



JP0150716



FCA XX-1炉心におけるガス膨張機構(GEM)
の反応度価値測定と解析
(共同研究)

2001年6月

大井川 宏之・安藤 真樹・飯島 進
高木 直行*・植松 真理 マリアンヌ*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行　　日本原子力研究所

FCA XX-1 炉心におけるガス膨張機構（GEM）の反応度価値測定と解析
(共同研究)

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究中心

大井川 宏之・安藤 真樹⁺・飯島 進⁺・高木 直行*・植松 真理 マリアンヌ*

(2001年4月13日受理)

大型高速炉の冷却材循環ポンプ停止時に負の反応度フィードバックを与えることを目的として、ガス膨張機構（GEM）の導入が検討されている。GEM が作動した場合の反応度効果（GEM 反応度価値）に対する予測精度を評価し、向上させることを目的として、高速炉臨界実験装置 FCA に XX-1 炉心を構築して模擬実験を実施した。GEM はその設置場所によって炉外 GEM と炉内 GEM に分類され、それぞれの反応度効果について実験を行った。

炉外 GEM 反応度価値に関しては、実効断面積の作成において、GEM 構造材である鉄の自己遮蔽効果を適切に評価する必要があることが分かった。決定論的手法による RZ モデル輸送計算を使って輸送補正を行った場合、計算は炉外 GEM 反応度価値を 10~20%程度過大評価することが分かった。さらに、輸送計算にモンテカルロ法を用いると、予測精度を 10%以内に改善できることが分かった。

炉内 GEM 反応度価値の解析においては、ボイドに沿った軸方向の中性子ストリーミングが大きく影響するため、セルの均質化法に注意を払う必要があることが分かった。炉内 GEM 反応度価値の予測精度にはナトリウム液位依存性が見られた。最小二乗法によるフィッティングを使って予測精度の成分別評価を行った結果、非漏洩項は 10~20%の過大評価であるが、漏洩項は実験誤差の範囲内で実験と計算が一致することが明らかとなった。

本報告書は、日本原子力発電株式会社との共同研究の成果である。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

+ エネルギーシステム研究部

* 日本原子力発電株式会社

Experiments and Analyses on Reactivity Worth of
Gas Expansion Module (GEM) in FCA XX-1
(Joint Research)

Hiroyuki OIGAWA, Masaki ANDOH⁺, Susumu IIJIMA⁺,
Naoyuki TAKAKI* and Mari Marianne UEMATSU*

Center for Neutron Science
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 13, 2001)

Gas Expansion Module (GEM) will be installed in large scale fast reactors in order to insert negative reactivity feedback in a transition of the primary pump trip. A mock-up experiment was performed at the XX-1 core of the Fast Critical Assembly (FCA) to evaluate and improve the prediction accuracy of the reactivity effect inserted by the GEM (GEM reactivity worth). The GEM was categorized into "External GEM" and "In-core GEM" according to its position; the experiment was performed for both cases, and the prediction accuracy was discussed.

As for the external GEM reactivity worth, it was indicated that the self-shielding effect for iron used as the structural material of the GEM should be taken into account in the preparation process of the effective cross section of the GEM region. The overestimation of 10 - 20% was observed when the deterministic calculation was adopted for the transport correction in RZ geometry. When the Monte-Carlo method was used instead, the overestimation was reduced below 10%.

As for the in-core GEM reactivity worth, it was pointed out that the cell homogenization should be carefully carried out since the neutron streaming affects the prediction accuracy. The prediction accuracy shows a dependence on the sodium level in the GEM. The prediction accuracy was evaluated by separating it into the non-leakage term and the leakage term by a least-squares fitting. It was found that the non-leakage term shows 10 - 20% overestimation, while the leakage term agrees well with the measurement within the experimental error.

Keywords: Gas Expansion Module, Sodium Void, Reactivity Worth, External GEM, In-core GEM, Self-shielding effect, Neutron Streaming Effect, Cell Homogenization, Heterogeneity, Monte-carlo Method, Transport Theory, Critical Experiment, Fast Critical Assembly, LMFBR

This report is the result of the joint research with the Japan Atomic Power Company.

+ Department of Nuclear Energy System

* The Japan Atomic Power Company

目 次

1. はじめに	1
2. FCAによる臨界実験	3
2.1 実験体系	3
2.2 GEM反応度価値の測定手法	3
3. 計算手法	21
3.1 セル計算	21
3.2 体系計算	21
3.3 摂動計算及び輸送補正	22
4. 考 察	24
4.1 炉外 GEM 領域の実効断面積に関する考察	24
4.2 炉外 GEM の実験結果	25
4.3 炉外 GEM 反応度価値の予測精度検討	26
4.4 炉内 GEM の実験結果	28
4.5 炉内 GEM 領域均質化法の影響	29
4.6 炉内 GEM 反応度価値の予測精度検討	30
5. まとめ	46
謝 辞	47
参考文献	47

Contents

1. Introduction -----	1
2. Critical Experiment at FCA-----	3
2.1 Description of FCA Core -----	3
2.2 Experimental Method for GEM Reactivity Worth Measurement -----	3
3. Calculation-----	21
3.1 Cell Calculation -----	21
3.2 Core Calculation -----	21
3.3 Perturbation Calculation and Transport Correction -----	22
4. Discussion-----	24
4.1 Effective Cross Section of External GEM Region-----	24
4.2 Experimental Results for External GEM Reactivity Worth-----	25
4.3 Discussion of Prediction Accuracy for External GEM Reactivity Worth -----	26
4.4 Experimental Results for In-core GEM Reactivity Worth -----	28
4.5 Influence of Homogenization Method for In-core GEM Region -----	29
4.6 Discussion of Prediction Accuracy for In-core GEM Reactivity Worth-----	30
5. Summary-----	46
Acknowledgements -----	47
References -----	47

1. はじめに

ナトリウム冷却型の高速炉の安全性を高めるため、受動的炉停止機構としてガス膨張機構 (Gas Expansion Module : GEM)⁽¹⁾を導入することが提案されている。GEM は異常過渡変化時スクラム失敗事象 (Anticipated Transient Without Scram : ATWS) の一種である流量減少時スクラム失敗事象 (Unprotected Loss Of Flow : ULOF) 時に負の反応度を挿入する炉停止機構であり、日本における高速実証炉への導入が検討されてきた。

GEM は高速炉用燃料集合体と同じ形状のステンレス鋼製の筒状の「缶」であり、炉心と径方向ブランケットの間に炉心を取り囲むように設置される炉外 GEM と、炉心内の燃料集合体の代わりに設置される炉内 GEM に分けられる。GEM は上部が密封された構造をしており、内部にはナトリウムと不活性ガスが充填され、下部のナトリウムは炉心冷却材ナトリウムとエントランスノズルでつながっている。冷却材循環ポンプが正常に作動しているときには GEM 内のナトリウムはポンプからの圧力により押し上げられ、GEM 内の不活性ガスの圧力と平衡を保っている。この時の GEM 内のナトリウム液面は炉心よりも高い位置にあるように設計されている。

GEM の作動原理を Fig.1.1 に示す。冷却材循環ポンプが停止した場合、ナトリウムを押し上げる力が低下するため、GEM 内の不活性ガスが膨張し、結果として GEM 内のナトリウム液面が炉心よりも低下することになる。GEM 内のナトリウムは炉心から漏れ出る中性子を反射体効果により炉心に戻す働きをしているため、GEM 内のナトリウム液面が低下すると、炉心から漏れ出す中性子の量が増加して、核分裂の連鎖反応が停止する。すなわち、負の反応度が受動的に挿入され、原子炉の出力が低下する。このように、GEM はポンプからの圧力と不活性ガスの圧力のみで動作し、機械的な駆動機構や電力の供給を必要としないため、信頼性の高い安全装置であるといえる。大型の高速炉では炉外 GEM だけでは十分な負の反応度フィードバックが得られないので、炉内 GEM の設置が必要となる。

炉外 GEM の場合は、炉心径方向への中性子漏洩が主な負の反応度成分となるが、炉内 GEM の場合は、炉心軸方向への中性子漏洩が重要な役割を果たす。さらに、炉内 GEM では、散乱物質であるナトリウムが喪失することによって中性子エネルギースペクトルが高エネルギー側にシフトすることによる正の反応度効果（散乱成分）が大きいため、負の反応度が一部打ち消されることに注意が必要である。

GEM に関する実験的研究は米国でわずかに行われているが^(2,3)、予測精度の詳細な検討にはデータが不足している。本研究では、日本原子力研究所の高速炉臨界実験装置 FCA において炉外 GEM 及び炉内 GEM の模擬実験を実施し、GEM 内のナトリウムがボイド化することによる反応度価値（以下、GEM 反応度価値と呼ぶ）を測定し、その実験解析に基づいて反応度価値の予測精度を評価する。

炉外 GEM の解析では、GEM 領域の実効断面積作成時における共鳴自己遮蔽効果の取扱い方法の影響について考察する。また、炉内 GEM の解析では、中性子ストリーミング効果を取り入れる方法について考察し、信頼性の高い計算方法の導入について検討する。

第 1 章に続き、第 2 章では FCA における実験の概要について、第 3 章では GEM 反応度価値の計算方法について述べる。その後、第 4 章では GEM 反応度に対する予測精度の評価・検討を行

う。最後に、第5章で本研究で得られた結論をまとめます。

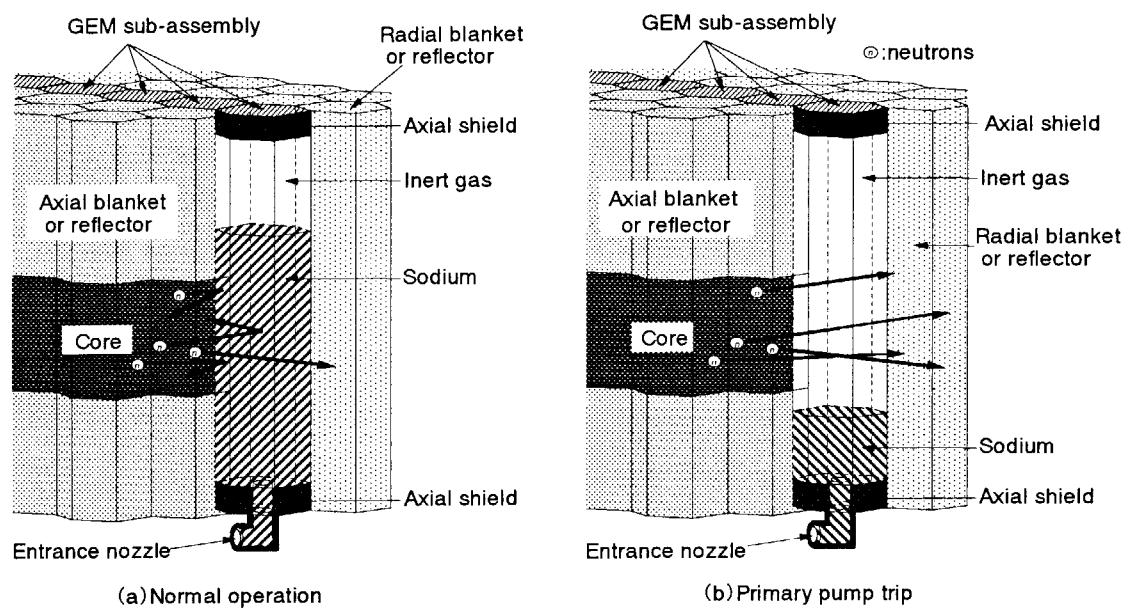


Fig.1.1 Mechanism of external GEM

2. FCA による臨界実験

2.1 実験体系

測定を実施した XX-1 炉心は、プルトニウムを燃料とした窒化物燃料高速炉を模擬したテスト領域(T2N)、それを取り囲むプルトニウム及び濃縮ウランを燃料とした酸化物燃料模擬の中間炉心領域(MOD)、さらにその外側を取り巻く濃縮ウランを燃料とした酸化物燃料模擬の外側炉心領域(EUD)から成る3領域炉心である。その他、制御安全棒(SCR)が MOD 領域に装荷されている。XX-1 炉心の XY 断面図及び RZ モデル図を Fig.2.1(a)及び Fig.2.2(a)に示す。さらに、炉心の各領域を構成する燃料引き出しの装填図を Fig.2.3 に、各領域の均質化原子数密度を Table 2.1 に示す。

XX-1 炉心は、GEM 反応度価値の測定のために構築された炉心であり、GEM の導入が検討されている高速実証炉に近づけるため、FCA で構築できる炉心のうちでは最大級の体積を持ち、かつ、解析を容易にするために、比較的単純な組成の炉心とした。テスト領域、中間炉心領域及び外側炉心領域をあわせた炉心体積は $8.83 \times 10^5 \text{cm}^3$ である。

実験実施にあたり GEM 領域を模擬するために、金属ナトリウムをステンレス鋼で被覆したブロック状の模擬物質(GEM 模擬体)を新たに製作した。GEM 模擬体は全て $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ の断面を持ち、長さは 46cm (タイプ-1)、15cm (タイプ-2)、5cm (タイプ-3) の 3 種類を用意した。実機では炉心を取り囲むように炉外 GEM が配置されるが、そのような配置を模擬するのに十分な数の模擬体を用意できなかったことから、Fig.2.1(a)に示したように、炉心周辺部に部分的に GEM 模擬領域を設置し、反応度価値を測定した。さらに、炉外 GEM 反応度価値に関する中性子漏洩等の物理現象を系統的に評価するため、GEM 模擬領域の厚さ、周方向への広がり、GEM 内のナトリウム液位等をパラメータとして変化させた多角的な測定を行った。この結果、炉外 GEM 反応度価値の実験では、4種類の小規模な炉心変更を行った。

基準とした XX-1 炉心(Fig.2.1(a))は、FCA 引き出し 3 層を用いて幅約 17cm の GEM 模擬領域を炉心径方向周辺部 X 軸上に設けた炉心である。GEM 模擬領域以外の炉心径方向周辺部には、劣化ウラン酸化物とナトリウムから成るソフトプランケット(SB)を設けた。この場合、GEM 模擬領域の径方向外側は劣化ウラン金属のプランケット(DUB)となる。このため、径方向プランケットの組成が GEM 反応度価値に及ぼす影響を検討することを目的に GEM 領域の径方向外側に SB を備えた XX-1(RSB)炉心も構築した。XX-1(RSB)炉心の断面図を Fig.2.1(b)に示す。

炉外 GEM 模擬領域を周方向に拡大した炉心として、X 軸上の GEM を 2 層にした炉心及び 1 層にした炉心も構築した。それぞれを XX-1(2X)、XX-1(1X)炉心と呼び、XY 断面図を Fig.2.1(c)及び Fig.2.1(d)に示す。さらに、Y 軸上に 1 層の GEM を設けた XX-1(1Y)炉心(Fig.2.1(e))も構築した。

一方、炉内 GEM の測定を実施したのは XX-1(R)炉心であり、XX-1 炉心から炉外 GEM 模擬領域を取り除き、炉心中心の T2N 引き出しを GEM 模擬引き出しに変更した炉心である。原子炉の過剰反応度調整のために MOD 引き出し及び EUD 引き出しの装荷本数は変更している。XY 断面図を Fig.2.1(f)に、RZ モデルを Fig.2.2(b)に示す。

2.2 GEM 反応度価値の測定手法

GEM 反応度価値はナトリウムを充填した GEM 模擬体を空のボイド缶(ステンレス鋼製)に置換することによる反応度価値とした。炉外 GEM 模擬領域構成用引き出しあは、GEM-A、GEM-B、GEM-C 及びナトリ

ウム板引き出しの計4種類のタイプがあり、それぞれの引き出し装填図は Fig.2.3(f)～(i)に示した。測定では、これらの引き出しに対して Fig.2.4 に示したように GEM 内のナトリウム液位が徐々に低下していく状態を模擬した。

また、Fig.2.1(a)～(e)に示した様々な GEM 模擬領域について、それぞれの反応度価値を測定した。GEM 模擬領域内でボイド状態を模擬する領域も変化させているため、多様なボイドパターンが存在する。炉外 GEM 反応度価値測定におけるボイドパターンを Fig.2.5 にまとめた。ボイドパターンの呼称における最後の「.....×1」又は「.....×2」は、固定側集合体密着面に向かって右側(炉室扉側)の GEM 模擬領域のみで測定したものを「×1」、両側の模擬領域で測定したものを「×2」で示したものである。但し、XX-1(1Y)炉心の場合の「.....×2」は集合体上側及び下側の両方で測定していることを示している。炉外 GEM の反応度価値に関する実験項目を Table 2.2 にまとめた。

炉内 GEM 模擬領域構成用引き出しは、GEM-I、GEM-J 及びナトリウム板引き出しの計3種類のタイプがあり、それぞれの引き出し装填図は Fig.2.3(j)～(l)に示した。測定では、これらの引き出しを炉心中心引き出しとして装荷し、Fig.2.6 に示したように GEM 内のナトリウム液位が徐々に低下していく様子を模擬した。GEM-J においては炉心軸方向中心の約 30cm の範囲をボイド化させない測定(Fig.2.6 において「with narrow part」と表記)も実施した。これは、炉内 GEM の設計において、正の反応度効果となる部分でのボイド化を避け、GEM による負の反応度効果を高めるための工夫を模擬したものである。炉内 GEM に関する実験項目を Table 2.3 にまとめる。

実験誤差は測定の条件によって大きく異なる。固定側集合体のみで GEM 模擬体又はナトリウム板をボイド缶に交換し、比較的小さな反応度価値($1 \times 10^{-3} \Delta k/k$ 程度まで)を臨界制御棒位置を使って測定する場合、実験誤差は $2 \times 10^{-6} \Delta k/k$ である。一方、摂動が移動側集合体まで及ぶ場合、集合体の分離・密着に伴う再現性の不確かを考慮するため、約 $3 \times 10^{-6} \Delta k/k$ の実験誤差となる。また、体系が未臨界になる場合、中性子源増倍法により反応度価値を測定することになり、複数の制御棒位置における測定値のばらつきから誤差を評価する必要がある。この場合、測定誤差は $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4} \Delta k/k$ 程度となつた。

Table 2.1 Homogenized atomic number density for FCA XX-1 core

Nuclide	Cell name a)					
	T'2N	SBN	MOD	SB	EUD	UOB
H	7.7586E-05	1.4398E-04	2.3546E-05		7.6428E-05	
B-10	3.1086E-07	3.1086E-07				1.2969E-04
B-11	1.1309E-06	1.1309E-06				
C	7.0163E-05	1.2575E-04	1.9889E-05		6.4462E-05	
N-14	9.1442E-03	9.1443E-03				1.0929E-04
O	2.3107E-04	2.5977E-04	1.5736E-02	1.8350E-02	1.2484E-02	
Na	7.6564E-03	7.6564E-03	7.6564E-03	7.6564E-03	3.6699E-02	5.6418E-05
Al	9.2944E-03	9.1445E-03	4.4876E-03			
Si	2.1999E-05	2.3273E-06	1.9671E-05			
Cr	3.3850E-03	3.1174E-03	3.3850E-03	3.1174E-03	3.5495E-03	1.8101E-03
Mn	2.5007E-04	2.2939E-04	2.5007E-04	2.2939E-04	2.6236E-04	1.2001E-04
Fe	1.2226E-02	1.1217E-02	1.2226E-02	1.1217E-02	1.2753E-02	6.4727E-03
Ni	1.5471E-03	1.4131E-03	1.5471E-03	1.4131E-03	1.5960E-03	7.8944E-04
U-235	5.3037E-05	7.0716E-05	4.9933E-04	1.8606E-05	2.1197E-03	3.7212E-05
U-238	7.3148E-03	9.7533E-03	6.5242E-03	9.1586E-03	8.5546E-03	1.8317E-02
Pu-239	1.0455E-03		1.0455E-03			
Pu-240	9.1348E-05		9.1348E-05			
Pu-241	2.5270E-06		2.5270E-06			
Pu-242	8.0368E-07		8.0368E-07			
Am-241	6.1243E-06		6.1243E-06			

a) See Fig.2.3.

Table 2.2 Measured items for external GEM reactivity worth

Core configuration	Drawer pattern ^{a)}	Number and position ^{b)}	Axial position of voided cell ^{c)}			
			10~13z	1~13z	-10~13z	-13~13z
GEM-A	3×1×2 (1st.)	3×3×2	10~13z	1~13z	-10~13z	-13~13z
		3×2×2	10~13z	1~13z	-10~13z	-13~13z
		3×1×2 (1st.)	10~13z	1~13z		
	3×1×2 (2nd.)	3×1×2 (2nd.)	1~13z			
		3×1×2 (3rd.)	1~13z			
		3×3×1	1~13z			
XX-1	GEM-B	5×3×2	1~13z	-13~13z		
			10~13z	7~13z	4~13z	1~13z
	GEM-C	3×3×2	-3~13z	-6~13z	-9~13z	-13~13z
		3×3×1	10~13z	7~13z	4~13z	1~13z
			1~3z			
	Sodium plates	3×3×1	10~13z	7~13z	4~13z	1~13z
XX-1(RSB)	GEM-A and B	23×2	1~13z	-13~13z		
	GEM-A	3×3×1	1~13z	-13~13z		
XX-1(2X)	GEM-A	3×2×2	-13~13z			
		14×2	-13~13z			
XX-1(1X)	GEM-A and B	22×2	-13~13z			
		9×2	-13~13z			
XX-1(1Y)	GEM-A and B	15×2	-13~13z			
		23×2	-13~13z			
	GEM-A	15×2	-13~13z			
	GEM-A and B	23×2	-13~13z			

a) See Fig.2.3.

b) See Fig. 2.5.

c) See Fig.2.4.

Table 2.3 Measured items for in-core GEM reactivity worth

Core configuration and position	Drawer pattern ^{a)}	Axial position of voided cell ^{b)}			
		10~15z	1~15z	-9~15z	-15~15z
XX-1(R) Central drawer	GEM-I	10~15z	1~15z	-9~15z	-15~15z
	GEM-J	10~15z	7~15z	4~15z	1~15z
		-3~15z	-6~15z	-9~15z	-15~15z
	GEM-J with a narrow part (-3~3z was not voided)	-6~15z	-9~15z	-15~15z	
	Sodium plates	10~15z	7~15z	4~15z	1~15z
		-3~15z	-6~15z	-9~15z	-15~15z

a) See Fig.2.3.

b) See Fig.2.6.

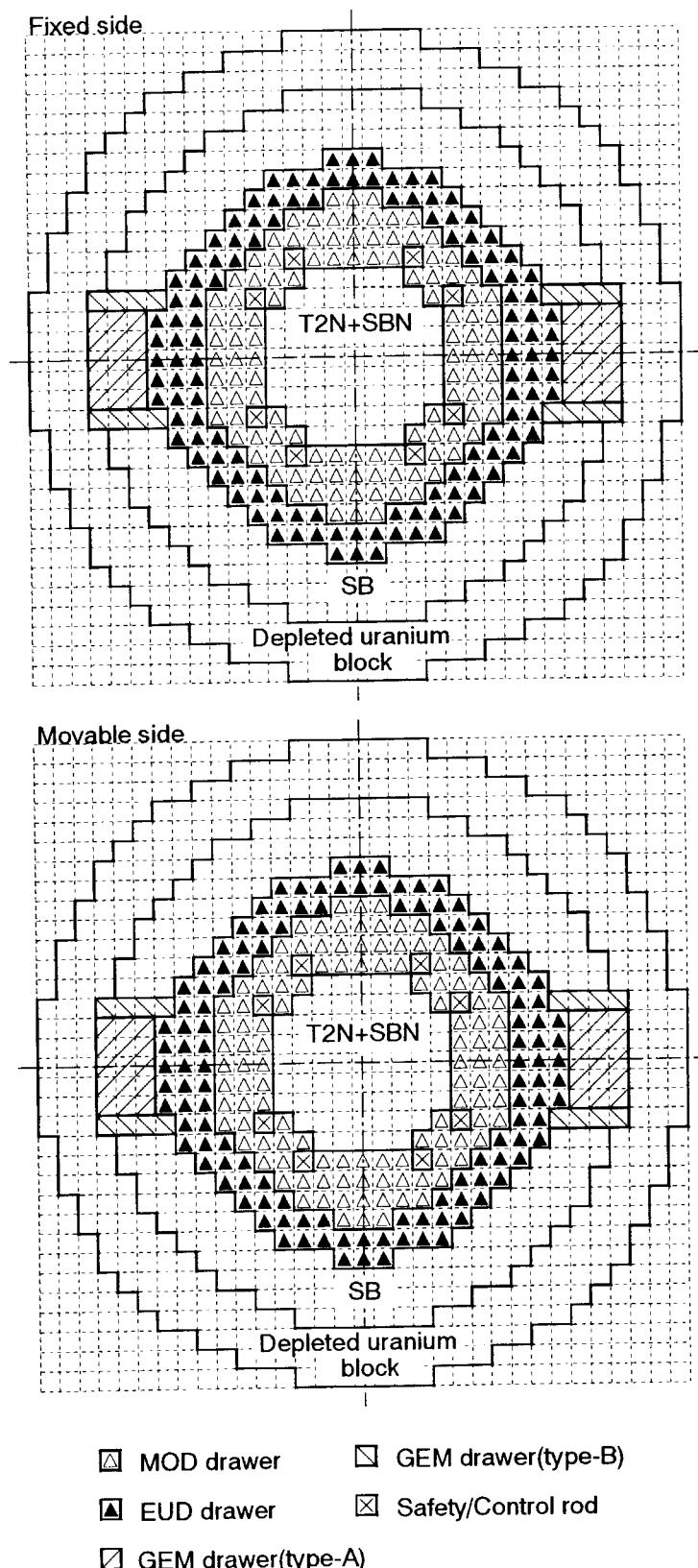


Fig. 2.1(a) XY cross sectional view of FCA XX-1

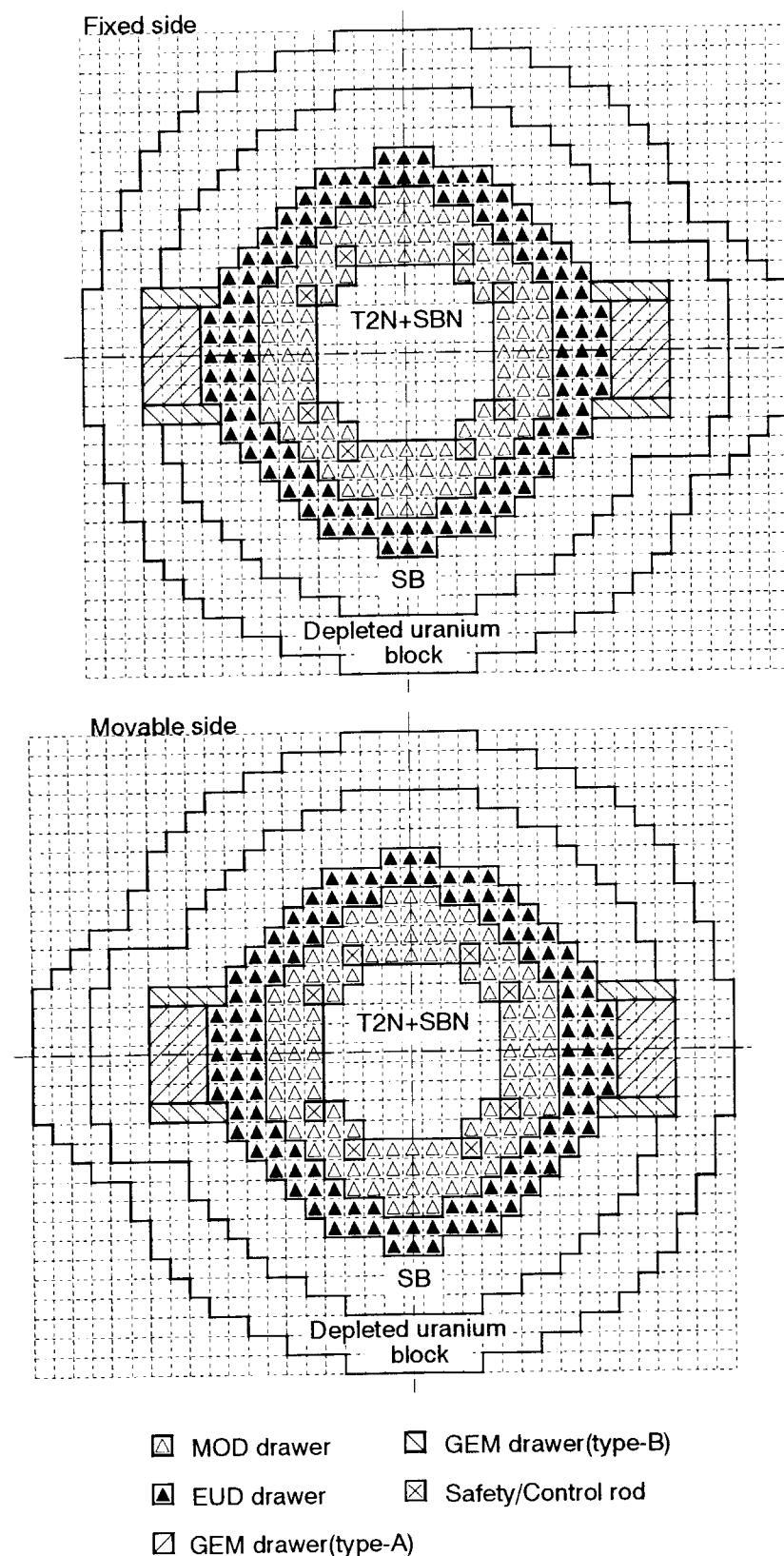


Fig. 2.1(b) XY cross sectional view of FCA XX-1(RSB)

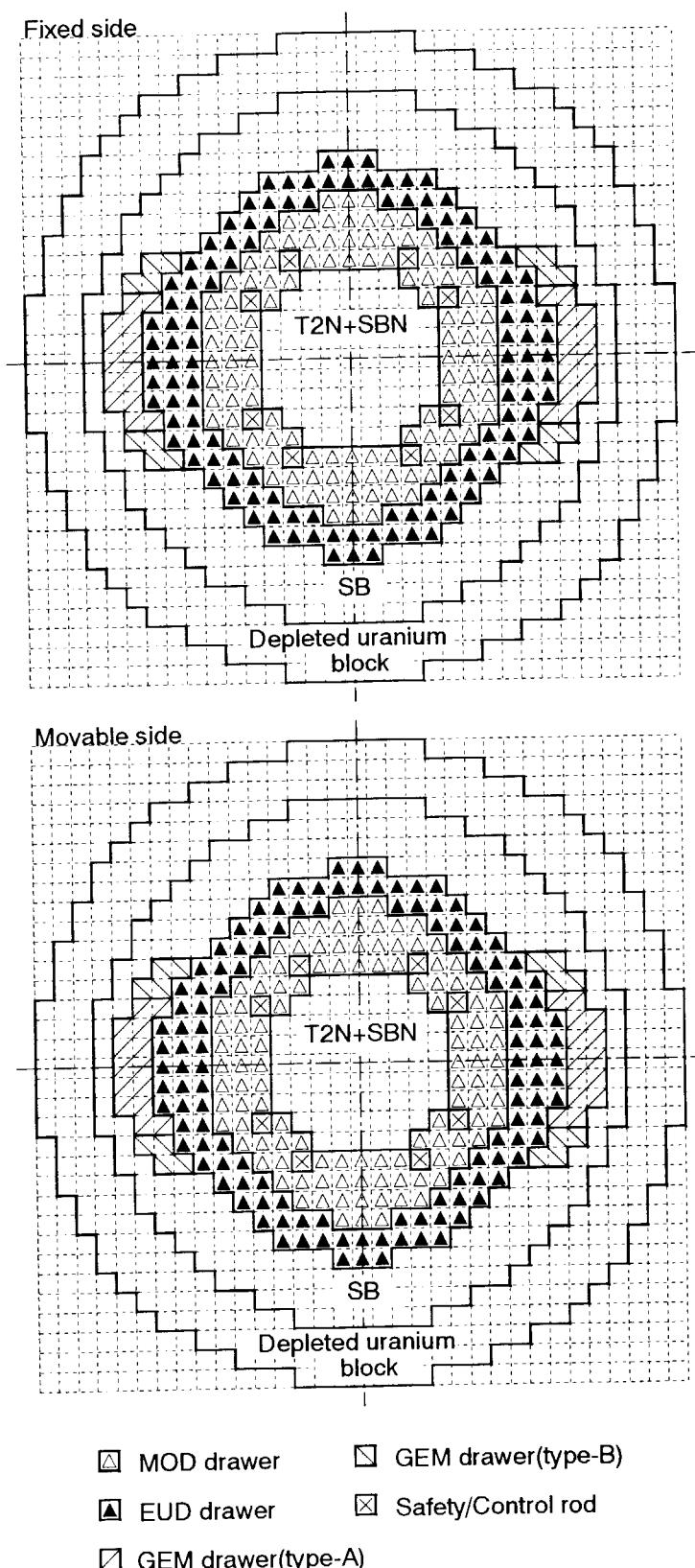


Fig. 2.1(c) XY cross sectional view of FCA XX-1(2X)

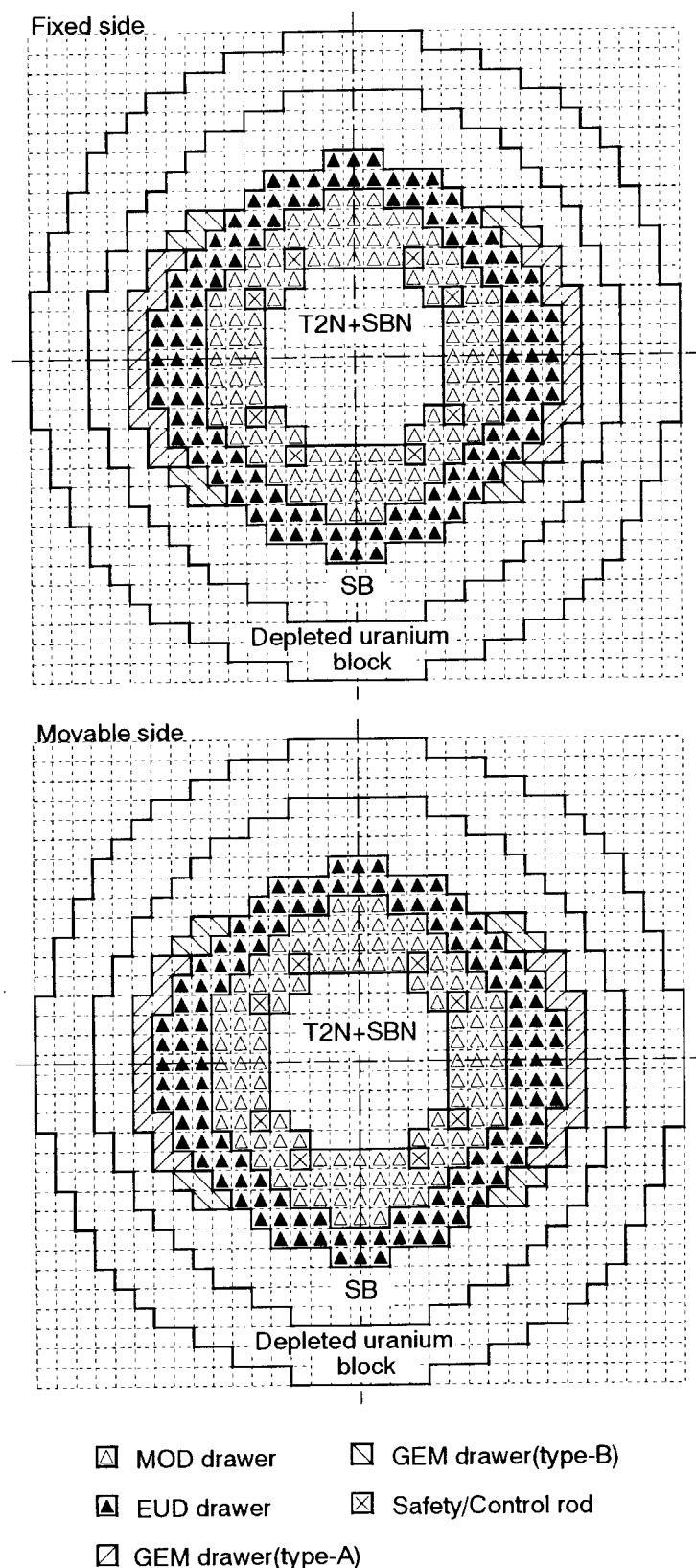


Fig. 2.1(d) XY cross sectional view of FCA XX-1(1X)

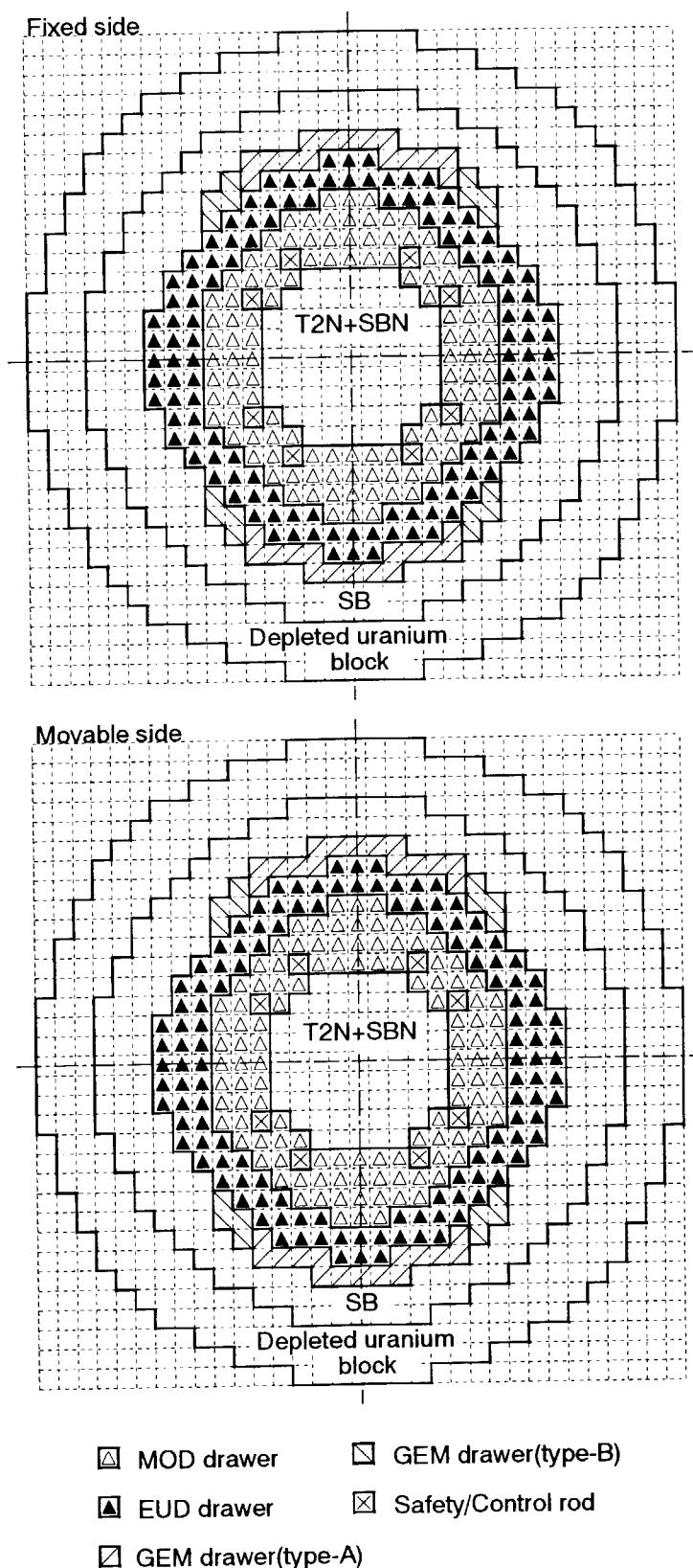


Fig. 2.1(e) XY cross sectional view of FCA XX-1(1Y)

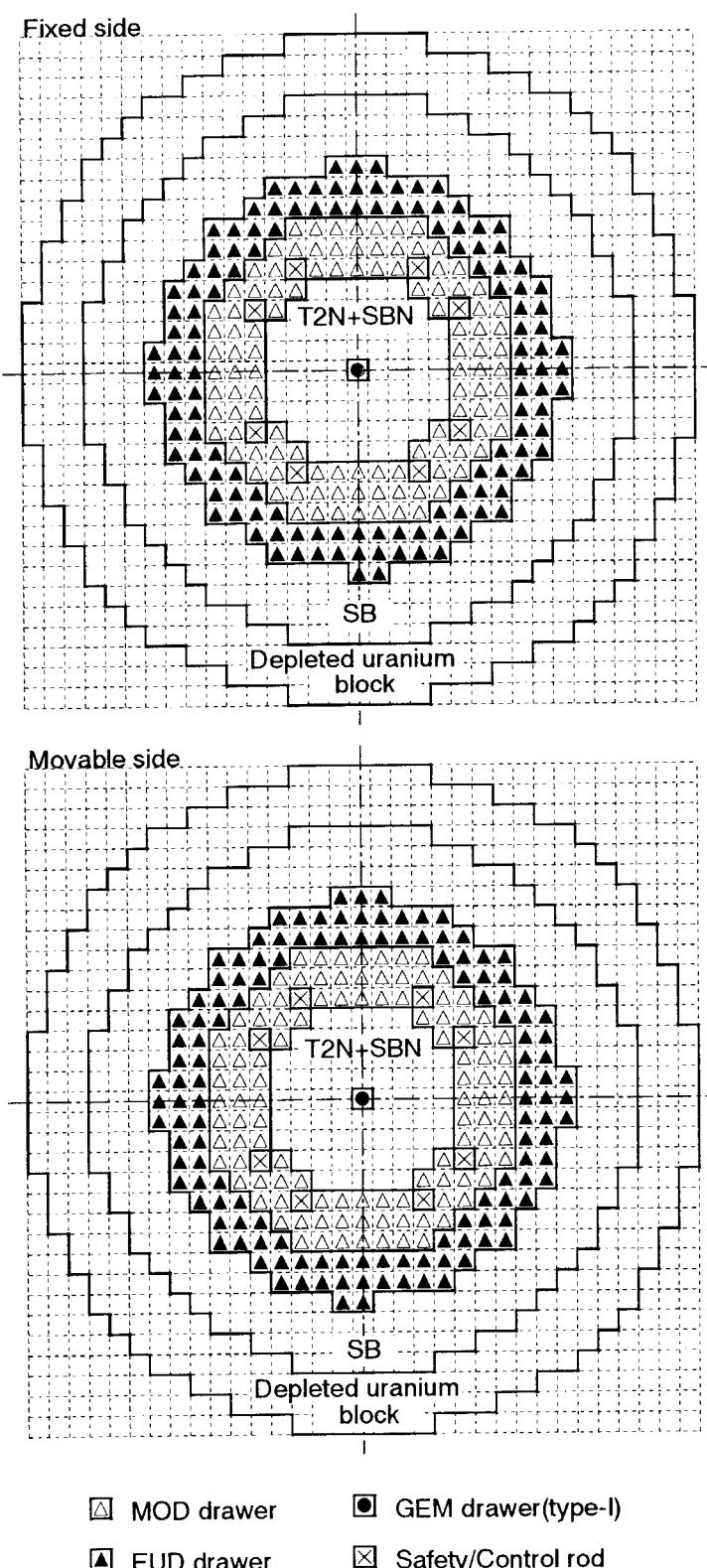


Fig. 2.1(f) XY cross sectional view of FCA XX-1(R)

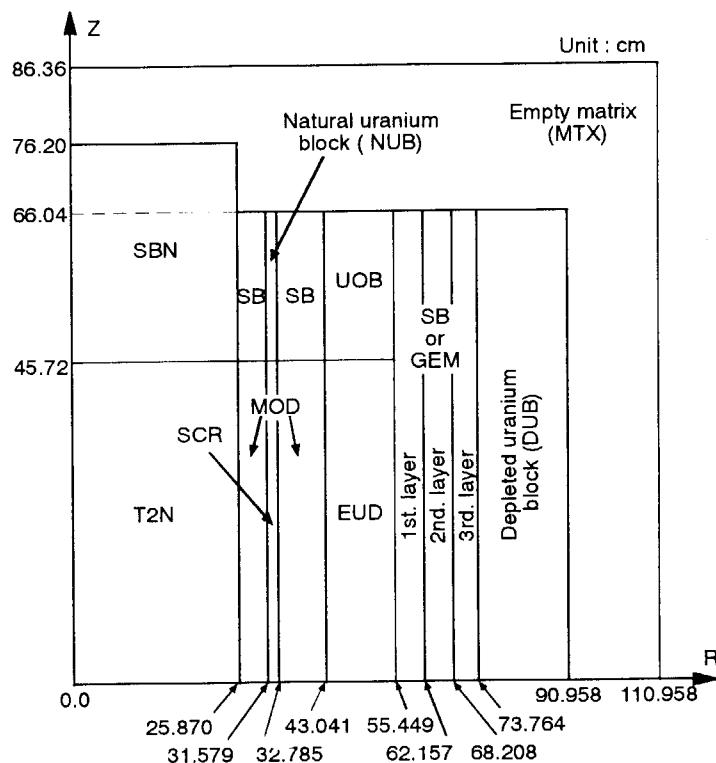


Fig. 2.2(a) RZ model of FCA XX-1

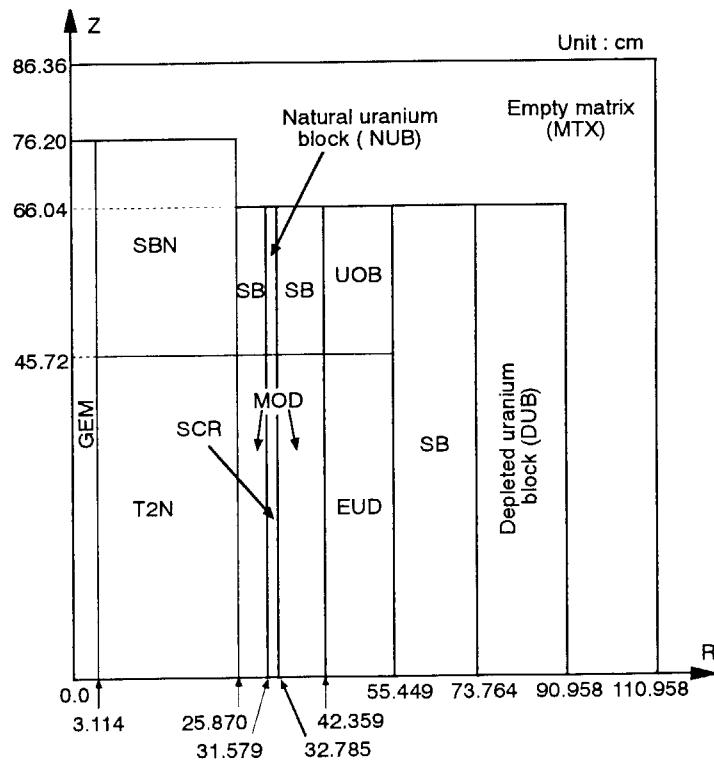
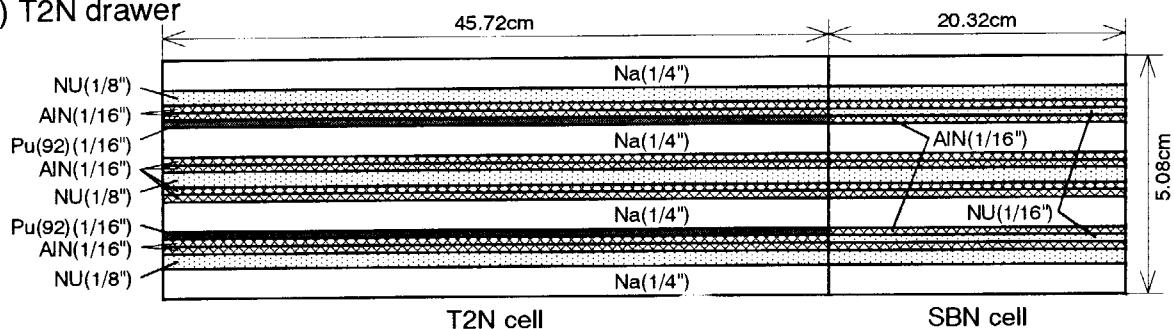


Fig. 2.2(b) RZ model of FCA XX-1(R)

Abbreviation

- Pu(92) : Plutonium metal plate covered with stainless steel.
 Fraction of fissile plutonium is 92%.
- 93%EU : 93 % enriched uranium metal plate.
- 20%EU : 20 % enriched uranium metal plate.
- NU : Natural uranium metal plate or block.
- DUO₂ : Depleted uranium dioxide plate.
- DU : Depleted uranium block.
- Na : Sodium metal plate covered with stainless steel.
- Al₂O₃ : Alumina plate.
- AIN : Aluminum nitride.
- Zr : Zirconium metal plate.
- SS : Stainless steel plate.
- Al(hole) : Aluminum metal plate with sixteen holes.

(a) T2N drawer



(b) SBN drawer

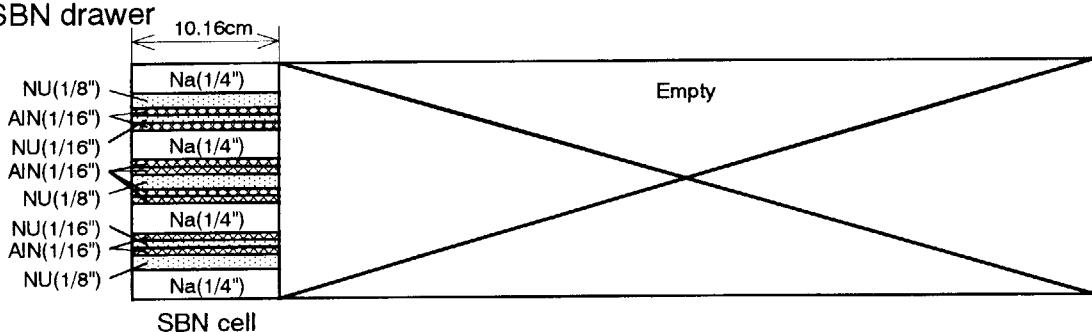
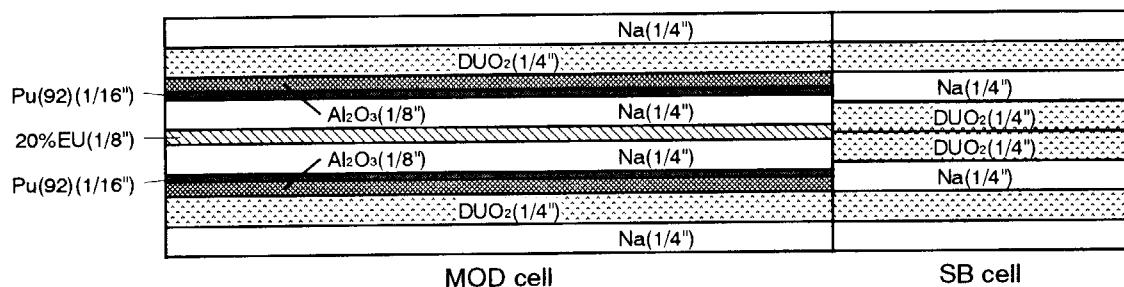
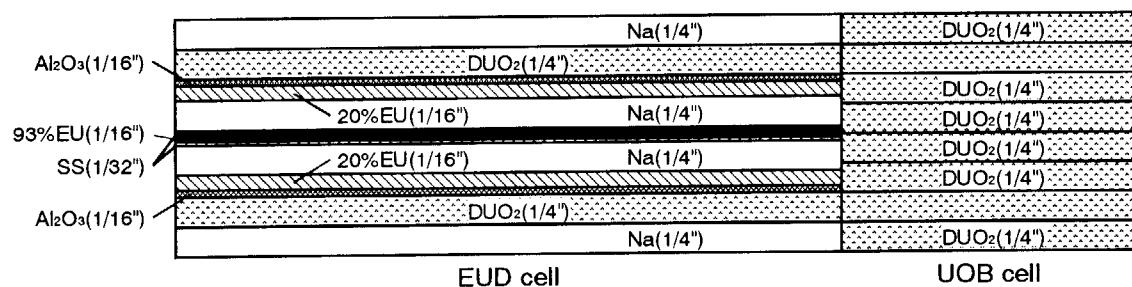


Fig. 2.3 Plate configuration of drawers in FCA XX-1 core (continued)

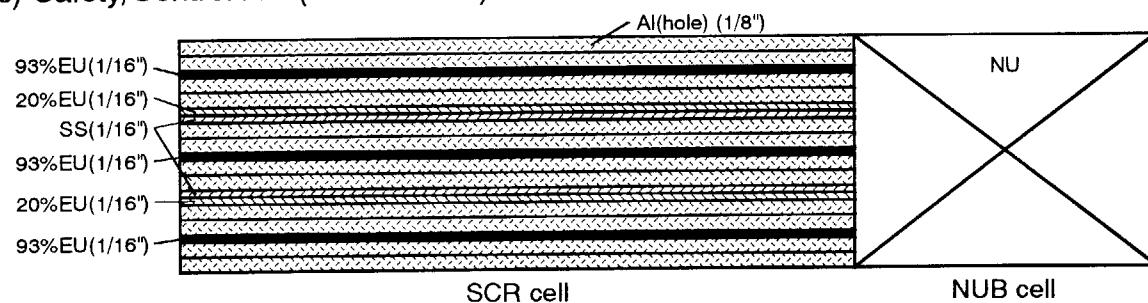
(c) MOD drawer



(d) EUD drawer



(e) Safety/Control rod (SCR drawer)



(f) GEM drawer (Type-A)

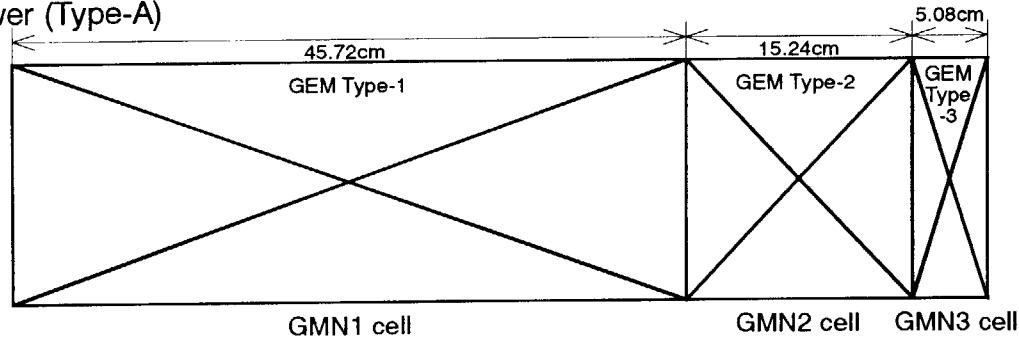
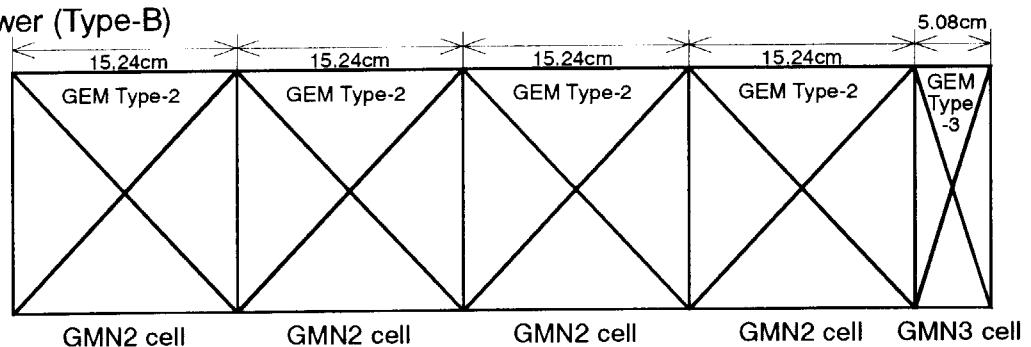
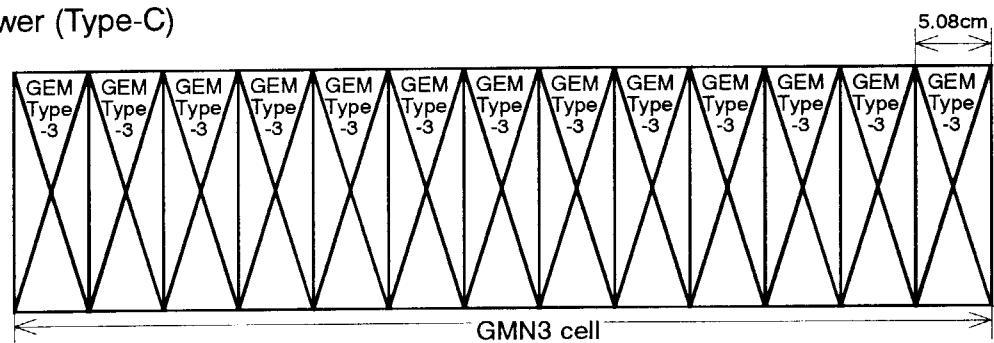


Fig.2.3 Plate configuration of drawers in FCA XX-1 core (continued)

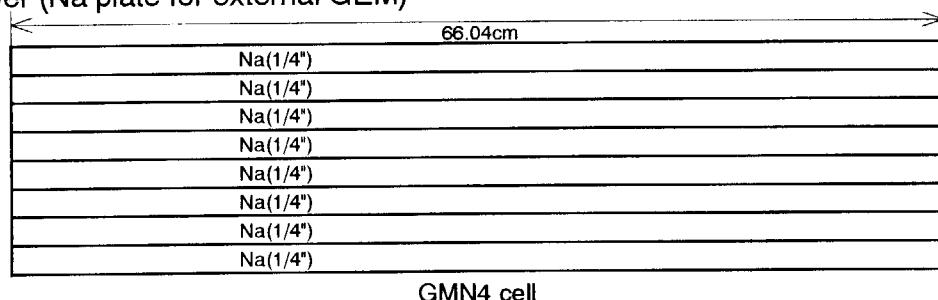
(g) GEM drawer (Type-B)



(h) GEM drawer (Type-C)



(i) GEM drawer (Na plate for external GEM)



(j) GEM drawer (Type-l)

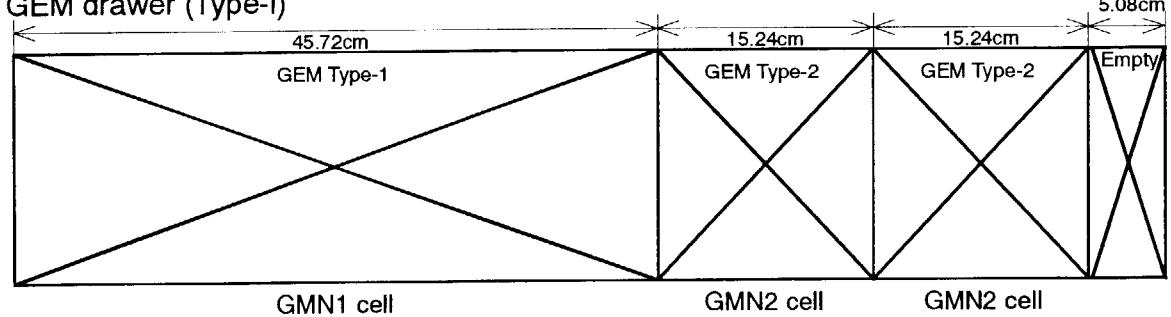
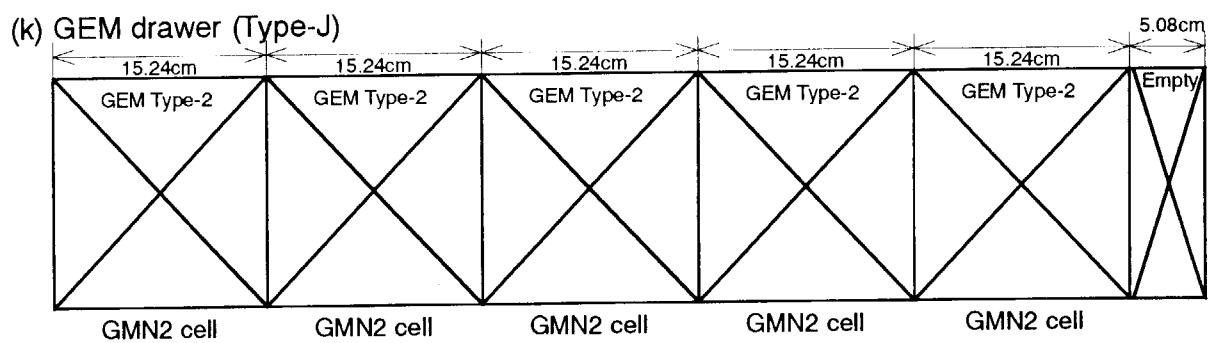


Fig.2.3 Plate configuration of drawers in FCA XX-1 core (continued)

(k) GEM drawer (Type-J)



(l) GEM drawer (Na plate for in-core GEM)

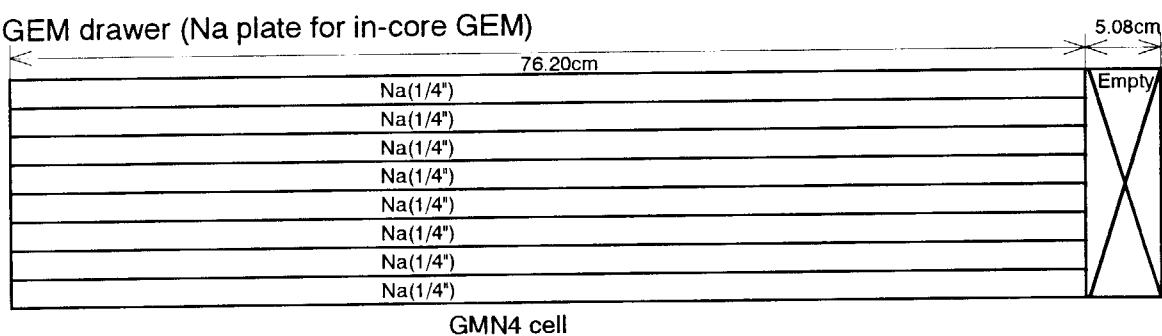


Fig. 2.3 Plate configuration of drawers in FCA XX-1 core (continued)

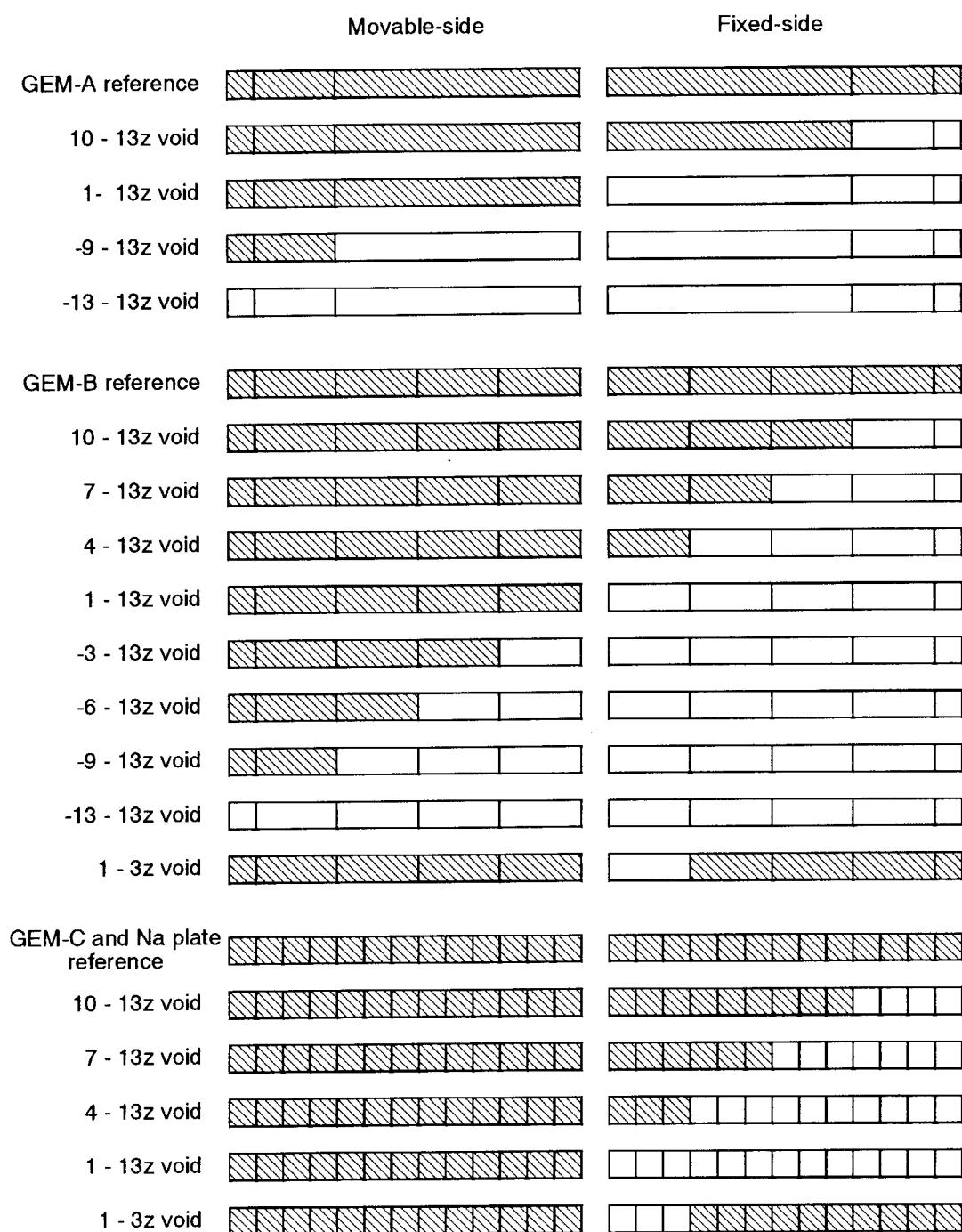


Fig. 2.4 Measurement of external GEM reactivity worth
 (hatched box : sodium filled can
 blank box : void can)

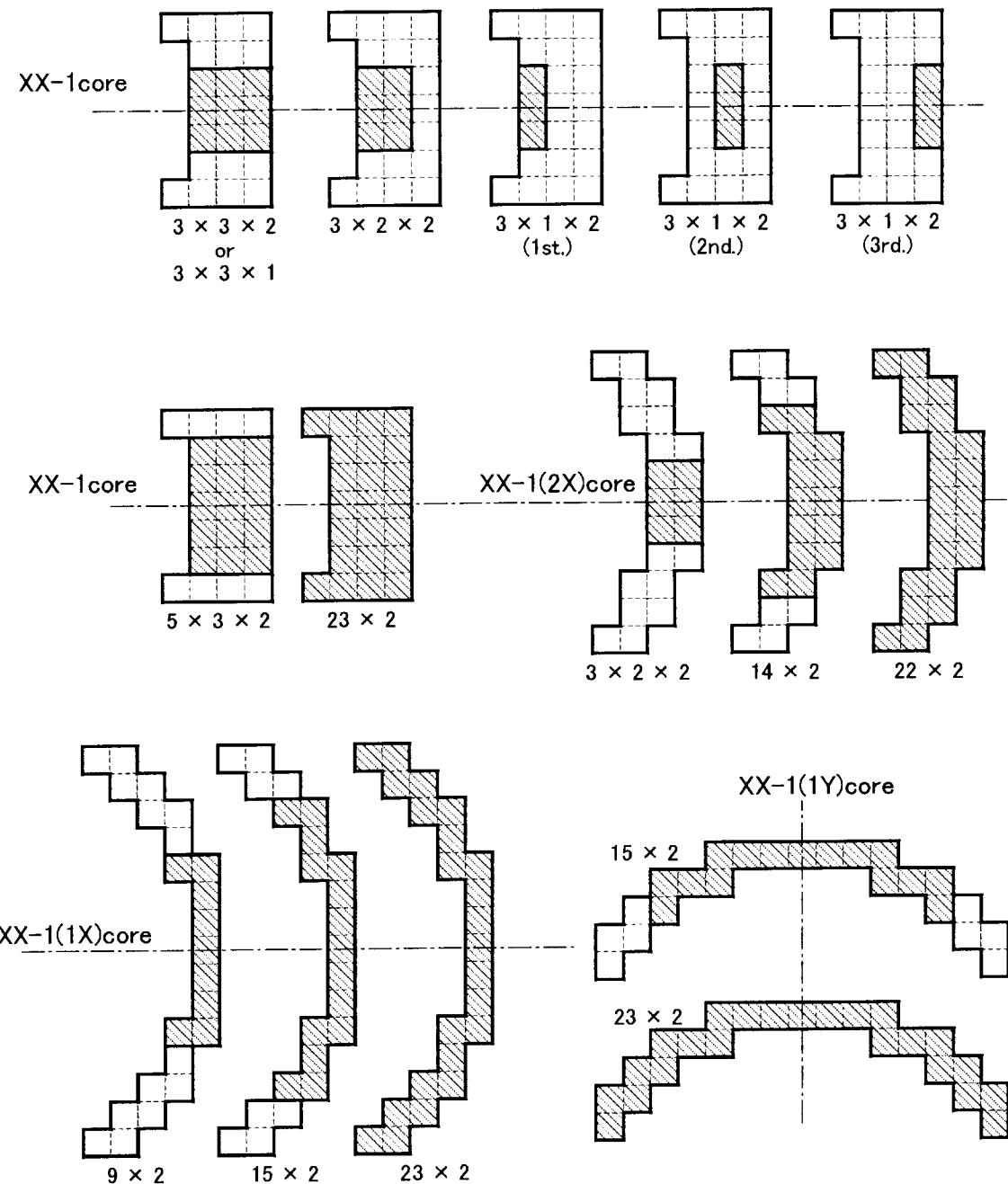


Fig. 2.5 GEM void patterns in external GEM reactivity worth measurements ("..... $\times 2$ " means that the measurement was performed at both side of the GEM regions, while "..... $\times 1$ " was done at one side of them)

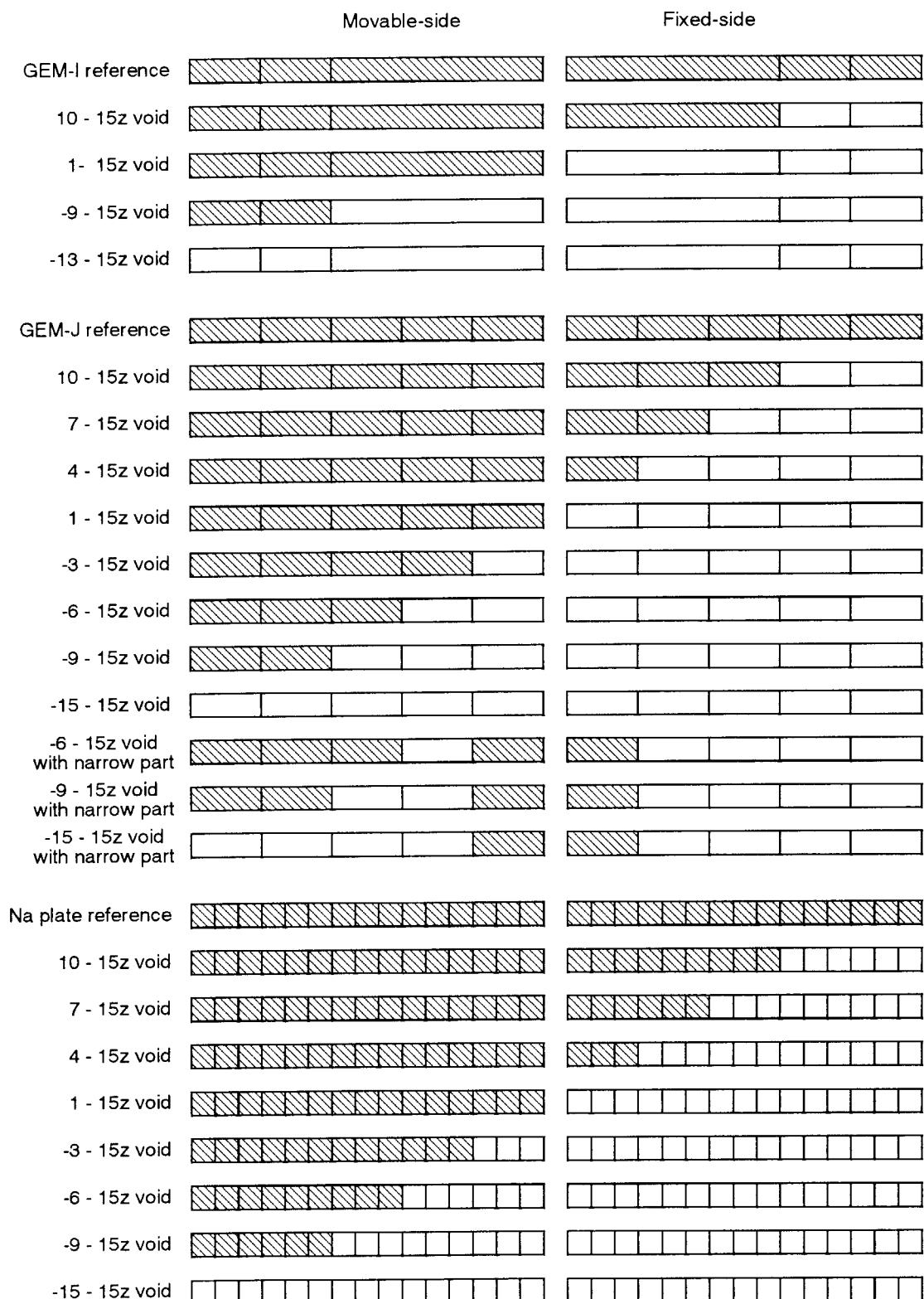


Fig. 2.6 Measurement of in-core GEM reactivity worth
 (hatched box : sodium filled can,
 blank box : void can)

3. 計算手法

Fig.3.1 に計算の流れを示す。以下、これに沿って計算手法の概略を説明する。

3.1 セル計算

評価済み核データファイル JENDL-3.2 に基づく 70 群群定数セット JFS-3-J3.2^(4,5)と、衝突確率法に基づく高速炉用セル計算コード SLAROM⁽⁶⁾を用いて体系を構成する各セルの実効断面積及び拡散係数を求めた。炉心やブランケットを構成するセルについては、1 次元無限平板モデルにより模擬物質板の非均質性を考慮した。他方、ブランケット部のウランブロック、ブランケット外周の空の FCA 格子管及び GEM 模擬領域については均質モデルで扱った。拡散係数には Benoist のモデルによる異方性拡散係数⁽⁷⁾を用いた。

GEM 模擬体はステンレス鋼製の被覆とナトリウムからなるが、炉外 GEM の計算ではこれに FCA 格子管と引き出しのステンレス鋼を加えて均質媒質として実効断面積を求めた。ボイド缶も同様に均質媒質とした。実効断面積を求める際の共鳴自己遮蔽因子には 3 種類のものを用いた。第 1 の自己遮蔽因子は GEM 模擬体及びボイド缶をそれぞれ無限媒質としたものである。この場合、特にボイド缶ではステンレス鋼のみの媒質となるため自己遮蔽因子が小さくなりすぎるおそれがある。第 2 は GEM 領域に隣接する炉心領域及び径方向ブランケット領域を GEM 領域に混合し、その混合媒質の自己遮蔽因子を近似的に用いるものであり、無限媒質では問題となるボイド缶の自己遮蔽因子の過小評価を防ぐことができる。第 3 の自己遮蔽因子は炉心部やブランケット部と GEM 領域間の衝突確率を用いて領域間の干渉を扱う「東稔の方法」⁽⁸⁾により求めるものであり、より厳密に共鳴自己遮蔽を取り扱うことができる。これら3種類の自己遮蔽因子を用いた場合の詳細な比較は次章で行う。

一方、炉内 GEM の計算では、炉心軸方向の中性子漏洩が重要であるため、ボイドに沿った中性子ストリーミングを精度良く取り扱う必要があると考えられる。そこで、炉外 GEM と同様に GEM を均質媒質とした場合と、GEM をナトリウム部分とステンレス鋼部分に分割した場合のセル計算を行い、結果を比較した。詳細については次章で述べる。

3.2 体系計算

まず、セル計算で得られたエネルギー 70 群の実効断面積を用いて RZ 体系の拡散計算を行う。本研究で使用した多群拡散計算コードは CITATION-FBR コード⁽⁹⁾である。炉心の RZ モデルは既 Fig.2.1 に示した。径方向(R 方向)には約 1.5cm のメッシュ幅を、軸方向(Z 方向)には約 2.5cm のメッシュ幅をそれぞれ採用した。FCA XX-1 炉心を変更した XX-1(RSB)、(2X)、(1X)、(1Y)の各炉心は XX-1 炉心の RZ モデルをそのまま採用した。

70 群 RZ モデルの体系計算で得られる中性子束は輸送計算や 3 次元拡散計算を 25 群で行うための断面積縮約用に用いた。

体系計算では、セル計算で均質モデルを採用した領域を除き、Benoist の異方性拡散係数⁽⁷⁾を用いた。異方性拡散係数は模擬物質板に平行な方向のもの(D_{\parallel})と垂直なもの(D_{\perp})で構成されるが、FCA における燃料板及び模擬物質板の配列方向を考慮して、RZ モデルにおける R 方向及び Z 方向それぞれの拡散係数には

$$D_R = \frac{D_{\parallel} + D_{\perp}}{2} \quad (3 \cdot 1)$$

$$D_z = D_{\parallel} \quad (3 \cdot 2)$$

を用いた。

次に 25 群に縮約した断面積を使って 3 次元 XYZ 体系による拡散計算を行う。5.52cm × 5.52cm × 5.08cm の単位セルに対して各方向 2 分割のメッシュ幅を採用した。異方性拡散係数は X 方向には D_{\perp} 、Y 及び Z 方向には D_{\parallel} を使った。

一方、輸送理論に基づく体系計算と比べて輸送効果を算出するための拡散計算では、異方性拡散係数は用いずに全方向について等方拡散係数 $D_H = 1/(3\Sigma_n)$ を用いた。ここで Σ_n は輸送断面積である。

輸送理論に基づく体系計算は 25 群に縮約した断面積を用いて 2 次元 RZ モデル又は XY モデルで行った。本研究で使用した多群輸送計算コードは S_N 法に基づく TWOTRAN-II コード⁽¹⁰⁾である。主に使用した S_N オーダーは S_8 であり、全断面積の代わりに輸送断面積を用いるいわゆる Diagnal Transport Approximation により散乱断面積の非等方性を一次まで考慮した。メッシュ幅は拡散計算と同一のものを用いた。

炉外 GEM 反応度の計算では、輸送理論に基づく 3 次元計算も行った。この時用いたコードは、 S_N 法コードの THREEDANT⁽¹¹⁾並びに連続エネルギーモンテカルロ法コード MVP^(12,13)及び多群モンテカルロ法コード GMVP^(12,13)である。

3.3 摂動計算及び輸送補正

体系計算で得た中性子束分布及び随伴中性子束分布と、セル計算で得たボイド化前後の実効断面積を用いて、摂動理論に基づく反応度価値の計算を行った。拡散計算で得た中性子束分布及び随伴中性子束分布を用いる場合には動特性パラメータ計算コード PERKY⁽¹²⁾を、輸送計算の場合には SNPERT-II コード⁽¹³⁾を用いた。摂動計算は厳密摂動理論に基づいて行った。

輸送理論に基づく摂動計算結果と拡散計算に基づく結果の比から輸送補正係数(輸送理論／拡散理論)を導いた。輸送補正係数は非漏洩項と漏洩項それぞれ別個に求め、別々に補正を施した。但し、3 次元輸送計算の場合は摂動計算は行わず、実効増倍係数の差から直接に反応度価値を求めた。詳細については次章で述べる。

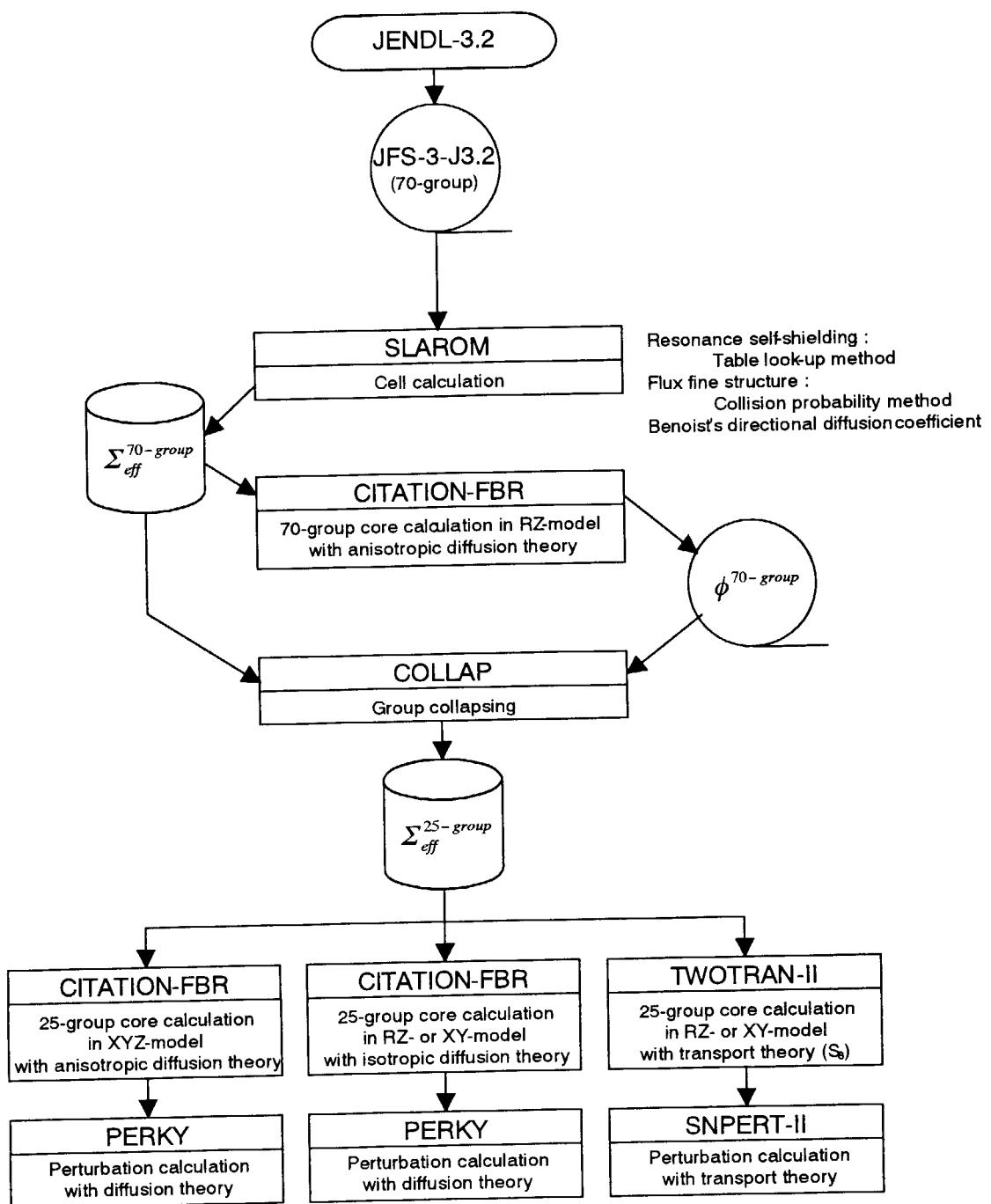


Fig. 3.1 Calculation flow chart

4. 考 察

4.1 炉外 GEM 領域の実効断面積に関する考察

炉外 GEM の模擬領域を構成する GEM 模擬体は、ステンレス鋼製の被覆缶に金属ナトリウムを充填したものである。GEM のボイド状態を模擬する時にはこの GEM 模擬体をステンレス鋼製のボイド缶に置換する。従って、GEM ボイドを模擬した単位セルには大きなボイドと格子管、引き出し及びボイド缶のステンレス鋼のみが含まれることになる。例えば、最も長いタイプ-1(長さ約 46cm)の GEM 模擬体の原子数密度は、およそ以下のような値をとる。

Na	: 1.93×10^{22} atoms/cm ³
Cr	: 2.65×10^{21} atoms/cm ³
Mn	: 1.66×10^{20} atoms/cm ³
Fe	: 9.52×10^{21} atoms/cm ³
Ni	: 1.12×10^{21} atoms/cm ³

GEM 反応度価値で最も寄与の大きい 400keV～1MeV のエネルギー範囲では、GEM 模擬セルの巨視的輸送断面積は～0.1cm⁻¹、ボイド模擬セルの巨視的輸送断面積は～0.03cm⁻¹となる。中性子の平均自由行程は輸送断面積の逆数であり、GEM 模擬セルでは約 10cm、ボイド模擬セルでは約 30cm となる。炉外 GEM の実験を行った XX-1 炉心では GEM 模擬領域の厚さは 5.5cm～16.6cm であることから、GEM のボイド状態を模擬した場合には多くの中性子がボイド領域で衝突を起こさずに通過していることが分かる。

一方、ある媒質又は単位セルにおいて、断面積の共鳴構造による自己遮蔽効果を考慮した実効断面積は、その媒質又は単位セルが無限に広がっている場合に成立する中性子束のエネルギースペクトルを仮定して求められている。従って、媒質が有限で、実際に成立している中性子束のエネルギースペクトルと無限媒質の場合のものとが大きく異なる場合は、その効果を適切に取り入れる必要がある。上述のように、GEM のボイド状態を模擬した場合では多くの中性子が炉心からブランケットへと通過していくため、むしろ炉心領域における中性子束のエネルギースペクトルをボイド模擬領域の実効断面積の計算に用いる方が適切であるかもしれない。特に、ボイド模擬領域では鉄の原子数密度が相対的に大きいため、無限媒質を仮定すると希釈断面積が小さくなり、鉄の自己遮蔽効果を過大に見積もってしまう可能性がある。

そこで、以下の3つの場合について GEM の反応度価値を計算し、鉄の共鳴自己遮蔽効果の評価方法の影響を考察する。

方法1: 無限媒質法 (Infinite media method) : SLAROM の無限均質媒質オプションで実効断面積を計算する。

方法2: 3 領域混合法 (Mixed media method) : SLAROM で炉心模擬領域、GEM 模擬領域、ブランケット領域をモデル化し、全領域にわたって平均化した原子数密度で GEM 領域の実効ミクロ断面積を求め、それを GEM 領域の実効巨視的断面積の計算に用いる。

方法3: 領域間干渉法 (東稔の方法、Tone method) : SLAROM で炉心模擬領域、GEM 模擬領域、

プランケット領域をモデル化し、東稔の方法⁽⁸⁾により領域間の干渉を考慮して実効断面積を計算する。

Table 4.1 に各モデルで計算した第 11 群(639~821keV)における鉄の希釈断面積及び全断面積に対する自己遮蔽因子を比較する。**Fig.4.1** にはこのエネルギー群における希釈断面積と自己遮蔽因子の関係を示した。無限媒質法では、ボイド状態の GEM における希釈断面積が特に小さいため、ボイド化の前後で自己遮蔽因子の差が大きいことが分かる。一方、3領域混合法では、GEM のボイド化前後でほとんど自己遮蔽因子は変化しないため、鉄の自己遮蔽効果の変化による反応度変化を考慮できない。東稔の方法は無限媒質法と3領域混合法の間に位置している。

Fig.4.2 は GEM がボイド化することによる GEM 領域の拡散係数の変化を示したものである。拡散係数の変化は主にナトリウムの有無によって引き起こされているが、計算モデル依存性があることが分かる。この計算モデル依存性は GEM がボイドになったときの鉄の自己遮蔽因子の計算値の差異が大きく影響しており、**Table 4.1** に示した計算モデル間の差異と一致した傾向である。すなわち、無限媒質法では GEM のボイド化により鉄の実効断面積が小さくなり、拡散係数が大きくなる。3領域混合法では GEM のボイド化前後で鉄の断面積が変化しないため、他のモデルの場合よりも拡散係数の変化は小さい。東稔法は上記2方法の中間に位置する。

さらに、これら3つのモデルで計算した実効断面積を使って GEM の反応度価値を求めた結果を **Table 4.2** に示す。また、GEM 反応度価値のエネルギー持ち分を **Fig.4.3** に示す。計算対象は $3 \times 3 \times 2$ の GEM 領域の -13z ~ 13z ボイドであり、計算には3次元 XYZ モデルの 25 群拡散計算を用いた。無限媒質法、東稔の方法、3領域混合法の順に反応度価値の絶対値は大きく、無限媒質法は3領域法よりも約 14% 大きな値を示す。**Fig.4.3** より、この傾向は 20keV ~ 1MeV で起こっていることが分かるが、これは **Fig.4.2** に示した拡散係数の変化と同じ傾向である。

以上の考察から炉外 GEM 反応度の計算においては構造材の自己遮蔽効果の取扱いに注意を要することが分かった。次節以降に示す解析では、最も近似が少ないと考えられる東稔の方法を用いることとする。

4.2 炉外 GEM の実験結果

Table 4.3 に炉外 GEM 模擬実験の結果をまとめた。

まず、GEM 内のナトリウム液位依存性について考察する。**Fig.4.4** には GEM-A 引き出しについてナトリウム液位が下がるに従って負の反応度が加えられる様子を示した。炉心部ではプランケット部に比べて大きな反応度価値となっていることが分かる。**Fig.4.5** にはナトリウム液位依存性を細かく測定した GEM-B 及び-C 引き出しに対する測定値を示す。軸方向にみて炉中心部で最も反応度価値が大きいため、「S字曲線」を呈していることが分かる。

次に、GEM-A 引き出しを用いた場合のボイド化領域依存性について考察する。**Fig.4.4** 及び **Table 4.3** から分かるように、 $3 \times 3 \times 2$ 、 $3 \times 2 \times 2$ 、 $3 \times 1 \times 2$ (1列目) ではボイドとなる領域の体積は 3:2:1 の比率であるが、反応度価値は 2.2:1.8:1 の比率となっており、体積と比例しない。これは、**Table 4.3** において $3 \times 1 \times 2$ の1列目、2列目、3列目に対する反応度価値が 1:0.7:0.4 であることからも分かるように、GEM 模擬領域中でも径方向に見て外側では反応度価値の持ち分が小さくなっているためであると考えられる。集合体の軸対称位置の2箇所で GEM ボイドを模擬する $3 \times 3 \times 2$ に比べて、1箇所のみで GEM

ボイドを模擬する $3 \times 3 \times 1$ の場合はほぼ $1/2$ の反応度価値となっており、加算性が成り立っている。GEM ボイド領域を周方向に広げた $5 \times 3 \times 2$ では $3 \times 3 \times 2$ に比べて体積の増分とほぼ比例した 1.6 倍の反応度価値となっている。

次に、GEM 模擬領域を構成する引き出しの種類の相違の効果を見てみる。GEM-A 引き出し、GEM-B 引き出し、GEM-C 引き出し及びナトリウム板で構成した引き出しを比べると、1~9z の部分の単位セル当たりに含まれるナトリウムの重量は、114g、112g、102g、90g と順に少なくなっている。Table 4.4 に示したように、1~9z の GEM ボイド反応度価値もこの順に減少しているが、ナトリウム重量当たりで見ると、ナトリウム重量が大きい方が単位重量当たりの反応度価値が大きいことが分かる。これは、単位セル当たりのナトリウムの重量が小さいセルでは、逆に単位セル当たりのステンレス鋼の重量が大きく、ナトリウムがボイド化することによる中性子漏洩の増加がステンレス鋼によって抑えられているためであると考えられる。これより、GEM の設計においては、構造材の割合を減らすことが効果的であると言える。

GEM 模擬領域の外側を劣化ウランのブロックとした場合と、ナトリウムと劣化ウラン酸化物で構成するソフトブランケット(SB)とした場合を比べると、SB とした場合の方が約 2% 大きな反応度価値を与えている。これは実験誤差(0.5%以下)と比べて有意な相違ではあるが、次節で述べる GEM 反応度価値の予測精度(10~20%程度)に比べて十分小さいことを考慮すると、GEM 領域の外側領域の組成は GEM 反応度価値には大きな影響は与えないと結論できる。

最後に、GEM 領域の形状依存性について考察する。Fig.4.6 に通常の XX-1 炉心、XX-1(2X)炉心、XX-1(1X)炉心、XX-1(1Y)炉心における-13~13z ボイドの GEM 反応度価値をボイド化 GEM 引き出し本数の関数として示す。同じボイド化 GEM 引き出し本数で比べると、XX-1(1Y)炉心、(1X)炉心、(2X)炉心、通常の XX-1 炉心の順に大きな反応度価値を与えていていることが分かる。これは、前述のように3層の GEM 模擬領域では内側の層の持ち分が大きいため、GEM を 1 層にして周方向に領域を広げる方が効果があることを示している。(1Y)と(1X)の相違は、XX-1 炉心が X 方向(炉心に水平な方向、燃料板に垂直な方向)と Y 方向(炉心の上下方向)で炉心が非対称であること、及び、炉心領域における燃料板及び模擬物質板の配列が X 方向と Y 方向で異なることなどが原因となっていると考えられる。

4.3 炉外 GEM 反応度価値の予測精度検討

Table 4.5 に炉外 GEM 反応度価値に関する実験と計算の比較を示す。以下、各項目毎に考察を行う。

(1) ナトリウム液位依存性

Fig.4.7 に実験値／計算値(C/E 値)の GEM 内ナトリウム液位依存性を示す。10~13z の上部軸方向ブランケット部分では、実験誤差は大きいものの、ナトリウム液位がこの位置よりも下がった時に比べて過大評価の傾向が強い。C/E 値は、液位が炉心中心付近まで下がった時に最も低く、さらに液位が下がるとわずかに上昇しているように見える。GEM-B 引き出し及び GEM-C 引き出しでは軸方向中心部の 1~3z のみのボイド化も模擬したが、この場合の C/E 値(約 1.12)は GEM-B 引き出しを用いた他の場合(C/E=1.14~1.17)及び GEM-C 引き出しを用いた他の場合(C/E=1.14~1.18)に比べて低い。これらの傾向から見て、軸方向ブランケット部では GEM ボイド化による中性子漏洩の過大評価傾向が強く、軸方向中心部(炉心部)ではこの過大評価傾向は弱まっていると考えられる。

(2) 径方向ボイド化領域位置依存性

GEM-A 引き出しを用いた $3 \times 1 \times 2 \cdot 1 \sim 13z$ の場合の 1 層目(1st.)、2 層目(2nd.)、3 層目(3rd.)の C/E 値を比較すると、それぞれ $1.07 \pm 0.4\%$ 、 $1.11 \pm 0.7\%$ 、 $1.16 \pm 1.1\%$ であり、炉心中心から離れるに従って過大評価傾向が強まっていることが分かる。また、1 層目と 2 層目の足し合わせである $3 \times 2 \times 2 \cdot 1 \sim 13z$ では $C/E = 1.12 \pm 0.2\%$ 、1~3 層目の足し合わせである $3 \times 3 \times 2 \cdot 1 \sim 13z$ では $C/E = 1.16 \pm 0.4\%$ であり、足し合わせることにより過大評価が強まる傾向がある。

(3) 引き出し種類依存性

$3 \times 3 \times 1$ 又は $3 \times 3 \times 2$ の $1 \sim 13z$ GEM ボイドについて、GEM-A 引き出し、GEM-B 引き出し、GEM-C 引き出し及びナトリウム板で構成した引き出しの場合を比べる。C/E 値はそれぞれ $1.16 \pm 0.2\%$ 、 $1.15 \pm 0.2\%$ 、 $1.15 \pm 0.4\%$ 、 $1.12 \pm 0.6\%$ と順に少なくなっているが、それほど大きな食い違いではないため、計算精度に引き出し種類依存性はないとして良いと考えられる。

(4) 径方向ブランケット領域組成依存性

XX-1(RSB)炉心で測定した GEM 反応度価値の C/E 値は $1.15 \sim 1.20$ 程度であり、通常の XX-1 炉心における $3 \times 3 \times 2$ 領域又は $3 \times 3 \times 1$ 領域の場合の同様の測定に対する C/E 値 ($1.12 \sim 1.17$) と比べて特に大きな相違は見られない。従って、GEM 領域の径方向外側の組成は炉外 GEM 反応度価値の計算精度に影響しないことが分かった。

(5) 模擬領域の形状に対する依存性

炉外 GEM の模擬実験では、GEM 模擬体の個数の制約により GEM 領域が炉心を取り巻くような体系での実験を行うことができなかった。そこで、GEM が炉心を取り囲む場合の予測精度が本実験で議論できるかどうかを検証するために、GEM の幅を 17cm (3 層、XX-1 炉心)、 11cm (2 層、XX-1(2X)炉心)、 6cm (1 層、XX-1(1X)炉心)と短縮し、それに従って模擬領域を周方向に広げた場合の GEM 反応度価値を計算と比較する。

GEM の幅を変化させたときの GEM 模擬領域及びボイド模擬領域の形状は既に Fig.2.5 に示した。それぞれの GEM 模擬領域形状について 3 種類のボイド模擬領域で反応度価値を測定し、模擬領域の形状及びボイド領域の広さの効果を検証した。

計算では JENDL-3.2 に基づき、次の 4 種類の手法を用いた。

- ①25 群 3 次元拡散計算に 2 次元 RZ モデルに基づく輸送補正を TWOTRAN-II コード⁽¹⁰⁾を用いて施す手法(決定論、RZ 輸送)
- ②同上、但し 3 次元 XYZ モデルに基づく輸送補正を THREEDANT コード⁽¹¹⁾を用いて施す手法(決定論、XYZ 輸送)
- ③上記の輸送補正の部分のみを 3 次元モデルの多群モンテカルロ法コード GMVP^(12,13)で行う方法(準決定論)
- ④連続エネルギーモンテカルロ法コード MVP^(12,13)を用いる方法(モンテカルロ法)

①の手法は、第3章で説明した計算手法であり、これまでの GEM 反応度価値の予測精度評価に用い

たものである。これに加えて、RZ モデルによる輸送補正の妥当性を検証するために、手法②及び③では XYZ モデルの輸送計算で輸送補正係数を求めた。手法②では決定論的手法である S_N 法輸送コード THREEDANT を、手法③では多群モンテカルロ法コード GMVP を用いた。但し、両コードとも摂動理論によって反応度価値を計算するコードが未整備であるため、実効増倍係数 k_{eff} の差から反応度価値を求めた。輸送補正是全てエネルギー25 群で行い、散乱の非等方性は全断面積の代わりに輸送断面積を用いる「輸送補正」によって考慮した。手法①及び手法②では S_N 次数を8とした。最後に手法④では、最も近似の少ない連続エネルギーモンテカルロ法コード MVP を用いた。MVP コードを用いた計算には多大な計算時間を要するため、GEM 模擬領域の各形状について、最もボイド領域の大きな場合についてのみ計算を行い、参照計算とした。

実験と計算の比較を Table 4.6 にまとめる。手法①では C/E 値は 1.13～1.24 と他の手法に比べて過大評価の傾向にある。過大評価の程度はナトリウム液位依存性等の実験項目と一致しており、GEM 模擬領域の形状が3層、2層、1層と変化しても予測精度に変化は見られなかった。

一方、手法②では、C/E 値は 0.96～1.09 と最も小さい値を示し、GEM 模擬領域の形状が3層、2層、1 層と薄くなるにつれて大きくなる傾向が見られる。手法③では C/E 値は 1.03～1.13 となり、手法②で見られた C/E 値の GEM 模擬領域形状依存性は見られない。参照計算である手法④では C/E 値は 1.05～1.11 であり、GEM 模擬領域形状依存性は見られない。手法③と手法④の C/E 値は良く一致していることから、手法①の過大評価傾向及び手法②に見られた C/E 値の GEM 模擬領域形状依存性は決定論的輸送計算に起因すると考えられる。但し、手法②において、角度分点を S_8 から S_{16} に増やしても結果に影響は無かった。

以上の考察より、計算は炉外 GEM 反応度価値を 10～20% 程度過大評価することが分かった。モンテカルロ法を用いればこれを 10% 以内に縮めることができる。

(6) GEM 模擬領域が炉心の全周を取り囲む場合の予測精度

GEM 模擬領域を一層として X 方向に設けた場合、すなわち XX-1(1X)炉心と、Y 方向に設けた場合、XX-1(1Y)炉心を比べると、前者では $C/E=1.13\sim1.17$ であるのに対して後者は $C/E=1.11\sim1.12$ である。GEM 模擬領域を X 方向に設けた方が若干過大評価の傾向は大きいが、実験誤差が 1～2% 程度であることを考慮すると、有意な差異とは言えない。

XX-1(1X)炉心と XX-1(1Y)炉心を合わせると炉心を全周にわたって GEM 模擬領域が取り囲む体系となる。両炉心で GEM 反応度価値の予測精度に有意な差異が見られないことから、炉心を全周にわたって 1 層の GEM 模擬領域(幅、約 7cm)が取り囲む場合の標準的な解析手法(前項の手法①)の予測精度は、10～20% の過大評価と結論できる。前項で示したように、手法①を用いると GEM 模擬領域の厚さに関する予測精度の依存性は見られないことから、GEM を 2 層(幅、約 13cm)又は 3 層(幅、約 18cm)とした場合も、予測精度は 10～20% の過大評価と考えられる。さらに、モンテカルロ法を用いれば予測精度は 10% 以内とできるという前項の結論は、GEM 模擬領域が炉心の全周を取り囲む場合にも適用できる。

4.4 炉内 GEM の実験結果

Table 4.7 に炉内 GEM 模擬実験の結果をまとめた。

まず、GEM 内のナトリウム液位依存性について考察する。Fig.4.8 には炉心中心に設けた炉内 GEM について、ナトリウム液位が下がるに従って変動する反応度の様子を示した。長尺(45.7cm)の GEM 模

擬体を用いた GEM-I 引き出しでは、ナトリウム液位の低下と共に単調に負の反応度が加わっているよう見える。ところが、短尺(15.2cm)の GEM 模擬体を用いた GEM-J 引き出しを用いて小刻みな反応度変化を測定すると、炉心の軸方向中心付近で正の反応度価値が加わる部分が存在していることが分かる。炉外 GEM の場合は、GEM の全長に対して漏洩項が支配的であるため、どの部分でも負の反応度価値となっていたが、炉心中心軸上に設置する炉内 GEM では、スペクトル硬化による正の反応度価値の寄与が顕著な部分が存在することが分かる。

正の反応度を呈する部分にはナトリウムの狭い流路のみを設けることによって、その部分でのナトリウムのボイド化を極力避ける設計が考案されている。図中「くびれ部が存在する GEM-J (GEM-J with narrow part)」は、炉心中心から軸方向に ±15.2cm の範囲に存在する GEM 模擬体をボイド缶に置き換えない場合の測定である(Fig.2.6 参照)。正側に反応度が逆行する部分がなくなり、より大きな負の反応度が挿入できることが分かる。

短尺の GEM 模擬体(GEM-J 引き出し)とナトリウム板を用いた場合では単位セル当たりのナトリウム重量はそれぞれ 112g 及び 90g であり、約 20% の差である。これに対して、炉内 GEM 反応度価値の実験値は、-15~15z の場合で、ナトリウム板を用いると GEM-J 引き出しを用いた場合に比べて 50~60% の反応度価値しか示さない。これは、炉外 GEM の場合と同様に、ナトリウム板に含まれる被覆用のステンレス鋼が中性子のストリーミングを妨げるためであると考えられる。

4.5 炉内 GEM 領域均質化法の影響

炉内 GEM 反応度価値は炉外 GEM の場合とは異なり、ボイドに沿った中性子の軸方向漏洩(ストリーミング)が重要な役割を果たす。以下、ボイドに沿ったストリーミング効果に影響を及ぼすと考えられる GEM 領域のセル均質化法について考察する。

Fig.4.9 に GEM 模擬引き出しの断面(単位セル)を示した。図のように、単位セルを外側のステンレス鋼の部分(GEM のボイド化前後で組成のほとんど変化しない領域: 格子管、引き出し、GEM 模擬体の被覆)と GEM のボイド化によりナトリウムが無くなる部分(ナトリウム及び GEM 模擬体の端栓またはナトリウムプレートの被覆材)に分割し、2 領域の 1 次元円柱モデルのセルを作成した。この 1 次元円柱モデルの周りを燃料(均質化した T2N セル)で取り囲んだスーパーセルでセル計算を行った。共鳴自己遮蔽効果は東稔の方法⁽⁸⁾で考慮した。セル計算の結果を用いて 2 領域を均質化した「均質モデル」と、2 つの領域で別々に実効断面積を求めてこれを体系計算でも 2 つの領域として扱う「非均質モデル」の 2 通りの計算を行い、結果を比較する。

Table 4.8 に GEM-I 引き出しを用いた実験を均質モデルと非均質モデルで解析した場合の C/E 値を示す。均質モデルを用いると 24~39% の過小評価となっているのに対し、非均質モデルを用いると 5% 以内の過小評価であり、予測精度に大きな差異があることが分かる。次に、両モデルの差異の原因について考察する。

Table 4.9 に GEM-I の -15~15z ボイドの場合について、①3 次元 XYZ モデル拡散計算(Benoist の異方性拡散係数⁽⁷⁾を使用)、②2 次元 RZ モデル拡散計算(拡散係数として $1/(3 \Sigma_{tr})$ を使用)、③2 次元 RZ モデル輸送計算(S_8 、輸送近似により散乱の非等方性は P_1 成分まで考慮)の 3 つの計算を比べる。均質モデルと非均質モデルの相違は非漏洩項では 20% 以下と顕著ではないが、拡散計算による漏洩項では非均質モデルの方が均質モデルに比べて 10 倍以上大きな値を示していることが分かる。輸送計算でも非均質モデルによる漏洩項は均質モデルによるものよりも 30% 程度大きな値を示している。Table 4.9

には輸送補正係数(2次元 RZ モデルによる拡散計算と輸送計算の比)も示した。均質計算の場合、漏洩項の輸送補正係数は 0.26 と一般的なナトリウムボイド反応度価値(0.9 程度)や炉外 GEM(0.6~0.8 程度)の場合に比べて非常に小さい。非均質計算の場合は、漏洩項の輸送補正係数は 0.026 とさらに 1/10 の大きさとなっている。これは、拡散計算では中性子漏洩を過大評価する傾向が希薄な媒質で顕著となることに起因していると考えられる。

Table 4.9 には3次元 XYZ モデル拡散計算と2次元 RZ モデル拡散計算の比(以下、3D/2D 補正係数)も示した。この値は体系の記述を2次元から3次元に詳細化する効果を示しており、Benoist の異方性拡散係数を取り入れる効果も含んでいる。3D/2D 補正係数は、非漏洩項が 0.97、漏洩項が 1.03 程度であり、均質モデルと非均質モデルでの差異がほとんどないことが分かる。従って、炉内 GEM の計算を行うときには、輸送計算を基準計算と考え、それに3次元効果及び異方性拡散の効果を補正するのが妥当である。

以上の考察から、Table 4.8 で観察された計算モデル間の予測精度の差異は、輸送計算の漏洩項の差異に起因していると考えられる。さらに、ボイドに沿った中性子ストリーミングが大きく影響する炉内 GEM の計算では、GEM の構造を詳細にモデル化した輸送計算が不可欠であると結論できる。以下に示す予測精度評価では非均質モデルによる計算を評価の対象とする。

4.6 炉内 GEM 反応度価値の予測精度検討

(1) ナトリウム液位依存性

Table 4.10 に炉内 GEM 反応度価値に関する実験と計算の比較を示す。また、Fig.4.10 には、GEM-I、GEM-J、くびれ部付き GEM-J、ナトリウム板の各場合について、GEM 内のナトリウム液位を横軸として実験値／計算値(C/E 値)をプロットしたものを示す。上部軸方向ブランケット部のみのボイド化(液位:約 -30cm)では実験誤差が大きいものの各場合とも 3% 以内で実験と計算が一致している。炉心部では GEM 内の液位が低下するに従って過小評価の傾向が強まり、液位-90cm の近辺で最も過小評価となる。この時の GEM-J の C/E 値は $0.89 \pm 3\%$ 、ナトリウム板の C/E 値は $0.78 \pm 6\%$ である。この近辺の極小値を過ぎると再び C/E 値は 1 に近付き、GEM の全長にわたってボイド化した場合の C/E 値は、GEM-I で $0.97 \pm 1\%$ 、GEM-J で $0.94 \pm 1\%$ 、くびれ部付き GEM-J で $0.97 \pm 1\%$ 、ナトリウム板で $0.86 \pm 2\%$ となつた。但し、くびれ部付き GEM-J では、C/E 値の極小部は見られず、0.97 程度の C/E 値を保っている。

以上の C/E 値に関する考察から、炉心上下の軸方向ブランケット部における炉内 GEM 反応度価値の予測精度は良好であるが、炉心部において過小評価の傾向があることが推定できる。次項では、ナトリウムボイド反応度価値の成分別予測精度評価の手法⁽¹⁶⁾を炉内 GEM 反応度価値にも適用して、定量的な予測精度の評価を行う。

(2) 成分別予測精度評価

Fig.4.11 に、漏洩項と非漏洩項の比($L_{i,cal}/N_{i,cal}$)を横軸として、実験値と非漏洩項の比($\rho_i/N_{i,cal}$)をプロットしたものを示す。図より明らかのように、GEM-I、GEM-J、くびれ部付き GEM-J、ナトリウム板の各場合が全て1本の直線上に並んでおり、各場合についての予測精度が共通に議論できることが分かる。

最小二乗法によるフィッティングで求めた非漏洩項及び漏洩項のそれぞれの C/E 値を Table 4.11 に示す。表では、フィッティングの際に GEM-I 及び GEM-J(くびれ部付きを含む)の結果のみを用いた場合、

ナトリウム板のみを用いた場合、及び、全ての実験を用いた場合について示した。

非漏洩項の C/E 値は3つの場合で6%程度のばらつきがあるが、フィッティング誤差が大きいため、誤差の範囲で一致していると言える。非漏洩項のフィッティング誤差が大きいのは、非漏洩項のみで決まるような炉心中心での GEM 反応度価値を測定していないためである。非漏洩項の計算は 10~20% の過大評価傾向にあると結論できる。

一方、漏洩項については3つの場合で良い一致を示しており、誤差の範囲内で C/E=1.00 と見なすことができる。従って、Fig.4.10 で示したように炉内 GEM 反応度価値の予測精度が炉心中心付近で極小値を示すのは非漏洩項の過大評価が原因していると考えられる。くびれ部付きの GEM-J では非漏洩項が大きな炉心中心部ではナトリウムのボイド化が起こらないため、非漏洩項の過大評価の影響を受けにくい。ナトリウム板の場合は、非漏洩項の相対的な割合が他の場合に比べて大きく、非漏洩項の過大評価の影響を強く受けているため、全体として小さな C/E 値となっている。

Table 4.1 Comparison of self-shielding factors for total cross section of iron
(Group-11 : 639-821keV)

Calculation model	Condition of GEM	Dilution cross section (barn)	Self-shielding factor
Infinite media	Normal	14.1	0.913
	Void	1.2	0.636
Mixed media	Normal	18.0	0.930
	Void	16.4	0.924
Tone method	Normal	15.0	0.917
	Void	4.1	0.782

Table 4.2 Comparison of GEM reactivity worth by various calculation model (GEM-A, $3 \times 3 \times 2$, 1-13z, calculated by 25-group three-dimensional diffusion theory)

Calculation model	Reactivity worth ($10^{-3} \Delta k/k$)
Infinite media	-3.44
Mixed media	-3.02
Tone method	-3.23

Table 4.3 Experimental results for external GEM reactivity worth

Core configuration	Drawer pattern	Number and position	Axial position of voided cell	Measured reactivity worth ($10^{-4} \Delta k/k$)	Experimental error ($10^{-4} \Delta k/k$)
GEM-A	$3 \times 3 \times 2$		10~13z	-1.00	± 0.02
			1~13z	-10.52	± 0.02
			-9~13z	-19.34	± 0.07
			-13~13z	-20.50	± 0.07
	$3 \times 2 \times 2$		10~13z	-0.82	± 0.02
			1~13z	-8.25	± 0.02
			-9~13z	-15.34	± 0.03
			-13~13z	-16.24	± 0.03
	$3 \times 1 \times 2$ (1st.)		10~13z	-0.45	± 0.02
			1~13z	-4.70	± 0.02
	$3 \times 1 \times 2$ (2nd.)		1~13z	-3.06	± 0.02
			1~13z	-1.76	± 0.02
	$3 \times 3 \times 1$		1~13z	-5.22	± 0.02
XX-1	$5 \times 3 \times 2$		1~13z	-16.87	± 0.37
			-13~13z	-31.93	± 0.37
			10~13z	-1.05	± 0.02
			7~13z	-3.35	± 0.02
			4~13z	-6.53	± 0.02
			1~13z	-10.28	± 0.02
	$3 \times 3 \times 2$		-3~13z	-13.88	± 0.03
			-6~13z	-16.88	± 0.03
			-9~13z	-18.88	± 0.07
			-13~13z	-20.05	± 0.07
			1~3z	-3.82	± 0.02
GEM-C	$3 \times 3 \times 1$		10~13z	-0.51	± 0.02
			7~13z	-1.50	± 0.02
			4~13z	-2.92	± 0.02
			1~13z	-4.57	± 0.02
			1~3z	-1.68	± 0.02
			10~13z	-0.34	± 0.02
Sodium plates	$3 \times 3 \times 1$		7~13z	-1.11	± 0.02
			4~13z	-2.25	± 0.02
			1~13z	-3.56	± 0.02
			10~13z	-0.34	± 0.02
GEM-A and B	23×2		1~13z	-26.79	± 0.46
			-13~13z	-50.21	± 0.46
XX-1(RSB)	GEM-A	$3 \times 3 \times 1$	1~13z	-5.32	± 0.02
			-13~13z	-10.45	± 0.03

(continued)

**Table 4.3 Experimental results for external GEM reactivity worth
(continued)**

Core configuration	Drawer pattern	Number and position	Axial position of voided cell	Measured reactivity worth ($10^{-4} \Delta k/k$)	Experimental error ($10^{-4} \Delta k/k$)
XX-1(2X)	GEM-A	$3 \times 2 \times 2$	-13~13z	-15.13	± 0.46
		14×2	-13~13z	-36.68	± 0.46
	GEM-A and B	22×2	-13~13z	-58.67	± 0.91
XX-1(1X)	GEM-A	9×2	-13~13z	-26.52	± 0.46
		15×2	-13~13z	-44.94	± 0.46
	GEM-A and B	23×2	-13~13z	-74.32	± 1.37
XX-1(1Y)	GEM-A	15×2	-13~13z	-48.83	± 0.46
	GEM-A and B	23×2	-13~13z	-78.08	± 1.37

Table 4.4 Comparison of measured GEM reactivity worth for various kinds of simulation drawers

Simulation drawer	Na weight per unit cell (g)	SS weight per unit cell (g)	Reactivity worth ^{a)} ($10^{-3} \Delta k/k$)	Reactivity worth per Na weight of unit cell ($10^{-5} \Delta k/k/g$)
GEM-A	114	191	-9.52 \pm 0.03	-8.35 \pm 0.03
GEM-B	111	203	-9.23 \pm 0.03	-8.30 \pm 0.03
GEM-C	102	238	-8.12 \pm 0.06	-7.99 \pm 0.06
Sodium plate	90	324	-6.44 \pm 0.06	-7.12 \pm 0.06

a) Reactivity worth caused by a change from 10·13z void to 1·13z void.

Reduced to $3 \times 3 \times 2$.

**Table 4.5 Calculated to experimental (C/E) value for external
GEM reactivity worth**

Core	Drawer pattern	Number and position	Axial position of voided cell	C/E value	Experimental error (relative)
GEM-A	$3 \times 3 \times 2$	10~13z	1.278	$\pm 2.0\%$	
		1~13z	1.159	$\pm 0.2\%$	
		-9~13z	1.167	$\pm 0.4\%$	
		-13~13z	1.170	$\pm 0.4\%$	
	$3 \times 2 \times 2$	10~13z	1.177	$\pm 2.4\%$	
		1~13z	1.123	$\pm 0.2\%$	
		-9~13z	1.123	$\pm 0.2\%$	
		-13~13z	1.126	$\pm 0.2\%$	
	$3 \times 1 \times 2$ (1st.)	10~13z	1.126	$\pm 1.5\%$	
		1~13z	1.072	$\pm 0.4\%$	
	$3 \times 1 \times 2$ (2nd.)	1~13z	1.109	$\pm 0.7\%$	
		1~13z	1.158	$\pm 1.1\%$	
	$3 \times 3 \times 1$	1~13z	1.169	$\pm 0.4\%$	
		1~13z	1.111	$\pm 2.2\%$	
XX-1	$5 \times 3 \times 2$	-13~13z	1.142	$\pm 1.1\%$	
		10~13z	1.206	$\pm 1.9\%$	
		7~13z	1.174	$\pm 0.6\%$	
		4~13z	1.165	$\pm 0.3\%$	
		1~13z	1.146	$\pm 0.2\%$	
	$3 \times 3 \times 2$	-3~13z	1.141	$\pm 0.2\%$	
		-6~13z	1.143	$\pm 0.2\%$	
		-9~13z	1.152	$\pm 0.4\%$	
		-13~13z	1.156	$\pm 0.4\%$	
		1~3z	1.122	$\pm 0.5\%$	
GEM-C	$3 \times 3 \times 1$	10~13z	1.175	$\pm 3.9\%$	
		7~13z	1.177	$\pm 1.3\%$	
		4~13z	1.160	$\pm 0.7\%$	
		1~13z	1.146	$\pm 0.4\%$	
		1~3z	1.128	$\pm 1.2\%$	
	$3 \times 3 \times 1$	10~13z	1.188	$\pm 5.9\%$	
		7~13z	1.133	$\pm 1.8\%$	
		4~13z	1.107	$\pm 0.9\%$	
		1~13z	1.117	$\pm 0.6\%$	
GEM-A and B	23×2	1~13z	1.199	$\pm 1.7\%$	
		-13~13z	1.240	$\pm 0.9\%$	
XX-1 (RSB)	GEM-A	$3 \times 3 \times 1$	1~13z	1.204	$\pm 0.4\%$
			-13~13z	1.146	$\pm 0.3\%$

(continued)

Table 4.5 Calculated to experimental (C/E) value for external GEM reactivity worth (continued)

Core	Drawer pattern	Number and position	Axial position of voided cell	C/E value	Experimental error (relative)
XX-1(2X)	GEM-A	3×2×2	-13~13z	1.166	±3.0%
		14×2	-13~13z	1.184	±1.2%
	GEM-A and B	22×2	-13~13z	1.233	±1.6%
XX-1(1X)	GEM-A	9×2	-13~13z	1.146	±1.7%
		15×2	-13~13z	1.131	±1.0%
	GEM-A and B	23×2	-13~13z	1.166	±1.8%
XX-1(1Y)	GEM-A	15×2	-13~13z	1.107	±0.9%
		23×2	-13~13z	1.117	±1.8%

Table 4.6 Calculated to experimental (C/E) value for various configurations of external GEM regions

Core	Number of void drawers	Experimental error (relative)	C/E value ^{a)}			
			① Deterministic, T.C. ^{b)} , by RZ	② Deterministic, T.C. by XYZ	③ Semi-deterministic ^{c)}	④ Monte-Carlo
XX-1	18	±0.3%	1.17	0.96	1.13±2.8%	----
	30	±1.1%	1.14	0.98	1.10±1.8%	----
	46	±0.9%	1.24	0.99	1.09±1.2%	1.05±2.3%
XX-1(2X)	12	±3.0%	1.17	1.01	1.08±3.6%	----
	28	±1.2%	1.18	1.00	1.03±1.7%	----
	44	±1.6%	1.23	1.06	1.11±1.0%	1.11±1.3%
XX-1(1X)	18	±1.7%	1.15	1.09	1.11±2.3%	----
	30	±1.0%	1.13	1.06	1.06±1.4%	----
	46	±1.8%	1.17	1.07	1.07±0.8%	1.09±1.5%

a) : Errors caused by statistical uncertainty of Monte-Carlo calculation are presented for one standard deviation.

b) : Transport correction.

c) : Transport correction by multi-group Monte-Carlo method was applied to deterministic diffusion calculation.

Table 4.7 Experimental results for in-core GEM reactivity worth

Core configuration and GEM position	Drawer pattern	Axial position of voided cell	Measured reactivity worth ($10^{-4} \Delta k/k$)	Experimental error ($10^{-4} \Delta k/k$)
GEM-I		10~15z	-0.53	± 0.02
		1~15z	-1.25	± 0.02
		-9~15z	-1.80	± 0.03
		-15~15z	-2.44	± 0.03
GEM-J		10~15z	-0.52	± 0.02
		7~15z	-1.18	± 0.02
		4~15z	-1.37	± 0.02
		1~15z	-1.20	± 0.02
Core : XX-1(R)		-3~15z	-0.98	± 0.03
		-6~15z	-1.13	± 0.03
		-9~15z	-1.74	± 0.03
		-15~15z	-2.38	± 0.03
Position : center	GEM-J with a narrow part ^{a)}	-6~15z	-1.50	± 0.03
		-9~15z	-2.13	± 0.03
		-15~15z	-2.76	± 0.03
Sodium plates		10~15z	-0.33	± 0.02
		7~15z	-0.73	± 0.02
		4~15z	-0.81	± 0.02
		1~15z	-0.67	± 0.02
		-3~15z	-0.49	± 0.03
		-6~15z	-0.55	± 0.03
		-9~15z	-0.95	± 0.03
		-15~15z	-1.34	± 0.03

a) Axial positions -3~3z were not voided.

Table 4.8 Influence of calculation model for in-core GEM on calculated to experimental (C/E) value

Drawer pattern	Calculation model	Axial position of voided cell	C/E value	Experimental error (relative)
GEM-I	Homogenized model	10~15z	0.764	$\pm 3.8\%$
		1~15z	0.631	$\pm 1.6\%$
		-9~15z	0.613	$\pm 1.6\%$
		-15~15z	0.642	$\pm 1.2\%$
	Heterogeneous model	10~15z	0.999	$\pm 3.8\%$
		1~15z	0.954	$\pm 1.6\%$
		-9~15z	0.960	$\pm 1.6\%$
		-15~15z	0.974	$\pm 1.2\%$

Table 4.9 Comparison of calculation result for in-core GEM reactivity worth (GEM-I, -15~15z)

	Homogenized model		Heterogeneous model	
	NL ^{a)}	L ^{b)}	NL	L
①Diffusion calculation with 3-dimensional XYZ model ($\Delta k/k$)	1.44×10^{-4}	-1.13×10^{-3}	1.25×10^{-4}	-1.43×10^{-2}
②Diffusion calculation with 2-dimensional RZ model ($\Delta k/k$)	1.49×10^{-4}	-1.10×10^{-3}	1.29×10^{-4}	-1.38×10^{-2}
③Transport calculation with 2-dimensional RZ model ($\Delta k/k$)	1.40×10^{-4}	-2.84×10^{-4}	1.41×10^{-4}	-3.60×10^{-4}
Transport correction factor ③/②	0.942	0.258	1.093	0.026
3D/2D effect with anisotropic diffusion effect ①/②	0.965	1.030	0.967	1.038

a) NL : Non-leakage term b) L : Leakage term

Table 4.10 Calculated to experimental (C/E) value for in-core GEM reactivity worth

Drawer pattern	Axial position of voided cell	Calculation ($10^{-4} \Delta k/k$)		C/E value	Experimental error (relative)
		NL ^{a)}	L ^{b)}		
GEM-I	10~15z	0.066	-0.601	0.999	$\pm 3.8\%$
	1~15z	0.677	-1.865	0.954	$\pm 1.6\%$
	-9~15z	1.294	-3.022	0.960	$\pm 1.6\%$
	-15~15z	1.365	-3.740	0.974	$\pm 1.2\%$
GEM-J	10~15z	0.067	-0.604	1.028	$\pm 3.9\%$
	7~15z	0.189	-1.346	0.982	$\pm 1.7\%$
	4~15z	0.393	-1.731	0.975	$\pm 1.5\%$
	1~15z	0.664	-1.781	0.930	$\pm 1.7\%$
	-3~15z	0.935	-1.809	0.890	$\pm 2.9\%$
	-6~15z	1.139	-2.142	0.890	$\pm 2.6\%$
	-9~15z	1.262	-2.866	0.921	$\pm 1.7\%$
	-15~15z	1.329	-3.554	0.937	$\pm 1.2\%$
GEM-J with a narrow part	-6~15z	0.597	-2.053	0.969	$\pm 1.9\%$
	-9~15z	0.720	-2.772	0.962	$\pm 1.4\%$
	-15~15z	0.786	-3.460	0.970	$\pm 1.0\%$
Sodium plates	10~15z	0.056	-0.380	0.977	$\pm 6.1\%$
	7~15z	0.155	-0.849	0.952	$\pm 2.8\%$
	4~15z	0.319	-1.084	0.948	$\pm 2.5\%$
	1~15z	0.537	-1.115	0.866	$\pm 3.1\%$
	-3~15z	0.755	-1.137	0.775	$\pm 5.8\%$
	-6~15z	0.920	-1.352	0.790	$\pm 5.3\%$
	-9~15z	1.018	-1.815	0.840	$\pm 3.0\%$
	-15~15z	1.074	-2.228	0.860	$\pm 2.1\%$

a) NL : Non-leakage term b) L : Leakage term

Table 4.11 Calculated to experimental (C/E) value for in-core GEM reactivity worth estimated by least-squares fitting

Item	C/E value ^{a)}	
	Non-leakage term	Leakage term
GEM-I and J ^{b)}	1.11 ± 0.04	1.00 ± 0.01
Na plate	1.14 ± 0.06	0.98 ± 0.02
All the measurements	1.17 ± 0.03	1.01 ± 0.01

a) Evaluated by the inverse of bias factors, α and β , using Eq.(4·1).

b) Including the measurements with a narrow part in GEM-J.

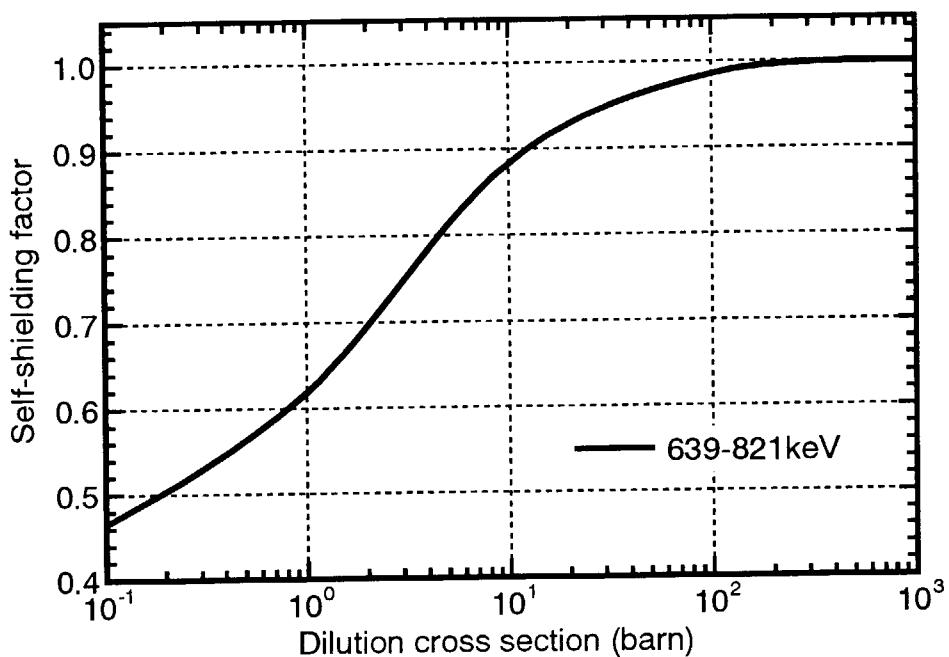


Fig. 4.1 Self-shielding factor for total cross section of iron.
(639-821keV)

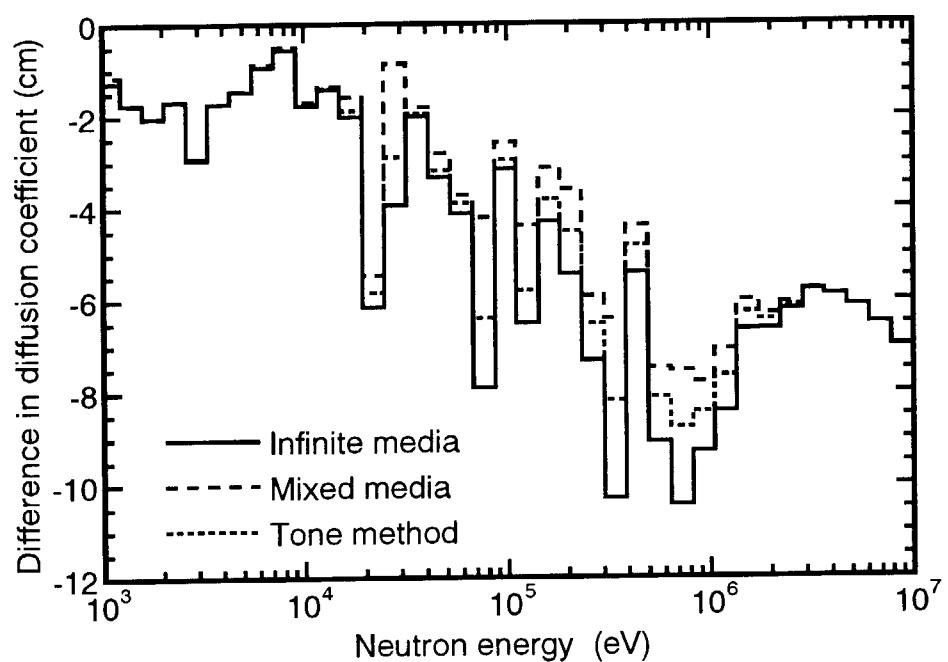


Fig. 4.2 Difference in diffusion coefficient between normal
GEM and voided GEM.

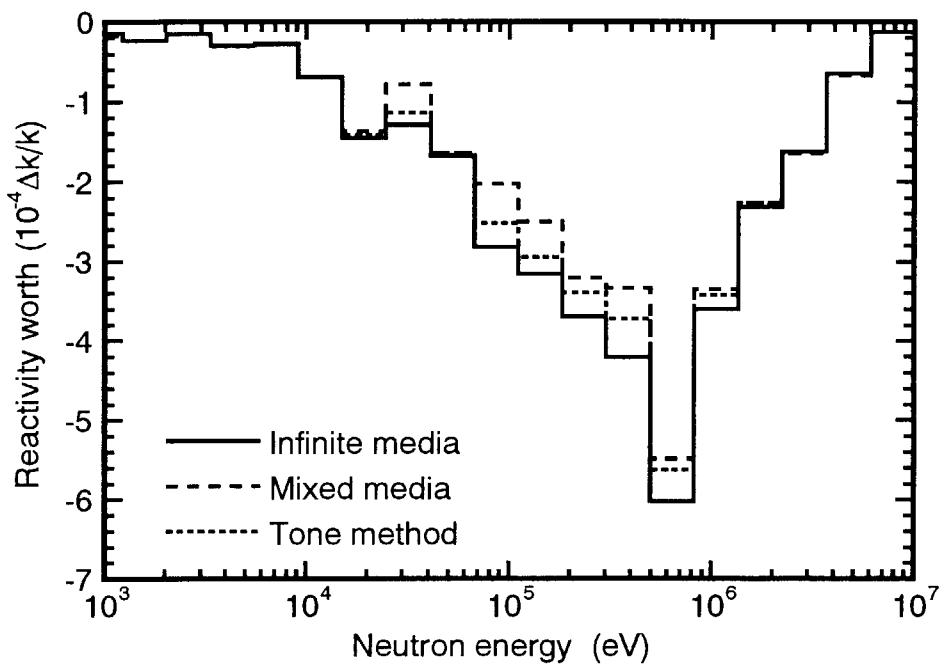


Fig. 4.3 Energy breakdown of GEM reactivity worth.
($3 \times 3 \times 2$ -15~15z)

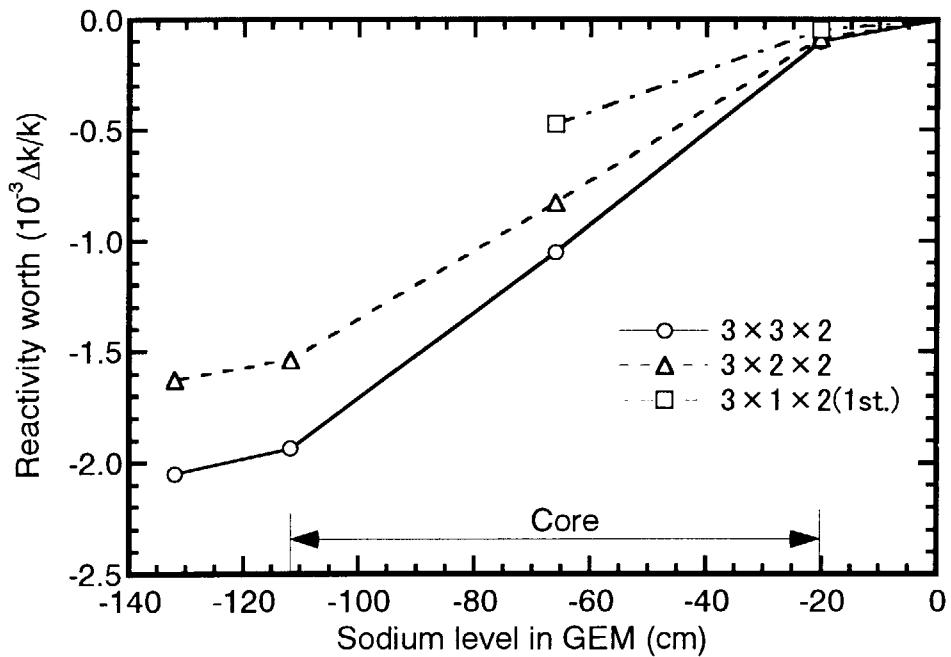


Fig. 4.4 Measured GEM reactivity worth in FCA XX-1 core
(GEM-A)

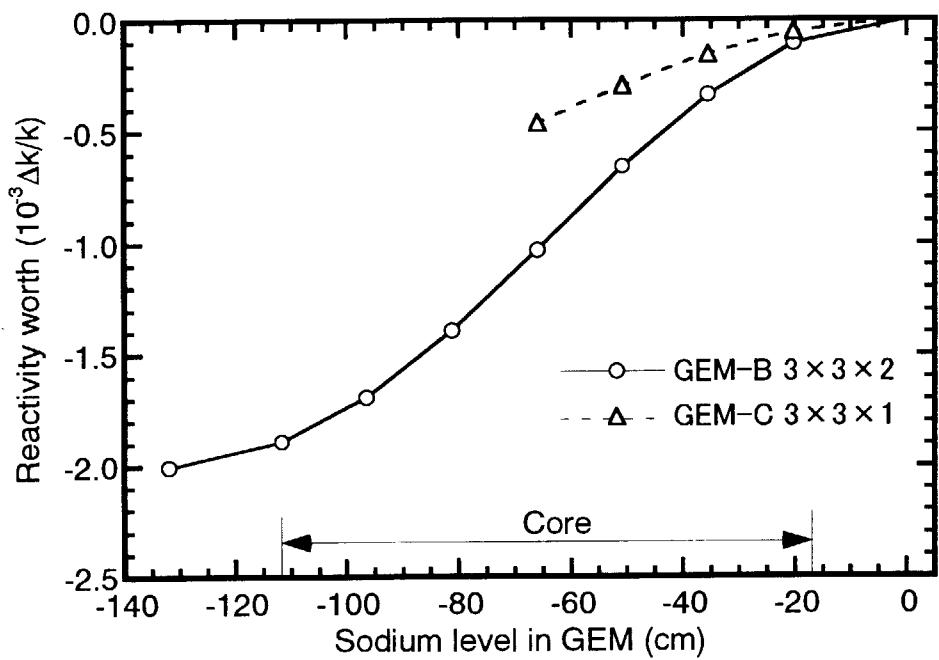


Fig. 4.5 Measured GEM reactivity worth in FCA XX-1 core (GEM-B and -C)

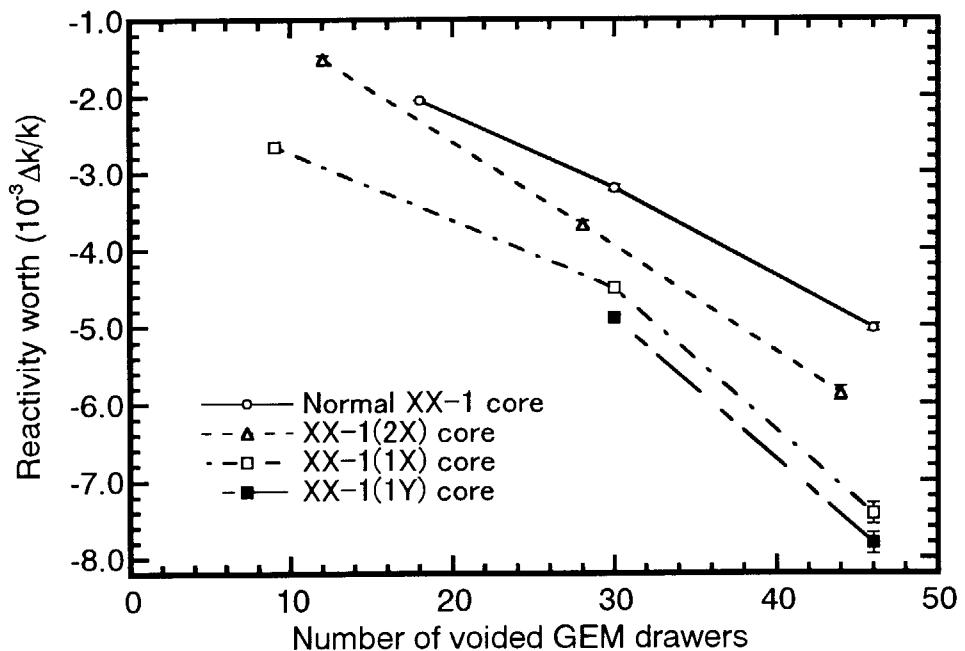


Fig. 4.6 Measured GEM reactivity worth for various GEM configuration

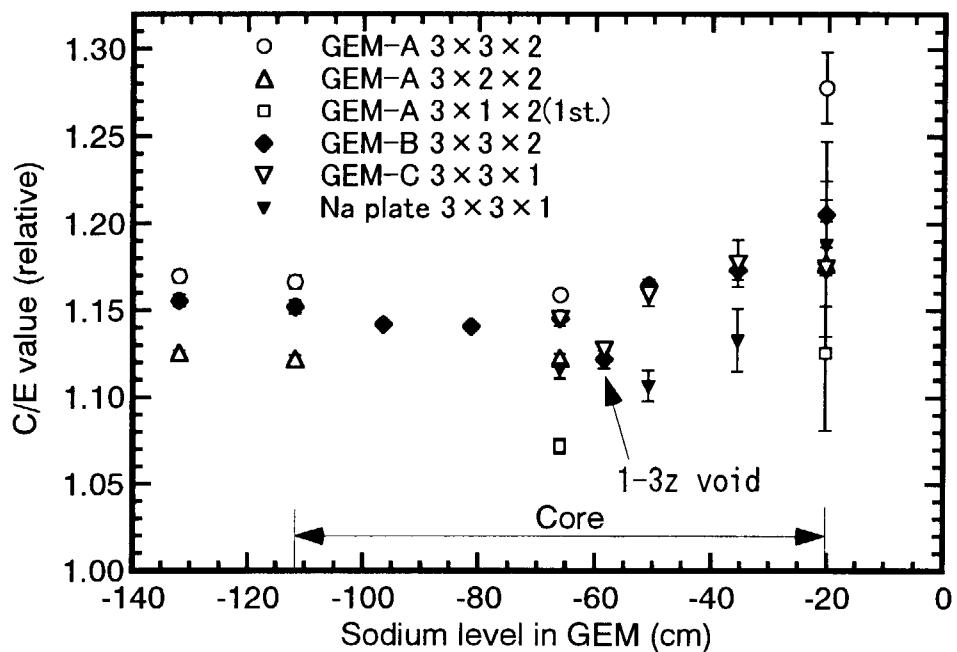


Fig. 4.7 Calculated to experimental (C/E) values for external GEM reactivity worth dependent on sodium level

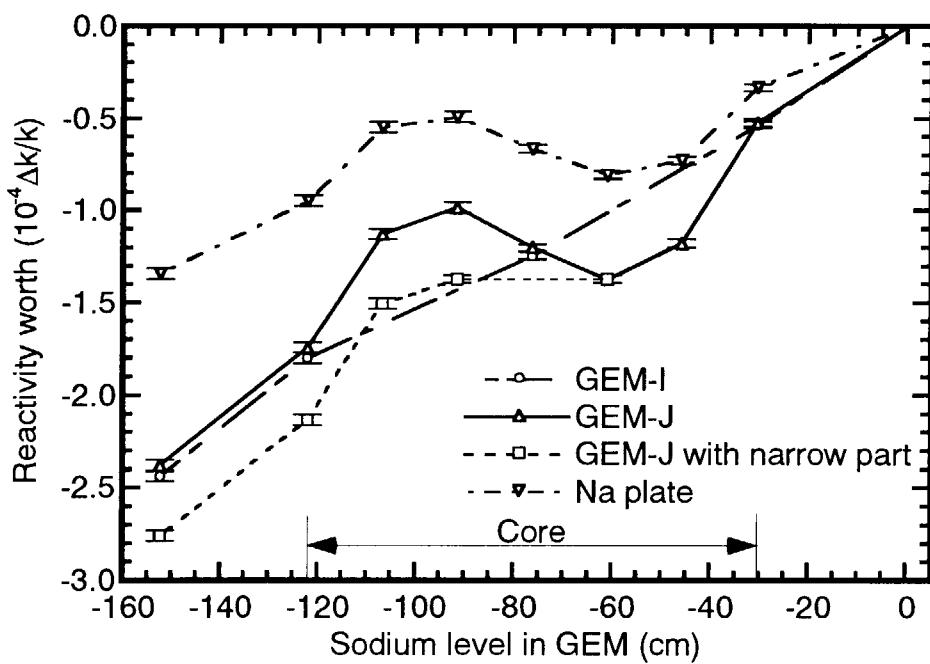


Fig. 4.8 Measured in-core GEM reactivity worth in FCA XX-1(R)

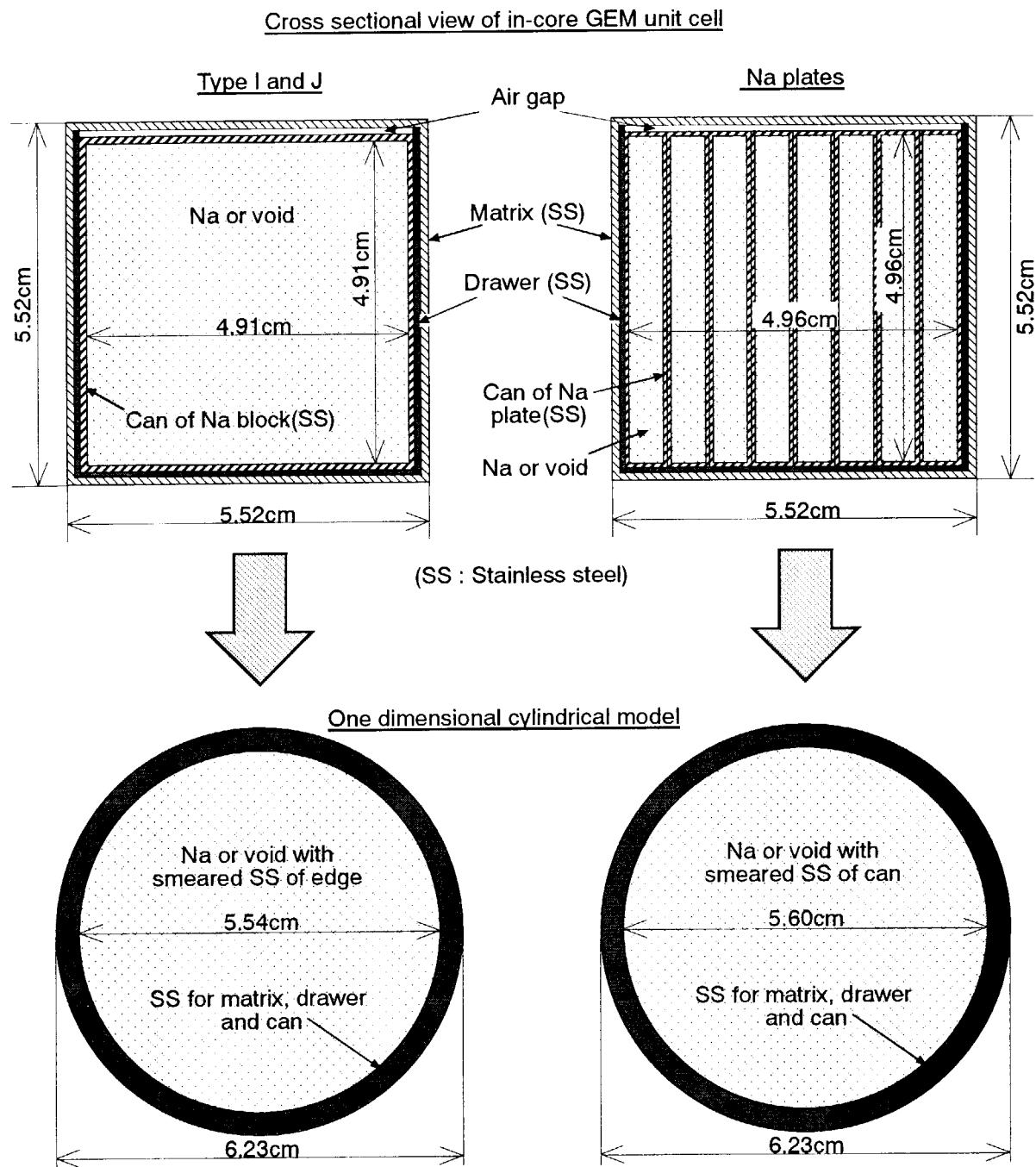


Fig. 4.9 Cell models for in-core GEM drawers

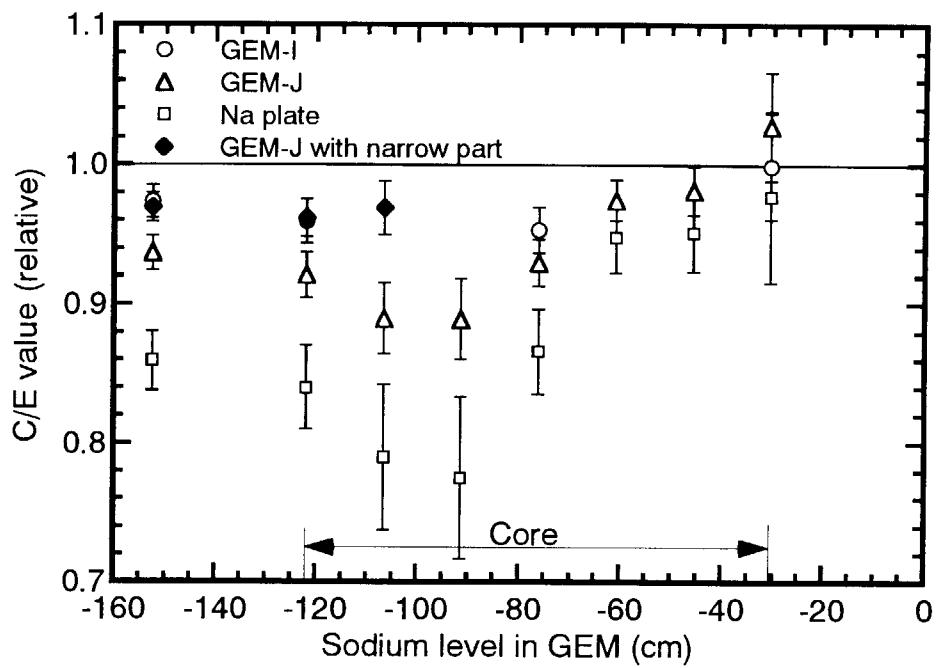


Fig. 4.10 Calculated to experimental (C/E) values for in-core GEM reactivity worth dependent on sodium level

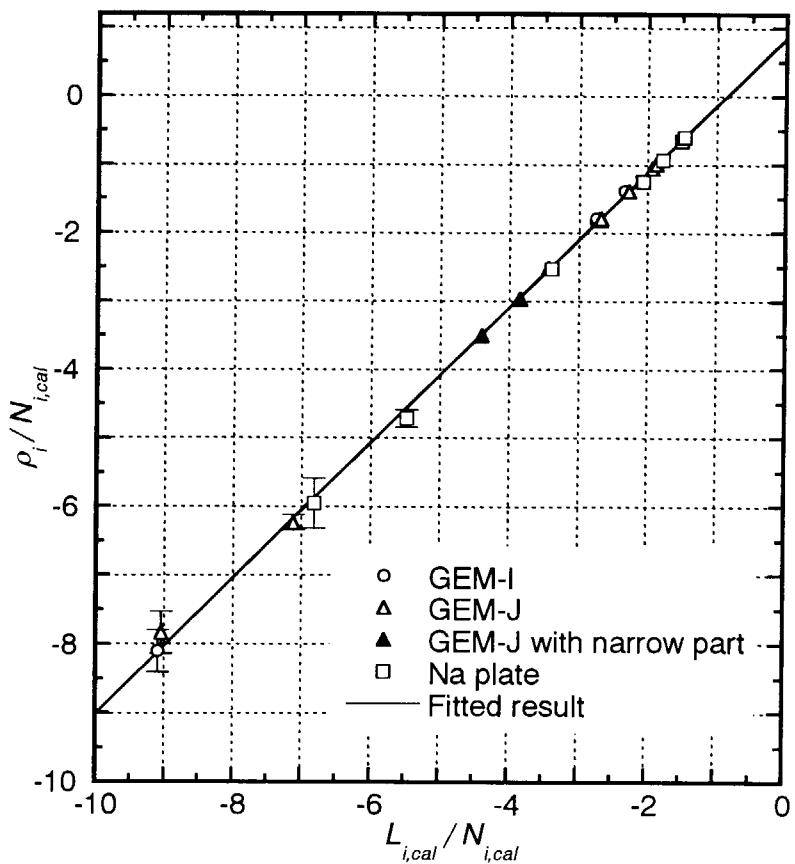


Fig. 4.11 Result of least squares fitting for in-core GEM reactivity worth in FCA XX-1(R)

5. まとめ

GEM(ガス膨張機構)は高速実証炉以降の大型 LMFBR への導入が検討されている受動的炉停止機構であり、主冷却ポンプ停止時のスクラム失敗事象等の ATWS 時に炉心からの中性子漏洩を増加させることにより負の反応度を加えるものである。GEM は、炉心と径方向ブランケットの間におかれる炉外 GEM と、炉心の燃料集合体の代わりにおかれる炉内 GEM に分けられる。炉外 GEM 及び炉内 GEM が作動した場合の反応度価値(GEM 反応度価値)に対する現在の計算手法による予測精度の評価とその向上を目的として、FCA に XX-1 炉心を構築して模擬実験を実施した。

まず、炉外 GEM に関して、GEM 反応度価値計算における実効断面積の作成方法を考察し、GEM がボイド化した場合の GEM の構造材である鉄の自己遮蔽効果を適切に評価する必要があることを明らかにした。本研究では「領域間干渉法(東稔の方法)」を最も近似の少ない手法として採用することとした。

炉外 GEM の実験では、GEM 反応度価値のナトリウム液位依存性、ボイド化領域依存性、模擬領域を構成する模擬物質の種類依存性、径方向ブランケットの組成依存性、GEM 領域の形状依存性等に着目した種々の実験を行った。これらの実験結果を用いて炉外 GEM 反応度価値の予測精度評価を行った。その結果、炉外 GEM 反応度価値は 10~20%程度の過大評価となっており、軸方向に見た場合、軸方向ブランケット部で過大評価の傾向が大きいことが分かった。径方向に見た場合は、炉心中心から離れるに従って過大評価傾向が強まった。GEM 領域を構成する引き出し及び径方向ブランケットの組成は GEM 反応度価値の予測精度には影響しないことが分かった。

炉外 GEM に関するここまで解析は3次元拡散計算に2次元 RZ モデルによる輸送補正を施したものであるが、模擬領域の形状が予測精度に及ぼす影響を評価するために、新たに3次元の輸送計算(決定論的手法及びモンテカルロ法)を導入し、種々の計算手法についての比較を行った。その結果、決定論的手法で見られた最大 20%程度の過大評価をモンテカルロ法を用いれば 10%以内に縮めることができることが明らかとなった。炉外 GEM が炉心の全周を取り囲むように配置された場合でも、2次元輸送計算を用いると 10~20%の過大評価となり、モンテカルロ法を用いれば 10%以内の予測精度が得られるものと考えられる。

炉内 GEM 反応度価値ではボイドに沿った軸方向の中性子ストリーミングが大きく影響するため、セルの均質化法に注意を払う必要がある。一部の実験を「均質モデル」と「非均質モデル」で解析した結果、均質モデルでは 20~40%の過小評価となるのに対し非均質モデルでは 5%以内の過小評価であり、予測精度に大きな差異があることが分かった。また、漏洩項に対する輸送効果が非常に大きく、炉内 GEM の計算では、GEM の構造を詳細にモデル化した輸送計算が不可欠であることを明らかにした。

炉内 GEM 反応度価値の予測精度はナトリウム液位の低下に伴って過小評価の傾向が強まり、炉心中心を過ぎた領域で極小値を示し、再び 1 に近付く。炉内 GEM 反応度価値では非漏洩項の寄与が炉外 GEM の場合に比べて大きいため、ナトリウムボイド反応度価値の場合と同様に最小二乗法によるフィッティングを使って予測精度の成分別評価を行った。その結果、非漏洩項は 10~20%の過大評価であるが、漏洩項は実験誤差の範囲内で実験と計算が一致していることが明らかとなった。

謝 辞

実験に当たっては、日本原子力研究所 エネルギーシステム研究部 炉物理研究グループ及び炉工学施設管理室の皆様に多大なるご支援をいただきました。ここに感謝の意を表します。

(株)高速炉エンジニアリングの亀井孝信氏(現、(株)東芝)及び鈴置善郎氏(現、核燃料サイクル開発機構)には解析の面で有益な意見交換を行っていただきました。心より感謝の意を表します。

参考文献

- (1) R. Tupper, W. Kwant and Y. Dayal : "Reactivity Control and Shutdown System for the U. S. ALMR", *Proc. Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles*, FR'91, Kyoto, Japan, 1991, Vol. III, p. P3.12-1 (1991).
- (2) J. B. Waldo, A. Paddilla, D. H. Nguyen, and S. W. Claybrook : "Application of the GEM Shutdown Device to the FFTF Reactor", *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 53, 312 (1986).
- (3) H. F. McFarlane, S. B. Brumbach, S. G. Carpenter and P. J. Collins : "Benchmark Physics Tests in the Metallic-Fueled Assembly ZPPR-15", *Nucl. Sci. Eng.*, 101, 137 (1989).
- (4) H. Takano : "Benchmark Tests of JENDL-3.2 for Thermal and Fast Reactors ", *Proc. of 1994 Symp. on Nucl. Data*, Tokai, Japan, 1994, JAERI-Conf95-008, p. 47 (1995).
- (5) 高野 秀機, 金子 邦男 : "JENDL-3Tと-3T/Rev.1 のベンチマーク・テスト", JAERI-M89-147, (1989).
- (6) M. Nakagawa and K. Tsuchihashi : "SLAROM : A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor", JAERI 1294 (1984).
- (7) P. Benoist : "Theory of the Diffusion Coefficient of Neutrons in a Lattice Containing Cavities", CEA-R-2278 (1964).
- (8) T. Tone : "A Numerical Study of Heterogeneity Effects in Fast Reactor Critical Assemblies", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 12, 467 (1975).
- (9) 飯島 進 :"CITATION-FBR" (公刊予定).
- (10) K. D. Lathrop and F. W. Brinkley : "TWOTRAN-II : An Interfaced, Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport", LA-4848-MS (1973).
- (11) R. E. Alcouffe, R. S. Baker, F. W. Brinkley, D. R. Marr, R. D. O'Dell and W. F. Walters : "DANTSYS : A Diffusion Accelerated Neutral Particle Transport Code System", LA-12969-M (1995).
- (12) T. Mori, M. Nakagawa and M. Sasaki : "Point Detector Estimator for a Vectorized Monte Carlo Code", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 29(12), 1224 (1992).

- (13) 森 貴正、中川 正幸："MVP/GMVP 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード", *JAERI-Data/Code* 94-007 (1994).
- (14) 飯島 進, 吉田 弘幸, 桜木 廣隆:"高速炉設計用計算プログラム・2(2次元・3次元拡散摂動理論計算コード:PERKY)", *JAERI-M* 6993 (1977).
- (15) 角田 弘和:"角度依存摂動計算コード:SNPERT-II", 私信 (1979).
- (16) H. Oigawa, S. Iijima and M. Andoh : "Experiments and Analyses on Sodium Void Reactivity Worth in Mock-up Cores of Metallic Fueled and MOX Fueled Fast Reactors at FCA", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 35(4), 264 (1998).

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ヘcta	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ eGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

(注)

1. 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(-10 ⁵ dyn)	kgf	lbf	力	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	0.101972	0.224809		1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ³	145.038
	9.80665	1	2.20462		0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	4.44822	0.453592	1		0.101325	1.03323	1	760	14.6959
粘度	1 Pa·s(N·s/m ²)	= 10 P(ボアズ)(g/(cm·s))			1.33322×10 ⁻¹	1.35951×10 ⁻³	1.31579×10 ⁻³	1	1.93368×10 ⁻²
動粘度	1 m ² /s	= 10 ⁴ St(ストークス)(cm ² /s)			6.89476×10 ⁻³	7.03070×10 ⁻³	6.80460×10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法)	
	1	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10 ¹⁸	= 4.184 J (熱化学)	
	9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁹	= 4.1855 J (15°C)	
	3.6×10 ⁶	3.67098×10 ⁵	1	8.59999×10 ⁵	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ²⁵	= 4.1868 J (国際蒸気表)	
	4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)	
	1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻¹	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹	= 75 kgf·m/s	
	1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸	= 735.499 W	
	1.60218×10 ¹⁰	1.63377×10 ²⁰	4.45050×10 ⁻²⁰	3.82743×10 ²⁰	1.51857×10 ⁻²²	1.18171×10 ⁻¹⁹	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量率	Sv	rem
	1	2.70270×10 ⁻¹¹		1	100		1	3876		1	100
	3.7×10 ¹⁰	1		0.01	1		2.58×10 ⁻⁴	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

