

JAERI-Research

2001-044



JP0150808



熱供給用超小型原子炉 MR-1G 炉心の核的検討

2001 年 10 月

小田野 直光・石田 紀久・落合 政昭

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、お申し越し下さい。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行っております。

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

熱供給用超小型原子炉 MR-1G 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・落合 政昭

(2001年 8月 24日受理)

MR-1G は都市のオフィスビルへの熱供給のための熱出力 1 MWt の超小型原子炉である。MR-1G の炉心設計として、原子炉負荷率 44 %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。燃料棒配置、<sup>235</sup>U 濃縮度について検討し、濃縮度を 8.5 wt% とすることで設計条件を満足できる炉心仕様を得た。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。また、受動的原子炉停止系に採用した反射体落下による炉停止性能の解析を行い、炉物理の観点からの成立性を確認した。

Neutronic Study of a Very Small Reactor MR-1G Core for Exclusive Use of Heat Supply

Naoteru ODANO, Toshihisa ISHIDA and Masa-aki OCHIAI

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

(Received August 24, 2001)

A very small reactor, MR-1G with a thermal output of 1 MW, is the integral-pressurized type reactor to be used for heat supply to an office building in a city. Neutronic study has been carried out for design of the MR-1G, the core of which could achieve continuous long-term operation without refueling for 10 years assuming a load factor of the core of 44 %. In the present study, arrangement of fuel rods and  $^{235}\text{U}$  enrichment of  $\text{UO}_2$  fuel rods were surveyed as design parameters. The  $^{235}\text{U}$  enrichment was determined to be 8.5 wt% to satisfy design requirement. 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 analyzed. Results of the safety analysis indicated that the determined core specifications satisfied design conditions. Reactor shutdown performance by dropping the reflector, which was adopted as a passive reactor shutdown system, was analyzed and confirmed its availability from a viewpoint of reactor physics.

Keywords: Very Small Reactor, Heat Supply, Light Water Reactor, Neutronics, Core Design, Burnup, Reactivity Coefficients, Power Distribution, Passive Reactor Shutdown System

## 目次

1. 序論	1
1.1 背景	1
1.2 熱供給用超小型炉 MR-1G	2
2. MR-1G 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	10
3.1 核特性解析手法の概要	10
3.2 燃料棒配置及び燃料濃縮度	13
3.3 材料組成	15
4. 核特性の評価	18
4.1 燃焼特性	18
4.2 反応度係数	20
4.3 出力分布	24
4.4 核的安全性の評価	29
4.5 受動的原子炉停止系の性能評価	33
4.6 核特性のまとめ	35
5. 結論	36
謝辞	37
参考文献	37
付録 A 実効増倍率の燃焼度依存性	38
付録 B 燃料棒内に蓄積される核種の原子個数密度	39
付録 C 反応度係数	51

Contents

1. Introduction .....	1
1.1 Background .....	1
1.2 A Very Small Reactor MR-1G for Heat Supply .....	2
2. Design Policy of MR-1G Core .....	5
2.1 Basic Policy .....	5
2.2 Core Configuration .....	8
3. Determination of Core Specifications .....	10
3.1 Outline of Methodology for Neutronic Analysis of Core .....	10
3.2 Arrangement of Fuel Rods and Fuel Enrichment .....	13
3.3 Material Compositions .....	15
4. Evaluation of Core Characteristics .....	18
4.1 Core Burnup Characteristics .....	18
4.2 Reactivity Coefficients .....	20
4.3 Power Distribution .....	24
4.4 Assessment of Neutronic Safety of Core .....	29
4.5 Assessment of Performance of Passive Reactor Shutdown System .....	33
4.6 Summary of Core Characteristics .....	35
5. Conclusions .....	36
Acknowledgement .....	37
References .....	37
Appendix A Burnup Dependency of Effective Multiplication Factor .....	38
Appendix B Atom Density of Nuclei Accumulated in Fuel Rods .....	39
Appendix C Reactivity Coefficients .....	51

## 1. 序論

### 1.1 背景

我国においては、地球温暖化やオゾン層破壊などの地球環境問題、少子高齢化社会の到来などの諸問題への対応が急務となっているが、これらの諸問題を克服し、21世紀においても持続可能な発展を達成することが必要である。少子高齢化の社会においては、老後の快適な生活の実現のために、バリアフリー化、介護用動力、季節の変化に応じた空調などのエネルギー消費が不可欠である。また、高齢化社会における不慮の事故を防止するには、裸火を用いない生活様式を整備することも重要であり、これは地震時の大規模火災を防止することにも役立つ。

世界的規模で考えると、21世紀の社会は、地球規模の環境問題、爆発的人口増加と少子高齢化といった二極分化した人口問題などが重要な課題である。発展途上国においては、今後急激な経済成長が見込まれるが、それに伴い、エネルギー消費量が増大することは確実である。その際、燃料価格の高騰などの資源問題及び地球温暖化に代表される環境問題が懸念される。

我国におけるエネルギー消費量をみると、産業用エネルギー消費量が停滞傾向にある一方、暖房及び給湯が約60%を占める民生用（業務及び家庭）エネルギー消費量が増大しており、今後その傾向がますます強くなると考えられる<sup>1)</sup>。冷房用のエネルギー消費量は、全体に占める割合はごくわずかであるが（2%）、夏期の一時期において集中的に消費されるために、大きな発電設備容量を必要とすること、冷房機器の冷媒が地球温暖化、オゾン層破壊などの観点から代替フロンも含め利用が制限されていることなど、の問題点がある。

このように、21世紀の社会をエネルギー問題、地球環境問題の観点から考えると、安価で、温室効果ガスを排出せず、長期安定供給が可能な民生用エネルギー源の確保が必要である。このようなエネルギー源の候補の一つとして、原子力が挙げられる。日本原子力研究所においては、原子力の発電以外の新たな利用分野の拡大の一つとして、原子炉を地域熱供給に使用することを検討している<sup>2),3)</sup>。本報告書においては、地域熱供給用原子力エネルギーシステムの中でも、都市のビルの熱供給に適した超小型原子炉の核設計について議論する。

## 1.2 熱供給用超小型炉 MR-1G

日本原子力研究所では、原子力の発電以外の利用分野への利用拡大の一検討として、ビルの熱供給に適した超小型原子炉 MR-1G の概念設計を行った<sup>4)</sup>。MR-1G の炉心概念の検討にあたっては、我国でこれまでに蓄積された技術を活用するために、原子炉には軽水炉を採用した。また、熱供給の対象が従業員 1000 人程度のオフィスビルであることから、原子炉の熱出力は、1 MWt とした。

図 1 に MR-1G の概念図を示す。MR-1G は、工場において製造、組立を行い、トレーラーにより輸送し、利用地において据付けをするカセット式原子炉プラントであり、一次冷却設備、蒸気発生器、非常用崩壊熱除去設備等のすべての構成要素を遮蔽機能を有した格納容器（直径 2.4 m、高さ 6 m）内に収めている。また、MR-1G 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。また MR-1G には、原子炉の受動的な安全確保の方策として、非常用崩壊熱除去設備の他に、反射体落下による原子炉停止系が設けられる。表 1 に MR-1G 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。

MR-1G 炉心の熱出力は 1 MWt で、発電用軽水炉炉心と比較して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。炉心サイズは、線出力密度、燃料棒本数等によって決まる。原子炉の負荷率は、夏期及び冬期においては、昼間 8 時間の負荷を 100%、それ以外の時間帯の負荷を 50%、また、春期及び秋期においては、昼間 8 時間の負荷を 33%、それ以外の時間の負荷を 16%と仮定することで、年間負荷率は 44%となる。そこで、原子炉は負荷率を 44%と仮定し、10 年間にわたって燃料無交換により連続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、MR-1G 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評価した。



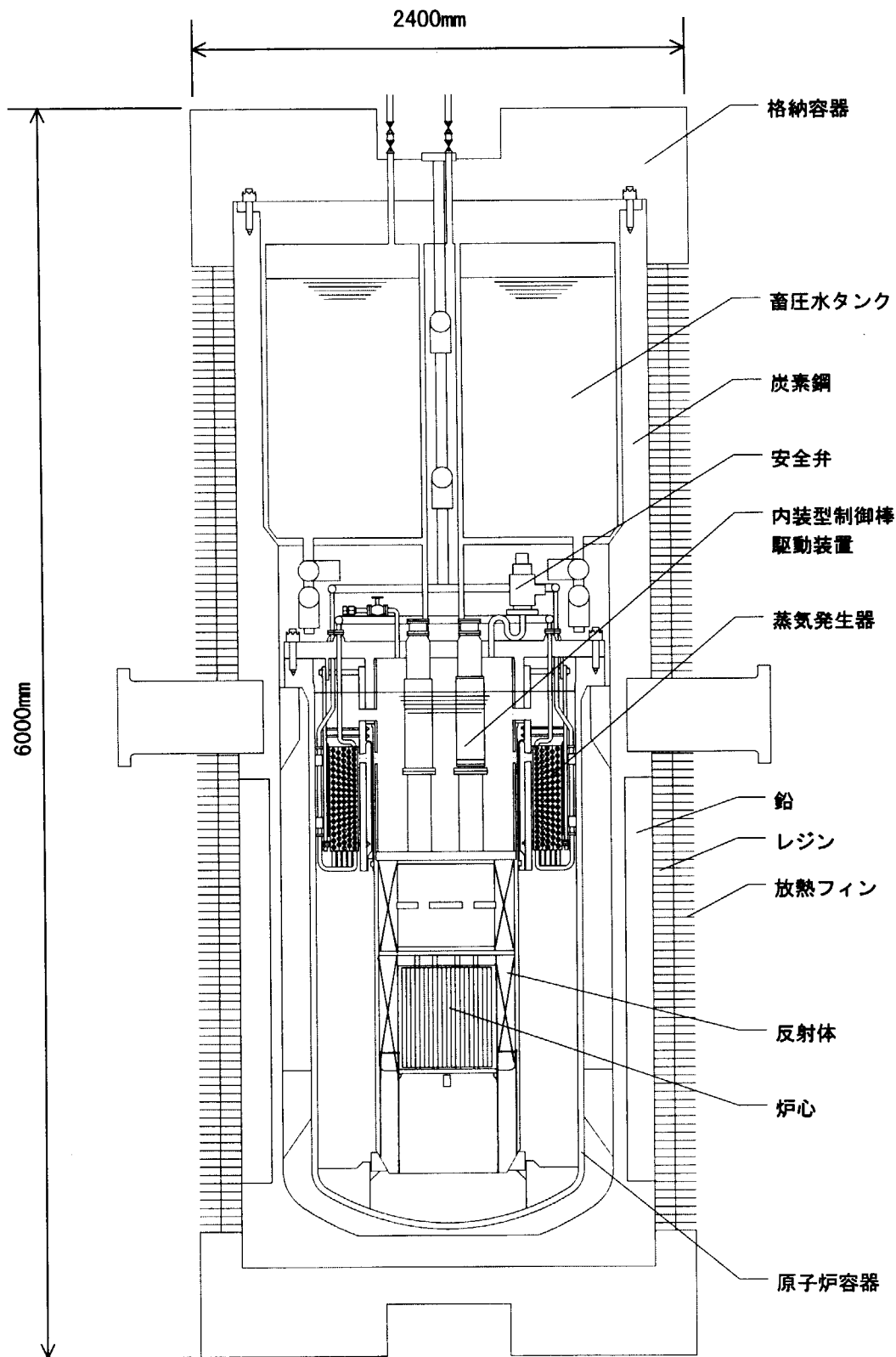


図1 MR-1Gの概念図

表1 MR-1G プラント設計主要目

項目	設計値
原子炉出力 (MWt)	1.0
炉形式	一体型加圧水炉 (自己加圧)
プラント直径 (m)	2.4
プラント高さ (m)	6.0
プラント重量 (t)	約 100
一次冷却系	
循環方式	自然循環
運転圧力 (MPa)	3.0
炉心入口/出口温度 (°C)	217/233
流量 (kg/s)	14
炉心	
燃料型式	ジルカロイ被覆 UO <sub>2</sub> 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
蒸気温度 (°C)	180
蒸気圧力 (MPa)	0.88

## 2. MR-1G 炉心の核設計方針

### 2.1 基本方針

MR-1G 炉心の核設計にあたっては、原研において設計研究を行ってきた類似の超小型炉、深海調査船用原子炉 DRX 及び海中航行観測船用原子炉 SCR 炉心の核設計<sup>5),6)</sup>を参考にした。基本的な考え方として、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、熱供給用原子炉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」<sup>7)</sup>を準用することにした。

MR1G 炉心の核設計を行う際の前提条件は、

- |           |                               |
|-----------|-------------------------------|
| (1) 熱出力   | : 1 MWt                       |
| (2) 設備利用率 | : 44 %                        |
| (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 $\text{UO}_2$ 燃料 |

である。

MR1G は一次冷却系に自然循環方式を採用していることを考慮し、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  $18 \sim 20 \text{ kW/m}$ <sup>8)</sup> に比べて低く抑えている。また、MR-1G 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  $17 \times 17$  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 2 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。

原子炉負荷率を 44% 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、 $\text{UO}_2$  燃料の濃縮度が決定される。MR-1G 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ため、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。

MR-1G 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。また、MR-1G では、受動的原子炉停止系として、反射体を落下させ原子炉を停止させるシステムを導入した。この原子炉停止系の炉停止性能については、核特性解析により確認する。

表 2 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 <sub>2</sub> ペレット	
直径 (mm)	8.21
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	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 <sub>4</sub> C
直径 (mm)	8.2
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.76
吸収材-被覆管ギャップ (mm)	0.015

MR-1G 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、製造工場まで格納容器ごと一括搬出後、工場施設内で実施するため、燃料取扱施設は原子炉設置場所には設けない。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、MR-1G 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。

(7) 受動的原子炉停止系の炉停止性能

受動的原子炉停止系作動後に、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。

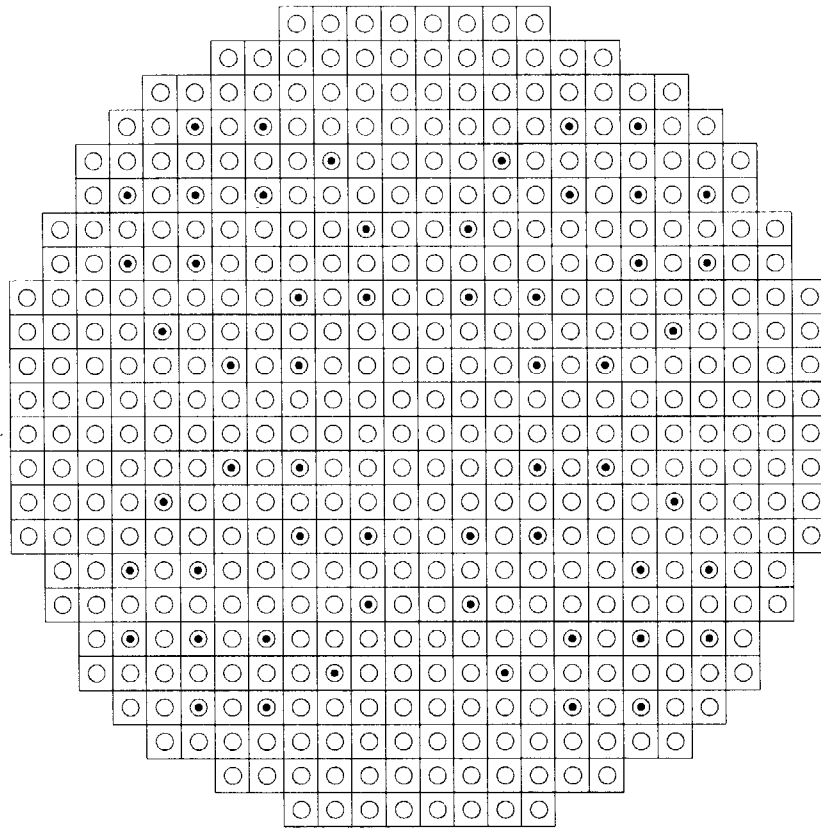
## 2.2 炉心配置

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 3 に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。

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 3 のような仕様とした。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 に MR-1G の炉心部分の断面の概念図を示す。なお、炉心の外周には、厚さ 12.6 cm の反射体と厚さ 1.8 cm の炉心槽を配置することにした。

表 3 炉心仕様

燃料棒ピッチ(mm)	16.75	18.0	20.0
燃料棒本数 (本)	412	412	412
制御棒本数 (本)	56	56	56
等価直径 (cm)	40.8	44.0	48.8
有効高さ (cm)	37.8	40.7	45.2
平均線出力 (kW/m)	5.91	5.96	5.37



- 燃料要素 (× 4 1 2)
- 制御要素 (× 5 6)

図 2 MR-1G 断面図 (正方格子配列)

### 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<sup>9)</sup>を用い、核データライブラリには JENDL-3.2<sup>10)</sup>に基づくものを使用した。

格子計算では、図 3 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 4 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、燃焼期間は 0 ~ 22,000 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 XYZ 体系によって行った。図 4 に炉心モデルの概念図を示す。

表 4 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	$1.0000 \times 10^7$	$1.3534 \times 10^6$
	2	$1.3534 \times 10^6$	$1.1109 \times 10^5$
	3	$1.1109 \times 10^5$	$2.0347 \times 10^3$
	4	$2.0347 \times 10^3$	$3.7266 \times 10^1$
	5	$3.7266 \times 10^1$	$1.8554 \times 10^0$
熱群	6	$1.8554 \times 10^0$	$2.7699 \times 10^{-1}$
	7	$2.7699 \times 10^{-1}$	$1.3700 \times 10^{-1}$
	8	$1.3700 \times 10^{-1}$	$6.4017 \times 10^{-2}$
	9	$6.4017 \times 10^{-2}$	$1.8467 \times 10^{-2}$
	10	$1.8467 \times 10^{-2}$	$1.0000 \times 10^{-5}$



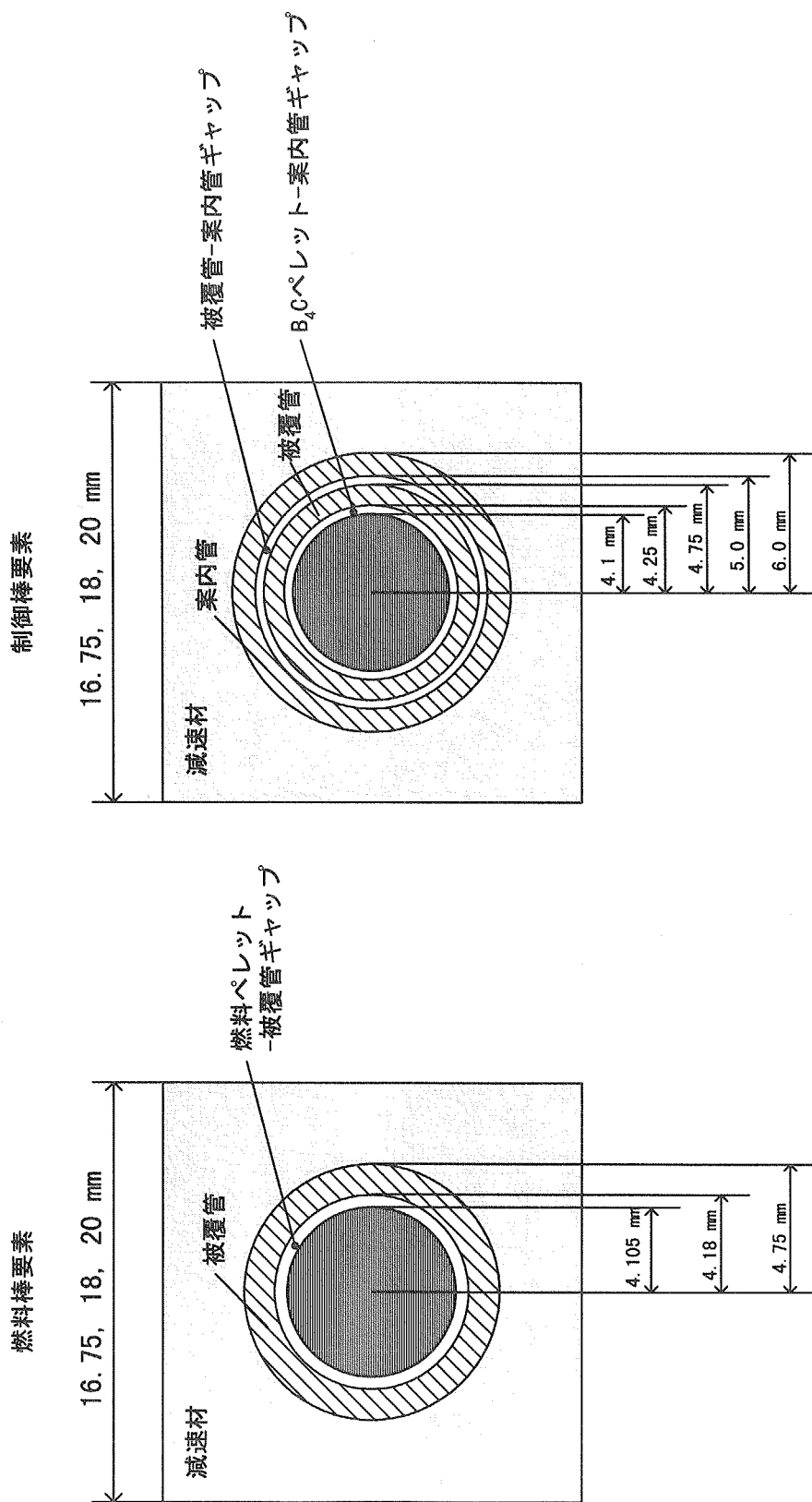


図3 燃料棒・制御棒要素領域の格子モデル

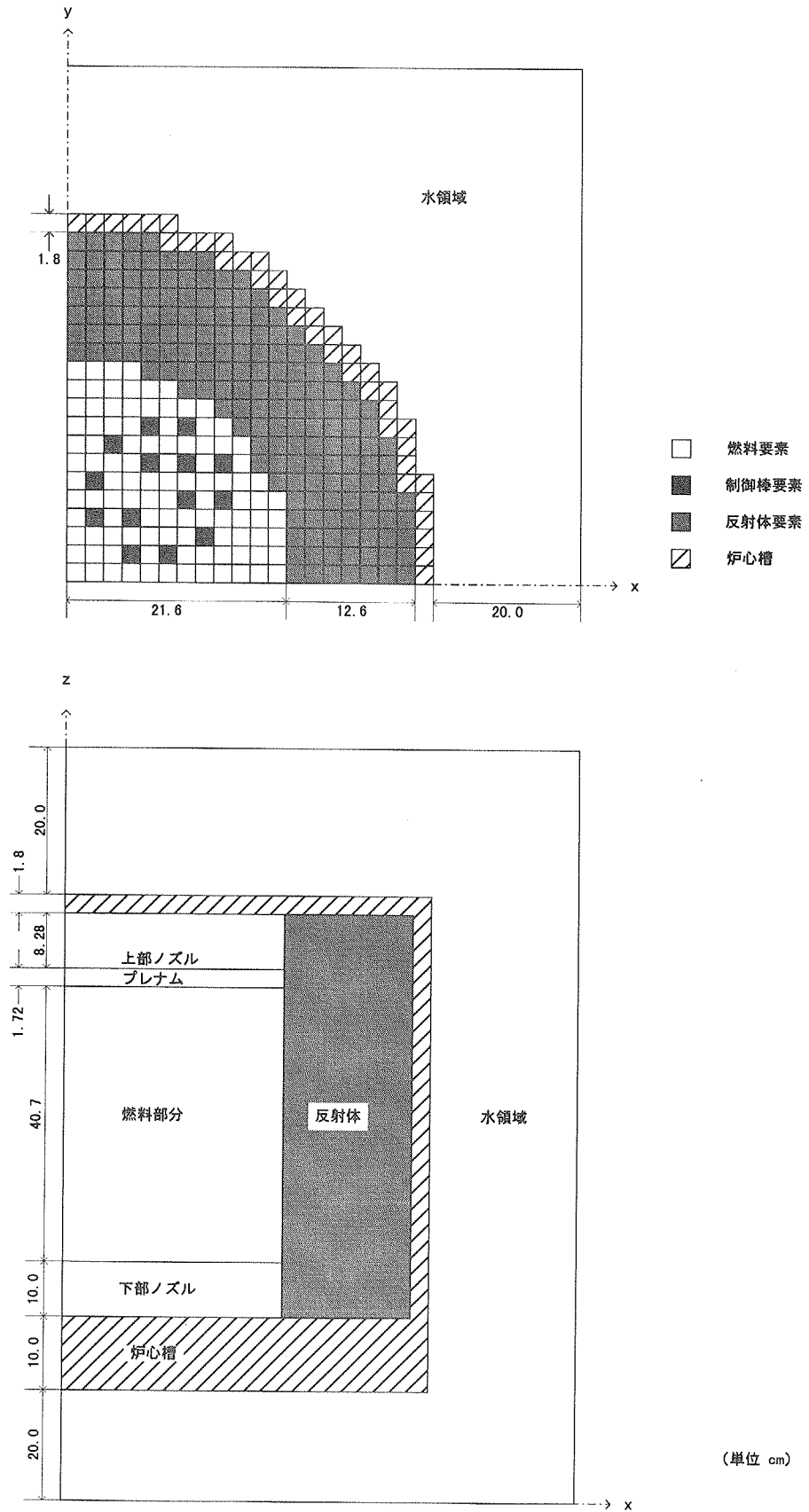


図4 炉心モデル図

## 3.2 燃料棒配置及び燃料濃縮度

表 3 に示した 3 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<sup>5)</sup>) とした。燃料棒ピッチと反応度の関係を表 5 に示す。燃料棒ピッチが大きくなるに従って、反応度は大きくなる傾向にあり、長期燃焼をねらう場合には、ピッチを広げる方が有利である。しかしながら、ピッチを広げすぎると過減速となり減速材温度係数が負となる可能性が出てくること、また、ピッチが広がることで炉心の等価直径も大きくなり、炉心の大きさを出来るだけ小さく抑える必要があることを考慮して、燃料棒ピッチを 18 mm とすることとした。

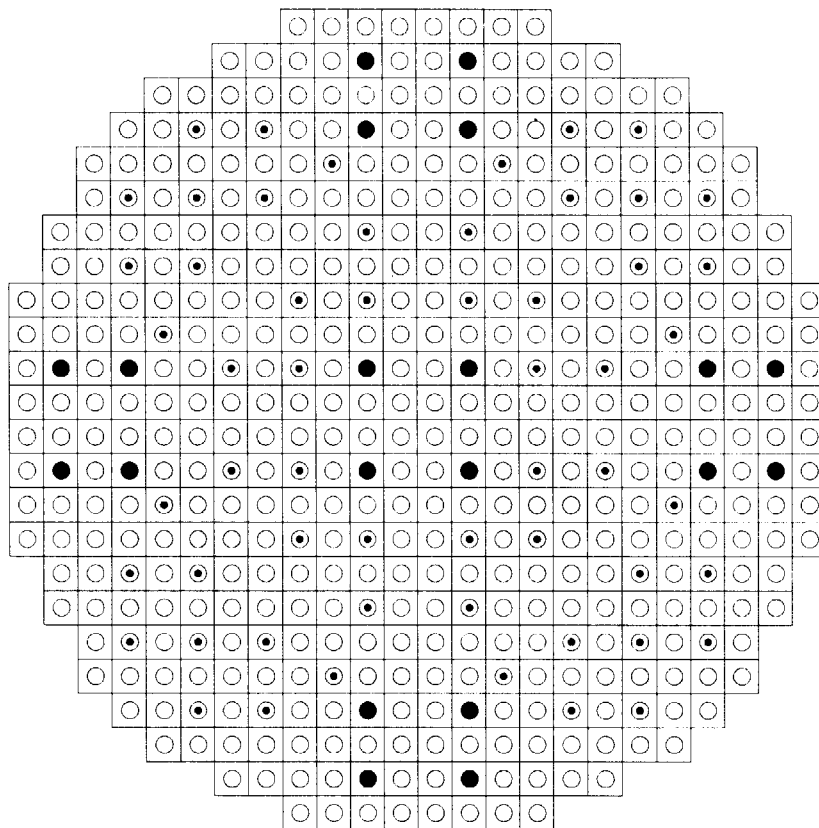
燃料濃縮度については 20%以下とする設計とする。初期の DRX 設計における燃料と同じ 11.0 wt%濃縮の燃料を使用した場合には、燃焼末期においても十分大きな余剰反応度があり、濃縮度を低くすることが可能である。また、濃縮度を変化させて燃焼末期の余剰反応度の評価を行った結果、8~9 wt%の濃縮度で 44%の負荷率を仮定して 10 年間の燃料無交換による燃焼が達成できることが明らかとなった。濃縮度 8 wt%の燃料棒を用いて炉心を構成した場合の燃焼初期の余剰反応度は 9.9 % $\Delta k/k$  であり、初期の余剰反応度を抑制し、運転期間中の反応度変化を緩やかにするために、可燃性毒物として  $Gd_2O_3$  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 5 に示すような配置とし、全体で 20 本配置した。可燃毒物入り燃料棒を配置した体系において、燃料濃縮度の調整を行ったところ、濃縮度 8.5 wt%で 44%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った。炉心計算に使用した  $Gd_2O_3$  燃料棒の組成を表 6 に示す。

表 5 燃料棒ピッチと実効増倍率の関係

燃料棒ピッチ (mm)	16.75	18.0	20.0
等価直径 (cm)	40.8	44.0	48.8
実効増倍率	1.1184	1.1585	1.1799

表 6  $Gd_2O_3$  入り燃料棒要素の元素組成 (濃縮度 8.5 wt%)

構成物質	原子個数密度 ( $\times 10^{24}$ 個/cm <sup>3</sup> )
<sup>235</sup> U	$1.855 \times 10^{-3}$
<sup>238</sup> U	$1.997 \times 10^{-2}$
<sup>16</sup> O	$4.675 \times 10^{-2}$
<sup>152</sup> Gd	$4.146 \times 10^{-6}$
<sup>154</sup> Gd	$4.520 \times 10^{-5}$
<sup>155</sup> Gd	$3.068 \times 10^{-4}$
<sup>156</sup> Gd	$4.244 \times 10^{-4}$
<sup>157</sup> Gd	$3.245 \times 10^{-4}$
<sup>158</sup> Gd	$5.150 \times 10^{-4}$
<sup>160</sup> Gd	$4.532 \times 10^{-4}$



- 燃料要素 (× 392)
- 可燃毒物入り燃料要素 (× 20)
- ⊙ 制御要素 (× 56)

図 5 可燃毒物入り燃料棒を配置した MR-1G 炉心の断面図

## 3.3 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  $\text{UO}_2$  で、 $\text{UO}_2$  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  $10.4 \text{ g/cm}^3$  とした。燃料要素に含まれる物質の原子組成を表 7 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 8 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<sup>11)</sup>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 6928<sup>12)</sup>から引用した。また、表 8 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、減速材の各温度は、表 9 に示すとおりである。

表 7 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 <sup>3</sup> )
UO <sub>2</sub> 燃料ペレット	
11.0 wt%濃縮	
<sup>235</sup> U	$2.554 \times 10^{-3}$
<sup>238</sup> U	$2.067 \times 10^{-2}$
<sup>16</sup> O	$4.644 \times 10^{-2}$
8.5 wt%濃縮	
<sup>235</sup> U	$1.973 \times 10^{-3}$
<sup>238</sup> U	$2.124 \times 10^{-2}$
<sup>16</sup> O	$4.643 \times 10^{-2}$
ジルカロイ-4 (被覆管) *	
Zr-nat (含 Sn)	$4.298 \times 10^{-2}$
Cr-nat	$7.589 \times 10^{-5}$
Fe-nat	$1.484 \times 10^{-4}$

\*燃料ペレット-被覆管ギャップは被覆管にスミア

表 8 減速材組成

条件	高温全出力	温態停止	冷態停止
圧力	3.0 MPa	3.0 MPa	3.0 MPa
温度	225.0°C *	217.0°C **	26.85°C
	498.15 K	490.15 K	300.00 K
密度	$0.8343 \text{ g/cm}^3$	$0.8449 \text{ g/cm}^3$	$0.9980 \text{ g/cm}^3$
核種	原子個数密度 ( $\times 10^{24}$ 個/cm <sup>3</sup> )		
<sup>1</sup> H	$5.578 \times 10^{-2}$	$5.648 \times 10^{-2}$	$6.672 \times 10^{-2}$
<sup>16</sup> O	$2.789 \times 10^{-2}$	$2.824 \times 10^{-2}$	$3.336 \times 10^{-2}$

\*炉心入口温度と出口温度の平均

\*\*炉心入口温度

表 9 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 *	446.85 °C	217.0 °C	26.85 °C
被覆管	302.45 °C	217.0 °C	26.85 °C
減速材	225.0 °C	217.0 °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  $1.76 \text{ g/cm}^3$ 、 $^{10}B$  濃度は 90 wt% とした。制御棒領域の格子計算モデルは図 3 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 10 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 6928<sup>12)</sup> から引用した。

表 10 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 <sup>3</sup> )
$B_4C$	
$^{10}B$	$7.344 \times 10^{-2}$
$^{11}B$	$7.422 \times 10^{-2}$
$^{12}C$	$2.022 \times 10^{-2}$
SUS304 (被覆管) *	
$^{12}C$	$3.173 \times 10^{-4}$
Si	$1.696 \times 10^{-3}$
P	$6.921 \times 10^{-5}$
S	$4.457 \times 10^{-5}$
Cr	$1.741 \times 10^{-2}$
$^{55}Mn$	$1.734 \times 10^{-3}$
Fe	$5.787 \times 10^{-2}$
Ni	$8.112 \times 10^{-3}$

\* $B_4C$  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 4 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 11 に示す。プレナム、ノズル部分の組成は JAERI-M 6928<sup>12)</sup> 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 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。反射体領域には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。

表 11 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	炉心槽 (鉄)
	原子個数密度 ( $\times 10^{24}$ 個/cm <sup>3</sup> )			
<sup>1</sup> H	$4.787 \times 10^{-2}$	$3.480 \times 10^{-2}$	$4.672 \times 10^{-2}$	-
<sup>9</sup> Be	-	-	-	-
<sup>12</sup> C	$5.637 \times 10^{-5}$	$2.570 \times 10^{-5}$	$5.646 \times 10^{-5}$	-
<sup>14</sup> N	-	$1.075 \times 10^{-5}$	-	-
<sup>16</sup> O	$2.394 \times 10^{-2}$	$1.740 \times 10^{-2}$	$2.336 \times 10^{-2}$	-
<sup>27</sup> Al	$2.879 \times 10^{-5}$	-	$4.442 \times 10^{-5}$	-
Si	$2.978 \times 10^{-4}$	$1.466 \times 10^{-4}$	$2.854 \times 10^{-4}$	-
Cr	$3.343 \times 10^{-3}$	$1.418 \times 10^{-3}$	$3.482 \times 10^{-3}$	-
<sup>55</sup> Mn	$2.735 \times 10^{-4}$	$1.405 \times 10^{-4}$	$2.553 \times 10^{-4}$	-
Fe	$9.568 \times 10^{-3}$	$4.702 \times 10^{-3}$	$9.195 \times 10^{-3}$	$8.465 \times 10^{-2}$
Ni	$2.800 \times 10^{-3}$	$6.570 \times 10^{-4}$	$3.541 \times 10^{-3}$	-
Zr	$2.579 \times 10^{-3}$	$4.255 \times 10^{-3}$	$3.052 \times 10^{-3}$	-
Mo	$1.478 \times 10^{-4}$	-	$2.280 \times 10^{-4}$	-

## 4. 核特性の評価

## 4.1 燃焼特性

MR-1G 炉心の  $k_{\text{eff}}$  の燃焼度依存性を図 6 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。 $k_{\text{eff}}$  は燃焼初期において Xe 及び Sm の効果により 1.4%  $\Delta k/k$  急激に減少し、その後緩やかに減少し 4 GWd/t で極小値をとり、その後、可燃毒物の効果が薄れ、 $k_{\text{eff}}$  は増加に転じ、11 GWd/t で極大値をとった後、単調減少していく。燃焼度 21 GWd/t において  $k_{\text{eff}}$  は 1.0020 である。21 GWd/t の燃焼度は 1710 日間の連続全出力運転に相当し、炉心の負荷率を 44% と仮定すると、炉心の寿命は 10.7 年となり、設計目標の 10 年を満足する。反応度変化の数値データは付録 A の表 A.1 に示す。

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（可燃毒物を含まない）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 7 に示す。詳細なデータは付録 B の表 B.1 に示す。

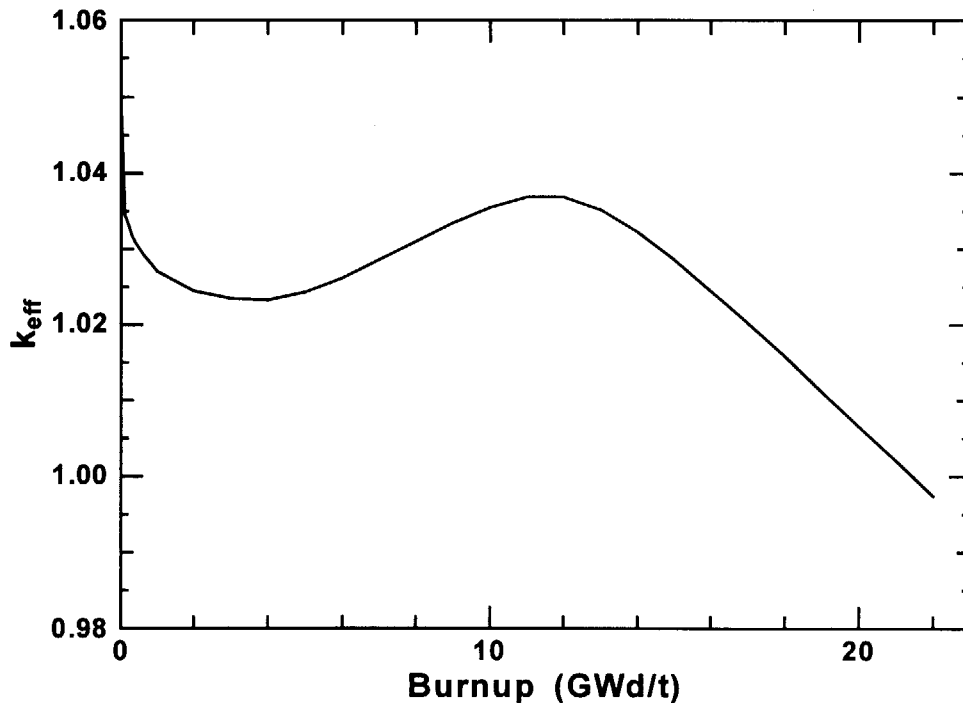


図 6  $k_{\text{eff}}$  の燃焼度依存性



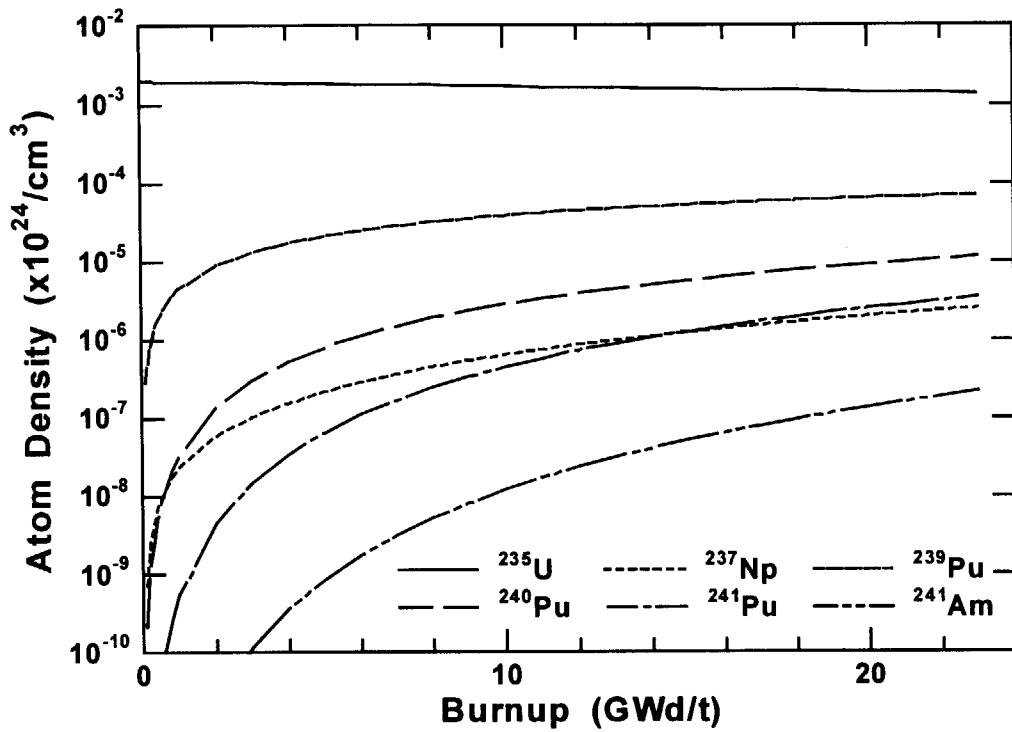


図 7 <sup>235</sup>U 及び超ウラン元素の燃料棒（可燃毒物を含まない）内原子個数密度の燃焼度依存性

## 4.2 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）において評価した。BOL においては、制御棒価値の評価結果を用いて、 $k_{\text{eff}}$  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。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 4 体の制御棒クラスターのうち 2 体の制御棒クラスターをバンク挿入するとして、2 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 2 体をバンク挿入する場合、制御棒を炉心上部から 11.2 cm 挿入したときに、実効増倍率が 1.00190 となる。従って、燃焼初期においては、制御用制御棒クラスター 2 体を 11.2 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 8 に制御棒挿入量と  $k_{\text{eff}}$  の関係を、図 9 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。

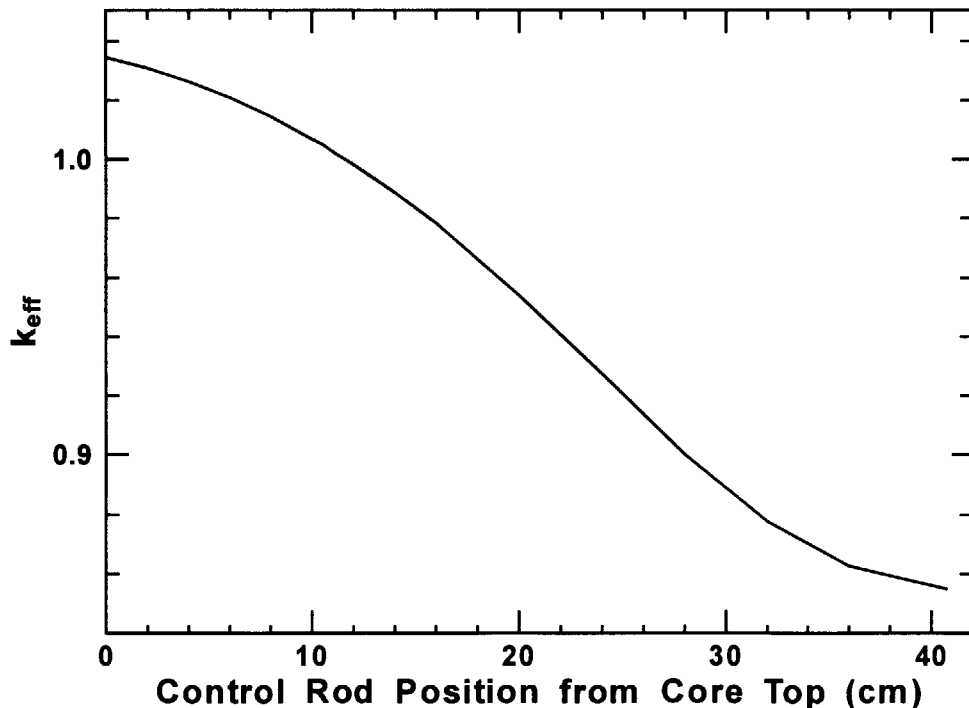


図 8 3 体の制御棒クラスターをバンク挿入した際の実効増倍率の変化

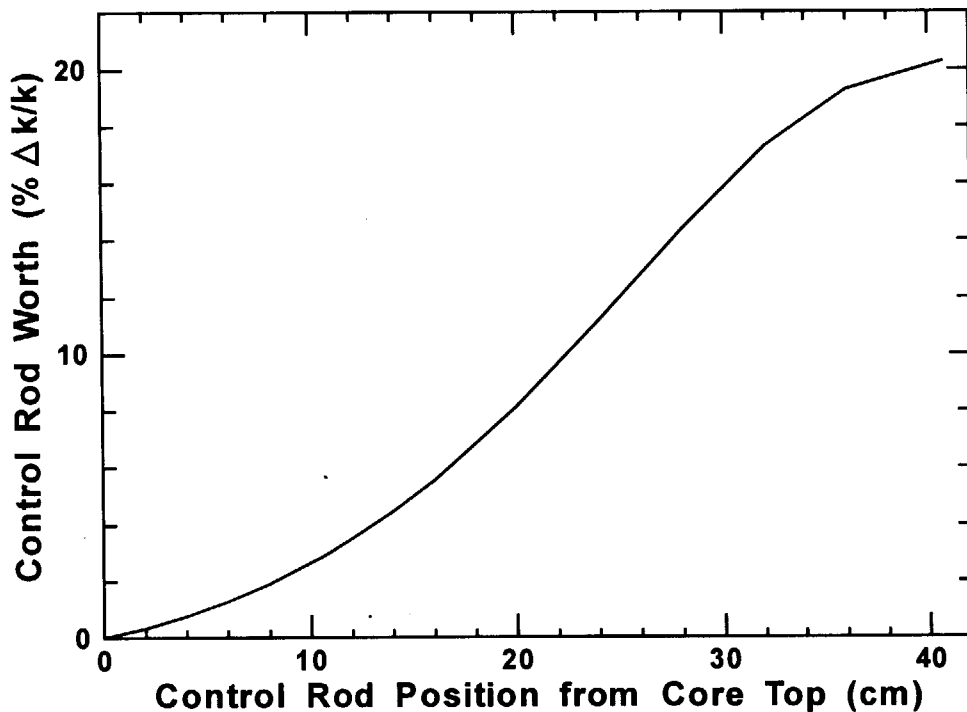


図9 制御棒クラスター2体挿入時の制御棒反応度値

#### (2) 減速材温度係数

減速材温度を 26.85 °C から 230 °C の範囲で変化させ、BOL (高温全出力、平衡 Xe 濃度、制御用制御棒 11.2 cm 挿入) における減速材温度係数を評価した。減速材温度を定常運転時の 225 °C から 230 °C に上昇させたときの反応度係数は  $-6.1 \times 10^{-4} \Delta k/k/^{\circ}C$  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、MR-1G の減速材温度係数は、発電用大型軽水炉の減速材温度係数と同程度であり、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。減速材温度と減速材温度係数の関係を図 10 に示す。減速材温度係数の詳細な数値を、付録 C の表 C.2 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 (高温全出力、平衡 Xe 濃度、制御用制御棒 11.2 cm 挿入) におけるドップラー係数を評価した。評価結果を付録 C の表 C.3 に示す。燃料温度の変化に伴うドップラー係数の変化を図 11 に示す。燃料温度を定常運転時の 446.85 °C から 626.85 °C に上昇させたときのドップラー係数は、 $-1.2 \times 10^{-5} \Delta k/k/^{\circ}C$  である。

#### (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、 $k_{\text{eff}}$  を計算し、BOL (高温全出力、Xe 平衡濃度、制御用制御棒 11.2 cm 挿入) 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.4 に示す。図 12 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。

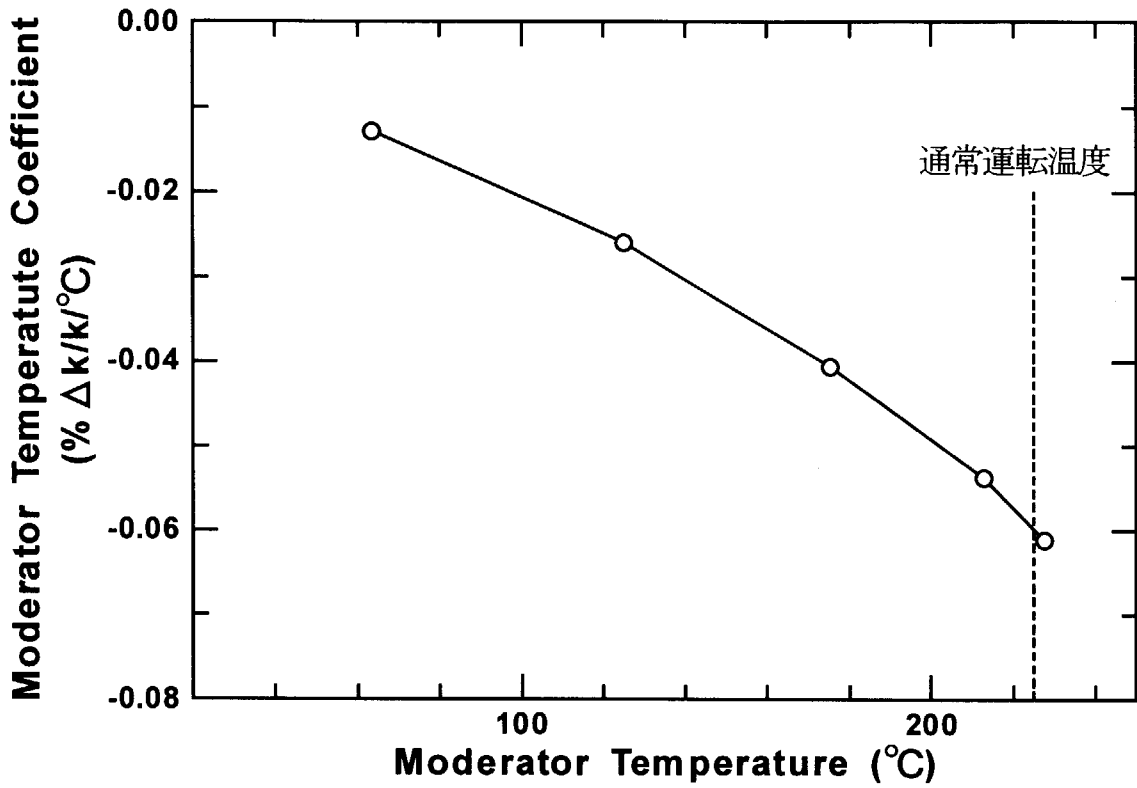


図 10 減速材温度の変化に伴う減速材温度係数の変化 (高温全出力、BOL)

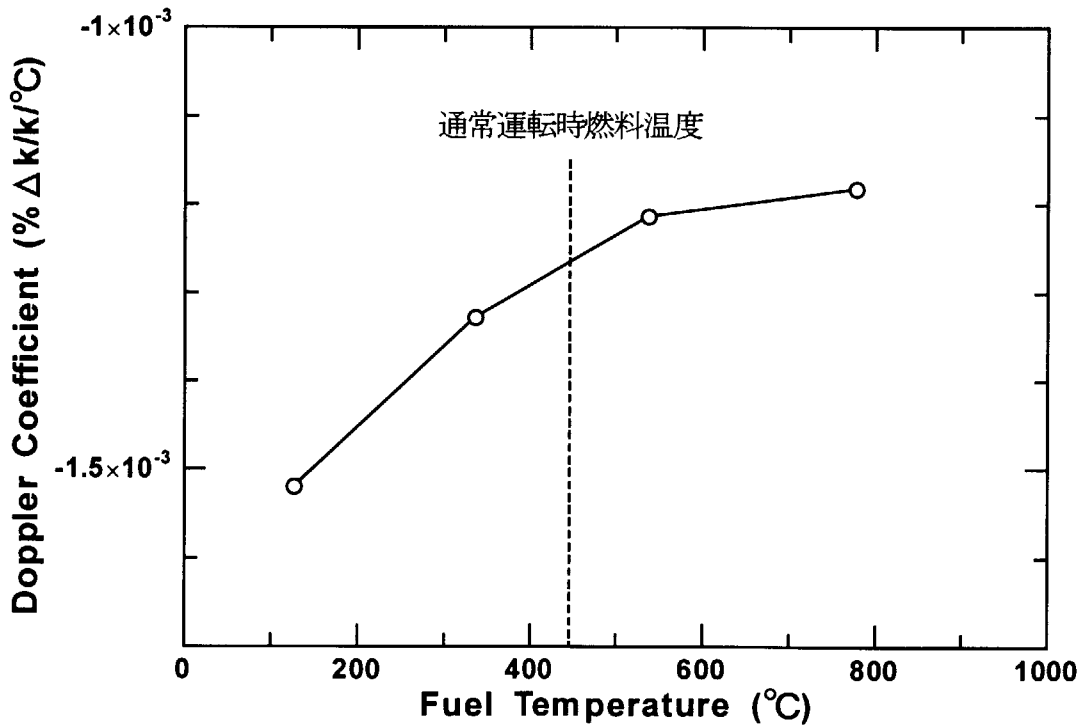


図 11 燃料温度の変化に伴うドップラー係数の変化 (高温全出力、BOL)

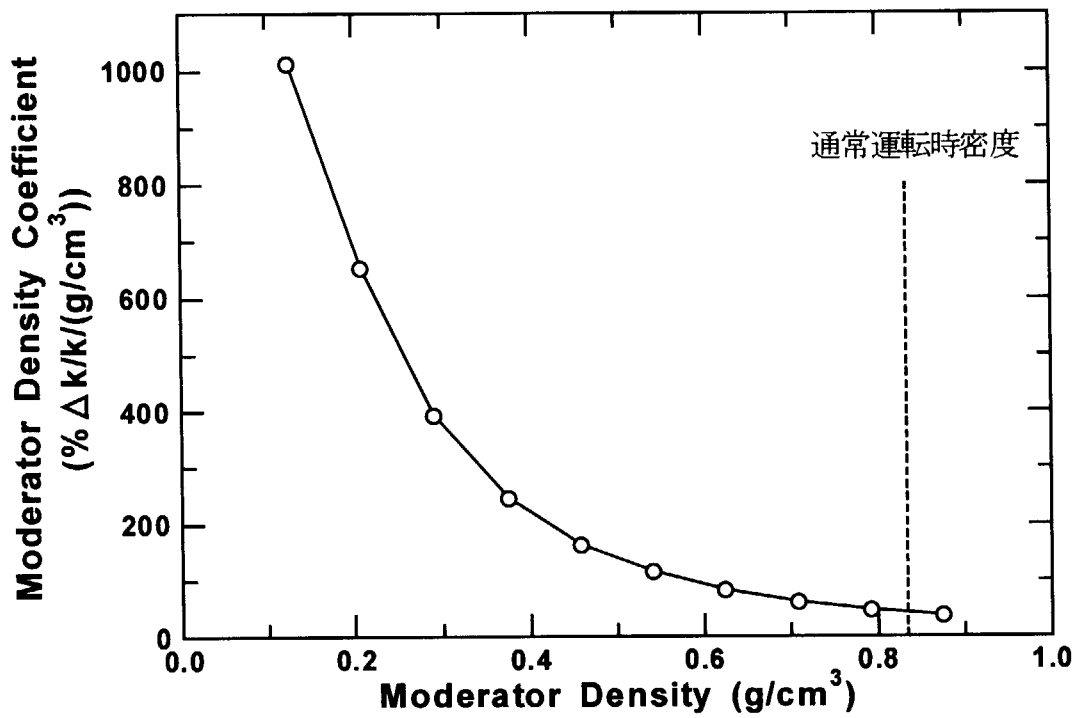


図 12 減速材密度の変化に伴う減速材密度係数の変化 (高温全出力、BOL)

4.3 出力分布

MR-1G 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 11.2 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 13 及び図 14 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 15 及び図 16 にそれぞれ示す。

ピーキング係数は表 12 にまとめた。BOL では制御棒が炉心上部より 11.2 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 1.61、軸方向 1.29 であり、トータルピーキング係数は 2.08 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方に基づき  $F_{\Delta H}^N$  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 12 ピーキング係数及び熱水路係数

	BOL	EOL
平均出力密度 (W/cc)	18.4	18.4
ピーキング係数		
トータルピーキング ( $F_{xy} \times F_z$ )	2.08	1.78
水平方向ピーキング ( $F_{xy}$ )	1.61	1.45
軸方向ピーキング ( $F_z$ )	1.29	1.23
熱水路係数		
核的エンタルピー上昇熱水路係数 ( $F_{\Delta H}^N$ )	1.91	1.72
核的熱流束熱水路係数 ( $F_Q^N$ )	2.18	1.88
熱流束熱水路係数 ( $F_Q^E$ )	2.25	1.94

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、

$$F_Q = F_{NQ}^N \times F_{EQ}^E \quad (3)$$

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 12 に示す。また、深海調査船用原子炉 DRX、海中航行観測船用原子炉 SCR、発電用 PWR との比較を表 13 に示す。MR-1G 炉心の  $F_{\Delta H}^N$  は発電用 PWR 炉心に比べて 20%程度大きくなっており、水平方向のピーキングが大きくなっているが、 $F_{NQ}^N$  は発電用 PWR 炉心とほぼ同程度である。MR-1G 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 13 定格出力時の核的熱水路係数の比較

	MR-1G	SCR	DRX	九州電力 玄海 1 号 <sup>13)</sup>
熱出力(MWt)	1.00	1.25	0.75	1650
$F_{NQ}^N$	2.18	2.00	1.66	2.25
$F_{\Delta H}^N$	1.91	1.73	1.52	1.60

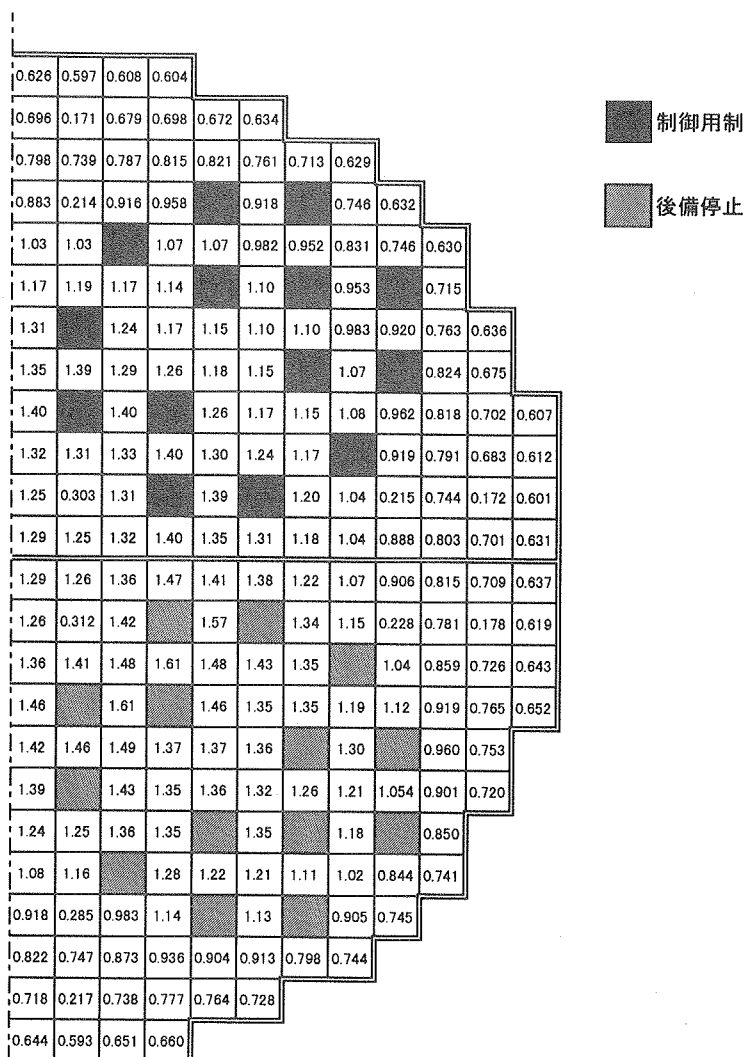


図 13 BOL における水平方向出力分布



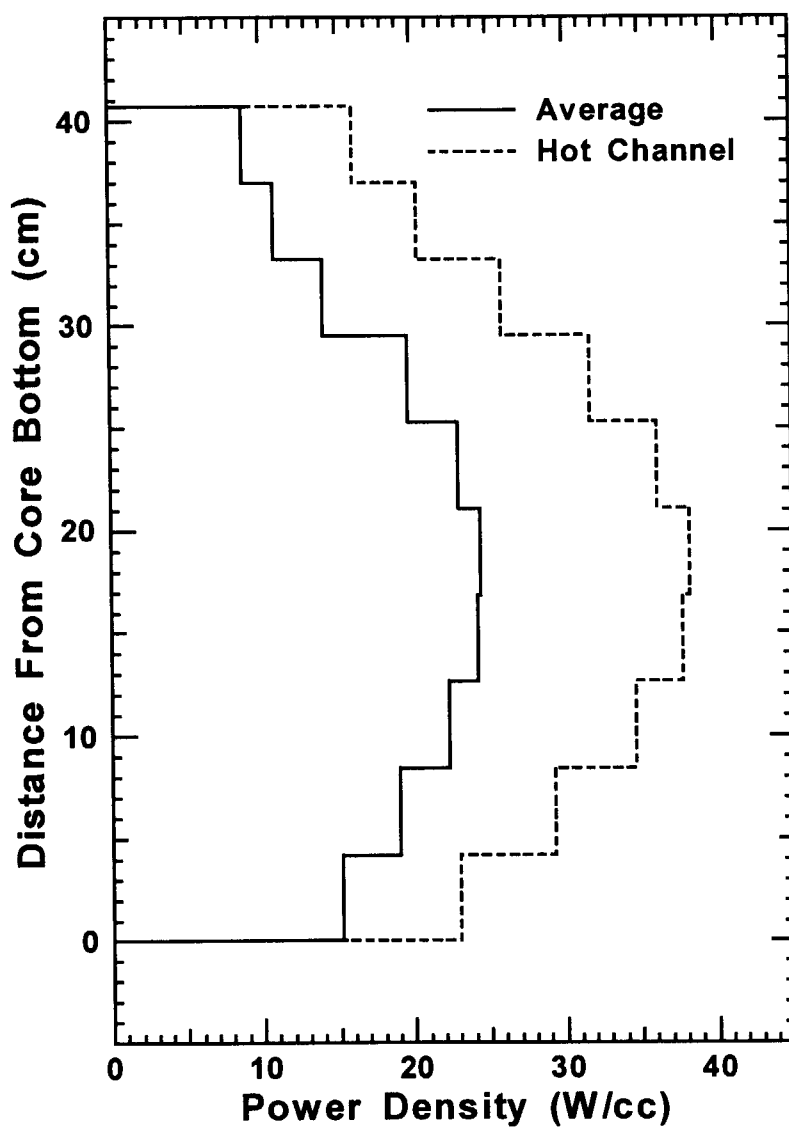


図 14 BOL における軸方向出力分布

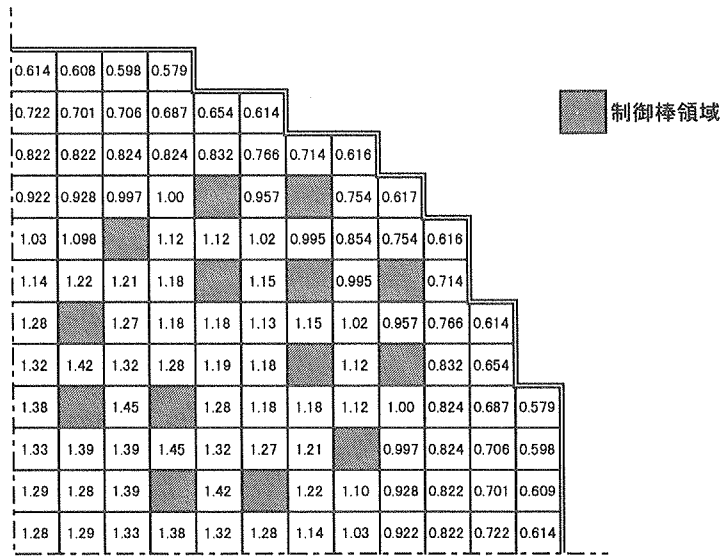


図 15 EOL における水平方向出力分布

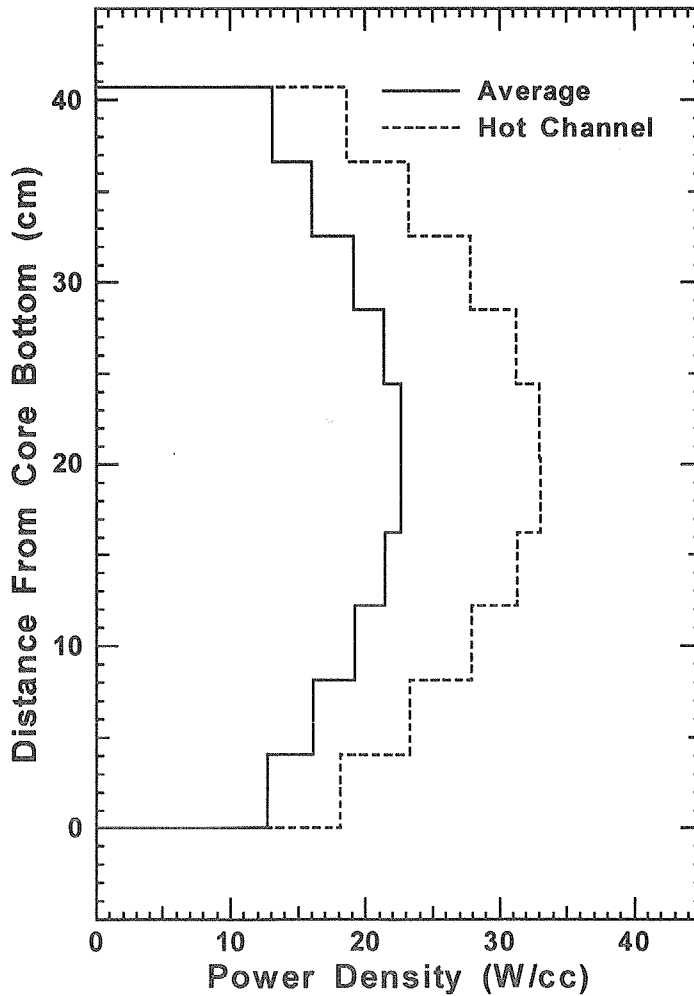


図 16 EOL における軸方向出力分布

#### 4.4 核的安全性の評価

MR-1G 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

MR-1G 炉心の制御棒クラスターは 4 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。MR-1G の制御棒クラスターは全て同一の制御棒配置であり、MR-1G 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 90 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価値は同一である。従って、反応度停止余裕の解析においては、4 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 3 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 8 に示すものを用い、CITATION の 3 次元 XYZ 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  $k_{\text{eff}}$  は 0.90860 となり、設計条件を満足していることが明らかとなった。

##### (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。

MR-1G では 4 体の制御棒クラスターを、制御用制御棒クラスター 2 体、後備停止用制御棒クラスター 2 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り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。

MR-1G 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認すればよい。解析では、図 17 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

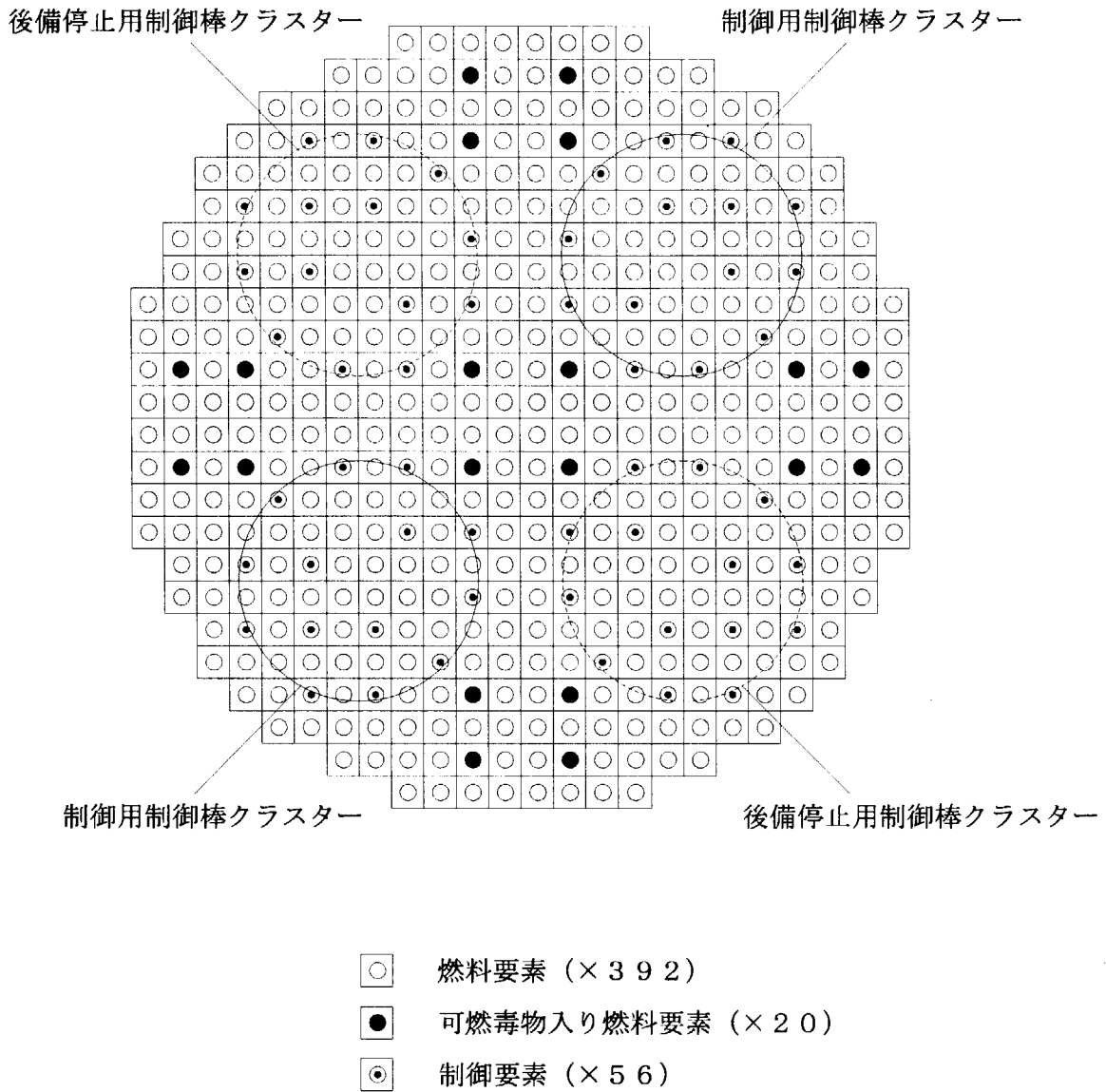
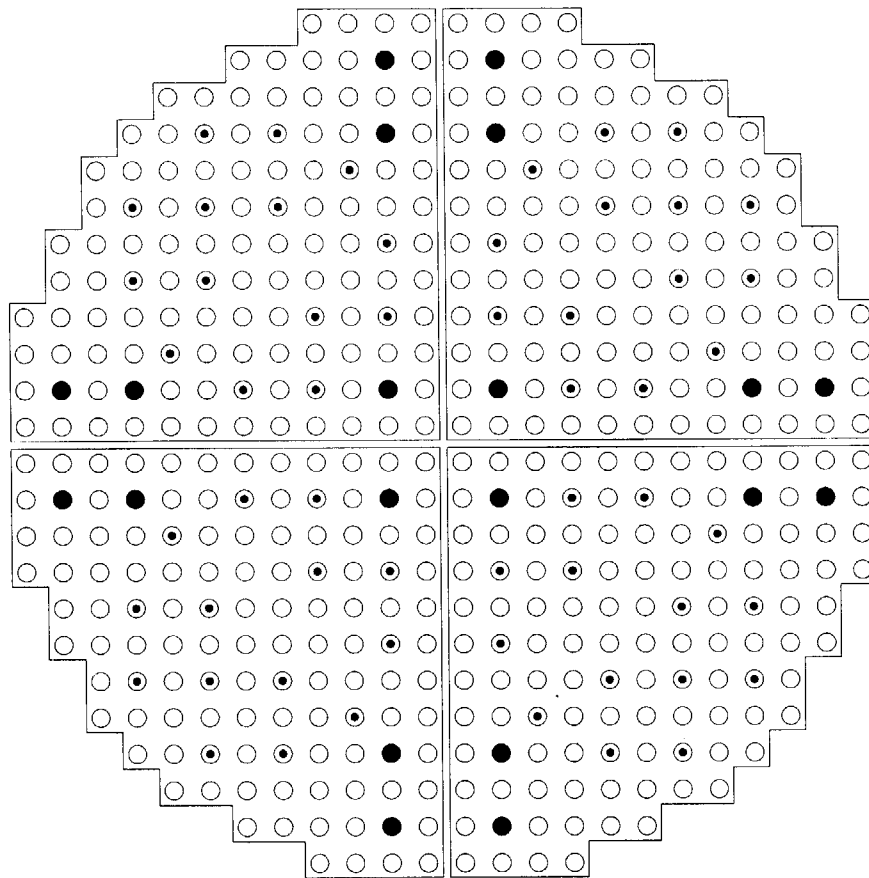


図 17 制御棒クラスターのグループ分け

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 XYZ モデルにより評価した。解析の結果、制御棒クラスター 2 体挿入による低温時の  $k_{eff}$  は 0.96204 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、MR-1G 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。MR-1G 炉心の制御棒クラスターは 4 体で構成されているので、炉心は図 18 に示すように



- 燃料棒要素 (× 392)
- 可燃毒物入り燃料要素 (× 20)
- ⊙ 制御要素 (× 56)

図 18 燃料集合体の構成

4 体の燃料集合体から構成されるようにした。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 3 次元 XYZ モデルで行い、図 4 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 14 に  $k_{eff}$  の評価結果を示す。燃料集合体 1 体に対する  $k_{eff}$  は設計基準  $k_{eff} < 0.95$  を十分下回っており、設計基準を満足する。従って、MR1G 炉心は燃料集合体 4 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 14 燃料集合体の未臨界性（低温、新燃料）

	$k_{\text{eff}}$
炉心を集合体 1 体で構成	1.07383
炉心を集合体 4 体で構成	0.68519

## 4.5 受動的原子炉停止系の性能評価

MR-1G では、受動的原子炉停止系として、反射体を落下させることにより、原子炉を低温状態で未臨界に維持できるようなシステムを設計した。受動的原子炉停止系は、一次冷却材の異常な温度上昇によって作動し、反射体を支える金属棒が熱膨張し、カムが作動し反射体の保持部が外れ、反射体が落下する仕組みである。反射体落下により原子炉は臨界未満となるが、その後、一次冷却材温度が室温まで低下するに従って、正の反応度が徐々に投入され、原子炉が再び臨界に達する可能性がある。反射体落下のみで低温で未臨界を維持するためには十分な負の反応度が投入される必要があるが、MR-1G 炉心では、反射体の落下によって投入される負の反応度は  $3.24 \% \Delta k/k$  であり、通常運転時の減速材温度から室温までの温度変化に伴う正の反応度変化  $5.62 \% \Delta k/k$  を下回る。そこで、受動的原子炉停止系の設計にあたり、反射体落下に引き続き、反射体と一体化した吸収体で反射体と置換えるようなシステム構成とすることにした。これにより、さらに大きな負の反応度効果を期待することができる。システム概念図を図 19 に示す。吸収体の材質については、主に制御棒の吸収体に使用されている物質を中心に、反応度効果の点から検討した。表 15 に検討した吸収材と反応度効果を示す。表に示すように、ボラル ( $B_4C$  とアルミニウム粉末を焼結したものをアルミニウム板で挟んだもの) を用いた場合に最も大きな反応度効果を期待できる。また、吸収体の厚さについては、3.6 cm の厚さで十分大きな負の反応度が期待できることが明らかとなった。

以上のように、反射体落下に伴い、反射体と一体化した吸収体と置換することにより、図 20 に示すように、より初期の反応度変化を大きくすることができるとともに、一次冷却材の温度が上昇し室温に達しても、実効増倍率は 0.977 と十分に未臨界を維持できる。従って、本反射体落下システムは、原子炉の異常な温度上昇を伴う事故時において、低温で未臨界を十分に維持できるシステムであり、第三の原子炉停止系として位置づけることが可能である。

表 15 反射体落下と吸収体置換による反応度効果

吸収材の種類	反応度効果 ( $\% \Delta k/k$ )
$B_4C$	- 7.35
$Eu_2O_3$	- 7.56
ボラル ( $Al-B_4C$ )	- 8.47
Cd	- 5.08
Ag-In-Cd	- 6.26

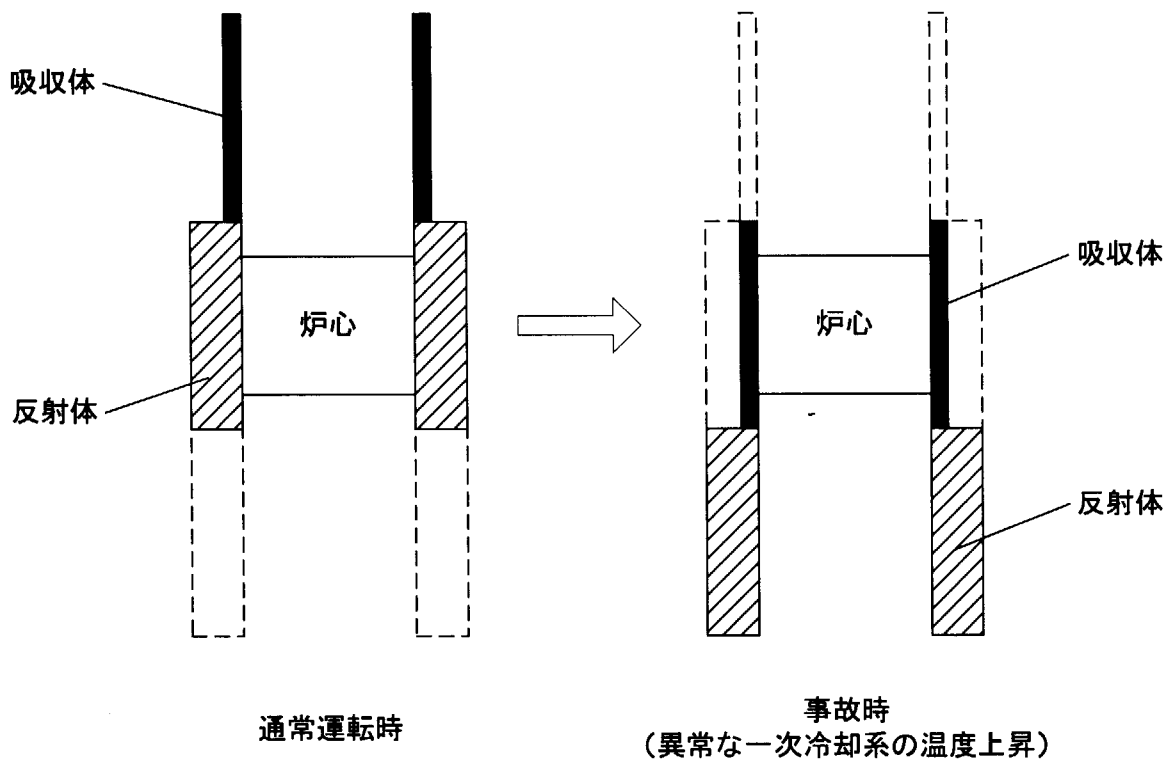


図 19 反射体落下システムのご概念図

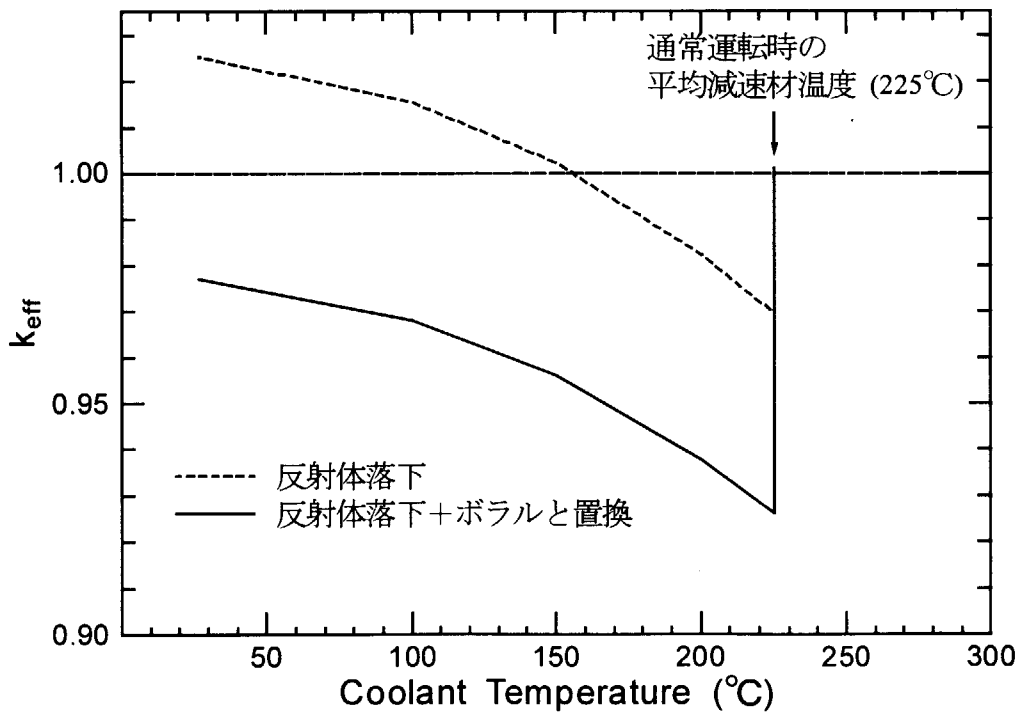


図 20 反射体落下システム作動後の一次冷却材温度の上昇に伴う反応度変化



## 4.6 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	44.0 cm	
燃料集合体数	4 体	
燃料棒数 (全炉心)	412 本 (うち 20 本は 6wt%の Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 入り燃料棒)	
濃縮度	8.5 wt%	
平均燃焼度	21.0 GWd/t	
核的熱水路係数 (定格出力時、BOL)		
$F_Q^N$	2.18	
$F_{\Delta H}^N$	1.91	
線出力密度		
定格出力時平均	5.96 kW/m	
定格出力時最大	12.4 kW/m	
実効増倍率		
高温全出力 (制御用制御棒 11.2cm 挿入、BOL)	1.00278	
高温全出力 (全制御棒引抜き、EOL)	1.00200	
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)	0.90860	
制御棒クラスター 2 体挿入 (他は全引抜き)	0.96204	
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)	9.1% $\Delta k/k$	(10%の設計上の裕度差引き)
燃料集合体 1 体冠水時 ( $k_{eff}$ )		
全制御棒引抜き、BOL	0.68505	
反応度係数		
		BOL
減速材温度係数 ( $\Delta k/k/^\circ C$ )	-1.3 $\times 10^{-4}$ ~ -6.1 $\times 10^{-4}$	
ドップラー係数 ( $\Delta k/k/^\circ C$ )	-1.2 $\times 10^{-5}$ ~ -1.5 $\times 10^{-5}$	
減速材密度係数 ( $\Delta k/k/(g/cm^3)$ )	0.37 ~ 10	
実効遅発中性子割合		
BOL	0.00762 (高温全出力)	
即発中性子寿命 ( $\mu s$ )		
BOL	32.0 (高温全出力)	

## 5. 結論

都市のビルの地下に設置する熱供給専用超小型原子炉 MR-1G について、既存の現行 PWR 技術に立脚して、原子炉負荷 44%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、燃料濃縮度等を決めた。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。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するとともに、受動的原子炉停止系の性能評価を行った。

本研究における検討から、以下の結論を得た。

- (1) 燃料濃縮度を 8.5 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 44%）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置かれた場合も未臨界性を保つために、MR-1G 炉心は集合体 4 体で構成する必要がある。
- (3) 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発電用 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。
- (4) トータルピーキングファクタは BOL において最も大きく 2.08 であり、定格出力時の最大線出力密度は、12.4 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。
- (5) MR-1G 炉心には 4 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 9.1%  $\Delta k/k$  であり、十分に余裕がある。
- (6) MR-1G 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。
- (7) 受動的原子炉停止系は、反射体落下に伴い、反射体と一体化した吸収体に置き換わるようなシステムとすることで、原子炉の異常な温度上昇を伴う事故時において、低温で未臨界を維持できるシステムであり、第三の原子炉停止系として位置づけることが可能である。

このように、本研究で実施した核設計及び遮蔽設計は、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、エネルギーシステム研究部分散型小型炉システム研究グループの中島伸也氏、楠剛氏、福原彬文氏（現三菱重工業株式会社）には、原子炉核設計についてご議論いただくとともに、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) 日本エネルギー経済研究所計量分析部：“1999 年版エネルギー・経済統計要覧”、省エネルギーセンター（1999）。
- 2) 落合政昭：“消費地立地型小型軽水炉「PSRD」”、エネルギー、**33**(10)、49 (2000)。
- 3) 中島伸也、楠剛、小田野直光、落合政昭：“熱供給用超小型原子炉に関する研究開発”、第 7 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集、**225** (2000)。
- 4) 楠剛、小田野直光、中島伸也、福原彬文、落合政昭：“ビルの熱供給に適した超小型原子炉の概念設計”、日本原子力学会誌、**42**、1195 (2000)。
- 5) 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)。
- 6) 小田野直光、石田紀久：“海中航行観測船用原子炉 SCR 炉心の核的検討”、JAERI-Research 2001-039 (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) 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)
0.0	1.04983
0.1	1.03440
0.2	1.03302
0.3	1.03184
0.4	1.03082
0.6	1.02919
0.8	1.02799
1.0	1.02707
2.0	1.02441
3.0	1.02335
4.0	1.02325
5.0	1.02425
6.0	1.02619
7.0	1.02857
8.0	1.03093
9.0	1.03331
10.0	1.03550
11.0	1.03689
12.0	1.03679
13.0	1.03512
14.0	1.03225
15.0	1.02860
16.0	1.02452
17.0	1.02020
18.0	1.01574
19.0	1.01123
20.0	1.00660
21.0	1.00200
22.0	0.99733

## 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)	<sup>235</sup> U	<sup>236</sup> U	<sup>237</sup> U	<sup>238</sup> U	<sup>237</sup> Np	<sup>239</sup> Np	<sup>238</sup> Pu
原子個数密度( $\times 10^{24}/\text{cm}^3$ )							
0.00E+00	1.973E-03	0.000E+00	0.000E+00	2.124E-02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.00E+02	1.970E-03	4.801E-07	1.520E-09	2.124E-02	7.163E-10	1.750E-07	2.066E-13
2.00E+02	1.967E-03	9.608E-07	2.267E-09	2.124E-02	2.335E-09	1.928E-07	1.415E-12
3.00E+02	1.965E-03	1.441E-06	2.658E-09	2.124E-02	4.407E-09	1.947E-07	4.151E-12
4.00E+02	1.962E-03	1.921E-06	2.894E-09	2.124E-02	6.730E-09	1.951E-07	8.690E-12
6.00E+02	1.956E-03	2.880E-06	3.201E-09	2.124E-02	1.183E-08	1.955E-07	2.379E-11
8.00E+02	1.950E-03	3.838E-06	3.448E-09	2.124E-02	1.737E-08	1.959E-07	4.760E-11
1.00E+03	1.945E-03	4.794E-06	3.682E-09	2.124E-02	2.329E-08	1.962E-07	8.078E-11
2.00E+03	1.917E-03	9.551E-06	4.844E-09	2.123E-02	5.859E-08	1.978E-07	4.094E-10
3.00E+03	1.888E-03	1.427E-05	5.963E-09	2.122E-02	1.030E-07	1.992E-07	1.065E-09
4.00E+03	1.861E-03	1.895E-05	7.054E-09	2.122E-02	1.561E-07	2.004E-07	2.122E-09
5.00E+03	1.833E-03	2.359E-05	8.120E-09	2.121E-02	2.177E-07	2.016E-07	3.653E-09
6.00E+03	1.805E-03	2.819E-05	9.166E-09	2.121E-02	2.875E-07	2.029E-07	5.731E-09
7.00E+03	1.778E-03	3.276E-05	1.019E-08	2.120E-02	3.652E-07	2.041E-07	8.429E-09
8.00E+03	1.750E-03	3.729E-05	1.120E-08	2.120E-02	4.507E-07	2.054E-07	1.182E-08
9.00E+03	1.723E-03	4.178E-05	1.219E-08	2.119E-02	5.437E-07	2.067E-07	1.598E-08
1.00E+04	1.696E-03	4.624E-05	1.317E-08	2.119E-02	6.440E-07	2.081E-07	2.098E-08
1.10E+04	1.670E-03	5.066E-05	1.413E-08	2.118E-02	7.514E-07	2.094E-07	2.691E-08
1.20E+04	1.643E-03	5.504E-05	1.508E-08	2.117E-02	8.657E-07	2.108E-07	3.384E-08
1.30E+04	1.616E-03	5.939E-05	1.602E-08	2.117E-02	9.867E-07	2.123E-07	4.185E-08
1.40E+04	1.590E-03	6.371E-05	1.695E-08	2.116E-02	1.114E-06	2.137E-07	5.103E-08
1.50E+04	1.564E-03	6.799E-05	1.786E-08	2.116E-02	1.248E-06	2.152E-07	6.146E-08
1.60E+04	1.538E-03	7.224E-05	1.877E-08	2.115E-02	1.389E-06	2.167E-07	7.325E-08
1.70E+04	1.512E-03	7.645E-05	1.967E-08	2.114E-02	1.535E-06	2.183E-07	8.647E-08
1.80E+04	1.486E-03	8.063E-05	2.057E-08	2.114E-02	1.687E-06	2.199E-07	1.012E-07
1.90E+04	1.460E-03	8.477E-05	2.145E-08	2.113E-02	1.846E-06	2.215E-07	1.176E-07
2.00E+04	1.434E-03	8.888E-05	2.233E-08	2.113E-02	2.009E-06	2.231E-07	1.357E-07
2.10E+04	1.409E-03	9.296E-05	2.321E-08	2.112E-02	2.179E-06	2.248E-07	1.557E-07
2.20E+04	1.384E-03	9.701E-05	2.408E-08	2.111E-02	2.354E-06	2.265E-07	1.776E-07

注) 例えば2.20E+04は $2.20 \times 10^4$ 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)	<sup>239</sup> Pu	<sup>240</sup> Pu	<sup>241</sup> Pu	<sup>242</sup> Pu	<sup>241</sup> Am	<sup>241g</sup> Am	<sup>241m</sup> 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	2.866E-07	2.109E-10	3.085E-13	7.400E-17	7.607E-17	1.385E-20	4.611E-21
2.00E+02	7.339E-07	1.065E-09	3.194E-12	1.536E-15	1.567E-15	3.508E-19	1.837E-19
3.00E+02	1.196E-06	2.635E-09	1.212E-11	8.870E-15	9.035E-15	2.188E-18	1.597E-18
4.00E+02	1.657E-06	4.924E-09	3.065E-11	3.028E-14	3.081E-14	7.775E-18	7.304E-18
6.00E+02	2.577E-06	1.164E-08	1.108E-10	1.670E-13	1.695E-13	4.462E-17	6.071E-17
8.00E+02	3.490E-06	2.118E-08	2.717E-10	5.521E-13	5.591E-13	1.505E-16	2.679E-16
1.00E+03	4.396E-06	3.349E-08	5.407E-10	1.385E-12	1.400E-12	3.818E-16	8.386E-16
2.00E+03	8.831E-06	1.353E-07	4.432E-09	2.328E-11	2.325E-11	6.549E-15	2.755E-14
3.00E+03	1.310E-05	3.002E-07	1.479E-08	1.185E-10	1.171E-10	3.342E-14	2.038E-13
4.00E+03	1.720E-05	5.232E-07	3.433E-08	3.721E-10	3.636E-10	1.048E-13	8.249E-13
5.00E+03	2.115E-05	7.996E-07	6.536E-08	8.980E-10	8.676E-10	2.519E-13	2.403E-12
6.00E+03	2.494E-05	1.125E-06	1.097E-07	1.835E-09	1.752E-09	5.125E-13	5.691E-12
7.00E+03	2.859E-05	1.496E-06	1.692E-07	3.345E-09	3.157E-09	9.299E-13	1.168E-11
8.00E+03	3.209E-05	1.907E-06	2.450E-07	5.610E-09	5.232E-09	1.552E-12	2.162E-11
9.00E+03	3.544E-05	2.357E-06	3.381E-07	8.828E-09	8.134E-09	2.429E-12	3.694E-11
1.00E+04	3.867E-05	2.842E-06	4.488E-07	1.321E-08	1.202E-08	3.616E-12	5.929E-11
1.10E+04	4.176E-05	3.359E-06	5.776E-07	1.898E-08	1.706E-08	5.167E-12	9.045E-11
1.20E+04	4.473E-05	3.906E-06	7.247E-07	2.636E-08	2.339E-08	7.137E-12	1.323E-10
1.30E+04	4.757E-05	4.481E-06	8.901E-07	3.560E-08	3.117E-08	9.584E-12	1.869E-10
1.40E+04	5.029E-05	5.081E-06	1.074E-06	4.694E-08	4.056E-08	1.256E-11	2.562E-10
1.50E+04	5.289E-05	5.704E-06	1.275E-06	6.062E-08	5.167E-08	1.613E-11	3.422E-10
1.60E+04	5.539E-05	6.349E-06	1.494E-06	7.689E-08	6.465E-08	2.035E-11	4.469E-10
1.70E+04	5.777E-05	7.014E-06	1.730E-06	9.602E-08	7.961E-08	2.526E-11	5.722E-10
1.80E+04	6.004E-05	7.698E-06	1.982E-06	1.182E-07	9.665E-08	3.092E-11	7.201E-10
1.90E+04	6.221E-05	8.398E-06	2.250E-06	1.438E-07	1.159E-07	3.739E-11	8.922E-10
2.00E+04	6.428E-05	9.114E-06	2.533E-06	1.730E-07	1.374E-07	4.472E-11	1.090E-09
2.10E+04	6.626E-05	9.845E-06	2.830E-06	2.061E-07	1.612E-07	5.295E-11	1.315E-09
2.20E+04	6.813E-05	1.059E-05	3.141E-06	2.433E-07	1.874E-07	6.213E-11	1.569E-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)	<sup>243</sup> Am	<sup>242</sup> Cm	<sup>243</sup> Cm	<sup>244</sup> Cm	<sup>245</sup> Cm	<sup>83</sup> Kr	<sup>93</sup> 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	9.200E-21	1.743E-20	2.571E-25	1.003E-22	1.076E-26	1.299E-08	1.546E-07
2.00E+02	3.796E-19	8.646E-19	2.438E-23	3.083E-22	2.935E-25	2.597E-08	3.091E-07
3.00E+02	3.322E-18	8.212E-18	3.526E-22	3.844E-21	8.337E-25	3.895E-08	4.636E-07
4.00E+02	1.528E-17	3.931E-17	2.283E-21	1.428E-20	4.887E-24	5.191E-08	6.181E-07
6.00E+02	1.283E-16	3.417E-16	3.039E-20	1.497E-19	5.839E-23	7.781E-08	9.269E-07
8.00E+02	5.714E-16	1.539E-15	1.851E-19	8.782E-19	4.086E-22	1.037E-07	1.236E-06
1.00E+03	1.806E-15	4.871E-15	7.398E-19	3.492E-18	1.999E-21	1.295E-07	1.544E-06
2.00E+03	6.211E-14	1.617E-13	5.060E-17	2.441E-16	2.741E-19	2.581E-07	3.084E-06
3.00E+03	4.808E-13	1.186E-12	5.674E-16	2.863E-15	4.842E-18	3.858E-07	4.621E-06
4.00E+03	2.035E-12	4.747E-12	3.072E-15	1.627E-14	3.678E-17	5.126E-07	6.154E-06
5.00E+03	6.196E-12	1.367E-11	1.120E-14	6.230E-14	1.763E-16	6.385E-07	7.683E-06
6.00E+03	1.533E-11	3.199E-11	3.185E-14	1.860E-13	6.323E-16	7.636E-07	9.208E-06
7.00E+03	3.288E-11	6.497E-11	7.633E-14	4.680E-13	1.857E-15	8.877E-07	1.073E-05
8.00E+03	6.353E-11	1.190E-10	1.615E-13	1.039E-12	4.711E-15	1.011E-06	1.225E-05
9.00E+03	1.134E-10	2.016E-10	3.110E-13	2.096E-12	1.069E-14	1.133E-06	1.376E-05
1.00E+04	1.900E-10	3.211E-10	5.558E-13	3.922E-12	2.223E-14	1.255E-06	1.528E-05
1.10E+04	3.025E-10	4.865E-10	9.354E-13	6.905E-12	4.306E-14	1.375E-06	1.678E-05
1.20E+04	4.620E-10	7.076E-10	1.498E-12	1.156E-11	7.864E-14	1.495E-06	1.829E-05
1.30E+04	6.811E-10	9.946E-10	2.303E-12	1.856E-11	1.367E-13	1.613E-06	1.979E-05
1.40E+04	9.743E-10	1.358E-09	3.417E-12	2.875E-11	2.280E-13	1.731E-06	2.129E-05
1.50E+04	1.358E-09	1.808E-09	4.919E-12	4.316E-11	3.667E-13	1.848E-06	2.278E-05
1.60E+04	1.851E-09	2.357E-09	6.898E-12	6.308E-11	5.714E-13	1.963E-06	2.427E-05
1.70E+04	2.473E-09	3.014E-09	9.453E-12	9.003E-11	8.662E-13	2.078E-06	2.576E-05
1.80E+04	3.248E-09	3.791E-09	1.269E-11	1.258E-10	1.281E-12	2.192E-06	2.725E-05
1.90E+04	4.199E-09	4.699E-09	1.674E-11	1.726E-10	1.854E-12	2.305E-06	2.873E-05
2.00E+04	5.353E-09	5.748E-09	2.173E-11	2.329E-10	2.632E-12	2.417E-06	3.021E-05
2.10E+04	6.738E-09	6.949E-09	2.779E-11	3.095E-10	3.670E-12	2.527E-06	3.168E-05
2.20E+04	8.387E-09	8.312E-09	3.509E-11	4.058E-10	5.037E-12	2.637E-06	3.315E-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)	<sup>96</sup> Zr	<sup>95</sup> Mo	<sup>97</sup> Mo	<sup>98</sup> Mo	<sup>99</sup> Mo	<sup>100</sup> Mo	<sup>99</sup> 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	1.522E-07	1.572E-07	1.459E-07	1.389E-07	6.319E-08	1.520E-07	8.556E-08
2.00E+02	3.044E-07	3.143E-07	2.918E-07	2.779E-07	7.131E-08	3.039E-07	2.262E-07
3.00E+02	4.565E-07	4.714E-07	4.377E-07	4.168E-07	7.235E-08	4.559E-07	3.738E-07
4.00E+02	6.087E-07	6.284E-07	5.836E-07	5.557E-07	7.248E-08	6.079E-07	5.223E-07
6.00E+02	9.129E-07	9.423E-07	8.753E-07	8.336E-07	7.250E-08	9.119E-07	8.195E-07
8.00E+02	1.217E-06	1.256E-06	1.167E-06	1.111E-06	7.250E-08	1.216E-06	1.117E-06
1.00E+03	1.521E-06	1.570E-06	1.459E-06	1.389E-06	7.249E-08	1.520E-06	1.414E-06
2.00E+03	3.040E-06	3.136E-06	2.916E-06	2.779E-06	7.250E-08	3.040E-06	2.897E-06
3.00E+03	4.558E-06	4.698E-06	4.372E-06	4.168E-06	7.248E-08	4.561E-06	4.376E-06
4.00E+03	6.073E-06	6.256E-06	5.827E-06	5.558E-06	7.247E-08	6.083E-06	5.853E-06
5.00E+03	7.587E-06	7.810E-06	7.281E-06	6.947E-06	7.246E-08	7.604E-06	7.327E-06
6.00E+03	9.099E-06	9.360E-06	8.733E-06	8.336E-06	7.246E-08	9.126E-06	8.797E-06
7.00E+03	1.061E-05	1.091E-05	1.018E-05	9.726E-06	7.245E-08	1.065E-05	1.026E-05
8.00E+03	1.212E-05	1.245E-05	1.163E-05	1.112E-05	7.244E-08	1.217E-05	1.173E-05
9.00E+03	1.362E-05	1.399E-05	1.308E-05	1.250E-05	7.243E-08	1.369E-05	1.319E-05
1.00E+04	1.513E-05	1.552E-05	1.453E-05	1.389E-05	7.242E-08	1.522E-05	1.465E-05
1.10E+04	1.663E-05	1.706E-05	1.598E-05	1.528E-05	7.241E-08	1.674E-05	1.610E-05
1.20E+04	1.813E-05	1.858E-05	1.742E-05	1.667E-05	7.240E-08	1.826E-05	1.755E-05
1.30E+04	1.963E-05	2.011E-05	1.887E-05	1.806E-05	7.239E-08	1.979E-05	1.900E-05
1.40E+04	2.113E-05	2.163E-05	2.031E-05	1.945E-05	7.239E-08	2.131E-05	2.044E-05
1.50E+04	2.263E-05	2.315E-05	2.175E-05	2.084E-05	7.238E-08	2.284E-05	2.189E-05
1.60E+04	2.412E-05	2.466E-05	2.319E-05	2.223E-05	7.237E-08	2.436E-05	2.332E-05
1.70E+04	2.561E-05	2.617E-05	2.463E-05	2.362E-05	7.236E-08	2.589E-05	2.476E-05
1.80E+04	2.710E-05	2.767E-05	2.607E-05	2.501E-05	7.236E-08	2.741E-05	2.619E-05
1.90E+04	2.859E-05	2.918E-05	2.750E-05	2.640E-05	7.235E-08	2.894E-05	2.762E-05
2.00E+04	3.008E-05	3.067E-05	2.894E-05	2.779E-05	7.234E-08	3.046E-05	2.904E-05
2.10E+04	3.157E-05	3.217E-05	3.037E-05	2.917E-05	7.234E-08	3.199E-05	3.047E-05
2.20E+04	3.305E-05	3.366E-05	3.181E-05	3.056E-05	7.233E-08	3.352E-05	3.188E-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)	<sup>101</sup> Ru	<sup>102</sup> Ru	<sup>103</sup> Ru	<sup>104</sup> Ru	<sup>105</sup> Ru	<sup>103</sup> Rh	<sup>105</sup> 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	1.243E-07	1.044E-07	7.057E-08	4.685E-08	8.331E-10	5.169E-09	6.409E-09
2.00E+02	2.486E-07	2.088E-07	1.318E-07	9.377E-08	8.359E-10	1.974E-08	6.584E-09
3.00E+02	3.729E-07	3.132E-07	1.849E-07	1.408E-07	8.379E-10	4.247E-08	6.603E-09
4.00E+02	4.972E-07	4.177E-07	2.310E-07	1.878E-07	8.399E-10	7.226E-08	6.618E-09
6.00E+02	7.459E-07	6.267E-07	3.056E-07	2.821E-07	8.438E-10	1.494E-07	6.649E-09
8.00E+02	9.945E-07	8.359E-07	3.619E-07	3.766E-07	8.477E-10	2.449E-07	6.680E-09
1.00E+03	1.243E-06	1.045E-06	4.043E-07	4.713E-07	8.516E-10	3.543E-07	6.711E-09
2.00E+03	2.486E-06	2.093E-06	5.037E-07	9.481E-07	8.702E-10	1.014E-06	6.859E-09
3.00E+03	3.730E-06	3.144E-06	5.301E-07	1.430E-06	8.888E-10	1.744E-06	7.005E-09
4.00E+03	4.973E-06	4.198E-06	5.390E-07	1.918E-06	9.069E-10	2.491E-06	7.147E-09
5.00E+03	6.216E-06	5.255E-06	5.437E-07	2.410E-06	9.247E-10	3.239E-06	7.286E-09
6.00E+03	7.459E-06	6.314E-06	5.473E-07	2.907E-06	9.421E-10	3.985E-06	7.423E-09
7.00E+03	8.702E-06	7.376E-06	5.506E-07	3.409E-06	9.592E-10	4.730E-06	7.557E-09
8.00E+03	9.945E-06	8.441E-06	5.538E-07	3.916E-06	9.761E-10	5.471E-06	7.690E-09
9.00E+03	1.119E-05	9.508E-06	5.570E-07	4.427E-06	9.928E-10	6.210E-06	7.820E-09
1.00E+04	1.243E-05	1.058E-05	5.601E-07	4.943E-06	1.009E-09	6.946E-06	7.949E-09
1.10E+04	1.367E-05	1.165E-05	5.631E-07	5.464E-06	1.025E-09	7.678E-06	8.076E-09
1.20E+04	1.492E-05	1.273E-05	5.661E-07	5.989E-06	1.042E-09	8.407E-06	8.202E-09
1.30E+04	1.616E-05	1.380E-05	5.691E-07	6.518E-06	1.058E-09	9.133E-06	8.327E-09
1.40E+04	1.740E-05	1.488E-05	5.720E-07	7.052E-06	1.073E-09	9.856E-06	8.450E-09
1.50E+04	1.864E-05	1.597E-05	5.750E-07	7.591E-06	1.089E-09	1.057E-05	8.573E-09
1.60E+04	1.988E-05	1.705E-05	5.778E-07	8.134E-06	1.105E-09	1.129E-05	8.695E-09
1.70E+04	2.112E-05	1.814E-05	5.807E-07	8.681E-06	1.120E-09	1.200E-05	8.817E-09
1.80E+04	2.236E-05	1.923E-05	5.835E-07	9.232E-06	1.136E-09	1.271E-05	8.938E-09
1.90E+04	2.360E-05	2.033E-05	5.864E-07	9.788E-06	1.151E-09	1.341E-05	9.058E-09
2.00E+04	2.484E-05	2.142E-05	5.892E-07	1.035E-05	1.167E-09	1.411E-05	9.178E-09
2.10E+04	2.608E-05	2.252E-05	5.920E-07	1.091E-05	1.182E-09	1.481E-05	9.298E-09
2.20E+04	2.732E-05	2.362E-05	5.948E-07	1.148E-05	1.197E-09	1.550E-05	9.418E-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)	<sup>105</sup> Pd	<sup>106</sup> Pd	<sup>107</sup> Pd	<sup>108</sup> Pd	<sup>109</sup> Ag	<sup>110</sup> Cd	<sup>111</sup> 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	1.797E-08	1.118E-08	4.171E-09	1.979E-09	9.954E-10	4.813E-13	5.270E-10
2.00E+02	4.301E-08	2.243E-08	8.390E-09	3.987E-09	2.013E-09	1.943E-12	1.058E-09
3.00E+02	6.826E-08	3.373E-08	1.265E-08	6.023E-09	3.054E-09	4.404E-12	1.592E-09
4.00E+02	9.358E-08	4.509E-08	1.696E-08	8.087E-09	4.119E-09	7.890E-12	2.130E-09
6.00E+02	1.444E-07	6.797E-08	2.570E-08	1.230E-08	6.321E-09	1.804E-11	3.218E-09
8.00E+02	1.954E-07	9.108E-08	3.461E-08	1.663E-08	8.617E-09	3.258E-11	4.320E-09
1.00E+03	2.467E-07	1.144E-07	4.369E-08	2.106E-08	1.101E-08	5.170E-11	5.438E-09
2.00E+03	5.061E-07	2.342E-07	9.158E-08	4.487E-08	2.432E-08	2.228E-10	1.124E-08
3.00E+03	7.710E-07	3.593E-07	1.436E-07	7.138E-08	3.989E-08	5.364E-10	1.740E-08
4.00E+03	1.041E-06	4.896E-07	1.997E-07	1.006E-07	5.767E-08	1.015E-09	2.392E-08
5.00E+03	1.316E-06	6.249E-07	2.597E-07	1.323E-07	7.756E-08	1.681E-09	3.078E-08
6.00E+03	1.596E-06	7.653E-07	3.236E-07	1.666E-07	9.953E-08	2.557E-09	3.798E-08
7.00E+03	1.882E-06	9.107E-07	3.913E-07	2.035E-07	1.235E-07	3.663E-09	4.551E-08
8.00E+03	2.171E-06	1.061E-06	4.628E-07	2.428E-07	1.494E-07	5.023E-09	5.337E-08
9.00E+03	2.466E-06	1.216E-06	5.380E-07	2.846E-07	1.773E-07	6.656E-09	6.156E-08
1.00E+04	2.765E-06	1.376E-06	6.169E-07	3.288E-07	2.070E-07	8.584E-09	7.006E-08
1.10E+04	3.069E-06	1.541E-06	6.993E-07	3.754E-07	2.385E-07	1.083E-08	7.889E-08
1.20E+04	3.377E-06	1.710E-06	7.854E-07	4.243E-07	2.718E-07	1.341E-08	8.804E-08
1.30E+04	3.689E-06	1.884E-06	8.750E-07	4.757E-07	3.068E-07	1.635E-08	9.750E-08
1.40E+04	4.006E-06	2.063E-06	9.682E-07	5.294E-07	3.436E-07	1.967E-08	1.073E-07
1.50E+04	4.328E-06	2.246E-06	1.065E-06	5.855E-07	3.821E-07	2.339E-08	1.174E-07
1.60E+04	4.653E-06	2.434E-06	1.165E-06	6.439E-07	4.222E-07	2.753E-08	1.278E-07
1.70E+04	4.983E-06	2.627E-06	1.269E-06	7.047E-07	4.639E-07	3.212E-08	1.385E-07
1.80E+04	5.317E-06	2.825E-06	1.376E-06	7.678E-07	5.072E-07	3.717E-08	1.495E-07
1.90E+04	5.655E-06	3.027E-06	1.486E-06	8.333E-07	5.521E-07	4.271E-08	1.608E-07
2.00E+04	5.998E-06	3.234E-06	1.601E-06	9.011E-07	5.986E-07	4.876E-08	1.725E-07
2.10E+04	6.344E-06	3.446E-06	1.718E-06	9.713E-07	6.466E-07	5.534E-08	1.845E-07
2.20E+04	6.695E-06	3.662E-06	1.839E-06	1.044E-06	6.961E-07	6.247E-08	1.967E-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)	$^{113}\text{Cd}$	$^{115}\text{In}$	$^{127}\text{I}$	$^{129}\text{I}$	$^{131}\text{I}$	$^{135}\text{I}$	$^{131}\text{Xe}$
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	3.940E-10	2.766E-10	3.035E-09	1.765E-08	5.060E-08	7.417E-09	1.981E-08
2.00E+02	7.502E-10	5.531E-10	6.074E-09	3.531E-08	7.568E-08	7.417E-09	6.513E-08
3.00E+02	1.072E-09	8.292E-10	9.117E-09	5.298E-08	8.811E-08	7.417E-09	1.231E-07
4.00E+02	1.363E-09	1.105E-09	1.217E-08	7.066E-08	9.429E-08	7.417E-09	1.872E-07
6.00E+02	1.864E-09	1.656E-09	1.827E-08	1.060E-07	9.888E-08	7.417E-09	3.232E-07
8.00E+02	2.274E-09	2.206E-09	2.440E-08	1.414E-07	1.000E-07	7.417E-09	4.625E-07
1.00E+03	2.609E-09	2.755E-09	3.055E-08	1.769E-07	1.003E-07	7.417E-09	6.024E-07
2.00E+03	3.562E-09	5.480E-09	6.153E-08	3.545E-07	1.006E-07	7.417E-09	1.301E-06
3.00E+03	3.919E-09	8.174E-09	9.294E-08	5.328E-07	1.008E-07	7.417E-09	1.997E-06
4.00E+03	4.060E-09	1.084E-08	1.248E-07	7.118E-07	1.009E-07	7.416E-09	2.689E-06
5.00E+03	4.123E-09	1.347E-08	1.570E-07	8.915E-07	1.010E-07	7.416E-09	3.377E-06
6.00E+03	4.157E-09	1.607E-08	1.896E-07	1.072E-06	1.012E-07	7.415E-09	4.061E-06
7.00E+03	4.179E-09	1.863E-08	2.226E-07	1.253E-06	1.013E-07	7.415E-09	4.741E-06
8.00E+03	4.196E-09	2.117E-08	2.560E-07	1.434E-06	1.015E-07	7.414E-09	5.418E-06
9.00E+03	4.210E-09	2.367E-08	2.898E-07	1.616E-06	1.016E-07	7.414E-09	6.091E-06
1.00E+04	4.221E-09	2.613E-08	3.239E-07	1.799E-06	1.017E-07	7.413E-09	6.760E-06
1.10E+04	4.231E-09	2.856E-08	3.584E-07	1.982E-06	1.019E-07	7.413E-09	7.425E-06
1.20E+04	4.239E-09	3.096E-08	3.932E-07	2.166E-06	1.020E-07	7.413E-09	8.086E-06
1.30E+04	4.245E-09	3.332E-08	4.283E-07	2.350E-06	1.021E-07	7.412E-09	8.743E-06
1.40E+04	4.250E-09	3.565E-08	4.638E-07	2.535E-06	1.022E-07	7.412E-09	9.396E-06
1.50E+04	4.254E-09	3.794E-08	4.996E-07	2.720E-06	1.023E-07	7.412E-09	1.005E-05
1.60E+04	4.256E-09	4.020E-08	5.357E-07	2.906E-06	1.025E-07	7.411E-09	1.069E-05
1.70E+04	4.257E-09	4.242E-08	5.721E-07	3.092E-06	1.026E-07	7.411E-09	1.133E-05
1.80E+04	4.257E-09	4.461E-08	6.088E-07	3.279E-06	1.027E-07	7.411E-09	1.197E-05
1.90E+04	4.255E-09	4.677E-08	6.458E-07	3.466E-06	1.028E-07	7.411E-09	1.260E-05
2.00E+04	4.253E-09	4.888E-08	6.832E-07	3.653E-06	1.029E-07	7.411E-09	1.323E-05
2.10E+04	4.249E-09	5.097E-08	7.208E-07	3.841E-06	1.030E-07	7.411E-09	1.385E-05
2.20E+04	4.244E-09	5.302E-08	7.587E-07	4.029E-06	1.031E-07	7.411E-09	1.447E-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)	$^{132}\text{Xe}$	$^{133}\text{Xe}$	$^{135}\text{Xe}$	$^{136}\text{Xe}$	$^{133}\text{Cs}$	$^{134}\text{Cs}$	$^{135}\text{Cs}$
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	1.052E-07	1.002E-07	7.570E-09	1.957E-07	6.278E-08	6.148E-12	1.023E-07
2.00E+02	2.104E-07	1.347E-07	7.587E-09	3.954E-07	1.913E-07	3.874E-11	2.155E-07
3.00E+02	3.157E-07	1.465E-07	7.586E-09	5.952E-07	3.423E-07	1.081E-10	3.288E-07
4.00E+02	4.210E-07	1.506E-07	7.585E-09	7.950E-07	5.011E-07	2.176E-10	4.419E-07
6.00E+02	6.319E-07	1.525E-07	7.583E-09	1.195E-06	8.248E-07	5.603E-10	6.682E-07
8.00E+02	8.430E-07	1.527E-07	7.581E-09	1.595E-06	1.150E-06	1.067E-09	8.945E-07
1.00E+03	1.054E-06	1.528E-07	7.578E-09	1.995E-06	1.475E-06	1.737E-09	1.121E-06
2.00E+03	2.115E-06	1.528E-07	7.565E-09	3.996E-06	3.099E-06	7.456E-09	2.250E-06
3.00E+03	3.181E-06	1.528E-07	7.549E-09	6.002E-06	4.718E-06	1.690E-08	3.376E-06
4.00E+03	4.253E-06	1.528E-07	7.530E-09	8.011E-06	6.334E-06	2.981E-08	4.499E-06
5.00E+03	5.331E-06	1.528E-07	7.511E-09	1.002E-05	7.945E-06	4.594E-08	5.618E-06
6.00E+03	6.415E-06	1.528E-07	7.491E-09	1.204E-05	9.551E-06	6.505E-08	6.734E-06
7.00E+03	7.504E-06	1.528E-07	7.471E-09	1.406E-05	1.115E-05	8.695E-08	7.846E-06
8.00E+03	8.600E-06	1.528E-07	7.449E-09	1.609E-05	1.275E-05	1.114E-07	8.955E-06
9.00E+03	9.701E-06	1.528E-07	7.427E-09	1.812E-05	1.434E-05	1.384E-07	1.006E-05
1.00E+04	1.081E-05	1.528E-07	7.404E-09	2.015E-05	1.593E-05	1.676E-07	1.116E-05
1.10E+04	1.192E-05	1.528E-07	7.380E-09	2.219E-05	1.752E-05	1.989E-07	1.226E-05
1.20E+04	1.304E-05	1.528E-07	7.356E-09	2.423E-05	1.910E-05	2.322E-07	1.335E-05
1.30E+04	1.416E-05	1.528E-07	7.331E-09	2.628E-05	2.067E-05	2.674E-07	1.444E-05
1.40E+04	1.529E-05	1.528E-07	7.305E-09	2.833E-05	2.224E-05	3.043E-07	1.552E-05
1.50E+04	1.643E-05	1.528E-07	7.279E-09	3.039E-05	2.381E-05	3.429E-07	1.660E-05
1.60E+04	1.757E-05	1.528E-07	7.252E-09	3.245E-05	2.537E-05	3.831E-07	1.768E-05
1.70E+04	1.872E-05	1.528E-07	7.224E-09	3.452E-05	2.693E-05	4.247E-07	1.875E-05
1.80E+04	1.987E-05	1.528E-07	7.196E-09	3.659E-05	2.848E-05	4.678E-07	1.981E-05
1.90E+04	2.103E-05	1.528E-07	7.167E-09	3.866E-05	3.003E-05	5.122E-07	2.088E-05
2.00E+04	2.219E-05	1.528E-07	7.137E-09	4.075E-05	3.157E-05	5.579E-07	2.193E-05
2.10E+04	2.336E-05	1.528E-07	7.106E-09	4.283E-05	3.311E-05	6.048E-07	2.298E-05
2.20E+04	2.454E-05	1.528E-07	7.075E-09	4.493E-05	3.464E-05	6.530E-07	2.403E-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)	<sup>139</sup> La	<sup>141</sup> Ce	<sup>141</sup> Pr	<sup>143</sup> Pr	<sup>143</sup> Nd	<sup>145</sup> Nd	<sup>147</sup> 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	1.543E-07	1.292E-07	1.159E-08	1.175E-07	2.610E-08	9.522E-08	4.307E-08
2.00E+02	3.086E-07	2.378E-07	4.385E-08	1.950E-07	9.211E-08	1.904E-07	6.889E-08
3.00E+02	4.628E-07	3.289E-07	9.346E-08	2.461E-07	1.844E-07	2.855E-07	8.437E-08
4.00E+02	6.170E-07	4.054E-07	1.576E-07	2.798E-07	2.940E-07	3.807E-07	9.365E-08
6.00E+02	9.254E-07	5.237E-07	3.208E-07	3.167E-07	5.434E-07	5.708E-07	1.025E-07
8.00E+02	1.234E-06	6.070E-07	5.186E-07	3.326E-07	8.132E-07	7.608E-07	1.057E-07
1.00E+03	1.542E-06	6.658E-07	7.410E-07	3.395E-07	1.092E-06	9.506E-07	1.069E-07
2.00E+03	3.083E-06	7.816E-07	2.030E-06	3.443E-07	2.506E-06	1.898E-06	1.075E-07
3.00E+03	4.622E-06	8.013E-07	3.413E-06	3.439E-07	3.914E-06	2.842E-06	1.074E-07
4.00E+03	6.159E-06	8.043E-07	4.812E-06	3.433E-07	5.309E-06	3.783E-06	1.073E-07
5.00E+03	7.694E-06	8.043E-07	6.212E-06	3.428E-07	6.692E-06	4.720E-06	1.072E-07
6.00E+03	9.228E-06	8.039E-07	7.611E-06	3.423E-07	8.062E-06	5.654E-06	1.072E-07
7.00E+03	1.076E-05	8.033E-07	9.008E-06	3.418E-07	9.420E-06	6.585E-06	1.071E-07
8.00E+03	1.229E-05	8.028E-07	1.040E-05	3.413E-07	1.077E-05	7.513E-06	1.070E-07
9.00E+03	1.382E-05	8.023E-07	1.180E-05	3.408E-07	1.210E-05	8.437E-06	1.070E-07
1.00E+04	1.535E-05	8.017E-07	1.319E-05	3.403E-07	1.342E-05	9.358E-06	1.069E-07
1.10E+04	1.687E-05	8.012E-07	1.458E-05	3.398E-07	1.472E-05	1.028E-05	1.068E-07
1.20E+04	1.840E-05	8.007E-07	1.597E-05	3.394E-07	1.602E-05	1.119E-05	1.068E-07
1.30E+04	1.992E-05	8.002E-07	1.736E-05	3.389E-07	1.730E-05	1.210E-05	1.067E-07
1.40E+04	2.144E-05	7.997E-07	1.875E-05	3.384E-07	1.856E-05	1.301E-05	1.066E-07
1.50E+04	2.296E-05	7.992E-07	2.014E-05	3.380E-07	1.982E-05	1.391E-05	1.066E-07
1.60E+04	2.448E-05	7.987E-07	2.152E-05	3.375E-07	2.106E-05	1.481E-05	1.065E-07
1.70E+04	2.600E-05	7.982E-07	2.290E-05	3.371E-07	2.228E-05	1.571E-05	1.065E-07
1.80E+04	2.751E-05	7.977E-07	2.429E-05	3.366E-07	2.349E-05	1.661E-05	1.064E-07
1.90E+04	2.903E-05	7.972E-07	2.567E-05	3.362E-07	2.469E-05	1.750E-05	1.064E-07
2.00E+04	3.054E-05	7.967E-07	2.704E-05	3.357E-07	2.588E-05	1.838E-05	1.063E-07
2.10E+04	3.205E-05	7.962E-07	2.842E-05	3.353E-07	2.704E-05	1.927E-05	1.062E-07
2.20E+04	3.356E-05	7.957E-07	2.980E-05	3.348E-07	2.820E-05	2.015E-05	1.062E-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)	<sup>148</sup> Nd	<sup>147</sup> Pm	<sup>148m</sup> Pm	<sup>148g</sup> Pm	<sup>149</sup> Pm	<sup>151</sup> Pm	<sup>147</sup> 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	4.092E-08	1.189E-08	2.526E-12	2.349E-12	9.493E-09	2.168E-09	2.432E-11
2.00E+02	8.188E-08	4.083E-08	1.708E-11	1.337E-11	1.023E-08	2.188E-09	1.732E-10
3.00E+02	1.229E-07	7.983E-08	4.911E-11	3.318E-11	1.029E-08	2.189E-09	5.247E-10
4.00E+02	1.639E-07	1.247E-07	9.987E-11	5.950E-11	1.030E-08	2.190E-09	1.125E-09
6.00E+02	2.459E-07	2.231E-07	2.532E-10	1.234E-10	1.031E-08	2.192E-09	3.164E-09
8.00E+02	3.279E-07	3.256E-07	4.618E-10	1.942E-10	1.031E-08	2.194E-09	6.389E-09
1.00E+03	4.099E-07	4.287E-07	7.092E-10	2.670E-10	1.032E-08	2.196E-09	1.082E-08
2.00E+03	8.200E-07	9.270E-07	2.178E-09	6.277E-10	1.037E-08	2.205E-09	5.078E-08
3.00E+03	1.230E-06	1.391E-06	3.658E-09	9.631E-10	1.042E-08	2.215E-09	1.188E-07
4.00E+03	1.640E-06	1.821E-06	5.031E-09	1.272E-09	1.047E-08	2.224E-09	2.127E-07
5.00E+03	2.049E-06	2.221E-06	6.296E-09	1.559E-09	1.052E-08	2.232E-09	3.304E-07
6.00E+03	2.458E-06	2.593E-06	7.463E-09	1.825E-09	1.056E-08	2.241E-09	4.702E-07
7.00E+03	2.868E-06	2.939E-06	8.539E-09	2.073E-09	1.060E-08	2.250E-09	6.303E-07
8.00E+03	3.277E-06	3.259E-06	9.535E-09	2.304E-09	1.064E-08	2.258E-09	8.090E-07
9.00E+03	3.686E-06	3.557E-06	1.046E-08	2.520E-09	1.068E-08	2.266E-09	1.005E-06
1.00E+04	4.095E-06	3.834E-06	1.131E-08	2.723E-09	1.071E-08	2.275E-09	1.217E-06
1.10E+04	4.503E-06	4.091E-06	1.210E-08	2.913E-09	1.075E-08	2.283E-09	1.443E-06
1.20E+04	4.912E-06	4.329E-06	1.284E-08	3.092E-09	1.078E-08	2.291E-09	1.682E-06
1.30E+04	5.320E-06	4.550E-06	1.353E-08	3.261E-09	1.081E-08	2.299E-09	1.933E-06
1.40E+04	5.728E-06	4.755E-06	1.416E-08	3.420E-09	1.084E-08	2.307E-09	2.196E-06
1.50E+04	6.136E-06	4.945E-06	1.476E-08	3.571E-09	1.087E-08	2.315E-09	2.468E-06
1.60E+04	6.544E-06	5.122E-06	1.531E-08	3.714E-09	1.091E-08	2.323E-09	2.750E-06
1.70E+04	6.952E-06	5.285E-06	1.583E-08	3.849E-09	1.093E-08	2.331E-09	3.040E-06
1.80E+04	7.360E-06	5.436E-06	1.631E-08	3.978E-09	1.096E-08	2.339E-09	3.337E-06
1.90E+04	7.768E-06	5.576E-06	1.676E-08	4.101E-09	1.099E-08	2.347E-09	3.641E-06
2.00E+04	8.175E-06	5.705E-06	1.718E-08	4.218E-09	1.102E-08	2.355E-09	3.950E-06
2.10E+04	8.582E-06	5.824E-06	1.757E-08	4.330E-09	1.105E-08	2.362E-09	4.266E-06
2.20E+04	8.990E-06	5.935E-06	1.794E-08	4.437E-09	1.108E-08	2.370E-09	4.585E-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)	<sup>148</sup> Sm	<sup>149</sup> Sm	<sup>150</sup> Sm	<sup>151</sup> Sm	<sup>152</sup> Sm	<sup>153</sup> Eu	<sup>154</sup> 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	7.562E-13	1.562E-08	1.188E-09	8.188E-09	6.747E-09	4.091E-09	2.766E-12
2.00E+02	9.324E-12	3.630E-08	6.076E-09	1.833E-08	1.369E-08	8.192E-09	1.097E-11
3.00E+02	3.739E-11	5.407E-08	1.455E-08	2.830E-08	2.082E-08	1.230E-08	2.458E-11
4.00E+02	9.555E-11	6.888E-08	2.605E-08	3.807E-08	2.815E-08	1.642E-08	4.356E-11
6.00E+02	3.327E-10	9.139E-08	5.617E-08	5.705E-08	4.337E-08	2.468E-08	9.752E-11
8.00E+02	7.628E-10	1.069E-07	9.331E-08	7.531E-08	5.931E-08	3.297E-08	1.726E-10
1.00E+03	1.408E-09	1.176E-07	1.353E-07	9.287E-08	7.596E-08	4.131E-08	2.687E-10
2.00E+03	8.129E-09	1.372E-07	3.793E-07	1.712E-07	1.687E-07	8.362E-08	1.056E-09
3.00E+03	2.072E-08	1.397E-07	6.411E-07	2.356E-07	2.752E-07	1.271E-07	2.337E-09
4.00E+03	3.897E-08	1.395E-07	9.060E-07	2.886E-07	3.929E-07	1.721E-07	4.091E-09
5.00E+03	6.261E-08	1.388E-07	1.172E-06	3.321E-07	5.197E-07	2.185E-07	6.302E-09
6.00E+03	9.142E-08	1.380E-07	1.438E-06	3.676E-07	6.538E-07	2.666E-07	8.955E-09
7.00E+03	1.252E-07	1.371E-07	1.705E-06	3.966E-07	7.938E-07	3.165E-07	1.204E-08
8.00E+03	1.638E-07	1.361E-07	1.972E-06	4.203E-07	9.385E-07	3.682E-07	1.555E-08
9.00E+03	2.070E-07	1.351E-07	2.239E-06	4.394E-07	1.087E-06	4.217E-07	1.947E-08
1.00E+04	2.547E-07	1.341E-07	2.506E-06	4.549E-07	1.238E-06	4.772E-07	2.380E-08
1.10E+04	3.068E-07	1.330E-07	2.774E-06	4.673E-07	1.391E-06	5.346E-07	2.852E-08
1.20E+04	3.631E-07	1.319E-07	3.041E-06	4.772E-07	1.545E-06	5.939E-07	3.365E-08
1.30E+04	4.237E-07	1.308E-07	3.308E-06	4.851E-07	1.701E-06	6.552E-07	3.917E-08
1.40E+04	4.883E-07	1.296E-07	3.576E-06	4.913E-07	1.857E-06	7.185E-07	4.507E-08
1.50E+04	5.569E-07	1.284E-07	3.843E-06	4.961E-07	2.014E-06	7.838E-07	5.136E-08
1.60E+04	6.295E-07	1.272E-07	4.110E-06	4.998E-07	2.170E-06	8.510E-07	5.803E-08
1.70E+04	7.059E-07	1.260E-07	4.377E-06	5.025E-07	2.326E-06	9.202E-07	6.507E-08
1.80E+04	7.862E-07	1.247E-07	4.643E-06	5.044E-07	2.482E-06	9.913E-07	7.249E-08
1.90E+04	8.703E-07	1.235E-07	4.910E-06	5.058E-07	2.638E-06	1.064E-06	8.028E-08
2.00E+04	9.581E-07	1.222E-07	5.176E-06	5.065E-07	2.793E-06	1.139E-06	8.842E-08
2.10E+04	1.050E-06	1.208E-07	5.441E-06	5.069E-07	2.947E-06	1.215E-06	9.693E-08
2.20E+04	1.145E-06	1.195E-07	5.707E-06	5.069E-07	3.101E-06	1.293E-06	1.058E-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)	<sup>155</sup> Eu	<sup>156</sup> Eu	<sup>154</sup> Gd	<sup>155</sup> Gd	<sup>156</sup> Gd	<sup>157</sup> Gd	<sup>158</sup> 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	8.362E-10	3.045E-10	1.692E-15	1.279E-12	5.958E-11	1.488E-10	1.026E-10
2.00E+02	1.657E-09	5.287E-10	1.324E-14	4.973E-12	2.166E-10	2.621E-10	2.424E-10
3.00E+02	2.461E-09	6.972E-10	4.438E-14	1.088E-11	4.463E-10	3.483E-10	4.107E-10
4.00E+02	3.250E-09	8.271E-10	1.048E-13	1.881E-11	7.313E-10	4.139E-10	6.010E-10
6.00E+02	4.783E-09	1.014E-09	3.518E-13	4.005E-11	1.424E-09	5.027E-10	1.028E-09
8.00E+02	6.257E-09	1.148E-09	8.306E-13	6.741E-11	2.236E-09	5.555E-10	1.498E-09
1.00E+03	7.676E-09	1.253E-09	1.617E-12	9.979E-11	3.140E-09	5.879E-10	1.993E-09
2.00E+03	1.402E-08	1.654E-09	1.274E-11	3.078E-10	8.707E-09	6.479E-10	4.656E-09
3.00E+03	1.930E-08	1.982E-09	4.242E-11	5.425E-10	1.575E-08	6.753E-10	7.492E-09
4.00E+03	2.377E-08	2.267E-09	9.927E-11	7.675E-10	2.409E-08	6.996E-10	1.047E-08
5.00E+03	2.759E-08	2.518E-09	1.915E-10	9.687E-10	3.356E-08	7.227E-10	1.359E-08
6.00E+03	3.092E-08	2.744E-09	3.272E-10	1.143E-09	4.405E-08	7.448E-10	1.684E-08
7.00E+03	3.388E-08	2.951E-09	5.139E-10	1.293E-09	5.545E-08	7.661E-10	2.023E-08
8.00E+03	3.658E-08	3.145E-09	7.592E-10	1.422E-09	6.769E-08	7.865E-10	2.376E-08
9.00E+03	3.909E-08	3.329E-09	1.070E-09	1.533E-09	8.073E-08	8.061E-10	2.742E-08
1.00E+04	4.147E-08	3.508E-09	1.455E-09	1.631E-09	9.451E-08	8.249E-10	3.121E-08
1.10E+04	4.377E-08	3.684E-09	1.919E-09	1.720E-09	1.090E-07	8.430E-10	3.514E-08
1.20E+04	4.605E-08	3.860E-09	2.470E-09	1.801E-09	1.243E-07	8.604E-10	3.920E-08
1.30E+04	4.833E-08	4.038E-09	3.115E-09	1.878E-09	1.402E-07	8.771E-10	4.339E-08
1.40E+04	5.065E-08	4.219E-09	3.860E-09	1.951E-09	1.569E-07	8.932E-10	4.772E-08
1.50E+04	5.301E-08	4.406E-09	4.713E-09	2.023E-09	1.743E-07	9.088E-10	5.219E-08
1.60E+04	5.546E-08	4.600E-09	5.678E-09	2.095E-09	1.925E-07	9.238E-10	5.679E-08
1.70E+04	5.799E-08	4.801E-09	6.763E-09	2.166E-09	2.115E-07	9.382E-10	6.152E-08
1.80E+04	6.062E-08	5.011E-09	7.975E-09	2.239E-09	2.313E-07	9.522E-10	6.640E-08
1.90E+04	6.336E-08	5.230E-09	9.318E-09	2.312E-09	2.520E-07	9.657E-10	7.141E-08
2.00E+04	6.622E-08	5.461E-09	1.080E-08	2.388E-09	2.736E-07	9.787E-10	7.656E-08
2.10E+04	6.921E-08	5.702E-09	1.243E-08	2.465E-09	2.961E-07	9.913E-10	8.186E-08
2.20E+04	7.233E-08	5.955E-09	1.420E-08	2.544E-09	3.197E-07	1.004E-09	8.729E-08



## 付録 C 反応度係数

4.2 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 (%)	$k_{\text{eff}}$	制御棒反応度値 (% $\Delta k/k$ )
0.0	0.0	1.03441	0.000
2.0	4.9	1.03064	0.353
4.0	9.8	1.02623	0.771
6.0	14.7	1.02067	1.30
8.0	19.7	1.01438	1.91
10.0	24.6	1.00686	2.65
10.5	25.8	1.00481	2.85
11.0	27.0	1.00278	3.05
11.2	27.5	1.00190	3.14
12.0	29.5	0.99835	3.49
14.0	34.4	0.98891	4.45
16.0	39.3	0.97812	5.56
20.0	49.1	0.95411	8.14
24.0	59.0	0.92732	11.2
28.0	68.8	0.90034	14.4
32.0	78.6	0.87755	17.3
36.0	88.5	0.86260	19.3
40.7	100.0	0.855032	20.3

表 C.2 減速材温度係数 (高温全出力)

減速材温度 (°C)	BOL	
	$k_{\text{eff}}$	反応度係数 (% $\Delta k/k/^\circ\text{C}$ )
26.85	1.06149	
		$-1.29 \times 10^{-2}$
100.00	1.05097	
		$-2.59 \times 10^{-2}$
150.00	1.03688	
		$-4.05 \times 10^{-2}$
200.00	1.01556	
		$-5.37 \times 10^{-2}$
225.00	1.00190	
		$-6.11 \times 10^{-2}$
230.00	0.99884	

表 C.3 ドップラー係数 (高温全出力)

燃料温度 (°C)	BOL	
	$k_{\text{eff}}$	反応度係数 (% $\Delta k/k/^\circ\text{C}$ )
26.85	1.00791	
		$-1.52 \times 10^{-3}$
225.00	1.00486	
		$-1.33 \times 10^{-3}$
446.85	1.00190	
		$-1.21 \times 10^{-3}$
626.85	0.99971	
		$-1.18 \times 10^{-3}$
926.85	0.99618	

表 C.4 減速材密度係数 (高温全出力)

減速材 密度比	BOL	
	$k_{\text{eff}}$	反応度係数 (% $\Delta k/k/(g/cm^3)$ )
0.1	0.30151	$1.01 \times 10^3$
0.2	0.40457	$6.54 \times 10^2$
0.3	0.51923	$3.93 \times 10^2$
0.4	0.62563	$2.45 \times 10^2$
0.5	0.71756	$1.65 \times 10^2$
0.6	0.79594	$1.15 \times 10^2$
0.7	0.86180	$8.38 \times 10^1$
0.8	0.91706	$6.28 \times 10^1$
0.9	0.96331	$4.79 \times 10^1$
1.0 *	1.00190	$3.71 \times 10^1$
1.1	1.03399	

\* 基準密度 :  $0.8343 \text{ g/cm}^3$

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
物質の量	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 <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·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	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
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	°C	
光強度	ルーメン	lm	cd·sr
照射線量	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

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 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J

1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> 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 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m

1 b = 100 fm = 10<sup>-28</sup> m

1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa

1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>

1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq

1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg

1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy

1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

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

(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, ヘクト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す場合に限り表2のカテゴリに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れている。

## 換算表

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

粘度 1 Pa·s (N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

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

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV	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)
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS (仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 735.499 W
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

熱供給用超小型原子炉 MR-1G 炉心の核的検討



古紙配合率100%  
白化度70%再生紙を使用しています