

社内資料

PNC 1605-97-002

本資料は2007年10月 〆日付けで登録区分、
変更する。

[技術情報室]

体内放射能計測技術高度化研究（Ⅱ）

（動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書）

1997年3月

名古屋大学工学部

森 千鶴夫

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

この資料は、動力炉・核燃料開発事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒319-11
茨城県那珂郡東海村大字村松4-23
動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

1997年3月

体内放射能計測技術高度化研究（Ⅱ）

（動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書）

名古屋大学工学部 原子核工学科

森 千鶴夫

要 旨

動力炉・核燃料開発事業団東海事業所では、体内放射能の定量のため鉄室内に相対検出効率61%のHPGe検出器が2台設置されていて、ヒューマン・カウンターとして使用されている。得られた測定結果から内部被曝線量を評価するためには検出効率の校正が重要である。この校正のために水ボックス・ファントムを用いているが、体格補正は行われていない。しかし、異常時には個人の体格情報に基づく評価が必要で、特に男女間や成人と子供などのように体格が大きく異なる場合には大きな差をもたらす。この様な観点から、体格による検出効率補正を必要としない γ - γ 同時計測法による放射能絶対測定法を体内放射能測定に適用するため、その基礎研究を行った。複数の ^{60}Co 線源および ^{46}Sc 線源を作製し、 $4\pi\beta$ - γ 同時計測法により崩壊率を決定し、これらの線源を用いて γ - γ 同時計測法により絶対測定を行った。 ^{60}Co の場合、20cm程度までの線源-検出器間距離では、10-80kBqの放射能を10%以内の精度で決定できた。一方、複数の線源を幾何学的効率が異なるように分布させた場合でも、実際の値よりも測定値が小さく評価されるが、配置を考慮すれば10%程度の系統的ずれ以内で測定しうる事が判明した。 ^{46}Sc の場合にも ^{60}Co と同等の結果が得られ、この方法が一般的に適用可能であることが証明された。

目次

第1章	はじめに	...	(1)
第2章	サムピーク法の測定原理	...	(4)
2. 1	点線源に対するサムピーク法の原理	...	(4)
2. 2	分布線源に対するサムピーク法の拡張	...	(7)
2. 3	ピーク面積の決定法	...	(13)
2. 4	角度相関に基づくサムピークの補正	...	(15)
2. 4. 1	^{60}Co の角度相関	...	(15)
2. 4. 2	^{46}Sc の角度相関	...	(16)
2. 5	エネルギー校正と全計数率の補正	...	(17)
第3章	サムピーク法の実験装置および測定方法	...	(19)
3. 1	相対検出効率35%のHPGe検出器の測定配置	...	(19)
3. 2	相対検出効率61%のHPGe検出器の測定配置	...	(21)
3. 3	使用線源	...	(22)
3. 3. 1	^{60}Co 線源	...	(22)
3. 3. 2	^{46}Sc 線源	...	(22)
第4章	^{60}Co 線源の測定結果および考察	...	(24)
4. 1	相対検出効率35%のHPGe検出器による測定結果および考察	...	(24)
4. 1. 1	点線源の測定	...	(24)
4. 1. 2	仮想分布線源の測定	...	(26)
4. 2	相対検出効率61%のHPGe検出器による測定結果および考察	...	(33)
4. 1. 1	点線源の測定	...	(33)
4. 1. 2	仮想分布線源の測定	...	(33)
第5章	^{46}Sc 線源の測定結果および考察	...	(42)
5. 1	相対検出効率35%のHPGe検出器による測定結果および考察	...	(42)
5. 1. 1	点線源の測定	...	(42)
5. 1. 2	仮想分布線源の測定	...	(50)
5. 2	相対検出効率61%のHPGe検出器による測定結果および考察	...	(50)
5. 2. 1	点線源の測定	...	(50)
5. 2. 2	仮想分布線源の測定	...	(50)

第6章	まとめと今後の課題	...	(65)
6.1	γ 線サムピーク法の他の核種への検討	...	(65)
6.2	まとめと今後の課題	...	(66)
	参考文献	...	(66)

第1章 はじめに

1895年11月のレントゲンによるX線の発見に続き、1896年2月のベクレルがウラン鉱石から放射線が出ていることを発見して以来100年が過ぎた。ところがX線発見の翌年には、X線被曝による皮膚炎が報告され、1902年にはX線による慢性皮膚炎が遂にガンになって死亡するという恐ろしい例が生じた。しかし、X線には物質透過性があるということで、人体その他色々のものの内部を透視することに使われ、その後放射性同位元素であるラジウムからの放射線の蛍光作用の利用へと広がっていった。X線の場合は外部被曝であるが、ラジウムの場合は放射性物質を体内に摂取し被曝する内部被曝であった。1938年にはハーンとストラスマンによる核分裂の発見により巨大なエネルギーが得られることが判明し、軍事目的から始まり平和的に対してもエネルギーそのものの利用が始まった。1954年には水爆実験の死の灰による、第5福竜丸の久保山愛吉の死は内部被曝と外部被曝の両方を複合して受けた結果と考えられる。

外部被曝の場合、フィルム・バッジ、TLD、ポケット線量計などの種々の個人モニターを用いて、その外部被曝線量をある程度直接的に測定することが可能である。しかし、内部被曝の場合、それらを直接的に測定しうるモニターは全くない。そのため内部被曝線量を求めるためには、推定した放射性物質の体内量から計算により算出するのが一般的である。体内の放射性物質の量を推定する方法としては、環境中の放射性物質の濃度から計算する方法と、人体について直接測定する方法が用いられている。環境中の放射性物質の濃度から推定するためには、まず作業環境中の空気中放射性物質濃度を決定する。次に、作業時間から算出した作業中の吸入空気量をもとに、身体内に入った放射性物質の量と存在量を推定する。経口摂取の場合も、飲食物中の放射性物質の濃度から、同じような手順により体内量を推定することができる。

一方、人体について測定する方法としては、ヒューマン・カウンターで測定する直接法、および尿などの排泄物を測定することにより、排泄物中の放射性物質

量から求める間接法とがある。間接法はバイオ・アッセイ法ともいわれ、主として尿中に排泄される物質の量と体内量の量的関係から、放射性物質の体内量を求める。この方法の精度は低い、純 β 放出核種の場合にはヒューマン・カウンターでは測定できないので、唯一の方法といえる。ヒューマン・カウンターはホール・ボディ・カウンター（全身放射能測定装置）とも呼ばれ、宇宙線などの自然放射線をできるだけ遮蔽した中に人間を入れて、体内の微量の放射性物質から放出される γ 線を測定する装置である。体内摂取直後に放射性物質の量を測定するには、バイオ・アッセイ法では時間がかかりすぎるため、ヒューマン・カウンターで測定するのが適している。

ヒューマン・カウンターによるピーク計数率の決定は容易ではあるが、その値から放射性物質の量へ換算するための検出効率の決定は困難である。水ボックス・ファントムを用いることにより、全身に均等分布する場合の検出効率を推定しようが、実際に均等分布として扱える核種は少なく、さらに個人の体格の補正は難しい。その上、異常時には個人の体格情報を含めた詳細な内部被曝評価が必要な場合があり、特に体格の異なる外国人や女性に対する測定では重要になる。また、原子力防災対策の観点からは、子供を含む様々な体格の一般公衆の体内放射能測定は集団としての内部被曝評価にとっても重要である。

一般的な放射能絶対測定法の1つに γ - γ 同時計測法がある。対象とする核種が β 崩壊に引き続き複数個の γ 線のどれか1対の γ 線がカスケード関係にあり、さらにクロスオーバーの γ 線を放出しないときにはこの方法が適用可能である。いろいろある同時計測法で共通する特徴は、検出効率を明確に求めることなく放射能を決定することが可能な点である。体内摂取された放射性同位元素のように、単独では検出効率を決定できない場合に有用と考えられ、この方法が応用できる可能性がある。しかしながら、この方法は1個の原子核の崩壊に基づく γ 線が同時に検出器に入射する必要があり、幾何学的な検出効率が小さいと精度が低下するばかりでなく、測定できなくなる可能性もある。ところで、体内摂取直後では経口摂取であっても吸入摂取であっても、胃や肺に蓄積すると考えられるので、

かなり大きな幾何学的な検出効率で測定が可能と考えられる。また長時間経過後でも、特定臓器・組織に蓄積または濃縮される場合には、より高い精度で測定できることが考えられる。

本委託研究の目的は、これらの観点に基づき、最も代表的な核種であり、しかも原子力施設において重要な核種である ^{60}Co に対して相対検出効率35%の高純度Ge検出器を用いて、その適用性および精度に関する基礎研究を行うことである。さらに、より大きな検出器を用いた場合には、どのように改善されるか調べること、および他の核種に対して応用した場合にも同様の結果が得られるかを調べるために、その1例として ^{46}Sc に対して同様の測定を行い、一般化について検討することも本研究の目的である。

本報告書の構成は次の通りである。第2章では $\gamma-\gamma$ 同時計測法による放射能絶対測定法の原理について述べる。第3章では、この方法を検証するために特別に作成した測定系を含む実験的手法について述べる。第4章では ^{60}Co 線源を用いての基礎的な測定結果および仮想分布線源に対する測定結果とその考察について述べる。第5章では、 ^{46}Sc に対する測定結果とその考察について述べる。第6章では適用可能な他の核種および測定方法の確立が望まれる核種に対する検討について述べる。最後に第7章では、今回の委託研究のまとめと今後の課題について述べる。

第2章 サムピーク法の測定原理

2. 1 点線源に対するサムピーク法の原理

^{60}Co は、図2.1のように β 崩壊に引き続いて1173keVおよび1333keVの2本の γ 線をカスケードに放出する。また、 ^{46}Sc も同様に図2.2のように889keVと1121keVの2本の γ 線をカスケードに放出する。1個のHPGe検出器を用いてこのような核種の γ 線スペクトルを測定すると、2つの γ 線ピークの他に、2本の γ 線が検出器に同時に入射して、それぞれのエネルギーを足し合わせたエネルギーの γ 線のように検出されたサムピークが現れる。図2.3に示した ^{60}Co の γ 線スペクトルでは、1173keVと1333keVの2本の γ 線のサムピークが2506keVに現れている。同様に図2.4に示した ^{46}Sc の γ 線スペクトルでは、889keVと1121keVの2本の γ 線のサムピークが2010keVに現れている。そこで、以下の取り扱いでは、カスケードに放出される2本の γ 線をそれぞれ γ_1 、 γ_2 とし、サムピークを γ_{12} とする。 ^{60}Co の場合には、 γ_1 は1173keVの γ 線、 γ_2 は1333keVの γ 線であり、 ^{46}Sc の場合には γ_1 は889keVの γ 線、 γ_2 は1121keVの γ 線となる。

測定対象となる線源を点線源と仮定すると、線源の崩壊率 N_0 [Bq]とHPGe検出器を用いて測定した γ 線スペクトルのピーク γ_1 、 γ_2 に検出された γ 線計数率(ピーク面積) N_{γ_1} 、 N_{γ_2} [cps]との間には、次式のような関係が成り立つ。

$$N_{\gamma_1} = N_0 \varepsilon_1^p (1 - \varepsilon_2^t) \quad (2.1.1)$$

$$N_{\gamma_2} = N_0 \varepsilon_2^p (1 - \varepsilon_1^t) \quad (2.1.2)$$

$\varepsilon_1^p, \varepsilon_2^p$: γ_1 、 γ_2 のピーク検出効率(γ_1 、 γ_2 がピークに検出される検出効率)

$\varepsilon_1^t, \varepsilon_2^t$: γ_1 、 γ_2 の全検出効率(γ_1 、 γ_2 が波高分布曲線のどこかに検出される検出効率)

式(2.1.1)は、 γ_1 がピークに検出されるためには、 γ_1 が検出効率 ε_1^p でピークに検出されるとともに、同時に放出された γ_2 が全く検出されないことが必要であるということを表している。 γ_2 がピークに検出される場合も同様に式(2.1.2)が成り立つ必要がある。

また、サムピークは γ_1 、 γ_2 が同時に検出されたピークなので、このピーク面積 $N_{\gamma_{12}}$ [cps]と線源の崩壊率 N_0 [Bq]との間には、

$$N_{\gamma_{12}} = N_0 \varepsilon_1^p \varepsilon_2^p \quad (2.1.3)$$

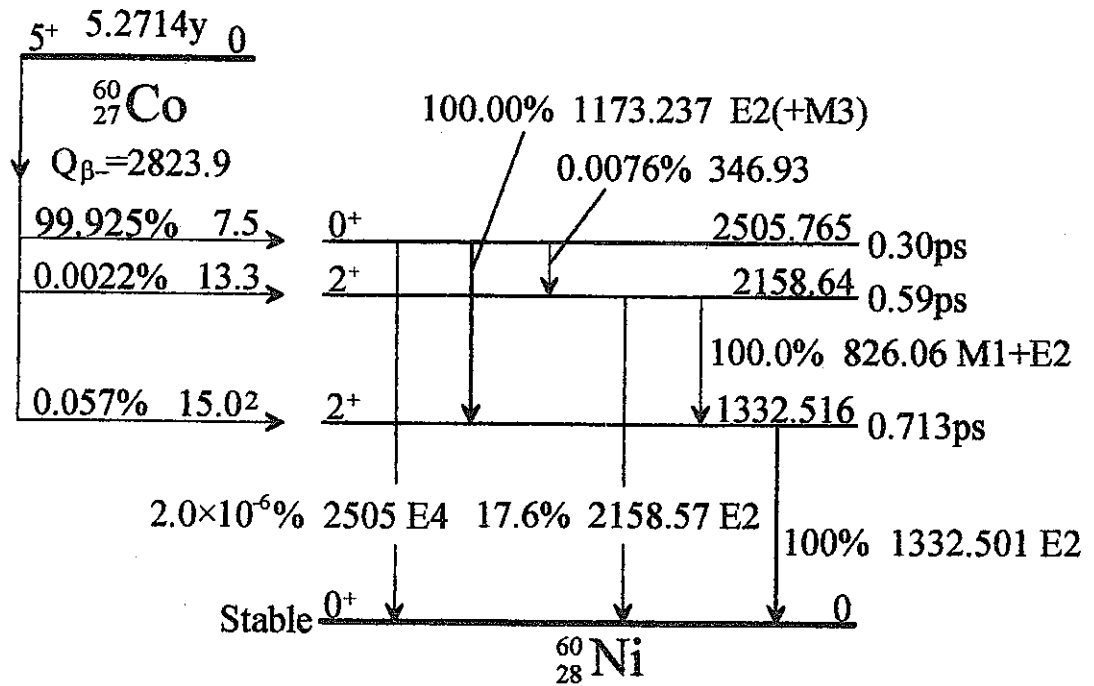


図2.1 ^{60}Co の崩壊図式(エネルギーの単位はkeV)

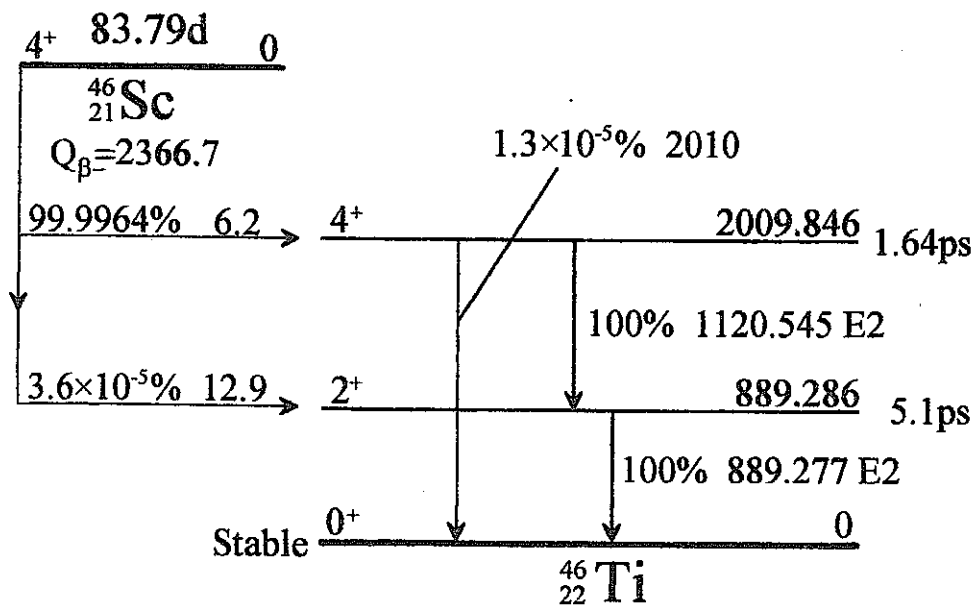


図2.2 ^{46}Sc の崩壊図式(エネルギーの単位はkeV)

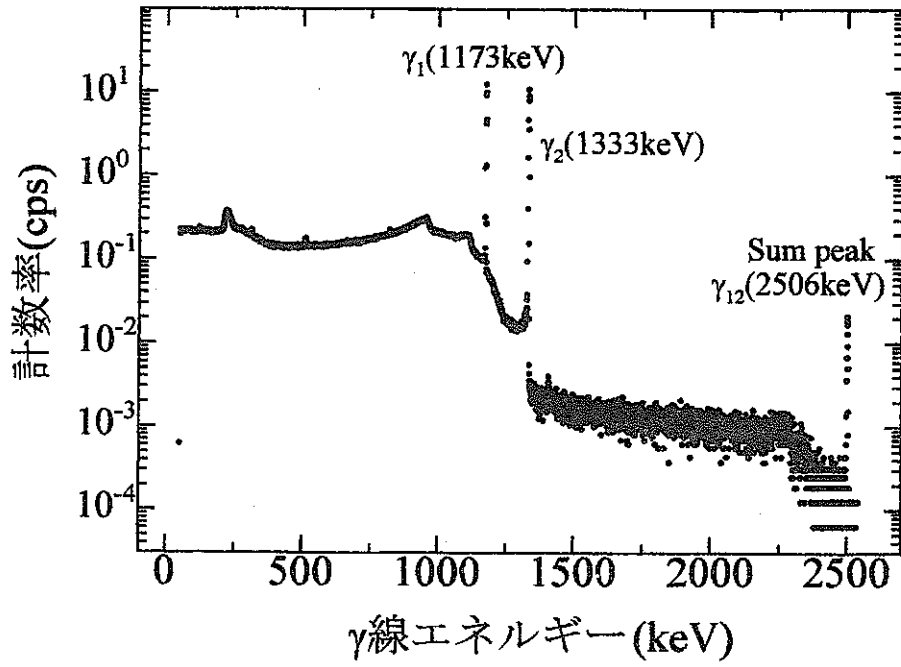


図2.3 HPGe検出器を用いて測定した ^{60}Co の γ 線スペクトル

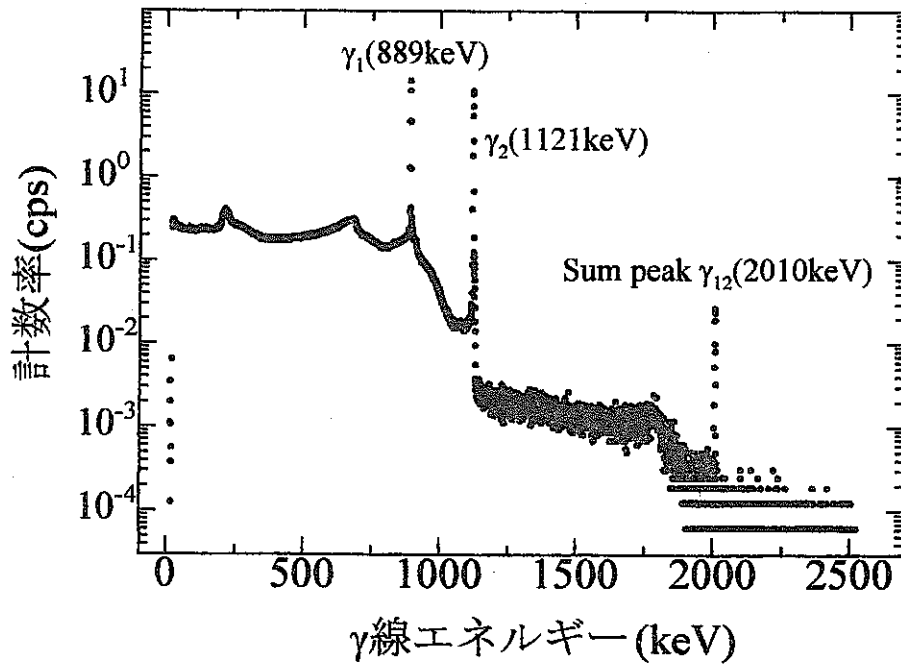


図2.4 HPGe検出器を用いて測定した ^{46}Sc の γ 線スペクトル

という関係が成り立つ。

ところで、線源から放出された γ 線のうちで、検出器に検出されなかった γ 線は全計数率を N [cps]とおくと、 $(N_0 - N)$ と表すことができ、これは γ_1 、 γ_2 のどちらの γ 線も検出されない場合であるから、次式のように表すことができる。

$$N_0 - N^t = N_0(1 - \varepsilon_1^t)(1 - \varepsilon_2^t) \quad (2.1.4)$$

式(2.1.1)、(2.1.2)を変形すると、次式が得られる。

$$\frac{N_{\gamma 1}}{\varepsilon_1^p} = N_0(1 - \varepsilon_2^t) \quad (2.1.1a)$$

$$\frac{N_{\gamma 2}}{\varepsilon_2^p} = N_0(1 - \varepsilon_1^t) \quad (2.1.2a)$$

式(2.1.4)に式(2.1.1a)、(2.1.2a)を代入すると、

$$\begin{aligned} N_0 - N^t &= N_0(1 - \varepsilon_1^t)(1 - \varepsilon_2^t) = \frac{N_0(1 - \varepsilon_1^t)N_0(1 - \varepsilon_2^t)}{N_0} \\ &= \frac{1}{N_0} \times \frac{N_{\gamma 2}}{\varepsilon_2^p} \times \frac{N_{\gamma 1}}{\varepsilon_1^p} = \frac{N_{\gamma 1} \cdot N_{\gamma 2}}{N_0 \varepsilon_1^p \varepsilon_2^p} \\ &= \frac{N_{\gamma 1} \cdot N_{\gamma 2}}{N_{\gamma 12}} \end{aligned}$$

の関係が得られる。よって

$$N_0 = N^t + \frac{N_{\gamma 1} \cdot N_{\gamma 2}}{N_{\gamma 12}} \quad (2.1.5)$$

となるので、検出効率 ε_1^p 、 ε_2^p 、 ε_1^t 、 ε_2^t は式からすべて消去される。

このように、測定対象が点線源と仮定できる場合、測定によって得られる γ 線スペクトルのピーク面積 $N_{\gamma 1}$ 、 $N_{\gamma 2}$ 、 $N_{\gamma 12}$ [cps]と全計数率 N [cps]のみから線源の崩壊率 N_0 [Bq]を求めることができる。

2. 2 分布線源に対するサムピーク法の拡張

前節では、測定する対象が点線源と仮定できる場合、測定によって得られる γ 線スペクトルのピーク面積および全計数率から線源の崩壊率が決定できることを示した。実際に人体内に放射性物質が摂取された場合、比較的短時間のうちに測定を行えば、このような方法で人体内に存在する放射性物質の量を決定できると考えられる。

しかしながら、放射性物質が摂取された後、測定するまでに時間の経過がある場合、体内の血液による循環活動などにより、放射性物質は人体内に広がっていくと考えられる。そのため、このように線源が分布している場合に適用できるサムピーク法について、点線源に対するサムピーク法の原理を応用して考える必要がある。

ここでは分布線源をn個の線源として考える。線源の崩壊率を N_{i0} ($=N_{10}, N_{20}, \dots, N_{n0}$, ただし $i=1, 2, 3, \dots, n$)とおき、 γ_1, γ_2 に対するピーク検出効率を各線源について $\varepsilon_{i1}^p, \varepsilon_{i2}^p$ 、全検出効率を各線源について $\varepsilon_{i1}^t, \varepsilon_{i2}^t$ とおく。点線源の場合の結果を応用して γ 線スペクトルから得られるピーク面積 $N_{\gamma 1}, N_{\gamma 2}, N_{\gamma 12}$ 、および全計数率 N^t は、次のように表すことができる。

$$N_{\gamma 1} = \sum_{i=1}^n \{N_{i0} \varepsilon_{i1}^p (1 - \varepsilon_{i2}^t)\} \quad (2.2.1)$$

$$N_{\gamma 2} = \sum_{i=1}^n \{N_{i0} \varepsilon_{i2}^p (1 - \varepsilon_{i1}^t)\} \quad (2.2.2)$$

$$N_{\gamma 12} = \sum_{i=1}^n \{N_{i0} \varepsilon_{i1}^p \varepsilon_{i2}^p\} \quad (2.2.3)$$

$$\sum_{i=1}^n \{N_{i0}\} - N^t = \sum_{i=1}^n \{N_{i0} (1 - \varepsilon_{i1}^t) (1 - \varepsilon_{i2}^t)\} \quad (2.2.4)$$

測定は1個の検出器で行うので、各線源に対する検出効率の違いは線源の検出器に対する立体角によって決定される。このため、ある1つの線源についての検出効率をもとにすると、他の線源の検出効率はすべてその実数倍として表すことができると仮定する。

そこで、第1の線源のピーク検出効率 $\varepsilon_{11}^p, \varepsilon_{12}^p$ を $\varepsilon_1^p, \varepsilon_2^p$ とおき、全検出効率 $\varepsilon_{11}^t, \varepsilon_{12}^t$ を $\varepsilon_1^t, \varepsilon_2^t$ とおいて、それぞれの線源の検出効率を検出効率係数 k_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$)を用いて、 $\varepsilon_1^p, \varepsilon_2^p, \varepsilon_1^t, \varepsilon_2^t$ で表すと、

$$\begin{aligned} \varepsilon_{i1}^p &= k_i \varepsilon_1^p \\ \varepsilon_{i2}^p &= k_i \varepsilon_2^p \\ \varepsilon_{i1}^t &= k_i \varepsilon_1^t \\ \varepsilon_{i2}^t &= k_i \varepsilon_2^t \end{aligned}$$

(ただし、 $\varepsilon_1^p = \varepsilon_{11}^p, \varepsilon_2^p = \varepsilon_{12}^p, \varepsilon_1^t = \varepsilon_{11}^t, \varepsilon_2^t = \varepsilon_{12}^t$ なので $k_1=1$)

と書くことができる。同様に第1の線源の崩壊率 N_{10} を N_0 とおいて、それぞれの線源の崩壊率 N_{i0} を崩壊率係数 h_i で表すと

$$N_{i0} = h_i N_{10} \quad (\text{ただし、} N_0 = N_{10} \text{なので } h_1=1)$$

となるので、式(2.2.1)~(2.2.4)は

$$\begin{aligned} N_{\gamma 1} &= \sum_{i=1}^n \{N_{i0} \varepsilon_{i1}^p (1 - \varepsilon_{i2}^t)\} \\ &= \sum_{i=1}^n \{h_i N_0 k_i \varepsilon_1^p (1 - k_i \varepsilon_2^t)\} \\ &= N_0 \varepsilon_1^p \sum_{i=1}^n \{h_i k_i (1 - k_i \varepsilon_2^t)\} \end{aligned} \quad (2.2.1a)$$

$$\begin{aligned}
N_{\gamma 2} &= \sum_{i=1}^n \{N_{i0} \varepsilon_{i2}^p (1 - \varepsilon_{i1}^t)\} \\
&= \sum_{i=1}^n \{h_i N_0 k_i \varepsilon_2^p (1 - k_i \varepsilon_1^t)\} \\
&= N_0 \varepsilon_2^p \sum_{i=1}^n \{h_i k_i (1 - k_i \varepsilon_1^t)\} \quad (2.2.2a)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{\gamma 12} &= \sum_{i=1}^n \{N_{i0} \varepsilon_{i1}^p \varepsilon_{i2}^p\} \\
&= \sum_{i=1}^n \{h_i N_0 k_i \varepsilon_1^p k_i \varepsilon_2^p\} \\
&= N_0 \varepsilon_1^p \varepsilon_2^p \sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\} \quad (2.2.3a)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^n \{N_{i0}\} - N^t &= \sum_{i=1}^n \{N_{i0} (1 - \varepsilon_{i1}^t) (1 - \varepsilon_{i2}^t)\} \\
\sum_{i=1}^n \{h_i N_0\} - N^t &= \sum_{i=1}^n \{h_i N_0 (1 - k_i \varepsilon_1^t) (1 - k_i \varepsilon_2^t)\} \\
N_0 \sum_{i=1}^n \{h_i\} - N^t &= N_0 \sum_{i=1}^n \{h_i (1 - k_i \varepsilon_1^t) (1 - k_i \varepsilon_2^t)\} \quad (2.2.4a)
\end{aligned}$$

の4つの式に書き表すことができる。これを解くため、まず式(2.2.4a)を変形して、

$$\begin{aligned}
N_0 \sum_{i=1}^n \{h_i\} - N^t &= N_0 \sum_{i=1}^n \{h_i - h_i k_i (\varepsilon_1^t + \varepsilon_2^t) + h_i k_i^2 \varepsilon_1^t \varepsilon_2^t\} \\
&= N_0 \sum_{i=1}^n \{h_i\} + N_0 (\varepsilon_1^t + \varepsilon_2^t) \sum_{i=1}^n \{h_i k_i\} + N_0 \varepsilon_1^t \varepsilon_2^t \sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\} \\
-N^t &= -N_0 (\varepsilon_1^t + \varepsilon_2^t) \sum_{i=1}^n \{h_i k_i\} + N_0 \varepsilon_1^t \varepsilon_2^t \sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\} \\
\frac{\left(\sum_{i=1}^n \{h_i k_i\}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\}} N_0 - N^t &= \frac{\left(\sum_{i=1}^n \{h_i k_i\}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\}} N_0 - N_0 (\varepsilon_1^t + \varepsilon_2^t) \sum_{i=1}^n \{h_i k_i\} + N_0 \varepsilon_1^t \varepsilon_2^t \sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\} \\
&= \frac{N_0}{\sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\}} \left[\left(\sum_{i=1}^n \{h_i k_i\}\right)^2 - (\varepsilon_1^t + \varepsilon_2^t) \sum_{i=1}^n \{h_i k_i\} \sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\} + \varepsilon_1^t \varepsilon_2^t \left(\sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\}\right)^2 \right] \\
&= \frac{N_0}{\sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\}} \left(\sum_{i=1}^n \{h_i k_i\} - \varepsilon_1^t \sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\} \right) \left(\sum_{i=1}^n \{h_i k_i\} - \varepsilon_2^t \sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\} \right) \\
&= \frac{N_0}{\sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\}} \left(\sum_{i=1}^n \{h_i k_i\} - \sum_{i=1}^n \{h_i k_i k_i \varepsilon_1^t\} \right) \left(\sum_{i=1}^n \{h_i k_i\} - \sum_{i=1}^n \{h_i k_i k_i \varepsilon_2^t\} \right) \\
&= \frac{N_0}{\sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\}} \sum_{i=1}^n \{h_i k_i (1 - k_i \varepsilon_1^t)\} \sum_{i=1}^n \{h_i k_i (1 - k_i \varepsilon_2^t)\}
\end{aligned}$$

よって、

$$\frac{\left(\sum_{i=1}^n \{h_i k_i\}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\}} N_0 - N^t = \frac{N_0}{\sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\}} \sum_{i=1}^n \{h_i k_i (1 - k_i \varepsilon_1^t)\} \sum_{i=1}^n \{h_i k_i (1 - k_i \varepsilon_2^t)\} \quad (2.2.4b)$$

を得る。

次に、式(2.2.1a)～(2.2.3a)を変形すると、次の関係が得られる。

$$\frac{N_{\gamma 1}}{N_0 \varepsilon_1^p} = \sum_{i=1}^n \{h_i k_i (1 - k_i \varepsilon_2^t)\} \quad (2.2.1b)$$

$$\frac{N_{\gamma 2}}{N_0 \varepsilon_2^p} = \sum_{i=1}^n \{h_i k_i (1 - k_i \varepsilon_1^t)\} \quad (2.2.2b)$$

$$N_{\gamma 12} = N_0 \varepsilon_1^p \varepsilon_2^p \sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\} \quad (2.2.3b)$$

これらを式(2.2.4b)に代入すると、

$$\begin{aligned} \frac{\left(\sum_{i=1}^n \{h_i k_i\}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\}} N_0 - N^t &= \frac{N_0}{\sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\}} \times \frac{N_{\gamma 2}}{N_0 \varepsilon_2^p} \times \frac{N_{\gamma 1}}{N_0 \varepsilon_1^p} \\ &= \frac{N_{\gamma 1} \cdot N_{\gamma 2}}{N_0 \varepsilon_1^p \varepsilon_2^p \sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\}} \\ &= \frac{N_{\gamma 1} \cdot N_{\gamma 2}}{N_{\gamma 12}} \end{aligned}$$

結果として、線源の検出効率 ε_1^p 、 ε_2^p 、 ε_1^t 、 ε_2^t はすべて消去されて、

$$\frac{\left(\sum_{i=1}^n \{h_i k_i\}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\}} N_0 = N^t + \frac{N_{\gamma 1} \cdot N_{\gamma 2}}{N_{\gamma 12}} \quad (2.2.5)$$

を導き出すことができる。

このようにして、サンプイク法の原理を分布線源の場合に当てはめてみると、右辺がピーク面積 $N_{\gamma 1}$ 、 $N_{\gamma 2}$ 、 $N_{\gamma 12}$ [cps]と全計数率 N [cps]の項となり、左辺が線源の崩壊率の係数倍となるので、分布線源についても点線源の場合と同様の式になることがわかる。

しかしながら、式(2.2.5)の左辺は、特別な場合以外はすべての線源の崩壊率の和に等しくはならず、通常は線源の崩壊率の和よりも小さい値を与えることがわかる。すべての線源の崩壊率の和を式で表すと、

$$N_{10} + N_{20} + \cdots + N_{n0} = h_1 N_0 + h_2 N_0 + \cdots + h_n N_0 = N_0 \sum_{i=1}^n \{h_i\} \quad (2.2.6)$$

となるので、式(2.2.5)の左辺がこの和以下になることを、次のように証明することができる。

$$\left(\sum_{i=1}^n \{h_i\}\right) N_0 \geq \frac{\left(\sum_{i=1}^n \{h_i k_i\}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\}} N_0 \quad (2.2.7)$$

を証明するためには、線源の崩壊率 N_0 は正の数であるから、係数を比べて

$$\sum_{i=1}^n \{h_i\} \geq \frac{\left(\sum_{i=1}^n \{h_i k_i\}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\}} \quad (2.2.7a)$$

を証明すればよい。ここで $k_i (i=1,2,3,\dots,n)$ は、第1の線源のピーク検出効率 $\epsilon_{i1}^p (= \epsilon_{i1}^p)$ 、 $\epsilon_{i2}^p (= \epsilon_{i2}^p)$ 、全検出効率 $\epsilon_{i1}^t (= \epsilon_{i1}^t)$ 、 $\epsilon_{i2}^t (= \epsilon_{i2}^t)$ に対して、それぞれの線源の検出効率 ϵ_{i1}^p 、 ϵ_{i2}^p 、 ϵ_{i1}^t 、 ϵ_{i2}^t が何倍であるかを表す係数なので、

$$k_i \geq 0, (i=1,2,\dots,n) \quad \text{ただし、} k_1 = 1$$

である。同様に h_i は第1の線源の崩壊率 $N_0 (= N_{10})$ に対して、それぞれの線源の崩壊率 N_{i0} が何倍であるかを表す係数なので、

$$h_i \geq 0, (i=1,2,\dots,n) \quad \text{ただし、} h_1 = 1$$

である。よって、

$$\sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\} > 0$$

だから、

$$\left(\sum_{i=1}^n \{h_i\}\right) \left(\sum_{i=1}^n \{h_i k_i^2\}\right) \geq \left(\sum_{i=1}^n \{h_i k_i\}\right)^2 \quad (2.2.7b)$$

を証明すればよいことになる。

左辺と右辺は、次のようになっているので、

$$(\text{左辺}) = h_1^2 k_1^2 + h_2^2 k_2^2 + \dots + h_n^2 k_n^2 + h_1 h_2 (k_1^2 + k_2^2) + h_1 h_3 (k_1^2 + k_3^2) + \dots + h_{n-1} h_n (k_{n-1}^2 + k_n^2)$$

$$(\text{右辺}) = h_1^2 k_1^2 + h_2^2 k_2^2 + \dots + h_n^2 k_n^2 + h_1 h_2 (2k_1 k_2) + h_1 h_3 (2k_1 k_3) + \dots + h_{n-1} h_n (2k_{n-1} k_n)$$

$j=1,2,3,\dots,n$ を用いて式(2.2.7b)を展開すると、

$$\sum_{i=1}^n \{h_i^2 k_i^2\} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \{h_i h_j (k_i^2 + k_j^2)\} \geq \sum_{i=1}^n \{h_i^2 k_i^2\} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \{h_i h_j (2k_i k_j)\}$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \{h_i h_j (k_i^2 + k_j^2)\} \geq \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \{h_i h_j (2k_i k_j)\}$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \{h_i h_j (k_i^2 + k_j^2)\} - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \{h_i h_j (2k_i k_j)\} \geq 0$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \{h_i h_j (k_i^2 - 2k_i k_j + k_j^2)\} \geq 0$$

ゆえに、

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \{h_i h_j (k_i - k_j)^2\} \geq 0 \quad (2.2.7c)$$

であり、すべての h_i, h_j は正であるから、この式は成り立つ。

また、等号が成立するのは $k_i=1$ より

$$k_i = 1, (i=1, 2, \dots, n)$$

の場合である。すなわち、検出器に対するすべての線源の立体角が等しく、検出効率が等しくなる場合である。このとき、式(2.2.5)は

$$\sum_{i=1}^n \{N_{i0}\} = N^t + \frac{N_{\gamma 1} \cdot N_{\gamma 2}}{N_{\gamma 12}} \quad (2.2.5a)$$

となり、左辺は存在するすべての線源の崩壊率の和に等しくなる。

ところで、検出器に対するすべての線源の立体角が等しく、検出効率が等しくなる場合に限った分布線源に対するサムピーク法の式(2.2.5a)は、式(2.2.1)~(2.2.4)から直接導くこともできる。線源の検出効率はどれも同じになるので、ピーク検出効率を $\varepsilon_1^p, \varepsilon_2^p$ で表し、全検出効率を $\varepsilon_1^t, \varepsilon_2^t$ と表すと、

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^p &= \varepsilon_{11}^p, \varepsilon_{21}^p, \dots, \varepsilon_{n1}^p & \varepsilon_1^t &= \varepsilon_{11}^t, \varepsilon_{21}^t, \dots, \varepsilon_{n1}^t \\ \varepsilon_2^p &= \varepsilon_{12}^p, \varepsilon_{22}^p, \dots, \varepsilon_{n2}^p & \varepsilon_2^t &= \varepsilon_{12}^t, \varepsilon_{22}^t, \dots, \varepsilon_{n2}^t \end{aligned}$$

と書くことができるので、式(2.2.1)~(2.2.4)は、

$$\frac{N_{\gamma 1}}{\varepsilon_1^p} = (1 - \varepsilon_2^t) \sum_{i=1}^n \{N_{i0}\} \quad (2.2.1c)$$

$$\frac{N_{\gamma 2}}{\varepsilon_2^p} = (1 - \varepsilon_1^t) \sum_{i=1}^n \{N_{i0}\} \quad (2.2.2c)$$

$$N_{\gamma 12} = \varepsilon_1^p \varepsilon_2^p \sum_{i=1}^n \{N_{i0}\} \quad (2.2.3c)$$

$$\sum_{i=1}^n \{N_{i0}\} - N^t = (1 - \varepsilon_1^t)(1 - \varepsilon_2^t) \sum_{i=1}^n \{N_{i0}\} \quad (2.2.4c)$$

となるから、

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \{N_{i0}\} - N^t &= \frac{(1 - \varepsilon_1^t) \sum_{i=1}^n \{N_{i0}\} (1 - \varepsilon_2^t) \sum_{i=1}^n \{N_{i0}\}}{\sum_{i=1}^n \{N_{i0}\}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \{N_{i0}\}} \times \frac{N_{\gamma 2}}{\varepsilon_2^p} \times \frac{N_{\gamma 1}}{\varepsilon_1^p} \\ \sum_{i=1}^n \{N_{i0}\} &= N^t + \frac{1}{\sum_{i=1}^n \{N_{i0}\}} \times \frac{N_{\gamma 1}}{\varepsilon_1^p} \times \frac{N_{\gamma 2}}{\varepsilon_2^p} = N^t + \frac{N_{\gamma 1} \cdot N_{\gamma 2}}{\varepsilon_1^p \varepsilon_2^p \sum_{i=1}^n \{N_{i0}\}} \end{aligned}$$

よって、

$$\sum_{i=1}^n \{N_{i0}\} = N^t + \frac{N_{\gamma 1} \cdot N_{\gamma 2}}{N_{\gamma 12}}$$

で、式(2.2.5a)が導き出せる。

このようにして導き出した式(2.2.5)によって、分布線源についてもサムピーク法を応用した線源の崩壊率測定を行うことができる。それぞれの線源の検出効率 $\epsilon_{p_1}^p, \epsilon_{p_2}^p, \epsilon_{p_1}^i, \epsilon_{p_2}^i$ は式から消去されるため、線源の崩壊率を測定によって得られる γ 線スペクトルのピーク面積 $N_{p_1}, N_{p_2}, N_{p_1}$ [cps]と全計数率 N [cps]のみで求めることができる。

しかしながら、すべての線源の検出器に対する立体角が等しく、検出効率が等しくなる場合については式(2.2.5a)にみられるように、求まる値はすべての線源の崩壊率の和に等しくなるが、それ以外では、求まる値はすべての線源の崩壊率の和よりも小さくなることを考慮しなければならない。このような場合、それぞれの線源の検出効率 $\epsilon_{p_1}^p, \epsilon_{p_2}^p, \epsilon_{p_1}^i, \epsilon_{p_2}^i$ は式から消去されるが、求まる値はそれぞれの線源の崩壊率の総和ではなく、各線源の崩壊率に、(第1の線源の検出効率に対するその線源の検出効率の比)²をかけた数値の和となる。

そのため、各線源の検出効率の違いが大きくなるほど、求まる値はすべての線源の崩壊率の和より小さくなる。線源の位置分布が全く知られていない対象を測定する場合には、求めた値がどの程度実際の放射性物質の崩壊率の総和より小さいのかを正確に知ることができない。そのため、分布線源をサムピーク法により測定する場合に、すべての線源の崩壊率の和により近い値を得るためには、分布線源の場所による検出効率の違いができる限り小さくなるように、測定の方法を考慮する必要があると考えられる。

2. 3 ピーク面積の決定法

HPGe検出器で線源を測定した場合に得られる γ 線スペクトルからピーク計数を求めるには、通常は特定の関数形をピークに当てはめる方法が行われる。当てはめに使われる関数としては、ピークに相当するガウス関数、連続スペクトル成分に相当する1次あるいは2次の線形関数を用いる場合が一般的であるが、ピークのテール部や複雑な連続スペクトル成分を表現する点において不十分であり、正確な表現のためには複雑なピーク関数を用いる必要が出てくる。そこで本研究では、 γ_1 と γ_2 のピーク面積を求める際に、関数を当てはめる方法ではなく、Helmerの積分法(1982)を採用した。

図2.5に示すように、ピーク関数を $y(x)$ 、連続スペクトル成分をピークの両端A,Bを結ぶ直線 $b(x)$ として、第1近似のピーク面積 S_1 を求める。

$$S_1 = \int_A^B \{y(x) - b(x)\} dx \quad (2.3.1)$$

次に、この結果を用いて、任意のチャンネルにおける連続スペクトル成分を次式で仮定する。

$$B(x) = \frac{\int_A^x \{y(z) - b(z)\} dz}{S_1} \{y(B) - y(A)\} + y(A) \quad (2.3.2)$$

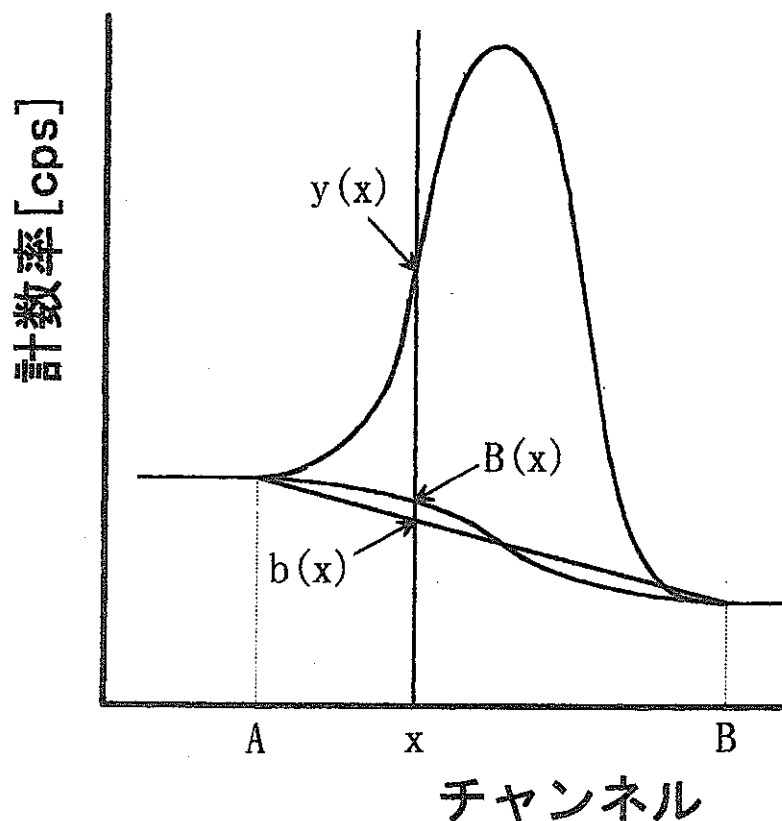


図2.5 Helmerの積分法によるピーク面積決定の模式図

式(2.3.1)と(2.3.2)を用いて、第2近似ピークの面積 S_2 が次式で求められる。

$$S_2 = \int_A^B \{y(x) - B(x)\} dx \quad (2.3.3)$$

この方法は計算機処理が容易で、近似計算を2,3回繰り返せば収束する。実際に作成した計算プログラムでは、5回の繰り返し計算を行って決定した。

Helmerの積分法を適用する γ 線スペクトルのデータは、HPGe検出器による測定で得られた計数を測定時間で割って、チャンネルごとに計数率を求め、それぞれのチャンネルごとのバックグラウンドの計数率を差し引いた値を用いているので、ピーク面積の単位は[cps]となる。

一方、サムピーク γ_{12} のピーク面積は、得られた γ 線スペクトルの形からサムピークのチャンネル範囲を決め、この範囲のチャンネルに検出された(計数の総和)/(測定時間)から、同じチャンネル範囲の(バックグラウンド計数の総和)/(測定時間)を引くことで決定した。これは、バックグラウンドを差し引いてもピークの形にほとんど影響が出ない γ_1 と γ_2 のピークと異なり、計数が少ないサムピークでは、バックグラウンドを差し引くとピークの形が大きく変化し、ピークチャンネルの範囲を決めることが難しいためである。

2. 4 角度相関に基づくサムピークの補正

2. 4. 1 ^{60}Co の角度相関

β 崩壊後の核からカスケードに2本の γ 線が放出される場合、第2の γ 線が放出される方向は第1の γ 線が放出された方向に依存する。線源の位置を原点にとり、第1の γ 線が放出された方向を $\theta=0$ とおくと、第2の γ 線が放出される方向の確率分布は、次の角度相関の式で近似される。

$$W(\theta) = 1 + A_{22}P_2(\cos\theta) + A_{44}P_4(\cos\theta) \quad (2.4.1)$$

ここで、 A_{22} および A_{44} は、核種による定数で、 ^{60}Co の β 崩壊による ^{60}Ni の場合、

$$A_{22}=(0.1015 \pm 0.0032), A_{44}=(0.095 \pm 0.003) \quad (2.4.2)$$

である。また、 $P_2(\cos\theta)$ 、 $P_4(\cos\theta)$ はLegendreの多項式で、

$$P_2(\cos\theta) = \frac{1}{4}(3 \cos(2\theta) + 1) \quad (2.4.3)$$

$$P_4(\cos\theta) = \frac{1}{64}(35 \cos(4\theta) + 20 \cos(2\theta) + 9) \quad (2.4.4)$$

を表しており、これらの式は $x=\cos\theta$ とおくと

$$P_2(x) = \frac{1}{2}(3x^2 - 1) \quad (2.4.3a)$$

$$P_4(x) = \frac{1}{8}(35x^4 - 30x^2 + 3) \quad (2.4.4a)$$

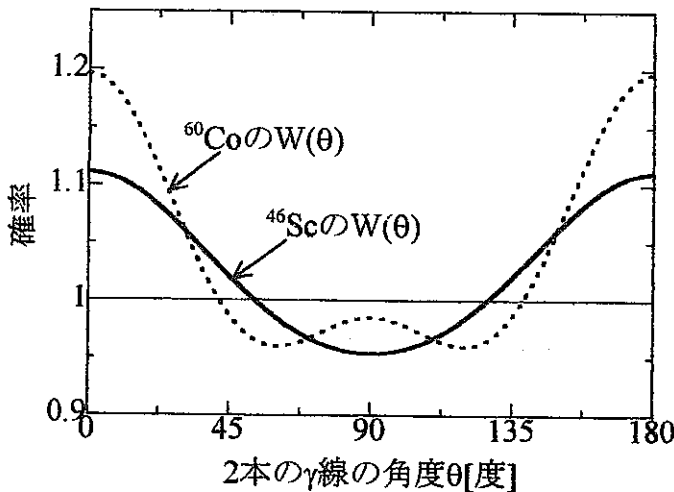


図2.6 ^{46}Sc 、 ^{60}Co の第2の γ 線が放出される方向の確率分布

と表すことができる。図2.6および空間座標に描画した図2.7に示すように、2本目の γ 線は $\theta=0$ および $\theta=\pi$ の方向に放出される確率が高い。この角度相関の効果により、 γ 線スペクトルのサムピークは角度相関がない場合よりも大きく検出されているため、サムピーク面積を補正する必要がある。

本研究では、1個の検出器を用いた測定であるため、近似的

に $\theta=0$ の $W(\theta)$ の値を用いて、検出器に第1の γ 線が入射し、同時に放出された第2の γ 線が角度相関により検出器方向に放出される確率を求めた。式(2.4.1)に $\theta=0$ を代入すると、

$$\begin{aligned} W(0) &= 1 + \frac{A_{22}}{4}(3 \times 1 + 1) + \frac{A_{44}}{64}(35 \times 1 + 20 \times 1 + 9) \\ &= 1 + A_{22} + A_{44} \\ &= 1 + 0.1015 + 0.095 \\ &= 1.1965 \end{aligned} \quad (2.4.5)$$

また、不確かさについては、

$$\sqrt{(0.0032)^2 + (0.003)^2} = 0.0044 \quad (2.4.6)$$

と計算できる。

そこで本研究では、 ^{60}Co 線源の崩壊率を決定する際に、 γ 線スペクトルから得られたサムピーク面積 $N_{\gamma 12}$ [cps]の値を1.1965(0.0044)で割る補正を行った。

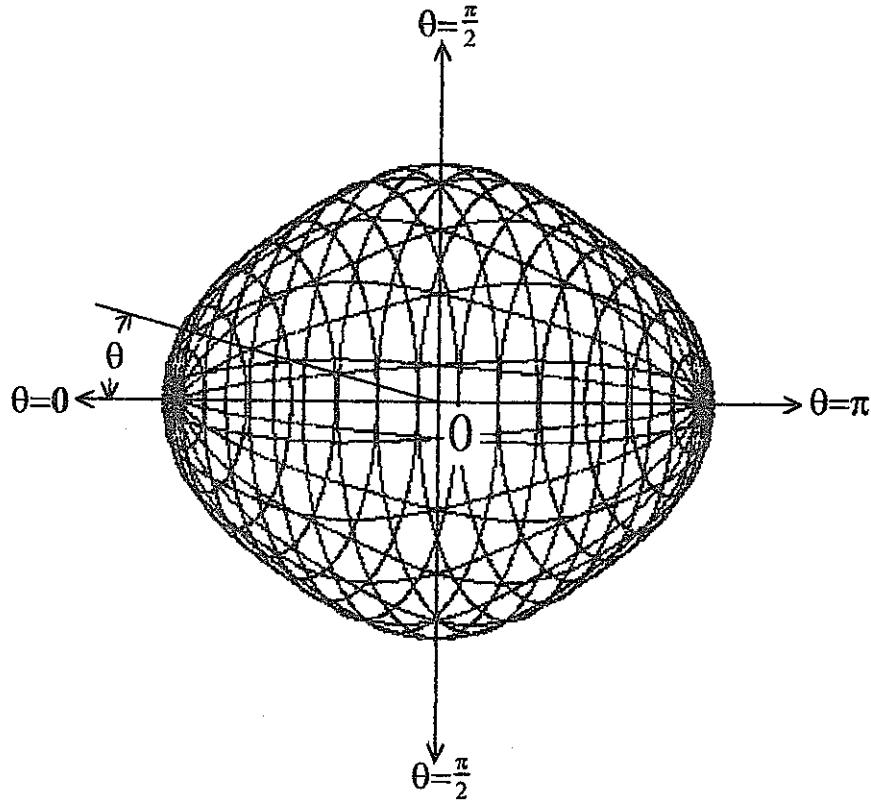


図2.7 ^{60}Co の第2の γ 線が放出される方向の確率分布 $W(\theta)$

2.4.2 ^{46}Sc の角度相関

^{46}Sc の β 崩壊による ^{46}Ti の場合、角度相関の式の定数は、

$$A_{22}=(0.1003 \pm 0.0018), A_{44}=(0.0103 \pm 0.0026)$$

である。図2.6に示すとおり、 ^{46}Sc は ^{60}Co に比べて角度相関による影響が小さい。また、空間座標に描画した $W(\theta)$ を図2.8に示す。 ^{60}Co と同様に $\theta=0$ の $W(\theta)$ の値を用いて、 ^{46}Sc の角度相関によって検出器方向に放出される確率を求めると、式(2.4.1)より、

$$\begin{aligned} W(0) &= 1 + \frac{A_{22}}{4}(3 \times 1 + 1) + \frac{A_{44}}{64}(35 \times 1 + 20 \times 1 + 9) \\ &= 1 + A_{22} + A_{44} \\ &= 1 + 0.1003 + 0.0103 \\ &= 1.1106 \end{aligned} \quad (2.4.7)$$

また、不確かさについては、

$$\sqrt{(0.0018)^2 + (0.0026)^2} = 0.0032 \quad (2.4.8)$$

となる。

そこで、 ^{46}Sc 線源の崩壊率を決定する際には、 γ 線スペクトルから得られたサムピーク面積 $N_{\gamma 12}[\text{cps}]$ の値を1.1106(0.0032)で割る補正を行った。

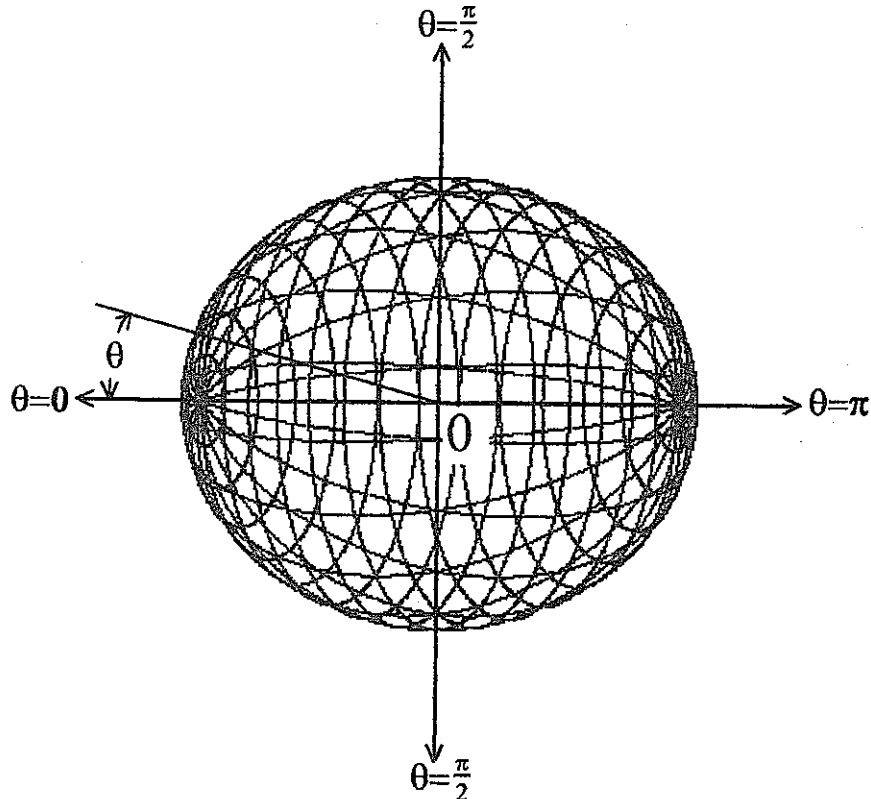


図2.8 ^{46}Sc の第2の γ 線が放出される方向の確率分布 $W(\theta)$

2. 5 エネルギー校正と全計数率の補正

γ 線スペクトルの全計数率 N は、 γ 線エネルギーが0keVに相当するチャンネルからサムピークの高エネルギー側の端のチャンネルまでの範囲に検出された計数の総合計を測定時間で割ることで決定している。このようにして決定した全計数率から、同じチャンネル範囲のバックグラウンドの全計数率を差し引くことで、線源のみの全計数率を決定することができる。

チャンネルに対する γ 線エネルギーを求めるための校正曲線は一次関数で近似した。校正直線の決定には、 ^{60}Co 線源の測定の場合には1173keVと1332keVの2本のピーク、 ^{46}Sc 線源の測定の場合には889keVと1121keVの2本のピークを用いたほか、多数

の γ 線を放出する ^{152}Eu を校正線源として使用した。校正に使用した ^{152}Eu の γ 線エネルギーおよびその放出率を表2.1に示す。

表2.1 エネルギー校正に使用した ^{152}Eu の γ 線エネルギーと放出率

γ 線エネルギー[keV]	放出率[%]
121.783	28.4
244.701	7.5
344.281	26.5
411.115	2.2
444.976	3.1
778.903	12.9
867.388	4.2
1112.116	13.5
1212.950	1.4
1299.124	1.6
1408.011	20.8

全計数率を求める際には、ディスクリミネーターによる0keV付近の計数損失を補正する必要がある。そのため、補正は低チャンネルの計数を一次近似し、0keVまでの計数を推定して加算して求めた。

第3章 実験装置および測定方法

3.1 相対検出効率35%のHPGe検出器を使用する測定装置

γ 線検出器として、ORTEC社製の直径58.1mm、長さ60.2mm、相対検出効率35.2%の同軸型高純度ゲルマニウム半導体検出器(HPGe検出器)を使用した。計数システムは図3.1のように構成される。

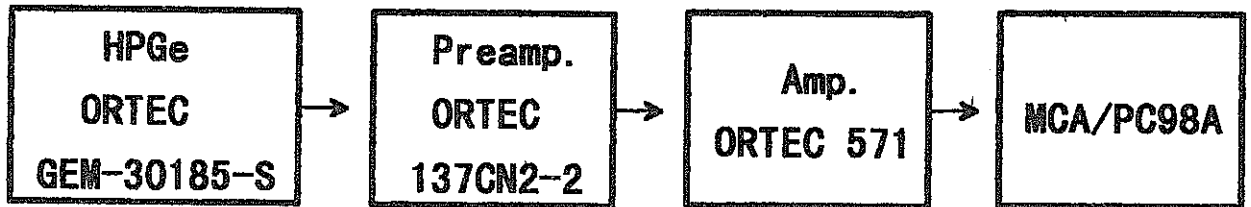


図3.1 第1の計数システムの概略図

このHPGe検出器を使用して、線源を測定するための装置を製作した。図3.2に製作した測定装置の全体図を示す。装置の寸法は、縦と横が35cm、高さが66cmで、検出器を含めた高さは77cmである。この装置では、線源をホルダーに置き、このホルダーを線源プレートに決められた位置にとりつける。ホルダー下部に突起があり、線源プレートの穴にはめることで、線源の位置を固定する。

この装置では、線源プレートを支える位置を変えることで、14通りに線源プレートの高さを設定できる。そのため、0cmから22cmまで2cmおきと5cmおきにHPGe検出器の前面から線源の表面までの距離を調節できる構造になっている。ただし、検出器との接触を避けるため、0cmの場合には実際の線源距離は0.3cmとなる。

また、線源プレートにとりつけるホルダーの位置を変えることにより、10方向に検出器の中心軸から動径方向への距離を0cmから20cmまで、2cmおきと5cmおきに設定できる。線源プレートは2重構造であるため、線源の取り替えの際にはホルダーを取り付ける板のみをスライドさせることができる。

1個の線源を使用する場合と、3個の線源を重ねて使用する場合は線源距離を調節するために、線源をとる溝の深さが0.1cmと0.3cmのホルダーを作製した。

測定はこの装置を10cm厚の鉛箱の中に設置して実験を行った。鉛箱には、鉛からの特性X線を除くため、厚さ0.08cmのカドミウム板および0.04cmの銅板が内張りしてある。鉛箱の内部寸法は縦と横が40cm、高さは78cmである。

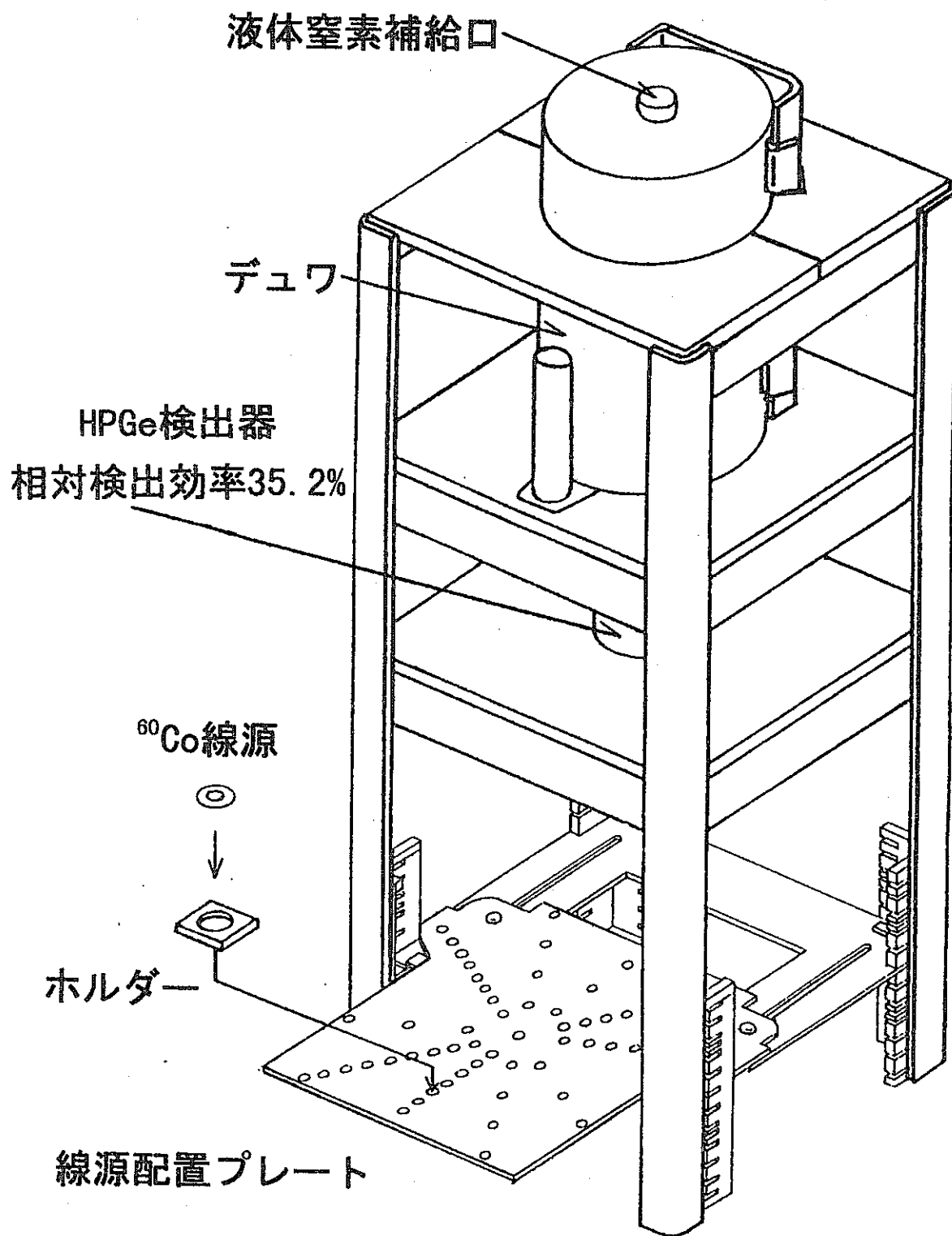


図3.2 相対検出効率35%のHPGe検出器を使用する測定装置

3. 2 相対検出効率61%のHPGe検出器を使用する測定装置

より高い相対検出効率の検出器による測定をCANBERRA社製の相対検出効率61.4%のHPGe検出器を使用して行った。計数システムは動力炉・核燃料開発事業団に設置されていて、図3.3のように構成されている。

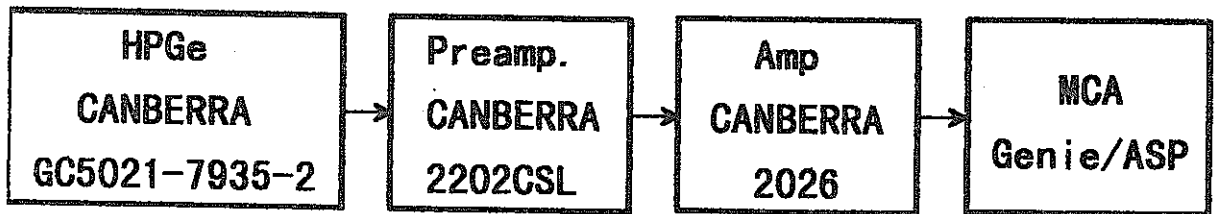


図3.3 第2の計数システムの概略図

同じ線源配置で測定を行うため、この測定では、図3.2に示した測定装置の部品を使用して組立型の測定装置を製作した。製作した測定装置を図3.4に示す。このHPGe検出器は遮蔽のための鉄室内に設置されているため、測定装置を平らな台の上に置き、測定を行った。線源の取り付け方法および線源位置の設定のしくみは、同じ部品を使用しているため、図3.2の測定装置と同じである。

また、遮蔽のための鉄室は、20cm厚の鉄板の内側に3mm厚の鉛板、0.5mm厚の銅板、3mm厚のポリ塩化ビニール板を張った構造となっている。遮蔽用鉄材には、あらかじめ3"φ×3"のNaI検出器を用いて測定し、放射能が0.5dpm/cm³以下と確認されたものが使用されている。鉄室の内部寸法は、開口2m、奥行き2.5m、高さ2mである。

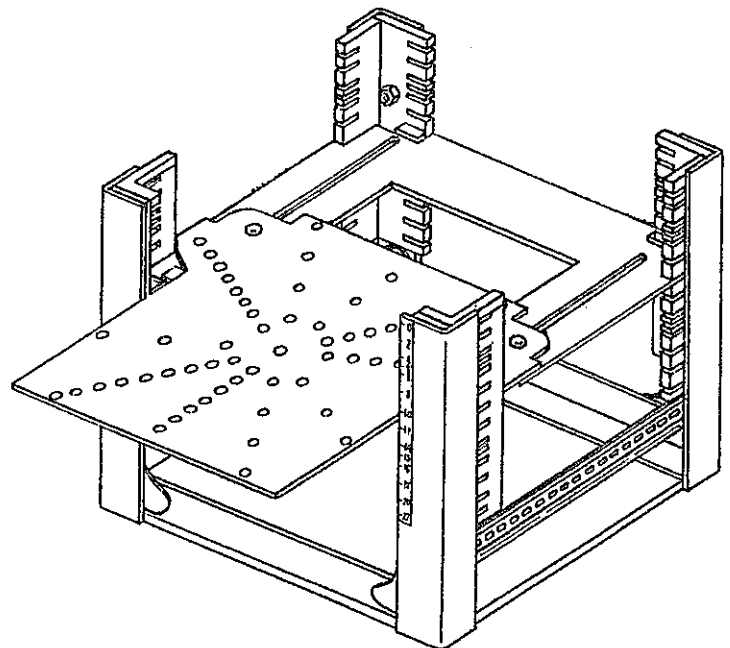


図3.4 組立型の測定装置

3.3 使用線源

3.3.1 ^{60}Co 線源

実験のために、9個の ^{60}Co 線源を作製した。HCl溶液に溶解した ^{60}Co をAuを蒸着したVYNS膜上に滴下し、赤外線ランプで乾燥させた後、同様のAuを蒸着したVYNS膜を被せて線源とした。

$4\pi\beta\text{-}\gamma$ 同時計数法によって各線源の崩壊率を決定した後、上面に厚さ $24\mu\text{m}$ のマイラー膜、下面にアルミ箔を張って補強を行った。崩壊率の異なる測定を行うため、崩壊率がおおよそ 20kBq 、 10kBq 、 7kBq となるように作製した。2個または3個の線源を同時に測定する実験を行うため、崩壊率がほぼ同じ線源を3個ずつ作製した。表3.1に $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 同時計数法によって決定した各線源の崩壊率を示す。一つの線源につき2回の測定を行い、得られた値の平均値を崩壊率とした。

表3.1 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 同時計数法によって決定した ^{60}Co 線源の崩壊率

線源名	崩壊率(不確かさ) [Bq]	測定日
Co1	23345(19)	1995年10月24日
Co2	19790(16)	〃
Co3	19621(16)	1995年10月25日
Co4	13219(10)	〃
Co5	11047(8)	〃
Co6	9172(7)	〃
Co7	7954(6)	〃
Co8	7645(6)	〃
Co9	6620(7)	〃

3.3.2 ^{46}Sc 線源

^{60}Co 線源と同様に、4個の ^{46}Sc 線源を作製した。HCl溶液に溶解した ^{46}Sc をAuを蒸着したVYNS膜上に滴下し、赤外線ランプで乾燥させた後、同様のAuを蒸着したVYNS膜を被せて線源とした。

4 π β - γ 同時計数法によって各線源の崩壊率を決定した後、上面に厚さ24 μ mのマイラー膜、下面にアルミ箔を張って補強を行った。崩壊率がおよそ30kBqの線源を2個、およそ20kBqの線源を2個作製した。表3.2に4 π β - γ 同時計数法によって決定した各線源の放射能強度を示す。Sc71とSc73はそれぞれ2回の測定を行い、Sc72とSc74はそれぞれ3回の測定を行って、得られた値の平均値を崩壊率とした。

表3.2 4 π β - γ 同時計数法によって決定した⁴⁶Sc線源の崩壊率

線源名	崩壊率(不確かさ) [Bq]	測定日
Sc71	28362(21)	1996年8月 3日
Sc72	31786(166)	1996年7月13日
Sc73	23885(39)	1996年8月 3日
Sc74	23601(66)	1996年7月 6日

第4章 ^{60}Co 線源の測定結果および考察

γ 線サムピーク法によって求めた崩壊率を $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 同時計数法により決定された真の崩壊率の値と比較し、測定値の精度について検討する。

作製した線源の崩壊率は6kBqから24kBqなので、これ以上の崩壊率の線源の測定の際には線源を重ね合わせて使用した。1個の線源の厚さは1mm以下なので、3個の線源を重ねた場合でも厚さ3mm以下であり、点線源とみなすことができる。

γ 線サムピーク法によって求めた崩壊率の測定結果を示した以下では、線源配置をわかりやすくするため、線源とHPGe検出器との直線距離を垂直成分と水平成分に分けて、HPGe検出器の中心軸方向成分を線源距離、中心軸方向に垂直な方向の成分を動径方向距離と表した。この線源距離は、線源ホルダー上に配置した線源表面とHPGe検出器の前面との距離である。ただし、グラフ上では、HPGe検出器内の相互作用位置までの距離0.8cmを加えた値で表示してある。線源と相互作用位置までの距離を一定であると仮定すると、線源の検出器に対する立体角は距離の2乗分の1に比例するため、 ^{60}Co の γ_1 、 γ_2 ピーク面積はこの変化に従うものと考えられる。そこで、線源距離を変えて測定を行うことにより、相互作用位置までの距離を0.8cmと決定した。この値には、検出器のふたの厚さ0.3cmが含まれる。また、動径方向距離は線源プレート上でのHPGe検出器の中心軸と線源との距離である。

すべての実験は測定時間のリアルタイムを2000秒で行った。 γ 線サムピーク法によって求めた崩壊率の測定結果の不確かさの主な原因は、サムピークカウントの統計的な不確かさによるため、測定時間を長くすればするほど、測定値の不確かさは小さくなる。しかしながら、人体内の放射性物質の測定を想定しているため、できるかぎり短時間で測定を行う必要がある。このような検討により2000秒を採用することとした。

4. 1 相対検出効率35%のHPGe検出器による測定結果及び考察

4. 1. 1 点線源の測定

図4.1のように、検出器の中心軸上で線源距離を0cmから22cmまで変化させて点線源Co1を測定した結果を図4.2に示す。測定結果は真の崩壊率とよく一致した値が得られた。8cmと10cmの場合の値が小さくなったが、全体として $\pm 10\%$ で一致している。線源距離15cm以上では、サムピークが50カウント以下と小さいので、得られた値の不確かさが大きくなる。

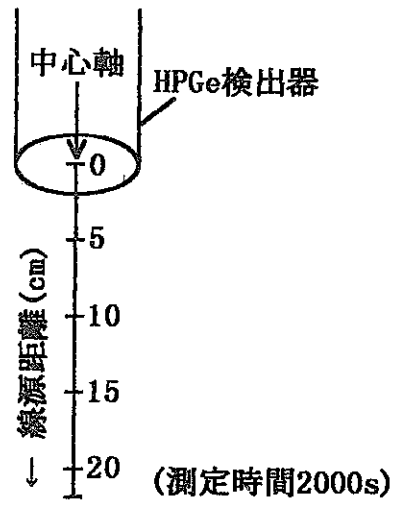


図4.1 線源配置1 (線源距離を変えて点線源を測定)

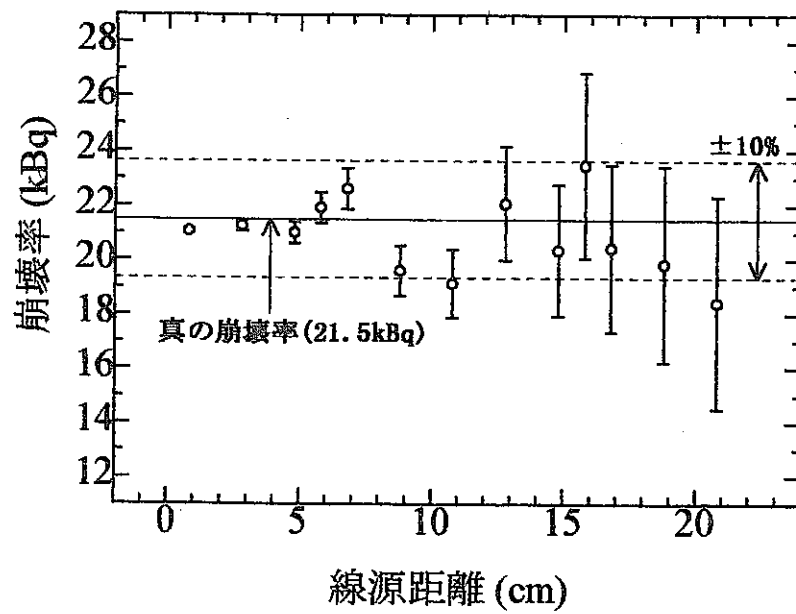


図4.2 線源距離を変えて点線源を測定

図4.3のように3個を重ねた線源で同様の実験を行った場合の結果を図4.4に示す。この場合にも真の崩壊率と±10%で一致した。線源距離が5cm以下では、pile-upや偶然同時計数の影響でサンプイクが大きく検出されてしまうために、崩壊率が小さくなるという問題がある。

次に、図4.5のように線源距離10cmとし、動径方向距離を0cmから20cmまで変化させて、線源Co1を測定した結果を図4.6に示す。同様の測定を、図4.7のように3個を重ねた線源で行った場合の結果を図4.8に示す。検出器からの直線距離が大きいため、得られた結果はばらついているが、図4.8の動径方向距離20cmの場合を除いておよそ±10%で一致していると考えられる。

4.1.2 仮想分布線源の測定

次に、分布線源を仮想して、複数の線源を配置した測定を行った。複数の線源を立体角が同じになるように配置した、検出効率がすべて等しい場合の分布線源の測定結果を示す。図4.9のように動径方向距離を10cmとして線源Co1と線源Co2を向かい合わせに配置し、線源距離を0cmから22cmまで変化させた測定結果を図4.10に示す。サンプイク法によって得られた値は、真の崩壊率の合計とよく一致した。

また、3個の線源で図4.11のように線源距離を10cmとし、動径方向距離を0cmから16cmまで変化させて、正三角形の配置で線源を測定した結果を図4.12に示す。この場合にも、サンプイク法によって得られた値は、それぞれの線源の真の崩壊率の合計とよく一致した。

検出効率が線源によって異なる場合の分布線源の測定結果を次に示す。図4.13のように3個の線源を線源プレート上に、動径方向距離0cmの位置に線源Co1、5cmに線源Co2、10cmに線源Co3となるように配置し、線源距離を0cmから22cmまで変化させて測定した結果を図4.14に示す。破線は、線源の検出器に対する立体角の大きさが距離の2乗分の1に比例すると考えて、分布線源に対するサンプイク法の式から推定した値である。この値は、線源距離をd[cm]とおいて、線源の真の崩壊率を $N_{10}(i=1,2,3)[cps]$ とすると、

$$\left\{ \frac{N_{10}}{d^2} + \frac{N_{20}}{5^2+d^2} + \frac{N_{30}}{10^2+d^2} \right\}^2 \div \left\{ \frac{N_{10}}{(d^2)^2} + \frac{N_{20}}{(5^2+d^2)^2} + \frac{N_{30}}{(10^2+d^2)^2} \right\} \quad (4.1)$$

と表すことができる。測定結果は、推定した理論値とよく一致し、線源距離が小さいほど、真の崩壊率の合計よりも小さくなる傾向を示している。

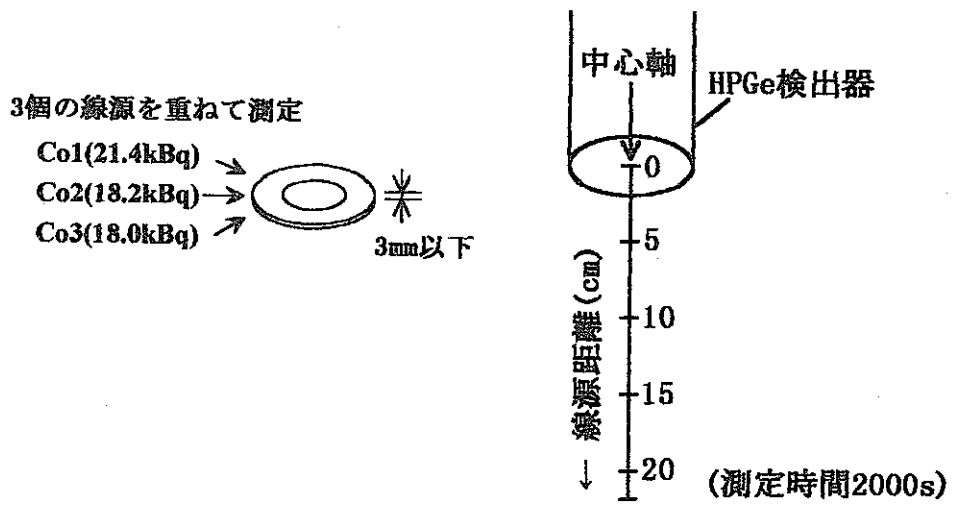


図4.3 線源配置2(線源距離を変えて点線源を測定)

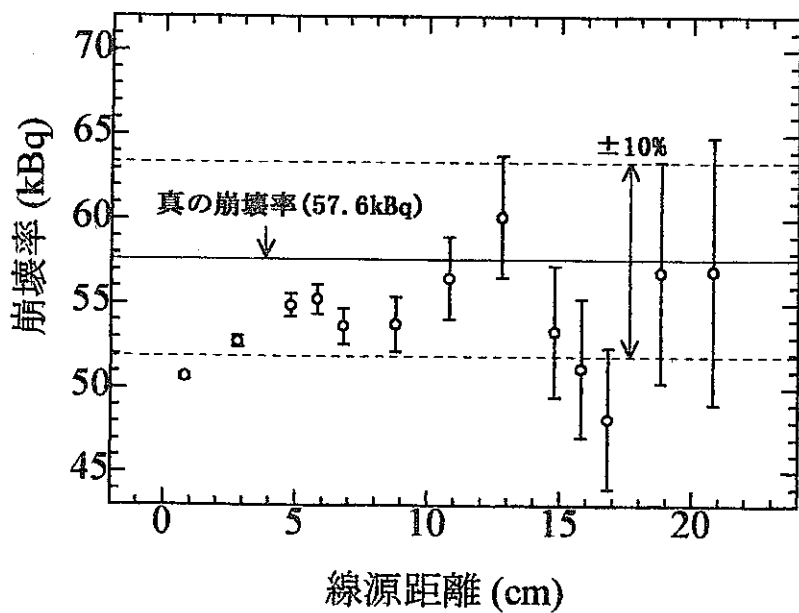
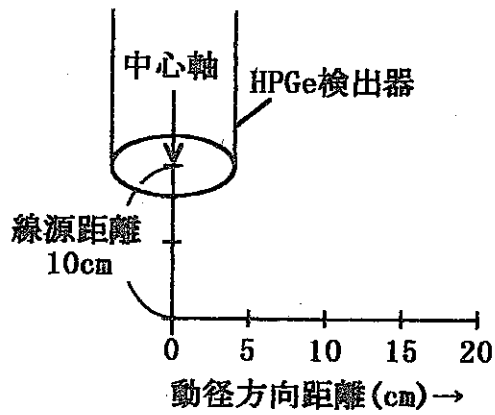


図4.4 線源距離を変えて点線源を測定



(測定時間2000s)

図4.5 線源配置3(動径方向距離を変えて点線源を測定)

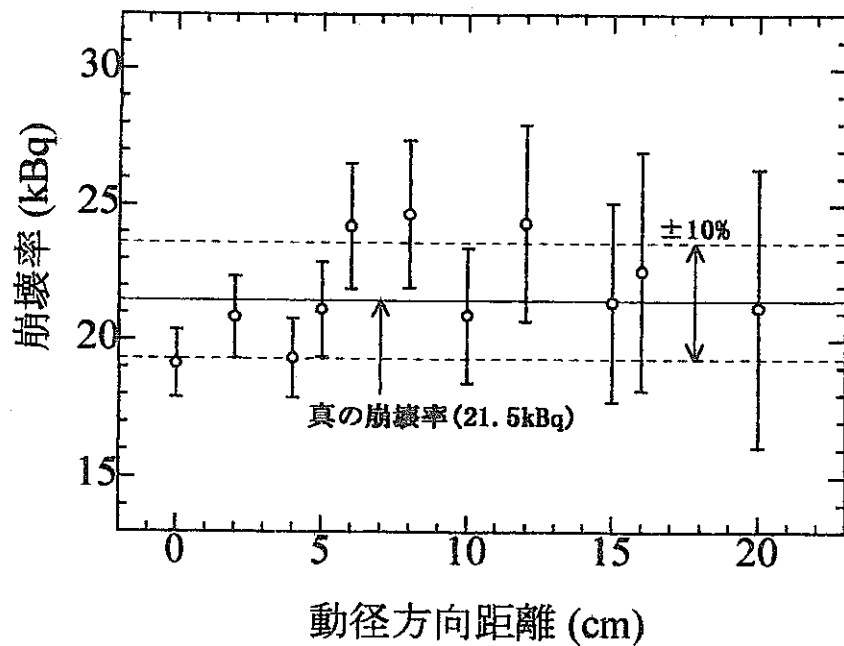
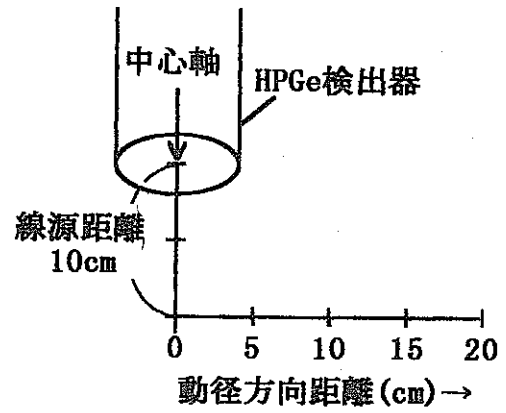
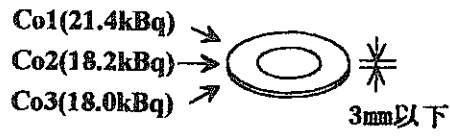


図4.6 動径方向距離を変えて点線源を測定

3個の線源を重ねて測定



(測定時間2000s)

図4.7 線源配置4(動径方向距離を変えて点線源を測定)

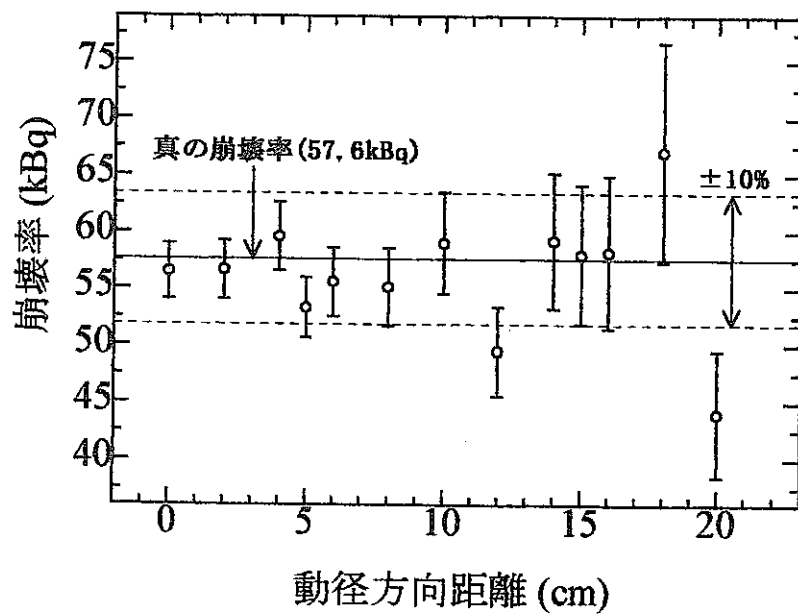


図4.8 動径方向距離を変えて点線源を測定(線源距離10cm)

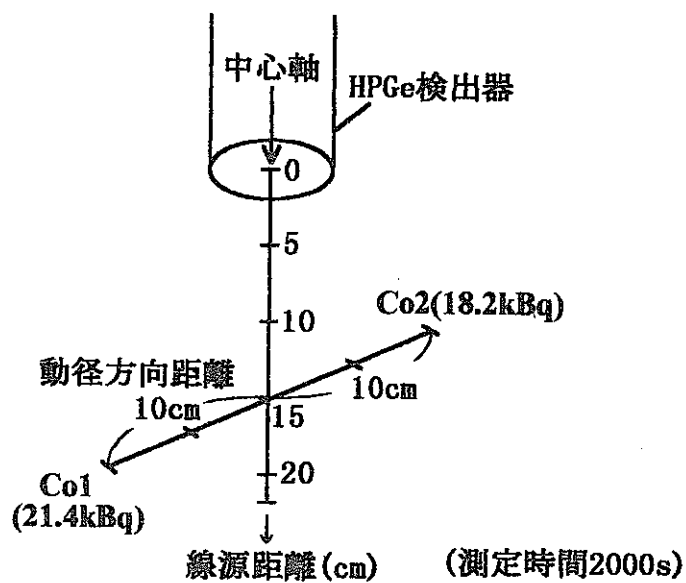


図4.9 線源配置5(同じ立体角で複数の線源を測定)

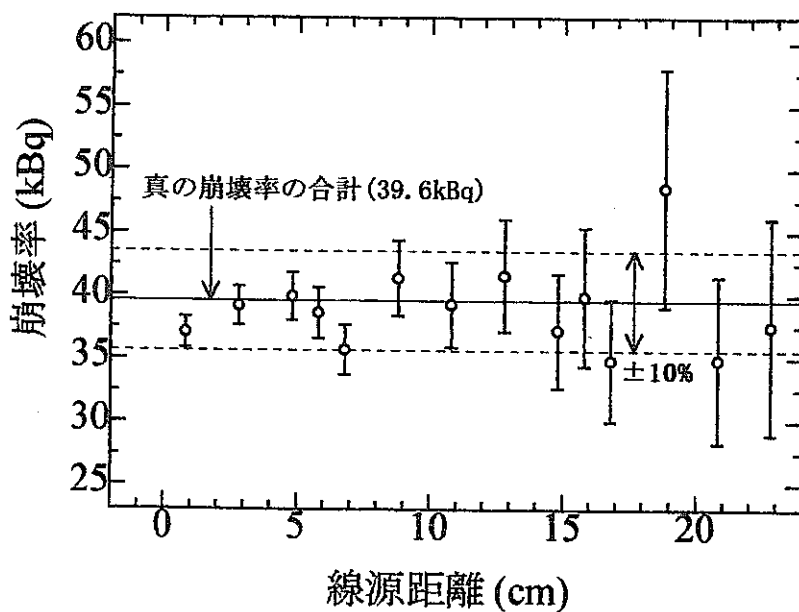


図4.10 線源距離を変えて仮想分布線源を測定(動径方向距離10cm)

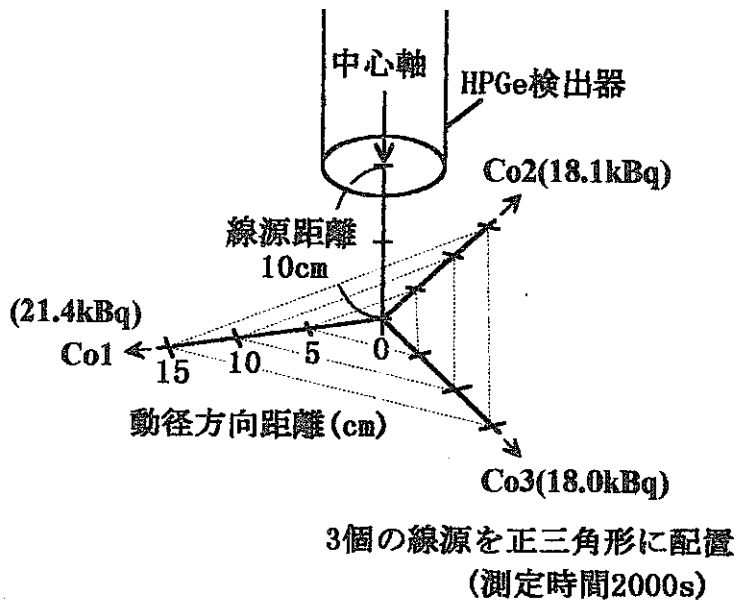


図4.11 線源配置6(同じ立体角で複数の線源を測定)

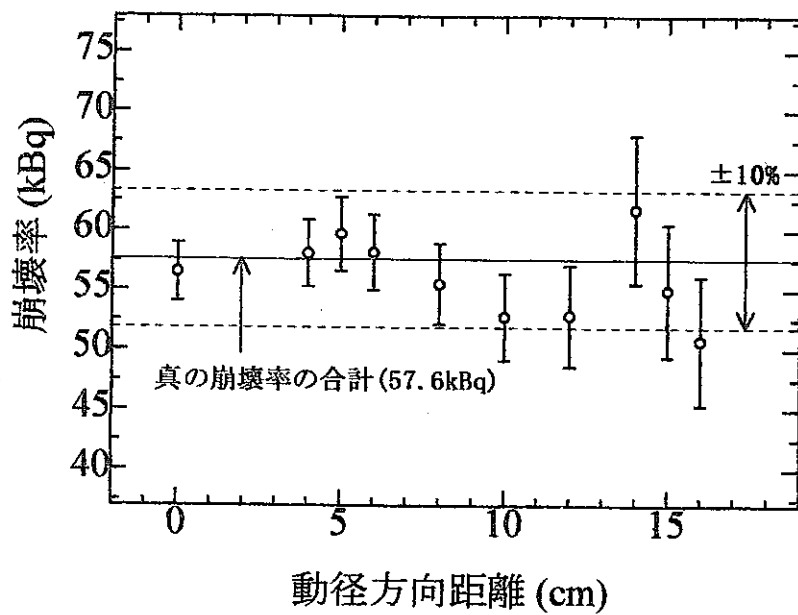


図4.12 動径方向距離を変えて仮想分布線源を測定(線源距離10cm)

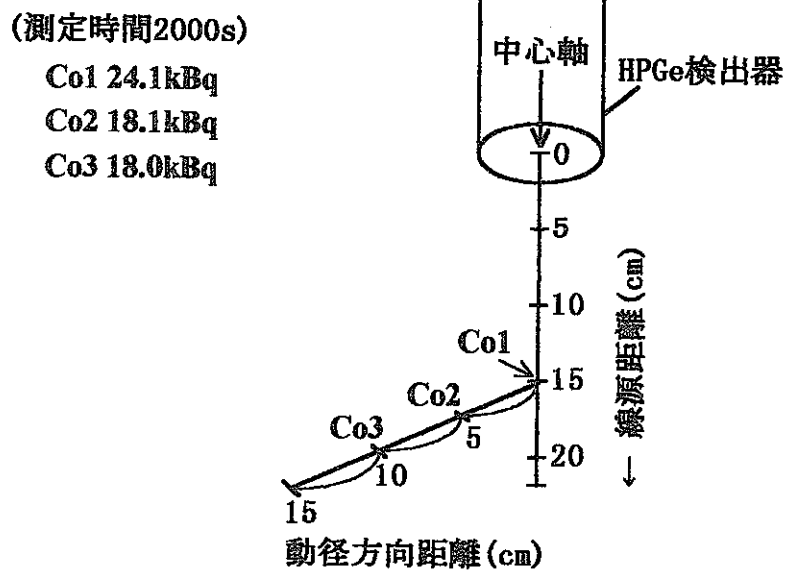


図4.13 線源配置7(異なる立体角で複数の線源を測定)

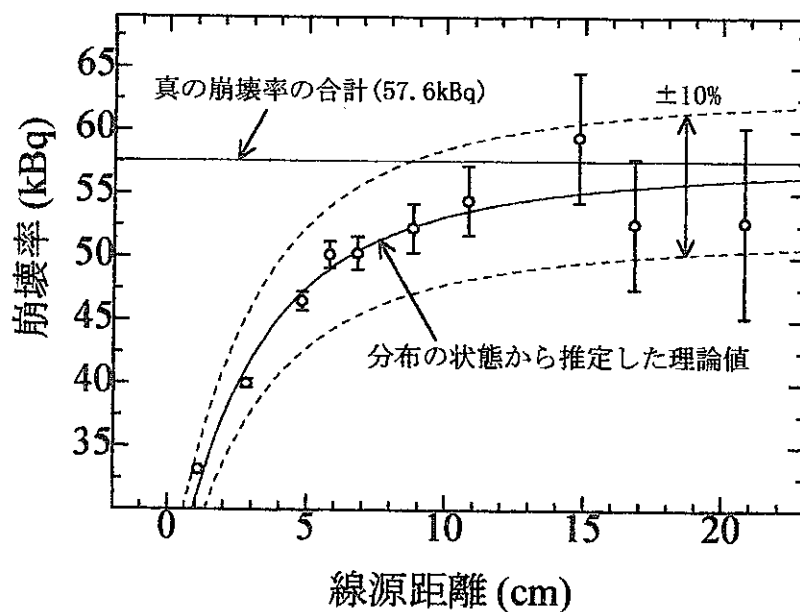


図4.14 線源距離を変えて仮想分布線源を測定

4. 2 相対検出効率61%のHPGe検出器による測定結果及び考察

4. 2. 1 点線源の測定

これまでに行った実験では、HPGe検出器の相対検出効率が35%であったため、線源距離が15cm以上になると検出できるサムピークのカウントが小さく、十分な測定精度が得られなかった。そこで、相対検出効率61%の検出器を用いてこれまでと同様の実験を行い、得られた結果を比較した。

線源距離を0cmから22cmまで変化させて1個の線源を測定する実験(図4.15)を、相対検出効率61.4%の検出器で行った結果を図4.16に示す。線源距離20cmでの値を、図4.2の測定結果と比較すると、相対検出効率35%の検出器を用いた場合には測定精度は21%であるが、相対検出効率61%の検出器を用いた場合には14%となり、測定精度が改善されている。

相対検出効率61%の検出器を用いて、図4.17のように線源距離を変化させて3個を重ねた線源を測定した結果を図4.18に示す。また、図4.19のように動径方向距離を変化させて1個の線源を線源を測定した結果を図4.20に、図4.21のように動径方向距離を変化させて3個を重ねた線源を測定した結果を図4.22に示す。相対検出効率61%の検出器ではpile-upや偶然同時計数の影響が相対検出効率35%の検出器の場合よりも大きくなるため、線源距離が短い場合や線源の崩壊率が大きい場合には得られる値が真の崩壊率よりも小さくなる。

4. 2. 2 仮想分布線源の測定

相対検出効率61%の検出器を用いて、分布線源を仮想して複数の線源を配置した測定を行った。図4.23のように動径方向距離を10cmとして線源Co1と線源Co2を向かい合わせに配置し、線源距離を0cmから22cmまで変化させた測定結果を図4.24に示す。分布線源の場合においても、サムピーク法によって得られた値は真の崩壊率の合計とよく一致し、測定精度が改善されている。同様に、3個の線源で図4.25のように線源距離を10cmとし、動径方向距離を0cmから16cmまで変化させて、正三角形の配置で線源を測定した結果を図4.26に示す。この場合にも、サムピーク法によって得られた値はそれぞれの線源の真の崩壊率の合計と±10%で一致した。

検出効率の異なる分布線源の測定として、図4.27のように3個の線源を線源プレート上に、動径方向距離0cmの位置に線源Co1、5cmに線源Co2、10cmに線源Co3となるように配置し、線源距離を0cmから22cmまで変化させて測定した結果を図4.28に

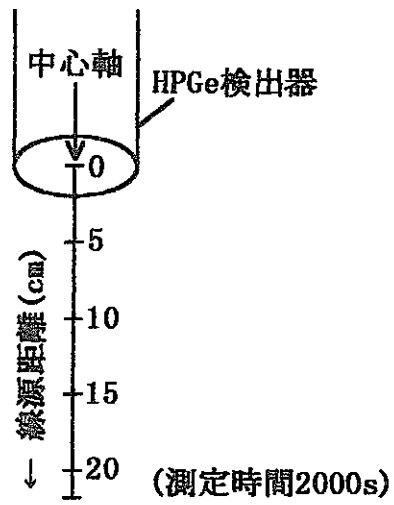


図4.15 線源配置1(線源距離を変えて点線源を測定)

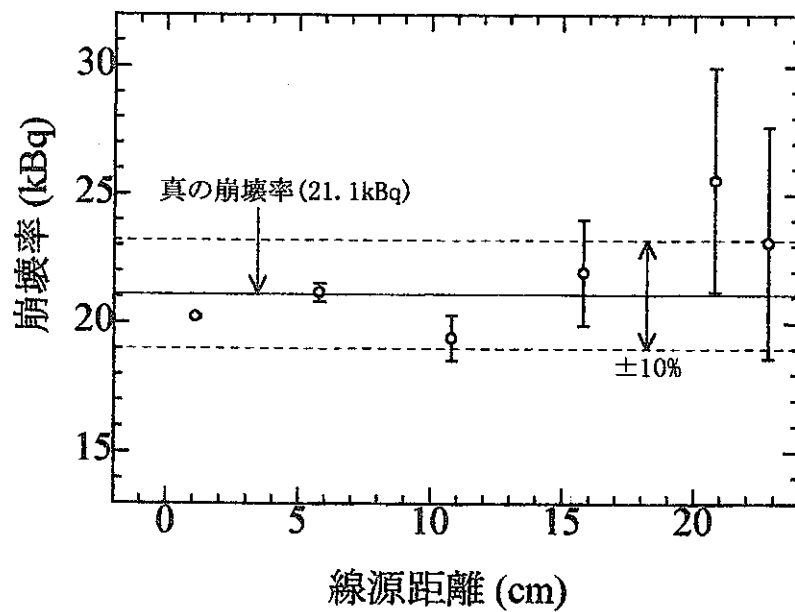


図4.16 線源距離を変えて点線源を測定

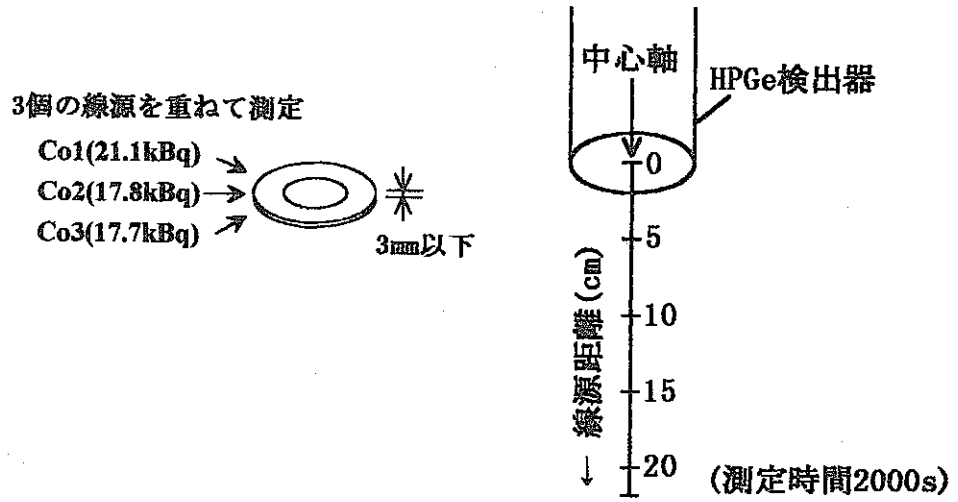


図4.17 線源配置2(線源距離を変えて点線源を測定)

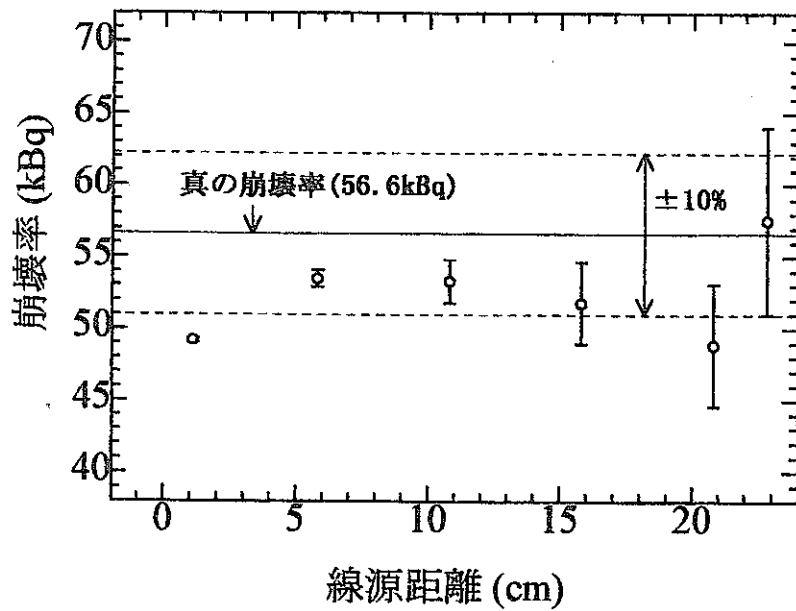
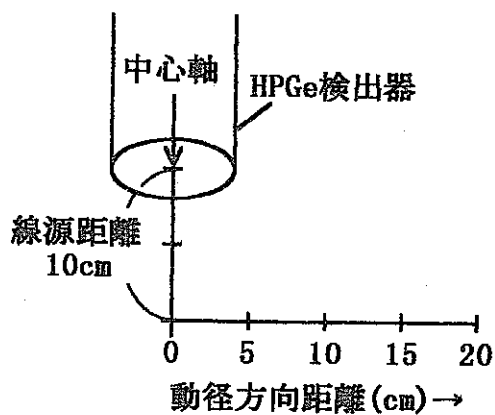


図4.18 線源距離を変えて点線源を測定



(測定時間2000s)

図4.19 線源配置3(動径方向距離を変えて点線源を測定)

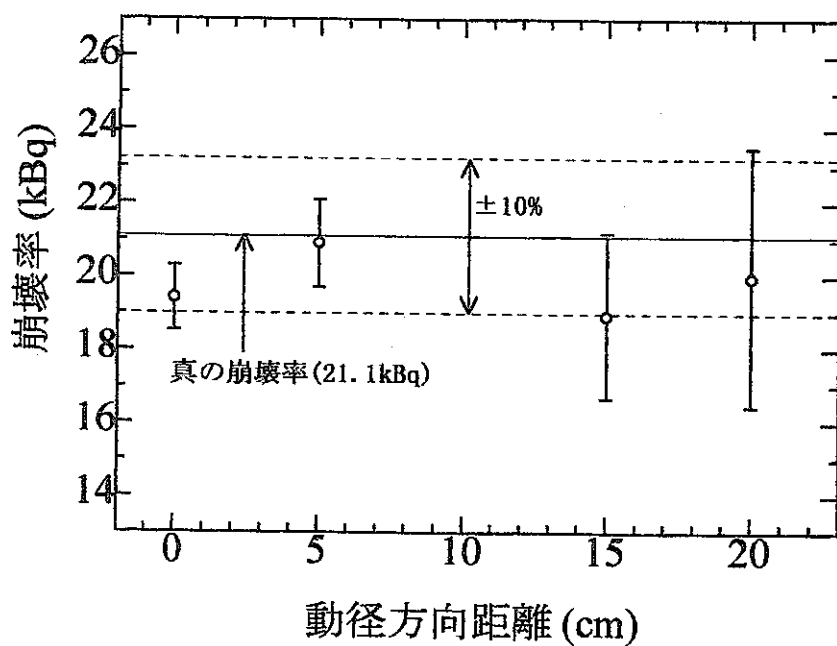
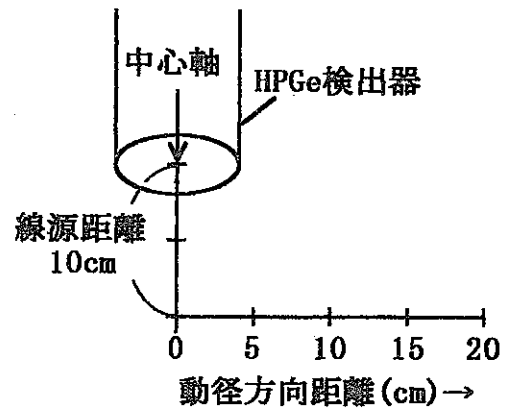
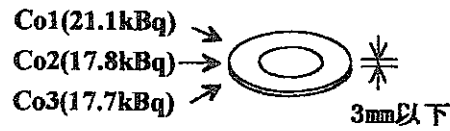


図4.20 動径方向距離を変えて点線源を測定

3個の線源を重ねて測定



(測定時間2000s)

図4.21 線源配置4(動径方向距離を変えて点線源を測定)

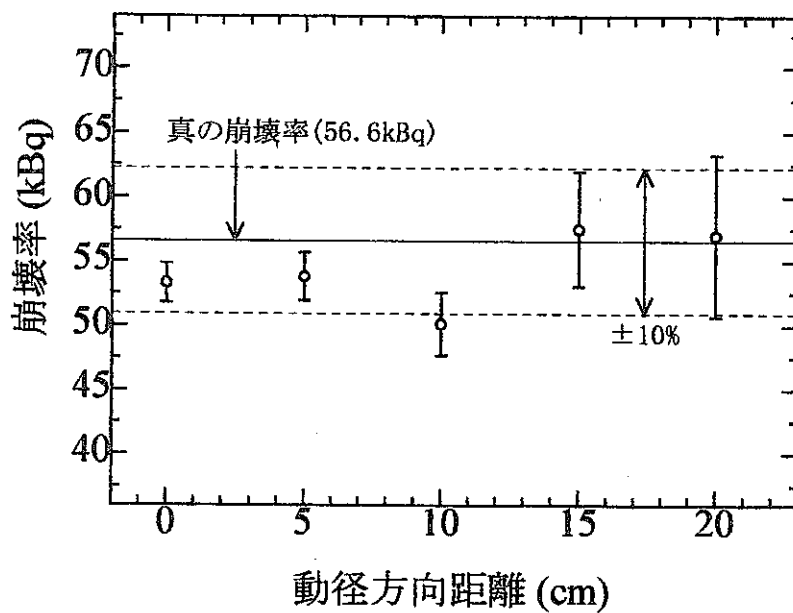


図4.22 動径方向距離を変えて点線源を測定(線源距離10cm)

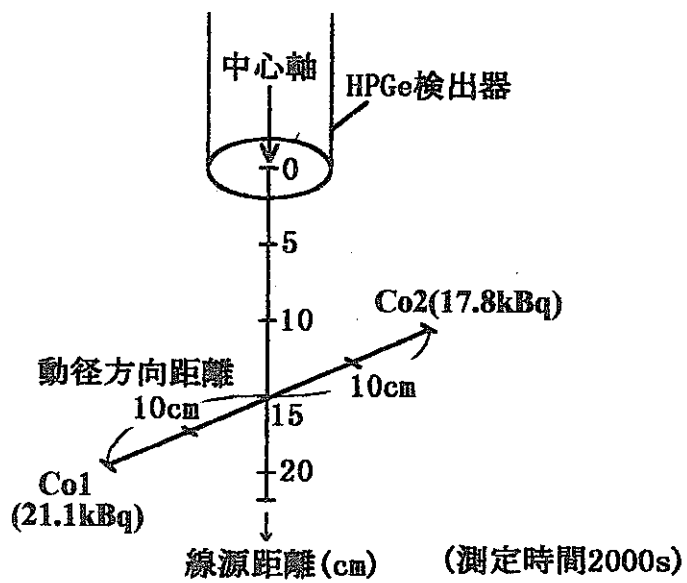


図4.23 線源配置5 (同じ立体角で複数の線源を測定)

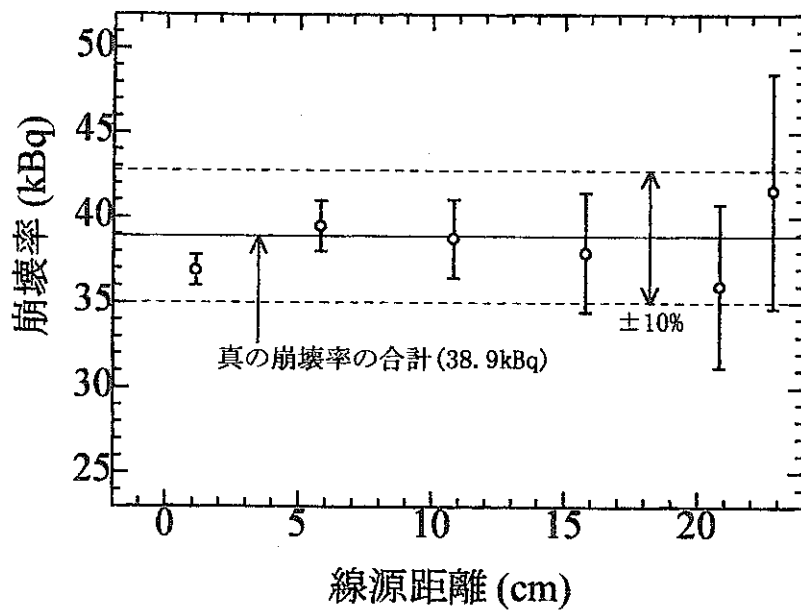


図4.24 線源距離を変えて仮想分布線源を測定 (動径方向距離10cm)

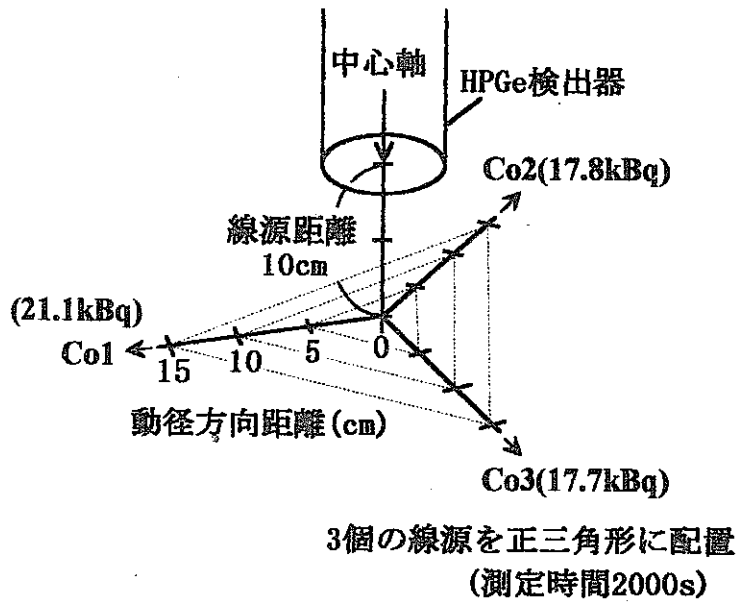


図4.25 線源配置6(同じ立体角で複数の線源を測定)

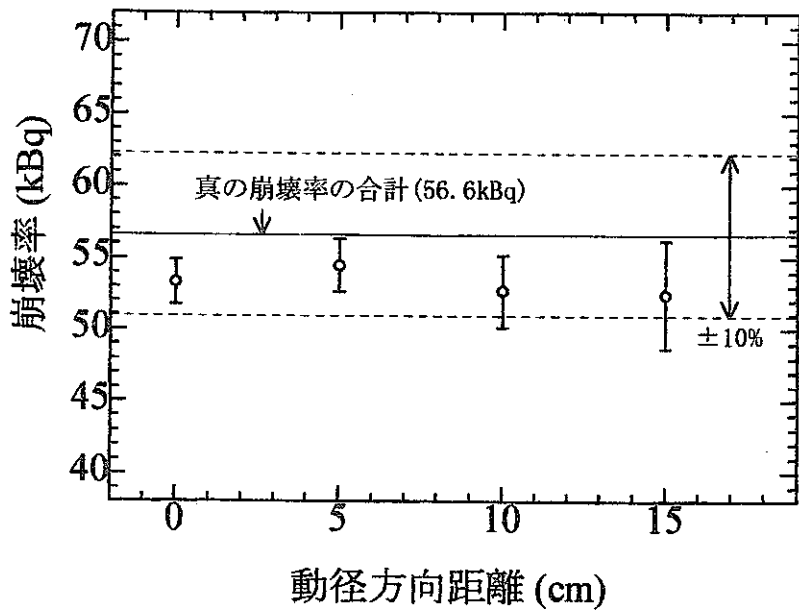


図4.26 動径方向距離を変えて仮想分布線源を測定(線源距離10cm)

(測定時間2000s)

Co1 21.1kBq

Co2 17.8kBq

Co3 17.7kBq

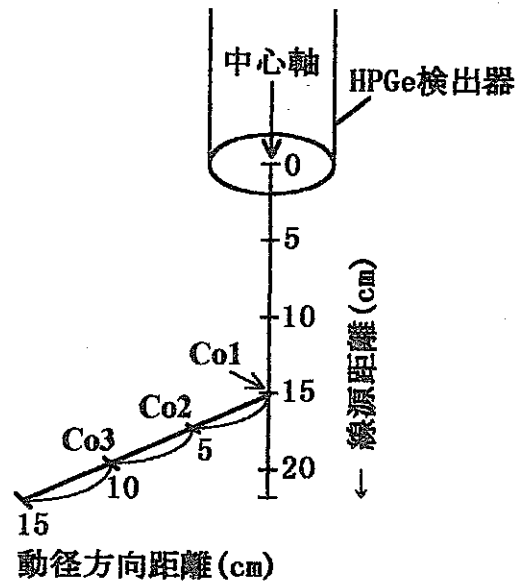


図4.27 線源配置7(異なる立体角で複数の線源を測定)

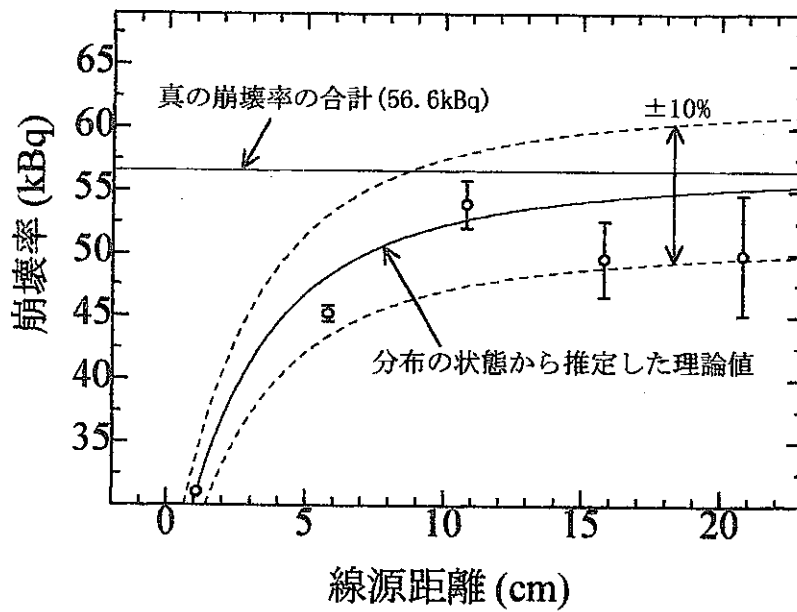


図4.28 線源距離を変えて仮想分布線源を測定

示す。図4.14に示した相対検出効率35%の検出器を用いた場合と同様に、測定結果は線源距離が長くなるにつれて、真の崩壊率の合計に近づくことがわかる。

これらの実験結果から、相対検出効率35%のHPGe検出器を用いた場合には、検出できるサムピークが小さいために十分な測定精度が得られなかった線源距離15cm以上の測定においても、相対検出効率61%の検出器を使用することで測定精度が改善できることがわかった。分布線源の場合には、検出器を遠ざけるほど各線源の検出効率の違いが小さくなり、サムピーク法によって得られる値が実際の崩壊率の合計に近づく。そこで、距離を大きくとった場合でも測定精度を得るために、相対検出効率の高い測定器を用いる必要があると云える。

第5章 ^{46}Sc 線源の測定結果および考察

γ 線サムピーク法によって得られた崩壊率を $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 同時計数法により決定された真の崩壊率の値と比較し、測定値の精度について検討する。

作製した線源の崩壊率は20kBqから30kBqなので、これ以上の崩壊率の線源の測定の際には線源を重ね合わせて使用した。 ^{60}Co 線源と同様に1個の線源の厚さは1mm以下なので、3個の線源を重ねた場合でも厚さ3mm以下であり、点線源とみなすことができる。

線源距離、動径方向距離についても ^{60}Co 線源と同様であり、測定時間はリアルタイム2000秒で行った。

5. 1 相対検出効率35%のHPGe検出器による測定結果及び考察

5.1.1 点線源の測定

図5.1のように、検出器の中心軸上で線源距離を0cmから22cmまで変化させて点線源Sc1を測定した結果を図5.2に示す。測定結果は真の崩壊率とよく一致した値が得られた。12cmの場合の値が大きくなったが、全体として $\pm 10\%$ で一致している。同様に線源Sc2を測定した結果を図5.3、線源Sc3を測定した結果を図5.4、線源Sc4を測定した結果を図5.5に示す。線源距離が15cm以上の測定では、サムピークが50カウント以下であったため、不確かさが大きくなり、値にばらつきが見られる。

図5.6のように3個を重ねた線源で同様の実験を行った場合の結果を図5.7に示す。線源距離が5cm以下では、pile-upや偶然同時計数の影響でサムピークが大きく検出されてしまうために、崩壊率が小さくなるという問題があるが、この場合にも線源距離18cmの場合を除いて真の崩壊率と $\pm 10\%$ で一致した。

次に、図5.8のように線源距離10cmとし、動径方向距離を0cmから20cmまで変化させて、線源Sc1を測定した結果を図5.9に示す。また、同様の実験を線源距離の設定を5cmと15cmにして行った結果を図5.10と図5.11に示す。これらの結果は、真の崩壊率とよく一致している。線源距離が長くなるほどサムピークの計数が小さくなるので図5.10に比べて図5.11は各点での不確かさが大きい。

同様の測定を、図5.12のように線源距離10cm、3個を重ねた線源で行った場合の結果を図5.13に示す。また、線源距離5cmの場合を図5.14、15cmの場合を図5.15に示

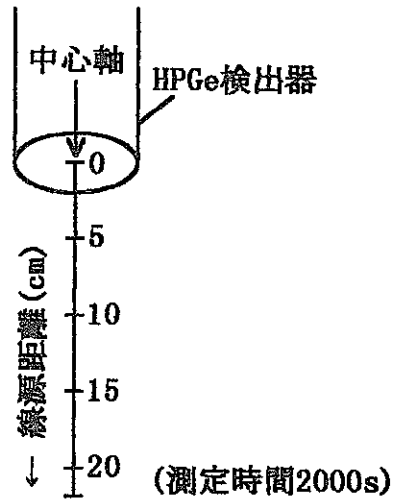


図5.1 線源配置1(線源距離を変えて点線源を測定)

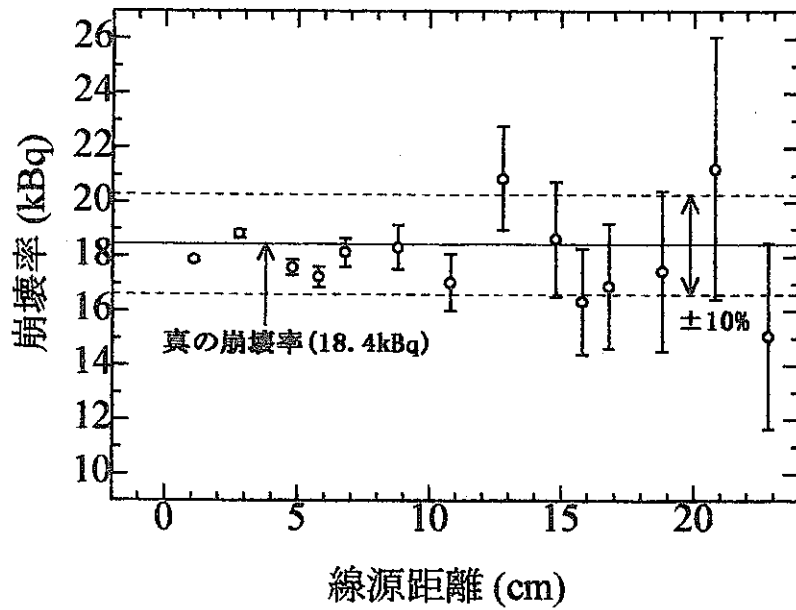


図5.2 線源距離を変えて点線源を測定(Sc^{71} (18.4kBq))

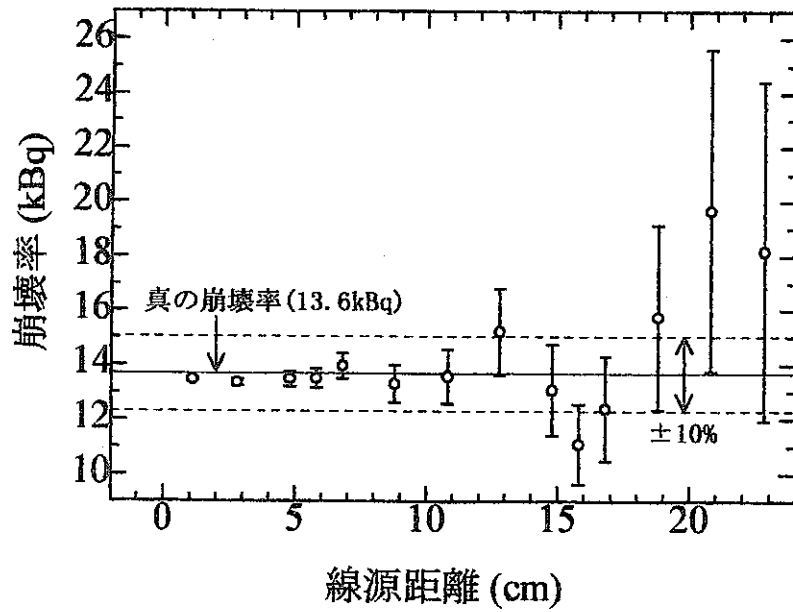


図5.3 線源距離を変えて点線源を測定(Sc72(13.6kBq))

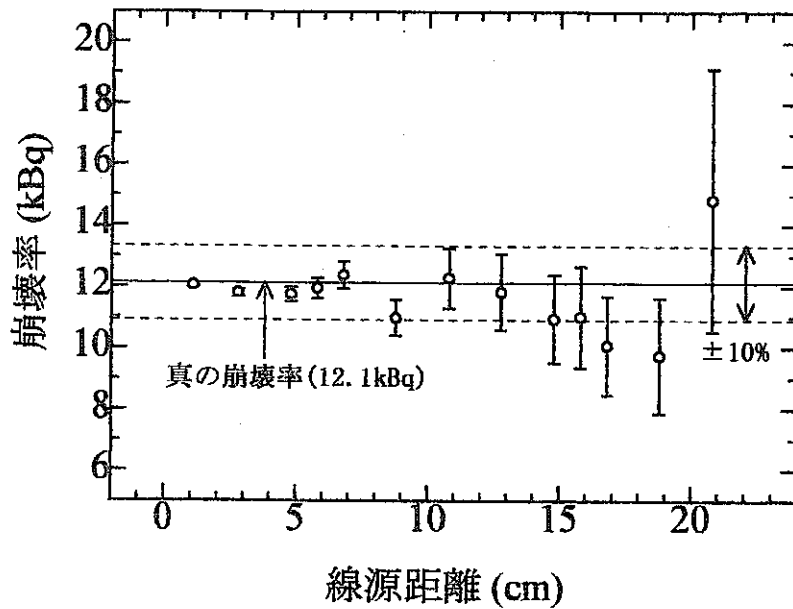


図5.4 線源距離を変えて点線源を測定(Sc73(12.1kBq))

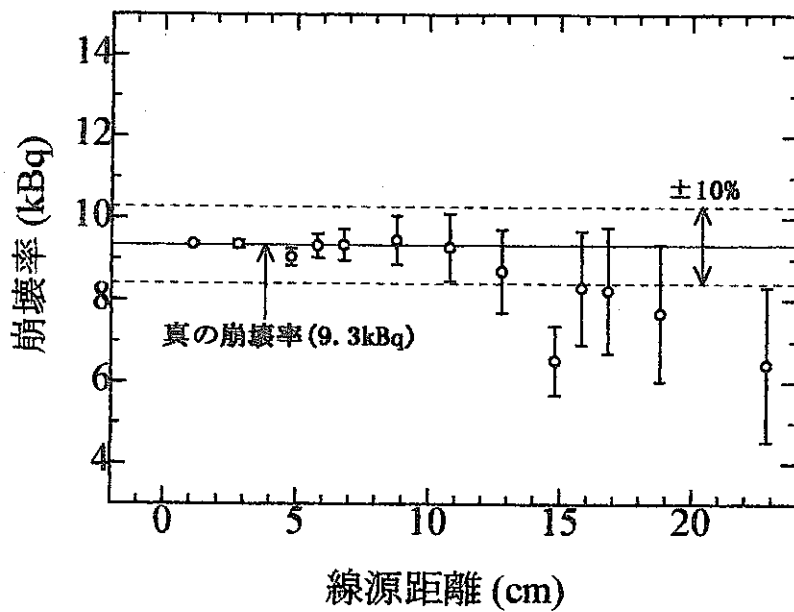


図5.5 線源距離を変えて点線源を測定(Sc74(9.3kBq))

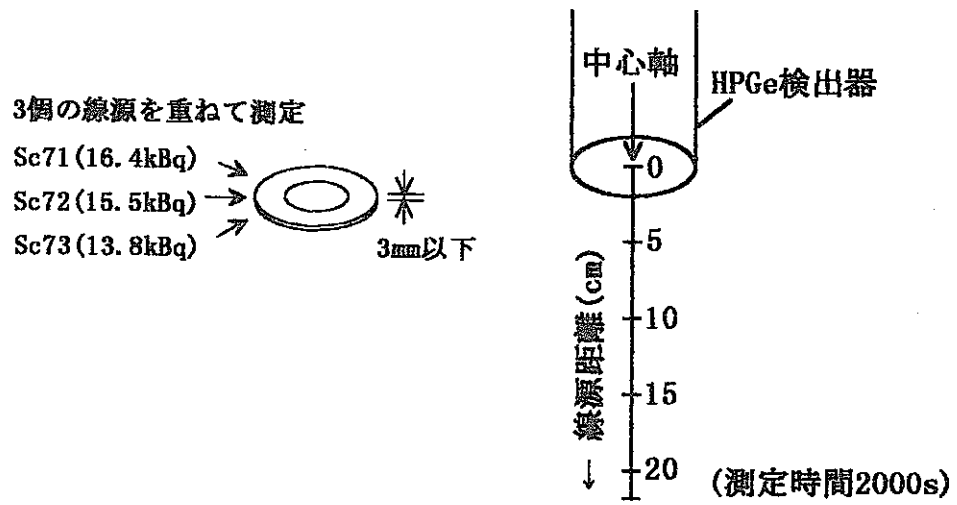


図5.6 線源配置2(線源距離を変えて点線源を測定)

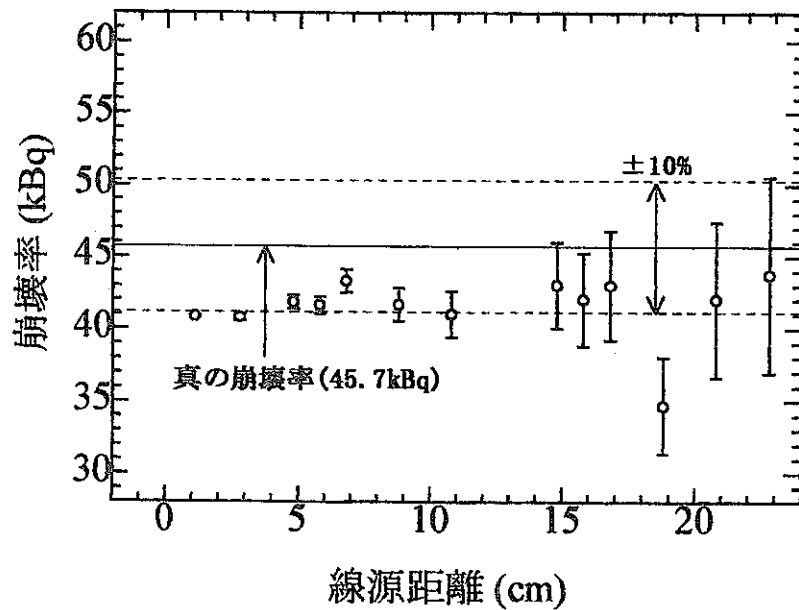
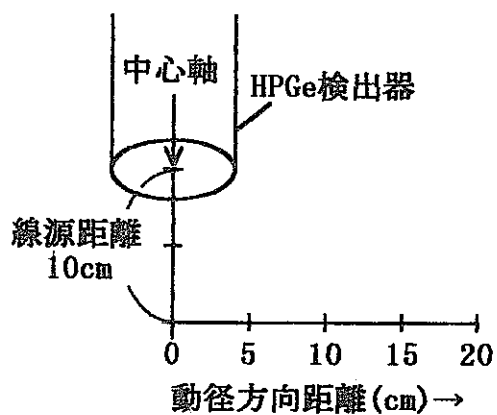


図5.7 線源距離を変えて点線源を測定



(測定時間2000s)

図5.8 線源配置3(動径方向距離を変えて点線源を測定)

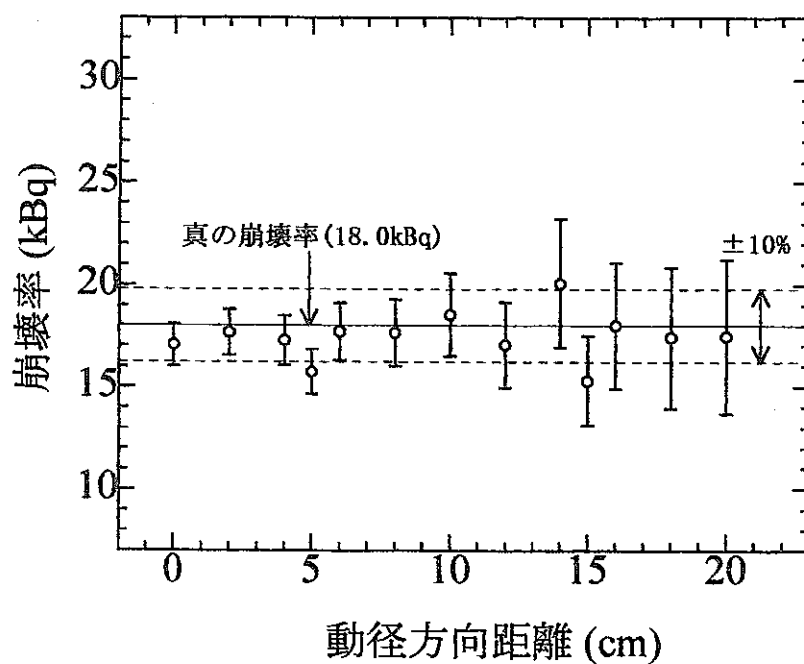


図5.9 動径方向距離を変えて点線源を測定

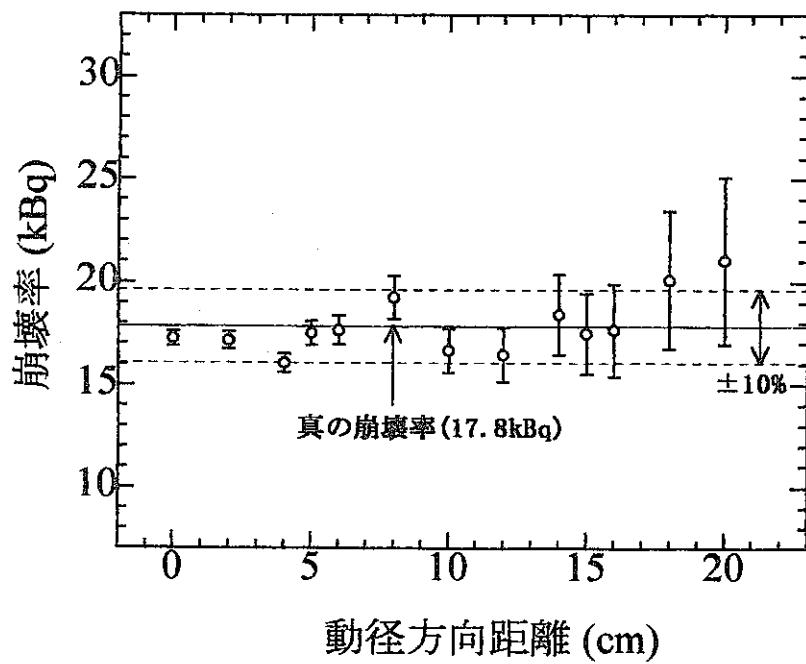


図5.10 動径方向距離を変えて点線源を測定(線源距離5cm)

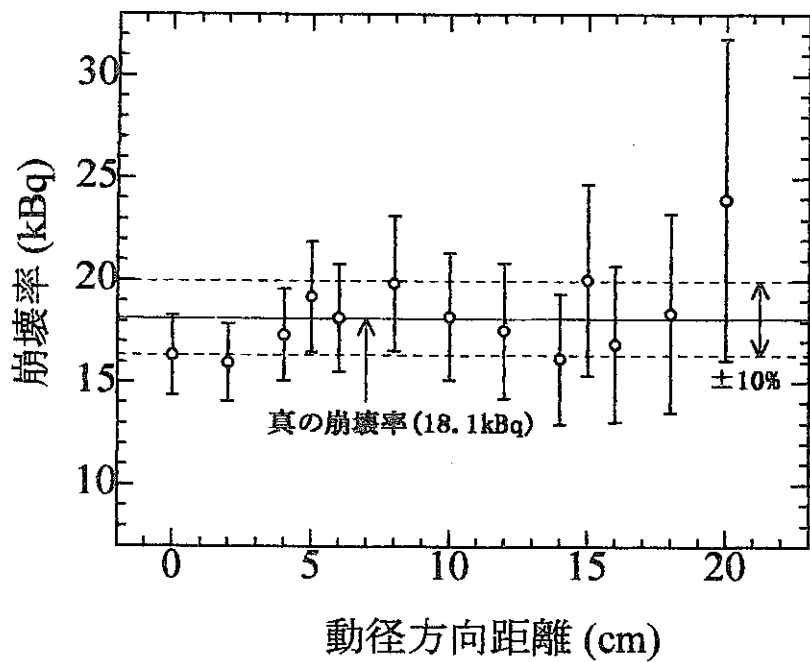
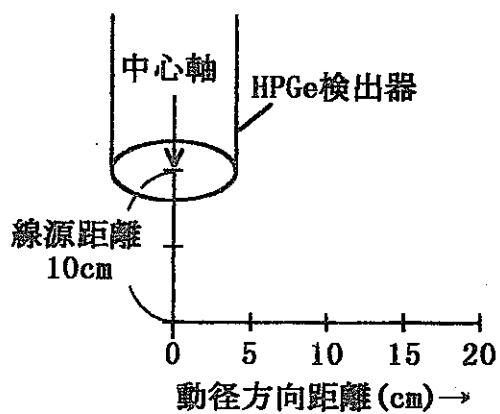
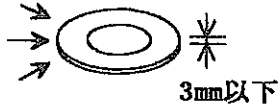


図5.11 動径方向距離を変えて点線源を測定(線源距離15cm)

3個の線源を重ねて測定

Sc71 (15.8kBq)
 Sc72 (14.9kBq)
 Sc73 (13.3kBq)



(測定時間2000s)

図5.12 線源配置4(動径方向距離を変えて点線源を測定)

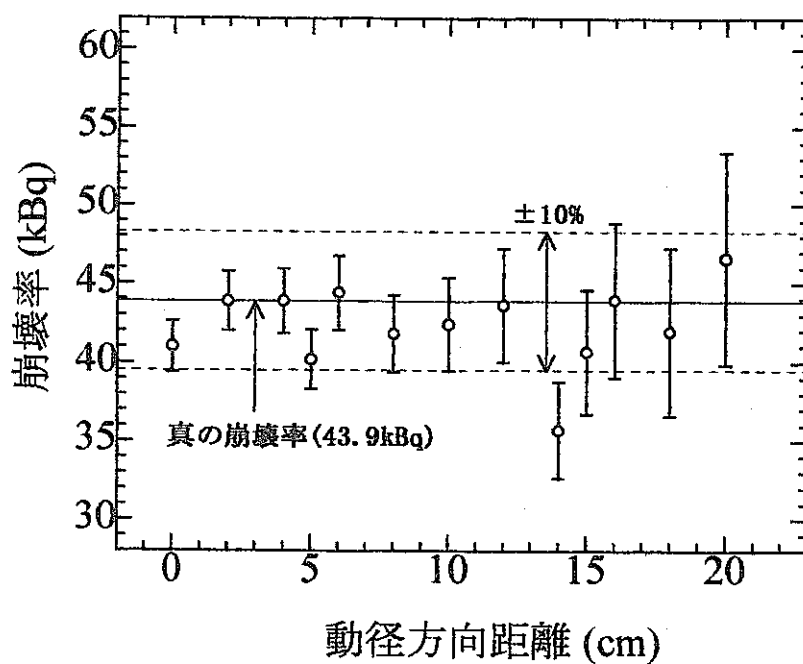


図5.13 動径方向距離を変えて点線源を測定

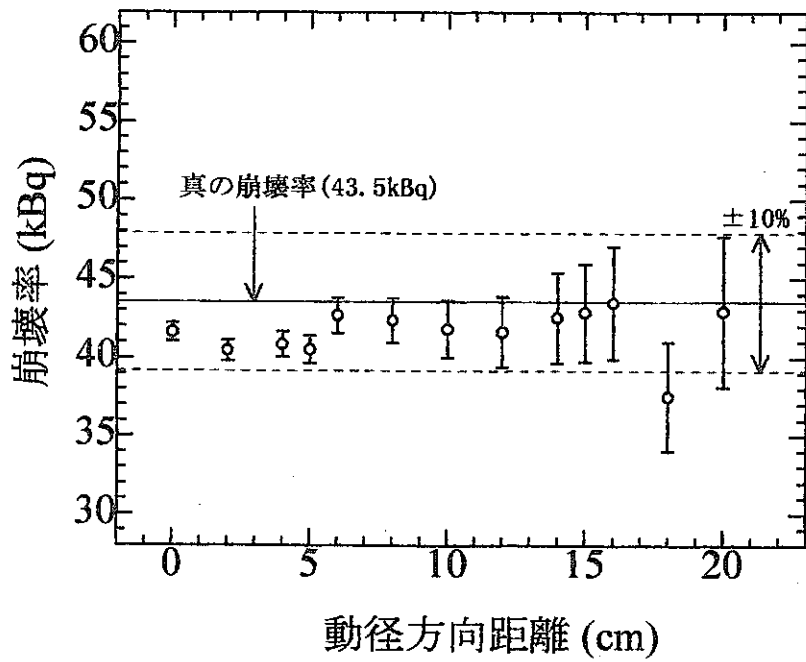


図5.14 動径方向距離を変えて点線源を測定(線源距離5cm)

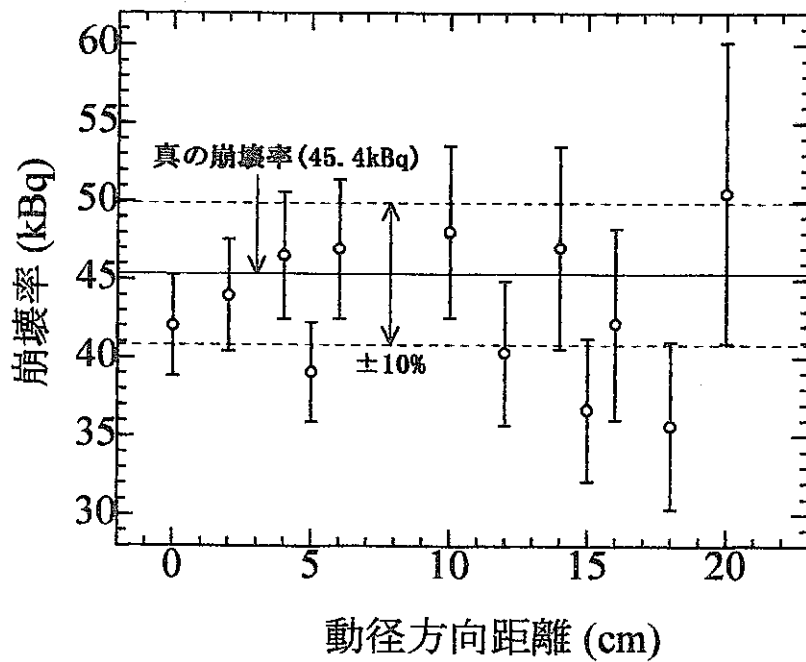


図5.15 動径方向距離を変えて点線源を測定(線源距離15cm)

す。図5.15はばらつきが大きくなってしまっているが、図5.13と図5.14は±10%でよく一致していると考えられる。

5.1.2 仮想分布線源の測定

次に、分布線源を仮想して、複数の線源を配置した測定を行った。複数の線源を立体角が同じになるように配置した、検出効率がすべて等しい場合の分布線源の測定結果を示す。図5.16のように動径方向距離を10cmとして線源Sc1と線源Sc2を向かい合わせに配置し、線源距離を0cmから22cmまで変化させた測定結果を図5.17に示す。サムピーク法によって得られた値は、真の崩壊率の合計とよく一致している。同様の実験を動径方向距離5cmと15cmで行ったものが図5.18と図5.19である。図5.19の場合、線源距離が10cm以上になると、線源とHPGe検出器との直線距離が大きいため、不確かさが大きく、ばらついた結果となった。

また、3個の線源で図5.20のように線源距離を10cmとし、動径方向距離を0cmから16cmまで変化させて、正三角形の配置で線源を測定した結果を図5.21に示す。サムピーク法によって得られた値は、それぞれの線源の真の崩壊率の合計とよく一致した。同様の実験を線源距離5cmと15cmで行ったものが図5.22と図5.23である。これらも真の崩壊率とおおよそ±10%で一致している。

最後に、検出効率が線源によって異なる場合の分布線源の測定結果を次に示す。図5.24のように3個の線源を線源プレート上に、動径方向距離0cmの位置に線源Sc1、5cmに線源Sc2、10cmに線源Sc3となるように配置し、線源距離を0cmから22cmまで変化させて測定した結果を図5.25に示す。破線は、 ^{60}Co と同様に式(4.1)によって計算した、測定で得られる値の推定値である。測定結果は、推定した理論値とよく一致し、線源距離が短い場合には、真の崩壊率の合計よりも小さい値が得られるが、線源距離が長くなるにつれて、各線源の検出器に対する立体角の違いが小さくなるため、真の崩壊率の合計に近い値が得られることがわかった。

5.2 相対検出効率61%のHPGe検出器による測定結果及び考察

5.2.1 点線源の測定

^{46}Sc 線源についても、相対検出効率61%のHPGe検出器を使用して、これまでにを行った実験と同様の実験を行い、得られた結果を比較した。

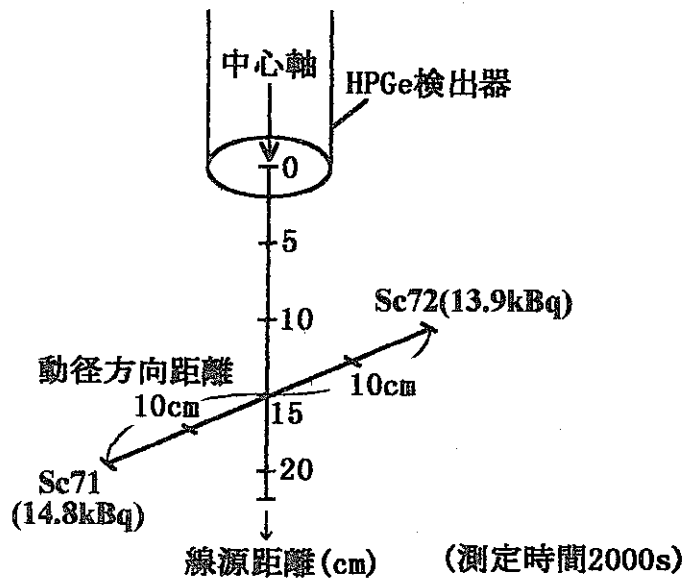


図5.16 線源配置5(同じ立体角で複数の線源を測定)

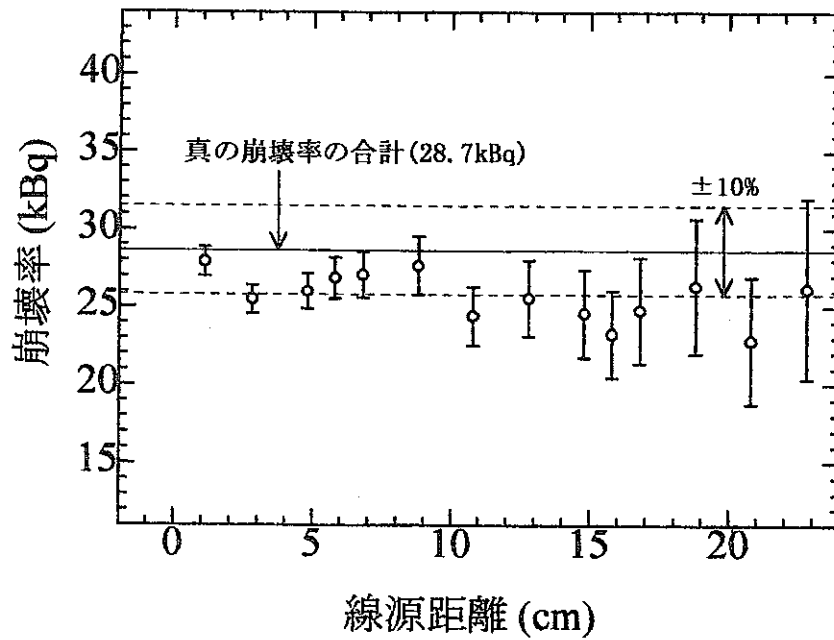


図5.17 線源距離を変えて仮想分布線源を測定(動径方向距離10cm)

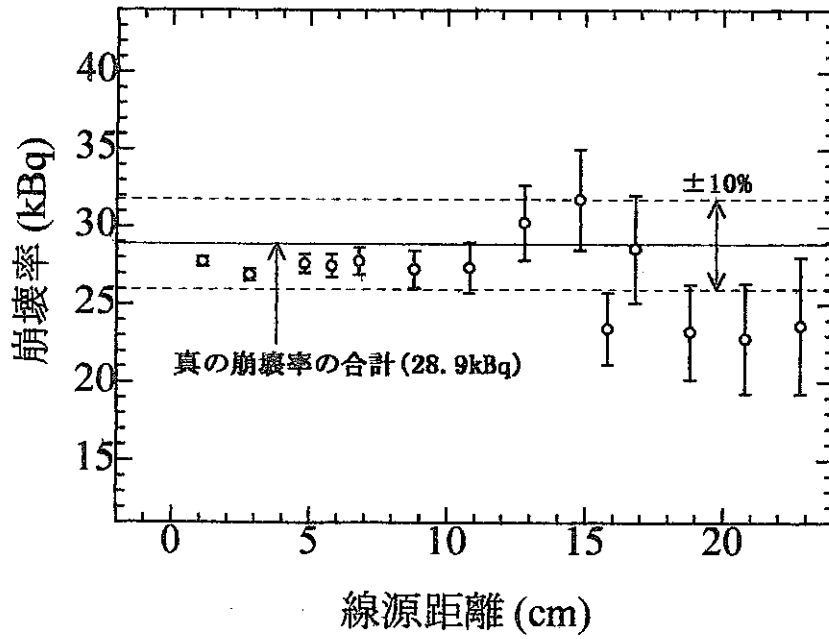


図5.18 線源距離を変えて仮想分布線源を測定(動径方向距離5cm)

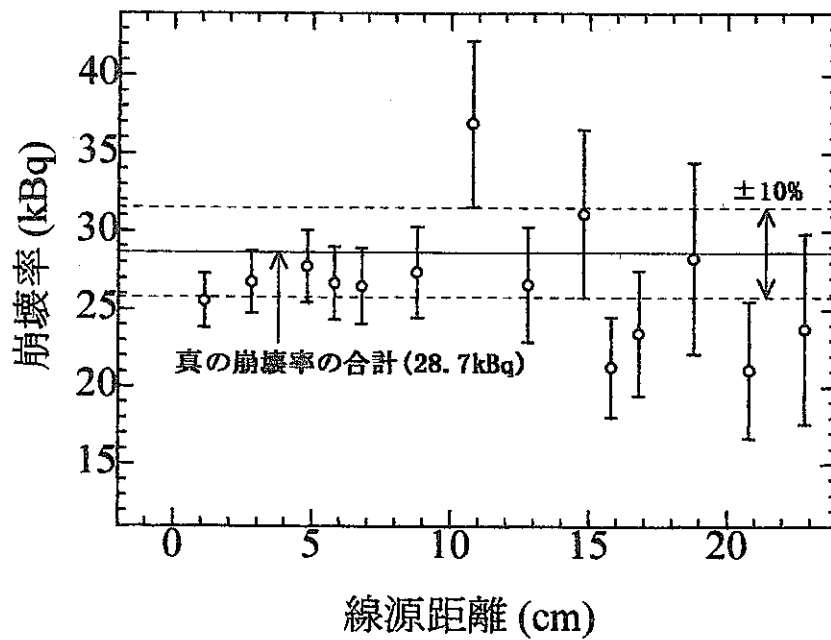


図5.19 線源距離を変えて仮想分布線源を測定(動径方向距離15cm)

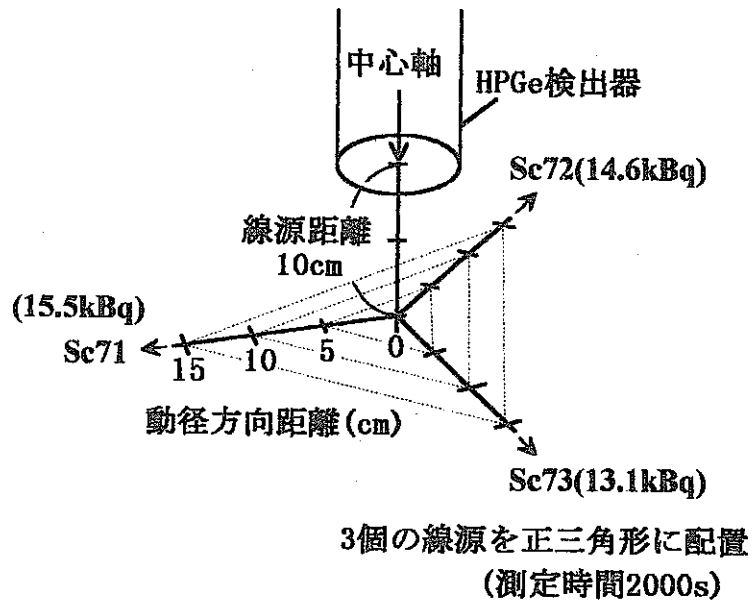


図5.20 線源配置6(同じ立体角で複数の線源を測定)

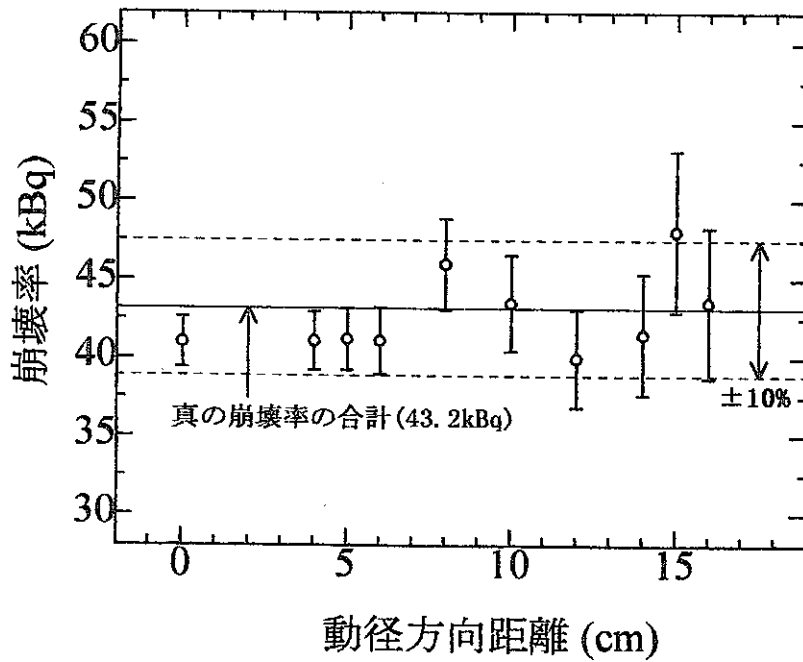


図5.21 動径方向距離を変えて仮想分布線源を測定(線源距離10cm)

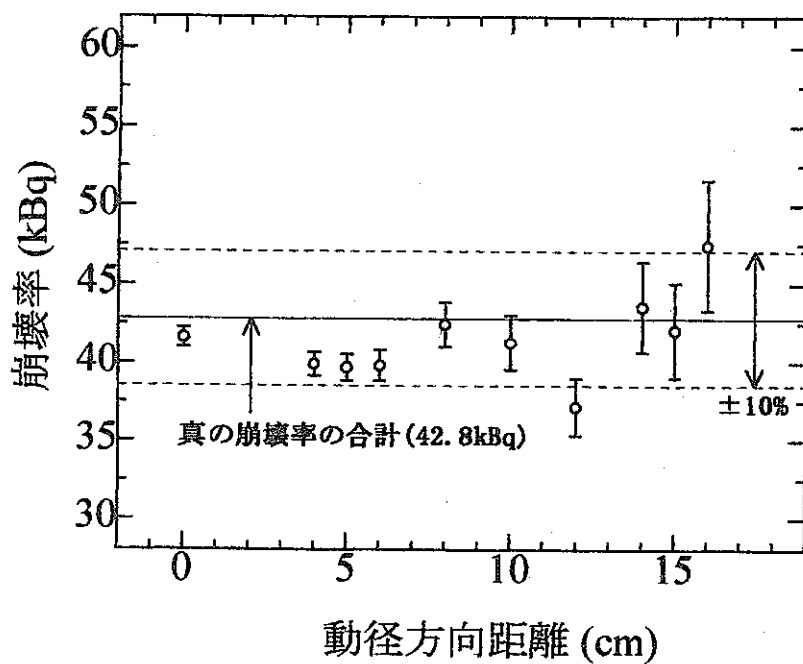


図5.22 動径方向距離を変えて仮想分布線源を測定(線源距離5cm)

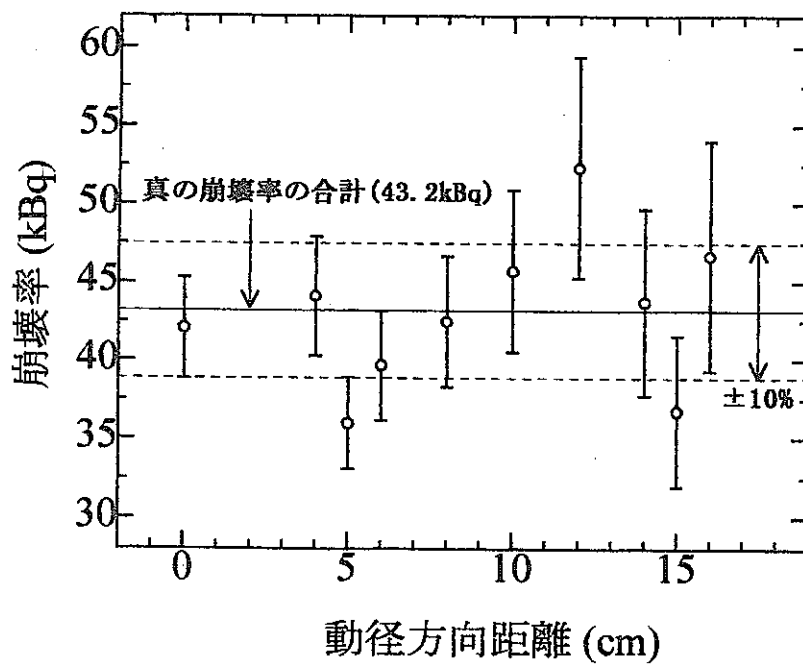


図5.23 動径方向距離を変えて仮想分布線源を測定(線源距離15cm)

(測定時間2000s)

Sc71 15.3kBq

Sc72 14.9kBq

Sc73 13.0kBq

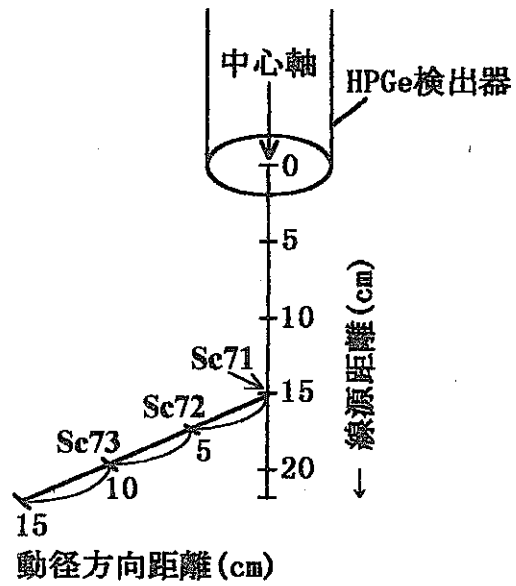


図5.24 線源配置7(異なる立体角で複数の線源を測定)

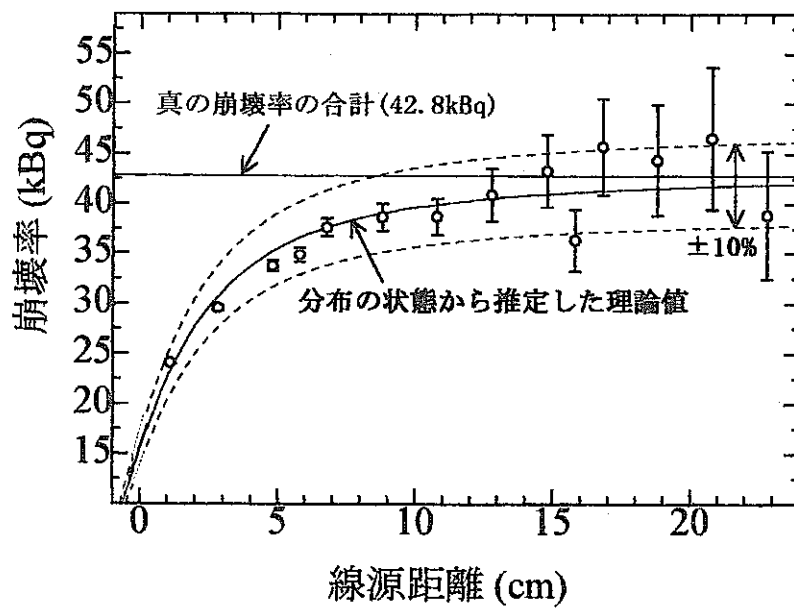


図5.25 線源距離を変えて仮想分布線源を測定

線源距離を0cmから22cmまで変化させて1個の線源を測定する実験(図5.26)を、相対検出効率61%の検出器で行った結果を図5.27に示す。同様の実験を図5.28のように3個を重ねた線源で行った場合の結果を図5.29に示す。また、図5.30のように動径方向距離を変化させて1個の線源を測定した結果を図5.31に、図5.32のように3個を重ねた線源で行った場合の結果を図5.33に示す。

これらの4つの実験結果は全体的に真の崩壊率よりも10%小さい値となった。この原因としては、相対検出効率61%の検出器ではpile-upや偶然同時計数が相対検出効率35%の検出器の場合よりも大きく影響するため、サムピークが大きく検出されてしまい、サムピーク法によって得られた値が小さくなったと考えられる。サムピークの計数が大きいため、得られた値の不確かさは、相対検出効率35%の検出器で行った結果に比べて改善されている。

5.2.2 仮想分布線源の測定

相対検出効率61%の検出器を用いて、分布線源を仮想して複数の線源を配置した測定を行った。図5.34のように動径方向距離を10cmとして線源Sc1と線源Sc2を向かい合わせに配置し、線源距離を0cmから22cmまで変化させた測定結果を図5.35に示す。サムピーク法によって得られた値は真の崩壊率の合計と±10%で一致し、測定精度が改善されている。同様に、3個の線源で図5.36のように線源距離を10cmとし、動径方向距離を0cmから16cmまで変化させて、正三角形の配置で線源を測定した結果を図5.37に示す。この場合は、サムピーク法によって得られた値はそれぞれの線源の真の崩壊率の合計に比べて全体的に小さいが、おおよそ真の崩壊率の-10%に収まる。

検出効率の異なる分布線源の測定として、図5.38のように3個の線源を線源プレート上に、動径方向距離0cmの位置に線源Sc1、5cmに線源Sc2、10cmに線源Sc3となるように配置し、線源距離を0cmから22cmまで変化させて測定した結果を図5.39に示す。測定結果は真の崩壊率の合計と±10%で一致し、図5.25と同様に線源距離が長くなるにつれて、真の崩壊率の合計に近づくことがわかる。

以上のように、⁴⁶Sc線源の測定についても、相対検出効率35%のHPGe検出器を用いた場合には、検出できるサムピークが小さいために十分な測定精度が得られなかった線源距離15cm以上の測定において、相対検出効率61%の検出器を使用することで測定精度が改善できる。分布線源の場合には、検出器を遠ざけるほど各線源の検出効率の違いが小さくなり、サムピーク法によって得られる値が実際の崩壊率の

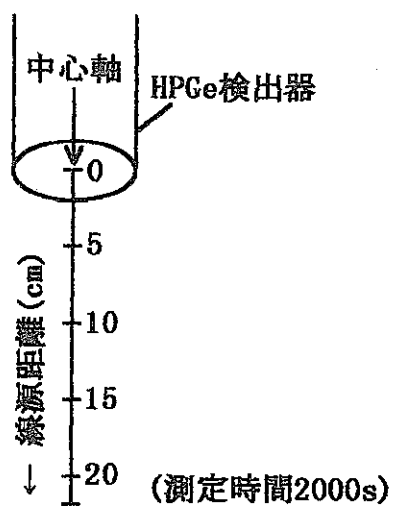


図5.26 線源配置1 (線源距離を変えて点線源を測定)

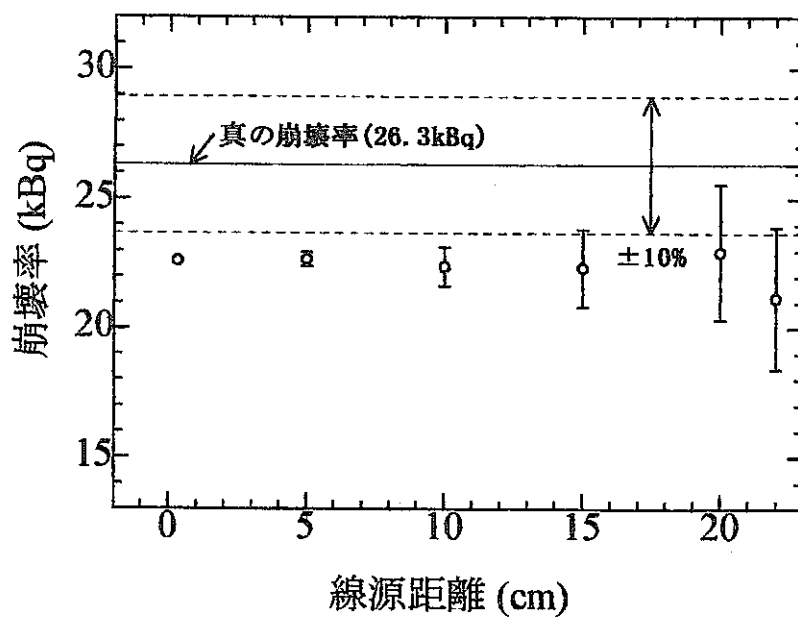


図5.27 線源距離を変えて点線源を測定

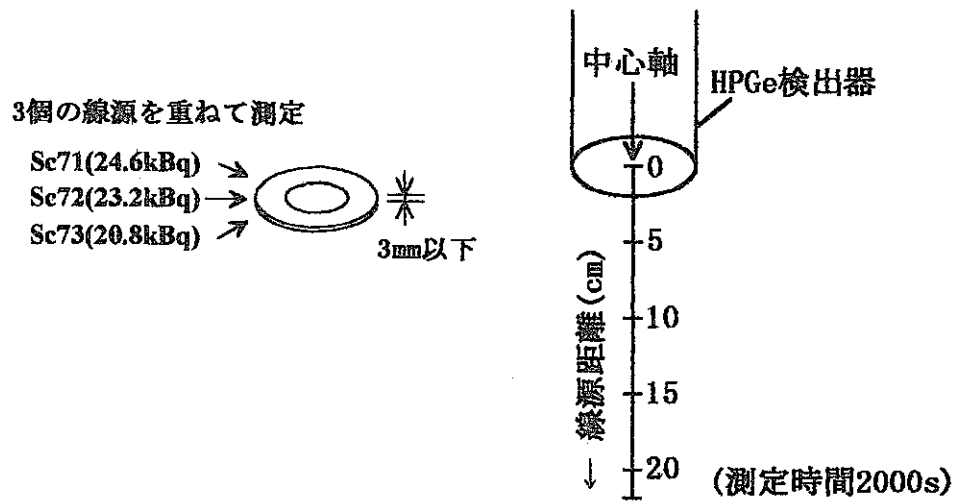


図5.28 線源配置2(線源距離を変えて点線源を測定)

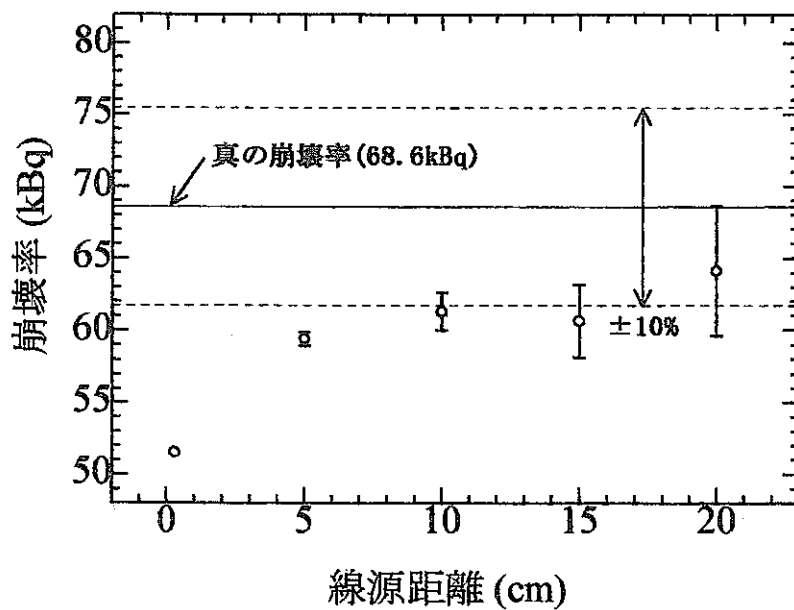
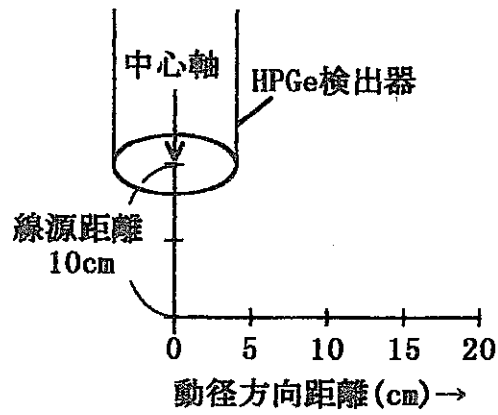


図5.29 線源距離を変えて点線源を測定



(測定時間2000s)

図5.30 線源配置3(動径方向距離を変えて点線源を測定)

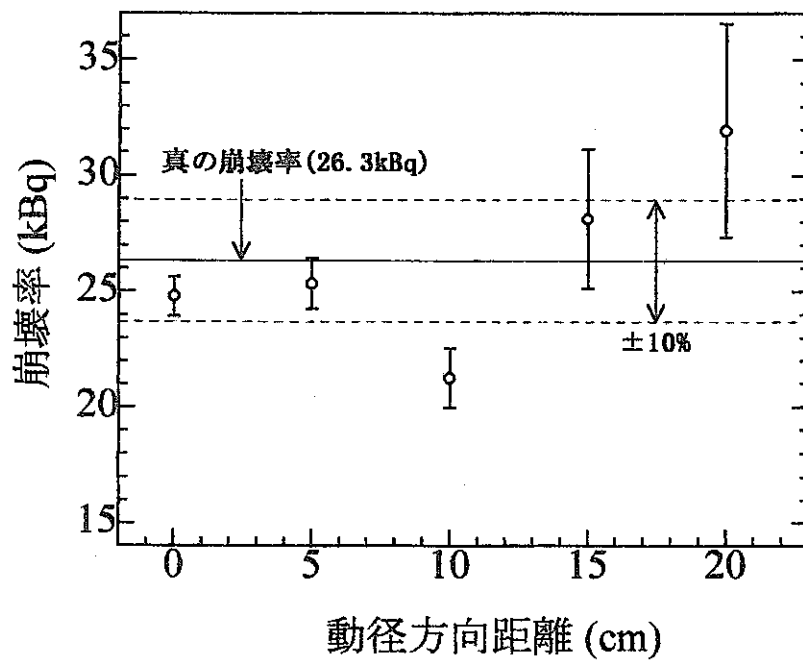
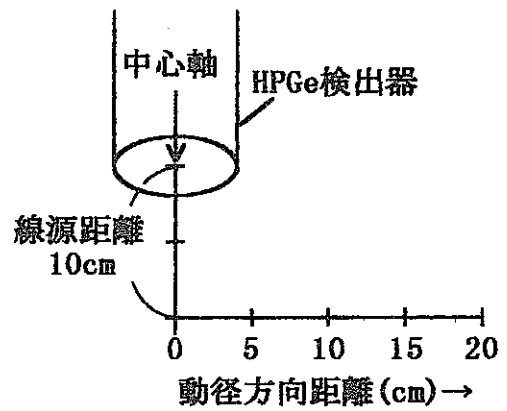
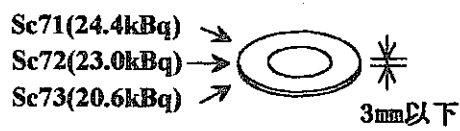


図5.31 動径方向距離を変えて点線源を測定

3個の線源を重ねて測定



(測定時間2000s)

図5.32 線源配置4(動径方向距離を変えて点線源を測定)

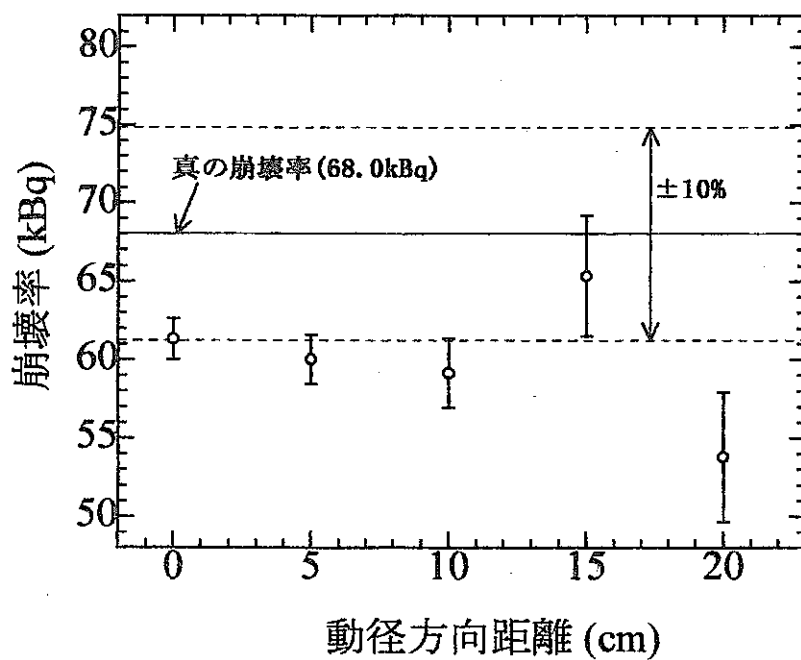


図5.33 動径方向距離を変えて点線源を測定(線源距離10cm)

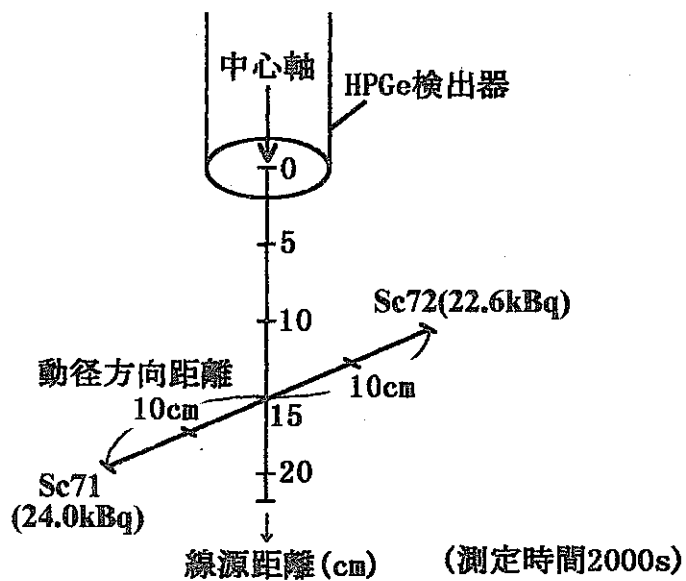


図5.34 線源配置5(同じ立体角で複数の線源を測定)

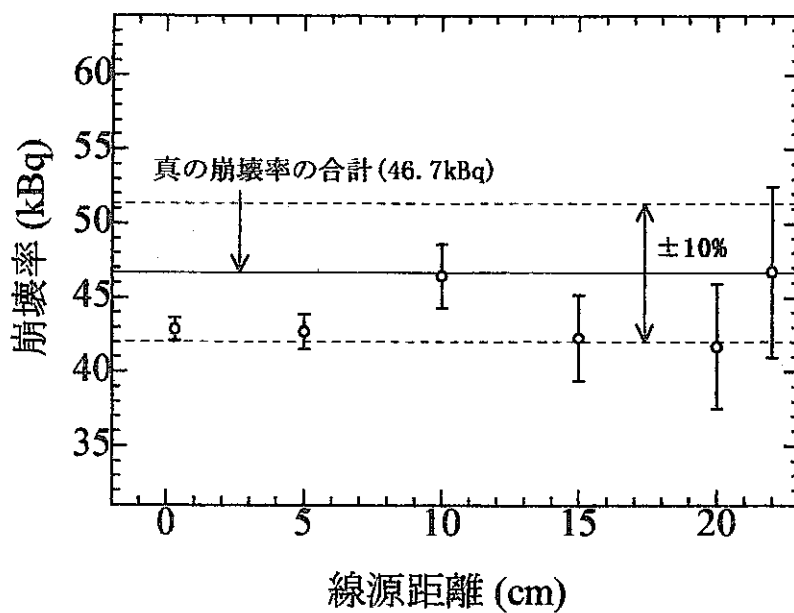


図5.35 線源距離を変えて仮想分布線源を測定(動径方向距離10cm)

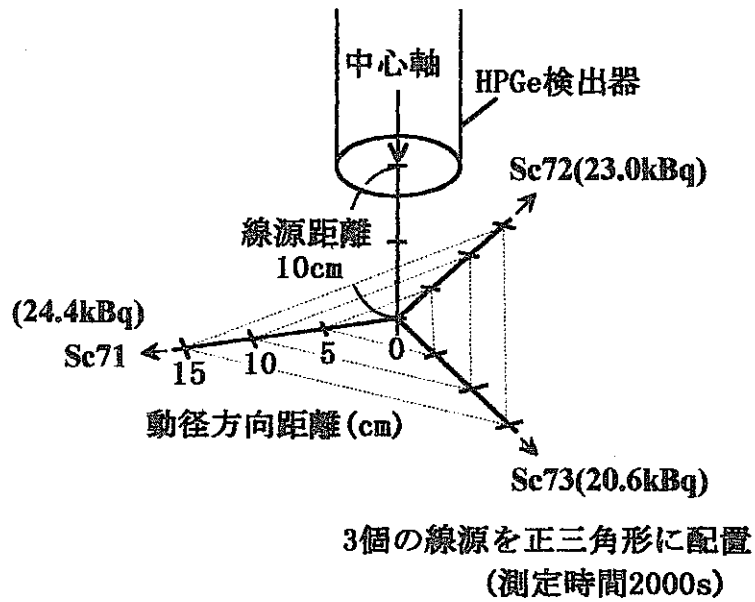


図5.36 線源配置6(同じ立体角で複数の線源を測定)

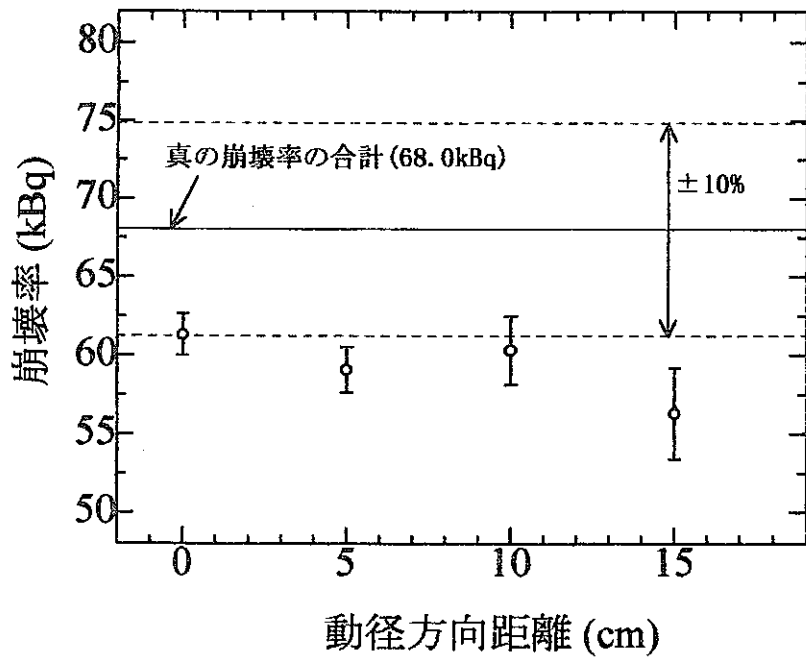


図5.37 動径方向距離を変えて仮想分布線源を測定(線源距離10cm)

(測定時間2000s)

Sc71 24.2kBq

Sc72 22.8kBq

Sc73 20.4kBq

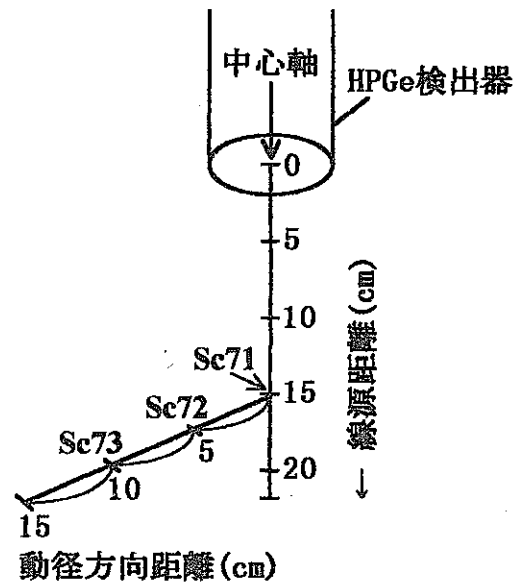


図5.38 線源配置7(異なる立体角で複数の線源を測定)

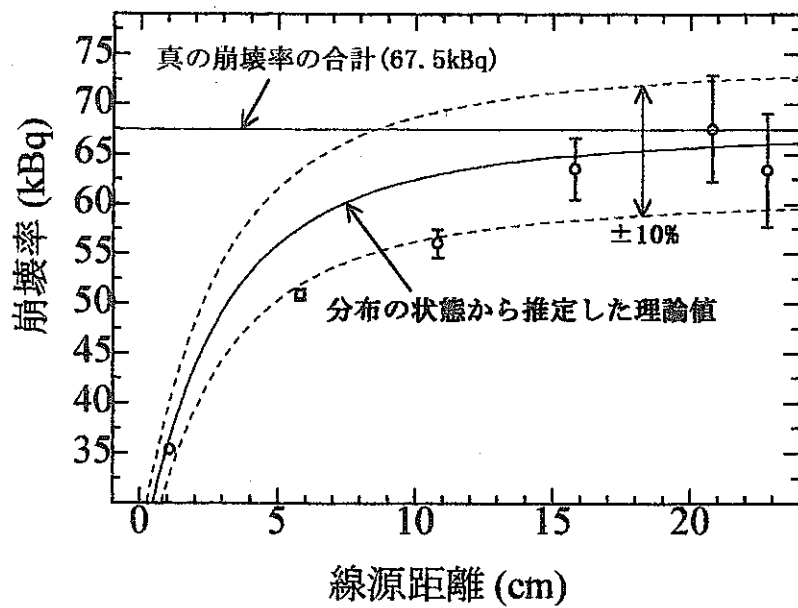


図5.39 線源距離を変えて仮想分布線源を測定

合計に近づく。そこで、距離を大きくとった場合でも測定精度を得るために、相対検出効率の高い測定器を用いる必要があると云える。

また、これらの実験結果が全体的に小さい値となったことについては、原因として考えられるpile-upや偶然同時計数が、高い相対検出効率の検出器を使用するほど影響が大きくなるため、今後は測定システムを再検討し、より高い計数率の場合に際しても信頼できる測定値が得られる改良を図る必要がある。

第6章 まとめと今後の課題

6.1 γ 線サムピーク法の他の核種への応用

γ 線サムピーク法は、 ^{60}Co 、 ^{46}Sc が β 崩壊後に2本の γ 線をカスケードに放出する核種であることを利用した測定方法である。そこで、カスケード状の崩壊をする他の核種について、 γ 線サムピーク法を利用した測定の可能性を考察する。

γ 線サムピーク法によって測定を行うことができる核種は、カスケードに γ 線を放出する核種であることが基本的条件である。ただし、カスケードに γ 線を放出するだけでなく、クロス・オーバー γ 線を放出する核種では、サムピークのためのピーク面積を得ることができないため、 γ 線サムピーク法で崩壊率を求めることはできない。同様にクロス・オーバー γ 線を放出しない核種であっても、カスケードに放出される2本の γ 線のエネルギーの和に近いエネルギーを持つ γ 線を別に放出し、HPGe検出器で分解して検出することができない核種の場合には、この方法は応用できない。逆に、多くの γ 線を放出する核種であっても、 γ 線サムピーク法に用いる2本の γ 線とそのサムピークのエネルギーが他の γ 線のエネルギーと十分に離れている場合にはこの方法で測定できる可能性がある。

これらの条件に加えて、サムピークを生ずる2本の γ 線がどちらも高い放出率の核種であることが必要となる。2本の γ 線の放出率がどの程度まで小さい核種に応用できるかは、測定する線源の崩壊率と使用するHPGe検出器の相対検出効率の大きさによる。ここでは、判断の目安として γ 線放出率が20%以上で、この方法が応用できる可能性が高い核種を表6.1に示す。

表6.1 γ 線サムピーク法による崩壊率測定の可能性高い核種

核種	半減期	第1の γ 線		第2の γ 線		サムピーク
		γ 線エネルギー-[keV]	放出率	γ 線エネルギー-[keV]	放出率	γ 線エネルギー-[keV]
^{46}Sc	83.8d	1121	100%	889	100%	2010
^{24}Na	15.02h	2754	99.9%	1369	100%	4123
^{60}Co	5.271y	1173	99.9%	1333	100%	2506
^{52}Mn	5.59d	936	94.5%	1434	100%	2370
//	//	744	90.0%	936	94.5%	1680
^{124}Sb	60.20d	1691	48.8%	603	97.9%	2294
^{140}La	40.27h	487	45.9%	1596	95.4%	2084
^{192}Ir	74.02d	468	47.8%	317	82.8%	785
^{154}Eu	8.6y	1274	35.5%	123	40.5%	1398
^{72}Ga	14.1h	2202	25.6%	834	95.6%	3036

^{52}Mn については、2通りのサムピークの計算のしかたが考えられる。本実験で使
用した ^{60}Co 、 ^{46}Sc 以外でも、 ^{24}Na 、 ^{52}Mn については、 γ 線サムピーク法による測定が十
分可能である。

6. 2 まとめと今後の課題

点線源の測定では、角相関による補正を行うことにより、線源の配置に関わらず
 $\pm 10\%$ で崩壊率を決定できた。相対検出効率が35%のHPGe検出器を用いた場合には、
検出器と線源との距離が15cm以上の測定において、測定精度が20%よりも大きくなる
ため、十分な測定精度が得られていない。この問題点は、相対検出効率が61.4%の検
出器を用いることで改善されることがわかった。

分布線源の測定では、各線源の検出効率の違いが大きくなるほど、得られる値が
線源の崩壊率の合計より小さくなることがわかった。実験から得られた値は、分布
の状態から推定される理論値とよく一致している。点線源と同様に検出器から15cm
以上離れた線源を測定する場合には、相対検出効率が35%の検出器では十分な測定精
度を得ることができない。

各線源の検出効率がすべて等しい分布線源の測定の場合には、得られる値は線源
の崩壊率の合計と $\pm 10\%$ で一致している。

人体内の放射性物質の測定では、摂取が起こった直後に測定を開始することがで
きる場合には点線源とみなすことができるが、体内に拡散が開始された場合には、
分布の状態は未知である。この場合、サムピーク法によって得られた値が、実際の
放射性物質の放射能強度よりどの程度小さいかを知ることはできない。

このため、得られる値がより実際の放射能強度に近づくように、検出器と身体と
の距離を15cm以上離し、各線源の検出効率の違いを小さくして測定を行う必要があ
る。また、測定精度を向上させるために、より高い相対検出効率の検出器を使用し
て測定を行う必要がある。

今後の課題として、測定精度をさらに向上させるために、2台のHPGe検出器を使用
して測定を行う方法を開発することが考えられる。この際、高い計数率の測定では、
pile-upや偶然同時計数によってサムピークが大きく検出されることにより、測定値
が小さくなる場合がある。そのため測定システムを再検討し、pile-upが起こりにく
いシステムを構築する必要がある。また、原子力事故の際に摂取される可能性が高
い核種に広く適用できるように、測定法を改良することが挙げられる。

参考文献

R.G.Helmer (1982) Nucl. Instr. and Meth. 199, 521.