

# ミハルゾ法による未臨界度測定(Ⅱ)

1997年10月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Nareta-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団

(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1996

## ミハルゾ法による未臨界度測定 (II)

羽様 平<sup>\*)</sup>

### 要旨

ミハルゾ法による未臨界度測定において、カリフォルニウム (Cf) 線源検出器の線源強度、及び、測定体系に設置される Cf 線源検出器と中性子検出器の配置が、測定結果に与える影響を実験的に評価した。

Cf 線源検出器を設置しない場合に体系中で発生する中性子 (バックグラウンド) が、Cf 中性子源の強度に対して無視できるレベルであれば、Cf 線源の強度を変えても測定値及びその統計誤差には影響が現れず、線源強度を強くしても、測定結果の改善にはつながらない事が確認された。

一方、中性子バックグラウンドのレベルが高くなると、レベルに応じて直接の測定値であるスペクトル比が小さくなり、正しい未臨界度 (実効増倍率) を得るには、バックグラウンドのレベルを基にした補正が必要となる。測定値の統計誤差は、バックグラウンドの寄与が 90% まで増大すると、2 倍になることが確認された。

ミハルゾ法による未臨界度測定の検出器配置に対する依存性を、検出器の視野を用いて補正する手法を検討した。補正によって、検出器配置に依存しない一定の測定評価値が得られることが確認された。

---

<sup>\*)</sup> 大洗工学センター実験炉部臨界工学試験室

## Subcriticality Measurement by Mihalczo Method (II)

Taira HAZAMA<sup>\*)</sup>

### Abstract

Subcriticality measurement by Mihalczo method was investigated varying Cf source intensity and neutron background level.

It is found that Cf source intensity must be chosen carefully when neutron background level is too high to be ignored compared to Cf source intensity.

Under current measurement accuracy, the statistic error becomes double when the ratio of neutron background occupies 90% of all neutron sources in the system.

On the other hand, under low neutron background level, Cf source intensity does not have any effect on the accuracy and error of measured keffs.

Also investigated was the detector position dependence of measured keffs. The detector fields of view for locally positioned detector was utilized to correct the dependence. When corrected, the measured keffs showed little dependence on detector position, which verified the validity of the correction method.

---

<sup>\*)</sup> Criticality Engineering Section, Experimental Reactor Division, O-arai Engineering Center, PNC

## 目次

1.はじめに .....	1
2.ミハルゾ法 .....	3
2.1 ミハルゾ法の概要 .....	3
2.2 測定機器 .....	4
3.データ解析手法 .....	6
3.1 SRの実効増倍率への換算 .....	6
3.2 データ解析手法の改善 .....	7
3.2.1 FFTプログラム .....	7
3.2.2 FFTプログラムの検証 .....	9
3.2.3 測定時間の検討 .....	12
4.Cf線源強度の影響 .....	17
4.1 強度30MBqのCf線源検出器 .....	17
4.1.1 電流モードによるCf線源検出器出力の測定 .....	18
4.2 スペクトル比の測定モード依存性 .....	19
4.2.1 理論上の相違点 .....	19
4.2.2 実験による測定モードの影響評価 .....	20
4.3 線源強度の影響評価 .....	22
4.3.1 実効増倍率が異なる体系における評価 .....	22
4.3.2 実験結果 .....	24
4.3.3 中性子バックグラウンドが異なる体系における評価 .....	26
5.検出器配置の影響 .....	34
5.1 検出器配置による測定結果のばらつき .....	34
5.2 検出器の視野を用いた補正 .....	37
5.2.1 理論式 .....	37
5.2.2 拡散計算コードによる補正値の計算 .....	38
5.2.3 実験データへの適用 .....	41
5.2.4 2本の検出器によるミハルゾ法測定の検討 .....	45
6.まとめ .....	47
7.謝辞 .....	49
8.参考文献 .....	50
APPENDIX .....	24

## 図表目次

表3-1	FFTプログラムとFFT装置の解析結果の比較	10
表4-1	測定時の中性子検出器の計算率	24
表4-2	Am-Be中性子源挿入前後の中性子検出器の計算率	29
表4-3	補正前後のスペクトル比 (Am-Be中性子源使用体系)	29
表4-4	Cf線源取り出し前後の中性子検出器の計数率	32
表4-5	補正前後のスペクトル比 (Pu燃料体系)	32
表5-1	ミハルゾ法測定結果の検出器配置依存性	36
表5-2	ミハルゾ法測定結果の検出器配置依存性 (配置(B)を補正)	41
図2-1	測定システム構成図	5
図2-2	Cf線源検出器	5
図3-1	FFTプログラム処理の流れ	8
図3-2	FFTプログラムによる模擬信号の解析結果	9
図3-3	Cf線源検出器出力の自己パワースペクトル密度についての比較	11
図3-4	中性子検出器出力の自己パワースペクトル密度についての比較	11
図3-5	測定時間の検討における測定時の検出器配置	12
図3-6	2時間測定時のコヒーレンス $\gamma_{12}$ の測定結果	14
図3-7	2時間測定時のコヒーレンス $\gamma_{23}$ の測定結果	14
図3-8	2時間測定時のスペクトル比の測定結果	15
図3-9	スペクトル比測定結果の測定時間依存性	15
図3-10	コヒーレンス測定結果の測定時間依存性	16
図4-1	測定モードの影響(APSDについての比較)	18
図4-2	測定モードの影響(スペクトル比についての比較)	21
図4-3	S-2炉心における検出器配置	23
図4-4	S-1炉心における検出器配置	23
図4-5	S-2炉心( $k_{eff}=0.8$ )におけるCf線源強度の影響	25
図4-6	S-1炉心( $k_{eff}=0.7$ )におけるCf線源強度の影響	25
図4-7	中性子源挿入位置と検出器配置	28
図4-8	Am-Be中性子源挿入前後の測定結果	30
図4-9	Am-Be中性子源挿入前後の測定結果 (バックグラウンド補正後)	30
図4-10	S4-4炉心における検出器配置	31
図4-11	S4-4炉心における測定結果	33
図4-12	S4-4炉心における測定結果 (バックグラウンド補正後)	33
図5-1	S4-1炉心における検出器配置	35
図5-2	ミハルゾ法測定結果の検出器配置依存性	36
図5-3	検出器の視野の空間分布	40

図5-4	検出器配置補正後の測定結果	41
図5-5	検出器配置補正後の測定結果( $k_{eff}=0.98$ )	42
図5-6	検出器配置補正後の測定結果( $k_{eff}=0.95$ )	42
図5-7	検出器配置補正後の測定結果( $k_{eff}=0.92$ )	43
図5-8	検出器配置補正後の測定結果( $k_{eff}=0.90$ )	43
図5-9	検出器配置補正後の測定結果( $k_{eff}=0.87$ )	44

## 1. はじめに

臨界工学試験室では、核燃料施設の臨界安全管理の高度化に資することを目的として、重水臨界実験装置(DCA)を用いて未臨界度モニターの開発を行っている。未臨界度モニターは核燃料を取り扱う体系の未臨界度（臨界までどのくらい離れているかを表す指標）を監視する装置であり、施設の運転状態を把握することによる安全性の向上や、臨界に対する安全裕度の低減による臨界安全管理の合理化を可能にするための手段として有効である。

未臨界度モニターに適用する未臨界度測定法としては、ミハルゾ法、ファインマン- $\alpha$ 法、パルス中性子源法等があり、当室ではモニターに適しているミハルゾ法とファインマン- $\alpha$ 法を検討している。中でもミハルゾ法は、他の測定手法と異なり、臨界近傍での較正を必要とせず未臨界度の絶対値が測定できるという特徴があり、臨界にすることのできない再処理施設等の核燃料体系の未臨界度測定に適している。

DCAにおけるミハルゾ法の実験は、ミハルゾ法に必須の Cf 線源検出器（強度 3.7MBq）が完成した平成6年8月から実施されている。当初の実験では、測定対象として、1.2%濃縮クラスター型燃料と減速材の重水で構成される炉心（新型転換炉（ATR）型炉心）を使用し、重水水位の変化による実効増倍率の変化に対して、ミハルゾ法の直接の測定値であるスペクトル比が有意な変化を示すことを確認した。しかしながら、スペクトル比から1点炉近似に基づく理論で評価した実効増倍率の測定値は誤差が大きく、計算値との一致を見ることはできなかった。

これは、測定体系が低濃縮ウランの重水減速体系であった為、体系が大きく、局所的に置かれた検出器では体系内の核分裂の情報を十分に取込めないという検出効率の問題や、測定体系の大きさに対して Cf 線源検出器の強度が十分でなかった事等の結果であった。又、測定結果のばらつきを極力小さくするために、検出器配置が局所的に偏り、一点炉近似が不適切であったことも一因として考えられる。

臨界工学試験室では、未臨界度測定研究に用いる事を目的として、DCA の炉心の中央に試験体領域を設ける改造を実施した。試験体領域には、低濃縮ウランや Pu 富化度の高い高速炉用の燃料棒で構成される未臨界試験体を装荷し、減速材として軽水、重水及びそれらの混合液が使用可能である。試験体の周囲（ドライバー領域）は、従来の ATR 型炉心と同様、クラスター型燃料と重水で構成される。

試験体はドライバー領域に比べて燃料が密に配置できるため、ドライバー領域だけの前回の測定体系よりはコンパクトな体系となった。もっとも、試験体領域だけでは実効増倍率の最大値が 0.8 程度であり、実効増倍率 0.8 以上の体系とするには、ドライバー領域に重水を給水する必要がある。その結果、高い実効増倍率の測定を実施する場合には体系が大きくなる。

本報告では、2.7%の濃縮ウラン燃料棒あるいは 0.79%富化度プルトニウム燃料棒と、減速材として軽水を使用した試験体で、又は試験体に 1.2%濃縮ウランのクラスター型燃料 44 体と重水を使用したドライバー領域を加えて構成される 2 領域炉心においてミハルゾ法による未臨界度測定実験を行い、Cf 線源検出器の線源強度の影響と、体系中の検出器配置の影響を評価する。



従来、DCA におけるデータ解析（時系列データの周波数解析）は、市販の FFT 解析装置 3 台で行っていた。ミハルゾ法では 3 組のパワースペクトル密度（PSD）が必要であるが、装置の制限から、従来の測定解析系では 1 つの検出器配置しか解析できず、検出器配置ごとにデータを取り直す必要があった。今回、実験を効率的に行うために FFT プログラムを新たに作成し、ワークステーションでデータ処理計算を実行する手法に変更した。

ミハルゾ法では、内部に Cf 線源を装填した Cf 線源検出器が必要である。Cf 線源検出器中の Cf-252 の線源強度がミハルゾ法の測定に与える影響を調べるために、既存の強度 3.9MBq の Cf-252 を内蔵した線源検出器に加えて、新たに 30MBq の Cf-252 を内蔵した線源検出器を製作した。中性子バックグラウンドの低い低濃縮ウランの体系と、中性子バックグラウンドの高い低富化度 Pu 燃料の体系において、線源強度がミハルゾ法の測定に与える影響を評価する。

ミハルゾ法においては、基本的な測定理論が 1 点炉近似に基づいている為、測定結果（測定された炉雑音データを統計処理して得られる実効増倍率の評価値）が検出器配置に依存するという問題がある。検出器配置依存性を定量的に評価する手法の一つとして、中性子の検出器に対するインポートランスを用いる手法が提案されている。ここでは、DCA における実験体系についてインポートランスを計算で求め、測定データに適用することによって、本手法が有効であることを実験的に確認する。

## 2. ミハルゾ法

### 2.1 ミハルゾ法の概要

ミハルゾ法（日本における通称であり、海外では“Cf-252 SOURCE DRIVEN NOISE ANALYSIS METHOD”と称されている）は、1972年に米国の OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY の J.T.Mihalczko 氏らによって提唱された未臨界度測定手法であり<sup>[1][2][3]</sup>、ファインマン- $\alpha$ 法、ロッシ- $\alpha$ 法などと同様に、中性子計数率の揺らぎの相関を解析することによって実効増倍率を算定する炉雑音解析手法である。ミハルゾ法が他の炉雑音解析手法と決定的に異なる点は、Cf 線源検出器と称する Cf-252 を内蔵した電離箱（電離箱の外に中性子を放出するとともに中性子発生信号として自発核分裂片を検出し、中性子放出のタイミングが把握できる中性子源）を使用することで実効増倍率の絶対値の測定を可能とした点であり、体系を臨界にする事のできない再処理施設などの核燃料取扱施設に対する未臨界度測定手法として適している。

ミハルゾ法では、検出器として Cf 線源検出器の他に He-3 カウンターなどの中性子検出器を2本使用し、それぞれの出力信号を周波数解析し、検出器信号間の相関量（パワースペクトル密度）より式(2-1)

$$SR = \frac{G_{12} G_{13}^*}{G_{11} G_{23}} \quad (2-1)$$

ここで、 $G_{ij}$  : 検出器  $ij$  間のパワースペクトル密度（\*は複素共役を表す）、

に従って、スペクトル比（SPECTRAL RATIO (SR)）を求める。SR は中性子源(Cf-252)の核分裂数と中性子源による誘導核分裂数の比にほぼ相当し、SR より式(2-2)

$$keff = 1 - \frac{C_1 \cdot SR}{\epsilon_c + (C_1 - C_2) \cdot SR} \quad (2-2)$$

ここで、 $\epsilon_c$  : Cf線源検出器の効率（測定量）

$C_1$  : 即発中性子放出数等の核的パラメータと空間補正因子に関する量

$C_2$  : Cf-252 の中性子放出数等に関する量、

に従って実効増倍率を算出する。式(2-2)中の  $C_1$  は、空間補正因子（体系内の核分裂の空間分布や Cf 線源検出器の配置を考慮する因子）の関数であり、測定体系に依存する。

## 2.2 測定機器

ミハルソ法で使用する測定機器の概要を以下に、システム構成を図 2-1 に示す。

### (1) 検出器

Cf 線源検出器：Cf-252 を内蔵した電離箱（図 2-2）。測定体系に中性子を供給すると同時に中性子発生タイミングを出力する。DCAでは、3.7MBq（平成 6 年 8 月現在値）と 30MBq（平成 8 年 5 月現在値）の強度のものを保有している。

Cf 線源は ORNL 製である。

2" φ He-3 中性子検出器：直径約 5cm, 有効長 50cm の He-3 比例計数管

### (2) 検出器周辺機器

前置増幅器：検出器からの信号を増幅、整形し、主増幅器に送る。検出器の近くに設置する。

高圧電源：前置増幅器を通して検出器に高圧を供給する。

主増幅器：前置増幅器からの信号を利用できるレベルまで増幅する。

SCA (SINGLE CHANNEL ANALYZER)：主増幅器からのパルス信号からパルス波高弁別により有効信号を取り出す。

電流増幅器：検出器出力信号を電流モードで処理する場合に使用する。最大  $10^{10}$  のゲインが得られる。(ケースレー製 428 CURRENT AMPLIFIER)

### (3) 周波数解析機器

PTF(PULSE TO FREQUENCY CONVERTER)：

検出システムからのパルス時系列信号を減衰回路により、アナログ波形に変換する。

(岩通製 SY-911)

LPF(LOW PASS FILTER)：

周波数解析におけるエイリアシングを防止するために不要な高周波数成分を除去する。

(MF 電子機器製 P-86)

FFT(FAST FOURIER TRANSFORM)：

アナログ波信号を周波数解析し、パワースペクトル密度を算出する。

(岩通製 SM-2100C)

### (4) その他

DEGITAL AUDIO TAPE RECORDER(DAT)：

実験データを記録し、実験後にデータの再現をするための装置として使用する。

(SONY 製 PC208A)

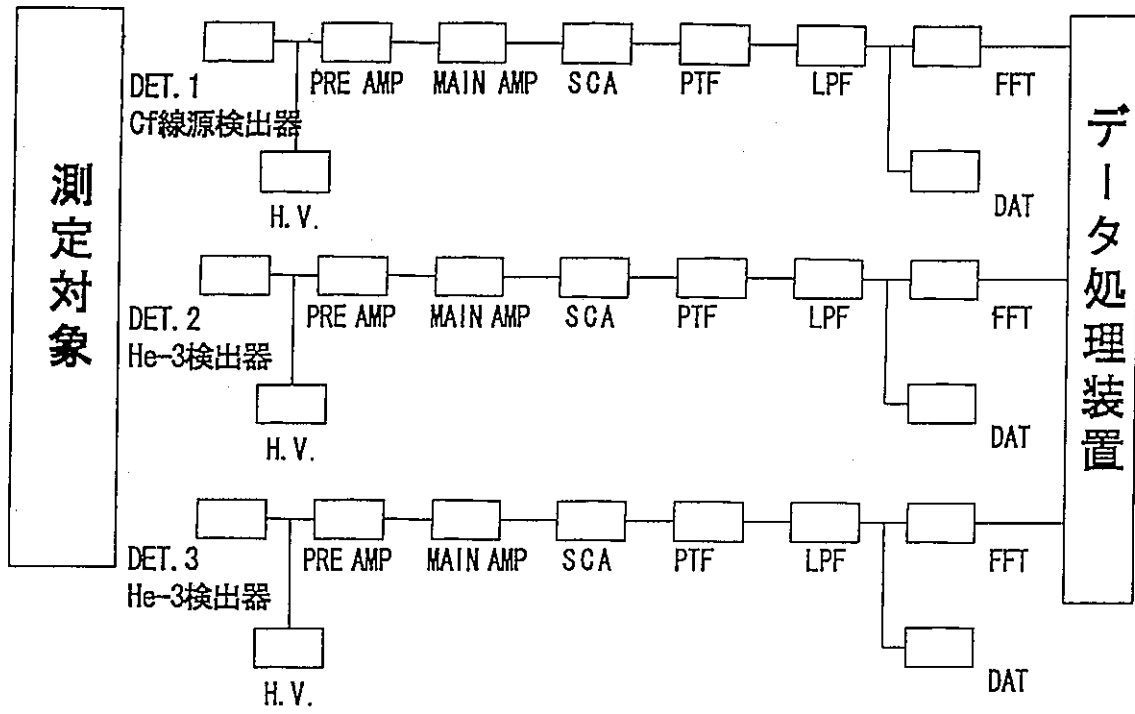


図2-1 測定システム構成図

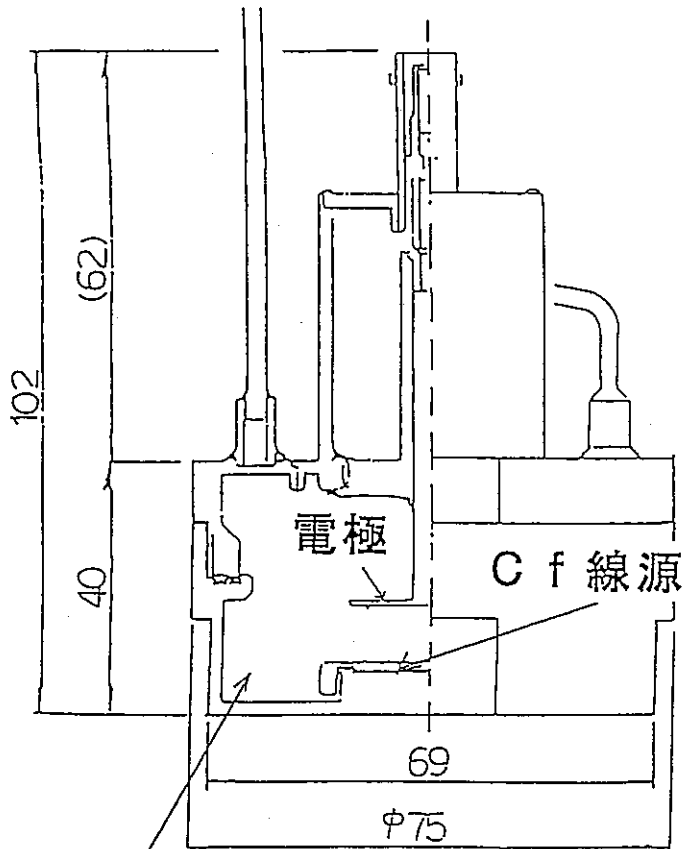


図2-2 Cf線源検出器

電離ガス 単位：mm

### 3. データ解析手法

#### 3.1 SRの実効増倍率への換算

ミハルソ法では次式 (3-1) により、直接の測定量スペクトル比(SR)を実効増倍率に換算する。

$$k_{eff} = 1 - \frac{C_1 \cdot SR}{\varepsilon_c + (C_1 - C_2) \cdot SR} \quad (3-1)$$

係数  $C_1$ 、 $C_2$  は炉雑音の理論と 1 点炉動特性近似に基づき (式 3-2) , (式 3-3) で表される。

$$C_1 = X_c \cdot R_c + \frac{(1 - \beta_i)^2}{(1 - \beta_c)^2} \cdot \left( \frac{\bar{\nu}_i}{\nu_c} \right) \cdot \left( \frac{\bar{I}_i}{I_c} \right) \cdot X_i \cdot R_i \cdot (Y - 1) \quad (3-2)$$

$$C_2 = \frac{(1 - \beta)^2}{(1 - \beta_c)^2} \cdot \left( \frac{\bar{\nu}}{\nu_c} \right) \cdot \left( \frac{\bar{I}}{I_c} \right) \cdot X \cdot R \cdot Y \quad (3-3)$$

ここで、

$\beta$  : 遅発中性子割合

$\nu$  : 核分裂 1 回あたりの中性子放出数

$I$  : 中性子インポートランス

$X$  : DIVEN 因子

$R$  : 空間補正因子 (中性子インポートランス ( $I$ ) と核分裂率分布の関数)

$$R = \frac{\bar{I}^2}{I^2} \quad (3-4)$$

$Y$  : 体系内に存在する自発核分裂中性子の寄与に対する補正量

であり、添え字のない記号は体系内誘導核分裂に関する量、添え字  $c$  が Cf-252 に関する量、添え字  $i$  が体系内に存在する自発核分裂物質に関する量であることを表す。上部の  $\bar{\nu}$  は、 $\nu$  については時間平均を、 $I$  については核分裂率中性子の空間及びエネルギー分布を重みとした平均を表す。

これらのパラメータのうち、 $\beta$ 、 $\nu$ 、 $X$  は燃料の種類で決まる値であり、 $Y$  は、中性子バックグラウンドの小さい体系では近似的に 1 となる。

本報告において、中性子インポートランス  $I$  及び核分裂率 (空間補正因子  $R$  の算出に使用) は、測定体系ごとに計算で求めた。SCALE4.2 コードシステムを用いて 27 群マクロ断面積を求め、2 次元輸送計算コード TWODANT の R-Z 体系 (エネルギー 27 群、 $P_n$  次数=3、 $S_n$  次数=8) で計算した。

換算式 (式 3-1) 中の  $\varepsilon_c$  は Cf 線源検出器の検出効率である。この値は非増倍系でのスペクトル比の測定により、0.8 と得られている。

### 3.2 データ解析手法の改善

従来、DCA における周波数解析は、市販の FFT 解析装置 (sm2100 岩通製) 3 台で行っていた。この解析装置ではメモリが最大 4kByte に制約されており、十分な周波数点が確保できないことや、解析中はデータを読み込めないため、装置が解析計算を行っている時間 (ほぼデータ読み込み時間に相当する) のデータが利用できない等の問題があった。また、ミハルゾ法では 3 組の組み合わせについての PSD が必要であるので、従来の装置では 1 回の測定で 1 つの検出器配置しか解析できず、検出器配置を変更するたびにデータを取り直す必要があった。

効率的に実験を行うために DATA RECORDER の出力ファイル进行处理する FFT プログラムを新たに作成し、ワークステーションで実行するように変更した。作成した FFT プログラムは模擬信号や実信号を用いて検証し、性能に問題がないことを確認した。以下に FFT プログラムの概要と検証結果を示す。また、必要な精度の評価値を得るために必要な測定時間についても検討を行った。

#### 3.2.1 FFT プログラム

DATA RECORDER (SONY 製) から出力される時系列データを処理する FFT プログラムを作成した<sup>4)</sup>。複数の検出器信号をフーリエ変換し、すべての検出器の組み合わせについてパワースペクトル密度を求める機能を備えている。

##### 機能

DAT の出力をフーリエ変換し、パワースペクトル密度を求める。

##### 仕様

プログラム言語 : C 言語

FFT の方式 : 2 実数信号同時解析

FFT 処理の際にデータに適用する WINDOW : hanning

入力ファイル : DAT の出力ファイル 1 組 (拡張子 \*.LOG, \*.BIN)

入力パラメータ : 入力ファイル名、解析時間幅、総解析時間、生データ平均回数、  
検出器数及び番号

出力ファイル : 各検出器の組み合わせについてのパワースペクトル密度

処理時間 : 1.3sec (検出器 1 組、解析結果の平均回数 1 回、DAT の SAMPLING 周波数 24000Hz  
で 1.37sec 分のデータを SUN work station (solaris 2.1) で解析したとき)

その他 : DAT の出力ファイルはハードディスク上に保存されるが、120 分のデータ (テープ 1 本分) に対して約 1.2Gbyte のディスク容量を必要とする。現状ではディスク容量に制限があるため 120 分の解析結果を得る際には、30 分ずつのデータを解析し、結果を平均した。

プログラム処理の流れを図 3-1 に示す。

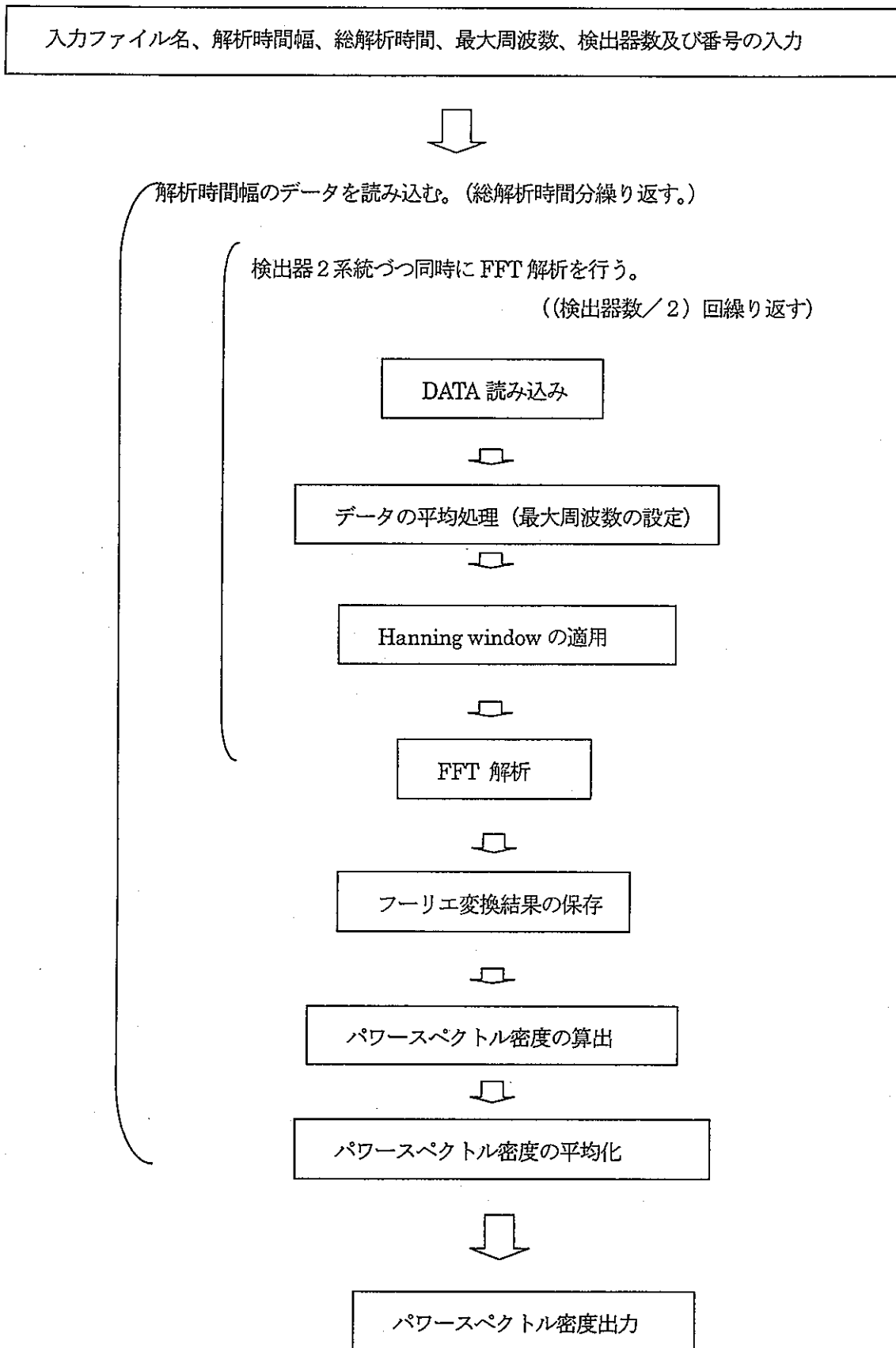


図3-1 FFTプログラム処理の流れ

### 3.2.2 FFT プログラムの検証

#### 3.2.2.1 模擬信号を用いた FFT プログラムの検証

FFT プログラムの検証のために、(式 3-5)で表される複合サイン波（模擬信号）の自己パワースペクトル密度（APSD）を計算した。計算結果を図 3-2 に示す。

$$f(x) = \sin\left\{2\pi\left(\frac{x}{16} + 1.0\right)\right\} + 5\sin\left\{2\pi\left(\frac{x}{64} + 2.0\right)\right\} + 2\sin\left\{2\pi\left(\frac{x}{256} + 3.0\right)\right\} \quad (3-5)$$

ただし、 $x=0,1,\dots,1024$

このデータ列では、例えば、第 1 項中の  $x$  に関する項の分母は 16 であり、1024 個のデータ中には 64 周期分の波形が含まれることになる。1024 個のデータが 1 秒間に相当するとすると、64Hz のサイン波となる。同様に、第 2 項、第 3 項は 16Hz、4Hz のサイン波となり、信号全体としては 64Hz、16Hz、4Hz のサイン波の合成信号と見なすことができる。

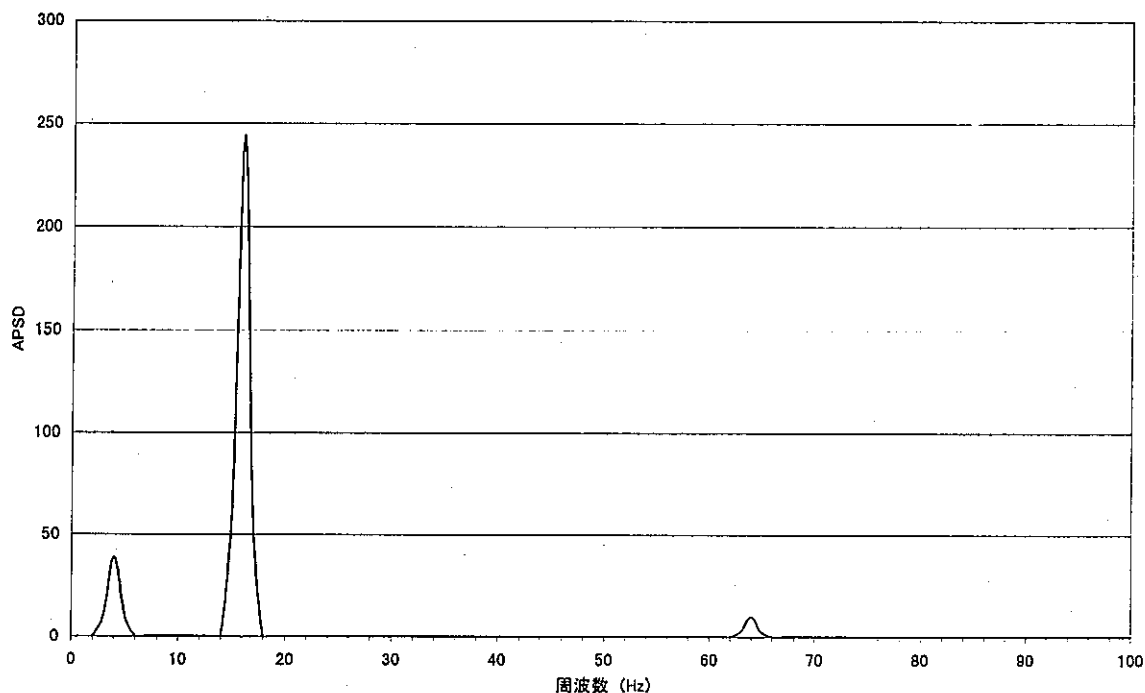


図3-2 FFTプログラムによる模擬信号の解析結果

各周波数点のピーク値はそれぞれ、9.776(64Hz)、244.141(16Hz)、39.062(4Hz)で、1:25:4 の比となっており、模擬信号中の成分比 1:5:2 の 2 乗である。APSD のゲインは周波数成分の 2 乗であるので、信号中のゲイン比が FFT プログラムで正確に解析されており、プログラムが正常に動作することが確認できた。



## 3.2.2.2 専用解析装置との比較による FFT プログラムの検証

実験データを使用した FFT プログラムの検証として、従来使用していた FFT 装置(SM-2100C 岩崎通信製)を用いて同一の実験データを解析し、今回作成した FFT プログラムを用いた解析結果と比較した。

比較に使用したデータ

S4-1 炉心のドライバー重水水位 60cm, 試験体減速材水位 200cm の体系( $k_{eff}=0.90$ )

表 3-1、図 3-3 及び図 3-4 に Cf 線源検出器と中性子検出器それぞれについての自己パワースペクトル密度の解析結果を示す。表 3-1 は図 3-3、図 3-4 において定常値を示す周波数領域 (10Hz~60Hz) のデータを平均した結果である。両者の解析結果は誤差の範囲で一致しており、作成した FFT プログラムが正常に動作することが確認できた。

表3-1 FFTプログラムとFFT装置の解析結果の比較 (10Hz~60Hzの平均値)

解析手段	FFT プログラム	専用 FFT 装置
APSD (Cf線源検出器)	57.40±1.71	57.20±1.78
APSD (中性子検出器)	165.73±4.2	167.75±3.8

汎用プログラムによる周波数解析では専用装置を使用する場合に比べて、

- メモリの制約が小さいため解析周波数点を多く取ることができ、平均値の信頼性が向上する。
- ワークステーションの CPU を使用するため計算速度が速い。
- プログラムを 1 回実行することによって、すべての検出器配置を解析できる。

等の改善が図られ、解析結果の向上と解析時間の大幅な短縮が可能となった。

また、ワークステーションのマルチタスク機能を利用して、読み込みと解析を交互に並行して行えるようにプログラムを改良すれば、データを無駄にせずリアルタイムで解析を行うことが可能であり、オンラインモニターにも適用できる。

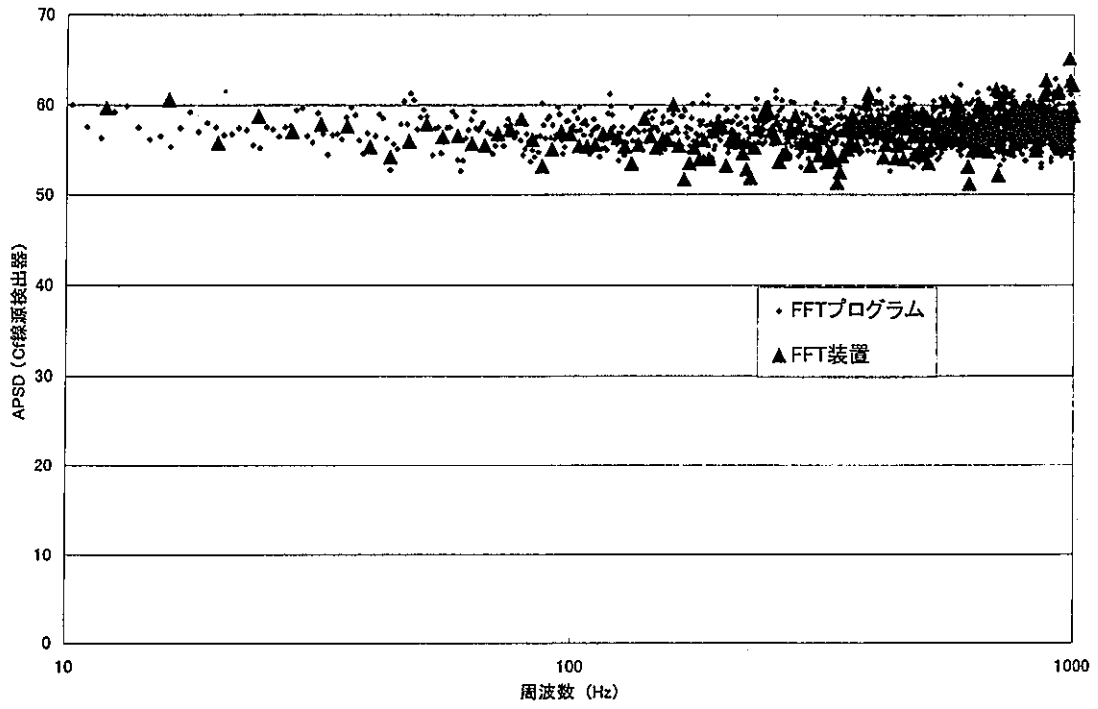


図3-3 Cf線源検出器出力の自己パワースペクトル密度についての比較

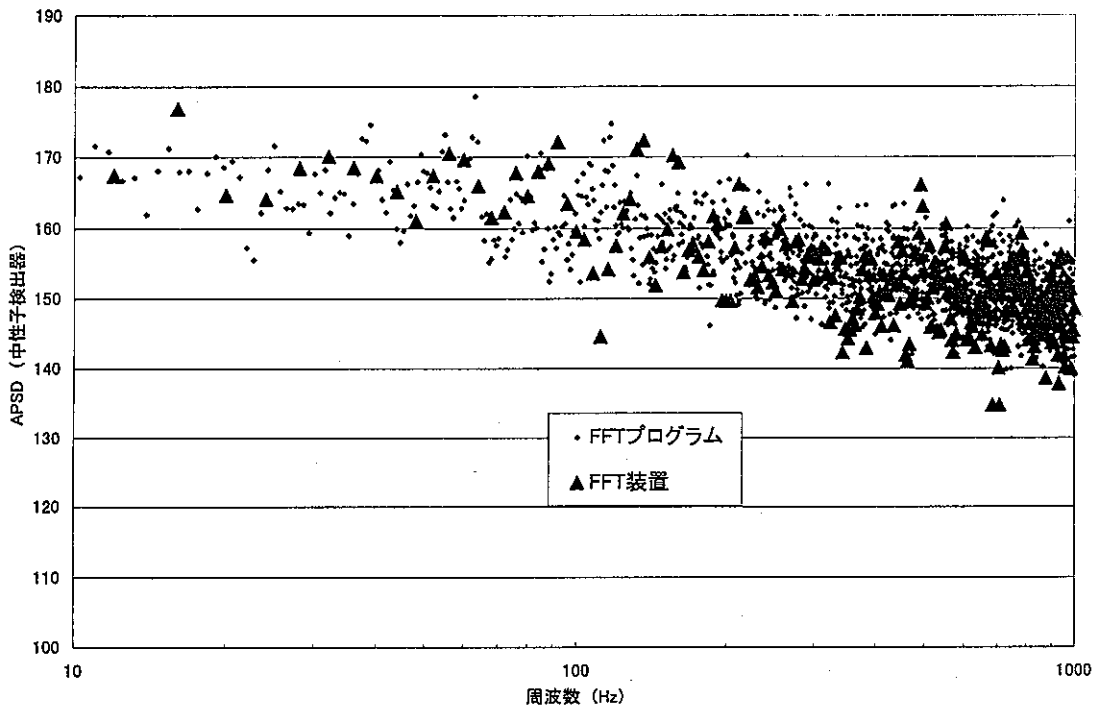


図3-4 中性子検出器出力の自己パワースペクトル密度についての比較

### 3.2.3 測定時間の検討

測定時間の増加に伴う未臨界度の評価値の変動を評価した。測定対象のうち実効増倍率のもっとも低い0.7の体系で最大6時間の測定を実施し、測定時間に対する評価値、誤差（標準偏差）の変化を調べた。

#### 対象とした測定体系

炉心名称：S-1炉心

炉心構成：試験体単独

試験体の種類：2.7%濃縮二酸化ウラン燃料棒72本を正方格子配列（ピッチ4.4cm）で装荷  
減速材：軽水200cm

推定実効増倍率：0.71（KENO-Vによる計算値）

検出器配置（図3-5参照）

#### 検出器の設定

Cf線源検出器30MBq：高圧1800V、電流アンプゲイン $10^8$ 、LPF設定5kHz

2" He-3 検出器 #1：計数率2950cps、PTF設定5kHz、LPF設定5kHz

2" He-3 検出器 #2：計数率3300cps、PTF設定5kHz、LPF設定5kHz

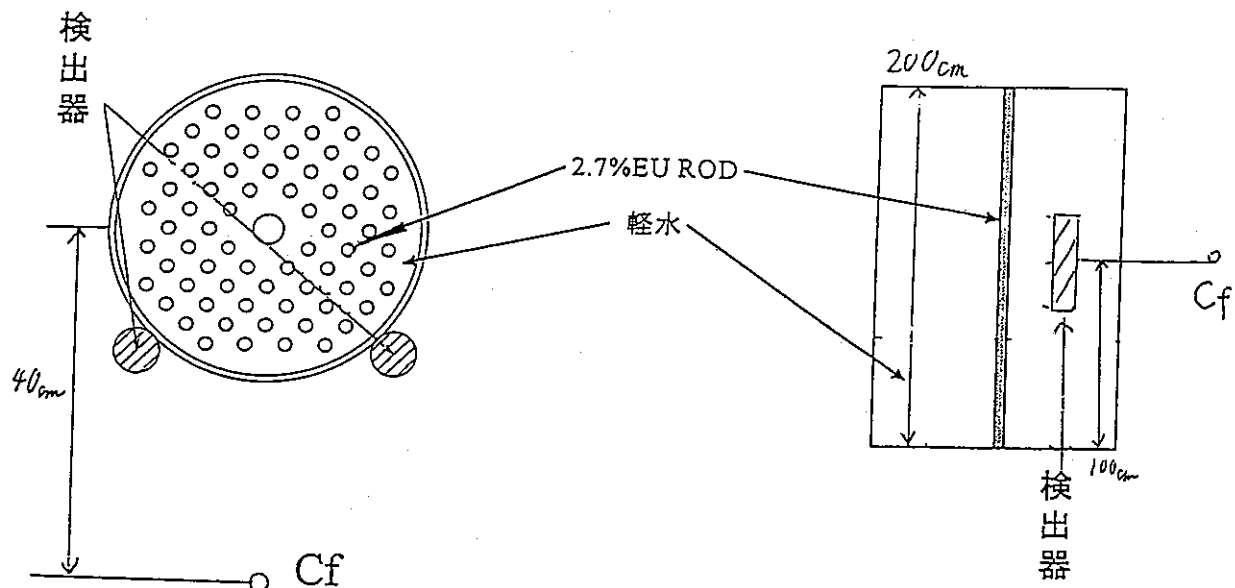


図3-5 測定時間の検討における測定時の検出器配置

式(2-1)のスペクトル比は、コヒーレンスを用いると式(3-6)で表される。

$$SR = \frac{\gamma_{12} \gamma_{13}}{\gamma_{23}} \quad (3-6)$$

ここで、 $\gamma_{ij}$ は検出器*ij*間のコヒーレンスであり、添え字で示されている検出器番号は、Cf線源検出器が#1、中性子検出器が#2,#3である。例えば、 $\gamma_{12}$ はCf線源検出器と中性子検出器間のコヒーレンスを表す。

$\gamma_{12}$ 、 $\gamma_{23}$ 、SRの測定結果を、測定時間を2時間に設定した時を例に取り図3-6~8に示す。 $\gamma_{12}$ と $\gamma_{13}$ は、図3-5のように検出器#2と#3の配置が炉心及びCf線源検出器に対して対象であるので $\gamma_{12}$ で評価した。

ミハルツ法では、統計誤差の比較的小さく、空間高長波の影響も受けにくい低周波数領域のスペクトル比を平均して評価値とする。100Hz以下のスペクトル比の平均して得られる、評価値(平均値)及び誤差(標準偏差)の測定時間依存性を図3-9に示す。

測定時間30分以内では評価値の変動が大きく、安定した値を得ることができないが、2時間、4時間、6時間の各測定時間における評価値は $\pm 0.005$ (評価値の3%)以内の変動に収まっており、2時間の測定ではほぼ安定した値を得ることができる。一般に実効増倍率が大きいと測定値のばらつきは小さくなるので、実効増倍率が0.7以上については測定時間を2時間に設定すれば十分な精度で評価値が得られると判断できる。

誤差は測定時間の増加と共に減少するが、6時間の測定後でも $\pm 0.05$ の誤差が残っている。この誤差は評価値の変動( $\pm 0.005$ 以内)に比べると、10倍大きく評価されている。誤差には評価値の変動以外の要素が含まれていると考えられる。

コヒーレンスの評価値と誤差の測定時間依存性を図3-10に示す。スペクトル比と同様、100Hz以下の点を平均して評価した。

スペクトル比の場合と同様、測定時間が2時間以上になると、評価値が安定する。6時間測定時の $\gamma_{23}$ 、 $\gamma_{12}$ の統計誤差を比較すると、約0.06と同じ値であるが、評価値が小さい分、相対的な誤差は大きくなる。実効増倍率0.7程度では、誤差の低減を計るには $\gamma_{23}$ の統計精度を向上させることが効果的である事が分かる。

統計誤差の源としては、実効増倍率の情報を含む炉雑音以外に、検出器からのパルス信号をアナログ信号に変換する際の歪み、FFTによる周波数解析に伴う誤差等が考えられる。アナログ機器を使用しない測定法の検討やFFT解析結果へのフィルターの適用などにより誤差が低減できる可能性がある。

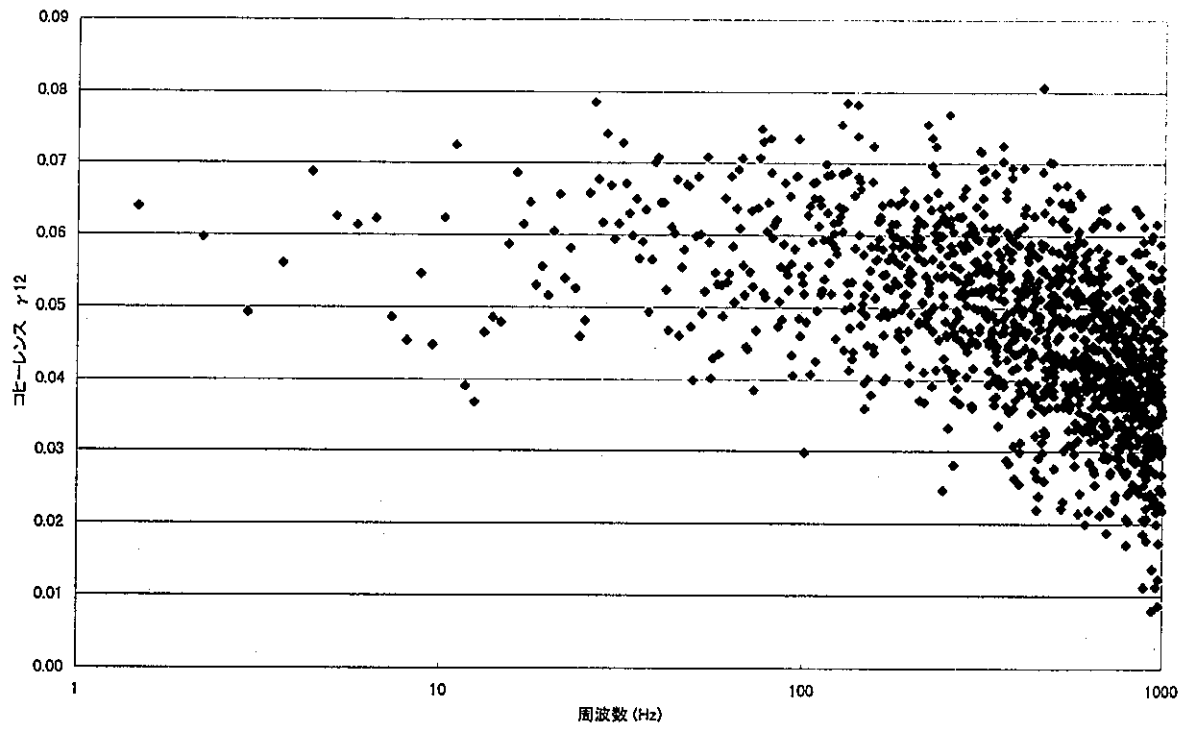


図3-6 2時間測定時のコヒーレンス $\gamma_{12}$ の測定結果

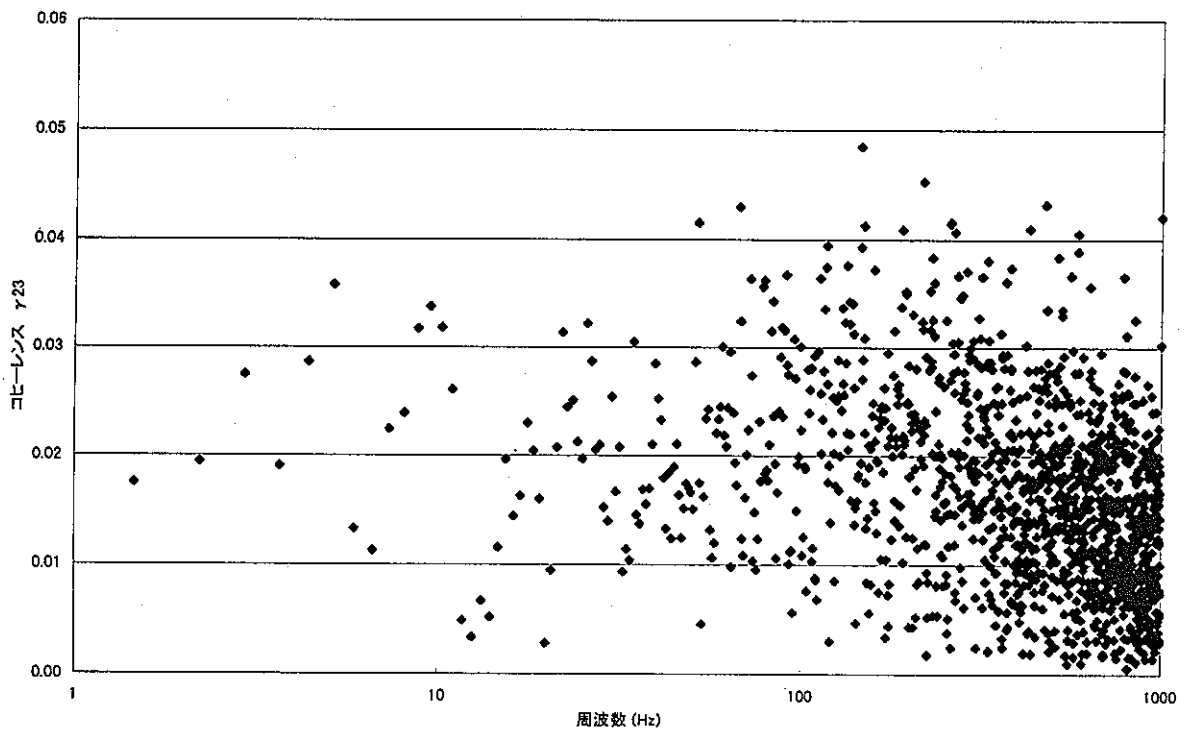


図3-7 2時間測定時のコヒーレンス $\gamma_{23}$ の測定結果

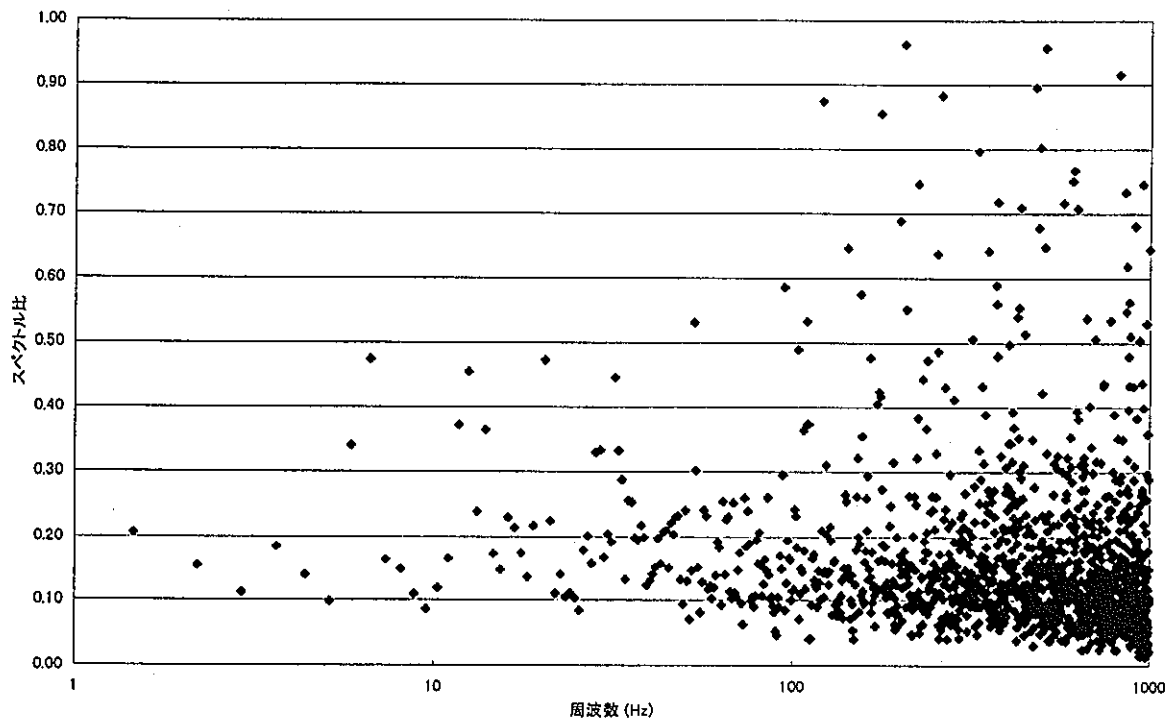


図3-8 2時間測定時のスペクトル比の測定結果

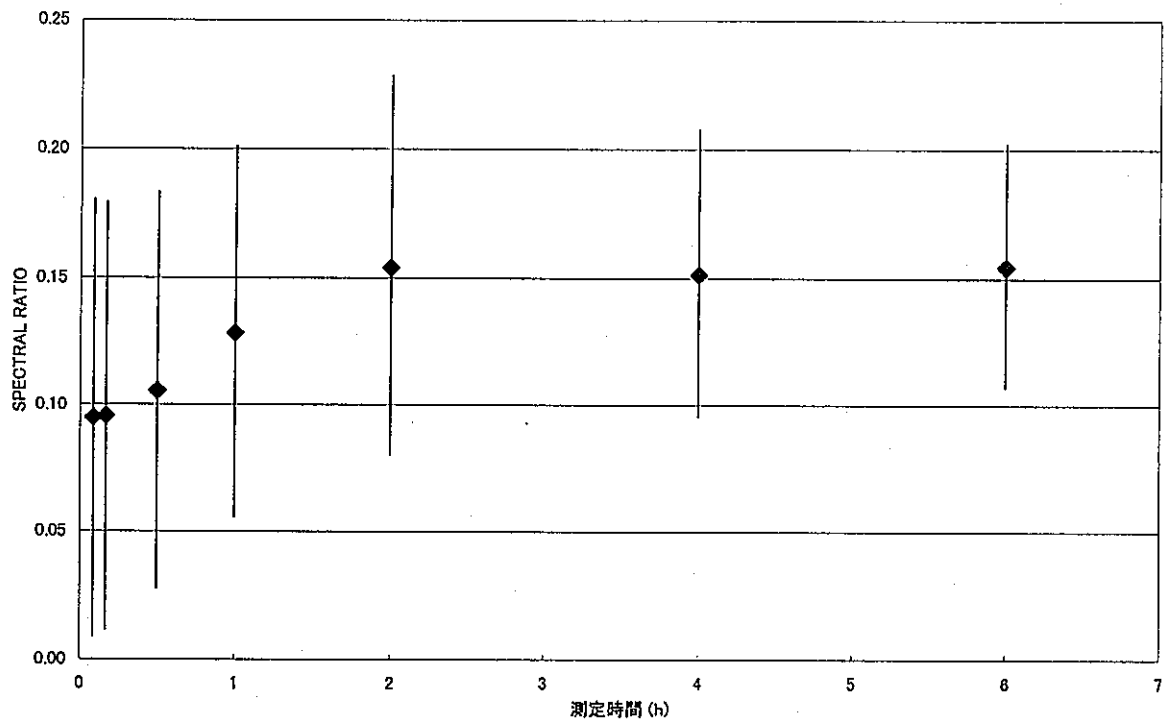


図3-9 スペクトル比測定結果の測定時間依存性

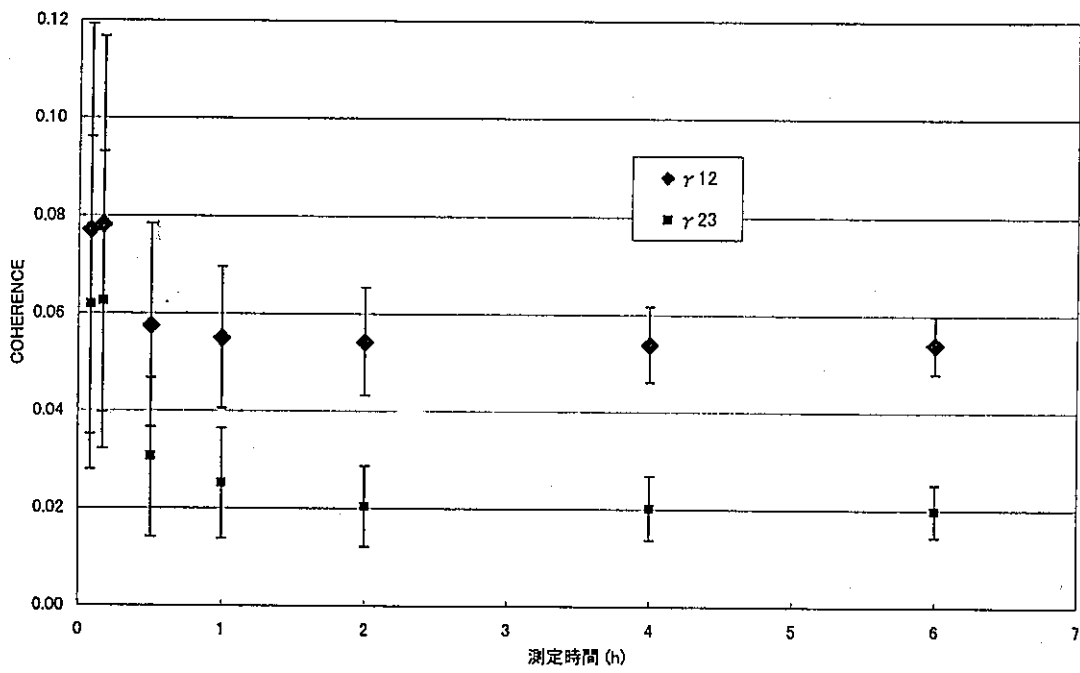


図3-10 コヒーレンス測定結果の測定時間依存性

#### 4. Cf線源強度の影響

ミハルゾ法では、Cf線源からの中性子とその中性子を起源とする誘導核分裂中性子の比を基に未臨界度を測定するので、Cf線源には体系内に有意な核分裂数の増加を引き起こす強度が必要である。一方、高強度の線源は放射線被ばくの観点から取扱いが困難であり、必要な線源強度を明らかにしておくことが重要である。Cf線源強度がミハルゾ法の測定に与える影響を調べるために、強度3MBqのCf-252を内蔵した線源検出器に加えて、新たに30MBqのCf-252を内蔵した線源検出器を製作し、2種類の検出器を用いた場合の測定結果を比較した。低濃縮ウランの体系と、中性子バックグラウンドの大きい低富化度Puを含んだ体系で測定を実施した。

##### 4.1 強度30MBqのCf線源検出器

新たに製作した30MBqのCf線源を内蔵したCf線源検出器の概要は以下の通りである。

Cf-252は米国Oak Ridge National Laboratoryで製造されたもので、あらかじめ線源検出器下部容器に設置された状態で日本アイソトープ協会を通して納入された。線源検出器上部容器の取付け及び検出器内の空気を電離ガスで置換する作業は、平成8年5月に大洗工学センター照射燃料試験室(AGF)の $\beta$ - $\gamma$ セルにおいてマニピュレータ操作で実施された。

##### 30MBq Cf線源検出器の仕様

電離箱型式：平板型電離箱

電極間距離：12mm

電離ガス：ARGON-10%CO<sub>2</sub>

構造材：SUS

Cf-252 (1996/2/5 現在、製造元(ORNL)データより引用)

強度：33.7MBq

質量：1.5 $\mu$ g

核分裂率： $1.0 \times 10^6 \text{sec}^{-1}$  (核分裂崩壊の分岐比を3.1%で計算)

中性子発生数： $3.8 \times 10^6 \text{sec}^{-1}$  (3.8 sec<sup>-1</sup>/fissionで計算)

30MBqのCf線源検出器は、核分裂率が $1.0 \times 10^6 \text{sec}^{-1}$ であり、電離箱で検出される中性子発生信号は、核分裂片の検出による信号だけで100万cpsとなる。現在DCAにあるパルス計数システムでは10万cps程度が限度であるため、30MBqのCf線源検出器の信号は、パルス計数による信号処理(パルスモードによる測定)ではなく、線源検出器からの電流信号をそのまま増幅する電流モードによって処理する。ただし、中性子検出器の出力については、3.9MBqのCf-252を使用する場合と同様にパルスモードで取り扱う。これは中性子検出器の出力電流が微弱なため電流モードでの扱いが困難なこと、及びミハルゾ法の測定値であるスペクトル比は、中性子検出器信号の処理法には依存しないことによる。



#### 4.1.1 電流モードによる Cf 線源検出器出力の測定

電流モードでの測定はパルスモードの測定とは異なり、

- ① Cf から発生する  $\alpha$  粒子による寄与や検出システムに混入するノイズの分離が不可能
- ② 周波数応答特性が高周波数ほど低下する。

等の欠点がある。周波数応答特性が低下するのは、電離箱中で形成されるイオン対のうち、移動速度の遅い陽イオン（電子の約 1000 倍）の寄与が影響するためと考えられる。本研究で使用した線源検出器の場合、陽イオンが電極に到達するまでに要する時間（移動時間）を線源—電極間距離より単純に計算すると、印加電圧 0.5kV の場合で 4msec となる。したがって、250Hz 以上の速い変動は重なり合い、伝達されにくい。移動時間は電極間の電界強度に比例するため、印加電圧を高くすることで周波数応答特性の低下を軽減することができる。

Cf 線源検出器の出力信号の自己パワースペクトル密度(APSD)を、印加電圧を 0.5kV、1.8kV の 2 通りの場合について電流モードで測定し、印加電圧が 0.5kV の時のパルスモードによる結果と比較した。図 4-1 に測定結果を示す。

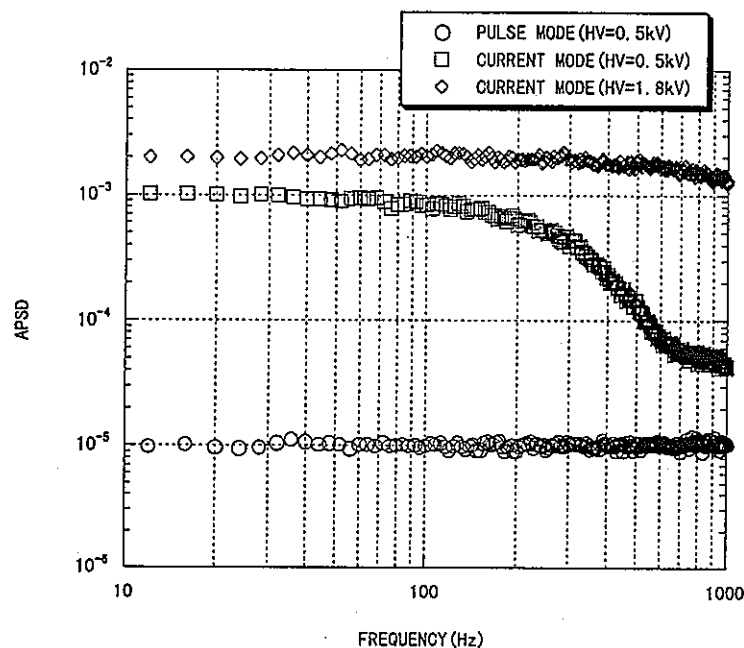


図4-1 測定モードの影響 (APSDについての比較)

Cf 線源の自発核分裂はポアソン事象であり、APSD は本来周波数に依存しない一定値になる。図 4-1 に示されているように、パルスモードによる測定結果は周波数に依存しないが、電流モードによる測定結果は、周波数が高くなると APSD が低下する特性を示している。印加電圧を上げると、APSD が低下し始める周波数点が、印加電圧 0.5kV で約 100Hz、1.8kV で約 300Hz のように高くなる。

Cf 線源検出器を電流モードで用いた場合には、高周波数領域で核分裂発生信号についての情報を得ることができず、ミハルゾ法の測定が困難である。ミハルゾ法では通常、折れ点周波数  $f_b (= \alpha / 2\pi$ 、

であり、実効増倍率が0.7の場合でもfbは数100Hzであり、印加電圧を1.8kVに設定すれば測定に支障はない。しかしながら、ミハルズ法を溶液燃料体系に適用する場合を想定すると、fbは1000Hz以上となる（ミハルズらの測定例では実効増倍率0.9で1700Hz<sup>[3]</sup>）。電流モードで測定する場合には、Cf線源検出器本体の電極間距離を狭くする等の改善が必要である。なお、パルスモードによる計数率の上限値はミハルズによると10<sup>7</sup>cpsであり<sup>[4]</sup>、我々の測定システムを改善することによって、パルスモードで測定できる可能性がある。

## 4.2 スペクトル比の測定モード依存性

測定モードの違いがスペクトル比に与える影響を調べた。

### 4.2.1 理論上の相違点

簡略化のために空間補正因子を省くと、式(2-1)で定義されるスペクトル比は近似的に式(4-1)で表される。測定モードの影響はCf線源検出器の特性量 $\varepsilon_c$ に含まれる。

$$SR = \frac{\varepsilon_c v_{CP} F_C}{[v_p(v_p - 1)F + v_{CP}(v_{CP} - 1)F_C + v_{IP}(v_{IP} - 1)F_i]} \quad (4-1)$$

ここで、

- $\varepsilon_c$  : Cf線源検出器の特性量
- F : 核分裂率
- $v$  : 核分裂1回あたりの中性子放出数

であり、添え字pは即発中性子成分を表し、p以外の添え字については、添え字のない記号が体系内の誘導核分裂に関する量、添え字cがCf-252に関する量、添え字iが体系内に存在する自発核分裂物質に関する量であることを表す。上部の-は時間平均を表す。

$\varepsilon_c$ は次式(4-2)で表される。

$$\varepsilon_c = \frac{q_{FP}^2}{q_{FP}^2 + q_\alpha^2} \quad (4-2)$$

ここで、

- $q_{FP}$  : Cf-252の単位核分裂あたりに検出される電荷量
- $q_\alpha$  : Cf-252の単位 $\alpha$ 崩壊あたりに検出される電荷量

である。検出される電荷量は、核分裂片又は $\alpha$ 粒子が発生時に持つ電荷と、電荷が線源検出器（電離箱）に検出される確率の積で表される。電荷の再結合率やガス増幅率も関係するが、発生時の電荷に依存しないとする。核分裂片と $\alpha$ 粒子の間には、発生時の電荷（約80MeVと約6MeV）、電離ガス中の飛程（平均12mmと24mm）、及び電荷損失特性（核分裂片は飛程の前半で、 $\alpha$ 粒子は後半でエネルギー

を多く失う) などにより、検出される電荷量に違いがある。

パルスモードでは、検出される電荷量の差を利用して、パルス波高を弁別することによって核分裂片による信号のみを取り出す。弁別後のパルス信号には、電荷の情報は含まれておらず、式(4-2)は

$$\varepsilon_C = \frac{\overline{P_{FP}^2}}{P_{FP}} \quad (4-3)$$

ここで、 $p_{FP}$  : Cf-252 の単位核分裂反応当たりの核分裂片に対する検出効率

となる。さらに、パルス発生事象は発生するか ( $p=1$ )、しないか ( $p=0$ ) であることを考えると、

$$\varepsilon_C = \overline{p_{FP}} \quad (4-4)$$

のように、 $\varepsilon_C$  は核分裂片に対する検出効率に等しくなる。実際には  $\alpha$  粒子と核分裂片の波高は連続しているため完全に分離できず、検出効率は検出器そのものの核分裂片の検出効率より小さくなる。3MBq の Cf 線源検出器をパルスモードで測定する場合、 $\varepsilon_C=0.8$  と得られている。

一方、電流モードでは  $\alpha$  粒子の寄与を分離できない。さらに測定系に混入するノイズが加わり  $\varepsilon_C$  が決まる。

#### 4.2.2 実験による測定モードの影響評価

3MBq の Cf 線源検出器の出力をパルスモード及び電流モードのそれぞれの方式で処理し、実効増倍率 0.8 の体系でスペクトル比を測定し、測定モードの影響を評価した。中性子検出器の信号は Cf 線源検出器の測定モードに依らず、パルスモードで処理した。図 4-2 にスペクトル比測定結果を示す。

パルスモードと電流モードによる測定結果の間に、評価値及び誤差ともに有意な差は見られない。今回のパルスモード、電流モードの測定条件では、Cf 線源検出器の特性量  $\varepsilon_C$  は測定モードにほとんど依存しないことが確認できた。

30MBq の Cf 線源検出器は 3MBq の Cf 線源検出器と構造が同じであるので、Cf 線源検出器の特性量  $\varepsilon_C$  は同じと考えられ、Cf 線源強度の影響を評価する際に、線源強度で異なる測定モードを使用しても問題がない。以下の評価では、3MBq の Cf 線源検出器については、従来からのパルスモードによって測定する。

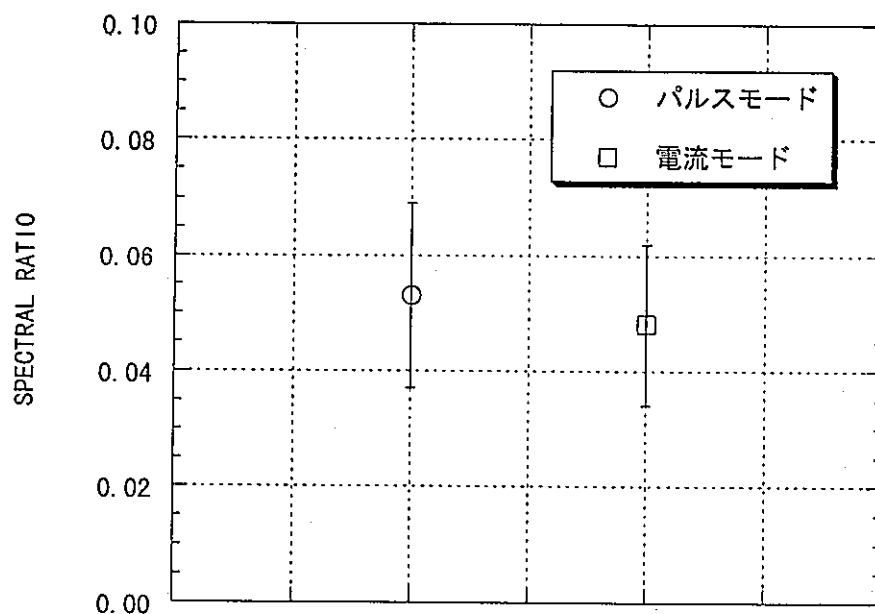


図4-2 測定モードの影響 (スペクトル比についての比較)

### 4.3 線源強度の影響評価

実効増倍率が異なる場合と、中性子バックグラウンドが異なる場合について、Cf 線源強度がミハルゾ法による測定に与える影響を評価した。ここで中性子バックグラウンドとは、測定対象となる核燃料体系に固有に含まれる中性子源 (Pu-240 など) から放出される中性子場を意味する。

#### 4.3.1 実効増倍率が異なる体系における評価

装荷する試験体燃料棒の本数によって実効増倍率の異なる 2 種類の炉心 (S-2 炉心、S-1 炉心) を構成し、Cf 線源検出器の線源強度の影響を評価した。評価に使用した 2 種類の炉心の概要は以下の通りである。

##### ① S-2 炉心

炉心構成：試験体単独炉心

試験体の種類：2.7%濃縮二酸化ウラン燃料棒 140 本を正方格子配列 (ピッチ 2.2cm) で装荷

減速材：軽水 200cm

推定実効増倍率：0.83 (KENO-V による計算値)

検出器配置 (図 4-3 参照)

##### ② S-1 炉心

炉心構成：試験体単独炉心

試験体の種類：2.7%濃縮二酸化ウラン燃料棒 72 本を正方格子配列 (ピッチ 4.4cm) で装荷

減速材：軽水 200cm

推定実効増倍率：0.71 (KENO-V による計算値)

検出器配置 (図 4-4 参照)

#### 検出器の設定

Cf 線源検出器 30MBq：高圧 1800V、電流アンプ ゲイン  $10^8$ 、LPF 設定 5kHz

Cf 線源検出器 3MBq：高圧 1000V、計数率  $6 \times 10^4$  cps、PTF 使用せず、LPF 設定 5kHz

$2^{222}\text{Rn}$  検出器：PTF 設定 5kHz、LPF 設定 5kHz

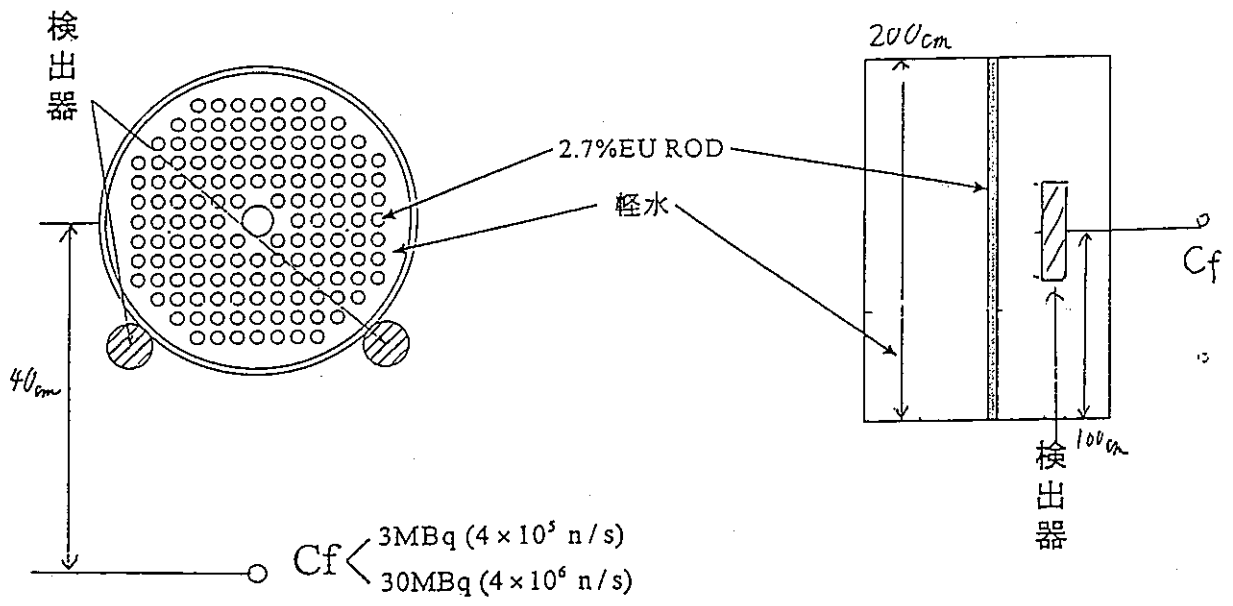


図4-3 S-2炉心における検出器配置

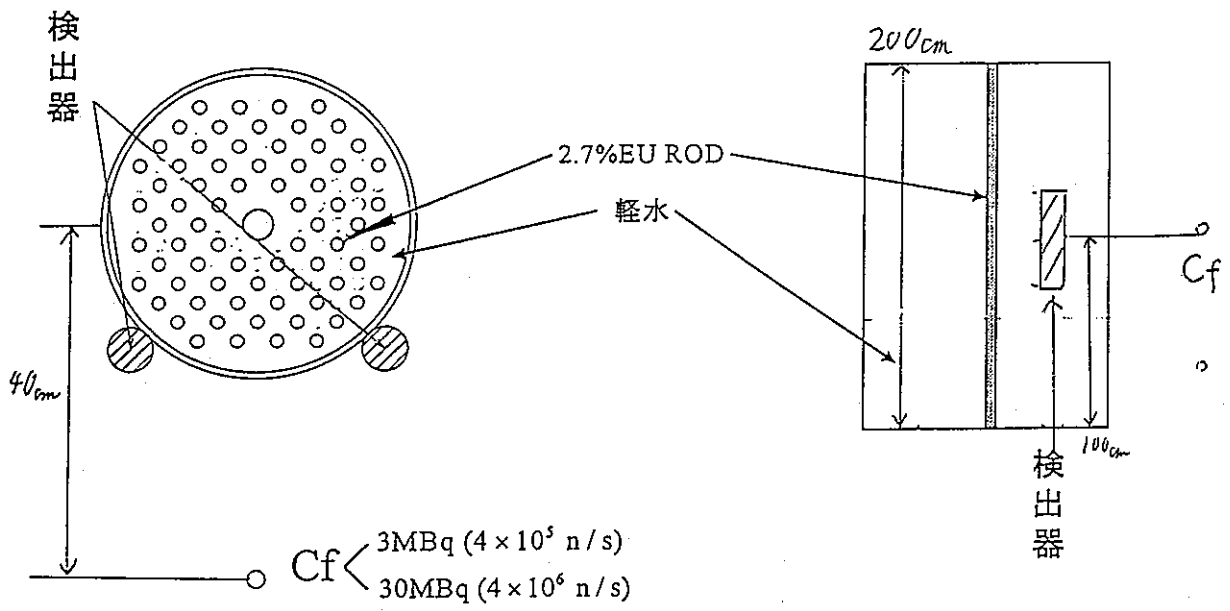


図4-4 S-1炉心における検出器配置

## 4.3.2 実験結果

S-2 炉心( $k_{eff}=0.8$ )、S-1 炉心( $k_{eff}=0.7$ )における各測定結果を図 4-5 及び図 4-6 に示す。

両方の炉心について、30MBq の Cf 線源検出器を用いた測定結果と 3MBq の Cf 線源検出器を用いた測定結果は、スペクトル比評価値及び誤差ともにほぼ同じ値であり、線源強度の影響がないことが分かる。

2つの体系について、測定時の中性子検出器の計数率（2本の中性子検出器についての平均値）を表 4-1 に示す。今回の測定では Cf 線源強度が 10 倍になると、それに応じて中性子検出器の計数率も約 10 倍になっている。一般に計数の誤差は、誤差に相当する標準偏差が計数の平方根で表され、計数が多いほど誤差の割合が減少する。ところが、今回のスペクトル比の測定結果では、誤差は線源強度に依存しなかった。これは、信号強度が増し、有効信号である相関情報が増加しても、非相関の情報も同様に増加し、S/N 比としては変化がないためと考えられる。

表4-1 測定時の中性子検出器の計数率 (cps)

炉心名称	3MBq	30MBq
S-2	370	3700
S-1	330	3200

以上の結果は、Cf 線源強度を無制限に強くしても測定結果が改善されないことを示している。

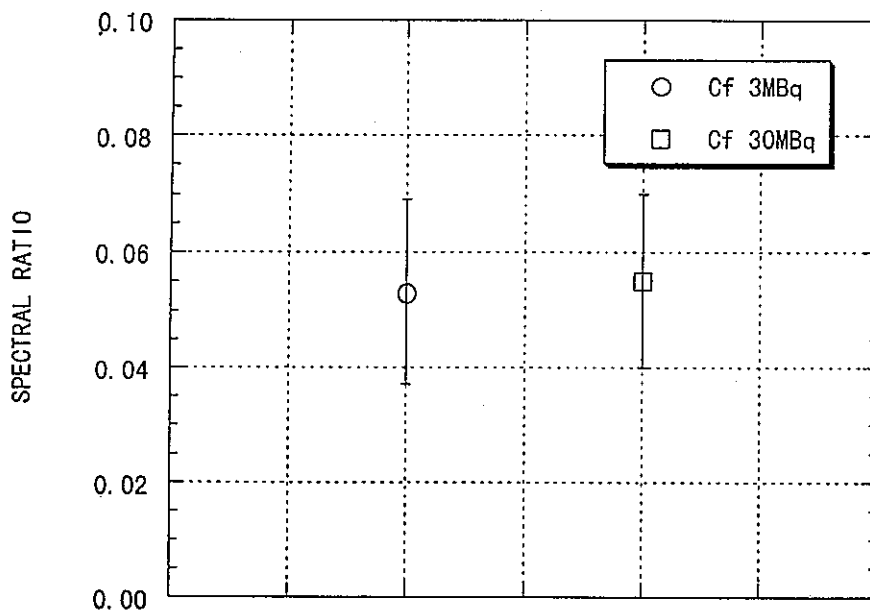


図4-5 S-2炉心(keff=0.8)におけるCf線源強度の影響

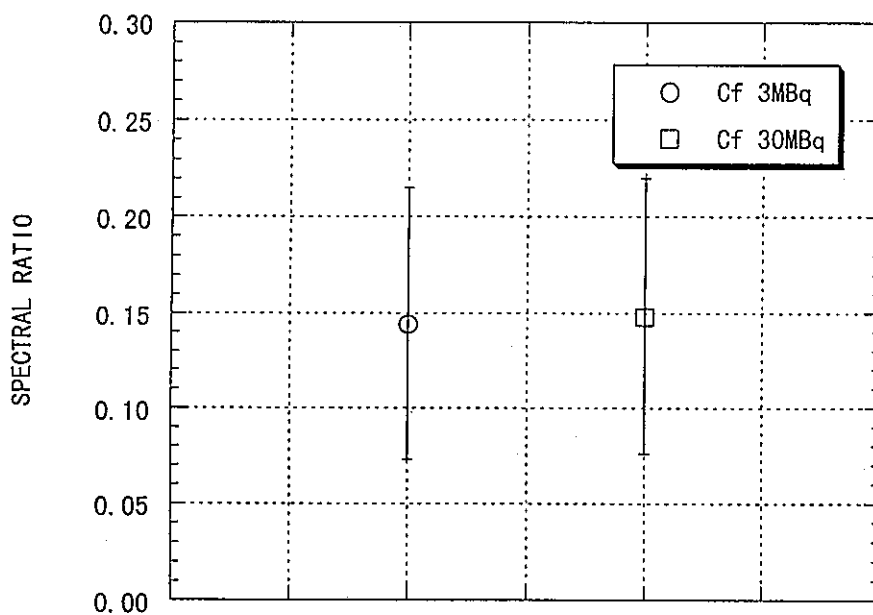


図4-6 S-1炉心(keff=0.7)におけるCf線源強度の影響



### 4.3.3 中性子バックグラウンドが異なる体系における評価

中性子バックグラウンドが大きい体系では、Cf とは無関係な中性子源を起源とする誘導核分裂の割合が大きく、ミハルゾ法の測定が困難になる。バックグラウンドの影響を定量的に評価するために、低濃縮ウランの体系に原子炉起動用中性子源を挿入して構成した高中性子バックグラウンドの体系と、低富化度プルトニウムを使用することによって構成した高中性子バックグラウンドの体系において、Cf 線源検出器の強度の影響を評価した。

#### 4.3.3.1 バックグラウンドの影響の補正

通常ミハルゾ法の未臨界度評価式では、式(3-1~3)に示されているように、自発核分裂中性子源の寄与に関する量 (Y) によって、バックグラウンドの影響を補正する。Y 値は、

$$Y = \frac{\overline{\nu}_c F_C I_C + \overline{\nu}_i F_i I_i}{\nu_c F_C I_C} \quad (4-5)$$

で表される。核分裂あたりの中性子検出効率を等しいと近似し、Y 値は、Cf が存在する場合の中性子検出器の計数率  $C_{Cf+i}$ 、ない場合の計数率  $C_i$  より、

$$Y = \frac{C_{Cf+i}}{C_{Cf+i} - C_i} \quad (4-6)$$

で測定される。

しかしながら、核分裂以外の中性子源 (( $\alpha, n$ ) 反応等) が存在する場合、式(4-5)と式(4-6)は一致しなくなる。

すべての中性子源を考慮に入れた補正手法を新たに検討した。補正は、式(3-1~3)のように換算係数に反映させるのではなく、スペクトル比そのものを補正する方法で行い、スペクトル比の比較によってバックグラウンドの影響を評価できるようにした。

スペクトル比を表す式 (式 4-1) において、簡略化のために Cf 線源検出器の検出効率を省略すると、次式(4-7)を得る。

$$SR = \frac{\nu_{CP} F_C}{\nu_P (\nu_P - 1) F + \nu_{CP} (\nu_{CP} - 1) F_C + \nu_{IP} (\nu_{IP} - 1) F_i} \quad (4-7)$$

中性子発生事象が Cf 及び自発核分裂物質の核分裂事象のみで、中性子放出数  $\nu$  を核種に依らず一定 (参考値 Cf-252 : 3.8、U-235 : 2.6、Pu-239 : 3.2、Pu-240 : 2.2) と近似すると、誘導核分裂率 F、Cf の自発核分裂率  $F_C$ 、体系固有の自発核分裂率  $F_i$  の関係は、

$$F = \frac{F_C + F_i}{1 - keff} \quad (4-8)$$

となる。例えば、実効増倍率 0.9 の場合、F は  $F_C + F_i$  の 10 倍となり、式(4-7)中の F に比べて  $F_C$ 、 $F_i$  が近似的に無視できる。実効増倍率が大きくなると、あるいは、( $\alpha, n$ ) 反応のような核分裂以外の中性子発生源が存在すると、一定の  $F_C$ 、 $F_i$  に対して F のみが大きくなり近似がより妥当なものになる。式(4-7)で分母の  $F_C$  と  $F_i$  を無視すると、スペクトル比は、式(4-7)のように Cf の核分裂率  $F_C$  と誘導核

分裂率  $F$  の比に比例する量となる。

$$SR = \frac{\nu_{CP} F_C}{\nu_P (\nu_P - 1) F} \quad (4-9)$$
$$\propto \frac{F_C}{F}$$

中性子バックグラウンドは、分母の  $F$  に比例するため、バックグラウンドが増加するほど、スペクトル比は小さくなる。(式 4-9) において、誘導核分裂率  $F$  が中性子検出器の計数率に比例するものと考え、Am-Be 中性子源を挿入する前後の中性子検出器の計数率比をかければ、バックグラウンドの影響が補正できる。

### 4.3.3.2 起動用中性子源を利用した高バックグラウンドの影響評価

中性子バックグラウンドの影響を実験で定量的に把握するために、まず、低濃縮ウランの体系に、原子炉起動用の中性子源を挿入して高バックグラウンドの体系を構成し、ミハルソ法の測定を行った。

#### 4.3.3.2.1 実験体系

炉心名称：S-2 炉心

炉心構成：試験体単独炉心

試験体の種類：2.7%濃縮二酸化ウラン燃料棒 140 本を正方格子配列（ピッチ 2.2cm）で装荷

減速材：軽水 50cm

推定実効増倍率：0.78 （KENO-V による計算値）

中性子源挿入位置、検出器配置（図 4-7 参照）

起動用中性子源：Am-Be 370GBq（中性子発生数  $3 \times 10^7$  n/s）

Cf 線源検出器：Cf-252 3MBq（中性子発生数  $4 \times 10^5$  n/s）

30MBq（中性子発生数  $4 \times 10^6$  n/s）

#### 検出器の設定

Cf 線源検出器 30MBq：高圧 1800V、電流アンプ ゲイン  $10^8$ 、LPF 設定 5kHz

Cf 線源検出器 3MBq：高圧 1000V、計数率  $6 \times 10^4$  cps、PTF 使用せず、LPF 設定 5kHz

$^2\text{He-3}$  検出器：PTF 設定 5kHz、LPF 設定 5kHz

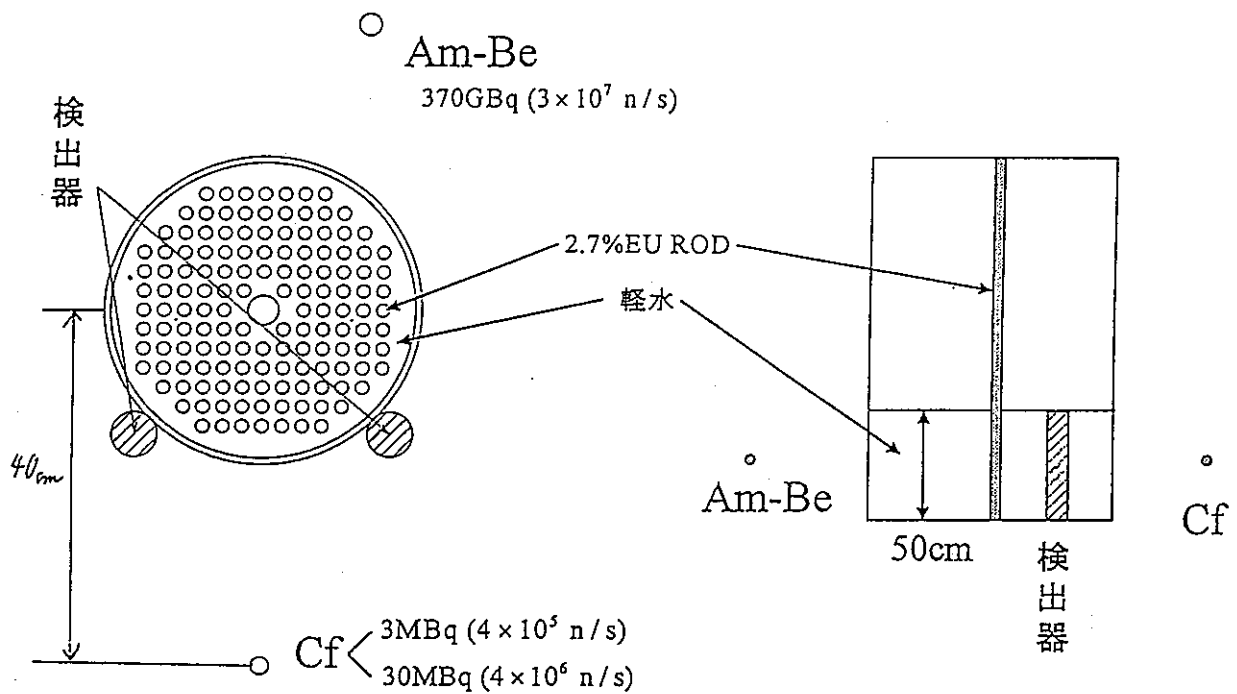


図4-7 中性子源挿入位置と検出器配置

## 4.3.3.2.2 実験結果

図 4-8 に中性子バックグラウンドの補正を加えない場合のスペクトル比の測定結果を示す。Am-Be 中性子源を挿入しない場合に比べると、スペクトル比評価値は 30MBq の Cf の場合で約 1/7、3MBq の Cf の場合で約 1/30 と小さくなっており、高中性子バックグラウンドの影響が大きく現れることが分かる。

Am-Be 中性子源を挿入する前後の中性子検出器の計数率を表 4-2 に示す。中性子源の挿入により、計数率は、3MBq の Cf の場合、75 倍、30MBq の Cf の場合、6.6 倍になる。

表4-2 Am-Be中性子源挿入前後の中性子検出器の計数率 (cps)

	3MBq Cf	30MBq Cf
挿入前	280	3800
挿入後	21000	25000
計数増加率 R	75	6.6

式(4-9)に基づき、計数増加率 R を用いてスペクトル比を補正した結果を表 4-3 及び図 4-9 に示す。

表4-3 補正前後のスペクトル比 (Am-Be中性子源使用体系)

	3MBq Cf	30MBq Cf
補正前	0.003±0.002	0.012±0.006
補正後	0.212±0.177	0.084±0.042
参照値	—	0.077±0.022

Am-Be 中性子源を挿入しない場合 (参照値) と比較すると、補正後の 30MBqCf を用いた場合の測定結果は誤差の範囲で一致しているが、誤差は約 2 倍になっている。3MBq の Cf の場合でも誤差の範囲で一致はしているものの、誤差が約 6 倍に増加している。ミハルゾ法では、スペクトル比 SR と実効増倍率  $k_{eff}$  の間には第 1 近似 (式(3-1)で  $\epsilon_c$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  を 1 と近似した場合) として  $k_{eff}=1-SR$  の関係がある。誤差の範囲を測定結果のとりうる範囲と考えると、30MBq の Cf 線源の場合では実効増倍率が 0.87 から 0.95 の範囲で評価できるが、3MBq の場合は実効増倍率が 0.61~0.95 の幅をとり実用に適さない。

このように、バックグラウンドが増加すると、実効増倍率の評価値については計数率による補正によってその影響を取り除くことができるが、統計誤差が増加することが確認された。誤差は、体系内の全中性子源中にしめる Cf 中性子源の強度が 1/7 程度の場合では 2 倍に増加する。以上の結果から、必要な評価精度を得るためにはバックグラウンドの強度に応じて Cf 線源強度を決定する必要があることが分かる。

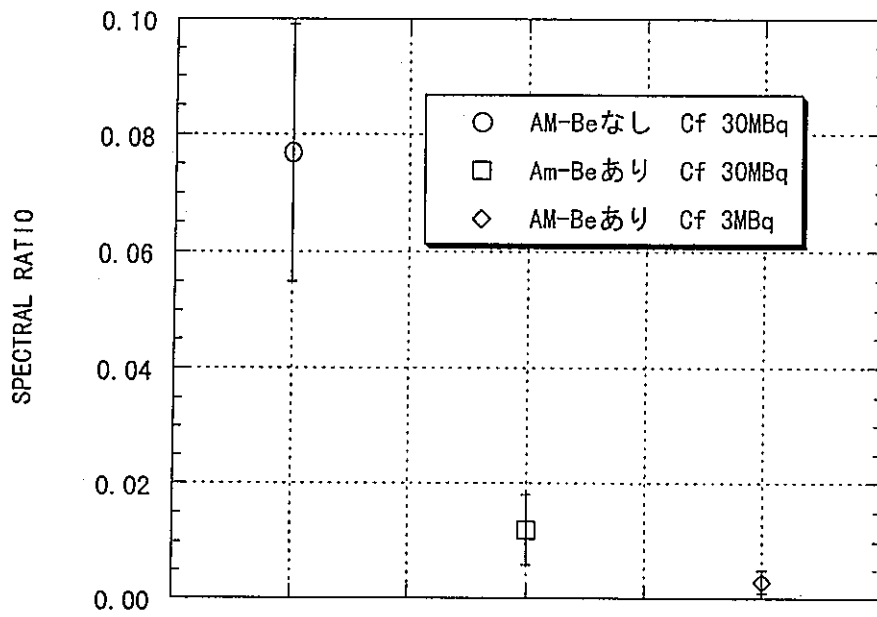


図4-8 Am-Be中性子源挿入前後の測定結果

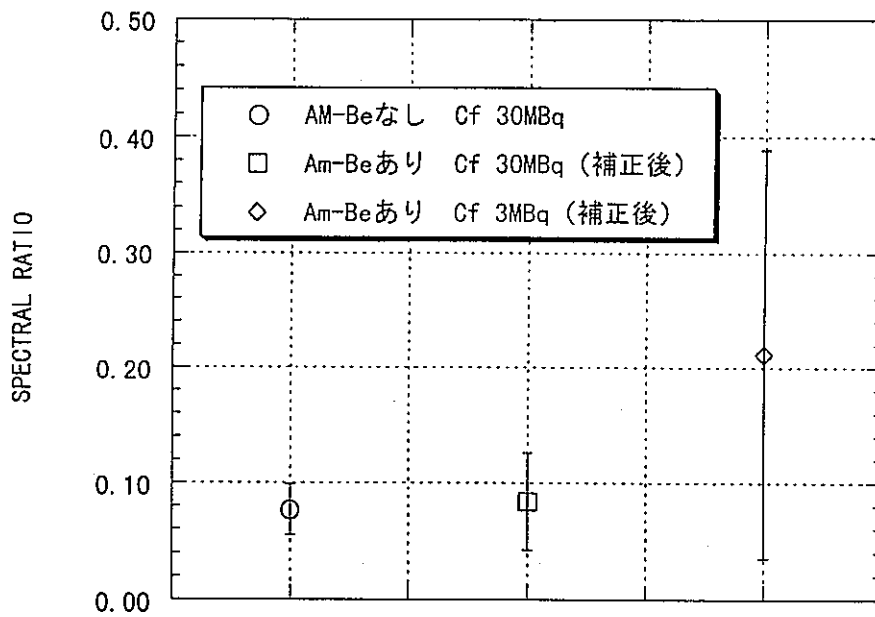


図4-9 Am-Be中性子源挿入前後の測定結果 (バックグラウンド補正後)

### 4.3.3.3 Pu 燃料体系における高バックグラウンドの影響評価

次に、模擬的に中性子源を挿入するのではなく、より自然な高バックグラウンド体系での測定として、Pu 燃料棒を用いた試験体を構成し、同様な測定を行った。

#### 4.2.2.3.1 実験体系

##### S4-4 炉心

炉心構成：2領域炉心

ドライバー領域：1.2%濃縮二酸化ウラン燃料体 132 体、減速材なし

試験体領域：0.79%Pu fissile 濃度プルトニウム燃料棒 (7R 燃料棒) 140 本を正方格子配列 (ピッチ 2.2cm) で構成した試験体を装荷

減速材 軽水 200cm

推定実効増倍率：0.75 (KENO-V による計算値)

検出器配置 (図 4-10 参照) (検出器の設定は、起動用中性子源を使用した実験と同様)

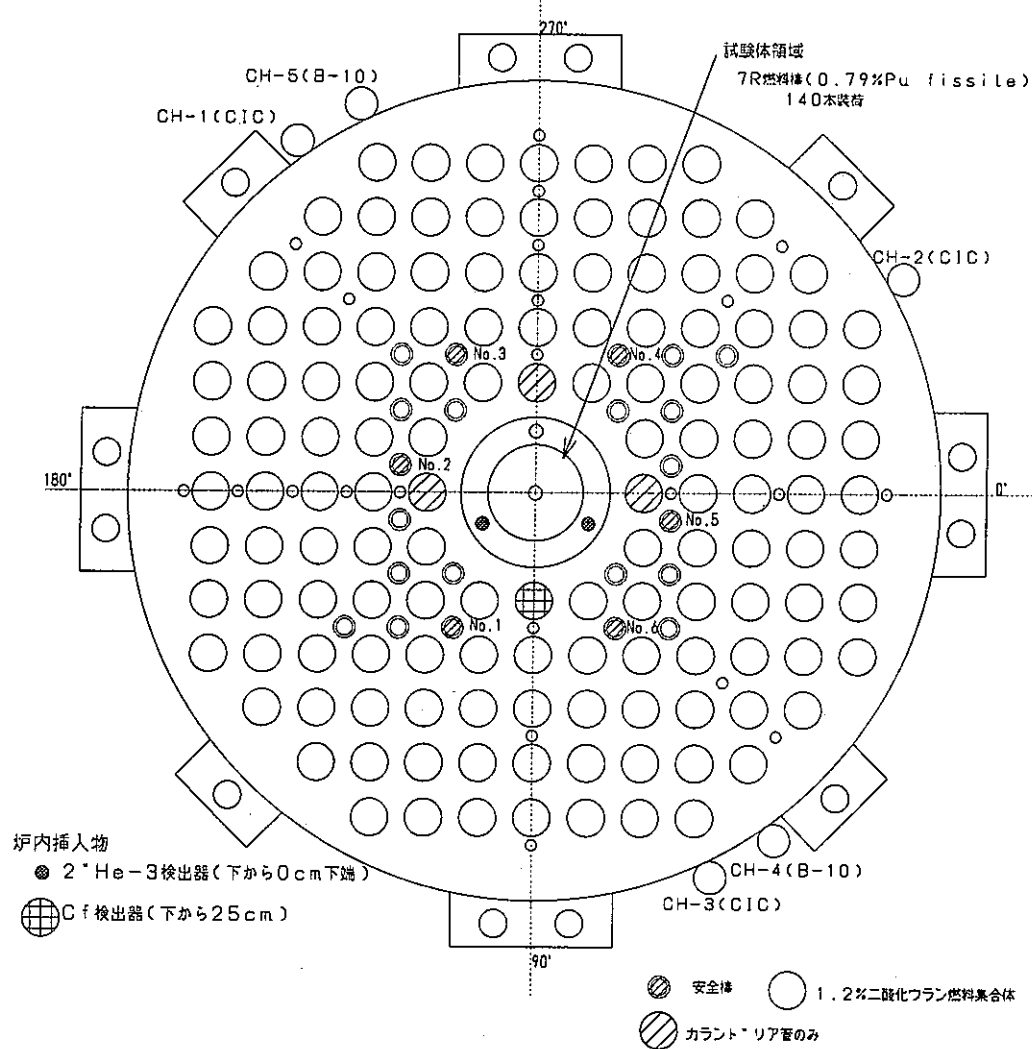


図4-10 S4-4炉心における検出器配置

## 4.3.3.3.2 実験結果

図 4-11 に中性子バックグラウンドの補正を加えない場合のスペクトル比の測定結果を示す。スペクトル比は 3MBq と 30MBq で異なる値を示しており、バックグラウンドの影響が確認できる。

Am-Be 中性子源を挿入した場合と異なり、バックグラウンドを変化させて計数率によるバックグラウンドの補正を行うことはできないので、式(4-6)の Y と同じ測定法を用いる。すなわち、バックグラウンドによる計数増加率 R を式(4-10)によって測定する。

$$R = \frac{C_{Cf+i}}{C_{Cf+i} - C_i} \quad (4-10)$$

表 4-4 に計数増加率 R を、R を用いてスペクトル比を補正した結果を表 4-5、図 4-11 に示す。

表4-4 Cf線源取り出し前後の中性子検出器の計数率 (cps)

	3MBq Cf	30MBq Cf
Cfあり	3300	8150
Cfなし	2860	2860
計数増加率 R	7.5	1.5

表4-5 補正前後のスペクトル比 (Pu燃料使用体系)

	3MBq Cf	30MBq Cf
補正前	0.023±0.013	0.114±0.036
補正後	0.170±0.095	0.176±0.055

バックグラウンドの計数率に対する補正の結果、スペクトル比の評価値については Cf の強度に関係なく一定値が得られた。今回の測定は、低富化度の Pu 体系であるが、30MBq の Cf を用いてもバックグラウンドの影響が無視できず、1.5 倍の補正係数を乗じる必要がある。尚、本体系のバックグラウンドの強度は、15MBq の Cf 線源に相当する。

バックグラウンドによる誤差の増加率がバックグラウンドの寄与率（バックグラウンドによる中性子数の増加率）で決まると仮定し、計数増加率 R の比較によって計数増加率が 1.5 倍の時の誤差を評価する。表 4-4 の 3MBq についての計数増加率 R は、Am-Be を用いた実験における Cf 線源 30MBq の場合（表 4-2）とほぼ同じ R=7 である。Am-Be を用いた実験の場合、R=7 のときに補正後の誤差が 2 倍になったことから、今回の体系でバックグラウンドがないと仮定した場合の誤差は、Cf 線源 3MBq に関する補正後の誤差の半分の 0.048 と推定できる。

この誤差に対して表 4-5 の Cf 線源 30MBq のときの補正後の誤差 0.055 は、1.2 倍であり、計数増加率が 1.5 倍の時は誤差が 1.2 倍になる。

このように、バックグラウンドの影響は、評価値についてはバックグラウンドによる中性子計数の増加率によって補正が可能であり、統計誤差については中性子計数が 1.5 倍（体系内の全中性子源に対

倍になることが実験的に確認できた。ただし、この評価結果は今回の測定に対する結果であって、測定の統計精度が向上すれば減少する。

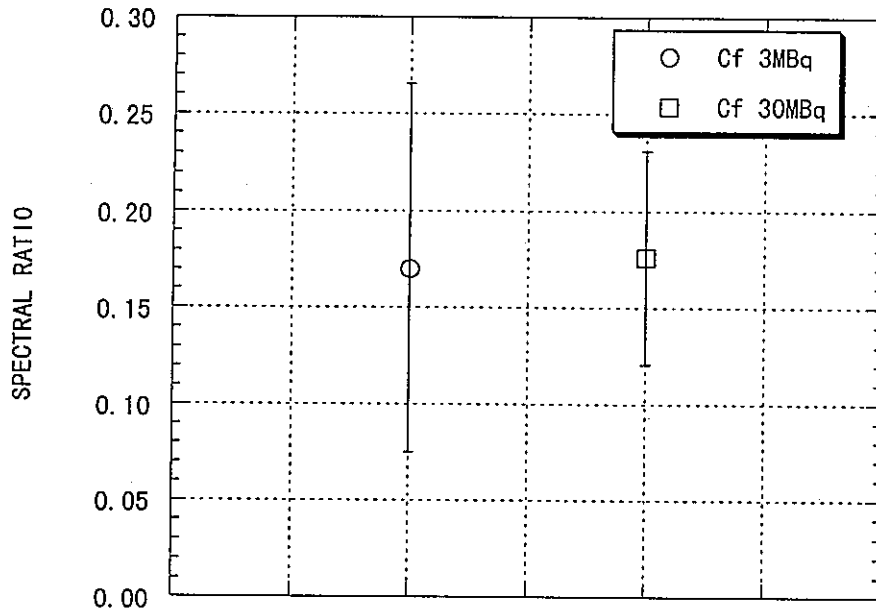


図4-11 S4-4炉心における測定結果

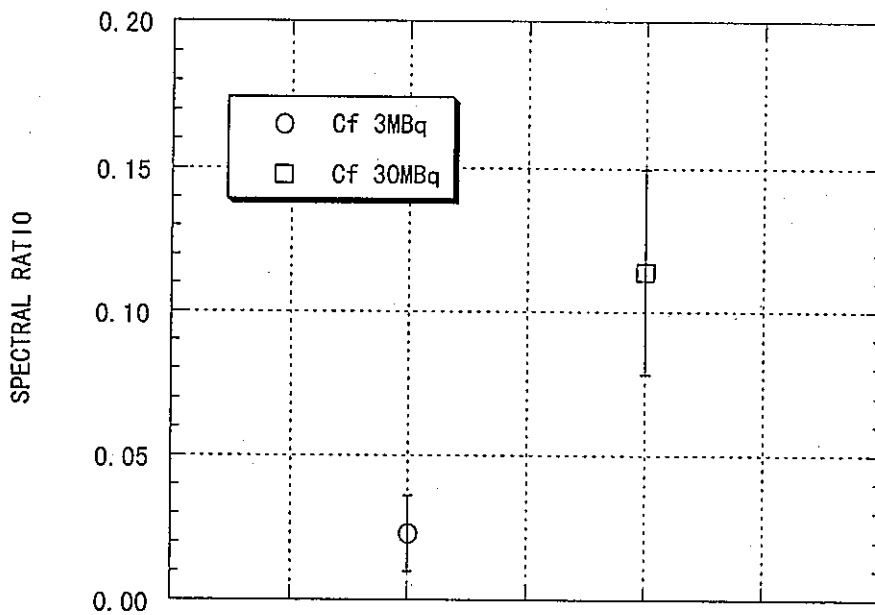


図4-12 S4-4炉心における測定結果 (バックグラウンド補正後)



## 5. 検出器配置の影響

ミハルゾ法による未臨界度測定の一点炉動特性近似に基づくデータ解析では、動特性の空間依存性が顕著になる実効増倍率の小さな体系で、測定時の検出器配置によって評価結果が異なるという検出器配置依存性の問題が現れる。これまで多くの研究者が検出器配置依存性について検討しており、空間高次モードを取り入れたスペクトル比の理論式の導出や配置依存性が小さい検出器配置に関しての実験的な指標の検討等が行われている<sup>[11][6]</sup>。最近では、スペクトル比を計算できるように改良したモンテカルロコードを用いて、スペクトル比について計算値と測定値を比較し、実効増倍率に対応させる手法が提案されている<sup>[7][8]</sup>。

その中で、検出器の視野(FIELD OF VIEW OF DETECTOR)による補正法<sup>[9][10][12]</sup>は既存の計算コードで補正量の計算が可能であり、かつ検出器配置依存性の現象を理解するのに適した手法である。

本節では、検出器の視野を用いて、検出器配置依存性を示す測定結果に補正を行い、検出器配置依存性を定量的に把握した。

### 5.1 検出器配置による測定結果のばらつき

検出器配置依存性を示す典型的な測定結果を示す。測定対象とした炉心は以下の通りである。

炉心名称：S1-4

炉心構成：2領域炉心

ドライバー領域：1.2%濃縮二酸化ウラン燃料体 44体

減速材 重水 120cm～40cm (水位で実効増倍率を設定)

試験体領域：2.7%濃縮二酸化ウラン燃料棒 140本を正方格子配列 (ピッチ 2.2cm) で構成した試験体を装荷

減速材 軽水 200cm (固定)

推定実効増倍率：0.98～0.87 (KENO-Vによる計算値)

検出器配置 (図 5-1 参照)

#### 検出器の設定

Cf線源検出器 3MBq：計数率  $6 \times 10^4$  cps、高圧 1000V、PTF 使用せず、LPF 設定 5kHz

2<sup>3</sup>He-3 検出器 #1：PTF 設定 10kHz、LPF 設定 10kHz

2<sup>3</sup>He-3 検出器 #2：PTF 設定 10kHz、LPF 設定 10kHz

測定においては、Cf線源検出器と中性子検出器3本を炉心の中心から径方向に等しい距離に90度づつずらして配置した。ミハルゾ法で用いる中性子検出器は2本であり、3本の内から選択することにより、2種類の検出器配置を組むことができる。Cf線源検出器に対して2本の中性子検出器が対称の位置にある配置を配置(B)、もう一方の配置を配置(A)とする。

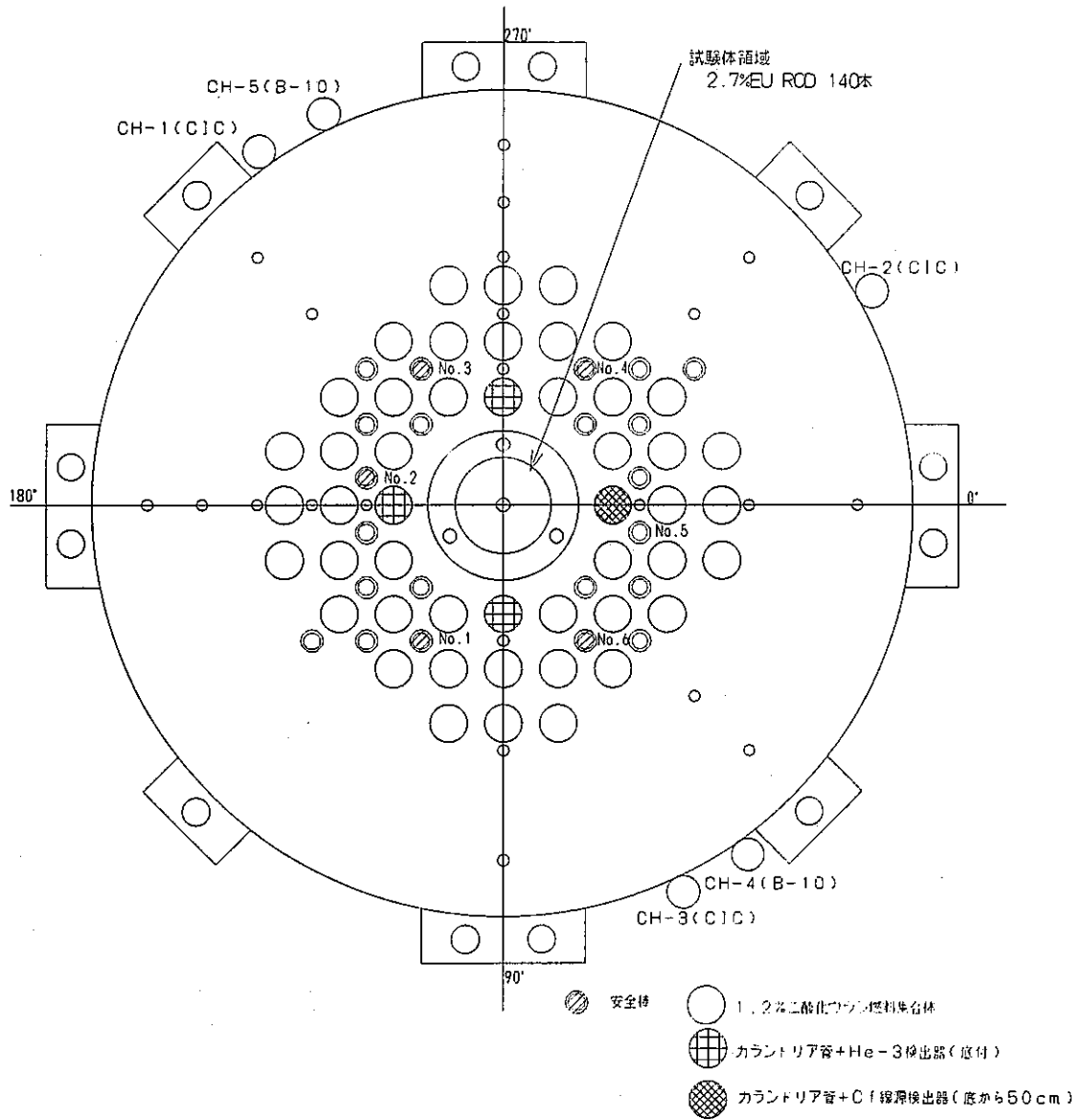


図5-1 S4-1炉心における検出器配置

それぞれの配置について実効増倍率を変化させてミハルツ法の測定を行った。スペクトル比の測定値を、一点炉近似に基づく換算係数(式(3-2),(3-3))により実効増倍率に換算した。換算係数の算出には2次元輸送計算コードを利用した。評価結果を表5-1及び図5-2に示す。実効増倍率が小さくなるにつれて検出器配置による評価結果の違いが大きくなっており、一点炉近似によるデータ解析式では正確に評価できないことが確認できる。モンテカルロコードKENO-Vによる計算値と比較すると、配置(A)の測定結果の方がよく一致しており、配置(B)は実効増倍率を低めに評価している。

表5-1 ミハルソ法測定結果の検出器配置依存性

重水水位*1 (cm)	スペクトル比		換算係数	
	配置(A)	配置(B)	C1	C2
120	0.017±0.004	0.020±0.005	0.79	0.85
100	0.035±0.006	0.045±0.007	0.94	0.85
80	0.046±0.007	0.065±0.008	1.23	0.85
60	0.047±0.006	0.072±0.009	1.73	0.85
40	0.047±0.010	0.073±0.015	2.17	0.85

重水水位*1 (cm)	実効増倍率		
	配置(A)	配置(B)	計算値*2
120	0.984±0.005	0.980±0.006	0.98
100	0.958±0.008	0.947±0.010	0.95
80	0.931±0.012	0.902±0.014	0.92
60	0.903±0.015	0.853±0.021	0.90
40	0.881±0.030	0.820±0.042	0.87

\*1: 臨界水位は140.53cm (線源を含まないダミーのCf線源検出器使用して測定)

\*2: 検出器を含まない体系での計算値 (臨界水位測定値は134.46cm、水位反応度係数は0.1%Δk/k/cmであり、検出器による反応度低下は約0.6%と推定される)

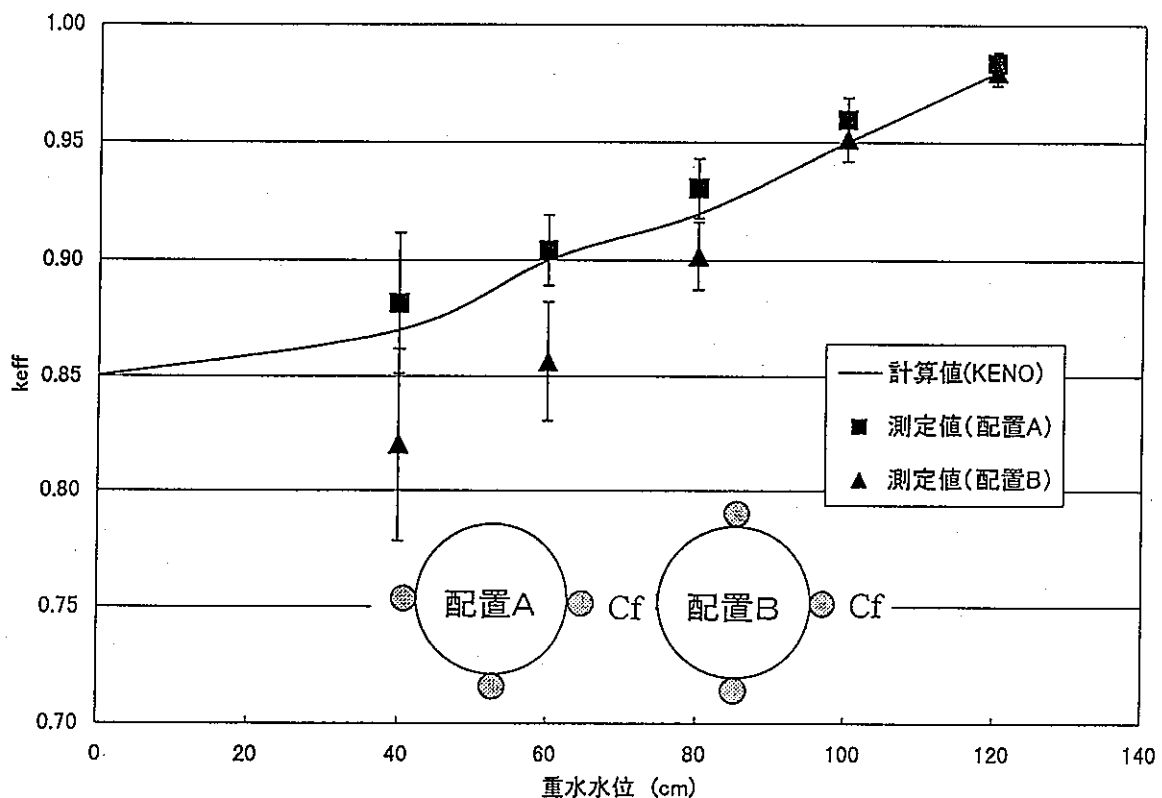


図5-2 ミハルソ法測定結果の検出器配置依存性

## 5.2 検出器の視野を用いた補正

「検出器の視野」は、特定の位置に設置された検出器について、空間的に分布する中性子が減速等を経て最終的に検出器に検出される割合を意味する。「検出器の視野」は、比較的古くから用いられている概念である<sup>[14]</sup>が、炉雑音解析に適用されたのは1975年にBWRの原子炉雑音の解析に提案された<sup>[11]</sup>のが最初であり、その後は出力炉の分野で研究が進んでいる。ミハルゾ法への適用は、須田<sup>[12]</sup>らによって試みられ有効性が確認されているが、検出器視野の計算手法、適用範囲等について更に検討が必要である。

ミハルゾ法で直接測定される量(スペクトル比)は、Cf線源検出器中のCfの核分裂 $F_c$ と体系内の誘導核分裂 $F$ の比に比例する(式(4-9)参照)。検出器配置依存性が現れる理由は、中性子検出器の設置場所と核分裂発生場所との位置関係によって、中性子検出器が核分裂中性子を検出する確率が異なるためであり、「検出器の視野」の概念を取り入れることによって理解することができる。

「検出器の視野」を用いた補正法について、以下に理論、計算手法、ミハルゾ法の測定結果への適用を説明する。

### 5.2.1 理論式

位置 $r$ にあるエネルギー第 $g$ 群の中性子に対する検出器の視野 $I_g(r)$ は、周波数 $f(\text{Hz})$ が $\lambda \ll f \ll v_g \nu \Sigma_{fg}$ の範囲では、周波数依存性が無視でき、式(5-1)で表される<sup>[12]</sup>。

$$(D_g \nabla^2 - \Sigma_{a,g}) I_g + (1 - \beta) \nu \Sigma_{f,g}(r) \sum_i \chi_{p,i} I_g(r) + \sum_k \Sigma_{s,g \rightarrow k}(r) I_k(r) - \sum_k \Sigma_{s,g \rightarrow k}(r) I_g(r) + \Sigma_{d,g}(r) = 0 \quad (5-1)$$

ここで、

- $D_g$  : エネルギー第 $g$ 群についての拡散係数
- $\Sigma_{a,g}$  : エネルギー第 $g$ 群についての吸収断面積
- $\Sigma_{s,g \rightarrow k}$  : エネルギー第 $g$ 群から第 $k$ 群への散乱断面積
- $\Sigma_{fg}$  : エネルギー第 $g$ 群についての核分裂断面積
- $\nu$  : 核分裂当たりの平均中性子放出数
- $\beta$  : 遅発中性子割合
- $\chi_{p,g}$  : エネルギー第 $g$ 群についての即発中性子スペクトル
- $\Sigma_{d,g}$  : エネルギー第 $g$ 群についての中性子検出断面積

である。式(5-1)は、多群固定中性子源問題の随伴形に、中性子源として中性子検出断面積を用いた場合に等しい。

一点炉近似に基づく式(3-1)~式(3-3)を導出する過程で、一点炉近似に基づく中性子インポートランス $I$ の一部を中性子検出器#2,#3それぞれに関しての検出器の視野 $I_2, I_3$ で置き換えると、「検出器の視野」による補正を用いた場合のスペクトル比(SR)を実効増倍率に換算する式(5-2~4)が得られる。

$$keff = 1 - \frac{C_1 \cdot SR}{\varepsilon_1 + (C_1 - C_2) \cdot SR} \quad (5-2)$$

$$C_1 = \frac{(1-\beta)^2}{(1-\beta_C)^2} \cdot \left( \frac{\bar{v}}{v_C} \right) \cdot \left( \frac{\bar{I}_2}{I_{2C}} \cdot \frac{\bar{I}_3}{I_{3C}} \right) \left( \frac{\bar{I}_C}{\bar{I}} \right) \cdot X \cdot R_{23} \cdot Y \quad (5-3)$$

$$C_2 = X_C \cdot R_{23C} + \frac{(1-\beta_i)^2}{(1-\beta_C)^2} \cdot \left( \frac{\bar{v}_i}{v_C} \right) \cdot \left( \frac{\bar{I}_{2i}}{I_{2C}} \cdot \frac{\bar{I}_{3i}}{I_{3C}} \right) \cdot \left( \frac{\bar{I}_C}{\bar{I}_i} \right) \cdot X_i \cdot R_{23i} \cdot (Y-1) \quad (5-4)$$

ここで、

$I_2$  : 中性子検出器#2の「検出器の視野」(#3についても同様)

$R_{23}$  : 空間補正因子 ( $I_2, I_3$ の関数)

$$R_{23} = \frac{\bar{I}_2 \bar{I}_3}{I_2 I_3} \quad (5-5)$$

## 5.2.2 拡散計算コードによる補正値の計算

ミハルソ法で使用する2本の中性子検出器のそれぞれについて「検出器の視野」を計算するには、中性子検出器の局所的な配置を評価に取り入れるために3次元計算が必要になる。DCAにおける実験体系にはボイド領域が存在するため、輸送計算コードの使用が望ましいが、現状では使用できるコードが整備されていないので、今回の解析では、3次元拡散計算コード CITATION を使用した。ただし、拡散計算ではボイド領域に起因する計算誤差が生じるため、絶対的な補正は困難であり、2種類の配置の相対的な補正を試みた。

### 5.2.2.1 計算手法

「検出器の視野」は、固定中性子源問題で、固定中性子源として検出器の中性子検出断面積を入力し、随伴計算をすることで得られる。

CITATION コードで、固定中性子源問題の随伴計算を実行するため、HAGEN の手法<sup>[10]</sup>に基づいて、マクロ断面積データをあらかじめ随伴計算用に変換した。

変換の手順は以下の通りである。

○断面積データの内、拡散係数  $D$ 、核分裂断面積  $\sigma_{\Sigma_f}$ 、核分裂スペクトル  $\chi$  は、変換せずに使用する。

○吸収断面積  $\Sigma_a$ 、散乱断面積  $\Sigma_s$  は次式で変換する。

$$\Sigma_{ai}^* = \Sigma_{ai} - \sum_{j \neq i}^n (\Sigma_{sji} - \Sigma_{sij}) - \chi_i \sum_j^n v \Sigma_{fj} + v \Sigma_{fi} \quad (5-6)$$

$$\Sigma_{sij}^* = \Sigma_{sji} + \chi_i v \Sigma_{fj} - \chi_j v \Sigma_{fi} \quad (5-7)$$

ただし、添え字 ij はエネルギー群 (最大 n 群) を表し、 $\Sigma_{sij}$  は i 群から j 群への散乱断面積を表す。

「検出器の視野」の計算は、臨界計算とは異なり、分布が検出器付近で急激に変化し、また、随伴計算であるため収束が悪い。そのため、今回の計算では SCALE4.2 コードシステムで作成した 27 群マクロ断面積を 2 次元輸送計算コード TWODANT の臨界計算で縮約し、エネルギー 2 群で計算した。エネルギー境界は 3.0eV とした。核分裂中性子に対する「検出器の視野」には、エネルギー第 1 群が相当する。

## 5.2.2.2 検出器の視野の計算結果

エネルギー第1群の「検出器の視野」の径方向分布（軸方向位置は検出器中心）を図5-3に示す。図に示した例は、重水水位60cm,実効増倍率0.85の体系である。

図に示されているように、検出器近傍と試験体領域にピークが観察される。高速中性子はそのままのエネルギーでは実験で使用したHe-3検出器に検出されにくいですが、検出器近傍に減速材があるために検出器位置でピークを持つ。試験体領域は、中心から20cm付近（ボイド領域）と比べて検出器から離れているにもかかわらず大きな値をとる。これは、試験体領域で発生した高速中性子は軽水で減速されて核分裂を起こし、増倍されるためである。試験体領域の中心は中空になっているため小さな落ち込みがある。

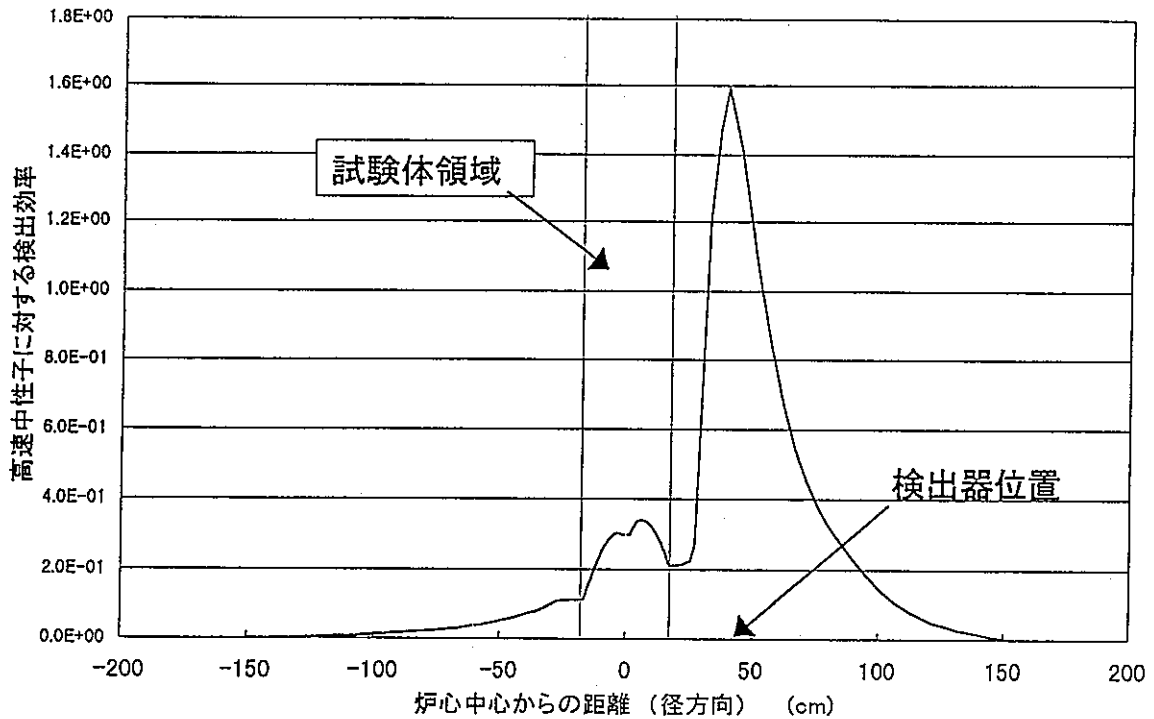


図5-3 検出器の視野の空間分布

### 5.2.3 実験データへの適用

「検出器の視野」を用いて式(5-3)、式(5-4)の換算係数を算出し、5.2.1 節のスペクトル比の測定値に適用した。ただし、5.2.2 節で述べたように、CITATION による計算結果だけでは絶対値の評価は困難な為、配置(A)の結果は一点炉近似に基づく換算係数で評価し、配置(B)と配置(A)の換算係数の比を用いて配置(B)の測定値を補正した。

補正結果を表 5-2、図 5-4 に示す。図 5-5~5-8 には、補正前後の測定結果を各実効増倍率ごとに示した。

配置(B)について「検出器の視野」による補正を加えた結果は、補正前と比べて配置(A)の結果に一致しており、本補正手法により検出器配置依存性を解消できることが確認できた。

表5-2 ミハルゾ法測定結果の検出器配置依存性 (配置(B)を補正)

重水水位 (cm)	換算係数 <sup>1</sup> C1		実効増倍率		
	補正前	補正後	補正前	補正後	配置(A)
120	0.79	0.65	0.980±0.006	0.984±0.005	0.984±0.005
100	0.94	0.73	0.947±0.010	0.959±0.008	0.958±0.008
80	1.23	0.85	0.902±0.014	0.930±0.011	0.931±0.012
60	1.73	1.14	0.853±0.021	0.898±0.015	0.903±0.015
40	2.17	1.58	0.820±0.042	0.862±0.034	0.881±0.030

\*1: 換算係数 C2 は検出器配置に依存しないため、C1 のみを示す。

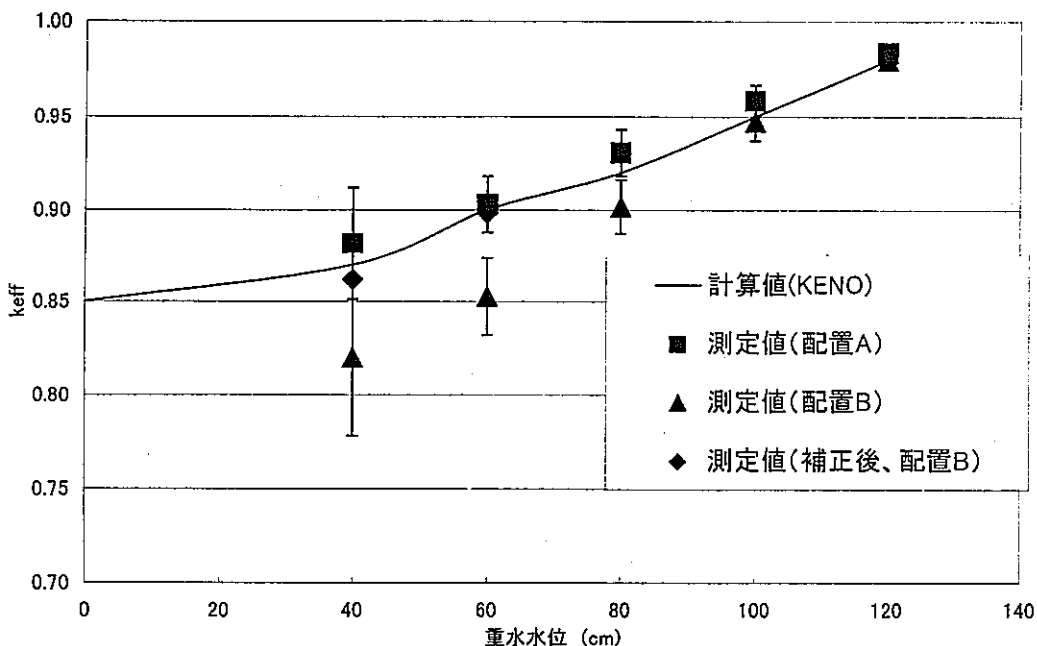


図5-4 検出器配置補正後の測定結果



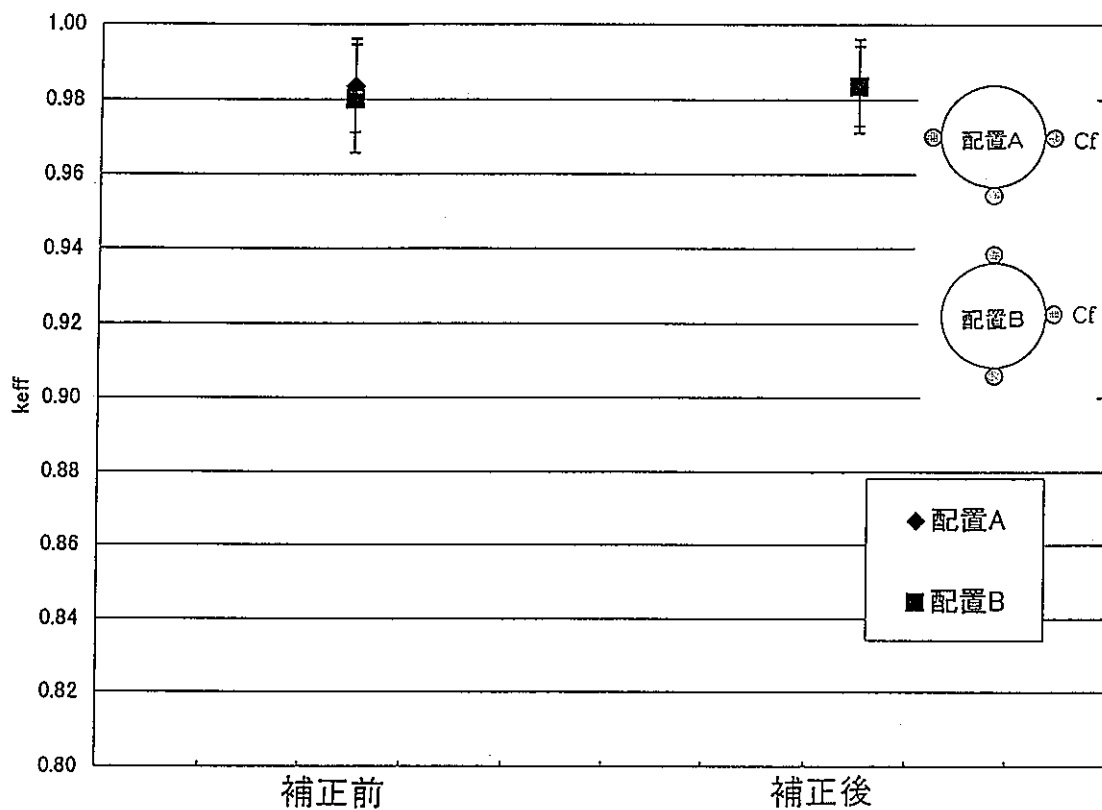


図5-5 検出器配置補正後の測定結果 (keff=0.98)

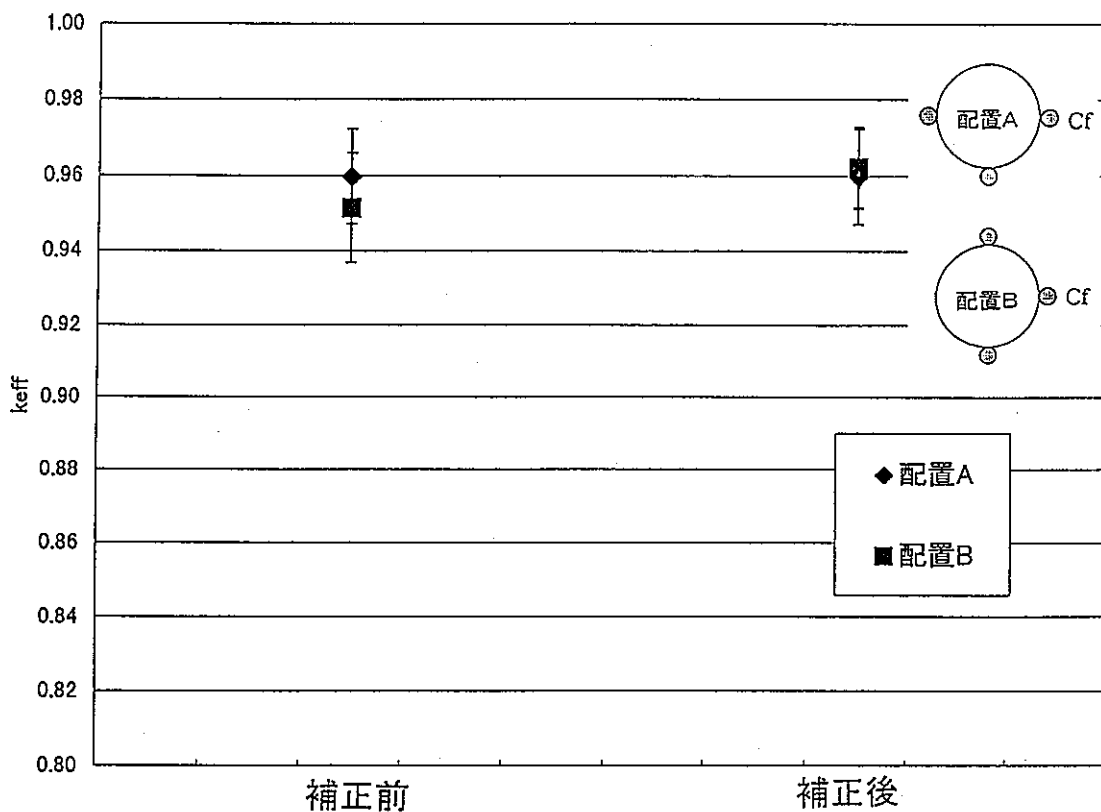


図5-6 検出器配置補正後の測定結果 (keff=0.95)

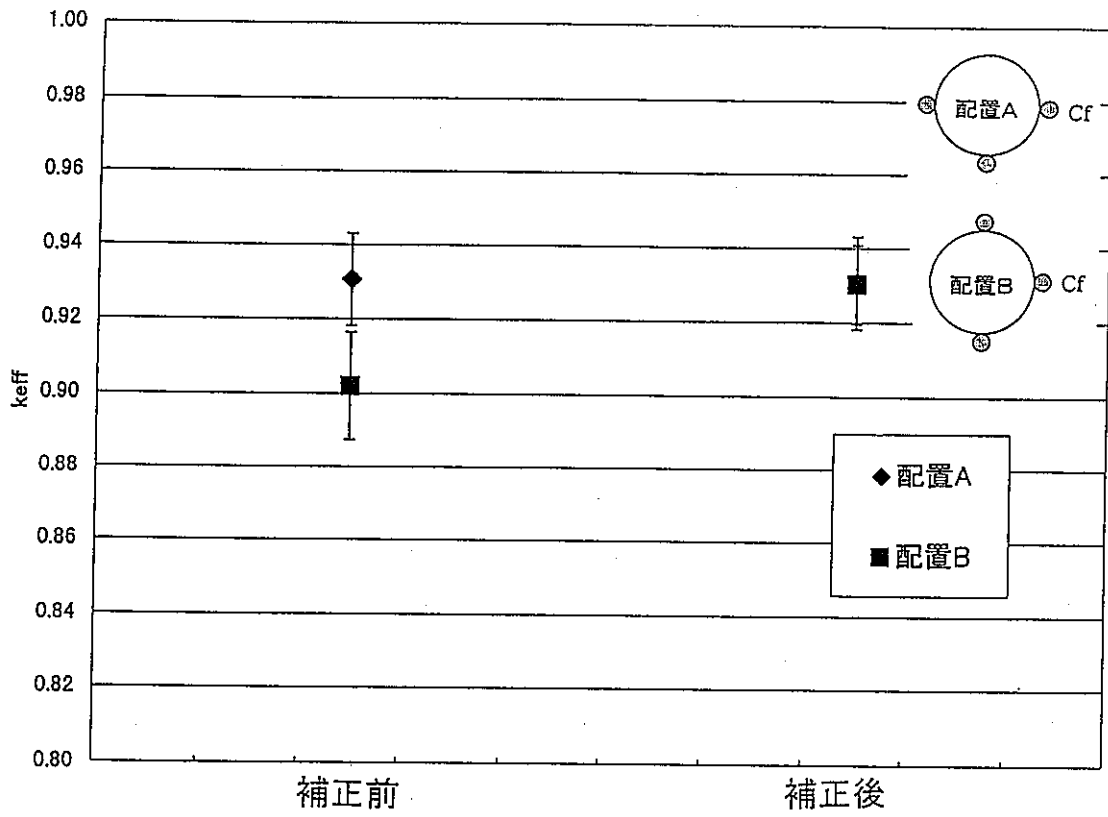


図5-7 検出器配置補正後の測定結果( $k_{eff}=0.92$ )

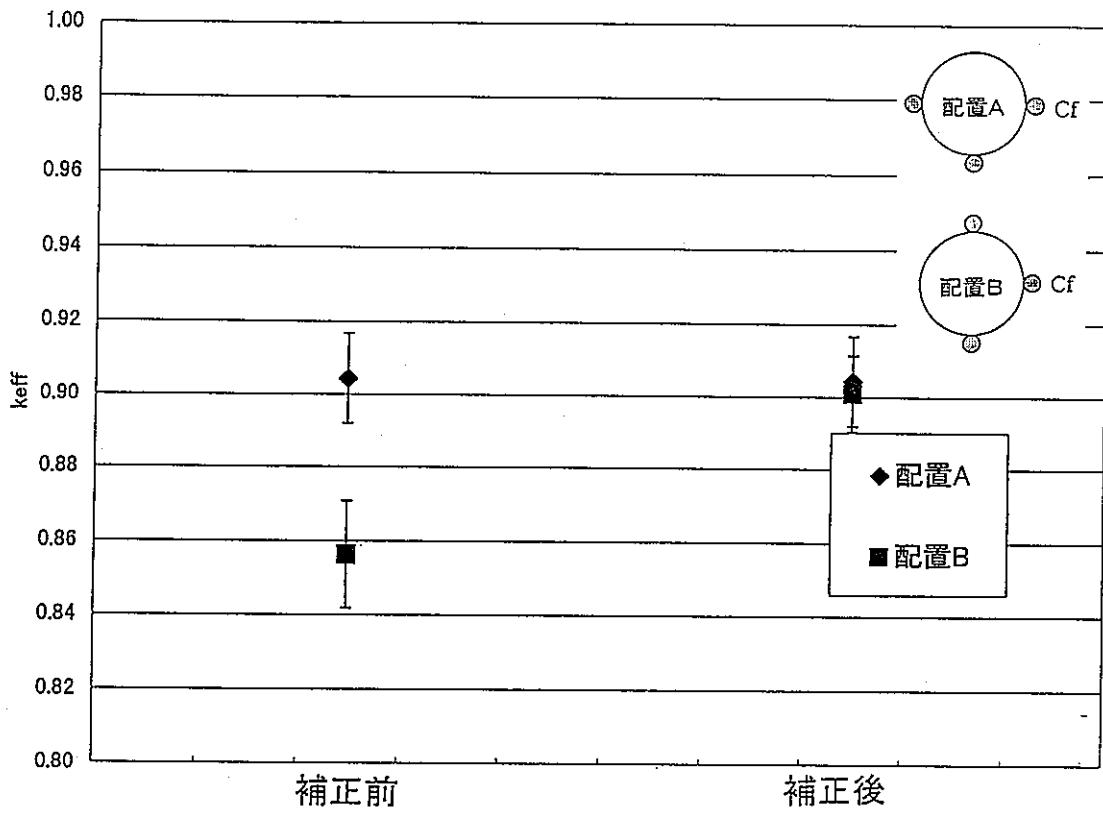


図5-8 検出器配置補正後の測定結果( $k_{eff}=0.90$ )

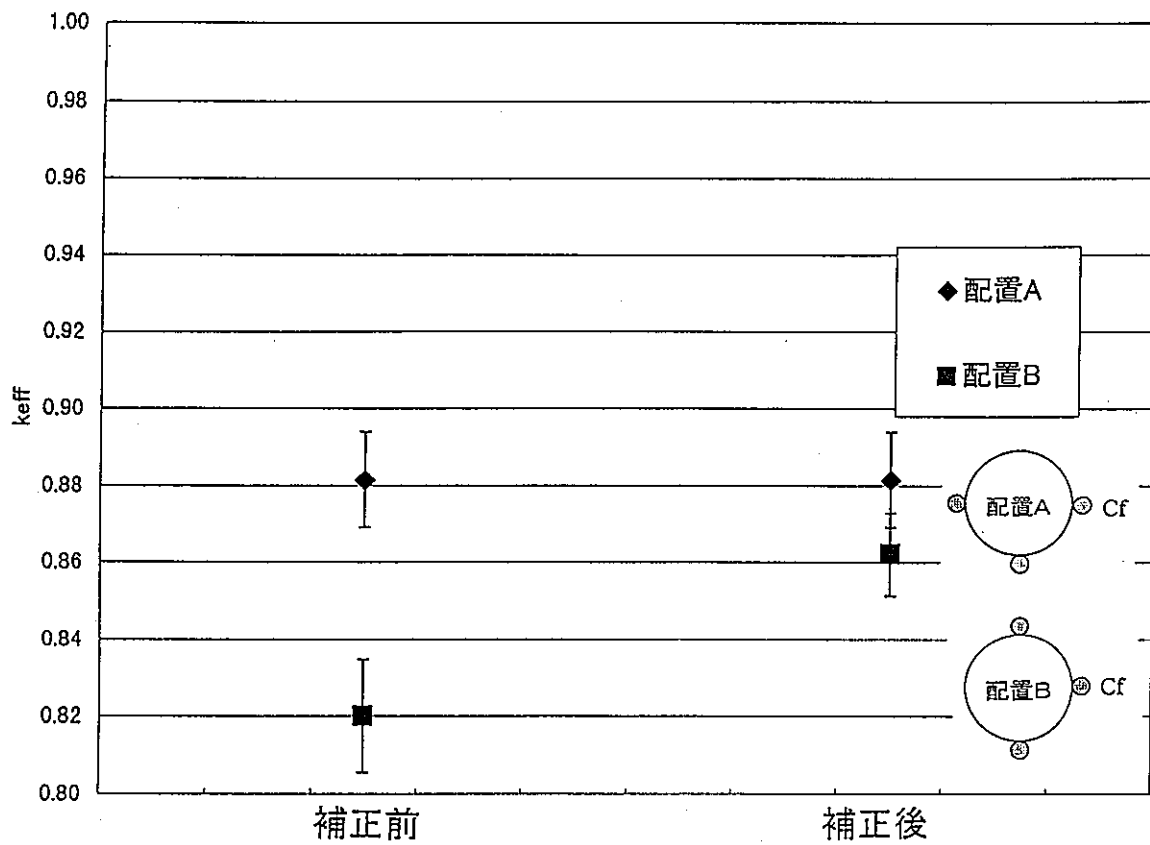


図5-9 検出器配置補正後の測定結果 (keff=0.87)

### 5.2.4 2本の検出器によるミハルゾ法測定の検討

本節では、従来の3本の検出器を使用するミハルゾ法の測定法を改良し、2本の検出器で測定できることを理論的に示す。前述のように検出器の視野を考慮することによって、ミハルゾ法の検出器配置依存性を取り除くことができる。しかしながら、今回のような実験体系では、検出器の視野を正確に計算することが可能であるが、再処理工程などの実体系では、簡略化したモデルで近似せざるを得ない。

検出器の数を削減することによって検出器配置依存性の予測を簡略化できる可能性がある。

ミハルゾ法では、3本の検出器出力信号間の相関量（パワースペクトル密度 PSD）を測定し、次式（式5-7）で表される PSD の比（スペクトル比(SR)）から、実効増倍率を求める。

$$SR = \frac{G_{12} G_{13}^*}{G_{11} G_{23}} \quad (5-8)$$

ここで、 $G_{ij}$  は検出器  $ij$  間のパワースペクトル密度であり、\*は複素共役を表す。

式中の分母  $G_{23}$  は中性子検出器(#2,#3)間の相互パワースペクトル密度 (CPSD) であり、1本の中性子検出器(例えば#2のみ)でも類似の相関量、自己パワースペクトル密度 (APSD,  $G_{22}$ ) が得られる。 $G_{11}, G_{12}$  ( $G_{13}$  も同様),  $G_{23}, G_{22}$  は次式で表される。

$$G_{11}(\omega) = |H_1(\omega)|^2 \overline{\varepsilon_1^2 F_C} \quad (5-9)$$

$$G_{12}(\omega) = H_1(\omega) H_2^*(\omega) \left[ \frac{\overline{\varepsilon_1 \varepsilon_2 v_C F_C}}{\alpha^2 + \omega^2} \right] \quad (5-10)$$

$$G_{22}(\omega) = |H_2(\omega)|^2 \left[ \frac{\overline{\varepsilon_2^2 N} + \frac{\overline{\varepsilon_2^2 \{v(v-1)F + v_C(v_C-1)F_C\}}}{\alpha^2 + \omega^2}}{\varepsilon_2^2 N + \frac{\overline{\varepsilon_2^2 \{v(v-1)F + v_C(v_C-1)F_C\}}}{\alpha^2 + \omega^2}} \right] \quad (5-11)$$

$$G_{23}(\omega) = H_2(\omega) H_3^*(\omega) \left[ \frac{\overline{\varepsilon_2 \varepsilon_3 \{v(v-1)F + v_C(v_C-1)F_C\}}}{\alpha^2 + \omega^2} \right] \quad (5-12)$$

ここで、

$\varepsilon$  : 中性子検出器の検出効率

$\alpha$  : 即発中性子減衰定数

$\omega$  : 角周波数 ( $2\pi \times$  周波数)

$H$  : 測定回路の周波数特性

$N$  : 中性子密度

$F$  : 核分裂率

であり、添え数字は検出器番号を、添え字 C は Cf に関する量であることを表す。(ただし、空間補正因子や自発核分裂物質の寄与は省略されている。)

自己パワースペクトル密度  $G_{22}$  には、 $G_{23}$  では現れない非相関成分  $\overline{\varepsilon_2^2 N}$  が含まれ、そのままでは  $G_{22}$  を  $G_{23}$  の代わりに用いることはできない。しかしながら、 $G_{22}$  の非相関成分が周波数によらず一定であるのに対し、相関成分  $\frac{\overline{\varepsilon_2^2 \{v(v-1)F + v_C(v_C-1)F_C\}}}{\alpha^2 + \omega^2}$  は高周波数領域ではゼロに漸近し、高周波数領

域における  $G_{22}$  には非相関成分だけが残る。

よって、高周波数領域での  $G_{22}$  より非相関成分を求め、 $G_{22}$  から差し引けば、 $G_{22}$  から相関成分だけを抽出することができる。

非相関成分を除去した  $G_{22}$  で  $G_{23}$  を、 $G_{13}$  を  $G_{12}$  で置き換えると検出効率や測定回路の周波数特性は、分子分母で打ち消し合い、スペクトル比の理論式 (式(5-13)) が得られる。式(5-13)は従来のミハルソ法のスペクトル比の理論式と同一である。

$$SR = \frac{\overline{\varepsilon_C^2} v_{CP} F_C}{\varepsilon_C^2 [v_P (v_P - 1) F + v_{CP} (v_{CP} - 1) F_C]} \quad (5-13)$$

2本でミハルソ法の測定ができれば、3本の場合に比べてより柔軟な測定システムを構築することが可能になると共に、検出器配置依存性の評価も簡略化できると考えている。今後、実験により検討していく。

## 6. まとめ

ミハルゾ法による未臨界度測定法について、Cf 線源検出器の線源強度、及び、検出器配置の影響を評価した。

ミハルゾ法に使用する Cf 線源検出器では、検出器内に装荷される Cf の線源強度が重要なパラメータである。一般的には、線源強度が強いほど統計精度も向上すると考えられるが、高強度の線源は製作や取扱いが困難であり、必要十分な線源強度を決定する事が重要である。本研究では Cf 線源検出器の線源強度が測定結果（実効増倍率）及び誤差に与える影響について評価した。

中性子バックグラウンドの低い体系における測定では、Cf 線源の強度を強くしても、実効増倍率の測定結果に有意な差を生じないことが確認された。

一般に計数率の評価では、同一の測定時間では計数率が増加すると誤差（標準偏差）が相対的に低減する。しかしながら、炉雑音解析では信号の強度よりも信号中の相関成分（核分裂率のゆらぎの情報）の割合で評価精度が決まり、体系固有の中性子バックグラウンド、即ち非相関成分が小さい場合には、中性子計数の S/N 比は、S（相関成分）を上げて、N（非相関成分）も同様に大きくなり、測定精度の向上につながらない。

一方、中性子バックグラウンドが高い場合には Cf 線源強度の影響が現れる。バックグラウンドは Cf を起源としない中性子による誘導核分裂の増加となり、評価値や評価値の統計誤差に影響を与える。

Cf を起源としない誘導核分裂が増加すると、実効増倍率が大きめに評価される。誘導核分裂の増加率は、近似的に中性子計数の増加率にほぼ等しいと近似できるので、バックグラウンドによる中性子計数の増加率を測定し、ミハルゾ法の評価値を補正した結果、バックグラウンドに依存しない実効増倍率の評価値を得ることができた。統計誤差は、バックグラウンドによる中性子計数が 1.5 倍（体系内の全中性子源に対して Cf 中性子源が 67%を占める場合）になる時は 1.2 倍に、7 倍（同 16%）になるときは 2 倍になる。

バックグラウンドによる中性子計数の増加率は、Cf 中性子源あるいは別の中性子源を体系から出し入れするときの中性子計数率の変化より測定することができる。ミハルゾ法をモニターとして再処理施設等に適用する場合、Cf 線源強度をバックグラウンドが無視できるぐらいに大きくできれば問題ないが、強度に制約がある場合には、バックグラウンド中性子の影響を測定する簡易な手法を検討する必要がある。

次に、検出器の視野（核分裂で発生した中性子が最終的に検出器に検出される率）を計算し、検出器の配置に対する補正因子として適用した。この補正によって検出器の配置に依存しない一定の評価が得られるようになり、検出器配置の影響が検出器の視野を用いて説明できることが実験によって確認できた。

ミハルゾ法の測定における Cf 線源強度の影響、検出器配置の影響を評価し、精度の高い測定値を得

るための必要条件を把握した。得られた結果を用いることによって、再処理施設等の複雑な条件を持つ実体系に設置する場合の評価精度の検討が可能となる。

未臨界度モニターにおいては、測定値の正確さと共に測定時間が重要である。今回の測定では、安定な測定値を得るために1時間以上の測定を行ったが、それでも統計誤差は  $k_{eff}=0.90$  に対して  $\pm 0.01$  である。ミハルゾらは<sup>2)</sup> 溶液燃料体系の小さな体系で実験を行い、6.4 秒の測定で  $k_{eff}=0.90$  に対して  $\pm 0.003$  の誤差で結果を得ている。

ミハルゾの実験体系と今回の実験体系を  $k_{eff}=0.90$  の場合で比較すると、対象周波数（有意な情報を含む周波数領域）がミハルゾの実験では 400Hz～5kHz、今回の実験では 10～100Hz である。ミハルゾの実験では測定周波数を高く（kHz のオーダー）設定することが可能であり、短い測定時間で多くの波形情報を得ている。中性子寿命（ミハルゾの実験  $10^{-5}$ sec に対し、今回の実験では  $10^{-3}$ sec のオーダー）の相違が原因である。また、幾何学的に見ても今回の実験体系は、ミハルゾの実験体系の約 10 倍であり、体系内の中性子に対する検出効率が小さい。測定精度に影響を与える大きな要因として考えられる。

今後は、統計誤差を低減する手法を測定装置、信号処理法の各観点から検討し、現状の測定体系で可能な統計精度を明確にする。測定装置については、複数の検出器信号を1つにまとめて測定することによって中性子検出効率を向上させることを検討する。信号処理法については、統計誤差の原因となりうるアナログ的な処理手法からデジタル的な処理手法に改変することや、周波数解析におけるフィルターの適用を検討する。中性子バックグラウンドの影響、検出器配置依存性の影響についても、高富化度 Pu を含む常陽 MK-I 燃料を用いた実験体系を対象に更に詳細に検討する。

また、ミハルゾ法測定を従来からの周波数領域での相関測定ではなく、時間領域での相関測定によって行い<sup>4)</sup>、従来手法との比較を行う。

## 7. 謝辞

本研究を行う上で重要な機器である 30MBq の Cf 線源検出器の製作に当たっては、照射燃料試験室の小山真一氏に多大なご協力をしていただきました。謹んで感謝します。

FFT プログラム作成においては臨界工学試験室の有賀正訓氏の助言により作業をスムーズに行うことができました。また、実験に当たっては、毛利智聡氏を始めとする臨界工学試験室の室員皆様のご協力をいただきました。この場を借りて感謝の意を表します。



## 8. 参考文献

- [1] J. T. Mihalcz, . V. K. Pare, G. E. Ragan, M. V. Mathis, and G. C. Tillette, "Determination of Reactivity from Power Spectral Density Measurements with Californium-252," Nucl. Sci. Eng., 66, 29(1978).
- [2] J. T. Mihalcz, E. D. Blakeman, G. E. Ragan, E. B. Johnson, and Y. Hachiya, "Dynamic Subcriticality Measurements Using the  $^{252}\text{Cf}$ -Source-Driven Noise Analysis Method," Nucl. Sci. Eng., 104, 314(1990).
- [3] J. T. Mihalcz, E. D. Blakeman, G. E. Ragan, R. C. Kryter, H. Seino, and R. C. Robinson, " $^{252}\text{Cf}$ -Source-Driven Neutron Noise Measurements of Subcriticality for an Annular Tank Containing Aqueous Pu-U Nitrate," Nucl. Technol., 94, 336(1991).
- [4] J. T. Mihalcz, "The Use of Californium-252 as a Randomly Pulsed Neutron Source for Prompt-Neutron Decay Measurements," Nucl. Sci. Eng., 53, 393(1974).
- [5] 小池 慎一, Cによる科学技術計算, CQ出版, (1994).
- [6] 山根義宏, 仁科 浩二郎, 他, 日本原子力学会誌, 28, 850(1986).
- [7] Edward P. Ficaró and D. K. Wehe, "KENO-NR: A Monte Carlo Code for Simulating  $^{252}\text{Cf}$ -Source-Driven Noise Analysis Measurements to Determine Subcriticality," Nucl. Sci. Eng., 117, 158(1994).
- [8] T. E. Valentine and J. T. Mihalcz, "MCNP-DSP: A neutron and gamma ray monte carlo calculation of Source-Driven Noise-Measured parameters," Ann. Nucl. Energy, 23, 1271(1996).
- [9] F. C. Difilippo, "Harmonic analysis of stochastic descriptors and the interpretation of  $^{252}\text{Cf}$  Neutron Source Experiments," Nucl. Sci. Eng., 104, 123(1990).
- [10] T. H. J. J. van der Hagen, et al., "A Multidimensional Multigroup Diffusion Model for the Determination of the Frequency-Dependent Field of View of a Neutron Detector," Nucl. Sci. Eng., 110, 237(1991).
- [11] Hugo Van Dam, "A perturbation method for analysis of detector response to parametric fluctuations in reactors", Atomkernenergie, Vol. 25[1], pp70-71, (1975).
- [12] 須田憲二, 山根義宏, 他, 日本原子力学会「1990 年年会」予稿集, B49
- [13] 羽様平, 仁科浩二郎, 他, 日本原子力学会「1992 年秋の大会」予稿集, B49
- [14] 大塚益比古, 「原子炉物理 —中性子インポートランスと原子炉の理論—」、共立物理学講座 24、共立出版, (1972).
- [15] 古橋晃, 日本原子力学会誌, 31, 374(1989).

## APPENDIX

## 1. FFTプログラムソースリスト

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#define PI 4.0*atan(1.0)
/*
/*      fft program */
/*
/*      copy from List 3.3.1(a)
/*
/* INPUT: SAMPLE DATA */
/* OUTPUT: PSD BINARY FILE FOR EACH DETECTOR COMBINATION */
/* OUTPUT FILES CAN BE 'TXT DATA' BY "txto.c"
/* MAX DATA LENGTH 8 SEC */
/* MAX 5 DETECTORS OK
/* MAX FREQUENCY FOR FINAL RESULT REDUCED TO 1/5 OF MAX CAL FREQ TO AVOID FILTER EFFECT */
/*
double x[70000], xr[5][4000], xi[5][4000], g1l[10][4000], g12r[10][4000];
double y[70000], g12i[10][4000];
double g1la[10][4000], g12ra[10][4000], g12ia[10][4000];
double cosx[20000], sinx[20000];
char fn1[50], fn2[50], fn3[50];
char fnin[50], fnot[50], extn1[3], extn2[3];
int nmax, nchan, ifreq, nrep, nave, nmax2, avenum;
int nch[10], combi, combix, combiy, combimax, noch;
long int posl, pos2;
char *achar[] = {"g1l", "g12r", "g12i"};

main() /* FFT for a couple of data N */
{
    int I, J, nrepmax, nmax, itemp, l;
    float dtlength, minfreq, maxfreq;
    double dt;

    printf(" input file name as (sample) ? %n");
    scanf("%s", fn1); /* input file name */
    printf(" extension for output file name as (001) ? %n");
    scanf("%s", extn2); /* output file name extension */
    filemaker(fn1, fn2, "LOG");
        printf(" filename 1 = %s%fn", fn2);
    silk1(&nmax, &nchan, &ifreq, fn2);
        printf(" nmax= %d%fn", nmax);
        printf(" nchan= %d%fn", nchan);
        printf(" ifreq= %d%fn", ifreq);
        dt = 1.0/ifreq*1000; /* sampling time (msec) */
        printf(" sampling time = %6.3f (msec) %fn", dt);
    filemaker(fn1, fnin, "BIN");
        printf(" filename 2 = %s%fn", fnin);
    printf(" data length (sec) per average (=0 for default(2sec) ) ? %n");
    scanf("%f", &dtlength); /* data length (sec) */
        if(dtlength==0) dtlength=2.;
        printf(" data length = %6.1f (sec) %fn", dtlength);
        nmax=dtlength/dt*1000; /* = # of data for data length */
        l=inv2pow(nmax); itemp=pow(2., (double)l);
    printf(" averaging number (=0 for default(max) ) ? %n");
    scanf("%d", &nrepmax); /* averaging number */
        if(nrepmax==0) nrepmax=nmax/itemp;
        nmax=itemp;
        minfreq=1/(dt*nmax)*1000;
        printf(" # of data (ideal) %d (real) %d, # of files %d%fn", nmax, nmax, nrepmax);
    printf(" input data averaging number (=0 for default(4) ) ? %n");
    scanf("%d", &avenum); /* input data averaging number */
        if(avenum==0) avenum=4; /* =highest frequency ifreq/(2*4) Hz */
        nmax2=nmax/avenum;
        maxfreq=ifreq/(2.0*avenum)/5.0;
        printf(" # of data after averaged = %d %fn", nmax2/10);
        printf(" min freq = %8.5f (Hz), max freq = %8.2f (Hz) %fn", minfreq, maxfreq);
    costable(cosx, nmax2); /* store cosine table */
    sintable(sinx, nmax2); /* store sine table */

    printf(" input number of channels to process (max 4) ? %n");
    scanf("%d", &noch); /* input # of channels */
    printf(" number of channels to process = %d %fn", noch);
    for (I=0; I<noch; I++)
    printf(" input data channel number %d of %d to process ? %n", I+1, noch);
    scanf("%d", &nch[I]); /* input channel number */
    }
    combimax=noch*(noch-1)/2;
    if (noch>noch/2*2) {

```

```

                nch[noch]=nch[0];
                noch=noch+1;
            }
        /*      printf(" %n combination #d %n",combi+1);
        printf("data for channel %d & %d %n",nchx,nchy); */
        posl=0;
        /*      nrep=0 usual ;' nrep=-1 for once through */
        nrep=0; nave=1;
        /*
        /*      averaging loop start
        /*
        /*      for (J=0;J<nrepmax;J++) {
        /*
        /*      sequential combination data processing loop start
        /*
        /*      for (combi=0;combi<noch/2;combi++) {
                if (combi==0) posl=pos1;
                posl=pos2;
                printf(" read file #d for combination #d %n",J+1,combi+1);
                if (nrep==1) J=nrepmax; /* for once through */
                if( silk2(x,y,nmax,nchan,nch[combi*2],nch[1+combi*2],ifreq,fnin,&posl,&nrep)==-1) exit();
                printf(" read to data # %d word %n",posl/(nchan*2));
        /*      sample data */
        /*      sines_2(xxx,n,t1,t2,t3,d1,d2,d3,c1,c2,c3)
        (c1*sine(2pi/t1*i+d1)+c1*sine(2pi/t1*i+d1)+c1*sine(2pi/t1*i+d1))/(c1+c2+c3)*/
        /*      nmax=1100;
                l=inv2pow(nmax); nmax2 = pow( 2. , (double)l);
        printf(" data number %d %n",nmax2);
                costable(cosx,nmax2);
                sintable(sinx,nmax2);
                x[nmax2]=0.0; y[nmax2]=0.0;
                sines_2(x,nmax2, 16.0,64.0,256.0, 1.0,2.0,3.0, 1.0,5.0,2.0);
                sines_2(y,nmax2, 16.0,64.0,256.0, 0.5,1.0,2.0, 1.0,5.0,2.0);
        /*
        /*      raw data output */
        /*
        /*      for (I=0;I<3;I++){
                printf(" x[%d] = %6.3f y[%d] = %6.3f %n",I,x[I],I,y[I]);
            }
            for (I=nmax/2;I<nmax/2+3;I++){
                printf(" x[%d] = %6.3f y[%d] = %6.3f %n",I,x[I],I,y[I]);
            }
            printf(" %n");
        /*
        /*      averaging data into 1 data */
            if (avenum>1.){
                sumdata(x,avenum,nmax2);
                sumdata(y,avenum,nmax2);
            }
        /*      apply hanning window */
                hann(x,cosx,nmax2); hann(y,cosx,nmax2);
        /*      fft calculation */
            printf(" fft calculation %n");
                fft(x,y,cosx,sinx,nmax2,-1.0);
        /*      fourier transform of data x,y before decomposition result output */
        /*
            for (I=0; I<4; I++)
            {
                printf("x[%d]= %6.3f y[%d]= %6.3f %n",I,x[I],I,y[I]);
            }
            printf("%n");
        /*
        /*      decomposition FFT data correspond to original */
        /*      fourier transform of data x,y
        /*
        /*      max freq = sampling freq / nave * 1/8
        /*
        /*
            for (I=0; I<nmax2/10 ; I++)
            {
                xr[combi*2][I]= (x[I]+x[nmax2-I])/2.0; xi[combi*2][I]= (y[I]-y[nmax2-I])/2.0;
                xr[combi*2+1][I]= (y[I]+y[nmax2-I])/2.0; xi[combi*2+1][I]= -(x[I]-x[nmax2-I])/2.0;
            }
        /*      fourier transform of data x,y result output */
        /*
            for (I=0; I<4; I++)
            {
                printf("x(real) [%d]= %6.3f x(imag) [%d]= %6.3f %n",I,xr[0][I],I,xi[0][I]);
            }
            printf("%n");
        /*
            }
        /*      combination serial processing loop end */

```

```

printf(" averaging %fn");
for (combi=0;combi<nch;combi++){
    apsd( combi, xr, xi, g1l, nmax2/10);
    averg(combi, g1l, g1la, nmax2/10, nave);
}
for (combi=0;combi<combimax;combi++){
    combimaker( combi, &combi, &combi);
    cpsd( combi, combi, combi, xr, xi, g12r, g12i, nmax2/10);
    averg(combi, g12r, g12ra, nmax2/10, nave);
    averg(combi, g12i, g12ia, nmax2/10, nave);
}
/* APSD, CPSD of data x, y result output */
/*
for (I=0;I<4; I++)
{
    printf("I= %d g1l= %5.3f g22= %5.3f g12r= %6.3f g12i= %6.3f\n",
        I, g1l[0][I], g12r[0][I], g12i[0][I]);
}
*/
    nave++;
}
/* averaging loop end */
printf (" end of calculation %fn");
printf ("%fn");

/* result dump to binary file */
for (I=0;I<5;I++){
    printf("I= %d g1la= %5.3f g12ra= %6.3f g12ia= %6.3f\n", I, g1la[0][I], g12ra[0][I], g12ia[0][I]);
}
for (combi=0;combi<nch;combi++){
    filemaker2(fn1, fn2, achar[0], extn1, nch[combi], nch[combi]);
    filemaker(fn2, fn3, extn1);
    filemaker(fn3, fnot, extn2);
    printf("result file (binary) = %s\n", fnot);
    flwriter1(combi, g1la, nmax2/10, fnot);
}

for (combi=0;combi<combimax;combi++){
    combimaker( combi, &combi, &combi);
    for (I=1;I<3;I++){
        filemaker2(fn1, fn2, achar[I], extn1, nch[combi], nch[combi]);
        filemaker(fn2, fn3, extn1);
        filemaker(fn3, fnot, extn2);
        printf("result file (binary) = %s\n", fnot);
        if (I==1) flwriter1(combi, g12ra, nmax2/10, fnot);
        if (I==2) flwriter1(combi, g12ia, nmax2/10, fnot);
    }
}
/*
filemaker(fn1, fnot, extn2);
printf("information file (text) = %s\n", fnot);
nrepmax
minfreq
*/
}
/* main end */

/*
/* setting of channel combination to process */
/*
int combimaker(combi, combi, combi)
/**/
int combi, *combi, *combi;
{
    if (combi==0) {
        *combi=0;
        *combi=1;
    }
    if (combi==1) {
        *combi=0;
        *combi=2;
    }
    if (combi==2) {
        *combi=1;
        *combi=2;
    }
    if (combi==3) {
        *combi=0;
        *combi=3;
    }
    if (combi==4) {
        *combi=1;
        *combi=3;
    }
    if (combi==5) {

```

```

        *combi=2;
        *combi=3;
    }
    if (combi==6) {
        *combi=0;
        *combi=4;
    }
    if (combi==7) {
        *combi=1;
        *combi=4;
    }
    if (combi==8) {
        *combi=2;
        *combi=4;
    }
    if (combi==9) {
        *combi=3;
        *combi=4;
    }
}
/* calculation of POWER SPECTRAL DENSITY & COHERENCE */
/* */
int apsd( combi, xr, xi, g1l, n)
    double xr[5][4000], xi[5][4000], g1l[5][4000];
    int n, combi;
{
    int I;
    for (I=0; I<n ; I++)
    {
        g1l[combi][I]= (xr[combi][I]*xr[combi][I]+xi[combi][I]*xi[combi][I]);
    }
}
int cpsd( combi, combix, combiy, xr, xi, g12r, g12i, n)
    double xr[5][4000], xi[5][4000], g12r[10][4000], g12i[10][4000];
    int n, combi, combix, combiy;
{
    int I;
    for (I=0; I<n ; I++)
    {
        g12r[combi][I]= (xr[combi][I]*xr[combiy][I]+xi[combi][I]*xi[combiy][I]);
        g12i[combi][I]= (xr[combi][I]*xi[combiy][I]-xi[combi][I]*xr[combiy][I]);
    }
}
/* FILENAME MAKER FROM (NAME + EXTENTION) TO (NAME.EXTENTION) */
/* */
int filemaker( fn1, fn2, extrn)
/**/
    char fn1[], fn2[], extrn[];
{
    int inum1, i;
    i=50;
    while(i) fn2[--i]=(char)0x00; /* initialize fn2 */
    inum1=strlen(fn1);
    strcpy(fn2, fn1); /* copy fn1 to fn2 */
    fn2[inum1]='.';
    strcat(fn2, extrn); /* add extention to fn2 */
}
int filemaker2( fn1, fn2, achar, extrn, indexn1, indexn2)
/**/
    char fn1[], fn2[], achar[], extrn[];
    int indexn1, indexn2;
{
    char cnum[10];

    strcpy(cnum, "0123456789");
    strcpy(extrn, "0");
    strcat(extrn, cnum+indexn1, 1); /* 0 to 9 for now */
    strcat(extrn, cnum+indexn2, 1); /* 0 to 9 for now */
    strcpy(fn2, fn1);
    strcat(fn2, achar);
}
/* SONY DAT data recorder data reading program */
/* */
/* silk 1 ; read *.LOG txt data */
/* silk 2 ; read *.BIN binary data */
/* */

int silk1(n, ch, freq, fn)
/**/
int *n, *ch, *freq;
char *fn;
{
    FILE *f1;

```

```

        int    I, J;
        int    dummy[10];
        char   dum1[20], dum2[20];
    /**/
    F1=fopen(fn, "r");
    /**/
    for(I=0; I<4; I++) {
        fscanf(F1, "%s%s%d", dum1, dum2, &dummy[I]); /* read txt data */
    }
    fclose(F1);
        *n = dummy[1];
        *ch = dummy[2];
        *freq = dummy[3];
    }
    int silk2(x, y, n, ch, nchx, nchy, freq, fn, posl, nrep)
    /**/
    double x[], y[];
    int    n, ch, nchx, nchy, freq, *nrep;
    long int *posl;
    char   *fn;
    {
        FILE *F1;
        short *A;
        int    I;
    /* set nrep=1 for once through */
        n=n*ch; /* # of data for each channel */
        F1=fopen(fn, "rb");
        fseek(F1, *posl, 0);
        if((A = (short *)malloc(sizeof(short)*n)) == NULL) {
            puts("out of memory");
            return(-1);
        }
        fread(A, sizeof(short), n, F1);
        *posl=ftell(F1);
        (*nrep)++;
        fclose(F1);
        for(I=0; I<n/ch; I++) {
            x[I]=(double)A[I*ch+(nchx-1)];
            y[I]=(double)A[I*ch+(nchy-1)];
        }
        free ((short *) A );
    }

    /**
    /** binary data processing program
    /**
    /** fiwriter ; make binary data
    /** skip first 2 data
    /**
    /**
    int flwriter1(combi, x, n, fn2)
    /**/
    double x[10][4000];
    int    n, combi;
    char   *fn2;
    {
        FILE *F2;
        float *xx;
        int    I;
        xx=(float *)calloc(n+1, sizeof(float));
        F2=fopen(fn2, "wb");
        for (I=2; I<=n; I++) {
            xx[I-2]=(float)x[combi][I];
        }
        fwrite(xx, sizeof(float), n-1, F2);
        fclose(F2);
        free ((int *) xx );
    }

    /**
    /** averaging program
    /**
    /**
    int averg(combi, x, xave, n, nave)
    /**/
    double x[10][4000], xave[10][4000];
    int    n, nave, combi;
    {
        int I;
        for (I=0; I<n; I++) {
            xave[combi][I]=( x[combi][I]+xave[combi][I]*(nave-1) )/nave;
        }
    }

    /**
    /** fft program
    /**
    /** copy from List 3.3.1(a)
    /**
    int fft(xx, yy, cosx, sinx, n, f)

```

```

double *xx, *yy, *cosx, *sinx, f;
int n;
{
    int l, i, i0, i1, j, l1, ns, n1, arg, arg2,
        *m;
    double s, c, xx1, yy1, t;

    l=inv2pow(n);    n=pow(2., (double)l);
    n1=n/2; ns=n1;
    m=(int *)calloc(n, 2);

    while(ns >= 1) /* main loop */
    {
        for (l1=0; l1<n; l1+=(2*ns))
        {
            arg=m[l1]/2;    arg2=arg+n1;
            c=cosx[arg]; s=f*sinx[arg];

/*
printf("arg= %d\n", arg);
*/
            for (i0=l1 ; i0<l1+ns; i0++)
            {
                i1 =i0+ns;

/*
*/
                xx1 =xx[i1]*c-yy[i1]*s; yy1 =yy[i1]*c+xx[i1]*s;
                xx[i1]=xx[i0]-xx1;    yy[i1]=yy[i0]-yy1;
                xx[i0]=xx[i0]+xx1;    yy[i0]=yy[i0]+yy1;
                m[i0]=arg;            m[i1]=arg2;
/*
printf("l1= %5d    i0= %5d    i1= %5d    x[i0]= %8.2f  x[i1]= %8.2f\n", l1, i0, i1, xx[i0], xx[i1]);*/
            }
            ns=ns/2;
        }

        if (f<0.0) /* judge fft(<0) or reverse fft(>0) */
        for (i=0; i<n; i++)
        {
            xx[i]/=(double)n; yy[i]/=(double)n;
        }

        for (i=0; i<n; i++) /* bit reverse operation */
        if ( (j=m[i]) > i )
        {
            t=xx[i]; xx[i]=xx[j]; xx[j]=t;
            t=yy[i]; yy[i]=yy[j]; yy[j]=t;
        }
        free ((int *) m );
    }
}

int inv2pow(n)
int n;
{
    int l;

    l=-1 ; while ( n!=0) {n/=2; l++;}
    return l;
}

int sines_2(xxx, n, t1, t2, t3, d1, d2, d3, c1, c2, c3)
double *xxx, t1, t2, t3, d1, d2, d3, c1, c2, c3;
int n;
/* xxx:data, n:# of data, t:period, d:delay time */
{
    int i;
    double sc1, sc2, sc3;
    sc1=2.0*PI/t1; d1=2.0*PI*d1;
    sc2=2.0*PI/t2; d2=2.0*PI*d2;
    sc3=2.0*PI/t3; d3=2.0*PI*d3;
    for (i=0; i<n; i++)
    {
        xxx[i]=100*( c1*sin((double)i*sc1+d1)
                    + c2*sin((double)i*sc2+d2)
                    + c3*sin((double)i*sc3+d3) )/(c1+c2+c3);
    }
}

int costable(x, n)
double *x;
int n;
{
    int i;
    double sc;
    sc=2*PI/(double)n;
    for (i=0; i<n; i++)
    {

```

```

        x[i]= cos((double)i*sc);
    }
}
int sintable(x,n)
double *x;
int n;
{
    int i;
    double sc;
        sc=2*PI/(double)n;
        for (i=0; i<n; i++)
        {
            x[i]= sin((double)i*sc);
        }
}

int hann(x,cosx,n) /* hanning window */
double *x,*cosx;
int n;
{
    int i;

        for (i=0; i<n; i++) x[i]=x[i]*(1.0-cosx[i])/2.0;
}

int sumdata(x,avenum,n) /* average data into 1 data */
double *x;
int n,avenum;
{
    int i,j;
    double sum;

        for (i=0; i<n; i++) {
            sum=0.0;
            for (j=0;j<avenum; j++) sum=sum+x[avenum*i+j] ;
            x[i]=sum;
        }
}

```



## 2. TWODANT 入力例

## 2.1 随伴中性子束計算用入力例

```

      3   0   0
DCA PITCH 2.2CM 35CM OUT 2.7EU 100% ;DRIVER(132) P=20, E, U=1.2
H:100, LT:200, LD:100 SCALE 27GRPNDF4 P3 S8
R-Z MODEL TWODANT (4G) adjoint cal.
/
/**** block i (control) ****
/
  igeom=r-z ngroup=4 isn=8
  niso=11 mt=11
  nzzone=11
  im=13 jm=8
  it=63 jt=56
  maxscm=200000 maxlcm=500000
t
/
/**** block ii (geometry) ****
/
xmesh=  0.0   1.50   1.7   2.775  14.946  16.8  17.5
        26.7  27.500  33.8510  40.6840  85.191  150.25  151.25
xints=   2     2     2     12     4     2     9
        2     2     2     9     13     2
ymesh=  0.00  6.00  15.00  55.00  105.00  115.00  215.00;
        307.3  347.3
yints=   2     2     8     10     2     20
        8     4
zones=  7  6  3  3  3  6  7  6  4  4  4  4  5;
        7  6  3  3  3  6  7  6  8  8  8  8  5;
        7  6  3  1  3  6  7  6  4  11  10  4  5;
        7  6  3  1  3  6  7  6  4  11  10  4  5;
        7  6  3  1  3  6  7  6  4  11  10  4  5;
        7  6  3  1  3  6  7  6  7  7  9  7  5;
        7  6  7  7  7  6  7  6  7  7  7  7  5;
        6  6  6  6  6  6  6  6  6  6  6  6  5;
t
/
/**** block iii (cross sections) ****
/
  lib= xslib
  maxord=3 ihm=10 iht=5 ihs=7 ifido=-1
  ititl=1 i2lpl=1
  names=
    U27H2O
    U27AIR
    H2O
    D2O
    ALMG
    AL
    AIR
    SUS304
    V100DR
    V100WE
    D20AIR
  chivec=
7.1873E-01 2.8119E-01 7.9665E-05 4.8548E-10
t
/
/***** end of cross section data *****/
/
/**** block iv (mixing) ****
/
  matls= isos
  assign= TSTWET U27H2O 1.0 ;
          TSTDYR U27AIR 1.0 ;
          LWTR   H2O   1.0 ;
          HWTR   D2O   1.0 ;
          TUBEAL ALMG  1.0 ;
          GRAL   AL    1.0 ;
          VAIR   AIR   1.0 ;
          SUS304 SUS304 1.0 ;
          AIRAIR V100DR 1.0 ;
          AIRWET V100WE 1.0 ;
          AIRD2O D20AIR 1.0 ;
t
/
/**** block v (solver) ****
/
  ievt=1 isct=3 ith=1

```

```
    ibl=1 ibr=0 ibt=0 ibb=0
    epsi=0.00001 oitm=50 iitm=30000
    norm=1
    fluxp=1 xsectp=1 fssrp=1 balp=1
  /
  / t
  / *** block vi (edits) ***
  /
  / t
  /
!eof
```

## 2.2 中性子源問題計算用入力例

```

3 0 0
DCA PITCH 2.2CM 35CM OUT.2.7EU 100% ;DRIVER(132) P=20, E, U=1.2
H:100, LT:200, LD:100.00 SCALE 27GRPNDP4 P3 S8
R-Z MODEL TWODANT (4G) DET IMP CAL.#3 (adjoint)
/
/**** block i (control) ****
/
igeom=r-z ngroup=4 isn=8
niso=11 mt=11
nzone=11
im=13 jm=8
it=63 jt=56
maxscm=200000 maxlcm=500000
t
/
/**** block ii (geometry) ****
/
xmesh= 0.0 1.50 1.7 2.775 14.946 16.8 17.5
        26.7 27.500 33.8510 40.6840 85.191 150.25 151.25
xints= 2 2 2 12 4 2 9
        2 2 2 9 13 2
ymesh= 0.00 6.00 15.00 55.00 105.00 115.00 215.00;
        307.3 347.3
yints= 2 2 8 10 2 20
        8 4
zones= 7 6 3 3 3 6 7 6 4 4 4 4 5;
        7 6 3 3 3 6 7 6 8 8 8 8 5;
        7 6 3 1 3 6 7 6 4 11 10 4 5;
        7 6 3 1 3 6 7 6 4 11 10 4 5;
        7 6 3 1 3 6 7 6 4 11 10 4 5;
        7 6 3 1 3 6 7 6 7 7 9 7 5;
        7 6 7 7 7 6 7 6 7 7 7 7 5;
        6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 5;
t
/
/**** block iii (cross sections) ****
/
lib= xslib
maxord=3 ihm=10 iht=5 ihs=7 ifido=-1
ititl=1 i2lpl=1
names=
        U27H2O
        U27AIR
        H2O
        D2O
        ALMG
        AL
        AIR
        SUS304
        V100DR
        V100WE
        D2OAIR
chivec=
7.1873E-01 2.8119E-01 7.9665E-05 4.8548E-10
t
/
/***** end of cross section data *****/
/
/**** block iv (mixing) ****
/
matls= isos
assign= TSTWET U27H2O 1.0 ;
        TSTDY U27AIR 1.0 ;
        LWTR H2O 1.0 ;
        HWTR D2O 1.0 ;
        TUBEAL ALMG 1.0 ;
        GRAL AL 1.0 ;
        VAIR AIR 1.0 ;
        SUS304 SUS304 1.0 ;
        AIRAIR V100DR 1.0 ;
        AIRWET V100WE 1.0 ;
        AIRD2O D2OAIR 1.0 ;
t
/
/**** block v (solver) ****
/
ievt=0 isct=3 ith=0
ibl=1 ibr=0 ibt=0 ibb=0
epsi=0.00001 oitm=50 iitm=30000
norm=1
fluxp=1 xsectp=1 fissrp=1 sourcp=1 balp=1

```

```
source=
7.1873E-01 2.8119E-01 7.9665E-05 4.8548E-10
sourcx= 38R 0.0 1.0 F 0.0
sourcy= 13R 0.0 1.0 F 0.0
/
t
/
*** block vi (edit$) ***
/
t
/
!eof
```

### 3. CITATION入力例

#### 3.1 随伴中性子束計算用入力例

DCA PITCH 2.2CM 35CM OUT 2.7EU 100% ;DRIVER(44) P=20, E.U=1.2  
 LT:50, LD:0 SCALE 4GRPNDF4 THETA-R-Z air D=air

```

001
0 0 0 0 0 1 1.0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1
1 0 0 0 1 0 0 0 1 2
0

003
0 0 0 0 12 0 0 0 0 0 -1 1 -1 0 0 0 0 1 0 -1
1.0E-04 1.0E-05
1.0E-06

004
1 0.20 10 1.3708 1 0.20 10 1.3708 1 0.2 10 1.3708
1 0.20 10 1.3708
2 1.50 1 0.2 2 1.075 12 12.171 4 1.854 2 0.7
3 9.20 1 0.80 2 6.351 2 6.833 9 44.507 13 65.059
1 1.0
2 6.00 2 9.0 10 50.0 10 50.00 7 36.39 13 63.61
8 92.3 4 40.0

005
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
8 8 8 8 8 8 8 8
8 8 8 8 8 8 8 8
8 8 8 8 8 8 8 8
8 8 8 8 8 8 8 8
8 8 8 8 8 8 8 8
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
3 3 3 3 3 3 3 3
1 1 1 1 1 1 1 1
3 3 3 3 3 3 3 3
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4
13 13 13 13 13 13 13 13
12 12 12 12 12 12 12 12
4 4 4 4 4 4 4 4
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
3 3 3 3 3 3 3 3
1 1 1 1 1 1 1 1
3 3 3 3 3 3 3 3
5 5 5 5 5 5 5 5

```

7 7 7 7 7 7 7 7  
5 5 5 5 5 5 5 5  
7 7 7 7 7 7 7 7  
7 7 7 7 7 7 7 7  
11 11 11 11 11 11 11 11  
7 7 7 7 7 7 7 7  
5 5 5 5 5 5 5 5  
7 7 7 7 7 7 7 7  
5 5 5 5 5 5 5 5  
3 3 3 3 3 3 3 3  
1 1 1 1 1 1 1 1  
3 3 3 3 3 3 3 3  
5 5 5 5 5 5 5 5  
7 7 7 7 7 7 7 7  
5 5 5 5 5 5 5 5  
7 7 7 7 7 7 7 7  
7 7 7 7 7 7 7 7  
11 11 11 11 11 11 11 11  
7 7 7 7 7 7 7 7  
5 5 5 5 5 5 5 5  
7 7 7 7 7 7 7 7  
5 5 5 5 5 5 5 5  
7 7 7 7 7 7 7 7  
7 7 7 7 7 7 7 7  
7 7 7 7 7 7 7 7  
5 5 5 5 5 5 5 5  
7 7 7 7 7 7 7 7  
5 5 5 5 5 5 5 5  
7 7 7 7 7 7 7 7  
7 7 7 7 7 7 7 7  
7 7 7 7 7 7 7 7  
5 5 5 5 5 5 5 5  
6 6 6 6 6 6 6 6  
6 6 6 6 6 6 6 6  
6 6 6 6 6 6 6 6  
6 6 6 6 6 6 6 6  
6 6 6 6 6 6 6 6  
6 6 6 6 6 6 6 6  
6 6 6 6 6 6 6 6  
6 6 6 6 6 6 6 6  
6 6 6 6 6 6 6 6  
6 6 6 6 6 6 6 6  
6 6 6 6 6 6 6 6  
6 6 6 6 6 6 6 6  
5 5 5 5 5 5 5 5  
008  
-2 1 1-13  
040  
0 0 0 0 0 0 0 2  
999

### 3.2 中性子源問題計算用入力例

DCA PITCH 2.2CM 35CM CUT 2.7EU 100% ;DRIVER(44) P=20, E.U=1.2  
 LT:50, LD:0 SCALE 4GRPNDF4 theta-R-Z air D=air

001

```
0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 -5 0 0 0 0 0 0 0 0 1
1 0 0 0 1 0 0 0 1 2
0
```

003

```
0 0 0 0 12 0 0 0 0 0 -1 1 -1 0 0 0 0 1 0 -1
1.0E-04 1.0E-05
1.0E-06
```

004

```
1 0.20 10 1.3708 1 0.20 10 1.3708 1 0.2 10 1.3708
1 0.20 10 1.3708
2 1.50 1 0.2 2 1.075 12 12.171 4 1.854 2 0.7
3 9.20 1 0.80 2 6.351 2 6.833 9 44.507 13 65.059
1 1.0
2 6.00 2 9.0 10 50.0 10 50.00 7 36.39 13 63.61
8 92.3 4 40.0
```

005

```
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
8 8 8 8 8 8 8 8
8 8 8 8 8 8 8 8
8 8 8 8 8 8 8 8
8 8 8 8 8 8 8 8
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
3 3 3 3 3 3 3 3
1 1 1 1 1 1 1 1
3 3 3 3 3 3 3 3
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
4 4 4 4 4 4 4 4
13 13 13 13 13 13 13 13
12 12 12 12 12 12 12 12
4 4 4 4 4 4 4 4
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
3 3 3 3 3 3 3 3
1 1 1 1 1 1 1 1
3 3 3 3 3 3 3 3
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 7
```

```
11 11 11 11 11 11 11 11
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
3 3 3 3 3 3 3 3
1 1 1 1 1 1 1 1
3 3 3 3 3 3 3 3
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 7
11 11 11 11 11 11 11 11
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
5 5 5 5 5 5 5 5
008
-2 1 1-13
026
0
1.00000E-00 0.00000E-01
1 1 31 31 15 15 1.000E+00
```

999



### 3.3 検出器の視野計算用入力例

DCA PITCH 2.2CM 35CM OUT 2.7EU 100% ;DRIVER(44) P=20, E.U=1.2  
 LT:50, LD:0 SCALE 4GRPNDF4 THETA-R-Z air D=air

001

```
0 0 0 0 0 1 1 0 0 -5 0 0 0 0 0 0 0 1
1 0 0 0 1 0 0 0 1 2
0
```

003

```
0 0 0 0 12 0 0 0 0 0 -1 1 -1 0 0 0 0 1 0 0
1.0E-04 1.0E-05
1.0E-06
```

004

```
1 0.20 10 1.3708 1 0.20 10 1.3708 1 0.2 10 1.3708
1 0.20 10 1.3708
2 1.50 1 0.2 2 1.075 12 12.171 4 1.854 2 0.7
3 9.20 1 0.80 2 6.351 2 6.833 9 44.507 13 65.059
1 1.0
2 6.00 2 9.0 10 50.0 10 50.00 7 36.39 13 63.61
8 92.3 4 40.0
```

005

```
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4
13 13 13 13 13 13 13 13
12 12 12 12 12 12 12 12
4 4 4 4 4 4 4 4
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
3 3 3 3 3 3 3 3
1 1 1 1 1 1 1 1
3 3 3 3 3 3 3 3
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
4 4 4 4 4 4 4 4
13 13 13 13 13 13 13 13
12 12 12 12 12 12 12 12
4 4 4 4 4 4 4 4
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
3 3 3 3 3 3 3 3
1 1 1 1 1 1 1 1
3 3 3 3 3 3 3 3
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 7
```

```
11 11 11 11 11 11 11 11
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
3 3 3 3 3 3 3 3
1 1 1 1 1 1 1 1
3 3 3 3 3 3 3 3
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 7
11 11 11 11 11 11 11 11
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
7 7 7 7 7 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 7
7 7 7 7 7 7 7 7
5 5 5 5 5 5 5 5
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6
5 5 5 5 5 5 5 5
008
-2 1 1-13
026
0
0.00000E-01 1.00000E+00
12 12 31 31 5 14 1.000E+00
```

999