

JAERI-M

8 9 1 8

F C A 集合体の測定中性子スペクトルと
計算スペクトルの比較

1 9 8 0 年 7 月

大 部 誠

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

FCA集合体の測定中性子スペクトルと計算スペクトルの比較

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

大部 誠

(1980年5月29日受理)

FCA VI-2, VI-1 および V-2 集合体において測定されている中性子スペクトルに検討を加え、計算結果と比較した。使用した測定データは反跳陽子計数管法とダブルシンチレータ法による測定から得たものである。計算は、セル計算プログラム SP-2000 と詳細群断面積ライブラリー AGR1/2 を用いて行い、1950 群および縮約 64 群、26 群のスペクトルを算出した。

エネルギー範囲 5 keV から 6 MeV までの測定スペクトルを C/E 値を用いて、計算結果と有効に比較している。比較の結果、測定スペクトルと計算スペクトルは、430 keV の酸素共鳴と 29 keV の鉄共鳴附近で差違が大きいことが示されている。他に、中心核分裂率比の実験値と計算値の比較を行っている。

Comparison between Measured and Calculated Neutron Spectra
in FCA Assemblies

Makoto ŌBU

Division of Reactor Engineering,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received May 29, 1980)

The neutron spectra measured in FCA Assembly VI-2, VI-1 and V-2 are discussed, and are compared with the results by calculation. The data were obtained by measurements of proton-recoil counter and double scintillator methods. Calculations were made with cell-program SP-2000 and fine-group cross section library AGRI/2, and the spectra with 1950 groups and broadened 64 and 26 groups were derived.

The measured spectra in the energy range of 5 keV to 6 MeV were effectively compared with the calculational results, by using C/E values. There are large differences between the measured and the calculated spectra near the 430 keV oxygen and 29 keV iron resonances. The experimental and the calculated central fission rate ratios were also compared.

Keywords : Measured Neutron Spectra, FCA Assemblies, Comparison,
Calculation, Program SP-2000, Cross Section Library AGRI/2,
1950-groups, 64-groups, 26-groups

目 次

1. まえがき	1
2. FCA 集合体	1
3. 測定中性子スペクトルの概要と計算手順	3
4. 結果と検討	4
4.1 測定スペクトルと詳細群計算の比較	4
4.2 少数群による比較と C/E	11
4.3 中心核分裂率比と SP-2000 計算の比較	15
5. まとめ	16
謝 辞	16
参考文献	16

Contents

1. Introduction	1
2. FCA Assemblies	1
3. Outline of measured neutron spectra and procedure for calculation	3
4. Results and discussions	4
4.1 Comparisons of measured spectra with fine-group calculation	4
4.2 Broadened group calculation and C/E	11
4.3 Comparisons of central fission rate ratios and SP-2000 calculation	15
5. Conclusion	16
Acknowledgment	16
References	16

1. ま え が き

高速炉臨界集合体内の中性子スペクトルは、その体系を構成する燃料と構造材核種の組成に大きく依存する。従って、集合体における測定中性子スペクトルはその体系の特性を表わす炉物理測定量の一つとして重要なものである。一方、炉物理量としての実効増倍係数、中心反応度値、中心反応率などの積分測定については、精度のよい測定値が期待できるが、これらの諸量はスペクトルに依存する量であるので、やはり体系内スペクトルの正確な情報を必要とする。FCAにおける中性子スペクトルの測定に関しては、先に高速炉の物理模擬炉心V-2⁽¹⁾、VI-1⁽²⁾、およびVI-2集合体⁽³⁾で、反跳陽子計数管法による測定が行われ⁽⁴⁾⁽⁵⁾、次第に測定精度が向上している。また、VI-2集合体ではダブルシンチレータ法による測定が行われ、反跳陽子計数管法より高いエネルギー領域で結果が得られている⁽⁶⁾。

本報告書では、FCA集合体で測定されたこれらの中性子スペクトルの相互の検討と、計算結果との比較について述べる。計算は衝突確率法にもとづくセル計算プログラムSP-2000⁽⁷⁾と積分データにより修正された詳細群断面積ライブラリーAGRI/2⁽⁸⁾を用いて行った。測定中性子スペクトルを先ずSP-2000計算による1950群構造のスペクトルと比較している。次に、SP-2000計算の計算結果を64群と26群に縮約したスペクトルを導出し、測定スペクトルとこれら少数群スペクトルの定量的比較を行っている。少数群について、計算スペクトルと測定スペクトルの比(C/E)を求めた。最後に、炉体系の中性子スペクトル指数(spectral index)として得られている中心核分裂率比の測定値と、SP-2000スペクトルを重み関数として縮約した26群定数による計数値の比較を示す。

2. FCA 集合体

FCA VI-2、VI-1およびV-2集合体は、いずれもプルトニウム燃料を装荷した高速炉の物理模擬炉心であり、各種の炉物理量の測定が行われている。各々の集合体の断面図をFig. 1に示す。VI-2集合体は円筒形ゾーン装荷型の集合体で、中心の試験領域とそれを取囲むドライバー帯域で炉心を構成しており、さらにその外側をブランケットで包んでいる。試験領域は半径29.38 cmで、長さ91.44 cmの大きさを持ち、その組成中に燃料として92% Puを含んでいる。濃縮ウランを含むドライバーの厚さは17.32 cm、天然ウランより成るブランケットは厚さ25.47 cmである。軸方向両端のブランケットは劣化ウラン、厚さ20.32 cmを使用している。試験領域の体積は248 ℓである。

VI-1集合体はVI-2と同様な型のゾーン装荷集合体で、試験領域の寸法は半径28.03 cm、長さ91.44 cmである。濃縮ウラン・ドライバーは厚さ12.52 cm、天然ウラン・ブランケットは厚さ22.12 cmである。軸方向両端のブランケットには、やはり劣化ウラン、厚さ20.32 cmを使用している。試験領域の体積は226 ℓである。

1. ま え が き

高速炉臨界集合体内の中性子スペクトルは、その体系を構成する燃料と構造材核種の組成に大きく依存する。従って、集合体における測定中性子スペクトルはその体系の特性を表わす炉物理測定量の一つとして重要なものである。一方、炉物理量としての実効増倍係数、中心反応度価値、中心反応率などの積分測定については、精度のよい測定値が期待できるが、これらの諸量はスペクトルに依存する量であるので、やはり体系内スペクトルの正確な情報を必要とする。FCAにおける中性子スペクトルの測定に関しては、先に高速炉の物理模擬炉心V-2⁽¹⁾、VI-1⁽²⁾、およびVI-2集合体⁽³⁾で、反跳陽子計数管法による測定が行われ⁽⁴⁾⁽⁵⁾、次第に測定精度が向上している。また、VI-2集合体ではダブルシンチレータ法による測定が行われ、反跳陽子計数管法より高いエネルギー領域で結果が得られている⁽⁶⁾。

本報告書では、FCA集合体で測定されたこれらの中性子スペクトルの相互の検討と、計算結果との比較について述べる。計算は衝突確率法にもとづくセル計算プログラムSP-2000⁽⁷⁾と積分データにより修正された詳細群断面積ライブラリーAGRI/2⁽⁸⁾を用いて行った。測定中性子スペクトルを先ずSP-2000計算による1950群構造のスペクトルと比較している。次に、SP-2000計算の計算結果を64群と26群に縮約したスペクトルを導出し、測定スペクトルとこれら少数群スペクトルの定量的比較を行っている。少数群について、計算スペクトルと測定スペクトルの比(C/E)を求めた。最後に、炉体系の中性子スペクトル指数(spectral index)として得られている中心核分裂率比の測定値と、SP-2000スペクトルを重み関数として縮約した26群定数による計数値の比較を示す。

2. F C A 集 合 体

FCA VI-2、VI-1およびV-2集合体は、いずれもプルトニウム燃料を装荷した高速炉の物理模擬炉心であり、各種の炉物理量の測定が行われている。各々の集合体の断面図をFig. 1に示す。VI-2集合体は円筒形ゾーン装荷型の集合体で、中心の試験領域とそれを取囲むドライバー帯域で炉心を構成しており、さらにその外側をブランケットで包んでいる。試験領域は半径29.38cmで、長さ91.44cmの大きさをもち、その組成中に燃料として92%Puを含をでいる。濃縮ウランを含むドライバーの厚さは17.32cm、天然ウランより成るブランケットは厚さ25.47cmである。軸方向両端のブランケットは劣化ウラン、厚さ20.32cmを使用している。試験領域の体積は248ℓである。

VI-1集合体はVI-2と同様な型のゾーン装荷集合体で、試験領域の寸法は半径28.03cm、長さ91.44cmである。濃縮ウラン・ドライバーは厚さ12.52cm、天然ウラン・ブランケットは厚さ22.12cmである。軸方向両端のブランケットには、やはり劣化ウラン、厚さ20.32cmを使用している。試験領域の体積は226ℓである。

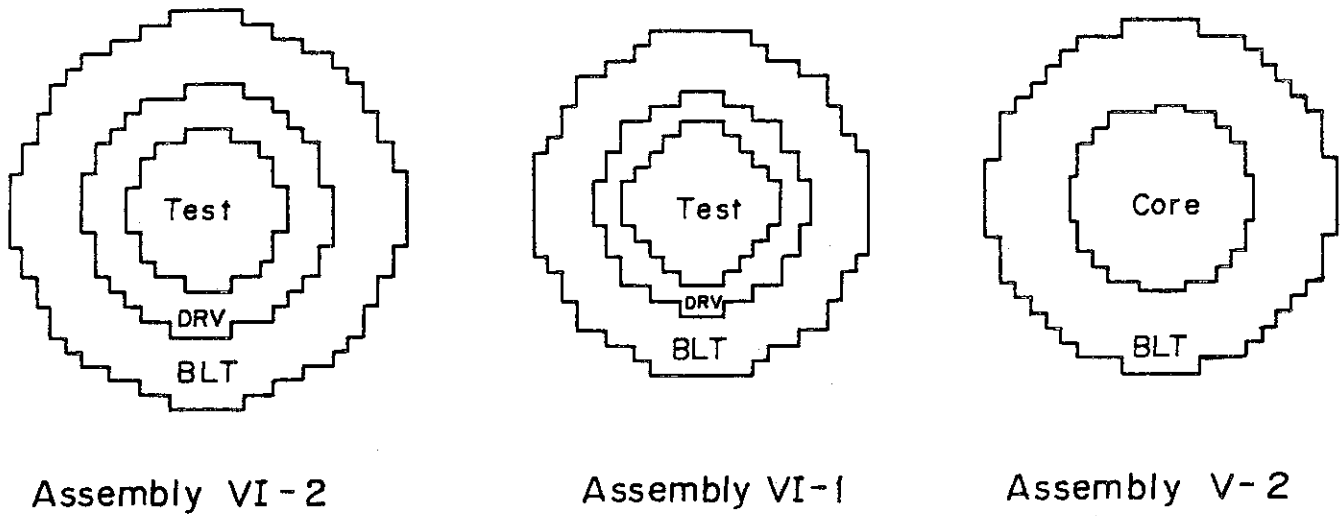


Fig. 1 Cross-sectional view of three assemblies of FCA

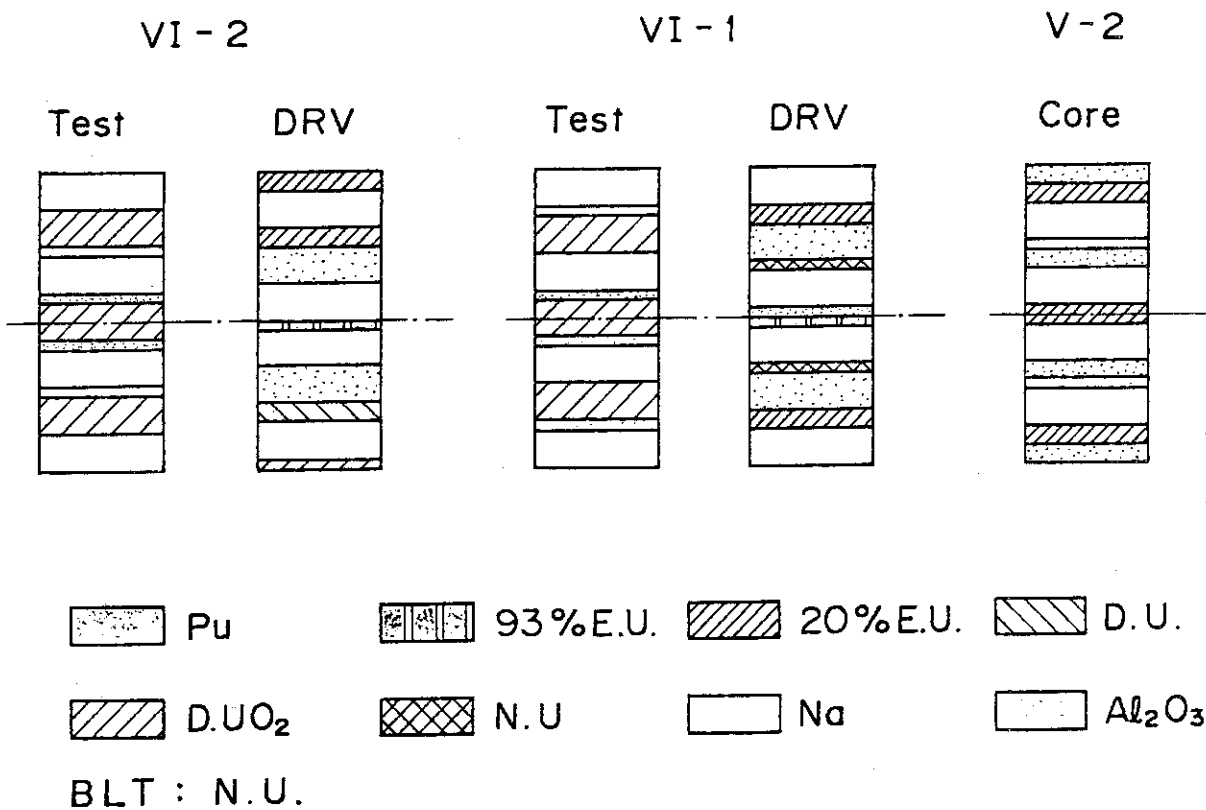


Fig. 2 Cell patterns of Assembly VI-2, VI-1 and V-2

V-2 集合体は、炉心とブランケットより成る円筒形二領域集合体である。炉心は半径 33.74 cm、長さ 60.96 cm の大きさを持ち、その組成中に燃料として Pu と濃縮ウランを含んでいる。炉心の周囲を取囲む天然ウラン・ブランケットの厚さは 28.61 cm、炉心体積は 218 ℓ である。

Fig. 2 に VI-2, VI-1 および V-2 集合体の炉心を構成する単位セル当りの装荷パターンを示す。燃料プレートは、核分裂源の分布ができるだけ均質に近くなるように配置したいわゆる均質炉心配置になっている。他に構造材として Pu と Na の被覆材、燃料引出しと格子などにステンレス鋼 (Fe, Ni, Cr) を使用している。炉心内中性子スペクトルは、これらの燃料と構造材の組成に大きく依存する。Table 1 に VI-2, VI-1 の試験領域と V-2 の炉心の領域内均質組成を示す。

Table 1 Composition of test regions in FCA Assemblies
VI-2, VI-1 and V-2
($\times 10^{22}/\text{cm}^3$)

Material	VI-2 Test region	VI-1 Test region	V-2 Core
Pu-239	0.10458	0.15687	0.10458
Pu-240	0.00933	0.01400	0.00933
Pu-241	0.00092	0.00160	0.00107
U-235	0.00152	0.00152	0.14700
U-238	0.69057	0.69057	0.58359
O	1.7286	1.5598	1.3101
Na	0.7656	0.7656	0.81341
Al	0.2403	0.1354	0.88295
Cr	0.3413	0.3552	0.32734
Fe	1.2504	1.3004	1.1950
Ni	0.1566	0.1639	0.15345

3. 測定中性子スペクトルの概要と計算手順

FCA における反跳陽子計数管法の手法は、二つの小型円筒形反跳陽子比例計数管を用いる方式によっている。すなわち、メタン充填計数管は高エネルギー領域の測定を、水素充填計数管は低エネルギー領域の測定を分担する。低エネルギー領域は、さらに γ 線波形弁別器を用いて γ 線バックグラウンドを弁別することにより測定の下限を伸ばす。反跳陽子計数管法では、検出器である計数管を直接炉心内に挿入して中心中性子スペクトルを測定するが、この場合、計数管は wall-and-end 効果を減らして測定領域の上限を伸ばすために 5 気圧程度の高いガス圧で充填ガスを封入しているので、いきおい高い計数効率をもっている。測定

V-2 集合体は、炉心とブランケットより成る円筒形二領域集合体である。炉心は半径 33.74 cm、長さ 60.96 cm の大きさを持ち、その組成中に燃料として Pu と濃縮ウランを含んでいる。炉心の周囲を取囲む天然ウラン・ブランケットの厚さは 28.61 cm、炉心体積は 218 ℓ である。

Fig. 2 に VI-2, VI-1 および V-2 集合体の炉心を構成する単位セル当りの装荷パターンを示す。燃料プレートは、核分裂源の分布ができるだけ均質に近くなるように配置したいわゆる均質炉心配置になっている。他に構造材として Pu と Na の被覆材、燃料引出しと格子などにステンレス鋼 (Fe, Ni, Cr) を使用している。炉心内中性子スペクトルは、これらの燃料と構造材の組成に大きく依存する。Table 1 に VI-2, VI-1 の試験領域と V-2 の炉心の領域内均質組成を示す。

Table 1 Composition of test regions in FCA Assemblies
VI-2, VI-1 and V-2

Material	(x10 ²² /cm ³)		
	VI-2 Test region	VI-1 Test region	V-2 Core
Pu-239	0.10458	0.15687	0.10458
Pu-240	0.00933	0.01400	0.00933
Pu-241	0.00092	0.00160	0.00107
U-235	0.00152	0.00152	0.14700
U-238	0.69057	0.69057	0.58359
O	1.7286	1.5598	1.3101
Na	0.7656	0.7656	0.81341
Al	0.2403	0.1354	0.88295
Cr	0.3413	0.3552	0.32734
Fe	1.2504	1.3004	1.1950
Ni	0.1566	0.1639	0.15345

3. 測定中性子スペクトルの概要と計算手順

FCA における反跳陽子計数管法の手法は、二つの小型円筒形反跳陽子比例計数管を用いる方式によっている。すなわち、メタン充填計数管は高エネルギー領域の測定を、水素充填計数管は低エネルギー領域の測定を分担する。低エネルギー領域は、さらにγ線波形弁別器を用いてγ線バックグラウンドを弁別することにより測定の下限を伸ばす。反跳陽子計数管法では、検出器である計数管を直接炉心内に挿入して中心中性子スペクトルを測定するが、この場合、計数管は wall-and-end 効果を減らして測定領域の上限を伸ばすために 5 気圧程度の高いガス圧で充填ガスを封入しているので、いきおい高い計数効率をもっている。測定

は高い計数率によるエレクトロニクス系のパルス・パイルアップをさけるため、通常 k_{eff} が 0.94 ~ 0.95 の未臨界運転の体系で行っている。測定技術の詳細については他の文献で報告されている⁽⁵⁾。VI-2 炉心における測定ではエネルギー範囲 2.5 KeV ~ 2 MeV の範囲で中性子スペクトルが測定されている。

ダブルシンチレータ法は 1st シンチレータと 2nd シンチレータの二つのプラスチック・シンチレータを用いて、炉心中心より引出した中性子ビームを検出する方法である。すなわち、まず中性子ビームを 1st シンチレータで受け、それより散乱する 4⁵ 方向の中性子を、2nd シンチレータで受けて両シンチレータ間の中性子飛行時間を検出し、得られた飛行時間の波高分布を入射エネルギー・スペクトルに変換する。両シンチレータ間の飛行距離は 1 m にとっている。なお、両シンチレータは炉心より 8.5 m 離れた炉室外に設置され、その間を中性子ビーム引出し管で連結している。VI-2 炉心における測定中性子スペクトルが 200 keV ~ 6 MeV の範囲で得られている。測定技術の詳細については他の文献で述べられている⁽⁶⁾。

中性子スペクトルの計算に用いたセル計算モジュール SP-2000 は、衝突確率法により 1950 エネルギー群（レサジー幅 0.0085）の基本モード中性子スペクトルを計算するもので、AGRI-DOYC 計算モジュール・システムの中で使用される。計算は集合体中心領域の組成について、均質モデルを行った。ここで、測定中性子スペクトルは実験的な分解能をもっている。そのため比較に当って、計算スペクトルを実験の分解能を参考にして、9% の半値幅（FWHM）をもつガウス分布関数によら広げた。また、少数群による比較を行うため、SP-2000 の計算結果を 64 群（レサジー幅 0.255）および 26 群（レサジー幅 0.468）に縮約したスペクトルも算出した。

前述のごとく、反跳陽子計数管法による測定は未臨界体系で行っている。この場合、体系内のスペクトルは、Pu 燃料中に含まれている ²⁴⁰Pu 自発核分裂中性子源の影響を受けるので、測定中性子スペクトルは計算による基本モードスペクトルと多少、異っている擬いがある。このため、両スペクトルの相違を計算により見積った。未臨界体系のスペクトルは拡散解析コード CITATION⁽⁹⁾ を用いて二次元 R-Z 形状による 26 群の計算から求めた。Table 2 に炉心中心の未臨界スペクトルと基本モード計算スペクトルの比を示す。少数群における比較にさいして、測定中性子スペクトルにこの未臨界による差を補正している。

4. 結果と検討

4.1 測定スペクトルと詳細群計算の比較

反跳陽子計数管法により測定した集合体 VI-2、VI-1 および V-2 の炉心中心スペクトルと SP-2000 計算結果の比較を、それぞれ Fig. 3、4 と 5 に示す。測定スペクトルは測定エネルギー範囲内にある単位レサジー当りの中性子束の積分値で計算スペクトルと規格化した。各スペクトルの測定誤差を Table 3 に示す。VI-2 測定で 5 keV 以下は γ 線波形弁別の低下と計数管の高ガス増幅度の使用により測定誤差はさらに大きくなる。測定の分解能は 5 keV ~ 2 MeV の範囲で 10 ~ 8% 半値幅（Full Width at Half Maximum）

は高い計数率によるエレクトロニクス系のパルス・パイルアップをさけるため、通常 k_{eff} が 0.94 ~ 0.95 の未臨界運転の体系で行っている。測定技術の詳細については他の文献で報告されている⁽⁵⁾。VI-2 炉心における測定ではエネルギー範囲 2.5 KeV ~ 2 MeV の範囲で中性子スペクトルが測定されている。

ダブルシンチレータ法は 1st シンチレータと 2nd シンチレータの二つのプラスチック・シンチレータを用いて、炉心中心より引出した中性子ビームを検出する方法である。すなわち、先ず中性子ビームを 1st シンチレータで受け、それより散乱する 4⁵ 方向の中性子を、2nd シンチレータで受けて両シンチレータ間の中性子飛行時間を検出し、得られた飛行時間の波高分布を入射エネルギー・スペクトルに変換する。両シンチレータ間の飛行距離は 1 m にとっている。なお、両シンチレータは炉心より 8.5 m 離れた炉室外に設置され、その間を中性子ビーム引出し管で連結している。VI-2 炉心における測定中性子スペクトルが 200 keV ~ 6 MeV の範囲で得られている。測定技術の詳細については他の文献で述べられている⁽⁶⁾。

中性子スペクトルの計算に用いたセル計算モジュール SP-2000 は、衝突確率法により 1950 エネルギー群（レサジー幅 0.0085）の基本モード中性子スペクトルを計算するもので、AGRI-DOYC 計算モジュール・システムの中で使用される。計算は集合体中心領域の組成について、均質モデルを行った。ここで、測定中性子スペクトルは実験的な分解能をもっている。そのため比較に当って、計算スペクトルを実験の分解能を参考にして、9% の半値幅（FWHM）をもつガウス分布関数によら広げた。また、少数群による比較を行うため、SP-2000 の計算結果を 64 群（レサジー幅 0.255）および 26 群（レサジー幅 0.468）に縮約したスペクトルも算出した。

前述のごとく、反跳陽子計数管法による測定は未臨界体系で行っている。この場合、体系内のスペクトルは、Pu 燃料中に含まれている ²⁴⁰Pu 自発核分裂中性子源の影響を受けるので、測定中性子スペクトルは計算による基本モードスペクトルと多少、異っている擬いがある。このため、両スペクトルの相違を計算により見積った。未臨界体系のスペクトルは拡散解析コード CITATION⁽⁹⁾ を用いて二次元 R-Z 形状による 26 群の計算から求めた。Table 2 に炉心中心の未臨界スペクトルと基本モード計算スペクトルの比を示す。少数群における比較にさいして、測定中性子スペクトルにこの未臨界による差を補正している。

4. 結果と検討

4.1 測定スペクトルと詳細群計算の比較

反跳陽子計数管法により測定した集合体 VI-2, VI-1 および V-2 の炉心中心スペクトルと SP-2000 計算結果の比較を、それぞれ Fig. 3, 4 と 5 に示す。測定スペクトルは測定エネルギー範囲内にある単位レサジー当りの中性子束の積分値で計算スペクトルと規格化した。各スペクトルの測定誤差を Table 3 に示す。VI-2 測定で 5 keV 以下は γ 線波形弁別の低下と計数管の高ガス増幅度の使用により測定誤差はさらに大きくなる。測定の分解能は 5 keV ~ 2 MeV の範囲で 10 ~ 8% 半値幅（Full Width at Half Maximum）

Table 2 Ratios of subcritical spectrum to fundamental-mode spectrum

Group lower energy boundary (keV)	VI-2 $k_{\text{eff}}=0.94$	VI-1 $k_{\text{eff}}=0.95$	V-2 $k_{\text{eff}}=0.94$
2274	1.089	1.070	1.081
1762	1.070	1.046	1.057
1365	1.053	1.029	1.031
1058	1.042	1.013	1.017
819.9	1.035	1.002	1.005
635.3	1.026	0.996	0.993
492.3	1.024	0.992	0.989
381.5	1.020	0.991	0.984
295.6	1.015	0.987	0.980
229.1	1.014	0.985	0.979
177.5	1.010	0.984	0.978
137.6	1.006	0.984	0.978
106.6	1.001	0.983	0.976
82.7	0.995	0.983	0.978
64.0	0.990	0.983	0.979
49.6	0.985	0.985	0.983
38.4	0.981	0.986	0.984
29.8	0.976	0.988	0.986
23.1	0.966	0.990	0.994
17.9	0.957	0.994	0.996
13.9	0.948	0.995	1.000
10.7	0.939	0.998	1.004
8.32	0.932	1.000	1.007
6.45	0.926	1.000	1.010
5.00	0.923	1.000	1.010
3.87	0.919	1.000	1.010
3.00	0.917	1.000	1.010
2.33	0.914	1.000	1.010

Table 3 Errors in proton recoil counter measurements

Energy range (keV)	Percentage errors		
	VI-2	VI-1	V-2
1000 ~ 2000	± 4	± 4	± 5
200 ~ 1000	± 3	± 5	± 5
60 ~ 200	± 3	± 6	± 8
15 ~ 60	± 4		± 16
5 ~ 15	± 6		

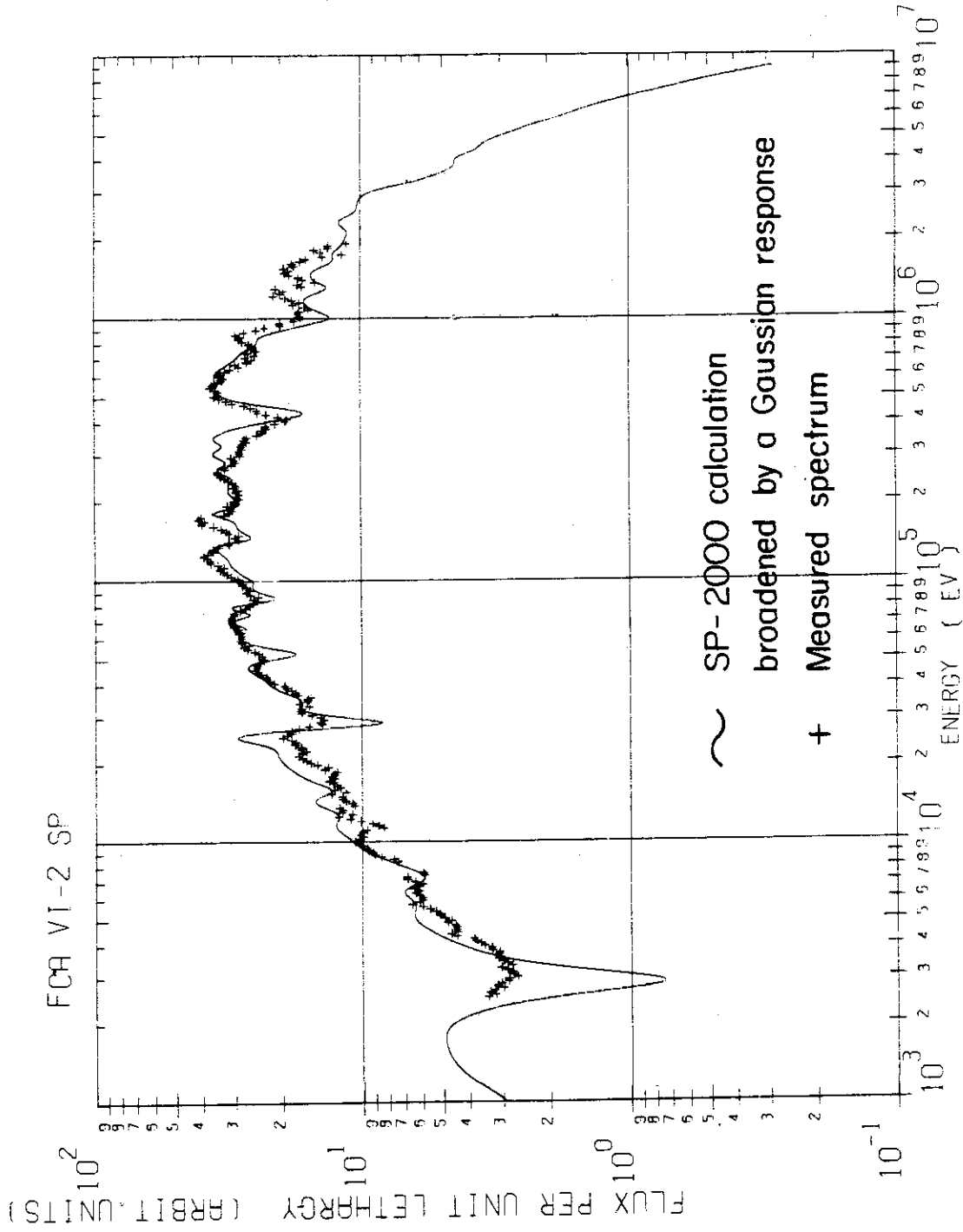


Fig.3 Measured neutron spectrum in FCA Assembly VI-2 by proton-recoil counter method compared with smoothed SP-2000 calculation

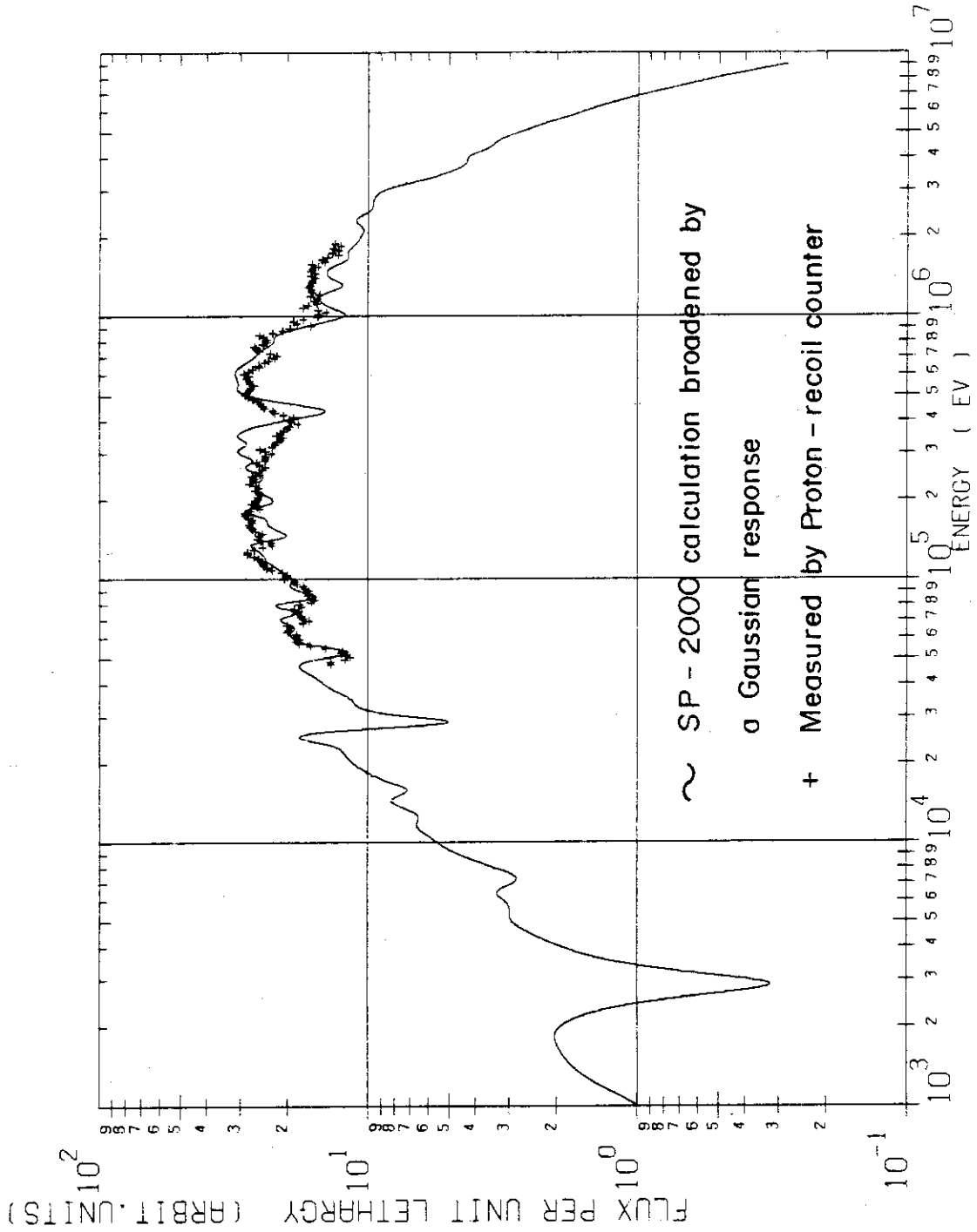


Fig.4 Measured neutron spectrum in FCA Assembly VI-1 by proton-recoil counter method compared with smoothed SP-2000 calculation

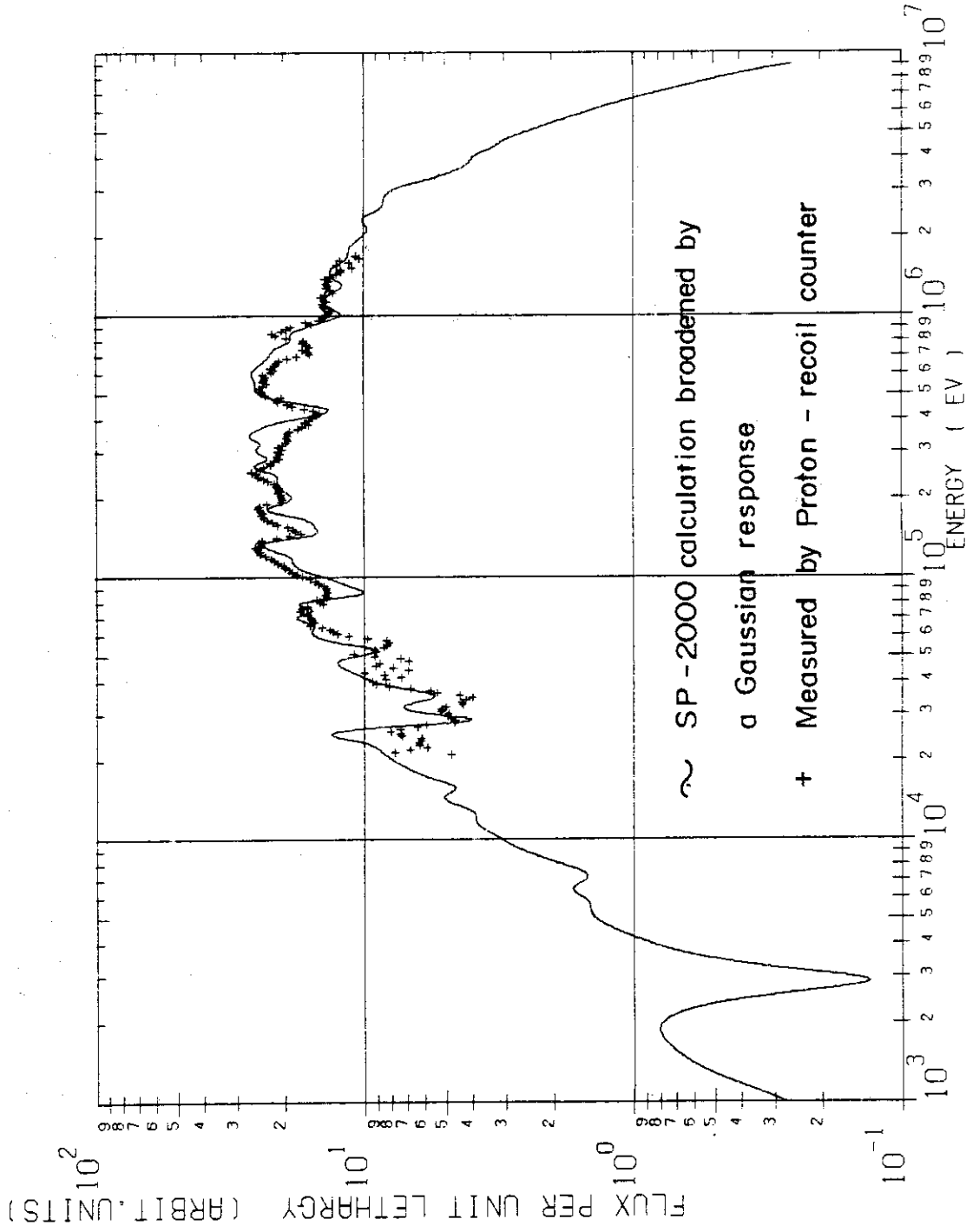


Fig.5 Measured neutron spectrum in FCA Assembly V-2 by proton-recoil counter method compared with smoothed SP-2000 calculation

である。5 keV以下では分解能は急速に低下し20%に達する。VI-2とV-2の測定については、測定に初期のスペクトル測定装置を用いているため、それぞれ50 keV以下、20 keV以下の低エネルギー領域で信頼すべき測定結果が得られていない^(注)。

VI-2炉心における比較では、5 keVから1 MeVの間で大きな二つの共鳴附近を除くと測定と計算スペクトルは良く一致していると言える。この比較範囲で特に目立つ不一致は、430 keVの酸素共鳴附近と29 keVの鉄共鳴附近の箇所である。5 keV以下の領域は測定誤差が増える領域であるが、特に、29 keVのナトリウム共鳴附近の測定と計算の一致はよくない。VI-1とV-2の測定については、VI-2の場合より炉心が小さくなるのでスペクトルは順次硬化している。両集合体における測定と計算スペクトル間に、やはり430 keVの酸素共鳴附近の系統的な不一致がある。これらの酸素および鉄の共鳴附近の形の差による測定スペクトルと計算スペクトルの不一致については先にも指摘した⁽⁵⁾。計算については、例えば酸素の共鳴パラメータがうまく取扱われているかどうかのチェックが必要であろう。測定に関しても検討の必要がある。鉄共鳴の附近についても同様である。三つの測定スペクトルを比べると、1 MeV以上の領域で幾分スペクトルに不確かさを含んでいるようである。

VI-2集合体において、ダブルシンチレータ法による中性子スペクトルの測定は200 keV～6 MeVのエネルギー範囲で適用されているが、エネルギースペクトル導出に使用するスペクトロメータ効率の低エネルギー側の測定精度から判断すると、このうち500 keV以上が信頼性の高いデータと考えられている⁽⁶⁾。それ故、ここでの比較には500 keV以上の測定データを使用した。測定エネルギー分解能は数百 keV領域で20数%に見積られており、エネルギーが高くなるにつれて次第に悪くなる。測定の統計誤差は、飛行時間スペクトルのシグナル計数の統計的なばらつきに大きく関連するが、高エネルギー領域ではシグナル計数が低くなるために測定の統計誤差も大きくなる。

ダブルシンチレータ法によるスペクトルを反跳陽子計数管法によるスペクトルと500 keVから1 MeVの範囲で中性子束の積分値により規格化した。ただしこの結合において、規格化の範囲にある両測定スペクトルの形が多少異なるために規格化範囲の取り方で両スペクトルに約6%の不確かさを生ずる。結合したスペクトルと計算スペクトルの比較をFig. 6に示す。1 MeV以上の領域で反跳陽子計数管法によるスペクトルがダブルシンチレータ法によるそれよりもかなり高く出ている。1 MeV以上のエネルギー領域では計算はむしろダブルシンチレータ法による測定結果とよく一致している。

その他500 keV以下の、ここでの比較外のダブルシンチレータ法のスペクトルに言及すると、スペクトルはエネルギーが低くなるに従って次第に反跳陽子計数管法による測定値(および計算値)から高い方にずれる傾向がある。この原因は前述のごとく、低エネルギー側におけるスペクトロメータの効率測定の精度の低下によるものである。参考のため、400 keV附近の反跳陽子計数管法、ダブルシンチレータ法および計算によるスペクトルをFig. 7に示す。二つの測定スペクトル間には、高さに関してかなりの差が見出されるが、しかし、エネルギー尺度は互に良く一致していることに注目すべきである。また、ダブルシンチレータ

注) V-2測定ではガンマ線波形弁別装置に、V-1測定ではファーストアンプ・クリッパーとファースト・ストレッチャーに問題があり、逐次新ユニットに交換している⁽⁵⁾。

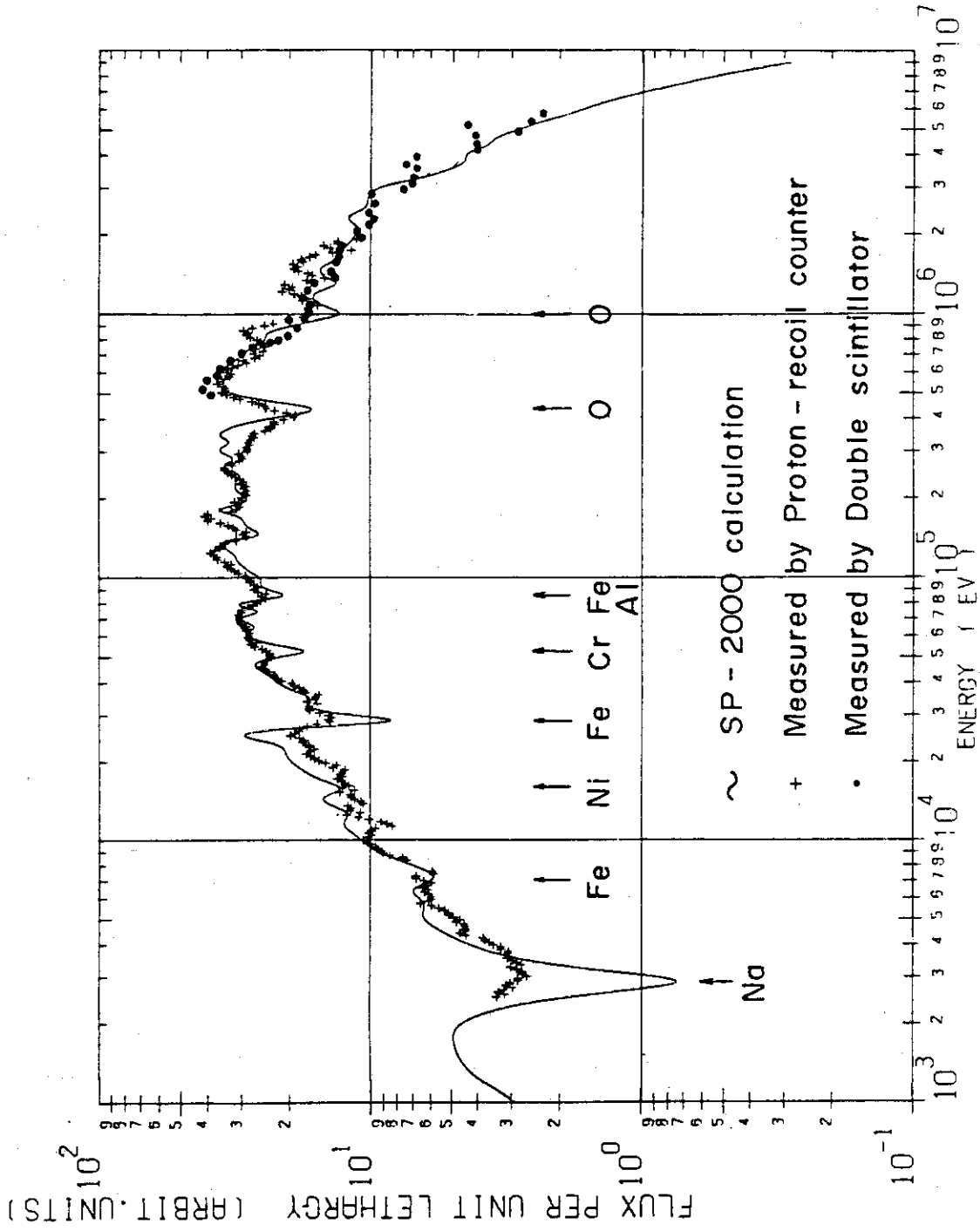


Fig. 6 Comparison of measured and calculated neutron spectra of FCA Assembly VI-2

法によるスペクトルの形は計算よりもむしろ反跳陽子法によるスペクトルの形に近いことに興味もてる。

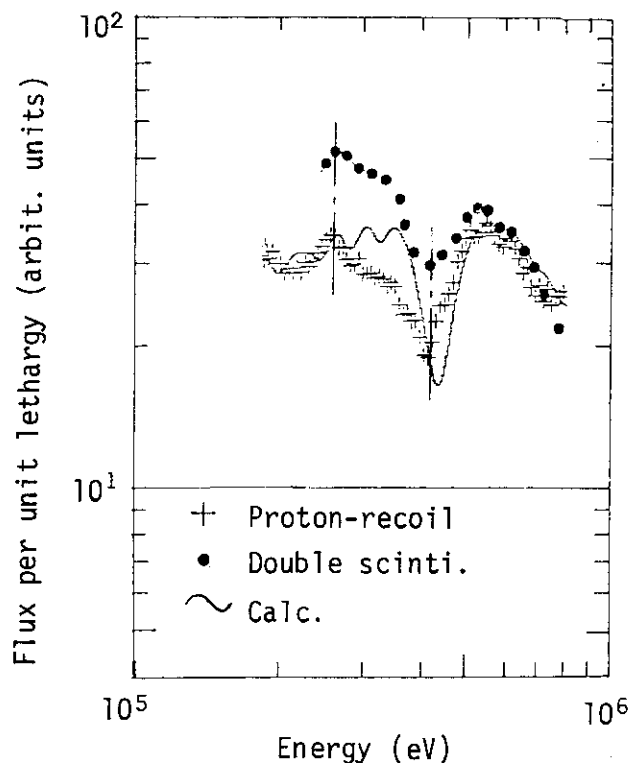


Fig.7 Spectra near 400 keV

4.2 少数群による比較とC/E

測定スペクトルと計算スペクトルの定量的な比較をするため、SP-2000による詳細群計算の結果を64群（レサジー幅0.255）と26群（レサジー幅0.468）に縮約した。測定スペクトルもこれらのレサジー幅に合せた中性子束の積分により群分けした。Table 4と5にVI-2集合体について0.255レサジー幅の計算スペクトルと測定スペクトルを、C/Eと共に、それぞれ反跳陽子計数管法とダブルシンチレータ法の場合について示す。反跳陽子計数管法とダブルシンチレータ法による測定スペクトルは、やはり500 keVから1 MeVの間で規格化しており両者は相互に結合されている。これらのTable中に示した0.255レサジー幅のC/EをFig. 8に図示する。C/E値の大きさが特に目立つ箇所（第14群および第24～26群）は先に指摘した430 keVの酸素共鳴附近と29 keVの鉄共鳴附近である。ダブルシンチレータ法の測定領域である1 MeV以上では目立った共鳴はないが、この領域でC/Eの大きな変化はない。VI-2集合体について、0.255レサジー幅のC/EをFig. 9に示す。各群間のC/Eの変化はVI-2の場合と似た傾向にある。他に、V-2集合体のC/Eについても同様の事が言える。VI-2集合体における0.462レサジー幅のC/EをFig. 10に示す。

Table 4 Experimental(Proton-recoil counter) and calculated neutron spectra in 0.255 lethargy width of FCA Assembly VI-2

Group No.	Lower energy boundary* (keV)	Calculated (SP-2000)	Experimental (Proton-recoil)	C/E
8	1365	3.62	4.09 ± 0.16	0.89 ± 0.04
9	1058	3.84	4.46 ± 0.18	0.86 ± 0.03
10	819.9	4.60	5.50 ± 0.17	0.84 ± 0.03
11	635.3	7.40	6.71 ± 0.20	1.10 ± 0.03
12	492.3	8.88	8.56 ± 0.26	1.04 ± 0.03
13	381.5	5.66	6.11 ± 0.18	0.93 ± 0.03
14	295.6	8.80	6.71 ± 0.20	1.31 ± 0.04
15	229.1	8.27	8.00 ± 0.24	1.03 ± 0.04
16	177.5	7.97	7.57 ± 0.23	1.05 ± 0.03
17	137.6	7.41	8.64 ± 0.26	0.86 ± 0.03
18	106.6	8.21	9.02 ± 0.27	0.91 ± 0.03
19	82.6	6.32	7.07 ± 0.21	0.89 ± 0.03
20	64.0	7.27	7.45 ± 0.22	0.98 ± 0.03
21	49.6	6.02	6.91 ± 0.28	0.87 ± 0.03
22	38.4	6.21	5.96 ± 0.24	1.04 ± 0.04
23	29.8	4.25	4.32 ± 0.17	0.98 ± 0.04
24	23.1	5.04	4.50 ± 0.18	1.12 ± 0.04
25	17.9	5.02	4.06 ± 0.16	1.24 ± 0.05
26	13.9	3.71	3.31 ± 0.20	1.12 ± 0.07
27	10.7	3.25	2.87 ± 0.17	1.13 ± 0.07
28	8.32	2.56	2.59 ± 0.16	0.99 ± 0.06
29	6.45	1.66	1.73 ± 0.10	0.96 ± 0.06
30	5.00	1.68	1.47 ± 0.09	1.14 ± 0.07
31	3.87	1.34	1.02 —	1.31 —
32	3.00	0.60	0.87 —	0.69 —

* 0.255 lethargy width corresponds to 64-group width

Table 5 Experimental(Double-scintillator) and calculated neutron spectra in 0.255 lethargy width of FCA Assembly VI-2

Group No.	Lower energy boundary* (keV)	Calculated (SP-2000)	Experimental Double scintillator	C/E
4	3786	1.00	1.16	0.87
5	2934	1.71	1.83	0.93
6	2274	2.77	2.44	1.14
7	1762	3.02	2.88	1.05
8	1365	3.62	3.46	1.05
9	1058	3.84	4.27	0.90
10	819.9	4.60	4.66	0.99
11	635.3	7.40	6.94	1.07

* 0.255 lethargy width corresponds to 64-group width

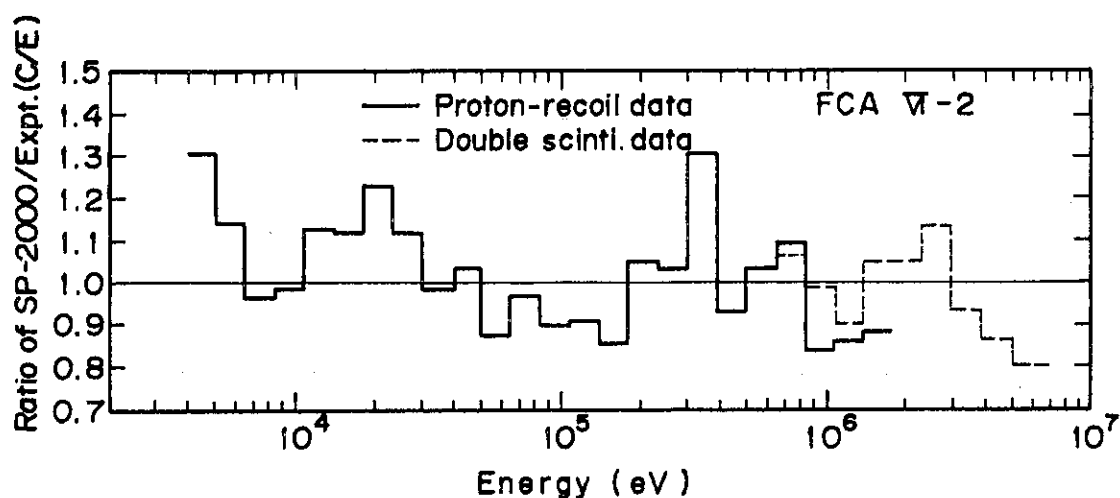


Fig.8 Ratios of calculated to experimental neutron spectra in 0.255 lethargy width (64 groups) at the core center of FCA Assembly VI-2

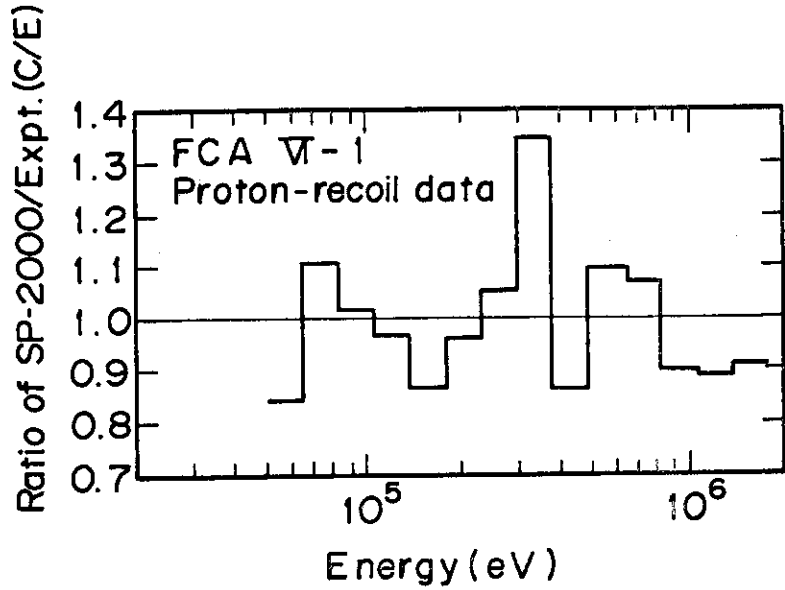


Fig.9 Ratio of calculated to experimental neutron spectrum in 0.255 lethargy width at the core center of FCA Assembly VI-1

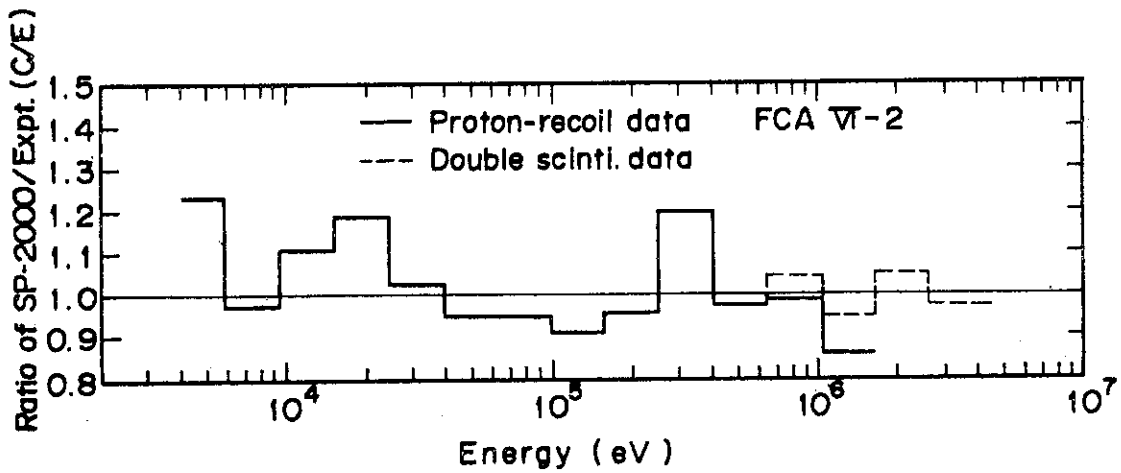


Fig.10 Ratios of calculated to experimental neutron spectra in 0.468 lethargy width (26 groups) at the core center of FCA Assembly VI-2

4.3 中心核分裂率比とSP-2000計算の比較

FCAの前述, 三つの集合体においては, 核燃料核種であるPu-239, U-235に対する炉心中心核分裂比 R^{29}/R^{25} と R^{28}/R^{25} が得られている。各々の核種の核分裂率 R^{29} , R^{25} および R^{28} は, それぞれの核種の電極塗布量が校正されているマイクロ核分裂計数管により測定された。ここで R^{29}/R^{25} と R^{28}/R^{25} なる量はそれぞれ低エネルギー中性子および高エネルギー中性子に対して感度がよく, 体系内の中性子スペクトルのずれの度合いを表示するスペクトル指数 (spectral index) として用いることが出来る。これらの核分裂率比の測定量をSP-2000AGRI/3をもとにした計算値と比較した。AGRI/3はAGRI/2のNaに関する核データを修正したもので, その他はAGRI/2と変わっていない。核分裂率比の計算はSP-2000-AGRI/3で求めたスペクトルを重み関数として作製した均質セル内実効26群定数を用いてDOYOシステムにより行った。

VI-2, VI-1およびV-2集合体における中心核分裂率比 R^{29}/R^{25} と R^{28}/R^{25} についての実験値と計算値を, C/Eと共にTable 6に示す。V-2, VI-1, VI-2と炉心容積が大きくなる従って R^{28}/R^{25} (スペクトルの硬成分) が減ってスペクトルが軟化する様子が分る。各集合体について, R^{29}/R^{25} は実験値と計算値が非常に良く一致している。 R^{28}/R^{25} は計算値が実験値よりも3~5%程高い。

Table 6 Experimental and calculated fission rate ratios

Assembly	Fission rate ratio	Experiment ^{a)} (E)	Calculation ^{b)} (C)	C/E
VI-2	R^{29}/R^{25}	$0.956 \pm 0.029^{\dagger}$	0.9493	0.993 ± 0.030
	R^{28}/R^{25}	$0.0219 \pm 0.0007^{\dagger}$	0.02301	1.051 ± 0.034
VI-1	R^{29}/R^{25}	$1.033 \pm 0.041^{\dagger}$	1.040	1.007 ± 0.040
	R^{28}/R^{25}	$0.0323 \pm 0.0013^{\dagger}$	0.03342	1.035 ± 0.042
V-2	R^{29}/R^{25}	$1.104 \pm 0.033^{\dagger\dagger}$	1.109	1.005 ± 0.030
	R^{28}/R^{25}	$0.0396 \pm 0.0012^{\dagger\dagger}$	0.04072	1.028 ± 0.031

a) Measured by fission chambers.

b) Calculated by AGLI/3-SP2000.

† Measured by N.Mizoo et al.

†† Measured by M.Obu et al.

5. ま と め

FCAVI-2, VI-1 および V-2 集合体において測定されている中性子スペクトルを相互に検討し, SP-2000-AGRI/2 による計算結果と比較した。反跳陽子計数管法による測定中性子スペクトルは 5 keV から 2 MeV の範囲で詳細群計算の結果を有効に説明できる測定精度を有している。一方, ダブルシンチレータ法による測定のスペクトルは 500 keV から 6 MeV の範囲で計算との比較に使用できる。ただ, 1 MeV 以上で両測定法によるスペクトル間に差が生じている点に検討の余地が残る。0.255 レサジー幅 (64 群幅) のスペクトルの比較については, C/E 値からみて, 測定スペクトルと計算スペクトル間にながりの部分で ±10% 以上の差がみられる。特に 430 keV の酸素共鳴附近および 29 keV の鉄共鳴附近のスペクトルの分布の違いによる大きな差が目立つ。

以上, 三つの集合体における測定と計算スペクトルの比較を行ったが, 測定の信頼性を高めるため, さらに多くの測定データが望まれる。また, C/E の改善に関して, より多くの比較例が必要である。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり御支援をいただいた高速炉物理研究室長黒井英雄氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 飯島 勉, 向山武彦, 溝尾宣長, 他: "FCAV-2 集合体の臨界量と特性試験", JAERI-M 7887 (1978)。
- 2) 引田実弥, 他: "FCAVI-1 集合体の臨界実験", 私信
- 3) 飯島 勉, 引田実弥, 溝尾宣長, 他: "FCAVI-2 集合体の臨界実験", JAERI-M 7888 (1979)
- 4) Obu, M, Shirakata, K, Ichimori, T.: "Proton-recoil Counter Technique for Measurement of Fast Neutron Spectrum", J. Nucl. Sci. Technol., 16[5], PP. 329~342 (1979)
- 5) 大部 誠: "反跳陽子計数管法による FCA 集合体の高速中性子スペクトルの測定", JAERI-M 8327 (1979)。
- 6) 白方敬章, 趙 満, 飯島 勉: "ダブルシンチレータ高速中性子スペクトロメータの開発", JAERI-M 6492 (1976)
- 7) Kuroi, H., Tone, T.: "SP-2000: Program for Calculating Fine Group

5. ま と め

FCAVI-2, VI-1 および V-2 集合体において測定されている中性子スペクトルを相互に検討し, SP-2000-AGRI/2 による計算結果と比較した。反跳陽子計数管法による測定中性子スペクトルは 5 keV から 2 MeV の範囲で詳細群計算の結果を有効に説明できる測定精度を有している。一方, ダブルシンチレータ法による測定のスペクトルは 500 keV から 6 MeV の範囲で計算との比較に使用できる。ただ, 1 MeV 以上で両測定法によるスペクトル間に差が生じている点に検討の余地が残る。0.255 レサジー幅 (64 群幅) のスペクトルの比較については, C/E 値からみて, 測定スペクトルと計算スペクトル間にかんがりの部分で ±10% 以上の差がみられる。特に 430 keV の酸素共鳴附近および 29 keV の鉄共鳴附近のスペクトルの分布の違いによる大きな差が目立つ。

以上, 三つの集合体における測定と計算スペクトルの比較を行ったが, 測定の信頼性を高めるため, さらに多くの測定データが望まれる。また, C/E の改善に関して, より多くの比較例が必要である。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり御支援をいただいた高速炉物理研究室長黒井英雄氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 飯島 勉, 向山武彦, 溝尾宣長, 他: "FCAV-2 集合体の臨界量と特性試験", JAERI-M 7887 (1978)。
- 2) 引田実弥, 他: "FCAVI-1 集合体の臨界実験", 私信。
- 3) 飯島 勉, 引田実弥, 溝尾宣長, 他: "FCAVI-2 集合体の臨界実験", JAERI-M 7888 (1979)。
- 4) Obu, M, Shirakata, K, Ichimori, T.: "Proton-recoil Counter Technique for Measurement of Fast Neutron Spectrum", J. Nucl. Sci. Technol., 16[5], PP. 329~342 (1979)。
- 5) 大部 誠: "反跳陽子計数管法による FCA 集合体の高速中性子スペクトルの測定", JAERI-M 8327 (1979)。
- 6) 白方敬章, 趙 満, 飯島 勉: "ダブルシンチレータ高速中性子スペクトロメータの開発", JAERI-M 6492 (1976)。
- 7) Kuroi, H., Tone, T.: "SP-2000: Program for Calculating Fine Group

5. ま と め

FCAVI-2, VI-1 および V-2 集合体において測定されている中性子スペクトルを相互に検討し, SP-2000-AGRI/2 による計算結果と比較した。反跳陽子計数管法による測定中性子スペクトルは 5 keV から 2 MeV の範囲で詳細群計算の結果を有効に説明できる測定精度を有している。一方, ダブルシンチレータ法による測定のスペクトルは 500 keV から 6 MeV の範囲で計算との比較に使用できる。ただ, 1 MeV 以上で両測定法によるスペクトル間に差が生じている点に検討の余地が残る。0.255 レサジー幅 (64 群幅) のスペクトルの比較については, C/E 値からみて, 測定スペクトルと計算スペクトル間にかんがりの部分で ±10% 以上の差がみられる。特に 430 keV の酸素共鳴附近および 29 keV の鉄共鳴附近のスペクトルの分布の違いによる大きな差が目立つ。

以上, 三つの集合体における測定と計算スペクトルの比較を行ったが, 測定の信頼性を高めるため, さらに多くの測定データが望まれる。また, C/E の改善に関して, より多くの比較例が必要である。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり御支援をいただいた高速炉物理研究室長黒井英雄氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 飯島 勉, 向山武彦, 溝尾宣長, 他: "FCAV-2 集合体の臨界量と特性試験", JAERI-M 7887 (1978)。
- 2) 引田実弥, 他: "FCAVI-1 集合体の臨界実験", 私信。
- 3) 飯島 勉, 引田実弥, 溝尾宣長, 他: "FCAVI-2 集合体の臨界実験", JAERI-M 7888 (1979)。
- 4) Obu, M, Shirakata, K, Ichimori, T.: "Proton-recoil Counter Technique for Measurement of Fast Neutron Spectrum", J. Nucl. Sci. Technol., 16[5], PP. 329~342 (1979)。
- 5) 大部 誠: "反跳陽子計数管法による FCA 集合体の高速中性子スペクトルの測定", JAERI-M 8327 (1979)。
- 6) 白方敬章, 趙 満, 飯島 勉: "ダブルシンチレータ高速中性子スペクトロメータの開発", JAERI-M 6492 (1976)。
- 7) Kuroi, H., Tone, T.: "SP-2000: Program for Calculating Fine Group

Neutron Spectrum in Multi-region Cell and Effective Broad Group Constants, JAERI-1240 (1970).

- 8) Kuroi, H., Mitani, H., Koyama, K., et al. : "Adjusted Cross Section Library AGLI and Reliability of Analysis of Integral Data", Intern. Symp. on Phys. of Fast Reactors, vol. 3, A33, PP. 1188~1206, Tokyo (1973).
- 9) Fowler, T. B., Vondy, D. R., Cunningham, G. W. : "Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION", ORNL-TM-2496, Rev. 2 (1969)