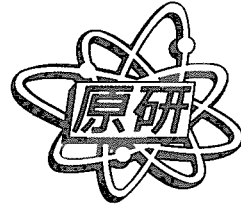


JAERI-Research
2001-039



JP0150730



海中航行観測船用原子炉SCR炉心の核的検討

2001年7月

小田野 直光・石田 紀久・和田 幸司*・今井 洋*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

海中航行観測船用原子炉 SCR 炉心の核的検討

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部

小田野 直光・石田 紀久・和田 幸司*・今井 洋*

(2001年6月1日受理)

熱出力 1250 kW の超小型原子炉 SCR (Submersible Compact Reactor) は、水深 300m 程度の中層域での科学調査船の動力源として用いられる一体型加圧炉である。SCR の炉心設計として、原子炉負荷率 50%を仮定した場合に燃料無交換で 10 年間の長期炉心寿命を達成する炉心の核的検討を行った。燃料棒の配列、 ^{235}U 濃縮度、反射体材質について検討し、9.5 wt%の濃縮度で設計条件を満足できる炉心仕様を得た。特に、超小型炉においては中性子の漏れが大きくなるので、反射体の設計は濃縮度とともに炉心寿命を左右する重要な因子である。本設計では、反射体材質としてジルカロイ-4 と Be 金属の検討を行い、その結果 Be 金属を使用することにした。また、燃料棒配列については、正方配列と三角配列の検討を行い、炉心サイズを小さくすることのできる後者を採用した。また、種々の核的安全性に係わるパラメータについて確認を行うとともに、反応度係数、出力分布等の核特性を評価し、設計条件を十分満足するものであることを明らかにした。

Neutronic Study of SCR Core for Under-sea Scientific Research Vessel

Naoteru ODANO, Toshihisa ISHIDA, Koji WADA* and Hiroshi IMAI*

Department of Nuclear Energy System
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 1, 2001)

A very small reactor, SCR (Submersible Compact Reactor), whose thermal output is 1250 kW, is an integral-pressurized type reactor to be used as a power source for a scientific research vessel in medium region to approximately 300-m in depth of the Arctic Ocean. Neutronic study has been carried out for design of the SCR core of which could achieve continuous long-term operation without refueling for 10 years considering 50 % of load factor of the core. In the present study, arrangement of fuel rods, ^{235}U enrichment of UO_2 fuel rods and reflector materials were surveyed. The ^{235}U enrichment has been determined to be 9.5 wt% to satisfy design criteria. Design of the reflector as well as that of the fuel enrichment is one of important factors for determination of the core life because leakage of neutrons from a very small reactor is large. In the present study Be metal was adopted as a reflector material. The square and triangle arrangements of fuel rods were studied and the later one was adopted for the present design to make possible to reduce size of the core. Reactor physics parameters including reactivity coefficients and power distributions were evaluated for the determined core specifications. Reactor physics parameters related to core safety were also confirmed and the evaluated parameters indicated that the determined core specifications in this study satisfied design conditions.

Keywords: Under-sea Research Vessel, Power Source, SCR, Light Water Reactor, Neutronics, Core Design, Burnnp, Reactivity Coefficients, Power Distribution

* Hitachi Engineering Co., Ltd.

目次

1. 序論	1
1.1 背景	1
1.2 海中航行観測船用原子炉 SCR	2
2. SCR 炉心の核設計方針	5
2.1 基本方針	5
2.2 炉心配置	8
3. 炉心仕様の決定	11
3.1 核特性解析手法の概要	11
3.2 材料組成	17
3.3 燃料棒配置	20
3.4 燃料濃縮度及び可燃毒物入り燃料棒配置	21
4. 核特性の評価	23
4.1 燃焼特性	23
4.2 核的安全性の評価	25
4.3 反応度係数	29
4.4 出力分布	34
4.5 核特性のまとめ	38
5. 結論	39
謝辞	39
参考文献	40
付録 A 実効増倍率の燃焼度依存性	41
付録 B 燃料棒内に蓄積される核種の原子個数密度	42
付録 C 反応度係数	54

Contents

1. Introduction	1
1.1 Background	1
1.2 Submersible Compact Reactor SCR for Under-sea Research Vessel	2
2. Design policy of SCR Core	5
2.1 Basic Policy	5
2.2 Core Configuration	8
3. Determination of Core Specifications	11
3.1 Outline of Methodology for Neutronic Analysis of Core	11
3.2 Material Compositions	17
3.3 Arrangement of Fuel Rods	20
3.4 Fuel Enrichment and Arrangement of Burnable Poison Doped Fuel Rods	21
4. Evaluation of Core Characteristics	23
4.1 Core Burnup Characteristics	23
4.2 Assessment of Nutronic Safety of Core	25
4.3 Reactivity Coefficients	29
4.4 Power Distribution	34
4.5 Summary of Core Characteristics	38
5. Conclusions	39
Acknowledgement	39
References	40
Appendix A Burnup Dependency of Effective Multiplication Factor	41
Appendix B Atom Density of Nuclei Accumulated in Fuel Rods	42
Appendix C Reactivity Coefficients	54

1. 序論

1.1 背景

地球の表面積の 71%を占める海洋は、地球温暖化に代表される地球規模の環境変動に大きく係わっており、環境変動の理解のために、近年ますます海洋観測の重要性が指摘されている。特に北極海は、地球の気候に影響を及ぼす海洋循環深く係わっていると考えられている。

北極海では、海水の氷結過程において、氷に溶け込めなかった塩分による高塩分水が生成され、深層域に沈み込む深層水の形成場所と考えられている。また、北極海は夏期でも厚い多年氷で覆われているので、海氷、海水、大気の 3 者が互いに相互作用を及ぼしあい、海洋循環にも影響を与えていると考えられる。従って、北極海における海洋観測は、地球規模の環境変動に深く係わっている海洋循環のメカニズムを解明するにあたり、欠かせないものである。しかしながら、夏期でも多年氷に覆われ、冬季は非常に厳しい海象となるために、既存の大型砕氷船では観測を行うことができない。また、海洋循環のメカニズム解明にあたっては、海表面の観測のみならず、水深 300m までの中層域について、広範囲な 3 次元的なデータ取得が不可欠である。観測では、広範囲に及ぶ海域について、氷厚、海水温度、塩分濃度、流速等の分布を海中から調査する必要があり、このような観測には海中調査船が適していると考えられる¹⁾。

北極海を対象とした調査は、米国の原子力潜水艦を利用した SCICEX (Scientific Ice Expeditions) プログラムによって 1993 年から 1999 年まで 7 回にわたって行われており、一部のデータが公表されている^{2,3)}。しかしながら米国海軍の潜水艦を使用しているという特殊事情のために、データの公開性に制限があること、搭乗人員の国籍制限などがあり、我が国の海洋研究者にとっては、アクセスしにくいデータとなっている。このような現状のために、我が国の海洋研究者のみならず海外の研究者からも純粋な平和利用のための海中航行観測船の実現が望まれている。

1.2 海中航行観測船用原子炉 SCR

日本原子力研究所では、改良船用炉の設計研究の一貫として、深海を含む海洋観測の動力源として利用できる最適な原子動力源の設計研究を行い、小型原子炉による発電システム DRX (Deep Sea Reactor X) の概念を確立した⁴⁾。さらに、海洋調査のニーズに応じた海中航行観測船を想定し、海中航行観測船用原子炉 SCR (Submersible Compact Reactor) の概念設計を行った⁵⁾。

原子炉の概念設計にあたり想定した海中航行観測船の主要目を表 1 に示す。海中航行観測船の排水量は 500 t で、要求船速は 12 ノット (22.2 km/h) である。これらの条件より海中航行観測船に必要な電力量は 500 kWe である。海中航行観測船は北極圏内を長期間 (最大 2 ヶ月) 連続航行するため、万一の場合に備えて原子炉系統を多重化させるため、出力 250 kWe の原子炉を 2 基搭載する設計とした。

図 1 に SCR の概念図を示す。SCR は、蒸気発生器を原子炉容器内に内蔵する一体型軽水炉である。原子炉プラントを直径 5.5 m の耐圧殻内に収める必要性から、タービン発電機等の二次系設備は分離して別の耐圧容器に収めることにした。小型化、受動的安全性の確保を基本的設計方針とし、海中航行観測船に適用するため、小人数の運転員による容易な運転が可能な原子炉を目指している。また、SCR の反応度制御には可溶性ボロンを使用しない設計としており、化学体積制御系を不要とすることができ、系統の簡素化に寄与している。表 2 に SCR の主要目を示す。表中、炉心に関する項目には、炉心設計の前提条件となるパラメータのみ記した。

SCR 炉心の熱出力は 1250 kWt で、非常に小さい炉心となり、原子炉物理的観点からは中性子の漏れが非常に大きい体系である。炉心の熱出力は、深海調査船の排水量、速力から決まる電力需要 (250 kWe) から決定されたものである。炉心サイズは、線出力密度、燃料棒本数等によって決まる。また、原子炉は負荷率 50% を仮定し、10 年間にわたって燃料無交換により運転することを可能とすることを目標とする。このため、炉心核設計においては、所要の出力及び炉心寿命を得るための、燃料棒配置、燃料濃縮度の検討などが必要になる。

本研究では、SCR 炉心の核的検討として、設計条件を満足する炉心の核的パラメータを決定し、熱水力特性及び動特性解析に必要な出力分布、反応度係数等の炉物理パラメータを算出した。

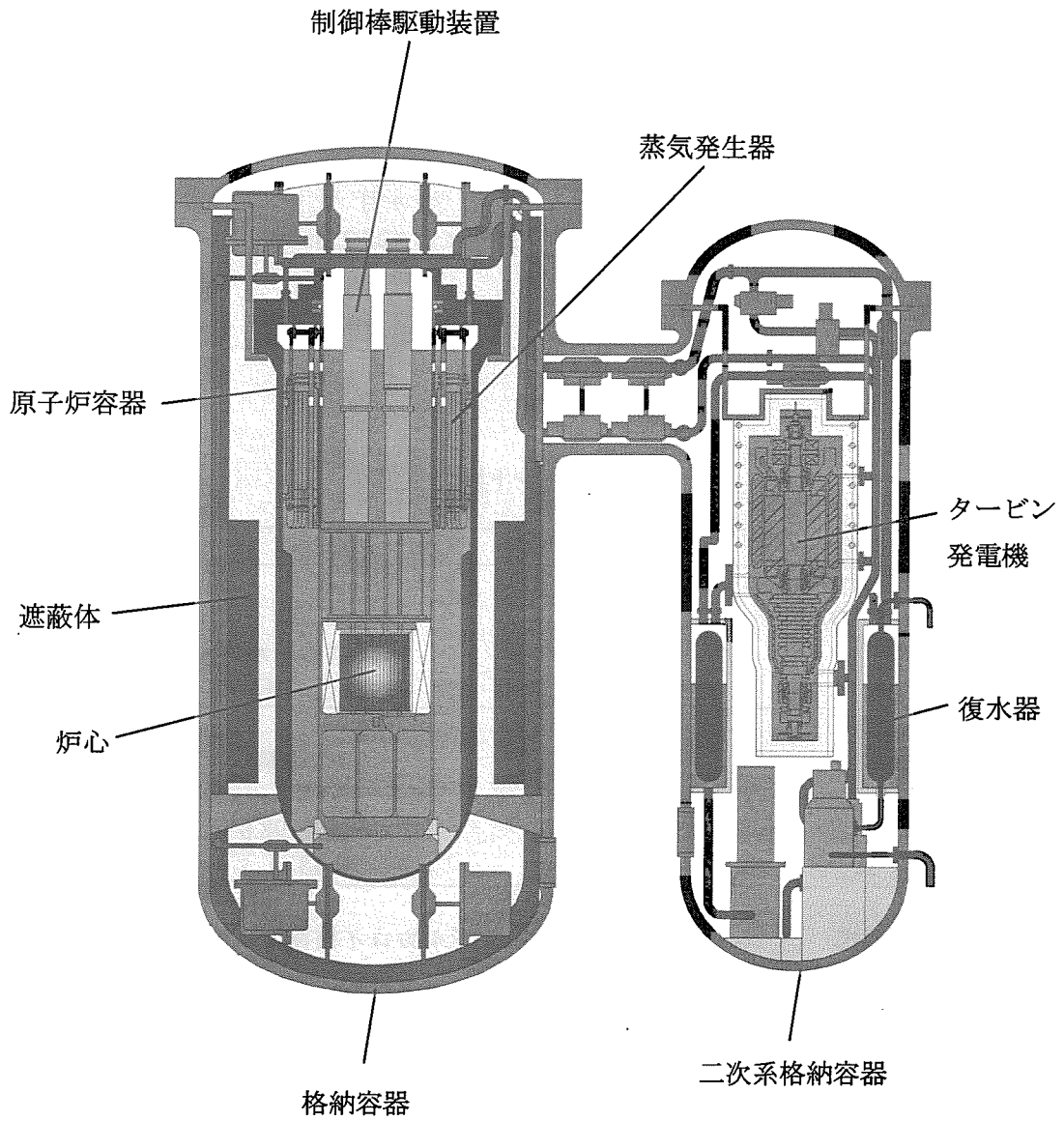


図1 SCRプラント概念図

表1 海中航行観測船の主要目

排水量	500 t
乗組員	16名
最大潜航深度	600 m
連続航行期間	2ヶ月
最大船速	12ノット (22.2 km/h)

表2 SCRプラント設計主要目

項目	設計値
原子炉出力 (MWt)	1.25
電気出力 (MWe)	0.25
炉形式	一体型加圧水炉 (自己加圧)
一次冷却系	
循環方式	自然循環
運転圧力 (MPa)	8.4
炉心入口/出口温度 (°C)	281.8 / 298.0
流量 (kg/s)	13
炉心	
燃料型式	ジルカロイ被覆 UO ₂ 燃料棒
寿命 (年)	10
制御棒	
制御棒要素型式	ロッドクラスター
制御棒駆動装置型式	原子炉容器内装型
蒸気発生器	
型式	貫流式ヘリカルコイル型
伝熱管材質	インコロイ 800
蒸気温度 (°C)	242.4
蒸気圧力 (MPa)	3

2. SCR 炉心の核設計方針

2.1 基本方針

SCR 炉心設計における基本的な考え方は DRX 炉心設計⁶⁾と同様であり、これまでに我が国で蓄積されてきた発電用加圧水型軽水炉の技術を十分に活用することとする。また、原子炉の安全設計については、原子力を動力源とする海中航行観測船のような特殊原子炉施設に対する明確な設計指針は存在しないので、我が国の原子力安全委員会が決定した「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」⁷⁾を準用することにした。

SCR 炉心の核設計を行う際の前提条件は、

- | | |
|-----------|---------------------------------|
| (1) 熱出力 | : 1250 kW |
| (2) 設備利用率 | : 50 % |
| (3) 炉心寿命 | : 10 年 |
| (4) 線出力密度 | : 5.9 kW/m |
| (5) 燃料交換 | : 炉心寿命期間中は燃料交換を行わない |
| (6) 反応度制御 | : 可溶性ボロンを使用しない |
| (7) 燃料仕様 | : ジルカロイ 4 被覆 UO ₂ 燃料 |

である。

SCR は一次冷却系に自然循環方式を採用し、また、船体動揺及び加速度条件などの負荷があることを考慮し、核沸騰限界 (DNB) 等の熱水力的なパラメータの制限から、線出力密度を、陸上の発電用 PWR の 18 ~ 20 kW/m⁸⁾ に比べて低く抑えている。また、SCR では、既存の現行 PWR 技術を活用するという観点から、発電用軽水炉において十分使用実績のある 17×17 燃料集合体に用いられているものと同一仕様の燃料棒及び制御棒を短尺化して用いることとする。表 3 に燃料棒及び制御棒の基本的な仕様を示す。炉心の大きさは、熱出力、線出力密度、燃料棒本数、燃料棒ピッチより決めることができる。

設備利用率を 50% と仮定し、燃料無交換で炉心寿命 10 年を達成するという条件からは、UO₂ 燃料の濃縮度が決定される。SCR 炉心は、非常に小さい炉心であり、中性子の漏れが非常に大きいので、燃料濃縮度 5 wt% 以下の低濃縮燃料では、炉心寿命 10 年という条件を達成することは困難である。燃料濃縮度を高くし、反射体材料を適切に選択することで設計条件を満足することができるが、核拡散抵抗性の観点から燃料濃縮度の上限は 20 wt% とし、必要最小限の濃縮度でとどめることとする。

SCR では反応度制御のための可溶性ボロンを使用しない設計となっており、原子炉停止系は制御棒による系統のみである。このため、スクラム方式の異なる 2 種類の制御棒制御系による制御棒クラスター挿入系を設けて多様化し、原子炉停止系の独立性を担保する。原子炉停止系の独立性及び制御棒による原子炉の停止余裕については、核特性解析により確認する。

SCR は炉心寿命期間中に燃料交換をしない設計であり、炉心寿命後に燃料交換をする場合には、耐圧殻一括搬出後陸上施設内で実施するため、燃料取扱施設は深海科学調査船内には設けない。本研究では、燃料取扱施設の臨界安全性の観点からの詳細な検討は行わず、燃料の臨界安全

表 3 燃料棒及び制御棒要素の基本仕様

燃料要素	
被覆管	
材質	ジルカロイ-4
外径/内径 (mm)	9.50 / 8.36
肉厚 (mm)	0.57
UO ₂ ペレット	
直径 (mm)	8.21
密度 (g/cm ³)	10.40
ペレット-被覆管ギャップ (mm)	0.075
制御棒要素	
制御棒案内管シンプル	
材質	ジルカロイ-4
外径/内径 (mm)	12.0 / 10.0
肉厚	1.0
被覆管	
材質	SUS304
外径 (mm)	9.5
肉厚 (mm)	0.5
吸収材	
材質	B ₄ C
直径 (mm)	8.2
密度 (g/cm ³)	1.76
吸収材-被覆管ギャップ (mm)	0.015

性については、炉心組立時の臨界安全性についてのみ考慮する。

以上のような観点から、SCRにおける炉心設計方針を以下のように決めた。

(1) 反応度停止余裕

制御棒クラスターは、最大反応度効果を持つ制御棒クラスター1体が、全引抜き位置のまま挿入できない場合でも、炉心を低温状態で臨界未満 ($k_{\text{eff}} < 0.99$) にできる設計とする。

(2) 原子炉停止系の独立性

原子炉停止系に含まれる独立した2種類の制御棒制御系のうち、1種類の制御棒制御系の制御棒により、低温停止状態で炉心を未臨界 ($k_{\text{eff}} < 0.99$) にでき、かつ、低温状態で臨界未満を維持できる設計とする。

(3) 反応度係数

炉心が負の反応度フィードバック特性を持つように、ドップラー係数と減速材温度係数が負になるように設計し、これらを総合した反応度出力係数が運転時の異常な過渡変化時及び低温炉停止時においても出力抑制効果を持つように設計する。

(4) 出力分布

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、燃料中心最高温度を二酸化ウランの容融点未満とする。定格出力時の最大線出力密度は、燃料焼きしまりの効果を含めずに 41 kW/m 以

下となるように設計する。また、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において最小限界熱流束比が 1.3 以下という制限を越えるような出力分布が起こらないように設計する。

(5) 燃料集合体の未臨界性の確保

燃料集合体 1 体は、いかなる湿度雰囲気に置かれたとしても、臨界未満 ($k_{\text{eff}} < 0.95$) を維持できるように設計する。

(6) 燃料濃縮度

核拡散抵抗性の観点から、燃料濃縮度は 20 wt% を越えないように設計することとし、可能な限り濃縮度を抑える設計とする。

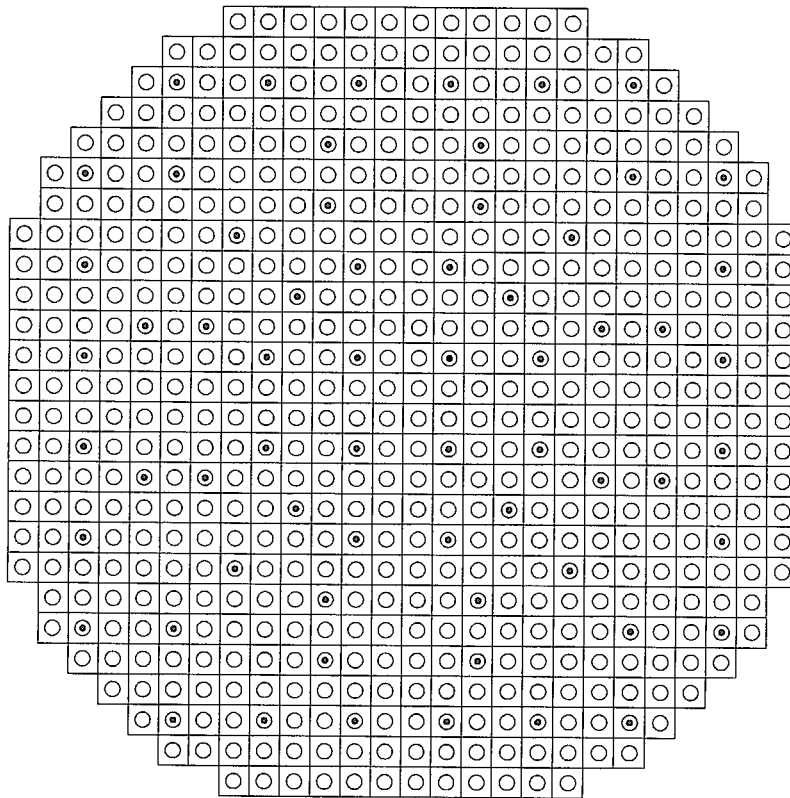
2.2 炉心配置

上記の炉心設計方針に基づいて、炉心の核特性の評価を行うにあたり、炉心全体の基本的な仕様について検討した。検討事項は、燃料棒の本数、燃料棒及び制御棒の配置である。表 4 に燃料棒配置（三角配列と正方配列）と燃料棒ピッチをパラメータに炉心サイズを検討した結果を示す。三角配列と正方配列の炉心サイズを比較すると、同一燃料棒ピッチの場合、三角配列の方が炉心等価直径が小さくなっており、炉心サイズを小さくするという観点からは設計上有利である。

制御棒本数及びその配置については、原子炉停止余裕の評価結果によっては変更が有り得るが、暫定的な炉心仕様として表 4 のような仕様とした。炉心の有効高さ及び平均線出力は固定して、燃料棒ピッチを調整した。燃料棒の本数は、炉心の有効高さ及び線出力密度から暫定的な値を決め、燃料棒が等価直径内に適切に配置されるように燃料棒の本数を調整した。制御棒配置は、制御棒クラスターの構造の制限から、制御棒が隣接して配置されることのないように配慮した。図 2 及び図 3 に、SCR の燃料要素を正方配列にした場合と三角配列にした場合の炉心部分の断面の概念図を示す。なお、SCR の概念設計においては、炉内構造物の大きさに関する詳細な検討はなされていないので、DRX の設計を参考に、炉心の外周には、厚さ 8.4 cm の反射体と厚さ 2 cm の炉心槽を配置することにした。

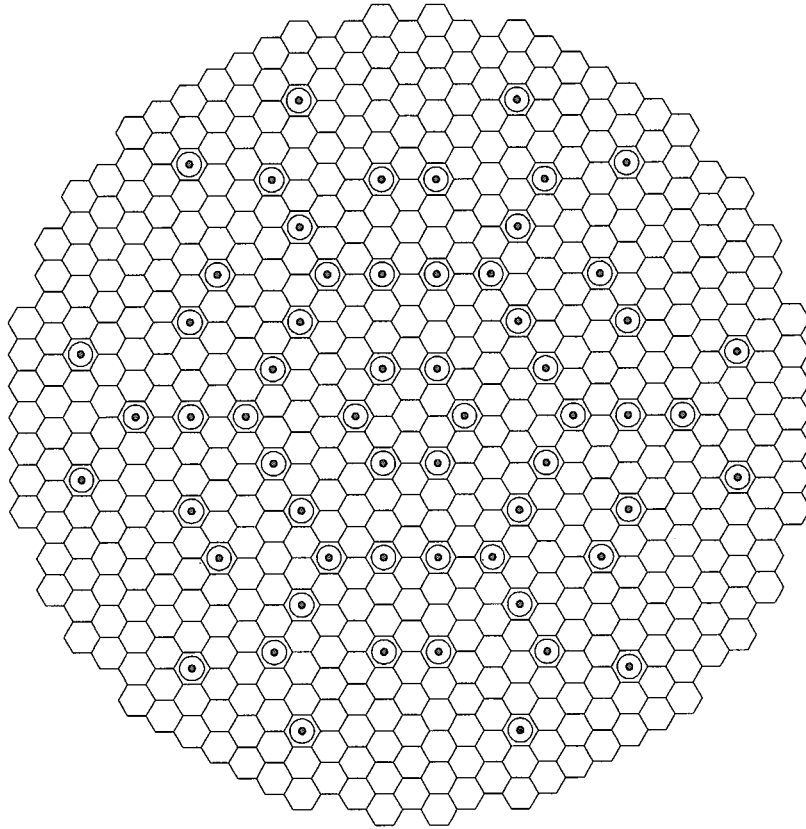
表 4 炉心仕様

燃料棒配列	正方格子配列			三角格子配列		
	16.75	18.0	20.0	16.75	18.0	20.0
燃料棒ピッチ(mm)	16.75	18.0	20.0	16.75	18.0	20.0
燃料棒本数 (本)	520			523		
制御棒本数 (本)	64			60		
等価直径 (cm)	45.6	49.0	54.6	42.4	45.6	50.8
有効高さ (cm)	40.7			40.7		
平均線出力 (kW/m)	5.91			5.87		



- 燃料要素 (× 5 2 0)
- ⊙ 制御要素 (× 6 4)

図 2 SCR 断面図 (正方格子配列)





-  燃料要素 (× 5 2 3 本)
-  制御要素 (× 6 0 本)

图 3 SCR 断面图 (三角格子配列)

3. 炉心仕様の決定

3.1 核特性解析手法の概要

炉心核特性の解析は SRAC コードシステム⁹⁾を用い、核データライブラリには JENDL-3.2¹⁰⁾に基づくものを使用した。

格子計算では、図 4、5 に示すような格子モデルを採用し、エネルギー及び領域依存の中性子分布からセル平均実効断面積を計算し、1 点炉近似のスペクトル計算を行った。さらに、同スペクトルを使用して炉心計算のための少数群（高速 5 群、熱群 5 群）の実効断面積を計算した。少数群の群構造を表 5 に示す。その際、幾何学バックリングを炉心等価半径 R と炉心高さ H から

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 + \left(\frac{2.405}{R}\right)^2 \quad (1)$$

で与え、炉心からの中性子の漏れを考慮した。なお、共鳴エネルギー領域については超詳細群衝突確率法により厳密に取り扱った。また、燃焼物質を含む格子については、格子燃焼計算を実施した。格子燃焼計算においては、平均線出力を与え、SRAC コード内の simple-FP チェーンを用い、燃焼期間は 0 ~ 25,000 MWd/t の燃焼度に相当する期間とした。

全炉心の計算は、格子計算で得られた少数群の実効断面積を用い、SRAC の拡散計算モジュール CITATION の 3次元体系（燃料を正方配列にした場合には XYZ 体系、三角配列にした場合には Hex-Z 体系）によって行った。図 6、7、8 に炉心モデルの概念図を示す。なお、SCR では制御棒ストロークを短くするという観点から、プレナム部を燃料棒下部に設置している。

表 5 少数群定数のエネルギー群構造

	群数	エネルギー上限 (eV)	エネルギー下限 (eV)
高速群	1	1.0000×10^7	1.3534×10^6
	2	1.3534×10^6	1.1109×10^5
	3	1.1109×10^5	2.0347×10^3
	4	2.0347×10^3	3.7266×10^1
	5	3.7266×10^1	1.8554×10^0
熱群	6	1.8554×10^0	2.7699×10^{-1}
	7	2.7699×10^{-1}	1.3700×10^{-1}
	8	1.3700×10^{-1}	6.4017×10^{-2}
	9	6.4017×10^{-2}	1.8467×10^{-2}
	10	1.8467×10^{-2}	1.0000×10^{-5}

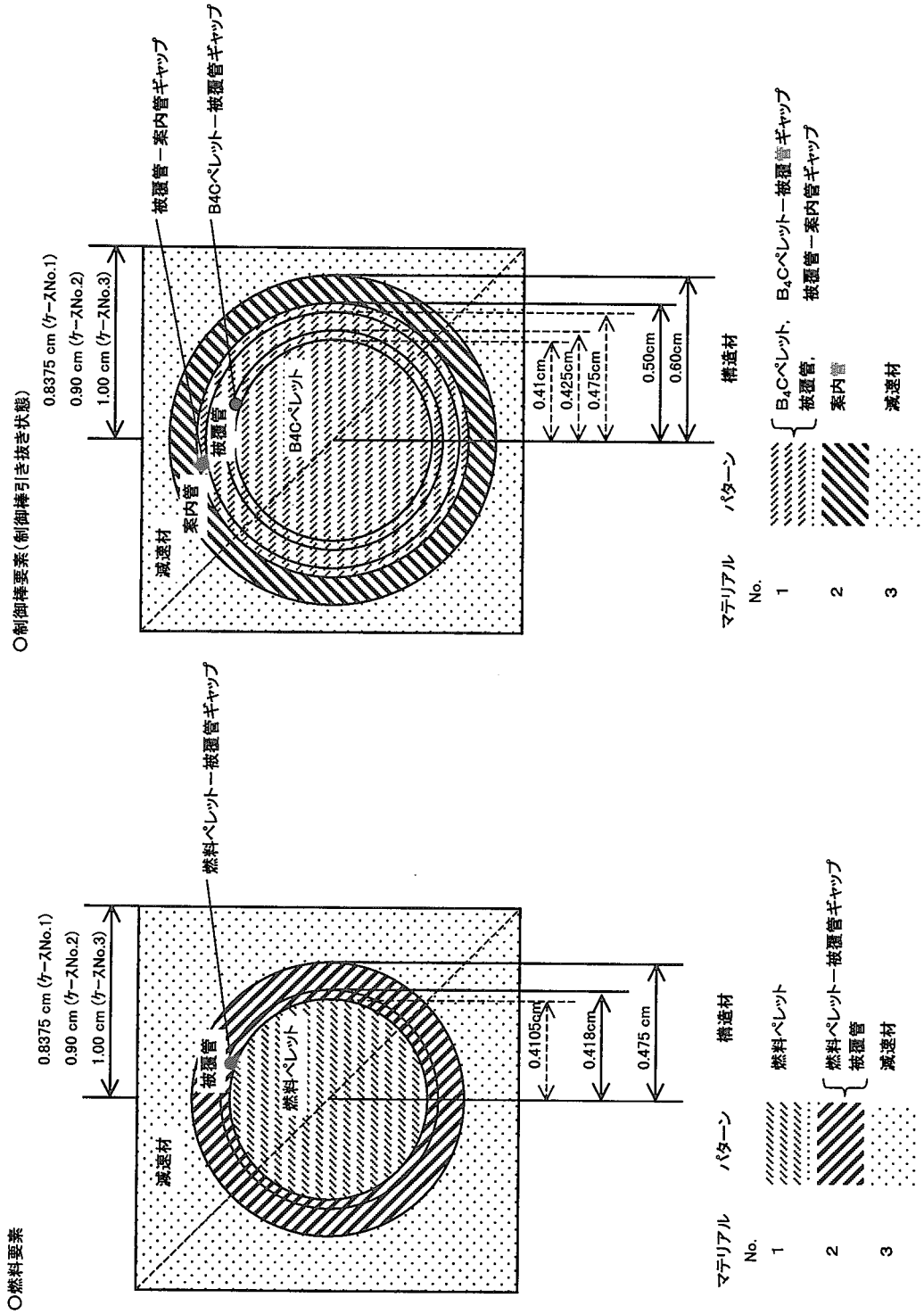


図 4 燃料・制御棒要素領域の格子モデル (正方格子)

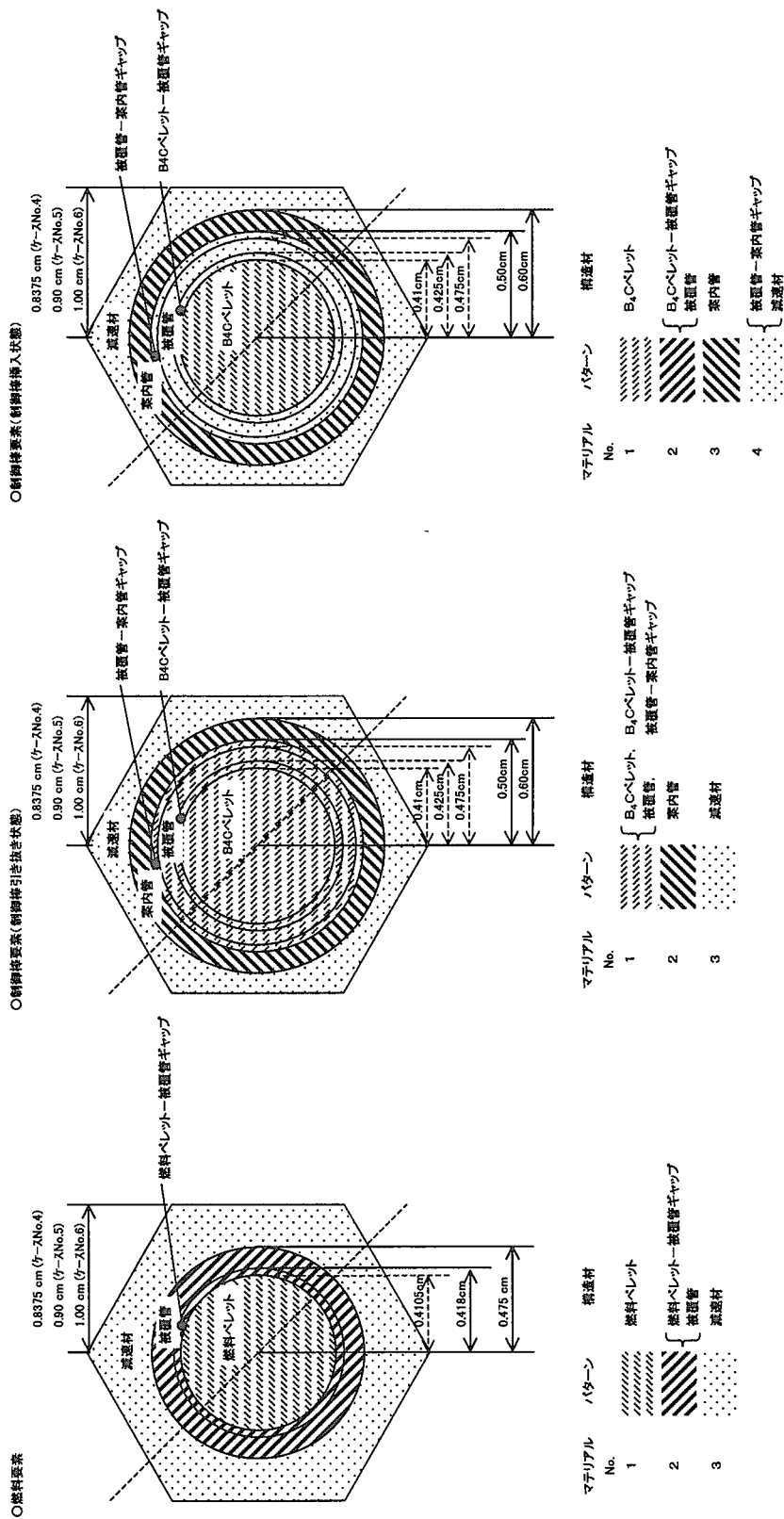


図5 燃料・制御棒要素領域の格子モデル (六角格子)

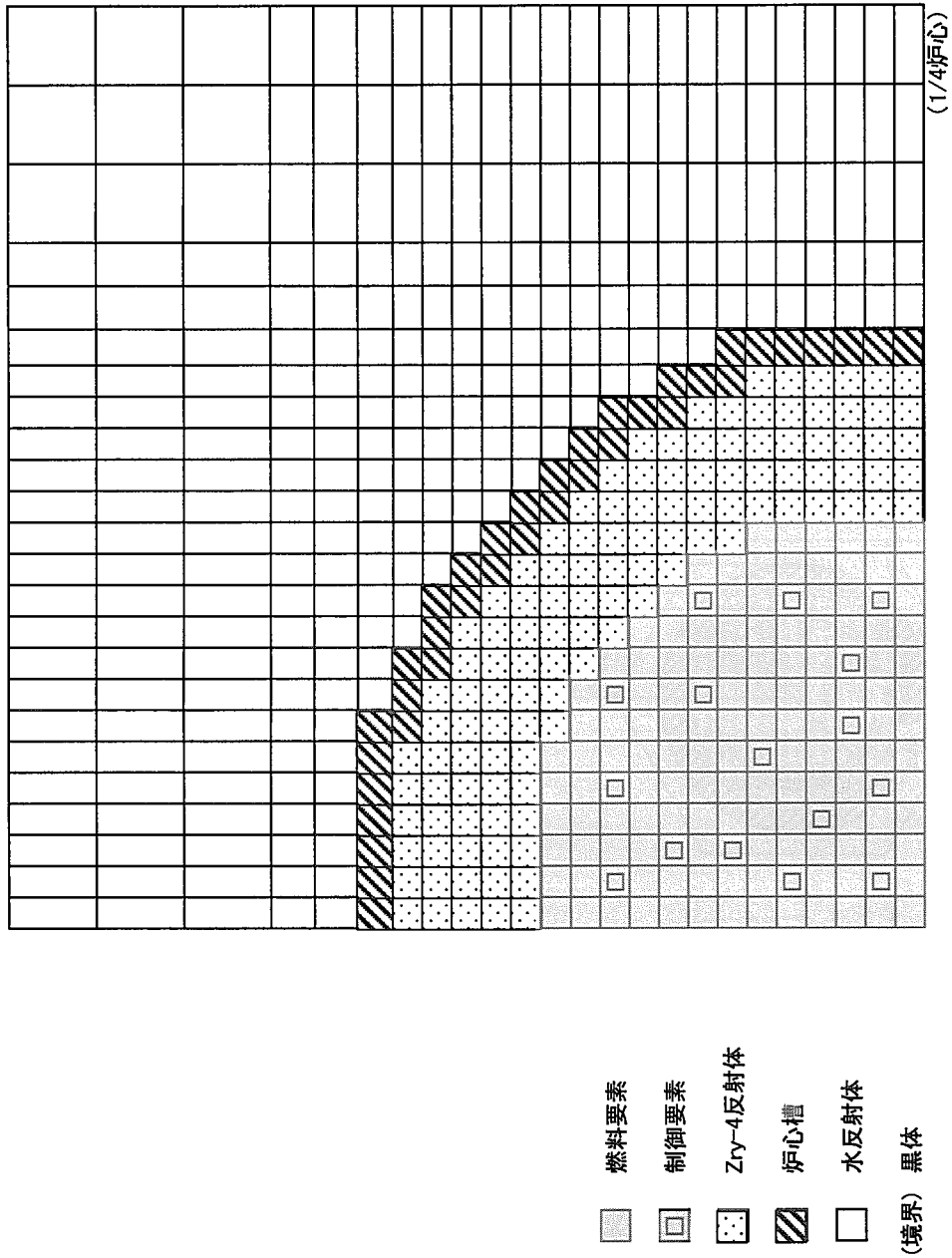


図6 炉心配置図 (正方格子)

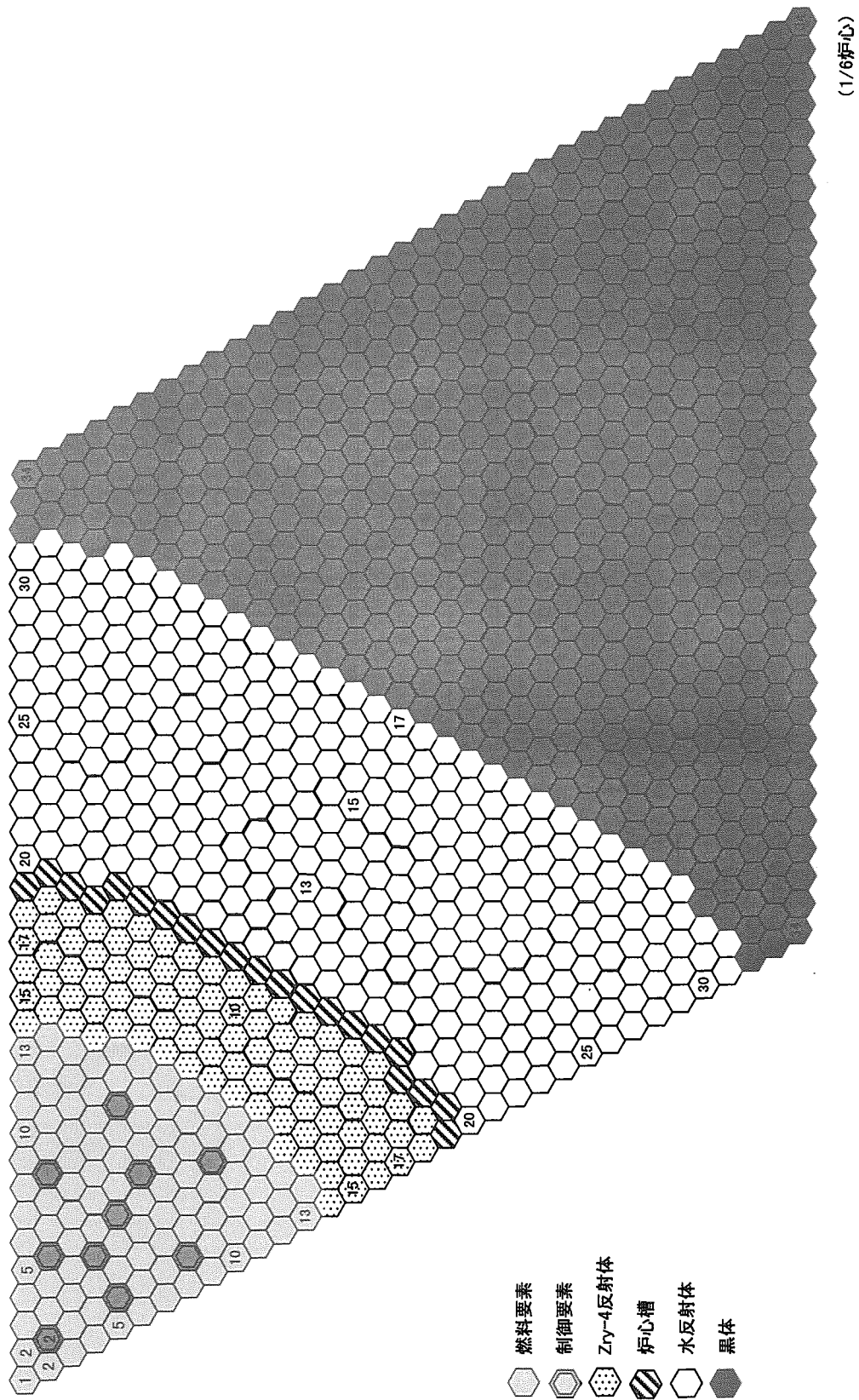


図7 炉心配置図 (六角格子)

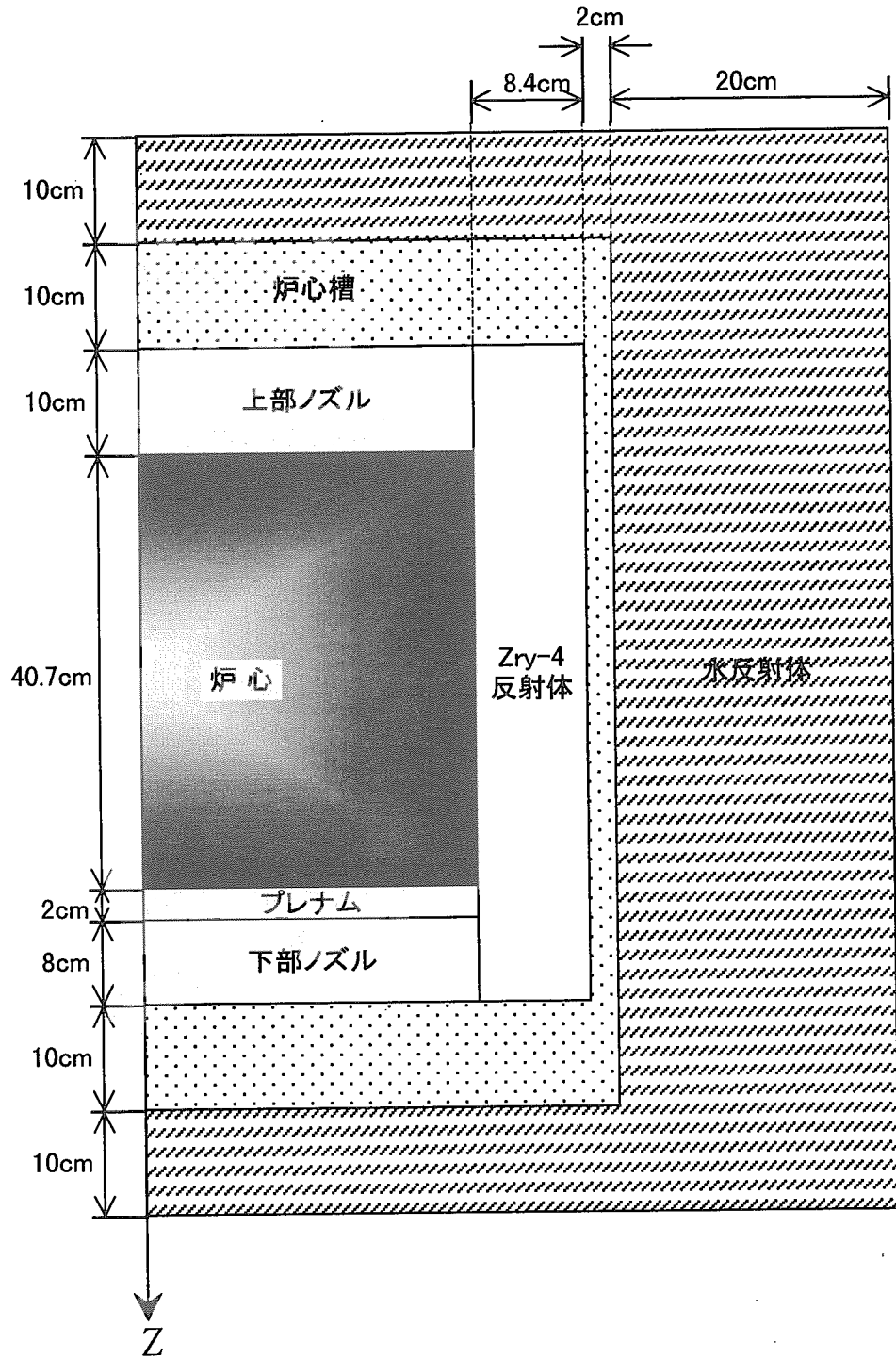


図 8 軸方向断面

3.2 材料組成

計算に使用した、材料組成を以下にまとめる。

(1) 燃料要素

燃料要素領域は、燃料ペレット、燃料被覆管、冷却材で構成される。燃料は UO_2 で、 UO_2 ペレットは 95%理論密度になるように焼結されると仮定し、密度を 10.4 g/cm^3 とした。燃料要素に含まれる物質の原子組成を表 6 に示す。燃料ペレット-被覆管ギャップは被覆管にスミアした。また、燃料要素領域に含まれる減速材（水）の密度は、表 7 に示す温度条件について、原研科学計算サブルーンプッケージ JSSL の STEAMZ ルーチン¹¹⁾を使用して計算し、各密度に対応した原子個数密度を計算した。ジルカロイの組成は JAERI-M 6928¹²⁾から引用した。また、表 7 に示す高温全出力、温態停止、冷態停止の各条件における、燃料棒、被覆管、減速材の各

表 6 燃料棒要素の元素組成

構成物質	原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)
UO ₂ 燃料ペレット	
11.0 wt%濃縮	
²³⁵ U	2.554×10^{-3}
²³⁸ U	2.067×10^{-2}
¹⁶ O	4.644×10^{-2}
9.5 wt%濃縮	
²³⁵ U	2.206×10^{-3}
²³⁸ U	2.101×10^{-2}
¹⁶ O	4.643×10^{-2}
ジルカロイ-4 (被覆管) *	
Zr-nat (含 Sn)	4.298×10^{-2}
Cr-nat	7.589×10^{-5}
Fe-nat	1.484×10^{-4}

*燃料ペレット-被覆管ギャップは被覆管にスミア

表 7 減速材組成

条件	高温全出力	温態停止	冷態停止
圧力	8.4 MPa	8.4 MPa	8.4 MPa
温度	289.9°C *	281.8°C **	26.85°C
	563.05 K	554.95 K	300.00 K
密度	0.7341 g/cm^3	0.7504 g/cm^3	1.0003 g/cm^3
核種	原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)		
¹ H	4.908×10^{-2}	5.017×10^{-2}	6.688×10^{-2}
¹⁶ O	2.454×10^{-2}	2.508×10^{-2}	3.344×10^{-2}

*炉心入口温度と出口温度の平均

**炉心入口温度

温度は、表 8 に示すとおりである。

表 8 原子炉の状態と炉心内各領域の温度条件

領域	高温全出力	温態停止	冷態停止
燃料棒 *	441.05 °C	281.8 °C	26.85 °C
被覆管	302.45 °C	281.8 °C	26.85 °C
減速材	289.9 °C	281.8 °C	26.85 °C

* RETRAN の解析結果より

(2) 制御棒要素

制御棒に使用する吸収材は B_4C である。 B_4C の密度は 1.76 g/cm^3 、 ^{10}B 濃度は 90 wt% とした。制御棒領域の格子計算モデルは図 4 及び 5 に示すとおりである。制御棒引抜き時には、水ロッド領域となる。表 9 に制御棒要素領域の B_4C 、被覆管、制御棒案内管シンプルの元素組成を示す。なお、 B_4C ペレットと被覆管の間のギャップは被覆管へスミアした。減速材組成は、燃料領域と同一である。ジルカロイの組成は JAERI-M 6928¹²⁾ から引用した。

表 9 制御棒要素の元素組成

構成物質	原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)
B_4C	
^{10}B	7.344×10^{-2}
^{11}B	7.422×10^{-2}
^{12}C	2.022×10^{-2}
SUS304 (被覆管) *	
^{12}C	3.173×10^{-4}
Si	1.696×10^{-3}
P	6.921×10^{-5}
S	4.457×10^{-5}
Cr	1.741×10^{-2}
^{55}Mn	1.734×10^{-3}
Fe	5.787×10^{-2}
Ni	8.112×10^{-3}

* B_4C ペレット-被覆管ギャップは被覆管にスミア

(3) 構造材領域

図 6、7、8 に示すように全炉心モデルでは、構造材として、反射体、炉心槽、プレナム、上下ノズルを考慮した。これらの材料の元素組成を表 10 に示す。プレナム、ノズル部分の組成は JAERI-M 6928¹²⁾ から引用した。なお、本検討では反射体の材料としてジルカロイ-4 とベリリウムを考慮した。反射体として使用するジルカロイ-4 の組成は被覆管のものと同様である。反射体の組成については、ベリリウム反射体の組成のみ表 10 に記した。また、反射体領域には

表 10 構造材領域の組成

元素	構造材				
	上部ノズル	プレナム	下部ノズル	反射体 (Be)	炉心槽 (鉄)
	原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)				
¹ H	4.787×10^{-2}	3.480×10^{-2}	4.672×10^{-2}	-	-
⁹ Be	-	-	-	1.236×10^{-2}	-
¹² C	5.637×10^{-5}	2.570×10^{-5}	5.646×10^{-5}	-	-
¹⁴ N	-	1.075×10^{-5}	-	-	-
¹⁶ O	2.394×10^{-2}	1.740×10^{-2}	2.336×10^{-2}	-	-
²⁷ Al	2.879×10^{-5}	-	4.442×10^{-5}	-	-
Si	2.978×10^{-4}	1.466×10^{-4}	2.854×10^{-4}	-	-
Cr	3.343×10^{-3}	1.418×10^{-3}	3.482×10^{-3}	-	-
⁵⁵ Mn	2.735×10^{-4}	1.405×10^{-4}	2.553×10^{-4}	-	-
Fe	9.568×10^{-3}	4.702×10^{-3}	9.195×10^{-3}	-	8.465×10^{-2}
Ni	2.800×10^{-3}	6.570×10^{-4}	3.541×10^{-3}	-	-
Zr	2.579×10^{-3}	4.255×10^{-3}	3.052×10^{-3}	-	-
Mo	1.478×10^{-4}	-	2.280×10^{-4}	-	-

冷却材流路が確保されており、反射体領域でのベリリウムと水の体積比をベリリウム : 水 = 92 : 8 とした。

3.3 燃料棒配置

表 4 に示した 6 種類の炉心について、高温全出力、燃焼初期、全制御棒引抜き条件で、実効増倍率を評価した。この際、燃料濃縮度は 11 wt% (初期の DRX 設計における濃縮度) とした。SCR の炉心設計では、可能な限り炉心を小さくするという観点から、炉心サイズと反応度の関係で評価結果を整理した。その結果を表 11 及び図 9 に示す。燃料棒を正方配列とした場合には、炉心の反応度は大きくなる一方、同一燃料棒ピッチの三角配列の場合と比較すると、等価直径が大きくなってしまふ。SCR 炉心形状の選択にあたっては、可能な限り炉心サイズを小さくできるように、燃料棒を稠密に配置することができる三角配列を採用することにした。また、三角配列を採用することで、炉心の反応度が小さくなるが、炉心の反射体にベリリウムを使用することで反応度低下の影響を補償することとした。反射体にベリリウムを使用することで、反応度を正方格子を採用した場合と同程度まで大きくすることが可能である。

表 11 燃料棒ピッチと実効増倍率の関係

燃料棒配列	正方配列			三角配列		
燃料棒ピッチ (mm)	16.75	18.0	20.0	16.75	18.0	20.0
等価直径 (cm)	45.6	49.0	54.6	42.4	45.6	50.8
実効増倍率	1.1091	1.1382	1.1649	1.0392	1.0755	1.1473*

*反射体にベリリウムを使用

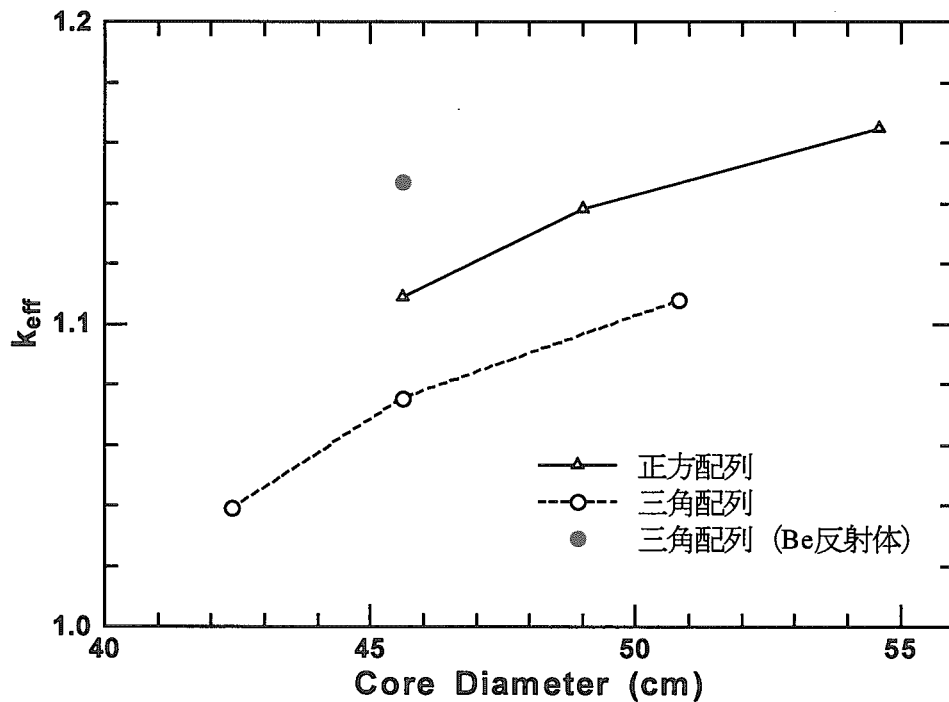


図 9 炉心等価直径と実効増倍率の関係

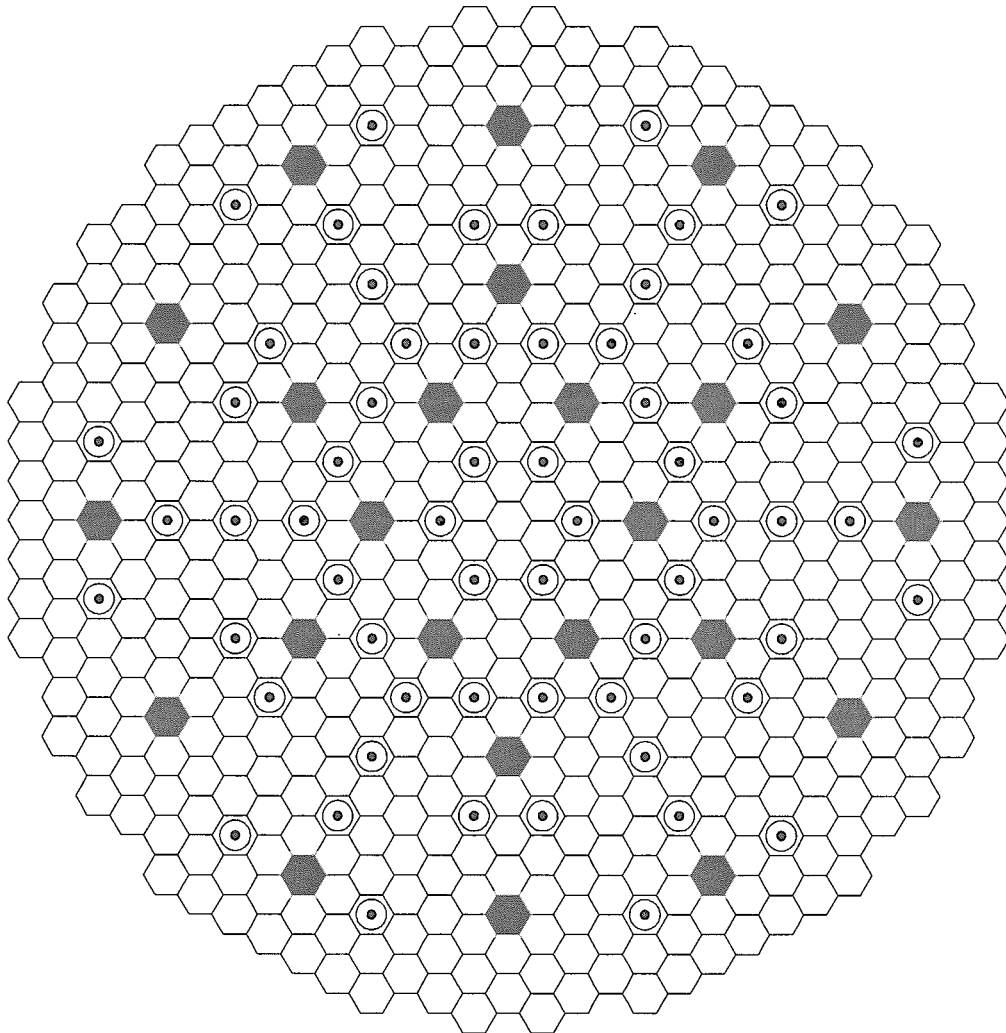
3.4 燃料濃縮度及び可燃毒物入り燃料棒配置

燃料濃縮度は 20%以下とする設計とする。DRX の燃料と同じ 11.0 wt%濃縮の燃料を使用した場合には、燃焼末期においても十分大きな余剰反応度があり、濃縮度を低くすることが可能である。濃縮度を変化させて燃焼末期の余剰反応度の評価を行った結果、9.5 wt%の濃縮度で 50%の負荷率を仮定して 10 年間の燃料無交換による燃焼が達成できることが明らかとなり、SCR 炉心の燃料棒には 9.5 wt%濃縮の燃料を使用することとした。

濃縮度 9.5 wt%の燃料棒を用いて炉心を構成した場合の燃焼初期の余剰反応度は 10.4 % $\Delta k/k$ であり、初期の余剰反応度を抑制し、運転期間中の反応度変化を緩やかにするために、可燃性毒物として Gd_2O_3 を 6 wt%添加した燃料要素を使用することにした。可燃毒物入り燃料棒の配置は図 10 に示すような配置とし、全体で 24 本配置した。炉心計算に使用した Gd_2O_3 燃料棒の組成を表 12 に示す。

表 12 Gd_2O_3 入り燃料棒要素の元素組成

構成物質	原子個数密度 ($\times 10^{24}$ 個/cm ³)
²³⁵ U	2.073×10^{-3}
²³⁸ U	1.975×10^{-2}
¹⁶ O	4.676×10^{-2}
¹⁵² Gd	4.146×10^{-6}
¹⁵⁴ Gd	4.520×10^{-5}
¹⁵⁵ Gd	3.068×10^{-4}
¹⁵⁶ Gd	4.244×10^{-4}
¹⁵⁷ Gd	3.245×10^{-4}
¹⁵⁸ Gd	5.150×10^{-4}
¹⁶⁰ Gd	4.532×10^{-4}



- 燃料要素 (× 499本)
- ⊙ 制御要素 (× 60本)
- BP入り燃料要素 (× 24本)

図 10 可燃毒物入り燃料棒を配置した SCR 炉心の断面

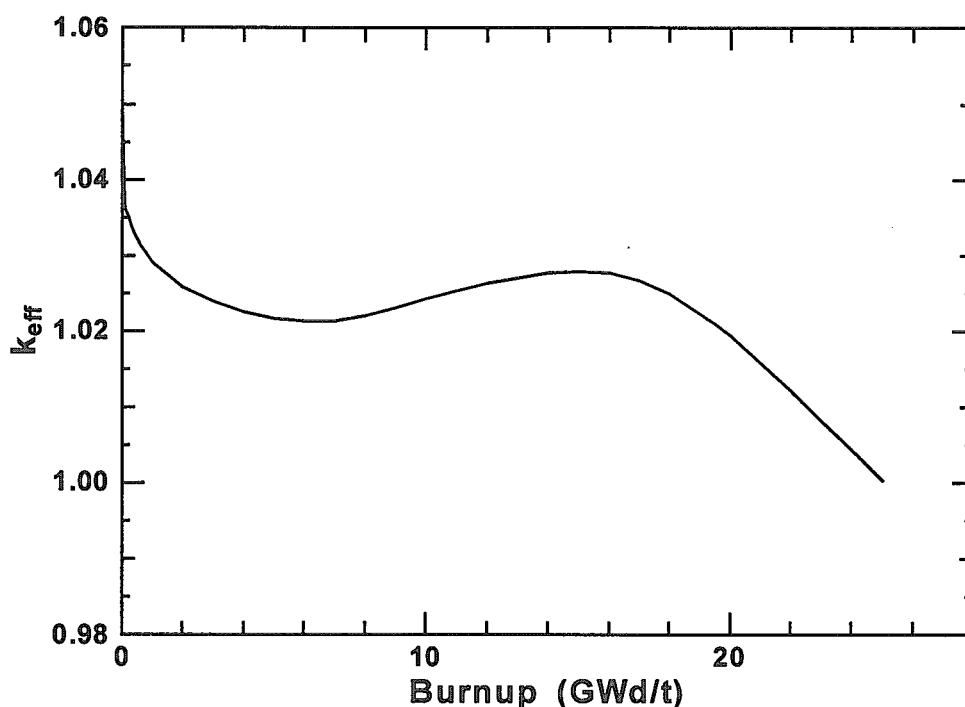
4. 核特性の評価

4.1 燃焼特性

SCR 炉心の k_{eff} の燃焼度依存性を図 11 に示す。計算条件は、高温全出力、全制御棒引抜き状態である。 k_{eff} は燃焼初期において Xe 及び Sm の効果により 1.3% $\Delta k/k$ 急激に減少し、その後緩やかに減少し 7 GWd/t で極小値をとり、その後、可燃毒物の効果が薄れ、 k_{eff} は増加に転じ、15 GWd/t で極大値をとった後、単調減少していく。燃焼度 23 GWd/t において k_{eff} は 1.0083 である。23 GWd/t の燃焼度は 1892 日間の連続全出力運転に相当し、炉心の負荷率を 50% と仮定すると、炉心の寿命は 10.4 年となり、設計目標を満足する。SCR 炉心の熱中性子束は 5×10^{12} n/cm²/sec であり、原子炉停止後の Xe の蓄積に伴い添加される負の反応度は 0.1% 程度であるので、EOL においても十分余剰反応度が確保されている。

燃焼期間中の冷態停止時及び温態停止時の余剰反応度について検討するため、それぞれの温度条件について、SRAC のブランチング燃焼計算機能を使用して実効増倍率の計算を行った。全制御棒引抜き状態での冷態停止時及び温態停止時の余剰反応度は、燃焼初期に最も大きく、それぞれ 13.5 % $\Delta k/k$ 、5.7 % $\Delta k/k$ である。温態停止時及び冷態停止時の燃焼に伴う反応度変化を図 12 に示す。反応度変化の数値データは付録 A の表 A.1 に示す。

また、核分裂性物質の炉内蓄積の検討に資するため、燃料ペレット内での主な核分裂性物質、超ウラン元素の原子個数密度の燃焼度依存性を図 13 に示す。詳細なデータは付録 B の表 B.1 に示す。

図 11 k_{eff} の燃焼度依存性

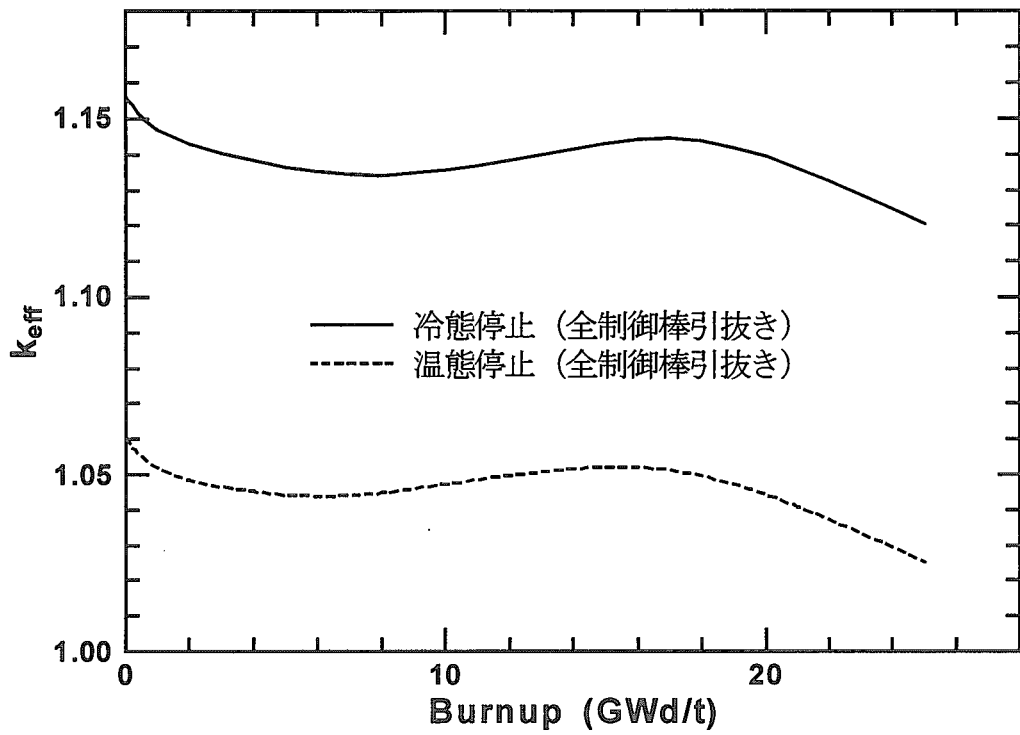


図 12 冷態停止時及び温態停止時の実効増倍率の燃焼度依存性

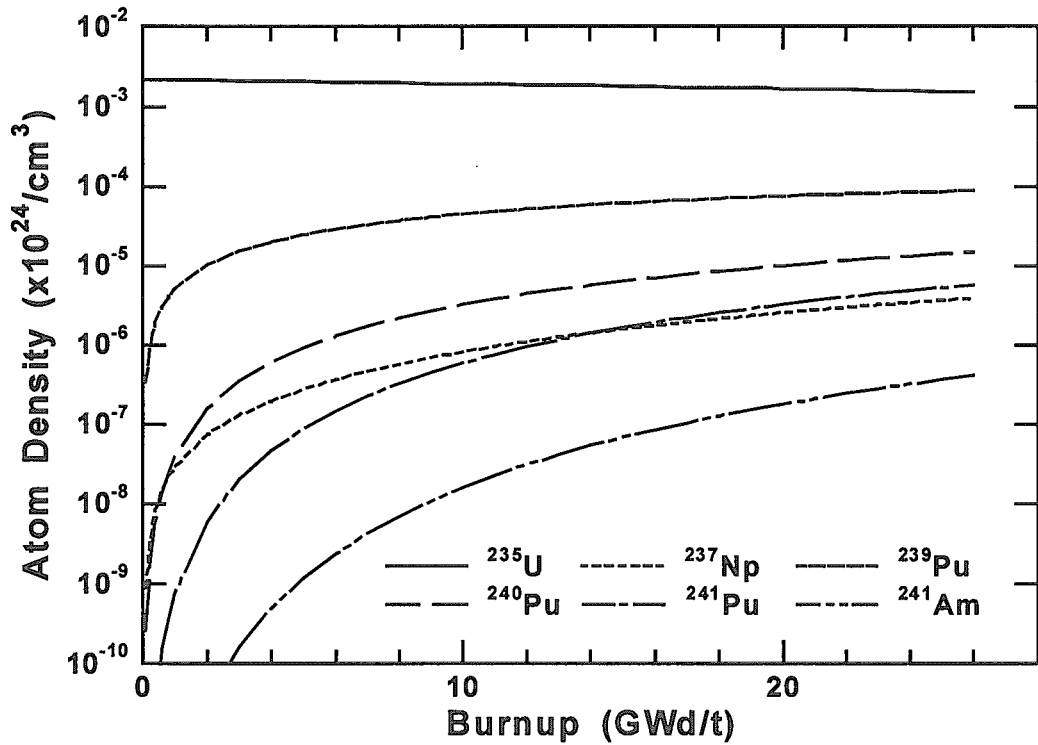


図 13 ^{235}U 及び超ウラン元素の燃料棒内原子個数密度の燃焼度依存性

4.2 核的安全性の評価

SCR 炉心の反応度停止余裕、原子炉停止系の独立性、燃料集合体の未臨界性についての解析を行い、核的安全性の評価を行った。

(1) 反応度停止余裕

SCR 炉心の制御棒クラスターは6体で構成する設計とする。2.1章で述べたように制御棒クラスターは、最大反応度効果を持つ制御棒クラスター1体が、全引抜きのまま挿入できない場合でも、炉心を低温状態で臨界未満 ($k_{\text{eff}} < 0.99$) にできる設計とする必要がある。この設計条件は、one-rod-stuck と呼ばれているものである。SCR の制御棒クラスターは全て同一の制御棒配置であり、SCR 炉心は全制御棒引抜き状態では XY 平面上の中心について 60 度回転対称となっているので、いずれの制御棒クラスターの制御棒値は同一である。したがって、反応度停止余裕の解析においては、6 体の制御棒クラスターのうち、いずれか1体が全引抜きのまま挿入できない場合に、残りの 5 体の制御棒クラスターで、原子炉を低温状態で未臨界にできることを確認する。

解析では新燃料を対象とし、低温状態は冷却材温度を 26.85 °C と仮定し、冷却材の原子個数密度は表 6 に示すものを用い、CITATION の 3 次元 Hex-Z モデルにより、one-rod-stuck に対する解析を行った。解析の結果、one-rod-stuck に対しては、低温状態で k_{eff} は 0.87149 となり、設計条件を満足していることが明らかとなった。このように SCR 炉心は十分な炉停止余裕を持っていることから、本研究の検討においては、制御要素の材質を ^{10}B を 90 wt%濃縮した B_4C としたが、材質を天然 B を用いた B_4C 、Ag-In-Cd、Hf とすることも可能であると考えられる。

(2) 原子炉停止系の独立性

発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針の指針 15 (原子炉停止系の独立性及び試験可能性) では、「原子炉停止系は、高温待機状態又は高温運転状態から、炉心を臨界未満にでき、かつ、高温状態で臨界未満を維持できる少なくとも二つの独立した系を有する」ことを要求している。

SCR では 6 体の制御棒クラスターを、制御用制御棒クラスター 3 体、後備停止用制御棒クラスター 3 体に振り分け、それぞれの制御棒クラスターのスクラム時の制御棒切り離し方式に異なる機構を採用している。それらの機構は、制御用制御棒クラスターについては機械的な制御棒の保持を開放する方法であり、後備停止用制御棒クラスターについては電磁石の非励磁化により制御棒の保持を開放する方法である。このように異なる制御棒切離し方式を採用していることから、制御用及び後備停止用制御棒クラスターは互いに独立の系とみなすことができる。

また、同指針 17 (原子炉停止系の停止能力) では、「原子炉停止系に含まれる独立した系の少なくとも一つは、低温状態で炉心を臨界未満にでき、かつ、低温状態で臨界未満に維持できる設計であること。」を要求している。

SCR では原子炉停止系として、前述のように制御用と後備停止用の 2 系統の原子炉停止系を有しており、いずれか一方の制御棒クラスターで、低温状態での未臨界性を確保できることを確

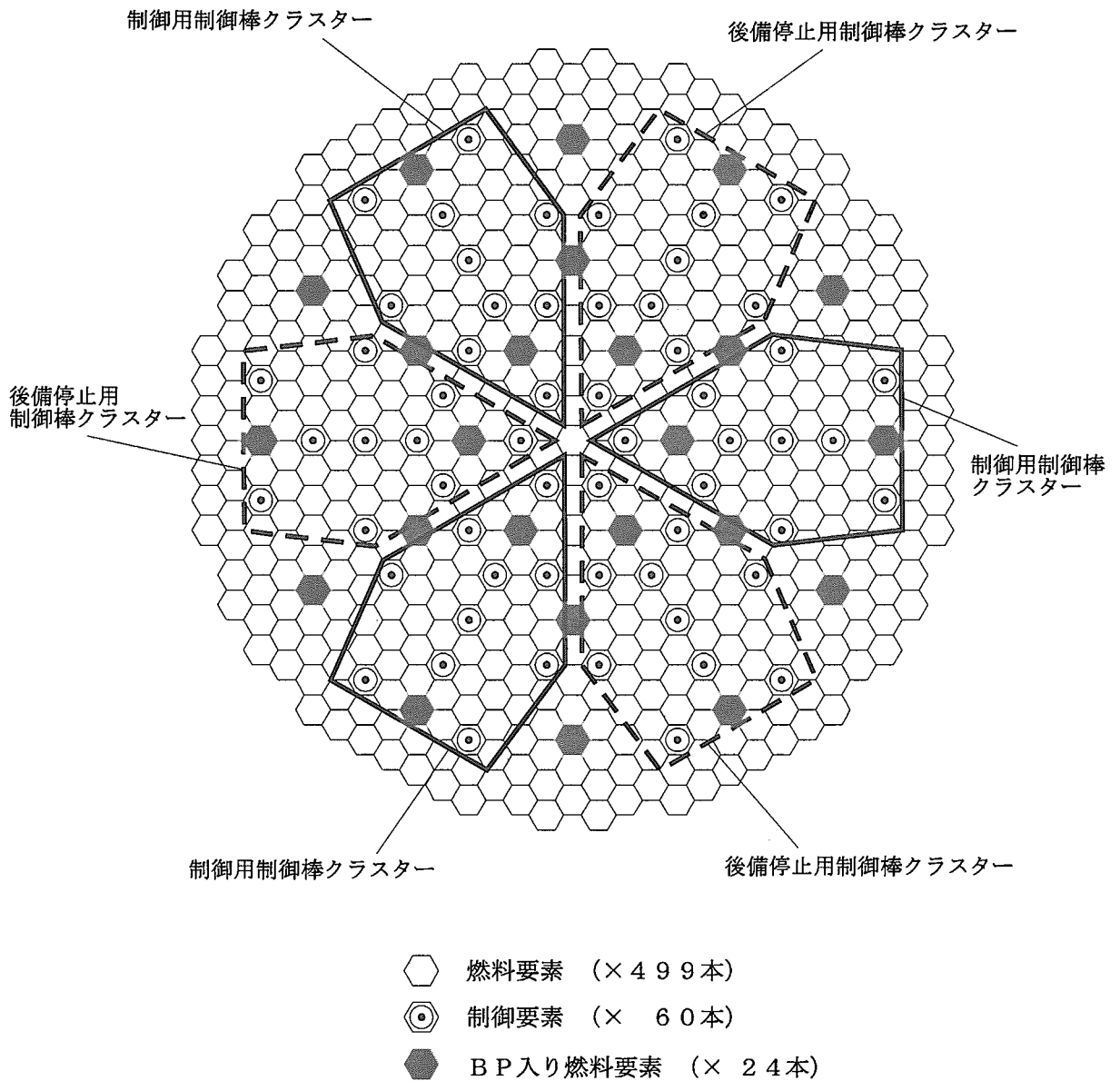
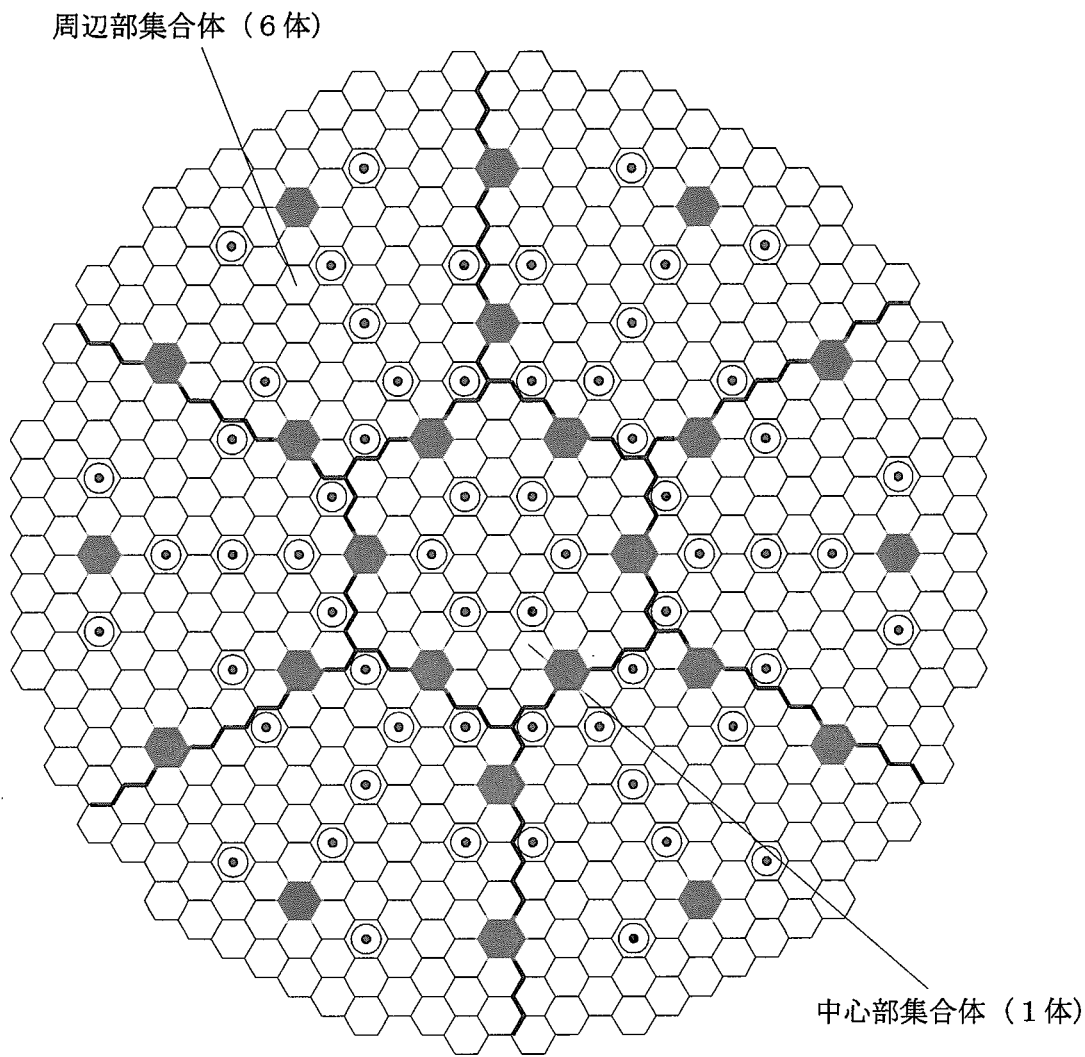


図 14 制御棒クラスターのグループ分け

認すればよい。解析では、図 14 に示すような制御棒クラスターのグループ分けとし、制御系と後備停止系が交互に配置されるようにした。解析では新燃料を対象とし、制御用制御棒を全て挿入し、後備停止用制御棒を全引抜きとした体系で、低温時の k_{eff} を CITATION の 3次元 Hex-Z モデルにより評価した。解析の結果、制御棒クラスター 3 体挿入による低温時の k_{eff} は 0.95663 となり、設計基準 $k_{eff} < 0.99$ を満足している。

(3) 燃料集合体の未臨界性

燃料集合体は、炉心組立時の燃料取扱の観点から、集合体 1 体がいかなる状態に置かれても未臨界を維持できることが必要である。安全評価上、未臨界性について全制御棒の引抜きを要求さ



- 燃料要素 (× 499本)
- ⊙ 制御要素 (× 60本)
- BP入り燃料要素 (× 24本)

図 15 燃料集合体の構成

れた場合、炉心を集合体1体で構成する場合には、全制御棒引抜き条件においては、寿命期間中に高温全出力状態で臨界を維持するのに十分な余剰反応度を持っているので、低温状態で未臨界とはならない。従って、SCR炉心は複数の集合体から構成するように設計変更することとした。SCR炉心の制御棒クラスターは6体で構成されているので、炉心も6体の燃料集合体で構成する設計とすることが合理的である。しかしながら、炉心を6分割にした場合には中心部分の燃料棒の振り分けが難しくなってしまうため、図15に示すように、中心部分は独立した1体の集合体とし、その外周部を6体の集合体で構成するようにした。なお、燃料の装荷及び取出し時においては、炉心に制御棒を全数挿入し、炉心全体を一括して取扱う設計とする。

燃料集合体の未臨界性の確認についての解析では、炉心の中心部及び外周部のそれぞれの集合体の新燃料が室温の水に冠水するものとした。解析は CITATION の Hex-Z モデルで行い、図 7 の炉心モデルから側部反射体、炉心槽等の構造物を取り除き、水を配置した体系で k_{eff} の計算を行った。表 13 に k_{eff} の評価結果を示す。炉心中心部及び外周部の燃料集合体 1 体に対する k_{eff} は設計基準 $k_{\text{eff}} < 0.95$ を十分下回っており、設計基準を満足する。従って、SCR 炉心は燃料集合体 7 体で構成されるよう設計することで、燃料集合体 1 体についての未臨界性を確保することができる。

表 13 燃料集合体の未臨界性（低温、新燃料）

	k_{eff}
炉心中心部	0.56959
炉心外周部	0.69975

4.3 反応度係数

反応度係数は、出力制御の観点から重要なパラメータであるとともに、プラントの動特性解析において必要となる。ここでは、反応度係数、制御棒価値等の炉物理パラメータを評価した結果を示す。反応度係数としては、減速材温度係数、減速材密度係数、ドップラー反応度係数について、高温全出力時の燃焼初期 (BOL) と燃焼末期 (EOL) において評価した。4.1 章に示したように、SCR の設計条件から EOL は 23 GWd/t と判断できるが、反応度係数については、EOL を 25 GWd/t ($k_{\text{eff}} = 1.00031$) として評価した結果を示す。BOL においては、制御棒価値の評価結果を用いて、 k_{eff} が 1.00 近傍となるように制御用制御棒を挿入した状態で計算を行った。また、BOL での評価は、平衡 Xe 濃度での評価とするため、0.1 GWd/t と極短期間燃焼後の燃料組成で反応度係数等の評価を行った。一方、EOL については、全制御棒引抜き状態で反応度係数等の評価を行った。なお、反応度係数の詳細な数値を付録 C に収めた。

(1) 制御棒反応度価値

制御棒は 6 体の制御棒クラスターのうち 3 体の制御棒クラスターをバンク挿入するとして、3 体の制御棒クラスターによる制御棒反応度価値の計算を行った。計算は Xe 濃度平衡条件で行った。制御棒クラスター 3 体をバンク挿入する場合、制御棒を炉心上部から 10.0 cm 挿入したときに、実効増倍率が 1.00244 となり、燃焼初期においては、制御用制御棒クラスター 3 体を 10.0 cm 挿入することで、 $k_{\text{eff}} = 1.00$ 近傍での運転をすることができる。図 16 に制御棒挿入量と k_{eff} の関係を、図 17 に制御棒挿入量と反応度価値の変化を示す。制御棒価値の数値を、付録 C の表 C.1 に示す。

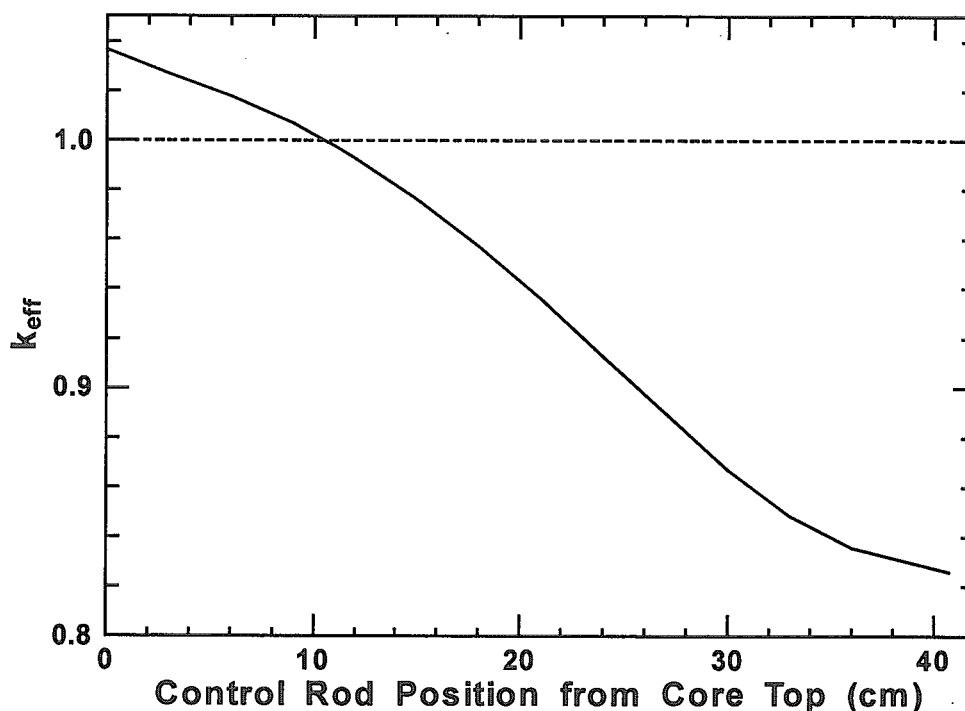


図 16 3 体の制御棒クラスターをバンク挿入した際の実効増倍率の変化

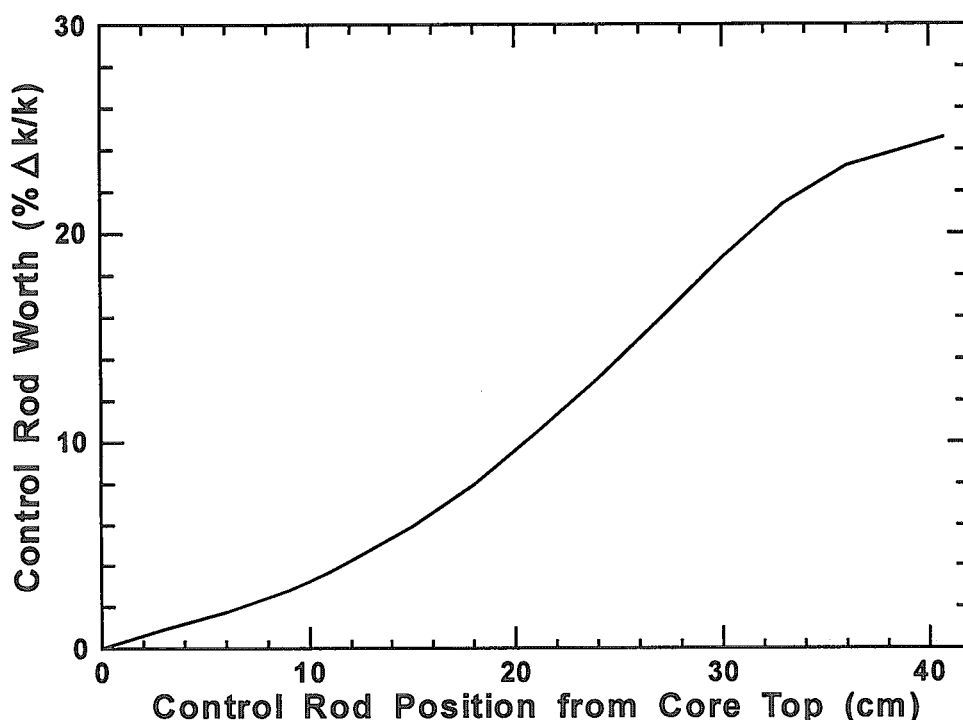


図 17 制御棒クラスター 3 体挿入時の制御棒反応度値

(2) 減速材温度係数

減速材温度を 26.9 °C から 298 °C の範囲で変化させ、BOL (平衡 Xe 濃度、制御用制御棒 10.0 cm 挿入) 及び EOL (全制御棒引抜き) における減速材温度係数を評価した。減速材温度係数は、高温全出力時と温態停止時について評価した。減速材温度を定常運転時の 289.9 °C から 298 °C に上昇させたときの反応度係数は BOL、EOL とともに $-1.1 \times 10^{-3} \Delta k/k/^\circ C$ であり、設計条件として挙げた負の減速材温度係数を持つという条件を満足している。また、発電用大型軽水炉の減速材温度係数と比較すると、SCR では絶対値では大きな値を持つ。従って、原子炉の出力制御において、良好な負荷追従性を期待することができる。高温全出力時 (BOL) の減速材温度と減速材温度係数の関係を図 18 に示す。EOL における高温全出力及び温態停止時についても、ほぼ同じ傾向である。減速材温度係数の詳細な数値を、付録 C の表 C.2 及び C.3 に示す。

(3) ドップラー係数

燃料温度を 26.85 °C から 926.85 °C まで変化させて、BOL (平衡 Xe 濃度、制御用制御棒 10.0 cm 挿入) 及び EOL (全制御棒引抜き) におけるドップラー係数を評価した。評価結果を付録 B の表 C.4 及び C.5 に示す。高温全出力 (BOL) 時における、燃料温度の変化に伴うドップラー係数の変化を図 19 に示す。燃料温度を定常運転時の 441.05 °C から 626.85 °C に上昇させたときのドップラー係数は、BOL で $-1.4 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ C$ 、EOL で $-1.5 \times 10^{-5} \Delta k/k/^\circ C$ である。

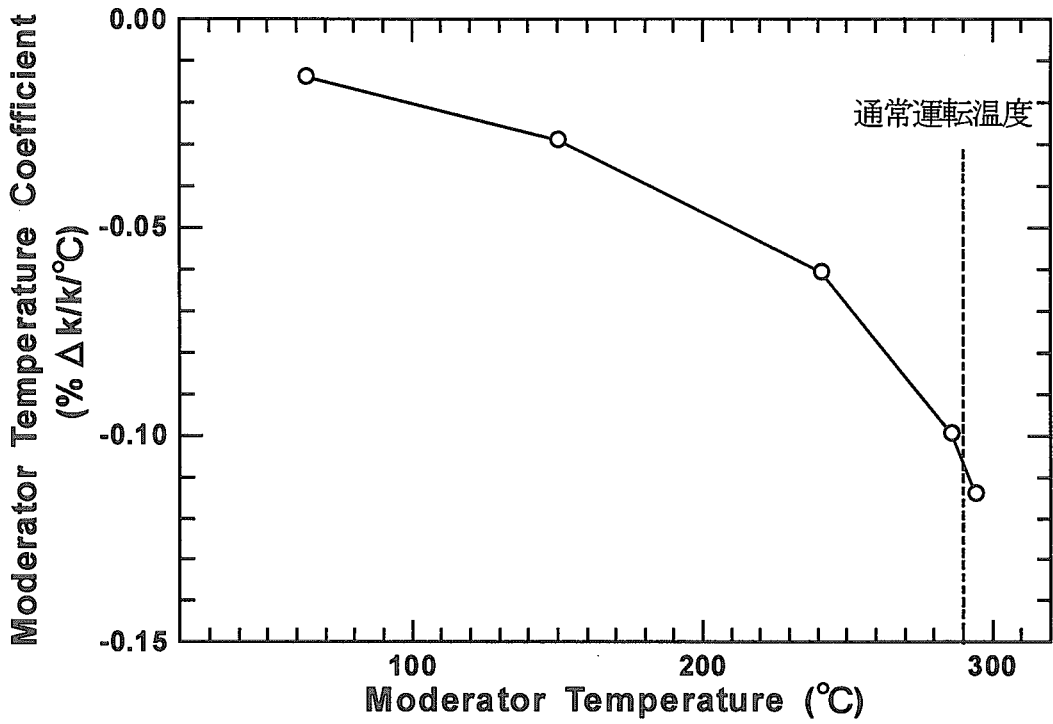


図 18 減速材温度の変化に伴う減速材温度係数の変化 (高温全出力、BOL)

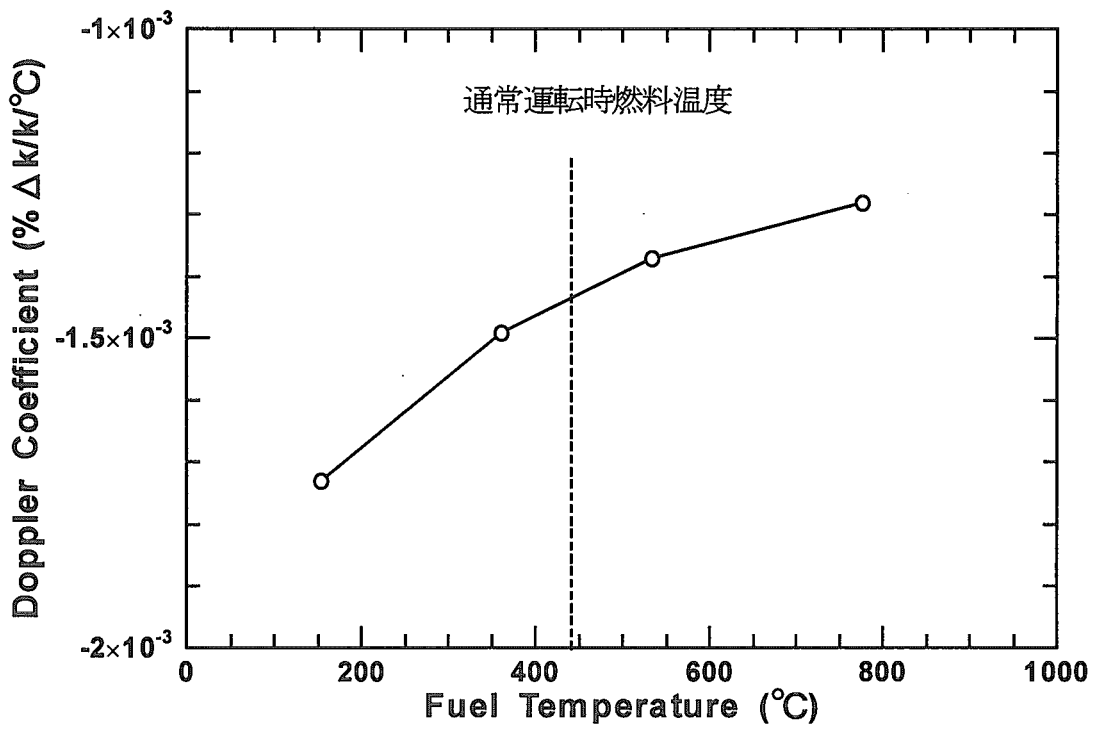


図 19 燃料温度の変化に伴うドップラー係数の変化 (高温全出力、BOL)

(4) 減速材密度係数

減速材の密度を定常運転時の密度を基準にして 0.1~1.1 倍に変化させて、 k_{eff} を計算し、BOL (Xe 平衡濃度、制御用制御棒 10.0 cm 挿入) 及び EOL (全制御棒引抜き) における減速材密度係数を評価した。評価結果を付録 C の表 C.6 及び C.7 に示す。図 20 に減速材密度の変化に伴う減速材密度係数の変化を示す。

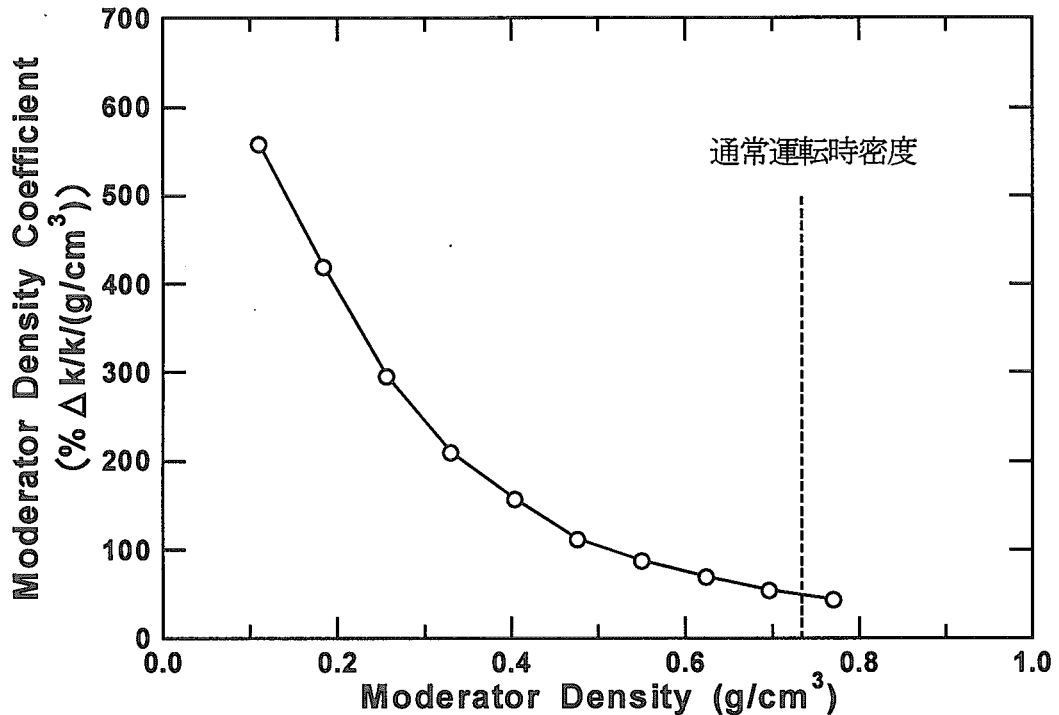


図 20 減速材密度の変化に伴う減速材密度係数の変化 (高温全出力、BOL)

(5) Xe 反応度係数

Xe 反応度は、出力変動に伴う中性子束の変化に炉内の Xe 濃度が変化することによって添加される反応度であり、出力変動が大きくなることが想定される SCR においては、あらかじめ評価しておく必要がある。Xe 反応度係数の評価においては、BOL (Xe 平衡濃度、制御用制御棒 10.0 cm 挿入) 及び EOL (全制御棒引抜き) について、通常運転時の炉内 ¹³⁵Xe 濃度に対して、¹³⁵Xe 濃度を 0%、50%、125% にして、実効増倍率を計算した。評価結果を付録 C の表 C.8 及び C.9 に示す。図 21 に Xe 濃度の変化に伴う実効増倍率の変化を示す。Xe 反応度係数は、BOL において $-1.2 \times 10^{-4} \Delta k/k/\%Xe$ 、EOL において $-1.4 \times 10^{-4} \Delta k/k/\%Xe$ である。

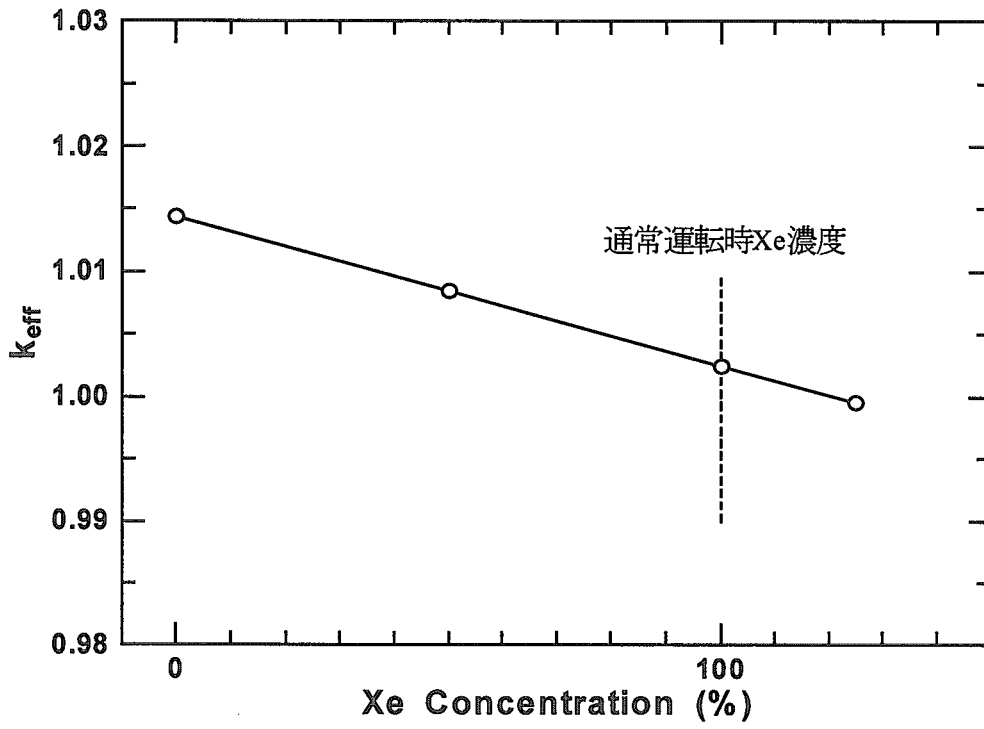


図 21 Xe 濃度の変化に伴う実効増倍率の変化 (高温全出力、BOL)

4.4 出力分布

SCR 炉心の出力分布に関するパラメータを、BOL（平衡 Xe 濃度、制御用制御棒 10.0 cm 挿入）及び EOL（全制御棒引抜き）において評価した結果を示す。BOL における水平方向及び軸方向出力分布を図 22 及び図 23 にそれぞれ示す。同様に EOL における水平方向及び軸方向出力分布を図 24 及び図 25 にそれぞれ示す。

ピーキング係数は表 14 にまとめた。BOL では制御棒が炉心上部より 10.0 cm 挿入されているため、全制御棒引抜き状態の EOL に比べて、ピーキング係数が厳しくなっている。BOL でのピーキング係数は、水平方向 1.39、軸方向 1.31 であり、トータルピーキング係数は 1.82 である。

核的エンタルピー上昇熱水路係数 $F_{\Delta H}^N$ は、炉心最大燃料棒出力と炉心平均燃料棒出力の比で定義される。 $F_{\Delta H}^N$ は水平方向ピーキング係数 F_{xy} の上限値に基づいて評価する。ここでは、10% の設計裕度をとったものを F_{xy} の炉心設計上の制限値とすることとする。さらに通常の我が国における PWR の設計では、この F_{xy} に対し、運転上の余裕及び計測誤差として 8% を考慮したものを $F_{\Delta H}^N$ としている。SCR 炉心でも同様の考えに基づき $F_{\Delta H}^N$ を評価した。

核的熱流束熱水路係数 F_Q^N は、炉心最大線出力密度と炉心平均線出力密度の比であり、以下の因子から成り立っている。

$$F_Q^N = \text{Max} \{F_{xy}^N(Z) \times P(Z)\} \times F_U^N \quad (2)$$

$F_{xy}^N(Z)$: 炉心高さ Z における水平方向ピーキング

$P(Z)$: 炉心高さ Z における炉心平均軸方向相対出力

F_U^N : 核的不確定性因子（陸上 PWR と同じ 1.05 とする）

(2) 式より F_Q^N を評価した。なお、(2) 式には燃料焼きしまり効果を含めていない。

工学的熱流束熱水路係数 F_Q^E は、燃料製造上の公差が熱流束熱水路係数に与える影響を考慮する因子であり、ペレットの直径、密度、濃縮度及び被覆管直径の製作公差を統計的に組み合わせた設計値 1.03 を使用する。

表 14 ピーキング係数及び熱水路係数

	BOL	EOL
平均出力密度 (W/cc)	20.8	20.9
ピーキング係数		
トータルピーキング ($F_{xy} \times F_z$)	1.82	1.74
水平方向ピーキング (F_{xy})	1.39	1.44
軸方向ピーキング (F_z)	1.31	1.21
熱水路係数		
核的エンタルピー上昇熱水路係数 ($F_{\Delta H}^N$)	1.73	1.71
核的熱流束熱水路係数 (F_Q^N)	2.00	1.84
熱流束熱水路係数 (F_Q)	2.06	1.90

熱流束熱水路係数 F_Q は、炉心最大線出力密度と炉心平均線出力密度の比であり、

$$F_Q = F_Q^N \times F_Q^E \quad (3)$$

により評価する。以上のようにして求めた熱水路係数を表 14 に示す。また、深海調査船用原子炉 DRX 及び発電用 PWR との比較を表 15 に示す。SCR 炉心の $F_{\Delta H}^N$ は DRX 炉心及び発電用 PWR 炉心に比べて 10%程度大きくなっており、水平方向のピーキングがやや大きくなっていることがわかる。SCR 炉心の F_Q^N は発電用 PWR 炉心と比較して低い値となっているが、SCR では一次系に自然循環方式を採用していることから、熱水力設計が厳しくなると予想されるので、今後、最小限界熱流束比の評価が必要である。

表 15 定格出力時の核的熱水路係数の比較

	SCR	DRX	関西電力 大飯 1 号 ¹³⁾	九州電力 玄海 1 号 ¹⁴⁾
熱出力(MWt)	1.25	0.75	3423	1650
F_Q^N	2.00	1.66	2.09	2.25
$F_{\Delta H}^N$	1.73	1.52	1.60	1.60

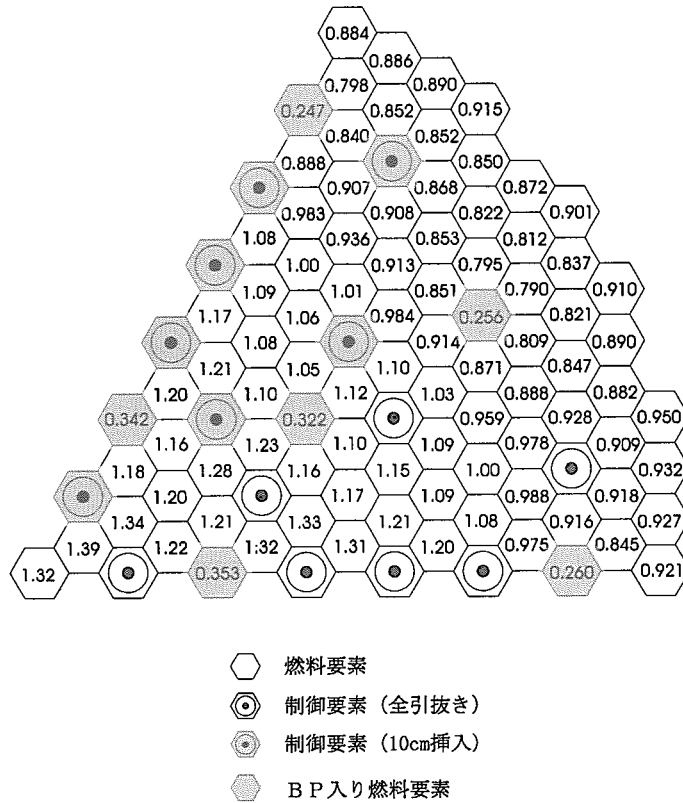


図 22 BOL における水平方向出力分布

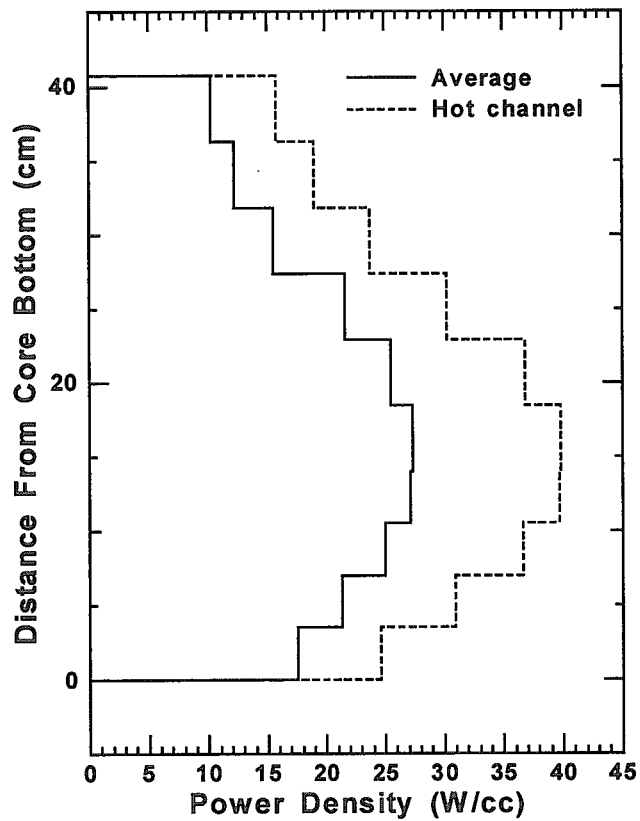


図 23 BOL における軸方向出力分布

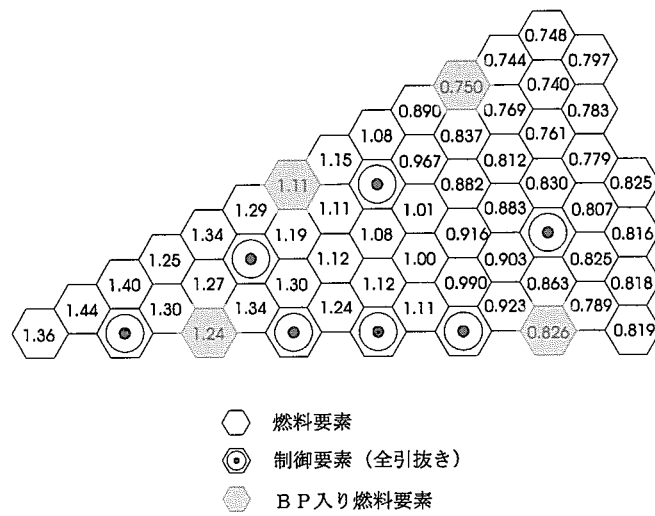


図 24 EOL における水平方向出力分布

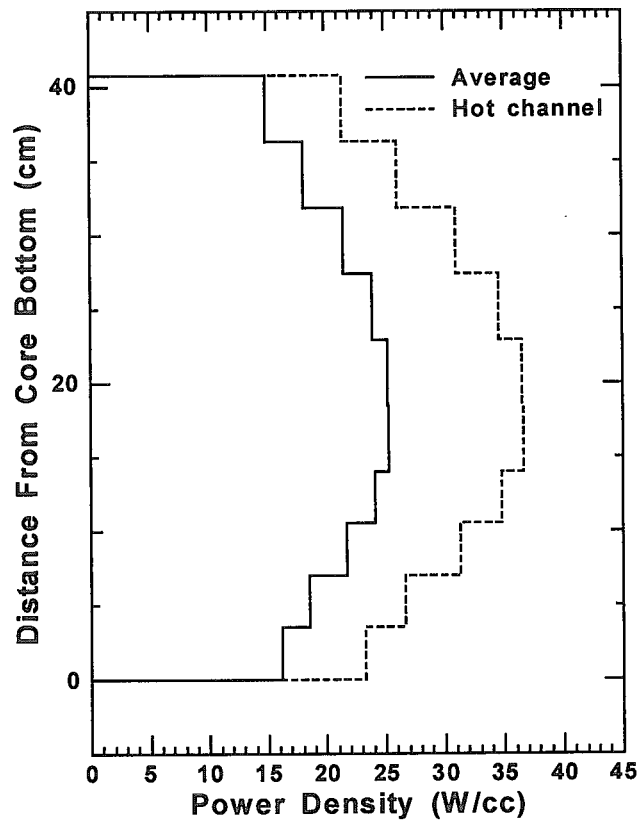


図 25 EOL における軸方向出力分布

4.5 核特性のまとめ

本研究において評価した核設計値を表 16 にまとめる。

表 16 核設計値

炉心		
有効高さ	40.7 cm	
等価直径	45.6 cm	
燃料集合体数	7 体	
燃料棒数 (全炉心)	523 本 (うち 24 本は 6wt%の Gd ₂ O ₃ 入り燃料棒)	
濃縮度	9.5 wt%	
平均燃焼度	23.0 GWd/t	
核的熱水路係数 (定格出力時、BOL)		
F_{Q}^{N}	2.00	
$F_{\Delta H}^{N}$	1.73	
線出力密度		
定格出力時平均	5.87 kW/m	
定格出力時最大	10.7 kW/m	
実効増倍率		
高温全出力 (制御用制御棒 10.0cm 挿入、BOL)	1.00244	
高温全出力 (全制御棒引抜き、EOL)	1.00830	
反応度制御能力 (k_{eff})		
制御棒クラスター 1 体挿入不能時 (低温、BOL)	0.87149	
制御棒クラスター 2 体挿入 (他は全引抜き)	0.95663	
反応度停止余裕		
制御棒クラスター 1 体挿入不能時 (低温、BOL)	13.3% $\Delta k/k$	(10%の設計上の裕度差引き)
燃料集合体 1 体冠水時 (k_{eff})		
中心部 (全制御棒引抜き、BOL)	0.56959	周辺部 (全制御棒引抜き、BOL) 0.69975
反応度係数		
	BOL	EOL
減速材温度係数 ($\Delta k/k/^{\circ}C$)	$-1.4 \times 10^{-4} \sim -1.1 \times 10^{-3}$	$-1.1 \times 10^{-4} \sim -1.1 \times 10^{-3}$
ドップラー係数 ($\Delta k/k/^{\circ}C$)	$-1.3 \times 10^{-5} \sim -1.7 \times 10^{-5}$	$-1.4 \times 10^{-5} \sim -2.0 \times 10^{-5}$
減速材密度係数 ($\Delta k/k/(g/cm^3)$)	0.45 \sim 5.6	0.44 \sim 5.7
実効遅発中性子割合		
BOL	0.00764 (高温全出力)	0.00764 (温態停止)
EOL	0.00697 (高温全出力)	0.00696 (温態停止)
即発中性子寿命 (μs)		
BOL	29.2 (高温全出力)	29.5 (温態停止)
EOL	32.1 (高温全出力)	32.4 (温態停止)

5. 結論

海中航行観測船用超小型原子炉 SCR について、既存の現行 PWR 技術に立脚して、原子炉負荷 50%を仮定した場合に燃料無交換で 10 年間の炉心寿命を達成する炉心の核的検討を行った。検討では、核設計の前提条件に基づき、炉心の基本的仕様のうち、燃料棒配列、燃料濃縮度、放射体材質を決めた。さらに、原子炉安全設計審査指針が要求する種々の核的安全性に関する項目を確認し、最終的な炉心仕様を決定した。最終的な炉心仕様に対して、反応度係数等の炉物理パラメータを計算し、基本的な原子炉の制御性について検討した。

本研究における検討から、以下の結論を得た。

- (1) 反射体をベリリウム金属とすることで、燃料濃縮度を 9.5 wt%と低くおさえつつ、燃料無交換で 10 年間の炉心寿命（原子炉負荷率 50%）を達成することが可能である。
- (2) 燃料集合体 1 体がどのような湿度雰囲気になされた場合も未臨界性を保つために、SCR 炉心は集合体 7 体で構成する必要がある。
- (3) SCR 炉心には 6 体の制御棒クラスターが装備されるが、最大反応度効果を持つ制御棒クラスター 1 体が、全引抜き位置のまま挿入できない場合であっても、炉心を低温状態で臨界未満にすることができる。このときの炉停止余裕は、設計上の余裕として 10%を差し引いても 13.3 % $\Delta k/k$ であり、十分に余裕がある。
- (4) SCR は原子炉制御に可溶性ボロンを使用せず、制御棒のみによって原子炉を制御する。原子炉停止系の独立性を確保するため、制御棒の系統を出力制御用と後備停止用に分類するとともに、両者の制御棒クラスター制御棒切離し方式に異なる方法を採用し、多様化を図っている。また、一方の制御棒クラスターのみで、原子炉を低温停止状態に維持するのに十分な制御棒価値を持っていることを確認した。
- (5) 反応度係数は、減速材温度係数、ドップラー係数、減速材密度係数等について評価した。ドップラー係数と減速材温度係数はいずれも負であり、炉心は負の反応度フィードバック特性を持つ。また、減速材温度係数の絶対値は陸上用 PWR と比較して大きな値となっており、良好な負荷追従性を期待することができる。
- (6) トータルピーキングファクタは BOL において最も大きく 1.82 であり、定格出力時の最大線出力密度は、10.7 kW/m と低く抑えられていることが明らかとなった。今後、詳細な熱水力解析を行い、最小限界熱流束比の評価を行う必要がある。

このように、本研究で検討した炉心仕様は、設計条件を十分満足するものである。本研究で導出した核特性データは熱水力特性解析及び動特性解析のための基礎データとして活用できる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、エネルギーシステム研究部炉物理研究グループ副主任研究員奥村啓介氏には SRAC コードシステムの使用に関してご指導いただきました。また、エンジニアリング開発株式会社の嶋田昭一郎氏には、原子炉核設計に関して有益なご助言をいただきました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 楠剛、藤本博巳、永田豊、高橋照雄、石田紀久：“海中航行観測船への小型原子炉の利用”、海洋調査技術、第12巻、第2号、1（2000）。
- 2) Carmack, E.C., Macdonald, R.W., Perkin, R.G., Mcluaglin, F.A. and Pearson, R.J.: “Evidence for Warming of Atlantic Water in the Southern Canadian Basin of the Arctic Ocean, Results from the Larsen-93 Expedition”, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1061 (1995).
- 3) SCISEX 2000 Organizing Committee: “Arctic Ocean Science from Submarines”, SCICEX 2000 Workshop, Virginia, USA, Oct. 1998 (1999).
- 4) Iida, H., Ishizaka, Y., Kim, Y. and Yamaguchi, C.: “Design Study of the Deep-Sea Reactor X”, *Nucl. Technol.*, **107**, 38 (1994).
- 5) Odano, N., Kusunoki, T., Yoritsune, T., Fukuhara, Y., Saito, K., Takahashi, T. and Ishida, T.: “Submersible Compact Reactor SCR for Under-sea Research Vessel”, *Proc. Int. Workshop on Utilization of Nuclear Power in Oceans*, Tokyo, Japan, pp. 231 – 236 (2000).
- 6) 小田野直光、石田紀久：“深海調査船用原子炉 DRX (Deep Sea Reactor X) 炉心の核的検討”、JAERI-Research 2001-004 (2001).
- 7) 科学技術庁原子力安全局原子力安全調査室監修：“改正9版 原子力安全委員会安全審査指針集”，大成出版 (1998).
- 8) 原子力安全研究協会実務テキスト (プラント・システム) 編集委員会：“軽水炉発電所のあらまし”，原子力安全研究協会 (1984).
- 9) 奥村啓介，金子邦男，土橋敬一郎：“SRAC95；汎用核計算コードシステム”，JAERI-Data/Code 96-015 (1996).
- 10) Nakagawa, T., Shibata, K., Chiba, S., Fukahori, T., Nakajima, Y., Kikuchi, Y., Kawano, T., Kanda, Y., Ohsawa, T., Matsunobu, H., Kawai, M., Zukeran, A., Watanabe, T., Igarasi, S., Kosako, K. and Asami, T.: “Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version 3, Revision 2: JENDL-3.2”, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **32**, 1259 (1995).
- 11) 藤村統一郎、西田雄彦、浅井清：“JSSL (原研版・科学用サブルーチン・ライブラリ) マニュアル”，JAERI-M 8479 (1979).
- 12) 小山謹二，奥村芳弘，吉田公人，宮坂駿一：“遮蔽材料の群定数”，JAERI-M 6928 (1977).
- 13) 関西電力株式会社：“大飯発電所原子炉設置変更許可申請書” (1990).
- 14) 九州電力株式会社：“玄海原子力発電所原子炉設置変更許可申請書” (1993).

付録 A 実効増倍率の燃焼度依存性

4.1 章の燃焼特性において議論した、実効増倍率の燃焼度依存性のデータを表 A.1 に示す。計算は、制御棒を全数引き抜いた体系について、高温全出力、温態停止、冷態停止について行った。

表 A.1 実効増倍率の燃焼度依存性

燃焼度 (GWd/t)	実効増倍率		
	高温全出力	温態停止	冷態停止
0.0	1.04994	1.06042	1.15617
0.1	1.03638	1.05925	1.15500
0.2	1.03512	1.05797	1.15368
0.3	1.03396	1.05682	1.15249
0.4	1.03301	1.05580	1.15142
0.6	1.03138	1.05414	1.14962
0.8	1.03010	1.05277	1.14816
1.0	1.02904	1.05173	1.14696
2.0	1.02577	1.04828	1.14300
3.0	1.02395	1.04653	1.14036
4.0	1.02256	1.04520	1.13828
5.0	1.02168	1.04427	1.13654
6.0	1.02130	1.04394	1.13520
7.0	1.02135	1.04405	1.13445
8.0	1.02198	1.04478	1.13426
9.0	1.02306	1.04600	1.13476
10.0	1.02420	1.04728	1.13567
11.0	1.02537	1.04852	1.13684
12.0	1.02628	1.04976	1.13820
13.0	1.02700	1.05071	1.13978
14.0	1.02769	1.05154	1.14143
15.0	1.02796	1.05211	1.14302
16.0	1.02768	1.05207	1.14413
17.0	1.02667	1.05123	1.14440
18.0	1.02488	1.04961	1.14368
19.0	1.02233	1.04721	1.14196
20.0	1.01937	1.04428	1.13938
21.0	1.01584	1.04089	1.13620
22.0	1.01214	1.03718	1.13262
23.0	1.00830	1.03334	1.12878
24.0	1.00438	1.02945	1.12476
25.0	1.00031	1.02538	1.12066

付録B 燃料棒内に蓄積される核種の原子個数密度

燃料棒内に蓄積される核種の原子個数密度の燃焼度依存性を表B.1に示す。

表B.1 燃料棒内に蓄積される核種の原子個数密度の燃焼度依存性

燃焼度 (MWd/t)	²³⁵ U	²³⁶ U	²³⁷ U	²³⁸ U	²³⁷ Np	²³⁹ Np	²³⁸ Pu
	原子個数密度($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)						
0.00E+00	2.206E-03	0.000E+00	0.000E+00	2.101E-02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.00E+02	2.203E-03	5.097E-07	1.888E-09	2.101E-02	8.995E-10	2.009E-07	2.834E-13
2.00E+02	2.200E-03	1.020E-06	2.810E-09	2.101E-02	2.927E-09	2.207E-07	1.937E-12
3.00E+02	2.197E-03	1.530E-06	3.293E-09	2.101E-02	5.521E-09	2.227E-07	5.677E-12
4.00E+02	2.194E-03	2.040E-06	3.587E-09	2.101E-02	8.429E-09	2.231E-07	1.188E-11
6.00E+02	2.188E-03	3.058E-06	3.977E-09	2.101E-02	1.482E-08	2.235E-07	3.250E-11
8.00E+02	2.183E-03	4.075E-06	4.294E-09	2.101E-02	2.177E-08	2.240E-07	6.503E-11
1.00E+03	2.177E-03	5.090E-06	4.595E-09	2.100E-02	2.923E-08	2.244E-07	1.104E-10
2.00E+03	2.149E-03	1.014E-05	6.084E-09	2.100E-02	7.387E-08	2.258E-07	5.608E-10
3.00E+03	2.121E-03	1.514E-05	7.521E-09	2.099E-02	1.303E-07	2.272E-07	1.462E-09
4.00E+03	2.093E-03	2.009E-05	8.913E-09	2.099E-02	1.979E-07	2.284E-07	2.919E-09
5.00E+03	2.065E-03	2.500E-05	1.027E-08	2.098E-02	2.765E-07	2.297E-07	5.031E-09
6.00E+03	2.037E-03	2.987E-05	1.159E-08	2.097E-02	3.655E-07	2.309E-07	7.901E-09
7.00E+03	2.010E-03	3.469E-05	1.289E-08	2.097E-02	4.646E-07	2.321E-07	1.163E-08
8.00E+03	1.983E-03	3.947E-05	1.416E-08	2.096E-02	5.735E-07	2.334E-07	1.631E-08
9.00E+03	1.955E-03	4.421E-05	1.540E-08	2.095E-02	6.918E-07	2.347E-07	2.204E-08
1.00E+04	1.929E-03	4.890E-05	1.662E-08	2.095E-02	8.193E-07	2.360E-07	2.894E-08
1.10E+04	1.902E-03	5.356E-05	1.782E-08	2.094E-02	9.556E-07	2.373E-07	3.710E-08
1.20E+04	1.875E-03	5.818E-05	1.900E-08	2.093E-02	1.101E-06	2.387E-07	4.662E-08
1.30E+04	1.849E-03	6.275E-05	2.016E-08	2.093E-02	1.254E-06	2.400E-07	5.762E-08
1.40E+04	1.822E-03	6.729E-05	2.130E-08	2.092E-02	1.415E-06	2.414E-07	7.021E-08
1.50E+04	1.796E-03	7.179E-05	2.243E-08	2.091E-02	1.584E-06	2.428E-07	8.449E-08
1.60E+04	1.770E-03	7.625E-05	2.354E-08	2.091E-02	1.761E-06	2.442E-07	1.006E-07
1.70E+04	1.744E-03	8.067E-05	2.464E-08	2.090E-02	1.946E-06	2.457E-07	1.186E-07
1.80E+04	1.719E-03	8.505E-05	2.573E-08	2.089E-02	2.137E-06	2.471E-07	1.387E-07
1.90E+04	1.693E-03	8.940E-05	2.680E-08	2.089E-02	2.335E-06	2.486E-07	1.610E-07
1.95E+04	1.680E-03	9.156E-05	2.718E-08	2.088E-02	2.437E-06	2.490E-07	1.729E-07
2.00E+04	1.668E-03	9.371E-05	2.771E-08	2.088E-02	2.540E-06	2.498E-07	1.855E-07
2.10E+04	1.642E-03	9.798E-05	2.891E-08	2.087E-02	2.752E-06	2.516E-07	2.124E-07
2.20E+04	1.617E-03	1.022E-04	2.996E-08	2.086E-02	2.970E-06	2.532E-07	2.420E-07
2.30E+04	1.592E-03	1.064E-04	3.099E-08	2.086E-02	3.195E-06	2.547E-07	2.742E-07
2.40E+04	1.567E-03	1.106E-04	3.202E-08	2.085E-02	3.426E-06	2.563E-07	3.092E-07
2.50E+04	1.543E-03	1.147E-04	3.303E-08	2.084E-02	3.662E-06	2.579E-07	3.471E-07
2.60E+04	1.518E-03	1.188E-04	3.404E-08	2.084E-02	3.905E-06	2.596E-07	3.881E-07

注) 例えば2.60E+04は 2.60×10^4 と読む。

表B.1 燃料棒内に蓄積される核種の原子個数密度の燃焼度依存性(続き)

燃焼度 (MWd/t)	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu	²⁴¹ Am	^{241g} Am	^{241m} Am
原子個数密度($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)							
0.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.00E+02	3.331E-07	2.566E-10	4.412E-13	9.988E-17	1.091E-16	2.059E-20	6.676E-21
2.00E+02	8.507E-07	1.275E-09	4.480E-12	2.048E-15	2.231E-15	5.218E-19	2.759E-19
3.00E+02	1.384E-06	3.137E-09	1.686E-11	1.172E-14	1.275E-14	3.223E-18	2.382E-18
4.00E+02	1.918E-06	5.842E-09	4.248E-11	3.981E-14	4.328E-14	1.139E-17	1.084E-17
6.00E+02	2.980E-06	1.376E-08	1.528E-10	2.182E-13	2.367E-13	6.491E-17	8.957E-17
8.00E+02	4.035E-06	2.497E-08	3.736E-10	7.189E-13	7.785E-13	2.180E-16	3.940E-16
1.00E+03	5.083E-06	3.941E-08	7.422E-10	1.799E-12	1.945E-12	5.516E-16	1.231E-15
2.00E+03	1.020E-05	1.583E-07	6.044E-09	2.997E-11	3.209E-11	9.377E-15	4.027E-14
3.00E+03	1.513E-05	3.493E-07	2.009E-08	1.517E-10	1.609E-10	4.755E-14	2.975E-13
4.00E+03	1.987E-05	6.059E-07	4.644E-08	4.735E-10	4.980E-10	1.482E-13	1.203E-12
5.00E+03	2.443E-05	9.218E-07	8.808E-08	1.136E-09	1.184E-09	3.543E-13	3.504E-12
6.00E+03	2.882E-05	1.292E-06	1.472E-07	2.309E-09	2.384E-09	7.167E-13	8.293E-12
7.00E+03	3.303E-05	1.710E-06	2.262E-07	4.186E-09	4.280E-09	1.293E-12	1.702E-11
8.00E+03	3.708E-05	2.172E-06	3.264E-07	6.984E-09	7.071E-09	2.146E-12	3.147E-11
9.00E+03	4.098E-05	2.673E-06	4.485E-07	1.093E-08	1.096E-08	3.341E-12	5.375E-11
1.00E+04	4.472E-05	3.212E-06	5.930E-07	1.627E-08	1.614E-08	4.946E-12	8.624E-11
1.10E+04	4.832E-05	3.783E-06	7.603E-07	2.325E-08	2.283E-08	7.028E-12	1.315E-10
1.20E+04	5.177E-05	4.385E-06	9.505E-07	3.213E-08	3.121E-08	9.655E-12	1.923E-10
1.30E+04	5.508E-05	5.014E-06	1.163E-06	4.316E-08	4.147E-08	1.290E-11	2.715E-10
1.40E+04	5.827E-05	5.668E-06	1.398E-06	5.661E-08	5.379E-08	1.682E-11	3.720E-10
1.50E+04	6.132E-05	6.345E-06	1.655E-06	7.273E-08	6.834E-08	2.148E-11	4.967E-10
1.60E+04	6.425E-05	7.043E-06	1.933E-06	9.179E-08	8.527E-08	2.695E-11	6.486E-10
1.70E+04	6.705E-05	7.761E-06	2.232E-06	1.141E-07	1.047E-07	3.329E-11	8.304E-10
1.80E+04	6.974E-05	8.495E-06	2.550E-06	1.398E-07	1.268E-07	4.056E-11	1.045E-09
1.90E+04	7.232E-05	9.246E-06	2.886E-06	1.692E-07	1.517E-07	4.880E-11	1.294E-09
1.95E+04	7.356E-05	9.627E-06	3.060E-06	1.854E-07	1.652E-07	5.323E-11	1.433E-09
2.00E+04	7.478E-05	1.001E-05	3.238E-06	2.025E-07	1.794E-07	5.800E-11	1.581E-09
2.10E+04	7.713E-05	1.079E-05	3.610E-06	2.401E-07	2.101E-07	6.843E-11	1.908E-09
2.20E+04	7.939E-05	1.158E-05	3.996E-06	2.821E-07	2.437E-07	7.991E-11	2.276E-09
2.30E+04	8.154E-05	1.238E-05	4.398E-06	3.287E-07	2.804E-07	9.256E-11	2.688E-09
2.40E+04	8.359E-05	1.319E-05	4.813E-06	3.802E-07	3.202E-07	1.064E-10	3.145E-09
2.50E+04	8.554E-05	1.402E-05	5.240E-06	4.369E-07	3.631E-07	1.215E-10	3.647E-09
2.60E+04	8.741E-05	1.485E-05	5.679E-06	4.988E-07	4.092E-07	1.379E-10	4.196E-09

表B.1 燃料棒内に蓄積される核種の原子個数密度の燃焼度依存性(続き)

燃焼度 (MWd/t)	²⁴³ Am	²⁴² Cm	²⁴³ Cm	²⁴⁴ Cm	²⁴⁵ Cm	⁸³ Kr	⁹³ Zr
原子個数密度($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)							
0.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.00E+02	1.496E-20	2.495E-20	3.901E-25	1.728E-22	5.076E-26	1.296E-08	1.543E-07
2.00E+02	6.190E-19	1.302E-18	4.186E-23	2.708E-21	1.936E-24	2.592E-08	3.086E-07
3.00E+02	5.369E-18	1.226E-17	6.029E-22	7.927E-21	9.774E-24	3.886E-08	4.628E-07
4.00E+02	2.454E-17	5.834E-17	3.880E-21	2.572E-20	2.333E-23	5.180E-08	6.170E-07
6.00E+02	2.045E-16	5.034E-16	5.124E-20	2.969E-19	1.635E-22	7.764E-08	9.253E-07
8.00E+02	9.074E-16	2.258E-15	3.106E-19	1.687E-18	1.056E-21	1.034E-07	1.233E-06
1.00E+03	2.859E-15	7.123E-15	1.237E-18	6.548E-18	4.754E-21	1.292E-07	1.541E-06
2.00E+03	9.731E-14	2.342E-13	8.369E-17	4.529E-16	6.268E-19	2.576E-07	3.078E-06
3.00E+03	7.486E-13	1.707E-12	9.324E-16	5.277E-15	1.102E-17	3.850E-07	4.611E-06
4.00E+03	3.150E-12	6.791E-12	5.019E-15	2.982E-14	8.329E-17	5.115E-07	6.139E-06
5.00E+03	9.539E-12	1.944E-11	1.820E-14	1.136E-13	3.975E-16	6.372E-07	7.663E-06
6.00E+03	2.347E-11	4.526E-11	5.145E-14	3.374E-13	1.420E-15	7.620E-07	9.184E-06
7.00E+03	5.007E-11	9.141E-11	1.226E-13	8.442E-13	4.151E-15	8.859E-07	1.070E-05
8.00E+03	9.622E-11	1.666E-10	2.581E-13	1.864E-12	1.049E-14	1.009E-06	1.221E-05
9.00E+03	1.708E-10	2.806E-10	4.942E-13	3.740E-12	2.371E-14	1.131E-06	1.372E-05
1.00E+04	2.847E-10	4.445E-10	8.785E-13	6.961E-12	4.909E-14	1.252E-06	1.523E-05
1.10E+04	4.510E-10	6.700E-10	1.471E-12	1.219E-11	9.468E-14	1.373E-06	1.673E-05
1.20E+04	6.851E-10	9.693E-10	2.343E-12	2.031E-11	1.722E-13	1.492E-06	1.822E-05
1.30E+04	1.005E-09	1.355E-09	3.582E-12	3.243E-11	2.982E-13	1.611E-06	1.972E-05
1.40E+04	1.430E-09	1.841E-09	5.285E-12	4.995E-11	4.952E-13	1.729E-06	2.121E-05
1.50E+04	1.983E-09	2.438E-09	7.568E-12	7.459E-11	7.931E-13	1.846E-06	2.270E-05
1.60E+04	2.688E-09	3.161E-09	1.056E-11	1.084E-10	1.231E-12	1.962E-06	2.418E-05
1.70E+04	3.574E-09	4.023E-09	1.439E-11	1.539E-10	1.858E-12	2.077E-06	2.566E-05
1.80E+04	4.669E-09	5.035E-09	1.922E-11	2.140E-10	2.738E-12	2.191E-06	2.713E-05
1.90E+04	6.005E-09	6.209E-09	2.521E-11	2.920E-10	3.946E-12	2.305E-06	2.861E-05
1.95E+04	6.774E-09	6.860E-09	2.870E-11	3.389E-10	4.701E-12	2.361E-06	2.934E-05
2.00E+04	7.615E-09	7.556E-09	3.254E-11	3.917E-10	5.575E-12	2.417E-06	3.008E-05
2.10E+04	9.539E-09	9.091E-09	4.141E-11	5.177E-10	7.743E-12	2.529E-06	3.154E-05
2.20E+04	1.181E-08	1.082E-08	5.200E-11	6.751E-10	1.058E-11	2.640E-06	3.300E-05
2.30E+04	1.448E-08	1.276E-08	6.453E-11	8.693E-10	1.425E-11	2.749E-06	3.446E-05
2.40E+04	1.758E-08	1.491E-08	7.923E-11	1.107E-09	1.895E-11	2.858E-06	3.592E-05
2.50E+04	2.116E-08	1.729E-08	9.631E-11	1.394E-09	2.488E-11	2.966E-06	3.737E-05
2.60E+04	2.527E-08	1.990E-08	1.160E-10	1.740E-09	3.229E-11	3.073E-06	3.882E-05

表B.1 燃料棒内に蓄積される核種の原子個数密度の燃焼度依存性(続き)

燃焼度 (MWd/t)	⁹⁶ Zr	⁹⁵ Mo	⁹⁷ Mo	⁹⁸ Mo	⁹⁹ Mo	¹⁰⁰ Mo	⁹⁹ Tc
原子個数密度($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)							
0.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.00E+02	1.521E-07	1.569E-07	1.458E-07	1.389E-07	6.274E-08	1.520E-07	8.600E-08
2.00E+02	3.042E-07	3.138E-07	2.916E-07	2.778E-07	7.063E-08	3.041E-07	2.268E-07
3.00E+02	4.563E-07	4.706E-07	4.374E-07	4.168E-07	7.163E-08	4.561E-07	3.745E-07
4.00E+02	6.083E-07	6.273E-07	5.832E-07	5.557E-07	7.175E-08	6.081E-07	5.230E-07
6.00E+02	9.123E-07	9.407E-07	8.747E-07	8.335E-07	7.177E-08	9.122E-07	8.201E-07
8.00E+02	1.216E-06	1.254E-06	1.166E-06	1.111E-06	7.176E-08	1.216E-06	1.117E-06
1.00E+03	1.520E-06	1.567E-06	1.458E-06	1.389E-06	7.176E-08	1.520E-06	1.414E-06
2.00E+03	3.038E-06	3.129E-06	2.914E-06	2.778E-06	7.176E-08	3.042E-06	2.896E-06
3.00E+03	4.554E-06	4.687E-06	4.368E-06	4.168E-06	7.175E-08	4.563E-06	4.375E-06
4.00E+03	6.068E-06	6.240E-06	5.822E-06	5.557E-06	7.174E-08	6.085E-06	5.849E-06
5.00E+03	7.579E-06	7.790E-06	7.273E-06	6.946E-06	7.173E-08	7.607E-06	7.320E-06
6.00E+03	9.089E-06	9.334E-06	8.724E-06	8.335E-06	7.172E-08	9.130E-06	8.788E-06
7.00E+03	1.060E-05	1.087E-05	1.017E-05	9.724E-06	7.171E-08	1.065E-05	1.025E-05
8.00E+03	1.210E-05	1.241E-05	1.162E-05	1.111E-05	7.170E-08	1.218E-05	1.171E-05
9.00E+03	1.361E-05	1.394E-05	1.307E-05	1.250E-05	7.169E-08	1.370E-05	1.317E-05
1.00E+04	1.511E-05	1.547E-05	1.451E-05	1.389E-05	7.168E-08	1.522E-05	1.462E-05
1.10E+04	1.661E-05	1.700E-05	1.596E-05	1.528E-05	7.167E-08	1.675E-05	1.607E-05
1.20E+04	1.811E-05	1.852E-05	1.740E-05	1.667E-05	7.166E-08	1.827E-05	1.752E-05
1.30E+04	1.960E-05	2.003E-05	1.884E-05	1.806E-05	7.165E-08	1.980E-05	1.896E-05
1.40E+04	2.110E-05	2.154E-05	2.028E-05	1.945E-05	7.165E-08	2.132E-05	2.040E-05
1.50E+04	2.259E-05	2.305E-05	2.172E-05	2.084E-05	7.164E-08	2.285E-05	2.183E-05
1.60E+04	2.408E-05	2.456E-05	2.315E-05	2.223E-05	7.163E-08	2.437E-05	2.326E-05
1.70E+04	2.557E-05	2.606E-05	2.459E-05	2.361E-05	7.163E-08	2.590E-05	2.469E-05
1.80E+04	2.706E-05	2.755E-05	2.602E-05	2.500E-05	7.162E-08	2.743E-05	2.612E-05
1.90E+04	2.854E-05	2.904E-05	2.746E-05	2.639E-05	7.161E-08	2.895E-05	2.754E-05
1.95E+04	2.928E-05	2.979E-05	2.817E-05	2.709E-05	7.160E-08	2.972E-05	2.825E-05
2.00E+04	3.002E-05	3.053E-05	2.889E-05	2.778E-05	7.160E-08	3.048E-05	2.895E-05
2.10E+04	3.151E-05	3.202E-05	3.032E-05	2.917E-05	7.160E-08	3.201E-05	3.037E-05
2.20E+04	3.299E-05	3.350E-05	3.175E-05	3.056E-05	7.159E-08	3.353E-05	3.178E-05
2.30E+04	3.447E-05	3.497E-05	3.318E-05	3.195E-05	7.159E-08	3.506E-05	3.318E-05
2.40E+04	3.594E-05	3.645E-05	3.460E-05	3.334E-05	7.158E-08	3.659E-05	3.458E-05
2.50E+04	3.742E-05	3.791E-05	3.603E-05	3.473E-05	7.158E-08	3.812E-05	3.598E-05
2.60E+04	3.889E-05	3.938E-05	3.745E-05	3.611E-05	7.157E-08	3.964E-05	3.738E-05

表B.1 燃料棒内に蓄積される核種の原子個数密度の燃焼度依存性(続き)

燃焼度 (MWd/t)	^{101}Ru	^{102}Ru	^{103}Ru	^{104}Ru	^{105}Ru	^{103}Rh	^{105}Rh
	原子個数密度($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)						
0.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.00E+02	1.245E-07	1.047E-07	7.102E-08	4.739E-08	8.413E-10	5.256E-09	6.483E-09
2.00E+02	2.489E-07	2.095E-07	1.326E-07	9.486E-08	8.444E-10	2.007E-08	6.657E-09
3.00E+02	3.734E-07	3.143E-07	1.859E-07	1.424E-07	8.466E-10	4.315E-08	6.677E-09
4.00E+02	4.978E-07	4.191E-07	2.320E-07	1.900E-07	8.489E-10	7.338E-08	6.695E-09
6.00E+02	7.468E-07	6.289E-07	3.067E-07	2.854E-07	8.533E-10	1.516E-07	6.730E-09
8.00E+02	9.957E-07	8.388E-07	3.629E-07	3.811E-07	8.577E-10	2.484E-07	6.765E-09
1.00E+03	1.245E-06	1.049E-06	4.051E-07	4.771E-07	8.621E-10	3.591E-07	6.799E-09
2.00E+03	2.489E-06	2.101E-06	5.036E-07	9.604E-07	8.827E-10	1.025E-06	6.964E-09
3.00E+03	3.734E-06	3.157E-06	5.297E-07	1.450E-06	9.034E-10	1.762E-06	7.127E-09
4.00E+03	4.978E-06	4.216E-06	5.388E-07	1.945E-06	9.235E-10	2.513E-06	7.285E-09
5.00E+03	6.223E-06	5.278E-06	5.438E-07	2.445E-06	9.430E-10	3.266E-06	7.438E-09
6.00E+03	7.467E-06	6.343E-06	5.477E-07	2.951E-06	9.621E-10	4.018E-06	7.589E-09
7.00E+03	8.710E-06	7.411E-06	5.513E-07	3.463E-06	9.808E-10	4.767E-06	7.736E-09
8.00E+03	9.954E-06	8.482E-06	5.548E-07	3.979E-06	9.992E-10	5.514E-06	7.880E-09
9.00E+03	1.120E-05	9.557E-06	5.582E-07	4.501E-06	1.017E-09	6.257E-06	8.022E-09
1.00E+04	1.244E-05	1.063E-05	5.615E-07	5.028E-06	1.035E-09	6.997E-06	8.161E-09
1.10E+04	1.368E-05	1.171E-05	5.648E-07	5.559E-06	1.052E-09	7.734E-06	8.298E-09
1.20E+04	1.493E-05	1.280E-05	5.680E-07	6.096E-06	1.070E-09	8.467E-06	8.433E-09
1.30E+04	1.617E-05	1.388E-05	5.712E-07	6.637E-06	1.087E-09	9.197E-06	8.566E-09
1.40E+04	1.741E-05	1.497E-05	5.743E-07	7.183E-06	1.103E-09	9.924E-06	8.698E-09
1.50E+04	1.865E-05	1.607E-05	5.774E-07	7.734E-06	1.120E-09	1.065E-05	8.828E-09
1.60E+04	1.989E-05	1.716E-05	5.804E-07	8.290E-06	1.136E-09	1.137E-05	8.957E-09
1.70E+04	2.113E-05	1.826E-05	5.834E-07	8.850E-06	1.153E-09	1.208E-05	9.085E-09
1.80E+04	2.237E-05	1.936E-05	5.864E-07	9.414E-06	1.169E-09	1.279E-05	9.211E-09
1.90E+04	2.361E-05	2.046E-05	5.893E-07	9.984E-06	1.185E-09	1.350E-05	9.337E-09
1.95E+04	2.423E-05	2.102E-05	5.907E-07	1.027E-05	1.193E-09	1.385E-05	9.397E-09
2.00E+04	2.485E-05	2.157E-05	5.921E-07	1.056E-05	1.201E-09	1.420E-05	9.459E-09
2.10E+04	2.609E-05	2.268E-05	5.951E-07	1.114E-05	1.217E-09	1.490E-05	9.586E-09
2.20E+04	2.732E-05	2.379E-05	5.979E-07	1.172E-05	1.232E-09	1.559E-05	9.709E-09
2.30E+04	2.856E-05	2.491E-05	6.008E-07	1.231E-05	1.248E-09	1.628E-05	9.831E-09
2.40E+04	2.980E-05	2.603E-05	6.036E-07	1.290E-05	1.264E-09	1.697E-05	9.954E-09
2.50E+04	3.103E-05	2.715E-05	6.064E-07	1.349E-05	1.279E-09	1.765E-05	1.008E-08
2.60E+04	3.227E-05	2.827E-05	6.091E-07	1.409E-05	1.295E-09	1.833E-05	1.020E-08

表B.1 燃料棒内に蓄積される核種の原子個数密度の燃焼度依存性(続き)

燃焼度 (MWd/t)	¹⁰⁵ Pd	¹⁰⁶ Pd	¹⁰⁷ Pd	¹⁰⁸ Pd	¹⁰⁹ AG	¹¹⁰ Cd	¹¹¹ Cd
	原子個数密度($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)						
0.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.00E+02	1.841E-08	1.155E-08	4.370E-09	2.071E-09	1.036E-09	5.849E-13	5.373E-10
2.00E+02	4.399E-08	2.317E-08	8.794E-09	4.174E-09	2.097E-09	2.363E-12	1.079E-09
3.00E+02	6.978E-08	3.485E-08	1.327E-08	6.310E-09	3.185E-09	5.361E-12	1.625E-09
4.00E+02	9.564E-08	4.660E-08	1.779E-08	8.477E-09	4.300E-09	9.611E-12	2.175E-09
6.00E+02	1.476E-07	7.028E-08	2.698E-08	1.291E-08	6.611E-09	2.200E-11	3.287E-09
8.00E+02	1.997E-07	9.421E-08	3.636E-08	1.747E-08	9.029E-09	3.978E-11	4.417E-09
1.00E+03	2.522E-07	1.184E-07	4.594E-08	2.215E-08	1.155E-08	6.320E-11	5.564E-09
2.00E+03	5.180E-07	2.429E-07	9.661E-08	4.740E-08	2.570E-08	2.736E-10	1.154E-08
3.00E+03	7.899E-07	3.733E-07	1.519E-07	7.570E-08	4.238E-08	6.609E-10	1.792E-08
4.00E+03	1.068E-06	5.096E-07	2.118E-07	1.070E-07	6.150E-08	1.254E-09	2.469E-08
5.00E+03	1.351E-06	6.515E-07	2.760E-07	1.411E-07	8.296E-08	2.082E-09	3.185E-08
6.00E+03	1.640E-06	7.990E-07	3.445E-07	1.781E-07	1.067E-07	3.171E-09	3.939E-08
7.00E+03	1.934E-06	9.520E-07	4.172E-07	2.179E-07	1.326E-07	4.550E-09	4.729E-08
8.00E+03	2.234E-06	1.110E-06	4.941E-07	2.604E-07	1.607E-07	6.243E-09	5.556E-08
9.00E+03	2.539E-06	1.274E-06	5.749E-07	3.055E-07	1.907E-07	8.277E-09	6.418E-08
1.00E+04	2.849E-06	1.443E-06	6.598E-07	3.533E-07	2.228E-07	1.068E-08	7.315E-08
1.10E+04	3.164E-06	1.617E-06	7.485E-07	4.038E-07	2.569E-07	1.347E-08	8.247E-08
1.20E+04	3.483E-06	1.796E-06	8.412E-07	4.568E-07	2.928E-07	1.668E-08	9.213E-08
1.30E+04	3.808E-06	1.981E-06	9.376E-07	5.123E-07	3.305E-07	2.033E-08	1.021E-07
1.40E+04	4.137E-06	2.170E-06	1.038E-06	5.704E-07	3.701E-07	2.445E-08	1.125E-07
1.50E+04	4.470E-06	2.364E-06	1.142E-06	6.311E-07	4.114E-07	2.906E-08	1.231E-07
1.60E+04	4.809E-06	2.564E-06	1.249E-06	6.942E-07	4.544E-07	3.418E-08	1.342E-07
1.70E+04	5.152E-06	2.768E-06	1.361E-06	7.598E-07	4.991E-07	3.984E-08	1.455E-07
1.80E+04	5.499E-06	2.977E-06	1.476E-06	8.278E-07	5.454E-07	4.606E-08	1.572E-07
1.90E+04	5.850E-06	3.192E-06	1.594E-06	8.984E-07	5.933E-07	5.287E-08	1.692E-07
1.95E+04	6.028E-06	3.301E-06	1.655E-06	9.346E-07	6.179E-07	5.650E-08	1.753E-07
2.00E+04	6.206E-06	3.411E-06	1.716E-06	9.714E-07	6.428E-07	6.028E-08	1.815E-07
2.10E+04	6.567E-06	3.635E-06	1.842E-06	1.047E-06	6.938E-07	6.834E-08	1.942E-07
2.20E+04	6.931E-06	3.864E-06	1.972E-06	1.125E-06	7.464E-07	7.705E-08	2.072E-07
2.30E+04	7.300E-06	4.098E-06	2.104E-06	1.205E-06	8.004E-07	8.644E-08	2.205E-07
2.40E+04	7.673E-06	4.337E-06	2.241E-06	1.288E-06	8.558E-07	9.654E-08	2.341E-07
2.50E+04	8.050E-06	4.581E-06	2.381E-06	1.373E-06	9.127E-07	1.074E-07	2.481E-07
2.60E+04	8.431E-06	4.829E-06	2.524E-06	1.461E-06	9.711E-07	1.190E-07	2.624E-07

表B.1 燃料棒内に蓄積される核種の原子個数密度の燃焼度依存性(続き)

燃焼度 (MWd/t)	¹¹³ Cd	¹¹⁵ In	¹²⁷ I	¹²⁹ I	¹³¹ I	¹³⁵ I	¹³¹ Xe
	原子個数密度($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)						
0.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.00E+02	4.017E-10	2.805E-10	3.035E-09	1.770E-08	5.047E-08	7.345E-09	1.999E-08
2.00E+02	7.688E-10	5.607E-10	6.074E-09	3.541E-08	7.532E-08	7.346E-09	6.558E-08
3.00E+02	1.104E-09	8.407E-10	9.119E-09	5.312E-08	8.755E-08	7.345E-09	1.238E-07
4.00E+02	1.410E-09	1.120E-09	1.217E-08	7.085E-08	9.358E-08	7.345E-09	1.881E-07
6.00E+02	1.946E-09	1.678E-09	1.828E-08	1.063E-07	9.803E-08	7.345E-09	3.243E-07
8.00E+02	2.393E-09	2.235E-09	2.442E-08	1.418E-07	9.913E-08	7.345E-09	4.636E-07
1.00E+03	2.766E-09	2.791E-09	3.057E-08	1.774E-07	9.943E-08	7.345E-09	6.036E-07
2.00E+03	3.895E-09	5.545E-09	6.163E-08	3.556E-07	9.969E-08	7.345E-09	1.302E-06
3.00E+03	4.372E-09	8.263E-09	9.316E-08	5.347E-07	9.986E-08	7.345E-09	1.997E-06
4.00E+03	4.586E-09	1.094E-08	1.252E-07	7.145E-07	1.000E-07	7.344E-09	2.687E-06
5.00E+03	4.695E-09	1.358E-08	1.576E-07	8.951E-07	1.002E-07	7.343E-09	3.373E-06
6.00E+03	4.760E-09	1.619E-08	1.905E-07	1.076E-06	1.003E-07	7.343E-09	4.055E-06
7.00E+03	4.807E-09	1.875E-08	2.238E-07	1.258E-06	1.005E-07	7.342E-09	4.732E-06
8.00E+03	4.845E-09	2.128E-08	2.575E-07	1.441E-06	1.006E-07	7.342E-09	5.405E-06
9.00E+03	4.877E-09	2.376E-08	2.915E-07	1.625E-06	1.008E-07	7.341E-09	6.074E-06
1.00E+04	4.907E-09	2.621E-08	3.260E-07	1.809E-06	1.009E-07	7.341E-09	6.738E-06
1.10E+04	4.934E-09	2.861E-08	3.609E-07	1.993E-06	1.011E-07	7.341E-09	7.398E-06
1.20E+04	4.959E-09	3.098E-08	3.961E-07	2.178E-06	1.012E-07	7.340E-09	8.054E-06
1.30E+04	4.981E-09	3.331E-08	4.316E-07	2.364E-06	1.013E-07	7.340E-09	8.705E-06
1.40E+04	5.002E-09	3.559E-08	4.675E-07	2.550E-06	1.014E-07	7.340E-09	9.352E-06
1.50E+04	5.021E-09	3.784E-08	5.038E-07	2.737E-06	1.016E-07	7.339E-09	9.994E-06
1.60E+04	5.039E-09	4.005E-08	5.403E-07	2.925E-06	1.017E-07	7.339E-09	1.063E-05
1.70E+04	5.054E-09	4.222E-08	5.772E-07	3.112E-06	1.018E-07	7.339E-09	1.127E-05
1.80E+04	5.069E-09	4.435E-08	6.144E-07	3.301E-06	1.019E-07	7.339E-09	1.189E-05
1.90E+04	5.082E-09	4.644E-08	6.519E-07	3.490E-06	1.020E-07	7.338E-09	1.252E-05
1.95E+04	5.087E-09	4.747E-08	6.707E-07	3.584E-06	1.021E-07	7.337E-09	1.283E-05
2.00E+04	5.092E-09	4.849E-08	6.897E-07	3.679E-06	1.021E-07	7.337E-09	1.314E-05
2.10E+04	5.103E-09	5.051E-08	7.277E-07	3.869E-06	1.023E-07	7.338E-09	1.375E-05
2.20E+04	5.112E-09	5.248E-08	7.661E-07	4.059E-06	1.024E-07	7.338E-09	1.436E-05
2.30E+04	5.119E-09	5.442E-08	8.048E-07	4.249E-06	1.025E-07	7.338E-09	1.497E-05
2.40E+04	5.125E-09	5.632E-08	8.437E-07	4.440E-06	1.026E-07	7.338E-09	1.557E-05
2.50E+04	5.130E-09	5.818E-08	8.829E-07	4.631E-06	1.027E-07	7.338E-09	1.617E-05
2.60E+04	5.134E-09	6.000E-08	9.223E-07	4.823E-06	1.028E-07	7.338E-09	1.676E-05

表B.1 燃料棒内に蓄積される核種の原子個数密度の燃焼度依存性(続き)

燃焼度 (MWd/t)	¹³² Xe	¹³³ Xe	¹³⁵ Xe	¹³⁶ Xe	¹³³ Cs	¹³⁴ Cs	¹³⁵ Cs
原子個数密度($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)							
0.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.00E+02	1.053E-07	9.975E-08	7.988E-09	1.889E-07	6.321E-08	7.146E-12	1.088E-07
2.00E+02	2.107E-07	1.337E-07	8.007E-09	3.813E-07	1.922E-07	4.515E-11	2.295E-07
3.00E+02	3.161E-07	1.452E-07	8.008E-09	5.737E-07	3.435E-07	1.260E-10	3.502E-07
4.00E+02	4.216E-07	1.492E-07	8.008E-09	7.661E-07	5.023E-07	2.534E-10	4.709E-07
6.00E+02	6.328E-07	1.510E-07	8.007E-09	1.151E-06	8.260E-07	6.517E-10	7.122E-07
8.00E+02	8.442E-07	1.512E-07	8.007E-09	1.536E-06	1.151E-06	1.241E-09	9.536E-07
1.00E+03	1.056E-06	1.512E-07	8.006E-09	1.921E-06	1.476E-06	2.018E-09	1.195E-06
2.00E+03	2.119E-06	1.512E-07	8.001E-09	3.847E-06	3.099E-06	8.643E-09	2.400E-06
3.00E+03	3.188E-06	1.512E-07	7.992E-09	5.776E-06	4.716E-06	1.957E-08	3.604E-06
4.00E+03	4.265E-06	1.512E-07	7.982E-09	7.708E-06	6.329E-06	3.448E-08	4.805E-06
5.00E+03	5.347E-06	1.512E-07	7.971E-09	9.642E-06	7.936E-06	5.308E-08	6.004E-06
6.00E+03	6.437E-06	1.512E-07	7.959E-09	1.158E-05	9.539E-06	7.509E-08	7.200E-06
7.00E+03	7.533E-06	1.512E-07	7.947E-09	1.352E-05	1.114E-05	1.003E-07	8.394E-06
8.00E+03	8.635E-06	1.512E-07	7.933E-09	1.546E-05	1.273E-05	1.284E-07	9.586E-06
9.00E+03	9.744E-06	1.512E-07	7.919E-09	1.741E-05	1.432E-05	1.592E-07	1.077E-05
1.00E+04	1.086E-05	1.512E-07	7.905E-09	1.936E-05	1.590E-05	1.926E-07	1.196E-05
1.10E+04	1.198E-05	1.512E-07	7.890E-09	2.131E-05	1.748E-05	2.284E-07	1.314E-05
1.20E+04	1.311E-05	1.512E-07	7.874E-09	2.327E-05	1.905E-05	2.663E-07	1.432E-05
1.30E+04	1.424E-05	1.512E-07	7.858E-09	2.523E-05	2.062E-05	3.063E-07	1.550E-05
1.40E+04	1.538E-05	1.512E-07	7.841E-09	2.719E-05	2.218E-05	3.482E-07	1.667E-05
1.50E+04	1.653E-05	1.512E-07	7.823E-09	2.916E-05	2.374E-05	3.919E-07	1.784E-05
1.60E+04	1.768E-05	1.513E-07	7.805E-09	3.113E-05	2.529E-05	4.373E-07	1.901E-05
1.70E+04	1.884E-05	1.513E-07	7.787E-09	3.310E-05	2.683E-05	4.843E-07	2.017E-05
1.80E+04	2.001E-05	1.513E-07	7.768E-09	3.508E-05	2.837E-05	5.328E-07	2.133E-05
1.90E+04	2.118E-05	1.513E-07	7.748E-09	3.706E-05	2.991E-05	5.826E-07	2.249E-05
1.95E+04	2.177E-05	1.512E-07	7.734E-09	3.805E-05	3.068E-05	6.080E-07	2.307E-05
2.00E+04	2.236E-05	1.512E-07	7.724E-09	3.905E-05	3.144E-05	6.336E-07	2.364E-05
2.10E+04	2.354E-05	1.513E-07	7.707E-09	4.104E-05	3.297E-05	6.860E-07	2.479E-05
2.20E+04	2.473E-05	1.513E-07	7.685E-09	4.303E-05	3.449E-05	7.396E-07	2.594E-05
2.30E+04	2.593E-05	1.513E-07	7.664E-09	4.503E-05	3.600E-05	7.943E-07	2.708E-05
2.40E+04	2.713E-05	1.513E-07	7.641E-09	4.703E-05	3.751E-05	8.500E-07	2.821E-05
2.50E+04	2.834E-05	1.513E-07	7.618E-09	4.903E-05	3.901E-05	9.068E-07	2.935E-05
2.60E+04	2.955E-05	1.513E-07	7.595E-09	5.104E-05	4.051E-05	9.645E-07	3.048E-05

表B.1 燃料棒内に蓄積される核種の原子個数密度の燃焼度依存性(続き)

燃焼度 (MWd/t)	¹³⁹ La	¹⁴¹ Ce	¹⁴¹ Pr	¹⁴³ Pr	¹⁴³ Nd	¹⁴⁵ Nd	¹⁴⁷ Nd
	原子個数密度($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)						
0.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.00E+02	1.542E-07	1.291E-07	1.170E-08	1.171E-07	2.628E-08	9.517E-08	4.300E-08
2.00E+02	3.084E-07	2.372E-07	4.422E-08	1.939E-07	9.265E-08	1.903E-07	6.864E-08
3.00E+02	4.625E-07	3.279E-07	9.420E-08	2.444E-07	1.853E-07	2.854E-07	8.394E-08
4.00E+02	6.166E-07	4.039E-07	1.588E-07	2.776E-07	2.952E-07	3.805E-07	9.307E-08
6.00E+02	9.248E-07	5.210E-07	3.229E-07	3.136E-07	5.450E-07	5.705E-07	1.017E-07
8.00E+02	1.233E-06	6.033E-07	5.216E-07	3.291E-07	8.149E-07	7.603E-07	1.048E-07
1.00E+03	1.541E-06	6.610E-07	7.448E-07	3.357E-07	1.093E-06	9.500E-07	1.059E-07
2.00E+03	3.080E-06	7.738E-07	2.035E-06	3.401E-07	2.507E-06	1.896E-06	1.064E-07
3.00E+03	4.618E-06	7.926E-07	3.418E-06	3.396E-07	3.914E-06	2.839E-06	1.064E-07
4.00E+03	6.153E-06	7.953E-07	4.815E-06	3.390E-07	5.310E-06	3.778E-06	1.063E-07
5.00E+03	7.687E-06	7.953E-07	6.214E-06	3.384E-07	6.694E-06	4.714E-06	1.062E-07
6.00E+03	9.219E-06	7.947E-07	7.611E-06	3.379E-07	8.068E-06	5.646E-06	1.061E-07
7.00E+03	1.075E-05	7.942E-07	9.007E-06	3.373E-07	9.430E-06	6.574E-06	1.061E-07
8.00E+03	1.228E-05	7.936E-07	1.040E-05	3.368E-07	1.078E-05	7.499E-06	1.060E-07
9.00E+03	1.381E-05	7.930E-07	1.179E-05	3.362E-07	1.212E-05	8.420E-06	1.059E-07
1.00E+04	1.533E-05	7.924E-07	1.318E-05	3.357E-07	1.345E-05	9.338E-06	1.058E-07
1.10E+04	1.686E-05	7.919E-07	1.457E-05	3.352E-07	1.476E-05	1.025E-05	1.058E-07
1.20E+04	1.838E-05	7.913E-07	1.596E-05	3.347E-07	1.607E-05	1.116E-05	1.057E-07
1.30E+04	1.990E-05	7.908E-07	1.735E-05	3.342E-07	1.736E-05	1.207E-05	1.056E-07
1.40E+04	2.142E-05	7.902E-07	1.873E-05	3.337E-07	1.864E-05	1.297E-05	1.056E-07
1.50E+04	2.294E-05	7.897E-07	2.012E-05	3.332E-07	1.992E-05	1.387E-05	1.055E-07
1.60E+04	2.445E-05	7.892E-07	2.150E-05	3.327E-07	2.117E-05	1.477E-05	1.055E-07
1.70E+04	2.597E-05	7.886E-07	2.288E-05	3.323E-07	2.242E-05	1.567E-05	1.054E-07
1.80E+04	2.748E-05	7.881E-07	2.426E-05	3.318E-07	2.366E-05	1.656E-05	1.053E-07
1.90E+04	2.899E-05	7.876E-07	2.564E-05	3.313E-07	2.488E-05	1.744E-05	1.053E-07
1.95E+04	2.974E-05	7.873E-07	2.633E-05	3.311E-07	2.549E-05	1.788E-05	1.053E-07
2.00E+04	3.050E-05	7.870E-07	2.701E-05	3.309E-07	2.609E-05	1.832E-05	1.052E-07
2.10E+04	3.201E-05	7.866E-07	2.839E-05	3.304E-07	2.729E-05	1.920E-05	1.052E-07
2.20E+04	3.351E-05	7.861E-07	2.976E-05	3.300E-07	2.847E-05	2.008E-05	1.051E-07
2.30E+04	3.502E-05	7.855E-07	3.113E-05	3.295E-07	2.965E-05	2.095E-05	1.051E-07
2.40E+04	3.652E-05	7.850E-07	3.250E-05	3.291E-07	3.081E-05	2.182E-05	1.050E-07
2.50E+04	3.803E-05	7.845E-07	3.387E-05	3.287E-07	3.196E-05	2.269E-05	1.050E-07
2.60E+04	3.953E-05	7.840E-07	3.524E-05	3.282E-07	3.309E-05	2.355E-05	1.049E-07

表B.1 燃料棒内に蓄積される核種の原子個数密度の燃焼度依存性(続き)

燃焼度 (MWd/t)	¹⁴⁸ Nd	¹⁴⁷ Pm	^{148m} Pm	^{148g} Pm	¹⁴⁹ Pm	¹⁵¹ Pm	¹⁴⁷ Sm
	原子個数密度($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)						
0.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.00E+02	4.099E-08	1.200E-08	2.937E-12	2.721E-12	9.451E-09	2.160E-09	2.480E-11
2.00E+02	8.201E-08	4.115E-08	1.983E-11	1.542E-11	1.017E-08	2.179E-09	1.765E-10
3.00E+02	1.231E-07	8.036E-08	5.699E-11	3.817E-11	1.023E-08	2.180E-09	5.340E-10
4.00E+02	1.641E-07	1.254E-07	1.159E-10	6.831E-11	1.023E-08	2.181E-09	1.144E-09
6.00E+02	2.462E-07	2.240E-07	2.938E-10	1.413E-10	1.024E-08	2.184E-09	3.213E-09
8.00E+02	3.284E-07	3.266E-07	5.362E-10	2.218E-10	1.025E-08	2.186E-09	6.481E-09
1.00E+03	4.105E-07	4.296E-07	8.238E-10	3.044E-10	1.026E-08	2.188E-09	1.097E-08
2.00E+03	8.211E-07	9.265E-07	2.533E-09	7.121E-10	1.031E-08	2.199E-09	5.132E-08
3.00E+03	1.231E-06	1.387E-06	4.258E-09	1.090E-09	1.036E-08	2.209E-09	1.198E-07
4.00E+03	1.642E-06	1.815E-06	5.851E-09	1.435E-09	1.041E-08	2.219E-09	2.142E-07
5.00E+03	2.052E-06	2.211E-06	7.315E-09	1.753E-09	1.046E-08	2.229E-09	3.324E-07
6.00E+03	2.462E-06	2.577E-06	8.658E-09	2.047E-09	1.050E-08	2.238E-09	4.725E-07
7.00E+03	2.871E-06	2.917E-06	9.894E-09	2.319E-09	1.055E-08	2.248E-09	6.326E-07
8.00E+03	3.281E-06	3.232E-06	1.103E-08	2.572E-09	1.059E-08	2.257E-09	8.111E-07
9.00E+03	3.690E-06	3.524E-06	1.208E-08	2.806E-09	1.063E-08	2.266E-09	1.006E-06
1.00E+04	4.099E-06	3.795E-06	1.305E-08	3.025E-09	1.066E-08	2.275E-09	1.217E-06
1.10E+04	4.508E-06	4.045E-06	1.395E-08	3.228E-09	1.070E-08	2.284E-09	1.442E-06
1.20E+04	4.917E-06	4.277E-06	1.478E-08	3.419E-09	1.073E-08	2.292E-09	1.679E-06
1.30E+04	5.326E-06	4.492E-06	1.555E-08	3.597E-09	1.076E-08	2.301E-09	1.928E-06
1.40E+04	5.734E-06	4.691E-06	1.626E-08	3.764E-09	1.079E-08	2.309E-09	2.188E-06
1.50E+04	6.143E-06	4.875E-06	1.692E-08	3.921E-09	1.082E-08	2.318E-09	2.457E-06
1.60E+04	6.551E-06	5.045E-06	1.754E-08	4.069E-09	1.085E-08	2.326E-09	2.735E-06
1.70E+04	6.959E-06	5.202E-06	1.811E-08	4.207E-09	1.088E-08	2.334E-09	3.021E-06
1.80E+04	7.367E-06	5.347E-06	1.864E-08	4.338E-09	1.091E-08	2.343E-09	3.313E-06
1.90E+04	7.775E-06	5.481E-06	1.913E-08	4.462E-09	1.093E-08	2.351E-09	3.612E-06
1.95E+04	7.979E-06	5.545E-06	1.934E-08	4.509E-09	1.095E-08	2.355E-09	3.763E-06
2.00E+04	8.183E-06	5.605E-06	1.955E-08	4.566E-09	1.096E-08	2.359E-09	3.916E-06
2.10E+04	8.590E-06	5.720E-06	2.001E-08	4.690E-09	1.099E-08	2.367E-09	4.225E-06
2.20E+04	8.998E-06	5.825E-06	2.041E-08	4.795E-09	1.101E-08	2.375E-09	4.538E-06
2.30E+04	9.405E-06	5.922E-06	2.078E-08	4.895E-09	1.104E-08	2.383E-09	4.855E-06
2.40E+04	9.812E-06	6.011E-06	2.113E-08	4.990E-09	1.106E-08	2.392E-09	5.175E-06
2.50E+04	1.022E-05	6.094E-06	2.145E-08	5.081E-09	1.109E-08	2.400E-09	5.497E-06
2.60E+04	1.063E-05	6.169E-06	2.174E-08	5.168E-09	1.111E-08	2.408E-09	5.822E-06

表B.1 燃料棒内に蓄積される核種の原子個数密度の燃焼度依存性(続き)

燃焼度 (MWd/t)	¹⁴⁸ Sm	¹⁴⁹ Sm	¹⁵⁰ Sm	¹⁵¹ Sm	¹⁵² Sm	¹⁵³ Eu	¹⁵⁴ Eu
	原子個数密度($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)						
0.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.00E+02	8.856E-13	1.594E-08	9.975E-10	8.272E-09	6.776E-09	4.134E-09	2.999E-12
2.00E+02	1.089E-11	3.750E-08	5.123E-09	1.853E-08	1.371E-08	8.279E-09	1.191E-11
3.00E+02	4.358E-11	5.660E-08	1.236E-08	2.864E-08	2.080E-08	1.243E-08	2.669E-11
4.00E+02	1.112E-10	7.305E-08	2.231E-08	3.860E-08	2.805E-08	1.660E-08	4.732E-11
6.00E+02	3.864E-10	9.932E-08	4.885E-08	5.804E-08	4.301E-08	2.495E-08	1.060E-10
8.00E+02	8.850E-10	1.187E-07	8.232E-08	7.689E-08	5.857E-08	3.335E-08	1.878E-10
1.00E+03	1.632E-09	1.330E-07	1.209E-07	9.516E-08	7.470E-08	4.179E-08	2.924E-10
2.00E+03	9.405E-09	1.642E-07	3.544E-07	1.785E-07	1.634E-07	8.471E-08	1.151E-09
3.00E+03	2.396E-08	1.708E-07	6.133E-07	2.498E-07	2.638E-07	1.289E-07	2.553E-09
4.00E+03	4.501E-08	1.719E-07	8.783E-07	3.109E-07	3.741E-07	1.747E-07	4.478E-09
5.00E+03	7.224E-08	1.717E-07	1.145E-06	3.632E-07	4.928E-07	2.220E-07	6.911E-09
6.00E+03	1.054E-07	1.711E-07	1.413E-06	4.079E-07	6.183E-07	2.711E-07	9.838E-09
7.00E+03	1.442E-07	1.705E-07	1.681E-06	4.461E-07	7.496E-07	3.220E-07	1.325E-08
8.00E+03	1.884E-07	1.697E-07	1.950E-06	4.788E-07	8.856E-07	3.749E-07	1.714E-08
9.00E+03	2.378E-07	1.688E-07	2.219E-06	5.066E-07	1.025E-06	4.297E-07	2.149E-08
1.00E+04	2.923E-07	1.679E-07	2.488E-06	5.303E-07	1.168E-06	4.865E-07	2.632E-08
1.10E+04	3.517E-07	1.670E-07	2.757E-06	5.505E-07	1.313E-06	5.454E-07	3.160E-08
1.20E+04	4.158E-07	1.660E-07	3.027E-06	5.677E-07	1.460E-06	6.064E-07	3.733E-08
1.30E+04	4.846E-07	1.649E-07	3.296E-06	5.823E-07	1.609E-06	6.694E-07	4.352E-08
1.40E+04	5.579E-07	1.638E-07	3.566E-06	5.946E-07	1.758E-06	7.345E-07	5.015E-08
1.50E+04	6.356E-07	1.627E-07	3.835E-06	6.051E-07	1.908E-06	8.017E-07	5.723E-08
1.60E+04	7.177E-07	1.615E-07	4.105E-06	6.140E-07	2.058E-06	8.710E-07	6.476E-08
1.70E+04	8.040E-07	1.603E-07	4.374E-06	6.214E-07	2.208E-06	9.424E-07	7.272E-08
1.80E+04	8.945E-07	1.591E-07	4.644E-06	6.277E-07	2.358E-06	1.016E-06	8.112E-08
1.90E+04	9.891E-07	1.578E-07	4.913E-06	6.329E-07	2.508E-06	1.091E-06	8.994E-08
1.95E+04	1.038E-06	1.571E-07	5.048E-06	6.352E-07	2.583E-06	1.129E-06	9.451E-08
2.00E+04	1.088E-06	1.565E-07	5.182E-06	6.372E-07	2.658E-06	1.167E-06	9.918E-08
2.10E+04	1.190E-06	1.552E-07	5.451E-06	6.408E-07	2.807E-06	1.246E-06	1.088E-07
2.20E+04	1.297E-06	1.539E-07	5.720E-06	6.438E-07	2.955E-06	1.326E-06	1.189E-07
2.30E+04	1.407E-06	1.526E-07	5.988E-06	6.461E-07	3.103E-06	1.408E-06	1.294E-07
2.40E+04	1.522E-06	1.512E-07	6.256E-06	6.480E-07	3.250E-06	1.492E-06	1.403E-07
2.50E+04	1.640E-06	1.499E-07	6.524E-06	6.495E-07	3.396E-06	1.577E-06	1.515E-07
2.60E+04	1.762E-06	1.485E-07	6.791E-06	6.506E-07	3.542E-06	1.664E-06	1.632E-07

表B.1 燃料棒内に蓄積される核種の原子個数密度の燃焼度依存性(続き)

燃焼度 (MWd/t)	¹⁵⁵ Eu	¹⁵⁶ Eu	¹⁵⁴ Gd	¹⁵⁵ Gd	¹⁵⁶ Gd	¹⁵⁷ Gd	¹⁵⁸ Gd
原子個数密度($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)							
0.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.00E+02	8.528E-10	3.122E-10	1.850E-15	1.324E-12	6.172E-11	1.590E-10	1.005E-10
2.00E+02	1.689E-09	5.421E-10	1.450E-14	5.176E-12	2.243E-10	2.887E-10	2.320E-10
3.00E+02	2.508E-09	7.150E-10	4.866E-14	1.138E-11	4.620E-10	3.946E-10	3.891E-10
4.00E+02	3.311E-09	8.484E-10	1.149E-13	1.977E-11	7.571E-10	4.812E-10	5.672E-10
6.00E+02	4.868E-09	1.042E-09	3.861E-13	4.250E-11	1.474E-09	6.102E-10	9.723E-10
8.00E+02	6.364E-09	1.180E-09	9.120E-13	7.220E-11	2.316E-09	6.978E-10	1.425E-09
1.00E+03	7.801E-09	1.291E-09	1.776E-12	1.078E-10	3.253E-09	7.582E-10	1.912E-09
2.00E+03	1.420E-08	1.713E-09	1.402E-11	3.464E-10	9.035E-09	8.873E-10	4.614E-09
3.00E+03	1.949E-08	2.058E-09	4.674E-11	6.321E-10	1.636E-08	9.395E-10	7.553E-09
4.00E+03	2.394E-08	2.354E-09	1.095E-10	9.206E-10	2.503E-08	9.808E-10	1.066E-08
5.00E+03	2.773E-08	2.614E-09	2.117E-10	1.190E-09	3.487E-08	1.019E-09	1.392E-08
6.00E+03	3.103E-08	2.846E-09	3.621E-10	1.433E-09	4.577E-08	1.057E-09	1.734E-08
7.00E+03	3.396E-08	3.058E-09	5.695E-10	1.648E-09	5.761E-08	1.092E-09	2.091E-08
8.00E+03	3.663E-08	3.256E-09	8.424E-10	1.836E-09	7.031E-08	1.127E-09	2.463E-08
9.00E+03	3.911E-08	3.443E-09	1.189E-09	2.002E-09	8.383E-08	1.160E-09	2.850E-08
1.00E+04	4.147E-08	3.624E-09	1.618E-09	2.150E-09	9.812E-08	1.192E-09	3.251E-08
1.10E+04	4.377E-08	3.802E-09	2.137E-09	2.284E-09	1.131E-07	1.224E-09	3.668E-08
1.20E+04	4.604E-08	3.979E-09	2.754E-09	2.408E-09	1.289E-07	1.254E-09	4.099E-08
1.30E+04	4.832E-08	4.158E-09	3.478E-09	2.524E-09	1.454E-07	1.283E-09	4.546E-08
1.40E+04	5.063E-08	4.340E-09	4.315E-09	2.636E-09	1.626E-07	1.312E-09	5.006E-08
1.50E+04	5.300E-08	4.526E-09	5.274E-09	2.744E-09	1.806E-07	1.340E-09	5.482E-08
1.60E+04	5.544E-08	4.719E-09	6.361E-09	2.852E-09	1.994E-07	1.367E-09	5.972E-08
1.70E+04	5.797E-08	4.918E-09	7.586E-09	2.960E-09	2.189E-07	1.393E-09	6.478E-08
1.80E+04	6.060E-08	5.125E-09	8.955E-09	3.070E-09	2.393E-07	1.418E-09	6.998E-08
1.90E+04	6.334E-08	5.341E-09	1.047E-08	3.181E-09	2.605E-07	1.443E-09	7.533E-08
1.95E+04	6.476E-08	5.449E-09	1.129E-08	3.238E-09	2.714E-07	1.454E-09	7.806E-08
2.00E+04	6.620E-08	5.562E-09	1.215E-08	3.295E-09	2.826E-07	1.465E-09	8.084E-08
2.10E+04	6.918E-08	5.802E-09	1.400E-08	3.412E-09	3.056E-07	1.491E-09	8.649E-08
2.20E+04	7.229E-08	6.048E-09	1.601E-08	3.533E-09	3.297E-07	1.514E-09	9.229E-08
2.30E+04	7.553E-08	6.304E-09	1.821E-08	3.657E-09	3.547E-07	1.537E-09	9.826E-08
2.40E+04	7.890E-08	6.573E-09	2.059E-08	3.785E-09	3.808E-07	1.559E-09	1.044E-07
2.50E+04	8.241E-08	6.853E-09	2.316E-08	3.916E-09	4.080E-07	1.581E-09	1.107E-07
2.60E+04	8.606E-08	7.146E-09	2.593E-08	4.050E-09	4.364E-07	1.602E-09	1.171E-07

付録 C 反応度係数

4.3 章で議論した反応度係数を以下に示す。

表 C.1 制御棒反応度値

制御棒挿入量 (cm)	制御棒相対挿入 割合 (%)	k_{eff}	制御棒反応度値 (% $\Delta k/k$)
0.0	0.0	1.03638	0.000
3.0	7.4	1.02674	0.910
6.0	14.7	1.01801	1.74
9.0	22.1	1.00683	2.83
10.0	24.6	1.00244	3.27
11.0	27.0	0.99780	3.73
12.0	29.5	0.99289	4.23
15.0	36.9	0.97647	5.92
18.0	44.2	0.95764	7.93
21.0	51.6	0.93596	10.4
24.0	59.0	0.91298	13.0
27.0	66.3	0.88952	15.9
30.0	73.7	0.86689	18.8
33.0	81.1	0.84849	21.4
36.0	88.5	0.83549	23.2
40.7	100.0	0.82584	24.6

表 C.2 減速材温度係数 (高温全出力)

減速材温度 (°C)	BOL		EOL	
	k_{eff}	反応度係数 (% $\Delta k/k/^\circ\text{C}$)	k_{eff}	反応度係数 (% $\Delta k/k/^\circ\text{C}$)
26.85	1.11018	-1.37×10^{-2}	1.10072	-1.14×10^{-2}
100.00	1.09808	-2.91×10^{-2}	1.09071	-2.69×10^{-2}
200.00	1.06410	-6.08×10^{-2}	1.05967	-5.94×10^{-2}
282.00	1.01061	-9.96×10^{-2}	1.00829	-8.89×10^{-2}
289.90	1.00244	-1.14×10^{-1}	1.00031	-1.12×10^{-1}
298.00	0.99327		0.99132	

表 C.3 減速材温度係数 (温態停止)

減速材温度 (°C)	BOL		EOL	
	k_{eff}	反応度係数 (% $\Delta k/k/^\circ\text{C}$)	k_{eff}	反応度係数 (% $\Delta k/k/^\circ\text{C}$)
26.85	1.10856	-1.42×10^{-2}	1.12040	-1.04×10^{-2}
100.00	1.09592	-3.07×10^{-2}	1.11032	-2.68×10^{-2}
200.00	1.06027	-6.36×10^{-2}	1.07833	-5.84×10^{-2}
282.00	1.00477	-1.04×10^{-1}	1.02538	-9.75×10^{-2}
289.90	0.99631	-1.19×10^{-1}	1.01722	-1.11×10^{-1}
298.00	0.98687		1.00796	

表 C.4 ドップラー係数 (高温全出力)

燃料温度 (°C)	BOL		EOL	
	k_{eff}	反応度係数 (% $\Delta k/k/^\circ\text{C}$)	k_{eff}	反応度係数 (% $\Delta k/k/^\circ\text{C}$)
26.85	1.00930	-1.73×10^{-3}	1.00794	-1.95×10^{-3}
281.80	1.00482	-1.49×10^{-3}	1.00293	-1.64×10^{-3}
441.05	1.00244	-1.37×10^{-3}	1.00031	-1.51×10^{-3}
626.85	0.99989	-1.28×10^{-3}	0.99751	-1.36×10^{-3}
926.85	0.99606		0.99345	

表 C.5 ドップラー係数 (温態停止)

燃料温度 (°C)	BOL		EOL	
	k_{eff}	反応度係数 (% $\Delta k/k/^\circ\text{C}$)	k_{eff}	反応度係数 (% $\Delta k/k/^\circ\text{C}$)
26.85	1.00923	-1.73×10^{-3}	1.03056	-1.92×10^{-3}
281.80	1.00477	-1.52×10^{-3}	1.02538	-1.63×10^{-3}
441.05	1.00234	-1.38×10^{-3}	1.02274	-1.45×10^{-3}
626.85	0.99977	-1.29×10^{-3}	1.01987	-1.40×10^{-3}
926.85	0.99592		1.01558	

表 C.6 減速材密度係数 (高温全出力)

減速材 密度比	BOL		EOL	
	k_{eff}	反応度係数 (% $\Delta k/k/(g/cm^3)$)	k_{eff}	反応度係数 (% $\Delta k/k/(g/cm^3)$)
0.1	0.40968	5.59×10^2	0.40164	5.72×10^2
0.2	0.49254	4.20×10^2	0.48393	4.30×10^2
0.3	0.58080	2.96×10^2	0.57004	3.22×10^2
0.4	0.66460	2.10×10^2	0.65880	2.18×10^2
0.5	0.74044	1.57×10^2	0.73622	1.57×10^2
0.6	0.80890	1.12×10^2	0.80470	1.17×10^2
0.7	0.86638	8.87×10^1	0.86456	8.98×10^1
0.8	0.91837	6.93×10^1	0.91654	6.96×10^1
0.9	0.96335	5.51×10^1	0.96153	5.49×10^1
1.0 *	1.00244	4.46×10^1	1.00031	4.40×10^1
1.1	1.03651		1.03373	

* 基準密度 : 0.7341 g/cm^3

表 C.7 減速材密度係数 (温態停止)

減速材 密度比	BOL		EOL	
	k_{eff}	反応度係数 (% $\Delta k/k/(g/cm^3)$)	k_{eff}	反応度係数 (% $\Delta k/k/(g/cm^3)$)
0.1	0.40869	5.46×10^2	0.40896	5.73×10^2
0.2	0.49095	4.17×10^2	0.49490	4.25×10^2
0.3	0.57910	2.92×10^2	0.58791	2.97×10^2
0.4	0.66310	2.08×10^2	0.67640	2.08×10^2
0.5	0.73944	1.51×10^2	0.75626	1.49×10^2
0.6	0.80722	1.15×10^2	0.82654	1.11×10^2
0.7	0.86708	8.70×10^1	0.88770	8.50×10^1
0.8	0.91937	6.85×10^1	0.94060	6.56×10^1
0.9	0.96497	5.47×10^1	0.98615	5.17×10^1
1.0 *	1.00477	4.40×10^1	1.02538	4.12×10^1
1.1	1.03930		1.05904	

* 基準密度 : 0.7504 g/cm^3

表 C.8 Xe 反応度係数 (高温全出力)

Xe 濃度 (%)	BOL		EOL	
	k_{eff}	反応度係数 (% $\Delta k/k/\%$ Xe 濃度)	k_{eff}	反応度係数 (% $\Delta k/k/\%$ Xe 濃度)
0.0	1.01444	-1.17×10^{-4}	1.01459	-1.41×10^{-4}
50.0	1.00843	-1.19×10^{-4}	1.00741	-1.41×10^{-4}
100.0 *	1.00244	-1.16×10^{-4}	1.00031	-1.38×10^{-4}
125.0	0.99952		0.99686	

* 高温全出力時の飽和 Xe 濃度を基準

表 C.9 Xe 反応度係数 (温態停止)

Xe 濃度 (%)	BOL		EOL	
	k_{eff}	反応度係数 (% $\Delta k/k/\%$ Xe 濃度)	k_{eff}	反応度係数 (% $\Delta k/k/\%$ Xe 濃度)
0.0	1.00477	-1.20×10^{-4}	1.02538	-1.42×10^{-4}
50.0	0.99876	-1.19×10^{-4}	1.01800	-1.40×10^{-4}
100.0 *	0.99285	-1.20×10^{-4}	1.01083	-1.39×10^{-4}
125.0	0.98987		1.00728	

* 高温全出力時の飽和 Xe 濃度を基準

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$\text{m} \cdot \text{kg} / \text{s}^2$
圧力, 応力	パスカル	Pa	N / m^2
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
工率, 放射束	ワット	W	J / s
電気量, 電荷	クーロン	C	$\text{A} \cdot \text{s}$
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W / A
静電容量	ファラド	F	C / V
電気抵抗	オーム	Ω	V / A
コンダクタンス	ジーメン	S	A / V
磁束	ウェーバ	Wb	$\text{V} \cdot \text{s}$
磁束密度	テスラ	T	Wb / m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb / A
セルシウス温度	セルシウス度	$^{\circ}\text{C}$	
光束	ルーメン	lm	$\text{cd} \cdot \text{sr}$
照射度	ルクス	lx	lm / m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J / kg
線量等量	シーベルト	Sv	J / kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm} = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm} / \text{s}^2 = 10^{-2} \text{ m} / \text{s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C} / \text{kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局1985年刊行による。ただし, 1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E.C閣僚理事会指令では bar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2) = 10 \text{ P (ポアズ)} (\text{g} / (\text{cm} \cdot \text{s}))$

動粘度 $1 \text{ m}^2 / \text{s} = 10^4 \text{ St (ストークス)} (\text{cm}^2 / \text{s})$

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}
	3.6×10^5	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1

- 1 cal = 4.18605 J (計量法)
 = 4.184 J (熱化学)
 = 4.1855 J (15°C)
 = 4.1868 J (国際蒸気表)
 仕事率 1 PS (仏馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10^{-11}
	3.7×10^{10}	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

