

JAERI-M

6496

高速炉体系における大きな負の反応度の測定(III)

中性子源引抜き法

1976年3月

中野 正文・溝尾 宣辰・向山 武彦・趙 満*

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

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.

高速炉体系における大きな負の反応度の測定 (Ⅲ)

中性子源引抜き法

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

中野正文・溝尾宣辰・向山武彦・趙 満*

(1976年2月20受理)

深い未臨界状態にある体系の反応度を可能な限り正確に求めることを目的にFCA VI-2 B2 集合体において一連の実験を行った。反応度測定法として5つの方法を採用したが、本稿はそのうち中性子源引抜き法による測定について述べる。

B_4C 量の変化、その挿入位置の変化により-2ドルから-7ドルまでの5つの未臨界体系を作り、体系の内外に置いた5系統の測定系により反応度を測定した。外部中性子源としてコッククロフト加速器からの14 MeV の中性子を用い、中性子源の引抜きはビーム・シャッターを閉じることで実現した。

反応度の観測値の検出器位置依存性は、 B_4C ピン・クラスター位置との関係よりも中性子源位置との関係が大きいことが判明した。検出器位置の中性子検出効率を導入し、中性子源挿入時と引抜き後の検出効率の違いを補正すると体系内の観測値は互に一致するようになり、反応度の定義と厳密に一致する実験値を十分な精度で求めることが出来た。この実験値は中性子源増倍法による実験値と3%以内で一致した。

* 韓国原子力研究所

Reactivity Measurement in a Far-Subcritical Fast System (III)

Source Jerk method

Masafumi NAKANO, Nobutatsu MIZOO,

Takehiko MUKAIYAMA and Mann CHO*

Division of Reactor Engineering, Tokai, JAERI

(Received February 20, 1976)

Experiments have been made to obtain the reliable values of reactivity of far subcritical fast systems. Of the five methods used for subcriticality measurements, the source jerk method is described.

The five subcritical systems of -2% to -7% were constructed in FCA VI-2 B2 assembly using three kinds of pin clusters with 90% and 80% enriched B_4C . With five detectors placed in and out the assembly, reactivity of the systems was measured. The 14MeV neutrons from a Cockcroft-Walton accelerator were used as the external source.

Position dependence of the measured reactivity is mainly caused by the singularity of the neutron source, but not by that of the B_4C pin cluster. A position dependent detector efficiency is introduced to take into consideration of the difference in flux distribution between the state of 'source in' and that after the source 'jerked out'. The measured values by respective detectors in the assembly agree well after the correction, so the experimental values are obtained with good accuracy. These values agree with the results by the source multiplication method within 3%.

* Korea Atomic Energy Research Institute

1. 序 論	1
2. 中性子源引抜き法による測定	2
2.1 測定原理	2
2.2 実験の概要	3
2.3 測定結果	7
3. 修正中性子源引抜き法による解析	10
3.1 修正中性子源引抜き法	10
3.2 補正係数の計算	13
3.3 実験結果	15
4. 討 論	17
謝 辞	19
参考文献	19
付 録	20

1. 序 論

特異点をもつ深い未臨界体系の反応度を可能な限り正確に求めることを目的に一連の実験を行なった。負の反応度測定にはいくつかの方法があるが、実験データを一点炉モデルによって解析した場合、体系の未臨界度が深くなると測定方法や検出器の位置の違いによって反応度の観測値がしばしば異なる。本実験では種々の測定法により得られる反応度の値を相互比較し、それぞれの傾向を適確に把握し、この比較を通してより正確な値に達することを目標としている。今回の実験においては、臨界つり合い法(CBT法)、中性子源増倍法(SM法)、パルス中性子源法(PNS法)、中性子源引抜き法(SJ法)およびRod drop法(RD法)によりいろいろな未臨界状態の反応度を測定した。本稿ではそのうちSJ法による測定結果について報告する。実験全般については文献(1)で述べ、SM法による測定結果は文献(2)に詳しく報告されている。

SJ法はFOAでは今回はじめて取り入れた測定方法である。SJ法による反応度測定が提案されて以来⁽³⁾、この方法は主に熱中性子体系の反応度測定に応用されてきたが、最近、高速炉系における実験も報告されている⁽⁴⁾。従来、FOAでは未臨界体系の反応度測定方法として主にSM法が用いられてきた。SM法は特殊な測定機器を必要とせず、実験が比較的容易である。これに比べて、SJ法は、瞬時のうちに体系から引抜くことのできる外部中性子源を必要とし、中性子源引抜きにともなう計数率の時間変化を測定しなければならない。本実験では、外部中性子源としてマッククロフト加速器による14 MeVの中性子を利用し、中性子源の引抜きはビーム・シャッターを閉じることで実現した。計数率の時間変化の測定やデータの磁気テープへの保存には多目的データ集積分析装置MPDA-9を活用した。

SJ法の測定データ解釈として2種類の解析方法がある。一つは、中性子源引抜き前と引抜き直後の計数率の比から反応度を求める方法で、他の一つは、引抜き前の計数率と引抜き後の全計数の積分値を用いる方法である。ここでは、前者を外挿法、後者を積分法と呼ぶことにする。外挿法における中性子源引抜き直後の計数率は、普通、引抜き後の計数率の減衰曲線を引抜き時に外挿して求めるが、この測定精度を上げるのがむずかしい。本実験では、測定データの解釈に主に積分法を用い外挿法は補助的に用いた。

SJ法は、SM法のように既知反応度体系における検出器の較正を必要とせず、測定対象となる一つの未臨界体系のみの測定データからその体系の反応度が求められる利点がある。しかし、深い未臨界体系では、一点炉モデルにもとづく通常のSJ法によって求めた反応度の観測値は検出器位置依存性が大きい。この問題を克服する一つの方法として、体系の外部に中性子源を置いた場合に体系の反応度を正しく与える検出器位置を選ぶという立場での研究が報告されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本研究では、実効増倍係数 k_{eff} から定義される体系固有の反応度 $\rho = (k_{eff} - 1) / k_{eff}$ と通常のSJ法によって得られる観測値との関係を明確にし、中性子源挿入時と引抜き後の実効的な中性子検出効率の違い等物理的意味の明確な補正係数を導入して観測値を修正することにより、検出器位置に依存しない定義と厳密に一致する反応度の実験値を求めることを試みた。この方法を修正中性子源引抜き法(MSJ法)と呼ぶ。

本報告では、まず一点炉モデルによって測定データを解析し、その結果得られる反応度の観測値の特徴、傾向などを示す。次いで、MSJ法およびこの方法によって観測値の修正を行なった結果について述べ、SM法による実験値と比較検討する。

2. 中性子源引抜き法による測定

2.1 測定原理

未臨界体系から定常な外部中性子源が瞬間的に引抜かれた場合、一点炉近似によると、体系の反応度 ρ はドル単位で次のように書ける。

$$-\rho / \beta_{\text{eff}} = \begin{cases} \frac{X}{\beta_{\text{eff}}} \cdot \frac{CR_0}{\int_0^{\infty} CR(t) dt}, & X = [A + \sum \beta_{\text{eff}i} / \lambda_i] \quad (1a) \\ & \text{-積分法-,} \\ CR_0 / CR_1 - 1 & \text{-外挿法-,} \quad (1b) \end{cases}$$

ここに、 A は中性子の生成寿命 (generation time), $\beta_{\text{eff}i}$ および λ_i はそれぞれ i 組の遅発中性子の実効割合および先行核の減衰定数である。また、 $CR(t)$ は時刻 t における計数率、 CR_0 は外部中性子源の挿入された定常状態での計数率、 CR_1 は中性子源引抜き直後の計数率の減衰曲線を中性子源引抜き時刻 $t = 0$ への外挿した値である。Pu 燃料の自発核分裂中性子などは定常的なバックグラウンドとなり、 CR はこのバックグラウンド成分を差引いた計数率になる。

2つのデータ解釈のうち外挿法は動特性パラメータを使わないで計数率の測定値のみからドル単位の反応度を求められる利点があるが、一般に CR_1 の測定精度が悪い。積分法の場合は計数率の測定値による誤差は小さくなるが反応度を求めるために動特性パラメータを必要とする。しかし、(1a)式のようにドル単位で反応度を求める限り遅発中性子データの不確かさの効果は大きくない。

(1)式の計数率 CR_0 は、物理的には、中性子源引抜き時における遅発中性子の先行核密度を決めるのに関係している。加速器を用いた中性子源を利用する場合中性子源強度が変動する。この場合は、中性子源引抜き前の計数率と遅発中性子データとから

$$CR_0 = \begin{cases} \frac{1}{\sum_i (\beta_{\text{eff}i} / \lambda_i)} \sum_i \beta_{\text{eff}i} \int_{-\infty}^0 CR(t) e^{\lambda_i t} dt & \text{-積分法-,} \quad (2a) \\ \frac{1}{\beta_{\text{eff}}} \sum_i \beta_{\text{eff}i} \lambda_i \int_{-\infty}^0 CR(t) e^{\lambda_i t} dt & \text{-外挿法-,} \quad (2b) \end{cases}$$

により実効的な CR_0 を求めることができる* (附録参照)。

* 積分法の場合、 A にかかる CR_0 は $CR(t=0)$ で $\sum_i (\beta_{\text{eff}i} / \lambda_i)$ にかかる CR_0 が (2a) 式で与えられる。しかし、 A の値は $\sum_i (\beta_{\text{eff}i} / \lambda_i)$ の値に比べて十分小さいので実際にはこの違いは無視できる。

本報告では、まず一点炉モデルによって測定データを解析し、その結果得られる反応度の観測値の特徴、傾向などを示す。次いで、MSJ法およびこの方法によって観測値の修正を行なった結果について述べ、SM法による実験値と比較検討する。

2. 中性子源引抜き法による測定

2.1 測定原理

未臨界体系から定常な外部中性子源が瞬間的に引抜かれた場合、一点炉近似によると、体系の反応度 ρ はドル単位で次のように書ける。

$$-\rho / \beta_{eff} = \begin{cases} \frac{X}{\beta_{eff}} \cdot \frac{CR_0}{\int_0^{\infty} CR(t) dt}, & X = [A + \sum \beta_{eff i} / \lambda_i] \quad (1a) \\ & \text{-積分法-,} \\ CR_0 / CR_1 - 1 & \text{-外挿法-,} \quad (1b) \end{cases}$$

ここに、 A は中性子の生成寿命 (generation time), $\beta_{eff i}$ および λ_i はそれぞれ i 組の遅発中性子の実効割合および先行核の減衰定数である。また、 $CR(t)$ は時刻 t における計数率、 CR_0 は外部中性子源の挿入された定常状態での計数率、 CR_1 は中性子源引抜き直後の計数率の減衰曲線を中性子源引抜き時刻 $t = 0$ への外挿した値である。Pu 燃料の自発核分裂中性子などは定常的なバックグラウンドとなり、 CR はこのバックグラウンド成分を差引いた計数率になる。

2つのデータ解釈のうち外挿法は動特性パラメータを使わないで計数率の測定値のみからドル単位の反応度を求められる利点があるが、一般に CR_1 の測定精度が悪い。積分法の場合は計数率の測定値による誤差は小さくなるが反応度を求めるために動特性パラメータを必要とする。しかし、(1a)式のようにドル単位で反応度を求める限り遅発中性子データの不確かさの効果は大きくない。

(1)式の計数率 CR_0 は、物理的には、中性子源引抜き時における遅発中性子の先行核密度を決めるのに関係している。加速器を用いた中性子源を利用する場合中性子源強度が変動する。この場合は、中性子源引抜き前の計数率と遅発中性子データとから

$$CR_0 = \begin{cases} \frac{1}{\sum_i (\beta_{eff i} / \lambda_i)} \sum_i \beta_{eff i} \int_{-\infty}^0 CR(t) e^{\lambda_i t} dt & \text{-積分法-,} \quad (2a) \\ \frac{1}{\beta_{eff}} \sum_i \beta_{eff i} \lambda_i \int_{-\infty}^0 CR(t) e^{\lambda_i t} dt & \text{-外挿法-,} \quad (2b) \end{cases}$$

により実効的な CR_0 を求めることができる* (附録参照)。

* 積分法の場合、 A にかかる CR_0 は $CR(t=0)$ で $\sum_i (\beta_{eff i} / \lambda_i)$ にかかる CR_0 が (2a) 式で与えられる。しかし、 A の値は $\sum_i (\beta_{eff i} / \lambda_i)$ の値に比べて十分小さいので実際にはこの違いは無視できる。

(2)式の右辺の時間積分は $-\infty$ から0までであるが、普通中性子源引抜き前100秒間の積分が $C R_0$ の90%程度を占め、300秒以前の寄与は0.5%以下である。

2.2 実験の概要

実験はFCA V1-2 B2集合体で行なった。体系の断面図をFig.1に示す。集合体の炉心部はPu燃料の試験領域と ^{235}U 燃料のドライバー領域からなる円筒状ゾーン体系で、炉心長さは約90cmである。半径方向ブランケットは平均厚さ約25cmの天然ウラン金属、炉心部の軸方向ブランケットは劣化ウラン酸化物とナトリウムから構成され、厚さは約35cmである。実験体系の諸元をTable 1にまとめる。基準となる臨界体系には、炉心中心にナトリウム・チャンネルをもつNC体系と試験領域の周辺部にナトリウム・チャンネルをもつNP体系がある。ナトリウム・チャンネルは断面が格子管2本分で炉心長さに等しい。それらのナトリウム・チャンネルを B_4C ピン・クラスターで置き換えた未臨界体系の反応度を測定する。

用いた B_4C ピン・クラスターは3種類あり、それぞれ、 B_4C ピン(直径約11mm)が7本、16本および32本で構成されている。これらをB-7, B-16およびB-32と書く。B-7およびB-16ピン・クラスターは断面が格子管1本分であり、これらを挿入した体系ではFig.1に示すように基準体系のナトリウム・チャンネルのうち格子管1本分のみが B_4C ピン・クラスターに置き換えられることになる。B-7とB-16は90%濃縮 B_4C である。B-32は手持の B_4C ペレットの制約から32ピンのうち16ピンは90%濃縮であるが残り16ピンは80%濃縮であり、それぞれの濃縮度の B_4C ピン16本ずつで一組のクラスターを作り隣接する格子管に挿入する。本実験ではこれら3種類の B_4C ピン・クラスターをNC系のナトリウム・チャンネルと置きかえたBC-7, BC-16, BC-32およびNP系のナトリウム・チャンネルと置きかえたBP-7, BP-32の合計5種類の未臨界体系を測定の対象とした。体系や B_4C ピン・クラスターの寸法、組成等については文献(1)に詳しく述べてある。測定体系は基準となるNCおよびNP臨界体系の炉の構成、形状、FCA制御棒位置等を完全に保持しておく。その結果、ナトリウム・チャンネルを B_4C ピン・クラスターに置きかえた反応度値が直接測定されることになる*。

外部中性子源としてコッククロフト加速器による14MeVの中性子を用いた。中性子源は点状である。ターゲットは軸方向の中心面に近い固定側1/2集合体の第1パック目($z=2.5\text{cm}$)で、ドライバーの外側境界に近い格子番号18-10に置いた(Fig.1)。中性子源の引抜きはビーム・シャッターを閉じることで実現した。

中性子検出系として体系内の半径方向ブランケット内に設けた4系統(A, A', BおよびC)および体系外のFの合計5系統を用いた。検出器の位置、種類などをTable 2にまとめる。Fig.1に示すように、検出器Bは中性子源に対して炉心中心をはさんで反対側にあるのに対し、検出器AおよびCはそれと直角方向にある。固定側1/2集合体中に密着面に接して置いたこれら3個の検出器によって、反応度の観測値の中性子源および B_4C ピン・クラスターに対

* 実際の測定では基準臨界体系決定後半径方向ブランケット中に検出器を1個(検出器A')挿入した。この反応度効果は $-0.0008\% \Delta K/K$ であった。したがって、ナトリウム・チャンネルを B_4C ピン・クラスターに置きかえた反応度値を求めるためには、反応度の測定値に上記の効果を補正しなければならない。

Table 1 Critical parameters of Assembly VI-2 B2

R (test zone)	29.38 (cm)
R (driver)	46.85±0.05 (cm)
R (blanket)	72.17 (cm)
V (test zone)	247.97 (ℓ)
V (whole core)	630.5±1 (ℓ)
Pu-fissile	101.64 (Kg)
U-235 (driver)	424.95±0.8 (Kg)
k - effective	1.000

Table 2 Detector type and positions used for Source Jerk experiment

Detector	Type	Position
A	FC (U-235)	F8-18
A'	³ He	M8-18
B	³ He	F18-28
C	FC (U-235)	F28-18
F	³ He	Floor in reactor room

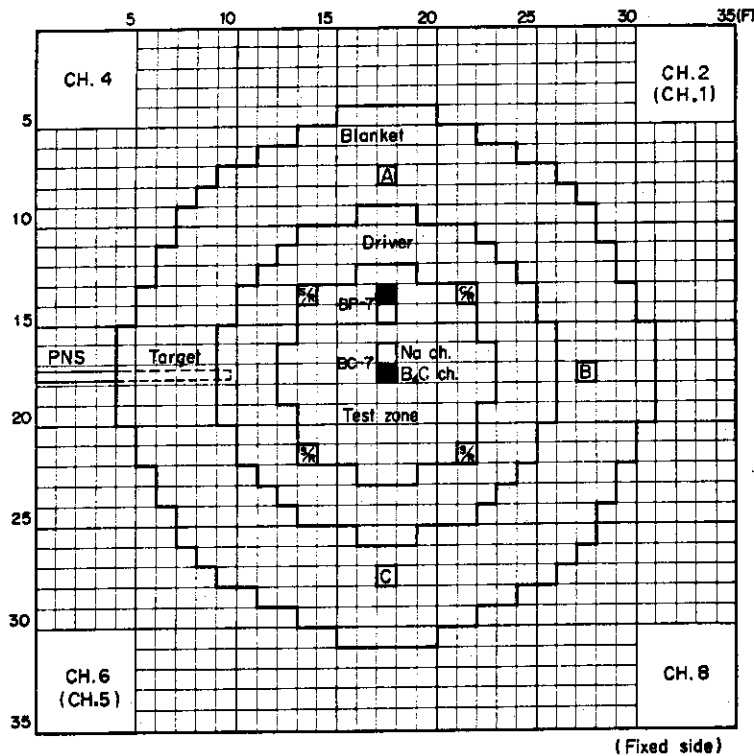


Fig. 1 Detector arrangement in the core (BC-7 or BP-7 system)

する検出器位置依存性を適確に把握することを目的とする。検出器A'は移動側1/2集合体中で密着面をはさんでAに対向する位置に置いた。実験体系は密着面に対しては対称であるために検出器AとA'は同じ反応度の観測値を与えることが期待され、両者の比較から実験の信頼性を評価することが出来る。検出器Fは体系の中心軸に45°の方向で、炉心中心から約6mの距離に置いた。中性子源増倍法ではこの検出器位置で未臨界度の深さやB₄Cピン・クラスタの位置に関係なくほぼ厳密な反応度が得られた⁽²⁾。

各検出器の計数率の時間変化測定のためマルチ・スケラーとしてPackard(2系統)、ND-3300(1系統)の他、多目的データ集積分析装置MPDA-9に設けられたインターフェースNL-01を用いて小型計算器PDP-9を利用した(2系統)。また、大部分の測定データは、大型計算機によるデータ解析のために、MPDA-9を用いて磁気テープに保存した。

検出器の出力は中性子源引抜きの300秒前から約1500秒にわたってチャンネル幅1sec、その間引抜きの3秒前から最低10秒間は特にチャンネル幅10msecで測定した。測定は中性子源強度が安定し、炉出力がほぼ定常になってから開始した。測定データの一例をFig. 2に示す。検出器の計数率は中性子源の引抜きと同時に急激に落ち、その後ゆるやかに減少して、引抜き後約500秒でバックグラウンド・レベルに達する。図にみられるように、中性子源引抜き時刻は1-2チャンネル(10-20msec)程度の不確かさで決定することができる。測定データの信頼性を上げるために、各測定体系とも中性子源強度や検出器とマルチスケラーの組合せを適宜変えて2-3回の測定を行なった。

基準臨界体系において、核計装の線形出力計(IG, チャンネルNo5および6)による炉出力と検出器の計数率との関係から各検出系の不感時間を測定した。結果をTable 3に示す。

Table 3 Measured dead times of detector system used for SJ experiment

Detector	Dead time (μsec)	Count rate at $0.4 \times 10^{-7} A$ of Ch.6 (cps)
A (FC)	5.8	1.7×10^4
A' (³ He)	5 ~ 6	2.7
B (³ He)	7 ~ 10	2.4
C (FC)	7.0	1.6
F (³ He)	5.9	2.2

検出器A, C (²³⁵U核分裂計数管)および体系外のF (³Heカウンター)に対しては炉出力 $0.2 \times 10^{-8} A - 0.6 \times 10^{-7} A$ (Ch. No6)の範囲では一定の不感時間が得られた。しかし、体系内に置いた³Heカウンター(検出器A'およびB)については炉出力の上昇とともに実効的な不感時間が一様に長くなる傾向がみられた。これは検出器のγ線遮蔽を行なわなかったためである。

各体系の反応度測定は中性子源挿入時の炉出力 $0.4 \times 10^{-7} A$ (Ch. No6)以下で行ない、各

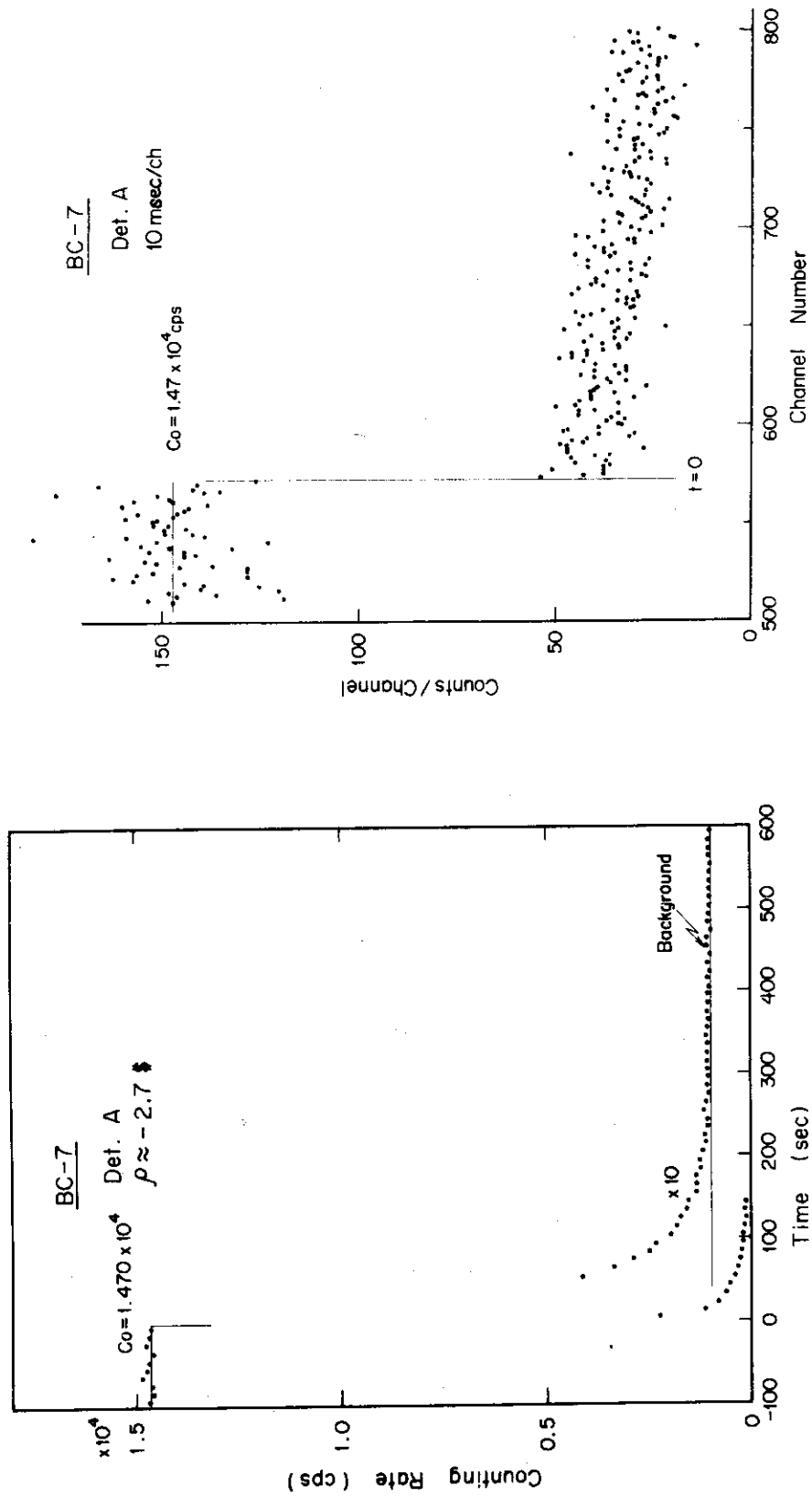


Fig. 2 Typical data from source Jerk experiment

検出器の計数率はTable 3 に示す不感時間を用いて補正する。ただし、検出器A'およびBに対しては、炉出力とともに変化する実効的な不感時間を採用する。

2.3 測定結果

測定データは不感時間を補正した後まず一点炉モデル(1)および(2)式に従って $CR_0 \int_0^{\infty} CR(t) dt$ および CR_1 により各検出器の示す反応度の観測値を求めた。積分法の場合データ処理の方法は明確であるが、外挿法の場合外挿値 CR_1 の推定方法に任意性がある。中性子源引抜き後のデータを多項式にフィットして、多項式の次数およびフィッティングに用いるデータの範囲を変化させた場合の CR_1 の値を求めた結果、一般に、1次式では引抜き後約1秒、2次式では3秒前後、3次式では4秒程度までのデータからフィッティングの範囲に依らない CR_1 が得られ、それぞれから得た CR_1 は互にはほぼ一致した値を示した。こゝでは、上記のようにして得た CR_1 の平均値を測定値として採用した。

データ解析にはJAERI-Fast 2/Tomlinsonデータを用いた6群2次元RZ計算によるNC体系の実効遅発中性子データを用いた⁽¹⁾。積分法の結果は原理的に解析に用いる遅発中性子データに依存する。解析に用いたデータに比べて、例えばKeepinのデータを用いた場合 β_{eff} 値は2.9%小さくなる。しかし、 $\sum_i (\beta_{effi} / \lambda_i)$ の値も同時に2.4%小さくなり、積分法で得られる反応度をドル単位で表わした場合は、これら2種類の実効遅発中性子データを用いることによる反応度の違いは0.5%程度にすぎない。また、(2)式から中性子源挿入時の実効的な計数率 CR_0 を求める際に上記2種類の遅発中性子データを用いることによる差は非常に小さく、両者の CR_0 値の違いは 10^{-3} %程度であった。

実効遅発中性子データは測定体系によって異なり、例えば β_{eff} 値はNC体系に比べてBC-7体系で約1%、BC-32体系では約3%大きくなる。しかし、データ解析にNC体系の遅発中性子データを用いたことによる誤差は小さく、積分法によるドル単位の反応度の違いはBC-32体系で0.1%であった。

測定値の誤差としては計数の統計誤差の他に測定系の不感時間の不確かさおよび中性子源引抜き時刻の不確かさの効果を考慮した。不感時間の測定誤差は ± 10 %とした。積分法の場合、このように評価した不感時間の不確かさによる測定値の誤差は計数の統計誤差と同程度で、両者を合せると測定誤差は1~2%であった*。一方、中性子源引抜き時刻の不確かさによる誤差は小さく、0.2%以下であった。外挿法の場合は測定データの統計的な変動による外挿値 CR_1 の推定誤差が大きく、その結果反応度の測定誤差は積分法の場合の2~4倍になった。

積分法により得られた各検出器の示す反応度の観測値をTable 4に示す。ドルの単位である β_{eff} 値は2次元RZ計算による値である。ただし、BP-7およびBP-32体系についてはそれぞれBC-7およびBC-32体系の値で近似した。各観測値はそれぞれ2~3回の測定結果の平均値である。個々の測定値は測定誤差の範囲でお互に良く一致した値を示した。

* 不感時間の不確かさは主に中性子源挿入時の計数率 CR_0 の誤差の原因となり、統計誤差は主として引抜き後の全計数 $\int_0^{\infty} CR(t) dt$ から生じる。統計誤差を少なくするため計数率を上げると不感時間の不確かさによる誤差が増加する。本実験では中性子源強度をさらに強くすることが可能であったが、反応度の測定精度の限界は不感時間の測定精度でおさえられた。

Table 4 Measured reactivities by SJ-integral method

System	β_{eff} (%)	$-\rho_{SJ}(\%)$					$-\rho_{MSM}(\%)^{(a)}$ ($\beta=0.595\% \Delta k/k$)
		A	A'	B	C	F	
BC-7	0.603	2.66±0.03	2.64±0.03	2.48±0.04	2.70±0.02	—	2.78±0.01
BC-16	0.608	4.34±0.05	4.32±0.06	3.83±0.05	4.36±0.05	—	4.64±0.02
BC-32	0.614	6.29±0.12	(5.86±0.09)	5.32±0.11	6.10±0.11	6.12±0.08	7.07±0.05
BP-7	0.603	2.24±0.03	2.19±0.02	2.06±0.03	2.22±0.02	—	2.18±0.03
BP-32	0.614	5.35±0.15	(5.06±0.16)	4.70±0.07	5.15±0.09	5.20±0.07	5.60±0.10

Notes:-

- a) Reactivity obtained from Modified source multiplication method (Ref.2).
 b) The values in the parenthesis were obtained from the data with multiscaler ND-3300.

Table 5 Measured reactivities by SJ-extrapolation method

System	$-\rho(\%)$				
	A	A'	B	C	F
BC-7	2.68±0.08	2.60±0.08	2.39±0.08	2.72±0.07	—
BC-16	4.21±0.14	4.40±0.31	3.78±0.14	4.17±0.18	—
BC-32	6.06±0.36	(6.72±0.32)	5.30±0.29	6.29±0.36	6.06±0.39
BP-7	2.28±0.07	2.20±0.07	1.96±0.09	2.23±0.12	—
BP-32	5.28±0.39	(5.22±0.29)	4.50±0.30	5.19±0.23	5.19±0.30

Note: The values in the parenthesis were obtained from the data with multiscaler ND-3300.

平均値の誤差としては、各測定値の誤差の2乗平均値と個々の測定値の分散から推定される誤差のうち大きい方を採った。同様にして求めた外挿法による観測値をTable 5に示す。外挿法の結果は1つの例外を除いて積分法の結果と良い一致を示している。Table 4および5で()内に示されている観測値はマルチスケラーND-3300により得られたデータから求めた値である。これらの結果のうち検出器A'によるBC-32体系の観測値は、積分法と外挿法による結果が一致していない唯一の場合である。本実験の初期にND-3300によるデータ集積がうまく行なえなかったことを考慮すると、()内に示した値は信頼性が低いと考えられ、こゝでは参考値に止める。積分法による解析では原理的に遅発中性子データを必要とするのに対し、外挿法は測定値のみからドル単位の反応度が求められる利点がある。しかし、積分法と外挿法による結果の一致が良いこと、外挿法は測定精度が良くないことを考慮すると、本実験の観測値として積分法による結果を採用するのが妥当であると考えられる。

密着面をはさんで対向する検出器AとA'による観測値は各体系とも良い一致を示した。両者の計数率比が1:1.6程度であること、用いたマルチ・スケラーが必ずしも同一でないことなどを考えると、本測定は全体として十分信頼性があるといえる。

SM法による反応度の観測値は B_4C ピン・クラスターに対する検出器の位置依存性が極めて大きかった。しかし、SJ法の場合は、 B_4C ピン・クラスターに対する検出器の位置依存性は小さく、BP体系でも中性子源に関して等価な位置にある検出器AとCによる観測値の違いは大きくない。これは、SJ法では、着目する体系に摂動を与えることなくその体系での中性子束の時間変化のみから系の反応度を求めることができるからである。しかし、偏心した点状中性子源を用いているので中性子源に対する検出器の位置依存性が大きく、炉心中心をはさんでターゲットと反対側に置いた検出器Bは直角方向の検出器AおよびCの結果に比べて大幅に小さい値（絶対値）を示した。SM法で未臨界度の深さや B_4C ピン・クラスターの位置に依らずに厳密な反応度を与えた体系外の検出器Fは、SJ法ではターゲットと直角方向の検出器AおよびCによる観測値に近い結果を示した。

Table 4 にSM法で得た各体系の反応度が示されている*。SM法の結果に比べると、SJ法による反応度の観測値は一樣に小さく（絶対値）、両者の違いは体系の未臨界度が深くなるにつれて急激に大きくなる。

以上のように、SJ法による反応法の観測値は、 B_4C ピン・クラスターに対する位置依存性はほとんどないが、中性子源に対する検出器位置依存性が大きい。観測値が検出器の位置に依存するのは中性子源挿入時と引抜き後で中性子束の分布形、したがって検出器の中性子検出効率が異なるからである。例えば、検出器Bの位置では中性子源挿入時に比べ引抜き後の検出効率が大きく、その結果系の反応度を過少評価する傾向にあることが定性的に理解できる。また、本実験ではすべての検出器を炉心中心線上あるいはターゲットからより遠い側に置いたために、上と同様の考えで、観測値は一樣に体系の反応度を過少評価する傾向にあると考えられ、SM法による結果との違いと矛盾しない。このような中性子検出効率の違いを定量的に評価し、検出器位置に依存しない体系の反応度の実験値を求めるために、中性子源と検出器位置を考慮した解析（Modified SJ法）を行なった。

* SJ法とSM法による反応度を比較する場合両者のドルの単位の違いに注意しなければならない。表ではドルの単位として前者は各体系の値で示されているのに対し、後者は比例係数を決めた基準体系の値で表わされている。

3. 修正中性子源引抜き法による解析

3.1 修正中性子源引抜き法

一点炉近似によると中性子源引抜き法による測定データから

$$-\rho = X \cdot \frac{CR_0}{\int_0^{\infty} CR(t) dt}, \quad (1a)$$

$$X = A + \sum_i (\beta_{effi} / \lambda_i),$$

により反応度の観測値が得られる。しかし、上式にしたがって求めた観測値は、前章でみたように、中性子源の位置や検出器の位置などに依存する量で、我々の求めようとする反応度即ち実効増倍係数 k_{eff} から

$$\rho = (k_{eff} - 1) / k_{eff}, \quad (3)$$

によって定義される体系固有の反応度とは必ずしも一致しない。

外部中性子源 $S(x, t)$ をもつ未臨界体系の中性子束 $\phi(x, t)$ は時間依存原子炉方程式

$$\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} \phi(x, t) = L\phi + (1 - \beta) \chi_p \int \nu \Sigma_f \phi dE' + \sum_i \chi_{di} \lambda_i c_i + S(x, t), \quad (4a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} c_i(r, t) = \beta_i \int \nu \Sigma_f \phi dE' - \lambda_i c_i, \quad (4b)$$

にしたがう。ここに L は中性子の消滅に関する演算子、その他は通常の見号である。変数 x は空間変数 r とエネルギー変数 E を含む*。

時刻 $t = 0$ でそれまで定常であった中性子源が瞬間的に消えた場合を考える。(4)式を $t = 0$ から ∞ まで積分すると、

$$\left[\frac{1}{v} \phi(x, t) \right]_0^{\infty} = L\phi_d(x) + (1 - \beta) \chi_p \int \nu \Sigma_f \phi_d dE' + \sum_i \chi_{di} \lambda_i c_i, \quad (5a)$$

$$\left[c_i(r, t) \right]_0^{\infty} = \beta_i \int \nu \Sigma_f \phi_d dE' - \lambda_i c_i(r), \quad (5b)$$

* 角度依存を考えると $x = (r, E, \Omega)$ となり、それに伴って(4)式は若干変るが以下の取扱いは本質的に変らず、結果も不変である。

を得る。ただし、 Φ_d および C_i は、中性子源引抜き後の中性子束および遅発中性子先行核密度の時間積分値で

$$\Phi_d(\mathbf{x}) = \int_0^{\infty} \phi(\mathbf{x}, t) dt, \quad (6a)$$

$$C_i(\mathbf{r}) = \int_0^{\infty} c_i(\mathbf{r}, t) dt, \quad (6b)$$

である。未臨界体系を考えているので $t = \infty$ では中性子束 ϕ および遅発中性子先行核密度 c_i は消え(5)式は次のように書ける。

$$L\Phi_d + M\Phi_d = S_d, \quad (7)$$

ただし、 M は核分裂中性子の生成に関する演算子で

$$M\Phi_d = \chi \int \nu \Sigma_f \Phi_d dE', \quad (8a)$$

$$\chi = (1 - \beta) \chi_p + \sum_i \chi_{di} \beta_i, \quad (8b)$$

で定義される。 S_d は一種の外部中性子源と考えることができ、初期条件から

$$S_d = \frac{1}{v} \phi(\mathbf{x}, 0) + \sum_i \chi_{di} c_i(\mathbf{r}, 0), \quad (9)$$

となる。つまり、中性子源引抜き後の時間的に減少する中性子束の時間積分値 Φ_d は(9)式で与えられる外部中性子源 S_d をもつ定常な原子炉方程式に従う。 S_d は中性子源挿入時の定常状態の中性子束 ϕ_s を用いて次のように書ける。

$$S_d = \frac{1}{v} \phi_s + \sum_i (\chi_{di} \beta_i / \lambda_i) \int \nu \Sigma_f \phi_s dE'. \quad (10)$$

一方、この体系の実効増倍係数 k_{eff} は固有値方程式

$$L\varphi + \frac{1}{k_{eff}} M\varphi = 0, \quad (11)$$

の第一固有値で定義される。(11)式の随伴方程式

$$L^+ \varphi^+ + \frac{1}{k_{eff}} M^+ \varphi^+ = 0, \quad (12)$$

を導入すると、(7)式と(12)式から次式を得る。

$$\left(1 - \frac{1}{k_{eff}}\right) \langle \varphi^+ M \Phi_d \rangle + \langle \varphi^+ S_d \rangle = 0.$$

したがって、我々の求めようとする体系の反応度 ρ は

$$-\rho = \frac{1 - k_{\text{eff}}}{k_{\text{eff}}} = \frac{\langle \varphi^+ S_d \rangle}{\langle \varphi^+ M \Phi_d \rangle}, \quad (13)$$

によって与えられる。ここに、 $\langle \quad \rangle$ は全エネルギーおよび空間の積分を表わす。(13)式の右辺の分子を explicit に書くと、

$$\langle \varphi^+ S_d \rangle = \langle \varphi^+ \frac{1}{v} \phi_s \rangle + \sum_i \left(\frac{\beta_i}{\lambda_i} \right) \langle \chi_{di} \varphi^+ \cdot \nu \Sigma_f \phi_s \rangle.$$

したがって、(13)式は

$$-\rho = X_s \cdot \frac{\langle \varphi^+ M \phi_s \rangle}{\langle \varphi^+ M \Phi_d \rangle}, \quad (14)$$

と書ける。ただし、

$$X_s = A_s + \sum_i (\beta_{si} / \lambda_i), \quad (15)$$

$$A_s = \langle \varphi^+ \frac{1}{v} \phi_s \rangle / \langle \varphi^+ M \phi_s \rangle, \quad (16)$$

$$\beta_{si} = \beta_i \langle \chi_{di} \varphi^+ \cdot \nu \Sigma_f \phi_s \rangle / \langle \varphi^+ M \phi_s \rangle, \quad (17)$$

である。(14)式から、体系の $\nu \Sigma_f$ に比例する反応断面積をもつ検出器が重み関数 $\int \chi \varphi^+ dE$ で体系に分布している場合、定常状態における計数率と中性子源引抜き後の全計数の比は $\langle \varphi^+ M \phi_s \rangle / \langle \varphi^+ M \Phi_d \rangle$ に等しくなり、別に求めた係数 X_s とから定義に合った反応度が得られることが分かる。係数 X_s を決める A_s および β_{si} はそれぞれ一種の中性子生成寿命 (generation time) および i 組の実効遅発中性子割合であるが、中性子束として(11)式の固有関数 φ の代りに定常状態の中性子束 ϕ_s によって与えられる点が通常の設定と異なる。

現実の測定を考えると、検出器 d の計数率 CR は

$$CR = \int_{V_d} d\mathbf{r} \int \Sigma_d \phi dE = \langle \Sigma_d \phi \rangle, \quad (18)$$

と書ける。そこで、中性子源挿入時の定常状態および引抜き後の時間積分に対して一種の中性子検出効率

$$\epsilon_s = \langle \Sigma_d \phi_s \rangle / \langle \varphi^+ M \phi_s \rangle = CR_0 / \langle \varphi^+ M \phi_s \rangle, \quad (19a)$$

$$\epsilon_d = \langle \Sigma_d \Phi_d \rangle / \langle \varphi^+ M \Phi_d \rangle = \int_0^\infty CR dt / \langle \varphi^+ M \Phi_d \rangle, \quad (19b)$$

を定義する。 ϵ は実効的な中性子生成(率)に対する検出器の計数(率)である。(19)式を(14)式に代入すると

$$- \rho = f_x \cdot f_e \left[X \frac{CR_0}{\int_0^\infty CR dt} \right] = f_x \cdot f_e \cdot (-\rho_{SJ}), \quad (20)$$

を得る。ここに、

$$\begin{aligned} f_x &= X_s / X, \\ f_e &= \epsilon_d / \epsilon_s, \end{aligned} \quad (21)$$

である。つまり、通常の一点炉近似によるSJ-積分法によって得られる反応度 ρ_{SJ} に対して、係数 X_s の代わりに X を用いることによる補正 f_x および定常状態と中性子源引抜き後の減衰状態の時間積分値に対する検出器の中性子検出効率の違いの補正 f_e をほどこすことにより、体系内の任意の位置で体系の反応度を測定することができる。補正係数 f_x および f_e を計算する際に必要となる ϕ_s および ϕ_d はともに外部中性子源をもつ定常状態の原子炉方程式の解で、通常の核計算コードにより容易に求められる。

3.2 補正係数の計算

測定体系の断面を忠実に記述した6群2次元X-Yモデルを基準に、体系内の検出器A(A'), BおよびCに対する補正係数を計算した。外部中性子源を持つ体系の中性子束分布 ϕ_s, ϕ_d および固有値方程式の随伴方程式を満足する φ^+ はともに拡散コードCITATION-2⁽⁷⁾により計算した。用いた群定数、軸方向バックリンクの値、空間メッシュ等は文献(1)に示す反応度計算に用いたのと同じである。

中性子検出効率 ϵ_s および ϵ_d の計算の流れをFig.3に示す。拡散コードによる核計算に先だって、まず点状中性子源のfirst collisionの分布を求め、そのcollision sourceを外部中性子源として定常状態の中性子束分布 ϕ_s の計算を行なう。標準計算では、first collisionの計算は平面モデルで行ない、14MeV中性子の断面積はJAERI-Fast 70群⁽⁸⁾の第1群(10.4-8.3MeV)の値で近似した。簡単のため試験領域とドライバーの平均自由行程は両者の平均値を用いた。このようにして求めた定常状態の中性子束分布 ϕ_s と随伴固有関数 φ^+ とから定常状態の中性子検出効率 ϵ_s が求まる。中性子源引抜き後の減衰状態の中性子束の時間積分値 ϕ_d に対する実効中性子源 S_d は ϕ_s から(10)式によって得られる。6群定数 λ_d および $\sum_i (\beta/\lambda)_i \nu \Sigma_f$ の値は、核計算に用いた群定数の場合と同様、25群1次元拡散計算から縮約して求めた。

一例としてBP-32体系における中性子検出効率 ϵ_s, ϵ_d および補正係数 f_e の空間分布をFig.4に示す。点状中性子源を含むX方向の検出効率の分布をみると、中性子源引抜き後の ϵ_d は炉心中心に関してほぼ対称であるが、中性子源挿入時の分布は歪みが大きく、その結果補正係数 f_e は0.5-1.25程度まで大幅に変化する。検出器B附近での補正係数の変化はゆるやかで、補正量は25%程度になる。補正係数は炉心中心よりや \searrow 中性子源よりで1をよぎるが、同様のことがBC体系についてもみられた。Y軸方向にはB₄Cピン・クラスターが存在するために検出効率の分布は大きく歪むが、中性子源挿入時と引抜き後の分布が互いによく

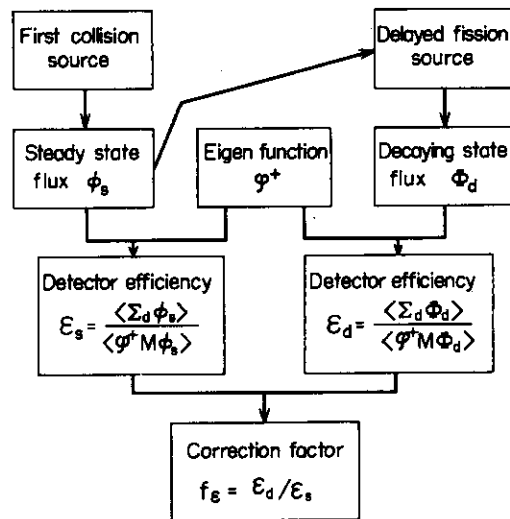


Fig.3 Calculation flow of correction factor f_s for Source Jerk experiment

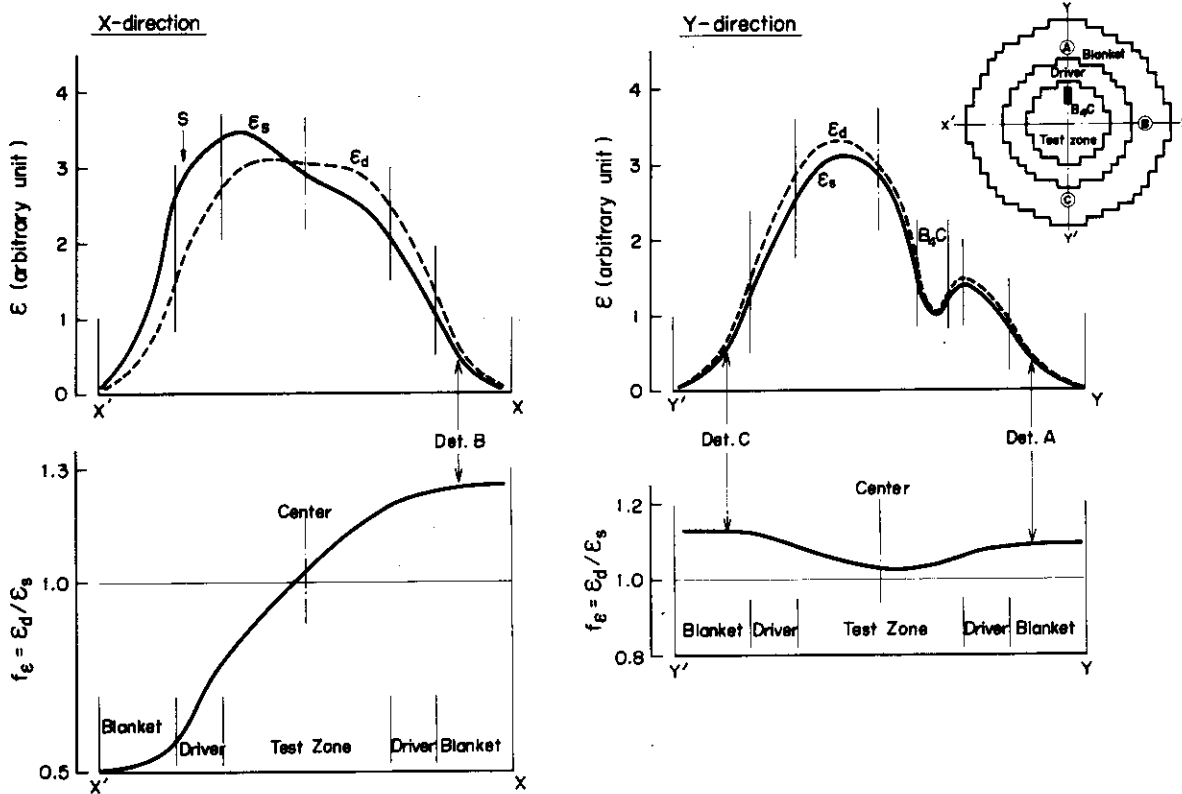


Fig.4 Spatial distribution of neutron-detection efficiency E and correction factor f_s for BP-32 system

似ており、補正係数 f_e の空間変化は大きくない。炉心中心に関する非対称性も顕著でなく、検出器 A と C に対する補正係数 f_e の違いは 4% 程度である。炉心中心に B_4C ピン・クラスターをもつ BC 体系の場合検出効率の空間分布は BP 体系の分布と異なるが、補正係数 f_e の空間変化の様子は両者ともほぼ同様であった。

測定データの解析には係数 X として RZ 計算で得た NC 体系に対する値 $X/\beta_{eff} = 1.126$ を用いた。係数 X_e の代わりにこの X 値を用いたことによる補正は小さく、補正量は BC 体系に対して +0.5% 程度、BP 体系では約 -1% であった。

上述の標準モデルで計算した補正係数に対して、中性子源の取扱い方法および軸方向分布を考慮することによる効果を代表的な体系について評価した。XY 計算は軸方向分布の平均値を取り扱っていると考えられるのに対し、検出器は軸方向の中心面近くに置かれた。そこで、軸方向分布の効果を 2 群の 3 次元 XYZ 計算と 2 次元 XY 計算から評価した結果、補正係数 f_e に対する効果はかなり大きく、BC-7 体系に対して約 -1%、BC-32 および BP-32 体系に対しては約 -2% であった。一方、補正係数 f_x に対する効果は小さく、-0.3% ~ -0.5% である。

中性子源の取扱い方法として、点状源をもつ 6 群拡散計算を行なった場合、first collision source の計算における断面積を DLO-2C 定数⁽⁹⁾ から評価した場合などにおける補正係数の違いを調べた。これら中性子源の取扱いの違いによる補正係数の変化は小さく、 f_e の値は点状中性子源を直接用いても最大 0.7% 増加するにすぎず、最も良い取扱いと考えられる DLO-2C の定数を用いることの効果は -0.3% ~ -0.5% であった。補正係数 f_x 値の変化はほとんどなく、その効果は ±0.1% 程度であった。

以上の効果を修正した後の各検出器に対する補正係数を Table 6 に示す。BC 体系に対する補正係数 f_x はほぼ 1 である。BP 体系で f_x 値が 1 よりやや小さいのは、 β_{eff} 値として BC 体系の値を用いたためであると考えられる。中性子検出効率の違いによる補正係数 f_e は検出器 A、B および C に対していずれも 1 より大きく、体系の未臨界度が深くなるとともに補正量が大きくなる。特に、炉心中心をはさんで中性子源と反対側の検出器 B に対する補正量は大きく BC-32 体系では 30% に達する。検出器 B に対する補正量は中性子源に対し直角方向の検出器 A および C の場合の約 2.5 倍である。BP 体系では B_4C ピン・クラスターに近い検出器 A に対する補正量が中性子源に関して対称な検出器 C に比べてやや小さくなった。

3.3 実験結果

検出器 A、A', B および C による反応度の観測値 $\rho_{s,j}$ に前節で求めた補正係数 (Table 6) を掛けて得られる修正後の反応度およびその平均値を Table 7 に示す。誤差には補正係数の不確かさは含まれていない。

一点炉近似で解析した検出器 B による反応度の観測値は検出器 A および C の観測値に比べて一様に小さく、未臨界度の深い BC-32 体系や BP-32 体系ではその差が 10% 以上あったのに対し、修正後の値は各体系とも測定誤差内か誤差をやや越える程度で互いに一致し、測定値の検出器位置依存性はほぼ解消した。また、BP 体系では検出器 A の観測値は検出器 C の観測値に比べやや大きい反応度を示す傾向にあったが、修正後は両者の一致がより良くなった。

Table 6 Correction factors for source Jerk experiment

System	Detector	β_{eff} ($\times 10^{-2}$)	$f_x = X_S/X$	$f_\epsilon = \epsilon_d/\epsilon_S$
BC-7	A, A'	0.603	1.000	1.041
	B			1.106
	C			1.042
BC-16	A, A'	0.608	1.002	1.078
	B			1.197
	C			1.080
BC-32	A, A'	0.614	1.001	1.115
	B			1.296
	C			1.123
BP-7	A, A'	0.603	0.989	1.022
	B			1.075
	C			1.030
BP-32	A, A'	0.614	0.981	1.064
	B			1.218
	C			1.098

Note: The value of $X=11.26 \beta_{\text{eff}}$ is used in the data analysis.

Table 7 Corrected reactivities by Modified Source Jerk method

System	β_{eff} ($\times 10^{-2}$)	$-\rho$ (\$)				
		A	A'	B	C	Average
BC-7	0.603	2.77 \pm 0.03	2.75 \pm 0.04	2.74 \pm 0.04	2.81 \pm 0.03	2.77 \pm 0.02
BC-16	0.608	4.69 \pm 0.05	4.67 \pm 0.06	4.58 \pm 0.06	4.72 \pm 0.05	4.67 \pm 0.03
BC-32	0.614	7.02 \pm 0.13	—	6.90 \pm 0.14	6.85 \pm 0.12	6.92 \pm 0.08
BP-7	0.603	2.26 \pm 0.03	2.21 \pm 0.02	2.19 \pm 0.03	2.26 \pm 0.02	2.23 \pm 0.02
BP-32	0.614	5.59 \pm 0.16	—	5.62 \pm 0.09	5.55 \pm 0.10	5.59 \pm 0.07

このように、測定誤差に比べてはるかに大きい補正 (BC-32 体系に対しては最大約 30%) をほどこした後の値は検出器の位置依存性がみられず、互いに一致していることから修正は正しく行なわれたと考えてよい。したがって、我々の求めようとする体系固有の反応度の実験値として、4 個の検出器 A, A', B および C から得た補正後の反応度の平均値を採用するのが妥当と考えられる。

Table 7 に示す平均値は各検出器による値の算術平均値である。誤差として各測定値の誤差の 2 乗平均から求めた値を採用した。この誤差は、いずれの体系も、分散から推定される誤差より大きかった (BC-16 および BP-7 体系では両者はほぼ等しかった)。実験誤差を評価する場合は用いた補正係数の不確かさも考慮しなければならない。検出効率の違いに対する補正係数をみると、BC 体系では補正量 ($f_\epsilon - 1$) が体系の反応度にはほぼ比例する傾向

がみられた。したがって、計算体系の反応度が違えばその分だけ補正量が真の値からずれている可能性がある。しかし、補正量が2倍以上違う検出器AおよびCとBとの結果が誤差の範囲では一致していることを考えると、補正係数の不確かさによる誤差はあまり大きくないと考えられる。仮りにすべての補正量の計算値に10%の不確かさがあるとすると、平均値の不確かさはBC-7体系で0.6%、BC-32体系で1.3%になり、この効果を取り入れると実験値の誤差はBC-7体系で約1%、BC-32体系で2%強になる。

4. 討 論

中性子源引抜きにともなう計数率の変化の測定データを積分法および外挿法により解析し体系の反応度を求めた結果、積分法により満足すべき精度(誤差1~2%)で反応度の観測値が得られた。2つの解析方法による結果は測定誤差の範囲で一致したが、外挿法の誤差は積分法の2~4倍になった。積分法の場合データ解析に遅発中性子データを必要とするが、解析に用いるデータの不確かさの影響は小さく、データ処理方法の明確さや測定精度の差を考えると積分法による解析の方が有利であるといえる。

一点炉近似にもとづく反応度観測値の検出器位置依存性は、SM法の場合と違って、B₄Cピン・クラスター位置との関係よりも中性子源位置との関係が大きいことが判明した。また、測定系の数の制限から検出器位置依存性に関して、SM法で観測されたような収束的傾向⁽²⁾を見るに足る十分な測定はできなかった。本実験では各検出器の観測値はSM法による平均値に比べて一様に小さな値(絶対値)を示し、両者の違いは体系の未臨界度が深くなるとともに急激に大きくなった。これは、今回の実験における中性子源と検出器の配置に起因するもので、必ずしもSJ法に本質的な問題ではない。例えば、点状中性子源の近傍に置いた検出器を考えると、中性子源挿入時の中性子検出効率は引抜き時よりも大きくなり、その結果反応度を過大評価することになる。したがって、適当に配置した検出器による観測値から体系の反応度の上下限をおさえることは可能と思われる。しかし、補正係数の計算結果(Fig. 4)からも分かるように、点状中性子源を用いる限り、SM法で得たような収束的傾向を示す検出器位置を体系外に選ぶことは困難と思われる。

SJ法による観測値をMSJ法で修正すると違いの大きかった各検出器の値が互に一致するようになり、MSJ法の妥当性が証明され、我々の求めようとする体系固有の反応度の実験値が十分な精度で得られた。このようにして得た中性子源引抜き法による実験結果を中性子源増倍法の結果とTable 8に比較する。MSJ法およびMSM法の実験値には補正係数の不確かさの効果は含まれていない。MSJ法の結果は、全体系を通じて、SM法による11個の検出量の平均値と誤差の範囲で良く一致している。MSM法の結果はBP-7やBP-32体系でやや小さい値を与えているが、その差は2~3%程度で、補正係数の計算値の不確かさなどを考慮すると一致は悪くないといえる。このように修正法を用いて従来の一点炉近似による反応度の観測値を補正することによってSM法とSJ法によっ

がみられた。したがって、計算体系の反応度が違えばその分だけ補正量が真の値からずれている可能性がある。しかし、補正量が2倍以上違う検出器AおよびCとBとの結果が誤差の範囲では一致していることを考えると、補正係数の不確かさによる誤差はあまり大きくないと考えられる。仮りにすべての補正量の計算値に10%の不確かさがあるとすると、平均値の不確かさはBC-7体系で0.6%、BC-32体系で1.3%になり、この効果を取り入れると実験値の誤差はBC-7体系で約1%、BC-32体系で2%強になる。

4. 討 論

中性子源引抜きにともなう計数率の変化の測定データを積分法および外挿法により解析し体系の反応度を求めた結果、積分法により満足すべき精度(誤差1~2%)で反応度の観測値が得られた。2つの解析方法による結果は測定誤差の範囲で一致したが、外挿法の誤差は積分法の2~4倍になった。積分法の場合データ解析に遅発中性子データを必要とするが、解析に用いるデータの不確かさの影響は小さく、データ処理方法の明確さや測定精度の差を考えると積分法による解析の方が有利であるといえる。

一点炉近似にもとづく反応度観測値の検出器位置依存性は、SM法の場合と違って、B₄Cピン・クラスター位置との関係よりも中性子源位置との関係が大きいことが判明した。また、測定系の数の制限から検出器位置依存性に関して、SM法で観測されたような収束的傾向⁽²⁾を見るに足る十分な測定はできなかつた。本実験では各検出器の観測値はSM法による平均値に比べて一様に小さな値(絶対値)を示し、両者の違いは体系の未臨界度が深くなるとともに急激に大きくなった。これは、今回の実験における中性子源と検出器の配置に起因するもので、必ずしもSJ法に本質的な問題ではない。例えば、点状中性子源の近傍に置いた検出器を考えると、中性子源挿入時の中性子検出効率は引抜き時よりも大きくなり、その結果反応度を過大評価することになる。したがって、適当に配置した検出器による観測値から体系の反応度の上下限をおさえることは可能と思われる。しかし、補正係数の計算結果(Fig. 4)からも分かるように、点状中性子源を用いる限り、SM法で得たような収束的傾向を示す検出器位置を体系外に選ぶことは困難と思われる。

SJ法による観測値をMSJ法で修正すると違いの大きかった各検出器の値が互に一致するようになり、MSJ法の妥当性が証明され、我々の求めようとする体系固有の反応度の実験値が十分な精度で得られた。このようにして得た中性子源引抜き法による実験結果を中性子源増倍法の結果とTable 8に比較する。MSJ法およびMSM法の実験値には補正係数の不確かさの効果は含まれていない。MSJ法の結果は、全体系を通じて、SM法による11個の検出量の平均値と誤差の範囲で良く一致している。MSM法の結果はBP-7やBP-32体系でやや小さい値を与えているが、その差は2~3%程度で、補正係数の計算値の不確かさなどを考慮すると一致は悪くないといえる。このように修正法を用いて従来の一点炉近似による反応度の観測値を補正することによってSM法とSJ法によつ

Table 8 Comparison of reactivities between SJ and SM methods

System	-ρ (% Δk/k)		
	MSJ*	MSM	SM (11 ch's av.)
BC-7	1.661±0.013	1.654±0.006	1.654±0.006
BC-16	2.83 ±0.02	2.76 ±0.02	2.79 ±0.02
BC-32	4.24 ±0.05	4.21 ±0.03	4.22 ±0.03
BP-7	1.338±0.013	1.30 ±0.02	1.315±0.013
BP-32	3.42 ±0.05	3.33 ±0.06	3.41 ±0.05

* The reactivity effect of the additional detector hole $-0.008\% \Delta k/k$ is corrected in the values by MSJ method.

て得られる反応度の測定値は一致し、静的方法と動的方法による観測値の違いは、反応度の定義を統一しその定義にしたがって観測値を補正することによって解消することが確認された。

中性子源引抜き法による未臨界体系の反応度測定はFOAでは今回初めて試みた方法である。従来主として行なわれてきたSM法は特殊な測定機器を必要とせず実験が比較的容易である。しかし、測定対象となる未臨界体系における計数率の測定と基準となる既知反応度体系における較正が必要で、その間の電気的ドリフトに起因する中性子検出効率の再現性に不安が残る。一方、SJ法ではその体系での連続した測定から反応度が得られるので上のような再現性の不安を取り除くことができる。

実験に用いたコッククロフト加速器による点状中性子源は中性子源強度が任意に変えられるので計数率を適当に調節できること、中性子源引抜き時間が極めて短いことなど利点が多い。中性子源挿入時の中性子源強度の変動も実用上問題がなかった。中性子源からの中性子が14 MeVの高エネルギーをもっていることも補正係数の計算における大きな誤差の原因にはならないことが確認された。

反応度の観測値の測定精度は、主に、統計誤差と検出系の不感時間の不確かさによって決まる。統計誤差を小さくするために計数率を上げると不感時間の不確かさによる誤差が増える。したがって、全体として測定精度を上げるためには不感時間の精度良い測定が重要になる。用いた検出器のうち体系内に置いた ^3He カウンターの不感時間が炉出力とともに変化するという結果が得られた。これは γ 線の影響と考えられ、今後の実験では γ 線の遮蔽を考慮する必要がある。

中性子源の引抜きにともなう計数率の時間変化の測定に多目的データ集積分析装置MPDA-9をマルチ・スケラーとして用いることにより測定系統を増すことができた。その結果測定のパフォーマンスとともに、検出器とマルチ・スケラーの組合せを適宜変更することによって測定データの信頼性をあげることができた。また、測定データをMPDA-9を用いて磁気テープに保存することにより膨大なデータを大型計算機で容易に処理できるようになるなど本実験の測定データの集積にはMPDA-9 systemに負うところが大きかった。

謝 辞

本実験を遂行するにあたり種々の御協力を頂いた高速炉物理研究室およびFCA管理機関の諸氏に深甚の感謝の意を表します。実験の遂行上多くの御支援と励しをいただいた原子炉工学部主任研究員弘田実弥氏と、報告をまとめるに当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) 溝尾宣辰他：高速炉体系における大きな負の反応度の測定(I)，JAERI-M 6066 (1975)。
- 2) 向山武彦他：“高速炉体系における大きな負の反応度の測定(II)”，JAERI-M 6067 (1975)。
- 3) Jankowski, F.J. et al. : “ Calibration of Control Rods ”, NSE 2, 228 (1957)。
- 4) Helm, H. et al. : “ Control Rod Measurements in a Uranium-fueled Mock-up of the Fast Breeder Prototype SNR ”, IAEA, Tokyo Conf., B24 (1973)。
- 5) Bridge, M.J. : “ The Theory for Source Jerk Experiments with an External Source ”, RD/B/N1191 (1969)。
- 6) Mountain, W. and Waterson, R.H. : “ Source Jerk Experiments using an External Source ”, RD/B/N1188 (1969)。
- 7) Fowler, T.B. : ORNL-TM 2496, Rev. 2 (1969)。
- 8) Katsuragi, S. et al. : JAERI-1195 (1970), JAERI-1199 (1970) and JAERI-1199 supplement 2 (1971)。
- 9) Roussin, R.W. : ORNL-TM-3049 (1969)。

謝 辞

本実験を遂行するにあたり種々の御協力を頂いた高速炉物理研究室およびFCA管理機関の諸氏に深甚の感謝の意を表します。実験の遂行上多くの御支援と励しをいただいた原子炉工学部主任研究員弘田実弥氏と、報告をまとめるに当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) 溝尾宣辰他：高速炉体系における大きな負の反応度の測定(I)，JAERI-M 6066 (1975)。
- 2) 向山武彦他：“高速炉体系における大きな負の反応度の測定(II)”，JAERI-M 6067 (1975)。
- 3) Jankowski, F.J. et al. : “Calibration of Control Rods”, NSE 2, 228 (1957)。
- 4) Helm, H. et al. : “Control Rod Measurements in a Uranium-fueled Mock-up of the Fast Breeder Prototype SNR”, IAEA, Tokyo Conf., B24 (1973)。
- 5) Bridge, M.J. : “The Theory for Source Jerk Experiments with an External Source”, RD/B/N1191 (1969)。
- 6) Mountain, W. and Waterson, R.H. : “Source Jerk Experiments using an External Source”, RD/B/N1188 (1969)。
- 7) Fowler, T.B. : ORNL-TM 2496, Rev. 2 (1969)。
- 8) Katsuragi, S. et al. : JAERI-1195 (1970), JAERI-1199 (1970) and JAERI-1199 supplement 2 (1971)。
- 9) Roussin, R.W. : ORNL-TM-3049 (1969)。

附 録 中性子源引抜き法の基本式

一点炉近似の動特性方程式は次のように書ける。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n + \sum_i \lambda_i C_i + S \quad (\text{A1})$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n - \lambda_i C_i \quad i = 1, 2, \dots \quad (\text{A2})$$

ここに、 n は中性子密度、 C_i は第 i 組の遅発中性子先行核密度、 S は外部中性子強度である。

(A2) 式から C_i と n との関係は積分表示で

$$C_i(t) = \frac{\beta_i}{\Lambda} e^{-\lambda_i t} \int_{-\infty}^t n(t') e^{\lambda_i t'} dt' \quad (\text{A3})$$

とかける。

外挿法

$t = 0$ で外部中性子 S が消えたとする。 $t = 0$ から即発中性子寿命の数倍の時間にわたって遅発中性子先行核密度が一定とすると、中性子源引抜き直後の中性子密度 n_1 は

$$n_1 = \frac{\Lambda}{\beta - \rho} \sum_i \lambda_i C_i \quad (\text{A4})$$

で与えられる。ここに、 C_{i0} は時刻 $t = 0$ における遅発中性子先行核密度である。 C_{i0} に (A3) 式の関係を用いると (A4) 式から

$$n_1 = \frac{1}{\beta - \rho} \sum_i \lambda_i \beta_i \int_{-\infty}^0 n(t) e^{\lambda_i t} dt$$

を得る。したがって、反応度は

$$-\rho / \beta = \frac{n_0'}{n_1} - 1 \quad (\text{A5})$$

で与えられる。ここに

$$n_0' = \sum_i \frac{\beta_i}{\beta} \lambda_i \int_{-\infty}^0 n(t) e^{\lambda_i t} dt \quad (\text{A6})$$

である。特に中性子源が定常の場合中性子源挿入後十分時間が経過した後では n_0' は中性子源挿入時の定常な中性子密度 n_0 に等しくなる。

積分法

(A1)式と(A2)式の辺々を加えると次式を得る。

$$\frac{dn}{dt} + \sum_i \frac{dC_i}{dt} = \frac{\rho}{\Lambda} n + S \quad (\text{A7})$$

$t=0$ で外部中性子源がないとすると(A7)式の辺々を $t=0$ から ∞ まで積分して

$$n_0 + \sum_i C_{i0} = - \frac{\rho}{\Lambda} \int_0^{\infty} n dt \quad (\text{A8})$$

を得る。ただし、未臨界体系を考えているので(A8)式では $t=\infty$ で n および C_i が消えている。一方、(A3)式から

$$\sum_i C_{i0} = \sum_i \frac{\beta_i}{\Lambda} \int_{-\infty}^0 n(t) e^{\lambda_i t} dt \quad (\text{A9})$$

したがって、(A9)式を(A8)式に代入して

$$-\rho = \frac{1}{\int_0^{\infty} n(t) dt} \left[\Lambda n_0 + \sum_i \beta_i \int_{-\infty}^0 n(t') e^{\lambda_i t'} dt' \right] \quad (\text{A10})$$

を得る。前と同様に、定常中性子源が $t=0$ で引抜かれた場合は(A10)式は簡単に

$$-\rho = \left[\Lambda + \sum_i (\beta_i / \lambda_i) \right] \frac{n_0}{\int_0^{\infty} n(t) dt} \quad (\text{A11})$$

となる。