

# 「常陽」照射MA試料の測定結果を用いたMAの 燃焼解析法精度評価

—先行基礎工学分野に関する平成7年度報告書—

1996年5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ください。

〒311-13 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

Enquires 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, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

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

# 「常陽」照射MA試料の測定結果を用いたMAの 燃焼解析法精度評価

－先行基礎工学分野に関する平成7年度報告書－

横山 賢治<sup>\*1)</sup>、竹田 敏一<sup>\*2)</sup>、山本 敏久<sup>\*3)</sup>、

北田 孝典<sup>\*3)</sup>、青山 卓史<sup>\*4)</sup>

## 要　旨

マイナーアクチニド(MA)の燃焼に関する研究の一環として、MAの代表核種である<sup>237</sup>Npについて、高速実験炉「常陽」で照射された<sup>237</sup>Np試料の測定結果に基づき燃焼解析法の精度評価を行った。

解析方法として、燃焼計算にはORIGEN2を用い、中性子束分布計算には従来から用いられている「常陽」炉心管理コードMAGI、3次元拡散計算コードCITATIONに加えて、照射集合体の内部構造を詳細に取り扱うため連続エネルギーモンテカルロコードMVPを導入した。また、ドシメータの反応率からアンフォールディングした中性子束も用い、これらを用いて計算した<sup>237</sup>Np変換率を比較した。

MVPの計算結果の比較により、今回の解析対象集合体では、集合体内部構造の非均質効果が<sup>237</sup>Npの燃焼計算に与える影響は小さいことがわかった。

MAGI、CITATIONの中性子束を用いた<sup>237</sup>Np変換率の計算は、中性子捕獲、核分裂反応とともに測定値を約30%過大評価した。また、アンフォールディングした中性子束を用いた場合でも測定値より約12~20%大きかった。この原因として、MAGI、CITATIONの中性子束計算法の他にアンフォールディングによる中性子束の誤差や<sup>237</sup>Np変換率の測定誤差についても検討する必要があることがわかった。

本研究により、<sup>237</sup>Np燃焼特性の解析精度を向上させる上で問題点を摘出した。

\*1) 研究生（大阪大学大学院 工学研究科 原子力工学専攻）

\*2) 瞽託（大阪大学工学部 原子力工学科 教授）

\*3) 客員研究員（大阪大学工学部 原子力工学科 助手）

\*4) 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター実験炉部技術課

# Accuracy of MA Transmutation Calculation with MA Specimens Irradiated in the Experimental Fast Reactor "JOYO"

Kenji YOKOYAMA\*, Toshikazu TAKEDA\*, Toshihisa YAMAMOTO\*  
Takanori KITADA\* and Takafumi AOYAMA\*\*

## ABSTRACT

The accuracy to calculate the transmutation of minor actinides (MAs) was evaluated using MA specimens irradiated in the Experimental Fast Reactor JOYO. The  $^{237}\text{Np}$  transmutation characteristics were analyzed in this study.

The transmutation ratio of  $^{237}\text{Np}$  was calculated by the one point burnup calculation code "ORIGEN2." The neutron fluxes which were input to "ORIGEN2" were calculated with the JOYO core management code system "MAGI" and "CITATION", both are based on three dimensional diffusion theory with 7 energy group. The continuous energy Monte-Carlo code "MVP" was introduced in order to evaluate the detail flux distribution inside the subassembly. The neutron flux obtained by a radiometric dose analysis without  $^{237}\text{Np}$  dosimeter was also used for the transmutation calculation.

By comparing the flux distributions by MVP with and without the geometric heterogeneity in a subassembly, it was found that there had little effect on the calculation of  $^{237}\text{Np}$  transmutation near the core center of JOYO Mark-II.

Calculated  $^{237}\text{Np}$  transmutation ratio with neutron fluxes by the MAGI and CITATION were 30% larger than that obtained from the  $\gamma$ -ray spectrum measurement, whereas the calculated value with the adjusted neutron flux by a radiometric dose analysis was about 12~20% larger than the measured value. It is apparently due to an overestimation of the neutron fluxes by the MAGI and CITATION. As it was also found that there were large uncertainties in the adjusted neutron flux and the measured  $^{237}\text{Np}$  transmutation ratio, further investigation is required.

As a result of this study, the points to be considered were found to improve the accuracy of the analysis.

---

\* Faculty of Engineering, Department of Nuclear Engineering, Osaka University

\*\* Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, O-arai Engineering Center, PNC

## 目 次

第1章 序 論 .....	1
第2章 解析手法 .....	5
2.1 $^{237}\text{Np}$ ドシメータ装荷位置での中性子束と1群断面積 .....	5
2.2 $^{237}\text{Np}$ ドシメータの燃焼計算 .....	9
第3章 結果と検討 .....	18
3.1 1群断面積及び中性子スペクトルの計算結果と検討 .....	18
3.2 中性子束分布の計算結果と検討 .....	20
3.3 $^{237}\text{Np}$ ドシメータの変換率の測定値と検討 .....	22
3.4 $^{237}\text{Np}$ ドシメータの変換率の計算結果と検討 .....	22
3.5 $^{237}\text{Np}$ ドシメータの変換率の誤差評価 .....	25
第4章 結 論 .....	56
謝 辞 .....	57
参考文献 .....	58
付 錄 計算機資源の利用状況 .....	59

## 表リスト

- 表1.1 Npドシメータリスト  
表1.2 CMIR-4 の照射履歴  
表2.1 JFS-3-J2の7群エネルギー構造  
表3.1 MAGIの中性子スペクトル (BOC) で縮約された断面積(JENDL-3.2)  
表3.2 MAGIの中性子スペクトル (EOC) で縮約された断面積(JENDL-3.2)  
表3.3 CITATION (7群Hex-Z体系) の中性子スペクトルで縮約された断面積(JENDL-3.2)  
表3.4 CITATION (70群R-Z体系) の中性子スペクトルで縮約された断面積(JENDL-3.2)  
表3.5 NEUPAC (103群) の中性子スペクトルで縮約された断面積(JENDL-3.2)  
表3.6 ORIGEN2の内蔵ライブラリーの断面積 (FFTF炉中心のスペクトルで縮約, ENDF/B-V)  
表3.7 MVP (CMIR-4内部構造均質化) の計算結果(JENDL-3.2)  
表3.8 MVP (CMIR-4内部構造考慮) の計算結果(JENDL-3.2)  
表3.9 MVP (CMIR-4内部構造考慮, 第24サイクルBOC, JENDL-3.2) により計算された<sup>237</sup>Npの実効断面積と核分裂スペクトルと1/Eスペクトルで7群縮約された断面積 (JENDL-3.2)との比較  
表3.10 MVP (CMIR-4内部構造考慮, 第24サイクルBOC, JENDL-3.2) により計算された<sup>238</sup>Puの実効断面積と核分裂スペクトルと1/Eスペクトルで7群縮約された断面積 (JENDL-3.2)の比較  
表3.11 計算に用いた中性子束  
表3.12 <sup>237</sup>Np変換率の測定結果  
表3.13 <sup>237</sup>Np変換率の計算結果

## 図リスト

- 図2.1  $^{237}\text{Np}$  ドシメータ変換率の解析手法
- 図2.2 CMIR-4内部構造を均質化した場合のMVPの計算体系（水平断面図）
- 図2.3 CMIR-4内部構造を均質化した場合のMVPの計算体系（垂直断面図）
- 図2.4 CMIR-4内部構造を均質化した場合のMVPの計算体系（CMIR-4水平断面拡大図）
- 図2.5 CMIR-4内部構造を考慮した場合のMVPの計算体系（水平断面図）
- 図2.6 CMIR-4内部構造を考慮した場合のMVPの計算体系（垂直断面図）
- 図2.7 CMIR-4内部構造を考慮した場合のMVPの計算体系（CMIR-4水平断面拡大図）
- 図3.1 ドシメータ装荷位置での7群中性子スペクトルの比較（第24サイクルBOC）
- 図3.2 ドシメータ装荷位置での7群中性子スペクトルの比較（第25サイクルBOC）
- 図3.3 ドシメータ装荷位置での7群中性子スペクトルの比較（第26サイクルBOC）
- 図3.4 ドシメータ装荷位置での7群中性子スペクトルの比較（第27サイクルBOC）
- 図3.5 MVPの中性子スペクトル統計誤差（CMIR-4内部構造均質化， 第24サイクルBOC）
- 図3.6 MVPの中性子スペクトル統計誤差（CMIR-4内部構造考慮， 第24サイクルBOC）
- 図3.7 CITATION (70群R-Z体系) による中性子スペクトル
- 図3.8 NEUPAC (103群) による中性子スペクトル
- 図3.9  $^{237}\text{Np}$  の70群断面積
- 図3.10  $^{238}\text{Pu}$  の70群断面積
- 図3.11 MAGIによる中性子束計算結果（第24サイクルBOC）
- 図3.12 MAGIによる中性子束計算結果（第24サイクルEOC）
- 図3.13 MAGIによる中性子束計算結果（第25サイクルBOC）
- 図3.14 MAGIによる中性子束計算結果（第25サイクルEOC）
- 図3.15 MAGIによる中性子束計算結果（第26サイクルBOC）
- 図3.16 MAGIによる中性子束計算結果（第26サイクルEOC）
- 図3.17 MAGIによる中性子束計算結果（第27サイクルBOC）
- 図3.18 MAGIによる中性子束計算結果（第27サイクルEOC）
- 図3.19 CITATION (7群Hex-Z体系) による中性子束計算結果（第24サイクルBOC）
- 図3.20 CITATION (7群Hex-Z体系) による中性子束計算結果（第25サイクルBOC）
- 図3.21 CITATION (7群Hex-Z体系) による中性子束計算結果（第26サイクルBOC）
- 図3.22 CITATION (7群Hex-Z体系) による中性子束計算結果（第27サイクルBOC）
- 図3.23 MVP (CMIR-4内部構造均質化) による中性子束計算結果（第24サイクルBOC）
- 図3.24 MVP (CMIR-4内部構造均質化) による中性子束計算結果（第25サイクルBOC）
- 図3.25 MVP (CMIR-4内部構造均質化) による中性子束計算結果（第26サイクルBOC）
- 図3.26 MVP (CMIR-4内部構造均質化) による中性子束計算結果（第27サイクルBOC）
- 図3.27 MVP (CMIR-4内部構造考慮) による中性子束計算結果（第24サイクルBOC）
- 図3.28 MVP (CMIR-4内部構造考慮) による中性子束計算結果（第25サイクルBOC）
- 図3.29 MVP (CMIR-4内部構造考慮) による中性子束計算結果（第26サイクルBOC）
- 図3.30 MVP (CMIR-4内部構造考慮) による中性子束計算結果（第27サイクルBOC）

## 第1章 序 論

使用済燃料の再処理で発生する高レベル放射性廃棄物中に含まれる長半減期のマイナーアクチニド(MA)の処理方法として、これを高速炉により燃焼させる技術開発が進められているが、この技術開発における重要な研究課題の一つに高速炉実機におけるMAの燃焼特性の把握と燃焼解析法の開発がある。

本研究では、高速実験炉「常陽」で照射したMA試料の測定結果を用いて、MAの燃焼解析法（核データ、燃焼チェーン、詳細中性子束分布計算法等）の精度評価を行う。

このうち、平成7年度では $^{237}\text{Np}$ の燃焼特性を評価対象とし、その精度向上を図る。特にドシメータが装荷された照射集合体内部の中性子束分布及びスペクトルを詳細に計算するために連続エネルギーモンテカルロコードMVP<sup>(1)</sup>を導入する。 $^{237}\text{Np}$ の燃焼計算には、詳細な燃焼チェーンが考慮されているORIGEN2<sup>(2)</sup>を用い、「常陽」の中性子スペクトルで縮約した1群断面積を使用する。ただし、ドライバー燃料等の中性子束分布計算及び燃焼計算については、炉心管理コードMAGIの計算結果を用いる。

現状の $^{237}\text{Np}$ の燃焼計算法について、以下の問題点が挙げられる。

(1) MAGIによる中性子束分布及び燃焼計算では、エネルギーが7群であり、径方向には1集合体あたり1メッシュで計算しているので、照射集合体内部の詳細な中性子束分布及びスペクトルが計算できない。

(2) ORIGEN2による燃焼計算では、照射場のスペクトルで縮約された1群断面積を用いる必要がある。

以上のように、現状では $^{237}\text{Np}$ の燃焼計算に入力するドシメータ装荷位置での中性子束に集合体で平均化した値を用いているので、照射集合体内部の中性子束分布計算を詳細に行う。また、 $^{237}\text{Np}$ の燃焼計算において「常陽」の中性子スペクトルにより縮約された1群断面積を用いる。ただし、ドライバー燃料の中性子束分布計算及び燃焼計算においては、運転サイクルごとの燃料交換や照射履歴を計算に取り入れる必要があるので、これについては従来どおりMAGIで行う。

照射集合体内部の中性子束及びスペクトルを従来のMAGI、CITATIONに加えて、連続エネルギーモンテカルロコードMVPで求め、その中性子スペクトルで縮約した1群断面積及び全中性子束を用いて、ORIGEN2で $^{237}\text{Np}$ の燃焼計算を行う。また、ドシメータによりアンフォールディングされた中性子スペクトルも用いる。MAGIについては、断面積セットがJFS-3-J2 (JENDL-2ベース) に更新され、JFS-3-J2による計算結果を用いて解析を進める。

現在までに、「常陽」で照射され、評価に用いることができる<sup>237</sup>Npドシメータは表1.1に示す16集合体である。このうち、照射集合体周辺の中性子束の空間変化が小さく、モンテカルロコードの入力体系が容易となると考えられることから、炉心第1列で照射されたCMIR-4を解析対象に選定した。CMIR-4集合体の照射条件は以下のとおりであり、表1.2にCMIR-4の詳細な照射履歴を示す。

- ・ 照射期間 : MK-II炉心第24サイクルから第27サイクル  
(平成4年3月24日～平成5年3月26日)
- ・ 原子炉積算出力 : 176.0EFPD (定格出力換算で $1.52 \times 10^7$ sec)
- ・ ドシメータの装荷位置 : 炉心アドレス1A1  
炉中心からの軸方向距離 (0cm)  
CMIR-4の軸心管のドシメータキャップセル内
- ・ ドシメータの種類 : Ni, Sc, Np\* (\*はバナジウムキャップセルに封入)

表1.1 Npドシメータリスト

DATE:1995.11/17

No.	集合体	受入れ年月日	炉心取出年月日	照射サイクル	アドレス	nvt (E>0.1)	EFPD	炉中心レベルからの軸方向位置(cm)	個数
1	B0J		83.7/8	0	1A1	$0.73 \times 10^{22}$	27.81	67.4, -77.2, -155.7	3
2	B1J		83.12/20	0-2	1E1, 2B1	$2.87 \times 10^{22}$	115.97	67.4, 0, -77.2, -155.7	4
3	CMIR-0		83.7/8	0	1C1	$0.70 \times 10^{22}$	27.81	26.8, 0, -28.2	3
4	C1J		84.8/26	1-4	2E2	$4.58 \times 10^{22}$	174.55	27.5, 0, -27.5	3
5	SMIR-7	87.6/11	86.12/9	7'-12'''	7F7	$0.68 \times 10^{22}$	222.28	59.1, -12.9, -54.1	3
6	UPR-1.2	90.2/9	88.9/6	13-16	5C2上部		214.71	181, 195, 211, 227, 241	5
7	UPR-1.3	91.6/4	90.1/4	17-20	5C2上部		245.40	181.191, 204, 288	4
8	CMIR-1	92.7/9	88.9/12	14-16	1A1	$4.15 \times 10^{22}$	160.50	67.4, 0, -77.2	3
9	B2M	92.9/10	86.6/27	3-10	3C2	$7.65 \times 10^{22}$	350.70	67.4, 0, -77.2, -153.7	4
10	SMIR-8	93.2/23	87.6/5	8-12'''	7B7	$0.82 \times 10^{22}$	221.52	61.0, 30.9, -1.9	3
11	SMIR-9	93.2/24	89.4/5	13-17	5B2	$3.29 \times 10^{22}$	283.05	54.4, -3.2, 37.7	3
12	B6	94.7/25	90.1/8	17-20	3F2	$5.27 \times 10^{22}$	217.44	0	1
13	CMIR-4	95.5/26	93.4/6	24-27	1A1	$4.63 \times 10^{22}$	175.97	0	1
14	SMIR-15	95.5/26	93.4/5	18-27	5C5	$5.40 \times 10^{22}$	558.04	6.5, -20.2, -53.5	3
15	SMIR-19	95.5/26	91.10/4	21-23'''	6F4	$1.39 \times 10^{22}$	97.84	40.8, 6.5, -20.2, -53.5	6
16	B-7	95.5/26	91.6/7	21-23	3F2	$3.75 \times 10^{22}$	193.47	0	1

注) · nvtは計算値を示す。  
 · No.1~4は評価済み。

表1.2 CMIR-4の照射履歴

第24サイクル	1992/3/24 8:28 ↓ 1992/5/4 21:00	41.52EFPD
定期検査		105.11日
第25サイクル	1992/8/17 23:37 ↓ 1992/10/21 20:00	64.85EFPD
定期検査		63.61日
第26サイクル	1992/12/24 10:41 ↓ 1993/2/1 23:00	39.51EFPD
定期検査		21.79日
第27サイクル	1993/2/23 17:57 ↓ 1993/3/25 20:00	30.09EFPD
合計		175.97EFPD

## 第2章 解析手法

MAGI、CITATIONから得られる中性子スペクトル及び全中性子束、今回新しく導入した連続エネルギーモンテカルロコードMVPから得られる中性子束分布及び1群実効断面積、NEUPAC<sup>(3)</sup>でアンフォールディングして得られる中性子スペクトル及び全中性子束を用い、8種類の方法で<sup>237</sup>Npドシメータの変換率の計算を行う。

ドライバー燃料の燃焼計算については、MVPでは計算量が膨大になり現実的でないので、すべてMAGIで得られた計算結果を用いる。<sup>237</sup>Npドシメータの燃焼計算は、MAGI、CITATION、NEUPAC、MVPの結果を反映した1群断面積と全中性子束を用いてORIGEN2で行う。

<sup>237</sup>Npドシメータの燃焼計算に必要な1群断面積と全中性子束の求め方について次に説明する。各手法についてまとめたものを図2.1に示す。

### 2.1 <sup>237</sup>Npドシメータ装荷位置での中性子束と1群断面積

以下に、8種類の計算ケース(1)～(8)について順次説明する。

#### 2.1.1 計算ケース(1)：MAGI（7群Hex-Z体系）

MAGIでは断面積セットにJFS-3-J2（JENDL-2<sup>(4)</sup>ベース）を用いている。MAGIは炉心管理コードであり、燃料交換、制御棒位置等が考慮されており、ドライバー燃料の燃焼計算も行われている。中性子束計算は3次元Hex-Z体系の7群拡散計算により行われている。表2.1にJFS-3-J2の7群エネルギー構造を示す。

中性子束は全炉心出力により規格化される。規格化に用いられる出力は核分裂とγ線による発熱を考慮して計算されている。<sup>237</sup>Npドシメータの変換率の計算にはこの全中性子束を用いる。1群断面積には、ドシメトリーファイル<sup>(5)</sup>（JENDL-3ベース<sup>(6)</sup>）の640群断面積を核分裂スペクトルと1/Eスペクトルで7群に縮約された断面積を、さらにMAGIの7群中性子スペクトルで1群に縮約したもの用いる。

#### 2.1.2 計算ケース(2)：CITATION（7群Hex-Z体系）

断面積セットは、MAGIと同様にJFS-3-J2（JENDL-2ベース）を用いる。ドライバー燃料の燃焼計算は行わず、原子数密度はMAGIの計算結果をそのまま用いる。中性子束の計算は、MAGIと同様に3次元Hex-Z体系の7群拡散計算により行われている。

CITATIONでは、炉心出力は核分裂のみで計算されており、中性子発熱に $\gamma$ 発熱分も含めているので、規格化された中性子束はMAGIの結果と異なるが最大2%程度の差である。このCITATIONによる中性子束を $^{237}\text{Np}$ ドシメータの変換率の計算に用いる。1群断面積には、計算ケース(1)と同様に、ドシメトリーファイル(JENDL-3.2)の640群断面積を核分裂スペクトルと1/Eスペクトルで7群に縮約し、さらにCITATIONの7群中性子スペクトルで1群に縮約したものを用いる。

#### 2.1.3 計算ケース(3)：CITATION (70群R-Z体系)

計算ケース(2)の7群Hex-Z体系のCITATIONと同等の条件で計算されており、異なる点は、エネルギー群数が70群と大きくなつたことと体系が2次元R-Z体系となつた点である。

1群断面積には、ドシメトリーファイルの640群断面積を核分裂スペクトルと1/Eスペクトルで70群に縮約された断面積を、さらに2次元R-Z体系のCITATIONで得られた70群中性子スペクトルで1群に縮約したものを用いる。全中性子束については、3次元Hex-Z体系のCITATIONで規格化されたものを用いる。

#### 2.1.4 計算ケース(4)：NEUPAC (103群)

全中性子束には、 $^{237}\text{Np}$ を除くドシメータの反応率測定結果からアンフォールディングにより求めた103群中性子スペクトルを用いる。

また、アンフォールディングによる103群中性子スペクトルを用いて断面積を1群に縮約する。縮約に用いる103群断面積は、ドシメトリーファイルの640群断面積を核分裂スペクトルと1/Eスペクトルで103群に縮約されたものである。

#### 2.1.5 計算ケース(5)：ORIGEN2 (FFTF)

ORIGEN2の内蔵ライブラリー断面積をそのまま用いて計算する。ORIGEN2は、燃料、炉心体系等の違いにより約20種類のライブラリーを持っている。この中で、「常陽」に近い燃料組成及びスペクトルを持つと考えられるFFTFのライブラリーを用いて計算を行う。この断面積ライブラリーは、FFTFの炉中心スペクトルで1群に縮約されており、ENDF-B/V<sup>(7)</sup>に基づく。

#### 2.1.6 計算ケース(6)：MVP (CMIR-4内部構造均質化)

次に説明する計算ケース(7)のCMIR-4内部構造を均質化した計算ケースである。計算体系は軸方向の非均質性を取り扱っていないことを除けば、MAGI、CITATIONのHex-Z体系に対応する。計算体系の水平断面図、垂直断面図、CMIR-4

の水平断面拡大図をそれぞれ、図2.2～2.4に示す。MVPを用いるので、連続エネルギー輸送計算となる。詳細は次の計算ケース(7)で述べる。

### 2.1.7 計算ケース(7)：MVP (CMIR-4内部構造考慮)

MVPを用いて連続エネルギー輸送計算を行い、CMIR-4の $^{237}\text{Np}$ ドシメータ装荷位置における1群断面積と全中性子束を求める。次にその詳細を説明する。

#### (1) 計算体系のモデル化

当初、CMIR-4の内部だけをモデル化し、適切な境界条件を与えることにより、CMIR-4内部の中性子束計算を行うことを考えたが、これまでのモンテカルロコードMCNP等の使用経験から、一般に集合体内部の中性子束は中性子発生領域全体(全燃料領域)の影響を受けることが分かっている。このため、全炉心をモデル化することとし、計算は固有値計算モードで行った。

計算体系の水平断面図、垂直断面図、CMIR-4の水平断面拡大図をそれぞれ図2.5～2.7に示す。体系は、図2.5に示したように燃料集合体1体あたりを1つの6角柱とした。反射体については、内側反射体、外側反射体をそれぞれひとつの6角柱でモデル化した。

軸方向にも非均質性があり、これも本来ならば考慮するべきであるが、計算機容量の観点から、 $^{237}\text{Np}$ ドシメータの装荷位置である炉中心レベル(0cm)位置の原子数密度のみを用いている。最初、軸方向の境界条件を完全等方反射としたが、実効増倍率が大きく逸脱した。そこで、計算量増加を抑え、より実際の炉心体系に近づけるために、燃料領域の軸方向非均質性は無視したまま、炉心高さを実際の炉心高さ(55cm)と等しくし、均質化した軸方向反射体を上下に配置するという方法を採った(図2.6参照)。

CMIR-4内部については、内部の詳細な中性子束分布をみるために各コンパートメント管とその内部、軸心管とその内部、ラッパー管をそれぞれ図2.7のようにモデル化した。

#### (2) CMIR-4の原子数密度

CMIR-4内部構造は、ラッパー管、軸心管、コンパートメント管を考慮している。軸心管及びコンパートメント管の内部は、炉中心レベル位置に装荷されているホルダー、照射資料、スペーサを考慮して原子数密度を計算した。照射試料の大部分を占める材質は、PNC316、PNC1520であり、照射試料の組成はすべてPNC316として算出した。

## (3) ドライバー燃料の原子数密度

ドライバー燃料集合体の原子数密度は、本来MVPの輸送計算の結果を元に燃焼計算を行うべきであるが、計算量が膨大になり非現実的であるので、炉心管理コードMAGIの燃焼計算結果より得られた原子数密度を用いる。

CMIR-4以外の集合体の原子数密度はMAGIの燃焼計算結果をそのまま用いるが、<sup>239</sup>Puおよび<sup>235</sup>Uのランプ化FPがMVPのライブラリーになかったため、代表的なFP核種で代表させることを考えた。代表核種は<sup>133</sup>Csとした。<sup>133</sup>Csの代表性については、ORIGEN2で「常陽」のドライバー燃料を50日照射した結果からFP中<sup>133</sup>Csの吸収率が大きいことを確認し、また、ランプ化FPの断面積のエネルギー依存性が<sup>133</sup>Csと類似していることも確認した。

<sup>133</sup>Csの原子数密度は、吸収率を保存するように次式により決定した。

$$N_1 = \frac{\sigma_{c,2}}{\sigma_{c,1}} N_2 + \frac{\sigma_{c,3}}{\sigma_{c,1}} N_3$$

ただし、

$N_1$  : <sup>133</sup>Csの原子数密度

$N_2$  : ウランのランプ化FPの原子数密度

$N_3$  : プルトニウムのランプ化FPの原子数密度

$\sigma_{c,1}$  : <sup>133</sup>Csの1群ミクロ捕獲断面積

$\sigma_{c,2}$  : ウランのランプ化FPの1群ミクロ捕獲断面積

$\sigma_{c,3}$  : プルトニウムのランプ化FPの1群ミクロ捕獲断面積

である。

ランプ化FPについてはMAGIの25群スペクトルで1群に縮約した断面積を用いる。<sup>133</sup>Csについては、ドシメトリーファイルの640群断面積を核分裂スペクトルと1/Eスペクトルで7群に縮約したものを、さらに炉心アドレス[000]のMAGI7群スペクトルで1群に縮約したものを用いる。

<sup>237</sup>Npドシメータの変換率計算用の1群断面積は、MVPの計算結果をそのまま用いるが、全中性子束は規格化されていないので、炉心アドレス[000]での全中性子束がMAGIの結果と等しくなるように規格化する。

### 2.1.8 計算ケース(8)：MVP (CMIR-4内部構造考慮) - NEUPAC全中性子束

MVP (CMIR-4内部構造考慮) で得られた1群断面積と $^{237}\text{Np}$ 以外のドシメータの反応率測定結果からアンフォールディングにより求めた全中性子束を用いて、 $^{237}\text{Np}$ ドシメータの変換率を計算する。MVPで得られた1群断面積は第24サイクルBOCのもので代表させる。

### 2.2 $^{237}\text{Np}$ ドシメータの燃焼計算

$^{237}\text{Np}$ ドシメータの燃焼計算はORIGEN2を用いて行い、MAGI、CITATION、NEUPAC及びMVPにより得られた $^{237}\text{Np}$ 及び $^{238}\text{Pu}$ の1群断面積をORIGEN2の燃焼計算に用いる。ORIGEN2の計算結果から燃焼後の質量（原子数密度）が得られるので、次に示す計算式により、捕獲反応による変換率と核分裂反応による変換率を算出する。

$^{237}\text{Np}$ ドシメータの捕獲反応による変換率の測定値は、 $^{238}\text{Pu}$ の $\gamma$ 線測定により得られる $^{238}\text{Pu}$ の生成量から算出されている。以下の式でも $^{238}\text{Pu}$ の生成量から $^{237}\text{Np}$ ドシメータの捕獲反応による変換率を求めており、 $^{238}\text{Pu}$ の燃焼効果の補正を行う必要がない。

#### 2.2.1 $^{237}\text{Np}$ 変換率の計算法

##### (1) $^{237}\text{Np}$ の全変換率 $D_T$

$$D_T = (W_T / W_S) \times 100$$

= (照射前の $^{237}\text{Np}$ 重量) - (照射後の $^{237}\text{Np}$ 重量)

$W_S$ : 照射前の $^{237}\text{Np}$ 重量[g]

$W_T$ :  $^{237}\text{Np}$ の全変換量[g]

##### (2) $^{237}\text{Np}$ の中性子捕獲による変換率 $D_G$

$$D_G = (W_G / W_S) \times 100$$

=  $^{238}\text{Pu}$ の生成量[g]

$W_S$ : 照射前の $^{237}\text{Np}$ 重量[g]

$W_G$ :  $^{237}\text{Np}$ の中性子捕獲反応による変換量[g]

##### (3) $^{237}\text{Np}$ の核分裂による変換率 $D_F$

$$D_F = D_T - D_G$$

表2.1 JFS-3-J2の7群エネルギー構造

エネルギー群	境界エネルギー (eV)	
	Upper	Lower
1	1.00000E+07	1.35335E+06
2	1.35335E+06	3.87742E+05
3	3.87742E+05	8.65168E+04
4	8.65168E+04	9.11880E+03
5	9.11880E+03	9.61114E+02
6	9.61114E+02	1.01301E+02
7	1.01301E+02	1.00000E- 05

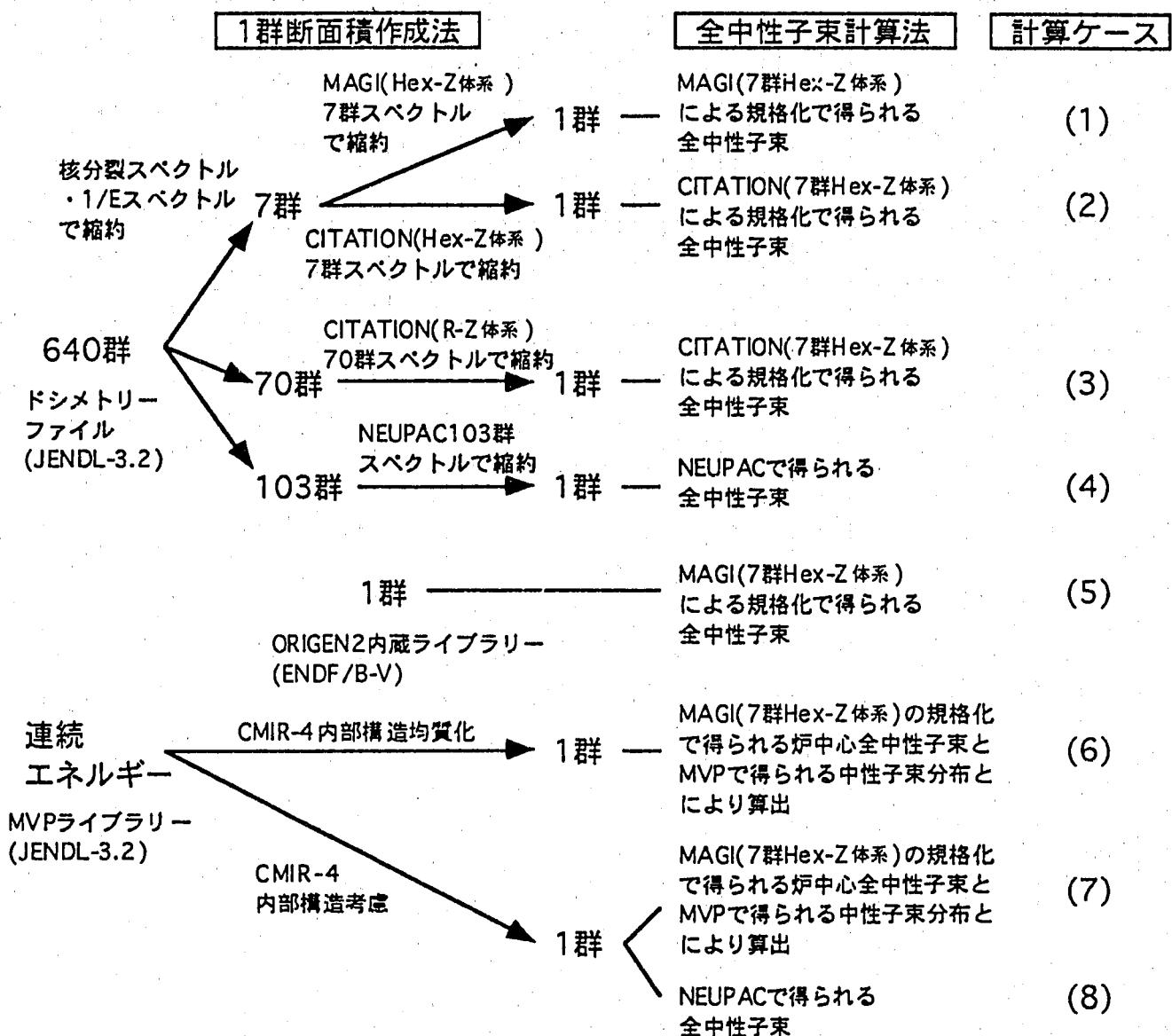


図2.1  $^{237}\text{Np}$  ドシメータ変換率の解析手法

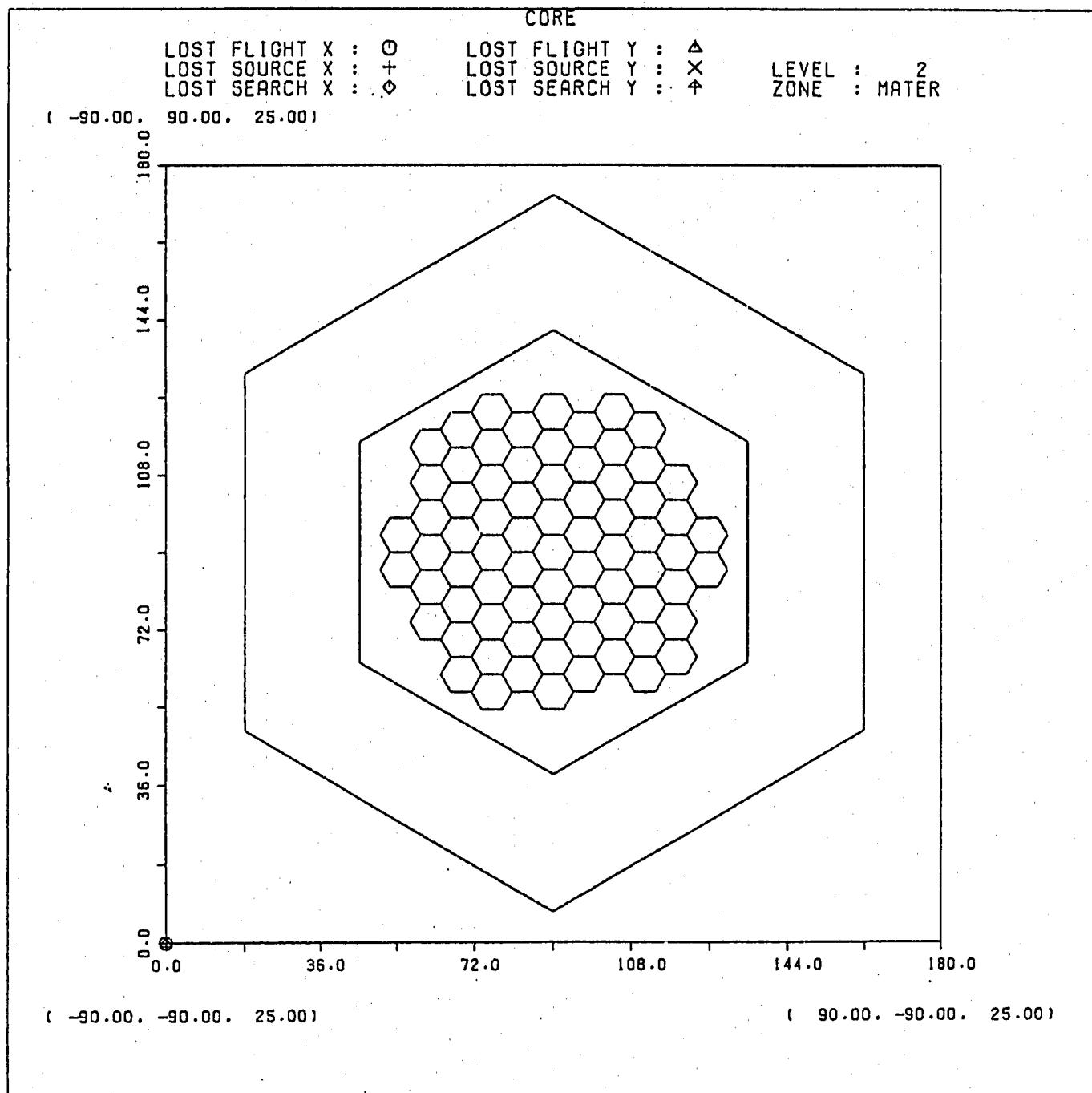


図2.2 CMIR-4内部構造を均質化した場合のMVPの計算体系（水平断面図）

CORE

LOST FLIGHT X : O  
LOST SOURCE X : +  
LOST SEARCH X : ◊

LOST FLIGHT Y : △  
LOST SOURCE Y : X  
LOST SEARCH Y : ♦

LEVEL : 2  
ZONE : MATER

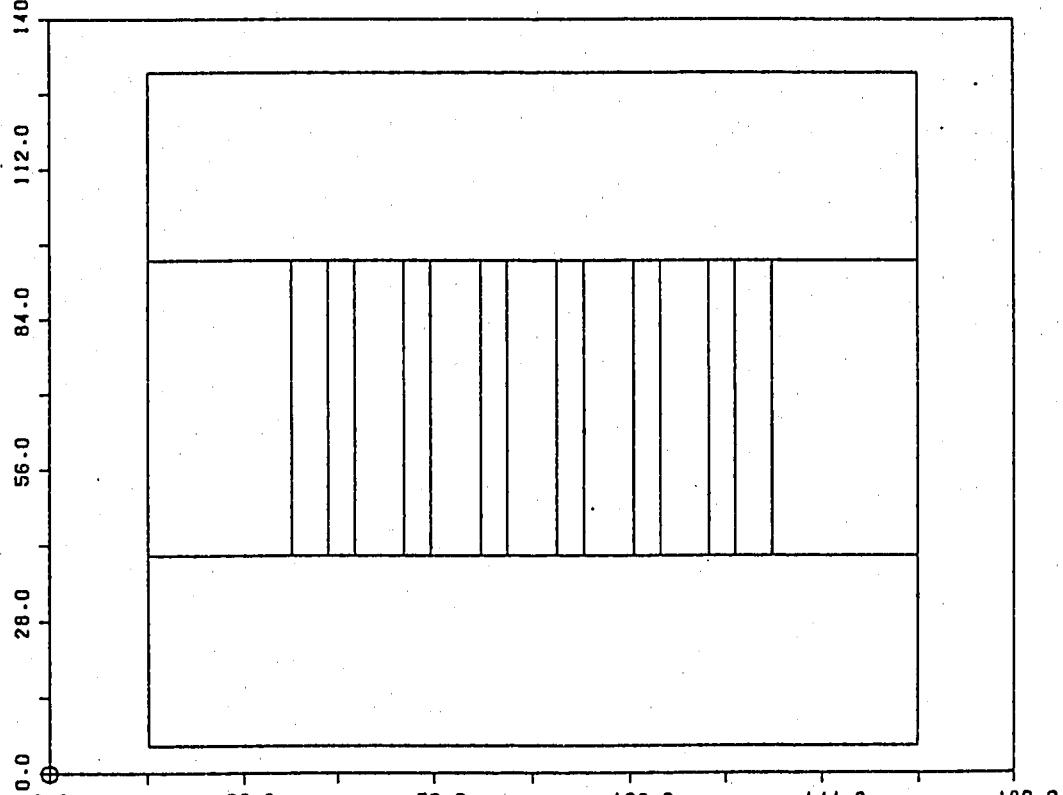


図2.3 CMIR-4内部構造を均質化した場合のMVPの計算体系（垂直断面図）

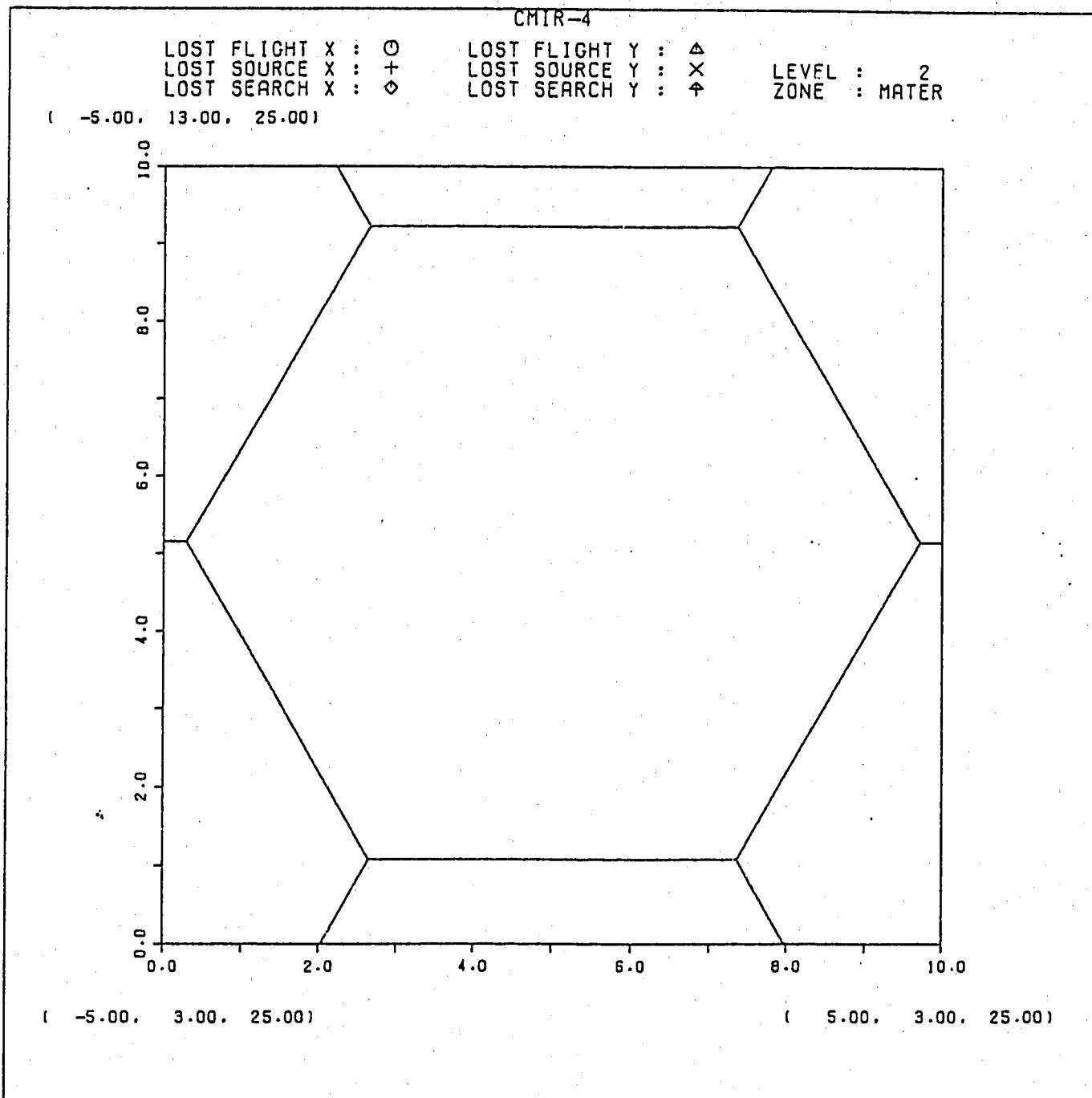


図2.4 CMIR-4内部構造を均質化した場合のMVPの計算体系（CMIR-4水平断面拡大図）

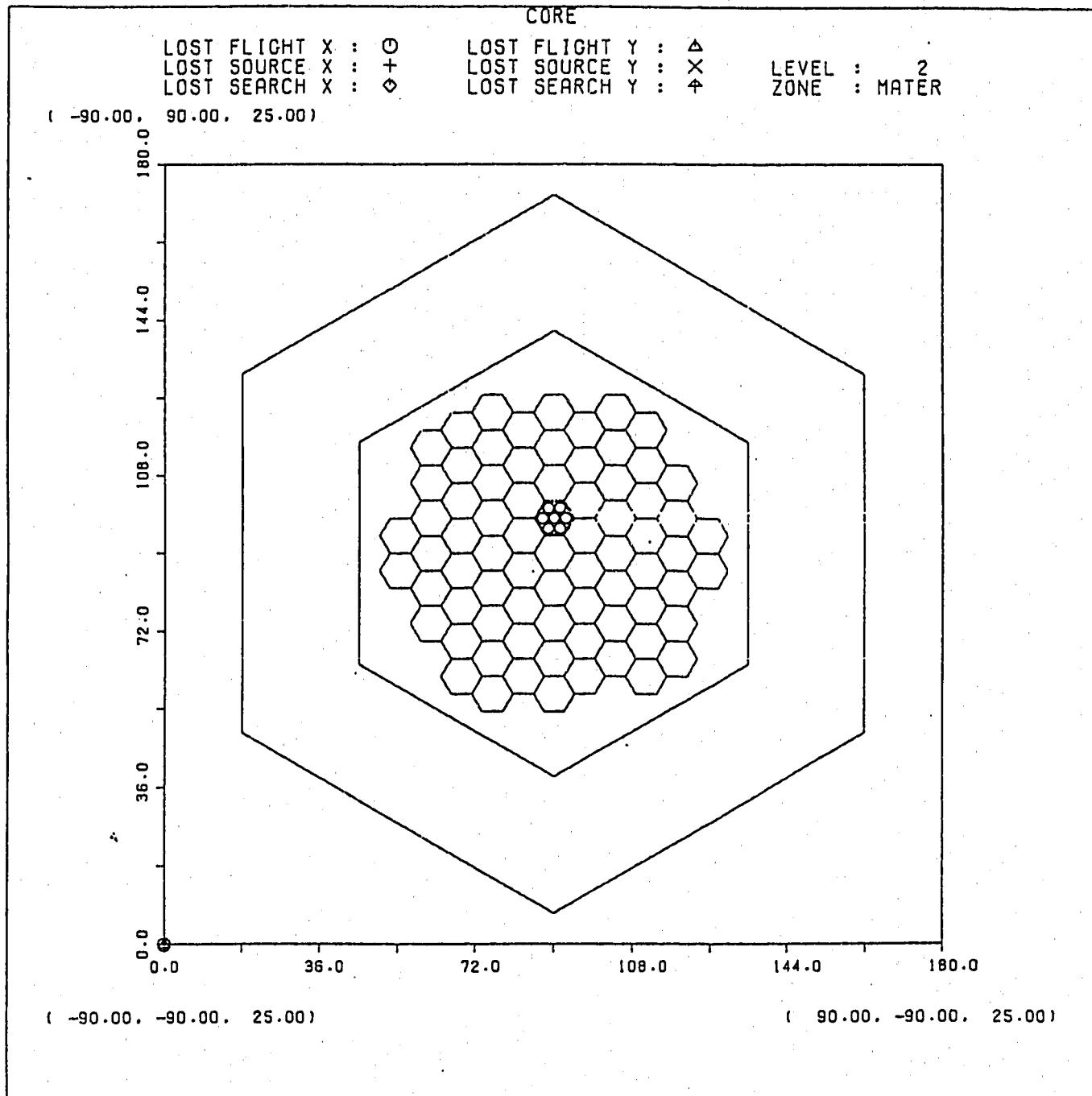


図2.5 CMIR-4内部構造を考慮した場合のMVPの計算体系（水平断面図）

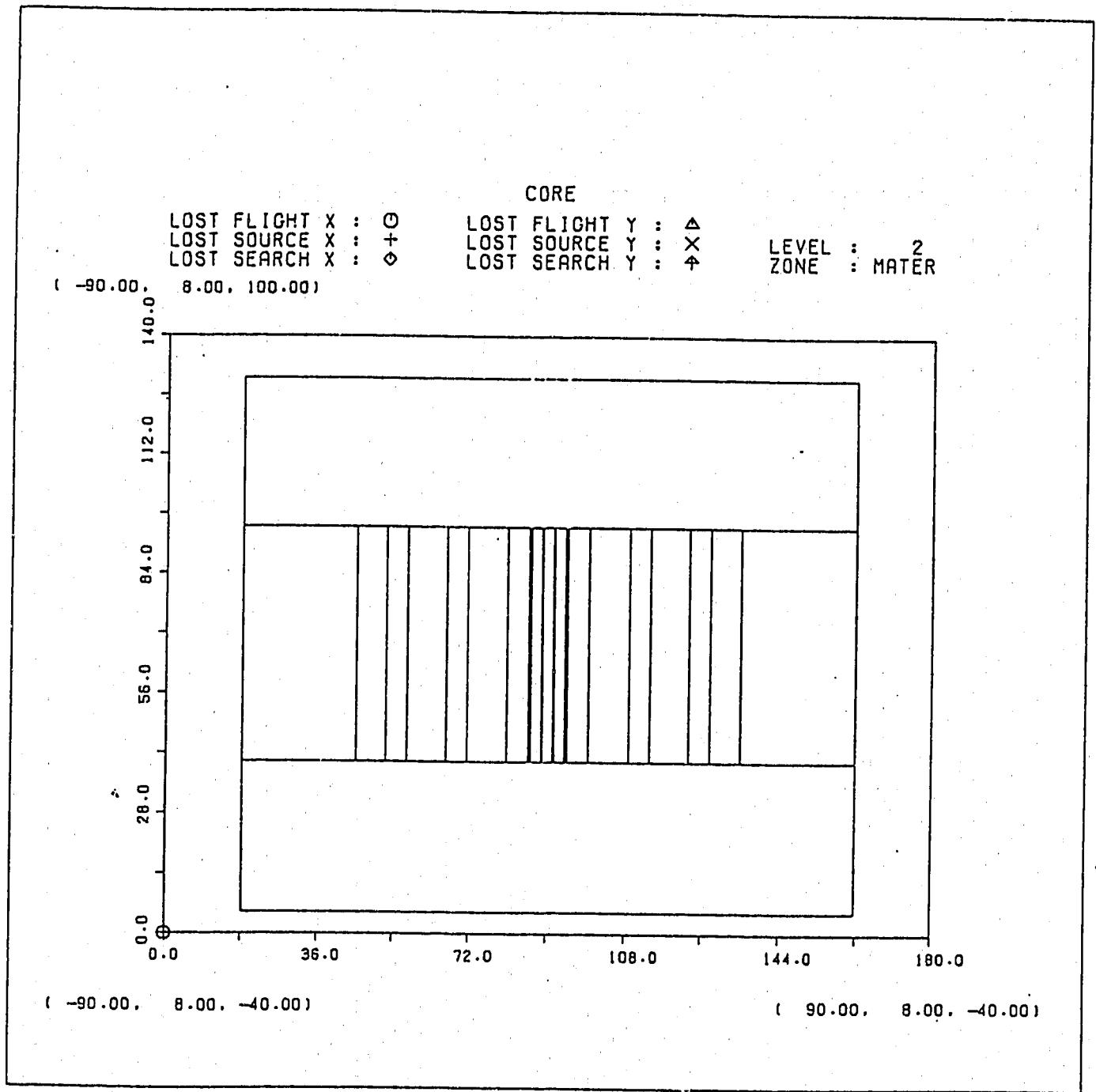


図2.6 CMIR-4内部構造を考慮した場合のMVPの計算体系（垂直断面図）

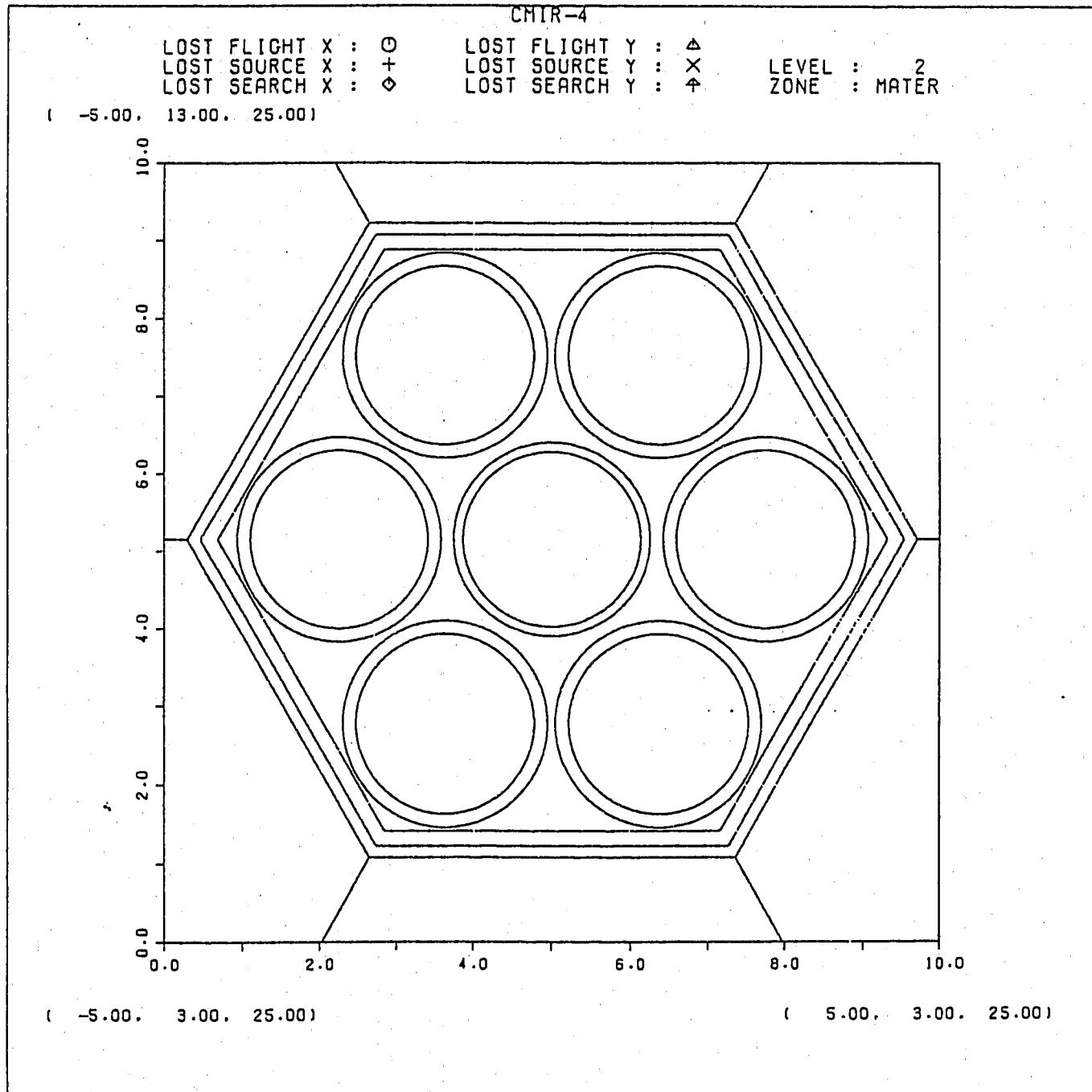


図2.7 CMIR-4内部構造を考慮した場合のMVPの計算体系 (CMIR-4水平断面拡大図)

## 第3章 結果と検討

### 3.1 1群断面積及び中性子スペクトルの計算結果と検討

表3.1及び3.2にMAGI（3次元Hex-Z体系）で計算された7群中性子スペクトルで1群に縮約した断面積を各運転サイクル毎に示す。

表3.3にMAGIの場合と同様に、CITATION（3次元Hex-Z体系）で計算された7群中性子スペクトルで1群に縮約した断面積を示す。

表3.4にCITATION（2次元R-Z体系）の中性子スペクトルで1群に縮約した断面積、また、表3.5にドシメータによるアンフォールディングで求めた103群中性子スペクトルで1群に縮約した断面積を示す。

表3.6は、ORIGEN2の内蔵ライブラリーの断面積を示している。FFTFの炉中心スペクトルで1群に縮約されたものである。

表3.7及び3.8にMVPにより計算された $^{237}\text{Np}$ ドシメータ装荷位置での $^{237}\text{Np}$ と $^{238}\text{Pu}$ の1群断面積を示す。表3.7はCMIR-4の内部構造を均質化した場合、表3.8はCMIR-4の内部構造を考慮した場合である。

#### 3.1.1 MVPで得られる1群実効断面積に関する検討

CMIR-4内部構造を均質化した場合にMVPで得られる1群断面積は、軸方向の非均質性は考慮していないものの、 $^{237}\text{Np}$ ドシメータ装荷位置（炉中心レベル0mm）に限れば計算体系はMAGI（7群Hex-Z体系）、CITATION（7群Hex-Z体系）と同等であると考えられる。したがって、MVPは連続エネルギー輸送計算である分だけ、より正確な実効断面積が得られると考えられる。

CMIR-4の内部構造を均質化した場合と考慮した場合の1群断面積を比べると、CMIR-4の内部構造を考慮した場合の方が $^{237}\text{Np}$ 捕獲断面積が大きく、かつ、核分裂断面積が小さい傾向を示している。このことから、 $^{237}\text{Np}$ ドシメータの装荷される軸心管では、周りに存在するコンパートメント管や照射試料、ナトリウム等により中性子が減速されていると考えることができる。

#### 3.1.2 縮約用7群断面積に関する検討

MAGI及びCITATIONの7群中性子スペクトルで断面積を1群に縮約する場合の7群断面積は、JFS-3の7群エネルギー構造の第1群と第2群に相当するエネルギー群を核分裂スペクトル、第3群から第7群を1/Eスペクトルで縮約したものである。

このようにして得られたMAGI（3次元Hex-Z体系）の $^{237}\text{Np}$ 及び $^{238}\text{Pu}$ の1群断面積とMVPで得られた1群断面積とを比較すると、 $^{237}\text{Np}$ の捕獲断面積で約40%、核分裂

断面積で約17%、MAGIの1群断面積の方が大きい。 $^{238}\text{Pu}$ の捕獲断面積では、MAGIの結果はMVPの結果に比べて3倍以上大きく、核分裂断面積に関してもMAGIの方が約9%大きい。 $^{237}\text{Np}$ 、 $^{238}\text{Pu}$ のどちらについてもMAGIの方が大きく、特に捕獲断面積でそれが大きい。これらの傾向はCITATION（3次元Hex-Z体系）についてもいえる。

MVPの計算体系は、MAGI、CITATIONの3次元Hex-Z体系と同等と考えられるので、連続エネルギー輸送計算を行っている分MVPの結果はより正確であると考えられる。したがって、MAGI、CITATIONで得られた1群断面積に問題があると考えられる。

CMIR-4の $^{237}\text{Np}$ ドシメータ存在位置での7群中性子スペクトルの比較を各運転サイクル毎に図3.1～3.4に示した。MVPの結果には統計誤差が含まれるので、別途、図3.5及び3.6に示した。各運転サイクル間の差は小さいので、第24サイクルの中性子スペクトルに着目する。第24サイクルの中性子スペクトルの比較（図3.1）から、MAGIとMVPには低速群の第6群及び第7群でのずれがみられるが、1群に縮約された断面積に3倍の差を生じるほど大きくはない。

表3.9に $^{237}\text{Np}$ について、MAGI、CITATION（3次元Hex-Z体系）の中性子スペクトルで1群に縮約するための7群断面積と、MVPの計算結果で得られた7群断面積を示した。表3.9より、低速群の捕獲断面積に大きな差が生じていることが分かる。表3.10に $^{238}\text{Pu}$ についての比較を示す。MVPの結果に比べて第7群の捕獲断面積は約280倍、核分裂断面積でも約60倍の差がある。

以上のことから、縮約用7群断面積に問題があると考えられる。

### 3.1.3 CITATION(2次元R-Z体系)、NEUPACによる1群断面積及び中性子スペクトルに関する検討

図3.7にCITATION(2次元R-Z系)の中性子スペクトル、図3.8にNEUPACの中性子スペクトルを示す。また、図3.9及び3.10にCITATIONの70群中性子スペクトルによる縮約に用いた $^{237}\text{Np}$ 、 $^{238}\text{Pu}$ の断面積を示す。

本来ならば、MVPの70群程度の中性子スペクトルとの比較も行いたいところであるが、計算機容量の制限によりMVPの70群中性子スペクトルの結果は得ることができなかったので、多群の中性子スペクトルが得られているCITATION（2次元R-Z体系）とNEUPACについて比較検討を行う。ただし、アンフォールディングに用いられたドシメータがNi、Scの2種類だけであり、今回の解析のNEUPACの結果に対する信頼性は低く、定性的な比較にとどめる。

1群に縮約された断面積（表3.4、3.5）を比較すると、 $^{237}\text{Np}$ 、 $^{238}\text{Pu}$ とともに捕獲断

面積は2倍以上の違いがみられるのに対して、核分裂断面積の差は小さい。捕獲断面積については共鳴領域以外は $1/v$ 型の断面積であり、低エネルギー群のスペクトルの差が影響している。一方、 $^{237}\text{Np}$ の核分裂断面積は、約1MeV付近にしきい値をもっているが、表3.4、3.5より縮約スペクトルの違いによって1群断面積は約20%異なっている。

以上より、 $^{237}\text{Np}$ の変換率の計算精度を上げるために中性子スペクトルを詳細に計算することが重要であることが分かる。

### 3.2 中性子束分布の計算結果と検討

図3.11～3.18にMAGIにより計算された中性子束分布を示す。ただし、他の計算コードとの比較、BOCとEOCの比較を行いやすいように、BOCでの炉心アドレス[000]が1となるように規格化を行っている。

同様に、図3.19～3.22にCITATIONの計算結果、図3.23～3.26にCMIR-4内部構造を均質化した場合のMVPの計算結果を、図3.27～3.30にCMIR-4内部構造を考慮した場合のMVPの計算結果を示す。表3.11には $^{237}\text{Np}$ ドシメータの燃焼計算に用いた全中性子束<sup>(8)</sup>を示す。

#### 3.2.1 CMIR-4内部の中性子束分布に関する検討

MVPのCMIR-4の内部構造を均質化した場合と非均質性を考慮した場合の結果を比較する。運転サイクル間の差は小さいので、代表として第24サイクルについて述べる（図3.23、3.27）。

全中性子束に関しては、 $^{237}\text{Np}$ ドシメータがCMIR-4の中心に位置する軸心管に装荷されていたこともある、統計誤差以上の有意な差は認められない。しかしながら、コンパートメント内の中性子束分布については、今回の計算精度の範囲内で有意な差が認められる。今後ドシメータがコンパートメントに装荷された場合の $^{237}\text{Np}$ 変換率の解析を行う場合には、照射集合体内部の中性子束分布を考慮する必要があることが分かる。

#### 3.2.2 中性子束分布に対する制御棒の効果に関する検討

MAGIとMVP（CMIR-4内部構造考慮）の第24サイクルBOCの中性子束分布計算結果を比較検討する。制御棒は炉心第3列のアドレス3A3、3B3、3C3、3D3、3F3及び5F2に配置されている。MVPの計算体系は、軸方向の非均質性を考慮しておらず、制御棒は全引抜きの状態でモデル化されているが、MAGIでは制御棒の挿入位置が考慮されている。このため、制御棒位置付近で両者の中性子束分布の結果はMVPの

標準偏差を超えて有意な差をもつ。

炉心第3列に制御棒が配置されてないE方向をみると、MVPの結果はMAGIと標準偏差以内で一致している。この結果からも、制御棒のモデル化の違いによって制御棒位置での中性子束分布の結果に違いが生じていることが分かる。

MVPでは、制御棒全引抜きの状態でモデル化された計算体系で計算されているので、制御棒挿入位置が計算体系に反映されているMAGIの結果に比べて、制御棒位置での中性子束が大きく評価されている。しかしながら、この制御棒の影響は、MVPの標準偏差の範囲ならば、制御棒に隣接する集合体の平均中性子束にまでしか影響を与えていないことが分かる。

今着目しているCMIR-4のアドレスは1A1であり、制御棒とは隣接していない。また、炉中心、制御棒の位置から見てアドレス1A1に対して対称位置にあるアドレス1E1の結果をみても、MAGIの結果と標準偏差以内で一致しているので、制御棒のモデル化の違いはあるものの、CMIR-4の<sup>237</sup>Npドシメータの燃焼解析に関しては、このMVP結果を用いても、制御棒のモデル化の違いは有為な差をもたらさないと考えられる。

次に、CMIR-4の<sup>237</sup>Npドシメータの燃焼解析においては直接関係はしないが、制御棒の外側の第5列の中性子束の違いを検討する。炉中心からみて制御棒の影になる炉心アドレス5A4、5B4、5C4、5D4、5F4で差が大きくなり、制御棒の影にならない炉心アドレス5A2、5B2、5C2、5D2、5F2でMAGIとMVPの結果が比較的一致することが分かる。これは、中性子が炉中心で多く発生し反射体に向かって流れるので、炉中心からみて制御棒の影になる位置では遮蔽されるからである。制御棒を全引抜きでモデル化すると、炉中心から見て制御棒の影になる位置では制御棒に隣接している炉心第4列を越えて炉心第5列の中性子束にまでその影響を及ぼすことが分かる。

### 3.2.3 MAGIのBOCとEOCの全中性子束の計算結果に関する検討

運転サイクル中の中性子束の変化が<sup>237</sup>Npの燃焼特性に与える影響をみるために、BOCとEOCの両方で中性子束が計算されているMAGIの計算結果について検討する。第24サイクルから第27サイクルまでみても、CMIR-4の装荷されているアドレス1A1の中性子束についてのBOCとEOCの差は、すべて0.76%以下である。MVPの中性子束計算結果は、炉心第1列で標準偏差が0.7~0.8%であるので、運転サイクル中の中性子束変化をMVPで考慮して計算しても、モンテカルロ計算の統計誤差内におさまる。したがって、現段階では運転サイクル中の中性子束変化を考慮する必要はない。

### 3.3 $^{237}\text{Np}$ ドシメータの変換率の測定値と検討

表3.12に $^{237}\text{Np}$ ドシメータの変換率の測定値<sup>(9)</sup>を示す。この表から測定誤差が全変換率で13%、中性子捕獲反応による変換率で16%とかなり大きいことが分かる。

これは、中性子捕獲反応により生成する $^{238}\text{Pu}$ の $\gamma$ 線が $^{237}\text{Np}$ ドシメータのバナジウムキャップセル中に含まれるTaにより妨害されていることが影響している<sup>(10)</sup>。すなわち、 $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182}\text{Ta}$ で生成する $^{182}\text{Ta}$ の $\gamma$ 線は100.01keVに光電ピークを持っており、 $^{238}\text{Pu}$ の99.9keV $\gamma$ 線の光電ピークと重なって測定される。このため、100keVに相当するチャンネルの全計数値から $^{182}\text{Ta}$ のカウント数（バックグラウンド）を差し引いて正味の $^{238}\text{Pu}$ のカウント数を求めており、 $\gamma$ 線測定時の統計誤差が大きくなり、中性子捕獲反応による変換率の測定誤差が大きくなっている。

$^{182}\text{Ta}$ の半減期は115.0日であり、冷却期間を長く取れば $^{182}\text{Ta}$ は減衰するので測定誤差を小さくすることができる。変換率の測定誤差を小さくするためには、十分に冷却された $^{237}\text{Np}$ ドシメータを選択する必要がある。

### 3.4 $^{237}\text{Np}$ ドシメータの変換率の計算結果と検討

表3.13に $^{237}\text{Np}$ ドシメータの変換率の計算値を示す。以下に、各計算ケースについて検討を行う。

#### 3.4.1 計算ケース(1)：MAGI (7群Hex-Z体系)

1群断面積を作成するための7群断面積が低速群で過大評価されていることはすでに述べた。このため、変換率の計算結果も過大評価される。捕獲断面積に比べて核分裂断面積は低速群での値が小さいので、この誤差は小さいと考えられるが、核分裂反応による変換率も中性子捕獲反応による変換率も同程度に約70%過大評価されている。これは、 $^{238}\text{Pu}$ の捕獲断面積も過大評価されているために $^{238}\text{Pu}$ の生成量が小さくなるためと考えられる。

#### 3.4.2 計算ケース(2)：CITATION (7群Hex-Z体系)

1群断面積を作成するために用いた7群断面積はMAGIで用いたものと同じであるので、同様に過大評価されている。MAGIに比べると過大評価の程度は小さい。これは、断面積誤差の大きかった第7群の中性子束がMAGIに比べて1桁以上小さく、断面積誤差を打ち消したためである。

### 3.4.3 計算ケース(3)：CITATION (70群R-Z体系)

7群の縮約用断面積が低速群で大きな誤差を持つことが分かり、ドシメトリーファイル640群断面積を核分裂スペクトルと1/Eスペクトルで縮約することによる誤差を小さくするために中性子エネルギー群数を70群とした計算ケースである。しかしながら、計算体系は計算ケース(2)の3次元Hex-Z体系に対して2次元R-Z体系となり実際の体系からは遠ざかった。

変換率の計算値は核分裂反応による変換率を除いて、CITATION (3次元Hex-Z体系) のケースよりもC/E値は1から離れた。計算機容量の制限によりMVPによる70群実効断面積の出力できず、MVPの結果との比較が行えないので縮約に用いた70群断面積の精度がどの程度あるか正確には分からぬ。しかしながら、エネルギー群数を大きくすることはC/E値を1に近づける方向に働くと考えられる。

以上のことから、群縮約の効果よりもR-Z体系で模擬したことによる効果の方が大きいことが分かる。

### 3.4.4 計算ケース(4)：NEUPAC (103群)

アンフォールディングによる中性子束及びスペクトルを用いて計算しているので、実質上、実測値ベースの結果である。全変換率は測定結果と良く一致しているが、中性子捕獲反応による変換率が8%過小評価、核分裂反応による変換率が25%過大評価されている。ドシメータによりアンフォールディングされてはいるものの、ドシメータはNi、Scの2種類であるので十分な精度でアンフォールディングされていないことによる誤差であると考えられる。

### 3.4.5 計算ケース(5)：ORIGEN2 (FFTF)

全中性子束はMAGIの結果をそのまま用い、断面積はORIGEN2の内蔵ライブラリーを用いて計算されている。ここで用いられた断面積はFFTFの炉中心スペクトルで縮約されたものである。FFTFの炉中心スペクトルは「常陽」の照射用集合体であるCMIR-4内部の中性子スペクトルに比べ硬いと推測される。推測されるとおりMVP (CMIR-4内部非均質構造考慮) の計算結果の $^{237}\text{Np}$ の1群断面積と比較してみると、捕獲断面積が小さく、核分裂断面積が大きくなっている。

仮にここで用いたMAGIの全中性子束が正しいとすれば、中性子捕獲断面積が過小評価されているので中性子捕獲反応による変換率が過小評価され、核分裂断面積が過大評価されているので、核分裂反応による変換率が過大評価されるはずである。ところが、結果は中性子捕獲反応による変換率も核分裂反応による変換率も過大評価されている。このことから、FFTFの炉中心の中性子スペクトルと「常陽」の

CMIR-4のドシメータ位置のスペクトルとの違い以上にMAGIの全中性子束が過大評価されていると考えられる。

### 3.4.6 計算ケース(6)：MVP (CMIR-4の内部構造均質化)

1群断面積、全中性子束とともに純粋な計算値を用いた計算ケースの中では最も変換率のC/E値が1に近づいた。計算体系は、計算ケース(1)のMAGIの計算体系と同等なものと考え、計算ケース(1)の結果との比較を行う。

中性子捕獲反応による変換率、核分裂反応による変換率、全変換率とともにC/E値は40%以上の差が見られる。全中性子束はMAGIの炉心アドレス000の値で規格化しており、両者のCMIR-4内部での全中性子束の差は2%程度である。したがって、1群断面積の作成方法の違いがC/E値の改善に大きく寄与したことが分かる。この違いは、中性子エネルギーの取り扱いが7群から連続エネルギーになったことと、拡散計算から輸送計算になったことである。しかし、先にも述べたように、計算ケース(1)で用いた7群断面積に問題があるので、単純に群縮約効果と輸送効果が40%あるとみるべきではない。

また、C/E値が1に近づいたとはいいうものの、30%以上の誤差が残っている。この誤差には、MAGIの中性子束の規格化の誤差、CMIR-4内部構造を均質化したことによる誤差などが含まれる。前者は計算ケース(7)との比較、後者は計算ケース(8)との比較により明らかになる。

### 3.4.7 計算ケース(7)：MVP (CMIR-4の内部非均質構造考慮)

CMIR-4内部構造を均質化した計算ケース(6)の変換率との比較を行う。各変換率とも計算ケース(6)の結果との間にそれほど大きな差はない。この差は、CMIR-4の内部構造の取扱いの差のみによって生じている。したがって、CMIR-4内部構造の取扱いの違いの効果は小さいものと考えられる。ただし、この計算ケースのモデル化では軸心管内部の非均質性を考慮していないので、モデル化が不十分であった可能性は残る。

また、計算ケース(6)に比べ各変換率のC/E値にばらつきがみられるが、これはCMIR-4内部構造を考慮した分、統計誤差が大きくなった結果であると考えられる。

### 3.4.8 計算ケース(8)：MVP (CMIR-4内部構造考慮) - NEUPAC全中性子束

計算ケース(3)のORIGEN2 (FFTF) の結果から、MAGIの全中性子束が過大評価されている可能性があることが分かったので、全中性子束はNEUPACでアンフォールディングしたもの用いた計算ケースである。NEUPACによる全中性子束は、第

24~27サイクルの平均の全中性子束しか得られないが、ドシメータによる測定値に基づき得られた結果であるので、準測定値であり、現在得られるCMIR-4の<sup>237</sup>Npドシメータ装荷位置での全中性子束の中で最も真值に近いと考えられる。この結果と、今回行った計算の中で最も正確な断面積が得られていると考えられる計算ケース(6)のMVPの1群断面積を用いて計算を行っている。

今回行った解析の中で、最も真值に近いと思われる全中性子束と断面積を用いているので、最も測定値に近づくと考えられるとおり、ドシメータによりアンフォールディングされた中性子スペクトルを用いた計算ケース(4)を除き、C/Eが最も1に近づいた。しかしながら、この結果にもまだ測定値と12~20%の差がある。この誤差にはアンフォールディングで得られた全中性子束の誤差、及び変換率の測定誤差、MVPで得られた断面積の統計的な誤差を含んでいる。例えば、アンフォールディングによって得られた中性子束には7.76%もの誤差が含まれている。この計算ケースの結果の信頼性を評価するために、次にこの計算ケースで得られた変換率の計算値の誤差評価を行うことを考える。

### 3.5 <sup>237</sup>Npドシメータの変換率の誤差評価

<sup>237</sup>Npドシメータの変換率を求めるために燃焼チェーンの複雑なORIGEN2を用いているので変換率の誤差評価は複雑になる。運転サイクル毎に1群断面積とその誤差が異なることや中性子捕獲反応による変換率が<sup>238</sup>Puの減少の効果を含むからである。しかし、計算ケース(8)の全変換率については、簡単に誤差評価を行うことができる。

第24サイクルBOCの断面積と照射期間の平均中性子束しか計算に使っていないこと、照射期間に比べて<sup>237</sup>Npの崩壊が無視できること、<sup>237</sup>Npの生成が無視できることから、全変換率はORIGEN2の燃焼チェーンを使わずに次式で簡単に評価することができる。

$$\text{全変換率} = 1 - e^{-(\sigma_f + \sigma_c)\phi t}$$

ここで、

$\sigma_f$  : 1群核分裂断面積

$\sigma_c$  : 1群捕獲断面積

$\phi$  : 平均中性子束

$t$  : 照射期間

である。全変換率が上式のように簡単な式で表されるので、断面積、中性子束の標準偏差をそれぞれ△をつけて表記することにすれば、誤差伝播則により、全変換率の標

準偏差は次式で簡単に評価することができる。

$$\text{全変換率の標準偏差} = e^{-(\sigma_f + \sigma_c)\phi t} \times (\sigma_f + \sigma_c) \phi t \sqrt{\frac{\Delta\sigma_f^2 + \Delta\sigma_c^2}{(\sigma_f + \sigma_c)^2} + \left(\frac{\Delta\phi}{\phi}\right)^2}$$

断面積の誤差はMVPの統計誤差、全中性子束の誤差はアンフォールディング時の誤差として、上式で<sup>237</sup>Npドシメータの全変換率の誤差評価を行うと、

$9.45 \pm 0.70$  (%)

となる。測定値が、

$8.02 \pm 1.02$  (%)

であるから、このケースの計算結果は標準偏差 $1\sigma$ 以下の範囲であるが一致している可能性はある。

MVPで得られた1群断面積が正しいかどうかを判断するためには、アンフォールディングで得られた全中性子束の標準偏差及び変換率測定値の標準偏差を小さくする必要がある。

表3.1 MAGIの中性子スペクトル(BOC)で縮約された断面積(JENDL-3.2)

	$^{237}\text{Np}$		$^{238}\text{Pu}$	
	捕獲断面積	核分裂断面積	捕獲断面積	核分裂断面積
第24サイクル	1.817E+00	5.124E-01	2.176E+00	1.338E+00
第25サイクル	1.841E+00	5.118E-01	2.239E+00	1.341E+00
第26サイクル	1.856E+00	5.102E-01	2.266E+00	1.340E+00
第27サイクル	1.864E+00	5.092E-01	2.282E+00	1.340E+00

(単位はbarn)

表3.2 MAGIの中性子スペクトル(EOC)で縮約された断面積(JENDL-3.2)

	$^{237}\text{Np}$		$^{238}\text{Pu}$	
	捕獲断面積	核分裂断面積	捕獲断面積	核分裂断面積
第24サイクル	1.848E+00	5.073E-01	2.233E+00	1.336E+00
第25サイクル	1.892E+00	5.042E-01	2.334E+00	1.338E+00
第26サイクル	1.886E+00	5.056E-01	2.321E+00	1.339E+00
第27サイクル	1.888E+00	5.056E-01	2.326E+00	1.339E+00

(単位はbarn)

表3.3 CITATION(7群Hex-Z体系)の中性子スペクトルで縮約された断面積(JENDL-3.2)

	$^{237}\text{Np}$		$^{238}\text{Pu}$	
	捕獲断面積	核分裂断面積	捕獲断面積	核分裂断面積
第24サイクル	1.324E+00	5.113E-01	6.121E-01	1.278E+00
第25サイクル	1.340E+00	5.091E-01	6.264E-01	1.278E+00
第26サイクル	1.341E+00	5.092E-01	6.280E-01	1.278E+00
第27サイクル	1.351E+00	5.069E-01	6.351E-01	1.277E+00

(単位はbarn)

表3.4 CITATION(70群R-Z体系)の中性子スペクトルで縮約された断面積(JENDL-3.2)

$^{237}\text{Np}$		$^{238}\text{Pu}$	
捕獲断面積	核分裂断面積	捕獲断面積	核分裂断面積
2.032E+00	3.969E-01	8.746E-01	1.232E+00

(単位はbarn)

表3.5 NEUPAC(103群)の中性子スペクトルで縮約された断面積(JENDL-3.2)

$^{237}\text{Np}$		$^{238}\text{Pu}$	
捕獲断面積	核分裂断面積	捕獲断面積	核分裂断面積
1.011E+00	5.136E-01	4.145E-01	1.274E+00

(単位はbarn)

表3.6 ORIGEN2の内蔵ライブラリーの断面積  
(FFTF炉中心のスペクトルで縮約, ENDF/B-V)

	$^{237}\text{Np}$		$^{238}\text{Pu}$	
	捕獲断面積	核分裂断面積	捕獲断面積	核分裂断面積
FFTF	1.189E+00	4.405E-01	5.905E-01	1.211E+00

(単位はbarn)

表3.7 MVP (CMIR-4内部構造均質化) の計算結果 (JENDL-3.2)

	$^{237}\text{Np}$		$^{238}\text{Pu}$	
	捕獲断面積	核分裂断面積	捕獲断面積	核分裂断面積
第24サイクル	1.28597D+00 (0.509%)	4.49726D-01 (0.379%)	5.27753D-01 (0.733%)	1.22358D+00 (0.145%)
第25サイクル	1.29197D+00 (0.464%)	4.48802D-01 (0.373%)	5.29810D-01 (0.689%)	1.22508D+00 (0.158%)
第26サイクル	1.28899D+00 (0.463%)	4.46563D-01 (0.391%)	5.36628D-01 (0.990%)	1.22234D+00 (0.166%)
第27サイクル	1.28840D+00 (0.511%)	4.49428D-01 (0.387%)	5.32724D-01 (0.654%)	1.22657D+00 (0.156%)

(単位はbarn)

表3.8 MVP (CMIR-4内部構造考慮) の計算結果 (JENDL-3.2)

	$^{237}\text{Np}$		$^{238}\text{Pu}$	
	捕獲断面積	核分裂断面積	捕獲断面積	核分裂断面積
第24サイクル	1.33253D+00 (1.221%)	4.37030D-01 (0.671%)	5.53564D-01 (1.765%)	1.21976D+00 (0.313%)
第25サイクル	1.33761D+00 (0.876%)	4.35486D-01 (0.706%)	5.54350D-01 (1.757%)	1.21738D+00 (0.295%)
第26サイクル	1.33566D+00 (0.866%)	4.33961D-01 (0.737%)	5.64526D-01 (1.641%)	1.21976D+00 (0.395%)
第27サイクル	1.33484D+00 (1.260%)	4.36903D-01 (0.662%)	5.50690D-01 (1.332%)	1.22375D+00 (0.327%)

(単位はbarn)

表3.9 MVP (CMIR-4内部構造考慮, 第24サイクルBOC, JENDL-3.2) により  
計算された $^{237}\text{Np}$ の実効断面積と核分裂スペクトルと1/Eスペクトルで  
7群縮約された断面積 (JENDL-3.2)との比較

エネルギー群	MVPによる7群実効断面積		核分裂スペクトルと1/Eスペクトル で縮約して作った7群断面積	
	$^{237}\text{Np}$		$^{237}\text{Np}$	
	捕獲断面積	核分裂断面積	捕獲断面積	核分裂断面積
1	5.66153D-02 (0.894%)	1.64496D+00 (0.092%)	4.46511E-02	1.64176E+00
2	2.60374D-01 (0.347%)	9.00788D-01 (0.451%)	2.10573E-01	1.13815E+00
3	8.24315D-01 (0.265%)	5.26221D-02 (0.466%)	8.43277E-01	5.14954E-02
4	2.15919E+00 (0.254%)	2.48396D-02 (0.112%)	2.39896E+00	2.41914E-02
5	6.28871D+00 (0.785%)	3.16565D-02 (0.671%)	6.73675E+00	3.33135E-02
6	1.59915D+01 (1.807%)	6.01844D-02 (2.222%)	2.19436E+01	9.00246E-02
7	9.01749D+01 (22.460%)	1.68614D-01 (34.532%)	1.14241E+03	1.83780E-01

(単位はbarn)

表3.10 MVP (CMIR-4内部構造考慮, 第24サイクルBOC, JENDL-3.2) により  
計算された $^{238}\text{Pu}$ の実効断面積と核分裂スペクトルと1/Eスペクトルで  
7群縮約された断面積 (JENDL-3.2) の比較

エネルギー群	MVPによる7群実効断面積		核分裂スペクトルと1/Eスペクトル で縮約して作った7群断面積	
	$^{238}\text{Pu}$		$^{238}\text{Pu}$	
	捕獲断面積	核分裂断面積	捕獲断面積	核分裂断面積
1	6.46270D-02 (0.690%)	2.21047D+00 (0.066%)	5.45177E-02	2.21469E+00
2	1.36175D-01 (0.293%)	1.74104D+00 (0.175%)	1.13889E-01	1.91160E+00
3	3.18610D-01 (0.210%)	7.96545D-01 (0.185%)	3.24230E-01	7.86961E-01
4	8.06251D-01 (0.279%)	7.15788D-01 (0.134%)	9.06036E-01	7.48216E-01
5	2.67204E+00 (0.725%)	1.16441D+00 (0.263%)	2.90071E+00	1.23447E+00
6	9.56841D+00 (7.033%)	3.87748D+00 (5.703%)	1.53213E+01	5.30939E+00
7	1.36709D+01 (43.667%)	1.96106D+00 (41.690%)	3.77891E+03	1.25026E+02

(単位はbarn)

表3.11 計算に用いた中性子束

運転サイクル	MAGI	CITATION	*MVP (CMIR-4内部構造考慮)	*MVP (CMIR-4内部構造均質化)	NEUPAC
24	4.15480E+15	4.24872E+15	4.17229E+15 (1.233%)	4.22417E+15 (0.800%)	3.69E+15 (7.76%)
25	4.16030E+15	4.24733E+15	4.18837E+15 (1.222%)	4.18930E+15 (0.830%)	
26	4.20622E+15	4.30601E+15	4.21109E+15 (1.291%)	4.24484E+15 (0.834%)	
27	4.21794E+15	4.30921E+15	4.25938E+15 (1.243%)	4.20392E+15 (0.824%)	

\*MVPの中性子束はMAGIのアドレス000における中性子束で規格化 (単位はcm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)

表3.12 <sup>237</sup>Np変換率の測定結果

	中性子捕獲反応による変換率(%)	核分裂反応による変換率(%)	全変換率(%)
測定値	5.54±0.88	2.48±0.14	8.02±1.02

表3.13 <sup>237</sup>Np変換率の計算結果

計算ケース	中性子捕獲反応による変換率(%)	核分裂反応による変換率(%)	全変換率(%)
(1)MAGI(7群Hex-Z体系)	9.56 (1.73)	4.33 (1.77)	13.89 (1.73)
(2)CITATION(7群Hex-Z体系)	7.58 (1.37)	3.73 (1.50)	11.31 (1.41)
(3)CITATION(70群R-Z体系)	11.18 (2.02)	3.33 (1.34)	14.51 (1.81)
(4)NEUPAC(103群)	5.11 (0.92)	3.10 (1.25)	8.21 (1.02)
(5)ORIGEN2(FFTF)	6.67 (1.20)	3.20 (1.30)	9.87 (1.23)
(6)MVP (CMIR-4内部構造均質化)	7.28 (1.31)	3.26 (1.31)	10.54 (1.31)
(7)MVP (CMIR-4内部構造考慮)	7.51 (1.36)	3.18 (1.29)	10.69 (1.33)
(8)MVP (CMIR-4内部構造考慮) NEUPAC全中性子束	6.67 (1.20)	2.78 (1.12)	9.45±0.70 (1.18)

( )内の数値はC/Eを表す。

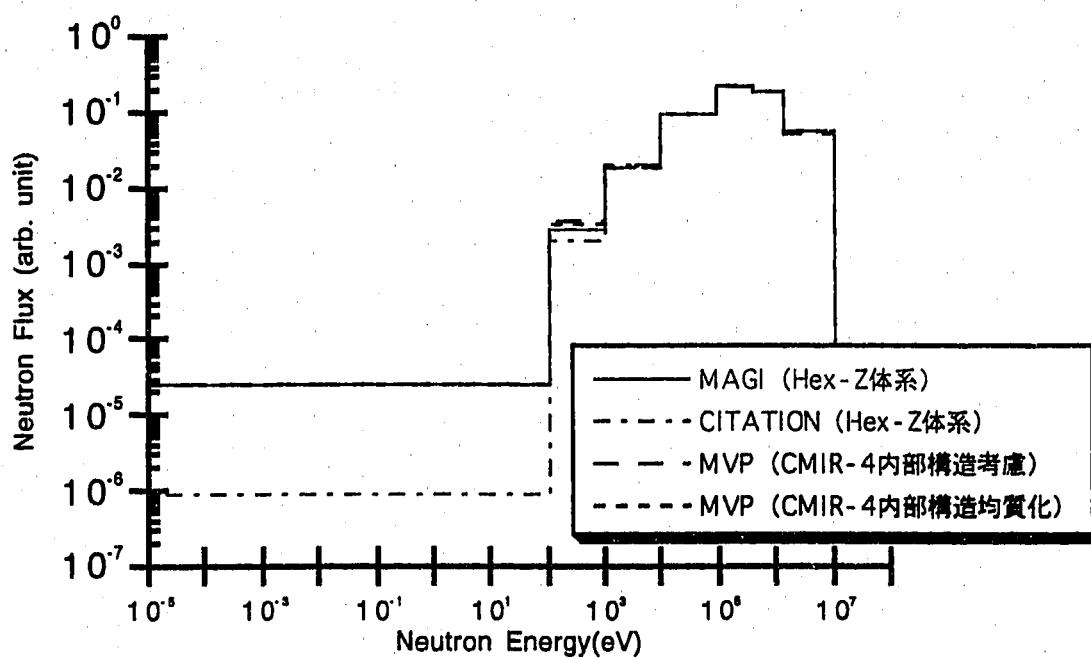


図3.1 ドシメータ装荷位置での7群中性子スペクトルの比較（第24サイクルBOC）

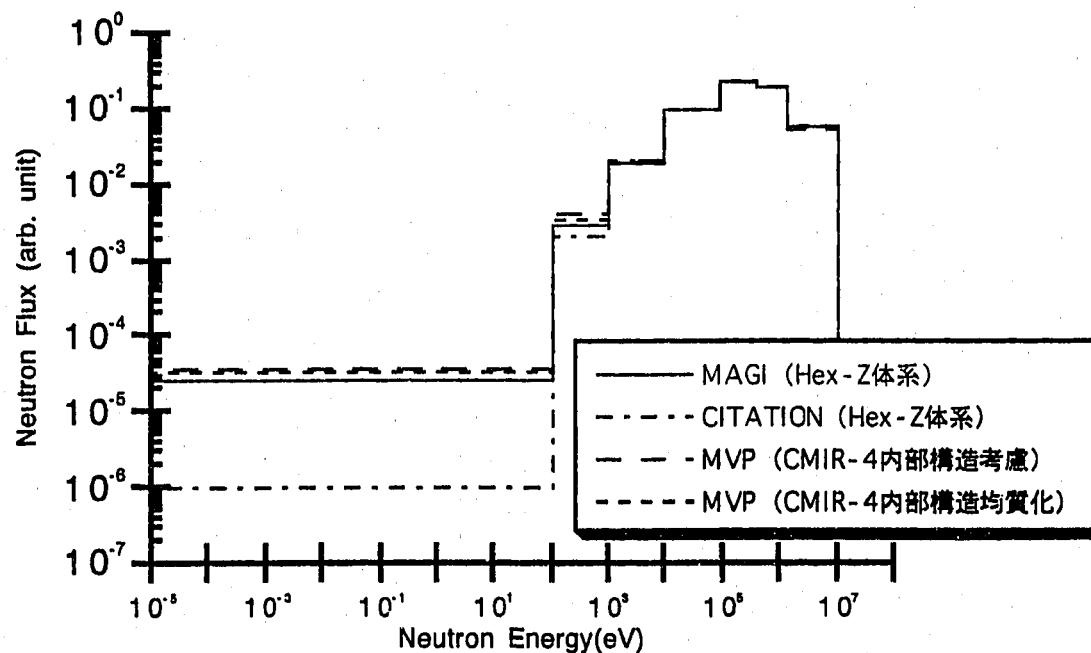


図3.2 ドシメータ装荷位置での7群中性子スペクトルの比較（第25サイクルBOC）

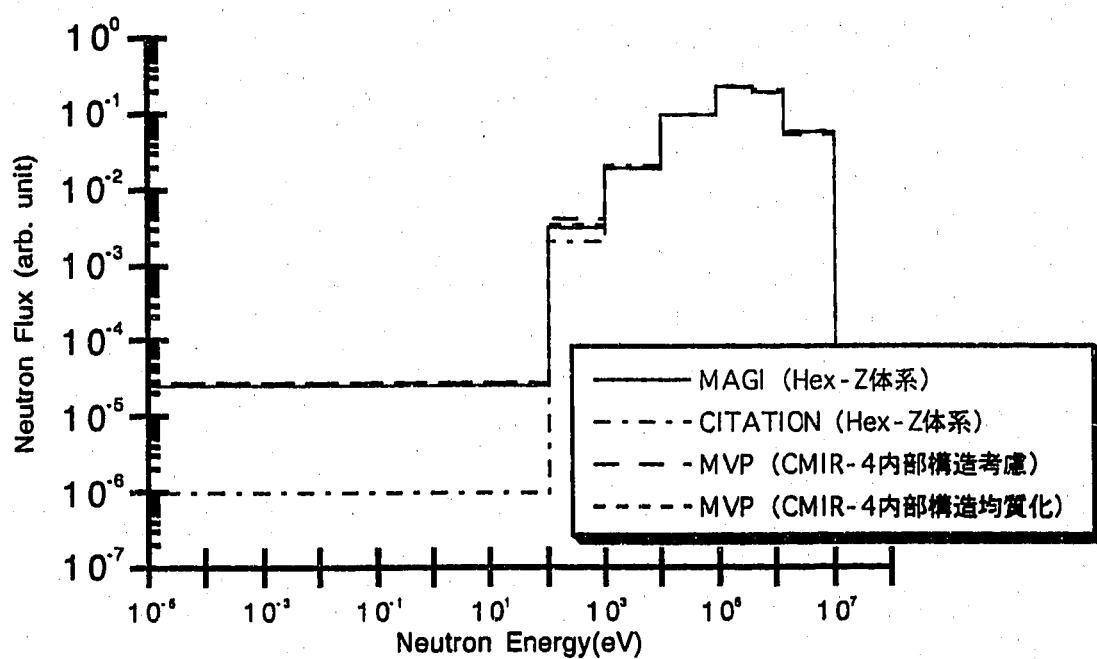


図3.3 ドシメータ装荷位置での7群中性子スペクトルの比較（第26サイクルBOC）

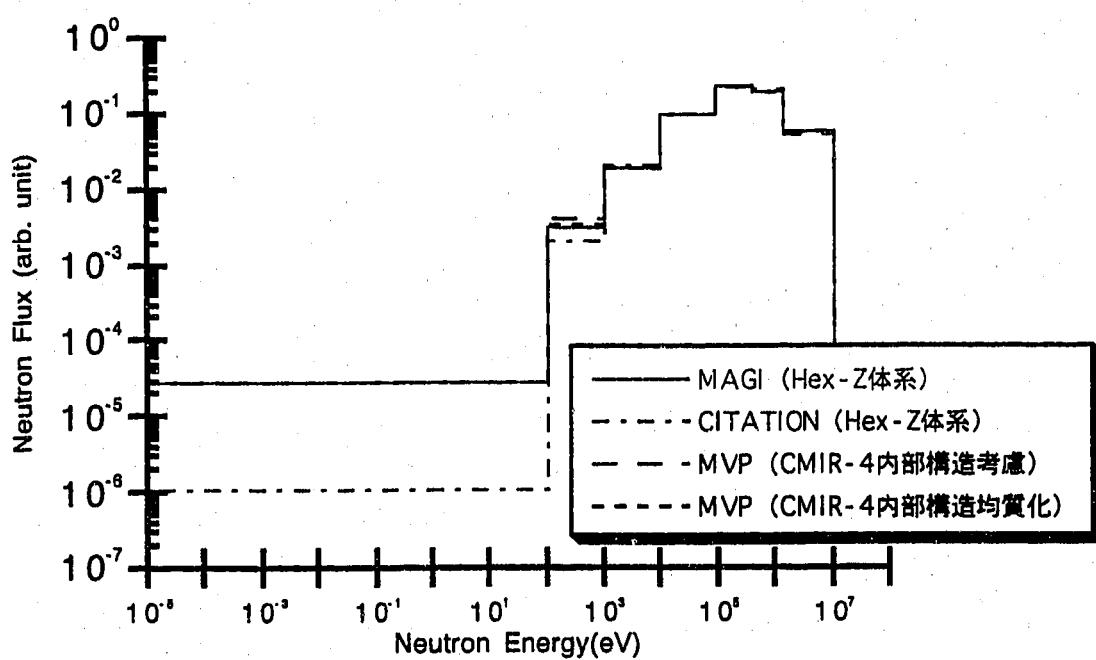


図3.4 ドシメータ装荷位置での7群中性子スペクトルの比較（第27サイクルBOC）

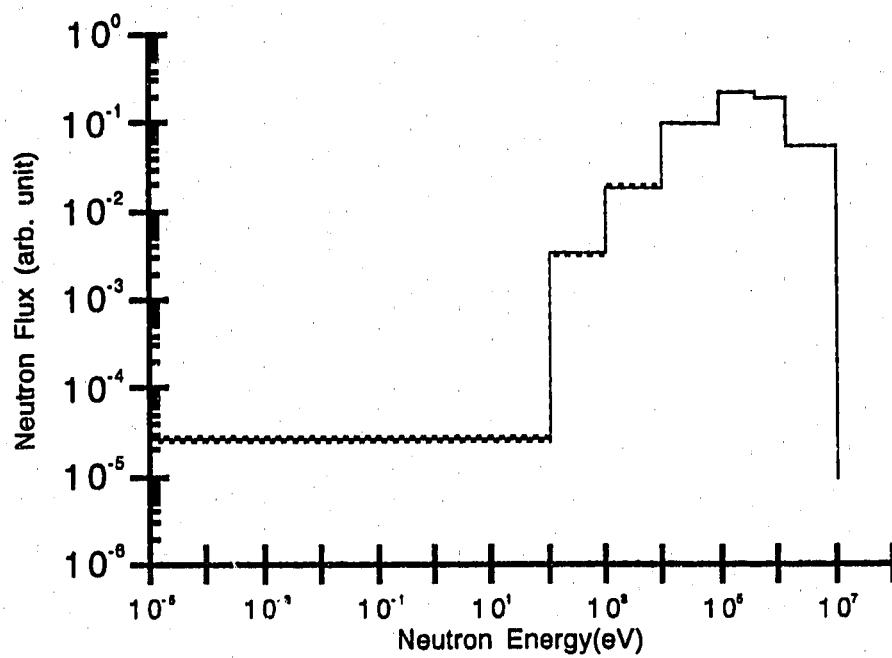


図3.5 MVPの中性子スペクトル統計誤差（CMIR-4内部構造均質化，第24サイクルBOC）

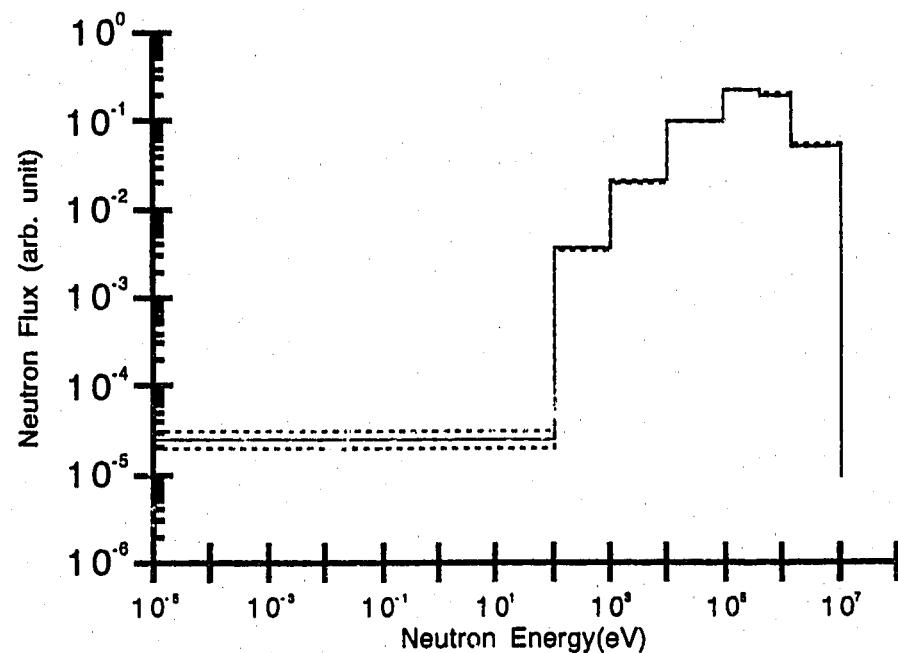


図3.6 MVPの中性子スペクトル統計誤差（CMIR-4内部構造考慮，第24サイクルBOC）

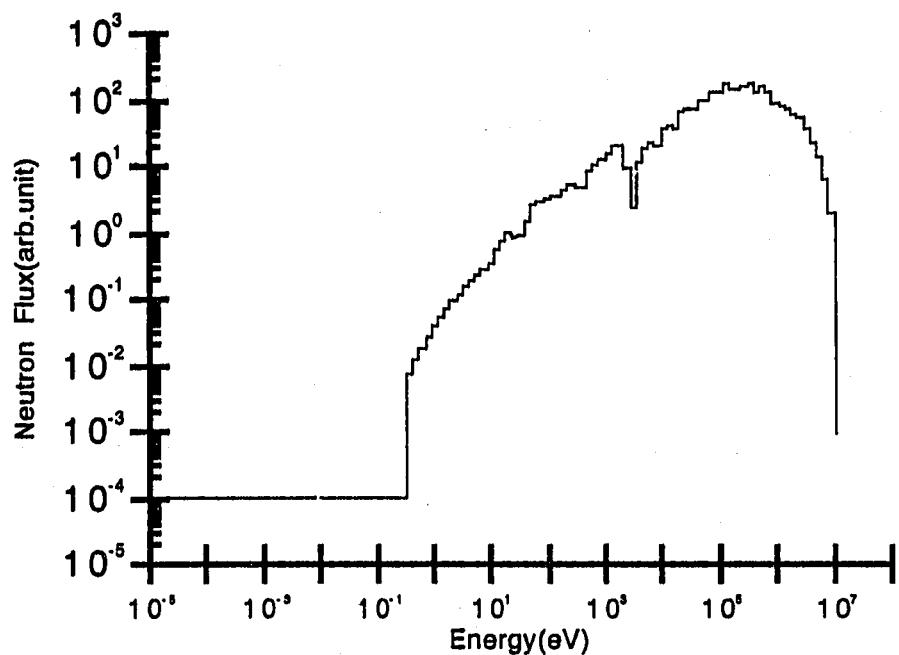


図3.7 CITATION (70群R-Z体系)による中性子スペクトル

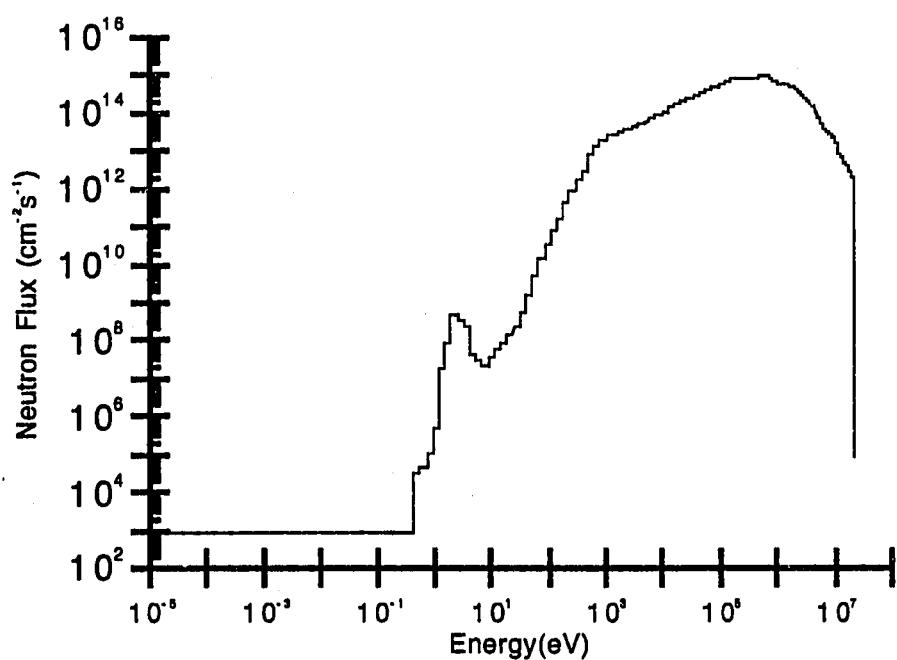
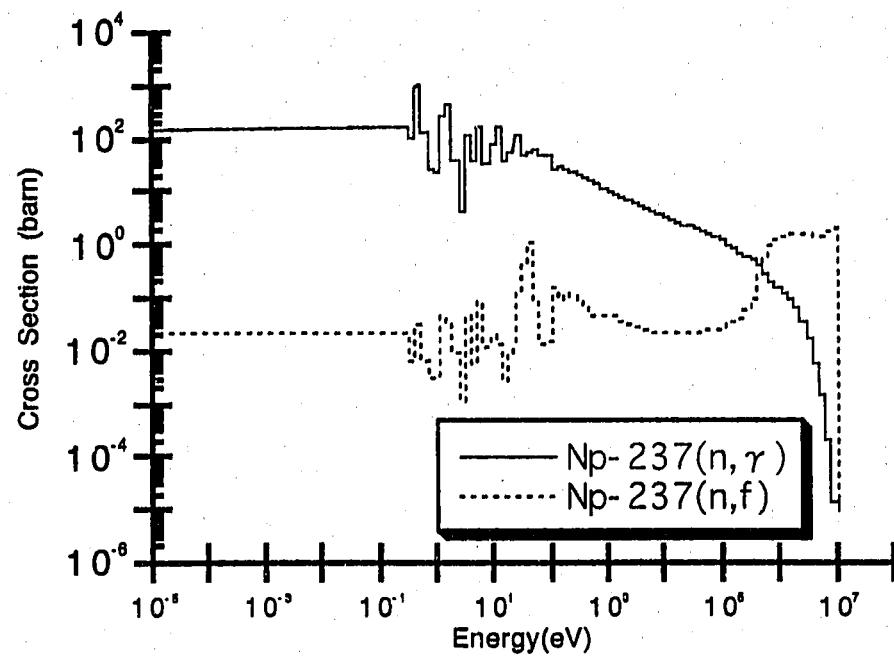
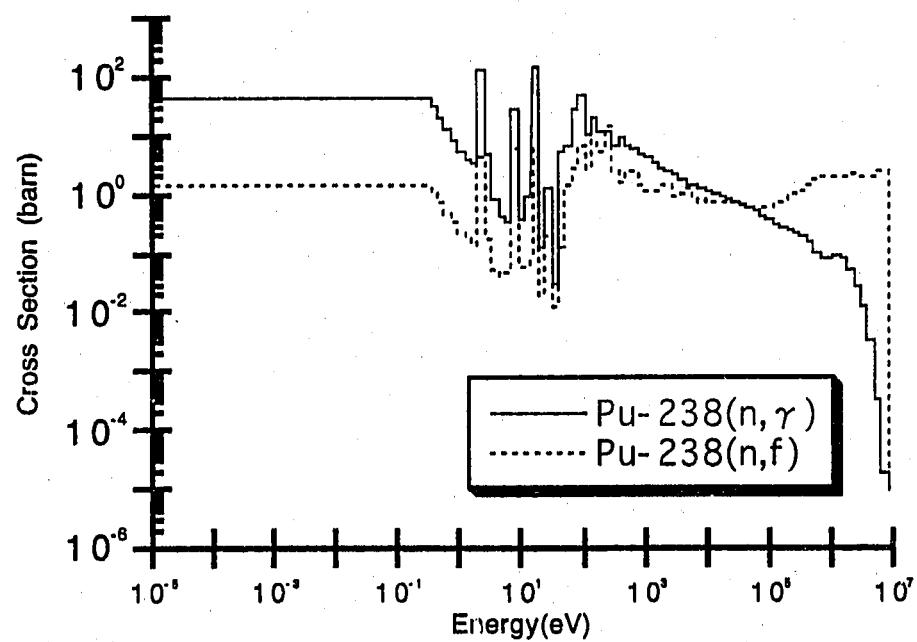


図3.8 NEUPAC (103群)による中性子スペクトル

図3.9  $^{237}\text{Np}$ の70群断面積図3.10  $^{238}\text{Pu}$ の70群断面積

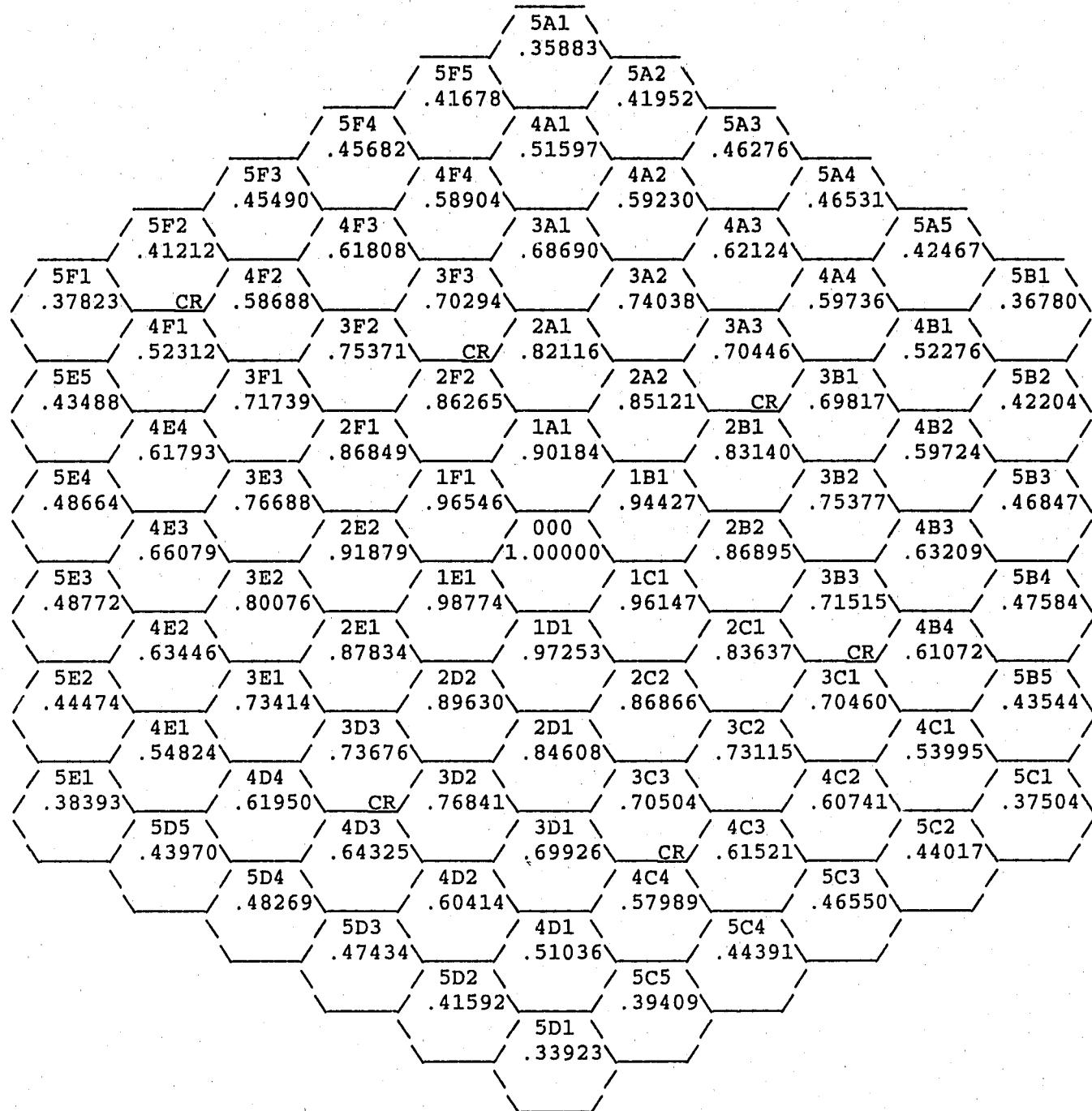
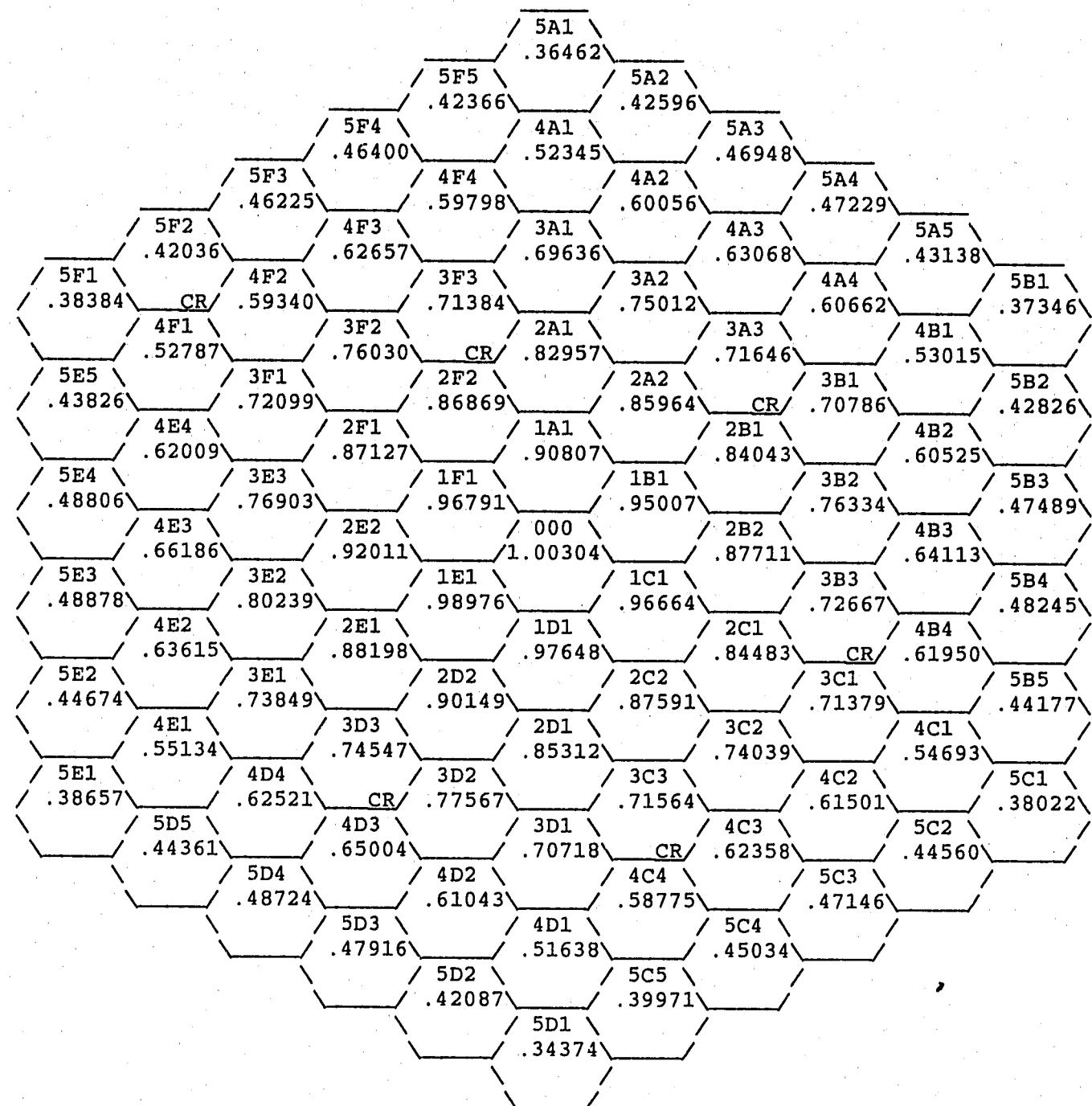


図3.11 MAGIによる中性子束計算結果（第24サイクルBOC）



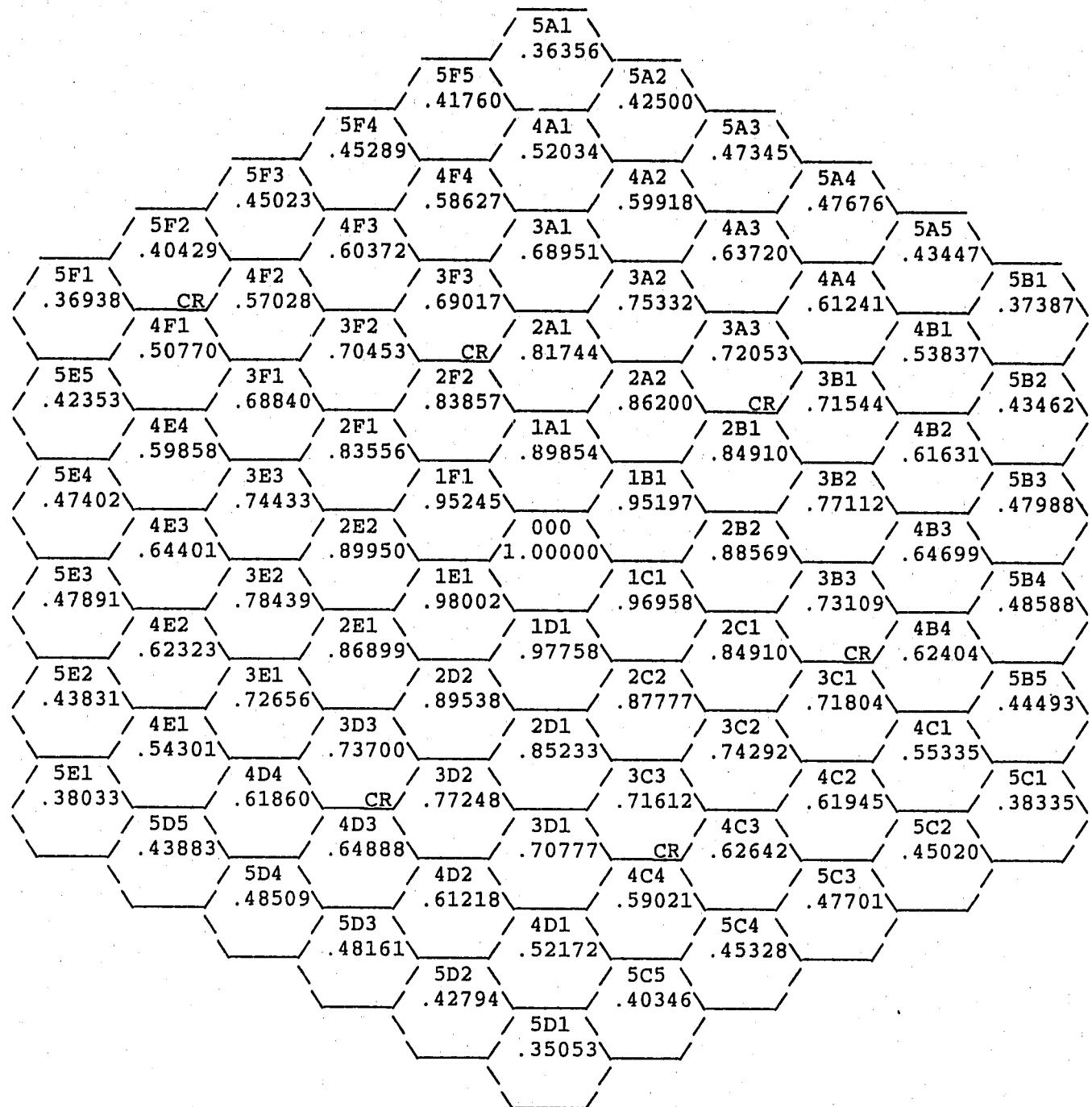
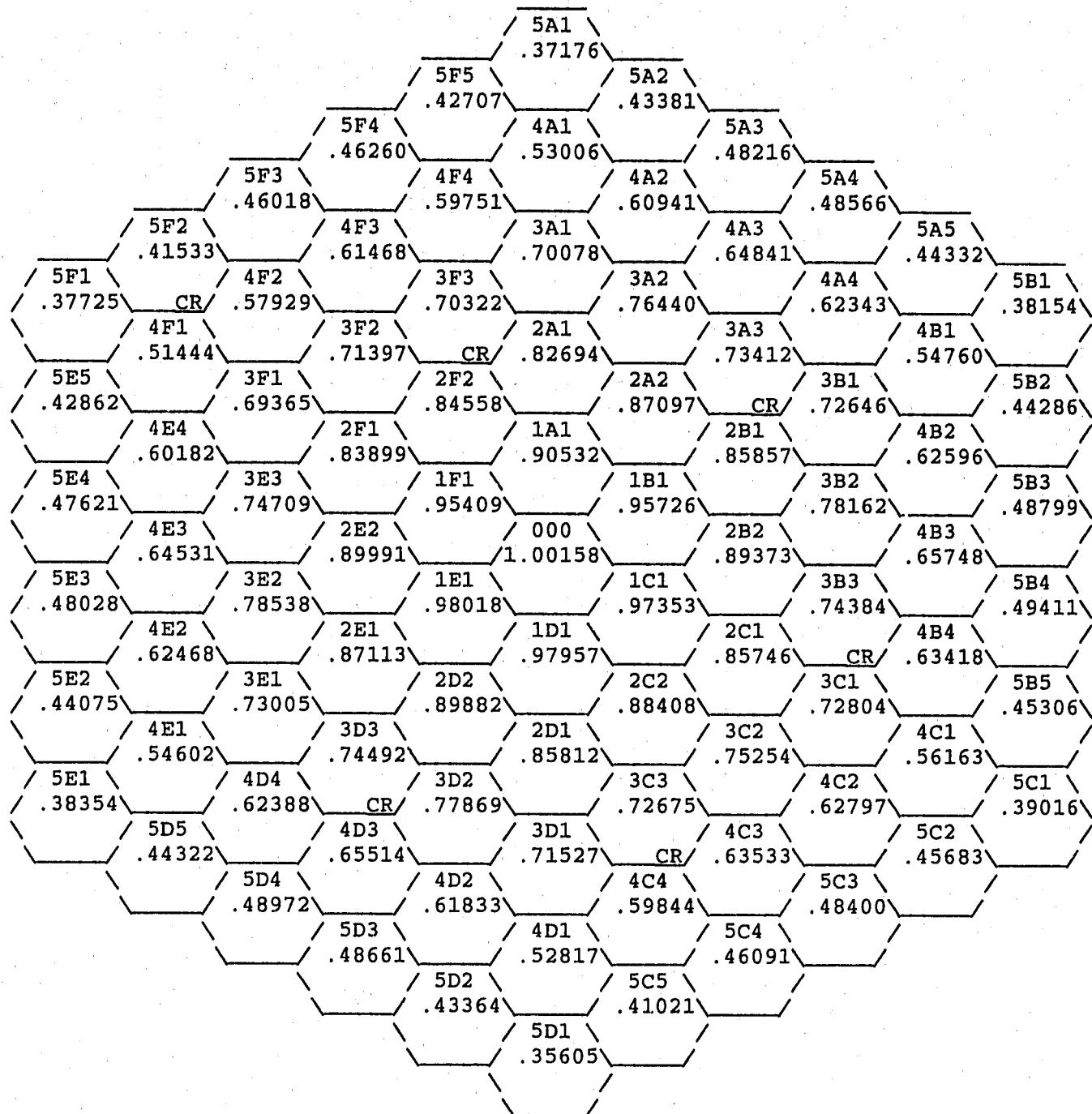


図3.13 MAGIによる中性子束計算結果（第25サイクルBOC）



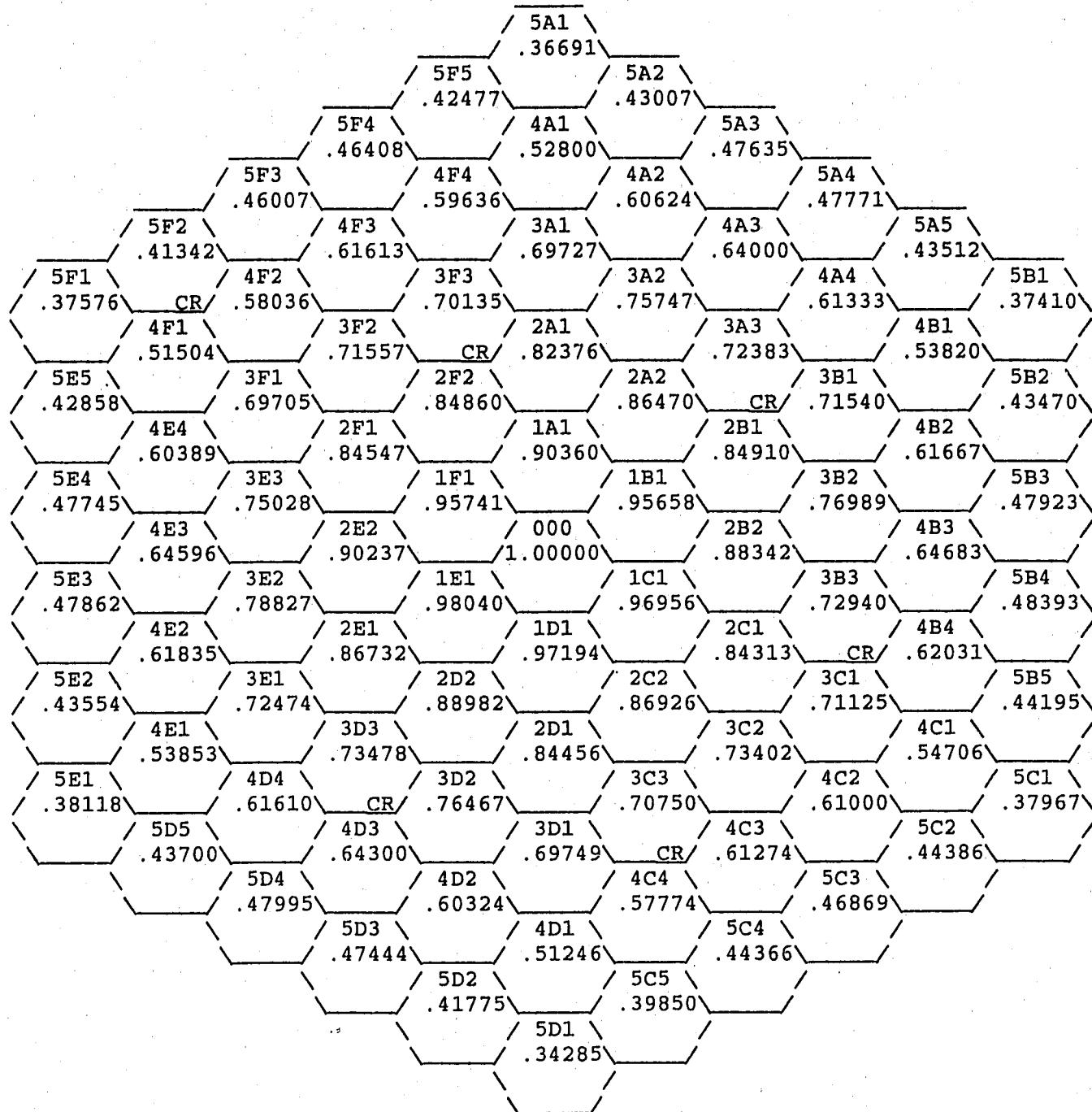


図3.15 MAGIによる中性子束計算結果（第26サイクルBOC）

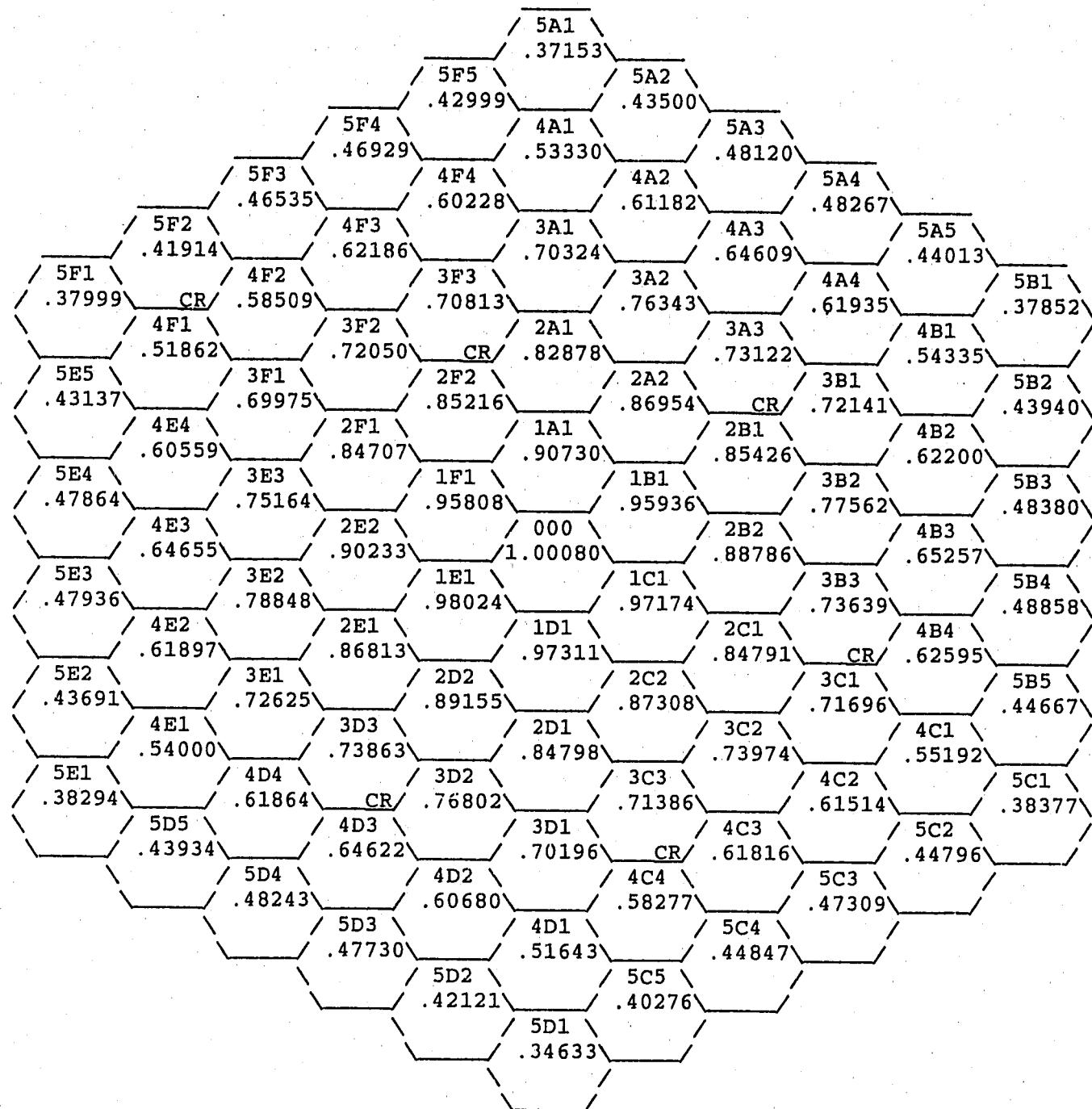


図3.16 MAGIによる中性子束計算結果（第26サイクルEOC）  
BOCのアドレス000の中性子束で規格化

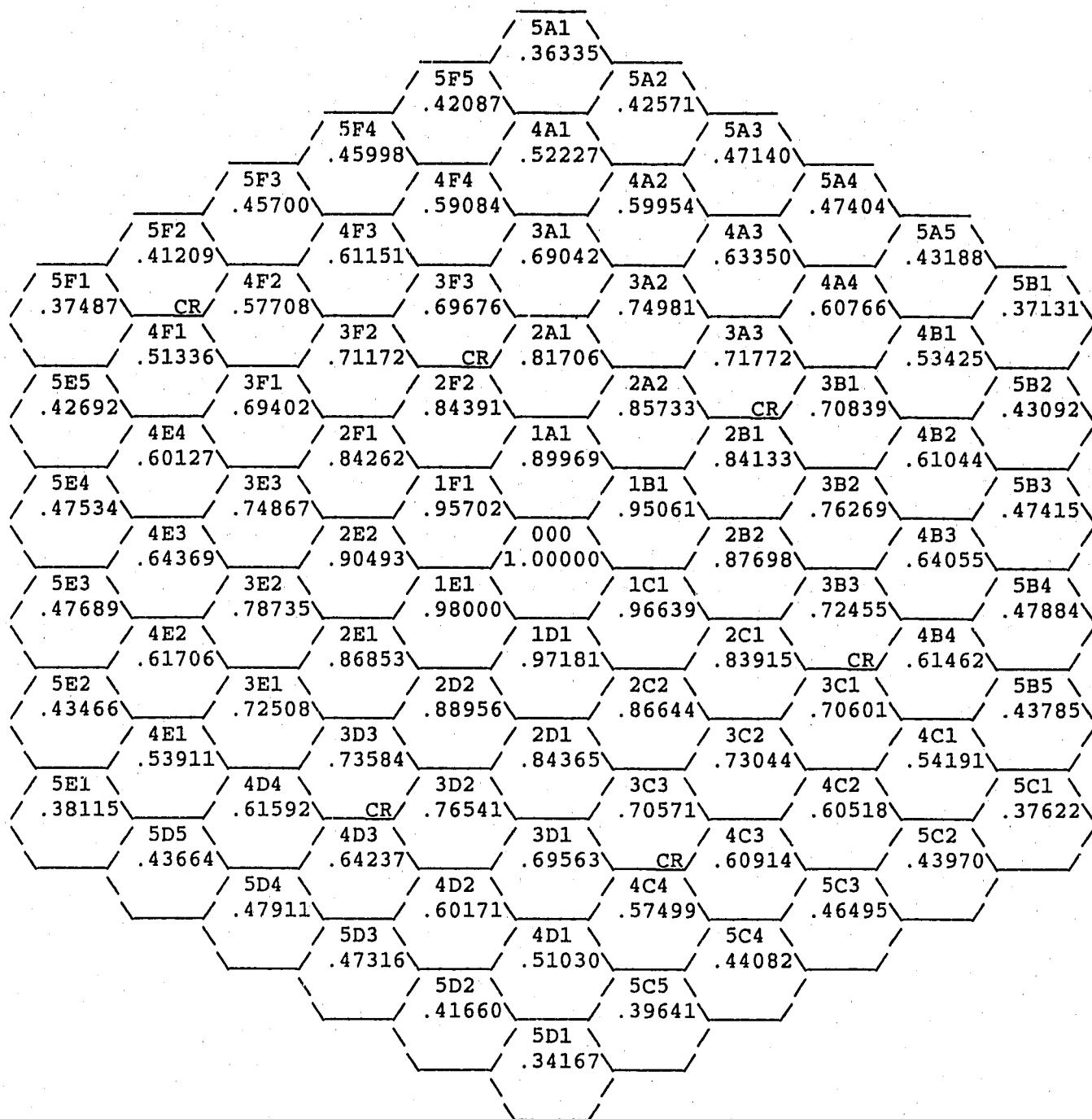


図3.17 MAGIによる中性子束計算結果（第27サイクルBOC）

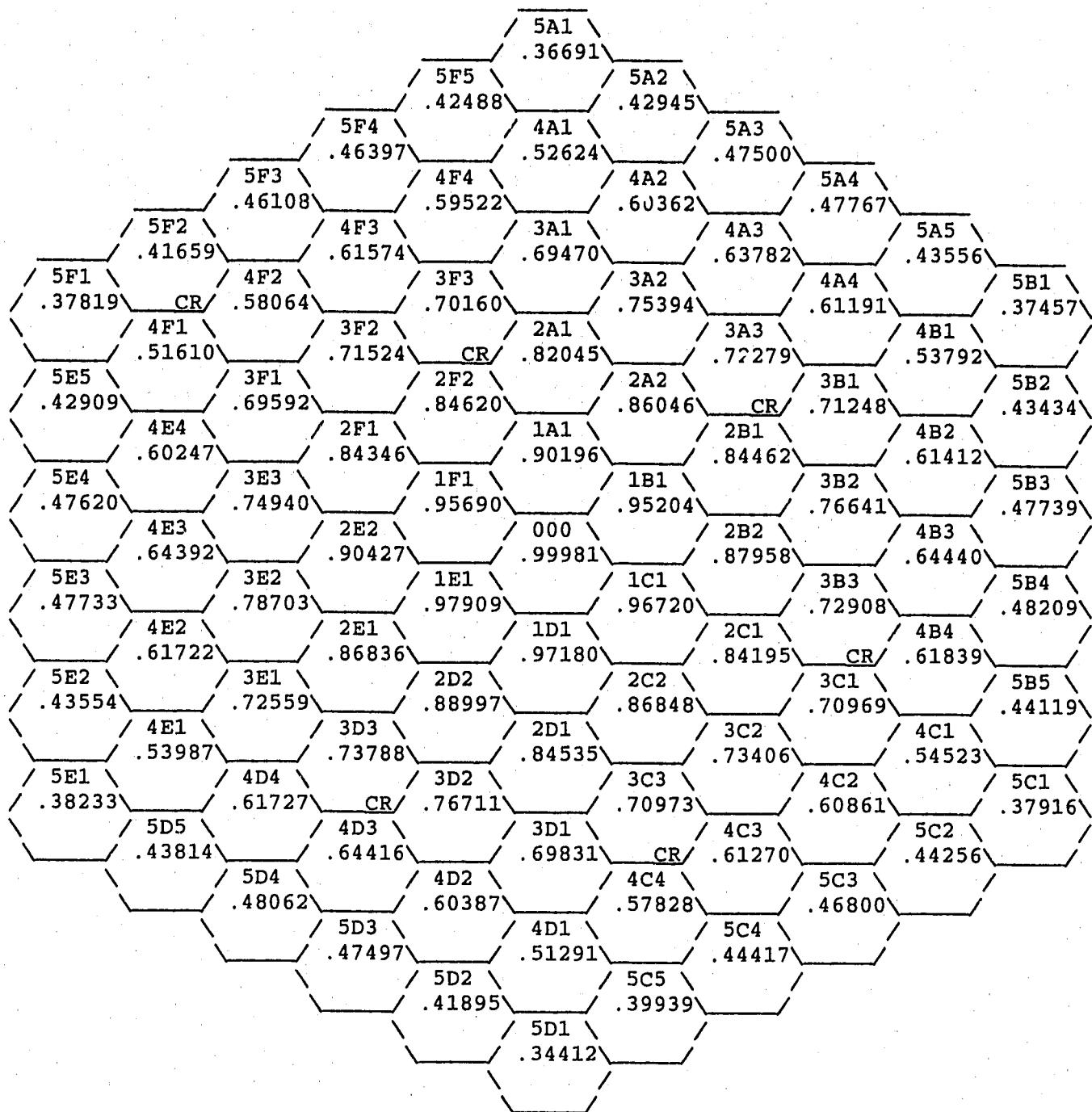


図3.18 MAGIによる中性子束計算結果（第27サイクルEOC）  
BOCのアドレス000の中性子束で規格化

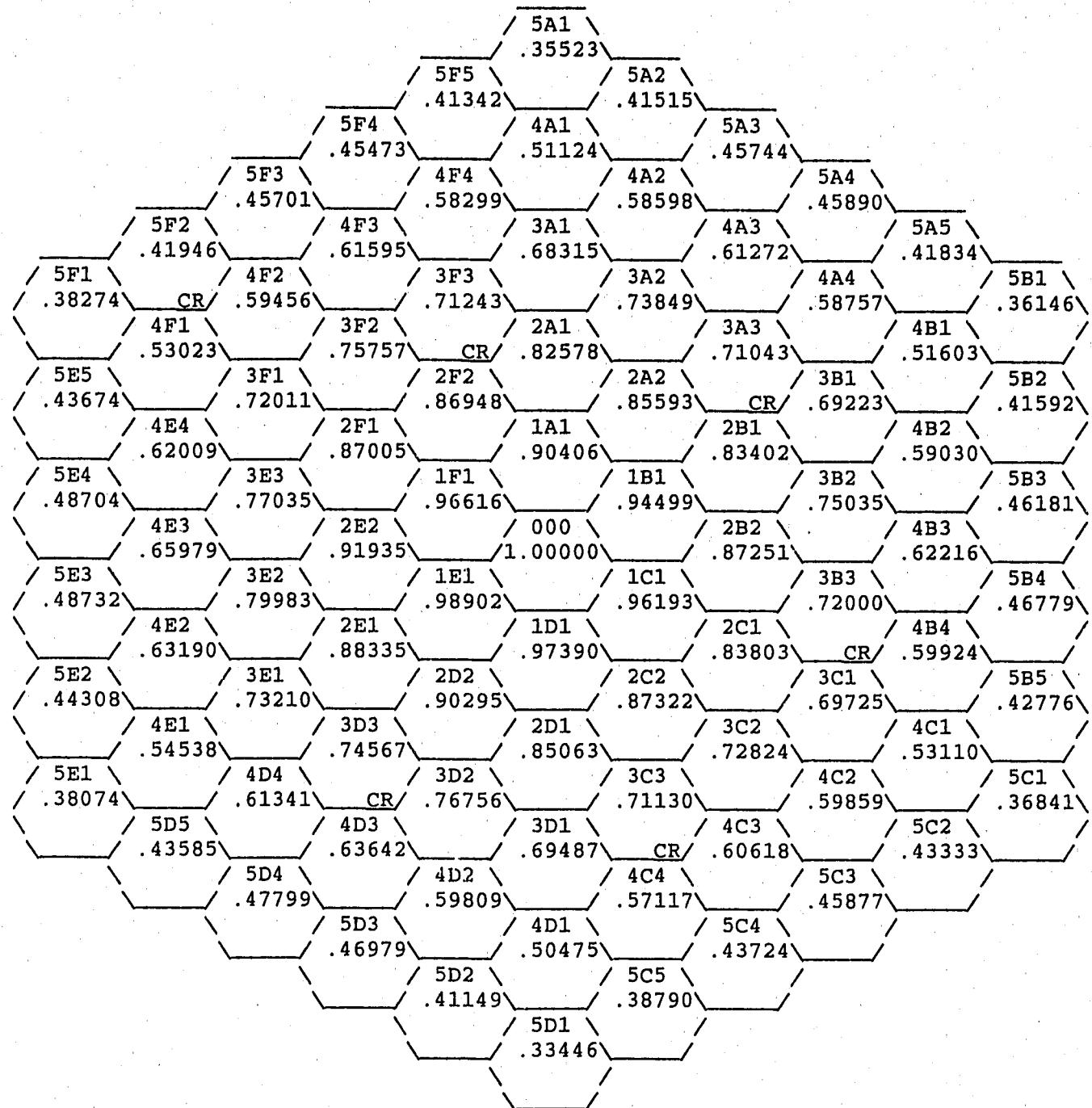


図3.19 CITATION (7群Hex-Z体系) による中性子束計算結果 (第24サイクルBOC)

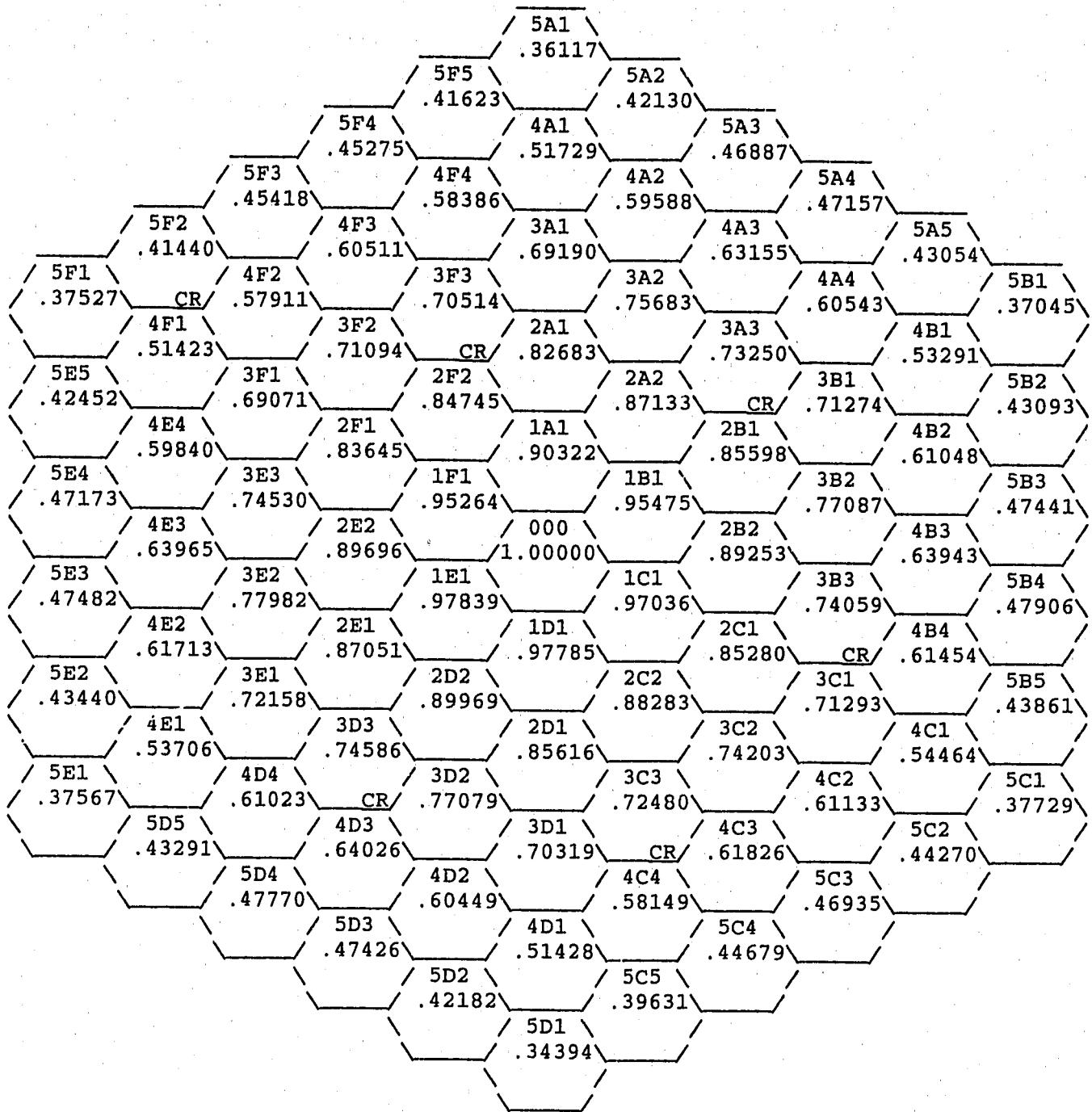


図3.20 CITATION (7群Hex-Z体系) による中性子束計算結果 (第25サイクルBOC)

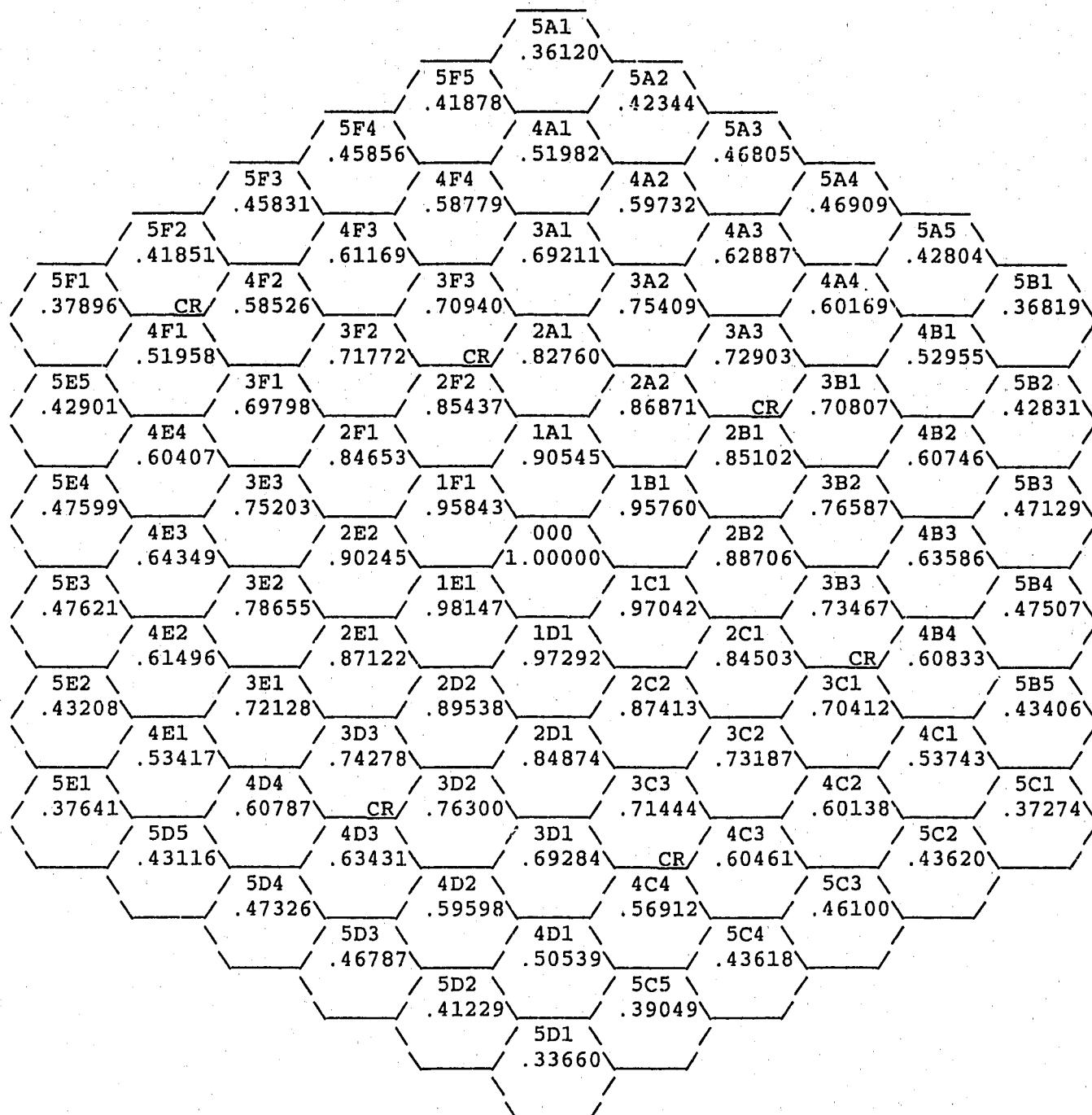


図3.21 CITATION (7群Hex-Z体系) による中性子束計算結果 (第26サイクルBOC)

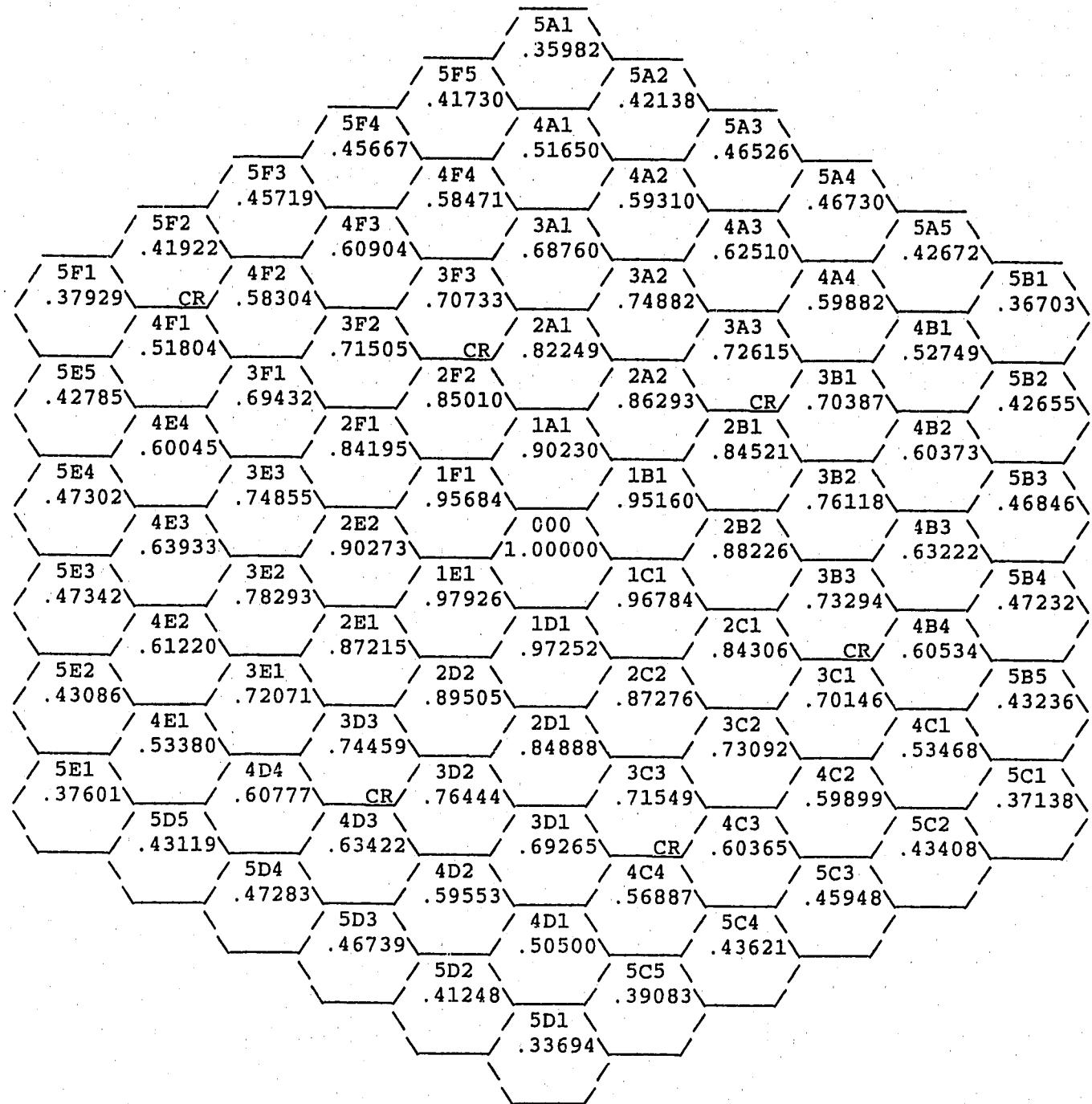


図3.22 CITATION (7群Hex-Z体系) による中性子束計算結果（第27サイクルBOC）

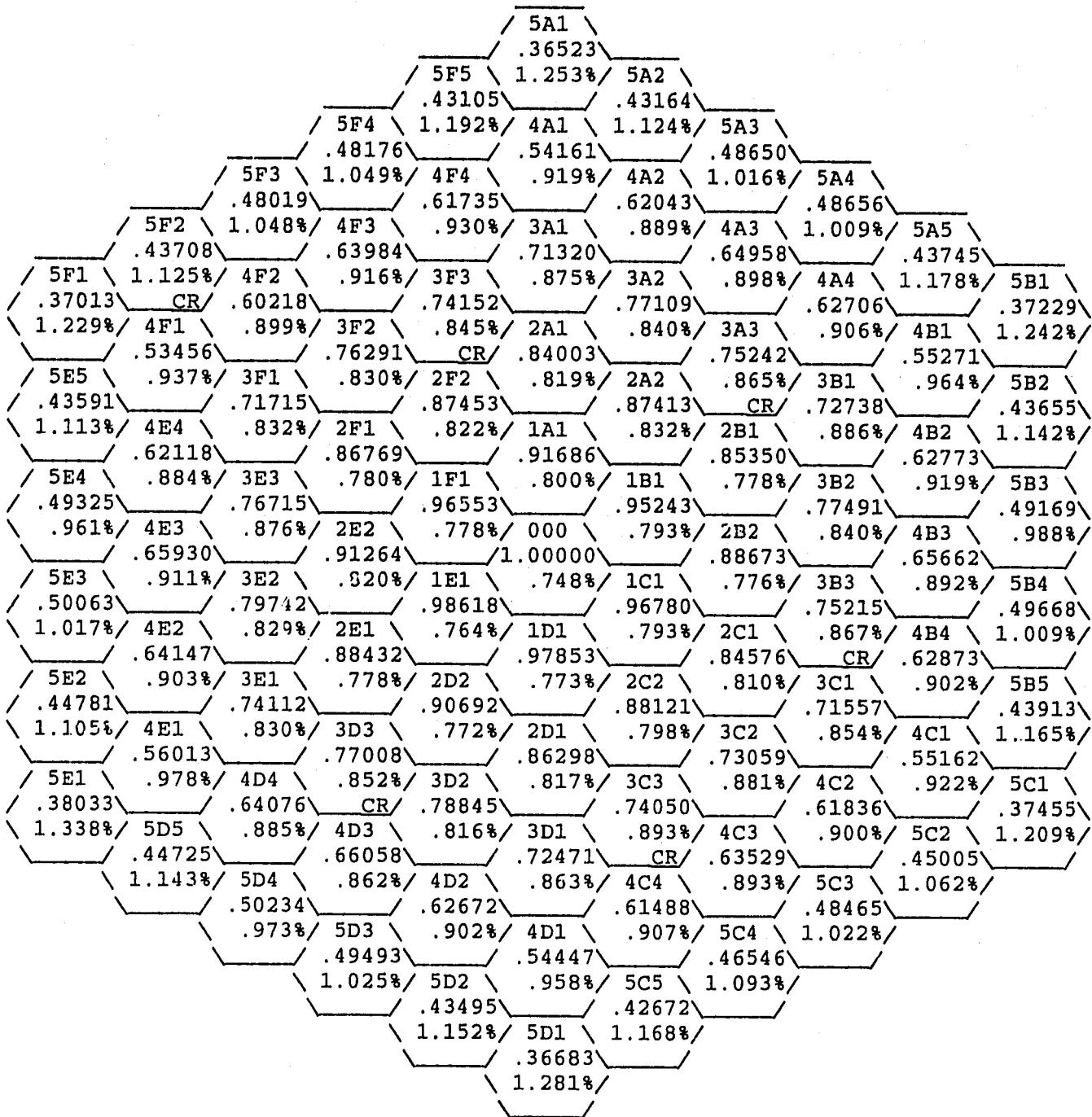


図3.23 MVP (CMIR-4内部構造均質化) による中性子束計算結果 (第24サイクルBOC)

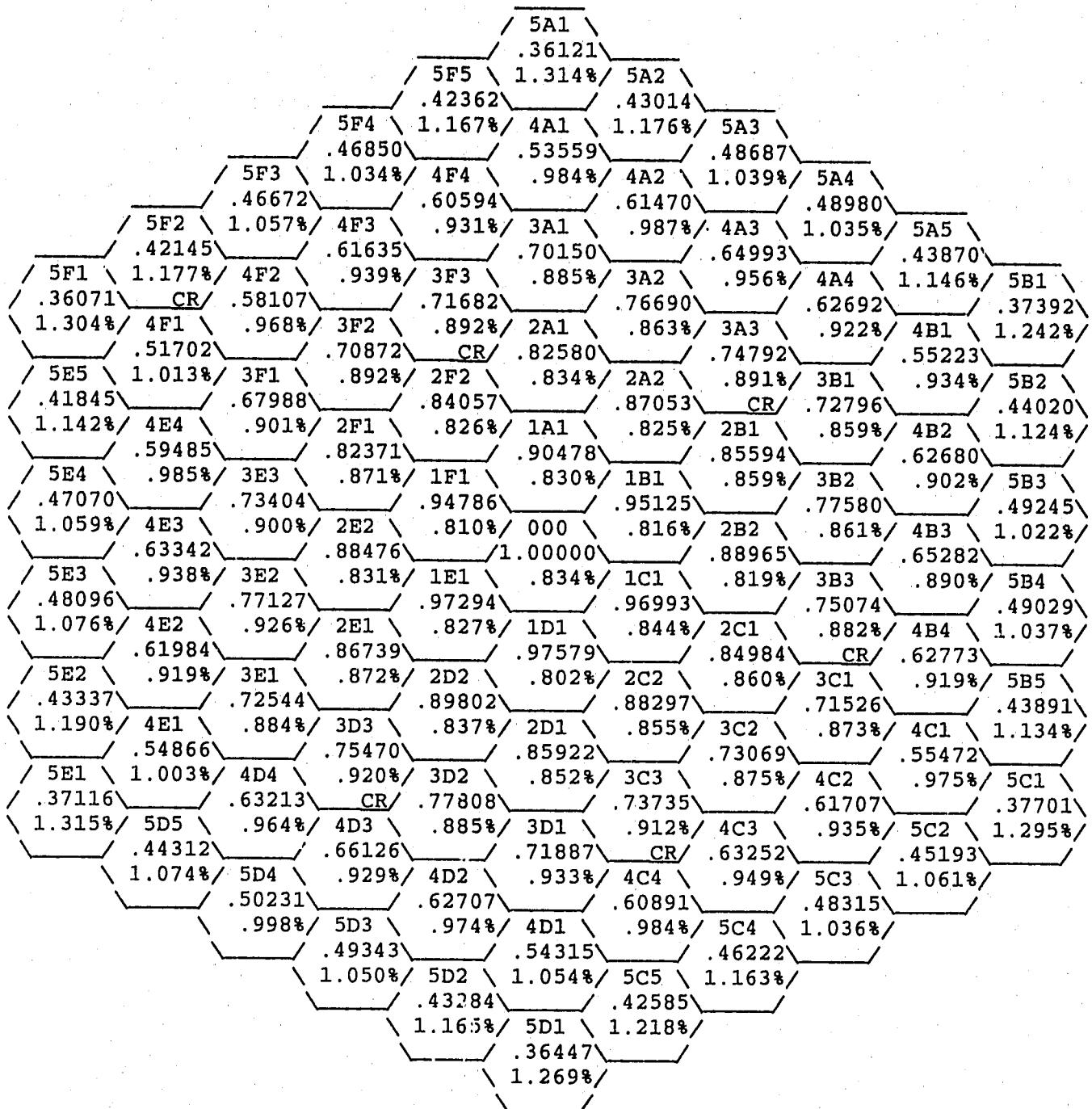
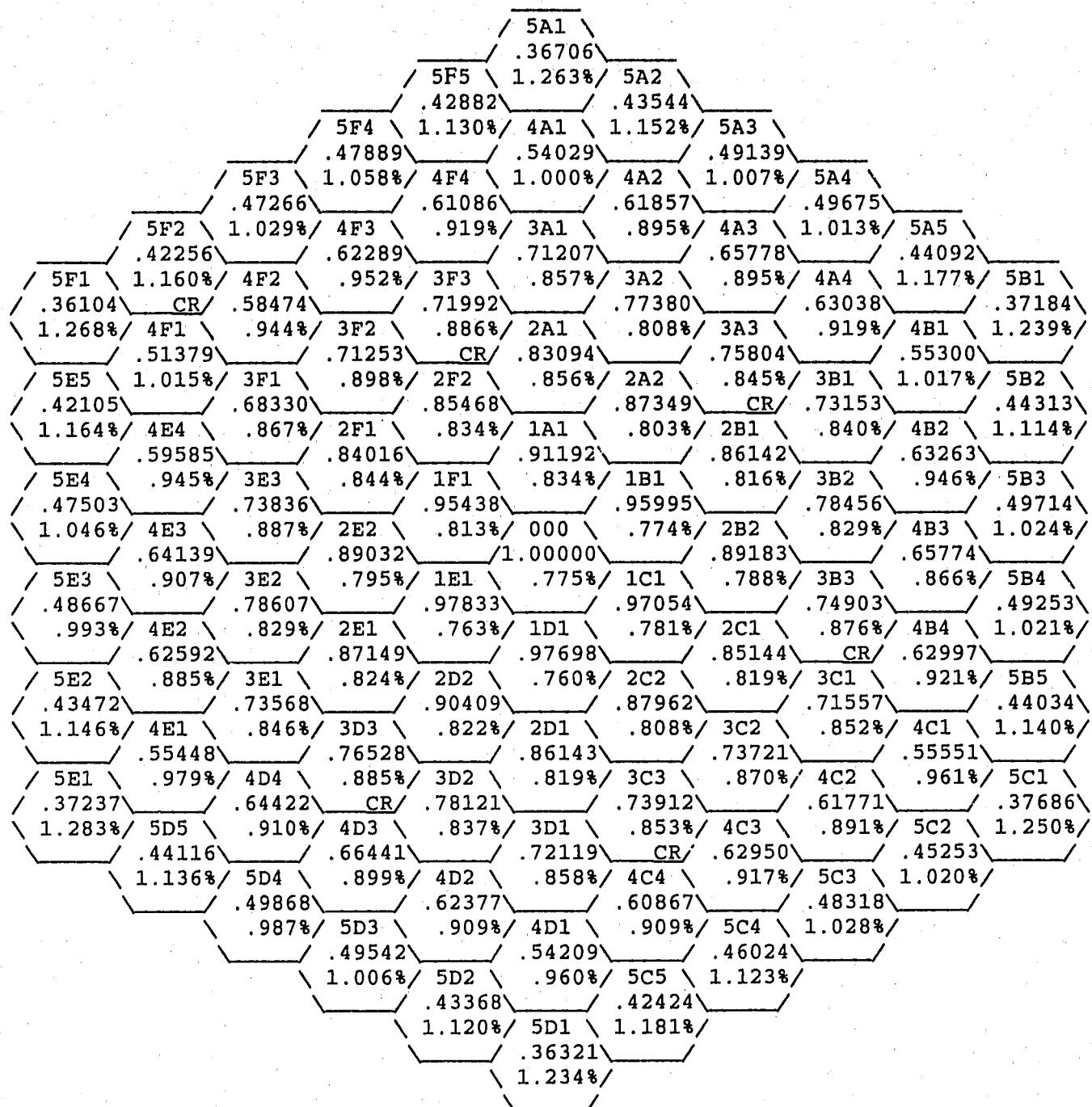


図3.24 MVP (CMIR-4内部構造均質化) による中性子束計算結果 (第25サイクルBOC)



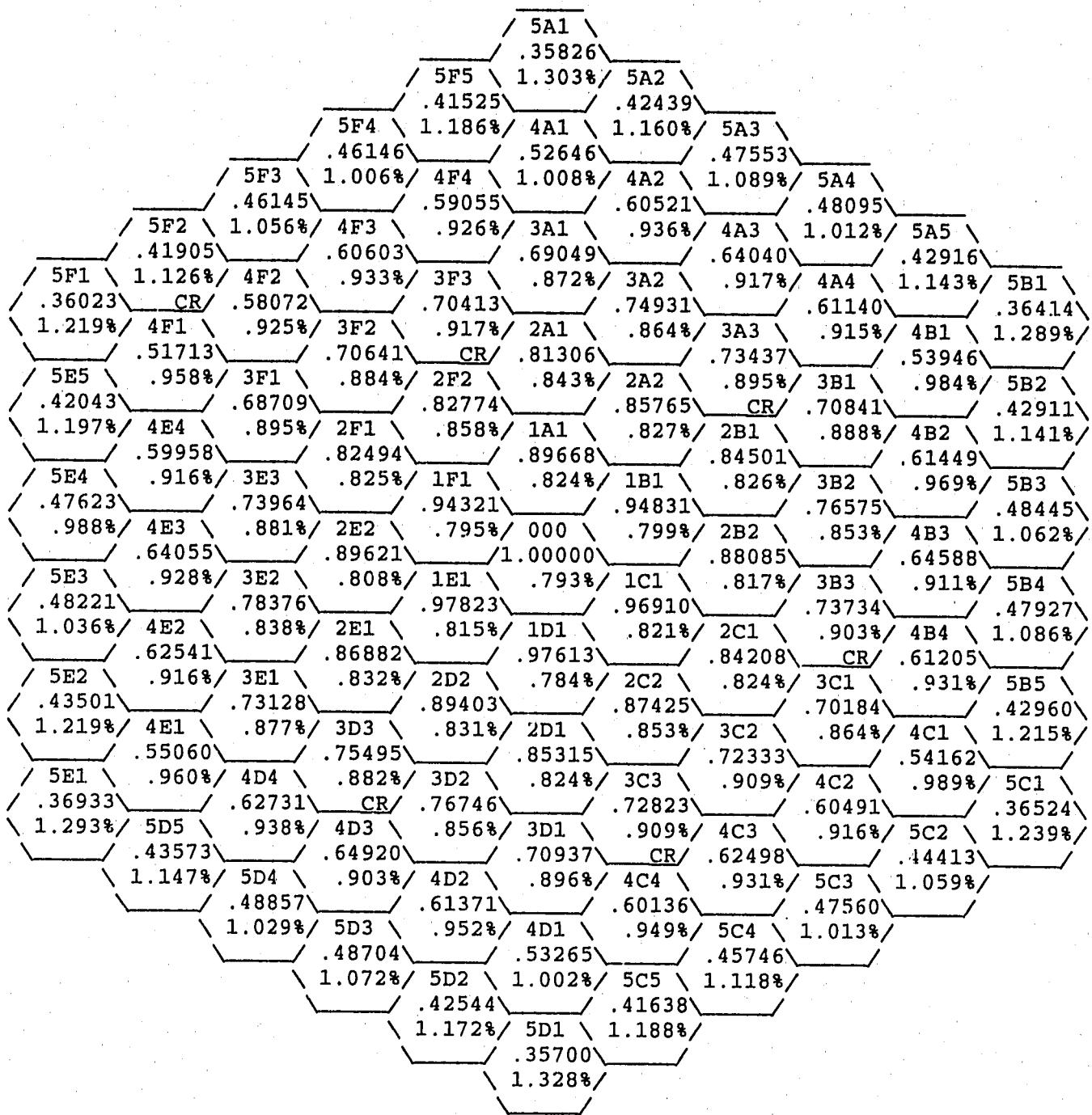


図3.26 MVP (CMIR-4内部構造均質化) による中性子束計算結果 (第27サイクルBOC)

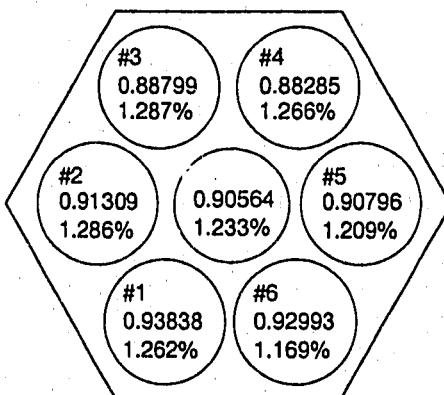
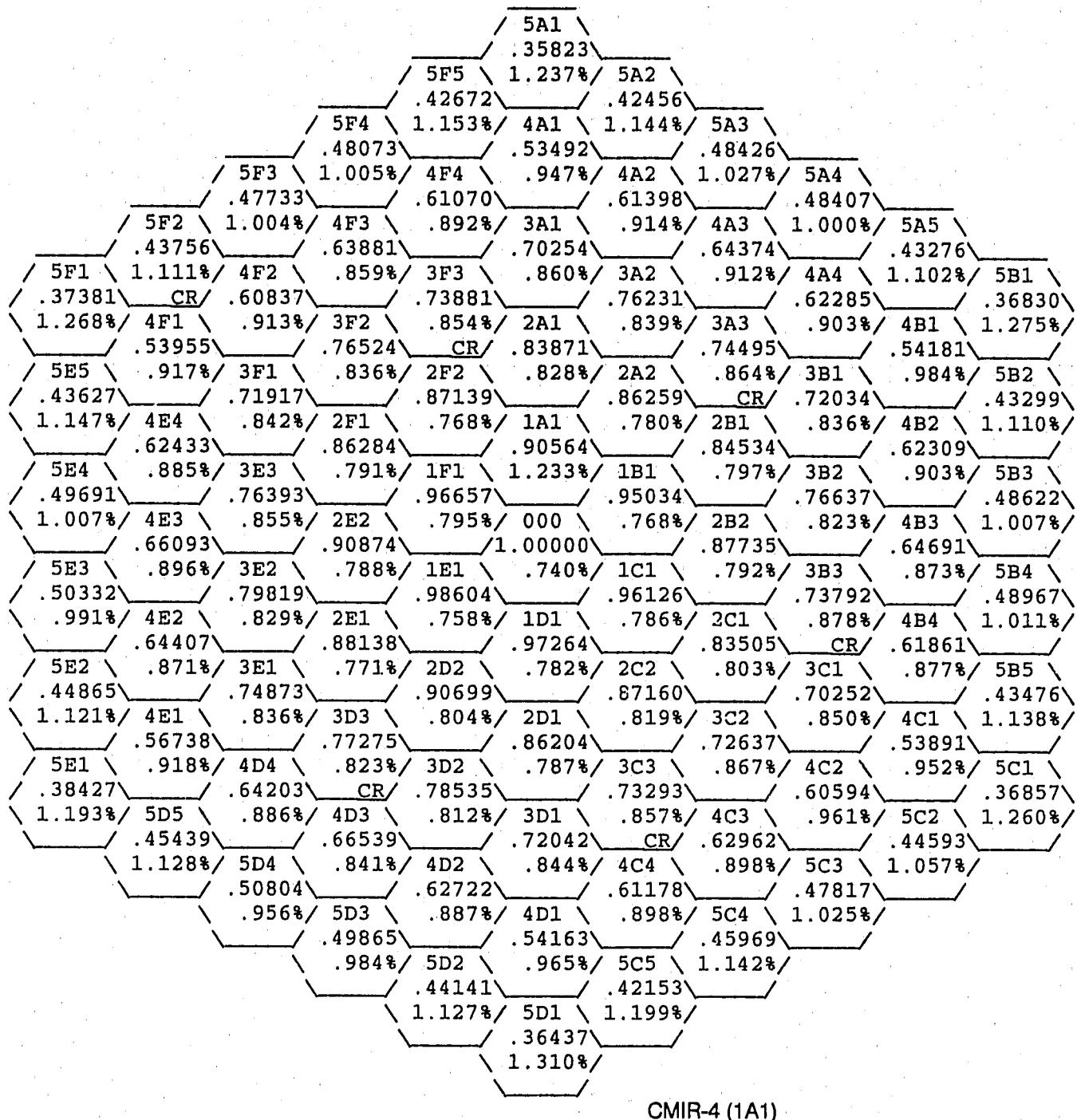
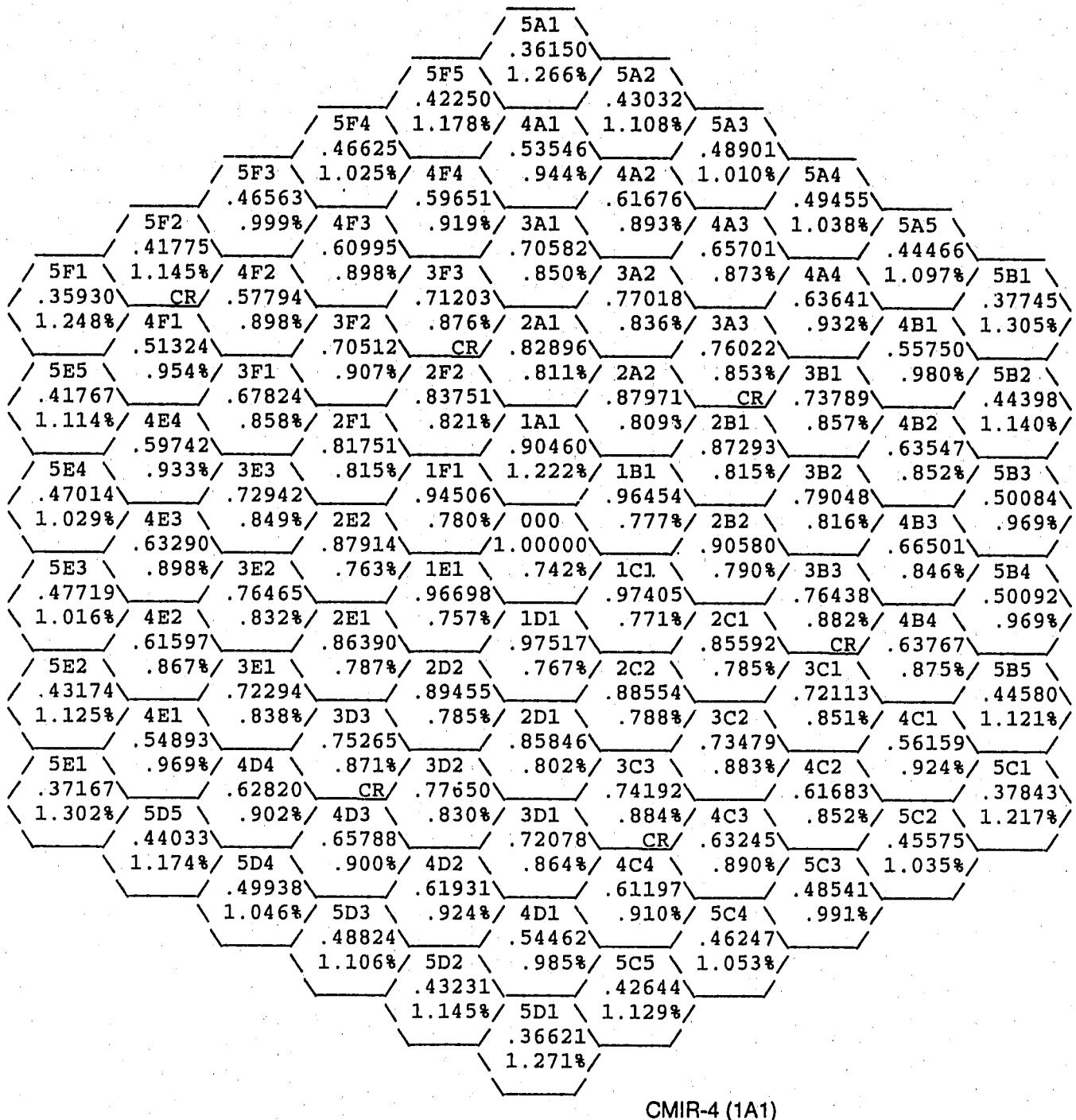


図3.27 MVP (CMIR-4内部構造考慮) による中性子束計算結果 (第24サイクルBOC)



CMIR-4 (1A1)

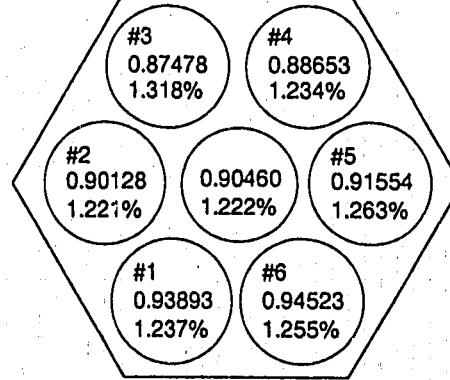


図3.28 MVP (CMIR-4内部構造考慮) による中性子束計算結果 (第25サイクルBOC)

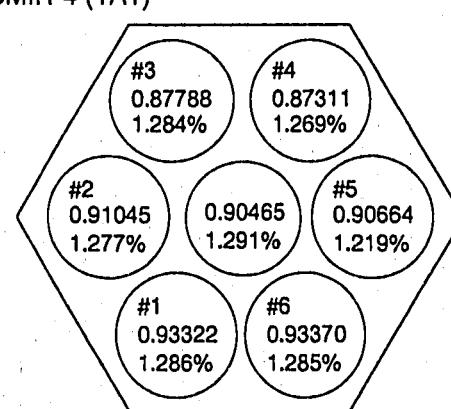
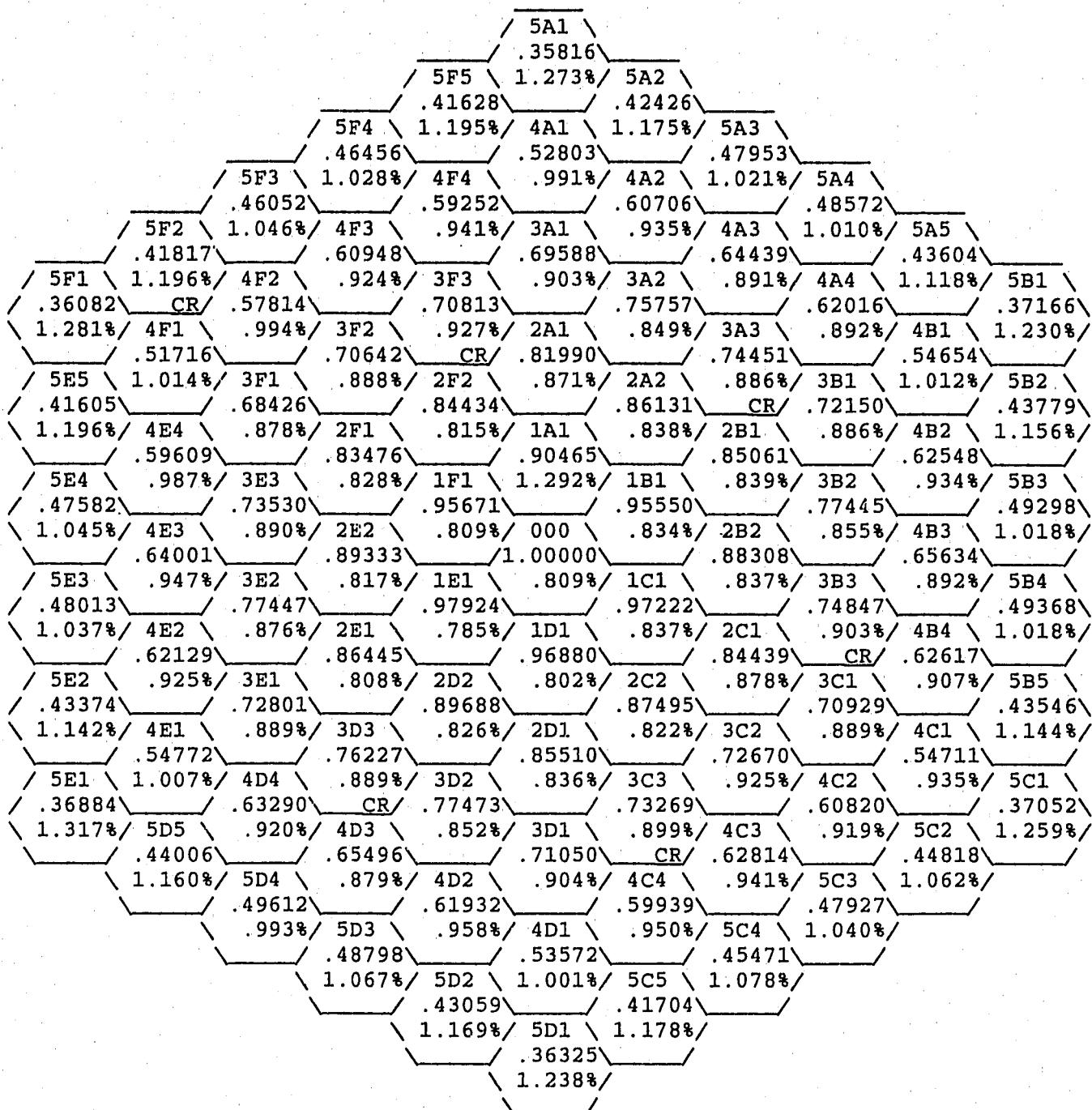


図3.29 MVP (CMIR-4内部構造考慮) による中性子束計算結果 (第26サイクルBOC)

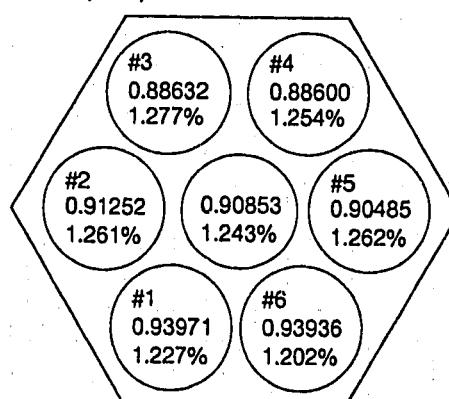
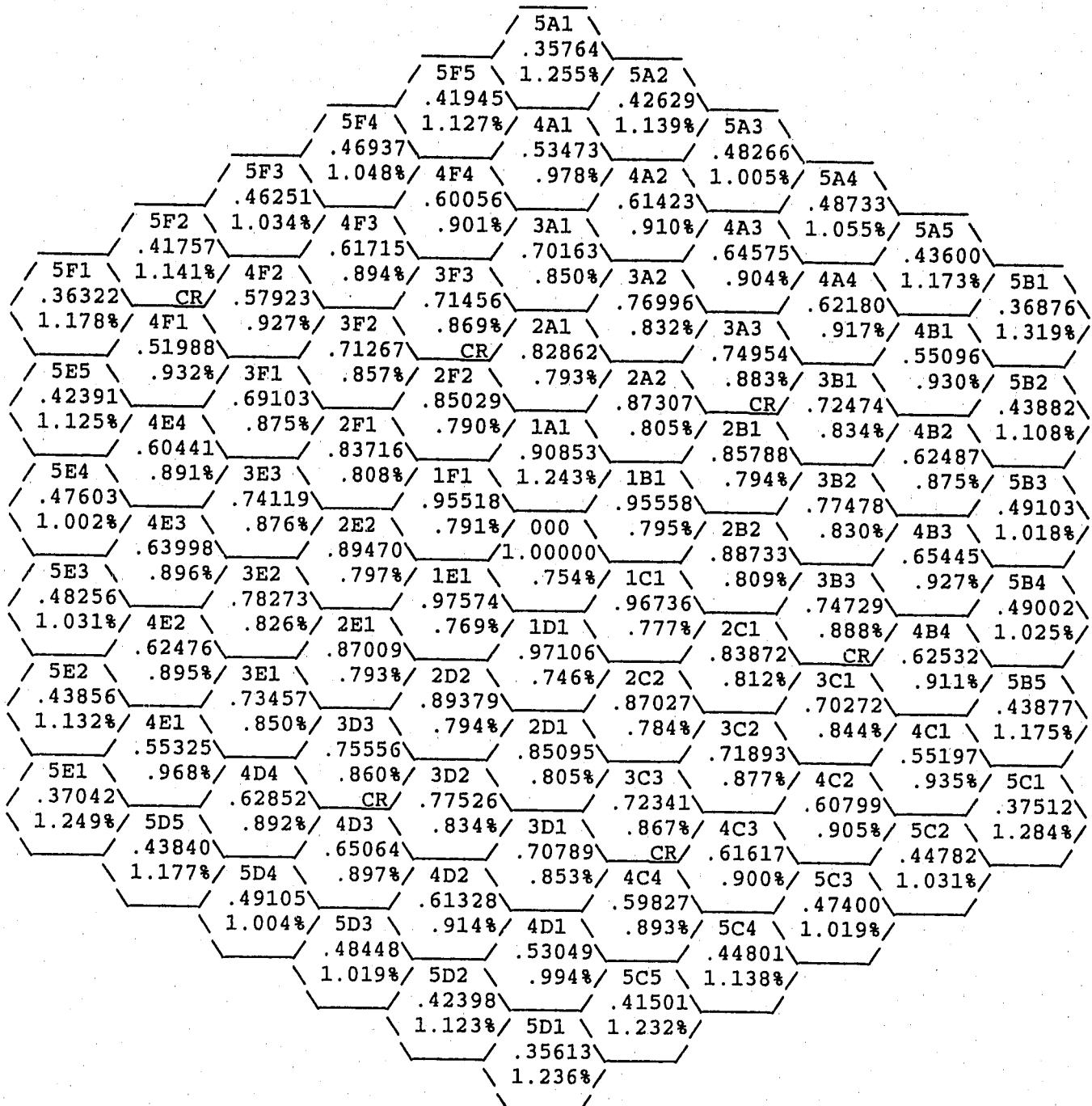


図3.30 MVP (CMIR-4内部構造考慮) による中性子束計算結果 (第27サイクルBOC)

## 第4章 結 論

代表的なMAとして、「常陽」で照射された $^{237}\text{Np}$ 試料の実測データを用いて $^{237}\text{Np}$ 変換率の解析手法を検討した結果、以下の結論を得た。

1. 連続エネルギーモンテカルロコードMVPを用いて全炉心体系の固有値モード計算を行い、照射集合体内の中性子束分布を詳細に解析できた。今回の解析対象集合体は、炉心中心近傍に装荷されたものであり、集合体内部の非均質効果が $^{237}\text{Np}$ の燃焼計算に与える影響は小さいことがMVPの計算結果で明らかとなった。
2. MAGI、CITATIONの中性子束を用いた $^{237}\text{Np}$ 変換率の計算は、中性子捕獲、核分裂反応とともに測定値を約30%過大評価した。また、アンフォールディングした中性子束を用いた場合でも測定値より約12~20%大きかった。この原因として、MAGI、CITATIONの中性子束計算法の他にアンフォールディングによる中性子束の誤差や $^{237}\text{Np}$ 変換率の測定誤差についても検討する必要があることがわかった。

本研究により、 $^{237}\text{Np}$ 燃焼特性の解析精度を向上させるまでの問題点を摘出した。

## 謝 辞

本研究を実施するにあたり、動燃事業団大洗工学センター実験炉部・鈴木惣十技術課長はじめ多くの方に有益な助言を頂きました。心から感謝致します。

## 参考文献

- (1) 森貴正、中川正幸：「MVP/GMVP連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・格子輸送計算モンテカルロコード」、JAERI-Data/Code 94-007 (1994)
- (2) A. G. Croff : "A USER'S MANUAL FOR THE ORIGEN2 COMPUTER CODE", ORNL-TM-7175 (1980)
- (3) 関口晃、中沢正治、植田伸幸：「高速炉ドシメトリー手法に関する研究」、PNC J26085-01 (1985)
- (4) T. Nakagawa : "Summary of JENDL-2 General Purpose File", JAERI M 84-103 (1984)
- (5) 中沢正治、小林捷平他："JENDL Dosimetry File", JAERI 1325 (1992)
- (6) K. Shibata et al., : "Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3—JENDL-3—" , JAERI 1319 (1990)
- (7) B. A. Magurno and P. G. Young, "ENDF-201 Supplement 1", BNL-NCS-17541 (1985)
- (8) 永谷睦美：「MAGIおよびCITATIONのデータ支給」、技術課メモ、技-7-186 (1996)
- (9) 佐井川拓也、枡井智彦：「ドシメータによるCMIR-4集合体の $^{237}\text{Np}$ 変換量の測定結果」、技術課メモ、技-7-185 (1996)
- (10) 佐井川拓也、青山卓史：「ドシメータによるCMIR-4集合体の中性子照射量評価結果」、技術課メモ、技-7-204 (1996)

## 付録 計算機資源の利用状況

MVPの計算は阪大のIBMサーバーRS/6000（主記憶256MB）で行った。

CMIR-4の内部構造を考慮した場合（100万ヒストリー）の例を次に示す。

CPU利用時間：4.50215E+04 SEC（12.5時間）

ターンアラウンド時間（計算にかかった実時間）：15.3時間

主記憶利用量：約80MB

また、解析には用いていないがヒストリー数を200万にしたときは、

CPU利用時間：9.18368E+04 SEC（25.5時間）

ターンアラウンド時間（計算にかかった実時間）：36.2時間

主記憶利用量：約125MB

であった。

計算時間は、計算機の利用状況に大きく左右されるが、200万ヒストリーで計算を行うと運転サイクルの時点の中性子束分布と実効断面積を求めるだけで、二日間計算機を占有することになり、実際上解析を行えない。

ヒストリー数の増加だけでなく領域数の増加も計算時間と主記憶利用量の増加を招くので、これ以上の計算体系を複雑化することは困難である。

例えば、今回の解析ではZ軸方向の非均質性を取り入れていないが、将来的に取り入れる必要が生じたとき、MAGIやCITATIONのように軸方向にメッシュを切ったのでは解析に用いることが可能な計算を行うことはできないと予想される。MVPの計算体系を複雑化させずに軸方向の非均質性を取り入れるための物理モデルが必要であると考えられる。