

JAERI-M

9 1 3 3

Pu 肺モニタ測定データの解釈に必要な  
X/ $\alpha$  比と平均実効エネルギーの決定

1980年10月

城谷 孝

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

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

Pu 肺モニタ測定データの解釈に必要な  
X /  $\alpha$  比と平均実効エネルギーの決定

日本原子力研究所東海研究所保健物理部  
城 谷 孝

(1980年9月18日受理)

肺に沈着した Pu 量を決定するためには、測定データに対し幾つかの補正が必要である。本報告では、Pu 同位体組成の相違に起因する計数率変動を補正するために必要な X /  $\alpha$  比の決定を、比例計数管と NaI 検出器を組合せた同時計数検出器を用いて行う簡易法について述べ、また測定した X /  $\alpha$  比から、被曝線量の計算に必要な平均実効エネルギー値を推定する経験的簡便法についても述べた。

Determination of X-ray to Alpha Ratio and Average  
Effective Energy Required in Interpretation of X-ray  
Counting Data for Internally Deposited Plutonium

Takashi SHIROTANI

Division of Health Physics, Tokai Research Establish-  
ment, JAERI

(Received September 18, 1980)

For the assessment of plutonium in the lungs, several corrections must be made to X-ray counting data obtained from direct measurement of a person inhaled plutonium aerosol.  $X/\alpha$  ratio varying with isotopic composition is one of the important correction factors required in interpretation of the counting data. This paper describes a method of determination of  $X/\alpha$  ratio of plutonium, using X-ray - alpha coincidence counter consisted of a proportional counter and a thin NaI-detector, and also describes an empirical method for estimating average effective energy of plutonium which has different isotopic composition.

Keywords: X-ray to Alpha Ratio, Plutonium, Lung Monitor, X-ray-Alpha Coincidence Counter, Effective Energy, Isotopic Composition

## 目 次

序 .....	1
1. プルトニウム $X/\alpha$ 比決定の必要性 .....	2
2. $X/\alpha$ 比の決定法 .....	4
2.1 実験的決定法 .....	4
1) 独立計数法 .....	4
2) 同時計数法 .....	4
2.2 偶然同時計数の問題 .....	5
3. 同時計数検出器 .....	7
3.1 比例計数管 - NaI 型同時計数検出器 .....	7
3.2 検出効率の決定 .....	7
4. Pu $X/\alpha$ 比の実用的決定法 .....	10
4.1 $(X/\alpha)_{Pu}$ の簡易決定法 .....	10
4.2 $(X/\alpha)_T$ の簡易決定法 .....	11
5. 平均実効エネルギーの簡易推定法 .....	12
結 言 .....	14
文 献 .....	14

## Contents

Introduction .....	1
1. Necessity of Determination of X/ $\alpha$ - Ratio .....	2
2. Determination of X/ $\alpha$ - Ratio .....	4
2.1 Experimental Method .....	4
1) Independent Counting Method .....	4
2) X-Ray - Alpha Coincidence Method .....	4
2.2 Effect of Chance Coincidence .....	5
3. X-Ray - Alpha Coincidence Counter .....	7
3.1 Proportional - NaI Coincidence Counter .....	7
3.2 Determination of Detection Efficiency .....	7
4. Practical Determination of X/ $\alpha$ - Ratio of Pu Sample ....	10
4.1 Simple Method of Determining (X/ $\alpha$ ) <sub>Pu</sub> .....	10
4.2 Simple Method of Determining (X/ $\alpha$ ) <sub>T</sub> .....	11
5. Empirical Method of Estimating Average Effective Energy of Pu Sample .....	12
Conclusion .....	14
References .....	14

## 序

プルトニウム（以下 Pu と略記する）取扱い施設において、Pu の吸入汚染事故が発生した場合、被曝者の身体除染後肺モニタによる胸部測定が行われる。その測定データから Pu の肺残留量を決定し、被曝線量を算定することになるが、Pu の場合そのデータの解釈が非常に難解で、いくつかの適切な補正を行うことが重要な問題となっている。これらの較正法における問題点の詳細については、解説<sup>1)</sup>があるのでそれを参照していただきたい。

本報では、重要な補正因子の中から、物理的に比較的正確に容易に決定ができるものとして、Pu の同位体組成の相違に起因する計数率の変動の補正に必要な X /  $\alpha$  比の決定法、および被曝線量の算定に必要な異なった同位体組成の平均実効エネルギーの簡易推定法について述べることにする。最近これらの問題に関していくつかの問合せを受け、この補正について基本的な考えをまとめて解説しておくことは、管理に携わる人に有益であると考え、特に緊急時に役立つように、細部にこだわらず実用的に記述した。

## 1. プルトニウムX/ $\alpha$ 比決定の必要性

プルトニウム（以下Puと記す）は、通常多くの同位体とその娘核種から成るもので、その代表的な核種を第1表に示す。 $^{241}\text{Pu}$ は $\beta$ 崩壊で $^{241}\text{Am}$ になる。他の同位体は $\alpha$ 崩壊であるが、同時にわずかの量の低エネルギー $\gamma$ 線を放出しており、また各同位体の娘核種の1部は励起状態にあり、LX線を放出している（通常PuのLX線と称している）。肺に沈着したPuの定量は、 $\gamma$ 線の放出率（ $\gamma/\alpha$ 比）が極めて小さいので、通常このLX線を体外で測定することにより行っている。すなわち、LX線の計数率から肺内のPu量（正確には $^{241}\text{Am}$ など娘核種を含む全 $\alpha$ 放射能を意味する。以下同様）を決定するわけである。そのためには、a) そのPuの同位体組成が明確であること、同時に各同位体のLX線放出率（ $X/\alpha$ 比）がわかっていること、または、b) そのPuの娘核種を含む同位体全体のLX線放出率（ $(X/\alpha)_T$ と記す）が測定されていることのいずれかが必要である。a)の場合は、 $(X/\alpha)_T$ は計算で求まるので問題はない。b)の場合は、同位体組成が不明のPuの $(X/\alpha)_T$ を実験により決定することが必要になる。

Puの各同位体と $^{241}\text{Am}$ の $X/\alpha$ 比は、第1表に示すように、それぞれ互に異なっている。このことは、同位体組成の違いにより全LX線の見掛けの計数率は、 $\alpha$ 放射能は同じであっても、大きく変化することがあることを示唆している。具体例で示そう。第2表に示す異なった同位体組成のPuのOne MPLB 当りのLX線放出率を計算した結果が第3表に記されているが、この例から明らかのように、同じMPLBを与えるPuであっても、同位体組成の違いによりLX線放出率は3倍も異なることがある。このことからPuの同位体組成の情報が、被曝者測定データの解釈にいかに重要であるかがわかるであろう。

Pu取扱い施設で吸入汚染事故が発生した緊急時に、そのPuの同位体分析を長時間かけて行うことができない場合が多い。そこで通常の管理では、このPuの $(X/\alpha)_T$ のみを測定し、肺内Pu量の算定が可能であることを、以下に基本的な式を用いて示しておく。

校正用ファントムの両肺部に、 $q_nC_i$ の校正用Pu線源を均一に分布させ、その肺部を見込む指定した位置に固定した検出器で得られる計数率 $n_p$ (cpm)は

$$n_p = 2.22 \times 10^3 q R_p a g_p F_p \quad (1.1)$$

であり、同様に $x_nC_i$ のPuで肺を汚染した被曝者を同一条件で測定して得られる計数率 $n_s$ (cpm)は、

$$n_s = 2.22 \times 10^3 x R_s a g_s F_s \quad (1.2)$$

である。

- $R_p, R_s$  : それぞれ、校正用Puの $(X/\alpha)_T$ 、被曝者の肺中のPuの $(X/\alpha)_T$
- $a$  : 検出器の吸収効率
- $g_p, g_s$  : それぞれ固定した位置の検出器のファントムおよび被曝者に対する幾何学的効率



$F_p, F_s$  : それぞれ, ファントムおよび被曝者の胸部軟組織, 肋骨等による吸収損失, その他の損失因子およびビルドアップ効果等のすべてを含む補正因子。

(1.1) 式で, 較正定数  $D_p = n_p/q$  (cpm/nCi) を用い, それを (1.2) 式へ代入し,  $x$  を求めると次式を得る。

$$x = \left( \frac{n_s}{D_p} \right) \left( \frac{R_p}{R_s} \right) \left( \frac{g_p F_p}{g_s F_s} \right) \quad (1.3)$$

この式が示すように, 被曝者の肺に沈着した Pu 量を算定するには, 被曝者とファントムの体格等の相違による補正因子  $(g_p F_p / g_s F_s)^*$  と両者の肺にある Pu の同位体組成の違いによる補正因子  $(R_p / R_s)$  とを決定しておかねばならないことがわかる。Pu の同位体組成については, その組成の詳細な情報が得られなくとも, その Pu の X/ $\alpha$  比が求められていれば, Pu 量の算定は可能であることも理解されよう。

本報では, 以下 2, 3, 4 章に X/ $\alpha$  比決定の基礎理論と実際について述べ, 第 5 章で被曝線量の算定に必要な異なった同位体組成の Pu の平均実効エネルギーの簡易推定法について述べる。

---

\* 体格差に起因する補正因子等は文献 (2) を参照。

## 2. X/α比の決定法

### 2.1 実験的決定法

PuのX/α比というとき、Puの同位体のみで娘核種<sup>241</sup>Amを含まないX/α比((X/α)<sub>Pu</sub>と記す)と<sup>241</sup>Amを含む(X/α)<sub>T</sub>とがある。ここでは<sup>241</sup>Amを含まないPuとする。<sup>241</sup>Amを含む(X/α)<sub>T</sub>の決定には、<sup>241</sup>Amの影響を補正する必要があるので後章にて述べることにする。

PuのX/α比の実験的決定には、次の2通りの方法がある。

#### 1) 独立計数法

問題となるPuのLX線とα線をそれぞれ別々に測定してX/α比を決定する。すなわち、同一のPu線源で測定されたLX線とα線の正味計数率 $n_X^*$ ,  $n_\alpha^*$ (cpm)は

$$n_X = a_X g_X R N_\alpha \quad (2.1)$$

$$n_\alpha = a_\alpha g_\alpha N_\alpha \quad (2.2)$$

と与えられるから、このPuの $R = (X/\alpha)_{Pu}$ は(2.2)式を(2.1)式へ代入して求められる。すなわち、

$$R = \frac{\varepsilon_\alpha}{\varepsilon_X} \frac{n_X}{n_\alpha} \quad (2.3)$$

$a_X, a_\alpha$  : それぞれ、LX線とα線検出器の吸収効率

$g_X, g_\alpha$  : それぞれの検出器の幾何学的効率

$N_\alpha$  : Pu線源の全α崩壊率(dpm)

$\varepsilon_\alpha = a_\alpha g_\alpha$  } それぞれの検出器の検出  
 $\varepsilon_X = a_X g_X$  } 効率(detection efficiency)

#### 2) 同時計数法

Puから放出されるα線とLX線の同時計数率を測定することにより $R = (X/\alpha)_{Pu}$ を決定する方法である。この方法では、この目的のために特別に設計されたα-X同時計数検出器が必要となる。

α-X同時計数率(true alpha-photon coincidence rate) $n_{tc}$ (cpm)は次式で与えられる。

$$n_{tc} = \varepsilon_X \varepsilon_\alpha R N_\alpha \quad (2.4)$$

$\varepsilon_X, \varepsilon_\alpha$ は各検出器の検出効率である。 $n_{tc}$ と $n_\alpha (= \varepsilon_\alpha N_\alpha)$ は実験で求められるので、こ

---

実際の線源では、α線の自己吸収損失、バックスキキヤッター、LX線の散乱・吸収損失等の補正を必要に応じて行わねばならない。

の実測値から得られる  $R$  を  $R_{exp.}$  とすると、

$$R_{exp.} = n_{tc} / n_{\alpha} \quad (2.5)$$

となり、(2.4)式を用いて

$$R = \frac{R_{exp.}}{\epsilon_X} \quad (2.6)$$

と  $(X/\alpha)_{Pu}$  が求まる。この方法では、 $n_{tc}$  と  $n_{\alpha}$  から、 $R_{exp.}$  を求め次に  $R$  を決定することになる。

上述の2つの方法で、実際には2)の同時計数法が広く一般に採用されている。それは次の理由による。

- i)  $Pu$  の  $X/\alpha$  比は一般に小さく(第1表)、弱い線源の場合、 $n_X$  が著るしく低くなるため、独立計数法ではバックグラウンド(以下  $B. G$  と記す)の影響が大きく、統計精度が低下する。一方同時計数法では、次節に述べるように、 $B. G$  の影響はほとんど無視することができる。
- ii) 独立計数法では、(2.3)式に示すように、 $X/\alpha$  比は  $\epsilon_{\alpha}$  の変動に影響されるが、同時計数法では  $\epsilon_{\alpha}$  の変動に全く関係がない。

以上の理由で特に i) が重要で、同時計数法は微量の試料しか得られないときこそ、その真価を発揮することができる。

## 2.2 偶然同時計数の問題

同時計数法では、 $\alpha$ 線と  $LX$ 線の“真の同時計数率(true coincidence rate)” $n_{tc}$ のみが必要なのであるが、実際の測定で得られる同時計数率  $n_c$  にはまた“偶然同時計数率(chance coincidence rate)” $n_{ch}$  も含まれていることに注意しなければならない。すなわち、各検出器からの出力パルスは一定の幅をもつため、時間差があっても $\alpha$ 線のパルスと  $X$ 線検出器からの  $X$ ,  $\gamma$ 線のパルスとが偶然に重畳する現象が発生することがあるからである。式で示すと、

$$\begin{aligned} n_c &= n_{tc} + n_{ch} \\ &= n_{tc} + \tau n_{\alpha} (n_X + n_X^b) \end{aligned} \quad (2.7)$$

である。

- $\tau$  : 両検出器からのパルスが一部重畳し、出力パルスが発生するときの重畳した全パルス中で、それは両パルス中の和より小さく1つのパルス中より大きい値(min.)
- $n_X^b$  :  $X$ 線検出器の  $B. G$  計数率のうち、 $LX$ 線チャンネル内に入る  $B. G$  計数率 (cpm)

(2.7)式は(2.4)式を用いて

$$n_c = \epsilon_{\alpha} \epsilon_X R N_{\alpha} (1 + \tau N_{\alpha}) + \epsilon_{\alpha} n_X^b \tau N_{\alpha} \quad (2.8)$$

従って、

$$R_{\text{exp.}} = \epsilon_X R (1 + \tau N_\alpha) + \tau n_X^b \quad (2.9)$$

$$\therefore R = \frac{R_{\text{exp.}} - \tau n_X^b}{\epsilon_X (1 + \tau N_\alpha)} \quad (2.10)$$

この(2.10)式が、偶然同時計数を含んだ実際の測定値から得られる  $X/\alpha$  比を与える。(2.6)式との比較から、偶然同時計数の影響を小さくするためには、

$$R_{\text{exp.}} \gg \tau n_X^b, \quad 1 \gg \tau N_\alpha$$

の条件を満たせばよい。すなわち、具体的には

- i)  $N_\alpha$  を不必要に大きくしない。換言すれば、強すぎる線源を使用しないこと。
- ii)  $\tau$  値を小さくする。
- iii)  $n_X^b$  を下げる。

の3点である。しかし通常の線源では、弱い線源の場合でも  $n_{1c} \gg \tau n_\alpha n_X^b$  となるので、B.G.の影響はほとんど無視することができ、上述のiii)は特に考慮する必要はない。問題となるのはi)の効果であって、使用する線源の強度は適切に選ぶことが大切である。

線源強度  $N_\alpha$  は、与えられた測定時間内の統計精度を考慮した上、(2.7)式で第2項の大きさが第1項の大きさの1%程度になるような値を選ばばよいであろう。すなわち、その比を  $\eta$  とすれば

$$\eta = \tau N_\alpha + \frac{\tau n_X^b}{\epsilon_X R} \leq 0.01 \quad (2.11)$$

を満たす  $N_\alpha$  の強さの線源であれば、(2.6)式を用いて  $X/\alpha$  比を計算してよい。具体例を示すと、 $R = 0.06$  の線源とすれば、 $\tau = 1.3 \times 10^{-7} \text{ min.}$ ,  $n_X^b = 60 \text{ cpm}$ ,  $\epsilon_X = 0.1$  であるとき、 $N_\alpha \approx 6.7 \times 10^4 \text{ dpm}$  となる。この試料の測定時間は、要求する統計精度によって決めるが、緊急時の場合はそう高い精度を考える必要はない。なお、 $\tau$ ,  $\epsilon_X$ ,  $n_X^b$  等の値は、それぞれの測定装置で異なるので、各自の装置について  $N_\alpha$  の上限値を、統計精度と測定時間の関係において求めておくと便利であろう。

### 3. 同時計数検出器

現在使用されている代表的な同時計数検出器は、

- a)  $\alpha$ 線用とX線用の半導体検出器を組合せた構造のもの<sup>(3)</sup>、
  - b)  $\alpha$ 線用にガス比例計数管、X線に薄型NaI(Tl)検出器を用い組合せた構造のもの<sup>(4)</sup>、
- の2種類である。

a) の半導体検出器は、エネルギー分解能に優れているため、核種分析が可能で、X/ $\alpha$ 比の決定も容易で精度も高い。しかし、同時検出効率 ( $\epsilon_c = \epsilon_\alpha \cdot \epsilon_X$ ) が低いこと、製作費が高く検出器の常時冷却を必要としその維持管理に費用が掛り煩わしさを伴う。b) の方式では、同時検出効率の十分高い検出器の設計が容易であり、製作費の安さ、維持管理の手間が全くないなどの利点をもつが、反面分解能が悪いため核種分析ができず、X/ $\alpha$ 比決定がやゝ面倒となりその精度も劣る、などの欠点もある。

いずれの方式を採用するかは、この検出器の利用状況によって決定されるべきであろう。すなわち、PuのX/ $\alpha$ 比の測定のみでなく、他の試料測定にも頻繁に使用することがあるならば、多目的型に設計することにより、無駄をはぶき有効に利用できるもので、精度のよい半導体方式を採用するのがよいであろう。しかし、他の目的に使用することもなく、単にPuのX/ $\alpha$ 比の測定のみを行う目的であれば、その使用頻度はきわめて低いのでb)方式を採用する方がよい。

以下に緊急時にのみ使用するb)方式の同時計数検出器の例を示す。

#### 3.1 比例計数管・NaI型同時計数検出器

製作した同時計数検出器は、第1図に示すように、比例計数管の上面にNaI検出器を取付けた構造である。比例計数管はガスフロー型で、内容積は5.2 cm $\phi$  × 3.1 cm、心線にタングステンを用い、管体はすべて真鍮合金で作られている。線源挿入台は、2個の線源が交互に測定できるように、引出し式に前後にスライドし、線源挿入孔は5.2 cm $\phi$  × 7 mmと大きいのが、通常はステンレス円板の電着線源を用いるため、2 $\pi$ ジオメトリーになるようにスペーサーを挿入している。プラトー曲線の実測例を第2図に示す。NaI結晶は5 cm $\phi$  × 3 mmで、窓材にはBe板が用いられている。

この同時計数検出器は遊休品を利用して製作したため、その性能は次節に述べるように最良のものではない。新たに設計される場合は、同時検出効率を十分高くするように、①NaI結晶の最適直径を選び、②比例計数管の厚さ(ガス層厚)を $\alpha$ 線の最大飛程を考慮してできるだけ薄くする、の2点を考慮することが大切である。特に②の注意は、PRガス中のLX線の減衰を最少にし、同時にNaI結晶に対する幾何学的効率を高める点で重要である。

この同時計数検出器に接続する電子回路は、第3図に示すように、ごく一般的な構成である。比例計数管の $\alpha$ 線のパルスは整形されゲート信号となり、NaI検出器からのX( $\gamma$ )線パルスとゲート回路で一致したときのみ出力があり、その出力信号は波高分析器(256チャンネルを

使用している) でスペクトル表示される。

### 3.2 検出効率の決定

検出器のPuのLX線に対する検出効率の決定法について述べる。比例計数管とNaI検出器の検出効率、 $\epsilon_\alpha = a_\alpha g_\alpha$ と $\epsilon_X = a_X g_X f_X$  ( $f_X$ はガス層による吸収損失で2章では省略していた)は計算で求めることも出来るが、ここでは実験的に求める方法を述べておく。実験に用いる線源は、Puとほぼ同じLX線を放出する $^{241}\text{Am}$ を用いる。それは $^{241}\text{Am}$ の核データの信頼性が高く、高純度のものが容易に入手できるからである。線源強度は前章の考えに従って決定し、自己吸収やバックスキヤッタの無視できるような電着線源を使用する。この線源の $\alpha$ 崩壊率 $N_\alpha^{\text{Am}}$  (dpm)を正確に測定しておく。

$\epsilon_\alpha$ の決定は、比例計数管に線源を挿入しその計数率を求める。 $a_\alpha = 1$ であるから、線源が正しく $2\pi$ ジオメトリに配置されていれば、 $N_\alpha^{\text{Am}}/2$ の値と統計誤差の範囲で一致するから、 $\epsilon_\alpha$ はすぐ求まる。

$\epsilon_X$ の決定は、 $^{241}\text{Am}$ のLX線を測定することにより行うが少々面倒である。NaI検出器は分解能が悪いため、LX線を計数するエネルギーチャンネル内に、 $^{241}\text{Am}$ から同時に放出されている26 keV  $\gamma$ 線および60 keV  $\gamma$ 線のescape peakの1部が入り、LX線の光電ピークに重なり分離できない。従って、正味のLX線の光電ピーク面積を求めるには、B.Gと共にこれらの影響を除くことが必要である。以下に、この影響を除いて $\epsilon_X$ を算出する方法を述べる。

[escape peakの補正]  $^{241}\text{Am}$ の60 keV  $\gamma$ 線について、escape to photo peak ratioが求まればよい。Swinth<sup>(4)</sup>は、種類と厚さの異なる吸収板(A $\ell$ , Cu, Pb)をNaI検出器の窓面に取付け、LX線を減衰させたスペクトルからその比を決定した。その値は $0.1658 \pm 0.002$ である。またAxel<sup>(5)</sup>は理論的計算からこれを求め0.156という値を得ている。

[26 keV  $\gamma$ 線の補正] この $\gamma$ 線はスペクトルの上では全く分離されず、その光電面積は不明であるので計算により求める。26 keV  $\gamma$ 線の計数率 $n_{26\gamma}$  (cpm)は次式で算出される。

$$n_{26\gamma} = \epsilon_\gamma R_{26\gamma}^{\text{Am}} N_\alpha^{\text{Am}} \quad (3.1)$$

$\epsilon_\gamma$  : 26 keV  $\gamma$ 線の検出効率で $a_\gamma g_\gamma f_\gamma$ で与えられる。 $a_\gamma = 1$ ,  $f_\gamma = 1$ , としてよいから、 $\epsilon_\gamma$ は $g_\gamma$ のみで与えられる。(  $f_\gamma$ は26 keV  $\gamma$ 線のガス中の吸収損失)

$R_{26\gamma}^{\text{Am}}$  : 26 keV  $\gamma$ 線の $\gamma/\alpha$ 比 = 0.025

以上の結果を用いて、 $\epsilon_X$ は次式で与えられる。

$$\epsilon_X = \frac{1}{N_\alpha^{\text{Am}} R_{\text{Am}}^{\text{Am}}} \left( n_X - n_{60\gamma} \frac{P}{1-P} - n_{26\gamma} \right) \quad (3.2)$$

$R_{\text{Am}}^{\text{Am}}$  :  $^{241}\text{Am}$ のX/ $\alpha$ 比 = 0.369

$n_X$  : 指定したLX線のエネルギーチャンネル内のB.Gを差引いた計数率 (cpm)

$n_{60\gamma}$  : 指定した 60 keV  $\gamma$  線チャンネル内の B. G を差引いた計数率 (cpm)

$P$  : 60 keV  $\gamma$  線の escape の発生確率。  $P/(1-P)$  は escape peak 面積と 60 keV  $\gamma$  線の光電面積の比を意味し、Swinth の測定した値と同じである。

NaI 検出器で  $^{241}\text{Am}$  のスペクトルを求め、 $n_x, n_{60\gamma}$  を算出し (このとき比例計数管の動作は停止)、(3.2) 式により  $\epsilon_x$  は計算される。 $n_x$  は測定値であるから、LX 線の PR ガス中での減衰効果を含むから、 $\epsilon_x$  もその効果を含んだ値となっている。なお、 $n_x$  を求める LX 線のチャンネル幅は、単に LX 線の光電ピークを含む領域だけでなく、(3.2) 式からも理解されるように、26 keV  $\gamma$  線と escape peak のすべてを含む広いエネルギー領域を取らねばならない。 $n_{60\gamma}$  のチャンネル幅も光電ピークの全面積が入るエネルギー領域とする。第 1 図の検出器の  $\epsilon_x$  決定の際の各チャンネル中は LX 線チャンネル幅 = 8~40 keV, 60 keV  $\gamma$  線チャンネル幅 = 42~78 keV とした。この同時計数検出器について求めた値は

$$\epsilon_\alpha = 0.50, \quad \epsilon_x = 0.09, \quad \epsilon_c = 0.045, \quad \epsilon_\gamma = 0.103$$

である。 $\epsilon_\gamma$  は PR ガス中の吸収損失が無視できる場合 (26 keV および 60 keV  $\gamma$  線) の効率であるから、幾何学的効率と等しい。従って、計算で求まるが、 $n_{60\gamma}$  を用いて

$$\epsilon_\gamma = \frac{n_{60\gamma}}{R_{60\gamma}^{Am} N_\alpha^{Am} (1-P)} \quad (3.3)$$

からも求まる。 $R_{60\gamma}^{Am}$  は 60 keV  $\gamma$  線の  $\gamma/\alpha$  比 = 0.36 である。

## 4. Pu X/ $\alpha$ 比の実用的決定法

事故現場から採取したPuは、電着線源に仕上げるのが最善である。時間的余裕のない場合はそのPuの硝酸溶液をステンレス試料皿に滴下乾燥させたものを使うこともやむを得ないであろう（汚染に注意）。線源の大きさ、形状等は $^{241}\text{Am}$ 線源と同程度のものとする。

PuのX/ $\alpha$ 比というとき、 $^{241}\text{Am}$ を除いた $(X/\alpha)_{\text{Pu}}$ と $^{241}\text{Am}$ を含んだ $(X/\alpha)_{\text{T}}$ とがある。両者の値はそれぞれ必要になるので、ここでは両者の場合について、緊急時の簡易決定法を述べる。

### 4.1 $(X/\alpha)_{\text{Pu}}$ の簡易決定法

同時計数検出器を用いて、問題となるPuの $n_{\alpha}$ を測定し、同時に“同時計数スペクトル”（測定例を第4図に示す）を求める。このスペクトルから、 $^{241}\text{Am}$ の影響を除いて、PuのみのLX線同時計数率 $n_{\text{C}}$ を算出するためには次式を用いる。

$$n_{\text{C}} = n'_{\text{C}} - n'_{\text{C}60\gamma} \cdot K \quad (4.1)$$

ここで

$$K = \frac{^{241}\text{Am} \text{線源で得られる LX 線チャンネル内の同時計数率 } n_{\text{C}}}{^{241}\text{Am} \text{線源で得られる } 60 \text{ keV } \gamma \text{線チャンネル内同時計数率 } n_{\text{C}60\gamma}}$$

であり、このK値は校正用 $^{241}\text{Am}$ 線源の同時計数スペクトル（測定例を第5図に示す）から求めておく。

$n'_{\text{C}}$  : 問題となるPu線源で得られる $^{241}\text{Am}$ のLX線等を含むLX線チャンネル内の同時計数率 (cpm)

$n'_{\text{C}60\gamma}$  : 同じスペクトルから、60 keV  $\gamma$ 線チャンネル内の同時計数率 (cpm)

(4.1)式において、Puの $n'_{\text{C}}$ 、 $n'_{\text{C}60\gamma}$ と $^{241}\text{Am}$ の $n_{\text{C}}$ 、 $n_{\text{C}60\gamma}$ とは、それぞれのエネルギー領域で同じチャンネル幅で求めた計数率でなければならない。ただし、LX線チャンネル幅は、前章の $\epsilon_{\text{X}}$ 決定の際に述べたような広いチャンネル幅を取る必要はなく、LX線の光電ピーク全面積が取れる幅でよい。

(4.1)式で算出した $n_{\text{C}}$ は、 $^{241}\text{Am}$ の効果をすべて除いているから、このPuの $(X/\alpha)_{\text{Pu}}$ をRとすれば、(2.5)式を用いて、

$$R_{\text{exp.}} = \frac{n_{\text{C}}}{n_{\alpha}}$$

$$R = \frac{R_{\text{exp.}}}{\epsilon_{\text{X}}} \quad (4.2)$$

と決定される。 $(n_{\text{C}} \approx n_{\text{ic}}$ である)。注意することは、 $n_{\alpha}$ はPuの $\alpha$ 線計数率であって、 $^{241}\text{Am}$ の $\alpha$ 線を含まないよう補正した値であることである。 $^{241}\text{Am}$ の量は、 $n'_{\text{C}60\gamma}$  または  $n_{60\gamma}$  か



ら決定される。 $^{241}\text{Am}$ が微量の場合、緊急時には $^{241}\text{Am}$ の補正をせず測定した $n_c$ をそのまま用いてもよい。

#### 4.2 $(X/\alpha)_T$ の簡易決定法

この場合は、前章の(3.2)式と同じように、 $n'_c$ から $^{241}\text{Am}$ の26 keV  $\gamma$ 線と escape peakを除いて、LX線チャンネル内の同時計数率 $n_c$ (Puと $^{241}\text{Am}$ のLX線を含む)を求めなければならない。すなわち

$$n_c = n'_c - n'_{c60\gamma} \frac{P}{1-P} - n'_{c26\gamma} \quad (4.3)$$

である。ここで、

$$n'_{c26\gamma} = \epsilon_\alpha \epsilon_\gamma R_{26\gamma}^{Am} N_\alpha^{Am}$$

と計算で求める。但し $N_\alpha^{Am}$ は問題となるPu中に含まれている $^{241}\text{Am}$ の量である。

$n_c$ が求まれば(4.2)式と同時に $R = (X/\alpha)_T$ は計算される。但し、この場合には $n_\alpha$ は $^{241}\text{Am}$ を含む値で単なる測定値でよいことに注意する必要がある。

なお、緊急時には、上述のような面倒な計算をはぶいて、更に近似的に求めてよい。すなわち、LX線チャンネル巾を第4図に示すように、光電ピークのみ入る巾に取れば、26 keV  $\gamma$ 線や escape peakの寄与は十分小さいので、 $n_c \simeq n'_c$ として直接(4.2)式のように $R$ は計算される。

上述の $X/\alpha$ 比決定法は、いずれの場合も近似的な値を得るためのもので、正確な値はいくつかの補正を必要とする。例えば、同位体組成の違いによっても上述の方法では $R$ 値が変わることがある。すなわち、 $^{239}\text{Pu}$ の存在比が高く、 $^{241}\text{Am}$ の存在比が極端に低い試料では、 $^{239}\text{Pu}$ からの52 keV  $\gamma$ 線( $\gamma/\alpha$ 比 $= 2 \times 10^{-4}$ )と $^{241}\text{Am}$ の60 keV  $\gamma$ 線とが重なり分離できないため、52 keV  $\gamma$ 線は $n'_{c60\gamma}$ の中に加算されて、その割合は無視できない場合もある。第4図のPuでは、 $n'_{c60\gamma}$ のうち約6.3%が52 keV  $\gamma$ 線によるものである。極端な場合は、 $^{241}\text{Am}$ を全く含まないのに、52 keV  $\gamma$ 線を $^{241}\text{Am}$ の60 keV  $\gamma$ 線と誤認して $R$ を計算することもあり得る。他の同位体についても同様の注意が必要になる。しかし、本報では、緊急時の $X/\alpha$ 比の早急な決定が目的であるから、このようなわずかな誤差しか与えない因子を補正する必要はない。半導体検出器では、このような補正もなく正確な値が得られることも理解されよう。

## 5. 平均実効エネルギーの簡易推定法

肺沈着 Pu 量 ( $\alpha$  放射エネルギー) の決定には、その Pu の  $X/\alpha$  比が必要だが、肺の被曝線量の算定には同位体組成比を知らなければならない。それは、Pu の各同位体の肺に対する実効エネルギー  $\epsilon$  が異なるため、平均実効エネルギー  $\bar{\epsilon}$  (各同位体の放射能比で  $\epsilon$  を荷重平均した値) を求める必要があるからである。

事故時に現場から採取した Pu の同位体分析を行うことは、試料の調製から分析まで長時間を要するため、緊急時の早急な線量算定を要求されているときにその時間的余裕がない場合が多い。このようなとき、ある特定の同位体の  $\epsilon$  値を用いても結果として大きな誤りは生じないが、簡単に  $\bar{\epsilon}$  が推定できるならその値を用いることがよいことは当然である。 $\bar{\epsilon}$  の推定に関し、緊急時の線量評価に便利な経験的な簡易法について検討した結果を以下に述べる。

それは、事故時には必ず問題の Pu の  $X/\alpha$  比の測定を行うが、この  $X/\alpha$  比から  $\bar{\epsilon}$  を推定する方法である。すなわち、同位体組成が明確で、互に異なった組成比をもつ多数の Pu について、それぞれ  $(X/\alpha)_T$  と  $\bar{\epsilon}$  を求めて両者の関係を図示しておく。事故時に現場から採取した Pu の  $(X/\alpha)_T$  を測定し、その値に対応する  $\bar{\epsilon}$  をこの図から求めればよいわけである。この方法は、多数の Pu について求めた  $(X/\alpha)_T$  と  $\bar{\epsilon}$  との間に相関関係があれば可能となる。個々の Pu についてみると、 $\bar{\epsilon}$  も  $(X/\alpha)_T$  も共に同位体の放射能比に依存しているため、両者の間に相関のあることがわかる。しかし、第 1 表に示すように、 $^{241}\text{Pu}$  を除くと、 $^{238}\text{Pu}$  と  $^{241}\text{Am}$  の  $\epsilon$  値は 57 MeV、 $^{239}\text{Pu}$  と  $^{240}\text{Pu}$  は 53 MeV、 $^{242}\text{Pu}$  が 51 MeV と 3 つのグループにわかれ、前 2 グループでは 2 核種の放射能が互に異なってもその和が一定であれば  $\bar{\epsilon}$  は同じ値となるが、 $(X/\alpha)_T$  は 2 核種の放射能の和が一定でも互に異なった放射能であれば変動することは知っておくべきである。

実際の Pu について、 $\bar{\epsilon}$  と  $(X/\alpha)_T$  との関係を調べるため、第 2 表に示すような互に異なった同位体組成をもつ 28 種の Pu について、 $\bar{\epsilon}$  と  $(X/\alpha)_T$  を計算した。その結果が第 3 表に示されている。また、この両者の関係を図示すると第 6 図のようになる。直線式は最小 2 乗法で求めたものである。計算から同位体組成比を求めた Pu (図の○印、以下 Pu(I) と記す) と実際の同位体分析で組成比を決定した Pu (図の・印、以下 Pu(II) と記す) との  $\bar{\epsilon}$  と  $(X/\alpha)_T$  との関係は、ほぼこの直線で近似できるとみてよい。すなわち、この直線式から  $\bar{\epsilon}$  が推定できる。更に荒い近似では、次のように、 $(X/\alpha)_T$  の大ききで区分した各 Pu の  $\bar{\epsilon}$  の平均値  $\langle \bar{\epsilon} \rangle$

$$\begin{aligned} (X/\alpha)_T \geq 0.1 \quad \text{の場合} \quad \langle \bar{\epsilon} \rangle &= 55.0 \text{ MeV} \\ (X/\alpha)_T < 0.1 \quad \text{の場合} \quad \langle \bar{\epsilon} \rangle &= 53.2 \text{ MeV} \end{aligned}$$

を  $\bar{\epsilon}$  値として用いてもよい。それは、同位体組成の違いによる  $\bar{\epsilon}$  の変動巾は、第 6 図に示すように大きなものではなく、上の値のような荒い近似であっても、緊急時の線量算定には十分の精度とみてよいからである。

以上の方法で  $\bar{\epsilon}$  の推定をすることができるが、参考までに、 $(X/\alpha)_{\text{Pu}}$  と主要な同位体の放射能比との関係を第 2 表の Pu について示し、その関係から  $\bar{\epsilon}$  を推定する方法を述べておく。主

要同位体の放射能比と  $(X/\alpha)_{Pu}$  の計算値を第3表に示す。この関係を図示すると第7～9図になる。第7図は  $(X/\alpha)_{Pu}$  と  $^{239}Pu$  の放射能比 ( $\alpha_{239}/\alpha_{Pu}$  と記す) の関係であり、両者の関係は直線できわめてよく表わされる ( $(X/\alpha)_{Pu}$  の計算で各同位体の  $X/\alpha$  比の値は、第1表の値を用いたが、従来の値を用いると両者の関係は、 $(X/\alpha)_{Pu}$  が大きくなるにつれ、やゝ凹型の曲線になってゆく)。この直線から、 $^{239}Pu$  の存在比が推定できる。次に  $^{240}Pu$  について同様の関係を第8図に示す。 $(X/\alpha) < 0.08$  の範囲では、Pu(I)とPu(III)とは一つの曲線で表わされるが、0.08を超えると両者のPuでは別々の曲線となる。また、第9図には、 $^{238}Pu$  の場合を示すが、これはPu(I)とPu(III)とでははっきり2本の曲線で表わされていることがわかる。この理由については、データ量が十分でないこともあり明確にはいえないが、Pu(I)では同位体分析(質量分析器によるものが多いと思われる)の精度の問題、また精製して  $^{239}Pu$  の存在比を高めたPuも多く、この場合は  $^{238}Pu$ 、 $^{240}Pu$  の存在比の変化による影響等がある。Pu(III)では、計算の条件が実際に生成されるPuに適合したものか否かも問題がある。

実際のPuでは、 $(X/\alpha)_{Pu} < 0.08$  以下のものが多いので、この範囲の値であれば図の曲線から各同位体比の放射能比の推定ができよう。すなわち、まず  $\alpha_{239}/\alpha_{Pu}$  を求め、次に  $\alpha_{240}/\alpha_{Pu}$  を求め、残りを  $\alpha_{238}/\alpha_{Pu}$  とする。 $\alpha_T$ 、 $\alpha_{Pu}$  および  $\alpha_{Am}$  は  $(X/\alpha)_{Pu}$  決定の際に求められるので、 $\bar{\epsilon}$  の計算に必要な主要同位体の放射能比は決定されることになる。 $\bar{\epsilon}$  の計算には、この程度の放射能比の情報が得られれば十分である。

なお、 $^{241}Pu$  は  $\beta$  崩壊であり、被曝線量への寄与は小さいものであるから緊急時には無視する。この核種が問題となるのは、 $\beta$  崩壊で生ずる  $^{241}Am$  による被曝であるが、これは本報の目的ではないので別の機会に論ずることとする。

## 結 言

前章まで、Puの $X/\alpha$ 比決定の基本的な考え方を説明し、比例計数管とNaI検出器を組合せた同時計数検出器の例を述べ、それを用いたPuの $X/\alpha$ 比の簡易決定法を述べた。また、測定した $X/\alpha$ 比の値から、そのPuの平均実効エネルギーの経験的簡易推定法についてもふれた。

緊急時の第1段階の被曝線量の推定は、正確な値より概算値でよいからより迅速に決定することが強く要求される。正確な線量算定は、必要に応じて後でゆっくり行えばよい。従って、 $X/\alpha$ 比も平均実効エネルギーも、とりあえずその概算値が求まればよい。この目的のため、本報では、理論的な厳密さや正確な値の決定よりも実用性に重点を置いた簡易法について述べたものである。このような簡易法であっても、その精度は実用的に十分なものである。他の補正因子（(1.3)式における $g_s, f_s$ ）の決定の不確かさはきわめて大きく、この不確かさが、肺内Pu量および被曝線量の不確かさを決定しているのであり、 $X/\alpha$ 比や $\bar{E}$ の精度はそう大して問題にならないといっても過言ではない。この観点から、緊急時の目的では、比例計数管とNaI検出器を組合せた同時計数検出器で十分であるといえる。製作した同時計数検出器は、すでに6年以上も経過しているが、何のトラブルもなく必要時に簡単に使用でき、実用性の高いことが実証されている。しかし、Pu以外の核種が混在する場合、 $X/\alpha$ 比の決定は非常に繁雑になりその精度も低下する欠点がある。

平均実効エネルギーの推定は、きわめて経験的なものであるが、緊急時にその近似的な値を知りたい場合に便利であろう。正確な値は、同位体分析を行い同位体比を明確にした後に計算すればよい。

以上管理に役立つよう实际的に述べたが、 $X/\alpha$ 比の決定については、それぞれの装置についてその手順をマニュアルとしてまとめておけばさらに便利になろう。

## 謝 辞

試作した同時計数検出器の校正に使用した $^{241}\text{Am}$ とPu電着線源は、体内放射能課の服部隆充氏に製作していただいた。ここに記して謝意を表す。

## 文 献

- 1) 城谷 孝他：日本原子力学会誌，18〔9〕，572（1976）
- 2) T. Shirotani and M. Fujita；J. Nucl. Sci. Technol.，10〔5〕，301（1973）
- 3) K. L. Swinth；IEEE Trans. Nucl. Sci.，NS-18，125（1971）
- 4) K. L. Swinth；BNWL-715，Part 1，20（1968）
- 5) P. Axel；Rev. Sci. Instr.，25，391（1954）

## 結 言

前章まで、Pu の  $X/\alpha$  比決定の基本的な考え方を説明し、比例計数管と NaI 検出器を組合せた同時計数検出器の例を述べ、それを用いた Pu の  $X/\alpha$  比の簡易決定法を述べた。また、測定した  $X/\alpha$  比の値から、その Pu の平均実効エネルギーの経験的簡易推定法についてもふれた。

緊急時の第1段階の被曝線量の推定は、正確な値より概算値でよいからより迅速に決定することが強く要求される。正確な線量算定は、必要に応じて後でゆっくり行えばよい。従って、 $X/\alpha$  比も平均実効エネルギーも、とりあえずその概算値が求まればよい。この目的のため、本報では、理論的な厳密さや正確な値の決定よりも実用性に重点を置いた簡易法について述べたものである。このような簡易法であっても、その精度は実用的に十分なものである。他の補正因子（(1.3)式における  $g_s, f_s$ ）の決定の不確かさはきわめて大きく、この不確かさが、肺内 Pu 量および被曝線量の不確かさを決定しているのであり、 $X/\alpha$  比や  $\bar{\epsilon}$  の精度はそう大して問題にならないといっても過言ではない。この観点から、緊急時の目的では、比例計数管と NaI 検出器を組合せた同時計数検出器で十分であるといえる。製作した同時計数検出器は、すでに6年以上も経過しているが、何のトラブルもなく必要時に簡単に使用でき、実用性の高いことが実証されている。しかし、Pu 以外の核種が混在する場合、 $X/\alpha$  比の決定は非常に繁雑になりその精度も低下する欠点がある。

平均実効エネルギーの推定は、きわめて経験的なものであるが、緊急時にその近似的な値を知りたい場合に便利であろう。正確な値は、同位体分析を行い同位体比を明確にした後に計算すればよい。

以上管理に役立つよう实际的に述べたが、 $X/\alpha$  比の決定については、それぞれの装置についてその手順をマニュアルとしてまとめておけばさらに便利になる。

## 謝 辞

試作した同時計数検出器の較正に使用した  $^{241}\text{Am}$  と Pu 電着線源は、体内放射能課の服部隆充氏に製作していただいた。ここに記して謝意を表す。

## 文 献

- 1) 城谷 孝他：日本原子力学会誌，18 [9]，572 (1976)
- 2) T. Shirotani and M. Fujita；J. Nucl. Sci. Technol.，10 [5]，301 (1973)
- 3) K. L. Swinth；IEEE Trans. Nucl. Sci.，NS-18，125 (1971)
- 4) K. L. Swinth；BNWL-715, Part 1, 20 (1968)
- 5) P. Axel；Rev. Sci. Instr.，25，391 (1954)

第1表 問題となる Pu の同位体と娘核種のデータ

Isotope	Half-life (years)	Physical data				ICRP data (Lung)				
		Radiation	Energy	Abundance (%)	Specific activity ( $\mu\text{Ci/g}$ )	Effective half-life (days)	$\epsilon$ (MeV)	MPLB		(MPC) <sub>a</sub> ( $\mu\text{Ci/cm}^3$ )
								(nCi)	( $\mu\text{g}$ )	
$^{238}\text{Pu}$	87	$\alpha$ {	55 MeV	72	17.54 $\times 10^6$	360	57	15	8.55 $\times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-11}$
			545 MeV	28						
		LX-rays	17 KeV (av)	114*						
		$\gamma$	44 KeV	0.034						
$^{239}\text{Pu}$	$2.4 \times 10^4$	$\alpha$ {	515 MeV	88	617 $\times 10^4$	364	53	16	0.26	$4 \times 10^{-11}$
			511 MeV	11						
		others	1							
		LX-rays	17 KeV (av)	46*						
		$\gamma$ {	39 KeV	0.007						
			52 KeV	0.02						
$^{240}\text{Pu}$	$6.5 \times 10^3$	$\alpha$ {	517 MeV	76	23 $\times 10^5$	364	53	16	6.96 $\times 10^{-2}$	$4 \times 10^{-11}$
			512 MeV	24						
		LX-rays	17 KeV (av)	115*						
		$\gamma$	45 KeV	0.045						
$^{241}\text{Pu}$	14	$\beta$	Max. 20 KeV	99.996	$112 \times 10^6$	339	0.053	$16 \times 10^3$	0.14	$4 \times 10^{-8}$
		$\alpha$	49 MeV	0.004						
		$\gamma$	100-145 KeV	0.0012						
$^{242}\text{Pu}$	$3.8 \times 10^5$	$\alpha$ {	49 MeV	76	$4 \times 10^3$	363	51	15	3.75	$4 \times 10^{-11}$
			486 MeV	24						
		LX-rays	17 KeV (av)	10						
		$\gamma$	44 KeV	0.01						
$^{241}\text{Am}$	$4.6 \times 10^2$	$\alpha$ {	549 MeV	85	3.24 $\times 10^6$	363	57	15	4.63 $\times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-10}$
			544 MeV	13						
		others	2							
		LX-rays	17 KeV (av)	369						
		$\gamma$ {	264 KeV	25						
			43 KeV	0.06						
			596 KeV	359						

\*この値は Swinth の測定値である<sup>(2)</sup>。

第2表 異なった同位体組成比をもつ Pu の例

## Pu 同位体組成 (weight %)

Pu 試料	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-242	Pu-241	Am-241	備考
No. 1	0.0071	95.6	3.83	0.0077	0.24	0.0053	計算*
No. 2	0.009	92.8	6.1	0.3	0.8	0.0045	文献**
No. 3	0.0073	85.15	13.36	0.055	0.81	0.61	計算*
No. 4	0.058	66.12	25.62	2.95	4.71	0.54	"
No. 5	0.92	58.59	20.84	4.41	14.32	0.92	"
No. 6	0.84	40.15	29.26	12.18	15.93	1.64	"
No. 7	0.51	32.98	35.79	12.76	16.98	0.99	"
No. 8	0.0074	94.93	5.29	0.015	0.34	0.045	文献**
No. 9	0.0003	96.65	3.23	0.0022	0.115	—	"
No. 10	—	80.0	16.0	1.5	2.5	—	"
No. 11	—	70.0	21.0	3.0	6.0	—	"
No. 12	—	90.0	8.1	0.5	1.4	—	"
No. 13	—	91.3	7.81	0.04	0.85	—	測定***
No. 14	<0.0697	97.27	2.57	—	<0.0907	—	"
No. 15	1.37	57.4	20.5	4.6	15.3	0.97	計算*
No. 16	0.68	43.3	26.8	10.2	17.7	1.35	"
No. 17	0.60	45.3	34.1	4.9	14.4	0.75	"
No. 18	0.072	57.9	31.6	3.8	5.9	0.68	"
No. 19	0.68	45.2	25.0	10.4	17.8	0.97	"
No. 20	0.0073	82.3	16.6	0.071	1.0	0.047	"
No. 21	0.62	75.28	14.39	1.39	8.32	0.48	測定***
No. 22	0.494	68.18	22.02	2.037	7.268	0.053	"
No. 23	0.101	38.408	45.624	5.165	10.702	1.110	"
No. 24	0.09	77.68	18.50	0.51	3.22	0.029	"
No. 25	0.016	90.538	8.537	0.066	0.843	0.027	"
No. 26	0.02	90.50	8.56	0.05	0.87	0.029	"
No. 27	0.00342	97.358	2.579	0.00291	0.0564	—	"
No. 28	0.09	77.91	18.36	0.49	3.15	0.035	"

\* 異なった型の原子炉内で1年間に生成する Pu 量を理論的に算出したものから求めた同位体組成比

\*\* 論文等に発表された Pu 同位体組成比 (実際に分析した値と考えてよい)

\*\*\* 実際に Pu 試料を分析し同位体比を決定したことが明らかであるもの

第3表 第2表の Pu について算出した各種パラメータ

Pu 試料	$\left(\frac{X}{\alpha}\right)_T$	$\left(\frac{X}{\alpha}\right)_{Pu}$	$\frac{\alpha_{238}}{\alpha_{Pu}}$	$\frac{\alpha_{239}}{\alpha_{Pu}}$	$\frac{\alpha_{240}}{\alpha_{Pu}}$	$\frac{\alpha_{239}+\alpha_{240}}{\alpha_{Pu}}$	$\frac{\alpha_{Am}}{\alpha_T}$	$\bar{\epsilon}$ (Mev)	one MPLB 当りの X- ray (dps)
No. 1	0.057	0.056	0.018	0.854	0.128	0.982	0.0025	53.1	33.0
No. 2	0.0614	0.0607	0.022	0.786	0.193	0.979	0.002	53.1	35.5
No. 3	0.128	0.072	0.015	0.621	0.363	0.984	0.198	54.0	73.5
No. 4	0.128	0.089	0.093	0.371	0.536	0.907	0.137	54.0	67.7
No. 5	0.133	0.104	0.657	0.147	0.195	0.342	0.108	55.8	70.1
No. 6	0.155	0.107	0.614	0.103	0.280	0.383	0.181	55.7	80.5
No. 7	0.145	0.107	0.465	0.106	0.428	0.534	0.143	55.0	75.0
No. 8	0.065	0.059	0.018	0.812	0.170	0.982	0.020	53.2	38.0
No. 9	0.054	0.054	0.00078	0.889	0.111	1.000	—	53.0	31.6
No. 10	0.075	0.075	—	0.572	0.427	1.000	—	53.0	45.1
No. 11	0.082	0.082	—	0.471	0.527	1.000	—	53.0	45.2
No. 12	0.063	0.063	—	0.749	0.251	1.000	—	53.0	36.4
No. 13	0.063	0.063	—	0.758	0.242	1.000	—	53.0	36.4
No. 14	0.062	0.062	0.156	0.768	0.076	0.844	—	53.6	36.0
No. 15	0.130	0.107	0.743	0.110	0.146	0.256	0.089	56.0	68.8
No. 16	0.151	0.106	0.574	0.128	0.296	0.424	0.174	55.6	92.0
No. 17	0.133	0.105	0.497	0.123	0.370	0.493	0.103	55.2	70.0
No. 18	0.137	0.094	0.104	0.295	0.600	0.895	0.154	54.0	75.1
No. 19	0.140	0.105	0.580	0.136	0.280	0.416	0.133	55.5	49.7
No. 20	0.081	0.076	0.014	0.562	0.423	0.985	0.017	53.1	46.6
No. 21	0.118	0.097	0.577	0.247	0.176	0.423	0.076	55.4	63.4
No. 22	0.101	0.098	0.482	0.235	0.283	0.518	0.0095	55.1	54.7
No. 23	0.156	0.104	0.121	0.162	0.716	0.878	0.197	54.1	84.1
No. 24	0.086	0.084	0.148	0.451	0.400	0.851	0.0088	54.0	48.1
No. 25	0.069	0.066	0.036	0.713	0.251	0.964	0.011	53.5	39.7
No. 26	0.070	0.066	0.044	0.707	0.249	0.956	0.012	53.5	40.0
No. 27	0.053	0.053	0.009	0.902	0.089	0.991	—	53.0	31.0
No. 28	0.087	0.084	0.149	0.453	0.398	0.851	0.0106	53.6	48.7

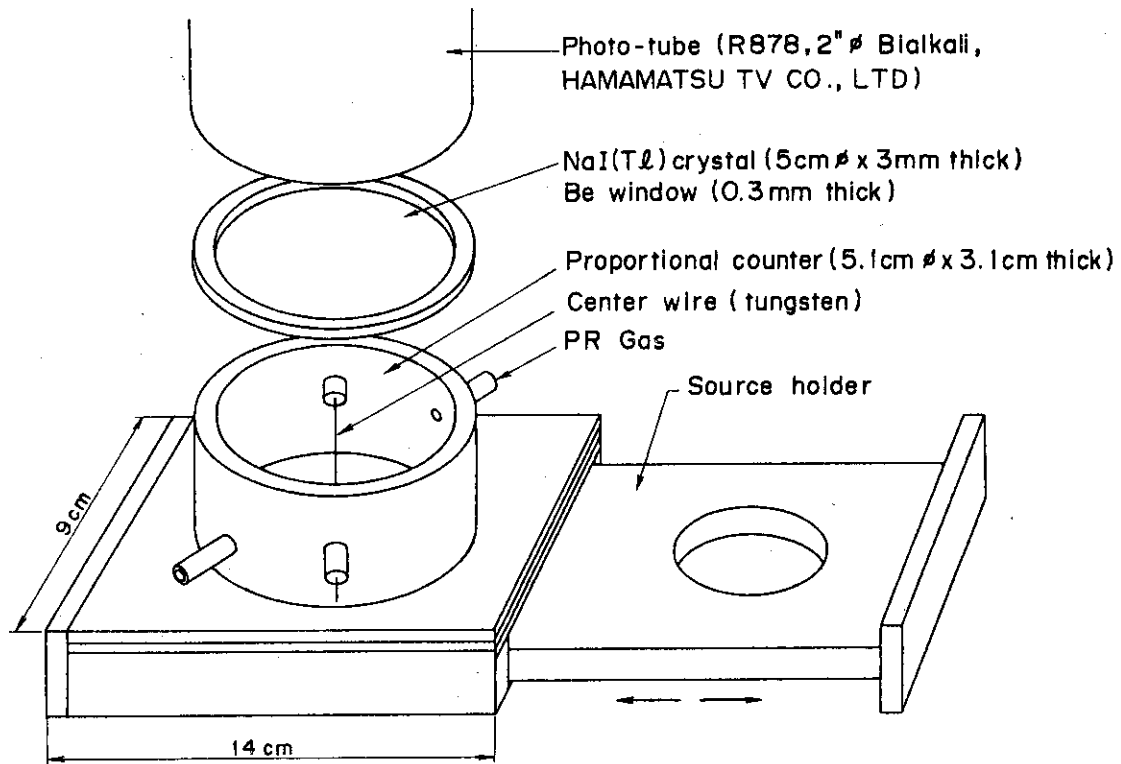
$\alpha_{238}, \alpha_{239}, \alpha_{240}$  :  $^{238}\text{Pu}, ^{239}\text{Pu}, ^{240}\text{Pu}$  の各  $\alpha$  放射能

$\alpha_{Pu}$  : Pu 同位体の全  $\alpha$  放射能

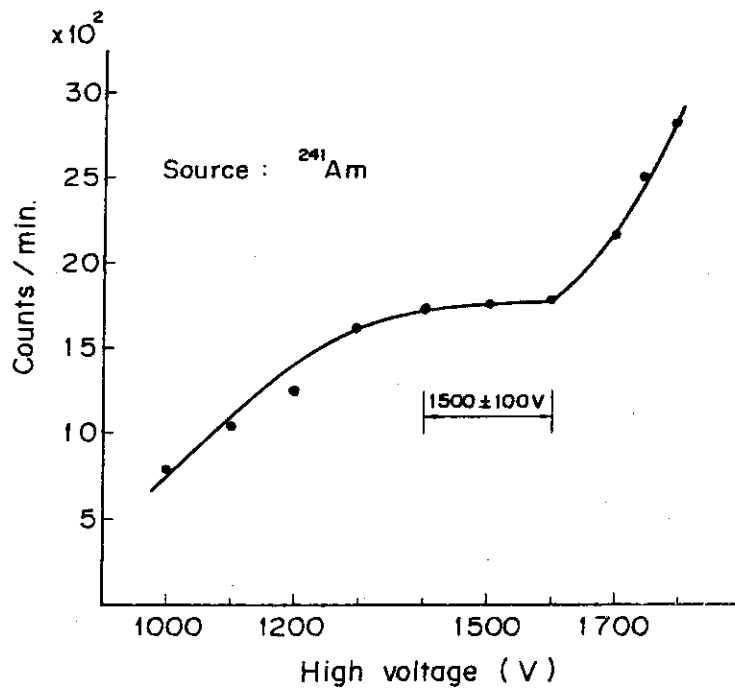
$\alpha_{Am}$  : Pu 中の  $^{241}\text{Am}$  の放射能

$\alpha_T$  : Pu 同位体と  $^{241}\text{Am}$  の全  $\alpha$  放射能

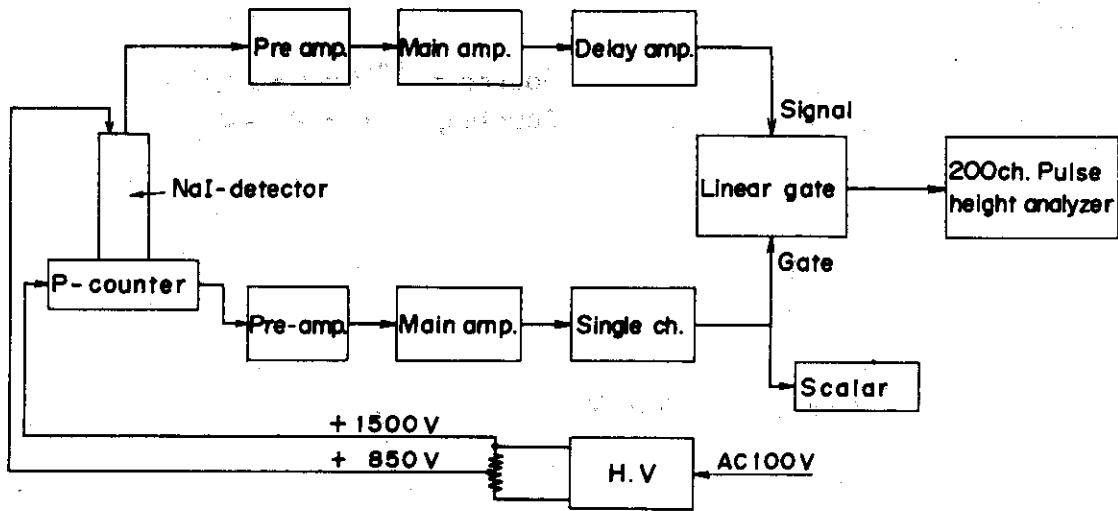




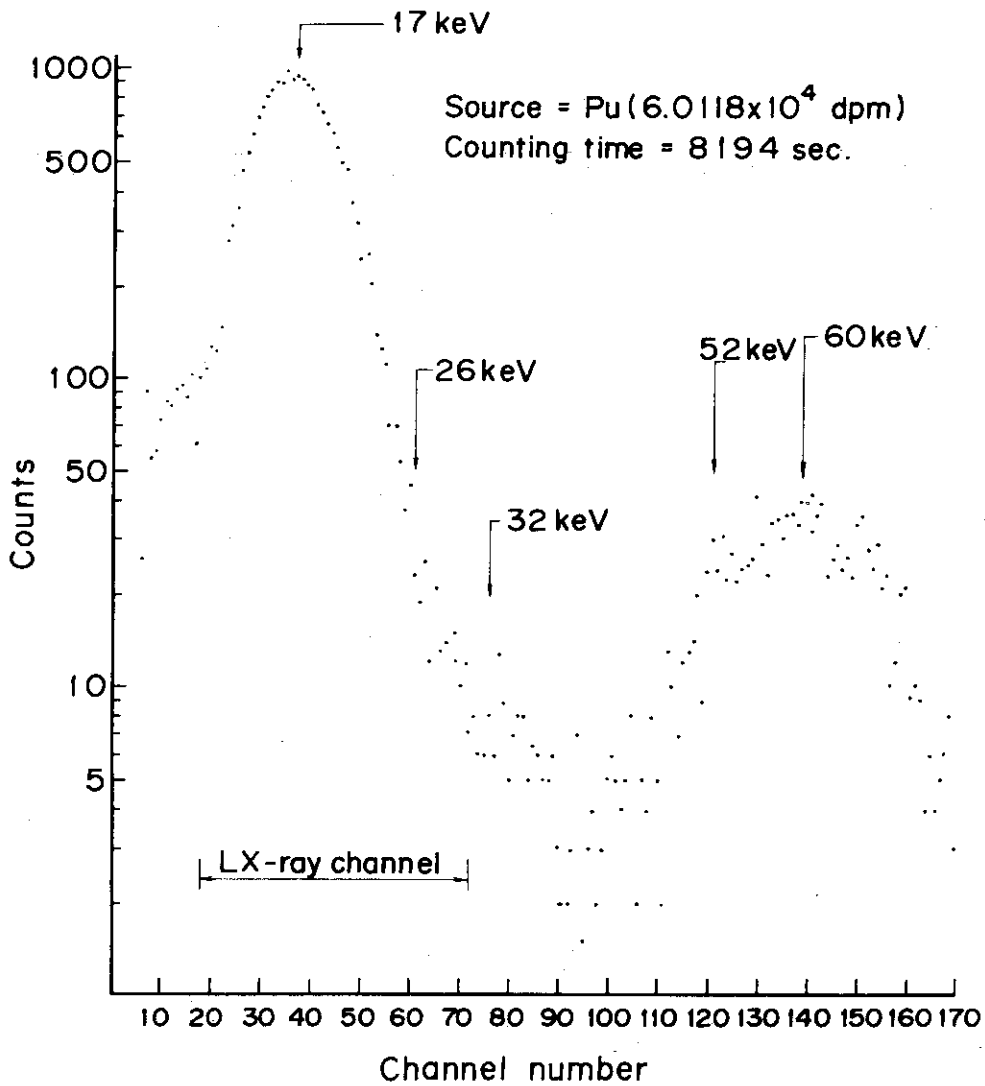
第1図 比例計数管とNaI検出器を組合せた  
X- $\alpha$ 同時計数検出器の例



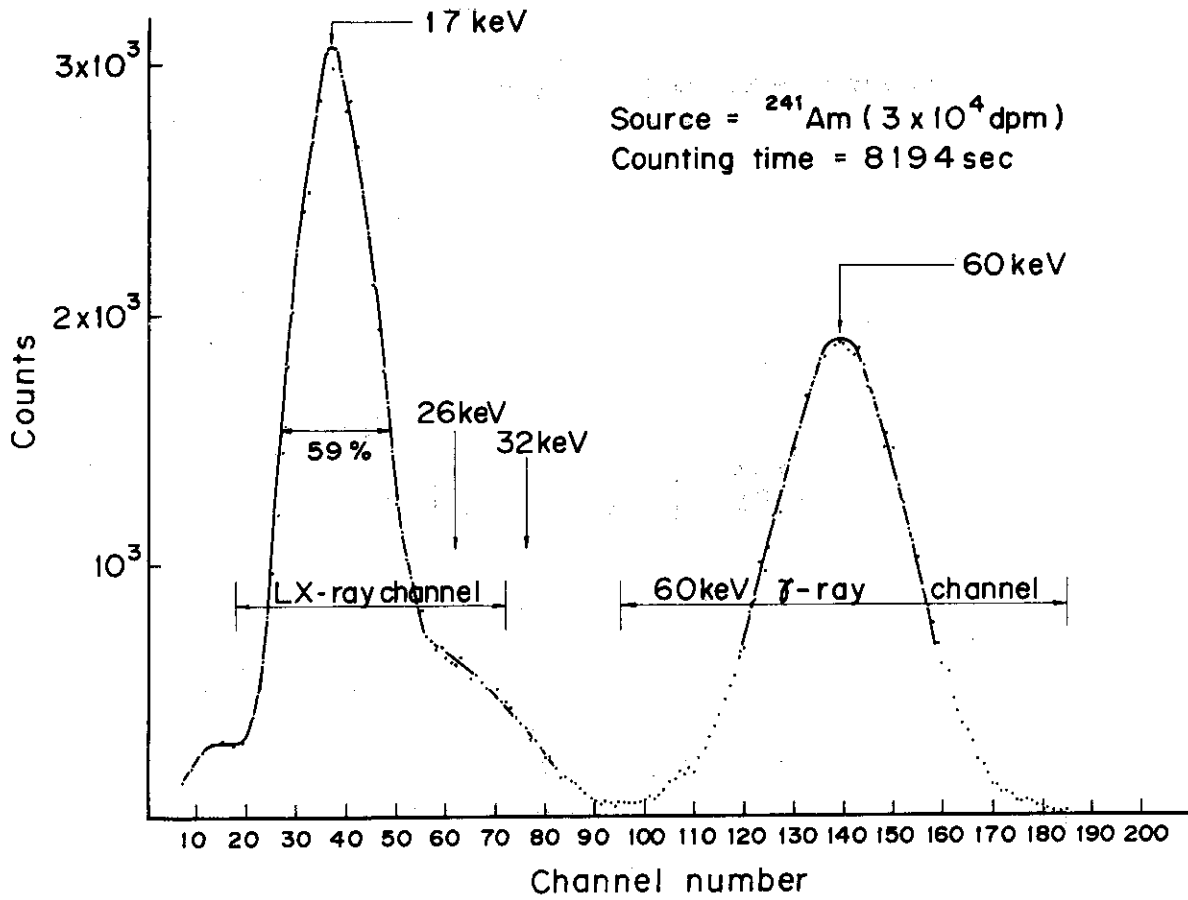
第2図 比例計数管プラントー曲線



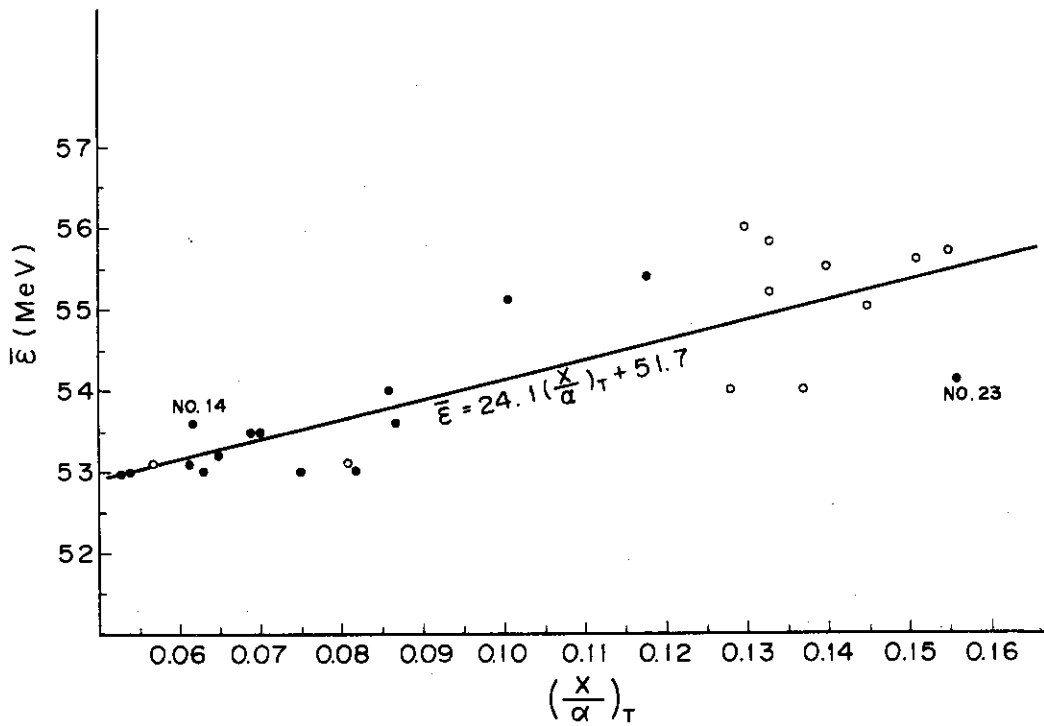
第3図 同時計数検出器の電子回路構成



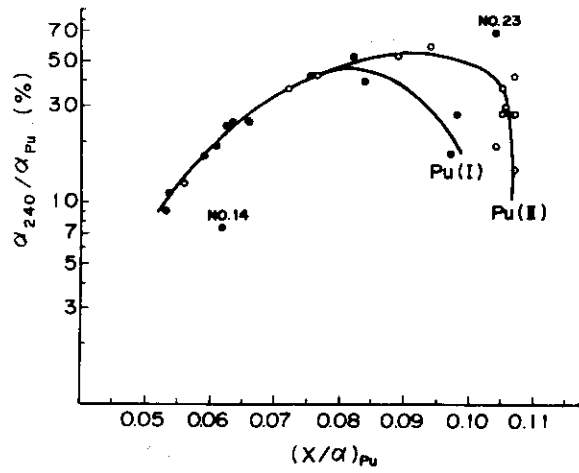
第4図 同時計数検出器により得られたPuの X- $\alpha$ コインシデンススペクトル



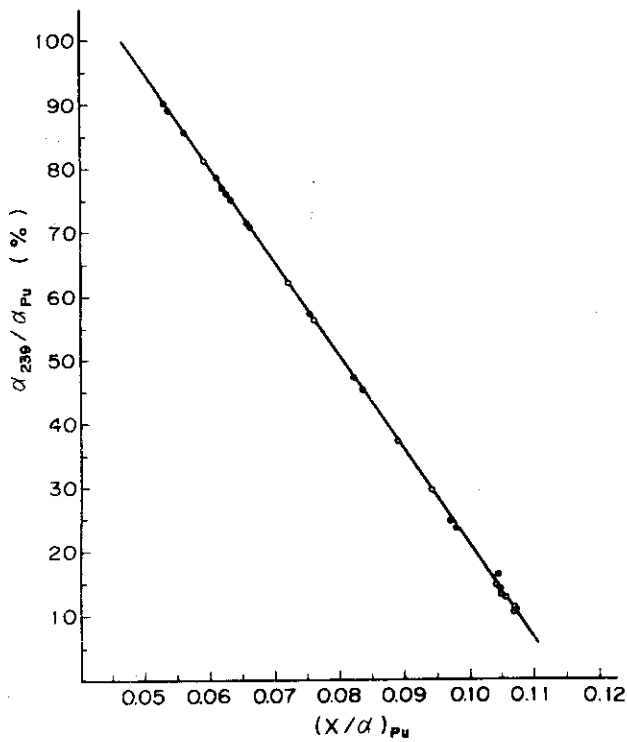
第5図 同時計数検出器により得られた  $^{241}\text{Am}$  の X- $\alpha$ コンシデンススペクトル



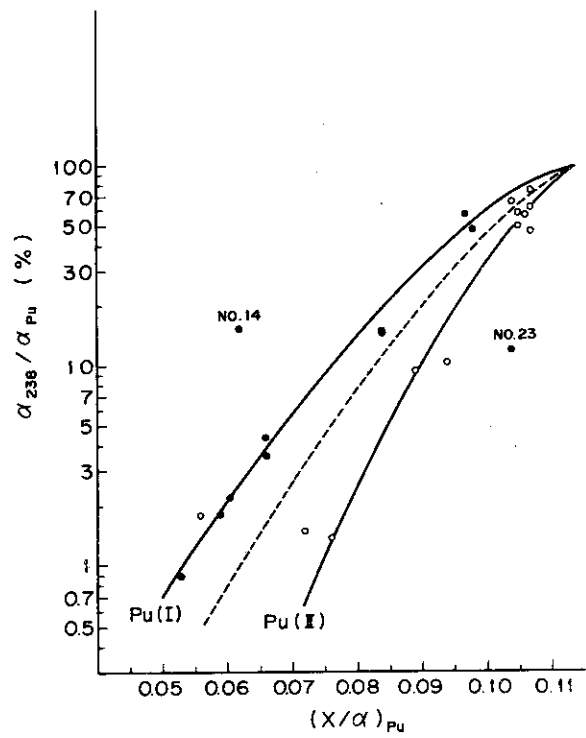
第6図 第2表のPuについて算出した  $(X/\alpha)_T$  と 平均実効エネルギー  $\bar{E}$  との関係



第8図 第2表のPuについて算出した  $(X/\alpha)_{Pu}$  と  $\alpha_{240}/\alpha_{Pu}$  との関係



第7図 第2表のPuについて算出した  $(X/\alpha)_{Pu}$  と  $\alpha_{239}/\alpha_{Pu}$  との関係



第9図 第2表のPuについて算出した  $(X/\alpha)_{Pu}$  と  $\alpha_{238}/\alpha_{Pu}$  との関係