

JAERI-Tech  
2000-024



JP0050345



## 低減速PWR型炉心の熱水力的成立性の検討

2000年3月

吉田啓之・大貫 晃・秋本 肇

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, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

## 低減速 PWR 型炉心の熱水力的成立性の検討

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  
吉田 啓之・大貫 晃・秋本 肇

(2000年2月4日受理)

原研では将来型原子炉システムの一つとして、冷却材に水を用い転換比 1 以上を達成可能な低減速スペクトル炉の概念検討を行っている。低減速スペクトル水冷却炉では従来よりも燃料棒間ギャップが著しく狭くなるため、炉心の熱的な成立性について確認しておくことが重要となる。本研究では、高転換比 PWR 型炉心(熱出力 2900MWt, 燃料棒間ギャップ 1mm)についての熱水力解析を行い、成立性について検討を行った。

本炉心では炉内にシード及びプランケット領域が存在する。シード及びプランケット燃料集合体の発熱量が大きく異なり、炉内で冷却材が沸騰する懸念があるため、各集合体にチャンネルボックスを設け流量を調整することとして検討を進めた。

解析にはサブチャンネル解析コード COBRA-IV-I と KfK 限界熱流束相関式を用いた。集合体単位の解析を行ったところ、プランケット燃料集合体への流量を 40%に制限し、シード燃料集合体への流量を増加させると、冷却材が沸騰することは無かった。全炉心を対象にした解析の結果、プランケット集合体にのみチャンネルボックスを設置し流量を 40%に制限すれば、シード燃料集合体にチャンネルボックスを設けなくても炉内の冷却が達成できることを確認した。

Feasibility Study on Thermal-Hydraulic design of Reduced-Moderation PWR-type core

Hiroyuki YOSHIDA, Akira Ohnuki, Hajime AKIMOTO

Department of Nuclear Energy System

Tokai Research Establishment

Japan Atomic Energy Research Institute

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 4, 2000)

At JAERI, a conceptual study on reduced-moderation water reactor (RMWR) has been performed as one of the advanced reactor system which is designed so as to realize the conversion ratio more than unity. In this reactor concept, the gap spacing between the fuel rods is remarkably narrower than in a reactor currently operated. Therefore, an evaluation of the core thermal margin becomes very important in the design of the RMWR. In this study, we have performed a feasibility evaluation on thermal-hydraulic design of RM-PWR type core (core thermal output: 2900 MWt, Rod gaps: 1mm).

In RM-PWR core, seed and blanket regions are exist. In the blanket region, power density is lower than that of the seed region. Then, evaluation was performed under setting a channel box to each fuel assembly in order to adjust the flow rate in each assembly, because it is possible that the coolant boils in the seed region.

In the feasibility evaluations, subchannel code COBRA-IV-I was used in combination with KfK DNB correlation. When coolant mass flow rate to the blanket fuel assembly is reduced by 40%, and that to the seed fuel assembly is increased, coolant boiling is not occurred in the assembly region calculation. Provided that the channel boxes to the blanket fuel assembly are set up and coolant mass flow rate to the blanket fuel assembly is reduced by 40%, it is confirmed by the whole core calculation that the boiling of the coolant is not occurred and the RM-PWR core is feasible.

Keywords : Reduced Moderation Water Reactor, COBRA-IV-I, Tight Lattice

## 目 次

1. はじめに.....	1
2. 評価方法.....	2
2.1 対象炉心の概要.....	2
2.2 热設計の方針.....	2
2.3 評価手順.....	3
2.3.1 燃料集合体単位の評価.....	3
2.3.2 全炉心評価.....	3
2.4 評価用コードとDNB 相関式.....	4
3. 評価結果と検討.....	16
3.1 燃料集合体単位の評価.....	16
3.2 全炉心評価.....	16
4. まとめ.....	25
参考文献.....	25
付録1 COBRA IV-I パソコン版の修正部分 .....	26

## Contents

1. Introduction.....	1
2. Evaluation Method.....	2
2.1 Outline of Core Characteristic.....	2
2.2 Direction of Thermal-Hydraulic Design.....	2
2.3 Evaluation Procedure.....	3
2.3.1 Evaluation for One Fuel Assembly.....	3
2.3.2 Evaluation for Entire Core.....	3
2.4 Evaluation Code and DNB Correlation .....	4
3. Results and Discussion.....	16
3.1 Evaluation for One Fuel Assembly.....	16
3.2 Evaluation for Entire Core.....	16
4. Conclusion.....	25
References.....	25
Appendix 1 Corrected Part in COBRA-IV-I PC Version.....	26

This is a blank page.

## 1. はじめに

原研では、将来型炉の技術オプションの一つとして、低減速スペクトル炉の研究開発を進めている<sup>1,2)</sup>。低減速スペクトル炉とは減速材の割合を少なくし、中性子の減速の割合を小さくした、いわゆる「硬い」中性子スペクトルを利用した水冷却炉のことである。低減速スペクトル炉では、転換比が高速増殖炉のように1を越える、つまり消費量以上の核分裂性物質が生産される可能性がある。

低減速スペクトル炉では、燃焼に伴う核分裂性 plutonium の割合の変化が従来の軽水炉に比べて小さく、 plutonium を多重リサイクルすることが可能となる。また、核分裂性でないウラン-238 が核分裂性の plutonium-239 に大量に変換されるため、ウラン資源の有効利用にも寄与する。さらに、燃料の燃焼に伴って核分裂物質が生産されるため、高燃焼度・長期サイクル運転を実現できる可能性があり、定期検査費用の削減や放射性廃棄物の低減にも役立つことが期待される。

低減速スペクトル炉心では燃料に対しての減速材の割合を小さくする必要があり、現行炉と比較して非常に稠密な、燃料棒間ギャップ:1mm 程度の燃料集合体が用いられる。水炉の場合、減速材である水(軽水あるいは重水)は、一般に冷却材としても機能しているため、減速材割合の低下は冷却材割合の減少へとつながる。このため、熱的にかなり厳しい状況となることが予測される。例えば従来の研究では、三角配列の稠密体系において燃料棒間ギャップが 1.5mm から 1.0mm になると、限界熱流束が 20%程度低下する事が報告されている<sup>3)</sup>。また、低減速スペクトル炉心では、転換比を向上させつつボイド反応度係数を負にするなどの要請から、高速増殖炉と同様に炉内に劣化ウランを多く含む領域、いわゆるブランケット領域が存在するのが一般的である。ブランケット領域では、核分裂性物質の割合が通常の領域(シードと呼ばれる)に比べると少ないため発熱も小さくなる。したがって、低減速スペクトル炉では炉内の発熱分布が現行炉と比較して複雑になり、また、出力ピーピング係数が大きくなることも予想される。

上述のように低減速スペクトル炉の設計においては、稠密燃料集合体が用いられること、及び、炉内のブランケットの存在による出力ピーピング係数の増大などの理由から、核的のみではなく熱的な成立性についても確認しておく必要がある。本研究では、現在検討が進められている低減速スペクトル炉のうち、PWR 型炉心について定格運転時の熱的成立性を数値解析により評価する。

## 2. 評価方法

### 2.1 対象炉心の概要

解析の対象とする PWR 型低減速スペクトル炉心の概要を表 2.1 に示す。低減速化のため冷却材(減速材)は重水とした。炉心熱出力 2900MWt(電気出力 1000MWe), 一次冷却材圧力は 15.4 MPa, 冷却材流量は改良型 PWR の 80% ( $82560\text{m}^3/\text{h}$ )とした。炉心入口温度は  $290^\circ\text{C}$ , 炉心バイパス流量は 7% とした。炉心の断面を図 2.1 に示す。炉心は六角形の集合体 313 体で構成される。そのうち 103 体はプランケット燃料のみで構成される集合体であり、本研究ではプランケット燃料集合体と呼ぶ。残りの 210 体の集合体は、軸方向に 2 段のシード部分を持ち、上下部及び中間部にプランケット領域を有する。この集合体はシード燃料集合体と呼ぶ。

炉心横断面の出力分布を図 2.2(対象性から 1/12 領域のみを示す)に、最大発熱集合体の軸方向出力分布を図 2.3 に示す。シード及びプランケット集合体の出力の差は大きく、最大で約 17 倍あり、シード燃料集合体に限定しても 1.6 倍程度の差がある。この炉心が成立するためには、炉心の全サイクルにわたって炉心内で沸騰が起こらず、充分な熱的余裕が有る設計としなければならない。

図 2.4, 図 2.5 にシード及びプランケット燃料集合体の横及び縦断面を示す。シード燃料棒及びプランケット燃料棒の直径はそれぞれ 9.5, 13.8mm であり、燃料棒間のギャップは双方とも 1mm である。プランケット燃料棒が太径となっている理由は、シード部分に比べて発熱量が小さいため除熱に余裕があることによる。シード燃料集合体には六角形を 7 つ組み合わせた形の制御棒案内管が 6 本設置されており、これは集合体を構造物として維持するためのタイロッドとしても機能する。また、シード燃料集合体中心には計装用案内管が 1 本用意されており、このためシード燃料集合体内の燃料棒総数は 504 本となる。プランケット燃料集合体内にはタイロッドが用意されていないが、後述するチャンネルボックスが用いられる場合には、これに構造を保持する機能を付加することが可能である。

### 2.2 热設計の方針

热設計に先立って、全炉心に対して予備的な解析を行ったところ、シード燃料集合体において沸騰が起るため何らかの対策が必要であることが分かった。ここでは燃料集合体ごとに冷却材流量の配分を変化させることにより、冷却を達成することを考える。

この場合、炉心の冷却のみを考慮すれば燃料集合体ごとに最適な流量を設定することも可能である。しかし炉心下部構造が複雑になり、また、炉心入口及び出口に複雑な流速分布を生じさせる可能性があるなど好ましくない面が多い。そこで考えられるのは、炉心をいくつかの領域に分割し、その領域ごとに流量配分を設定すること、あるいは、集合体をいくつかの種類に分類し、その種類ごとに適切な流量を設定することである。炉心をいくつかの領域に分割する場合には炉心支持板に流量を配分するための抵抗を設けることが現実的であり、集合体をいくつかの種類に分類する場合には、集合体下部(又は上部)に抵抗部を作ることになると思われる。

集合体下部に抵抗部を設ける場合、燃料のシャッフルリングや製造コストなどを考慮すると、抵抗部のみ異なる集合体を製造することは現実的ではない。ここで検討する炉心においてはシード及びプランケットの 2 種類の集合体ごとに流量配分を変化させることが現実的と思われる。ただし、この場合は流量の調節範囲が狭くなる。一方、炉心支持板に抵抗部を設ける場合には、集合体に設ける場合よりも調節可能

な範囲が大きくなり、より最適な設計が可能である。しかしながら、炉心支持板に設置した場合、プラント寿命中の変更が難しくなる。また、対象炉心のように、シード及びプランケット燃料集合体では顕著な出力の差があるが、領域ごとの分布がそれほど存在しない場合には、有効な手段とは言い難い。そこで、プランケット燃料集合体下部(あるいは上部)に流動抵抗を設置し、シード及びプランケット燃料集合体で冷却材流量を変えることによって冷却が達成可能かどうかを検討することにした。

## 2.3 評価手順

### 2.3.1 燃料集合体単位の評価

集合体ごとに冷却材を配分しても、集合体間で冷却材の移動が可能であれば、炉心上部で冷却材流量は平均化されてしまう。このため炉心下部で冷却材を配分することによる効果が十分に發揮されないことが懸念される。そこで集合体ごとに現行 BWR 炉心で用いられているようなチャンネルボックスを設け、集合体間の冷却材の移動を制限した条件で当面の解析を行うことにした。集合体間の冷却材の移動を考慮する必要が無ければ、全炉心の解析を行う必要がなく、集合体単位の解析を行えば良い。そこで集合体単位の詳細な解析を、集合体の入口流量をパラメータとして実施した。

図 2.2 で示した出力分布は平衡炉心中期のものであり、燃焼に伴いこの分布は変化する。特に、プランケット部は、初装荷時点では核分裂性物質をほとんど含まないため発熱は小さく、サイクル末期では核分裂性プルトニウムの生産により出力が大きくなるなど、変化が大きいことが予想される。そこで表 2-3 のようにシード及びプランケット部の発熱割合も計算パラメータとした。シードとプランケットとの出力比をどのように設定するかは議論の余地のある問題であるが、本解析では運転開始時を想定して、プランケットの出力が小さい場合の模擬としてプランケット出力を 0 とした場合と、燃焼が非常に進んだ時点を想定して、プランケット出力が平衡炉心中期(ここではベースケースと呼ぶことにする)の 2 倍となった場合を考慮することとした。実際には運転開始時点においてもプランケット出力は 0 ではなく、燃焼が進んでもプランケット出力が 2 倍になることは考えにくいため、この想定は保守的なものであると思われる。

図 2.6、図 2.7 に解析に用いたシード及びプランケット燃料集合体のチャンネル分割図を示す。現在の炉心核解析では集合体を軸方向には分割しているが、横断面では分割していないため、集合体内での出力分布は得られていない。しかし、実際にはローカルの出力分布は存在し、ローカルピーピング係数を 1.1 以下になるように設計することになっている。そこで、本解析においてもシード燃料集合体のローカルピーピングを考慮して、高出力棒(出力比 1.1)と低出力棒(出力比 0.9)を配置することとした。現実にはより複雑な分布となることが予想されるが、高出力及び低出力棒を集中して配置し保守的な解析となるようにした。なお、本炉心の減速材(冷却材)には重水が使用されているが、本解析では軽水の物性値を使用した。

### 2.3.2 全炉心評価

炉心出口での温度分布や、チャンネルボックスの必要性の有無を検討するため、全炉心に対する解析を行った。炉心出口での温度分布が大きいと、炉内の機器に悪影響を与える可能性がある。また、チャンネルボックスが存在する場合、余分な構造物が必要となるため、コストや廃棄物の増大要因となる。さらにチャンネルボックスの存在は、再冠水時の炉心冷却<sup>4)</sup>を妨げる要因となる可能性もあり、必要性の有無を検討しておくことは重要である。

図 2.8 に解析に用いたチャンネル分割を示す。発熱量が最大となり、沸騰が起こる可能性の大きい集合体を細分化した。このようなチャンネル分割を用い、全てのチャンネルボックスを取り去った場合について解析したところ、シード燃料集合体を流れるべき冷却材がブランケット部に流入することにより沸騰が生じ、その沸騰がブランケット集合体への冷却材の流入を促進し、さらに沸騰が激しくなるという状況になるため、計算を行うことが不可能であった。試みにブランケット冷却材の流量を 0 としてみたが同様の結果しか得られず、全てのチャンネルボックスを取り去った場合には安全な炉心を形成することが不可能であると判断した。そこで、全ての集合体にチャンネルボックスがある場合と、ブランケット燃料集合体にのみチャンネルボックスを設けた場合の 2 つについて解析を行った。シード燃料集合体ではなく、ブランケット燃料集合体にチャンネルボックスを設置した理由は、シード燃料集合体と比較しブランケット燃料集合体の方が出力変化の割合が大きいこと、及び、ブランケット燃料集合体は体数が少なくコスト的に有利となるからである。

## 2.4 評価用コードと DNB 相関式

解析にはサブチャンネルコードを COBRA-IV-I<sup>5)</sup>を用い、DNBR の評価には以下で示す KfK 相関式<sup>6)</sup>を用いた。

KfK 相関式

$$\phi_{CHF} = \frac{A + B \cdot \Delta H_{in}}{C + Z \cdot Y \cdot Y'} \quad (10^6 \text{Btu}/\text{ft}^2 \cdot \text{hr})$$

ただし、

$$A = \frac{0.25GD\lambda Q_1 F_1}{1 + Q_2 F_2 GD(Y')^{Q_3}}$$

$$B = 0.25GD$$

$$C = C'V \left( 1 + \frac{Y-1}{1+G} \right)$$

$$C' = \frac{Q_4 F_3 (GDY')^{0.5}}{D_h}$$

$$D = F_p D_h$$

$D_h$ :熱水力等価直径(in)

$F_p$ :径方向出力分布ファクター(-)

$$F_p = \frac{\gamma_l \sum_{i=1}^n a_i}{\sum_{i=1}^n a_i \gamma_i}$$

ここで、

$a_i$ :注目するサブチャンネルに面するホットロッドの加熱長さ

$\gamma_i$ :注目するサブチャンネルに面するホットロッドの径方向ピーピング係数

$$\gamma_l = \max(\gamma_i)$$

$n$ :注目するサブチャンネルに面するホットロッドの数  
である。

$$F_1 = Pr^{0.982} \exp[1.17(1-Pr)]$$

$$F_2 = Pr^{0.841} \exp[1.424(1-Pr)]$$

$$F_3 = Pr^{1.851} \exp[1.241(1-Pr)]$$

$G$  :質量流束( $10^6\text{lb}/\text{ft}^2\cdot\text{hr}$ )

$\Delta H_{in}$  :炉心入口サブクール度(Btu/lb)

$P$  :一次系圧力(lb/ $\text{ft}^3$ )

$$Pr = 10^{-3} P$$

$Q_i$  :形状ファクター, 三角稠密格子炉心に対する値

$$Q_1 = 1.748, Q_2 = 7.540, Q_3 = -1.0, Q_4 = 8.783$$

$V$  :スペーサーファクター, グリッドスペーサに対する式

$$V = -0.252 - 2.789 \exp(-3.874G) + 1.915 \exp(-0.234G)$$

$$Y = \frac{1}{\tilde{\phi}(z)} \cdot \frac{\int_0^z \tilde{\phi}(z) dz}{\int_0^z dz}$$

$$Y' = \frac{0.25G \left( \frac{D_h}{12} \right) (H_z - H_{in})}{\int_0^z \tilde{\phi}(z) dz}$$

$z$  :炉心入口から CHF 計算ノードまでの長さ(in)

$\lambda$  :潜熱(Btu/lb)

$\tilde{\phi}(z)$  :軸方向位置  $z$  での平均熱流束( $10^6\text{Btu}/\text{ft}^2\cdot\text{hr}$ )

$H_{in}$  :炉心入口エンタルピ(Btu/lb)

$H_z$  :CHF 計算ノードでのエンタルピ(Btu/lb)

これらのうち,  $F_p$ :径方向出力分布ファクター以外は, COBRA-IV-I の入力オプションを指定するだけで特に値を入力する必要はない。 $F_p$ に関しては, コード内に計算ルーチンを含まず入力値として与える必要がある。ここでは表計算ソフトを用いて容易に  $F_p$  に関する入力を作成できるようしている。サブチャンネル解析で重要な乱流混合係数は, 稠密の三角格子体系で通常用いられる 0.003 とした<sup>7)</sup>。解析条件を表 2.2 に示す。なお, 実際の解析では, UNIX 版の COBRA-IV-I を Windows 環境に移植した PC 版を利用した。なお, 2.3.2 で述べた全炉心解析を行う場合, チャンネル入口に流量配分を付ける必要がある。COBRA-IV-I では計算体系入口での流量条件として, 各チャンネルの流束を一定とチャンネルごとに流量を指定することができる。したがって本解析のように集合体ごとに流量配分を付ける場合には, 各チャンネルの流量を指定すれば良い。しかし, 今回の解析のように各チャンネルの流路面積が大きく異なる場合には, 面積が小さいチャンネルでの誤差が大きくなってしまう。そこで, PC 版の作成に合わせて, 流量条件としてチャンネルごとの流量を, 平均値の比として入力できるように改良した。具体的な修正方法については, その他のものを含め付録 1 に示した。

表 2.1 炉心主要パラメータ

炉心熱出力	2900MWt	
電気出力	1000MWe	
炉心等価直径	5m	
炉心有効長	2m	
一次冷却材	流量	82560m <sup>3</sup> /h
	圧力	157kg/cm <sup>2</sup> (=15.4MPa)
	入口温度	290°C
	出口温度	325°C
燃料集合体本数	313 体	
シード燃料集合体	210 体	
プランケット燃料集合体	103 体	
シード燃料棒	集合体あたりの本数	504 本
	外径	9.5mm
	ペレット外径	8.6mm
	ピッチ	10.5mm
	被覆管材料	SUS-316
	軸方向内部プランケット長	20cm
プランケット燃料棒	軸方向上下プランケット長	40cm
	集合体あたりの本数	271 本
	外径	15mm
	ペレット外径	13.7mm
	ピッチ	16mm
制御棒	被覆管材料	SUS-316
	本数	84 本
	ピン本数/集合体	6 本
吸収材材質		濃縮 B-10 の B <sub>4</sub> C ペレット
最高線出力	40kW/m 以下	

表 2.2 解析条件

スペーサ損失係数	1.0	
熱伝達相関式	RELAP-4 パッケージ	
乱流混合係数	単相	0.003
	二相	0.003
熱流束(CHF)相関式	KfK 相関式	
サブクールボイドモデル	Levy	
ボイド率相関式	EPRI 相関式	
乱流摩擦相関式	プラジウスの式	

表 2.3 計算パラメータ

	ベースケース	サイクル初期を想定した場合	ベースケースよりもプランケット出力が増加した場合 (ベースケースの 2 倍)
シード出力	88%	100%	76%
プランケット出力	12%	0%	24%

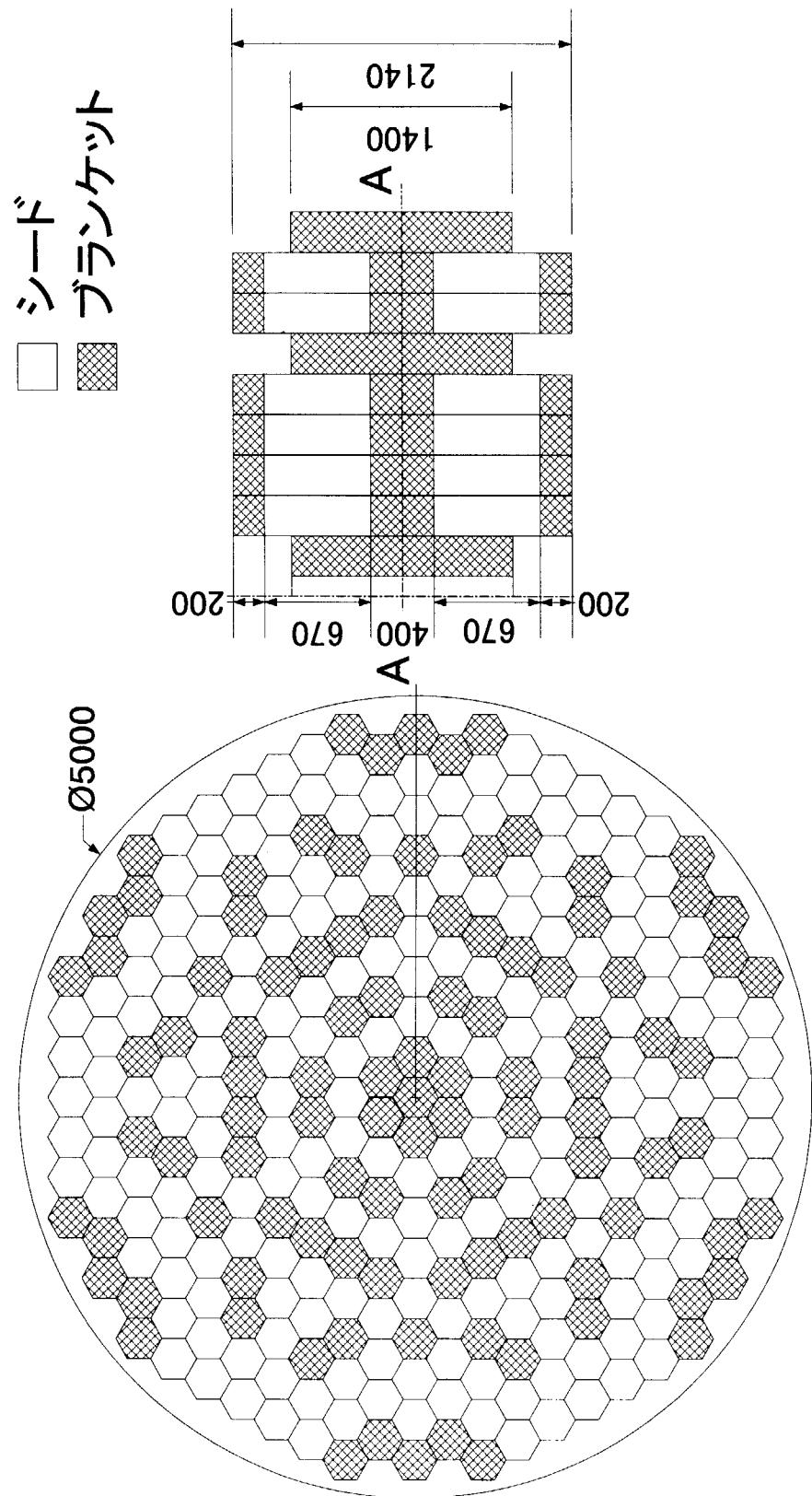


図 2.1 焰心断面図

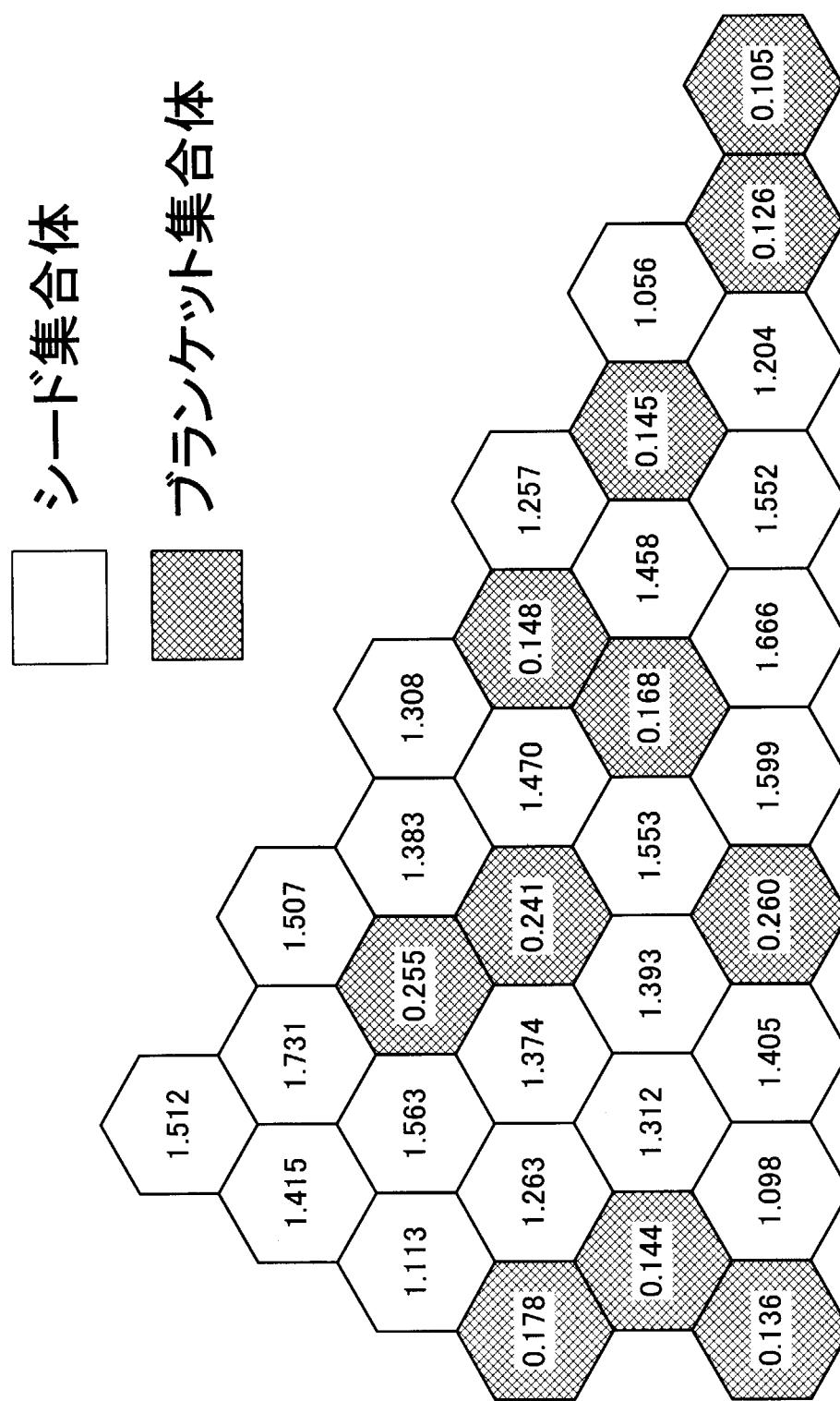


図 2.2 炉心出力分布(横断面)

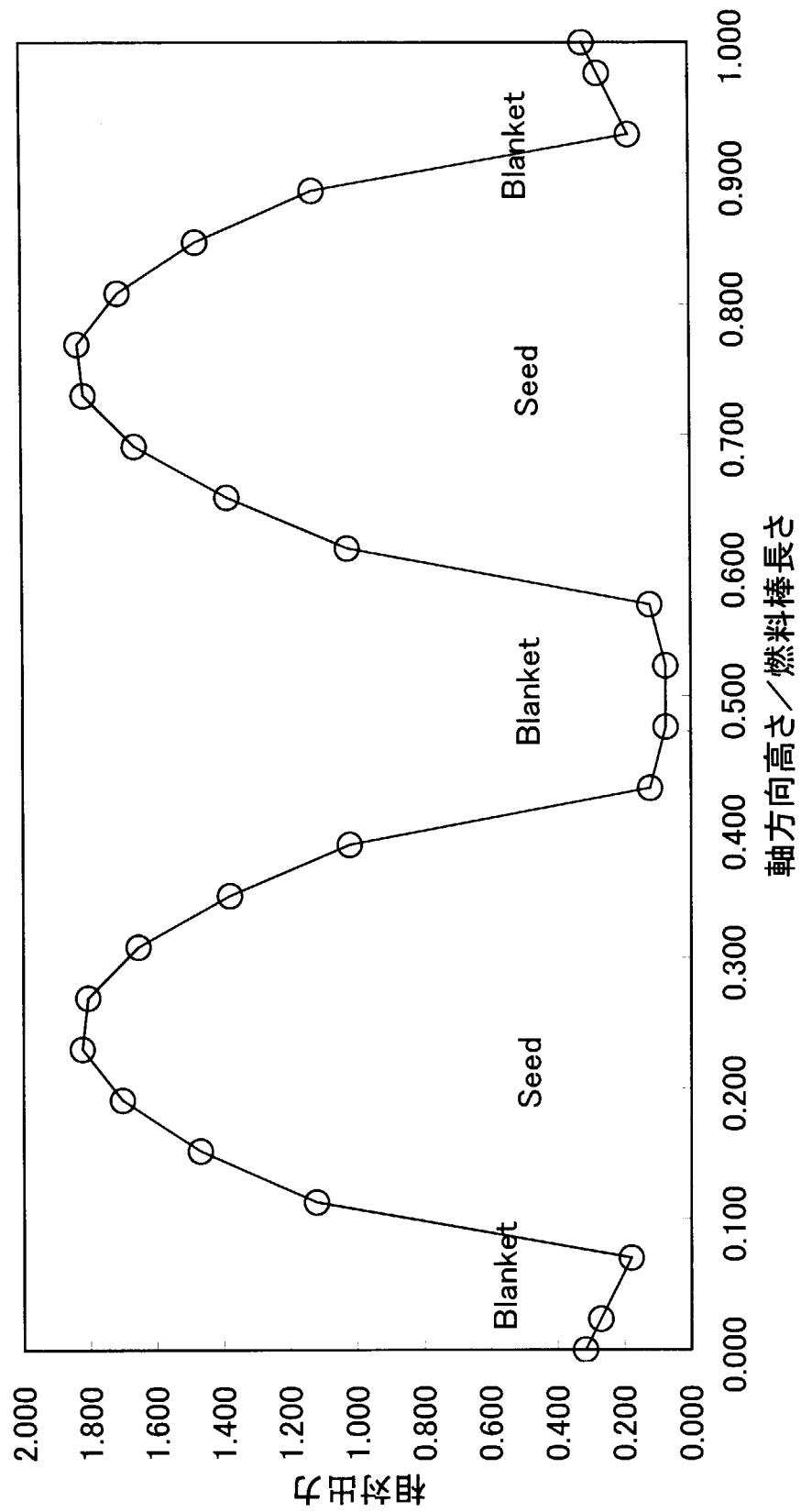


図 2.3 軸方向出力分布

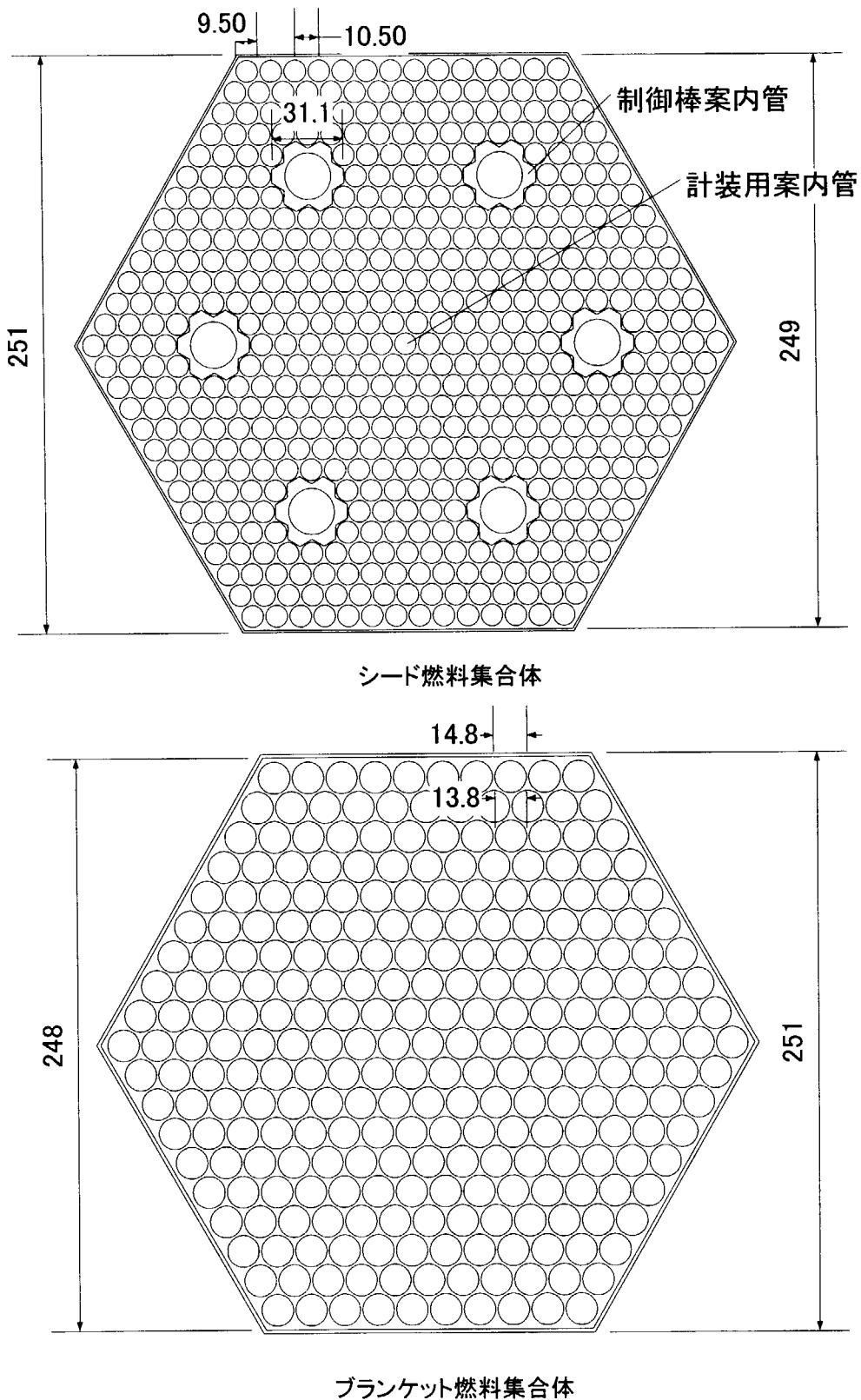


図 2.4 シード及びブランケット燃料集合体の横断面

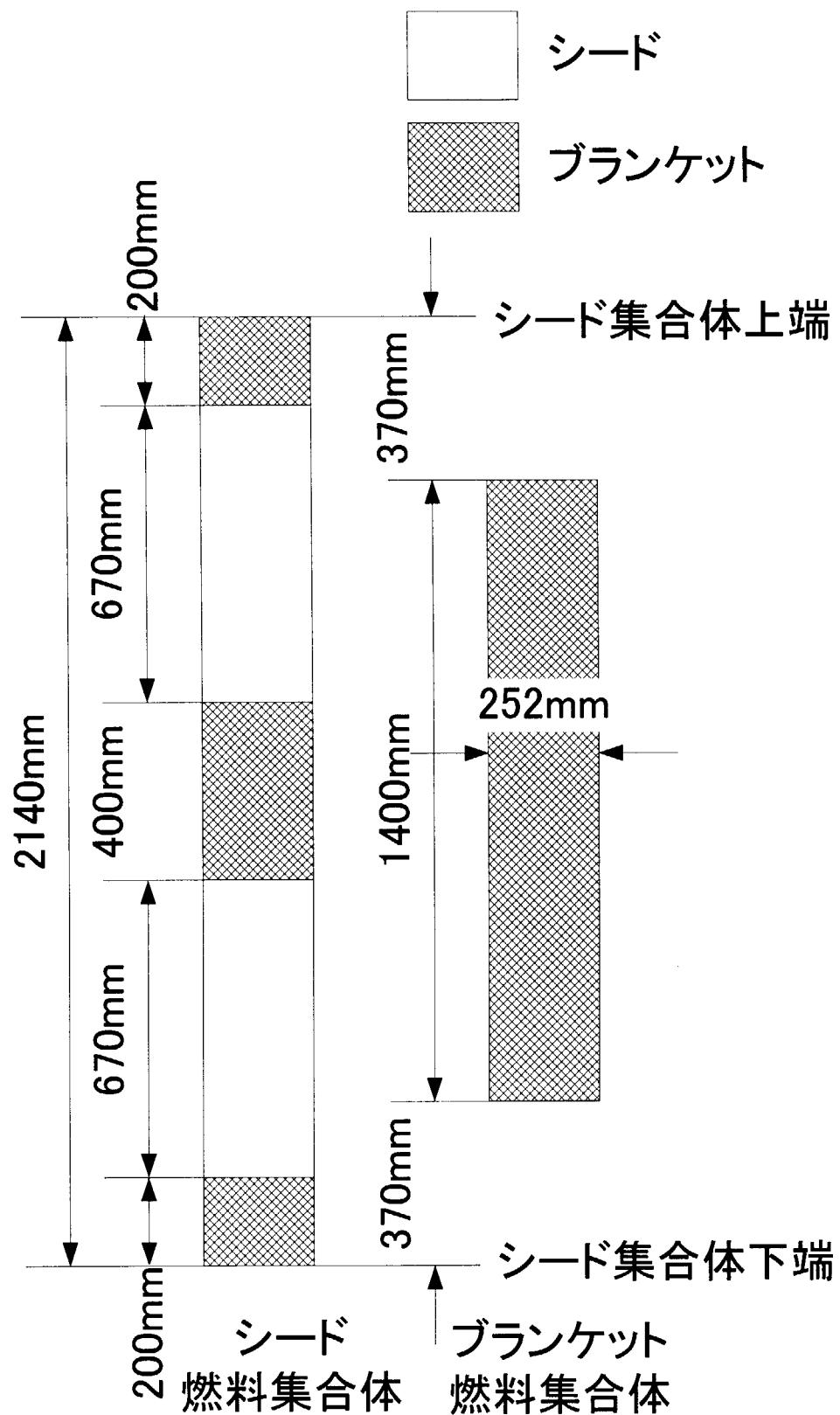


図 2.5 シード及びブランケット燃料集合体の縦断面

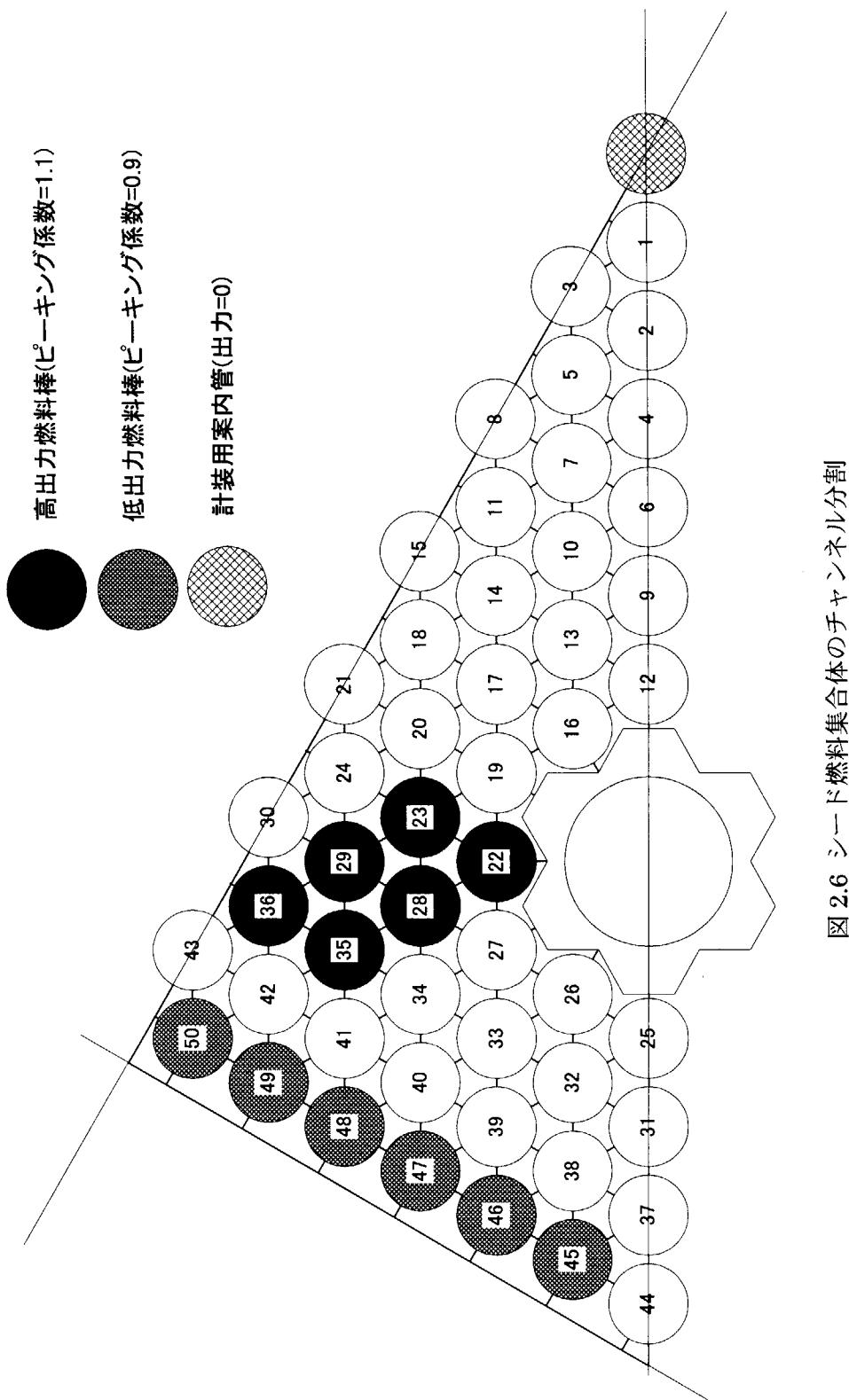


図 2.6 シード燃料集合体のチャンネル分割

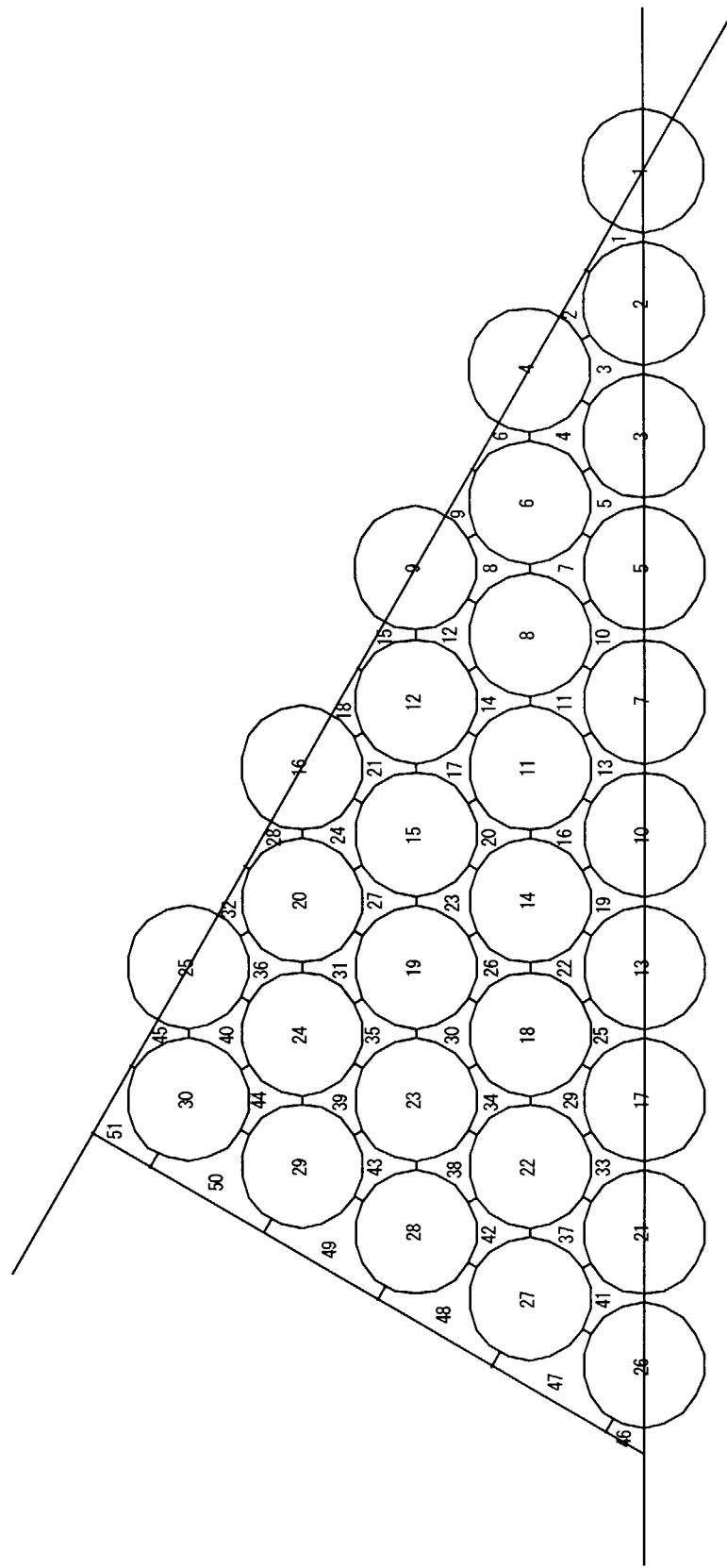


図 2.7 ブランケット燃料集合体のチャンネル分割

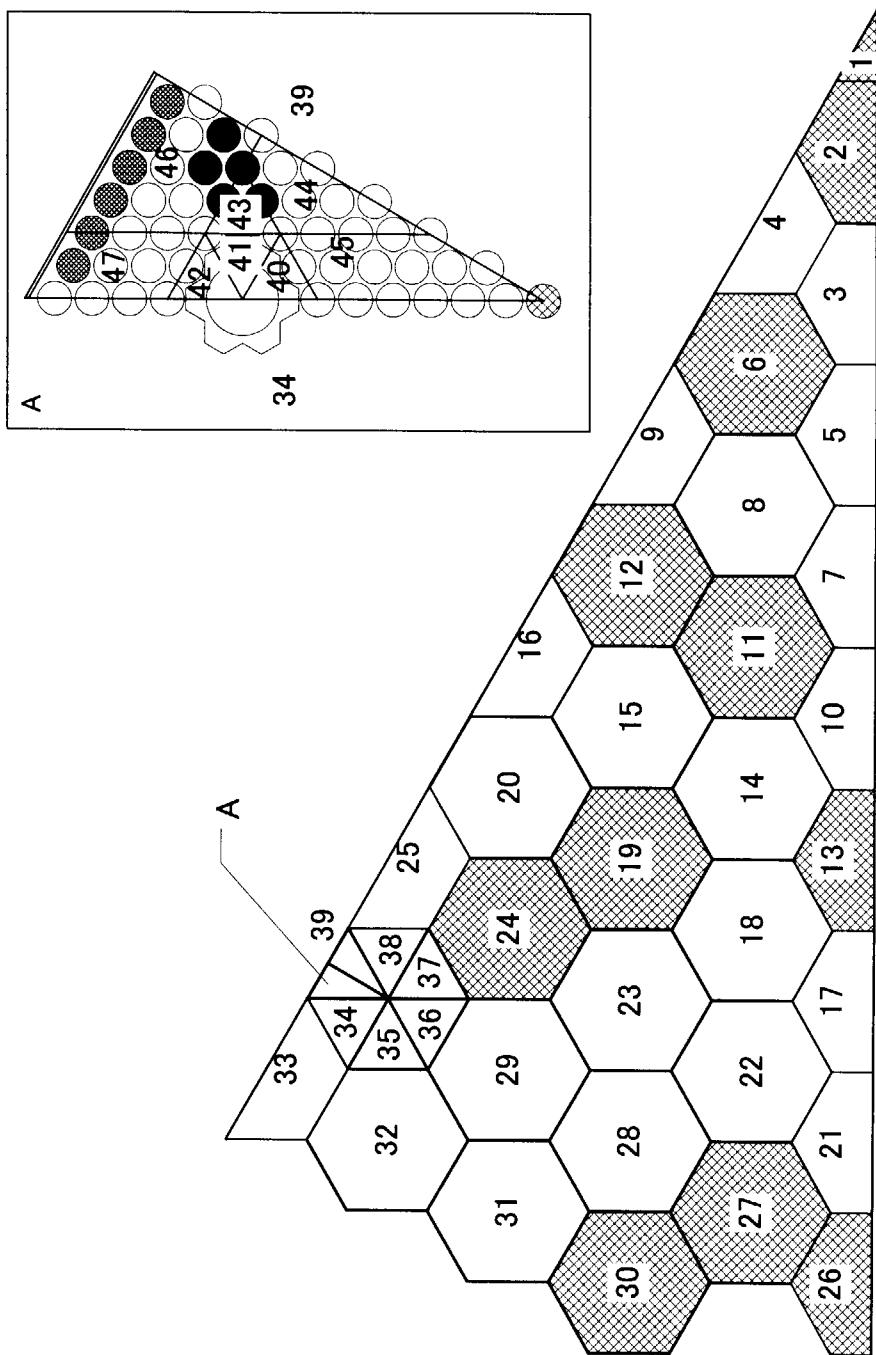


図 2.12 炉心全体解析に用いるチャンネル分割

### 3. 評価結果と検討

#### 3.1 燃料集合体単位の評価

2.3.1 で示した、ベースケースについて、冷却材を均一に流入させた、つまり入口流量を調節しない場合の解析を行った。解析で得られた軸方向のチャンネル平均の最大ボイド率と最小 DNBR の変化を図 3.1 に示す。シード燃料集合体下端から 3/4あたりで沸騰が開始し、出口でのボイド率は 0.28 程度となる。この場合の DNBR は 1.2 ほどであった。図 3.2 と同じく、ベースケースについて炉内の流量配分を行わない場合の出口でのボイド率分布を示す。高出力燃料棒周辺の、制御棒案内管に近い領域でボイド率が高いことが分かる。また、集合体外縁でボイド率が小さくなっているが、これは周辺部に低出力燃料棒を配置したことに加え、この部分の流路面積が大きいことによる。

このように入口流量を調節しない場合には、炉内のシード燃料集合体で沸騰が起こる。シード燃料集合体に対する流量を増加させれば、シード部での沸騰は回避されるが、プランケット燃料集合体で沸騰が起きる可能性がある。図 3.3 に、シード及びプランケット燃料集合体に対する流量配分を変化させた場合の、炉心(集合体)出口におけるボイド率の最大値の変化を示す。シード燃料集合体でのボイド率はプランケット燃料集合体に対する流量が減少するにしたがって低下するが、反対に、プランケット燃料集合体では上昇する。シード及びプランケット燃料集合体の双方で沸騰が起こらない(ボイド率が 0)となれば、実際の炉心として成立する。図より、プランケット燃料集合体の流量を平均流量の 40%程度まで低下させると、この条件を満足することが分かる。図 3.4 にこの場合の最大発熱シード燃料集合体における DNBR の変化を示す。DNBR は、どの部分でも通常安全余裕を考慮して設定している 1.3 以下にはならず、この条件での成立性が十分にあることが分かる。そこで、次の全炉心解析においては、この流量配分を用いて解析を進めた。

#### 3.2 全炉心評価

図 3.5, 6 に、全ての集合体にチャンネルボックスがある場合と、プランケット部のみチャンネルボックスを設けた場合の炉心出口温度の分布を示す。プランケット出力が 0 の場合には、プランケット内の冷却材は加熱されることなく出口まで流動し、プランケット燃料集合体の出口温度はシード集合体の最高出口温度と比較して約 48°C 低い。プランケット部の出力が増大するにしたがってプランケット燃料集合体の出口温度も増加し、プランケット出力が 2 倍の場合には、シード燃料集合体の最高出口温度よりもプランケット燃料集合体の最高出口温度の方が高くなる。図 3.5, 6 の差異は非常に小さく、この図からシード部チャンネルボックスの影響を判断することは難しい。

図 3.7 にシード燃料集合体出口温度の最大値を示す。図 3.5, 6 でも確認されるように出口温度の最大値はチャンネルボックスの有無の影響をほとんど受けない。燃料集合体間の冷却材の混合によって最高温度が低下すると期待された、シード燃料集合体にチャンネルボックスが無い場合の方が若干であるが最高温度が増加している。これは、冷却材の膨張により出力の大きな集合体から小さな集合体への冷却材の移動の影響が、燃料集合体間での冷却材の混合の影響を上回るためだと思われる。このことはシード部の出力が大きいほど(プランケット出力比が小さいほど)、チャンネルボックスの有無の影響が大きくなることからも確認できる。図 3.8 にシード燃料集合体出口温度の標準偏差を示す。出口温度の最大値とほぼ同様の結果を示し、チャンネルボックスの有無による影響はほとんど見られない。流量や出口冷却材温

度の均一化という点では、若干ではあるが全ての集合体にチャンネルボックスを設けた方が良いが、その影響は小さく、定格運転時の除熱という観点からは、シード燃料集合体のチャンネルボックスの必要性は小さいと思われる。

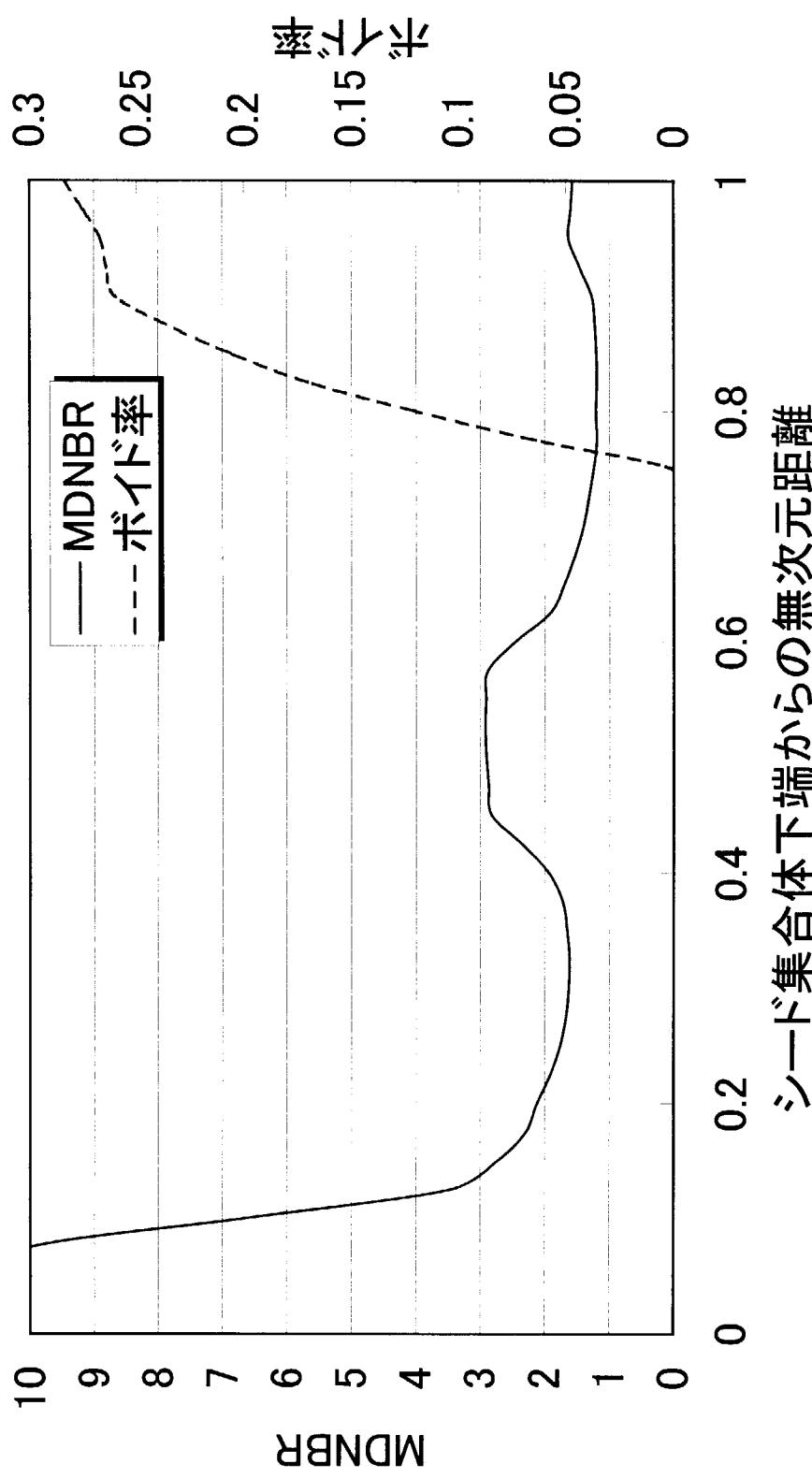


図 3.1 集合体単体での解析結果の一例(ベースケース, 流量配分を行わない場合)

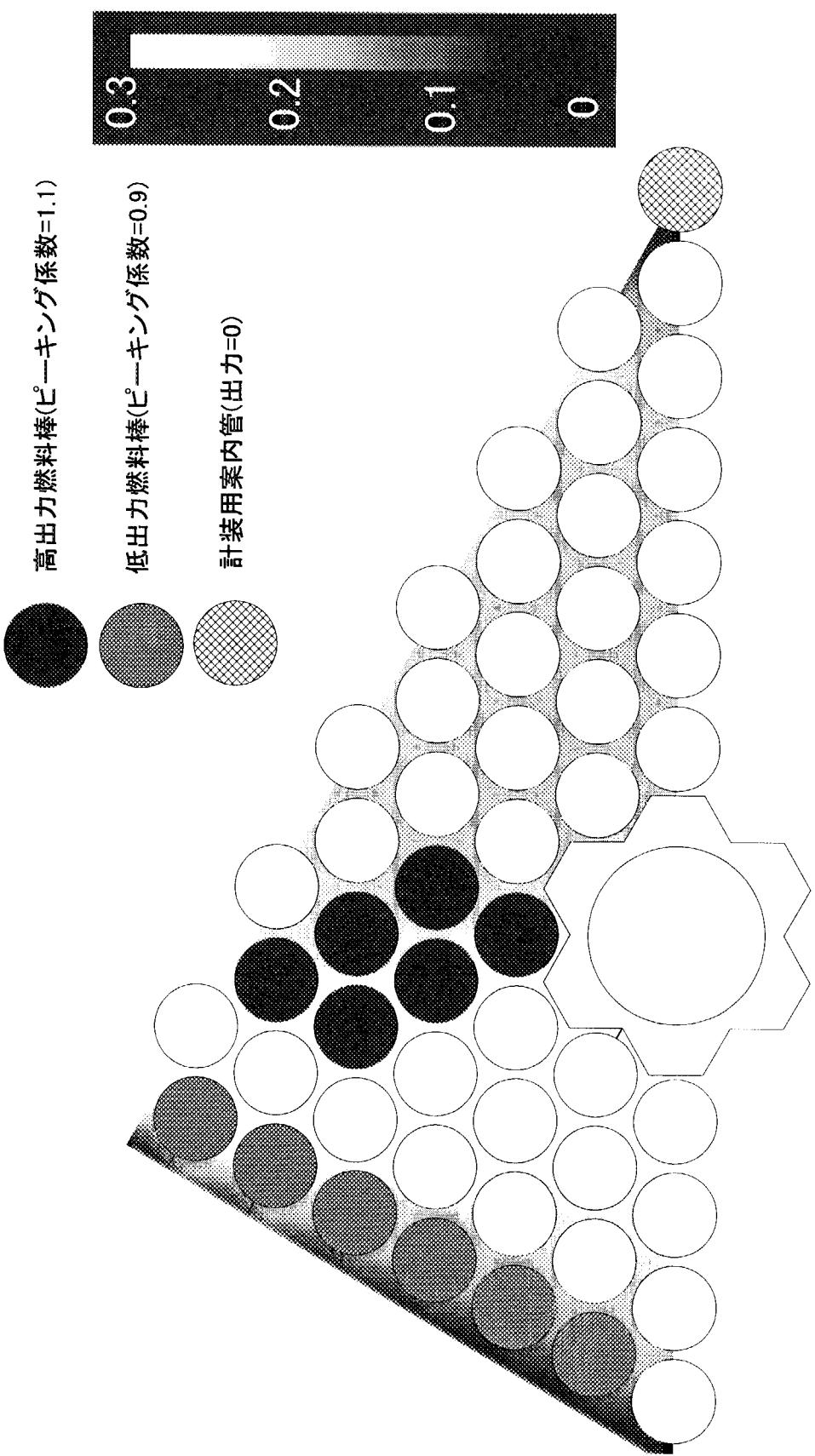


図 3.2 集合体出口でのボイド率分布の一例(ベースケース、流量配分を行わない場合)

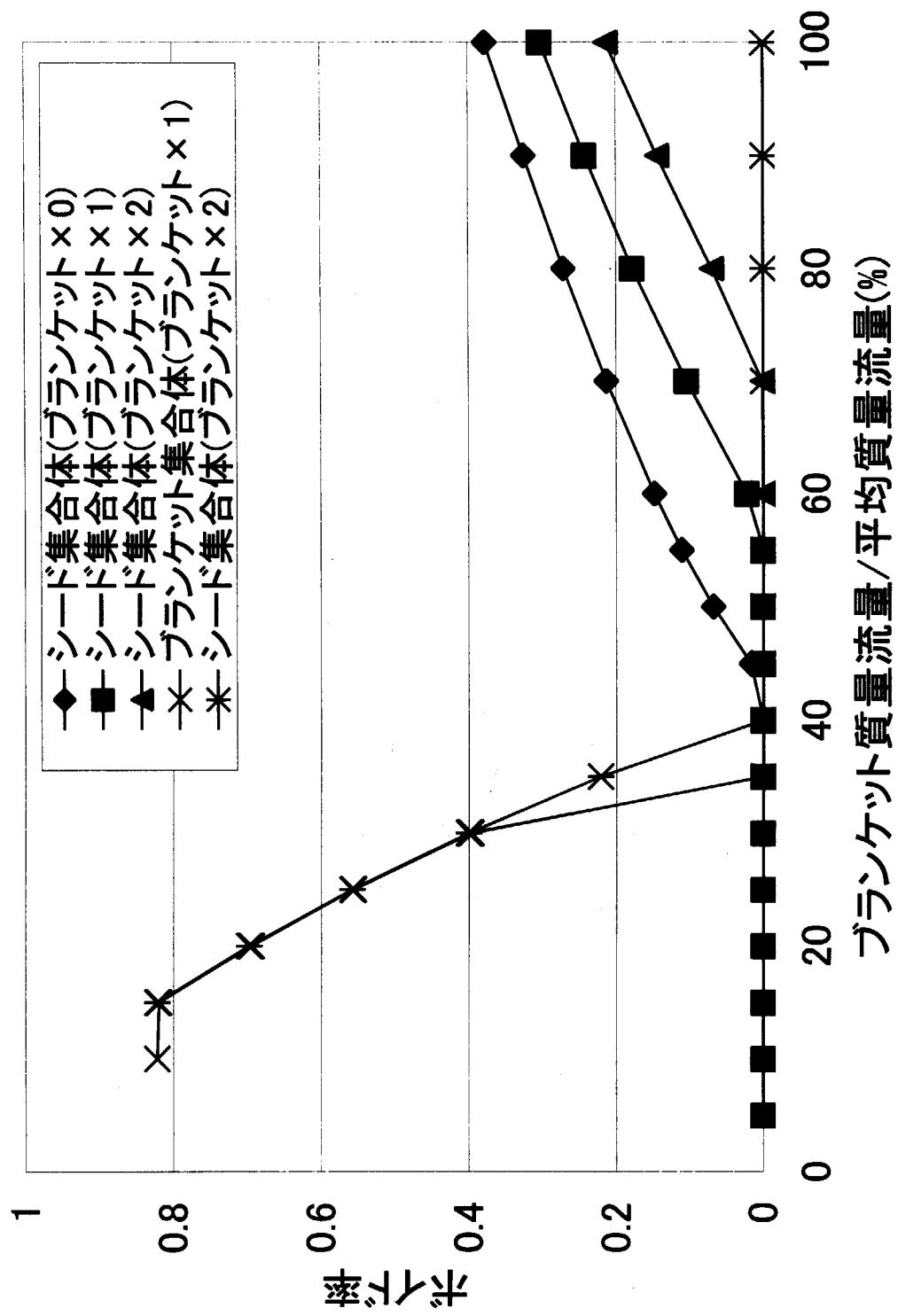


図 3.3 流量配分に対する炉心出口最大ボイド率の変化

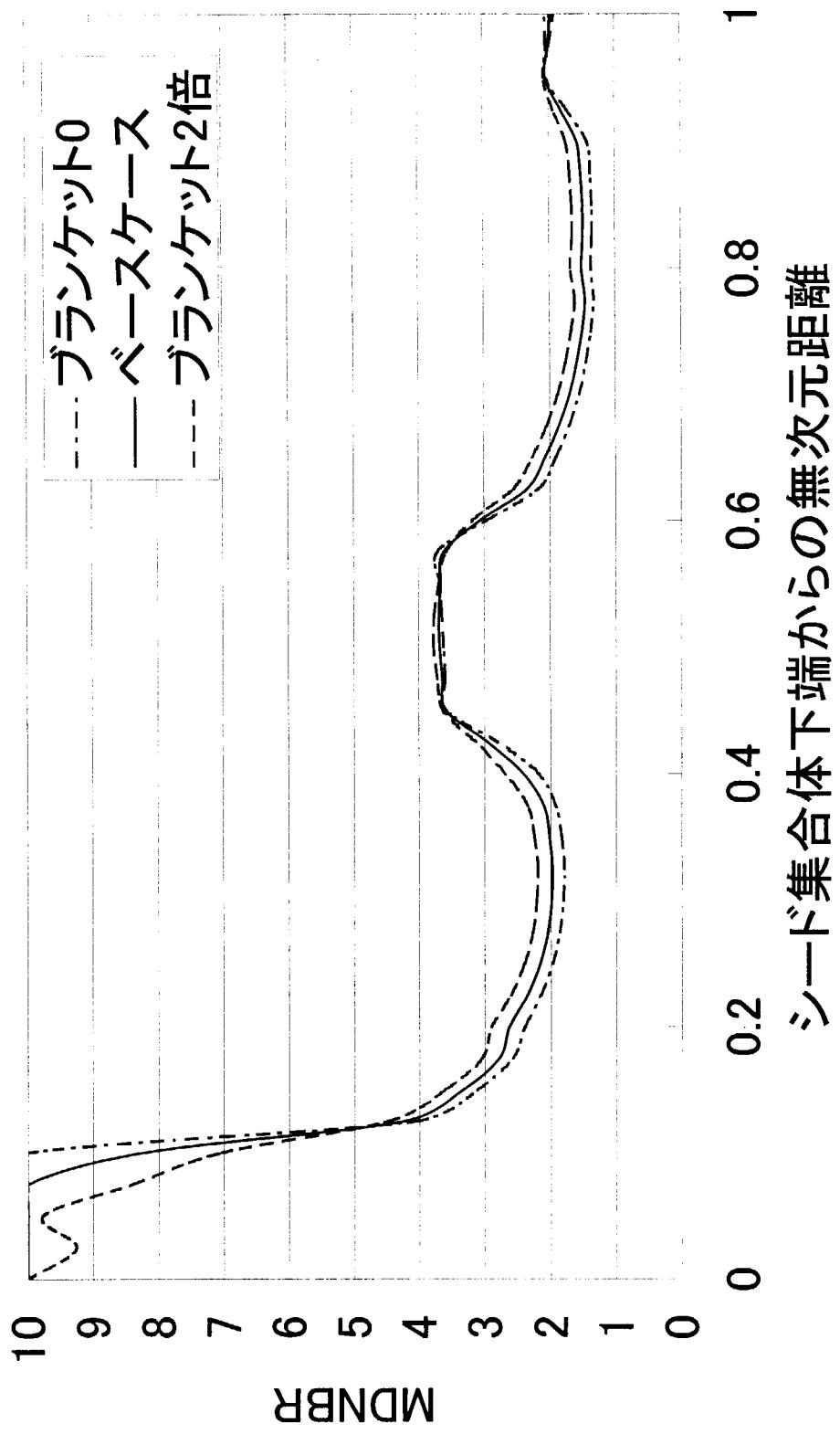
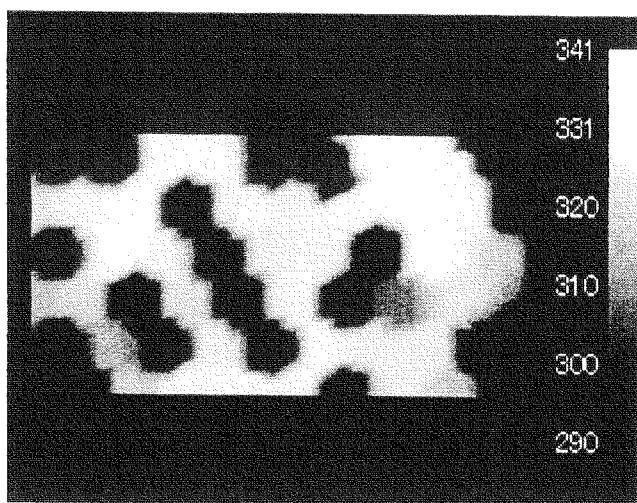
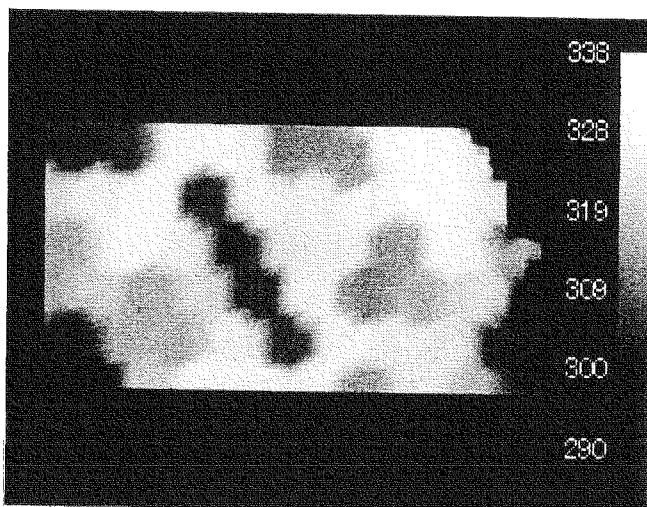


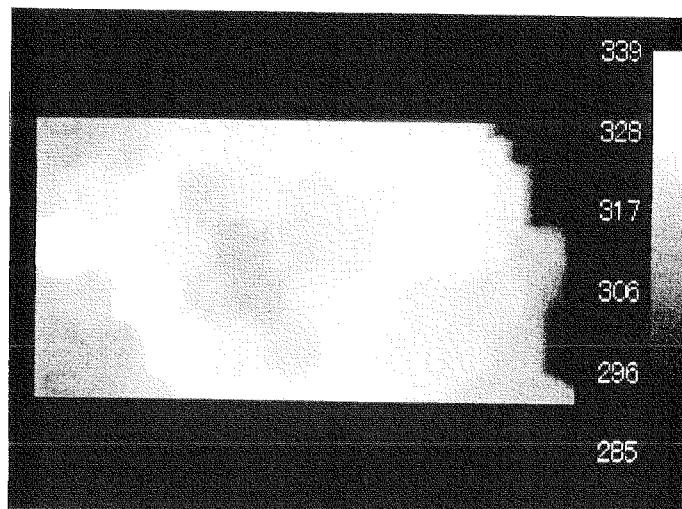
図 3.4 ブランケット下流量を 40%にした場合の DNBR



ブランケット出力 0



ブランケット出力 1 倍



ブランケット出力 2 倍

図 3.5 炉心出口温度分布(チャンネルボックスあり)

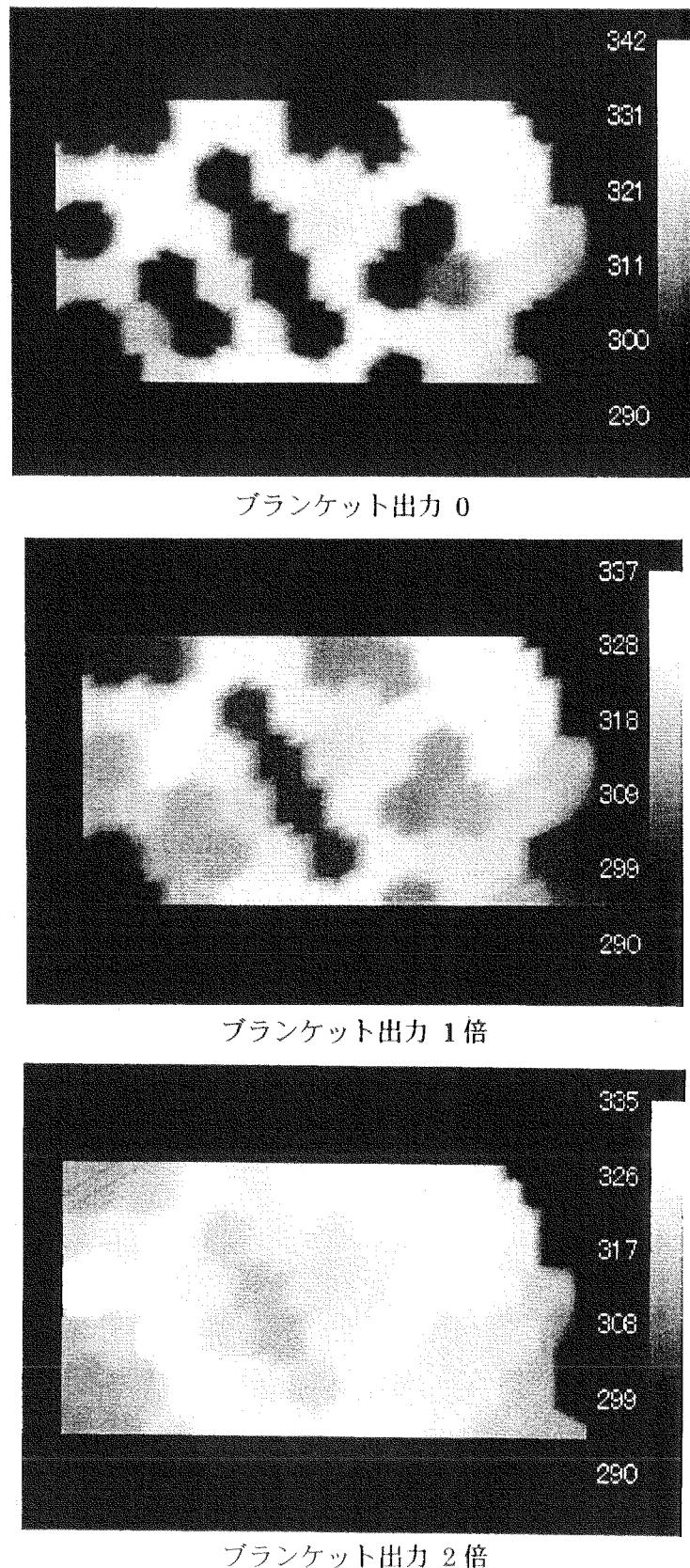


図 3.6 炉心出口温度分布(シード部チャンネルボックス無し)

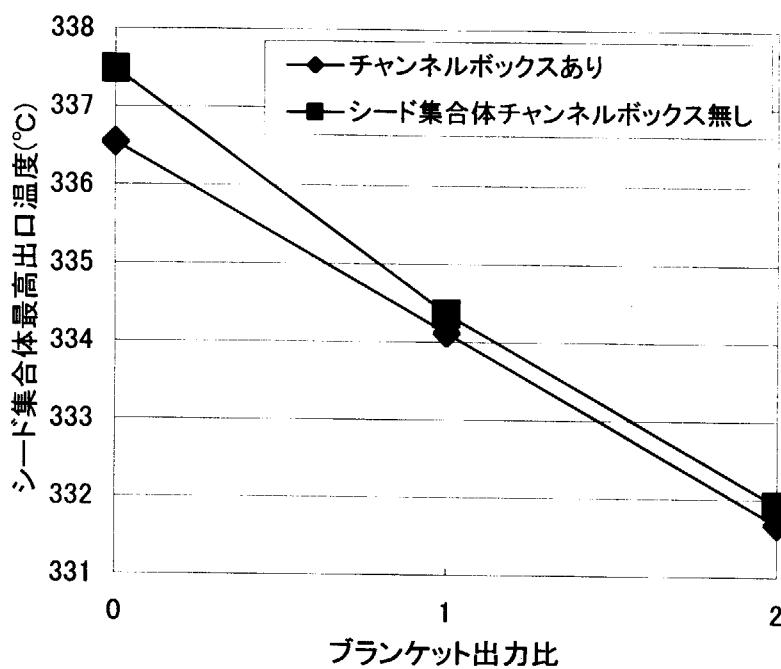


図 3.7 シード燃料集合体出口温度の最大値の変化

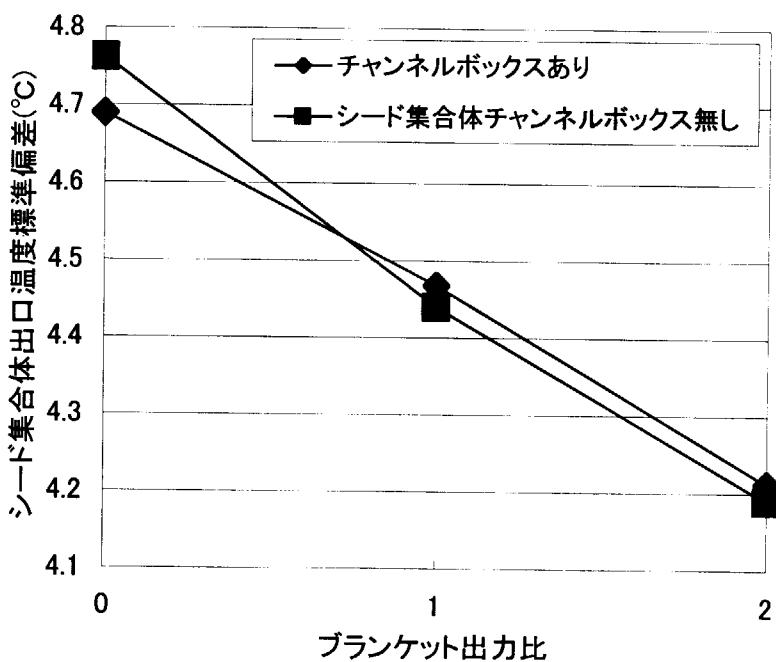


図 3.8 シード燃料集合体出口温度の標準偏差

#### 4. まとめ

PWR型低減速スペクトル炉心を対象とした定格運転時の熱水力的評価設計解析により、以下の結果を得た。

1. 炉心入口部で冷却材を均一に流入させた場合、シード燃料集合体内で沸騰が起こる。
2. 集合体にチャンネルボックスを設けた場合を想定し、炉心入口部での流量配分を決定するための集合体単体の解析を行い、プランケット燃料集合体への流量を40%に制限し、シード燃料集合体への流量を増加させることによって沸騰が起こらず熱水力的に成立することを確認した。
3. 集合体単位の評価で得た流量配分により、全炉心に対する解析を行った。
  - (1) チャンネルボックスを設けない場合には炉内で沸騰が発生する。
  - (2) 全ての燃料集合体にチャンネルボックスを設けた場合と、プランケット燃料集合体にのみチャンネルボックスを設けた場合の炉心出口温度を比較した所、最大値で1°C程度の差異を生じた。流量や出口冷却材温度の均一化という点では、全ての集合体にチャンネルボックスを設けた方が良いが、熱水力的成立性という観点からはシード燃料集合体チャンネルボックスの必要性は低いと思われる。

#### 参考文献

- 1) 中島 伸也、落合 政昭(編): "水冷却炉におけるPu利用の高度化に関する研究会報告書 平成11年3月2日、東京開催", JAERI-Conf 99-014 (1999)
- 2) 岩村 公道、他: "低減速スペクトル炉の研究", JAERI-Research 99-058 (1999)
- 3) 新谷 文将、他: "将来型軽水炉の概念検討(16)－高転換炉心の限界熱流束の検討－", 日本原子力学会「1999春の年会」, F39 (1999)
- 4) 大貫 晃、他: "A Feasibility Study on Core Cooling of Pressurized Heavy Water Moderated Reactor with Tight Lattice Core", Proc. ICONE-7, ICONE-7026 (1999)
- 5) Wheeler, C. L., et al: "COBRA-IV-I: An interim version of COBRAS for thermal-hydraulic analysis of rod bundle nuclear fuel elements and cores", BNWL-1962 (1976)
- 6) M. Dalle Donne and W. Hame, "Critical Heat Flux Correlation for Triangular Arrays of Rod Bundles with Tight Lattices, including the Spiral Spacer Effect", Nuclear Technology, 71, 111, (1985)
- 7) 伝熱流動研究室: "高転換軽水炉の熱水力工学の研究", JAERI-M 91-055 (1991)

## 付録 1 COBRA IV-I パソコン版の修正部分

## 1. COMMON 文の INCLUDE 化

元々の COBRA-IV-I はチャンネルのデータ数を指定し、それに基づいて、別プログラムにより本体のソースコードを修正するようになっていた。UNIX 版ではこの別プログラムが移植されていないため、最大のデータ数を変更することが出来ないようになっていた。この問題を修正するため、COMMON 文の中でデータ数により変更され部分を INCLUDE 文として読み込むように修正した。修正の一例を以下に示す。

```
C =====
C
C     A R E A
C
C     =COBRA4I.SI92=====
SUBROUTINE AREA (J ,JX ) IMPLICIT INTEGER*4 (I-N) INCLUDE 'COBRA_PC.INC' 修正部分
C*CD SPEC2
    COMMON IK(MYG),JK(MYG),X(MYX),ANGLE(MYG),FACTOR(MYG),LENGTH(MYG),
    1      AXIAL(MYP),Y(MYP),TMH(MYC),SURFH(MYC),WIDTH(MYW),IKW(MYW),
    2      JKW(MYW),UWCP(2,MYW),UWALL(2,MYW),RWALL(2,MYW),RHOLCP(MYW),
    3      NHTC,KIJ,AFLUX,Z,THETA,PI,NAX,I3,I2,IERROR,J1,J2,J3,J4,
    1      J7,ATOTAL,QAX,ELEV,FERROR,ITERAT,SLDX,DTGC,DXGC,DTGC,GC,
```

INCLUDE ファイル(COBRA\_PC.INC)の一例以下に示す。

```
PARAMETER(MYP= 151,MYC= 241,MYG= 251,MYS= 251,MYL= 6,
1   MYA= 251,MYX= 100,MYN= 6,MYT= 3,MYR= 100,
2   MYE= 121,MYZ= 8,MYK= 3,MYW= 3,MYY= 6,
3   MYO= 353,MYI= 10,MY1= 6000,MY2=726000,MY3= 252,
4   MY4= 503,MY5= 754,MY6= 1005,MY7= 1256,MY8= 1507,
5   MY9= 1764,MYB= 1864,MYD= 1964,MYF= 2064,MYH= 2164,
6   MYQ= 2264,MYU= 2864,NYP= 3105,NYC= 3346,NYG= 3587,
7   NYS= 3828,NYL= 4069,NYA= 4310,NYX= 4551,NYN= 4792,
8   NYT= 5033,NYR= 5274,NYE= 5515,NYZ= 5756,NYK= 6001,
9   NYW= 12001,NYY= 1758,NYO= 1761,NYI= 354,NY1= 12,
A   NY2= 91977,NY3= 2,NY4= 1000,NY5= 12000,NY6= 88854,
B   NY7= 88603,NY8= 2892)
```

この修正により、INCLUDE ファイルを修正すれば、ソースコードを修正することなしにデータ数を変えることが出来るようになった。ただし、配列のうちのいくつかは、相互に関連しているため、任意に変化させて良いものではない。そこで、与えられたデータを元に上記のような INCLUDE ファイルを生成するプログラム(SPECSET\_PC.F)を作成した。作成したソースコードを以下に示す。

```
C PROGRAM SPECSET (INPUT,OUTPUT,NEWPU,TAPE5=INPUT,TAPE6=OUTPUT,TAPE1
C +0,PUNCH=NEWPU)
C THIS PROCEDURE CONTAINS THE DIMENSION PARAMETERS FOR COBRA-IVC.
C THE PARAMETERS ARE DEFINED AS -
C MP - MAXIMUM NUMBER OF CARDS IN PROPERTY TABLE.
C MC - MAXIMUM NUMBER OF SUBCHANNELS,
C MG - MAXIMUM NUMBER OF SUBCHANNEL GAP CONNECTIONS,
C ML - MAXIMUM NUMBER OF AXIAL LOCATIONS FOR GAP AND AREA VARIATION
C MX - MAXIMUM NUMBER OF AXIAL NODES PLUS ONE.
C MN - NUMBER OF FUEL COLLOCATION POINTS PLUS THREE.
C MT - MAXIMUM NUMBER OF FUEL TYPES.
C MR - MAXIMUM NUMBER OF FUEL RODS.
C ME= MX IF NO STORAGE ON PERIPHERALS
C ME= 3 FOR STORAGE ON PERIPHERALS
C MZ - MAXIMUM NUMBER OF AXIAL LOCATIONS FOR GRID SPACERS
```

```

C      MK - MAXIMUM NUMBER OF GRID SPACER TYPES
C      MA - MAXIMUM NUMBER OF SUBCHANNELS THAT CAN HAVE AREA VARIATIONS.
C      MW = MAXIMUM NUMBER OF WALL CONECTIONS
C      MY= MAXIMUM NUMBER OF AXIAL FUEL TYPE DIVISIONS
C      MO - MAXIMUM WIDTH OF AAA ARRAY
C      MI - MAXIMUM NUMBER OF CONNECTIONS TO A CHANNEL(THERMAL+ FLOW)
C      MS - MAXIMUM NUMBER OF GAPS THAT CAN HAVE GAP SPACING VARIATIONS,
C
C      DIMENSION BUFFR(80),V(64),VAL(5,64),BUFFFW(144),IVAL(64),VALUE(10),
+     NS(64),VO(64),ISAVED(4),VLCM(3),VD(64),AMD(64),ACOT(15),ACT(6)
        CHARACTER*10 ACOP(2)
        REAL*4 VO/'P ','C ','G ','S ','L ','A ','X ',
1       'N ','T ','R ','E ','Z ','K ','W ',
2       'Y ','O ','I ','47*' '/
        REAL*4 V/17*/' ',1 ','2 ','3 ','4 ','5 ','6 ',
1       '7 ','8 ','9 ','B ','D ','F ','H ',
2       'Q ','U ','32*' '/
        DATA VALUE(1) /1H0 /
        DATA AM,AN,AY/1HM,1HN,1HY/
        DATA EQUAL/1H=/

        DATA BLANK /1H /
        DATA PLEFT,PRIGHT,COMMA,AL /1H(,1H),1H,,1HL /
          OPEN(15,FILE='SPEC.DAT')
        READ(15,410) (VLCM(I),I=1,3)
        NPC=17
        DO 100 I=1,NPC
        READ(15,420) V(I),(VAL(J,I),J=1,4)
100  CONTINUE
        DO 130 I=1,NPC
        IF (VO(I).EQ.V(I)) GO TO 130
        DO 120 J=1,NPC
        IF (VO(I).NE.V(J)) GO TO 120
        SAVE=V(I)
        V(I)=V(J)
        V(J)=SAVE
        DO 110 K=1,4
        SAVE=VAL(K,I)
        VAL(K,I)=VAL(K,J)
110  VAL(K,J)=SAVE
120  CONTINUE
130  CONTINUE
        DO 140 I=2,10
        VALUE(I)=V(I+NPC-1)
140  CONTINUE
        DO 170 I=1,NPC
        N=0
        DO 160 J=1,4
        IF (VAL(J,I).EQ.BLANK) GO TO 160
        DO 150 K=1,10
        IF (VAL(J,I).NE.VALUE(K)) GO TO 150
        L=K-1
        M=N*10.+L
        N=M
        IVAL(I)=N
        GO TO 160
150  CONTINUE
160  CONTINUE
170  CONTINUE
        NMC=13
        NMG=7
        NMR=5
        NMW=2
        IVAL(2)=MAX0(IVAL(10),IVAL(2))
C        IF (IVAL(10).GT.IVAL(2)) IVAL(2)=IVAL(10)
        ICHECK=IVAL(16)*IVAL(3)-MAX0(5,IVAL(17))*IVAL(2)-3*IVAL(14)
        IF (ICHECK.LT.0) IVAL(3)=IVAL(3)+1-ICHECK/IVAL(16)
        ISAVED(3)=IVAL(16)+1

```

```

ISAVED(4)=IVAL(17)+2
NPCP1=NPC+1
IVAL(NPCP1)=NMC*IVAL(2)+NMG*IVAL(3)+(IVAL(8)+NMR)*IVAL(10)+NMW*IVA
+L(14)
DO 180 I=1,1000
IF (FLOAT(IVAL(NPCP1))/FLOAT(IVAL(8)).LE.IVAL(NPCP1)/IVAL(8)) GO T
+O 190
180 IVAL(NPCP1)=MAX0(IVAL(NPCP1)+1,2*IVAL(1)+38)
190 CONTINUE
NPCP2=NPC+2
IVAL(NPCP2)=IVAL(NPCP1)*IVAL(11)
IVAL(NPC+3)=IVAL(3)+1
IS=NPC+4
IE=IS+NMG-3
C
DO 200 J=IS,IE
200 IVAL(J)=IVAL(J-1)+IVAL(3)
IS=IE+1
ISAVED(1)=IVAL(IE)+IVAL(3)
ISAVED(2)=ISAVED(1)+IVAL(14)
IVAL(IS)=ISAVED(2)+IVAL(14)
IE=IE+1
IS=IE+1
IE=IE+NMR
DO 210 J=IS,IE
210 IVAL(J)=IVAL(J-1)+IVAL(10)
IS=IE+1
IVAL(IS)=IVAL(IE)+IVAL(10)*IVAL(8)
IS=IS+1
IE=IS+NMC-2
DO 220 J=IS,IE
220 IVAL(J)=IVAL(J-1)+IVAL(2)
IS=IE+1
IVAL(IS)=IVAL(NPCP1)+1
IE=IS+1
IVAL(IE)=IVAL(IS)+IVAL(NPCP1)
DO 230 I=1,4
IE=IE+1
230 IVAL(IE)=ISAVED(I)
IS=IE+1
IVAL(IS)=14*IVAL(2)+IVAL(3)*IVAL(16)
IS=IS+1
IVAL(IS)=IVAL(2)/IVAL(16)+2
IS=IS+1
IVAL(IS)=IVAL(NPCP1)/IVAL(8)
IS=IS+1
IVAL(IS)=2*IVAL(NPCP1)
IS=IS+1
IVAL(IS)=ISAVED(3)*IVAL(3)
IS=IS+1
IVAL(IS)=IVAL(16)*IVAL(3)
IS=IS+1
IVAL(IS)=ISAVED(4)*IVAL(2)
NIVAL=IS
C -- ESTIMATION IS FINISHED --
C
C -- OUTPUT SECTION --
IP=0
ICO=17
ICB=15
DO 300 I=1,ICO
AMD(I)=AM
VD(I)=VO(I)
300 CONTINUE
DO 310 I=1,ICB
AMD(I+ICO)=AM
VD(I+ICO)=V(I+ICO)
310 CONTINUE

```

```

DO 320 I=1,ICO
  AMD(I+ICO+ICB)=AN
  VD(I+ICO+ICB)=VO (I)
320 CONTINUE
  DO 330 I=1,MIN0(NIVAL-(ICO*2+ICB),ICB)
    AMD(I+ICO*2+ICB)=AN
    VD(I+ICO*2+ICB)=V (I+ICO)
330 CONTINUE
C
  ACOP(1)='PARAMETER'
  ACOP(2)=' '
  ACC=' '
  ACB=' '
  ACRP=' )'
  II=0
  ACOT(1)=ACB
  DO 345 I=1,9
    ACOT(I+1)=V(I+ICO)
345 CONTINUE
  ACOT(11)='A'
  ACOT(12)='B'
  ACOT(13)='C'
  ACOT(14)='D'
  ACOT(15)='E'
C
  DO 347 I=1,6
    ACT(I)=ACC
347 CONTINUE
C
  OPEN(25,FILE='COBRA_PC.INC')
  ICF=5
  DO 350 I=1,NIVAL,ICF
    II=II+1
    IE=MIN0(ICF-1,NIVAL-(II-1)*ICF-1)+I
    ICOP=MIN0(II,2)
    IF(NIVAL-(II-1)*ICF-1.LE.ICF-1) ACT(IE-I+1)=ACRP
    WRITE(25,430) ACOT(II),ACOP(ICOP),(AMD(J),AY,VD(J),IVAL(J))
    & ,ACT(J-I+1),J=I,IE)
350 CONTINUE
C
  STOP
410 FORMAT (3A1)
420 FORMAT (1X,1A1,1X,4A1)
430 FORMAT (5X,A1,A10,6(3A1,'=',I6,A1))
END

```

このプログラムは下記のようなデータファイル(SPEC.DAT)を読み込み、INCLUDE ファイルを生成するものである。

```

test      JALLOUK'S SPECSET INPUT DATA CASE 0  (WHEELER)
MC=241
MG=251
MX=100
MN=6
MR=100
ME=121
MP=151
ML=6
MZ=8
MW=3
MY=6
MI=10
MO=353
MK=3

```

```
MA=251
MT=3
MS=251
```

ファイルの一行目はコメント行である。2行目以降のパラメータについてはCOBRA IV-Iのマニュアルを参考のこと。実際に実行ファイルを作製する手順は以下のようになる。

- (1) SPEC.DAT を修正。
- (2) SPECSET\_PC を実行し、COBRA\_PC.INC を作成
- (3) COBRA IV-I のソースをコンパイル

## 2. 日時取得部分の修正

プログラム内には、いくつか日時を取得する部分があった。用いている外部サブルーチンに、2000 年問題に対応していない部分があったため修正を行った。

```
C =====
C
C P U T D A T
C
C =COBRA4I.SI92=====

C
C---- SET DATA AND TIME.
cc* update.d for conversion to ap3000 cal 98/04/01
c   CALL DATE(DATECH)
c   CALL TIME(TIMEPA)
c   READ(DATECH,'(I2,1X,I2,1X,I2)') YEAR,MONTH,DAY
c   DATEPA = YEAR * 10000 + MONTH * 100 + DAY
c   integer mdy(3)
c   call idate(mdy)
c   datepa = mdy(3) *10000 + mdy(2)*100 +mdy(1)
cc* update.u for conversion to ap3000 cal 98/04/01
cc* update.d for visual fortran
    integer mdy(8)
    CALL DATE_AND_TIME(values=mdy)
    datepa = mdy(1)*10000+mdy(2)*100+mdy(3)
cc* update.d for visual fortran
```

修正部分

## 3. 入口流量条件の追加

入口流量条件を追加するため、サブルーチン CARD11 に以下の部分を追加した。

```
      if(ig.eq.2) then
        DO 155 I=1,NCHANL
 00155 FINLET(I)=GIN*ATOTAL*FINLET(I)/0.0036
      endif
      if(ig.eq.3) then
        DO 156 I=1,NCHANL
 00156 FINLET(I)=GIN*AN(I) *FINLET(I)/0.0036
      endif
```

追加部分

該当する部分の入力ファイルの一例を以下に示す。

カードグループ 11 の N2 に条件 3 を追加					
11	1	3	0	0	0
2233.1	554.0	2.6461	0.09123		
0.4000.4001.2801.2801.2800.4001.2801.2801.2800.4000.400					
0.4001.2801.2801.2801.2800.4001.2801.2801.2800.400					
1.2800.4000.4001.2801.2800.4001.2801.2801.2801.280					
1.2801.2801.2801.2801.2801.2801.2801.2801.2801.280					

N2=3 の場合の Optional Input。例えばチャンネル 1 には平均の 40% の流量が、チャンネル 3 には 1.28 倍の流量が与えられる。これにより、正確かつ簡単に流量の調節が可能となり、また入力ミスの可能性も小さくなる。

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	$s^{-1}$
圧力、応力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	$N/m^2$
上率、放熱束	ジュール	J	N·m
電気量、電荷	ワット	W	J/s
電位、電圧、起電力	クーロン	C	A·s
静電容量	ボルト	V	W/A
電気抵抗	フアラード	F	C/V
コンダクタンス	オーム	$\Omega$	V/A
磁束	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
インダクタンス	テスラ	T	$Wb/m^2$
セルシウス温度	ヘンリー	H	$Wb/A$
光束照度	セルシウス度	$^{\circ}C$	
放射能	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
吸収線量	ルクス	lx	$lm/m^2$
線量当量	ベクレル	Bq	$s^{-1}$
	グレイ	Gy	J/kg
	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	$\mu$
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	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、1eVおよび1u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。
- 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  $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$

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

圧	MPa( $=10$ bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	$7.50062 \times 10^3$	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$
	$6.89476 \times 10^{-3}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	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 cal = 4.18605 J(計量法)	
								1	= 4.184 J(熱化学)
	1	0.101972	2.77778 $\times 10^{-7}$	0.238889	9.47813 $\times 10^{-4}$	0.737562	6.24150 $\times 10^{-18}$		= 4.184 J(熱化学)
9.80665		1	2.72407 $\times 10^{-6}$	2.34270	9.29487 $\times 10^{-3}$	7.23301	6.12082 $\times 10^{-19}$		= 4.1855 J(15 °C)
$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{25}$			= 4.1868 J(国際蒸気表)
4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	3.96759 $\times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{-19}$			仕事率 1 PS(仏馬力)
1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$			= 75 kgf·m/s
1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{18}$			= 735.499 W
$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1			

放射能	Bq	Ci
	1	$2.70270 \times 10^{-11}$
	$3.7 \times 10^{10}$	1

吸 收 線 量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照 射 線 量	C/kg	R
	1	3876
	$2.58 \times 10^{-4}$	1

線 量 當 量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

