

JAERI-M
4525

パルス中性子実験データ解析コード
ALPHA-D

1971年7月

大久保収二・金子義彦・秋濃藤義

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

パルス中性子実験データ解析コード

ALPHA-D

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

計算センター 大久保収二

炉物理実験研究室 金子義彦

〃 秋濃藤義

(1971年6月受理)

要旨 増倍体系におけるパルス中性子実験データ処理用コードALPHA-Dを開発した。このコードはパルス中性子の投入によつて生ずる増倍体系の全中性子密度から遅発中性子崩壊の部分を適正に評価除去し、即発中性子崩壊の部分をできるだけ純粋に抽出してから単一指数関数に最小自乗法によりあてはめ、即発中性子崩壊定数 α_p を最適に決定することを目的としている。遅発中性子崩壊の成分は一点炉におけるパルス中性子の投入に対する応答をルンゲクッタ法による数値解析により求め、その即発中性子崩壊定数を時定数とする指数関数的減衰との差分として評価するという方法を採用した。

増倍体系の実験に対してこのコードによりデータ処理を行うと従来のような遅発中性子崩壊を時間的に一定として最小自乗法を適用する場合に比較して臨界近傍においては約4% α_p の値が大きくなることが試験データおよびSHEにおける実験データ処理から結論された。

Computer Code ALPHA-D for Analysis of
Experimental Data in Pulsed Neutron Technique

Shuzi OHKUBO

Computer Center

Yoshihiko KANEKO, Fugiyoshi AKINO

Thermal Reactor Physics Lab.

Div. of Nuclear Engineering, Tokai, JAERI

(Received July 1971)

Abstract — Computer code ALPHA-D has been developed for data processing in pulsed neutron measurements in a multiplying medium. The purpose of this code is to determine the value of prompt neutron decay constant α_p as accurately as possible by removing the component of delayed neutron decay from the raw experimental data. In the code, the component of delayed neutron decay is estimated as the deviation of the response of the one-point reactor from the exponential decay with time constant α_p for repeated pulsed neutron bursts.

It is found from the application of the code for the test data and, for experimental data of pulsed neutron experiment in SHE (Semi-Homogeneous Experiment) that the usual data processing method disregarding the slowly decaying delayed neutron mode underestimates the value of α_p by about 4% in a multiplying medium near critical, having a long neutron life time of about 1 ms.

目 次

1. ま え が き	1
2. パルス中性子に対する原子炉の応答	2
2.1 数値解法	2
2.2 解析的方法	4
3. 即発中性子崩壊定数の最適決定	6
4. プログラム	9
4.1 プログラムの解説	9
4.2 FORTRAN の構成	10
4.3 プログラムの入出力の説明	10
4.3.1 入力データ	10
4.3.2 出力データ	12
5. 計算結果と討論	12
5.1 試験データに対する結果	12
5.2 SHE における実験データに対する結果	12
6. 結 論	13
7. 附 録	21
A. ルンゲークッタ・ジル法	21
B. FORTRAN ソースリスト	22
C. 入出力データ例	28

* Contents *

1. Introduction	1
2. Response of reactor for pulsed neutrons injection	2
2.1 Numerical method	2
2.2 Analytical method	4
3. Optimum determination of prompt neutron decay constant	6
4. Computer program	9
4.1 Explanation of program	9
4.2 Constitution of program	10
4.3 Explanation of input and output data	10
4.3.1 Input data	10
4.3.2 output data	12
5. Results of calculations and discussions	12
5.1 Results for test data	12
5.2 Results for experimental data at SHE	12
6. Conclusion	13
7. Appendix	21
A. Runge-Kutta method	21
B. FORTRAN source list	22
C. Example of input and Output data	28

1. ま え が き

パルス中性子法による原子炉の反応度や中性子寿命の測定は各所で広く行なわれている。臨界近傍での実験に関するかぎり、次の問題点を除けば技術的にはほぼ完成に近づいているといえよう。この未解決の問題点とはパルス中性子投入後の原子炉中の中性子密度の減衰曲線からどうやって最適に即発中性子崩壊定数 α_p を決めるかという点である。軽水炉が実験体系の場合は中性子寿命が100 μ s程度に短いため、全中性子密度の減衰曲線は即発中性子崩壊の部分と微少な遅発中性子崩壊の部分とに明確に別れていて後者の成分を時間的に一定値のbackgroundとして最小自乗法の適用により正確に α_p を決定しうる。しかし黒鉛炉や重水炉が実験体系の場合は中性子寿命が約1msになる場合が多く、即発中性子崩壊はかなりゆつくりしてその成分はかなりの部分が遅発中性子崩壊の成分と非分離の状態で観測されるようになる。後者の成分の大きさも軽水炉の場合に比べずつと大きくなっている。そのため軽水炉に対して行つたような遅発中性子を一定値とするような単純な最小自乗法では系統誤差が有意の大きさに達するようになると推定される。

Küchle⁽¹⁾は西独のカールスルーエ研究所の重水炉FR-2における反応度測定に際して以上の問題点を指摘し、この遅発中性子崩壊の影響についてFraude⁽²⁾の解析的手法による評価を用いて一つの補正方法を導出した。Fraudeの解析では本質的にはLaplace変換を用いた初期値問題として動特性方程式が解かれていることは解るが、研究内容は“Exponential and Critical experiment”で一部報告されているのみで詳細は不明である。

この方法により補正を行なおうとすると逆時間方程式の7つの根を求めることが必要になり、かなり複雑な過程が入ってくるという難点があるので計算コードとしてまとめにくいと思われた。

一方、BNLのC. Sastre⁽³⁾等は即発中性子崩壊と遅発中性子崩壊の数値的な関係は差分法を主体にした数値解法で求め、即発中性子崩壊の部分には実験的に測定された計数率の時間変化を対応させて補正するという方法を提案している。この研究で問題の概要は明らかにされたのであるが、計数率の時間変化そのものを即発中性子崩壊の一次近似としているためその過程に中性子投入の直後にあらわれる検出器位置による空間依存性による効果や検出器の不感時間の影響等を受け易いという欠点が残されていた。

一方、著者等のグループは黒鉛炉である平均質臨界集合体：SHEにおいてパルス中性子実験を行なつて来た。⁽⁴⁾

この体系の中性子寿命は理論計算による推定では炉心構成により0.5~1.6ms程度変化するが、かなり長いので上記の遅発中性子崩壊に関する問題点につきあつた。そこで遅発中性子崩壊の影響を考慮して最適に即発中性子崩壊定数 α_p を決定する計算コードを開発することにした。開発にあつては遅発中性子崩壊を一定値バックグラウンドとみなして α_p を最小自乗法により決定するコードであるALPHA⁽⁵⁾を主要部分として使い、パルス中性子投入直後の基本モードの中性子密度の高さを検出器の計数率の時間変化の全体から定めることにし、⁽²⁾生の実験データから遅発中性子崩壊の成分を除去するための計算をルンゲクッタ法により行う部分を

附加するという方法を採用した。

この方式により Sastre 等の方法の欠点はほぼ完全に解決されたと判断してよいと考えている。

2. パルス中性子に対する原子炉の応答

まずパルス中性子の投入があつたときの臨界未満原子炉の応答を把握する必要がある。そこで次の簡化された条件で応答を求めることにした。

1. 中性子密度は各エネルギーの中性子密度を積分したもので与えられるとする一群近似を採用し、遅発中性子群数は ^{235}U のみを装荷燃料として6とにする。
2. パルス中性子投入の初期にある程度存在する空間高周波の寄与は無視する。

条件1は最初に投入したパルス中性子が減速熱化され核分裂を起し、再び熱化されるという過程を数回くりかえしエネルギー的に定常スペクトルが得られた後は厳密に成立する。それまでの過渡状態(黒鉛炉では約2~3ms)でもかなりよい近似と解釈される。条件2は一見乱暴な近似のように見えるが十分根拠がある。というのは各高次高周波のつくる遅発中性子先行核密度は $1/\alpha_{p_n}$ (α_{p_n} は高次高周波の即発中性子崩壊定数) に比例するが、臨界近傍では α_{p_n} の20~50倍大きいので基本モードの作る先行核密度の2~3%にしか相当しないからである。

条件1,2のもとにパルス中性子応答を計算するには差分法による数値解法と Laplace 変換を使った解析的解法とが考えられる。コードの構成は数値解を主として利用し、補足的に解析解を使うという方法を採用した。各々の解法の要点を以下に記すことにした。

2.1 数値解法

時間 $t = 0$ において、唯一回パルスの n_0 の中性子の投入があつた臨界未満の原子炉中の中性子密度 $n(t)$ は、一点近似によりつぎのような基本方程式にしたがう。

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\delta kep}{\ell} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = -\lambda_i C_i(t) + \frac{\beta_i k_e}{\ell} n(t) \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, 6$$

ここに

$C_i(t)$: i 番目の先行核密度

β_i : i 番目の遅発中性子割合

λ_i : i 番目の先行核密度の減衰定数

β : 全遅発中性子割合

δkep : 即発性超過増倍係数であつて、 $\delta kep = ke(1-\beta) - 1$ で与えられる。

附加するという方法を採用した。

この方式により Sastre 等の方法の欠点はほぼ完全に解決されたと判断してよいと考えている。

2. パルス中性子に対する原子炉の応答

まずパルス中性子の投入があつたときの臨界未満原子炉の応答を把握する必要がある。そこで次の簡化された条件で応答を求めることにした。

1. 中性子密度は各エネルギーの中性子密度を積分したもので与えられるとする一群近似を採用し、遅発中性子群数は ^{235}U のみを装荷燃料として6ことにする。
2. パルス中性子投入の初期にある程度存在する空間高周波の寄与は無視する。

条件1は最初に投入したパルス中性子が減速熱化され核分裂を起し、再び熱化されるという過程を数回くりかえしエネルギー的に定常スペクトルが得られた後は厳密に成立する。それまでの過渡状態(黒鉛炉では約2~3ms)でもかなりよい近似と解釈される。条件2は一見乱暴な近似のように見えるが十分根拠がある。というのは各高次高周波のつくる遅発中性子先行核密度は $1/\alpha_{p_n}$ (α_{p_n} は高次高周波の即発中性子崩壊定数) に比例するが、臨界近傍では α_{p_n} の20~50倍大きいので基本モードの作る先行核密度の2~3%にしか相当しないからである。

条件1,2のもとにパルス中性子応答を計算するには差分法による数値解法と Laplace 変換を使った解析的解法とが考えられる。コードの構成は数値解を主として利用し、補足的に解析解を使うという方法を採用した。各々の解法の要点を以下に記すことにした。

2.1 数値解法

時間 $t = 0$ において、唯一回パルスの n_0 の中性子の投入があつた臨界未満の原子炉中の中性子密度 $n(t)$ は、一点近似によりつぎのような基本方程式にしたがう。

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\delta kep}{\ell} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = -\lambda_i C_i(t) + \frac{\beta_i k_e}{\ell} n(t) \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, 6$$

ここに

$C_i(t)$: i 番目の先行核密度

β_i : i 番目の遅発中性子割合

λ_i : i 番目の先行核密度の減衰定数

β : 全遅発中性子割合

δkep : 即発性超過増倍係数であつて、 $\delta kep = ke(1-\beta) - 1$ で与えられる。

(k_e は実効増倍係数)

表 4 参照

ℓ : 中性子寿命
 である。 ^{235}U のみを核分裂燃料として使っている場合について考えているが、他の核分裂燃料をも使用していたり、減速材に重水を使っている場合は遅発中性子の先行核の数は6以上になる。

初期条件は、

$$\left. \begin{aligned} n(0) &= n_0 \\ C_i(0) &= 0 \quad i = 1, \dots, 6 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(1)(2)式を(3)式の初期条件のもとに求めることは電子計算機を使用した数値解法により容易である。計算時間を短縮するためにパルス中性子投入直後の $n(t)$ の変化の激しい時間領域のみをルンゲクッタ・ジルの方法(附録1.)⁽⁶⁾を使い、 $n(t)$ の変化が少い時間領域では次のようなテイラー展開を使つた簡便な解法を用いた。時間 t までの中性子密度 $n(t)$ および先行核密度 $C_i(t)$ ($i=1, \dots, 6$) が既知のとき、 Δt だけ後の時間 $t+\Delta t$ における $n(t)$ と $C(t)$ はテイラー展開によつて次のように求められる。

$$n(t+\Delta t) = n(t) + \frac{1}{1!} \frac{dn(t)}{dt} \Delta t + \frac{1}{2!} \frac{d^2 n(t)}{dt^2} (\Delta t)^2 \quad (4)$$

$$C_i(t+\Delta t) = C_i(t) + \frac{1}{1!} \frac{dC_i(t)}{dt} \Delta t + \frac{1}{2!} \frac{d^2 C_i(t)}{dt^2} (\Delta t)^2 \quad (5)$$

ここに $dn(t)/dt$ と dC_i/dt は(1)および(2)式より $n(t)$ と $C(t)$ の関数として与えられているし、 $d^2 n(t)/dt^2$ と $d^2 C_i(t)/dt^2$ は(1)および(2)式とそれらを微分した式から

$$\frac{d^2 n(t)}{dt^2} = \left\{ \left(\frac{\delta k_{ep}}{\ell} \right)^2 + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \frac{k_e \beta_i}{\ell} \right\} n(t) + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\delta k_{ep}}{\ell} - \lambda_i - \lambda_i^2 \right) C_i(t) \quad (6)$$

$$\frac{d^2 C_i(t)}{dt^2} = \left(-\lambda_i + \frac{\delta k_{ep}}{\ell} \right) \frac{k_e \beta_i}{\ell} n(t) + \lambda_i^2 C_i + \frac{k_e \beta_i}{\ell} \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad (7)$$

として与えられる。

(4), (5)式で3次以上の微分値による増分を無視した誤差は Δt の値を

$$-\frac{\delta k_{ep}}{\ell} \Delta t = 10^{-2} \quad (8)$$

程度に小さくすれば無視しうる。というのはその誤差の2次までの微分値により得られる増分との相対値は、 $n(t)$ の近似解を $e^{\delta k_{ep} \Delta t / \ell}$ として

$$\frac{\frac{1}{3!} \frac{d^3 n(t)}{dt^3} (\Delta t)^3}{\frac{dn(t)}{dt} \Delta t + \frac{1}{2!} \frac{d^2 n(t)}{dt^2} (\Delta t)^2} = \frac{\frac{1}{6} \left(\frac{\delta k_{ep}}{\ell} \Delta t \right)^3}{\frac{\delta k_{ep}}{\ell} + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta k_{ep}}{\ell} \Delta t \right)^2} = 1.6 \times 10^{-5} \quad (9)$$

となるからである。パルス中性子実験の生データの精度が $n(t)$ について約0.1%であることを考えるとこのように小さな数値計算上の誤差は無視してよいであろう。

2.2 解析的方法

動特性方程式(1), (2)はラプラス変換を応用して解析的にも厳密解を求めることができる。
 まず(1), (2)式をラプラス変換してみる。

$$S \bar{n}(s) - \bar{n}(0) = \bar{n}(s) \frac{\delta k_{ep}}{\ell} + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \bar{C}_i(s) \tag{10}$$

$$S \bar{C}_i(s) - \bar{C}_i(0) = -\lambda_i \bar{C}_i(s) + \frac{k_e}{\ell} \beta_i \bar{n}(s) \tag{11}$$

$$i = 1, \dots, 6$$

(11)式より

$$\bar{C}_i(s) = \frac{1}{(S + \lambda_i)} \left\{ \frac{k_e}{\ell} \beta_i \bar{n}(s) + \bar{C}_i(0) \right\}$$

物理的に $\bar{C}_i(0) = 0$ であるから

$$\bar{C}_i(s) = \frac{1}{(S + \lambda_i)} \cdot \frac{k_e}{\ell} \beta_i \bar{n}(s) \tag{12}$$

(10)式に代入して、整理すると

$$\bar{n}(s) = \frac{n(0)}{S \left\{ 1 + \frac{k_e}{\ell} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{S + \lambda_i} \right\} - \frac{\delta k_e}{\ell}} \tag{13}$$

$$B(s) = S \left\{ 1 + \frac{k_e}{\ell} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{S + \lambda_i} \right\} - \frac{\delta k_e}{\ell} \tag{14}$$

さて $B(s) = 0$ とするような S の 7 つの根 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_7$ に対しては $\bar{n}(s)$ は無限大になる。

$$\bar{n}(s) = \frac{n(0)}{\frac{\prod_{j=1}^7 (S - \alpha_j)}{\prod_{i=1}^6 (S + \lambda_i)}} \tag{15}$$

(15)式にラプラス逆変換を行い

$$\begin{aligned} n(t) &= L^{-1} \left\{ \frac{n(0)}{B(s)} \right\} \\ &= \sum_{j=1}^7 a_j e^{\alpha_j t} \end{aligned} \tag{16}$$

ここで

$$a_j = \frac{n(0)}{\frac{dB}{dS}(\alpha_j)} \tag{17}$$

ところで

$$B(s) = \frac{\prod_{j=1}^7 (S - \alpha_j)}{\prod_{i=1}^6 (S + \lambda_i)} \quad (18)$$

だから

$$\frac{dB(s)}{dS} = \frac{\prod_{j=1}^7 (S - \alpha_j)}{\prod_{i=1}^6 (S + \lambda_i)} \left[\sum_{j=1}^7 \frac{1}{S - \alpha_j} - \sum_{i=1}^6 \frac{1}{S + \lambda_i} \right] \quad (19)$$

$$\frac{dB(\alpha'_j)}{dS} = \frac{(\alpha'_j - \alpha_1)(\alpha'_j - \alpha_2) \cdots (\alpha'_j - \alpha_{j-1})(\alpha'_j - \alpha_{j+1}) \cdots (\alpha'_j - \alpha_7)}{(\alpha'_j + \lambda_1)(\alpha'_j + \lambda_2)(\alpha'_j + \lambda_3)(\alpha'_j + \lambda_4)(\alpha'_j + \lambda_5)(\alpha'_j + \lambda_6)} \quad (20)$$

より α_j を求めることができる。

この解法の問題点は $B(s) = 0$ の 7 次代数方程式の根 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_7$ を求めることが簡単でないことである。

実係数であるからベアストウ法等を用いて数值的に根を得ることができるが、繁雑で容易ではない点に注意すべきである。

この解法から得られた重要な結果を整理してみよう。

1) (14)式から即発中性子崩壊定数 α_p と超過反応度 δk_e の関係は

$$\delta k_e = \frac{-\ell \alpha_p + Z(\alpha_p)}{1 - Z(\alpha_p)} \quad (21)$$

$$Z(\alpha_p) = \alpha_p \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\alpha_p - \lambda_i} \quad (22)$$

である。

2) $n(t)$ のうち即発中性子崩壊を示す成分は、(20)式において $\alpha'_j = -\alpha_p$ とおいて ($j' = 7$)

$$a_7 = \frac{(-\alpha_p + \lambda_1)(-\alpha_p + \lambda_2) \cdots (-\alpha_p + \lambda_6)}{(-\alpha_p - \alpha_1)(-\alpha_p - \alpha_2) \cdots (-\alpha_p - \alpha_6)} \cdot n(0) \quad (23)$$

である。遅発中性子を一群に縮約した場合は、

$$a_7 = n_0 \frac{-\alpha_p + \lambda}{-\alpha_p - \alpha_1} \quad (24)$$

となる。ここに λ は縮約した遅発中性子の崩壊定数であつて

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^6 \lambda_i \beta_i}{\beta}$$

$$\alpha_1 = \frac{\lambda \delta k_e}{\delta k_e - \beta k_e}$$

3. 即発中性子崩壊定数の最適決定

パルス中性子実験では一定周期 T の間隔でくりかえしてパルス中性子の投入を行い、中性子検出器により一周期内的中性子密度の変化を測定し時間分析器に記録する。このような実験データから最適に即発中性子崩壊定数 α_p を次のようなデータ処理によつて決定することができる。

時間分析器の第 n チャンネルに記録されている計数 CR_n の期待値 R_n は検出器の中性子検出効率をとおして、

$$R_n = \epsilon \sum_{m=0}^{\infty} \int_{t_n}^{t_n + \Delta} n(t + T \cdot m) dt + \epsilon n_c \Delta \quad (25)$$

$$t_n = 4\Delta + (n-2)(\Delta + 10^{-5}) \quad (26)$$

$$n = 2, \dots, 256$$

と表わされる。 Δ は時間分析器のチャンネルあたりの計数時間巾であつて中性子バーストから n Channel の始まる時間分析器に合わせて書いたものである。また n_c はパルス中性子の投入と関係なく存在する ^{238}U の自発性核分裂等に原因して発生する一定の中性子密度である。臨界近くの実験では $T = 10$ 秒程度のため (25) 式において $m = 3$ 以上の $\sum_{m=3}^{\infty} n(t + T \cdot m)$ は一定値として十分良い近似になるので n_c に含めて取扱つてよい。

つまり、

$$R_n = \epsilon \sum_{m=0}^2 \int_{t_n}^{t_n + \Delta} n(t + T \cdot m) dt + \epsilon n_c \Delta \quad (27)$$

としてよい。また以後の議論では簡単のために $\epsilon = 1$ とする。さらに時間積分をつぎのように近似する。

$$\int_{t_n}^{t_n + \Delta} n(t + T \cdot m) dt = \frac{\Delta}{2(\Delta + 10^{-5})} \left[n(t_n + T \cdot m) + n(t_{n+1} + T \cdot m) \right] \quad (28)$$

ここに

$$t_{n+1} - t_n = \Delta + 10^{-5} \quad (29)$$

である。

(28) 式を (27) 式に代入して

$$R_n = \frac{\Delta}{2(\Delta + 10^{-5})} \left[n(t_n) + n(t_{n+1}) + n(t_n + T) + n(t_{n+1} + T) + n(t_n + 2T) + n(t_{n+1} + 2T) \right] + n_c \Delta \quad (30)$$

即発性超過増倍係数 δk_{ep} 以外の β_i 等の動特性パラメータは既知である。そこで (30) 式で最も良く R_n が表現されるように δk_{ep} 、つまり即発中性子崩壊定数 α_p を決定する問題

になる。

単純に考えるとパルス中性子に対する厚子炉の応答 $n(t)$ が (16) 式で書けるのだから、(16) 式を (30) 式に代入した場合最も良く各チャンネルの計数を表現できるように最小自乗法により δk_{ep} , n_0 および C をきめればよいことになる。しかし同時に 7 項の指数の和を扱う最小自乗法は実行上、極めて困難であるので採用できない。そこで次のような近似的な方法を採用することにした。

(16) 式を即発中性子崩壊の部分とその他の遅発中性子崩壊の部分とに分ける。

$$n(t) = a_7 e^{-\alpha_P t} + D(t) \quad (31)$$

$$D(t) = \sum_{j=1}^6 a_j e^{\alpha_j t} \quad (32)$$

この表現を使うと (30) 式は

$$R_n = \frac{\Delta}{2(\Delta + 10^{-5})} \left[a_7 (e^{-\alpha_P t_n} + e^{-\alpha_P t_{n+1}} + e^{-\alpha_P (t_n + T)} + e^{-\alpha_P (t_{n+1} + T)} + e^{-\alpha_P (t_n + 2T)} + e^{-\alpha_P (t_{n+1} + 2T)} + D(t_n) + D(t_{n+1}) + D(t_n + T) + D(t_{n+1} + T) + D(t_n + 2T) + D(t_{n+1} + 2T)) \right] + n_c \Delta \quad (33)$$

さらに、

$$e^{-\alpha_P T} < e^{-6 \times 10} = 10^{-26} \quad (34)$$

であるので、

$$R_n = \frac{\Delta}{2(\Delta + 10^{-5})} \left[a_7 (e^{-\alpha_P t_n} + e^{-\alpha_P t_{n+1}}) + D(t_n) + D(t_{n+1}) + D(t_n + T) + D(t_{n+1} + T) + D(t_n + 2T) + D(t_{n+1} + 2T) \right] + n_c \Delta \quad (35)$$

$D(t)$ は $e^{-\alpha_P t}$ に比べればずっと時間的にゆつくりと減少する関数であるから、まず第 1 近似として $D(t) = \text{Const}$ という条件で (35) 式の形で最も良く CR_n が表現されるように α_P を最小自乗法により決定する。

つまり、

$$R_n = R'_P \int_{t_n}^{t_n + \Delta} e^{-\alpha'_P t} + R'_d \Delta \quad (36)$$

という関数形で fitting を行い α'_P, R'_P および R'_d を次の条件から決定する。このやり方は通常のこれまで採用されている実験データから即発中性子崩壊定数 α_P を求める過程と全く同一である。

$$\sum_{n=2}^{256} \frac{|CR_n - R_n|^2}{CR_n} = \text{最小} \quad (37)$$

CR_n : n チャンネルの統計的変動を含んだ実測計数値

この簡単な方式でも、 Δ が長く δk_e が小さい最悪の場合でも約 5% の精度で α_P を決定す

ることができることを5.の数値実験の結果からわかっている。また同じ程度の精度で遅発中性子崩壊の振幅 R'_p

$$R'_p = \frac{\Delta}{(\Delta + 10^{-5})} \cdot a_7 \quad (38)$$

も求まっている。

つぎに $D(t) = \text{一定}$ 、という条件をはずしてより高い精度で α_p を決定することを考える。

つまり、

$$\alpha_p = \alpha'_p \quad (39)$$

$$\frac{\Delta}{(\Delta + 10^{-5})} \cdot a_7 = R'_p \quad (40)$$

といつたん第1次近似としてきめて、さらに(40)式と、遅発中性子を一群に縮約した場合の a_7 ($a_7 = -\alpha_p$) と n_0 の関係式である(24)式を使って n_0 を求める。

$$n_0 = \frac{-\alpha_p - \lambda_1}{-\alpha_p + \lambda} \cdot R'_p \cdot \frac{\Delta + 10^{-5}}{\Delta} \quad (41)$$

(39)式からきまつた α_p を(21)、(22)式に代入して δk_{ep} と k_e を次式により求める。

$$\delta k_{ep} = (1 + \delta k_e)(1 - \beta) - 1 \quad (42)$$

$$k_e = 1 + \delta k_e \quad (43)$$

(39)、(41)、(42)、および(43)式によつて決つたパラメータ α_p 、 n_0 、 δk_{ep} および k_e を使つて、2.1で述べた数値解法によつて $n(t)$ を計算する。この数値解は、 α_p が(39)式によつてきめた近似値のため正確には(31)式の $n(t)$ を与えていないがこの過程をくりかえすことによりしだいに正確になつていくと考えられる。

ここで $n(t)$ から $D(t)$ の部分のみを引き出すことを考える。つまり(31)、(32)式により

$$D(t) = (n(t) - a_7 e^{-\alpha_p t}) \Delta \quad (44)$$

a_7 は2.2の解析的解法の(24)式より良い近似で、

$$a_7 = n_0 \frac{-\alpha_p + \lambda}{-\alpha_p - \lambda_1} \quad (24)'$$

と与えられるものを使うことにする。

(44)式できめられた $D(t)$ を使い、時間分析器の各チャンネルの計数から遅発中性子崩壊の成分を取り除くことができる。つまり(35)式に着目して、補正された各チャンネルの計数値を CR'_n と書いて、

$$CR'_n = CR_n - \frac{\Delta}{2(\Delta + 10^{-5})} \left[D(t_n) + D(t_{n+1}) + D(t_n + T) + D(t_{n+1} + T) + D(t_n + 2T) + D(t_{n+1} + 2T) \right]$$

その期待値は(24)'式の近似の範囲で、

$$= \frac{\Delta}{2(\Delta + 10^{-5})} a_7 (e^{-\alpha_p t_n} + e^{-\alpha_p t_{n+1}}) + n_0 \Delta \quad (45)$$

となる。

この結果をふたたび(36)式の単一指関数減衰形の式に最小自乗法によりあてはめ、第1回

の推定値 α'_p より正確な即発中性子崩壊定数 α_p を決定することができる。つまり

$$\sum_{n=2}^{256} \frac{|CR'_n - R_n|^2}{R_n} = \text{最小} \quad (46)$$

$$R_n = R_p \int_{t_n}^{t_n + \Delta} e^{-\alpha_p t} dt + R_d \cdot \Delta \quad (36)'$$

以後 (37) 式に始まり (36)' で終る過程をくりかえして α_p の値が収束するまでつづけて、最終的に最適な α_p の値を得ることができる。

4. プログラム

4.1 プログラムの解説

3. で述べた即発中性子崩壊定数 α_p の最適決定の方法を FACOM 230-60 用の FORTRAN-IV 語による数値計算プログラムを作った。プログラムは (36) 式の単一指数関数のあてはめ関数に実験データをあてはめる既製のコード ALPHA⁽⁵⁾ の部分に遅発中性子崩壊の効果を評価し、補正量 $D(t)$ を計算する新設部分の PULSE より成り立っている。全体のフローチャートを Fig. 1 に示した。PULSE の主要部分は一点炉において唯一回のパルス中性子投入に対する応答を計算するところである。Fig. 2 に示すように時間メッシュ点 1 から 259 までは中性子密度 $n(t)$ の時間変化が大きいのでルンゲクッタ法を用い、その後はテイラー展開の二次までをとり入れる方法でまかせている。実際のパルス中性子実験では周期 T でくりかえしてパルス中性子の投入があるため時間分析器の各チャンネルの計数は (27) 式のようになり、 $n(t)$ の T 秒後ごとの値の 3 回の重ね合せと一定値で表現される。

計算の時間メッシュは時間分析器のチャンネル巾と不感時間の和としてチャンネル番号と時間メッシュ点との対応が簡単になるようにした。Fig. 2 に示すようにプログラムの中では最初の 1 より 259 までの時間メッシュ点については中性子密度を SN と表し、一周遅れて始まる時間メッシュ点については SN2 とし以下 SN3 という表現を使っている。プログラムの全体を附録 2. にのせた。PULSE の部分のパルス中性子投入に対する一応答計算例が Fig. 2 である。

またこの場合の三周期の和 $SN + SN2 + SN3$ およびこれと初期値を同じくする単一指数関数 $e^{-\beta t}$ との差を Fig. 3 に示した。この差は一定値に漸近せず一度最高値に達した後ゆつくり減少することが示されている。Fig. 2 の計算に使った炉のパラメータは

$$\rho = -0.120 \%$$

$$\beta = 1.0^{-3} \text{ sec}$$

$$\alpha_p = 8.00 \text{ sec}^{-1}$$

$$P = 3891 (0.1 \text{ pps})$$

である。

ところでこの部分に要求される計算精度は一応 SN については 0.1 %、SN2、SN3 に対し

の推定値 α'_p より正確な即発中性子崩壊定数 α_p を決定することができる。つまり

$$\sum_{n=2}^{256} \frac{|CR'_n - R_n|^2}{R_n} = \text{最小} \quad (46)$$

$$R_n = R_p \int_{t_n}^{t_n + \Delta} e^{-\alpha_p t} dt + R_d \cdot \Delta \quad (36)'$$

以後 (37) 式に始まり (36)' で終る過程をくりかえして α_p の値が収束するまでつづけて、最終的に最適な α_p の値を得ることができる。

4. プログラム

4.1 プログラムの解説

3. で述べた即発中性子崩壊定数 α_p の最適決定の方法を FACOM 230-60 用の FORTRAN-IV 語による数値計算プログラムを作った。プログラムは (36) 式の単一项指数関数のあてはめ関数に実験データをあてはめる既製のコード ALPHA⁽⁵⁾ の部分に遅発中性子崩壊の効果を評価し、補正量 $D(t)$ を計算する新設部分の PULSE より成り立っている。全体のフローチャートを Fig. 1 に示した。PULSE の主要部分は一点炉において唯一回のパルス中性子投入に対する応答を計算するところである。Fig. 2 に示すように時間メッシュ点 1 から 259 までは中性子密度 $n(t)$ の時間変化が大きいのでルンゲクッタ法を用い、その後はテイラー展開の二次までをとり入れる方法ですまさせている。実際のパルス中性子実験では周期 T でくりかえしてパルス中性子の投入があるため時間分析器の各チャンネルの計数は (27) 式のようになり、 $n(t)$ の T 秒後ごとの値の 3 回の重ね合せと一定値で表現される。

計算の時間メッシュは時間分析器のチャンネル巾と不感時間の和としてチャンネル番号と時間メッシュ点との対応が簡単になるようにした。Fig. 2 に示すようにプログラムの中では最初の 1 より 259 までの時間メッシュ点については中性子密度を SN と表し、一周遅れて始まる時間メッシュ点については SN2 とし以下 SN3 という表現を使っている。プログラムの全体を附録 2. にのせた。PULSE の部分のパルス中性子投入に対する一応答計算例が Fig. 2 である。

またこの場合の三周期の和 $SN + SN2 + SN3$ およびこれと初期値を同じくする単一项指数関数 $e^{-\beta t}$ との差を Fig. 3 に示した。この差は一定値に漸近せず一度最高値に達した後ゆつくり減少することが示されている。Fig. 2 の計算に使った炉のパラメータは

$$\rho = -0.120\%$$

$$\beta = 1.0^{-3} \text{ sec}$$

$$\alpha_p = 8.00 \text{ sec}^{-1}$$

$$P = 3891 (0.1 \text{ pps})$$

である。

ところでこの部分に要求される計算精度は一応 SN については 0.1%、SN2、SN3 に対し

ては0.2%程度であると考えられる。主たる理由は各チャンネルの計数の統計的バラツキに原因して α_p には多くの場合0.2%程度のランダム誤差が存在しているため、いはば補正のための計算にあまり精度をあげても意味がないからである。SN, SN2, SN3に関するPULSEの計算精度は、遅発中性子一群の場合についてラプラス変換による厳密解の式(24), (24)', (24)''と比較して評価した。対象とした炉のパラメータは

$$k_e = 0.99936$$

$$\delta k_e = -0.000637$$

$$\ell = 0.001 \text{ sec}$$

$$\beta = 0.0064$$

$$\lambda = 0.1 \text{ sec}^{-1}$$

$$T = 10 \text{ sec}$$

であり結果をTable 1にまとめた。その結果から、パルス中性子打込みから約20.5 secまで0.05%の精度を有し、要求される範囲に入っていることがわかる。

4.2 FORTRANプログラムの構成

FORTAN語はMAIN PROGRAMと4つのSUB PROGRAMで構成され、INPUT DATAはMAIN PROGRAMに入れるようになっている。

FORTANの構成は下のとおりである。

(a) MAIN ; ALPHA

(b) SUB ; DOOL

(c) SUB ; PULSE

(d) SUB ; SNC

(e) SUB ; SUB

上に記した(a)~(e)の説明をすると

ALPHA ; 実験データを最小自乗法の適用により解いている。

DOOL ; マトリックスの計算

PULS ; パルス中性子投入に対する応答を計算する部分

SNC, SUB ; 中性子密度の時間変化が大きい部分の時間メッシュ1~259までをルンゲクッタ法で解いている。

4.3 プログラムの入出力の説明

4.3.1 入力データ

カードの順位と内容は下記の通りである。

Card 1. IPRO

problem number

Card 2. LTEST ;

ITEST

Iterationの打切り回数を指定する。

0 : 最後の計算結果のみをlistする。

0 以外：毎回の計算結果を list する。

Card 3. YEAR, MONTH, DAY, NCASE

年 . 月 . 日 . ケース

Card 4. MAXJ

1.0 を入れる。

(card 1 ~ 4 の F \bar{O} R \bar{M} A \bar{T} (1 4 I 5))

Card 5. ALPHA BETA EPSLON

α_p の初期値 同振巾の初期値 収束条件

Card 6. CZERO

バックグラウンドの初期値

Card 7. R

XL

Delay time ratio Channel length

Card 8. S

TAU

Strage time Dead time

(card 5 ~ 8 は F \bar{O} R \bar{M} A \bar{T} (3 E 1 2.5))

Card 9. ISWT (I 5) B (E 1 2.5)

1 : バックグラウンド考慮

バックグラウンドの値

0 : バックグラウンド考慮せず

Card 10. P (E 1 2.5)

Total pulse injection

Card 11. MAXK (I 5)

Total number of skip channel number

Card 12. NSKIP (I 5)

MAXK=0 のとき、このカードは省いて良い。

Card 13. ISTART (I 5) IEND (I 5)

Initial start channel number Last channel number

Card 14. ICHAN (5 I 1 2)

{

63. 各チャンネルの中性子計数値

Card 64. JMAX (I 1 2) ALPC (F 7.2) ROU (F 5.1) DELT (E 1 2.5)

遅発中性子群数 臨界時の α_p の値 空間高調波に関 時間メッシュ巾

(単位 sec^{-1}) する因子, 通常

1.0

Card 65. TPINV (F 1 2.3)

遅発中性子群パルス中性子打込み周期 (単位 sec)

Card 66. RAMDA (6 F 1 2.4)

λ_i : i 群の先行核の崩壊定数

Card 66. BETT (6 E 1 2.3)

β_i ; i 群の先行核生成比 ($\sum \beta_i = 1$)

入力データの例は附録 3. にのせた。

4.3.2 出力データ

出力データについて簡単に説明する。

ALPPP : 最初はバックグラウンド一定という条件で α_p を求めた結果を、つぎには PULSE により遅発中性子崩壊の影響を考慮した結果を順次 out put する。

SKE : 実効増倍係数

DELK : 超過反応度

BCR : 生の実験データから遅発中性子崩壊に関する成分をさし引いた結果

出力データの一例を附録 3. に示した。

5. 計算結果と討論

5.1 実験データに対する結果

今回開発した ALPHA-D が意図したようにどの程度正確に遅発中性子崩壊の影響による系統誤差を除き得るかどうか吟味する目的を持って、つぎのような試験データに適用してみた。試験データは PULSE の部分のみを取り出して SN と SN2 および SN3 の和を求め作製したものである (Fig. 2 参照)。対象の炉については中性子寿命 $\ell = 10^{-3}$ および 10^{-4} sec として黒鉛あるいは重水炉および軽水炉を代表させ、各々の臨界未満度を約 -2.0 以下 -1 \$ 程度変えた 7 case の試験データを用意した。これらの試験データの炉物理的内容と ALPHA-D の適用結果をまとめて Table 2 にまとめた。

適用結果からつぎの結論を得た。遅発中性子崩壊の時間変化を無視して、時間的に一定とする従来の処理方法では即発中性子崩壊定数 α_p を過少評価する。その程度は $\ell = 10^{-3}$ sec の黒鉛 (重水) 炉では反応度 ρ は約 -2.0 以下から -1 \$ にあたり $4 \sim 3$ % であり、臨界に近いほど大きくなる。しかし $\ell = 10^{-4}$ sec の軽水炉では臨界近傍の $\rho = -0.93$ 以下でも 1.2 % の過少評価にとどまる。

5.2 SHEにおける実験データに対する結果

つぎに実際の実験データに対する本コードの有効性を吟味する目的をもつて SHE (20% 濃縮ウラン黒鉛減速反応体つき臨界集合体)⁽⁷⁾ におけるパルス中性子実験データに対して適用してみた。

炉心は燃料濃度、 $C / {}^{235}\text{U} = 5368$ であつて、側面反射体つき炉心の SHE-5 であり、パルス実験は燃料棒数 219 本の臨界状態より数本の燃料棒を抜いて臨界未満に行われた。実験の目的はこれらの僅か臨界未満の炉心の α_p の測定値を外挿して臨界における即発中性子崩壊定数を求めることであつた。この炉心の中性子寿命は約 1 ms. でかなり長いために遅発中性子崩壊の効果がかなり強くパルス中性子に対する応答にあらわれてきている。実験データの二つの例についてチャンネル当りの倍数 CR_n の時間変化を Fig. 4 に示した。

β_i ; i 群の先行核生成比 ($\sum \beta_i = 1$)

入力データの例は附録3.にのせた。

4.3.2 出力データ

出力データについて簡単に説明する。

ALPPP : 最初はバックグラウンド一定という条件で α_p を求めた結果を、つぎには PULSE により遅発中性子崩壊の影響を考慮した結果を順次 out put する。

SKE : 実効増倍係数

DELK : 超過反応度

BCR : 生の実験データから遅発中性子崩壊に関する成分をさし引いた結果

出力データの一例を附録3.に示した。

5. 計算結果と討論

5.1 実験データに対する結果

今回開発したALPHA-Dが意図したようにどの程度正確に遅発中性子崩壊の影響による系統誤差を除き得るかどうか吟味する目的を持って、つぎのような試験データに適用してみた。試験データはPULSEの部分のみを取り出してSNとSN2およびSN3の和を求め作製したものである(Fig.2参照)。対象の炉については中性子寿命 $\ell = 10^{-3}$ および 10^{-4} secとして黒鉛あるいは重水炉および軽水炉を代表させ、各々の臨界未満度を約-2.0%より-1%程度変えた7 caseの試験データを用意した。これらの試験データの炉物理的内容とALPHA-Dの適用結果をまとめてTable 2にまとめた。

適用結果からつぎの結論を得た。遅発中性子崩壊の時間変化を無視して、時間的に一定とする従来の処理方法では即発中性子崩壊定数 α_p を過少評価する。その程度は $\ell = 10^{-3}$ secの黒鉛(重水)炉では反応度 ρ は約-2.0%から-1%にわたり4~3%であり、臨界に近いほど大きくなる。しかし $\ell = 10^{-4}$ secの軽水炉では臨界近傍の $\rho = -0.93\%$ でも1.2%の過少評価にとどまる。

5.2 SHEにおける実験データに対する結果

つぎに実際の実験データに対する本コードの有効性を吟味する目的をもつてSHE(20%濃縮ウラン黒鉛減速反応体つき臨界集合体)⁽⁷⁾におけるパルス中性子実験データに対して適用してみた。

炉心は燃料濃度、 $C/^{235}\text{U} = 5368$ であつて、側面反射体つき炉心のSHE-5であり、パルス実験は燃料棒数219本の臨界状態より数本の燃料棒を抜いて臨界未満にして行われた。実験の目的はこれらの僅か臨界未満の炉心の α_p の測定値を外挿して臨界における即発中性子崩壊定数を求めることであつた。この炉心の中性子寿命は約1ms.でかなり長いために遅発中性子崩壊の効果がかなり強くパルス中性子に対する応答にあらわれてきている。実験データの二つの例についてチャンネル当りの倍数 CR_n の時間変化をFig.4.に示した。

その炉心の状態はつぎのとおりである。

Case A

装荷燃料棒数 214本

即発中性子崩壊定数 α_p ; $9.32 \pm 0.04 \text{ sec}^{-1}$

反応度 -35.2188%

Case B

装荷燃料棒本数 215本

即発中性子崩壊定数 α_p ; $8.54 \pm 0.06 \text{ sec}^{-1}$

反応度 -22.4219%

このうち α_p の値は ALPHA-D によつて決定された結果である。生の計数値に対して、ALPHA-D の機能の一つとして遅発中性子崩壊の成分を引き去つた結果 ((45) 式に相当するもの : CR_n) をも Fig. 4 に示してある。ALPHA-D を使用せずに従来の遅発中性子崩壊の成分を時間的に一定とみなす最小自乗法では Fig. 4 に示してあるように Case A で $8.99 \pm 0.04 \text{ sec}^{-1}$, Case B で $8.22 \pm 0.05 \text{ sec}^{-1}$ となり、ALPHA-D の結果に比べて各々 3.5 および 3.7 % 近い結果を得ている。二つのデータ処理方法による差は 3.5~3.7 % であつて各コードの定める誤差量 0.4~0.7 % (ALPHA-D) , および 0.4~0.6 % (ALPHA) よりずつと大きく系統誤差の存在していることを示している。したがつて ALPHA-D の使用により、この 4 % もの系統誤差を取り除いてより正確な α_p の値を決定し得ることが結論された。この α_p における 4 % の系統誤差は β/l の値を α_c , つまり臨界時の α_p より (21) 式と (22) 式を利用し求めたとき 4.5 % の系統誤差となつてくる。パルス中性子法による反応度測定では、Simon & King⁽⁸⁾ が (21) 式より導いた公式

$$\rho (\$ \text{ unit}) = \frac{\alpha_p - \alpha_c}{\beta/l} \quad (47)$$

を使用するので β/l における 4.5 % の系統誤差はそのまま反応度に関する系統誤差になるので極めて ALPHA-D の使用によるデータ処理は有効であると思われる。

6. 結 論

増倍体系におけるパルス中性子実験データ解析用コード ALPHA-D を開発した。このコードはパルス中性子投入によつて生ずる全中性子密度から遅発中性子崩壊の成分を適正に評価してさし引き、問題にしている即発中性子崩壊の部分をできるだけ純粹に抽出してから単一指数関数に最小自乗法によりあてはめ、即発中性子崩壊定数 α_p を最適に決定することを目的としている。コード開発にあつては遅発中性子成分の評価について特に注意を払い、中性子密度の空間依存性になるべく影響されないように留意した。つまり一度遅発中性子崩壊を一定値バックグラウンドとみなして最小自乗法を行い、決定した即発中性子崩壊定数を初期値として、くりかえし計算を行い十分な収束が得られるようにしている。また計算時間を短縮するためにパルス中性子投入後の初期にルンゲクッタ法を使いにとどめ、大部分の時間領域にはテイラー

その炉心の状態はつぎのとおりである。

Case A

装荷燃料棒数 214本

即発中性子崩壊定数 α_p ; $9.32 \pm 0.04 \text{ sec}^{-1}$

反応度 -3.52188×10^{-4}

Case B

装荷燃料棒本数 215本

即発中性子崩壊定数 α_p ; $8.54 \pm 0.06 \text{ sec}^{-1}$

反応度 -2.24219×10^{-4}

このうち α_p の値は ALPHA-D によつて決定された結果である。生の計数値に対して、ALPHA-D の機能の一つとして遅発中性子崩壊の成分を引き去つた結果 ((45) 式に相当するもの : CR_n) をも Fig. 4 に示してある。ALPHA-D を使用せずに従来の遅発中性子崩壊の成分を時間的に一定とみなす最小自乗法では Fig. 4 に示してあるように Case A で $8.99 \pm 0.04 \text{ sec}^{-1}$, Case B で $8.22 \pm 0.05 \text{ sec}^{-1}$ となり, ALPHA-D の結果に比べて各々 3.5 および 3.7 % 近い結果を得ている。二つのデータ処理方法による差は 3.5~3.7 % であつて各コードの定める誤差量 0.4~0.7 % (ALPHA-D) , および 0.4~0.6 % (ALPHA) よりずつと大きく系統誤差の存在していることを示している。したがつて ALPHA-D の使用により, この 4 % もの系統誤差を取り除いてより正確な α_p の値を決定し得ることが結論された。この α_p における 4 % の系統誤差は β/ℓ の値を α_c , つまり臨界時の α_p より (21) 式と (22) 式を利用し求めたとき 4.5 % の系統誤差となつてくる。パルス中性子法による反応度測定では, Simon & King⁽⁸⁾ が (21) 式より導いた公式

$$\rho (\$ \text{ unit}) = \frac{\alpha_p - \alpha_c}{\beta/\ell} \quad (47)$$

を使用するので β/ℓ における 4.5 % の系統誤差はそのまま反応度に関する系統誤差になるので極めて ALPHA-D の使用によるデータ処理は有効であると思われる。

6. 結 論

増倍体系におけるパルス中性子実験データ解析用コード ALPHA-D を開発した。このコードはパルス中性子投入によつて生ずる全中性子密度から遅発中性子崩壊の成分を適正に評価してさし引き, 問題にしている即発中性子崩壊の部分をできるだけ純粹に抽出してから単一指数関数に最小自乗法によりあてはめ, 即発中性子崩壊定数 α_p を最適に決定することを目的としている。コード開発にあつては遅発中性子成分の評価について特に注意を払い, 中性子密度の空間依存性になるべく影響されないように留意した。つまり一度遅発中性子崩壊を一定値バックグラウンドとみなして最小自乗法を行い, 決定した即発中性子崩壊定数を初期値として, くりかえし計算を行い十分な収束が得られるようにしている。また計算時間を短縮するためにパルス中性子投入後の初期にルンゲクッタ法を使うにとどめ, 大部分の時間領域にはテイラー

展開による time-step 法を使うことにより、典型的な 256 channel のデータ処理には約1分以内の計算時間でよいことにした。

また本コードの有効さを定量的に実証するために、試験用として臨界近傍の炉のパルス実験データを人工的に作成して処理し、良好な結果を得るとともに、SHE における実際の実験データに対しても期待した通りの成果を収めた。つまり中性子寿命が 1 ms 程度の炉に対しては従来のように遅発中性子崩壊を一定値バックグラウンドとして最小自乗法を行うと、真の値を 4% 過少評価して即発中性子崩壊定数 α_p をきめてしまうことである。本コードの適用により、この系統誤差は完全に取り除いて真の値を得ることができることが明らかになった。中性子寿命の長い黒鉛炉、重水炉におけるパルス中性子実験のデータ処理には、広く本コードが使用されてより正確値が得られることを期待している。

文 献

1. Kuchle, M : "Exponential and Critical Experiment" vol.2 Vienna, IAEA(1964).
2. Fraude, A : Nukleonik 4 (1962) 84.
3. Sastre, C et al : Nucl. Sci. Eng. 20, 359 (1964).
4. Kaneko, Y et al : J. Nucl. Sci. Technol. 4, 9, (1967).
5. Akino, F & Tzutzui. : JAERI-memo 1795(1964).
6. FACOM230-60 SSL 使用方法解説書
7. Inoue, K, et al : JAERI-4014(1960).
8. Simmon, B. E. & King, J. S. : Nucl. Sci. Eng. 3, 595 (1958).

Table 1 パルス中性子の応答計算精度

中性子密度	ラプラス変換による正解	PULSEの数値解
SN(6)	0.91365	0.91365
SN(252)	0.022693	0.0226995
SN2(6)	0.011701	0.011705
SN2(252)	0.011634	0.011639
SN3(6)	0.0106998	0.0107046
SN3(252)	0.01063962	0.0106440

Table 2 Performance test of ALPHA-D

Case No.	neutron lifetime	reactivity(%) (true α_p value)	α_p determined by ⁽¹⁾ earlier method	α_p determined by ⁽²⁾ presend method
1	10^{-3}	-0.120 (8,000)	76831±0.0065	80008±0.0002
2	10^{-3}	-0.331 (10,000)	96854±0.0091	99977±0.0004
3	10^{-3}	-0.539 (12,000)	11672±0.013	11998±0.001
4	10^{-4}	-0.006 (65,000)	64234±0.104	64957±0.022
5	10^{-4}	-0.157 (80,000)	79277±0.136	79955±0.036
6	10^{-4}	-0.309 (95,000)	94307±0.162	94951±0.065
7	10^{-4}	-0.460 (110,000)	10931±0.20	10992±0.130

(1) convergence criteria 10^{-4} (2) convergence criteria 0.5×10^{-3}

Raw data recorded in a time analyzer RC_n $n=2, 256$

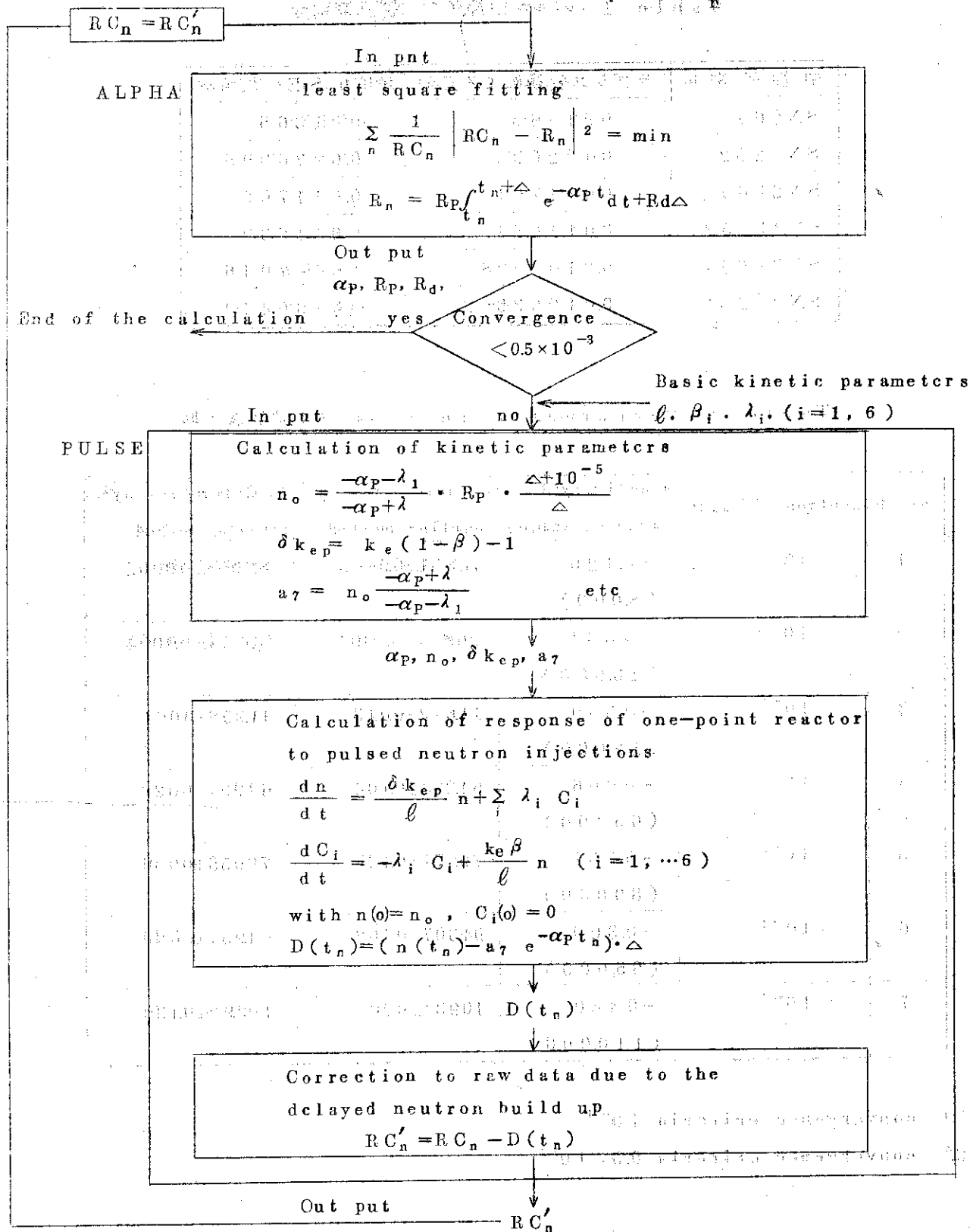


Fig.1 Flow chart of the computer code

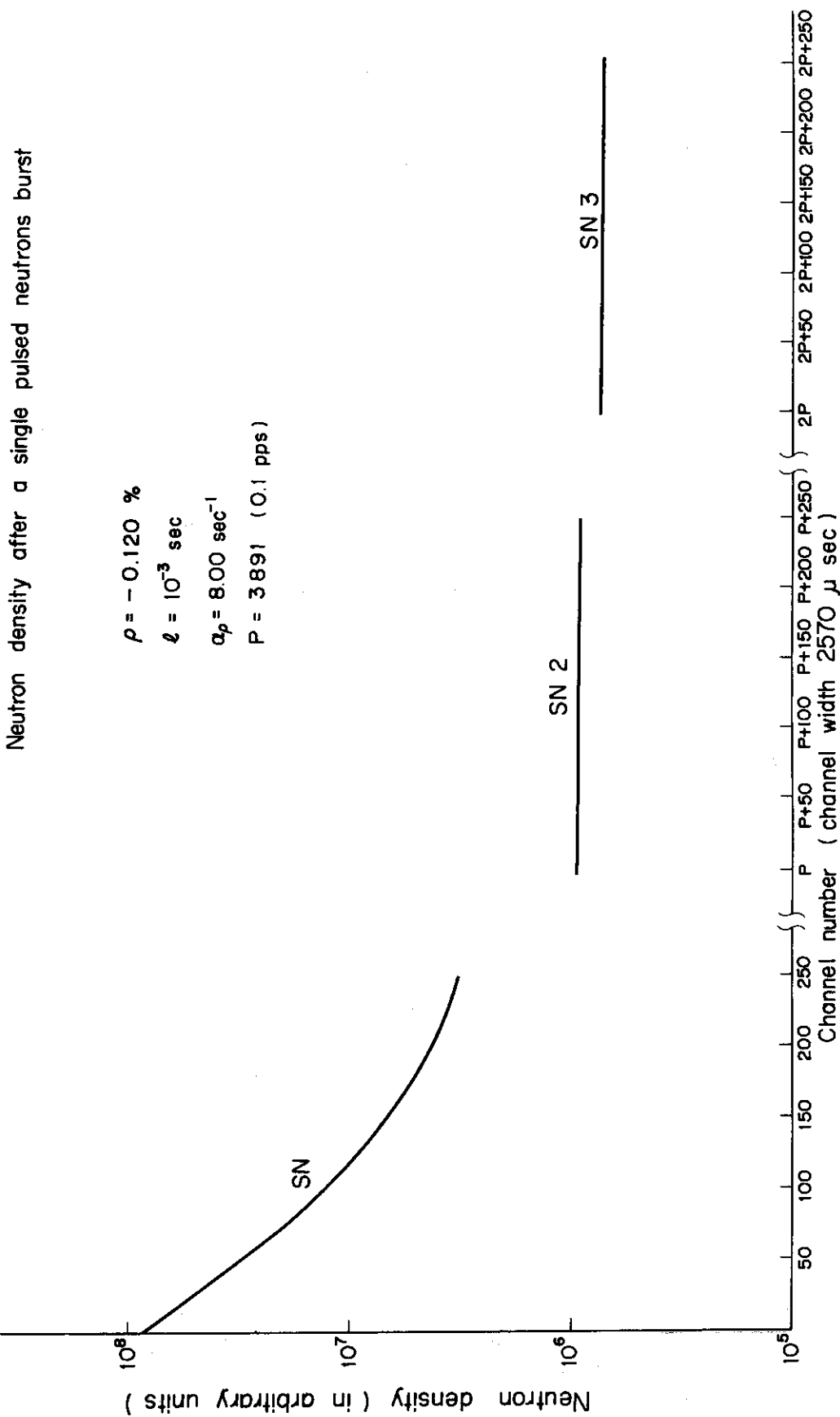


Fig. 2 Calculated neutron density induced by a single pulsed neutrons burst

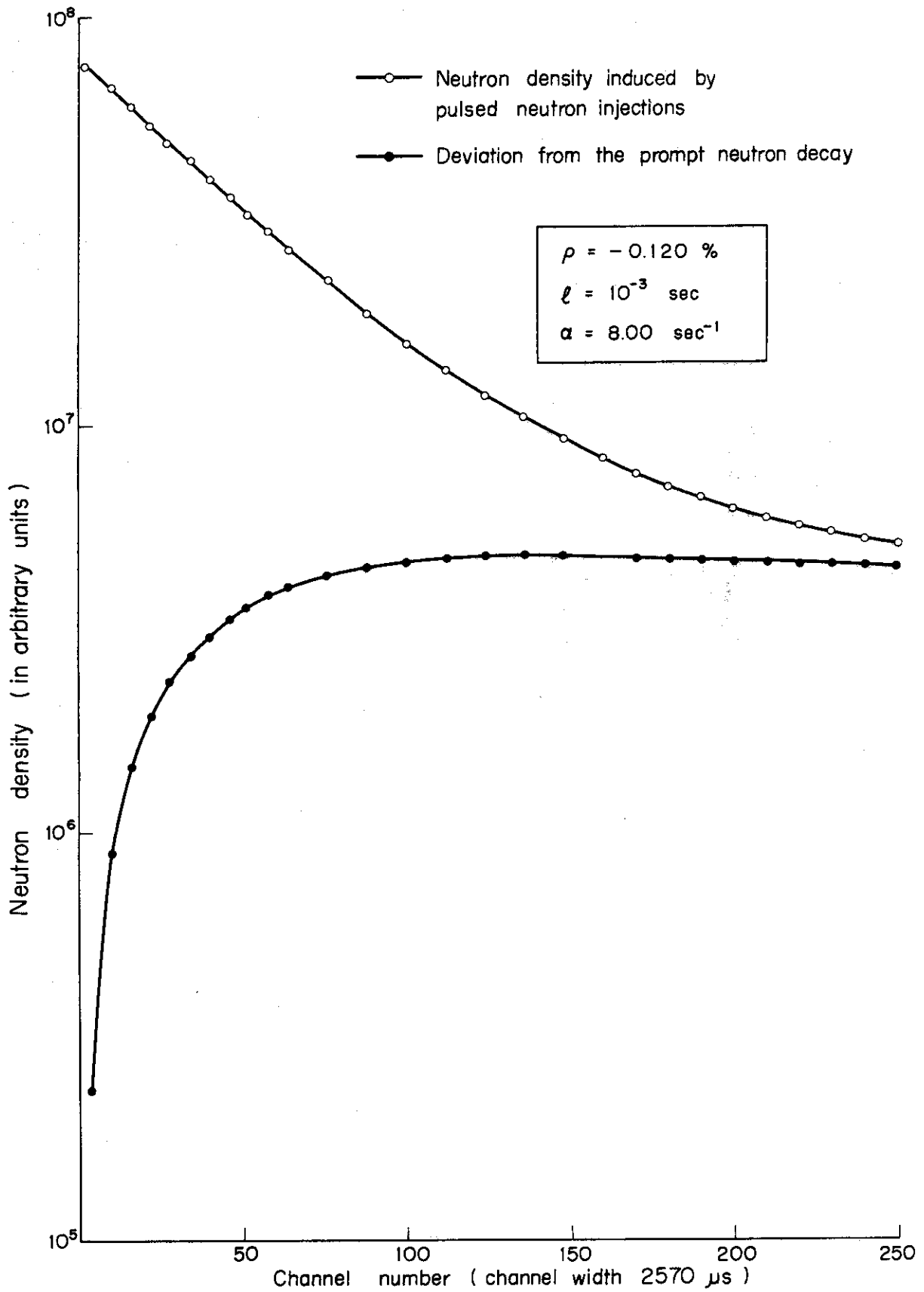


Fig. 3 Deviation of neutron density from the prompt neutron decay induced by pulsed neutron injections

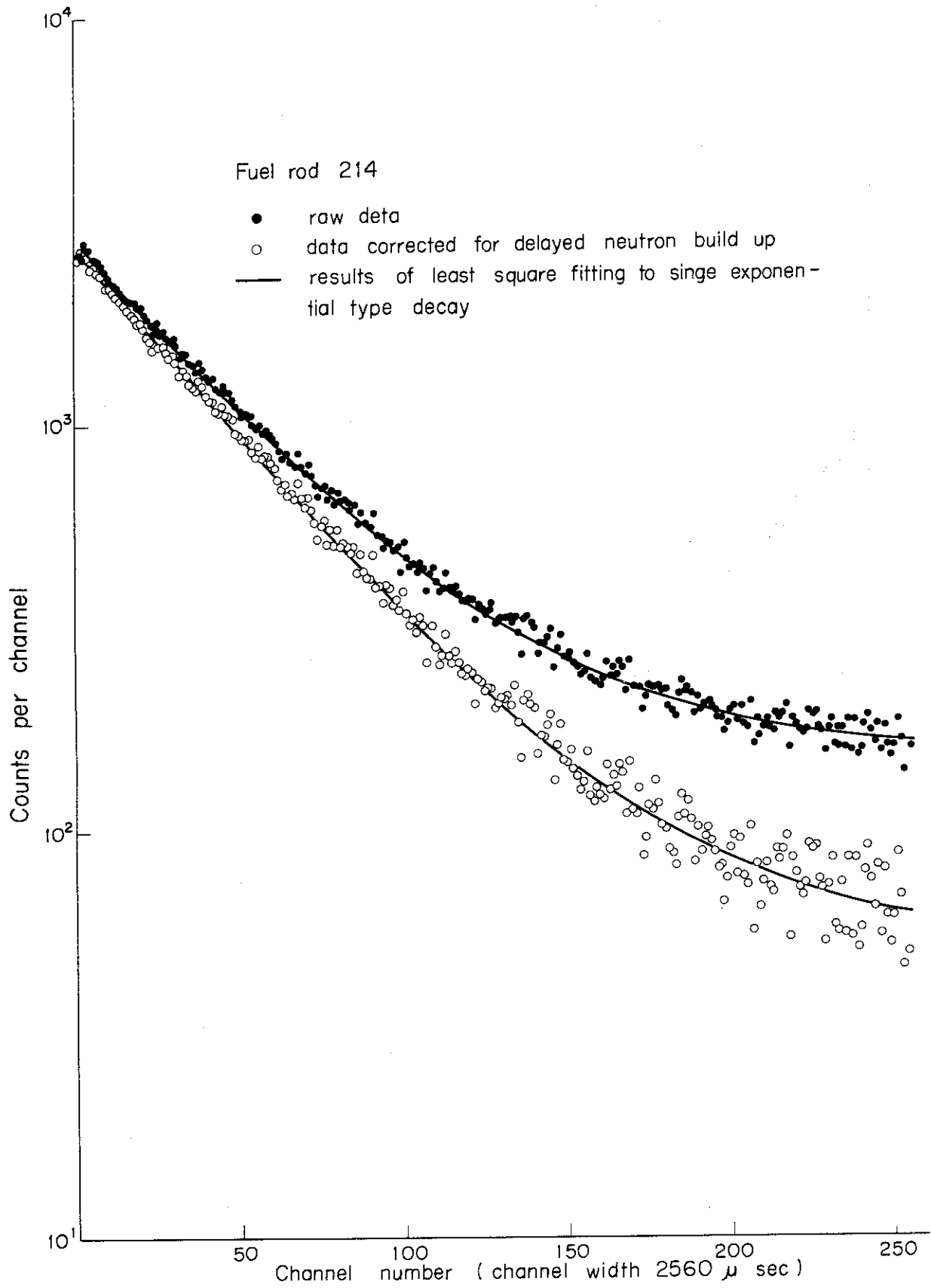


Fig.4. a) Decay of neutron density after bursts in SHE-5

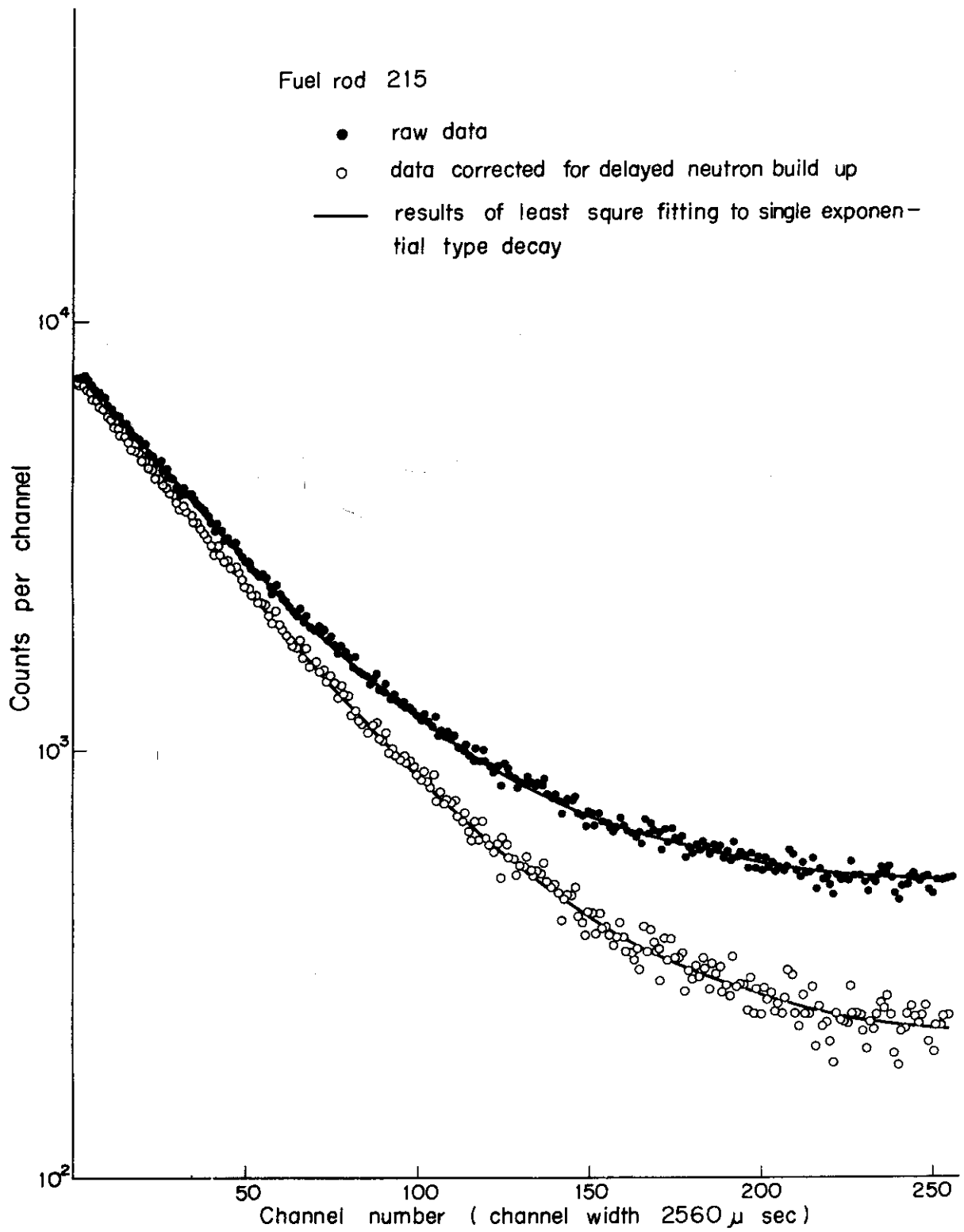


Fig. 4. b) Decay of neutron density after bursts in SHE-5

7. 附 録

A. ルンゲクッタ・シル法

連立1階常微分方程式

$$dy_i/dx = f_i(x, y_1, \dots, y_m) \quad i=1, 2, \dots, m$$

を解く。

独立変数 x の初期値 x_0 のときの従属変数 y の初期値 y_{i0} ($i=1, 2, \dots, n$) を与えて, x_0 から h きざみで m 点にわたり, $x_0+h, x_0+2h, \dots, x_0+(m-1)h$ 点の y_i, f_i の値 ($i=1, 2, \dots, n$) を求める。

なお高階微分方程式

$$\frac{d^n y}{dx^n} = f\left(x, y, \frac{dy}{dx}, \dots, \frac{d^{n-1}y}{dx^{n-1}}\right)$$

も

$$y_1 = y, \quad y_2 = \frac{dy_1}{dx} = \frac{dy_1}{dx} = \frac{dy}{dx}, \dots, \quad y_n = \frac{dy_{n-1}}{dx} = \frac{d^{n-1}y}{dx^{n-1}}$$

とおいて, この y_1, \dots, y_n についての微分方程式として処理することにより解ける。

なお, この問題で用いたパラメータは $m=259, n=8$ である。

附録B FORTRANソースリスト

* SOURCE STATEMENT *

```

1 COMMON SKI,ALPH, FB,ALPH,ALP,IFND
2 COMMON HCR , ICHAN,HETT,RANDA,ROU ,DELT, TPINVI
3
4 JMAX=1,ISTART,IEND
5 DIMENSION ALDPP(2,5),REPP(2,5)
6 DIMENSION ALPHA(3),BETA(3),EPSLON(5),NSKIP(20),CHAN(256),T(206)
7 DIMENSION F(256),EIMT(256)
8 FRET(256,5)=A(10,11) *D(10),ANS(10),COF(10)
9 DIMENSION ICHAN(260),BCK(5,260),CCIN(206)
10 DIMENSION ALPHA(3),BETA(5)
11 DIMENSION BETT(5),RHMNAC(5)
12 INTEGER YEAR,NDAY
13
14 1 FORMAT (14I5)
15 2 FORMAT (3E12,5)
16 3 FORMAT (15,1E12,5)
17 4 FORMAT (5I12)
18
19 C
20 C ...READ INPUT DATA...
21 C
22 1111 READ (5,1) IPHU
23 READ (5,1) LTEST,IITER
24 READ (5,1) YEAR,MOUNT,NDAY,NCASE
25 READ (5,1) MAXJ
26 READ (5,2) ALPHA(1),BETA(1),EPSLON(1),I=1,MAXJ
27 READ (5,2) CZERO
28 READ (5,2) R+AL
29 READ (5,2) S+TAU
30 READ (5,3) IS+T+B
31 READ (5,2) H
32 READ (5,1) MAXSK
33 IF (MAXSK) 2001,2002,0,0,0
34 2001 READ (5,1) (NSKIP(I),I=1,MAXSK)
35 2002 READ (5,1) ISTART,IEND,I
36 READ (5,4) (ICHAN(I),I=1,ISTART,IEND)
37
38 C
39 READ(5,5) JMAX,ALP,ROU,DELT,TPINVI
40 3 FORMAT(11I2,7F,2,5,1,1E12,5,F14,3)
41 READ(5,6) (HAMA(J),J=1,JMAX)
42 READ(5,7) (HET(J),J=1,JMAX)
43 4 FORMAT(6F14,4)
44 ALPHA(1:1) =ALPHA(1)
45 REPP(1:1) =BETA(1)
46 ICL=1
47 5000 L=0
48 M=2*MAXJ+4
49
50 C
51 C ...WRITE INPUT DATA...
52 C
53 WRITE (6,1001) IPHU,YEAR,MOUNT,NDAY,NCASE,MAXJ
54 1001 FORMAT(11I14,HP,PLE=NUMBER,5X,15//1X,ANYEAR,5X,14,6X,6MOUNT,11,
55 14X,12,1X,NDAY,2X,12,2X,19X,PERIMENTAL NUMBER,6X,13//1X,13MAXMU
56 2M OF 4,1X,12//1X,1PHIN) [AL VALUE,16X,5HALPHA,15X,4HBETA,16X,7M
57 3EPRILCN//)
58 DO 18 I=1,MAXJ
59 18 WRITE (6,1002) I,ALPH(1),BETA(1),EPSLON(1)
60 1002 FORMAT(5X,12,14X,13(8X,1E12,5)//)

```

* SOURCE STATEMENT (FTMAIN) *

```

45 WRITE (6,1003) CZERO
46 KKA=1
47 2900 GO TO (3001,3002,3006,3008,3010),KKA
48 3001 DO 3000 I=1,ISTART,IEND
49 3000 CHAN(I)=ICHAN(I)
50 GO TO 3005
51 3002 KKA=KKA-1
52 DO 3003 I=1,ISTART,IEND
53 3003 CHAN(I)=BCK(KKA,I)
54 GO TO 3012
55 3006 KKA=KKA-1
56 DO 3007 I=1,ISTART,IEND
57 3007 CHAN(I)=BCK(KKA,I)
58 GO TO 3012
59 3008 KKA=KKA-1
60 DO 3009 I=1,ISTART,IEND
61 3009 CHAN(I)=BCK(KKA,I)
62 GO TO 3012
63 3010 KKA=KKA-1
64 DO 3011 I=1,ISTART,IEND
65 3011 CHAN(I)=BCK(KKA,I)
66 3012 DO 3013 I=1,ISTART,IEND
67 3013 WEIGHT(I)=1./BCR(KKA,I)
68 KKA=KKA-1
69 GO TO 3015
70 3005 DO 3014 I=1,ISTART,IEND
71 CCHM(I)=ICHAN(I)
72 3014 WEIGHT(I)=1./CCHM(I)
73 3015 DO 10 I=1,ISTART,IEND
74 T(I)=FLOAT(I-2)*(S+XL)*A, *XL=0,2E=05
75 F(I)=1./T(I)-CCHAN(I)*AU/(P+XL))
76 10 CHAN(I)=CHAN(I)*F(I)=
77 C
78 ...CALCULATION OF FZERO(I),FALPHA(I,J),FBETA(I,J)...
79 DO 11 I=1,ISTART,IEND
80 FZERO(I)=CZERO-XL-CHAN(I)
81 DO 11 J=1,MAXJ
82 AL=ALDPP(I,KKA)
83 BE=BEDPP(I,KKA)
84 EA=EAB*(ALJ*(T(I)+XL))
85 EATL=EAP*(ALJ*(T(I)+XL))
86 FZPRO(I)=FZERO(I)+(BE/ALJ)*(EAT-EATL)
87 FALPH(I,J)=(BE/ALJ*(ALJ*ALJ)*(EAT*(T(I)+1.)+(EATL*(ALJ*(T(I)+X
88 1,1-2)))
89 11 FBETA(I,J)=(EAT-EATL)/ALJ
90 ...CLEAR ZERO =AD(J)*A(I,J)=...
91 C
92 DO 20 J=1,M2
93 AU(J)=0.
94 DO 20 K=1,M2
95 A(J,K)=0.
96 C
97 ...SKIP CHANNEL TO ZERO
98 IF (MAXSK) 2001,2002,2003
99 2003 DO 30 I=1,MAXSK
100 30 NSKIP(I)

```

* SOURCE STATEMENT (F1MAIN)*

```

94 30 WEIGHT(K)=0
95 C ...CALCULATION OF MATRIX ELEMENTS...
96 2002 DU 50 J=1:MAXJ
97 MJ=MAXJ
98 DU 50 K=1:MAXJ
99 MK=MAXJ
100 DU 50 I=ISTART,IEND
101 W=WEIGHT(I)
102 AL(J,K)=A(J,K)+W*FALPHA(I,J)*FALPHA(I,K)
103 A(M,J)=A(M,J)+W*FBETA(I,J)*FALPHA(I,K)
104 A(L,J)=A(L,J)+W*FBETA(I,J)*FBETA(I,K)
105 50 CONTINUE
106 DU TO K=1:MAXJ
107 MK=MAXJ
108 DU 60 I=ISTART,IEND
109 FALK=FALPHA(I,K)
110 FBIK=FBETA(I,K)
111 AD(K)=AD(K)+W*WEIGHT(I)*FZERO(I)*FALK
112 AD(MK)=AD(MK)+W*WEIGHT(I)*FZERO(I)*FBIK
113 A(L2,K)=A(L2,K)+WEIGHT(I)*AL*FALK
114 60 A(L2,MK)=A(L2,MK)+WEIGHT(I)*XL*FBIK
115 AK(M2)=AK(M2,K)
116 AK(MK)=AK(M2,MK)
117 60 CONTINUE
C
118 DU 80 I=ISTART,IEND
119 A(L2,M2)=A(M2,M2)+WEIGHT(I)*XL*XL
120 AD(M2)=AD(M2)+WEIGHT(I)*FZERO(I)*AL
121 CALL CDEL(M2,A,AD,ANS,COP)
C ...TEST OF ALPHA(C),LT,EPSILON(C)...
122 DU 90 J=1:MAXJ
123 MJ=MAXJ
124 ALPP(J,KKK) = ALPP(J,KKK)-ANS(J)
125 BEPPP(L,KKK) = BEPPP(L,KKK)-ANS(MJ)
126 IF (ABS(ANS(J)/ALPP(J,KKK)) .LT. EPSILON(C)) JCOUNT=JCOUNT+1
127 90 CONTINUE
128 CZERO=CZERO-ANS(M2)
129 L=I
130 IF (I/PRI) 1201,1205,1401
131 1201 L=L-1 TEST
132 WRITE(6,92) LLT
133 92 FORMAT(10X,4MLT=14)
134 IF (L=1) 1202,1202,1206
135 ...WRITE (ITERATION OUTPUT)...
C
136 1202 WRITE (6,101) L
137 1011 FORMAT(1X,4SHRESULT OF 13,13H-TH ITERATION)
138 DU 12 I=1:MAXJ
139 12 I=1:MAXJ
140 1022 FORMAT(8X,12+3X+6HALDPPP,E12.5,10X,6HREPPP,E12.5)
141 WRITE (6,1003) CZERO
142 1003 FORMAT(9X,14MCNSTANT OF CO,6X,E12.5)
143 JCHA=JCOUNT*MAXJ
144 WRITE(6,94) JCHA
145 94 FORMAT(10X,5HJCHA=14)

```

* SOURCE STATEMENT (FTMAIN)*

```

145 IF (JCOUNT.NE.MAXJ) GO TO 100
146 ALP=ALPP(1,KKK)
147 FND=BEPPP(1,KKK)
148 CALL PULSF(KKK)
C ...CALCULATION OF STANDARD ERROR...
C
149 SANS=0
150 DU 13 I=ISTART,IEND
151 SUM=CZRO*AL-CZAR(I)
152 DU 14 J=1:MAXJ
153 14 SUM=SUM+(BEPPP(1,KKK)/ALPP(1,KKK)) * (EXP(-ALPP(1,KKK)*T(I))-
1 1 *XP(-ALPP(1,KKK)*T(I)*XL))
154 13 SANS=SANS+(WEIGHT(I)*SUM)
155 WRITE(6,6709) SANS
156 6709 FORMAT (E75.6)
C
157 EXT=SHNS/(FLUAT(IEND-(I-1)*M2))
158 DU 15 J=1:MAXJ
159 MJ=MAXJ
C
160 ALPHA(I,J) =SINT(ABS(CUF(IJ)*EXT2))
161 BETA(I,J) =SINT(ABS(CUF(MJ)*EXT2))
162 CZEROP =SINT(ABS(CUF(M2)*EXT2))
C
C ...WRITE STANDARD ERROR...
C
163 WRITE (6,1008)
164 1008 FORMAT(10H1-TH STANDARD ERROR,15X,5HALPHA+15X+4HBETA)
165 DU 16 I=1:MAXJ
166 16 WRITE(6,1009) I,ALPHA(I),BETA(I)
167 WRITE(6,1010) CZEROP
168 1009 FORMAT(8X,12+11X+2(8X+E12.5))
169 1010 FORMAT(8X,2HC,E12.5)
170 KKI=KKK+1
171 ALPP(I,KKK)=ALPP(I,KKK)
172 BEPPP(1,KKK)=BEPPP(1,KKK)
173 KKK=KKK+1
174 IF (KKK.EQ.2) GO TO 2900
175 IF (ABS((ALPP(1,1)-ALPP(1,2))/ALPP(1,2)).GE.0.005) GO TO 21-1
176 GO TO 1203
177 IF (KKK.EQ.3) GO TO 2900
178 IF (ABS((ALPP(1,2)-ALPP(1,3))/ALPP(1,3)).GE.0.005) GO TO 2111
179 GO TO 1203
180 IF (KKK.EQ.4) GO TO 2900
181 IF (ABS((ALPP(1,3)-ALPP(1,4))/ALPP(1,4)).GE.0.005) GO TO 2112
182 GO TO 1203
183 IF (KKK.EQ.5) GO TO 2900
184 IF (ABS((ALPP(1,4)-ALPP(1,5))/ALPP(1,5)).GE.0.005) GO TO 12-3
185 GO TO 5002
186 1203 IF (L=1) 1200,1200,1200
187 1200 J=JCOUNT*MAXJ
188 WRITE(6,93) JH
189 93 FORMAT(10X,3HJH=14)
190 IF (JCOUNT.NE.MAXJ) GO TO 100
C

```


FACOM 230-60 FORTRAN D -110110-0009-03 COMPILATION 71.05.20 PAGE 5

* SOURCE STATEMENT (FMAIN) *

```

191 1206 WRITE (6,1)111 L
192      DO 112 I=1,MAXJ
193 112 WRITE(6,1)I*991+ALPHA(I),BETA(I)
194 1099 FORMAT(8A,12,11X,2(15),E12,5//)
195      WRITE (6,1)03) CZERO
C
196 1203 WRITE (6,1)04) R,XL,S,TAU,ISM7,B,P
197 1004 FORMAT(1H1)6HDELAY TIME RATIO,3X,F12.5,8X,23HANALYSIS CHANNEL LEN
      2/1X,1+HBACK GROUND,8X,F6.1,3X,20HVALUE OF BACK GROUND,1X,E12,5//1X
      3+10HPULSE INJECTION,4A,E12,5)
198      WRITE (6,1)05) MAXSK,(NSKIP(I),I=1,MAXSK)
199 1002 FORMAT(1H1)28HTOTAL NUMBER OF SKIP CHANNEL,13//1X,19HSKIP CHANNEL
      INUMBER,18D//)
200      WRITE (6,1)06) ISTART,IEND
201 1006 FORMAT(1X,28HINITIAL START CHANNEL NUMBER,14//1X,17HCOUNT PER CHAN
      INEL,12X,17HMAXIMUM OF CHANNEL,16)
202      IC=IC+1
203      WRITE(6,5)0) IC,IA
204 5500 FORMAT(10X,3HIC=,13,1UX,3HIA=,13)
205      IF (IC=IA) GO TO 5001,5001,5002
206 5001 ISTAR=ISTART+10
207      GO TO 5000
208 5002 GO TO 1111
209      END
    
```

FACOM 230-60 FORTRAN D -110110-0009-03 COMPILATION 71.05.20 PAGE 6

* SOURCE STATEMENT *

```

1 SUBROUTINE DOUL(N,A,ALP,ANS,COF)
2 COMMON SKE,ALPC, FT,ALPH,ALP,FNO
3 COMMON BCK, ICHAN,BETT,KANDA,ROU,DELT, TPINVI
4 1 +JMAX,ISTART,IEND
5 DIMENSION BCK(5*260),ICHAN(260),BETT(6),KANDA(6)
6 DIMENSION A(10,11),B(10,11),AP(10),ANS(10),COF(10)
7 DO 11 I=1,N
8 11 A(I,1)=AU(I)
9 NUN=N-2
10 NI=2*N-1
11 DO 12 I=1,NI
12 DO 13 J=NUN+1
13 12 A(I,J)=0.
14 DO 1 I=1,NI
15 1 I(I,1)=1.
16 DO 2 I=1,NI
17 2 B(I,1)=A(I,1)/A(1,1)
18 DO 13 K=2,N
19 13 K=1
20 DO 4 J=K+1
21 DO 3 J=1,M
22 3 A(K,1)=A(K,1)-(A(J,1)*B(J,K))
23 4 B(K,1)=A(K,1)/A(K,K)
24 13 CONTINUE
25 DO 5 I=1,NI
26 5 A(N,1)=B(N,1)
27 NM=N-1
28 DO 7 K=1,NM
29 J2=N-K
30 DO 7 I=1,NI
31 A(J2,1)=B(J2,1)
32 DO 7 I=1,K
33 7 I=N-K+1
34 7 A(J2,1)=A(J2,1)-(A(J1,1)*B(J2,1))
35 DO 8 I=1,NI
36 8 ANS(I)=A(1,N+1)
37 DO 9 I=1,NI
38 DO 9 J=1,NI
39 NJ=N-K+1
40 9 A(I,J)=A(I+N,J)
41 DO 10 I=1,N
42 10 COF(I)=A(1,1)
43 RETURN
44 END
    
```

* SOURCE STATEMENT *

```

1 SUBROUTINE PULSE(KKK)
2 COMMON SKF,ALPL, FF,ALPH,ALP,FNO
3 COMMON BCK, CHAN,BETT,RAMDA,ROU,DELT,TPINVI
4 DIMENSION SN2(260),SN3(260),SNP(260),SN41(260),SN51(260),C2(260+b)
5 1 JMAX,ISTART,IEND
6 1 LCC(6), C2(260+b), BCK(5+60)
7 2 RETT(6),RAMDA(6),SSS(260),ICHAN(260),E(260),C1(6),CP(6)
8 3 T(260),M3(260),SN(260)
9 4 CK(6),SN5(260),CS(260+b)
10 DOUBLE PRECISION C,SNS
11 INTEGER M,P1,PP,PM1,P259,P1,P21,P2259,P29
12 P=C1/DELT*TPINVI
13 PM=1
14 SL=1,DF=03
15 BET=0.0064
16 SUM=0.
17 SU=BR=0.
18 DO 10 I=1,JMAX
19 SU=SUM+BETT(I)/(ALP+RAMDA(I))
20 SUMBR=SUMBR+BETT(I)*RAMDA(I)
21 S=ALP=SUM
22 RA=SUMBR/HLT
23 DELK=(-SL+ALP+S)/(1.-S)
24 SKF=1.+DFLK
25 A=RET /SL)*SKL=DELK/SL+RA
26 B=(-RA /SL)*DELK
27 RN1=(A+SQRT(A*A-4.*B))*.5
28 RN2=(-A+SQRT(A*A-4.*B))*.5
29 FF=(RN2+RA)/(RN2-RN1)
30 FNI=F*FF
31 ALPH=(BET-DELK*(1.-RET))/SL
32 WRITE(I,19) SKF=DELK,FF,ALPH,FNI
33 14 FUNMAI(2X,4H5KE=E13.0,5X,2HDEI K=F13.6,5A,3HFF=E13.6,5X,5HALPH=
34 1 E12.6,5X,6HFNI=E13.6)
35 CALL DMC(C,SNS)
36 DO 100 I=1,259
37 SN(I)=SNS(I+1)
38 100 CONTINUE
39 WRITE(6,40) (SN(I),I=1,259)
40 FORMAT(7E10.5)
41 P1=P+1
42 SN1=SN(259)
43 DO 20 I=1,JMAX
44 CK(I)=C2(259+I)
45 DO 110 K=259,P1
46 PU(I)=0.
47 PU(I)=0.
48 DO 22 I=1,JMAX
49 PU(I)=UM1+RAMDA(I)*CK(I)
50 PU(I)=UM3+RAMDA(I)*RAMDA(I)*CK(I)
51 CU=TIME
52 UN(I)=-ALPH*PM1+ROU*PUM1
53 PUM2=0.
54 DO 23 I=1,JMAX
55 PUM2=UM2+RAMDA(I)*BETT(I)/0.0064

```

* SOURCE STATEMENT (PULSE)*

```

50 23 CONTINUE
51 PUM4=UM2*5KE
52 DN2=ALPH*(ALPH*SN1-ROU*PUM1)+ROU*(PUM4+ALPC*SN1-PUM3)
53 DO 24 I=1,JMAX
54 REI=BETT(I)/0.0064
55 RAM=RAMDA(I)
56 DCC1=ALPC*BETT*SN1*5KE=HAM*CK(I)
57 DCC2=ALPC*BETT*DN1*5KE=RAM*DCC1
58 CK(I)=CK(I)+DCC1*DELT+0.5*DCC2*DELT*DELT
59 24 CONTINUE
60 SN1=SN1+DN1*DELT*0.5+DNN2*DELT*DELT
61 110 CONTINUE
62 WRITE(6,27) SN1
63 FORMAT(7E10.5)
64 PM=1
65 P259=259
66 DO 50 I=1,JMAX
67 C2(PP1+I)=CK(I)
68 SN2(I)=SN1
69 DO 55 I=PP1,P259
70 SUM1=0.
71 SU=M3=0.
72 DO 56 I=1,JMAX
73 SU=M1=SUM1+RAMDA(I)*C2(I)
74 SU=M3=SUM3+RAMDA(I)*RAMDA(I)*C2(I)
75 DN1=-ALPH*SN2(I)+ROU*SUM1
76 SUM2=0.
77 DO 51 I=1,JMAX
78 SUM2=SUM2+RAMDA(I)*BETT(I)/0.0064
79 51 CONTINUE
80 SU=M2=SUM2*SKF
81 DN2=ALPH*(ALPH*SN2(I)-ROU*SUM1)+ROU*(SUM2+ALPC*SN2(I)-SUM2)
82 DO 52 I=1,JMAX
83 REI=BETT(I)/0.0064
84 RAM=RAMDA(I)
85 DCY1=ALPC*BETT*SN2(I)*5KE=HAM*CK(I)
86 DCY2=ALPC*BETT*DN2*5KE=RAM*DCY1
87 C2(I+1)=C2(I)+DCY1*DELT+0.5*DCY2*DELT*DELT
88 52 CONTINUE
89 SN2(I+1)=SN2(I)+UN2*DELT+0.5*DN2*DELT*DELT
90 SP2=SN2(I+1)
91 53 CONTINUE
92 WRITE(6,40) (SN2(I),I=1,259)
93 SP=SP2
94 DO 65 J=1,JMAX
95 CCL(I)=C2(1+59+I)
96 P259=P+259
97 TP=P+P+1
98 DO 66 I=P+9,TP1
99 SS1=0.
100 SS3=0.
101 DO 61 I=1,JMAX
102 SS1=SS1+RAMDA(I)*CCC(I)
103 SS3=SS3+RAMDA(I)*RAMDA(I)*CCC(I)
104 UN21=-ALPH*SP+ROU*SS1

```

* SOURCE STATEMENT (PULSF) *

```

105 S2=0.
106 DU 62 J=1,JMAX
107 S2=S2+RAMDA(J)*BET(J)/D.0064
108 CONTINUE
109 S2=S2*SKE
110 DN32 = ALPH*(ALPH*SP *ROU*SS1)+ROU*(S2*ALPC*SP -SSJ)
111 DU 63 J=1,JMAX
112 RL=RETT(J)/D.0064
113 RAM=RAMDA(J)
114 DC31 = ALPC*BET*SP*SKE*RAM*CCC(J)
115 DC32 = ALPC*BET*DN31*SKE*RAM*DC31
116 CC(J) =CC(J)*DC31*DELT + 0.5*DC32*DELT*DELT
117 SP = SP *D.31*DELT +0.5*DN32*DELT*DELT
118 P2=59*458
119 P21=1
120 SNJ(1)=SP
121 DU 80 J=1,JMAX
122 C3VP21+J)=LCC(J)
123 DU 300 I=P21+P2259
124 SA1=0.
125 SA1=0.
126 DU 301 J=1,JMAX
127 SA1 =S1+RAMDA(J)*C3(I,J)
128 301 SA1 =S13+RAMDA(J)*RAMDA(J)*C3(I,J)
129 DN=NL = -ALPH*SN3(1) + ROU*SA1
130 SA2=0.
131 DU 302 J=1,JMAX
132 SA2 =SA2 +RAMDA(J)*BET(J)/D.0064
133 CONTINUE
134 SAP=SAP*SKE
135 DN=NL2 = ALPH*(ALPH*SNJ(1) -ROU*SA1) + ROU*(SA2*ALPC*SN3(1)-SA3)
136 DU 303 J=1,JMAX
137 BEL =RETT(J)/D.0064
138 RAM =RAMDA(J)
139 DCC1 = ALPC*BET*SN3(I)*SKE*RAM*CC(J)
140 DCC2 = ALPC*BET*DN31*SKE*RAM*DCC1
141 C3(I+1,J) =C3(I,J) + DCC1*DELT + 0.5*DCC2*DELT*DELT
142 303 SN3(I+1) =DN3(I)+DN31*DELT + 0.5*DN32*DELT*DELT
143 WRITE(6,400) (SN3(I),I=1,259)
144 T(0)=0.1078E-01
145 T(1)=0.3598E-01
146 T(2)=0.6168E-01
147 T(3)=0.8738E-01
148 IST1=ISTAR-1
149 DU 150 I=1,15
150 SNP(I) = (SN(I+1) +SN(I))/2.
151 SN4(I) = (SN(2(I+1) + SN2(I))/2.
152 SN5(I) = (SN(3(I+1) + SN3(I))/2.
153 150 SSS(I) = SN4(I)+SN5(I) +SNP(I)
154 ISTE=ISTAR+3
155 IE=D3*IFENU+3
156 DU 200 I=1,12+IEND3
157 SNP(I) = (SN(I+1) + SN(I))/2.
158 SN4(I) = (SN(2(I+1) + SN2(I))/2.
159 SN5(I) = (SN(3(I+1) + SN3(I))/2.
    
```

* SOURCE STATEMENT (PULSE) *

```

160 SSS(I) = SN4(I)+SN5(I) +SNP(I)
161 SSS(I) =SSS(I)+0.257E-02
162 T(I+1)=T(I)+0.257E-02
163 EXPTT= 0.5*(EXP(-ALP *T(I+1)) +EXP(-ALP *T(I)))
164 E(I)=SSS(I)*FF*FN1*EXPTT *0.257E-02
165 ED=E(I) * (DELT+D.0064*FF)/DELT
166 I3=I-3
167 M3(I3)=SSN(I)
168 FAXHAN=ICHAN(I3)
169 BCR(KKK+I3)=FAXHAN -ED
170 CONTINUE
171 WRITE(6,400) KKK
172 *U FURNAT(10A,4HKKK,13)
173 *U FURNAT(2X,1E18.5)
174 WRITE(6,53) (BCR(KKK+I),I=2,255)
175 RETURN
176 END
    
```

FACOM 230-60 FORTRAN D -710110- 0007-03 COMPILATION 71.05.20 PAGE 11

* SOURCE STATEMENT *

```

1 SUBROUTINE SNC(CS,SNS)
2 COMMON SKF,ALPC, FF,ALPH,ALP, FND
3 DIMENSION Y(8),F(8),X(8,260),YY(8,260),YS(260,8)
4 DIMENSION SNS(260),C(260,6)
5 DOUBLE PRECISION Y,F,X,YY,SNS,YS,CS, F
6 EXTERNAL SUB
7 FN=F(1)/FF
8 M=259
9 H=0,DD<57
10 Y(1)=0.
11 Y(2)=FN
12 Y(3)=0.
13 Y(4)=0.
14 Y(5)=0.
15 Y(6)=0.
16 Y(7)=0.
17 Y(8)=0.
18 CALL SNG(Y,8,8,M,H,F, SUB,FX,YY,IL)
19 IF(IL.EQ.0) GO TO 1
20 S=0
21 DO 10 JP=1,8
22 DO 10 SN=(J)*YY(C,JP)
23 DO 10 JP=1,M
24 DO 10 KK=J,8
25 YS(JP,YY)=Y(KK,JP)
26 KK2=KK-2
27 CS(JP,KK2)=YS(JP,KK)
28 100 CONTINUE
29 RETURN
30 END
    
```

FACOM 230-60 FORTRAN D -710110- 0007-03 COMPILATION 71.05.20 PAGE 12

* SOURCE STATEMENT *

```

1 SUBROUTINE SUB(K,YZ,ZZ)
2 COMMON SKF,ALPC, FF,ALPH,ALP, FND
3 DIMENSION YZ(K),ZZ(K)
4 DOUBLE PRECISION YZ,ZZ
5 B1=0.035
6 B2=0.249
7 B3=0.176
8 B4=0.375
9 B5=0.115
10 B6=0.442
11 DL1=0.0124
12 DL2=0.0305
13 DL3=0.111
14 DL4=0.301
15 DL5=1.14
16 DL6=0.01
17 ZZ(2)=ALP*YZ(2)+DL1*YZ(3)+DL2*YZ(4)+DL3*YZ(5)+DL4*
18 YZ(6)+DL5*YZ(7)+DL6*YZ(8)
19 ZZ(3)=DL1*YZ(3)+B1*SKF*ALPC*YZ(2)
20 ZZ(4)=DL2*YZ(4)+B2*SKF*ALPC*YZ(2)
21 ZZ(5)=DL3*YZ(5)+B3*SKF*ALPC*YZ(2)
22 ZZ(6)=DL4*YZ(6)+B4*SKF*ALPC*YZ(2)
23 ZZ(7)=DL5*YZ(7)+B5*SKF*ALPC*YZ(2)
24 ZZ(8)=DL6*YZ(8)+B6*SKF*ALPC*YZ(2)
25 RETURN
26 END
    
```

附録C 入力データの例

122 1

```

80
1
1771 6 1 2
1
0.4 *U1 0.77A *OT 0.1 -04
+0.
+0.2 E=U1+0.256 E=02
+0.1 E=04+0.0
1+0.0
+0.0
0
2
255
19484 19117 18726 18402 18055
17714 17387 17026 16737 16424
16117 15816 15541 15233 14950
14674 14401 14135 13874 13619
13366 13123 12883 12647 12416
12190 11969 11751 11539 11330
11124 10925 10749 10537 10348
10164 9983 9805 9632 9461
9294 9131 8971 8814 8660
8500 8361 8216 8074 7935
7790 7665 7544 7406 7280
7137 7036 6918 6802 6688
6577 6487 6380 6255 6153
6055 5953 5828 5701 5668
5577 5488 5400 5315 5230
5144 5067 4988 4910 4834
4760 4686 4615 4545 4476
4404 4342 4277 4214 4151
4096 4030 3971 3914 3857
3802 3744 3692 3643 3591
3541 3492 3444 3397 3351
3304 3261 3217 3174 3132
3091 3051 3011 2972 2934
2897 2861 2825 2790 2755
2721 2688 2656 2624 2593
2562 2532 2502 2473 2445
2417 2390 2363 2337 2311
2286 2261 2237 2213 2190
2167 2144 2122 2100 2079
2054 2038 2018 1998 1979
1960 1941 1923 1905 1888
1870 1853 1837 1821 1805
1780 1773 1758 1744 1729
1714 1701 1697 1673 1660
1647 1634 1622 1609 1597
1584 1574 1562 1551 1540
1526 1519 1508 1498 1488
1474 1468 1459 1449 1440
1431 1422 1413 1405 1396
1388 1380 1372 1364 1357
1340 1342 1334 1327 1320
1314 1306 1299 1293 1286
1280 1274 1268 1262 1256
1250 1244 1238 1233 1227
1222 1217 1211 1206 1201
1194 1191 1187 1182 1177
1174 1168 1164 1159 1155
1131 1147 1143 1139 1135
1117 1127 1123 1119 1116
1094 1104 1100 1102 1098
A 6.40 1.0+2.57 E=02 10.000 1.14 5.01
0.124 0.305 0.111 0.304
0.21120E-04 0.14016E-02 0.12544E-04 0.25240E-02 0.73600E-03 0.66800E-03

```


JAERI-M 4525

STANDARD ERKOR 1 ALPHA 0.12158E-04 BETA 0.32642E 04

C 0.13529E 04 LLT = -4 RESULT OF 6-TH ITERATION ALPH= 0.79915E 01 DELPH= 0.78058E 07 CONSTANT OF CO 0.12731E 05

Table with columns: SKE, JCHA, DELK, FF, ALPH, FNL, and numerical values. It contains a large grid of data points, likely representing simulation results or error metrics.

JAERI-M 4525

0.57601E 04	0.564432E 04	0.57283F 04	0.54154E 04	0.53056E 04	0.51967E 04	0.50909E 04
0.49872E 04	0.48864E 04	0.47867E 04	0.46890E 04	0.45933E 04	0.44996E 04	0.44079E 04
0.43183E 04	0.42307E 04	0.4144U 04	0.40605E 04	0.39769E 04	0.38963E 04	0.38188E 04
0.37342E 04	0.36627E 04	0.35882F 04	0.35147E 04	0.34432E 04	0.33747E 04	0.33053E 04
0.32378E 04	0.31714E 04	0.31064F 04	0.30435E 04	0.29821E 04	0.29207E 04	0.28613E 04
0.28029E 04	0.27455E 04	0.26901F 04	0.26347E 04	0.25812E 04	0.25290E 04	0.24776E 04
0.24273E 04	0.23769E 04	0.23286F 04	0.22812E 04	0.22349E 04	0.21896E 04	0.21452E 04
0.21009E 04	0.20596E 04	0.20182F 04	0.19749E 04	0.19346E 04	0.18953E 04	0.18570E 04
0.18186E 04	0.17813E 04	0.17456F 04	0.17047E 04	0.16754E 04	0.16411E 04	0.16078E 04
0.15745E 04	0.15421E 04	0.15108F 04	0.14805E 04	0.14502E 04	0.14209E 04	0.13916E 04
0.13633E 04	0.13349E 04	0.13076F 04	0.12813E 04	0.12550E 04	0.12297E 04	0.12043E 04
0.11800E 04	0.11557E 04	0.11323F 04	0.11090F 04	0.10867E 04	0.10643E 04	0.10430E 04
0.10218E 04	0.10003E 04	0.97991E 03	0.95955E 03	0.94019E 03	0.92083E 03	0.90246E 03
0.88409E 03	0.86572E 03	0.84834F 03	0.83045E 03	0.81357E 03	0.79718E 03	0.78078E 03
0.76539E 03	0.74898E 03	0.73358F 03	0.71917E 03	0.70475E 03	0.69033E 03	0.67591E 03
0.66148E 03	0.64805E 03	0.63561F 03	0.62217E 03	0.60972E 03	0.59727E 03	0.58482E 03
0.57236E 03	0.56089E 03	0.54942E 03	0.53795E 03	0.52747E 03	0.51699E 03	0.50651E 03
0.49500E 03	0.48551E 03	0.47503E 03	0.46454E 03	0.45398E 03	0.44346E 03	0.43294E 03
0.42841E 03	0.41987E 03	0.41134F 03	0.40279E 03	0.39424E 03	0.38569E 03	0.37713E 03
0.37056E 03	0.36299E 03	0.35542E 03	0.34784E 03	0.34125E 03	0.33366E 03	0.32707E 03
0.32047E 03	0.31386E 03	0.30725F 03	0.30163E 03	0.29501E 03	0.28938E 03	0.28275E 03
0.27711E 03	0.27147E 03	0.26582F 03	0.26017E 03	0.25451E 03	0.24985E 03	0.24418E 03
0.23951E 03	0.23483E 03	0.23015F 03	0.22546E 03	0.22076E 03	0.21606E 03	0.21136E 03
0.20665E 03	0.20293E 03	0.19821F 03	0.19449E 03	0.19076E 03	0.18602E 03	0.18228E 03
0.17844E 03	0.17479E 03	0.17105F 03	0.16727E 03	0.16351E 03	0.16074E 03	0.15796E 03
0.15348E 03	0.15104E 03	0.14861E 03	0.14481E 03	0.14201E 03	0.13920E 03	0.13639E 03
0.13356E 03	0.13076E 03	0.12794E 03	0.12511E 03	0.12227E 03	0.11943E 03	0.11759E 03
0.11478E 03	0.11289E 03	0.11003F 03	0.10817E 03	0.10530E 03	0.10243E 03	0.10159E 03
0.98670E 02	0.96784E 02					
0.131148E 00						

STANDARD ERROR ALPHA BETA
 1 0.32482E-U3 0.11622E U3

C 0.22017E 02
 LLT= -3
 RESULT OF 7-TH ITERATION
 1 ALPH= 0.8008E 01 DLPPH= 0.78082E U7
 CONSTANT OF CD =-0.13222E 04

JCHA= 0
 SKE= 0.998798E 00 DELTA=-0.120236E-U2 H= 0.956345E CD ALPH= 0.759467E 01 FNI= 0.814460E 07

0.0	0.80069E 07	0.78282E 07	0.77009E 07	0.75525E 07	0.74071E 07	0.72646E 07
0.71250E 07	0.69883E 07	0.68543E 07	0.67234E 07	0.65943E 07	0.64682E 07	0.63447E 07
0.62137E 07	0.61051E 07	0.59468E 07	0.58750F 07	0.57634E 07	0.56541E 07	0.55470E 07
0.54420F 07	0.53392E 07	0.52304E 07	0.51398F 07	0.50429E 07	0.49480E 07	0.48521E 07
0.47641E 07	0.46749E 07	0.45874E 07	0.45018F 07	0.44178E 07	0.43256E 07	0.42360E 07
0.41760E 07	0.40986E 07	0.40248F 07	0.39494E 07	0.38764E 07	0.38049E 07	0.37349E 07
0.36658E 07	0.35986E 07	0.35348E 07	0.34699E 07	0.34051E 07	0.33432E 07	0.32825E 07
0.32230E 07	0.31647E 07	0.31091E 07	0.30516F 07	0.29967E 07	0.29430E 07	0.28903E 07
0.28397E 07	0.27881E 07	0.27345E 07	0.26899E 07	0.26422E 07	0.25956E 07	0.25498E 07
0.25050E 07	0.24610E 07	0.24180E 07	0.23758E 07	0.23344E 07	0.22939E 07	0.22541E 07
0.22152E 07	0.21770E 07	0.21376E 07	0.21030F 07	0.20670E 07	0.20318E 07	0.19973E 07
0.19634F 07	0.19303E 07	0.18978E 07	0.18659F 07	0.18328E 07	0.18001E 07	0.17681E 07
0.17447E 07	0.17159E 07	0.16876E 07	0.16598E 07	0.16324E 07	0.16042E 07	0.15769E 07
0.15454E 07	0.15294E 07	0.15049E 07	0.14803F 07	0.14557E 07	0.14310E 07	0.14113E 07
0.13911E 07	0.13673E 07	0.13449E 07	0.13225E 07	0.13004E 07	0.12784E 07	0.12565E 07
0.12432E 07	0.12226E 07	0.12026E 07	0.11829E 07	0.11634E 07	0.11439E 07	0.11245E 07
0.11199E 07	0.11034E 07	0.10872E 07	0.10713F 07	0.10557E 07	0.10400F 07	0.10245E 07
0.10108E 07	0.99636E 06	0.98244E 06	0.96840F 06	0.95471E 06	0.94151E 06	0.92845E 06
0.91565E 06	0.90310E 06	0.89078E 06	0.87871E 06	0.86687E 06	0.85526E 06	0.84387E 06
0.83270E 06	0.82174E 06	0.81100E 06	0.80046F 06	0.79013E 06	0.77999E 06	0.77005E 06
0.76030E 06	0.75079E 06	0.74145E 06	0.73225E 06	0.72312E 06	0.71426E 06	0.70558E 06
0.69706E 06	0.68870E 06	0.68049E 06	0.67245E 06	0.66456E 06	0.65681E 06	0.64922E 06
0.64176E 06	0.63445E 06	0.62747E 06	0.62023E 06	0.61333E 06	0.60655E 06	0.59990E 06
0.59337E 06	0.58697E 06	0.58068E 06	0.57451E 06	0.56846E 06	0.56252E 06	0.55669E 06
0.55097F 06	0.54536E 06	0.53985E 06	0.53445E 06	0.52927E 06	0.52430E 06	0.51881E 06
0.51379E 06	0.50868E 06	0.50368E 06	0.49877E 06	0.49406E 06	0.48946E 06	0.48504E 06
0.48113E 06	0.47679E 06	0.47254E 06	0.46836F 06	0.46426E 06	0.46024E 06	0.45628E 06
0.45240E 06	0.44854E 06	0.44464E 06	0.44119E 06	0.43755E 06	0.43401E 06	0.43052E 06
0.42710E 06	0.42374E 06	0.42043E 06	0.41719E 06	0.41400E 06	0.41087E 06	0.40780E 06
0.40478E 06	0.40181E 06	0.39889E 06	0.39602F 06	0.39320E 06	0.39044E 06	0.38772E 06
0.38504E 06	0.38242E 06	0.37984E 06	0.37730F 06	0.37480E 06	0.37235E 06	0.36994E 06
0.36737E 06	0.36524E 06	0.36295E 06	0.36070F 06	0.35849E 06	0.35631E 06	0.35417E 06
0.35207E 06	0.35000E 06	0.34766E 06	0.34546E 06	0.34329E 06	0.34106E 06	0.33872E 06
0.33828E 06	0.33644E 06	0.33436E 06	0.33284E 06	0.33109E 06	0.32936E 06	0.32766E 06
0.32599E 06	0.32435E 06	0.32273E 06	0.32113F 06	0.31957E 06	0.31802E 06	0.31650E 06
0.31501E 06	0.31354E 06	0.31209E 06	0.31066F 06	0.30926E 06	0.30787E 06	0.30651E 06
0.30517E 06	0.30385E 06	0.30255E 06	0.30127E 06	0.30001E 06	0.29876E 06	0.29754E 06
0.78204E 05						
0.78204E 05	0.78192E 05	0.78181E 05	0.78169E 05	0.78158E 05	0.78146E 05	0.78135E 05
0.78204E 05	0.78111E 05	0.78100E 05	0.78088E 05	0.78077E 05	0.78069E 05	0.78062E 05
0.78042E 05	0.78031E 05	0.78019E 05	0.78008F 05	0.77996E 05	0.77985E 05	0.77975E 05
0.77962E 05	0.77951E 05	0.77939E 05	0.77928E 05	0.77916E 05	0.77905E 05	0.77893E 05
0.77882E 05	0.77870E 05	0.77859E 05	0.77847E 05	0.77836E 05	0.77825E 05	0.77813E 05
0.77802E 05	0.77790E 05	0.77778E 05	0.77767E 05	0.77756E 05	0.77745E 05	0.77733E 05
0.77722E 05	0.77710E 05	0.77699E 05	0.77688F 05	0.77676E 05	0.77665E 05	0.77654E 05
0.77642E 05	0.77631E 05	0.77619E 05	0.77608F 05	0.77597E 05	0.77589E 05	0.77574E 05
0.77563E 05	0.77551E 05	0.77540E 05	0.77529E 05	0.77517E 05	0.77506E 05	0.77495E 05
0.77483E 05	0.77472E 05	0.77461E 05	0.77450E 05	0.77439E 05	0.77427E 05	0.77416E 05
0.77404E 05	0.77393E 05	0.77382E 05	0.77370E 05	0.77359E 05	0.77348E 05	0.77337E 05
0.77325E 05	0.77314E 05	0.77303E 05	0.77292E 05	0.77280E 05	0.77269E 05	0.77258E 05
0.77247E 05	0.77235E 05	0.77224E 05	0.77213E 05	0.77202E 05	0.77191E 05	0.77179E 05
0.77168E 05	0.77157E 05	0.77146E 05	0.77134E 05	0.77123E 05	0.77112E 05	0.77101E 05
0.77090E 05	0.77079E 05	0.77067E 05	0.77056E 05	0.77045E 05	0.77034E 05	0.77023E 05
0.77012E 05	0.77000E 05	0.76989E 05	0.76978E 05	0.76967E 05	0.76956E 05	0.76945E 05
0.76934E 05	0.76922E 05	0.76911E 05	0.76900F 05	0.76889E 05	0.76878E 05	0.76867E 05

JAERI-M 4525

STANDARD ERROR ALPHA BETA
1 0.17374E-03 0.17308E 03
C 0.11434E 02

DELAY TIME RATIO 0.20000E 01 ANALYSIS CHANNEL LEN/1XBACK GROUND 0.0 VALUEOF BACK

PULSE INJECTION 0.0
FT744X ERROR AT(036520) TYPE OF OUT-PUT LIST IS NOT SAME FORMAT

DELAY TIME RATIO ***** ANALYSIS CHANNEL LEN/1XBACK GROUND 0.0 VALUEOF BACK GROUND* 0.0

PULSE INJECTION

TOTAL NUMBER OF SKIP CHANNEL 0

SKIP CHANNEL NUMBER 0

INITIAL START CHANNEL NUMBER 2

COUNT PER CHANNEL MAXIMUM OF CHANNEL 255

IC= 2 IA= 0
FT7227 ERROR AT(034043) * END OF FILE * READ