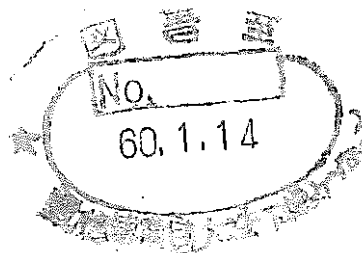


「常陽」MK-II 炉心ガンマ線発熱評価

(受託研究)



1984年8月

株式会社 日立製作所

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」MK-II炉心ガンマ線発熱評価*

▽PNC ** ▽戸邦和**
沢田周作** 大政良昭**
高橋 仁***

要 旨

「常陽」MK-II炉心第0サイクルについて、ガンマ線発熱解析を実施した。本解析を行うに先立ち、以下の作業を実施した。

- (1) ガンマ線発熱解析用断面積（中性子断面積，2次ガンマ線生成断面積，ガンマ線輸送断面積，中性子7群，ガンマ線20群）をJENDL-II B-70群定数，ならびにENDF-B/Wをベースとした2次ガンマ線生成データより作成した。
- (2) 「常陽」MK-II炉心のガンマ線発熱解析に先立ち、「常陽」MK-II炉心のモックアップ体系であるFCA X-2集合体で実施されたガンマ線発熱実験解析を実施した。

解析には，RZ体系とXY体系を用い，ガンマ線線源計算は中性子拡散計算をベースに行い，ガンマ線輸送計算はSNコードによりP₃S₆で行った。

本解析により，以下の結果を得た。

- (1) FCA X-2集合体，「常陽」MK-II内側反射体でのガンマ線発熱量のC/E値は下表のとおりである。

* 本報告書は，株式会社日立製作所が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

** 株式会社日立製作所日立工場

*** 日立エンジニアリング株式会社

項 目		C/E 値 (平均値)
FCA	炉 心 部	0.52
X-2	径 反 射 体 部	1.02
集合体	SS-Block 部	0.82
「常陽」MK-II 炉心第 0 サイクル内側反射体		0.81 / 1.15 ^(*)

(*) 集合体出口冷却材温度より推定，集合体間勢移動考慮/同左未考慮

- (2) 上表の如く FCA X-2 集合体については，炉心部を除き，解析値は実測値と比較的良好に合っているが，「常陽」MK-II 炉心の内側反射体領域では約 20% の過小評価となっている。
- (3) 上記 C/E 値のベースとなった実測値には，検討すべき余地があるので，それらの解決の後，C/E 値を見直す必要がある。
- (4) 上記「常陽」MK-II 炉心のガンマ線発熱解析結果をベースに第 0 サイクロ初期の炉心湾曲解析を実施し，以下の結果を得た。

項 目		数 値
集合体頂部最大変位 (mm)		5.9
パッド部 (kg) 最大接触荷重	頂部パッド	11
	下部パッド	27
0MWを基準とした 炉心湾曲反応度変化 (%)	熱出力 45 MW	-1
	熱出力 80 MW	-6.5
	熱出力 100 MW	-3.5
炉心湾曲による出力 係数 ($\times 10^{-6} \Delta k/k / MW$)	熱出力 45 ~ 80 MW	-6
	熱出力 80 ~ 100 MW	+6

Evaluation of Gamma Heating for "Joyo" MK-II Core*

Yoshio Watari**, Kunikazu Kaneto**, Shusaku Sawada**,
Yoshiaki Oomasa**, Hitoshi Takahashi***

Abstract

The Analysis on the Gamma heating of the 0'th cycle of "Joyo" MK-II Core has been performed. In advance of this analysis, the followings have been performed.

- (1) The Cross Sections for the Gamma heating analysis have been prepared based on JENDL-IIB-70 and the second Gamma production data which was made from ENDF-B/IV. These Cross Sections include the Neutron Cross Section, the second Gamma production Cross Section and the Gamma transport cross section.

The number of the energy groups is 7 for the Neutron, and 20 for the Gamma ray.

- (2) The analysis on the experiment of the Gamma heating in the FCA X-2. This FCA X-2 is the mock-up of the "Joyo" MK-II core.

The analysis has been performed based on the RZ-geometry and the XY-geometry. The Gamma source was calculated with the Neutron Diffusion theory and the Gamma transport calculation was performed with SN-Code (P₃S₆).

* This work was performed under contact between Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp. and Hitachi Ltd.

** Hitachi Works, Hitachi Ltd.

*** Hitachi Engineering Company Ltd.

The results are as follows,

- (1) The C/Es of the Gamma Heating are showed in the following table.

Items		C/E (Averaged)
FCA X-2	Core Region	0.52
	Radial Reflector Region	1.02
	SS-Block Region	0.82
Inner Reflector Region of "Joyo" MK-II		0.81/1.15 (*)

(*) estimated based on the core elements' outlet temperature.

considered heat transport between core elements/
not considered.

- (2) On the FCA X-2, discrepancies between the calculated value and measured value at the regions except for the core region are relatively small. But the underestimated results are obtained at the inner reflector region of "Joyo" MK-II core.
- (3) There are some rooms in the above C/Es for re-evaluation. In the future, the above C/Es should be re-evaluated, after resolving the uncertainties in the measured values.
- (4) The analysis on the bowing behavior of the "Joyo" MK-II has been performed based on the analytical results of the Gamma heating. The main results are as follows,

Items		Values
Maximum Displacement of the Top of the Core Element (mm)		5.9
Maximum Contact Force between Pads (kg)	Top Load Pad	11
	Lower Load Pad	27
Core Bowing Reactivity Change from 0 Power (ρ)	at 45MWth	-1
	at 80MWth	-6.5
	at 100MWth	-3.5
Power Reactivity Coefficient due to Core Bowing ($\times 10^{-6} \Delta k/k/MW$)	at 45-80MWth	-6
	at 80-100MWth	+6

目 次

1. 緒 言	1-1
2. ガンマ線発熱解析用断面積の作成	2-1
2.1 全体フロー	2-1
2.2 中性子実効断面積の作成	2-1
2.2.1 セル平均70群実効ミクロ断面積の作成	2-2
2.2.2 70群から7群への縮約	2-2
2.2.3 「常陽」MK-II炉心制御棒用中性子断面積の作成	2-2
2.2.4 中性子断面積作成において使用したデータ	2-2
2.3 2次ガンマ線生成断面積の作成	2-15
2.3.1 2次ガンマ線生成基本ライブラリーの概要	2-15
2.3.2 2次ガンマ線生成断面積の作成法	2-16
2.4 ガンマ線輸送断面積の作成	2-30
2.5 断面積の結合	2-31
3. FCAモックアップ炉心体系におけるガンマ線発熱実験解析	3-1
3.1 解析モデル	3-1
3.1.1 解析体系	3-1
3.1.2 計算方法	3-2
3.2 解析結果	3-4
3.2.1 RZ計算結果	3-4
3.2.2 XY計算結果	3-40
3.2.3 RZ計算とXY計算の組合わせ結果	3-40
3.3 実測値との比較	3-40
3.3.1 実測値の概要	3-40
3.3.2 実測値との比較結果	3-41
4. 「常陽」MK-II炉心第0サイクル体系におけるガンマ線発熱解析	4-1
4.1 解析モデル	4-1
4.1.1 解析体系	4-1
4.1.2 ガンマ線発熱計算法	4-1

4. 1. 3	集合体出口冷却材温度の実測値との比較方法	4-1
4. 2	解析結果	4-6
4. 2. 1	RZ体系に基づく発熱計算結果	4-6
4. 2. 2	RZ計算, XY計算の組合せ結果	4-10
4. 3	集合体出口冷却材温度の実測値との比較	4-39
4. 3. 1	集合体出口冷却材温度解析値	4-39
4. 3. 2	集合体出口冷却材温度実測値	4-39
4. 3. 3	比較・検討	4-39
4. 4	第0サイクル初期の炉心湾曲解析	4-41
4. 4. 1	解析条件	4-41
4. 4. 2	解析結果	4-45
4. 4. 3	検 討	4-45
5.	ガンマ線発熱解析精度評価	5-1
6.	結 論	6-1
7.	謝 辞	7-1
8.	参考文献	8-1

表 リ ス ト

表 2. 1	JENDL-II B-70 群と 7 群のエネルギー群構造	2-4
表 2. 2	FCA X-2 集合体のセル平均原子数密度	2-5
表 2. 3	FCA X-2 集合体炉心部, 制御棒部のプレート毎原子数密度	2-6
表 2. 4	「常陽」MK-II 炉心第 0 サイクル初期原子数密度	2-7
表 2. 5	2 次ガンマ線生成データ ($Y_{ix}(n), P_{ix}(n, g)$) の中性子 100 群エネルギー群構造 (日本原子力研究所作成ライブラ リー)	2-24
表 2. 6	核分裂時の即発並びに遅発ガンマ線総エネルギー	2-25
表 2. 7	ガンマ線 20 群のエネルギー群構造	2-32
表 2. 8	中性子実効断面積と 2 次ガンマ線生成実効断面積セット内の 核種名と ID % (FCA X-2 集合体)	2-33
表 2. 9	同上 (「常陽」MK-II 炉心)	2-34
表 2. 10	ガンマ線輸送断面積セット内の核種名と ID % (FCA X-2 集合体)	2-35
表 2. 1. 1	同上 (「常陽」MK-II 炉心)	2-36
表 3. 1	角度分点方向余弦とその重率 (S_6)	3-5
表 3. 2	FCA X-2 集合体の各領域発熱量内訳 (RZ 計算)	3-13
表 3. 3	FCA X-2 集合体のガンマ線線源のエネルギー (RZ 計算)	3-14
表 3. 4	FCA X-2 集合体ガンマ線発熱分布軸方向ピーキング係数	3-15
表 3. 5	ガンマ線による径方向発熱分布 (RZ 計算と XY 計算の組合せ)	3-44
表 3. 6	吸収線量実測値	3-45
表 3. 7	炉心における ^{237}Np 原子 1 個の核分裂率	3-46
表 3. 8	^{237}Np 原子 1 個当りの核分裂率で規格化したガンマ線発熱量	3-47
表 4. 1	集合体毎冷却材流量 (第 0 サイクル)	4-3
表 4. 2	集合体間のギャップにおける冷却材流量 (第 0 サイクル)	4-3
表 4. 3	集合体出口冷却材温度解析に使用した物性値	4-4
表 4. 4	「常陽」MK-II 炉心第 0 サイクル初期の各領域発熱量内訳	4-10
表 4. 5	「常陽」MK-II 炉心第 0 サイクル初期におけるガンマ線源の	

	エネルギー	4-11
表 4.6	炉心湾曲解析条件	4-47
表 4.7	「常陽」MK-II 炉心の炉心構成要素最大変位	4-48
表 4.8	「常陽」MK-II 炉心のパッド部での最大接触荷重	4-48
表 5.1	ガンマ線発熱解析の C/E 値	5-1

図 リ ス ト

図 2. 1	ガンマ線発熱解析用断面積作成全体フロー (F C A X-2 集合体ならびに「常陽」MK-II炉心)	2-8
図 2. 2	7群中性子実効断面積作成フロー	2-9
図 2. 3	F C A X-2 集合体水平断面	2-10
図 2. 4	F C A X-2 集合体RZ体系 (1 / 2 炉心)	2-11
図 2. 5	F C A X-2 集合体炉心部および制御棒部のセル構造	2-12
図 2. 6	「常陽」MK-II炉心第0サイクル (初期炉心) 炉心構成	2-13
図 2. 7	「常陽」MK-II炉心第0サイクル (初期炉心) RZ体系	2-14
図 2. 8	2次ガンマ線生成収率データ ($Y_{ix}(n)$) の収録状況 (日本原子力研究所作成ライブラリー)	2-26
図 2. 9	2次ガンマ線生成収率 ($Y_{ix}(n)$) の中性子エネルギー依存 性 (日本原子力研究所作成ライブラリー)	2-27
図 2. 1 0	2次ガンマ線生成断面積作成フロー	2-29
図 2. 1 1	中性子実効断面積と2次ガンマ線生成実効断面積の結合断 面積セットの書込形式	2-37
図 2. 1 2	ガンマ線輸送断面積セットの書込形式	2-38
図 3. 1	F C A X-2 集合体ガンマ線発熱解析手順	3-6
図 3. 2	F C A X-2 集合体RZ解析体系 (1 / 2 炉心)	3-7
図 3. 3	F C A X-2 集合体XY解析体系 (1 / 4 炉心)	3-8
図 3. 4	F C A X-2 集合体径方向中性子束分布 (炉心中心面 , RZ計算)	3-16
図 3. 5	F C A X-2 集合体の軸方向中性子束分布 (炉心中心位 置 , RZ計算)	3-17
図 3. 6	同 上 (径方向反射体最内層 , RZ計算)	3-18
図 3. 7	同 上 (SS BLOCK最内層 , RZ計算)	3-19
図 3. 8	F C A X-2 集合体の核分裂による発熱量軸方向分布 (RZ計算)	3-20
図 3. 9	F C A X-2 集合体のガンマ線源のエネルギー分布	

	(R Z 計算)	3-21
図 3.1 0	F C A X-2 集合体の 2 次ガンマ線生成マクロ断面積	3-22
図 3.1 1	F C A X-2 集合体のガンマ線束スペクトル (R Z 計算)	3-29
図 3.1 2	F C A X-2 集合体の 2 次ガンマ線源径方向分布 (炉心 中心面, R Z 計算)	3-30
図 3.1 3	F C A X-2 集合体のガンマ線束の径方向分布 (炉心中 心面上 R Z 計算)	3-33
図 3.1 4	F C A X-2 集合体のガンマ線発熱径方向分布 (炉心中 心面, R Z 計算)	3-36
図 3.1 5	F C A X-2 集合体のガンマ線発熱軸方向分布	3-37
図 3.1 6	F C A X-2 集合体のガンマ線発熱径方向分布 (X Y 計算)	3-48
図 3.1 7	F C A X-2 集合体のガンマ線による径方向発熱分布 (R Z 計算と X Y 計算の組合せ)	3-49
図 3.1 8	F C A X-2 集合体のガンマ線による径方向発熱分布 炉中心の ²³⁷ Np 原子 1 個の核分裂率で規格化	3-50
図 4.1	「常陽」M K - II 第 0 サイクルガンマ線発熱解析および炉 心湾曲解析手順	4-5
図 4.2	「常陽」M K - II 炉心第 0 サイクル X Y 解析体系 (1 / 6 回転対称体系)	4-6
図 4.3	「常陽」M K - II 炉心第 0 サイクル初期中性子束径方向分 布 (炉心中心面上, R Z 計算)	4-12
図 4.4	「常陽」M K - II 炉心の軸方向中性子束分布 (第 0 サイク ル初期, 炉心中心位置, R Z 計算)	4-13
図 4.5	同 上 (炉心最外層)	4-14
図 4.6	同 上 (B 型特殊燃料)	4-15
図 4.7	同 上 (材料照射用反射体)	4-16
図 4.8	同 上 (内側反射体最内層)	4-17
図 4.9	同 上 (外側反射体(A)最内層)	4-18
図 4.1 0	「常陽」M K - II 炉心の核分裂による軸方向出力分布 (第 0 サイクル初期, R Z 計算)	4-19

図 4.1.1	「常陽」MK-II 炉心のガンマ線源エネルギー分布 (第 0 サイクル初期, 炉心中心面上, RZ 計算)	4-20
図 4.1.2	同上	4-21
図 4.1.3	同上	4-22
図 4.1.4	「常陽」MK-II 炉心のガンマ線束エネルギー分布 (第 0 サイクル初期, 炉心中心面上, RZ 計算)	4-23
図 4.1.5	同上	4-24
図 4.1.6	同上	4-25
図 4.1.7	「常陽」MK-II 炉心ガンマ線線源径方向分布 (第 0 サイクル初期, 炉心中心面上, RZ 計算)	4-26
図 4.1.8	「常陽」MK-II 炉心第 0 サイクル初期ガンマ線束の径方向分布 (炉心中心面上, RZ 計算)	4-29
図 4.1.9	「常陽」MK-II 炉心のガンマ線発熱径方向分布 (第 0 サイクル初期, 炉心中心面上, RZ 計算)	4-32
図 4.2.0	「常陽」MK-II 炉心ガンマ線発熱軸方向分布	4-33
図 4.2.1	「常陽」MK-II 炉心集合体毎核分裂発熱量 (第 0 サイクル初期)	4-36
図 4.2.2	「常陽」MK-II 炉心集合体毎ガンマ線発熱量 (第 0 サイクル初期)	4-37
図 4.2.3	「常陽」MK-II 炉心集合体毎 (核分裂+ガンマ線) 発熱量 (第 0 サイクル初期)	4-38
図 4.2.4	「常陽」MK-II 炉心集合体出口冷却材温度 (バルク温度)	4-42
図 4.2.5	「常陽」MK-II 炉心集合体出口冷却材温度実測値	4-43
図 4.2.6	集合体出口冷却材温度の解析値と実測値の比較	4-44
図 4.2.7	「常陽」MK-II 炉心径方向温度分布 (第 0 サイクル初期)	4-49
図 4.2.8	ラッパ管軸方向温度分布 (第 0 サイクル初期)	4-52
図 4.2.9	「常陽」MK-II 炉心の炉心構成要素湾曲状況 (第 0 サイクル初期, 炉心対角線列)	4-54
図 4.3.0	「常陽」MK-II 炉心の下部パッド部変位量 (第 0 サイクル初期)	4-55

図 4.3.1	「常陽」MK-II 炉心の炉心構成要素頂部変位量（第 0 サイクル初期）	4-56
図 4.3.2	「常陽」MK-II 炉心の下部パッド部の接触状況（第 0 サイクル初期）	4-57
図 4.3.3	「常陽」MK-II 炉心の頂部パッド部の接触状況（第 0 サイクル初期）	4-58
図 4.3.4	「常陽」MK-II 炉心起動時の炉心湾曲による反応度変化（第 0 サイクル初期）	4-59

1. 緒 言

高速実験炉「常陽」MK-II炉心では、反射体が直接炉心に隣接するため、炉心境界近傍では、ガンマ線発熱が特に大きくなると予想される。一方、従来計算に基づくこの発熱量解析値は内側反射体出口冷却材温度からの推定値と比較すると、過小評価であるとの結果が得られている。

本研究は、ガンマ線発熱をガンマ線の輸送効果も含め詳細に解析するとともに、現状技術ベースでのガンマ線発熱解析評価精度を明らかにすることを目的とする。

本解析を行うに先立って、「常陽」MK-II炉心のモップアップ体系であるFCA X-2集合体で行われたガンマ線発熱実験の解析を行い、解析手法の妥当性確認、ガンマ線発熱評価精度明確化の一助とした。

以下、2章では本解析に必要なガンマ線発熱断面積の作成、3章ではFCA X-2集合体でのガンマ線発熱実験解析結果、4章では「常陽」MK-II炉心第0サイクル体系におけるガンマ線発熱解析結果、5章ではガンマ線発熱解析精度評価について述べる。

なお、4章では本ガンマ線発熱解析結果をベースとした炉心湾曲解析も実施し、ガンマ線発熱に関し簡易手法を用いた前年度結果⁽³⁾と比較した結果についても述べる。

2. ガンマ線発熱解析用断面積の作成

FCA X-2 集合体，ならびに「常陽」MK-II 炉心のガンマ線発熱解析に必要な下記断面積を作成した。以下にそれらの作成方法について述べる。

- (1) 中性子実効断面積
- (2) 2次ガンマ線生成断面積
- (3) ガンマ線輸送断面積

2.1 全体フロー

図 2.1 にガンマ線発熱解析用断面積作成のための全体フローを示す。本断面積の作成では，基本的には JENDL-II B-70 群定数と日本原子力研究所で作成された 2 次ガンマ線生成データ（中性子 100 群，ガンマ線 20 群）を基に，炉心内領域毎の実効マイクロ断面積セット（中性子実効断面積と 2 次ガンマ線生成実効断面積の結合された断面積セット）ならびに，炉心内領域に依存しないガンマ線輸送マイクロ断面積セットを作成する。

中性子実効断面積，2 次ガンマ線生成断面積，ならびにガンマ線輸送断面積各部の作成方法については，2.2 節以降に示す。

2.2 中性子実効断面積の作成

「常陽」MK-II 炉心のモックアップ炉心である FCA X-2 集合体，ならびに「常陽」MK-II 炉心とも，JENDL-II B-70 群定数を基本定数とし，炉心内領域依存の 7 群実効マイクロ断面積を作成した。JENDL-II B-70 群ならびに 7 群のエネルギー群構造を表 2.1 に示す。上記 7 群構造は，「常陽」MK-II 炉心の核設計に用いられた構造である。

FCA X-2 集合体ならびに「常陽」MK-II 炉心に共通する実効断面積作成部を図 2.2 に示す。同図は，「常陽」MK-II 炉心制御棒領域を除く，炉心内領域全ての中性子実効断面積を作成するためのフローを示したものである。同図からわかるように，7 群中性子実効断面積の作成は，炉心構成要素毎のセル平均 70 群マイクロ実効断面積の作成部と，70 群から 7 群への縮約部とからなる。

以下に，上記 2 点について述べる。また，「常陽」MK-II 炉心制御棒領域の定数の作成については，2.2.3 項で述べる。

2.2.1 セル平均70群実効マイクロ断面積の作成

本セル平均70群実効マイクロ断面積は、JENDL-II B-70群ライブラリーを基に、SLAROMコードを用いて作成した。

SLAROMコードでは、セルを均質系あるいは非均質系で取り扱うことができるが、FCA X-2 集合体の炉心部ならびに制御棒部（プースタータイプ）については、非均質系として扱い、径反射体、軸反射体、SS-Block については、均質系とした。一方、「常陽」MK-II炉心については、全ての炉心構成要素について均質系として扱った。なお、SLAROMにおける輸送近似オプションには、Diagonal Transport Approximation Σ_{tr} を用いた。

なお、断面積作成に際し、使用した具体的数値データ等は2.2.4項にまとめて示す。

2.2.2 70群から7群への縮約

2.2.1項で述べたセル平均70群実効マイクロ断面積の7群への縮約には、CITATION によるRZ 2次元計算で求めた70群中性子束を用いた。なお、SLAROMコードで求めた70群マイクロ定数をCITATION 形式に変換して使用した。

2.2.3 「常陽」MK-II炉心制御棒用中性子断面積の作成

SLAROMによれば、制御棒内の非均質性を円環モデルを用いて考慮することができるが、今回は弊社において使用実績のあるHICLEコードを用いて、制御棒用定数を作成した。即ち、(1)前項で述べた70群中性子束を用いて、SLAROMコードにより均質系として求めた70群実効断面積を25群に縮約する。(2)その25群実効断面積を用いて、上記HICLEコードにより、衝突確率法に基づく輸送計算を行い、制御棒内の25群中性子束を求める。(3)上記25群中性子束を用いて、上記25群実効断面積を空間、およびエネルギー縮約し、7群実効断面積とする。

なお、上記HICLEコードはスーパーセルによる衝突確率法に基づく輸送計算コードであるが、中性子エネルギー群数の最大値が25群であるため、上記のような一担70群から25群に縮約するというステップを入れた。

2.2.4 中性子断面積作成において使用したデータ

FCA X-2 集合体、「常陽」MK-II炉心の各々において使用した数値デ

ータを以下に示す。

i) FCA X-2 集合体

a) 炉心体系：炉心断面図を図 2.3 に示す。また，RZ 2 次元体系を図 2.4 に示す。

b) セル構造：SLAROM で用いた炉心部と制御棒部のセル構造を図 2.5 に示す。

c) 体系温度：全系 300°K とした。

d) 原子数密度：炉心部をはじめとする各領域のセル平均原子数密度を表 2.2 に，また炉心部，制御棒部のプレート毎の原子数密度を表 2.3 に示す。

ii) 「常陽」MK-II 炉心

a) 炉心体系：炉心断面図を図 2.6 に示す。また，RZ 2 次元体系を図 2.7 に示す。なお，図 2.7 は全系 250°C 時のものである。

b) 体系温度：燃料温度 1373°K ，その他の領域 523°K とした。

c) 原子数密度： 250°C の集合体配列ピッチセル内にスミアした原子数密度（動燃殿御支給）を用いた。代表的な領域について表 2.4 に示す。

表 2.1 JENDL-II B-70群と7群のエネルギー群構造

JENDL-II B-70群			7群	JENDL-II B-70群			7群
群 No.	下限エネルギー (eV)		群 No.	群 No.	下限エネルギー (eV)		群 No.
1	8.3	E+6	1	39	5.98	E+2	6
2	6.5	E+6		40	4.65	E+2	
3	5.1	E+6		41	3.60	E+2	
4	4.0	E+6		42	2.78	E+2	
5	3.1	E+6		43	2.15	E+2	
6	2.5	E+6		44	1.66	E+2	
7	1.9	E+6		45	1.29	E+2	
8	1.4	E+6		46	1.00	E+2	
9	1.1	E+6	2	47	7.73	E+1	7
10	8.0	E+5		48	5.98	E+1	
11	6.3	E+5		49	4.65	E+1	
12	5.0	E+5		50	3.60	E+1	
13	4.0	E+5		51	2.78	E+1	
14	3.1	E+5	3	52	2.15	E+1	
15	2.5	E+5		53	1.66	E+1	
16	2.0	E+5		54	1.29	E+1	
17	1.5	E+5		55	1.00	E+1	
18	1.2	E+5		56	7.73	E+0	
19	1.0	E+5		57	5.98	E+0	
20	7.73	E+4	4	58	4.65	E+0	
21	5.98	E+4		59	3.60	E+0	
22	4.65	E+4		60	2.78	E+0	
23	3.60	E+4		61	2.15	E+0	
24	2.78	E+4		62	1.66	E+0	
25	2.15	E+4		63	1.29	E+0	
26	1.66	E+4		64	1.00	E+0	
27	1.29	E+4		65	7.73	E-1	
28	1.00	E+4		66	5.98	E-1	
29	7.73	E+3	5	67	4.65	E-1	
30	5.98	E+3		68	3.60	E-1	
31	4.65	E+3		69	2.78	E-1	
32	3.60	E+3		70	2.15	E-1	
33	2.78	E+3					
34	2.15	E+3					
35	1.66	E+3					
36	1.29	E+3					
37	1.00	E+3					
38	7.73	E+2					

(注) 1群の上限は 1.05×10^6 eV

表 2.2 FCA X-2 集合体のセル平均原子数密度

単位 10^{24} atom/cc

領域 核種	炉心	制御棒	径反射体	軸反射体	SS-Block
^{239}Pu	2.094 E-3	—	—	—	—
^{240}Pu	1.84 E-4	—	—	—	—
^{241}Pu	1.0 E-5	—	—	—	—
^{242}Pu	—	—	—	—	—
^{235}U	7.40 E-4	4.130 E-3	—	—	—
^{238}U	5.207 E-3	5.463 E-3	—	—	—
O	1.283 E-2	1.283 E-2	—	—	—
Na	7.656 E-3	7.656 E-3	5.742 E-3	7.656 E-3	—
Al	5.763 E-3	5.463 E-3	—	—	—
Cr	3.665 E-3	3.818 E-3	1.161 E-2	1.014 E-2	1.601 E-2
Fe	1.3558 E-2	1.399 E-2	4.139 E-2	3.643 E-2	5.830 E-2
Ni	1.686 E-3	1.718 E-3	5.12 E-3	4.46 E-3	6.98 E-3

表 2.3 FCA X-2 集合体炉心部, 制御棒部のプレート毎原子数密度
(セル構造は図 2.5 参照)

炉心部

単位: 10^{24}atom/cc

プレート 核種	Wall	EU (20%) - Al_2O_3	Na	Pu (92%)	Al_2O_3	DuO_2
^{239}Pu	—	—	—	1.8204E-2	—	—
^{240}Pu	—	—	—	1.5978E-3	—	—
^{241}Pu	—	—	—	8.9826E-5	—	—
^{235}U	—	6.38985E-3	—	—	—	4.0399E-5
^{238}U	—	2.53605E-2	—	—	—	1.9904E-2
O	—	1.46685E-2	—	—	5.6942E-2	3.9889E-2
Na	—	—	1.6639E-2	—	—	—
Al	—	9.77875E-3	—	2.6075E-3	3.7712E-2	—
Cr	1.3245E-2	8.3839E-4	3.6794E-3	5.4536E-3	8.3839E-4	8.3839E-4
Fe	4.8223E-2	3.0524E-3	1.3596E-3	2.0915E-2	3.0524E-3	3.0524E-3
Ni	5.7739E-3	3.6547E-4	1.7210E-3	2.6744E-3	3.6547E-4	3.6547E-4

制御棒部

プレート 核種	Wall	Al_2O_3	EU (20%)	Na	EU (93%)	DuO_2
^{239}Pu			—		—	
^{240}Pu			—		—	
^{241}Pu			—		—	
^{235}U			9.25673E-3		4.27030E-2	
^{238}U			3.67411E-2		3.22828E-3	
O	炉心部と 同じ	炉心部と 同じ	—	炉心部と 同じ	—	炉心部と 同じ
Na			—		—	
Al			—		—	
Cr			8.3839E-4		8.3839E-4	
Fe			3.0524E-3		3.0524E-3	
Ni			3.6547E-4		3.6547E-4	

表 2.4 「常陽」MK-II 炉心第 0 サイクル初期原子数密度 (250℃体系)

単位: 10^{24} atom/cc

領域 核種	炉心燃料	B型特燃燃料部	材料照射用反射体	制御棒吸収体	内側反射体(太径)	外側反射体(A)	外側反射体(B)
^{239}Pu	1.80064 E-3	4.51247 E-4	—	—	—	—	—
^{240}Pu	4.91202 E-4	1.23097 E-4	—	—	—	—	—
^{241}Pu	8.31095 E-5	2.08275 E-5	—	—	—	—	—
^{242}Pu	1.65531 E-5	4.14827 E-6	—	—	—	—	—
^{235}U	7.39797 E-4	1.70744 E-4	—	—	—	—	—
^{238}U	5.35665 E-3	1.23630 E-3	—	—	—	—	—
O	1.67212 E-2	3.95252 E-3	—	—	—	—	—
Mu	3.45275 E-4	4.51454 E-4	6.59102 E-4	2.78269 E-4	1.11716 E-3	1.18539 E-3	1.22557 E-3
Na	8.73043 E-3	1.26796 E-2	1.15304 E-2	1.30130 E-2	6.22037 E-3	4.71409 E-3	4.55693 E-3
Cr	3.54388 E-3	4.63369 E-3	6.76498 E-3	2.85614 E-3	1.26543 E-2	1.36994 E-2	1.40591 E-2
Fe	1.26643 E-2	1.65588 E-2	2.41751 E-2	1.02066 E-2	4.36027 E-2	4.57618 E-2	4.82251 E-2
Ni	2.49242 E-3	3.25889 E-3	4.75783 E-3	2.00873 E-3	5.82885 E-3	6.38523 E-3	6.06183 E-3
Mo	2.82448 E-4	3.69308 E-4	5.39172 E-4	2.27636 E-4	1.09164 E-4	1.39095 E-4	—
C	—	—	—	6.21170 E-3	—	—	—
^{10}B	—	—	—	2.24508 E-2	—	—	—
^{11}B	—	—	—	2.26885 E-3	—	—	—

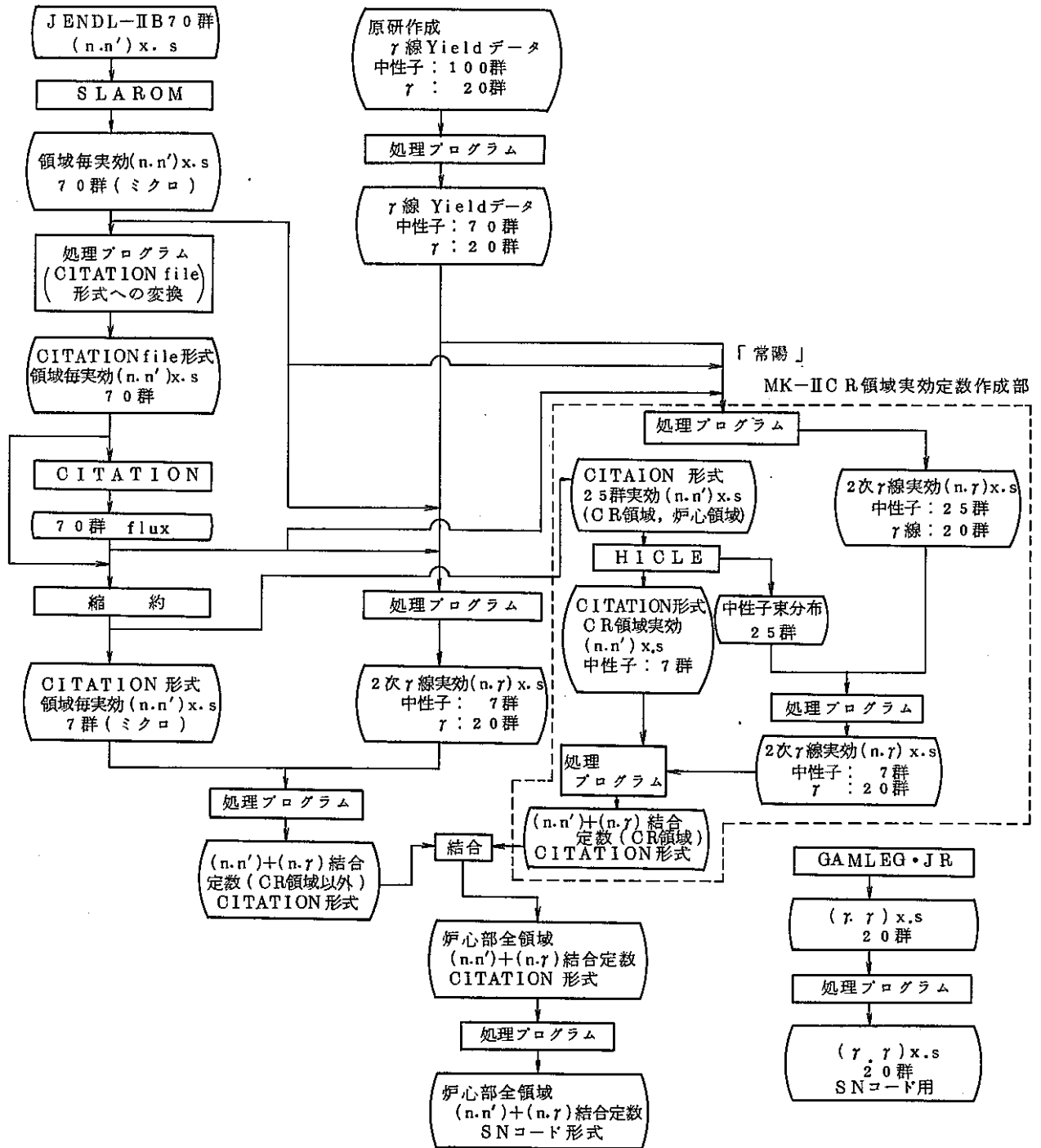


図 2.1 ガンマ線発熱解析用断面積作成全体フロー
 (FCA X-2 集合体ならびに「常陽」MK-II 炉心)
 (注) ・ 部は、「常陽」MK-II 炉心の制御棒部分のみに適用
 ・ X.S は断面積を意味する。

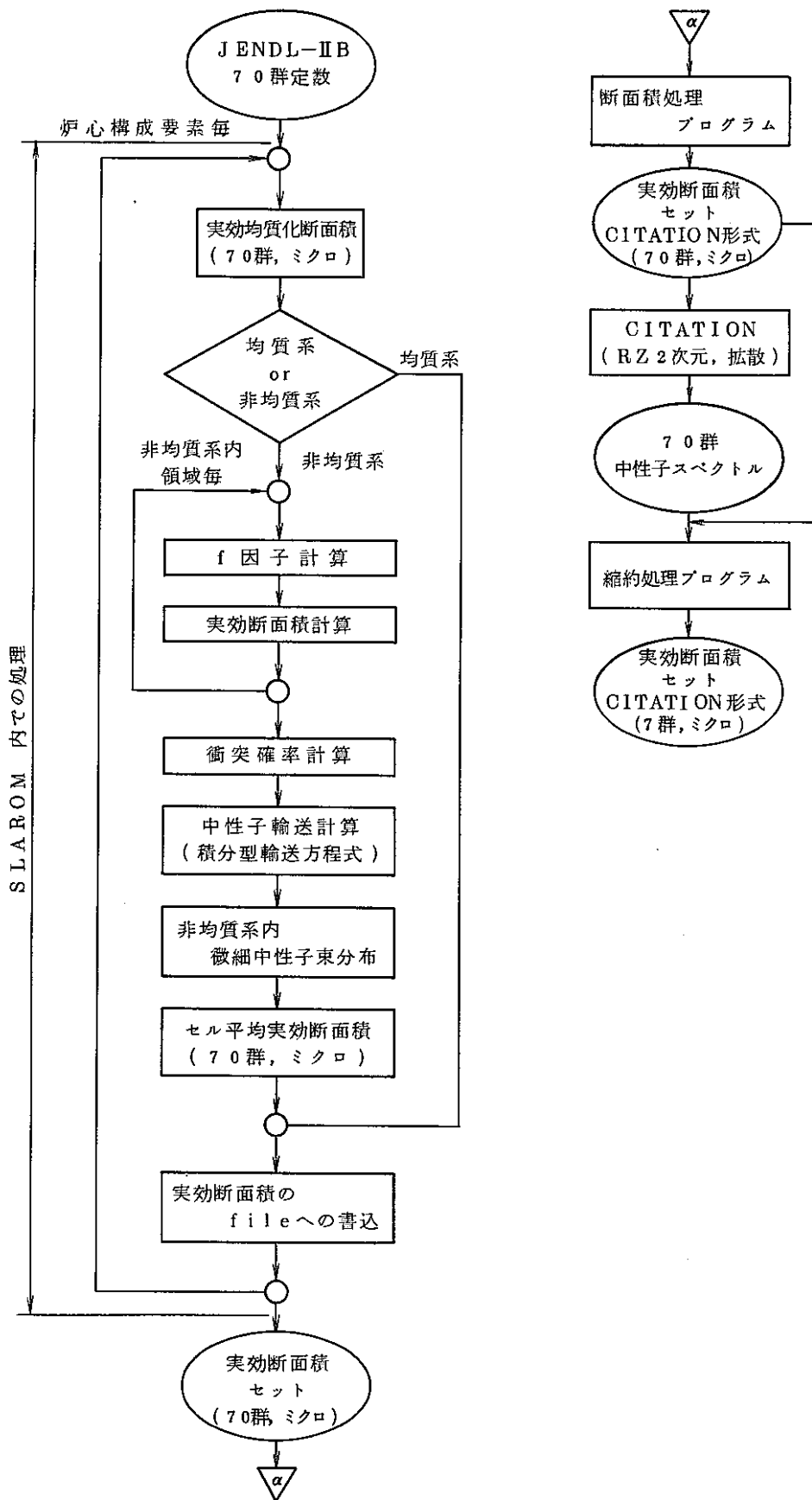


図 2.2 7 群中性子実効断面積作成フロー
(「常陽」MK-II 制御棒領域は除く)

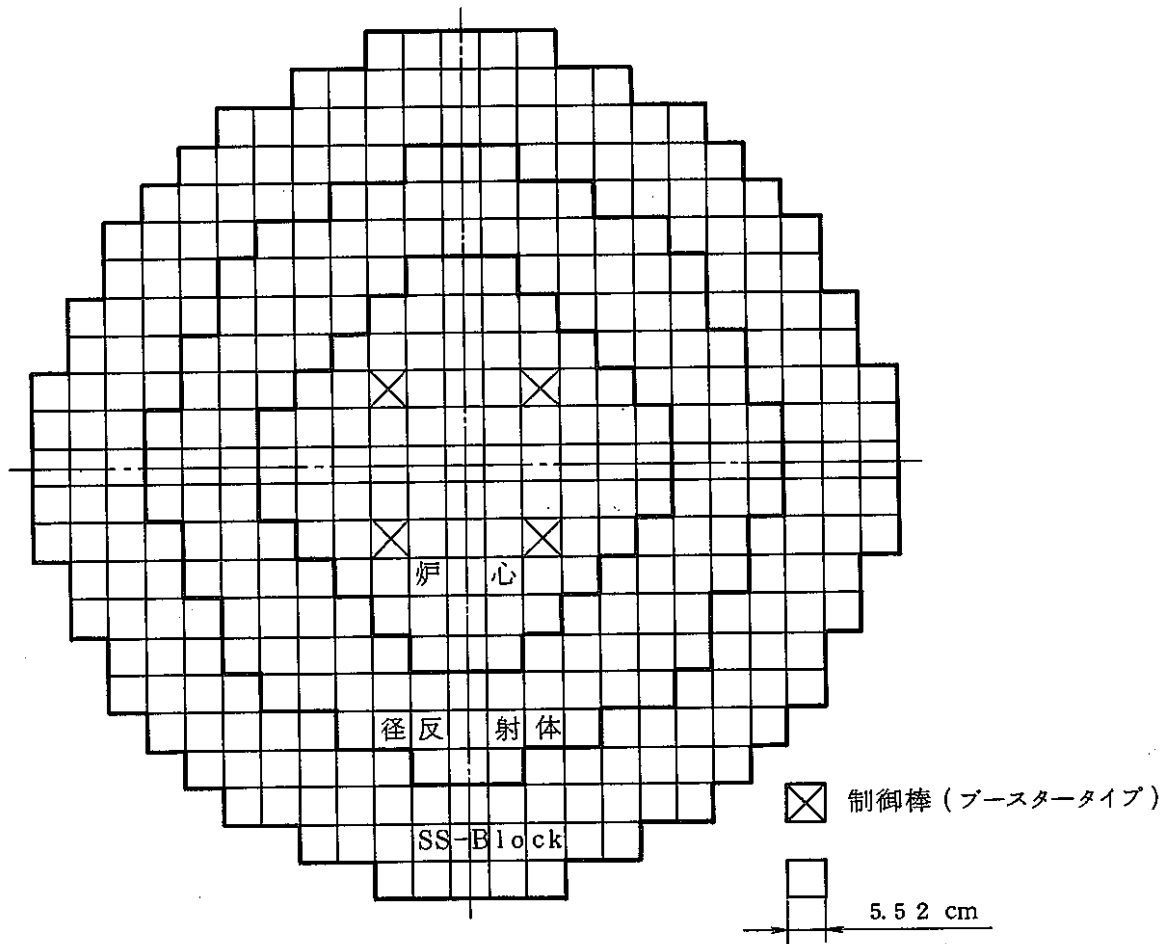


図 2.3 FCA X-2 集合体水平断面

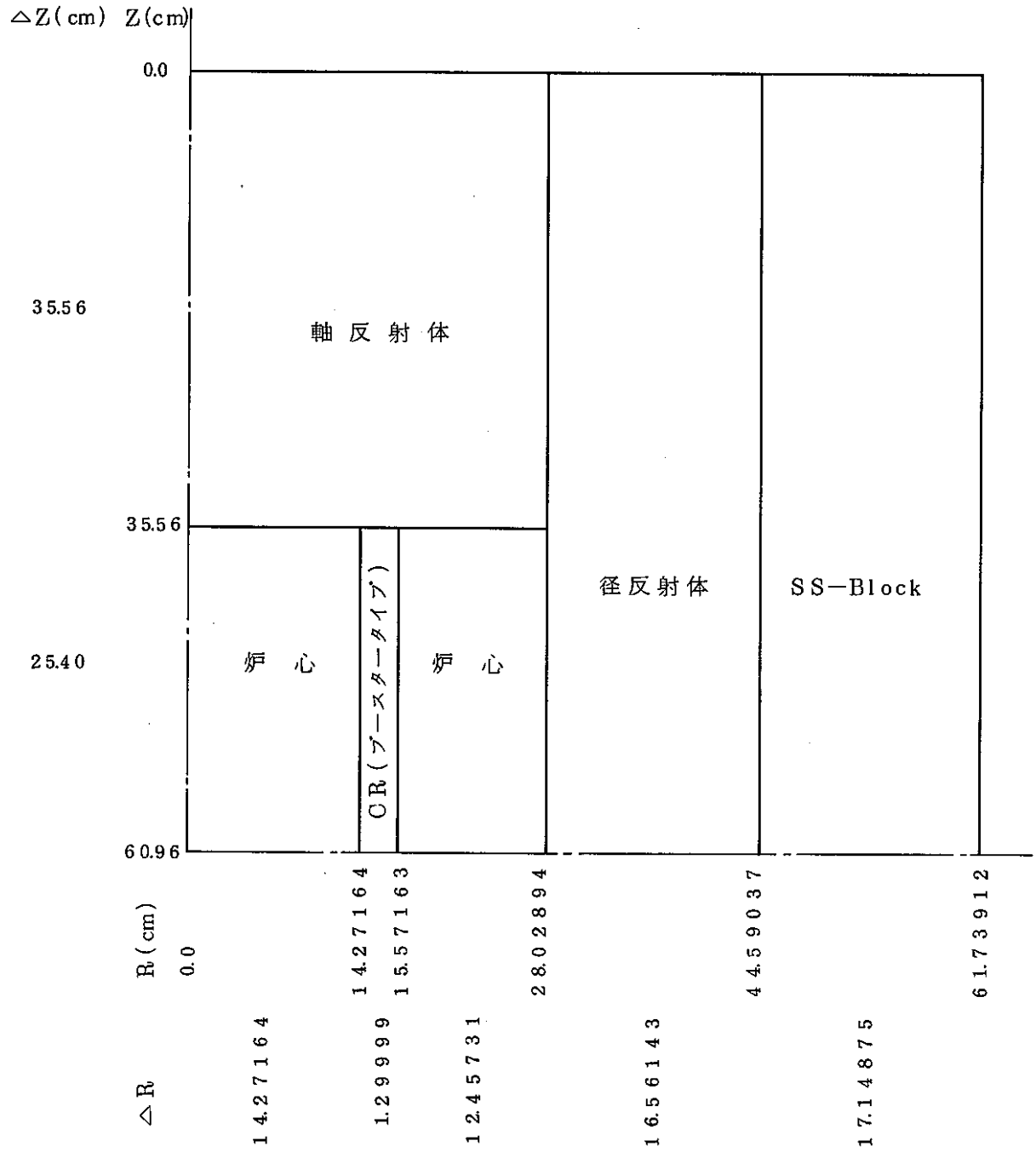


図 2.4 FCA X-2 集合体 RZ 体系 (1 / 2 炉心)

ΔZ (cm)	Z (cm)
0.2 2 0 0	0.0
0.3 1 7 5	0.2 2 0 0
0.6 3 5 0	0.5 3 7 5
0.1 5 8 7 5	1.1 7 2 5
0.3 1 7 5	1.3 3 1 2 5
0.6 3 5 0	1.6 4 8 7 5
0.1 5 8 7 5	2.2 8 3 7 5
0.6 3 5 0	2.4 4 2 5
0.1 5 8 7 5	3.0 7 7 5
0.6 3 5 0	3.2 3 6 2 5
0.3 1 7 5	3.8 7 1 2 5
0.1 5 8 7 5	4.1 8 8 7 5
0.6 3 5 0	4.3 4 7 5
0.3 1 7 5	4.9 8 2 5
0.2 2 0 0	5.3 0 0 0
	5.5 2 0 0

Wall
Eu (20%) - Al ₂ O ₃
Na
Pu (92%)
Al ₂ O ₃
Na
Pu (92%)
DuO ₂
Pu (92%)
Na
Al ₂ O ₃
Pu (92%)
Na
Eu (20%) - Al ₂ O ₃
Wall

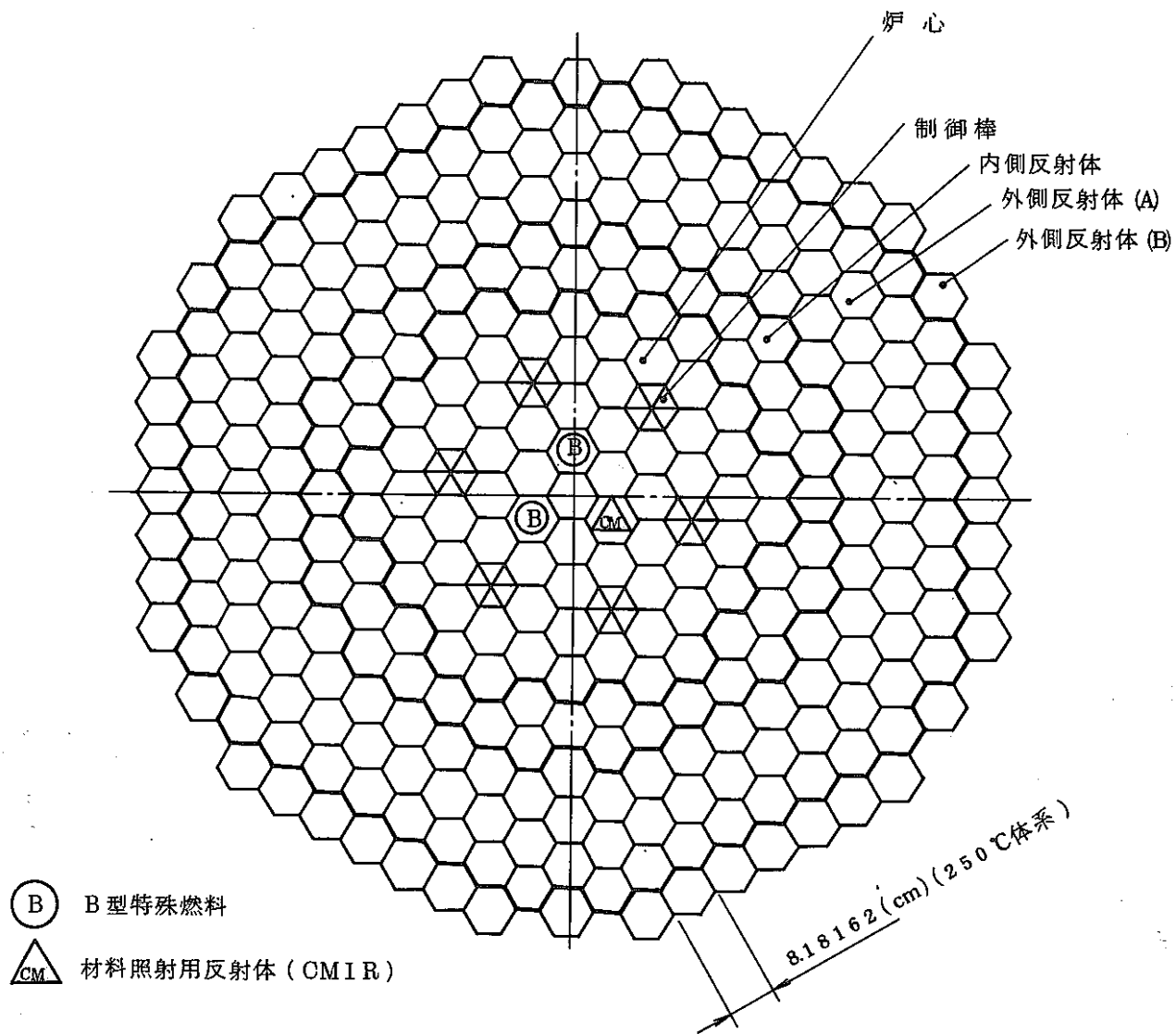
炉心部

ΔZ (cm)	Z (cm)
0.2 2 0 0	0.0
0.1 5 8 7 5	0.2 2 0 0
0.3 1 7 5	0.3 7 8 7 5
0.6 3 5 0	0.6 9 6 2 5
0.3 1 7 5	1.3 3 1 2 5
0.1 5 8 7 5	1.6 4 8 7 5
0.6 3 5 0	1.8 0 7 5 0
0.6 3 5 0	2.4 4 2 5
0.1 5 8 7 5	3.0 7 7 5
0.6 3 5 0	3.2 3 6 2 5
0.3 1 7 5	3.8 7 1 2 5
0.1 5 8 7 5	4.1 8 8 7 5
0.7 9 3 7 5	4.3 4 7 5 0
0.1 5 8 7 5	5.1 4 1 2 5
0.2 2 0 0	5.3 0 0 0
	5.5 2 0 0

Wall
Al ₂ O ₃
Eu (20%)
Na
Al ₂ O ₃
Eu (93%)
Na
DuO ₂
Eu (93%)
Na
Al ₂ O ₃
Eu (93%)
Na
Eu (20%)
Wall

制御棒部
(ブースタータイプ)

図 2.5 FCA X-2 集合体炉心部および制御棒部のセル構造



(B) B型特殊燃料
 (CM) 材料照射用反射体 (CMIR)

炉心構成

炉心燃料	: 64体
制御棒	: 6体
内側反射体	: 48体
外側反射体 (A)	: 144体
外側反射体 (B)	: 48体
B型特殊燃料	: 2体
材料照射用反射体	: 1体
<hr/>	
計	: 313体

図 2.6 「常陽」MK-II炉心第0サイクル (初期炉心) 炉心構成

- ① 炉心燃料 ⑦ 下部反射体 ⑬ 欠 番 ⑲ B型特殊インシュレータ
- ② インシュレータベレット ⑧ エントランスノズル ⑭ 制御棒上部構造部 ⑳ 同上 燃料部
- ③ 上部反射体 ⑨ 外側反射体 (A) ⑮ 制御棒下部構造部 ㉑ 同上 下部遮蔽部
- ④ ガスプレナム ⑩ 外側反射体 (B) ⑯ 制御棒引抜部 ㉒ 同上 下部構造部
- ⑤ ハンドリングヘッド ⑪ 内側反射体 (細径) ⑰ B型特殊上部プレナム ㉓ 材料照射用反射体
- ⑥ 炉心燃料下部空間 ⑫ 同上 (太径) ⑱ 同上 上部遮蔽体 ㉔ 制御棒吸収体

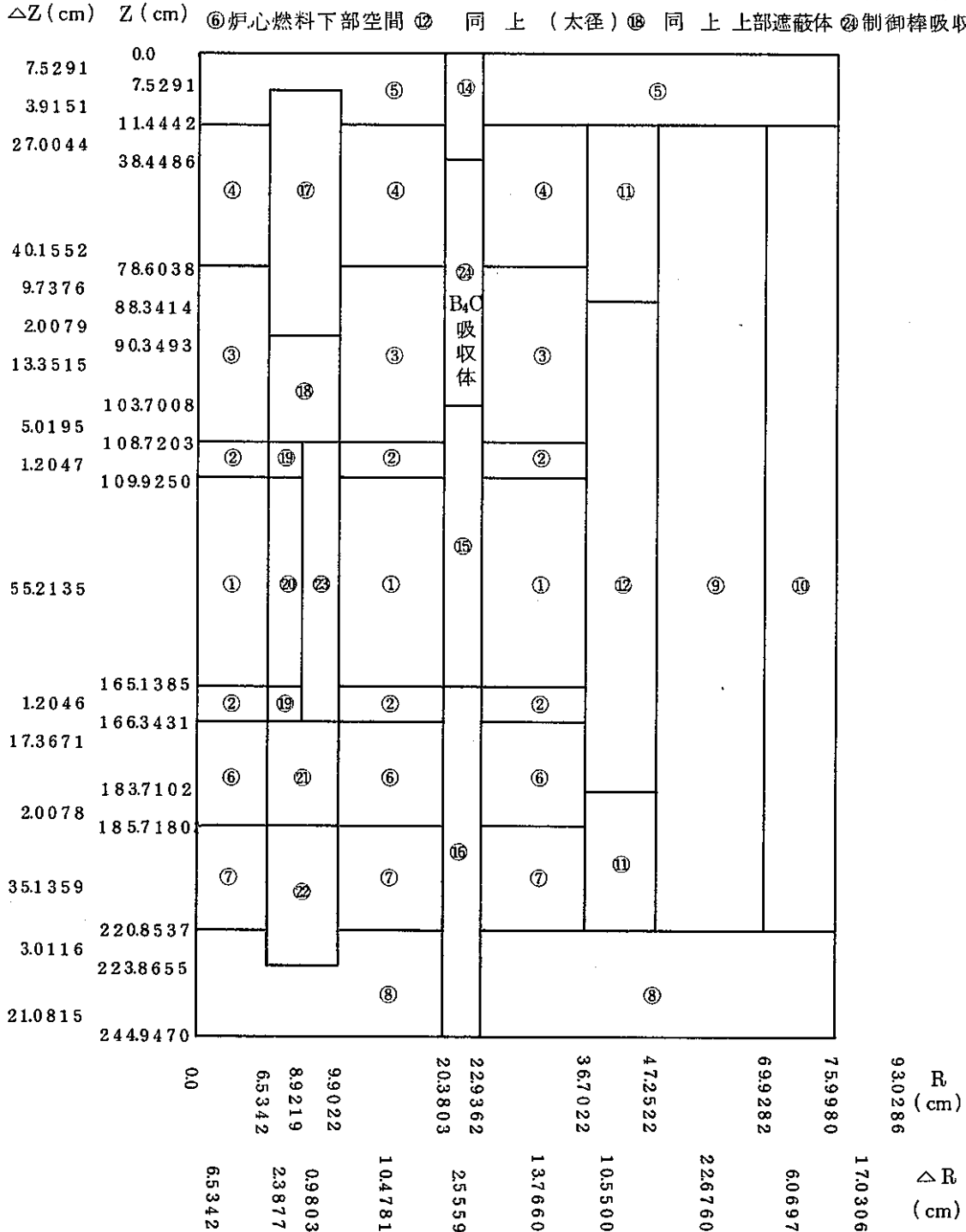


図 2.7 「常陽」MK-II 炉心第 0 サイクル (初期炉心) R Z 体系

2.3 2次ガンマ線生成断面積の作成

2次ガンマ線生成断面積は下式のように表わせる。

$$\sigma_i(n, g) = \sum_x \sigma_{ix}(n) \cdot Y_{ix}(n) \cdot P_{ix}(n, g) \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで i : 核種 \mathcal{N}_i

n : 中性子エネルギー群 \mathcal{N}_n

g : 2次ガンマ線エネルギー群 \mathcal{N}_g

$\sigma_i(n, g)$: 第 n 群の中性子により, 核種 i から第 g 群の2次ガンマ線が生成されるマイクロ断面積

x : ガンマ線生成反応 \mathcal{N}_x

$\sigma_{ix}(n)$: 第 n 群の中性子により, 核種 i が反応 x を起こすマイクロ断面積

$Y_{ix}(n)$: 第 n 群の中性子により, 核種 i が反応 x を起こした際のガンマ線の収率

$P_{ix}(n, g)$: 第 n 群の中性子により, 核種 i が反応 x を起こした際のガンマ線のエネルギースペクトル

$$\sum_g P_{ix}(n, g) = 1.0$$

2.2節で述べた中性子実効断面積のエネルギー群数が7群であったので, 上記(2.1)式における中性子エネルギー群数も7群とした。一方, ガンマ線のエネルギー群数は20群とした。

(2.1)式における $\sigma_{ix}(n)$ には, JENDL-II B-70群断面積を基にSLAROMコードで処理した70群実効断面積を用いた。また, $Y_{ix}(n)$, $P_{ix}(n, g)$ には日本原子力研究所でENDF/B-IVを基に作成された中性子100群, ガンマ線20群のライブラリーを使用した。上記の如く, $\sigma_{ix}(n)$ と $Y_{ix}(n)$, $P_{ix}(n, g)$ は中性子エネルギー群数が異なる(エネルギー群構造も異なる)ため, それに対処し2次ガンマ線生成断面積を作成する方法について述べる。

2.3.1 2次ガンマ線生成基本ライブラリーの概要

前述の日本原子力研究所で作成された2次ガンマ線生成基本ライブラリー($Y_{ix}(n)$, $P_{ix}(n, g)$)の概要について述べる。上記ライブラリーの特徴

を列挙すると以下のようになる。

- i) ENDF/B-IVをベースとしている。
- ii) 中性子100群，ガンマ線20群。
- iii) 32核種，合計83組のガンマ線生成反応データ ($\sigma_{ix}(n)$, $Y_{ix}(n)$, $P_{ix}(n, g)$) が収納されている。
- iv) 高エネルギー領域では，ガンマ線生成反応を区別せず，non-elastic 反応として一括して扱っている。(図2.8，図2.9参照)
- v) 核分裂反応のガンマ線収率 ($Y_{ifis}(n)$) には遅発ガンマ線が考慮されていない。

上記の特徴中，ii)，iv)，v)に対処するための処理を実施した。即ち，

ii)に対しては，JENDL-IB-70群断面積のエネルギー群構造に，2次ガンマ線生成ライブラリーのそれを変換する，

iv)に対しては，全ての中性子エネルギー群に対して，一律には(2.1)式を適用しない，

v)に対しては，遅発ガンマ線の収率分を補正する，

である。次の2.3.2項では，上記の処理法も含め，2次ガンマ線生成断面積の作成法について述べる。

2.3.2 2次ガンマ線生成断面積の作成法

図2.10に2次ガンマ線生成断面積の作成フローを示す。同図の処理プログラム(I)で，前述の日本原子力研究所で作成された中性子100群，ガンマ線20群の2次ガンマ線生成データ ($Y_{ix}(n)$, $P_{ix}(n, g)$) をJENDL-IB-70群のエネルギー群構造(中性子70群)に変換する。次に処理プログラム(II-1)により変換後の上記2次ガンマ線生成データとSLAROMコードで求めた各種反応の実効断面積 ($\sigma_{ix}(n)$) を結合し，さらに各反応について加え合わせることにより，中性子70群，ガンマ線20群の2次ガンマ線生成実効断面積を求める。この際，核分裂の遅発ガンマ線の補正を行う。最後に，処理プログラム(II-2)により，上記2次ガンマ線生成実効断面積を中性子7群に縮約(ガンマ線については20群のまま)し，2次ガンマ線生成実効断面積の作成を終了する。

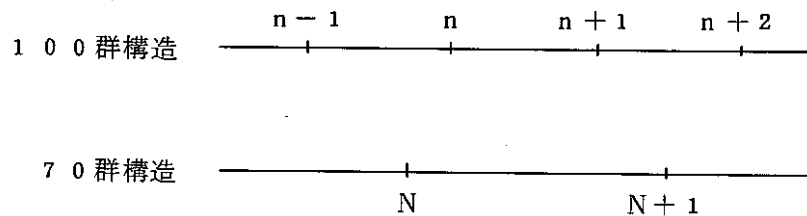
以上，断面積の作成の概略を述べたが，以下にその詳細について述べる。

i) 2次ガンマ線生成データ ($Y_{ix}(n)$, $P_{ix}(n, g)$) のエネルギー群構造の変換

ENDF/B-IV をベースとした日本原子力研究所で作成された2次ガンマ線生成データ ($Y_{ix}(n)$, $P_{ix}(n, g)$) の中性子エネルギー群構造が100群であるため、これをJENDL-IB-70群エネルギー群構造に変換する方法について述べる。参考のために、100群のエネルギー群構造を表2.5に示す。70群構造については、既に表2.1に示した。

a) 2次ガンマ線収率 $Y_{ix}(n)$ の変換

100群と70群のエネルギー群構造境界が下図のようになっているとした場合、下記(2.2)式により、70群構造での第N群の2次ガンマ線収率 $Y_{ix}(N)$ を求める。



$$Y_{ix}(N) = \frac{(U_n - U_N) Y_{ix}(n-1) + (U_{n+1} - U_N) Y_{ix}(n) + (U_{n+1} - U_{n+1}) Y_{ix}(n+1)}{U_{N+1} - U_N} \quad (2.2)$$

ここで $Y_{ix}(N)$; 70群構造での第N群の2次ガンマ線収率

$Y_{ix}(n)$; 100群構造での第n群の2次ガンマ線収率

U_N ; 70群構造での第N群の下側レサジー境界

U_n ; 100群構造での第n群の下側レサジー境界

上記(2.2)式はエネルギー群のレサジー幅で重みを付け平均することを意味しているが、これは以下の考え方に基づく。

群構造の変換前後で第g群のガンマ線生成量は等しくなければならない。即ち、下式が成立しなければならない。

$$\begin{aligned}
& \phi_N \cdot \sigma_{ix}(N) \cdot Y_{ix}(N) \cdot P_{ix}(N, g) \cdot \frac{U_{N+1} - U_N}{U_{N+1} - U_N} \\
= & \phi_{n-1} \cdot \frac{U_n - U_N}{U_n - U_{n-1}} \cdot \sigma_{ix}(n-1) \cdot Y_{ix}(n-1) \cdot P_{ix}(n-1, g) \\
& + \phi_n \frac{U_{n+1} - U_n}{U_{n+1} - U_n} \cdot \sigma_{ix}(n) \cdot Y_{ix}(n) \cdot P_{ix}(n, g) \quad \dots\dots\dots (2.3) \\
& + \phi_{n+1} \frac{U_{n+1} - U_{n+1}}{U_{n+2} - U_{n+1}} \cdot \sigma_{ix}(n+1) \cdot Y_{ix}(n+1) \cdot P_{ix}(n+1, g) \\
& \quad (g = 1, 2, \dots, G)
\end{aligned}$$

ここで ϕ_N ; 70群構造での第N群中性子束

ϕ_n ; 100群構造での第n群中性子束

$P_{ix}(N, g)$; 70群構造での第N群中性子に対する2次ガンマ線
エネルギースペクトル

$P_{ix}(n, g)$; 100群構造での第n群中性子に対する2次ガンマ
線エネルギースペクトル

G ; ガンマ線エネルギー群数

上記(2.3)式において $\frac{\phi_n}{U_{n+1} - U_n} \cdot \sigma_{ix}(n)$ が、考えているエネルギー領

域においてエネルギー依存性が小さいとすると、(2.3)式は

$$\begin{aligned}
& Y_{ix}(N) \cdot P_{ix}(N, g) (U_{N+1} - U_N) \\
= & (U_n - U_N) \cdot Y_{ix}(n-1) \cdot P_{ix}(n-1, g) \\
& + (U_{n+1} - U_n) \cdot Y_{ix}(n) \cdot P_{ix}(n, g) \quad \dots\dots\dots (2.4) \\
& + (U_{N+1} - U_{n+1}) \cdot Y_{ix}(n+1) \cdot P_{ix}(n+1, g) \\
& \quad (g = 1, 2, \dots, G)
\end{aligned}$$

となる。上記(2.4)式を $g = 1$ から G まで加え合せ、さらに

$$\begin{aligned}
\sum_{g=1}^G P_{ix}(N, g) = \sum_{g=1}^G P_{ix}(n-1, g) = \sum_{g=1}^G P_{ix}(n, g) = \sum_{g=1}^G P_{ix}(n+1, g) = 1.0 \\
\dots\dots\dots (2.5)
\end{aligned}$$

なる関係を用いると、

$$Y_{ix}(N) \cdot (U_{N+1} - U_N) = (U_n - U_N) \cdot Y_{ix}(n-1) + (U_{n+1} - U_n) \cdot Y_{ix}(n) \\ + (U_{N+1} - U_{n+1}) \cdot Y_{ix}(n+1) \quad \dots \quad (2.6)$$

となる。上記(2.6)式より、(2.2)式が得られる。

b) 2次ガンマ線エネルギースペクトル $P_{ix}(n, g)$ の変換

(2.4)式より、

$$P_{ix}(N, g) = \frac{(U_n - U_N) \cdot Y_{ix}(n-1) \cdot P_{ix}(n-1, g) + (U_{n+1} - U_n) \cdot \\ Y_{ix}(n) \cdot P_{ix}(n, g) + (U_{N+1} - U_{n+1}) \cdot Y_{ix}(n+1) \cdot P_{ix}(n+1, g)}{(U_{N+1} - U_N) \cdot Y_{ix}(N)} \\ \dots \dots \dots (2.7)$$

が得られ、本式を用いて $P_{ix}(n, g)$ の70群への変換を行う。

なお、上記(2.7)式において、分母の $Y_{ix}(N)$ には(2.2)式で求めたものを用いる。

ii) 2次ガンマ線生成70群実効断面積の作成

(i)で述べたJENDL-II B-70群のエネルギー群構造に変換した2次ガンマ線生成データ ($Y_{ix}(N)$, $P_{ix}(N, g)$) と、SLAROMコードで求めた70群中性子実効断面積 ($\sigma_{ix}(N)$) を結合することにより、2次ガンマ線生成70群実効ミクロ断面積を作成する。基本的には、既に述べた次式

$$\sigma_i(N, g) = \sum_X \sigma_{ix}(N) \cdot Y_{ix}(N) \cdot P_{ix}(N, g) \quad \dots \quad (2.1)$$

を用いる。上式における反応Xとして、

- 1) 核分裂 (fission)
- 2) 捕獲 (Capture)
- 3) 非弾性散乱 (In-elastic)

の3反応を考慮した。

ところで、基本的には上記(2.1)式を用いるが、前述のとおり、2次ガンマ線生成データの中性子高エネルギー部ではガンマ線生成反応を一括してNon-elasticとして扱っており、(2.1)式が適用できないこと、核分裂でのガ

ンマ線収率 ($Y_{ix}(N)$) には、遅発ガンマ線が考慮されていないこと等の問題がある。以下では、上記の問題に対する処理法およびその他特記項目について述べる。

a) Non-elastic として一括してデータが与えられている場合

上記の場合には、下式により 2 次ガンマ線生成 70 群実効断面積を求める。

$$\sigma_i(N, g) = \sigma_{i, \text{non-elastic}}(N) \cdot Y_{i, \text{non-elastic}}(N) \cdot P_{i, \text{non-elastic}}(N, g) \dots\dots\dots (2.8)$$

上式において、 $\sigma_{i, \text{non-elastic}}(N)$ は、SLAROM コードで求めた $\sigma_{i, \text{fis}}(N)$ 、 $\sigma_{i, \text{cap}}(N)$ 、 $\sigma_{i, \text{inelastic}}(N)$ より、下式にて求める。

$$\sigma_{i, \text{non-elastic}}(N) = \sigma_{i, \text{fis}}(N) + \sigma_{i, \text{cap}}(N) + \sigma_{i, \text{inelastic}}(N) \dots\dots\dots (2.9)$$

ここで $\sigma_{i, \text{fis}}(N)$; 第 N 群の中性子に対する実効核分裂断面積
 $\sigma_{i, \text{cap}}(N)$; 第 N 群の中性子に対する実効捕獲断面積
 $\sigma_{i, \text{inelastic}}(N)$; 第 N 群の中性子に対する実効非弾性散乱断面積

尚、核種によっては、non-elastic 反応の 2 次ガンマ線生成データが与えられている中性子エネルギー群において、核分裂、捕獲、あるいは非弾性散乱反応の 2 次ガンマ線データのいずれかが non-elastic 反応と併せて与えられていることもある。しかしそのような場合でも、上記 3 反応のデータが同時に与えられていることは稀であるので、non-elastic 反応のデータのみを用いて、(2.8) 式により断面積を求めている。即ち、non-elastic 反応のデータを優先して使用する。

b) 核分裂反応の 2 次ガンマ線収率データにおける遅発ガンマ線の補正

前述のとおり、今回使用する核分裂 2 次ガンマ線収率データ ($Y_{i, \text{fis}}(N)$) には、核分裂生成物からの 2 次ガンマ線 (遅発ガンマ線) 収率が含まれていない (即発ガンマ線分しか含まれていない)。遅発ガンマ線は、核分裂後、有意な時間後核分裂生成物より放出されるものであるが、そのエネルギーは

即発ガンマ線と同程度である。今回の解析対象である FOAX-2 集合体，「常陽」MK-II 炉心とも，遅発ガンマ線の放出量が定常となるのに十分な時間だけ一定出力が保たれているものとし，今回の解析では遅発ガンマ線を考慮することにした。

遅発ガンマ線の収率分の補正方法は下記のとおりである。

$$Y_{i', fis}(N) = Y_{i, fis}(N) \cdot \frac{\bar{E}_{i, p} + \bar{E}_{i, d}}{\bar{E}_{i, p}} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

ここで $Y_{i', fis}(N)$; 核分裂 2 次ガンマ線収率 (補正後)

$Y_{i, fis}(N)$; 核分裂即発ガンマ線収率 (補正前)

$\bar{E}_{i, p}$; 1 核分裂当りの即発ガンマ線総エネルギー

$\bar{E}_{i, d}$; 1 核分裂当りの遅発ガンマ線総エネルギー

本補正方法は，即発，遅発ガンマ線とも同じエネルギースペクトルを持つという仮定に基づくものである。

上記 $\bar{E}_{i, p}$, $\bar{E}_{i, d}$ は参考文献(2)より引用した。具体的数値を表 2.6 に示す。

ところで，上記補正は $Y_{i, fis}(N)$ がライブラリー中に与えられている場合には問題ない。しかし，前述の a) のように non-elastic として $Y_{i, non-elastic}(N)$ と一括して与えられている場合には，そのままでは補正ができないので以下のような取り扱いをする。 $Y_{i, non-elastic}$ と一括して，2 次ガンマ線収率が与えられているエネルギー領域では，捕獲反応断面積は小さく，下式が成り立つとする。

$$\begin{aligned} & Y_{i, non-elastic}(N) \cdot (\sigma_{i, fis}(N) + \sigma_{i, inelastic}(N)) \\ & = Y_{i, fis}(N) \cdot \sigma_{i, fis}(N) + Y_{i, inelastic}(N) \cdot \\ & \quad \sigma_{i, inelastic}(N) \quad \dots\dots\dots (2.11) \end{aligned}$$

上式において， $Y_{i, non-elastic}(N)$, $Y_{i, fis}(N)$, $\sigma_{i, inelastic}(N)$, $\sigma_{i, fis}(N)$ を代入し， $Y_{i, inelastic}(N)$ を求める。上記のようにして求めた $Y_{i, inelastic}(N)$ を用いて，下式により遅発ガンマ線を考慮した $Y_{i, nonelastic}(N)$ を求める。

$$Y_{i, \text{fis}}(N) \cdot \frac{\bar{E}_{i, p} + \bar{E}_{i, d}}{\bar{E}_{i, p}} \cdot \sigma_{i, \text{fis}}(N)$$

$$Y_{i, \text{non-elastic}}(N) = \frac{+Y_{i, \text{inelastic}}(N) \cdot \sigma_{i, \text{inelastic}}(N)}{\sigma_{i, \text{fis}}(N) + \sigma_{i, \text{inelastic}}(N)}$$

..... (2.12)

なお、上述中の $Y_{i, \text{fis}}(N)$ については、実際には $Y_{i, \text{nonelastic}}(N)$ が与えられているエネルギー領域では与えられておらず、低エネルギー側から高エネルギー側へ外挿して求めたものである。これは、図 2.9 に示したように、 $Y_{i, \text{fis}}(N)$ は、データが与えられているエネルギー域ではエネルギーにほとんど依存していないことから採用した方法である。

c) その他補足事項

前述の 2 次ガンマ線生成データライブラリーには、今回の解析で必要となる全ての核種が収納されているわけではなく、また収納されている核種についても必要なガンマ線生成反応が全て収納されているわけではない。そこで、以下のような取り扱いを行った。

ア) ライブラリーにデータが収納されていない核種

解析に必要な核種でライブラリーに収納されていない核種としては、 ^{241}Pu 、 ^{242}Pu 、 ^{11}B があつた。これらについては、各々 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{10}B のデータで代用した。

イ) ライブラリーにデータが収納されていない反応

ライブラリーに収納されていない反応データについては、考慮しなかつた (Cr 、 Ni 、 Mo の非弾性散乱^{*}、 ^{10}B 、 ^{11}B の捕獲等)。また、 ^{10}B の ($n, p\gamma$) 反応、 ^{16}O の ($n, p\gamma$)、($n, \alpha\gamma$) の反応はライブラリー中には収納されているが、JENDL-II B-70 群断面積の方に断面積データが収納されていないので、これらについても考慮しなかつた。

iii) 2 次ガンマ線生成実効断面積の 70 群から 7 群への縮約

2 次ガンマ線生成実効断面積の 70 群から 7 群への縮約は、即ち図 2.10 に

* non-elastic としては考慮されている。

示したように、CITATIONで求めた70群中性子束を重み関数した。

ただし、「常陽」MK-II炉心の制御棒吸収体領域については、上記CITATIONによる70群中性子束により一担25群に縮約し、その25群の2次ガンマ線生成実効断面積を、前述のHICLEコードで求めた25群中性子束を用いて、空間およびエネルギー縮約し、7群とした。

表 2.5 2次ガンマ線生成データ ($Y_{ix}(n)$, $P_{ix}(n, g)$) の中性子100群エネルギー
群構造 (日本原子力研究所作成ライブラリー)

単位: eV								
群	ΔU	Lower Energy	群	ΔU	Lower Energy	群	ΔU	Lower Energy
1	0.125	1.4550+7	41	0.125	9.8037+4	81	0.250	2.9023+1
2		1.2840+7	42		8.6517	82	0.250	2.2603+1
3		1.1331+7	43		7.6351	83		1.7603
4		1.0000+7	44		6.7379	84		1.3710
5		8.8250+6	45		5.9462	85		1.0667+1
6		7.7880+6	46		5.2475	86		8.3153+0
7		6.8729+6	47		4.6309	87		6.4760
8		6.0653+6	48		4.0868	88	0.250	5.0435
9		5.3526+6	49	0.125	3.6066	89		3.9279
10		4.7237+6	50		3.1828	90		3.0590
11		4.1686+6	51		2.8088	91		2.3824
12		3.6788+6	52		2.4788	92		1.8554
13		3.2465+6	53		2.1875	93		1.4450
14		2.8650+6	54		1.9305	94		1.1254+0
15		2.5284	55		1.7036	95		8.7642-1
16		2.2313	56	0.125	1.5034	96		6.8256
17		1.9691	57	0.250	1.1709+4	97		5.3158
18		1.7377	58	0.250	9.1188+3	98	0.250	4.1399
19		1.5335	59		7.1017	99	1.0031	1.5183-1
20		1.3534	60		5.5308	100	6.0658	3.5238-4
21		1.1943	61		4.3074			
22		1.0540+6	62		3.3546			
23		9.3014+5	63		2.6126			
24		8.2085	64		2.0347			
25		7.2440	65		1.5846			
26		6.3928	66		1.2341+3			
27		5.6416	67		9.6112+2			
28		4.9787	68		7.4852			
29		4.3937	69		5.8295			
30		3.8774	70		4.5400			
31		3.4218	71		3.5357			
32		3.0197	72	0.250	2.7536			
33		2.6649	73		2.1445			
34		2.3518	74		1.6702			
35		2.0754	75		1.3007			
36		1.8316	76		1.0130+2			
37		1.6163	77		7.8893+1			
38		1.4264	78		6.1442			
39		1.2588	79		4.7851			
40	0.125	1.1109+5	80	0.250	3.7267			

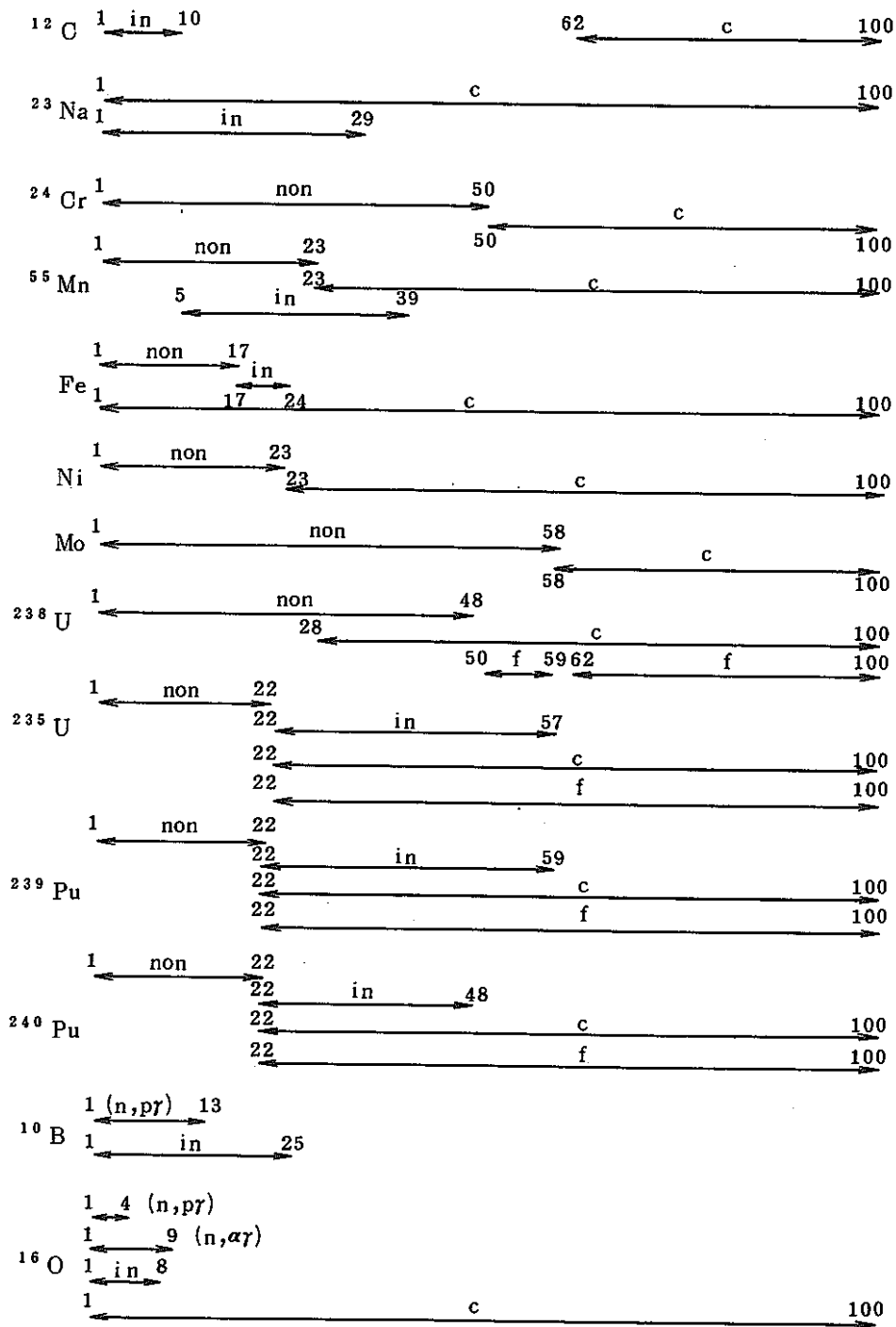
(注) 第1群の上限エネルギー
16.487MeV

表 2.6 核分裂時の即発並びに遅発ガンマ線総エネルギー

単位；MeV

核 種	即発ガンマ線総エネルギー	遅発ガンマ線総エネルギー
^{235}U	6.97	6.33
^{236}U	6.96	7.21
^{238}U	6.54	8.02
^{239}Pu	7.76	5.17
^{240}Pu	6.96	6.31
^{241}Pu	7.64	6.40
^{242}Pu	6.96	7.55

(注) 参考文献(2)より引用



記号の説明： $i \xrightarrow{X} j$: 反応Xのガンマ線収率 ($Y_{ix}(n)$) が中性子
第 i 群から第 j 群まで与えられている。

non : non-elastic 反応

in : inelastic 反応

c : capture 反応

f : fission 反応

図 2.8 2次ガンマ線生成収率データ ($Y_{ix}(n)$) の収録状況 (日本原子力研究所
作成ライブラリー)

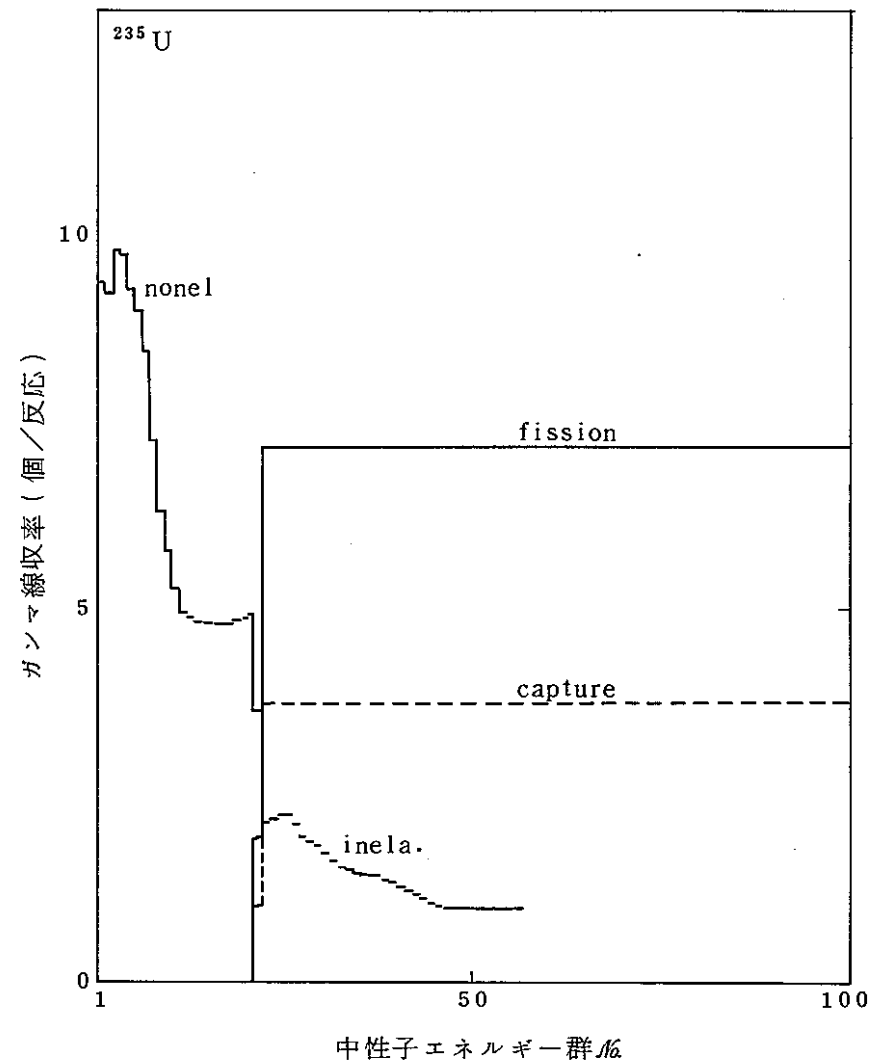
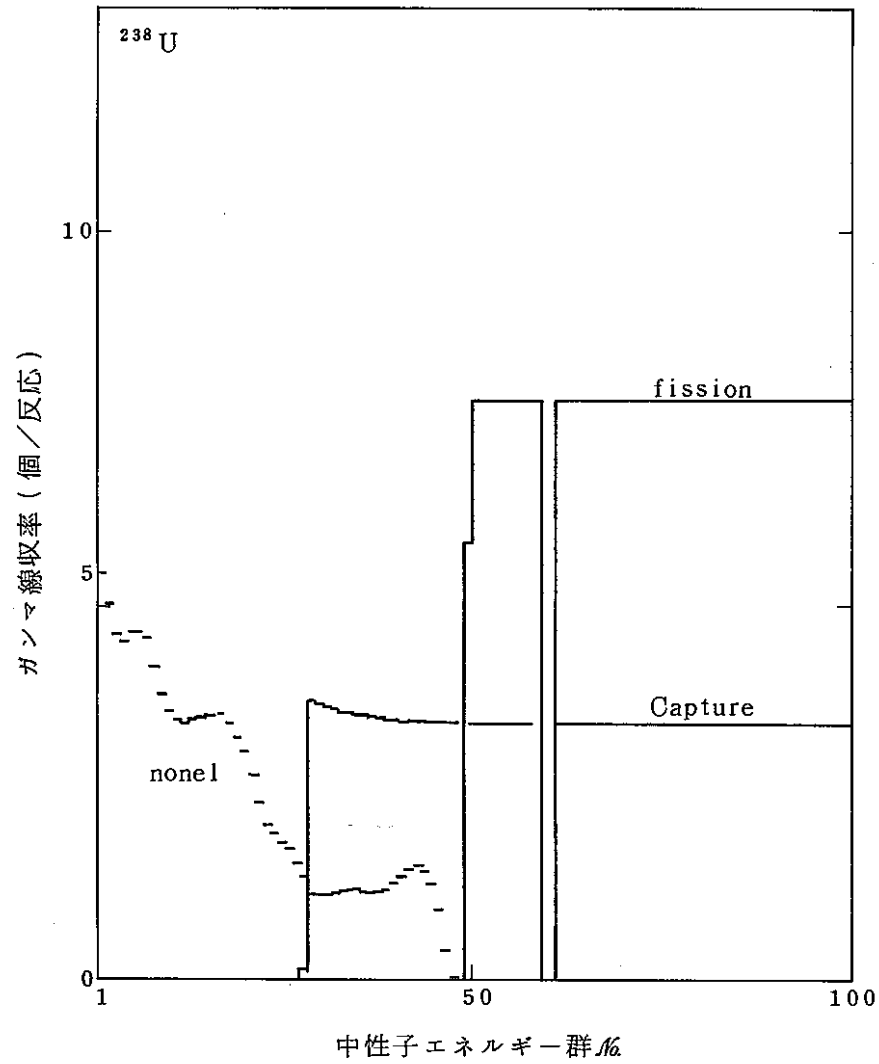


図 2.9 (1) 2次ガンマ線生成収率 ($Y_{ix}(n)$) の中性子エネルギー依存性 (日本原子力研究所作成ライブラリー)

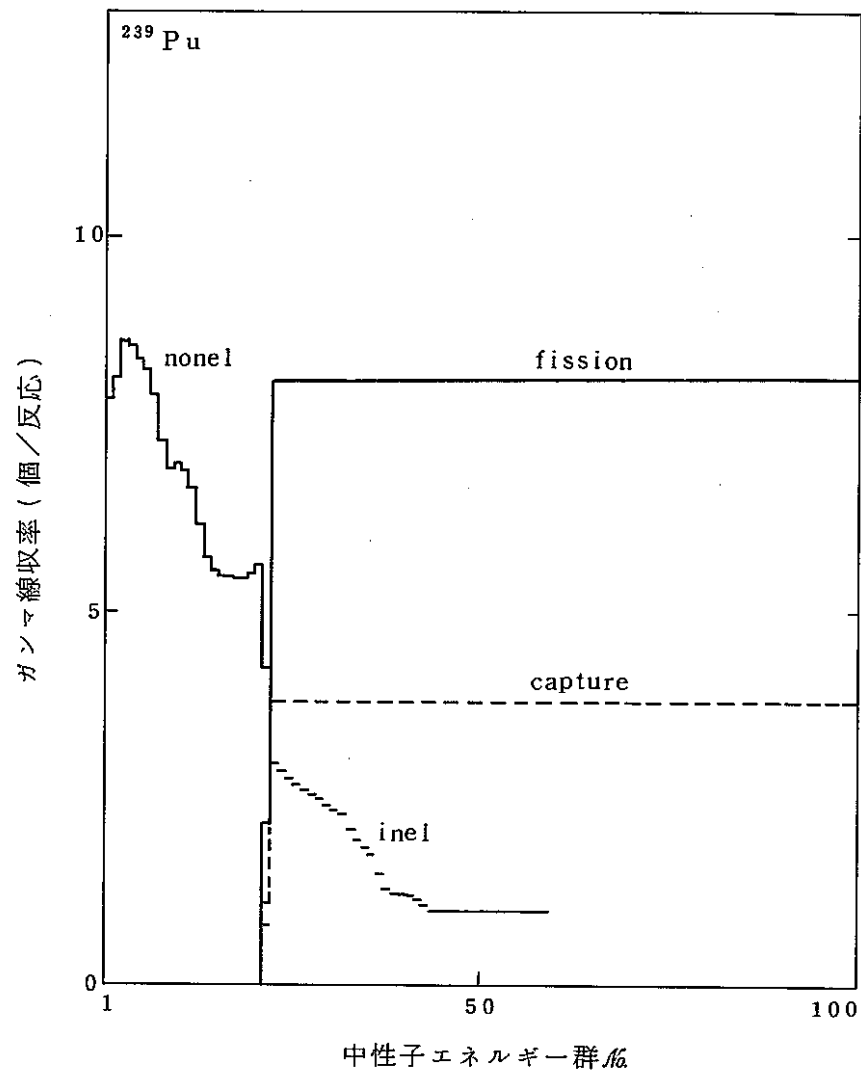
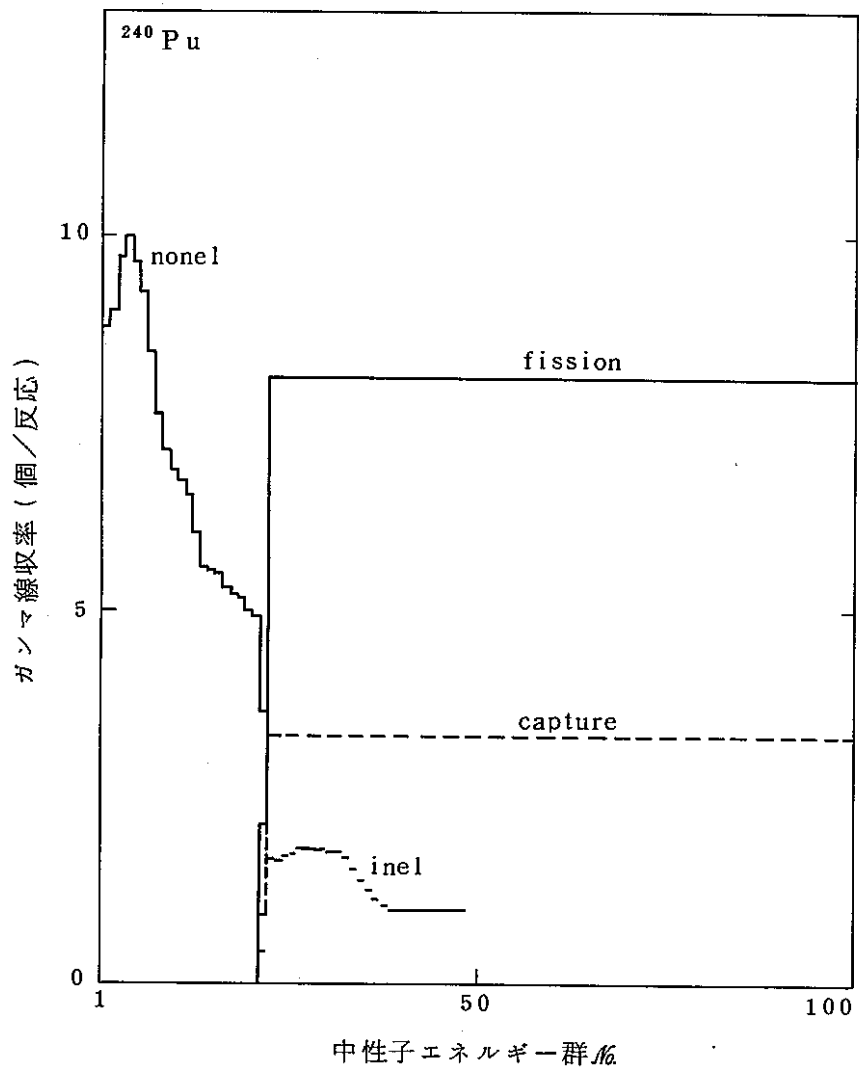


図 2.9 (2) 2次ガンマ線生成収率 ($Y_{ix}(n)$)の中性子エネルギー依存性 (日本原子力研究所作成ライブラリー)

2次ガンマ線生成断面積：

$$\sigma_i(n, g) = \sum_x \sigma_{ix}(n) \cdot Y_{ix}(n) \cdot P_{ix}(n, g)$$

i : 核種 \mathcal{N}

n : 中性子エネルギー群 \mathcal{N}

g : 2次ガンマ線エネルギー群 \mathcal{N}

$V_{ix}(n, g)$: 第 n 群の中性子により、核種 i から第 g 群の2次ガンマ線が生成されるマイクロ断面積

x : ガンマ線生成反応 \mathcal{N}

$V_{ix}(n)$: 第 n 群の中性子により核種 i が反応 X を起こす実効マイクロ断面積

$Y_{ix}(n)$: 第 n 群の中性子により核種 i が反応 X を起こした際のガンマ線収率

$P_{ix}(n, g)$: 第 n 群の中性子により核種 i が反応 X を起こした際のガンマ線のエネルギースペクトル $\sum_g P_{ix}(n, g) = 1.0$

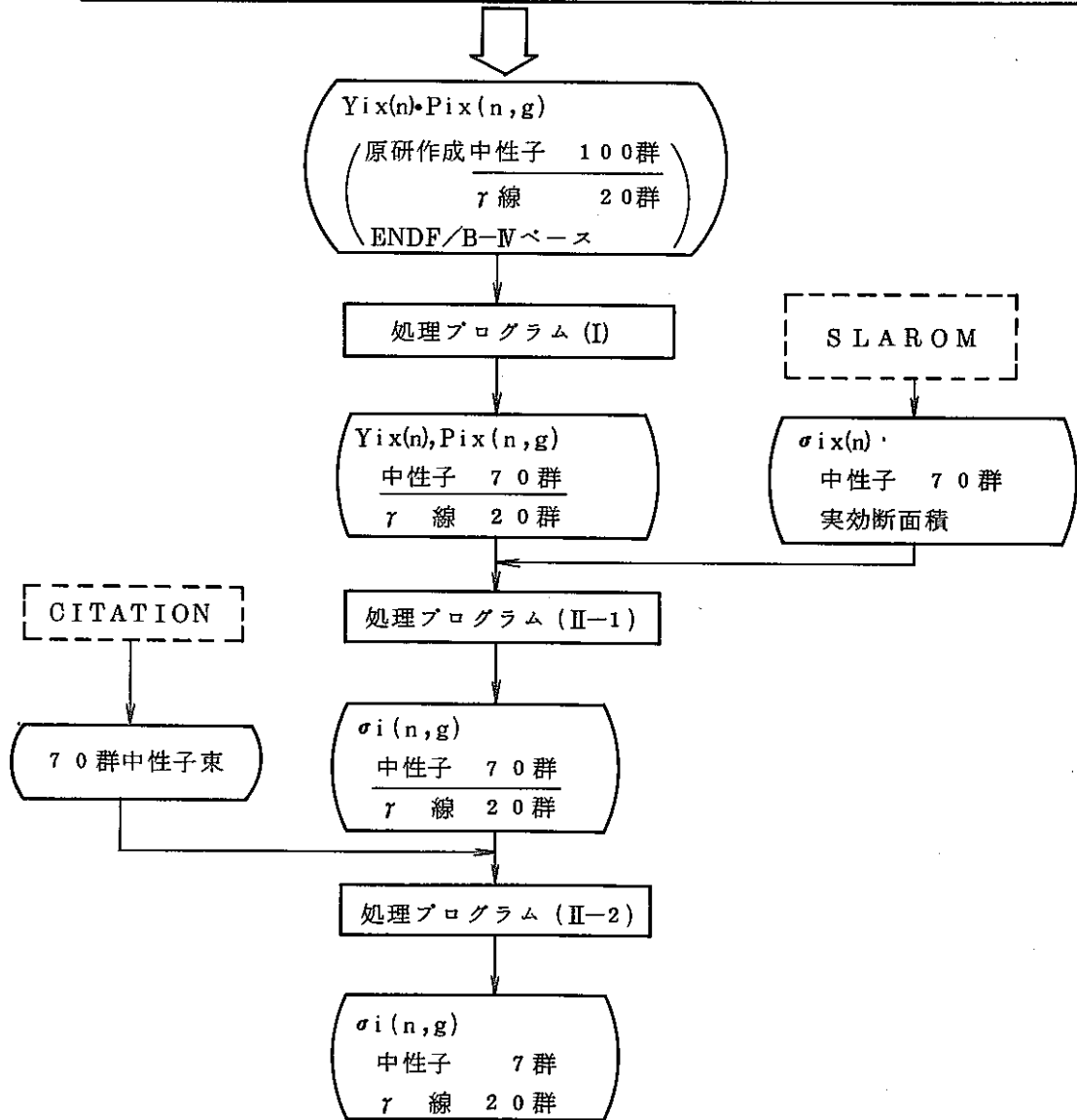


図 2.10 2次ガンマ線生成断面積作成フロー

2.4 ガンマ線輸送断面積の作成

ガンマ線輸送断面積およびガンマ線発熱断面積（ともにマイクロ）はRADHEAT-V3コード内のGAMLEG-JRで作成した。

GAMLEG-JRでは、ガンマ線の吸収断面積は、光電効果ならびに電子対生成断面積の和として与えられ、散乱断面積はコンプトン散乱ならびに干渉性散乱^(*)断面積の和として与えられ、全断面積は上記吸断面積と散乱断面積の和で与えられる。光電効果、電子対生成ならびに、干渉性散乱断面積については、原子番号（Z）とガンマ線エネルギーに関する経験式で求められている。また、コンプトン散乱断面積については、ガンマ線散乱マトリックスから求められる。

一方、ガンマ線発熱断面積は下式⁽⁷⁾にて計算される。

$$h\gamma(g) = 1.6 \times 10^{-13} \times (\mu_{en}/\rho) (M/No) \bar{E}_g [\text{barn} \cdot \text{Joule} / \text{atom}] \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

ここで g : ガンマ線エネルギー群
 \bar{E}_g : 第 g 群のガンマ線平均エネルギー (MeV)
 M : 核種の質量数
 No : アボガドロ数 (したがって (M/No) は原子1個あたりの質量)
 (μ_{en}/ρ) : 質量エネルギー吸収係数 (cm^2/g)
 1.6×10^{-13} : エネルギー単位変換 (MeV \rightarrow Joule) 係数

上式中、 (μ_{en}/ρ) は下式で表わされる。

$$(\mu_{en}/\rho) = \left(\frac{C}{\rho}\right) \cdot f_c + \left(\frac{\tau}{\rho}\right) f_\tau + \left(\frac{\kappa}{\rho}\right) \cdot f_\kappa \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

上記(2.14)式の各項は、各々コンプトン散乱、光電効果、電子対生成の質量エネルギー吸収係数であり、ともに

(*) 散乱波の波長が入射波の波長と同じである散乱、電子による電磁波（ガンマ線等）の散乱の場合は、トムソン散乱と呼ぶ。

(質量減衰係数) × (2次電子に付与されるエネルギーのガンマ線エネルギーに対する割合)

という形で表わされている。なお、干渉性散乱は無視している。

以上の計算法により、ガンマ線エネルギー群数20群、ルジャンドル展開次数3までの、ガンマ線輸送断面積を作成した。本20群断面積の作成に際しては、群定数化用の重み関数を用いていないので、本断面積は中性子断面積のように炉心内領域依存断面積ではなく、領域非依存の断面積である。したがって、本断面積は、炉心内の複数領域に共通して使用される。なお、参考のためにガンマ線20群のエネルギー群構造を表2.7に示す。

2.5 断面積の結合

中性子拡散、ガンマ線輸送を同時に解くと、解析に必要な計算機容量が大きくなるため、今回は中性子の計算とガンマ線の計算を分けて行なった。即ち、中性子の拡散計算により、ガンマ線線源分布を求め、次にガンマ線輸送計算を固定線源問題として行う方法に依った。

そのため、断面積の結合は、2.2節、2.3節で述べた中性子実効断面積と2次ガンマ線生成実効断面積についてのみ行なった。結合後の断面積セットの書込形式を図2.11に示す。また、ガンマ線輸送断面積セットの書込形式を図2.12に示す。さらに、上記セットに書き込まれている核種ならびにそのID No.を表2.8, 2.9, 2.10, 2.11に示す。

表 2.7 ガンマ線 20 群のエネルギー群構造

単位：eV

群 No	下限エネルギー
1	1.2 E + 7
2	1.0 E + 7
3	8.0 E + 6
4	6.5 E + 6
5	5.0 E + 6
6	4.0 E + 6
7	3.0 E + 6
8	2.5 E + 6
9	2.0 E + 6
10	1.66 E + 6
11	1.33 E + 6
12	1.0 E + 6
13	8.0 E + 5
14	6.0 E + 5
15	4.0 E + 5
16	3.0 E + 5
17	2.0 E + 5
18	1.0 E + 5
19	5.0 E + 4
20	2.0 E + 4

(注) 第 1 群の上限は 1.4 E + 7 eV.

表 2.8 中性子実効断面積と2次ガンマ線生成実効断面積セット内の核種名とI.D.№(FCA X-2集合体)

I.D.№	核種名	領域名
101	^{239}Pu	炉心
102	^{240}Pu	
103	^{241}Pu	
105	^{235}U	
107	^{238}U	
108	O	
109	Na	
110	Cr	
111	Ni	
113	Fe	
120	Al	
209	Na	
210	Cr	
211	Ni	
213	Fe	
309	Na	軸反射体
310	Cr	
311	Ni	
313	Fe	
410	Cr	SS-Block
411	Ni	
413	Fe	
505	^{235}U	制御棒 (プースタータイプ)
507	^{238}U	
508	O	
509	Na	
510	Cr	
511	Ni	
513	Fe	
520	Al	

(注) 本断面積セットにはPo成分のみ収納

表 2.9 中性子実効断面積と2次ガンマ線生成実効断面積セット内の
核種名とIDNo (「常陽」MK-II炉心)

IDNo	核種名	領域名	IDNo	核種名	領域名	IDNo	核種名	領域名	IDNo	核種名	領域名
101	²³⁹ Pu	炉心燃料	609	Na	炉心燃料 下部空間	1214	Mn	制御棒上 部構造部	2001	²³⁹ Pu	B型特燃 燃料部
102	²⁴⁰ Pu		610	Cr		1409	Na		2002	²⁴⁰ Pu	
103	²⁴¹ Pu		611	Ni		1410	Cr		2003	²⁴¹ Pu	
104	²⁴² Pu		612	Mo		1411	Ni		2004	²⁴² Pu	
105	²³⁵ U		613	Fe		1412	Mo		2005	²³⁵ U	
107	²³⁸ U		614	Mn		1413	Fe		2007	²³⁸ U	
108	O		709	Na		1414	Mn		2008	O	
109	Na		710	Cr	1509	Na	2009	Na			
110	Cr		711	Ni	1510	Cr	2010	Cr			
111	Ni		712	Mo	1511	Ni	2011	Ni			
112	Mo		713	Fe	1512	Mo	2012	Mo			
113	Fe		714	Mn	1513	Fe	2013	Fe			
114	Mn		714	Mn	1514	Mn	2014	Mn			
205	²³⁵ U		インシュ レータベ レット	809	Na	エントラン スノズル	1609	Na	制御棒 引抜部	2109	
207	²³⁸ U	810		Cr	1610		Cr	2110		Cr	
208	O	811		Ni	1611		Ni	2111		Ni	
209	Na	812		Mo	1612		Mo	2112		Mo	
210	Cr	813		Fe	1613	Fe	2113	Fe			
211	Ni	814		Mn	1614	Mn	2114	Mn			
212	Mo	909		Na	外側 反射体(A)	1709	Na	B型特燃 上部ブレ ナム	2209	Na	
213	Fe	910		Cr		1710	Cr		2210	Cr	
214	Mn	911		Ni		1711	Ni		2211	Ni	
309	Na	912		Mo		1712	Mo		2212	Mo	
310	Cr	913	Fe	1713		Fe	2213		Fe		
311	Ni	914	Mn	1714		Mn	2214		Mn		
312	Mo	上部反射 体	1009	Na	外側 反射体(B)	1809	Na	B型特燃 上部反射 体	2309	Na	材料照射 用反射体
313	Fe		1010	Cr		1810	Cr		2310	Cr	
314	Mn		1011	Ni		1811	Ni		2311	Ni	
409	Na		1013	Fe		1812	Mo		2312	Mo	
410	Cr	ガブプレ ナム	1014	Mn	1813	Fe	2313	Fe			
411	Ni		1109	Na	1814	Mn	2314	Mn			
412	Mo		1110	Cr	B型特燃 インシュ レータベ レット	1905	²³⁵ U	制御棒 吸収体	2409	Na	
413	Fe		1111	Ni		1907	²³⁸ U		2410	Cr	
414	Mn		1112	Mo		1908	O		2411	Ni	
509	Na	1113	Fe	1909		Na	2412		Mo		
510	Cr	1114	Mn	1910		Cr	2413		Fe		
511	Ni	ハンドリ ングヘッ ド	1209	Na	内側 反射体 (太径)	1911	Ni	2414	Mn		
512	Mo		1210	Cr		1912	Mo	2417	¹⁰ B		
513	Fe		1211	Ni		1913	Fe	2418	¹¹ B		
514	Mn		1212	Mo		1914	Mn	2419	C		
			1213	Fe							

(注) 本断面積セットにはPo成分のみ収納

表 2.10 ガンマ線輸送断面積セット内の核種名と I D № (FCA X-2 集合体)

I D №	P _N 次数	核種名
400	0	O
401	1	
402	2	
403	3	
500	0	Na
501	1	
502	2	
503	3	
700	0	Al
701	1	
702	2	
703	3	
1100	0	Cr
1101	1	
1102	2	
1103	3	
1300	0	Fe
1301	1	
1302	2	
1303	3	
1400	0	Ni
1401	1	
1402	2	
1403	3	

I D №	P _N 次数	核種名
2300	0	²³⁵ U
2301	1	
2302	2	
2303	3	
2500	0	²³⁸ U
2501	1	
2502	2	
2503	3	
2700	0	²³⁹ Pu
2701	1	
2702	2	
2703	3	
2800	0	²⁴⁰ Pu
2801	1	
2802	2	
2803	3	
2900	0	²⁴¹ Pu
2901	1	
2902	2	
2903	3	

1. (NFILE, MM, IGM, IHT)
 NFILE = 断面積セットの名前
 MM = 断面積セット中の核種数
 IGM = エネルギー群数 (7)
 IHT = 断面積テーブル中の σ_t の位置 (27)
2. ((CHI(I), I=1, IGM), (VE(I), I=1, IGM))
 CHI(I) = エネルギー群 I の核分裂スペクトル
 VE(I) = エネルギー群 I のスピード
3. SN法における角度積分のための重率と角度余弦

For M=1, MM;

2*M+2 (NCID, NAME)
 NCID = M番目の核種ID No.
 NAME = M番目の核種名

2*M+3 (($\sigma(J, I, M)$, J=1, IHM), I=1, IGM)
 $\sigma(J, I, M)$ = 核種Mの第1群の断面積テーブル中位置Jにおける
 ミクロ断面積
 IHM = IHT + IGM

2*MM+4 32767 (セットの終わりを示すマーカー)

(注) $\sigma(J, I, M)$ のテーブルは下記のようにになっている。

$$\left. \begin{array}{l}
 \sigma(1, I, M) = \\
 \vdots \\
 \sigma(J, I, M) = \\
 \vdots \\
 \sigma(20, I, M) = \\
 \sigma(21, I, M) = 0 \\
 \sigma(22, I, M) = 0
 \end{array} \right\} \begin{array}{l}
 \text{第I群の中性子から第J群のガンマが生成されるミ} \\
 \text{クロ断面積}
 \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l}
 \sigma(23, I, M) = \sigma_c(I, M) \quad ; \text{捕獲ミクロ断面積 (不使用)} \\
 \sigma(24, I, M) = \sigma_f(I, M) \quad ; \text{核分裂ミクロ断面積} \\
 \sigma(25, I, M) = \sigma_a(I, M) \quad ; \text{吸収ミクロ断面積} \\
 \sigma(26, I, M) = \nu \sigma_f(I, M) \quad ; \text{核分裂中性子生成ミクロ断面積} \\
 \sigma(27, I, M) = \sigma_t(I, M) \quad ; \text{ミクロ全断面積 (ミクロ輸送断面積)} \\
 \sigma(28, I, M) = \sigma_s(1 \rightarrow I, M) \\
 \sigma(29, I, M) = \sigma_s(2 \rightarrow I, M) \\
 \vdots \\
 \sigma(34, I, M) = \sigma_s(T \rightarrow I, M)
 \end{array} \right\} \text{散乱ミクロ断面積}$$

図 2.1.1 中性子実効断面積と2次ガンマ線生成実効断面積の結合断面積セットの書込形式

1. (NFILE, MM, IGM, IHT)
 - NFILE = 断面積セットの名前
 - MM = 断面積セット中の核種数 (同一核種の異なるルジャンドル
次数の成分は別核種として数える。)
 - IGM = エネルギー群数 (20)
 - IHT = 断面積テーブル中の σ_t の位置 (5)
2. ((CHI(I), I=1, IGM), (VE(I), I=1, IGM))
 - CHI(I) = エネルギー群 I の核分裂スペクトル (0.0)
 - VE(I) = エネルギー群 I の平均エネルギーの逆数 (1/MeV)
3. SN法における角度積分のための重率と角度余弦

For M=1, MM;

2*M+2	(NCID, NAME)
	MCID = M 番目の核種の ID # (同一核種の異なるルジャンドル 次数の成分は別 ID # を付ける。ただし、次数の順に連 続 # である。)
	NAME = M 番目の核種数
2*M+3	(($\sigma(J, I, M)$, J=1, IHM), I=1, IGM)
	$\sigma(J, I, M)$ = 核種 M の第 I 群の断面積テーブル中位置 J におけ るマイクロ断面積
	IHM = IHT + IGM

2*MM+4 32767 (セットの終わりを示すマーカー)

(注) $\sigma(J, I, M)$ のテーブルは下記のようにになっている。

$\sigma(1, I, M)$ = ガンマ線発熱マイクロ断面積 (P₀成分以外は 0)

$\sigma(2, I, M) = 0.0$

$\sigma(3, I, M) = \sigma_a(I, M)$; 吸収マイクロ断面積 (P₀成分以外は 0)

$\sigma(4, I, M) = 0.0$

$\sigma(5, I, M) = \sigma_t(I, M)$; ミクロ全断面積 (P₀成分以外は $\sum_{K=1}^{IGM} \sigma_s(I \rightarrow K, M)$)

$\sigma(6, I, M) = \sigma_s(1 \rightarrow I, M)$

$\sigma(7, I, M) = \sigma_s(2 \rightarrow I, M)$

⋮

$\sigma(J, I, M) = \sigma_s(J-5 \rightarrow I, M)$

⋮

$\sigma(25, I, M) = \sigma_s(20 \rightarrow I, M)$

} 散乱マイクロ断面積

図 2.12 ガンマ線輸送断面積セットの書込形式

3. FCAモックアップ炉心体系におけるガンマ線発熱実験解析

2章で述べた中性子実効断面積と2次ガンマ線生成実効断面積の結合断面積セットならびにガンマ線輸送断面積セットを用いて、「常陽」MK-II炉心のモックアップ体系であるFCA X-2集合体のガンマ線発熱実験解析を実施した。

図3.1に本解析の手順を示した。同図に示すように、解析はRZ計算とXY計算を組合せて、ガンマ線発熱量測定点での解析値を求め、測定値と解析値を比較するという方法をとった。ガンマ線線源は、中性子拡散計算をベースとして求め、その線源に基づくガンマ線束分布は $P_3 S_6$ のガンマ線輸送計算(固定線源問題)をベースとして求めた。上記中性子拡散計算、ガンマ線輸送計算には、ともに2次元SNコードを用いた。

以下、解析モデル、解析結果ならびに解析結果の測定値との比較結果の詳細について述べる。

3.1 解析モデル

本節では、解析体系、計算方法、実験値との比較方法、使用SNコードの概要について述べる。

3.1.1 解析体系

i) 解析体系

RZ体系、XY体系を図3.2、図3.3に示す。FCA X-2集合体は、炉心等価直径約56cm、高さ50.8cmの炉心であり、その周囲に径反射体(等価厚さ:16.6cm)、軸反射体(厚さ:35.6cm)が配置されている。さらに、径反射体の周囲にはステンレス製ブロック領域(SS-Block, 等価厚さ17.1cm)が配されている。上記反射体は、ステンレス製板とNa板とからなり、一方、SS-BlockにはNaは含まれていない。

炉心内には、プースタータイプの制御棒が4体配置されている。本制御棒にはウランが含まれており、試験中は挿入されている。実際には試験中は臨界とするために1in程度引抜かれていたが、解析では全挿入されているものとした。

炉心体系は炉心中心面に対して対称であるため、RZ体系は図3.2に示すように1/2炉心体系とした。一方、XY体系はその対称性から、図3.3に示すように1/4炉心体系とした。

XY体系では，図3.3に示すよう炉心外側に仮想領域（原子数密度には，SS-Block領域の1/50の原子数密度を用いた）を設け，四角体系とした。メッシュ幅は，RZ，XY体系とも2.5cm前後とした。

ii) 原子数密度

炉心体系内各領域の原子数密度は，既に表2.2に示した。

3.1.2 計算方法

i) ガンマ線線源計算

本ガンマ線線源計算は，中性子7群拡散計算で求めた中性子束をベースに求めた。即ち，下式により各メッシュ点ごとのガンマ線線源（20群）を求める。

$$S_{ij}^g = \sum_{n=1}^7 \Sigma_{ij}^{n \rightarrow g} \cdot \phi_{ij}^n \quad (g=1, 2, \dots, 20) \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで，(i, j)：2次元体系におけるメッシュ点を表わす番号

S_{ij}^g ：メッシュ点(i, j)における第g群のガンマ線源

$\Sigma_{ij}^{n \rightarrow g}$ ：メッシュ点(i, j)における第n群の中性子から第g群の2次ガンマ線が生成されるマクロ断面積

ϕ_{ij}^n ：メッシュ点(i, j)における第n群の中性子束

ところで，XY体系用の中性子軸方向バックリングには，CITATIONで求めた，炉心高さ部平均値を用いた。このため，XY体系で求められる中性子束は炉心高さ部軸方向平均中性子束となり，これらを用いて計算されるガンマ線線源も炉心高さ部軸方向平均線源となる。

なお，中性子束の規格化用炉心出力は，試験が出力0.5Wでなされたことから0.5Wとした。ただし，この規格化用出力は核分裂時の核分裂片，β線，中性子による発熱量の積分値であり，ガンマ線による発熱分は含まれていない。即ち，試験での出力と解析での出力は必ずしも一致しているわけではない。しかし，ガンマ線発熱量の実測値と解析値の比較は，各々の中性子束レベルでの²³⁷Npの核分裂率で規格化した値で行うので，上記不一致は問題にはならない。

ii) ガンマ線輸送計算

上記i)で述べたガンマ線線源分布を用いて，固定線源問題として，ガンマ線輸送計算を行う。即ち，ガンマ線線源分布により生じるガンマ線束を第1群から順に下の群へと求めていくという計算である（いわゆる Inner Iteration

のみを行う)。

計算は P3 S6 の輸送計算である。即ち、散乱の非等方性はルジャンドル展開の 3 次のオーダーまで考慮し、Angular Flux の角度分点を 30 点^(*) ($6 \times (6+4)/2=30$) とする。

今回の解析で使用した角度分点の方向余弦 (μ, η)、およびその重率を表 3.1 に示す。これは参考文献(5)の Table I より引用したものである。

以上の方法で求めたガンマ線束を用いて、ガンマ線による発熱量を、下式で計算する。

$$P_{ij} = \sum_{g=1}^{20} h \Sigma_{ij}^g \cdot \phi_{ij}^g \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、 P_{ij} : メッシュ点 (i, j) におけるガンマ線発熱密度 (w/cc)

$h \Sigma_{ij}^g$: 第 g 群のガンマ線に対するメッシュ点 (i, j) におけるガンマ線発熱マクロ断面積

ϕ_{ij}^g : メッシュ点 (i, j) における第 g 群のガンマ線束

iii) 実測値との比較方法

既に図 3.1 で示したように、ガンマ線発熱の実測値と解析値の比較には、発熱量絶対値は RZ 計算をベースに、ドロワー毎の発熱分布 (相対値) は XY 計算をベースにして、実測値がある位置での発熱量解析値を求め、これと実測値を比較するという方法を取った。即ち、XY 計算より各ドロワー毎の発熱分布を求め、これと RZ 計算で求めた全炉心ガンマ線発熱量絶対値から、各ドロワー毎の発熱量絶対値を求める。さらに、RZ 計算で求めたガンマ線発熱軸方向分布と上記各ドロワー毎の発熱量絶対値とから、測定点 (ほぼ炉心中心面上) での発熱量絶対値を求める。

上記発熱量絶対値が本来ならば測定値と比較すべきものであるが、炉心出力レベルが解析と実験とで必ずしも一致していないので、出力レベルの規格化を行う。この方法としては、炉心中心に置かれた²³⁷Np 核分裂率でガンマ線発熱

(*) TWO TRAN では、S6 計算の場合、角度分布は 24 点 ($6 \times (6+2)/2$) であるが、本 SN コードでは各 η レベルで重率 = 0 の分点を 1 点必要とするので、30 点となる (DOT 3.5 もこのタイプ)。

量を割ることにより、炉心中心におかれた ^{237}Np の1核分裂当りのガンマ線発熱量に規格化した。解析値の規格化に当たっては、炉心中心位置での中性子束（RZ計算結果）と ^{237}Np の核分裂断面積（70群無限稀釈断面積を7群に縮約した断面積）から求めた ^{237}Np の核分裂率を用いた。

iv) SNコードの概要

本解析に使用した2次元SNコードの特徴は以下のとおりである。

- a) RZ, $R\theta$ 体系, 四角メッシュのXY, 正三角形メッシュのXY体系の解析が可能である。
- b) 輸送方程式の他に拡散方程式も解析可能である。
- c) 輸送方程式を解く際にはDiamond差分法を主として用い、負のAngular Fluxが生じた場合には、重み付差分法を用いる。

上記のような特徴のうち、a)が今回の解析に本コードを使用する主な理由である。即ち、一般に良く知られているDOT 3.5等は三角メッシュのXY体系の解析ができず、「常陽」の解析には不向きであるため、三角メッシュが使用できる本コードを用いた。

3.2 解析結果

以下に、RZ計算、XY計算結果、ならびに左記計算結果を組み合わせ、さらに実測値と比較するために規格化したガンマ線発熱計算結果について示す。

3.2.1 RZ計算結果

i) ガンマ線発熱量

表3.2に核分裂に伴う核分裂片、 β 線、中性子による全発熱量を0.5Wに規格化した場合の、核分裂とガンマ線による発熱量の内訳を示した。同表によると、全発熱量は0.551Wであり、その内の9.3%がガンマ線による発熱である。9.3%のガンマ線発熱の領域毎の内訳を以下に示す。

炉心部	: 69%
反射体部	: 23%
SS-Block	: 8%

一方、表3.3にはガンマ線源により発生するガンマ線エネルギー合計を各領域毎に示す。表3.2、表3.3の比較から、発生するガンマ線エネルギーのうち

表 3.1 角度分点方向余弦とその重率 (S6)

No.	μ m	η m	w m
16 1	-0.3770797	± 0.9261808	0.0
17 2	-0.2666355	"	0.04403155
18 3	+0.2666355	± 0.9261808	0.04403155
19 4	-0.7318110	± 0.6815076	0.0
20 5	-0.6815076	"	0.03930180
21 6	-0.2666355	"	"
22 7	+0.2666355	"	"
23 8	+0.6815076	± 0.6815076	0.03930180
24 9	-0.9637974	± 0.2666357	0.0
25 10	-0.9261808	"	0.04403155
26 11	-0.6815076	"	0.03930180
27 12	-0.2666355	"	0.04403155
28 13	+0.2666355	"	0.04403155
29 14	+0.6815076	"	0.03930180
30 15	+0.9261808	± 0.2666357	0.04403155

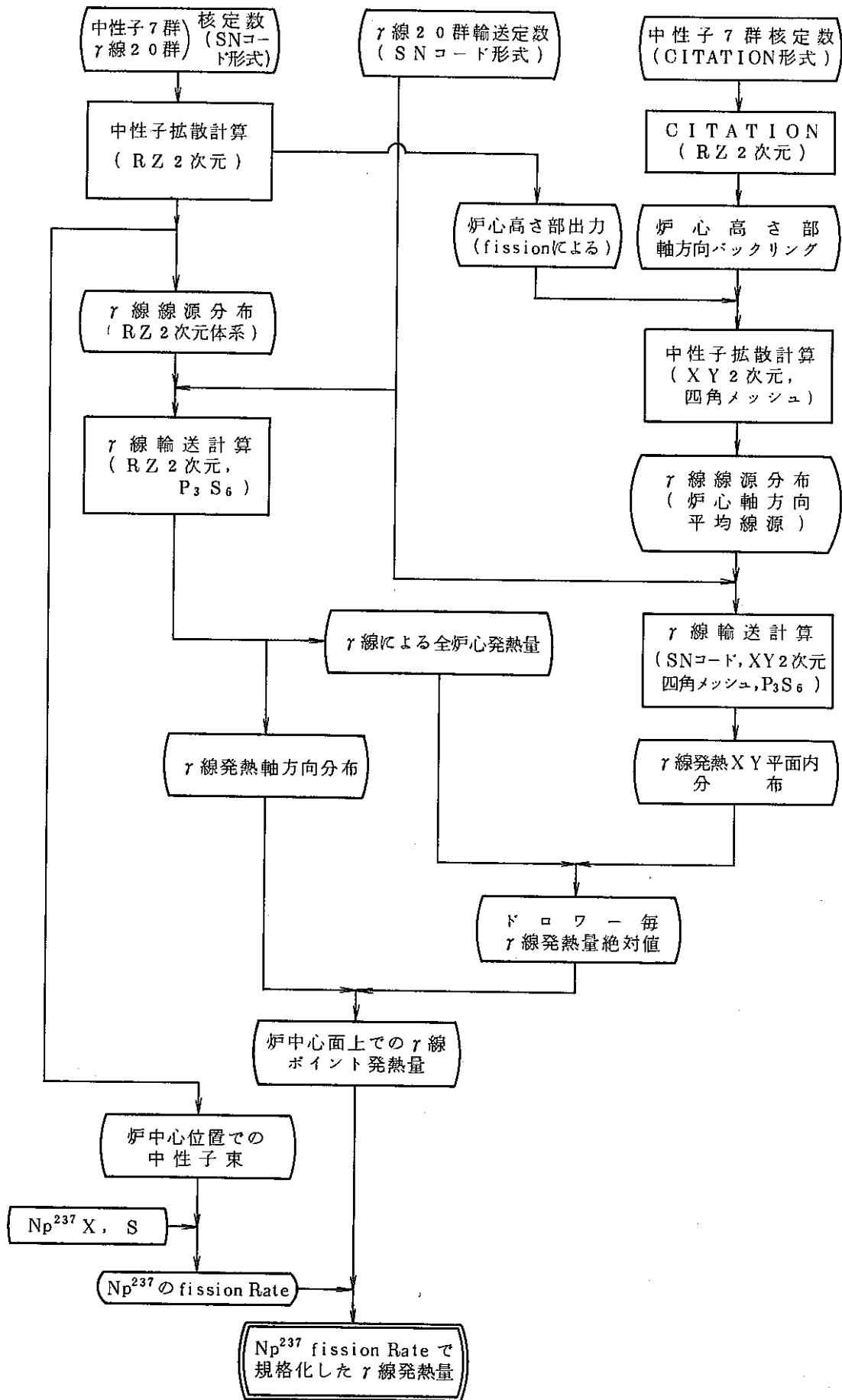


図 3.1 FCA X-2 集合体ガンマ線発熱解析手順

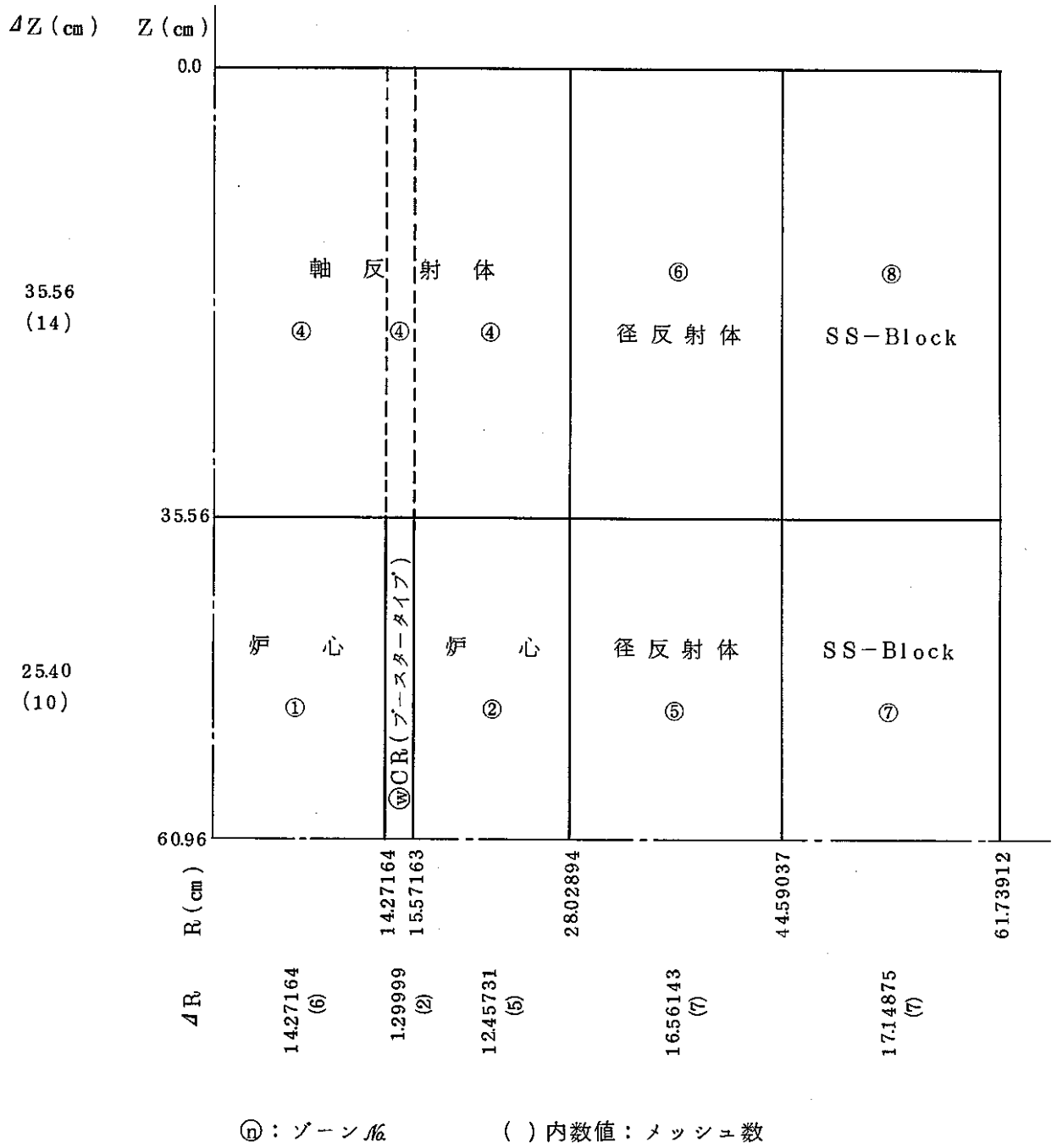


図 3.2 FCA X-2 集合体 RZ 解析体系 (1/2 炉心)

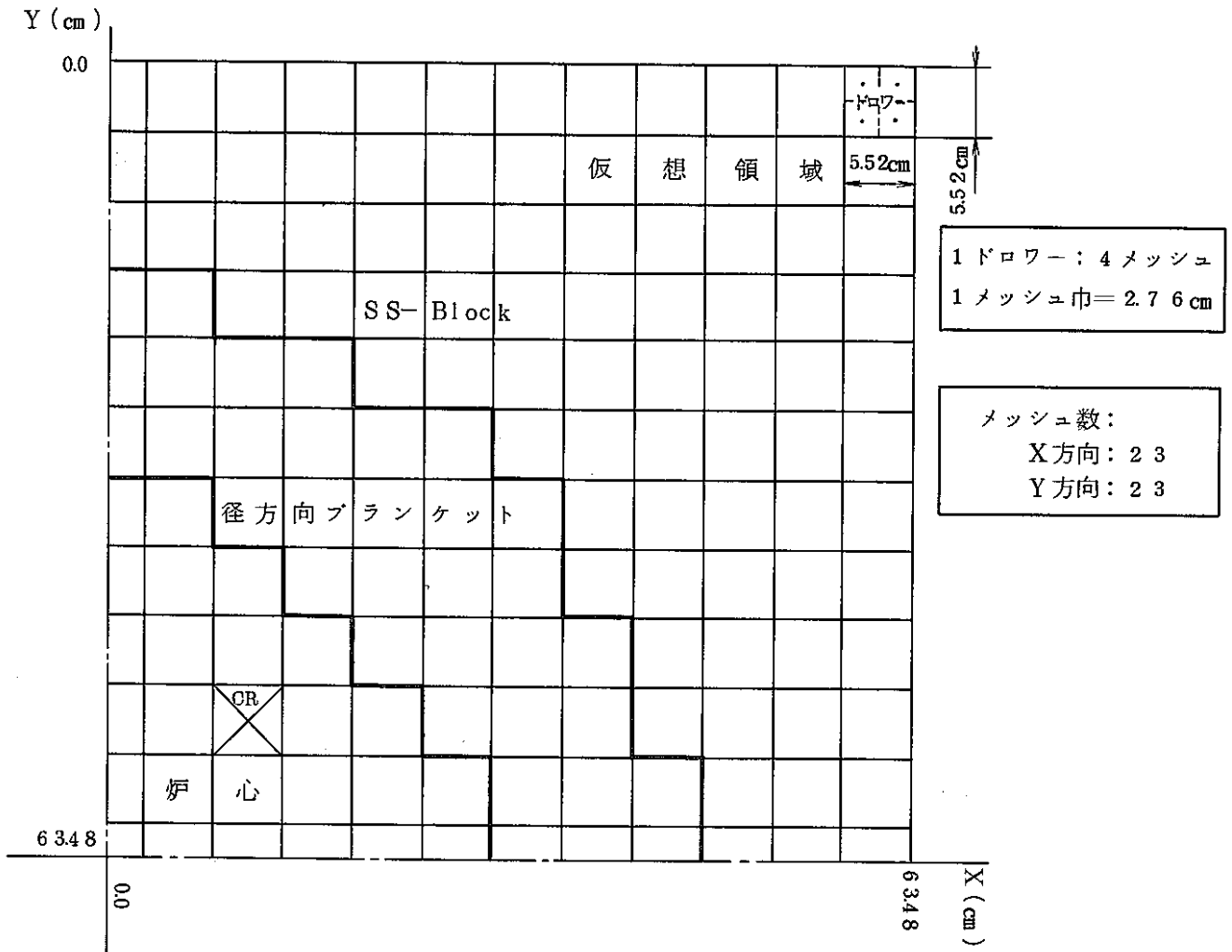


図 3.3 FCA X-2 集合体 XY 解析体系 (1/4 炉心)

約 90% が体系内に吸収され，残りの 10% は吸収されていないことがわかる。一方，体系外へ漏れ出るガンマ線数は少なく，線源ガンマ線の約 0.2% である。このように，ガンマ線は体系外にほとんど漏れ出ていないにもかかわらず，吸収されないガンマ線が 10% に達するのは，2.4 項で述べた (2.14) 式における f (2 次電子に付与される運動エネルギーのガンマ線エネルギーに対する比) によるものと考えられる。ガンマ線発熱断面積の計算に今回用いた RADHEAT-V3 は，光電効果あるいは電子対生成に対し，軌道電子の結合エネルギーあるいは陰，陽電子生成エネルギーを考慮して， $f < 1$ としている。これが，吸収エネルギーが発生エネルギーを下回る原因と考えられる。

表 3.2，表 3.3 から各領域毎に吸収エネルギー / 発生エネルギー比を見ると，

炉心部	:	83%
径反射体部	:	116%
軸反射体部	:	123%
SS-Block 部	:	94%

となるが，上記光電効果，電子対生成に対して $f = 1.0$ として概算評価すると，吸収エネルギーは炉心部で約 11%，反射体部で約 5% 増加する。

以上，RZ 計算の総括的結果を述べたが，以下に本結果が得られるに到る各段階での結果を示す。

ii) 中性子束分布

図 3.4 に炉心中心面上での径方向中性子束分布を示す。反射体部での第 5，6，7 群中性子束に盛り上がりがある。

図 3.5，3.6，3.7 に炉心中心位置，径反射体最内層，SS-Block 最内層の軸方向中性子束分布を示す。炉心中心位置では，軸反射体部での第 5，6，7 群中性子束に盛り上がりがある。径反射体最内層でも軸反射体部のある軸方向位置レベルで同様の傾向が見られる。しかし，SS-Block 最内層になると，もうその傾向は見られない。

iii) 核分裂による発熱量軸方向分布

図 3.8 に核分裂による発熱量軸方向分布を示した。

iv) ガンマ線源のエネルギー分布

図 3.9 に上記 ii) で述べた中性子束分布をベースに計算されたガンマ線源のエ

エネルギー分布を示した。同図は、炉心中心位置、径反射体最内層、SS-Block 最内層でのエネルギー分布を示すものであるが、炉心中心位置では 0.4 ~ 0.6 MeV のガンマ線の発生率が最大となっている。また、径反射体、SS-Block では、0.8 ~ 1 MeV のガンマ線の発生率が最大となっている。また、これらの領域で特徴的なことは、7 MeV 前後のガンマ線発生率が相対的に大きいことである。

上記特徴を説明するために、図 3.10 に 2 次ガンマ線生成マクロ断面積を示した。径反射体、SS-Block の上記マクロ断面積に注目すると、中性子エネルギーが低下するに従い、ガンマ線エネルギー群で 5, 4, 3 群 (エネルギーにして 5 MeV ~ 10 MeV) の生成断面積が大きくなっている。これは、Cr, Fe, Ni の捕獲断面積が中性子エネルギーの低下とともに増加し、かつ捕獲後の複合核放出 γ 線エネルギーが 8 ~ 9 MeV と高いことによる。また、径反射体、SS-Block において 0.8 ~ 1 MeV のガンマ線の発生率が、最大になっているのは、図 3.10 からわかるように、中性子第 1, 2 群からガンマ線第 1, 3 群が生成されるマクロ断面が大きいことによるが、これは、Fe, Ni, Cr の非弾性散乱によって生成されるガンマ線によるものである。一方、炉心部では、例えば ^{239}Pu の核分裂による生成ガンマ線エネルギー分布が第 1, 4, 15 群で最大となる比較的ゆるやかな分布をしているため、図 3.9 に示したようなガンマ線源分布となった。

V) ガンマ線束のエネルギー分布

図 3.11 に炉心中心、径反射体最内層、SS-Block 最内層におけるガンマ線束のエネルギー分布を示す。これを図 3.9 に示したガンマ線源のエネルギーのエネルギー分布と比較すると以下のことがわかる。

- a) 炉心中心部では、0.4 ~ 0.6 MeV に最大値を持つて発生したガンマ線は、0.6 MeV 以下のガンマ線の吸収が効いて、相対的に 0.6 MeV 以上のガンマ線の割合が増加している。
- b) 径反射体、SS-Block では、0.8 ~ 1 MeV に最大値を持つて発生したガンマ線は、散乱により 0.8 ~ 1 MeV のピークが低下し、0.1 ~ 0.6 MeV のガンマ線が相対的に増加している。また、SS-Block については、ガンマ線源にみられた、5 ~ 10 MeV の分布形状がガンマ線束にそのまま残っている。

vi) ガンマ線源径方向分布

炉心中心面上での2次ガンマ線源径方向分布を図3.12に示す。同図から、線源の径方向分について以下のような傾向を示していることがわかる。

- a) ガンマ線第2, 3, 4群では, 炉心部より径反射体, SS-Blockの方が, ガンマ線発生率が高い。これは, IV)で述べたとおり, 上記領域では中性子エネルギーが相対的に低く, そのため中性子捕獲反応が優勢となり, 捕獲後の複合核から高エネルギーガンマ線が放出されるためである。
- b) 第5群以上のガンマ線源に関しては, 炉心部でのガンマ線の発生が優勢であり, 単位体積当りの発生率では, 径反射体に比べ1桁前後大きい。ただし, 第13群のガンマ線についてはIV)で述べたように, Cr, Fe, Niの非弾性散乱により発生するガンマ線により径反射体, SS-Blockにおいて他群のガンマ線より1桁程度大きくなっている。

vii) ガンマ線束径方向分布

炉心中心面上でのガンマ線束径方向分布を図3.13に示す。同図から, 以下のことがわかる。

- a) 第2, 3, 4, 5群は, それらの群の線源径方向分布の傾向がそのまま現われている。
- b) 第6から15群までは, 径反射体部から外側で急激にガンマ線束が減衰している。
- c) 第16から19群までは, 径反射体部でのガンマ線束の盛り上がりがある。これは, よりエネルギーの高い群のガンマ線が散乱によりエネルギーが低下し, 上記群に移行してきたことによる。この点については, 前記V)のガンマ線束エネルギー分布でも述べた。

viii) ガンマ線発熱径方向分布

図3.14に炉心中心面でのガンマ線発熱密度の径方向分布を示す。同図から以下のことがわかる。

- a) 炉心部では, 発熱密度は炉心周辺部へ行くと急激に低下する。
- b) 径反射体の炉心隣接部の発熱密度は, 炉心の径反射体隣接部のその約半分程度である。

径反射体内を径方向外側へ移動していくと, 約5cm(1ドロー程度)で

発熱密度は炉心隣接部の約 $1/4$ に低下する。

- c) SS-Block 部の径反射体隣接部の発熱密度は、径反射体の SS-Block 隣接部のそれより大きい。これは、SS-Block の密度が径反射体のそれより大きいためである。

IX) ガンマ線発熱軸方向分布

径方向各位置におけるガンマ線発熱密度軸方向分布を図 3.15 に、また、発熱量軸方向ピーキング係数を表 3.4 に示した。図 3.15 図の第 1, 2, … ドロワーは炉心対角線上を炉中心ドロワーから数えたドロワー n を示す(表 3.4 下段参照)。同図、表からわかるように、軸方向ピーキングは炉心外側に行くほど小さくなる。

表 3.2 FCA X-2 集合体の各領域発熱量内訳 (RZ 計算)

一核分裂に伴なり核分裂片, β 線, 即発中性子, 遅発中性子による全発熱量を 0.5 W に規格化した。

全 発 熱 量 (W)		5.512 × 10 ⁻¹ (100%)	
核分裂による発熱	炉心部 (W)	4.649 × 10 ⁻¹ (84.36%)	5.0 × 10 ⁻¹ (90.72%)
	制御棒部 (プースタータイプ) (W)	3.506 × 10 ⁻² (6.361%)	
	その他領域 (W)	0.0 (0.0%)	
γ 線による発熱	炉心部 (W)	3.280 × 10 ⁻² (5.951%)	5.116 × 10 ⁻² (9.281%)
	制御棒部 (プースタータイプ) (W)	2.323 × 10 ⁻³ (0.422%)	
	径反射体部 (炉心高さ部) (W)	5.954 × 10 ⁻³ (1.080%)	
	同上 (軸反射体厚さ部) (W)	2.497 × 10 ⁻³ (0.453%)	
	SS-Block (炉心高さ部) (W)	2.721 × 10 ⁻³ (0.494%)	
	同上 (軸反射体厚さ部) (W)	1.632 × 10 ⁻³ (0.296%)	
	軸反射体部 (W)	3.226 × 10 ⁻³ (0.585%)	

() 内数値：全発熱量に対する割合 (%)

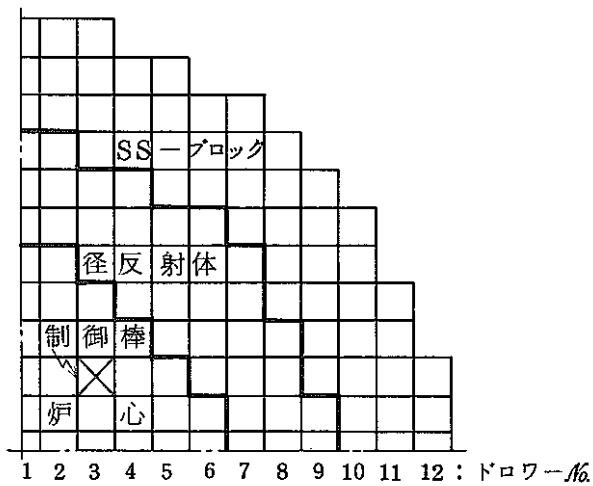
表 3.3 FCA X-2 集合体のガンマ線線源のエネルギー
(R Z 計算)

一核分裂に伴なう核分裂片, β 線, 即発中性子,
遅発中性子による全発熱量を 0.5 W に規格化
した。

領 域 名	ガンマ線エネルギー (W)
炉 心 部	3.933 - 2
制御棒部 (ブースタータイプ)	3.050 - 3
径反射体部 (炉心高さ部)	4.749 - 3
同 上 (軸反射体厚さ部)	2.530 - 3
SS-Block (炉心高さ部)	2.880 - 3
同 上 (軸反射体厚さ部)	1.734 - 3
軸反射体部	2.618 - 3
合 計	5.689 - 2

表 3.4 FCA X-2 集合体ガンマ線発熱分布軸方向ピーキング係数

位 置		炉心高さ部	炉心 + } 部 軸反射体
炉 心	第 1 ドロワー	1.185 ₄	2.613 ₁
	第 2 ドロワー	1.184 ₄	2.610 ₀
	第 3 ドロワー	1.182 ₀	2.602 ₃
	第 4 ドロワー	1.174 ₀	2.585 ₅
	第 5 ドロワー	1.164 ₆	2.555 ₈
	第 6 ドロワー	1.149 ₄	2.499 ₄
	制御棒ドロワー	1.174 ₃	2.617 ₉
径 反 射 体	第 7 ドロワー	1.148 ₉	1.916 ₂
	第 8 ドロワー	1.128 ₈	1.769 ₅
	第 9 ドロワー	1.115 ₂	1.699 ₇
SS ブ ロ ッ ク	第 10 ドロワー	1.101 ₆	1.649 ₀
	第 11 ドロワー	1.100 ₉	1.646 ₆
	第 12 ドロワー	1.099 ₉	1.647 ₄



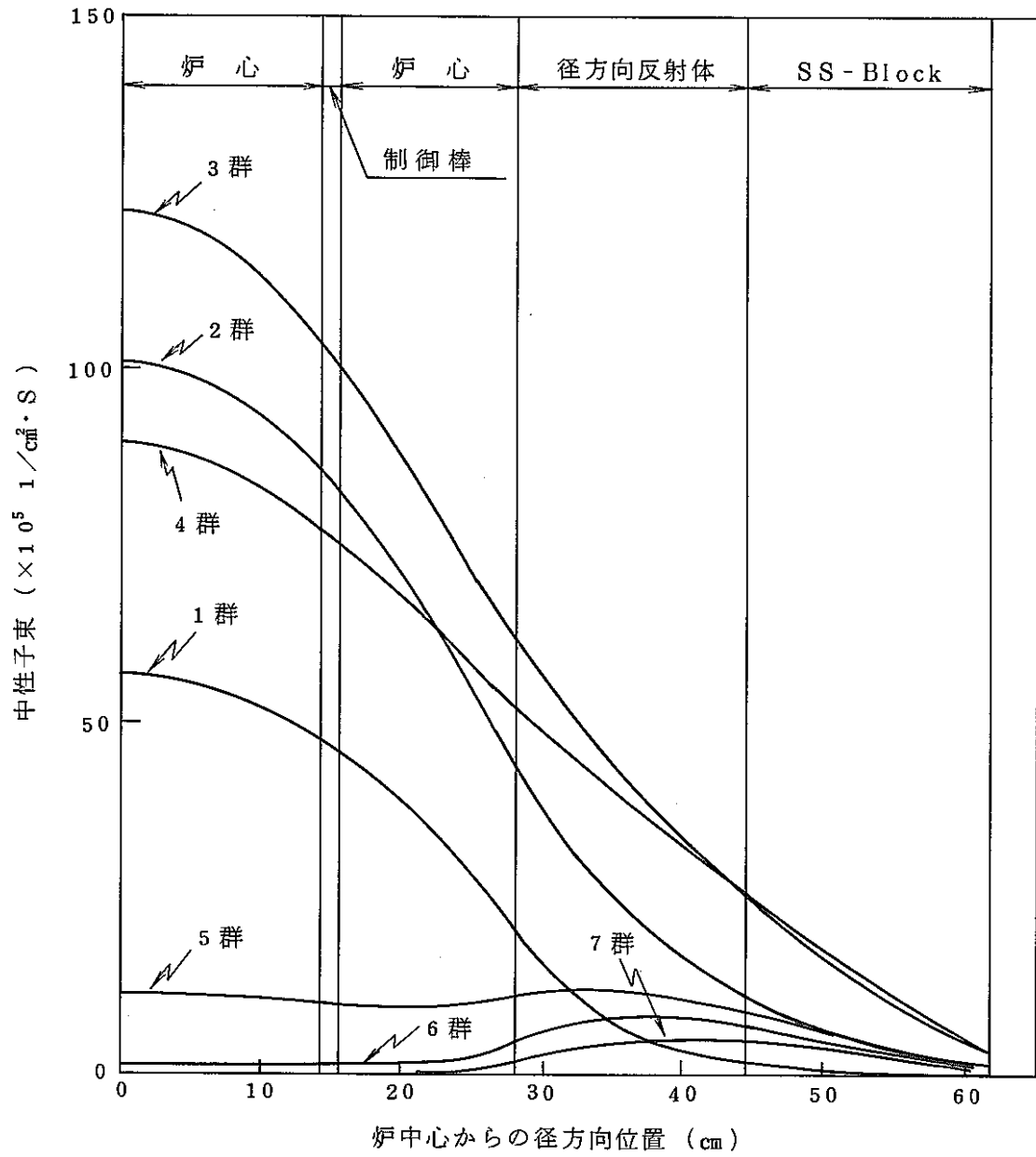


図 3.4 FCA X-2 集合体径方向中性子束分布 (炉心中心面, RZ 計算)

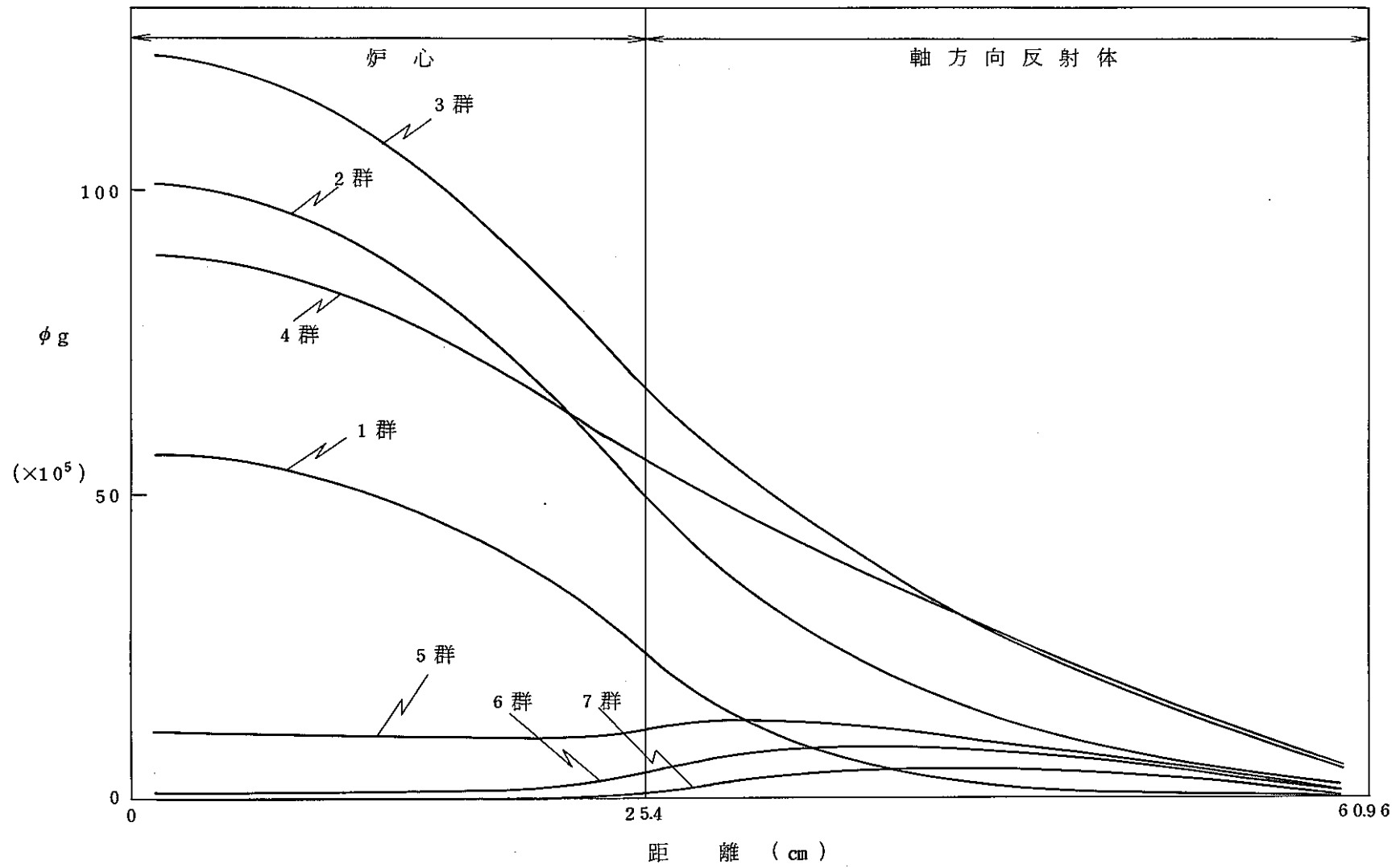


図 3.5 FCA X-2 集合体の軸方向中性子束分布 (炉心中心位置, RZ 計算)

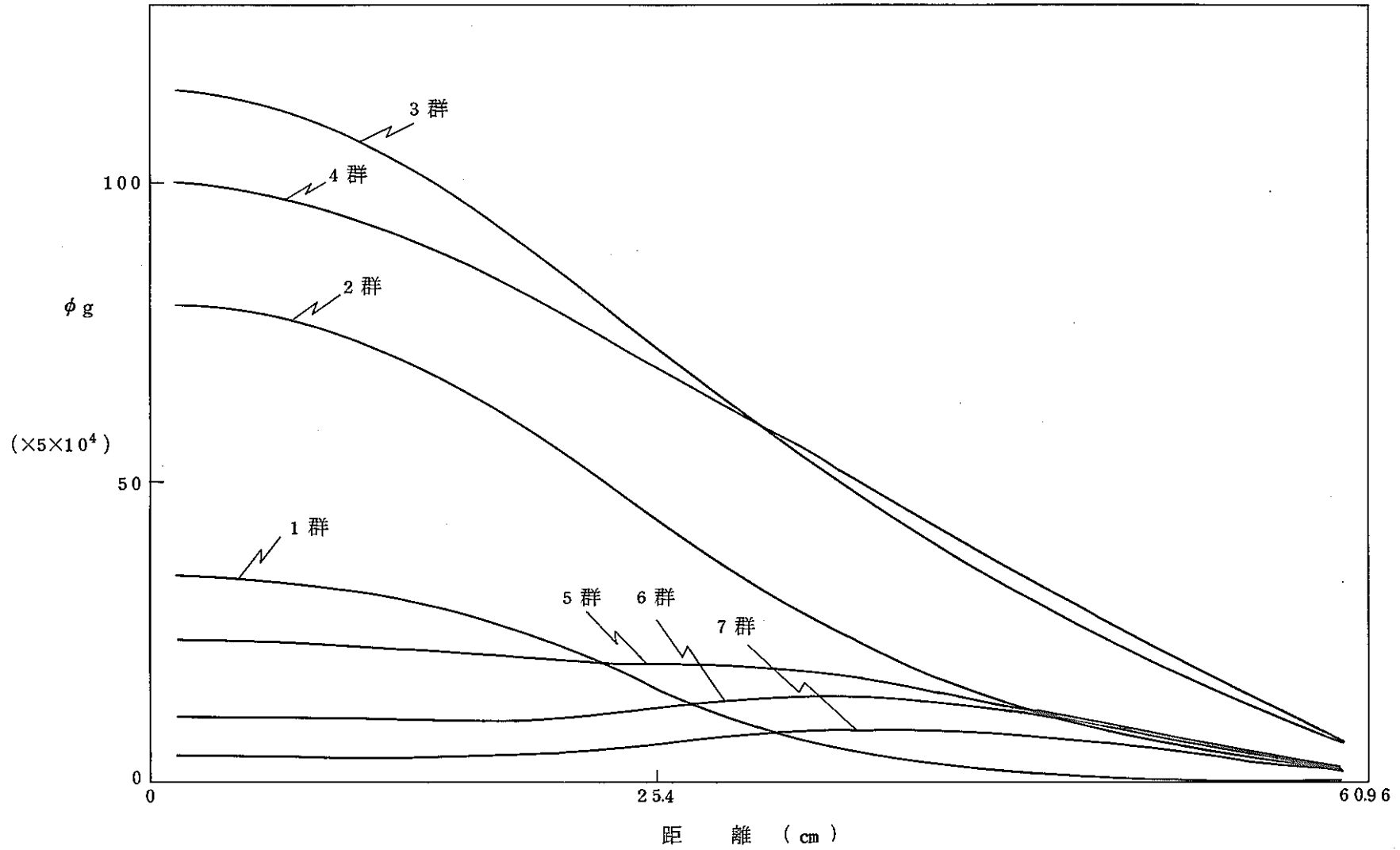


図 3.6 FCA X-2 集合体の軸方向中性子束分布 (径方向反射体最内層, RZ 計算)

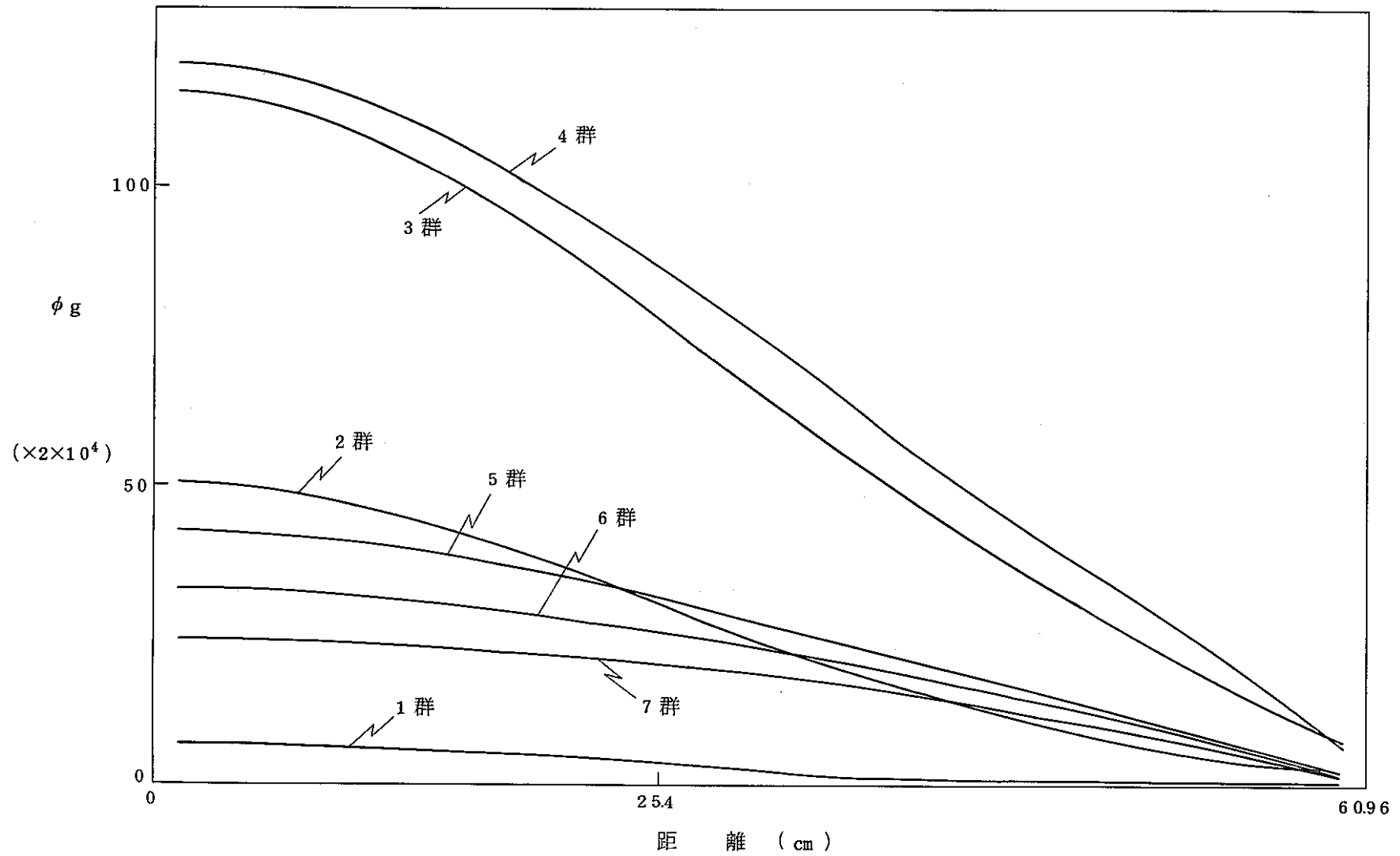


図 3.7 FCA X-2 集合体の軸方向中性子束分布 (SS BLOCK 最内層, RZ 計算)

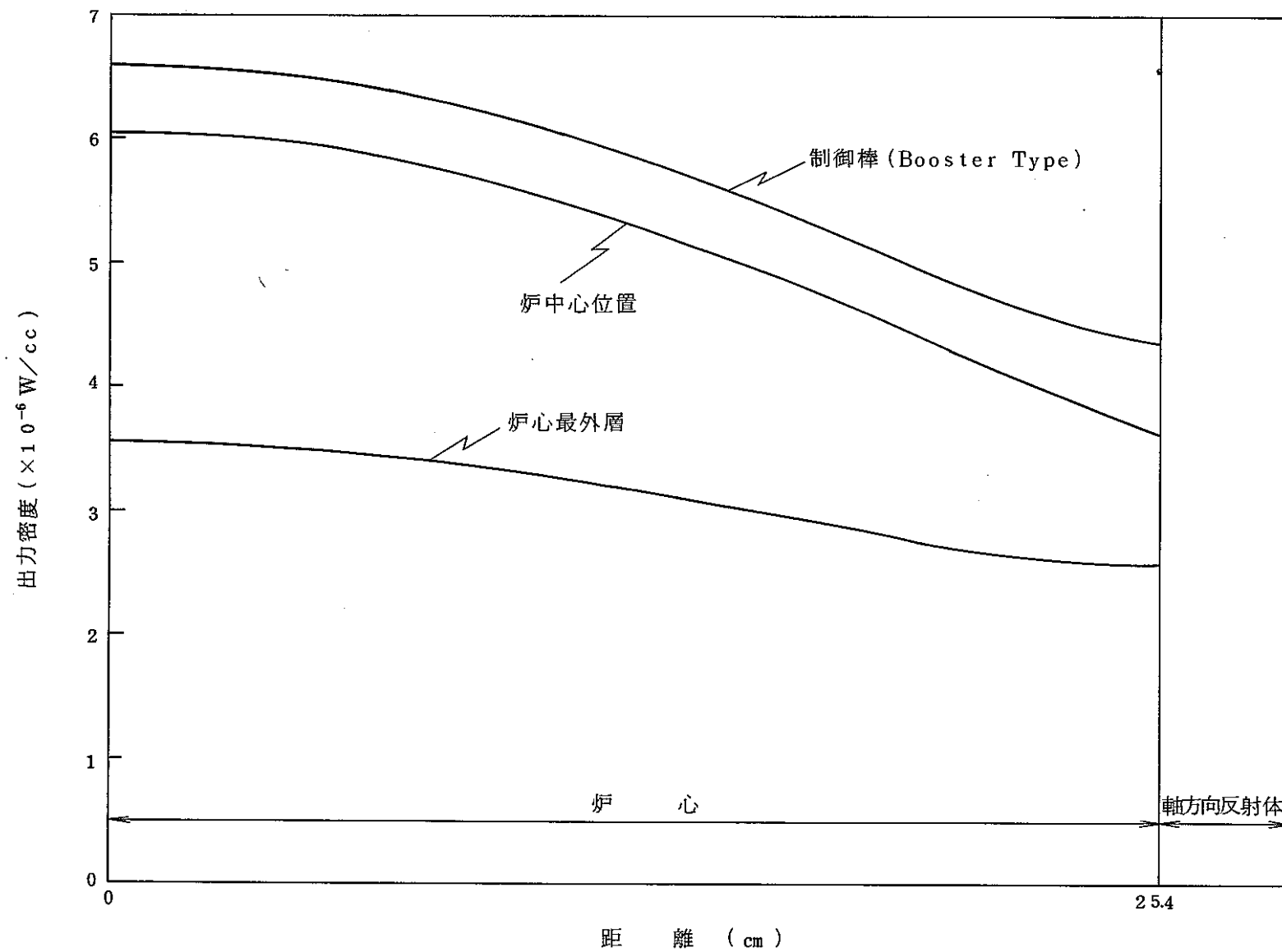


図 3.8 FCA X-2 集合体の核分裂による発熱量軸方向分布 (RZ 計算)

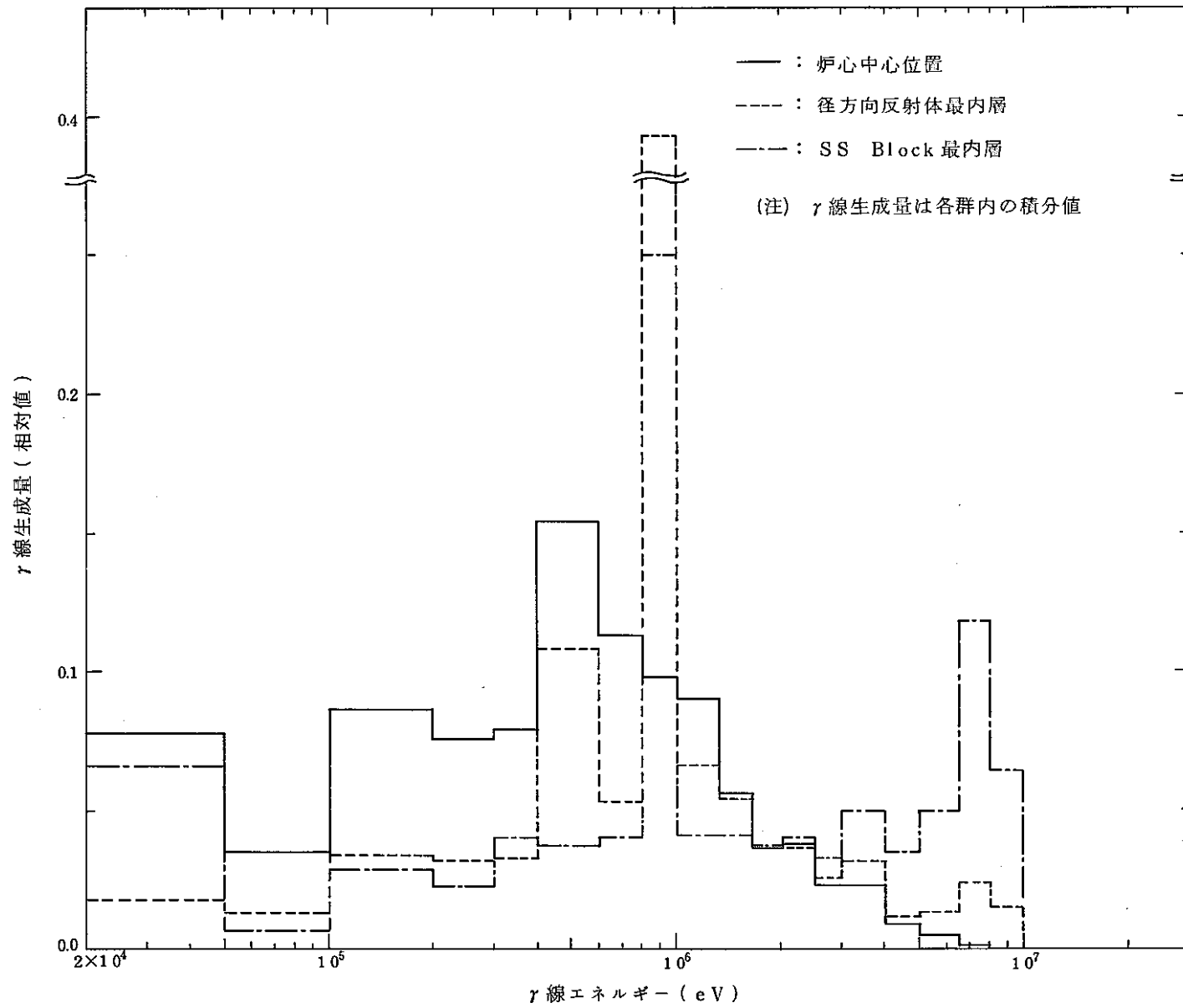


図 3.9 FCA X-2 集合体のガンマ線源のエネルギー分布 (RZ 計算)

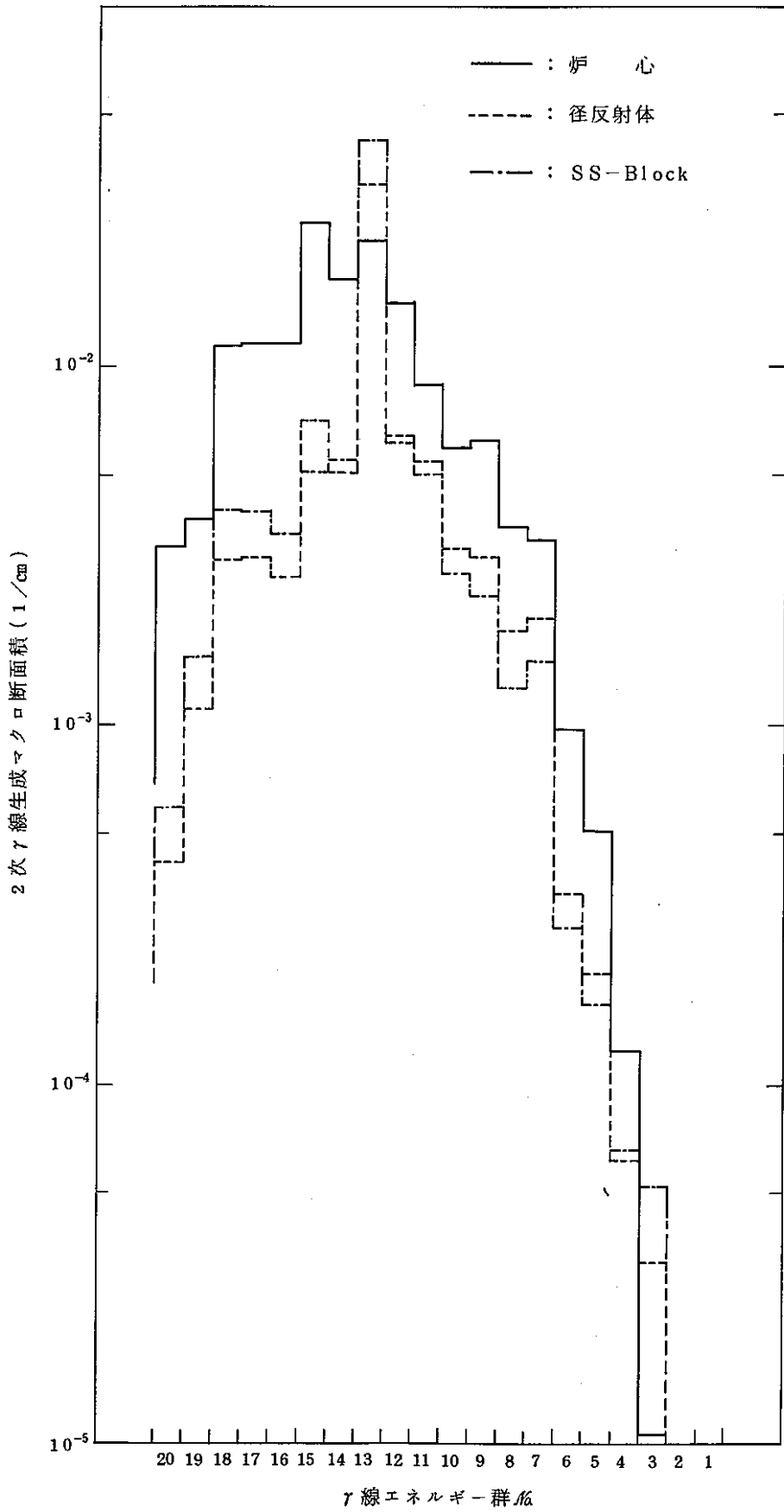


図 3.10 (a) FCA X-2 集合体の 2 次ガンマ線生成マクロ断面積 (中性子第 1 群)

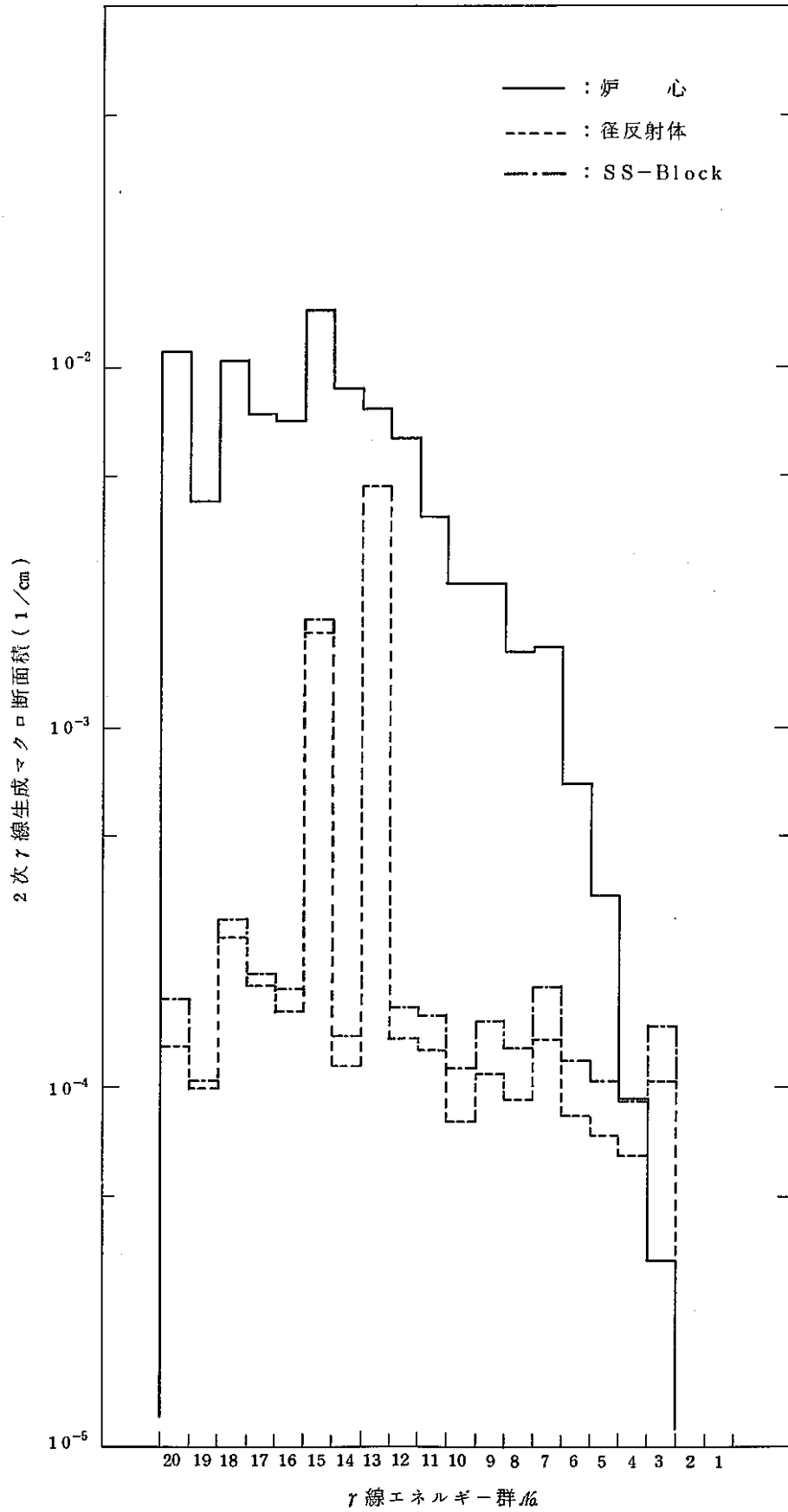


図 3.10 (b) FCA X-2 集合体の 2 次ガンマ線生成マクロ断面積 (中性子第 2 群)

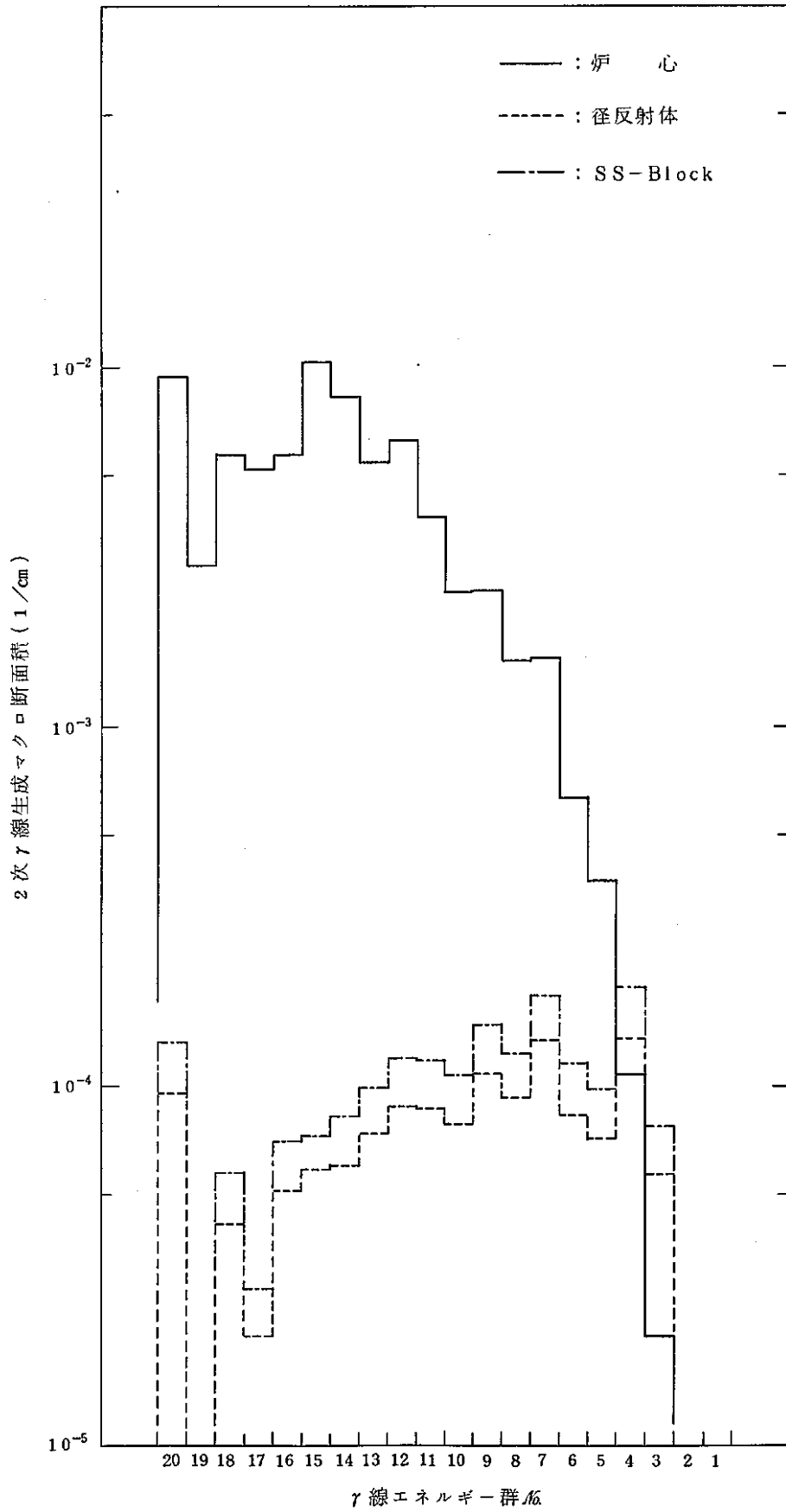


図 3.1 0 (c) FCA X-2 集合体の 2 次ガンマ線生成マクロ断面積 (中性子第 3 群)

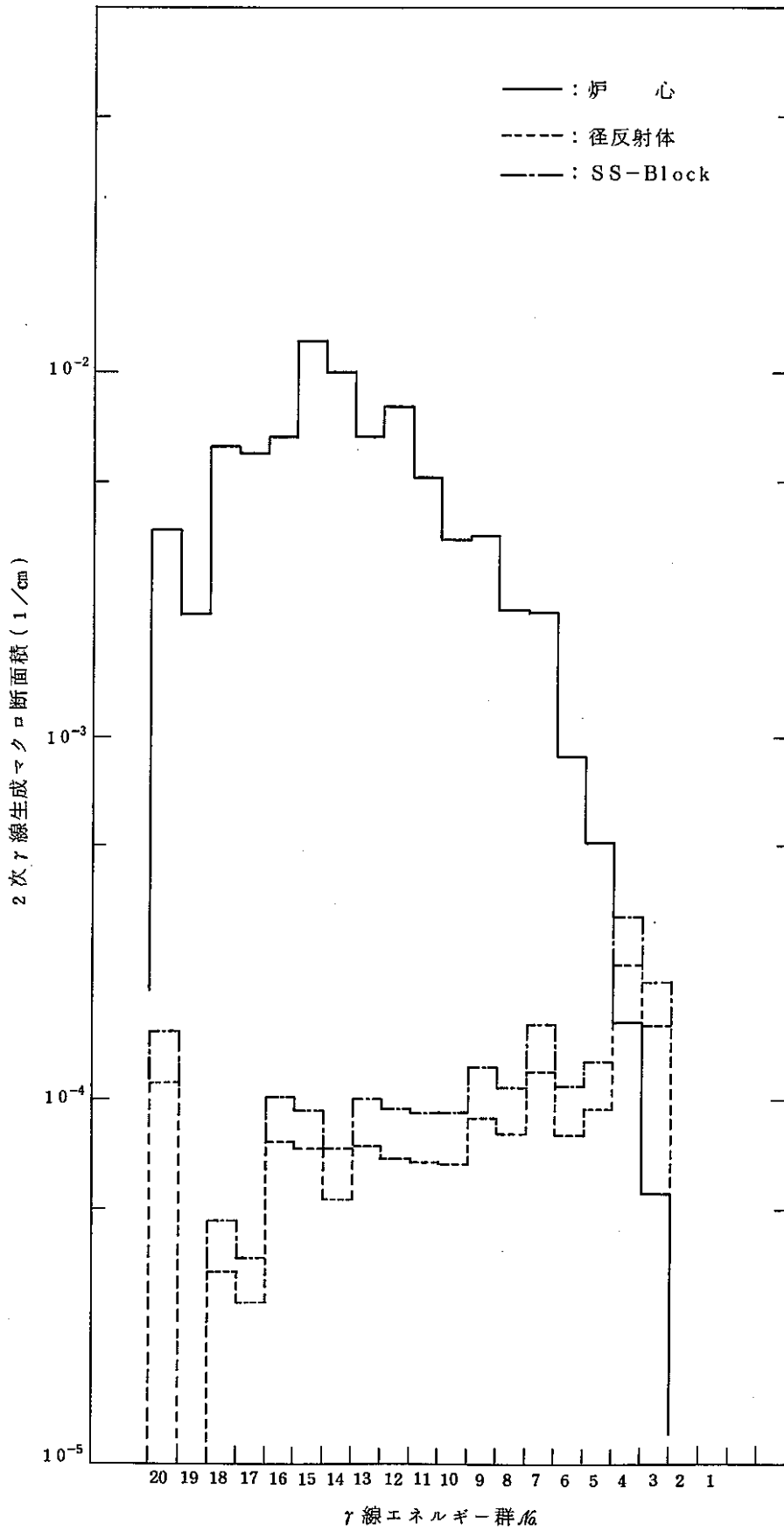


図 3.10 (d) FCA X-2 集合体の 2 次ガンマ線生成マクロ断面積 (中性子第 4 群)

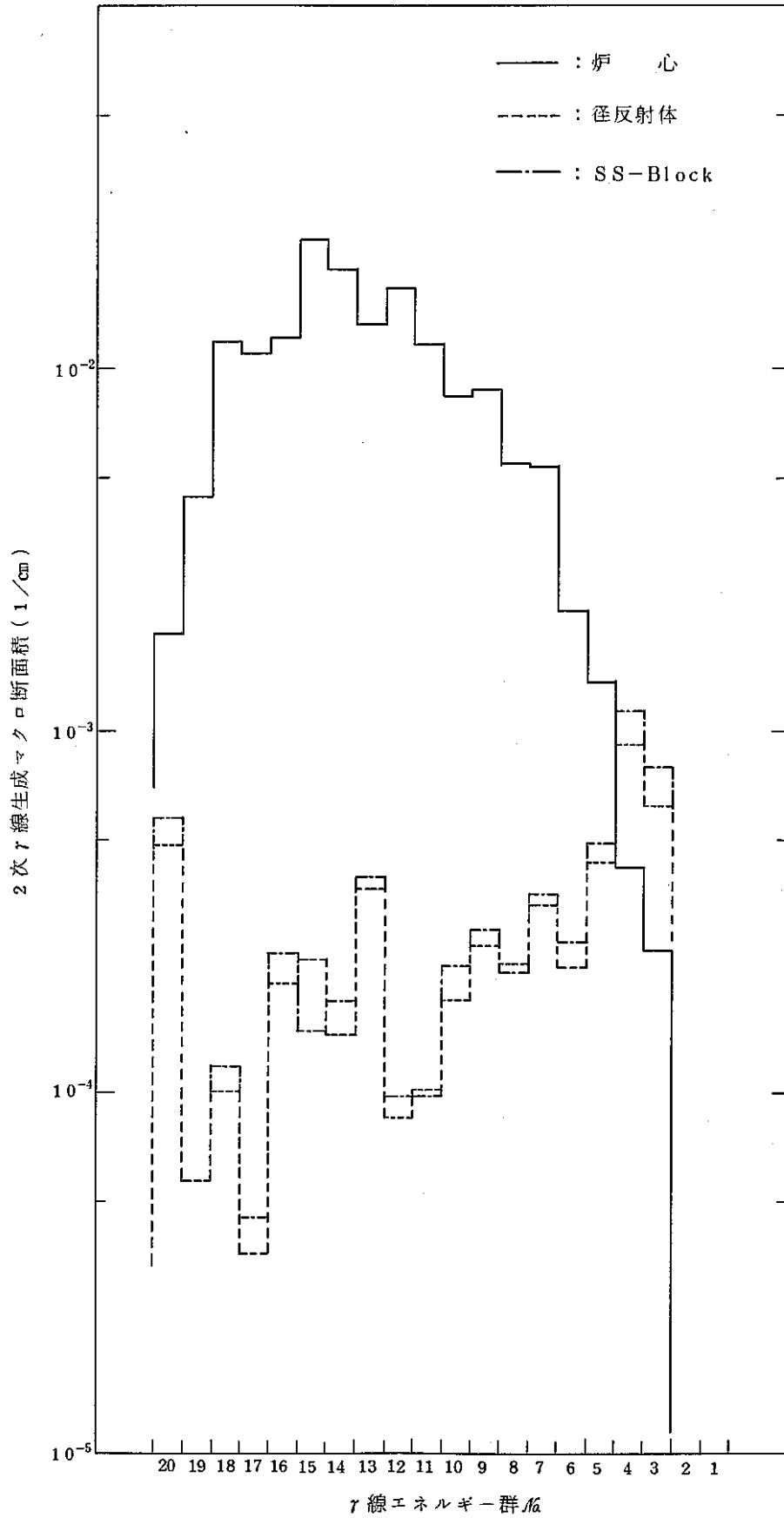


図 3.10 (e) FCA X-2 集合体 2 次ガンマ線生成マクロ断面積 (中性子第 5 群)

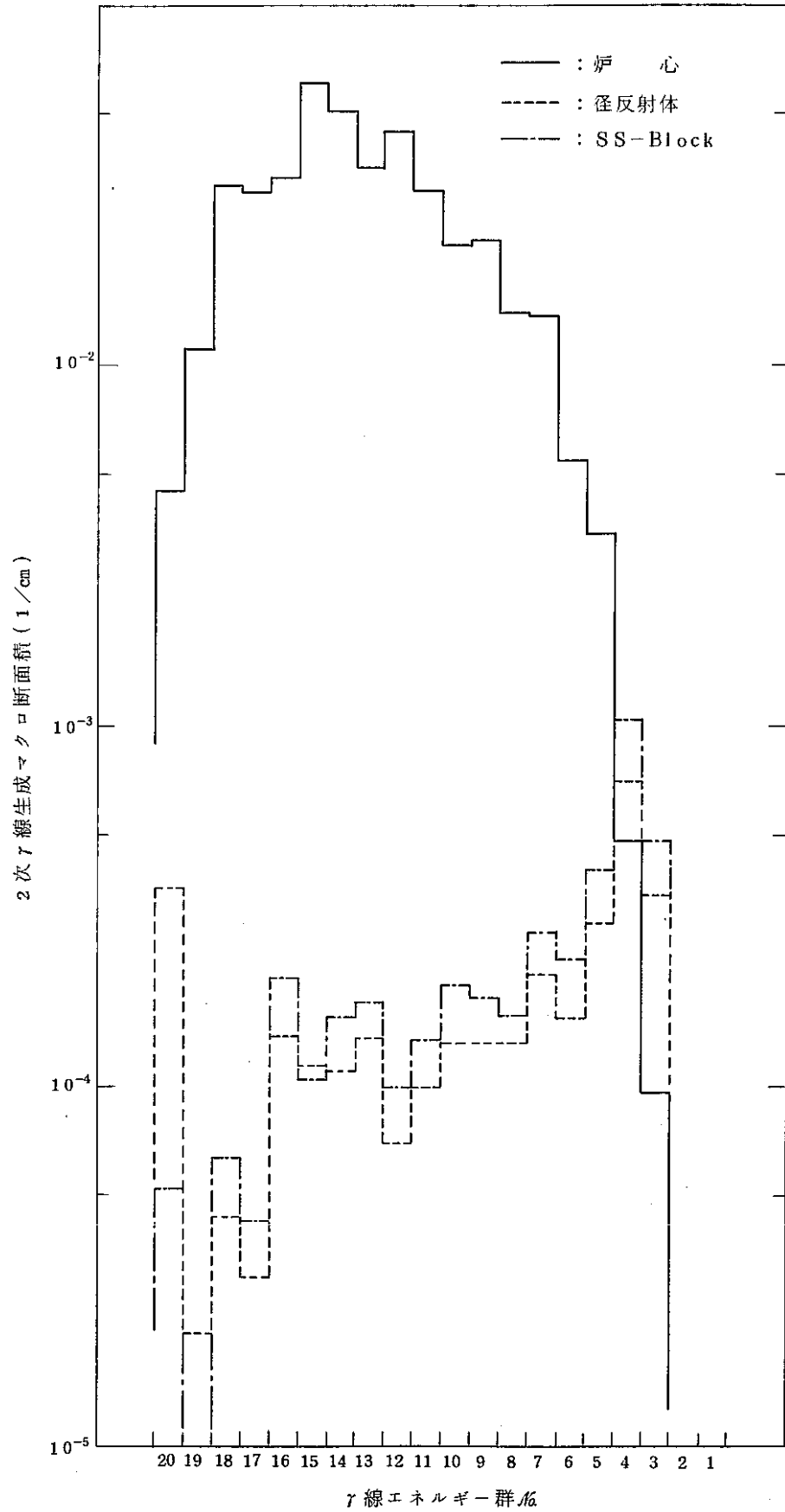


図 3.10 (f) FCA X-2 集合体の 2 次ガンマ線生成マクロ断面積 (中性子第 6 群)

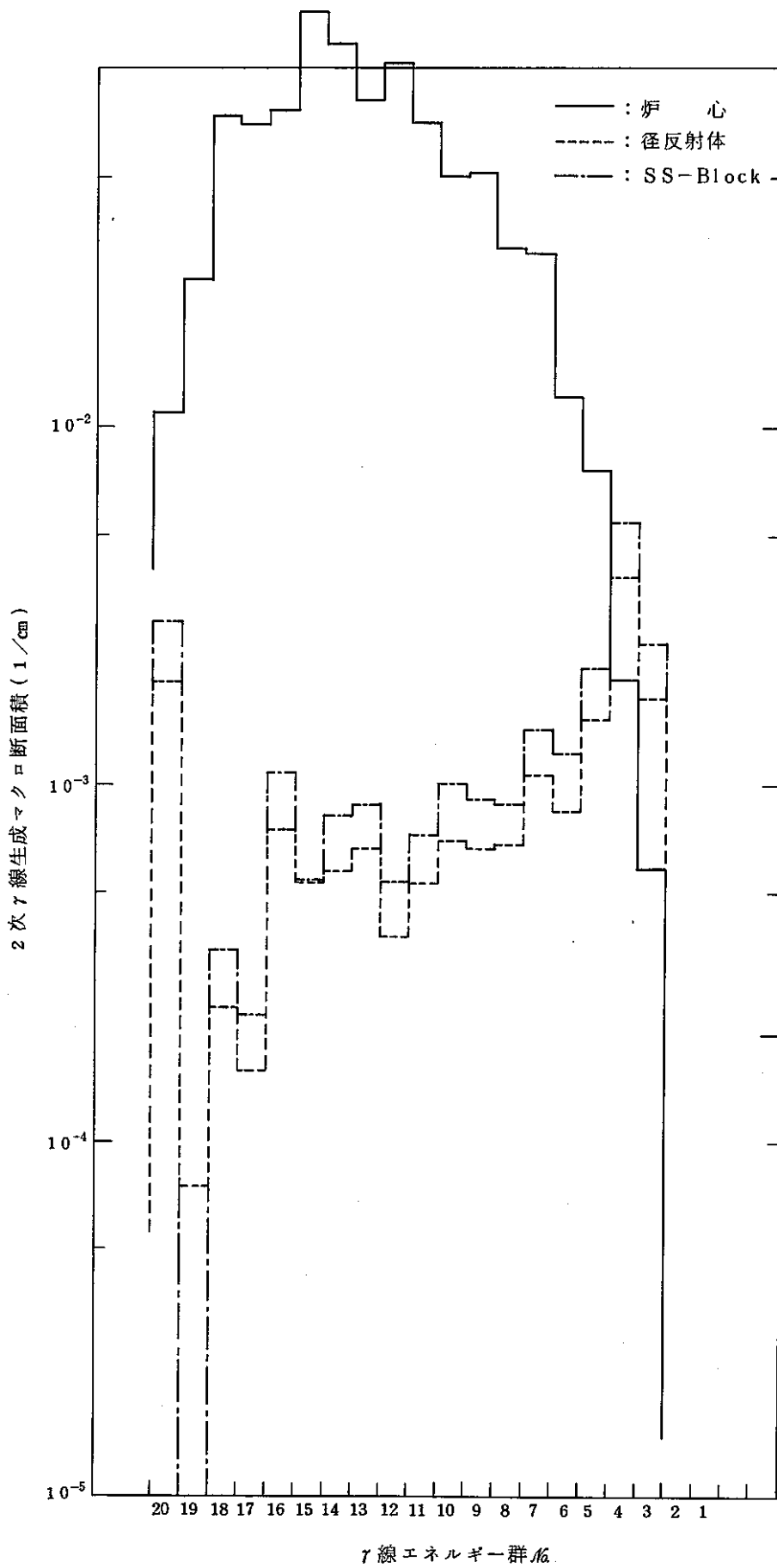


図 3.10 (g) FCA X-2 集合体の 2 次ガンマ線生成マクロ断面積 (中性子第 7 群)

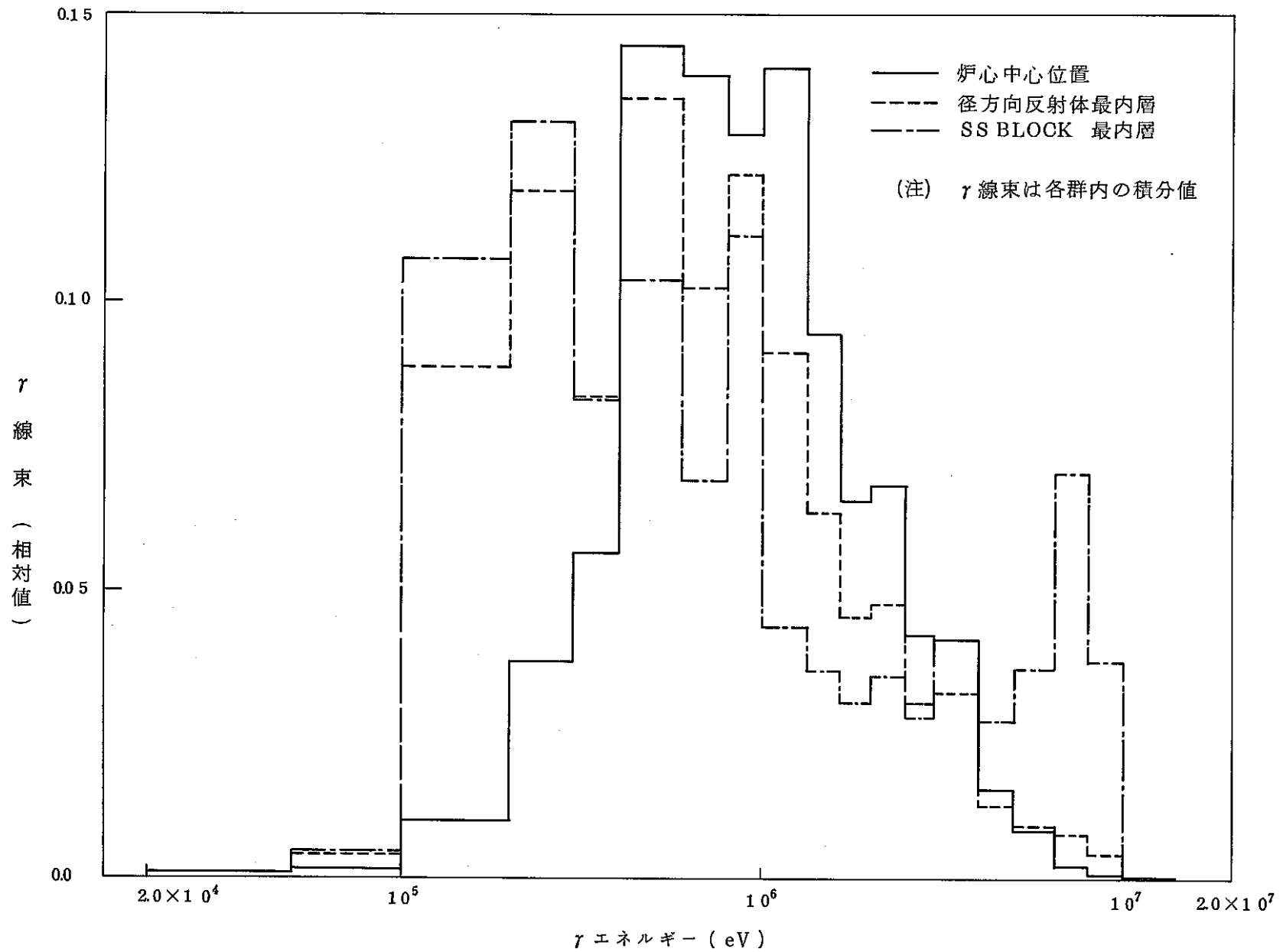


図 3.1.1 FCA X-2 集合体のガンマ線束スペクトル (RZ 計算)

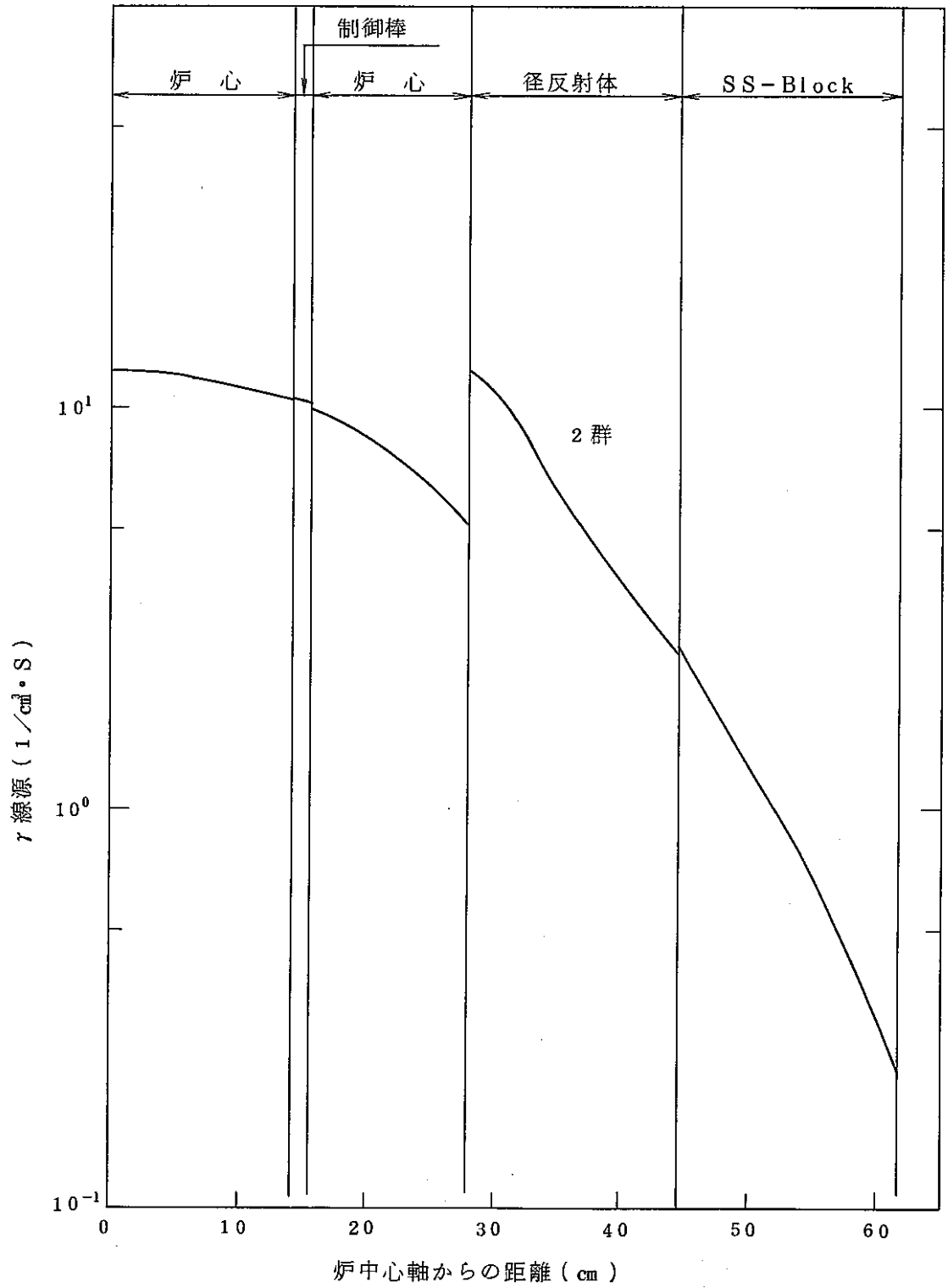


図 3.12(a) FCA X-2 集合体の 2 次ガンマ線源径方向分布
(炉心中心面, RZ 計算)

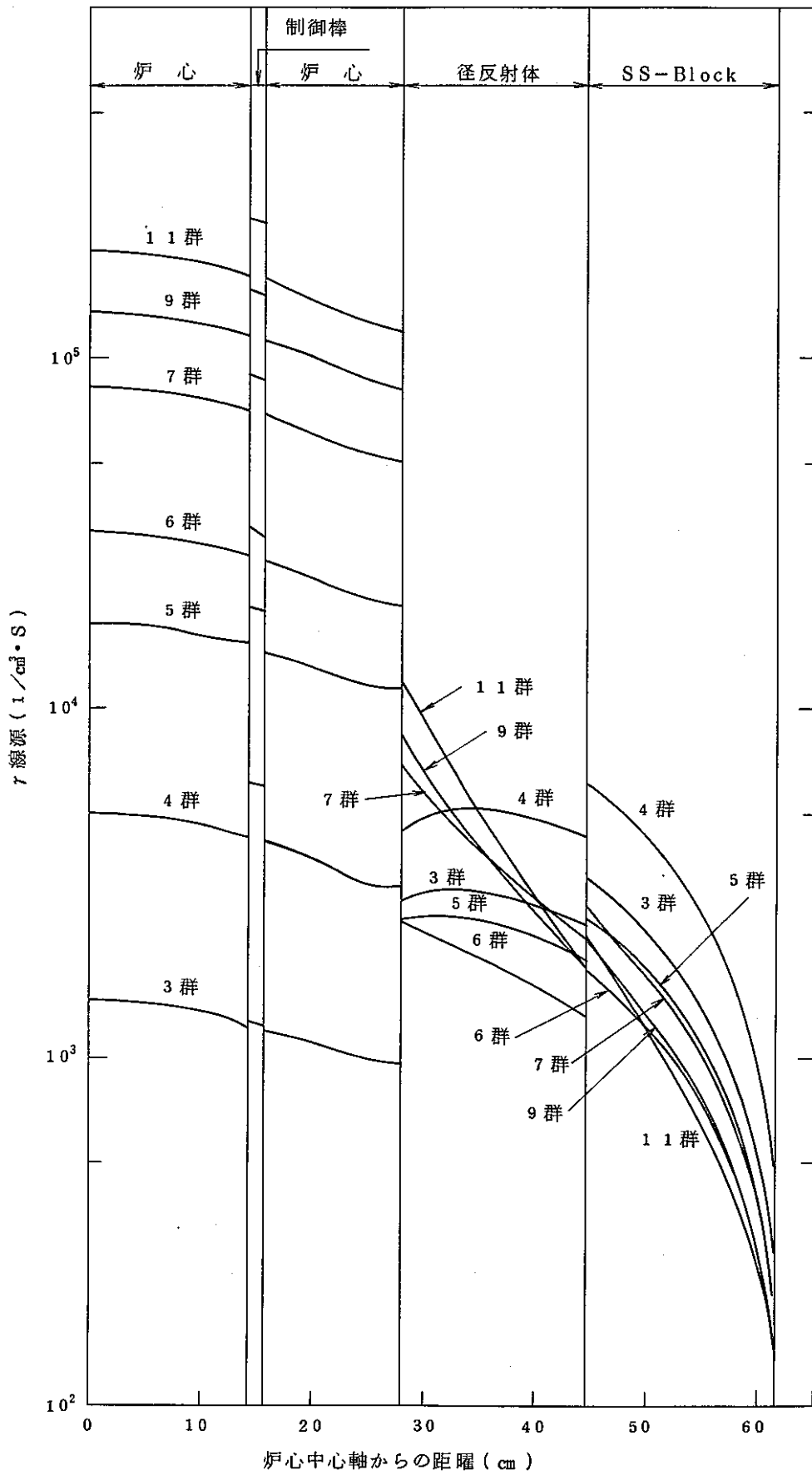


図 3.1 2 (b) FCA X-2 集合体の 2 次ガンマ線径方向分布
(炉心中心面, RZ 計算)

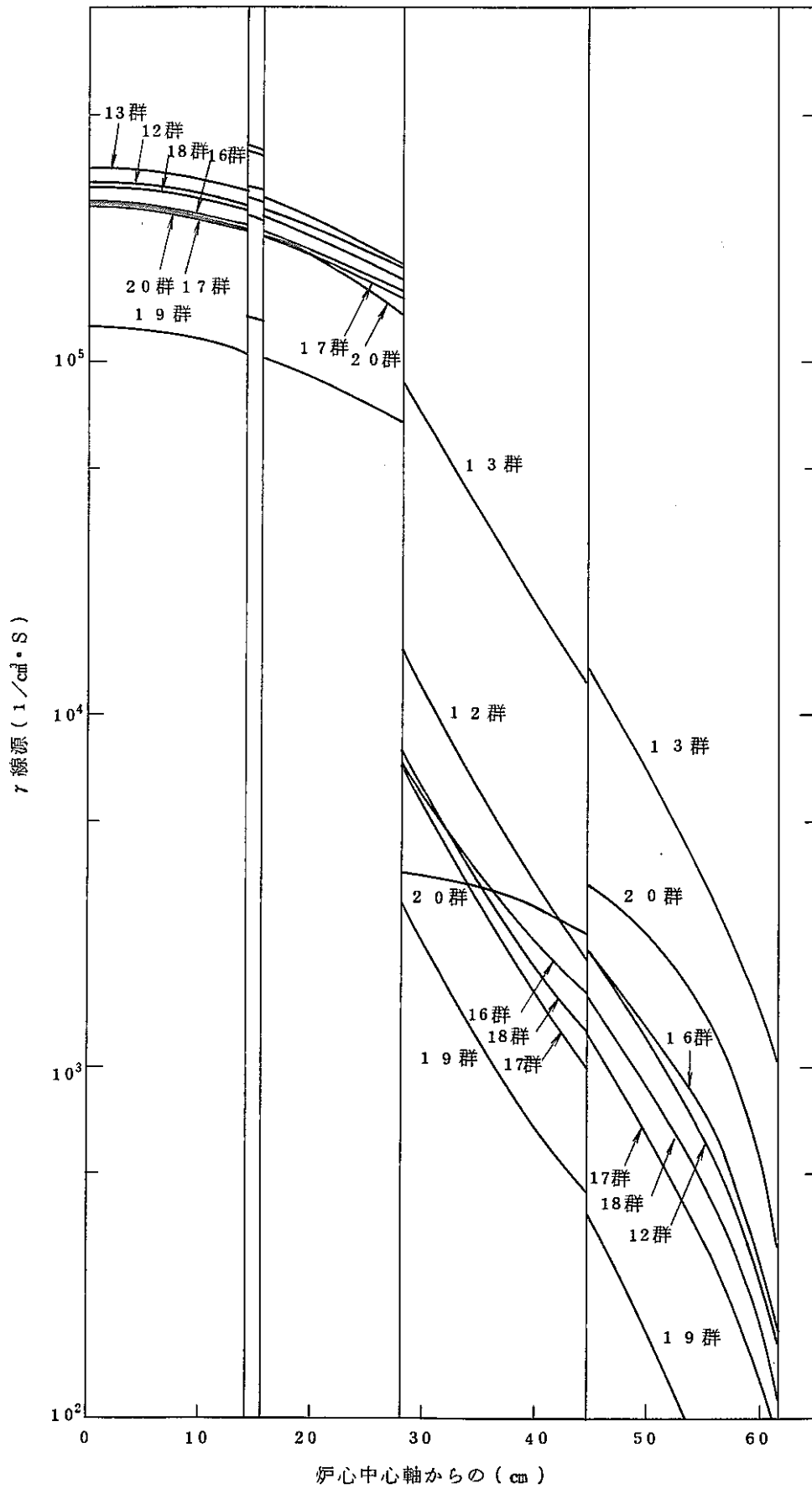


図 3.1 2 (c) FCA X-2 集合体の 2 次ガンマ線径方向分布
(炉心中心面上 R Z 計算)

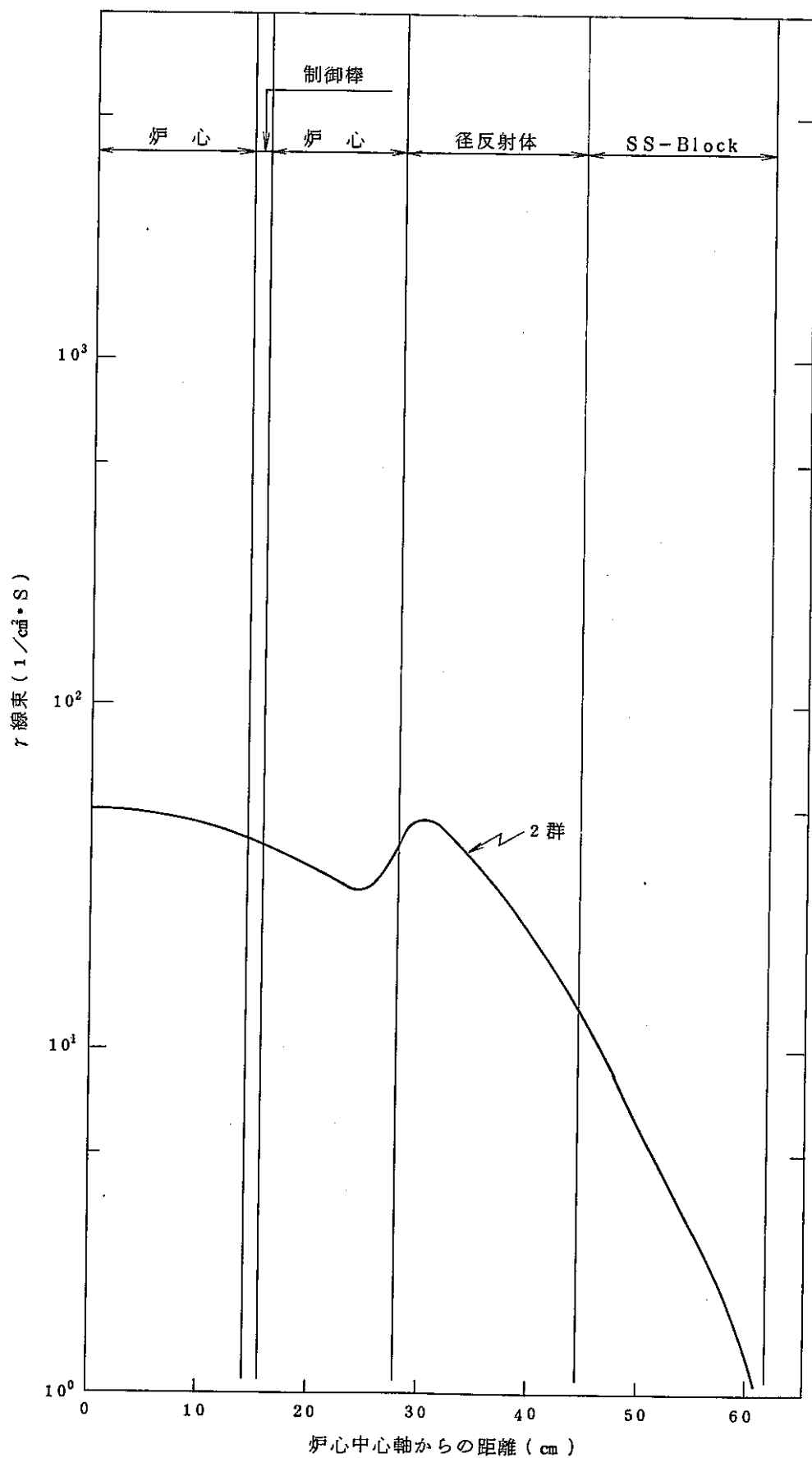


図 3.1 3(a) FCA X-2 集合体のガンマ線束の径方向分布
(炉心中心面上RZ計算)

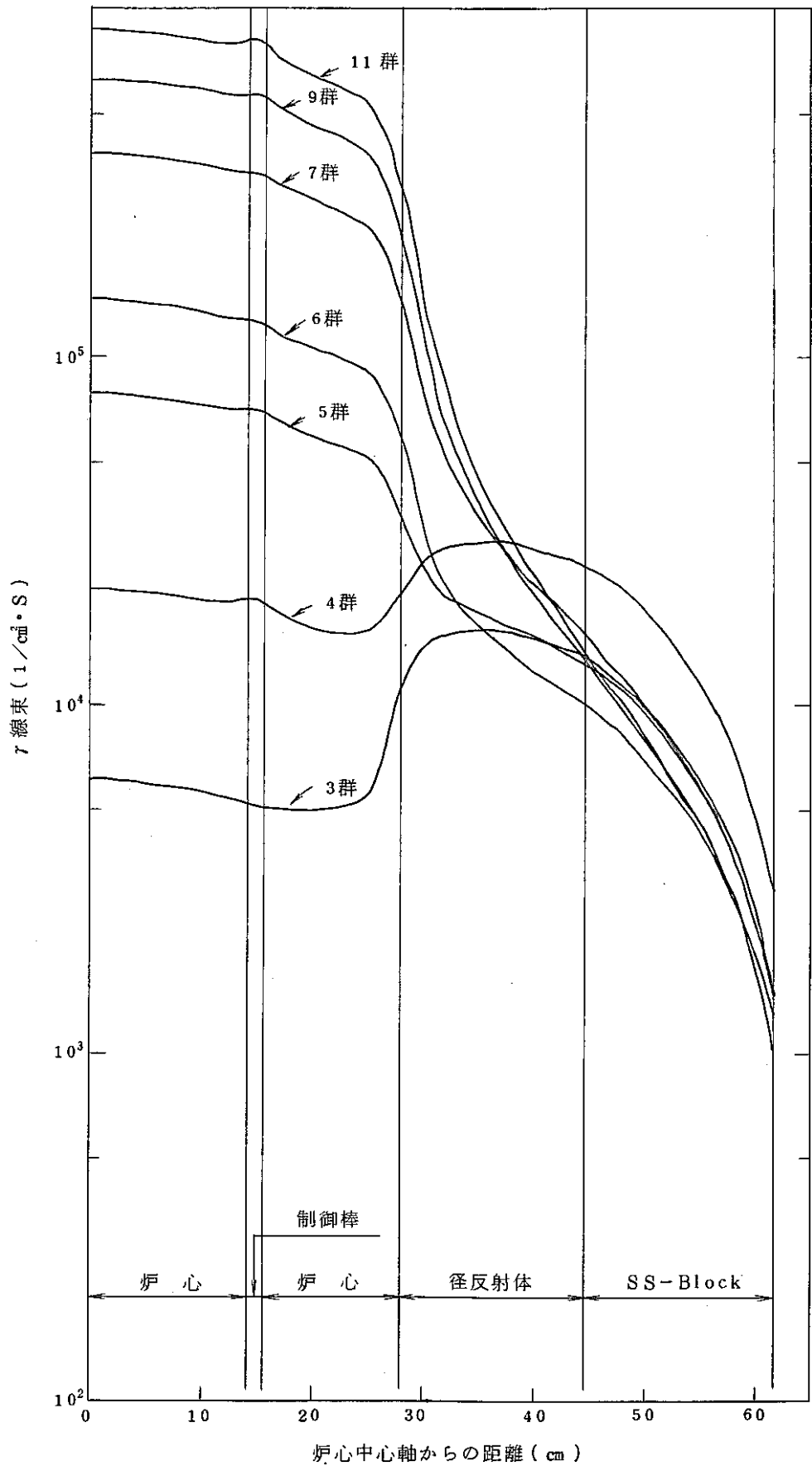


図 3.1 3 (b) FCA X-2 集合体のガンマ線束の径方向分布
 (炉心中心面上RZ計算)

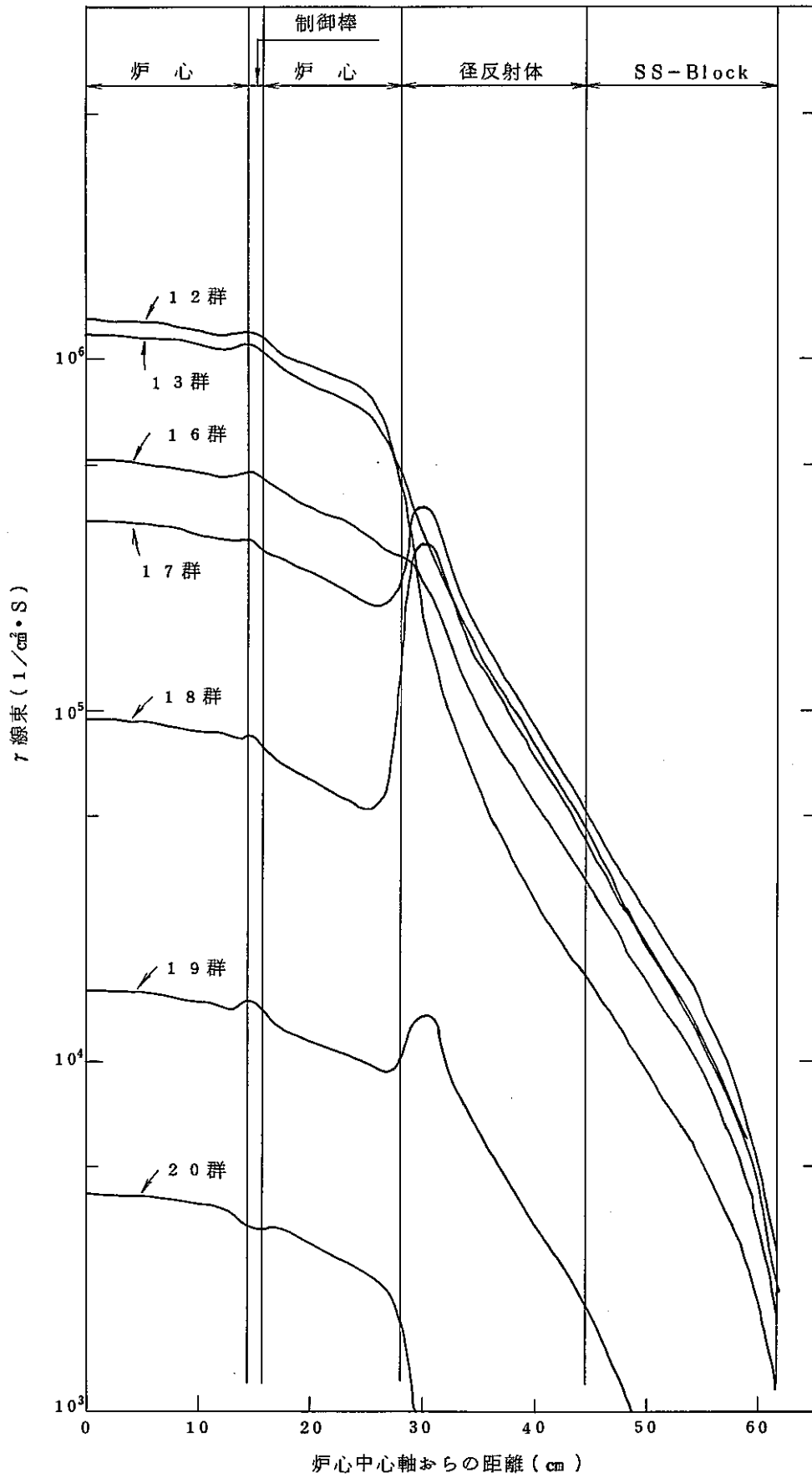


図 3.1 3 (b) FCA X-2 集合体のガンマ線束の径方向分布
(炉心中心面上RZ計算)

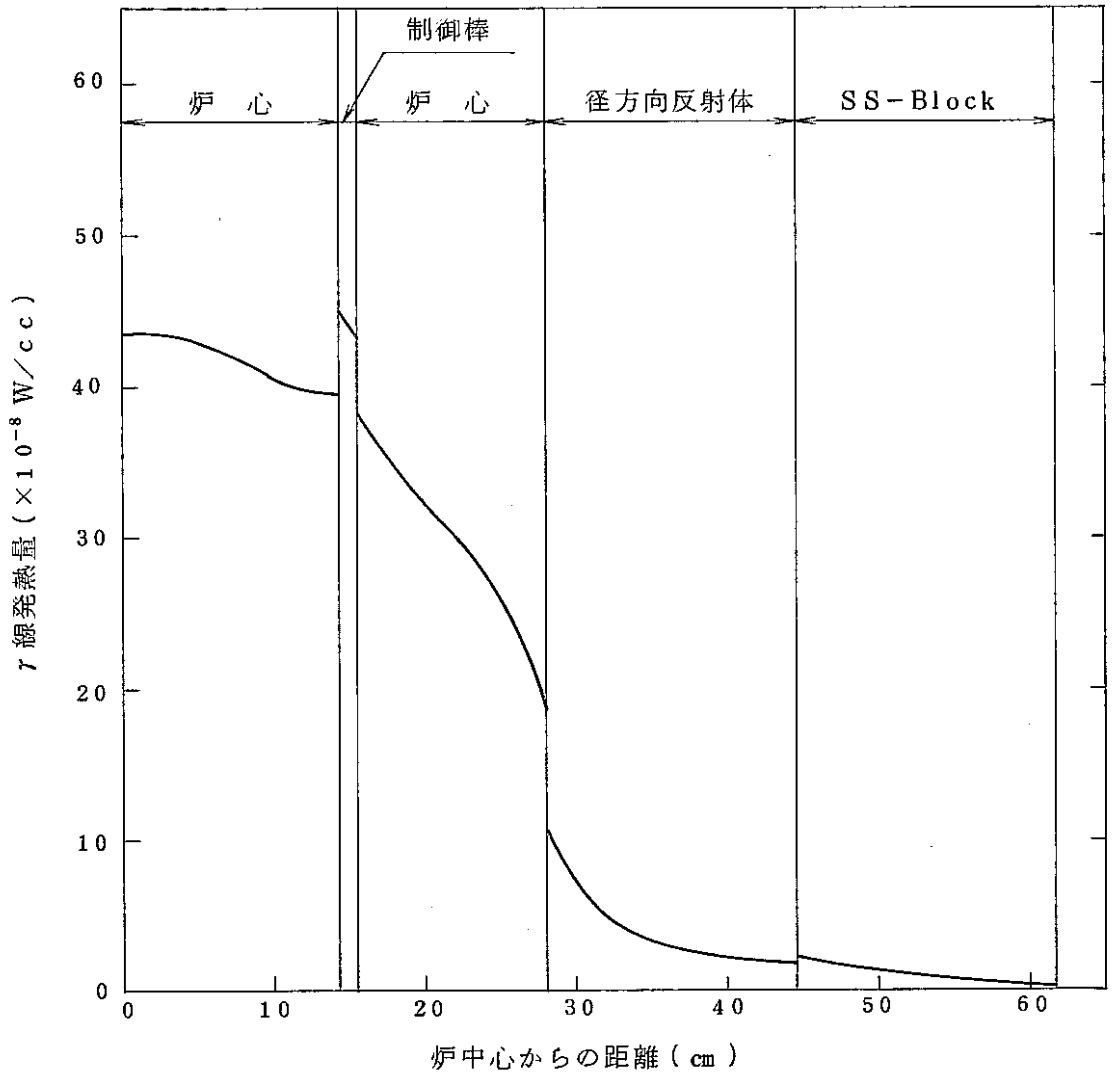


図 3.1 4 FCA X-2 集合体のガンマ線発熱径方向分布 (炉心中心面, R Z 計算)
核分裂による炉出力 0.5 W 時

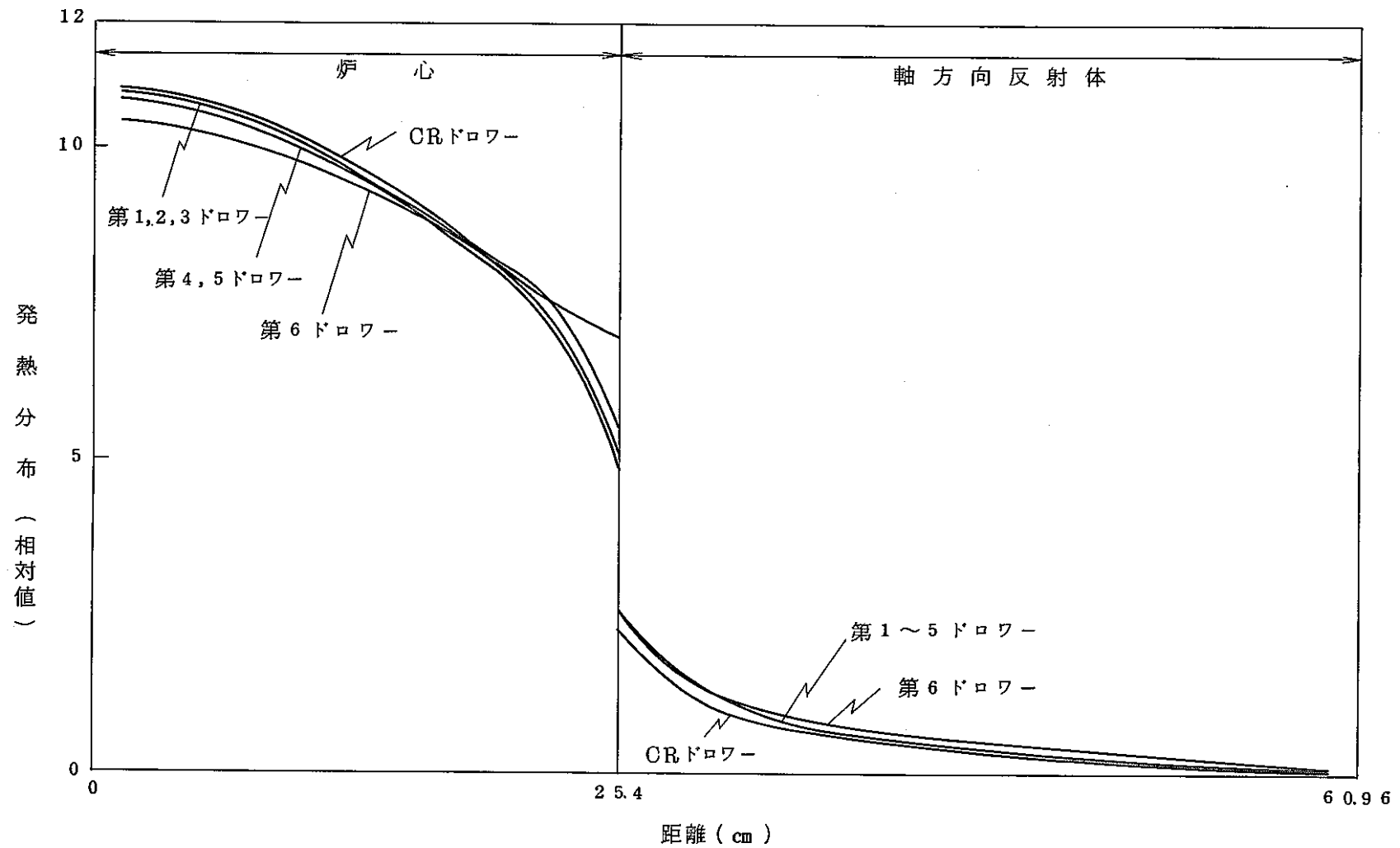


図 3.15(a) FCA X-2 集合体のガンマ線発熱軸方向分布 (炉心部, RZ部)

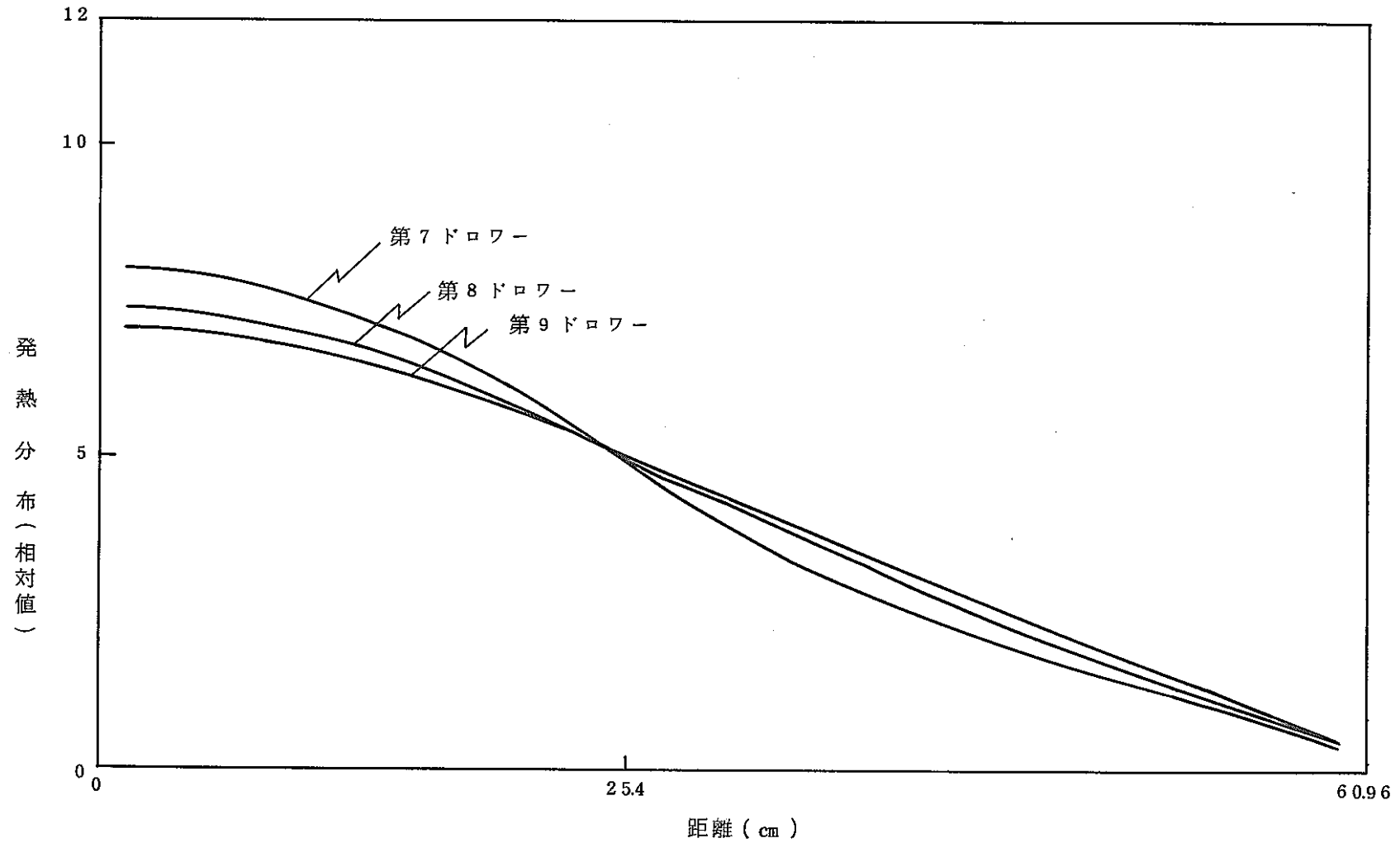


図 3.15(b) FCA X-2 集合体のガンマ線発熱軸方向分布 (径反射体部, RZ 計算)

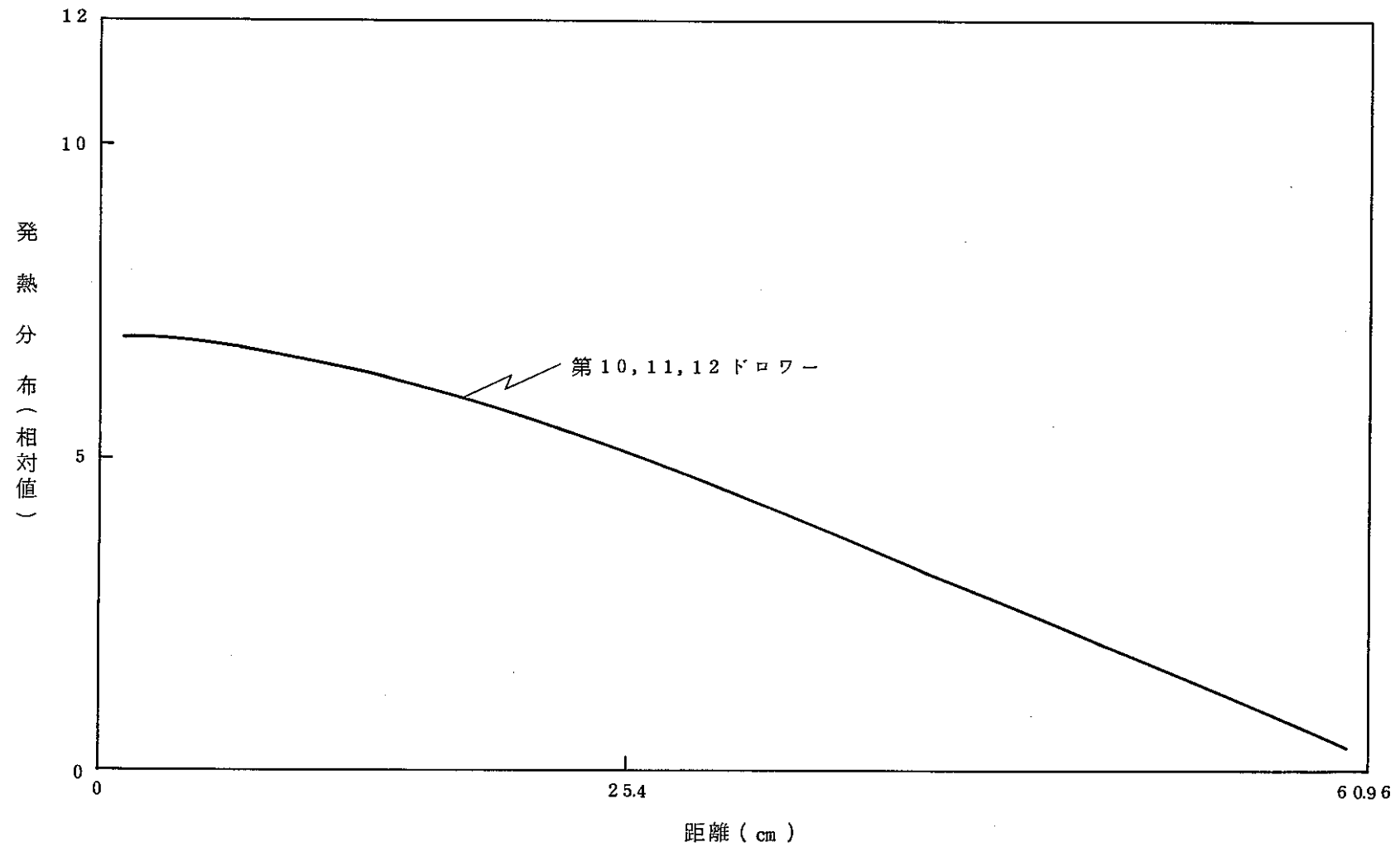


図 3.1 5(c) FCA X-2 集合体のガンマ線発熱軸方向分布(SS-BLOCK部, RZ計算)

3.2.2 X Y 計算結果

図 3.1.6 に X Y 計算によるガンマ線発熱密度の平面内分布を示す。同図は、1 ドロワー (5.52 × 5.52 cm) を 4 メッシュ (1 メッシュ 2.76 cm) に切つて解析した結果であり、炉心高さ部の軸方向平均密度を示すものである。

図 3.1.6 からわかるように、X Y 計算でも R Z 計算と同様の傾向が見られる。

3.2.3 R Z 計算と X Y 計算の組合わせ結果

R Z 計算と X Y 計算結果を組合わせて、実測点のある位置でのガンマ線発熱密度 (核分裂による発熱を 0.5 W に規格化した時のガンマ線発熱密度) を求めた。算出方法を以下に示す。

- (i) X Y 計算結果より、炉心高さ分の単位面積当りの出力割合 (w) を求める。
- (ii) 上記出力割合 w に R Z 計算で求めた炉心部、径反射体部、SS-Block 部の炉心高さ分の出力 (P) を乗じ、炉心高さ分の単位面積当りの出力絶対値 (p) を求める。

$$\text{ここで } P = 1.095 \times 10^{-2} \text{ W (1/4 炉心)}$$

- (iii) 上記出力絶対値 (p) を炉心高さ H (5.08 cm) で割り、炉心部出力軸方向ピーキング係数 (PF, 表 3.4 参照) を乗じ、各ドロワー内の炉心中心面での発熱密度を求める。なお、実測点のある位置は、炉心対角線上の炉心中心ドロワーから径方向 1 列の、ほぼ炉心中心面上である。

以上の方法により求めた結果を表 3.5, 図 3.1.7 に示す。実測値との比較は、上記結果をさらに ^{237}Np の核分裂率で規格することにより行う。

3.3 実測値との比較

以下に実測値の概要、3.2 節で述べた測定結果との比較結果について述べる。

3.3.1 実測値の概要⁽¹⁾

測定は、 ^7LiF ($Z_{\text{eff}}=8.2$), $\text{CaSO}_4 + ^7\text{LiF}$ ($Z_{\text{eff}}=12.7$), BaSO_4 ($Z_{\text{eff}}=45.5$) の 3 種の TLD (熱蛍光線量計) を用いて行われた。ガンマ線吸収量 (= 発熱量) は、上記 3 種の TLD の線量値を用いて、炉心領域 ($Z_{\text{eff}}=73.7$) では Z_{eff} の外挿により、反射体、SS-Block (Z_{eff} は各々 25.5, 25.9) では、 Z_{eff} の内挿により求められている。

上記結果は、SS-Block 中におかれた ^{237}Np モニター計数値で規格化され、さ

らに計算値との比較用に上記計数値で規格化された炉中心での ^{237}Np 核分裂率で割っている(さらに単位は erg/g から J/cm^3 に変換されている)。この結果を表3.6に示す。同表からわかるように、実測値の精度は、炉心部で+50%,-30%、反射体、SS-Blockで±17%である。このように、炉心部の精度が悪いのは、上記の如く、炉心部での吸収線量は、 Z_{eff} に関する外挿法により求められているためである。

なお、上記実測値にはTLDの中性子に対する感度も含まれている。

3.3.2 実測値との比較結果

実測値は、SS-Block中におかれた ^{237}Np モニターで規格化したガンマ線吸収量をさらに炉心中心位置における ^{237}Np の核分裂率^(*)(上記モニター計数率で規格化)で割ることにより、ガンマ線吸収量を規格化している⁽¹⁾したがって、上記規格化されたガンマ線吸収量は、炉心中心における ^{237}Np の1核分裂当りの吸収量である。ところが、 ^{237}Np の核分裂率が、炉心中心においた ^{237}Np 核分裂検出器内の全核分裂率なのか、1個の ^{237}Np 原子の核分裂率なのかは、参考文献に明記されていない。しかし、下記脚注に記したSS-Block中の ^{237}Np モニター1カウント当りの ^{237}Np の核分裂率の値のオーダーから、炉中心にある1個の ^{237}Np 原子の核分裂率と判断した。

そこで、解析値と実測値を比較する際には、表3.5あるいは図3.17に示したガンマ線の発熱量を炉中心での1個の ^{237}Np 原子の核分裂率で割った。以下に、結果を順を追って示す。

(i) ^{237}Np の核分裂率

炉中心に置かれた ^{237}Np 核分裂検出器内の ^{237}Np の原子数を以下に示す(原子数そのものは計算に使用しない)。

^{237}Np 原子数 ; 1.42×10^{18}
不純物(Pu) ; 0.51%

上記のようにPuが不純物として0.51%含まれている。したがって、測定で得られた ^{237}Np の核分裂数にはPuの核分裂も含まれている。したがって、 ^{237}Np の

(*) : 参考文献(1)によるとこの値は 0.4434×10^{-18} である。

核分裂の算出の際には、このPuの効果も入れる。ただし、このPuの組成が不明であるため、全て ^{239}Pu として計算した。

計算の際には使用した核分裂断面積は、 ^{237}Np については70群無限稀釈断面積を7群に縮約したもの、 ^{239}Pu については2章で述べた7群断面積である。

以上の方法により求めた核分裂による発熱量が0.5Wの時の中性子束レベルでの炉中心にある ^{237}Np 原子1個の核分裂率は以下のとおりである。

炉中心にある ^{237}Np 原子1個の核分裂率： $2.05 \times 10^{-17} \text{ S}^{-1} \cdot \text{atom}^{-1}$ (Puの効果含む)

なお、表3.7には上記数値を得たバックデータを示した。

(ii) ^{237}Np 1核分裂当りのガンマ線発熱量

上記核分裂率で規格化したガンマ線発熱量を表3.8ならびに図3.1.8に実測値と比較して示した。

(iii) 実測値との比較ならびに検討

表3.8および図3.1.8に実測値と解析値を併せて示したが、同図、表によると

- 炉中心部では解析値は実測値より40~70%小さく、炉心周辺部に行く程、解析値と実測値の差は大きくなる。
- 径反射体部では、解析値と実測値はほぼ一致する。
- SS-Block部では、内側ほど解析値と実測値との一致度は良いが、外側に行くに従がい、解析値は実測値より小さくなる(最外周ドロワーで約40%過小評価、これは集合体角部のマトリックスを解析上考慮していないことによると考えられる)。

本解析値は、参考文献(1)に記載の解析値(*)と比較すると、40~70%本解析値の方が大きく、これは核分裂ガンマ線収率に遅発ガンマ線の効果を考慮したことによると考えられる。したがって、本解析値は、参考文献(1)に記載の解析値に比べ実測値に合う方向にあり、特に径反射体、SS-Blockにおいては上述の如く本解析値と実測値と良く合うという結果となった。しかし、炉中心部では本解析値は依然40~70%過小評価であり、しかも炉心部における発熱量径方向分布が異な

(*)：R1次元計算に基づく。

っている。即ち、本解析値は炉心周辺部へ行くにしたがい発熱量は減少（最外周位置発熱密度／炉中心発熱密度 $\sim 1/2$ ）するのに対し、実測値はほぼ一様の分布を示している。中性子に対するTLDの感度が上記相違の一因をなしていると考えられるが、それ以外に下記点も考えられる。即ち、ガンマ線の検出器であるTLDがPu燃料中に含まれる ^{241}Am からの60 KeVのガンマ線の影響が実測値に含まれているということである。

以上の結果から、少なくとも反射体においては、RADHAT-V3の発熱断面積の計算法における問題点^(**)を考慮してもガンマ線発熱量は本解析手法で妥当な解が得られるという見通しが得られたので、本解析手法を「常陽」MK-II炉心に適用する。

第4章においては、その結果の詳細を述べる。

(**): 反射体部では約5%の過小評価

表 3.5 r 線による径方向発熱分布 (R Z 計算と X Y 計算の組合せ)

- 炉中心面上
- 核分裂による出力を 0.5 W に規格化した時の
 r 線による発熱密度

炉心高さ部全 r 線発熱量 $P = 1.09499 \times 10^{-2} \text{ W (1/4 炉心)}$

ド ロ ワ ー No.	メ ッ シ ュ No.	炉心高さ分の単位	炉心高さ分の単位面	炉心高さ部軸方向	炉心中心面上での
		面積当りの出力割合 w	積当りの出力(W/cm ²) $p = w \times P$	平均出力密度(W/a) $q = p / H^{(*)}$	出力密度 (W/cc) $q^{max} = q \times PF^{(**)}$
1	1	1.7349-3	1.8997-5	3.7396-7	4.4329-7
2	2	1.7147-3	1.8776-5	3.6961-7	4.3777-7
	3	1.6777-3	1.8371-5	3.6163-7	4.2832-7
3	4	1.6219-3	1.7759-5	3.4959-7	4.1322-7
	5	1.5498-3	1.6971-5	3.3407-7	3.9487-7
4	6	1.4602-3	1.5989-5	3.1474-7	3.6951-7
	7	1.3680-3	1.4980-5	2.9488-7	3.4619-7
5	8	1.2563-3	1.3757-5	2.7080-7	3.1537-7
	9	1.1531-3	1.2626-5	2.4855-7	2.8946-7
6	10	1.0437-3	1.1428-5	2.2497-7	2.5858-7
	11	8.3077-4	9.0969-6	1.7907-7	2.0583-7
7	12	3.0770-4	3.3693-6	6.6325-8	7.6201-8
	13	1.7312-4	1.8956-6	3.7315-8	4.2872-8
8	14	1.2468-4	1.3652-6	2.6875-8	3.0336-8
	15	9.6957-5	1.0617-6	2.0899-8	2.3591-8
9	16	7.8421-5	8.5870-7	1.6903-8	1.8851-8
	17	6.5020-5	7.1196-7	1.4015-8	1.5630-8
10	18	6.9966-5	7.6612-7	1.5081-8	1.6613-8
	19	5.4700-5	5.9896-7	1.1790-8	1.2988-8
11	20	4.1698-5	4.5659-7	8.9880-9	9.8949-9
	21	3.0311-5	3.3190-7	6.5334-9	7.1927-9
12	22	2.0009-5	2.1909-7	4.3128-9	4.7437-9
	23	1.0405-5	1.1394-7	2.2428-9	2.4669-9

(*) H : 5 0.8cm

(**) PF : 炉心部軸方向ピーキングファクター

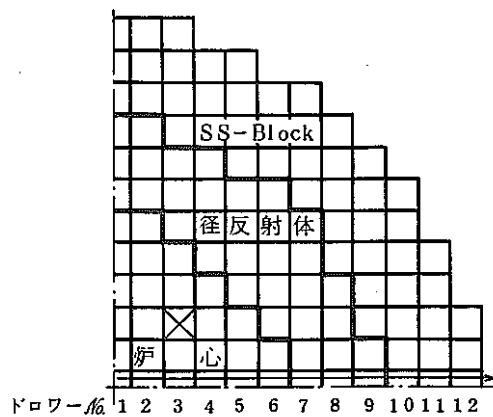
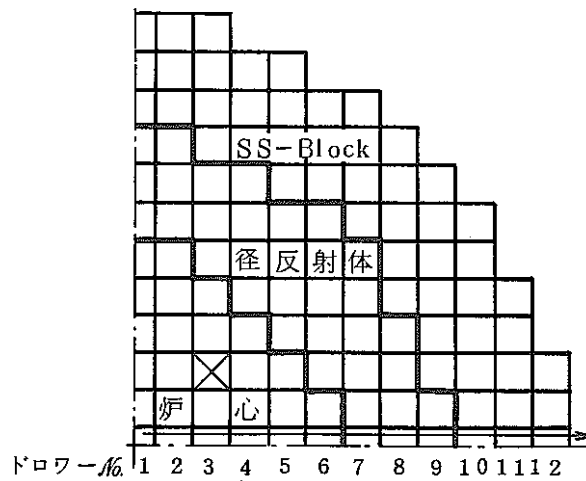


表 3.6 吸収線量実測値 (参考文献(1)より引用)

領域名	ドロー-№*	吸収線量** (Joule/cm ³)	誤差 (%)
炉心	1	3.34 ± 1.0	± 3.0
	2	3.72 ± 1.0	+ 5.0, - 4.0
	3	—	—
	4	3.25 ± 1.0	+ 4.7, - 3.2
	5	—	—
	6	3.38 ± 1.0	+ 4.5, - 2.9
径反射体	7	2.56 ± 0.9	± 1.7
	8	1.30 ± 0.9	± 1.7
	9	8.27 ± 0.8	± 1.7
SS-Block	10	7.41 ± 0.8	± 1.7
	11	4.75 ± 0.8	± 1.7
	12	2.71 ± 0.8	± 1.7

* : 下図参照



** : 炉心中心での²³⁷Npの核分裂率で規格化

表 3.7 炉中心における²³⁷Np 原子 1 個の核分裂率

核分裂による発熱量が 0.5 W の時の中性子束レベル
での核分裂率

原子数割合：²³⁷Np：99.49%

Pu：0.51% (全て²³⁹Puとする)

群 №	²³⁷ Np の核分裂 マイクロ断面積(*)	²³⁹ Pu の核分裂 マイクロ断面積(*)	中性子束 (1/cm ² ・S)	核分裂率 (1/S・atom)
1	1.6438	1.9747	5.6608E+6	9.3148E-18
2	1.0192	1.7149	1.0112E+7	1.0342E-17
3	4.3998E-2	1.5565	1.2205E+7	6.3114E-19
4	1.1645E-2	1.6459	8.9372E+6	1.7857E-19
5	1.3749E-2	2.5725	1.1359E+6	3.0441E-20
6	3.6869E-2	7.3082	1.0748E+5	7.9485E-21
7	2.8473E-2	17.368	1.9153E+3	2.2390E-22
合		計	3.8160E+7	2.0505E-17

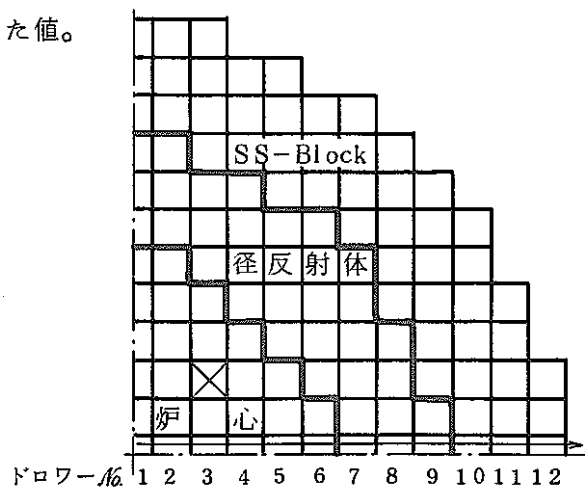
(*) 単位：barn

表 3.8 ^{237}Np 原子 1 個当りの核分裂率で規格化したガンマ線発熱量

領域	ドロー-(**) №	メッシュ №	規格化ガンマ線 発熱量 J/cm^3	(*)同 左(C) (ドロー-中心)	同 左(E) (実測値)	$\frac{C}{E}$ %
炉 心	1	1	$2.16 \text{E}+10$	$2.16 \text{E}+10$	$3.34 \text{E}+10$	65
	2	2	$2.13 \text{E}+10$	$2.11 \text{E}+10$	$3.72 \text{E}+10$	57
		3	$2.09 \text{E}+10$			
	3	4	$2.02 \text{E}+10$	$1.98 \text{E}+10$	—	—
		5	$1.93 \text{E}+10$			
	4	6	$1.80 \text{E}+10$	$1.75 \text{E}+10$	$3.25 \text{E}+10$	54
		7	$1.69 \text{E}+10$			
	5	8	$1.54 \text{E}+10$	$1.48 \text{E}+10$	—	—
		9	$1.41 \text{E}+10$			
	6	10	$1.26 \text{E}+10$	$1.13 \text{E}+10$	$3.38 \text{E}+10$	33
		11	$1.00 \text{E}+10$			
	径 反 射 体	7	12	$3.72 \text{E}+9$	$2.65 \text{E}+9$	$2.56 \text{E}+9$
13			$2.09 \text{E}+9$			
8		14	$1.48 \text{E}+9$	$1.32 \text{E}+9$	$1.30 \text{E}+9$	102
		15	$1.15 \text{E}+9$			
9		16	$9.19 \text{E}+8$	$8.30 \text{E}+8$	$8.27 \text{E}+8$	100
		17	$7.62 \text{E}+8$			
SS ブ ロ ック	10	18	$8.10 \text{E}+8$	$7.20 \text{E}+8$	$7.41 \text{E}+8$	97
		19	$6.33 \text{E}+8$			
	11	20	$4.83 \text{E}+8$	$4.15 \text{E}+8$	$4.75 \text{E}+8$	87
		21	$3.51 \text{E}+8$			
	12	22	$2.31 \text{E}+8$	$1.72 \text{E}+8$	$2.71 \text{E}+8$	63
		23	$1.20 \text{E}+8$			

(*) : 図 3.18 より読み取った値。

(**) : 下図参照。



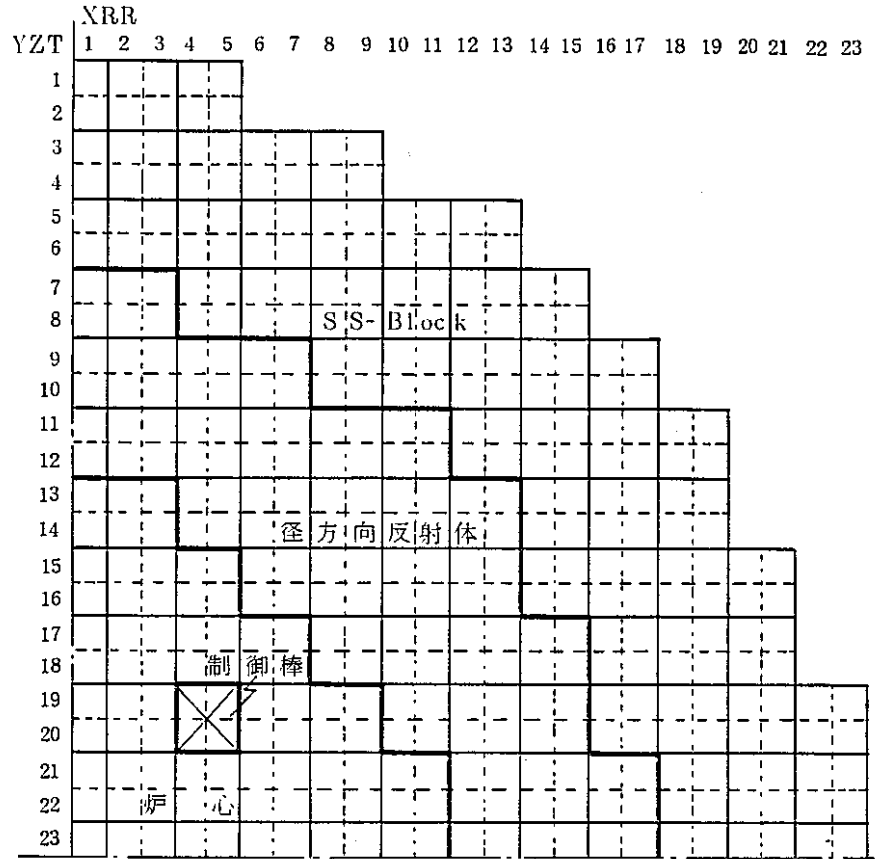
YZT	XRR 1 9
1	9.11337E-08
2	1.75244E-08
3	2.65476E-09
4	3.65212E-08
5	4.79092E-08
6	6.12812E-08
7	5.69509E-08
8	6.86913E-08
9	8.49473E-08
10	1.09034E-08
11	1.51467E-08
12	2.69582E-08
13	7.26864E-08
14	9.13345E-07
15	1.01003E-07
16	1.10036E-07
17	1.19822E-07
18	1.27892E-07
19	1.35744E-07
20	1.42054E-07
21	1.46947E-07
22	1.50188E-07
23	1.51955E-06

YZT	XRR 10 18
5	1.41146E-08
6	2.48118E-08
7	3.50461E-08
8	4.48435E-08
9	5.66906E-08
10	7.07265E-08
11	6.18177E-08
12	7.09403E-08
13	8.13790E-08
14	9.14945E-08
15	1.07869E-08
16	1.26810E-08
17	1.54881E-08
18	2.09625E-08
19	2.71088E-08
20	3.78839E-08
21	8.15849E-08
22	9.06893E-08
23	9.14135E-08

YZT	XRR 19
11	5.49948E-08
12	8.00956E-08
13	1.09646E-08
14	1.41074E-08
15	1.98214E-08 (W/cm)
16	2.51147E-08
17	2.99834E-08
18	3.42204E-08
19	3.78620E-08
20	4.23568E-08 (cm ²)
21	4.46886E-08
22	4.66491E-08
23	4.79094E-08

算)

(に対応) 単位: W/cc



1 ドロワー: 5.52 cm × 5.52 cm

4 メッシュ分割

1 メッシュ: 2.76 cm × 2.76 cm

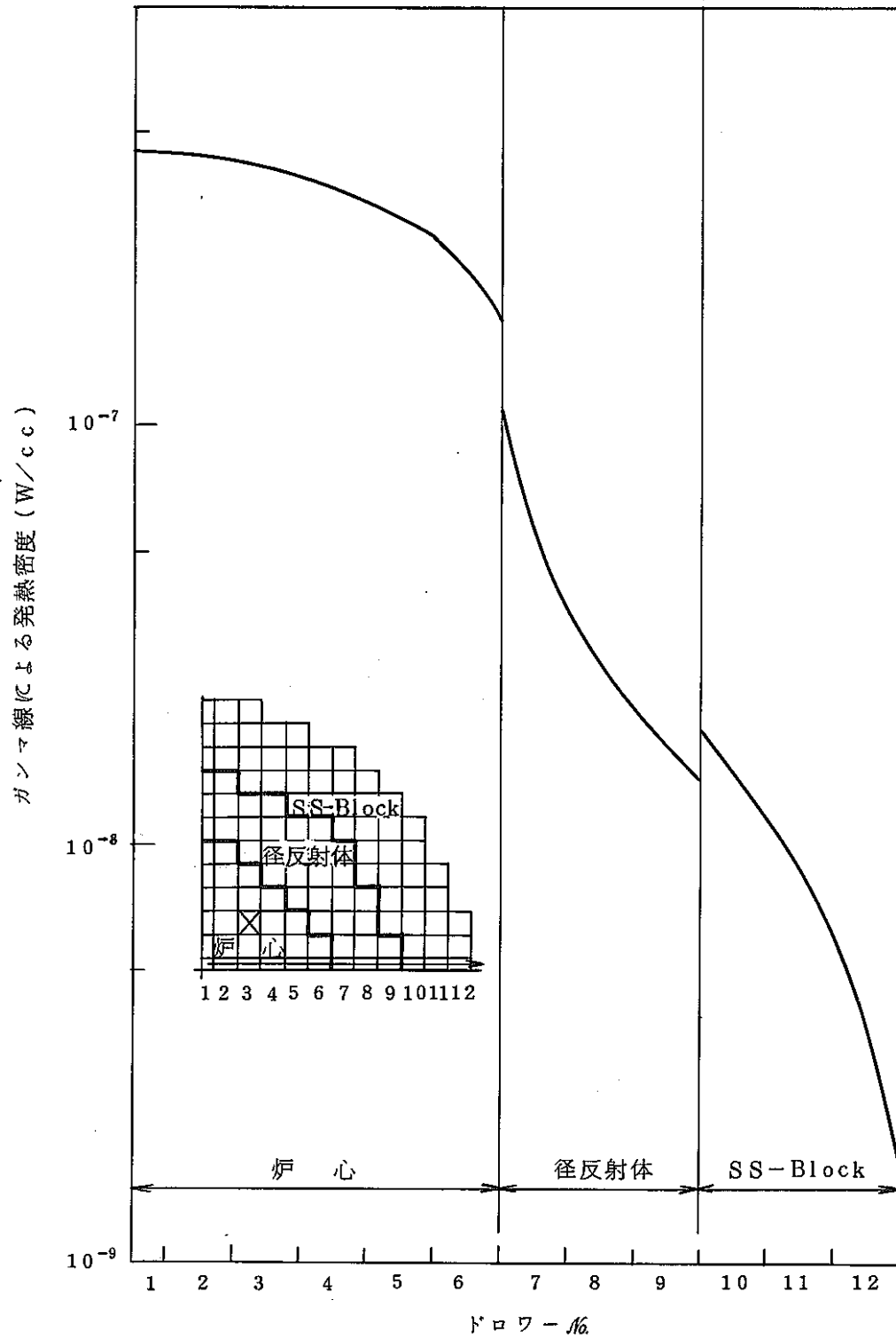


図 3.17 FCA X-2集合体のガンマ線による径方向発熱分布(RZ計算とXY計算の組合せ)

- 炉心中心面上
- 核分裂による出力を 0.5 W に規格化した時の r 線による発熱密度

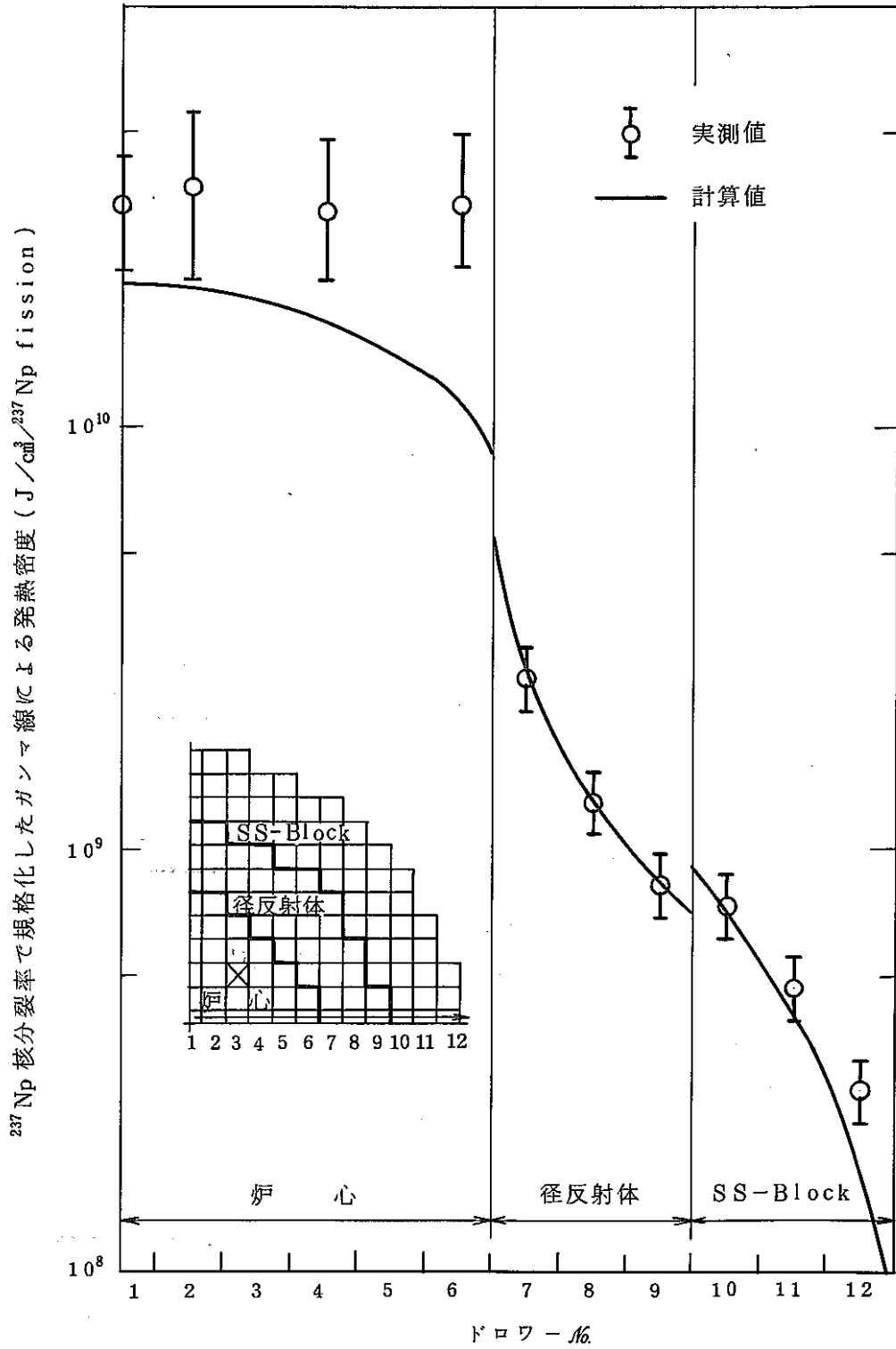


図 3.18 FCA X-2 集合体のガンマ線による径方向発熱分布
炉中心の ^{237}Np 原子1個の核分裂率で規格化

4. 「常陽」MK-II炉心第0サイクル体系におけるガンマ線発熱解析

3章で述べた手法と同一の手法により、「常陽」MK-II炉心の第0サイクル初期のガンマ線発熱解析を実施し、さらにその結果に基づき集合体出口冷却材温度解析、ラッパ管温度解析、炉心湾曲解析、ならびに湾曲反応度変化解析を実施した。上記解析項目のうち集合体出口冷却材温度については、実測値と比較した。

図4.1に上記解析の全体フローを示す。以下、解析モデル、解析手法、解析結果、集合体出口冷却材温度に関する解析値と実測値との比較結果の詳細を示す。

4.1. 解析モデル

本節では、ガンマ線発熱解析体系、ガンマ線発熱計算方法、実測値である集合体出口冷却材温度との比較方法について示す。

4.1.1 解析体系

RZ体系、XY体系を図2.7、図4.2に示す。2.2節で述べたように、解析体系は全系250°C時のものである(集合体配列ピッチ: 8.18162cm)。XY体系は図4.2に示したように、1/6回転対称体系とした。したがって、炉心第1列に装荷されているB型特殊燃料ならびに材料照射用反射体は考慮されない。これは、今回の解析が内側反射体のガンマ発熱に注目したものであることによるが、実測値と比較する集合体出口冷却材温度計算の際には、RZ計算で求めたB型特殊燃料あるいは材料照射用反射体のガンマ線発熱量を用いた。なお、XY体系のメッシュ分割は、1集合体6メッシュの三角メッシュとした。

次に、原子数密度については、既に表2.4に示した原子数密度を用いた。

4.1.2 ガンマ線発熱計算法

既に3.1.2項で述べたFCA X-2炉心のガンマ線発熱計算法と全く同じ方法を用いた。

即ち、 ガンマ線線源計算； 中性子拡散計算
 ガンマ線輸送計算； P₃S₆のSN計算

4.1.3 集合体出口冷却材温度の実測値との比較方法

今回の発熱解析の妥当性あるいは精度評価に利用できる実測値は、集合体出口冷却材温度である。そこで、今回の「常陽」MK-II炉心ガンマ線発熱解析結果を用いて、集合体出口冷却材温度解析を実施した。以下、集合体出口冷却材温度

解析に必要な集合体毎の発熱量構成法，使用した冷却材流量等について示す。

i) 集合体毎発熱量構成法

既に示した図 4.1 を用いて，本構成法について説明する。

集合体出口冷却材温度計算には，集合体 1 体毎の全発熱量と，発熱量軸方向分布^(*)を必要とする。以下に各々の計算法を示す。

a) 集合体 1 体毎の全発熱量

炉心燃料部では核分裂^(**)とガンマ線，反射体部ではガンマ線による発熱を考慮する必要がある。集合体毎の核分裂，ガンマ線各々の発熱量の算出方法は基本的には同じである。以下それを示す。

図 4.1 に示すように，発熱量絶対値は R Z 計算をベースとし，集合体毎の発熱量分布は X Y 計算をベースとし，R Z 計算と X Y 計算を組合わせて，集合体毎発熱量を求める。また，発熱量の規格化は，核分裂とガンマ線発熱量の合計が 100 MW となるように行う。

b) 発熱量軸方向分布

核分裂，ガンマ線発熱共に R Z 計算結果から求める。

即ち，核分裂，ガンマ線発熱各々の絶対値の軸方向分布を R Z 計算から求め，これを加え合わせることでより全発熱量の軸方向分布を得る。

ii) 出口温度計算用冷却材流量

集合体出口冷却材温度解析には動燃殿の委託により開発した HITETRAS コード⁽³⁾⁽⁴⁾を用いた。本コードに用いた集合体毎の冷却材流量，集合体間のギャップ流量，物性値を各々表 4.1，4.2，4.3 に示す。表 4.1 に示した集合体毎の冷却材流量は，動燃殿による実測値である。また，表 4.2 に示した集合体間ギャップ流量は参考文献(3)の Table 4.5 より引用した。

(*) 集合体間熱移行を考慮するためには，軸方向分布を必要とする。

(**) 核分裂に伴う核分裂片，β線，中性子による発熱

表 4.1 集合体毎冷却材流量 (第 0 サイクル)^(*1)

集合体種類		配分流量 (kg/s)
炉 心	第 0, 1 列	8.864
	2 列	8.392
	3 列	7.558
	4 列	6.857
	5 列	5.738
反 射 体	内 側	0.176
	外側(A)	0.178
	外側(B)	0.163 ^(*2) ₁
制 御 棒		3.330 ^(*3)
中 性 子 源		0.897
C M I R		1.124
B 型 特 燃		4.715

(*1) 実測値 (動燃殿御支給)

(*2) スリットありとなしの反射体の平均値

$$\frac{23 \times 0.174 + 25 \times 0.153}{23 + 25} = 0.163 \text{ (kg/s)}$$

(*3) 低圧プレナムから冷却材が供給される炉心構成要素についての
実測値と計算値の比を計算値に乗じて求めた。

表 4.2 集合体間のギャップにおける冷却材流量^(*1) (第 0 サイクル)

炉 心 内 位 置	ギャップ流量 (g/s)
炉心部	30.43
炉心-内側反射体境界	30.43
内側反射体部	30.43
内側-外側反射体境界	21.87
外側反射体部	13.30

(*1) 参考文献(3) Table 4.5より引用

表 4.3 集合体出口冷却材温度解析に使用した物性値

項 目	数 値	備 考
Na 比熱, $w \cdot sec / g \cdot ^\circ C$	1.2 5 9 6	ANL-7323 500 $^\circ C$ 時の値を使用
Na 密度 g / cm^3	0.8 3 2 3	同 上
Na 熱伝導率 $w / cm \cdot ^\circ C$	0.6 6 8 3	同 上
構造材 熱伝導率 $w / cm \cdot ^\circ C$	0.1 9 7 9	WARD-4135 500 $^\circ C$ 時の値を使用

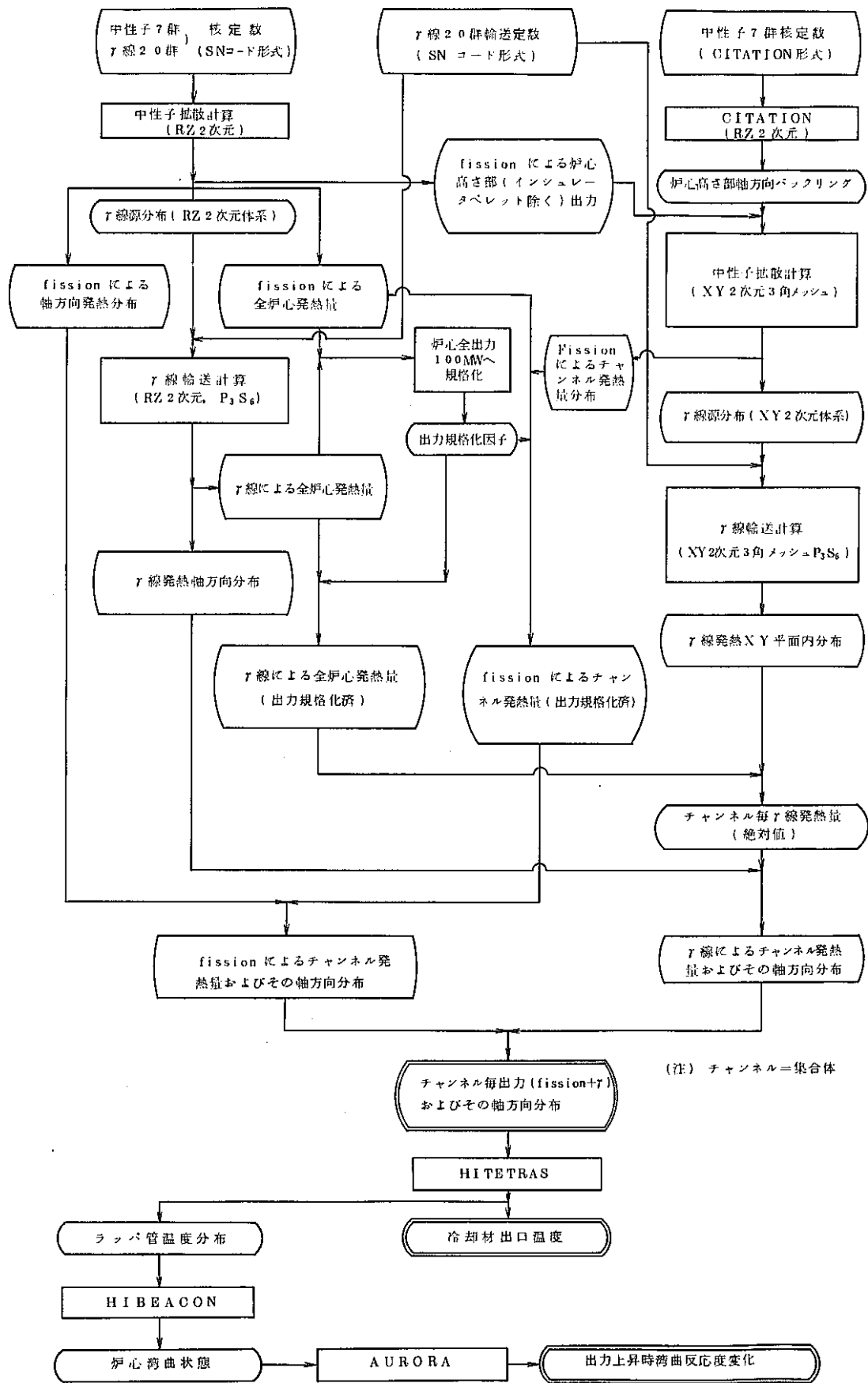


図 4.1 「常陽」MK-II 第 0 サイクル γ 線発熱解析および炉心湾曲解析手順

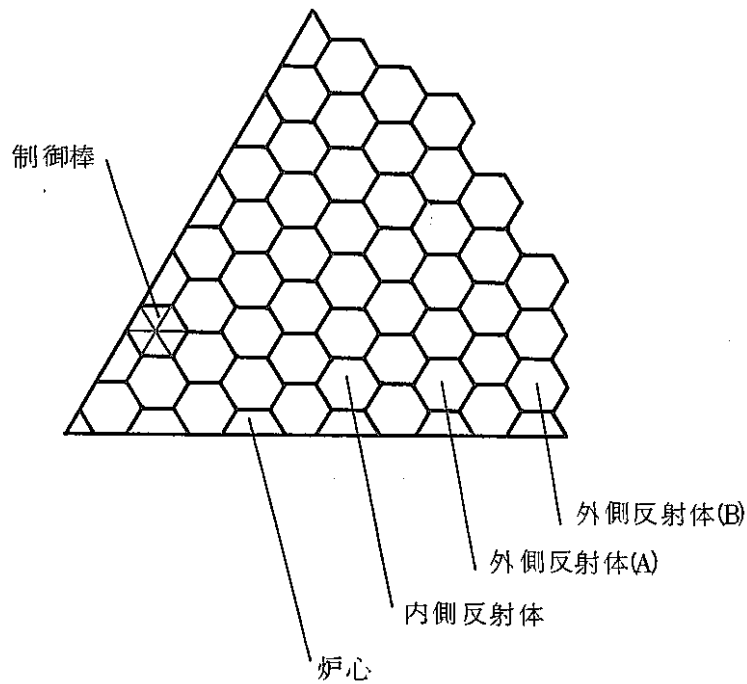


図 4.2 「常陽」MK-II 炉心第 0 サイクル XY 解析体系
(1/6 回転対称体系)

4.2 解析結果

以下に R Z 計算結果，およびこれと X Y 計算とを組合せて求めた集合体毎発熱量，左記発熱量を基にした集合体出口冷却材温度解析結果を順次示して行く。

4.2.1 R Z 体系に基づく発熱計算結果

i) ガンマ線発熱量

表 4.4 に「常陽」MK-II 炉心第 0 サイクル初期における全発熱量を 100 MW に規格化した場合の核分裂とガンマ線による発熱量の内訳を示す。ここでいう核分裂による発熱というのは，FCA X-2 集合体の解析の場合と同じように，核分裂に伴なり核分裂片， β 線，中性子による発熱であり，核分裂の際に発生するガンマ線は含まれていない（核分裂の際に発生するガンマ線は上記ガンマ線による発熱の中に含まれる）。

同表からわかるように全発熱量の 10.2% が，ガンマ線による発熱である。10.2% のガンマ線発熱の領域毎の内訳は次のとおりである。

炉心燃料部 ; 63%
 (インシュレータ部含む)
 B型特殊燃料部 ; 1%
 (インシュレータ部含む)
 内側反射体部 ; 12%
 外側反射体部(A), (B) ; 15%
 その他 ; 9%

一方, 表 4.5 にはガンマ線源より発生するガンマ線エネルギー合計を各領域毎に示す。表 4.5, 4.4 の比較から, 発生するガンマ線のエネルギーの内, 約 90% が体系内に吸収される。この結果は, FCA X-2 集合体での解析結果とほぼ等しい。10% のガンマ線エネルギーが吸収されていないのは, FCA X-2 集合体と同じ原因による。発生ガンマ線エネルギーに対する吸収ガンマ線エネルギーの比を参考のために各領域毎に見ると以下のようになる。

炉心部 (インシュレータ部含む) ;	82%
B型特殊燃料部 (インシュレータ部含む) ;	110%
材料照射用反射体 ;	198%
内側反射体 ;	119%
外側反射体(A) ;	94%
外側反射体(B) ;	103%
その他領域 ;	119%

以上, RZ 計算の総括的結果を述べたが, 以下に本結果を得られるに致る各段階での結果を示す。

ii) 中性子束分布

図 4.3 に炉心中心面上での径方向中性子束分布を示す。FCA X-2 集合体の場合と同様に内側反射体の第 5, 6, 7 群の中性子束に盛り上がりがある。

図 4.4 から 4.9 までに炉心中心位置, 炉心最外層, B型特殊燃料, 材料照射用反射体, 内側反射体最内層, 外側反射体(A)最内層における軸方向中性子分布を示す。外側反射体(A)最内層を除く他の位置においては, 炉心端面近傍の第 5, 6, 7 群の中性子束に盛り上がりがある。外側反射体(A)最内層では, 上記中性子束については, もうその傾向はみられない。

iii) 核分裂による軸方向出力分布

図 4.10 に核分裂による軸方向出力分布を示した。

iv) ガンマ線源のエネルギー分布

図 4.11, 4.12, 4.13 に炉心中心位置, 炉心最外層, B型特殊燃料, 材料照射用反射体, 制御棒, 内側反射体最内層, 外側反射体(A)最内層, 外側反射体(B)位置におけるガンマ線源のエネルギースペクトル(ともに炉心中心面上)を示した。各々の位置における特徴は下記のとおりである。

a) 炉心燃料部 ; 0.4~0.6 MeV にピークがある。

b) B型特燃, 材料照射用反射体, 制御棒位置 ;

0.4~0.6 MeV ならびに 0.8~1.0 MeV にピークがある。

c) 反射体部 ; 0.4~0.6 MeV, 0.8~1.0 MeV, 6.5~8 MeV にピークがある。しかも, 炉心部から遠い反射体ほど前者2つのピークが小さくなり, 後者のピークが大きくなってくる。

以上のような特徴が生じる原因は, FCA X-2 集合体の場合と同様でありこれは 3.2.1 項 iv) で既に述べた。

v) ガンマ線束のエネルギー分布

ガンマ線源のエネルギー分布について示した位置と同じ位置におけるガンマ線束のエネルギー分布を図 4.14, 4.15, 4.16 に示した。

これを図 4.11~4.13 に示したガンマ線源のエネルギー分布と比較すると以下のことがわかる。

a) 炉心燃料部 ; 0.6 MeV 以下のガンマ線の吸収効果により, 相対的に 0.6 MeV 以上のガンマ線の割合が増加している。この傾向は FCA X-2 集合体の場合と同じである。

b) B型特燃, 材料照射用反射体, 制御棒位置 ;

0.4~1.0 MeV のガンマ線の散乱, 吸収効果により, そのエネルギー域のガンマ線が相対的に減少(特に 0.8~1.0 MeV 以下のエネルギー域でも吸収効果が効いて減少している。逆に, 1~4 MeV のガンマ線が相対的に増加している。

c) 反射体部 ; ガンマ線源における 0.8~1 MeV の大きなピークはなく

なり、 $0.1\sim 0.4\text{ MeV}$ のエネルギー域のガンマ線が増加している。これは、上記の $0.8\sim 1\text{ MeV}$ のガンマ線の散乱によるエネルギーの減少と、炉心部から漏れてきた低エネルギーのガンマ線の効果によるものと考えられる。一方、線源における $6.5\sim 8\text{ MeV}$ のピークは線束にもそのまま残っている。

VI) ガンマ線源径方向分布

炉心中心面上でのガンマ線源径方向分布を図 4.17 に示す。同図から、線源の径方向分布について以下のような傾向を示していることがわかる。

- a) ガンマ線第 1, 2, 3, 4 群では、炉心部より反射体部の方が、ガンマ線発生数が大きい。これは、FCA X-2 集合体の場合と同様に、反射体部での中性子エネルギーが相対的に低く、中性子捕獲反応が優勢となり、捕獲後の複合核から高エネルギーガンマ線が放出されるためである。
- b) 第 5 群以上のガンマ線に関しては、FCA X-2 集合体の場合と同じく炉心部でのガンマ線の発生が優勢であり、単位体積あたりの発生率では、内側反射体最内層に比べ 1 桁前後大きい。ただし、第 13 群のガンマ線については、構造材核種の非弾性散乱により発生するガンマ線により、反射体部において他群のガンマ線より 1 桁程度大きくなっている。

VII) ガンマ線束径方向分布

炉心中心面上でのガンマ線束径方向分布を図 4.18 に示す。同図から以下のことわかる。

- a) ガンマ線第 5 群までは、それらの群の線源径方向分布の傾向がそのまま現われている。
- b) 第 6 群から、第 15 群までは内側反射体から外側で急激にガンマ線束は減衰している。
- c) 第 16 群から第 19 群までは、内側反射体部にガンマ線束の盛り上がりが見られる。これは、よりエネルギーの高い群からのガンマ線の散乱に基づく移行による。

VIII) ガンマ線発熱径方向分布

図 4.19 に炉心中心面上でのガンマ線発熱径方向分布を示す。同図から以下

のことがわかる。

a) 炉心中心部では 50W/cc のガンマ線発熱がある。これは核分裂による発熱約 7% に相当する。炉心周辺部では、中心部の約 $1/2$ のガンマ線発熱がある。

b) 内側反射体では、その最内層で約 10W/cc のガンマ線発熱がある。

ix) ガンマ線発熱軸方向分布

径方向各位置におけるガンマ線発熱軸方向分布を図 4.20 に示す。

4.2.2 RZ 計算, XY 計算の組合せ結果

図 4.21, 4.22, 4.23 に RZ 計算, XY 計算を組合せて求めた集合体毎のガンマ線, 核分裂ならびにそれらの合計発熱分布を示す。同図は材料照射用反射体がある $1/2$ 炉心での発熱分布である。この発熱分布は後の集合体出口部冷却材温度計算 (HITETRAS コード) の入力条件となる。

表 4.4 「常陽」MK-II 炉心第 0 サイクル初期の各領域発熱量内訳 (RZ 計算)

全 発 熱 量 (W)		1.000×10^8 (100%)	
核分裂による発熱	炉心燃料部 (W)	8.874×10^7 (88.735%)	8.983×10^7 (89.83%)
	炉心燃料インシュレータ部 (W)	2.117×10^5 (0.212%)	
	B型特殊燃料燃料部 (W)	8.841×10^5 (0.884%)	
	B型特殊燃料インシュレータ部 (W)	1.881×10^3 (0.002%)	
	その他の領域 (W)	0.0 (0.0%)	
γ線による発熱	炉心燃料部 (W)	6.296×10^6 (6.296%)	1.017×10^7 (10.17%)
	炉心燃料インシュレータ部 (W)	1.075×10^5 (0.108%)	
	B型特殊燃料燃料部 (W)	1.147×10^5 (0.115%)	
	B型特殊燃料インシュレータ部 (W)	2.241×10^3 (0.002%)	
	材料照射用反射体(炉心高さ部) (W)	4.786×10^4 (0.048%)	
	内側反射体 (W)	1.219×10^6 (1.219%)	
	外側反射体(A) (W)	1.446×10^6 (1.446%)	
	外側反射体(B) (W)	1.124×10^5 (0.112%)	
その他領域 (W)	8.272×10^5 (0.827%)		

(*) 核分裂に伴う核分裂片, β線, 中性子による発熱

表 4.5 「常陽」MK-II 炉心第 0 サイクル初期における
ガンマ線源のエネルギー (RZ 計算)

単位 : W

領 域 名	ガンマ線エネルギー
炉心燃料部	7.733×10^6
炉心燃料インシュレータ部	6.128×10^4
B 型特殊燃料燃料部	1.052×10^5
B 型特殊燃料インシュレータ部	1.341×10^3
材料照射用反射体 (炉心高さ部)	2.423×10^4
内側反射体	1.023×10^6
外側反射体 (A)	1.537×10^6
外側反射体 (B)	1.092×10^5
その他領域	6.941×10^5
合 計	1.129×10^7

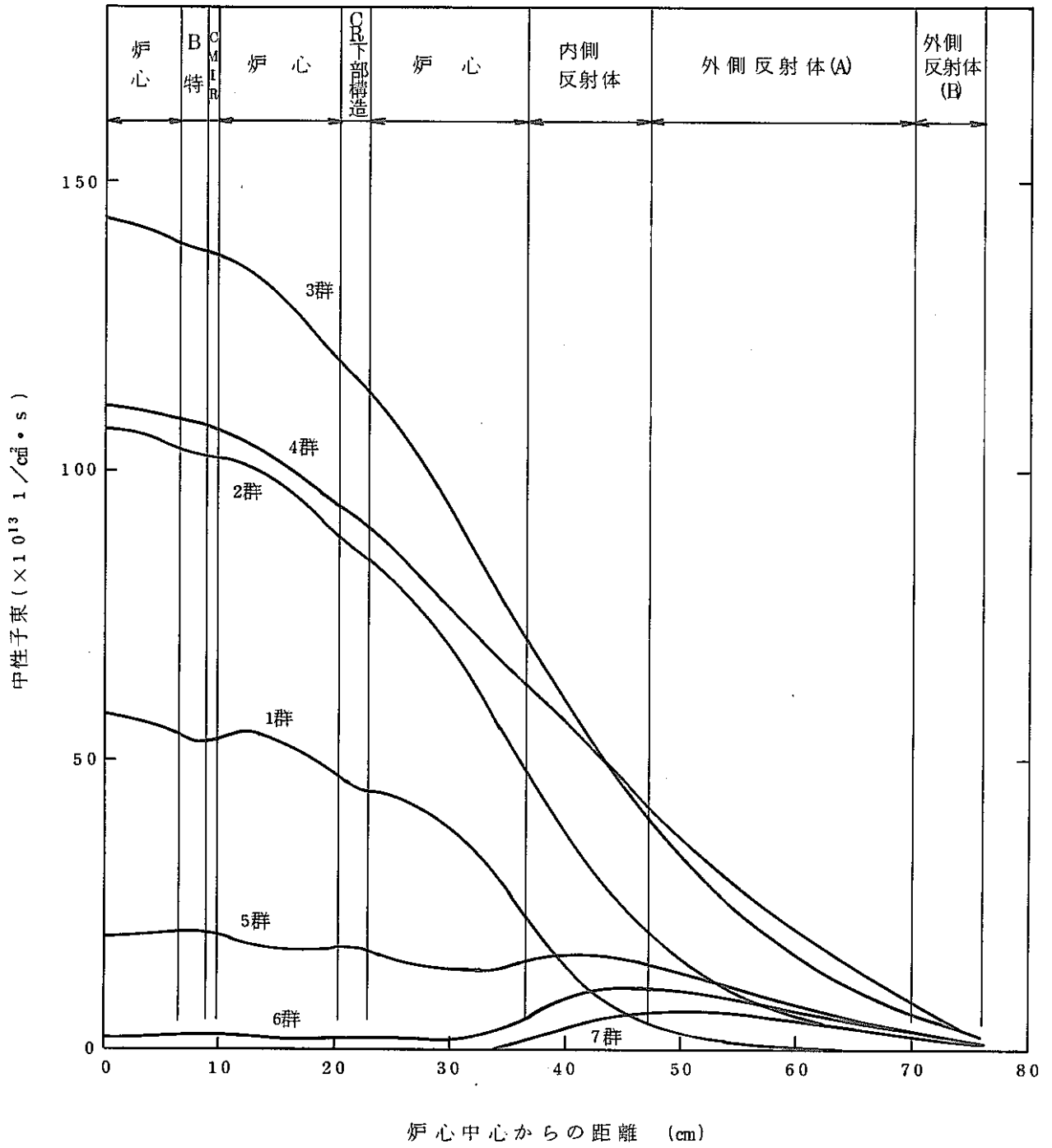


図 4.3 「常陽」MK-II 炉心第 0 サイクル初期中性子束径方向分布
(炉心中心面上 RZ 計算)

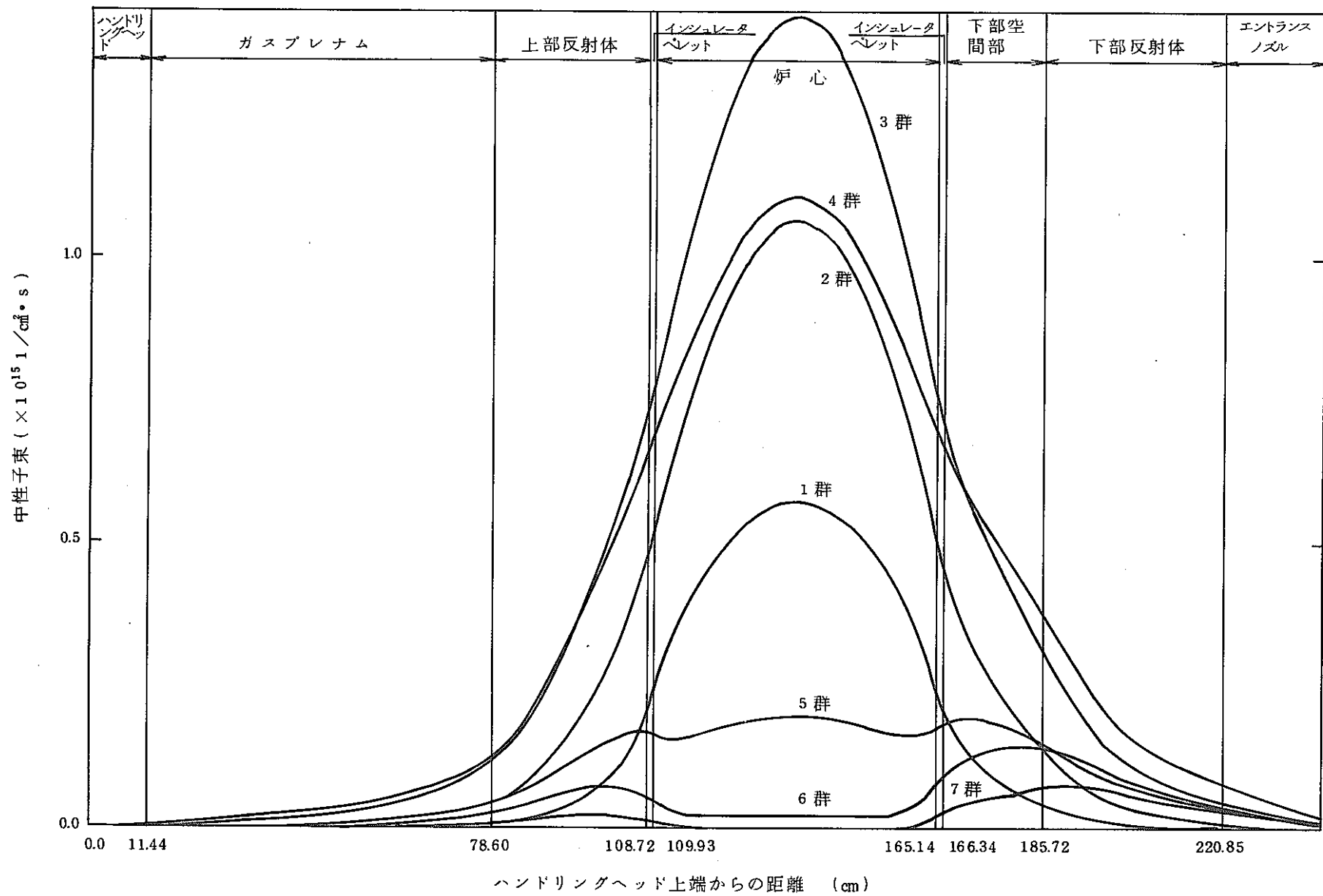


図 4.4 「常陽」MK-II 炉心の軸方向中性子束分布 (第0サイクル初期, 炉心中心位置, RZ 計算)

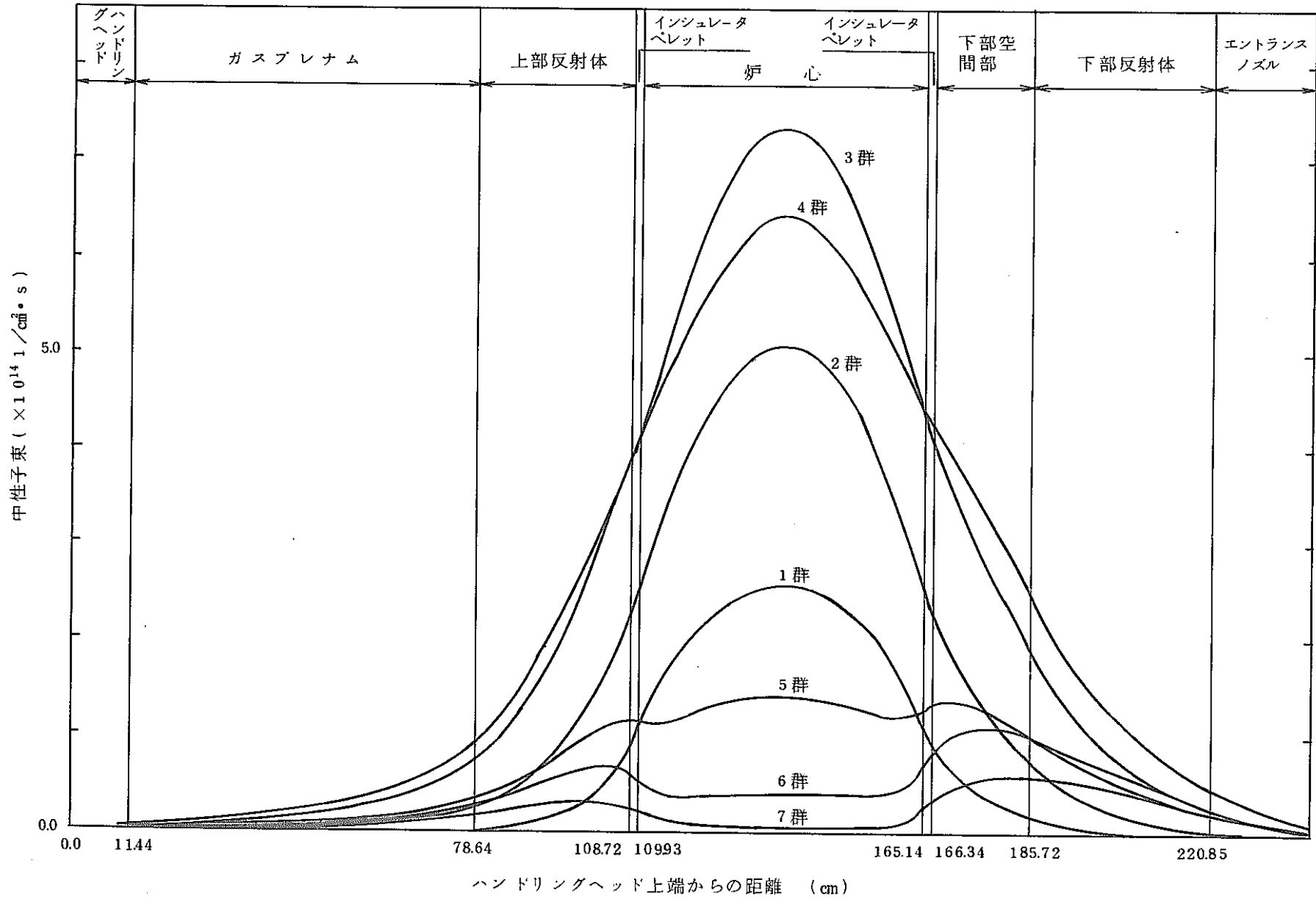


図 4.5 「常陽」MK-II 炉心の軸方向中性子束分布 (第0サイクル初期, 炉心最外層, RZ計算)

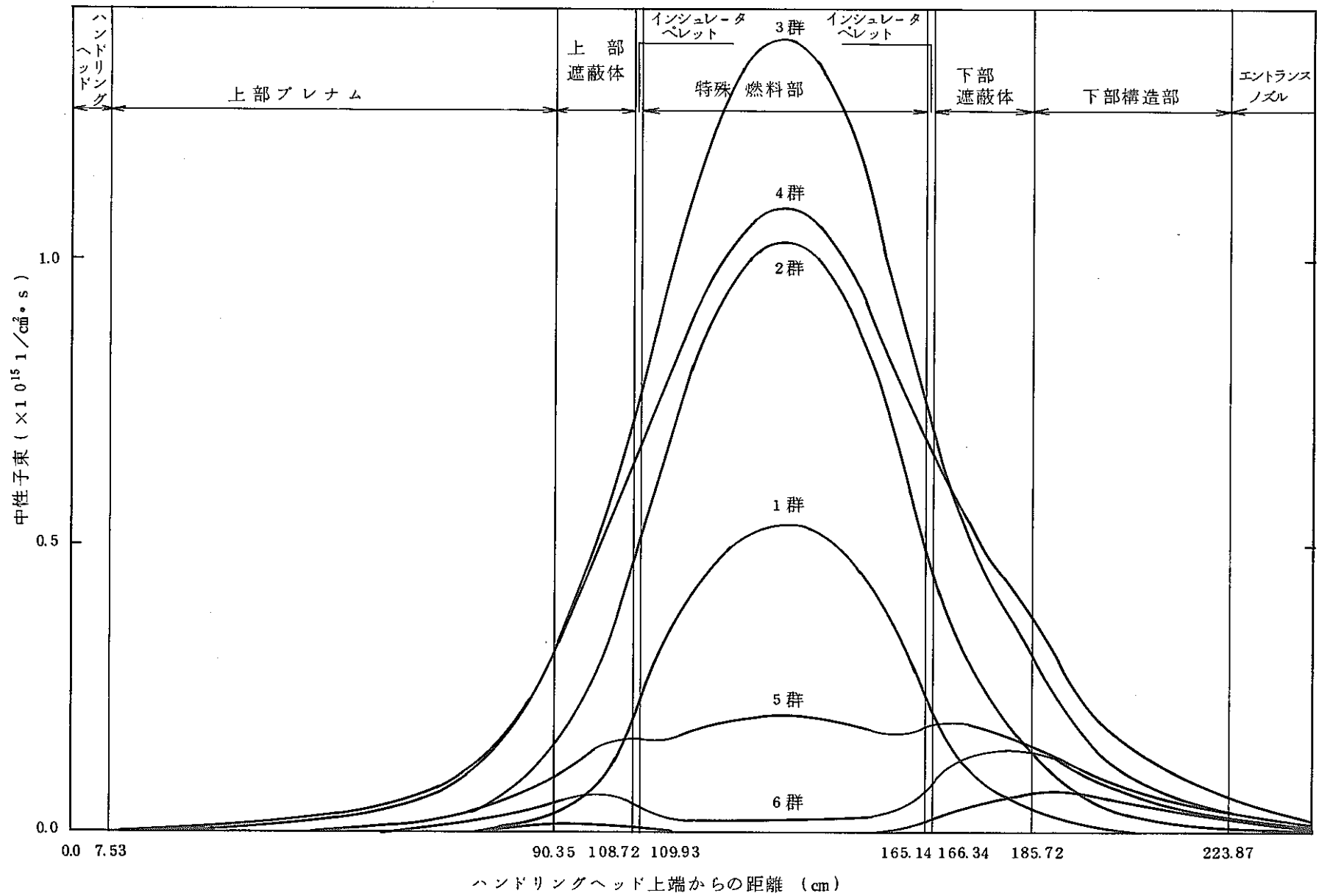


図 4.6 「常陽」MK-II 炉心の軸方向中性子分布 (第 0 サイクル初期, B 型特殊燃料, RZ 計算)

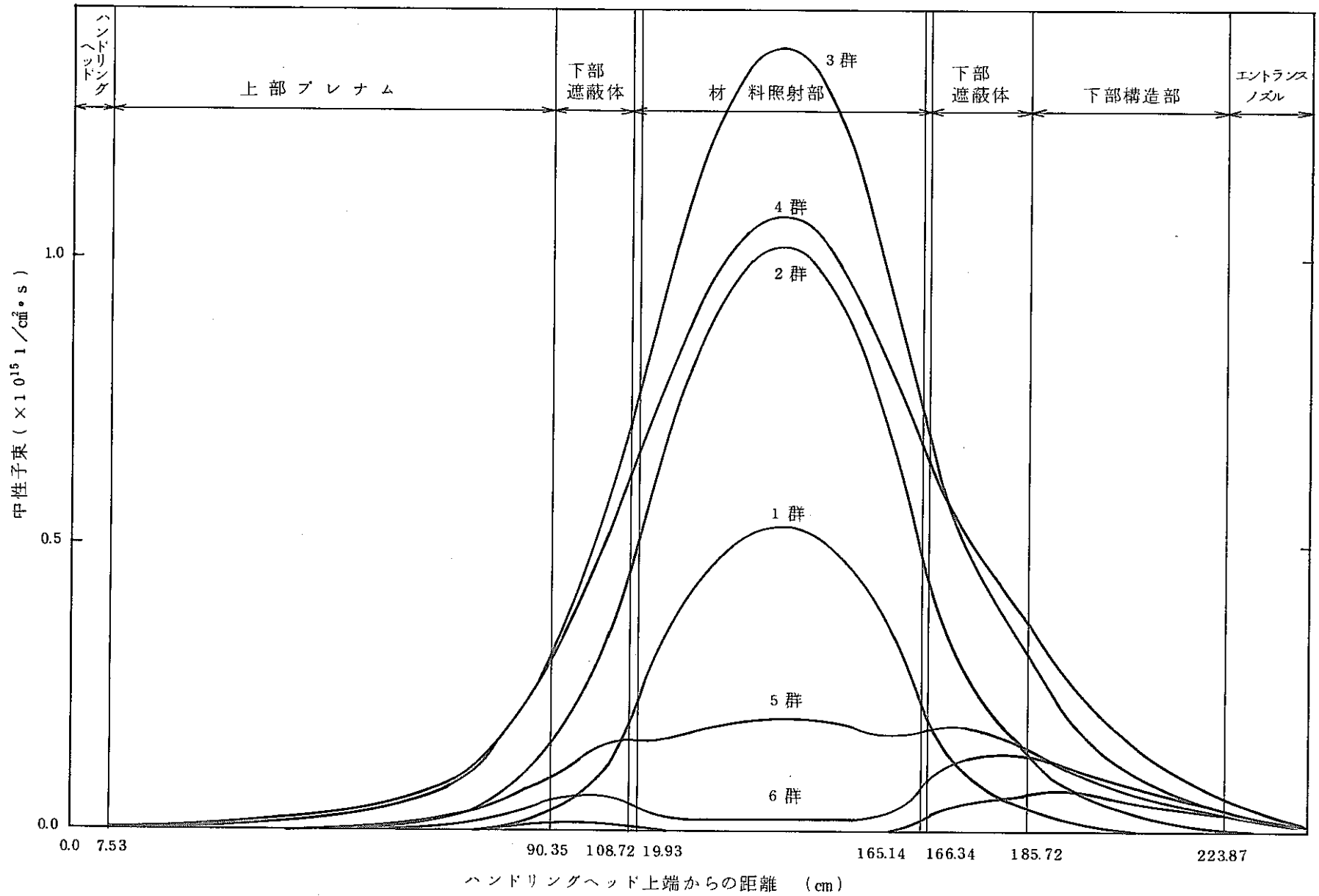


図 4.7 「常陽」MK-II 炉心の軸方向中性子束分布 (第0サイクル初期, 材料照射用反射体, RZ 計算)

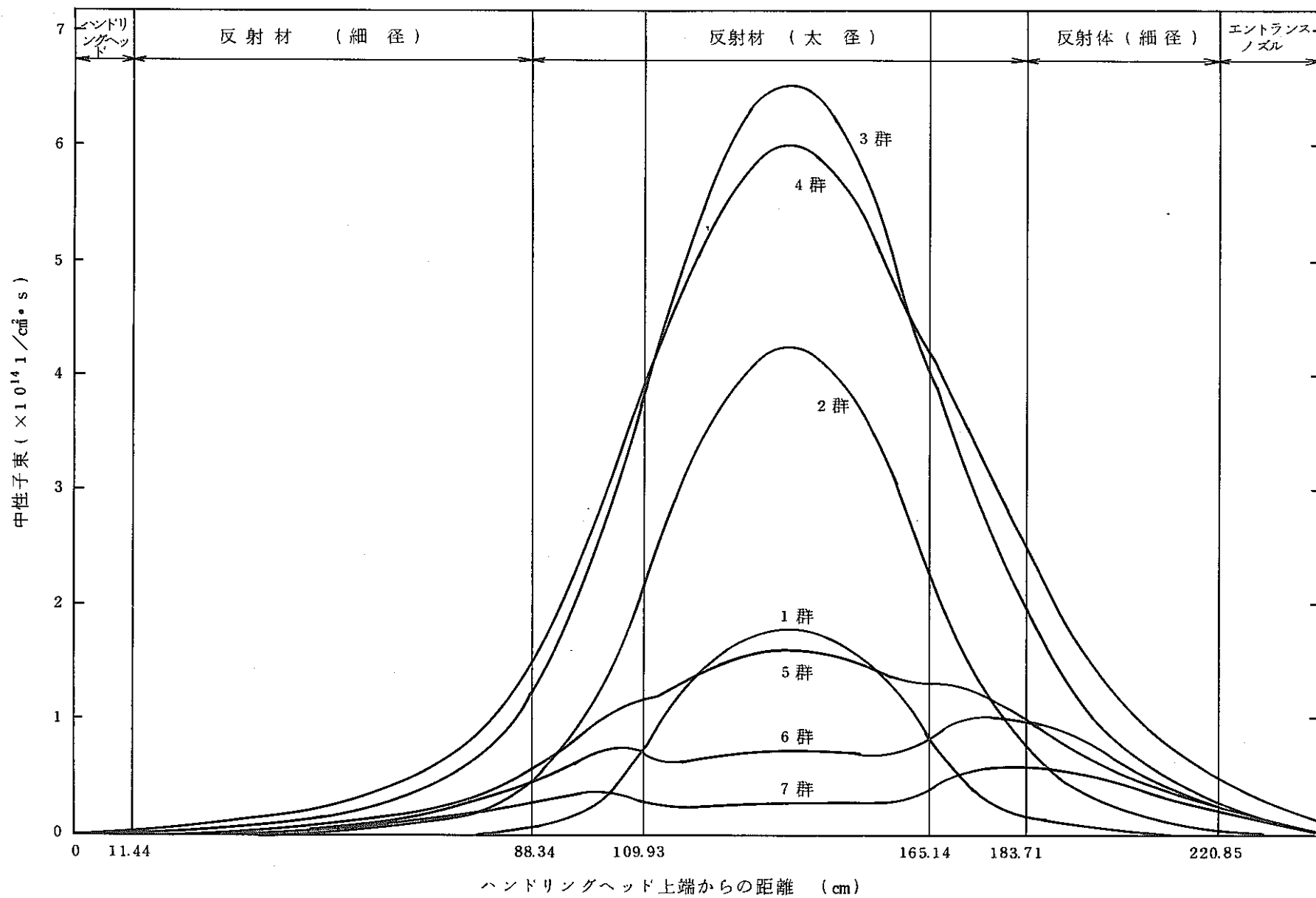


図 4.8 「常陽」MK-II 炉心の軸方向中性子束分布 (第 0 サイクル初期, 内側反射体最内層, RZ 計算)

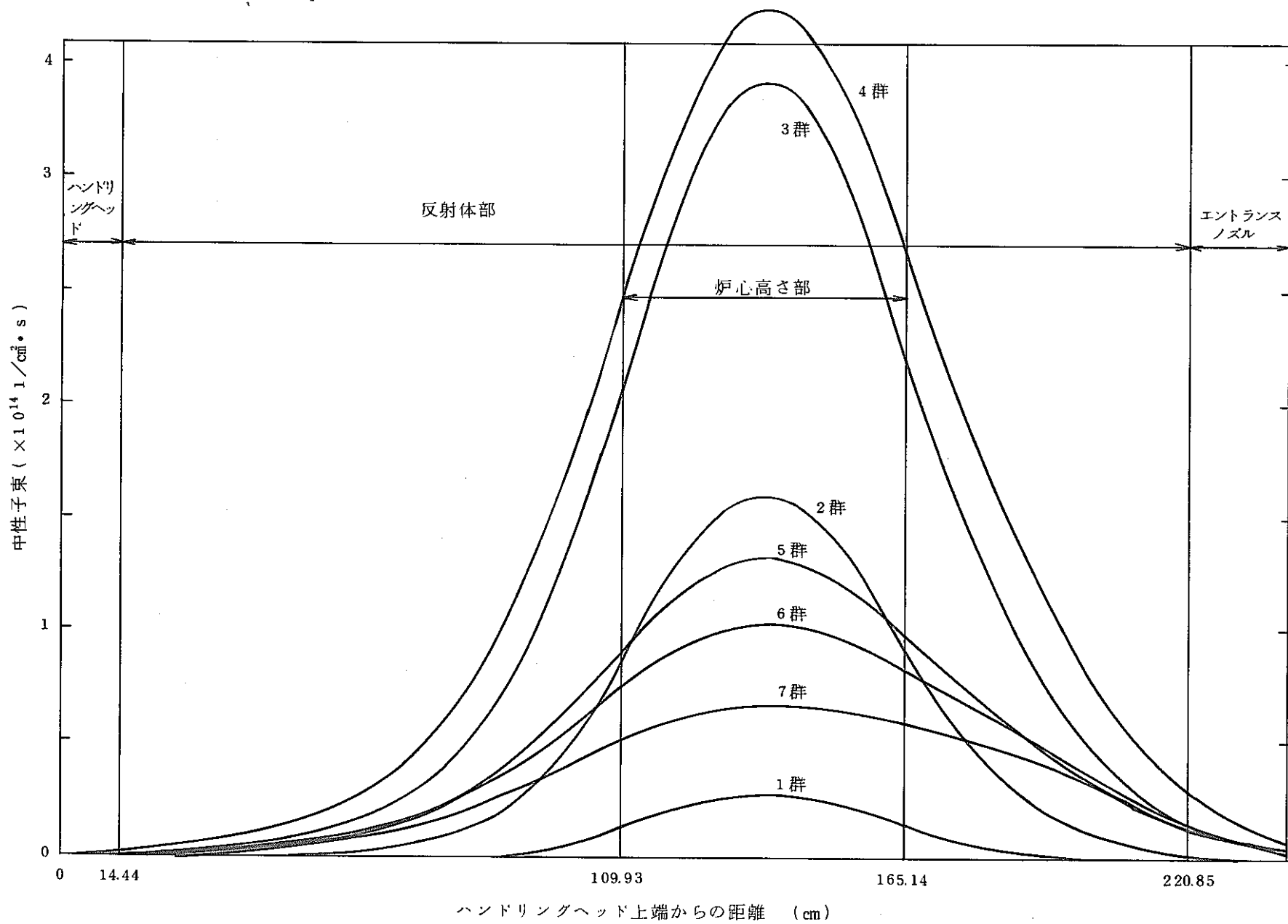


図 4.9 「常陽」MK-II 炉心の軸方向中性子束分布 (第 0 サイクル初期, 外側反射体(A)最内層, RZ 計算)

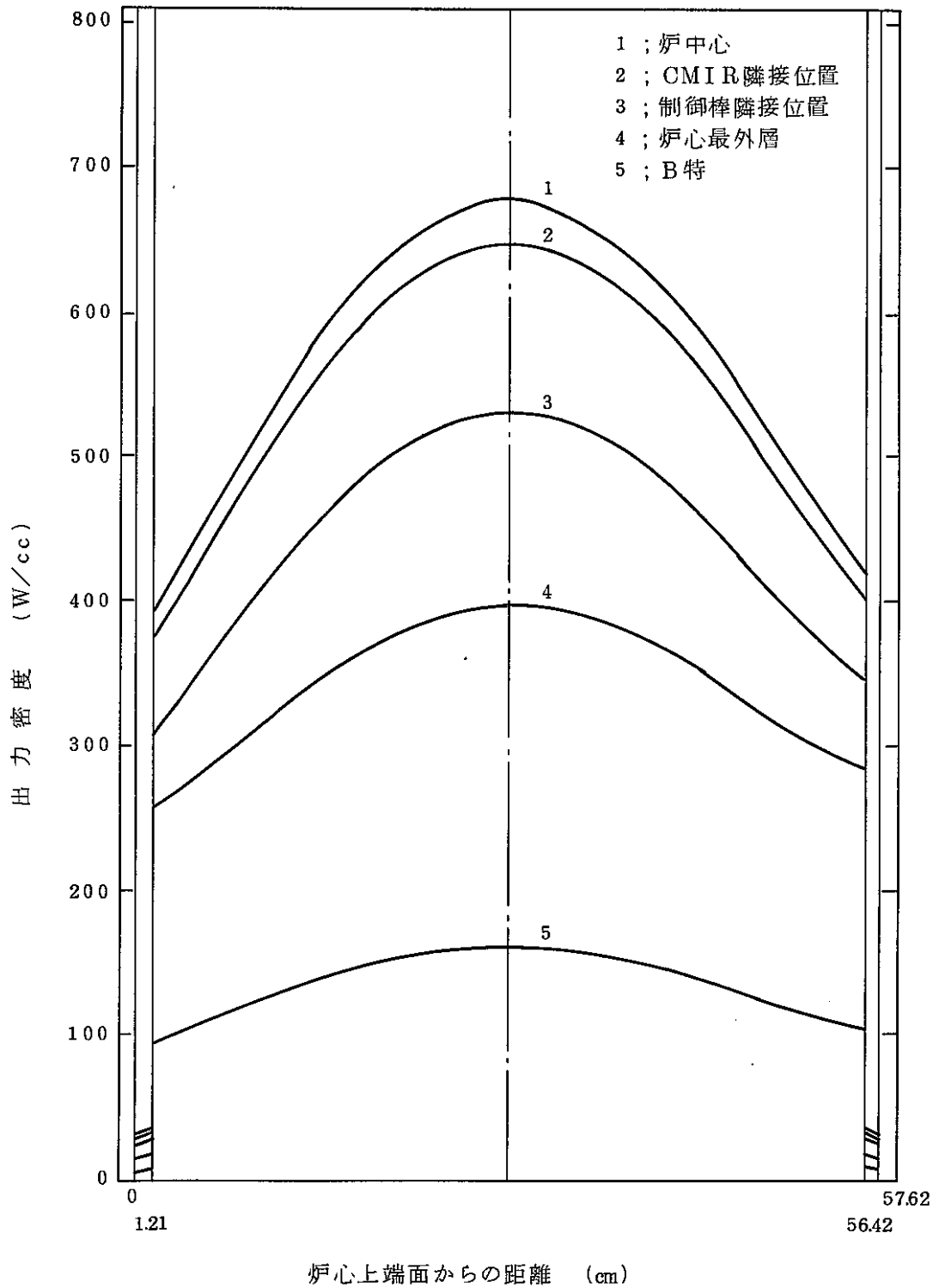


図 4.10 「常陽」MK-II 炉心の核分裂による軸方向出力分布
(第0サイクル初期, RZ計算)

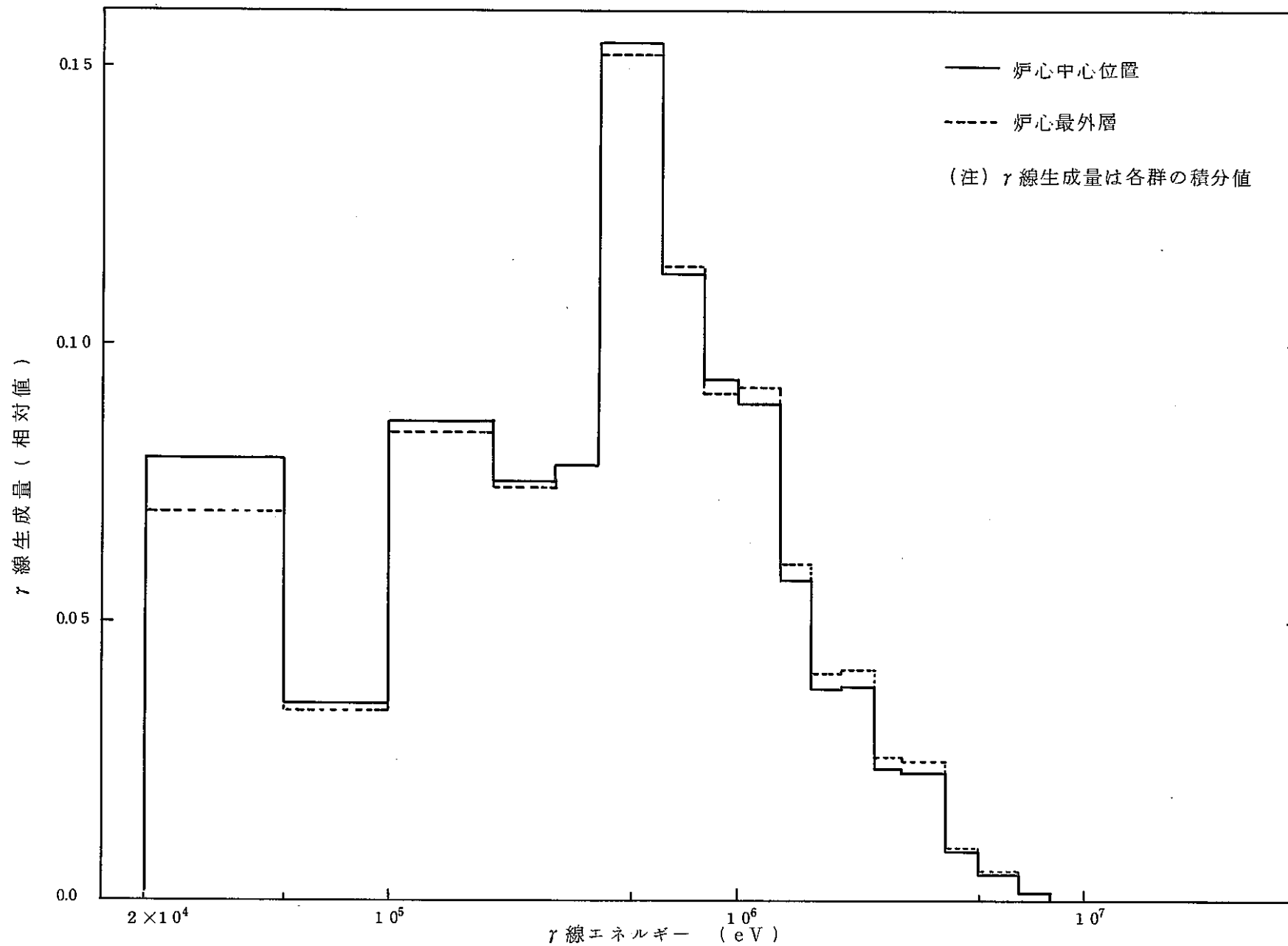


図 4.11 「常陽」MK-II 炉心のガンマ線源エネルギー分布 (第 0 サイクル初期, 炉心中心面上, RZ 計算)

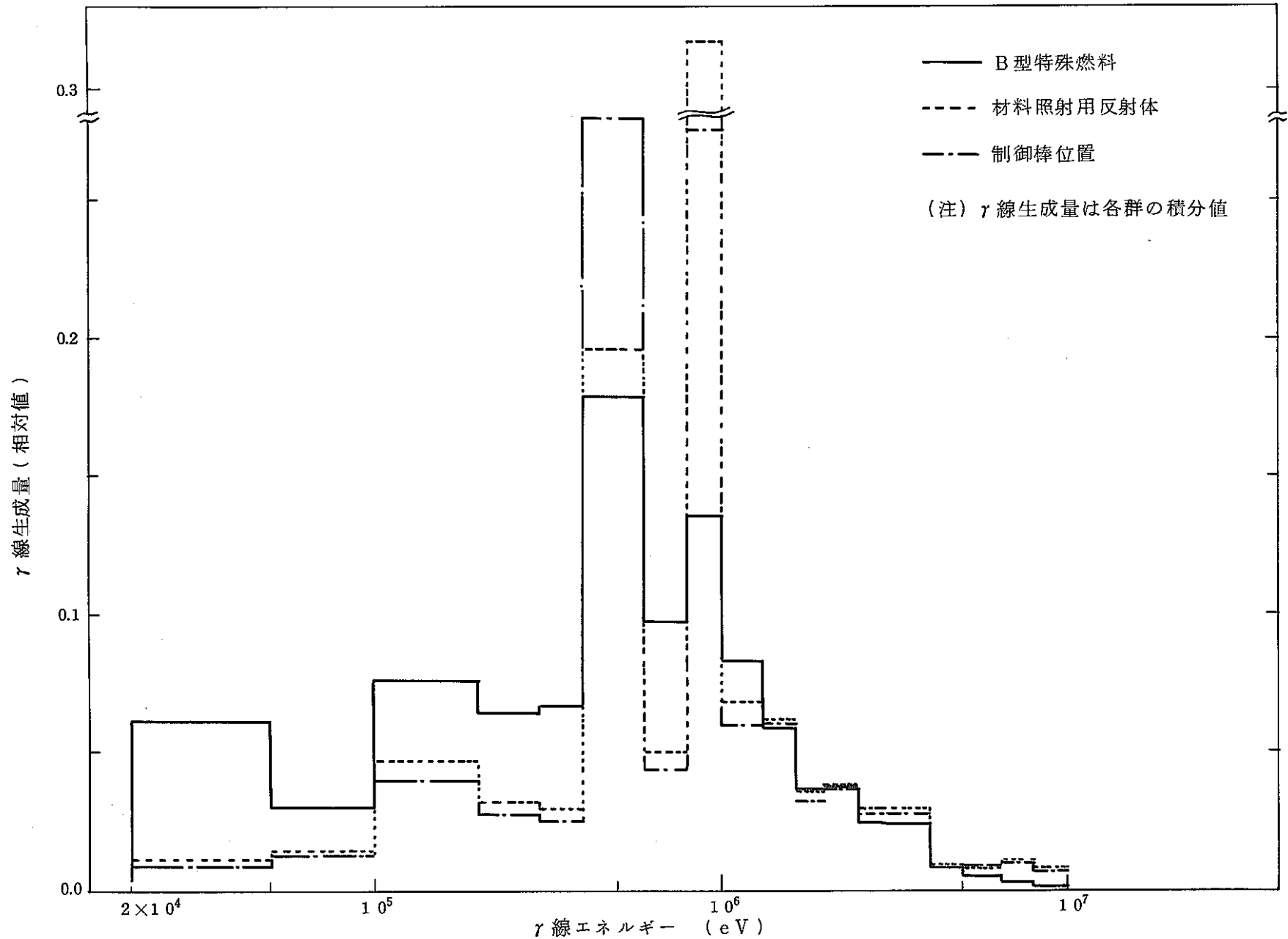


図 4.12 「常陽」MK-II 炉心のガンマ線エネルギー分布 (第0サイクル初期, 炉心中心面上, RZ計算)

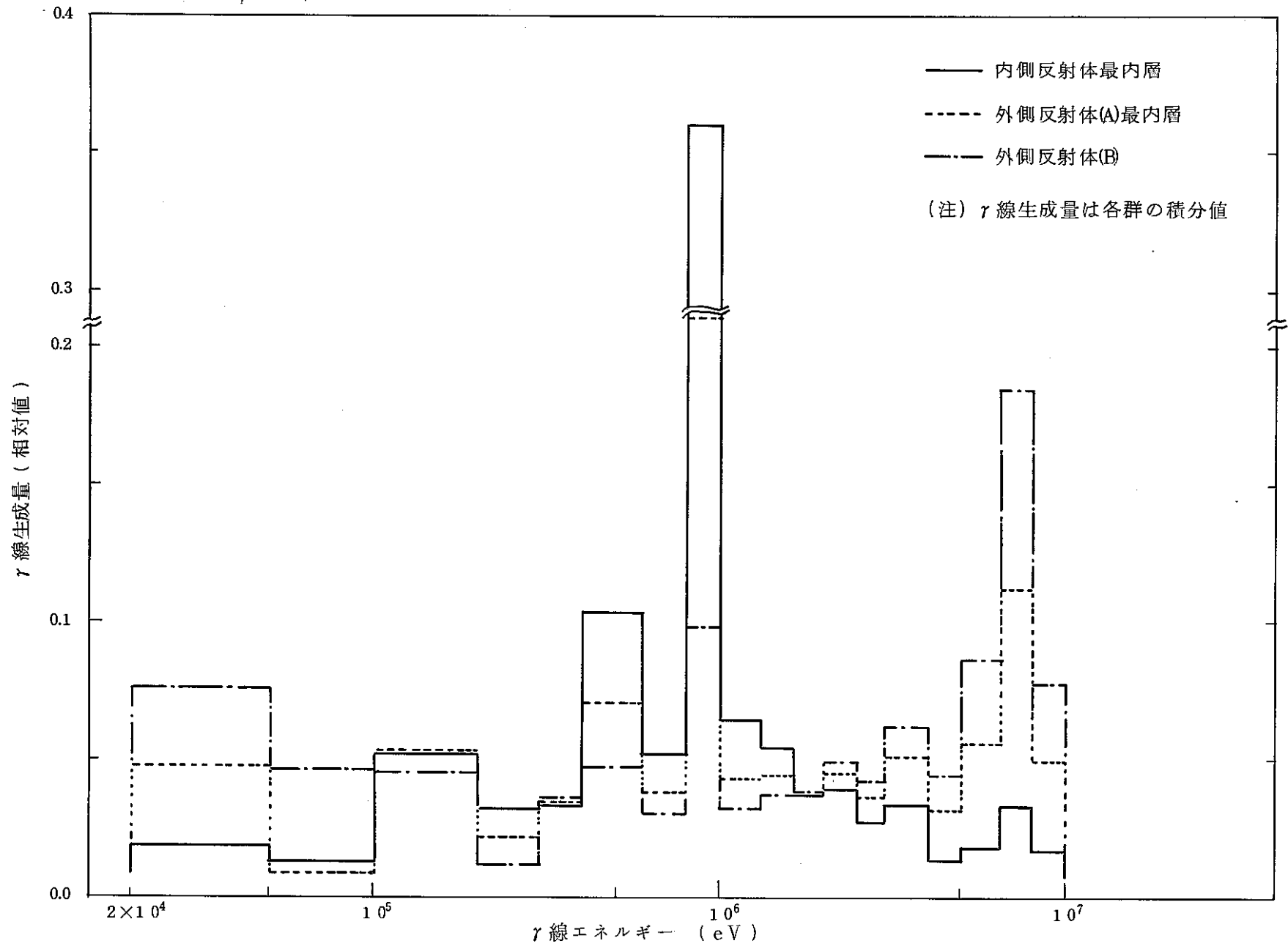


図 4.13 「常陽」MK-II 炉心のガンマ線源エネルギー分布(第0サイクル初期, 炉心中心面上, RZ計算)

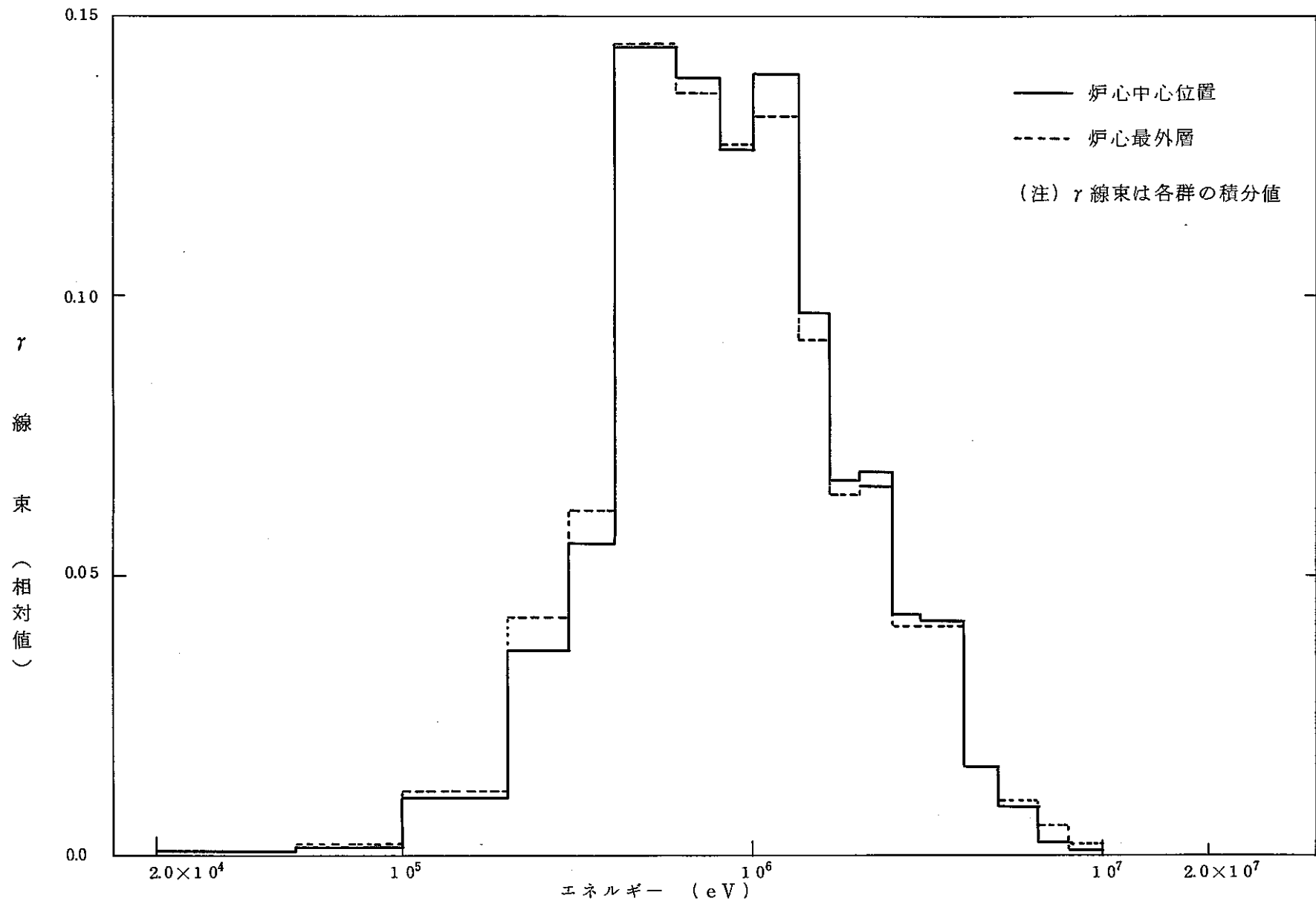


図 4.1.4 「常陽」MK-II 炉心ガンマ線束エネルギー分布 (第0サイクル初期, 炉心中心面上, RZ計算)

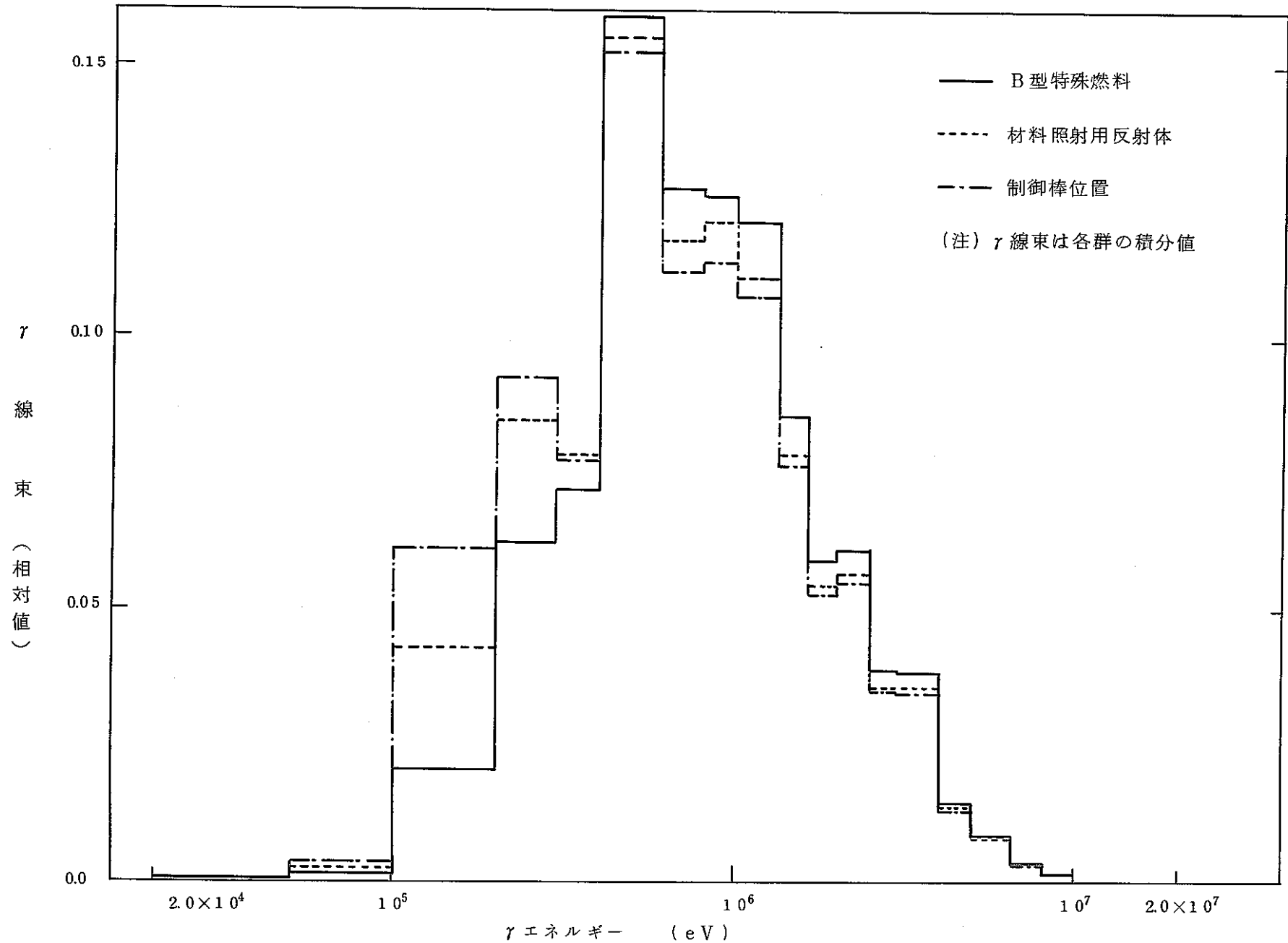


図 4.15 「常陽」MK-II 炉心のガンマ線束エネルギー分布 (第0サイクル初期, 炉心中心面上, RZ計算)

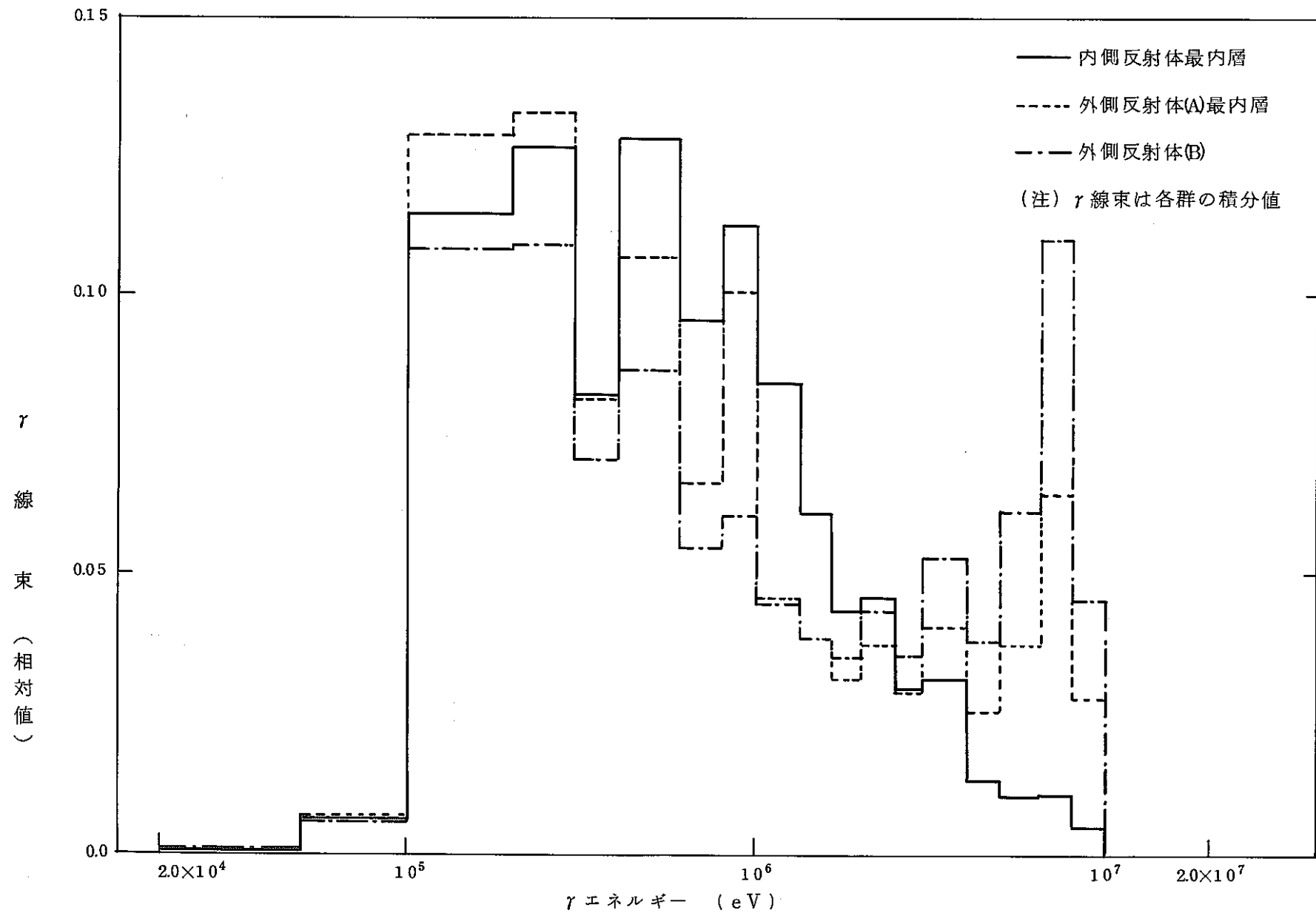


図 4.16 「常陽」MK-II 炉心のガンマ線束エネルギー分布 (第 0 サイクル初期, 炉心中心面上, RZ 計算)

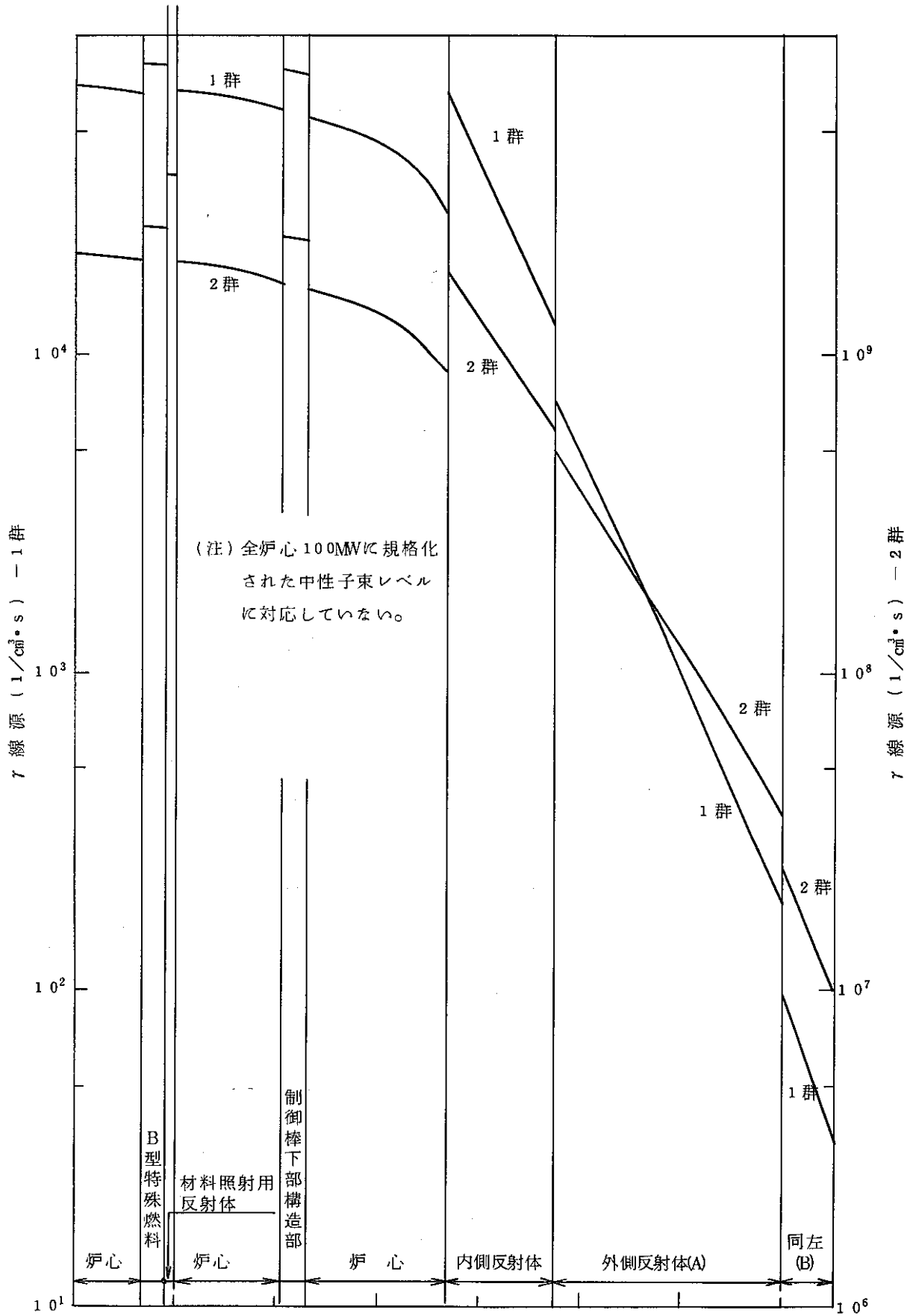


図 4.17(a) 「常陽」MK-II 炉心ガンマ線線源径方向分布
(第0サイクル初期炉心中心面上, RZ計算)

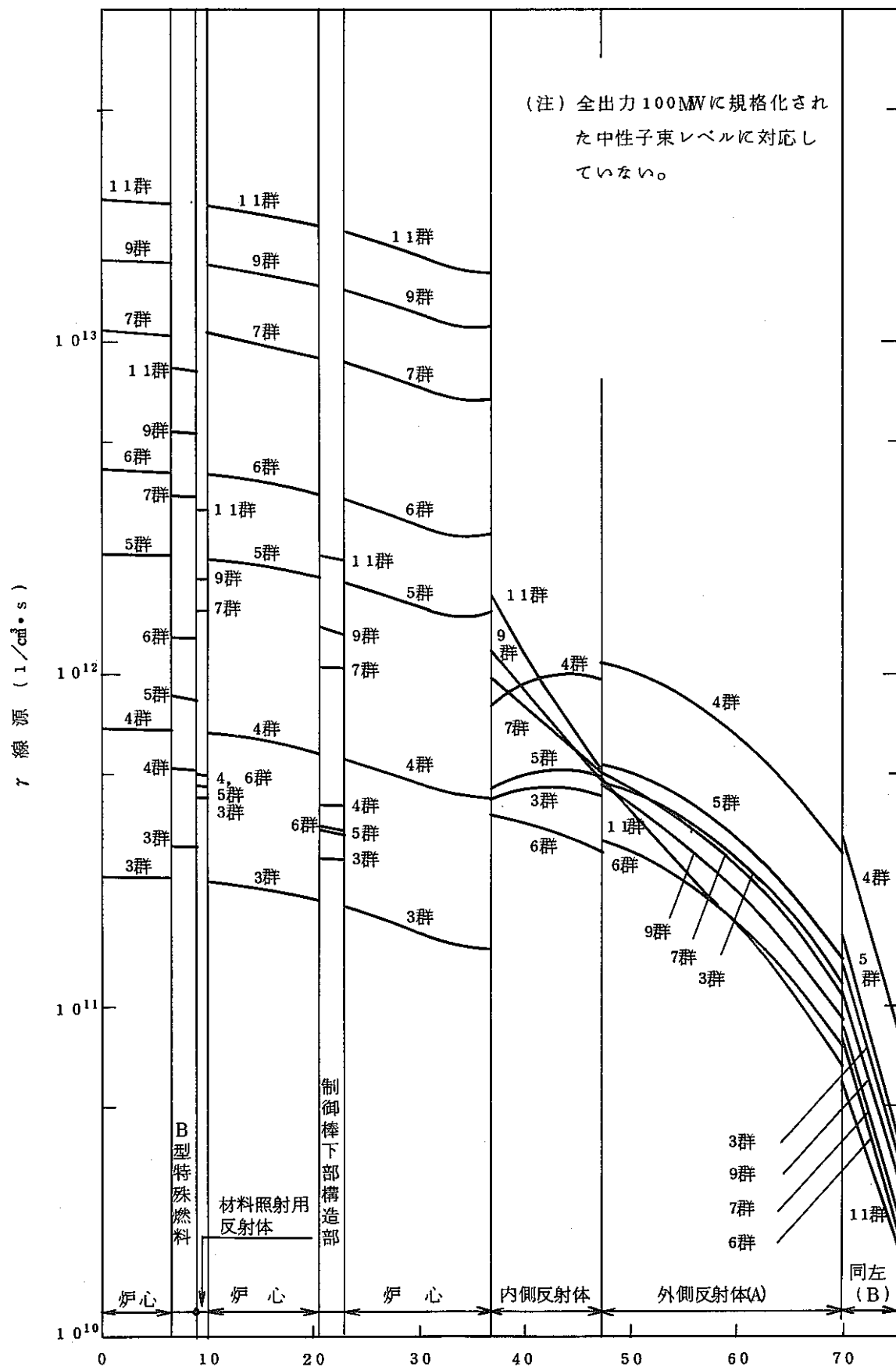


図 4.17(b) 「常陽」MK-II 炉心ガンマ線線源径方向分布
(第0サイクル初期炉心中心面上, RZ計算)

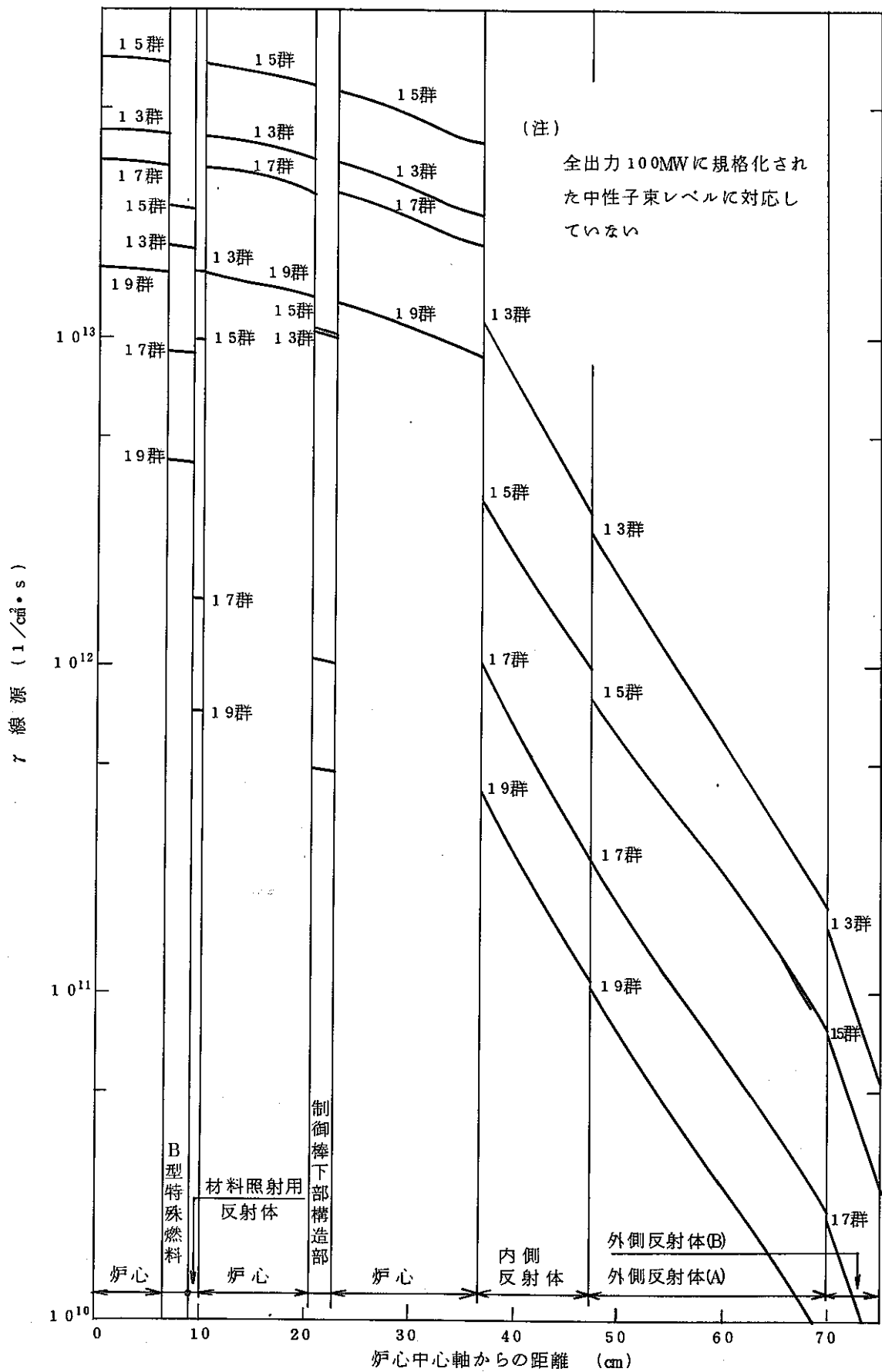


図 4.17(c) 「常陽」MK-II 炉心ガンマ線線源径方向分布
(第0サイクル初期炉心中心面上, RZ計算)

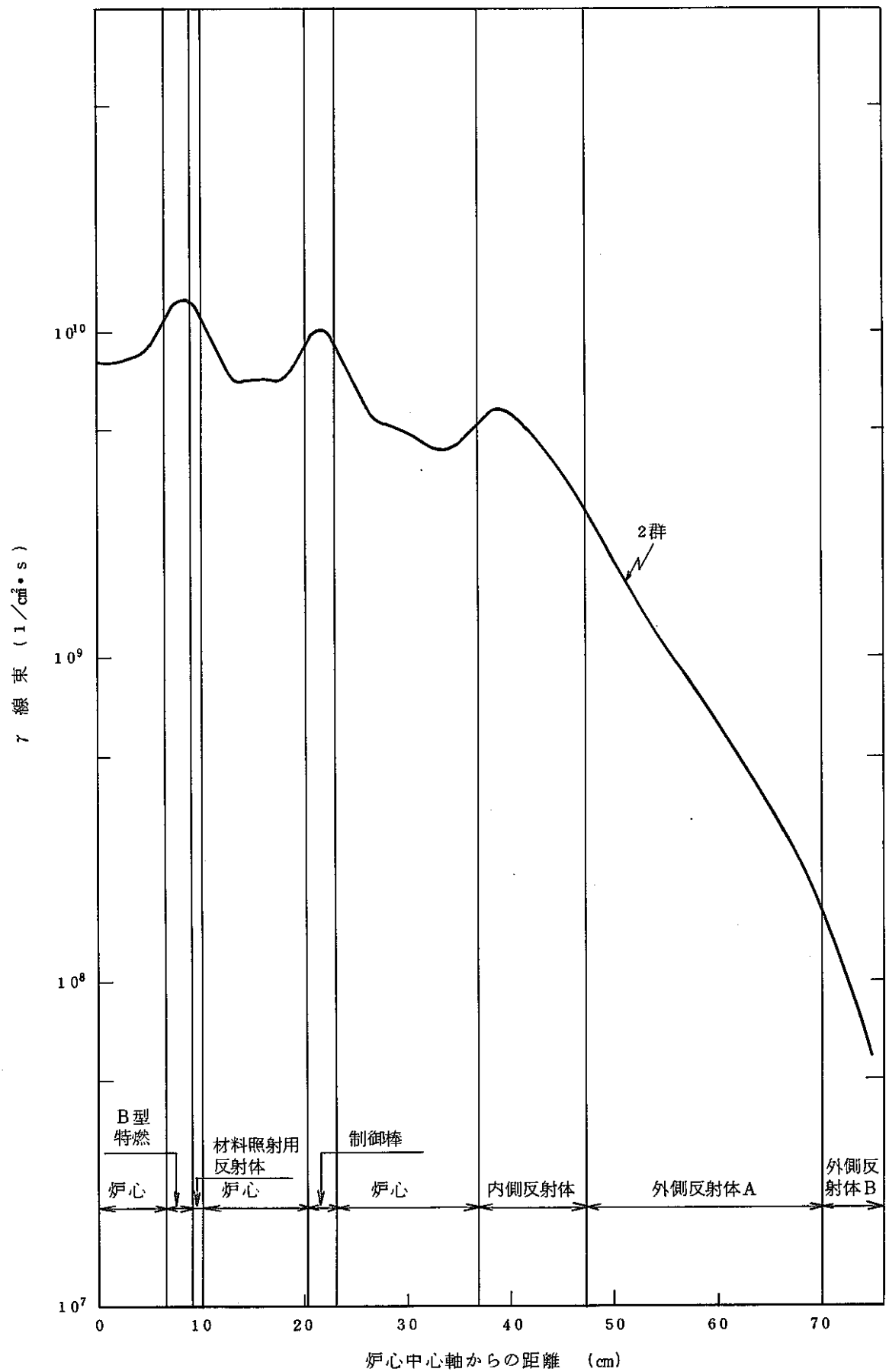


図 4.1 8(a) 「常陽」MK-II炉心第0サイクル初期 γ 線束の径方向分布
(炉心中心面上RZ計算)

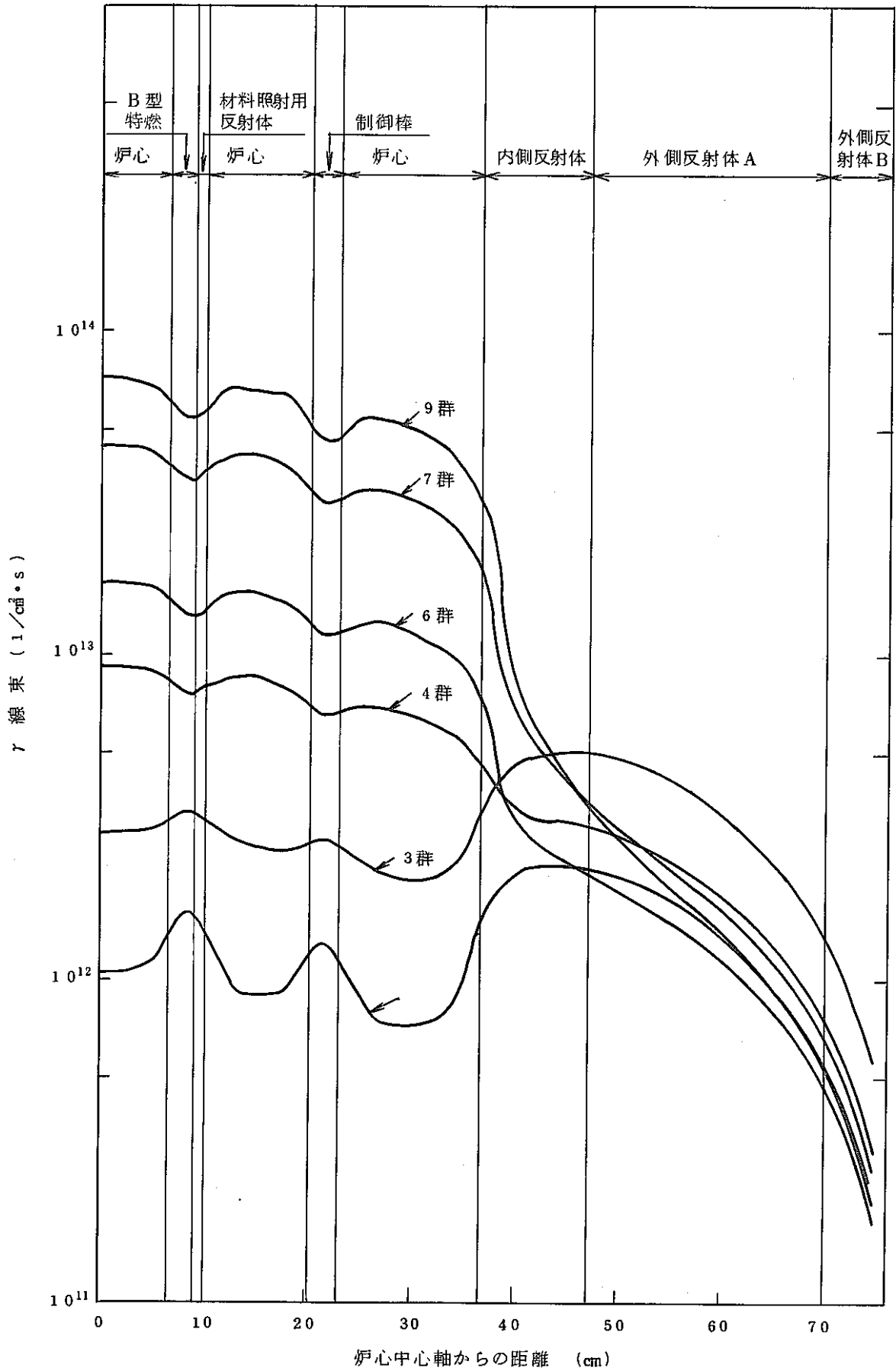


図 4.18(b) 「常陽」MK-II 炉心第 0 サイクル初期 γ 線束の径方向分布
(炉心中心面上 RZ 計算)

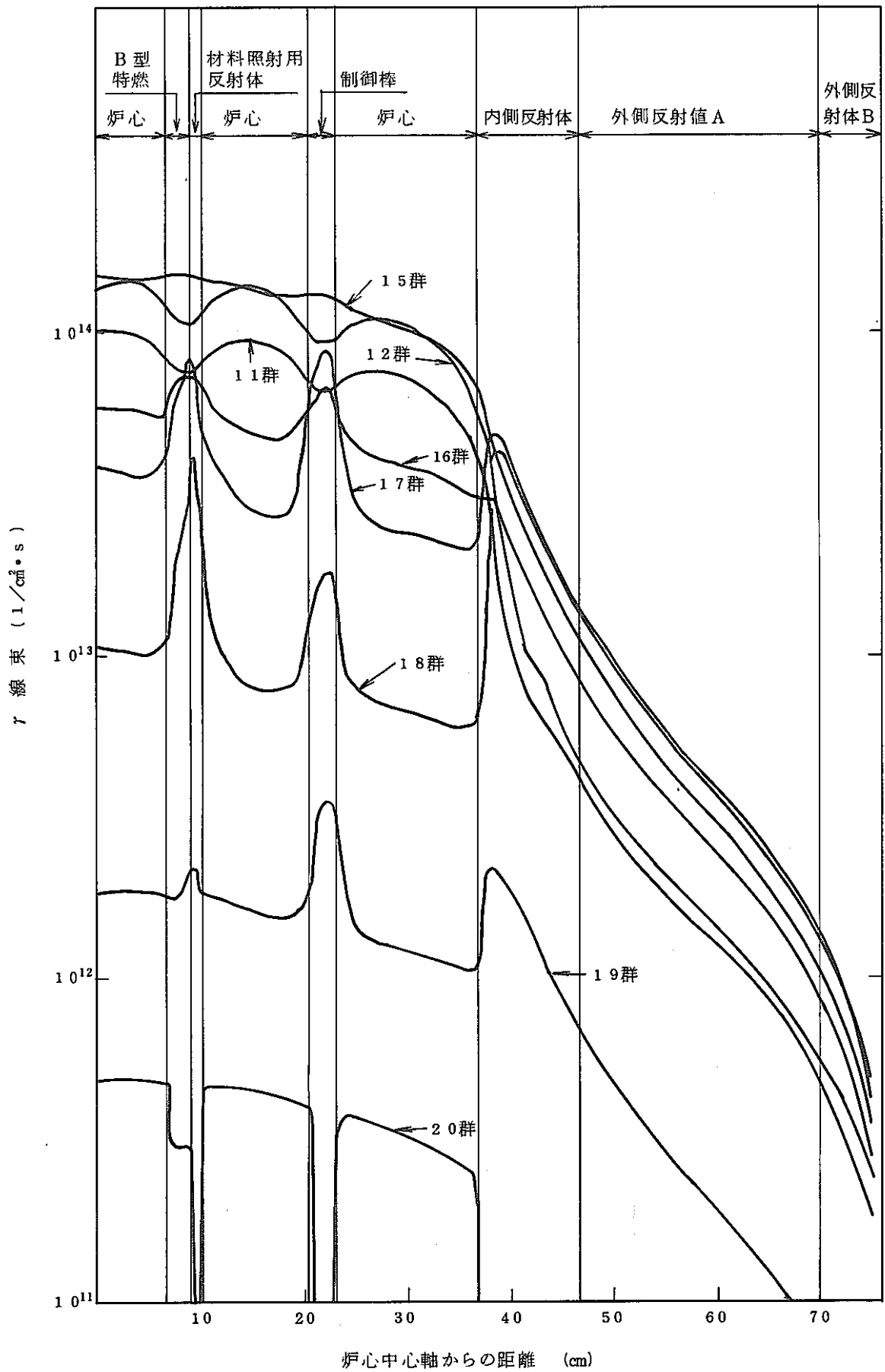


図 4.18(c) 「常陽」MK-II 炉心第 0 サイクル初期 γ 線束の径方向分布
(炉心中心面上 RZ 計算)

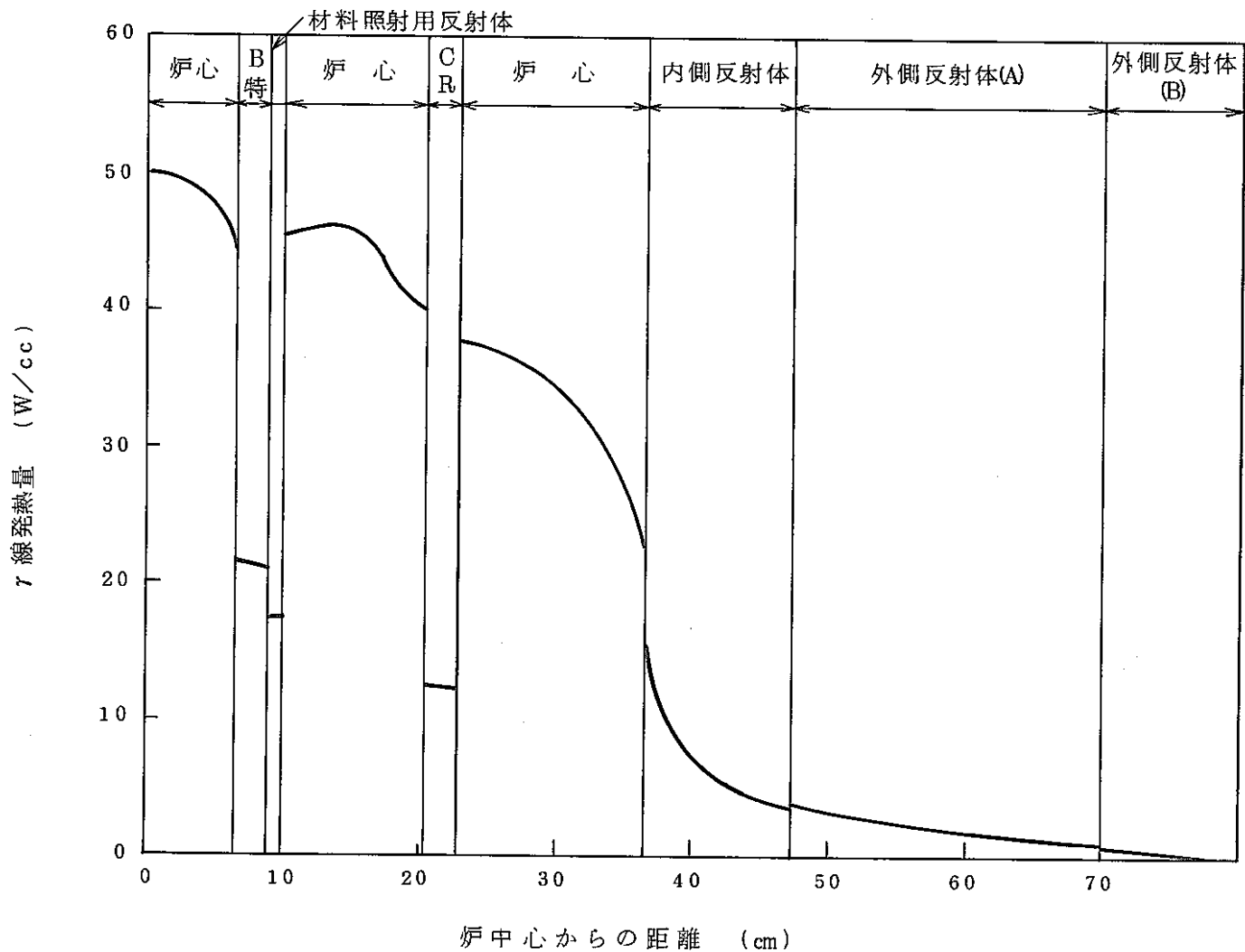


図 4.1 9 「常陽」MK-II 炉心の γ 線発熱径方向分布 (第 0 サイクル初期, 炉心中心面上, RZ 計算)

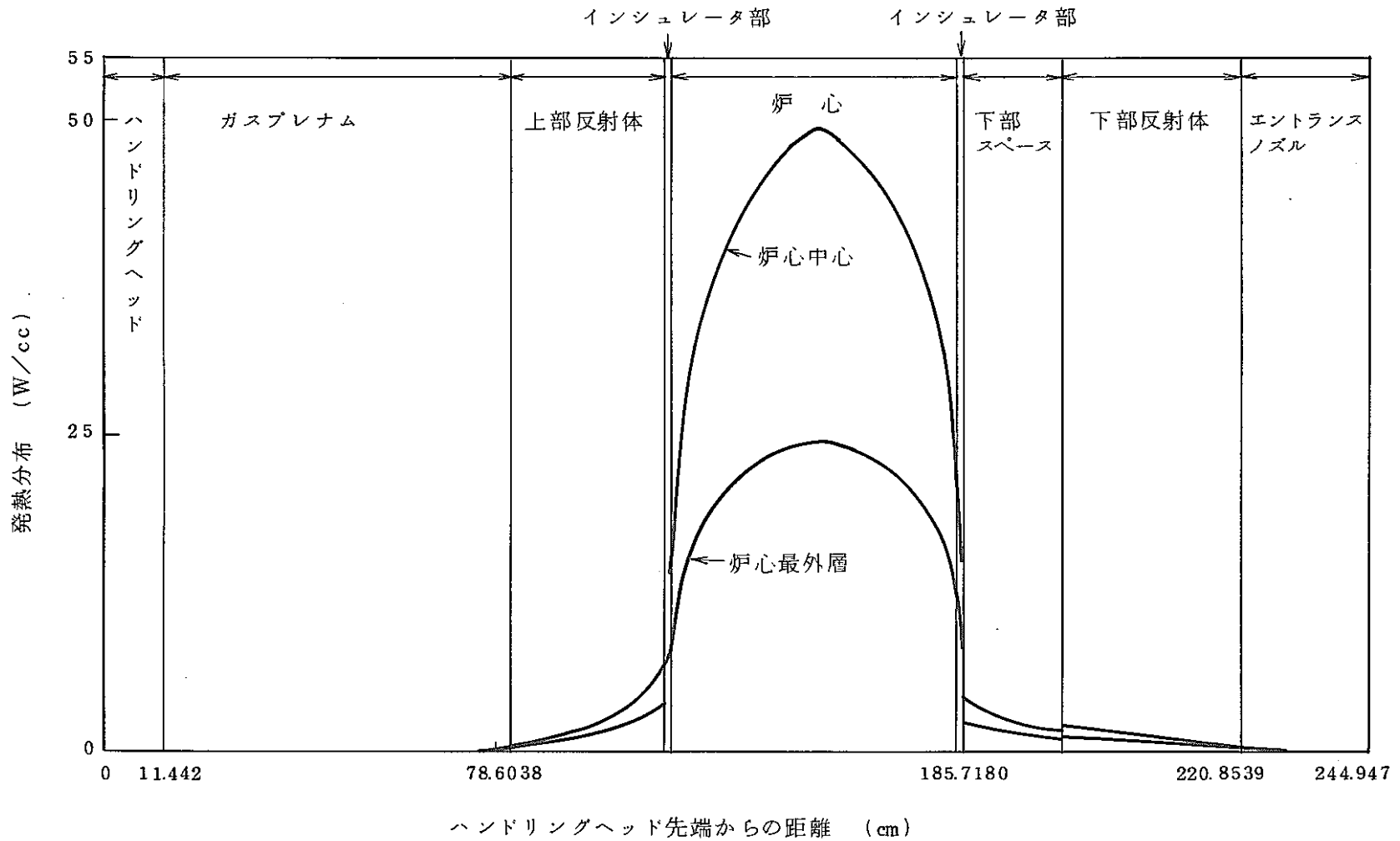


図 4.20(a) 「常陽」MK-II 炉心 γ 線発熱軸方向分布 (第 0 サイクル初期, RZ 計算)
 - 炉心中心および炉心最外層

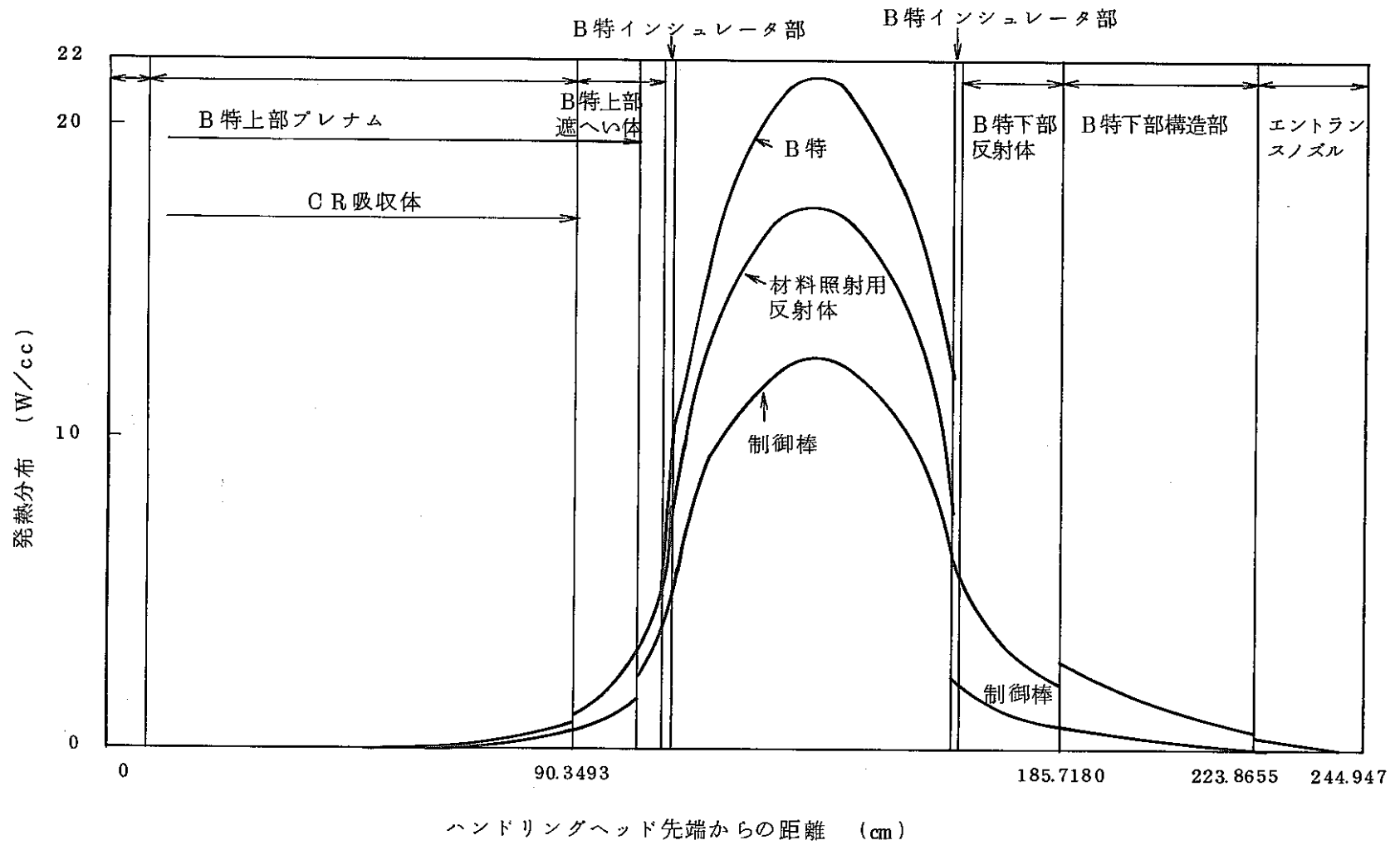


図 4.2 0(b) 「常陽」MK-II 炉心の γ 線発軸方向分布 (第 0 サイクル初期, RZ 計算)
 - B 型特殊燃料, 材料照射用反射体および制御棒

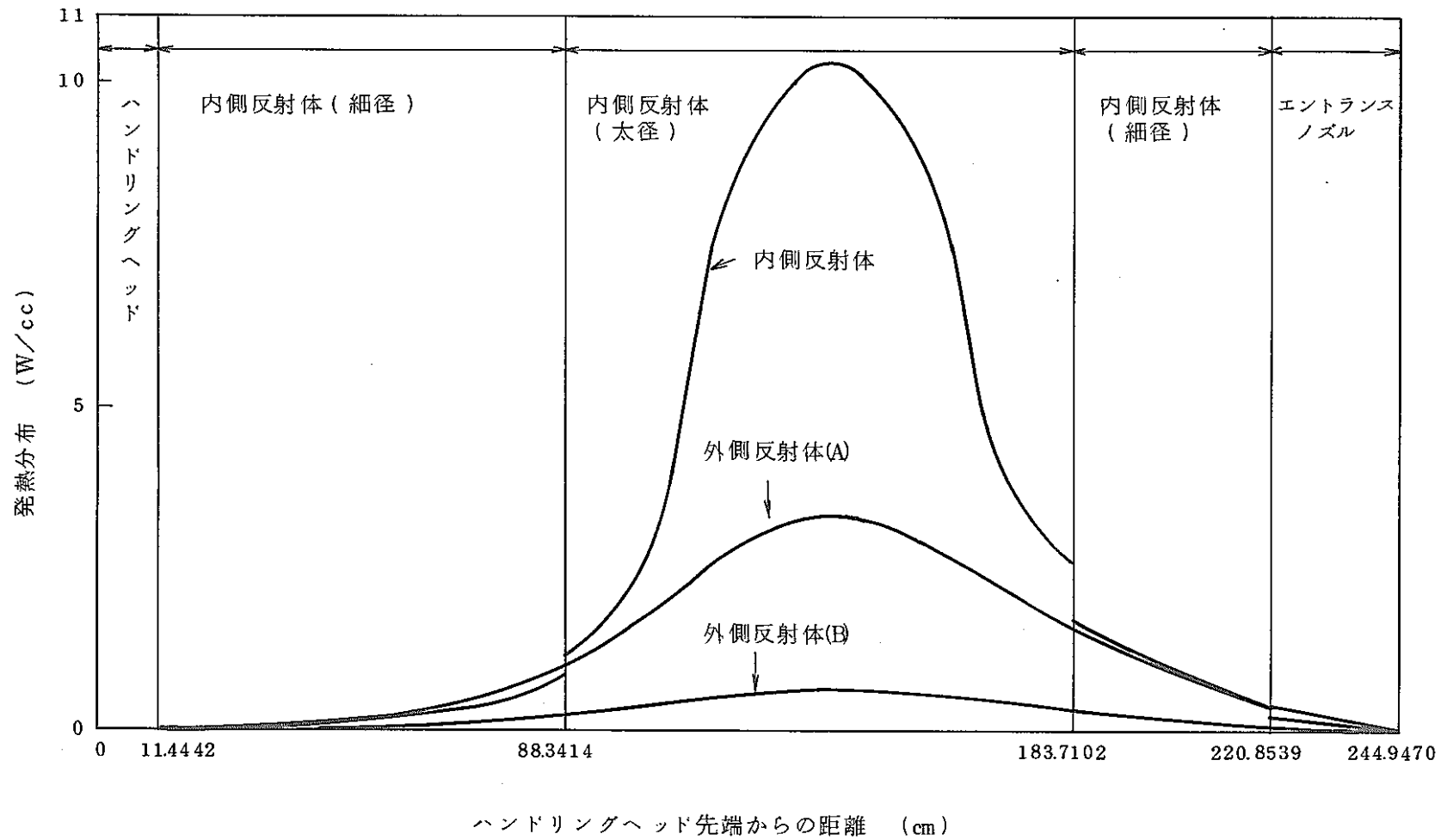
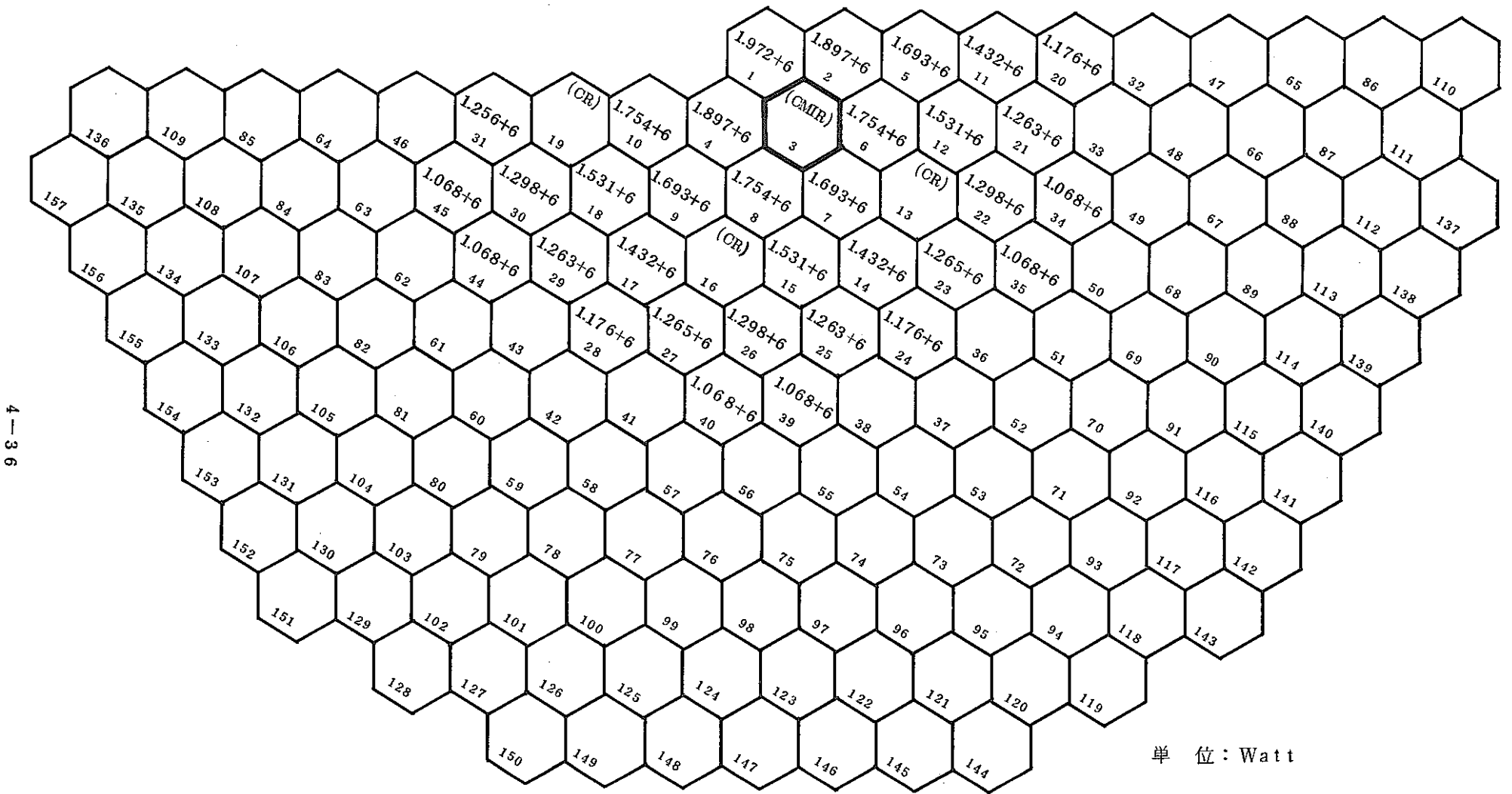
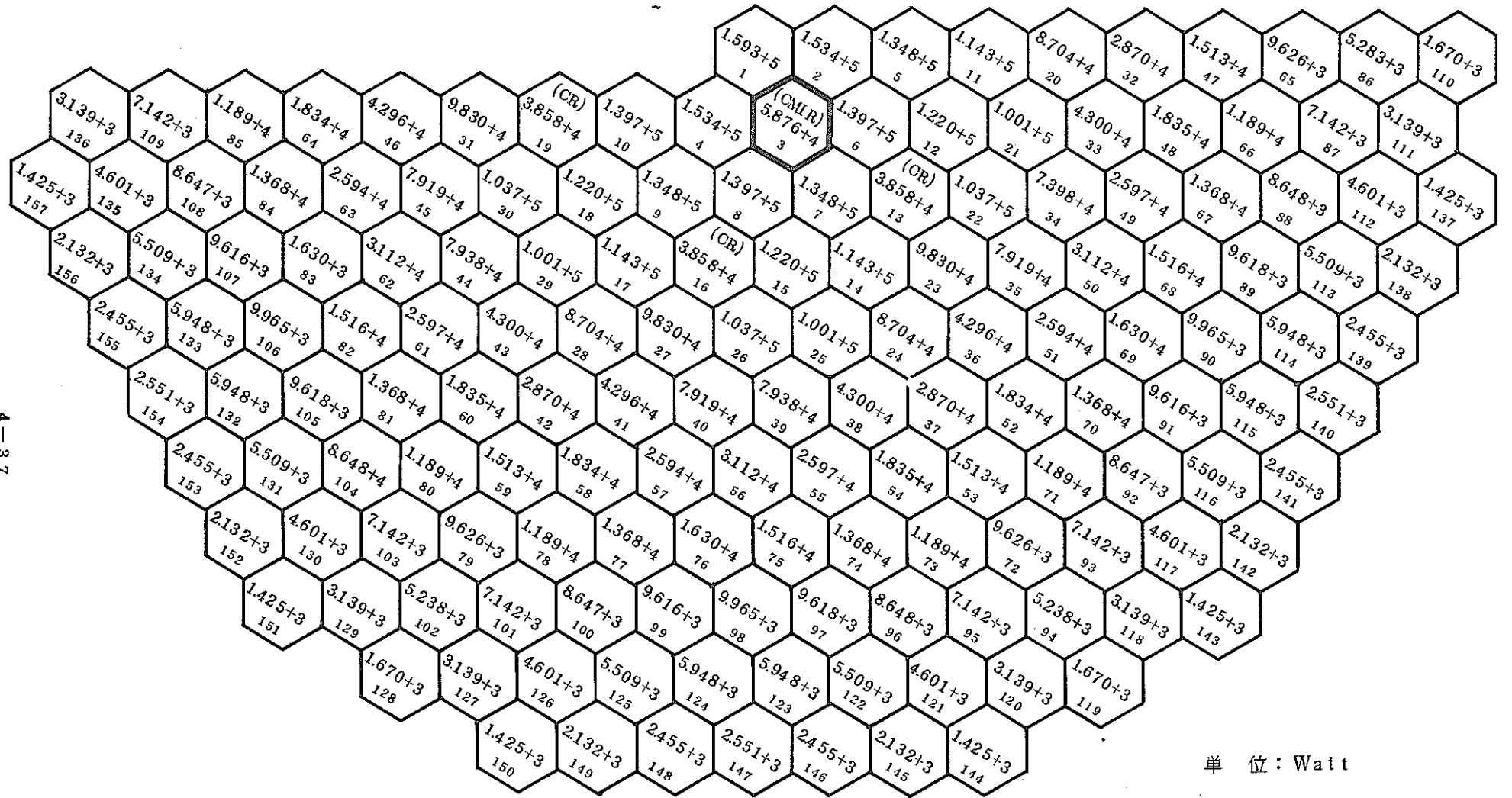


図 4.2 0(c) 「常陽」MK-II炉心の γ 線発熱軸方向分布(第0サイクル初期, RZ計算)
 -内側反射体, 外側反射体(A), および外側反射体(B)



4-36

図 4.2 1 「常陽」MK-II 炉心集合体毎核分裂発熱量(第 0 サイクル初期)



4-37

図 4.2.2 「常陽」MK-II 炉心集合体毎ガンマ線発熱量 (第0サイクル初期)

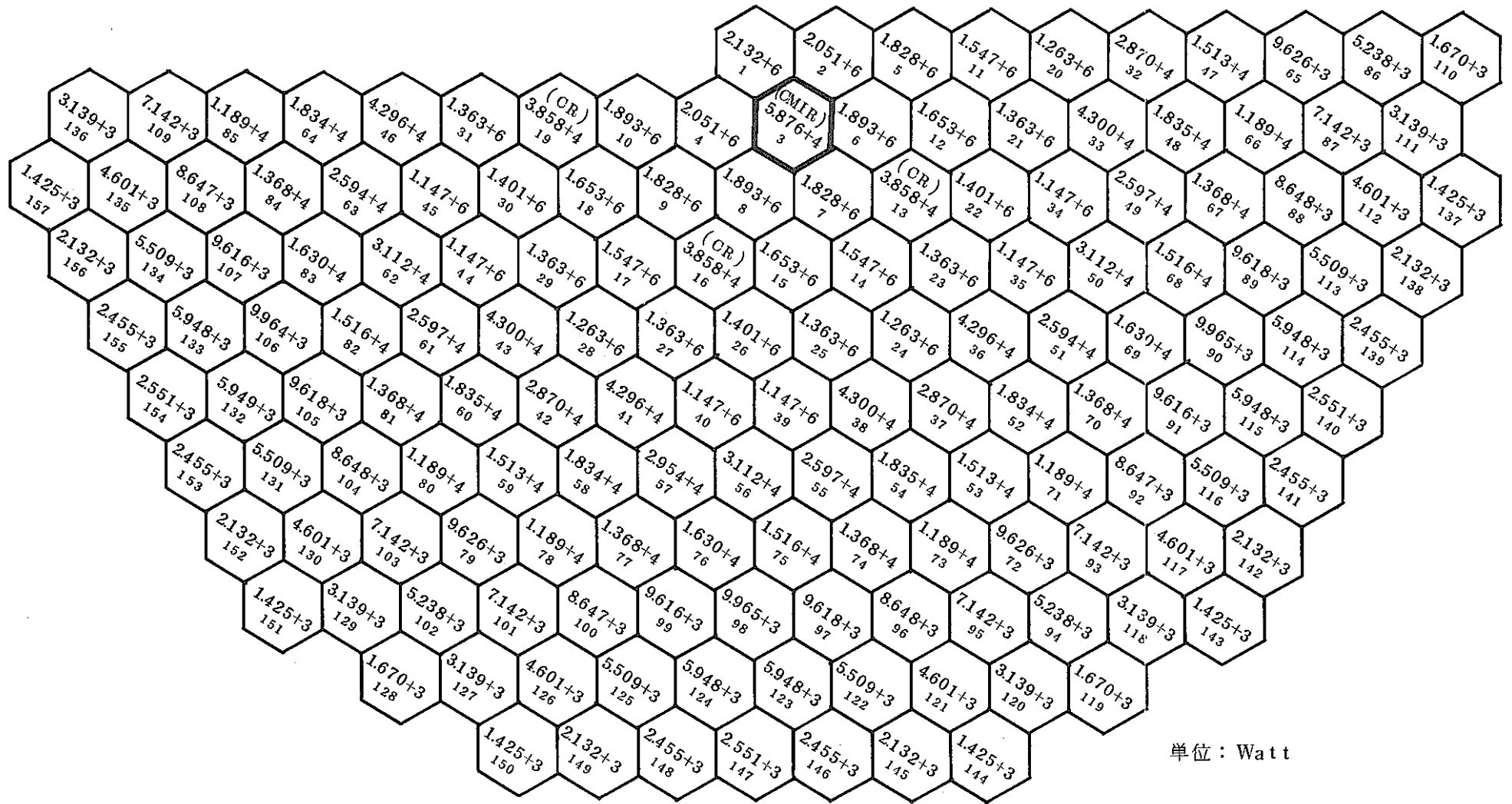


図 4.23 「常陽」MK-II 炉心集合体毎 (核分裂+ガンマ線) 発熱量 (第0サイクル初期)

4.3 集合体出口冷却材温度の実測値との比較

4.2 節で述べたガンマ線発熱解析結果を用い、集合体出口冷却材温度解析を行い、その結果と同実測値との比較を行った。以下、その比較結果について述べる。

4.3.1 集合体出口冷却材温度解析値

図 4.2.2 に示した集合体毎の発熱量（核分裂ならびにガンマ線発熱量合計値）を用い、集合体出口冷却材を、3次元ラップ管群温度解析コード H I T E T R A S⁽³⁾により実施した。本解析に用いた、集合体毎の冷却材流量、集合体間のギャップ流量、冷却材流量は既に表 4.1, 4.2, 4.3 に示した。

解析結果を図 4.2.4 に示す。本結果は集合体間の熱移動効果を考慮したものであるが、同図には上記効果を考慮しない場合の出口冷却材温度も示した。ここで反射体部において、集合体間の熱移動を考慮した場合の温度の方が、考慮しない場合のそれよりも低いことが注目される。特に、内側反射体ではこの結果は一見矛盾しているように思われる（炉心部から熱移動により出口温度は、熱移動を考慮した場合の方が、そうでない場合より高くなると思われる）。この原因は集合体間のギャップフローによると考えられる。今、内側反射体に注目すると、内側反射体内部を流れる流量は 0.176 kg/s であるのに対し、ギャップを流れる流量は反射体一体当り $80 \text{ g/s} \sim 90 \text{ g/s}$ （表 4.2 参照）であり、内部を流れる冷却材の約 $1/2$ である。このギャップ流量が持ちさる熱量が比較的大きいため、反射体内部の冷却材出口温度が低下したと考えられる。

4.3.2 集合体出口冷却材温度実測値

4.3.1 項で述べた解析値と比較すべき実測値を図 4.2.5 に示す。同実測値は、100 回程度のサンプリング結果の平均値である。

4.3.3 比較・検討

解析対象領域における解析値の実測値からの差を図 4.2.6 に示す。同図には解析値と実測値の温度差、ならびに左記温度差の実測値と原子炉入口温度との差に対する比を示している。

同図から以下のことがわかる。

- i) 炉心部においては、第 2 列までは解析値は実験値を $2 \sim 10 \%$ 過大評価している。一方、第 3 列から外側では最大 10% 過小評価している。
- ii) 内側反射体では、 $10 \sim 40 \%$ 解析値は実測値を過小評価している。しかも、

炉心からはなれている反射体ほど過小評価の程度は大きい。また集合体間熱移動を考慮しない場合出口温度解析値と実測値を比較すると、その解析値の過小評価傾向は小さくなる。

以上のような結果が得られた原因について検討した結果を以下に示す。

動燃殿の御検討によれば、内側反射体の冷却材出口部では、炉心燃料の冷却材流量と内側反射体のそれとに大きな差（約30倍）があるため、内側反射体の出口部冷却材は炉心燃料のそれに巻き込まれ、また内側反射体の出口部冷却材には炉心上部プレナムの冷却材が巻き込まれる傾向を示す。このことから、少なくとも内側反射体出口部冷却材温度については、高温の炉心上部プレナム冷却材が混ざることにより、実測値は実際の出口冷却材温度より、過大となる可能性がある。しかも、炉心から離れている反射体の方がその傾向が強いと言え、これは上記比較結果の傾向と一致する。

上記のような可能性があるとは言え、その定量的把握が現状困難であるので、ここでは過小評価の一因と考えられる、中性子の減速に伴なり媒質へのエネルギー付与（今回の発熱解析では考慮していない）について検討した結果を以下に示す。

中性子の運動エネルギーが媒質である原子核に付与される反応としては、弾性散乱、非弾性散乱、捕獲の3種が主として考えられる。このうち、非弾性散乱は原子核の励起に中性子運動エネルギーが主に使われ、それがガンマ線の発生に至るため、考慮しない。また捕獲反応は低エネルギー域で生じ、原子核に付与される運動エネルギーは小さいとしてやはり無視する。したがって、中性子運動エネルギーは主に弾性散乱で原子核に付与されるものとし、下式によりそのエネルギーを概算評価した。

$$\sum_{i=1}^{IGP} \sum_{j=1}^{IGP} \{ \Sigma_{i \rightarrow j}^e (\bar{E}_i - \bar{E}_j) \cdot \phi_i \} \quad \dots\dots (4.1)$$

- ここで
- IGP : 中性子エネルギー群数 (= 7)
 - $\Sigma_{i \rightarrow j}^e$: 中性子が第 i 群から j 群に移行する弾性散乱マクロ断面積
 - \bar{E}_i, \bar{E}_j : 中性子第 i, j 群の平均エネルギー
 - ϕ_i : 中性子第 i 群の中性子束

(4.1)式により概算すると、内側反射体最内層の炉心中心面上での中性子の弾性散乱の発熱は約3W/ccであり、一方、同位置でのガンマ線発熱は図4.19より10W/ccである。即ち、中性子による発熱は、ガンマ線の発熱の30%程度あることになる。ところで、この中性子による発熱は第1群の中性子束にほぼ比例し、内側反射体について言えば、第1群の中性子束の径方向への減衰は、ガンマ線発熱のそれに比べ大きいから、内側反射体1体での発熱量を考えると、中性子による発熱のガンマ線発熱に対する割合は30%には至らないと言える。

以上の検討結果をまとめると、

- i) ガンマ線発熱に関し、今回詳細な解析を行ったが、内側反射体出口冷却材温度に関し、上記解析をベースとした温度は実測値を10~40%過小評価する。
(集合体間熱移動効果を考慮しないと上記過小評価傾向は小さくなる)
- ii) 上記過小評価の原因の一つとして、中性子の運動エネルギーの媒質への付与を考慮していないことも考えられる。
- iii) 反射体部分では、集合体間ギャップ流量が出口冷却材温度に比較的大きく影響する。したがって、その流量の詳細な検討が必要である。

4.4 第0サイクル初期の炉心湾曲解析

前節までに述べた集合体毎の発熱量ならびに冷却材流量を基に、炉心温度解析、炉心湾曲解析を第0サイクル初期について実施した。以下その結果について述べる。

4.4.1 解析条件

温度条件を図4.27、図4.28に示す。同図は各々炉心径方向温度分布(炉心中心面上、炉心上端面、燃料要素束上端)、ラップ管軸方向温度分布を示す。

また、炉心構造の主な仕様を表4.6に示す。

解析体系は、集合体出口冷却材温度計算で述べたように、1/2炉心体系とした。その他条件については、参考文献(3)と同一とした。即ち、

内側反射体剛性	: 17.29 cm ⁴ (等価ラップ管厚さ=1.17 mm)
エントランスノズル下端間隙	: 0.1 mm
倒れしきいモーメント	: 0.0 kg・cm

今回の湾曲解析の条件は、温度条件を除いて参考文献(3)の条件と同一である。温度条件に関して言えば、反射体部温度が概して参考文献(3)の温度より高くなっ

(注) (1) 集合体間熱移動考慮

ただし()内数値は熱移動効果を無視した場合の温度

(2) 冷却材入口温度：370℃

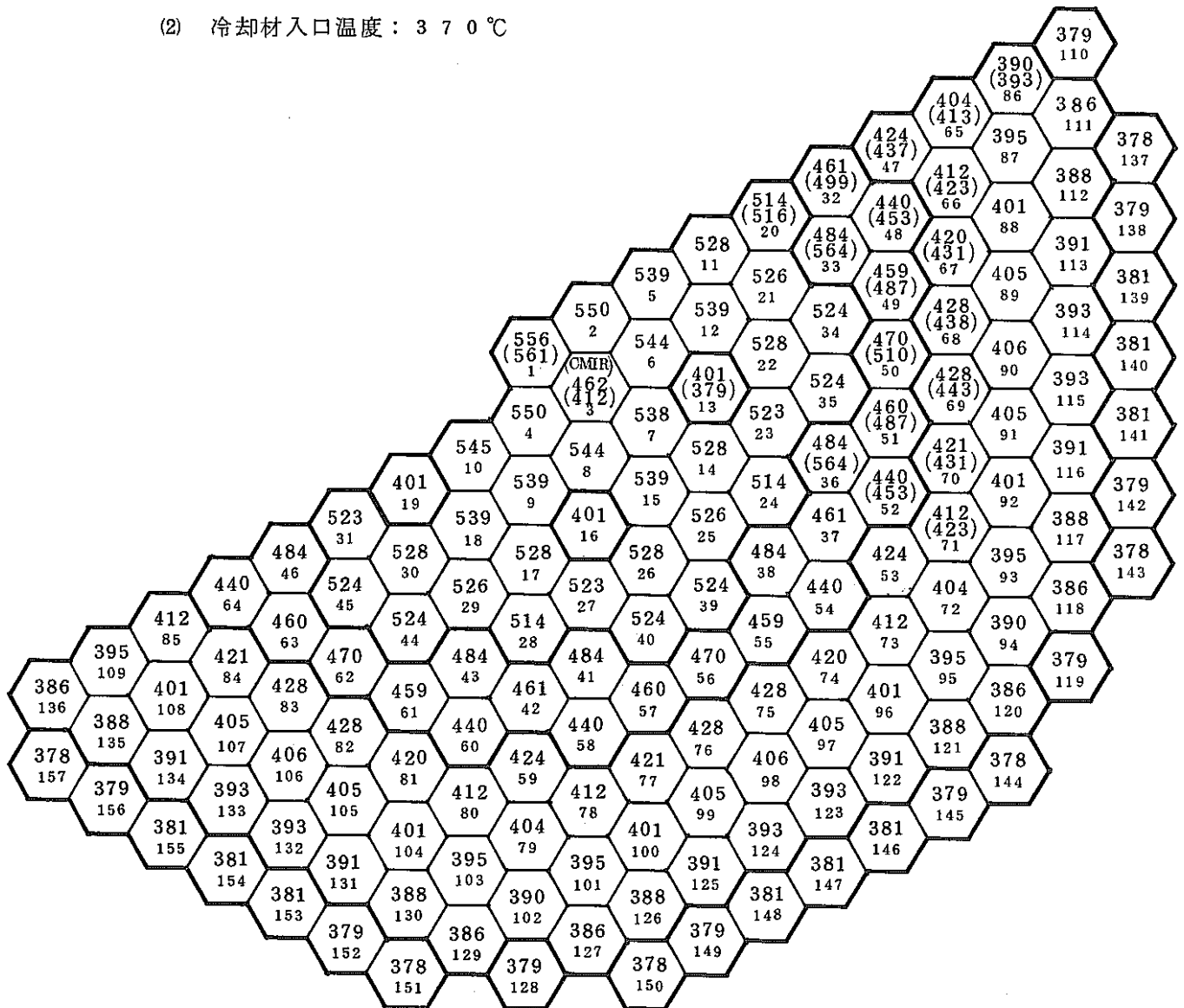


図 4.24 「常陽」MK-II 炉心集合体出口冷却材温度 (バルク温度)
(第0サイクル初期)

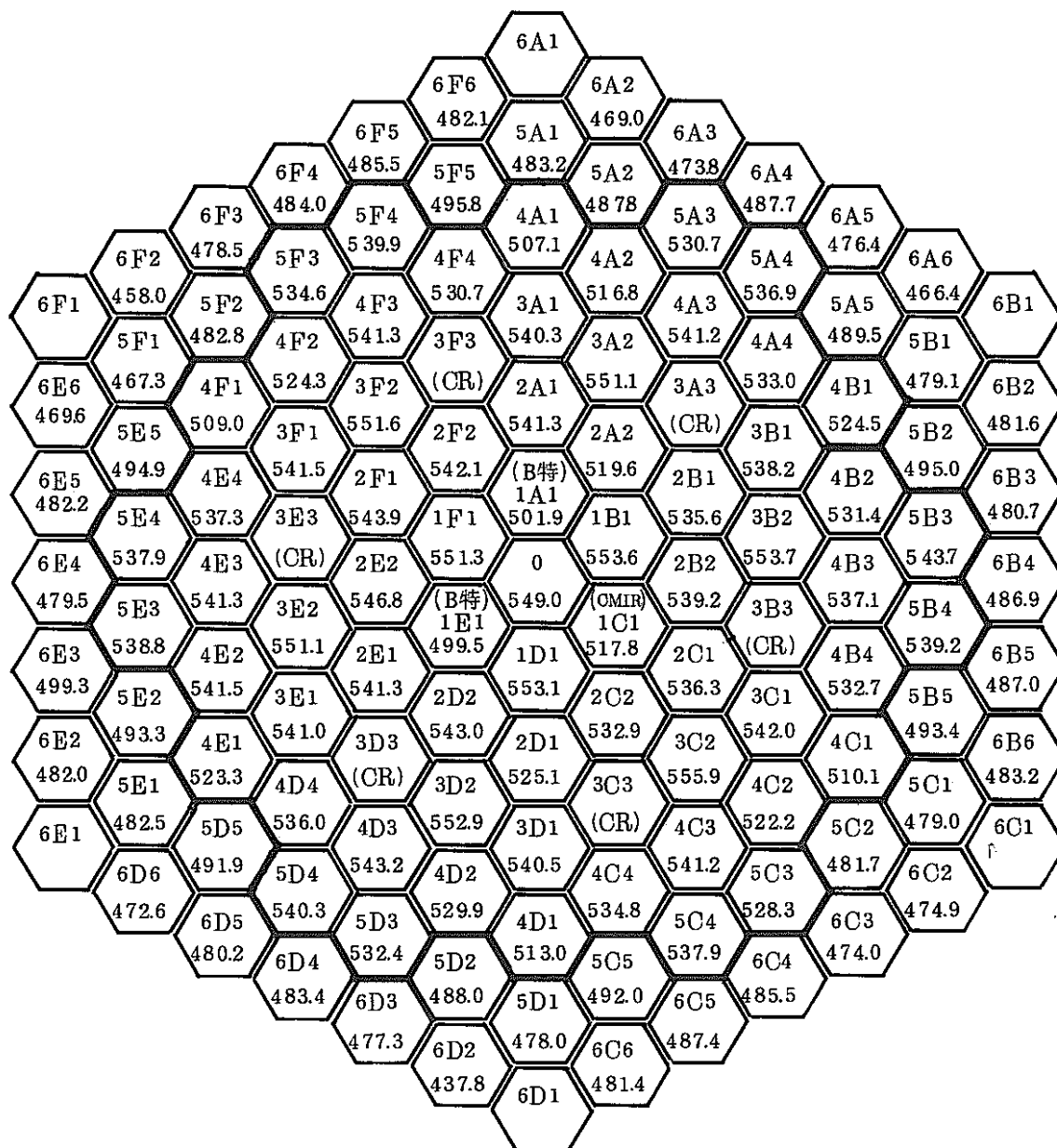
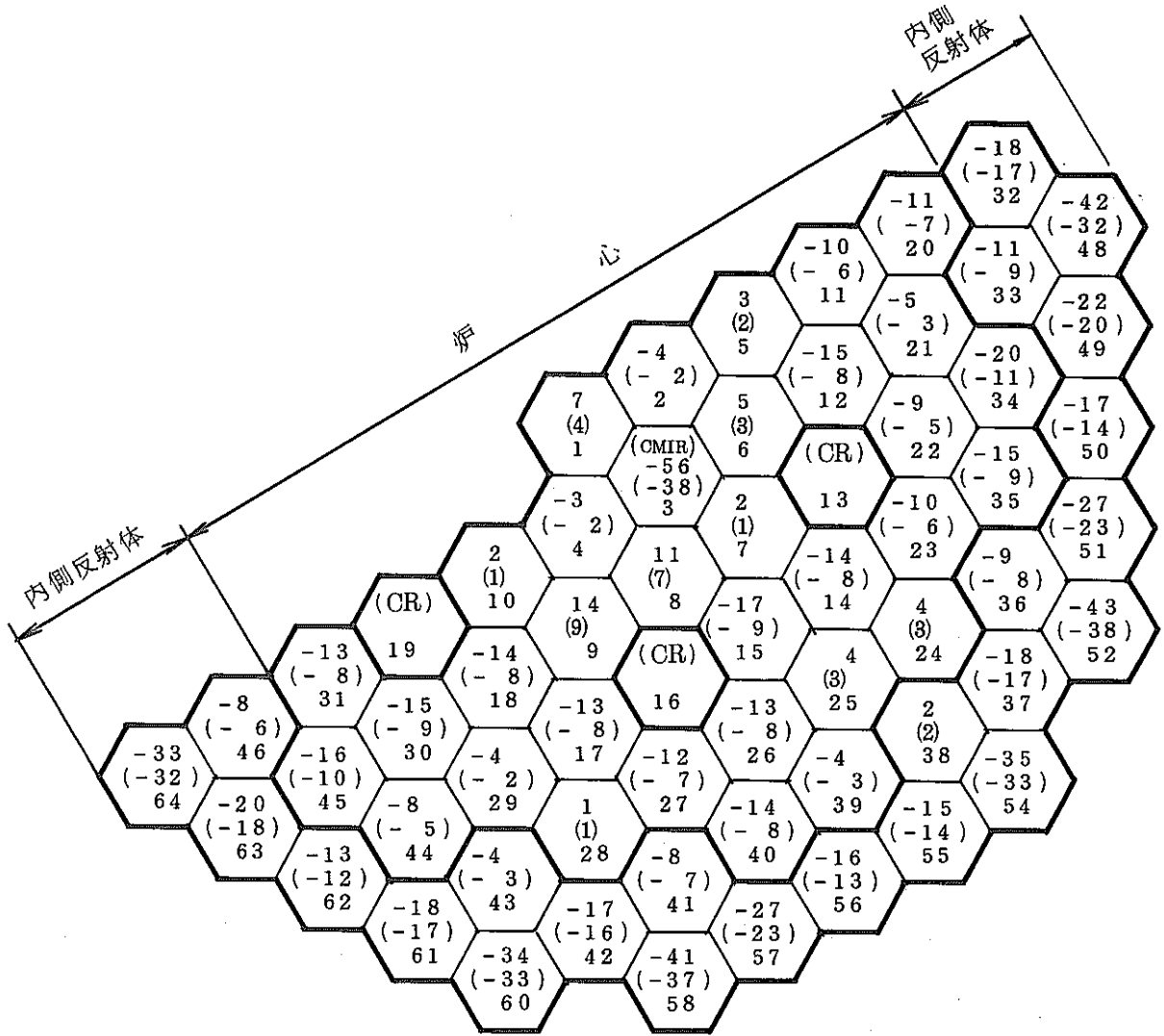


図 4.25 「常陽」MK-II 炉心集合体出口冷却材温度実測値
(第0サイクル)



ΔT : 解析値^(*) - 実測値 (°C)

$$\frac{\Delta T}{(X)}_n$$

X : $\frac{\Delta T}{\text{実測値} - \text{原子炉入口温度}}$ (%)

n : 集合体 N

(*) 集合体間熱移動考慮

図 4.26 集合体出口冷却材温度の解析値と実測値の比較

ている（例えば内側反射体では20～40℃）。

4.4.2 解析結果

i) 変位

第0サイクル初期定格出力到達後の炉心構成要素湾曲状況を図4.29に示す。また、下部パッド部ならびに炉心構成要素頂部における変位方向を図4.30、図4.31に示す。図4.30からわかるように下部パッド位置での変位は、炉心部では炉心外側方向に向いており、また反射体領域では変位は小さく、図上には現われていない。一方、頂部での変位は、反射体部では炉心外側方向を向いているが、炉心部では制御棒、材料照射用反射体の存在により不規則な変位であるが、概ね低温の制御棒、材料照射用反射体方向に向いている。

最後に変位量に関する最大値を表4.7にまとめた。

ii) 接触荷重

図4.32、図4.33に下部パッド、頂部パッドにおける接触状態を示す。同図からわかるように下部パッド部での接触は主に炉心部で生じており、頂部パッド部での接触は主に反射体部で生じている。これは、反射体部で反射体が概ね炉心外側方向に変形することによる。

パッド部での最大接触荷重を表4.8に示す。

iii) 出力上昇の炉心湾曲反応度変化

第0サイクル初期での出力上昇時の炉心湾曲による反応度変化（炉心燃料部の湾曲変位による）を図4.34に示す。

同図からわかるように、熱出力45～80MWまでは負の反応度が投入され続け、最大-6.5 β まで投入される。80MW以降、正の反応度が投入され、80MWから100MW間での反応度変化は約+3 β であり、出力係数で約+0.15 β /MW= $+6 \times 10^{-6} \Delta R/R/MW$ に相当する。

4.4.3 検討

本解析結果と参考文献(3)記載の結果^(*)とを比較し、温度条件の影響について検討した。

最大変位ならびに接触荷重を本解析結果と参考文献(3)のTable 5.6, 5.7に記

(*) 今回の解析とは温度条件のみが異なる。

載された数値と比較すると、

変位：炉心燃料部では頂部、下部パッド部ともに本解析結果の方が小さくなっている（頂部：-1.7mm，下部：-0.2mm）内側反射体部でも、頂部、下部パッド部とも本解析結果の方が小さくなっている（頂部：-0.5mm，下部：-0.6mm）外側反射体部でもやはり同様の傾向を示す。
（頂部：-0.2mm，下部：-0.6mm）

荷重：外側反射体(B)部を除き、頂部パッド部、下部パッドとも本解析結果は参考文献(3)記載値より小さくなっている。
（炉心部で-20~-40%，内側反射体部で-60%，外側反射体(A)部で-30~-80%）

一方、外側反射体(B)部では頂部パッドでは差がなく、下部パッド部では大きく(+10%)になっている。

次に、出力上昇時の湾曲反応度変化について本解析結果と参考文献(3)記載のそれ（Fig6.1(1)）を比較すると、参考文献(3)記載の結果は約50MWで正の反応度が投入され始め、100MW到達時点で約10%の正の反応度が投入される。一方、図4.3.4に示した今回の解析結果は、約45MWから負の反応度が入り始め、約80MWで最大(-6.5%)、その後、正の反応度が投入され100MWで湾曲による反応度は-3.5%まで回復する。これらの結果を炉心燃料部の変位の観点から述べると次のようになる。

参考文献(3)の結果は、炉心燃料が約50MW時点から炉心中心方向に変位することを意味している。一方、今回の結果は、約45MW時点から炉心燃料は炉心外側方向に変位し続け、約80MWでその炉心外側方向の変位から炉心中心方向への変位に変わる。

上記両結果における炉心燃料の炉心中心側への変位は内側反射体による下部パッドを介した炉心燃料の炉心中心側への押し込みによるものである。今回の結果のように、内側反射体による押し込みが遅れたのは、内側反射体温度が高く、中心部から内側反射体にかけての径方向温度勾配が小さくなり、その結果、内側反射体の炉心外側方向への熱湾曲が小さくなったためと考えられる。

以上の検討結果から、炉心湾曲挙動解析における反射体部の温度条件の設定が重要であると言えるが、その温度条件に対する影響因子として下記のもの挙げ

られる。

- 反射体部熱出力, 冷却材流量
- 反射体部のギャップ流量

表 4.6 炉心湾曲解析条件

項	目	仕 様
炉心構成要素	総 数	3 1 3 体
	全 長	2 9 7 0 mm
	炉心上部支持板からハンドリングヘッド上端までの距離	2 4 4 0 mm
	配列ピッチ	8 1.5 mm
	外側対辺間距離	7 8.5 mm
スペーサパッド	構 造	打出し加工
	軸方向位置 (上部炉心支持板基準)	2 3 9 0 / 1 1 7 0 mm
	パッド間間隔	1.2 / 0.3 mm
ラッパ管肉厚	炉心燃料集合体	1.9 mm
	制御棒要素	1.8 mm
	内側反射体 (*1)	1 1.7 mm
	外側反射体(A) (*2)	1.9 4 mm
	外側反射体(B) (*3)	2 5.0 mm
エントランスノズル部	全 長	5 1 0 mm
	下端部間隙 (*4)	0.1 mm
最外周反射体・炉心支持枠間の間隙		1.3 5 / 0.2 5 mm

(*1) 7本の反射材を考慮した断面2次モーメントに等価な値

(*2) 反射材を支持する中心支持棒を考慮した断面2次モーメントに等価な値

(注3) 実際の断面2次モーメントに等価な値

(注4) 公 称 値

表 4.7 「常陽」MK-II 炉心の炉心構成要素最大変位

第 0 サイクル初期 単位 ; mm

集合体タイプ	位 置	最大変位量
炉 心 燃 料 部	頂 部	3.4 (4 4)
	下部パッド位置	0.5 (7)
内 側 反 射 体 部	頂 部	5.9 (4 6)
	下部パッド位置	0.4 (5 1)
外 側 反 射 体 A 部	頂 部	4.4 (8 3)
	下部パッド位置	0.3 (6 8)
外 側 反 射 体 B 部	頂 部	0.9 (1 5 1)
	下部パッド位置	0.2 (1 3 7)

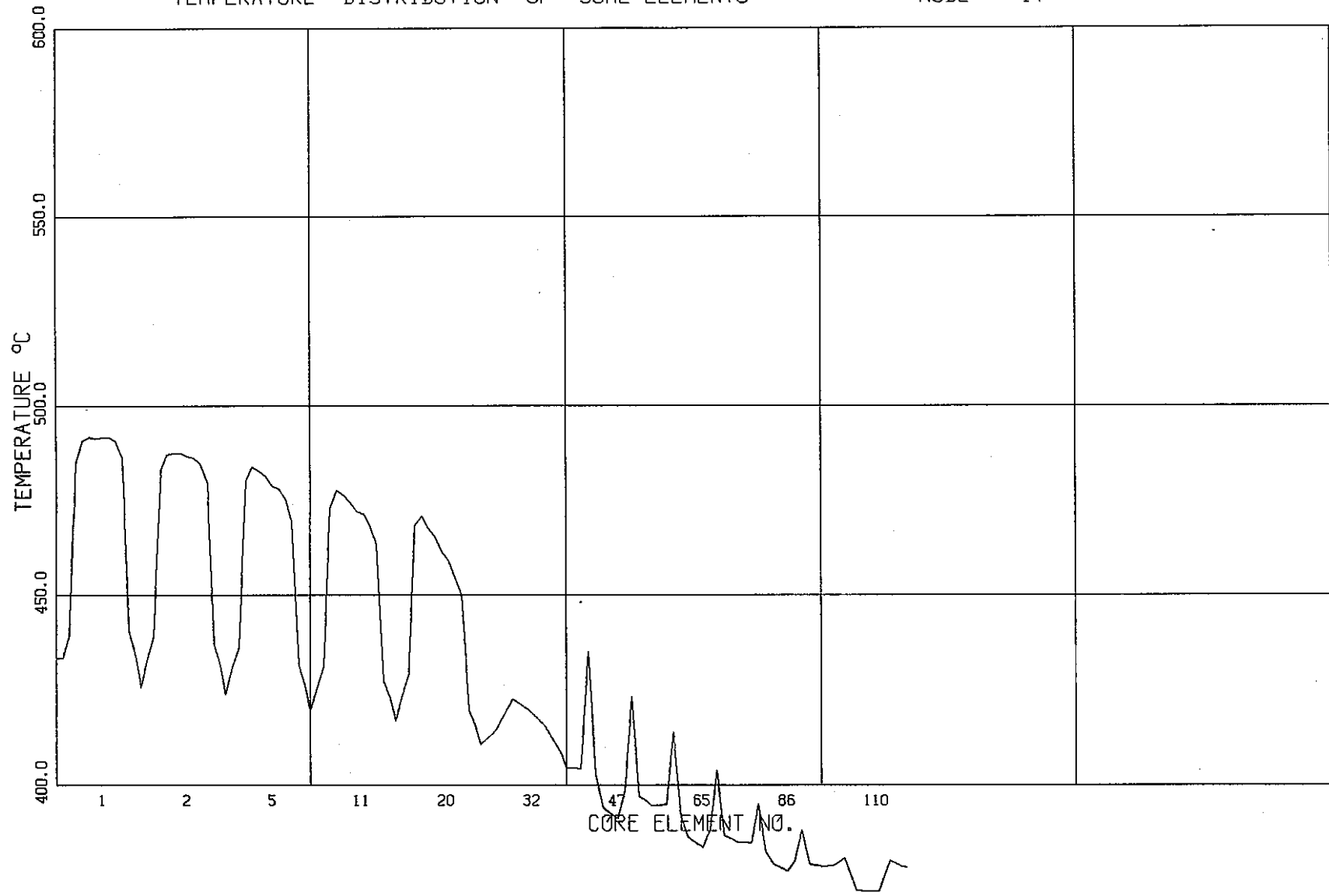
表 4.8 「常陽」MK-II 炉心のパッド部での最大接触荷重

第 0 サイクル初期 単位 ; kg

集合体タイプ	位 置	最大接触荷重
炉 心 燃 料 部	頂 部 パ ッ ド	8.4 (5- 19)
	下 部 パ ッ ド	2 3.6 (5- 6)
内 側 反 射 体 部	頂 部 パ ッ ド	1 0.3 (61- 81)
	下 部 パ ッ ド	1 7.0 (44- 61)
外 側 反 射 体 A 部	頂 部 パ ッ ド	1 1.0 (81-104)
	下 部 パ ッ ド	1.7 (56- 75)
外 側 反 射 体 B 部	頂 部 パ ッ ド	1 0.8 (130-151)
	下 部 パ ッ ド	2 6.9 (151)

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF SOME ELEMENTS

NODE 17

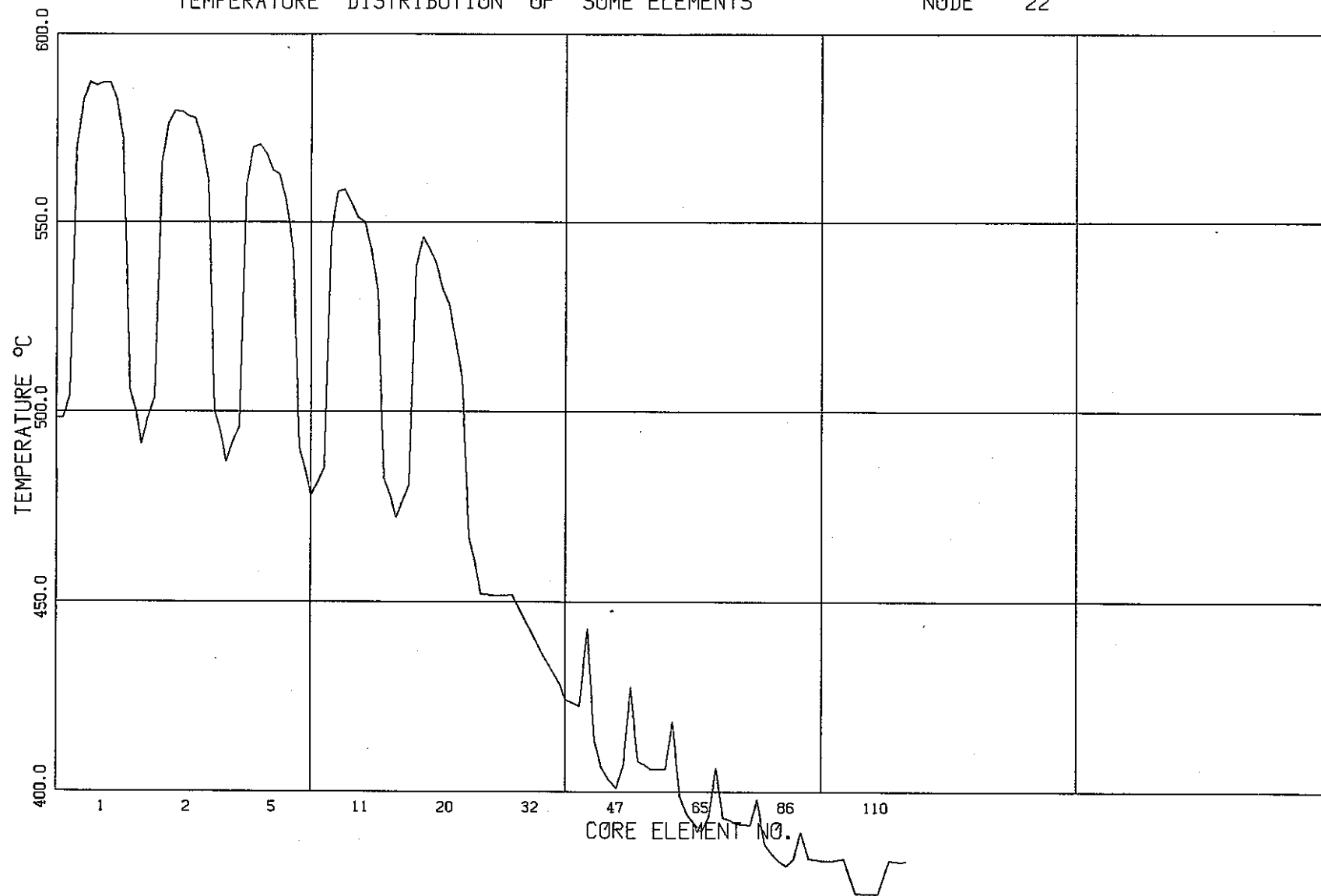


4-49

図 4.27 (a) 「常陽」MK-II 炉心径方向温度分布—炉心中心面
(第 0 サイクル初期)

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF SOME ELEMENTS

NODE 22

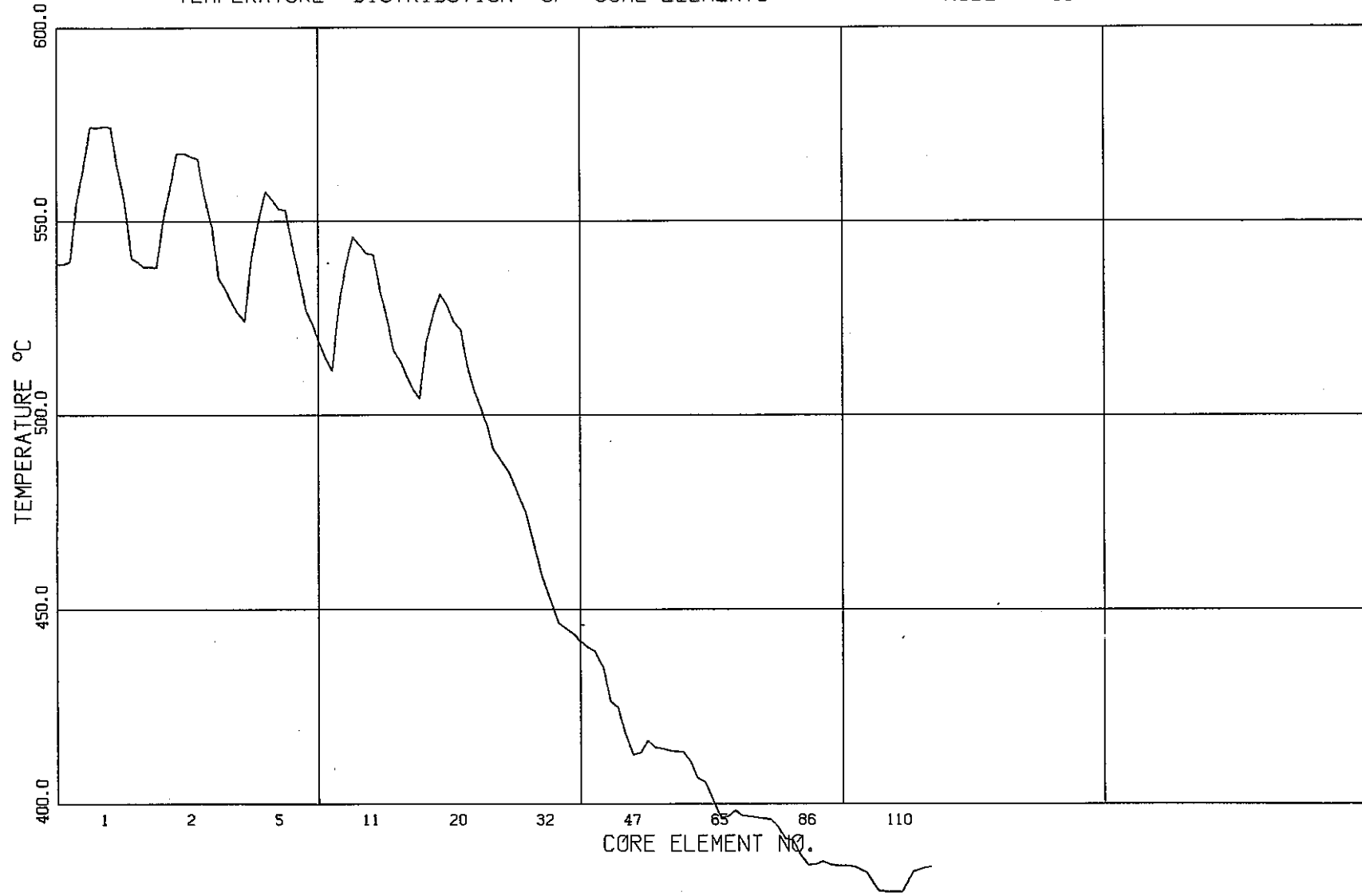


4-50

図 4.27 (b) 「常陽」MK-II 炉心径方向温度分布—炉心上端面
(第0サイクル初期)

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF SOME ELEMENTS

NODE 46



4-51

図 4.27 (c) 「常陽」MK-II 炉心径方温度分布—燃料要素束上端
(第0サイクル初期)

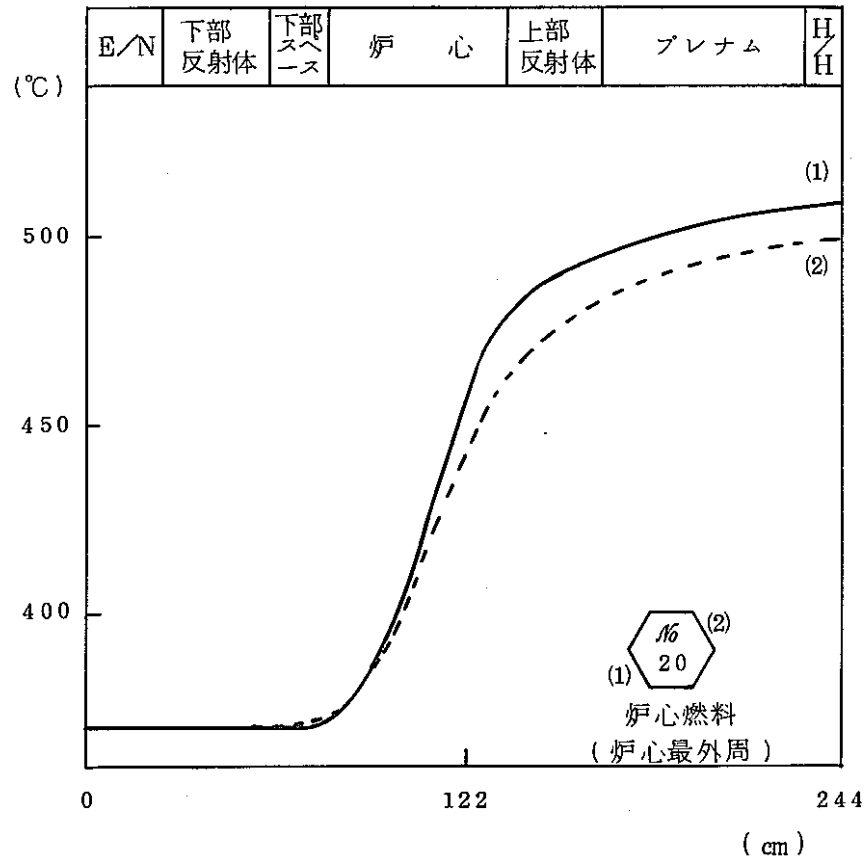
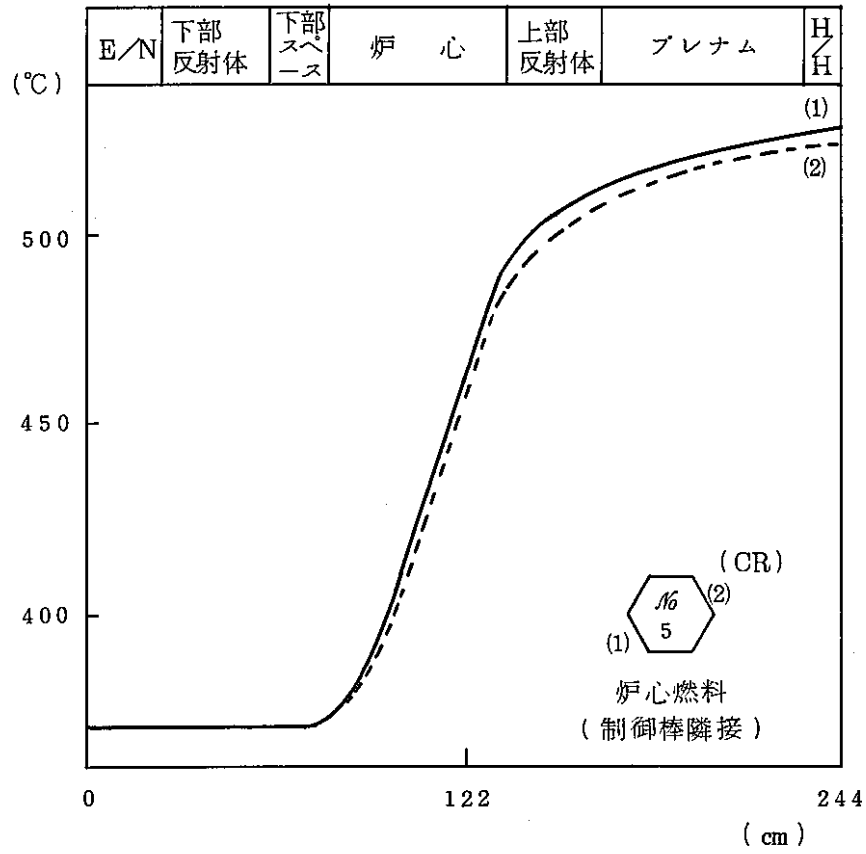


図 4. 28 (a) ラップ管軸方向温度分布 (第 0 サイクル初期)

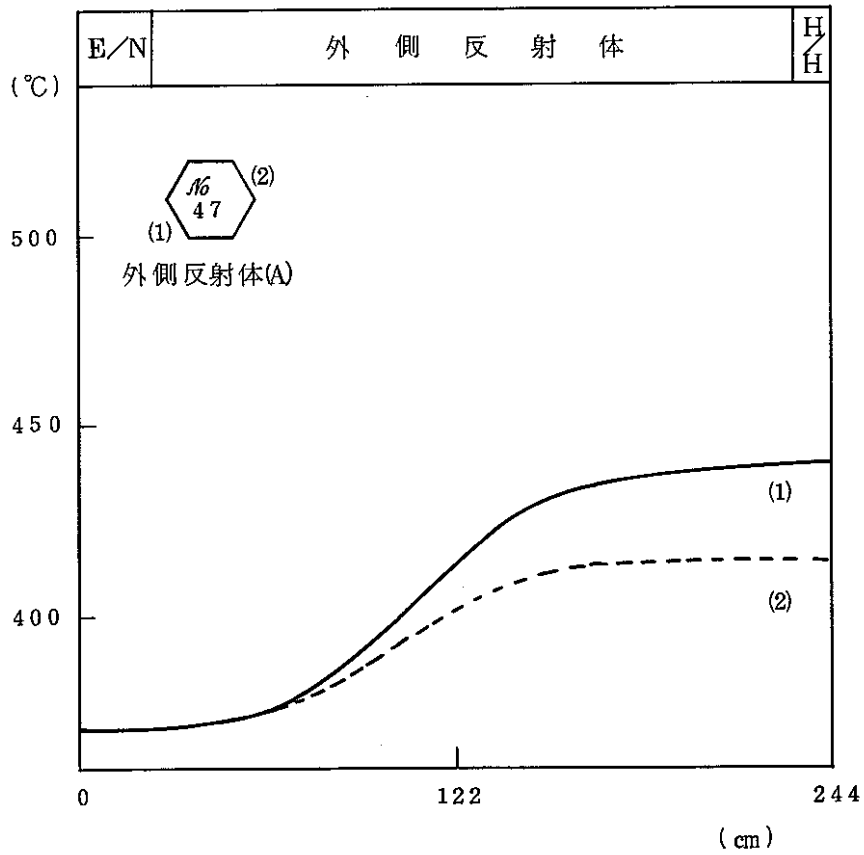
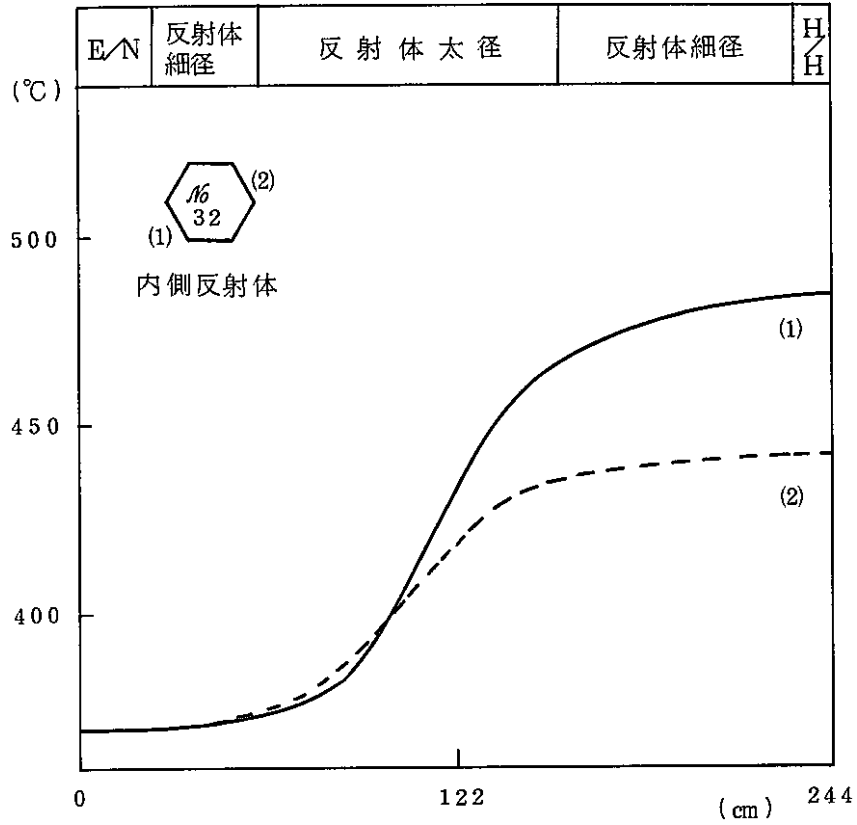
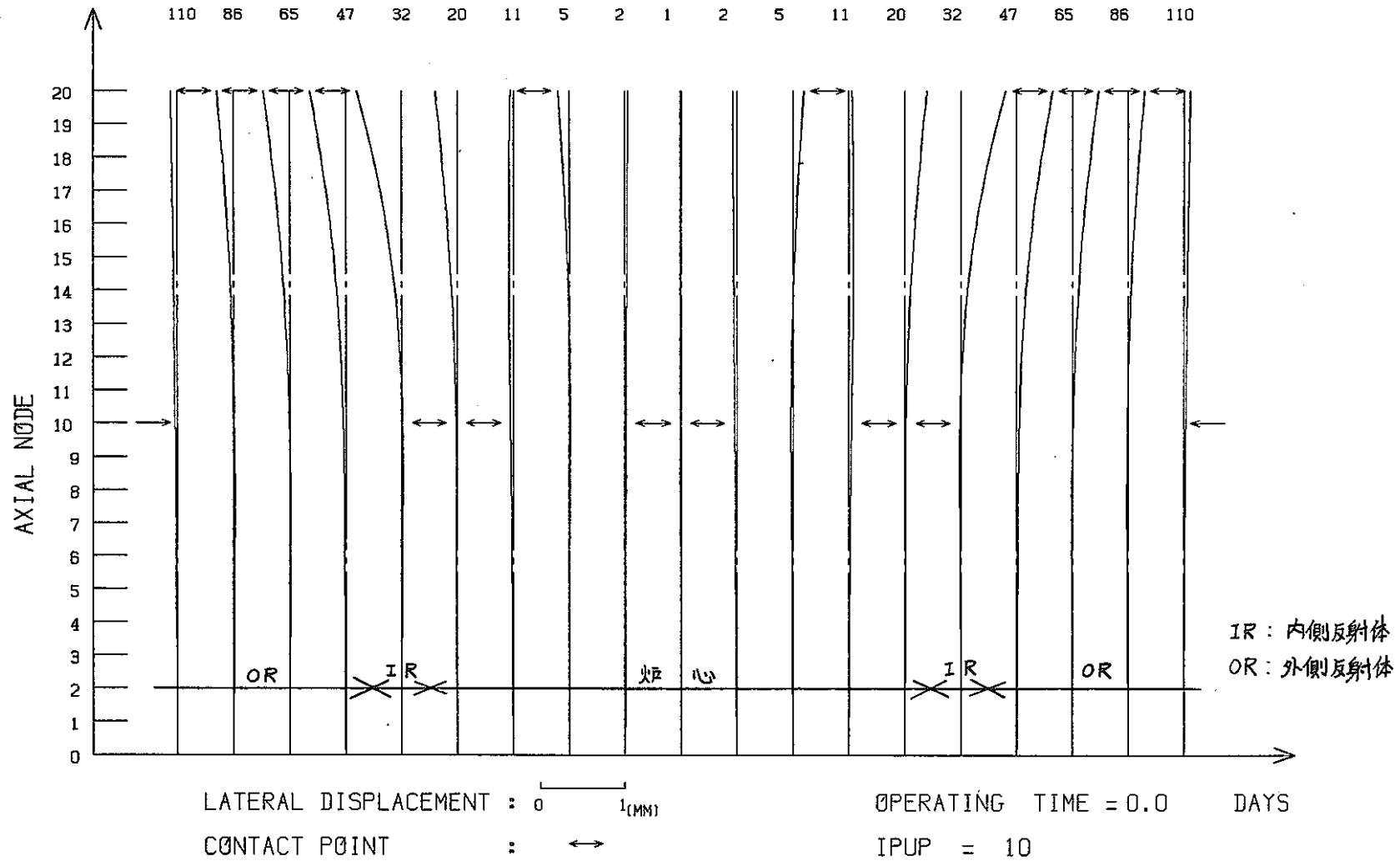


図 4.28(b) ラッパ管軸方向温度分布 (第 0 サイクル初期)

CORE ELEMENT NUMBER :



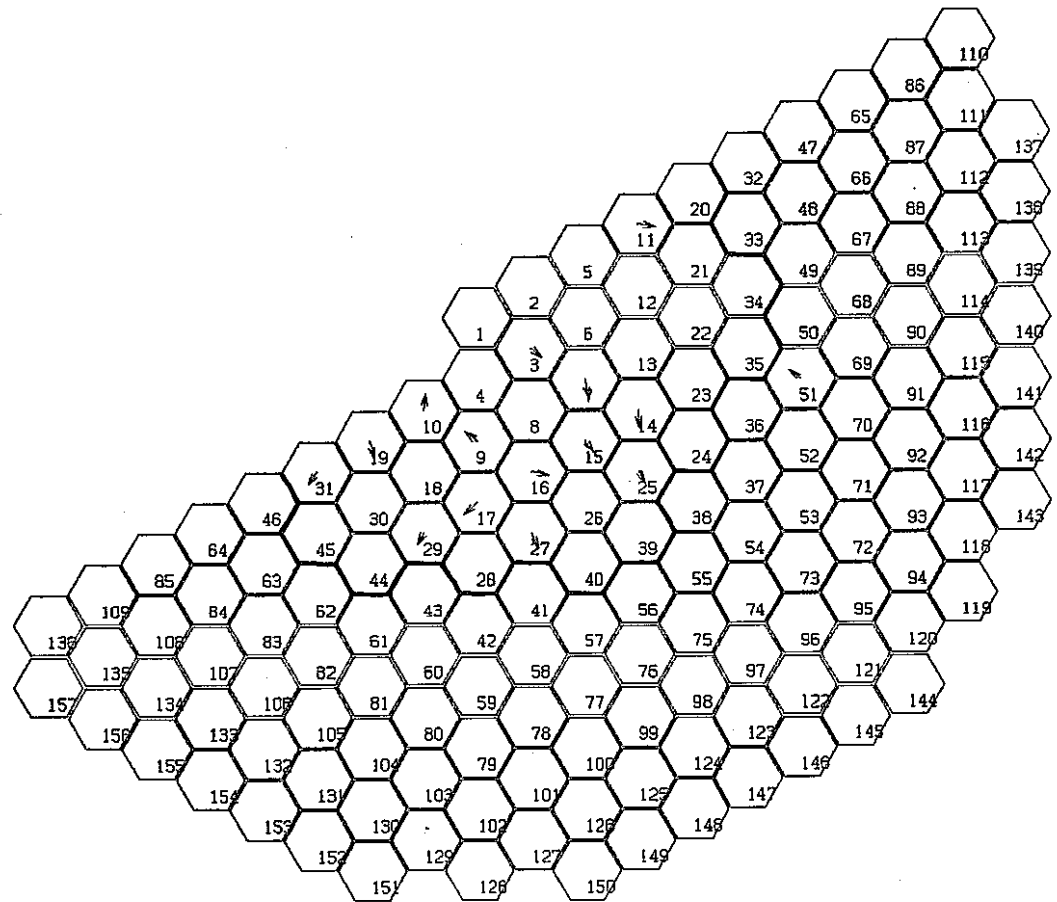
AXIAL SHAPE OF BOWED CORE ELEMENTS

図 4.29 「常陽」MK-II 炉心の炉心構成要素湾曲状況
(第0サイクル初期, 炉心対角線列)

IPUP = 10

OPERATING TIME = 0.0 DAYS

AXIAL DISTANCE = 1220.0 MM



← 5 MM

4-55

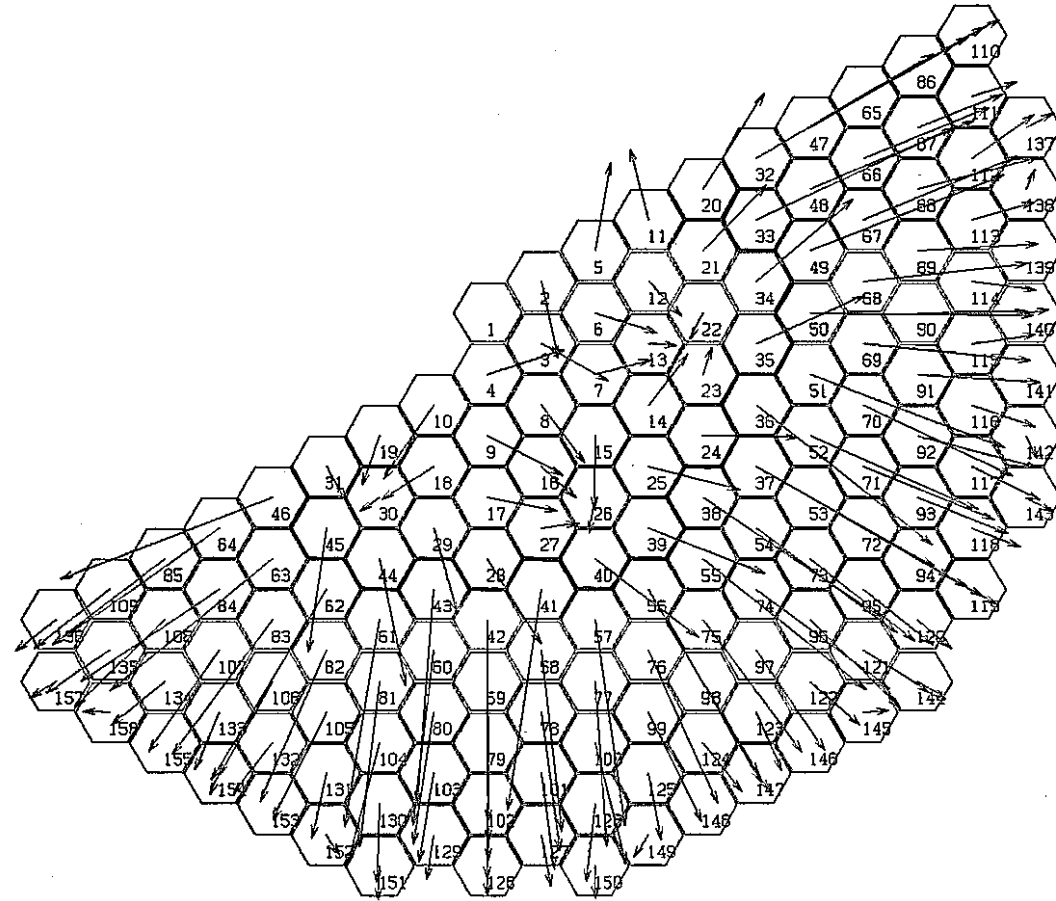
DISPLACEMENTS OF CORE ELEMENTS

図 4.30 「常陽」MK-II 炉心の下部パッド部変位量
(第0サイクル初期)

IPUP = 10

OPERATING TIME = 0.0 DAYS

AXIAL DISTANCE = 2440.0 MM



4-56

← 5 MM

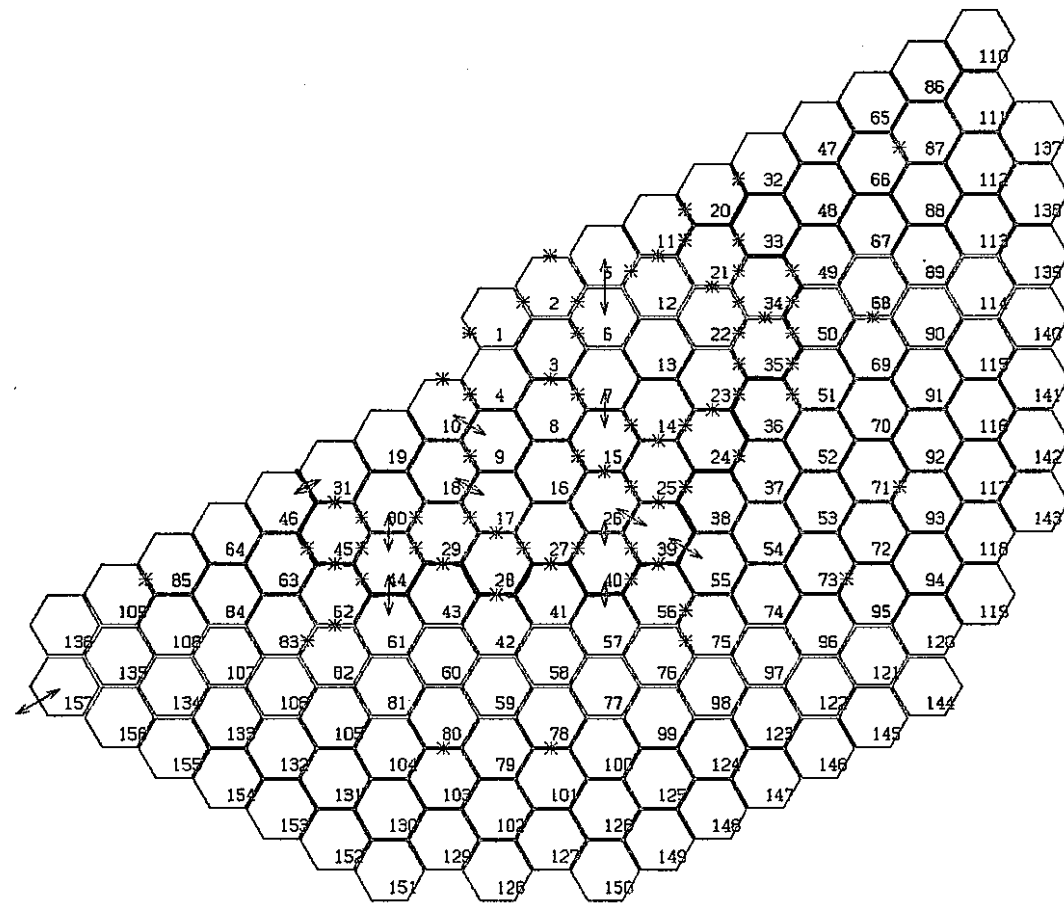
DISPLACEMENTS OF CORE ELEMENTS

図 4.31 「常陽」MK-II 炉心の炉心構成要素頂部変位量
(第0サイクル初期)

IPUP = 10

OPERATING TIME = 0.0 DAYS

AXIAL DISTANCE = 1220.0 MM



4-57



200 KG

*

LESS THAN 10.23 KG

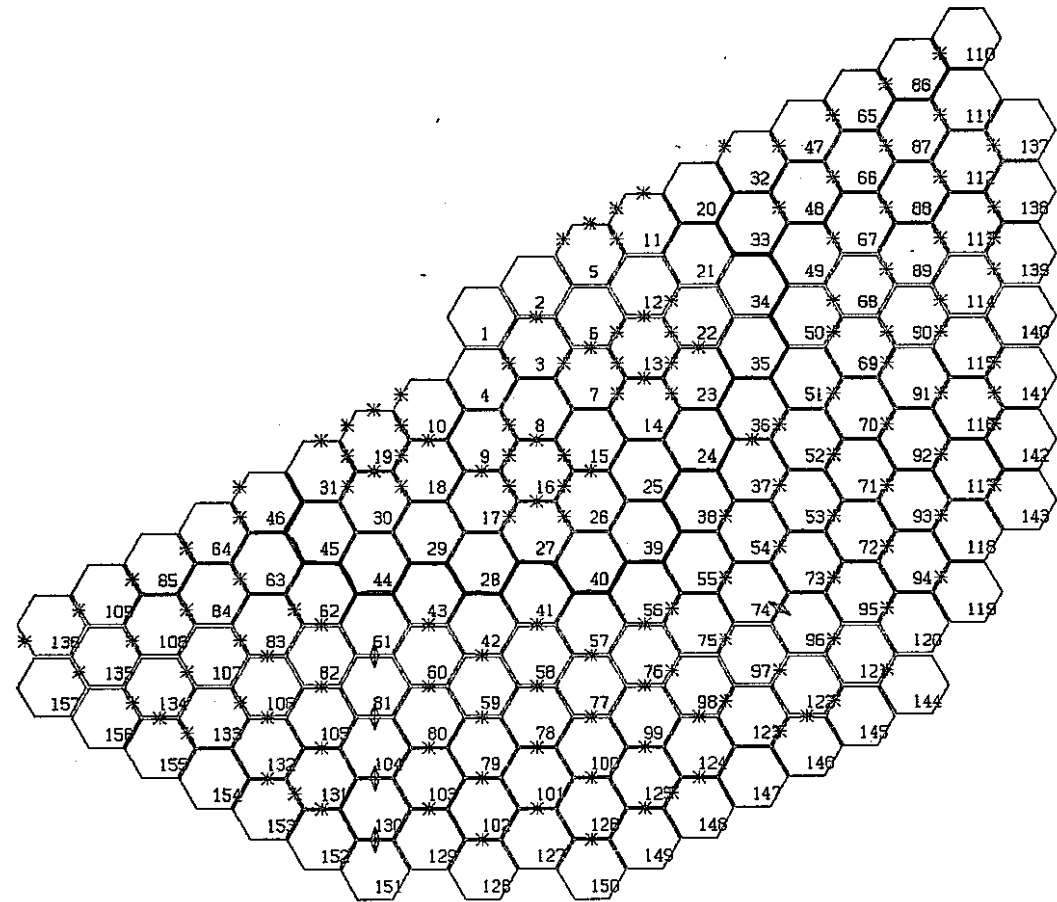
CONTACT FORCES BETWEEN CORE ELEMENTS

図 4.32 「常陽」MK-II 炉心の下部パッド部の接触状況
(第0サイクル初期)

IPUP = 10

OPERATING TIME = 0.0 DAYS

AXIAL DISTANCE = 2440.0 MM



4-58



200 KG

*

LESS THAN 10.23 KG

CONTACT FORCES BETWEEN CORE ELEMENTS

図 4.33 「常陽」MK-II 炉心の頂部パッド部の接触状況
(第0サイクル初期)

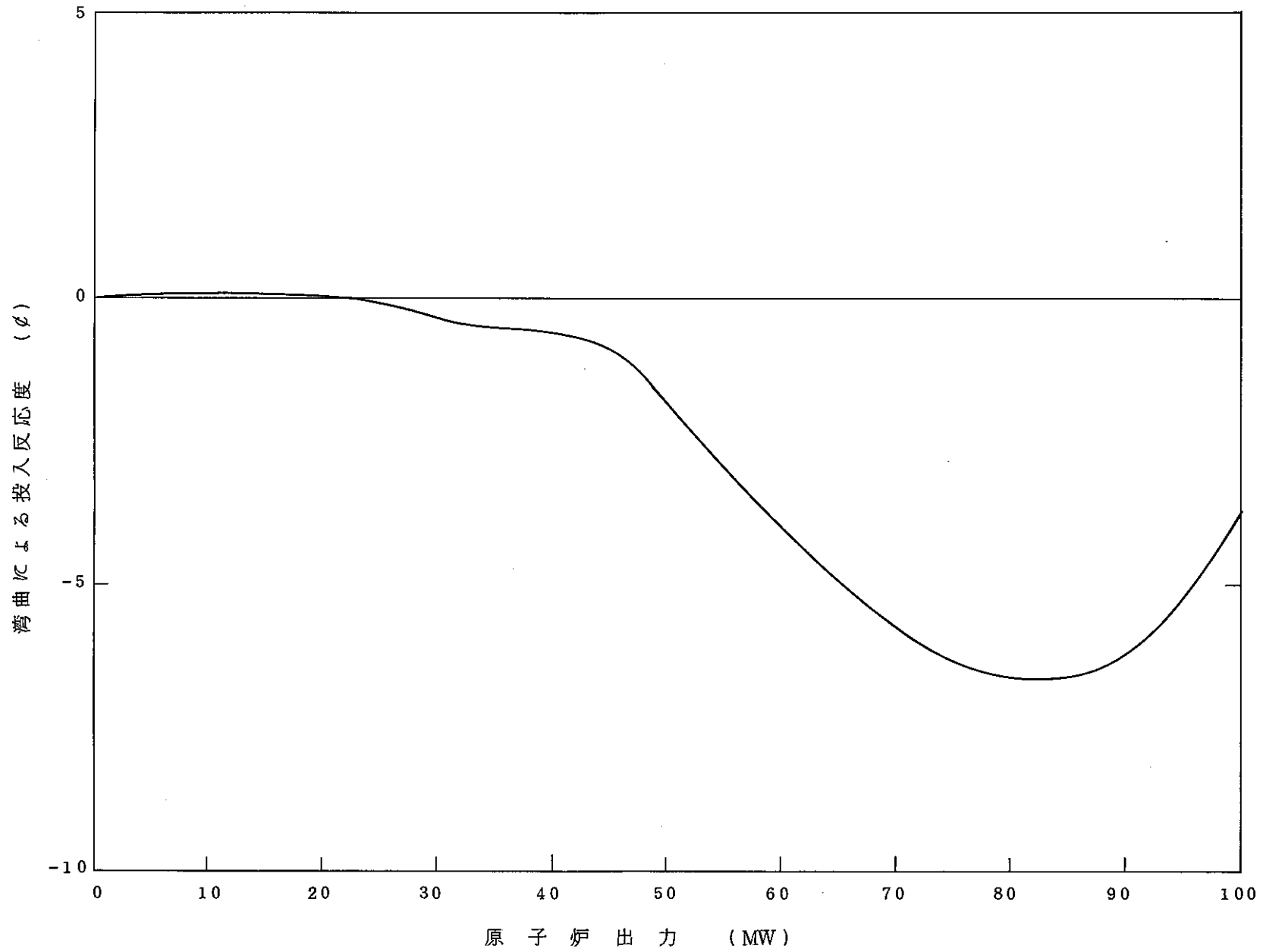


図 4.34 「常陽」MK-II 炉心起動時の炉心湾曲による反応度変化 (第0サイクル初期)

5. ガンマ線発熱解析精度評価

3章, 4章で述べたFCA X-2集合体ガンマ線発熱解析, ならびに「常陽」MK-II炉心第0サイクル初期の集合体出口冷却材温度解析結果と各々の実測値との比較から, 現状技術ベースでのガンマ線発熱解析精度評価を行った。以下その結果を示す。

表5.1に今回の解析結果のC/E値を示す。FCA X-2集合体に注目すると, 径反射体部では解析値を良く再現しているが, 炉心では, 解析値は実測値の約1/2であり, SS-Block部では解析値は実測値を約20%過小評価している。しかも, 比較を炉心径方向位置について細かく行ってみると, C/E値は炉中心から離れるに従い, 小さくなっていく(解析値の過小評価傾向は大きくなる)。一方, 「常陽」MK-II炉心に注目すると, 内側反射体領域で解析値は実測値を約20%過小評価(解析値に集合体間熱移動を考慮した場合)している。また, FCA X-2集合体での場合と同様に, 炉心中心から離れている反射体においてほどC/E値は小さい。

表 5.1 ガンマ線発熱解析のC/E値

項 目		C/E値(平均値)
FCA X-2 集 合 体	炉 心 部	0.52
	径 反 射 体 部	1.02
	SS-Block 部	0.82
「常陽」MK-II炉心第0サイクル 内側反射体		0.81/1.15 ^(*)

(*) 集合体出口冷却材温度比較からの推定値
集合体間熱移動考慮/同左未考慮

ところで, 表5.1に示したC/E値は実測値あるいは解析値に下記のような不確定要因があり, 今後見直す必要がある。

FCA X-2集合体 ; 実測値にはTLDの中性子に対する感度の効果が含まれており真のガンマ線発熱量ではない。したがって, 実測値は真のガンマ線発熱量を過大評価している可能性がある。今後, 実測値から上記中性子に対する感度の効果を取り除き, 解析値と比較する必要

がある（あるいは、解析値に上記効果を上乘せする）。

- 上記効果を考慮しても、炉心部における解析値と実測値の大きな相違は著しく改善するとは考えられない。炉心部におけるこの大きな相違の一原因として、実測値が2種のTLDの結果から実効原子番号に関する外捕によっていることである。今後この方法の妥当性の確認が必要である。

「常陽」MK-II炉心；

- 炉心部と内側反射体部出口冷却材流量の大きな差に基づく圧力差により、内側反射体出口部の温度計は、巻き込まれた炉心上部プレナム冷却材の温度を計測している可能性があり、その結果、実測値は真の出口冷却材温度より大きい可能性がある（動燃殿御検討結果）。

- 解析によると、反射体出口冷却材温度は集合体間ギャップ流量の影響を受ける（反射体内部の冷却材流量が小さいため）。したがって、今回の解析に使用した上記ギャップ流量の妥当性の確認が必要である。

また、両ケースに共通する項目として、RADHEAT-V3ガンマ線発熱断面積計算における光電効果と電子対生成に対する f （2次電子に付与される運動エネルギーのガンマ線エネルギーに対する比）の取り扱い上の問題点（ガンマ線発熱断面積を過小評価する）もあり、本件についてはRADHEAT-V3を今後改良する必要がある。

6. 結 論

「常陽」MK-II 炉心第0サイクルについて、ガンマ線発熱解析を実施した。本解析評価にあたってはガンマ線発熱解析用断面積の作成から始め、「常陽」MK-II 炉心のモックアップ体系であるFCA X-2 集合体におけるガンマ線発熱実験解析を行い、解析手法の妥当性の確認を行った。さらに、本解析結果をベースに第0サイクル初期の炉心湾曲解析も行った。

本解析手法の概要は以下のとおりである。

- (i) 中性子断面積は7群とした。本中性子断面積の基本ライブラリーはJENDL-II B-70群である。
- (ii) ガンマ線輸送断面積は20群とした。この断面積はRADHEAT-V3システム内のGAMLEG-JRにより作成した。
- (iii) 2次ガンマ線生成断面積は、上記JENDL-II B-70群定数と、ENDF-B/IVをベースに作成された中性子100群、ガンマ線20群の2次ガンマ線生成データ（日本原子力研究所作成）より作成した。
- (iv) 解析にはRZ体系とXY体系を用い、ガンマ線線源計算は中性子拡散計算をベースに行い、ガンマ線輸送計算はSNコードによりP3S6で行った。

以上の手法を用いた解析より次の結論を得た。

(i) FCA X-2 集合体 ガンマ線発熱実験解析

表6.1の如く、炉心部では大きく過小評価するが径反射体部では良く一致した。また炉心から離れるなど解析値の実測値に対する過小評価傾向が強くなる。

(ii) 「常陽」MK-II 炉心ガンマ線発熱実験解析

集合体出口冷却材温度より推定した発熱量（集合体間の熱移動効果含み）から求めたC/E値は表6.1の如くであり、内側反射体部で過小評価傾向を示す。

(iii) ガンマ線発熱解析精度評価

今回の解析で得られたC/E値は表6.1のとおりであるが、実測値の側にも不確定要因があり、これを解決した上で再度C/E値を見直す必要がある。

(iv) 第0サイクル初期炉心湾曲解析

前年度実施した炉心湾曲解析の結果⁽³⁾と比較すると、本年度の解析結果は前年度のものより接触荷重で小さく、また炉心湾曲による反応度投入は、熱出力100MWまで負とな

った（前年度実施の結果は熱出力100MWまで正の反応度が投入された）。この相違は主に反射体部温度が前年度のものより高くなったことに基づく。

表 6.1 ガンマ発熱解析のC/E値

項 目		C/E値(平均値)
FCA X-2 集合体	炉心部	0.52
	径反射体部	1.02
	SS-Block部	0.82
「常陽」MK-II炉心第0サイクル 内側反射体		0.81/1.15(*)

(*) 集合体出口冷却材温度比較より推定
集合体間熱移動考慮/同左未考慮

7. 謝 辞

本研究の遂行にあたり，御指導，御協力をいただいた動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター高速実験炉部技術課の池上哲雄氏，並びに同団高速増殖炉開発本部の大谷暢夫氏の両氏に厚く感謝の意を表します。

8. 参 考 文 献

- (1) 岡嶋, 大杉 ; 「熱蛍光線量を用いた FCA-X-2 集合体によるガンマ線発熱測定」 JAERI-Memo 58-024
- (2) R. Sher ; 「Fission Energy Release for 16 Fissioning Nuclides」
Proceedings of Conference Nuclear Data Evaluation Methods and Procedures, Sep. 1980
- (3) 日 立 ; 「「常陽」MK-II 炉心湾曲解析」
SJ 902 83-02, 動燃委託研究
- (4) 日 立 ; 「燃焼履歴を追った3次元炉心湾曲解析コードの改良(II)」
SJ 202 80-07, 動燃委託研究
- (5) K.D.Lathrop et al; 「Discrete Ordinates Angular Quadrature of Neutron Transport Equation」 LA-3186
- (6) 「シグマ」特別専門委; 「原子炉設計におけるガンマ線生成核データ」
日本原子力学会誌 vol 21. No5 (1979)
- (7) 小山他 ; 「RADHEAT-V3, A code System for Generating Coupled Neutron and Gamma Ray Group Constants and Analysing Radiation Transport」
JAERI-M 7155