

# 燃料自給型ハイブリット 高速炉の成立性評価

1998年7月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki-gun, Ibaraki-ken 311-1393 Japan.

©動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

## 燃料自給型ハイブリッド高速炉 の成立性評価

実施責任者 谷 賢\*  
小綿泰樹\* 大坪 章\*

### 要 旨

陽子加速器駆動により未臨界高速炉を燃料自給型ハイブリッド高速炉として利用する場合の炉物理的成立性を検討するために、ターゲット部で発生する中性子の炉心内増倍効果および長期サイクル運転を達成できる炉心パラメータを求める解析を行った。

炉心内にターゲット領域を設けた炉心で、DORTコードによる輸送計算を簡略的手法と現実的手法の2つで行い、両者の中性子束分布および未臨界増倍率を比較して前者の妥当性を評価した。前者はターゲット部を非増倍領域とした固有値計算、後者はそれを局所中性子源とした未臨界増倍計算である。簡略的な固有値計算では、高速中性子束分布はターゲット部に近い炉心領域ほど未臨界増倍計算のそれに比べて過小評価するが、未臨界増倍率は過大評価する。

ターゲット領域を設けたハイブリッド高速炉の炉心拡散・燃焼計算を2DBURNコードで行った。前年度実施した予備解析の炉心条件に比べて炉心体積を約3倍増加させるとともに、加速器駆動のための実効増倍率変化範囲を $0.90 \pm 0.05$ に拡大した。初装荷燃料として10wt%濃縮ウランと一部にダミー燃料を併用し、取り替え燃料には天然ウランを使用すれば、約40年にわたる燃焼サイクルの達成が可能である。

---

\* 大洗工学センター 基盤技術開発部 先進技術開発室

# Estimation on Availability of Accelerator-Driven Fast Reactor System

Ken Tani\*

Yasuki Kowata\* Akira Otsubo\*

## Abstract

*Availability of proton beam accelerator-driven subcritical fast reactor (ADSFR) system as a fuel-self-supporting type power reactor, has been estimated by a core neutronic analyses. Multiplication effect of neutrons generated in a target of the subcritical system is investigated by transport calculation. The effect of core parameters are examined by diffusion and burnup calculation with respect to possibility of a long term reactor operation.*

*In a core which surrounds the target region, neutron transport calculations are made using DORT code based on both simple and realistic methods in order to appreciate propriety of the former method by comparing the results calculated by the two methods on a neutron flux distribution and a subcritical multiplication factor. The former method is called general eigen value calculation (EVC) treating the target region as a non-multiplying region, and the later is more practical subcritical multiplication calculation(SMC) treating it as a local neutron source. The simple EVC underestimates the fast neutron flux as part of the core closer to the target region, but overestimates the subcritical multiplication factor of whole core.*

*The diffusion and burnup calculations are made using 2DBURN code over many cycles in ADSFR core with the target region. The core volume in this calculation is increased by about three times compared with that in the previous preliminary analyses. The variation range of effective multiplication factor( $k_{eff}$ ) with burnup is enlarged to  $k_{eff}=0.90 \pm 0.05$  necessary to driving an accelerator. It is possible to achieve a long term reactor operation over about 40 years, if 10wt% enriched uranium and partially dummy assemblies without fuel meat are used for an initial core and natural uranium for an exchange core.*

---

\* Frontier Technology Development Section, Advanced Technology Division, OEC.

# 燃料自給型ハイブリッド高速炉 の成立性評価

## 目 次

1. 緒言	1
2. ターゲット設置による炉心特性への影響	2
2.1 未臨界増倍体系の中性子束分布	2
2.2 ビーム入射孔からの中性子漏洩	6
2.3 ターゲット内の核反応計算手法	8
3. 燃料自給型炉の炉心概念の検討	10
3.1 概要	10
3.2 炉心の設定	10
3.3 燃料自給型炉心成立要件の選定	11
3.4 燃料交換計画の導入	11
3.5 燃料自給型炉心燃焼特性のまとめ	13
4. 結言	15
謝辞	16
参考文献	17
付録-1 ターゲット設置炉心の中性子束分布計算結果	53
付録-2 LAHETコードの概要	66

## 表リスト

表2.1	炉心各部の組成と体積割合	18
表2.2	ターゲット半径とウラン濃縮度をパラメータとした実効増倍率の計算結果	19
表2.3	ターゲット高さとうラン濃縮度をパラメータとした実効増倍率の計算結果	20
表2.4	全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ケース1：標準ケース)	21
表2.5	全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ケース2：ターゲット高さ：100cm)	23
表2.6	全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ケース3：炉心密度+20%)	25
表2.7	全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ケース4：炉心密度-20%)	27
表2.8	ターゲット寸法をパラメータとした場合の未臨界増倍率と 全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較	29
表2.9	全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ターゲット半径：40 cm)	30
表2.10	全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ターゲット半径：10 cm)	32
表2.11	ビームポート上部における中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較	34
表3.1	長期サイクル炉心各部の組成	35
表3.2	初期炉心の燃焼特性	36
表3.3	長期サイクル達成のための燃焼計算条件	37
表3.4	長期サイクル炉心燃焼特性の計算結果	38

## 図リスト

本文

図2.1	ターゲット設置炉心の2次元RZ計算体系	39
図2.2	ターゲット半径をパラメータとしたウラン濃縮度と実効増倍率の関係	40
図2.3	ターゲット半径と実効増倍率の関係	41
図2.4	全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ケース1：標準ケース)	42
図2.5	全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ケース2：ターゲット高さ100cm)	43
図2.6	全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ケース3：炉心密度+20%)	44
図2.7	全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ケース4：炉心密度-20%)	45
図2.8	中性子増倍率に対する収束状況	46
図2.9	全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ターゲット半径40cm)	47
図2.10	全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ターゲット半径10cm)	48
図3.1	ウラン濃縮度をパラメータとした初期炉心の燃焼反応度特性	49
図3.2	10バッチ燃料交換による燃焼履歴(1)、(2)	50
図3.3	燃料自給条件を導入した長期燃焼履歴	51

付録

図A.1	固有値計算における径方向高速中性子束分布	54
図A.2	固有値計算における径方向熱中性子束分布	55
図A.3	固有値計算における径方向全中性子束分布	56
図A.4	未臨界増倍計算における径方向高速中性子束分布	57
図A.5	未臨界増倍計算における径方向熱中性子束分布	58
図A.6	未臨界増倍計算における径方向全中性子束分布	59
図A.7	固有値計算における軸方向炉心断面の高速中性子束等高線	60
図A.8	固有値計算における軸方向炉心断面の熱中性子束等高線	61
図A.9	固有値計算における軸方向炉心断面の全中性子束等高線	62
図A.10	未臨界増倍計算における軸方向炉心断面の高速中性子束等高線	63
図A.11	未臨界増倍計算における軸方向炉心断面の熱中性子束等高線	64
図A.12	未臨界増倍計算における軸方向炉心断面の全中性子束等高線	65
図A.13	LAHET コードシステムの構成	66
図A.14	ターゲット側面の中性子漏洩スペクトル	67
図A.15	ターゲット内径方向発熱分布	68



## 1. 緒言

陽子加速器と未臨界高速炉を組み合わせた加速器駆動高速炉（ハイブリッド高速炉）について、エネルギー生産炉（動力炉）に限定した場合の炉心燃焼特性を平成8年(1996年)度実施した予備解析<sup>(1)</sup>で概略的に検討した。その際の解析条件として、ターゲット領域の存在を無視し、ターゲット部で発生する中性子の散乱、吸収等の挙動を考慮しない簡略化した中性子増倍計算を採用した。予備解析の結果、初装荷燃料の核分裂性物質濃度を約10wt%にすれば、ハイブリッド高速炉は増殖が長期にわたって期待でき、燃料自給によって約10年間の長期運転が可能であることが示された。

本年度は、昨年度検討した長期燃料自給が可能とされたハイブリッド高速炉（以下、燃料自給型ハイブリッド炉と呼ぶ）について、現実的に考えられる形状のターゲット領域を炉心内に設置し、核破砕反応で発生した中性子の増倍を考慮したより現実的体系で輸送計算を行って、予備解析の計算手法の妥当性を検討した。また、実際にターゲット領域を設置した炉心で拡散および燃焼計算を行い、初期炉心のみならず、継続サイクルも考慮した約40年の長期運転が可能となる炉物理的成立性を検討した。なお、本解析ではハイブリッド高速炉に使用する燃料は、核拡散防止と燃料コスト抑制の観点重視してウランのみとした。

## 2. ターゲット設置による炉心特性への影響

### 2.1 未臨界増倍体系の中性子束分布

予備解析ではターゲット領域の存在そのものを無視して検討した。すなわち、その解析ではターゲット領域がない未臨界体系を考え、本来陽子ビームとターゲットであるW原子核との核破砕反応によって発生する中性子を考慮していない。このため炉心内中性子束分布は必然的に外部中性子源となるべきターゲット領域のない未臨界炉心体系において固有値計算を行い（中性子束分布は臨界時のものと同じ）、炉心特性を評価したことを意味する。しかし、核破砕反応による中性子は本来炉心中央部のターゲット部で発生するもので、独自のエネルギースペクトルと飛行指向性をもった局所中性子源とみなされる。

以上のことから、本解析では炉心中心部にターゲット領域を設けた円筒炉心（ターゲット設置炉心）において、ターゲット部を局所中性子源とした現実的な未臨界増倍計算および中性子源とみなさない通常の固有値計算からそれぞれ求められる中性子束分布を比較する。この比較によって、予備解析で採用した解析手法の妥当性および炉心特性に与える影響を評価しておく必要がある。

#### 2.1.1 計算条件

基本的な炉心体系および計算条件は以下のとおりである。パラメータとして最も現実的と考えられるターゲット半径20cmの計算体系を図2.1に示す。

##### ①使用計算コード

2次元拡散・燃焼計算コード：2DBURN<sup>(2)</sup>

2次元中性子輸送計算コード（Sn法）：DORT<sup>(3)</sup>

##### ②使用核定数ライブラリ

2DBURNコードによる解析には、平成9年度に実施した予備解析と同様、核データにはJENDL3.2<sup>(4)</sup>から作成した70群定数（JFS-3-J3.2）を7群に縮約して使用する。

DORTコードによる解析には、JENDL3から作成された高次非等方散乱も考慮できる中性子エ

エネルギー100群のJSSTD<sup>6)</sup>を縮約せず100群で使用する。

### ③燃料組成

初装荷燃料および取り替え燃料にはそれぞれ濃縮ウラン、天然ウランを用いる。なお、燃料組成は予備解析と同様の窒化物とする。計算に使用した炉心各領域の組成を表2.1に示す。

#### 2.1.2 計算手法

ターゲット設置炉心においてSn法輸送計算コードDORTを使用し、以下の2つの方法でエネルギー100群、中性子束角度成分：S8、散乱断面積角度成分：P3の各近似でRZ形状の炉心計算を行う。

##### (1) 未臨界増倍計算

高速中性子を放出するターゲット部を局所中性子源 $n$  ( $\text{sec}^{-1}$ )として増倍系(炉心部)をもつ未臨界体系で中性子増倍計算(未臨界増倍計算)を行い、炉心全体での中性子発生数 $N$  ( $\text{sec}^{-1}$ )を求める。炉心全体の未臨界増倍率 $\alpha$ は $(N/n)$ から求まる。

陽子とWターゲットとの核破砕反応で発生する中性子については、そのエネルギースペクトル $\chi(E)$ 、空間分布、角度分布等はまだまだよく解明されていない。このため、ここでは局所中性子源を次の計算条件で模擬した。

エネルギースペクトル：Watt型の<sup>235</sup>U核分裂スペクトル

$$\chi(E) = 0.44 \exp(-E/0.988) \cdot \sinh(2.249E)$$

空間分布：ターゲット部で一様に発生( $1 \text{ヶ} \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ )

角度分布：等方

##### (2) 固有値計算

ターゲット部を中性子源とせず単なる炉心構造材の非増倍部とし、炉心部を増倍系とする未臨界体系で実効増倍率 $k_{\text{eff}}$ を求める。実効増倍率 $k_{\text{eff}}$ の体系に $n$ ヶの高速中性子を投入させた場合、体系内でこの $n$ ヶの中性子がすべて吸収されると $nk_{\text{eff}}/(1-k_{\text{eff}})$ ヶの中性子が発生する。従って、固有値計算では $\alpha$ は $k_{\text{eff}}/(1-k_{\text{eff}})$ として求められる。

(1)および(2)の各手法で得られた炉心径方向中性子束分布を比較し、両者の相違を評価する。また、同一体系で炉心部の燃料組成を変化させることにより未臨界度を変化させた場合の影響

を検討する。

まず、拡散計算によるパラメータサーベイで長期運転可能となるウラン濃縮度を選定する。固有値計算および未臨界増倍計算とで得られた各中性子束分布にどの程度の差が生ずるかを確認することが目的である。そのため、ここではターゲット設置炉心の炉心半径およびターゲット半径をそれぞれ基準ケースとして以下の①のように設定した後、炉心半径は②のようにターゲット半径に応じて変化させる。

①基準ケース：炉心高さ(=炉心半径)=100cm、ターゲット半径=20cm

②ターゲット半径と炉心半径の関係：炉心高さは100cmに固定したまま、炉心半径はターゲット半径に対応して炉心体積を保存するように調整する。

以下の計算ケースに示すように、標準ケース（ケース1）に加え、ターゲット高さを100cmに拡大した場合（ケース2）、および炉心各領域の密度を±20%変化させた場合（ケース3、4）それぞれの未臨界炉心でDORTコードにより固有値計算および未臨界増倍計算を行い、未臨界中性子増倍率および中性子束分布を求めてそれぞれ比較した。

ケース	ターゲット (cm)		炉心密度	$k_{\text{eff}}$	$\alpha$
	高さ	半径			
1	40	20	標準	~0.92	~12.4
2	100	20	標準	~0.92	~12.1
3	40	20	+20%	~0.96	~24.9
4	40	20	-20%	~0.87	~ 6.9

### 2.1.3 計算結果

#### (1) ウラン濃縮度

陽子加速器の駆動能力を考慮して、初期炉心の実効増倍率 $k_{\text{eff}}$ が $0.92 \leq k_{\text{eff}} \leq 0.95$ となるように燃料のウラン濃縮度を設定する。

パラメータとしてウラン濃縮度(10~14wt%)とターゲット半径(0~40cm)を変化させた場合の拡散計算結果を表2.2に示す。ターゲット半径をパラメータとしたときのウラン濃縮度と実効

増倍率の関係を図2.2に示す。このうちターゲット半径をより細かく変化させて計算した12%濃縮ウラン燃料の場合について、ターゲット半径と実効増倍率の関係を図2.3に示す。

ハイブリッド高速炉の幾何学的形状から現実的大きさのターゲット半径は20cm程度と考えられる。この場合、図2.2からウラン濃縮度が11.2~12.0wt%の場合に、 $0.92 \leq k_{\text{eff}} \leq 0.95$ となる。

## (2) ターゲット高さ

高さ100cmの炉心では、現実的なターゲット高さは40cm程度になると考えられる。ここでは、ターゲット高さ/半径を40cm/20cm、燃料のウラン濃縮度を12.0wt%とする炉心を標準ケースとした。ターゲット高さの実効増倍率への影響については、ターゲット高さが炉心高さと同じ(100cm)で存在するものとみなして $k_{\text{eff}}$ を計算し、標準ケースの $k_{\text{eff}}$ と比較することで評価した。

表2.3に示す結果から、ターゲット高さを40cmから100cmに増大させてもその実効増倍率への影響は十分小さく無視できることが分かる。

## (3) 中性子束分布

標準ケースにおいて未臨界増倍計算および固有値計算の二方法で得られた炉心内中性子束分布を熱群 ( $\leq 0.4\text{eV}$ ) と高速群 ( $\geq 100\text{keV}$ ) に分割するとともに全エネルギー群それぞれの径方向分布、および軸方向断面でみた中性子束等高線分布を付録の図A.1~A.12に示す。二つの計算手法で求めた全中性子束をそれぞれ規格化して表2.4~表2.7に示すとともに、全中性子束について固有値計算に対する未臨界増倍計算の比を炉心中心からの位置毎に求めて図2.4~図2.7に示す。

未臨界増倍計算で求めた径方向中性子束分布の特徴を、固有値計算で求めたものと比較すると以下のような結果である。

- ①高速中性子束はターゲット部および炉心中央部ほど高く、炉心周辺部と反射体部で低い。
- ②熱中性子束は、概ね同様な分布を示しているが、高速中性子束と同様炉心周辺部ほど低い。
- ③全中性子束は、絶対値の大きい高速中性子束の分布と同様になっている。

以上のことから、未臨界増倍計算の全中性子束は、炉心中央部ほど高く(最大2.9倍)、炉心周辺部ほど低い(最小0.7倍)という結果が得られた。この結果から固有値計算では炉心中央部ほど中性子束を過小評価する。すなわち、炉心中央部ほど炉心周辺部に比べて出力および燃焼度を

過小評価する傾向である。最終的には、出力分布と燃焼度分布とで比較して評価すべきと考えられる。

#### (4) 未臨界増倍率

各ケースで得られた実効増倍率、未臨界増倍率および中性子束を計算手法毎に比較して表2.8に示す。 $\alpha$ の値について固有値計算に対する未臨界増倍計算の比をとり各ケースで比較すると、いずれのケースでも1.0未満となった。この結果から、固有値計算による $\alpha$ の値は過大評価する傾向である。なお、未臨界増倍計算における各ケースの $\alpha$ の収束状況を図2.8に示す。

### 2.2 ビーム入射孔からの中性子漏洩

ハイブリッド高速炉の体系的特徴の一つとして、ターゲット部で発生した中性子のエネルギーが極めて高い（核分裂スペクトルよりかなり硬い）ので、この核破砕反応中性子がビーム入射孔から炉心内ビーム導入軸に沿って漏洩し易いことがある。この中性子漏洩はハイブリッド高速炉の炉心性能を低下させる要因となる。このため、主にターゲット領域の大きさに依存する中性子漏洩の炉心特性への影響を評価することはハイブリッド高速炉の成立性評価に重要である。

#### 2.2.1 計算手法

ターゲット半径をパラメータとしてDORTコードにより固有値計算および未臨界増倍計算を行い、ターゲット半径の変化に伴う中性子束および中性子束分布の変化を比較した。

計算体系の軸方向断面を図2.1に示す。ここでは、ターゲット半径の変化に伴い炉心部の体積も変化することにより炉心部からの中性子漏洩や炉出力が大きな影響を受けないようにした。すなわち、炉心高さを1mに固定し、炉心体積がターゲット半径の変化に応じて保存するように炉心半径を調整した。パラメータとするターゲット半径は10cm,20cmおよび40cmの3ケースとし、その他のパラメータは1節と同様である。なお、ターゲット高さは各ケースとも40cmとした。

また、表2.2の計算結果をもとにして、発生出力も保存させるため各体系の未臨界度も $0.92 \leq k_{eff} \leq 0.95$ となるように燃料のウラン濃縮度を調整した。この結果、ターゲット半径の変化に対す

る炉心半径および燃料のウラン濃縮度との関係を以下に示す。

ターゲット半径(cm)	炉心半径(cm)	ウラン濃縮度(wt%)
0	100.0	10.5
10	100.5	11.0
20	102.0	11.5
40	107.7	12.5

### 2.2.2 計算結果

#### (1) 中性子束分布

ターゲット半径を40cmおよび10cmに設定したケースについて炉心径方向各位置での全中性子束および両計算手法によるそれらの比を求め、その結果を表2.9と表2.10および図2.9と図2.10に示す。

各位置での全中性子束の比の径方向分布は1節に示した結果と同様な形状で炉心中央部ほど大きい。炉心中央部でのその比の傾向はターゲット半径が大きいほど増大する。しかし、ターゲット領域に隣接した炉心部では、その比はターゲット半径が小さいほど大きいことから、出力に対する固有値計算の過小評価の程度はより著しくなる。

#### (2) ビームポートからの中性子漏洩量

ターゲット半径を変化させた各ケースについて固有値計算および未臨界増倍計算を行って炉心各部の中性子束を求めた。着目するターゲット部上方のビームポート入射部（図2.1のA点）における高速中性子束と全中性子束、および両計算手法による各中性子束の比を求めて表2.11に示す。

この結果、高速中性子については固有値計算に比べ未臨界増倍計算では約2倍漏洩が大きいことが分かった。

## 2.3 ターゲット内の核反応計算手法

### 2.3.1 コード開発の現状

ハイブリッド高速炉は陽子加速器で発生させた高速中性子を未臨界体系で増倍させて出力を得る。このためハイブリッド高速炉の正確な炉心特性や燃焼特性を評価するには、まずターゲット部での核反応過程を追跡・計算して中性子発生量、そのエネルギースペクトル、中性子飛行角度等を求めた上で、炉心部の拡散・輸送計算または燃焼計算を行う必要がある。しかし現在のところ、ターゲット部での核反応過程を取り扱う方法の開発はまだ緒についたばかりである。

高エネルギー陽子ビームをターゲット領域に入射させて生じる核破碎反応過程を追跡・評価する計算手法がわが国の原研、欧米の研究機関等で開発されている。ここでは、調査したターゲット部での核反応過程を取り扱う方法をまとめることとする。

### 2.3.2 公開コードとその特徴

各研究機関で開発・提案された計算手法を調査した結果、解析コードとして公開されている代表的なものは以下の4コードである。

#### (1) NMTC<sup>(6)</sup>

BNLとORNLで開発された。加速器によってGeVオーダーにまで加速された荷電粒子（主に陽子）と媒質との微視的、巨視的な相互作用としての核反応やハドロン輸送挙動を計算するコードの初期のものである。その後の発展の原型となったものである。①入射した陽子が標的物質内で原子核間を輸送されて原子核と衝突するまでの過程、②続いて核内でカスケード反応を行う過程、③残留核から核子や軽い核種が蒸発する過程の3つをモンテカルロ法で扱い、GeVオーダーの高エネルギーからスタートして20 (15) MeVまでのエネルギーを計算し、それ以下の中性子は通常の輸送計算に引き継いでゆく。NMTCの由来は、Nucleon Meson Transport Code である。

#### (2) NMTC-JAERI<sup>(7)</sup>

NMTCでは、核反応として核内核子カスケードと蒸発のみが考慮されているが、精度を高めるためにNMTCに対して高エネルギーでの核分裂を組み込んだもの。原研の中原氏によって改良されたNMTCの改良版である。NMTC、HETCではターゲット中に含めることができる元素は質量数Aが1の水素の他、 $8 \leq A \leq 239$ に限定されているが、Li、Beも扱えるように $6 \leq A \leq 250$ に拡張さ



れている。

### (3) HETC<sup>(8)</sup>

NMTCが適用できるエネルギーはパイ中間子生成反応モデルからの制約で3.5GeV迄であるが、これを1.0TeVまで適用が可能ないように改良したもの。High Energy (Nucleon Meson) Transport Code の略である。KFA、CEAなど、主に欧州で使用されている。

### (4) LAHET<sup>(9)</sup>

モンテカルロ計算コードMCNPとの連携を考慮して、LANLでHETCを基に改良・開発されたコードである。LAHETはLos Alamos High Energy Transport Code の略。LAHETコードを含むLCS (LAHET Code System) として公開されている。

以上の計算コードのうち陽子加速器駆動高速炉のターゲット部での核破砕反応を評価するコードとして、計算精度および計算時間の観点から適当と考えられるものはLAHETである。今後は、ターゲット部での核破砕反応によって発生した中性子量及び中性子スペクトルを計算する方法として、LAHETコードをハイブリッド高速炉の核計算コードに組み入れることが必要と考えられる。LAHETコードの詳細な概要を付録-2に示す。

### 3. 燃料自給型炉の炉心概念の検討

#### 3.1 概要

1997年度に行ったハイブリッド高速炉の概念的な炉心燃焼特性を検討した予備解析では、取り替え燃料に天然ウランを使用する平衡炉心を想定して、炉心の半径と高さをそれぞれ100cm、出力密度約300w/cc（炉出力942MWt）のターゲット領域を無視した炉心を選定した。さらに、加速器による出力制御可能な炉心の実効増倍率 $k_{eff}$ の下限値を、ビーム出力条件(約60MW) から0.92に設定して燃焼計算を行った結果、以下のことが分かった。

- (1) 初期炉心では、高転換率の持続(燃料自給性)により約10年の長期運転可能な初装荷燃料の核分裂性物質濃度と燃料体積の最適な組み合わせが存在する。
- (2) 約10年間運転可能な核分裂性物質濃度は約10wt%となり、燃焼および燃料取り替えによる反応度変化は±約5%  $\Delta k/k$ である。ただし、燃料物質がウランまたはMOXのいずれかによって燃料体積比を40~50%の範囲で調整する必要がある。

本報では前年度の予備解析に引き続き、更に解析精度の向上を図るとともに、燃料交換を含む長期燃焼サイクルの達成可能性を検討するために、実際にターゲット領域を設置した炉心において2DBURNコードを用いて以下の解析を行う。本解析によって増殖性が長期間持続する燃料自給型炉としてのハイブリッド高速炉が炉物理的に成立する炉心パラメータを幅広く検討することとする。なお、炉心内にターゲット領域を設置したこと、燃料をウランのみとしたこと以外の炉心条件、および解析手法は予備解析と同様であるので詳細は省略する。

#### 3.2 炉心の設定

##### 3.2.1 炉心形状

対象とする炉心体系は、第2章の標準ケースと同一とし(図2.1参照)、炉心半径は前述したようにターゲット領域を設置しても炉心体積(出力)が保存されるように調整した。したがって、炉心の平均出力密度も予備解析と同一の300Wt/cc(炉出力942MWt)である。ターゲットおよび炉心の幾何学的寸法は以下のとおりである。

ターゲット半径／高さ＝20／40cm

炉心半径／高さ＝102／100cm

### 3.2.2 燃料集合体

初装荷、取り替え燃料ともに核種はウラン(窒化物)とする。ただし、取り替え用は天然ウランを使用するが、初装荷用には加速器駆動が可能な程度の未臨界度を確保するため濃縮ウランを使用する。なお、燃料の取り替えによる正の反応度添加が過大にならないようにするため、本解析では通常の初装荷燃料、取り替え燃料の他に燃料ミートのないダミー燃料集合体も一部用いることとする。

### 3.3 燃料自給型炉心成立要件の選定

予備解析での検討結果を参考として、初装荷燃料の燃料体積比を40%とした。パラメータとして燃料のウラン濃縮度を10,11,12および15wt%に選んだ。2DBURNコードを用いて、1年の燃焼ステップで10年間の燃焼計算を行い、初期炉心の燃焼特性を求めた。使用した各燃料の原子数密度を表3.1に示す。ウラン濃縮度をパラメータとした実効増倍率および燃焼反応度の燃焼期間依存性の計算結果を表3.2に、また燃焼反応度の変化を図3.1にそれぞれ示す。

図3.1から、ウラン濃縮度が10ないし11wt%であれば10年間の燃焼反応度はほぼ $\pm 10\% \Delta k/k$ となり、ハイブリッド高速炉の運転上好ましいことが分かる。しかし、濃縮度を多少高くして15wt%にすれば燃焼特性は急に悪化し、燃料自給は期待できない。

### 3.4 燃料交換計画の導入

3.3節で行ったパラメータサーベイで得られた燃焼計算結果から炉物理的観点で最も長期運転可能な1つのケースとしてウラン濃縮度11wt% (燃料体積比40%) の燃料を選択した。このケースの炉心を初期炉心として燃料交換を組み込んだ長期(約40年)燃焼サイクルの燃焼計算を行う。この結果をもとに燃料自給型炉としてのハイブリッド高速炉の炉物理的成立性を評価する。なお、燃料交換を伴う燃料自給型炉心の長期燃焼計算に当たっては以下の点を考慮に入れた。

①燃料交換に伴う反応度変化を極力少なくさせるためダミー燃料集合体を使用する。

②燃料交換はできるだけ長期運転サイクルが達成できるような方法（サイクル期間、バッチ数）を導入する。

③燃焼による反応度変化範囲は、将来的な加速器駆動力を考慮して当初の想定 ( $0.92 \leq k_{eff} \leq 0.95$ ) より広い  $0.85 \leq k_{eff} \leq 0.95$  (約10%  $\Delta k$ ) を許容する燃料交換手順を設定する。

初期の10年間に燃料交換なしの場合とありの場合、およびその後の20年間に燃料交換を行う一例について約30年間の長期燃焼計算結果を図3.2(1)、(2)に示す。燃料交換ありの場合長期燃焼サイクルを達成するため、ここでは次のような炉心構成と燃料交換法を採用した。

①ダミー燃料は初期炉心に全体の1/10装荷する。

②1バッチが3年間とし、3年毎に1/10バッチの燃料交換とする。

③1回目の燃料交換で全ダミー燃料を、2サイクル以降は実際の燃料（11wt%濃縮ウラン）をそれぞれ天然ウラン燃料に取り替える。

図3.2の計算結果から、燃料交換なしの場合でもありの場合でも約10年で当初目標とした反応度変化範囲の下限 ( $k_{eff}=0.92$ ) を下回り、それ以後  $k_{eff}$  は緩やかに低下して20年以降は約0.8に漸近する。この条件では加速器駆動可能な運転条件を逸脱し、長期サイクル達成は困難であることが分かった。この改善策としてここでは当初設定した解析条件を以下のように緩和し、長期燃焼サイクルの達成が可能な新たな成立要件となる炉心パラメータを再設定して燃焼計算を行うこととした。すなわち、次の5つの方策を導入してより増殖性を高めるとともに、ダミー燃料のより幅広い運用を導入することとした。

①炉心半径を102.0cmから174.4cmに拡大し、炉心体積を約3倍にする。

②初装荷燃料のウラン濃縮度を11wt%から10wt%に低下させる。

③初装荷燃料の燃料体積比を40%から50%に増大させる。

④ダミー燃料の装荷割合は全体の35%に増加させる。

⑤燃焼期間6年とし、10バッチで天然ウラン燃料に取り替える。ただし、ダミー燃料が装荷されている限り、ダミー燃料との交換を優先させる（4回目の燃料交換では残りの5%のダミー燃料と5%の旧燃料がそれぞれ新燃料と交換される）。

出力密度（ダミー燃料は除く燃料集合体）を300W/cc（炉出力1837MW）を保持したまま炉心体積を3倍にして初期の燃焼計算を行うと、今度は逆に高増殖性による反応度上昇率が過大にな

り、5年未満で反応度変化範囲を超過することが予想された。そのため炉心体積の3倍化に伴って炉出力の増加率も3倍にするのではなく、それを1.5倍の1413MW（出力密度231W/cc）に抑制して長期燃焼計算することにした。この場合の解析条件を表3.3に示す。

以上の方法により長期燃焼サイクルを継続させた場合の燃焼特性を表3.4および図3.3に示す。このような計算条件を設定した結果、全サイクルにわたって反応度変化の条件 ( $k_{\text{eff}}=0.90\pm 0.05$ ) を40年間満足できるようになることが分かった。また図3.2と3.3の結果から、もし炉心半径を102.0cmから174.4cm（炉心体積で3倍）の大幅な変更ではなく150cm（同2.2倍）程度にすれば、次のような結果が予測できる。

- ①出力密度231W/ccを維持する場合、炉出力を1413MWから約1000MWに低下させれば、図3.3と同程度の燃焼特性が得られる。
- ②炉出力1413MWを維持する場合、出力密度を231W/ccから約300W/ccに上昇させれば、燃焼期間を6年から約4.5年にすることで6サイクル（約30年）の長期サイクル運転が可能である。

### 3.5 燃料自給型炉心燃焼特性のまとめ

3.3および3.4節の計算結果を整理し、陽子加速器駆動によるハイブリッド高速炉を燃料自給型炉として運用するための炉心燃焼特性を計算した。その結果、炉物理的に長期運転が成立するハイブリッド高速炉の炉心概念について以下のようにまとめられる。

- (1) 炉出力は炉心の反応度変化に対応して加速器の陽子ビーム強度を制御して保持するが、加速器出力を軽減し、制御上の負担を少なくすることが必要である。このためには炉心の反応度変化はできるだけ少ない方がよい。一方、炉心設計に対してできるだけ広い自由度を確保するためには反応度変化の許容範囲はできるだけ大きい方がよい。ここでは、将来の加速器技術の飛躍的向上に期待をかけて炉心の反応度制御範囲を $k_{\text{eff}}=0.90\pm 0.05$ に設定した（加速器駆動条件としては、燃焼反応度変化幅 $\Delta k_{\text{eff}}$ を $\pm 5\%$ 未満とすることが望ましいが、炉心設計としては $\pm 10\%$ 以内にするには成立条件設定が困難）。
- (2) 取り替え燃料として天然ウランを装荷した場合の反応度低下をなるべく少なくすることが必要である。この一方策として、予めダミー燃料をある割合だけ炉心内に装荷しておき、このダミー燃料を天然ウラン燃料と交換することが効果的である（この場合、燃料交換ではなく

燃焼が進んだ旧燃料は取り出さず、天然ウラン燃料の補充のみ行うことも考えられる)。

(3)(2)の方法を炉心の寿命期間を通じて積極的に利用すれば、炉心からの燃料取り出しのないプラントも可能となる。

## 4. 結言

陽子加速器により未臨界高速炉を駆動するハイブリッド高速炉の炉心核計算手法について、ターゲット部での中性子発生を無視した簡略的手法の妥当性を2次元輸送計算コードDORTを用いて検証した。炉心内にターゲット領域を設けた炉心で、Sn法による輸送計算を以下の2つの手法で行い、両者の中性子束分布および未臨界増倍率をそれぞれ比較・評価した。この結果、ターゲット部を非増倍領域とした簡略的な固有値計算では、それを局所中性子源とした現実的な未臨界増倍計算に比べ、高速中性子束分布はターゲット部に近い炉心領域ほど過小評価するが、未臨界増倍率は過大評価することが分かった。

実際にターゲット領域を設けてハイブリッド高速炉の炉心燃焼特性を2次元拡散・燃焼計算コード2DBURNを用いて行った。増殖性が長期間持続する燃料自給型炉として長期運転可能な炉物理的成立性を確認した。予備解析の炉心条件に比べて炉心体積を約3倍増加させるとともに、加速器駆動のための実効増倍率変化範囲を $0.90 \pm 0.05$ に拡大した。初装荷燃料として10wt%濃縮ウランと一部にダミー燃料を併用し、取り替え燃料には天然ウランを使用すれば、約40年にわたる燃焼サイクルの達成が可能である。

## 謝 辞

本報告書における解析作業では、新型炉技術開発株式会社の横堀 仁氏に御協力頂きました。  
ここに、感謝の意を表します。



## 参 考 文 献

- (1) 小綿泰樹、大坪章、"陽子加速器・ハイブリッド高速炉の炉心特性の予備検討", PNC TN9410 97-064(1997).
- (2) 三菱原子力工業(株), "高速増殖炉核設計計算コードの概要", MAPI-F-0001,(1981).
- (3) W.A. Rhoades and R.L. Childs, "The DORT Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code," *Nuclear Science & Engineering*, "99,1,(1988).
- (4) K. Shibata, et al., "Japanese Evaluated Nuclear Data Library JENDL-3," JAERI-1319.
- (5) A. Hasegawa, "Development of a Common Nuclear Group Constants Library System: JSSTD-295n-104  $\gamma$  Based on JENDL-3 Nuclear Data Library," Proc. Int. Conf. of Nuclear Data for Science and Technology. 13-17(1991).
- (6) W.A. Coleman and T.W. Armstrong, "Computational Scheme of Intranuclear Code NMTC," ORNL-4606(1970) RSIC CCC-161.
- (7) 中原康明、筒井恒夫: "高エネルギー核反応および核子・中間子輸送シミュレーション・コードシステム NMTC/JAERI," JAERI-M82-198,(1982).
- (8) K.C. Chandler and T.W. Armstrong, "HETC Monte Carlo High Energy Nucleon Meson Transport Code," RSIC CCC-178.
- (9) R.E. Prael and H. Lichtenstein, "User Guide to LCS: The LAHET CODE SYSTEM," LA-UR-89-3014 (1989) .

表 2.1 炉心各部の組成と体積割合

## (1) 原子数密度

(atoms/barn/cm)

核種	燃料集合体	Wターゲット	SUS	Na
Mn	2.6242E - 04		1.3121E - 03	
Fe	1.1273E - 02		5.6364E - 02	
Cr	3.1424E - 03		1.5713E - 02	
NI	2.2108E - 03		1.1054E - 02	
Mo	2.5045E - 04		1.2523E - 03	
Na	8.9704E - 03			2.2426E - 02
W	0.0000E + 00	6.2567E - 02		
N	1.3667E - 02			
U235	1.5717E - 03			
U238	1.2095E - 02			

## (2) 体積割合

領域	燃料 (MN)	冷却材 (Na)	構造材 (SS)	W
1. 炉心	0.4	0.4	0.2	0.0
2. 遮蔽体	0.0	0.2	0.8	0.0
3. 上・下遮蔽体	0.0	0.4	0.6	0.0
4. ターゲット	0.0	0.0	0.0	1.0
5. ターゲット上部	0.0	0.2	0.0	0.0
6. ターゲット下部	0.0	0.4	0.6	0.0

## (3) 燃料の原子数密度

(atoms/barn/cm)

Nuclide	Enrichment (%)						
	0.7205	9	10	11	12	13	14
U235	9.8472E-05	1.2300E-03	1.3667E-03	1.5034E-03	1.6401E-03	1.7767E-03	1.9134E-03
U238	1.3568E-02	1.2437E-02	1.2300E-02	1.2164E-02	1.2027E-02	1.1890E-02	1.1754E-02

表2.2 ターゲット半径とウラン濃縮度をパラメータとした実効増倍率の計算結果

Target radius (cm) Enrichment(%)	実効増倍率				
	0	10	20	30	40
10.0	0.90154		0.86500		0.82489
11.0	0.94613		0.90835		0.86664
12.0	0.98793	0.97176	0.94908	0.92731	0.90607
13.0	1.02716		0.98739		0.94319
14.0	1.06409		1.02354		0.97831

表 2.3 ターゲット高さとうラン濃縮度をパラメータとした実効増倍率の計算結果

ターゲット高さ (cn) Enrichment(%)	実効増倍率		
	40	100	差 (%)
10.0	0.86500		
11.0	0.90835		
12.0	0.94908	0.94899	0.009
13.0	0.98739		
14.0	1.02354		

表2.4 全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ケース1: 標準ケース)

メッシュ	炉心中心からの距離 (cm)	中性子束 (規格値)		$\frac{\textcircled{2}}{\textcircled{1}}$
		①固有値	②未臨界増倍	
1	1.00E + 00	2.07E + 01	1.19E + 02	5.76E + 00
2	3.00E + 00	2.08E + 01	1.19E + 02	5.70E + 00
3	5.00E + 00	2.11E + 01	1.17E + 02	5.57E + 00
4	7.00E + 00	2.15E + 01	1.16E + 02	5.38E + 00
5	9.00E + 00	2.21E + 01	1.13E + 02	5.13E + 00
6	1.10E + 01	2.28E + 01	1.10E + 02	4.84E + 00
7	1.30E + 01	2.36E + 01	1.06E + 02	4.51E + 00
8	1.50E + 01	2.46E + 01	1.02E + 02	4.15E + 00
9	1.70E + 01	2.57E + 01	9.68E + 01	3.77E + 00
10	1.90E + 01	2.70E + 01	9.05E + 01	3.35E + 00
11	2.10E + 01	2.85E + 01	8.36E + 01	2.93E + 00
12	2.31E + 01	2.99E + 01	7.78E + 01	2.61E + 00
13	2.51E + 01	3.10E + 01	7.29E + 01	2.35E + 00
14	2.72E + 01	3.19E + 01	6.85E + 01	2.14E + 00
15	2.92E + 01	3.28E + 01	6.45E + 01	1.97E + 00
16	3.13E + 01	3.35E + 01	6.09E + 01	1.82E + 00
17	3.33E + 01	3.41E + 01	5.77E + 01	1.69E + 00
18	3.54E + 01	3.46E + 01	5.47E + 01	1.58E + 00
19	3.74E + 01	3.50E + 01	5.20E + 01	1.48E + 00
20	3.95E + 01	3.53E + 01	4.95E + 01	1.40E + 00
21	4.15E + 01	3.55E + 01	4.71E + 01	1.33E + 00
22	4.36E + 01	3.56E + 01	4.49E + 01	1.26E + 00
23	4.56E + 01	3.56E + 01	4.29E + 01	1.20E + 00
24	4.77E + 01	3.56E + 01	4.10E + 01	1.15E + 00
25	4.97E + 01	3.54E + 01	3.91E + 01	1.11E + 00
26	5.18E + 01	3.52E + 01	3.74E + 01	1.06E + 00
27	5.38E + 01	3.48E + 01	3.57E + 01	1.03E + 00
28	5.59E + 01	3.44E + 01	3.41E + 01	9.91E - 01
29	5.79E + 01	3.40E + 01	3.26E + 01	9.59E - 01
30	6.00E + 01	3.34E + 01	3.11E + 01	9.31E - 01
31	6.20E + 01	3.28E + 01	2.97E + 01	9.04E - 01
32	6.41E + 01	3.21E + 01	2.83E + 01	8.80E - 01
33	6.61E + 01	3.14E + 01	2.70E + 01	8.58E - 01
34	6.82E + 01	3.06E + 01	2.57E + 01	8.38E - 01
35	7.02E + 01	2.98E + 01	2.44E + 01	8.20E - 01
36	7.23E + 01	2.89E + 01	2.32E + 01	8.03E - 01
37	7.43E + 01	2.79E + 01	2.20E + 01	7.87E - 01
38	7.64E + 01	2.70E + 01	2.08E + 01	7.73E - 01

ターゲット領域

39	7.84E + 01	2.59E + 01	1.97E + 01	7.59E - 01
40	8.05E + 01	2.49E + 01	1.86E + 01	7.47E - 01
41	8.25E + 01	2.38E + 01	1.75E + 01	7.36E - 01
42	8.46E + 01	2.26E + 01	1.64E + 01	7.26E - 01
43	8.66E + 01	2.15E + 01	1.54E + 01	7.17E - 01
44	8.87E + 01	2.03E + 01	1.44E + 01	7.09E - 01
45	9.07E + 01	1.91E + 01	1.34E + 01	7.01E - 01
46	9.28E + 01	1.80E + 01	1.25E + 01	6.95E - 01
47	9.48E + 01	1.68E + 01	1.16E + 01	6.89E - 01
48	9.69E + 01	1.56E + 01	1.07E + 01	6.85E - 01
49	9.89E + 01	1.45E + 01	9.85E + 00	6.81E - 01
50	1.01E + 02	1.34E + 01	9.07E + 00	6.80E - 01
51	1.03E + 02	1.23E + 01	8.37E + 00	6.79E - 01
52	1.05E + 02	1.14E + 01	7.72E + 00	6.79E - 01
53	1.07E + 02	1.04E + 01	7.06E + 00	6.79E - 01
54	1.09E + 02	9.46E + 00	6.42E + 00	6.78E - 01
55	1.11E + 02	8.54E + 00	5.79E + 00	6.78E - 01
56	1.13E + 02	7.64E + 00	5.18E + 00	6.77E - 01
57	1.15E + 02	6.78E + 00	4.59E + 00	6.77E - 01
58	1.17E + 02	5.96E + 00	4.03E + 00	6.77E - 01
59	1.19E + 02	5.16E + 00	3.49E + 00	6.76E - 01
60	1.21E + 02	4.40E + 00	2.97E + 00	6.76E - 01
61	1.23E + 02	3.67E + 00	2.48E + 00	6.75E - 01
62	1.25E + 02	2.96E + 00	2.00E + 00	6.75E - 01
63	1.27E + 02	2.27E + 00	1.53E + 00	6.74E - 01
64	1.29E + 02	1.61E + 00	1.08E + 00	6.74E - 01
65	1.31E + 02	8.98E - 01	6.04E - 01	6.73E - 01

表 2.5 全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ケース 2 : ターゲット高さ 100cm)

メッシュ	炉心中心からの距離 (cm)	中性子束 (規格値)		$\frac{\textcircled{2}}{\textcircled{1}}$
		①固有値	②未臨界増倍	
1	1.00E + 00	5.11E + 01	1.74E + 02	3.40E + 00
2	3.00E + 00	5.15E + 01	1.73E + 02	3.37E + 00
3	5.00E + 00	5.21E + 01	1.72E + 02	3.30E + 00
4	7.00E + 00	5.32E + 01	1.70E + 02	3.19E + 00
5	9.00E + 00	5.45E + 01	1.67E + 02	3.07E + 00
6	1.10E + 01	5.62E + 01	1.64E + 02	2.91E + 00
7	1.30E + 01	5.82E + 01	1.60E + 02	2.74E + 00
8	1.50E + 01	6.06E + 01	1.55E + 02	2.56E + 00
9	1.70E + 01	6.33E + 01	1.50E + 02	2.36E + 00
10	1.90E + 01	6.65E + 01	1.43E + 02	2.15E + 00
11	2.10E + 01	7.01E + 01	1.36E + 02	1.94E + 00
12	2.31E + 01	7.34E + 01	1.30E + 02	1.78E + 00
13	2.51E + 01	7.60E + 01	1.25E + 02	1.64E + 00
14	2.72E + 01	7.82E + 01	1.19E + 02	1.52E + 00
15	2.92E + 01	8.02E + 01	1.14E + 02	1.42E + 00
16	3.13E + 01	8.19E + 01	1.09E + 02	1.34E + 00
17	3.33E + 01	8.34E + 01	1.05E + 02	1.26E + 00
18	3.54E + 01	8.46E + 01	1.01E + 02	1.19E + 00
19	3.74E + 01	8.55E + 01	9.65E + 01	1.13E + 00
20	3.95E + 01	8.62E + 01	9.26E + 01	1.07E + 00
21	4.15E + 01	8.67E + 01	8.89E + 01	1.02E + 00
22	4.36E + 01	8.70E + 01	8.53E + 01	9.81E - 01
23	4.56E + 01	8.70E + 01	8.19E + 01	9.41E - 01
24	4.77E + 01	8.69E + 01	7.86E + 01	9.05E - 01
25	4.97E + 01	8.65E + 01	7.54E + 01	8.72E - 01
26	5.18E + 01	8.59E + 01	7.23E + 01	8.42E - 01
27	5.38E + 01	8.52E + 01	6.94E + 01	8.15E - 01
28	5.59E + 01	8.42E + 01	6.65E + 01	7.89E - 01
29	5.79E + 01	8.31E + 01	6.37E + 01	7.66E - 01
30	6.00E + 01	8.18E + 01	6.10E + 01	7.45E - 01
31	6.20E + 01	8.03E + 01	5.83E + 01	7.26E - 01
32	6.41E + 01	7.87E + 01	5.57E + 01	7.08E - 01
33	6.61E + 01	7.70E + 01	5.32E + 01	6.91E - 01
34	6.82E + 01	7.51E + 01	5.07E + 01	6.76E - 01
35	7.02E + 01	7.30E + 01	4.83E + 01	6.62E - 01
36	7.23E + 01	7.08E + 01	4.60E + 01	6.49E - 01
37	7.43E + 01	6.86E + 01	4.37E + 01	6.37E - 01
38	7.64E + 01	6.62E + 01	4.14E + 01	6.26E - 01

  
ターゲット領域

39	7.84E + 01	6.37E + 01	3.92E + 01	6.15E - 01
40	8.05E + 01	6.11E + 01	3.70E + 01	6.06E - 01
41	8.25E + 01	5.84E + 01	3.49E + 01	5.97E - 01
42	8.46E + 01	5.56E + 01	3.28E + 01	5.90E - 01
43	8.66E + 01	5.28E + 01	3.08E + 01	5.83E - 01
44	8.87E + 01	5.00E + 01	2.88E + 01	5.76E - 01
45	9.07E + 01	4.71E + 01	2.68E + 01	5.71E - 01
46	9.28E + 01	4.41E + 01	2.50E + 01	5.65E - 01
47	9.48E + 01	4.12E + 01	2.31E + 01	5.61E - 01
48	9.69E + 01	3.83E + 01	2.14E + 01	5.58E - 01
49	9.89E + 01	3.55E + 01	1.97E + 01	5.55E - 01
50	1.01E + 02	3.28E + 01	1.82E + 01	5.54E - 01
51	1.03E + 02	3.03E + 01	1.68E + 01	5.54E - 01
52	1.05E + 02	2.79E + 01	1.55E + 01	5.54E - 01
53	1.07E + 02	2.56E + 01	1.42E + 01	5.54E - 01
54	1.09E + 02	2.33E + 01	1.29E + 01	5.54E - 01
55	1.11E + 02	2.10E + 01	1.16E + 01	5.53E - 01
56	1.13E + 02	1.88E + 01	1.04E + 01	5.53E - 01
57	1.15E + 02	1.67E + 01	9.22E + 00	5.53E - 01
58	1.17E + 02	1.46E + 01	8.09E + 00	5.52E - 01
59	1.19E + 02	1.27E + 01	7.01E + 00	5.52E - 01
60	1.21E + 02	1.08E + 01	5.97E + 00	5.52E - 01
61	1.23E + 02	9.02E + 00	4.97E + 00	5.52E - 01
62	1.25E + 02	7.28E + 00	4.01E + 00	5.51E - 01
63	1.27E + 02	5.59E + 00	3.08E + 00	5.51E - 01
64	1.29E + 02	3.95E + 00	2.17E + 00	5.50E - 01
65	1.31E + 02	2.21E + 00	1.21E + 00	5.49E - 01



表 2.6 全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ケース 3 : 炉心密度 + 20%)

メッシュ	炉心中心からの距離 (cm)	中性子束 (規格値)		$\frac{\textcircled{2}}{\textcircled{1}}$
		①固有値	②未臨界増倍	
1	1.00E + 00	3.50E + 01	1.36E + 02	3.90E + 00
2	3.00E + 00	3.53E + 01	1.36E + 02	3.86E + 00
3	5.00E + 00	3.57E + 01	1.35E + 02	3.78E + 00
4	7.00E + 00	3.65E + 01	1.34E + 02	3.67E + 00
5	9.00E + 00	3.74E + 01	1.32E + 02	3.52E + 00
6	1.10E + 01	3.86E + 01	1.29E + 02	3.35E + 00
7	1.30E + 01	4.01E + 01	1.27E + 02	3.16E + 00
8	1.50E + 01	4.18E + 01	1.23E + 02	2.95E + 00
9	1.70E + 01	4.38E + 01	1.19E + 02	2.72E + 00
10	1.90E + 01	4.61E + 01	1.14E + 02	2.48E + 00
11	2.10E + 01	4.89E + 01	1.08E + 02	2.22E + 00
12	2.31E + 01	5.17E + 01	1.03E + 02	2.00E + 00
13	2.51E + 01	5.40E + 01	9.85E + 01	1.82E + 00
14	2.72E + 01	5.61E + 01	9.43E + 01	1.68E + 00
15	2.92E + 01	5.79E + 01	9.04E + 01	1.56E + 00
16	3.13E + 01	5.95E + 01	8.69E + 01	1.46E + 00
17	3.33E + 01	6.09E + 01	8.37E + 01	1.37E + 00
18	3.54E + 01	6.21E + 01	8.06E + 01	1.30E + 00
19	3.74E + 01	6.30E + 01	7.78E + 01	1.24E + 00
20	3.95E + 01	6.37E + 01	7.51E + 01	1.18E + 00
21	4.15E + 01	6.42E + 01	7.26E + 01	1.13E + 00
22	4.36E + 01	6.46E + 01	7.02E + 01	1.09E + 00
23	4.56E + 01	6.47E + 01	6.78E + 01	1.05E + 00
24	4.77E + 01	6.46E + 01	6.55E + 01	1.01E + 00
25	4.97E + 01	6.44E + 01	6.33E + 01	9.83E - 01
26	5.18E + 01	6.40E + 01	6.11E + 01	9.55E - 01
27	5.38E + 01	6.34E + 01	5.90E + 01	9.30E - 01
28	5.59E + 01	6.27E + 01	5.69E + 01	9.07E - 01
29	5.79E + 01	6.18E + 01	5.48E + 01	8.87E - 01
30	6.00E + 01	6.08E + 01	5.28E + 01	8.68E - 01
31	6.20E + 01	5.96E + 01	5.07E + 01	8.50E - 01
32	6.41E + 01	5.84E + 01	4.87E + 01	8.34E - 01
33	6.61E + 01	5.69E + 01	4.67E + 01	8.20E - 01
34	6.82E + 01	5.54E + 01	4.47E + 01	8.06E - 01
35	7.02E + 01	5.38E + 01	4.27E + 01	7.94E - 01
36	7.23E + 01	5.20E + 01	4.07E + 01	7.82E - 01
37	7.43E + 01	5.02E + 01	3.88E + 01	7.72E - 01
38	7.64E + 01	4.83E + 01	3.68E + 01	7.62E - 01

ターゲット領域

39	7.84E + 01	4.63E + 01	3.49E + 01	7.53E - 01
40	8.05E + 01	4.42E + 01	3.29E + 01	7.45E - 01
41	8.25E + 01	4.20E + 01	3.10E + 01	7.38E - 01
42	8.46E + 01	3.98E + 01	2.91E + 01	7.31E - 01
43	8.66E + 01	3.76E + 01	2.72E + 01	7.25E - 01
44	8.87E + 01	3.53E + 01	2.54E + 01	7.20E - 01
45	9.07E + 01	3.29E + 01	2.35E + 01	7.15E - 01
46	9.28E + 01	3.06E + 01	2.17E + 01	7.10E - 01
47	9.48E + 01	2.82E + 01	1.99E + 01	7.07E - 01
48	9.69E + 01	2.59E + 01	1.82E + 01	7.04E - 01
49	9.89E + 01	2.36E + 01	1.66E + 01	7.01E - 01
50	1.01E + 02	2.15E + 01	1.50E + 01	7.00E - 01
51	1.03E + 02	1.96E + 01	1.37E + 01	7.00E - 01
52	1.05E + 02	1.81E + 01	1.27E + 01	7.00E - 01
53	1.07E + 02	1.65E + 01	1.16E + 01	7.00E - 01
54	1.09E + 02	1.50E + 01	1.05E + 01	6.99E - 01
55	1.11E + 02	1.36E + 01	9.48E + 00	6.99E - 01
56	1.13E + 02	1.21E + 01	8.48E + 00	6.99E - 01
57	1.15E + 02	1.08E + 01	7.51E + 00	6.99E - 01
58	1.17E + 02	9.44E + 00	6.59E + 00	6.99E - 01
59	1.19E + 02	8.17E + 00	5.71E + 00	6.98E - 01
60	1.21E + 02	6.97E + 00	4.86E + 00	6.98E - 01
61	1.23E + 02	5.80E + 00	4.05E + 00	6.98E - 01
62	1.25E + 02	4.68E + 00	3.27E + 00	6.98E - 01
63	1.27E + 02	3.59E + 00	2.51E + 00	6.97E - 01
64	1.29E + 02	2.54E + 00	1.77E + 00	6.97E - 01
65	1.31E + 02	1.42E + 00	9.87E - 01	6.97E - 01

表 2.7 全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ケース 4 : 炉心密度 - 20%)

メッシュ	炉心中心からの距離 (cm)	中性子束 (規格値)		$\frac{\textcircled{2}}{\textcircled{1}}$
		①固有値	②未臨界増倍	
1	1.00E + 00	1.37E + 01	1.08E + 02	7.84E + 00
2	3.00E + 00	1.38E + 01	1.07E + 02	7.74E + 00
3	5.00E + 00	1.40E + 01	1.06E + 02	7.55E + 00
4	7.00E + 00	1.43E + 01	1.04E + 02	7.26E + 00
5	9.00E + 00	1.46E + 01	1.01E + 02	6.89E + 00
6	1.10E + 01	1.51E + 01	9.73E + 01	6.46E + 00
7	1.30E + 01	1.56E + 01	9.30E + 01	5.96E + 00
8	1.50E + 01	1.62E + 01	8.78E + 01	5.41E + 00
9	1.70E + 01	1.69E + 01	8.18E + 01	4.83E + 00
10	1.90E + 01	1.78E + 01	7.44E + 01	4.18E + 00
11	2.10E + 01	1.87E + 01	6.69E + 01	3.59E + 00
12	2.31E + 01	1.94E + 01	6.14E + 01	3.17E + 00
13	2.51E + 01	1.99E + 01	5.68E + 01	2.85E + 00
14	2.72E + 01	2.04E + 01	5.28E + 01	2.59E + 00
15	2.92E + 01	2.08E + 01	4.92E + 01	2.37E + 00
16	3.13E + 01	2.11E + 01	4.60E + 01	2.18E + 00
17	3.33E + 01	2.14E + 01	4.31E + 01	2.01E + 00
18	3.54E + 01	2.17E + 01	4.05E + 01	1.87E + 00
19	3.74E + 01	2.18E + 01	3.82E + 01	1.75E + 00
20	3.95E + 01	2.20E + 01	3.60E + 01	1.64E + 00
21	4.15E + 01	2.20E + 01	3.40E + 01	1.54E + 00
22	4.36E + 01	2.20E + 01	3.22E + 01	1.46E + 00
23	4.56E + 01	2.20E + 01	3.05E + 01	1.38E + 00
24	4.77E + 01	2.19E + 01	2.89E + 01	1.32E + 00
25	4.97E + 01	2.18E + 01	2.74E + 01	1.25E + 00
26	5.18E + 01	2.17E + 01	2.60E + 01	1.20E + 00
27	5.38E + 01	2.15E + 01	2.47E + 01	1.15E + 00
28	5.59E + 01	2.12E + 01	2.34E + 01	1.10E + 00
29	5.79E + 01	2.09E + 01	2.23E + 01	1.06E + 00
30	6.00E + 01	2.06E + 01	2.12E + 01	1.03E + 00
31	6.20E + 01	2.03E + 01	2.01E + 01	9.92E - 01
32	6.41E + 01	1.99E + 01	1.91E + 01	9.60E - 01
33	6.61E + 01	1.95E + 01	1.81E + 01	9.31E - 01
34	6.82E + 01	1.90E + 01	1.72E + 01	9.05E - 01
35	7.02E + 01	1.86E + 01	1.63E + 01	8.80E - 01
36	7.23E + 01	1.81E + 01	1.55E + 01	8.58E - 01
37	7.43E + 01	1.75E + 01	1.47E + 01	8.38E - 01
38	7.64E + 01	1.70E + 01	1.39E + 01	8.19E - 01

ターゲット領域

39	7.84E + 01	1.64E + 01	1.32E + 01	8.01E - 01
40	8.05E + 01	1.58E + 01	1.24E + 01	7.85E - 01
41	8.25E + 01	1.52E + 01	1.17E + 01	7.71E - 01
42	8.46E + 01	1.46E + 01	1.11E + 01	7.58E - 01
43	8.66E + 01	1.40E + 01	1.04E + 01	7.46E - 01
44	8.87E + 01	1.33E + 01	9.80E + 00	7.35E - 01
45	9.07E + 01	1.27E + 01	9.20E + 00	7.26E - 01
46	9.28E + 01	1.20E + 01	8.62E + 00	7.17E - 01
47	9.48E + 01	1.14E + 01	8.07E + 00	7.10E - 01
48	9.69E + 01	1.07E + 01	7.56E + 00	7.04E - 01
49	9.89E + 01	1.01E + 01	7.07E + 00	7.00E - 01
50	1.01E + 02	9.49E + 00	6.62E + 00	6.98E - 01
51	1.03E + 02	8.84E + 00	6.17E + 00	6.98E - 01
52	1.05E + 02	8.16E + 00	5.69E + 00	6.98E - 01
53	1.07E + 02	7.48E + 00	5.21E + 00	6.97E - 01
54	1.09E + 02	6.81E + 00	4.74E + 00	6.96E - 01
55	1.11E + 02	6.15E + 00	4.28E + 00	6.95E - 01
56	1.13E + 02	5.52E + 00	3.83E + 00	6.94E - 01
57	1.15E + 02	4.90E + 00	3.40E + 00	6.93E - 01
58	1.17E + 02	4.31E + 00	2.98E + 00	6.92E - 01
59	1.19E + 02	3.74E + 00	2.58E + 00	6.92E - 01
60	1.21E + 02	3.19E + 00	2.20E + 00	6.91E - 01
61	1.23E + 02	2.66E + 00	1.84E + 00	6.90E - 01
62	1.25E + 02	2.15E + 00	1.48E + 00	6.89E - 01
63	1.27E + 02	1.65E + 00	1.14E + 00	6.89E - 01
64	1.29E + 02	1.17E + 00	8.02E - 01	6.88E - 01
65	1.31E + 02	6.53E - 01	4.48E - 01	6.86E - 01

表 2.8 ターゲット寸法をパラメータとした場合の未臨界増倍率と全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較

項 目	パラメータ	標準ケース	ターゲット高さ 拡 大	炉心密度		ターゲット半径	
				+ 20 %	- 20 %	拡 大	縮 小
ターゲット半径 (cm)		20	20	20	20	40	10
ターゲット高さ (cm)		40	100	40	40	40	40
炉心密度の増減		1.0	1.0	1.2	0.8	1.0	1.0
実効増倍率: $k_{\text{eff}}$ (固有値計算)		0.9256	0.9238	0.9614	0.874	0.8872	0.944
未臨界増倍率: $\alpha$							
①固有値計算		1.24E + 01	1.21E + 01	2.49E + 01	6.94E + 00	7.87E + 00	1.69E + 01
②未臨界増倍計算		1.12E + 01	9.05E + 00	2.16E + 01	6.47E + 00	4.27E + 00	2.10E + 01
②/①		0.90	0.75	0.87	0.93	0.54	1.25
全中性子束* ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ )							
①固有値計算		2.84E + 01	7.01E + 01	4.89E + 01	1.87E + 01	5.24E + 01	1.28E + 01
②未臨界増倍計算		8.36E + 01	1.36E + 02	1.08E + 02	6.69E + 01	1.03E + 02	4.80E + 01
②/①		2.94	1.94	2.21	3.58	1.97	3.75

\* 炉心最内層位置の値

表 2.9 全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ターゲット半径 : 40cm)

メッシュ	炉心中心からの距離 (cm)	中性子束 (規格値)		$\frac{\textcircled{2}}{\textcircled{1}}$
		①固有値	②未臨界増倍	
1	2.00E + 00	1.72E + 01	1.56E + 02	9.05E + 00
2	6.00E + 00	1.77E + 01	1.56E + 02	8.77E + 00
3	1.00E + 01	1.88E + 01	1.54E + 02	8.23E + 00
4	1.40E + 01	2.04E + 01	1.52E + 02	7.48E + 00
5	1.80E + 01	2.26E + 01	1.50E + 02	6.62E + 00
6	2.20E + 01	2.56E + 01	1.46E + 02	5.70E + 00
7	2.60E + 01	2.94E + 01	1.41E + 02	4.79E + 00
8	3.00E + 01	3.40E + 01	1.34E + 02	3.93E + 00
9	3.40E + 01	3.97E + 01	1.25E + 02	3.14E + 00
10	3.80E + 01	4.65E + 01	1.13E + 02	2.43E + 00
11	4.08E + 01	5.24E + 01	1.03E + 02	1.97E + 00
12	4.25E + 01	5.59E + 01	9.78E + 01	1.75E + 00
13	4.42E + 01	5.90E + 01	9.28E + 01	1.57E + 00
14	4.59E + 01	6.19E + 01	8.84E + 01	1.43E + 00
15	4.76E + 01	6.45E + 01	8.42E + 01	1.30E + 00
16	4.93E + 01	6.70E + 01	8.04E + 01	1.20E + 00
17	5.10E + 01	6.92E + 01	7.68E + 01	1.11E + 00
18	5.27E + 01	7.12E + 01	7.34E + 01	1.03E + 00
19	5.44E + 01	7.30E + 01	7.03E + 01	9.63E - 01
20	5.61E + 01	7.46E + 01	6.74E + 01	9.03E - 01
21	5.78E + 01	7.60E + 01	6.46E + 01	8.51E - 01
22	5.95E + 01	7.71E + 01	6.20E + 01	8.04E - 01
23	6.12E + 01	7.81E + 01	5.95E + 01	7.63E - 01
24	6.28E + 01	7.88E + 01	5.72E + 01	7.26E - 01
25	6.45E + 01	7.93E + 01	5.49E + 01	6.93E - 01
26	6.62E + 01	7.95E + 01	5.27E + 01	6.63E - 01
27	6.79E + 01	7.96E + 01	5.06E + 01	6.36E - 01
28	6.96E + 01	7.95E + 01	4.86E + 01	6.12E - 01
29	7.13E + 01	7.92E + 01	4.67E + 01	5.90E - 01
30	7.30E + 01	7.87E + 01	4.48E + 01	5.69E - 01
31	7.47E + 01	7.79E + 01	4.30E + 01	5.51E - 01
32	7.64E + 01	7.71E + 01	4.12E + 01	5.34E - 01
33	7.81E + 01	7.60E + 01	3.94E + 01	5.19E - 01
34	7.98E + 01	7.47E + 01	3.77E + 01	5.05E - 01
35	8.15E + 01	7.33E + 01	3.61E + 01	4.92E - 01
36	8.32E + 01	7.18E + 01	3.44E + 01	4.80E - 01
37	8.49E + 01	7.00E + 01	3.29E + 01	4.69E - 01
38	8.65E + 01	6.82E + 01	3.13E + 01	4.59E - 01

ターゲット領域

39	8.82E + 01	6.62E + 01	2.98E + 01	4.50E - 01
40	8.99E + 01	6.41E + 01	2.83E + 01	4.42E - 01
41	9.16E + 01	6.18E + 01	2.68E + 01	4.34E - 01
42	9.33E + 01	5.95E + 01	2.54E + 01	4.27E - 01
43	9.50E + 01	5.70E + 01	2.40E + 01	4.21E - 01
44	9.67E + 01	5.45E + 01	2.26E + 01	4.15E - 01
45	9.84E + 01	5.19E + 01	2.13E + 01	4.10E - 01
46	1.00E + 02	4.93E + 01	2.00E + 01	4.06E - 01
47	1.02E + 02	4.66E + 01	1.87E + 01	4.02E - 01
48	1.03E + 02	4.40E + 01	1.75E + 01	3.99E - 01
49	1.05E + 02	4.13E + 01	1.64E + 01	3.97E - 01
50	1.07E + 02	3.87E + 01	1.53E + 01	3.96E - 01
51	1.09E + 02	3.60E + 01	1.42E + 01	3.95E - 01
52	1.11E + 02	3.32E + 01	1.31E + 01	3.95E - 01
53	1.13E + 02	3.05E + 01	1.20E + 01	3.95E - 01
54	1.15E + 02	2.77E + 01	1.09E + 01	3.94E - 01
55	1.17E + 02	2.50E + 01	9.86E + 00	3.94E - 01
56	1.19E + 02	2.24E + 01	8.82E + 00	3.93E - 01
57	1.21E + 02	1.99E + 01	7.83E + 00	3.93E - 01
58	1.23E + 02	1.75E + 01	6.87E + 00	3.93E - 01
59	1.25E + 02	1.52E + 01	5.95E + 00	3.92E - 01
60	1.27E + 02	1.29E + 01	5.07E + 00	3.92E - 01
61	1.29E + 02	1.08E + 01	4.23E + 00	3.91E - 01
62	1.31E + 02	8.73E + 01	3.41E + 00	3.91E - 01
63	1.33E + 02	6.70E + 01	2.62E + 00	3.91E - 01
64	1.35E + 02	4.74E + 01	1.85E + 00	3.90E - 01
65	1.37E + 02	2.65E + 01	1.03E + 00	3.89E - 01

表 2.10 全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ターゲット半径: 10cm)

メッシュ	炉心中心からの距離 (cm)	中性子束 (規格値)		$\frac{\textcircled{2}}{\textcircled{1}}$
		①固有値	②未臨界増倍	
1	5.00E - 01	1.17E + 01	6.45E + 01	5.50E + 00
2	1.50E + 00	1.17E + 01	6.42E + 01	5.47E + 00
3	2.50E + 00	1.18E + 01	6.37E + 01	5.41E + 00
4	3.50E + 00	1.18E + 01	6.29E + 01	5.32E + 00
5	4.50E + 00	1.19E + 01	6.19E + 01	5.21E + 00
6	5.50E + 00	1.20E + 01	6.07E + 01	5.07E + 00
7	6.50E + 00	1.21E + 01	5.91E + 01	4.90E + 00
8	7.50E + 00	1.22E + 01	5.73E + 01	4.70E + 00
9	8.50E + 00	1.23E + 01	5.51E + 01	4.47E + 00
10	9.50E + 00	1.25E + 01	5.24E + 01	4.19E + 00
11	1.11E + 01	1.28E + 01	4.80E + 01	3.75E + 00
12	1.34E + 01	1.31E + 01	4.36E + 01	3.33E + 00
13	1.57E + 01	1.33E + 01	4.01E + 01	3.01E + 00
14	1.79E + 01	1.35E + 01	3.71E + 01	2.76E + 00
15	2.02E + 01	1.36E + 01	3.46E + 01	2.54E + 00
16	2.24E + 01	1.37E + 01	3.23E + 01	2.36E + 00
17	2.47E + 01	1.37E + 01	3.03E + 01	2.21E + 00
18	2.70E + 01	1.37E + 01	2.85E + 01	2.08E + 00
19	2.92E + 01	1.37E + 01	2.69E + 01	1.96E + 00
20	3.15E + 01	1.37E + 01	2.54E + 01	1.86E + 00
21	3.38E + 01	1.36E + 01	2.41E + 01	1.77E + 00
22	3.60E + 01	1.35E + 01	2.28E + 01	1.70E + 00
23	3.83E + 01	1.33E + 01	2.17E + 01	1.63E + 00
24	4.05E + 01	1.32E + 01	2.06E + 01	1.56E + 00
25	4.28E + 01	1.30E + 01	1.96E + 01	1.51E + 00
26	4.51E + 01	1.28E + 01	1.87E + 01	1.45E + 00
27	4.73E + 01	1.26E + 01	1.78E + 01	1.41E + 00
28	4.96E + 01	1.24E + 01	1.69E + 01	1.37E + 00
29	5.19E + 01	1.21E + 01	1.61E + 01	1.33E + 00
30	5.41E + 01	1.18E + 01	1.53E + 01	1.29E + 00
31	5.64E + 01	1.15E + 01	1.46E + 01	1.26E + 00
32	5.86E + 01	1.12E + 01	1.38E + 01	1.23E + 00
33	6.09E + 01	1.09E + 01	1.31E + 01	1.20E + 00
34	6.32E + 01	1.06E + 01	1.25E + 01	1.18E + 00
35	6.54E + 01	1.02E + 01	1.18E + 01	1.16E + 00
36	6.77E + 01	9.87E + 00	1.12E + 01	1.13E + 00
37	7.00E + 01	9.50E + 00	1.06E + 01	1.12E + 00
38	7.22E + 01	9.12E + 00	1.00E + 01	1.10E + 00

ターゲット領域



39	7.45E + 01	8.72E + 00	9.43E + 00	1.08E + 00
40	7.67E + 01	8.32E + 00	8.87E + 00	1.07E + 00
41	7.90E + 01	7.91E + 00	8.32E + 00	1.05E + 00
42	8.13E + 01	7.50E + 00	7.79E + 00	1.04E + 00
43	8.35E + 01	7.08E + 00	7.28E + 00	1.03E + 00
44	8.58E + 01	6.66E + 00	6.77E + 00	1.02E + 00
45	8.81E + 01	6.23E + 00	6.28E + 00	1.01E + 00
46	9.03E + 01	5.81E + 00	5.81E + 00	1.00E + 00
47	9.26E + 01	5.39E + 00	5.35E + 00	9.93E + 00
48	9.48E + 01	4.98E + 00	4.92E + 00	9.87E + 00
49	9.71E + 01	4.59E + 00	4.51E + 00	9.83E - 01
50	9.94E + 01	4.21E + 00	4.13E + 00	9.81E - 01
51	1.02E + 02	3.86E + 00	3.78E + 00	9.80E - 01
52	1.04E + 02	3.53E + 00	3.46E + 00	9.80E - 01
53	1.06E + 02	3.21E + 00	3.14E + 00	9.79E - 01
54	1.08E + 02	2.89E + 00	2.83E + 00	9.79E - 01
55	1.11E + 02	2.58E + 00	2.52E + 00	9.78E - 01
56	1.13E + 02	2.29E + 00	2.24E + 00	9.78E - 01
57	1.15E + 02	2.01E + 00	1.96E + 00	9.77E - 01
58	1.17E + 02	1.74E + 00	1.70E + 00	9.76E - 01
59	1.20E + 02	1.50E + 00	1.46E + 00	9.76E - 01
60	1.22E + 02	1.26E + 00	1.23E + 00	9.75E - 01
61	1.24E + 02	1.04E + 00	1.01E + 00	9.75E - 01
62	1.27E + 02	8.30E - 01	8.09E - 01	9.74E - 01
63	1.29E + 02	6.28E - 01	6.12E - 01	9.74E - 01
64	1.31E + 02	4.35E - 01	4.23E - 01	9.73E - 01
65	1.33E + 02	2.33E - 01	2.27E - 01	9.72E - 01

表 2.11 ビームポート上部における中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算

項 目	パラメータ	標準ケース	ターゲット高さ 拡 大	炉心密度		ターゲット半径	
				+ 20 %	- 20 %	拡 大	縮 小
ターゲット半径 (cm)		20	20	20	20	40	10
ターゲット高さ (cm)		40	100	40	40	40	40
炉心密度の増減		1.0	1.0	1.2	0.8	1.0	1.0
高速中性子束 ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )							
①固有値計算		5.13E-05	3.01E-05	8.24E-05	3.62E-05	2.73E-05	6.17E-05
②未臨界増倍計算		1.10E-04	7.05E-05	1.40E-04	9.21E-05	5.12E-05	1.39E-04
②/①		2.14	2.35	1.70	2.54	1.88	2.26
全中性子束* ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )							
①固有値計算		8.88E-05	5.48E-05	1.44E-04	6.21E-05	4.44E-05	1.14E-04
②未臨界増倍計算		1.76E-04	1.11E-04	2.31E-04	1.45E-04	7.66E-05	2.42E-04
②/①		1.99	2.03	1.60	2.34	1.73	2.12

\* 炉心最内層位置の値

表3.1 長期サイクル炉心各部の組成

(1) 炉心各部の原子数密度

(atoms/barn/cm)

核種	燃料集合体 (燃料体積比50%)			遮蔽体	
	天然ウラン	11%濃縮U	タミー燃料	径方向	軸方向
Mn	1.968E-04	1.968E-04	7.873E-04	1.050E-03	7.873E-04
Fe	8.455E-03	8.455E-03	3.382E-02	4.509E-02	3.382E-02
Cr	2.357E-03	2.357E-03	9.427E-03	1.257E-02	9.427E-03
Ni	1.658E-03	1.658E-03	6.632E-03	8.843E-03	6.633E-03
Mo	1.878E-04	1.878E-04	7.514E-04	1.002E-03	7.514E-04
Na	7.849E-03	7.849E-03	2.691E-02	4.485E-03	8.970E-03
N	1.708E-02	1.708E-02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
U235	1.231E-04	1.879E-03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
U238	1.696E-02	1.520E-02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

(2) ウラン濃縮度に対する燃料原子数密度

(atoms/barn/cm)

核種	ウラン235濃縮度 (燃料体積比40%)			
	10%	11%	12%	15%
Mn	2.624E-04	2.624E-04	2.624E-04	2.624E-04
Fe	1.127E-02	1.127E-02	1.127E-02	1.127E-02
Cr	3.142E-03	3.142E-03	3.142E-03	3.142E-03
Ni	2.211E-03	2.211E-03	2.211E-03	2.211E-03
Mo	2.505E-04	2.505E-04	2.505E-04	2.505E-04
Na	8.970E-03	8.970E-03	8.970E-03	8.970E-03
N	1.367E-02	1.367E-02	1.367E-02	1.367E-02
U235	1.367E-03	1.367E-03	1.640E-03	2.050E-03
U238	1.230E-02	1.216E-02	1.206E-02	1.162E-02

表 3.2 初期炉心燃焼特性の計算結果

## (1) 実効増倍率

燃焼期間 (年)	ウラン濃縮度* (wt %)			
	10	11	12	15
0	0.7964	0.8758	0.8772	0.8219
1	0.8243	0.8885	0.8766	0.7785
2	0.8376	0.8934	0.8710	0.7371
3	0.8409	0.8924	0.8616	0.6999
4	0.8369	0.8868	0.8493	0.6666
5	0.8276	0.8775	0.8344	0.6355
6	0.8141	0.8652	0.8175	0.6045
7	0.7974	0.8504	0.7986	0.5723
8	0.7781	0.8335	0.7780	0.5385
9	0.7567	0.8149	0.7559	0.5027
10	0.7334	0.7946	0.7322	0.4651

\* 燃料体積比 : 40 %

(2) 燃焼反応度 ( $\% \Delta k/k$ )

燃焼期間 (年)	ウラン濃縮度* (wt %)			
	10	11	12	15
0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	4.2	1.6	-0.1	-6.8
2	6.2	2.2	-0.8	-14.0
3	6.6	2.1	-2.1	-21.2
4	6.1	1.4	-3.7	-28.3
5	4.7	0.2	-5.8	-35.7
6	2.7	-1.4	-8.3	-43.8
7	0.2	-3.4	-11.2	-53.1
8	-3.0	-5.8	-14.5	-64.0
9	-6.6	-8.5	-18.3	-77.3
10	-10.8	-11.7	-22.6	-93.3

表 3.3 長期サイクル達成のための燃焼計算条件

項目	条件
ターゲット形状	
高さ (cm)	40.0
半径 (cm)	20.0
炉心形状	
高さ (cm)	100.0
半径 (cm)	174.4
体積 (cm <sup>3</sup> )	9.42E + 06
燃料体積比	0.5
燃料装荷割合	0.65
ダミー燃料装荷割合	0.35
U濃縮度 (%)	
初装荷燃料	10.0
取替燃料	0.7
燃焼期間 (年)	6.0
原子力炉出力 (MWt)	1413.0
出力密度 (W/cm <sup>3</sup> )	231

表3.4 長期サイクル炉心燃焼特性の計算結果

ステップ	燃焼期間 (年)	実効増倍率
1	0	0.8604
2	2	0.8855
3	4	0.9008
4	6	0.9087
5	6	0.8887
6	8	0.9117
7	10	0.9248
8	12	0.9308
9	12	0.9129
10	14	0.9316
11	16	0.9417
12	18	0.9458
13	18	0.9297
14	20	0.9446
15	22	0.9525
16	24	0.9554
17	24	0.9219
18	26	0.9368
19	28	0.9448
20	30	0.9478
21	30	0.9000
22	32	0.9171
23	34	0.9264
24	36	0.9302
25	36	0.8865
26	38	0.9045
27	40	0.9143

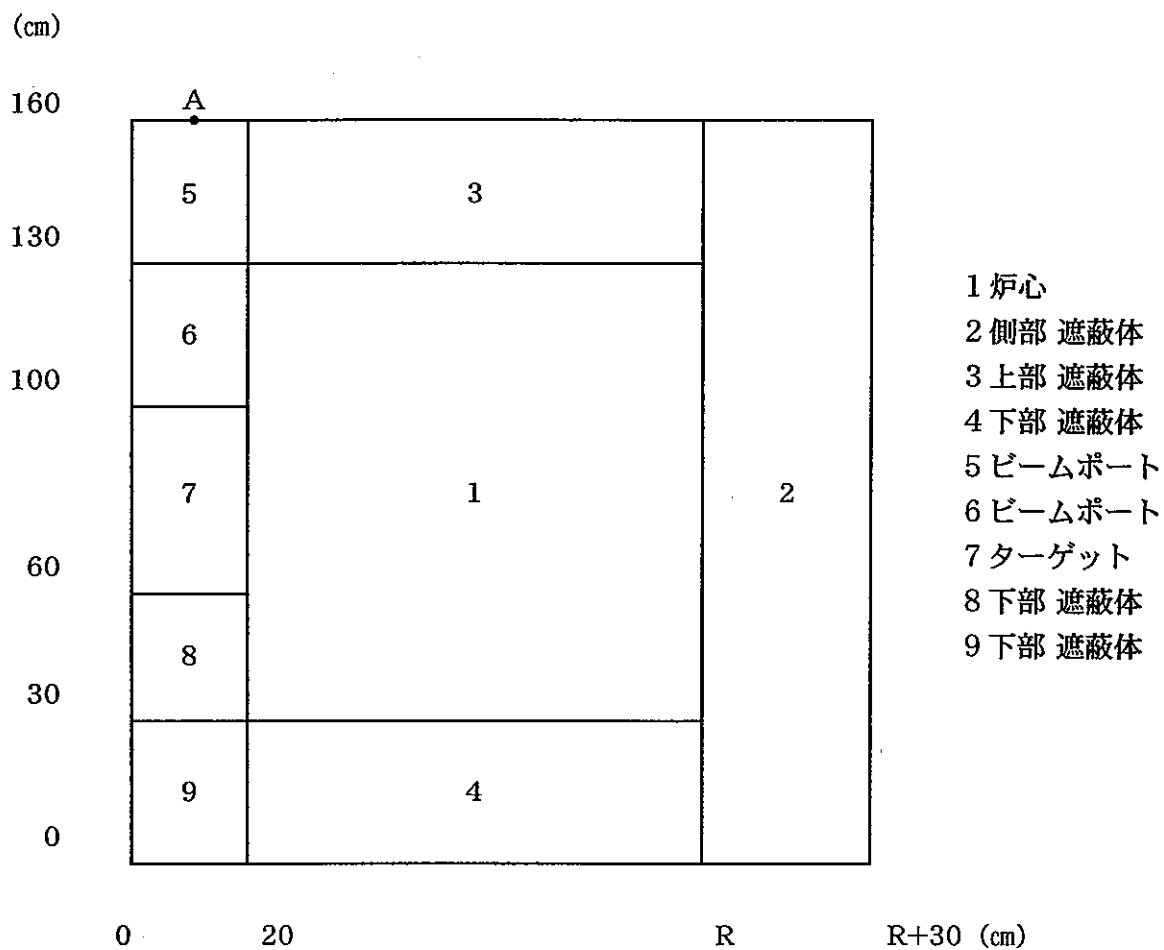


図2.1 ターゲット設置炉心の2次元RZ計算体系

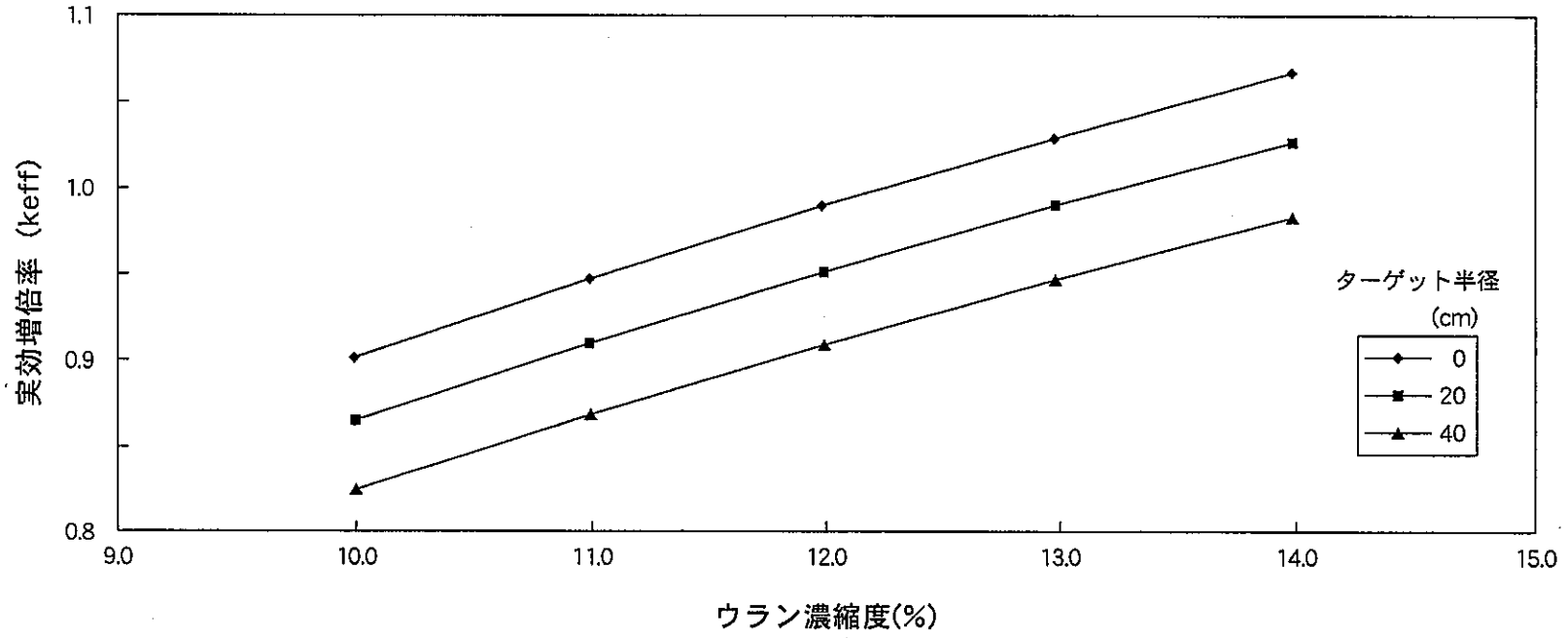


図2.2 ターゲット半径をパラメータとしたウラン濃縮度と実効増倍率の関係



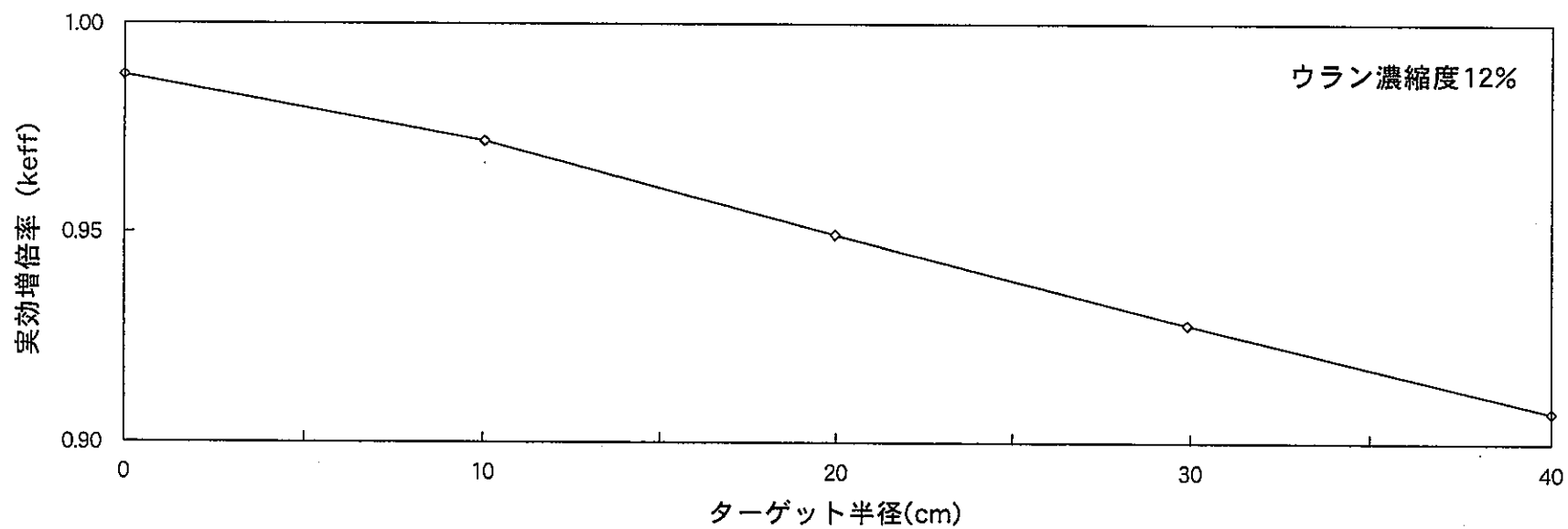


図2.3 ターゲット半径と実効増倍率の関係

中性子束の比 (未臨界増倍 / 固有値計算)

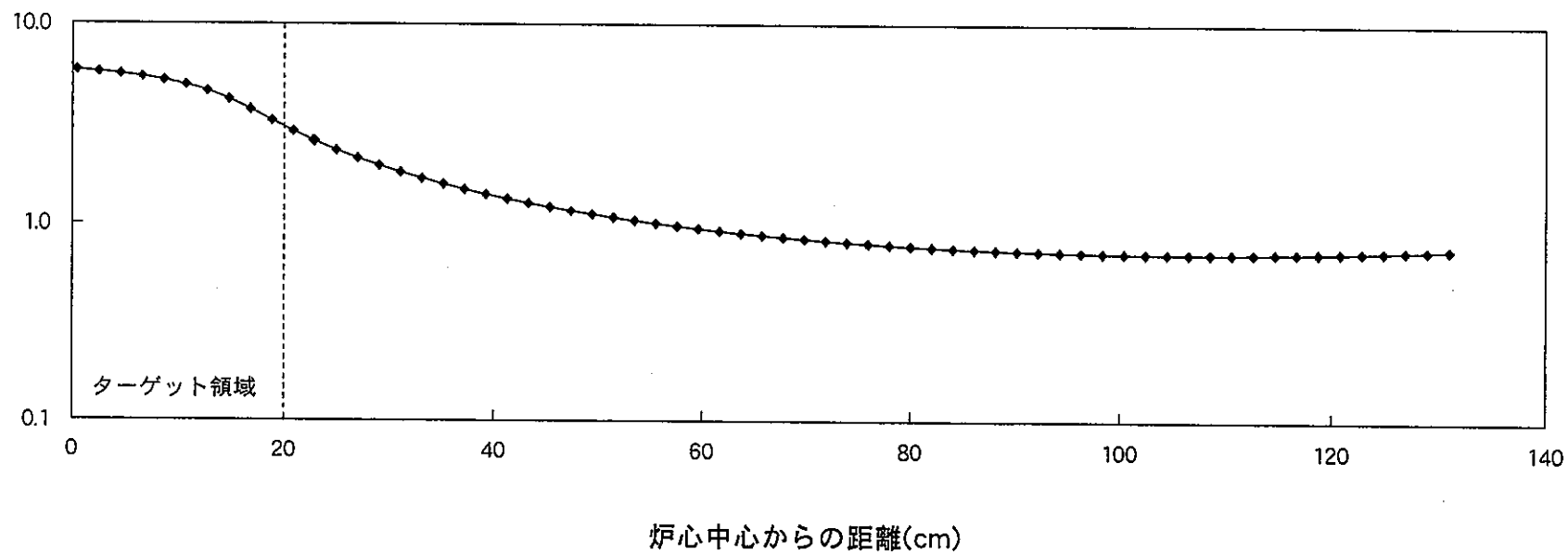


図2.4

全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ケース1: 標準ケース)

中性子束の比 (未臨界増倍 / 固有値計算)

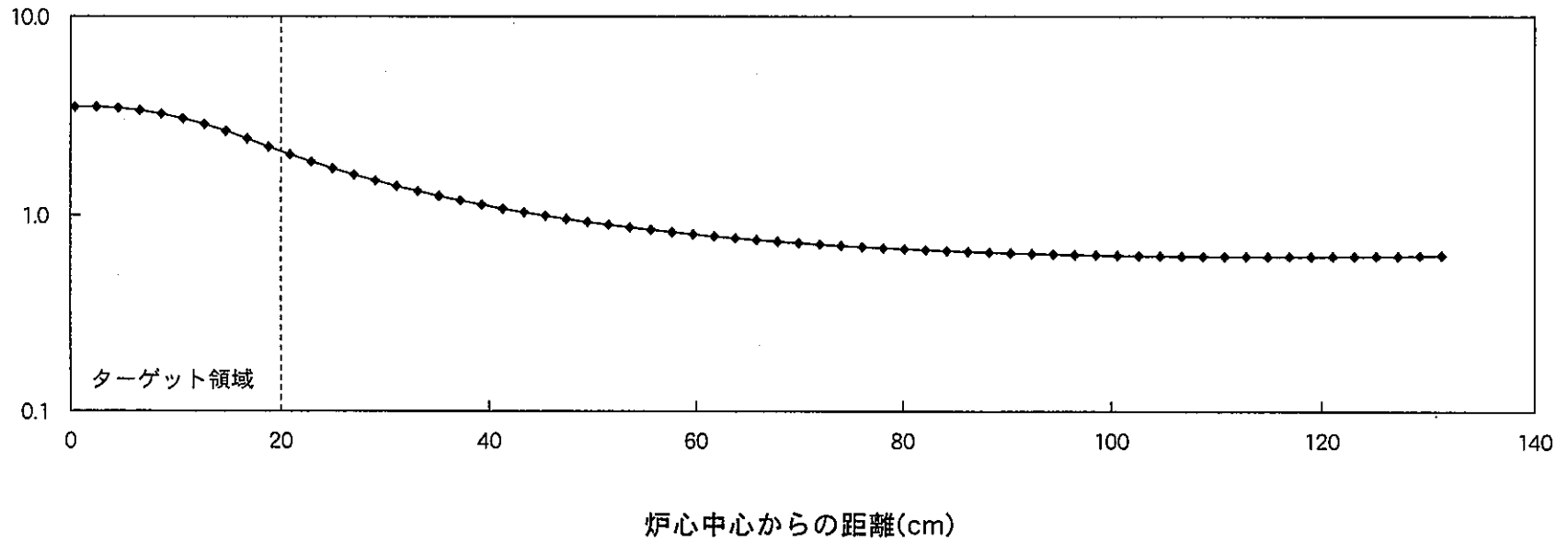


図2.5 全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ケース2: ターゲット高さ100cm)

中性子束の比 (未臨界増倍/固有値計算)

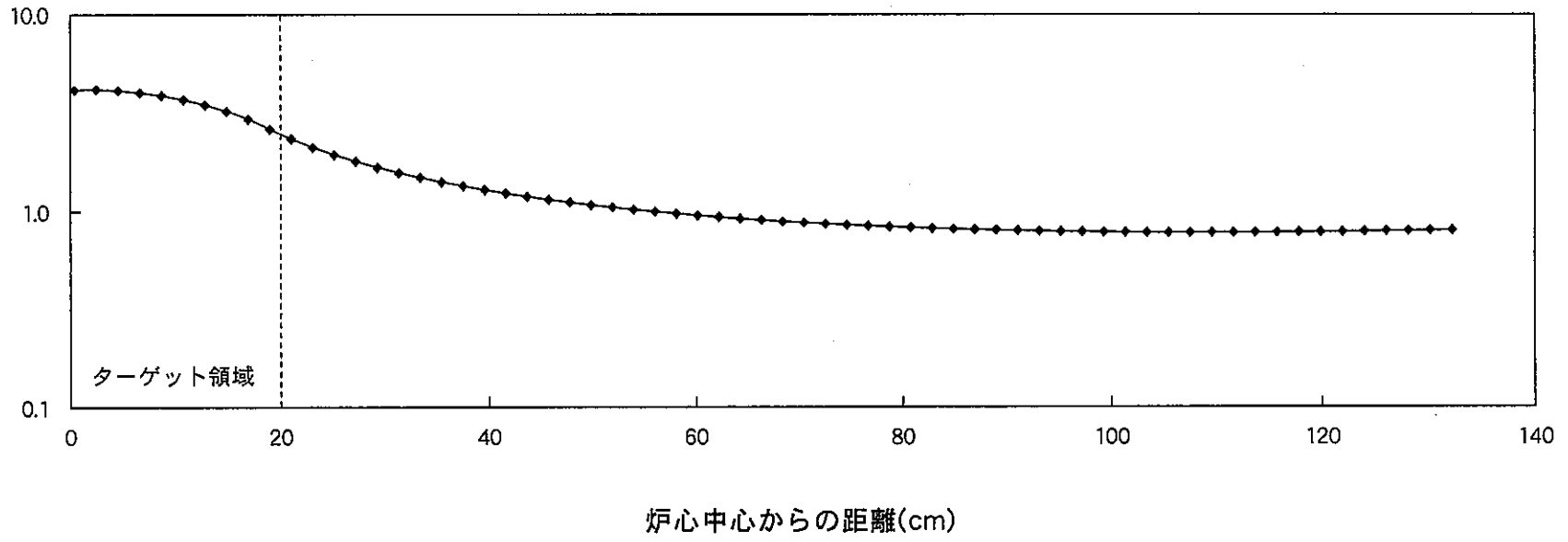


図2.6 全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ケース3: 炉心密度+20%)

中性子束の比(未臨界増倍/固有値計算)

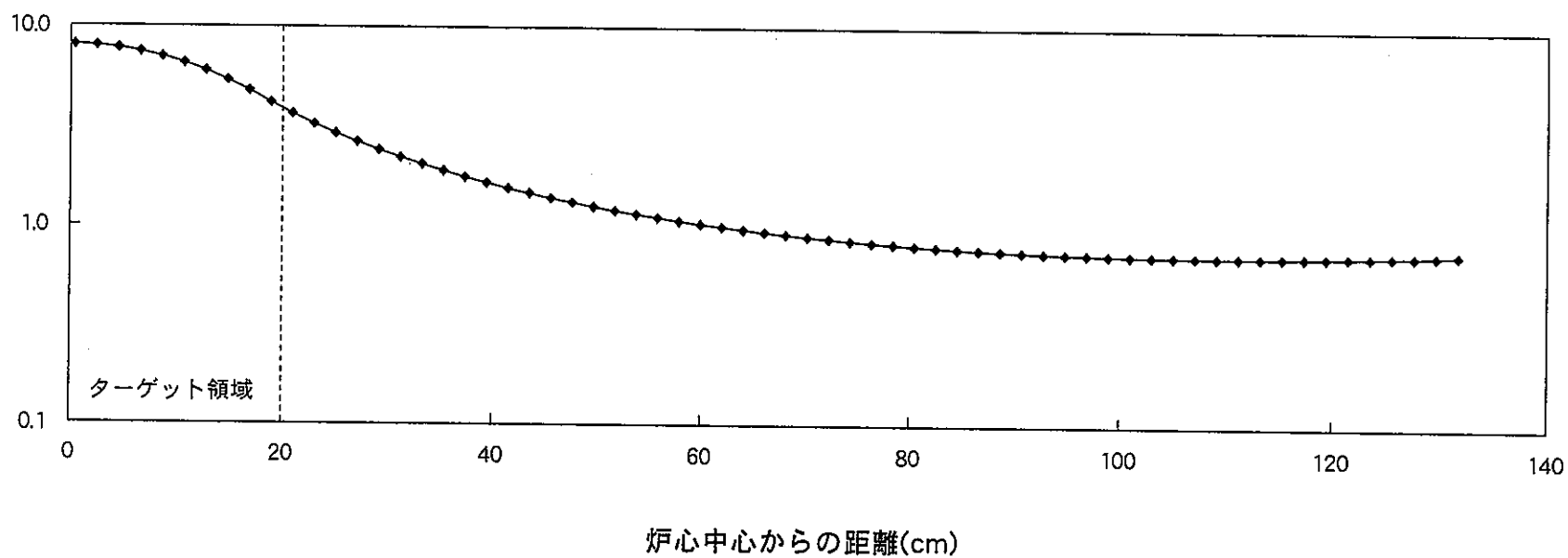


図2.7 全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ケース4: 炉心密度-20%)

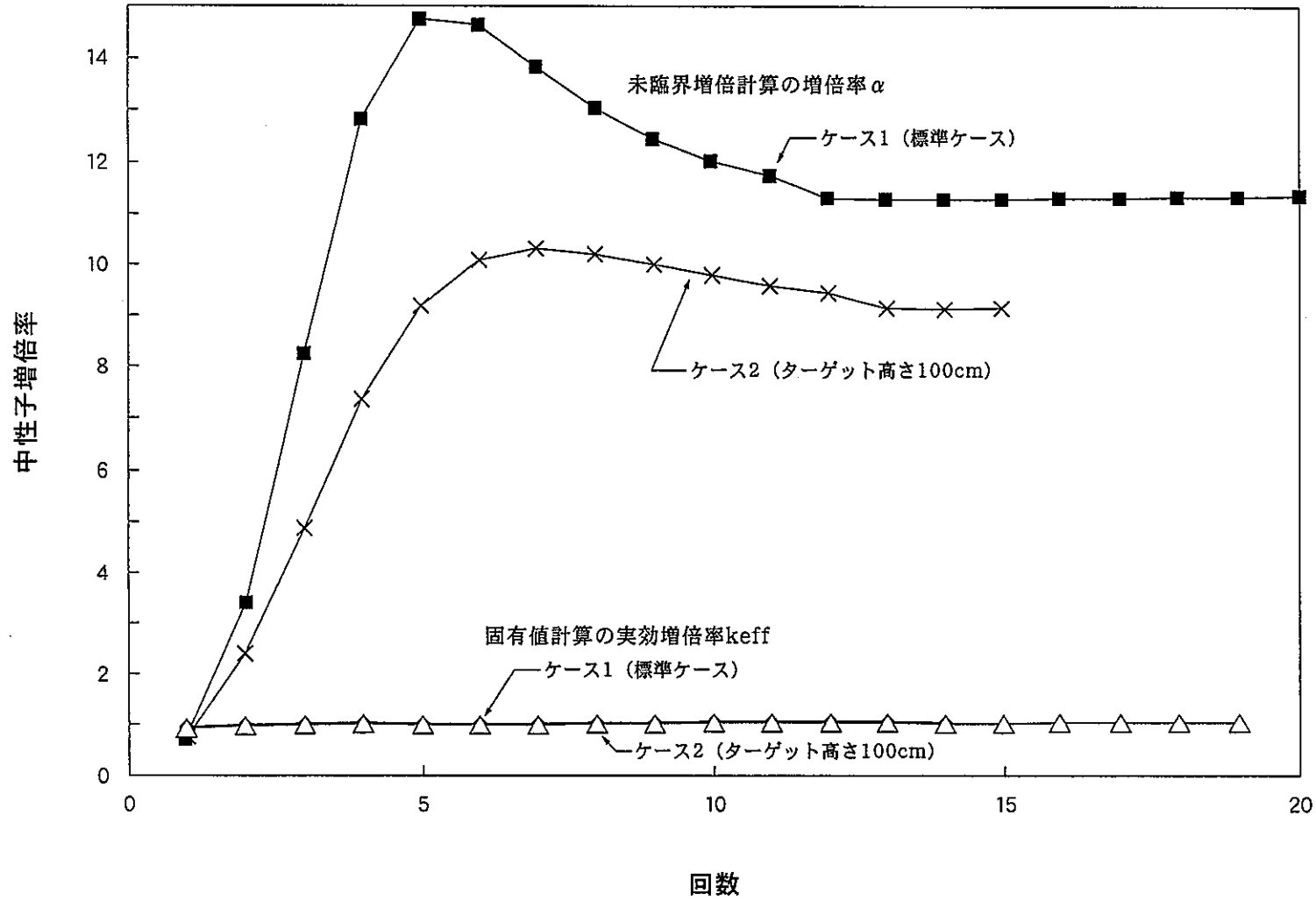


図2.8 中性子増倍率に対する収束状況

中性子束の比 (未臨界増倍 / 固有値計算)

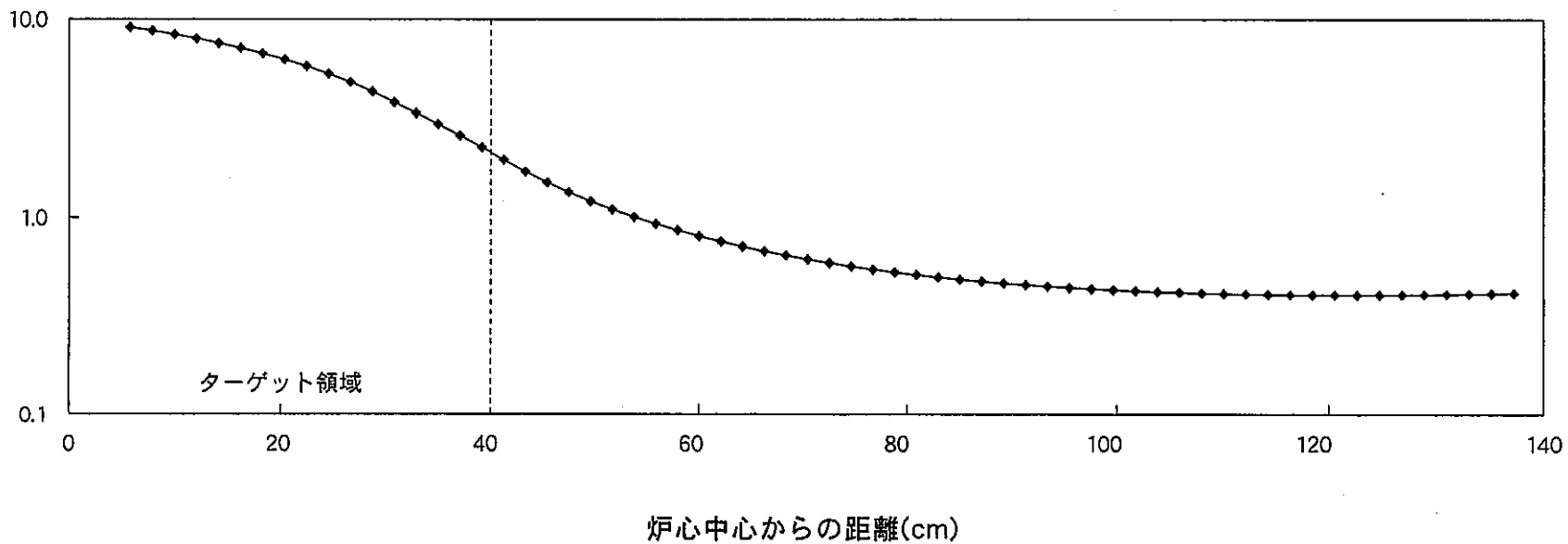


図2.9 全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ターゲット半径40cm)

中性子束の比 (未臨界増倍 / 固有値計算)

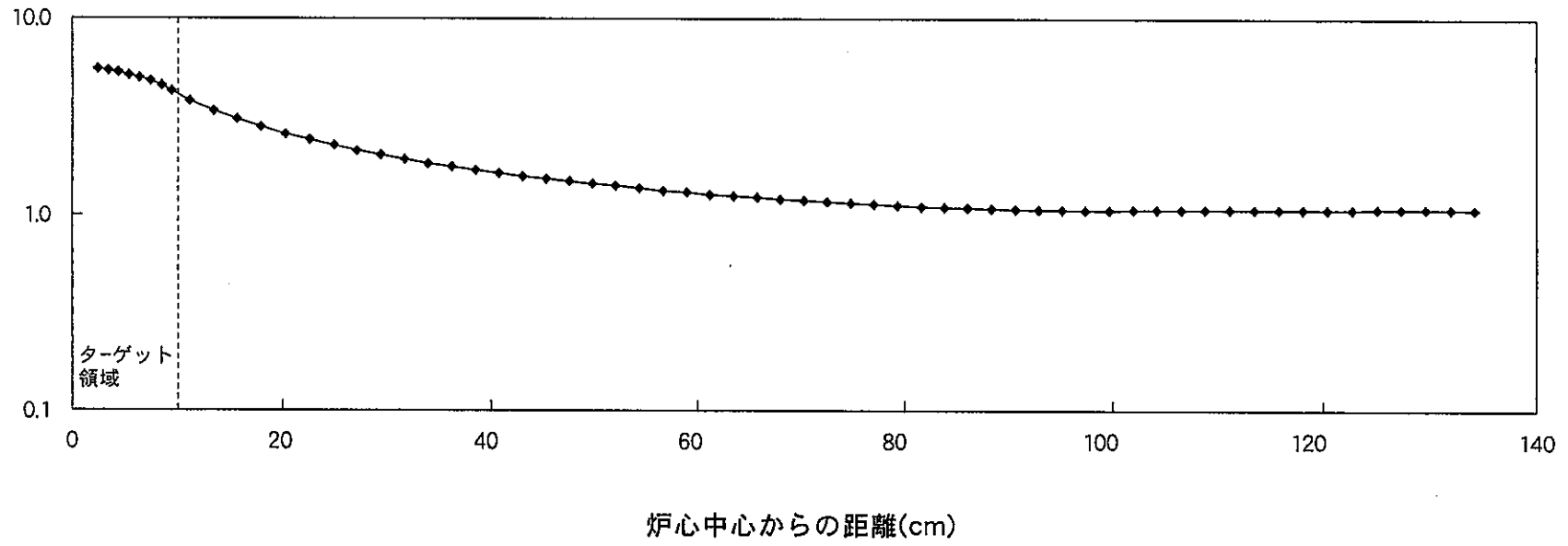


図2.10 全中性子束に対する未臨界増倍計算と固有値計算の比較 (ターゲット半径10cm)



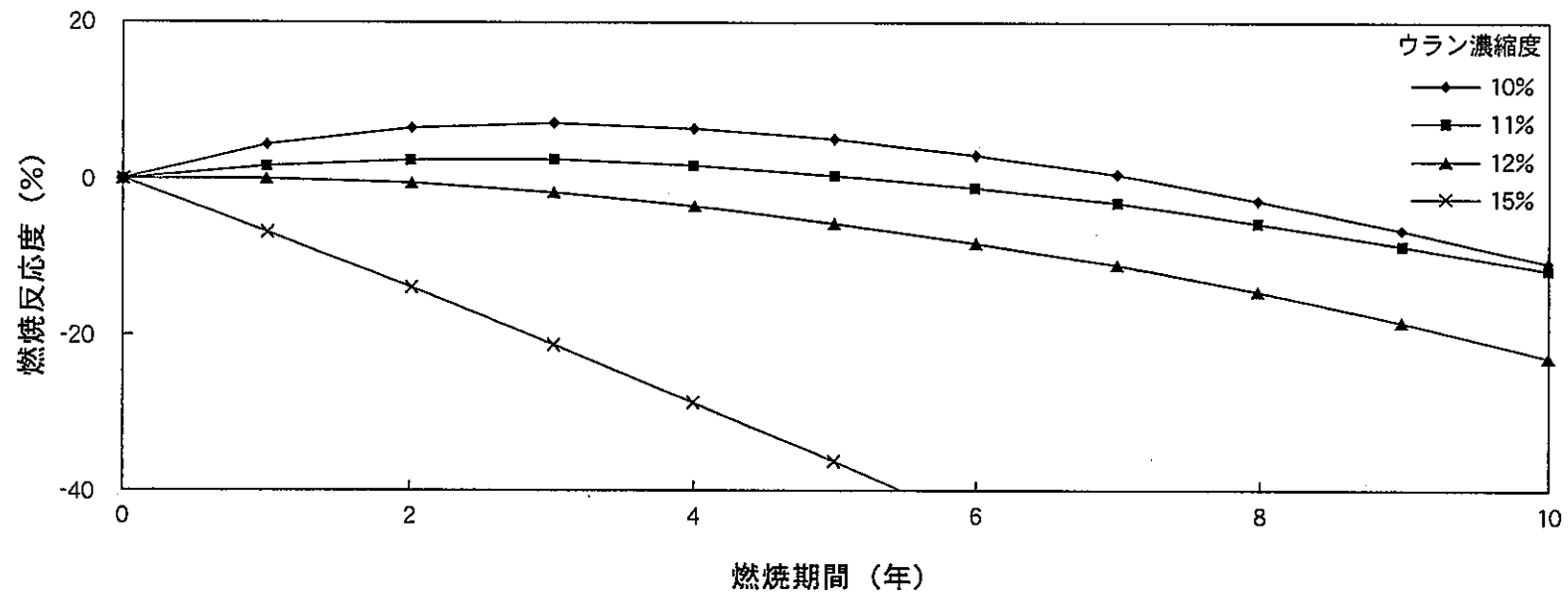


図3.1 ウラン濃縮度をパラメータとした初期炉心の燃焼反応度特性

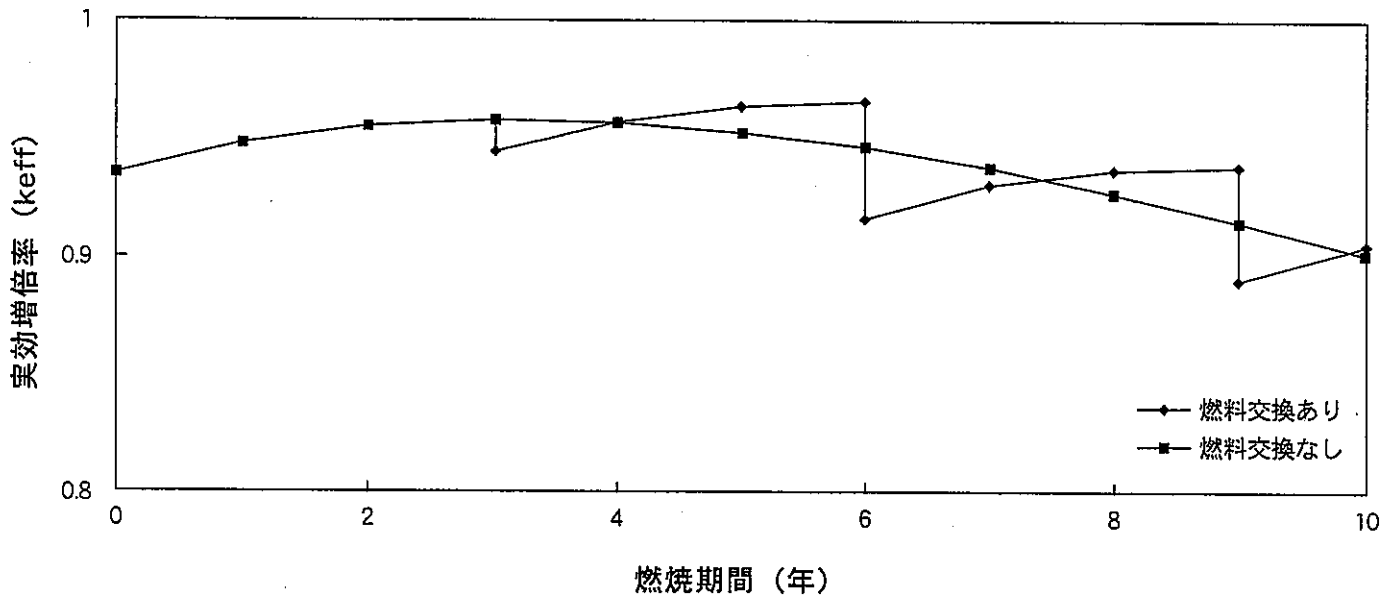


図3.2 10バッチ燃料交換による燃焼履歴 (1)

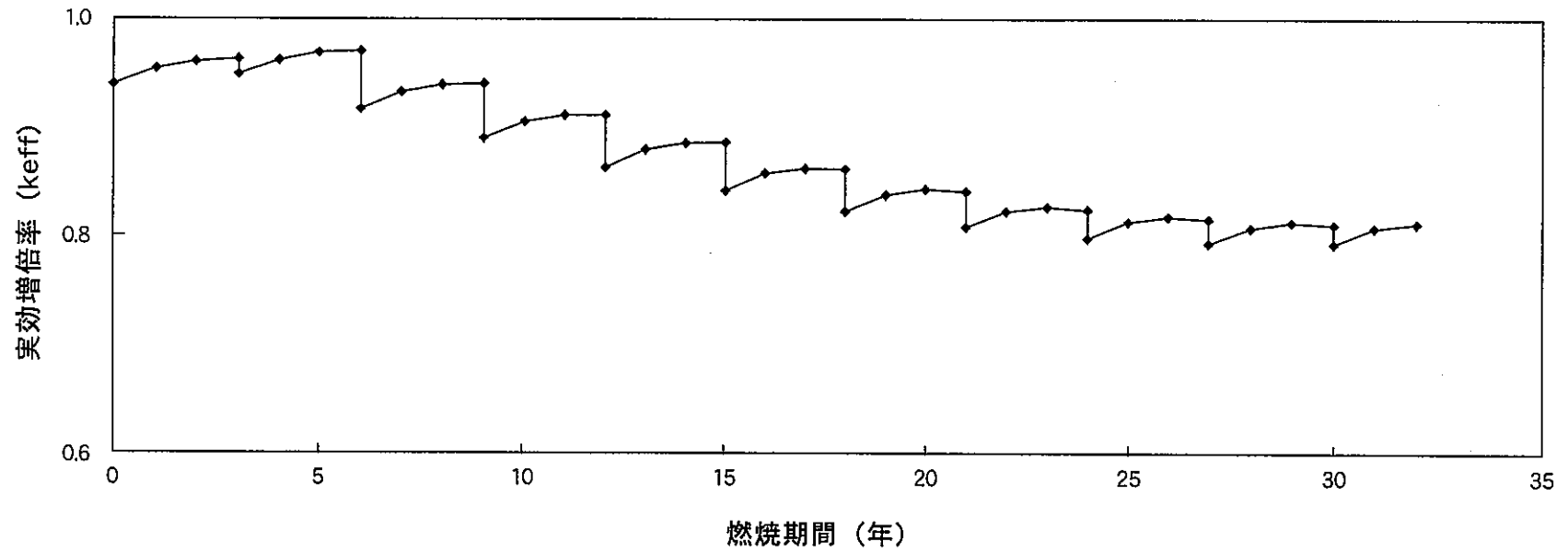


図3.2 10バッチ燃料交換による燃焼履歴 (2)

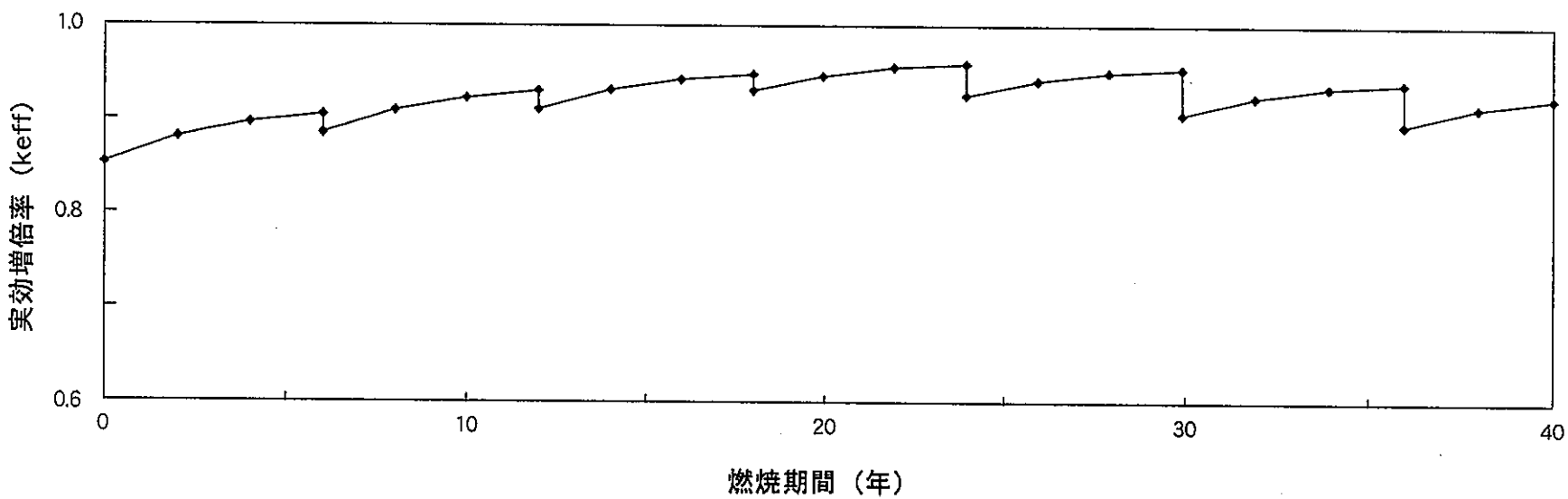
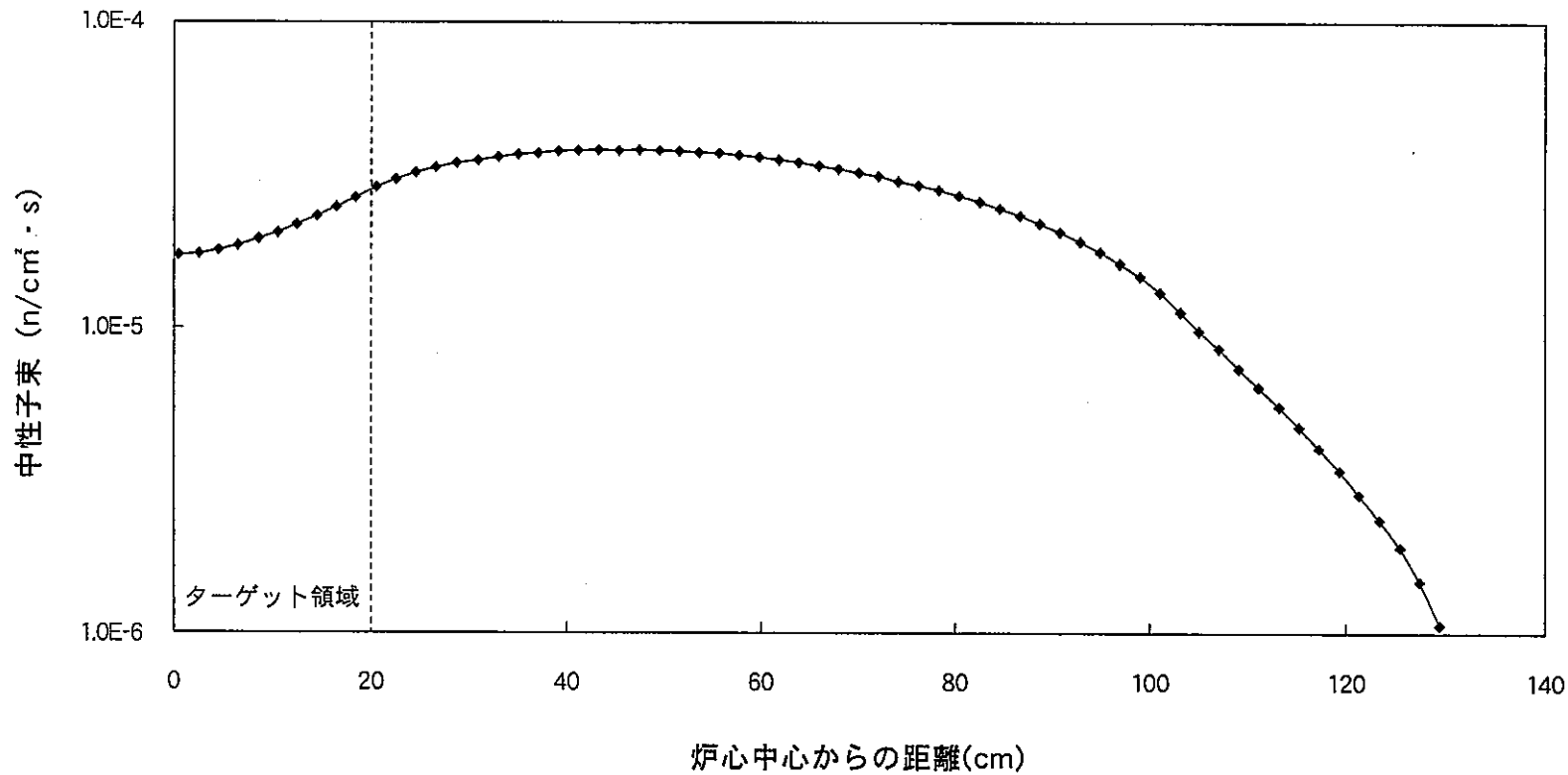


図3.3 燃料自給条件を導入した長期燃焼履歴

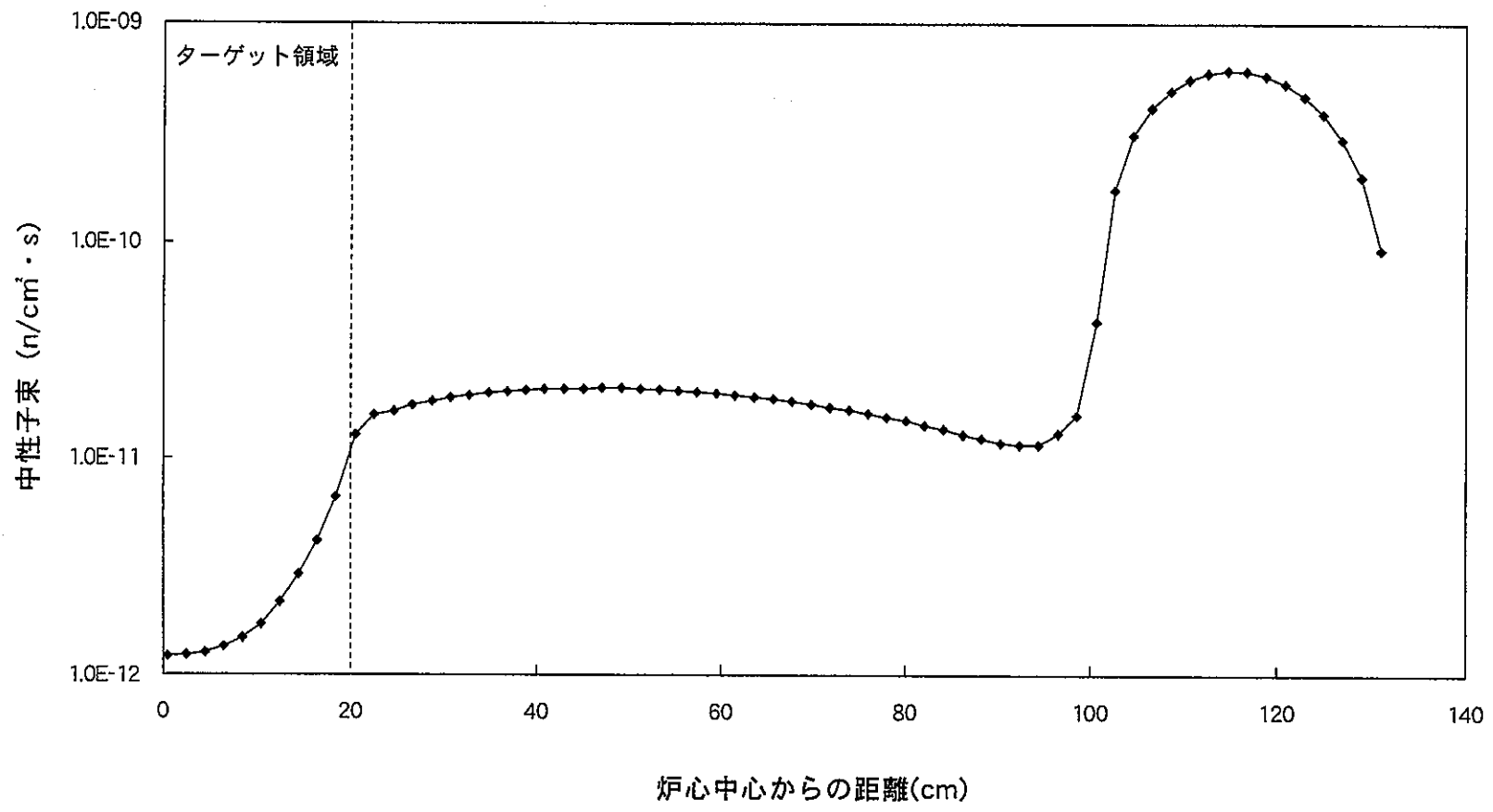
## 付録－1 ターゲット設置炉心の中性子束分布計算結果

ターゲット設置炉心（ターゲット半径20cm、ターゲット高さ40cm、炉心半径102.0cm）において未臨界増倍計算および固有値計算の二方法で得られた炉心内中性子束分布を熱群（ $\leq 0.4\text{eV}$ ）と高速群（ $\geq 100\text{keV}$ ）に分割するとともに全エネルギー群それぞれの径方向分布、および軸方向断面でみた中性子束等高線分布を図A-1～A-12に示す。

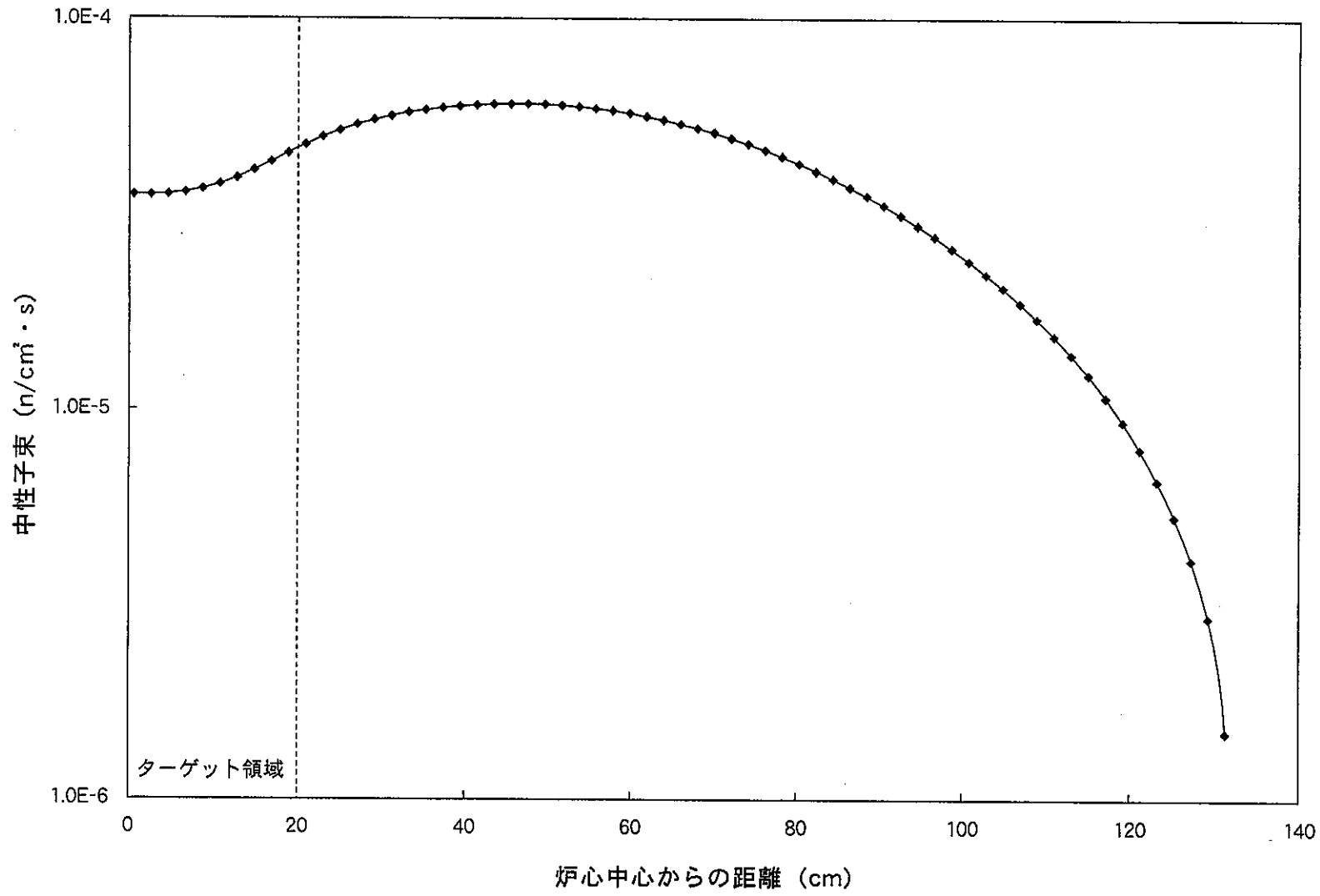
ターゲット設置炉心の全中性子束について固有値計算と未臨界増倍計算の比を示した図2.4～2.7の結果を裏付けるように、固有値計算で得られた径方向中性子束分布を未臨界増倍計算のものと比較すれば、高速群、熱群ともにターゲット領域に近い炉心中心部ほど中性子束は低下している。また全中性子束分布は、固有値計算、未臨界増倍計算ともに高速中性子束分布と同様の形状であることから、熱中性子束の寄与は十分小さいことを示している。



図A.1 固有値計算における径方向高速中性子束分布

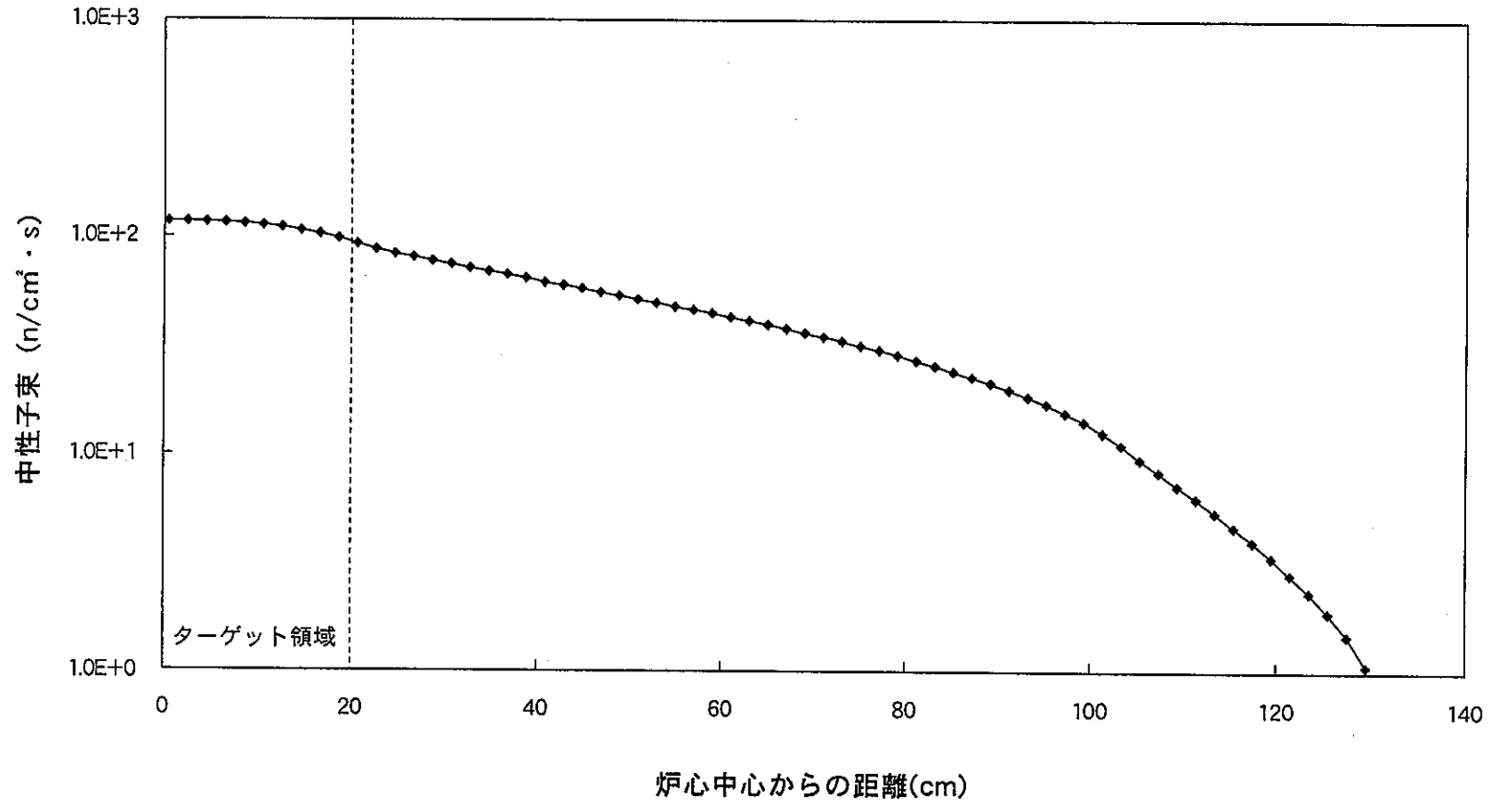


図A.2 固有値計算における径方向熱中性子束分布

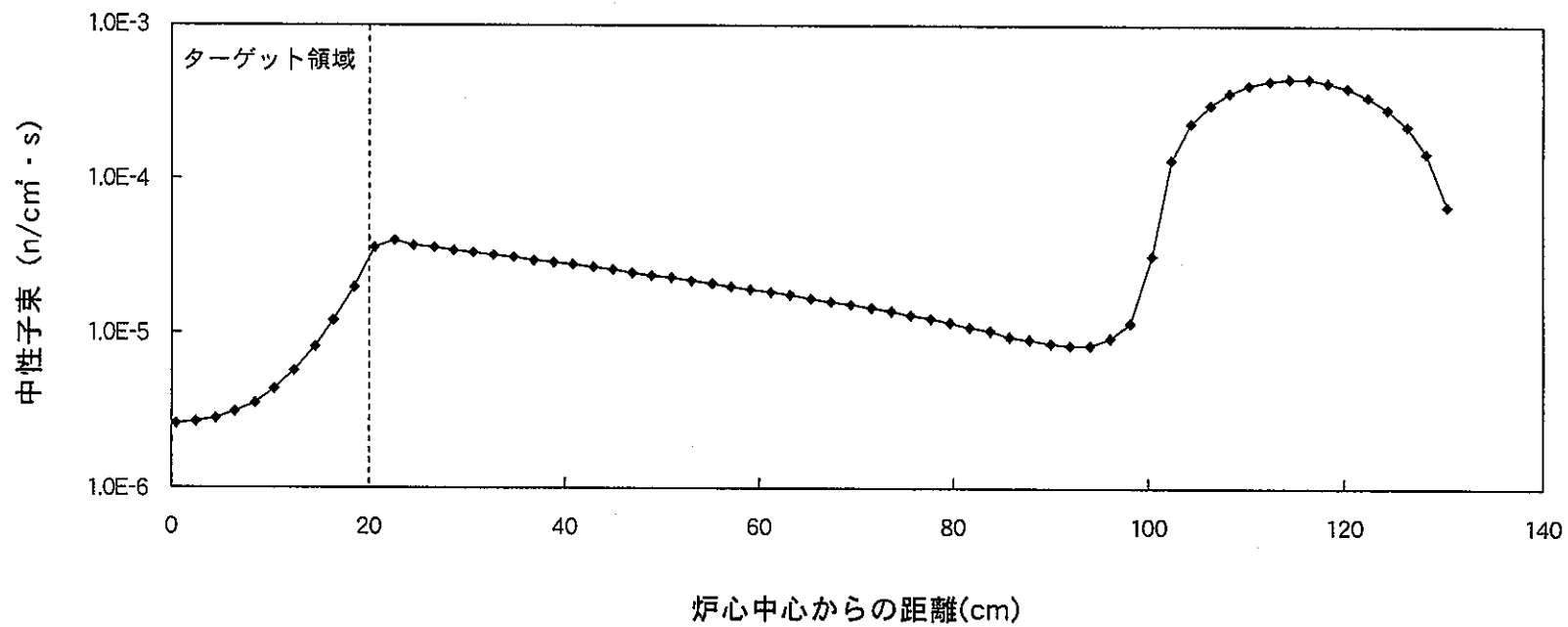


図A.3 固有値計算における径方向全中性子束分布

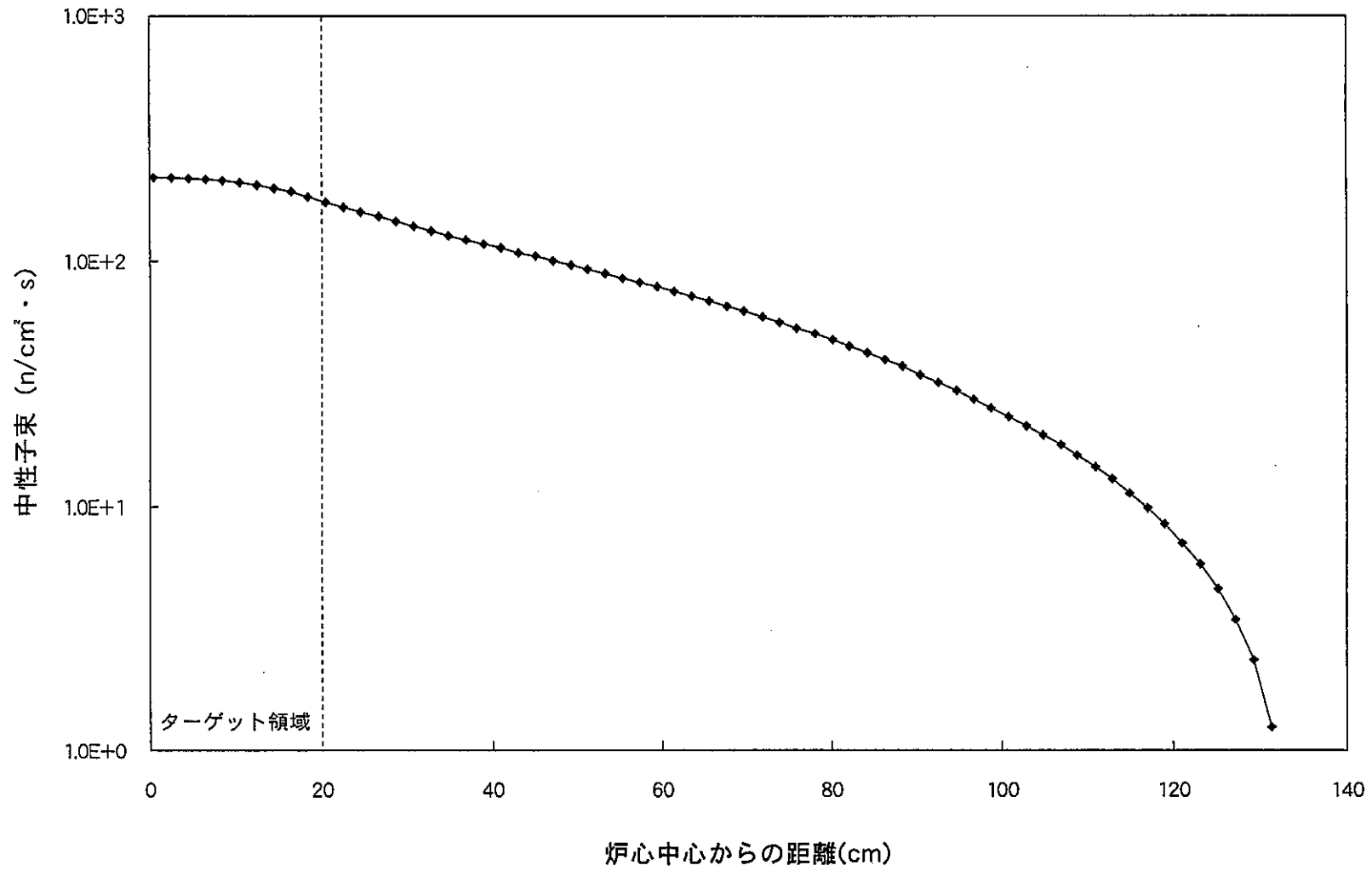




図A.4 未臨界増倍計算における径方向高速中性子束分布



図A.5 未臨界増倍計算における径方向熱中性子束分布



図A.6 未臨界増倍計算における径方向全中性子束分布

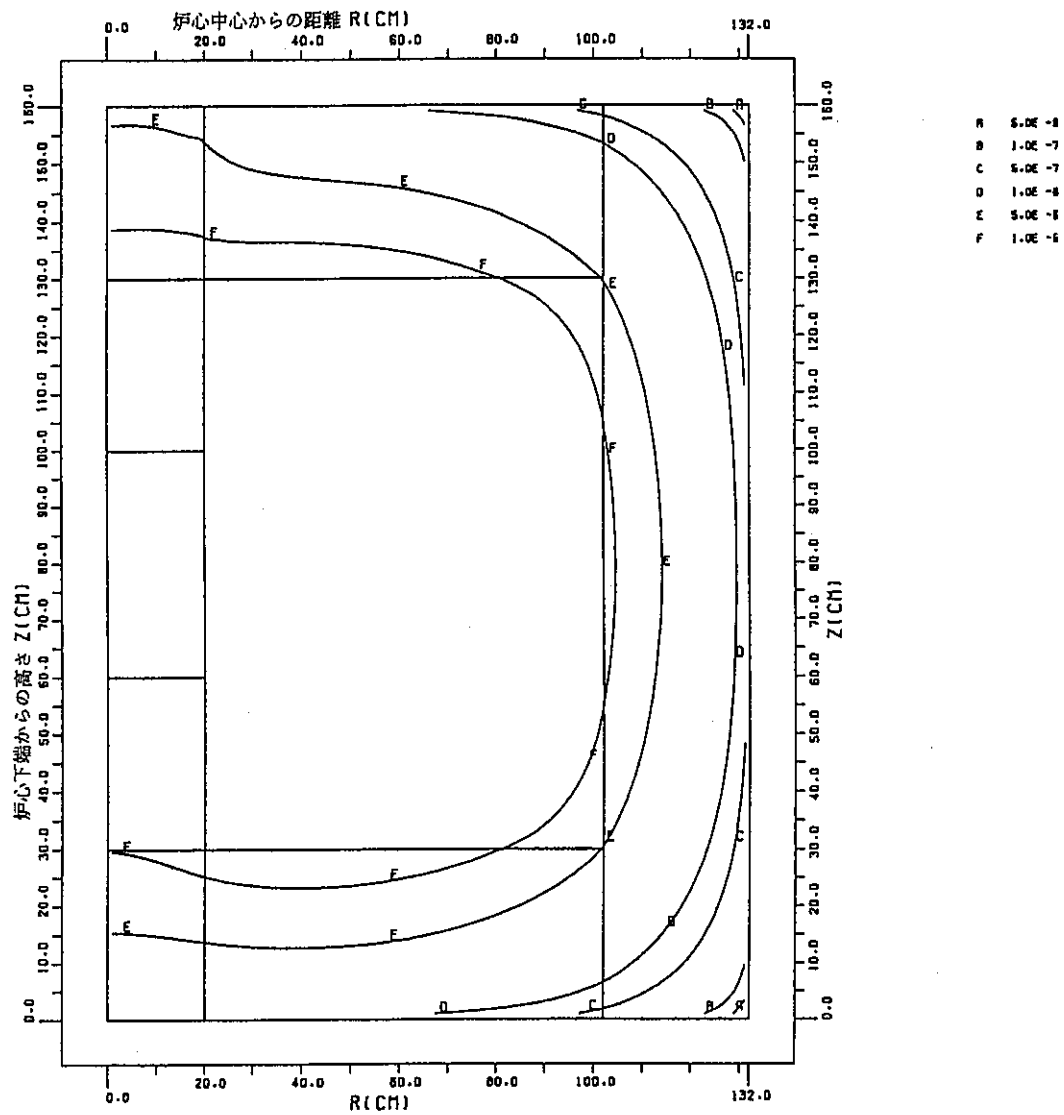


図 A.7 固有値計算における軸方向炉心断面の高速中性子束等高線

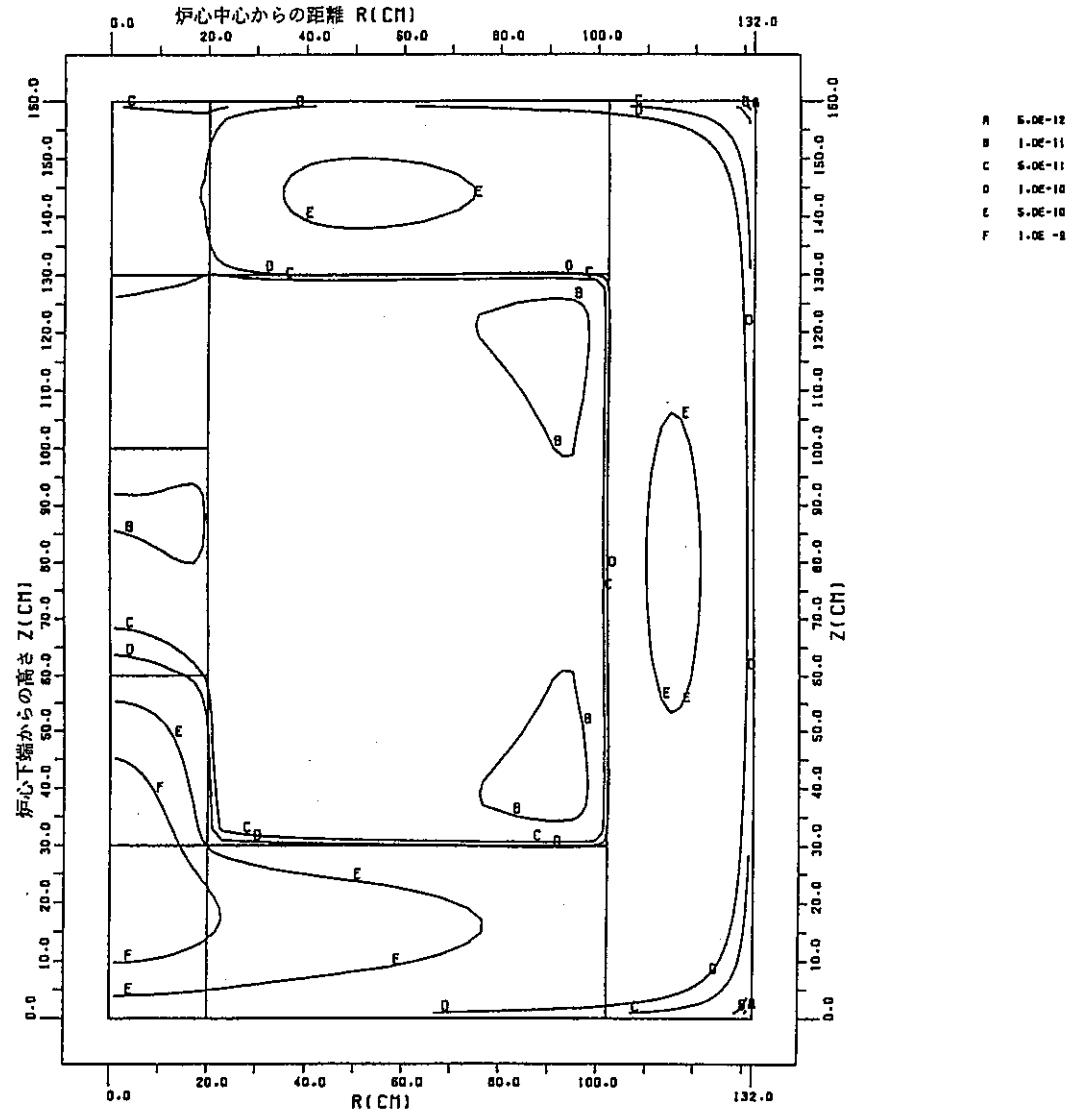


図 A.8 固有値計算における軸方向炉心断面の熱中性子束等高線

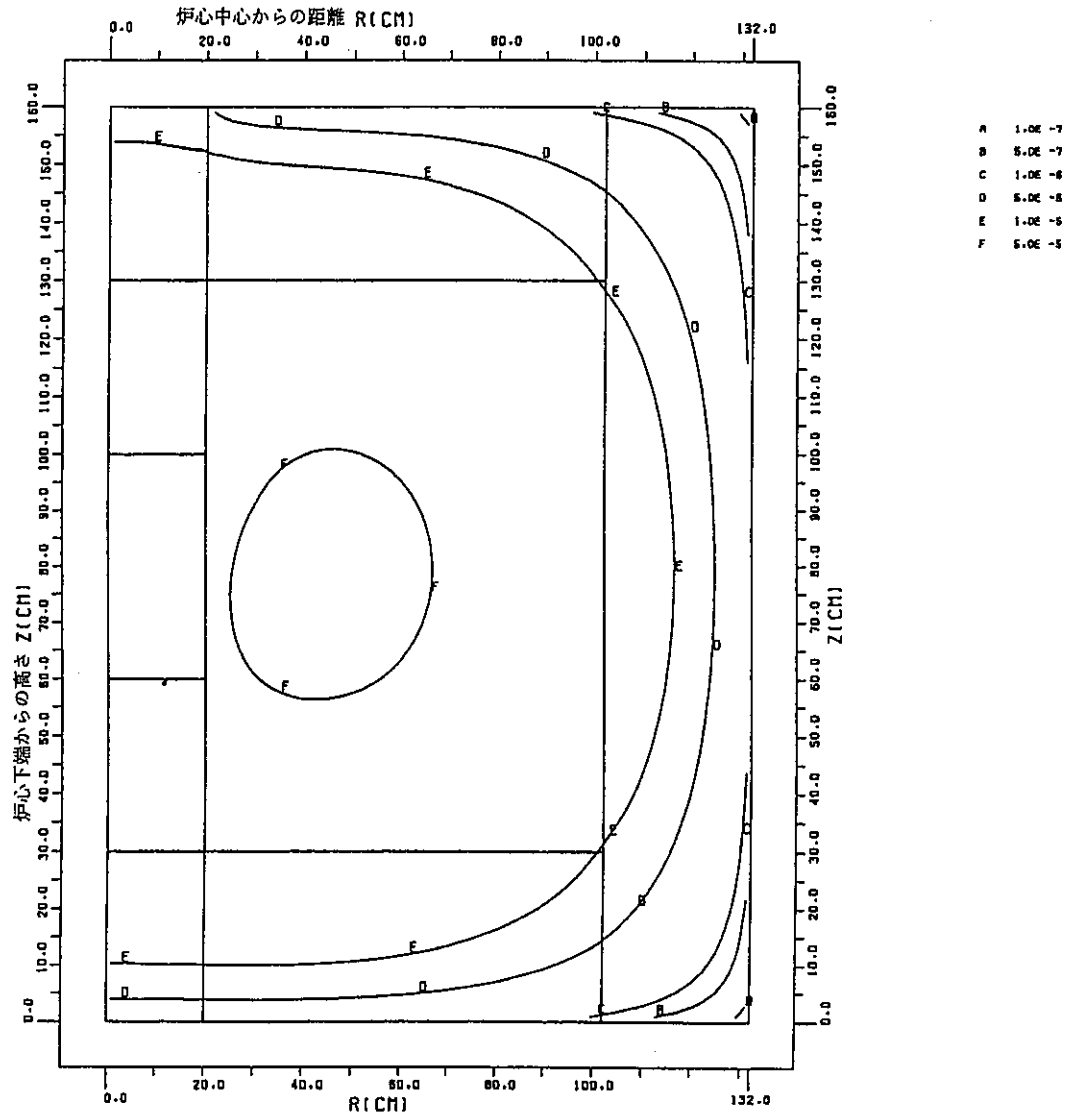


図 A.9 固有値計算における軸方向炉心断面の全中性子束等高線

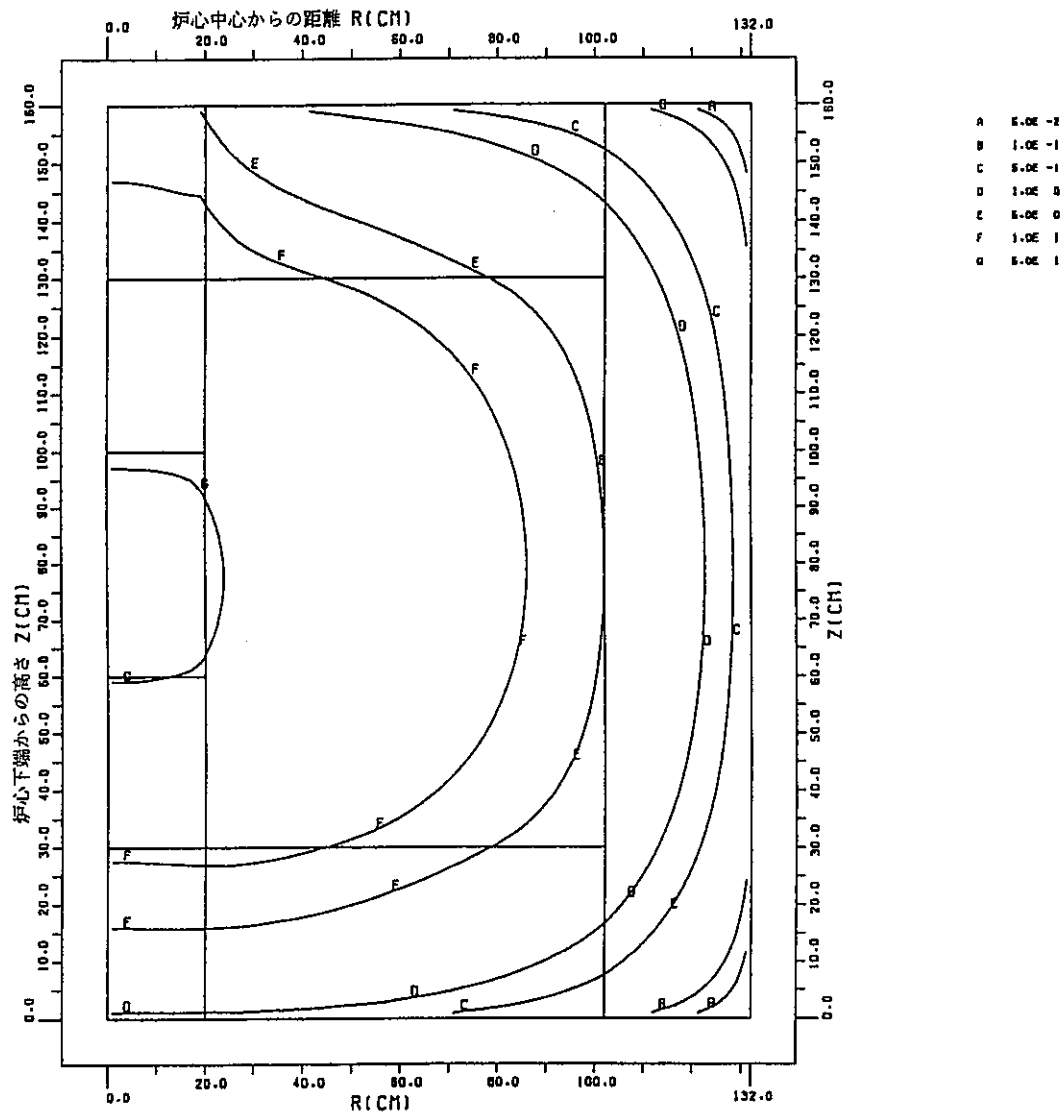


図 A.10 未臨界増倍計算における軸方向炉心断面の高速中性子束等高線

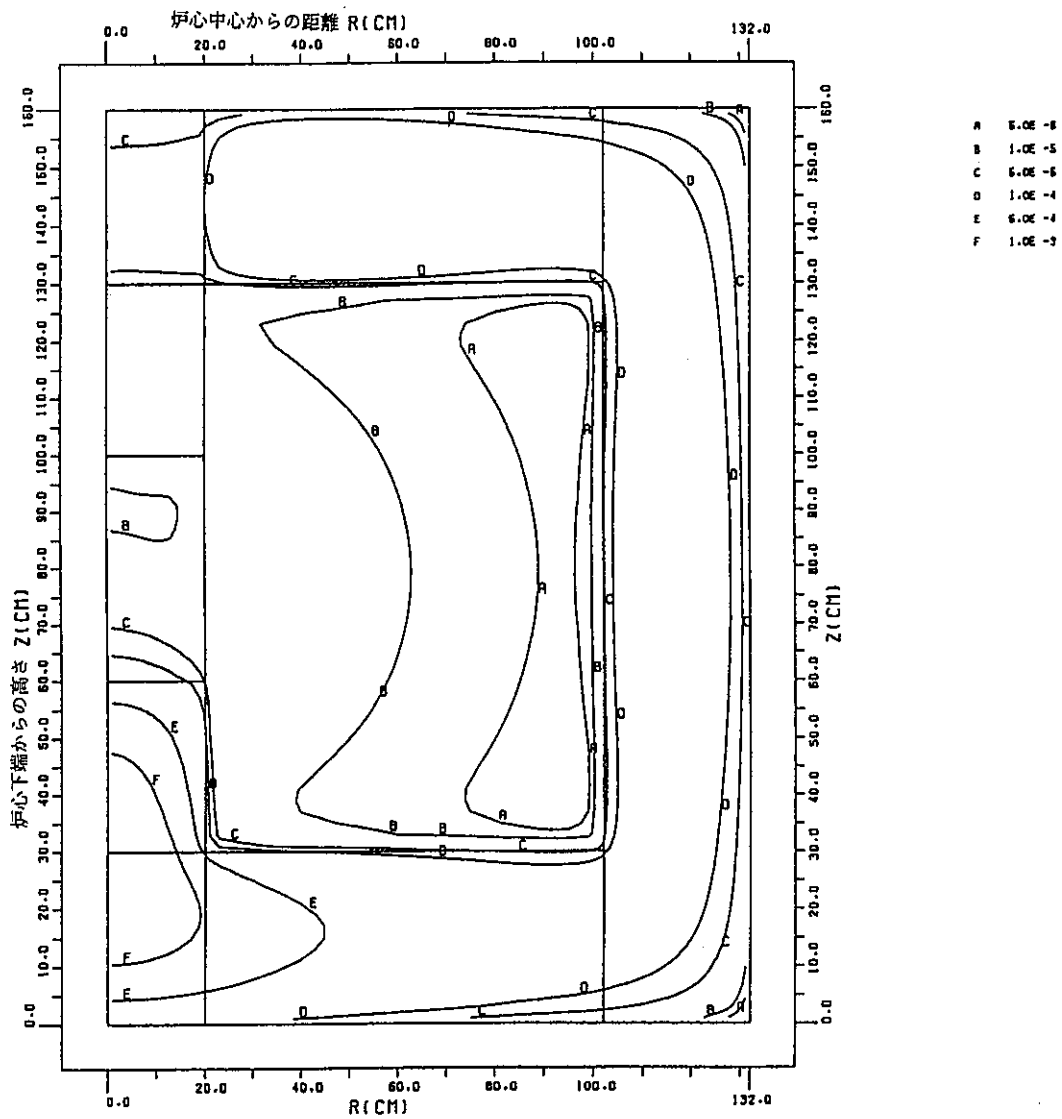


図 A.11 未臨界増倍計算における軸方向炉心断面の熱中性子束等高線



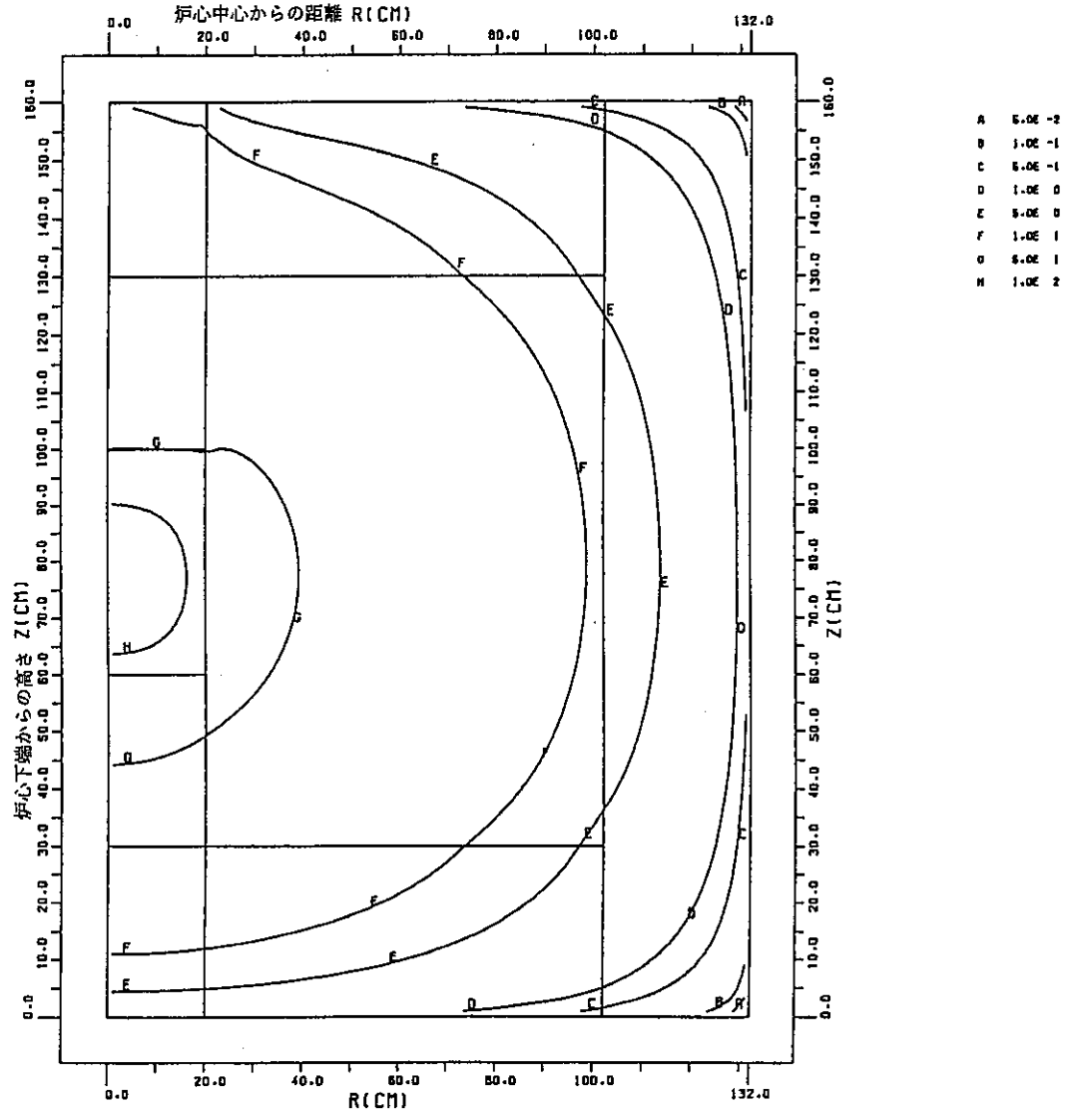


図 A.12 未臨界増倍計算における軸方向炉心断面の全中性子束等高線

## 付録-2 LAHETコードの概要

LAHETコードは1996年7月に米国LANLから公開された。計算手法は連続エネルギーモンテカルロ法による3次元ハドロン輸送解析コードシステムである。ガンマ線および20MeV以下の中性子の挙動はHMCNPコード（モンテカルロ法コードMCNPの改良版）で取り扱っている。

核定数断面積ライブラリーは粒子のエネルギーにより、20MeV以上についてはLAHET内で自動的に算出され、20MeV以下についてはENDF-B/VIによる連続エネルギー断面積を使用している。

LAHETコードのシステム構成を図A-13に示す。陽子加速器のターゲット部で核破砕実験（V. I. Belyakov-Bodin et al., Nucl. Inst. Methods, A295, 140(1990)）を解析した中性子スペクトルおよびターゲット発熱分布の計算例をそれぞれ図A-14、図A-15に示す。なおこの核破砕実験の主な実験条件は以下のとおりである。

入射陽子エネルギー：1.2GeV

ターゲット仕様：直径20cm, 高さ60cmの円筒形（Pb円板の積層）

測定方法：積層板の間に箔を置いて発熱量を計測

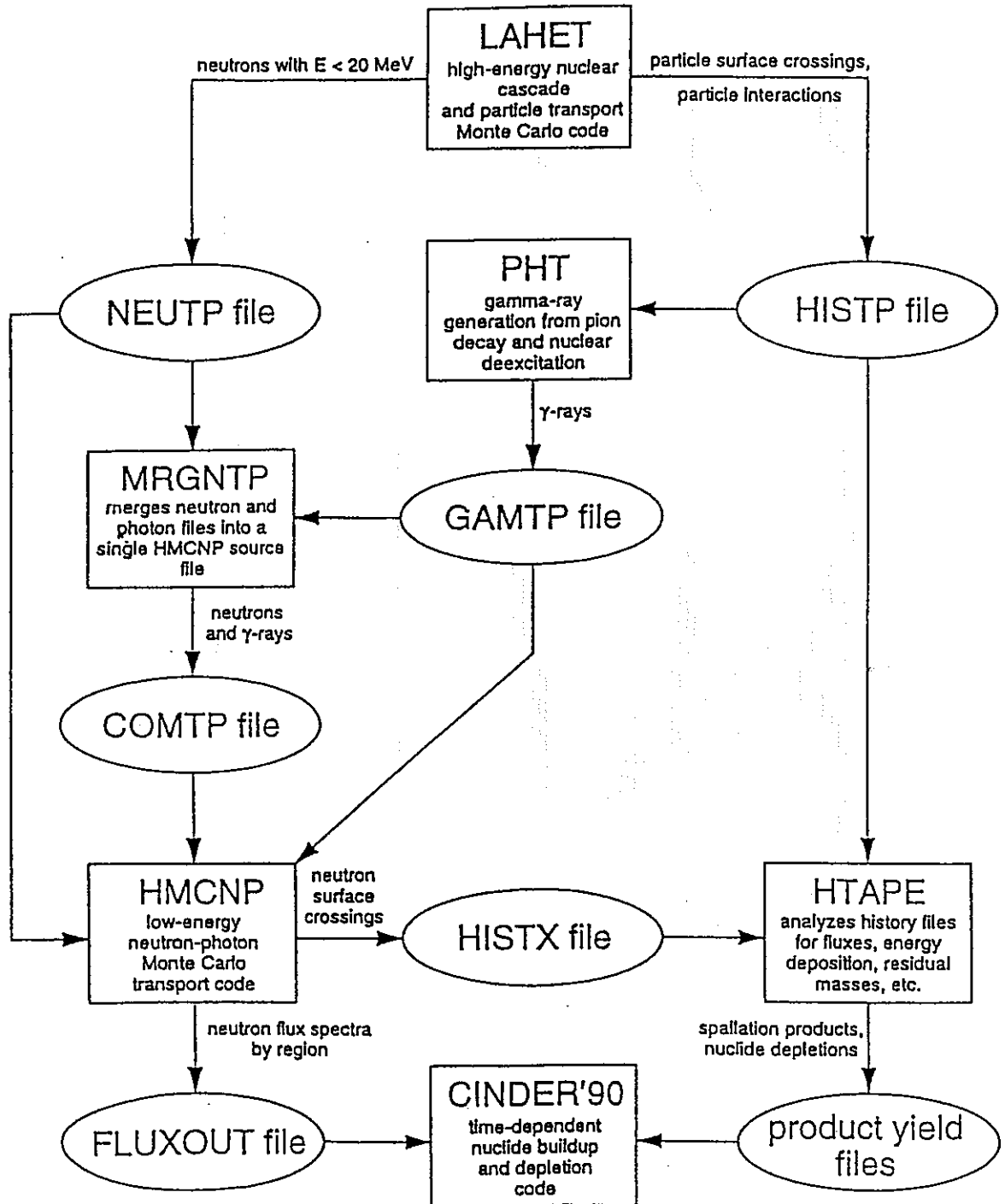


図 A.13 LAHET コードシステムの構成

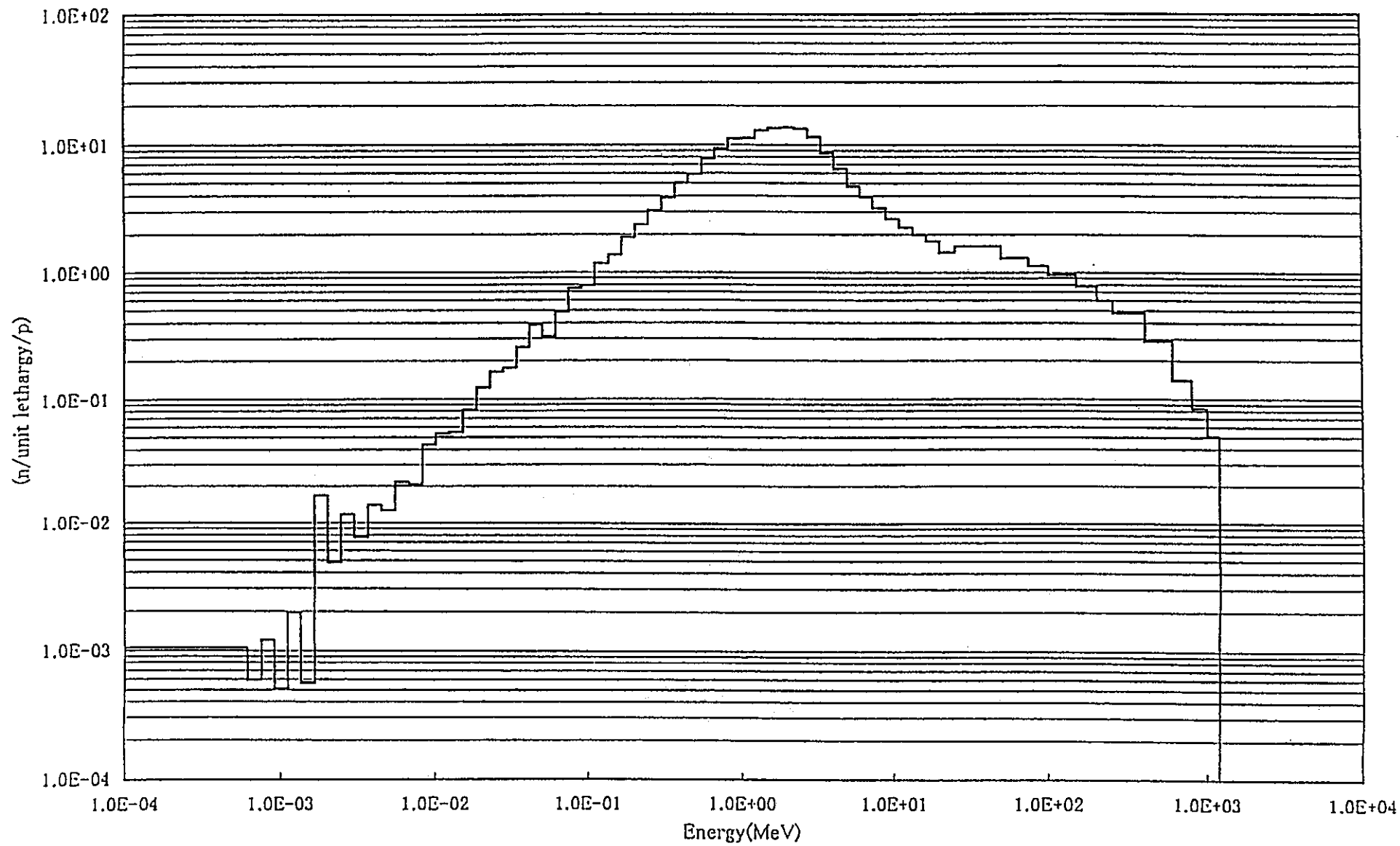


図 A.14 ターゲット側面の中性子漏洩スペクトル

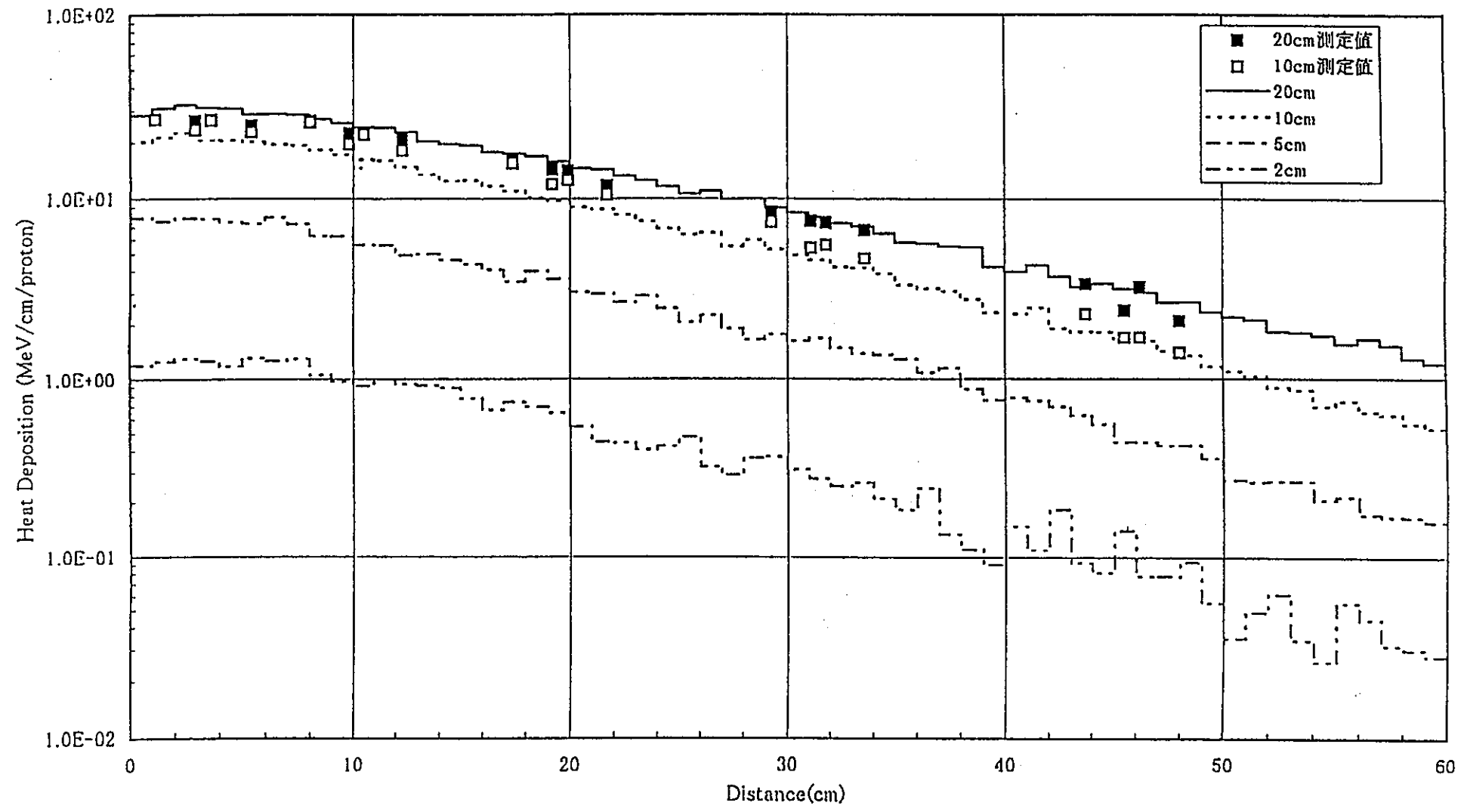


図 A.15 ターゲット内径方向発熱分布