

JAERI - M
85-139

モンテカルロ法によるJRR-3改造炉心の
詳細臨界計算

1985年9月

小室 雄一

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課 (〒319-11 茨城県那珂郡東海村) であて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター (〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内) で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

モンテカルロ法による JRR-3 改造炉心の詳細臨界計算

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

小室 雄 一

(1985年8月9日受理)

日本原子力研究所では、国産研究用原子炉 JRR-3 の性能向上を目的としてこの原子炉の改造計画を進めている。JRR-3 改造炉の核設計は、熱中性子炉体系標準核設計コードシステム SRAC を用いて行われた。「JRR-3 改造炉の核設計」(JAERI-M 84-099)には、SRAC に収納されている中性子拡散コード CITATION を用いて求めた JRR-3 改造炉の中性子束分布、出力分布、実効増倍係数等が記されている。CITATION 用の燃料領域群定数には、セル計算によって得られた均質化少数群定数が用いられた。炉心は X-Y 2次元形状で模擬された。

この方法で得られた結果の精度を実効増倍係数につき再検討することを目的として、原研で整備中の臨界安全評価コードシステム JACS に収納されている多群定数ライブラリ MGCL と多群モンテカルロ臨界計算コード MULTI-KENO を用いて詳細計算を行った。この計算結果から、JRR-3 改造炉の停止余裕とワン・ロッド・スタック・マージンは JRR-3 改造炉設計方針に定められている核的制限値に対して十分な余裕を持つことが再確認できた。

Detailed Criticality Calculation of the Upgraded JRR-3
Research Reactor by Monte Carlo Method

Department of Fuel Safety Research
Tokai Research Establishment , JAERI

Yuichi KOMURO

(Received August 9, 1985)

JAERI has a plan upgrading the research reactor JRR-3. Neutronics calculations about the upgraded-reactor were performed by JAERI thermal reactor standard code system SRAC. As a result, neutron flux distribution and power distribution were obtained by diffusion code CITATION included in SRAC. In those calculations, a few-group constant averaged over a cell was used, and a reactor core was modified to be expressed by X-Y coordinate.

Checking for effective multiplication factors calculated by SRAC, detailed criticality calculations were carried out with the different code system JACS developed for criticality safety. A multi-group constants library MGCL and a multi-group Monte Carlo criticality code MULTI-KENO were used, and the core was represented as three-dimension similar to the real one.

Results obtained by JACS showed that the reactor had fully enough shut-down margin and stuck-rod margin.

Keywords : Monte Carlo Method , JACS , Criticality Calculation ,
Effective Multiplication Factor , JRR-3

目 次

1. 序	1
2. JRR-3改造炉の概要	2
2.1 炉心	2
2.2 燃料要素	2
2.3 制御棒要素	2
2.4 燃料領域内照射筒要素	2
2.5 ベリリウム反射体要素	3
2.6 重水反射体	3
3. 計算方法	11
4. 計算モデル	16
4.1 燃料要素	16
4.2 制御棒要素	16
4.3 燃料領域内照射筒要素	16
4.4 ベリリウム反射体要素	16
4.5 重水反射体	16
4.6 原子炉全体構成及び炉内各要素の高さ方向の配置	17
4.7 各領域の原子個数密度	17
5. 計算ケース	17
5.1 標準型燃料要素の無限増倍係数	17
5.2 全制御棒全引抜時の炉心の実効増倍係数	17
5.3 全制御棒全挿入時の炉心の実効増倍係数	17
5.4 制御棒1本のみ全引抜時の炉心の実効増倍係数	17
5.5 ベリリウムの散乱マトリクスの検討	17
6. 計算条件	18
7. 計算結果及び検討	23
7.1 計算結果	23
7.2 検討	24
8. 結論	26
謝 辞	27
参考文献	27
付 録	29
A.1 137群, 300K MGCLに収納されているベリリウムの散乱マトリクス	29
A.2 137群, 300K MGCLへのハフニウム同位体核種の追加	29
A.3 インターセクト機能の検証(ケース2C, 3C, 4C)	29
A.4 MULTI-KENOから得られる実効増倍係数と標準偏差	34

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of the upgraded JRR-3 research reactor	2
2.1 Core	2
2.2 Fuel elements	2
2.3 Control rods	2
2.4 Irradiation thimbles	2
2.5 Beryllium reflector	3
2.6 Heavy-water reflector	3
3. Method of calculation	11
4. Model for calculation	16
4.1 Fuel elements	16
4.2 Control rods	16
4.3 Irradiation thimbles	16
4.4 Beryllium reflector	16
4.5 Heavy-water reflector	16
4.6 Assembly of each modeled element and vertical location of each element in the core	17
4.7 Atomic number density	17
5. Calculations	17
5.1 Infinite multiplication factor of a standard-type fuel element	17
5.2 Effective multiplication factor of the core in which all control rods are fully withdrawn	17
5.3 Effective multiplication factor of the core in which all control rods are fully inserted	17
5.4 Effective multiplication factor of the core in which one control rod is fully withdrawn	17
5.5 Verification of scattering cross section of beryllium	17
6. Parameters for criticality calculation	18
7. Results and Discussions	23
7.1 Results	23
7.2 Discussions	24
8. Conclusions	26
Acknowledgement	27
References	27
Appendices	29
A.1 Scattering cross section of beryllium in 137-group, 300 K MGCL	29
A.2 Adding Hf isotope to 137-group, 300 K MGCL	29
A.3 Verification of the intersection option of MULTI-KENO (Cse 2C, 3C, 4C)	29
A.4 Effective multiplication factor and standard deviation calculated by MULTI-KENO	34

1. 序

本報告書は、原研で整備中の臨界安全評価コードシステム JACS¹⁾による JRR-3 改造炉初装荷炉心の詳細臨界計算結果をまとめたものである。この計算の主な目的は、熱中性子炉体系標準核設計コードシステム SRAC²⁾を用いて行われた JRR-3 改造炉の核設計³⁾計算結果を再検討することである。

SRAC による臨界計算は、セル計算によって作成した均質化少数群定数と中性子拡散コード CITATION の組合せで行われた。なお、CITATION による計算では体系は X-Y 2次元で表現され、制御棒表面での熱群境界条件には対数微分境界条件が適用された。

一方、JACS による臨界計算は、多群定数ライブラリ MGCL と多群モンテカルロ臨界計算コード MULTI-KENOの組合せで実施した。エネルギー群数は137群である。MULTI-KENO では体系を3次元で取扱うことが可能なため、制御棒や燃料要素等の複雑な部分に至るまで実物に極めて近い形で表現できた。

計算ケースとして、次に示す JRR-3 改造炉の3つの炉心パターンを選んだ。各ケースの実効増倍係数 k_{eff} を JACS により求め、SRAC による計算結果と比較した。

- (1) 全制御棒全引抜
- (2) 全制御棒全挿入
- (3) 1本の制御棒のみ全引抜，その他の制御棒は全挿入

本報告書では、第2章で JRR-3 改造炉の概要、第3章で計算手法、第4章で計算モデル、第5章で計算ケース、第6章で計算条件、第7章で計算結果及び検討、第8章で結論を述べる。

2. J R R - 3 改造炉の概要

2.1 炉心

炉心平面図を Fig. 1 に示す。炉心は 37 個のセルに分割されている。このうち 26 個のセルに標準型燃料要素、6 個のセルに制御棒要素がそれぞれ収められている。制御棒要素の下部にはフォロー型燃料要素が連結されている。炉心外周（円周方向）はベリリウム反射体で覆われている。制御棒が全挿入されると、制御棒有効長部分は標準燃料要素有効長部分と同じ高さになる。制御棒が全引抜きされると、制御棒有効長部分は炉心外へ引出されると同時に制御棒下部のフォロー型燃料要素が炉心内に引入られて反応度の増加に寄与する。炉心を包囲する重水反射体の平面図を Fig. 2 に示す。この図の内側の小円が Fig. 1 の炉心に対応する。重水反射体の径方向の厚さは 67 cm、その外側は厚い軽水で覆われている。炉心、重水反射体及び軽水反射体の間はいずれもアルミニウム製タンクで仕切られている。重水反射体を横切るパイプ群は各種照射孔である。制御棒の構造を説明する垂直断面図を Fig. 3 に示す。

2.2 燃料要素

燃料要素は、標準型燃料要素とフォロー型燃料要素の 2 種類がある。標準型燃料要素は 1 体あたり 20 枚の燃料板を持ち、炉内に 26 体装荷されている。形状を Fig. 4 から Fig. 6 に示す。6 体のフォロー型燃料要素は 1 体あたり 16 枚の燃料板を持ち、6 本の制御棒の下端に各々連結されている。この要素は、制御棒全挿入時には炉の下方にあるが、制御棒全引抜時には炉内に引入られる。この要素の形状を Fig. 7 から Fig. 9 に示す。Fig. 8 のアルミニウム製外枠は制御棒案内管である。燃料板及びその集合体である燃料要素の仕様を Table 1 及び Table 2 に示す。

2.3 制御棒要素

制御棒要素の断面図を Fig. 10 に示す。制御棒要素は中空正方形の中性子束トラップ型吸収体と、その外側の制御棒案内管で構成される。吸収体の材質はハウニウムで、その有効長は 88 cm である。

2.4 燃料領域内照射筒要素

燃料領域内の照射筒要素を Fig. 11 に示す。有効長は 94.5 cm、材質はアルミニウムである。中心には直径 6 cm の孔が空けられている。Fig. 11 は、この孔の中にアルミニウム製のプラグが挿入された状態にある。

2.5 ベリリウム反射体要素

ベリリウム反射体を Fig. 12 に示す。形状は、A 型、B 型及び C 型の 3 種類あり、これらの組合せで円筒状炉心シュラウドと炉心の間をうめている。B 型及び C 型要素にはそれぞれ照射筒が設けられており、照射筒キャプセルの装着を可能としている。キャプセルを装着しない場合には、照射筒はベリリウム製のプラグが挿入される。

2.6 重水反射体

炉心の外側には重水反射体がある。重水はアルミニウム製の円環タンク内に充てんされている。タンクの寸法は、内径が 62 cm、外径が 196 cm、高さが 160 cm である。アルミニウム板の厚さは 1 cm である。重水反射体領域内には、先に Fig. 2 で示した実験孔が多数貫通している。

なお、この章で用いた図表は、すべて文献 3) からの引用である。

Table 1 燃料板仕様

項目	標準型燃料要素	フォロー型燃料要素
濃縮度 (%)	19.75	19.75
²³⁵ U 量 (g)	300	190
全 U 量 (g)	1500	950
芯材		
化学組成	$U \cdot Al_x + Al$	$U \cdot Al_x + Al$
U・Al, 存在比 (%)	50	50
U・Al, 存在比 (%)	50	50
U 密度 (g/cm ³)	2.2	2.2
ポイド率 (%)	5.7	5.7
巾 (cm)	6.16	4.90
長さ (cm)	75.0	75.0
厚さ (cm)	0.076	0.076
体積/枚 (cm ³)	35.1	27.9
燃料板		
板巾 (cm)	7.08	5.82
長さ (cm)	77.0	77.0
厚さ (cm)	0.152	0.152
被覆厚さ (cm)	0.038	0.038

Table 2 燃料要素仕様

項目	標準型燃料要素	フォロー型燃料要素
全長 (cm)	115.0	88.0
断面寸法 (cm)	7.62 × 7.62	6.36 × 6.36
側板		
板厚 (cm)	0.48	0.48
板巾 (cm)	7.62	6.36
長さ (cm)	95.0	88.0
燃料板		
枚数	20	16
間隔 (cm)	0.228	0.238
板厚 (cm)	0.152	0.152
長さ (cm)	77.0	77.0
コーム		
板厚 (cm)	0.6	—
巾 (cm)	1.7	—
長さ (cm)	1.0	—
ピン直径 (cm)	0.26	—
材質		
側板	A 6061	
ノズル部	A 6061	
燃料板被覆	A 5052	
コーム	A 5052	

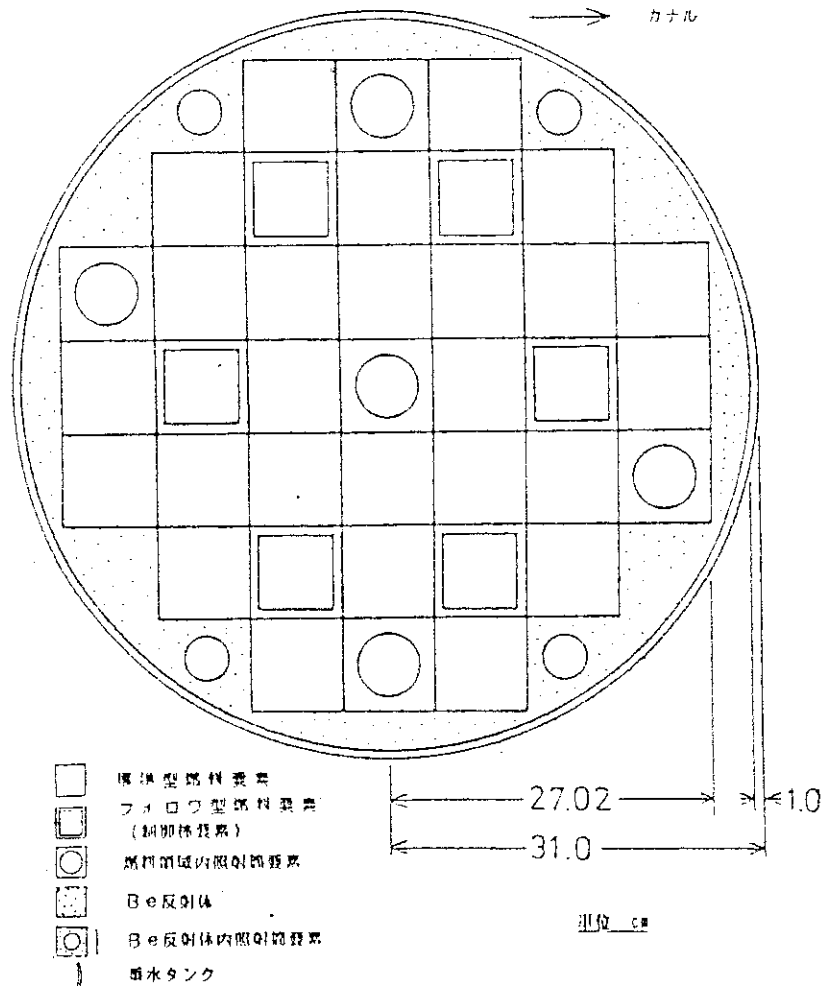


Fig. 1 炉心水平断面

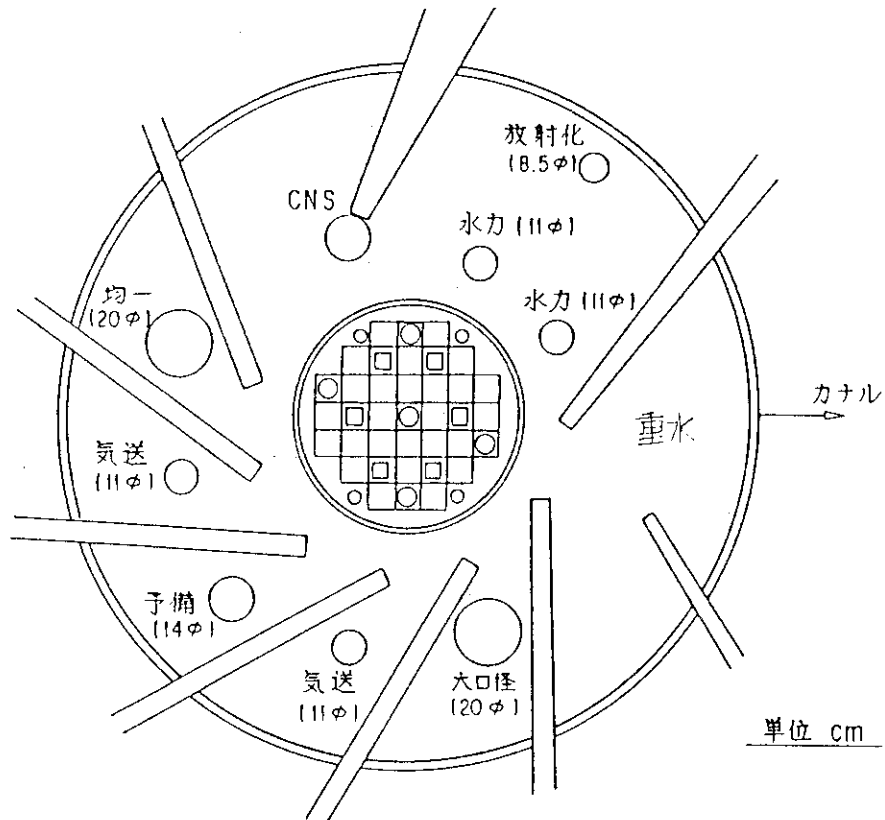
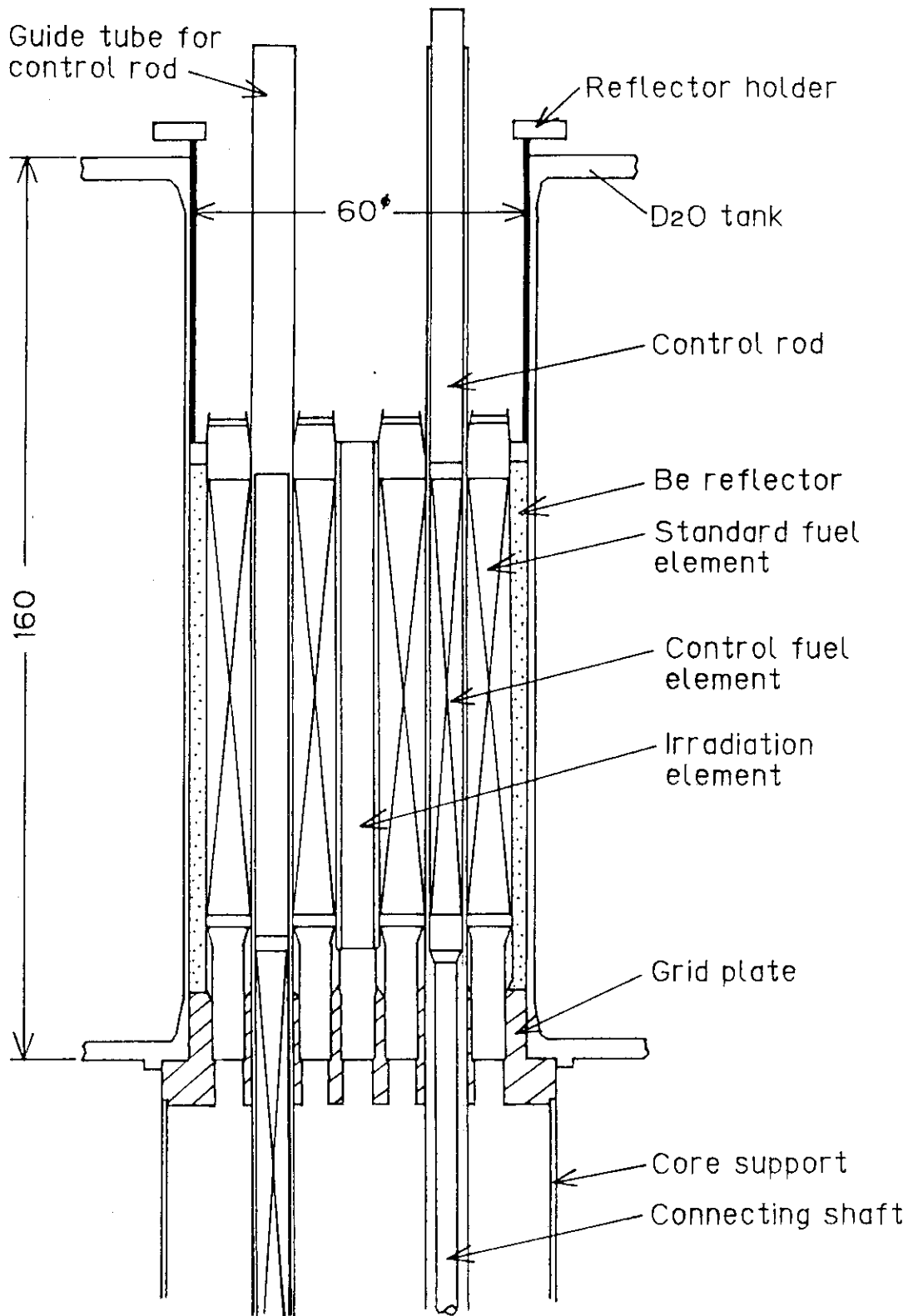
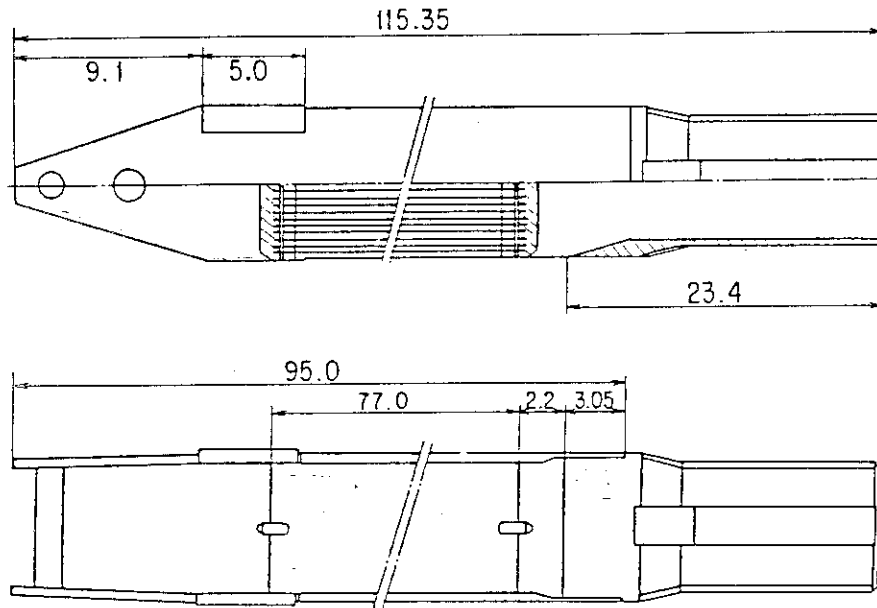


Fig. 2 重水反射体内照射孔配置



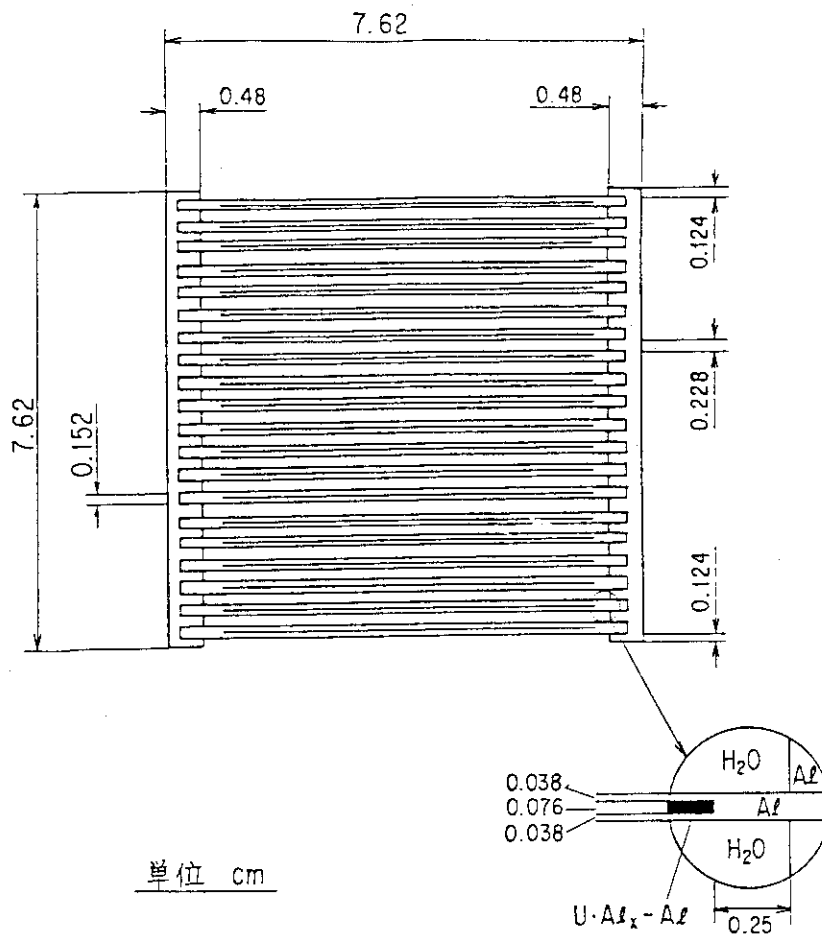
All dimensions in cm.

Fig. 3 制御棒垂直断面



單位 cm

Fig. 4 標準型燃料要素垂直断面



單位 cm

Fig. 5 標準型燃料要素水平断面

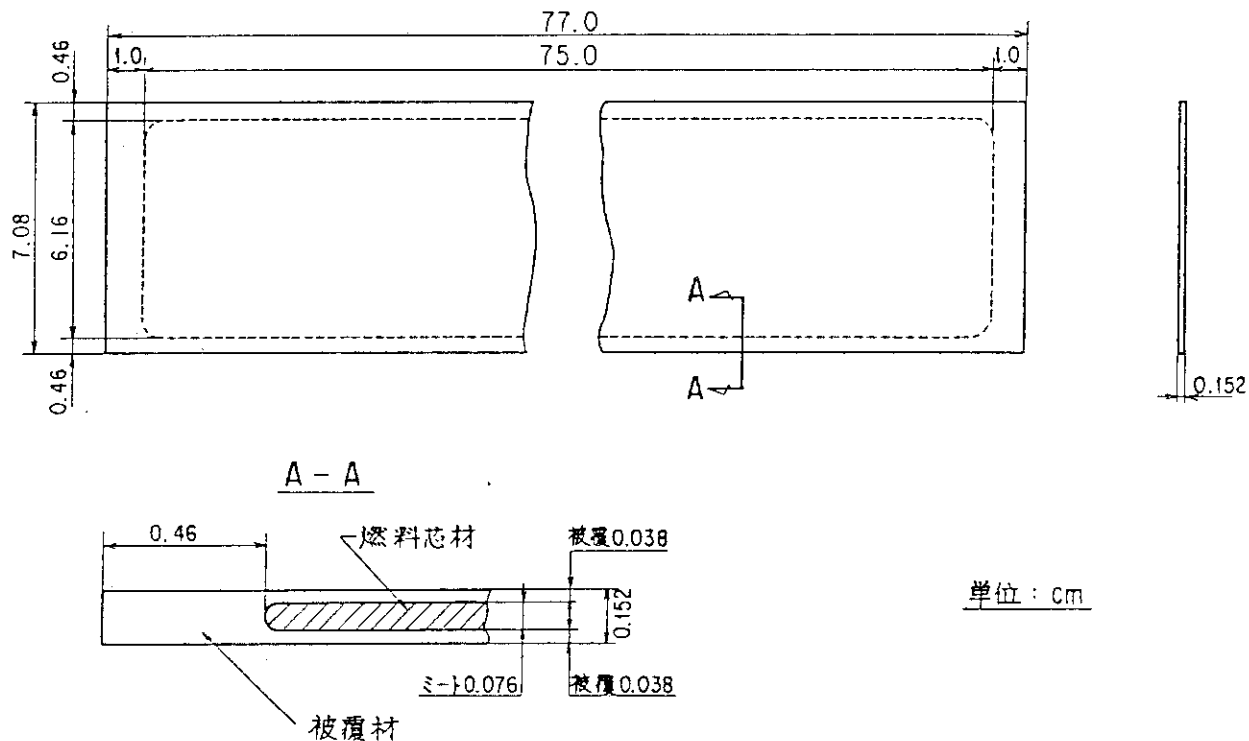


Fig. 6 標準型燃料要素用燃料板

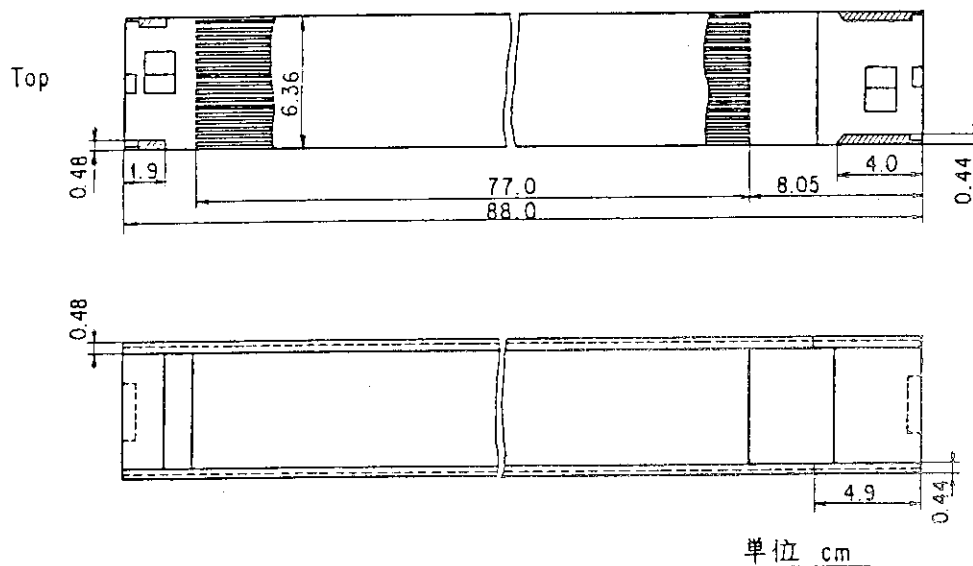


Fig. 7 フォロワ型燃料要素垂直断面

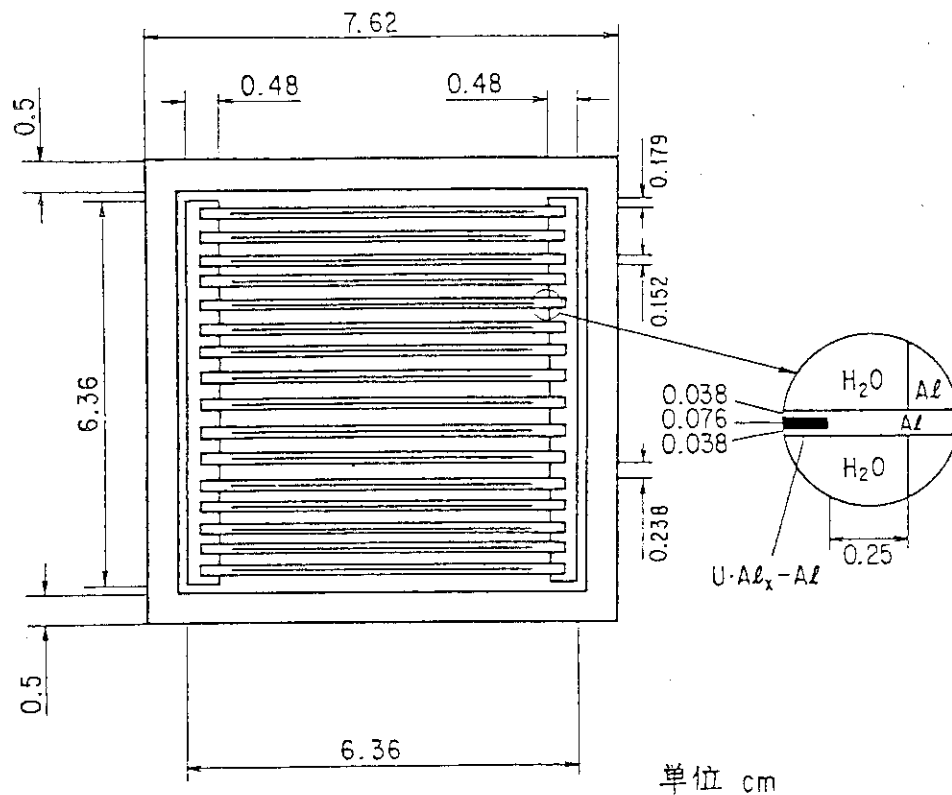


Fig. 8 フォロワ型燃料要素水平断面

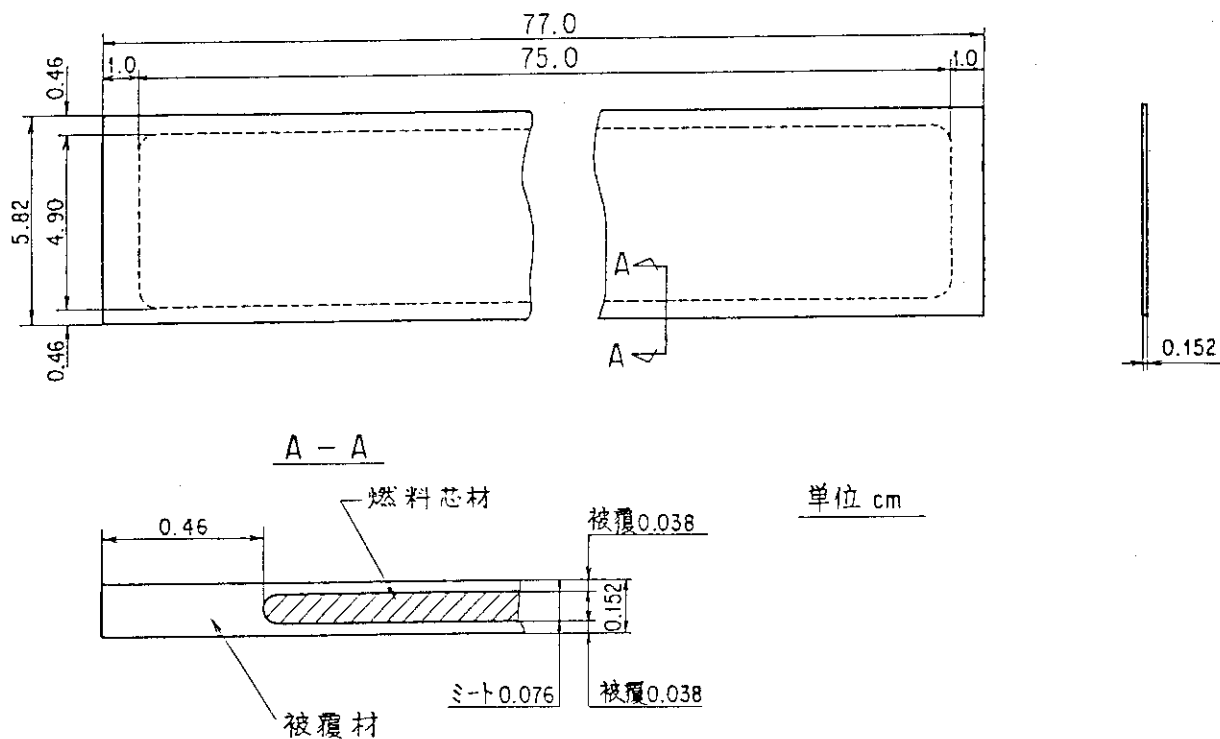


Fig. 9 フォロワ型燃料要素用燃料板

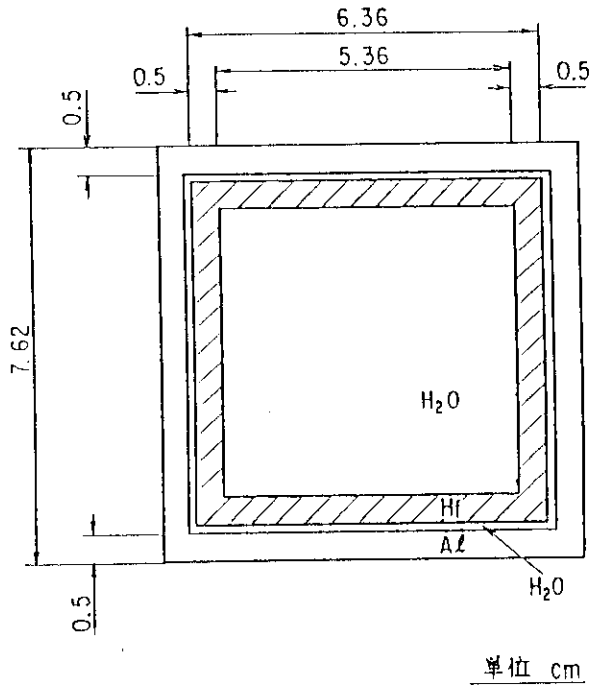


Fig. 10 制御棒要素水平断面

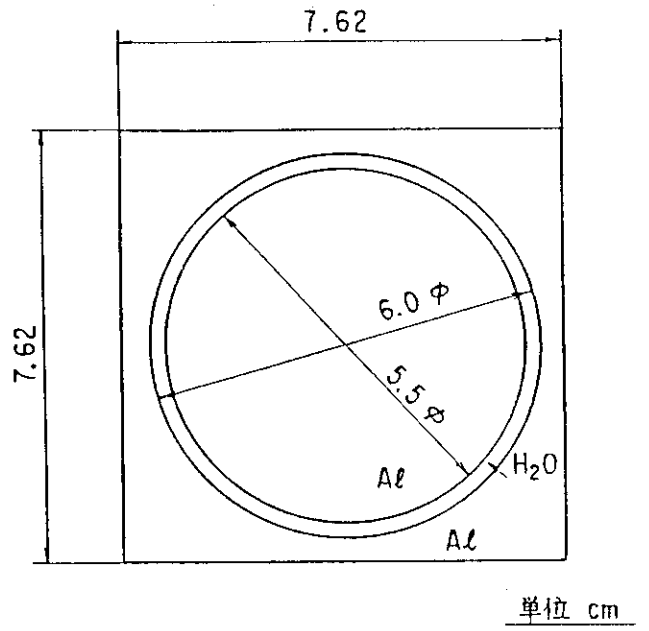


Fig. 11 燃料領域内照射筒要素水平断面

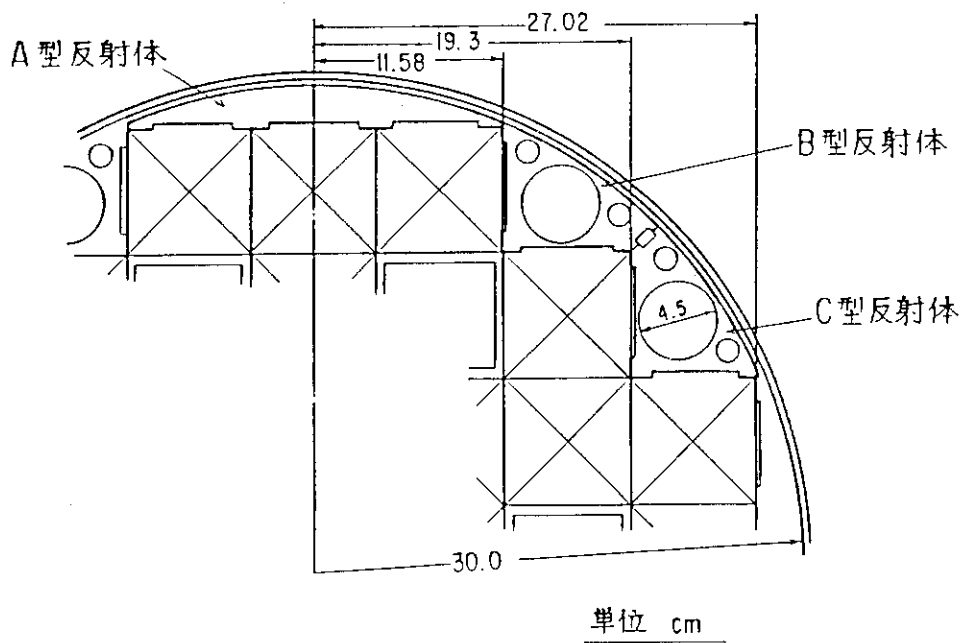


Fig. 12 ベリリウム反射体水平断面

3. 計 算 方 法

臨界安全性評価コードシステム JACS に収納されている多群定数ライブラリ MGCL と多群モンテカルロ臨界計算コード MULTI-KENO⁴⁾ の組合せにより、Fig. 13 に示す流れで計算を実施した。MGCL は中性子核データ ENDF/B-V⁵⁾ を MGCL-ACE⁶⁾ で処理・作成した多群定数であり、核種 i の第 g 群における反応 X の無限希釈断面積 $\sigma_{X,g}^i(\sigma_0 = \infty)$ と式(1)で定義される中性子自己遮蔽因子 (f -変数) の Bondarenko 型⁷⁾ 1次元データと、弾性散乱、非弾性散乱及び $(n, 2n)$ 散乱に関する2次元データ (散乱マトリクス) から構成される。2次元データは高速群 (第1群から第92群) については SUPERTOG⁸⁾、熱群 (第93群から第137群) については FRANGE⁹⁾ 及び PIXSE¹⁰⁾ でそれぞれ処理・作成した。中性子散乱の角度依存性は、散乱断面積を Legendre 展開した時の P_1 成分までを考慮している。MGCL のマスターライブラリは Table 3 に示す137群のエネルギー群構造を持つ。

$$f_{X,g}^i(\sigma_0^i) = \frac{\sigma_{X,g}^i(\sigma_0 = \sigma_0^i)}{\sigma_{X,g}^i(\sigma_0 = \infty)} \quad (1)$$

MAIL は1次元データと対象体系を構成する各領域に含まれる各核種の個数密度から、式(2)、(3)、(4)を使って各領域の巨視的実効断面積 Σ_{eff} を計算するプログラムである。

$$\sigma_0^i = \frac{1}{N^j} \left(\sum_{i \neq j} N^i \cdot \sigma_{t,g}^i + \frac{a \cdot G}{\ell} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{X,g,\text{eff}}^j = \sigma_{X,g}^j(\sigma_0 = \infty) \cdot f_{X,g}^j(\sigma_0^j) \quad (3)$$

$$\Sigma_{X,g,\text{eff}} = \sum_j N^j \cdot \sigma_{X,g,\text{eff}}^j \quad (4)$$

ここで、

i, j : 核種識別添字

x : 反応識別添字

g : エネルギー群識別添字

σ_t : 全断面積

σ_0 : バックグラウンド断面積

ℓ : 燃料ブロックの平均弦長

G : ダンコフ補正因子

a : ベル補正因子

さらにMAILでは、計算した Σ_{eff} 、2次元データ及びフィッション・スペクトルを KENO 型式のライブラリに編集する。

MULTI-KENO は KENO-IV¹¹⁾ に改良を施した臨界計算コードである。KENO-IV はモンテカルロ法を使って多群近似の中性子輸送方程式を解くコードで、アメリカの ORNL で開発された。KENO-IV は対象体系の形状を 3 次元的に表現することが可能であるところから、核燃料取扱施設等にみられる複雑な形状（核燃料ユニットの配列、核燃料溶液の流れる配管等）の臨界計算に用いられる。中性子輸送方程式の解を得るために、体系内の核燃料部分からフィッション・スペクトルに従ったエネルギーを持つ中性子を多数発生させ、1 つ 1 つの中性子のふるまいを確率（各種反応の巨視的実効断面積、散乱マトリクス、平均自由行程等）に従って決定付け順次追跡し、中性子が体系内で吸収されるか体系外へ漏れるまでこれを続ける。モンテカルロ法による計算では精度の良い結果を得るために膨大な量の試行を必要とするが、KENO-IV ではウェイトという考え方が採用されて統計精度の向上が計られている。このコードの出力として体系の実効増倍係数 k_{eff} 、体系内での吸収量、核分裂量、体系外への漏れ量、領域ごとの中性子束等が得られる。このコードを基礎コードとして、形状オプションの拡張等の改良を施したコードが MULTI-KENO である。複雑な形状をした JR-R-3 改造炉の臨界計算を行う場合には、形状を簡便に表現できる MULTI-KENO が有利である。

Table 3 MGCL のエネルギー群構造 (137群, 26群)

Group No		Upper Energy	Lethergy	Group No		Upper Energy	Lethergy
25Gr	137Gr	Boundary	width ΔU	25Gr	137Gr	Boundary	width ΔU
1	1	18.487 Mev	0.125	4	38	161.63 Kev	0.125
	2	14.550	0.125		39	142.64	0.125
	3	12.840	0.125		40	125.88	0.125
	4	11.331	0.125		41	111.09	0.125
	5	10.000	0.125		42	98.037	0.125
	6	8.825	0.125		43	86.517	0.125
	7	7.788	0.125		44	76.351	0.125
	8	6.8729	0.125		45	67.379	0.125
	9	6.0653	0.125		46	59.462	0.125
	10	5.3526	0.125		5	47	52.475
2	11	4.7239	0.125	48		46.309	0.125
	12	4.1686	0.125	49		40.868	0.125
	13	3.6788	0.125	50		36.066	0.125
	14	3.2465	0.125	51		31.828	0.125
	15	2.8650	0.125	52		28.088	0.125
	16	2.5284	0.125	53		24.788	0.125
	17	2.2313	0.125	54		21.675	0.125
	18	1.9691	0.125	55	19.305	0.125	
	19	1.7377	0.125	56	17.036	0.125	
	20	1.5335	0.125	6	57	15.034	0.25
	21	1.3533	0.125		58	11.709	0.25
	22	1.1943	0.125		59	9.1188	0.25
3	23	1.0540	0.125	60	7.1017	0.25	
	24	930.14 Kev	0.125	7	61	5.5308	0.25
	25	820.85	0.125		62	4.3075	0.25
	26	724.40	0.125		63	3.3546	0.25
	27	639.28	0.125		64	2.6126	0.25
	28	564.16	0.125		65	2.0347	0.25
	29	497.87	0.125		66	1.5846	0.25
	30	439.37	0.125		67	1.2341	0.25
	31	387.74	0.125		68	961.12 ev	0.25
	32	342.18	0.125	69	748.52	0.25	
	33	301.97	0.125	8	70	582.95	0.25
	34	266.49	0.125		71	454.00	0.25
	35	235.18	0.125		72	353.58	0.25
	36	207.54	0.125		73	275.36	0.25
4	37	180.16	0.125		74	214.45	0.25

Table 3 MGCL のエネルギー群構造 (137 群, 26 群) (続き)

Group No		Upper Energy	Lethergy
26Gr	137Gr	Boundary	width ΔU
8	75	167.02 ev	0.25
9	76	130.07	0.25
	77	101.30	0.25
	78	78.893	0.25
	79	61.442	0.25
	80	47.851	0.25
	81	37.267	0.25
10	82	29.023	0.25
	83	22.603	0.25
	84	17.603	0.25
	85	13.710	0.25
	86	10.677	0.25
	87	8.3153	0.25
11	88	6.4760	0.25
	89	5.0435	0.25
	90	3.9279	0.25
	91	3.0590	0.25
	92	2.3824	0.25
12	93	1.8554	0.125
	94	1.6374	0.125
	95	1.4450	0.125
13	96	1.2752	0.125
	97	1.1254	0.125
	98	0.99312	0.125
14	99	0.87642	0.125
	100	0.77344	0.125
15	101	0.68256	0.125
	102	0.60236	0.125
	103	0.53158	0.125
	104	0.46912	0.125
16	105	0.41399	270m/sec
	106	0.38925	270
	107	0.36528	270
17	108	0.34206	270
	109	0.31961	270

Group No		Upper Energy	Lethergy
26Gr	137Gr	Boundary	width ΔU
17	110	0.29792 ev	270m/sec
18	111	0.27699	270
	112	0.25683	270
	113	0.23742	270
19	114	0.21871	270
	115	0.20090	270
	116	0.18378	270
20	117	0.16743	270
	118	0.15183	270
	119	0.13700	270
21	120	0.12293	270
	121	0.10962	270
	122	0.09708	270
22	123	0.085295	270
	124	0.074274	270
	125	0.064015	270
23	126	0.054518	270
	127	0.045783	270
	128	0.037811	270
24	129	0.030600	270
	130	0.024152	270
	131	0.018465	270
25	132	0.013541	270
	133	0.009379	270
	134	0.005979	270
26	135	0.003341	270
	136	0.001466	270
	137	0.000352	270
		0.000033	270

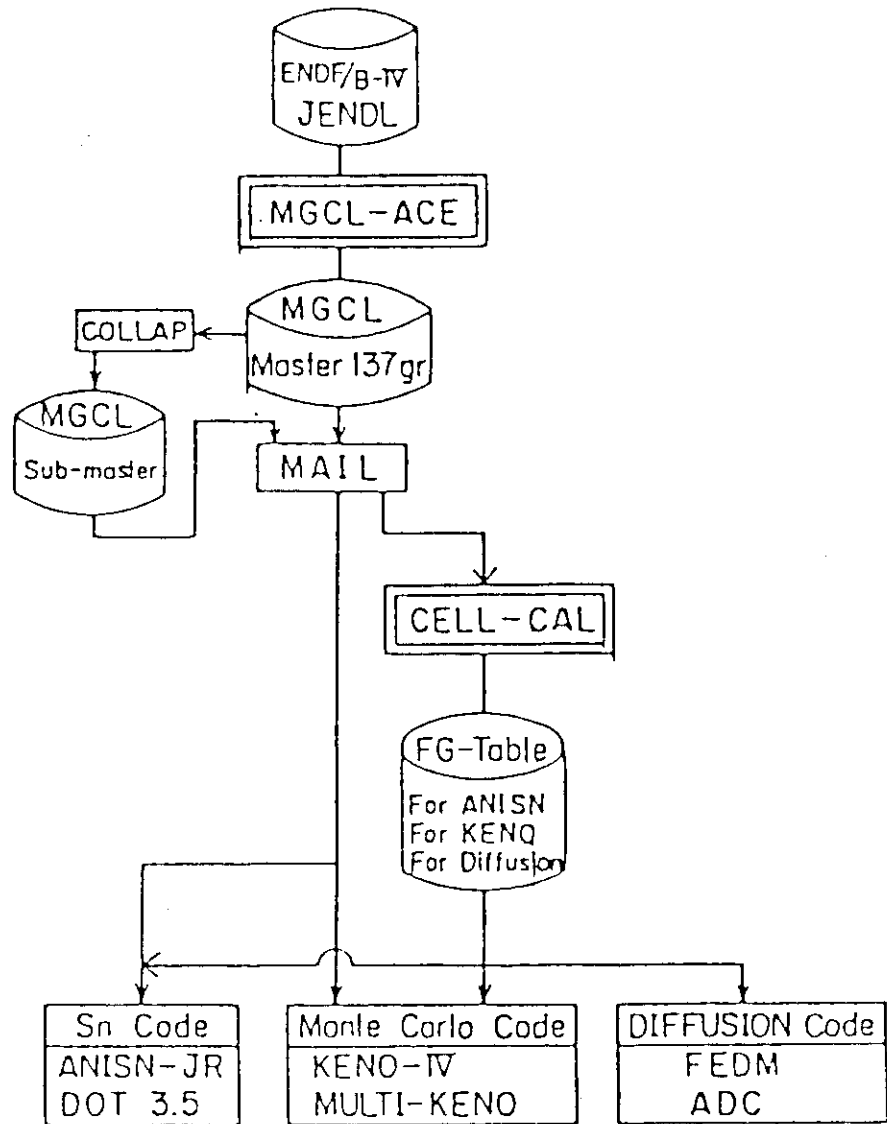


Fig. 13 JACS システムの計算フロー

4. 計算モデル

形状は3次元で表現した。計算モデルは、円周方向は重水反射体まで、高さ方向は重水タンク高さに相当する160 cmの部分及びこのタンク下部の軽水反射体の一部分の30 cmまでとした。炉心内の炉内構造物以外の部分はすべて軽水で満たされているものと仮定した。これらの境界から外へ出た中性子が再び反射体領域を通過して炉内に戻り燃料に吸収される確率は極めて小さいと考えられるので、境界の中性子反射率（アルベド）は0と仮定した。

炉内各要素の計算モデルを以下に述べる。

4.1 燃料要素

標準型燃料要素及びフォロー型燃料要素の燃料板部分は、仕様通りに形状を表現した。

標準型燃料要素は Fig. 4の中央77 cmの部分のみとした。この部分の上及び下側は薄いアルミニウムボックスのため、臨界計算の場合は省略可能と判断し水と置きかえた。同じ理由でフォロー型燃料要素も Fig. 7の中央の77 cm部分のみとした。なお、両燃料要素とも $U \cdot A \ell_x$ の存在する燃料有効長は75 cmである。

4.2 制御棒要素

高さ方向はハフニウム製中性子吸収体の有効長88 cm部分のみとした。この部分の水平断面は Fig. 10に示す断面図通りに表現した。

4.3 燃料領域内照射筒要素

高さは94.5 cmである。断面は Fig. 11に示す断面図の通りに表現した。なお、この要素内には高さ94.5 cmのプラグが装着されているものとした。

4.4 ベリリウム反射体要素

B型及びC型反射体の照射筒にベリリウム製プラグが装着された状態で、全反射体要素を均質化した。なお、反射体要素の円周部分は、MULTI-KENOの持つインターセクト機能を使うことで正確な形状表現ができた。

4.5 重水反射体

重水タンク内は重水のみで占められ、軽水や気泡の混入は皆無とした。反射体部分を貫通している照射孔はすべて重水と置換した。

4.6 炉内全体構成及び炉内各要素の高さ方向の配置

計算モデルの全体図を Fig. 14 に示す。この図の“CORE”で表示した部分に含まれている各要素相互の高さ方向の位置関係を Fig. 15 に示す。制御棒位置は、今回の計算ケースに限り、全引抜または全挿入のいずれかである。Fig. 15 に示す通り、全引抜制御棒はその上端、全挿入制御棒はフォロー型燃料下端のそれぞれ一部を省略した。なお、省略した部分は標準型燃料要素の集合から十分離れており、炉心に対する反応度の寄与は極めて小さいことが予備計算の結果わかっている。

4.7 各領域の原子個数密度

MULTI-KENO 用巨視的断面積作成のために用いた各領域の原子個数密度を Table 4 に示す。なお、燃料の原子個数密度は新燃料に相当する値である。

5. 計 算 ケ ー ス

5.1 標準型燃料要素の無限増倍係数 (ケース1)

単純体系の中性子増倍係数を SRAC による計算結果と比較するために、軽水中に沈めた標準型燃料要素の無限増倍係数を求める。

5.2 全制御棒全引抜時の炉心の実効増倍係数 (ケース2A)

6本の制御棒すべてを完全に引抜きフォロー型燃料棒を炉内に引入れた場合の実効増倍係数を求め、原子炉の余剰反応度を推定する。

5.3 全制御棒全挿入時の炉心の実効増倍係数 (ケース3A)

6本の制御棒すべてを完全に挿入した場合の実効増倍係数を求め、原子炉の停止余裕を推定する。

5.4 制御棒1本のみ全引抜時の炉心の実効増倍係数 (ケース4A)

6本の制御棒のうち最も反応度の高い Fig. 1 左端の制御棒1本のみ全引抜き残り5本の制御棒全挿入の場合の実効増倍係数を求め、原子炉のワン・ロッド・スタック・マージンを推定する。

5.5 ベリリウムの散乱マトリクスの検討 (ケース2B, 3B, 4B)

反射体要素は固体のベリリウムである。一方、MGCL に収納されているベリリウムの散乱マトリクスは自由原子モデル (約10 eV 以下) のデータである。このため、ケース2A, 3A, 4A では

4.6 炉内全体構成及び炉内各要素の高さ方向の配置

計算モデルの全体図を Fig. 14 に示す。この図の“CORE”で表示した部分に含まれている各要素相互の高さ方向の位置関係を Fig. 15 に示す。制御棒位置は、今回の計算ケースに限り、全引抜または全挿入のいずれかである。Fig. 15 に示す通り、全引抜制御棒はその上端、全挿入制御棒はフォロー型燃料下端のそれぞれ一部を省略した。なお、省略した部分は標準型燃料要素の集合から十分離れており、炉心に対する反応度の寄与は極めて小さいことが予備計算の結果わかっている。

4.7 各領域の原子個数密度

MULTI-KENO 用巨視的断面積作成のために用いた各領域の原子個数密度を Table 4 に示す。なお、燃料の原子個数密度は新燃料に相当する値である。

5. 計 算 ケ ー ス

5.1 標準型燃料要素の無限増倍係数 (ケース1)

単純体系の中性子増倍係数を SRAC による計算結果と比較するために、軽水中に沈めた標準型燃料要素の無限増倍係数を求める。

5.2 全制御棒全引抜時の炉心の実効増倍係数 (ケース2A)

6本の制御棒すべてを完全に引抜きフォロー型燃料棒を炉内に引入れた場合の実効増倍係数を求め、原子炉の余剰反応度を推定する。

5.3 全制御棒全挿入時の炉心の実効増倍係数 (ケース3A)

6本の制御棒すべてを完全に挿入した場合の実効増倍係数を求め、原子炉の停止余裕を推定する。

5.4 制御棒1本のみ全引抜時の炉心の実効増倍係数 (ケース4A)

6本の制御棒のうち最も反応度の高い Fig. 1 左端の制御棒1本のみ全引抜き残り5本の制御棒全挿入の場合の実効増倍係数を求め、原子炉のワン・ロッド・スタック・マージンを推定する。

5.5 ベリリウムの散乱マトリクスの検討 (ケース2B, 3B, 4B)

反射体要素は固体のベリリウムである。一方、MGCL に収納されているベリリウムの散乱マトリクスは自由原子モデル (約10 eV 以下) のデータである。このため、ケース2A, 3A, 4A では

自由ガスモデルの散乱マトリクスを使って臨界計算を行う。

このように固体のベリリウム領域の散乱マトリクスに自由ガスモデルのデータを流用することが臨界計算結果に及ぼす影響を調べるために、次の計算を行う。ENDF/B-III¹²⁾に入っている分子構造を考慮した固体モデルのベリリウム (Material No.106) の散乱則データを AMPXシステム¹³⁾を使って処理し、MGCL形式の散乱マトリクスを作成する。ベリリウム領域の散乱マトリクスとしてこのデータを使いケース2A, 3A, 4Aと同じ体系の実効増倍係数を求める。

6. 計 算 条 件

次に示す条件を設定して MULTI-KENOによる臨界計算を行った。但し、ケース1に限り1世代当りの中性子数を300とした。

体 系 温 度	3 0 0 K
中性子エネルギー群数	1 3 7
1 世代当りの中性子数	1 0 0 0
計算世代数	1 0 0
スキップ世代数	1 0
初期中性子発生分布	平坦
中性子平均重み	0.5

自由ガスモデルの散乱マトリクスを使って臨界計算を行う。

このように固体のベリリウム領域の散乱マトリクスに自由ガスモデルのデータを流用することが臨界計算結果に及ぼす影響を調べるために、次の計算を行う。ENDF/B-III¹²⁾に入っている分子構造を考慮した固体モデルのベリリウム (Material No.106) の散乱則データを AMPXシステム¹³⁾を使って処理し、MGCL形式の散乱マトリクスを作成する。ベリリウム領域の散乱マトリクスとしてこのデータを使いケース2A, 3A, 4Aと同じ体系の実効増倍係数を求める。

6. 計 算 条 件

次に示す条件を設定して MULTI-KENOによる臨界計算を行った。但し、ケース1に限り1世代当りの中性子数を300とした。

体 系 温 度	3 0 0 K
中性子エネルギー群数	1 3 7
1 世代当りの中性子数	1 0 0 0
計算世代数	1 0 0
スキップ世代数	1 0
初期中性子発生分布	平坦
中性子平均重み	0.5

Table 4 Atomic number density of each region

Standard type fuel plate, Follower type fuel plate

^{235}U	^{238}U	Al
1.0945×10^{-3}	4.3912×10^{-3}	4.7522×10^{-2}

Aluminum

Al
6.0038×10^{-2}

Light water

^1H	O
6.6627×10^{-2}	3.3314×10^{-2}

Hafnium

^{174}Hf	^{176}Hf	^{177}Hf	^{178}Hf	^{179}Hf
7.1797×10^{-5}	2.3334×10^{-3}	8.3464×10^{-3}	1.2161×10^{-2}	6.1476×10^{-3}
^{180}Hf				
1.5795×10^{-2}				

Beryllium and light water (Homogeneous region)

^1H	O	Be
1.3392×10^{-2}	6.6961×10^{-3}	9.8237×10^{-2}

Table 4 Atomic number density of each region (continued)

Heavy water

^2H	O
6.6396×10^{-2}	3.3198×10^{-2}

Follower type fuel element (Homogeneous region)

^{235}U	^{238}U	^1H	O	Al
1.0943×10^{-4}	4.3902×10^{-4}	2.9200×10^{-2}	1.4600×10^{-2}	3.2474×10^{-2}

Control rod and control rod guide tube (Homogeneous region)

^{174}Hf	^{176}Hf	^{177}Hf	^{178}Hf	^{179}Hf
1.4119×10^{-5}	4.5886×10^{-4}	1.6413×10^{-3}	2.3914×10^{-3}	1.2089×10^{-3}
^1H	O	Al		
3.7606×10^{-2}	1.8803×10^{-2}	1.4345×10^{-2}		

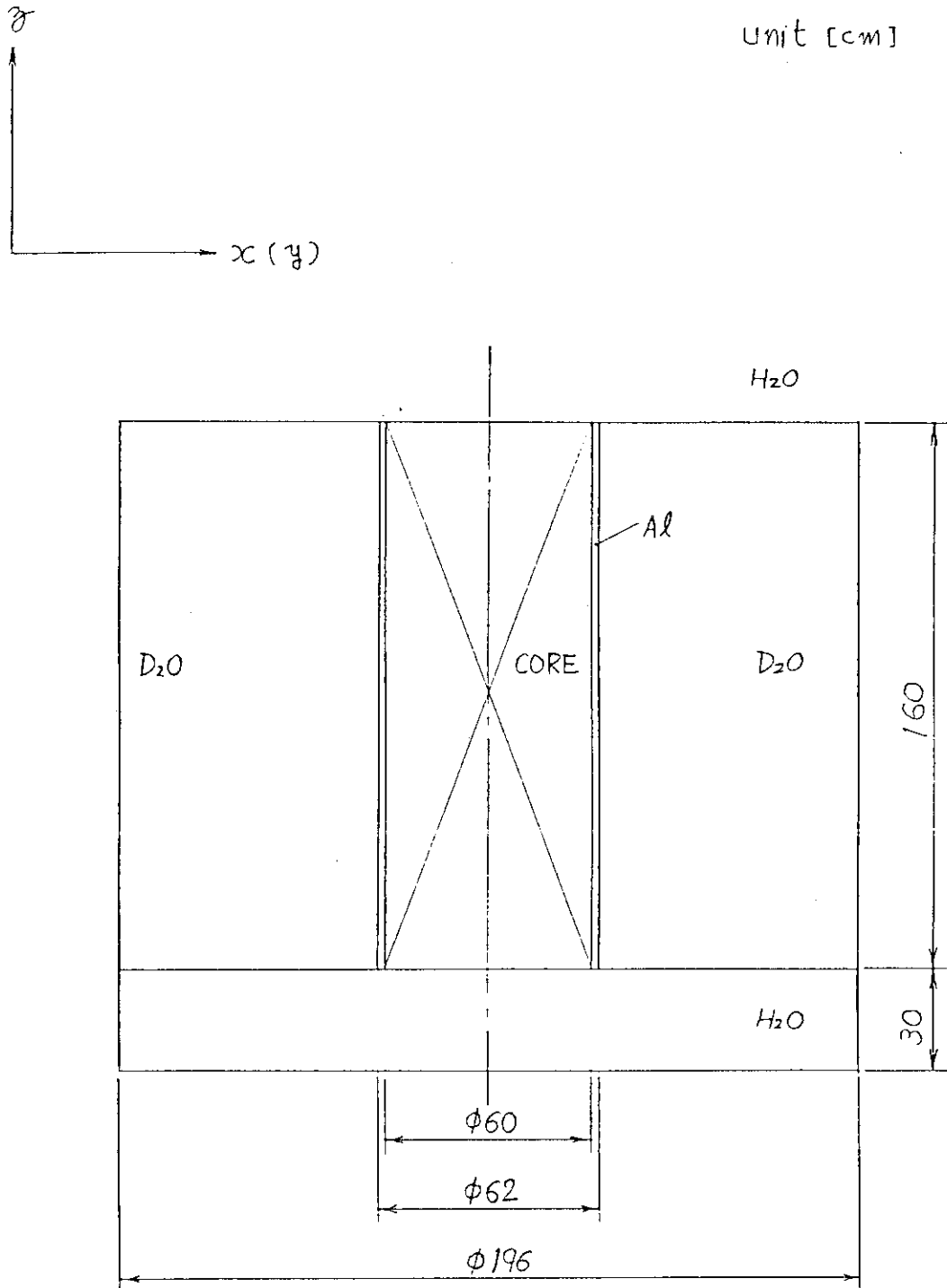


Fig. 14 JRR-3 vertical cross section

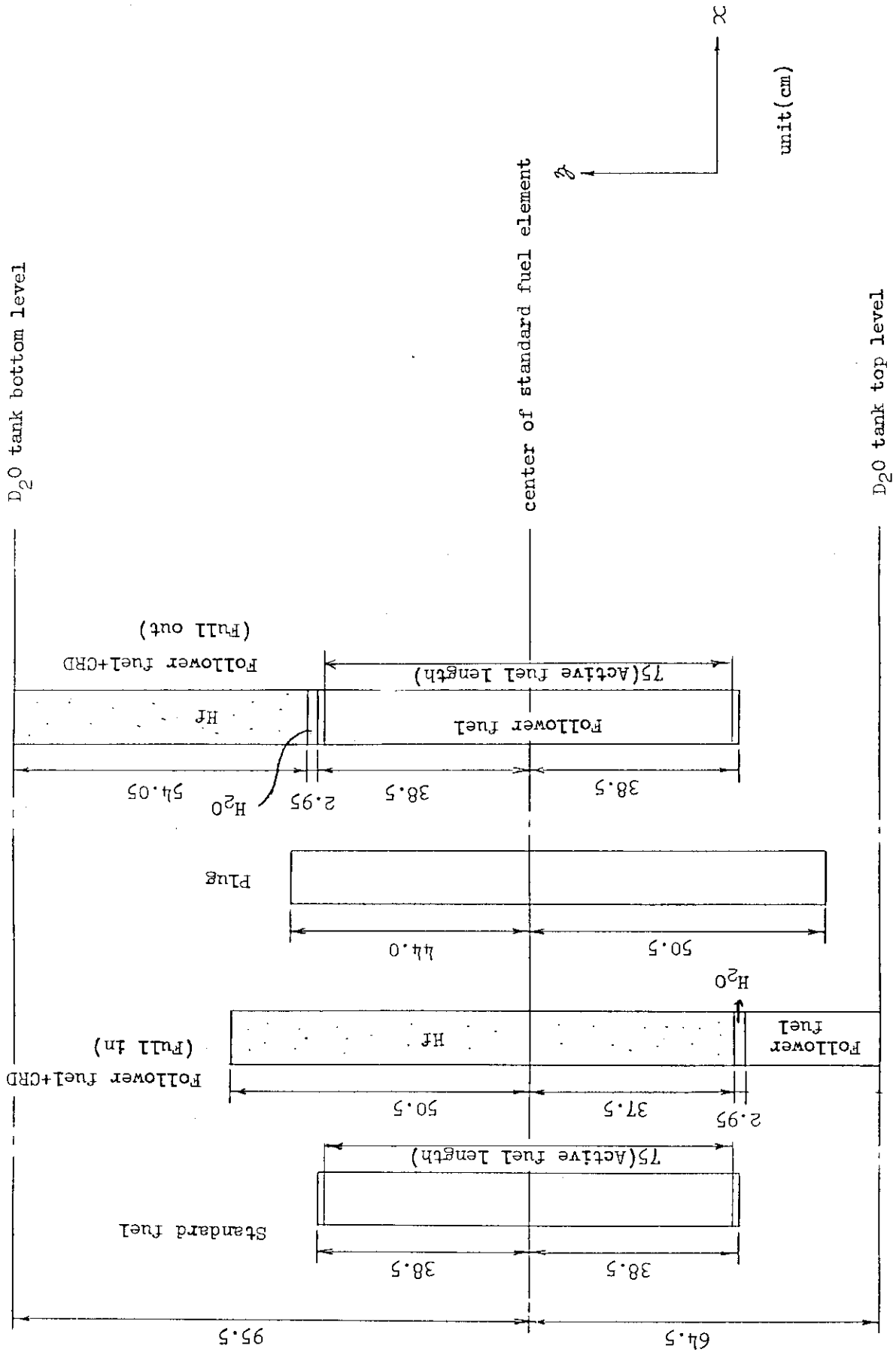


Fig. 15 Relative of each element from standard fuel element center

7. 計算結果及び検討

(1) SRAC との比較

JACS を用いて計算した下記4ケースの中性子増倍係数を、SRAC による計算結果と併せて Table 5 に示す。なお、SRAC による計算結果は文献 3) から引用した。

ケース1 : 標準型燃料要素の無限増倍係数

ケース2A : 全制御棒全引抜時の炉心の実効増倍係数

ケース3A : 全制御棒全挿入時の炉心の実効増倍係数

ケース4A : 制御棒1本のみ全引抜、その他の制御棒全挿入時の炉心の実効増倍係数

JACS による標準型燃料要素の無限増倍係数(ケース1)は 1.6048 ± 0.0030 である。SRAC による計算結果は 1.5863 で、この値は JACS による結果と比べて相対差で約1パーセント小さい。この大小関係は、全制御棒全引抜時の炉心の実効増倍係数(ケース2A)でも同様であり、SRAC の結果は JACS の結果よりも相対差で約1パーセント小さい。

1本の制御棒のみ全引抜きしその他の制御棒全挿入時の炉心の実効増倍係数(ケース4A)は、JACS の結果が SRAC の結果を僅かに上回っているが、その相対差は約0.2パーセントである。

JACS による全制御棒全挿入時の炉心の実効増倍係数(ケース3A)は 0.8550 ± 0.0025 である。SRAC による計算結果は 0.8743 で、この値は JACS による結果と比べて相対差で約2パーセント大きい。

以上のように、JRR-3改造炉の実効増倍係数を JACS と SRAC による計算結果で比較すると、両者の結果の大小関係は制御棒引抜パターンによって異なる。制御棒の挿入量が増大すると SRAC による実効増倍係数の計算結果は JACS による計算結果よりも大きくなる。これは、ケース4の比較結果をも考慮すると、SRAC は制御棒反応度値を JACS よりも小さく見積っていることを意味する。JACS による計算では制御棒を忠実に3次元的に表現したのに対して、SRAC による計算では2次元形状の取扱いをするとともに制御棒表面での熱群境界条件に対数微分境界条件を適用した。この相違が、JACS と SRAC とでは異なる制御棒反応度値を算出する結果になったと推察する。

(2) JRR-3改造炉の余剰反応度、停止余裕、ワン・ロッド・スタック・マージン

ケース2A、3A、4Aに対する JACS の計算結果(実効増倍係数)を反応度に変換して Table 5 の右端に示す。ケース2A、3A、4Aの各反応度が、順に余剰反応度、停止余裕、ワン・ロッド・スタック・マージンに相当する。

JRR-3改造炉設計方針には、核的制限値の1つとして反応度停止余裕が $0.01 \Delta K/K$ 以上であることが定められている。但し、この反応度停止余裕とは、最大の反応度値を持つ制御棒1本が全挿入できず全引抜の状態にある場合の反応度を指す。したがって、この反応度とケース4Aの計算結果から得られたワン・ロッド・スタック・マージンとは同一であり、対等な比較ができる。両者を比較すると、ケース4Aの計算結果から得られたワン・ロッド・スタック・マージン $0.04 \Delta K/K$ は、反応度停止余裕 $0.01 \Delta K/K$ よりも大きい。故に、JRR-3改造炉の反応度停止余裕は制限値よりも十分に安全な値であることが確認できた。

なお、当然ながらケース 3 A の計算結果から得られた全制御棒挿入時の停止余裕 $0.170 \Delta K / K$ も制限値よりも十分安全側である。

ケース 2 A の計算結果から得られた余剰反応度は $0.175 \Delta K / K$ である。この値は、JRR-3 改造炉設計方針に定められている最大過剰反応度約 $0.16 \Delta K / K$ を若干上回っている。但し、計算によって得られた余剰反応度 $0.175 \Delta K / K$ は、初装荷炉心の値であることをここで再度強調しておく。

(3) ベリリウム散乱マトリクス検討

ベリリウム反射体要素（固体）の散乱マトリクスとして、自由原子モデル及び固体モデルのデータをそれぞれ使って JACS により計算した実効増倍係数を Table 6 に示す。ケース 2 A, 3 A, 4 A では自由原子モデルの散乱マトリクスを使った。ケース 2 B, 3 B, 4 B では固体モデルの散乱マトリクスを使った。ケース 2 A とケース 2 B, ケース 3 A とケース 3 B, ケース 4 A とケース 4 B の制御棒引抜パターンは各々同一である。Table 6 に示す 3 つの制御棒引抜パターンの場合、自由原子モデル、固体モデルのいずれの散乱マトリクスを用いても JACS によって得られた実効増倍係数に大きな差異は認められず、相対差は最大でも 1 パーセント未満となった。

Table 5 Calculated k_{eff} values and reactivity of the upgraced JRR-3 research reactor by JACS

Case No	JACS	SRAC ^{e)}	$k_{\text{eff}}^{\text{S}} - k_{\text{eff}}^{\text{A}}$	$\rho = \frac{k_{\text{eff}}^{\text{A}} - 1}{k_{\text{eff}}^{\text{A}}}$
	$k_{\text{eff}}^{\text{A}} \pm \sigma$	$k_{\text{eff}}^{\text{S}}$	$k_{\text{eff}}^{\text{A}}$	
1 a)	1.60480±0.00304	1.5863	-0.0115	—
2 A b)	1.21242±0.00241	1.1969	-0.0128	0.175
3 A c)	0.85497±0.00248	0.8743	0.0226	-0.170
4 A d)	0.96163±0.00251	0.9594	-0.00232	-0.040

- a) k_{∞} of standard type fuel element.
 b) All control rods are fully withdrawn.
 c) All control rods are fully inserted.
 d) One control rod is fully withdrawn, and the other are fully inserted.
 e) Refere to JAERI-M 84-099.

Table 6 Comparison of calculated k_{eff} by JACS between different scattering matrix files of beryllium

Case No	Free atom model	Case No	Binding model	$k_{\text{eff}}^{\text{A}} - k_{\text{eff}}^{\text{B}}$
	$k_{\text{eff}}^{\text{A}} \pm \sigma$		$k_{\text{eff}}^{\text{B}} \pm \sigma$	$k_{\text{eff}}^{\text{B}}$
2A a)	1.21242±0.00241	2B a)	1.21193±0.00243	0.0004
3A b)	0.85497±0.00248	3B b)	0.86068±0.00240	-0.0066
4A c)	0.96163±0.00251	4B c)	0.95550±0.00279	0.0064

- a) All control rods are fully withdrawn.
 b) All control rods are fully inserted.
 c) One control rod is fully withdrawn, and the other are fully inserted.

8. 結 論

JACS で計算した JRR-3 改造炉に装荷する標準型燃料要素の無限増倍係数及び3種類の制御棒引抜パターンでの JRR-3 改造炉の各実効増倍係数を、SRAC による計算結果と比較した。

JACS で計算した標準型燃料要素の無限増倍係数及び全制御棒全引抜炉心の実効増倍係数は、SRAC で計算した値よりも大きく、約1パーセントの相対差を持つ。JACS で計算した全制御棒全挿入炉心の実効増倍係数は、SRAC で計算した値よりも小さく、約2パーセントの相対差を持つ。最大反応度値を持つ制御棒のみ全引抜きし、その他の制御棒を全挿入した炉心の実効増倍係数は、両計算結果は近い値を示した。これらは、制御棒のモデル化の違いに誘引されて生じた傾向と推察する。

全制御棒全挿入炉心及び最大反応度値を持つ制御棒のみ全引抜きし、その他の制御棒を全挿入した炉心の各実効増倍係数は、JACS 及び SRAC によれば次に示す値になった。

	JACS		SRAC
	全制御棒全挿入炉心の実効増倍係数	k_{eff}	0.85497±0.00248
	ρ	-0.170	-0.143
最大反応度値を持つ制御棒のみ全引抜きし、その他の制御棒を全挿入した炉心の実効増倍係数	k_{eff}	0.96163±0.00251	0.9594
	ρ	-0.040	-0.042

これらの結果から、JRR-3 改造炉の停止余裕、ワン・ロード・スタック・マージンはともに JRR-3 改造炉設計方針に定められた核的制限値（反応度停止余裕） $0.01 \Delta K/K$ を十分に満足していることが確認できた。

謝 辞

JRR-3 改造炉に関する詳細な情報は、日本原子力研究所研究炉管理部の鶴田晴通、市川博喜、岩崎淳一の3氏から提供していただいた。固体ベリリウム散乱マトリクスは、プラント安全解析研究室の片倉純一氏に作成していただいた。MULTI-KENOのインターセクト機能のメンテナンスのためにセンチュリ・リサーチ・センタの川崎光弘氏には少なからぬ労力をおかけする結果となってしまった。臨界安全解析全般については、プラント安全解析研究室室長内藤倣孝氏から適切なご指導をいただいた。ここに深謝する。

参 考 文 献

- 1) J. Katakura, Y. Naito and Y. Komuro : "Development of the Computer Code System JACS for Criticality Safety", Transaction of ANS, 41, 329 (1982)
- 2) K. Tsuchihashi, et al. : "SRAC : JAERI Thermal Reactor Standard Code System for Reactor Design and Analysis", JAERI - 1285 (1983)
- 3) 鶴田晴通, 市川博喜, 岩崎淳一 : 「JRR-3 改造炉の核設計」, JAERI-M 84-099
- 4) Y. Naito, M. Yokota and K. Nakano : "MULTI-KENO : A Monte Carlo Code for Criticality Safety Analysis", JAERI-M 83-049 (1983)
- 5) ENDF/B Summary Documentation, BNL - NCS - 17541 (ENDF-201), 2nd Edition (ENDF/B-IV) (1975)
- 6) Y. Naito, et al. : "MGCL-PROCESSOR : A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL", JAERI-M 9396 (1981)
- 7) I. I. Bondarenko, et al. : "Group Constants for Nuclear Reactor Calculation", Consultants Bureau, New York (1964)
- 8) R. Q. Wright, et al. : "SUPERTOG : A Program to Generate Group Constants and Pn Scattering Matrices from ENDF/B", ORNL - TM - 2679 (1969)
- 9) H. C. Honeck and D. R. Finch, "FLANGE II : A Code to Process Thermal Neutron Data from an ENDF/B Tape", DP-2179, E. I. Du Pont De Nemours & Company (1971)
- 10) J. D. MacDougall, "PIXSE", AEEW-M318, Atomic Energy Establishment, Winfrith (1963)
- 11) L. M. Petrie and N. F. Cross, "KENO-IV, An Improved Monte Carlo Criticality Program", ORNL-4938, ORNL (1975)
- 12) ENDF/B Summary Documentation, BNL - NCS - 17541 (ENDF-201), 1st Edition (ENDF/B-III) (1973)

謝 辞

J R R - 3 改造炉に関する詳細な情報は、日本原子力研究所研究炉管理部の鶴田晴通、市川博喜、岩崎淳一の3氏から提供していただいた。固体ベリリウム散乱マトリクスは、プラント安全解析研究室の片倉純一氏に作成していただいた。MULTI-KENOのインターセクト機能のメンテナンスのためにセンチリ・リサーチ・センタの川崎光弘氏には少なからぬ労力をおかけする結果となってしまった。臨界安全解析全般については、プラント安全解析研究室室長内藤倣孝氏から適切なご指導をいただいた。ここに深謝する。

参 考 文 献

- 1) J. Katakura, Y. Naito and Y. Komuro : "Development of the Computer Code System JACS for Criticality Safety", Transaction of ANS, 41, 329 (1982)
- 2) K. Tsuchihashi, et al. : "SRAC : JAERI Thermal Reactor Standard Code System for Reactor Design and Analysis", JAERI - 1285 (1983)
- 3) 鶴田晴通, 市川博喜, 岩崎淳一 : 「J R R - 3 改造炉の核設計」, JAERI-M 84-099
- 4) Y. Naito, M. Yokota and K. Nakano : "MULTI-KENO : A Monte Carlo Code for Criticality Safety Analysis", JAERI-M 83-049 (1983)
- 5) ENDF/B Summary Documentation, BNL - NCS - 17541 (ENDF-201), 2nd Edition (ENDF/B-IV) (1975)
- 6) Y. Naito, et al. : "MGCL-PROCESSOR : A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL", JAERI-M 9396 (1981)
- 7) I. I. Bondarenko, et al. : "Group Constants for Nuclear Reactor Calculation", Consultants Bureau, New York (1964)
- 8) R. Q. Wright, et al. : "SUPERTOG : A Program to Generate Group Constants and Pn Scattering Matrices from ENDF/B", ORNL-TM-2679 (1969)
- 9) H. C. Honeck and D. R. Finch, "FLANGE II : A Code to Process Thermal Neutron Data from an ENDF/B Tape", DP-2179, E. I. Du Pont De Nemours & Company (1971)
- 10) J. D. MacDougall, "PIXSE", AEEW-M318, Atomic Energy Establishment, Winfrith (1963)
- 11) L. M. Petrie and N. F. Cross, "KENO-IV, An Improved Monte Carlo Criticality Program", ORNL-4938, ORNL (1975)
- 12) ENDF/B Summary Documentation, BNL - NCS - 17541 (ENDF-201), 1st Edition (ENDF/B-III) (1973)

- 13) N. M. Greene, J. L. Lucius, L. M. Petrie, W. E. Ford III, J. E. White, and R. Q. Wright, "AMPX: A Modular Code System for generating Coupled Multigroup Neutron-Gamma Libraries from ENDF/B", ORNL/TM-3706 (1976)

付 録

A. 1 137群, 300K MGCLに収納されているベリリウムの散乱マトリクス

ベリリウム反射体は固体である。一方, MGCLに収納されているベリリウムの散乱マトリクスは自由ガスモデルのデータである。固体及び自由ガスモデルの散乱マトリクスの違いが臨界計算に及ぼす影響について調べたところ, 計算結果に有意な差は生じないことがわかった。従って, 今回の計算では, ベリリウム領域の散乱マトリクスデータは既にMGCLに収納されている自由ガスモデルのデータを使った。

A. 2 137群, 300K MGCLへのハフニウム同位体核種の追加

制御棒要素の中性子吸収体の材質はハフニウムであるが, 137群, 300K MGCLにはハフニウム同位体核種は含まれていない。さらに, MGCLの原典である評価済核データENDF/B-IVにもこれらの核種のデータは記載されていない。

このため, JENDL-2に含まれているハフニウム同位体核種のデータをMGCL-ACEで処理し137群, 300K MGCLに追加した。追加核種を Table A. 1に示す。

A. 3 インターセクト機能の検証(ケース2C, 3C, 4C)

モンテカルロ臨界計算コードKENO-Nの形状指定方式では, リフレクター・カードで定義する領域はその内側のコア・バウンダリ・カードで定義した領域を完全に包含しなければならず, 交差(インターセクト)は許されない。

MULTI-KENOの形状指定方式ではこの制限が緩和され, 交差が許される(インターセクト機能)。この機能は, JRR-3改造炉のベリリウム反射体外周部を表現する場合に有効である。Fig. A. 1に, インターセクト機能を使ったJRR-3改造炉の計算モデルを示す。これは, ケース2A, 3A, 4Aに共通である。7×7に配列された正方形のブロックは, 各々スーパー・ボックス^{*}である。スーパー・ボックス群の外周がコア・バウンダリ・ラインである。このモデルでは, 複雑な形(扇形)をしたベリリウム反射体要素を, コア・バウンダリ・ラインを交差するリフレクター・ラインで忠実に再現している。このモデルによるJACSの計算結果は, 本文のTable 5に示した。MULTI-KENOから得られたこのモデルの体系図を Fig. A. 2に示す。

インターセクト機能を使った場合の計算結果の妥当性を確認するために, ケース2A, 3A, 4A

* スーパー・ボックスとは, その内部に配列指定が可能であり, それ自身の配列も許されるボックスである。MULTI-KENOによるJRR-3改造炉の臨界計算では, 燃料要素, 制御棒要素等をスーパー・ボックスで定義した。燃料要素を構成する燃料板はスーパー・ボックス内を配列指定して定義した。

の体系に対してこの機能を使わずに計算を行った（ケース2C, 3C, 4C）。ベリリウム反射体要素の曲線部分は、この要素の断面積を保存するように Fig. A. 3 に示す階段状の近似を施した。このモデルに基づく JACS の計算結果をインターセクト機能を使った JACS の計算結果（本文 Table 5）と併せて Table A. 2 に示す。このテーブル右端に示した両計算結果間の相対差は3ケースとも1パーセント未満である。したがって、インターセクト機能は正常であると判断する。

Table A.1 Hf isotope in MGCL

Nuclide	Nuclide ID No.	Abundance ^{a)} [atom %]
${}^{174}_{72}\text{Hf}$	2 7 2 1 7 4 0	0.1 6
${}^{176}_{72}\text{Hf}$	2 7 2 1 7 6 0	5.2 0
${}^{177}_{72}\text{Hf}$	2 7 2 1 7 7 0	1 8.6
${}^{178}_{72}\text{Hf}$	2 7 2 1 7 8 0	2 7.1
${}^{179}_{72}\text{Hf}$	2 7 2 1 7 9 0	1 3.7
${}^{180}_{72}\text{Hf}$	2 7 2 1 8 0 0	3 5.2

a) Refer to Table of Isotope (Seventh edition)

Table A.2 Comparison of calculated k_{eff} by JACS
between intersection model and non intersection
model for the upgraded JRR-3 research reactor

Case No.	Intersection model	Case No.	Non intersection model	$\frac{k_{\text{eff}}^{\text{A}} - k_{\text{eff}}^{\text{C}}}{k_{\text{eff}}^{\text{C}}}$
	$k_{\text{eff}}^{\text{A}} \pm \sigma$		$k_{\text{eff}}^{\text{C}} \pm \sigma$	
2 A a)	1.21242 ± 0.00241	2 C a)	1.20260 ± 0.00250	-0.0081
3 A b)	0.85497 ± 0.00248	3 C b)	0.85626 ± 0.00277	0.0015
4 A c)	0.96163 ± 0.00251	4 C c)	0.96098 ± 0.00262	-0.0007

a) All control rods are fully withdrawn.

b) All control rods are fully inserted.

c) One control rod is fully withdrawn, and the other are inserted.

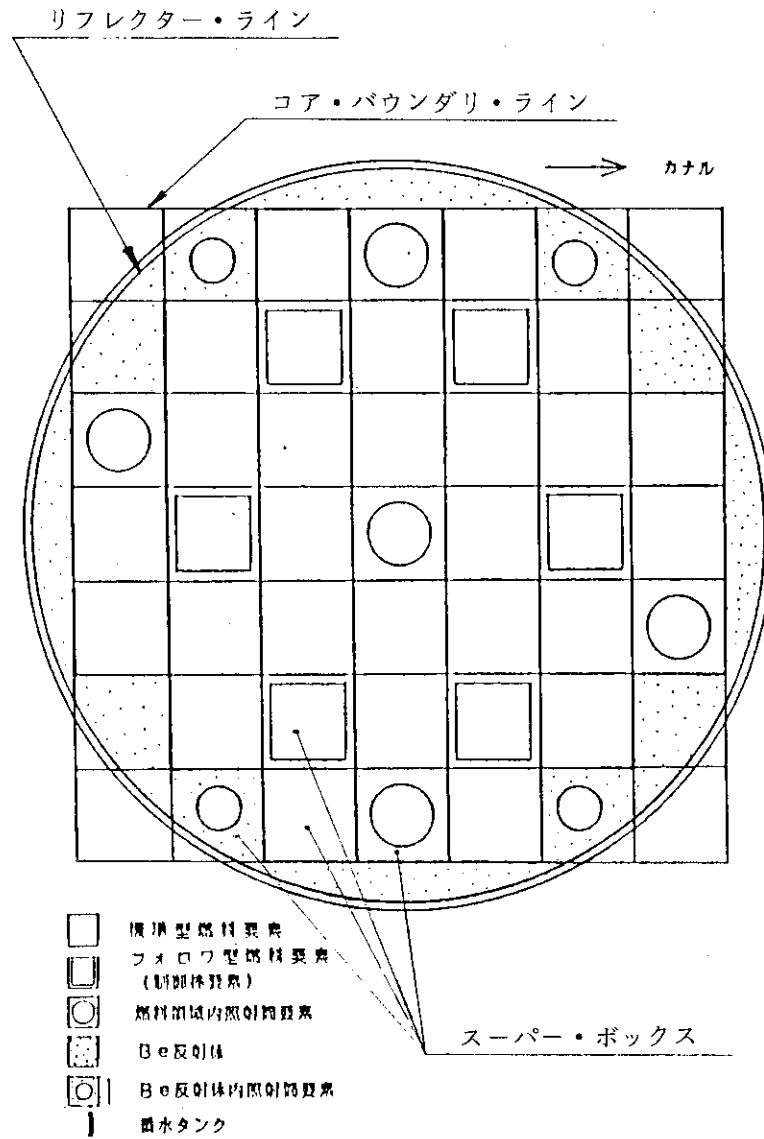


Fig. A. 1 インターセクション機能を使った JRR-3 改造炉の計算モデル

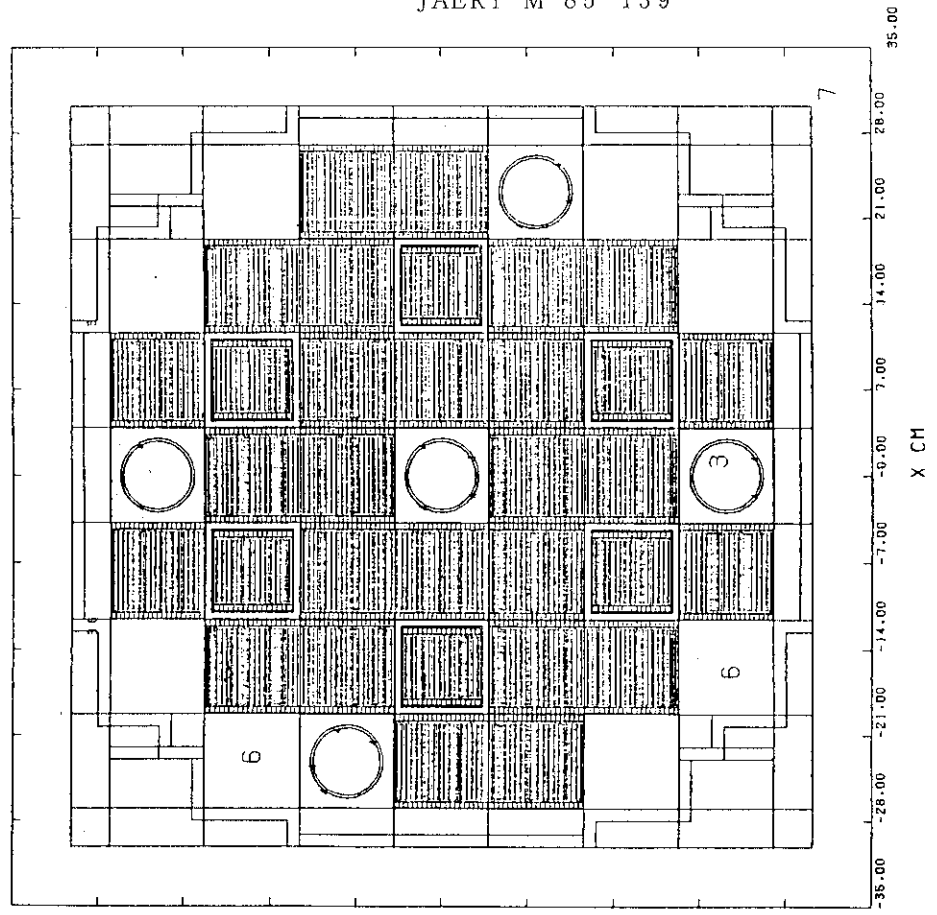
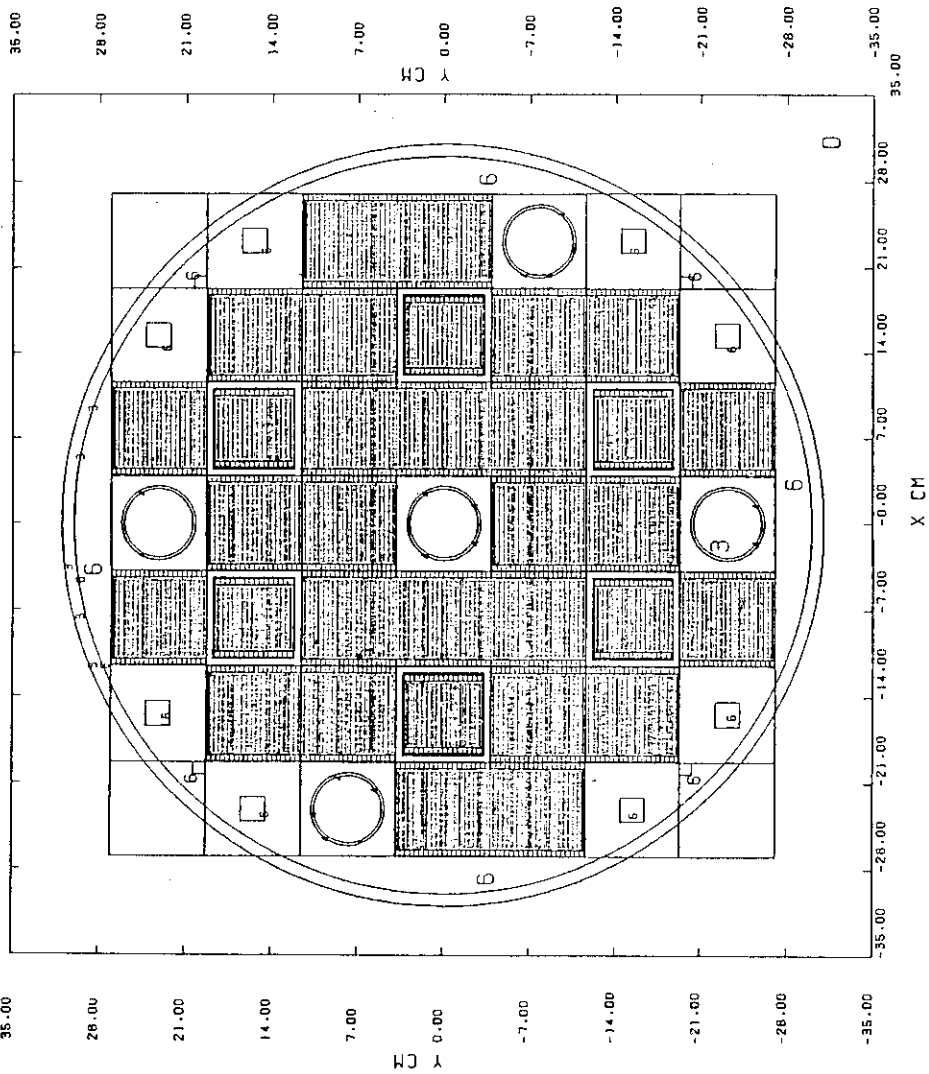


Fig. A. 2 JRR-3 core calculation model using intersection option (output of MULTI-KENO)

Fig. A. 3 JRR-3 core calculation model without intersection option (output of MULTI-KENO)

A. 4 MULTI-KENOから得られる実効増倍係数と標準偏差

本文の Table 5, 6 及び付録の Table A. 2 に示した各実効増倍係数 $k_{\text{eff}} \pm \sigma$ は MULTI-KENO の計算結果である。 k_{eff} は、各世代の実効増倍係数の相加平均であり、次式によって求められている。

$$k_{\text{eff}} = \frac{1}{N'} \sum_{i=N_s+1}^N k_i \quad \text{-----} \quad (\text{A. 1})$$

ここで、

$$N' = N - N_s$$

k_{eff} : 平均実効増倍係数

k_i : 各世代の実効増倍係数

N : 計算世代数

N_s : スキップ世代数

である。また、 σ は k_{eff} に対する標準偏差であり、次式から求められている。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N'(N'-1)} \sum_{i=N_s+1}^N (k_i - k_{\text{eff}})^2} \quad \text{-----} \quad (\text{A. 2})$$