

## 2. 放射線計測による核種の同定と放射能

### 【目的】

近年、放射線に関する基礎知識や取り扱い方法は、日常に於いても非常に関心が高まっており、特に放射線による生体への影響については、重要な研究課題の一つである。そこで本実験課題では、弱い放射性物質から放出される放射線(β線とγ線)を計数することで、放射線と放射能、およびその計測技術、放射線防護に関する基礎知識の理解・習得を目的とする。ここで放射線とは、宇宙線や放射性物質から放射される粒子や電磁波を指す。天然に存在する $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ などの重い核種は、過剰な核子とエネルギーを安定化させるため原子核から放射線として放出する。一般に、放射線を放出して安定化する不安定な原子のことを放射性物質といい、この不安定な原子核から自ら放射線を放出する性質を放射能、この放出過程を放射性壊変(または崩壊)という。つまり放射線とはエネルギーの流れの一つであり、放射能とはその放射線を放出する能力あるいは性質、放射性物質の数量を意味する。放射線の種類は、電磁放射線(X線、γ線)、荷電粒子線(電子線β<sup>-</sup>、陽電子線β<sup>+</sup>、陽子線など)、電荷を持たない中性子線等に分類される。放射性壊変によりヘリウム原子核 $^4_2\text{He}$ (アルファ粒子)を放出する過程をアルファ(α)崩壊、電子線を放出するものをベータ(β)崩壊、電磁波を放出するものをガンマ(γ)崩壊という。

### 【原理】

#### 《半減期》

放射性物質の崩壊は、ある確率で起こる。これは、単位時間内に崩壊する原子数は、そのとき存在する放射性物質の全原子数に比例するはずである。時刻 $t$ における原子数を $N$ とすると、時刻 $t+dt$ の微小時間に、 $dN$ だけ減少するので、比例定数を $\lambda$ とすると、

$$-dN = \lambda N dt \quad (1)$$

の関係が成り立つ。時刻0で全原子数が $N_0$ で、時刻 $t$ で $N(t)$ になったとして、この微分方程式を解くと

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t) \quad (2)$$

となる。ここで導入した $\lambda$ は、崩壊定数と呼ばれる定数であり、それぞれの核種に固有な値である。実際の測定では、バックグラウンド(自然計数)があるので、試料を取り除いた状態で測定された計数を差し引いたものが $N$ となる。

また、半減期( $T_{1/2}$ と表す)とは、放射性物質が崩壊して、最初の全原子数の半分の量になるまで減衰するのに要する時間のことである。したがって、(2)式より

$$N = \frac{N_0}{2} = N_0 \exp(-\lambda T_{1/2}) \quad (3)$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (4)$$

として、得ることができる。

#### 《吸収係数》

ある遮蔽物質の微小な厚さ $dx$ に毎秒 $N$ 個の放射線が、毎秒 $dN$ 個吸収されるとすると、半減期の計算と同様に比例定数を $\mu$ として、

$$-dN = \mu N dx \quad (5)$$

とかける。この微分方程式を解くと、

$$N(x) = N_0 \exp(-\mu x) \quad (6)$$

となり、 $N$ はバックグラウンドの影響を差し引いたものである。 $\mu$ は吸収係数と呼ばれ、物質に固有な量であり、 $[\text{m}^{-1}]$ の次元を持つ。(6)式を変形し、両辺の自然対数をとると

$$\ln \frac{N(x)}{N_0} = -\mu x \quad \therefore N(x) = -\mu x + \ln N_0 \quad (7)$$

から直線となり、計数率を自然対数でプロットすれば、その傾きが吸収定数 $\mu$ であり、切片 $\ln N_0$ が線源から放出される放射線量であることがわかる。この吸収定数 $\mu$ は、遮蔽定数とも呼ばれ、物質に固有の量である。

### 《定立体角法による放射能の導出》

測定された1秒間当たりの計数率 $n_0$ (バックグラウンド, および遮蔽材と空気による吸収の効果を補正された量)と線源の放射能(1秒間当たりの壊変率) $D$ の関係は以下のように表される。

$$D = \frac{n_0}{G \cdot (1 - A_s) \cdot (1 + s_b) \cdot (1 + s_h)} \quad (8)$$

ここで,  $G$ は幾何効率と呼ばれ, 線源が検出器に対して張る立体角と全立体角 $4\pi$ との比として与えられる。線源の大きさを無視できる場合には,

$$G = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + R^2}} \right) \quad (9)$$

で与えられる。ここで,  $R$ と $d$ はそれぞれ検出器の入射窓の半径および線源と検出器との距離である。また,  $A_s$ は自己吸収と呼ばれ, 線源自身により放射線がある程度吸収されるためにその寄与を補正する係数である。ただし, この見積もりは非常に困難であるため,  $A_s \rightarrow 0$ であるような線源を用いるのが望ましい。 $s_b$ は後方散乱の効果を表す。線源を固定している台により $\beta$ 線は若干後方散乱を受け, 検出器へ入射する。これにより計数が元々の計数より増加することが考えられるため, これを補正する必要がある。最後に,  $s_h$ は周囲の物質, 壁や空気などの散乱により寄与である。

この定立体角法は, 扱う装置および導出が簡単なので, 放射能測定に広く用いられるが, 以上の補正項などの見積もりが難しいため, 測定精度はあまり良くないという欠点がある。

### 【所要装置, 器具, 薬品】

《机上(実験A, B)》			
放射線計測装置KRC-200(本体)	1	, 放射線源( $\beta$ 線源)	1
実験用架台KT-300	1	, 厚さの異なる吸収材(Al板, Cu板, W板)	各1
$\beta$ 線検出器(半導体検出器)CSB-02	1	, 解析用PC(Excel)	1
《机上(実験C)》			
放射線計測装置KRC-200(本体)	1	, 放射線源( $\gamma$ 線源)	1
実験用架台KT-300	1	, 解析用PC(Excel)	1
$\gamma$ 線検出器(CsIシンチレータ)CSX-10	1	,	
《机上(実験D)》			
シャーレ(蓋付)	1	, エタノール	1
スポンジ	1	, フィン(冷却用架台)	1
黒色画用紙	1	, 懐中電灯	1
放射線源( $\beta$ 線源)	1	液体窒素	適量

### 【予習課題】

1. 実験課題A, B-1, B-2, C, Dの実験手順の要点を(例えばフローチャート形式で), 実験ノートにまとめること。
2. 放射線の種類、性質、特徴等について調べ, その要点を実験ノートにまとめること。
3. 放射線検出器(特に半導体検出器, GM計数管, シンチレーション計数管, 霧箱)の装置, 計測原理について調べ,  $\beta$ 線と $\gamma$ 線計測の違いについて実験ノートにまとめること。

### 【実験】

本実験は, 実験A, Bと実験C, Dの4課題を2日間に分けて2人一組で行う。実験A, B, C(実験Dを除く)では同じ計測装置本体(KRC-200)を使用する(検出部のみ $\beta$ 線と $\gamma$ 線で異なる)。**【付録】**の“1. 実験装置(KRC-201型)の使用法”を熟読し, 効率よく実験を進めること。必要なデータは, レポートフォームに則りノートに記録して, USBメモリ等で持ち帰り, レポート作成のために利用すること。なお, 線源の設置や交換は基本的に実験担当者が行う。勝手に線源に触れない

こと。まずは、KRC-200本体と解析用コンピュータ(PC)を起動させる。この時、KRC-200が安定するまで5分程度経過してから測定を開始すること。

#### A. $\beta$ 線強度の距離依存性

本課題では、放射線源と検出器の距離を変化させることで、放射線強度の距離依存性を測定する。これは、万が一放射線の漏洩が発生した際の放射線防護の観点から大変重要な測定である。測定の意味を十分理解し、以下の手順で測定を効率よく進めること。

1. 図1のように実験装置を配置する。
2. 線源を置かない条件(バックグラウンド)で、1分間×3回計数して平均値を求める(線源は、検出器および自分の身体から十分離れた場所に置くこと。線源の移動の際には、線源に触れる時間もできるだけ短くすること)。この結果は実験Bでも使用する。

1回目	2回目	3回目	平均値

3. 検出器からの距離 $L$ を方眼紙のマス目に沿って1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 7.0, 10.0, 15.0 mmと変化させながら、各1分間×3回ずつ計数して平均値を求め、以下の表を埋める<sup>\*1</sup>。
4. 検出器からの距離 $L$ と真の計数率<sup>\*2</sup>の関係を、Excel上で散布図を使ってプロットする。ここで、検出器入口から実際の半導体検出部までは6.0 mm隙間があるので検出器までの真の距離 $L' = L + 6.0$  [mm]であることに注意する。

$L$ (mm)	$L'$ (mm)	1回目	2回目	3回目	平均値	真の計数率
1.0						
2.0						
3.0						
4.0						
5.0						
7.0						
10.0						
15.0						

5. Excelを用い、実験データから累乗関数 $y = x^a$ で近似曲線を求め、距離 $L$ と真の計数率の関係を求める。

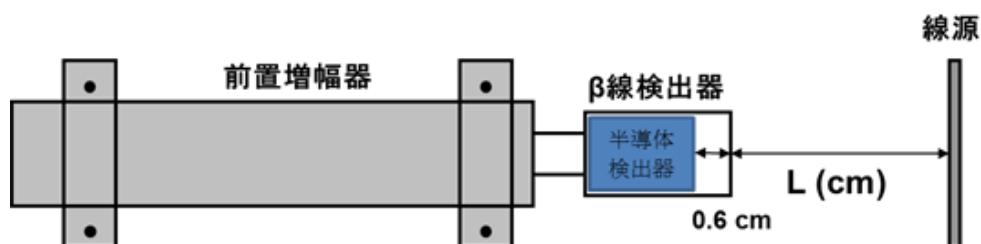


図1 実験Aの概略図

※1 《測定方法》 図7に測定装置本体(KRC-200)が示されている。

1) 切り替え⑩が「DISC」になっていることを確認し、DISCRIつまみ⑧を1.0に固定する。

2) スタートボタン③を押すと計数を開始し、一定の測定時間(本測定では2分間)後、ボタン上のランプが消えたら測定終了となる。測定時間は、タイムプリセット⑦で設定できる。タイムプリセット⑦が「1 min(または60 sec)」にセットされているか確認し、なっていない場合は備え付けの精密ドライバーで設定する。分からなければ担当者に相談すること。

※2 真の計数率とは、線源があるときの平均値とバックグラウンドの平均値の差を、測定時間(60秒)で割った1秒間あたりの個数を意味する(count per second; cpsという)。

### B-1. $\beta$ 線と遮蔽効果

本課題では、放射線源と検出器の間に様々な厚さの金属板を置くことにより、放射線量の減衰を測定する。これは、放射線を遮蔽するための必要な材質を選定するために重要な測定である。また、本測定結果から線源の放射能を導出することもできる。以下の手順に従い測定を進め、本実験課題から放射線の漏洩を防ぐために必要な材質の選定、および放射線と放射能の違いを理解する。なお本課題は、実験B-1とB-2の関連する2課題を行う。

1. 図2のように実験装置を配置する。このとき線源と検出器との間の距離は、 $L = 1.0\text{--}2.0\text{ mm}$ (金属板を検出器と線源の間における間隔をあける)の位置に固定すること。
2. 様々な厚さの3種類の金属板(アルミニウム板、銅板、タングステン板)を検出器と線源との間に置き、 $\beta$ 線の強度を1分間×3回計数し、その平均値から真の計数率を求め、それぞれの標的金属に対して、以下の表を埋めよ。このとき用いる金属板の厚さは、様々な厚さの板を組み合わせ、0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 1.0 mmと強度の変化がほぼ一定になるまで測定する。線源が置かれていない条件で測定されたバックグラウンドは、実験Aの2の結果を用いてよい。
3. アルミニウム板、銅板、タングステン板の各金属板の厚さと真の計数率の自然対数との関係を、Excelを使って散布図でプロットすると、【原理】の(7)式より線形関数(直線)で近似できる。近似曲線の傾きから金属板(遮蔽材)それぞれの吸収係数 $\mu_{\text{Al}}$ ,  $\mu_{\text{Cu}}$ ,  $\mu_{\text{W}}$ を算出せよ。ただし、測定の結果、2つの傾き(途中で折れ曲がったような形状)が観測された場合には、厚さの薄い側から数点の(傾きの急な部分の)データだけを使って線形近似を行うこと。

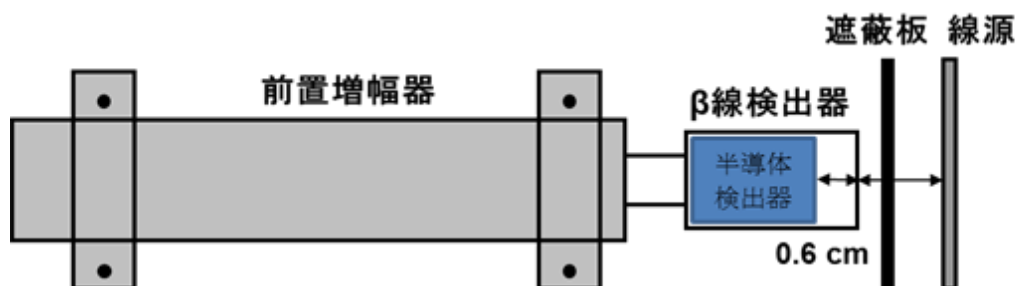


図2 実験Bの概略図

4. 今回測定された3種類の遮蔽物質の吸収係数を比較すると、放射線を遮蔽する材質として最も適した材質は何であると考えられるか。その理由も含めて考察せよ。

厚さ (mm)	1回目	2回目	3回目	平均値	計数率 n	自然対数 LN(n)
0.1						
0.2						
0.3						
0.4						
0.5						
0.7						
1.0						

## B-2. 放射能の計算

ここでは、実験B-1で測定したアルミニウム板の厚さと真の計数率の関係から線源の放射能を導出する。放射能とは、放射線を放出する性質を意味し、1秒間あたりの全放射線数、または壊変数(単位:ベクレル[Bq])で定義される。放射能を見積もるにはいくつかの手法があるが、ここでは定立体角法について学ぶ。定立体角法は、測定精度はそれほど高くはないが、比較的簡単な補正だけで放射能が決められる利点がある。

1. 実験B-1で使用したアルミニウムの厚さ[mm]を面密度[g cm<sup>2</sup>]に換算せよ。ただし、(面密度) = (実際の厚さ) × (密度)で表され、アルミニウムの密度は、2.69 g cm<sup>-3</sup>である。面密度に換算する理由は、β線遮蔽物質の質量に対する吸収率が物質の種類に依存しなくなり、種々の物質に対するβ線の吸収を統一的に扱うことができるためである。
2. 実験B-1で観測されたβ線の計数率は、アルミニウムだけではなく周囲の空気分子にも吸収され減衰されているはずである。空気の密度を1.29 mg cm<sup>-3</sup>、線源から検出器入口までの距離を $L (= 0.3)$  [cm]として、空気の面密度は $1.29 \times (L + 0.6)$  [mg cm<sup>-2</sup>]として計算できる(0.6 cmは検出器入口から実際の半導体までの距離)。この値に1.で換算したアルミニウムの面密度を加えたものが、実際にβ線を遮蔽した全物質となる。実験B-1で測定した表の新しいx軸として、遮蔽物質(アルミニウムと空気)の面密度と計数率の自然対数との関係をExcelの散布図でプロットせよ。
3. プロットした点を【原理】の(7)式より線形関数で近似して得られる切片が、アルミニウムにも空気にも遮蔽されず線源から放出された真の係数率 $n_0$ となる。線形近似の切片から得られる真の係数率 $n_0$ を求めよ。
4. この1秒間当たりの真の計数率 $n_0$ を用い、【原理】の(8)式を使うと放射能 $D$ を求めることができる。今回用いた線源の放射能 $D$ はいくらであったか。ただし、放射能の単位は[Bq(ベクレル) = 壊変数/秒 = 個数/秒]であり、【原理】の(8)式において、 $S_b = 0.5$ ,  $A_s = S_b \approx 0$ であると仮定する。また、幾何効率 $G$ は式(9)を用いて計算せよ。検出器の入射窓の半径 $R = 0.5$  cm、線源から検出器までの距離 $d = (L + 0.6)$  cmである。

## C. γ線エネルギースペクトルと放射線源の同定

本実験課題では、<sup>137</sup>Csと<sup>22</sup>Naから放出されるγ線エネルギーを分析することで、γ線放出の機構、および検出器の原理を理解し、どのようにγ線核種を同定するかを理解する。

1. 図3のように、 $\gamma$ 線源 $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$ が各机に設置され固定されている。実験班が各机に移動し、それぞれの線源について $\gamma$ 線エネルギースペクトルの測定を表1の条件に従い行う。<sup>※1,2</sup>
2. DISCRI⑧のメモリ(CH;チャンネルという)と計数率(1秒間あたりの数)について以下のような表を作成し、そのグラフをExcelで散布図プロットせよ(表はレポートに載せる必要はない)。

CH	線源 $^{137}\text{Cs}$ の計数率	CH	線源 $^{22}\text{Na}$ の計数率
1.20		1.1	
1.25		1.2	
1.30		1.3	
1.35		1.4	
・		・	
・		・	
4.15		7.0	
4.20		7.1	

3. 測定結果から、 $\gamma$ 線エネルギースペクトルが示す形状とその特徴について、グラフからわかることを【付録】を参考に考察せよ<sup>※3</sup>。例えば、ピークのエネルギーは何MeVか、なぜピーク構造を示すかなど。
4. 測定された2枚の $\gamma$ 線エネルギースペクトルは、レポートに添付せよ。

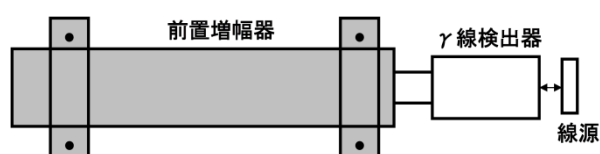


図3 実験Cの概略図



図4 DISCRI⑧のつまみ上部の窓の中が1の位、つまみのメモリの数字が0.1の位を示す

※1 《測定方法》 図7に測定装置本体(KRC-200)が示されている。

- 1) 切り替え⑩が「SCA」になっているか確認する。
- 2) スタートボタン③を押すと、計数開始し、一定の測定時間後、ボタン上のランプが消えたら測定終了となる。測定時間は、タイムプリセット⑦で設定すること。本測定では40秒間である。
- 3) DISCRI⑧(図4)の初期値を表1のようにセットし、そこから表にあるメモリステップ数ずつ(このメモリをチャンネルといい、CHで表し、 $\gamma$ 線のエネルギーに比例する)変化させながら、40秒間ずつ $\gamma$ 線を計数せよ。

表1  $\gamma$ 線エネルギースペクトルの測定条件

線源試料	DISCRI⑧の範囲	メモリ間隔(ステップ数)	CH(測定点)
$^{137}\text{Cs}$	1.2 - 4.2	0.05	60
$^{22}\text{Na}$	1.1 - 7.1	0.10	60

※2 例えば、 $^{137}\text{Cs}$ を測定する場合、DISCRI⑧を1.2メモリに設定して測定を開始し、約0.05メモリずつ変化させながら各40秒間の測定を60点（つまり、4.2メモリまで）測定する。1個の試料を測定し終わったら、次の試料の机に移動して同様の測定を行う。

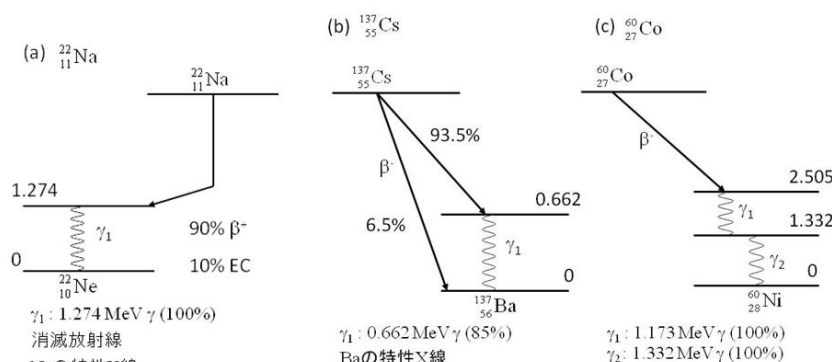


図5  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ の崩壊エネルギーダイアグラム

※3 《データの解析》【付録】に示したように、ベル型(ガウス型)のピーク構造を示す横軸のCH値は、線源から放出されている $\gamma$ 線のエネルギーに比例する。すなわち、高エネルギー $\gamma$ 線が検出されるほど、大きなCH値にガウス型のピーク構造が観測されることになる。例えば、測定した線源が $^{137}\text{Cs}$ の場合、図5に示したように0.662 MeVの $\gamma$ 線が放出されているので、1個のピークが観測される。すなわち、このピーク構造が現れるCH値がガンマ線のエネルギー0.662 MeVに相当する。今回測定で得られた2個の $\gamma$ 線エネルギースペクトルのピーク構造が現れるCH位置と図5を参考に、 $\gamma$ 線源 $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$ に対するエネルギースペクトルの特徴(グラフからわかること)を述べよ。ただし、図5で $^{22}\text{Na}$ に書かれている消滅放射線とは、 $^{22}\text{Na}$ が電子の反物質である陽電子を放出する性質があり、電子と陽電子が消滅することで0.511 MeVの $\gamma$ 線を放出する過程を示している。

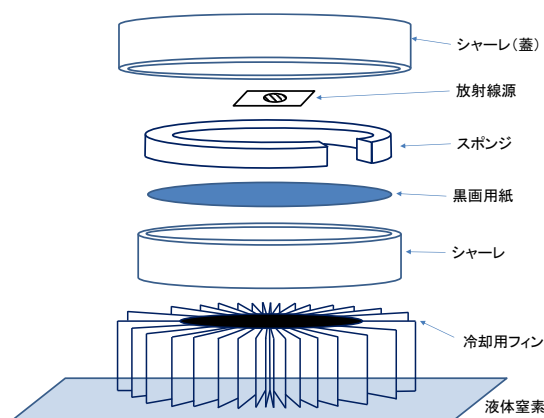


図6 霧箱の準備(液体窒素充填と線源の設置は担当者が行う)

#### D. 霧箱を用いた放射線の観察

本課題では、目に見えない放射線を観察する手法の一つである霧箱を作成し、実際に観察する。霧箱を使うと普段目では見ることのできない放射線が通過した道筋(飛跡)を観測することができる。図6に従ってグループで霧箱を実際に制作し、放射線の軌跡を観測することで、放射線の存在とその種類を自身の目で確認する。

1. シャーレ容器の底に丸く切った黒い画用紙を敷く。
2. 容器の内側側面には、適当な長さのスポンジをシャーレの側面が少し開く程度に敷く(この隙間から懐中電灯

を照らす)。

3. スポンジと黒い画用紙が湿る程度(あまりかけ過ぎない)にエタノールをかけ、黒い画用紙を底面に密着させる。
4. 線源をシャーレの中央付近において(担当者が入れる)、シャーレに蓋をし、シャーレ本体を冷却用フィンの中中央付近に置く。
5. 液体窒素(担当者が行う)で冷却フィンの底面を冷却させる。
6. シャーレの側面のスポンジの隙間から、懐中電灯の光を内部に向かって照射し、3～5分程度経過すると、線源の周辺に放射線の飛跡が観測されるはずである。
7. 飛跡が観測できずシャーレ内部に霧や水滴が発生した場合には、冷却し過ぎである。一度ドライヤーでシャーレ内を乾燥させてからもう一度はじめて行うこと。
8. 放射線の飛跡の様子をノートにスケッチせよ。飛跡には短く太いものと、細く長いものが観測されるはずである。これは何の違いによるものか考察せよ。

#### 【注意】

1. 放射線検出器は精密機器であり、検出部分および本体が破損すると信頼性のある結果が得られないので落したり、叩いたり等の衝撃は決して与えないよう注意すること。
2. 本実験で取り扱う放射線源は密封線源と呼ばれ、強度が弱く安全であるが、試料への物理的な衝撃や長時間に及ぶ携帯は避け(外部被ばく防止)、実験中の飲食・化粧を禁止(内部被ばく防止)する。実験終了後は必ず手を洗うこと。
3. ノイズ発生の原因になるので、通信機能のあるスマートフォン・携帯電話等の電源は切っておくこと。やむを得ない事情がある場合には、実験担当者に相談すること。電卓は、解析用PCのExcelを使うか、関数電卓を使用すること。

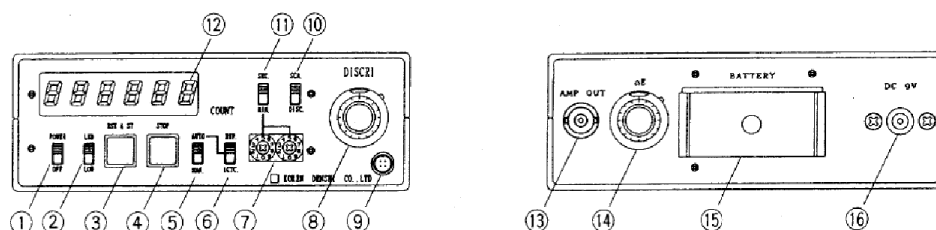
#### 【付録】

##### 1. 実験装置(KRC-201型)の使用方法

###### 《フロントパネル》

1. 電源 ON/OFF  
ONで計測状態になる。ACアダプタ使用時、バッテリーは自動的に切れる。ONを押してから、**約3秒**はプリアンプのチャージノイズを計数するので、その後から計測を開始する。
2. 通常の実験時(ACアダプタ使用時)は、明(LED)で使用する。
3. リセット&スタート用押しボタン。スタートボタンを押すと測定が開始される。
4. 測定を停止するボタン。手動モードおよび計測を止めるときに使用する。
5. タイマーセットを有効(AUT)にするか、手動(MAN)にするかの切り替えボタン。MANの場合、スタート・ストップ押しボタンのみ有効になる。
6. タイマーによる1回測定(1CYC)か、自動繰り返し(REP)か選択できる。
7. 計測時間の設定時に使用する。1秒から99分まで選択可能。
8. COUNTモードで使用時に有効。最小設定メモリは、フルスケールの1/500までセット可能。よって、最小メモリごとSCA計測する場合は、500CH分割で計測する。
9. 検出器接続用端子
10. COUNTモードで使用時に有効。DISCモード(ディスクリミネータモード):ダイヤルメモリ0.00でノイズ計数する。ダイヤルを回し、ノイズ計数しなくなった時点でおおよそ120 keVに相当。SCAモード(シングルチャンネルモード):シングルチャンネルの幅 $\Delta E$ はリアパネル⑭で設定可能。 $\Delta E$ はディスクリミネータ範囲の1/10に設定されている。このとき、DISCRIつまみは、LLD(Low Level Discr)として働く。
11. 測定時間の選択。MIN(分)とSEC(秒)の測定を選択できる。
12. 数値表示パネル。6桁、緑色、LED表示。COUNT選択時は、連続点灯となる。





1 電源スイッチ	9 検出器接続コネクタ
2 LED輝度切換スイッチ	10 シングルチャネル/ディスクリ切換
3 リセット&スタート押釦	11 タイマー単位 秒/分切換スイッチ
4 ストップ押釦	12 緑色LED計数表示
5 AUTO/MAN切換スイッチ	13 リニアアンプ出力 BNCコネクタ
6 REPEAT/ICYC切換スイッチ	14 シングルチャネル ΔE ダイアル
7 タイマープリセット	15 006P-9V乾電池ケース
8 ディスクリミネータダイヤル	16 DC9V INアダプター電源接続

図7 KRC-201型

#### 《リアパネル》

13. アンプ出力用BNC端子。本実験では未使用。
14. シングルチャネル $\Delta E$ 設定ダイヤル。本実験では、0.05-0.10に設定済み。特に説明が無い限り、設定を変えないこと。
15. 9 V乾電池使用時の電池ボックス。本実験では使用しない。
16. DC9Vアダプタ用端子。ACアダプタをコンセントより接続する。

#### 2. 検出器の原理

本実験で使用する放射線検出器は、半導体検出器( $\beta$ 線計測)とシンチレーション計数管( $\gamma$ 線計測)である。それぞれの検出器の原理について簡単に示す。さらに詳しく勉強したい場合には、参考文献を併用すること。

##### 《半導体検出器(実験A, B: $\beta$ 測定)》

図8(右)に示したように、半導体を利用した粒子あるいは放射線検出器である。基本的な動作原理は、放射線が半導体検出器を通過するとそれらによって電離した電子が電子-正孔対を作り出し、これを逆バイアス電場によって電極に集める。こうして集められた電荷を増幅・測定することにより、空孔内部で失われたエネルギーがわかる。

##### 《シンチレーション計数管(実験C: $\gamma$ 線測定)》

図8(左)に示されるように、光学的に透明なある種の結晶(本実験の場合は、CsI(Tl)、タリウムを含むヨウ化セシウム)に荷電粒子または電磁波が入射すると、励起の後の緩和現象の一環として、不純物原子の励起状態が形成され、適当な波長の光が放出されることがある。この光を光電効果により放出される電子を増幅し電気信号に変換すれば、放射線検出器として働く。この検出器をシンチレーション計数管といい、一般に、検出部(シンチレータ)、光電子増倍管部、前置増幅器から成る。シンチレーション計数管により $\gamma$ 線を検出する場合、シンチレータに入射した $\gamma$ 線が光電効果によりそのほぼ全エネルギーをシンチレータに与える過程が重要である。光電効果の確率は原子番号の5乗に比例して増加するので、シンチレータとしては、高い原子番号のものが望まれる。

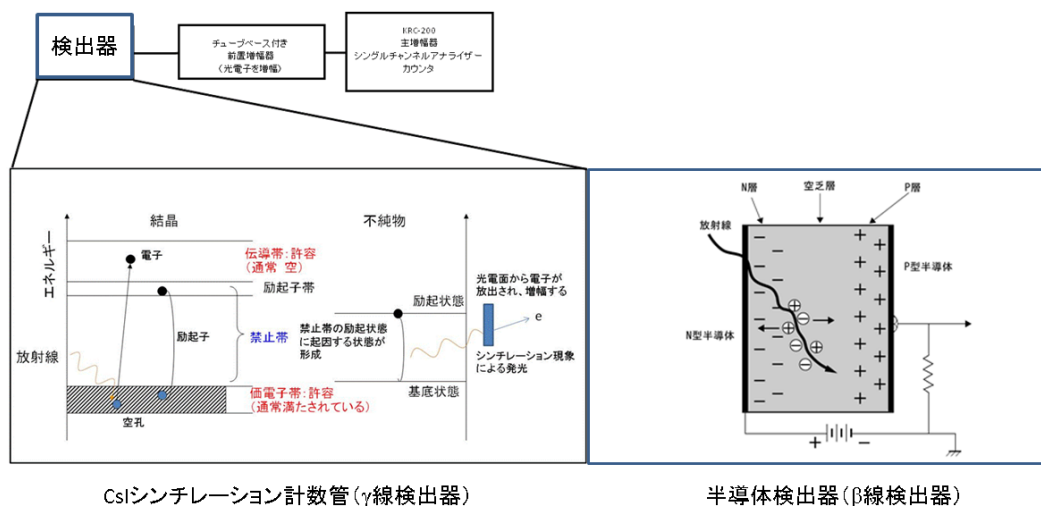


図8 検出器の原理と計測ブロックダイアグラム

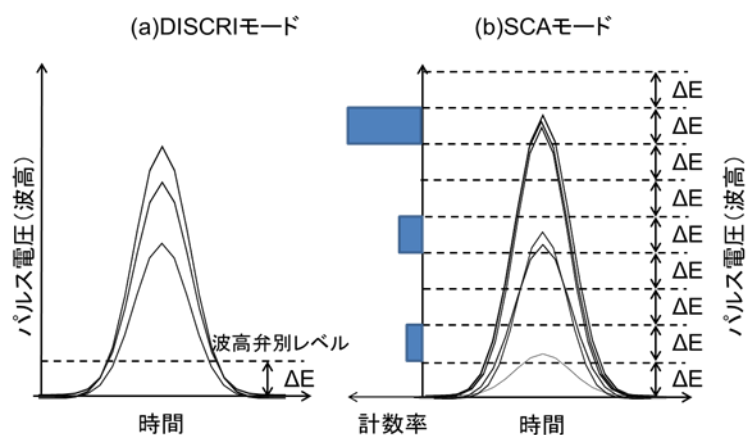


図9 DISCモードとSCAモード計測の原理

### 《信号の増幅と計数》

上で示したシンチレーション検出器から放出される光電子や半導体検出器から放出された電荷から変換された電気信号は、前置増幅器(プリアンプ)により増幅され、電圧信号として検出される。この出力された電気信号は「パルス電圧」と呼ばれ、その電圧の大きさ(波高)により弁別される。

図9 (a) DISCモード: 実験A, Bで行われた全放射線の計数率を測定するときを使用する方法。ある高さ以上の波高を持った電圧パルスをすべて計数することを意味し、放射線の計数率(放射能に比例した量)を計測する場合に用いる。

図9 (b) SCAモード: 実験Cで行ったように、放射線のもつエネルギー分布を測定する場合に用いる。SCAとはシングルチャンネルアナライザーの頭文字であり、パルス電圧の波高が単一のチャンネル $\Delta E$ の範囲内にある放射線数のみを計数することができる。放射線検出器は、入射した放射線のエネルギーが高いほど高いパルス波高の電圧を出力するため、このSCAモードを使用して、 $\Delta E$ は一定のままDISCつまみを変化させ、どのCH値に多くの放射線が計数されるかを測定すれば、どのくらいのエネルギーをもつ放射線が多く検出されたかがわかり、放射線のエネルギー分布を得ることが出来る。

### 3. γ線エネルギースペクトルの構造

実験Cにおいてγ線源 $^{137}\text{Cs}$ と $^{22}\text{Na}$ からは特定のエネルギーをもつγ線が放出されており、その結果、測定されたγ線エネルギースペクトルは、共通のガウス型のピーク構造を示していることが分かる。これは、特定の線源から放出されたγ

線のエネルギーは、付録2で示したようにシンチレーション計数管内で光電効果により電圧信号に変換され、エネルギーに比例した波高電圧として検出されていることを示している。しかしながら、光電効果だけではなく、検出器内ではコンプトン効果も同時に起こっている。コンプトン効果による散乱光エネルギーが散乱角度により連続的に変化することから、図10に示したようにベル型(ガウス型)を示す光電効果のピークより低いエネルギー領域に連続的に分布することになる。このコンプトン効果による構造は、試料から放出された固有のエネルギーをもった $\gamma$ 線が検出器内で散乱された結果であり、あくまで $\gamma$ 線固有のエネルギーを示すのは、光電効果ピーク位置であることに注意すること。この光電効果のピークに着目すると $\gamma$ 線のエネルギーが分かり、放射線源を同定することが可能となる。

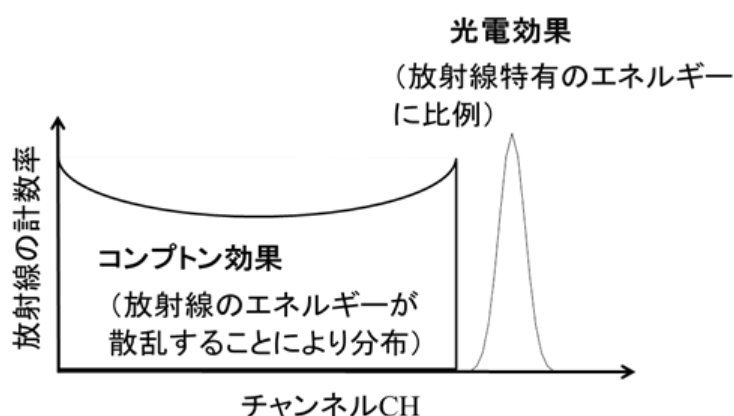


図10  $\gamma$ 線のエネルギースペクトル

#### 《光電効果》

図11 (a)に示したように、物質に電磁波が照射されると、光電効果により光子はそのエネルギーを物質内電子に与えられ電離する。このとき、光子エネルギーの一部は、原子から束縛電子を電離するために消費される。消費されたエネルギーは、標的が原子の場合「電離エネルギー」、標的が金属表面の場合「仕事関数」と呼ばれる。電磁波が、 $\gamma$ 線やX線など高エネルギー( $\sim \text{MeV}$ )である場合、一般に $\sim \text{eV}$ 程度の束縛エネルギー(仕事関数)は無視され、放出電子の運動エネルギーは、おおよそ電磁波の光子エネルギーと等しくなる。

#### 《コンプトン効果》

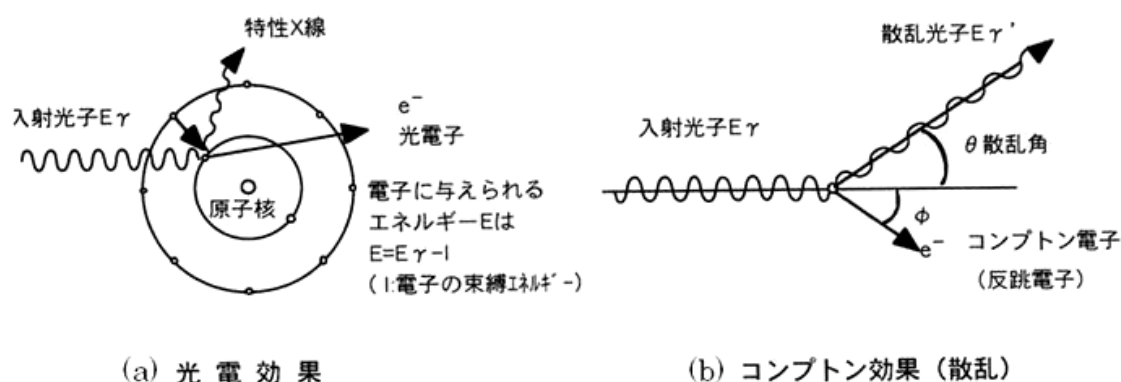


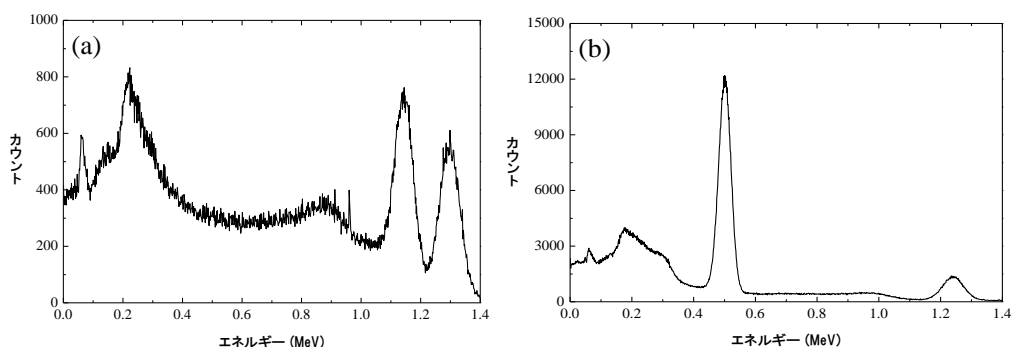
図11 物質と $\gamma$ 線(電磁波)との相互作用

図11 (b)に示したコンプトン効果は、主にゆるく束縛された外殻軌道の電子と電磁波との相互作用により起こり、光子と電子の衝突の結果、光子エネルギーの一部を電子に与える。衝突により入射した電磁波は散乱され、そのエネルギーが減少する。一般に光電効果では、光子エネルギーがほぼ電子の運動エネルギーに変換されるのに対し、コンプトン効果では、電子の運動エネルギーが散乱波の分だけ小さくなるので、両者は区別することができる。

### 【レポート課題】

本課題に対するレポートは、目的、実験原理、実験手順、結果と考察など従来のフルレポート形式に従って作成すること。その際、実験結果や考察において、以下の点に注意し、各課題の答えのみならず、可能であれば参考文献や本テキストの付録から、関連事項について調べ、予習課題を含めてレポートを作製することが望ましい。添付するグラフはマイクロソフトExcel(または、それに準ずるグラフソフト)を使い作成すること。ただし、実験Cについては数値データテーブルを添付する必要はない。

1. 実験A, Bにおいて、バックグラウンドを測定する理由は何か。
2. 実験Aより、線源から放出される放射線( $\beta$ -線)強度と、検出器と線源との距離の間にはどのような関係式があるか。
3. 実験B-1より、それぞれの金属の吸収係数 $\mu$ から、放射線( $\beta$ -線)を遮蔽するのに最も適した材質はどのような物質が良いか説明できるか。
4. 1秒間あたりの放射線数(計数率という)から放射能を見積もる手順、およびその際に用いられる幾何効率Gとは何か説明できるか。
5.  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$ から放出される $\gamma$ 線のエネルギースペクトルの特徴や形状の意味が理解できているか。
6. ある2種類の線源から放出された $\gamma$ 線エネルギースペクトルを測定したら、以下のグラフが得られた。線源は何であったか図5を参考にして説明できるか。ただし、グラフの横軸はエネルギーに換算されている。



7. 霧箱を用いると放射線の飛跡が観測できる理由を説明できるか。
8. 霧箱の実験Dにおいて、太く短い飛跡と細く長い飛跡の違いは何か説明できるか。
9. 万が一、事故等による放射線の大気中への漏洩や発生したときどのように防護したらよいか、本実験結果からその方法について考察できるか。また、 $\gamma$ 線が漏洩・放出された際には、核種を同定するための方法を説明できるか。

### 【参考文献】

- [1] G. F. Knoll著, 木村逸郎, 阪井英次訳, 放射線計測ハンドブック 第4版 日刊工業 (2006).
  - [2] 河田 燕著, 物理学実験9 放射線計測技術 東京大学出版会 (1991).
- その他「放射線計測」に関する文献であれば大概の事は書かれているので、各自調べてみる。