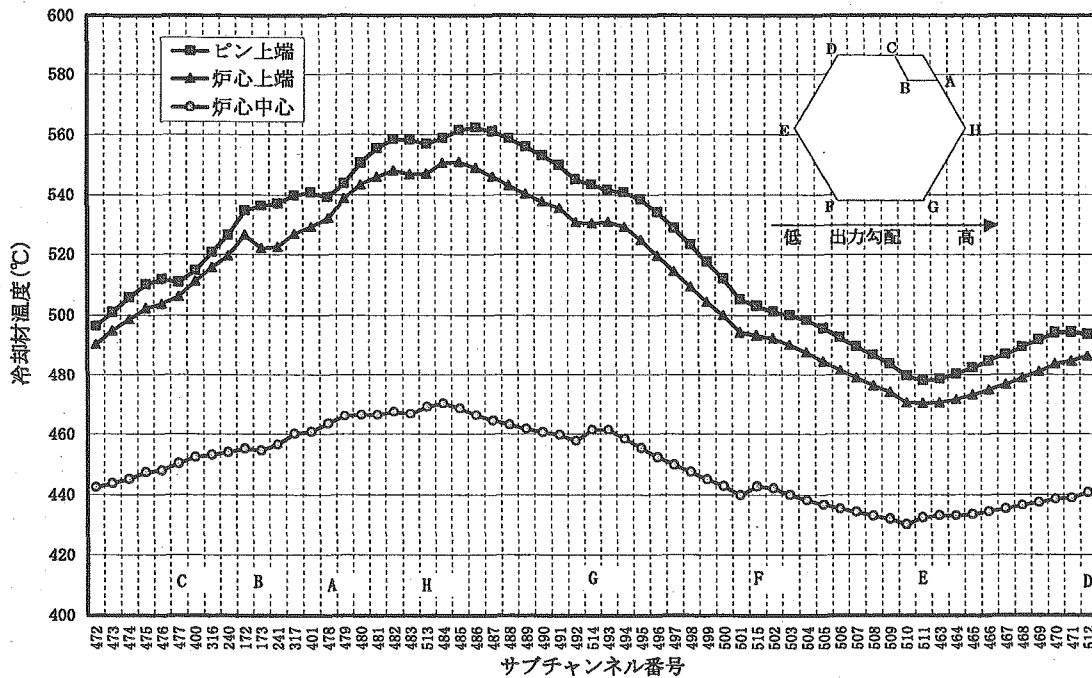


図 2.1-16 ダクト温度分布(周辺サブチャンネル温度分布) (CASE-2)

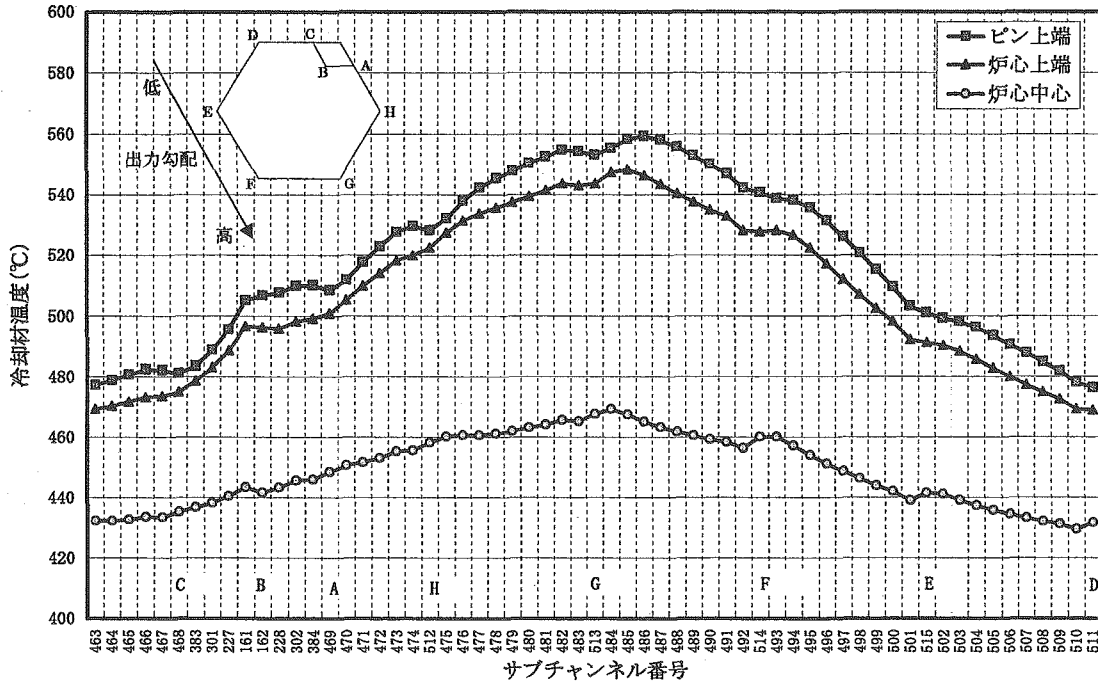


図 2.1-17 ダクト温度分布(周辺サブチャンネル温度分布) (CASE-3)

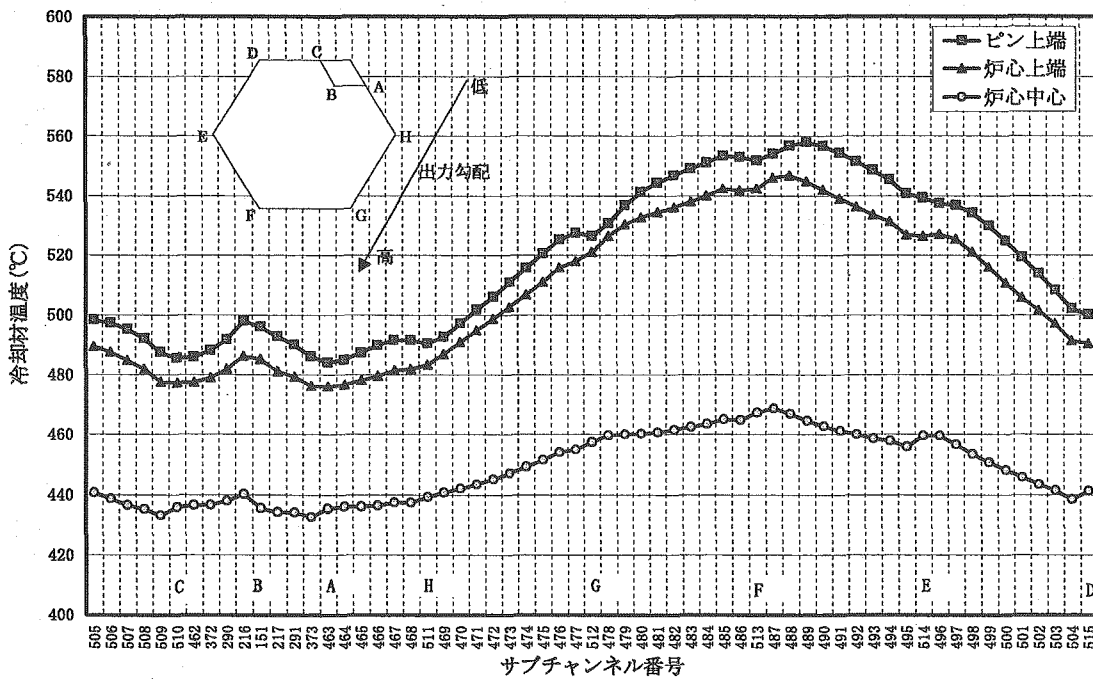


図 2.1-18 ダクト温度分布(周辺サブチャンネル温度分布) (CASE-4)

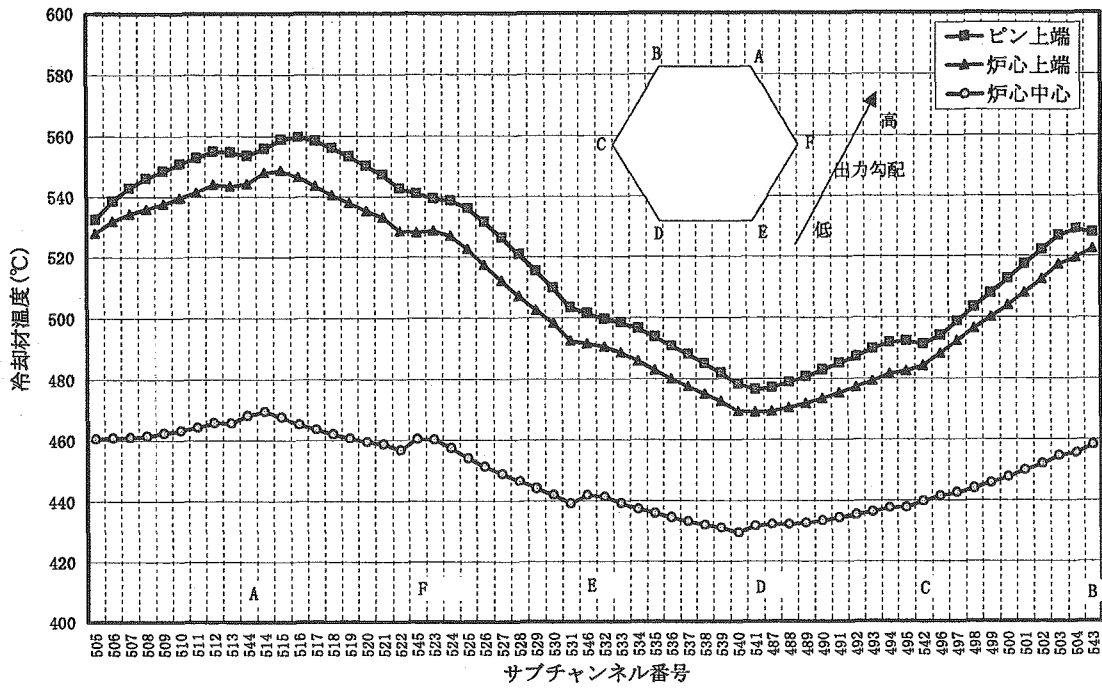


図 2.1-19 ダクト温度分布(周辺サブチャンネル温度分布)
(CASE-0 : 271 ピン体系)

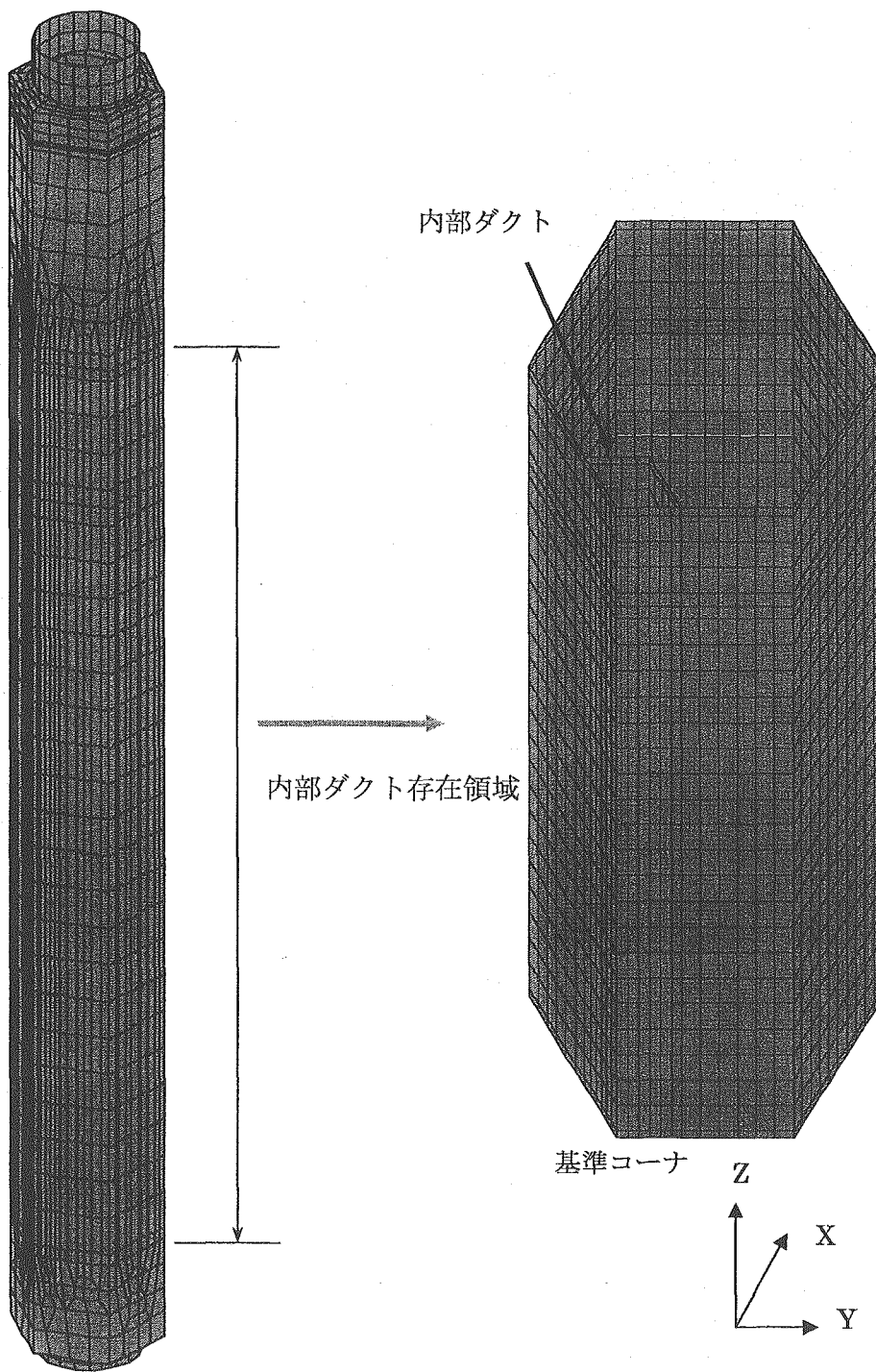


図 2.1-20 燃料集合体の構造解析モデル

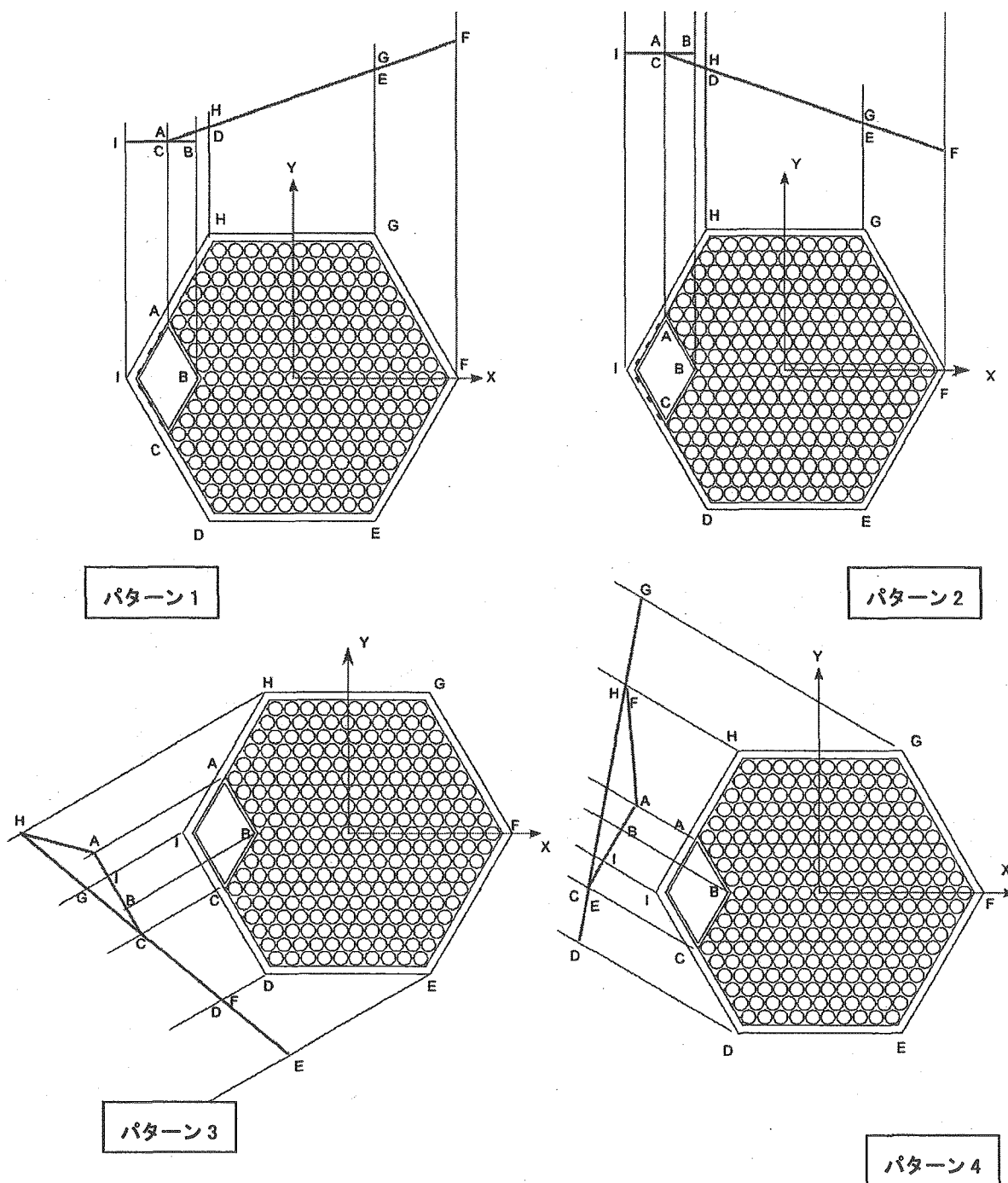


図 2.1-21 燃料集合体水平方向温度分布

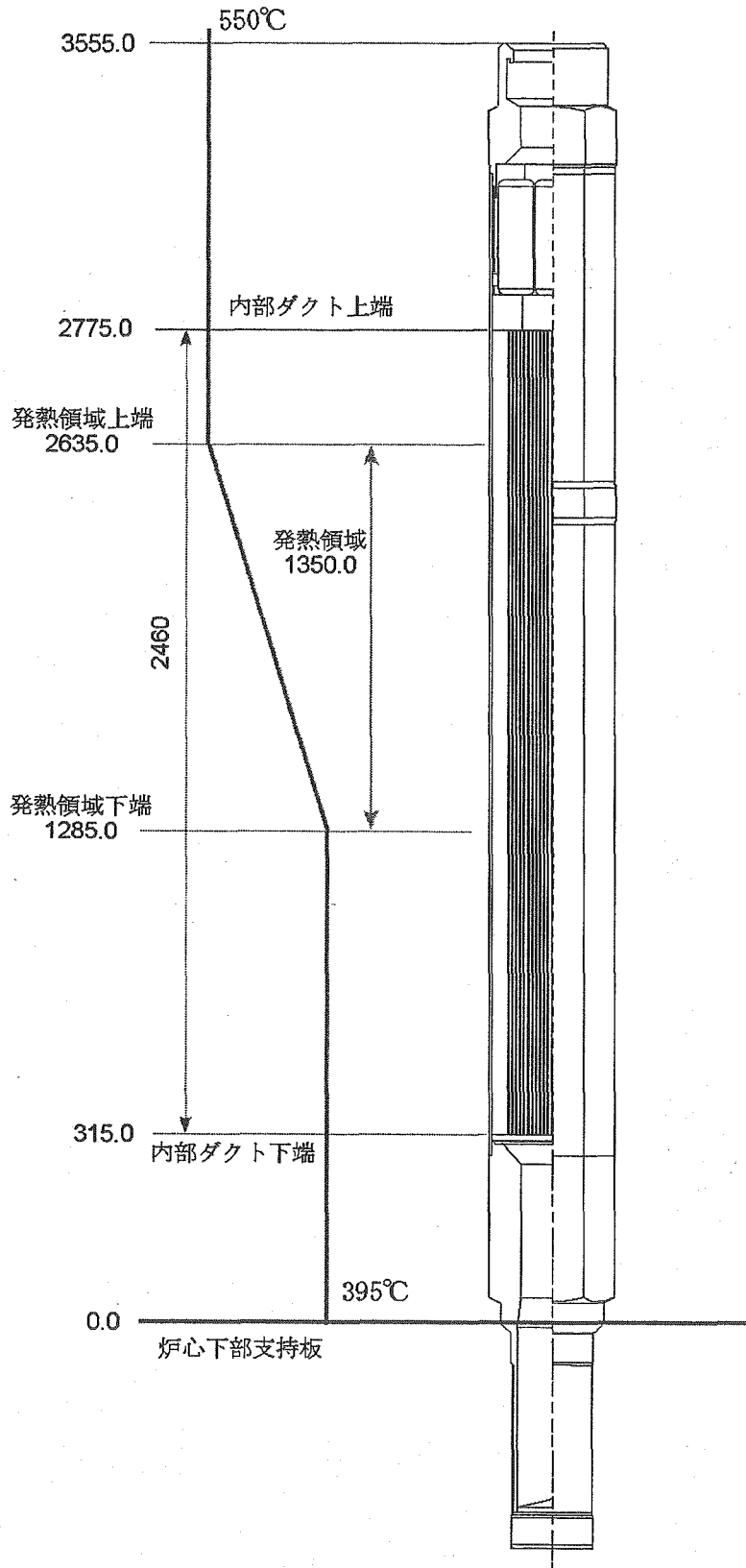
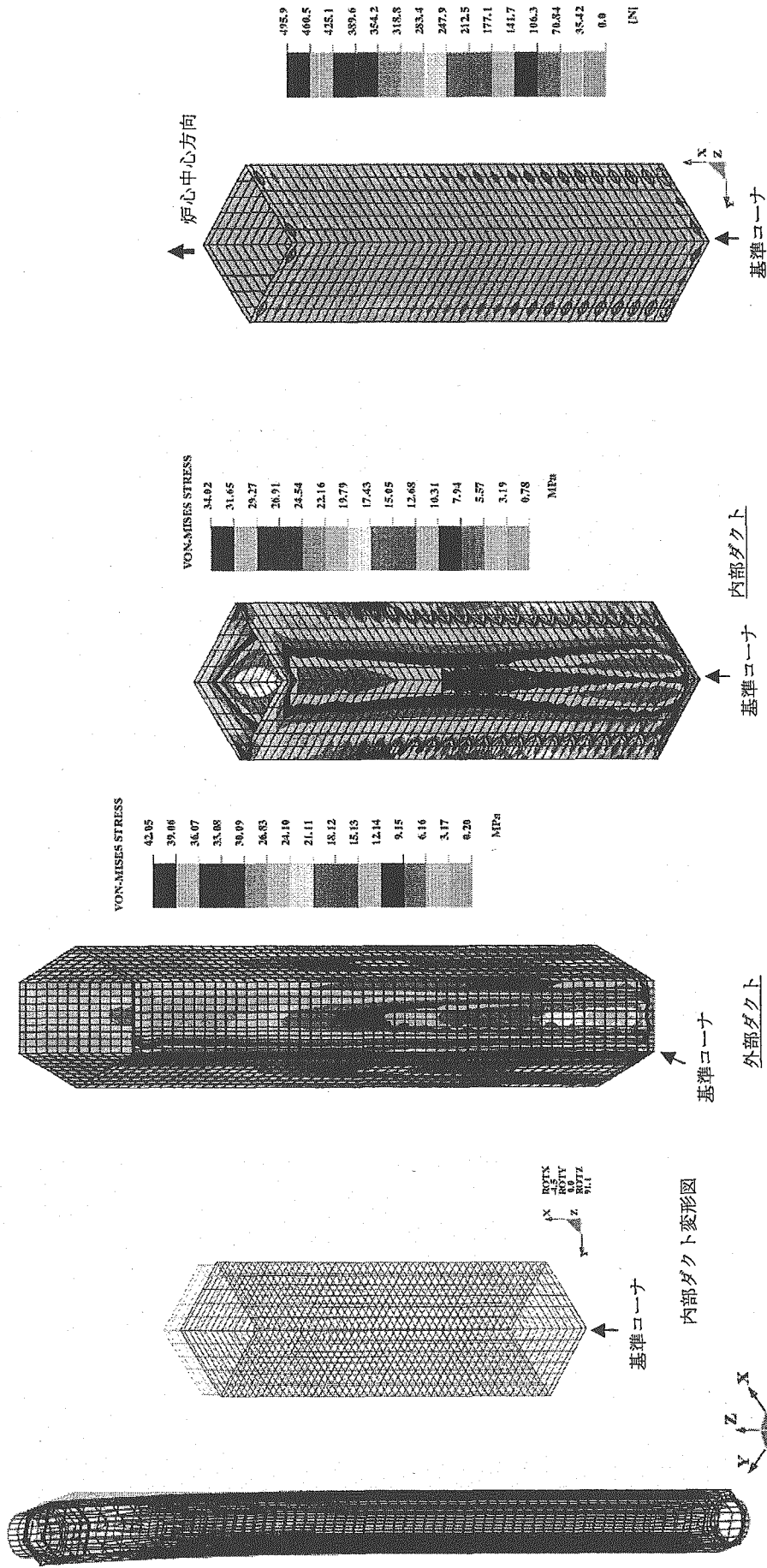


図 2.1-22 燃料集合体軸方向温度分布

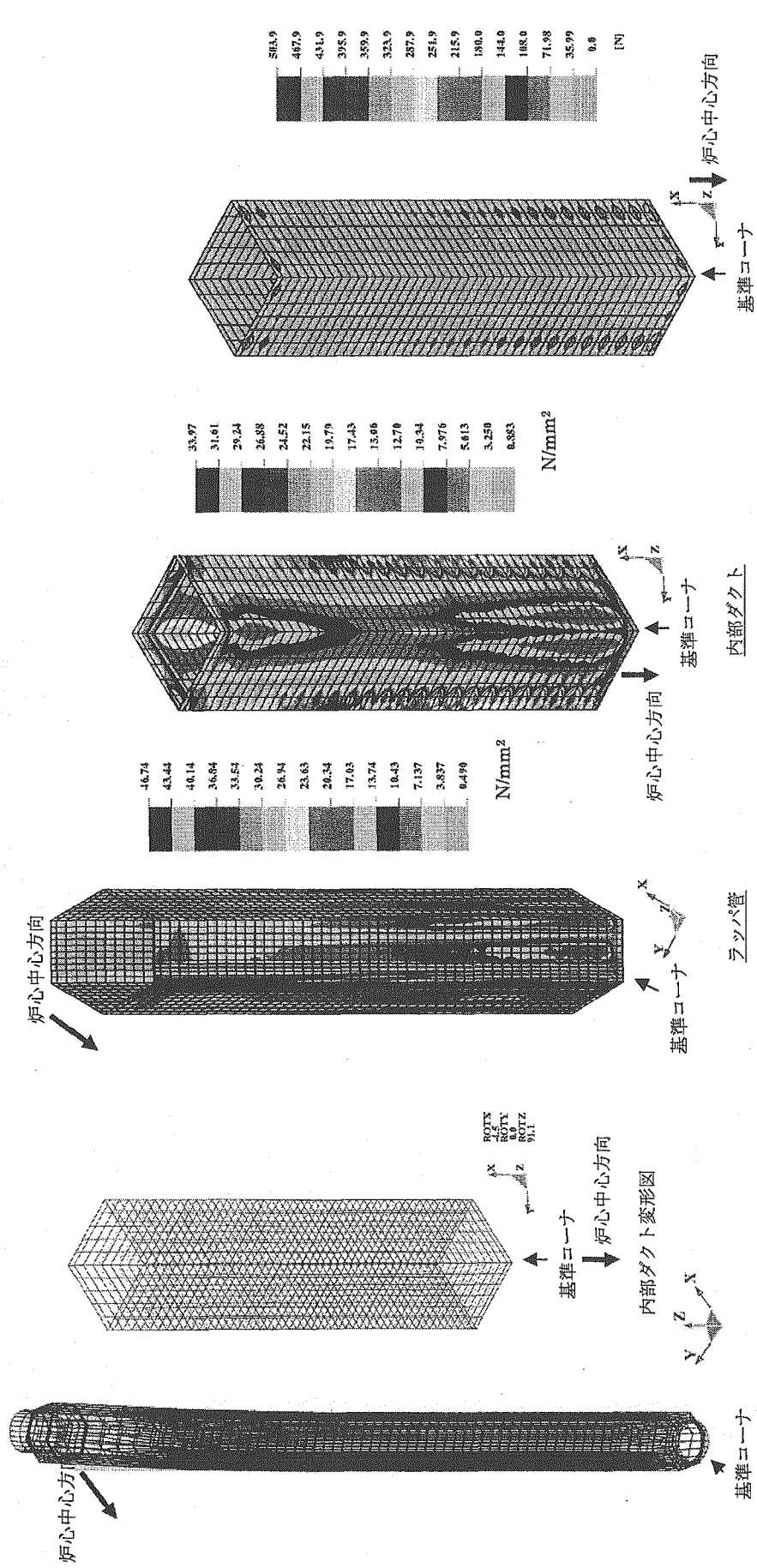


[溶接部反力の分布(せん断方向)]

[ラップ管・内部ダクトの Mises 相当応力分布図]

[集合体・内部ダクト変形図]

図 2.1-23 熱湾曲解析結果 (パターン 1: 温度差 100°C)



[溶接部反力の分布(せん断方向)]

[ラッパ管・内部ダクトの Mises 相当応力分布図]

[集合体・内部ダクト変形図]

図 2.1-24 熱湾曲解析結果 (パターン 2: 温度差 100°C)

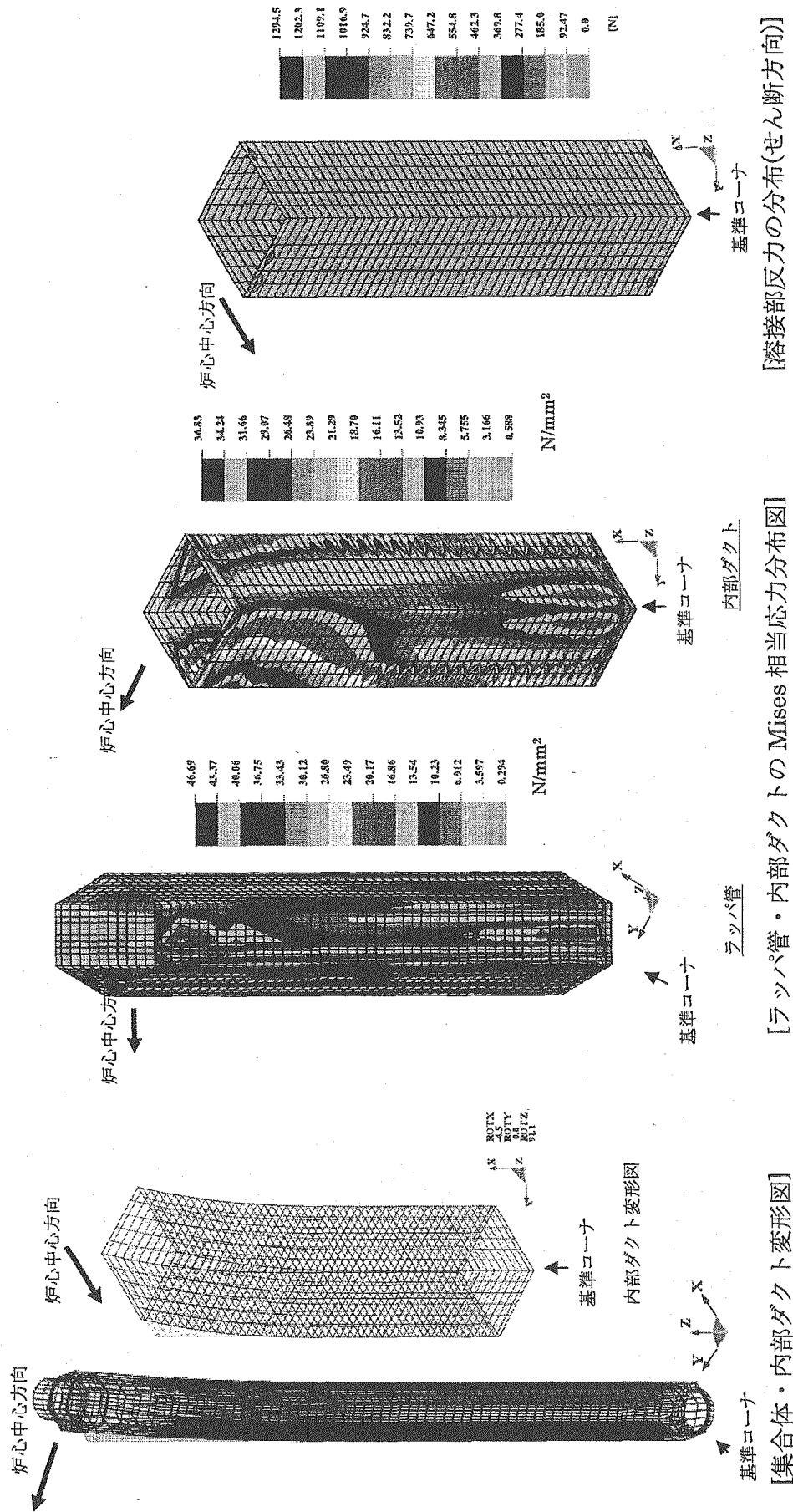
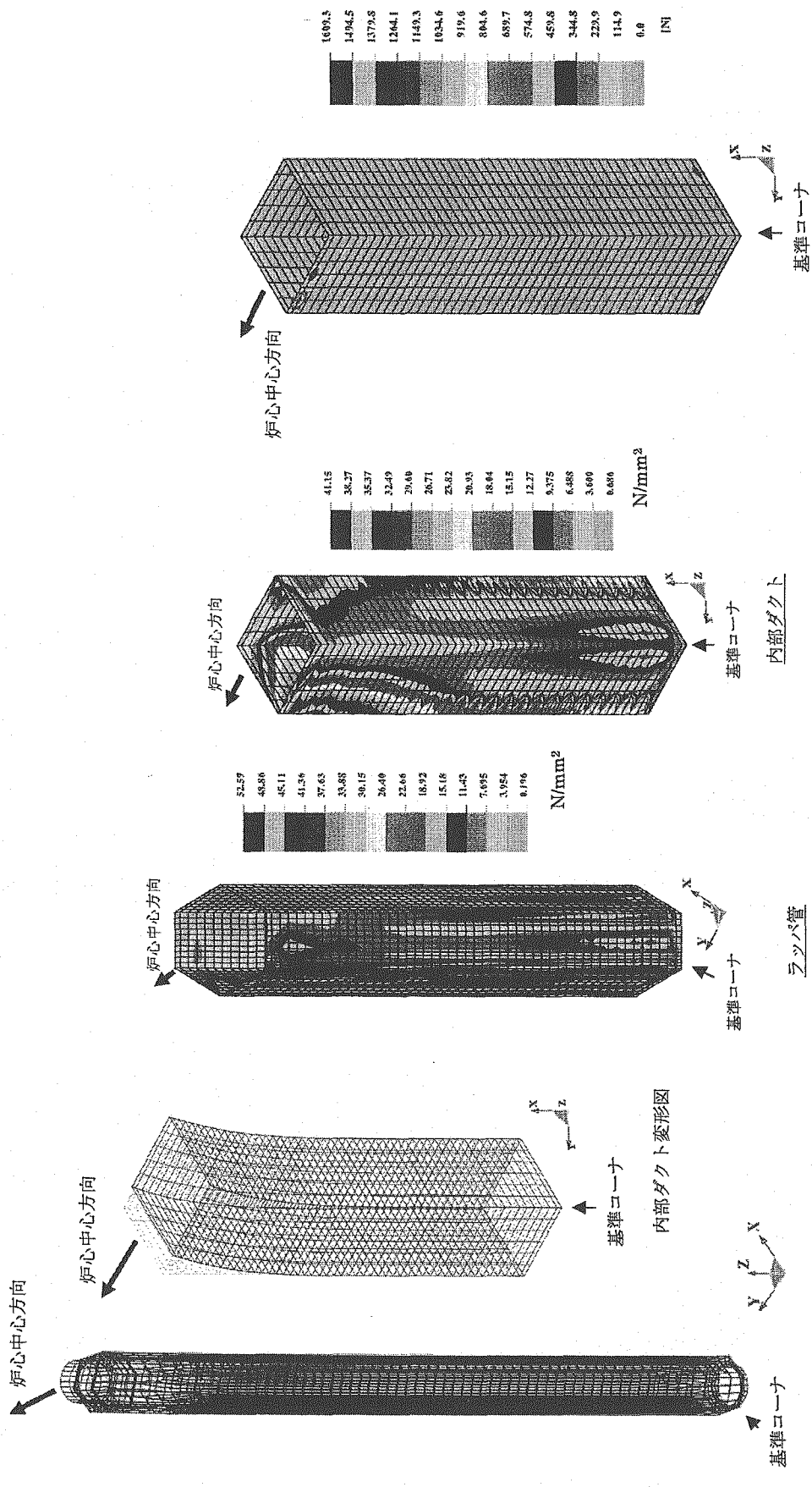


図 2.1-25 熱湾曲解析結果 (パターン 3 : 温度差 100°C)



[集合体・内部ダクト変形図]

[ラップ管・内部ダクトの Mises 相当応力分布図]

[溶接部反力の分布(せん断方向)]

図 2.1-26 熱湾曲解析結果 (パターン 4: 温度差 100°C)

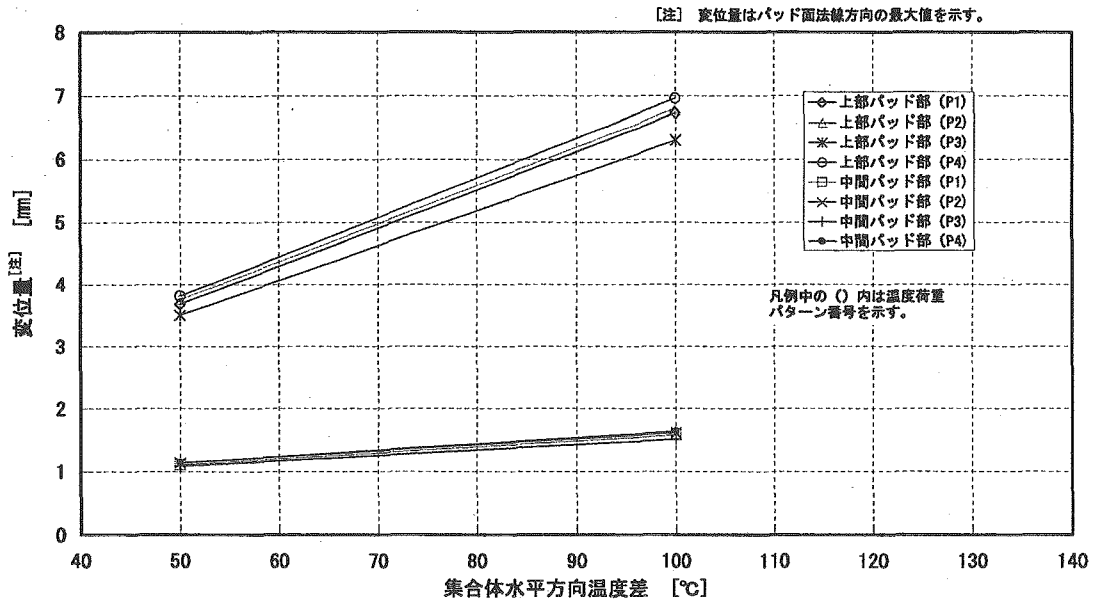


図 2.1-27 集合体パッド部変位と集合体水平方向温度差の関係

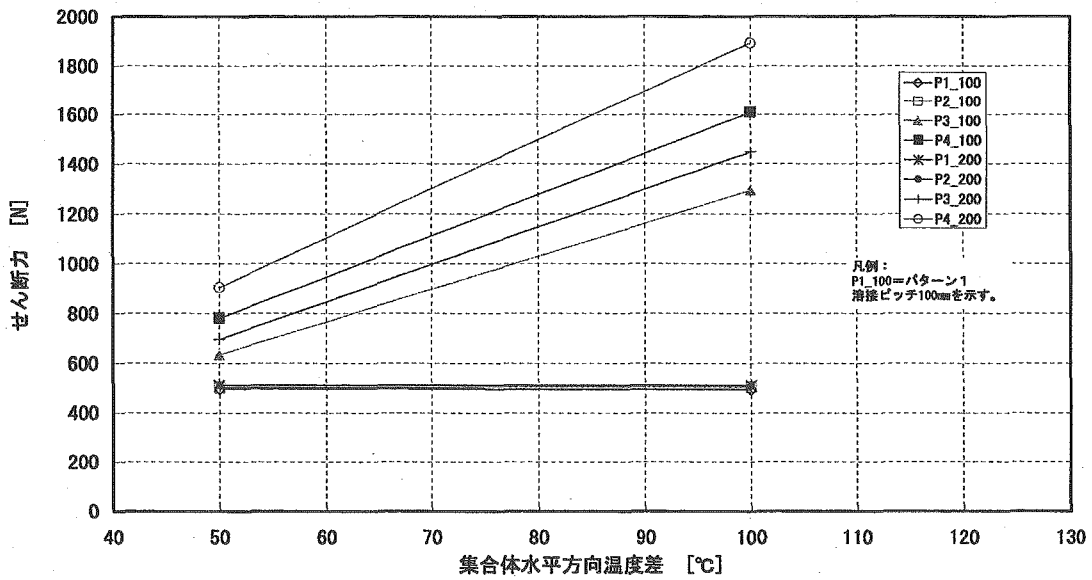


図 2.1-28 内部ダクト溶接部せん断力と集合体水平方向温度差の関係

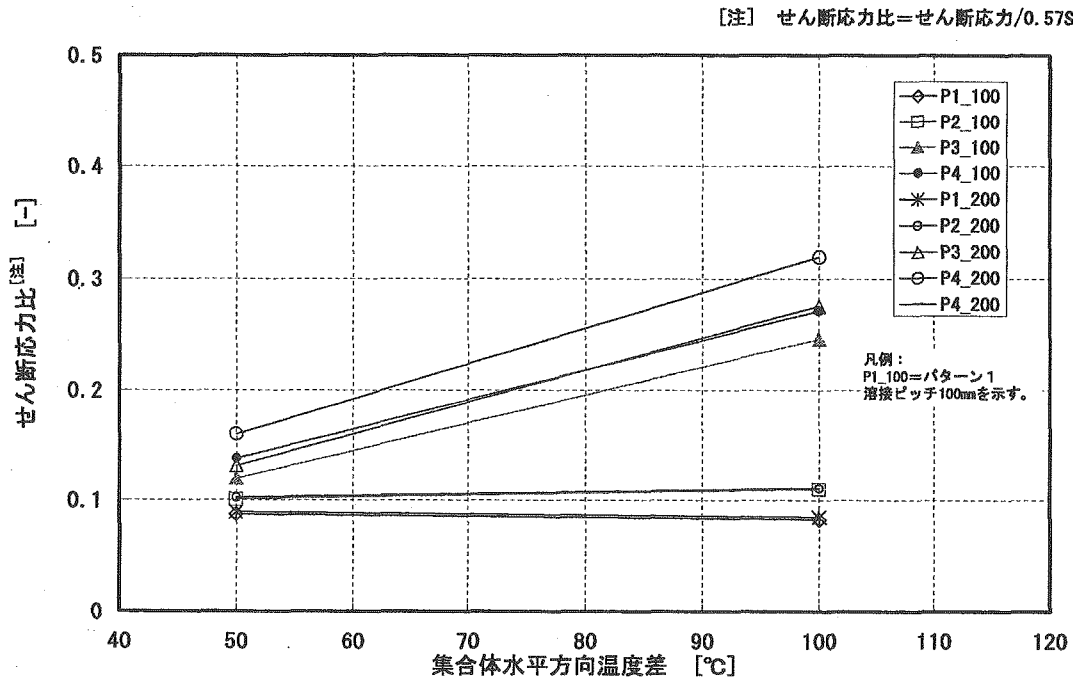


図 2.1-29 溶接部せん断応力比と集集体水平方向温度差の関係

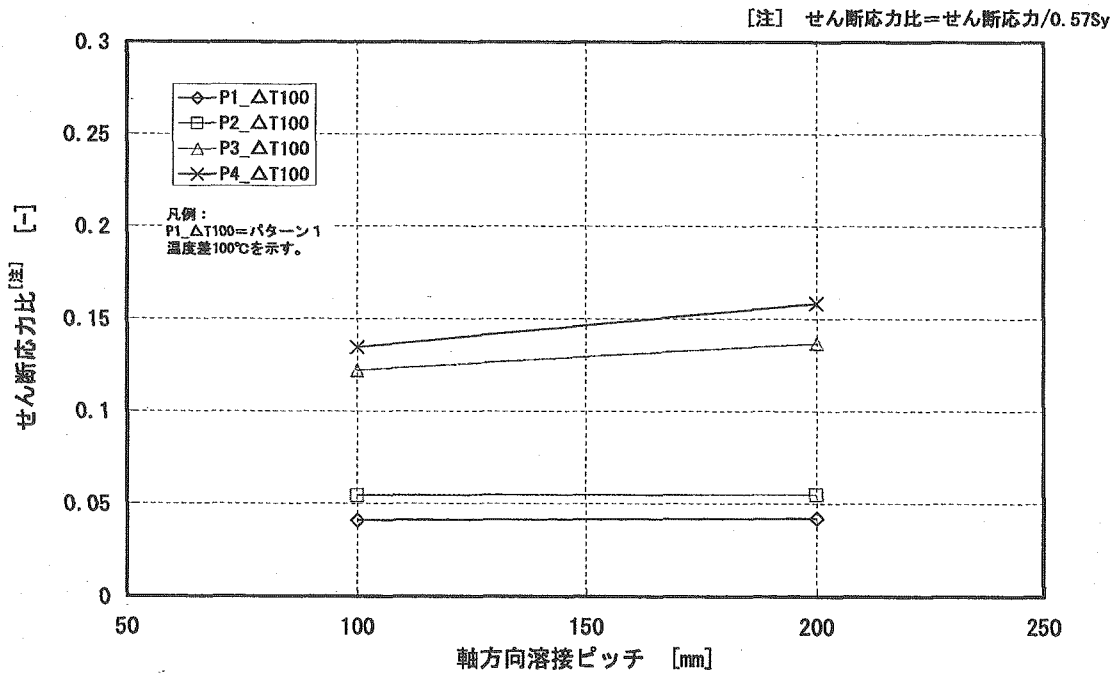


図 2.1-30 溶接ピッチとせん断応力比の関係

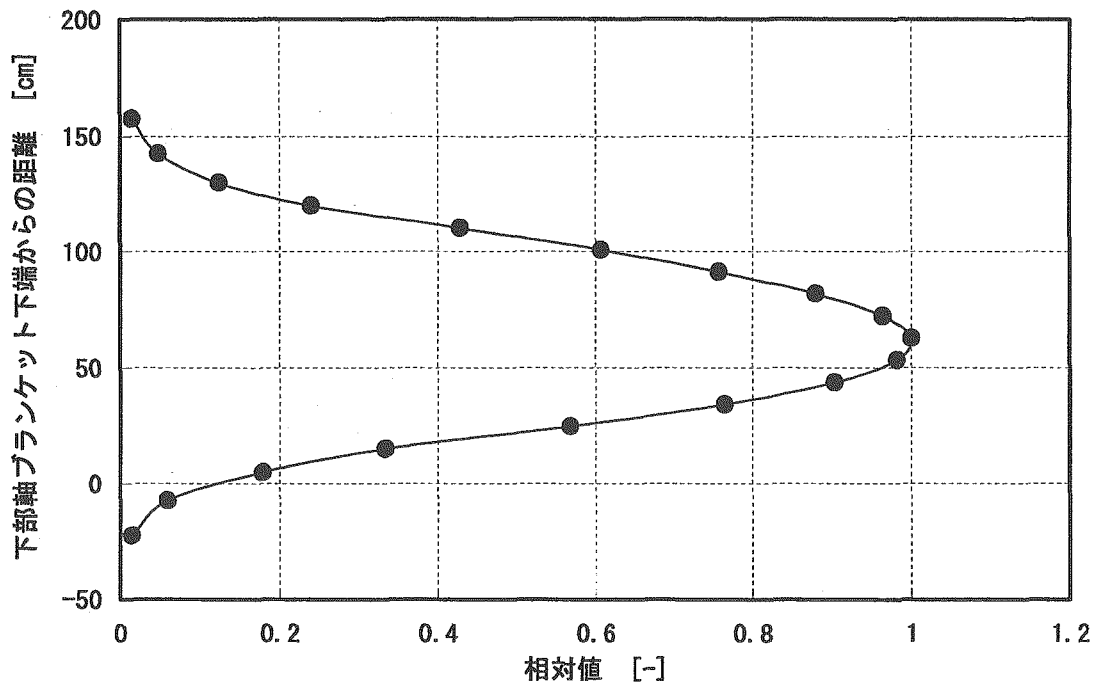
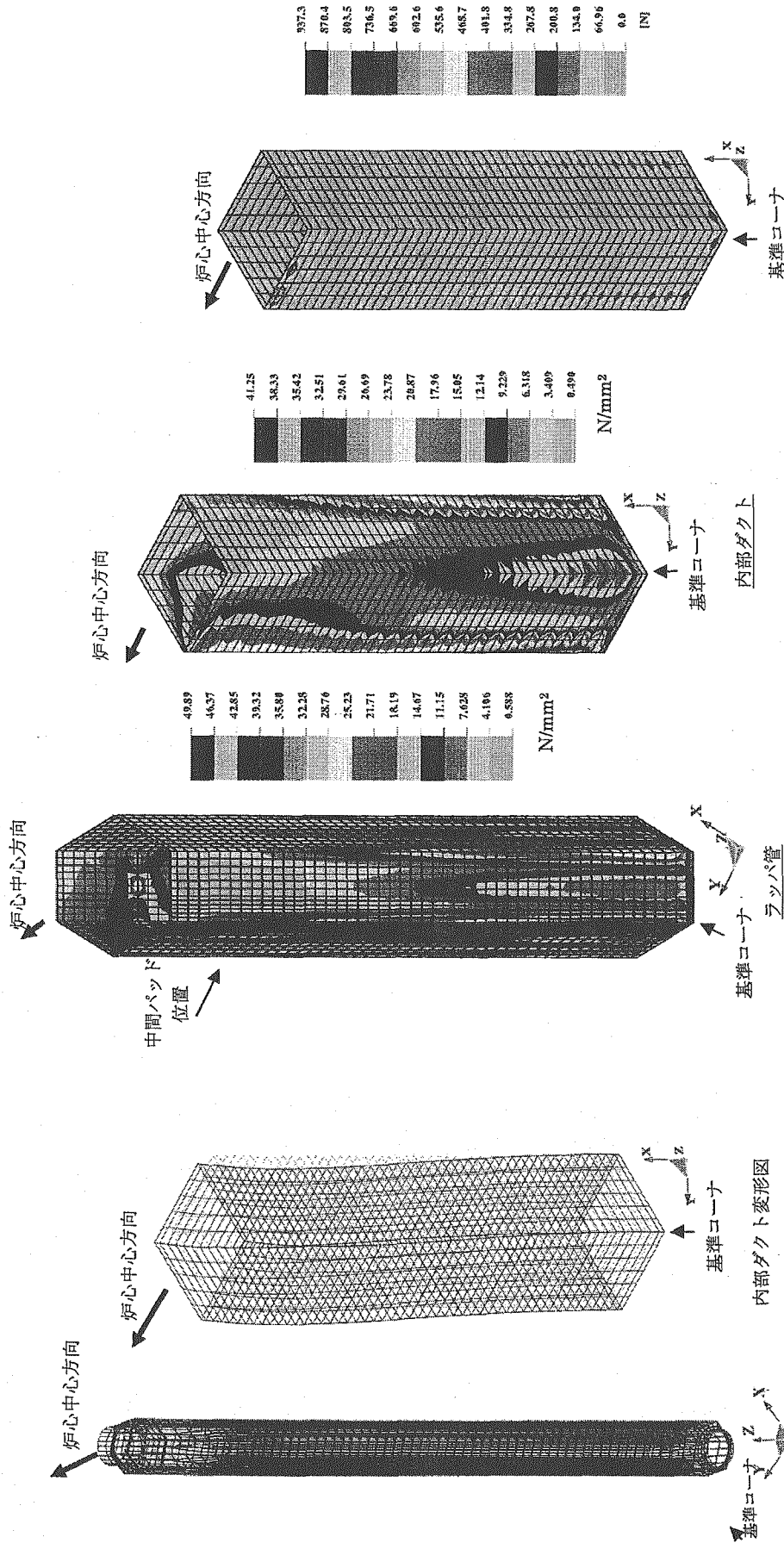


図 2.1-31 高速中性子束軸方向分布

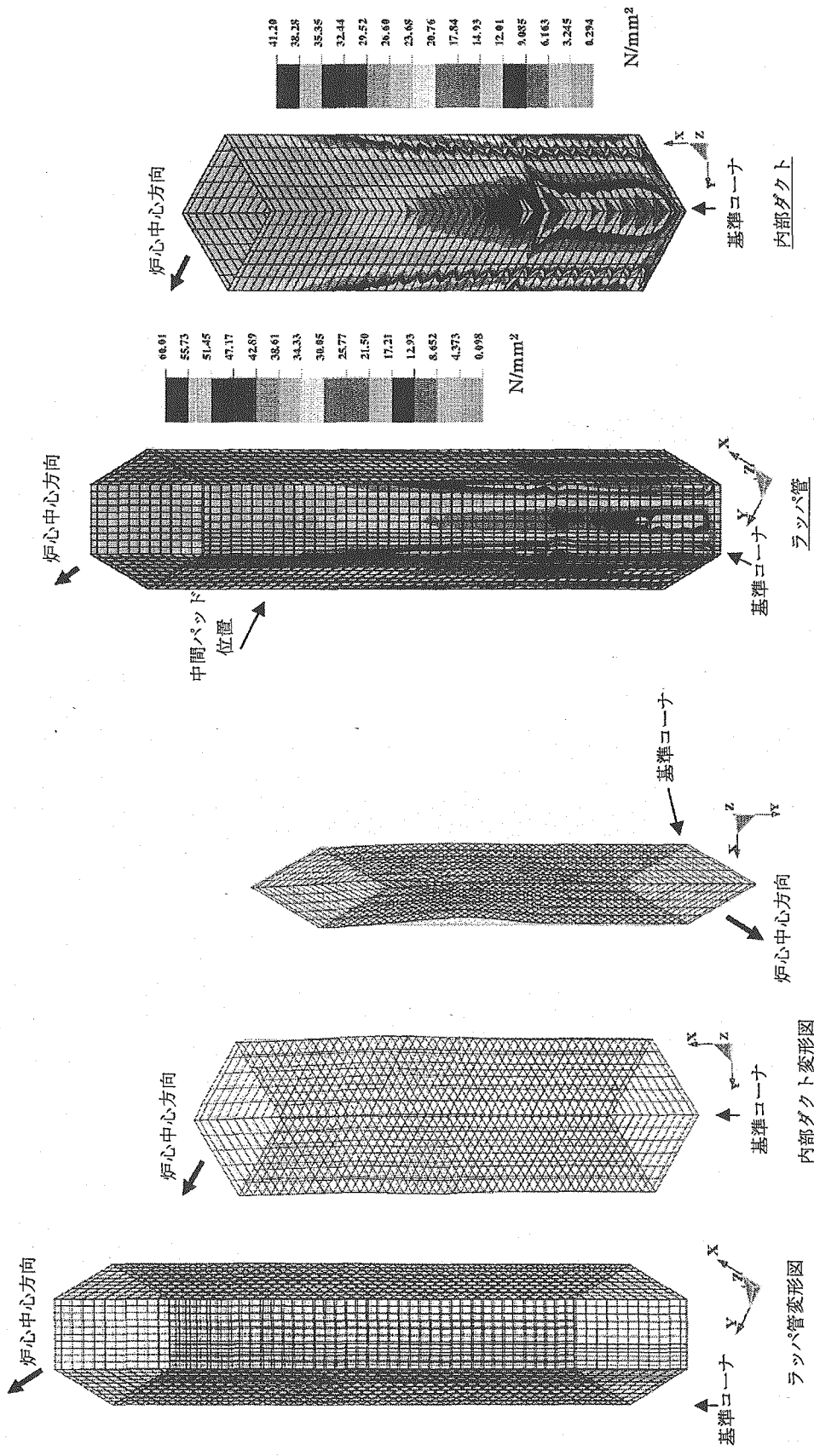


[集合体・内部ダクト変形図]

[ラップ管・内部ダクトの Mises 相当応力分布図]

[溶接部反力の分布(せん断方向)]

図 2.1-32 照射湾曲解析結果 (照射初期)
(パターン 4: 温度差 100°C、湾曲拘束条件)

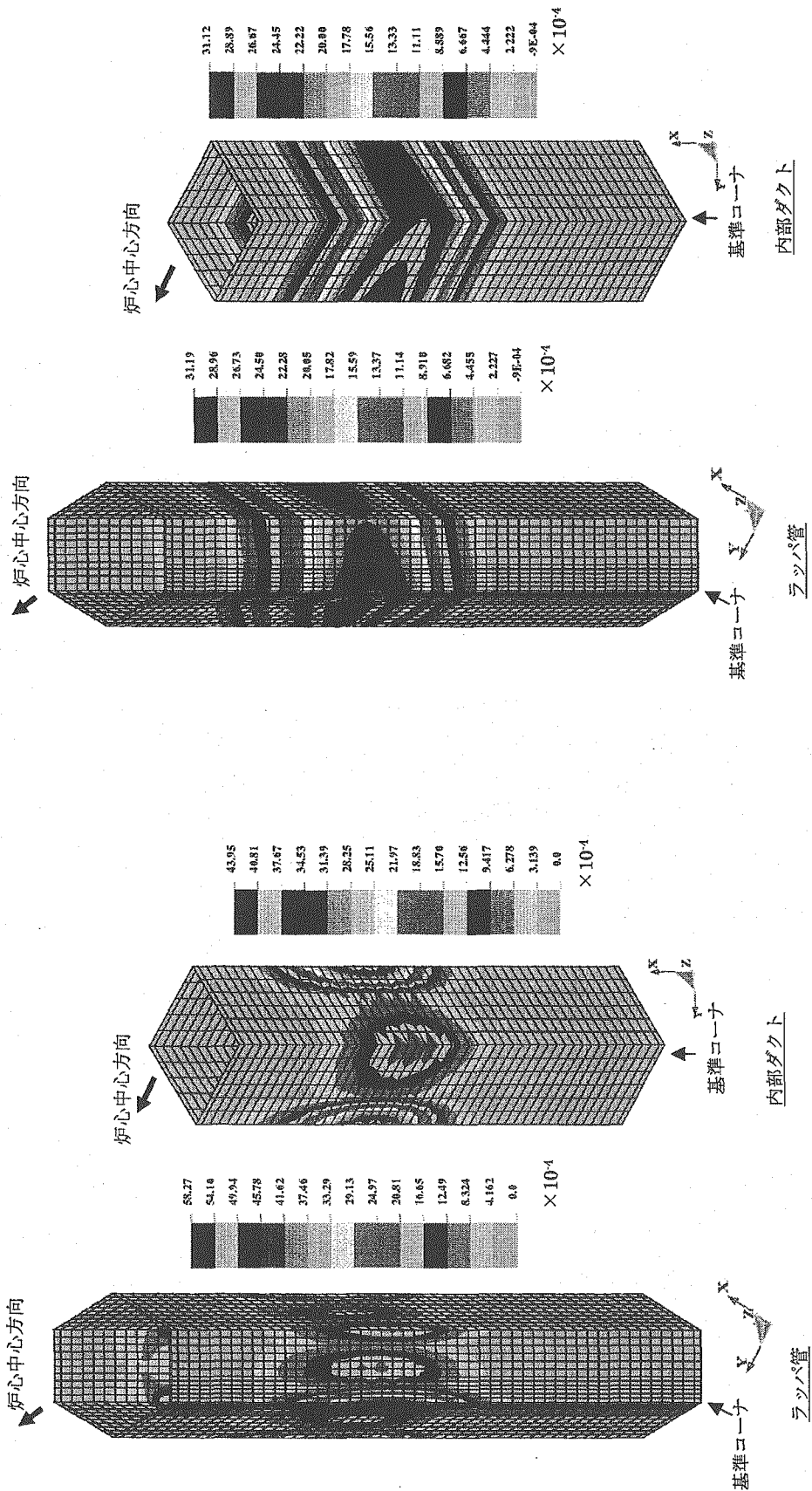


[ラップ管・内部ダクトの Mises 相当応力分布図]

[内部ダクト変形図]

[集合体変形図]

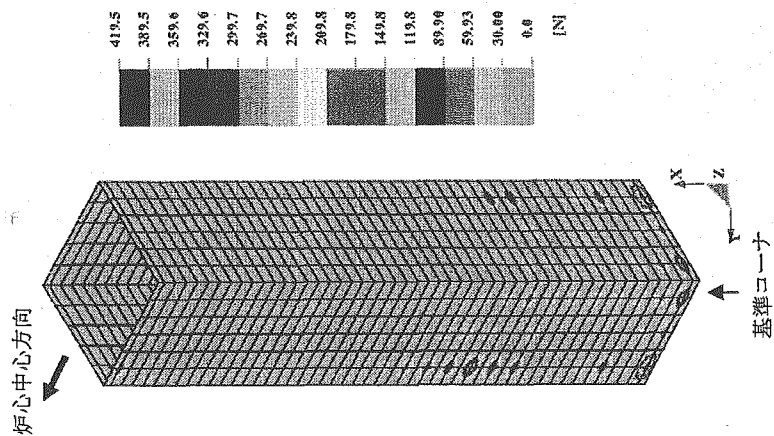
図 2.1-33(1) 照射湾曲解析結果 (照射末期)
(パターン 4 : 温度差 100°C、湾曲拘束条件)



[ラップパ管・内部ダクトの相当クリープひずみの分布]

[ラップパ管・内部ダクトのストレインリングひずみの分布]

図 2.1-33(2) 照射湾曲解析結果 (照射末期)
(パターン 4: 温度差 100°C、湾曲拘束条件)



【溶接部反力の分布(せん断方向)】

図 2.1-33(3) 照射湾曲解析結果 (照射末期)
 (パターン 4 : 温度差 100°C、湾曲拘束条件)

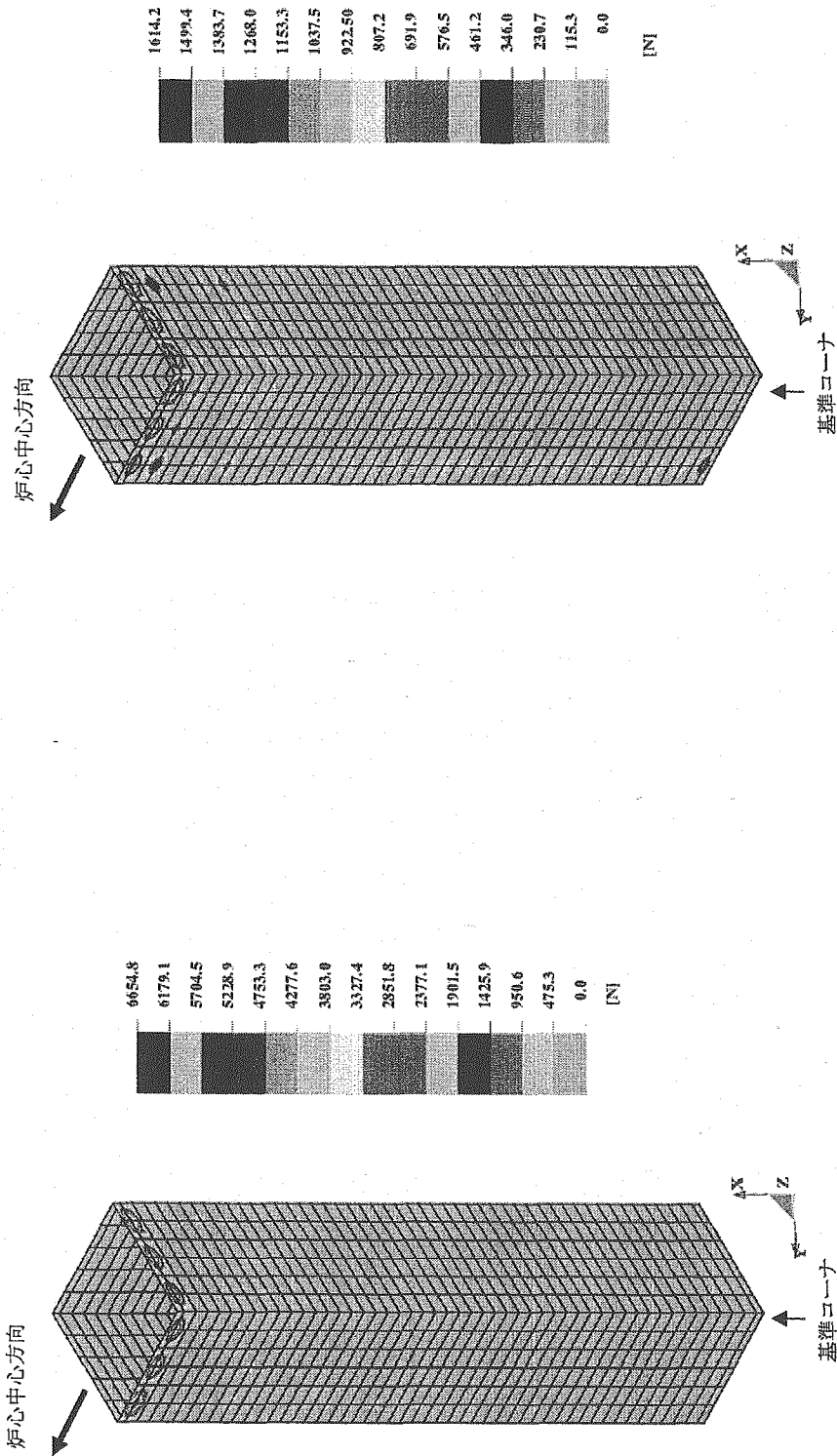


図 2.1-34 内部ダクト溶接部反力の分布(せん断応力)
(冷却材温度急昇事象)

図 2.1-35 内部ダクト溶接部反力の分布(せん断応力)
(冷却材温度急冷事象)

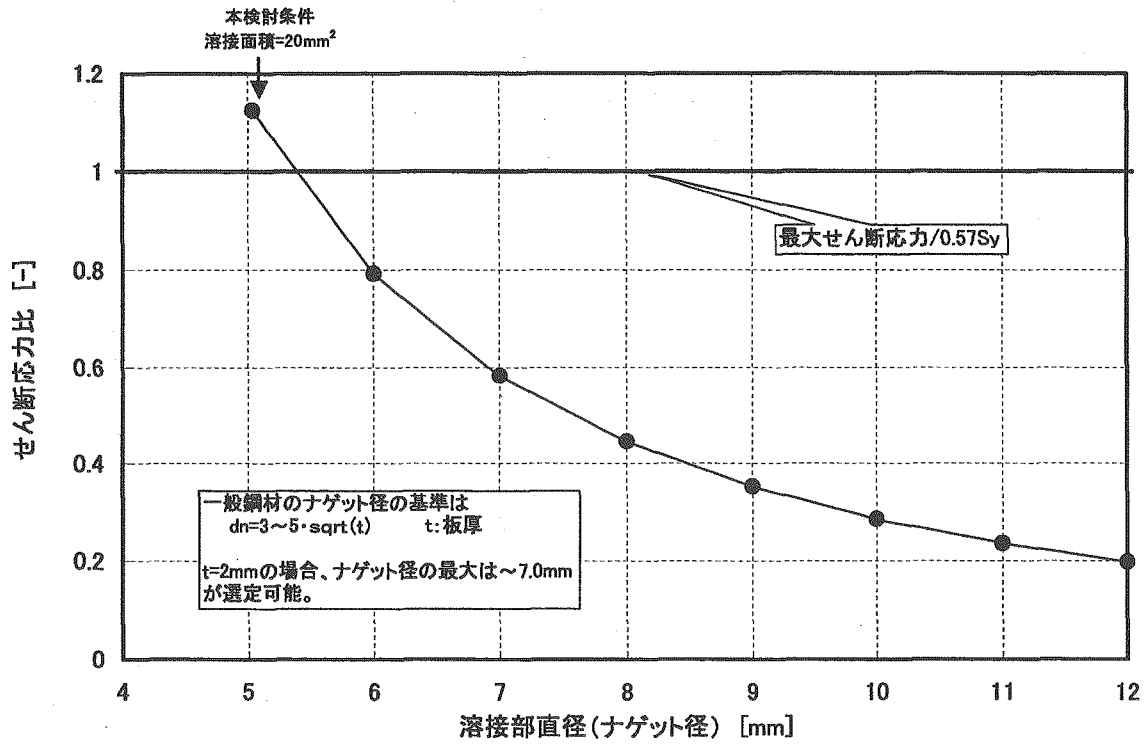


図 2.1-36 溶接部直径(ナゲット径)とせん断応力比の関係

2.2 代表炉心概念の選定

FS フェーズⅡのまとめに向けた大型および中型 MOX 燃料炉心の設計検討として、新たな再臨界回避方策である改良内部ダクト型燃料集合体を採用した高内部転換型とコンパクト型の炉心を構築し、炉心仕様、核特性および性能の比較を行い、代表とする炉心概念を選定した。

2.2.1 検討条件

表 2.2-1 に、大型炉および中型炉 MOX 燃料炉心の代表概念を選定するための検討に用いたプラント仕様、炉心・燃料基本仕様、燃料健全性および安全設計からの制限条件、他設計との取合条件、炉心性能の目標を示す。

表 2.2-1 において、大型炉のプラント仕様に関する設計条件としては、炉心熱出力が 3,570MWt、原子炉出口および入口温度が 550℃および 395℃、一次冷却材流量が 18,200kg/s である。

炉心・燃料の基本仕様としては、燃料形態が MOX、炉心型式が均質 2 領域炉心、再臨界回避方策が改良内部ダクト型燃料集合体であり、燃料の TRU は高速多重リサイクル組成である。燃料の FP 混入率は 2003 年度までの設計検討に適用した取合条件である 2vol%とした。

ここで、本年度の検討で採用した改良内部ダクト型燃料集合体は、安全設計側の検討において、2003 年度までの検討で対象としていた ABLE 型燃料集合体は CDA 時の熔融燃料排出能力に課題が多いことが明らかとなり、新たな方策として提示されたものである。

炉心材料は被覆管が ODS 鋼、ラップ管が PNC-FMS 鋼である。

制限条件としては、ULOF 起因過程における即発臨界回避のための安全要求であるナトリウムボイド反応度 6\$ 程度以下、炉心高さ 100cm 程度以下、炉心平均比出力 40kW/kg-MOX 程度以上と燃料健全性確保のための条件である最大線出力 430W/cm 以下、高速中性子照射量 5×10^{23} n/cm² (E>0.1MeV) 以下、被覆管最高温度（肉厚中心）700℃以下、通常運転時の CDF 0.5 以下がある。

燃料製造およびプラント設計との取合条件としては、燃料のスミア密度が炉心 82wt%、ブランケット 90wt%、燃料バンドル部の圧損が 0.2MPa 以下があり、制御棒については切込み付き UIS に対応した配置とすることとしている。遮へい体外接円径の条件は、2003 年度の設計検討に適用した 6.6m 以下から 7m 程度以下に緩和されている。

炉心性能の目標としては、増殖比が FBR 導入期炉心に対して 1.1 程度、FBR 平衡期炉心に対して 1.03 程度、取出平均燃焼度は、炉心部が 150GWd/t 程度、全炉心平均（ブランケット燃料を含む）が 60GWd/t 程度以上、運転サイクル長さは 18 ヶ月以上である。

中型炉の設計条件は、プラント仕様として炉心熱出力を 1,785MWt、一次冷却材流量を 9,083kg/s とし、取合条件として遮へい体外接円径を 5.5m 程度以下とする以外は大型炉と同一である。

2.2.2 評価手法

主要な核特性評価手法を以下に示す。

- ・ 炉定数 : 統合炉定数 ADJ2000R [7]
- ・ 燃焼計算 : 2次元 RZ 体系拡散燃焼計算
- ・ 出力分布計算 : 3次元三角メッシュ拡散計算
- ・ 反応度係数計算 : ドップラ係数 1次近似摂動計算
ボイド反応度 厳密摂動計算
- ・ 制御棒価値計算 : 3次元三角メッシュ拡散計算

2.2.3 大型炉の検討

大型 MOX 燃料炉心の検討では、前記 2.2.1 項に記載の検討条件を基に、高内部転換型炉心とコンパクト型の FBR 導入期炉心を構築し、両炉心の仕様、特性および性能の比較検討を行い代表とする炉心概念を選定した。

(1) 高内部転換型炉心

表 2.2-2 に大型 MOX 燃料高内部転換型炉心の主要な炉心・燃料仕様と核特性を示す。

表 2.2-2 において、増殖比は 1.10、ブランケット燃料を含めた全炉心取出平均燃焼度は 90GWd/t であり、炉心に対する性能要求を満足している。

また、最大線出力は 398W/cm、最大高速中性子照射量は $4.8 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ 、ナトリウムボイド反応度は 5.4\$ であり制限条件を満足している。

なお、径方向遮へい体の外接円径は 6.9m であり設計条件である 7m 程度以下を満足している。

(2) コンパクト型炉心

表 2.2-3 に大型 MOX 燃料コンパクト型炉心の主要な炉心・燃料仕様と核特性を示す。

表 2.2-3 において、増殖比は 1.11、ブランケットを含めた全炉心取出平均燃焼度は 77GWd/t であり、炉心に対する性能要求を満足している。

また、最大線出力は 425W/cm、最大高速中性子照射量は $4.5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ 、ナトリウムボイド反応度は 5.7\$ であり制限条件を満足している。

なお、径方向遮へい体の外接円径は 6.1m であり設計条件である 7m 程度以下を満足している。

(3) 炉心概念の選定

表 2.2-4 に大型 MOX 燃料高内部転換型炉心とコンパクト型炉心の主要な仕様と核特性の比較を示す。

表 2.2-4 において、高内部転換型炉心はコンパクト型炉心に比較して、ブランケット燃料を含めた全炉心取出平均燃焼度が 12% 高く、運転サイクル長さが 46% (約 8 ヶ月) 長いことから、燃料サイクルコストおよび稼働率に優れている。コンパクト型炉心は高内部転換炉心に比較して遮へい体外接円径が小さく建設コス

トの点では優位といえるが、発電コストの資本費で比較するとその差は僅かである。このことから、経済性は燃料サイクルコストが低く、稼働率の高い高内部転換型炉心が優れている。なお、コンパクト型炉心は初装荷 Pu-f 重量が高内部転換型炉心に比較して低いことから資源の有効利用の点では優れているが、高内部転換型炉心も FBR 導入シナリオへの適合性に問題ない見通しである。

以上のことから、炉心に与えられた条件、性能要求を全て満足し、経済性に優れた高内部転換型炉心を大型 MOX 燃料炉心の代表概念として選定した。

2.2.4 中型炉の検討

中型 MOX 燃料炉心の検討では、前記 2.2.1 項に記載の検討条件を基に、高内部転換型炉心とコンパクト型の FBR 平衡期炉心を構築し、両炉心の仕様、特性および性能の比較検討を行い代表とする炉心概念を選定した。

(1) 高内部転換型炉心

表 2.2-5 に中型 MOX 燃料高内部転換型炉心の主要な炉心・燃料仕様と核特性を示す。

表 2.2-5 において、増殖比は 1.03、ブランケット燃料を含めた全炉心取出平均燃焼度は 98GWd/t であり、炉心に対する性能要求を満足している。

また、最大線出力は 422W/cm、最大高速中性子照射量は $5.7 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ 、ナトリウムボイド反応度は 5.3\$ であり制限条件を満足している。

なお、径方向遮へい体の外接円径は 5.2m であり設計条件である 5.5m 程度以下を満足している。

(2) コンパクト型炉心

表 2.2-6 に中型 MOX 燃料コンパクト型炉心の主要な炉心・燃料仕様と核特性を示す。

表 2.2-6 において、増殖比は 1.03、ブランケット燃料を含めた全炉心取出平均燃焼度は 74GWd/t であり、炉心に対する性能要求を満足している。

また、最大線出力は 395W/cm、最大高速中性子照射量は $4.5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ 、ナトリウムボイド反応度は 5.4\$ であり制限条件を満足している。

なお、径方向遮へい体の外接円径は 4.7m であり設計条件である 5.5m 程度以下を満足している。

(3) 炉心概念の選定

表 2.2-7 に中型 MOX 燃料高内部転換型炉心とコンパクト型炉心の主要な仕様と核特性の比較を示す。

表 2.2-7 において、高内部転換型炉心はコンパクト型炉心に比較して、ブランケット燃料を含めた全炉心取出平均燃焼度が 32% 高く、運転サイクル長さが 49% (8.6 ヶ月) 長いことから、燃料サイクルコストおよび稼働率に優れている。コンパクト型炉心は高内部転換炉心に比較して遮へい体外接円径が小さく建設コストの点では優位といえるが、発電コストの資本費で比較するとその差は僅かである。このことから、経済性は燃料サイクルコストが低く、稼働率の高い高内部転

換型炉心が優れている。なお、初装荷 Pu-f 重量が高内部転換型炉心に比較して低いことから資源の有効利用の点では優れているが、高内部転換型炉心も FBR 導入シナリオへの適合性に問題ない見通しである。

以上のことから、炉心に与えられた条件、性能要求を全て満足し、経済性に優れた高内部転換型炉心を中型 MOX 燃料炉心の代表概念として選定した。

表 2.2-1 MOX 燃料の代表炉心概念検討に用いた主要な条件

項 目		大型炉	中型炉	
プラント仕様	電気出力	1,500MWe	750MWe	
	炉心熱出力	3,570MWt	1,785MWt	
	原子炉出口/入口温度	550 / 395 °C	←	
	1次系流量	18,200kg/s	9,083kg/s	
炉心・燃料基本仕様	燃料形態	MOX	←	
	炉心型式	均質2領域	←	
	再臨界回避方策	改良内部ダ外型燃料集合体	←	
	燃料	組成*1	高速炉多重サイクルTRU	←
		FP混入率*2	2Vol%	←
	炉心材料*3	被覆管	ODS鋼	←
ラッパ管		PNC-FMS鋼	←	
制限条件	安全要求	トリウムホウ反応度	6\$以下	←
		炉心高さ	100cm以下	←
		炉心平均比出力	40kW/kg-MOX程度以上	←
	燃料健全性	最大線出力	430W/cm以下	←
		高速中性子照射量*4	$5 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ 以下	←
		被覆管最高温度[肉厚中心]	700°C以下	←
		CDF(通常運転時)	0.5以下	←
取合条件	燃料スミア密度	炉心	82%TD	←
		ブランケット	90%TD	←
	燃料ハンドル部圧損	0.2MPa以下	←	
	遮へい体外接円径	7m程度以下*5	5.5m程度以下	
	制御棒、SASS配置	切込み付きUIS対応	←	
炉心性能目標	増殖比	導入期炉心	1.1程度	←
		平衡期炉心	1.03程度	←
	取出平均 燃焼度	炉心部	150GWd/t程度	←
		全炉心*6	60GWd/t程度以上	←
	運転サイクル長さ	18ヶ月以上	←	

*1 高速炉多重サイクル組成 (wt%)

$$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/^{243}\text{Am}/^{244}\text{Cm}/^{245}\text{Cm}$$

$$= 1.1/54.1/32.1/ 4.3/ 3.9/ 0.5/ 2.0/ 1.0/ 1.0/ 0.0$$

*2 代表炉心概念検討用(2003年度までの取合条件)

*3 炉心材料組成[炉心燃料設計用] (wt%) : Fe/Cr/Ni/Mo/Mn/W = 85.5/11.0/0.4/0.5/0.6/2.0

*4 $E > 0.1\text{MeV}$

*5 2003年度設計検討:6.6m以下

*6 ブランケット燃料を含む全炉心取出平均燃焼度

表 2.2-2 大型 MOX 燃料高内部転換型炉心(導入期)の主要仕様および核特性

項目	評価値
原子炉出力	3570 MWt (1500 MWe)
炉心型式	均質 2 領域炉心
再臨界回避方策	改良内部ダクト型集合体
運転サイクル長さ	26.3 ヶ月 (800 日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランチ)	4 / 4 バッチ
炉心高さ	100 cm
軸方向ブランチ厚さ (上部/下部)	20 / 25 cm
燃料集合体数 (内側炉心/外側炉心/炉心合計/径方向ブランチ)	297 / 279 / 576 / 96
炉心等価直径	546 cm
遮へい体外径	6.9 m
燃料形態	MOX
炉心材料 (被覆管/ラップ管)	ODS 鋼 / PNC-FMS 鋼
燃料ピン外径 / 肉厚	10.4 / 0.71 mm
燃料スミア密度 (炉心/軸方向ブランチ/径方向ブランチ)	82 / 90 / 90 %TD
ワイア径	1.03 mm
内部ダクト外面辺の長さ / 肉厚	45.9 / 2.0 mm
集合体当たり燃料ピン本数	255 本
Pu 富化度 ^{*1} (内側/外側)	18.8 / 22.1 wt. %
取出平均燃焼度 (炉心部/全炉心 ^{*2})	146 / 86 Gwd/t
燃焼反応度	2.5 %Δk/kk'
増殖比 (炉心/軸方向ブランチ/径方向ブランチ/全体)	0.82 / 0.21 / 0.07 / 1.10
最大線出力 (内側/外側)	394 / 394 W/cm
炉心平均比出力	40 kW/kg-MOX
最大高速中性子照射量 ^{*3}	4.8 × 10 ²³ n/cm ²
初装荷 Pu-f 重量	6.0 t/GWe
ドップラ係数 [TdK/dT] (平衡末期) ^{*4}	-5.5 × 10 ⁻³
ポイド反応度 (平衡末期) ^{*4, *5}	5.4 \$

*1 Pu/重金屬 *2 ブランチ燃料を含む全体の平均燃焼度 *3 E > 0.1MeV *4 集合体内非均質効果考慮

*5 実効遅発中性子割合 0.00340

表 2.2-3 大型 MOX 燃料コンパクト型炉心(導入期)の主要仕様および核特性

項目	評価値
原子炉出力	3570 MWt (1500 MWe)
炉心型式	改良内部ダクト型均質 2 領域炉心
再臨界回避方策	改良内部ダクト型集合体
運転サイクル長さ	18.0 ヶ月 (548 日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランチ)	4 / 4 バッチ
炉心高さ	85 cm
軸方向ブランチ厚さ (上部/下部)	25 / 35 cm
燃料集合体数 (内側炉心/外側炉心/炉心合計/径方向ブランチ)	316 / 278 / 594 / 96
炉心等価直径	490 cm
遮へい体外径	6.1 m
燃料形態	MOX
炉心材料 (被覆管/ラップ管)	ODS 鋼 / PNC-FMS 鋼
燃料ピン外径 / 肉厚	8.8 / 0.52 mm
燃料スミア密度 (炉心/軸方向ブランチ/径方向ブランチ)	82 / 90 / 90 %TD
ワイア径	1.27 mm
内部ダクト外面辺の長さ / 肉厚	40.5 / 2.0 mm
集合体当たり燃料ピン本数	255 本
Pu 富化度 ^{*1} (内側/外側)	21.9 / 24.7 wt. %
取出平均燃焼度 (炉心部/全炉心 ^{*2})	149 / 77 Gwd/t
燃焼反応度	3.3 %Δk/kk'
増殖比 (炉心/軸方向ブランチ/径方向ブランチ/全体)	0.73 / 0.29 / 0.08 / 1.11
最大線出力 (内側/外側)	425 / 425 W/cm
炉心平均比出力	59 kW/kg-MOX
最大高速中性子照射量 ^{*3}	4.5 × 10 ²³ n/cm ²
初裝荷 Pu-f 重量	4.5 t/GWe
ドップラ係数 [TdK/dT] (平衡末期) ^{*4}	-4.9 × 10 ⁻³
ボイド反応度 (平衡末期) ^{*4, *5}	5.7 \$

^{*1} Pu/重金屬 ^{*2} ブランチ燃料を含む全体の平均燃焼度 ^{*3} E > 0.1MeV ^{*4} 集合体内非均質効果考慮
^{*5} 実効遅発中性子割合 0.00339

表 2.2-4 大型 MOX 燃料高内部転換型炉心とコンパクト型炉心(導入期)の炉心・燃料仕様および核特性の比較

項 目	高内部転換型炉心 (コンパクト型との差)	コンパクト型炉心
運転サイクル長さ(ヶ月)	26.3 (46%)	18.0
炉心高さ(cm)	100	85
軸方向フランケット厚さ(cm)	上部	25
	下部	35
	合計	60
燃料集集体数	内側炉心	316
	外側炉心	278
	炉心合計	594
	径フランケット	96
遮へい体外径円径(m)	6.9 (13%)	6.1
Pu富化度 [Pu/重金属] (wt%)	内側炉心	21.9
	外側炉心	24.7
増殖比	1.10	1.11
燃焼反応度 (%Δk/kk')	2.5 (-24%)	3.3
取出平均燃焼度 (GWd/t)	炉心部	149
	全炉心*1	77
最大線出力 (W/cm)	内側炉心	425
	外側炉心	425
最大高速中性子照射量 [E>0.1MeV] (n/cm ²)	4.8E+23	4.5E+23
初装荷Pu-f重量 (t/GWe)	6.0 (33%)	4.5
ドップラ係数*2 [Tdk/dT; 平衡末期]	-5.5E-03	-4.9E-03
ポイド反応度*2 [平衡末期] (\$)	5.4*3	5.7*4

*1 フランケット燃料を含む *2 集体内非均質効果考慮 *3 実効遅発中性子割合0.00340 *4 実効遅発中性子割合0.00339

表 2.2-5 中型 MOX 燃料高内部転換型炉心(平衡期)の主要仕様および核特性

項目	評価値
原子炉出力	1785 MWt (750 MWe)
炉心型式	均質 2 領域炉心
再臨界回避方策	改良内部ダクト型集合体
運転サイクル長さ	26.1 ヶ月 (794 日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランクット)	4 / -バッチ
炉心高さ	100 cm
軸方向ブランクット厚さ (上部/下部)	25 / 30 cm
燃料集合体数 (内側炉心/外側炉心/炉心合計/径方向ブランクット)	157 / 129 / 286 / -
炉心等価直径	383 cm
遮へい体外径	5.2 m
燃料形態	MOX
炉心材料 (被覆管/ラップ管)	ODS 鋼 / PNC-FMS 鋼
燃料ピン外径 / 肉厚	10.4 / 0.71 mm
燃料スミア密度 (炉心/軸方向ブランクット/径方向ブランクット)	82 / 90 / 90 %TD
ワイア径	1.04 mm
内部ダクト外面辺の長さ / 肉厚	46.0 / 2.0 mm
集合体当たり燃料ピン本数	255 本
Pu 富化度*1 (内側/外側)	20.1 / 23.0 wt. %
取出平均燃焼度 (炉心部/全炉心*2)	148 / 98 Gwd/t
燃焼反応度	3.2 %Δk/kk'
増殖比 (炉心/軸方向ブランクット/径方向ブランクット/全体)	0.79 / 0.24 / - / 1.03
最大線出力 (内側/外側)	422 / 418 W/cm
炉心平均比出力	41 kW/kg-MOX
最大高速中性子照射量*3	5.7 × 10 ²³ n/cm ²
初装荷 Pu-f 重量	6.3 t/GWe
ドップラ係数 [Tdk/dT] (平衡末期)*4	-
ポイド反応度 (平衡末期)*4 *5	5.3 \$

*1 Pu/重金屬 *2 ブランクット燃料を含む全体の平均燃焼度 *3 E > 0.1MeV *4 集合体内非均質効果考慮
 *5 実効遅発中性子割合 0.00333

表 2.2-6 中型 MOX 燃料コンパクト型炉心(平衡期)の主要仕様および核特性

項目	評価値
原子炉出力	1785 MWt (750 MWe)
炉心型式	改良内部ダクト型均質 2 領域炉心
再臨界回避方策	改良内部ダクト型集合体
運転サイクル長さ	17.5 ヶ月 (532 日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランチ)	4 / 一バッチ
炉心高さ	85 cm
軸方向ブランチ厚さ (上部/下部)	44.5 / 47.5 cm
燃料集合体数 (内側炉心/外側炉心/炉心合計/径方向ブランチ)	158 / 156 / 314 / -
炉心等価直径	349 cm
遮へい体外径	4.7 m
燃料形態	MOX
炉心材料 (被覆管/ラツバ管)	ODS 鋼 / PNC-FMS 鋼
燃料ピン外径 / 肉厚	8.5 / 0.5 mm
燃料スミア密度 (炉心/軸方向ブランチ/径方向ブランチ)	82 / 90 / 90 %TD
ワイア径	1.26 mm
内部ダクト外面辺の長さ / 肉厚	39.2 / 2.0 mm
集合体当たり燃料ピン本数	255 本
Pu 富化度 ^{*1} (内側/外側)	22.4 / 27.7 wt. %
取出平均燃焼度 (炉心部/全炉心 ^{*2})	149 / 74 Gwd/t
燃焼反応度	3.9 %Δk/kk'
増殖比 (炉心/軸方向ブランチ/径方向ブランチ/全体)	0.70 / 0.33 / - / 1.03
最大線出力 (内側/外側)	395 / 394 W/cm
炉心平均比出力	61 kW/kg-MOX
最大高速中性子照射量 ^{*3}	4.5 × 10 ²³ n/cm ²
初装荷 Pu-f 重量	4.8 t/GWe
ドップラ係数 [TdK/dT] (平衡末期) ^{*4}	-
ポイド反応度 (平衡末期) ^{*4} ^{*5}	5.4 \$

^{*1} Pu/重金屬 ^{*2} ブランチ燃料を含む全体の平均燃焼度 ^{*3} E > 0.1MeV ^{*4} 集合体内非均質効果考慮

^{*5} 実効遅発中性子割合 0.00336

表 2.2-7 中型 MOX 燃料高内部転換型炉心とコンパクト型炉心(平衡期)の炉心・燃料仕様および核特性の比較

項 目	高内部転換型炉心 (コンパクト型との差)	コンパクト型炉心
運転サイクル長さ(ヶ月)	26.1 (49%)	17.5
炉心高さ (cm)	100	85
軸方向ブラケット厚さ (cm)	上部	44.5
	下部	47.5
	合計	92
燃料集集体数	内側炉心	158
	外側炉心	156
	炉心合計	314
	径ブラケット	—
遮へい体外径 (m)	5.2 (11%)	4.7
Pu富化度 [Pu/重金属] (wt%)	内側炉心	22.4
	外側炉心	27.7
増殖比	1.03	1.03
燃焼反応度 (%Δk/kk')	3.2 (-18%)	3.9
取出平均燃焼度 (Gwd/t)	炉心部	149
	全炉心*1	74
最大線出力 (W/cm)	内側炉心	423
	外側炉心	420
最大高速中性子照射量 [E>0.1MeV] (n/cm ²)	5.7E+23	4.5E+23
初装荷Pu-f重量 (t/GWe)	6.3 (31%)	4.8
ドップラ係数*2 [Tdk/dT; 平衡末期]	—	—
ポイド反応度*2 [平衡末期] (\$)	5.3*3	5.4*4

*1 プラケット燃料を含む *2 集体内非均質効果考慮 *3 実効選発中性子割合0.00333 *4 実効選発中性子割合0.00336

2.3 代表炉心概念の設計検討

2.3.1 大型炉の設計検討

前記 2.2.3 項において、大型 MOX 燃料炉心の代表概念として高内部転換型炉心を選定した。本項では代表炉心概念として選定した大型 MOX 燃料高内部転換型炉心について、FBR 導入期炉心と FBR 平衡期炉心を構築し、核・熱流設計および燃料健全性に係る検討を行い、炉心・燃料仕様、炉心特性および性能を明らかにした。

(1) 検討条件

表 2.3-1 に、大型炉代表炉心の設計検討における主要な条件であるプラント仕様、燃料の基本的な仕様、燃料健全性および安全設計からの制限条件、他設計との取合条件を示す。

表 2.3-1 において、大型炉のプラント仕様に関する設計条件としては、炉心熱出力が 3,750MWt、原子炉出口および入口温度が 550℃および 395℃、一次冷却材流量が 18,200kg/s である。

炉心・燃料の基本仕様としては、燃料形態が MOX、炉心型式が均質 2 領域炉心、再臨界回避方策が改良内部ダクト型燃料集合体であり、炉心燃料の TRU は高速炉多重リサイクル組成（設計標準）である。新燃料の FP 混入率 0.2Vol%は、2004 年度に MOX 燃料再処理システムの有望概念として選定された先進湿式法における製品への FP 移行率を基に設定したものである。

炉心材料は被覆管が ODS 鋼、ラップ管が PNC-FMS 鋼である。

制限条件としては、ULOF 起因過程における即発臨界回避のための安全要求であるナトリウムボイド反応度 6\$ 程度以下、炉心高さ 100cm 程度以下、炉心平均比出力 40kW/kg-MOX 程度以上と燃料健全性確保のための条件である最大線出力 430W/cm 以下、高速中性子照射量 5×10^{23} n/cm² 以下、被覆管最高温度（肉厚中心）700℃以下、通常運転時の CDF 0.5 以下がある。

燃料製造およびプラント設計との取合条件としては、燃料のスミア密度が炉心 82%、ブランケット 90%、遮へい体外接円径が 7m 程度以下、燃料バンドル部の圧損が 0.2MPa 以下があり、制御棒については切込み付き UIS に対応した配置とすることとしている。

炉心性能の目標としては、増殖比が FBR 導入期炉心に対して 1.1 程度、FBR 平衡期炉心に対して 1.03 程度、取出平均燃焼度は、炉心部が 150GWd/t 程度、全炉心（ブランケット燃料を含む）が 60GWd/t 程度以上、運転サイクル長さは 18 ヶ月以上である。

(2) FBR 導入期炉心の検討結果

(i) 炉心・燃料仕様

表 2.3-2 に、大型 MOX 燃料高内部転換型導入期炉心の主要仕様および特性を示し、表 2.3-3 および図 2.3-1 には炉心・燃料仕様および炉心燃料集合体の概念図を示す。炉心高さは 100cm、軸方向ブランケット厚さは上部下部ともに 20cm、

炉心の等価直径は 538cm である。炉心燃料集合体は改良内部ダクト型であり、燃料ピンの本数は 255 本、ピン径が 10.4 mm である。

図 2.3-2 に炉心配置を示す。炉心燃料集合体は、内側炉心が 288 体、外側炉心が 274 体の合計 562 体、径方向ブランケット燃料集合体が 96 体である。制御棒は主炉停止系が 40 本、後備炉停止系が 17 本であり、配置は切込付コラム型 UIS に対応するとともに SASS の設置を考慮したものとしている。径方向遮へい体は 2 層であり、炉心の外側に SUS 遮へい体を 1 層、最外周に B₄C 遮へい体を 1 層設置している。径方向遮へい体の外接円径は約 6.8m である。

(ii) 核特性

(a) 評価手法

主要な核特性評価手法を以下に示す。

- ・ 炉定数 : 統合炉定数 ADJ2000R [7]
- ・ 燃焼計算 : 2次元 RZ 体系拡散燃焼計算
- ・ 出力分布計算 : 3次元三角メッシュ拡散計算
- ・ 反応度係数計算 : ドップラ係数 1次近似摂動計算
ボイド反応度 厳密摂動計算
- ・ 制御棒価値計算 : 3次元三角メッシュ拡散計算

(b) 評価結果

表 2.3-4 に、大型 MOX 燃料高内部転換型導入期炉心の主要な核特性を示し、表 2.3-5 には重金属の物量収支を示す。本炉心の核特性は、炉心に科せられた条件、性能要求を全て満足しており、運転サイクル長さは 26.3 ヶ月であり、性能要求の 18 ヶ月を大幅に超えて達成している。炉心取出平均燃焼度は 147GWd/t、ブランケット燃料を含めた全炉心取出平均燃焼度は 90GWd/t であり性能要求である 60GWd/t より約 50%高い値を示している。

増殖比は FBR 導入期炉心の目標値である 1.1 を達成している。平衡サイクル末期におけるナトリウムボイド反応度は 5.3 \$、ドップラ係数 (Tdk/dT) は -5.7×10^{-3} であり、ナトリウムボイド反応度は制限条件の 6 \$程度以下を十分に下回っている。

表 2.3-6 に、制御反応度収支の評価結果を示す。制御棒の仕様としては、主炉停止系、後備炉停止系ともに ¹⁰B 濃縮度が 80 wt%、吸収材 (B₄C) の体積比が 31%である。原子炉停止系の機能条件としては、主炉停止系がワンロッドスタックで定格運転状態から低温停止が可能、後備炉停止系がワンロッドスタックで定格運転状態から高温停止、全数挿入時には低温停止が可能としている。主炉停止系の制御反応度収支としては、必要制御反応度 (炉停止余裕 1 \$を含む) が 5.1% $\Delta k/kk'$ に対して、制御棒価値が 6.8% $\Delta k/kk'$ であり 1.7% $\Delta k/kk'$ の反応度停止余裕を有して成立している。

後備炉停止系の必要制御反応度 (事故時投入反応度 0.2% $\Delta k/kk'$ を考慮) は、ワンロッドスタック時で 1.0% $\Delta k/kk'$ 、全数挿入時で 1.2% $\Delta k/kk'$ である。これ

に対して制御棒価値はワンロードスタック時が $2.0\% \Delta k/kk'$ 、全数挿入時が $2.3\% \Delta k/kk'$ であり、ワンロードスタック時が $1.0\% \Delta k/kk'$ 、全数挿入時が $1.1\% \Delta k/kk'$ の反応度停止余裕を有して成立している。

上記のとおり本炉心は、プラント側との取合条件および安全の制限条件を満足しつつ、FS における炉心性能の設計目標を達成している。

(iii) TRU 組成変動の影響

FBR 導入期には、軽水炉の使用済燃料から回収した TRU が燃料として用いられることが考えられる。この場合、軽水炉の使用済燃料から回収した TRU は設計標準としている高速炉多重リサイクル TRU に比較して MA 混入率が高いことから核特性に影響が及ぶことになる。このことから、FBR 導入シナリオの検討結果を基に設定した軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成のモデルケースを用いた核特性への影響検討を行った。

(a) TRU 組成

TRU 組成変動の影響評価に用いた軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成モデルケースは、FBR 導入シナリオの代表的な時期における各種炉型毎の使用済燃料の再処理量を基に以下のとおり混合した組成である。

a. 組成①

30 年貯蔵した LWR 使用済ウラン燃料 (45~49GWd/t) から回収した TRU と 20 年貯蔵した ALWR 使用済ウラン燃料 (60GWd/t) から回収した TRU を 9 : 1 で混合

b. 組成②

70 年貯蔵した LWR 使用済ウラン燃料 (45~49GWd/t) から回収した TRU と 40 年貯蔵した ALWR 使用済ウラン燃料 (60GWd/t) から回収した TRU を 3 : 7 (再処理量比例) で混合

c. 組成③

40 年貯蔵したプルサーマル使用済燃料 (45~49GWd/t) から回収した TRU と FBR 使用済燃料から回収した TRU を 5 : 5 で混合

c. 組成④

110 年貯蔵したプルサーマル使用済燃料 (45~49GWd/t) から回収した TRU と 90 年貯蔵した LWR 使用済ウラン燃料 (45~49GWd/t) から回収した TRU と 40 年貯蔵した ALWR 使用済ウラン燃料 (60GWd/t) から回収した TRU を 0.5 : 1.9 : 7.6 で混合 [プルサーマル : ウラン = 0.5 : 9.5, LWR : ALWR = 2 : 8]

表 2.3-7 に軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成モデルケースの TRU 組成を示し、図 2.3-3 および図 2.3-4 には Pu 組成および MA 組成を示す。表 2.3-7 に示すとおり、軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成モデルケースは MA 混入率が 12.5~20.9wt% と高く、設計標準としている高速炉多重リサイクル TRU 組成 (4.5wt%) の 2 倍以上となっている。また、fissile 核種の含有率は高速炉多重リ

サイクル TRU 組成に比較して 3~12wt%低い値となっている。

なお、軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成モデルケースにおいて組成②と組成④が類似していることから、本検討は組成②を除く 3 ケースを対象として行った。

(b) 評価結果

表 2.3-8 に、軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成のモデルケースを用いた場合の核特性を設計標準 TRU 組成（高速炉多重リサイクル TRU）の結果と併せて示す。表 2.3-8 において、軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成のモデルケースを用いた場合、燃焼反応度は設計標準 TRU 組成を用いた場合に比較して減少し、増殖比は増加している。ここで、軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成を用いた場合の燃焼反応度および増殖比への影響は共に設計標準 TRU 組成に比較して MA 混入率が高いことに起因し、fertale 量が多いことにより燃焼反応度が減少、捕獲反応断面積の大きな ^{237}Np が多いことにより増殖比が増加したものと考えられる。

ナトリウムボイド反応度は設計標準 TRU 組成を用いた場合に比較して増加しているが、何れも設計条件である 6\$程度以下を満足している。ここで、軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成を用いた場合のナトリウムボイド反応度の増加は MA による低エネルギー側 (keV 領域) での捕獲反応の減少と高エネルギー側 (MeV 領域) での核分裂反応の増加が主な要因と考えられる。また、ドップラ係数は設計標準 TRU 組成を用いた場合に比較して絶対値が減少している。

以上、軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成のモデルケースを用いた場合、燃焼反応度および増殖比に対する影響は炉心設計にとって有益なものである。一方、ナトリウムボイド反応度およびドップラ係数に対する影響は不利益なものではあるが、その程度は小さく設計成立の見通しである。

(iv) 熱流力特性および燃料健全性

(a) 評価手法・条件

熱流力特性および燃料健全性評価の主要な手法および条件はを以下に示す。

- ・ 1 次系流量..... 18,200 kg/s
- ・ 被覆管ホットスポットファクタ..... 表 2.3-9
(実証炉設計例参照)
- ・ 圧力損失評価式..... Cheng-Todreas 式^[8]
- ・ 材料強度式(クリープ強度、内面・外面腐食)

クリープ強度：ODS 鋼クリープ破断強度式(FS フェース II 設計評価用暫定式)

$$\begin{aligned} \text{LMP} &= (T + 273.15) (21.94 + \log_{10} (3 t_R))/1000 \\ &= 45.93 - 9.943 \log_{10}(S_R) \end{aligned}$$

T : 温度 (°C)

t_R : 破断時間 (hr)

S_R : 設計クリープ破断応力強さ (MPa)

(S_t ベースで適用、 $S_t = 0.8 \times S_R$)

内面腐食：ODS 鋼暫定評価式

外面腐食：ODS 鋼暫定評価式^[9]

・ CDF 評価手法…………… 統計処理適用

(b) 評価結果

図 2.3-5 に、前記(ii)の核特性評価で求めた出力分布を基に設定した炉心の流量領域区分を示す。炉心の流量領域は、内側炉心 4 領域、外側炉心 4 領域、径方向ブランケット 2 領域の合計 10 領域である。表 2.3-10 には各流量領域への流量配分と熱流力特性を示す。炉心および径方向ブランケット燃料に配分する流量は 16767.6kg/s であり、一次系流量の 92.1%である。被覆管最高温度は内側炉心が 700℃、外側炉心が 699℃であり制限条件である 700℃以下を満足している。バンドル部圧損は最大で 0.22MPa であり、取合条件である 0.2MPa 程度以下を満足している。

上記のとおり本炉心の熱流力設計は成立している。

次に、核および熱流力特性評価結果を基に行った燃料健全性 (CDF) の評価結果 (通常運転時) を示す。表 2.3-11 に CDF 評価対象燃料ピンの出力履歴および燃焼度を示し、表 2.3-12 および図 2.3-6 には被覆管最高温度の履歴を示す。表 2.3-13 に CDF 評価結果を示す。表 2.3-13 において、CDF は内側炉心の最大が 0.37、外側炉心の最大が 0.07 であり、制限条件の 0.5 以下を満足している。

(3) FBR 平衡期炉心の検討結果

(i) 炉心・燃料仕様

上記(2)項の FBR 導入期炉心の炉心・燃料仕様を基に、FBR 平衡期炉心の仕様を設定した。表 2.3-14 に、FBR 平衡期炉心の主要仕様および特性を示し、表 2.3-15 には、炉心・燃料仕様を示す。炉心・燃料仕様は、FBR 導入期炉心の上部軸方向ブランケット厚さを 20cm から 15cm に変更したのみである。図 2.3-7 に炉心配置を示す。炉心燃料集合体の配置および構成は FBR 導入期炉心と同一であり、径方向ブランケット燃料集合体 (96 体) を SUS 遮へい体に変更したのみである。

(ii) 核特性

(a) 評価手法

核特性評価手法は上記(2)項と同様である。

(b) 評価結果

表 2.3-16 に、大型 MOX 燃料高内部転換型平衡期炉心の主要な核特性を示し、表 2.3-17 には重金属の物量収支を示す。本炉心の核特性は、炉心に科せられた条件、性能要求を全て満足しており、運転サイクル長さは 26.3 ヶ月であり、性能要求の 18 ヶ月を大幅に超えて達成している。ブランケット燃料を含めた全炉心取出平均燃焼度は 115GWd/t であり、性能要求である 60GWd/t より約 90%高い値を示している。

増殖比は FBR 平衡期炉心の目標値である 1.03 を達成している。平衡サイクル末期におけるナトリウムボイド反応度は 5.3 \$、ドップラ係数 (Tdk/dT) は -5.8×10^{-3} であり、ナトリウムボイド反応度は制限条件の 6 \$ 程度以下を十分に下回っている。

上記のとおり本炉心は、プラント側との取合条件および安全の制限条件を満足しつつ、FS における炉心性能の設計目標を達成している。

2.3.2 中型炉の設計検討

前記 2.2.3 項において、中型 MOX 燃料炉心の代表概念として高内部転換型炉心を選定した。本項では代表炉心概念として選定した中型 MOX 燃料高内部転換型炉心について、FBR 平衡期炉心と FBR 導入期炉心を構築し、核・熱流設計および燃料健全性に係る検討を行い、炉心・燃料仕様、炉心特性および性能を明らかにした。

(1) 検討条件

表 2.3-18 に、中型炉代表炉心の設計検討における主要な条件であるプラント仕様、燃料の基本的な仕様、燃料健全性および安全設計からの制限条件、他設計との取合条件を示す。

表 2.3-18 において、中型炉のプラント仕様に関する設計条件としては、炉心熱出力が 1,785MWt、原子炉出口および入口温度が 550°C および 395°C、一次冷却材流量が 9,083kg/s である。

炉心・燃料の基本仕様としては、燃料形態が MOX、炉心型式が均質 2 領域炉心、再臨界回避方策が改良内部ダクト型燃料集合体であり、炉心燃料の TRU は高速炉多重リサイクル組成 (設計標準) である。新燃料の FP 混入率 0.2Vol% は、2004 年度に MOX 燃料再処理システムの有望概念として選定された先進湿式法における製品への FP 移行率を基に設定したものである。

炉心材料は被覆管が ODS 鋼、ラップ管が PNC-FMS 鋼である。

制限条件としては、ULOF 起因過程における即発臨界回避のための安全要求であるナトリウムボイド反応度 6 \$ 程度以下、炉心高さ 100cm 程度以下、炉心平均比出力 40kW/kg-MOX 程度以上と燃料健全性確保のための条件である最大線出力 430W/cm 以下、高速中性子照射量 5×10^{23} n/cm² 以下、被覆管最高温度 (肉厚中心) 700°C 以下、通常運転時の CDF 0.5 以下がある。

燃料製造およびプラント設計との取合条件としては、燃料のスミア密度が炉心 82%、ブランケット 90%、遮へい体外接円径が 5.5m 程度以下、燃料バンドル部の圧損が 0.2MPa 以下があり、制御棒については切込み付き UIS に対応した配置とすることとしている。

炉心性能の目標としては、増殖比が FBR 導入期炉心に対して 1.1 程度、FBR 平衡期炉心に対して 1.03 程度、取出平均燃焼度は、炉心部が 150GWd/t 程度、全炉心 (ブランケット燃料を含む) が 60GWd/t 程度以上、運転サイクル長さは

18ヶ月以上である。

(2) FBR 平衡期炉心の検討結果

(i) 炉心・燃料仕様

表 2.3-19 に、中型 MOX 燃料高内部転換型平衡期炉心の主要仕様および特性を示し、表 2.3-20 には、炉心・燃料仕様を示す。炉心高さは 100cm、軸方向ブランケット厚さは上部が 20cm、下部が 25cm、炉心の等価直径は 383cm である。炉心燃料集合体は改良内部ダクト型であり、燃料ピンの本数は 255 本、ピン径が 10.4 mm である。

図 2.3-8 に炉心配置を示す。炉心燃料集合体は、内側炉心が 157 体、外側炉心が 129 体の合計 286 体であり、径方向ブランケット燃料集合体は設置していない。制御棒は主炉停止系が 21 本、後備炉停止系が 6 本であり、配置は切込付コラム型 UIS に対応するとともに SASS の設置を考慮したものとしている。径方向遮へい体は 3 層であり、炉心の外側に SUS 遮へい体を 2 層、最外周に B₄C 遮へい体を 1 層設置している。径方向遮へい体の外接円径は約 5.2m である。

(ii) 核特性

(a) 評価手法

主要な核特性評価手法を以下に示す。

- ・炉定数 : 統合炉定数 ADJ2000R [7]
- ・燃焼計算 : 2次元 RZ 体系拡散燃焼計算
- ・出力分布計算 : 3次元三角メッシュ拡散計算
- ・反応度係数計算 : ドップラ係数 1次近似摂動計算
ボイド反応度 厳密摂動計算
- ・制御棒価値計算 : 3次元三角メッシュ拡散計算

(b) 評価結果

表 2.3-21 に、中型 MOX 高内部転換型平衡期炉心の主要な核特性を示し、表 2.3-22 には重金属の物量収支を示す。本炉心の核特性は、炉心に科せられた条件、性能要求を全て満足しており、運転サイクル長さは 26.1ヶ月であり、性能要求の 18ヶ月を大幅に超えて達成している。炉心取出平均燃焼度は 146GWd/t、ブランケット燃料を含めた全炉心取出平均燃焼度は 104GWd/t であり性能要求である 60GWd/t より約 70%高い値を示している。

増殖比は FBR 平衡期炉心の目標値である 1.03 を達成している。平衡サイクル末期におけるナトリウムボイド反応度は 5.0 \$、ドップラ係数 (Tdk/dT) は -5.5×10^{-3} であり、ナトリウムボイド反応度は制限条件の 6 \$程度以下を十分に下回っている。

表 2.3-23 に、制御反応度収支の評価結果を示す。制御棒の仕様としては、主炉停止系、後備炉停止系ともに ¹⁰B 濃縮度が 80 wt%、吸収材 (B₄C) の体積比が 31% である。原子炉停止系の機能条件としては、主炉停止系がワンロードスタックで定格運転状態から低温停止が可能、後備炉停止系がワンロードスタックで定

格運転状態から高温停止、全数挿入時には低温停止が可能としている。主炉停止系の制御反応度収支としては、必要制御反応度（炉停止余裕 1 \$を含む）が 5.0% $\Delta k/kk'$ に対して、制御棒価値が 5.4% $\Delta k/kk'$ であり 0.4% $\Delta k/kk'$ の反応度停止余裕を有して成立している。

後備炉停止系の必要制御反応度（事故時投入反応度 0.3% $\Delta k/kk'$ を考慮）は、ワンロッドスタック時で 1.1% $\Delta k/kk'$ 、全数挿入時で 1.3% $\Delta k/kk'$ である。これに対して制御棒価値はワンロッドスタック時が 1.5% $\Delta k/kk'$ 、全数挿入時が 1.9% $\Delta k/kk'$ であり、ワンロッドスタック時が 0.4% $\Delta k/kk'$ 、全数挿入時が 0.6% $\Delta k/kk'$ の反応度停止余裕を有して成立している。

上記のとおり本炉心は、プラント側との取合条件および安全の制限条件を満足しつつ、FS における炉心性能の設計目標を達成している。

(iii) 熱流力特性および燃料健全性

(a) 評価手法・条件

熱流力特性および燃料健全性評価の主要な手法および条件はを以下に示す。

- ・ 1 次系流量…………… 9,083 kg/s
- ・ 被覆管ホットスポットファクタ…………… 表 2.3-9
(実証炉設計例参照)
- ・ 圧力損失評価式…………… Cheng-Todreas 式^[8]
- ・ 材料強度式(クリープ強度、内面・外面腐食) …… 前記 2.3.1 項参照
- ・ CDF 評価手法…………… 統計処理適用

(b) 評価結果

図 2.3-9 に、燃料集合体の寿命中における最大燃料ピン出力を示す。図 2.3-9 の最大燃料ピン出力に基づき、内側炉心 3 領域、外側炉心 4 領域の流量領域区分を設定した。図 2.3-10 に設定した炉心の流量領域区分を示し、表 2.3-24 には各流量領域への流量配分と熱流力特性を示す。炉心に配分する流量は 8718.6kg/s であり、一次系流量の 96% である。被覆管最高温度は内側炉心が 698℃、外側炉心が 700℃ であり制限条件である 700℃ 以下を満足している。バンドル部圧損は最大で 0.22MPa であり、取合条件である 0.2MPa 程度以下を満足している。

上記のとおり本炉心の熱流力設計は成立している。

次に、核および熱流力特性評価結果を基に行った燃料健全性（CDF）の評価結果を示す。CDF 評価（通常運転時）は、最高燃焼度ピンと各流量領域の被覆管最高温度ピンとした。表 2.3-25 に CDF 評価対象燃料ピンの出力履歴および燃焼度を示し、表 2.3-26 および図 2.3-11 には被覆管最高温度の履歴を示す。表 2.3-27 に CDF 評価結果を示す。表 2.3-27 において、CDF は内側炉心の最大が 0.45、外側炉心の最大が 0.21 であり、制限条件の 0.5 以下を満足している。

(3) FBR 導入期炉心の検討結果

(i) 炉心・燃料仕様

上記(2)項の FBR 平衡期炉心の炉心・燃料仕様を基に、FBR 導入期炉心の仕様を設定した。表 2.3-28 に、FBR 導入期炉心の主要仕様および特性を示し、表 2.3-29 には、炉心・燃料仕様を示す。炉心・燃料仕様は、FBR 平衡期炉心の下部軸方向ブランケット厚さを 25cm から 20cm に変更したのみである。図 2.3-12 に炉心配置を示す。炉心燃料集合体の配置および構成は FBR 平衡期炉心と同一であり、SUS 遮へい体の内側 1 層を径方向ブランケット燃料集合体 (66 体) に変更したのみである。

(ii) 核特性

(a) 評価手法

核特性評価手法は上記(2)項と同様である。

(b) 評価結果

表 2.3-30 に、中型 MOX 高内部転換型導入期炉心の主要な核特性を示し、表 2.3-31 には重金属の物量収支を示す。本炉心の核特性は、炉心に科せられた条件、性能要求を全て満足しており、運転サイクル長さは 27.4 ヶ月であり、性能要求の 18 ヶ月を大幅に超えて達成している。ブランケット燃料を含めた全炉心取出平均燃焼度は 86GWd/t であり、性能要求である 60GWd/t より約 40%高い値を示している。

増殖比は FBR 導入期炉心の目標値である 1.1 を達成している。平衡サイクル末期におけるナトリウムボイド反応度は 5.1 \$、ドップラ係数 (Tdk/dT) は -5.3×10^{-3} であり、ナトリウムボイド反応度は制限条件の 6 \$程度以下を十分に下回っている。

上記のとおり本炉心は、プラント側との取合条件および安全の制限条件を満足しつつ、FS における炉心性能の設計目標を達成している。

(iii) TRU 組成変動の影響

前記 2.3.1(2)項に示した大型炉を対象とした検討と同様に、FBR 導入シナリオの検討結果を基に設定した軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成のモデルケースを用いた核特性への影響検討を行った。

(a) TRU 組成

TRU 組成変動の影響評価に用いた軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成のモデルケースは、前記 2.3.1(2)の大型炉を対象とした検討に用いたものと同一である。

(b) 評価結果

表 2.3-32 に、軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成のモデルケースを用いた場合の核特性を設計標準 TRU 組成 (高速炉多重リサイクル TRU) の結果と併せて示す。表 2.3-32 において、軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成のモデルケースを用いた場合、燃焼反応度は設計標準 TRU 組成を用いた場合に比較して減少し、増殖比は増加している。ここで、軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成を用いた場合の燃焼反応度および増殖比への影響は共に設計標準 TRU 組成に比較して MA 混入率が高いことに起因し、fertile 量が多いことにより燃焼反応度が減少、捕獲反応断面

積の大きな ^{237}Np が多いことにより増殖比が増加したものと考える。

ナトリウムボイド反応度は設計標準 TRU 組成を用いた場合に比較して増加しているが、何れも設計条件である 6\$ 程度以下を満足している。ここで、軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成を用いた場合のナトリウムボイド反応度の増加は MA による低エネルギー側 (keV 領域) での捕獲反応の減少と高エネルギー側 (MeV 領域) での核分裂反応の増加が主な要因と考えられる。また、ドップラ係数は設計標準 TRU 組成を用いた場合に比較して絶対値が減少している。

以上、軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成のモデルケースを用いた場合、燃焼反応度および増殖比に対する影響は炉心設計にとって有益なものである。一方、ナトリウムボイド反応度およびドップラ係数に対する影響は不利益なものではあるが、その程度は小さく設計成立の見通しである。

2.3.3 代替被覆管材料採用炉心の検討

高温強度、耐照射性に優れる ODS 鋼は、現在開発段階にある材料である。開発リスクを低減するために、ODS 鋼の代替材として PNC-FMS 鋼を用いた炉心の検討を行った。PNC-FMS 鋼のクリープ強度と ODS 鋼のそれとの比較を図 2.3-13 に示す(環境効果は考慮せず)。PNC-FMS 鋼は、ODS 鋼と比較して、650°C 以上で破断時間、設計クリープ破断応力強さの低下が大きいことがわかる。

燃料被覆管材に ODS 鋼、ラップ管材に PNC-FMS 鋼を用いた炉心(以下、ODS 鋼炉心と称す)と同一の燃料要素仕様で、代替燃料材として燃料被覆管材・ラップ管材共に PNC-FMS 鋼を用いた炉心について、CDF の設計制限値を満足する原子炉入口・出口温度を評価するとともに、プラントへの影響を評価する。

(1) 評価手法・条件

燃料健全性評価の主要な手法および条件を以下に記す。

材料評価式は、クリープ強度に PNC-FMS 鋼暫定評価式^{[6] [10]}を適用し、内面腐食、外面腐食は、ODS 鋼暫定評価式^[9]を適用する。

対象炉心は、MOX 燃料高内部転換型導入期大型炉心(改良内部ダクト型概念)とする。燃料集合体仕様を表 2.3-33 に示す(被覆管材以外は ODS 鋼炉心で設定された仕様と同じである)。燃焼条件として、出力分布、出力履歴、炉心流量配分領域区分、周辺流れ効果係数、被覆管工学的安全係数は、ODS 鋼炉心の CDF 評価で用いたものを用いる。

(2) 評価結果

流量領域ごとに、燃焼度、発熱量および寿命末期で被覆管温度が最大になる燃料要素について検討した。

各流量領域の炉心流量配分値と熱流力特性を表 2.3-34 に、CDF 評価対象燃料ピンの被覆管最高温度履歴を表 2.3-35 に、CDF 評価のまとめを表 2.3-36 に示す。制限目安値に対し CDF 値が厳しいのは、第 1、第 3 及び第 4 流量領域である。第 3 及び第 4 流量領域は、燃料要素バンドル部圧力損失の観点から集合体流量に余

裕があるため、集合体流量を若干調整した。何れの流量領域の代表ピンも制限条件である 0.5 を下回っており、燃料健全性は成立していることが認められた。このとき、原子炉入口温度は 332℃、原子炉出口温度は 487℃と評価された。

原子炉入口/出口温度が、395/550℃から 332/487℃に低下した場合、平成 15 年度の大型炉-1500MOX レファレンスプラント（原子炉出口温度 550℃）及び平成 15 年度の金属燃料プラント（原子炉出口温度 505℃）のデータから概略評価した結果、タービン効率は 42%から 39%に低下し、NSSS 物量は 10%強増加するものと推定される。

また、原子炉入口・出口温度の昇温方策として、被覆管肉厚の厚肉化による被覆管強度向上、運転サイクル長 18 か月以上とできる範囲で燃料有効長を短尺化して下部ガスプレナム長尺化することによるガス内圧低減が有効であると考えられる。

表 2.3-1 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の設計検討条件

項 目		設計検討条件		
プラント仕様		電気出力	1,500MWe	
		炉心熱出力	3,570MWt	
		原子炉出口/入口温度	550 / 395 °C	
		1次系流量	18,200kg/s	
炉心・燃料基本仕様		燃料形態	MOX	
		炉心型式	均質2領域	
		再臨界回避方策	改良内部ダウ型燃料集合体	
		燃料	組成 *1	高速炉多重リサイクルTRU
			FP混入率 *2	0.2Vol%
		炉心材料 *3	被覆管	ODS鋼
ラッパ管	PNC-FMS鋼			
制限条件	安全要求	トリウムホド反応度	6\$ 以下	
		炉心高さ	100cm 以下	
		炉心平均比出力	40kW/kg-MOX程度 以上	
	燃料健全性	最大線出力	430W/cm 以下	
		高速中性子照射量 *4	5×10^{23} n/cm ² 以下	
		被覆管最高温度[肉厚中心]	700°C 以下	
		CDF(通常運転時)	0.5 以下	
		燃料スミア密度	炉心 ブランケット	82%TD 90%TD
燃料ハンドリング部圧損	0.2MPa 以下			
遮へい体外接円径	7m 程度以下			
制御棒、SASS配置	切込み付きUIS対応			
炉心性能目標		増殖比	導入期炉心	1.1 程度
			平衡期炉心	1.03 程度
		取出平均 燃焼度	炉心部	150GWd/t 程度
			全炉心 *5	60GWd/t 程度以上
		運転サイクル長さ	18ヶ月 以上	

*1 高速炉多重リサイクル組成 (wt%)

$$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/^{243}\text{Am}/^{244}\text{Cm}/^{245}\text{Cm}$$

$$= 1.1/54.1/32.1/ 4.3/ 3.9/ 0.5/ 2.0/ 1.0/ 1.0/ 0.0$$

*2 先進湿式再処理法の移行率を基に設定

*3 炉心材料組成[炉心燃料設計用] (wt%) : Fe/Cr/Ni/Mo/Mn/W = 85.5/11.0/0.4/0.5/0.6/2.0

*4 $E > 0.1\text{MeV}$

*5 ブランケット燃料を含む全炉心取出平均燃焼度

表 2.3-2 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の主要目 (導入期炉心)

項目		仕様
基本仕様・炉心構成	炉心熱出力	3570 MWt
	電気出力	1500 Mwe
	炉心型式	改良内部ダクト型均質 2 領域炉心
	運転サイクル長さ	26.3 ヶ月 (800 日)
	燃料交換パッチ数 (炉心/径方向ブランチ)	4/4 パッチ
	炉心高さ	100 cm
	軸方向ブランチ厚さ (上部/下部)	20/20 cm
	炉心等価直径	538 cm
	遮へい体外接円径	6.77 m
	炉心燃料集合体数 (内側/外側/合計)	288 / 274 / 562 体
	径方向ブランチ体数	96 体 (1 層)
	制御棒本数 (主炉停止系/後備炉停止系)	40 / 17 体
	径方向遮へい体数 (SUS 遮へい体) (ZrH 遮へい体)	102 体 (1 層) 108 体 (1 層)
炉心燃料仕様	燃料形態	MOX (ペレット型)
	炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼
	燃料ピン外径	10.4 mm
	被覆管肉厚	0.71 mm
	燃料スミア密度 (炉心/軸方向ブランチ/径方向ブランチ)	82 / 90 / 90 %TD
	スペーサワイヤ径	1.03 mm
	燃料ピン配列/燃料ピン外径 (P/D)	1.15
	集合体当たり燃料ピン本数	255 本
	内部ダクト外面辺の長さ	46.0 mm
	内部ダクト肉厚	2.0 mm
	ラッパ管外対面間距離	201.6 mm
	ラッパ管肉厚	5.0 mm
	集合体配列ピッチ	206.0 mm
炉心主要特性	Pu 富化度 ^{*1} (内側/外側)	18.3 / 20.9 wt%
	炉心部取出平均燃焼度	147 GWd/t
	全炉心取出平均燃焼度 ^{*2}	90 GWd/t
	燃焼反応度	2.3 %Δk/k'
	最大線出力 (内側/外側)	398 / 396 W/cm
	炉心平均比出力	41 kW/kg-MOX
	炉心平均出力密度	145 W/cm ³
	最大高速中性子束 ^{*3}	1.8×10 ¹⁵ n/cm ² s
	最大高速中性子照射量 ^{*3}	5.0×10 ²³ n/cm ²
	増殖比	1.10
	ドップラ係数 [Tdk/dT] ^{*4} (平衡末期)	-5.7×10 ⁻³
ポイド反応度 ^{*4} (平衡末期)	5.3 \$ ^{*5}	

*1: Pu/HM、*2: ブランチ燃料を含む全体の平均燃焼度、*3: E > 0.1 MeV

*4: 集合体内非均質効果考慮、*5: 実効遅発中性子割合 0.00342 (全親核種考慮)

表 2.3-3 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心・燃料仕様 (導入期炉心)

項目		仕様		
		炉心	軸方向ブランケット	径方向ブランケット
燃料要素	燃料形態	(Pu, U)O ₂ (ペレット型)	UO ₂ (ペレット型)	←
	被覆管材料	ODS 鋼		←
	被覆管外径 (mm)	10.4		11.7
	被覆管内径 (mm)	8.98		10.86
	被覆管肉厚 (mm)	0.71		0.42
	燃料要素全長 (mm)	2690		←
	燃料スタック長 (mm)	1000	200 / 200 (上部/下部)	1400
	ガスプレナム長さ(上/下) (mm)	100 / 1100		←
	ボンド材	He		←
	燃料スミア密度 (%TD)	82	90	90
集合体	集合体全長 (mm)	4570		←
	燃料ピン本数 (本)	255		217
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	11.5		12.8
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.11		1.10
	ラッパ管材料	PNC-FMS 鋼		←
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	201.6		←
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	191.6		←
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0		←
	ラッパ管間ギャップ (mm)	4.4		←
	集合体配列ピッチ (mm)	206.0		←
	スペーサワイヤ径 (mm)	1.03		1.07
	スペーサワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200.0		←
	体積比 (%)	燃料 (実効)	43.9 (36.0)	43.9 (39.6)
構造材		25.8	←	18.5
冷却材		30.3	←	26.7

表 2.3-4 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の主要核特性 (導入期炉心)

項目	設計値
運転サイクル長さ	26.3 ヶ月 (800 日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランクett)	4/4 バッチ
Pu 富化度*1 (内側/外側)	18.3 / 20.9 wt%
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランクett/径方向ブランクett)	147 / 21 / 8 GWd/t
全炉心取出平均燃焼度*2	90 GWd/t
燃焼反応度	2.3 % $\Delta k/kk'$
増殖比 (全体) (炉心/軸方向ブランクett/径方向ブランクett)	1.10 0.84 / 0.19 / 0.07
炉心平均比出力	41 kW/kg-MOX
最大線出力 (内側/外側)	398 / 396 W/cm
炉心平均出力密度	145 W/cm ³
出力分担率 (炉心/軸方向ブランクett/径方向ブランクett)	0.926 / 0.058 / 0.016
最大高速中性子束*3	1.8×10^{15} n/cm ² s
最大高速中性子照射量*3	5.0×10^{23} n/cm ²
初装荷炉心重金属インベントリ (炉心/軸方向ブランクett/径方向ブランクett)	71.8 / 31.6 / 23.5 t
ブランクett/炉心重金属重量比	約 0.77
初装荷 Pu-f インベントリ (出力当たり)	5.7 t/Gwe
原子炉倍增時間	65 年
複合システム倍增時間*4	72 年
ポイド反応度*5 (平衡末期)	5.3 \$*6
ドップラ係数 [Tdk/dT]*5 (平衡末期)	-5.7×10^{-3}

*1 : Pu/HM

*2 : ブランクett燃料を含む全体の平均燃焼度

*3 : $E > 0.1$ MeV

*4 : 燃料炉外滞在期間 5 年、燃交・定検期間 45 日

*5 : 集合体内非均質効果考慮

*6 : 実効遅発中性子割合 0.00342 (全親核種考慮)

表 2.3-5(1/2) 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の物量収支(導入期炉心)

装荷燃料 1 バッチ当たりの燃料重量 [kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランク	径ブランク	ブランク合計	合計
U235	22.3	20.5	42.8	23.7	17.7	41.3	84.2
U236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U238	7407.5	6822.5	14230.0	7870.0	5867.5	13737.5	27967.5
U 合計	7429.8	6843.0	14272.8	7893.7	5885.2	13778.8	28051.7
Pu238	19.4	21.1	40.5	0.0	0.0	0.0	40.5
Pu239	955.3	1037.3	1992.5	0.0	0.0	0.0	1992.5
Pu240	566.8	615.5	1182.3	0.0	0.0	0.0	1182.3
Pu241	75.9	82.4	158.4	0.0	0.0	0.0	158.4
Pu242	68.9	74.8	143.8	0.0	0.0	0.0	143.8
Pu 合計	1686.3	1831.1	3517.4	0.0	0.0	0.0	3517.4
Np237	8.8	9.6	18.4	0.0	0.0	0.0	18.4
Np 合計	8.8	9.6	18.4	0.0	0.0	0.0	18.4
Am241	35.3	38.3	73.7	0.0	0.0	0.0	73.7
Am242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am243	17.7	19.2	36.8	0.0	0.0	0.0	36.8
Am 合計	53.0	57.5	110.5	0.0	0.0	0.0	110.5
Cm242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm244	17.7	19.2	36.8	0.0	0.0	0.0	36.8
Cm245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm 合計	17.7	19.2	36.8	0.0	0.0	0.0	36.8
HM 合計	9195.5	8760.4	17955.9	7893.7	5885.2	13778.8	31734.7
ランパ化 FP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
随伴 FP	11.9	11.3	23.2	0.0	0.0	0.0	23.2
FP 合計	11.9	11.3	23.2	0.0	0.0	0.0	23.2

取出燃料 1 バッチ当たりの燃料重量 [kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランク	径ブランク	ブランク合計	合計
U235	4.7	7.5	12.3	13.0	12.6	25.6	37.9
U236	3.1	2.5	5.6	2.4	1.2	3.6	9.2
U238	5957.5	5922.5	11880.0	7310.0	5647.5	12957.5	24837.5
U 合計	5965.3	5932.5	11897.9	7325.3	5661.3	12986.7	24884.5
Pu238	23.1	25.9	49.0	0.2	0.0	0.3	49.3
Pu239	839.3	872.3	1711.5	381.4	174.8	556.2	2267.7
Pu240	542.8	585.5	1128.3	39.5	9.6	49.0	1177.3
Pu241	85.4	83.5	169.0	2.7	0.4	3.1	172.0
Pu242	67.5	72.6	140.2	0.1	0.0	0.2	140.3
Pu 合計	1558.0	1639.8	3197.9	423.9	184.8	608.8	3806.6
Np237	5.1	6.3	11.4	0.8	0.3	1.1	12.5
Np 合計	5.1	6.3	11.4	0.8	0.3	1.1	12.5
Am241	29.0	40.0	69.1	0.3	0.0	0.3	69.4
Am242m	2.1	2.3	4.4	0.0	0.0	0.0	4.4
Am243	18.9	20.0	39.0	0.0	0.0	0.0	39.0
Am 合計	50.1	62.4	112.4	0.3	0.0	0.3	112.7
Cm242	1.6	1.5	3.0	0.0	0.0	0.0	3.1
Cm243	0.2	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4
Cm244	17.9	17.5	35.4	0.0	0.0	0.0	35.4
Cm245	3.6	3.0	6.6	0.0	0.0	0.0	6.6
Cm 合計	23.3	22.1	45.4	0.0	0.0	0.0	45.4
HM 合計	7601.9	7663.0	15264.9	7750.4	5846.5	13596.9	28861.8
ランパ化 FP	1593.7	1097.3	2691.0	143.3	38.7	182.0	2873.0
随伴 FP	11.9	11.3	23.2	0.0	0.0	0.0	23.2
FP 合計	1605.6	1108.6	2714.2	143.3	38.7	182.0	2896.2

表 2.3-5(2/2) 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の物量収支(導入期炉心)

平衡サイクル初期炉心の燃料重量 [kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランク	径ブランク	ブランク合計	合計
U235	53.9	58.6	112.5	76.4	62.7	139.1	251.5
U236	7.0	4.8	11.8	4.2	1.9	6.2	17.9
U238	27340.0	25910.0	53250.0	30620.0	23140.0	53760.0	107010.0
U 合計	27400.9	25973.4	53374.2	30700.6	23204.6	53905.3	107279.5
Pu238	85.0	91.7	176.8	0.2	0.0	0.2	177.0
Pu239	3674.0	3886.0	7560.0	662.6	276.4	939.0	8499.0
Pu240	2240.0	2426.0	4666.0	39.6	8.7	48.2	4714.2
Pu241	328.6	334.2	662.8	1.9	0.2	2.1	664.9
Pu242	272.8	295.7	568.5	0.1	0.0	0.1	568.6
Pu 合計	6600.4	7033.6	13634.1	704.3	285.3	989.6	14623.7
Np237	28.2	32.5	60.7	1.2	0.4	1.7	62.4
Np 合計	28.2	32.5	60.7	1.2	0.4	1.7	62.4
Am241	127.3	156.3	283.6	0.1	0.0	0.1	283.7
Am242m	4.9	4.5	9.4	0.0	0.0	0.0	9.4
Am243	73.0	78.2	151.1	0.0	0.0	0.0	151.1
Am 合計	205.2	238.9	444.1	0.1	0.0	0.2	444.3
Cm242	5.2	4.2	9.4	0.0	0.0	0.0	9.5
Cm243	0.5	0.3	0.8	0.0	0.0	0.0	0.8
Cm244	70.8	73.5	144.3	0.0	0.0	0.0	144.3
Cm245	7.5	5.7	13.2	0.0	0.0	0.0	13.2
Cm 合計	84.0	83.7	167.7	0.0	0.0	0.0	167.7
HM 合計	34318.7	33362.1	67680.9	31406.3	23490.4	54896.7	122577.6
ラプ化 FP	2463.4	1679.3	4142.7	168.4	50.2	218.6	4361.3
随伴 FP	47.6	45.2	92.8	0.0	0.0	0.0	92.8
FP 合計	2511.0	1724.6	4235.5	168.4	50.2	218.6	4454.1

平衡サイクル末期炉心の燃料重量 [kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランク	径ブランク	ブランク合計	合計
U235	36.3	45.6	81.9	65.7	57.7	123.4	205.3
U236	10.1	7.3	17.4	6.6	3.1	9.7	27.1
U238	25890.0	25010.0	50900.0	30060.0	22920.0	52980.0	103880.0
U 合計	25936.4	25062.8	50999.3	30132.3	22980.8	53113.1	104112.4
Pu238	88.7	96.6	185.3	0.4	0.1	0.5	185.8
Pu239	3558.0	3721.0	7279.0	1044.0	451.2	1495.2	8774.2
Pu240	2216.0	2396.0	4612.0	79.1	18.2	97.3	4709.3
Pu241	338.1	335.3	673.4	4.6	0.6	5.2	678.6
Pu242	271.4	293.5	564.9	0.2	0.0	0.2	565.1
Pu 合計	6472.2	6842.4	13314.6	1128.3	470.1	1598.4	14913.0
Np237	24.5	29.2	53.7	2.0	0.8	2.8	56.4
Np 合計	24.5	29.2	53.7	2.0	0.8	2.8	56.4
Am241	121.0	158.0	279.0	0.4	0.1	0.5	279.5
Am242m	7.0	6.8	13.8	0.0	0.0	0.0	13.8
Am243	74.3	79.0	153.3	0.0	0.0	0.0	153.3
Am 合計	202.3	243.8	446.1	0.4	0.1	0.5	446.5
Cm242	6.8	5.7	12.5	0.0	0.0	0.0	12.5
Cm243	0.7	0.4	1.1	0.0	0.0	0.0	1.1
Cm244	71.1	71.8	142.9	0.0	0.0	0.0	142.9
Cm245	11.1	8.7	19.8	0.0	0.0	0.0	19.8
Cm 合計	89.7	86.6	176.3	0.0	0.0	0.0	176.3
HM 合計	32725.1	32264.8	64989.9	31263.0	23451.7	54714.8	119704.6
ラプ化 FP	4057.1	2776.6	6833.7	311.7	88.9	400.6	7234.3
随伴 FP	47.6	45.2	92.8	0.0	0.0	0.0	92.8
FP 合計	4104.6	2821.9	6926.5	311.7	88.9	400.6	7327.1

表 2.3-6 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の制御反応度収支(導入期炉心)

[単位: % $\Delta k/kk'$]

項目	主炉停止系 (ワロッド・スタック)	後備炉停止系	
		ワロッド・スタック	全数挿入
I. 計画余剰反応度	4.2	0.6	0.8
(1) 出力補償	0.8	0.6	0.8
(2) 燃焼補償	3.2 ^{*1}	—	—
(3) 運転余裕	0.2	—	—
II. 余剰反応度不確かさ (2 σ)	0.5	0.2	0.2
(1) 臨界予測誤差	0.0	—	—
(2) 出力補償予測誤差	—	0.12	0.16
(3) 燃料製作予測誤差	0.39	—	—
(4) 燃料交換余裕	0.2	—	—
III. 事故時投入反応度	—	0.2	0.2
IV. 必要制御反応度 (I+II+III)	5.1 ^{*2}	1.0	1.2
V. 制御棒価値	6.8 ^{*3}	2.0 ^{*3}	2.3 ^{*3}
VI. 反応度停止余裕 (V-IV)	1.7	1.0	1.1

*1: ノミナル計算値に燃料組成変動分を考慮した値

*2: 炉停止余裕 1\$ (0.4% $\Delta k/kk'$) を考慮した値

*3: ノミナル計算値に対し、各種補正 (メッシュ効果および縮約効果、ランピング効果、輸送効果等) 23.9%、設計予測誤差 9% を考慮した値

表 2.3-7 軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成モデルケース

[単位: wt%]

核種	高速炉多重リサイクルTRU [設計標準]	軽水炉使用済燃料回収TRU組成モデルケース			
		組成①* ¹	組成②* ²	組成③* ³	組成④* ⁵
Pu-238	1.1	1.9	2.1	1.8	2.1
Pu-239	54.1	47.2	44.5	41.6	43.4
Pu-240	32.1	24.0	23.8	32.4	24.3
Pu-241	4.3	2.4	1.2	3.2	1.2
Pu-242	3.9	7.0	7.7	8.5	8.1
Np-237	0.5	6.4	7.5	0.9	7.4
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-241	2.0	9.4	11.3	8.4	11.4
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-243	1.0	1.5	1.8	2.5	2.0
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-244	1.0	0.2	0.1	0.7	0.1
Cm-245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pu合計	95.5	82.5	79.3	87.5	79.1
MA合計	4.5	17.5	20.7	12.5	20.9
fissile合計	58.4	49.6	45.7	44.8	44.6
fertile合計	41.6	50.4	54.3	55.2	55.4

*¹ 組成①: 30年貯蔵したLWR使用済ウラン燃料(45~49GWd/t)から回収したTRUと20年貯蔵したALWR使用済ウラン燃料(60GWd/t)から回収したTRUを9:1(再処理量比例)で混合

*² 組成②: 70年貯蔵したLWR使用済ウラン燃料(45~49GWd/t)から回収したTRUと40年貯蔵したALWR使用済ウラン燃料(60GWd/t)から回収したTRUを3:7(再処理量比例)で混合

*³ 組成③: 40年貯蔵したPuサーマル使用済燃料(45~49GWd/t)から回収したTRUとFBR使用済燃料から回収したTRUを5:5(再処理量比例)で混合

*⁵ 組成④: 110年貯蔵したPuサーマル使用済燃料(45~49GWd/t)から回収したTRUと90年貯蔵したLWR使用済ウラン燃料(45~49GWd/t)から回収したTRUと40年貯蔵したALWR使用済ウラン燃料(60GWd/t)から回収したTRUを0.5:1.9:7.6(再処理量比例)で混合
[Puサーマル:ウラン=0.5:9.5, LWR:ALWR=2:8]

表 2.3-8 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心における TRU 組成変動の核特性への影響 (導入期炉心)

項目	設計標準 [高速炉多重サイクル TRU]	LWR 使用済燃料からの回収 TRU 組成モデルケース		
		組成① 30年貯蔵したLWR使用済ウラン燃料と20年貯蔵したALWR使用済ウラン燃料から回収したTRUを9:1で混合	組成③ 40年貯蔵したプルサーマル使用済燃料とFBR使用済燃料から回収したTRUを5:5で混合	組成④ 110年貯蔵したプルサーマル使用済燃料と90年貯蔵したLWR使用済ウラン燃料と40年貯蔵したALWR使用済ウラン燃料から回収したTRUを0.5:1.9:7.6で混合
取出平均燃焼度	147 GWd/t	←	←	←
全炉心取出平均燃焼度 ^{*1}	90 GWd/t	←	←	←
Pu 富化度 ^{*2} (内側炉心 / 外側炉心)	18.3 / 20.9 wt%	17.8 / 20.9 wt%	19.4 / 23.1 wt%	18.0 / 21.6 wt%
MA 混入率 ^{*2} (平均)	1.0 wt%	4.1 wt%	3.1 wt%	5.3 wt%
Fertile 含有率 ^{*2} (平均)	41.6 wt%	50.4 wt%	55.2 wt%	55.4 wt%
燃焼反応度	2.3 %Δk/kk'	1.1 %Δk/kk'	1.0 %Δk/kk'	0.4 %Δk/kk'
増殖比 (全体)	1.10	1.12	1.16	1.15
(炉心/軸ブランクット / 径ブランクット)	0.84 / 0.19 / 0.07	0.84 / 0.20 / 0.08	0.88 / 0.20 / 0.08	0.86 / 0.20 / 0.08
最大線出力 (内側炉心 / 外側炉心)	398 / 396 W/cm	402 / 402 W/cm	402 / 403 W/cm	406 / 403 W/cm
最大高速中性子フルエンス ^{*3}	5.0 × 10 ²³ n/cm ²	4.9 × 10 ²³ n/cm ²	4.8 × 10 ²³ n/cm ²	4.9 × 10 ²³ n/cm ²
初装荷 Pu-f インベントリ (出力当たり)	5.7 t/GWe	5.6 t/GWe	5.2 t/GWe	5.3 t/GWe
実効遅発中性子割合 (全親核種考慮)	0.00342	0.00338	0.00341	0.00336
ポイド反応度 ^{*4}	5.3 \$	5.8 \$	5.7 \$	6.0 \$
ドップラ係数 [Idk/dT] ^{*4}	-5.7 × 10 ⁻³	-4.6 × 10 ⁻³	-4.8 × 10 ⁻³	-4.2 × 10 ⁻³
複合システム倍増時間 ^{*5}	72 年	69 年	48 年	61 年

^{*1} ブランクット燃料を含む ^{*2} Pu/HM ^{*3} E > 0.1 MeV ^{*4} 集合体内非均質効果考慮 ^{*5} 炉外滞在期間 5 年、燃交・定検期間 45 日

表 2.3-9 被覆管最高温度評価用ホットスポットファクタ

処理方法	項目	ホットスポットファクタ		
		ΔT_{Na}	ΔT_{film}	ΔT_{clad}
乗算項	出力分布誤差	1.05	1.05	1.05
	炉心熱出力較正誤差		1.02	1.02
	流路変形効果	1.03		
	集合体間流量配分誤差	1.05		
	原子炉出入口温度誤差	1.02		
	ワイヤコンタクト効果		2.00	
統計項	炉内流量配分誤差	1.03		
	物性値誤差	1.02	1.30	1.03
	各部製造公差	1.03	1.04	1.05
	ペレット偏心効果		1.16	1.20

(注記) 空欄は 1.0

表 2.3-10 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の流量配分計画と熱流力特性
(導入期炉心)

	流量領域 番号	集合体 体数	集合体流量 (kg/s)	領域流量 (kg/s)	燃料要素 最大出力 (kW)	被覆管 最高温度 (°C)	バンドル部 圧損 (MPa)
内側 炉心	1	54	35.3	1906.2	34.9	689	0.22
	2	54	33.2	1792.8	32.9	689	0.20
	3	88	31.1	2736.8	30.9	689	0.18
	4	92	28.1	2585.2	28.9	700	0.15
外側 炉心	5	40	31.7	1268.0	31.8	695	0.18
	6	66	28.9	1907.4	28.4	688	0.16
	7	88	25.4	2235.2	23.2	699	0.13
	8	80	19.9	1592.0	20.6	699	0.09
	小計	562	16023.6 (kg/s) [1次系流量の 88.0%]				
径 フ ラ	9	38	9.2	349.6	—	699	—
	10	58	6.8	394.4	—	696	—
	小計	96	744.0 (kg/s) [1次系流量の 4.1%]				
	合計	658	16767.6 (kg/s) [1次系流量の 92.1%]				
	1次系流量		18200.0 (kg/s)				

表 2.3-11 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の CDF 評価対象燃料ピンの出力履歴および燃焼度(導入期炉心)

炉心領域	流量領域	燃料ピン出力 (kW)								燃料ピン燃焼度 * (MWd/t)
		装荷第1サイクル		装荷第2サイクル		装荷第3サイクル		装荷第4サイクル		
		BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	
内側炉心	1	32.7	34.9	33.2	34.8	33.1	34.3	32.6	33.5	221,000
	2	30.9	32.9	31.3	32.8	31.1	32.4	30.7	31.7	208,400
	3	30.5	30.9	30.8	30.8	30.7	30.4	30.2	29.7	200,400
	4	28.7	27.8	28.9	27.7	28.8	27.4	28.4	26.8	184,300
外側炉心	5	31.8	31.0	31.0	30.2	30.2	29.3	29.3	28.5	197,800
	6	28.4	28.4	27.7	27.7	27.0	27.1	26.4	26.4	179,800
	7	24.8	26.2	24.2	25.5	23.6	24.9	23.0	24.3	161,000
	8	20.1	20.6	19.8	20.3	19.4	19.9	19.1	19.5	130,200

* 燃焼度の不確かさ3%を考慮

表 2.3-12 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の CDF 評価対象燃料ピンの被覆管温度履歴(導入期炉心)

[単位: °C]

炉心領域	流量領域	装荷第1サイクル		装荷第2サイクル		装荷第3サイクル		装荷第4サイクル		平均値
		BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	
内側炉心	1	674.4	689.4	676.3	686.5	673.5	680.4	667.9	672.7	677.6
	2	674.6	689.4	675.9	686.2	673.1	680.3	667.6	672.8	677.5
	3	688.0	689.1	689.3	686.0	686.2	680.1	680.5	671.7	684.0
	4	698.9	686.8	699.5	683.7	696.4	678.3	690.8	671.4	688.2
外側炉心	4	695.5	685.2	686.5	676.0	677.6	666.8	668.5	657.7	676.7
	5	688.3	686.2	680.2	677.6	672.3	669.4	664.4	661.3	675.0
	6	684.2	699.0	676.2	690.3	668.4	681.8	660.5	673.4	679.3
	7	692.8	698.5	686.9	692.1	681.9	686.0	675.9	679.9	686.7

表 2.3-13 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の CDF(導入期炉心)

領域	流量領域	燃料ピン 最大出力 (kW)	被覆管肉厚中心HS温度(°C)		燃料ピン 最高燃焼度 (MWd/t)	CDF
			最高	寿命末期		
内側炉心	1	34.9	689	673	221,000	0.37
	2	32.9	689	673	208,400	0.21
	3	30.9	689	673	200,400	0.23
	4	28.9	700	671	184,300	0.15
外側炉心	5	31.8	695	658	197,800	0.07
	6	28.4	688	661	179,800	0.03
	7	26.2	699	673	161,000	0.02
	8	20.6	699	680	130,200	0.01

表 2.3-14 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の主要目 (平衡期炉心)

項目		仕様
基本仕様・炉心構成	炉心熱出力	3570 MWt
	電気出力	1500 Mwe
	炉心型式	改良内部ダクト型均質 2 領域炉心
	運転サイクル長さ	26.3 ヶ月 (800 日)
	燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランクット)	4/-バッチ
	炉心高さ	100 cm
	軸方向ブランクット厚さ (上部/下部)	15/20 cm
	炉心等価直径	538 cm
	遮へい体外接円径	6.77 m
	炉心燃料集合体数 (内側/外側/合計)	288 / 274 / 562 体
	径方向ブランクット体数	-
	制御棒本数 (主炉停止系/後備炉停止系)	40 / 17 体
	径方向遮へい体数 (SUS 遮へい体) (ZrH 遮へい体)	198 体 (2 層) 108 体 (1 層)
炉心燃料仕様	燃料形態	MOX (ペレット型)
	炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼
	燃料ピン外径	10.4 mm
	被覆管肉厚	0.71 mm
	燃料スミア密度 (炉心/軸方向ブランクット/径方向ブランクット)	82 / 90 / - %TD
	スペーサワイヤ径	1.03 mm
	燃料ピン配列/燃料ピン外径 (P/D)	1.15
	集合体当たり燃料ピン本数	255 本
	内部ダクト外面辺の長さ	46.0 mm
	内部ダクト肉厚	2.0 mm
	ラッパ管外対面間距離	201.6 mm
	ラッパ管肉厚	5.0 mm
	集合体配列ピッチ	206.0 mm
炉心主要特性	Pu 富化度*1 (内側/外側)	18.3 / 21.1 wt%
	炉心部取出平均燃焼度	150 GWd/t
	全炉心取出平均燃焼度*2	90 GWd/t
	燃焼反応度	2.5 %Δk/kk'
	最大線出力 (内側/外側)	411 / 408 W/cm
	炉心平均比出力	41 kW/kg-MOX
	炉心平均出力密度	148 W/cm ³
	最大高速中性子束*3	1.8×10 ¹⁵ n/cm ² s
	最大高速中性子照射量*3	4.9×10 ²³ n/cm ²
	増殖比	1.03
	ドップラ係数 [Tdk/dT]*4 (平衡末期)	-5.8×10 ⁻³
ポイド反応度*4 (平衡末期)	5.3 \$*5	

*1 : Pu/HM、*2 : ブランクット燃料を含む全体の平均燃焼度、*3 : E > 0.1 MeV

*4 : 集合体内非均質効果考慮、*5 : 実効遅発中性子割合 0.00341 (全親核種考慮)

表 2.3-15 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心・燃料仕様 (平衡期炉心)

項目		仕様		
		炉心	軸方向ブランク	径方向ブランク
燃料要素	燃料形態	(Pu, U)O ₂ (ペレット型)	UO ₂ (ペレット型)	—
	被覆管材料	ODS 鋼		—
	被覆管外径 (mm)	10.4		—
	被覆管内径 (mm)	8.98		—6
	被覆管肉厚 (mm)	0.71		—
	燃料要素全長 (mm)	2690		—
	燃料スタック長 (mm)	1000	150 / 200 (上部/下部)	—
	ガスプレナム長さ(上/下) (mm)	150 / 1100		—
	ボンド材	He		—
	燃料スミア密度 (%TD)	82	90	—
集合体	集合体全長 (mm)	4570		—
	燃料ピン本数 (本)	255		—
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	11.5		—
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.11		—
	ラッパ管材料	PNC-FMS 鋼		—
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	201.6		—
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	191.6		—
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0		—
	ラッパ管間ギャップ (mm)	4.4		—
	集合体配列ピッチ (mm)	206.0		—
	スペーサワイヤ径 (mm)	1.03		—
	スペーサワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200.0		—
	体積比 (%)	燃料 (実効)	43.9 (36.0)	43.9 (39.6)
構造材		25.8	←	—
冷却材		30.3	←	—

表 2.3-16 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の主要核特性 (平衡期炉心)

項目	設計値
運転サイクル長さ	26.3 ヶ月 (800 日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランクett)	4/- バッチ
Pu 富化度*1 (内側/外側)	18.3 / 21.1 wt%
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランクett/径方向ブランクett)	150 / 23 / - Gwd/t
全炉心取出平均燃焼度*2	115 Gwd/t
燃焼反応度	2.5 % $\Delta k/kk'$
増殖比 (全体) (炉心/軸方向ブランクett/径方向ブランクett)	1.03 0.85 / 0.18 / -
炉心平均比出力	41 kW/kg-MOX
最大線出力 (内側/外側)	411 / 408 W/cm
炉心平均出力密度	148 W/cm ³
出力分担率 (炉心/軸方向ブランクett/径方向ブランクett)	0.944 / 0.056 / -
最大高速中性子束*3	1.8×10^{15} n/cm ² s
最大高速中性子照射量*3	4.9×10^{23} n/cm ²
初装荷炉心重金属インベントリ (炉心/軸方向ブランクett/径方向ブランクett)	71.8 / 27.6 / - t
ブランクett/炉心重金属重量比	約 0.38
初装荷 Pu-f インベントリ (出力当たり)	5.8 t/Gwe
原子炉倍增時間	-
複合システム倍增時間*4	-
ボイド反応度*5 (平衡末期)	5.3 β *6
ドップラ係数 [Tdk/dT]*5 (平衡末期)	-5.8×10^{-3}

*1: Pu/HM

*2: ブランクett燃料を含む全体の平均燃焼度

*3: $E > 0.1$ MeV

*4: 燃料炉外滞在期間 5 年、燃交・定検期間 45 日

*5: 集合体内非均質効果考慮

*6: 実効遅発中性子割合 0.00341 (全親核種考慮)

表 2.3-17(1/2) 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の物量収支(平衡期炉心)

装荷燃料 1 バッチ当たりの燃料重量 [kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランク	径ブランク	ブランク合計	合計
U235	22.3	20.5	42.8	20.7	0.0	20.7	63.5
U236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U238	7407.5	6802.5	14210.0	6885.0	0.0	6885.0	21095.0
U 合計	7429.8	6823.0	14252.8	6905.7	0.0	6905.7	21158.5
Pu238	19.4	21.3	40.7	0.0	0.0	0.0	40.7
Pu239	955.0	1048.0	2003.0	0.0	0.0	0.0	2003.0
Pu240	566.5	621.8	1188.3	0.0	0.0	0.0	1188.3
Pu241	75.9	83.3	159.2	0.0	0.0	0.0	159.2
Pu242	68.9	75.6	144.5	0.0	0.0	0.0	144.5
Pu 合計	1685.7	1850.0	3535.7	0.0	0.0	0.0	3535.7
Np237	8.8	9.7	18.5	0.0	0.0	0.0	18.5
Np 合計	8.8	9.7	18.5	0.0	0.0	0.0	18.5
Am241	35.3	38.8	74.1	0.0	0.0	0.0	74.1
Am242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am243	17.6	19.4	37.0	0.0	0.0	0.0	37.0
Am 合計	52.9	58.1	111.1	0.0	0.0	0.0	111.1
Cm242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm244	17.7	19.4	37.0	0.0	0.0	0.0	37.0
Cm245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm 合計	17.7	19.4	37.0	0.0	0.0	0.0	37.0
HM 合計	9194.9	8760.1	17955.1	6905.7	0.0	6905.7	24860.8
ラング化 FP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
随伴 FP	11.9	11.3	23.2	0.0	0.0	0.0	23.2
FP 合計	11.9	11.3	23.2	0.0	0.0	0.0	23.2

取出燃料 1 バッチ当たりの燃料重量 [kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランク	径ブランク	ブランク合計	合計
U235	4.9	7.0	11.9	10.7	0.0	10.7	22.6
U236	3.1	2.6	5.7	2.2	0.0	2.2	7.9
U238	5977.5	5852.5	11830.0	6355.0	0.0	6355.0	18185.0
U 合計	5985.5	5862.1	11847.5	6367.9	0.0	6367.9	18215.4
Pu238	23.2	26.2	49.4	0.2	0.0	0.2	49.7
Pu239	842.0	864.0	1706.0	353.8	0.0	353.8	2059.8
Pu240	543.5	589.8	1133.3	38.2	0.0	38.2	1171.5
Pu241	85.2	86.0	171.2	2.6	0.0	2.6	173.8
Pu242	67.5	73.3	140.8	0.1	0.0	0.1	141.0
Pu 合計	1561.4	1639.3	3200.7	395.0	0.0	395.0	3595.7
Np237	5.2	6.1	11.3	0.8	0.0	0.8	12.0
Np 合計	5.2	6.1	11.3	0.8	0.0	0.8	12.0
Am241	29.4	39.2	68.6	0.3	0.0	0.3	68.8
Am242m	2.1	2.4	4.5	0.0	0.0	0.0	4.5
Am243	18.9	20.3	39.2	0.0	0.0	0.0	39.3
Am 合計	50.4	61.9	112.3	0.3	0.0	0.3	112.6
Cm242	1.6	1.6	3.1	0.0	0.0	0.0	3.1
Cm243	0.2	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4
Cm244	17.8	17.9	35.7	0.0	0.0	0.0	35.7
Cm245	3.6	3.2	6.7	0.0	0.0	0.0	6.7
Cm 合計	23.1	22.8	45.9	0.0	0.0	0.0	45.9
HM 合計	7625.6	7592.1	15217.7	6764.0	0.0	6764.0	21981.7
ラング化 FP	1569.4	1168.0	2737.4	141.7	0.0	141.7	2879.1
随伴 FP	11.9	11.3	23.2	0.0	0.0	0.0	23.2
FP 合計	1581.3	1179.3	2760.6	141.7	0.0	141.7	2902.3

表 2.3-17(2/2) 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の物量収支 (平衡期炉心)

平衡サイクル初期炉心の燃料重量 [kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランク	径ブランク	ブランク合計	合計
U235	54.3	57.4	111.7	65.7	0.0	65.7	177.3
U236	6.9	5.0	11.9	4.0	0.0	4.0	15.9
U238	27380.0	25770.0	53150.0	26740.0	0.0	26740.0	79890.0
U 合計	27441.2	25832.4	53273.6	26809.6	0.0	26809.6	80083.2
Pu238	85.1	92.9	178.0	0.2	0.0	0.2	178.2
Pu239	3676.0	3898.0	7574.0	617.2	0.0	617.2	8191.2
Pu240	2240.0	2449.0	4689.0	38.3	0.0	38.3	4727.3
Pu241	327.9	340.7	668.6	1.8	0.0	1.8	670.4
Pu242	272.7	298.8	571.5	0.1	0.0	0.1	571.6
Pu 合計	6601.7	7079.4	13681.1	657.6	0.0	657.6	14338.7
Np237	28.3	32.5	60.8	1.2	0.0	1.2	61.9
Np 合計	28.3	32.5	60.8	1.2	0.0	1.2	61.9
Am241	127.9	156.1	284.0	0.1	0.0	0.1	284.1
Am242m	4.9	4.7	9.6	0.0	0.0	0.0	9.6
Am243	72.9	79.1	152.0	0.0	0.0	0.0	152.0
Am 合計	205.7	239.9	445.6	0.1	0.0	0.1	445.7
Cm242	5.2	4.4	9.6	0.0	0.0	0.0	9.6
Cm243	0.5	0.3	0.8	0.0	0.0	0.0	0.8
Cm244	70.7	74.5	145.2	0.0	0.0	0.0	145.2
Cm245	7.4	6.1	13.5	0.0	0.0	0.0	13.5
Cm 合計	83.8	85.4	169.1	0.0	0.0	0.0	169.1
HM 合計	34360.6	33269.5	67630.2	27468.5	0.0	27468.5	95098.7
ラン化 FP	2419.1	1771.0	4190.1	154.4	0.0	154.4	4344.5
随伴 FP	47.6	45.2	92.8	0.0	0.0	0.0	92.8
FP 合計	2466.7	1816.2	4282.9	154.4	0.0	154.4	4437.3

平衡末期 (EOEC) の燃料重量 [kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランク	径ブランク	ブランク合計	合計
U235	36.8	44.0	80.8	55.7	0.0	55.7	136.4
U236	10.0	7.6	17.6	6.2	0.0	6.2	23.8
U238	25950.0	24820.0	50770.0	26210.0	0.0	26210.0	76980.0
U 合計	25996.8	24871.5	50868.3	26271.8	0.0	26271.8	77140.2
Pu238	88.9	97.9	186.7	0.4	0.0	0.4	187.1
Pu239	3563.0	3714.0	7277.0	971.0	0.0	971.0	8248.0
Pu240	2217.0	2417.0	4634.0	76.5	0.0	76.5	4710.5
Pu241	337.2	343.4	680.6	4.5	0.0	4.5	685.1
Pu242	271.3	296.5	567.8	0.2	0.0	0.2	568.0
Pu 合計	6477.4	6868.8	13346.1	1052.6	0.0	1052.6	14398.7
Np237	24.6	28.9	53.5	1.9	0.0	1.9	55.5
Np 合計	24.6	28.9	53.5	1.9	0.0	1.9	55.5
Am241	122.0	156.5	278.5	0.4	0.0	0.4	278.9
Am242m	7.0	7.0	14.0	0.0	0.0	0.0	14.0
Am243	74.2	80.1	154.3	0.0	0.0	0.0	154.3
Am 合計	203.2	243.6	446.8	0.4	0.0	0.4	447.2
Cm242	6.8	6.0	12.7	0.0	0.0	0.0	12.8
Cm243	0.7	0.5	1.1	0.0	0.0	0.0	1.1
Cm244	70.9	73.0	143.9	0.0	0.0	0.0	143.9
Cm245	11.0	9.3	20.2	0.0	0.0	0.0	20.2
Cm 合計	89.3	88.7	178.0	0.0	0.0	0.0	178.0
HM 合計	32791.2	32101.5	64892.8	27326.8	0.0	27326.8	92219.6
ラン化 FP	3988.5	2939.0	6927.5	296.1	0.0	296.1	7223.6
随伴 FP	47.6	45.2	92.8	0.0	0.0	0.0	92.8
FP 合計	4036.0	2984.2	7020.3	296.1	0.0	296.1	7316.4

表 2.3-18 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の設計検討条件

項 目		設計検討条件		
プラント仕様	電気出力	750MWe		
	炉心熱出力	1,785MWt		
	原子炉出口/入口温度	550 / 395 °C		
	1次系流量	9,083kg/s		
炉心・燃料基本仕様	燃料形態	MOX		
	炉心型式	均質2領域		
	再臨界回避方策	改良内部ダ外型燃料集合体		
	燃料	組成 *1	高速炉多重サイクルTRU	
		FP混入率 *2	0.2Vol%	
	炉心材料 *3	被覆管	ODS鋼	
ラッパ管		PNC-FMS鋼		
制限条件	安全要求	ナトリウム反応度	6\$ 以下	
		炉心高さ	100cm 以下	
		炉心平均比出力	40kW/kg-MOX程度 以上	
	燃料健全性	最大線出力	430W/cm 以下	
		高速中性子照射量 *4	$5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ 以下	
		被覆管最高温度[肉厚中心]	700°C 以下	
		CDF(通常運転時)	0.5 以下	
		取合条件	燃料スミア密度	炉心
		ブランケット	90%TD	
	燃料バンドル部圧損	0.2MPa 以下		
	遮へい体外接円径	5.5m 程度以下		
	制御棒、SASS配置	切込み付きUIS対応		
炉心性能目標	増殖比	導入期炉心	1.1 程度	
		平衡期炉心	1.03 程度	
	取出平均 燃焼度	炉心部	150GWd/t 程度	
		全炉心 *5	60GWd/t 程度以上	
	運転サイクル長さ	18ヶ月 以上		

*1 高速炉多重サイクル組成 (wt%)

$${}^{238}\text{Pu}/{}^{239}\text{Pu}/{}^{240}\text{Pu}/{}^{241}\text{Pu}/{}^{242}\text{Pu}/{}^{237}\text{Np}/{}^{241}\text{Am}/{}^{243}\text{Am}/{}^{244}\text{Cm}/{}^{245}\text{Cm}$$

$$= 1.1/54.1/32.1/ 4.3/ 3.9/ 0.5/ 2.0/ 1.0/ 1.0/ 0.0$$

*2 先進湿式再処理法の移行率を基に設定

*3 炉心材料組成[炉心燃料設計用] (wt%) : Fe/Cr/Ni/Mo/Mn/W = 85.5/11.0/0.4/0.5/0.6/2.0

*4 $E > 0.1\text{MeV}$

*5 ブランケット燃料を含む全炉心取出平均燃焼度

表 2.3-19 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の主要目 (平衡期炉心)

項目		仕様
基本仕様・炉心構成	原子炉熱出力	1785 MWt
	電気出力	750 MWe
	炉心型式	改良内部ダクト型 均質 2 領域炉心
	運転サイクル長さ	26.1 ヶ月 (794 日)
	燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランケット)	4 / - バッチ
	炉心高さ	100 cm
	軸方向ブランケット厚さ (上部/下部)	20 / 25 cm
	炉心等価直径	383 cm
	遮へい体外接円径	約 5.22 m
	炉心燃料集合体数 (内側/外側/合計)	157 / 129 / 286 体
	径方向ブランケット体数	-
	制御棒本数 (主炉停止系/後備炉停止系)	21 / 6 本
	径方向遮へい体数 (SUS 遮へい体) (Zr-H 遮へい体)	138 体 (2 層) 78 体 (1 層)
	炉心燃料仕様	燃料形態
炉心材料 (被覆管/ラッパ管)		ODS 鋼/PNC-FMS 鋼
燃料ピン外径		10.4 mm
被覆管肉厚		0.71 mm
燃料スミア密度 (炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)		82 / 90 / - %TD
スペーサワイヤ径		1.04 mm
燃料ピン配列/燃料ピン外径 (P/D)		1.11
集合体当たり燃料ピン本数		255 本
内部ダクト外面辺の長さ		46.0 mm
内部ダクト肉厚		2.0 mm
ラッパ管外対面間距離		201.8 mm
ラッパ管肉厚		5.0 mm
集合体配列ピッチ		206.3 mm
炉心主要特性		Pu 富化度*1 (内側/外側)
	炉心部取出平均燃焼度	146 GWd/t
	全炉心取出平均燃焼度*2	104 GWd/t
	燃焼反応度	2.6 %Δk/kk'
	最大線出力 (内側/外側)	427 / 407 W/cm
	炉心平均比出力	41 kW/kg-MOX
	炉心平均出力密度	146 W/cm ³
	最大高速中性子束*3	1.9×10 ¹⁵ n/cm ² s
	最大高速中性子照射量*3	5.3×10 ²³ n/cm ²
	増殖比	1.03
	ドップラ係数 [Tdk/dT]*4 (平衡末期)	-5.5×10 ⁻³
ボイド反応度*4 (平衡末期)	5.0 \$ ^{*5}	

*1: Pu/HM、*2: ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、*3: E > 0.1 MeV

*4: 集合体内非均質効果考慮、*5: 実効遅発中性子割合 0.00346 (全親核種考慮)

表 2.3-20 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心・燃料仕様 (平衡期炉心)

項目		仕様		
		炉心	軸方向ブランク	径方向ブランク*
燃料要素	燃料形態	(Pu, U)O ₂ (ペレット型)	UO ₂ (ペレット型)	—
	被覆管材料	ODS 鋼		—
	被覆管外径 (mm)	10.4		—
	被覆管内径 (mm)	8.98		—
	被覆管肉厚 (mm)	0.71		—
	燃料要素全長 (mm)	2630		—
	燃料スタック長 (mm)	1000	200 / 250 (上部/下部)	—
	ガスプレナム長さ(上/下) (mm)	100 / 990		—
	ボンド材	He		—
	燃料スミア密度 (%TD)	82	90	—
集合体	集合体全長 (mm)	4300		—
	燃料ピン本数 (本)	255		—
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	11.50		—
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.11		—
	内部ダクト外面辺の長さ	46.0 mm		—
	内部ダクト肉厚	2.0 mm		—
	ラッパ管材料	PNC-FMS 鋼		←
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	201.8		—
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	191.8		—
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0		—
	ラッパ管間ギャップ (mm)	4.5		—
	集合体配列ピッチ (mm)	206.3		—
	スペーサワイヤ径 (mm)	1.04		—
	スペーサワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200.0		—
体積比 (%)	燃料 (実効)	43.8 (35.9)	← (39.4)	—
	構造材	25.7	←	—
	冷却材	30.4	←	—

表 2.3-21 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心特性 (平衡期炉心)

項目	設計値
運転サイクル長さ	26.1 ヶ月 (793 日)
燃料交換バッチ数 (炉心)	4 バッチ
Pu 富化度*1 (内側/外側)	18.5 / 23.5 wt%
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランク特)	146 / 18 GWd/t
全炉心取出平均燃焼度*2	104 GWd/t
燃焼反応度	2.6 %Δk/kk'
増殖比 (全体) (炉心/軸方向ブランク特)	1.03 0.82 / 0.21
炉心平均比出力	41 kW/kg-MOX
最大線出力 (内側/外側)	427 / 407 W/cm
炉心平均出力密度	146 W/cm ³
出力分担率 (炉心/軸方向ブランク特)	0.941 / 0.059
最大高速中性子束*3	1.9×10^{15} n/cm ² · s
最大高速中性子照射量*3	5.3×10^{23} n/cm ²
初装荷炉心重金属インベントリ (炉心/軸方向ブランク特)	36.6 / 18.1 t
ブランク特/炉心重金属重量比	約 0.49
初装荷 Pu-f インベントリ (出力当たり)	6.2 t/GWe
ボイド反応度*4 *5 (平衡末期)	5.0 \$
ドップラ係数 [Tdk/dT]*4 (平衡末期)	-5.5×10^{-3}

*1 : Pu/HM

*2 : ブランク特燃料を含む全体の平均燃焼度

*3 : E > 0.1 MeV

*4 : 集合体内非均質効果考慮

*5 : 実効遅発中性子割合 0.00346 (全親核種考慮)

表 2.3-22(1/2) 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の物量収支(平衡期炉心)

装荷燃料1バッチ当たりの重量[kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブラ	径ブラ	ブラ合計	合計
U235	12.1	9.3	21.5	13.6	0.0	13.6	35.0
U236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U238	4029.8	3103.8	7133.6	4504.4	0.0	4504.4	11638.0
U 合計	4041.9	3113.1	7155.0	4518.0	0.0	4518.0	11673.0
Pu238	10.7	11.2	21.8	0.0	0.0	0.0	21.8
Pu239	525.0	549.1	1074.1	0.0	0.0	0.0	1074.1
Pu240	311.5	325.8	637.3	0.0	0.0	0.0	637.3
Pu241	41.7	43.6	85.4	0.0	0.0	0.0	85.4
Pu242	37.8	39.6	77.4	0.0	0.0	0.0	77.4
Pu合計	926.8	969.3	1896.1	0.0	0.0	0.0	1896.1
Np237	4.9	5.1	9.9	0.0	0.0	0.0	9.9
Np合計	4.9	5.1	9.9	0.0	0.0	0.0	9.9
Am241	19.4	20.3	39.7	0.0	0.0	0.0	39.7
Am242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am243	9.7	10.1	19.9	0.0	0.0	0.0	19.9
Am合計	29.1	30.4	59.6	0.0	0.0	0.0	59.6
Cm242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm244	9.7	10.1	19.9	0.0	0.0	0.0	19.9
Cm245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm合計	9.7	10.1	19.9	0.0	0.0	0.0	19.9
HM合計	5012.4	4128.1	9140.5	4518.0	0.0	4518.0	13658.5
随伴FP	6.5	5.3	11.8	0.0	0.0	0.0	11.8
ランプ化FP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP合計	6.5	5.3	11.8	0.0	0.0	0.0	11.8

取出燃料1バッチ当たりの重量[kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブラ	径ブラ	ブラ合計	合計
U235	2.6	3.6	6.1	9.1	8.4	17.5	23.7
U236	1.6	1.1	2.7	1.3	0.8	2.1	4.8
U238	3147.8	2661.4	5809.2	4644.9	3829.9	8474.7	14283.9
U 合計	3152.0	2666.1	5818.0	4655.3	3839.1	8494.4	14312.4
Pu238	12.8	13.0	25.7	0.1	0.0	0.1	25.9
Pu239	448.2	414.7	862.9	210.3	125.5	335.8	1198.7
Pu240	295.8	289.6	585.4	17.7	8.0	25.7	611.1
Pu241	46.2	40.2	86.4	1.0	0.4	1.4	87.8
Pu242	37.1	36.2	73.3	0.0	0.0	0.1	73.4
Pu合計	840.1	793.7	1633.8	229.1	133.9	363.0	1996.8
Np237	2.8	3.2	6.0	0.4	0.2	0.6	6.6
Np合計	2.8	3.2	6.0	0.4	0.2	0.6	6.6
Am241	16.4	20.8	37.2	0.1	0.0	0.1	37.3
Am242m	1.2	1.1	2.3	0.0	0.0	0.0	2.3
Am243	10.4	10.0	20.4	0.0	0.0	0.0	20.4
Am合計	28.0	31.9	59.9	0.1	0.0	0.1	60.0
Cm242	0.9	0.7	1.6	0.0	0.0	0.0	1.6
Cm243	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2
Cm244	9.8	8.5	18.3	0.0	0.0	0.0	18.3
Cm245	1.9	1.4	3.3	0.0	0.0	0.0	3.3
Cm合計	12.7	10.6	23.3	0.0	0.0	0.0	23.3
HM合計	4035.5	3505.6	7541.0	4884.8	3973.3	8858.2	16399.2
随伴FP	848.3	504.7	1352.9	66.6	32.2	98.8	1451.7
ランプ化FP	64.3	52.7	117.0	0.0	0.0	0.0	117.0
FP合計	912.6	557.4	1469.9	66.6	32.2	98.8	1568.7

表 2.3-22(2/2) 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の物量収支(平衡期炉心)

平衡初期炉心の燃料重量[kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブラ	径ブラ	ブラ合計	合計
U235	28.7	26.5	55.2	49.8	42.1	91.9	147.1
U236	3.6	2.0	5.6	2.3	1.4	3.7	9.3
U238	14401.0	11567.2	25968.2	19300.9	15725.4	35026.3	60994.5
U 合計	14433.3	11595.7	26029.0	19352.9	15769.0	35121.9	61150.9
Pu238	47.0	45.9	92.9	0.1	0.0	0.1	93.1
Pu239	2000.6	1906.9	3907.5	358.5	207.3	565.8	4473.3
Pu240	1234.8	1212.7	2447.5	17.4	7.6	25.0	2472.5
Pu241	179.5	165.1	344.6	0.6	0.3	0.9	345.5
Pu242	150.9	148.3	299.2	0.0	0.0	0.0	299.2
Pu合計	3612.8	3478.9	7091.7	376.6	215.3	591.9	7683.6
Np237	15.7	16.4	32.1	0.6	0.4	0.9	33.0
Np合計	15.7	16.4	32.1	0.6	0.4	0.9	33.0
Am241	71.6	79.8	151.4	0.0	0.0	0.1	151.5
Am242m	2.7	2.2	4.9	0.0	0.0	0.0	4.9
Am243	40.3	39.2	79.5	0.0	0.0	0.0	79.5
Am合計	114.6	121.2	235.8	0.0	0.0	0.1	235.9
Cm242	2.8	2.0	4.8	0.0	0.0	0.0	4.8
Cm243	0.2	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4
Cm244	39.0	36.5	75.5	0.0	0.0	0.0	75.5
Cm245	4.0	2.7	6.7	0.0	0.0	0.0	6.7
Cm合計	46.0	41.3	87.3	0.0	0.0	0.0	87.3
HM合計	18222.4	15253.5	33475.9	19730.2	15984.6	35714.8	69190.7
随伴FP	1312.6	787.4	2100.0	75.4	37.5	112.9	2212.9
ランプ化FP	257.1	210.8	467.9	0.0	0.0	0.0	467.9
FP合計	1569.7	998.2	2567.9	75.4	37.5	112.9	2680.8

平衡末期炉心の燃料重量[kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブラ	径ブラ	ブラ合計	合計
U235	19.6	20.9	40.4	44.0	38.5	82.5	122.9
U236	5.2	3.1	8.3	3.6	2.3	5.8	14.2
U238	13656.6	11188.9	24845.5	19005.5	15558.9	34564.4	59409.9
U 合計	13681.4	11212.9	24894.3	19053.1	15599.7	34652.7	59547.0
Pu238	49.1	48.2	97.3	0.2	0.1	0.3	97.6
Pu239	1919.0	1799.2	3718.3	570.7	334.7	905.4	4623.6
Pu240	1216.1	1192.7	2408.8	35.3	15.8	51.1	2459.9
Pu241	183.6	163.9	347.5	1.6	0.7	2.3	349.8
Pu242	149.8	146.8	296.6	0.1	0.0	0.1	296.7
Pu合計	3517.6	3350.9	6868.5	607.9	351.2	959.1	7827.5
Np237	13.6	14.8	28.3	1.0	0.6	1.6	29.9
Np合計	13.6	14.8	28.3	1.0	0.6	1.6	29.9
Am241	68.4	81.3	149.7	0.1	0.1	0.2	149.9
Am242m	3.8	3.3	7.2	0.0	0.0	0.0	7.2
Am243	41.0	39.5	80.5	0.0	0.0	0.0	80.5
Am合計	113.2	124.1	237.4	0.2	0.1	0.2	237.6
Cm242	3.7	2.7	6.3	0.0	0.0	0.0	6.3
Cm243	0.4	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5
Cm244	38.9	35.4	74.4	0.0	0.0	0.0	74.4
Cm245	5.9	4.1	10.0	0.0	0.0	0.0	10.0
Cm合計	48.9	42.4	91.3	0.0	0.0	0.0	91.3
HM合計	17374.6	14745.0	32119.7	19662.1	15951.5	35613.6	67733.3
随伴FP	2160.4	1295.9	3456.3	143.6	70.5	214.1	3670.4
ランプ化FP	257.1	210.8	467.9	0.0	0.0	0.0	467.9
FP合計	2417.5	1506.6	3924.2	143.6	70.5	214.1	4138.2

表 2.3-23 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の制御反応度収支(平衡期炉心)

[単位: % $\Delta k/kk'$]

項目	主炉停止系 (ワレット・スタック)	後備炉停止系	
		ワレット・スタック	全数挿入
I. 計画余剰反応度	4.49	0.64	0.81
(1) 出力補償	0.81	0.64	0.81
(2) 燃焼補償	3.48 ^{*1}	—	—
(3) 運転余裕	0.20	—	—
II. 余剰反応度不確かさ (2 σ)	0.50	0.13	0.16
(1) 臨界予測誤差	0.00	—	—
(2) 出力補償予測誤差	—	0.13	0.16
(3) 燃料製作予測誤差	0.39	—	—
(4) 燃料交換余裕	0.20	—	—
III. 事故時投入反応度	—	0.3	0.3
IV. 必要制御反応度 (I+II+III)	5.0 ^{*2}	1.1	1.3
V. 制御棒価値	5.4 ^{*3}	1.5 ^{*3}	1.9 ^{*3}
VI. 反応度停止余裕 (V-IV)	0.4	0.4	0.6

*1: ノミナル計算値に燃料組成変動分を考慮した値

*2: 炉停止余裕 1\$ (0.4% $\Delta k/kk'$) を考慮した値

*3: ノミナル計算値に対し、各種補正 (メッシュ効果および縮約効果、ランピング効果、輸送効果等) 23%、設計予測誤差 9 % を考慮した値

表 2.3-24 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の熱流力特性(平衡期炉心)

領域	流量領域 番号	集合体 体数	集合体流量 (kg/s)	領域流量 (kg/s)	燃料要素 最大出力 (kW)	被覆管 最高温度 (°C)	バンドル部 圧損 (MPa)
内側 炉心	1	64	36.0	2304.0	35.9	685	0.22
	2	54	32.9	1776.6	32.9	685	0.19
	3	39	28.0	1092.0	29.4	698	0.14
外側 炉心	4	21	32.0	672.0	33.6	700	0.18
	5	48	29.3	1406.4	30.6	699	0.15
	6	33	25.9	854.7	27.2	699	0.12
	7	27	22.7	612.9	24.0	699	0.10
合計		286	8718.6 (kg/s) [1次系流量の 96.0%]				
1次系流量			9083.0 (kg/s)				

表 2.3-25 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の CDF 評価対象燃料ピンの出力履歴および燃焼度(平衡期炉心)

炉心領域	流量領域	燃料ピン出力 (kW)								燃料ピン燃焼度 * (MWd/t)
		装荷第1サイクル		装荷第2サイクル		装荷第3サイクル		装荷第4サイクル		
		BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	
内側炉心	1	35.7	32.8	35.9	32.6	35.6	32.1	34.9	31.3	208,200
		35.3	33.2	35.6	33.0	35.4	32.4	34.7	31.7	208,600
	2	32.7	29.8	32.9	29.6	32.7	29.2	32.3	28.7	190,700
	3	29.4	27.5	29.4	27.3	29.2	26.9	28.8	26.5	173,000
外側炉心	4	33.6	32.2	32.1	30.8	30.8	29.7	29.7	28.6	190,400
	5	30.6	29.9	29.4	28.8	28.3	27.8	27.4	26.9	176,200
	6	25.2	27.2	24.2	26.2	23.3	25.4	22.5	24.6	152,700
	7	20.7	24.0	19.9	23.2	19.2	22.4	18.6	21.7	130,500

* 燃焼度の不確かさ3%を考慮

表 2.3-26 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の CDF 評価対象燃料ピンの被覆管最高温度履歴(平衡期炉心)

[単位: °C]

炉心領域	流量領域	装荷第1サイクル		装荷第2サイクル		装荷第3サイクル		装荷第4サイクル		平均値
		BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	
内側炉心	1	683.6	660.7	685.2	658.9	682.8	654.6	677.6	648.6	669.0
		680.7	663.5	683.3	662.0	681.3	657.7	676.2	651.5	669.5
	2	683.5	657.6	685.1	656.2	683.3	652.6	679.2	647.7	668.1
	3	697.1	677.8	697.6	675.8	695.4	672.1	691.1	667.1	684.2
外側炉心	4	699.5	686.1	686.0	674.2	674.2	663.6	663.7	653.9	675.1
	5	698.7	691.2	686.3	680.3	675.6	670.6	666.0	661.8	678.8
	6	676.1	699.2	664.7	688.1	654.8	678.2	646.1	669.2	672.0
	7	657.0	699.2	646.8	688.3	637.9	678.5	630.0	669.7	663.4

表 2.3-27 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の CDF (平衡期炉心)

領域	流量領域	燃料ピン 最大出力 (kW)	被覆管肉厚中心HS温度(°C)		燃料ピン 最高燃焼度 (MWd/t)	CDF
			最高	寿命末期		
内側炉心	1	35.9	685	649	208,200	0.41
		35.6	683	651	208,600	0.45
	2	32.9	685	648	190,700	0.16
	3	29.4	698	667	173,000	0.30
外側炉心	4	33.6	700	654	190,400	0.21
	5	30.6	699	662	176,200	0.15
	6	27.2	699	669	152,700	0.03
	7	24.0	699	670	130,500	0.004

表 2.3-28 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の主要目 (導入期炉心)

項目		仕様
基本仕様・炉心構成	原子炉熱出力	1785 MWt
	電気出力	750 MWe
	炉心型式	改良内部ダクト型 均質 2 領域炉心
	運転サイクル長さ	27.4 ヶ月 (832 日)
	燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランケット)	4 / 4 バッチ
	炉心高さ	100 cm
	軸方向ブランケット厚さ (上部/下部)	20 / 20 cm
	炉心等価直径	383 cm
	遮へい体外接円径	約 5.22 m
	炉心燃料集合体数 (内側/外側/合計)	157 / 129 / 286 体
	径方向ブランケット体数	66 体
	制御棒本数 (主炉停止系/後備炉停止系)	21 / 6 本
	径方向遮へい体数 (SUS 遮へい体) (Zr-H 遮へい体)	72 体 (1 層) 78 体 (1 層)
	炉心燃料仕様	燃料形態
炉心材料 (被覆管/ラッパ管)		ODS 鋼/PNC-FMS 鋼
燃料ピン外径		10.4 mm
被覆管肉厚		0.71 mm
燃料スミア密度 (炉心/軸方向ブランケット/径方向ブランケット)		82 / 90 / 90 %TD
スペーサワイヤ径		1.04 mm
燃料ピン配列/燃料ピン外径 (P/D)		1.11
集合体当たり燃料ピン本数		255 本
内部ダクト外面辺の長さ		46.0 mm
内部ダクト肉厚		2.0 mm
ラッパ管外対面間距離		201.8 mm
ラッパ管肉厚		5.0 mm
集合体配列ピッチ		206.3 mm
炉心主要特性		Pu 富化度*1 (内側/外側)
	炉心部取出平均燃焼度	150 GWd/t
	全炉心取出平均燃焼度*2	86 GWd/t
	燃焼反応度	2.8 %Δk/kk'
	最大線出力 (内側/外側)	417 / 401 W/cm
	炉心平均比出力	40 kW/kg-MOX
	炉心平均出力密度	143 W/cm ³
	最大高速中性子束*3	1.9×10 ¹⁵ n/cm ² s
	最大高速中性子照射量*3	5.4×10 ²³ n/cm ²
	増殖比	1.10
	ドップラ係数 [Tdk/dT]*4 (平衡末期)	-5.3×10 ⁻³
ポイド反応度*4 (平衡末期)	5.1 \$*5	

*1: Pu/HM、*2: ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、*3: E > 0.1 MeV

*4: 集合体内非均質効果考慮、*5: 実効遅発中性子割合 0.00335 (全親核種考慮)

表 2.3-29 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心・燃料仕様 (導入期炉心)

項目		仕様		
		炉心	軸方向ブランク	径方向ブランク*1
燃料要素	燃料形態	(Pu, U)O ₂ (ペレット型)	UO ₂ (ペレット型)	←
	被覆管材料	ODS 鋼		←
	被覆管外径 (mm)	10.4		11.7
	被覆管内径 (mm)	8.98		10.87
	被覆管肉厚 (mm)	0.71		0.415
	燃料要素全長 (mm)	2630		←
	燃料スタック長 (mm)	1000	200 / 200 (上部/下部)	1400
	ガスプレナム長さ(上/下) (mm)	100 / 990		←
	ボンド材	He		←
	燃料スミア密度 (%TD)	82	90	←
集合体	集合体全長 (mm)	4300		←
	燃料ピン本数 (本)	255		217
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	11.50		12.84
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.11		1.10
	内部ダクト外面辺の長さ	46.0 mm		—
	内部ダクト肉厚	2.0 mm		—
	ラッパ管材料	PNC-FMS 鋼		←
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	201.8		←
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	191.8		←
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0		←
	ラッパ管間ギャップ (mm)	4.5		←
	集合体配列ピッチ (mm)	206.3		←
	スペーサワイヤ径 (mm)	1.04		1.08
	スペーサワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200.0		200
体積比 (%)	燃料 (実効)	43.8 (35.9)	← (39.4)	54.6 (49.2)
	構造材	25.7	←	18.5
	冷却材	30.4	←	26.9

表 2.3-30 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心特性 (導入期炉心)

項目	設計値
運転サイクル長さ	27.4 ヶ月 (832 日)
燃料交換バッチ数 (炉心)	4 バッチ
Pu 富化度*1 (内側/外側)	18.8 / 23.7 wt%
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランクett/径方向ブランクett)	150 / 19.3 / 8.9 GWd/t
全炉心取出平均燃焼度*2	86 GWd/t
燃焼反応度	2.8 % $\Delta k/kk'$
増殖比 (全体) (炉心/軸方向ブランクett/径方向ブランクett)	1.10 0.80 / 0.19 / 0.11
炉心平均比出力	40 kW/kg-MOX
最大線出力 (内側/外側)	417 / 401 W/cm
炉心平均出力密度	143 W/cm ³
出力分担率 (炉心/軸方向ブランクett/径方向ブランクett)	0.924 / 0.052 / 0.024
最大高速中性子束*3	1.9×10^{15} n/cm ² ·s
最大高速中性子照射量*3	5.4×10^{23} n/cm ²
初装荷炉心重金属インベントリ (炉心/軸方向ブランクett/径方向ブランクett)	36.5 / 16.1 / 16.2 t
ブランクett/炉心重金属重量比	約 0.88
初装荷 Pu-f インベントリ (出力当たり)	6.3 t/GWe
ポイド反応度*4 *5 (平衡末期)	5.1 \$
ドップラ係数 [Tdk/dT]*4 (平衡末期)	-5.3×10^{-3}

*1 : Pu/HM

*2 : ブランクett燃料を含む全体の平均燃焼度

*3 : E > 0.1 MeV

*4 : 集合体内非均質効果考慮

*5 : 実効遅発中性子割合 0.00335 (全親核種考慮)

表 2.3-31(1/2) 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の物量収支(導入期炉心)

装荷燃料1バッチ当たりの重量[kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブラ	径ブラ	ブラ合計	合計
U235	12.1	9.3	21.4	12.0	12.1	24.2	45.6
U236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U238	4013.7	3092.3	7106.0	4002.3	4032.0	8034.2	15140.2
U 合計	4025.8	3101.6	7127.4	4014.3	4044.1	8058.4	15185.7
Pu238	10.8	11.3	22.1	0.0	0.0	0.0	22.1
Pu239	532.2	553.8	1086.0	0.0	0.0	0.0	1086.0
Pu240	315.8	328.6	644.4	0.0	0.0	0.0	644.4
Pu241	42.3	44.0	86.3	0.0	0.0	0.0	86.3
Pu242	38.4	40.0	78.4	0.0	0.0	0.0	78.4
Pu合計	939.5	977.6	1917.1	0.0	0.0	0.0	1917.1
Np237	4.9	5.1	10.0	0.0	0.0	0.0	10.0
Np合計	4.9	5.1	10.0	0.0	0.0	0.0	10.0
Am241	19.7	20.5	40.2	0.0	0.0	0.0	40.2
Am242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am243	9.9	10.2	20.1	0.0	0.0	0.0	20.1
Am合計	29.5	30.7	60.3	0.0	0.0	0.0	60.3
Cm242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm244	9.9	10.3	20.1	0.0	0.0	0.0	20.1
Cm245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm合計	9.9	10.3	20.1	0.0	0.0	0.0	20.1
HM合計	5009.6	4125.3	9134.9	4014.3	4044.1	8058.4	17193.3
随伴FP	6.5	5.3	11.8	0.0	0.0	0.0	11.8
ランプ化FP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP合計	6.5	5.3	11.8	0.0	0.0	0.0	11.8

取出燃料1バッチ当たりの重量[kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブラ	径ブラ	ブラ合計	合計
U235	2.6	3.5	6.1	6.6	8.3	14.9	21.0
U236	1.7	1.1	2.8	1.2	0.9	2.1	4.9
U238	3239.0	2696.2	5935.3	3713.9	3854.2	7568.1	13503.3
U 合計	3243.3	2700.8	5944.1	3721.7	3863.4	7585.0	13529.2
Pu238	14.3	14.9	29.1	0.1	0.1	0.2	29.3
Pu239	457.0	427.5	884.5	198.5	137.4	336.0	1220.5
Pu240	295.6	303.0	598.6	19.6	8.3	27.9	626.5
Pu241	46.3	42.6	88.9	1.3	0.3	1.6	90.5
Pu242	34.9	36.5	71.4	0.1	0.0	0.1	71.5
Pu合計	848.1	824.5	1672.6	219.6	146.2	365.8	2038.3
Np237	3.5	3.7	7.2	0.6	0.4	0.9	8.2
Np合計	3.5	3.7	7.2	0.6	0.4	0.9	8.2
Am241	16.4	22.0	38.4	0.1	0.0	0.2	38.6
Am242m	1.5	1.5	3.0	0.0	0.0	0.0	3.0
Am243	10.2	10.5	20.7	0.0	0.0	0.0	20.7
Am合計	28.2	34.0	62.1	0.1	0.0	0.2	62.3
Cm242	1.0	0.8	1.9	0.0	0.0	0.0	1.9
Cm243	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2
Cm244	12.1	11.7	23.8	0.0	0.0	0.0	23.8
Cm245	2.3	1.8	4.1	0.0	0.0	0.0	4.1
Cm合計	15.6	14.4	30.0	0.0	0.0	0.0	30.0
HM合計	4138.6	3577.4	7716.0	3941.9	4010.0	7951.9	15667.9
随伴FP	6.5	5.3	11.8	0.0	0.0	0.0	11.8
ランプ化FP	873.9	553.4	1427.3	67.9	32.5	100.4	1527.6
FP合計	880.4	558.7	1439.1	67.9	32.5	100.4	1539.4

表 2.3-31(2/2) 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の物量収支(導入期炉心)

平衡初期炉心の燃料重量[kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブラ	径ブラ	ブラ合計	合計
U235	29.4	26.7	56.1	38.8	42.3	81.1	137.2
U236	3.7	2.1	5.9	2.2	1.5	3.7	9.5
U238	14834.7	11760.0	26594.7	15568.6	15860.3	31428.8	58023.6
U 合計	14867.9	11788.8	26656.7	15609.6	15904.0	31513.6	58170.3
Pu238	49.7	50.5	100.1	0.1	0.1	0.2	100.3
Pu239	2023.7	2001.6	4025.3	344.9	224.5	569.4	4594.7
Pu240	1237.1	1281.4	2518.5	19.6	7.8	27.4	2545.9
Pu241	180.4	175.3	355.8	0.9	0.2	1.1	356.9
Pu242	147.5	154.4	301.9	0.0	0.0	0.0	301.9
Pu合計	3638.4	3663.2	7301.6	365.5	232.6	598.2	7899.7
Np237	17.1	18.1	35.2	0.9	0.6	1.5	36.6
Np合計	17.1	18.1	35.2	0.9	0.6	1.5	36.6
Am241	72.0	84.7	156.7	0.1	0.0	0.1	156.8
Am242m	3.4	3.0	6.4	0.0	0.0	0.0	6.4
Am243	40.3	41.5	81.8	0.0	0.0	0.0	81.8
Am合計	115.7	129.2	244.8	0.1	0.0	0.1	244.9
Cm242	3.3	2.4	5.7	0.0	0.0	0.0	5.7
Cm243	0.3	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5
Cm244	43.2	43.3	86.5	0.0	0.0	0.0	86.5
Cm245	4.5	3.3	7.7	0.0	0.0	0.0	7.7
Cm合計	51.3	49.1	100.4	0.0	0.0	0.0	100.4
HM合計	18690.4	15648.4	34338.7	15976.1	16137.2	32113.3	66452.0
随伴FP	25.9	21.3	47.2	0.0	0.0	0.0	47.2
ランプ化FP	1353.7	862.6	2216.2	73.3	36.4	109.7	2325.9
FP合計	1379.6	883.9	2263.5	73.3	36.4	109.7	2373.2

平衡末期炉心の燃料重量[kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブラ	径ブラ	ブラ合計	合計
U235	19.8	20.9	40.7	33.3	38.4	71.6	112.4
U236	5.4	3.2	8.7	3.4	2.4	5.8	14.5
U238	14050.9	11363.1	25413.9	15271.3	15679.2	30950.5	56364.4
U 合計	14076.1	11387.2	25463.3	15308.0	15720.0	31027.9	56491.2
Pu238	53.1	54.1	107.2	0.3	0.1	0.4	107.6
Pu239	1947.6	1875.4	3823.0	547.5	364.0	911.5	4734.5
Pu240	1216.4	1256.3	2472.6	39.5	16.2	55.7	2528.3
Pu241	184.4	174.1	358.5	2.2	0.6	2.7	361.3
Pu242	144.0	151.0	295.0	0.1	0.0	0.1	295.1
Pu合計	3545.4	3510.9	7056.3	589.6	380.8	970.5	8026.8
Np237	15.7	16.7	32.3	1.5	1.0	2.5	34.8
Np合計	15.7	16.7	32.3	1.5	1.0	2.5	34.8
Am241	68.6	86.1	154.7	0.2	0.1	0.3	155.0
Am242m	4.9	4.5	9.4	0.0	0.0	0.0	9.4
Am243	40.7	41.7	82.4	0.0	0.0	0.0	82.4
Am合計	114.2	132.4	246.6	0.2	0.1	0.3	246.8
Cm242	4.3	3.3	7.6	0.0	0.0	0.0	7.6
Cm243	0.4	0.3	0.7	0.0	0.0	0.0	0.7
Cm244	45.5	44.7	90.3	0.0	0.0	0.0	90.3
Cm245	6.8	5.1	11.8	0.0	0.0	0.0	11.8
Cm合計	57.0	53.3	110.4	0.0	0.0	0.0	110.4
HM合計	17808.4	15100.5	32908.8	15899.3	16101.8	32001.1	64910.0
随伴FP	25.9	21.3	47.2	0.0	0.0	0.0	47.2
ランプ化FP	2238.7	1415.8	3654.5	145.2	70.2	215.4	3869.9
FP合計	2264.6	1437.1	3701.7	145.2	70.2	215.4	3917.1

表 2.3-32 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心における TRU 組成変動の核特性への影響 (導入期炉心)

項目	設計標準 [高速炉多重リサイクル TRU]	LWR 使用済燃料からの回収 TRU 組成モデルケース			
		組成① 30 年貯蔵した LWR 使用済ウラン燃料と 20 年貯蔵した ALWR 使用済ウラン燃料から回収した TRU を 9:1 で混合	組成② 70 年貯蔵した LWR 使用済ウラン燃料と 40 年貯蔵した ALWR 使用済ウラン燃料から回収した TRU を 3:7 で混合	組成③ 40 年貯蔵したプルサーマル使用済燃料と FBR 使用済燃料から回収した TRU を 5:5 で混合	組成④ 110 年貯蔵したプルサーマル使用済燃料と 90 年貯蔵した LWR 使用済ウラン燃料と 40 年貯蔵した ALWR 使用済ウラン燃料から回収した TRU を 0.5:1.9:7.6 で混合
取出平均燃焼度	150 GWd/t	←	←	←	←
全炉心取出平均燃焼度 ^{*1}	86 GWd/t	←	←	←	←
Pu 富化度 ^{*2} (内側炉心 / 外側炉心)	18.8 / 23.7 wt%	18.0 / 23.6 wt%	18.0 / 23.6 wt%	19.7 / 26.1 wt%	18.1 / 24.3 wt%
MA 混入率 ^{*2} (平均)	1.0 wt%	4.4 wt%	4.4 wt%	3.2 wt%	5.5 wt%
Fertile 含有率 ^{*2} (平均)	86.9 wt%	87.4 wt%	87.4 wt%	88.2 wt%	88.0 wt%
燃焼反応度	2.8 %Δk/k'	1.4 %Δk/k'	1.4 %Δk/k'	1.3 %Δk/k'	0.6 %Δk/k'
増殖比 (全体)	1.10	1.12	1.12	1.16	1.15
(炉心/軸ブランクット / 径ブランクット)	0.80 / 0.19 / 0.11	0.80 / 0.20 / 0.12	0.80 / 0.20 / 0.12	0.84 / 0.20 / 0.12	0.82 / 0.20 / 0.13
最大線出力 (内側炉心 / 外側炉心)	409 / 402 W/cm	406 / 406 W/cm	407 / 408 W/cm	405 / 406 W/cm	407 / 408 W/cm
最大高速中性子照射量 ^{*3}	5.4 × 10 ²³ n/cm ²	5.4 × 10 ²³ n/cm ²	5.4 × 10 ²³ n/cm ²	5.4 × 10 ²³ n/cm ²	5.4 × 10 ²³ n/cm ²
初装荷 Pu-f インベントリ (出力当たり)	6.3 t/GWe	6.0 t/GWe	6.0 t/GWe	5.6 t/GWe	5.8 t/GWe
実効遅発中性子割合 (全親核種考慮)	0.00335	0.00323	0.00323	0.00325	0.00317
ポイド反応度 ^{*4}	5.1 \$	5.8 \$	5.8 \$	5.7 \$	6.1 \$
ドップラ係数 [TdK/dT] ^{*4}	-5.3 × 10 ⁻³	-4.2 × 10 ⁻³	-4.2 × 10 ⁻³	-4.3 × 10 ⁻³	-3.8 × 10 ⁻³
複合システム倍増時間 ^{*5}	84 年	70 年	58 年	50 年	55 年

^{*1} ブランクット燃料を含む ^{*2} Pu/PlM ^{*3} E > 0.1 MeV ^{*4} 集合体内非均質効果考慮 ^{*5} 炉外滞在期間 5 年、燃交・定検期間 45 日

表 2.3-33 代替燃料材炉心検討用の主要な燃料仕様

	項 目	単 位	仕 様
炉 心 燃 料 集 合 体	燃料集合体型式	-	改良内部ダクト型 (集合体コーナ部燃 料要素16本削除)
	燃料材料	-	MOX
	構造材材料 (被覆管/ラッパ管)	-	PNC-FMS/PNC-FMS
	燃料要素本数/集合体	本	255
	炉心高さ	mm	1000
	軸方向ブランケット厚 (上/下)	mm	400(200/200)
	燃料要素外径	mm	10.4
	被覆管肉厚	mm	0.71
	燃料要素配列ピッチ	mm	11.5
	燃料要素配列ピッチ/燃料要素外径	-	1.106
	ワイヤ径	mm	1.03
	ワイヤ巻き付けピッチ	mm	200
	ガスプレナム長 (上部/下部)	mm	100/1100
	燃料要素全長	mm	2690
	内部ダクト ダクト厚	mm	2.0
	ダクト外面の1辺の長さ	mm	46.0
削除される燃料要素本数	本	16	
径 方 向 ブ ラ ン ケ ッ ト 燃 料 集 合 体	燃料集合体型式	-	正三角配列型
	燃料材料	-	劣化ウラン
	構造材材料 (被覆管/ラッパ管)	-	PNC-FMS/PNC-FMS
	燃料要素本数/集合体	本	217
	径方向ブランケット燃料高さ	mm	1400
	燃料要素外径	mm	11.7
	被覆管肉厚	mm	0.415
	燃料要素配列ピッチ	mm	12.83
	燃料要素配列ピッチ/燃料要素外径	-	1.097
	ワイヤ径	mm	1.07
	ワイヤ巻き付けピッチ	mm	200
	ガスプレナム長 (上部/下部)	mm	100/1100
燃料要素全長	mm	2690	
共 通 事 項	ラッパ管肉厚	mm	5.0
	ラッパ管内対面間距離	mm	191.6
	集合体間ギャップ	mm	4.4
	集合体配列ピッチ	mm	206.0

表 2.3-34 炉心流量配分値および熱流力特性

	流量領域 番号	集集体 体数	集集体流量 [kg/s]	領域流量 [kg/s]	燃料要素 最大出力 [kW]	被覆管 最高温度 [°C]	バンドル部 圧損 (MPa)
内側 炉心	1	54	35.3	1906.2	34.9	624	0.22
	2	54	33.2	1792.8	32.9	624	0.20
	3	88	31.4	2763.2	30.9	622	0.18
	4	92	28.7	2640.4	28.9	628	0.16
外側 炉心	5	40	31.7	1268.0	31.8	622	0.18
	6	66	28.9	1907.4	28.4	622	0.16
	7	88	25.4	2235.2	23.2	622	0.13
	8	80	19.9	1592.0	20.6	622	0.09
小計		562	16105.2 (kg/s) (88.5%)				
径 フ ラ	9	38	9.2	349.6			—
	10	58	6.8	394.4			—
小計		96	744.0 (kg/s) (4.1%)				
必要流量(合計)		658	16849.2 (kg/s) (92.6%)				
1次系流量			18200.0 (kg/s)				

表 2.3-35 CDF 評価対象燃料ピンの被覆管肉厚中心温度履歴

(単位: °C)

	流量領域 番号	第1サイクル		第2サイクル		第3サイクル		第4サイクル	
		BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC
内側 炉心	1	609.3	624.1	611.2	621.3	608.4	615.3	602.8	607.6
	2	609.5	624.2	610.8	621.0	608.0	615.1	602.6	607.7
	3	620.2	621.2	621.4	618.1	618.4	612.4	612.7	605.1
	4	627.6	615.8	628.2	612.8	625.2	607.5	619.8	600.8
外側 炉心	5	630.2	620.1	621.4	610.9	612.5	601.8	603.4	592.7
	6	623.1	621.0	615.1	612.5	607.3	604.4	599.4	596.3
	7	619.3	633.8	611.2	625.1	603.4	616.8	595.6	608.4
	8	627.6	633.3	621.9	627.0	616.4	620.9	610.9	614.9

表 2.3-36 PNC-FMS 鋼炉心の CDF 値

領域	流量領域	燃料ピン 最大出力 (kW)	被覆管肉厚中心 HS 温度(°C)		燃料ピン 最高燃焼度 (MWd/t)	CDF
			最高	寿命末期		
内側炉心	1	34.9	624	608	221,000	0.48
	2	32.9	624	608	208,400	0.41
	3	30.9	621	605	200,400	0.49
	4	28.9	628	601	184,300	0.46
外側炉心	5	31.8	622	606	197,800	0.21
	6	28.4	622	606	179,700	0.15
	7	26.2	622	606	161,000	0.23
	8	20.6	622	606	130,200	0.28

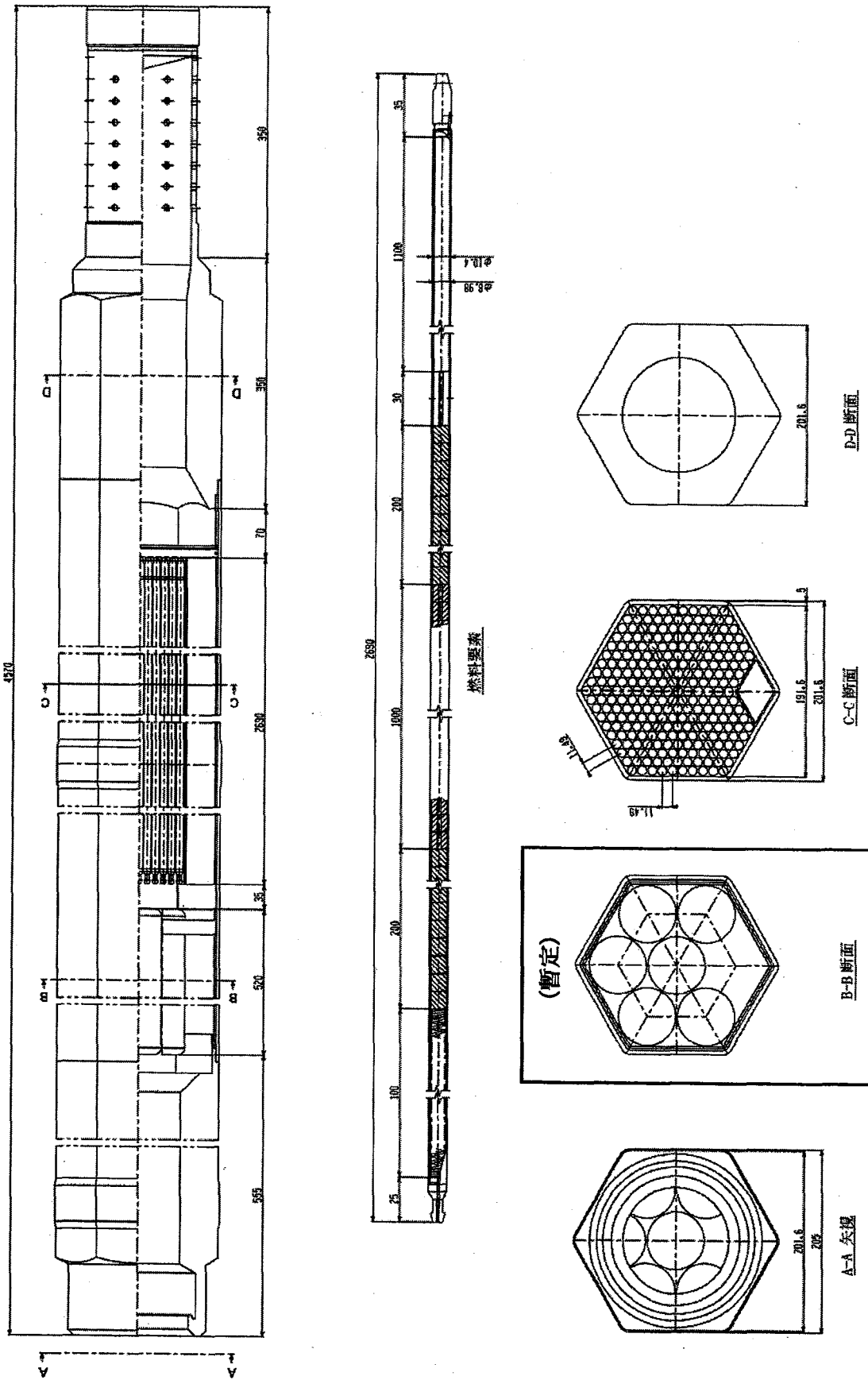


図 2.3-1 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の燃料集合体概念図 (導入期炉心)

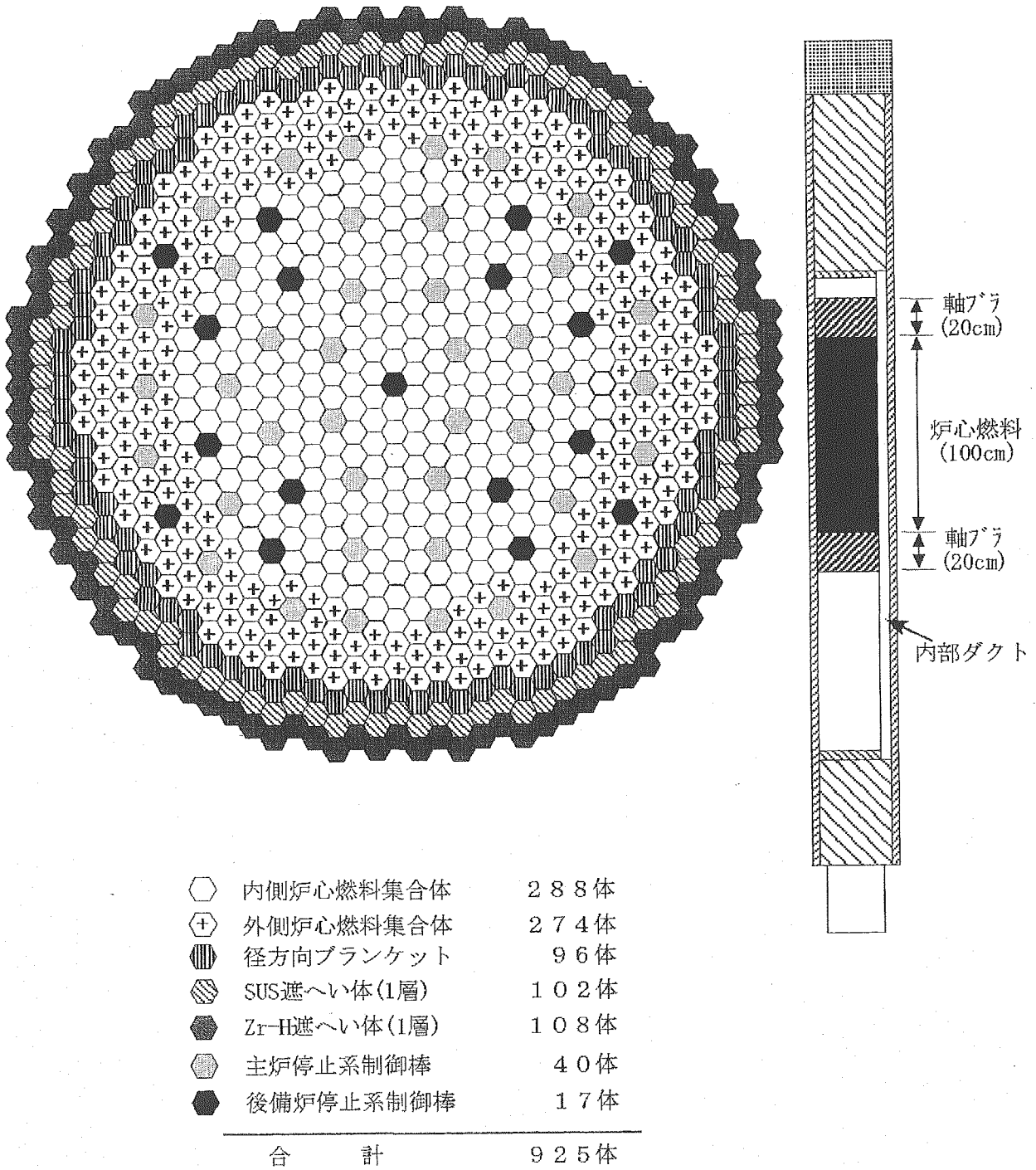


図 2.3-2 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心配置(導入期炉心)

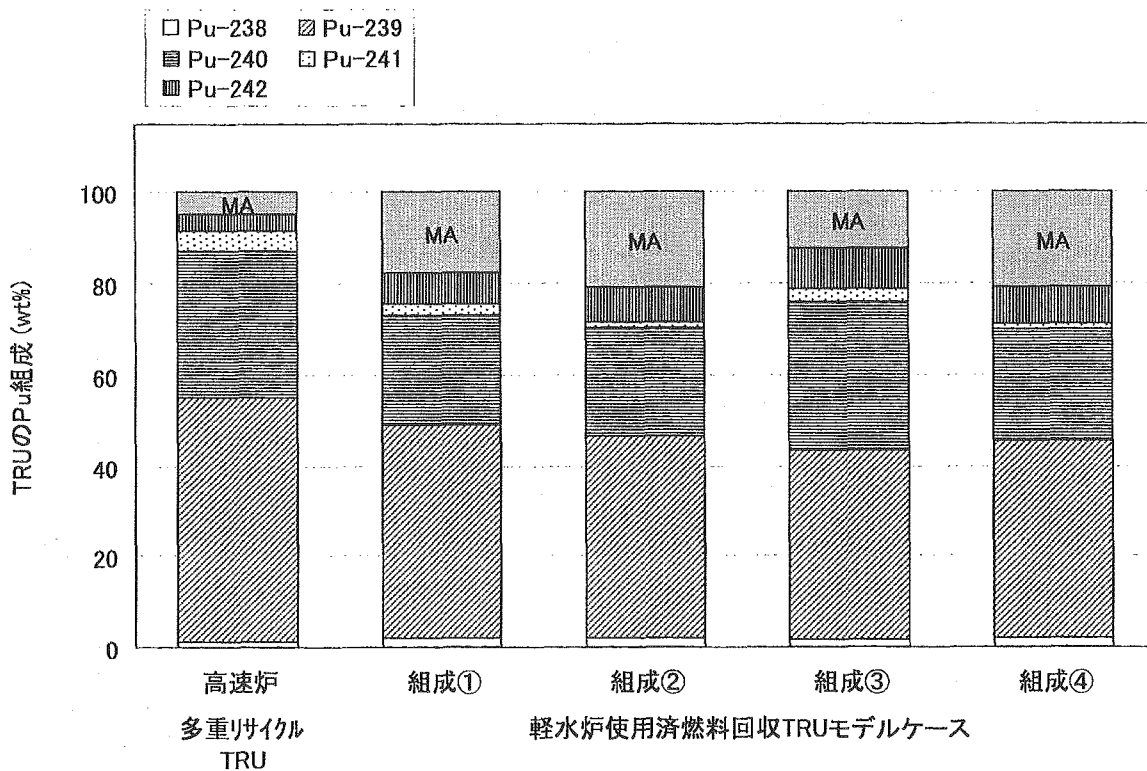


図 2.3-3 軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成モデルケースの Pu 組成

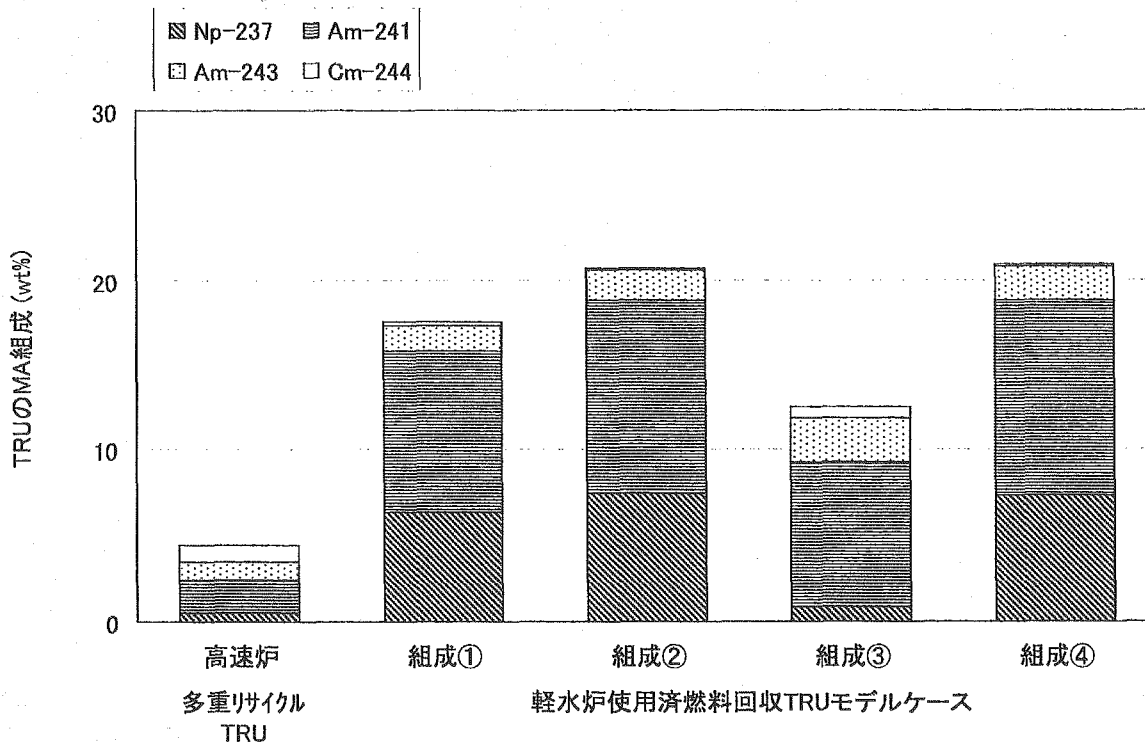
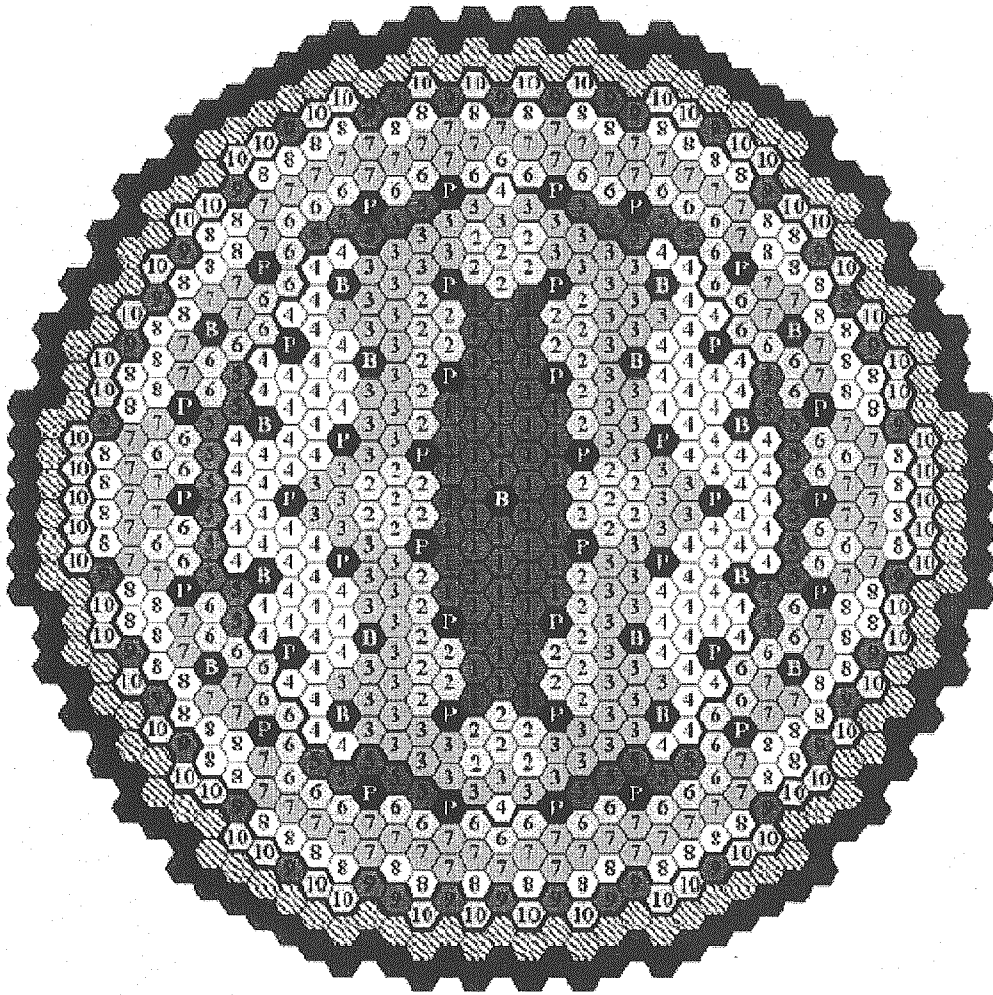


図 2.3-4 軽水炉使用済燃料回収 TRU 組成モデルケースの MA 組成



内側炉心燃料集合体 (288体)

● 第1流量領域 (54体)

② 第2流量領域 (54体)

③ 第3流量領域 (38体)

④ 第4流量領域 (92体)

外側炉心燃料集合体 (274体)

● 第5流量領域 (40体)

⑥ 第6流量領域 (66体)

⑦ 第7流量領域 (38体)

⑧ 第8流量領域 (34体)

径方向ブランクット燃料集合体 (96体)

● 第9流量領域 (36体)

⑩ 第10流量領域 (58体)

燃料集合体以外

P 主炉停止系制御棒

B 後備炉停止系制御棒

斜線 SUS 遮へい体

● Zr-16 遮へい体

図 2.3-5 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の流量領域区分(導入期炉心)

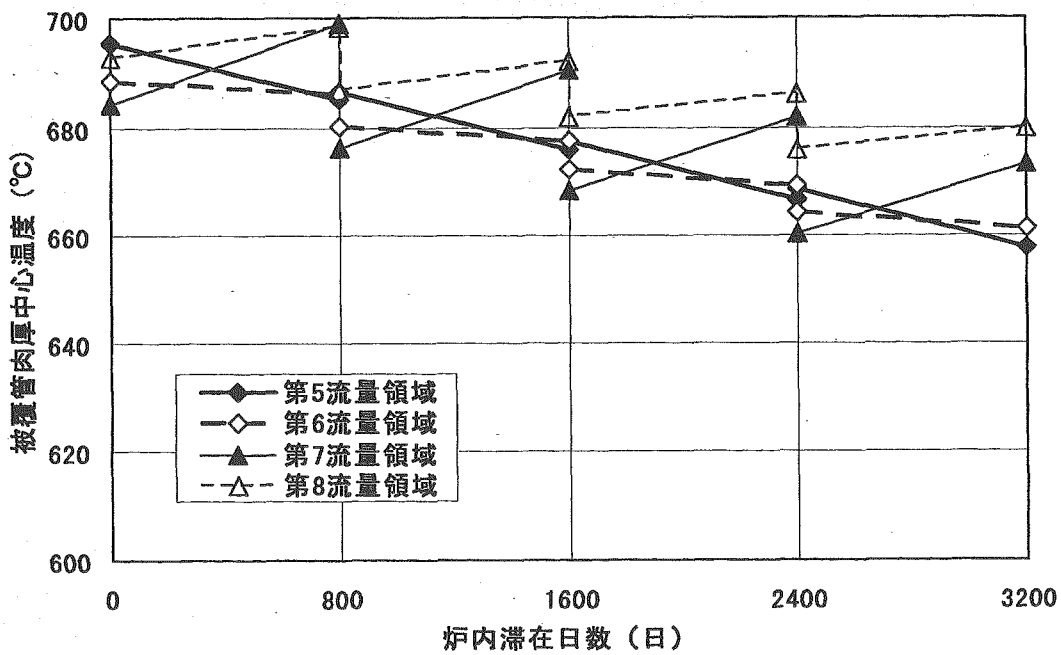
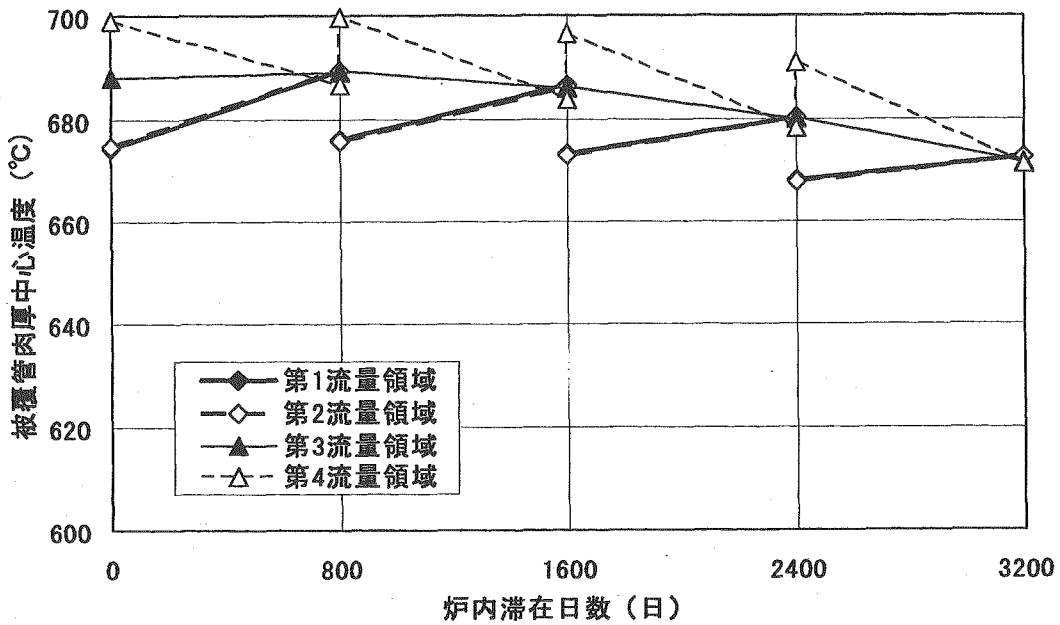


図 2.3-6 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の CDF 評価対象燃料ピンの被覆管最高温度履歴 (導入期炉心)

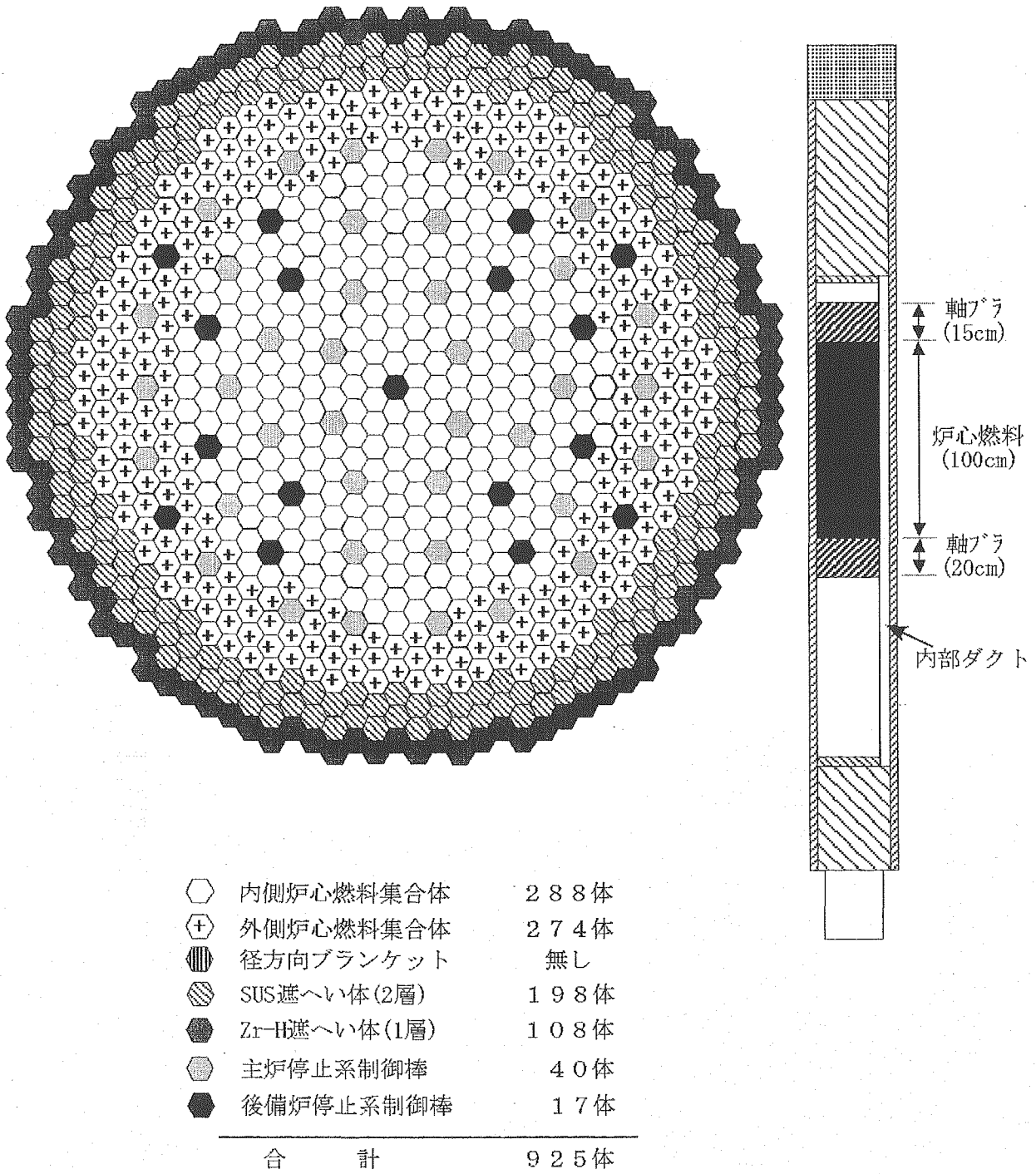
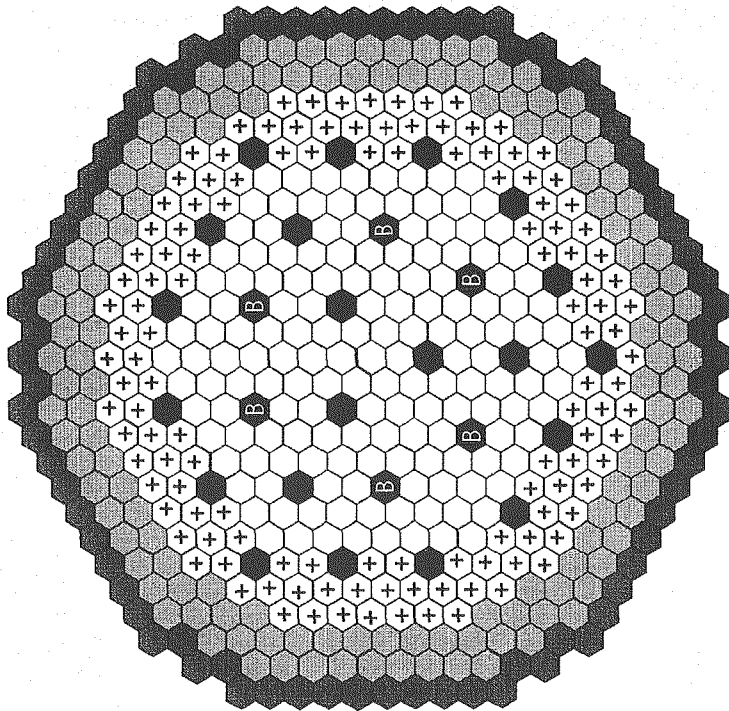
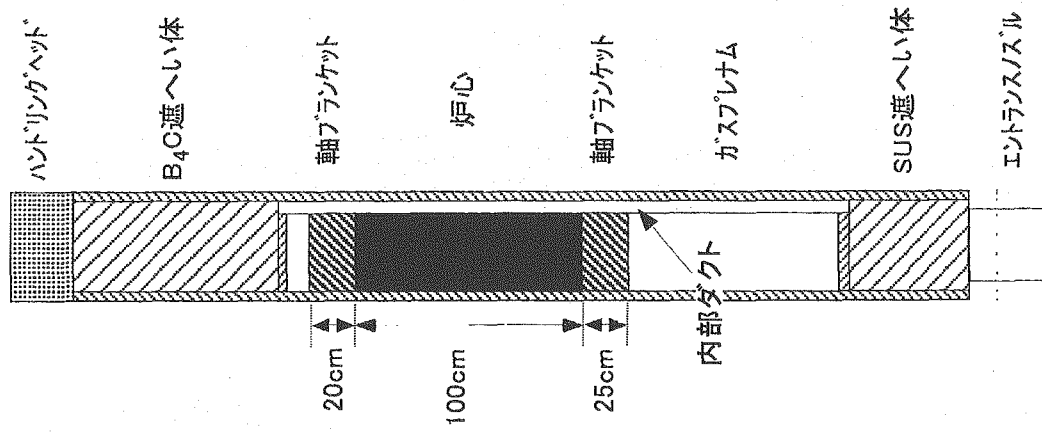


図 2.3-7 大型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心配置(平衡期炉心)



○	内側炉心燃料集合体	157体
+	外側炉心燃料集合体	129体
◐	SUS遮へい体	138体
◑	Zr-H遮へい体	78体
●	主炉停止系制御棒	21体
◐	後備炉停止系制御棒	6体
合 計		529体

図 2.3-8 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心配置(平衡期炉心)

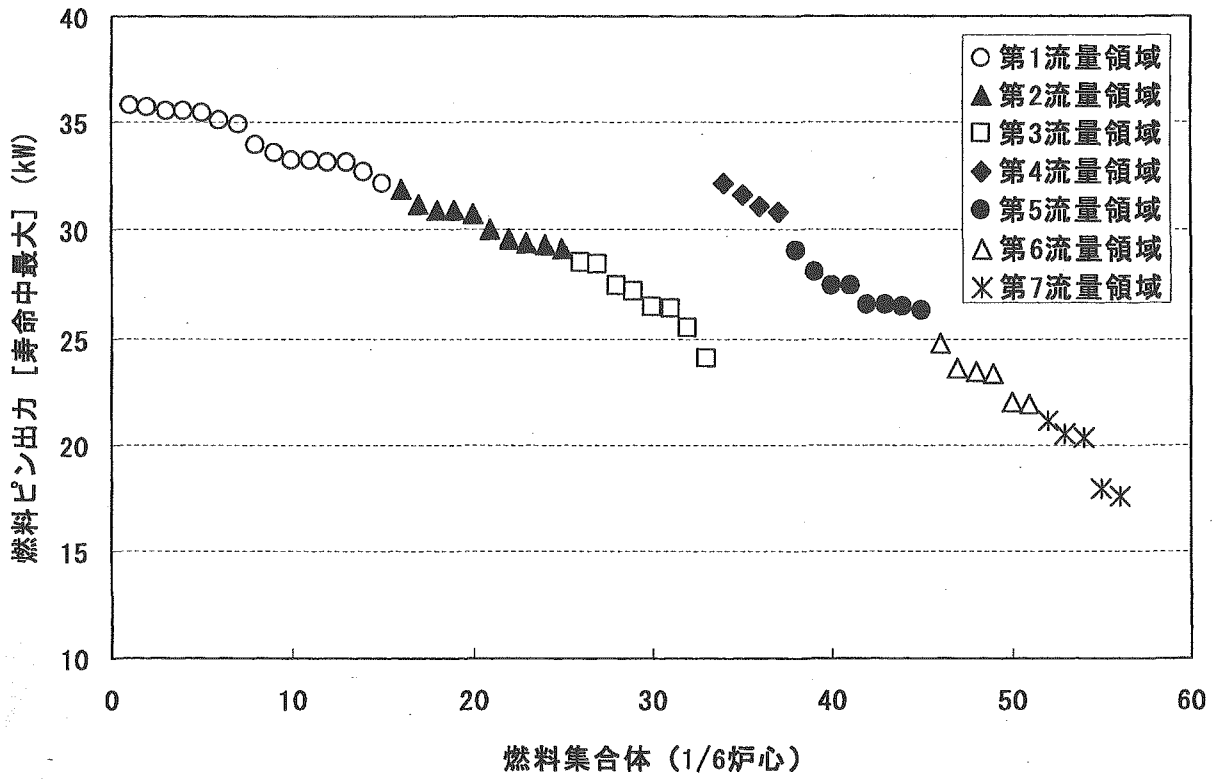


図 2.3-9 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の燃料ピン最大出力と流量領域区分 (平衡期炉心)

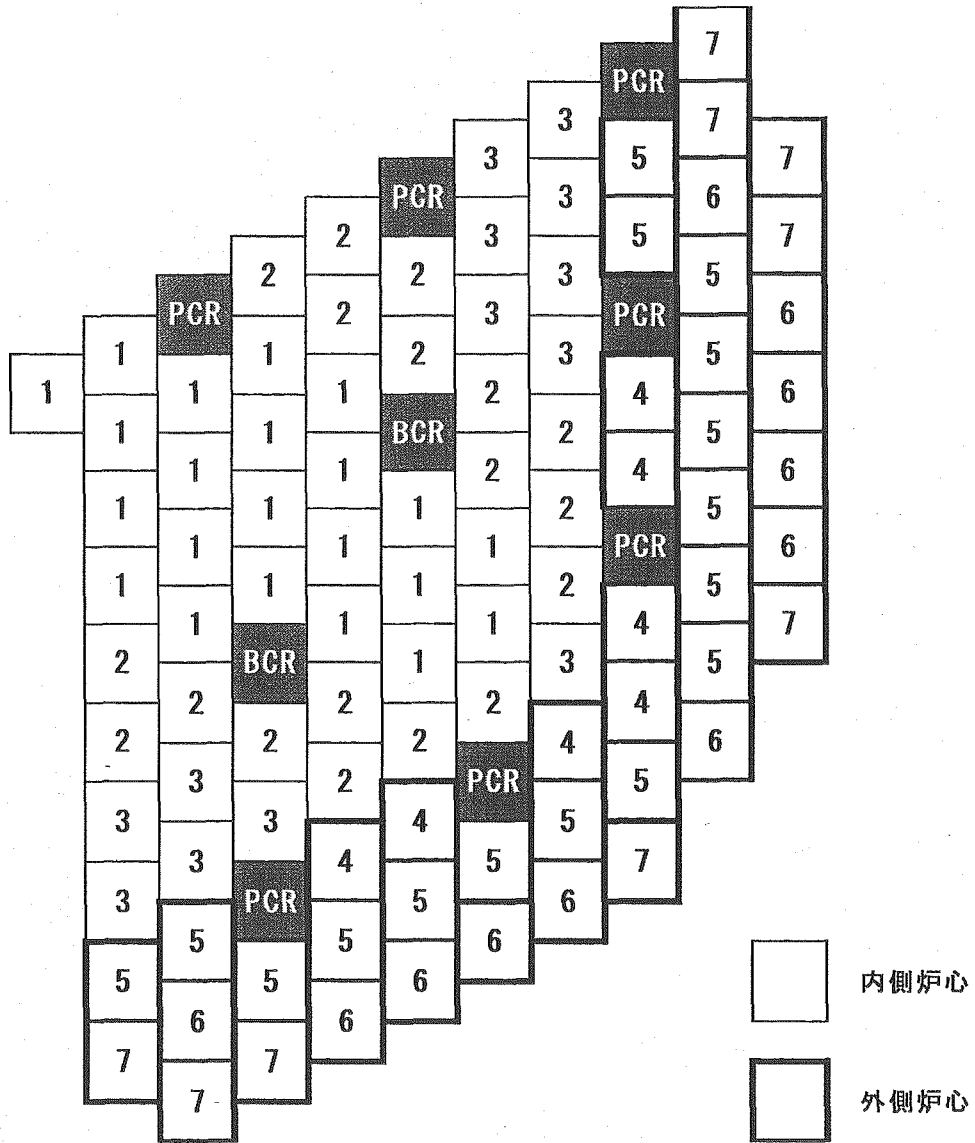


図 2.3-10 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の流量領域区分(平衡期炉心)

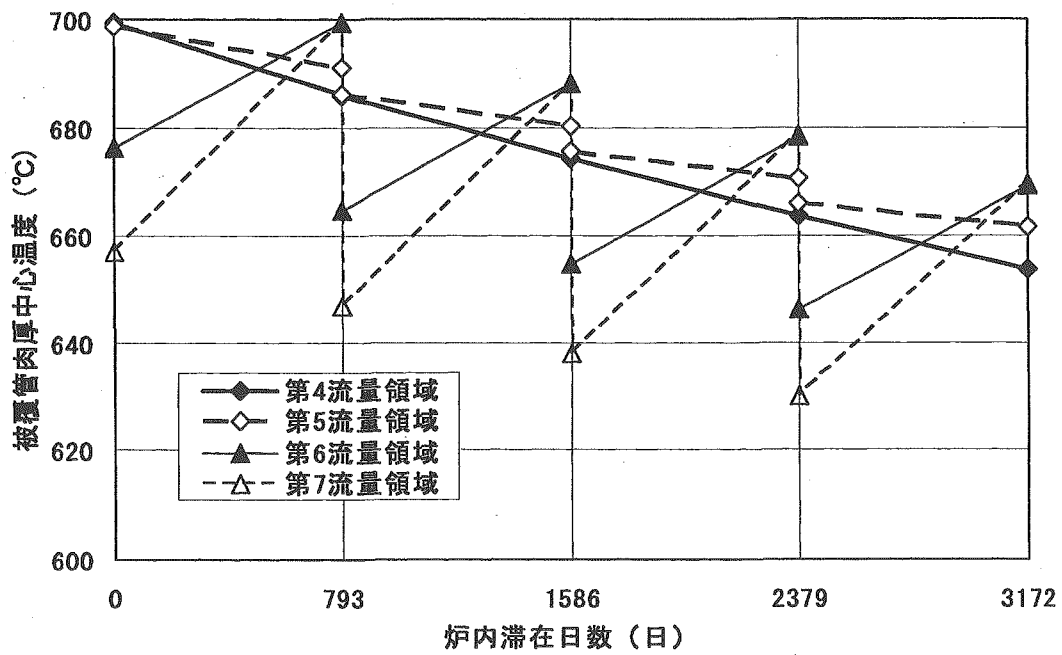
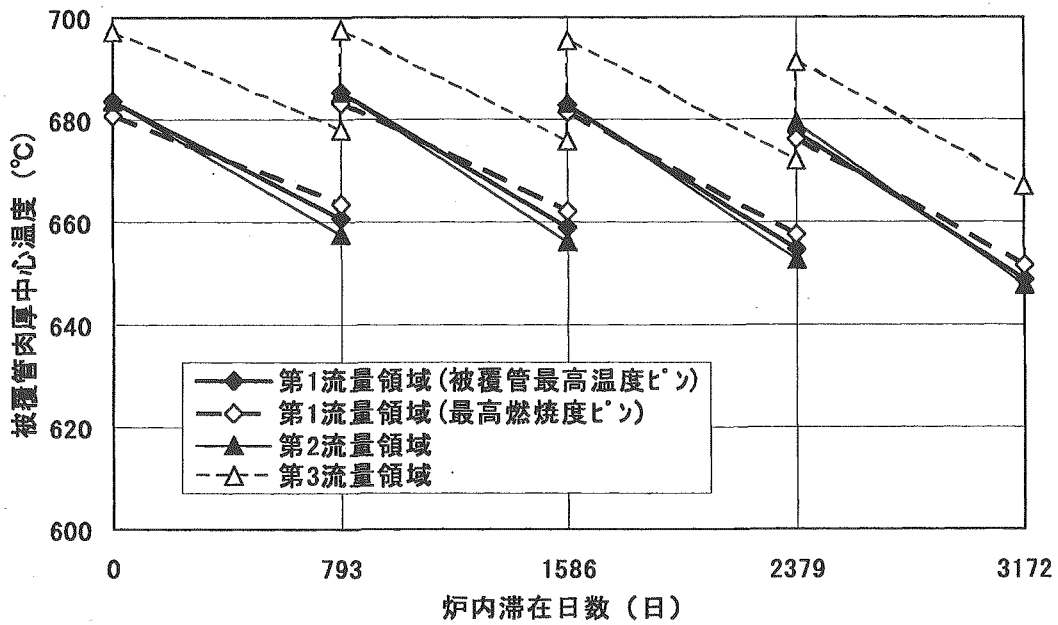
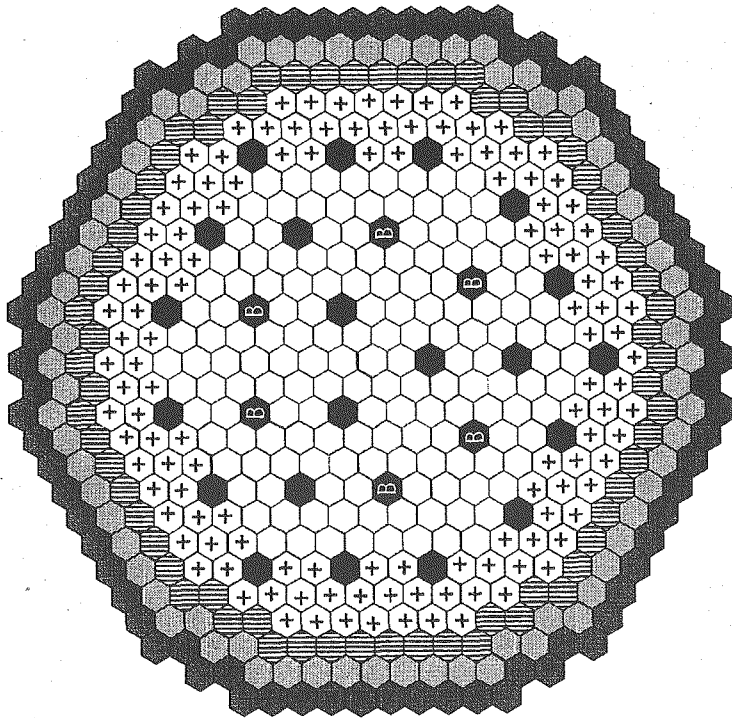
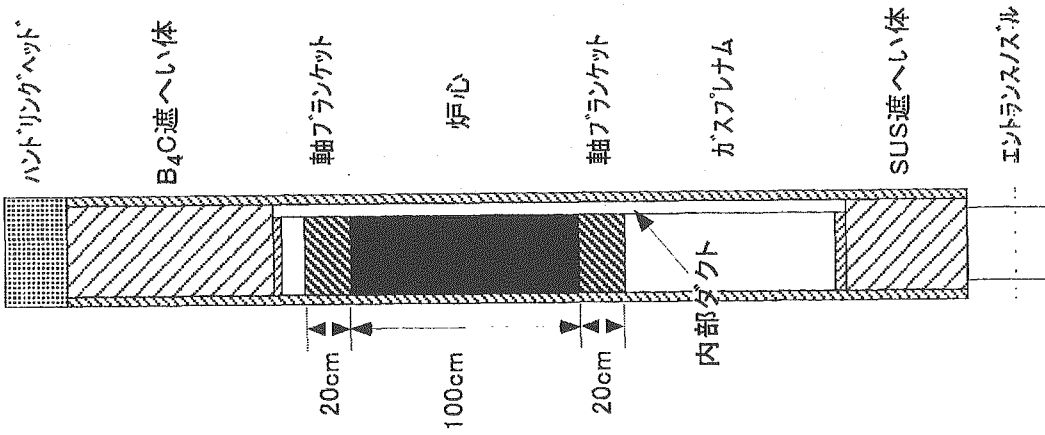


図 2.3-11 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の CDF 評価対象燃料ピンの被覆管最高温度履歴 (平衡期炉心)



○	内側炉心燃料集合体	157体
+	外側炉心燃料集合体	129体
▨	径方向ブランクケット燃料集合体	66体
▧	SUS遮へい体	72体
●	Zr-H遮へい体	78体
■	主炉停止系制御棒	21体
⊕	後備炉停止系制御棒	6体
合 計		529体

図 2.3-12 中型 MOX 燃料高内部転換型代表炉心の炉心配置 (導入期炉心)

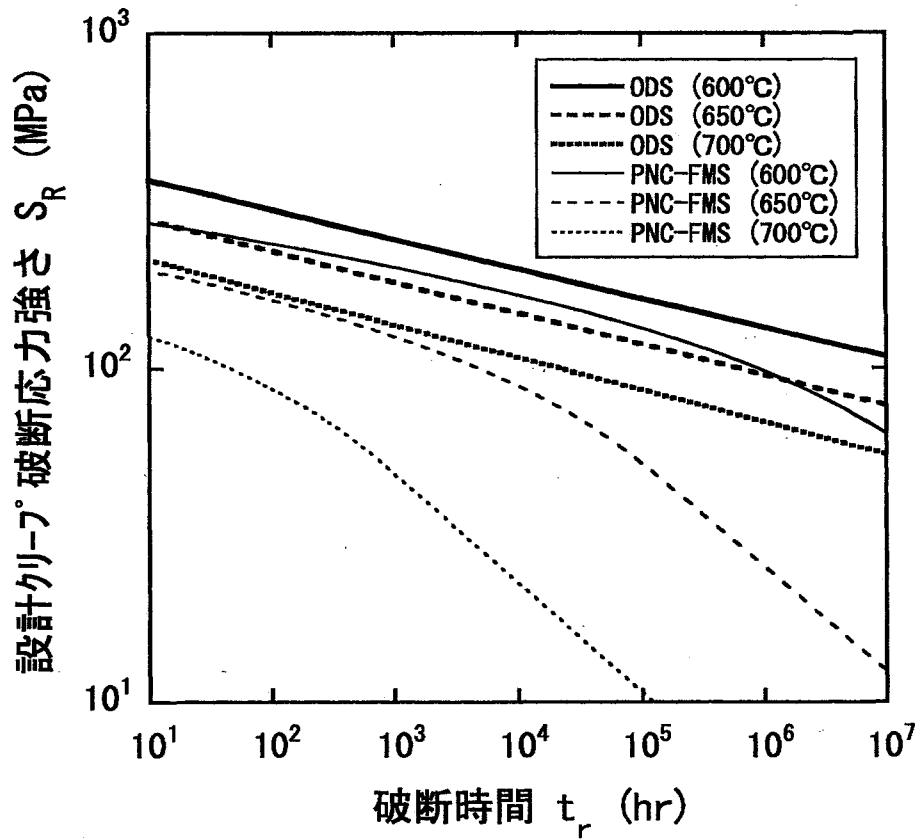


図 2.3-13 クリープ強度特性の比較 (ODS 鋼—PNC-FMS 鋼、環境効果未考慮)

2.4 まとめ

ナトリウム冷却 MOX 燃料炉心の設計検討として、安全設計側から新たな再臨界回避方策として提示された改良内部ダクト型燃料集合体の構造を具体化するとともに、燃料集合体の周辺流れ効果等の熱流動挙動を明らかにし、熱流体力特性評価に反映した。

また、改良内部ダクト型燃料集合体を採用した大型炉および中型炉の高内部転換型炉心とコンパクト型炉心を構築し、両炉心について仕様、核特性および性能の比較検討を行い代表炉心概念の絞り込みを行った。この結果、高内部転換型炉心とコンパクト型炉心はともに大型および中型炉の炉心に与えられた条件、性能要求を全て満足できる見通しを得た。しかしながら、炉心性能の点で高内部転換型炉心はコンパクト型炉心に比較して、ブランケット燃料を含めた全炉心取出平均燃焼度が高く、運転サイクル長さの長期化が可能であり、燃料サイクルコストおよび稼働率に優れているとの結論を得た。炉心仕様としては、遮へい体外接円径がコンパクト型より若干大きいのが、大型炉、中型炉ともにプラント側との取合条件を満足している。以上のことから、大型炉、中型炉ともに高内部転換型炉心を代表概念として選定した。

更に、代表炉心概念として選定した大型および中型高内部転換型炉心について、熱流体力と燃料健全性も含めた設計検討を行い、核・熱および燃料健全性の設計成立性を確認するとともに炉心・燃料仕様および炉心性能を明確化し、代表炉心として設定した。大型及び中型高内部転換型炉心の主要な仕様および炉心特性は下表のとおりである。

項 目	大型炉		中型炉		
	導入期炉心	平衡期炉心	導入期炉心	平衡期炉心	
炉心・燃料仕様	電気出力	1500	←	750	←
	炉心熱出力	3570	←	1785	←
	運転サイクル長さ (ヶ月)	26.3	←	27.4	26.1
	炉心高さ (cm)	100	←	100	←
	軸方向ブランケット厚さ [上部/下部] (cm)	20/20	15/20	20/20	20/25
	燃料集合体数 [内側炉心/外側炉心/径ブランケット]	562/96	562/-	286/66	286/-
	炉心流量領域数 [内側炉心/外側炉心]	4/4	4/-	4/4	4/-
	遮へい体外接円径 (m)	6.8	←	5.2	←
	炉心特性	Pu富化度* ¹ [内側炉心/外側炉心] (wt%)	18.3/20.9	18.3/21.1	18.8/23.7
増殖比		1.10	1.03	1.10	1.03
燃焼反応度 (%Δk/kk')		2.3	2.5	2.8	2.6
取出平均燃焼度 [炉心/全炉心]* ² (GWd/t)		147/90	150/115	150/86	146/104
最大線出力 (W/cm)		398	411	417	427
最大高速中性子照射量 [E>0.1MeV] (n/cm ²)		5.0E+23	4.9E+23	5.4E+23	5.3E+23
初装荷Pu-f重量 (t/GWe)		5.7	5.8	6.3	6.2
ポイド反応度* ³ [平衡末期] (\$)		5.3	←	5.1	5.0
ドップラ係数* ³ [Tdk/dT; 平衡末期]		-5.7E-03	-5.8E-03	-5.3E-03	-5.5E-03
被覆管最高温度 (°C)		700	—	—	700
被覆管CDF		0.37	—	—	0.45

*¹ Pu/重金属 *² ブランケット燃料を含む *³ 集合体内非均質効果考慮

上記の核・熱特性および燃料健全性評価結果より、代表炉心として構築した大型および中型高内部転換型炉心は、炉心に与えられた条件、性能要求を全て満足し、設計成立の見通しである。炉心性能において、大型炉は運転サイクル長さが約 26 ヶ月、全炉心取出平均燃焼度（ブランケット燃料を含む）が 90～115GWd/t、中型炉は運転サイクル長さが 26～27 ヶ月、全炉心取出平均燃焼度が 86～104GWd/t であり、炉心に対する性能要求である 18 ヶ月以上と 60GWd/t 以上を大幅に超えて達成する見通しである。

3. 金属燃料炉心

MOX 燃料炉心と比較して被覆管温度制約が 50℃程度厳しい金属燃料炉心において、MOX 燃料炉心と同等の原子炉出入口温度（550℃/395℃）を実現するために、金属燃料のもつ高内部転換特性を活かし、Pu 富化度を単一でかつ 12～14wt% とし、重金属密度を多段階化することにより、図 3.1-1 に示すような出力分布の時間的に非常に安定である高出口温度型金属燃料炉心概念を構築する。

また、更なる高温化方策について 3.3 で検討結果を行う。

3.1 代表炉心の設計検討

ODS 鋼の開発目標である高速中性子照射量 $5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{MeV}$) を満足する仕様を代表炉心として設定する。

3.1.1 大型炉

電気出力 1,500MWe の大型炉に適合する炉心を設定する。Zr 含有率については、昨年度検討^[5]では燃料融点を低下させないと言う安全性の観点から金属燃料の標準仕様である 10wt% を下限としていた。このような設定は標準仕様金属燃料に対して融点の低下を抑制することになるが、燃料製造性の観点からは新たな課題を生み出す可能性につながる。そこで、本検討では、燃料製造性悪化を防止する観点から、Zr 含有率 10wt% を上限とすることとした。逆に下限を、米国の金属燃料の照射実績から、6wt% とした。そして、Zr 含有率のみの 2 領域化では十分な出力分布の平坦化が達成できない場合は、スミア密度も 70～75% の範囲で調整することとした。その他の項目については、これまでの検討から変更はない。以上の考えに基づいた設計条件を表 3.1-1 に示す。

(1) FBR 平衡期炉心

増殖比 1.03 の炉心を設定する。以下、核設計、熱水力設計、燃料健全性評価に係る検討について示す。

①核設計検討

解析条件は次の通りである。

- ・炉定数：高速炉用統合炉定数 ADJ2000R^[7] (JFS-3 型式 70 群)
- ・随伴 FP の取扱い：Nd-143 で代表させ、FP 等価係数 1.0 を適用 (FS の金属電解法再処理を想定)
- ・燃焼特性：2 次元 RZ 体系中性子 70 群拡散燃焼計算により算出
- ・ナトリウムボイド反応度：基準状態に対し炉心部のラップ管内のナトリウムをボイド化し、2 次元 RZ 体系中性子 70 群拡散計算により算出し、非均質補正 (0.96) を考慮
- ・ドップラー係数：基準状態に対し炉心部の重金属核種のみを昇温させ、2 次元

RZ 体系中性子 70 群拡散計算により算出し、非均質補正 (1.05) を考慮

- ・最大線出力、最大高速中性子照射量：3次元 Tri-Z 体系中性子 7 群拡散計算により算出
- ・熱特性解析用出力分布：3次元 Tri-Z 体系中性子 7 群拡散計算により算出
- ・制御棒価値計算：3次元 Tri-Z 体系中性子 7 群拡散計算により算出し、輸送補正 (0.96)、メッシュ補正 (1.07)、群縮約補正 (0.97)、ランピング効果 (制御棒干渉効果の過度の保守性を排除するためにランピング効果 0.77 となるように B4C 原子数密度を希釈)、不確かさ (3σ で 9%) を考慮
- ・遮へい構成：径方向はステンレス鋼反射体 2 層と B4C 遮へい体 2 層とし、軸方向は上部にガスペナム、下部にステンレス鋼遮へい体とする。今後、本報告書の炉心配置図に示した遮へい構成条件での解析が必要である。

まず、内側炉心と外側炉心の Zr 含有率とスミア密度を設定する。昨年度検討では、内側炉心と外側炉心の Zr 含有率をそれぞれ 16wt%、10wt% と設定した場合が最適であった。6~10wt% の範囲で Zr 含有率のみを変えた場合には、内側炉心と外側炉心の Zr 含有率はそれぞれ 10wt%、6wt% となるが、内側炉心と外側炉心の重金属密度比は 0.90 であり、昨年度設定の 0.85 には及んでおらず、十分な出力分布の平坦化が期待できない。そこで、スミア密度も併せて調整することとし、内側炉心の Zr 含有率を 10wt% にスミア密度を 70% に、外側炉心の Zr 含有率を 6wt% にスミア密度 75% に設定することにより、内側炉心と外側炉心の重金属密度比を 0.86 にまで下げることができた。

次に、基本燃料仕様を設定する。一般に炉心を大型化することにより、出力当たりの重金属インベントリが削減できる。従って、昨年度検討のように炉心サイズに依らずピン径を一定とした場合には、炉心の大型化につれて燃料ピン総本数が少なくなり、線出力の増加につながる。その結果、同じ冷却材温度条件下では被覆管内と膜の温度上昇が増加することにより、被覆管内面の温度が相対的に高くなる。従って、燃料ピン総本数 (燃料ピン総延長) を増加させることは、被覆管内面温度を低減する観点からは望ましい。ただし、過剰な燃料ピン総本数の増加は、燃料製造側の負荷を過度に増大させたり、核特性悪化の原因にもなりうる。そこで、代表炉心の選定では、昨年度設定した中型炉心の平均線出力 170W/cm を目安とする。内側炉心と外側炉心の体数比 (内側炉心 45%)、取出平均燃焼度 (95GWd/t)、バンドル部圧力損失 (0.2MPa) を一定とした条件で、燃料ピン径についてサーベイした結果を表 3.1-2 に示す。燃料ピンを昨年度仕様の 8.5mm から 7.2mm へと細径化し、炉心高さを 100cm から 95cm へと縮小することにより、平均線出力 176W/cm、Na ボイド反応度 8% 以下、増殖比 1.03 近傍の炉心が設定できると期待できることが分かる。

更に、燃料ピン径 7.2mm で高さ 95cm の炉心について、熱流力設計の目安となる包絡熱出力を極力抑えるためのサーベイを行う。ここで、包絡熱出力は図 3.1-2

に示すように燃料集合体単位での運転期間中の最大発熱の和である。1次系冷却材流量はヒートバランスから与えられるので、包絡熱出力が低ければ、同じ原子炉出入口温度条件では運転期間中の原子炉入口からの温度上昇最高値が減少し、その分がホットスポット温度の低減につながる。換言すれば、同じホットスポット温度条件では原子炉出入口温度を向上させることができる。さて、炉心高さ(95cm)、取出平均燃焼度(95GWd/t)、バンドル部圧力損失(0.2MPa)一定条件で全燃料集合体数(炉心等価直径)と内側対外側燃料集合体割合をパラメータとしてサーベイした結果を表3.1-3に示す。また、規格化包絡熱出力(=包絡熱出力/定格熱出力)の炉心等価直径と内側炉心割合による等高線図を図3.1-3に示す。増殖比1.03の条件では炉心等価直径4.7mで内側炉心割合が50%の場合(炉心②-2と炉心②-3の中間の仕様)が最適であることが分かる。参考情報として、Pu富化度と増殖比との関係を図3.1-4に示す。増殖比1.03は炉心サイズや内側炉心割合に依らずPu富化度を12.5wt%と設定することにより得られていることが分かる。また、Pu富化度0.2wt%の変動により増殖比が1%変化することも分かる。

以上のサーベイ結果より大型代表炉心仕様を選定した。大型代表炉心の主要燃料仕様を表3.1-4に、主要核特性を表3.1-5に、炉心配置を図3.1-2に、重金属物量収支を表3.1-6にそれぞれ示す。設計条件は概ね満足しているが、高速中性子照射量制限により(炉心部)取出平均燃焼度は100GWd/tとなっている。参考用に昨年度に選定した代表炉心とコンパクト型炉心(炉心配置は図3.1-3参照)の核特性の比較も表3.1-4に示している。昨年度代表炉心と比較して、Zr含有率を低めに設定したために重金属インベントリと炉心サイズが低減されていることが大きな特徴である。コンパクト型炉心との比較では、初装荷Pu-fインベントリは若干多いものの、炉心等価直径はより小さく、原子炉出口温度は約40℃高く、非常に魅力ある金属燃料炉心概念であると言える。

代表炉心の制御反応度収支を表3.1-7に、1ロッドスタック制御棒位置を図3.1-7にそれぞれ示す。燃焼反応度が1%以下と非常に小さいため、従来の炉心と比較して少ない制御棒体数でも成立が得られる。

最後に運転サイクル長期化の概略検討について示す。代表炉心の運転サイクル長さは21.5ヶ月であり、MOX燃料代表炉心の26ヶ月よりも短く稼働率において1%程度下回ることが予想される。そこで、燃料交換バッチ数を3から2とし、運転サイクル長さを32.3ヶ月に長期化させた場合の核特性への影響を評価した。評価結果を表3.1-8に示すが、燃焼反応度が約2倍の $1\% \Delta k/k'$ に増加している点を除けば包絡熱出力も含めて特に変化は見られず、代表炉心の基本特性は維持できる見通しである。稼働率についてはMOX燃料代表炉心よりも逆に約1%上回る結果となっている。制御反応度収支を表3.1-9示すが、燃焼反応度の増加、事故時投入反応度の増加、2バッチとなったことによる燃料スエリング補償と燃料製作公差の増加を考慮しても制御反応度収支は成立しており、設計対応の必要はない。なお、稼働率について、ここでの検討は定検期間を45日一定と仮定したが、実際に

は燃料交換バッチ数の変更により燃料交換体数が大幅に変化するためにその影響を考慮する必要がある。

② 熱流力設計検討

核計算で得られた3次元出力分布を基に熱特性解析を行う。被覆管温度計算においては、サブチャンネル解析モデルを適用した。なお、流量配分計画策定においては、原子炉出入口温度条件と流量条件を満足させ、被覆管内面最高温度の制限からの超過を定量的に求めることとした。

- ・ 1次系流量：18,200kg/s
(炉心領域に配分できる流量として1次系流量の96%を想定)
- ・ 原子炉出口／入口温度：550℃／395℃
- ・ 被覆管内面最高温度制限：650℃ (液相形成防止)
- ・ 工学的安全係数：表 3.1-10 に示すとおり (実証炉設計研究で使用された係数に対し、各部製造公差とスラグ偏心効果を ANL の製造実績に基づき見直し)
- ・ 圧力損失評価式：Cheng-Todreas 式^[8]
- ・ 流量領域：8 領域程度 (従来設計研究と同様)
- ・ スペーサ形式：ワイヤ型

内側炉心4領域、外側炉心7領域の計11領域とし、出入口温度は550/395℃の条件で、流量条件を満足するよう流量配分を行った。流量配分結果を表 3.1-11 に、流量領域区分を図 3.1-8 にそれぞれ示す。被覆管内面最高温度は650℃であり、制限を満足する結果が得られた。昨年度検討では、被覆管内面最高温度は655℃にまで達したが、今年度の評価では、燃料ピンを細径化したことによる周辺流れ効果の改善と平均線出力の低減による被覆管内部と膜の温度上昇低減により、5℃の改善が見られる結果となっている。また、バンドル部圧力損失は最大で0.20MPaであり制限を満足している。

燃料健全性評価用データとして、流量領域毎の代表燃料要素の出力履歴と被覆管肉厚中心温度履歴をそれぞれ表 3.1-12、表 3.1-13 の通り求めた。

③ 燃料健全性評価検討

熱特性解析において得られた燃料要素の出力と被覆管肉厚中心温度の履歴に基づき、被覆管の内面及び外面の腐食、FPガス放出による内圧増加を考慮し、寿命末期における被覆管周方向応力とクリープ寿命分数和(CDF)を算出し、燃料健全性評価を行う。

- ・ 材料特性評価式：クリープ強度 以下に示す ODS クリープ 破断強度式
(FS フェーズ II 設計評価用暫定式)

$$\begin{aligned} \text{LMP} &= (T + 273.15) (21.94 + \log_{10} (3 t_R)) / 1000 \\ &= 45.93 - 9.943 \log_{10}(S_R) \end{aligned}$$

T : 温度 (°C)

t_R : 破断時間 (hr)

S_R : 設計クリープ破断応力強さ (MPa)

(S_t ベースで適用、 $S_t = 0.8 \times S_R$)

内面腐食 ODS 鋼暫定評価式

外面腐食 ODS 鋼暫定評価式^[9]

得られた出力履歴と被覆管肉厚中心温度履歴を用いて、燃料健全性評価を行った。燃料健全性の評価結果を表 3.1-14 に示す。ガスプレナム長を昨年度検討と同様に 1,720mm とした場合には寿命末期の被覆管周方向応力は最大で 123MPa であり F/S で暫定的に設定した制限目安 120MPa 以下を若干超過したため、ガスプレナム長を 1,760mm まで延長し、被覆管周方向応力を 119MPa に低減させた。寿命末期における CDF は最大で 0.20 であり制限の 0.5 以下を満足している。以上のように、燃料健全性の成立性が確認できた。

(2) FBR 導入期炉心

① 核設計検討

核設計検討に加え、熱流力特性概略評価検討を示す。

平衡期炉心に対し、高さ 15cm の上部軸ブランケットの付加により、増殖比 1.1 程度の導入期炉心を設定した。設定した炉心の主要炉心特性を表 3.1-15 に、配置を図 3.1-9 にそれぞれ示す。主要核特性について、ナトリウムボイド反応度は 8.2% と条件の 8% 程度を満足している。炉心部取出平均燃焼度は平衡期炉心と同様に 100GWd/t 程度である。複合システム倍増時間は 59 年となった。

導入期炉心では上部に軸ブランケットを負荷するため、炉心部の出力分担は数%減少する。他方、被覆管内面ホットスポット温度はブランケット燃料上端部ではなく炉心燃料上端部に生じると考えられるため、熱水力設計目安となる包絡熱出力は炉心部分担分について見ておけばよい。軸ブランケット発熱寄与分は最小となる燃焼初期で 1.7% なので、平衡期炉心と比較して導入期炉心では、炉心部包絡熱出力も 1.7% 減少すると予想され、被覆管ホットスポット温度は 4°C 程度減少し 646°C となる見込みである。また、平衡期炉心と同じ被覆管ホットスポット温度条件では、原子炉出口温度は 3°C 程度向上可能な見込みである。更に、定性的には燃焼反応度も半分程度なので、制御棒運用に係る合理化も期待できる。また、バンドル部圧力損失は 0.21MPa となり制限の 0.2MPa 程度以下を満足する。

② TRU 組成変動の影響検討

導入期向け代表炉心を対象に金属燃料高速炉多重リサイクル TRU 組成を用いた場合に対して、MOX 燃料炉心からの移行を想定した MOX 燃料高速炉多重リサイクル TRU 組成への変化、あるいは、2.3.1(iii)項で示した軽水炉からの移行を想定した FBR 導入シナリオに基づく種々の軽水炉取出使用済燃料回収 TRU 組成への変化と言った TRU 組成変動による核特性への影響評価を行った。

評価結果を表 3.1-16 に示す。

MOX 燃料高速炉多重リサイクル TRU 組成を用いた場合の、金属燃料高速炉多重リサイクル TRU 組成を用いた場合に対する影響は非常に軽微である。また、約 3% の内部転換比の向上により倍增時間に 10 年程度の短縮が見られる。

軽水炉取出使用済燃料回収 TRU 組成を用いた場合の、金属燃料高速炉多重リサイクル TRU 組成を用いた場合に対する影響に関して、Pu 富化度が 13~14wt% と MOX 燃料炉心と比較して低いため、MA 含有率は最大で 3.6% であり 5% にまでは達していない。燃焼反応度は絶対値で $1\% \Delta k/kk'$ 以上の増加が見られ、図 3.1-10 に示すように燃焼と共に余剰反応度の大きな増加が見られる。内部転換比の向上に起因して、内側炉心及び外側炉心の出力分担率の燃焼による変化の程度が増加していることから、径方向出力分布変動も増加していることが予想される。Na ボイド反応度は最大で 9.5\$ にまで達しており、目標の 8\$ を大きく超過している。ただし、Na ボイド反応度の制限からの超過は、MOX 燃料炉心の設計（LWR 使用済燃料回収 TRU 組成適用時も制限の 6\$ をほぼ満足）とは異なり、高速炉多重リサイクル TRU 組成を使用した基準炉心の設計において、制限に対する余裕が少なかったためである。炉心・燃料設計検討で基準としている高速炉多重リサイクル TRU 組成使用時に対して、LWR 使用済燃料回収 TRU を用いた場合の核特性への影響は比較的大きい。このように、金属燃料炉心について、ここで暫定した LWR 使用済燃料回収 TRU 組成を想定する場合には、内部転換比や Na ボイド反応度を適切にするために炉心高さの縮小等の設計対応が必要であると考えられる。

3.1.2 中型炉

電気出力 750MWe の中型炉に適合する炉心を設定する。設計条件を表 3.1-17 に示すが、電気/熱出力、1 次系流量、遮へい体外接円径目安については中型炉相応としているが、それ以外については大型炉の設計条件と同様である。

(1) FBR 平衡期炉心

増殖比 1.03 の炉心を設定する。以下、核設計、熱流体力設計、燃料健全性評価に係る検討について示す。

① 核設計検討

解析条件は次の通りである。

- ・ 炉定数：高速炉用統合炉定数 ADJ2000R^[7] (JFS-3 型式 70 群)

- ・ 随伴 FP の取扱い：Nd-143 で代表させ、FP 等価係数 1.0 を適用（FS の金属電解法再処理を想定）
- ・ 燃焼特性：2次元 RZ 体系中性子 70 群拡散燃焼計算により算出
- ・ ナトリウムボイド反応度：基準状態に対し炉心部のラップ管内のナトリウムをボイド化し、2次元 RZ 体系中性子 70 群拡散計算により算出し、非均質補正 (0.96) を考慮
- ・ ドップラー係数：基準状態に対し炉心部の重金属核種のみを昇温させ、2次元 RZ 体系中性子 70 群拡散計算により算出し、非均質補正 (1.05) を考慮
- ・ 最大線出力、最大高速中性子照射量：3次元 Tri-Z 体系中性子 7 群拡散計算により算出
- ・ 熱特性解析用出力分布：3次元 Tri-Z 体系中性子 7 群拡散計算により算出
- ・ 制御棒価値計算：3次元 Tri-Z 体系中性子 7 群拡散計算により算出し、輸送補正 (0.96)、メッシュ補正 (1.07)、群縮約補正 (0.97)、ランピング効果（制御棒干渉効果の過度の保守性を排除するためにランピング効果 0.77 となるように B4C 原子数密度を希釈）、不確かさ (3σ で 9%) を考慮
- ・ 遮へい構成：解析では径方向はステンレス鋼反射体 2 層と B4C 遮へい体 2 層とし、軸方向は上部はガスペナムだが下部はステンレス鋼遮へい体としている。今後、本報告書の炉心配置図に示した遮へい構成条件での解析が必要である。

内側炉心と外側炉心の Zr 含有率とスミア密度は大型炉と同様に内側炉心の Zr 含有率を 10wt% にスミア密度を 70% に、外側炉心の Zr 含有率を 6wt% にスミア密度 75% に設定する。

代表炉心の選定では、大型炉検討と同様に昨年度設定した中型炉心の平均線出力 170W/cm を目安とし、3.3 において燃料ピン総本数の増加による被覆管内面温度の低減効果を感度解析的に評価することとする。内側炉心と外側炉心の体数比（内側炉心 450）、炉心高さ（100cm）、高速中性子照射量 ($5.3 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ 、 $E > 0.1 \text{MeV}$)、バンドル部圧力損失 (0.2MPa) 一定の条件で、燃料ピン径についてサーベイした結果を表 3.1-18 に示す。炉心配置は昨年度検討炉心とほぼ類似とし、燃料ピンを昨年度仕様の 8.5mm から 7.5mm へと細径化することにより、Na ボイド反応度 8% 以下、増殖比 1.03 近傍の炉心が設定できると期待できることが分かる。

更に、燃料ピン径 7.5mm の炉心について、熱流力設計の目安となる包絡熱出力を極力抑えるためのサーベイを行う。炉心高さ（100cm）、取出平均燃焼度（90GWd/t）、バンドル部圧力損失（0.2MPa）一定条件で全燃料集合体数（炉心等価直径）と内側対外側燃料集合体割合をパラメータとしてサーベイした結果を表 3.1-19 に示す。また、規格化包絡熱出力（=包絡熱出力/定格熱出力）の炉心等価直径と内側炉心割合による等高線図を図 3.1-12 に示す。増殖比 1.03 の条件では炉心等価直径 3.4m で内側炉心割合が 40% の場合（炉心②・2 相応）が規格化包絡熱出力を低減する上で最適であることが分かる。参考情報として、炉心等価直径

と内側炉心割合による Pu 富化度の等高線図を図 3.1-13 に示す。増殖比 1.03 は大型炉心の場合と同様に炉心サイズや内側炉心割合に依らず Pu 富化度を 12.5wt% と設定することにより得られていることが分かる。また、大型炉心に比べ、中型炉心では径方向の中性子漏洩の寄与が約 2 倍であることから炉心等価直径に対する増殖比や Pu 富化度への感度が 2 倍程度高いことも分かる。

以上のサーベイ結果より中型代表炉心仕様を選定した。中型代表炉心の主要燃料仕様を表 3.1-20 に、主要核特性を表 3.1-21 に、炉心配置を図 3.1-13 に、重金属物量収支を表 3.1-22 にそれぞれ示す。設計条件は概ね満足しているが、高速中性子照射量制限から（炉心部）取出平均燃焼度は約 100Gwd/t となっている。参考用に昨年度に選定した代表炉心とコンパクト型炉心（炉心配置は図 3.1-14 参照）の核特性の比較も表 3.1-21 に示している。昨年度代表炉心との比較では Zr 含有率を低めに設定したために重金属インベントリと炉心サイズが低減されていることが大きな特徴である。コンパクト型炉心との比較では、初装荷 Pu-f インベントリは多いものの炉心等価直径は同等であり、原子炉出口温度は約 40℃ 高く、非常に魅力ある金属燃料炉心概念であると言える。

代表炉心の制御反応度収支を表 3.1-23 に、1 ロッドスタック制御棒位置を図 3.1-15 にそれぞれ示す。燃焼反応度が 1% 以下と非常に小さいため、従来の炉心と比較して少ない制御棒体数で成立する。

最後に運転サイクル長期化の概略検討について示す。代表炉心の運転サイクル長さは 24 ヶ月であり、MOX 燃料代表炉心の 26 ヶ月よりも短く、稼働率において 0.4% 程度下回ることが予想される。そこで、燃料交換バッチ数を 3 から 2 とし、運転サイクル長さを 36 ヶ月に長期化させた場合の核特性への影響を評価した。評価結果を表 3.1-24 に示すが、燃焼反応度が約 2 倍の $1\% \Delta k/kk'$ に増加している点を除けば包絡熱出力も含めて特に変化は見られず、代表炉心の基本特性は維持できる見通しである。稼働率については MOX 燃料代表炉心よりも逆に約 1.5% 上回る結果となっている。制御反応度収支を表 3.1-25 示すが、燃焼反応度の増加、事故時投入反応度の増加、2 バッチとなったことによる燃料スエリング補償と燃料製作公差の増加を考慮しても制御反応度収支は成立しており、設計対応の必要はない。なお、稼働率について、ここでの検討は定検期間を 45 日一定と仮定したが、実際には燃料交換バッチ数の変更により燃料交換体数が大幅に変化するためにその影響を考慮する必要がある。

② 熱流力設計検討

核計算で得られた 3 次元出力分布を基に熱特性解析を行う。被覆管温度計算においては、サブチャンネル解析モデルを適用した。なお、流量配分計画策定においては、原子炉出入口温度条件と流量条件を満足させ、被覆管内面最高温度の制限からの超過を定量的に求めることとした。

- ・ 1次系流量：9,083kg/s
(炉心領域に配分できる流量として1次系流量の96%を想定)
- ・ 原子炉出口／入口温度：550℃／395℃
- ・ 被覆管内面最高温度制限：650℃（液相形成防止）
- ・ 工学的安全係数：表 3.1-10 に示すとおり（実証炉設計研究で使用された係数に対し、各部製造公差とスラグ偏心効果を ANL の製造実績に基づき見直し）
- ・ 圧力損失評価式：Cheng-Todreas 式^[8]
- ・ 流量領域：8 領域程度（従来設計研究と同様）
- ・ スペーサ形式：ワイヤ型

内側炉心 2 領域、外側炉心 8 領域の計 10 領域とし、出入口温度は 550/395℃ の条件で、流量条件を満足するよう流量配分を行った。流量配分結果を表 3.1-26 に、流量領域区分を図 3.1-16 にそれぞれ示す。被覆管内面最高温度は 657℃であり、制限の 650℃を 7℃超過する結果が得られたが、工学的安全係数の合理化や 3.3 に示す更なる高温化対策等により、制限の 650℃は満足できる見通しである。昨年度検討では、被覆管内面最高温度は 659℃であったが、今年度の評価では燃料ピンを細径化したことによる周辺流れ効果の改善により、2℃の改善が見られる結果となっている。また、バンドル部圧力損失は最大で 0.21MPa であり制限の 0.2MPa 程度以下を満足している。

燃料健全性評価用データとして、流量領域毎の代表燃料要素の出力履歴を表 3.1-27 の通り求めた。

次に燃料健全性概略評価について示す。表 3.1-26 に示す中型炉心の解析結果では、被覆管内面最高温度は 650℃を超えており、特に液相形成が問題となるが、この超過は工学的安全係数の合理化等により改善されることを前提として、ここでは被覆管の温度履歴は現状の大型炉心のものと同レベルであると仮定する。また、大型炉心の評価結果から、中型炉心についても CDF には十分な余裕があり、被覆管周方向応力が燃料健全性成立性の律則となると考えられる。そこで、寿命末期の被覆管周方向応力が制限目安の 120MPa を満足するように上部ガスプレナム長を設定することとする。出力履歴から、内圧と被覆管内面腐食量（炉心上端部の燃焼度より算出）を求め、寿命末期の被覆管周方向応力を算出する。燃料健全性概略評価を表 3.1-28 に示す。大型炉と同様にガスプレナム長を 1,760mm に設定することにより、被覆管周方向応力は最大で 118MPa と得られ、暫定的に設定した制限目安 120MPa を満足できる見通しであることが分かった。

(2) FBR 導入期炉心

核設計検討及び熱流力特性概略評価検討を行った。

平衡期炉心に対し、高さ 10cm の上部軸ブランクットの付加により、増殖比 1.1 程度の導入期炉心を設定した。設定した炉心の主要炉心特性を表 3.1-29 に、配置

を図 3.1-17 にそれぞれ示す。炉心部取出平均燃焼度は平衡期炉心と同様に 100GWd/t 程度である。複合システム倍増時間は 74 年となった。

導入期炉心では上部に軸ブランケットを負荷するため、炉心部の出力分担は 1.5% 減少する。他方、被覆管内面ホットスポットはブランケット燃料上端部ではなく炉心燃料上端部に生じると考えられるため、熱水力設計目安となる包絡熱出力は炉心部分担分について見ておけばよい。軸ブランケット発熱寄与分は最小となる燃焼初期で 1.2% なので、平衡期炉心と比較して導入期炉心では、炉心部包絡熱出力も 1.2% 減少すると予想され、被覆管ホットスポット温度は 3℃ 程度減少し 654℃ となる見込みである。また、平衡期炉心と同じ被覆管ホットスポット温度条件では原子炉出口温度は 2℃ 程度向上可能な見込みである。更に、定性的には燃焼反応度も半分程度なので、制御棒運用に係る合理化も期待できる。また、バンドル部圧力損失は 0.21MPa となり制限の 0.2MPa 程度以下を満足する。

表 3.1-1 大型金属燃料高出口温度型炉心の設計条件

項 目		仕様	
プラント仕様	原子炉電気出力	1,500MWe	
	原子炉熱出力	3,570MWt	
	冷却材出口/入口温度	550 / 395°C	
	1次系流量	18,200kg/s	
炉心・燃料基本仕様	燃料形態	U-Pu-Zr三元合金金属燃料	
	Zr含有率	6~10wt%	
	炉心型式	均質Zr含有率2領域	
	再臨界回避方策	MABLE型燃料集合体*1	
	燃料組成	組成	高速炉多重リサイクル組成*2
		FP混入率	0.6vol%
炉心材料	被覆管	ODS鋼*3	
	ラッパ管	PNC-FMS鋼*3	
制限条件	安全設計要求	ナトリウムボイド反応度	8\$程度以下
	燃料健全性	最大線出力	500W/cm程度以下
		高速中性子照射量*4	5×10 ²³ n/cm ² 程度以下*5
		被覆管最高温度*6	650°C程度以下
		CDF(通常運転時)	0.5以下(Stベース)
取合条件	炉心燃料スミア密度	70~75%TD	
	遮へい体外接円径	7m程度以下	
	制御棒、SASS配置	切込み付きUIS対応配置	
	燃料バンドル部圧損	0.2MPa程度以下	
炉心性能目標	増殖比	導入期炉心	1.1~1.2程度
		平衡期炉心	1.03程度
	取出平均燃焼度	炉心部	150GWdt程度*7
		全炉心*8	60GWdt程度以上
運転サイクル長さ	18ヶ月以上		

*1 下部軸ブランケット削除型燃料集合体

*2 金属燃料FBR多重リサイクル組成 (wt%)

²³⁸Pu/²³⁹Pu/²⁴⁰Pu/²⁴¹Pu/²⁴²Pu/²³⁷Np/²⁴¹Am/²⁴³Am/²⁴⁴Cm/²⁴⁵Cm
= 1.1/66.0/25.2/2.4/2.4/0.4/1.6/0.5/0.4/0.1

*3 炉心材料組成[炉心・燃料設計用] (wt%)

Fe/Cr/Ni/Mo/Mn/W = 85.5/11.0/0.4/0.5/0.6/2.0

*4 E>0.1MeV

*5 高速中性子照射量設計目標目安(高燃焼度化炉心を除く)

*6 内面

*7 高燃焼度化炉心のみ適用

*8 ブランケット燃料を含む全炉心取出平均燃焼度

表 3.1-2 大型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の燃料ピン径サーベイ結果

項目	2003年度基準炉心	炉心(1)	炉心(2)
燃料集合体数(内側/外側/合計)	252/303/555	291/354/645	291/354/645
炉心高さ(mm)	1,000	950	950
平均線出力(W/cm)	194	176	176
被覆管外径(mm)	8.5	7.5	7.2
被覆管内径(mm)	7.50	6.62	6.36
被覆管肉厚(mm)	0.50	0.44	0.42
ラッパ管外対面間距離(mm)	190.3	172.1	167.6
ラッパ管内対面間距離(mm)	180.3	162.1	157.6
ラッパ管間ギャップ(mm)	7.1	5.5	5.5
集合体配列ピッチ(mm)	197.4	177.6	173.1
ワイヤ径(mm)	1.22	1.22	1.28
燃料体積比(%)	43.3	41.7	40.5
構造材体積比(%)	23.0	23.8	23.9
冷却材体積比(ラッパ管内)(%)	26.6	28.4	29.3
運転サイクル長さ(ヶ月)	23.0	22.3	21.1
Pu富化度(wt%)	12.4	11.8	12.2
Zr含有率(内側/外側)(wt%)	16.0/10.0	10.0/6.0	10.0/6.0
スミア密度(内側/外側)(%)	75/75	70/75	70/75
燃焼反応度(% $\Delta k/kk'$)	0.42	0.28	0.31
増殖比	1.034	1.064	1.040
最大線出力(内側/外側)(W/cm)	306/313	242/276	244/273
Naボイド反応度(\$)	7.6	7.7	7.9

サーベイ時共通仕様・特性

項目	仕様
制御棒体数	28
内側炉心割合(%)	45
ガスプレナム長さ(上)(mm)	1,720(仮設定)
燃料ピン本数(本)	331
ラッパ管肉厚(mm)	5.0
ワイヤ巻き付けピッチ(mm)	200
燃料交換バッチ数(炉心)	3
取出平均燃焼度(GWd/t)	95
バンドル部圧力損失(MPa)	0.2

表 3.1-3 大型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の炉心仕様サーベイ結果

項目	炉心①-1	炉心①-2	炉心①-3	炉心②-1	炉心②-2	炉心②-3	炉心③-1	炉心③-2	炉心③-3
炉心燃料集合体数(内側/外側/合計)	198/357/555	252/303/555	303/252/555	225/420/645	291/354/645	357/288/645	303/390/693	369/324/693	441/252/693
炉心内側炉心割合(%)	35.7	45.4	54.6	34.9	45.1	55.3	43.7	53.2	63.6
ラッパ管外側間距離(mm)	170.9	←	←	167.6	←	←	165.9	←	←
ラッパ管内側間距離(mm)	160.9	←	←	157.6	←	←	155.9	←	←
ラッパ管間ギャップ(mm)	5.5	←	←	5.5	←	←	5.5	←	←
集合体配列ピッチ(mm)	176.4	←	←	173.1	←	←	171.4	←	←
ワイヤ径(mm)	1.44	←	←	1.28	←	←	1.18	←	←
運転サイクル長さ(ヶ月)	18.0	17.7	17.4	21.0	20.6	20.2	22.2	21.8	21.4
Pu濃化度 ¹ (wt%)	12.6	13.0	13.3	11.9	12.2	12.6	11.8	12.1	12.5
燃焼反応度 ² (%Δk/k ⁰)	0.58	0.92	1.19	0.21	0.28	0.60	0.26	0.28	0.50
増殖比	1.028	1.009	0.995	1.060	1.043	1.025	1.063	1.049	1.025
炉心最大熱出力(内側/外側)(W/cm)	287/334	306/308	341/278	240/287	244/273	273/256	218/261	238/249	277/221
炉心ボイド反応度 ⁴ (平衡末期)(\$)	←	←	←	←	7.9	7.9	←	←	←
炉心等価直径(m)	4.47	←	←	4.72	←	←	4.83	←	←
蒸へい体外径内径(m)	5.66	←	←	5.90	←	←	6.34	←	←
規格北包絡熱出力	1.0549	1.0593	1.0633	1.0541	1.0476	1.0477	1.0512	1.0466	1.0554

サーベイ時共通仕様・特性

項目	仕様
制御棒体数	28
被覆管外径(mm)	7.2
被覆管内径(mm)	6.36
被覆管肉厚(mm)	0.42
ガスプレナム長さ(上)(mm)	1,720(仮設定)
燃料ピン本数(本)	331
ラッパ管肉厚(mm)	5.0
ワイヤ巻き付けピッチ(mm)	200
燃料交換バッチ数(炉心)	3
炉心高さ(mm)	950
Zr含有率(内側/外側)(wt%)	10.0/6.0
スミア密度(内側/外側)(%)	70/75
取出平均燃焼度(GWd/t)	95
バンドル部圧力損失(MPa)	0.2

表 3.1-4 大型金属燃料高出口温度型炉心の主要燃料仕様

項目		仕様			
		炉心	軸方向ブランケット	径方向ブランケット	
燃料要素	燃料形態	U-Pu-Zr	U-Zr		
	被覆管材料	ODS鋼			
	被覆管外径 (mm)	7.2			
	被覆管内径 (mm)	6.36			
	被覆管肉厚 (mm)	0.42			
	ガスプレナム長さ(上) (mm)	1,760(燃料健全性評価結果)			
	ボンド材	ナトリウム			
	燃料スミア密度 (%TD)	70~75	←		
	Zr含有率 (wt%)	6~10	10		
			なし		
集合体	燃料ピン本数 (本)	331			
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	8.52			
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.18			
	ラップ管材料	PNC-FMS鋼			
	ラップ管外対面間距離 (mm)	167.3			
	ラップ管内対面間距離 (mm)	157.3			
	ラップ管肉厚 (mm)	5.0			
	ラップ管間ギャップ (mm)	5.1			
	集合体配列ピッチ (mm)	172.4			
	ワイヤ径 (mm)	1.26			
	ワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200			
	体積比 (%)	燃料	40.9	←	
		(実効)	(28.6~30.6)	←	
構造材		24.0	←		
冷却材		35.1	←		
		なし			

表 3.1-5 大型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の主要核特性

項目	設計値	設計値 (2003年度炉心)	コンパクト型炉心 (参考)
運転サイクル長さ	21.5ヶ月 (654日)	23.1ヶ月 (703日)	18ヶ月 (548日)
燃料交換パッチ数 (炉心)	3 パッチ	3 パッチ	3 パッチ
炉心高さ	950 mm	1,000 mm	850 mm
軸ブランケット高さ (上部)	0 mm	0 mm	150 mm (下部 50 mm)
Pu富化度 ¹	12.4 wt%	12.4 wt%	13.0 / 17.2 wt%
Zr含有率 (内側/外側)	10.0 / 6.0 wt%	16.0 / 10.0 wt%	10.0 / 10.0 wt%
スミア密度 (内側/外側)	70 / 75 %	75 / 75 %	75 / 75 %
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランケット)	100.0 / - GWd/t	94.1 / - GWd/t	109.3 / 16.8 GWd/t
全炉心平均燃焼度 ²	100.0 GWd/t	94.1 GWd/t	86.5 GWd/t
燃焼反応度	0.48 % Δk/kk'	0.42 % Δk/kk'	1.3 % Δk/kk'
増殖比 (全体)	1.033	1.034	1.042
(炉心/軸方向ブランケット)	1.033 / -	1.034 / -	0.911 / 0.131
最大線出力 (内側/外側)	274 / 270 W/cm	288 / 315 W/cm	483 / 492 W/cm
炉心平均出力密度	217 W/cm ³	182 W/cm ³	252 W/cm ³
出力分担率 (炉心/軸方向ブランケット)	1.000 / -	1.000 / -	0.963 / 0.037
最大高速中性子束 ³	3.2×10 ¹⁵ n/cm ² s	2.8×10 ¹⁵ n/cm ² s	3.7×10 ¹⁵ n/cm ² s
最大高速中性子照射量 ³	5.4×10 ²³ n/cm ²	5.0×10 ²³ n/cm ²	5.3×10 ²³ n/cm ²
装荷時重金属インベントリ (パッチ当たり) (炉心/軸方向ブランケット)	23.3 / - t	26.8 / - t	19.3 / 4.5 t
ブランケット/炉心重金属重量比	0	0	約0.2
装荷時核分裂性Pu重量 (出力当たり)	4.1 t/GWe	4.7 t/GWe	3.9 t/GWe
ポイド反応度 ⁴ (平衡末期)	7.9 \$ ⁶	7.6 \$ ⁶	7.8 \$
ドブラー係数 [Td _k /dT] ⁵ (平衡末期)	-4.2×10 ⁻³	-4.2×10 ⁻³	-4.1×10 ⁻³
炉心等価直径	4.70 m	5.00 m	4.87 m
速へい体外接円径	5.88 m	6.33 m	5.97 m

*1: Pu/HM、*2: ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、*3: E > 0.1 MeV、

*4: 非均質補正 (0.96) 考慮、*5: 非均質補正 (1.05) 考慮、

*6: 実効遅発中性子割合 0.00356

表 3.1-6(1) 大型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の重金属物量収支
 -1 バッチ当たり装荷-

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	28.2	32.8	61.0	0.0	0.0	0.0	61.0
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U-238	9,369.9	10,903.1	20,272.9	0.0	0.0	0.0	20,272.9
U合計	9,398.0	10,935.9	20,333.9	0.0	0.0	0.0	20,333.9
Np-237	5.5	6.4	11.9	0.0	0.0	0.0	11.9
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np合計	5.5	6.4	11.9	0.0	0.0	0.0	11.9
Pu-238	15.1	17.6	32.7	0.0	0.0	0.0	32.7
Pu-239	906.4	1,054.8	1,961.2	0.0	0.0	0.0	1,961.2
Pu-240	346.1	402.7	748.8	0.0	0.0	0.0	748.8
Pu-241	33.0	38.4	71.3	0.0	0.0	0.0	71.3
Pu-242	33.0	38.4	71.3	0.0	0.0	0.0	71.3
Pu合計	1,333.5	1,551.8	2,885.3	0.0	0.0	0.0	2,885.3
Am-241	22.0	25.6	47.5	0.0	0.0	0.0	47.5
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-243	6.9	8.0	14.9	0.0	0.0	0.0	14.9
Am合計	28.8	33.6	62.4	0.0	0.0	0.0	62.4
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-244	5.5	6.4	11.9	0.0	0.0	0.0	11.9
Cm-245	1.4	1.6	3.0	0.0	0.0	0.0	3.0
Cm合計	6.9	8.0	14.9	0.0	0.0	0.0	14.9
合計	10,772.8	12,535.6	23,308.4	0.0	0.0	0.0	23,308.4
FP ^{*1}	31.7	33.0	64.7	0.0	0.0	0.0	64.7
FP ^{*2}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP合計	31.7	33.0	64.7	0.0	0.0	0.0	64.7

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃焼期間中生成FP

表 3.1-6(2) 大型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の重金属物量収支
 -1 バッチ当たり取出-

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	7.9	14.2	22.1	0.0	0.0	0.0	22.1
U-236	3.7	3.5	7.1	0.0	0.0	0.0	7.1
U-238	7,971.5	9,788.8	17,760.4	0.0	0.0	0.0	17,760.4
U合計	7,983.1	9,806.5	17,789.6	0.0	0.0	0.0	17,789.6
Np-237	6.6	7.9	14.4	0.0	0.0	0.0	14.4
Np-239	1.9	1.5	3.3	0.0	0.0	0.0	3.3
Np合計	8.4	9.3	17.7	0.0	0.0	0.0	17.7
Pu-238	15.4	18.2	33.6	0.0	0.0	0.0	33.6
Pu-239	930.4	1,071.6	2,002.0	0.0	0.0	0.0	2,002.0
Pu-240	384.8	423.6	808.4	0.0	0.0	0.0	808.4
Pu-241	51.2	50.5	101.7	0.0	0.0	0.0	101.7
Pu-242	31.4	36.0	67.4	0.0	0.0	0.0	67.4
Pu合計	1,413.3	1,599.8	3,013.1	0.0	0.0	0.0	3,013.1
Am-241	15.5	21.9	37.4	0.0	0.0	0.0	37.4
Am-242m	1.3	1.4	2.6	0.0	0.0	0.0	2.6
Am-243	8.0	8.8	16.8	0.0	0.0	0.0	16.8
Am合計	24.7	32.1	56.8	0.0	0.0	0.0	56.8
Cm-242	1.2	1.1	2.3	0.0	0.0	0.0	2.3
Cm-243	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2
Cm-244	7.5	7.8	15.3	0.0	0.0	0.0	15.3
Cm-245	1.4	1.5	2.9	0.0	0.0	0.0	2.9
Cm合計	10.3	10.5	20.8	0.0	0.0	0.0	20.8
合計	9,439.7	11,458.3	20,898.0	0.0	0.0	0.0	20,898.0
FP ^{*1}	31.7	33.0	64.7	0.0	0.0	0.0	64.7
FP ^{*2}	1,333.0	1,077.3	2,410.4	0.0	0.0	0.0	2,410.4
FP合計	1,364.7	1,110.4	2,475.1	0.0	0.0	0.0	2,475.1

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃焼期間中生成FP

表 3.1-6(3) 大型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の重金属物量収支 —平衡初期—

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	58.6	76.1	134.7	0.0	0.0	0.0	134.7
U-236	5.1	4.4	9.5	0.0	0.0	0.0	9.5
U-238	26,659.7	31,565.3	58,225.0	0.0	0.0	0.0	58,225.0
U合計	26,723.4	31,645.8	58,369.1	0.0	0.0	0.0	58,369.1
Np-237	17.9	20.9	38.8	0.0	0.0	0.0	38.8
Np-239	4.2	3.3	7.5	0.0	0.0	0.0	7.5
Np合計	22.1	24.2	46.3	0.0	0.0	0.0	46.3
Pu-238	45.2	52.6	97.8	0.0	0.0	0.0	97.8
Pu-239	2,790.2	3,205.9	5,996.0	0.0	0.0	0.0	5,996.0
Pu-240	1,080.4	1,230.2	2,310.5	0.0	0.0	0.0	2,310.5
Pu-241	122.1	130.1	252.2	0.0	0.0	0.0	252.2
Pu-242	96.3	112.1	208.4	0.0	0.0	0.0	208.4
Pu合計	4,134.0	4,730.8	8,864.9	0.0	0.0	0.0	8,864.9
Am-241	56.9	71.7	128.7	0.0	0.0	0.0	128.7
Am-242m	2.0	1.9	3.8	0.0	0.0	0.0	3.8
Am-243	21.9	25.0	46.9	0.0	0.0	0.0	46.9
Am合計	80.9	98.5	179.4	0.0	0.0	0.0	179.4
Cm-242	2.7	2.3	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0
Cm-243	0.2	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3
Cm-244	18.6	20.6	39.2	0.0	0.0	0.0	39.2
Cm-245	4.0	4.6	8.7	0.0	0.0	0.0	8.7
Cm合計	25.5	27.7	53.2	0.0	0.0	0.0	53.2
合計	30,985.8	36,527.0	67,512.9	0.0	0.0	0.0	67,512.9
FP ¹	95.1	99.1	194.2	0.0	0.0	0.0	194.2
FP ²	1,332.5	1,079.8	2,412.3	0.0	0.0	0.0	2,412.3
FP合計	1,427.6	1,178.9	2,606.4	0.0	0.0	0.0	2,606.4

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃焼期間中生成FP

表 3.1-6(4) 大型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の重金属物量収支 —平衡末期—

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	38.4	57.4	95.8	0.0	0.0	0.0	95.8
U-236	8.7	7.9	16.6	0.0	0.0	0.0	16.6
U-238	25,261.3	30,451.1	55,712.4	0.0	0.0	0.0	55,712.4
U合計	25,308.4	30,516.4	55,824.8	0.0	0.0	0.0	55,824.8
Np-237	18.9	22.4	41.3	0.0	0.0	0.0	41.3
Np-239	6.1	4.8	10.9	0.0	0.0	0.0	10.9
Np合計	25.0	27.2	52.2	0.0	0.0	0.0	52.2
Pu-238	45.5	53.2	98.7	0.0	0.0	0.0	98.7
Pu-239	2,814.2	3,222.7	6,036.8	0.0	0.0	0.0	6,036.8
Pu-240	1,119.1	1,251.0	2,370.1	0.0	0.0	0.0	2,370.1
Pu-241	140.3	142.3	282.6	0.0	0.0	0.0	282.6
Pu-242	94.7	109.7	204.4	0.0	0.0	0.0	204.4
Pu合計	4,213.8	4,778.9	8,992.6	0.0	0.0	0.0	8,992.6
Am-241	50.4	68.1	118.5	0.0	0.0	0.0	118.5
Am-242m	3.2	3.2	6.5	0.0	0.0	0.0	6.5
Am-243	23.1	25.8	48.8	0.0	0.0	0.0	48.8
Am合計	76.7	97.1	173.8	0.0	0.0	0.0	173.8
Cm-242	3.9	3.4	7.3	0.0	0.0	0.0	7.3
Cm-243	0.3	0.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6
Cm-244	20.6	22.0	42.6	0.0	0.0	0.0	42.6
Cm-245	4.1	4.6	8.6	0.0	0.0	0.0	8.6
Cm合計	28.9	30.2	59.1	0.0	0.0	0.0	59.1
合計	29,652.8	35,449.7	65,102.5	0.0	0.0	0.0	65,102.5
FP ¹	95.1	99.1	194.2	0.0	0.0	0.0	194.2
FP ²	2,665.5	2,157.1	4,822.6	0.0	0.0	0.0	4,822.6
FP合計	2,760.6	2,256.2	5,016.8	0.0	0.0	0.0	5,016.8

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃焼期間中生成FP

表 3.1-7 大型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の制御反応度収支

項目	主系		後備系
	1ロッドスタック	1ロッドスタック	全数挿入
1.計画余剰反応度	1.82	0.34	0.47
a)出力補償	0.47	0.34	0.47
b)燃焼補償	0.78		
c)運転余裕	0.20		
d)燃料スエリング補償	0.37		
2.余剰反応度の不確かさ(2 σ)	0.51	0.07	0.09
a)臨界性予測誤差	0.00		
b)出力補償予測誤差		0.07	0.09
c)燃料製作公差	0.46		
d)燃料交換余裕	0.20		
3.事故時投入反応度		0.13	0.13
4.最小反応度停止余裕	0.34		
必要制御反応度	2.67	0.54	0.69
補正後制御棒価値	3.98	1.03	1.21
反応度停止余裕	1.31	0.49	0.52

単位:% $\Delta k/kk'$

表 3.1-8 大型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の長期運転サイクル化検討結果

項目	平衡期長期運転 サイクル化炉心	平衡期炉心 (基準炉心)
運転サイクル長さ	32.3ヶ月(982日)	21.5ヶ月(654日)
燃料交換バッチ数(炉心)	2バッチ	3バッチ
炉心高さ	950 mm	←
軸ブランケット高さ(上部)	0 mm	0 mm
Pu富化度 ^{*1}	12.5 wt%	12.4 wt%
Zr含有率(内側/外側)	10.0/6.0 wt%	10.0/6.0 wt%
スミア密度(内側/外側)	70/75 %	70/75 %
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランケット)	100.2 / - GWd/t	100.0 / - GWd/t
全炉心平均燃焼度 ^{*2}	100.2 GWd/t	100.0 GWd/t
燃焼反応度	0.97 %Δk/kk'	0.48 %Δk/kk'
増殖比(全体) (炉心/軸方向ブランケット)	1.027 1.027 / -	1.033 1.033 / -
最大線出力(内側/外側)	270 / 270 W/cm	274 / 270 W/cm
炉心平均出力密度	217 W/cm ³	←
出力分担率(炉心/軸方向ブランケット)	1.000 / -	1.000 / -
最大高速中性子束 ^{*3}	3.2×10 ¹⁵ n/cm ² s	3.2×10 ¹⁵ n/cm ² s
最大高速中性子照射量 ^{*3}	5.4×10 ²³ n/cm ²	5.4×10 ²³ n/cm ²
装荷時重金属インベントリ(バッチ当たり) (炉心/軸方向ブランケット)	23.3 / - t	23.3 / - t
ブランケット/炉心重金属重量比	0	0
装荷時核分裂性Pu重量(出力当たり)	4.1 t/GWe	4.1 t/GWe
炉心等価直径	4.70 m	←
遮へい体外接円径	5.88 m	←

*1:Pu/HM、*2:ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、*3:E>0.1 MeV

表 3.1-9 大型金属燃料高出口温度型炉心（運転サイクル長期化平衡期）の制御反応度収支

項目	後備系		
	主系	1ロッドスタック	全数挿入
1.計画余剰反応度	2.50	0.34	0.47
a)出力補償	0.47	0.34	0.47
b)燃焼補償	1.27		
c)運転余裕	0.20		
d)燃料スエリング補償	0.56		
2.余剰反応度の不確かさ(2σ)	0.60	0.07	0.09
a)臨界性予測誤差	0.00		
b)出力補償予測誤差		0.07	0.09
c)燃料製作公差	0.56		
d)燃料交換余裕	0.20		
3.事故時投入反応度		0.26	0.26
4.最小反応度停止余裕	0.34		
必要制御反応度	3.44	0.67	0.82
補正後制御棒価値	3.98	1.03	1.21
反応度停止余裕	0.55	0.36	0.39

単位:%Δk/kk'

表 3.1-10 金属燃料炉心用工学的安全係数（ワイヤスペーサ型集合体）

処理	項目	工学的安全係数(HSF)		
		ΔT_{Na}	ΔT_{Film}	ΔT_{Clad}
乗算処理	出力分布誤差	1.05	1.05	1.05
	炉心熱出力校正誤差	1.00	1.02	1.02
	流路変形効果	1.03	1.00	1.00
	集合体間流量配分誤差	1.05	1.00	1.00
	原子炉出入口温度誤差	1.02	1.00	1.00
	ワイヤコンタクト効果	1.00	2.00	1.00
統計処理	炉内流量配分誤差	1.03	1.00	1.00
	物性値誤差	1.02	1.30	1.03
	各部製造公差	1.04	1.07	1.08
	燃料スラグ偏心効果	1.00	1.04	1.08

表 3.1-11 大型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の冷却材流量配分結果

炉心領域	流量領域	集集体数	集集体最大出力 [MW]	集集体流量 [kg/s]	必要領域流量 [kg/s]	冷却材最高温度 [°C]	被覆管内面最高温度 ² [°C]	バンドル部 圧力損失 [MPa]
内側炉心	1	42	7.06	31.5	1323.0	634	650	0.20
	2	72	6.73	30.5	2196.0	631	650	0.19
	3	126	6.19	29.1	3666.6	634	650	0.17
	4	87	5.95	26.7	2322.9	635	650	0.15
	5	72	6.81	30.8	2217.6	633	650	0.19
	6	48	6.38	29.1	1396.8	634	650	0.17
	7	42	5.79	27.2	1142.4	635	649	0.15
	8	42	5.04	24.4	1024.8	636	650	0.12
	9	24	4.44	22.3	535.2	636	650	0.11
	10	18	3.94	20.3	365.4	636	650	0.09
	11	72	3.34	17.7	1274.4	638	649	0.07
合計(最大値)	—	645	3748.05	(31.5)	17465.1	(638)	(650)	(0.20)
				炉心流量 ¹ [kg/s]	17472.0			
				余剰流量 [kg/s]	+6.9 (+0.0%)			

*1: 1次系流量の内、96%を燃料集集体冷却用に配分

*2: HSF計算結果: 1.24、周辺流れ効果係数計算結果: 1.097

表 3.1-12 大型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の代表燃料要素出力履歴

炉心領域	流量領域	燃料要素最大出力 [kW]						平均出力 [kW]
		BOEC-1	EOEC-1	BOEC-2	EOEC-2	BOEC-3	EOEC-3	
内側炉心	1	20.8	21.4	21.6	21.3	21.4	20.7	21.2
	2	19.8	20.8	20.4	20.7	20.3	20.2	20.4
	3	17.9	20.0	18.2	20.0	18.2	19.6	19.0
	4	16.9	18.4	17.3	18.4	17.2	18.0	17.7
外側炉心	5	20.0	21.1	20.1	20.9	20.0	20.6	20.5
	6	19.8	19.6	20.0	19.4	19.7	19.0	19.6
	7	18.7	17.8	18.7	17.6	18.6	17.4	18.1
	8	16.8	15.5	16.9	15.5	16.8	15.3	16.1
	9	15.3	14.0	15.4	14.1	15.4	14.0	14.7
	10	13.9	12.8	14.0	12.8	14.0	12.8	13.4
	11	12.2	11.3	12.3	11.3	12.4	11.2	11.8

表 3.1-13 大型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の代表燃料要素被覆管温度履歴

炉心領域	流量領域	被覆管肉厚中心ホットスポット温度 [°C]					
		BOEC-1	EOEC-1	BOEC-2	EOEC-2	BOEC-3	EOEC-3
内側炉心	1	635	642	644	641	642	633
	2	633	645	640	643	638	637
	3	617	645	621	644	622	639
	4	625	645	630	645	629	640
外側炉心	5	632	644	633	643	631	638
	6	642	640	645	637	641	632
	7	644	632	644	629	642	626
	8	644	625	646	625	644	622
	9	645	623	646	624	645	622
	10	644	624	646	623	646	623
	11	644	624	647	625	647	623

表 3.1-14 大型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の燃料健全性評価結果

炉心領域	流量領域	寿命中平均極覆管温度*1 [°C]	寿命末期被覆管温度*1 [°C]	外面腐食量 [mm]	内面腐食量 [mm]	被覆管肉厚*2 [mm]	燃料要素内圧*3 [MPa]	被覆管周方向応力*3 [MPa]	CDF*3
内側炉心	1	640	633	0.027	0.129	0.26	9.4 (9.1)*4	123 (119)*4	0.20 (0.15)*4
	2	639	637	0.027	0.126	0.27	9.1	117	0.14
	3	631	639	0.023	0.114	0.28	8.5	104	3.3E-02
	4	636	640	0.025	0.111	0.28	8.0	97	1.8E-02
外側炉心	5	637	638	0.025	0.110	0.28	8.7	106	4.2E-02
	6	639	632	0.027	0.108	0.29	8.3	101	2.2E-02
	7	636	626	0.025	0.099	0.30	7.7	90	4.7E-03
	8	634	622	0.025	0.090	0.30	6.8	77	8.1E-04
	9	634	622	0.025	0.084	0.31	6.3	69	2.4E-04
	10	634	623	0.025	0.077	0.32	5.7	62	8.0E-05
	11	635	623	0.026	0.069	0.32	5.1	54	1.8E-05

*1: 肉厚中心ホットスポット、*2: 製造時は0.42mm、*3: ガスブレナム長1,720mmの場合、*4: ガスブレナム長1,760mmの場合

表 3.1-15 大型金属燃料高出口温度型炉心（導入期）の主要核特性

項目	導入期炉心	平衡期炉心 (基準炉心)
運転サイクル長さ	21.5ヶ月 (654日)	←
燃料交換/パッチ数 (炉心)	3 パッチ	←
炉心高さ	950 mm	←
軸ブランケット高さ (上部)	150 mm	0 mm
Pu富化度 ^{*1}	12.1 wt%	12.4 wt%
Zr含有率 (内側/外側)	10.0 / 6.0 wt%	10.0 / 6.0 wt%
スミア密度 (内側/外側)	70 / 75 %	70 / 75 %
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランケット)	98.1 / 14.2 GWd/t	100.0 / - GWd/t
全炉心平均燃焼度 ^{*2}	87.1 GWd/t	100.0 GWd/t
燃焼反応度	0.25 %Δ k/kk'	0.48 %Δ k/kk'
増殖比 (全体)	1.114	1.033
(炉心/軸方向ブランケット)	1.030 / 0.084	1.033 / -
最大線出力 (内側/外側)	275 / 264 W/cm	274 / 270 W/cm
炉心平均出力密度	217 W/cm ³	←
出力分担率 (炉心/軸方向ブランケット)	0.978 / 0.022	1.000 / -
最大高速中性子束 ^{*3}	3.2×10 ¹⁵ n/cm ² s	3.2×10 ¹⁵ n/cm ² s
最大高速中性子照射量 ^{*3}	5.4×10 ²³ n/cm ²	5.4×10 ²³ n/cm ²
装荷時重金属インベントリ (パッチ当たり) (炉心/軸方向ブランケット)	23.3 / 3.5 t	23.3 / - t
ブランケット/炉心重金属重量比	約0.2	0
装荷時核分裂性Pu重量 (出力当たり)	4.0 t/GWe	4.1 t/GWe
原子炉倍增時間	42年	-
複合システム倍增時間 ^{*4}	59年	-
ポイド反応度 ^{*5} (平衡末期)	8.2 \$ ^{*7}	7.9 \$ ^{*7}
ドブラー係数 [TdK/dT] ^{*6} (平衡末期)	-4.2×10 ⁻³	-4.2×10 ⁻³
炉心等価直径	4.70 m	←
遮へい体外接円径	5.88 m	←

*1: Pu/HM、*2: ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、*3: E > 0.1 MeV、
 *4: 燃料炉外滞在期間5年、燃交・定検期間45日、*5: 非均質補正(0.96)考慮、
 *6: 非均質補正(1.05)考慮、*7: 実効遅発中性子割合0.00356

表 3.1-16 大型金属燃料高出口温度型炉心（導入期）の TRU 組成変動影響評価結果

項目	LWR使用済燃料からの回収TRU組成モデルケース			
	組成① 30年貯蔵したLWR使用済ウラン燃料と20年貯蔵したALWR使用済ウラン燃料から回収したTRUを9:1で混合	組成② 70年貯蔵したLWR使用済ウラン燃料と40年貯蔵したALWR使用済ウラン燃料から回収したTRUを3:7で混合	組成③ 40年貯蔵したブルサール使用済燃料とFBR使用済燃料から回収したTRUを5:5で混合	組成④ 110年貯蔵したブルサール使用済燃料と90年貯蔵したLWR使用済ウラン燃料と40年貯蔵したALWR使用済ウラン燃料から回収したTRUを0.5:1.9:7.6で混合
炉心部取出平均燃焼度	98.1 GWd/t	97.8 GWd/t	97.8 GWd/t	97.8 GWd/t
全炉心取出平均燃焼度 ^{*1}	87.1 GWd/t	86.8 GWd/t	86.8 GWd/t	86.8 GWd/t
Pu富化度 ^{*2}	12.1 wt%	13.2 wt%	13.6 wt%	13.8 wt%
核分裂性核種含有率 ^{*2}	8.5 wt%	8.0 wt%	7.8 wt%	7.8 wt%
親核種含有率 ^{*2}	91.5 wt%	92.0 wt%	92.2 wt%	92.2 wt%
MA混入率 ^{*2}	0.4 wt%	2.8 wt%	3.5 wt%	3.6 wt%
燃焼反応度	0.25 %Δk/kk'	1.30 %Δk/kk'	1.74 %Δk/kk'	1.81 %Δk/kk'
増殖比(全体)	1.114	1.141	1.152	1.156
(炉心/軸ワラケット)	1.030 / 0.084	1.053 / 0.087	1.063 / 0.089	1.067 / 0.089
最大線出力(内側炉心/外側炉心)	256 / 260 W/cm	262 / 263 W/cm	266 / 265 W/cm	267 / 265 W/cm
出力分担率[%]	54.7/43.6/1.7	54.8/43.6/1.6	54.8/43.7/1.6	54.7/43.7/1.6
(内側/外側/軸ワラ)	54.6/42.8/2.6	55.4/42.2/2.4	55.7/42.0/2.4	55.6/41.9/2.4
燃焼変化	-0.1/-0.8/+0.9	0.0/-0.9/+0.9	+0.9/-1.7/+0.8	+0.6/-1.6/+0.8
最大高速中性子束 ^{*3}	3.2×10 ¹⁵ n/cm ² s	3.2×10 ¹⁵ n/cm ² s	3.2×10 ¹⁵ n/cm ² s	3.2×10 ¹⁵ n/cm ² s
最大高速中性子照射量 ^{*3}	5.4×10 ²³ n/cm ²	5.5×10 ²³ n/cm ²	5.5×10 ²³ n/cm ²	5.5×10 ²³ n/cm ²
初装荷Pu-イソペンクトリ	4.0 t/GWe	3.8 t/GWe	3.7 t/GWe	3.6 t/GWe
実効運転中性子割合	0.00360	0.00361	0.00344	0.00343
炉心部ボイド反応度 ^{*4}	8.2 \$	8.4 \$	9.5 \$	9.6 \$
ドップラ係数 dk/dT ^{*4}	-4.3×10 ⁻³	-4.0×10 ⁻³	-3.0×10 ⁻³	-3.0×10 ⁻³
原子炉倍増時間	42年	32年	33年	32年
複合システム倍増時間 ^{*5}	59年	45年	46年	45年

*1: プランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、*2: HM当たり、*3: E > 0.1 MeV、*4: 集合体内非均質効果考慮、*5: 燃料炉外滞在期間5年、燃交・定検期間45日

表 3.1-17 中型金属燃料高出口温度型炉心の設計条件

項目		仕様	
プラント仕様	原子炉電気出力	750MWe	
	原子炉熱出力	1,785MWt	
	冷却材出口/入口温度	550 / 395°C	
	1次系流量	9.083kg/s	
炉心・燃料基本仕様	燃料形態	U-Pu-Zr三元合金金属燃料	
	Zr含有率	6~10wt%	
	炉心型式	均質Zr含有率2領域	
	再臨界回避方策	MABLE型燃料集合体*1	
	燃料組成	組成	高速炉多重リサイクル組成*2
		FP混入率	0.6vol%
炉心材料	被覆管	ODS鋼*3	
	ラッパ管	PNC-FMS鋼*3	
制限条件	安全設計要求	ナトリウムボイド反応度	8\$程度以下
	燃料健全性	最大線出力	500W/cm程度以下
		高速中性子照射量*4	5×10 ²³ n/cm ² 程度以下*5
		被覆管最高温度*6	650°C程度以下
		CDF(通常運転時)	0.5以下(Stベース)
取合条件	炉心燃料スミア密度	70~75%TD	
	遮へい体外接円径	5.5m以下	
	制御棒、SASS配置	切込み付きUIS対応配置	
	燃料バンドル部圧損	0.2MPa程度以下	
炉心性能目標	増殖比	導入期炉心	1.1~1.2程度
		平衡期炉心	1.03程度
	取出平均燃焼度	炉心部	150GWd/t程度*7
		全炉心*8	60GWd/t程度以上
運転サイクル長さ	18ヶ月以上		

*1 下部軸ブランケット削除型燃料集合体

*2 金属燃料FBR多重リサイクル組成 (wt%)

$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/^{243}\text{Am}/^{244}\text{Cm}/^{245}\text{Cm}$
= 1.1/66.0/25.2/2.4/2.4/0.4/1.6/0.5/0.4/0.1

*3 炉心材料組成[炉心・燃料設計用] (wt%)

Fe/Cr/Ni/Mo/Mn/W = 85.5/11.0/0.4/0.5/0.6/2.0

*4 E>0.1MeV

*5 高速中性子照射量設計目標目安(高燃焼度化炉心を除く)

*6 内面

*7 高燃焼度化炉心のみ適用

*8 ブランケット燃料を含む全炉心取出平均燃焼度

表 3.1-18 中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の燃料ピン径サーベイ結果

項目	2003年度基準炉心	炉心(1)	炉心(2)
燃料集合体数(内側/外側/合計)	159/234/393	156/237/393	156/237/393
被覆管外径 (mm)	8.5	7.5	7.0
被覆管内径 (mm)	7.50	6.62	6.18
被覆管肉厚 (mm)	0.50	0.44	0.41
ラッパ管外対面間距離 (mm)	169.5	156.6	150.3
ラッパ管内対面間距離 (mm)	159.5	146.6	140.3
ラッパ管間ギャップ (mm)	5.5	4.5	4.0
集合体配列ピッチ (mm)	175.0	161.1	154.3
ワイヤ径 (mm)	1.00	1.21	1.32
燃料体積比 (%)	45.1	41.5	39.4
構造材体積比 (%)	24.4	24.8	25.2
冷却材体積比(ラッパ管内) (%)	24.3	28.2	30.3
運転サイクル長さ(ヶ月)	27.0	22.4	20.5
Pu富化度 (wt%)	12.1	12.0	13.0
Zr含有率 (内側/外側) (wt%)	16.0/10.0	10.0/6.0	10.0/6.0
スミア密度 (内側/外側) (%)	75/75	70/75	70/75
取出平均燃焼度 (GWd/t)	93.9	89.8	94.7
燃焼反応度 (% $\Delta k/kk$)	0.48	0.43	1.35
増殖比	1.033	1.038	0.990
最大線出力 (内側/外側) (W/cm)	255/278	252/264	254/263
Naボイド反応度 ^{*1} (\$))	6.9	7.8	8.1

*1: ボンド材未考慮(ボンド材を炉心スタック部に常駐させた場合は0.2\$程度減少見込み)

サーベイ時共通仕様・特性

項目	仕様
制御棒体数	16
内側炉心割合 (%)	40
炉心高さ (mm)	1,000
平均線出力 (W/cm)	168
ガスプレナム長さ(上) (mm)	1,720(仮設定)
燃料ピン本数 (本)	271
ラッパ管肉厚 (mm)	5.0
ワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200
燃料交換バッチ数 (炉心)	3
高速中性子照射量 ^{*1} ($\times 10^{23} n/cm^2$)	5.3
バンドル部圧力損失 (MPa)	0.2

*1: E>0.1MeV

表 3.1-19 中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の炉心仕様サーベイ結果

項目	炉心①-1	炉心①-2	炉心①-3	炉心②-1	炉心②-2	炉心②-3	炉心③-1	炉心③-2	炉心③-3
燃料集合体数(内側/外側/合計)	102/261/363	144/219/363	183/180/363	120/273/393	156/237/393	195/198/393	144/327/471	183/288/471	237/324/417
内側炉心割合(%)	28.1	39.7	50.4	30.5	39.7	49.6	30.6	38.9	50.3
ラッパ管外対面間距離(mm)	158.4	←	←	156.6	←	←	153.5	←	←
ラッパ管内対面間距離(mm)	148.4	←	←	146.6	←	←	143.5	←	←
ラッパ管間キヤップ(mm)	4.5	←	←	4.5	←	←	4.5	←	←
集合体配列ピッチ(mm)	162.9	←	←	161.1	←	←	158.0	←	←
ワイヤ径(mm)	1.31	←	←	1.21	←	←	1.03	←	←
運転サイクル長さ(ヶ月)	21.1	20.7	20.3	23.0	22.4	22.0	27.3	26.9	26.4
Pu濃化度(wt%)	12.3	12.8	13.2	11.9	12.2	12.5	11.2	11.4	11.7
燃焼反応度(%Δk/kk)	0.47	0.87	1.18	0.20	0.28	0.54	0.70	0.51	0.20
増殖比	1.035	1.012	0.995	1.060	1.045	1.035	1.083	1.073	1.067
炉心最大線出力(内側/外側)(W/cm)	269/312	283/287	301/282	244/283	255/265	271/245	218/261	238/249	277/221
炉心特性	ポイド反応度(平衡末期)(\$)	←	←	←	7.9	7.9	←	←	←
炉心等価直径(m)	3.33	←	←	3.42	←	←	3.66	←	←
遮へい体外接円径(m)	4.77	←	←	4.83	←	←	5.04	←	←
規格北包装熱出力	1.0599	1.0634	1.0680	1.0637	1.0587	1.0621	1.0688	1.0644	1.0653

サーベイ時共通仕様・特性

項目	仕様
制御棒体数	16
被覆管外径(mm)	7.5
被覆管内径(mm)	6.62
被覆管肉厚(mm)	0.44
ガスブレンナム長さ(上)(mm)	1,720(仮設定)
燃料ピン本数(本)	271
ラッパ管肉厚(mm)	5.0
ワイヤ巻き付けピッチ(mm)	200
燃料交換バッチ数(炉心)	3
炉心高さ(mm)	1000
Zr含有率(内側/外側)(wt%)	10.0/6.0
スミア密度(内側/外側)(%)	70/75
取出平均燃焼度(GWd/t)	90
バンドル部圧力損失(MPa)	0.2

表 3.1-20 中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の主要燃料仕様

項目	仕様			
	炉心	軸方向ブランケット	径方向ブランケット	
燃料要素	燃料形態	U-Pu-Zr	U-Zr	なし
	被覆管材料	ODS鋼		
	被覆管外径 (mm)	7.5		
	被覆管内径 (mm)	6.62		
	被覆管肉厚 (mm)	0.44		
	ガスプレナム長さ(上) (mm)	1,760(燃料健全性評価結果)		
	ボンド材	ナトリウム		
	燃料スミア密度 (%TD)	70~75	←	
Zr含有率 (wt%)	6~10	10		
集合体	燃料ピン本数 (本)	271		なし
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	8.76		
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.17		
	ラップ管材料	PNC-FMS鋼		
	ラップ管外対面間距離 (mm)	156.6		
	ラップ管内対面間距離 (mm)	146.6		
	ラップ管肉厚 (mm)	5		
	ラップ管間ギャップ (mm)	4.5		
	集合体配列ピッチ (mm)	161.1		
	ワイヤ径 (mm)	1.21		
	ワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200		
	体積比 (%)	燃料 (実効)	41.5 (29.1~31.1)	
構造材		24.8	←	
冷却材		33.7	←	

表 3.1-21 中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の主要核特性

項目	設計値	設計値 (2003年度炉心)	コンパクト型炉心 (参考)
運転サイクル長さ	24ヶ月(730日)	27ヶ月(821日)	18ヶ月(548日)
燃料交換パッチ数(炉心)	3パッチ	3パッチ	3パッチ
炉心高さ	1,000 mm	1,000 mm	850 mm
軸ブランケット高さ(上部)	0 mm	0 mm	350 mm(下部 50 mm)
Pu富化度 ^{*1}	12.3 wt%	12.4 wt%	13.3 / 19.5 wt%
Zr含有率(内側/外側)	10.0 / 6.0 wt%	16.0 / 10.0 wt%	10.0 / 10.0 wt%
スミア密度(内側/外側)	70 / 75 %	75 / 75 %	75 / 75 %
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランケット)	96.5 / - GWd/t	93.8 / - GWd/t	104.6 / 9.4 GWd/t
全炉心平均燃焼度 ^{*2}	96.5 GWd/t	93.8 GWd/t	74.0 GWd/t
燃焼反応度	0.48 %Δk/kk'	0.58 %Δk/kk'	1.8 %Δk/kk'
増殖比(全体)	1.034	1.032	1.039
(炉心/軸方向ブランケット)	1.034 / -	1.032 / -	0.866 / 0.173
最大線出力(内側/外側)	255 / 273 W/cm	256 / 279 W/cm	447 / 493 W/cm
炉心平均出力密度	194 W/cm ³	164 W/cm ³	255 W/cm ³
出力分担率(炉心/軸方向ブランケット)	1.000 / -	1.000 / -	0.959 / 0.041
最大高速中性子束 ^{*3}	2.9×10 ¹⁵ n/cm ² s	2.5×10 ¹⁵ n/cm ² s	3.6×10 ¹⁵ n/cm ² s
最大高速中性子照射量 ^{*3}	5.4×10 ²³ n/cm ²	5.2×10 ²³ n/cm ²	5.1×10 ²³ n/cm ²
装荷時重金属インベントリ(パッチ当たり) (炉心/軸方向ブランケット)	13.5 / - t	15.7 / - t	9.5 / 4.5 t
ブランケット/炉心重金属重量比	0	0	約0.5
装荷時核分裂性Pu重量(出力当たり)	4.7 t/GWe	5.5 t/GWe	4.2 t/GWe
ポイド反応度 ^{*4} (平衡末期)	7.3 \$ ^{*5}	6.7 \$ ^{*5}	7.2 \$
ドップラー係数[Tdk/dT] ^{*5} (平衡末期)	-4.1×10 ⁻³	-4.2×10 ⁻³	-3.9×10 ⁻³
炉心等価直径	3.42 m	3.72 m	3.32 m
遮へい体外接円径	4.51 m	4.90 m	4.68 m

*1: Pu/HM、*2: ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、*3: E > 0.1 MeV、

*4: 非均質補正(0.96)考慮、*5: 非均質補正(1.05)考慮、

*6: 実効遅発中性子割合0.00358

表 3.1-22(1) 中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の重金属物量収支
—1 バッチ当たり装荷—

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	12.8	22.6	35.4	0.0	0.0	0.0	35.4
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U-238	4,257.9	7,498.5	11,756.4	0.0	0.0	0.0	11,756.4
U合計	4,270.7	7,521.1	11,791.8	0.0	0.0	0.0	11,791.8
Np-237	2.5	4.4	6.8	0.0	0.0	0.0	6.8
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np合計	2.5	4.4	6.8	0.0	0.0	0.0	6.8
Pu-238	6.8	12.0	18.8	0.0	0.0	0.0	18.8
Pu-239	408.9	720.2	1,129.1	0.0	0.0	0.0	1,129.1
Pu-240	156.1	275.0	431.1	0.0	0.0	0.0	431.1
Pu-241	14.9	26.2	41.1	0.0	0.0	0.0	41.1
Pu-242	14.9	26.2	41.1	0.0	0.0	0.0	41.1
Pu合計	601.6	1,059.5	1,661.2	0.0	0.0	0.0	1,661.2
Am-241	9.9	17.5	27.4	0.0	0.0	0.0	27.4
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-243	3.1	5.5	8.6	0.0	0.0	0.0	8.6
Am合計	13.0	22.9	35.9	0.0	0.0	0.0	35.9
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-244	2.5	4.4	6.8	0.0	0.0	0.0	6.8
Cm-245	0.6	1.1	1.7	0.0	0.0	0.0	1.7
Cm合計	3.1	5.5	8.6	0.0	0.0	0.0	8.6
合計	4,890.9	8,613.3	13,504.3	0.0	0.0	0.0	13,504.3
FP ¹	14.4	22.7	37.1	0.0	0.0	0.0	37.1
FP ²	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP合計	14.4	22.7	37.1	0.0	0.0	0.0	37.1

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃焼期間中生成FP

表 3.1-22(2) 中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の重金属物量収支
—1 バッチ当たり取出—

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	3.5	10.0	13.4	0.0	0.0	0.0	13.4
U-236	1.7	2.4	4.0	0.0	0.0	0.0	4.0
U-238	3,602.0	6,749.0	10,351.0	0.0	0.0	0.0	10,351.0
U合計	3,607.1	6,761.3	10,368.4	0.0	0.0	0.0	10,368.4
Np-237	3.0	5.3	8.3	0.0	0.0	0.0	8.3
Np-239	0.8	0.9	1.7	0.0	0.0	0.0	1.7
Np合計	3.8	6.2	10.0	0.0	0.0	0.0	10.0
Pu-238	7.0	12.6	19.6	0.0	0.0	0.0	19.6
Pu-239	419.5	736.0	1,155.5	0.0	0.0	0.0	1,155.5
Pu-240	173.1	289.8	462.8	0.0	0.0	0.0	462.8
Pu-241	22.8	33.8	56.6	0.0	0.0	0.0	56.6
Pu-242	14.1	24.6	38.7	0.0	0.0	0.0	38.7
Pu合計	636.4	1,096.7	1,733.1	0.0	0.0	0.0	1,733.1
Am-241	7.2	15.8	22.9	0.0	0.0	0.0	22.9
Am-242m	0.6	1.0	1.5	0.0	0.0	0.0	1.5
Am-243	3.6	6.0	9.6	0.0	0.0	0.0	9.6
Am合計	11.4	22.7	34.1	0.0	0.0	0.0	34.1
Cm-242	0.5	0.7	1.2	0.0	0.0	0.0	1.2
Cm-243	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
Cm-244	3.4	5.3	8.7	0.0	0.0	0.0	8.7
Cm-245	0.6	1.0	1.7	0.0	0.0	0.0	1.7
Cm合計	4.6	7.1	11.7	0.0	0.0	0.0	11.7
合計	4,263.2	7,894.1	12,157.4	0.0	0.0	0.0	12,157.4
FP ¹	14.4	22.7	37.1	0.0	0.0	0.0	37.1
FP ²	627.7	719.2	1,346.9	0.0	0.0	0.0	1,346.9
FP合計	642.1	741.9	1,384.0	0.0	0.0	0.0	1,384.0

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃焼期間中生成FP

表 3.1-22(3) 中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の重金属物量収支
—平衡初期—

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	26.4	52.6	79.0	0.0	0.0	0.0	79.0
U-236	2.3	3.0	5.3	0.0	0.0	0.0	5.3
U-238	12,092.5	21,726.5	33,819.0	0.0	0.0	0.0	33,819.0
U合計	12,121.2	21,782.1	33,903.3	0.0	0.0	0.0	33,903.3
Np-237	8.1	14.2	22.4	0.0	0.0	0.0	22.4
Np-239	1.8	2.0	3.8	0.0	0.0	0.0	3.8
Np合計	9.9	16.2	26.1	0.0	0.0	0.0	26.1
Pu-238	20.4	36.1	56.6	0.0	0.0	0.0	56.6
Pu-239	1,260.0	2,193.8	3,453.8	0.0	0.0	0.0	3,453.8
Pu-240	486.9	840.4	1,327.3	0.0	0.0	0.0	1,327.3
Pu-241	54.7	88.0	142.7	0.0	0.0	0.0	142.7
Pu-242	43.4	76.6	119.9	0.0	0.0	0.0	119.9
Pu合計	1,865.5	3,234.8	5,100.4	0.0	0.0	0.0	5,100.4
Am-241	25.9	49.9	75.8	0.0	0.0	0.0	75.8
Am-242m	0.9	1.3	2.2	0.0	0.0	0.0	2.2
Am-243	9.9	17.0	26.9	0.0	0.0	0.0	26.9
Am合計	36.7	68.2	104.9	0.0	0.0	0.0	104.9
Cm-242	1.1	1.4	2.6	0.0	0.0	0.0	2.6
Cm-243	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2
Cm-244	8.4	14.1	22.5	0.0	0.0	0.0	22.5
Cm-245	1.8	3.2	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0
Cm合計	11.4	18.7	30.2	0.0	0.0	0.0	30.2
合計	14,044.8	25,120.1	39,164.9	0.0	0.0	0.0	39,164.9
FP ¹	43.2	68.1	111.3	0.0	0.0	0.0	111.3
FP ²	628.1	719.9	1,347.9	0.0	0.0	0.0	1,347.9
FP合計	671.2	787.9	1,459.2	0.0	0.0	0.0	1,459.2

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃焼期間中生成FP

表 3.1-22(4) 中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の重金属物量収支
—平衡末期—

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	17.0	40.0	57.0	0.0	0.0	0.0	57.0
U-236	4.0	5.3	9.3	0.0	0.0	0.0	9.3
U-238	11,436.5	20,977.0	32,413.6	0.0	0.0	0.0	32,413.6
U合計	11,457.6	21,022.4	32,479.9	0.0	0.0	0.0	32,479.9
Np-237	8.6	15.2	23.8	0.0	0.0	0.0	23.8
Np-239	2.5	2.9	5.4	0.0	0.0	0.0	5.4
Np合計	11.2	18.1	29.3	0.0	0.0	0.0	29.3
Pu-238	20.6	36.7	57.4	0.0	0.0	0.0	57.4
Pu-239	1,270.6	2,209.6	3,480.2	0.0	0.0	0.0	3,480.2
Pu-240	503.9	855.2	1,359.1	0.0	0.0	0.0	1,359.1
Pu-241	62.6	95.6	158.2	0.0	0.0	0.0	158.2
Pu-242	42.6	74.9	117.5	0.0	0.0	0.0	117.5
Pu合計	1,900.3	3,272.1	5,172.4	0.0	0.0	0.0	5,172.4
Am-241	23.2	48.2	71.3	0.0	0.0	0.0	71.3
Am-242m	1.5	2.2	3.7	0.0	0.0	0.0	3.7
Am-243	10.4	17.6	28.0	0.0	0.0	0.0	28.0
Am合計	35.0	68.0	103.1	0.0	0.0	0.0	103.1
Cm-242	1.6	2.1	3.8	0.0	0.0	0.0	3.8
Cm-243	0.1	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3
Cm-244	9.3	15.0	24.3	0.0	0.0	0.0	24.3
Cm-245	1.8	3.1	4.9	0.0	0.0	0.0	4.9
Cm合計	12.9	20.4	33.3	0.0	0.0	0.0	33.3
合計	13,417.0	24,400.9	37,818.0	0.0	0.0	0.0	37,818.0
FP ¹	43.2	68.1	111.3	0.0	0.0	0.0	111.3
FP ²	1,255.8	1,439.1	2,694.9	0.0	0.0	0.0	2,694.9
FP合計	1,299.0	1,507.1	2,806.1	0.0	0.0	0.0	2,806.1

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃焼期間中生成FP

表 3.1-23 中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の制御反応度収支

項目	主系		後備系
	1ロッドスタック	1ロッドスタック	全数挿入
1.計画余剰反応度	1.82	0.33	0.47
a)出力補償	0.47	0.33	0.47
b)燃焼補償	0.78		
c)運転余裕	0.20		
d)燃料スエリング補償	0.37		
2.余剰反応度の不確かさ(2 σ)	0.51	0.07	0.09
a)臨界性予測誤差	0.00		
b)出力補償予測誤差		0.07	0.09
c)燃料製作公差	0.46		
d)燃料交換余裕	0.20		
3.事故時投入反応度		0.17	0.17
4.最小反応度停止余裕	0.34		
必要制御反応度	2.67	0.57	0.73
補正後制御棒価値	3.82	0.88	1.35
反応度停止余裕	1.15	0.31	0.62

単位:% Δ k/kk'

表 3.1-24 中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の長期運転サイクル化検討結果

項目	平衡期長期運転 サイクル化炉心	平衡期炉心 (基準炉心)
運転サイクル長さ	36ヶ月(1,095日)	24ヶ月(730日)
燃料交換パッチ数(炉心)	2パッチ	3パッチ
炉心高さ	1,000 mm	←
軸ブランケット高さ(上部)	0 mm	0 mm
Pu富化度 ^{*1}	12.5 wt%	12.3 wt%
Zr含有率(内側/外側)	10.0/6.0 wt%	10.0/6.0 wt%
スミア密度(内側/外側)	70/75 %	70/75 %
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランケット)	96.5 / - GWd/t	96.5 / - GWd/t
全炉心平均燃焼度 ^{*2}	96.5 GWd/t	96.5 GWd/t
燃焼反応度	1.06 %Δk/kk'	0.48 %Δk/kk'
増殖比(全体)	1.030	1.034
(炉心/軸方向ブランケット)	1.030 / -	1.034 / -
最大線出力(内側/外側)	254 / 273 W/cm	255 / 273 W/cm
炉心平均出力密度	194 W/cm ³	←
出力分担率(炉心/軸方向ブランケット)	1.000 / -	1.000 / -
最大高速中性子束 ^{*3}	2.9×10 ¹⁵ n/cm ² s	2.9×10 ¹⁵ n/cm ² s
最大高速中性子照射量 ^{*3}	5.4×10 ²³ n/cm ²	5.4×10 ²³ n/cm ²
装荷時重金属インベントリ(パッチ当たり) (炉心/軸方向ブランケット)	13.5 / - t	13.5 / - t
ブランケット/炉心重金属重量比	0	0
装荷時核分裂性Pu重量(出力当たり)	4.7 t/GWe	4.7 t/GWe
炉心等価直径	3.42 m	←
遮へい体外接円径	4.51 m	←

*1:Pu/HM、*2:ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、*3:E>0.1 MeV

表 3.1-25 中型金属燃料高出口温度型炉心（長期運転サイクル化平衡期）の制御反応度収支

項目	後備系		
	主系	1ロッドスタック	全数挿入
1.計画余剰反応度	2.59	0.33	0.47
a)出力補償	0.47	0.33	0.47
b)燃焼補償	1.36		
c)運転余裕	0.20		
d)燃料スエリング補償	0.56		
2.余剰反応度の不確かさ(2σ)	0.60	0.07	0.09
a)臨界性予測誤差	0.00		
b)出力補償予測誤差		0.07	0.09
c)燃料製作公差	0.56		
d)燃料交換余裕	0.20		
3.事故時投入反応度		0.34	0.34
4.最小反応度停止余裕	0.34		
必要制御反応度	3.53	0.74	0.90
補正後制御棒価値	3.82	0.88	1.35
反応度停止余裕	0.30	0.14	0.45

単位:%Δk/kk'

表 3.1-26 中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の冷却材流量配分結果

炉心領域	流量領域	集集体数	集集体最大出力 [MW]	集集体流量 [kg/s]	必要領域流量 [kg/s]	冷却材最高温度 [°C]	被覆管内面最高温度 ² [°C]	バンドル部圧力損失 [MPa]
内側炉心	1	111	5.68	24.9	2763.9	642	656	0.18
	2	48	5.24	23.2	1113.6	642	657	0.16
外側炉心	3	36	5.94	26.5	954.0	642	657	0.21
	4	36	5.44	24.7	889.2	642	657	0.18
	5	42	4.90	22.6	949.2	642	657	0.16
	6	24	4.29	20.4	489.6	643	656	0.13
	7	36	3.80	18.4	662.4	644	656	0.11
	8	15	3.34	16.7	250.5	645	657	0.09
	9	33	2.86	14.8	488.4	644	656	0.07
	10	12	2.45	13.0	156.0	645	656	0.06
合計(最大値)	—	393	1911.12	(26.5)	8716.8	(645)	(657)	(0.21)
			炉心流量 ¹ [kg/s]		8719.7			
			余剰流量 [kg/s]		+2.9 (+0.0%)			

*1: 1次系流量の内、96%を燃料集集体冷却用に配分

*2: HSF計算結果: 1.23~1.24、周辺流れ効果係数計算結果: 1.115

表 3.1-27 中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の代表燃料要素出力履歴

炉心領域	流量領域	燃料要素最大出力 [kW]						平均出力 [kW]
		BOEC-1	EOEC-1	BOEC-2	EOEC-2	BOEC-3	EOEC-3	
内側炉心	1	19.1	21.2	19.5	20.9	19.4	20.4	20.1
	2	18.7	19.9	19.1	19.8	18.9	19.4	19.3
	3	22.4	22.0	22.6	21.8	22.2	21.0	22.0
	4	21.0	20.7	21.2	20.4	20.7	19.7	20.6
外側炉心	5	19.2	19.4	19.2	19.1	19.0	18.7	19.1
	6	17.5	16.0	17.5	15.8	17.4	15.6	16.6
	7	15.7	14.8	15.8	14.9	15.8	14.7	15.3
	8	14.3	13.1	14.4	13.2	14.5	13.2	13.8
	9	12.7	11.6	12.7	11.5	12.7	11.5	12.1
	10	11.1	10.2	11.3	10.4	11.3	10.3	10.8

表 3.1-28 中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の燃料健全性概略評価結果

炉心	領域	被覆管外面 腐食量 [mm]	上端燃焼度 [GWd/t]	被覆管内面 腐食量 [mm]	被覆管肉厚 [mm]	発生エネルギー ギ一 [MWd]	燃料要素内圧 [MPa]	被覆管周方向 応力 [MPa]
大型炉心	内側炉心	0.027	80.3	0.129	0.26	41.6	9.1	119
	外側炉心	0.025	64.8	0.109	0.29	—	—	—
中型炉心	内側炉心	0.031	69.1	0.129	0.28	44.0	9.2	118
	外側炉心	0.029	63.3	0.109	0.30	48.2	9.9	117
中型炉心 出根拠(対大型炉心)	+4 μm(燃料 寿命差相当)	解析値	解析値	上端燃焼度か ら同等と設定	腐食量に基 いて算出	解析値	発生エネル ギ一に比例	—

※上部ガスプレナム長:1,760mm

表 3.1-29 中型金属燃料高出口温度型炉心（導入期）の主要核特性

項目	導入期炉心	平衡期炉心 (基準炉心)
運転サイクル長さ	24ヶ月 (730日)	←
燃料交換バッチ数 (炉心)	3 バッチ	←
炉心高さ	1,000 mm	←
軸ブランクets高さ (上部)	100 mm	0 mm
Pu富化度 ^{*1}	12.0 wt%	12.3 wt%
Zr含有率 (内側/外側)	10.0 / 6.0 wt%	10.0 / 6.0 wt%
スミア密度 (内側/外側)	70 / 75 %	70 / 75 %
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランクets)	95.0 / 15.5 GWd/t	96.5 / - GWd/t
全炉心平均燃焼度 ^{*2}	88.2 GWd/t	96.5 GWd/t
燃焼反応度	0.27 % Δk/kk'	0.48 % Δk/kk'
増殖比 (全体)	1.098	1.034
(炉心/軸方向ブランクets)	1.041 / 0.057	1.034 / -
最大線出力 (内側/外側)	256 / 268 W/cm	255 / 273 W/cm
炉心平均出力密度	194 W/cm ³	←
出力分担率 (炉心/軸方向ブランクets)	0.985 / 0.015	1.000 / -
最大高速中性子束 ^{*3}	2.9×10 ¹⁵ n/cm ² s	2.9×10 ¹⁵ n/cm ² s
最大高速中性子照射量 ^{*3}	5.5×10 ²³ n/cm ²	5.4×10 ²³ n/cm ²
装荷時重金属インベントリ (バッチ当たり) (炉心/軸方向ブランクets)	13.5 / 1.3 t	13.5 / - t
ブランクets/炉心重金属重量比	約0.1	0
装荷時核分裂性Pu重量 (出力当たり)	4.6 t/GWe	4.7 t/GWe
原子炉倍增時間	56年	-
複合システム倍增時間 ^{*4}	74年	-
ボイド反応度 ^{*5} (平衡末期)	7.7 \$ ^{*7}	7.3 \$ ^{*7}
ドップラー係数 [Dk/dT] ^{*6} (平衡末期)	-4.1×10 ⁻³	-4.1×10 ⁻³
炉心等価直径	3.42 m	←
遮へい体外接円径	4.51 m	←

*1: Pu/HM、*2: ブランクets燃料を含む全体の平均燃焼度、*3: E > 0.1 MeV、

*4: 燃料炉外滞在期間5年、燃交・定検期間45日、*5: 非均質補正 (0.96) 考慮、

*6: 非均質補正 (1.05) 考慮、*7: 実効遅発中性子割合0.00358

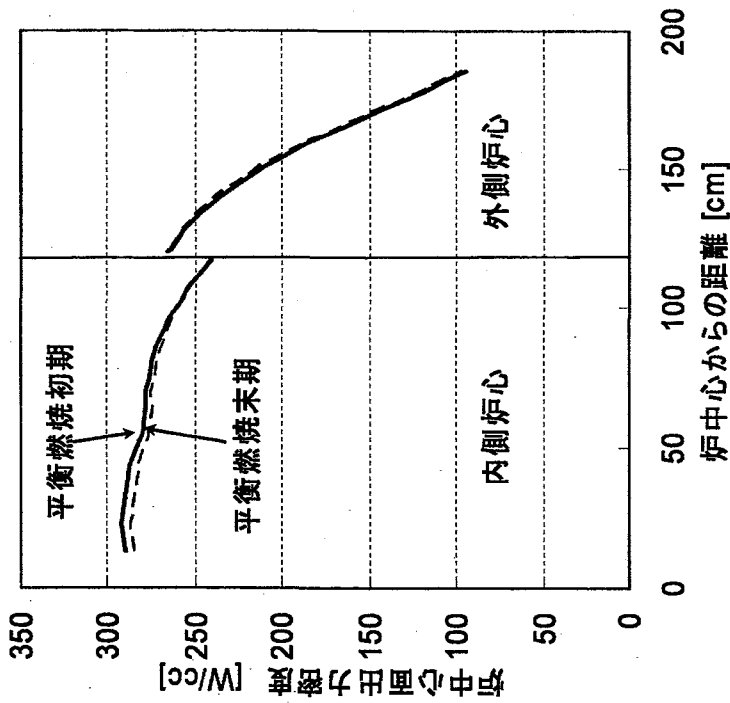
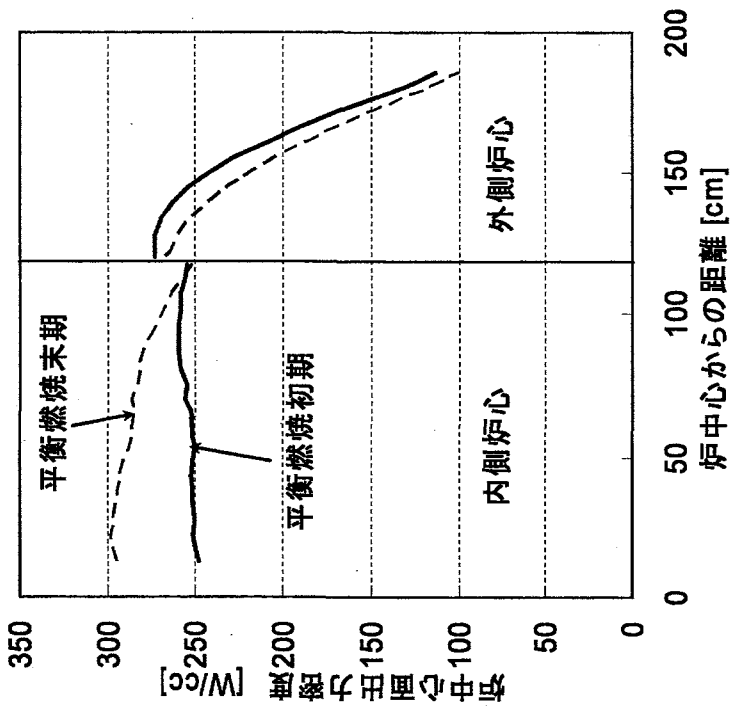


図 3.1-1 高出口温度型金属燃料炉心における径方向出力分布の特徴

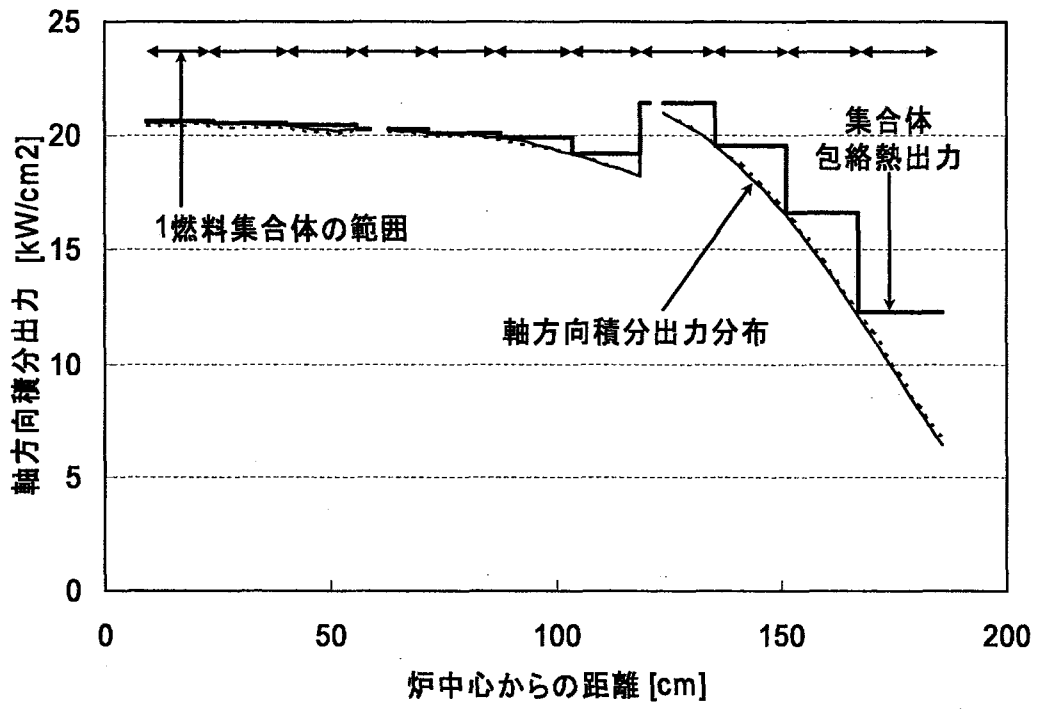


図 3.1-2 包絡熱出力の概念

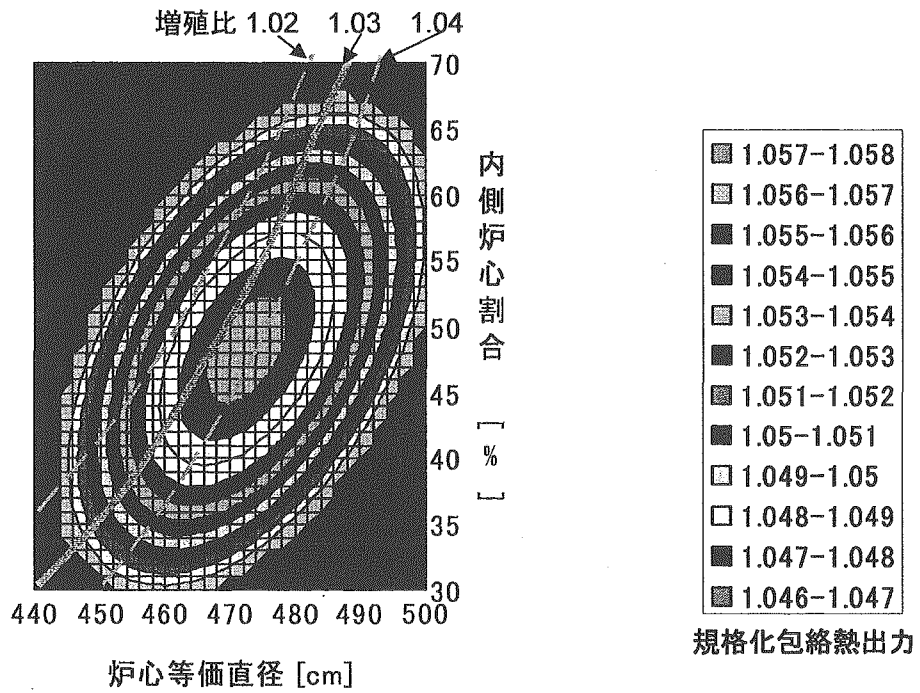


図 3.1-3 大型金属燃料高出口温度型炉心の包絡熱出力サーベイ結果

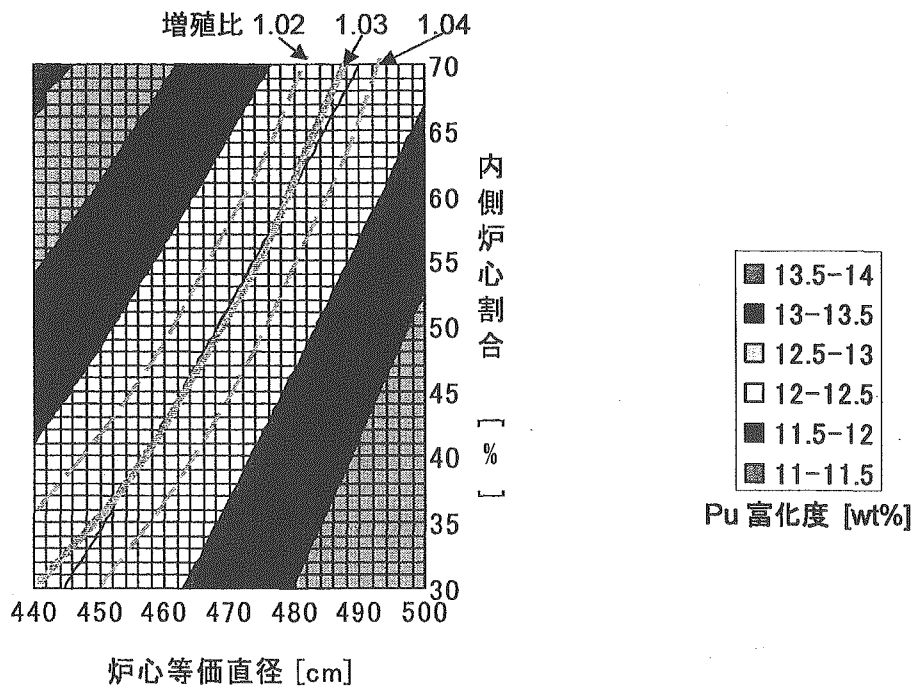


図 3.1-4 大型金属燃料高出口温度型炉心の増殖比と Pu 富化度との関係

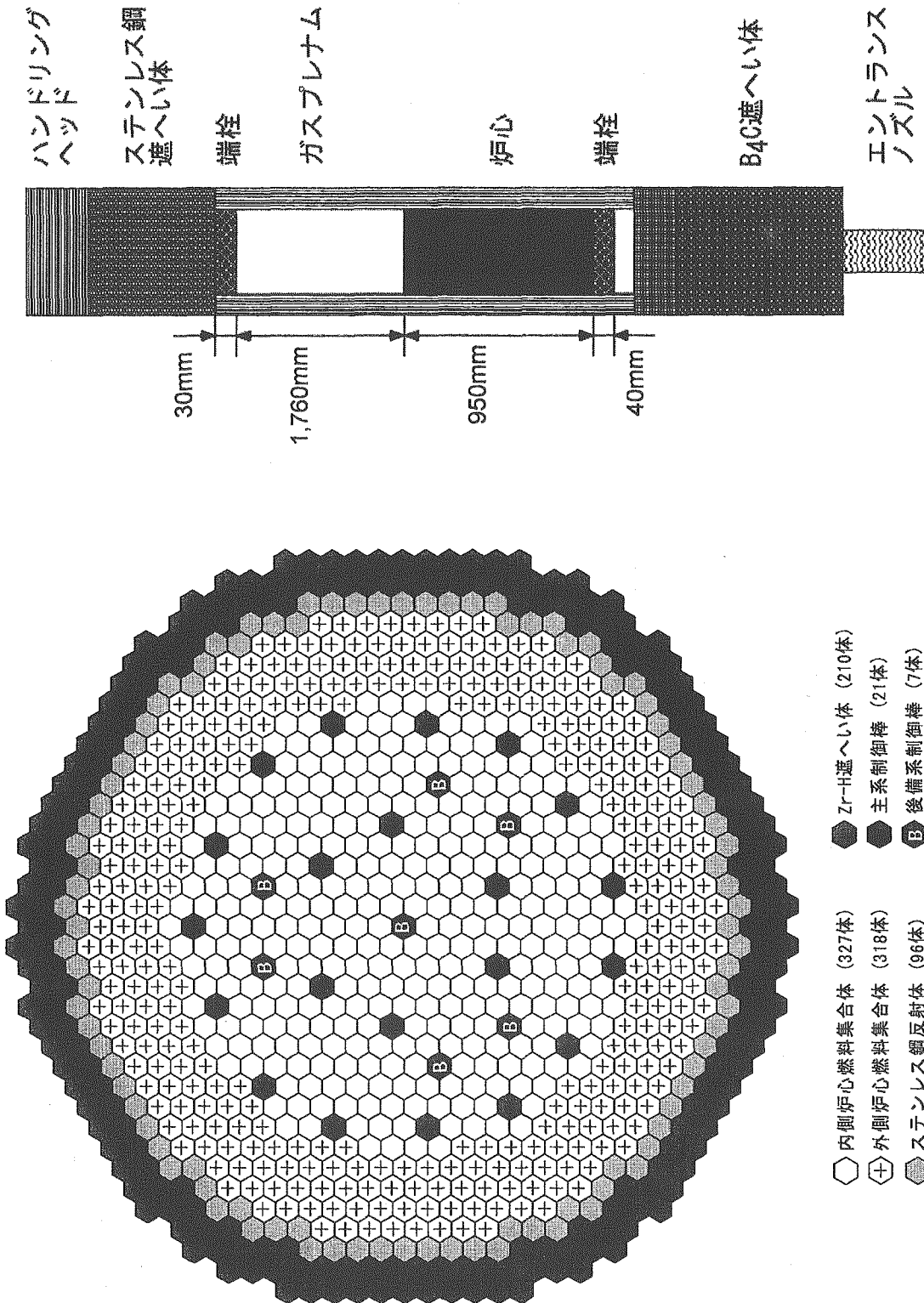


図 3.1-5 大型金属燃料高出口温度型炉心 (平衡期代表) の配置図

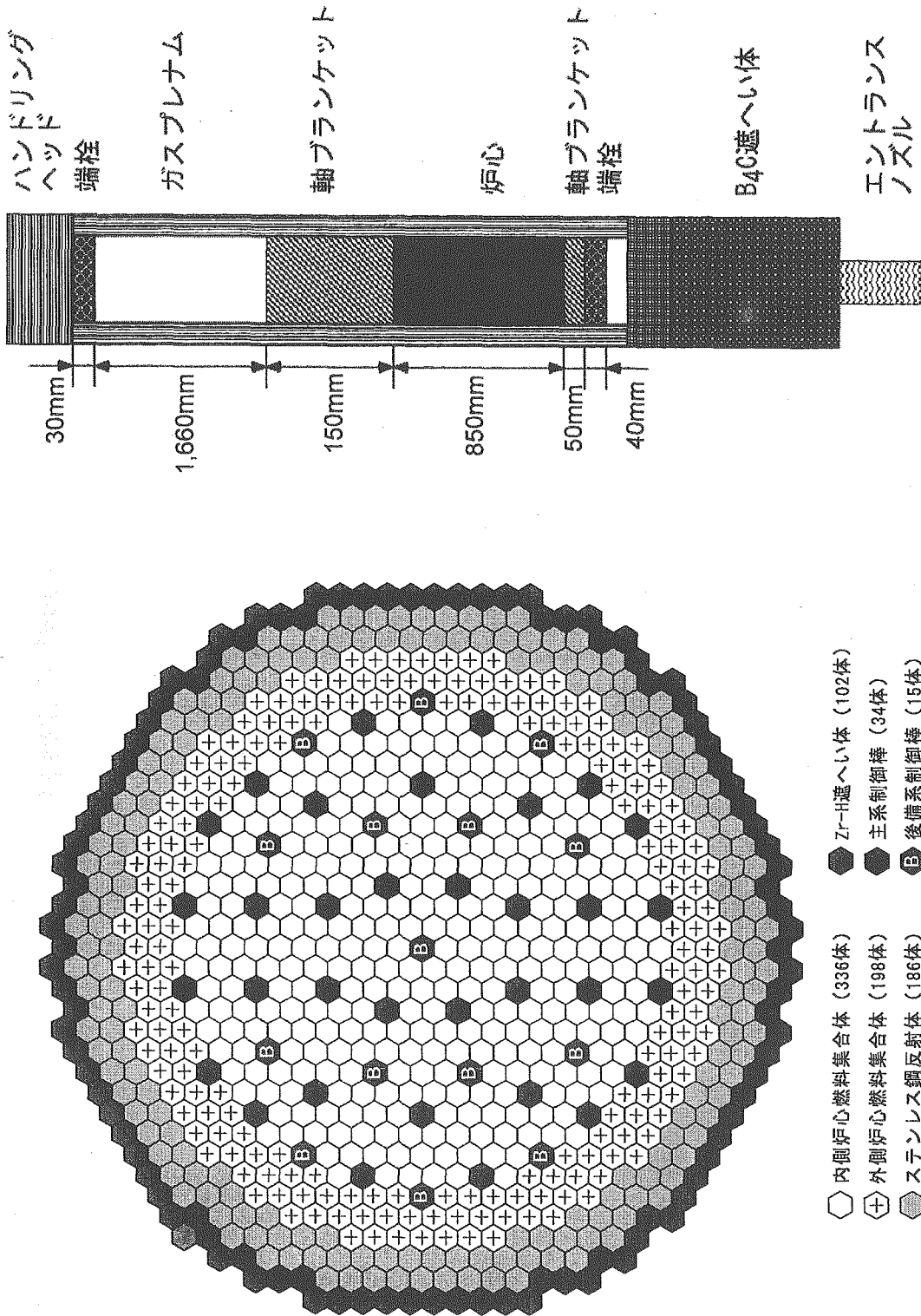


図 3.1-6 大型金属燃料コンパクト型炉心の配置図

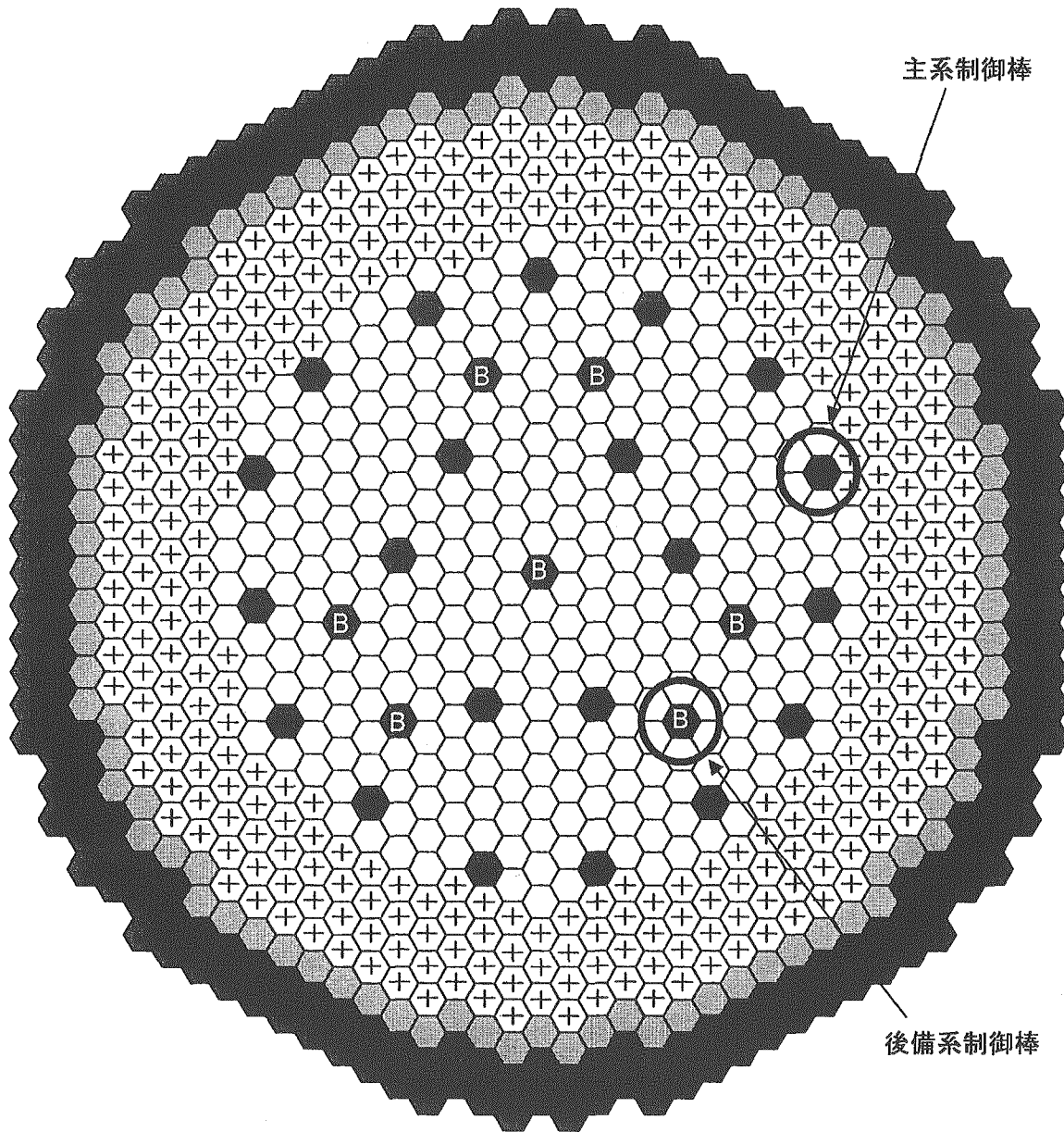


図 3.1-7 大型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）のワンロッドスタック制御棒位置

3分の1炉心（回転対称）

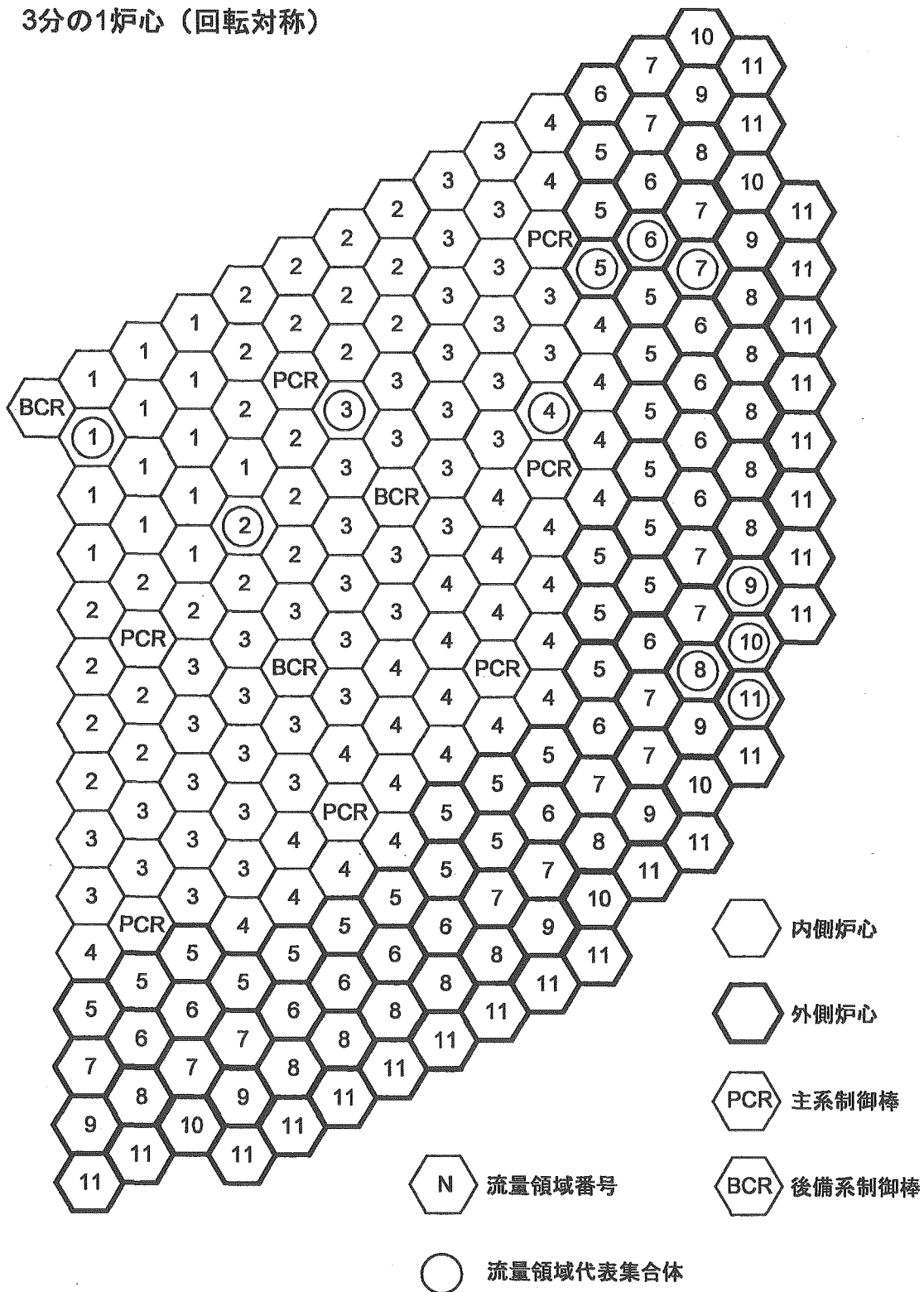


図 3.1-8 大型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の冷却材流量領域区分図

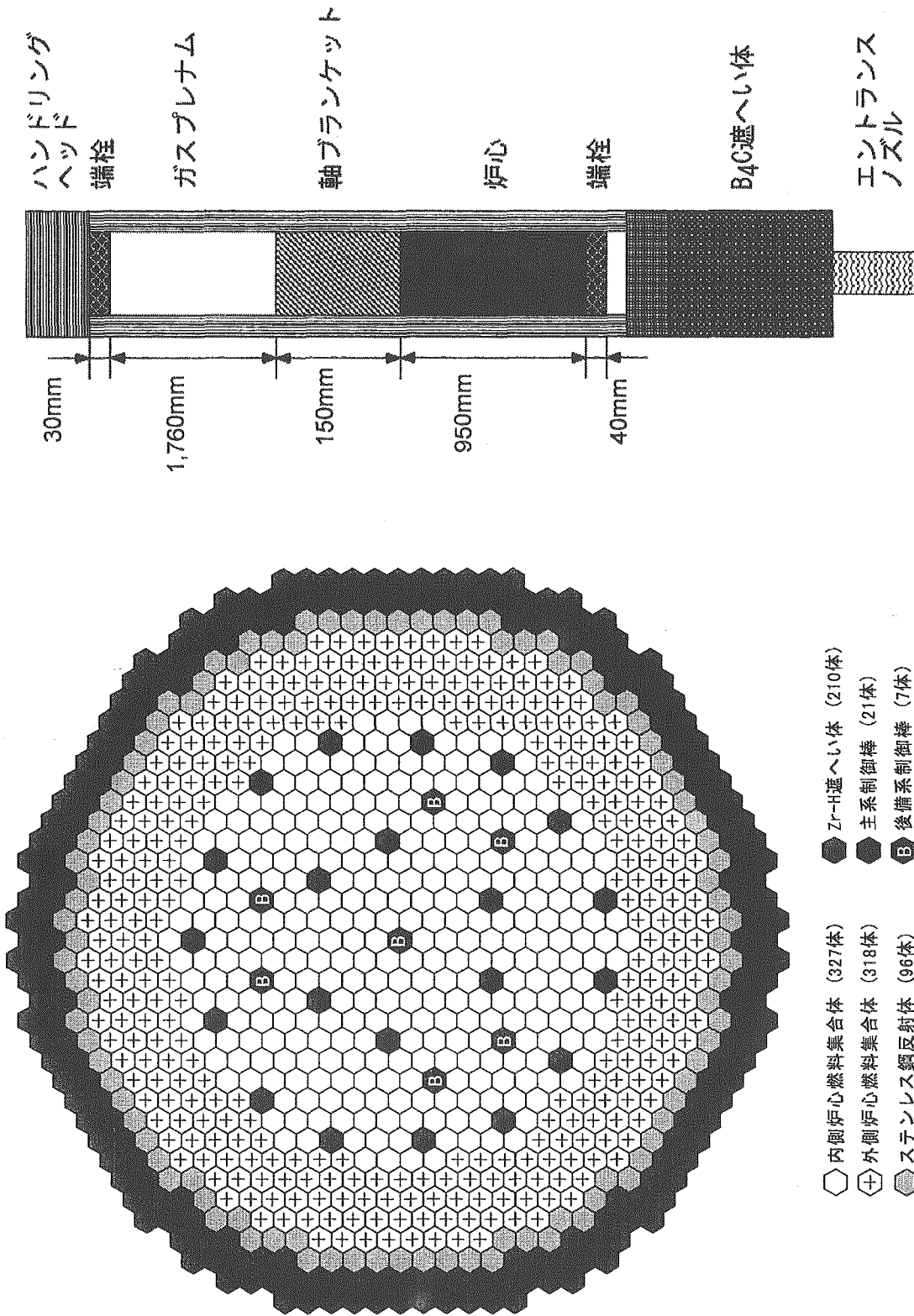


図 3.1-9 大型金属燃料高出口温度型炉心（導入期）の配置図

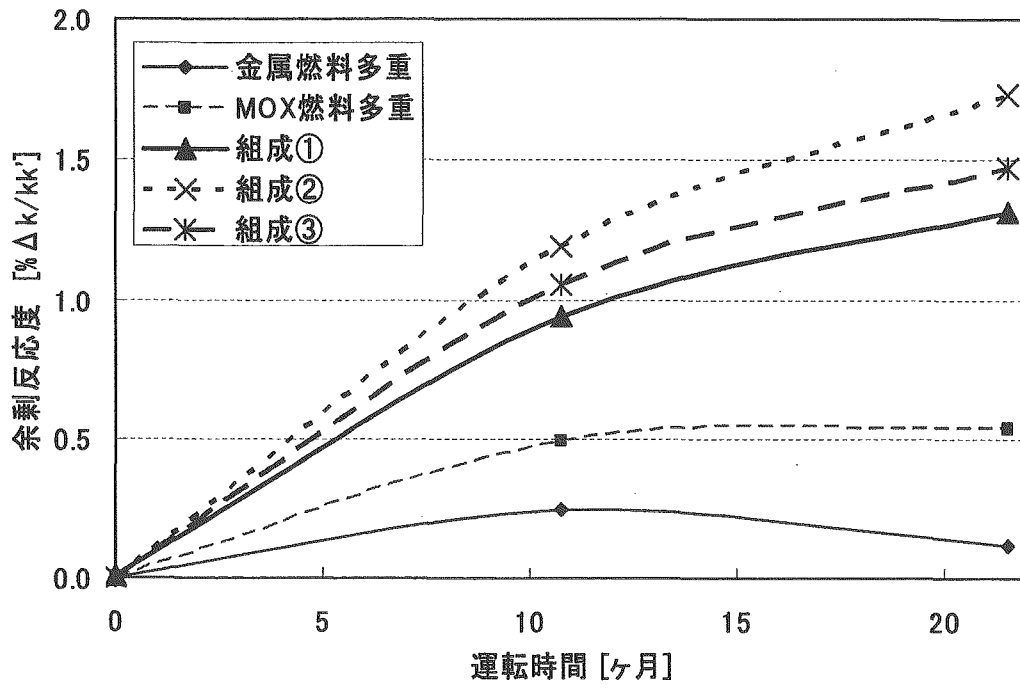


図 3.1-10 大型金属燃料高出口温度型炉心（導入期）の TRU 組成変動による
余剰反応度燃焼変化への影響

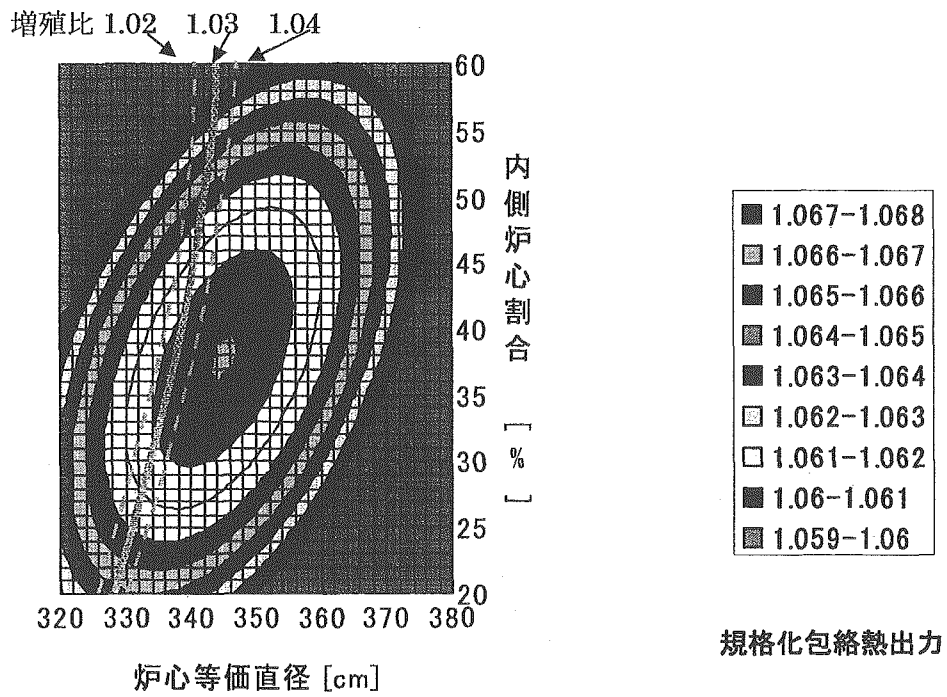


図 3.1-11 中型金属燃料高出口温度型炉心の包絡熱出力サーベイ結果

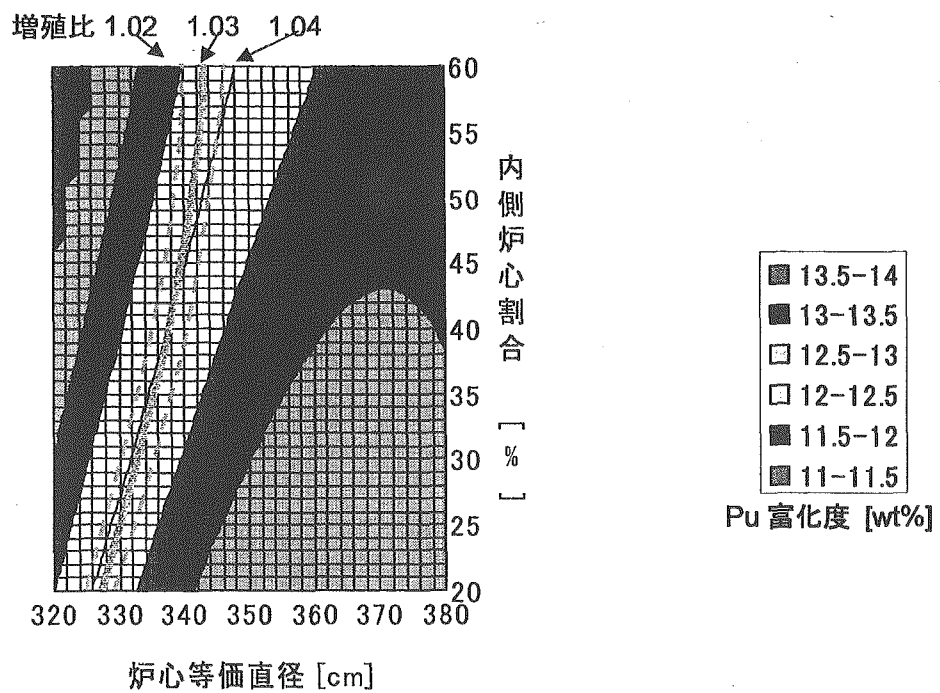


図 3.1-12 中型金属燃料高出口温度型炉心の増殖比と Pu 富化度との関係

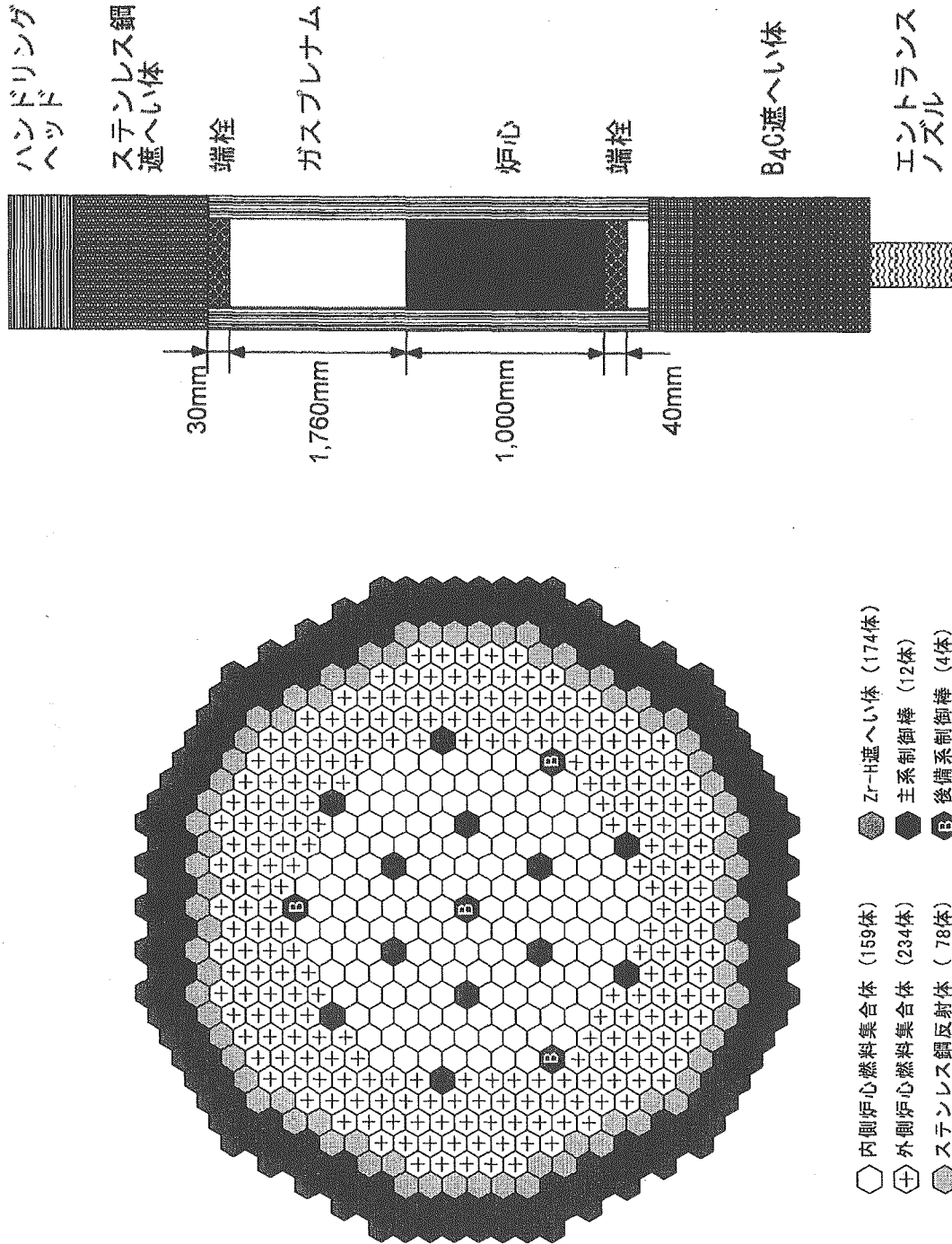


図 3.1-13 中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の配置図

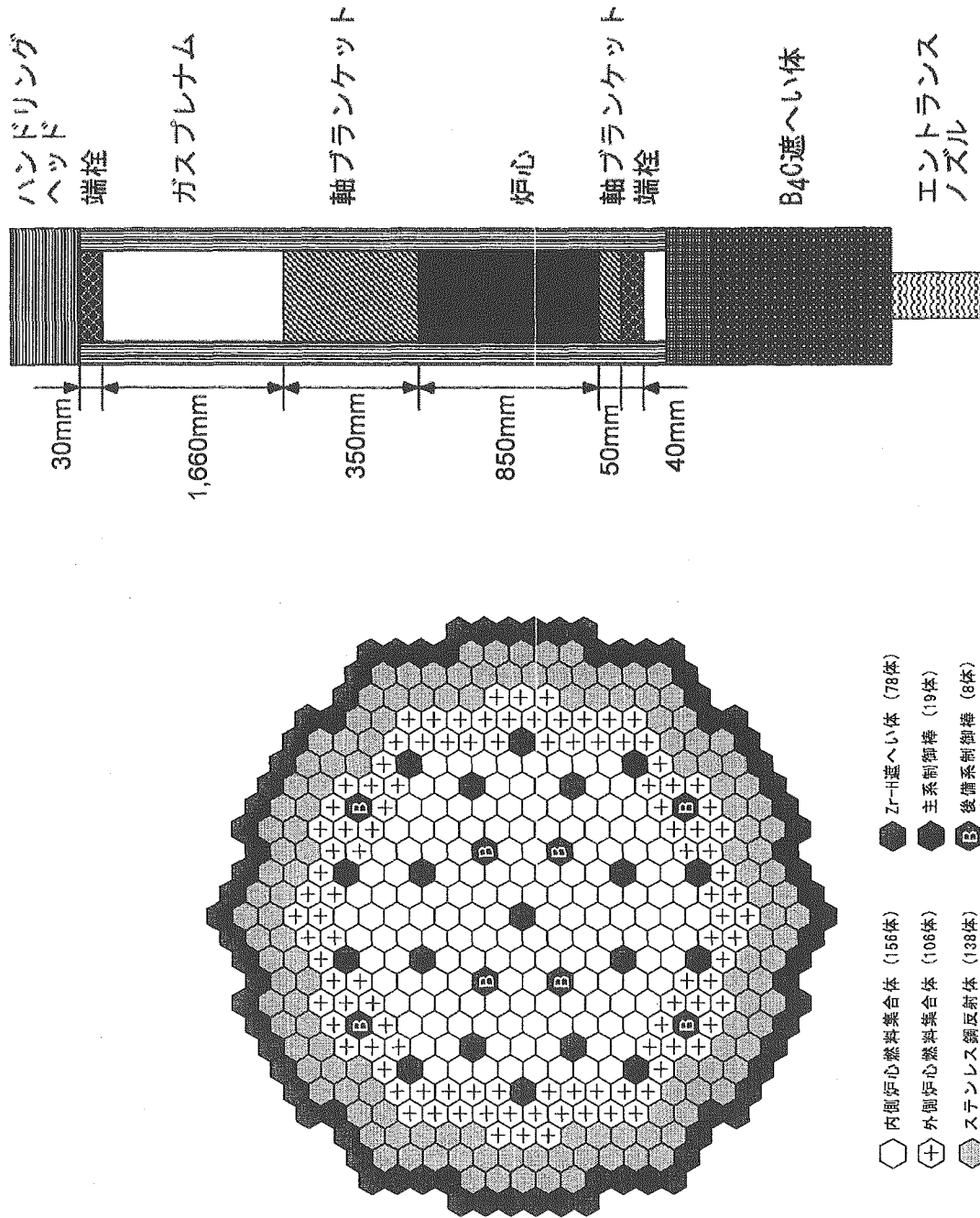


図 3.1-14 中型金属燃料コンパクト型炉心の配置図

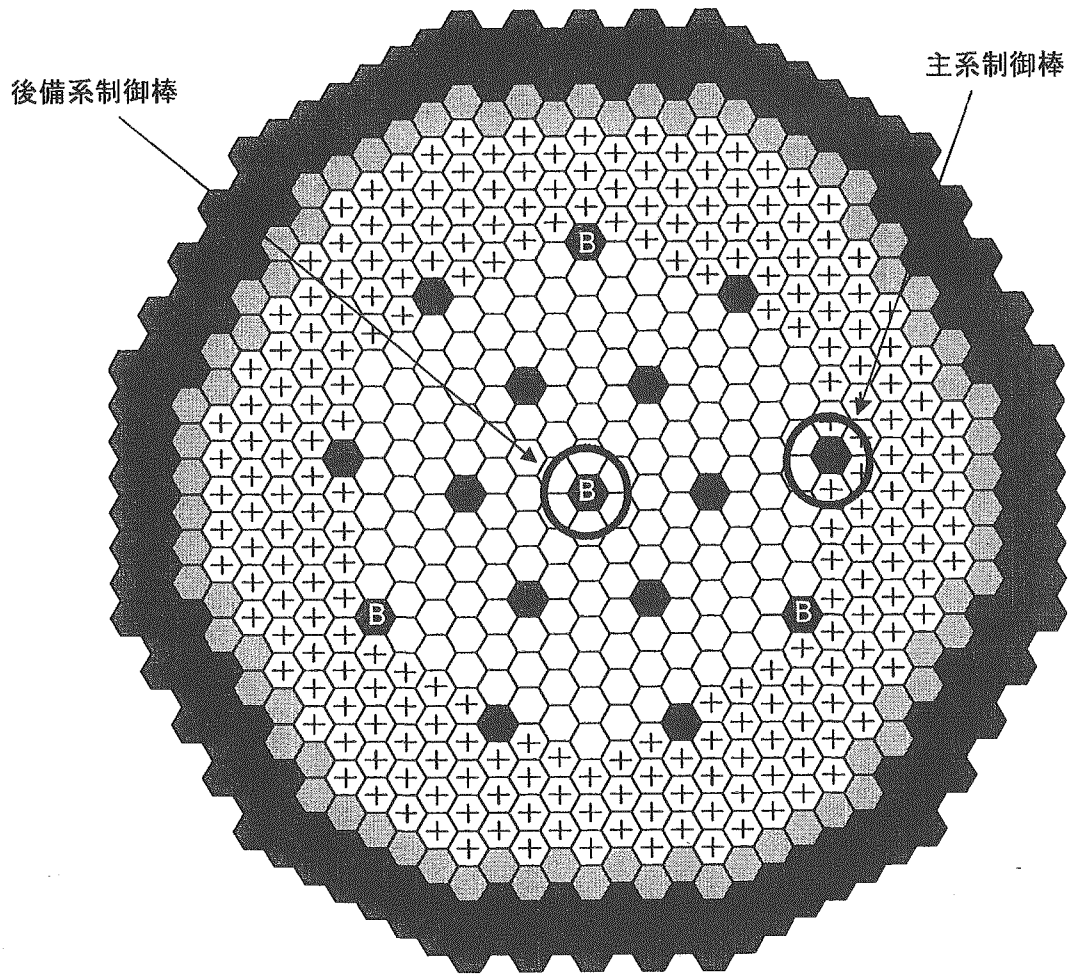


図 3.1-15 中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）のワンロッドスタック制御棒位置

3分の1炉心（回転対称）

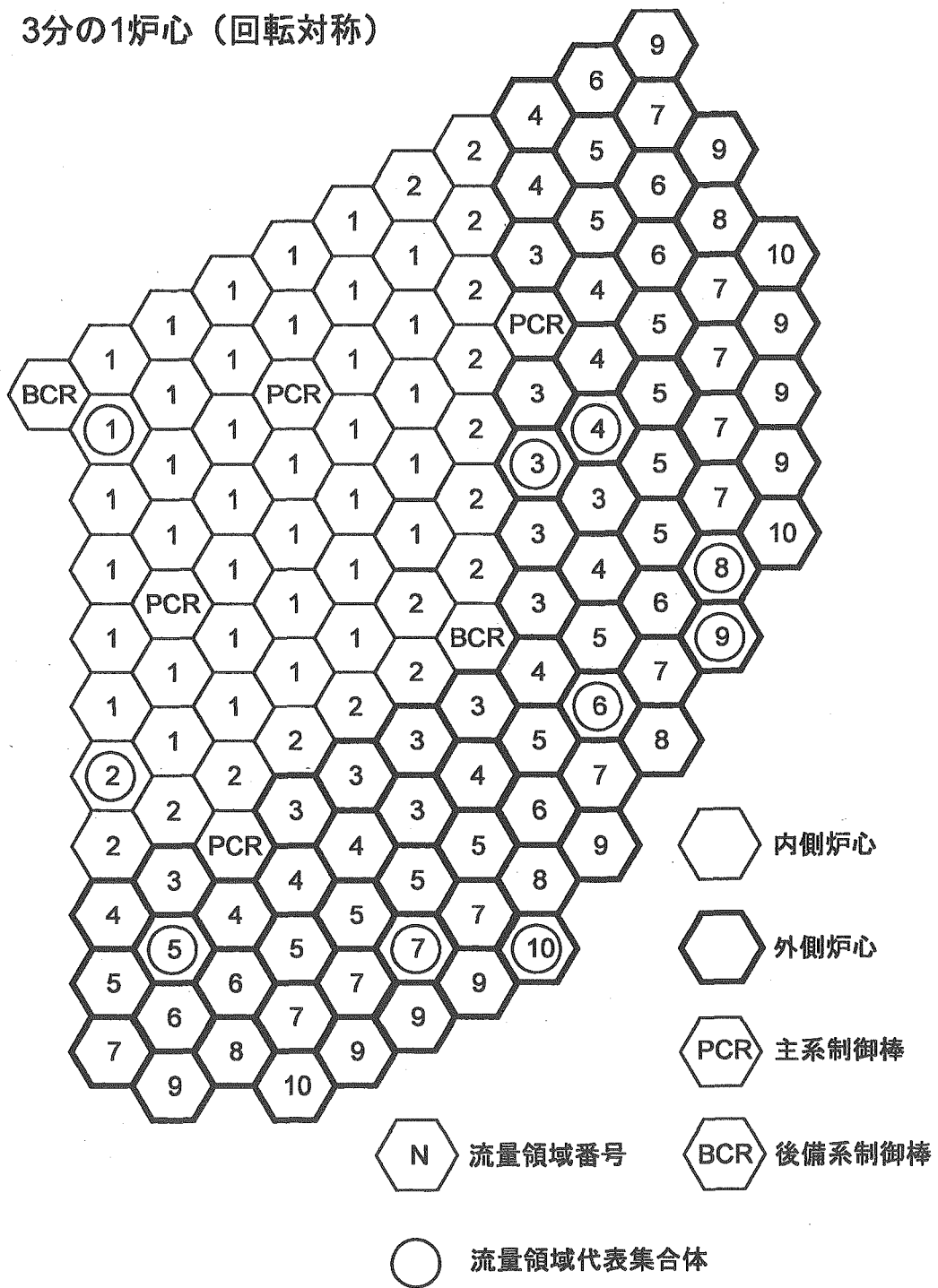
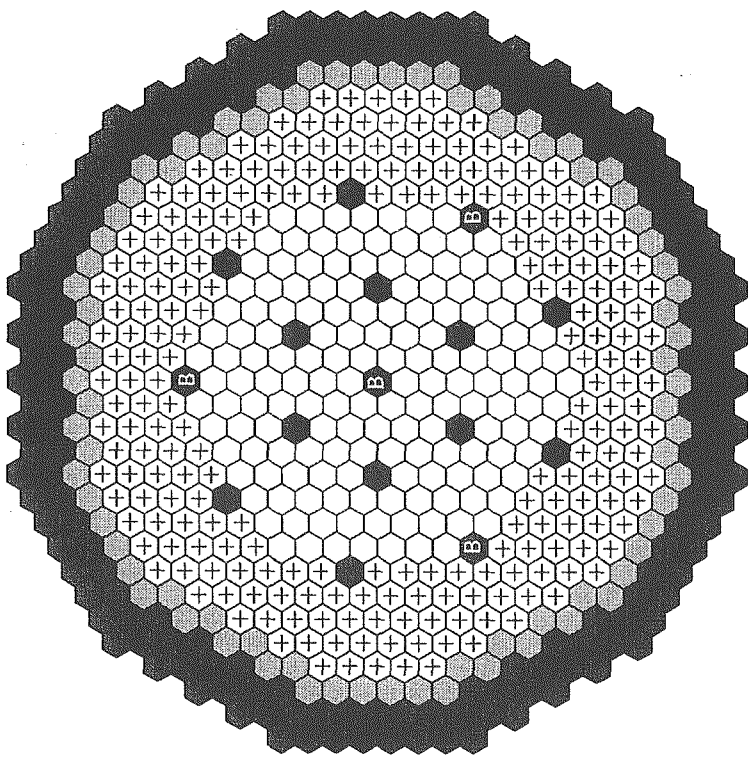
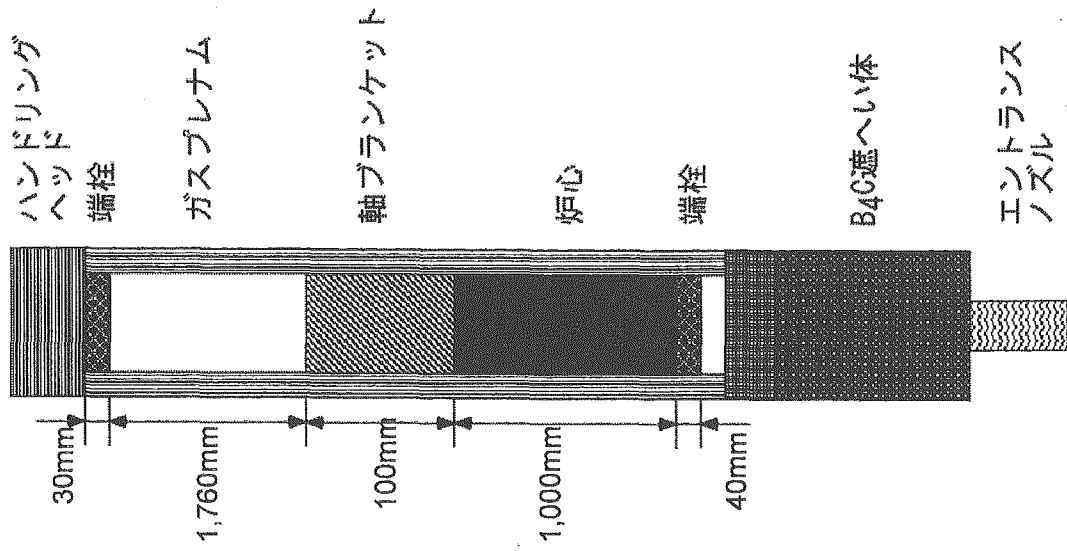


図 3.1-16 中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の冷却材流量領域区分図



- 内側炉心燃料集合体 (159体)
- ⊕ 外側炉心燃料集合体 (234体)
- ⊞ ステンレス鋼反射体 (78体)
- ⊞ Zr-H遮へい体 (174体)
- 主系制御棒 (12体)
- ⊞ 後備系制御棒 (4体)

図 3.1-17 中型金属燃料高出口温度型炉心 (導入期) の配置図

3.2 高燃焼度化炉心の設計検討

本炉心の検討では、高速中性子照射量の設計条件を緩和し炉心部取出平均燃焼度の目標を達成する炉心を構築する。それにより、材料の開発や高精度な照射挙動の把握等、開発課題は大きくなるものの、それにより得られる経済性の向上を評価することを目的とする。具体的には、照射変形量は ODS 鋼の開発目標である高速中性子照射量 $5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{MeV}$) 相当以上とはならないことを仮定する。そして、高速中性子照射量の設計目標目安からの超過を許容し、炉心部取出平均燃焼度 150GWd/t を達成し、MOX 燃料炉心と同じ設計条件を満足する金属燃料炉心を構築する。このような炉心では燃料体積比を十分にとることができ、金属燃料炉心特有の高内部転換性の特長を考慮すれば、MOX 燃料炉心に対する核特性上の優位性を示すことが期待できる。

3.2.1 大型炉心

電気出力 1,500MWe の大型炉に適合する炉心部取出平均燃焼度 150GWd/t を達成する炉心を設定する。設計条件は表 3.1-1 の通りであるが、高速中性子照射量には制限を設けない。

なお、本炉心は F/S フェーズ II 最終まとめにおける総合評価対象の金属燃料炉心（資源重視・経済性重視）である。

(1) FBR 平衡期炉心

核設計検討に加え、熱流力特性概略評価検討を示す。

代表炉心では、遮へい体外接円径において設計条件に対する余裕が見られるため、炉心高さや炉心径の拡大により、ブランケットなしで増殖比 1.03 程度を満足する高燃焼度化炉心仕様の設定を試みた。

まず、代表炉心に対して燃料ピン径 (7.2mm) を保存し、燃料集合体の増加を行った。設定した炉心の主要仕様・特性を表 3.2-1 に、炉心配置を図 3.2-1 にそれぞれ示すが、炉心燃料集合体数は 915 体に達し、燃料交換作業工程への影響が非常に大きくなることが予想されることから選定対象から除外する。

次に、代表炉心に対して炉心燃料集合体数 (645 体) を保存し、燃料ピンの太径化を行った。その結果、燃料ピン径を 7.2mm から 8.2mm に太径化し、炉心高さを 95cm から 100cm に拡大し、内側/外側炉心燃料集合体数を調整することにより、Na ボイド反応度 8% 以下で増殖比 1.03 の炉心仕様を設定することができた。主要燃料仕様を表 3.2-2 に、主要核特性を表 3.2-3 に、炉心配置を図 3.2-2 に、重金属物量収支を表 3.2-4 にそれぞれ示す。なお、最大高速中性子照射量は $8.5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{MeV}$) に達している。代表炉心と比較して高燃焼度化炉心では、包絡熱出力は 2.2%、周辺流れ効果が 1.2% それぞれ増加しており、被覆管ホットスポット温度は 9℃ 程度増加し 659℃ となる見込みである。また、代表炉心と同じ被覆管ホットスポット温度条件では原子炉出口温度は 5℃ 程度低下する見込みである。本炉

心を総合評価用金属燃料経済性重視炉心として選定する。

(2) FBR 導入期炉心

核設計検討に加え、熱流力特性概略評価検討を示す。

(1)で設定した平衡期炉心に対し、高さ 15cm の上部軸ブランケットの付加により、増殖比 1.1 程度の導入期炉心を設定した。設定した炉心の主要炉心特性を表 3.2-2 に、配置を図 3.2-3 にそれぞれ示す。主要核特性について、ナトリウムボイド反応度は 8.1\$ と条件の 8\$ を若干超過しているが十分設計対応可能な範囲である。複合システム倍増時間は 58 年となった。

導入期炉心では上部に軸ブランケットを付加するため、炉心部の出力分担は数%減少する。他方、被覆管内面ホットスポットはブランケット燃料上端部ではなく炉心燃料上端部に生じると考えられるため、熱水力設計目安となる包絡熱出力は炉心分担分について見ておけばよい。軸ブランケット発熱寄与は最小となる燃焼初期で 2.4% なので、平衡期炉心と比較して導入期炉心では、炉心部包絡熱出力は 2.4% 減少すると予想され、被覆管ホットスポット温度は 6℃ 程度減少し 653℃ となる見込みである。また、平衡期炉心と同じ被覆管ホットスポット温度条件では原子炉出口温度は 3℃ 程度向上し 548℃ となる見込みである。更に、定性的には燃焼反応度も 3 分の 1 程度なので、制御棒運用に係る合理化も期待できる。また、バンドル部圧力損失は 0.2MPa となり制限を満足する。

3.2.2 中型炉心

電気出力 750MWe の中型炉に適合する炉心部取出平均燃焼度 150GWd/t を達成する炉心を設定する。設計条件は表 3.1-17 の通りであるが、高速中性子照射量には制限を設けない。

平衡期炉心を対象に核設計検討及び熱流力特性概略評価検討について示す。

代表炉心では、遮へい体外接円径において設計条件に対する余裕が見られるため、炉心高さや炉心径の拡大により、ブランケットなしで増殖比 1.03 程度を満足する高燃焼度化炉心の設定を試みた。

代表炉心に対して燃料ピン径 (7.5mm) を保存し、燃料集合体の増加により炉心を設定した。その結果、炉心燃料集合体数を 393 体から 552 体増加させることにより、Na ボイド反応度 8\$ 以下で増殖比 1.03 の炉心を設定することができた。主要燃料仕様を表 3.2-6 に、主要核特性を表 3.2-7 に、炉心配置を図 3.2-4 に、重金属物量収支を表 3.2-8 にそれぞれ示す。なお、最大高速中性子照射量は $8.4 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{MeV}$) に達している。代表炉心と比較して高燃焼度化炉心では、包絡熱出力が 0.3%、周辺流れ効果が 0.6% それぞれ増加しており、被覆管ホットスポット温度は 2℃ 程度増加し 659℃ となる見込みである。また、代表炉心と同じ被覆管ホットスポット温度条件では原子炉出口温度は 1℃ 程度低下する見込みである。

表 3.2-1 大型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化）のピン径保存時の主要仕様・特性

項目	基準炉心	高燃焼度化炉心
燃料集合体数(内側/外側/合計)	291/354/645	519/396/915
制御棒体数	28	40
被覆管外径 (mm)	7.2	←
被覆管内径 (mm)	6.36	←
被覆管肉厚 (mm)	0.42	←
燃料ピン本数 (本)	331	←
ラッパ管外対面間距離 (mm)	167.3	162.2
ラッパ管内対面間距離 (mm)	157.3	152.2
ラッパ管肉厚 (mm)	5.0	←
ラッパ管間ギャップ (mm)	5.1	4.9
集合体配列ピッチ (mm)	172.4	167.1
ワイヤ径 (mm)	1.26	1.00
ワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200	←
燃料体積比 (%)	40.9	43.5
構造材体積比 (%)	24.0	24.6
冷却材体積比(ラッパ管内) (%)	29.3	26.2
運転サイクル長さ(ヶ月)	21.5	21.1
燃料交換バッチ数(炉心)	3	←
炉心高さ (mm)	950	980
Pu富化度 (wt%)	12.4	12.2
Zr含有率 (内側/外側) (wt%)	10.0/6.0	←
スミア密度 (内側/外側) (%)	70/75	←
取出平均燃焼度 (GWd/t)	100	149
増殖比	1.033	1.029
最大線出力 (内側/外側) (W/cm)	274/270	163/184
Naボイド反応度 (\$)	7.9	7.7
炉心等価直径 (m)	4.47	5.42
遮へい体外接円径 (m)	5.66	6.55

表 3.2-2 大型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化）の主要燃料仕様

項目	仕様			
	炉心	軸方向ブランケット	径方向ブランケット	
燃料要素	燃料形態	U-Pu-Zr	U-Zr	なし
	被覆管材料	ODS鋼		
	被覆管外径 (mm)	8.2		
	被覆管内径 (mm)	7.24		
	被覆管肉厚 (mm)	0.48		
	ガスプレナム長さ(上) (mm)	1,760		
	ボンド材	ナトリウム		
	燃料スミア密度 (%TD)	70~75	←	
	Zr含有率 (wt%)	6~10	10	
集合体	燃料ピン本数 (本)	331		なし
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	9.38		
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.14		
	ラッパ管材料	PNC-FMS鋼		
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	183.0		
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	173.0		
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0		
	ラッパ管間ギャップ (mm)	6.5		
	集合体配列ピッチ (mm)	189.5		
	ワイヤ径 (mm)	1.13		
	ワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200		
体積比 (%)	燃料 (実効)	43.8 (30.7~32.9)	←	
	構造材	23.4	←	
	冷却材	32.8	←	

表 3.2-3 大型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化）の主要核特性

項目	高燃焼度化平衡期炉心	高燃焼度化導入期炉心	平衡期炉心 (基準炉心)
運転サイクル長さ	22ヶ月 (669日)	←	21.5ヶ月 (654日)
燃料交換バッチ数 (炉心)	6 バッチ	←	3 バッチ
炉心高さ	1,000 mm	←	950 mm
軸ブランクett高さ (上部)	0 mm	150 mm	0 mm
Pu富化度 ^{*1}	11.6 wt%	11.1 wt%	12.4 wt%
Zr含有率 (内側/外側)	10.0 / 6.0 wt%	10.0 / 6.0 wt%	10.0 / 6.0 wt%
スミア密度 (内側/外側)	70 / 75 %	70 / 75 %	70 / 75 %
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランクett)	153.3 / - GWd/t	149.0 / 28.0 GWd/t	100.0 / - GWd/t
全炉心平均燃焼度 ^{*2}	153.3 GWd/t	134.0 GWd/t	100.0 GWd/t
燃焼反応度	0.48 % Δ k/k'	0.14 % Δ k/k'	0.48 % Δ k/k'
増殖比 (全体) (炉心/軸方向ブランクett)	1.031 / -	1.109 / 0.083	1.033 / -
最大線出力 (内側/外側)	272 / 250 W/cm	272 / 235 W/cm	274 / 270 W/cm
炉心平均出力密度	171 W/cm ³	171 W/cm ³	217 W/cm ³
出力分担率 (炉心/軸方向ブランクett)	1.000 / -	0.972 / 0.028	1.000 / -
最大高速中性子束 ^{*3}	2.5×10 ¹⁵ n/cm ² s	2.5×10 ¹⁵ n/cm ² s	3.2×10 ¹⁵ n/cm ² s
最大高速中性子照射量 ^{*3}	8.5×10 ²³ n/cm ²	8.5×10 ²³ n/cm ²	5.4×10 ²³ n/cm ²
装荷時重金属インベントリ (バッチ当たり) (炉心/軸方向ブランクett)	15.6 / - t	15.6 / 2.4 t	23.3 / - t
ブランクett/炉心重金属重量比	0	0.15	0
装荷時核分裂性Pu重量 (出力当たり)	5.1 t/GWe	4.9 t/GWe	4.1 t/GWe
原子炉倍増時間	-	55年	-
複合システム倍増時間 ^{*4}	-	58年	-
ポイド反応度 ^{*5} (平衡末期)	7.8 \$ ^{*7}	8.1 \$ ^{*7}	7.9 \$ ^{*7}
ドブラー係数 [Td/dT] ^{*6} (平衡末期)	-3.9×10 ⁻³	-3.9×10 ⁻³	-4.2×10 ⁻³
炉心等価直径	5.16 m	←	4.70 m
遮へい体外接円径	6.46 m	←	5.88 m

*1: Pu/HM、*2: ブランクett燃料を含む全体の平均燃焼度、*3: E > 0.1 MeV、
 *4: 燃料炉外滞在期間5年、燃交・定検期間45日、*5: 非均質補正 (0.96) 考慮、
 *6: 非均質補正 (1.05) 考慮、*7: 実効遅発中性子割合0.00356

表 3.2-4(1) 大型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化平衡期）の重金属物量収支
 - 1 バッチ当たり装荷 -

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	23.7	17.5	41.1	0.0	0.0	0.0	41.1
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U-238	7,868.3	5,803.3	13,671.6	0.0	0.0	0.0	13,671.6
U合計	7,892.0	5,820.7	13,712.7	0.0	0.0	0.0	13,712.7
Np-237	4.3	3.2	7.5	0.0	0.0	0.0	7.5
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np合計	4.3	3.2	7.5	0.0	0.0	0.0	7.5
Pu-238	11.8	8.7	20.5	0.0	0.0	0.0	20.5
Pu-239	708.0	522.2	1,230.2	0.0	0.0	0.0	1,230.2
Pu-240	270.3	199.4	469.7	0.0	0.0	0.0	469.7
Pu-241	25.8	19.0	44.7	0.0	0.0	0.0	44.7
Pu-242	25.7	19.0	44.7	0.0	0.0	0.0	44.7
Pu合計	1,041.7	768.3	1,809.9	0.0	0.0	0.0	1,809.9
Am-241	17.2	12.7	29.8	0.0	0.0	0.0	29.8
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-243	5.4	4.0	9.3	0.0	0.0	0.0	9.3
Am合計	22.5	16.6	39.2	0.0	0.0	0.0	39.2
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-244	4.3	3.2	7.5	0.0	0.0	0.0	7.5
Cm-245	1.1	0.8	1.9	0.0	0.0	0.0	1.9
Cm合計	5.4	4.0	9.3	0.0	0.0	0.0	9.3
合計	8,965.8	6,612.7	15,578.6	0.0	0.0	0.0	15,578.6
FP ^{*1}	26.6	16.9	43.5	0.0	0.0	0.0	43.5
FP ^{*2}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP合計	26.6	16.9	43.5	0.0	0.0	0.0	43.5

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃焼期間中生成FP

表 3.2-4(2) 大型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化平衡期）の重金属物量収支
 - 1 バッチ当たり取出 -

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	3.3	5.2	8.6	0.0	0.0	0.0	8.6
U-236	3.3	2.2	5.4	0.0	0.0	0.0	5.4
U-238	6,108.6	4,971.7	11,080.3	0.0	0.0	0.0	11,080.3
U合計	6,115.2	4,979.1	11,094.3	0.0	0.0	0.0	11,094.3
Np-237	5.5	4.2	9.7	0.0	0.0	0.0	9.7
Np-239	1.1	0.6	1.7	0.0	0.0	0.0	1.7
Np合計	6.6	4.8	11.4	0.0	0.0	0.0	11.4
Pu-238	12.9	9.9	22.7	0.0	0.0	0.0	22.7
Pu-239	728.4	546.3	1,274.7	0.0	0.0	0.0	1,274.7
Pu-240	314.5	215.9	530.4	0.0	0.0	0.0	530.4
Pu-241	41.6	25.0	66.6	0.0	0.0	0.0	66.6
Pu-242	24.5	17.4	41.9	0.0	0.0	0.0	41.9
Pu合計	1,121.9	814.4	1,936.3	0.0	0.0	0.0	1,936.3
Am-241	13.8	12.7	26.5	0.0	0.0	0.0	26.5
Am-242m	1.1	0.9	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0
Am-243	6.5	4.5	10.9	0.0	0.0	0.0	10.9
Am合計	21.4	18.0	39.4	0.0	0.0	0.0	39.4
Cm-242	0.8	0.5	1.3	0.0	0.0	0.0	1.3
Cm-243	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
Cm-244	6.6	4.1	10.7	0.0	0.0	0.0	10.7
Cm-245	1.2	0.8	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0
Cm合計	8.7	5.4	14.1	0.0	0.0	0.0	14.1
合計	7,273.8	5,821.8	13,095.5	0.0	0.0	0.0	13,095.5
FP ^{*1}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP ^{*2}	1,687.0	790.4	2,477.4	0.0	0.0	0.0	2,477.4
FP合計	1,687.0	790.4	2,477.4	0.0	0.0	0.0	2,477.4

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃焼期間中生成FP

表 3.2-4(3) 大型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化平衡期）の重金属物量収支
— 平衡初期 —

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	72.4	66.8	139.2	0.0	0.0	0.0	139.2
U-236	12.7	7.2	19.9	0.0	0.0	0.0	19.9
U-238	42,601.8	32,683.4	75,285.3	0.0	0.0	0.0	75,285.3
U合計	42,687.0	32,757.4	75,444.4	0.0	0.0	0.0	75,444.4
Np-237	30.3	22.3	52.6	0.0	0.0	0.0	52.6
Np-239	6.3	3.1	9.3	0.0	0.0	0.0	9.3
Np合計	36.6	25.4	62.0	0.0	0.0	0.0	62.0
Pu-238	73.3	54.3	127.6	0.0	0.0	0.0	127.6
Pu-239	4,487.1	3,259.3	7,746.4	0.0	0.0	0.0	7,746.4
Pu-240	1,747.7	1,239.1	2,986.8	0.0	0.0	0.0	2,986.8
Pu-241	206.6	132.6	339.2	0.0	0.0	0.0	339.2
Pu-242	148.3	108.9	257.2	0.0	0.0	0.0	257.2
Pu合計	6,663.0	4,794.2	11,457.1	0.0	0.0	0.0	11,457.1
Am-241	88.3	74.6	162.8	0.0	0.0	0.0	162.8
Am-242m	4.5	3.0	7.5	0.0	0.0	0.0	7.5
Am-243	35.6	25.3	60.9	0.0	0.0	0.0	60.9
Am合計	128.4	102.8	231.2	0.0	0.0	0.0	231.2
Cm-242	4.1	2.3	6.4	0.0	0.0	0.0	6.4
Cm-243	0.4	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5
Cm-244	31.8	21.5	53.3	0.0	0.0	0.0	53.3
Cm-245	6.5	4.6	11.0	0.0	0.0	0.0	11.0
Cm合計	42.8	28.5	71.3	0.0	0.0	0.0	71.3
合計	49,557.7	37,708.3	87,265.9	0.0	0.0	0.0	87,265.9
FP ^{*1}	159.8	117.8	277.6	0.0	0.0	0.0	277.6
FP ^{*2}	4,217.4	1,965.2	6,182.5	0.0	0.0	0.0	6,182.5
FP合計	4,377.1	2,083.0	6,460.1	0.0	0.0	0.0	6,460.1

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃焼期間中生成FP

表 3.2-4(4) 大型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化平衡期）の重金属物量収支
— 平衡末期 —

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	52.3	54.2	106.4	0.0	0.0	0.0	106.4
U-236	15.9	9.5	25.4	0.0	0.0	0.0	25.4
U-238	40,873.3	31,823.3	72,696.6	0.0	0.0	0.0	72,696.6
U合計	40,941.5	31,886.9	72,828.4	0.0	0.0	0.0	72,828.4
Np-237	31.6	23.4	55.0	0.0	0.0	0.0	55.0
Np-239	7.4	3.7	11.0	0.0	0.0	0.0	11.0
Np合計	39.0	27.1	66.0	0.0	0.0	0.0	66.0
Pu-238	74.3	55.5	129.8	0.0	0.0	0.0	129.8
Pu-239	4,507.6	3,282.8	7,790.4	0.0	0.0	0.0	7,790.4
Pu-240	1,789.6	1,255.3	3,044.9	0.0	0.0	0.0	3,044.9
Pu-241	221.9	138.8	360.7	0.0	0.0	0.0	360.7
Pu-242	147.0	107.3	254.3	0.0	0.0	0.0	254.3
Pu合計	6,740.4	4,839.6	11,580.0	0.0	0.0	0.0	11,580.0
Am-241	85.0	74.3	159.3	0.0	0.0	0.0	159.3
Am-242m	5.7	3.8	9.5	0.0	0.0	0.0	9.5
Am-243	36.6	25.8	62.5	0.0	0.0	0.0	62.5
Am合計	127.3	103.9	231.2	0.0	0.0	0.0	231.2
Cm-242	4.9	2.8	7.7	0.0	0.0	0.0	7.7
Cm-243	0.5	0.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.7
Cm-244	34.0	22.5	56.6	0.0	0.0	0.0	56.6
Cm-245	6.6	4.5	11.1	0.0	0.0	0.0	11.1
Cm合計	46.0	30.0	76.0	0.0	0.0	0.0	76.0
合計	47,894.1	36,887.6	84,781.7	0.0	0.0	0.0	84,781.7
FP ^{*1}	159.8	117.8	277.6	0.0	0.0	0.0	277.6
FP ^{*2}	5,876.2	2,785.3	8,661.5	0.0	0.0	0.0	8,661.5
FP合計	6,036.0	2,903.1	8,939.1	0.0	0.0	0.0	8,939.1

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃焼期間中生成FP

表 3.2-4(1) 大型金属燃料高出口温度型炉心（高燃烧度化導入期）の重金属物量収支
 -1 バッチ当たり装荷-

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	23.8	17.6	41.4	7.1	0.0	7.1	48.4
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U-238	7,912.7	5,836.0	13,748.6	2,343.8	0.0	2,343.8	16,092.5
U合計	7,936.5	5,853.5	13,790.0	2,350.9	0.0	2,350.9	16,140.9
Np-237	4.1	3.0	7.1	0.0	0.0	0.0	7.1
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np合計	4.1	3.0	7.1	0.0	0.0	0.0	7.1
Pu-238	11.3	8.3	19.7	0.0	0.0	0.0	19.7
Pu-239	678.7	500.6	1,179.3	0.0	0.0	0.0	1,179.3
Pu-240	259.1	191.1	450.3	0.0	0.0	0.0	450.3
Pu-241	24.7	18.2	42.9	0.0	0.0	0.0	42.9
Pu-242	24.7	18.2	42.9	0.0	0.0	0.0	42.9
Pu合計	998.5	736.5	1,735.0	0.0	0.0	0.0	1,735.0
Am-241	16.5	12.1	28.6	0.0	0.0	0.0	28.6
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-243	5.1	3.8	8.9	0.0	0.0	0.0	8.9
Am合計	21.6	15.9	37.5	0.0	0.0	0.0	37.5
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-244	4.1	3.0	7.1	0.0	0.0	0.0	7.1
Cm-245	1.0	0.8	1.8	0.0	0.0	0.0	1.8
Cm合計	5.1	3.8	8.9	0.0	0.0	0.0	8.9
合計	8,965.8	6,612.7	15,578.6	2,350.9	0.0	2,350.9	17,929.4
FP ^{*1}	26.6	16.9	43.5	0.0	0.0	0.0	43.5
FP ^{*2}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP合計	26.6	16.9	43.5	0.0	0.0	0.0	43.5

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃烧期間中生成FP

表 3.2-4(2) 大型金属燃料高出口温度型炉心（高燃烧度化導入期）の重金属物量収支
 -1 バッチ当たり取出-

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	3.2	5.5	8.7	3.3	0.0	3.3	12.0
U-236	3.3	2.1	5.4	0.8	0.0	0.8	6.2
U-238	6,112.5	5,027.7	11,140.2	2,140.5	0.0	2,140.5	13,280.7
U合計	6,119.0	5,035.3	11,154.4	2,144.5	0.0	2,144.5	13,298.9
Np-237	5.5	4.1	9.6	0.4	0.0	0.4	10.0
Np-239	1.1	0.6	1.7	0.2	0.0	0.2	1.8
Np合計	6.6	4.7	11.2	0.6	0.0	0.6	11.9
Pu-238	12.4	9.5	21.9	0.1	0.0	0.1	22.0
Pu-239	726.8	543.4	1,270.2	130.0	0.0	130.0	1,400.2
Pu-240	308.2	208.5	516.7	11.7	0.0	11.7	528.4
Pu-241	40.7	23.6	64.3	0.6	0.0	0.6	64.9
Pu-242	23.7	16.7	40.4	0.0	0.0	0.0	40.4
Pu合計	1,111.8	801.7	1,913.5	142.5	0.0	142.5	2,056.0
Am-241	13.2	12.4	25.6	0.1	0.0	0.1	25.7
Am-242m	1.1	0.8	1.9	0.0	0.0	0.0	1.9
Am-243	6.2	4.3	10.5	0.0	0.0	0.0	10.5
Am合計	20.5	17.5	38.0	0.1	0.0	0.1	38.1
Cm-242	0.8	0.4	1.2	0.0	0.0	0.0	1.2
Cm-243	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
Cm-244	6.4	4.0	10.3	0.0	0.0	0.0	10.3
Cm-245	1.2	0.7	1.9	0.0	0.0	0.0	1.9
Cm合計	8.4	5.2	13.6	0.0	0.0	0.0	13.6
合計	7,266.3	5,864.4	13,130.7	2,287.7	0.0	2,287.7	15,418.4
FP ^{*1}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP ^{*2}	1,692.2	747.1	2,439.4	60.7	0.0	60.7	2,500.1
FP合計	1,692.2	747.1	2,439.4	60.7	0.0	60.7	2,500.1

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃烧期間中生成FP

表 3.2-4(3) 大型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化導入期）の重金属物量収支
 - 平衡初期 -

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	72.2	68.3	140.5	31.4	0.0	31.4	171.9
U-236	12.9	7.1	19.9	2.4	0.0	2.4	22.3
U-238	42,765.6	32,954.8	75,720.4	13,544.4	0.0	13,544.4	89,264.8
U合計	42,850.7	33,030.2	75,880.9	13,578.2	0.0	13,578.2	89,459.0
Np-237	29.7	21.6	51.3	1.3	0.0	1.3	52.6
Np-239	6.4	3.0	9.3	0.8	0.0	0.8	10.1
Np合計	36.1	24.6	60.6	2.1	0.0	2.1	62.7
Pu-238	70.4	52.2	122.6	0.2	0.0	0.2	122.8
Pu-239	4,412.5	3,183.5	7,595.9	381.8	0.0	381.8	7,977.7
Pu-240	1,690.3	1,189.6	2,879.9	20.2	0.0	20.2	2,900.1
Pu-241	199.8	125.7	325.4	0.8	0.0	0.8	326.2
Pu-242	142.4	104.6	247.0	0.0	0.0	0.0	247.0
Pu合計	6,515.4	4,655.5	11,170.8	403.0	0.0	403.0	11,573.8
Am-241	84.3	72.3	156.6	0.1	0.0	0.1	156.7
Am-242m	4.4	2.8	7.1	0.0	0.0	0.0	7.1
Am-243	34.2	24.2	58.4	0.0	0.0	0.0	58.4
Am合計	122.8	99.3	222.1	0.1	0.0	0.1	222.2
Cm-242	4.0	2.1	6.1	0.0	0.0	0.0	6.1
Cm-243	0.4	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5
Cm-244	30.6	20.6	51.2	0.0	0.0	0.0	51.2
Cm-245	6.2	4.4	10.6	0.0	0.0	0.0	10.6
Cm合計	41.2	27.2	68.3	0.0	0.0	0.0	68.3
合計	49,566.1	37,836.7	87,402.8	13,983.3	0.0	13,983.3	101,386.1
FP ^{*1}	159.8	117.8	277.6	0.0	0.0	0.0	277.6
FP ^{*2}	4,201.5	1,834.9	6,036.5	114.7	0.0	114.7	6,151.2
FP合計	4,361.3	1,952.8	6,314.1	114.7	0.0	114.7	6,428.8

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃焼期間中生成FP

表 3.2-4(4) 大型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化導入期）の重金属物量収支
 - 平衡末期 -

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	52.0	55.9	107.9	27.5	0.0	27.5	135.4
U-236	16.1	9.3	25.4	3.2	0.0	3.2	28.6
U-238	41,019.7	32,121.8	73,141.5	13,336.0	0.0	13,336.0	86,477.5
U合計	41,087.8	32,187.0	73,274.7	13,366.7	0.0	13,366.7	86,641.4
Np-237	31.1	22.8	53.8	1.8	0.0	1.8	55.6
Np-239	7.4	3.5	11.0	1.0	0.0	1.0	12.0
Np合計	38.5	26.3	64.8	2.7	0.0	2.7	67.6
Pu-238	71.5	53.3	124.8	0.3	0.0	0.3	125.1
Pu-239	4,461.0	3,226.5	7,687.4	513.8	0.0	513.8	8,201.2
Pu-240	1,736.2	1,206.6	2,942.8	31.9	0.0	31.9	2,974.8
Pu-241	214.9	131.4	346.3	1.4	0.0	1.4	347.7
Pu-242	141.3	103.0	244.3	0.1	0.0	0.1	244.3
Pu合計	6,624.8	4,720.8	11,345.6	547.5	0.0	547.5	11,893.1
Am-241	81.3	72.2	153.5	0.2	0.0	0.2	153.7
Am-242m	5.4	3.6	9.1	0.0	0.0	0.0	9.1
Am-243	35.2	24.7	59.9	0.0	0.0	0.0	59.9
Am合計	121.9	100.6	222.5	0.2	0.0	0.2	222.6
Cm-242	4.7	2.6	7.3	0.0	0.0	0.0	7.3
Cm-243	0.5	0.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6
Cm-244	32.8	21.5	54.3	0.0	0.0	0.0	54.3
Cm-245	6.3	4.3	10.7	0.0	0.0	0.0	10.7
Cm合計	44.3	28.6	72.9	0.0	0.0	0.0	72.9
合計	47,917.3	37,063.2	84,980.5	13,917.1	0.0	13,917.1	98,897.6
FP ^{*1}	159.8	117.8	277.6	0.0	0.0	0.0	277.6
FP ^{*2}	5,843.8	2,607.2	8,451.0	178.3	0.0	178.3	8,629.3
FP合計	6,003.5	2,725.0	8,728.6	178.3	0.0	178.3	8,906.9

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃焼期間中生成FP

表 3.2-5 中型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化）の主要燃料仕様

項目	仕様			
	炉心	軸方向ブランケット	径方向ブランケット	
燃料要素	燃料形態	U-Pu-Zr	U-Zr	なし
	被覆管材料	ODS鋼		
	被覆管外径 (mm)	7.5		
	被覆管内径 (mm)	6.62		
	被覆管肉厚 (mm)	0.44		
	ガスプレナム長さ(上) (mm)	1,760		
	ボンド材	ナトリウム		
	燃料スミア密度 (%TD)	70~75	←	
Zr含有率 (wt%)	6~10	10		
集合体	燃料ピン本数 (本)	271		なし
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	8.56		
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.14		
	ラッパ管材料	PNC-FMS鋼		
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	153.1		
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	143.1		
	ラッパ管肉厚 (mm)	5		
	ラッパ管間ギャップ (mm)	4.5		
	集合体配列ピッチ (mm)	157.6		
	ワイヤ径 (mm)	1.01		
	ワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200		
	体積比 (%)	燃料	43.4	
(実効)		(30.4~32.5)	←	
構造材		25.2	←	
冷却材		31.4	←	

表 3.2-6 中型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化平衡期）の主要核特性

項目	高燃焼度化平衡期炉心	平衡期炉心 (基準炉心)
運転サイクル長さ	26ヶ月(791日)	24ヶ月(730日)
燃料交換バッチ数(炉心)	6バッチ	3バッチ
炉心高さ	1,000 mm	1,000 mm
軸ブランクート高さ(上部)	0 mm	←
Pu富化度 ^{*1}	11.6 wt%	12.3 wt%
Zr含有率(内側/外側)	10.0 / 6.0 wt%	10.0 / 6.0 wt%
スミア密度(内側/外側)	70 / 75 %	70 / 75 %
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランクート)	148.6 / - GWd/t	96.5 / - GWd/t
全炉心平均燃焼度 ^{*2}	148.6 GWd/t	96.5 GWd/t
燃焼反応度	0.48 % Δk/kk'	0.48 % Δk/kk'
増殖比(全体)	1.028	1.034
(炉心/軸方向ブランクート)	1.028 / -	1.034 / -
最大線出力(内側/外側)	177 / 197 W/cm	255 / 273 W/cm
炉心平均出力密度	145 W/cm ³	194 W/cm ³
出力分担率(炉心/軸方向ブランクート)	1.000 / -	←
最大高速中性子束 ^{*3}	2.1×10^{15} n/cm ² s	2.9×10^{15} n/cm ² s
最大高速中性子照射量 ^{*3}	8.4×10^{23} n/cm ²	5.4×10^{23} n/cm ²
装荷時重金属インベントリ(バッチ当たり) (炉心/軸方向ブランクート)	9.5 / - t	13.5 / - t
ブランクート/炉心重金属重量比	0	0
装荷時核分裂性Pu重量(出力当たり)	6.2 t/GWe	4.7 t/GWe
ボイド反応度 ^{*4} (平衡末期)	7.2 \$ ^{*6}	7.3 \$ ^{*6}
ドブラー係数[Tdk/dT] ^{*5} (平衡末期)	-3.7×10^{-3}	-4.1×10^{-3}
炉心等価直径	3.95 m	3.42 m
遮へい体外接円径	5.03 m	4.51 m

*1: Pu/HM、*2: ブランクート燃料を含む全体の平均燃焼度、

*3: E > 0.1 MeV、*4: 非均質補正(0.96)考慮、*5: 非均質補正(1.05)考慮、

*6: 実効遅発中性子割合0.00358

表 3.2-7(1) 中型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化平衡期）の重金属物量収支
 -1 バッチ当たり装荷-

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	9.0	16.0	25.1	0.0	0.0	0.0	25.1
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U-238	2,997.4	5,331.4	8,328.8	0.0	0.0	0.0	8,328.8
U合計	3,006.5	5,347.4	8,353.9	0.0	0.0	0.0	8,353.9
Np-237	1.6	2.9	4.5	0.0	0.0	0.0	4.5
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np合計	1.6	2.9	4.5	0.0	0.0	0.0	4.5
Pu-238	4.5	8.0	12.5	0.0	0.0	0.0	12.5
Pu-239	269.0	478.5	747.5	0.0	0.0	0.0	747.5
Pu-240	102.7	182.7	285.4	0.0	0.0	0.0	285.4
Pu-241	9.8	17.4	27.2	0.0	0.0	0.0	27.2
Pu-242	9.8	17.4	27.2	0.0	0.0	0.0	27.2
Pu合計	395.7	703.9	1,099.7	0.0	0.0	0.0	1,099.7
Am-241	6.5	11.6	18.1	0.0	0.0	0.0	18.1
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-243	2.0	3.6	5.7	0.0	0.0	0.0	5.7
Am合計	8.6	15.2	23.8	0.0	0.0	0.0	23.8
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-244	1.6	2.9	4.5	0.0	0.0	0.0	4.5
Cm-245	0.4	0.7	1.1	0.0	0.0	0.0	1.1
Cm合計	2.0	3.6	5.7	0.0	0.0	0.0	5.7
合計	3,414.4	6,073.1	9,487.5	0.0	0.0	0.0	9,487.5
FP ¹	10.0	16.0	26.0	0.0	0.0	0.0	26.0
FP ²	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP合計	10.0	16.0	26.0	0.0	0.0	0.0	26.0

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃焼期間中生成FP

表 3.2-7(2) 中型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化平衡期）の重金属物量収支
 -1 バッチ当たり取出-

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	1.2	4.4	5.6	0.0	0.0	0.0	5.6
U-236	1.2	2.0	3.3	0.0	0.0	0.0	3.3
U-238	2,314.8	4,494.8	6,809.6	0.0	0.0	0.0	6,809.6
U合計	2,317.3	4,501.2	6,818.5	0.0	0.0	0.0	6,818.5
Np-237	2.1	3.9	6.0	0.0	0.0	0.0	6.0
Np-239	0.4	0.5	0.8	0.0	0.0	0.0	0.8
Np合計	2.5	4.3	6.8	0.0	0.0	0.0	6.8
Pu-238	5.1	9.2	14.3	0.0	0.0	0.0	14.3
Pu-239	277.3	499.4	776.7	0.0	0.0	0.0	776.7
Pu-240	119.2	198.2	317.4	0.0	0.0	0.0	317.4
Pu-241	15.4	22.4	37.7	0.0	0.0	0.0	37.7
Pu-242	9.2	15.8	25.0	0.0	0.0	0.0	25.0
Pu合計	426.2	745.0	1,171.1	0.0	0.0	0.0	1,171.1
Am-241	5.7	12.2	17.9	0.0	0.0	0.0	17.9
Am-242m	0.5	0.8	1.3	0.0	0.0	0.0	1.3
Am-243	2.4	4.1	6.6	0.0	0.0	0.0	6.6
Am合計	8.6	17.2	25.8	0.0	0.0	0.0	25.8
Cm-242	0.3	0.4	0.7	0.0	0.0	0.0	0.7
Cm-243	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
Cm-244	2.5	3.9	6.4	0.0	0.0	0.0	6.4
Cm-245	0.5	0.7	1.2	0.0	0.0	0.0	1.2
Cm合計	3.3	5.0	8.3	0.0	0.0	0.0	8.3
合計	2,757.8	5,272.7	8,030.5	0.0	0.0	0.0	8,030.5
FP ¹	10.0	16.0	26.0	0.0	0.0	0.0	26.0
FP ²	656.6	800.4	1,457.0	0.0	0.0	0.0	1,457.0
FP合計	666.7	816.4	1,483.1	0.0	0.0	0.0	1,483.1

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃焼期間中生成FP

表 3.2-7(3) 中型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化平衡期）の重金属物量収支
— 平衡初期 —

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	27.2	59.3	86.6	0.0	0.0	0.0	86.6
U-236	4.9	6.9	11.8	0.0	0.0	0.0	11.8
U-238	16,188.2	29,829.1	46,017.3	0.0	0.0	0.0	46,017.3
U合計	16,220.3	29,895.4	46,115.7	0.0	0.0	0.0	46,115.7
Np-237	11.5	20.6	32.1	0.0	0.0	0.0	32.1
Np-239	2.1	2.5	4.6	0.0	0.0	0.0	4.6
Np合計	13.6	23.1	36.7	0.0	0.0	0.0	36.7
Pu-238	28.3	50.3	78.6	0.0	0.0	0.0	78.6
Pu-239	1,709.7	2,994.2	4,703.9	0.0	0.0	0.0	4,703.9
Pu-240	664.2	1,137.7	1,801.8	0.0	0.0	0.0	1,801.8
Pu-241	77.2	120.3	197.5	0.0	0.0	0.0	197.5
Pu-242	56.2	99.5	155.7	0.0	0.0	0.0	155.7
Pu合計	2,535.5	4,402.0	6,937.5	0.0	0.0	0.0	6,937.5
Am-241	35.0	70.0	104.9	0.0	0.0	0.0	104.9
Am-242m	1.8	2.8	4.7	0.0	0.0	0.0	4.7
Am-243	13.5	23.3	36.8	0.0	0.0	0.0	36.8
Am合計	50.3	96.1	146.4	0.0	0.0	0.0	146.4
Cm-242	1.5	1.9	3.4	0.0	0.0	0.0	3.4
Cm-243	0.1	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3
Cm-244	12.1	19.9	32.0	0.0	0.0	0.0	32.0
Cm-245	2.4	4.2	6.6	0.0	0.0	0.0	6.6
Cm合計	16.1	26.2	42.3	0.0	0.0	0.0	42.3
合計	18,835.9	34,442.7	53,278.7	0.0	0.0	0.0	53,278.7
FP ¹	60.3	96.0	156.3	0.0	0.0	0.0	156.3
FP ²	1,650.6	1,995.9	3,646.5	0.0	0.0	0.0	3,646.5
FP合計	1,710.9	2,091.9	3,802.8	0.0	0.0	0.0	3,802.8

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃焼期間中生成FP

表 3.2-7(4) 中型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化平衡期）の重金属物量収支
— 平衡末期 —

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U-235	19.4	47.7	67.1	0.0	0.0	0.0	67.1
U-236	6.1	9.0	15.1	0.0	0.0	0.0	15.1
U-238	15,505.6	28,992.5	44,498.1	0.0	0.0	0.0	44,498.1
U合計	15,531.2	29,049.1	44,580.3	0.0	0.0	0.0	44,580.3
Np-237	12.0	21.6	33.6	0.0	0.0	0.0	33.6
Np-239	2.5	3.0	5.5	0.0	0.0	0.0	5.5
Np合計	14.4	24.6	39.0	0.0	0.0	0.0	39.0
Pu-238	28.9	51.5	80.4	0.0	0.0	0.0	80.4
Pu-239	1,718.0	3,015.1	4,733.1	0.0	0.0	0.0	4,733.1
Pu-240	680.7	1,153.2	1,833.9	0.0	0.0	0.0	1,833.9
Pu-241	82.7	125.3	208.0	0.0	0.0	0.0	208.0
Pu-242	55.6	97.9	153.5	0.0	0.0	0.0	153.5
Pu合計	2,565.9	4,443.1	7,009.0	0.0	0.0	0.0	7,009.0
Am-241	34.2	70.6	104.8	0.0	0.0	0.0	104.8
Am-242m	2.3	3.7	6.0	0.0	0.0	0.0	6.0
Am-243	13.9	23.7	37.7	0.0	0.0	0.0	37.7
Am合計	50.4	98.0	148.4	0.0	0.0	0.0	148.4
Cm-242	1.7	2.3	4.1	0.0	0.0	0.0	4.1
Cm-243	0.2	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3
Cm-244	13.0	20.9	33.9	0.0	0.0	0.0	33.9
Cm-245	2.5	4.2	6.7	0.0	0.0	0.0	6.7
Cm合計	17.4	27.6	44.9	0.0	0.0	0.0	44.9
合計	18,179.3	33,642.4	51,821.7	0.0	0.0	0.0	51,821.7
FP ¹	43.2	68.1	111.3	0.0	0.0	0.0	111.3
FP ²	1,255.8	1,439.1	2,694.9	0.0	0.0	0.0	2,694.9
FP合計	1,299.0	1,507.1	2,806.1	0.0	0.0	0.0	2,806.1

※単位:kg *1: 再処理時随伴FP *2: 燃焼期間中生成FP

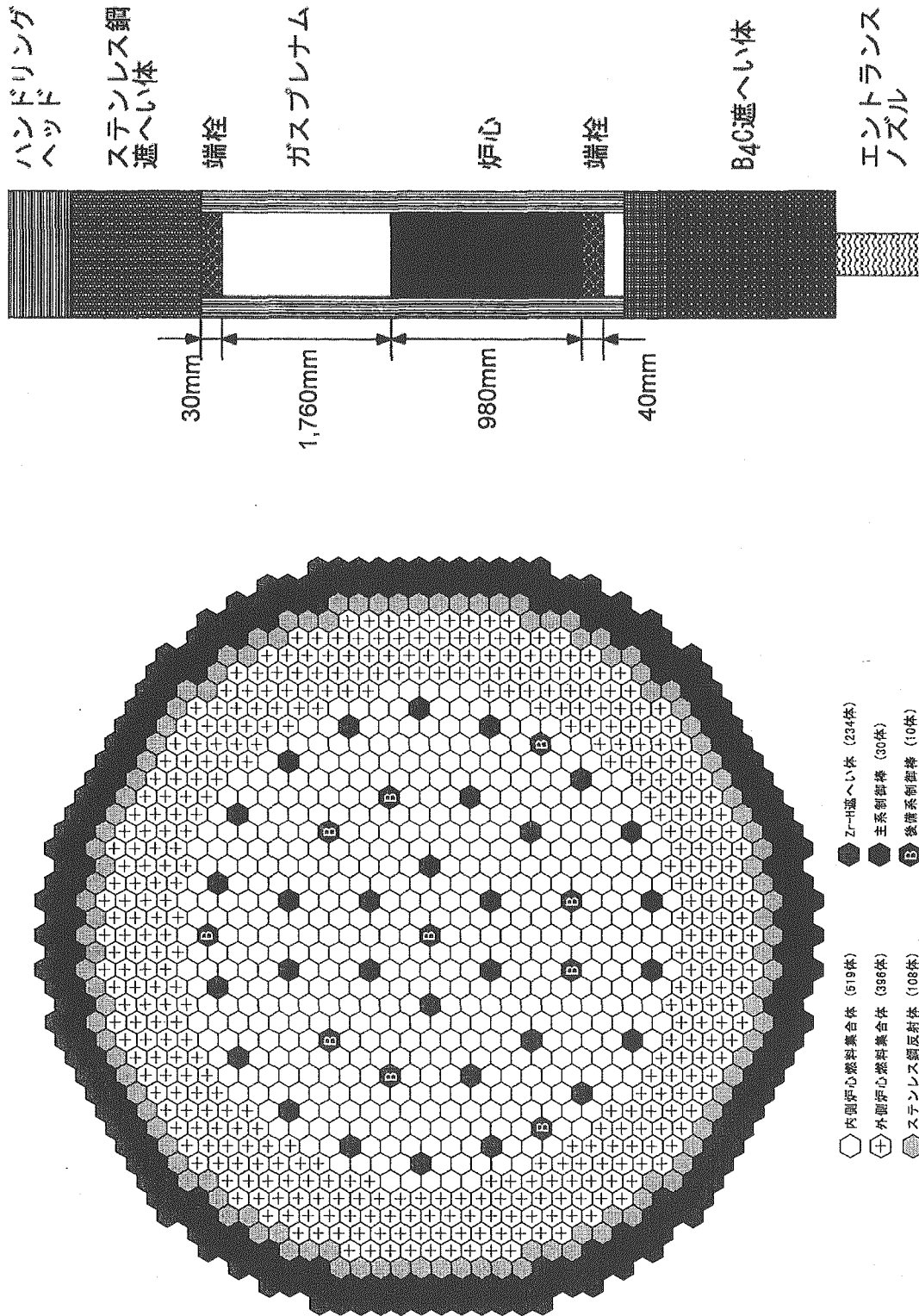


図 3-2-1 大型金属燃料高出口温度型炉心（高燃焼度化平衡期）のピン径保存時の炉心配置図

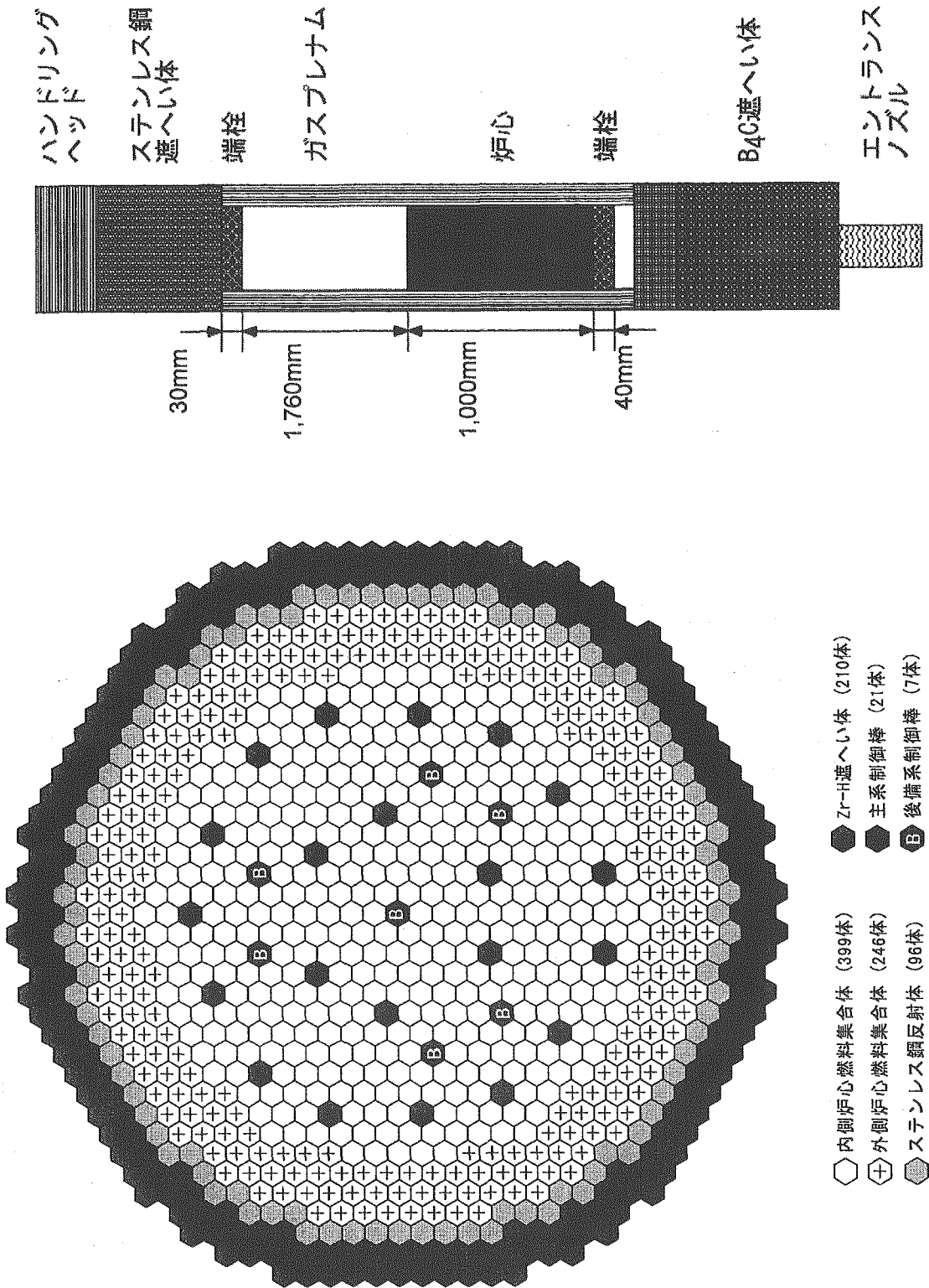


図 3.2-2 大型金属燃料高出口温度型炉心 (高燃焼度化平衡期) の配置図

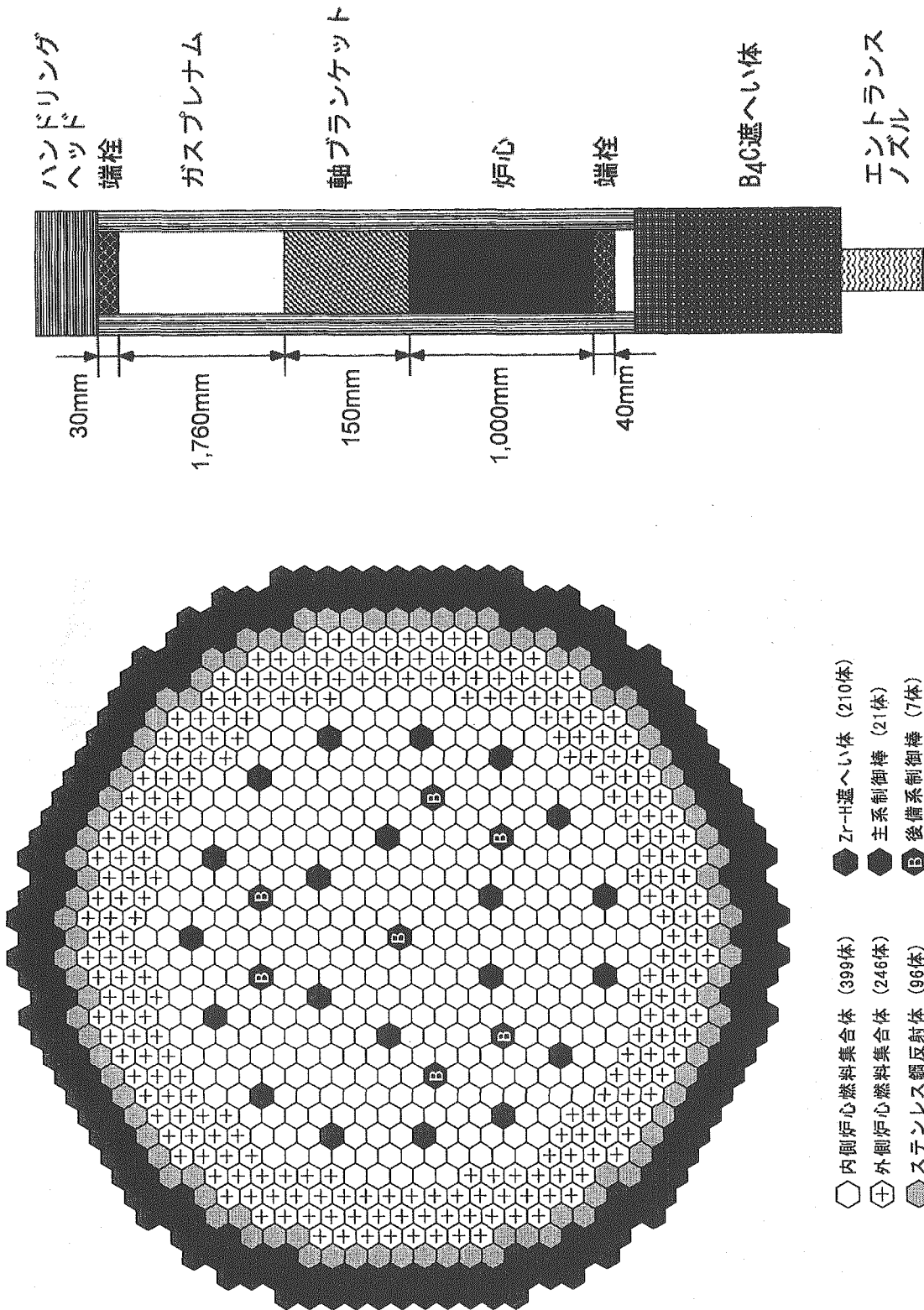


図 3.2-3 大型金属燃料高出口温度型炉心 (高燃焼度化導入期) の配置図

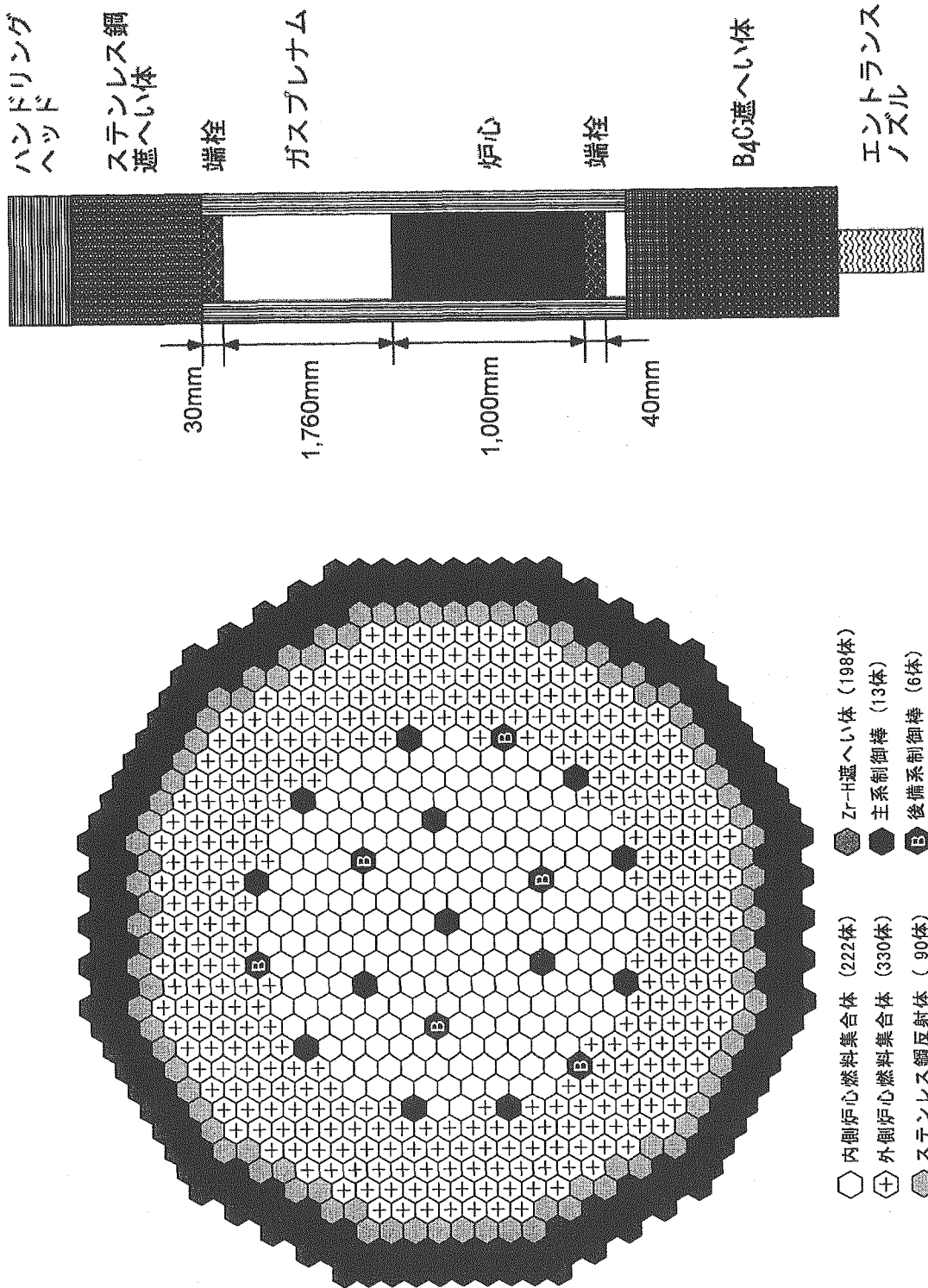


図 3.2-4 中型金属燃料高出口温度型炉心 (高燃焼度化平衡期) の配置図

3.3 更なる高温化方策の検討

熱効率の向上やハイブリッド熱化学法^[11]を用いた水素製造性の改善の観点から、更なる原子炉出口温度の高温化が望まれる。また、燃料健全性の担保、特に、被覆管の液相浸食防止の観点から、被覆管内面ホットスポット温度の低減も重要な課題である。ここでは、本金属燃料炉心概念における高温化方策についていくつか検討し、有望な方策について改善効果を定量的に評価することとする。

原子炉出口温度の向上や被覆管内面ホットスポット温度の低減のための要求として、①径方向ピーキング係数の低減、②集合体内ピーキング係数の低減、③集合体周辺流れ効果の低減、④炉心燃料上端部の熱流束の低減、⑤高温点より下部の熱出力の低減、⑥工学的安全係数の合理化、⑦液相形成温度の高精度化 (Pu 富化度 12wt%前後の金属燃料と被覆管が接する場合)、⑧液相形成の防止、などが挙げられる。これらについて考えられる具体的方策と課題を表 3.3-1 に示す。今年度の炉心・燃料設計側の検討としては、高性能反射体の採用とピン細径化本数増加燃料集合体の適用について検討を行うこととする。

(1) 核設計検討

解析条件は次の通りである。

- ・炉定数：高速炉用統合炉定数 ADJ2000R^[7] (JFS-3 型式 70 群)
- ・随伴 FP の取扱い：Nd-143 で代表させ、FP 等価係数 1.0 を適用 (ANL の金属電解法再処理を想定)
- ・燃焼特性：2次元 RZ 体系中性子 70 群拡散燃焼計算により算出
- ・ナトリウムボイド反応度：基準状態に対し炉心部のラップ管内のナトリウムをボイド化し、2次元 RZ 体系中性子 70 群拡散計算により算出し、非均質補正 (0.96) を考慮
- ・ドップラー係数：基準状態に対し炉心部の重金属核種のみを昇温させ、2次元 RZ 体系中性子 70 群拡散計算により算出し、非均質補正 (1.05) を考慮
- ・最大線出力、最大高速中性子照射量：3次元 Tri-Z 体系中性子 7 群拡散計算により算出
- ・熱特性解析用出力分布：3次元 Tri-Z 体系中性子 7 群拡散計算により算出

① 高性能反射体の採用に関する検討

検討は図 3.3-1 に示す昨年度設定した代表炉心を対象とした。この炉心は径方向反射体としてステンレス鋼 (SUS) を 2 層配置しているが、この 2 層の SUS 反射体を高性能が期待できる物質に置換することにより、外側炉心における径方向出力分布勾配を緩やかにし、径方向ピーキング係数と集合体内ピーキング係数の低減に資する。高性能が期待できる物質としては、原子量が大きく全断面積の大きい Pb や Ni 等を含む化合物が挙げられる。そこで、それらの単体を反射体材料として適用し、包絡熱出力の変化により高温化効果の評価を行う。基準の SUS 反射体 (体積率 73%) の内の被覆管とラップ管を除く体積率 50%分を Pb あるいは Ni で置換した場合の径方向出力分布の変化を図 3.3-2 に示す。Pb、Ni のいずれを適用した場合も外側炉心における径方向出力分布勾配が緩やかになっていることが分かる。しかしながら、包絡熱出力の改善は 0.4%に留まっており、3.1 でしめしたサーベイ結果 (図 3.1-11) より炉心を最適化しても改善効果はあまり期待できず、これらの反射体の採用による原子炉出口温度の高温化あるいは被覆管内面ホットスポット温度の低減は高々 1°C程度であると考えられる。

② ピン細径化本数増加燃料集合体の適用に関する検討

3.1 において選定した中型平衡期代表炉心 (被覆管内面ホットスポット温度 657°C) を基本に検討を行った。中型平衡期代表炉心は集合体当たりの燃料ピン本数は 271 本であることから、大型炉心と同じ集合体当たり 331 本までは許容されると考えられる。次に燃料ピン径を設定することになるが、本検討は感度解析的な位置づけであることから、炉心配置に関する検討までは視野に

入れないことにし、代表炉心と同じ炉心配置条件（図 3.1-13 に示す通り）で同等の核特性・バンドル部圧力損失となるようなピン径を求めることにする。検討の結果、ピン径を 6.9mm とした場合に成立することが分かった。主要燃料仕様を表 3.3-2 に、核特性を表 3.3-3 にそれぞれ示す。集合体配列ピッチは 2.4mm とわずかに増加したが、集合体内ピーキング係数の悪化にまでは至らない程度である。核特性はほぼ代表炉心と同等であり、最大線出力はほぼ集合体当たりピン本数比（331 分の 271）となっている。

(2) 熱設計検討

核計算で得られた 3 次元出力分布を基に熱特性解析を行う。被覆管温度計算においては、サブチャンネル解析モデルを適用した。なお、流量配分計画策定においては、原子炉出入口温度条件と流量条件を満足させ、被覆管内面最高温度の制限からの超過を定量的に求めることとした。

- ・ 1 次系流量：9,083kg/s
（炉心領域に配分できる流量として 1 次系流量の 96% を想定）
- ・ 原子炉出口／入口温度：550℃／395℃
- ・ 被覆管内面最高温度制限：650℃（液相形成防止）
- ・ 工学的安全係数：表 3.1-10 に示すとおり（実証炉設計研究で使用された係数に対し、各部製造公差とスラグ偏心効果を ANL の製造実績に基づき見直し）
- ・ 圧力損失評価式：Cheng-Todreas 式⁴⁾
- ・ 流量領域：8 領域程度（従来設計研究と同様）
- ・ スペーサ形式：ワイヤ型

流量領域区分は代表炉心と同じ（図 3.1-16 に示す通り）とし、出入口温度は 550/395℃ の条件で、流量条件を満足するよう流量配分を行った。流量配分結果を表 3.3-4 に示す。被覆管内面最高温度は 652℃ であり、代表炉心の 657℃ からは 5℃ の低減となった。内訳は、周辺流れ効果分が 2℃、被覆管内部温度上昇分が 2℃、膜温度上昇分が 1℃ である。また、バンドル部圧力損失は最大で 0.21MPa であり制限の 0.2MPa 程度以下を満足している。

表 3.3-1 要求に対する更なる高温化方策と検討対象選定

方策		目的	課題	短所・問題点	検討対象
(1)	高性能反射体の採用	①径方向ピーキング係数の低減	照射試験	—	○
(2)	外側炉心重金属密度増加	②集合体内ピーキング係数の低減	照射試験	外側炉心燃料健全性の低下	×
(3)	燃焼反応度の低減や余剰反応度不確かさの見直しによる制御棒挿入深度の合理化	①径方向ピーキング係数の低減 ②集合体内ピーキング係数の低減 ⑤工学的安全係数の合理化	解析評価	—	× (2005年度検討予定)
(4)	燃料ピンの細径化による燃料集合体の小型化	②集合体内ピーキング係数の低減 ④炉心燃料上端部の熱流束の低減	—	燃料集合体数の増加、燃料製造負荷の増加、核特性の悪化	×
(5)	最外周ワイヤ細径化	③集合体周辺流れ効果の低減	照射試験	燃料製造負荷の増加、流力振動による燃料健全性の低下	×
(6)	グリッドスペーサの適用		照射試験	燃料製造負荷の増加	×
(7)	燃料ピンの細径化と集合体内ピン本数の増加(集合体サイズは維持)	③集合体周辺流れ効果の低減 ④炉心燃料上端部の熱流束の低減	燃料集合体の組立可能性評価	燃料製造負荷の増加、核特性の悪化	○
(8)	上部軸ブランケットの設置	⑤高温点より下部の熱出力の低減	—	取出平均燃焼度の低下、余剰Pu生成の可能性、燃料製造負荷の増加	○(導入期炉心の設定)
(9)	工学的安全係数の合理化	⑥工学的安全係数の合理化	試験・解析評価	—	× (2005年度検討予定)
(10)	被覆管内面温度制限の合理化	⑦液相形成温度の高精度化	炉外試験・照射試験	—	×
(11)	ライナ付被覆管の適用	⑧液相形成の防止	照射試験・CDA解析	燃料製造負荷の増加、CDA時の燃料分散効果減少	×

表 3.3-2 中型金属燃料高出口温度型炉心（更なる高温化平衡期）の主要燃料仕様

項目		仕様	
		更なる高出口温度化を目指した炉心	基準(参考)
燃料要素	燃料形態	U-Pu-Zr	←
	被覆管材料	ODS鋼	←
	被覆管外径 (mm)	6.9	7.5
	被覆管内径 (mm)	6.08	6.62
	被覆管肉厚 (mm)	0.41	0.44
	ガスプレナム長さ(上) (mm)	1,760	1,760
	ボンド材	ナトリウム	←
	燃料スミア密度 (%TD)	70~75	←
Zr含有率 (wt%)	6~10	←	
集合体	燃料ピン本数 (本)	331	271
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	8.07	8.76
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.17	1.17
	ラッパ管材料	PNC-FMS鋼	←
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	159.0	156.6
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	149.0	146.6
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0	5.0
	ラッパ管間ギャップ (mm)	4.5	4.5
	集合体配列ピッチ (mm)	163.5	161.1
	ワイヤ径 (mm)	1.12	1.21
	ワイヤ巻き付けピッチ (mm)	200	←
	体積比 (%)	燃料 (実効)	41.5 (29.1~31.1)
構造材		24.9	24.8
冷却材		33.6	33.7

表 3.3-3 中型金属燃料高出口温度型炉心（更なる高温化平衡期）の主要核特性

項目	更なる高出口温度化を 目指した炉心	平衡期炉心 (基準炉心)
運転サイクル長さ	24.7ヶ月 (751日)	24ヶ月 (730日)
燃料交換パッチ数 (炉心)	3 パッチ	←
炉心高さ	1,000 mm	←
軸ブランケット高さ (上部)	0 mm	←
Pu富化度 ^{*1}	12.3 wt%	12.3 wt%
Zr含有率 (内側/外側)	10.0 / 6.0 wt%	10.0 / 6.0 wt%
スミア密度 (内側/外側)	70 / 75 %	70 / 75 %
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランケット)	97.5 / - GWd/t	96.5 / - GWd/t
全炉心平均燃焼度 ^{*2}	97.5 GWd/t	96.5 GWd/t
燃焼反応度	0.45 %Δ k/kk'	0.48 %Δ k/kk'
増殖比 (全体)	1.034	1.034
(炉心/軸方向ブランケット)	1.034 / -	1.034 / -
最大線出力 (内側/外側)	207 / 224 W/cm	255 / 273 W/cm
炉心平均出力密度	189 W/cm ³	194 W/cm ³
出力分担率 (炉心/軸方向ブランケット)	1.000 / -	1.000 / -
最大高速中性子束 ^{*3}	2.8×10^{15} n/cm ² s	2.9×10^{15} n/cm ² s
最大高速中性子照射量 ^{*3}	5.4×10^{23} n/cm ²	5.4×10^{23} n/cm ²
装荷時重金属インベントリ (パッチ当たり) (炉心/軸方向ブランケット)	13.9 / - t	13.5 / - t
ブランケット/炉心重金属重量比	0	0
装荷時核分裂性Pu重量 (出力当たり)	4.8 t/GWe	4.7 t/GWe
ポイド反応度 ^{*4} (平衡末期)	7.4 \$ ^{*6}	7.3 \$ ^{*6}
ドップラー係数 [TdK/dT] ^{*5} (平衡末期)	-4.1×10^{-3}	-4.1×10^{-3}
炉心等価直径	3.47 m	3.42 m
遮へい体外接円径	4.58 m	4.51 m

*1: Pu/HM、*2: ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、*3: E > 0.1 MeV、

*4: 非均質補正 (0.96) 考慮、*5: 非均質補正 (1.05) 考慮、

*6: 実効遅発中性子割合 0.00358

表 3.3-4 中型金属燃料高出口温度型炉心（更なる高温化平衡期）の冷却材流量配分結果

炉心領域	流量領域	集集体数	集集体最大出力 [MW]	集集体流量 [kg/s]	必要領域流量 [kg/s]	冷却材最高温度 [°C]	被覆管内面最高温度 ² [°C]	バンドル部圧力損失 [MPa]
内側炉心	1	111	5.68	24.8	2752.8	640	652	0.19
	2	48	5.24	23.3	1118.4	639	651	0.17
	3	36	5.94	26.5	954.0	639	652	0.21
外側炉心	4	36	5.44	24.7	889.2	640	652	0.18
	5	42	4.90	22.7	953.4	639	651	0.16
	6	24	4.29	20.4	489.6	641	651	0.13
	7	36	3.80	18.4	662.4	642	652	0.11
	8	15	3.34	16.8	252.0	641	651	0.09
	9	33	2.86	14.8	488.4	642	652	0.07
	10	12	2.45	13.0	156.0	643	652	0.06
合計(最大値)	—	393	1911.12	(26.5)	8716.2	(643)	(652)	(0.21)
				炉心流量 ¹ [kg/s]	8719.7			
				余剰流量 [kg/s]	+3.5 (+0.0%)			

*1: 1次系流量の内、96%を燃料集集体冷却用に配分

*2: HSF計算結果: 1.23、周辺流れ効果係数計算結果: 1.102

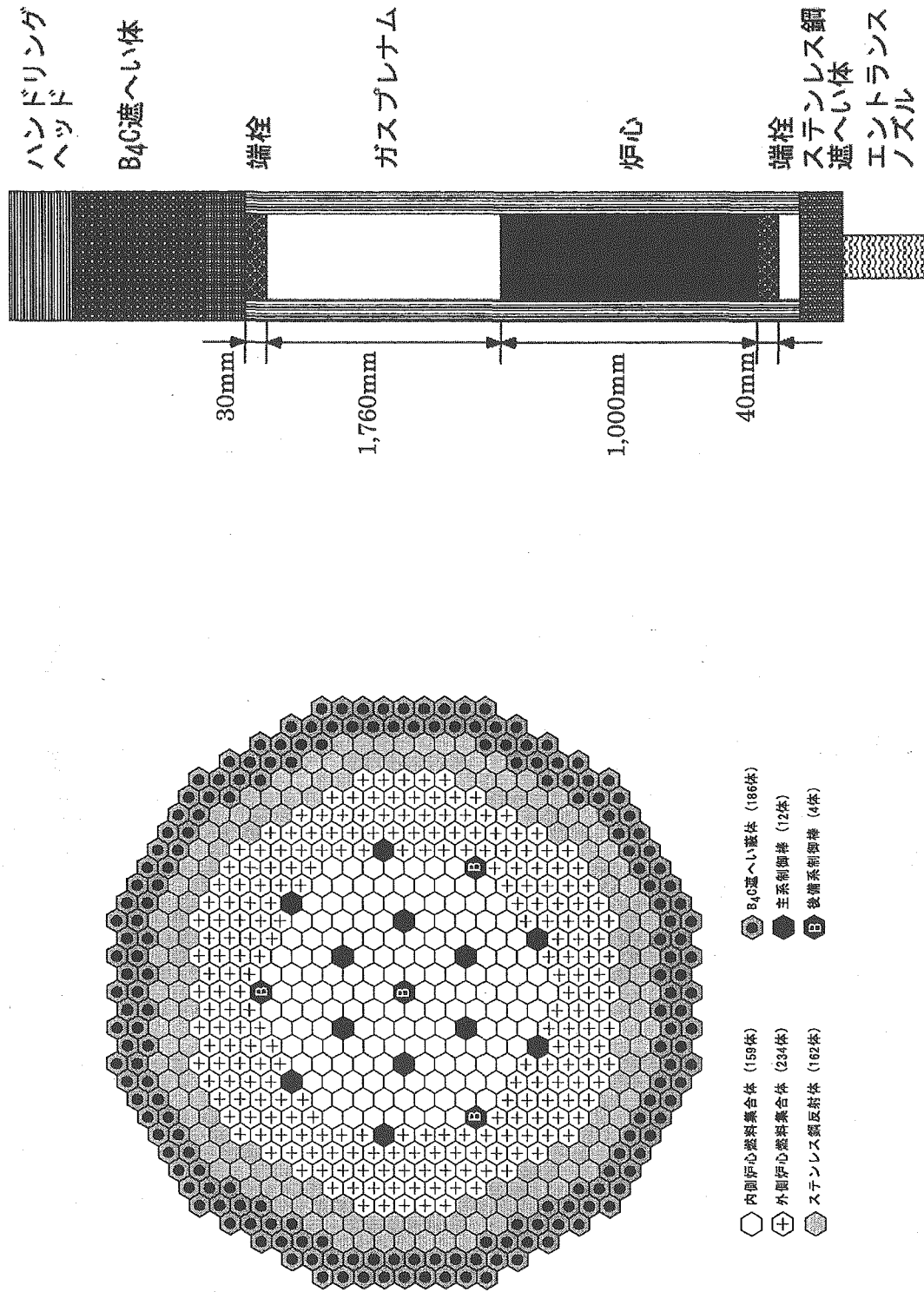


図 3.3-1 2003 年度中型金属燃料高出口温度型炉心（平衡期代表）の炉心配置図

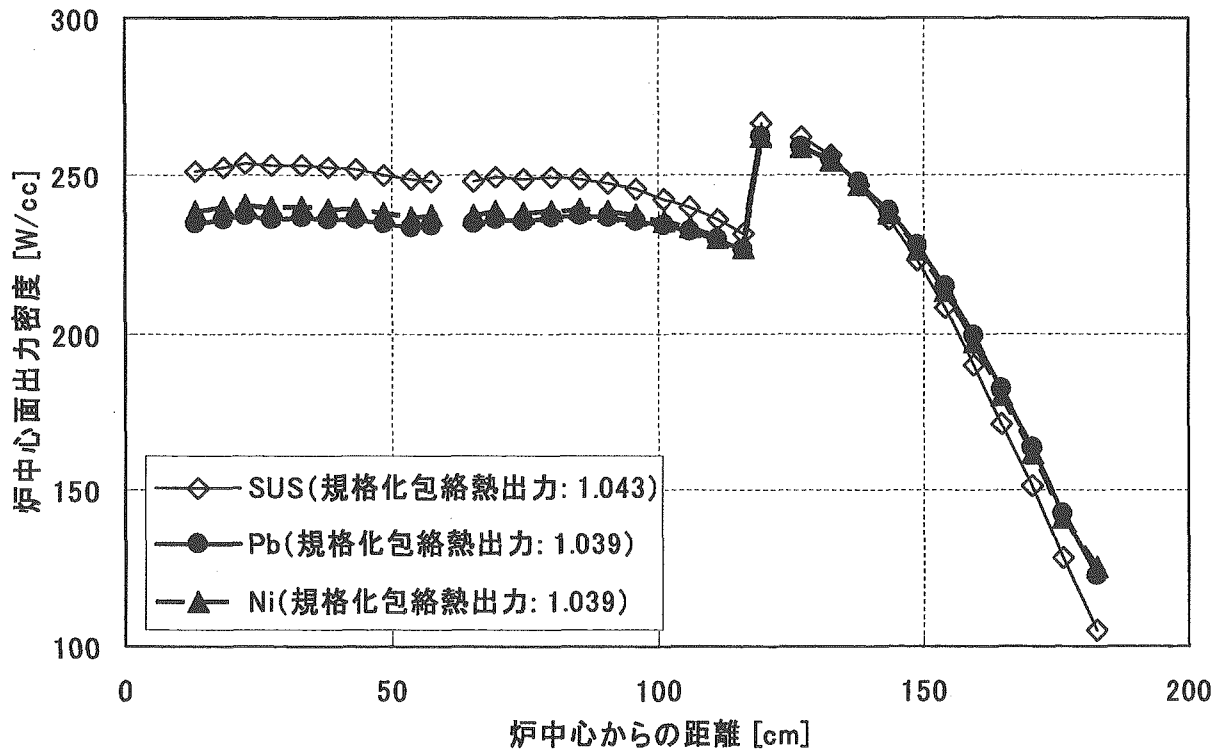


図 3.3-2 鉛及びニッケル反射体適用時の径方向出力分布の比較

※

SUS (体積率 73%) : Na 冷却高速炉における標準的な反射体

Pb (体積率 50%) : 単体では液体であるため、現実的には化合物としての適用が想定される。

Ni (体積率 50%) : 単体ではスエリングが大きい。高 Ni 鋼であるインコネルは照射脆化が大きい。

3.4 まとめ

ナトリウム冷却 MOX 燃料炉心と同等の原子炉出入口温度 (550°C/395°C) を達成する大型及び中型高出口温度型炉心を構築した。高出口温度が金属燃料炉心の新しい出力分布平坦化方策として、ピン径を単一として燃料の Zr 含有率とスミア密度を多段階化する方法を適用し、炉心概念を構築した。標準仕様金属燃料に対する燃料製造性の悪化を防止するために Zr 含有率を 6~10wt% の範囲としたが、結果的には炉心のコンパクト化に有効であり、炉心インベントリの低減に資することができた。また、構築した炉心は、炉心部取出平均燃焼度を除いて、設計条件、設計目標も満足している。

熱特性解析として、原子炉出入口温度 550°C/395°C の条件で冷却材流量配分計画を策定した。その結果、被覆管内面最高温度について、大型炉心では 650°C と制限を満足する結果が得られた。中型炉心については被覆管内面最高温度は 657°C と制限の 650°C を超過する結果となったが、更なる高温化方策としてピン細径化本数増加燃料集合体 (集合体配列ピッチは維持) の採用により被覆管内面最高温度を 652°C とすることができた。工学的安全係数の合理化を行えば、大型炉心と中型炉心共に制限の 650°C からの裕度を確保することも可能であり、原子炉出口温度の高温化にも資することができると考えられる。また、策定した流量配分計画の下、定常時の燃料健全性評価を行い、健全性が担保されていることを確認した。

柔軟性評価については、①炉心部取出平均燃焼度、②増殖性能に関して行った。①炉心部取出平均燃焼度に関しては、高速中性子照射量設計目標目安の伸長を前提とし、ブランケットなしで炉心部取平均燃焼度 150GWd/t を満足する平衡期炉心を設定することができた。②増殖性能については、上部軸ブランケットの付加のみにより導入期炉心を設定することができた。

4. おわりに

実用化戦略調査研究フェーズⅡにおける本年度（2004年度）の炉心・燃料に関する設計検討では、ナトリウム冷却炉について魅力ある炉心概念の創出を目標とした MOX および金属燃料炉心の検討を行い、2005年度のフェーズⅡまとめとしての代表炉心を構築した。

MOX 燃料炉心の設計検討として、安全設計側から新たな再臨界回避方策として提示された改良内部ダクト型燃料集合体の構造を具体化するとともに、燃料集合体の周辺流れ効果等の熱流動挙動を明らかにした。また、改良内部ダクト型燃料集合体を採用した大型炉および中型炉の高内部転換型炉心とコンパクト型炉心を構築し、両炉心について仕様、核特性および性能の比較検討を行い代表炉心概念の絞り込みを行った。この結果、高内部転換型炉心とコンパクト型炉心はともに大型および中型炉の炉心に与えられた条件、性能要求を全て満足できる見通しを得た。しかしながら、炉心性能の点で高内部転換型炉心はコンパクト型炉心に比較して、ブランケット燃料を含めた全炉心取出平均燃焼度が高く、運転サイクル長さの長期化が可能であり、燃料サイクルコストおよび稼働率に優れているとの結論を得た。炉心仕様としては、遮へい体外接円径がコンパクト型より若干大きい、大型炉、中型炉ともにプラント側との取合条件を満足している。以上のことから、大型炉、中型炉ともに高内部転換型炉心を代表概念として選定した。更に、代表炉心概念として選定した大型および中型高内部転換型炉心について、熱流力と燃料健全性も含めた設計検討を行い、核・熱および燃料健全性の設計成立性を確認するとともに炉心・燃料仕様および炉心性能を明確化した。代表炉心は、大型、中型ともに炉心に与えられた条件、性能要求を全て満足し、設計成立の見通しである。炉心性能としては、大型炉が運転サイクル長さ約 26 ヶ月、全炉心取出平均燃焼度（ブランケット燃料を含む）90～115GWd/t、中型炉は運転サイクル長さ 26～27 ヶ月、全炉心取出平均燃焼度 86～104GWd/t であり、炉心に対する性能要求である 18 ヶ月以上と 60GWd/t 以上を大幅に超えて達成する見通しである。

金属燃料炉心の設計検討では、FBR 実用化時代に求められる高い経済性や安全性の観点から、MOX 燃料と比較して高い増殖性能や燃料インベントリの低減が期待できる金属燃料炉心を取り上げ、大型（電気出力 1,500MWe）及び中型（750MWe）のナトリウム冷却金属燃料高出口温度型の概念を構築した。

ナトリウム冷却 MOX 燃料炉心と同等の原子炉出入口温度（550℃/395℃）を達成する大型及び中型高出口温度型炉心の構築においては、高出口温度が金属燃料炉心の新しい出力分布平坦化方策として、ピン径を単一として燃料の Zr 含有率とスミア密度を多段階化する方法を適用した。標準仕様金属燃料に対する燃料製造性の悪化を防止するために Zr 含有率を 6～10wt% の範囲としたが、結果的には炉心のコンパクト化に有効であり、炉心インベントリの低減に資することができた。また、構築した炉心は、炉心部取出平均燃焼度を除いて、設計条件、設計目標も満足している。

熱特性解析として、原子炉出入口温度 550℃/395℃ の条件で冷却材流量配分計画

を策定した。その結果、被覆管内面最高温度について、大型炉心では 650℃と制限を満足する結果が得られた。中型炉心については被覆管内面最高温度は 657℃と制限の 650℃を超過する結果となったが、更なる高温化方策としてピン細径化本数増加燃料集合体(集合体配列ピッチは維持)の採用により被覆管内面最高温度を 652℃とすることができた。工学的安全係数の合理化を行えば、大型炉心と中型炉心共に制限の 650℃からの裕度を確保することも可能であり、原子炉出口温度の高温化にも資することができると考えられる。また、策定した流量配分計画の下、定常時の燃料健全性評価を行い、健全性が担保されていることを確認した。

以上示した高出口温度型炉心について、F/S フェーズ II 最終まとめに向けて、金属燃料炉心概念のデータベースをそろえる目的から、出力規模(大型炉と中型炉)、FBR 導入シナリオを想定した増殖性能(導入期炉心と平衡期炉心)、経済性向上を目指した高燃焼度化に関する評価も示した。

5. 謝辞

本ナトリウム冷却炉 MOX 燃料炉心の設計・評価については、核燃料サイクル開発機構・日本原子力発電（株）（9 電力会社、電源開発（株）及び日本原子力発電（株）の代表）が立案した検討方針に従って、新型炉技術開発（株）大久保 良幸 氏、三菱重工業（株）矢野 眞理 氏、日比 宏基 氏、菅 太郎 氏、ニュークリア・デベロップメント（株）小川 伸太 氏、（株）日立製作所 山舘 恵 氏、茨城日立情報サービス（株）黒澤 典史 氏に解析作業（炉心・燃料設計、熱流力設計、燃料健全性等）を、（株）NESI 曾我 彰 氏に計算作業を担当して頂きました。改良内部ダクト型燃料集合体の核特性非均質効果の解析では、（株）NESI 沼田一幸氏に多大な協力を頂きました。また、金属燃料炉心の解析においては、（株）日立製作所 山舘 恵 氏、藤村 幸治 氏、茨城日立情報サービス（株）黒澤 典史 氏に解析作業（炉心・燃料設計、熱流力設計、燃料健全性等）を、（株）NESI 菰田 宏 氏に計算作業を担当して頂きました。

上記の方々には、設計・評価作業全般について、厳しいスケジュールの中ご尽力頂きました。この場において、感謝の意を込めてお礼を申し述べさせていただきます。

6. 参考文献

- [1] 此村 守、他：“高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズⅡ中間報告－原子炉プラントシステム技術検討書－”、JNC TN9400 2004-035、(2004).
- [2] 永沼正行、他：“ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討 (MOX 燃料炉心)－2003 年度報告－ (研究報告) ”、JNC TN9400 2004-039 (2004).
- [3] 山舘 恵、他：“原子炉出口温度高温化に適合するナトリウム冷却金属燃料炉心の検討”、サイクル機構技報 No.18, JNC TN1340 2002-004 (2003).
- [4] 杉野和輝、水野朋保：“ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討－2002 年度金属燃料炉心の検討－”、JNC TN9400 2003-056 (2003).
- [5] 杉野和輝、他：“ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討－2003 年度金属燃料炉心の検討－”、JNC TN9400 2004-030 (2004).
- [6] 野村 茂雄、他：“高速炉炉心構成要素用高強度フェライト/マルテンサイト鋼 (PNC-FMS)材料強度基準(暫定案)”、JNC ZN9410 92-110、(1992).
- [7] 羽様 平、他：“高速炉用統合炉定数 ADJ2000R の作成 (研究報告)”, JNC TN9400 2002-064, (2002).
- [8] S.K.Cheng, N.E.Todreas：“Hydrodynamic Models and Correlations for Bare and Wire-Wrapped Hexagonal Rod Bundles - Bundle Friction Factors, Subchannel Friction Factors and Mixing Parameters”, Nuclear Engineering and Design, Vol.92, p.227-251, (1986).
- [9] 水田 俊治、他：“ODS フェライト鋼被覆管の設計評価用関係式の検討 (研究報告書)”, JNC TN9400 2000-048, (2000).
- [10] 上平 明弘、他：“高強度フェライト/マルテンサイト鋼(PNC-FMS 鋼)のクリープ強度特性の評価”、JNC TN9400 99-045、(1999).
- [11] 中桐俊男、他：“ハイブリッド熱化学法による水素製造実証試験”, JNC TN9400 2004-056 (2004).

付録A 改良内部ダクト型燃料集合体炉心の核特性非均質効果の解析

改良内部ダクト型燃料集合体は前述のように正六角形の集合体の1角に内部ダクトを設けることにより炉心崩壊事故時に炉心燃料の流出を促進し、再臨界回避を目指したものである。この内部ダクトの設置により、中性子ストリーミング効果や燃料の局在化効果、中性子の局所的な減速効果が増長されることが考えられる。これらの効果による影響が有意である可能性のある核特性として臨界性、Na ボイド反応度、局所的（集合体内）出力分布が挙げられる。本項では、臨界性、Na ボイド反応度、集合体内出力分布の非均質効果の解析評価結果について述べる。

1. 検討条件

- ・対象炉心：H15 年度中型高内部転換型炉心⁽¹⁾
- ・対象集合体形式：ABLE 型及び改良内部ダクト型
- ・解析方法：連続エネルギーモンテカルロ法（MVP コード使用）⁽²⁾
- ・解析モデル（臨界性と Na ボイド反応度）：全炉心体系（全て新燃料）とし、燃料ピン（被覆管と燃料）、冷却材、ラッパー管は正確にモデル化し、ワイヤスペーサは全冷却材中に均一に混合した。内部ダクトの方向は、全ての集合体について、①同一方向、②中心向き、③外周向きとした（図 A.1 参照）。ただし、内部ダクトそのものは内部ダクト隣接燃料ピンが少数であることから自己遮へい効果への影響は無視しうると考えられ、非考慮とした。
- ・解析モデル（集合体内出力分布）：単一集合体（全て新燃料）とし、集合体3体の内部ダクトを集中させることにより非均質効果を包絡的に評価するために完全反射境界条件とした。燃料ピン（被覆管と燃料+ミート）、冷却材、ラッパー管は正確にモデル化し、ワイヤスペーサは全冷却材中に均一に混合した。ただし、内部ダクトそのものは内部ダクト隣接燃料ピンが少数であることから自己遮へい効果への影響は無視しうると考えられ、非考慮とした。出力は Pu-239 の核分裂反応率により代用した。

2. 検討結果

(1) 臨界性と Na ボイド反応度

臨界性と Na ボイド反応度の非均質効果計算結果を表 A.1 に示す。

臨界性については、F/S で用いている実証炉の値と良い一致を示していると考えられる。また、再臨界回避概念間で差は見られない。更に、両極端なケース、すなわち、内部ダクトを全て中心向けに配置した場合と外周向けに配置したケースで、臨界性の差は $0.3\% \Delta k/k'$ であり、核設計上の不確かさ程度である。

Na ボイド反応度については、ABLE 型についてモンテカルロ法を用いた場合には F/S で使用されている値よりも 3% 大きい値を示しているが、決定論的手法を用いた場合の計算結果と良い一致が見られることから、計算結果は妥当であると考えられる。非均質効果の増加は、高内部転換型燃料仕様の採用に伴うピン径の増加が主要因であると推測される。他方、改良内部ダクト型集合体とした場合は、ABLE 型に対し 2% の増加が見られるが、統計誤差が 1% 程度であることから必ずしも有意な差とは言えない。更に、差に関する理論的な説明も難しい。両極端なケース、すなわち、内部ダクトを全て中心向けに配置した場合と外周向けに配置したケースで補正係数の差は 2% であり、影響は小さいと考えられる。

以上の結果から、当面は非均質効果の見直しは行わないこととするが、実証炉からの炉心・燃料仕様の変更に伴う非均質効果の増加は可能性として留意しておくことが望ましいと考える。

(2) 集合体内出力分布

集合体内燃料ピンの相対出力分布計算結果を図 A.2 に示す。平均値に対し、内部ダクト

部近接部では出力は+0.3～+0.8%高くなっており、内部ダクト部から遠ざかるに従い出力が減少し、内部ダクトの対面側では-0.3～-0.5%程度の出力となっている。これは、より高エネルギーの中性子は核分裂反応が生じる燃料ピン周辺により多く存在するのに対し、より低エネルギーの中性子は吸収の少ない内部ダクト周辺により多く存在し、その相殺により生じた結果と考えられる。(Pu-239の核分裂断面積は、高速炉の主要エネルギー範囲では、低エネルギーになるに従い、ほぼ単調に増加する。)

この相対出力分布は巨視的な出力勾配がない状態での201本(217-16)の燃料ピンに対するものであるから、熱特性評価で用いられる集合体内出力分布に対して独立な補正として考慮できる。ただし、その補正は255本(271-16)ピン集合体に対しても高々±1%未満と考えられる。更に、燃料ピン出力が最も高くなるのは、内部ダクトが出力勾配の下り側に配置された場合であるが、その場合の最高出力燃料ピンは内部ダクトと反対側に位置しており、ピン出力に対する補正はわずかな負となり、補正しないことはわずかではあるが保守側評価であることが分かる。よって、集合体内出力分布の非均質効果は考慮しなくても良いと考えられる。

3. まとめ

改良内部ダクト型燃料集合体により構成される炉心の臨界性、Naボイド反応度、集合体内出力分布の非均質効果の解析評価を行った。いずれの特性についても従来のABLE型炉心と比較して非均質効果に有意な違いは見られなかった。従って、F/Sの核設計研究の観点からは改良内部ダクト型燃料集合体を採用した場合の特別な配慮は必要ないと考えられる。

参考文献

- (1) 永沼正行, 他: "ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討(MOX燃料炉心) - 2003年度報告-", JNC TN9400 2004-039 (2004).
- (2) 森貴正, 中川正幸: "MVP/GMVP 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード", JAERI-Data/Code 94-007 (1994).

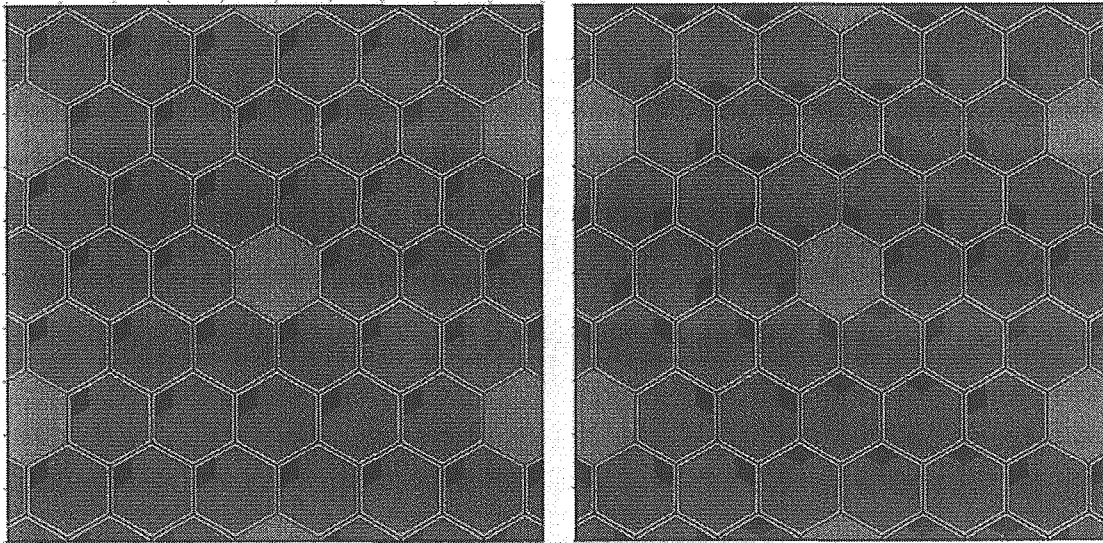
以上

表 A.1 臨界性と Na ボイド反応度の非均質効果解析結果

炉心	解析方法	内部ダクトの向き	臨界性 [% $\Delta k/kk$]	Naボイド反応度 [-]
ABLE型集合体炉心	MCM	—	0.55 \pm 0.01	0.934 \pm 0.012
	DM	—	0.55	0.924
S-FAIDUS型集合体炉心	MCM	全て同一方向	0.54 \pm 0.01	0.957 \pm 0.013
		全て中心向き	0.43 \pm 0.01	0.965 \pm 0.013
		全て外周向き	0.74 \pm 0.01	0.947 \pm 0.013
F/S Na-MOX炉心(実証炉)	DM	—	0.45	0.904

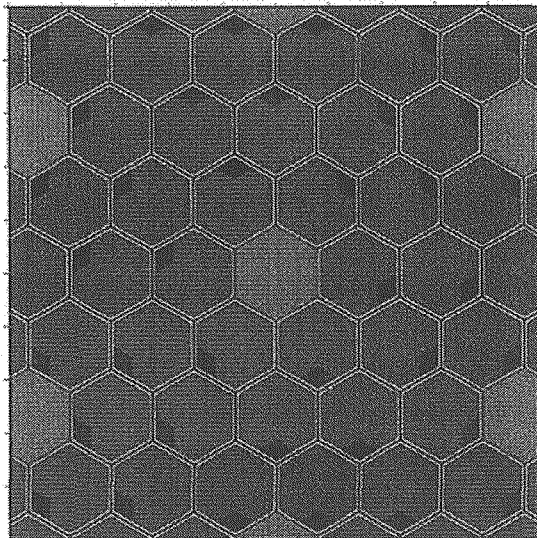
※MCM：連続エネルギーモンテカルロ法

DM：決定論的手法



(同一方向)

(中心向き)



(外周向き)

図 A.1 Short-FAIDUS 集合体の配置方法
(各図の中心は炉中心部)

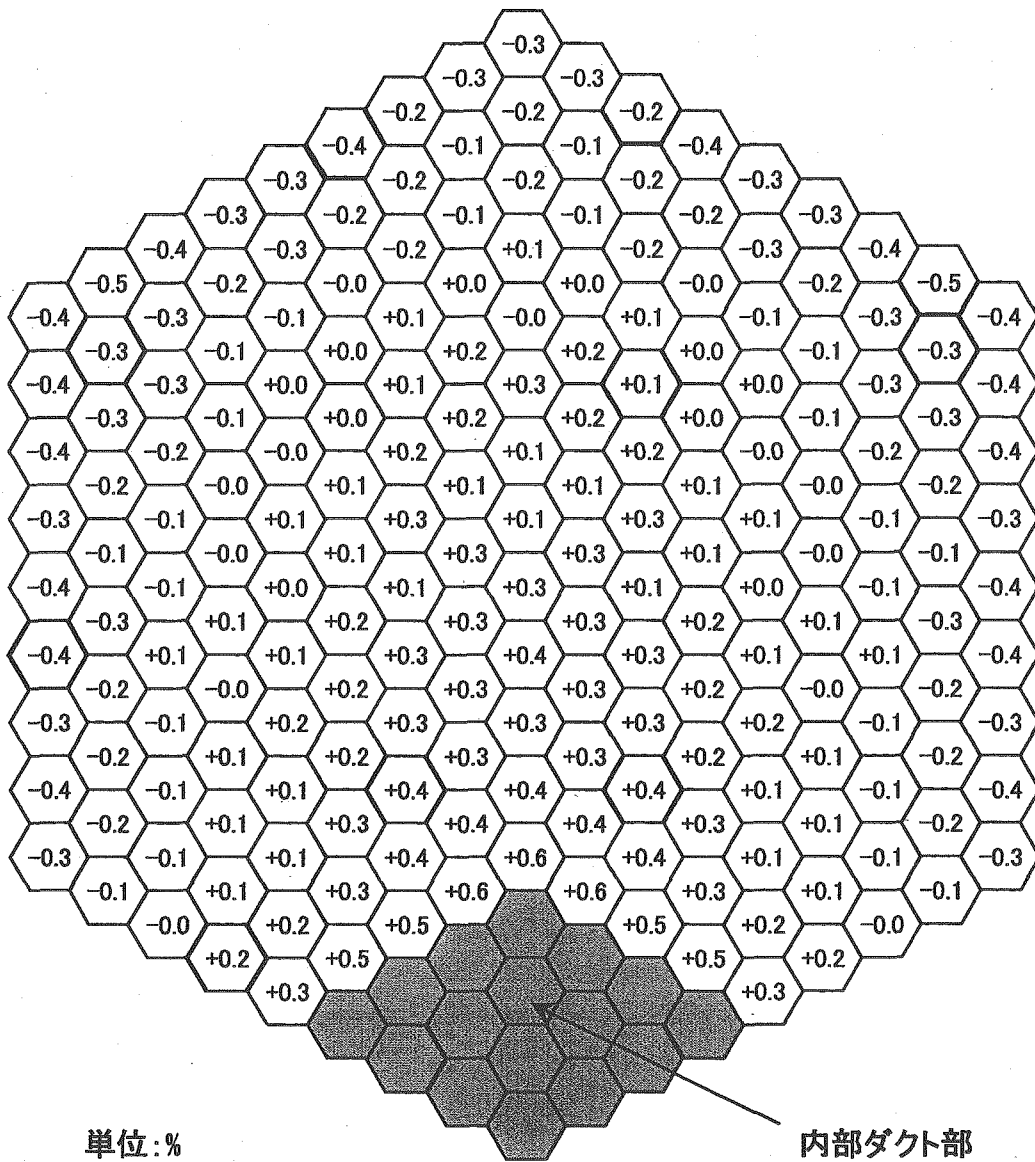


図 A.2 Short-FAIDUS 集合体の相対出力分布計算結果
(ピン単位核分裂反応率の平均値からの相対差分布)