

JAERI-Tech

2001-016



JP0150364



JRR-4即発 γ 線分析装置による
BNCT用血液サンプルの
ホウ素濃度測定

2001年3月

山本 和喜・岸 敏明・堀 直彦・熊田 博明・
鳥居 義也・堀口 洋二

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

JRR-4 即発 γ 線分析装置による BNCT 用血液サンプルのホウ素濃度測定

日本原子力研究所東海研究所研究炉部

山本 和喜・岸 敏明・堀 直彦・熊田 博明・鳥居 義也・堀口 洋二

(2001年2月2日受理)

1998年にはJRR-4 医療照射設備が医療照射実施に向けて準備が整い、1999年10月には最初の医療照射が行われた。原研におけるホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) では患者にBSH ($Na_2B_{12}H_{11}SH$) を投与し、腫瘍細胞が正常細胞よりBSHを含有しやすい性質を利用して中性子照射を行うことにより腫瘍細胞に大きな影響を付与するものである。腫瘍細胞に効果的な線量を与えるためには照射中の患者内ホウ素濃度を正確にかつ迅速に推定することが必要となる。即発 γ 線分析法は ^{10}B に対して高感度、前処理不要などの利点があるためにBNCTには重要な分析法であり、本報告では即発 γ 線分析を用いたホウ素濃度測定において重要なホウ素のピーク面積の計算方法について報告する。

ホウ素に中性子が照射された際に (n, α) 反応で放出された 7Li 核が高速移動中にはかの核と衝突して減速されるまでの間に即発 γ 線が放出される。その際、検出器によって測定される γ 線の波長は、ドップラー効果によって真の γ 線の波長からシフトしたものとなり、測定されるホウ素のピークは一般の崩壊現象で観察されるようなガウス分布の形とはならない。このドップラー効果のある場合に観測されるピーク関数を物理的に導出し、非線形最小自乗法を用いてピーク面積及びその他のパラメータを計算する方法を開発した。

計算された面積を水素のピーク面積で除したB/H比とホウ素濃度との検量線を作成して十分な直線性が得られることを確認して実際の医療照射で利用している。

Measurement of Boron-10 Concentration in the Blood Sample for
BNCT by Prompt Gamma-ray Analysis Equipment of JRR-4

Kazuyoshi YAMAMOTO, Toshiaki KISHI, Naohiko Hori,
Hiroaki KUMADA, Yoshiya TORII and Yoji Horiguchi

Department of Research Reactor
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 2, 2001)

The preparation of the medical irradiation facility of JRR-4 finished in 1998, and the first medical irradiation was carried out in October, 1999. As for the boron-neutron capture therapy (BNCT) in JAERI, the patient has infused the BSH ($\text{Na}_2\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{SH}$) in this body beforehand. Large damage to the tumor cells is given by neutron irradiation using the property in which tumor cells is easy to contain BSH further than the normal cell.

It is required that the boron concentration of the patient under irradiation is estimated accurately and quickly in order to give the dose which is effective in the tumor cells. Prompt gamma rays analysis is very important analysis method for BNCT, since there is advantage in which high sensitivity and pretreatment are unnecessary for ^{10}B . In this report, calculation method of peak area of the boron to determine the boron concentration at the prompt gamma ray analysis is reported.

Prompt gamma rays are emitted in the slowdown process of ^7Li nucleus formed in the (n, α) reaction, when the neutron was irradiated in the boron. As the result, the observed energy peak of the boron measured by the detector becomes shifting from the energy of true gamma-ray by the Doppler effect, and the measured peak does not become form of the Gaussian distribution observed in general decay phenomena. The peak function observed this Doppler effect was deduced physically, and the method for calculating peak area and other parameter using the nonlinear least squares method was developed.

Since the sufficient linearity of the calibration curve of B/H ratio, the calculated area divided by peak area of the hydrogen versus boron concentration is obtained, the method is utilized in actual medical irradiation.

Keywords: JRR-4, Boron, Gamma Spectroscopy, Least Square Fit, Neutron Activation Analysis, Prompt Gamma Radiation, Numerical Solution, Spectroscopy, Whole Blood, Prompt

Gamma-Ray Measurements, Nonlinear Least-Square Fit, Doppler Shift, Doppler Broadening, Error Function, BNCT, BSH

This is a blank page.

目次

1	はじめに	1
2	JRR-4 即発 γ 線分析装置の概要	2
3	ボロンのドップラー効果	3
4	ドップラーピーク関数の導出	4
5	非線型最小2乗法	7
6	誤差評価	9
7	ソフト開発	10
8	校正実験	10
8.1	ホウ酸水を用いた校正	11
8.2	血液の分析	12
8.3	血液中 Na の影響の考察	13
9	まとめ	15
	謝辞	17
	参考文献	18

Contents

1	Introduction.	1
2	Out Line of JRR-4 Neutron Beam Facility.	2
3	Doppler Effect with Boron-10 Prompt Gamma.	3
4	Derivation of Doppler Function.	4
5	Nonlinear Least-square Fit.	7
6	Evaluation of Fitting Error.	9
7	Development of Software.	10
8	Calibration Experiment and Method.	10
8.1	Calibration with Boric Acid.	11
8.2	Measurement of Boron (with BSH) in the Human Whole Blood.	12
8.3	Influence of Na in the Blood.	13
9	Conclusion.	15
	Acknowledgment.	17
	References.	18

1はじめに

1959年から1961年にかけてBrookhevenで行われたBNCTの臨床研究において、ホウ素濃度の決定に要する時間は3~4時間必要であった。ホウ素濃度は、最初の腫瘍摘出手術時にボロンを患者に注入し、ホウ素濃度試験を行って推定していた¹⁾。血液脳関門現象(BBB:Blood Brain Barrier)の回復のため3週間を開けて、BNCTを行っていた。時間関数として高注入時の推定血液濃度計算するために、低注入で得られた曲線から推論できると仮定していた。ところが、この臨床研究の最後の患者で、BNCT実施時の実際の血液中ホウ素を測定したところ、この推論で計算を行ったものより濃度が高かった。この患者は治療後10日後、脳の浮腫に至り死亡した。適切な腫瘍：脳濃度比だけでなく血管の放射線壊死を発生しない照射時間で血液中のホウ素濃度すら評価できていなかった。この反省から、血中ホウ素の測定を数分で行なうことが要求された。この問題を解決したのはKobayashiとKanda²⁾であり京都大学研究炉(KUR)の中性子導管においてボロンの中性子捕獲反応からの即発 γ 線(478keV)を精度良く測定することにより1gのサンプルの¹⁰B濃度(ppmオーダ)を短時間で測定できるシステムを開発した。一方、ブルックヘブン国立研究所(BNL:Brookhaven National Labpratory)においても1985年にRalph Fairchildら³⁾が同様の解決策を示した。彼らの方法により治療を行っている原子炉より得られる熱中性子を利用して即発 γ 線分析を行うことで治療中の血液中ホウ素の決定が実質上可能となったといえる。原研のJRR-2においてBNCTの臨床研究が開始されたのが1990年であったが、初期の頃は即発 γ 線分析を用いたホウ素測定は行われていなかった。その後、JRR-3Mに即発 γ 線分析装置が整備され⁴⁾、1992年よりYonezawaらによってBNCT臨床時のホウ素濃度測定を開始した⁵⁾。しかし、治療を行っていたJRR-2とホウ素測定を行っていたJRR-3Mと使用する原子炉が異なるため、BNCT実施時にJRR-3Mが停止期間になる場合もあり、必ずしも理想的な状況にはなかった。その後、1996年にJRR-2は停止し、その代替機能はJRR-4に受け継がれた。JRR-4には、血液中のボロン測定を行なえる即発 γ 線分析装置と発光プラズマ分光分析装置(ICP-AES)を装備した⁶⁾。これにより、同一原子炉において、照射中のホウ素測定が可能となり、安全な線量評価を行えるようになったといえる。1998年、MagaraとYonezawaは¹⁰Bピーク形状を考察し、非線型最小2乗法による計算方法を示した。JRR-4においても臨床に向け、1998年に独自に¹⁰Bピーク形状を考察し、非線型最小2乗法による計算方法を確立し1999年の10月に実施された第1回BNCT時においてすでに実用化している。

JRR-4に装備された即発 γ 線分析装置は、炉プール上に置かれたサンプルに向けて、熱中性子を照射しながらGe検出器で γ 線を測定する装置である。ビームラインは炉心に対してタンジェンシャルに配置されているもののプールから発生するガンマ線の混在量も多く、バックグラウンドが高い状態においてボロンピーク面積を測定しなければならなかつた。ボロンのピークはGe検出器で測定されているようなガウス分布の形態を取らない。これはボロンの(n, α)反応で生成される⁷Li核が他の核に衝突され減速されるまでの間に即発 γ 線を放出し、観測者(検出器)はドップラー効果により真の γ 線よりずれた波長で検出されるからである。⁷Liが飛行中まったく束縛を受けなければ、単純にそのエネルギー幅は約7.67keVになる。しかし、物質中を飛行する場合、媒質の電場等により、観測されるエネルギー幅はシフトする。今回の研究の中で、このドップラーシフトを含めたドップラー効果のある場合の観測されるピークの関数を物理的に導出した。フィッティング関数はボロンピークの式にバックグラウンド1次式を考慮したもので、これに非線型最小2乗法を用いてピーク面積、その他の各パラメータを計算する。計算された面積に水素ピーク面積で除したB/H比とホウ素との検量線を作成した

ところ、バックグラウンドの高い本設備においても、十分な直線性が得られた。

また、本研究では Magara らが行ったアプローチと違った確率論的アプローチによりピークの関数を求め、ドップラーピークの関数化を行い、ここではそのアルゴリズム、誤差評価等を述べることとする。

2 JRR-4 即発 γ 線分析装置の概要

即発ガンマ線分析は、中性子捕獲反応等の際に反応後 10^{-14} sec 以内に放出される即発ガンマ線を測定し、 γ 線エネルギー及びその強度値から核種を分析する方法である。即発ガンマ線分析は、放射化生成核種の壊変ガンマ線を測定する中性子放射化分析と同様、多元素同時非破壊分析法であり、さらに中性子放射化分析では分析が困難な元素の分析が可能となる。

JRR-4 即発 γ 線分析装置は、コリメータ、中性子導管、導管サポート、サポート回転機構、設置台座、測定用遮蔽体、自動試料交換装置、Ge 検出器、測定器及び制御装置から構成される。JRR-4 即発 γ 線分析装置の構造を Fig.1 に示す。炉心で発生した熱中性子をコリメータ、中性子導管（スーパーミラー）を用いてプール上面に導き、測定用遮蔽体にセットした試料に熱中性子を照射し、その時、発生する即発ガンマ線を Ge 検出器で測定し、分析を行う。中性子導管としては、プール上面でホウ素の分析に必要な $10^6 \text{n/cm}^2/\text{sec}$ の熱中性子束を得るため、全長 8m、 $2\text{cm} \times 5\text{cm}$ の中性子送路を有するスーパーミラーを採用した。中性子導管に用いたスーパーミラーはガラスにニッケルとチタンを交互に 124 層コーティングしたものであり、Ni 単一層の中性子ミラーと比較すると約 2 倍の性能を有するものである。即発 γ 線分析装置は回転機構を設けることにより、測定時にはコリメータを含んだ中性子導管は炉心タンクに近接し、測定に使用しない時は炉心から離れた位置にセットすることができる。これにより、プール実験設備を有効に使用できる。

測定用遮蔽体は遮蔽体本体、検出器遮蔽体、中性子コリメータ、ビームシャッタ及びビスマス遮蔽で構成される (Fig.2 参照)。遮蔽体本体の内張りには、中性子遮蔽には、中性子の吸収断面積が 940 バーンと大きく、かつ、即発ガンマ線の放出率が小さい ^{6}Li が適しているため、天然 LiF タイルを用いている。ガンマ線遮蔽には鉛を用いた。検出器遮蔽体は、検出器と試料の位置を任意に変更することができる。検出器のコリメータは、鉛で $\phi 70\text{mm}$ 、 $\phi 40\text{mm}$ 、 $\phi 20\text{mm}$ 、 $\phi 10\text{mm}$ の 4 種類を用意し、中性子コリメータは、濃縮 LiF タイルで $\phi 20\text{mm}$ 、 $\phi 10\text{mm}$ 、 $\phi 5\text{mm}$ 、 $\phi 1\text{mm}$ の 4 種類を用意している。天然 LiF タイルと濃縮 LiF タイルを組み合わせて作られたビームシャッタは、中性子ビームの ON-OFF のために用いられ、中性子導管出口部に設けてある。また、中性子導管を通して漏洩してくるガンマ線を遮蔽するために単結晶ビスマスブロックを中性子ビーム出口に設け、必要に応じて 2cm から 16cm までの厚さに変えられる構造とした。

自動試料交換装置は、最大 20 個の試料を自動交換できるものを設けた。サンプルビンには、テフロン製の 8cc の市販容器を使用した。検出器は、高純度 Ge 検出器 (相対感度 30%、分解能 1.7keV) を用い、測定器は、高圧電源、デジタルシグナルプロセッサ (DSP)、波高分析器 (MCA) 等で構成する。

新設された即発 γ 線分析装置の特性測定として、中性子束、カドミ比、ガンマ線量の測定を行った。ビスマスブロックは、ガンマ線の遮へいのために設けているが、そのビスマスの効果についても調べ、n/ γ 比が最大になる厚さが 4cm であることを実験により明かにした。遮へいを置かない状態では、原子炉出力 3.5MW におけるビーム出口中心の熱中性子束が $9.6 \times 10^6 (\text{n/cm}^2/\text{sec})$ 、ガンマ線線量率が

8.36mSv/h、カドミ比が85.3である。ビスマスブロックの厚さを4cmとした時のコリメータ出口での熱中性子束が 6.7×10^6 (n/cm²/sec)、ガンマ線線量率が1.69mSv/hとすることができる。KURに設置されている即発γ線分析装置の性能が熱中性子束 2×10^6 (n/cm²/sec)、γ線線量率 $1\mu\text{Sv}/\text{h}$ である。これと比較してJRR-4の即発γ線分析装置は熱中性子束が5倍と高いが、γ線線量率が160倍であることから、感度の低い測定対象物を測定する場合、バックグラウンドを下げる必要がある。

3 ポロンのドップラー効果

¹⁰Bは中性子を吸収して⁷Li核とHe核に分裂する(n,α)反応を起こす。励起状態の⁷Li核とHe核は分裂された後、等方的にそれぞれ飛び出す。励起状態の⁷Li核は半減期が短く飛行中基底状態になるために、停止するまでにγ線を放出することになる(Fig.3参照)。物理的に単純化するために真空中に励起された⁷Li核が初期速度(840keV)を保った状態で飛行し、半減期73fsで減衰してγ線(477.595keV)を飛行中に放出するものとする。その⁷Li核に対して相対速度 v_s である観測者がその光子(γ線)を観測すると観測される振動数 ν' は本来の光子の振動数 ν と違った振動数になる。JRR-4即発γ線分析装置で観測されたポロンの即発γ線のエネルギースペクトルをFig.4に示す。これがドップラー効果と呼ばれるもので、観測される振動数 ν' と光子の振動数 ν との間には、次のような関係がある。

$$\nu' = \frac{\nu(c + v_0)}{c + v_s} \quad (1)$$

ここで、cは真空中の光の速度、 v_0 は観測者の速度である。

この式は相対論を無視したものであるが、相対論的な扱いを行うと、

$$\nu' = \frac{\nu \left(1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}}{c} \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mathbf{v}}{c} \right)^2}} \quad (2)$$

となる。

ドップラーフィルムの最大値及び最小値を与えるのは \mathbf{v} と \mathbf{e} が平行の場合である。そこで \mathbf{v}/\mathbf{e} であり、 $v/c \ll 1$ の場合、上式は

$$\nu' = \nu \left(1 \pm \frac{v}{c} \right) \quad (3)$$

と簡略化できる。これが一般に知られるドップラー効果を示す式である。さらに $E = \hbar\nu$ の関係を用いてエネルギーの表現に書き換えると

$$E' = E \left(1 \pm \frac{v}{c} \right) \quad (4)$$

となり、観測されるスペクトルはドップラー幅 $E\nu/c$ を持つことになる。そこで励起されている ^7Li の速度 v は $E=1/2mv^2=840\text{keV}$ から計算できて、

$$v = 4.812 \times 10^6 \text{m/s} \quad (5)$$

となる。 ^{10}B のドップラー幅は真空中に ^7Li 核が飛行しているとするならば、上式より

$$E \frac{v}{c} = 7.673(\text{keV}) \quad (6)$$

の理想化されたドップラー幅となる。しかし、実際には我々が対象とするのは水中のホウ素であるため、真空中ではなく媒質中の ^{10}B のスペクトルを観測することになる。この場合、飛行する ^7Li 核は、媒質の電場等の影響を受け、飛行中の ^7Li 核はその速度を減速する。この媒質特有の減速される能力は阻止能として知られていて、このボロンのドップラーシフトは阻止能の測定にも利用されている。つまり媒質が決まればそのドップラーシフトは一定値となる。

4 ドップラーピーク関数の導出

放出される γ 線はドップラー効果により、本来の振動数 ν でなく観測される振動数がシフトした ν' (E) として観測されることになる。それぞれの単色 E の ν' (E) だけを見れば観測される γ 線スペクトル分布はガウス分布をなすものと考えられる。また、振動数 ν' の γ 線は ^7Li が等方的に放出されるため、前章で述べたようにドップラー幅を持った等確率で放出されているものと考えられる (Fig.5 の模式図参照)。この等確率の放出されるものを観測すると各振動数に対してガウス分布をなし、連続的であるスペクトルが観測されることになる。言いかえればガウス分布の中心がドップラー幅分連続にシフトしたガウス分布の積算した関数であるといえる。

そこで領域を分けて考察すると簡単に導出することができるので以下にそれを説明する。各振動数 ν' に対応する正規分布の確率密度関数は

$$f = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(E_0 - x)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

となり、ドップラー幅の一様分布の確率密度関数は

$$g = 1/2E, \quad (E_0 - E \leq x \leq E_0 + E) \quad (8)$$

となる。以下の 4 つの領域に分けて式を導出すると、それぞれの密度関数は

$-\infty < x \leq E_0 - E$ の場合、

$$\phi_1 = \frac{1}{4E} \left\{ erfc\left(\frac{E_0 - E - x}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) - erfc\left(\frac{E_0 + E - x}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) \right\} \quad (9)$$

$-E_0 - E < x \leq 0$ の場合、

$$\phi_2 = \frac{1}{4E} \left\{ erf\left(\frac{x - E_0 + E}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) - erf\left(\frac{E_0 + E - x}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) \right\} \quad (9)$$

$-0 < x \leq E_0 + E$ の場合、

$$\phi_3 = \frac{1}{4E} \left\{ erf\left(\frac{x - E_0 + E}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) - erf\left(\frac{E_0 + E - x}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) \right\} \quad (10)$$

$-E_0 + E < x \leq \infty$ の場合、

$$\phi_4 = \frac{1}{4E} \left\{ erfc\left(\frac{x - E_0 + E}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) - erfc\left(\frac{x - E_0 - E}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) \right\} \quad (11)$$

となる。ここで、 $erf()$ は誤差関数、 $erfc()$ は余誤差関数である。

実はこれら領域に分けた関数は数学的手順により、1つの関数にまとめることができる。

$$\phi = \frac{1}{4E} \left\{ erf\left(\frac{x - E_0 + E}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) - erf\left(\frac{x - E_0 - E}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) \right\} \quad (13)$$

この関数が確率密度関数であるためには、その定義により積分値が 1 とならなければならない。これを確かめるため、この誤差関数の部分のみを $-\infty$ から ∞ までの積分を行う。

$$\begin{aligned} A &= \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ erf\left(\frac{x - E_0 + E}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) - erf\left(\frac{x - E_0 - E}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) \right\} dx \\ &= 2 \times \int_0^{\infty} \left\{ erf\left(\frac{x + E}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) - erf\left(\frac{x - E}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) \right\} dx \\ &= 2 \times \left[\sqrt{2\sigma^2} \left[\int_{\frac{-E}{\sqrt{2\sigma^2}}}^{\frac{\infty+E}{\sqrt{2\sigma^2}}} erf(x) dx - \int_{\frac{E}{\sqrt{2\sigma^2}}}^{\frac{\infty-E}{\sqrt{2\sigma^2}}} erf(x) dx \right] \right] \\ &= 2\sqrt{2\sigma^2} \times \left[\int_0^{\frac{\infty+E}{\sqrt{2\sigma^2}}} erf(x) dx - \int_0^{\frac{E}{\sqrt{2\sigma^2}}} erf(x) dx - \int_0^{\frac{\infty-E}{\sqrt{2\sigma^2}}} erf(x) dx + \int_0^{\frac{E}{\sqrt{2\sigma^2}}} erf(x) dx \right] \end{aligned}$$

$$= 2\sqrt{2\sigma^2} \times \left[\int_0^{\frac{\infty}{\sqrt{2\sigma^2}}} erf(x)dx + \frac{E}{\sqrt{2\sigma^2}} - \int_0^{\frac{E}{\sqrt{2\sigma^2}}} erf(x)dx - \int_0^{\frac{\infty}{\sqrt{2\sigma^2}}} erf(x)dx + \frac{E}{\sqrt{2\sigma^2}} + \int_0^{\frac{E}{\sqrt{2\sigma^2}}} erf(x)dx \right] \\ = 4E \quad (14)$$

ゆえに、(13)式のの積分値は 1 となり、まさしく確率密度関数であることが分かった。これは確率密度関数の合成関数もまた確率密度関数なので、その積分値が 1 となるのは至極当然のことである。

確率論的にこの問題を解いてきたが、実は 1998 年、Magara と Yonezawa によって ^{10}B ピークの現象論的な考察により、ピークの関数を求めている。彼らによればピークの関数は積分式として表現され、以下のようになる。

$$F = N \int_0^\pi \exp \left\{ -\frac{(x - E_0 + E \cos \theta)^2}{2\sigma^2} \right\} \sin \theta d\theta \quad (15)$$

我々の定義しているガウス分布を用いた表現に書き換えると、実際には係数 $\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}$ を含んでおり、

球面の積分変換は $1/2 \sin \theta d\theta$ であるので $1/2$ が N に含まれているはずである。したがって、本来の関数形は次式のようになるはずである。

$$F = N_1 \frac{1}{2\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_0^\pi \exp \left\{ -\frac{(x - E_0 + E \cos \theta)^2}{2\sigma^2} \right\} \sin \theta d\theta \quad (16)$$

この式と我々の確率論的な考察の結果の関数が一致することを証明する。

まず、媒介変数 t を用い $t = x - E_0 + E \cos \theta$ とすると、上式の積分は、

$$\begin{aligned} & \int_0^\pi \exp \left\{ -\frac{(x - E_0 + E \cos \theta)^2}{2\sigma^2} \right\} \sin \theta d\theta = \int_{\frac{x-E_0+E}{\sqrt{2\sigma^2}}}^{\frac{x-E_0-E}{\sqrt{2\sigma^2}}} -1/E \exp \left(\frac{-t^2}{2\sigma^2} \right) dt \\ & = \int_0^{\frac{x-E_0+E}{\sqrt{2\sigma^2}}} -1/E \exp \left(\frac{-t^2}{2\sigma^2} \right) dt - \int_0^{\frac{x-E_0-E}{\sqrt{2\sigma^2}}} -1/E \exp \left(\frac{-t^2}{2\sigma^2} \right) dt \\ & = \frac{1}{E} \left\{ \frac{\sqrt{2\pi\sigma^2}}{2} erf \left(\frac{x - E_0 + E}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) - \frac{\sqrt{2\pi\sigma^2}}{2} erf \left(\frac{x - E_0 - E}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

(17)式の結果を元の(16)式に代入すると、

$$\begin{aligned}
F &= N_1 \frac{1}{2\sqrt{2\pi\sigma^2}} \frac{1}{E} \left\{ \frac{\sqrt{2\pi\sigma^2}}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{x-E_0+E}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) - \frac{\sqrt{2\pi\sigma^2}}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{x-E_0-E}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) \right\} \\
&= N_1 \frac{1}{4E} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{x-E_0+E}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x-E_0-E}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) \right\}
\end{aligned} \tag{18}$$

となり、確率論的に行った我々の方法と Magara と Yonezawa 方法ではそのアプローチ方法が異なるものの、数学的に F/N_1 と ϕ が同一の式になることは興味深いものである。また、簡単な考察のもとに我々が導出したピーク関数の物理式を用いれば、誤差関数の性格がすでに数学的に知られているので、プログラムを作る上でこれらを利用し効率的なフィッティングが可能となる。

5 非線型最小2乗法

ボロンのドップラーピークはガウス分布と違いドップラーフィルム ($2E = \text{約 } 13\text{keV}$) を持ったピークとなるため、そのピーク前後を含めてピーク領域に妨害ピークが現れることが考えられる。特に血液中には Na があり、この即発 γ 線エネルギーが 472.202keV とボロンピーク内に存在するため、これが妨害するのではないかという心配があった。そのため、妨害ピークの分離を目的に最小2乗法を用いることにした。各パラメータが分からないとした場合、バックグラウンドを1次式のベースラインとして見積もることとし、スペクトルは次式のように表現できるものとした。

$$\phi = c_0 + c_1(x - c_4) + c_2 \left\{ \operatorname{erf}\left(\sqrt{c_3}(x - c_4 + c_5)\right) - \operatorname{erf}\left(\sqrt{c_3}(x - c_4 + c_5)\right) \right\} \tag{19}$$

この未知パラメータを含んだスペクトル関数を測定値 y に対して、非線形最小2乗法を行う。非線形最小2乗法では以下のマトリックスを解き δc_i を求め、 $|\delta c_i|$ が十分小さくなるまで計算を行い、 c_i を最終的に求める。

$$\begin{bmatrix}
\sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_0} \frac{\partial \phi_i}{\partial c_0} & \sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_0} \frac{\partial \phi_i}{\partial c_1} & \sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_0} \frac{\partial \phi_i}{\partial c_2} & \dots & \sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_0} \frac{\partial \phi_i}{\partial c_5} \\
\sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_1} \frac{\partial \phi_i}{\partial c_0} & \sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_1} \frac{\partial \phi_i}{\partial c_1} & \sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_1} \frac{\partial \phi_i}{\partial c_2} & \dots & \sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_1} \frac{\partial \phi_i}{\partial c_5} \\
\sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_2} \frac{\partial \phi_i}{\partial c_0} & \sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_2} \frac{\partial \phi_i}{\partial c_1} & \sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_2} \frac{\partial \phi_i}{\partial c_2} & \dots & \sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_2} \frac{\partial \phi_i}{\partial c_5} \\
\vdots & & & \ddots & \vdots \\
\sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_5} \frac{\partial \phi_i}{\partial c_0} & \sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_5} \frac{\partial \phi_i}{\partial c_1} & \sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_5} \frac{\partial \phi_i}{\partial c_2} & \dots & \sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_5} \frac{\partial \phi_i}{\partial c_5}
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} \delta c_0 \\ \delta c_1 \\ \delta c_2 \\ \vdots \\ \delta c_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_0} R_i \\ -\sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_1} R_i \\ -\sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_2} R_i \\ \vdots \\ -\sum_i \frac{\partial \phi_i}{\partial c_5} R_i \end{bmatrix}$$

(20)

このマトリックスを計算するには $\frac{\partial \phi}{\partial c_i}$ を求めなければならない。つまり、非線形最小2乗法を行う上

で各未知パラメータ i に対する偏微分 $\frac{\partial \phi}{\partial c_i}$ をそれぞれ計算を行う必要がある。ベースラインで使用する一次関数や一般的なガウス分布に関しては簡単に解くことができるが、今回対象となるのは誤差関数を含んでいるため誤差関数の微分を行わなくてはならない。まず、誤差関数の特徴を調べ、その微分値がどのようになるか検討した。

誤差関数 $erf(x)$ は次のように定義される関数である。

$$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt \quad (21)$$

この関数の級数展開した形は

$$erf(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2(-1)^n x^{2n+1}}{\sqrt{\pi} (2n+1)n!} \quad (22)$$

である。一般的なプログラム言語には $erf(x)$ の関数がないため、この級数展開された式を計算することにした。この級数展開された式を微分すれば $erf(x)$ の微分関数が級数展開の表現で得ることができる。微分の定義により、

$$\begin{aligned} (erf(x))' &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[\frac{1}{\Delta x} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2(-1)^n}{\sqrt{\pi} (2n+1)n!} \left\{ (x + \Delta x)^{2n+1} - x^{2n+1} \right\} \right] \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[\frac{1}{\Delta x} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2(-1)^n}{\sqrt{\pi} (2n+1)n!} \left\{ x^{2n+1} \left(1 + \frac{\Delta x}{x} \right)^{2n+1} - x^{2n+1} \right\} \right] \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[\frac{1}{\Delta x} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2(-1)^n x^{2n+1}}{\sqrt{\pi} (2n+1)n!} \left\{ 1 + (2n+1) \frac{\Delta x}{x} - 1 \right\} \right] \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2(-1)^n x^{2n}}{\sqrt{\pi} n!} \end{aligned} \quad (23)$$

となる。ここでは微分の定義より求めたが、簡単に $(x^{n+1})' = (n+1)x^n$ を用いても結果は同じである。さらに、これは指数の級数展開の形と比較すると、より簡単になる。

$$(erf(x))' = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-x^2)^n}{n!} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2) \quad (24)$$

これで誤差関数 $erf(x)$ の微分関数が明記できることになる。

(20)式に必要な、それぞれの未知パラメータに対する ϕ の偏微分をそれぞれ求めると、

$$\frac{\partial \phi}{\partial c_0} = 1 \quad (25)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial c_1} = x - c_4 \quad (26)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial c_2} = \operatorname{erf}\left(\sqrt{c_3}(x - c_4 + c_5)\right) - \operatorname{erf}\left(\sqrt{c_3}(x - c_4 - c_5)\right) \quad (27)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial c_3} = \frac{c_2}{2\sqrt{c_3}} \left\{ (x - c_4 + c_5) \operatorname{erf}'\left(\sqrt{c_3}(x - c_4 + c_5)\right) - (x - c_4 - c_5) \operatorname{erf}'\left(\sqrt{c_3}(x - c_4 - c_5)\right) \right\} \quad (28)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial c_4} = c_1 - \left\{ c_2 \sqrt{c_3} \operatorname{erf}'\left(\sqrt{c_3}(x - c_4 + c_5)\right) - c_2 \sqrt{c_3} \operatorname{erf}'\left(\sqrt{c_3}(x - c_4 - c_5)\right) \right\} \quad (29)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial c_5} = c_2 \sqrt{c_3} \operatorname{erf}'\left(\sqrt{c_3}(x - c_5 + c_5)\right) + c_2 \sqrt{c_3} \operatorname{erf}'\left(\sqrt{c_3}(x - c_5 - c_5)\right) \quad (30)$$

となり、測定される各チャンネルの残差 R_i を

$$R_i = c_0 + c_1(x_i - c_4) + c_2 \left\{ \operatorname{erf}\left(\sqrt{c_3}(x_i - c_4 + c_5)\right) - \operatorname{erf}\left(\sqrt{c_3}(x_i - c_4 - c_5)\right) \right\} - y_i \quad (31)$$

とで計算できるので非線形最小2乗法のマトリックスに代入すれば、各パラメータは上述のごとく計算することができる。我々の知りたい情報であるピーク面積、中心エネルギー、ドップラー幅、半値幅の各パラメータを用いて次のように計算することができる。

$$\text{ボロンピークの面積: } A = c_2 \times 2 \times c_5 \quad (32)$$

$$\text{ピーク中心エネルギー: } E_0 = c_4 \quad (33)$$

$$\text{ドップラー幅: } E = c_5 \quad (34)$$

$$\text{半値幅: } FWHM = \sqrt{\frac{2.773}{c_3}} \quad (35)$$

6 誤差評価

非線形最小2乗法の各未知パラメータに対する標準誤差は一般に次式で示される。

$$\sigma(c_k) = \sqrt{\frac{F_{kk}^{-1} \sum_{i=0}^n R_i^2}{(n-q)}} \quad (36)$$

ここで

F_{kk}^{-1} ; 非線型マトリックスの逆行列の対角要素

n ; 観測されるチャンネルの数

q ; 未知パラメータの数

R_i ; 残差

これらの誤差を含んだ計算には誤差伝播の計算を行えば良い。たとえばボロンのピーク面積の標準誤差 σ_A は

$$\sigma_A = A \sqrt{\frac{\sigma(c_2)^2}{c_2^2} + \frac{\sigma(c_5)^2}{c_5^2}} \quad (37)$$

と評価される。

7 ソフト開発

6 章に述べた計算手法のためのフローチャートを Fig.6 に示す。本ソフトを B10Peak.bas と名づけ VisualBasic5 (マイクロソフト社) を用いて本解析ソフトを開発した。その計算プログラムの主要な部分を付録に示す。VisualBasic5 は Windows (マイクロソフト社) の OS 上に開発する Basic 言語で、簡単にインターフェイスを作成することができるものである。入力されるスペクトルデータはテキスト形式のファイルである。基本的には入力部を変更することで Basic の読める形式であれば、計算は可能である。

B10peak のメインの Form を Fig.7 に示す。解析を行うファイルを選択した後、Calc ボタンをクリックするだけで、ボロンピーク面積、標準誤差、ドップラー幅、ドップラーシフト、半値幅、ピーク中心エネルギー等を計算することができる。同時に水素のピークもガウス関数を用いて非線型最小2乗法を用いて計算し、水素ピーク面積、標準誤差、半値幅、ピーク中心エネルギーを出力することができる。さらに水素ピーク面積に対するホウ素ピーク面積の比 (B/H 比) を TextBox 上に表示し、必要な情報が下の TextBox 上にストアされるようにした。TextBox 上に出力することにより、マウスのコピー&ペーストで他のアプリケーションへ複写可能である。また、計算した結果はその解析を行った日付のファイルを作成し、保存されるようになっている。Na ボタンをクリックした場合、Na ピークを自動的に探し出し、それを除去したボロンピークの情報を出力してくれる。しかし、Na ピークが存在しないか、ごく僅かである場合、無理にボロンピークから削り出して Na ピークを作り出すことから注意が必要である。血液中には Na は約 0.2% 存在するが、その感度が低いため、Fig.4 に示すように JRR-4 即発 γ 線分析装置では観測されていない。したがって、血液中のホウ素測定する場合には Calc ボタンをクリックするだけで、計算は完了することになる。その計算に要する時間は約 5 秒程度 (CPU : PentiumIII 450MHz) であり、Ge 検出器で計測されたデータをストレスなく迅速に非線型最小二乗フィッティング処理が行えるようになった。

8 校正実験

^{10}B 濃度を定量測定する方法は、基本的に京都大学で行われている Kobayashi²⁾ の用いている比較法によって行う。

$$B_x = \frac{B_0 H_x}{R_{b/h_0} H_0} R_{b/hx} \quad (38)$$

ここで、

B_x : 測定する試料の ^{10}B 濃度

B_0 : 濃度の分かっている標準試料の ^{10}B 濃度

$R_{b/hx}$: 測定する試料の H に対する ^{10}B の計数比

R_{b/h_0} : 濃度の分かっている H に対する ^{10}B の計数比

H_x : 測定する試料の水素濃度

H_0 : 標準試料の水素濃度

Kobayashi によれば、この(38)式が示すように原理的に求まるので濃度精度は試料の量に依存しないが、 γ 線測定に係る統計的誤差があり、短時間の測定で統計誤差を低くするには試料の量を増やすか、検出効率をあげる必要があるとしている²⁾。

(38)式は、計数 $a = B_0 / (R_{b/h_0} H_0)$ を用いて、

$$B_x = a R_x \frac{H_x}{H_0} \quad (39)$$

と書きかえる。この係数 a を求めるために校正曲線を得ておく必要がある。この式が示すように正比例関係があり、既知の濃度に対する R_x を実測することにより校正曲線を作成することができる。しかし、JRR-4 即発 γ 線分析装置には試料以外から発生する水素 γ 線が存在するため、水素の計数率からこのバックグラウンドを差し引き、 R_{b/h_0} を求めなければならない。したがって、本来の係数 a はバックグラウンドを差し引き、次式のとおりである。

$$a = \frac{B_0}{I_b / (I_h - I_{hbg})} \quad (40)$$

8.1 ホウ酸水を用いた校正

天然同位体比のホウ素から成るホウ酸標準溶液を作成して校正実験を行った。まず、水素のバックグラウンドの測定を行なった。測定条件は原子炉出力 3.5MW 時に 9 回の測定を行なった。JRR-4 原子炉では出力の変動が予想されたので測定する時刻を変えることにより、その影響も誤差を考慮できるとした。9 回の測定結果を Table 1 に示す。この測定により水素のバックグラウンド I_{hbg} が $13.7 \pm 0.177\text{cps}$ であることが分かった。

次ぎに天然ホウ酸水のホウ素濃度(^{10}B)を 10ppm から 100ppm までを用意し、サンプルビンに 0.1cc、0.2cc、0.3cc、0.5cc、1cc、3cc 注入した標準サンプルを作成した。これらのサンプルを元に校正曲線を求める。校正曲線のグラフは、横軸にホウ酸の濃度 (^{10}B)、縦軸に水素計数率（バックグラウンドを引いた）に対するホウ素の計数率をプロットし、その傾きを最小二乗によって求めることにより係数 $1/a$ を決定する。測定時間は Live Time を 600 秒と固定して行った。その結果を Fig.8 に示す。このグラフの中の直線は、統計誤差 2%未満のものを選択して得られたものである(Fig.9 参照)。直線の式

から a は以下のとおりである。

$$a = 32.8 \quad : \text{ (ppm}^{-1}\text{)} \quad (41)$$

この直線からの誤差とホウ酸液量の関係を見るために Fig.10 のようにまとめた。この Fig.10 が示すように誤差が小さいのは 0.2cc~0.5cc であることが分かった。0.1cc の統計誤差が大きいために生じている誤差であるのに対し、1cc、3cc では統計誤差が小さいにも関わらず大きな偏差を示す。これは統計誤差以外の誤差を内在していることを示唆している。主な原因は、 ^{10}B ピーク関数のパラメータすべてを未知の値として計算していることと、バックグラウンドが高いことが挙げられる。1、5ppm と濃度が小さい時に大きく外れており、 ^{10}B ピークの半値幅も 60ppm 以上のそれと比較して大きくなる傾向にある。つまり、S/N 比が悪いため、半値幅がうまく計算せず、本来の形状と違ったもので計数を計算するようである。これを防ぐためには計測時間を長くするか、半値幅の固定及びドップラーシフトの固定などの非線型最小二乗のパラメータ選定が必要と考えられる。次ぎにデッドタイムの影響を調べるために、Fig.11 に示すようにデッドタイムと誤差の関係を整理した。統計誤差が小さい場合、総合誤差が小さいが、デッドタイムが上昇するとともにやや誤差が十側にシフトして行くように思われる。総合誤差を統計誤差範囲に抑えるには、測定時のデッドタイムを 23%未満とし、かつ、統計誤差を 2%未満にしなければならない。これは測定時間、サンプルの量などと関係しているので今後、適切な測定条件を選定する必要がある。Fig.12 は統計誤差 2%未満のデータについて長期間の総合誤差の推移を示している。これを眺めると、データの再現性が±5%程度保持されていることが分かる。しかし、期間が長くなるに連れ、マイナス側にシフトして行く現象が現れる。これは標準サンプルの変化によるものと考えられる。蒸発により水分だけが少しずつサンプルピンより逃げ、ホウ酸水が濃縮して行っていると判断できる。これは品質保証上問題となるので、標準サンプルは 6 ヶ月程度で交換すべきことがわかった。

8.2 血液の分析

血液を測定する場合、以下の点がホウ酸水と異なる。

- 1) 水素濃度がホウ酸水と異なる。
- 2) 阻止能が異なる。
- 3) ^{23}Na のピークが重なる。
- 4) 血球等が混在しており不均一な体系である。
- 5) 血球と血漿は比重が異なるため分離する。
- 6) 血球対血漿の比は人により異なる。

まず、水素濃度の補正については ICRU レポート 46 の血液の水素濃度を用いて、補正を行えば良いので(39)式に代入して、次式を導出できる。

$$B_x = 32.8 \times \frac{10.2}{11.189} R_x = 29.9 R_x \quad (42)$$

水素の濃度比を調べるために血液 1cc に対するホウ酸 1cc の水素計数率比を求めるとき、0.911 となり、ICRU レポート 46 の $10.2/11.189 = 0.912$ とほぼ同じとなり、(42)式の水素濃度補正を適性であることがわかる。血液に BSH ($\text{Na}_2\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{SH}$) を調整した試料の校正曲線を Fig.13 に示す。グラフ中の直線は(42)式である。Fig.14 に総合誤差を示す。データが(42)式に対して $\pm 5\%$ の誤差にほぼ収まっていることが分かる。

阻止能の問題は ICRU レポートにプロトンについてのデータがあり、それによると水と血液の差は大きくなく 0.8% 程度血液のほうが小さいようである。しかし、ドップラーシフトは単にエネルギー損失を示すので阻止能は同程度としても密度が異なれば異なる数値を示す。実際にほう素濃度 40ppm 以上のホウ酸水と血液のドップラーシフト値を比較すると、ホウ酸水では $0.821 \pm 0.016\text{keV}$ であるのに対し、血液中のドップラーシフト値は $0.858 \pm 0.012\text{keV}$ であり、4.5% 程度血液の方が大きくなっている。これに前述の阻止能の差 (0.8%) を考慮すると、血液試料の密度が 1053kg/m^3 であることが分かる。解析で示したようにこのドップラーシフト幅が異なっても、必要となる ^{10}B ピーク面積には影響しない。なぜならば、議論したとおり、確率密度関数であるためその積分値は関数の形状に寄らず 1 であるからである。

^{23}Na の即発 γ 線の感度が ^{10}B に比べて相対的に低いことから数 10ppm を測定する場合については影響が少ない。JRR-4 即発 γ 線分析装置を用いて実際に測定を行っても、顕著なピークを見出すことはできない。そこで ^{23}Na のこの係数 a へ及ぼす影響を次節で考察することにする。

4)~6)の血球と血漿による不均一がもたらす影響は、今後課題としてさらに研究を必要とする。現在血液の測定は測定直前に十分攪拌し、測定を行なうことで対応している。今後、血球血漿分離の防止や均一化に対する技術開発、逆に分離した血液の影響などの調査を必要とされる。

8.3 血液中 Na の影響の考察

血液内には Na が存在し、中性子を捕獲した ^{23}Na から 472.202keV の即発 γ 線を放出する。この ^{23}Na ピークがホウ素のドップラーピークと干渉するため、その影響を差し引かねばならない。JRR-4 において測定が可能となるまで、我々はこの ^{23}Na ピークの分離する技術が必須であると考え、非線型最小 2 乗法を用いた本解析方法を見出し、ソフト開発を行った。しかし、我々は実際 JRR-4 の γ 線分析装置において ^{23}Na のピークを確認することができなかった。ここに、なぜ、 ^{23}Na のピークが検出されないのかを考察することとした。

(39)式の係数 a の物理的な意味についてまず議論する。Ge 検出器に検出されるガンマ線は、それぞれのエネルギーに対応した効率 $\varepsilon(E)$ で測定されている。熱中性子に対するホウ素の反応率と水素の反応率の比をとることにより係数 a は表現される。

$$\begin{aligned} \frac{I_b}{I_h} &= \frac{\nu_b \varepsilon_b \sum_{B10} \phi}{\nu_H \varepsilon_H \sum_H \phi} \\ &= \frac{\nu_b \varepsilon_b \sigma_{B10} N_{B10}}{\nu_H \varepsilon_H \sigma_H N_H} = \frac{\nu_b \varepsilon_b \sigma_{B10} N_A \omega_{B10} / 10}{\nu_H \varepsilon_H \sigma_H N_A \omega_{H2O} \cdot 2/18} \end{aligned} \quad (43)$$

ここで、

ε_b : ^{10}B の 477.595keV 即発 γ 線に対する Ge 検出器のエネルギー効率
 ε_H : H の 2224.57keV 即発 γ 線に対する Ge 検出器のエネルギー効率
 ν_b : B-10 の 477.595keV 即発 γ 線の放出割合(=0.947)
 ν_H : H の 2224.57keV 即発 γ 線の放出割合(=1.0)
 ω_{B10} : ^{10}B の質量(g)
 ω_{H2O} : 水の質量(g)
 σ_{B10} : 热中性子に対する ^{10}B のミクロ断面積 (barn) (=3837)
 σ_H : 热中性子に対する水素のミクロ断面積 (barn) (=332.0e-3)
 Σ_{B10} : 热中性子に対するマクロ断面積 (cm^{-1})
 Σ_H : 热中性子に対するマクロ断面積 (cm^{-1})
 N_A : アボガドロ数 (mol^{-1})
 N_{B10} : ^{10}B の原子数
 N_H : H の原子数

ホウ素及び水素の断面積を代入して、

$$\frac{I_b}{I_h} = \frac{0.947 \cdot 3837 / 10.8}{1.0 \cdot 332.0 \times 10^{-3} \cdot 2 / 18} \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_H} \frac{\omega_{B10}}{\omega_{H2O}} = 9.85 \times 10^{-3} \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_H} \left(\frac{\omega_{B10}}{\omega_{H2O}} \right)_{\text{ppm}} \quad (44)$$

となる。ホウ素と水素の相対効率比 $\varepsilon_b / \varepsilon_H$ を確かめるために、密封 Eu-152 線源をサンプルピンに取り付け測定を行なった。エネルギー効率測定の結果 (Fig.15 参照) から、効率比は γ 線エネルギーの-0.759乗に比例しており、(44)式は次式となる。

$$\frac{I_b}{I_h} = 9.89 \times 10^{-3} \left(\frac{E_b}{E_H} \right)^{-0.759} \left(\frac{\omega_{B10}}{\omega_{H2O}} \right)_{\text{ppm}} = 3.17 \times 10^{-2} \left(\frac{\omega_{B10}}{\omega_{H2O}} \right)_{\text{ppm}} \quad (45)$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 E_b &: {}^{10}\text{B} の即発 γ 線のエネルギー (keV) (=477.595) \\
 E_H &: H の即発 γ 線のエネルギー (keV) (=2224.57)
 \end{aligned}$$

したがって、(45)式の係数は a の逆数であるから、 $a=31.6$ と計算される。この半理論的に導いた値はホウ酸水を用いて計測された 32.8 より 3.7%程度低い値となる。つまり、この考察が妥当であることが実験と比較することで証明されたことになる。

同様の手順を ^{23}Na についても行うことができる。そこで計算を行うと、

$$\frac{I_{Na}}{I_h} = \frac{\nu_{Na} \varepsilon_{Na} \sigma_{Na} N_{Na}}{\nu_H \varepsilon_H \sigma_H N_H} = \frac{\nu_{Na} \varepsilon_{Na} \sigma_{Na} N_A \omega_{Na} / 23}{\nu_H \varepsilon_H \sigma_H N_A \omega_{H2O} \cdot 2 / 18} = 6.26 \times 10^{-7} \frac{\varepsilon_{Na}}{\varepsilon_H} \frac{\omega_{Na}}{\omega_{H2O}} \quad (46)$$

$$= 6.26 \times 10^{-7} \left(\frac{E_{Na}}{E\varepsilon_H} \right)^{-0.759} \left(\frac{\omega_{Na}}{\omega_{H_2O}} \right)_{ppm} = 2.03 \times 10^{-6} \left(\frac{\omega_{Na}}{\omega_{H_2O}} \right)_{ppm} \quad (47)$$

ここで、

ε_{Na} : ^{23}Na の 472.202keV 即発 γ 線に対する Ge 検出器のエネルギー効率

ν_{Na} : ^{23}Na の 472.202keV 即発 γ 線の放出割合(=1.0)

ω_{Na} : ^{23}Na の質量(g)

σ_{Na} : 熱中性子に対する ^{10}B のミクロ断面積 (barn) (=531.4e-3)

N_{Na} : ^{23}Na の原子数

E_{Na} : ^{23}Na の即発 γ 線のエネルギー (keV) (=472.202)

となる。

通常生体内の Na 濃度の細胞外液には当量濃度で 142mEq/l、細胞内液には 10mEq/l である。(当量 (equivalent;Eq) : イオンのモル数をイオンの原子価で割った値。電気的にみたモルに相当する量である。通常は mEq を用いる。) 血液は血漿と血球から成るが、その比を全血中の血球量の比をヘマクリット値と呼び、成人だと 45%と一定である。したがって、ヘマクリット値 45%を用いると血液中の Na 濃度は 82.6mEq/l ($=1.79 \times 10^3 \text{ ppm}$) と計算できる。これを(47)式に代入すると、 I_{Na}/I_H は 3.64×10^{-3} となる。

$$B_{Blood} = 29.9 \left(\frac{I_b}{I_H} - \frac{I_{Na}}{I_H} \right) = 29.9 \left(R_x - 1.79 \times 10^{-3} \right) \quad (48)$$

(48)式が示すホウ素濃度の校正曲線に対する Na の影響を Fig16 に、Na 濃度による誤差を Fig17 にそれぞれ示す。通常 BNCT では血液中のホウ素濃度を数 10ppm としているため、Na による誤差は 0.1%以下に抑えられている。

9まとめ

JRR-4においても BNCT 臨床に向け、 ^{10}B ピーク形状を考察し、非線型最小2乗法による計算方法を確立した。本解析で使用する関数形が 1998 年の Magara と Yonezawa で示している ^{10}B ピーク関数からも導出可能であることも同時に示した。彼らとは異なり、我々は確率論的アプローチ方法から、簡単に導出することができた。その関数形は 2 つの誤差関数の差になっていることが分かった。この関数とバックグラウンドの 1 次式を用いた非線型最小2乗法を用いたフィッティングを行うアルゴリズムと解析プログラムを開発した。このソフトを用いることにより、素早く血液中 ^{10}B 濃度を正確に計算することが可能となった。このソフトを用いて JRR-4 の最初の BNCT (1999 年 10 月) における血液中ホウ素濃度測定を実施した。

JRR-4 即発 γ 線分析装置は水素のバックグラウンドが高く、その補正方法を示すとともに、原子炉の出力変動の誤差を考慮した水素のバックグラウンドの測定を行なった。この測定によりサンプルのみの照射状態で水素バックグラウンドとして $13.7 \pm 0.177 \text{ cps}$ あることが分かった。

天然ホウ酸水を用いてホウ酸濃度 (^{10}B) を 10ppm から 100ppm まで、液量を 0.1cc、0.2cc、0.3cc、0.5cc、1cc、3cc とした標準サンプルを作成し校正曲線を求めた。その結果、総合誤差が小さいのは 0.2cc~0.5cc であることが分かった。1cc、3cc では統計誤差が小さいにも関わらず偏差拡大する場合があり、その主たる原因として ^{10}B ピーク関数のパラメータのすべてを未知の値として計算していることと、バックグランドが高いことが挙げられた。S/N 比が悪いと半値幅がうまく計算せず、本来の形状と違ったもので計数を計算する場合があるためである。

総合誤差を統計誤差範囲に抑えるためには、測定時のデットタイムを 23%未満にし、かつ、統計誤差を 2%未満にしなければならない。この条件を満たすように測定すれば、バックグランドの高い本設備においても、十分な直線性 (±5%以内) が得られることが確認された。

しかし、長期間標準サンプル測定した実験では徐々にマイナス側にシフトして行く現象が現れることが分かった。これは標準サンプルが蒸発により水分だけが少しずつサンプルビンより逃げ、ホウ酸水が濃縮して行っていると判断した。これは品質保証上問題となるので、標準サンプルは 6 ヶ月程度で交換すべきである。

血液の測定には水素の濃度比 0.912 を用いることで補正を行うと良い事が分かった。血液に BSH を調整した標準試料に対して、ホウ酸の校正曲線に水素濃度比補正した直線が ±5% の誤差に収まった。

面積に直接関与しないが、計算されるドップラーシフトから密度を計算することも示した。ホウ酸水と血液のドップラーシフト値を比較すると、ホウ酸水では $0.821 \pm 0.016\text{keV}$ であるのに対し、血液中のドップラーシフト値は $0.858 \pm 0.012\text{keV}$ となり、ゆえに阻止能の違い (0.8%) を考慮して血液サンプルの比重は 1057kg/m^3 と求められた。これは成人の血液比重 $1.05 \sim 1.06$ に合致するものである。

実験的に求めてきた校正直線を半理論的にそれを導出すること考察で述べた。同様の手法により ^{23}Na についても感度を求め、校正直線に及ぼす影響を調べた結果、数 10ppm を測定する場合、その影響の誤差が 0.1% 以下であることを明かにした。

今後の課題として以下のものが考えられる。

- 1)JRR-4 即発 γ 線のバックグランドを低下させ S/N 比を向上させる。
- 2)適切な測定条件を選定しなくてはならない
- 3)血球と血漿による不均一がもたらす影響についてさらに細かく観察し、血球血漿分離の防止や均一化に対する技術開発等を行わなければならない。
- 4)プログラムには無駄な記述もあり、できるだけシンプルにして高速化を目指す。
- 5)校正曲線を理論的に導出し、検討することにより感度及び効率を上げる方法を模索する。

謝辞

本研究が医学との学術境界領域であるため筑波大学の松村明先生、山本哲哉先生には血液サンプル作成にあたり協力頂いたこと、血液の性質の基礎について御教授を頂きましたこと大変感謝しております。また、研究炉技術管理課の田中純利氏にはホウ酸水の標準液を作成していただき、大変感謝しています。研究炉利用課の大竹真一氏及び高田準太郎氏には諸々の実験準備及び補助して頂き、心よりお礼申し上げます。本報告書をまとめるあたり、御指導下さった研究炉部の高柳政二部長、小林晋昇次長、桜井文雄 JRR-4 管理課長、吉島哲夫研究炉技術管理課長並びに海江田圭右前研究炉部長、には深く感謝いたします。以上の諸先生方、部次長ならびに利用課の方々に謝辞を申し上げます。

参考文献

- 1)W.H.Sweet : Early history of development of boron neutron capture therapy of tumors, Journal of Neuro-Oncology 33, 19-26, 1997
- 2)T.Kobayashi and K.Kanda : Microanalysis system of ppm-order ^{10}B concentrations in tissue for neutron capture therapy by prompt gamma-ray spectrometry, Nucl. Instr. Meth. 204, 525-531, 1983
- 3)R.G.Fairchild, D.Gabel, B.H.Laster, D.Greenberg, W.Kiszenick, P.L.Micca : Microanalytical techniques for boron analysis using the $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ reaction, Me Phys 13, 50-56, 1986
- 4)C.Yonezawa, M.Hoshi, Y.Ito, E.Tachikawa : Construction of reactor neutron induced prompt gamma-ray analyzing system at the neutron beam guide of JRR-3M, in Proceedings of Third Asian Symposium on Research Reactor, JAERI-M92-028, p583, 1992
- 5)C.Yonezawa, H.Matsue, H.Sawahata, T.Kurosawa, M.Hoshi, Y.Ito : Application of Neutron-Induced prompt Gamma-ray Analysis for Determination of B-10 in BNCT, Cancer Neutron Capture Therapy, ed. Mishima, Plenum Press, New York, 221-225, 1996
- 6)Y.Torii, T.Kishi, H.Kumada, K.Yamamoto, K.Yokoo, N.Ohashi, F.Sakurai : BNCT Irradiation Facility at JRR-4, JAERI-Conf 99-006, 228-231, 1999
- 7)M.Magara, C.Yonezawa : Decomposition of Prompt Gamma-Ray Spectra Including The Doppler-Broadened Peak for Boron Determination, Nuclear instruments and methods in physics research. Section a accelerators spectrometers detectors and associated equipment v. 411, 130-136, 1998

Table 1 Measurement of hydrogen gamma-ray background counts in the JRR-4 PGA

No.	time sec	I_{hbg} counts	σ_h counts
1	616	8.73×10^3	1.05×10^2
2	600	8.06×10^3	9.96×10^1
3	600	8.35×10^3	1.06×10^2
4	600	8.27×10^3	1.02×10^2
5	600	8.18×10^3	9.08×10^1
6	600	8.15×10^3	1.16×10^2
7	600	8.00×10^3	8.60×10^1
8	600	8.21×10^3	1.34×10^2
9	600	8.12×10^3	1.11×10^2

Average: $13.7 \text{ cps} \pm 0.177 \text{ cps}$

Table 2 Doppler parameters

	Doppler Broadening	Doppler shift	FWHM
	keV	keV	keV
Boric acid	6.852 ± 0.016	0.821 ± 0.016	3.524 ± 0.222
BSH	6.854 ± 0.022	0.819 ± 0.021	3.535 ± 0.307
Blood+BSH	6.815 ± 0.012	0.858 ± 0.012	3.404 ± 0.334

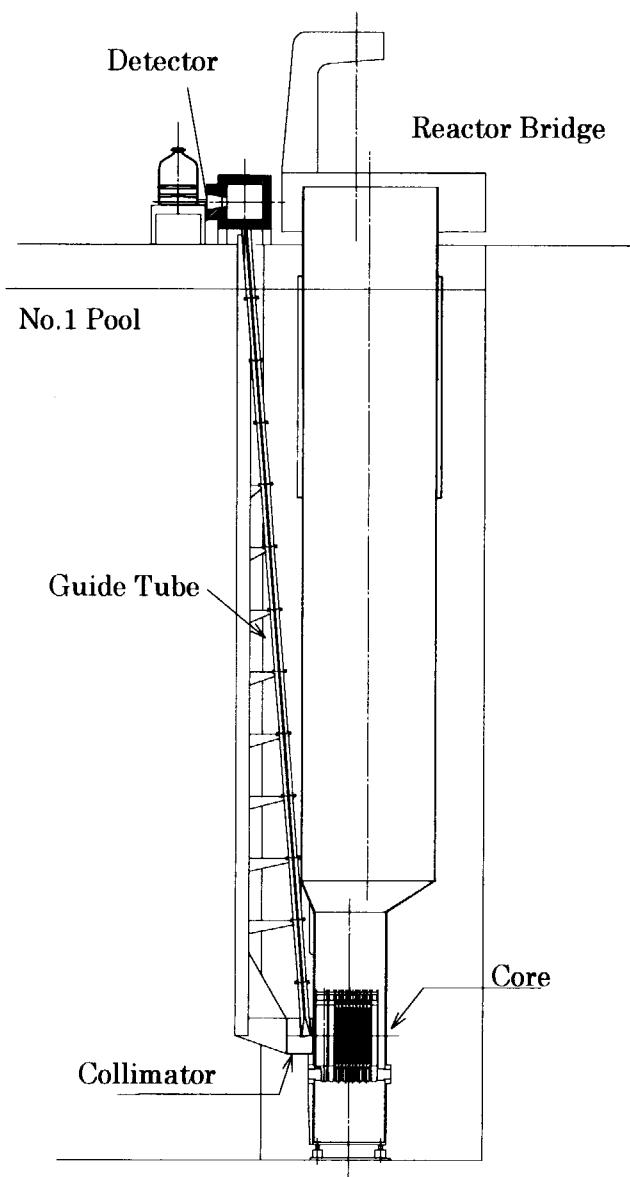


Fig.1 JRR-4 prompt gamma ray analyzing system

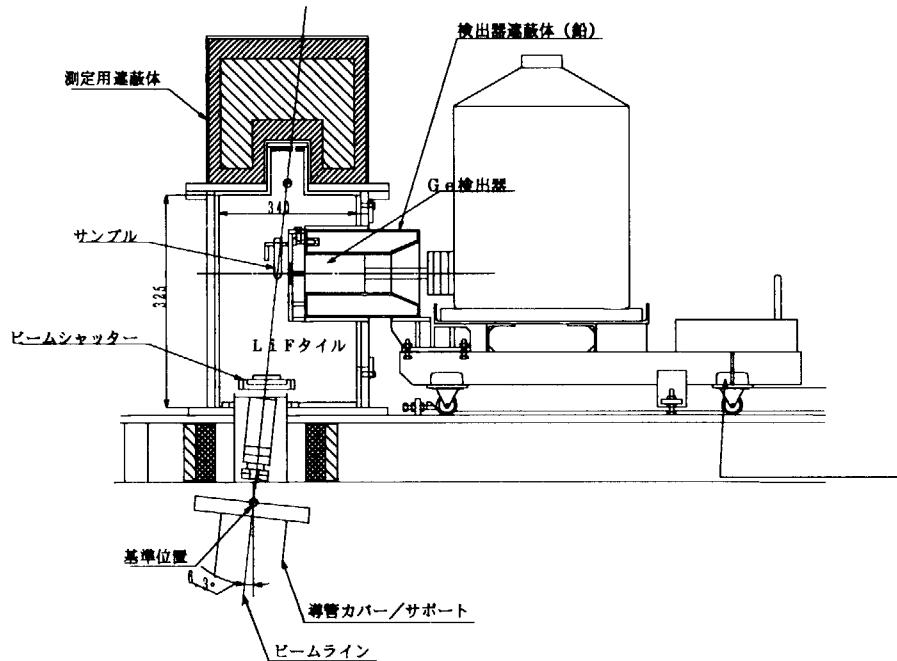
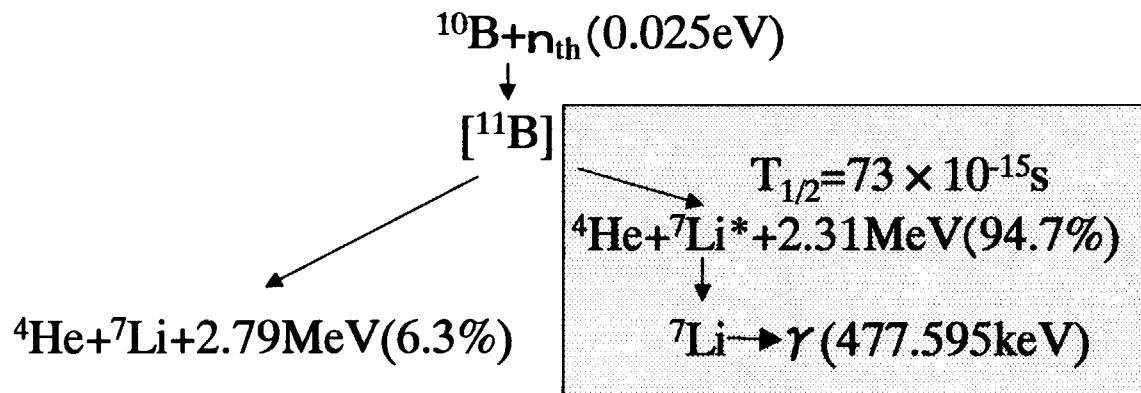


Fig.2 prompt gamma-ray system attached to the neutron guide tube of JRR-4

Fig.3 B-10(n,alpha)Li-7 reaction, activated Li particle is radiated a prompt gamma ray from it with 0.478MeV energy during $T_{1/2}=7.3 \times 10^{-14}$ sec after reaction.

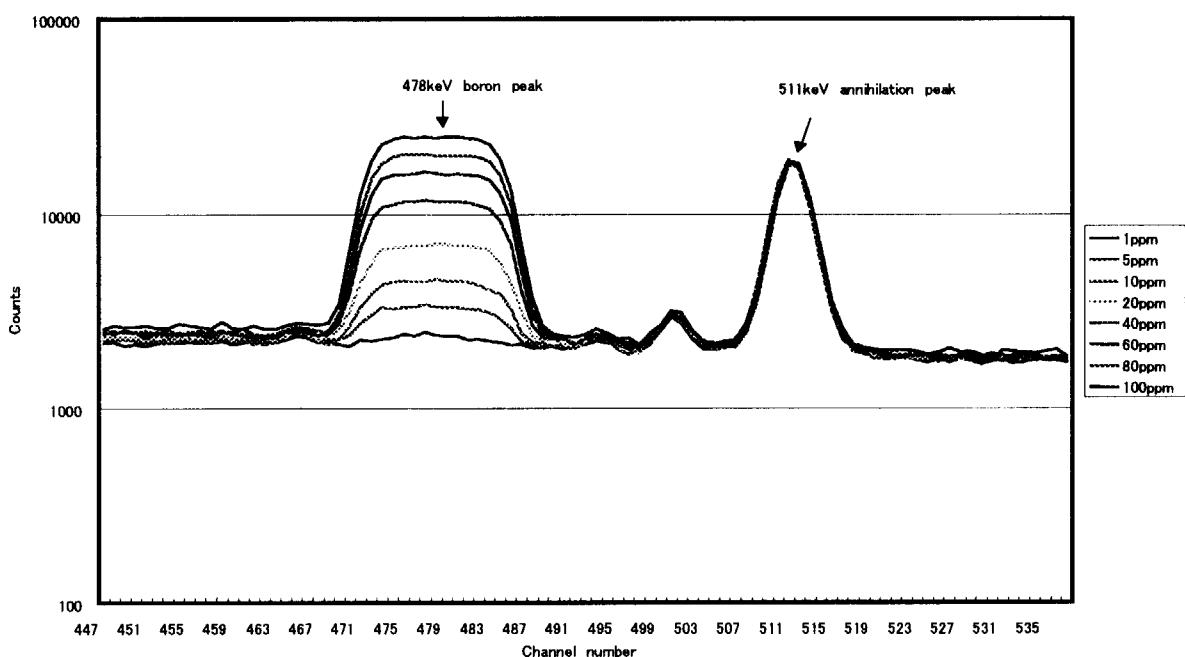


Fig.4 Observation of the boron doppler peak in boric acid sample of 1cc at JRR-4 prompt gamma-ray analysis system (The peak was observed the spectrum shifted from true gamma wave length with Doppler effect because the Li particle was radiated a prompt gamma ray from the activated Li particle during decelerating and moving under collision by (n, alpha) reaction of born-10)

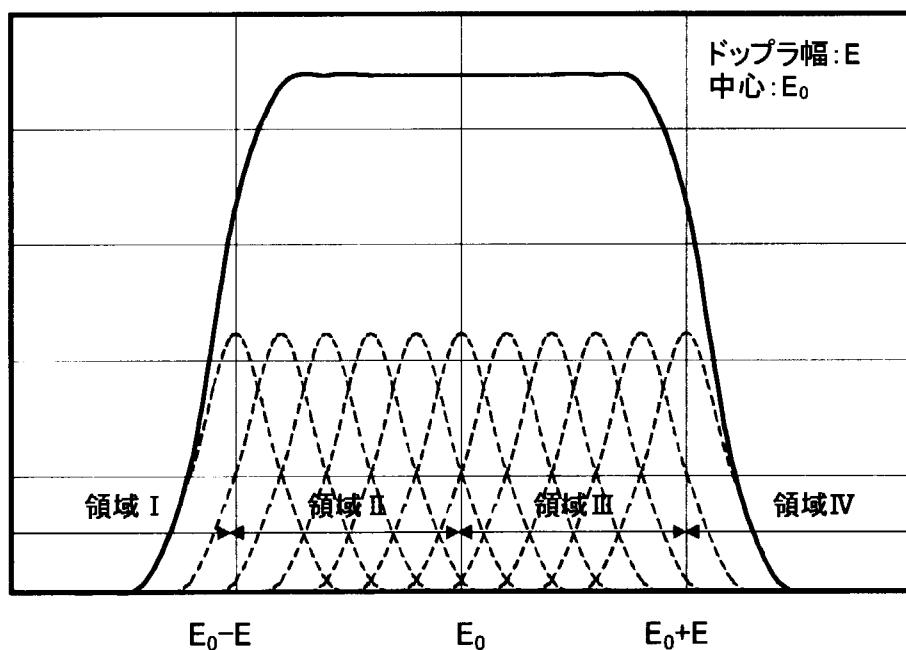


Fig.5 the pattern model of a doppler peak for the probability theory

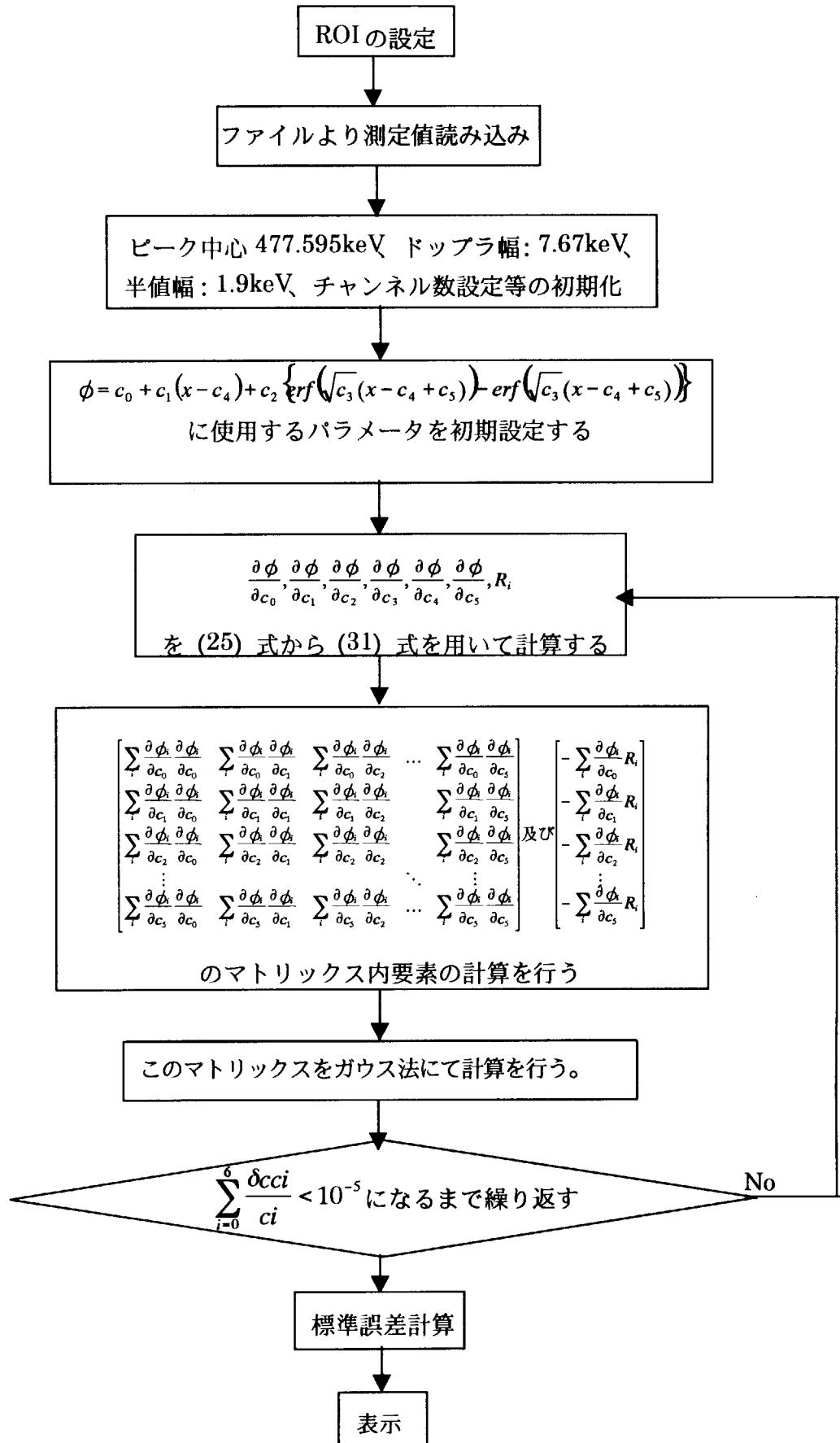


Fig.6 flow chart of iteration routine for nonlinear least-square fitting

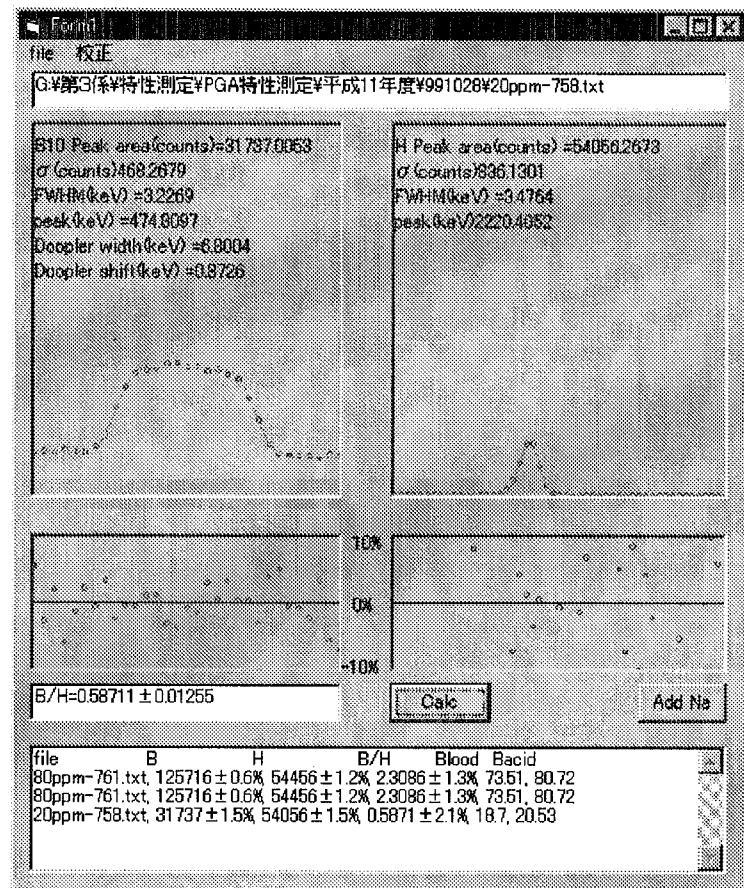


Fig.7 Main form of B10peak.bas, which was developed on the Windows NT with Visual Basic Ver.5

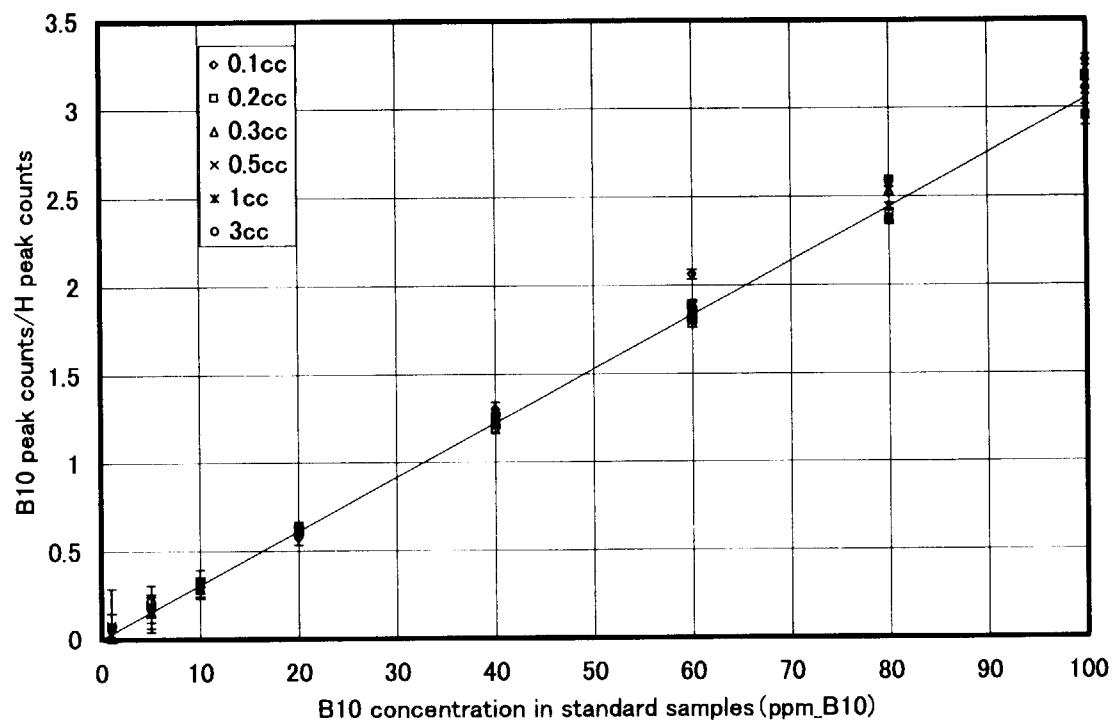


Fig.8 Calibration curve of Boron / Hydrogen counts ratio for the standard samples with boric acid

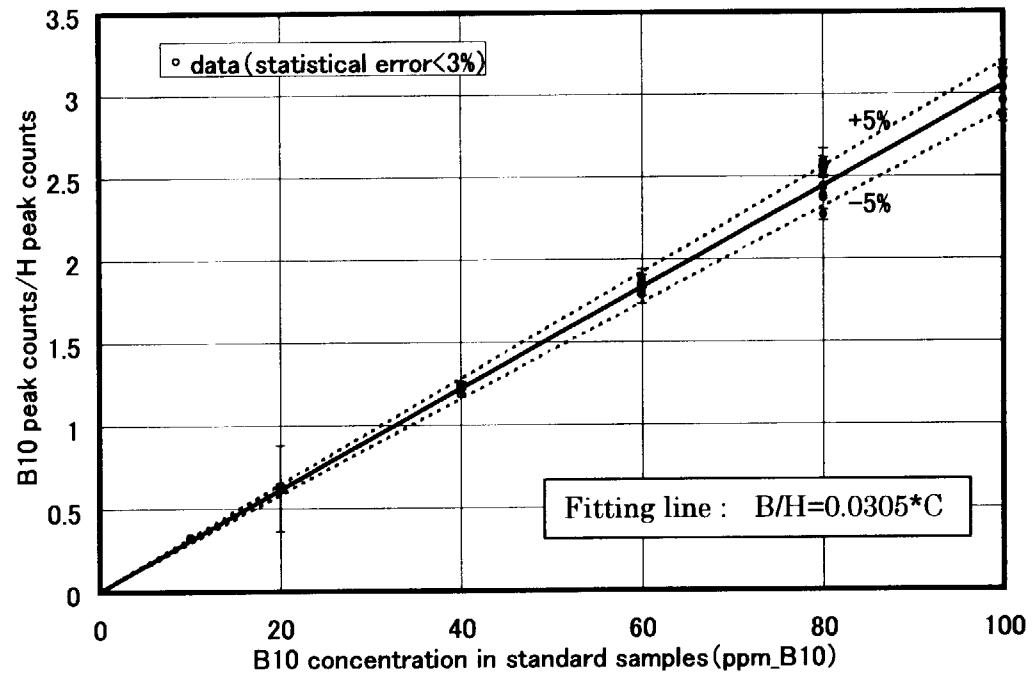


Fig.9 Least square fit of liner function of Boron / Hydrogen counts ratio for the standard samples with boric acid

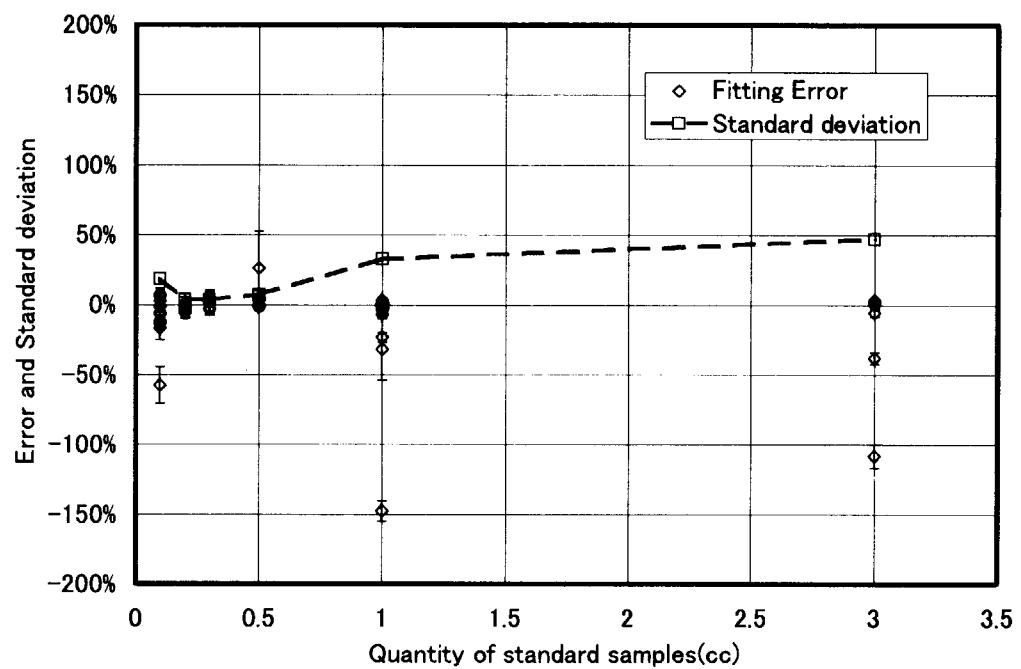


Fig.10 Error of data from the fitting line (at Fig.7) and standard deviation

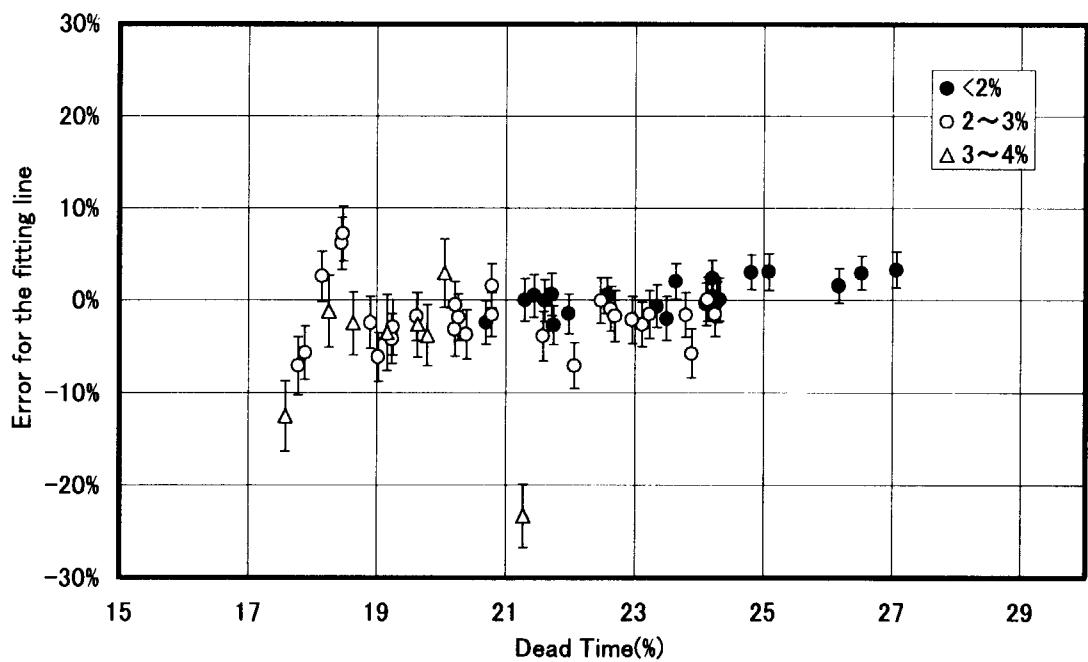


Fig.11 Error of data from the fitting line (at Fig.7) and standard deviation for dead time ratio

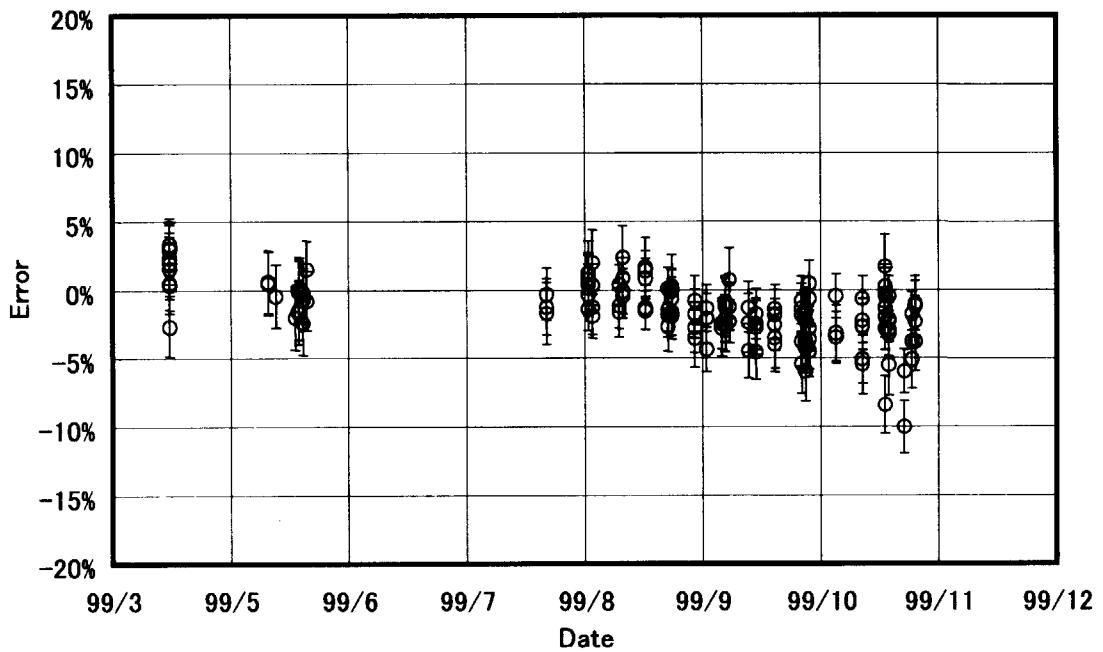


Fig.12 Transition of the data for error of less than 2% in the boric acid standard samples

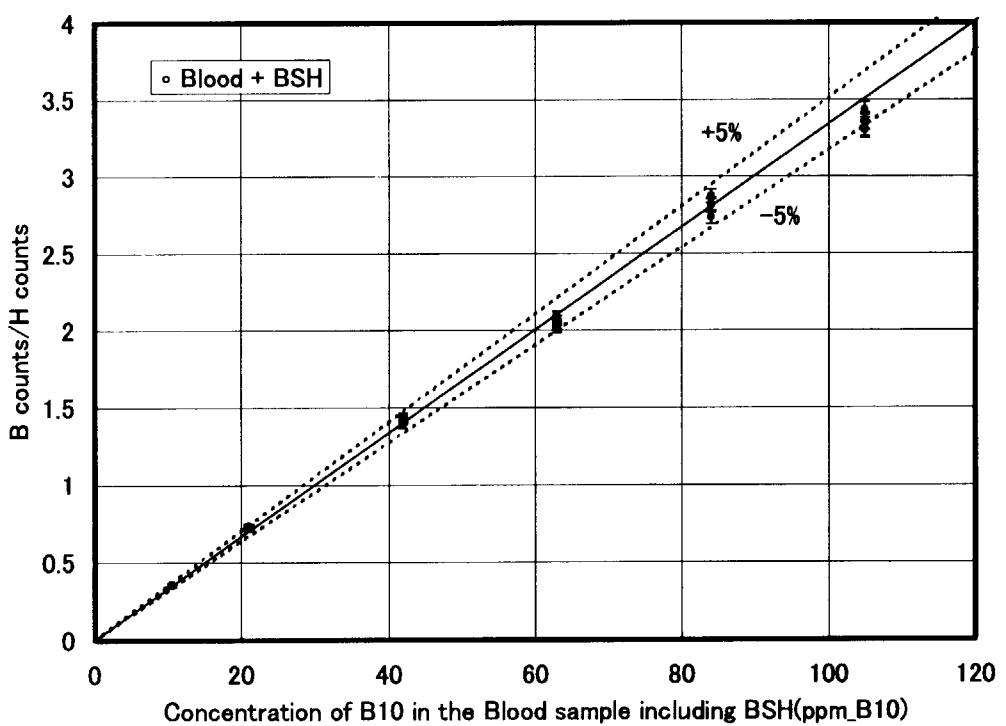


Fig.13 Calibration curve of Boron / Hydrogen counts ratio for the blood samples including BSH

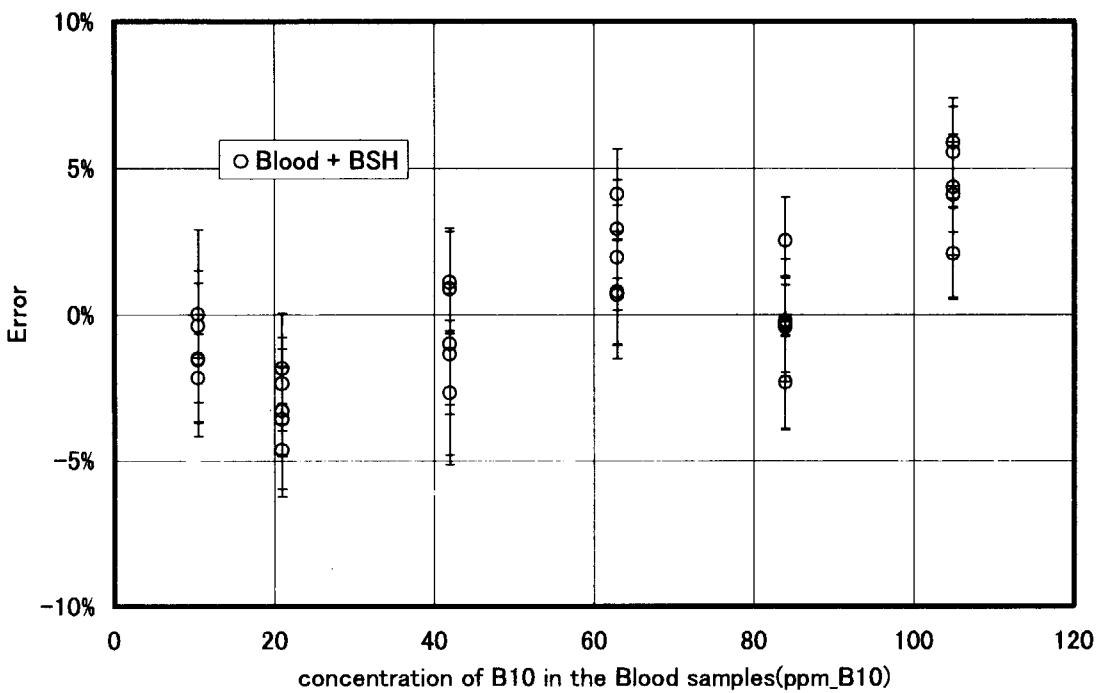


Fig.14 Error of data from the fitting line (at Fig.7) and standard deviation for dead time ratio

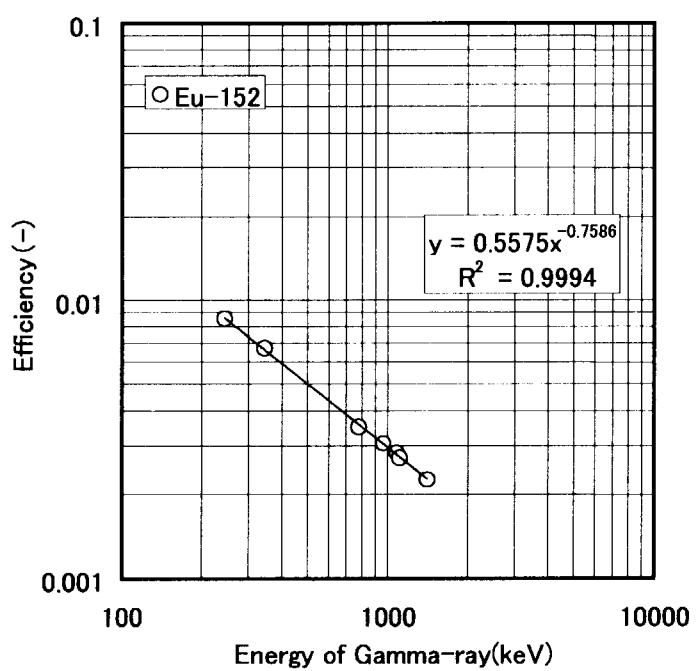


Fig.15 Peak efficiency to the energy of gamma-ray

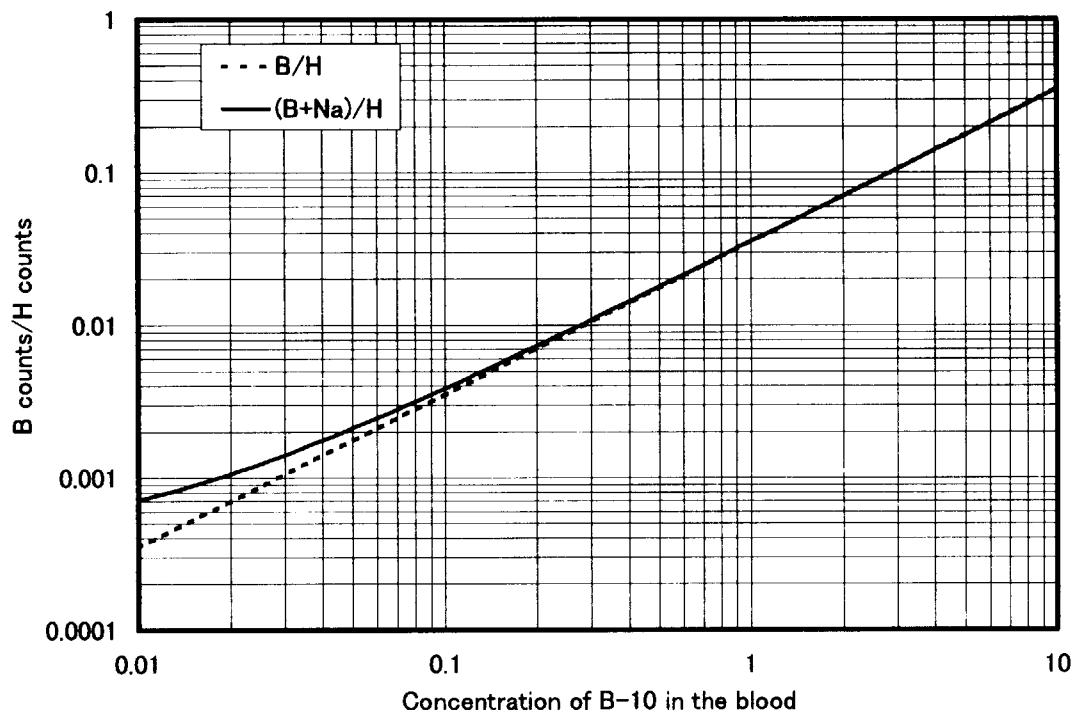


Fig.16 Influence of Na peak for the calibration curve of the human blood

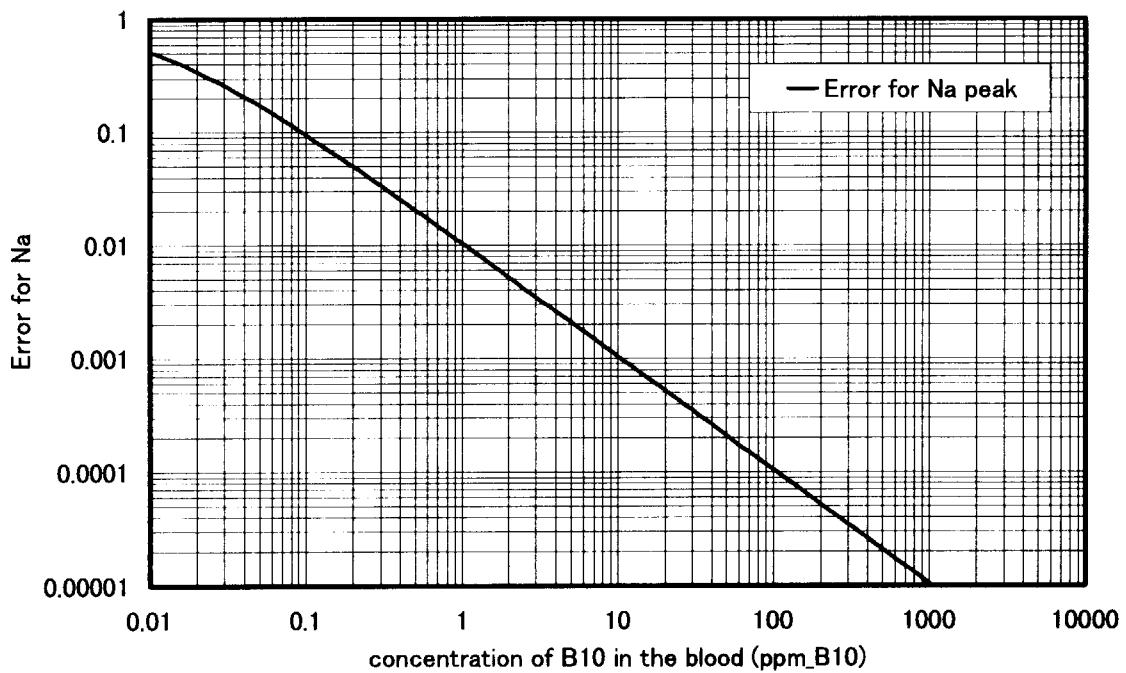


Fig.17 Error of the Na peak for the calibration curve

付録

関数 fit60

関数 fit60はドップラーピーク、バックグランドの計算に加えて、Na のピークも計算できるようにしたものである。(20) 式と違うのはそのためであるが、基本的な計算方法は変わりない。応用のため、以下の関数を示しておく。

入力する数値

a00 : マトリックス (-)
 b0 : 実測値 (counts)
 c0 : 計算された各パラメータ
 l : ROI の下限 (1ch/1keV としている)
 h : ROI の上限 (1ch/1keV としている)
 psig0 : 標準誤差

```
Public Sub fit6(a00 As Variant, b0 As Variant, c0 As Variant, l As Variant, h As Variant, psig0 As Variant)
```

<変数の定義>

```
Dim f(10)
Dim d(10)
Dim a(10, 10)
Dim inv(10, 10)
Dim e0, e02, eg1, e, nbch, fwhm, sig, nch, nev, dc, lp, i, j, ic, x, r, delc, kapa, kapa1, kapa2, y, c3, rr, area, siga
Dim fcl(10000)
```

<初期化>

```
e0 = 477.595
e02 = 472.202
e = 7.67
fwhm = 1.9
sig = fwhm / (2 * Sqr(2 * Log(2)))
nch = h - l
nev = (h - l) / nch
eg1 = 472
```

$$c(0) = (b(0) + b(nch)) / 2$$

$$c(1) = 1$$

$c(2) = \text{Abs}(b(478 - l) - c(0)) * 5$
 $c(3) = 1 / (2 * \text{sig}^2)$
 $c(4) = e0$
 $c(5) = e$
 $c(6) = b(\text{eg1} - l)$
 $c(7) = \text{eg1}$

For lp = 0 To 50

For i = 0 To 8

For j = 0 To 7

$a(i, j) = 0$

Next j

Next i

rr = 0

For ic = 0 To nch - 1

$x = ic * nev + 1$

$c3 = c(3)^0.5$

$f(0) = 1$

$f(1) = x - c(4)$

$f(2) = \text{Erf}(c3 * (x - c(4) + c(5))) - \text{Erf}(c3 * (x - c(4) - c(5)))$

$f(3) = c(2) * 0.5 / c3 * ((x - c(4) + c(5)) * d\text{Erf2}(-c3 * (x - c(4) + c(5))) - (x - c(4) - c(5)) * d\text{Erf2}(c3 * (x - c(4) - c(5)))) - c(6) * (x - c(7)) * \text{Exp}(-c3 * (x - c(7))^2)$

$f(4) = -c(1) - c3 * c(2) * (d\text{Erf2}(c3 * (x - c(4) + c(5))) - d\text{Erf2}(c3 * (x - c(4) - c(5))))$

$f(5) = c3 * c(2) * (d\text{Erf2}(c3 * (x - c(4) + c(5))) + d\text{Erf2}(c3 * (x - c(4) - c(5))))$

$f(6) = \text{Exp}(-c3 * (x - c(7))^2)$

$f(7) = 2 * c(6) * c3 * (x - c(7)) * \text{Exp}(-c3 * (x - c(7))^2)$

$f(8) = c(0) + c(1) * (x - c(4)) + c(2) * (\text{Erf}(c3 * (x - c(4) + c(5))) - \text{Erf}(c3 * (x - c(4) - c(5)))) + c(6) * \text{Exp}(-c3 * (x - c(7))^2)$

$fcl(ic) = f(8)$

For i = 0 To 7

For j = 0 To 7

$a(i, j) = a(i, j) + f(i) * f(j)$

Next j

Next i

$r = f(8) - b(ic)$

$rr = rr + r^2$

For i = 0 To 7

$a(8, i) = a(8, i) - f(i) * r$

Next i

Next ic

For i = 0 To 8

For j = 0 To 8

$a0(i, j) = a(i, j)$

Next j

Next I

<半値幅が大きくなり収束しないと判断した場合メッセージを出力>

If c(3) > 20 Then MsgBox ("Error No B10 Peak"): GoTo 9999

<マトリックスの計算>

guss2 a, d, inv, 8

delc = 0

For i = 0 To 7

delc = delc + Abs(d(i) / c(i))

Next I

<収束条件>

If delc < 0.00001 Then GoTo 999

kapa = 0.5

kapa1 = 0.1

kapa2 = 0.9

$c(0) = c(0) + kapa2 * d(0)$

$c(1) = c(1) + kapa1 * d(1)$

$c(2) = c(2) + kapa2 * d(2)$

$c(3) = c(3) + kapa1 * d(3)$

$c(4) = c(4) + kapa1 * d(4)$

$c(5) = c(5) + kapa1 * d(5)$

$c(6) = c(6) + kapa1 * d(6)$

$c(7) = c(7) + kapa2 * d(7)$

Next lp

<収束回数が lp=50 と設定していて、これを超えるような場合、収束しないと判断しメッセージを出力>

MsgBox ("Iteration over"): GoTo 9999

999

<標準誤差計算>

For i = 0 To 7

 psig(i) = Sqr(rr * Abs(inv(i, i)) / (nch - 8))

Next i

9999

End Sub

関数 Erf()

上記の計算ルーチンに現れる誤差関数 erf()の計算方法を示す。

Public Function Erf(x0 As Variant) As Variant

Dim x As Double

Dim i As Double

Dim i1 As Double

Dim ss As Double

Dim sig As Double

Dim b As Double

Dim a As Double

If x0 < 0 Then x = -x0 Else x = x0

If x > 4 Then a = 1: GoTo 100

ss = 0

For i = 0 To 150

 ss = ss + (-1) ^ i * x ^ (2 * i + 1) / (Mm(i) * (2 * i + 1))

Next i

 a = 2 * ss / Sqr(4 * Atn(1))

100

If x0 < 0 Then a = -a

Erf = a

Exit Function

End Function

Public Function Mm(a As Double) As Double

Dim ii As Double

Dim i As Double

If a = 0 Then Mm = 1: GoTo 100

ii = 1

For i = 1 To a

ii = ii * i

Next i

Mm = ii

100

End Function

関数 dErf2()

上記の誤差関数 erf()の微分値を計算する関数を示す。

Public Function dErf2(x0 As Variant) As Variant

dErf2 = 2 / Sqr(4 * Atn(1)) * Exp(-x0 * x0)

End Function

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

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

表3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, l
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J

1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

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

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

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

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

換 算 表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

粘度 1 Pa·s(N·s/m²) = 10 P(ボアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St(ストークス)(cm²/s)

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322 × 10 ⁻⁴	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
6.89476 × 10 ⁻³	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								= 4.184 J(熱化学)	= 4.1855 J(15 °C)
1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸			= 4.1868 J(国際蒸気表)
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹			
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵			
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹			仕事率 1 PS(ボアズ)
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹			= 75 kgf·m/s
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸			= 735.499 W
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1			

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

フローラー即発γ線分析装置によるDZO-1用血液サンプルのホウ素濃度測定