



JAEA-Technology

2006-035



JP0650399

JAEA-Technology

「もんじゅ」における実用化像実証炉心の設計検討 II

Design Study on a Demonstration Core for a Practical LMFBR in MONJU II

齋藤 浩介 前田 誠一郎 樋口 真史*

高野 光弘* 中沢 博明

Kosuke SAITO, Sei-ichiro MAEDA, Masashi HIGUCHI*

Mitsuhiro TAKANO* and Hiroaki NAKAZAWA

東海研究開発センター

核燃料サイクル工学研究所

プルトニウム燃料技術開発センター

燃料技術部

Fuel Technology Department

Plutonium Fuel Development Center

Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories

Tokai Research and Development Center

June 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。
本レポート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下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課

Tel. 029-282-6387, Fax. 029-282-5920

This report is issued by Japan Atomic Energy Agency irregularly.

Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to:

Intellectual Resources Section,

Intellectual Resources Department

2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN

Tel. 81 29 282 6387, Fax. 81 29 282 5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

「もんじゅ」における実用化像実証炉心の設計検討Ⅱ

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所 プルトニウム燃料技術開発センター 燃料技術部
齋藤 浩介、前田 誠一郎、樋口 真史*1、高野 光弘*2、中沢 博明

(2006年2月21日受理)

耐スエリング性に優れた酸化物分散強化型フェライト鋼(ODS鋼)を炉心材料に適用し、太径中空ペレットを用いた燃料を取替燃料として装荷し、実用化段階で想定される炉心・燃料像(取出平均燃焼度約150GWd/t、長期運転サイクル)を高速増殖原型炉「もんじゅ」で実証する構想の検討を進めている。

2003年度に実施した設計検討時点からODS鋼の材料強度基準案が改訂されたことを踏まえ、その影響を把握すると共に核・熱・燃料設計の成立性に関して改めて確認した。

ODS鋼の材料強度の低下に対応して被覆管強度評価の成立性が確保できるように被覆管肉厚と外径との比を増加させるように燃料仕様を見直した。これに伴って被覆管外径、運転サイクル期間等の炉心・燃料に関する基本仕様を再設定した。なお、本検討では現行の原子炉出力を維持できる127本バンドル炉心案を対象とした。

核設計検討では、燃料仕様変更による燃料体積率の低減に伴う影響を受けるものの、最大線出力、燃料反応度等の主要な評価項目について設計目標を満足し、成立性が確保される見通しを確認した。

熱・燃料設計では、被覆管強度評価を満足する被覆管最高温度を把握すると共に炉内出力分布を踏まえ、この被覆管最高温度を満足するように冷却材流量配分設計が可能な見通しであることを確認した。

改訂された炉心・燃料案では前検討に比べ燃料体積率の低下に伴い、運転サイクル長さの短縮による稼働率の低減及び燃料交換体数の増加等の若干の影響を受けるものの、取出平均燃焼度150GWd/t、1年を超える長期運転、照射炉心としての利用が維持でき、実用化像実証炉心で目標とした基本条件について満足できる見通しである。

本検討は「もんじゅ」の将来的な利用計画検討の一環として行っているものであり、今後の計画の進展に伴って設計検討についても、より具体化を進めていく必要がある。

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

*1 株式会社 NESI

*2 原子力技術株式会社

Design Study on a Demonstration Core for a Practical LMFBR in MONJU II

Kosuke SAITO, Sei-ichiro MAEDA, Masashi HIGUCHI*¹,
Mitsuhiro TAKANO*² and Hiroaki NAKAZAWA

Fuel Technology Department
Plutonium Fuel Development Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February, 21, 2006)

Because of the revision on the standardized strength of the ODS steel, the previous design study of MONJU demonstrative core has been obliged to be reconsidered. For economical advantages, only a 127 pins-bundle core was selected to be redesigned. For the sake of cladding endurance, the ratio of cladding thickness to outer diameter was reset incrementally followed by the determination of the basic specification of a pin. Notwithstanding some deterioration thanks to the reduction of a fuel volume fraction, the prospect in neutronics was obtained. Coolant flow distribution design which was based on power distribution was successfully carried out without overheating cladding. Average burn-up of 150 GWd/t and 380 days-long operational period per cycle are to be attained, and the designed core can thermally afford to receive test fuels. The study has necessity to be advanced extensively for the purpose of materialization according to the circumstances of MONJU in future.

Keywords: MONJU, Demonstration Core, 150 GWd/t, Long Operational Period, 127 Pins-bundle Fuel Assembly, Economical Design, ODS Steel

* 1 Nuclear Energy System Incorporation

* 2 Nuclear Technology & Engineering Corporation

目次

1. 緒言	1
2. 基本仕様の再検討	2
2.1 基本仕様設定の考え方	2
2.2 予備的被覆管強度評価	3
2.2.1 ODS 鋼評価強度	3
2.2.2 再評価の検討条件	3
2.2.3 CDF 解析結果	5
2.2.4 短時間強度解析結果	5
2.2.5 考察	5
2.3 基本仕様のサーベイ	7
2.3.1 サーベイの方法	7
2.3.2 取り合い条件と対策	8
2.3.3 基本仕様の設定	9
3. 核設計	10
3.1 解析手法及び条件	10
3.2 解析結果	13
4. 熱流力・燃料設計	16
4.1 冷却材流量配分	16
4.1.1 炉心部以外への流量配分	16
4.1.2 炉心部への流量配分決定のための出力評価	16
4.1.3 炉心部への流量配分	16
4.1.4 まとめ	17
4.2 被覆管強度評価	18
4.2.1 評価方法と検討条件	18
4.2.2 被覆管 CDF 解析結果	18
4.2.3 短時間強度解析結果	19
4.2.4 まとめ	19
5. 炉心案総合評価	20
6. 結言	21
参考文献	22

添付資料

A. 「もんじゅ」実用化像実証炉心検討における核設計手法	59
B. 核反応による放出エネルギー	71
B.1 CITATION コード	71
B.2 3次元拡散計算コード	73
B.3 考察	74

Contents

1.	Introduction	1
2.	Survey of basic design	2
2.1	Limiting condition and general procedure	2
2.2	Preliminary cladding strength analyses	3
2.2.1	Standardized ODS steel strength	3
2.2.2	Procedure and conditions	3
2.2.3	Results of CDF of creep rupture strength analyses	5
2.2.4	Results of short time strength analyses	5
2.2.5	Discussion	5
2.3	Survey of basic design	7
2.3.1	Procedure of survey	7
2.3.2	Trade-offs	8
2.3.3	Basic specification of fuel pin	9
3.	Neutronic design	10
3.1	Analyses procedure	10
3.2	Results	13
4.	Thermal and fuel designs	16
4.1	Coolant flow distribution	16
4.1.1	Coolant flow distribution at the outside of core	16
4.1.2	Ad hoc power distribution of core	16
4.1.3	Coolant flow distribution of core	16
4.1.4	Conclusive remarks	17
4.2	Cladding strength analyses	18
4.2.1	Procedure and conditions	18
4.2.2	Results of CDF of creep rupture strength analyses	18
4.2.3	Results of short time strength analyses	19
4.2.4	Conclusive remarks	19
5.	Core general assessment	20
6.	Conclusion	21
	References	22

Appendices

A.	Neutronic design procedure of this study	59
B.	Released energy at nuclear reaction	71
B.1	Burning properties calculation code "CITATION"	71
B.2	Neutronics code on three-dimensional diffusion theory	73
B.3	Discussion	74

表 目 次

表 2-1	予備的被覆管強度評価における燃料ピン仕様及び燃焼条件	23
表 2-2	予備的被覆管強度評価における CDF 評価用の被覆管最高温度履歴	23
表 2-3	被覆管 (ODS 鋼) の設計用物性値	24
表 2-4	予備的被覆管強度評価における CDF 評価結果	26
表 2-5	予備的被覆管強度評価における短時間強度解析結果	27
表 2-6	基本仕様決定のための計算表	28
表 2-7	実用化像実証炉心案の基本仕様	29
表 3-1	核設計手法の変更点	30
表 3-2	空間分布評価時の制御棒位置	30
表 3-3	主要核特性	31
表 3-4	最大燃焼度	32
表 3-5	最大線出力	33
表 3-6	最大集合体出力	33
表 3-7	集合体出力履歴	34
表 3-8	最大高速中性子束	34
表 3-9	最大高速中性子照射量	34
表 3-10	平衡サイクルにおける炉内 HM インベントリ	35
表 3-11	平衡サイクルにおける 1 バッチ当たりの物質収支	36
表 4-1	炉心部以外の冷却材必要流量の推定	38
表 4-2	炉心出力	39
表 4-3	冷却材流量配分	39
表 4-4	被覆管強度評価における燃料ピン仕様及び燃焼条件	40
表 4-5	被覆管 CDF 評価用の被覆管最高温度履歴	40
表 4-6	被覆管 CDF 及び短時間強度解析結果	41
表 5-1	炉心案の評価	42
添付表		
表 B-1	核分裂当たりの発熱量	75
表 B-2	核分裂当たりの正味の放出エネルギー QG	75
表 B-3	CITATION コード用核反応当たりの放出エネルギー	76

Table Contents

Table 2-1	Fuel pin specification and burning conditions at preliminary cladding stress analyses	23
Table 2-2	Maximum temperature histories of cladding for CDF estimation at preliminary cladding stress analyses	23
Table 2-3	ODS steel cladding properties on design	24
Table 2-4	Results of CDF at preliminary cladding analyses	26
Table 2-5	Results of short time strength at preliminary cladding analyses	27
Table 2-6	Calculation table for basic fuel pin design	28
Table 2-7	Basic fuel pin specification	29
Table 3-1	Revisions of nuclear designing methods	30
Table 3-2	Control rod configuration at space distribution analyses	30
Table 3-3	Primary core properties	31
Table 3-4	Maximum burn-ups	32
Table 3-5	Maximum linear heat rate	33
Table 3-6	Maximum assembly power	33
Table 3-7	Assembly power histories	34
Table 3-8	Maximum neutron flux	34
Table 3-9	Maximum neutron fluence	34
Table 3-10	HM inventory at an equilibrium cycle	35
Table 3-11	Material balance per batch at an equilibrium cycle	36
Table 4-1	Necessary coolant flow at the outside of core	38
Table 4-2	Core power	39
Table 4-3	Coolant flow distribution	39
Table 4-4	Fuel pin specification and burning conditions at cladding stress analyses	40
Table 4-5	Temperature histories for CDF analyses at cladding stress analyses	40
Table 4-6	Results of cladding CDF and stress analyses	41
Table 5-1	Core general assessment	42
Appendices		
Table B-1	Heat generation per fission	75
Table B-2	Net released energy per fission	75
Table B-3	Released energy per nuclear reaction for CITATION	76

目 次

図 2-1	ODS 鋼のクリープ破断応力強さ	43
図 2-2	ODS 鋼の設計降伏点	44
図 2-3	ODS 鋼の設計引張強さ	44
図 2-4	予備的被覆管強度評価における被覆管 CDF 評価用の被覆管最高温度履歴 (a) 内側炉心 (b) 外側炉心	45
図 2-5	パラメータ決定のフローチャート	46
図 3-1	「もんじゅ」実用化像実証炉心の燃料配置	47
図 3-2	「もんじゅ」実用化像実証炉心の 2 次元 RZ 体系	49
図 3-3	炉心径方向燃焼度分布 —制御棒挿入位置包絡—	50
図 3-4	平衡サイクル初期における最大線出力発生集合体の軸方向線出力分布 (a) 内側炉心 (b) 外側炉心	51
図 3-5	粗調整棒の挿入に伴う反応度変化と最大線出力の関係	52
図 3-6	集合体出力分布 —平衡サイクル時期及び制御棒挿入パターン包絡—	53
図 3-7	集合体出力履歴	55
図 3-8	最大高速中性子照射量分布 —制御棒挿入位置包絡—	56
図 4-1	被覆管 CDF 評価用の被覆管最高温度履歴 (a) 内側炉心 (b) 外側炉心	57
図 4-2	温度により変遷する強度補正係数の概念図	58
添付図		
図 A-1	核特性解析のフローチャート	64
図 A-2	断面積作成のフローチャート	65
図 A-3	制御棒断面積作成時のリングモデル化手法	66
図 A-4	Pu 富化度計算～燃焼特性解析までのフローチャート	67
図 A-5	燃焼計算で用いる燃焼チェーン	68
図 A-6	3 次元拡散計算による空間分布評価のフローチャート	69
図 A-7	Na ボイド反応度計算を含む反応度係数計算のフローチャート	70

Figure Contents

Figure 2-1	Creep fracture stress strength of ODS steel	43
Figure 2-2	Standardized yield point of ODS steel	44
Figure 2-3	Standardized tensile strength of ODS steel	44
Figure 2-4	Maximum temperature histories of cladding for CDF analyses at preliminary cladding stress analyses (a) Inner core (b) Outer core	45
Figure 2-5	Flowchart for basic parameter calculation	46
Figure 3-1	Fuel assembly configuration	47
Figure 3-2	Two-dimensional RZ-coordinates	49
Figure 3-3	Radial burn-up distribution	50
Figure 3-4	Axial linear heat rate distribution of an assembly with the maximum power at an equilibrium cycle (a) Inner core (b) Outer core	51
Figure 3-5	Maximum linear heat rate with reactivity caused by CCR insertion	52
Figure 3-6	Assembly power distribution	53
Figure 3-7	Assembly power histories	55
Figure 3-8	Maximum fast neutron fluence distribution	56
Figure 4-1	Maximum temperature histories of cladding for CDF estimation for cladding stress analysis (a) Inner core (b) Outer core	57
Figure 4-2	Conceptual diagram of strength correction coefficient in temperature transition	58
Appendices		
Figure A-1	Flowchart of analyses on neutronics	64
Figure A-2	Flowchart of preparation of cross section	65
Figure A-3	Control rod modeling for its cross section	66
Figure A-4	Flowchart of burn-up properties	67
Figure A-5	Nuclide chain for burn-up calculation	68
Figure A-6	Flowchart for special distribution analysis	69
Figure A-7	Flowchart of reactivity calculation including sodium void reactivity	70

1. 緒言

我が国の高速増殖炉開発ステップにおける一つの選択肢として、既存プラントである「もんじゅ」において炉心・燃料の実用化像を実証する構想がある。この実用化像とは、取出平均燃焼度 150 GWd/t 程度の高燃焼度化、優れた耐スエリング性を有する炉心材料の適用、太径中空ペレット燃料を用いた燃料集合体等の特徴を持つものである。

2003 年の前報告書¹⁾は、この構想の可能性を、概念設計を通して具体化したものである。ここでは被覆管等の炉心材料に酸化物分散強化型フェライト鋼（ODS 鋼）を適用し、91 本あるいは 127 本バンドルの集合体構造を持つ炉心を検討対象とした。そしてこれらの炉心・燃料が、核・熱・燃料設計の分野で成立の見通しがあることを示した。

この検討は、2002 年に策定された ODS 鋼製被覆管の材料強度基準案²⁾に基づいて実施した。しかしその後、2005 年にこの基準案が改訂³⁾されている。改訂ではクリープ強度等が大きく低減しており、炉心・燃料の成立性を確保するには被覆管肉厚等を含めて再検討する必要性が生じた。

そこで、本報告書ではこの実用化像炉心案の再検討を行う。前報告書では、炉出力は低減するが実用化像の模擬性を重視した 91 本バンドル炉心案、及び炉出力を維持して経済性を向上させた 127 本バンドル炉心案、の 2 つの炉心案を検討した。本報告書では経済性を重視し、127 本バンドル炉心案のみを対象とする。

本報告書では、原則として前報告書と同様な方法で炉心・燃料の設計検討を進める。2 章では、前述した ODS 鋼の改訂された材料強度を用いて被覆管強度に関して再評価を行い、この結果と前報告書の検討例を基礎に、「基本仕様」の設定を行う。決定した基本仕様により、3 章では核設計、4 章では熱収支及び燃料の成立性を検討する。5 章では本検討炉心の総合評価をまとめる。最後に、6 章で結言を述べる。

2. 基本仕様の再検討

2.1 基本仕様設定の考え方

ODS 鋼の材料強度の改訂に伴い、炉心・燃料の基本仕様のうち被覆管肉厚、被覆管外径、中空ペレットの外径等を見直す。これに影響を受けない以下の仕様、条件は前報告書と同じである。

<前報告書と共通の基本仕様>

- ・ バンドル数 127 本
- ・ 取出平均燃焼度 約 150 GWd/t
- ・ 被覆管材 酸化物分散強化型フェライト (ODS) 鋼
- ・ 径方向ブランケットの削除
- ・ 被覆管最高温度 700 °C以下
- ・ スミア密度 約 82 %TD
- ・ 炉心高さ 110 cm
- ・ 軸方向ブランケット長 上下とも 10 cm
- ・ 軸方向ブランケットの発熱分担 約 2 %

<主な要求条件>

- ・ 燃焼反応度 5 % $\Delta k/kk'$ 程度
- ・ 最大線出力 470 W/cm 以下
- ・ 最大集合体出力 5.2 MW 以下
- ・ バンドル部圧力損失 3.3~3.5 kg/cm²程度

<基本仕様の見直し>

まず、改訂された ODS 鋼の材料強度を用いて、クリープ強度及び短時間強度の観点で被覆管健全性を満足する肉厚／外径比を予備的に評価する。次いで、この被覆管肉厚／外径比を前提に、燃料ピン外径を変数とした簡易的な関係式により最大線出力、最大集合体出力、バンドル部圧力損失等の炉心特性値を推定する。この関係式は前報告書他、過去の検討例を参考に作成したものである。得られた特性値が要求条件を満足する範囲を把握し、基本仕様を設定する。

2.2 予備的被覆管強度評価

ODS 鋼強度の最新知見を用いて被覆管強度評価を見直し、被覆管肉厚／外径比或いは被覆管最高温度を決定する。

2.2.1 ODS 鋼評価強度

ODS 鋼の機械的強度は 2002 年に材料強度基準²⁾ (以下、「2002 年報告」という) としてまとめられたが、その後、炉外強度試験データが蓄積され、2005 年の材料強度基準³⁾ (以下、「2005 年報告」という) においてはクリープ破断強度及び短時間強度が見直されている。2002 年報告で用いた式 (以下、「2002 年式」という) と 2005 年報告における最新知見の式 (以下、「2005 年式」という) の、クリープ破断応力強さ (S_R)、設計降伏点 (S_y) 及び設計引張強さ (S_u) の各々を比較して図 2-1~2-3 にそれぞれ示す。

2002 年式に比べ 2005 年式はいずれも材料強度が低下している。また、9Cr-ODS 鋼^(注) では熱時効の効果によって短時間強度が低下する特徴があり、この効果を取り入れるための短時間強度補正係数が新たに策定されている。図 2-2 及び 2-3 にはその様子の一例を示しているが、この効果は温度履歴によって変化する。

(注) 従来、2 種類の ODS 鋼を「フェライト系」及び「マルテンサイト系」という呼称で区別していたが、2005 年報告ではこれが改められ、それぞれ「12Cr 系」及び「9Cr 系」と呼んでいる。本報告書でもこれに倣い後者で表記する。

2.2.2 再評価の検討条件

前報告書では、基本仕様として 2002 年式を適用して求めた被覆管制限温度 (寿命中の被覆管最高温度: 内側 700 °C、外側 690 °C) 及び被覆管肉厚 (0.53 mm) を適用した。本検討では 2005 年式を用い、これら温度及び肉厚の値を再評価する。被覆管温度或いは肉厚のどちらか一方を変化させ、所要の被覆管強度が保てるようなもう一方の値を探索する。具体的には、以下のように行う。

(1) 被覆管温度の変化

被覆管肉厚を固定して (0.53 mm)、被覆管温度を前回の制限温度 (内側 700 °C、外側 690 °C) からそれぞれ 5 °C 刻みで低下させる。

(2) 被覆管肉厚の変化

被覆管制限温度を固定し (内側 700 °C、外側 690 °C)、肉厚を 0.01 mm 刻みで増加させる。被覆管外径、ギャップ幅及びペレット内径は固定し、肉厚の変化に合わせて被覆管内径、ペレット外径、プレナム体積等を変える。

評価対象となる燃料ピンは、内側及び外側炉心のそれぞれで、最も平均燃焼度が高くなるもの

である。設計基準、製造公差の扱い等は現行設計手法に準拠する。

被覆管クリープ寿命分数和 (CDF) は、最大集合体出力履歴に基づいて被覆管温度履歴を設定し、最高温度部での寿命末期までの進展を評価する。成立性判断の目安は、過渡事象による追加等を考慮し、定格運転時において 0.5 以下とする。

短時間強度の成立性に関しては、評価上最も厳しくなる寿命末期に、過渡事象が発生した場合における被覆管最高温度部での一次一般膜応力 (Pm_{θ}) の設計応力比 (Pm_{θ}/S_m , S_m :許容応力) を以って評価する。成立性の目安は 1 以下とする。

燃料ピン仕様、照射条件他は前報告書と同一とし、以下の通り。

- 燃料ピン仕様及び燃焼条件

表 2-1 に、燃料ピン仕様及び燃焼条件を示す。現行燃料ピン仕様を参考に暫定的に製造公差等を設定し、燃料ピン内圧が高くなる組み合わせを適用する。被覆管肉厚は製造公差を考慮した最小値とする。

- 被覆管温度履歴

表 2-2 及び図 2-4 に被覆管最高温度履歴を示す。この温度履歴は、各流量領域の集合体出力履歴に基づいて階段状に包絡させたものであり、これを内側及び外側炉心それぞれについて設定する。

- FP ガス放出率：現行設計式

$$Bu < 70 \text{ GWd/t}$$

$$F = 30.0 + 1.88Bu - 1.804 \times 10^{-2} Bu^2 + 7.828 \times 10^{-5} Bu^3$$

$$Bu \geq 70 \text{ GWd/t}$$

$$F = 100$$

F : FP ガス放出率 (%)

Bu : 燃焼度 (GWd/t)

FP ガス収率を 0.27 atoms/fission とし、核分裂当りの発生エネルギーを 200 MeV とする。

- ガスプレナム部温度

上部ガスプレナム温度：被覆管最高温度より $-15 \text{ }^{\circ}\text{C}$

下部ガスプレナム温度：冷却材原子炉入口温度 ($397 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

- 設計応力強さ (St): $St = 0.8S_R$

現行の設計基準に準拠。クリープ強度評価に適用する。

- 許容応力 (S_m): $S_m = \text{Min}(3/4S_y, 1/2S_u)$

現行の設計基準に準拠。短時間強度評価に適用する。

- 過渡事象における被覆管温度上昇

冷却材入口温度から被覆管最高温度までの上昇幅が定格出力時の約 1.2 倍 (短時間強度評価に適用)。

$$\frac{\text{過渡時の被覆管最高温度} - \text{冷却材入口温度}}{\text{定格時の被覆管最高温度} - \text{冷却材入口温度}} = 1.205$$

表 2-3 に 2 種類の ODS 鋼の物性式を示す。本評価では内外面腐食、設計引張応力強さ、設計

降伏点並びに短時間強度補正係数（9Cr系のみ）及びクリープ破断応力強さを使用する。

2.2.3 CDF 解析結果

被覆管 CDF の解析結果を表 2-4 に示す。クリープ破断応力強さは 12Cr 系 ODS 鋼の方が 9Cr 系に比べて大きく、前者を適用した場合の被覆管 CDF は、後者を適用した場合に比べて 1桁ほど小さい。今回評価対象となる条件下では、12Cr 系の CDF はいずれも成立性目安 0.5 以下を満足する。

9Cr 系 ODS 鋼に関して、肉厚を 0.53 mm に固定し、被覆管最高温度を内側炉心で 700 °C、外側炉心で 690 °C とした場合、内側、外側共に CDF は 1 を超える。被覆管 CDF の成立性を確保するためには、被覆管最高温度を内側炉心で 680 °C、外側で 670 °C まで低下させる必要がある。一方、被覆管最高温度（内側 700 °C、外側 690 °C）を固定した場合には、被覆管肉厚を内側炉心で 0.58 mm、外側炉心で 0.57 mm まで増やす必要がある。この場合、被覆管肉厚/外径比 (t^*/D 、 t^* は暫定的な腐食代 0.16 mm を減殺した値) は、現行仕様の 0.047 から、内側、外側炉心でそれぞれ 0.053、0.052 に増加する。

2.2.4 短時間強度解析結果

被覆管短時間強度の解析結果を表 2-5 に示す。クリープ強度の場合とは逆に、短時間強度は 9Cr 系の方が大きい。今回評価対象となる条件下では、9Cr 系を適用した場合はいずれも成立性目安である設計応力比 1 以下を満足する。

12Cr 系では、被覆管肉厚を 0.53 mm に固定した場合、設計応力比 1 以下を満たすには内側、外側炉心共に被覆管最高温度を 670 °C まで下げなければならない。被覆管最高温度を固定（内側 700 °C、外側 690 °C）した場合、内側炉心では被覆管肉厚を 0.62 mm、外側炉心では 0.58 mm まで増加させる必要がある。この場合の t^*/D は、内側、外側炉心でそれぞれ 0.058、0.053 である。

2.2.5 考察

被覆管肉厚を変えずに成立性を得るには、前報告書の検討例（内側 700 °C、外側 690 °C）に比較して、9Cr 系の場合は 20 °C、12Cr 系を使用した場合は 30 °C ほど被覆管最高温度を抑えなければならない。被覆管最高温度を 20~30 °C 下げるとは、現行設計程度の温度制限（675 °C）であり、その特徴の一として高温強度を謳った ODS 鋼の性能を実証する目的から乖離する。したがって、本設計検討では被覆管制限温度を変えず、肉厚を増加させて成立を目指す。

現状、9Cr 系及び 12Cr 系の両方について開発が進められているが、製管性等の観点から 9Cr 系が第一位の候補材とされており、本報告書ではこの鋼種の採用を前提とする。

9Cr 系を適用した場合には被覆管 CDF が制約となり、被覆管肉厚を 0.58mm 程度まで、 t^*/D

としては 0.053 程度まで増加させる必要がある。これは、2002 年式を用いた前報告書における $t^*/D = 0.047$ (被覆管肉厚 0.53mm) に比べて約 14 % の増加である。

ここで、バンドル部での冷却材圧力損失の制約から被覆管外径の増加は困難であり、被覆管肉厚を増加させるためにはペレット外径を縮小せざるを得ない。ペレット外径の縮小で炉心の燃料体積率は減少する。そしてこれは Pu 富化度の増加、燃焼ミスマッチの増加、燃焼反応度の増加、運転サイクル期間の低減等、炉心性能に望ましくない影響を及ぼす。

クロム含有率が高く相対的に優れた耐腐食性を示す 12Cr 系鋼は予備材として位置付けられている。この鋼種を採用した場合には短時間強度が制約となり、9Cr 系に比べて被覆管肉厚を更に厚く 0.62mm まで、 t^*/D としては 0.058 程度まで増加させる必要がある。将来的に 12Cr 系を採用する事態に至った場合には、炉心性能に更なる影響を及ぼす。

2.3 基本仕様のサーベイ

予備的被覆管強度評価の帰結として、被覆管温度制限は従来通りとして肉厚を増加させる方針の下、所要の t^*/D 値を 0.053 $((0.58-0.16)/7.9)$ に決定する。この値を前提にして炉心基本仕様のサーベイを行う。

2.3.1 サーベイの方法

表 2-6 に、基本仕様を決定する計算表を示す。左側の A 表は原則固定値であり、前提条件であるが、フィードバックを掛けて変更する事がある。右側の B 表がおおよその仕様を決定するための表である。図 2-5 に、基本仕様決定のフローチャートを示す。この流れに従い、表 2-6 では B 表において左から右へと各パラメータが逐次計算される。本検討の仕様決定プロセスでは、被覆管外径を主要な変数とし、その関数である各パラメータが各制限条件をなるべく満たすような変数（外径）の値を探索する。

まず、被覆管外径により燃料を構成する各要素の幾何学的大きさが決定し、実効燃料体積率が定まる。

この実効燃料体積率を変数とした簡易評価式により Pu 富化度が決定する。現行設計では燃料融点の観点から富化度を 32 wt%以下に制限しており、本検討でもこれを一つの基準と考える。

続いて、この Pu 富化度を変数とした推定式により、集合体出力及び線出力それぞれについての燃焼ミスマッチを見積もる。

全ピーキング係数は燃焼ミスマッチと形状ピーキングとの積である。前報告書の検討での最大集合体出力又は最大線出力から、集合体出力と線出力の全ピーキング係数を評価する。これと、前報告書の燃焼ミスマッチを用いて形状ピーキングを得る。

この形状ピーキングを用いて、Pu 富化度の関数として求めた燃焼ミスマッチから最大集合体出力が求まる。この時集合体出力余裕として 1.5 %を考慮する。

最大集合体出力から最大冷却材流量が計算される。本検討では、当初 t^*/D 値を設定した際に使用した被覆管温度制限である「内側で 700 °C以下、外側で 690 °C以下」を満たさなければならない。この条件の下、集合体単位の冷却材必要流量の算出には、最大集合体出力、集合体内出力分布及び被覆管制限温度等に応じた次の関係式を用いる。この式は、127 本バンドル型燃料集合体の熱流解析コードを用いたサブチャンネル解析結果に対してフィッティングして求めたものであり、サブチャンネル解析結果と ± 4 °Cで一致している。

$$T_{HS} = 1.28 \cdot Q \cdot PF_6 \cdot \left(\frac{897.9}{W} + 2.45 \right) + 397 \quad (2.1)$$

T_{HS} 被覆管最高温度（ホットスポットファクタ考慮後）(°C)

Q 集合体出力 (MW)

PF_6 集合体内径方向出力ピーキング (-)

(集合体断面を 6 分割した軸方向積分出力に対するピーキング係数)

W 集合体あたりの冷却材流量 (kg/s)

内側と外側では制限温度が異なるので、それぞれについて流量を算出する。

続いて、これらの必要な集合体冷却材流量から圧力損失を算定する。内側と外側で必要冷却材流量の大きい方を用いて評価する。表 2-6 に示した計算値は MIT 式⁴⁾を用いた圧力損失である。現行設計では、燃料棒有効長の範囲で 3.5 kg/cm^2 という値を上限に定めているが、MIT 式は相対的に小さめの評価となるので上限を 3.3 kg/cm^2 とする。ピン径の増加により冷却材流路面積が減少すると圧力損失が増加するので、圧力損失はピン外径の上限を定める制限因子となる。

最大線出力も形状ピーキングと燃焼ミスマッチを用いて算出する。最大線出力制限は 470 W/cm である。ピン外径が小さくなるに従い線出力は上昇傾向にあるので、最大線出力はピン外径の下限を設定する因子になり得る。

2.3.2 取り合い条件と対策

以上の手順で表 2-6 は作成された。まとめると、直接的な制限因子となるのは Pu 富化度、最大線出力及び圧力損失の 3 項目である。しかし、同表から分かるように、現行「もんじゅ」の制限をすべて満たすものは得られない。また、既述の通り各簡易評価式はあるモデルに対するフィッティング式であり、詳細計算によって厳しい方向に再評価される可能性、またその逆もあり得る。

現時点で、被覆管外径 7.85 mm あたりに炉心成立の可能性があると判断する。以下、これらの制限因子に関して考察する。

(1) Pu 富化度

被覆管外径 7.85 mm においては Pu 富化度 33.5 wt\% 程度（外側炉心）が見込まれ、これは現行の富化度制限 32 wt\% を超えている。この Pu 富化度制限の対策として

- ・ ウランの濃縮度を上げる
- ・ 制限そのものを緩和
- ・ 使用原料の Pu フィッサイル率を現時点での想定 61.5 wt\% から引き上げる

が考えられる。第 1 のウラン濃縮度に関して、「もんじゅ」は劣化ウラン利用の実証が使命の一であり、従って濃縮ウランを利用する事は「もんじゅ」の存在意義からも妥当な解決法ではない。第 2 の制限の緩和であるが、燃料融点の観点からこれは容易でない。よって、第 3 の方策であるが、これに関しては次のような状況にあると考えられる。

本検討炉心の稼働時期は軽水炉燃料高燃焼度化 (45 GWd/t) が恒常的になっていると予期できる時期である。この Pu フィッサイル率 61.5 wt\% というのは、BWR と PWR を 6:4 の割合（国内原子炉の基数の比）で混合したものとして評価した推定値である。使用済み燃料の Pu フィッサイル率は、燃焼度が同じでも BWR よりも PWR の方が高いため、質的に有利な PWR 使用済み燃料から再処理した Pu 原料のみを、或いはより多く使用することが可能ならばフィッサイル率が上がり、富化度を下げる事ができる。しかし、六ヶ所再処理工場の稼働条件により、このような原料選択が将来的に可能かどうかは不透明である。

(2) 最大線出力

線出力制限は 470 W/cm であり、被覆管外径 7.85 mm において制限を満足できる見込みがある。しかし、現段階は粗い見積もりであるため、詳細設計における評価値に注意する必要がある。

(3) 圧力損失とワイヤ巻き付けピッチ

BDI の影響を考慮するとワイヤ巻き付けピッチは短いほど有利であるが、逆に圧力損失が増大する。最近の傾向として巻き付けピッチ 20 cm が提唱されているが、圧力損失が厳しいので現行設計である 30.7 cm を使用すると 3.3 kg/cm² 基準の達成が見込める程度にまで減少する。しかし、依然として基準値よりは大きく、基準緩和検討の必要性がある。

2.3.3 基本仕様の設定

以上から、被覆管外径の設計値として 7.85 mm を設定する。表 2-7 に基本仕様を纏める。被覆管肉厚の値を小数点 2 桁に丸め（切り上げ）た結果、表 2-6 の 7.85 mm に対応する数値と小さい桁で若干異なっている。

これを基礎に、次章ではより詳細な設計に移行する。

- ・ 核定数ライブラリ JFS-3-J3.2R
- ・ エネルギー群数 18 群

空間分布の評価では様々な運転状況を想定し、粗調整棒の位置について以下に示すように平衡サイクル初期は 3 パターン、平衡サイクル末期は 2 パターンを対象とした解析を行う。表 3-2 に微調整棒、後備炉停止棒及び以下の各パターンに対応した粗調整棒の具体的な制御棒位置を示す。

<平衡サイクル初期>

- ① 燃焼反応度の約半分を抑制する位置
- ② 燃焼反応度分を抑制する位置
- ③ 燃焼反応度+1% $\Delta k/kk'$ の反応度を抑制する位置

<平衡サイクル末期>

- ④ 引き抜き位置
- ⑤ 1% $\Delta k/kk'$ の反応度を抑制する位置

①は所定の炉心反応度が確保できない状態で運転する場合を想定したものであり、③及び⑤は運転期間を保証する観点で意図的に炉心反応度を高めに設定した場合のものである。

微調整棒は常に、微調整棒のみで運転余裕+バイト分の反応度を抑制する位置とし、後備炉停止棒は常に引き抜き位置とする。

最大線出力は上記 5 パターンで最大値を評価し、集合体出力分布及び集合体出力履歴は①、③、④及び⑤の 4 パターンで最大値を評価する。また、高速中性子照射量及び燃焼度は制御棒挿入が浅めとなるパターンの組み合わせ（①及び④）及び制御棒挿入が深めとなるパターンの組み合わせ（③及び⑤）の 2 種類の組み合わせで最大値を評価する。

(3) Na ボイド反応度

Na ボイド反応度は、厳密摂動計算と同等な結果が得られるとされる直接計算で算出する。ここで、拡散計算では炉心上部のプレナム部における負の反応度を過大評価してしまうためこれを行わず、輸送計算で反応度を求める。計算体系は制御棒部を Na フォロワとした 2 次元 RZ 体系、評価対象は平衡サイクル末期である。解析時に用いる組成は、燃焼特性解析用を実施する 2 次元 RZ 燃焼計算で求める組成を炉心部、軸方向ブランケット部ともに 2 次元 RZ 体系の層毎に均質化したものである。

<反応度計算>

- ・ 計算コード TWOTRAN-II⁸⁾
- ・ 計算理論 輸送
- ・ 算出方法 直接計算
- ・ 計算体系 2 次元 RZ (Na フォロワ状態)
- ・ 核定数ライブラリ JFS-3-J3.2R
- ・ エネルギー群数 70 群

<実効遅発中性子割合>

- 計算コード PERKY⁹⁾
- 計算理論 拡散
- 計算体系 2次元 RZ 体系 (Na フォロワ状態)
- 核定数ライブラリ JFS-3-J3.2R
- エネルギー群数 18 群
- 遅発中性子データ Tuttle 79¹⁰⁾

3.2 解析結果

燃焼特性解析及び空間分布評価により算出した主要核特性を表 3-3 に示す。比較のため、同表には現行「もんじゅ」炉心及び実用化段階での炉心案の核特性を示す。

(1) Pu 富化度

Pu 富化度の設定では、平衡サイクル末期の臨界性を満足し、想定される制御棒挿入状態において燃料ピンが線出力制限を超えず且つ内側と外側炉心の出力を出来るだけ平坦化させる必要がある。

前報告書の結果から、本検討炉心では外側炉心の Pu 富化度が現行炉心の上限である 32 wt% ((Pu+²⁴¹Am)/HM の定義で製造公差等を考慮すると 31.5 wt%程度) を大きく超えると予測した。従って本検討では、将来的に六ヶ所再処理工場で再処理する使用済み燃料の種類が選択可能になることを想定し、外側炉心には PWR 使用済み燃料のみの再処理で得られる比較的 Pu フィッソイル率の高い原料を用いている。この結果、基本仕様見直し後の本炉心案の Pu 富化度は 25.1/32.7 (内側炉心/外側炉心) wt%となり、外側炉心の Pu 富化度を前報告書の結果と同程度に抑えられる。

(2) 燃焼反応度

燃焼反応度は 5.94 %Δk/k'であり、これは「もんじゅ」高燃焼度炉心の 2 倍以上である。

(3) 燃焼度

炉心部及び軸方向ブランケット部の集合体燃焼度、燃料ピン燃焼度及びペレット相当燃焼度を表 3-4 に示す。また、燃焼度の径方向分布を図 3-3 に示す。

炉心部の取出平均燃焼度は 151 GWd/t、軸方向ブランケット燃料も含めた経済性の指標となる実効的な取出平均燃焼度は 132 GWd/t である。

最高燃焼度は、内側炉心では集合体平均で 164 GWd/t、燃料ピン平均で 165 GWd/t、ペレット相当で 204 GWd/t である。外側炉心では、5 バッチ燃料交換であるため内側炉心よりも燃焼度は高くなり、集合体平均で 180 GWd/t、燃料ピン平均で 195 GWd/t、ペレット相当で 232 GWd/t である。

(4) 最大線出力

「もんじゅ」現行設計で用いられている軸方向伸び効果 (1.2 %) 及びラップ管発熱効果 (0.6 %) を考慮した各制御棒挿入パターンに対する流量領域毎の最大線出力を表 3-5 に示す。また、平衡サイクル初期における、各制御棒挿入位置に対応する内側及び外側炉心の最大線出力発生集合体の軸方向線出力分布を図 3-4 に示す。

最大線出力は内側、外側炉心ともに平衡サイクル初期で発生する。内側炉心では粗調整棒で燃焼反応度の約半分を抑制している状態で発生する 447 W/cm、外側炉心では粗調整棒で燃焼反応度分を抑制している状態で発生する 443 W/cm である。これらの値は、最大線出力制限の暫定値 470 W/cm を満足する。

また、制御棒挿入反応度に対する最大線出力の変化を図 3-5 に示す。外側炉心では、上記の値

は運用時における平衡サイクル初期の粗調整棒挿入位置の想定範囲内で最大に近い値となっている。内側炉心では今回の想定範囲外の粗調整棒挿入位置（1.0～3.0 % $\Delta k/kk'$ ）において最大値が発生する可能性もあるが、この最大値との差は大きくないと推測できる。

(5) 集合体出力分布

各制御棒挿入パターンに対する流量領域毎の最大集合体出力を表 3-6 に示す。また、制御棒挿入位置及び平衡サイクル初期、末期の各集合体出力を包絡し、対称性を考慮した 1/3 炉心体系での最大集合体出力分布を図 3-6 に示す。

運転に応じて制御棒挿入位置の違いを考慮した最大集合体出力は、平衡サイクル末期で微調整棒のみが挿入された状態において第 1 流量領域で発生する 4.97 MW である。外側炉心の最大集合体出力は、平衡サイクル初期で粗調整棒で燃焼反応度 +1 % $\Delta k/kk'$ を抑制している状態において第 6 流量領域で発生する 4.69 MW である。

(6) 集合体出力履歴

平衡サイクル初期及び末期の各制御棒挿入パターンを包絡した流量領域毎の最大集合体出力履歴を表 3-7 及び図 3-7 に示す。

第 1～3 流量領域の集合体出力は平衡サイクル初期における粗調整棒挿入の影響により平衡サイクル初期に比べて平衡サイクル末期の方が高い。また、内側炉心に比べて Pu 富化度が高い外側炉心では寿命中の集合体出力低下が大きい。

(7) 最大高速中性子束

流量領域毎の、集合体断面平均及びペレット相当の高速中性子束を表 3-8 に示す。

ペレットピーク相当の最大高速中性子束は $3.11 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ であり、「もんじゅ」現行高燃焼度炉心より僅かに低下する。

(8) 最大高速中性子照射量

流量領域毎の、集合体断面平均及びペレット相当の高速中性子照射量を表 3-9 に示す。また、炉中心から各集合体中心までの距離に対する集合体断面平均及びペレット相当の高速中性子照射量の径方向分布を図 3-8 に示す。

本炉心の集合体断面平均の最大高速中性子照射量は内側炉心の第 1 流量領域で発生する $3.96 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ である。また、ペレット相当レベルの最大高速中性子照射量は内側炉心の第 1 流量領域と外側炉心の第 6 流量領域で発生する $3.97 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ である。ODS 鋼の開発上の高速中性子照射量に対する制限値の目標としている $5.0 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ に対して余裕をもって満足する。

(9) 増殖比

増殖比は炉心部のみで 0.65、軸方向ブランケットを含めた炉心全体で 0.71 である。「もんじゅ」現行高燃焼度炉心と比べると、径方向ブランケット燃料を削除し、軸方向ブランケット燃料の充填量も減らしているため炉心全体の値は低下している。一方で燃料体積率が増加しているため、炉心部での内部転換率は向上している。

(10) 物質収支

平衡サイクルにおける炉内インベントリを表 3-10 に示す。また、平衡サイクルにおける 1 バッチ当たりの物質収支を炉心部及びブランケット部並びにこれらの合計について表 3-11 に示す。

本炉心の平衡サイクルにおける炉内の Pu-f インベントリは平衡サイクル初期が 1.24 トン、平衡サイクル末期が 1.15 トンである。また、1 バッチ当たりの物質収支（取出し量－装荷量）は Pu-f が -82 kg、Pu 合計で -92.6 kg である。

(11) Na ボイド反応度

平衡サイクル末期における炉心部のみの Na ボイド反応度は 4.7 \$ である。ここで、炉心崩壊事象（CDA）評価における流量損失型スクラム失敗事象（ULOF）では、Na のボイド化が炉心部のみならず、炉心上部側にも拡散していくと期待できる。そこで、上部軸方向ブランケット部及び上部ガスプレナム部でも同時にラップ管内の Na がボイド化することを想定した場合は 4.2 \$ である。なお、「もんじゅ」炉心の Na ボイド反応度については明確な制限目標が設けられていないが、結果は実用化段階で想定される大型炉に対する設計目標である 5～6 \$ 以下を満足している。

(12) まとめ

「もんじゅ」実用化像実証炉心の主要核特性について検討した。その結果、ODS 鋼の強度評価見直しに伴う仕様変更により外側炉心の Pu 富化度が大幅に増加すると予測されたが、外側炉心に六ヶ所再処理で PWR 使用済み燃料のみを処理して得られる原料を用いる事で前報告書と同程度の 32.7 wt% に抑制可能である事が分かった。また、制御棒挿入効果を取り入れた空間分布評価を行い以下の結果を得た。なお、今回は制御棒反応度収支の評価は行っていないが前報告書の結果より燃焼反応度の増加分を考慮しても成立性が見込めると推測される。

- ・ 最大線出力は暫定的に設定した中空高密度燃料に対する制限値の 470 W/cm を下回る 447 W/cm である。
- ・ 最大集合体出力は第 1 流量領域で発生する 4.97 MW である。
- ・ 各着目レベルでの最大燃焼度は外側炉心で発生し、集合体炉心部平均で 180 GWd/t、燃料ピン炉心部平均で 195 GWd/t、ペレット相当レベルの評価で 232 GWd/t である。
- ・ 最大高速中性子照射量はペレット相当レベルの評価で ODS 鋼の開発上の目標制限値である 5.0×10^{23} n/cm を下回る 3.97×10^{23} n/cm である。

Na ボイド反応度は、炉心部のみに着目すると平衡サイクル末期で 4.7 \$ であり、実用化段階で想定されている大型炉に対する設計目標の 6 \$ 未満を満足している（「もんじゅ」では Na ボイド反応度の制限は設定されていない）。仮想的に設定された設計基準外事象である炉心崩壊事象（CDA）に対して現行条件に比べてより厳しい評価が想定され、今後 CDA 等に関する安全性評価への影響について具体的な解析により確認する必要がある。

4. 熱流力・燃料設計

4.1 冷却材流量配分

本検討炉心の出力分布に対して、「もんじゅ」プラントの現行冷却系条件下の冷却材流量配分の検討を行う。集合体単位の冷却材必要流量の算出には(2.1)式を用いる。

4.1.1 炉心部以外への流量配分

実用化像実証炉心は、径方向ブランケットを削除して代わりに置換反射体を設置する設計である。現行炉心の径方向ブランケットは、炉心燃料に比べて小さいとはいえ、全炉心出力の内3%弱の発熱を分担している。一方、ステンレス鋼製の置換反射体になると、炉心からの中性子やガンマ線等の流入による発熱はあるが、その熱量は小さい。このため、径方向ブランケットの削除並びに置換反射体の設置により、炉心部以外への冷却材流量の削減が可能である。また、径方向ブランケットでは寿命中に ^{239}Pu 等の蓄積が進み出力が増加するため、現行設計では出力負担に対応した流量よりも多く配分されており、削減の効果はより大きい。置換反射体及び径方向中性子遮蔽体の発熱量は、本検討炉心と構造が比較的似た炉心（127本バンドル燃料集合体、径ブランケットを削除し置換反射体を配置）の設計¹⁴⁾における遮蔽計算にて算出した値を用いる。

長期運転を目指すことで、サイクル初期に挿入される制御棒反応度が増加するため、制御棒部の最大発熱量の増加が考えられる。従って、挿入反応度値に対応させて制御棒への配分流量を増加させる。

以上を考慮して算出した、炉心部以外に配分する冷却材流量を表4-1に示す。炉心部以外への流量配分は現行設計に比べて220 kg/s程度減少し、この分を炉心部へ割譲可能である。

4.1.2 炉心部への流量配分決定のための出力評価

炉内の出力分布評価では、サイクル初期において制御棒挿入位置が燃焼反応度の半分相当の場合、燃焼反応度の+1% $\Delta k/k$ 変動した場合及びサイクル末期において制御棒がパーク位置となる場合を包絡する分布を対象としている。表4-2に、この包絡した最大集合体出力を示す。

流量領域毎の最大集合体出力から領域換算出力（＝包絡最大集合体出力×集合体数）を求め、これを積算した冷却性能評価上の炉心出力は約856 MWであり、現行設計における約775 MWに比べて10.4%増加している。これは、約6%程度の出力を負担していた径方向ブランケットの削除、高燃焼度化に伴う燃焼ミスマッチの増加、及び長期運転に対応する制御棒挿入深度の増加に伴う径方向ピーキングの増加による影響である。

4.1.3 炉心部への流量配分

冷却材流量配分の検討結果を表4-3に示す。本検討では燃料交換パターンによる変動寄与を除外して標準化するため、2次元RZ体系での燃焼計算によって燃料組成変化を評価すると共に3

次元拡散計算によって制御棒挿入効果を含めた出力分布を評価している。燃料交換パターンによる誤差に対する効果として表 4-2 の包絡最大集合体出力に一律 1.5 % を上乘せし、これを最大集合体出力として扱う。また、配分流量は、被覆管温度評価手法の誤差等を考慮し、必要流量に一律 1.5 % を乗じた値で評価する。

前述のように、冷却性能評価上の炉心部出力が 10.4 % 増加したのに対して、炉心部全体の必要流量は 3592 kg/s であり、現行の 3523 kg/s から 2 % の増加に留まっている。これは ODS 鋼製被覆管を採用したことにより被覆管制限温度が 675 °C から 695 ~ 700 °C (「外側炉心の制限 695 °C」の結果は次節に記載) に緩和されたことの反映である。

余裕を考慮した炉心部の配分流量は 3646 kg/s であり、現行設計での 3538 kg/s に比べて 108 kg/s 増加する。しかし、既述の通り径方向ブランケット削除等によって炉心部へは 220 kg/s 程度割譲できるため、冷却材流量配分が成立する見通しである。ここで、炉心部への配分流量の増加は、径方向中性子遮へい体領域に設置された流量調整機構付遮へい体数の調整によって行うため、各部の流力特性 (圧力損失係数等) を考慮の上、冷却材の高圧プレナム、低圧プレナムの圧力条件等の確認を行う必要がある。

また、冷却材の配分流量の余裕 1.5 % に対応して、被覆管最高温度は制限温度に対し内側、外側炉心共に約 4 °C の余裕が確保できる。

ワイヤ巻き付けピッチを現行仕様と同等とした場合に、集合体出力約 5.04 MW に対応する配分流量 20.7 kg/s の条件で、バンドル部圧力損失は約 3.38 kg/cm² (MIT 式) となり、基本仕様のサーベイで述べた 3.3 kg/cm² の目安をやや超えるが、冷却材ポンプ能力の余裕等で吸収し得る程度と考えられる。

また、照射試験燃料の装荷によって出力分布が更に大きく変動する場合でも、炉心部へ配分可能な流量を考慮すると被覆管温度制限を満足し得ると考えられる。

4.1.4 まとめ

実用化像実証炉心は、径方向ブランケットの削除、高燃焼度化に伴う燃焼ミスマッチの増加及び長期運転に伴う制御棒挿入深度の増加に起因する径方向ピーキングの増加により、冷却能力評価上の炉心部出力が増加する特徴がある。しかし、径方向ブランケットの削除は冷却材を炉心部へ割譲可能にするため、この特徴は相殺される。また、ODS 鋼被覆管の採用による被覆管制限温度の緩和により冷却材の必要流量が低減し、この効果で幾分の補償がなされる。

従って本検討では被覆管最高温度はその温度制限を満足し、よって流量配分が成立する見通しである。

今後具体化を進めるため、サブチャンネル解析により詳細な検討が必要である。

4.2 被覆管強度評価

クリープ強度及び短時間強度評価を行い、機械的設計成立性を把握する。

4.2.1 評価方法と検討条件

評価方法は、2.3 節で行った予備的被覆管強度評価と、短時間強度補正係数の取り扱いを除いて全く同じ手続きである。成立目安も被覆管 CDF が 0.5 以下、短時間強度の設計応力比が 1 以下として判断する。表 4-4 に、燃料ピン仕様及び燃焼条件を、表 4-5 及び図 4-1 に被覆管最高温度履歴をそれぞれ示す。

2.3 節では、短時間強度補正係数 (9Cr 系のみ) の計算に適用する温度として、保守的に次の(1)の場合のみで評価した。ここではより合理的に、(2)の場合も評価対象とする。

<通常時の被覆管最高温度>

- (1) 寿命中一定 (現行手法、保守的)
- (2) 段階的に変動

図 4-2 に、強度補正係数設定の概念図を示す。(1)は、左図に示されるように、寿命中最高である初期温度 T_1 を寿命中一定として扱い、右図の T_1 曲線に従って補正係数が減少 (評価強度が減少) する場合である。2.3 節では保守的なこの条件のみで評価した。(2)は、材料状態が環境によって変化する速度はその時の材料の状態 (温度) に依存すると仮定したもので、サイクル毎に変化する最高温度に従い、それぞれの温度に対応する強度補正係数曲線に段階的に移行していくものである。低い温度に対応する曲線は強度低下速度が小さい。

4.2.2 被覆管 CDF 解析結果

内側及び外側炉心の代表燃料ピンに対する被覆管 CDF 解析結果を表 4-6 に示す。

内側炉心の場合には、ODS 鋼の開発目標である「被覆管制限温度 700 °C」に対応する寿命中の被覆管最高温度 700 °C の条件でも、寿命末期までの被覆管 CDF は 9Cr 系 ODS 鋼で 0.49 と成立性目安 0.5 以下を満足している。また、12Cr 系 ODS 鋼では 0.07 であり、十分に目安値を下回っている。

外側炉心の場合、内側炉心に比べて寿命中の被覆管の温度低下率は大きくなり、これは被覆管健全性に有利である。しかし、運転サイクルが内側炉心よりも 1 サイクル長い 5 サイクルであり、このため燃料ピン平均燃焼度が大きい。これにより、寿命中の最高温度を 700 °C とした被覆管温度履歴では、被覆管 CDF は 9Cr 系 ODS 鋼で 0.59、12Cr 系で 0.07 である。9Cr 系では制限目安を超えており、従って被覆管 CDF の成立性確保のため、寿命中の被覆管最高温度を下げる必要がある。最高温度を 695 °C とした時、この被覆管 CDF は 0.36 となり、これは目安を満足する。

4.2.3 短時間強度解析結果

内側炉心及び外側炉心の代表燃料ピンに対する被覆管短時間強度に関する設計応力比の解析結果を表 4-6 に示す。

寿命中の最高温度を 700 °C とした被覆管温度履歴に対して、最も燃料ピン内圧が高くなる寿命末期に過渡事象が発生した場合、9Cr 系 ODS 鋼の場合は内側及び外側炉心ともに設計応力比は 0.8 以下である。一方、12Cr 系の場合、同温度履歴に対して内側及び外側炉心共に設計応力比は 1 を超える。

9Cr 系 ODS 鋼は環境効果による強度低下が認められている。短時間強度補正係数に適用する温度条件として、寿命中一定とした場合と階段状の温度漸減を考慮した場合の強度評価の結果、後者の場合の方が許容応力が高くなるもののその差は 1 kg/mm² 未満であり、設計応力比への影響も僅かである。

4.2.4 まとめ

9Cr 系 ODS 鋼製被覆管を用いた場合、クリープ強度（被覆管 CDF）及び短時間強度（設計応力比）での成立性が確認できた。被覆管制限温度（寿命中の被覆管最高温度）は、短時間強度ではなく、被覆管 CDF の制約によって定められ、内側炉心で 700 °C、外側炉心では基本仕様設定で前提条件とした温度よりも 5 °C 高い 695 °C で設定された。

5. 炉心案総合評価

ODS 鋼の材料強度基準案の改定に伴う実用化像実証炉心の再検討の結果、前報告書で検討した炉心案に比べて運転サイクル期間の約 5 % 短縮、年間燃料交換対数の約 4 % の増加等の影響が認められたが、取出平均燃焼度 150 GWd/t までの高燃焼度化、1 年を超える長期運転サイクル等の実用化像実証炉心で目指した基本性能を確保できる。表 5-1 に炉心案の評価を纏める。

(1) 高速炉実用化像の実証

1 サイクルの日数は 380 日であり、1 年を超える長期運転が可能である。これに伴って稼働率は高い水準を維持し、売電による収入も、年間発電量で比較すると現行炉心より 14 % 増が見込める。

また、高燃焼度化等によって MOX 燃料集合体の年間取替体数は現行炉心に比べてほぼ半減し、更に、バンドル本数の削減 (169 本→127 本) の効果を考慮すると、燃料ピン製造本数は約 4 割にまで低減する。

使用済み燃料の発生量については、径方向ブランケット燃料の削除も合わせて更に大きく低減し、年間の発生体数としては約 1/4 以下まで削減され、保管及び再処理に対する負荷が著しく減免される。

FS において検討されている高内部転換型炉心¹²⁾や当課で提唱している内部増殖炉心燃料¹³⁾は、太径中空燃料を用いて実効燃料体積率を向上させ、炉心特性の改善を図りつつ高燃焼度化させ、経済性を向上させる路線を指向している。

このように原型炉である「もんじゅ」においては炉心規模の制約があるものの、実用化像で想定されている太径中空燃料を適用することで、先行的に大幅な経済性の向上が実証できる。

(2) 照射利用

現行炉心ではその熱的制限から照射試験燃料の受入には制約があるが、本検討炉心では余裕があり、柔軟な対応が可能である。炉心高さの延長により中性子束が低減するが、稼働率の向上によって年間的高速中性子照射量は現行並みの水準が確保できる。

6. 結言

ODS 鋼の材料強度基準案の改訂に伴い、2003 年の報告「『もんじゅ』における実用化像実証炉心の設計検討」を見直した。同時に炉心案は 127 本バンドル炉心に一本化し、核設計手法はその一部を変更した。

改訂された ODS 鋼の強度を用いて被覆管の強度評価を行い、これを基にして被覆管肉厚/外径比等の燃料の基本仕様を決定した。この基本仕様及び「もんじゅ」の条件から核・熱・燃料設計を行った。その結果、炉心は以下のような特徴を持つ。

- ・ 1 年を超える長期運転による高稼働率と、それによる売電収入の増加が見込める。
- ・ 高燃焼度化等によって年間の MOX 燃料集合体の取替体数は現行に比べほぼ半減する。
- ・ この高燃焼度化に加えて径方向ブランケットの削除によって使用済み燃料の発生量は大幅に低減する。
- ・ 実用化段階で想定される「太径中空燃料」を適用することで、炉心規模で先行的に高い経済性を実証できる。
- ・ 熱的余裕によって照射試験燃料の受入が可能であり、年間の高速中性子照射量は現行並みの水準が確保できる。

前報告書の検討に比較して、運転サイクル期間、年間取替体数の面で若干の炉心性能劣化はあるものの、一定の成立の見通しが得られた。

我が国の高速炉の実用化ステップに対して複数のシナリオが検討されているが、「ポストもんじゅ」、実用導入炉、商業炉と段階を追って進める事が基本的な考え方となっている。ここで、本検討で示すように炉心・燃料の分野においては実用化段階での姿を「もんじゅ」においてある程度実証することが可能となる見通しである。ポンプ組込型中間熱交換器等のプラント機器について、大型ナトリウム試験で性能実証することと組み合わせて、「ポストもんじゅ」を「(改造)もんじゅ」で対応することも、重要な選択肢の一つとなると考えられる。

本検討は、このような「もんじゅ」の将来利用構想を具体化するための一助として実施したものであり、核・熱・燃料設計の分野の主要な項目での成立性を見通しを把握したものの、CDA を含む事故時の成立性確認については未実施である。本炉心案の具体的な成立性については、今後とも検討を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) 前田 誠一郎, 富樫 信仁, 樋口 真史, 高野 光弘, 安部 智之: “「もんじゅ」における実用化像実証炉心の設計検討”, JNC TN8400 2003-028 (2003).
- 2) 皆藤 威二, 大塚 智史: 私信
- 3) 皆藤 威二, 水田 俊治, 上羽 智之, 大塚 智史, 鶴飼 重治: “ODS フェライト鋼被覆管の材料強度基準 (暫定案)”, JNC TN9400-2005-015 (2005).
- 4) Shin-Kuei Cheng and Neil E. Todreas: “Hydrodynamic models and correlations for bare and wire-wrapped hexagonal rod bundles—bundle friction factors, subchannel friction factors and mixing parameters”, Nucl. Eng. & Design, **92**, p.227 (1986).
- 5) T. B. Fowler, D. R. Vondy and G. W. Cunningham: “Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION”, ORNL-TM-2496, Rev.2, Oak Ridge National Laboratory (1971).
- 6) 千葉 豪, 沼田 一幸: “JENDL-3.2 に基づく高速炉用炉定数 JFS-3-J3.2R の作成”, JNC TN9400 2001-124 (2002)
- 7) R. D. Lawrence: “THE DIF3D NODAL NEUTRONICS OPTION FOR TWO-AND THREE-DIMENSIONAL DIFFUSION THEORY CALCULATIONS IN HEXAGONAL GEOMETRY”, ANL-83-1, Argonne National Laboratory (1983).
- 8) K. D. Lathrop and F. W. Brinkley: “TWOTRAN-II: An Interfaced, Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport”, LA-4848-MS, Los Alamos Scientific Laboratory (1973).
- 9) 飯島 進, 吉田 弘幸, 桜木 廣隆: “高速炉設計用計算プログラム・2 (2次元・3次元拡散摂動理論計算コード:PERKY)”, JAERI-M 6993 (1977).
- 10) 羽様 平, 千葉 豪, 沼田 一幸, 佐藤 若英: “高速炉用統合炉定数 ADJ2000R の作成”, JNC TN9400 2002-064 (2002).
- 11) T. Abe, H. Takashita and H. Hayashi: “A Conceptual Design Study of Monju Advanced Core for the Realization of Efficient Pu utilization in the Future”, Proc. Int. Conf. on Future Nuclear Systems GLOBAL'97, Yokohama, Japan, Vol.2, p.1080 (1997).
- 12) 永沼 正行, 杉野 和輝, 相田 達也, 小川 隆, 水野 朋保: “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—”, JNC TN9400 2005-051 (2005).
- 13) 前田 誠一郎, 高下 浩文, 大川 剛, 樋口 真史, 安部 智之: “太径中空燃料を用いた内部増殖炉心概念の設計研究”, JNC TN8400 2003-019 (2003).

表2-1 予備的被覆管強度評価における燃料ピン仕様及び燃焼条件

項目	単位	値	公差	
炉心ペレット	外径	mm	6.67	±0.05
	内径	mm	2.00	±0.20
	密度	%TD	95.0	±2.0
	O/M	—	1.97	+0.02 -0.03
	蒸発性不純物量	μl/g	180	-
	炉心燃料長さ	mm	1100	±5
	燃料重量	g	391	-
軸ブラペレット	直径	mm	6.67	±0.05
	密度	%TD	95.0	±2.0
	O/U	—	2.00	-
	蒸発性不純物量	μl/g	50	-
	軸ブラ長さ 上部/下部(公差=上+下)	mm	100/100	±4
	燃料重量	g	77	-
燃料ピン	被覆管外径	mm	7.90	±0.04
	被覆管内径	mm	6.84	±0.04
	被覆管肉厚	mm	0.53	±0.04
	プレナム長さ(上部/下部)	mm	1190/220	-
	実効プレナム体積(上部/下部)	cm ³	38.6/8.0	-
燃焼条件	運転サイクル期間	EFPD	400	-
	サイクル数(内/外側炉心)	—	4/5	-
	燃料ピン平均燃焼度(内/外)	GWd/t	162/192	-
	軸ブラ燃焼度(内/外)	GWd/t	27/23	-
	冷却材入口温度	℃	397	-
	冷却材圧力	kg/mm ²	0.015	-

表2-2 予備的被覆管強度評価におけるCDF評価用の被覆管最高温度履歴

流量領域	被覆管最高温度(℃)(初期/末期)					
	第1サイクル	第2サイクル	第3サイクル	第4サイクル	第5サイクル	
内側炉心	第1	685/700	661/679	643/663	630/649	—
	第2	695/700	672/680	654/664	640/652	—
	第3	700/698	677/679	659/663	645/651	—
	第4	700/696	678/678	661/663	648/651	—
	第5	700/688	680/672	664/658	651/647	—
	内側包絡	700/700	680/680	664/664	652/652	—
外側炉心	第6	690/666	664/645	644/628	627/614	613/602
	第7	690/666	669/649	652/634	637/622	625/611
	第8	690/677	669/659	652/643	637/630	625/619
	外側包絡	690/690	670/670	655/655	640/640	625/625

表2-3 被覆管(ODS鋼)の設計用物性値 (1/2)

物性	物性値の算出式
被覆管内面腐食 (FP腐食量)	<p>燃料ペレットに接面する被覆材では、その内面に次の計算式により定める腐食代C_{FP} (μm)をとる</p> <p>1) $0 < B \leq B_0$ $C_{FP} = 35$</p> <p>2) $B_0 < B \leq B_1$ $C_{FP} = K_1(B - B_0) - (K_1/K_2)[1 - \exp\{-K_2(B - B_0)\}] + 35$</p> <p>3) $B_1 < B$ $C_{FP} = K_1(B_1 - B_0) - (K_1/K_2)[1 - \exp\{-K_2(B - B_0)\}] + 35$</p> <p>$B$ = 局所燃焼度(MWd/t) B_0 = 9000 (MWd/t) B_1 = 57500 (MWd/t) T = 被覆管内面温度(K) $K_1 = 1.363 \times 10^{-3}$ $K_2 = 7.676 \times 10^8 \exp(-E/RT)$ $E = 47000$(cal/mol) $R = 1.987$(cal/mol·K)</p> <p><u>適用範囲</u> 温度: 480~700°C 燃焼度: 最大160000 (MWd/t)</p>
被覆管外面腐食 (ナトリウム腐食量)	<p>液体ナトリウムに接面する部材では、評価計算式により定める腐食代C_{NA} (μm)をとる</p> $C_{NA} = [C_{R1} + C_{R2} \times ti] \cdot O_{Xi}$ <p>C_{R1}は接液面温度T_i、酸素濃度O_{Xi}における初期腐食量 (μm) C_{R2}は接液面温度T_i、酸素濃度O_{Xi}に対して定める定常腐食量 ($\mu m/h$) tiは接液面温度T_i、酸素濃度O_{Xi}における使用時間(h) O_{Xi}は酸素濃度(ppm) C_{R1}およびC_{R2}は次の式で定める</p> $\log_{10} C_{R1} = 9.078 - 8.251 \times 10^3 / (T_i + 273.15)$ $C_{R2} = 4.1667 \times 10^4 \cdot \exp[-1.758 \times 10^4 / (T_i + 273.15)]$ <p>T_i: 接液面温度(°C)</p> <p><u>適用範囲</u> T_i: 400~650°C O_{Xi}: 5ppm以下</p>

注) 被覆管内面腐食評価式はPNC1520鋼に対して作成されたものを燃焼度を外挿して適用
 高速炉炉心構成要素用 改良オーステナイト鋼(PNC1520)材料強度基準(案)1992年4月 PNC ZN9410 92-112
 被覆管外面腐食評価式はPNC-FMS鋼に対して作成されたものを温度を外挿して適用
 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)1992年4月 PNC ZN9410 92-110

表2-3 被覆管(ODS鋼)の設計用物性値 (2/2)

物 性	物性値の算出式
設計引張応力強さ Su	<p><9Cr系></p> $Su=1125-1.307T+4.468 \times 10^{-3}T^2-1.036 \times 10^{-5}T^3+6.201 \times 10^{-9}T^4$ <p><12Cr系></p> $Su=913.0-1.053T+3.990 \times 10^{-3}T^2-1.012 \times 10^{-5}T^3+6.437 \times 10^{-9}T^4$ <p>Su: 設計引張強さ(MPa) T: 温度(°C)</p>
設計降伏点 Sy	<p><9Cr系></p> $Sy=977.0-1.910T+7.818 \times 10^{-3}T^2-1.576 \times 10^{-5}T^3+9.066 \times 10^{-9}T^4$ <p><12Cr系></p> $Sy=828.8-1.497T+6.325 \times 10^{-3}T^2-1.366 \times 10^{-5}T^3+8.218 \times 10^{-9}T^4$ <p>Sy: 設計引張強さ(MPa) T: 温度(°C)</p>
短時間強度補正係数 γ	<p><9Cr系のみ></p> $\gamma_{sy}=3.959-1.934 \times 10^{-1}(LMP)+2.267 \times 10^{-3}(LMP)^2$ $LMP=(T+273.15)(\log_{10}t+17.885)/1000$ $\gamma_{su}=4.297-2.596 \times 10^{-1}(LMP)+4.664 \times 10^{-3}(LMP)^2$ $LMP=(T+273.15)(\log_{10}t+17.670)/1000$ <p>T: 温度[°C] t: 時間[hr]</p> <p>適用範囲 $\gamma_{sy} \leq 1.0$、$\gamma_{su} \leq 1.0$、$t \leq 30000$、$RT \leq T \leq 750$</p>
設計クリープ破断応力強さ S_R	<p><9Cr系></p> $LMP=(T+273.15)(21.94+\log_{10}(3 \cdot t_R)) \times 10^{-3}$ $=45.37-9.943 \log_{10} S_R$ <p><12Cr系></p> $LMP=(T+273.15)(37.47+\log_{10}(7 \cdot t_R)) \times 10^{-3}$ $=60.74-9.839 \log_{10} S_R$ <p>S_R: 設計クリープ破断応力強さ(MPa) T: 温度(°C) t_R: 破断時間(h)</p>

※ ODSフェライト鋼被覆管の材料強度基準(暫定案), JNC TN9400 2005-015 (2005).

表2-4 予備的被覆管強度評価におけるCDF評価結果

		内側炉心			外側炉心				
燃焼期間	(day)	1600	←	←	2000	←	←		
平均燃焼度	(GWd/t)	162	←	←	192	←	←		
被覆管 温度を パラメ ータ化	被覆管最高温度履歴 寿命初期/末期	(°C)	700/652	685/640	680/635	690/625	675/615	670/610	
	肉厚	(mm)	0.53	←	←	←	←	←	
	ペレット外径	(mm)	6.67	←	←	←	←	←	
	スミア密度	(%TD)	82.2	←	←	←	←	←	
	実効燃料体積率	(%)	33.2	←	←	←	←	←	
	t*/D	(-)	0.047	←	←	←	←	←	
	Na腐食量	(mm)	0.046	0.036	0.032	0.040	0.030	0.027	
	FP腐食量	(mm)	0.1	←	←	←	←	←	
	残留肉厚	(mm)	0.344	0.354	0.358	0.350	0.360	0.363	
	蒸発性不純物ガス量	(mol)	0.005	←	←	←	←	←	
	FPガス量	(mol)	0.068	←	←	0.08	←	←	
	内圧	(kg/mm ²)	1.14	1.13	1.12	1.30	1.29	1.29	
	応力	(kg/mm ²)	12.1	11.7	11.5	13.7	13.2	13.0	
	CDF								
		9Cr系	(-)	1.88	0.58	0.36	1.64	0.51	0.32
		12Cr系	(-)	0.22	0.04	0.02	0.07	0.01	6.3E-03
	被覆管 肉厚を パラメ ータ化	被覆管最高温度履歴 寿命初期/末期	(°C)	700/652	←	←	690/625	←	←
肉厚		(mm)	0.53	0.57	0.58	0.53	0.56	0.57	
ペレット外径		(mm)	6.67	6.59	6.57	6.67	6.61	6.59	
スミア密度		(%TD)	82.2	82.0	81.9	82.2	82.0	82.0	
実効燃料体積率		(%)	33.2	32.3	32.1	33.2	32.5	32.3	
t*/D		(-)	0.047	0.052	0.053	0.047	0.051	0.052	
Na腐食量		(mm)	0.046	0.046	0.046	0.040	0.040	0.040	
FP腐食量		(mm)	0.100	←	←	←	←	←	
残留肉厚		(mm)	0.344	0.384	0.394	0.350	0.380	0.390	
蒸発性不純物ガス量		(mol)	0.005	←	←	←	←	←	
FPガス量		(mol)	0.068	0.066	0.066	0.080	0.079	0.078	
内圧		(kg/mm ²)	1.14	1.14	1.14	1.30	1.30	1.30	
応力		(kg/mm ²)	12.1	10.8	10.5	13.7	12.5	12.2	
CDF									
		9Cr系	(-)	1.88	0.54	0.40	1.64	0.63	0.46
		12Cr系	(-)	0.22	0.07	0.05	0.07	0.03	0.02

表2-5 予備的被覆管強度評価における短時間強度解析結果

		内側炉心			外側炉心				
平均燃焼度	(GWd/t)	162	←	←	192	←	←		
被覆管最高温度履歴	寿命初期/末期 (°C)	700/652	675/635	670/630	690/625	675/615	670/610		
被覆管温度をパラメータ化	肉厚	(mm)	0.53	←	←	←	←	←	
	ペレット外径	(mm)	6.67	←	←	←	←	←	
	スミア密度	(%TD)	82.2	←	←	←	←	←	
	t*/D	(-)	0.047	←	←	←	←	←	
	寿命末期 定格時	内圧	(kg/mm ²)	1.14	1.1	1.1	1.30	1.29	1.29
		応力	(kg/mm ²)	12.1	11.4	11.3	13.7	13.2	13.0
	寿命末期 過渡時	被覆管温度	(°C)	704	683.8	677.8	672	660	654
		内圧	(kg/mm ²)	1.19	1.2	1.2	1.36	1.34	1.34
		応力	(kg/mm ²)	12.7	11.9	11.8	14.3	13.7	13.6
	9Cr系	引張強さ	(kg/mm ²)	33.4	37.1	38.2	39.3	41.5	42.7
		降伏点	(kg/mm ²)	23.9	27.5	28.6	29.6	31.8	32.9
	12Cr系	引張強さ	(kg/mm ²)	20.3	23.5	24.5	25.4	27.4	28.4
		降伏点	(kg/mm ²)	16.5	19.6	20.5	21.4	23.3	24.3
	設計応力比 (過渡時)	9Cr系	(-)	0.85	0.69	0.66	0.79	0.70	0.67
12Cr系		(-)	1.26	1.02	0.97	1.13	1.01	0.97	
被覆管肉厚をパラメータ化	被覆管最高温度履歴	寿命初期/末期 (°C)	700/652	←	←	690/625	←	←	
	肉厚	(mm)	0.53	0.61	0.62	0.53	0.57	0.58	
	ペレット外径	(mm)	6.67	6.51	6.49	6.67	6.59	6.57	
	スミア密度	(%TD)	82.2	81.7	81.6	82.2	82.0	81.9	
	t*/D	(-)	0.047	0.057	0.058	0.047	0.052	0.053	
	寿命末期 定格時	内圧	(kg/mm ²)	1.14	1.13	1.13	1.30	1.30	1.30
		応力	(kg/mm ²)	12.1	9.7	9.5	13.7	12.2	11.9
	寿命末期 過渡時	被覆管温度	(°C)	704	←	←	672	←	←
		内圧	(kg/mm ²)	1.19	1.19	1.18	1.36	1.35	1.35
		応力	(kg/mm ²)	12.7	10.1	9.9	14.3	12.70	12.40
	9Cr系	引張強さ	(kg/mm ²)	33.4	←	←	39.3	←	←
		降伏点	(kg/mm ²)	23.9	←	←	29.6	←	←
	12Cr系	引張強さ	(kg/mm ²)	20.3	←	←	25.4	←	←
		降伏点	(kg/mm ²)	16.5	←	←	21.4	←	←
設計応力比 (過渡時)	9Cr系	(-)	0.85	0.68	0.66	0.79	0.70	0.68	
	12Cr系	(-)	1.26	1.01	0.98	1.13	1.01	0.98	

表2-7 実用化像実証炉心案の基本仕様

熱出力	(MWt)	714
冷却材温度(入口/出口)	(°C)	397/529
運転サイクル期間	(EFPD)	380
燃料交換バッチ数(内/外)		4/5
集合体配列ピッチ	(mm)	115.6
炉心等価直径(炉心部)	(m)	1.79
炉心高さ	(cm)	110
炉心平均出力密度	(W/cc)	275
炉心平均線出力	(W/cm)	250
軸ブラ長さ(上/下)	(cm)	10/10
プレナム長さ(上/下)	(cm)	119/22
ラップ管材質		PNC-FMS鋼
ラップ管内対面間距離	(mm)	106.1
燃料ピン本数	(本)	127
被覆管外径	(mm)	7.85
被覆管肉厚	(mm)	0.58
被覆管内径	(mm)	6.69
被覆管-ペレット直径ギャップ	(mm)	0.17
ペレット外径	(mm)	6.52
ペレット内径	(mm)	2.00
ワイヤ径	(mm)	1.29
ワイヤ巻き付けピッチ	(mm)	307
ペレット密度	(%T.D.)	95
スミア密度	(%T.D.)	81.7
実効燃料体積率	(%)	31.5
Pu同位体組成		内側:軽水炉取出* 外側:PWRのみを再処理した組成

* $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{241}\text{Am}=3/52/27/9.5/7/1.5$ (wt%)

表3-1 核設計手法の変更点

項目	内容	効果
核反応当たりの放出エネルギー	2次元燃焼計算及び3次元拡散計算で用いる核分裂当たりの放出エネルギーに関して、両者の整合性を確保	燃焼特性及び空間分布のより妥当な評価が可能
燃焼チェーン	^{241}Am の中性子捕獲反応による $^{242\text{m}}\text{Am}$ 、 ^{242}Am への分岐比について、常陽の試験結果に基づく知見 ^{*1} の適用 ^{238}U の(n,2n)反応による ^{237}Np への変換割合 ^{*2} を決定する断面積を、ENDF/B-IVのFBRライブラリからJFS-3-J3.2Rの値に変更	新しい知見の反映
燃焼組成計算における制御棒挿入状態	全引き抜きに相当する「Naフォロー状態」から、制御棒挿入状態へ変更	燃焼組成分布の模擬性の向上
内側/外側炉心のPu富化度調整	従来は、燃焼反応度相当の制御棒挿入状態において、内側及び外側炉心の最大線出力が均衡するように富化度を設定。これを、想定した制御棒運用の範囲内で可能な限り均衡を保持する方策に変更	制御棒運用法の想定範囲からの逸脱があっても、最大線出力の制限値内を保証
3次元拡散計算で用いる中性子エネルギーの縮約群数	7群から18群に変更	解析精度の向上
空間分布評価における制御棒挿入パターン	制御棒チャンネルのNaフォロー状態を評価対象から除外 計画通りの運転が出来なかった場合を想定した粗調整棒挿入量を、従来の $-1\% \Delta k/k'$ から燃焼反応度の半分相当に変更	通常の運転状態からは乖離した状態を除外することによる合理化 保守性の向上

*1 大木：“高速実験炉「常陽」を用いたサンプル照射試験によるMA核データの検証(1)- ^{243}Am サンプル(試料番号77)の予備解析”, JNC TN9400 2004-002 (2004).

*2 燃焼計算(CITATION)では(n,2n)反応を取り扱えないため、 ^{238}U の核分裂の一部が ^{237}Np になるとして取り扱っている

表3-2 空間分布評価時の制御棒位置

	[cm]		
	粗調整棒 (CCR)	微調整棒 (FCR)	後備炉停止棒 (BCR)
制御棒引抜き位置	-15	-15	-15
運転余裕+バイト分の反応度 ^{*1} をFCRで抑制	-15	17.5	-15
平衡サイクル初期			
① 燃焼反応度の約半分をCCRで抑制 (FCRが挿入された状態に対する)	39.6	17.5	-15
② 燃焼反応度分をCCRで抑制 ^{*2} (FCRが挿入された状態に対する)	60.6	17.5	-15
③ 燃焼反応度+ $1\% \Delta k/k'$ をCCRで抑制 (FCRが挿入された状態に対する)	67.1	17.5	-15
平衡サイクル末期			
④ CCRを引抜き位置とする (FCRは挿入された状態とする)	-15	17.5	-15
⑤ $1\% \Delta k/k'$ をCCRで抑制 (FCRが挿入された状態に対する)	17.0	17.5	-15

・炉心部上端に対する制御棒の B_4C ペレットスタック部の下端位置で示す。正值は挿入深度、負値は引抜き高さを示す。

*1 運転余裕+バイト分の反応度は平衡サイクル初期で $0.3\% \Delta k/k'$ とする。バイト分の反応度は微調整棒による微小な負荷変動追随制御するために必要な制御棒のある程度の挿入を補償するもの

*2 最大線出力評価用の制御棒挿入パターン

表3-3 主要核特性

主要仕様	「もんじゅ」現設計-高燃 (平衡炉心)	「もんじゅ」実用化像実証炉心	実用化炉心案*1 (高内外部転換型)	
			中型炉	大型炉
炉出力 [MWth]	714	←	1785	3750
運転サイクル長さ [日]	148	380	794	800
炉心等価直径 [m]	1.79	←	3.83	5.38
燃料集合体体数 (内側/外側/径ブラ)	108 / 90 / 174	108 / 90 / -	157 / 129 / -	288 / 274 / -
制御棒本数	10 / 3 / 6 (粗調整/微調整/後備)	←	21 / 6 (主系/後備系)	40 / 17 (主系/後備系)
燃料交換パッチ数 (内側/外側/径ブラ)	5 / 5 / 5	4 / 5 / -	4 / 4 / -	4 / 4 / -
軸ブラ高さ [cm] (上部/下部)	30 / 35	10 / 10	20 / 25	15 / 20
炉心高さ [cm]	93	110	100	100
燃料ピン本数	169	127	255	255
燃料ピン外径 [mm]	6.50	7.85	10.40	10.40
ペレット密度 [%TD]	85	95	—	—
ペレットスミア密度 [%]	80.2	81.7	82.0	82.0
実効燃料体積率 [%]	28.4	31.5	35.9	36.0
Pu同位体組成*2 (内側/外側)	設計 / 設計	標準 / PWR45	FBR多重/FBR多重	←
Pu富化度*3 [wt%] (内側/外側)	22.4 / 29.9	25.1 / 32.7 24.7 / 32.2	18.7 / 21.6 18.3 / 21.1	18.9 / 24.0 18.5 / 23.5
核データライブラリ	MICS-5.2	JFS-3-J3.2R	ADJ2000R	←
主要核特性				
燃焼反応度 [%Δk/kk']	約 2.5	5.94	2.60	2.50
取出平均燃焼度 [GWd/t]				
炉心部	約80	151	146	150
炉心部+ブランケット部	22	132	104	115
炉心平均出力密度 [W/CC]	302	277	146	148
最大集合体出力 [MW]	4.73	4.97	N.A.	N.A.
最大線出力*4 [W/cm]				
内側炉心	350	447*5	427	411
外側炉心	350	443*5	407	408
サイクル平均出力分担率 [%]				
炉心部	90.0	97.9	94.1	94.4
軸方向ブランケット部	3.9	2.1	5.9	5.6
径方向ブランケット部	6.1	—	—	—
最大高速中性子束*4 [10 ¹⁵ n/cm ² ·s]	3.6	3.11	1.9	1.8
最大高速中性子照射量*4 [10 ²³ n/cm ²]	N.A.	3.97、	5.3	4.9
サイクル平均増殖比				
炉心部	0.57	0.65	0.82	0.85
軸方向ブランケット部	0.19	0.06	0.21	0.18
径方向ブランケット部	0.36	—	—	—
合計	1.13	0.71	1.03	1.03
炉内核分裂性Pu重量 [t]				
平衡サイクル初期	N.A.	1.24	N.A.	N.A.
平衡サイクル末期	N.A.	1.15	N.A.	N.A.
平衡末期Naボイド反応度 [β]				
炉心部	N.A.	4.71	5.0	5.3
炉心部～上部プレナム部	N.A.	4.20	N.A.	N.A.

*1 永沼ら、「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―」, JNC TN9400 2005-051 (2005).

*2 設計組成 [wt%]

$^{238}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu} / ^{240}\text{Pu} / ^{241}\text{Pu} / ^{242}\text{Pu} / ^{241}\text{Am} = 0.0 / 58.0 / 24.0 / 14.0 / 4.0 / 0.0$
 標準組成 (BWR取出し45GWd/t + PWR取出し45GWd/t, BWR:PWR=6:4, 炉外サイクル10年)
 $^{238}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu} / ^{240}\text{Pu} / ^{241}\text{Pu} / ^{242}\text{Pu} / ^{241}\text{Am} = 3.0 / 52.0 / 27.0 / 9.5 / 7.0 / 1.5$
 PWR45 (PWR取出し45GWd/t, 炉外サイクル10年)
 $^{238}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu} / ^{240}\text{Pu} / ^{241}\text{Pu} / ^{242}\text{Pu} / ^{241}\text{Am} = 2.1 / 56.2 / 24.1 / 9.6 / 6.5 / 1.5$
 FBR多重 (FBR多重炉心TRU組成 + 随伴FP2vol組成)
 $^{238}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu} / ^{240}\text{Pu} / ^{241}\text{Pu} / ^{242}\text{Pu} / ^{241}\text{Am} / ^{242m}\text{Am} / ^{242}\text{Am} / ^{243}\text{Am} / ^{243}\text{Cm} / ^{244}\text{Cm} / ^{248}\text{Cm} / ^{237}\text{Np} = 1.1 / 54.1 / 32.1 / 4.3 / 3.9 / 2.0 / 0.0 / 0.0 / 1.0 / 0.0 / 0.0 / 1.0 / 0.0 / 0.5$

*3 上段は(Pu+²⁴¹Am)/HM、下段はPu/HM

*4 実用化像実証炉心の値は3次元解析結果に基づく燃料ペレット相当レベルの評価

*5 軸方向のびとして1.2%、ラップ管発熱割合として0.7%を考慮

表3-4 最大燃焼度*1

<炉心部>										
炉心区分	流量領域	集集体 平均燃焼度 (GWd/t)	集集体No.	燃料ピン 平均燃焼度 (GWd/t)	集集体No.	ピンNo.	ペレット相当 燃焼度 (GWd/t)	集集体No.	ピンNo.	発生位置*2 (cm)
内側炉心	第1層	<u>164.3</u>	6	164.7	6	125	<u>204.3</u>	7	116	50.0~52.0
	第2層	164.1	17	<u>164.8</u>	17	105	203.8	19	110	50.0~52.0
	第3層	160.8	34	163.5	34	110	200.1	37	110	50.0~52.0
	第4層	155.6	56	160.7	56	104	196.2	56	104	50.0~52.0
	第5層	146.8	85	152.3	85	104	187.3	84	104	50.0~52.0
	第6層	138.2	120	144.9	120	104	175.5	120	104	50.0~52.0
外側炉心	第7層	<u>179.7</u>	160	<u>194.9</u>	161	104	<u>232.1</u>	161	104	50.0~52.0
	第8層	153.2	207	172.5	207	104	205.8	207	104	46.2~49.4
		147.4	205	163.4	205	104	196.9	205	104	50.0~52.0

<軸方向ブランケット部>						
炉心区分	流量領域	集集体 平均燃焼度 (GWd/t)	集集体No.	燃料ピン 平均燃焼度 (GWd/t)	集集体No.	ピンNo.
内側炉心	第1層	<u>27.7</u>	6	23.4	6	125
	第2層	27.3	17	<u>23.9</u>	17	118
	第3層	26.4	34	23.4	34	110
	第4層	25.0	56	22.4	56	104
	第5層	22.7	85	19.9	85	104
	第6層	20.2	120	18.6	120	104
外側炉心	第7層	<u>23.1</u>	160	<u>21.0</u>	161	104
	第8層	19.1	207	17.6	207	104
		18.6	205	17.0	205	104

<炉心部+軸ブラ部>			
炉心区分	流量領域	集集体 平均燃焼度 (GWd/t)	集集体No.
内側炉心	第1層	<u>144.5</u>	6
	第2層	144.2	17
	第3層	141.3	34
	第4層	136.6	56
	第5層	128.7	85
	第6層	121.0	120
外側炉心	第7層	<u>157.0</u>	160
	第8層	133.8	207
		128.8	205

※理論上、本検討炉心では中心軸に関して完全な3回回転対称性を持つが、計算機内部での非対称性のために、6, 17, 34...等の最大燃焼度集集体No.及び125, 105, 110...等のピンNo.が決定する。したがって結果は、120°及び240°回転位置にある集集体及び対応する燃料ピンと全く同値であることに注意。

*1 二重下線は内側あるいは外側炉心での最大値

*2 炉心部下端からの高さで示す

表3-5 最大線出力

炉心区分	流量領域	[W/cm]					
		平衡サイクル初期*			平衡サイクル末期		
		CCR挿入パターン①	②	③	④	⑤	
内側炉心	第1層	第1	447 (6, 44.5)	419 (6, 41.5)	404 (6, 37.5)	416 (7, 63.5)	418 (7, 53.5)
			443 (17, 47.8)	419 (17, 41.5)	406 (17, 41.5)	409 (17, 63.5)	412 (17, 57.5)
	第2層	第2	433 (34, 47.8)	417 (34, 41.5)	405 (34, 41.5)	400 (34, 63.5)	404 (34, 57.5)
			423 (56, 47.8)	413 (56, 41.5)	403 (56, 41.5)	389 (56, 63.5)	394 (56, 57.5)
	第3層	第3	400 (84, 47.8)	395 (85, 41.5)	389 (85, 41.5)	366 (85, 63.5)	372 (84, 57.5)
			374 (120, 47.8)	373 (120, 44.5)	369 (120, 41.5)	342 (120, 63.5)	349 (120, 57.5)
	第4層	第4	440 (160, 47.8)	443 (160, 41.5)	442 (161, 44.5)	388 (159, 63.5)	397 (159, 57.5)
			370 (206, 47.8)	379 (207, 44.5)	380 (207, 44.5)	330 (206, 63.5)	339 (206, 57.5)
外側炉心	第7	第7	364 (205, 47.8)	366 (205, 41.5)	359 (205, 41.5)	325 (205, 63.5)	334 (205, 57.5)
			364 (205, 47.8)	366 (205, 41.5)	359 (205, 41.5)	325 (205, 63.5)	334 (205, 57.5)

- ・表3-4の脚注(※)参照
 - ・軸方向伸び(1.2%)及びラップ管発熱割合(0.6%)を考慮
 - ・二重下線は平衡サイクル初期及び末期において内側と外側炉心各々での最大値
 - ・()内は最大線出力発生位置を“(集合体番号, 炉心部下端からの高さ(cm))”で表す
- CCR挿入パターン
- ①: 燃焼反応度の約半分をCCRで抑制(炉心部上端から39.6 cm挿入)
 - ②: 燃焼反応度をCCRで抑制(炉心上端から60.7 cm挿入)
 - ③: 燃焼反応度+1%Δk/kk'分をCCRで抑制(炉心上端から67.2 cm挿入)
 - ④: 引き抜き位置
 - ⑤: 1%Δk/kk'をCCRで抑制

表3-6 最大集合体出力

炉心区分	流量領域	平衡サイクル初期				平衡サイクル末期				包絡出力		
		CCR挿入パターン①		③		④		⑤		集合体出力 [MW]	ピーキング係数 [-]	
		集合体出力 [MW]	ピーキング係数 [-]									
内側炉心	第1層	第1	4.68 (6)	1.010	4.19 (6)	1.030	4.97 (7)	1.009	4.84 (6)	1.001	4.97	1.009
			4.75 (17)	1.004	4.44 (17)	1.015	4.87 (17)	1.006	4.81 (17)	1.004		
	第2層	第2	4.67 (34)	1.009	4.46 (34)	1.009	4.73 (34)	1.012	4.69 (34)	1.011	4.73	1.012
			4.55 (56)	1.018	4.45 (56)	1.013	4.53 (56)	1.021	4.52 (56)	1.020		
	第3層	第3	4.28 (85)	1.020	4.26 (85)	1.018	4.23 (85)	1.020	4.24 (85)	1.020	4.28	1.020
			3.97 (120)	1.029	4.05 (120)	1.025	3.89 (120)	1.033	3.91 (120)	1.031		
	第4層	第4	4.49 (160)	1.047	4.69 (161)	1.044	4.26 (159)	1.052	4.29 (160)	1.048	4.69	1.044
			3.68 (207)	1.058	3.88 (207)	1.055	3.51 (206)	1.057	3.55 (206)	1.057		
外側炉心	第7	第7	3.57 (205)	1.055	3.66 (205)	1.047	3.44 (205)	1.063	3.47 (205)	1.060	3.66	1.047
			3.57 (205)	1.055	3.66 (205)	1.047	3.44 (205)	1.063	3.47 (205)	1.060		

- ・表3-4の脚注(※)参照
 - ・ピーキング係数は、集合体が6体の正三角柱に分割した時の各三角柱の出力に対する値
 - ・二重下線は運転サイクル時期及びCCR挿入ケースを包絡した値
 - ・()内は表中の出力が発生した集合体の集合体No.
- CCR挿入パターン
- ①: 燃焼反応度の約半分をCCRで抑制(炉心部上端から39.6 cm挿入)
 - ③: 燃焼反応度+1%Δk/kk'分をCCRで抑制(炉心上端から67.2 cm挿入)
 - ④: 引き抜き位置
 - ⑤: 1%Δk/kk'をCCRで抑制

表3-7 集合体出力履歴

炉心区分	流量領域	集合体出力 [MW]										出力低下比* [-]
		1サイクル		2サイクル		3サイクル		4サイクル		5サイクル		
		初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	
内側炉心	第1層	4.68	4.97	4.29	4.63	4.00	4.36	3.77	4.15	—	—	0.16
	第2層	4.75	4.87	4.36	4.54	4.07	4.28	3.84	4.07	—	—	0.16
	第3層	4.67	4.73	4.30	4.42	4.02	4.17	3.80	3.97	—	—	0.16
	第4層	4.55	4.53	4.20	4.23	3.93	4.00	3.71	3.81	—	—	0.16
	第5層	4.28	4.24	3.96	3.98	3.72	3.77	3.52	3.59	—	—	0.16
	第6層	4.05	3.91	3.78	3.69	3.56	3.50	3.38	3.34	—	—	0.16
外側炉心	第7層	4.69	4.29	4.25	3.93	3.89	3.63	3.61	3.39	3.37	3.19	0.28
	第8層	3.88	3.55	3.58	3.30	3.33	3.08	3.12	2.91	2.95	2.76	0.24
		3.66	3.47	3.37	3.22	3.14	3.02	2.94	2.84	2.78	2.70	0.24

* 出力低下比 = (第1サイクルの最大出力 - 最終サイクルの最大出力) / (第1サイクルの最大出力)

表3-8 最大高速中性子束^{*1}

炉心区分	流量領域	集合体断面平均			ペレット相当			
		高速中性子束 ($\times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$)	集合体No.	発生位置 ^{*4} (cm)	高速中性子束 ($\times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$)	集合体No.	燃料ピンNo.	発生位置 ^{*4} (cm)
内側炉心	第1層	<u>3.10</u>	7	53.5	3.11	7	20	53.5
	第2層	3.06	17	53.5	<u>3.11</u>	17	116	53.5
	第3層	2.97	34	53.5	3.03	34	116	53.5
	第4層	2.86	56	53.5	2.93	57	116	53.5
	第5層	2.70	85	53.5	2.81	84	116	53.5
	第6層	2.53	120	41.5	2.62	119	116	53.5
外側炉心	第7層	<u>2.32</u>	161	41.5	<u>2.48</u>	161	116	41.5
	第8層	1.80	207	44.5	2.16	207	116	41.5
		1.72	205	37.5	2.04	205	116	37.5

・表3-4の脚注(※)参照

*1 高速中性子: 0.1 MeV以上

*2 平衡サイクル時期及びCCR挿入ケースを包絡した最大値

*3 炉心部下端からの高さ

*4 二重下線は各着目レベルでの内側炉心及び外側炉心の最大値

表3-9 最大高速中性子照射量^{*1}

炉心区分	流量領域	集合体断面平均			ペレット相当			
		高速中性子照射量 ($\times 10^{23} \text{ n/cm}^2$)	集合体No.	発生位置 ^{*4} (cm)	高速中性子照射量 ($\times 10^{23} \text{ n/cm}^2$)	集合体No.	燃料ピンNo.	発生位置 ^{*4} (cm)
内側炉心	第1層	<u>3.96</u>	6	47.8	3.97	2	20	47.8
	第2層	3.90	17	49.7	<u>3.97</u>	17	116	47.8
	第3層	3.80	34	49.7	3.87	34	116	49.7
	第4層	3.67	56	51.0	3.75	57	116	49.7
	第5層	3.47	85	44.5	3.60	84	116	51.0
	第6層	3.28	120	47.8	3.36	119	116	51.0
外側炉心	第7層	<u>3.69</u>	160	44.5	<u>3.97</u>	160	116	44.5
	第8層	2.85	207	47.8	3.43	207	116	47.8
		2.75	205	44.5	3.26	205	116	44.5

・表3-4の脚注(※)参照

*1 高速中性子: 0.1 MeV以上

*2 2種類の平衡サイクル初期及び末期のCCR挿入ケースの組み合わせを包絡した最大値

*3 炉心部下端からの高さ

*4 二重下線は各着目レベルでの内側炉心及び外側炉心の最大値

表3-10 平衡サイクルにおける炉内HMインベントリ

平衡初期								[kg]
核種	内側炉心		外側炉心		炉心部計	軸ブラ部計	合計	
	炉心部	軸ブラ	炉心部	軸ブラ				
Pu	238	25.8	0.0	20.7	0.0	46.5	0.0	46.5
	239	497.3	14.6	545.6	12.4	1042.9	26.9	1069.8
	240	281.7	0.9	278.2	0.7	559.8	1.7	561.5
	241	80.1	0.1	85.2	0.0	165.3	0.1	165.4
	242	72.1	0.0	73.4	0.0	145.5	0.0	145.5
U	234	0.3	0.0	0.3	0.0	0.6	0.0	0.6
	235	8.9	1.7	6.8	1.4	15.7	3.2	18.9
	236	6.5	0.1	4.9	0.1	11.4	0.2	11.6
	238	2973.5	694.6	2241.4	579.0	5214.8	1273.5	6488.4
Np	237	0.8	0.0	0.6	0.0	1.4	0.1	1.4
Am	241	16.6	0.0	20.3	0.0	36.9	0.0	36.9
	242m	0.5	0.0	0.5	0.0	1.0	0.0	1.0
	243	4.6	0.0	4.3	0.0	8.9	0.0	8.9
Cm	242	0.9	0.0	0.8	0.0	1.7	0.0	1.7
	243	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
	244	0.9	0.0	0.7	0.0	1.6	0.0	1.6
	245	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
	246	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	247	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	248	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pu total		956.9	15.6	1003.2	13.1	1960.1	28.7	1988.8
	fissile	577.4	14.6	630.8	12.4	1208.2	27.0	1235.2
	fertile	379.6	0.9	372.3	0.7	751.9	1.7	753.5
U		2989.2	696.4	2253.4	580.5	5242.6	1276.9	6519.4
MA		24.3	0.0	27.3	0.0	51.7	0.1	51.7
HM		3970.4	712.0	3283.9	593.6	7254.3	1305.7	8560.0

平衡末期								[kg]
核種	内側炉心		外側炉心		炉心部計	軸ブラ部計	合計	
	炉心部	軸ブラ	炉心部	軸ブラ				
Pu	238	22.7	0.0	19.4	0.0	42.1	0.0	42.1
	239	466.1	22.9	500.8	17.8	966.9	40.7	1007.6
	240	278.0	1.8	276.8	1.3	554.8	3.1	557.9
	241	69.5	0.1	75.1	0.1	144.6	0.2	144.8
	242	70.4	0.0	72.4	0.0	142.8	0.0	142.8
U	234	0.5	0.0	0.4	0.0	0.9	0.0	0.9
	235	6.9	1.5	5.7	1.3	12.6	2.8	15.3
	236	6.6	0.1	4.9	0.1	11.5	0.3	11.8
	238	2866.1	681.8	2185.1	571.0	5051.2	1252.8	6303.9
Np	237	1.2	0.1	0.9	0.0	2.1	0.1	2.2
Am	241	16.8	0.0	21.1	0.0	37.9	0.0	37.9
	242m	0.7	0.0	0.7	0.0	1.4	0.0	1.4
	243	7.1	0.0	6.2	0.0	13.3	0.0	13.3
Cm	242	1.2	0.0	1.1	0.0	2.2	0.0	2.2
	243	0.1	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.2
	244	1.7	0.0	1.2	0.0	3.0	0.0	3.0
	245	0.1	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.2
	246	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	247	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	248	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pu total		906.8	24.9	944.4	19.2	1851.2	44.1	1895.3
	fissile	535.6	23.1	575.9	17.9	1111.5	41.0	1152.5
	fertile	371.2	1.9	368.5	1.3	739.7	3.1	742.9
U		2880.0	683.4	2196.1	572.4	5076.1	1255.8	6331.9
MA		28.9	0.1	31.4	0.0	60.3	0.1	60.4
HM		3815.7	708.4	3171.9	591.6	6987.6	1300.0	8287.6

表3-11 平衡サイクルにおける1バッチ当たりの物質収支(1/2)

炉心		[kg]						
核種		装荷重量			取出重量			物質収支
		内側炉心	外側炉心	合計	内側炉心	外側炉心	合計	
Pu	238	7.9	4.8	12.8	4.9	3.5	8.4	-4.4
	239	137.4	129.7	267.1	106.6	85.4	191.9	-75.2
	240	71.3	55.6	126.9	67.8	54.1	121.9	-5.1
	241	25.1	22.2	47.3	14.6	12.1	26.7	-20.6
	242	18.5	15.0	33.5	16.9	14.0	30.9	-2.6
U	234	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.3	0.3
	235	3.2	1.9	5.1	1.1	0.8	1.9	-3.1
	236	1.6	0.9	2.5	1.6	1.0	2.6	0.1
	238	784.6	471.2	1255.7	678.6	415.8	1094.3	-161.4
Np	237	0.0	0.0	0.0	0.4	0.3	0.7	0.7
Am	241	4.0	3.5	7.4	4.1	4.4	8.5	1.1
	242m	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.4	0.4
	243	0.0	0.0	0.0	2.5	1.9	4.4	4.4
Cm	242	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	0.5	0.5
	243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
	244	0.0	0.0	0.0	0.8	0.5	1.3	1.3
	245	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1
	246	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	247	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	248	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Pu total	260.3	227.3	487.5	210.7	169.1	379.7	-107.8
fissile	162.5	151.8	314.3	121.2	97.4	218.6	-95.7	
fertile	97.8	75.4	173.2	89.5	71.6	161.1	-12.1	
U	789.3	474.0	1263.3	681.5	417.7	1099.2	-164.1	
MA	4.0	3.5	7.4	8.6	7.5	16.1	8.6	
HM	1053.5	704.7	1758.3	900.8	594.2	1495.0	-263.3	

軸方向ブランケット		[kg]						
核種		装荷重量			取出重量			物質収支
		内側炉心	外側炉心	合計	内側炉心	外側炉心	合計	
Pu	238	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	239	0.0	0.0	0.0	8.3	5.4	13.6	13.6
	240	0.0	0.0	0.0	0.9	0.5	1.4	1.4
	241	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1
	242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U	234	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	235	0.5	0.4	0.9	0.3	0.2	0.5	-0.4
	236	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1
	238	178.5	119.0	297.5	165.9	111.2	277.0	-20.5
Np	237	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am	241	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm	242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	244	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	246	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	247	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	248	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Pu total	0.0	0.0	0.0	9.3	6.0	15.2	15.2
fissile	0.0	0.0	0.0	8.3	5.4	13.8	13.8	
fertile	0.0	0.0	0.0	0.9	0.5	1.5	1.5	
U	179.0	119.4	298.4	166.2	111.4	277.6	-20.8	
MA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
HM	179.0	119.4	298.4	175.5	117.4	292.9	-5.5	

表3-11 平衡サイクルにおける1バッチ当たりの物質収支(2/2)

炉心+軸方向ブランケット		[kg]						
		装荷重量			取出重量			物質収支
核種		内側炉心	外側炉心	合計	内側炉心	外側炉心	合計	
Pu	238	7.9	4.8	12.8	4.9	3.5	8.4	-4.4
	239	137.4	129.7	267.1	114.8	90.7	205.5	-61.5
	240	71.3	55.6	126.9	68.7	54.7	123.3	-3.6
	241	25.1	22.2	47.3	14.7	12.1	26.8	-20.4
	242	18.5	15.0	33.5	16.9	14.0	30.9	-2.6
U	234	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.3	0.3
	235	3.7	2.3	5.9	1.4	1.0	2.4	-3.5
	236	1.6	0.9	2.5	1.7	1.0	2.7	0.2
	238	963.1	590.2	1553.2	844.4	526.9	1371.4	-181.8
Np	237	0.0	0.0	0.0	0.5	0.3	0.7	0.7
Am	241	4.0	3.5	7.4	4.1	4.4	8.5	1.1
	242m	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.4	0.4
	243	0.0	0.0	0.0	2.5	1.9	4.4	4.4
Cm	242	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	0.5	0.5
	243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
	244	0.0	0.0	0.0	0.8	0.5	1.3	1.3
	245	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1
	246	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	247	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	248	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Pu	total	260.3	227.3	487.5	219.9	175.0	395.0
	fissile	162.5	151.8	314.3	129.5	102.9	232.4	-82.0
	fertile	97.8	75.4	173.2	90.4	72.2	162.6	-10.6
U		968.3	593.4	1561.7	847.7	529.1	1376.8	-184.9
MA		4.0	3.5	7.4	8.6	7.5	16.1	8.7
HM		1232.6	824.1	2056.7	1076.2	711.6	1787.8	-268.8

表 4-1 炉心部以外の冷却材必要流量の推定

	流量領域 *1	集合体数	現行設計(径ブラあり)			実用化像実証炉心(径ブラ削除)			増減 (実用化像実証炉心 - 現行炉心)
			1体当たりの 発熱量	配分流量		1体当たりの 発熱量	配分流量		
				集合体 1体あたり	領域全体		集合体 1体あたり	領域全体	
(体)	(MW)	(kg/sec)	(kg/sec)	(MW)	(kg/sec)	(kg/sec)	(kg/sec)		
径方向ブランケット	9	54	0.93	4.5	243.0	0.120	0.63	34.1	
又は 置換反射体*2	10	60	0.43	2.1	127.2	0.079	0.42	24.9	
	11	60	0.22	1.0	58.6	0.052	0.27	16.4	
小計					428.8			75.4	-353.4
中性子遮へい体*2	12	246	0.026	0.14	33.9	0.032	0.17	41.4	
	13	38		0.18	6.8		0.22	8.3	
	F/C	40		0.15	6.0		0.18	7.3	
小計					46.8			57.0	10.2
制御棒*3	CCR	10	0.27	8.2	81.8	0.58	18.0	180.0	
	FCR	3	0.17	8.2	24.5	0.38	18.0	54.0	
	BCR	6	0.13	3.0	17.9	0.13	3.0	17.9	
小計					124.2			251.8	127.6
合計					599.8			384.2	-215.6

*1 12:標準型中性子遮へい体、13:標準型中性子遮へい体を流量可変機構位置に装荷したとき、F/C:流量可変機構型中性子遮へい体

CCR:主炉停止系粗調整棒、FCR:主炉停止系微調整棒、BCR:後備炉停止系制御棒

*2 置換反射体及び中性子遮へい体の発熱量は遮へい計算結果による

*3 サイクル初期に挿入される制御棒価値に対応して発熱量の増加を考慮

表 4-2 炉心出力

流量領域	集合体数 (体)	炉内径方向 位置 (層)	包絡最大 集合体出力 (MW)	領域 換算出力* (MW)	参考:現行設計		
					最大 集合体出力 (MW)	領域 換算出力* (MW)	
内側	1	18	1	4.97	89.4	4.73	85.1
	2	12	2	4.87		4.46	53.5
	3	24	3	4.73	56.7	4.20	100.8
	4	24	4	4.55	109.2	3.91	93.8
	5	30	5	4.28	102.6	3.71	111.3
外側	6	42	6	4.05	121.4	4.14	173.9
	7	18	7	4.69	196.9	3.39	61.0
	8	30	8	3.88	69.9	3.19	95.7
合計	198			855.9		775.2	

* 包絡最大集合体出力×集合体数

表4-3 冷却材流量配分

流量領域	集合体数 (体)	最大集合体 出力*1 (MW)	径方向 ピーキング*2 (-)	必要流量*3		配分流量*5		被覆管 最高温度*4 (°C)	参考:現行設計				
				必要流量		配分流量			必要流量		配分流量		
				集合体*4 (kg/sec)	領域 (kg/sec)	集合体 (kg/sec)	領域 (kg/sec)		集合体 (kg/sec)	領域 (kg/sec)	集合体 (kg/sec)	領域 (kg/sec)	
内側	1	18	5.04	1.009	20.4	367	20.7	372	696	21.2	382	21.4	384
	2	12	4.80	1.012	19.4	233	19.7	236	696	19.9	239	20.0	240
	3	24	4.62	1.018	18.7	450	19.0	456	696	19.0	455	19.0	457
	4	24	4.34	1.020	17.6	422	17.9	429	696	17.6	423	17.7	424
	5	30	4.11	1.025	16.7	501	16.9	508	696	16.4	492	16.5	494
外側	6	42	4.76	1.044	20.2	849	20.5	862	691	19.2	805	19.2	808
	7	18	3.94	1.055	16.8	302	17.0	307	691	16.1	290	16.2	291
	8	30	3.71	1.047	15.6	469	15.9	476	691	14.6	438	14.6	439
合計					3592		3646			3523		3538	

*1 2次元燃焼及び3次元拡散計算での包絡集合体出力に燃料交換パターン変動効果等のため1.5%の余裕を考慮

*2 集合体断面を6分割し、軸方向に積算した出力に対する集合体内径方向出力ピーキング(PF₆)

*3 被覆管制限温度 内側炉心:700 °C以下、外側炉心:695 °C以下を満足させるのに必要な冷却材流量

*4 被覆管温度簡易評価式による $T_{HS} = 1.28 \cdot Q \cdot PF_6 \cdot (897.9/W + 2.45) + 397$

Q:集合体出力(MW)、PF₆:集合体断面を6分割し、軸方向に積算した出力に対する集合体内径方向出力ピーキング、W:冷却材流量(kg/sec)

*5 冷却材の配分余裕として必要流量に1.5%を上乗せ

表4-4 被覆管強度評価における燃料ピン仕様及び燃焼条件

	項目	単位	値	公差
炉心ペレット	外径	mm	6.52	±0.05
	内径	mm	2.00	±0.20
	密度	%TD	95.0	±2.0
	O/M	—	1.97	+0.02 -0.03
	蒸発性不純物量	μl/g	180	—
	スタック長	mm	1100	±5
	燃料重量	g	372	—
軸ブラペレット	直径	mm	6.52	±0.05
	密度	%TD	95.0	±2.0
	O/U	—	2.00	—
	蒸発性不純物量	μl/g	50	—
	軸ブラ長さ(上部/下部)	mm	100/100	±2/±2
	燃料重量	g	74	—
燃料ピン	被覆管外径	mm	7.85	±0.04
	被覆管内径	mm	6.69	±0.04
	被覆管肉厚	mm	0.58	±0.04
	プレナム長さ(上部/下部)	mm	1190/220	—
	実効プレナム体積(上部/下部)	cm ³	36.9/7.6	—
燃焼条件	運転サイクル期間	EFPD	380	—
	サイクル数(内/外側炉心)	—	4/5	—
	燃料ピン平均燃焼度(内/外)	GWd/t	165/195	—
	軸ブラ燃焼度(内/外)	GWd/t	24/21	—
	冷却材入口温度	℃	397	—
	冷却材圧力	kg/mm ²	0.015	—

表4-5 被覆管CDF評価用の被覆管最高温度履歴

流量領域	被覆管最高温度(℃)(初期/末期)					
	第1サイクル	第2サイクル	第3サイクル	第4サイクル	第5サイクル	
	1	692/700	668/680	650/663	636/650	
内側炉心	2	696/700	673/680	655/664	640/651	
	3	700/699	677/679	659/663	644/651	
	4	700/698	678/679	661/664	647/651	
	5	700/690	680/673	663/659	650/647	
	内側包絡	700/700	680/680	665/665	655/655	
外側炉心	6	695/670	667/647	645/628	626/613	611/600
	7	695/669	672/650	652/634	636/620	623/608
	8	695/680	672/660	653/643	636/629	623/617
	外側包絡	695/695	675/675	655/655	640/640	625/625

表4-6 被覆管CDF及び短時間強度解析結果

炉心領域				内側炉心	外側炉心		
燃烧期間		(day)		1520	1900		
平均燃烧度		(GWd/t)		165	195		
被覆管最高温度履歴	寿命初期/末期	(°C)		700/655	700/630	695/625	
残留肉厚		(mm)		0.395	0.394	0.398	
寿命末期 定格時	内圧	(kg/mm ²)		1.16	1.32	1.32	
	応力	(kg/mm ²)		10.6	12.2	12.0	
	Na腐食量	(mm)		0.045	0.046	0.042	
被覆管	FP腐食量	(mm)		0.100	←	←	
	蒸発性不純物ガス量	(mol)		0.005	←	←	
C	FPガス量	(mol)		0.066	0.078	0.078	
D F	CDF	9Cr系	-	0.49	0.59	0.36	
		12Cr系	-	0.07	0.03	0.02	
短時間強度	寿命末期 過渡時	被覆管温度	(°C)	708	678	672	
		内圧	(kg/mm ²)	1.21	1.38	1.37	
		応力	(kg/mm ²)	11.1	12.7	12.5	
	許容応力	9Cr系	最高温度一定	(kg/mm ²)	14.1	16.3	16.9
			温度変動考慮		14.5	16.9	17.5
		12Cr系	(kg/mm ²)	9.8	12.2	12.7	
設計応力比 (過渡時)	9Cr系	最高温度一定	-	0.79	0.78	0.74	
		温度変動考慮	-	0.77	0.75	0.72	
		12Cr系	-	1.13	1.04	0.99	

表5-1 炉心案の評価

評価の観点	評価項目	現行設計炉心	実用化像実証炉心案		評価結果概要
			前報告書	今回の再検討	
高速炉実用化像の実証 実用化段階で想定される太径中空燃料を炉心規模で適用し、高燃焼度化、運転サイクルの長期化、内部転換比向上等の炉心の高性能化を実証する。「もんじゅ」の運転に係る実効的な経費を可能な限り縮減するため、発電量向上、取替燃料体数の削減を図る。	高燃焼度化				
	取出平均燃焼度 (GWd/t)				ODS鋼の採用により、取出均燃焼度150GWd/tを「もんじゅ」において実証
	炉心部	80	151	151	
	炉心部+ブランケット部	22	132	132	
	運転期間				・1年を超える長期運転による稼働率の大幅な向上
	サイクル期間(日)	148 (5ヶ月)	400 (13ヶ月)	380 (12.5ヶ月)	・燃料交換のために行う中間炉停止 ^{*3} が不要
	稼働率 ^{*1}	71%	82%	81%	
	売電収入				稼働率の向上によって年間発電量が14%増加
	年間発電量 (10 ⁹ kWh/年)	1.75	2.00	1.98	
	燃料サイクルコスト				・年間使用済燃料発生量は高燃焼度化に伴って炉心部で約2/3まで、更にブランケットの削減により炉心全体では約1/5まで低減。これにより再処理に対する負荷が大幅に低減
	年間取替集合体数 (体/年)	69(炉心)+61(ブランケット)	34	35	・高燃焼度化、燃料体積率の増加により年間取替燃料体数は現行の1/4以下に低減
	年間燃料ピン製造数 (本/年)	11740	4260	4440	・取替燃料費及び使用済燃料貯蔵費が大幅に低下
	年間使用済燃料発生量 (tHM/年)				
	炉心部	2.1	1.4	1.4	
ブランケット部	6.1	0.2	0.2		
計	8.1	1.6	1.6		
実用化像の模擬性				・太径中空高密度燃料の量産、炉心規模での実用化の実証	
燃料構造 (ピン径)	細径低密度 (6.5 mm)	太径中空高密度 (7.9mm)	太径中空高密度 (7.85mm)	・実効燃料体積率の向上によるPu蓄化度の低減、内部転換比の向上	
実効燃料体積率	28.4%	33.2%	31.5%		
照射利用				最大線出力等の熱的余裕を有し、柔軟な対応が可能	
燃料・材料に関する照射場を提供する。	照射試験燃料の受け入れ	限定的	可	可	
	照射速度				現行並みの照射速度を確保
	年間高速中性子照射量 ^{*2} (10 ²² n/cm ² /年)	8.1	7.9	7.9	

*1 定期検査期間90日、中間炉停止期間30日を想定
 *2 最も中性子束が大きくなる制御棒運用パターン且つピーク位置で、E≥0.1 MeV
 *3 定期検査と定期検査の間に炉を停止すること

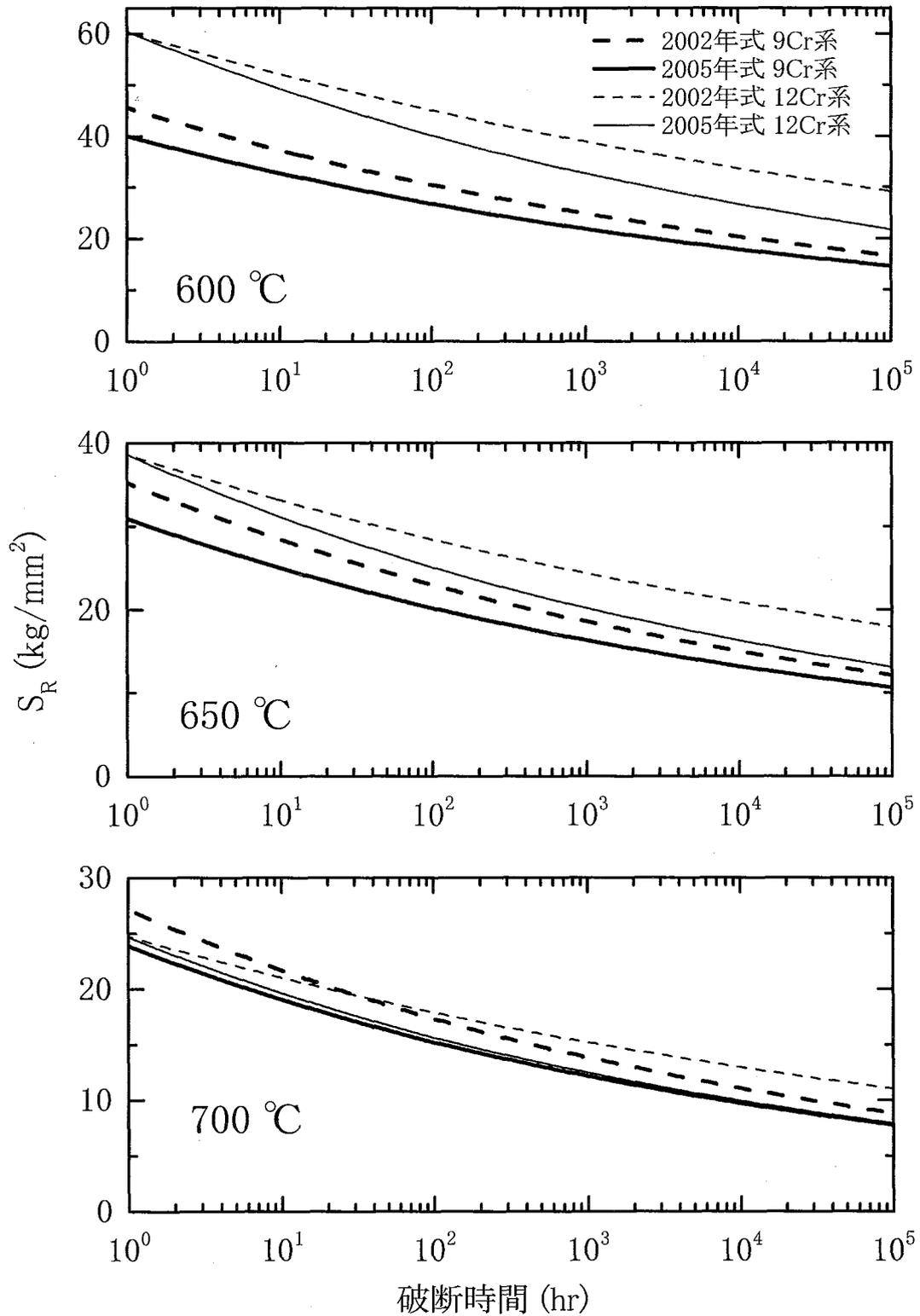


図2-1 ODS鋼のクリープ破断応力強さ

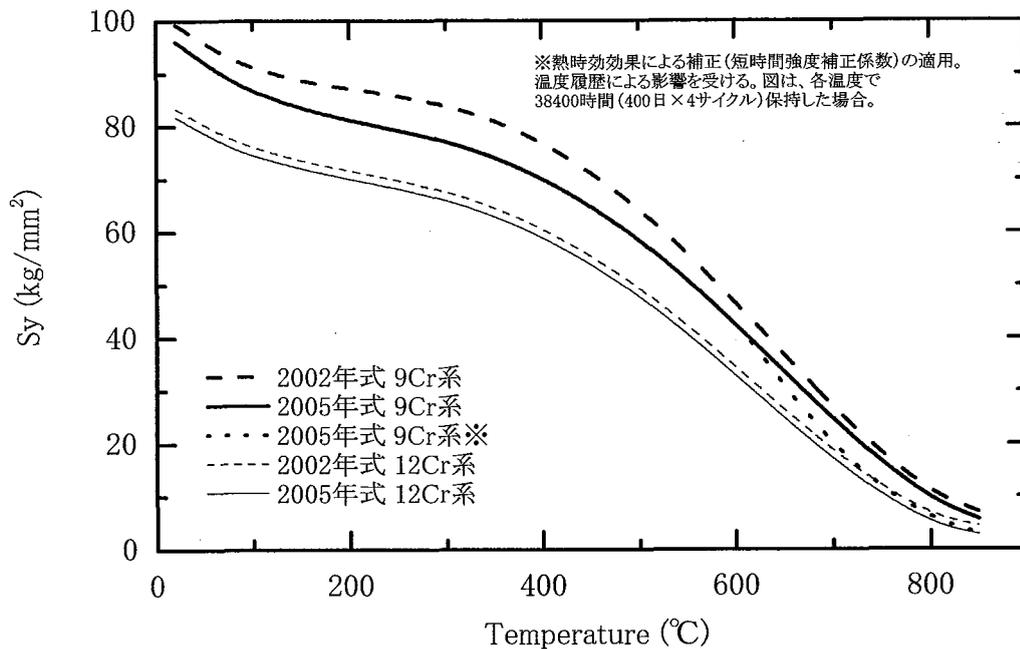


図2-2 ODS鋼の設計降伏点

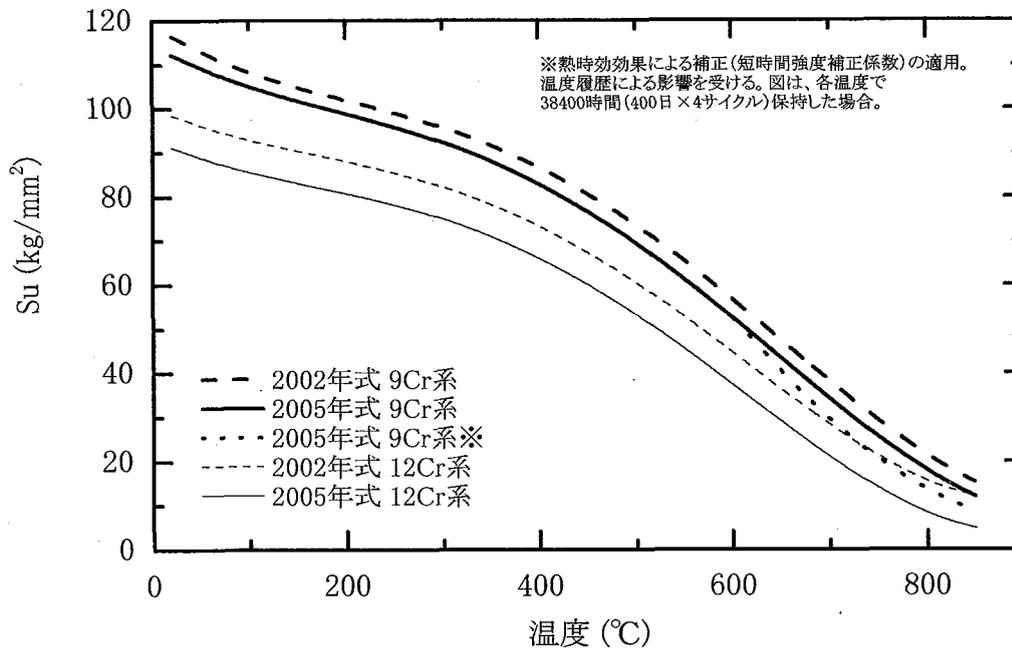


図2-3 ODS鋼の設計引張強さ

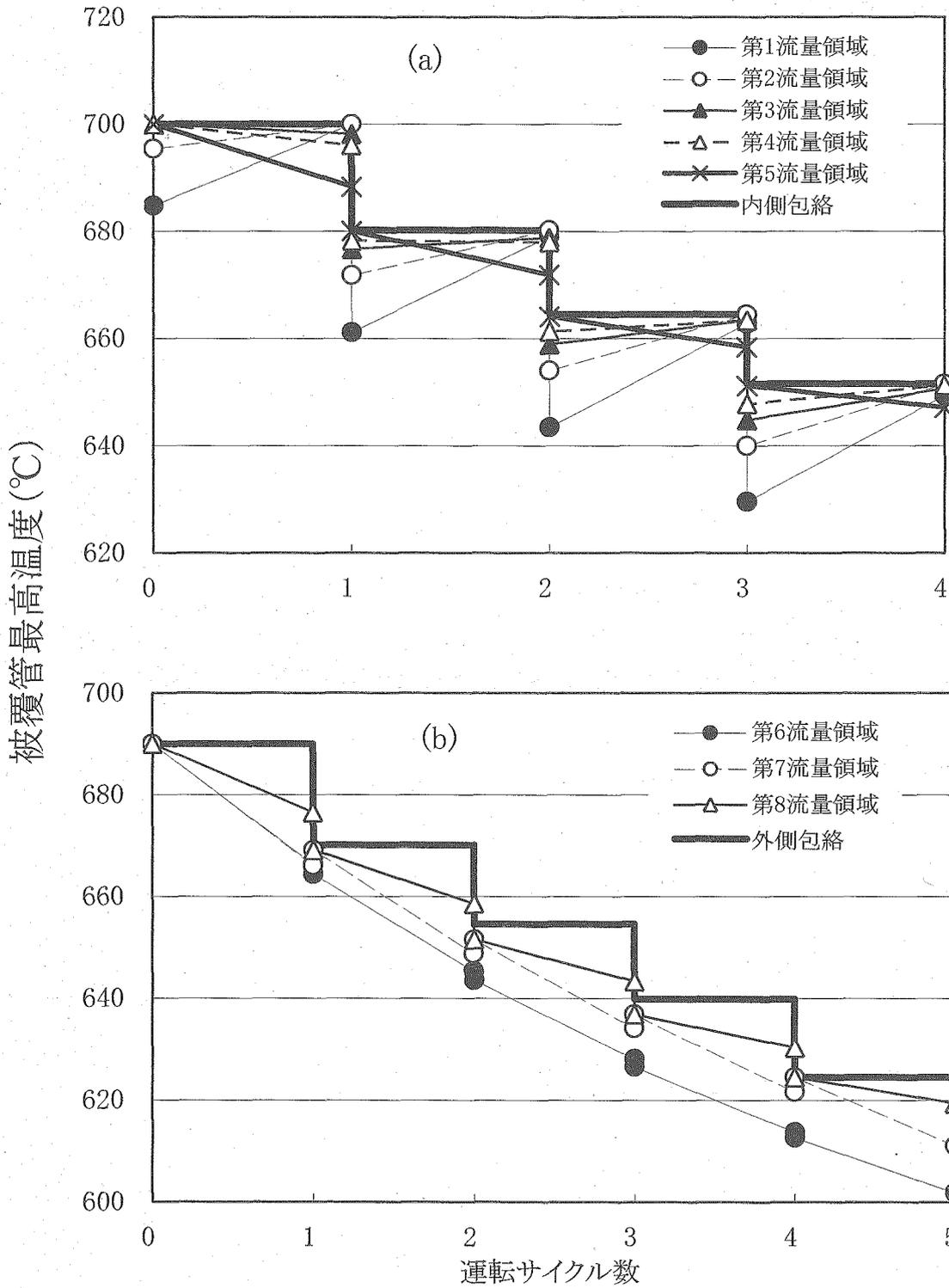


図2-4 予備的被覆管強度評価における被覆管CDF評価用の被覆管最高温度履歴

(a) 内側炉心 (b) 外側炉心

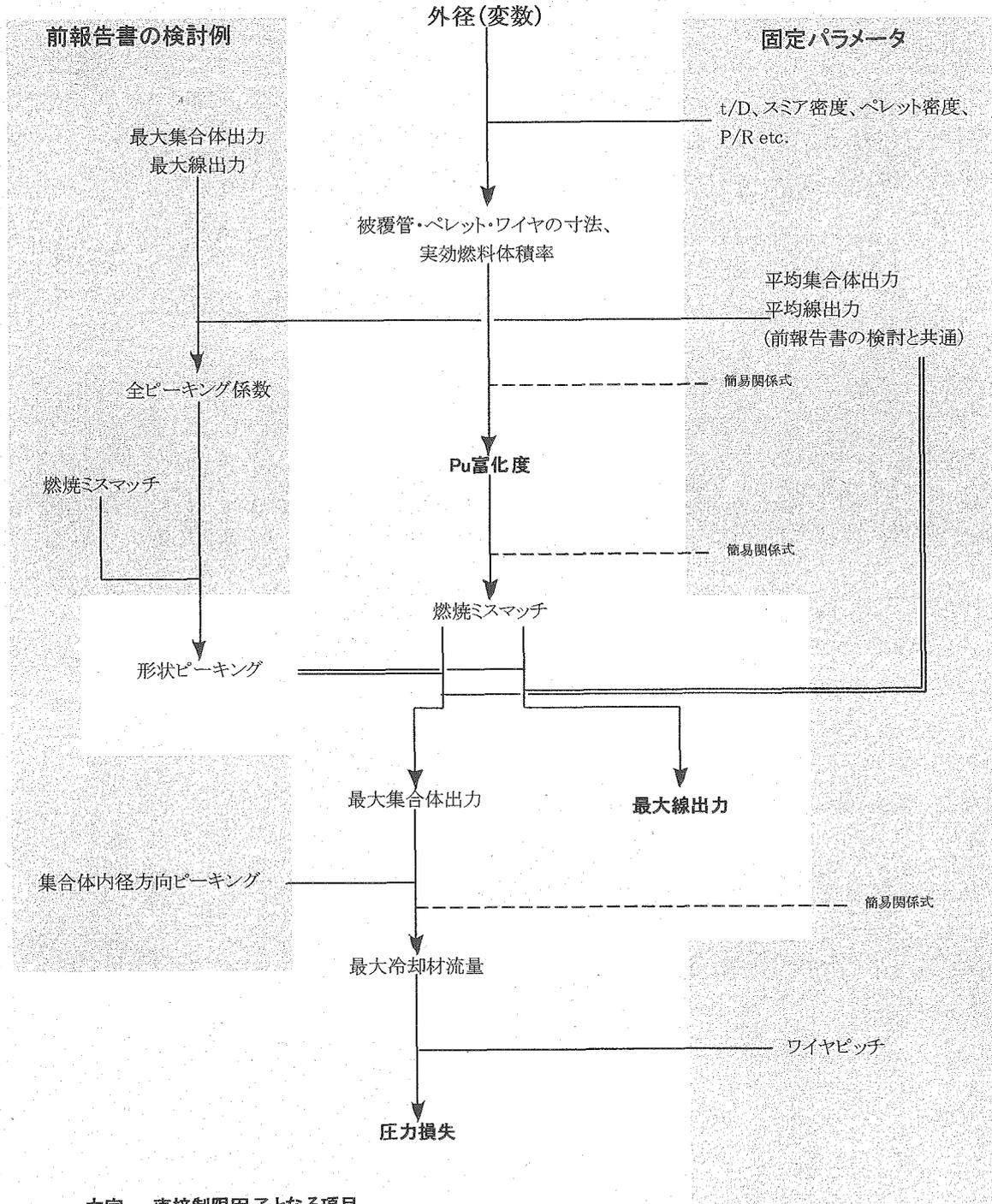
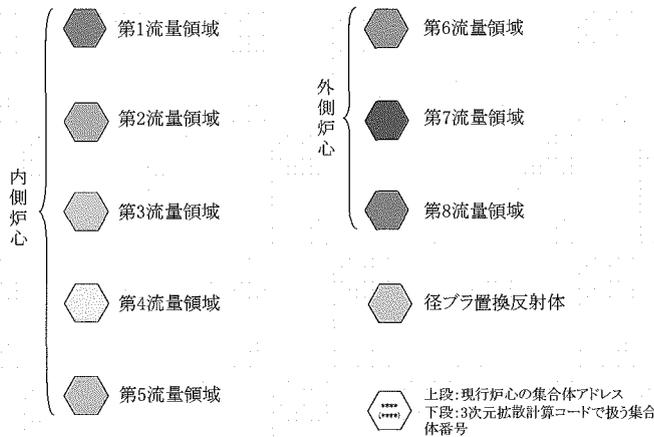
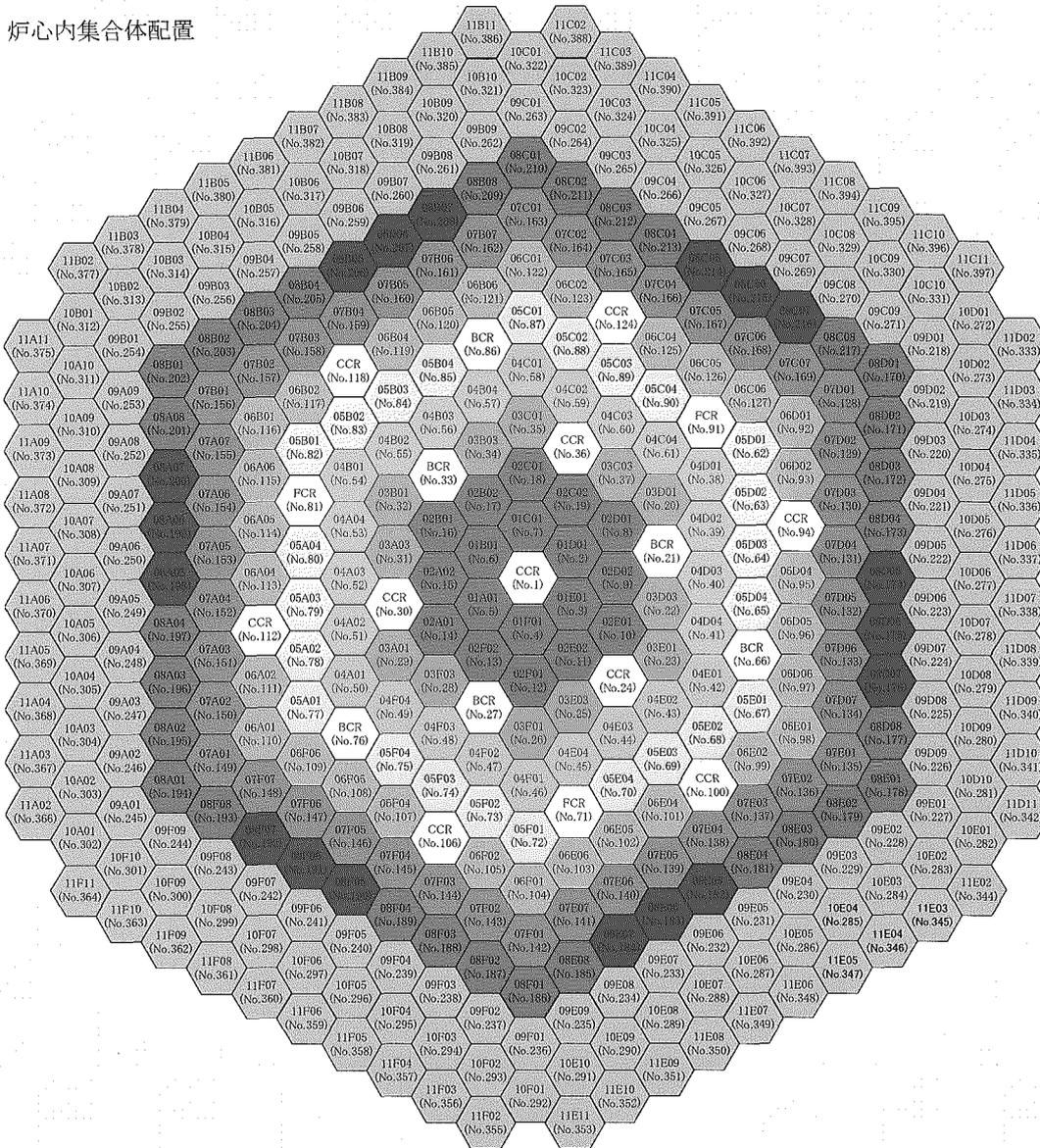


図2-5 パラメータ決定のフローチャート

炉心内集合体配置



集合体内燃料ピン番号

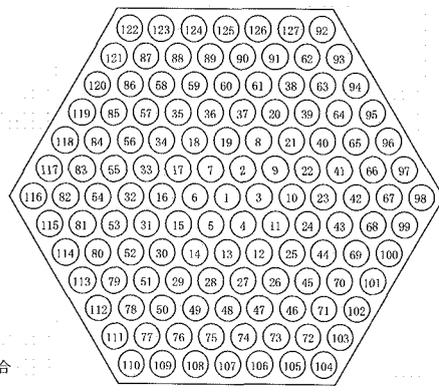
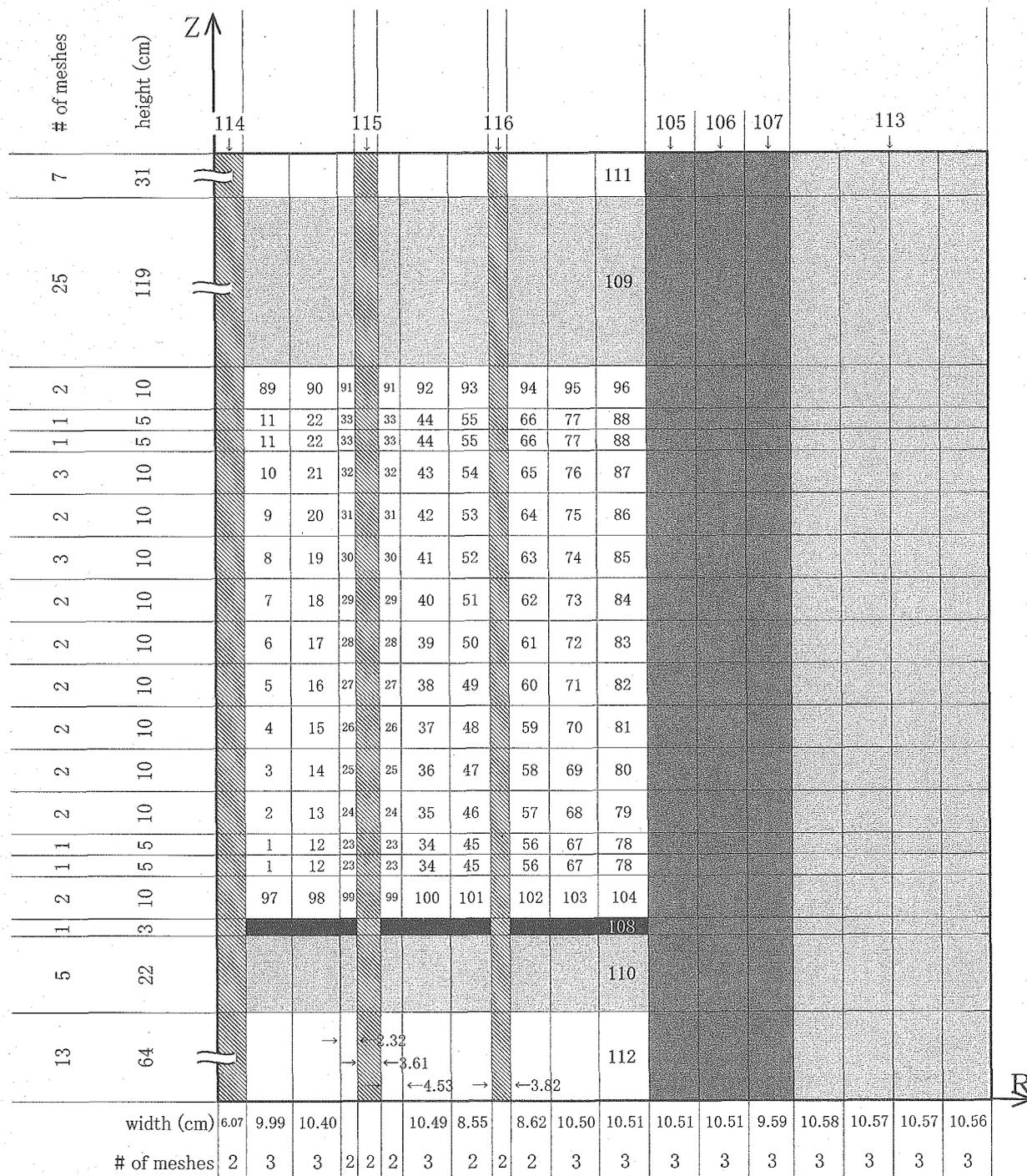


図3-1 「もんじゅ」実用化像実証炉心の燃料配置

This is a blank page.

領域No.	領域名	領域No.	領域名
1~66	内側炉心	110	下部ガスプレナム
67~88	外側炉心	111	上部遮へい体
89~104	軸方向ブランケット	112	下部遮へい体
105~107	置換反射体	113	径方向遮へい体
108	下部支持プラグ	114~116	CRP
109	上部ガスプレナム		



※実体系とほぼ相似に描いた。軸破断部は1/3にしてある

図3-2 「もんじゅ」実用化像実証炉心の2次元RZ体系

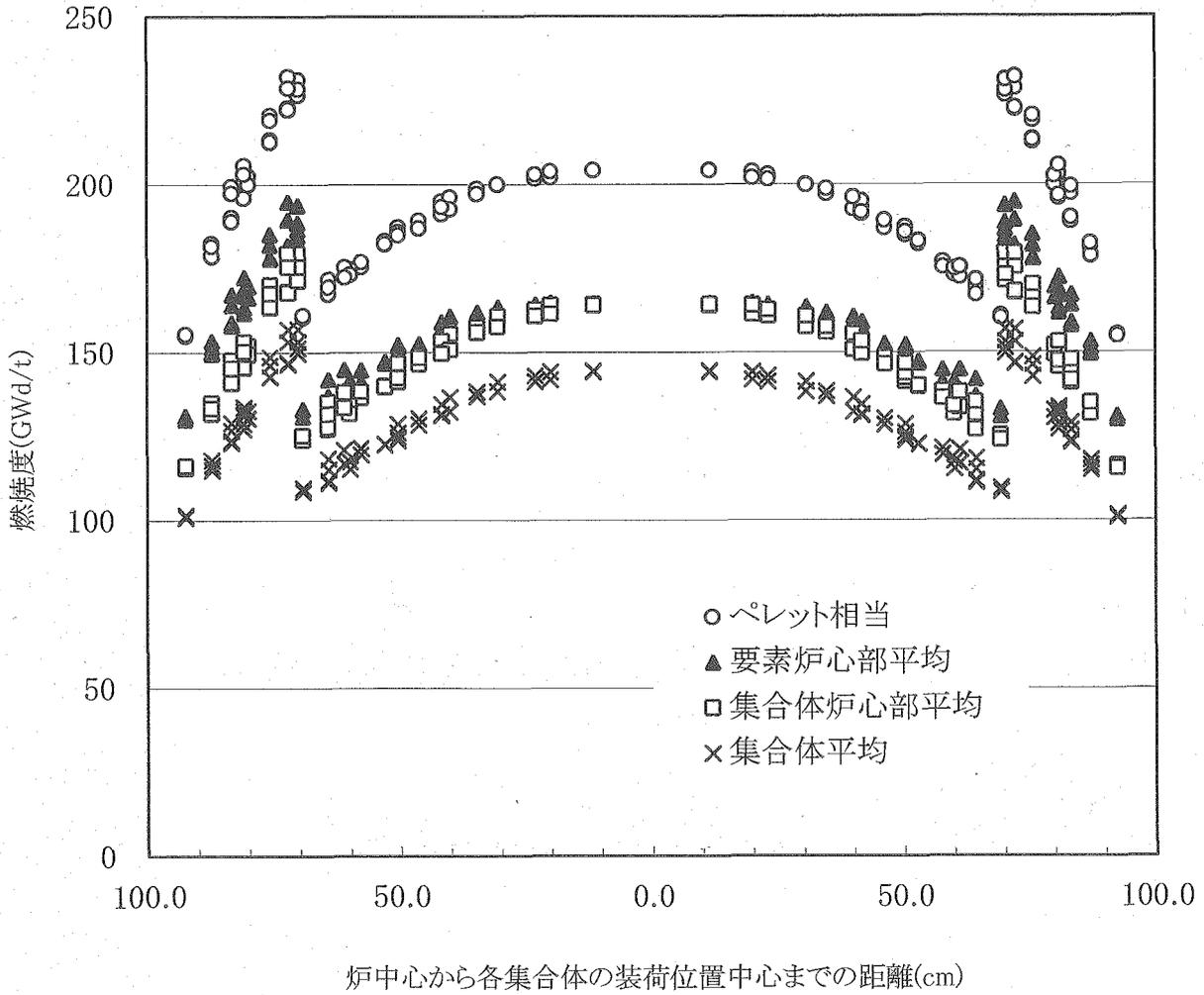
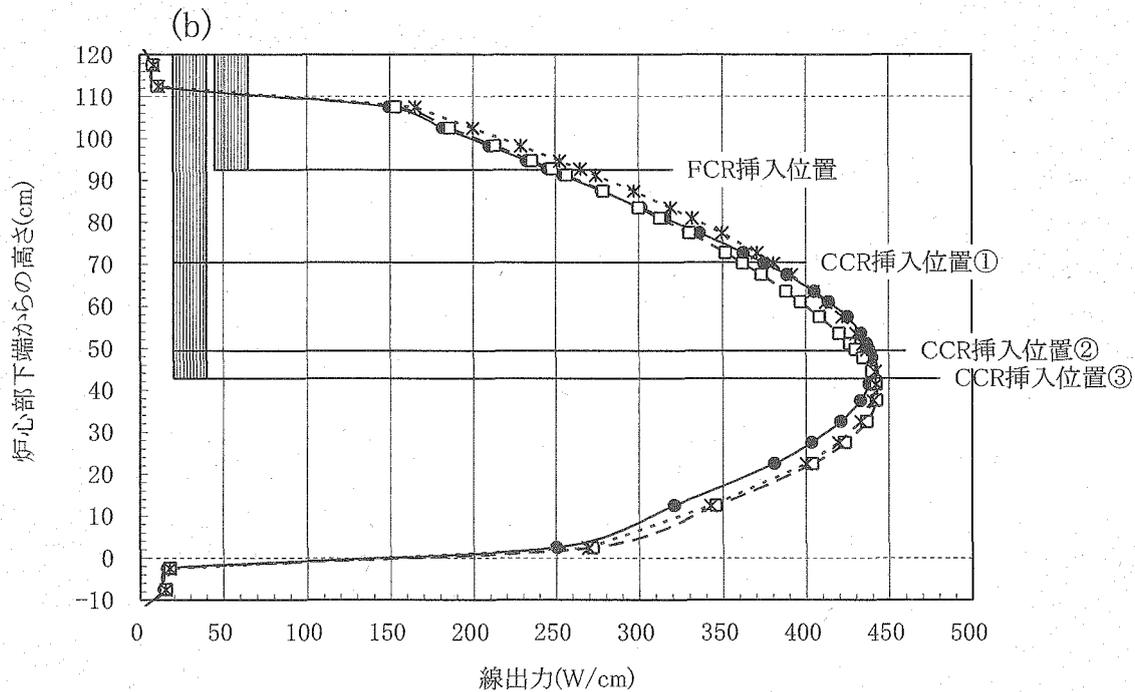
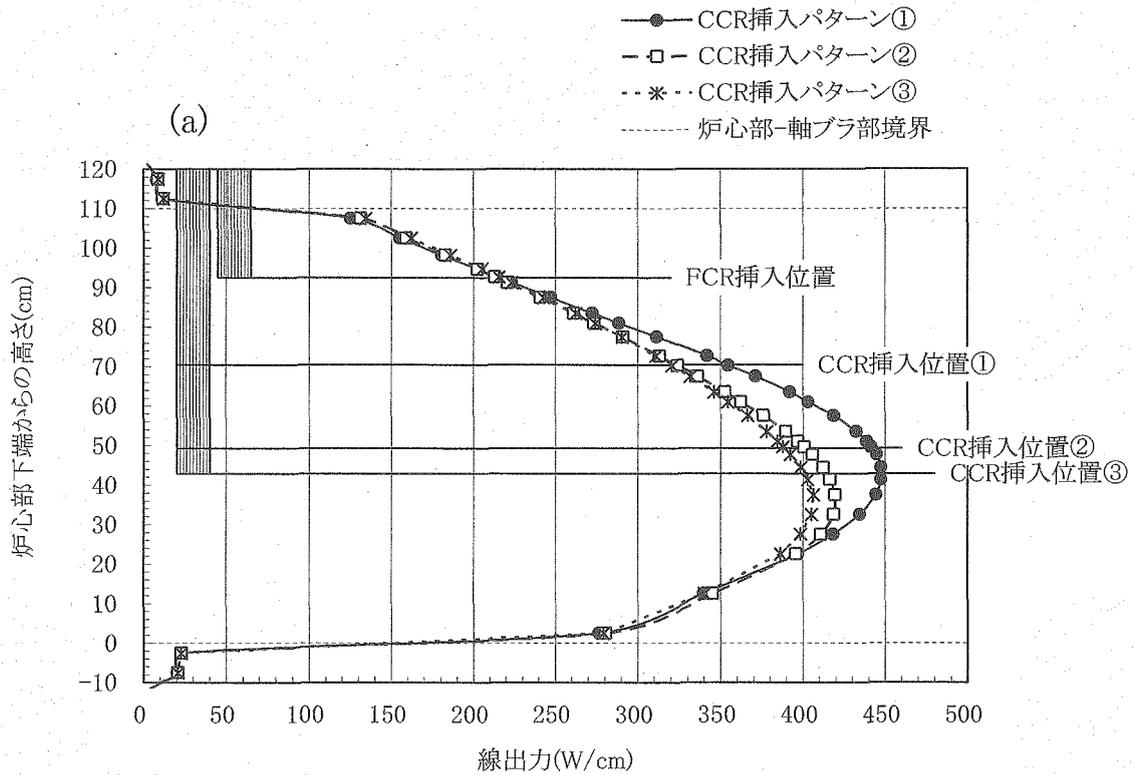
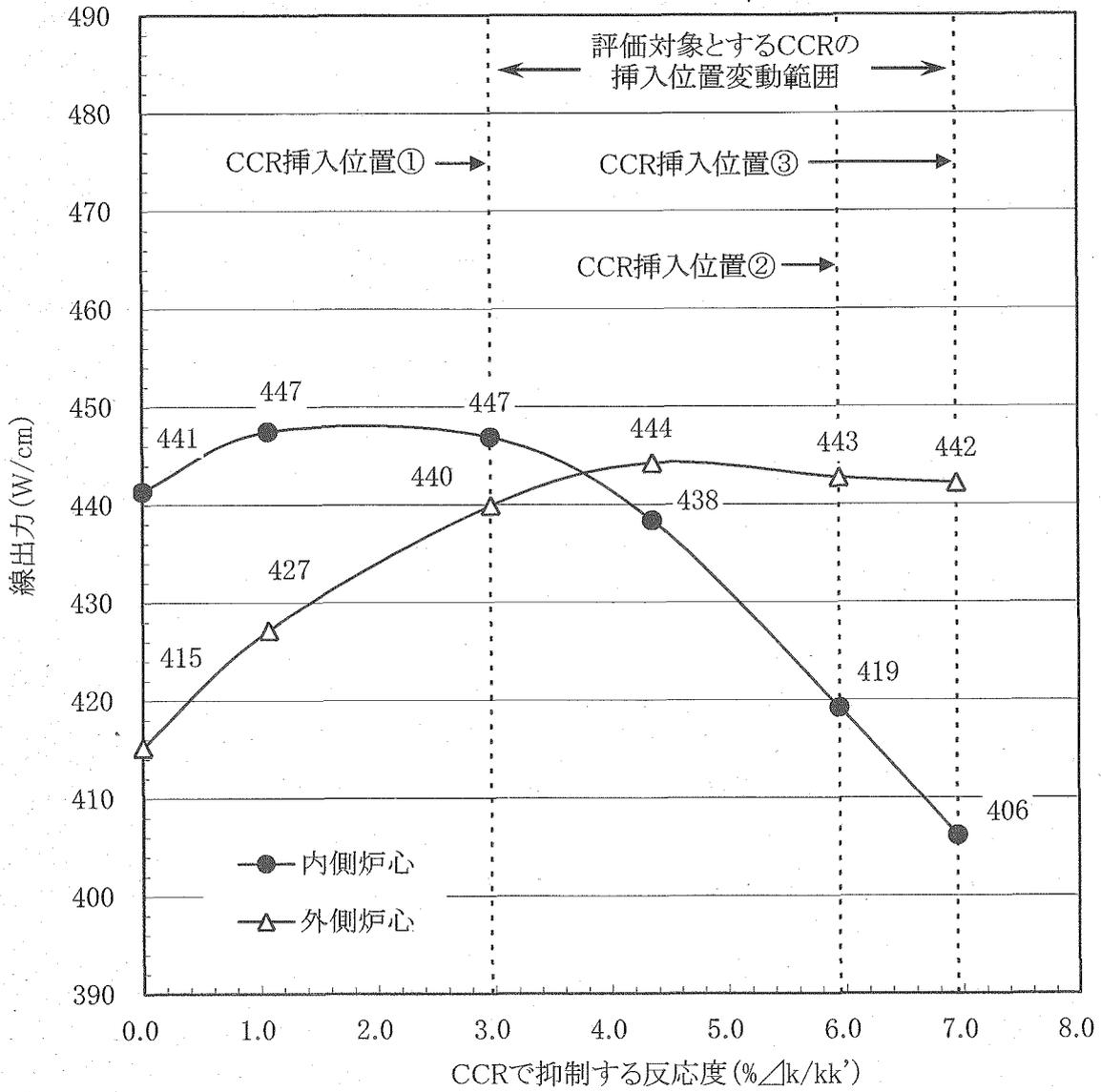


図3-3 炉心径方向燃焼度分布 —制御棒挿入位置包絡—



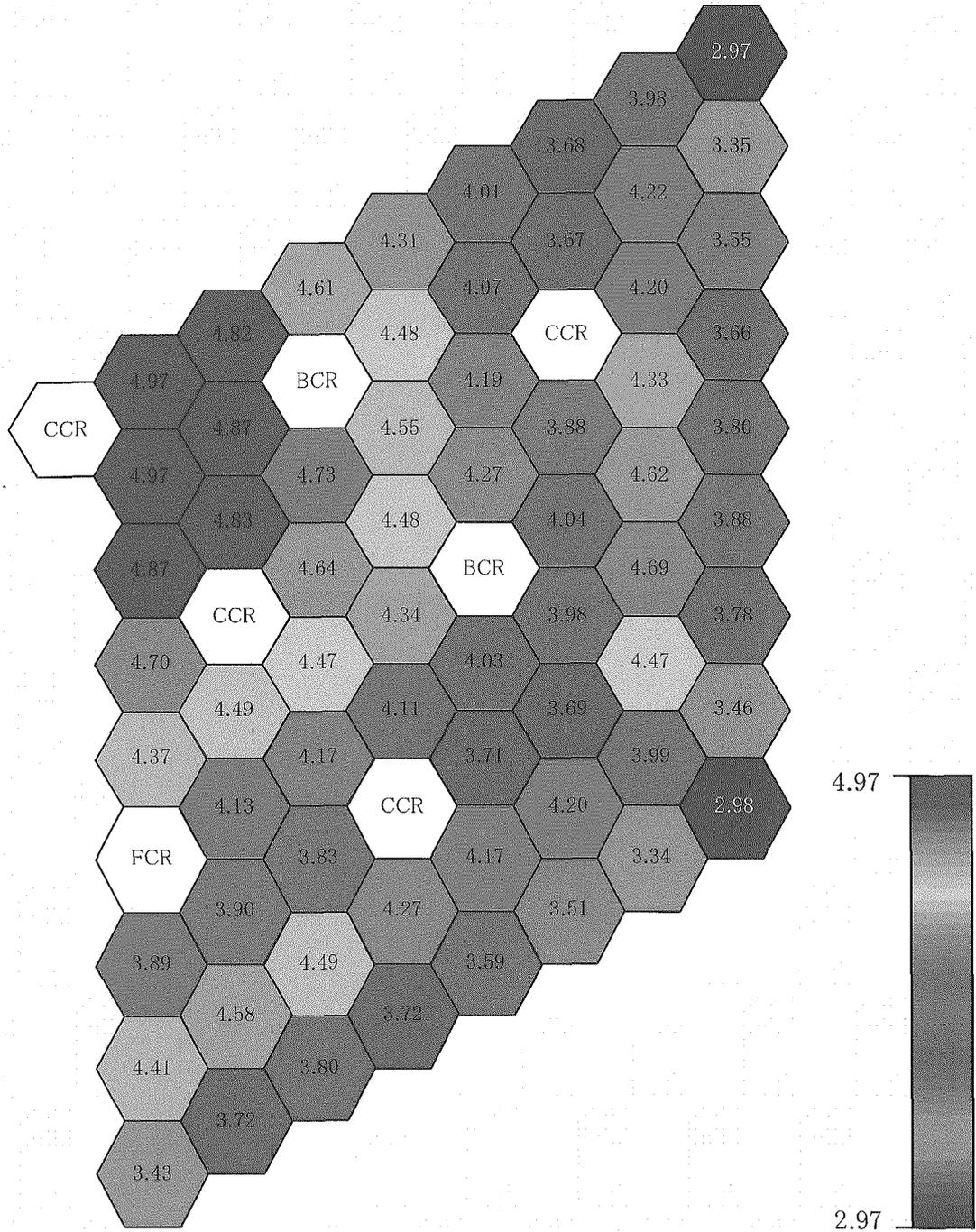
- ①: 燃焼反応度の約半分をCCRで抑制
- ②: 燃焼反応度分をCCRで抑制
- ③: 燃焼反応度+1% $\Delta k/k$ 分をCCRで抑制

図3-4 平衡サイクル初期における最大線出力発生集合体の軸方向線出力分布
(a)内側炉心 (b)外側炉心



- ①: 燃焼反応度の約半分をCCRで抑制
(炉心部上端から39.6cm挿入)
- ②: 燃焼反応度分をCCRで抑制
(炉心上端から60.7cm挿入)
- ③: 燃焼反応度+1%Δk/kk'分をCCRで抑制
(炉心上端から67.2cm挿入)

図3-5 粗調整棒の挿入に伴う反応度変化と最大線出力の関係



※対称性を考慮して1/3炉心を記載

図3-6 集合体出力分布
—平衡サイクル時期及び制御棒挿入パターン包絡—

This is a blank page.

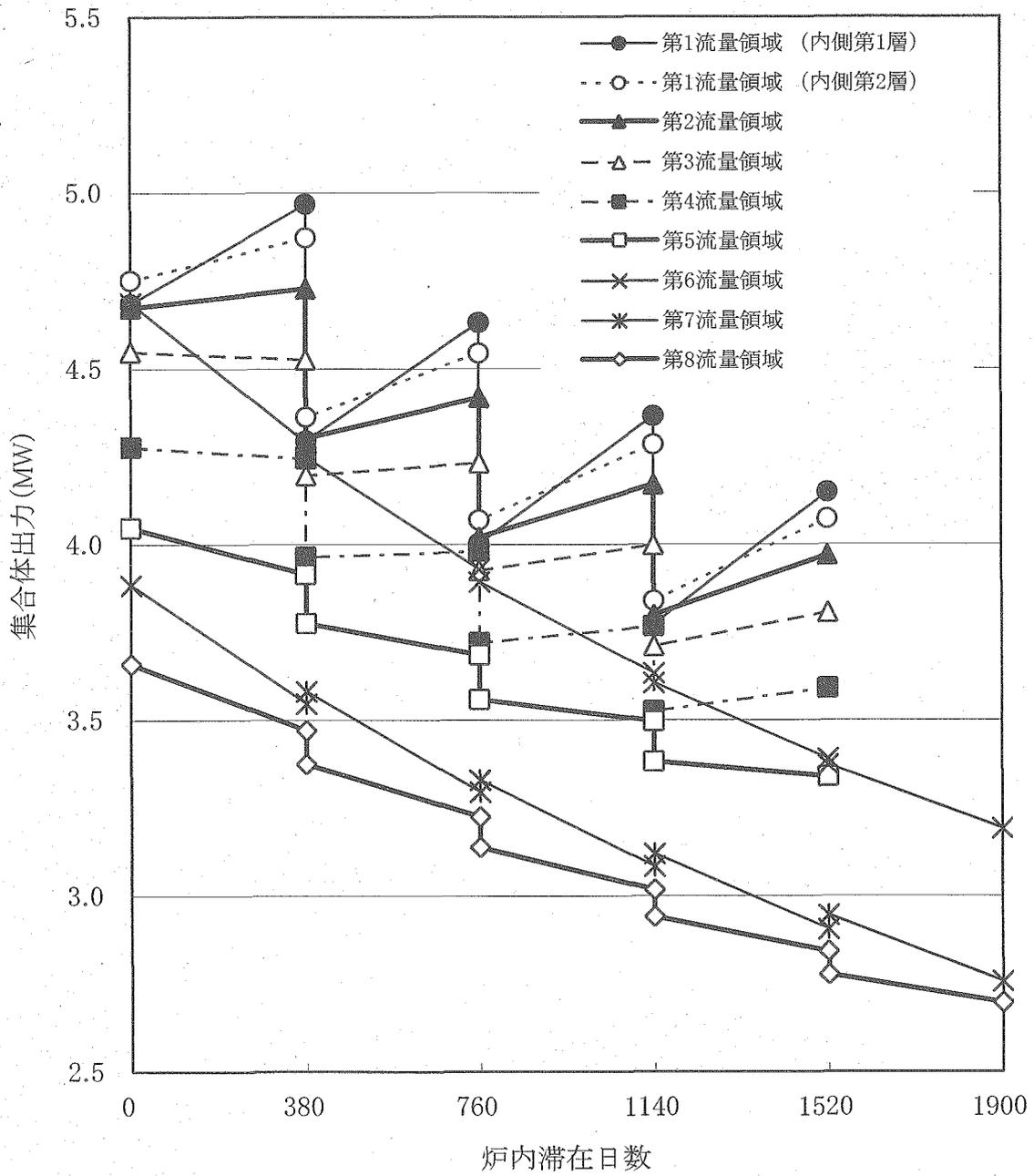


図3-7 集合体出力履歴

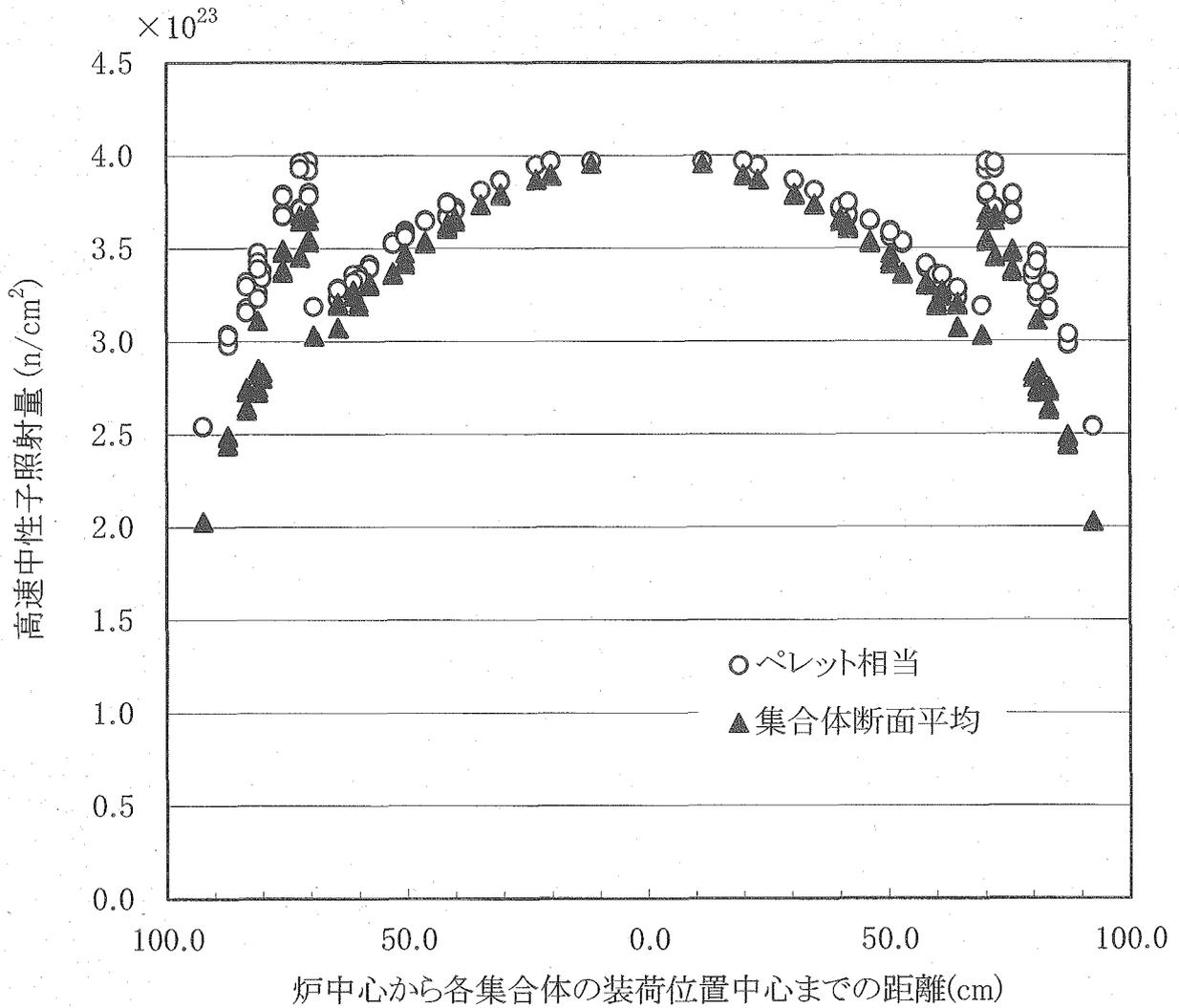


図3-8 最大高速中性子照射量分布
—制御棒挿入位置包絡—

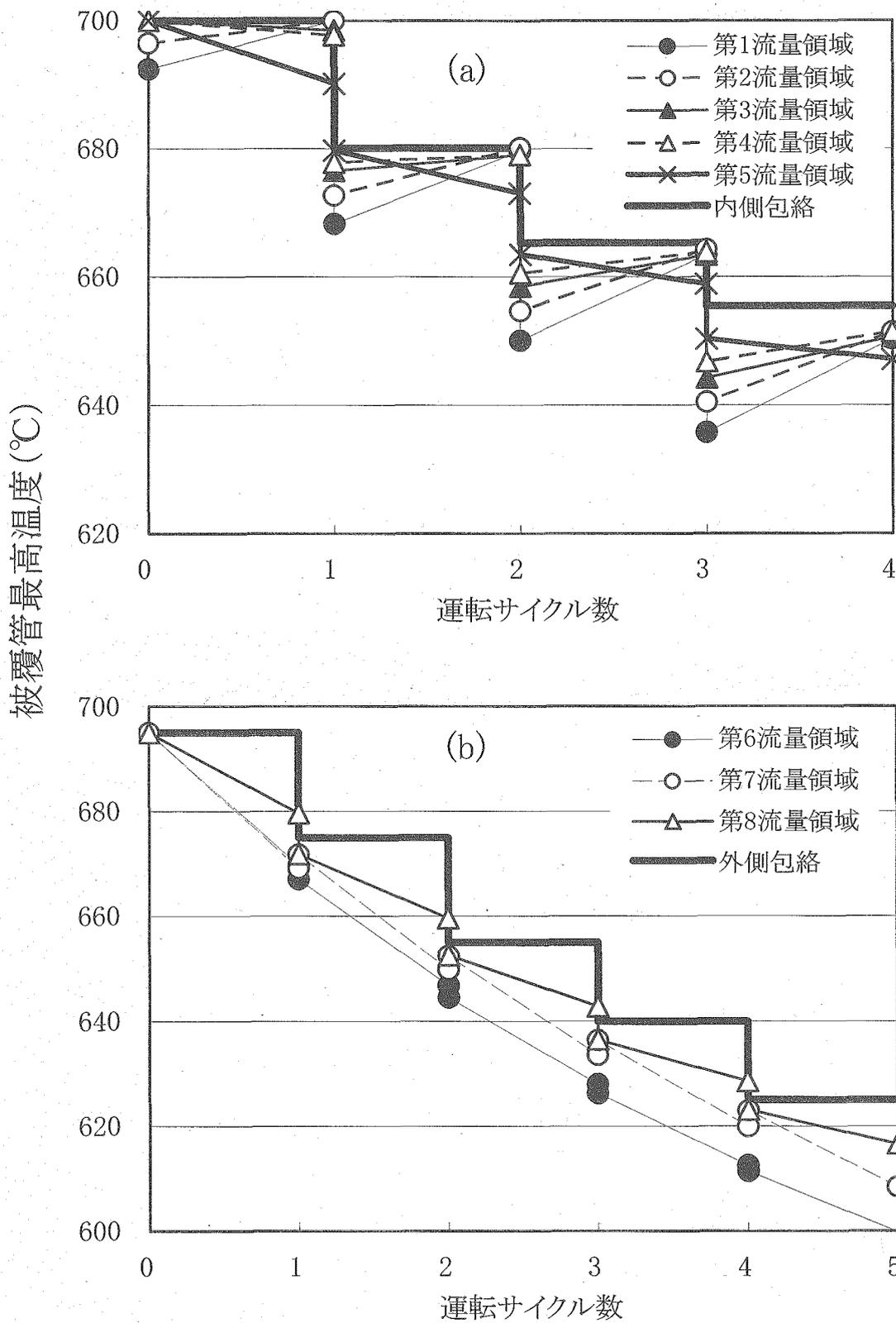


図4-1 被覆管CDF評価用の被覆管最高温度履歴
(a) 内側炉心 (b) 外側炉心

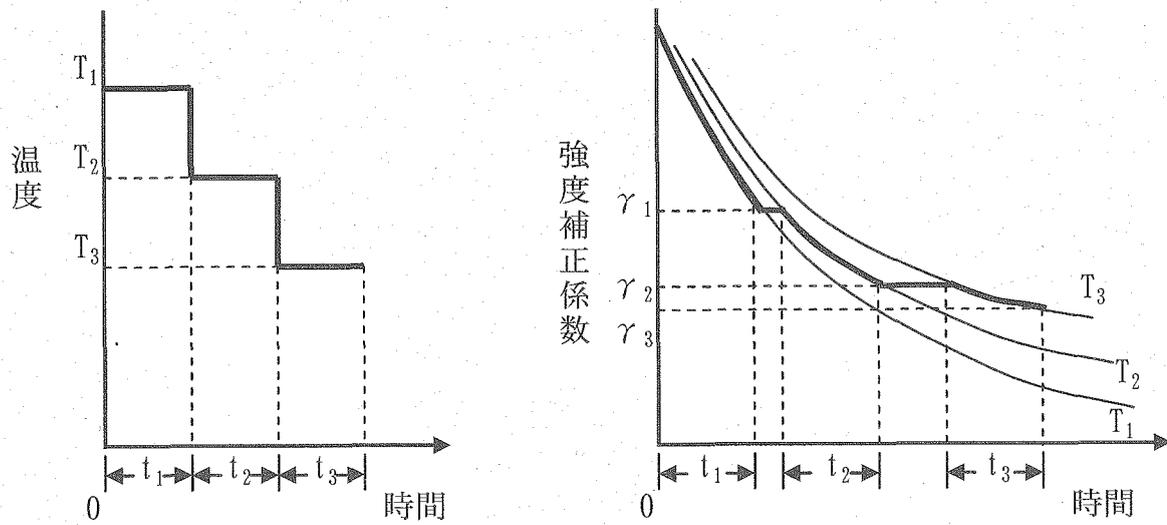


図 4-2 温度により変遷する強度補正係数の概念図

添付資料 A

「もんじゅ」実用化像実証炉心検討における核設計手法

本検討で採用している核設計計算の解析手法、条件等について述べる。核設計計算の全体の流れを図 A-1 に示す。

(1) 核定数ライブラリ

核定数ライブラリは、JENDL-3.2²⁾をベースとした高速炉用炉定数セットである JFS-3-J3.2R²⁾を用いる。本ライブラリは、これまで広く用いられてきた JFS-3-J3.2³⁾において、ライブラリ作成時の重みスペクトルとランプ化 FP のデータが改訂されたものである。

(2) 70 群実効断面積

断面積作成の流れを図 A-2 に示す。70 群実効断面積作成には核種毎に温度条件を設定できるように改良された SLAROM コード⁴⁾を使用する。セル体系は原則として無限平板とし、燃料集合体とその周辺の集合体ギャップ間に存在する Na を均質化して扱う。ただし、制御棒については非均質効果の影響が大きいため、セル体系を無限円筒とし、図 A-3 に示す非均質形状の中性子束分布を反映して断面積を作成する。

(3) 2 次元 RZ 体系

燃料集合体、制御棒等を六方格子で配置している炉心の 2 次元 RZ 体系へのモデル化については、炉中心制御棒を第 0 層、その周囲にある 6 体の燃料集合体を第 1 層、更にその外周に隣接する 12 体の燃料集合体を第 2 層・・・という様に、集合体の並びを層として扱い、原則として各層の体積を保存しつつ同心の円筒形状で模擬する。ここで、炉中心以外の制御棒チャンネルを含む層については次の通りとする。まず、制御棒集合体と燃料集合体の 2 つの層に分離する。第 3 層については制御棒チャンネルの体積を保存しつつ炉中心点から制御棒層厚の中心までの距離が炉中心点から実際の制御棒チャンネル中心までの距離と等しくなるようにし、第 3 層のドライバ燃料層を 2 層に分離してその制御棒層を挟み込むようにする。第 5 層及び第 6 層にある制御棒については各制御棒層を合わせて 1 つの層とし、第 5 層と第 6 層の燃料集合体層の間に配置する。

(4) 少数群実効断面積

少数群実効断面積として、70 群実効断面積を 7 群に縮約した断面積を 2 次元 RZ 燃焼計算で使用し、同じく 18 群に縮約した断面積を 3 次元拡散計算で使用する。この断面積の縮約には JOINT⁵⁾コードを用いる。本コードは基本的に CITATION-FBR⁶⁾コードを用いた 2 次元拡散計算で求められる領域毎の中性子スペクトルで断面積を縮約する。ただし、輸送断面積については拡散係数と領域毎の中性子スペクトルの積で縮約する。

(5) Pu 富化度計算

本検討では Pu 富化度の定義を $(Pu+^{241}Am)/HM$ とする。

Pu 富化度計算には、平衡サイクル末期の実効増倍率、及び内側炉心の最大線出力と外側炉心のそれとの比、の 2 つを Pu 富化度設定の判定条件として、CITATION⁶⁾コードによる 2 次元 RZ

燃焼計算を繰り返し実行する計算システムを用いる。この計算で用いる断面積は、平衡サイクル初期の組成に基づく7群マイクロ断面積である。また、制御棒状態については全引き抜き状態に相当するNa フォロワとして扱う。判定条件は次とする。

1. 平衡サイクル末期の実効増倍率： 1.003 ± 0.001
2. 平衡サイクル初期における最大線出力の比（外側炉心／内側炉心）：3次元解析で求める値が約1.0

実効増倍率条件については平衡サイクル末期の臨界性に対して運転余裕+バイト分（微調整棒による微小な負荷変動追従制御を行うために必要な制御棒のある程度の挿入に対応した反応度）として $+0.3\% \Delta k/k'$ を考慮している。最大線出力の比の条件については制御棒挿入を模擬した3次元拡散計算に基づいて求められる最大線出力の比が約1.0となる値を反映して設定する。この時の3次元拡散計算では、上記の実効増倍率条件を満足する2次元RZ燃焼計算で求められた平衡サイクル初期の組成を使用する。また、3次元拡散計算時に模擬する制御棒挿入状態は後述する3種類とする。さらに、最大線出力は3次元拡散計算結果に基づくペレット相当レベルでの集合体内空間分布評価により求められる線出力について、3種類の制御棒挿入状態の結果を包絡した最大値とする。

(6) 2次元RZ燃焼計算

Pu 富化度計算から燃焼特性解析までの計算の流れを図A-4に、燃焼計算で用いる燃焼チェーンを図A-5に示す。

燃焼反応度、燃焼度等の燃焼特性解析はPu 富化度計算と同じ計算システムを用いる。この時用いる断面積は平衡サイクル初期の組成に基づく7群マイクロ断面積である。また、制御棒状態はPu 富化度計算の場合と異なり、後述する3次元拡散計算時の制御棒挿入状態（粗調整棒による反応度制御：燃焼反応度の半分相当）を模擬する。ここで、2次元RZ体系では制御棒が環状の層として配置されるため3次元体系と同じ挿入位置では制御棒価値が過大になる。そこで、この制御棒価値の差は ^{10}B のマイクロ吸収断面積を補正して調整する。更に、複数の種類の制御棒が混在する炉心燃料配置の第3層及び第5、6層では、マイクロ断面積として粗調整棒のものを代用し、各種制御棒の体積を重みとして組成を均質化する。

燃焼チェーンについて、 ^{241}Am の中性子捕獲で生成する ^{242}Am の核異性体 $^{242\text{m}}\text{Am}$ への分岐比を最新の知見⁷⁾に基づき15%とする。また、CITATIONコードでは核反応に伴うエネルギー発生を反応の種類別に扱うことができず、核分裂のエネルギーのみを扱い中性子捕獲によるエネルギーを考慮していない。そこで、核分裂反応の放出エネルギーに中性子捕獲による発生エネルギーを補正として上乗せした核発熱データを使用して解析精度を上げる。この核発熱データの詳細は添付資料Bに記述する。

(7) 3次元拡散計算

3次元拡散計算の流れを図A-6に示す。制御棒挿入効果を取り入れた空間分布評価に関わる核特性はDIF3D[®]コードをベースとした3次元拡散計算コードを使用し、3次元体系のTri-Zメッシュによる拡散計算で求める。この計算で用いる燃焼組成は、燃焼計算で求める平衡サイクル時期のものである。また、使用する3次元拡散計算コードは、CITATIONコードと異なり、核分裂或いは中性子捕獲による発生エネルギーを区別して考慮した発熱断面積を扱うことができる。こ

の発熱断面積を作成する際の考え方や核分裂及び中性子捕獲当たりの放出エネルギーの出典等の詳細は添付資料 B に記述する。

3 次元拡散計算で各種空間分布を評価する際の制御棒挿入位置は、各制御棒の役割を考慮して以下の通りとする。

- ・ 後備炉停止棒 (BCR)
 運転サイクル時期に関わらず常にパーク位置 (定常運転時の最大引抜き位置であり、B₄Cペレットのスタック下端が炉心上端よりも 15 cm 上方あるような位置) とする。
- ・ 微調整棒 (FCR)
 平衡サイクル初期で BCR と粗調整棒がパーク位置にある状態において、FCR のみをパーク位置から挿入することで運転余裕+バイト分の反応度 (0.3 %Δk/kk') を担保できる位置とし、運転サイクルの時期に関わらずその位置を維持する。
- ・ 粗調整棒 (CCR)
 サイクル初期においては燃焼反応度分の過剰反応度を制御棒により抑制する必要がある、この炉心反応度制御には CCR を用いる。CCR の挿入位置は上記した BCR、FCR それぞれの制御棒挿入状態に対して以下の通りとする。
 <サイクル初期>
 - A. パーク位置からの挿入により燃焼反応度 (2 次元燃焼解析結果) の半分相当の反応度を担保できる位置
 - B. パーク位置からの挿入により燃焼反応度 (2 次元燃焼解析結果) 分を担保できる位置
 - C. パーク位置からの挿入により燃焼反応度 (2 次元燃焼解析結果) に+1 %Δk/kk'分の余裕を見込んだ反応度を担保できる位置
 <サイクル末期>
 - D. パーク位置
 - E. パーク位置からの挿入により+1 %Δk/kk'分の反応度を担保できる位置

A は定期検査が遅れる等の何らかの理由により所定の炉心反応度を確保できず、且つ、運転サイクル期間の短縮を許容しても運転を開始することを想定したものであり、サイクル初期の CCR 挿入量が少ない。B は計画通りに所定の反応度を維持する場合で、局所的な歪の影響を受ける線出力評価用に考慮する。C は計画通りの反応度制御に対して更に+1 %Δk/kk'分の余裕を見込んだものである。これは、所定の運転サイクル期間を確実に維持するために意図的に炉心反応度を高めに設定した場合に対応する。

D は、運転余裕分等を除きサイクル末期で余剰反応度が無くなった場合であり、E は C と同様にサイクル末期にて+1 %Δk/kk'分の余裕を見込んだものである。

3 次元解析結果として評価する空間分布のうち、各運転サイクルの瞬時的な核特性である集合体出力、高速中性子束 (≥0.1 MeV) については上記した CCR 挿入ケースの A と C の包絡値及び D と E の包絡値を最大値として評価する。ただし、線出力については制御棒挿入による軸方向

も含めた局所的な歪の影響を考慮する必要があるため、A と C だけでなく B も含めた包絡値を最大値として評価する。

上記に対して燃料の炉内滞在期間中の累積的な核特性である燃焼度及び高速中性子照射量は、CCR 挿入位置の想定シナリオよりサイクル初期の A に対してはサイクル末期の D、サイクル初期の C に対してはサイクル末期の E の 2 つの組み合わせが考えられ、これら 2 種類の組み合わせの包絡値を最大値として評価する。ここで、集合体出力履歴も炉内滞在期間中の累積的な核特性として考えられるが、これには各サイクル時期の最大集合体出力を使用し、最大集合体出力の履歴として保守的な評価とする。

(8) Na ボイド反応度

Na ボイド反応度の計算の流れを図 A-7 に示す。Na ボイド反応度を拡散計算で算出した場合、炉心上部のガスプレナム部における負の反応度が過大評価される傾向にある。従って、本検討では TWOTRAN-II⁹⁾コードを用いた 2 次元 RZ 体系の 70 群輸送計算に基づく直接計算で Na ボイド反応度を求める。反応度の単位換算 ($\Delta k/k' \rightarrow \beta$) に用いる実効遅発中性子割合 (β_{eff}) は PERKY¹⁰⁾コードを用いた 18 群拡散計算で求める。

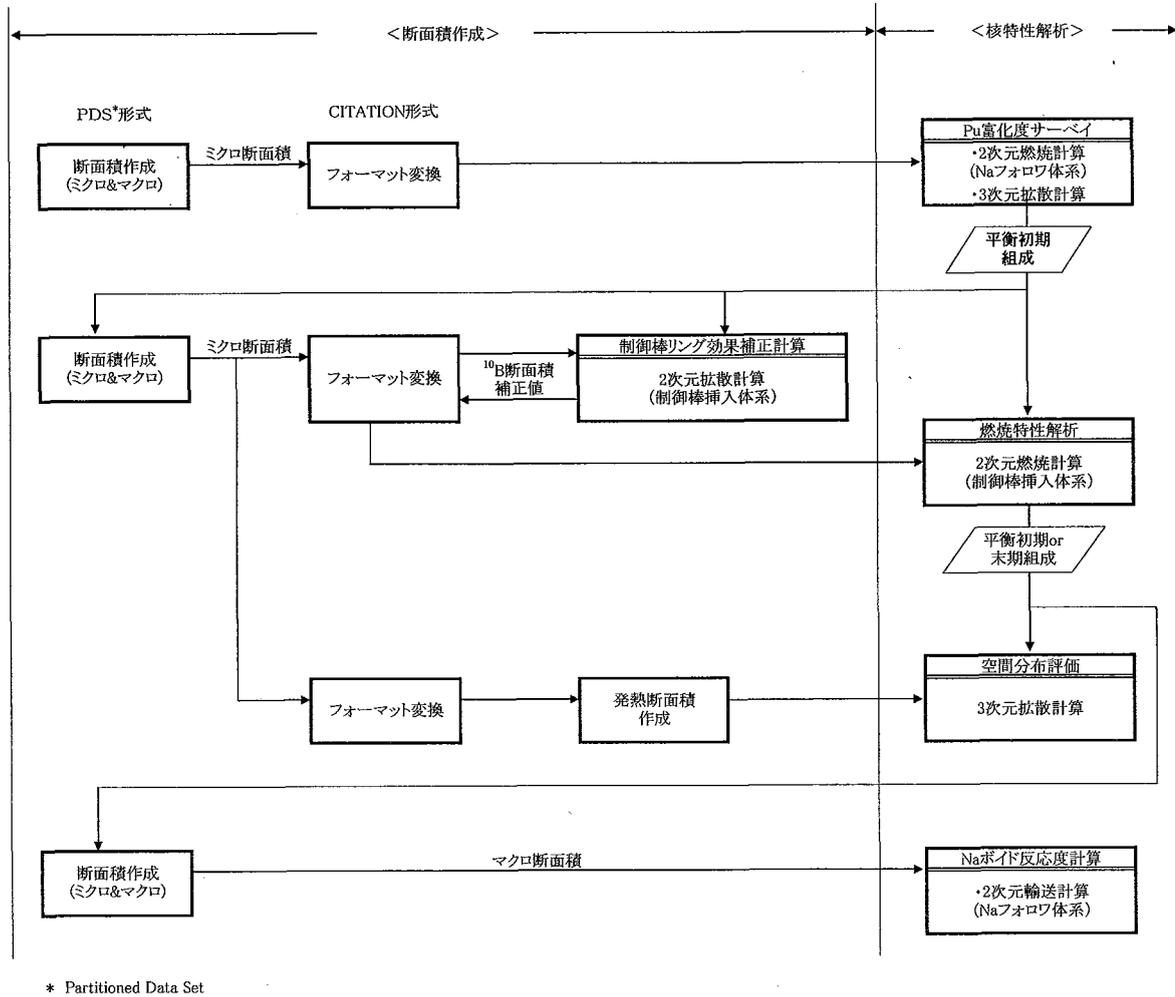
Na ボイド反応度計算時の制御棒状態は全引き抜きに相当する Na フォロワとして扱う。輸送計算で用いる 70 群断面積は、制御棒挿入体系の燃焼計算で求められた平衡サイクル初期及び末期の組成を炉心部、軸方向ブランケット部共に 2 次元 RZ 体系の層毎に均質化したもので作成した断面積とする。Na がボイド化する領域はラッパ管内の全冷却材チャンネルとする。簡易的ではあるがその発生メカニズムを模擬するため、ボイドは内側炉心、外側炉心、炉心上部軸ブラ、炉心上部プレナム部の順に拡散し、また炉心部より下側の領域ではボイドが発生しないとする。なお、Na ボイド反応度は燃料の非均質効果の寄与が大きいが、これは反応度を低減させる効果になると予測される。よって本検討では保守的に Na ボイド反応度に対する燃料非均質効果を考慮しない。

参考文献

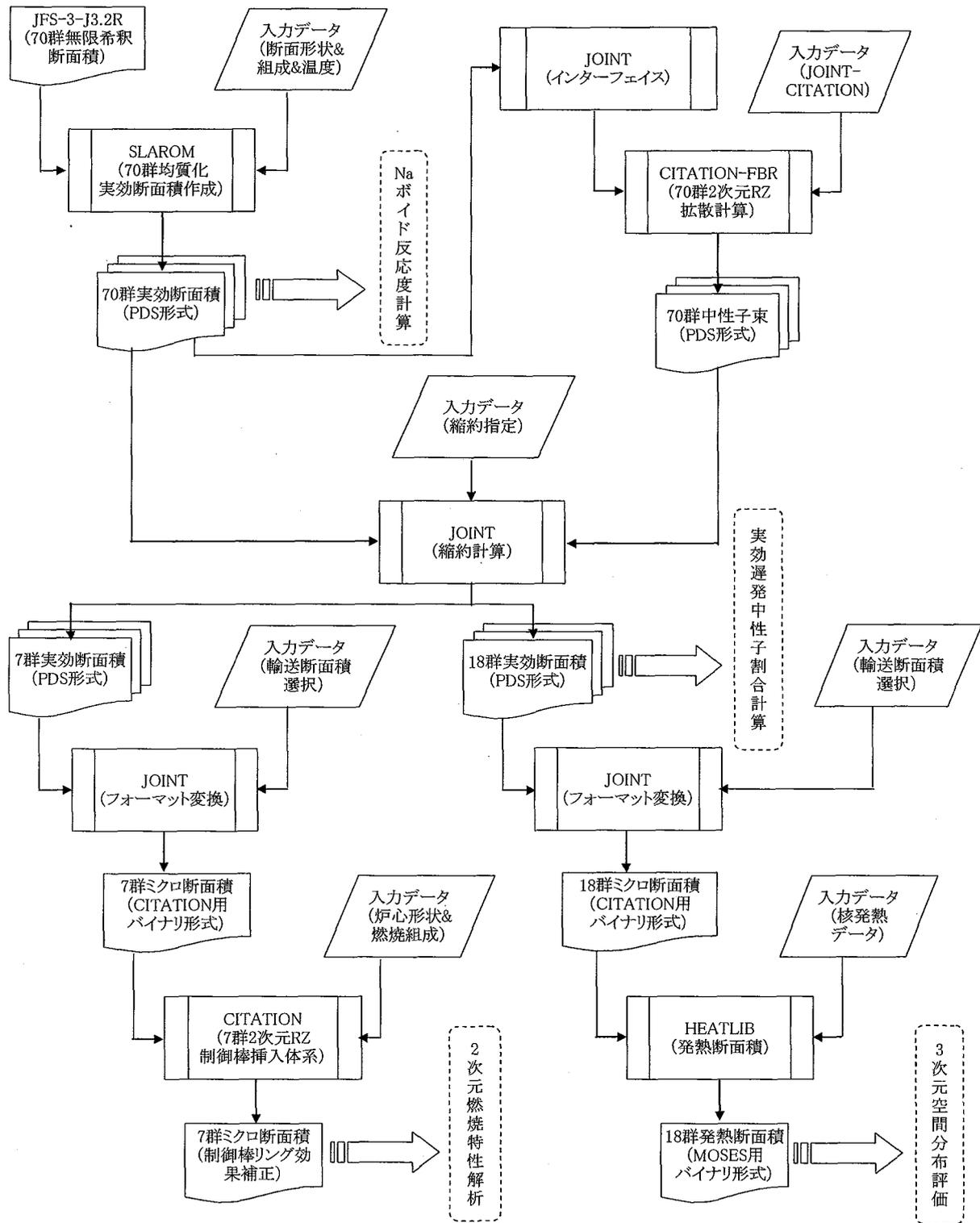
- 1) T. Nakagawa, *et al.*: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-2: JENDL-3.2", J. Nucl. Sci. Technol, **32**, p.1259 (1995).
- 2) 千葉 豪, 沼田 一幸: "JENDL-3.2 に基づく高速炉用炉定数 JFS-3-J3.2R の作成", JNC TN9400 2001-124
- 3) 高野 秀機, 金子 邦夫: "JENDL-3.2 の炉定数の整備", JAERI-memo 07-083 (1995).
- 4) M. Nakagawa and K. Tsuchihashi: "SLAROM: A Code for Cell Homogenization calculation of Fast Reactor", JAERI 1294 (1984).
- 5) 中川ら: "高速炉の核特性解析コードシステム", JAERI-M 83-066 (1983).
- 6) T. B. Fowler, D. R. Vondy and G. W. Cunningham: "Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION", ORNL-TM-2496, Rev.2, Oak Ridge National Laboratory (1971).
- 7) 大木 繁夫: "高速実験炉「常陽」を用いたサンプル照射試験による MA 核データの検証 (1) -²⁴³Am サンプル (試料番号 77) の予備解析", JNC TN9400 2004-002 (2004).
- 8) R. D. Lawrence: "THE DIF3D NODAL NEUTRONICS OPTION FOR TWO-AND

THREE-DIMENSIONAL DIFFUSION THEORY CALCULATIONS IN HEXAGONAL GEOMETRY”, ANL-83-1, Argonne National Laboratory (1983).

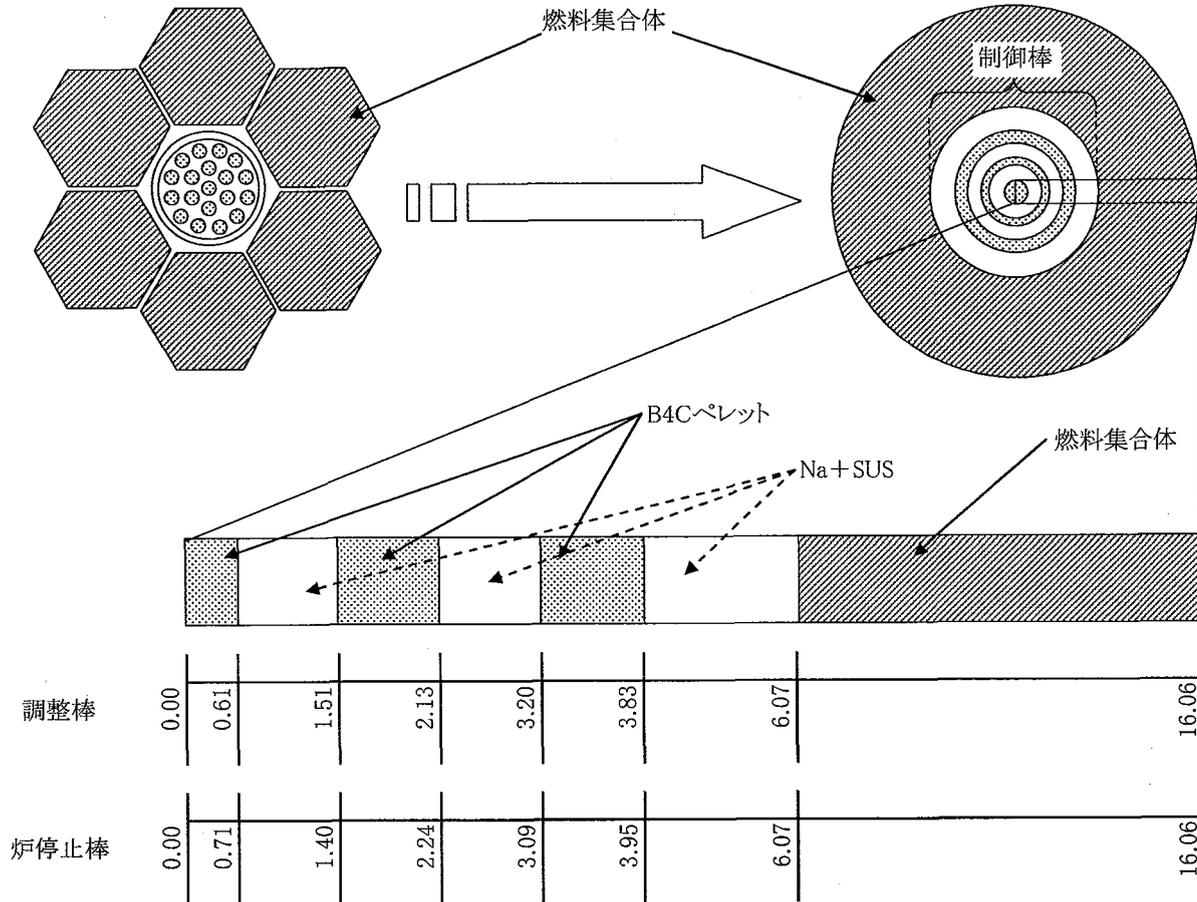
- 9) K. D. Lathrop and F. W. Brinkley: “TWOTRAN- II :An Interfaced, Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport”, LA-4848-MS, Los Alamos Scientific Laboratory (1973).
- 10) 飯島 進, 吉田 弘幸, 桜木 廣隆: “高速炉設計用計算プログラム・2 (2次元・3次元拡散摂動理論計算コード:PERKY) ”, JAERI-M 6993 (1977).



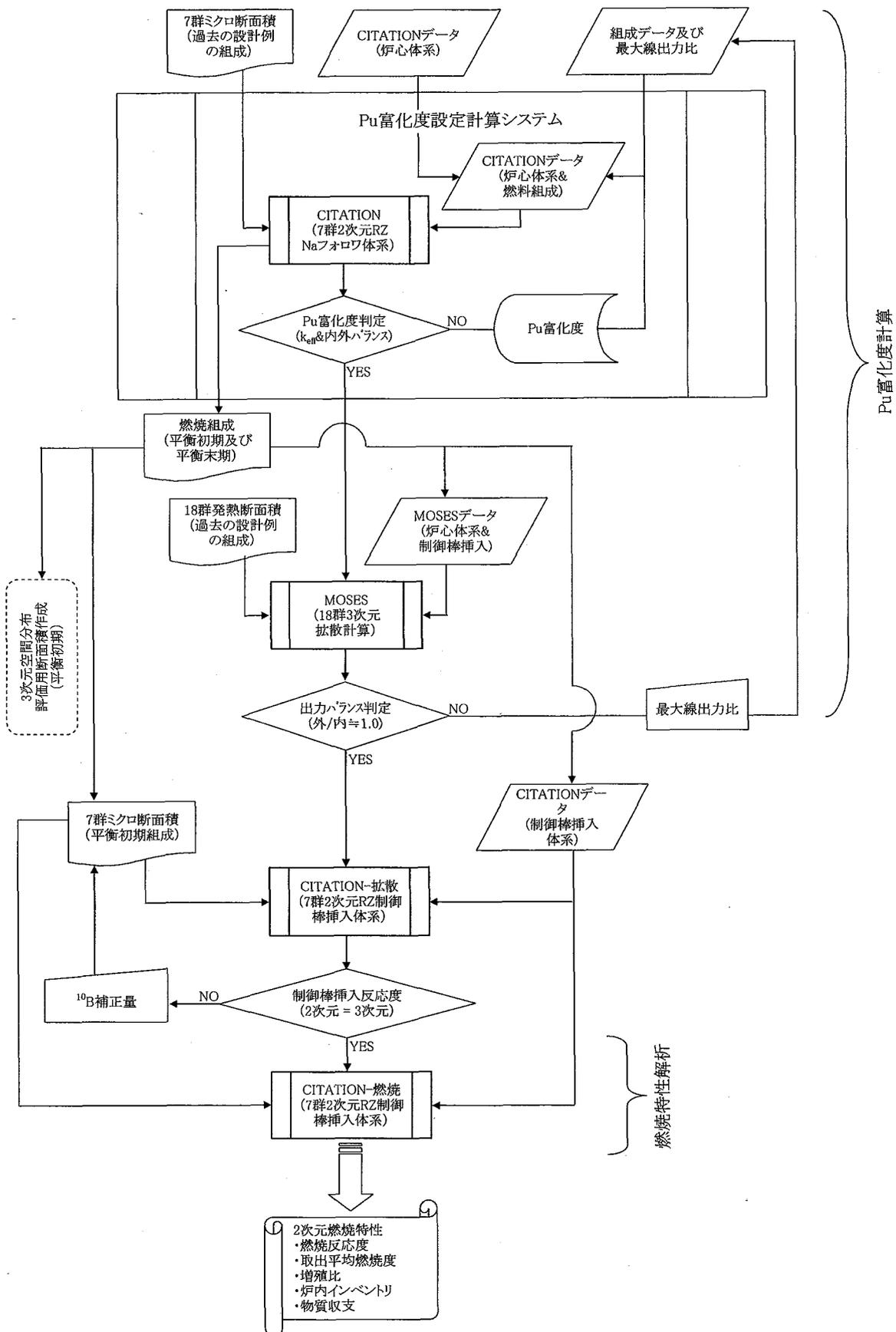
図A-1 核特性解析のフローチャート



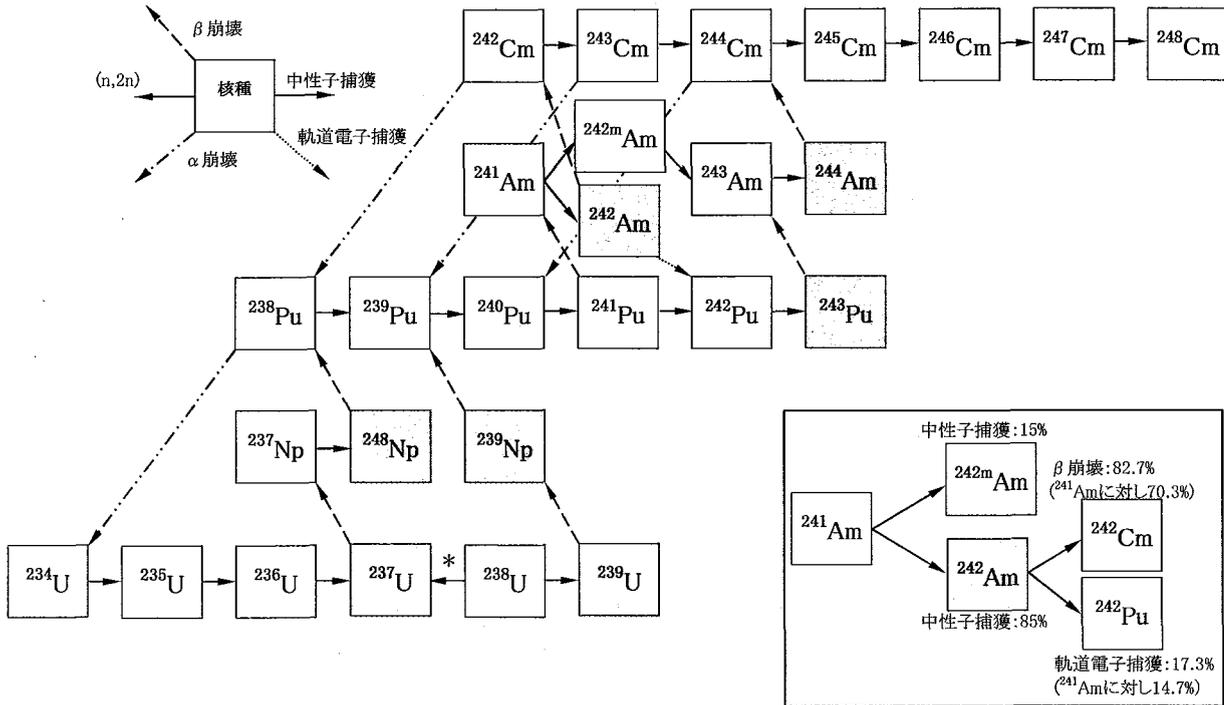
図A-2 断面積作成のフローチャート



図A-3 制御棒断面積作成時のリングモデル化手法



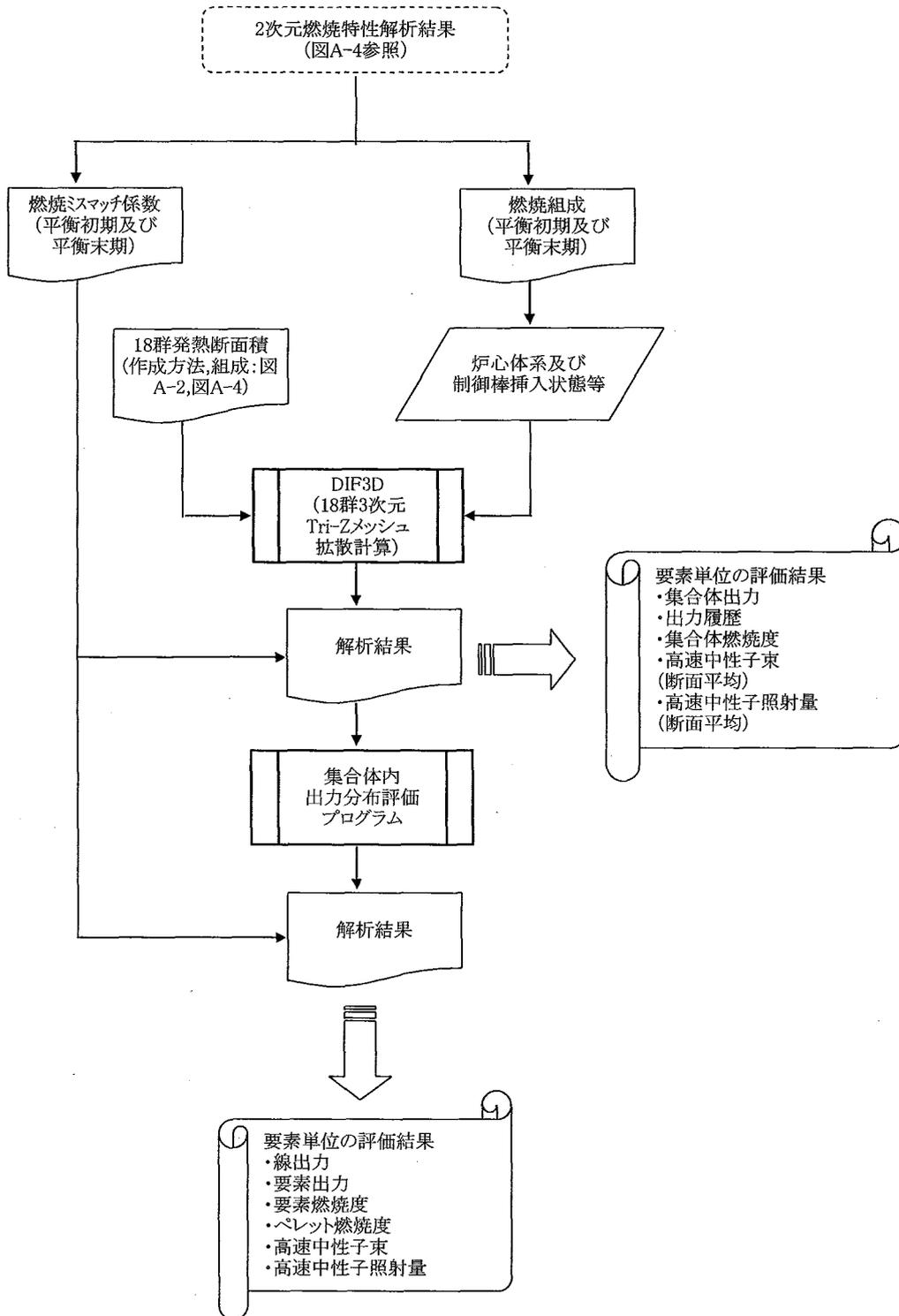
図A-4 Pu富化度計算～燃焼特性解析までのフローチャート



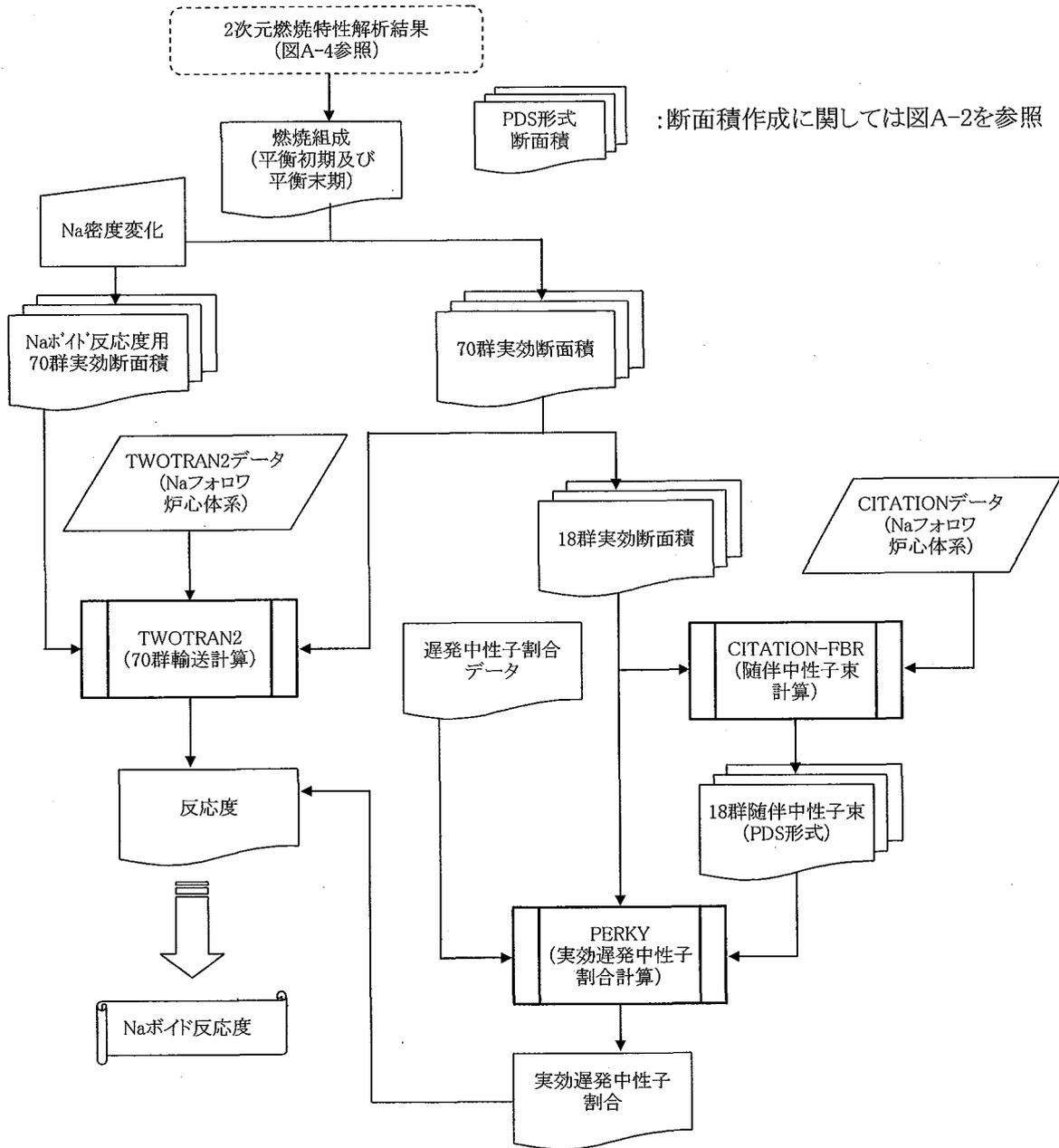
□内の核種は、生成後直ちに崩壊するものとする

* 計算上は核分裂反応の2.3%として扱う

図A-5 燃焼計算で用いる燃焼チェーン



図A-6 3次元拡散計算による空間分布評価のフローチャート



図A-7 Naボイド反応度計算を含む反応度係数計算のフローチャート

添付資料 B

核反応による放出エネルギー

本検討では、燃焼特性解析に CITATION¹⁾コードを、空間分布評価には DIF3D²⁾コードをベースとした 3次元拡散計算コードの、2種類の核特性解析コードを適用している。CITATION コードは核分裂以外の核反応による発熱を扱うことができない。対して、3次元拡散計算コードは核分裂反応による発熱に加え、中性子捕獲及び中性子散乱による発熱も取り扱うことができる。このような発熱反応の取り扱いの違いを踏まえ、両コード間で整合が取れた核反応の放出エネルギーを設定する。

B.1 CITATION コード

CITATION コードで扱える核反応当たりの放出エネルギーは核分裂反応の 1種類だけであり、従来から中性子捕獲による発熱を無視していた。そこで、核分裂の放出エネルギーに当該核種の中性子捕獲に伴う放出エネルギーを加味し、更に核燃料物質以外の核種（構造材、制御棒等）による中性子捕獲に伴う発熱の寄与を考慮する。この「実効的な」核分裂当たりの放出エネルギーは以下のように定式化できる。

$$E_{fi}^{eff} = E_{fi} + E'_{i,cap} \dots\dots\dots(B.1)$$

$$E'_{i,cap} = (\nu_i - 1)E_c^{ave} \dots\dots\dots(B.2)$$

$$E_c^{ave} = \sum_j E_{cj}R_{cj} \dots\dots\dots(B.3)$$

- E_{fi}^{eff} 核種 i の実効的な核分裂当たりの放出エネルギー
- E_{fi} 核種 i の核分裂当たりの放出エネルギー
- $E'_{i,cap}$ 核種 i の核分裂反応に伴って発生した中性子が炉内で捕獲されることによる放出エネルギー
- ν_i 核種 i の核分裂当たりに放出される平均中性子数
- E_c^{ave} 炉心全体の中性子捕獲反応比を考慮した中性子捕獲当たりの平均放出エネルギー
- E_{cj} 核種 j の中性子捕獲当たりの放出エネルギー
- R_{cj} 体系内のすべての核種による中性子捕獲反応率に対する核種 j の中性子捕獲反応率の比

核種 i は燃料核種のみを、核種 j は燃料、構造材及び制御材を含む体系内の全ての核種を表す。
 (B.1)式右辺の第 2 項 $E'_{i,cap}$ は核種 i の核分裂により発生した中性子 (ν_i 個) のうち臨界を持続するのに必要な数 (1 個) を除いた全中性子が、ある核種に捕獲される*1ことにより発生するエ

エネルギーである。これを E_f に加算することで実効的な核分裂当たりの放出エネルギーを得る。ここで、(B.2)式で示すように核種 i から発生した中性子が体系内のどの核種に捕獲されるか特定できないことに対応して、炉心全体で平均した中性子捕獲当たりの放出エネルギー E_c^{ave} を $(\nu_i - 1)$ 倍することで $E'_{i,cap}$ を得ている。

普通、中性子捕獲は中性子の発生位置とは異なる場所で起こるが、この考え方では、中性子発生場所で捕獲によるエネルギーを放出させている。このため、CITATION による出力分布評価は空間分布の模擬性が低い。

*1 実際には体系外に漏れる中性子も存在するが、計算体系として遮へい体を含む範囲を対象としているため、中性子漏えいによるエネルギーの漏れの影響は無視できるほど小さい。

中性子捕獲当たりの放出エネルギーは ENDF/B-VI の値を用いる。炉心計算において構造材核種の一部については天然核種のデータを使用しているが、ENDF/B-VI には Fe、Cr 及び Ni の天然核種のデータが存在しない。このため、これらの元素の各同位体の中性子捕獲当たりの放出エネルギーを存在比³⁾と中性子捕獲断面積の積で加重平均して天然核種に対する値を求める。また、ランプ化 FP のデータも存在しないため、これらに関しては JNDC (Japan Nuclear Data Committee) の報告書⁴⁾に記載されている値を使用する。JNDC の報告書にも記載がない ^{235}U -FP 及び ^{238}U -FP については ^{239}Pu -FP の値で代用する。

一部の核種では、中性子捕獲による生成核の崩壊に伴う放出エネルギーも考慮する。考慮する核種は、生成核の半減期が 1 ヶ月未満の 6 核種 (^{236}U 、 ^{238}U 、 ^{237}Np 、 ^{242}Pu 、 ^{241}Am 及び ^{243}Am) である。

^{10}B については、 (n, γ) に比べて (n, α) 反応断面積が非常に大きい ($\sigma_\alpha/\sigma_{cap} \sim 10^4$) ことを考慮して、後者の反応の放出エネルギーを用いている。

また、核分裂当たりの発生エネルギー E_f (添え字 i を省略した) は、Sher⁵⁾による核分裂当たりの正味の放出エネルギー QG を使用し、ニュートリノのエネルギーは体系外へ持ち去られるとして、次式で定義する。

$$E_f = QG - E_{NU} \dots\dots\dots(B.4)$$

E_{NU} ニュートリノのエネルギー

表 B-1 に QG の各値を示す。Sher がまとめていない核種については、セグレチャート上近傍の核種で代用する*2。なお、これらのまとめられていない核種による核分裂反応割合はわずかであり、代用による影響は殆どないと考えられる。

*2 具体的には、 ^{242m}Am 及び ^{242}Cm は ^{242}Pu 、 ^{243}Cm は ^{243}Am 、 $^{245}\sim^{248}\text{Cm}$ は ^{244}Cm の値で代用する。

以上、作成した CITATION コード使用時の核分裂当たりの放出エネルギーを表 B-2 に示す。

B.2 3次元拡散計算コード

3次元拡散計算コードについては発熱断面積を用いることが可能である。この断面積は下の式に示すように、核分裂反応に伴う発熱（第1項）、中性子捕獲に伴う発熱（第2項）、中性子散乱に伴う発熱（第3項）をそれぞれ考慮している。

$$\Sigma_{Hij} = (E_{fi} + EM_j)\sigma_{fij} + (E_{ci} + EM_j)\sigma_{cij} + HSD_{ij} \dots\dots\dots(B.5)$$

- Σ_{Hij} 核種 i のエネルギー群 j の中性子に対する発熱断面積
- E_{fi} 核種 i の核分裂当たりの放出エネルギー
- E_{ci} 核種 i の中性子捕獲当たりの放出エネルギー
- σ_{fij} 核種 i のエネルギー群 j の中性子に対する核分裂断面積
- σ_{cij} 核種 i のエネルギー群 j の中性子に対する捕獲断面積
- EM_j エネルギー群 j のレサジー平均エネルギー
- HSD_{ij} エネルギー群 j を起点とした下方散乱による発熱ミクロ断面積

$$HSD_{ij} = \sum_{k>j} \{ \sigma_{si,j\rightarrow k} (EM_j - EM_k) \} \dots\dots\dots(B.6)$$

- $\sigma_{si,j\rightarrow k}$ 核種 i のエネルギー群 j から k への中性子散乱断面積

核種 i は、燃料、構造材及び制御棒等、炉心計算における全ての核種である。

ここで、核分裂によって発生する即発及び遅発中性子が持つエネルギーは(B.5)式の第3項（散乱）で取り扱われるため、第1項に含まれる核分裂当たりの放出エネルギーは、次式に示すようにこれらを除く。

$$E_f = QG + E_{INC} - E_{NU} - E_{NP} - E_{ND} \dots\dots\dots(B.7)$$

- E_{INC} 入射中性子のエネルギー
- E_{NP} 核分裂当たりの即発中性子のエネルギー
- E_{ND} 核分裂当たりの遅発中性子のエネルギー

記載がない核種については CITATION コードと同様にセグレチャート上近傍の核種で代用する。また、(B.5)式第2項の中性子捕獲当たりの放出エネルギーは ENDF/B-VI の値を適用する。以上、3次元拡散計算コード使用時の核反応当たりの放出エネルギーを表 B-3 に示す。

B.3 考察

「もんじゅ」現行設計の高燃焼度段階炉心（平衡サイクル初期）条件を対象に CITATION コード及び 3 次元拡散計算コードにおいて全炉心の総核分裂反応率 (F_{total}) を算出し、次式のように全炉心で平均した核分裂当たりの放出エネルギー ($E_{f,ave}$) を算出した。

$$E_{f,ave} = \frac{P}{F_{total}} \dots\dots\dots(B.8)$$

P : 炉出力
 F_{total} : 総核分裂反応率

結果、CITATION コードによる $E_{f,ave}$ は 211.2MeV、3 次元拡散計算コードでは 211.1MeV となり、両者がほぼ一致した。

このように、発熱に関する取り扱い方法に両コード間で違いがあるが、核反応当たりの放出エネルギーを適切に設定することで発熱量の整合をとることができる。

参考文献

- 1) T. B. Fowler, D. R. Vondy and G. W. Cunningham: "Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION", ORNL-TM-2496, Rev.2, Oak Ridge National Laboratory (1971).
- 2) R. D. Lawrence: "THE DIF3D NODAL NEUTRONICS OPTION FOR TWO-AND THREE-DIMENSIONAL DIFFUSION THEORY CALCULATIONS IN HEXAGONAL GEOMETRY", ANL-83-1, Argonne National Laboratory (1983).
- 3) 文部省 国立天文台 編: "理科年表 平成 13 年 2001", 丸善株式会社 (2001).
- 4) Kanji TASAKA, *et al.*: "JNDC Nuclear Data Library of Fission Products -Second Version-", JAERI 1320 (1990).
- 5) R. Sher: "Fission Energy Release for 16 Fissioning Nuclides", Proc. Conf. on Nuclear Data Evaluation Method and Procedures, p835, BNL (1980).

表B-1 核分裂当たりの発熱量*

Nuclide	(MeV/fission)				
	ED delayed total	EP prompt total	EB β ray	EGD delayed γ	ENU neutrino
Pu238	18.01	186.46	5.42	5.31	7.28
Pu239	17.62	189.52	5.31	5.17	7.14
Pu240	21.39	187.43	6.44	6.31	8.64
Pu241	21.84	189.15	6.58	6.40	8.85
Pu242	25.60	187.94	7.70	7.55	10.34
U235	21.60	180.76	6.50	6.33	8.75
U236	24.43	179.89	7.35	7.21	9.87
U238	27.35	178.24	8.25	8.02	11.08
Am241	18.68	189.82	5.62	5.51	7.54
Am243	21.81	191.03	6.56	6.43	8.81
Np237	20.69	183.69	6.23	6.10	8.36
Cm244	21.03	193.08	6.33	6.20	8.50
U234	20.16	179.41	6.07	5.95	8.14
U233	17.10	180.76	5.16	5.01	6.93
Pa233	23.29	175.75	7.01	6.87	9.41
Th232	26.97	168.73	8.13	7.91	10.93

Nuclide	EFR	EGP	ENP	EINC	END
	fission fragment	prompt γ	prompt n	incident n	delayed n
Pu238	173.6	6.96	5.92	thermal	0.002
Pu239	175.78	7.76	5.9	thermal	0.0028
Pu240	173.7	6.96	6.77	2.39	0.004
Pu241	175.36	7.64	5.99	thermal	0.005
Pu242	174.0	6.96	6.98	2.32	0.010
U235	169.12	6.97	4.79	thermal	0.0074
U236	167.5	6.96	5.41	2.82	0.01
U238	169.57	6.54	5.51	3.10	0.018
Am241	176.4	6.96	6.53	thermal	-
Am243	176.3	6.96	7.77	3.0	-
Np237	170.6	6.96	6.17	2.37	0.005
Cm244	178.5	6.96	7.62	thermal	-
U234	167.1	6.96	5.36	2.36	0.005
U233	168.21	7.73	4.9	thermal	0.031
Pa233	163.5	6.96	5.28	3.0	0.01
Th232	160.39	7.11	4.7	3.35	0.022

* R. Sher: "Fission Energy Release for 16 Fissioning Nuclides", Proc. Conf. on Nuclear Data Evaluation Method and Procedures, p835, BNL (1980).

表B-2 核分裂当たりの正味の放出エネルギー QG*

Nuclide	(MeV/fission)
	QG
Pu238	204.66
Pu239	207.02
Pu240	205.66
Pu241	210.73
Pu242	209.47
U235	202.53
U236	201.82
U238	206.01
Am241	209.51
Am243	209.8
Np237	202.23
Cm244	211.52
U234	197.78
U233	198.02
Pa233	196.62
Th232	195.93

* R. Sher: "Fission Energy Release for 16 Fissioning Nuclides", Proc. Conf. on Nuclear Data Evaluation Method and Procedures, p835, BNL (1980).

表B-3 CITATIONコード用核反応当たりの放出エネルギー

核種	核分裂反応当たりの 放出エネルギー(E_f) *1	核分裂反応当たりの 中性子発生数(ν)	実効的核分裂反応 当たりの放出エネ ルギー(E_f^{eff})*1
	(MeV)	(-)	(MeV)
Pu-238	197.38	3.01	209.70
Pu-239	199.88	2.95	211.87
Pu-240	197.02	3.00	209.29
Pu-241	201.88	2.98	214.02
Pu-242*2	199.13	3.14	212.30
U-235	193.78	2.44	202.64
U-236*2	191.95	2.64	201.99
U-238*2	194.93	2.74	205.60
Am-241*2	201.97	3.51	217.38
Am-242M	199.13	3.32	213.40
Am-243*2	200.99	3.54	216.56
Np-237*2	193.87	2.76	204.69
Cm-242	199.13	3.43	214.06
Cm-243	200.99	3.49	216.26
Cm-244	203.02	3.51	218.44
Cm-245	203.02	3.58	218.83
B-10	-	-	-
B-11	-	-	-
C	-	-	-
O-16	-	-	-
Na-23	-	-	-
Fe-nat	-	-	-
Cr-nat	-	-	-
Ni-nat	-	-	-
Mo-nat	-	-	-
Mn-55	-	-	-
W-nat	-	-	-
U-235 FP	-	-	-
U-238 FP	-	-	-
Pu-239 FP	-	-	-
Pu-241 FP	-	-	-
U-234	189.64	2.57	199.25
Cm-246	203.02	3.53	218.56
Cm-247	203.02	3.88	220.70
Cm-248	203.02	3.47	218.16

*1 全炉心平均の中性子捕獲当たりの中性子発エネルギー(E_{cave})として6.14MeVを適用

*2 捕獲反応時の放出エネルギーに娘核種の崩壊による放出エネルギーも含めている

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル ⁻¹	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ (物質量の) 濃度	アンペア毎メートル	A/m
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

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

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

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

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときはいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

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

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2) ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ノット	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dam ² =10 ⁴ m ²
ヘクタール	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1b=100fm=10 ⁻⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイナ	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
ストルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	XU	1 XU=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガリ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	metric carat	1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カリ	cal	1 cal=4.184 J
ミクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m