

使用許可を持たない施設における  
下限数量以下の非密封 RI の使用に関する  
安全取扱マニュアル

2016年5月

公益社団法人 日本アイソトープ協会  
ライフサイエンス部会  
下限数量以下の非密封 RI の安全取扱に関する専門委員会

# 目 次

はじめに .....	1
1. 下限数量以下の非密封 RI とは .....	2
1-1 非密封 RI の定義について .....	2
1-2 下限数量について .....	2
1-3 下限数量以下の非密封 RI の購入と判断例 .....	4
(1) 1 事業所で 1 核種のみ購入する場合 .....	4
(2) 2 種類以上の核種を購入する場合 .....	4
2. 下限数量以下の非密封 RI を使用するための注意点 .....	5
2-1 受入・保管について .....	5
管理帳簿様式例 1 : 【下限数量以下の非密封 RI の受入・使用簿】 .....	6
管理帳簿様式例 2 : 【下限数量以下の非密封 RI の保管管理帳簿 (核種別集計表)】 .....	6
2-3 使用場所について .....	7
2-4 使用～保管場所への返却について .....	7
3. 日本アイソトープ協会取扱の下限数量以下の非密封 RI を購入するには .....	8
様式例 1 : 非密封 RI 使用事業所登録依頼・同意書 .....	9
様式例 2 : 「下限数量以下 RI 注文書」 (許可使用施設以外の事業所専用) .....	10
4. 下限数量以下の非密封 RI を用いた実験 (実習) 例 .....	11
付 録 .....	13
参考資料 .....	30

## はじめに

放射性同位元素（以下、「RI」という）は、ごく微量でも放射性物質として検知できることから、広い領域で利用されてきました。しかし、RI から放出される高エネルギーの放射線は、人体に影響を及ぼすこともあります。そのため、RI の利用は法令で規制されています。

平成17年6月に放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律で核種毎に規制対象に関する下限数量が設定され、下限数量以下であれば法令で規制されないこととなりました。とはいえ、それが複数同時に存在して下限数量を超えると、法的規制を受けることとなりますので、法的規制の対象外といえども注意して使用する必要があります。

日本アイソトープ協会ライフサイエンス部会では、平成26年5月に「下限数量以下の非密封RIの安全取扱いに関する専門委員会」を立ち上げ、実際に下限数量以下の非密封RIを使用した実験例を巻末付録にまとめ、初めて下限数量以下の非密封RIを実験等に使用する場合でも安全に利用できるように編集しました。下限数量以下のRIの利用は、放射線取扱の管理区域を持つ事業所と持たない事業所がありますので、まず、管理区域を持たない事業所での利用について、本マニュアルをまとめました。

なお、本マニュアルでは安全取扱いのために「下限数量以下RI管理責任者」による下限数量以下の非密封RIの管理と、使用後に発生する廃棄物の適切な処理をお願いしています。また、本マニュアルは下限数量以下の非密封RIを年1回から数回の実習等に利用することを念頭において作成しました。参考にいただければ幸いです。

また、本マニュアル作成にあたり、資料提供等ご協力いただきました大学・高等学校の関係者の皆様に対し感謝申し上げます。

「下限数量以下の非密封RIの安全取扱いに関する専門委員会」委員長 都筑 幹夫

## 1. 下限数量以下の非密封 RI とは

### 1-1 非密封 RI の定義について

「密封された RI」については、規格、使用について定義されていますが、「非密封 RI」については、明確な法的定義がありません。

密封された RI は、その使用について「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」（以下、「放射線障害防止法<sup>\*1</sup>」という）の施行規則<sup>\*2</sup>に「密封された放射性同位元素を使用する場合には、その放射性同位元素を常に次に適合する状態において使用をすること。イ. 正常な使用状態においては、開封又は破壊されるおそれのないこと。ロ. 密封された放射性同位元素が漏えい、浸透等により散逸して汚染することのないこと」と記載されています。

また、その規格については「設計に従った使用において、設計条件での放射性物質の散逸を避けるため、カプセルに密閉するか、支持材に結合して一体化した放射線源」と日本工業規格<sup>\*3</sup>で定義されています。

したがって、非密封 RI は、密封された RI 以外の RI と定義されます。

### 1-2 下限数量について

「下限数量」は、国際原子力機関（IAEA）などの国際機関が共同で策定した「国際基本安全基準」で提唱されている免除レベルという考え方が導入されたものです。

平成 17 年 6 月に放射線障害防止法の一部が改正され、同施行令第 1 条に以下のとおり記載されています。

「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行令」  
(放射性同位元素)

第 1 条 放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（第 20 条の 3 第 2 号及び第 20 条の 4 第 1 号を除き、以下「法」という。）第 2 条第 2 項 の放射性同位元素は、放射線を放出する同位元素及びその化合物並びにこれらの含有物（機器に装備されているこれらのものを含む。）で、放射線を放出する同位元素の数量及び濃度がその種類ごとに原子力規制委員会が定める数量（以下「下限数量」という。）及び濃度を超えるものとする。ただし、次に掲げるものを除く。<sup>\*4</sup>

<sup>\*1</sup> 法令改正に伴う法律名の変更（平成 31 年 9 月頃）への対応として、本マニュアルに記載されている「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（放射線障害防止法）」は、「放射性同位元素等の規制に関する法律」と読み替えてください。

<sup>\*2</sup> 放射線障害防止法施行規則 第 15 条（使用の基準）

<sup>\*3</sup> 日本工業規格「JIS Z 4821-1：2015 密封放射線源-第 1 部：一般要求事項及び等級」、「JIS Z 4821-2：2002 密封放射線源-第 2 部：漏出試験方法」

<sup>\*4</sup> 除外条項の記載は省略

また、非密封 RI の下限数量及び濃度については、「放射線を放出する同位元素の数量等を定める件」（平成 12 年 10 月 23 日科学技術庁告示第 5 号）で、次のように定めています。

- ・数量については事業所全体、濃度については容器 1 個。  
（事業所内に使用場所が複数ある場合は、合計数量で管理する。）
- ・核種が 2 種類以上の場合、「核種ごとの規制対象下限値（「放射線障害防止法」数量告示別表第 1）に対する割合の和が 1 を超える場合」に下限数量を超えるものとし規制対象となる。
- ・数量と濃度の双方が規制対象下限値を超える場合に、規制対象となる。
- ・購入数量と廃棄物の数量で管理する。

告示「放射線を放出する同位元素の数量等を定める件」別表第 1 より抜粋

第 1 欄		第 2 欄	第 3 欄
放射線を放出する同位元素の種類		数量 (Bq)	濃度 (Bq/g)
核種	化学形等		
$^3\text{H}$		$1 \times 10^9$	$1 \times 10^6$
$^{14}\text{C}$	一酸化物	$1 \times 10^{11}$	$1 \times 10^8$
$^{14}\text{C}$	二酸化物	$1 \times 10^{11}$	$1 \times 10^7$
$^{14}\text{C}$	一酸化物及び二酸化物以外のもの	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^4$
$^{22}\text{Na}$		$1 \times 10^6$	$1 \times 10^1$
$^{32}\text{P}$		$1 \times 10^5$	$1 \times 10^3$
$^{35}\text{S}$	蒸気	$1 \times 10^9$	$1 \times 10^6$
$^{35}\text{S}$	蒸気以外のもの	$1 \times 10^8$	$1 \times 10^5$
$^{45}\text{Ca}$		$1 \times 10^7$	$1 \times 10^4$
$^{68}\text{Ga}$		$1 \times 10^5$	$1 \times 10^1$
$^{68}\text{Ge}$	放射平衡中の子孫核種を含む。	$1 \times 10^5$	$1 \times 10^1$
$^{125}\text{I}$		$1 \times 10^6$	$1 \times 10^3$
$^{131}\text{I}$		$1 \times 10^6$	$1 \times 10^2$
$^{137}\text{Cs}$	放射平衡中の子孫核種を含む。	$1 \times 10^4$	$1 \times 10^1$
$^{137\text{m}}\text{Ba}$		$1 \times 10^6$	$1 \times 10^1$

#### 【コラム 1】

本マニュアルにおける下限数量の管理について

先述のとおり、法令上は数量、濃度いずれかが下限値を下回っていれば法令規制対象外として取扱可能となっており、どちらか一方で管理を行えばよいこととなります。ただし実際の運用では、一事業所内に存在する RI（廃棄物を含む）の濃度は通常不均一であり、濃度での管理は非常に複雑になります。よって、本マニュアルでは数量で管理することを推奨しており、数量での管理を前提に記述しています。

### 1-3 下限数量以下の非密封 RI の購入と判断例

#### (1) 1事業所で1核種のみ購入する場合

購入予定の下限数量以下の非密封 RI と保管している非密封 RI (同核種の廃棄物を含む) と合算した数量が、該当する核種の下限数量以下であれば、下限数量以下の RI として購入することができます。

例1)

第1欄		第2欄	保有数量* +購入数量 (Bq)
放射線を放出する 同位元素の種類		数量 (Bq)	
核種	化学形等		
$^3\text{H}$		$1 \times 10^9$	$5 \times 10^8$

(数量告示別表第1より)

\*「保有数量」は保管中の非密封 RI と廃棄物の合計数量。

上記  $^3\text{H}$  の例では、新たに購入する予定の下限数量以下の RI と保管中の  $^3\text{H}$  及び廃棄物 (同核種) の合計数量が、上記表中の数量 ( $1 \times 10^9$  (Bq)) を超えていないので、下限数量以下の RI として購入できます。

#### (2) 2種類以上の核種を購入する場合

核種が2種類以上のときは、核種毎の数量の下限数量 (数量告示別表1で核種毎の数量) に対する割合の和が1を超えなければ、下限数量以下の RI として購入できます。

例2)

第1欄		第2欄	保有数量* +購入数量 (Bq)	下限数量 との比 (B/A)
放射線を放出する 同位元素の種類		数量 (A)		
核種	化学形等			
$^{32}\text{P}$		$1 \times 10^5$	$4 \times 10^4$	0.4
$^{35}\text{S}$	蒸気以外のもの	$1 \times 10^8$	$8 \times 10^5$	0.008
$^{45}\text{Ca}$		$1 \times 10^7$	$4 \times 10^5$	0.04
(数量告示別表第1より)			比の合計	0.448

\*「保有数量」は保管中の非密封 RI と廃棄物の合計数量。

上記の例では、核種ごとの数量の下限数量に対する割合の和が 0.448 であり、1を超えていないので、下限数量以下の RI として購入できます。

## 2. 下限数量以下の非密封 RI を使用するための注意点

### 2-1 受入・保管について

受入事業所は、「下限数量以下 RI 管理責任者」（放射線取扱主任者免状を有する必要はありませんが、放射線取扱に関して一定の知識・経験を持っている方を推奨します）を選任します。

選任された「下限数量以下 RI 管理責任者」は、以下の業務を行います。

- 1) 事業所全体の数量が下限数量を超えていないことを確認するため、受入、使用、保管、廃棄について一元管理する帳簿を作成する。
- 2) RI の受入に際しては、保有数量を含めて（保有数量+新規購入予定数量の値が）下限数量を超えない（核種が2種類以上のときは、核種ごとの保有数量+新規購入予定数量の下限数量に対する割合の和が1を超えない）ことを、「管理帳簿」（参照：管理帳簿様式例1、2）で確認した後に、発注する。
- 3) 下限数量以下の非密封 RI の受入時には発注書と現品を確認し、決められた保管場所に保管する。また、保管場所の管理も行う。
- 4) 受入、使用、保管、廃棄が発生した都度、「管理帳簿」に記録する。また、受入簿、使用簿、保管・廃棄簿等の管理帳簿は、当 RI を廃棄してから5年間保管することが望ましい。

#### 【コラム2】

下限数量以下の非密封 RI が送られてきた際の梱包資材の廃棄方法について（お願い）

日本アイソトープ協会では下限数量以下の非密封 RI を輸送する際、放射線障害防止法の規制対象となる RI を輸送する場合の「L型輸送物」と同等の梱包（段ボール箱）で発送しています。したがって、梱包資材を廃棄する際には、外容器（バイアル瓶等が入っていた容器等）の放射能マーク及びダンボール箱表面の「放射性L」の表示ラベルをはがしてください。はがした放射能マーク及び「放射性L」の表示ラベルは破棄してください。

#### 【コラム3】 下限数量以下の非密封 RI の保管場所は？

実験準備室のキャビネットや冷蔵庫など、みだりに（不特定多数の）人が触れないような場所が適しています。法的な規制はありませんが、キャビネットは施錠することを推奨します。

管理帳簿様式例 1 : 【下限数量以下の非密封 RI の受入・使用簿】

\*本様式では、バイアル、アンプル等、製品 1 本単位での管理を想定しています。

管理番号		下限数量以下 RI 管理責任者氏名		
受入年月日		購入先等		
核 種		製品名等		
化学形等		保管年月日		保管 場所
数 量 (Bq)		告示数量 (Bq)		
使用者氏名等		使用目的等		
使用年月日 (保管年月日)	使用量数量 (Bq)	保管 RI 数量 (Bq)		保管廃棄物数量 (Bq)
	×10	×10		×10

管理番号		下限数量以下 RI 管理責任者氏名		
受入年月日		購入先等		
核 種		製品名等		
化学形等		保管年月日		保管 場所
数 量 (Bq)		告示数量 (Bq)		
使用者氏名等		使用目的等		
使用年月日 (保管年月日)	使用量数量 (Bq)	保管 RI 数量 (Bq)		保管廃棄物数量 (Bq)
	×10	×10		×10

管理帳簿様式例 2 : 【下限数量以下の非密封 RI の保管管理帳簿 (核種別集計表)】

集計年月日		下限数量以下 RI 管理責任者氏名			
告示数量等		保管 RI	保管廃棄物	合計数量 (A) (Bq)	告示数量 との比 (A/B)
核種	化学形等	数 量 (Bq)	数 量 (Bq)		
		×10	×10	×10	
		×10	×10	×10	
		×10	×10	×10	
		×10	×10	×10	
				比の総和	

## 2-3 使用場所について

下限数量以下の非密封 RI は、設定された適切な場所で使用します。また、揮発性のものを使用する場合は、部屋の換気を良くした状態で使用します。

## 2-4 使用～保管場所への返却について

### 1) 使用者への教育訓練

実験等で使用する人は、使用時の注意等について事前に学習することが推奨されます。

### 2) 下限数量以下 RI 管理責任者への事前連絡と許諾

実験等で使用する人は、使用予定の核種、数量、目的、方法、使用場所等を下限数量以下 RI 管理責任者に事前に届け出て、使用許可を得てから、保管場所から持ち出します。

### 3) 使用中の注意点

実験等で使用する人は、使用中は飲食、喫煙など体内に摂取するおそれのある行為をせず、下限数量以下 RI 管理責任者の指示に従うことが求められます。

### 4) 使用した器具の洗浄等

実験等で使用した器具等は、使用后、水でよく洗浄します。また、流し台も水洗いし、実験台や周囲の床の清掃も行います。

### 5) 使用簿等の管理帳簿への記帳

実験等で使用する人は、使用後に、「使用年月日」「核種」「使用数量」「持出者氏名（使用者氏名）」「使用目的」「使用場所」等を使用簿に記録し、下限数量以下 RI 管理責任者の確認を受けます。

### 6) 保管場所への返却

実験等で使用する人は、下限数量以下 RI 管理責任者による使用簿等の管理帳簿の確認を受ける際、残った下限数量以下の RI を決められた保管場所へ返却した旨を報告します。

### 7) 使用後に出る廃棄物の管理

実験等で使用した後に出る廃棄物は、事業所で適切に処理します。

## 【コラム4】 下限数量以下の非密封 RI を第三者に引き渡すことができる？

非密封 RI の使用許可を有する施設への引渡しはできません。また、非密封 RI の使用許可を持たない施設への引渡しについては、下限数量以下の非密封 RI として管理する必要がありますので、引渡先の所有する該当核種の総数量が下限数量以下であることが必要です。なお、核種が2種類以上の場合は、核種ごとの下限数量（数量告示別表1で核種毎の数量）に対する割合の和が1を超えなければ、下限数量以下の非密封 RI として引き渡すことができます。下限数量以下 RI 管理責任者の確認が取れなければ、第三者に引き渡すことはしないでください。

### 3. 日本アイソトープ協会取扱の下限数量以下の非密封 RI を購入するには

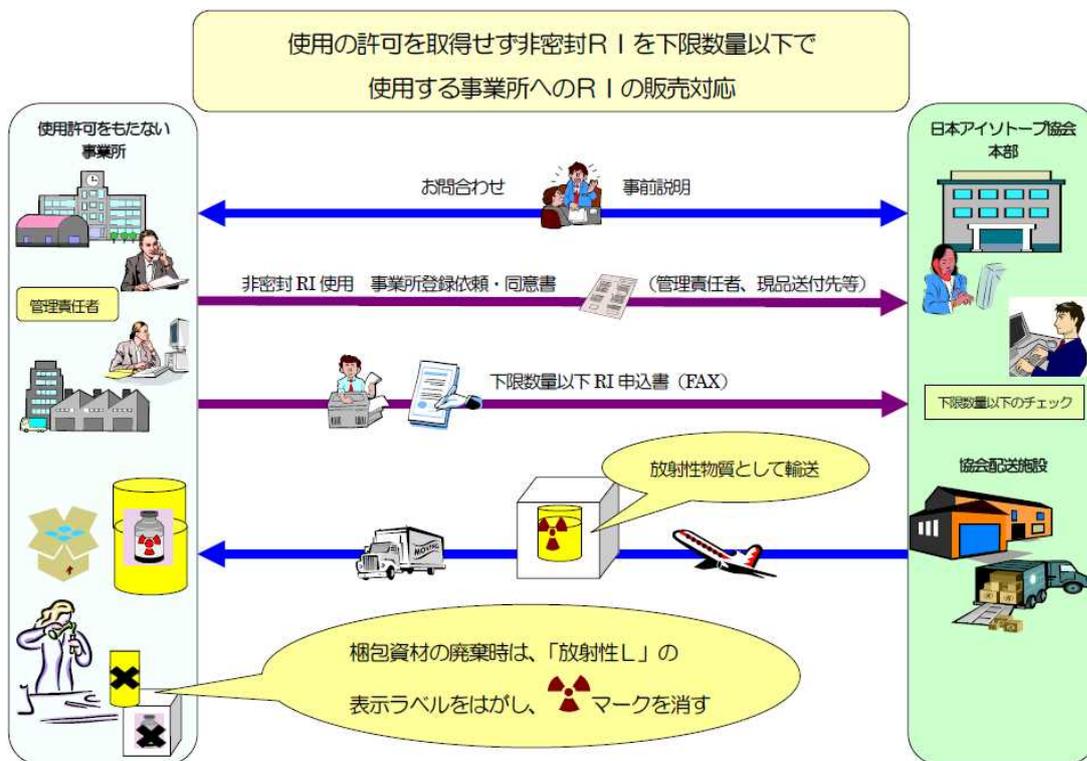
下限数量以下の非密封 RI は放射線障害防止法の規制対象外であり、購入する場合も規制は受けません。しかし、頒布業者である日本アイソトープ協会から下限数量以下の非密封 RI を購入する際は、下限数量以下の RI の注文内容について事前に数点確認させていただきます。特に新規購入の場合は「**下限数量以下の非密封 RI 使用事業所登録依頼・同意書**」（参照：様式例 1）を協会と取り交わした後に購入可能となります（参照：図 1）。

日本アイソトープ協会から下限数量以下の非密封 RI を購入する場合は、あらかじめ、その事業所全体での下限数量以下の非密封 RI の所有について管理する「**下限数量以下 RI 管理責任者**」を選任し管理体制を整えておきます。また、日本アイソトープ協会の担当部署に、購入手続き等の確認をしておきます。

下限数量以下 RI 管理責任者は、事業所内の注文をとりまとめ、日本アイソトープ協会指定の「**下限数量以下 RI 注文書**」（参照：様式例 2）にて FAX 注文します。注文する数量はもとより、受入時に事業所において所有する数量を加えても下限数量以下（複数核種の場合は比の和が 1 を超えない）であることを事前に確認することが必要です。また、受入先（注文書内「現品送付先」）は 1 箇所に限定します。

受取った際には、注文と現品が相違ないか確認し事業所内に受入れます。

図 1. 日本アイソトープ協会取扱の下限数量以下の非密封 RI の注文から受入までの流れ



様式例1：非密封RI使用事業所登録依頼・同意書

平成 年 月 日

下限数量以下の非密封RI使用  
事業所登録依頼・同意書

公益社団法人日本アイソトープ協会 殿

事業所名

放射線障害防止法の使用の許可を取得せずに、非密封RI（下限数量以下）を購入するための事業所登録を依頼します。

また、非密封RI（下限数量以下）を購入・使用するにあたり、別添「使用許可を取得せずに非密封RIを下限数量以下で使用するための注意事項」を遵守することに同意いたします。

事業所CD	※1
事業所名	
代表者名	役職名： 氏名： 印
住 所	〒

管理責任者	
所 属	
氏 名	印
連絡先	TEL： FAX：
	E-mail：

現品送付先	※2
住 所	〒
※3	

- ※1 事業所CDは、当会の記入欄になります
- ※2 管理責任者への送付の場合は記入不要です
- ※3 建物等の名称がありましたら、ご記載をお願いいたします



#### 4. 下限数量以下の非密封 RI を用いた実験（実習）例

##### <物理学に関する実験例>

- $\beta$  線の測定（使用機器；GM 計数管）
  - 1) プラトー特性の測定 ( $^{32}\text{P}$  線源)
  - 2) 測定誤差の統計的変動 ( $^{32}\text{P}$  線源)
  - 3)  $\beta$  線の吸収曲線と未知核種の同定 ( $^{32}\text{P}$ 、 $^{35}\text{S}$ 、 $^{45}\text{Ca}$  線源)
  - 4)  $\beta$  線の後方散乱の測定 ( $^{32}\text{P}$  線源)
- \*大学薬学部での具体的実習例参照（付録1、2）
- 特性曲線および半減期の測定（使用機器；LSC）
  - 1) 娘核種の特性曲線および半減期の測定 ( $^{137}\text{Cs}$ - $^{137\text{m}}\text{Ba}$  ジェネレータ)
- $\gamma$  線スペクトロメトリ（使用機器；Ge 半導体検出器/TS100LaBr  $\gamma$  線検出器）
  - 1) 娘核種の特性曲線および半減期の測定 ( $^{137}\text{Cs}$ - $^{137\text{m}}\text{Ba}$  ジェネレータ)
  - 2)  $\gamma$  線スペクトロメトリと土壤中未知核種の同定（各種標準線源、汚染土壌）

##### <化学に関する実験例>

- ジェネレータの作製と娘核種を用いた実験（使用機器； $\gamma$  カウンタ等）
  - 1) ジェネレータの作製 ( $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$  ジェネレータ)
  - 2) 娘核種のミルクキングと半減期の測定 ( $^{68}\text{Ga}$ )
  - 3) 吸着と共沈 ( $^{68}\text{Ga}$ )
  - 4) 溶媒抽出とイオン交換分離 ( $^{68}\text{Ga}$ )
  - 5) 汚染と除染 ( $^{68}\text{Ga}$ )
  - 6) その他

##### <計測に関する実験例>

- LSC におけるクエンチングと計数効率（使用機器；LSC）
- チェレンコフ光の測定（使用機器；LSC）
  - 1) 水容量と計数効率の測定 ( $^{32}\text{P}$ -無機リン酸)
  - 2) 拭き取り法による RI 汚染検査 ( $^{32}\text{P}$ -無機リン酸)

## <生物学に関する実験例>

### <生化学／医療に関する実験例>

- In vitro 実験（使用機器；LSC）
  - 1) Caco-2 細胞層での薬物の膜透過性試験（ $^3\text{H}$ -化合物、 $^{14}\text{C}$  化合物等）
  - 2) 正常ヒト胚繊維芽細胞（NHLF）での DNA 合成能の測定（ $^3\text{H}$ -チミジン）
- オートラジオグラフィ（使用機器；IP）
- RIA（使用機器； $\gamma$ カウンタ／LSC）
  - 1) 血中インスリンの測定（ $^{125}\text{I}$ -インスリン RIA kit）
  - 2) アセチルコリンエステラーゼ（ACE）活性の測定（ $^3\text{H}$ -RIA kit）

### <動物・植物を用いた実験例>

- 薬物動態（使用機器；ARG/LSC 等）
  - 1) ラット、マウスを用いた ADME（ $^3\text{H}$ -化合物、 $^{14}\text{C}$  化合物等）
- 放射性ヨウ素のマウス甲状腺への集積とルゴール液事前投与による抑制の検討（使用機器； $\gamma$ カウンタ）
- 蛋白質のヨウ素（ $^{125}\text{I}/^{131}\text{I}$ ）標識とその体内動態（使用機器； $\gamma$ カウンタ）
- $^{68}\text{Ga}$  植物による吸収（使用機器； $\gamma$ カウンタ）
- $^{68}\text{Ga}$  の担がんマウスでのがん組織集積性（使用機器； $\gamma$ カウンタ）

### <ゲノム・遺伝子に関する実験例>

- 放射性同位元素を用いたセントラルドグマの検証実験
- DNA の塩基組成・配列を調べよう
- バクテリオファージの遺伝物質の同定

注) 実験操作については、責任者の安全管理のもと、化学実験における基礎的な原則事項に従って行ってください。

## 付 録

付録1：下限数量以下の非密封<sup>32</sup>Pを用いた放射線測定  
(A 大学薬学部の実施例、一部記載省略)

付録2：下限数量以下の非密封<sup>32</sup>Pを用いたβ線の最大エネルギー推定と未知核種の同定  
(B 大学薬学部の実施例)

付録3：下限数量以下の非密封<sup>32</sup>Pと<sup>35</sup>Sを用いた遺伝子発現機構の検証実験  
(サイエンスパートナーシッププログラム等におけるC 高等学校の実施例)

## 下限数量以下の非密封<sup>32</sup>Pを用いた放射線測定 (A 大学薬学部の実施例、一部記載省略)

### 1. 放射線の種類と物質透過性

**【到達目標：放射線を測定できる、放射性核種の半減期を算出できる】**

#### 1. ラジオアイソトープ (RI) の取扱い方

薬学におけるラジオアイソトープ (RI)・放射線の利用は、薬を創る学問、薬の作用機序を明らかにする学問、薬を正しく使う学問など多岐にわたるが、トレーサー研究法の果たす割合は極めて大きい。特に診断用のラジオアイソトープで標識した体内投与用放射性医薬品は、生きているヒトの生体機能を直接追求する薬剤であり、一般医薬品研究が求めている応用学研究の最先端に位置している。たとえば酵素および受容体の特異的な拮抗剤は、生体内の本来の基質よりもより強く結合できるが、これらを放射性元素で標識して生体に投与すれば、標的とする酵素や受容体の多く存在する組織や細胞内器官に集まり、その場所や存在量を映像として特定することができる。この手法は生きたヒトを対象とした診断にも利用されており、脳内の組織の特定の酵素量や受容体量を手術などすることなく測定できる。

病院などの医療機関においては、薬剤師の資格で放射性医薬品としての放射性物質の取扱いが法的に認められており、放射性医薬品の調製や管理については薬剤師が責任を持つべきものである。このようにラジオアイソトープ・放射線に関する正しい知識と理解なしでは薬の科学を進めることは不可能となっている。

薬に有益な作用と有害な作用があるように、ラジオアイソトープ・放射線を利用する科学・技術にも便益と同時に危険性が必ず付随する。ラジオアイソトープ・放射線に悪玉あるいは善玉の区別などはもちろんないが、原子核からのメッセージについて正しい理解と認識を深めることが、ラジオアイソトープ・放射線を安全にかつ有効に使いこなすために重要である。

この実習では、放射性物質についてその有効で安全な利用を行うための基本的な取扱い方を理解するとともに、少量の放射性物質を用いて放射線の性質と検出・測定法について学習・修得する。

**※ 今回の実験に用いる下限数量以下の非密封 RI は、上記の注意を守って適切に使用する限り安全であり、健康上何の問題もありません。**

(1) 下限数量以下の非密封 RI の安全取扱い (項目のみ掲載)

I. 放射線防護の原則

- a) 体外被ばくに対する防護                      b) 体内被ばくに対する防護

II. 下限数量以下の非密封 RI を取り扱う実験室での諸注意

- (2) 放射線の種類と物質との相互作用  
(3) 放射線の測定  
(4) ガイガー・ミュラー (GM) 計数管について  
(5) 半減期について

## 2. GM 計数管を用いた放射線の測定

(1) 調製済みの試薬

$^{32}\text{P}$  水溶液、 $^{51}\text{Cr}$  水溶液

(2) 操作手順

[1] GM 計数管測定を行う検体の調製

- ① 未知検体 (水溶液) 2 種 ( $^{32}\text{P}$ :  $\beta$  線放出核種, エネルギー 1.71 MeV,  $T_{1/2} = 14.3$  d,  $^{51}\text{Cr}$ :  $\gamma$  線放出核種, エネルギー 0.32 MeV,  $T_{1/2} = 27.7$  d) をマイクロピペットで試料皿に採る (10  $\mu\text{L}$ )。  
② 赤外ランプで乾燥させた後、ラッカーを 30  $\mu\text{L}$  を加えて表面に膜を作り、再度赤外線ランプで乾燥させる。(約 5 分間。焦げないように注意する。)  
③ 乾燥した試料をシャーレにいれる。

[2] GM 計数管のプラトー測定による使用電圧の決定

- ① 高電圧調節つまみが最低 (左いっぱい) になっていることを確認する。  
② 確認後、数分間ウォーミングアップする。  
③ 計数装置内の 2 段目に放射線源を置く。  
④ カウントボタンを押し、計数装置を作動状態にする。高電圧つまみをゆっくりと時計方向に回し、印加電圧を徐々に上げていくとある電圧で計数装置が動作し初め、カウント数が表示されるようになる。この時の電圧を始動電圧という。始動電圧で 0.5 分間計測する。  
⑤ 始動電圧から 25V ずつ印加電圧を上げていき、それぞれの電圧で 0.5 分間計測する。ただし上限は 1400V までとする (1400V は必ず測定する)。

**\*注意!**

GM計数管の電圧を 1450V 以上にすると計数管が破壊され、非常に危険です。1450V 以上には絶対にあげないこと! プラトー部 (計数率がほぼ一定になる領域) を過ぎ、計数率の増加傾向 (連続放電領域) が見られた時は、測定を中止し、すぐに電圧を下げること。

- ⑥ 方眼紙の横軸に印加電圧 (V)、縦軸に計数値をプロットし、プラトー曲線を描く。  
⑦ プラトー部の最初の 1/4~1/3 のところ (区切りのよい電圧) を使用電圧に決定する。

電圧	(始動電圧)							1400 V
Count (0.5分)								

[3] GM 計数管による測定と核種の同定

- ① バックグラウンド (BG、サンプルなしで測定した値) を 1 分間、3 回測定する。
- ② GM 計数管の 2 段目に検体を、1 段目にアルミ板をのせて 1 分間、3 回測定する。その後、アルミ板の厚さを変えて測定を繰り返し、遮へい効果の相違により  $^{32}\text{P}$ ,  $^{51}\text{Cr}$  を同定する。

サンプル	アルミ板の厚さ	0.2 mm	0.5mm	1.0 mm	2.0 mm	3.0 mm
なし	① A の count					
平均 (=BG)	② ①の平均					
	③ ②-BG					
	④ log (③)					
	⑤ B の count					
	⑥ ⑤の平均					
	⑦ ⑥-BG					
	⑧ log (⑦)					

[4] GM 計数管による測定と半減期の算出

- ① GM 計数管の 1 段目に  $^{32}\text{P}$  をのせ、計数率を測定する。さらに、決められた日および「放射能の定量」実習の日に同じ GM 計数管を用いて計数率を測定し、半減期を求める。計数率の測定は毎回、バックグラウンド (BG) を 1 分間、3 回測定し、さらに検体を 1 分間、3 回測定する。検体の計数率 (cpm) から BG (cpm) を差し引く。  
バックグラウンド (BG) は、サンプルを入れない状態で測定することで求められる。

	1.		2.		3.		4.	
	( 月 日 時)		( 月 日 時)		( 月 日 時)		( 月 日 時)	
	BG	$^{32}\text{P}$	BG	$^{32}\text{P}$	BG	$^{32}\text{P}$	BG	$^{32}\text{P}$
1 回目								
2 回目								
3 回目								
平均 (cpm)								
① $^{32}\text{P}$ -BG								
② log (①)								

- ② 測定終了後、GM 計数管の高圧電源のつまみをゆっくりと反時計方向に回し、電圧を下げ、もとの最低の位置になったことを確認してから電源を切る。

### (3) 廃液・廃棄物の処理

すべての廃棄物は所定の廃棄物容器に廃棄する。

### (4) 実験データのまとめ方

- ① [2]の結果から、プラトー曲線を描く。プラトー部を決め、使用電圧およびプラトー勾配を求める。
- ② 計数率の対数値を縦軸に、アルミ板の厚さを横軸にとり、2種類の検体の測定結果（④および⑧）から近似曲線（直線）を描く。

### (5) 課題

- ① 始動電圧(OV)、使用電圧(OV)、プラトー部(OV～OV)およびプラトー勾配をレポートに記す。
- ② 放射線の種類と物質の透過性の関係から、検体A、Bのどちらが $^{51}\text{Cr}$ で、どちらが $^{32}\text{P}$ であるかを考察する。
- ③ 崩壊曲線（直線）の傾きから半減期を求める。

## 2. 放射能の測定

**【到達目標： $^{32}\text{P}$  および $^{40}\text{K}$ の放射能を測定できる】**

### 1. 測定法の原理

この実験の目的は、GM計数管を用いて標準線源との相互比較による放射能の定量測定法を習得することである。GM計数管の厳密な計数効率の測定は多くの補正を必要とし、極めて難しいが、簡易法として、 $^{90}\text{Sr}$ 標準線源を用いて壊変率（放射能）を求める。（一部省略）

### 2. GM計数管を用いた放射能の測定

#### (1) 調製済みの試薬

$^{32}\text{P}$ 水溶液

#### (2) 操作手順

##### [1] $^{32}\text{P}$ の放射能の測定

- ①  $^{32}\text{P}$ の水溶液をマイクロピペットで銅製の試料皿の中央にのせる（10  $\mu\text{L}$ ）。
- ② 赤外ランプで乾燥させた後、ラッカーを30  $\mu\text{L}$ を加えて表面に膜を作り、再度赤外線ランプで乾燥させる。（約5分間。）
- ③ GM計数管のバックグラウンド（BG、自然計数）を1分間、3回測定する。
- ④ 標準線源を1段目に置き、1分間、3回測定する。さらに2段目～6段目と位置を変え、それぞれ1分間、3回測定する。（標準線源（ $^{90}\text{Y}$ ）の放射能\_\_\_\_\_ Bq (=A)）
- ⑤ 試料（ $^{32}\text{P}$ ）について④と同様に行う。

サンプル なし	位置	1 段目	2 段目	3 段目	4 段目	5 段目	6 段目
	① $^{90}\text{Y}$ count						
平均 (=BG)	② ①の平均						
	③ ②-BG						
計数 効率	④ ③/ $(A' \times 60 \times 1.65)$						
	⑤ $^{32}\text{P}$ count						
	⑥ ⑤の平均						
	⑦ ⑥-BG						
$^{32}\text{P}$ 放射能	⑧ ⑦/ $(④ \times 60 \times 1.44)$						

## [2] 自然界に存在する放射能の測定

- ① GM 計数管を求めた使用電圧に設定し、安定化させる。
- ② 市販の KCl 試薬約 1 g を秤量皿に精秤する。(KCl \_\_\_\_\_ g)
- ③ 空の秤量皿 (バックグラウンド (BG、自然計数) を計測する) と KCl の入った試料皿を 2 段目でそれぞれ 5 分間ずつ計測し、計数率 (cpm) を求める。  
(BG : \_\_\_\_\_ counts、\_\_\_\_\_ cpm、KCl : \_\_\_\_\_ counts、\_\_\_\_\_ cpm)
- ④ 測定終了後、GM 計数管の高圧電源のつまみをゆっくりと反時計方向に回し、電圧を下げ、もとの最低の位置になったことを確認してから電源を切る。

## (3) 廃液・廃棄物の処理

すべての廃棄物は所定の廃棄物容器に廃棄する。

#### (4) 実験データのまとめ方

- [1] 指示に従って計算し、表を完成させる。
- [2] KCl の計数率  $n_s$  (cpm) からバックグラウンド (BG、自然計数) の計数率  $n_b$  (cpm) を差し引き、KCl の正味の計数率  $n$  (cpm) を算出する。計数効率を 7.0% として  $^{40}\text{K}$  の放射能を求める式[1-1]ならびに原子数を計算する式[1-2]に数値を代入し、KCl 中に存在する放射性物質  $^{40}\text{K}$  ( $\beta^-$ 線放出核種, エネルギー 1.31 MeV) の存在比を求める。

$^{40}\text{K}$  の放射能  $A$  (dpm) の求め方

$$A = n / (k \times f_w) \cdots [1-1]$$

$A$ : 塩化カリウム \_\_\_\_\_ g 中の放射能の測定値 (dpm)

$k$ : 計数効率 (%) (今回は 7.0%)

$n$ : 測定された標準試料放射線源の正味の計数率  $= n_s - n_b$  (cpm)

$f_w$ : 自己吸収補正係数 塩化カリウム約 1 g の場合: 0.8

$^{40}\text{K}$  の原子数  $N_0$  (個) の求め方

$$A = \lambda \times N_0 \times a \text{ (dpm)} \cdots [1-2]$$

$\lambda$ : 壊変定数

$$T_{1/2} = 0.693 / \lambda \text{ (min)}$$

半減期 ( $T_{1/2}$ ):  $6.73 \times 10^{14}$  min

$\beta^-$  壊変の割合 ( $a$ ): 89.3%

$N$ : \_\_\_\_\_ g の KCl 中に含まれる K 原子の個数  $= \text{KCl のモル数} \times \text{アボガドロ定数}$

KCl の分子量: 74.55

$$\text{KCl 中に存在する } ^{40}\text{K} \text{ の存在比 (\%)} = N_0 / N \times 100 \cdots [1-3]$$

#### (5) 課題

- ① 1 段目～6 段目で計数効率が異なるのは主に何が原因か。また、1 段目～6 段目で  $^{32}\text{P}$  の放射能が異なる結果となった原因を考察せよ。
- ② 今回求めた  $^{40}\text{K}$  の存在比を用いて、体の中から出ている  $^{40}\text{K}$  の放射能 (Bq) を計算せよ。ただし体内のカリウム (原子量: 39.10) は体重のおよそ 0.2% であり、体重は 60kg とする。

#### (6) 参考: 計数効率について

- a) 幾何学的効率      b) 吸収      c) 散乱      d) 数え落とし

## 下限数量以下の非密封 $^{32}\text{P}$ を用いた $\beta$ 線の最大エネルギー推定と未知核種の同定 (B 大学薬学部の実施例)

### ■ $\beta^-$ 線の吸収曲線と未知核種の同定

#### [目的]

$\beta^-$  線の最大エネルギーを推定したり、あるいは GM 計数管の入射窓、試料と入射窓間の空気層による  $\beta$  線の吸収を補正して吸収ゼロの真の計数値を求めたりする時には吸収曲線を作成する必要がある。また、これより得られた吸収曲線を用いて Feather 法などにより未知核種のエネルギーを求め、核種を推定することができる。

そこで、本実習では  $^{32}\text{P}$  線源を用いて吸収曲線を作成し、これより最大飛程を読みとり、最大エネルギーを計算により求める。さらに、Feather 法により未知核種の同定を行う。

#### [理論]

$\beta^-$  線源と GM 計数管との測定装置試料棚に線源を置き吸収体の厚さと計数率との関係を示したものを**吸収曲線**という。 $\beta^-$  線は物質と相互作用し、徐々にエネルギーを失う。 $\beta^-$  線のエネルギーは連続スペクトルを示し、吸収体の厚さを増すと、吸収される  $\beta^-$  粒子の数は減少し、やがてある厚さに達すると、ついにはゼロとなり計数されなくなる。この時の厚さを、その物質中での**最大飛程**という。

#### [準備]

使用機器：GM 測定装置一式

使用器具：アルミ吸収板セット、ピンセット

線 源： $^{32}\text{P}$  線源 (2 kBq)、未知線源 ( $^{32}\text{P}$ 、 $^{35}\text{S}$ 、 $^{45}\text{Ca}$ 、各 2 kBq)

#### [操作]

##### [A] $\beta$ 線の吸収曲線と最大エネルギーの推定

- (1) 主電源スイッチを入れた後、印加電圧調節用ダイヤルを回し、GM 計数管の使用電圧に合わせる。
- (2)  $^{32}\text{P}$  線源を適当な棚に置き、計数率が  $(8\sim 9) \times 10^3$  cpm であることを確認する。
- (3)  $^{32}\text{P}$  線源を棚から取り除き、自然計数を 10 分以上測定する。
- (4) 操作 (2) で得られた棚に  $^{32}\text{P}$  線源を納め、吸収板がない時の計数率を再度測定する。

- (5) 800 mg/cm<sup>2</sup> の前後の吸収板を最大値として、この約 1/10 程の厚さのものから順次、2/10、3/10、・・・と厚みを増して、各々の計数率を測定する。

\* 各計数率からは当然自然計数率を差し引く必要がある。

- (6) 得られた測定値を片対数方眼用紙に、横軸には吸収層の厚さ (mg/cm<sup>2</sup>) を、縦軸 (対数目盛) には計数率をプロットし、吸収曲線を作成する。

\* 吸収板ゼロの点は決して吸収層ゼロではない。空気層の厚さ (1 cm 当たり 1.3 mg/cm<sup>2</sup>) と GM 計数管の窓厚 (各々記載されている) を加えたもの (1.3 × 棚段数 + GM 計数管の窓厚) が、アルミ吸収板ゼロ点にはすでに厚さとして存在している。

- (7) (6) の吸収曲線より <sup>32</sup>P の最大飛程を読みとる (図 1(a))。

- (8) 読み取った最大飛程を次式に挿入して最大エネルギーを求め、理論値と比較する。

$$R = 0.542 \times E - 0.133 \quad (E > 0.8 \text{ MeV})$$

\*  $R$  は g/cm<sup>2</sup>、 $E$  は MeV であるので、計算の際に単位をあわせること。

## [B] Feather 法による $\beta$ 線放出未知核種の同定

吸収曲線から  $\beta$  線の最大エネルギーを求める最も一般的な方法であり、標準線源として RaDEF あるいは <sup>32</sup>P などが用いられる。ここでは、実験[A]で作成した <sup>32</sup>P による吸収曲線を用いる。

- (1) <sup>32</sup>P の最大飛程が 780 mg/cm<sup>2</sup> であることから、実験[A]で作成した <sup>32</sup>P の吸収曲線の横軸 (厚さ) を 78、156、234、・・・702 と分割し、各々の点を 0'、1'、2'・・・、9' とする。この場合、原点 (0') が真の吸収層ゼロの点である。
- (2) 0'、1'、2'・・・、9' から縦軸に平行線を引き、吸収曲線と交わった点を求め、各々の点から横軸に平行に仮想線を引く。さらに、これらを縦軸に投影した点 0、1、2、・・・、9 を有する物指し (Feather analyzer) を作成する (図 1(b))。
- (3) <sup>32</sup>P 標準線源と同様に、未知線源について吸収曲線を作成する。この場合、横軸のスケールは同一でなくともよいが、縦軸のスケールはほぼ同一にする。
- (4) Feather analyzer のゼロ (0) 点を未知線源吸収曲線の吸収層 0 の計数率に合わせる。
- (5) Feather analyzer の 1、2、3、・・・、9 に相当する横軸上の吸収層の厚さ  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、・・・、 $r_9$  を読みとる (図 1(c))。
- (6)  $n$  に相当する吸収層の厚さを  $r_n$  として、見かけの飛程  $R_n = r_n \times (10/n)$  を、 $n = 1, 2, 3, \dots, 9$  について計算する。
- (7)  $n$  と  $R_n$  との関係を図示し、 $n = 10$  に相当する  $R_{10}$  を読みとる (図 2)。

この  $r_{10}$  が最大飛程である。この値と図 3 のアルミニウム中での  $\beta$  線の最大飛程とエネルギーとの関係より、次の式のいずれかを用い最大エネルギーを求める。

$$R = 0.542 \times E - 0.133 \quad (E > 0.8 \text{ MeV})$$

$$R = 0.407 \times E^{1.38} \quad (0.15 \text{ MeV} < E < 0.8 \text{ MeV})$$

ただし、ここで  $R$  は g/cm<sup>2</sup>、 $E$  は MeV 単位。

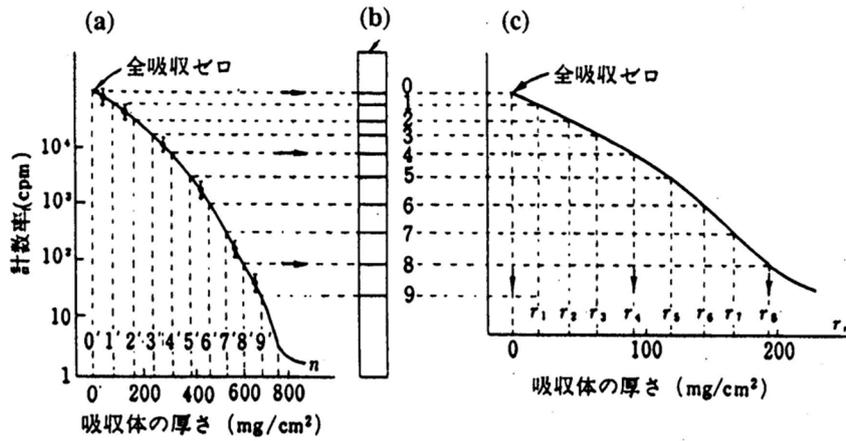


図1 <sup>32</sup>Pの吸収曲線と Feather analyzer の作成

- (a) <sup>32</sup>Pの吸収曲線
- (b) Feather analyzer
- (c) Feather analyzer による未知核種吸収曲線の解析

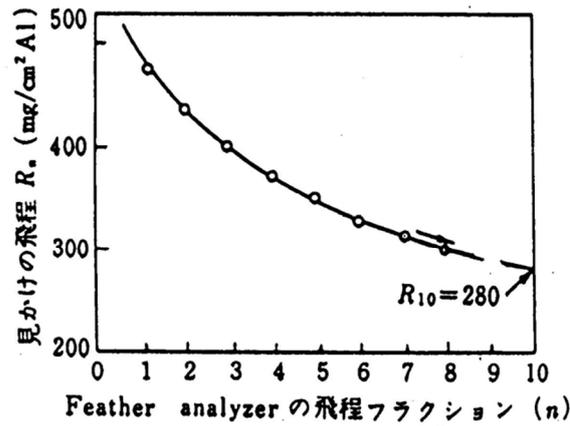


図2 補外法による未知核種の最大否定の推定

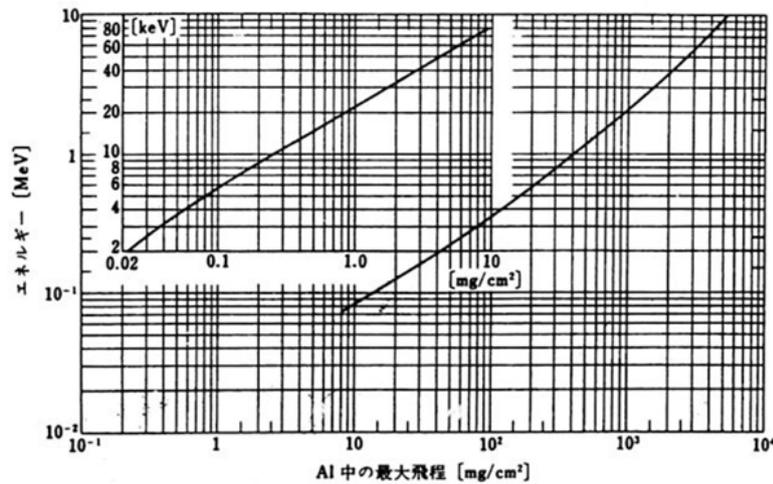


図3 アルミニウム中でのβ線の最大飛程とエネルギー

### [データ処理]

- (1) 操作[B]の(7)で求めた最大エネルギーから未知核種を推定する。

### [考察への手引き]

- (1) Feather 法により全ての $\beta^-$ 線のエネルギーが推定できるのはどのような原則が成り立つからか、その理由を考えること。
- (2)  $\beta^-$ 線と同時に $\gamma$ 線放核種の場合には吸収曲線はどのようなようになるか、考察すること。
- (3)  $\beta^-$ 線のエネルギー決定法には、他にどのような方法があるか。
- (4) 次の核種について放出 $\beta^-$ 線のエネルギーを確認しておくこと。

$^{32}\text{P}$ :  $\beta^-$ 線 (最大エネルギー=1.711 MeV)

$^{35}\text{S}$ :  $\beta^-$ 線 (最大エネルギー=0.167 MeV)

$^{45}\text{Ca}$ :  $\beta^-$ 線 (最大エネルギー=0.257 MeV)

(出典：アイソトープ手帳 11 版 (編集発行：日本アイソトープ協会))

## 下限数量以下の非密封 $^{32}\text{P}$ と $^{35}\text{S}$ を用いた 遺伝子発現機構の検証実験 (サイエンスパートナーシッププログラム等における C 高等学校の実施例)

### [解説]

#### ●バクテリオファージの遺伝物質の同定

DNA は分子内にリンを含みますがイオウを含まず、タンパク質はイオウは含みますがリンを含まないことから、ハーシーとチェイス(1952)はバクテリオファージの DNA を放射性の  $^{32}\text{P}$  で標識し、タンパク質を放射性の  $^{35}\text{S}$  で標識して大腸菌に感染させ、どちらの元素が大腸菌中に入っていくかを調べました。この実験を高校生を対象として実施できます。この実験は典型的なトレーサー実験として非常に教育効果の高い実験です。

- 1) 事前に指導者が  $^{32}\text{P}$  や  $^{35}\text{S}$  を加えた合成培地で大腸菌を培養し、バクテリオファージを加えて溶菌させることで、標識バクテリオファージを得ておきます。
- 2) 生徒実験では、まずそれらのバクテリオファージを大腸菌に感染させた後、ブレンダーやボルテックスなどで激しく攪拌してバクテリオファージを大腸菌からひきはがします。
- 3) 攪拌後に遠心分離を行って上清 (バクテリオファージ) と沈殿 (大腸菌) に分離してそれらの放射能を測定します。

#### ●セントラルドグマの検証実験

遺伝情報は DNA から RNA に写し取られ、RNA の情報をもとにタンパク質が合成されます。この過程を放射性同位元素を使ってトレースする実験です。

##### 1) 転写 (DNA → RNA)

鋳型となる DNA (GFP 遺伝子にプロモーターを連結したもの) と RNA ポリメラーゼ、 $^{32}\text{P}$  標識 ATP、NTP 混合液 (非標識 ATP、TTP、CTP、GTP) を混合して、15 分後にゲル浸透クロマトグラフィー スピнкаラムを用いて、高分子量の画分 (RNA) の放射能を測定します。その際、反応液に RNA ポリメラーゼを添加しなかったもの (対象) と、RNA ポリメラーゼと RNA 分解酵素を加えたものも作製し、高分子物質が RNA であることを確認します。

##### 2) 翻訳 (RNA → タンパク質)

転写実験で合成した GFP の伝令 RNA ( $^{32}\text{P}$ -ATP は用いない) を、破碎した大腸菌液 (無細胞翻訳系) に加え、 $^{35}\text{S}$ -メチオニン、 $^{35}\text{S}$ -システインを含むアミノ酸混合液を加えて 15 分間翻訳を行います。その後、ゲル浸透クロマトグラフィー スピнкаラムを用いて、高分子量の画分 (タンパク質) の放射能を測定します。得られたタンパク質を SDS-電気泳動で展開後、ろ紙に貼付けて乾燥し、イメージングプレートでオートラジオグラフィーを行なって、放射性タンパク質の分子量を求めて、遺伝子として使用した GFP が翻訳されているかを調べます。

また、一晩継続して翻訳反応を行った試験管に紫色の光を当てると GFP の緑色の蛍光が観察できます。

### ●DNA の塩基組成の規則性（シャルガフの法則）を調べよう

DNA の構造がまだ解明されていなかった時代に、シャルガフがさまざまな生物から DNA を抽出して、その塩基の割合を調べた結果、どんな生物の DNA でも アデニン(A)とチミン(T)の量がほぼ等しく、グアニン(G)とシトシン(C)の量がほぼ等しいということと、(A+T)と(G+C)の割合は、生物種によって異なるという経験則を見出しました。この経験則は後にワトソン・クリックによる DNA の構造決定の参考になったと言われていました。

シャルガフは DNA を酸で分解して塩基の組成を直接調べましたが、ここではこの法則を PCR 法を使って検証します。DNA は dATP、dTTP、dCTP、dGTP を基質として合成されますが、それぞれの放射性ヌクレオシド三リン酸を取り込ませ、DNA に G と C がほぼ同量ずつ取り込まれ、G と A は生物種によって異なることを調べます。その際、鋳型となる DNA として、原核生物由来の GC 含量の多い DNA と、植物の葉緑体由来の AT 含量の多い DNA を用い、生物材料の違いが放射能の違いとして反映されるかどうかを調べます。

## [実験の実際]

ここでは、上記「DNA の塩基組成の規則性（シャルガフの法則）を調べよう」を例に取り、実際の高等学校における実施例を紹介します。実施をされる先生方が放射線管理についてそれほど詳しくない場合は、前述のようにお近くの理系大学や科学館などへ協力を依頼してください。

### 1 下限数量以下の RI の入手

この実験では、<sup>32</sup>P で標識されたヌクレオシド三リン酸(dATP, dGTP, dCTP)を DNA 合成の基質として使用します。

- 1) まず管理職の先生へ相談し、「下限数量以下 RI 管理責任者」を選びます。この管理責任者はどなたでも結構ですが、今後この方が中心となって RI の購入や廃棄などの管理を行う事になりますので、実際の実験を担当する理科の先生が望ましいと思われます。
- 2) 日本アイソトープ協会では取り扱っている RI を購入する際は、「下限数量以下の非密封 RI 使用事業所登録依頼・同意書」を交します。
- 3) 発注する RI が下限数量以下であることを管理責任者が確認し、「下限数量以下 RI 注文書」を用いて FAX で注文します。この実験では [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P]dATP, [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P]dGTP, [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P]dCTP をそれぞれ 30 kBq ずつ購入しました (dTTP は入手できなかった)。<sup>32</sup>P の下限数量は 100 kBq なので、3 種類のヌクレオシド三リン酸を購入しても合計で 90 kBq であり、下限数量以下となっています。この実験で購入した RI は ARC 社のもので、カタログ番号は以下のとおりです

ARP0118A Deoxyadenosine 5'-triphosphate, tetra (triethylammonium) salt, [ $\alpha$ - $^{32}$ P]

ARP0120A Deoxycytidine 5'-triphosphate, disodium salt, [ $\alpha$ - $^{32}$ P]

ARP0140A Deoxyguanosine 5'-triphosphate [ $\alpha$ - $^{32}$ P] (tetra-triethylammonium salt)

4) RIを受領したら、発注品したものが正しく納品されたかを確認し、受入れの帳簿に記載します。帳簿の様式は自由ですが、受入者の氏名、日付、数量、保管場所などを記載します（帳簿の例が上に掲載されています）。保管場所は理科準備室のキャビネットや冷蔵庫とし、みだりに生徒などが触れないような場所にします（規則はありませんが、施錠できるものが推薦されます）。受入の記録は使用を終了してから5年間保存します。

## 2 実験の準備

- 1) 下限数量以下とは言え、実験では放射線を放出する物質を取扱うため、実験に参加する生徒およびその保護者には、事前に文書による十分な安全性の説明を行います。
- 2) 使用場所を「生物室」や「化学室」などと決め、それ以外の場所では使用しないようにします。使用場所では飲食など、体内にRIを摂取するおそれのある行為はさせないようにします。
- 3) 実験机にポリエチレンろ紙を貼付けておくと、万一RIが飛散しても対処が容易です。
- 4) 生徒に対しては、放射線の性質や人体への影響、取扱い上の注意点などについて説明しておきます。
- 5) 可能であれば、事前にRIを使用せずに全く同じ手順で実験の練習をしておくと、RI使用実験時の手順や注意点を確認することができ、RI使用実験当日の安全性が向上します（コールドランの実施）。
- 6) 鋳型DNAや精製キットの準備、PCR用試薬の調製など、遺漏の無いように準備をします。特に今回の実験では、PCRに用いる非放射性dNTPの最適濃度（放射性dNTPとの比）を予備実験によって調べておくことが重要です。

## 3 実験の実施

この実験は、通常授業の2時間分を使って実施しました。生徒を5～6人ずつ6班に分け、各々の机に大学生のティーチングアシスタントを1名ずつ配置して実施しました。

- 1) 再度、実験手順を生徒に説明して良く理解させます。
- 2) 実験にあたり、生徒には白衣、手袋、ゴーグル、マスクなどの保護具を着用させます。
- 3) RIは「下限数量以下RI管理責任者」の許可を得た後、保管場所から持ち出します。

[DNA の各ヌクレオチドの放射標識]

放射標識された dGTP、dCTP、dATP の 3 種類のヌクレオシド三リン酸が鋳型 DNA の種類 (AT を多く含む DNA および GC を多く含む DNA) によって、どのくらいの割合で合成 DNA に取込まれるかを測定します。

今回は 6 班に分かれて実験を行い、各班ごとに以下のように 1 種類の DNA について 2 種類の放射標識ヌクレオシド三リン酸を取込ませます。

1 班 AT rich DNA で C と G の量を比較	4 班 GC rich DNA で C と G の量を比較
2 班 AT rich DNA で A と C の量を比較	5 班 GC rich DNA で A と C の量を比較
3 班 AT rich DNA で A と G の量を比較	6 班 GC rich DNA で A と G の量を比較

1. 各班で PCR チューブを 2 本用意し、おのおのに調べる塩基を書きます (1 班なら C と G)。インクが消えやすいので書いた所はあまりさわらないようにして下さい。
2. 2 本の PCR チューブに AT rich 用、GC rich 用の PCR 反応液を 40  $\mu$ l 加えます。  
PCR 反応液には、DNA (AT rich または GC rich)、dATP、dTTP、dCTP、dGTP、プライマー-DNA、耐熱性 DNA ポリメラーゼがあらかじめ混合されています。
3. おのおのの PCR チューブに 10  $\mu$ l の放射標識ヌクレオチド三リン酸を加え、キャップを閉めて混合します。
4. 2~3 秒ほど遠心分離して溶液を下に集めたあと、サーマルサイクラーへ入れて下さい。その際、自分の入れた場所を忘れないようにして下さい。
5. 以下の条件で PCR を行います。

熱変性	94°C	2 分	
熱変性	94°C	15 秒	┌
プライマーの結合	55°C	15 秒	└ 10 サイクル繰り返します
DNA の合成	68°C	15 秒	┌
DNA の合成	68°C	2 分	

[標識された DNA と未反応 dNTP の分離]

PCR で合成された DNA と、DNA に取込まれなかった放射標識 dNTP をカラムクロマトグラフィーで分離します。DNA の精製は、キアゲン社のキット (QIAquick PCR Purification kit) を用います。

1. PCR を行った反応液全量 (50  $\mu$ l) を注意深く PB 溶液 (250  $\mu$ l) の入ったチューブに加えて良く混合します。

2. 上で混合したサンプルを紫色のカラムに入れ、フタに班の番号と加えた放射性 dNTP の種類を書きます(1G, 2A, 3C など)。
3. 1 分間室温で遠心分離を行います。DNA はカラム樹脂に吸着し、dNTP はカラムを素通りします。
4. コレクションチューブ内のカラムを素通りした液を、チューブごとゴミ入れに捨てます。この溶液の放射能は高いと思われるので、こぼしたり飛沫を散乱させないように注意して下さい。
5. 新しいコレクションチューブにカラムを入れます。
6. 樹脂を洗浄するために、500  $\mu$ l の PE 溶液 をカラムに加え、1 分間遠心分離を行います。
7. コレクションチューブ内のカラムを素通りした液を、チューブごとゴミ入れに捨てます。この溶液の放射能も高いと思われるので、こぼしたり、飛沫を散乱させないように注意して下さい。
8. 新しいコレクションチューブにカラムを入れます。
9. カラムに何も加えずに、再度 1 分間遠心分離を行い、PE 溶液を完全に取り除きます。
10. コレクションチューブ内のカラムを素通りした液を、チューブごとゴミ入れに捨てます。
11. 新しいコレクションチューブにカラムを移します。カラムに吸着した DNA を溶出するために、50  $\mu$ l の EB 溶液をカラムに加え、2 分間室温においた後、1 分間遠心分離を行います。

[ポリエチレンろ紙へのスポットと放射能測定]

1. 遠心分離が終わったら、注意深く遠心機からカラムを取り出し、コレクションチューブを外したら、カラムは容器に捨てます。
2. スポット用のポリエチレンろ紙を用意し、マイクロピペットを用いてコレクションチューブ内の溶出液の全量をろ紙にスポットします。
3. スポットしたろ紙 (乾いてなくても良いです) にサランラップをかけ、プラスチックシンチレーション計数器を使って、放射能を計数します。その際、測定する試料以外の部分はアクリルの板で覆っておいて下さい。計数値が大きすぎて振り切れる場合は、講師を呼んで下さい。
4. 2 種類の塩基のスポットの計数値を記録します。  
計数値は CPM で測定されます (1 分間に何本の放射線が検出されたか)。

各班の測定結果を黒板の表に書いて下さい。

5. 実験が終了したら、手を洗ってゴーグルをはずし、白衣、マスク、手袋を所定のゴミ袋へいれます。



下限数量以下 RI 使用実験の様子

#### 4 保管や使用の書類への記帳

- 1) 残った未使用 RI は保管場所へ戻し、RI 管理責任者に返却した旨を報告します。  
また、実験により発生した廃棄物を RI 管理責任者に引き渡し、RI 管理責任者はこれを適切に処理します。
- 2) 使用した核種・数量、廃棄した量を保管量から差し引いて保管記録の更新を行います。使用簿には、「持出年月日時間」「核種・放射能」「持出者（使用者）」「使用目的」を記録し、RI 管理責任者の確認を受けます。これらの書類は使用終了（すべてを廃棄した）後、5年間保管します。

## 参考資料

参考資料1：密封線源を用いた放射線教育の実施例（中学校・高等学校での実施例）

参考資料2：天然放射性物質を用いた放射線教育（中学校・高等学校での実施例）

## 密封線源を用いた放射線教育の実施例

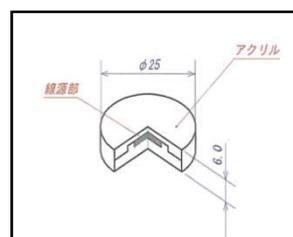
### ◆ 放射線教育用ガンマ線源 $^{133}\text{Ba}$ について

現在、ガンマ線の放射線実験用として、公益社団法人日本アイソトープ協会から、放射線教育用線源( $^{133}\text{Ba}$ 、370 kBq) を無料で借りることができます。なお、同線源はガンマ線の放射線実験で使用の際の十分な線量率がありますが、人体への放射線影響は無視できる程度の線量率であり、下限数量以下ですので、中学校・高等学校でも使用できます。

(<https://www.jrias.or.jp/seminar/cat8/804.html>)

<主な仕様>

- 1) 核種： $^{133}\text{Ba}$  (バリウム133)
- 2) 放射能：370 kBq
- 3) 主なガンマ線のエネルギー：81 keV、303 keV、356 keV
- 4) 形状等：コイン型放射線源  $^{133}\text{Ba}$  を アクリル製のホルダー (縦 32 mm×横 32 mm×高さ 32 mm) に収納。
- 5) その他：放射線障害防止法で規制される「放射性同位元素」ではありません。
- 6) 被ばく線量：50 cm の距離で30分使用した場合の被ばく線量は 0.1  $\mu\text{Sv}$  以下です。



コイン型放射線源  $^{133}\text{Ba}$   
(単位：mm)

### ◆ 放射線検知器について

放射線は人間の五感では感知できないため、放射線測定器を使って検出します。

「はかるくん」はガンマ線測定用簡易放射線測定器ですが、「はかるくんII」では、ベータ線も測定することができます。

現在、一部の都道府県庁、都道府県・市町村の教育委員会などでは、中学校・高等学校向けに簡易放射線測定器「はかるくん」、「はかるくんII」の貸出を行っています。

また、放射線実験用の「実験セット」も同時に貸出していますので、同様にお問い合わせください。



はかるくんII



はかるくん  
DX-200A



はかるくん  
DX-300



はかるくん  
CP-100



はかるくん  
メモリー

簡易放射線測定器「はかるくん」

また、放射線の感光現象を利用して、写真の印画紙を使って放射線を検出する方法もあり、感光に多少の時間はかかりますが、さまざまな透過実験などに使用できます。

## 1. 放射線教育用ガンマ線源 $^{133}\text{Ba}$ と「はかるくん」を使った放射線実験

### (1) 放射線量（率）と距離の関係について学習する（所要時間：20分）

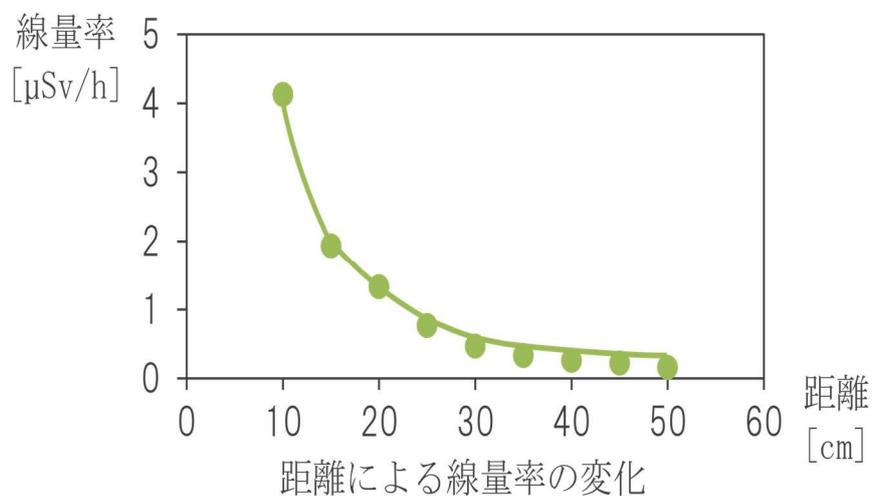
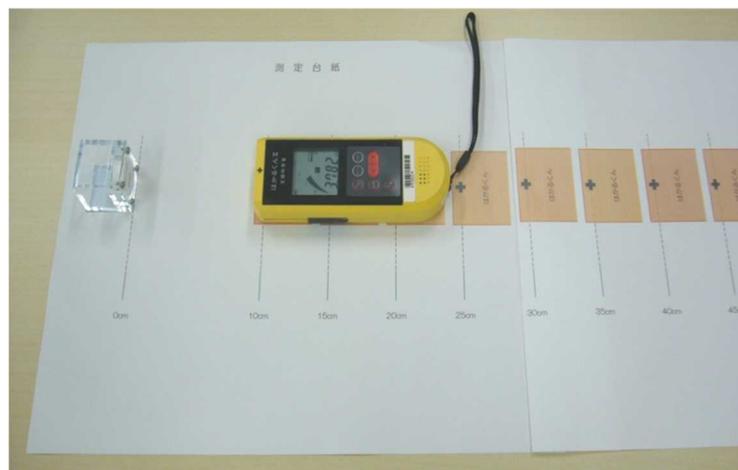
#### 【目的】

放射線の量（線量率）と距離との間には、一定の法則（線量率は距離の二乗に反比例する）があることを放射線教育用ガンマ線源  $^{133}\text{Ba}$  を用いて学習する。また、「距離を取れば、ひばく線量を抑えることができる」という放射線防護の考え方を確認する。

#### 【実験概要】

$^{133}\text{Ba}$  線源と測定器「はかるくん」の設置場所を記した用紙を用意し、「はかるくん」の設置場所を変えて、線量率を測定、記録する。測定結果から、線源からの距離をX軸、線量率をY軸とするグラフを作成する。

作成したグラフから、線量率が距離の二乗に反比例していることを確認する。



## (2) 放射線の透過量の材質による違いについて学習する (レベル計の原理)

(所要時間：20分)

### 【目的】

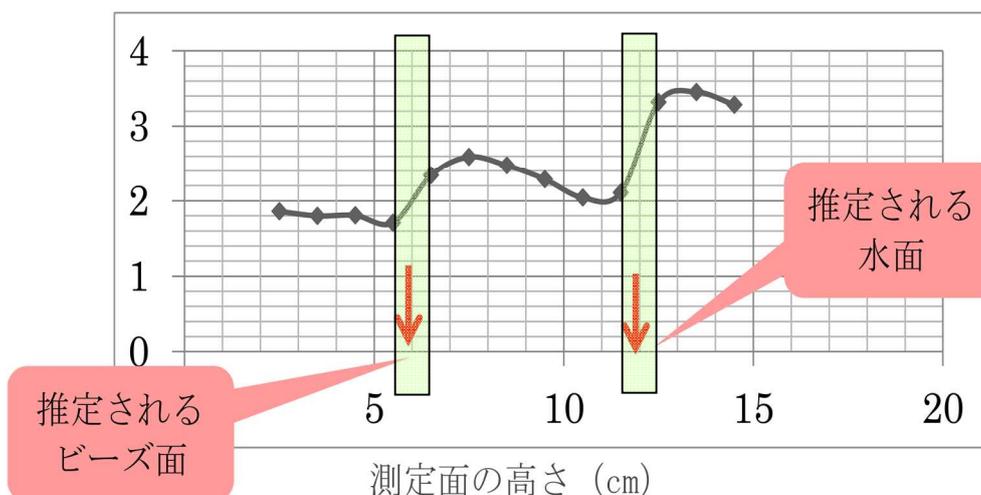
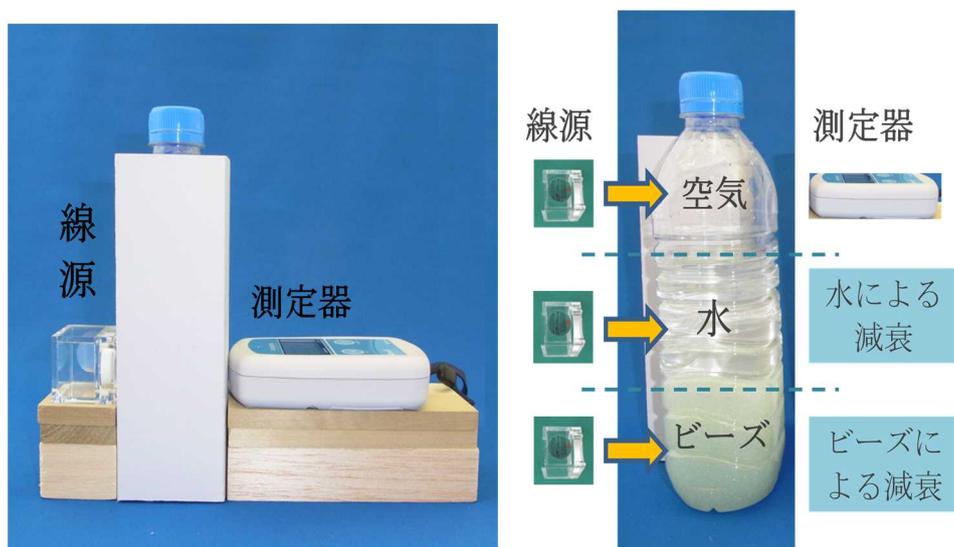
放射線には物質を透過する能力があるが、その透過する量は透過する物質(材質)により異なる。工業分野で放射線を利用した機器に、容器内の液面を外部から管理できる「レベル計」があるが、放射線源として放射線教育用ガンマ線源  $^{133}\text{Ba}$  を用いて、その原理を学習する。

### 【実験概要】

$^{133}\text{Ba}$  線源、「はかるくん」、適量のガラスビーズと水を入れたペットボトル(ペットボトル内が見えないようにボール紙等で覆う)、高さ調節用の板を用意する。

$^{133}\text{Ba}$  線源の高さを変えて(ただし、線源と「はかるくん」は同じ高さ)、その都度、線量率を測定、記録する。測定結果から、測定面の高さをX軸、線量率をY軸とするグラフを作成する。

作成したグラフの大きく変化した箇所で、2点間の中間点をそれぞれペットボトル内のガラスビーズ面と水面の高さとして推定する。



### (3) 放射線の透過量の厚さによる違いについて学習する (厚さ計の原理)

(所要時間：20分)

#### 【目的】

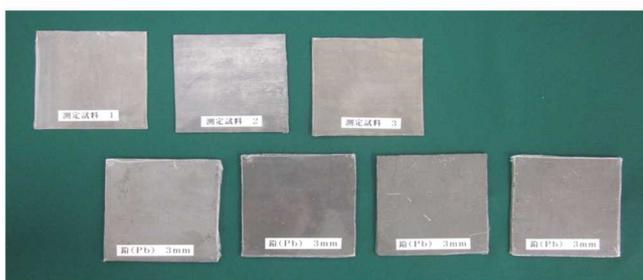
放射線の透過量は、透過する物質の厚さによって変化する。工業分野で放射線を利用した機器として、紙等の厚さを生産ラインで管理できる「厚さ計」があるが、放射線源として放射線教育用ガンマ線源  $^{133}\text{Ba}$  を用いて、その原理を学習する。

#### 【実験概要】

$^{133}\text{Ba}$  線源、「はかるくん」、厚さの異なる鉛板 (又は、同じ厚さの鉛板を複数枚用意)、厚さ不明の鉛板、鉛板を固定するための実験装置を用意する。鉛板の厚さを変えて線量率を測定、記録する。測定結果から、鉛板の厚さをX軸、線量率をY軸とするグラフを作成する。厚さ不明の鉛板の線量率を測定し、作成したグラフから、その厚さを推定する。



測定中の様子 (鉛板厚さ6mm (3mm×2枚) の状態)

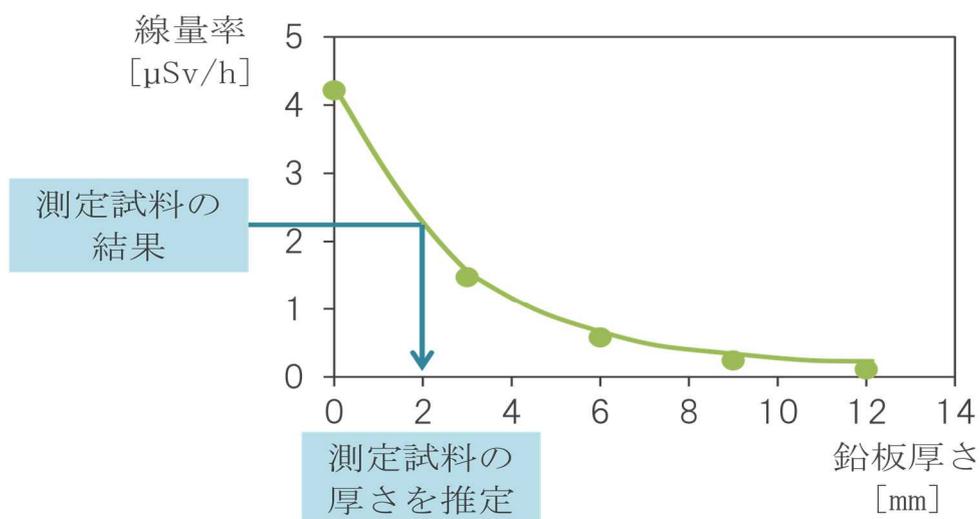


フィルムで保護した測定試料及び鉛板

#### 測定試料

- 0.3 mm厚鉛板
- 0.5 mm厚鉛板
- 1.0 mm厚鉛板

鉛板3mm×4枚



鉛板厚さによる線量率の変化および測定試料の厚さの推定

●中学校における「はかるくん」を使った実施例

1) はかるくんの使い方を練習しよう

自然放射線のバックグラウンドの測定

2) さまざまな物質から出る放射線量率を測定しよう。

- ① 玉川温泉の湯の花                      ② 花崗岩 (かこうがん)
- ③ ランタンのマントル                    ④ 船底塗料の添加剤

3) ガンマ線を効率よくさえぎる物質はどのようなものだろうか？

船底塗料から出てくるガンマ線をさまざまな物質でさえぎって、どのような物質が放射線量率を減らすのに効果があるかを調べよう。また、その効果と物質の密度の関係を考えよう。

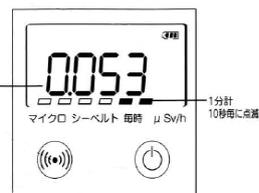
- ① アクリル (密度 : 1.19 g/cm<sup>3</sup>)                      ② アルミニウム (密度 : 2.72 g/cm<sup>3</sup>)
- ③ 真ちゅう (密度 : 8.42 g/cm<sup>3</sup>)                    ④ 鉛 (密度 : 11.34 g/cm<sup>3</sup>)

4) 放射線の量は、放射性物質からはなれると、どのように減って行くのだろうか？

船底塗料から出てくるガンマ線を、5 cm、10 cm、15 cm、20 cm のところで測って、放射性物質から遠ざかると、放射線量率はどのように減って行くのかを調べよう。

「はかるくん」の使用方法

- ・携帯電話の電源を切ってください。携帯電話の電波はエネルギーは低いのですがガンマ線と同じ電磁波で、着信があるとはかるくんの測定数値が上がる場合があります(先生方にもお願いします)。
- ・はかるくんを水に濡らさないでください。
- ・落としたり衝撃を与えたりしないでください。



## はかるくんの使い方を練習しよう

### 自然放射線のバックグラウンドの測定

さまざまな放射線源を遠くに置いてその影響をなくし、まずは自然状態の放射線量率をはかります。この値をバックグラウンドと言ひ、これから測定するさまざまな値からバックグラウンド値を引くことによって、試料からでる放射線量率を求めるのに使ひます。

はかるくんの使い方を説明します。

まず、はかるくんの [電源ON] ボタンを押してください。

「ピッ」と音が鳴って、35 と表示され、数字がだんだん小さくなって行きます。その数字が0 になったら測定ができます。

左下に点滅する点があります。10 秒ごとに1 つずつ点が多くなって行き、そのつど線量率の数字が変わります。6 個 (60 秒) まで行ったらまた点滅は1 個にもどります。

はかるくんは直近 60 秒の平均線量率を測定していますので、測定は最低 60 秒 (1 分) 以上で行います。

- ・電源を入れたら、まず点滅する点が1 個になるまで待ちます。
- ・点滅が増えて行き、次に1 個になった時の測定値を「1 回目の測定値」として記録します。
- ・測定を続け、もう一度点滅が1 個になった時の値を「2 回目の測定値」として記録します。
- ・1 回目の測定値と2 回目の測定値の平均を計算します。

1 回目の測定値 \_\_\_\_\_  $\mu\text{Sv/h}$

2 回目の測定値 \_\_\_\_\_  $\mu\text{Sv/h}$

1 回目と2 回目の測定値の平均：

バックグラウンド \_\_\_\_\_  $\mu\text{Sv/h}$

## 天然放射性物質を用いた放射線教育 (中学校・高等学校での実施例)

放射線やそれを放出する物質は身の回りにはあふれていますが、そのほとんどは人体に害がない程度の非常にわずかな量です。

ここでは、そのようなごく少量の放射性同位元素が含まれる天然放射性物質を使った中学校・高等学校における放射線実験例を紹介します。

なお、天然放射性物質は、日本アイソトープ協会の取扱品目ではありませんので、日本アイソトープ協会から入手することはできません

### 1. KCl (塩化カリウム) 試薬線源を用いて放射線の透過量の厚さによる違いについて学習する (厚さ計の原理) (所要時間: 60 分)

#### 【目的】

放射線の透過する量は、透過する物質の厚さによって変化する。工業分野でベータ線を利用した機器として「厚さ計」があるが、KCl (塩化カリウム) 試薬をシャーレに収納したものを放射線源 (ベータ線) として用いた実験により、その原理を学習する。

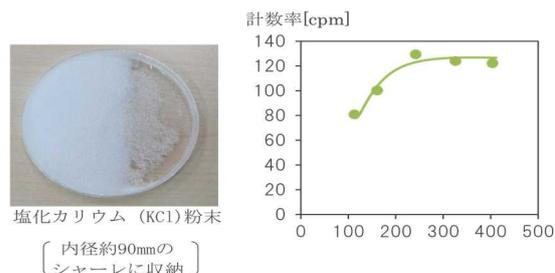
#### 【実験概要】

塩化カリウム (KCl) 粉末をシャーレに収納した放射線源 (ベータ線)、ベータ線測定器「はかるくんII」、厚さの異なるアルミニウム板 (又は同じ厚さのアルミニウム板を複数枚用意)、厚さ不明のアルミニウム板、アルミニウム板を固定するための実験装置を用意する。アルミニウム板の厚さをを変えて線量率を測定、記録する。測定結果から、アルミニウム板の厚さをX軸、線量率をY軸とするグラフを作成する。厚さ不明のアルミニウム板の線量率を測定し、作成したグラフから、その厚さを推定する。

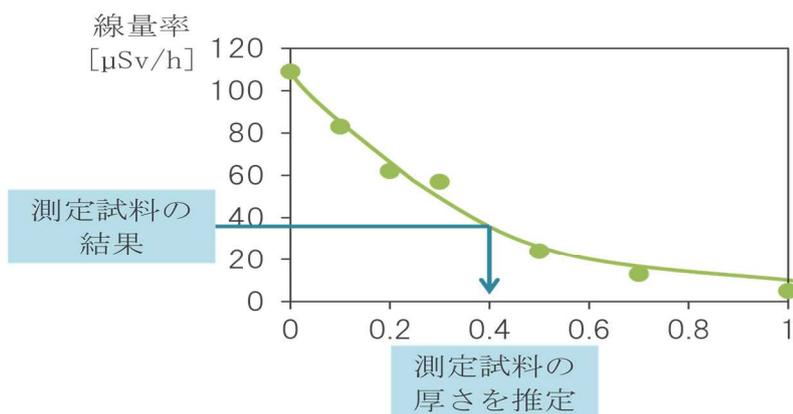


ベータ(β)線厚さ計実験装置

放射線源: 塩化カリウム (KCl) 粉末※



※「授業で使えるβ線の吸収実験—はかるくんIIと身近な材料を用いて—」: Isotope News 2013年2月号 36-38頁



アルミニウム板厚さによる線量率の変化および測定試料の厚さの推定

## 2. 空気中の自然放射能の捕集

### 【目的】

天然の放射性物質を使用する実験用の放射線源として、空気中（室内）に存在する Rn（ラドン）222 の生成物（子孫核種）を捕集したダスト線源を製作する。  
霧箱用放射線源やベータ線の計数率の変化を調べる実験に使用できる。

#### 1) ゴム風船を用いたダスト線源\*の製作（製作時間：30分程度）

##### 手順①：

膨らましたゴム風船（霧箱で使用する場合は、白い飛跡が良く見えるよう暗黒色が望ましい）の表面をウール繊維でこすり帯電させる。



##### 手順②：

膨らましたゴム風船は、コンクリート内壁の室内の壁に付けると静電気のため付いたままになるので、そのまま30分程度放置する。（エアコン停止、入室禁止）



##### 手順③：

ゴム風船の表面には Rn（ラドン）222 が付着しているので、できるだけゴム風船の表面に触れないようにして取り外して、中の空気を抜く。（ダスト線源の完成）



\*霧箱の放射線源（アルファ線、ベータ線）としての利用が可能。

## 2) ティッシュペーパー製ダスト線源の製作 (製作時間: 30 分程度)

下記実験装置により、空气中 (室内) に存在する Rn (ラドン) 222 の生成物 (子孫核種) を「ティッシュペーパー (ろ紙の代用)」に吸引補集する。

霧箱で使用する場合は、白い飛跡が良く見えるよう暗黒色が望ましい



実験装置  
ダストサンプラ等で  
吸引を行う



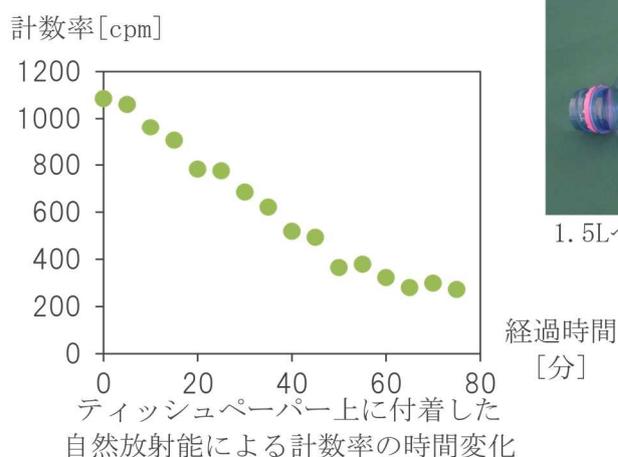
ティッシュペーパー  
(ろ紙の代替)



目の細かいざる



1.5Lペットボトル  
の上部



## 3. 霧箱の製作と放射線観察 (所要時間: 30 分)

### 【目的】

身近の材料を用いて霧箱を自作し、目に見えない放射線 (アルファ線、ベータ線) の飛跡を霧箱で観測する。

### 【実験概要】

用意するもの:

- ① 観察容器、容器のフタ
- ② スポンジテープ
- ③ 円形黒画用紙
- ④ 発泡スチロールトレイ
- ⑤ ラジウムセラミックボール (2個)
- ⑥ スポイト



他に、無水エタノール、ドライアイス、LEDライト、プラスチック定規、ティッシュペーパーを用意する。

(1) 霧箱の製作：

観察容器 (①) の底部に円形黒画用紙 (④) 置き、観察容器 (①) の内側にスポンジテープ (②) を貼る。スポイト (⑥) を使ってスポンジテープ (②) に無水エタノール (⑦) をたっぷりしみ込ませる。観察容器 (①) のフタをすれば完成する。



(2) 放射線の観察 1 (自然界の放射線)：

発泡スチロールトレイ (④) にドライアイスを入れ、その上に、観察容器 (①) の底面が良く密着するように置く。プラスチック定規を乾いたティッシュペーパーでこすって静電気を起こし、霧箱の上面に触れないようにして、霧箱の上を霧箱に触れないようにして左右に数回動かす。部屋を暗くして、霧箱の側面からLEDライトで、霧箱の底面を照らすと、飛行機雲のような白い飛跡が見える。

この実験では、霧箱内に閉じ込められた空気中のラドン 222 等から出たアルファ線の飛跡、宇宙線の飛跡、ベータ線の飛跡を観察することができる。



(3) 放射線の観察 2 (セラミックボールから出る放射線)：観察容器 (①) の底面に、ラジウムセラミックボール (⑤) を置き、観察 1 と同様に、セラミックボールから出る放射線を観察する。

この実験では、霧箱内に閉じ込められた空気中のラドン 222 等から出たアルファ線の飛跡、セラミックボールから出るアルファ線の飛跡、宇宙線の飛跡、ベータ線の飛跡を観察することができる。



\*ラジウムセラミックボール・・・天然のトリウム系列の放射性物質をごく微量含む土を小球状にして、焼いたもの。

(注1) 印刷物等に転載するには、転載許可が必要です。

(注2) 委員の所属等は執筆時のものです。

本マニュアルは、公益社団法人 日本アイソトープ協会第25期ライフサイエンス部会  
「下限数量以下の非密封RIの安全取扱に関する専門委員会」にて作成いたしました。

(発行年月日：平成28年5月25日)

(平成31年3月一部更新)

委員長 都筑 幹夫 (東京薬科大学生命科学部)

委員 小島 周二 (東京理科大学薬学部)

佐藤 浩之 (東邦大学理学部)

田野井慶太朗 (東京大学大学院農学生命科学研究科)

反保 浩一 (第一三共株式会社品川研究開発センター)

古川 純 (筑波大学アイソトープ環境動態研究センター／生命環境系)