

東京大学大学院新領域創成科学研究科

環境システム学専攻

2020 年度

修士論文

自然起源物質を素材とした
教育実験用放射線源の開発とその利用

2021 年 2 月 22 日提出

指導教員 飯本 武志 教授

小池 弘美

目次

1. 序論.....	1
1.1 放射線教育の現状と課題	1
1.1.1 放射線教育の現状	1
1.1.2 人工的な放射線源の特徴と教育利用における課題	2
1.2 自然放射線源の特徴	3
1.3 既往研究とその課題	4
1.4 本研究の目的	5
1.5 本論文の構成.....	5
2. 本研究に関連した重要となる基盤的情報と知見.....	6
2.1 自然起源放射性物質の定義と特徴	6
2.1.1 自然起源放射性物質(NORM: Naturally Occurring Radioactive Material).....	6
2.1.2 リン鉱石	6
2.1.3 石炭灰.....	6
2.1.4 塩化カリウム	7
2.2 エネルギースペクトロメトリー.....	7
2.3 Ge 半導体検出器	8
2.4 天然放射性核種	10
2.4.1 トリウム系列	10
2.4.2 カリウム-40.....	10
2.5 Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS)	11
2.6 蛍光 X 線装置	11
2.7 可搬型測定器 (各種サーベイメータ)	12
2.8 放射線に関する単位	14
2.8.1 放射能.....	14
2.8.2 周辺線量当量	14

2.8.3 質量減弱係数	14
2.9 教育について	15
2.9.1 学習指導要領	15
2.9.2 ふくしま放射線教育・防災教育指導資料	15
3. 自然起源の放射性物質を用いた新たな線源の開発	22
3.1 自然放射線源の作製	22
3.1.1 作製方法	22
3.1.2 使用物質の選定	24
3.1.3 自然放射線源に求められる安全評価試験の考え方	25
3.2 自然放射線源に関する特徴の試験	26
3.2.1. 物理的特徴に関する検証	26
3.2.1.1 成形条件の検討	26
3.2.1.2 水分量の測定方法と試験方法	28
3.2.1.3 粒径の分級方法と試験方法	29
3.2.1.4 圧縮時圧力	29
3.2.1.5 衝撃試験	30
3.3 結果および考察	32
3.3.1 水分量について	32
3.3.2 粒径について	35
3.3.3 圧縮時圧力について	36
3.4 放射線学的な特徴に関する試験	39
3.4.1 含有核種の同定と放射能測定に係る手順	39
3.4.2 測定試料の調製	39
3.4.3 密度補正に関するモンテカルロシミュレーション(PHITS)の条件設定	41
3.4.4 測定試料の組成比の測定	43
3.5 結果および考察	44
3.5.1 ピーク効率の取得	44
3.5.2 Ge 半導体検出器による測定結果	46

3.5.3	密度補正係数の取得と放射能の決定	49
4.	自然放射線源の教育現場での利用に関する考察	52
4.1	PHITS によるモンテカルロシミュレーションと実測定のための前提条件	52
4.1.1	検討の対象となる自然放射線源の構成	52
4.1.2	実測定実施条件	54
4.1.3	実験環境の再現に関する設定	54
4.1.3.1	距離によるフラックスの変化	55
4.1.3.2	自然放射線源の自己吸収	55
4.2	結果と考察	57
4.2.1	開発された自然放射線源を $\beta \cdot \gamma$ 線源として扱った際の放射線環境	57
4.2.2	実測定との比較	63
4.2.3	開発された自然放射線源を α 線源として扱った際の放射線環境	66
4.2.4	実測定との比較	67
4.2.5	開発された自然放射線源の特徴のまとめ	68
5.	放射線教育における自然放射線源を使用した実験実習の提案とその習熟度別展開	69
5.1	開発された自然放射線源を用いた教育現場における実験のラインナップ	69
5.1.1	β 線における教育実験	69
5.1.1.1	表面測定	69
5.1.1.2	距離依存性実験	70
5.1.1.3	アルミニウム板による β 線の吸収実験	71
5.1.1.4	自然放射線源による自己吸収実験	72
5.1.2	α 線に関する教育実験	73
5.1.2.1	表面測定	73
5.1.2.2	距離依存性実験	73
5.1.2.3	遮蔽体による吸収実験	74
5.2	自然放射線源を利用した実験実習の習熟度別展開	75
5.2.1	自然放射線源を利用した実験内容と学習指導要領の対応関係	75
5.2.2	β 線の遮蔽体による吸収実験計画	76
5.2.2.1	本実験と学習項目の関連性	76

5.2.2.2 習熟度別の実験実習計画.....	78
5.2.2.3 教員が持つべき放射線に関する知識.....	79
6 結語.....	85
6.1 結論.....	85
6.2 今後の展望.....	87
参考文献.....	88
謝辞.....	90

1. 序論

1.1 放射線教育の現状と課題

1.1.1 放射線教育の現状

放射性物質や放射線は環境中に存在し、身近な所で生活を豊かにするために利用されている。例として、エネルギー分野における原子力発電や、医療分野における X 線撮影やがん治療、工業分野では材料加工や製品検査等がある。日々放射線による恩恵を享受する一方、2011 年に発生した東京電力・福島第一原子力発電所での事故以降、公衆における放射線に関する知識や理解の不足が要因のひとつとなり、社会全体に混乱が生じた。

2019 年度の原子力に関する世論調査[1]内で、放射線の分野における基礎的な知識に関する質問が設定されている(図 1.1)。聞いたことのある項目は「自然放射線の存在」「放射線利用」「放射影響の単位」の割合が高いが、説明できる項目についてはすべての項目について 10%を下回っている。1 つも説明ができない回答者は約 80%にのぼる。情報を見聞きし、誤った情報に惑わされず自分自身を守りながら放射線を有効活用していくためには、放射線や放射性物質について正しい知識を身に着ける必要がある。そのため、放射線に関する基礎的な知識の普及と定着が重要視されている。知識の普及のためには、全員が等しく受ける中学校等の義務教育における放射線教育の拡充が有効になろう。

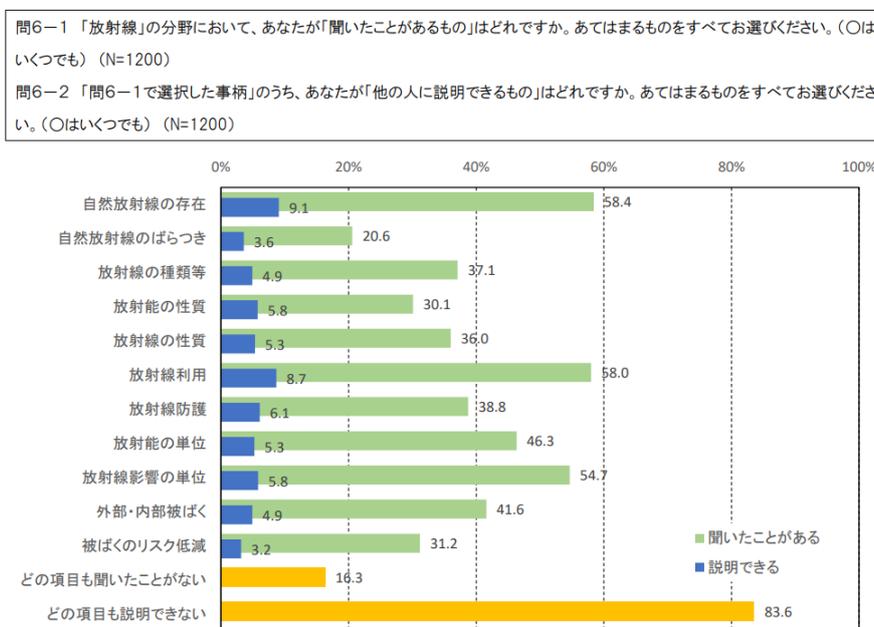


図 1.1 放射線に関する知識量に関する調査結果[1]

1.1.2 人工的な放射線源の特徴と教育利用における課題

放射線教育をたとえば理科実験と組み合わせて行うためには、放射線の特性や関係する事象を事前に整理し、安定的に再現することが確実にならなければならない。したがって、一般的に市販の放射性同位元素から作製された放射線源が必要となる。放射性同位元素等の規制に関する法律では、放射性同位元素は「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(下限数量)及び濃度を超えるもの」を指す。下限数量を超える放射線源を使用する際には放射性同位元素等の規制に関する法律や電離放射線障害防止規則等の法令により規制を受ける。使用の際には、放射性同位元素の種類や数量等を原子力規制委員会に届け出る必要がある。また、放射線管理区域の設定や個人線量の管理、教育訓練の実施が必須である。届出内容の変更や使用を停止し線源を廃棄する場合についても同様に届出が必要である。また安全管理上の責任者として、放射線取扱主任者を選任する必要がある。下限数量以下のものであれば使用に関して規制を受けない。しかし、微量でも放射線を常に放出しているため、放射線安全上の留意はある程度は要求されていることに変わりはない。

これらより、人工的な線源を学校で用いる際の問題点は大きく分けて3つある。

1つ目は人工的に作製された放射線源は精製され放射能が大きくなるため単位時間当たりの被ばく線量が大きいことである。放射線が人体に与える影響として、確率的影響と確定的影響がある[2]。確定的影響は発がんや遺伝的影響以外の障害を指し、発生するしきい線量がわかっている。一番しきい線量が低いものとして男性の一時不妊が挙げられ、そのしきい線量は0.1Gyである。確定的影響はしきい線量がわかっているため防ぎやすく、低線量被ばくの場合では大きな問題にはならない。しかし、発がんや遺伝的影響を指す確率的影響は発生にしきい線量がなく、被ばく線量が高くなるほど発生リスクが高まるとされている。下限数量以下の線源であって、規制を受けず被ばくの恐れが少ないとされていても、被ばくの可能性があるのであれば、できる限り被ばく線量の低い方法を選択する必要がある。

2つ目は、人工的に放射性同位元素から作製された密封放射線源を教育現場で使用すると負担が増加することが挙げられる。例えば、下限数量を超える線源は18歳未満では使用できない。それに加え使用のために管理区域が必要となり、それに付随し個人線量の管理や放射線予防規程の作成や放射性同位元素の種類・量の届出が必要である。

3つ目は、濃縮等の加工がされた人工の放射線源は心理的に抵抗がある人も多いことである。2011年に発生した東京電力・福島第一原子力発電所での事故以降、放射線に不安感や恐怖を抱く人も多数存在する。法令で定められた下限数量以下の線源であっても心理的に抵抗感を持つ人も存在するであろう。特に今まで放射線に深く関わってこなかった生徒や教員は特に感じるであろう。

1.2 自然放射線源の特徴

人工の放射線源は、線源を管理できる環境と放射線に精通する人がいることの2点が揃わない限り使用は難しい。この問題を解決するために、身近に存在する物質を用いて放射線源を作製する試みがなされている(図 1.2)[3]。自然起源放射性物質を粉末化したものをドーナツ状の治具入れ、プレス機で上から約 30kN の力で圧縮をすることで直径 3 cm 厚さ 1 cm のコイン型の自然放射線源が作製される(図 1.3)。作製された線源は自然放射線源と呼ばれる。

自然放射線源の良い点は、一般に市販されている物質や普段食品として摂取している身近な物質で作製可能であるため、規制を受けることなく人・場を問わず使用可能である。また、放射線教育の導入として、身の回りのすべての物質から放射線が出ていることを学ぶが、自然放射線源は環境中に存在するもので作製されているため、それを学びやすい。成分の濃縮や化学物質等の添加をすることなく、高圧力で圧縮を行い物質の形を変えるだけで作製が可能であるため、毒性が低く安全である。

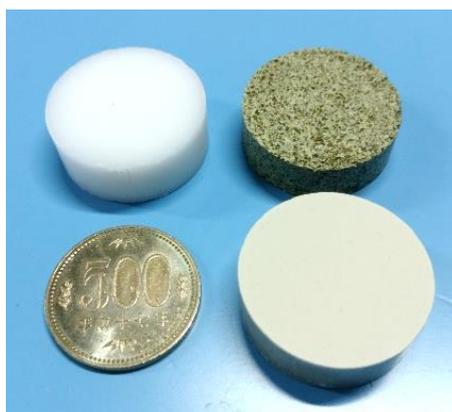


図 1.2 自然放射線源 (500 円玉は大きさの比較用)

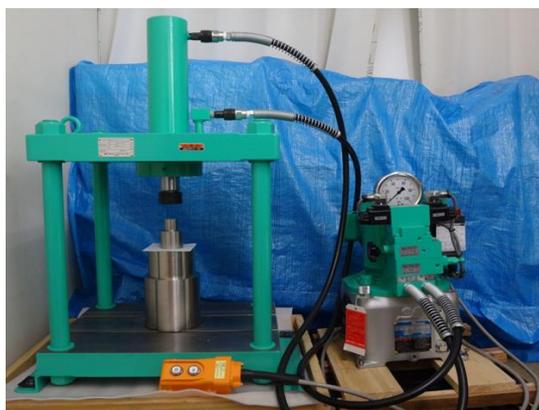


図 1.3 圧縮装置外観

1.3 既往研究とその課題

既往研究では、化学肥料や昆布、湯の華入浴剤、作製された線源については、成形後のサイズのばらつきや必要な粉末量、線源の密度が整理されている[3][4][5]。そのほかにも、昆布やインスタントコーヒーにおける産地、製造業者、製造方法別の線源強度の比較や含有核種の同定が行われている[6][7]。また教育利用の面では、実用性評価として、実際に GM 計数管を利用し放射線の特性を理解するための実験が行われている。例えば距離依存性試験では減塩塩線源では昆布線源に比べ実用性に優れており、昆布線源を使用する際には測定時間を延ばす等工夫が必要であるという結果が示されていた[8]。

既往研究では、線源サイズのばらつきや使用物質の産地別の比較、線源の教育利用時の実用性や工夫点について整理がなされていた。一方、線源の成形に関する物理プロセスと作製条件の整理、含有核種の比放射能の幅、放射線の種類やエネルギー分布など、放射線源としての基本的な特徴に関する分析やそれらの系統的な精査、学習指導要領と結びつけた教育現場になじみやすい活用方法や実験方法の具体的な整理とその教育上の意味づけまではなされていない。

多くの場所で使用され放射線教育の質の向上のためには、安定的に線源を作製し実験環境で長く利用できることが重要である。また、教育効果を考えると、放射線の特性を教育の現場で正しく再現する基盤を整備する必要もある。既往研究で開発された自然放射線源が線源作製の観点で安定して製造、供給ができることや、その線源を用いた実験で用いる適切な測定器の選定、さらにはその線源の特徴に見合った実験方法の提案等も重要になってくる。それに加え、教材として取り入れやすく教育現場に馴染みやすくするためには、自然放射線源と学習指導要領の結びつきの解明も重要となる。

1.4 本研究の目的

これまでに自然起源放射性物質を放射線源として学校等での放射線教育の機会で利用することはあったが、これを放射線科学的な観点で体系的に分析、整理し、定量的な意味づけをした上で積極的に活用していく試みはなかった。本研究では、安定的な自然放射線源の作製に関する成形プロセスの解明と、試作された線源の基本的な特徴を放射線学的な観点で明らかにすることで、教育現場での実験に適した自然放射線源を設計、開発し、教育現場に馴染みやすい具体的な利用方法を検討、提案することを目的とする。

本研究における自然放射線源は塩化カリウムや昆布等の自然起源放射性物質を圧縮することによって作製されたものとする。自然放射線源の成形に関しては、大きく 2 つの観点に分けて検討を進める。1 つ目は成形加工学的な観点である。ここでは線源の耐久性を指標とし成形条件を実験的に定め成形プロセスの解明を行う。2 つ目は放射線学的な観点であり、含有核種の比放射能の幅、放射線の種類やエネルギー分布の系統的な精査を行う。教育利用に関する検討では、自然放射線源の周辺環境における放射線分布をシミュレーションを用いて再現し、実施可能な実験方法を整理する。そこで挙げられた実験方法と文部科学省が策定した学習指導要領等から考えられる、放射線の学習に関係する学年や教科・単元を結びつけ、具体的な活用方法へとつなげていく。

1.5 本論文の構成

本論文の第 2 章において本研究における必要な情報や知識をまとめる。第 3 章では自然起源の放射性物質を用いた新たな線源の開発として、自然放射線源の成形条件と放射線学的特徴の整理を行う。第 4 章では開発された自然放射線源近傍の環境における放射線分布の定量化を進める。第 5 章では第 4 章で得られた放射線分布から実際に実施可能な実験実習を提案し習熟度別の展開を行う。

2. 本研究に関連した重要となる基盤的情報と知見

本章では、本研究の遂行と理解のために必要となる基本的な事項を解説する。

2.1 自然起源放射性物質の定義と特徴

2.1.1 自然起源放射性物質(NORM: Naturally Occurring Radioactive Material)

自然起源放射性物質とは、自然界に存在する放射性核種を除き、有意な量の放射性核種を含まない放射性物質のことである[9]。放射能濃度の比較的高いものには、リン鉱石や産業活動のなかで発生するものとしては火力発電所等で発生する石炭灰が挙げられる。また、塩化カリウムなど製品として加工される際に放射能濃度が濃縮されてしまうものも存在する。これを TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material) という。何らかの人間活動の過程で放射性物質が濃縮されてしまったものを指す。NORM と TENORM の間に厳密な境界線を引くことは困難である[10]。

2.1.2 リン鉱石[11]

リン鉱石(phosphate ore)は、リン酸塩鉱物を主成分とした鉱石である。リン鉱石は、その成因によって、無機質と有機質リン鉱石とに分けられる。無機質リン鉱石は、マグマや火成岩の生成、活動によってできる鉱物であり、代表的な鉱物にリン灰石(アパタイト)がある。その主成分は、リン酸三カルシウム($\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$)で、化学組成は $3\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8 \cdot \text{Ca}(\text{Cl},\text{F})_2$ である。有機質リン鉱石は、魚類や脊椎動物の遺骸が海底で堆積し、地殻の変動・隆起により陸化してリン灰土(phosphorite)となったものを指す。地殻活動によってできる鉱物であるため、土壤中に含まれるウラン系列、トリウム系列核種が多く含まれる。

2.1.3 石炭灰[11][12]

石炭火力発電所では、微粉碎した石炭をボイラ内で燃焼させ、そのエネルギーを電気に変えている。燃焼により溶融状態になった灰の粒子は、高温の燃焼ガス中を浮遊し、ボイラ出口で温度が低下することにもない、球形微細粒子となって電気集じん器に捕集される。これを一般にフライアッシュと呼ぶ。このフライアッシュは、サイロに乾燥状態で貯蔵され、用途に応じて更に調合または分級器で粒度調整等を行い、貯蔵される。

クリンカアッシュは、ボイラ内で燃焼によって生じた石炭灰の粒子が相互に凝集し、多孔質な塊となってボイラ底部のクリンカホッパ(水槽)に落下堆積したものを破砕機で砂状に砕いた物である。フライアッシュとクリンカアッシュを一般的に石炭灰と呼ぶ。

石炭とは、湖底や海底に層状に堆積した植物が地殻変動や造山活動等により、地中に埋め

られ、地圧や地熱の影響により、長い年月をかけて石炭化(炭素が濃縮される)したことにより生成した物質の総称である。石炭は炭素の他に、燃焼成分として水素と酸素、その他硫黄、灰分(植物中のミネラルや土壌)、水分を含んでいる。灰分がミネラルや土壌成分であるため、 ^{40}K やウラン系列核種が多く含まれる。

2.1.4 塩化カリウム[13]

塩化カリウムは主に固体の可溶性塩化カリウム鉱物(シルビン、カーナリット等)と液体の塩湖鹹水(かんすい)から作られたものである。カリウムの濃度を意図的に高めているため、カリウム中に0.017%の割合で含まれる ^{40}K の量も多くなる。そのため、比較的高い放射能を持つ。

2.2 エネルギー spektrometry

エネルギー弁別機能を有するHPGe半導体検出器等を用いて得られる γ 線のエネルギー分布を解析し、放射性核種の種類や放射エネルギー等を決定する方法に用いられる[2]。 α 線、 β 線、 γ 線、中性子線等、すべての放射線について spektrometry が存在するが、 γ 線 spektrometry が選択されることが多い。この理由として、 γ 線は透過力が高く自己吸収が少ないこと、エネルギーが核種固有で単一であるため他に比べ正確なスペクトルの取得が可能であること、多くの核種が γ 線を放出するため様々な核種に対応できること、測定試料の前処理が必要ないこと等が挙げられる。

本研究では自然環境や身近に市販される物質の核種の同定と放射能の決定を行う。放射能濃度が低く、多核種にわたる可能性があるためGe半導体検出器による γ 線 spektrometry を採用することにした。

2.3 Ge 半導体検出器

γ 線のエネルギースペクトロメトリーに用いられる、エネルギー分解能が比較的高い代表的な検出器のひとつである。

半導体に電気が流れない方向に電圧をかけると電子が存在しない空乏層ができる[2]。そこに荷電粒子が入射すると価電子帯に存在する電子にエネルギーを与え伝導帯に持ち上げ自由電子を生成する。価電子帯に存在した電子が伝導帯に遷移したため空席ができ、これを正孔と呼ぶ。自由電子は電圧により正の電極に移動し電流が流れる。これを電気信号として検出する。比例計数管や GM 計数管では電子正孔対を生成するのに必要なエネルギーは 30eV ほどである。しかし、Ge 半導体検出器では電子正孔対を生成するのに必要な平均エネルギーはゲルマニウム結晶であれば、3.0eV である。そのため、発生する電子正孔対の量が多くなり不確かさが小さくなり、エネルギー分解能が高くなることが特徴である。

実際に Ge 半導体検出器を用いて対象核種の放射能を求める際には、測定で得られた各エネルギーのカウントから放射能への換算係数が必要である。この換算係数を求めることをピーク効率校正という。放射能への換算係数はピーク効率と呼ばれ以下の式で示される。

$$\varepsilon = \frac{N}{A \cdot I_{\gamma}}$$

N：ピーク計数、A：放射能、 I_{γ} ： γ 線の放出率

測定試料の放射能を求めるためには、国家標準や国際標準にトレーサビリティのとれた放射線量が決定された標準線源を測定しピーク効率を取得しておく必要がある。しかし、このピーク効率は、 γ 線のエネルギー、測定試料の形状、材質、密度の条件に強く依存する。

本研究では標準線源（9核種混合線源）と測定試料の形状を合わせるために、標準線源と同様の U8 容器に 50mm の高さで試料を充填し測定を行っている。9核種から放出される γ 線エネルギー毎のピーク効率を求め、内挿する形で目的の γ 線エネルギーのピーク効率を求めた。ここで校正に用いた標準線源に含まれる核種と放射能は以下の通りである(図 2.2)。また、材質や密度のパラメータに関して、標準線源と測定試料が異なるとさらなる補正が必要となる。

また、得られたエネルギースペクトルより各核種の計数を計算する際には、コベル法を用いた[14]。コベル法は計数値積算法とも呼ばれ、 γ 線スペクトル解析等においてピーク面積（ピークの正味計数値）を求める方法である。ピーク領域内の計数値を積算し、その中に含まれる平坦部の計数値を差し引く方法であり、ピーク領域内に他のエネルギーのピークがあるときはこの方法を直接的に適用することはできない。ピークの形状は単純なガウス関数であり、ベースラインは限られた範囲内で直線であると仮定し計数を計算する。

表 2.2 標準線源の放射能と質量(基準日 2020/2/26 12:00)

核種	校正値 (Bq)
Cd-109	4356
Co-57	286
Ce-139	283
Cr-51	7114
Sr-85	354
Cs-137	358
Mn-54	391
Y-88	425
Co-60	462
質量[g]	94.0

2.4 天然放射性核種

本研究で扱うトリウム系列と ^{40}K について扱う。

2.4.1 トリウム系列[2]

トリウム系列は ^{232}Th から始まり、6 回の α 壊変と 4 回の β^- 壊変を行い、安定核種の ^{208}Pb となり終わる。主に岩石や鉱物に含まれる。トリウム系列の核種は生成後 70 年ほどで放射平衡となる。

2.4.2 カリウム-40[2]

半減期は 1.28×10^9 年、天然のカリウムに 0.0117% の割合で含まれる。カリウムは自然中や人体に多く存在する。カリウム-40 は 89% の割合で β^- 壊変し β 線を放出し ^{40}Ca となる。また、11% の割合で電子捕獲を起こし、 ^{40}Ar となる。

2.5 Particle and Heavy Iron Transport code System (PHITS)

PHITS とは任意の体系中における様々な放射線の挙動を、核反応モデルや核データを用いて模擬するモンテカルロ計算コードである。原子力分野での数多くの基盤技術を集結し、その技術を原子力のみならず放射線に関連する多様な研究分野に応用することを目的に、原子力機構が中心となって開発が進められている。放射線施設的设计、医学物理計算、放射線防護研究、宇宙線・地球惑星科学など、工学、医学、理学の様々な分野の研究者・技術者に利用されている。

電子・陽電子、光子の計算には、EGS5 と EPDL というコードを使用している。EGS5 コードでは、電子／陽電子または光子の任意の元素、化合物、混合物中での輸送を取り扱う [15][16]。計算対象とする光子のエネルギー範囲は 1 keV から数千 GeV である。EGS コードは、20 MeV 以下の光子と電子の輸送を扱うことができる特徴がある。EPDL はローレンス・リバモア国立研究所 (LLNL) からリリースされている評価済み核データである。光子相互作用データや電子相互作用データ等が収録されている [17]。これらを用いて電子、光子の挙動を模擬する。

2.6 蛍光 X 線装置

蛍光 X 線分析とは試料中に含まれる元素の定性、定量分析を行う方法である。分析試料に X 線を当て、原子の内閣電子を励起し、安定状態に戻る際に発生する元素に固有のエネルギーを持った蛍光 X 線を観測することで含有元素を分析する。非破壊分析を行うことができる。しかし、デメリットとして原子番号がフッ素以下の軽元素については測定ができないことが挙げられる。

2.7 可搬型測定器（各種サーベイメータ）

2.7.1 ガイガー・ミュラー(GM)計数管[2]

気体の電離作用を用いた検出器である。筒に細い芯線を張った構造になっており、筒が用電極、芯線が正電極となっている。筒内にはアルゴンガスを主としてハロゲンガス等が少量混ぜられたガスが充填されている。ここに高電圧をかける。入射した放射線がイオンを作り、生成された電子は陽極に移動し電流が流れ信号として取り出す。

本研究では GM サーベイメータを使用している。端窓型であり検出窓に膜が張っている。そのためエネルギーの低い ^3H の β 線や α 線は窓を通過できず検出ができない。使用した GM サーベイメータは HITACHI TGS-1146 である。

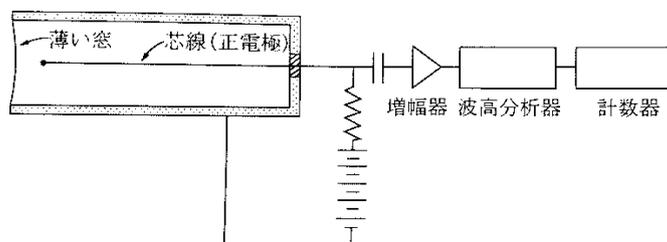


図 2.1 端窓型 GM サーベイメータの構造[2]

2.7.2 NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータ[2]

タリウムを少量添加したヨウ化ナトリウム結晶を金属ケースに封入したものである。吸収したエネルギーに比例した光を発する性質がある。この光を光電子増倍管が受け、光を電子に変換し増幅することで電気信号として取り出される。ヨウ化ナトリウム結晶は潮解性を持つため金属ケースに封入されており、 α 線の測定はできない。 β 線はヨウ化ナトリウムが高原子番号であるため後方散乱の影響が強く測定に適さない。使用した NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータは HITACHI TCS-172 である。

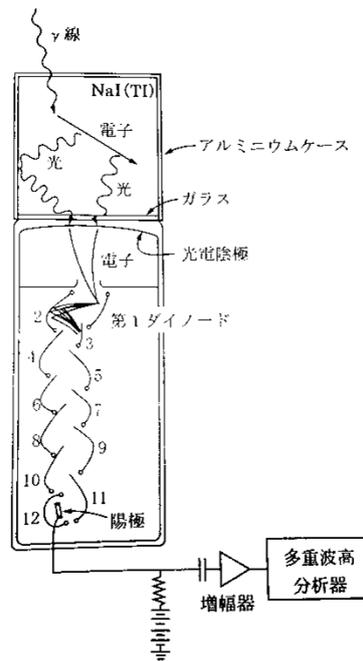


図 2.2 NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの構造[2]

2.7.3 ZnS(Ag)シンチレーション式サーベイメータ[2]

原理は NaI シンチレーション式サーベイメータと同様である。硫化亜鉛は白色の粉末であり大きな結晶にはできず、膜としてしか使用できない。 β 、 γ 線は飛程が長いので測定に適さない。ZnS(Ag)シンチレータはアフターグローが他のシンチレータに比べ非常に大きい。高い計数率の放射線が入射すると発光が連続で起こり重なるため数え落としが多くなる。 α 線に比べ環境中に多く存在する β 、 γ 線の計測には向かない。また潮解性がなく、金属容器に封入する必要がなく α 線の計測に向いている。使用した ZnS(Ag)シンチレーション式サーベイメータは HITACHI TCS-232B である。

2.8 放射線に関する単位[2]

本研究で扱う放射能、周辺線量当量について扱う。

2.8.1 放射能

毎秒あたりの壊変数を示したものである。単位としてベクレル(Bq)が用いられる。1Bqは1秒あたりに1壊変することを示している。実際に物質の放射能を示す際には、粉末の場合比放射能が用いられる。比放射能は放射性核種の属する元素の単位質量当たりの放射能である。本研究では1g当たりの放射能(Bq/g)を使用している。

2.8.2 周辺線量当量

国際放射線単位測定委員会(ICRU)が測定のための実用的な量として、1cm線量当量、3mm線量当量、70 μ m線量当量を定めている。人の筋肉組織に等価な物質で作製された直径30cmの球に平行で一様に入射した際に、球の表面から1cm、3mm、70 μ mの深さでの線量当量である。単位はSvである。本研究でNaIシンチレーション式サーベイメータでの測定では1cm線量当量が計数される。

2.8.3 質量減弱係数

単位長さあたりに相互作用を起こす確率を線減弱係数という。これを物質の密度で除したものを質量減弱係数という。単位は m^2/kg である。光子の相互作用は主に3つあり、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成である。本研究で対象とする γ 線のエネルギーは1.461MeVである。この場合、主相互作用はコンプトン散乱となる。コンプトン散乱に対する質量減弱係数は電子密度に比例する。原子量を質量数え近似すると、1g当たりの電子数は物質に寄らず一定となるため、コンプトン散乱に対する質量減弱係数は物質によらず一定となる。本研究にて使用する質量減弱係数は物質に寄らず一定である。

2.9 教育について

2.9.1 学習指導要領[18]

学習指導要領とは、全国どこの学校でも一定の水準が保てるよう、文部科学省が定めている教育課程（カリキュラム）の基準である。およそ10年に1度改訂がされ、小中学校では来年度の2021年度、高校では2022年度から次の新指導要領が適用されることになっている。教科書や時間割は、これを基に作られている。学習指導要領においては、教育課程全般にわたる配慮事項や授業時数の取扱いなどを「総則」で定めるとともに、各教科等のそれぞれについて、目標、内容、内容の取扱いを大まかに規定している。

学習指導要領の中でも、放射線教育に係る部分は図2.3、2.4の通りである。

2.9.2 ふくしま放射線教育・防災教育指導資料[19]

福島県教育委員会がこれまでに作成した「放射線等に関する指導資料（第1版～第5版）」及び「防災教育指導資料（第1版～第3版）」から授業に活用しやすい部分を抜粋してまとめたものである。放射線教育編と防災教育編に分かれている。放射線教育編内では放射線教育に関する学習指導案例等や東京電力（株）福島第一原子力発電所の事故に関連する資料、放射線等に関する基礎知識についてまとめられている。本研究で使用する福島県における放射線教育に関する学習内容を図2.5に示す。

図 2.3 小学校、中学校における学習指導要領抜粋〔18〕より作成

校種	学年	教科等	単元等	学習指導要領	解説
小・中		総則	現代的な諸問題に対応して求められる資質・能力	各学校においては、生徒や学校、地域の実態及び生徒の発達段階を考慮し、豊かな人生の実現や災害等乗り越えて次代の社会を形成することにむけた現代的な諸問題に対応して求められる資質・能力を、教科等横断的な視点で育成していくことができるよう、各学校の特色を生かした教育課程の編成を図るものとする。	本項は、「生きる力」の育成という教育の目標を、各学校の特色を生かした教育課程の編成により具体化していくに当たり、豊かな人生の実現や災害等乗り越えて次代の社会を形成することにむけた現代的な諸問題に対応して求められる資質・能力を、それぞれ教科等横断的な視点で育成していくことができるように示している。
小・中		総則	健やかな体	学校における体育・健康に関する指導を、生徒の発達段階を考慮して、学校の教育活動全体を通じて適切に行うことにより、健康で安全な生活と豊かなスポーツライフの実現を目指すこと。特に、学校における食育の推進並びに体力の向上に関する指導、安全に関する指導及び心身の健康の保持増進に関する指導については、保健体育科、技術・家庭科及び特別活動の時間ともより、各教科、道徳科及び総合的学習の時間などにおいてそれぞれその特色に応じた適切な指導を行うよう努めること。また、それらの指導を通じて、家庭や地域社会との連携を図りながら、日常生活において適切な体育・健康に関する活動の実践を促し、生涯を通じて健康・安全で活力ある生活を送るための基礎が培われるよう配慮すること。	これからの社会を生きる生徒に、健やかな心身の育成を図ることは極めて重要である。体力は、人間の活動の基であり、健康の維持のほか意欲や気力といった精神面の基盤に大きく関わっており、「生きる力」を支える重要な要素である。生徒の心身の発達の観点から、運動を通して体力を養うとともに、食育の推進を通して健康な食生活習慣を形成することが必要である。また、東日本大震災をはじめとする様々な自然災害の発生や、情報化等の進展に伴う生徒を取り巻く環境の変化などを踏まえ、生徒の安全・安心に対する関心が広がっていることから、安全に関する指導の充実が必要である。さらに、生徒が心身の成長発達について正しく理解することが必要である。
小	4年	社会	第4学年の内容	(1) 都道府県（以下第2章第2節において「県」という。）の様子について、学習の問題を追究・解決する活動を通して、次の事項を身に付けることができるよう指導する。 (イ) 次のような思考力、判断力、表現力等を身に付けること。 (ロ) 我が国における自分たちの県的位置、県全体の地形や主な産業の分布、交通網や主な都市の位置などに着目して、県の様子を探え、地理的環境の特色を考え、表現すること。	なお、電気を取り上げる場合には、電気を大量に消費する大都市圏に住む人々の生活は、消費地から離れた県などにある発電所から電力の供給を受けており立っていることに触れるようにする。その際、県の東日本大震災において高圧電力送電所で大きな事故が発生したことに伴って生じた、県内におきながら、当該地域やその住民、一時避難者などに十分配慮して指導することが必要である。
中	2年	理科	電流とその利用	(3) 電流とその利用 電流とその利用についての観察、実験などを通して、次の事項を身に付けることができるよう指導する。 ア 電流、磁界に関する事象・現象を日常生活や社会と関連付けながら、次のことを理解するとともに、それらの観察、実験などに関する技能を身に付けること。 (イ) 電流 (ロ) 電線 (ハ) 静電気と電流 異なる物質同士をこすり合わせることで静電気が起こり、帯電した物体間では空間を開けて力が働くこと及び静電気と電流には関係があることを見いだして理解すること。 ウ 内容の(3)については、次のとおり取り扱うものとする。 エ アの(イ)については、電流が電子の流れに関係していることを扱うこと。また、真空放電と関連付けながら放射線の性質と利用にも触れること。	電流も静電気の放電現象の一種であることを取り上げ、高電圧発生装置（誘導コイルなど）の放電やクルックス管などの真空放電の観察から電子の存在を理解させ、電子の流れが電流に関係していることを理解させる。その際、真空放電と関連させてX線にも触れるとともに、X線と同じように透過性などの性質をもつ放射線が存在し、医療や製造業などで利用されていることにも触れる。
中	3年	理科	科学技術と人間	(7) 科学技術と人間 科学技術と人間との関わりについての観察、実験などを通して、次の事項を身に付けることができるよう指導する。 ア 日常生活や社会と関連付けながら、次のことを理解するとともに、それらの観察、実験などに関する技能を身に付けること。 (イ) エネルギーと物質 (ロ) エネルギーとその変換に関する観察、実験などを通して、日常生活や社会では様々なエネルギーの変換を利用していることを見いだして理解すること。また、人間は、水力、火力、原子力、太陽光などからエネルギーを得ていることを知ることも、エネルギー資源の有効な利用が大切であることを認識すること。 ウ 内容の(7)については、次のとおり取り扱うものとする。 ア アの(イ)については、熱の伝わり方、放射線にも触れること。	放射線については、核燃料から出ていたり、自然界にも存在し、地中や空中の物質から出ていたり、宇宙から降り注いでいたりすることなどにも触れる。東日本大震災以降、社会において、放射線に対する不安が生じたり、関心が高まったりすること、理科においては、放射線について科学的に理解することが重要であり、放射線に関する学習を通して、生徒たちが自ら思考し、判断する力を養成することに努めると考えられる。その際、他教科等との関連を図り、学習を関連していくことも考えられる。
中		技術・家庭科(家庭分野)	衣食住の生活	次の(1)から(7)までの項目について、課題をもって、健康・快適・安全で豊かな食生活、衣生活、住生活に向け考え、工夫する活動を通して、次の事項を身に付けることができるよう指導する。 (3) 日常食の調理と地域の食文化 ア 次のような知識及び技能を身に付けること。 (イ) 日常生活と関連付け、用途に応じた食品の選択について理解し、適切にできること。	食品添加物や残留農薬、放射性物質などについては、基準値を設けて、食品の安全を確保する仕組みがあることについても触れるようにする。
中		保健体育	健康と環境	(4) 健康と環境について、課題を発見し、その解決を目指す活動を通して、次の事項を身に付けることができるよう指導する。 ア 健康と環境について理解を深めること。 (イ) 飲料水や空気は、健康と密接に関わりがあること。また、飲料水や空気を衛生的に保つには、基準に適合するよう管理する必要があること。	必要に応じて、飲料水の衛生的管理、空気の衛生的管理の内容と関連させて、放射線と健康についても触れるように配慮するものとする。

図2. 4 高等学校における学習指導要領抜粋([18]より作成)

教科等	単元等	学習指導要領	解説
<p>総則</p>	<p>(2) 現代的な諸課題</p>	<p>(2) 各学校においては、生徒や学校、地域の実態及び生徒の発達の段階を考慮し、豊かな人生の実現や災害等を乗り越えて次代の社会を形成することに向けた現代的な諸課題に対応して求められる資質・能力を、教科等横断的な観点で育成していくことができるよう、各学校の特色を生かした教育課程の編成を図るものとする。</p>	<p>本項は、「生きる力」の育成という教育の目標を、各学校の特色を生かした教育課程の編成により具体化していくに当たり、豊かな人生の実現や災害等を乗り越えて次代の社会を形成することに向けた現代的な諸課題に照らして必要となる資質・能力を、それぞれ教科等の観点から示している。</p> <p>特に、未着の重要性となった東日本大震災から平成28年熊本地震をはじめとする災害等による困難を乗り越え次代の社会を形成するという大きな役割を担う生徒に、現代的な諸課題に対応して求められる資質・能力を教科横断的に育成することが一層重要となっている。そのため、今回の改訂では、例えば、放射線の科学的な理解や科学的に探究する態度（「物理基礎」）、「物理」、環境と健康についての理解（「保健」）、食品の安全確保の仕組み（「家庭基礎」）、情報の妥当性や信頼性の吟味の仕方（「現代の国語」）、情報の妥当性や信頼性を踏まえた公正な判断力（「公共」）などの内容の充実を図っており、放射線に関する科学的な理解や、科学的に思考し、情報を正しく理解する力を養成することとしている。</p>
<p>(1) エネルギーとその利用</p>	<p>⑦エネルギーとその利用 人類が利用可能な水力、化石燃料、原子力、太陽光などを源とするエネルギーの特性や利用などについて、物理学的な観点から理解すること。</p>	<p>⑦エネルギーとその利用 人類が利用可能な水力、化石燃料、原子力、太陽光などを源とするエネルギーの特性や利用などについて、物理学的な観点から理解すること。</p> <p>(1) ⑦については、電気エネルギーへの変換を中心に扱うこと。「原子力」については、核分裂によってエネルギーが発生していることに触れること。関連して放射線の種類と性質、放射性物質の基本的な性質及び原子力の利用とその課題にも触れること。</p>	<p>ここでは、人類が利用可能な水力、化石燃料、原子力、太陽光、風力などを源とするエネルギーの特性や利用などについて、物理学的な側面から理解させることがねらいである。エネルギーの利用については電気エネルギーへの変換を中心に扱う。例えば、様々なエネルギー資源については、エネルギー変換の仕組みや発電量を調べさせることなどが考えられる。原子力については、核分裂によってエネルギーが発生していることに定性的に触れる。また、核融合のエネルギー、太陽などの恒星のエネルギー源に触れることも考えられる。</p> <p>α線、β線、γ線、中性子線などの放射線の性質、放射性物質に関する半減期などの基本的な性質、放射線に関する単位に触れる。その際、霧箱や放射線測定器を用いた放射線の観察、測定などを行うことが考えられる。放射線及び原子力の利用とその課題にも触れる。その際、放射線がその性質に応じて、医療、工業、農業などに利用されていることに触れ、原子力の安全性の確保、放射性廃棄物の処理、廃炉等に関する課題にも触れる。また、原子力発電所などの事故を例に、環境中に拡散した放射性物質の動態にも触れることも考えられる。</p> <p>なお、東日本大震災以降、社会において、放射線に対する不安が生じたり、関心が高まったりする中、放射線についての科学的に理解することが重要であり、放射線に関する学習を通して、生徒が自ら思考し、判断する力を養うことが大切である。その際、例えば、理科の他の科目や他教科等との関連を図り、学習を展開していくことも考えられる。</p>
<p>物理基礎</p>	<p>(4) 物理学が拓く世界</p>	<p>⑦物理学が拓く世界 この科目で学んだ事柄が、日常生活や社会を支えている科学技術と結び付いていることを理解すること。</p> <p>(4) ⑦については、日常生活や社会で利用されている科学技術の具体的な事例を取り上げること。</p>	<p>ここでは、交通、医療、情報通信ネットワーク、建築、防災など、日常生活や身近な環境への物理学の成果や応用に着目して、例えば、次のような具体的な事例を取り上げ、これまでに学んできたこととの関連を考察させ、物理学が拓く世界について認識を深めさせる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・自動車や鉄道、船舶などの運輸機関に生かされている技術 ・海空施設の大規模レーンなどに活用される重量物移動の技術 ・医療における放射線、MRI、レーザー、超音波の利用 ・情報通信技術及び人工衛星の利用 ・人工知能(AI)やロボットの開発と利用 ・熊の洞窟の歴史と設計を可能とする技術 ・水筒構造や建築物の免震、耐震構造 ・ヒートポンプを利用した空調システム ・エネルギー資源の開発や有効利用に活用される技術 ・船舶工場、農業機械の自動運転など食料生産に関する技術 ・日常生活への物理学の応用(調理、スポーツ、介護等) <p>また、科学技術の具体的な事例について、物理学の原理や法則などがどのように応用されているかを調査させることも考えられる。</p>
<p>物理</p>	<p>(1) 原子と原子核</p>	<p>②原子とスペクトル 原子の構造及びスペクトルと電子のエネルギー準位との関係について理解すること。</p> <p>①原子核 原子核の構成、原子核の崩壊及び核反応について理解すること。</p> <p>(1) ①については、水素原子の構造を中心にスペクトルと関連させて扱うこと。</p> <p>④については、質量とエネルギーの等価性にも触れること。</p>	<p>ここでは、原子と原子核についての観察、実験などを通して、原子とスペクトル、原子核、素粒子について理解させ、それらの観察、実験などの技能を身に付けさせるとともに、思考力、判断力、表現力等を養成することが主なねらいである。</p> <p>⑦ 原子とスペクトルについて 中学校では、第1分野「(6) 化学変化とイオン」で、原子が電子と原子核からできていること、原子核が陽子と中性子からできていることについて学習している。ここでは、原子の構造及びスペクトルと電子のエネルギー準位との関係について理解させることがねらいである。</p> <p>原子の構造については、例えば、歴史的なα粒子の散乱実験の資料などを取り上げ、原子核の存在を扱う。また、原子が放射線を出し、電子のエネルギー準位との関係については、スペクトルの波長に相関性があること、ボーアの原子モデルなどを扱う。</p> <p>例えば、原子の発光スペクトルや吸収スペクトルを観察したり、水素原子のエネルギー準位とスペクトル系列の資料を基に考察したりして、水素原子のスペクトルに相関性があることを思いださせることが考えられる。</p>

<p>化学基礎</p> <p>(2) 物質の構成</p>	<p>物質の構成について、次の事項を身に付けることができるよう指導する。</p> <p>ア 物質の構成原子について、次のことを理解すること。また、物質と化学結合についての観察、実験などを通して、次のことを理解するとともに、それらの観察、実験などに関する技術を身に付けること。</p> <p>イ 物質の構成について、観察、実験などを通して探究し、物質の構成における規則性や関係性を思いだして表現すること。</p> <p>(7) 原子の構成</p> <p>⑦ 原子の構造</p> <p>原子の構造及び陽子、中性子、電子の性質を理解すること。</p> <p>⑧ 電子配置と周期表</p> <p>元素の周期律及び原子の電子配置と周期表の族や周期との関係について理解すること。</p> <p>内容の(2)のアの⑦の②については、原子番号、質量数及び同位体を扱うこと。その際、放射性同位体とその利用にも触れること。⑧の「原子の電子配置」については、代表的な典型元素を扱うこと。「元素の周期律」については、イオン化エネルギーの変化にも触れること。</p>	<p>⑦ 原子の構造</p> <p>原子の構造及び陽子、中性子、電子の性質を理解すること。また、原子番号や質量数も扱う。その際、電子が原子核の周りを回ることも考えられる。同位体については、水素、炭素、酸素などの身近な元素を扱う。放射性同位体については、例えば、年代測定や医療などへの利用方法に触れる。</p> <p>⑧ 電子配置と周期表</p> <p>原子の構造及び陽子、中性子、電子の性質を理解すること。また、原子番号や質量数も扱う。その際、電子が原子核の周りを回ることも考えられる。同位体については、水素、炭素、酸素などの身近な元素を扱う。放射性同位体については、例えば、年代測定や医療などへの利用方法に触れる。</p>	<p>④ 地球内部の状態と物質</p> <p>「地球基礎」では、「(1) ア (7) ④ 地球内部の構造」で、地殻、マントル、外核、内核の区分と状態、構成物質について学習している。ここでは、地球内部の状態、密度、圧力及び構成物質の組成について理解させることがねらいである。</p> <p>地球内部の温度、密度、圧力については、地殻、マントル、外核、内核の構成物質の組成については、地殻、マントル、外核、内核の組成を扱う。その際、例えば、様々な手法を組み合わせて、地球内部の温度、圧力や構成物質の組成などを取り上げられる。アインシュタインについては、アセノスフェアとリソスフェア間の浮力と重力が釣り合っていることを扱う。その際、スカンジナビア半島の熱帯氷期以降の隆起などを取り上げ、アインシュタインが原因となっていない場所があることに気付かせることも考えられる。地球内部の温度については、地下増温率と地殻熱流量を取り上げ、熱源としての放射性同位体の崩壊なども触れる。</p>	<p>(1) ②については、非拘束的扱い、地震波トモグラフィにも触れること。④については、アインシュタインも扱うこと。また、放射性同位体の崩壊など地球内部の熱源にも触れること。</p> <p>⑦ 地球の変化</p> <p>風化、侵食、運動及び堆積の諸作用による地形の形成について、身近な地形と関連付けて理解すること。</p> <p>⑧ 地層の観察</p> <p>地層に関する野外観察や実験などを行い、地層の形成及び地質時代における地殻変動や地殻変動について理解すること。</p> <p>⑨ 地球環境の変遷</p> <p>大気、海洋、大陸及び生物などの変遷に関する資料に基づいて、地球環境の移り変わりを総合的に理解すること。</p> <p>(1) ②については、阪正、陸上及び海面の堆積物も扱うこと。「地形の形成」については、土砂災害にも触れること。⑨の「地質時代における地殻変動や地殻変動」については、地層や化石に基づいて過去の様子を探求する方法と関連付けて理解すること。</p> <p>(2) 地球の活動と歴史</p> <p>③ 科学技術の高度化と知識基盤社会</p> <p>科学技術の高度化と知識基盤社会 諸資料を活用し、問題を追究したり解決したりする活動を通して、次の事項を身に付けることができるよう指導する。</p> <p>ア 次のような知識を身に付けること。</p> <p>イ 原子力の利用や宇宙探査などの科学技術、医療技術、バイオテクノロジーと生命倫理、人工知能と労働の在り方の変遷、情報通信技術の発達と知識の普及と知能の学習に目し、主題を設定し、調査や比較したり関連付けてたりして読み解き、深い科学技術や文化の歴史的特徴、第二次世界大戦後の科学技術の高度化と政治・経済・社会の変化との関連性などを多面的に考察し、表現すること。</p> <p>(3) については、欧米などの動向のみを取り上げることのないよう留意し、持続可能な社会の実現に向け、科学技術における知識の在り方について、人文科学や社会科学の知識との学際的な連携が求められることに気付かせること。</p>
<p>地学</p>				

<p>第1節 家庭基礎 B 衣食住の生活の自立と設計 (1) 食生活と健康</p>	<p>ア 次のような知識及び技能を身に付けること。 (ア) ライフステージに応じた栄養の特性や食品の栄養的特質、健康や環境に配慮した食生活について理解し、自己や家族の食生活の計画・管理に必要な技能を身に付けること。 (イ) おいしさの構成要素や食品の調理上の性質、食品衛生について理解し、目的に応じた調理に必要な技能を身に付けること。 イ 食の安全や食品の調理上の性質、食文化の継承を考慮した献立作成や調理計画、健康や環境に配慮した食生活について考察し、自己や家族の食事を工夫すること。</p>	<p>ア おいしさの構成要素や食品の調理上の性質、食品衛生について理解し、目的に応じた調理に必要な技能を身に付けること。 おいしさの構成要素については、味、香り、柔らかさや粘りなどのテクスチャー、色、形などの外観、音、温度などを、五感を通して感じるとともに、調理や加工によりおいしさを変化させることと理解できるようにする。その際、伝統的な和食の特徴についても理解できるようにする。 食品の調理上の性質については、日常用いられる食品の調理上の性質について理解し、調理法の要点を踏まえ、調理の経験・実習を通して調理の知識と技能を身に付けることのできるようにする。また、乾燥や発酵などの加工により食品の保存性を高めることと理解できるようにする。食品衛生については、食品の腐敗や変敗、食中毒、食品添加物などについて食品の購入、調理、保存と関わらせ理解し、食生活を安全で衛生的に営むこととできるようにする。 特に食中毒については、身近な例を具体的に取り上げ、その原因や症状、予防のための調理上の性質について理解し、調理実習の際に十分に留意する。また、食品添加物や残留農薬、放射線物質などについては、基準値を設けていることと取り上げ、社会における食品の安全管理の仕組みについても理解できるようにする。</p>
<p>第2節 家庭総合 (1) 食生活の科学と文化</p>	<p>ア 次のような知識及び技能を身に付けること。 (ア) 食生活を振り返り振り返り、食の安全と衛生、日本と世界の食文化など、食と人との関わりについて理解すること。 (イ) ライフステージの特性や環境に着目し、栄養的特徴、食品の栄養的特質、健康や環境に配慮した食生活について理解するとともに、自己と家族の食生活の計画・管理に必要な技能を身に付けること。 (ウ) おいしさの構成要素や食品の調理上の性質、食品衛生について科学的に理解し、目的に応じた調理に必要な技能を身に付けること。</p>	<p>ア (ア) 食生活を振り返り振り返り、食の安全と衛生、日本と世界の食文化など、食と人との関わりについて理解すること。 食生活を振り返り振り返り、食の安全と衛生、日本と世界の食文化など、食と人との関わりについて理解すること。 食生活の変化について、その際、伝統的な和食の特徴についても理解できるようにする。 食品の調理上の性質については、日常用いられる食品の調理上の性質について理解し、調理法の要点を踏まえ、調理の経験・実習を通して調理の知識と技能を身に付けることとできるようにする。また、乾燥や発酵などの加工により食品の保存性を高めることと理解できるようにする。食品衛生については、食品の腐敗や変敗、食中毒、食品添加物などについて食品の購入、調理、保存と関わらせ理解し、食生活を安全で衛生的に営むこととできるようにする。 特に食中毒については、身近な例を具体的に取り上げ、その原因や症状、予防のための調理上の性質について理解し、調理実習の際に十分に留意する。また、食品添加物や残留農薬、放射線物質などについては、基準値を設けていることと取り上げ、社会における食品の安全管理の仕組みについても理解できるようにする。</p>
<p>第14節 フードデザイン イ (3) フードデザイン実習</p>	<p>(3) フードデザイン実習 ア 食事テーマの設定と献立作成 イ 食品の選択と調理 ウ テープルコーディネートとサービスの実習 イ (指導項目)の(2)のオ及び(3)のウについては、日本料理、西洋料理及び中国料理のテーマレベルアップの基本的な考え方や、方法を扱うこと。また、食事のテーマにふさわしいテーブルコーディネートやサービスの基本的な考え方や、方法を扱うこと。 (ウ)については、調理に配慮した食材の選択や調理法の工夫などについても扱うこと。また、災害時の食事計画についても扱うこと。</p>	<p>イ 食品の選択と調理 作成した献立を通して食品の選択と、食品の調理性を踏まえた適切な調理について扱う。食品の選択については、主として調理実習に用いる農産物、水産物、畜産物及びそれらの加工品の鑑別方法についても扱う。その際、食品添加物や残留農薬、放射線物質などについては、基準値を設けていることと取り上げ、社会における食品の安全確保の仕組みがあることについても理解できるようにする。 また、例えば、食品の旬や地産地消など環境に配慮した食材の選択、食べ残しや食品の廃棄量を減らす調理の工夫、環境資源を無駄にしない仕付けの工夫などについても取り上げる。 さらに、調理について、例えば、災害などの非常時を想定し、備蓄食の準備やそれを活用した調理なども取り上げる。なお、調理実習に際しては、食品衛生と安全に十分に配慮して、食品を適切に取り扱い、主な調理操作を習得することにより、能率よく、おいしく、きれいに作ることができるよう指導する。</p>
<p>第18節 食品 (4) 食品の加工と貯蔵</p>	<p>(4) 食品の加工と貯蔵 ア 食品の加工 イ 食品の貯蔵 エ (指導項目)の(4)のアについては、物理的加工、化学的加工及び微生物や酵素による加工の目的、方法及び成分の変化を扱うこと。イについては、代表的な貯蔵の方法の原理と特徴の概要を扱うこと。</p>	<p>イ 食品の貯蔵 貯蔵の目的は品質や期限の防止、品質の維持にあることを扱う。乾燥、塩蔵、糖漬、酢漬、冷蔵、冷凍、冷蔵、耐凍、缶詰、缶詰、殺菌、缶詰、放射線などによる貯蔵の方法について、その原理と特徴を身近な事例と関連付けて取り上げる。 ここでは、菌汚染における食品への菌汚染や、食品を介して感染する寄生虫病について扱う。なお、重金属や放射性物質などについては、基準値を設けていることと取り上げ、社会における食品の安全確保の仕組みがあることと取り上げるとともに、食品や環境の衛生などに關心をもつことができるようになることと取り上げ、このねらいを実現するため、次の①から③までの事項を身に付けることができるよう、(指導項目)を指導する。 ① 食品に存在する有害物質の原因について理解し、関連する技術を取り組むこと。 ② 食品や環境の衛生について課題を発見し、その解決に向けて考察すること。 ③ 食品の汚染について自ら学び、食品衛生に主体的にかつ協力的に取り組むこと。 ア 有害物質による食品の汚染とその予防 重金属、化学物質、農薬、放射性物質などの有害物質が環境を汚染し、食品や人体に影響を及ぼしていることを扱う。また、環境汚染物質による重積汚染の他、食物連鎖及び生物濃縮の過程を経て発生することについて事例を通して理解できるように指導する。その際、汚染防止についても取り上げる。 食品を通して感染する寄生虫を感染経路によって大別し、主な寄生虫のそれぞれの特徴、感染経路、症状、予防法などについて扱う。 (指導項目) イ 寄生虫病とその予防 ア 微生物による変質とその防止 イ 化学的作用による変質とその防止 (内容の範囲や程度) エ (指導項目)の(4)については、食品の変質とその防止に関する基礎的な内容を扱うこと。 (四) 食品の貯蔵とその防止 ここでは、微生物や化学的作用による食品の変質について、それらの現象と善及び防止法を理解し、食品の鑑別や保管が適切に行えるようにすることをねらいとして、このねらいを実現するため、次の①から③までの事項を身に付けることができるよう、(指導項目)を指導する。 ① 微生物や化学的作用による食品の変質について理解し、関連する技術を取り組むこと。 ② 食品の鑑別や保管について課題を発見し、その解決に向けて考察すること。 ③ 食品の変質とその防止について自ら学び、食品の鑑別や保管に主体的にかつ協力的に取り組むこと。</p>

	<p>(1) 現代社会と健康について、自他や社会の課題を究見し、その解決を目指した活動を通して、次の事項を身に付けることができるよう指導する。</p> <p>ア 現代社会と健康について理解を深めること。</p> <p>(7) 健康の考え方 国民の健康水準の向上や疾病構造の変化 2 各科目の目標及び内容 199 に伴って変わってきていること。また、健康は、様々な要因の影響を受けながら、主体と環境の相互作用の下に成り立っていること。健康の保持増進には、ヘルスプロモーションの考え方を踏まえた個人の適切な意思決定や行動選択及び環境づくりが関わること。</p> <p>(1) 現代の感染症とその予防 感染症の発生や流行には、時代や地域によって違いがみられること。その予防には、個人の取組及び社会的な対策を行う必要があること。</p> <p>(7) 生活習慣病などの予防と回復 健康の保持増進と生活習慣病などの予防と回復には、運動、食事、休養及び睡眠の調和のとれた生活の実践や疾病の早期発見、及び社会的な対策が必要であること。</p> <p>(2) 喫煙、飲酒、薬物乱用と健康 喫煙と飲酒は、生活習慣病などの要因になること。また、薬物乱用は、心身の健康や社会に深刻な影響を与えることから行ってはならないこと。それらの対策には、個人や社会環境への対策が必要であること。</p> <p>(4) 精神疾患の予防と回復 精神疾患の予防と回復には、運動、食事、休養及び睡眠の調和のとれた生活を実践するとともに、心身の不調に気づくことが重要であること。また、疾病の早期発見及び社会的な対策が必要であること。</p> <p>イ 現代社会と健康について、課題を究見し、健康や安全に関する原則や概念に着目して解決の方法を思考し判断する</p>	<p>(7) 生活習慣病などの予防と回復 がん、脳血管疾患、虚血性心疾患、高血圧症、脂質異常症、糖尿病などのリスクを減らし予防するには、適切な運動、食事、休養及び睡眠など、調和のとれた健康的な生活を営むことが必要であること、定期的な健康診断やがん検診などを受診することが必要であること。</p> <p>その際、がんについては、肺がん、大腸がん、胃がんなど様々な種類があり、生活習慣のみならず細菌やウイルスの感染などの原因もあることについて理解できるようにする。がんの回復においては、手術療法、化学療法、放射線療法などの治療法があること、患者や周囲の人々の生活の質を保つことや緩和ケアが重要であることについて適宜触れるようにする。</p> <p>また、生活習慣病などの予防と回復には、個人の取組とともに、健康診断やがん検診の普及、正しい情報の発信など社会的な対策が必要であることを理解できるようにする。</p> <p>なお、日常生活にスポーツを計画的に取り入れることは生活習慣病などの予防と回復に有効であること、また、運動や食事について性差による将来の健康課題があることについて取り上げるよう配慮する。</p>
保健体育	<p>(4) 健康を支える環境づくりについて、自他や社会の課題を究見し、その解決を目指した活動を通して、次の事項を身に付けることができるよう指導する。</p> <p>ア 健康を支える環境づくりについて理解を深めること。</p> <p>(7) 環境と健康 人間の生活や産業活動は、自然環境を汚染し健康に影響を及ぼすことがあること。それらを防ぐには、汚染の防止及び改善の対策をとる必要があること。また、環境衛生活動は、学校や地域の環境を健康に適したものとすよう基準が設定され、それに基づき行われていること。</p> <p>(1) 食品と健康 食品の安全性を確保することは健康を保持増進する上で重要であること。また、食品衛生活動は、食品の安全性を確保するよう基準が設定され、それに基づき行われていること。</p> <p>(7) 保健・医療制度及び地域の保健・医療機関 生涯を通じて健康を保持増進するには、保健・医療制度や地域の保健所、保健センター、医療機関などを適切に活用することが必要であること。また、医薬品は、有効性及び安全性が確保されており、販売には制限があること。疾病からの回復や悪化の防止には、医薬品を正しく使用することが有効であること。</p> <p>(2) 様々な保健活動や社会的対策 我が国や世界では、健康課題に対応して様々な保健活動や社会的対策などが行われていること。</p> <p>(4) 健康に関する環境づくりと社会参加 自他の健康を保持増進するには、ヘルスプロモーションの考え方を生かした健康に関する環境づくりが重要であり、それに積極的に参加していくことが必要であること。また、それらを実現するには、適切な健康情報の活用が有効であること。</p> <p>イ 健康を支える環境づくりに関する情報から課題を究見し、健康に関する原則や概念に着目して解決の方法を思考し判断するとともに、それらを表現すること。</p>	<p>(4) 健康を支える環境づくりについて、自他や社会の課題を究見し、その解決を目指した活動を通して、次の事項を身に付けることができるよう指導する。</p> <p>ア 健康を支える環境づくりについて理解を深めること。</p> <p>(7) 環境と健康 人間の生活や産業活動は、自然環境を汚染し健康に影響を及ぼすことがあること。それらを防ぐには、汚染の防止及び改善の対策をとる必要があること。また、環境衛生活動は、学校や地域の環境を健康に適したものとすよう基準が設定され、それに基づき行われていること。</p> <p>(1) 食品と健康 食品の安全性を確保することは健康を保持増進する上で重要であること。また、食品衛生活動は、食品の安全性を確保するよう基準が設定され、それに基づき行われていること。</p> <p>(7) 保健・医療制度及び地域の保健・医療機関 生涯を通じて健康を保持増進するには、保健・医療制度や地域の保健所、保健センター、医療機関などを適切に活用することが必要であること。また、医薬品は、有効性及び安全性が確保されており、販売には制限があること。疾病からの回復や悪化の防止には、医薬品を正しく使用することが有効であること。</p> <p>(2) 様々な保健活動や社会的対策 我が国や世界では、健康課題に対応して様々な保健活動や社会的対策などが行われていること。</p> <p>(4) 健康に関する環境づくりと社会参加 自他の健康を保持増進するには、ヘルスプロモーションの考え方を生かした健康に関する環境づくりが重要であり、それに積極的に参加していくことが必要であること。また、それらを実現するには、適切な健康情報の活用が有効であること。</p> <p>イ 健康を支える環境づくりに関する情報から課題を究見し、健康に関する原則や概念に着目して解決の方法を思考し判断するとともに、それらを表現すること。</p>

2 小・中学校における放射線等に関する学習内容(例)

学習内容と学習指導案例、実践事例等との関連一覧表

学習内容・指導内容		小学校			中学校		
		低学年	中学年	高学年	1学年	2学年	3学年
放射線等に関する知識を得るための内容	<input type="checkbox"/> 放射線、放射性物質の存在を知る	◎	◎	◎	◎	○	○
	<input type="checkbox"/> 放射線と放射能、放射性物質の違いを知る	○	○	○	◎	○	○
	<input type="checkbox"/> 身の回りや自然界の放射線を知る		○	○	◎	○	○
	<input type="checkbox"/> 放射線の透過性について知る			○	◎	○	○
	<input type="checkbox"/> 放射線の単位、測り方を知る			○	◎	○	○
	<input type="checkbox"/> 放射線の種類、性質を知る			○	○	◎	○
	<input type="checkbox"/> 放射能の半減期と放射線量の関係を知る					○	◎
	<input type="checkbox"/> 放射線の利用について知る			○	○	○	◎
	<input type="checkbox"/> 東日本大震災と原子力災害の概要を知る			○	◎	○	○
	<input type="checkbox"/> 除染の意味を知る		○	○	○	○	◎
	<input type="checkbox"/> 東京電力福島第一原子力発電所の廃炉等の現状を知る			○	○	○	◎
	<input type="checkbox"/> 復興に向けた取組の現状を知る			○	○	○	◎
放射線等から身を守るための内容	<input type="checkbox"/> 放射性物質が一度に大量に放出された場合の避難の仕方を知る	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	<input type="checkbox"/> 外部被ばくや内部被ばくをしないための生活の仕方を知る	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	<input type="checkbox"/> 放射線の人体に対する影響について知る	○	○	◎	◎	◎	◎
	<input type="checkbox"/> 情報の収集の仕方を知る			○	◎	○	○
	<input type="checkbox"/> 外部被ばくと内部被ばくの影響について知る			○	◎	○	○
	<input type="checkbox"/> 食物と放射線量の関係を知る			○	○	◎	○
	<input type="checkbox"/> 心身共に健康に生活する仕方を知る			○	○	○	◎

◎: その学年で重点的に指導する内容 ○: 関連する学年で指導する内容

図 2.5 福島県における放射線に関する学習内容

3. 自然起源の放射性物質を用いた新たな線源の開発

3.1 自然放射線源の作製

3.1.1 作製方法

自然放射線源の作製方法について述べる。

作製手順

1. 物質を乳鉢やミキサーを用いて粉末化を行う(図 3.1)
2. 粉末を専用の治具に入れる(図 3.2)
3. 圧縮機で圧力をかけ 2 分間圧縮する。
4. 圧縮後、角材を治具の下に敷き圧縮機で押し出し、取り出す

自然放射線源の基本形状は直径 3cm、厚さ 1cm としている。教育現場で使用される検出器は β 、 γ 線の測定であれば GM サーベイメータが用いられる。検出面は大面積端窓型であれば直径 5 cm の円形である。また NaI シンチレーション式サーベイメータの検出面は直径 3cm の円形である。十分に計数率を得ることができ、教育現場で扱いやすいサイズとして自然放射線源の直径は 3cm とした。厚さは実験実習での扱いやすさを考え 1cm としている。本研究では作製対象物質として昆布、インスタントコーヒー、塩化カリウム、湯の華としている。物質によって厚さ 1cm とした場合の粉末量が異なる。昆布であれば 10g、その他の物質は 15g としている。また圧縮機の構成は表 3.1 の通りである。

表 3.1 圧縮機の構成(図 3.3 に対応)

番号	装置名称	装置の説明
1	パワージャッキ	型番 : E20H25
2	ショッププレスフレーム	型番 : KPA-20-H25
3	電動油圧ポンプ	型番 : GH1/2-V2T-K-P
4	油圧ゴムホース	型番 : RH6-2B



図 3.1 粉末化後の塩化カリウム

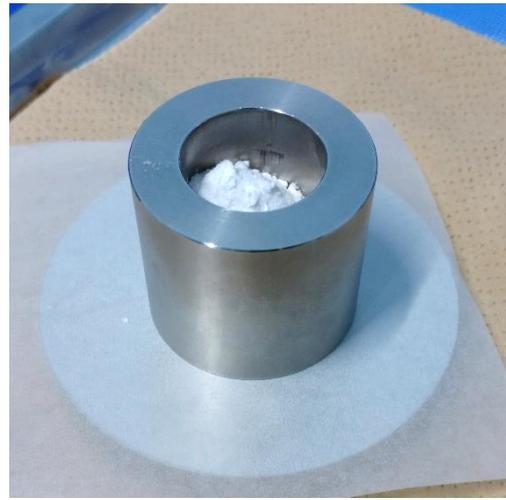


図 3.2 治具へ入れた塩化カリウム

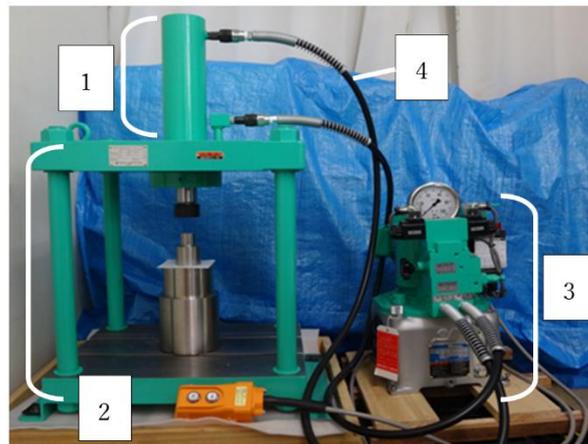


図 3.3 圧縮装置の外観

3.1.2 使用物質の選定

教育現場で用いる自然放射線源の作製に使用する物質に求められる条件は以下のものが考えられる。

- ① 環境バックグラウンドと比べ、検知できる程度の高い放射能をもつ
- ② 粉末化が可能である
- ③ 使用に規制がなく、あらゆる場所で自由に扱うことができる
- ④ 身近に存在し、親しみを持つことができる物質である

①は放射線の特性を再現する上で非常に重要である。②は作製方法によるものである。自然放射線源は粉末を高圧力で圧縮し作製する。粘性があったり水分量が極端に多かったり、硬度が高く粉末化ができないような物質からは作製ができない。③については自然放射線源は学校での利用を想定している。”どこでも誰でも”使用できることが重要であるため必要不可欠な項目である。④は実験の際に重要である。義務教育では自然放射線の存在について学ぶ。全てのもの、物質に放射性核種が存在し放射線を出していることを学ぶために、身近で親しみのある材料を選択することは学習効果を高めることにつながる。

これらの条件より本研究で選定した物質を表 3.2 に示す。

表 3.2 本研究で選定した物質

選定物質	メーカー	選定理由
万能昆布	北前船物産	家庭科で比放射能が他の食品と比較すると高い物質として紹介されている 特に日本で親しみがある
インスタントコーヒー MAXIM	味の素 AGF 株式会社	比放射能が他の食品と比較すると高く、世界的に親しみがある
秋田名湯 玉川温泉の 華浴剤	株式会社 ユゼ	温泉として親しみがあり、様々な放射性核種を含む
塩化カリウム(特級)	米山薬品工業株式会社	理科実験等で使用する物質として気軽に入手できる 比放射能も高い

3.1.3 自然放射線源に求められる安全評価試験の考え方

はじめに、人工の放射線源の使用環境と安全性の評価方法について整理をする。本項目では形状の変化のない密封放射線源の評価方法を整理する。

密封放射線源は、放射性物質を容器に封入し外部に漏出しない形で利用する線源を指す。使用の際に漏出およびそれによって放射線被ばくが発生することを防ぐために、日本工業規格(JIS)にて性能基準が定められている。密封放射線源は様々な分野で使用されている。例えば、石油検層用の線源として使用されていたり、医療分野では前立腺がんや舌癌等の密封小線源治療に用いられている。様々な現場で安全に利用できるよう密封放射線源としての要求事項が定められている。温度、圧力、振動、衝撃、パンク、曲げ試験の6つの項目があり、それぞれについて試験方法が定められている。

しかし、本研究で開発を目指している自然放射線源は教育現場での利用を想定している。高温下に長時間保管したり、高圧力下で実験を行うことは想定されない。使用される環境は一般の生活環境と同様である。また、自然放射線源の放射能濃度は自然に存在するレベルの範囲を逸脱するものではなく、毒性も低い。対象線源が使用中に割れても大きな問題になりにくい。そのため、人工線源に要求される6つすべての試験項目を線源要件に課すことは合理的ではないと考えた。たとえば、理科実験等では自然放射線源を誤って落としてしまう状況があろう。この状況を想定し、自然放射線源に必要な試験項目を「衝撃試験」と位置づけることにした。

3.2 自然放射線源に関する特徴の試験

3.2.1. 物理的特徴に関する検証

3.2.1.1 成形条件の検討

選定した物質を用いて実際に作製すると、塩化カリウムでは成形ができたが、昆布、インスタントコーヒー、湯の華については一部の物質で圧縮時に液体が滲出したり、線源を取り出す際に崩れたり飛び散ったりした。成形不能の例を図 3.3-3.5 に示す。

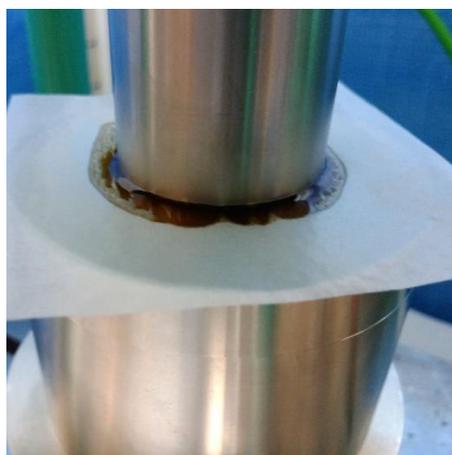


図 3.4(左)圧縮後取り出し時に割れた湯の華線源、(右)圧縮時に液体が滲出した湯の華線源



図 3.5 圧縮時に割れたインスタントコーヒー線源

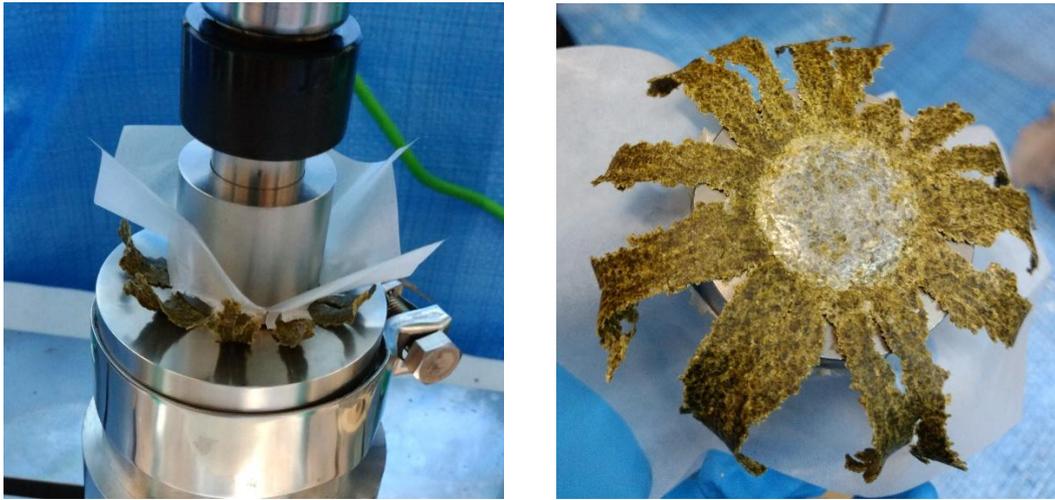


図 3.6 圧縮時に治具より飛び出た昆布線源

また、自然放射線源は教育現場での使用を想定している。そのため、耐久性も必要である。開発過程で挙げられた成形に関わる条件は、物質の水分量、粉末の粒径、圧縮時圧力、含有成分、圧縮時間、粒子形状である。セラミックの成形についてはあるが粒径、含水量、密度が重要であるとされている[20]。また、層状の剥離を防ぐためには圧縮時圧力の影響が大きく、圧縮時間は関係が少ないことが示されている[21]。本研究では、物質の水分量、粉末粒径、圧縮時圧力の3つについて検討を行った。

3.2.1.2 水分量の測定方法と試験方法

水分量の測定は土壌水分計を用いて行った。測定方法はグルセロール抽出屈折率測定法(GER法)である[22]。測定試料とグリセリンを混合し、試料中の水分によるグリセリンの希釈による屈折率の低下から含水率を計算するものである。測定試料とグリセリンは基本的に重量を基準に1:1で混合した。混合後の上澄み液の測定を行うが、測定試料によってはグリセリンを吸着し上澄み液が残らないものも存在した。この場合はグリセリンを追加し、測定後の水分量をグリセリン量から補正を行い、最終的な水分量を算出した。測定に供する試料としては、容易に入手できる市販されているものを可能な限り多く集め、事例を蓄積することに努めた。

以下に土壌水分計の情報、試料の調整・測定手順を示す。

測定器

土壌水分計 ATAGO SH-200

調整・測定手順

1. 測定対象物質、グリセリンを秤量する
2. 秤量した2つをジッパー付きの袋へ入れふたを閉め、1分間手で混合させる
3. 3分間放置する
4. 測定器に専用のろ紙を敷き、上澄み液を垂らし測定を行う

同一試料間の測定誤差を考慮し、測定の回数を各試料5回と設定し、その平均を代表値とした。水分量を同定した後、その粉末を用いて線源を作製し、圧縮中、圧縮後の様子を目視で観察した。線源の作製の際の圧縮時間を2分間、圧力を50MPaとした。また線源の大きさを統一するため、ここでは直径が3cmの金属治具を用意し、その中で圧縮成形をした。

3.2.1.3 粒径の分級方法と試験方法

試料粉末の粒径に関する成形特徴を調べるために、ふるい分け試験を行った。ふるい分け試験は2つに区分することができ、気体中で行う試験を乾式ふるい分け、液体を分散溶媒として用いる場合を湿式ふるい分けという。ふるい分け方法も2つに区分することができ、ふるいを手で振動させながら行うことを手動ふるい分け、装置を用いて振動させるものは機械ふるい分けという。今回は乾式で手動によるふるい分けを行った[23]。使用するふるいの目開きは食卓塩の粒径が $500\sim 300\mu\text{m}$ 、片栗粉の粒径が $50\sim 70\mu\text{m}$ ほどであるが、これらと比較をすると本研究で扱う粉末はこれらの間の粒径であることが見て取れた。採用したふるいの目開きは $150\mu\text{m}$ 、 $300\mu\text{m}$ である。これより3つの粒径に分級した。

粒径区分

- ① $300\mu\text{m}$ 以上
- ② $150\mu\text{m}$ 以上 $300\mu\text{m}$ 未満
- ③ $150\mu\text{m}$ 未満

また、粒径を分級後、各粒径について線源を2個作製した。物質は3.1.2で述べた4種類とした。作製時の条件は水分量の際と同様である。その後、粒径の耐久度への影響を調べるために衝撃試験をおこなった。衝撃試験方法は3.2.1.5で述べる。

3.2.1.4 圧縮時圧力

油圧ポンプにより圧力をかけ、圧縮を行うが、その際の圧力を変更した。本研究における圧縮機の最大圧力は 70MPa である。圧縮時圧力は安全のために 60MPa までとし、衝撃試験を行い差を見るために 10MPa ごとに最小圧力を 10MPa までとした。密封放射線源の衝撃試験の実施回数と同様に2個ずつ作製を行った。物質は3.1.1で述べた4種類とした。

3.2.1.5 衝撃試験

耐久度の評価のために衝撃試験を行った。本研究で行う衝撃試験は、密封放射線源の安全性の評価の際に行われる衝撃試験を参考に構成した。密封放射線源における衝撃試験は、等級によって定められた重さの衝撃ハンマをガイドパイプを用いて1mの高さから鉄床へ自由落下させることを2つの試験線源を用いて行う試験である[24]。

表 3.3 に密封放射線源における等級と衝撃ハンマの重量を示す。

表 3.3 密封放射線源における衝撃試験の評価等級別条件表([24]より作成)

等級	1	2	3	4	5	6
落下させる高さ	無試験	1m				
衝撃ハンマの重量		50g	200g	2 kg	5kg	20kg
回数		1	1	1	1	1



図 3.7 使用した 200g 衝撃ハンマ



図 3.8 鉄床とガイドパイプ

自然放射線源は樹脂等で周りをコーティングしておらず、強化剤等も追加していない。そのため、密封放射線源と比較すると耐久度は低い。密封放射線源の衝撃試験をそのまま適応すると等級 2 でほぼすべての種類の自然放射線源が割れてしまい、比較ができない。これより密封放射線源の衝撃試験を参考に独自の衝撃試験を実施した。等級 2 では 1m の高さから衝撃ハンマを落下させるが、新設した等級 1.5 では 50g の衝撃ハンマを等級 2 の半分である 50 cm の高さから落下させる形とした。また落下させる回数を増やし表 3.4 の通りとした。

表 3.4 本研究における衝撃試験の評価等級別条件表

等級	1	1.5	2	3	4
落下させる高さ	無試験	50 cm	1m		
衝撃ハンマの重量		50g	50g	200g	2 kg
回数		15	5	1	1

3.3 結果および考察

3.3.1 水分量について

水分量の測定結果と圧縮後の状態を以下に示す。

湯の華については2%台の水分量のものは成形が可能であった。圧縮時に液体が滲出するものに関しては3%以上、圧縮後取り出す際に割れてしまうものは1%以下の水分量であることが判明した。昆布については、万能昆布は添加物等を使用していない乾燥昆布であるが、刻み昆布は醸造酢で加工がされているものである。そのため、水分量が多くなり昆布の粘りとともに治具の隙間から出てきてしまったと考えられる。ふりかけは測定下限値以下となった。しかし、触感や質感を観察するとしっとりしており水分感があり、成形時にも液体が滲出した。このことから、昆布については適切な測定ができていないかの点で現時点では疑義が残り、今後さらなる検討と考察を要する。

本研究では、さまざまな試料に対して、便宜上、土壌水分計を利用して水分量の定量を試みたが、その適切性の確認は別に必要とも考えられる。また異なる種類の試料間の直接比較はできそうにないが、同一物質間であれば結果の比較が可能であると考えた。

表 3.5 水分量の測定を行った物質一覧

	線源番号	商品名	産地
湯の華	1	天然湯の花 北海道神恵内温泉湯の華	北海道 神恵内温泉
	2	天然温浴剤 二股ラジウム	北海道 二股ラジウム温泉
	3	天然湯の花	—
	4	天然伊豆の湯	静岡 伊豆温泉
	5	天然湯の華(北海道)	北海道
	6	磐梯吾妻 湯の花	福島 高湯温泉
	7	湯の華	—
	8	山形蔵王温泉湯の華	山形 蔵王温泉
	9	松川温泉御湯花	岩手 松川温泉
	10	つるつる美肌の湯	—
	11	南紀白浜	和歌山 南紀白浜温泉
	12	玉川温泉の華浴剤	秋田 玉川温泉
	13	湯の華 登別温泉	北海道 登別温泉
	14	薬用 湯の華(大分別府明礬)	大分 別府明礬温泉
	15	別府温泉入浴原料湯の花	大分 別府温泉
乾燥昆布	16	刻み昆布	—
	17	万能昆布	北海道
乾燥わかめ	18	ふえるわかめちゃん	—
	19	カットわかめ	—
ふりかけ	20	トップバリュー若菜	—
コーヒー	21	インスタントコーヒーMAXIM	—
塩化カリウム	22	米山薬品工業 試薬塩化カリウム	—

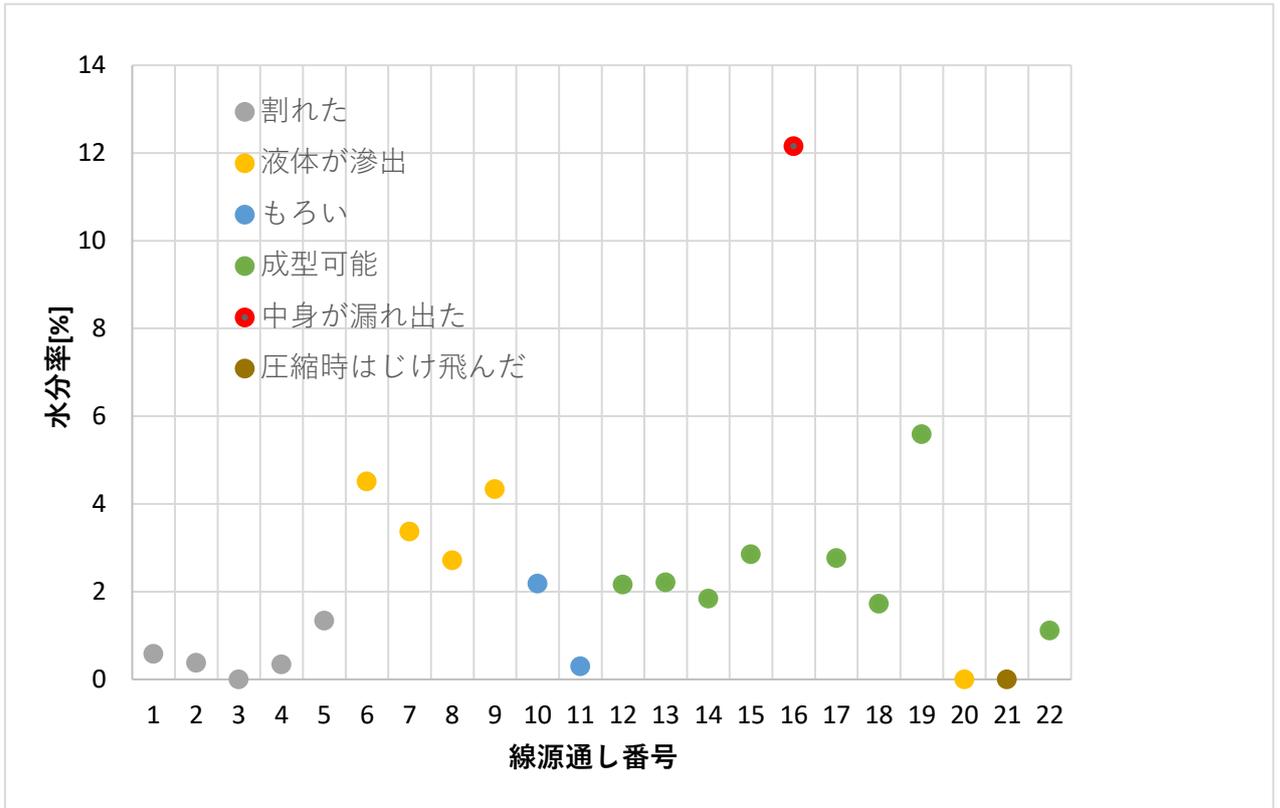


図 3.9 各物質と水分量の関係

3.3.2 粒径について

粒径別の線源作製後の衝撃試験結果を以下に示す。等級、粒径別の数字は線源2個で衝撃試験を実施した際の割れた回数の平均値である。

昆布に関しては粒径別の衝撃試験結果について大きな差はみられなかった(表3.6)。インスタントコーヒーについてはふるいを用いて分級を行った時点で、粒径が150 μ m未満のものが大半であり(表3.7)、1.5等級1回で割れてしまう結果となった。また、湯の華も同様に粒径が150 μ m未満のものしか存在しない結果となり、1.5等級3回までしか耐えず低い位置からの落下でも割れてしまう可能性があることが示された(表3.8)。塩化カリウムについては150 μ m未満の粒径の粒子が少ない結果となった。等級については300 μ m以上の粒径のもので作製すると1.5等級の3回目で割れるという結果となったが、150 μ m以上300 μ m未満であると9回と増加した(表3.9)。これは、粒径が細かいものであると線源の目が詰まり結晶同士が結びつきやすくなるためと考えられる。実際に、写真でも見比べると150 μ m以上300 μ m未満のものは透明感が増していることが見て取れる(図3.10)。

表 3.6 昆布の粒径別衝撃試験耐久回数

等級 \ 粒径	150 μ m 未満	150~300 μ m	300 μ m 以上
1.5	割れず	割れず	割れず
2	割れず	割れず	割れず
3	割れず	割れず	割れず
4	割れず	0.5	割れず

表 3.7 インスタントコーヒーの粒径別衝撃試験耐久回数

等級 \ 粒径	150 μ m 未満
1.5	1

表 3.8 湯の華の粒径別衝撃試験耐久回数

等級 \ 粒径	150 μ m 以下
1.5	3

表 3.9 塩化カリウムの粒径別衝撃試験耐久回数

等級	粒径	
	150～300 μm	300 μm 以上
1.5	9	3



図 3.10 粒径別の塩化カリウム線源(上 2 つ : 150 μm 以上 300 μm 未満、下 2 つ : 300 μm 以上)

3.3.3 圧縮時圧力について

各圧縮時圧力で作製した線源の衝撃試験結果を以下に示す。対象物質は昆布、インスタントコーヒー、湯の華、塩化カリウムである。圧縮時圧力は 60MPa まで 10MPa ごととしている。しかし、インスタントコーヒーの 60MPa 作製時に粉末と治具内部壁との摩擦音が響き危険であると判断したためインスタントコーヒーは 50MPa までとしている。

昆布、インスタントコーヒー、湯の華では圧縮時圧力で衝撃試験結果に大きな差はみられなかった(表 3.10-3.12)。塩化カリウムでは 40MPa 以上の高圧力の場合で衝撃試験結果が変化し、高圧力であると耐久性が増加していた(表 3.13)。また、圧縮時圧力と成形後の自然放射線源の厚さの関係を考える。図 3.11 を見るとインスタントコーヒーの 40MPa の場合が高くなっている。しかし、昆布、塩化カリウムについては 40MPa 以上で成形完了時の厚さが安定している。また、湯の華について 10—30MPa では傾きが大きいが、30MPa 以上の部分では傾きが小さく安定してきている。塩化カリウム以外の物質では衝撃試験結果に大きくは差はないが、厚さを安定させるためにも 40MPa 以上の高圧力での圧縮が必要であると判明した。

表 3.10 圧縮時圧力別の衝撃試験結果：昆布

等級 \ 圧力 [MPa]	10	20	30	40	50	60
1.5	割れず					
2						
3						
4						

表 3.11 圧縮時圧力別の衝撃試験結果(平均値)：インスタントコーヒー

等級 \ 圧力 [MPa]	10	20	30	40	50
1.5	1	1.5	1.5	1.5	1

表 3.12 圧縮時圧力別の衝撃試験結果(平均値)：湯の華

等級 \ 圧力 [MPa]	10	20	30	40	50	60
1.5	2	3	3.5	3	4	2.5

表 3.13 圧縮時圧力別の衝撃試験結果(平均値)：塩化カリウム

等級 \ 圧力 [MPa]	10	20	30	40	50	60
1.5	2.5	3	2	6.5	6	7.5

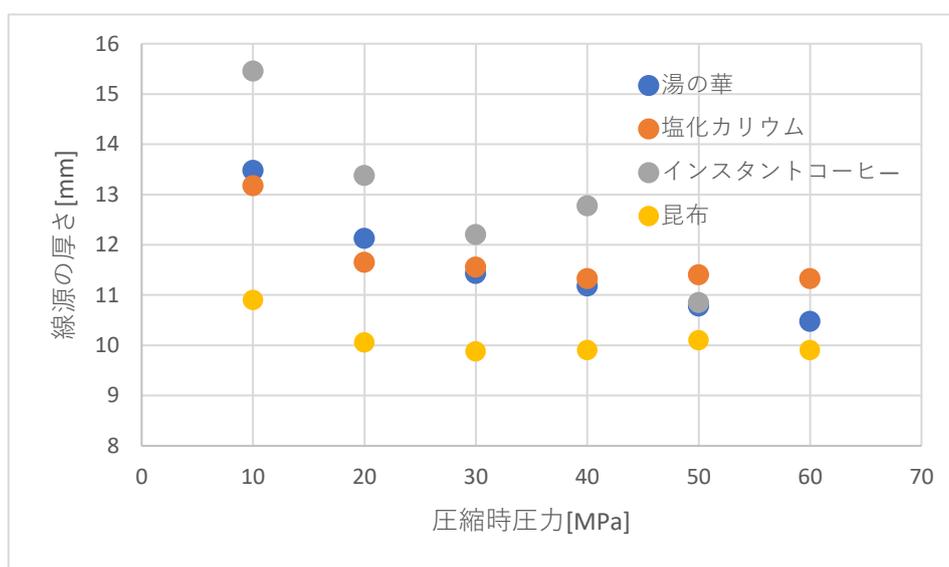


図 3.11 圧縮時圧力と成形後の線源の厚さの関係

3.4 放射線学的な特徴に関する試験

3.4.1 含有核種の同定と放射能測定に係る手順

物質に含まれる核種を同定するために、 γ 線スペクトロメトリーを実施した。

測定手順として、まず初めに U8 容器に封入した 9 核種混合線源を 200,000 秒間測定し、ピーク効率係数を算出した。その後、物質を体積線源と同様の U8 容器に封入し、ピーク効率の線源と同様のジオメトリで測定を行った。また、線源の密度が異なることで、線源の自己吸収割合が変化する。そのため、密度の補正係数を取得し、掛け合わせた。密度補正には、今回 80–3000keV の γ 線を扱う。本研究では、対応する光子のエネルギー範囲が 1keV 以上であり、原子力等計算用途の限られていないモンテカルロ計算コード PHITS を用いて計算を行った。

3.4.2 測定試料の調製

乾燥昆布、湯の華入浴剤、インスタントコーヒー、塩化カリウムについて測定を行った。Ge 半導体検出器では、ピーク効率校正が必要になる。そのため、試料の測定の前に放射能が既知である標準線源での測定を行い、実際の放射能と計数率な関係を明らかにしておく。前述したように本研究での標準線源の形状は直径 50mm の円柱状の U8 容器であり、そこに高さ 50mm で放射性物質が均一に分布されたアルミナが詰められている。測定試料と標準線源の形状が同じであれば、得られたピーク効率を実測定のジオメトリに合わせる必要がない。

また、ここで対象となっている自然放射線源は、放射エネルギーを確実に、かつ短時間で同定する対象としては放射能濃度が十分なレベルにはない。圧縮後の 10-15g 程の量では十分な計数を得るまでに時間がかかる。したがって、本研究では標準線源と同様の U8 容器を使用し、高さ 50mm まで試料を詰めて試料の量を増すことで、総放射エネルギーを十分に確保することにした。

試料の状態は U8 容器に均一に詰まるように粉末化後の各物質を詰める形とした。以下に作製した試料を示す。

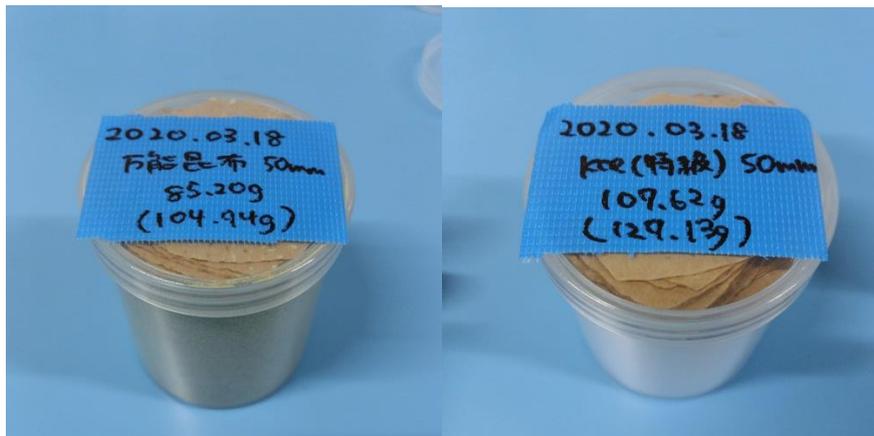


図 3.12 Ge 半導体検出器での測定試料(左：昆布、右：塩化カリウム)



図 3.13 Ge 半導体検出器での測定試料(左：湯の花、右：インスタントコーヒー)

3.4.3 密度補正に関するモンテカルロシミュレーション(PHITS)の条件設定

調製した試料と標準線源は材質と密度が異なる。そのため、材質、密度の補正が必要である。各試料の密度は図 3.14 の通りである。PHITS にて放射能の測定に使用した Ge 半導体検出器と測定試料を再現し、密度を表 3.14 の通りに変化させフラックスを取得した。

表 3.14 標準線源と選定物質の重量、密度一覧

	標準線源	塩化カリウム	昆布	インスタント コーヒー	湯の華
重量 [g]	94	107.62	85.20	60.43	99.73
密度 [g/cm ³]	0.96	1.09	0.86	0.62	1.02

シミュレーションに必要な入力情報は以下の通りである。

- ・ 線源及びその周辺環境を構成する物質の元素組成比
- ・ 線源中の核種の種類とその放射エネルギー
- ・ 線源とその周辺環境のジオメトリ

対象線源の元素組成比を決めるために、蛍光 X 線分析装置で測定を行った。本測定で得られた詳細な組成比情報については 3.4.4 で示す。また、標準線源と同様の核種、放射エネルギーを線源として採用している。

ここでは、Ge 半導体検出器で測定している状況を本シミュレーションで再現することを目的とし、以下にそのジオメトリを示す。図内 101 が測定試料を表し、302 が Ge 半導体検出器の結晶部分、つまり放射線検出部を表している。

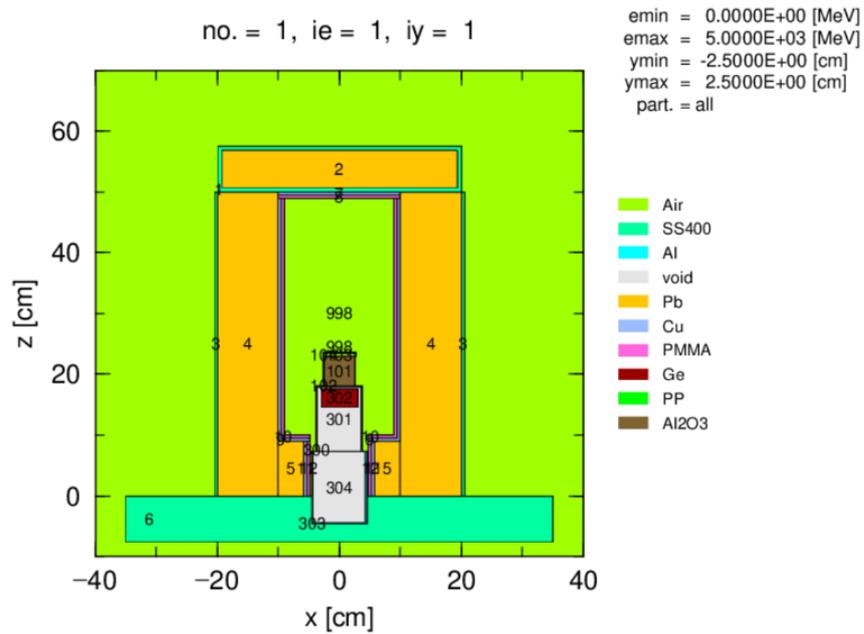


図 3.14 再現した Ge 半導体検出器

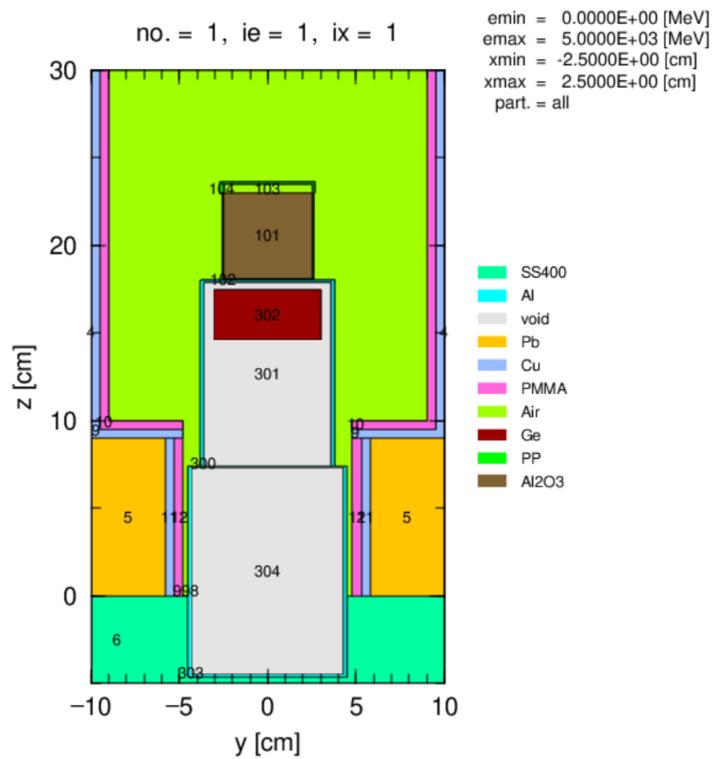


図 3.15 再現した Ge 半導体検出器(測定部分拡大版)

3.4.4 測定試料の組成比の測定

試料の密度補正にはシミュレーションの結果を利用する。その入力には放射線の自己吸収に大きく影響を与える試料の元素組成比が重要となる。本研究では、3.1.2 で選定した4種の試料について蛍光 X 線分析装置を用いて組成比を決定した。しかし、蛍光 X 線装置はフッ素以下の軽元素の測定が難しい。昆布やインスタントコーヒーには炭素等の軽元素が含まれている可能性が高い。したがって、軽元素が含まれない塩化カリウムと昆布、インスタントコーヒーの GM サーベイメータの計数率を比較し軽元素割合を決定した。図 3.15-3.18 に4種類の物質の組成比をまとめる。

表 3.15 塩化カリウムの組成比

	核種	
	Cl	K
含有割合 [mass%]	44.7	55.1

表 3.16 インスタントコーヒーの組成比

	核種			
	P	S	K	Ca
含有割合 [mass%]	2.82	1.65	82.1	8.69

表 3.17 昆布の組成比

	核種					
	C	Na	S	Cl	K	Ca
含有割合 [mass%]	28	9.95	2.35	30.7	12.2	8.89

表 3.18 湯の華の組成比

	核種					
	Al	Si	S	K	Ca	Ti
含有割合 [mass%]	7.58	28.9	59.6	1.48	0.105	0.475

3.5 結果および考察

3.5.1 ピーク効率の取得

校正用の線源である、9核種混合線源を Ge 半導体検出器にて測定し、エネルギースペクトルを取得した。

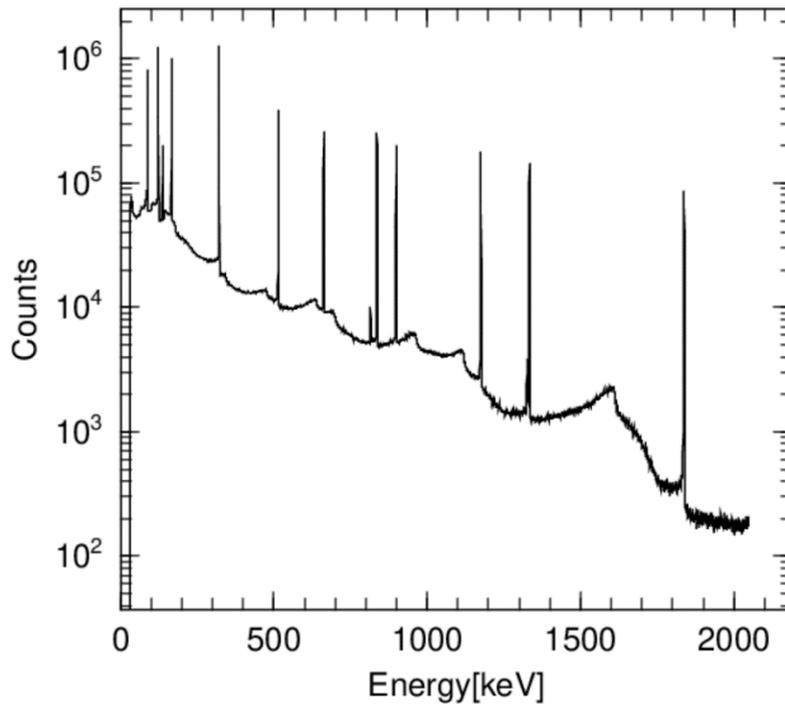


図 3.16 取得した標準線源のスペクトル

これより、目的のエネルギーに関心領域を設定しピーク効率を算出した。各エネルギーにおけるピーク面積はコベル法を用いて算出した。安定的かつ確実な放射能の決定が重要であるため、原子力規制委員会が発行する放射能測定シリーズ[14]を基に算出を行った。ピーク効率は以下の式で示される。 E_0 は 300-600keV の範囲内で曲線がなめらかになっている部分のエネルギーとする。今回は 400keV とした。

$$\ln(\varepsilon) = C_1 + C_2x + C_3x^2 + C_4x^3 + C_5x^4$$
$$x = \ln\left(\frac{E}{E_0}\right)$$

ε : ピーク効率、C:係数、E:エネルギー[keV]、 E_0 : 400keV

測定で得られた関心領域のデータより、最小 2 乗法を用いて上式の C1-C5 及び E₀ の各パラメータを実験的に求めた。得られた係数とエネルギーと計数の関係を以下に示す。

表 3.19 フィッティング後の係数

C1	-3.90
C2	-0.92
C3	0.23
C4	-0.06
C5	-0.20
E0	400

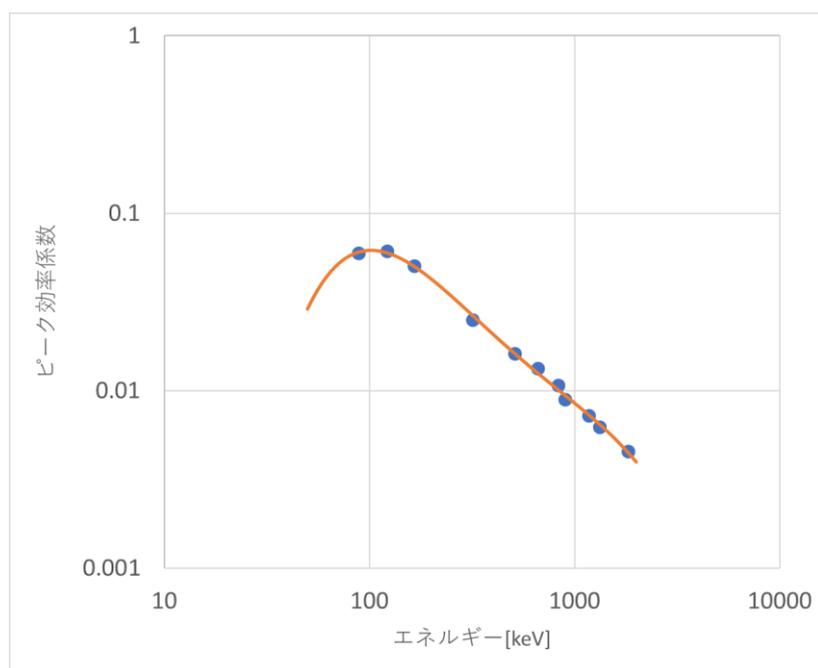


図 3.17 ピーク効率とエネルギーの関係

上図によれば、標準線源を本研究で用いる Ge 半導体検出器にて測定する場合の入射光子エネルギーとピーク効率係数の関係は、100keV 周辺に極大値を作るような凸型の形状となっている。エネルギーが小さいほど光電効果を起こす確率が高くなり、ピーク効率係数は高くなる。しかし、100keV 以下の領域では Ge 半導体検出器の真空容器による吸収や Ge 結晶表面の不感層が原因でそれは低下する。自然放射線源の物質を測定した後、このフィッティング結果を利用し、エネルギー補正を行って放射エネルギーの定量をした。

3.5.2 Ge 半導体検出器による測定結果

塩化カリウム、昆布、インスタントコーヒー、湯の華における Ge 半導体検出器による測定結果を示す(図 3.34-3.37)。

塩化カリウム、昆布、インスタントコーヒーについては、1461keV にピークが存在している。Ge 半導体検出器は γ 線を測定している。1461keV の γ 線を放出する核種として ^{40}K が挙げられる。 ^{40}K の同位体存在比は 0.0117% とされている。塩化カリウムは化学式の通りカリウムが含まれている。また、昆布にはミネラルとしてカリウムが多量に含まれていることは一般にもよく知られている。インスタントコーヒーの原料であるコーヒー豆も、植物としてカリウムを蓄積していることが自明で、それが濃縮されて観測されたと考えられる。

湯の華の測定では、様々なピークが観測された。正味計数に着目すると、239keV、583keV、727keV、911keV、969keV のピークが特徴的である。各エネルギーに対応する核種を挙げると、順に ^{212}Pb 、 ^{208}Tl 、 ^{212}Bi 、 ^{228}Ac となる。ここにある核種はトリウム系列に含まれる自然放射性核種である。トリウム系列は ^{232}Th の α 壊変から ^{208}Pb まで壊変を繰り返すものであり、トリウムは岩石や鉱物に含まれる。また、湯の華は地中で作られる温泉の成分が沈殿したものである。これより、5つのピークは ^{212}Pb 、 ^{208}Tl 、 ^{212}Bi 、 ^{228}Ac から放出されているものといえる。

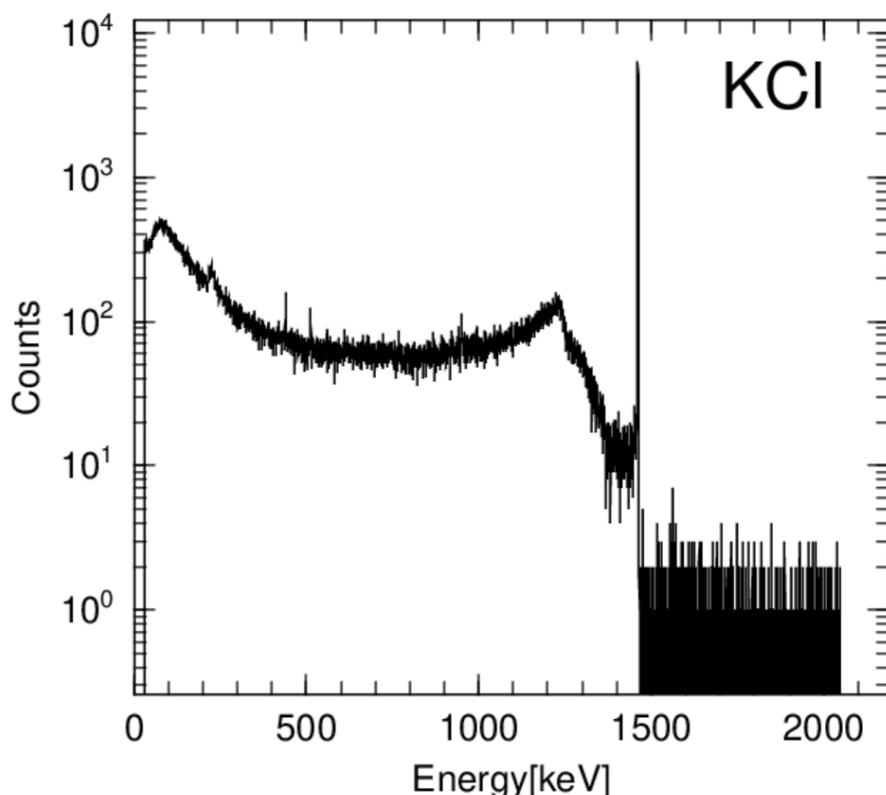


図 3.18 塩化カリウムの測定結果

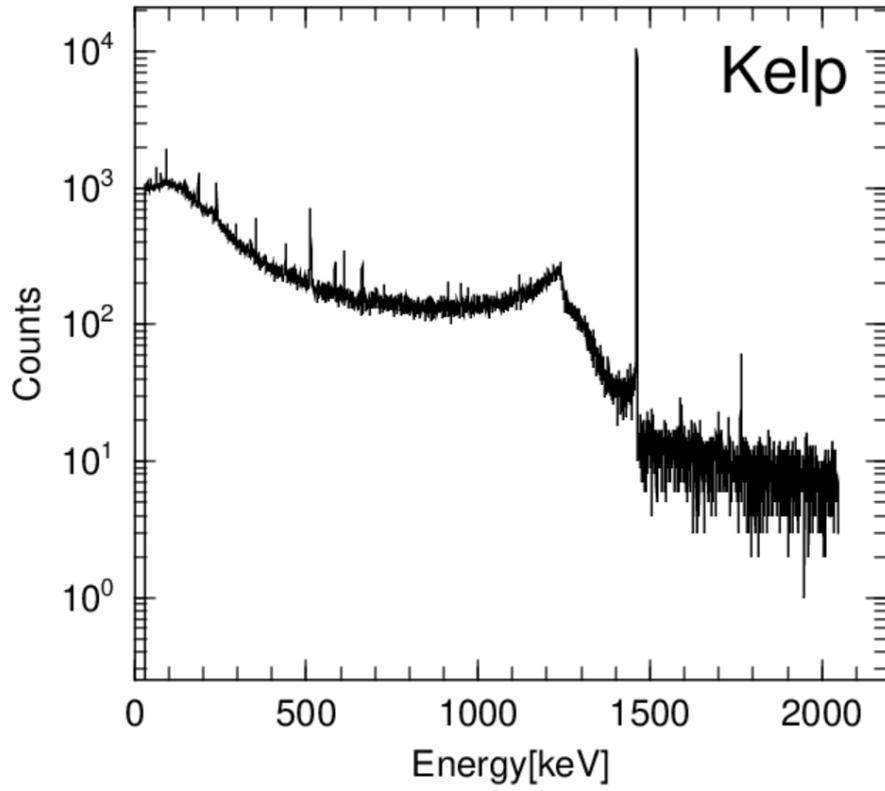


図 3.35 昆布の測定結果

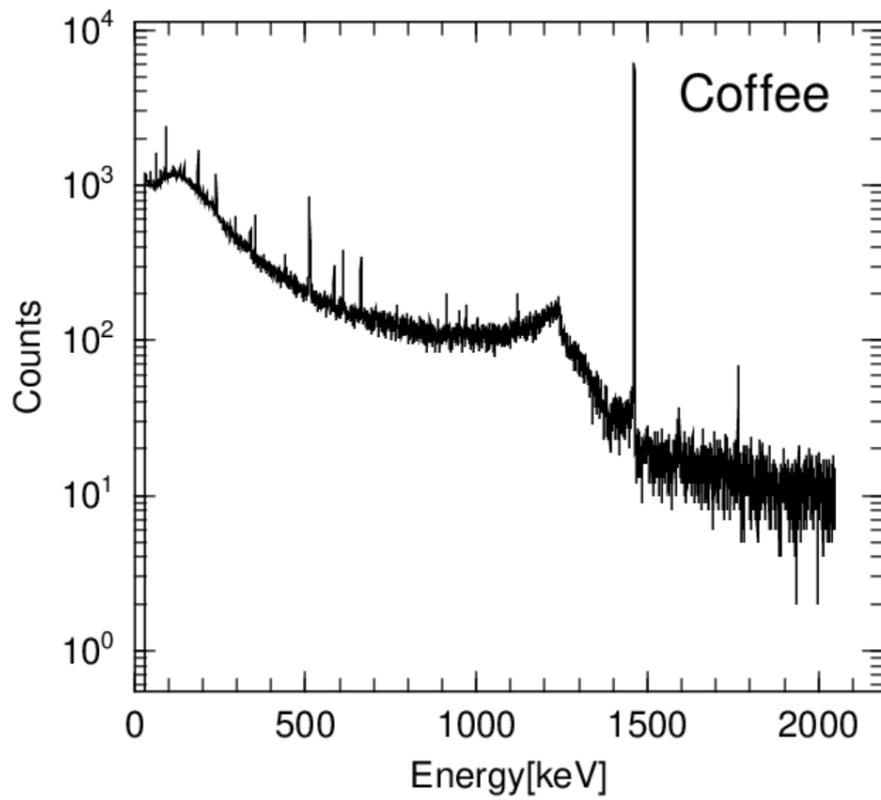


図 3.19 インスタントコーヒーの測定結果

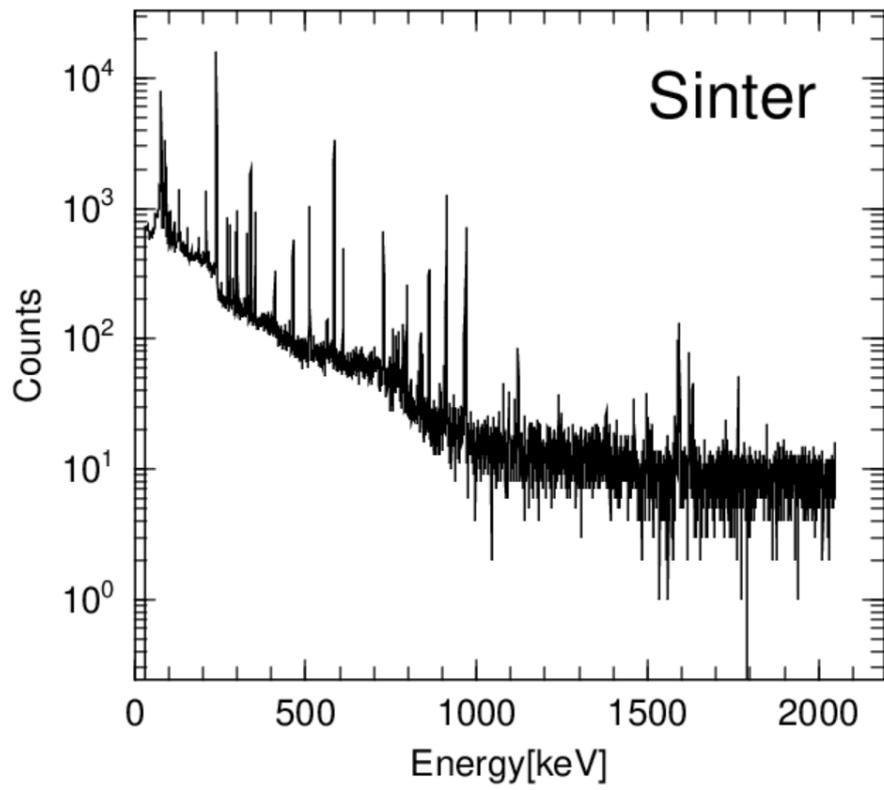


図 3.20 湯の華の測定結果

3.5.3 密度補正係数の取得と放射能の決定

PHITS によるモンテカルロシミュレーションにて得られた標準線源を基準とした各物質・核種における密度補正係数を示す(図 3.20)。密度補正係数は各物質に対する標準線源の比である。

表 3.20 各物質における密度補正係数

物質	密度[g/cm ³]	核種	エネルギー[keV]	係数
昆布	0.86	K-40	1461	0.980
インスタントコーヒー	0.62		1461	0.946
塩化カリウム	1.09		1461	1.010
湯の華	1.02	Pb-212	478	1.025
		Tl-208	583	1.021
		Bi-212	727	1.018
		Ac-228	911	1.016

⁴⁰K を含む昆布、インスタントコーヒー、塩化カリウムは密度が小さいほど密度補正係数は小さくなっている。光子数は平板に平行に入射する場合以下の式に従う。

$$N = N_0 e^{-\mu_m \rho x}$$

N：通過光子数、N₀：入射光子数、μ_m：質量減弱係数、x：平板の厚さ、ρ：密度

本研究で対象とする試料は平板ではないが、試料ごとの形状は変わらず、μ_mは物質の種類で大きく変化しないことから通過γ線数は結果的に密度ρに依存すると考えられる。具体的には、密度の小さいインスタントコーヒーは通過γ線数が多くなり、塩化カリウムと昆布と比較して密度補正係数は小さくなったと考えられる。また、質量減弱係数はその特徴から、エネルギーが小さいほど大きくなる傾向にある(図 3.21)。湯の華ではエネルギーが小さい²¹²Pbの通過γ線数が少なくなり、結果として密度補正係数が大きく評価されたと考えられる。

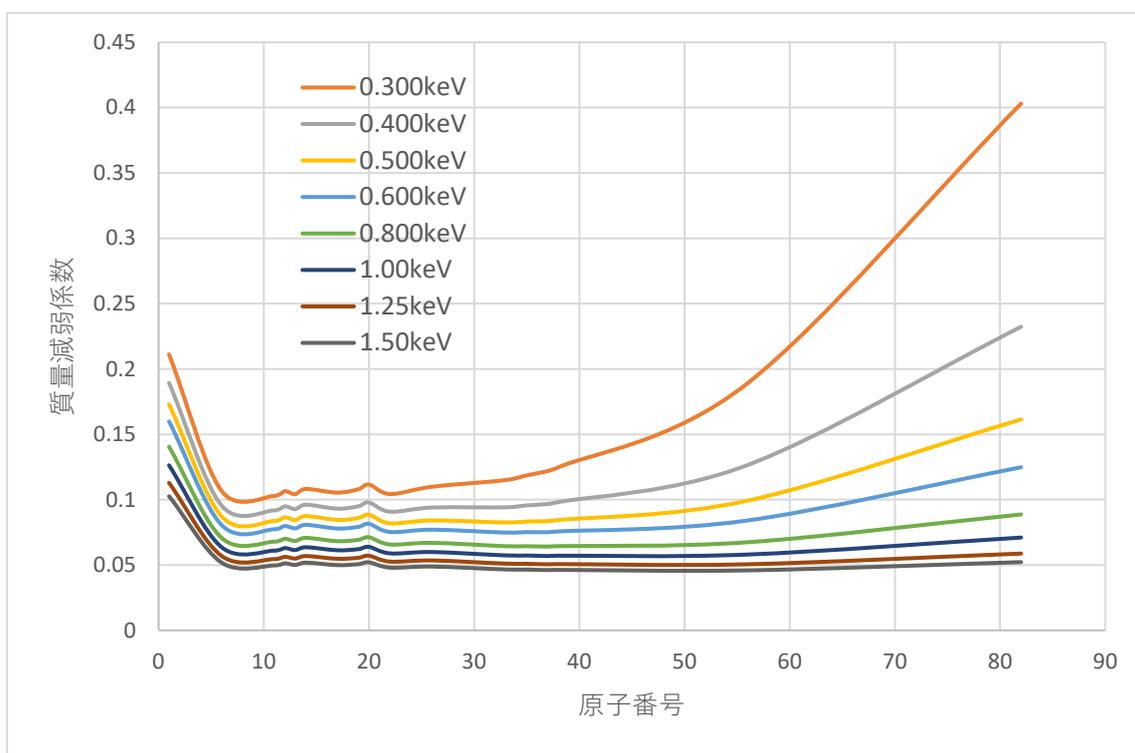


図 3.21 原子番号と質量減弱係数の関係([25]より作成)

密度補正係数を実際の測定で得られた比放射能に掛け合わせることで、放射能を決定する。最終的な放射能は以下の通りである。 ^{40}K に着目すると、実験試薬で純度の高い塩化カリウムが最も放射能が高く、 10Bq/g を大きく超える結果となった。この値は放射線規制科学の観点で大変に興味深い。国連組織のひとつである国際原子力機関 (IAEA) による基本安全基準の GSR-Part 3 によれば、 ^{40}K 濃度として 10Bq/g を越える場合には、自然の放射性物質であっても計画被ばくとして扱うとの趣旨の記述があり、この内容をどのように各国の法体系に取りこみ、安全管理を履行するかは、現時点で国際的なコンセンサスが得られていない。今後の国際的な議論の焦点のひとつにもなる、重要な知見である。また、インスタントコーヒーと昆布は、カリウム濃度として $2\text{--}3\text{Bq/g}$ 程度の結果となった。湯の華はトリウム系列の核種を含んでいるため α 線を放出する。そのため、教育現場では、 α 線源として使用できる可能性示唆された。

表 3.21 各物質、各核種における比放射能

物質	核種	最終放射能 [Bq/g]
インスタントコーヒー	K-40	1.7
昆布	K-40	2.9
塩化カリウム	K-40	23.6
湯の華	Tl-208	2.3
	Bi-212	7.5
	Ac-228	4.9
	Pb-212	7.8

4. 自然放射線源の教育現場での利用に関する考察

自然放射線源を教育実験で使用することを想定し、PHITS を用いたシミュレーションと適切な検出器を用いた実測の組み合わせにより線源近傍の周辺環境における放射線分布の定量化を進めた。

4.1 PHITS によるモンテカルロシミュレーションと実測定のための前提条件

4.1.1 検討の対象となる自然放射線源の構成

前章の検討で、昆布、インスタントコーヒー、塩化カリウムについては ^{40}K 、湯の華については ^{212}Pb 、 ^{208}Tl 、 ^{212}Bi 、 ^{228}Ac が含まれていることがわかった。これらの線源を教育実験に安定的に使用するには、距離依存性等の放射線特性を、自然放射線源を用いて再現できることを確認する必要がある。その条件のひとつに、放射エネルギーがバックグラウンドに比べ十分に高いことが要求される。他の物質と比較すると放射能の高い塩化カリウムを線源がその候補となる。塩化カリウムは 1311keV の β 線と 1461keV の γ 線を放出する。その放出割合は 89.1%、10.7% であり、塩化カリウムは $\beta \cdot \gamma$ 線源として使用できる可能性がある。一方、湯の華についてはトリウム系列を多く含み壊変の中で α 線を放出するため、その特徴を活かし、 α 線源として使用することができそうである。

自然放射線源のサイズを図 4.1 に示す。直径は 3cm、厚さは約 1 cm、1 つあたりの重量は約 15g である。また、シミュレーションへの入力のための元素組成比には、放射能の決定の際の密度補正の際に測定したものと同一値を使用する。シミュレーションに入力する放射能の量は、自然放射線源の実際の放射能の量をそのまま入力するとシミュレーション時の統計誤差が大きくなるため、ここでは 1 核種あたり 5000Bq に設定し、規格化した形で計数を得ることとした。

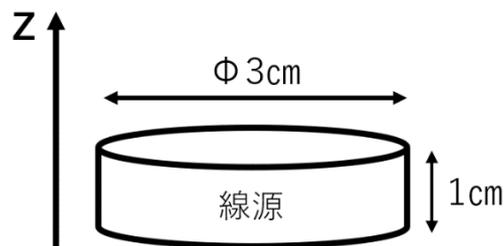


図 4.1 線源の大きさ

シミュレーションでの試行回数を以下の通りに設定した。また、放射線の放出角度を表 4.1 に示す z 軸の正の方向を中心に立体角 2π [sr] 分とした。この工夫により、測定面における計数を効率よく得ることができる。一方、検出器を設定する方を前方とすると、後方に放出される放射線の中で後方散乱を起こし検出器に入射する分の数え落としがある。つまり、前方のみに放出方向を限定してしまうと過小評価になる可能性が残る。ここでは以下のように、放出方向を後方のみにした場合に後方散乱を起こし、検出器に入射する放射線の割合を別に評価しておき、後でその分を補正することにした。

PHITS を用いて放出角度を実際に行うシミュレーション時の反対方向である、z 軸の負の方向を中心に立体角 2π [sr] 分とした。その結果を図 4.3 に示す。 γ 、 β 線は 0.01% 程度以下となり、 α 線については自然放射線源そのものによって自己吸収が起こるため 0% と判明した。そのため、放出方向を z 軸の正の方向を中心に立体角 2π [sr] 分としても計算上の影響は無視できると結論した。したがって、シミュレーション時の放出方向を、z 軸の正の方向を中心に立体角 2π [sr] 分に設定しても評価上は問題ない。

表 4.1 シミュレーションにおける全試行回数と放射能の設定

繰り返し回数(バッチ数)	10
1 バッチあたりの試行回数	100000
全試行回数	1000000
線源 1 つあたりの放射能[Bq]	5000

表 4.2 各線種における後方散乱割合

	Photon	Electron	Alpha
後方散乱割合 [%]	0.012	0.0010	0.000

4.1.2 実測定実施条件

実測定で用いた検出器を整理する。今回用いた検出器は3種類であるが、5mm厚のアルミニウム板と組み合わせ4つの測定方法を実施することで α 、 β 、 γ 線の計数率と線量率の測定を行った。各測定方法を以下に示す(図4.4)。

表 4.3 実測定における測定方法

測定方法	検出器	測定線種	測定単位
1	ZnS シンチレーション式サーベイメータ	α	計数率 [cpm]
2	GM サーベイメータ	β 、 γ	
3	GM サーベイメータ+5mm厚のアルミニウム板	γ	
4	NaI シンチレーション式サーベイメータ	$\gamma(\beta)$	線量率 [μ Sv/h]

α 線の測定には ZnS シンチレーション式サーベイメータを用いた。 β 、 γ 線の計数率の測定には研修や講習でよく使用される GM サーベイメータを用いた。しかし、GM サーベイメータは β 、 γ 線のどちらも同様に計数するため、それぞれを区別した評価ができない。したがって、測定方法3にてアルミニウム板を検出器と自然放射線源間に挟み計数することで γ 線のみを数え上げ、測定方法2から3の測定結果を減算することで β 線のみを計数率とした。また、NaI シンチレーション式サーベイメータは空間線量率の測定が可能である。

4.1.3 実験環境の再現に関する設定

本研究で整理する環境は2つである。1つ目は距離の変化によって単位面積当たりの放射線入射数を示すフラックスがどのように変化するかを整理する。2つ目は、線源を2、3個並べた場合の自然放射線源そのものが遮蔽体となり計数率が下がる自己吸収の整理である。以下でそれぞれをモンテカルロシミュレーションと実測で再現する環境のジオメトリをまとめる。

4.1.3.1 距離によるフラックスの変化

α 、 β 、 γ 線と比較すると飛程が短い。放射性同位元素から放出される α 線の空気中の飛程は数 cm である。また、紙等で簡単に遮蔽される。そのため、自然放射線源自体による遮蔽効果の影響を受け、飛程が短くなることが考えられる。シミュレーションの際には自然放射線源—検出器表面間の距離を、0 cm から 1 cm までは 0.1 cm ごと、それ以降は 1 cm 間隔で 5 cm までとした。実測定の際には 0.1 cm に検出器を設定することは難しいため、0 cm から 5 cm まで 1 cm 間隔とした。

β 線は空気中での最大飛程が数 m になる。また β 線は負の電荷をもつため空気中や物質中の原子との散乱や衝突を繰り返し、直線状には進まないことが多い。飛程は最大飛程より短くなることがほとんどである。したがって、 β 線については自然放射線源—検出器表面間の距離を、0 cm から 1 cm 間隔で 5 cm までとした。

γ 線は電荷をもたず、電磁波の一種であり飛程は極めて長い。 γ 線の減衰は点線源であれば距離の逆 2 乗則に従うとされている。本研究の自然放射線源は点線源ではないが、実験場の観点から、どの程度で距離の逆二乗則に従うかを確認するため、変化の大きいであろう自然放射線源—検出器表面間の距離が 0 cm—5 cm の部分では 1 cm 間隔、それ以降 30 cm までは 5 cm 間隔とした。

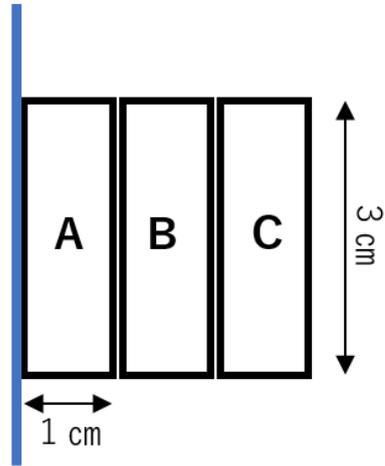
また、モンテカルロシミュレーション時の測定面の形状、大きさは、放射線に関する教育や訓練、講習等で頻繁に使用される GM サーベイメータを想定し、その検出面のサイズである直径 5 cm の円形とした。

4.1.3.2 自然放射線源の自己吸収

本研究で作製した自然放射線源は 1 cm の厚さがある。自己吸収は飛程が短く紙で遮蔽がされてしまう α 線では確認はできない。しかし、 β 、 γ 線であれば α 線に比べ、透過性が強いいため自己吸収を確認できるであろう。ここでは、実験によって放射線源の自己吸収の理解を深めることを目的として、自然放射線源の数を 2、3 個と増やした場合の放射線分布の変化を評価する。

この実験では図 4.5 のようなジオメトリを再現する。A、B、C は線源の位置を示しており、青の面はシミュレーションでは測定面、実測定では検出器の検出面を示す。はじめに線源個数は 1 個とし、A、B、C それぞれに置いた場合を計数する。次に線源を 3 個に増やし、A、B、C すべてに置いた場合を計数する。前者の和と後者の計数率を比較することで自己吸収がどれぐらい発生しているかを評価する。シミュレーション時の測定面の形状、大きさは距離によるフラックスの変化の場合と同様である。

測定面



図内 A,B,C は線源を示す

図 4.2 自己吸収実験概略図

表 4.4 自然放射線源における自己吸収実験のジオメトリ概略図

	線源個数	線源位置	測定項目
ジオメトリ 1	1	A	測定面への入射放射線数の測定
ジオメトリ 2		B	
ジオメトリ 3		C	
ジオメトリ 4	3	A, B, C	測定面への入射放射線数の測定 + 線源 B からの測定面①への入射 線源 C からの測定面①への入射

4.2 結果と考察

4.2.1 開発された自然放射線源を β ・ γ 線源として扱った際の放射線環境

初めに、自然放射線源を配置した環境におけるフラックスを示す。

β 線と γ 線の違いとして、 β 線に比べ γ 線の方が全体としてフラックスが高くなっている。 ^{40}K の β 、 γ 線の放出割合は89.1%、10.7%である。 β 線の放出割合の方が高いためフラックスは高くなると考えられる。しかし、全体として γ 線のフラックスの方が高い。これは γ 線の飛程が長いことと、 β 線は γ 線に比べ簡単に遮蔽されやすいことが挙げられる。 β 、 γ 線源として本研究では、代表的な自然放射線源として塩化カリウムを選択している。そのため、自然放射線源による遮蔽効果が高いと考えられる。また、 β 線の飛程は散乱や衝突により直進しないことが視覚的に明らかとなった。

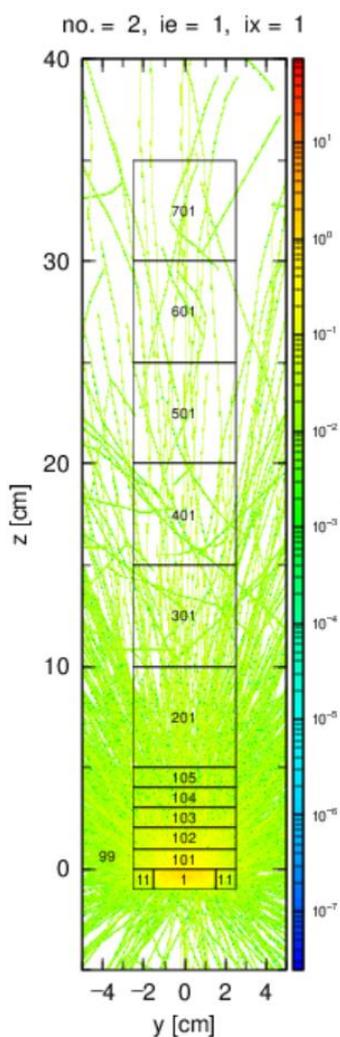


図 4.3 自然放射線源(塩化カリウム)の存在する空間における β 線のフラックス

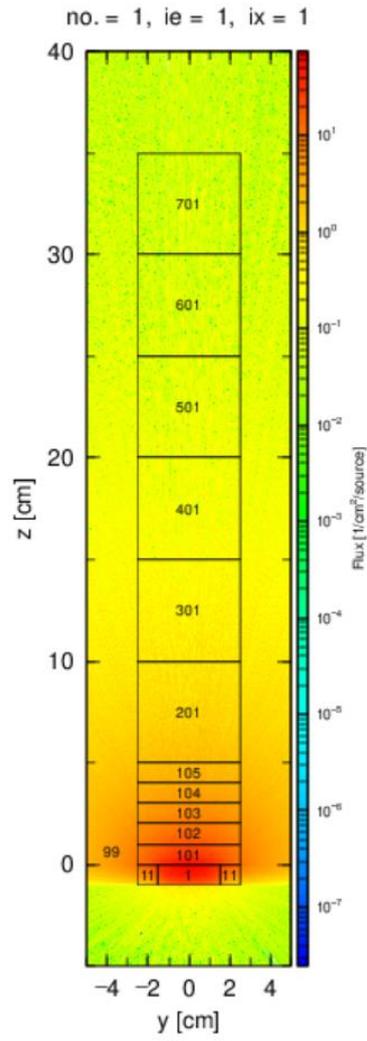


図 4.4 自然放射線源(塩化カリウム)の存在する空間における γ 線のフラックス

次に各自然放射線源—検出面間の距離別のフラックスを示す。

γ 線の場合、自然放射線源と測定面の距離を大きくすることで、測定面への γ 線の入射数の減少が見て取れた。点線源の場合、 γ 線の減衰は距離の逆二乗則に従うとされている。自然放射線源—検出面間距離が 0 cmを基準とし各距離について比をとり、距離の逆二乗則を再現しているといえるか確認するためにフィッティングを行った。距離の逆二乗則の式は以下の通りである。

$$N = \frac{b}{(a + X)^2}$$

N:減衰後の距離 0 cmに対する割合、a, b: 定数、X:線源—検出面距離

最小二乗法を用いて、シミュレーション結果をフィッティングしたところ、結果は以下のようになった。決定係数が 0.99 ということから、距離の逆 2 乗則を再現ができていると考えられる。本研究の β 、 γ 線源は点線源ではないものの、 γ 線については結果的には距離の逆二乗則がほぼ確認できると考えられ、 γ 線の特徴を知るための距離依存性実験に利用の可能性があることが示された。

表 4.5 シミュレーションによる γ 線の距離別粒子通過数

	自然放射線源—検出面距離[cm]					
	0	1	2	3	4	5
設定面への入射個数 [1/cm/sec]	21.4±0.05	12.5±0.04	7.55±0.03	4.85±0.02	3.33±0.02	2.4±0.01
距離 0 cmに対する割合	1.00	0.58	0.35	0.23	0.16	0.11

自然放射線源—検出面距離[cm]				
10	15	20	25	30
0.754±0.010	0.353±0.007	0.206±0.005	0.134±0.004	0.095±0.004
0.035	0.017	0.0096	0.0063	0.0044

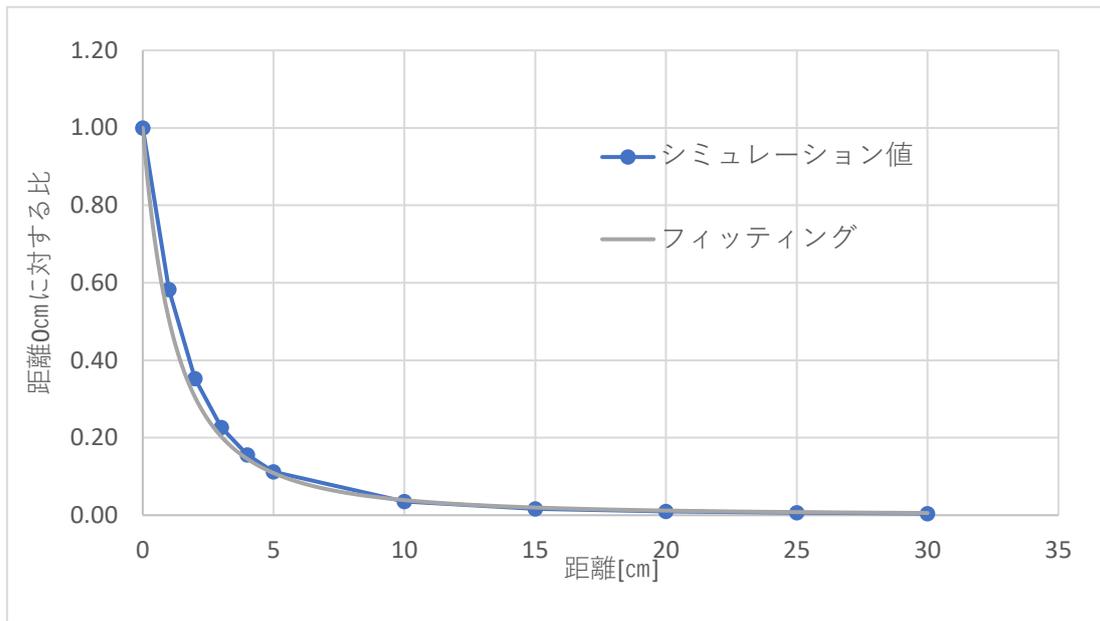


図 4.5 シミュレーションによる γ 線と距離の関係のグラフ

β 線は、距離の逆二乗則に従わず、線形を示している。これは、 β 線のもつ空气中を直進しない特徴が大きな原因になっている。 β 線は負の電荷をもち、質量が小さい。物質内で電子もしくは原子核の電場により散乱が起こる。散乱により β 線の進行方向が変化するため、 β 線は直進しない。

表 4.6 シミュレーションによる β 線の距離別粒子通過数

	自然放射線源－検出面距離[cm]					
	0	1	2	3	4	5
設定面への入射個数 [1/cm/sec]	0.175 ± 0.0048	0.123 ± 0.004	0.0828 ± 0.0033	0.056 ± 0.0027	0.04 ± 0.0023	0.0286 ± 0.0019
距離 0 cm に対する割合	1.00	0.70	0.47	0.32	0.23	0.16

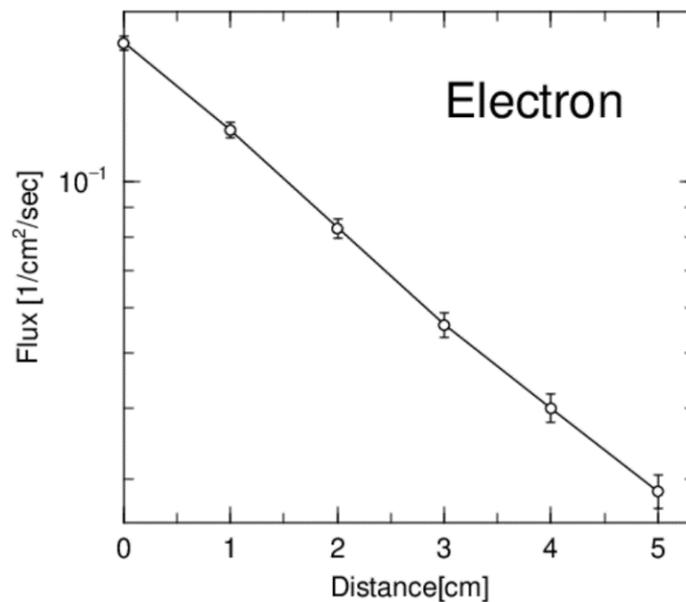


図 4.6 シミュレーションによる β 線と距離の関係

自然放射線源の自己吸収に関するシミュレーション結果を示す。

ジオメトリ①-③の結果の和とジオメトリ④の結果を比較する。 γ 線では、ジオメトリ①-③を合計した場合より、ジオメトリ④の結果において 0.7 だけ減少している。これは線源 B からの γ 線は線源 A に、線源 C からの γ 線は線源 A、B に遮蔽されるためと考えられる。線源によって吸収される割合である自己吸収割合は、 γ 線の場合、数%であることが判明した。同様に β 線で考えると自己吸収割合は自然放射線源 1 個当たり 30%程度であると判明した。

表 4.7 シミュレーションによる自己吸収割合の計算結果(ジオメトリ 1-3)

線源個数：1

自然放射線源－検出面距離 [cm]	設定面への入射個数[1/cm/sec]	
	Photon	Electron
0	21.4 ± 0.05	0.175 ± 0.005
1	12.5 ± 0.04	0.123 ± 0.004
2	7.55 ± 0.03	0.0828 ± 0.003
合計	41.4 ± 0.006	0.381 ± 0.06

表 4.8 シミュレーションによる自己吸収割合の計算結果(ジオメトリ 4)

線源個数：3

自然放射線源－検出面距離 [cm]	設定面への入射個数[1/cm/sec]	
	Photon	Electron
0	40.7 ± 0.12	0.308 ± 0.011

表 4.9 シミュレーションによる自己吸収割合

放出線源	Photon		Electron	
	設定面への入射個数 [1/cm/sec]	自己吸収割合 [%]	設定面への入射個数 [1/cm/sec]	自己吸収割合 [%]
線源 B	12.2 ± 0.07	2.51	0.0830 ± 0.0057	33
線源 C	7.19 ± 0.05	4.77	0.0454 ± 0.0042	45

4.2.2 実測定との比較

以下に実測定の結果を示す。

距離の依存性については、 γ 線の計数率は線源を置き測定を実施してもバックグラウンドと大きくは変わらなかった。シミュレーションでは、距離の逆二乗則にしっかり従うとしていたが、実測定の場合放射能が低く距離の逆二乗則を再現することは難しいことが判明した。 β 線の場合、バックグラウンドと比べると計数は十分に得られた。シミュレーション結果と比較を行うと一致した結果となっており、 β 線に関しては良く再現ができています。

γ 線においてシミュレーションと実測定の結果が乖離した理由として、 γ 線の検出効率が悪いことが挙げられる。検出効率はピーク面積/実際の γ 線放出数を示し、 β 線の場合は100%に近いが、 γ 線は数%にとどまる。そのため、 γ 線が検出器の検出面を通過していても計数がされないものがほとんどである。これらの理由より γ 線の計数がバックグラウンドレベルまでしか計数されなかったと考えられる。

また NaI シンチレーション式サーベイメータによる測定から、線量率を算出した。自然放射線源—検出面間距離を 0 cmとしてもバックグラウンドと大きな差はなく空間線量率は自然放射線源の有無で大きく変わらないことが示された。

表 4.10 γ 線の計数率

自然放射線源—検出面距離 [cm]	0	1	2	3	4	5
計数值[cpm]	2±5.4	-2±14.1	-7.7±7.1	6.0±12.6	3.7±10.1	1.3±5.2

10	15	20	25	30
-0.3±9.1	0±9.9	-5.3±6.8	-3±6.6	2±5.5

表 4.11 β 線の計数率

自然放射線源—検出面距離 [cm]	0	1	2	3	4	5
計数值[cpm]	288.3±7.6	214.7±19.8	160.3±12.1	96.3±12.6	78.3±14.9	54.3±6.4

表 4.12 NaI シンチレーション式サーベイメータでの測定結果

自然放射線源—検出面距離 [cm]	0	1	2	3	4	5
計数值[cpm]	0.05±0.008	0.04±0.005	0.04±0.005	0.05±0.01	0.04±0.01	0.04±0.005

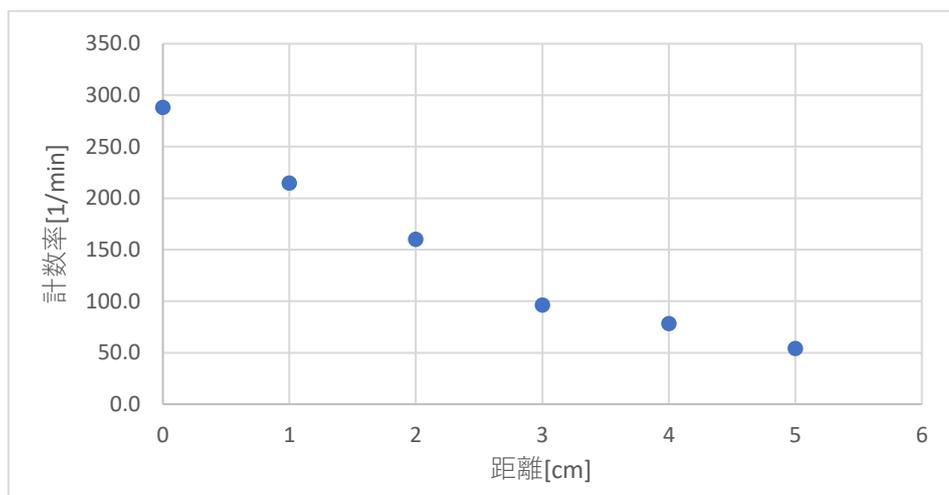


図 4.7 β 線の距離と計数率の関係

自己吸収の実測定の結果を以下に示す。

γ 線に注目する。得られた計数率よりバックグラウンドの計数率を減算しているため、一部値が負になっている。計数率が小さいためばらつきが大きいのが、ほぼ両パターンとも計数率はバックグラウンドと同等であることが明らかになった。 β 線に注目すると、各線源位置に1つ自然放射線源を置いた場合の和と、3つすべての位置に置いた場合とで2倍ほどの差が出た。これは自然放射線源の自己吸収による影響と考えられる。3つ置いた場合、線源位置 B から放出された β 線は線源位置 A の吸収を受ける。また、線源位置 C から放出された β 線は線源位置 A、B の吸収を受ける。そのため計数率が減少している。線量率は線源の配置によって大きな差はみられなかった。

これらを総合すると、この自然放射線源を利用することにより、 γ 線と β 線の物質中の飛程や自己吸収の特徴などを、実験により教育的に論じることができることが明らかになった。

表 4.13 実測定による γ 線の自己吸収実験結果(計数率)

パターン	計数率平均値 [cpm]
①+②+③	-8.67 ± 12.3
⑤	3.33 ± 6.1

表 4.14 実測定による β 線の自己吸収実験結果(計数率)

パターン	計数率平均値 [cpm]
①+②+③	655.67 ± 21.8
⑤	316 ± 35.6

表 4.15 実測定による γ 線の自己吸収実験結果(線量率)

パターン	線量率平均値 [μ Sv/h]
①+②+③	0.017 ± 0.02
⑤	0.017 ± 0.01

4.2.3 開発された自然放射線源を α 線源として扱った際の放射線環境

初めに、自然放射線源を配置した環境におけるフラックスを示す(図 4.8)。本研究での α 線源には湯の華を選択している。 α 線は飛程が短く紙等で容易に遮蔽される。線源内のフラックスが大きくても、自然放射線源外に実際に放出される α 線は比較的少ない。つまり、観測される α 線は、線源の極表面に存在する核種からのものであることは明白である。また、自然放射線源－検出面間距離を大きくすることで、測定面へ入射する α 線数は減少した(図 4.9)。減少した理由として α 線の飛程が関係すると考えられる。 α 線のエネルギーが4から7MeVの場合、空気中における飛程は以下の式で示される。

$$R = 0.318E^{\frac{3}{2}}$$

R: α 線の飛程[cm]、E: エネルギー

^{212}Bi が放出する6.051MeVの α 線の場合、飛程は4.73 cmとなる。これに自然放射線源自身による減衰が影響をする。そのため、2 cm程度で自然放射線源が影響を環境に及ぼさなくなるという結果となったと考えられる。

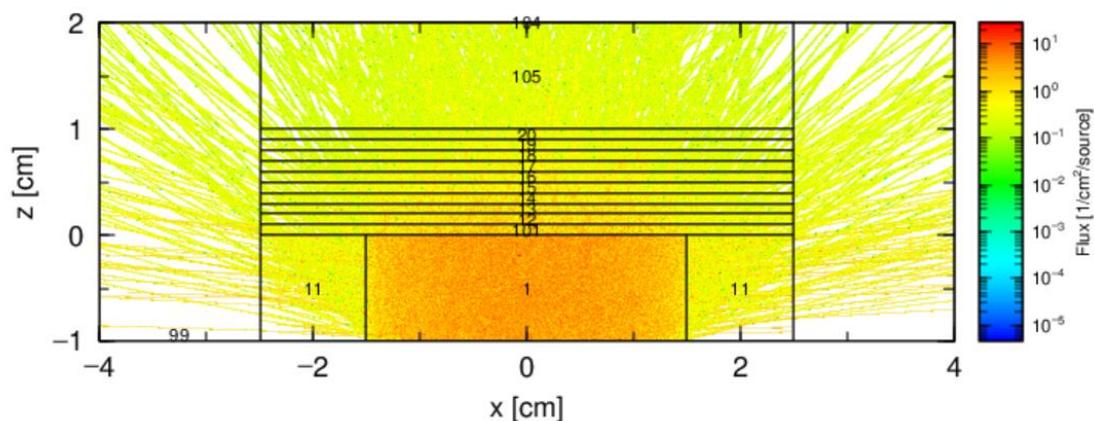


図 4.8 自然放射線源(湯の華)の存在する空間における α 線のフラックス

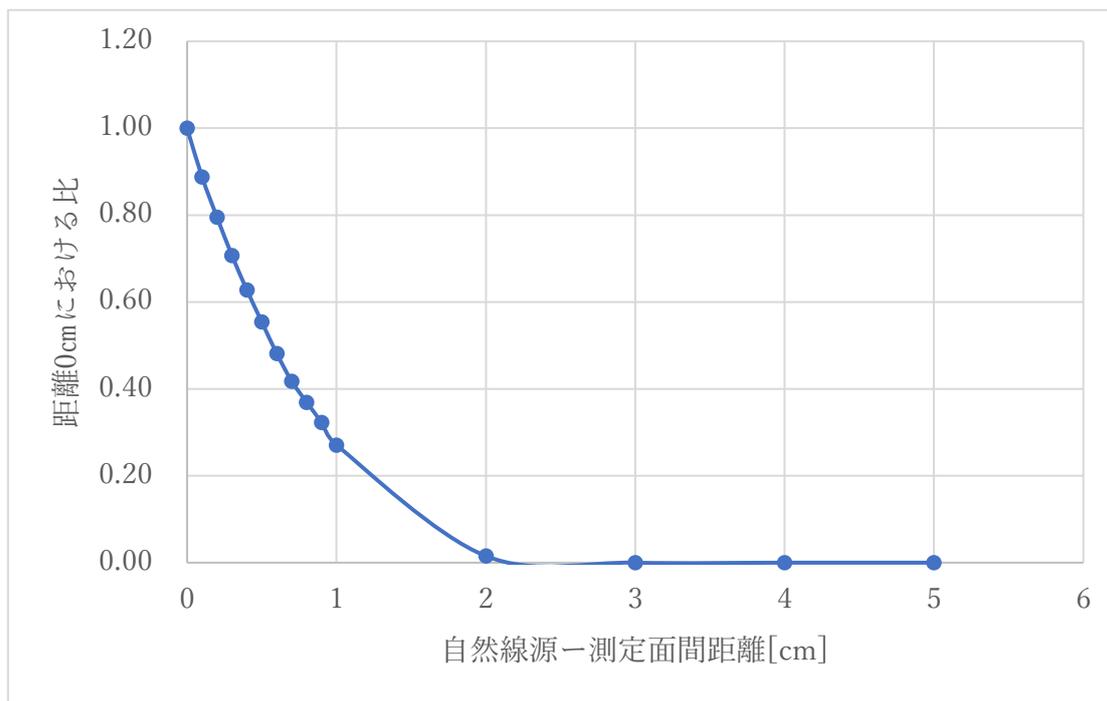


図 4.9 シミュレーションによる α 線と距離の関係

4.2.4 実測定との比較

α 線源として測定をした場合の結果を以下に示す。ZnS シンチレーション式サーベイメータにおけるバックグラウンドは 0cpm である。そのため、表面から 3 cm までの距離であれば自然放射線源による影響が及んでいるといえる。測定し α 線の存在を確認することは可能であるが計数率は高いわけではない。表面測定や遮蔽実験等基本的な α 線の特性実験には使用できる可能性がある。

表 4.16 自然放射線源(湯の華)における α 線計数率

自然放射線源-検出面距離 [cm]	0	1	2	3	4	5
計数値 [cpm]	12.7 ± 2.2	6.7 ± 2.2	4.3 ± 1.8	3.7 ± 2.5	2.3 ± 1.3	0.3 ± 1.1

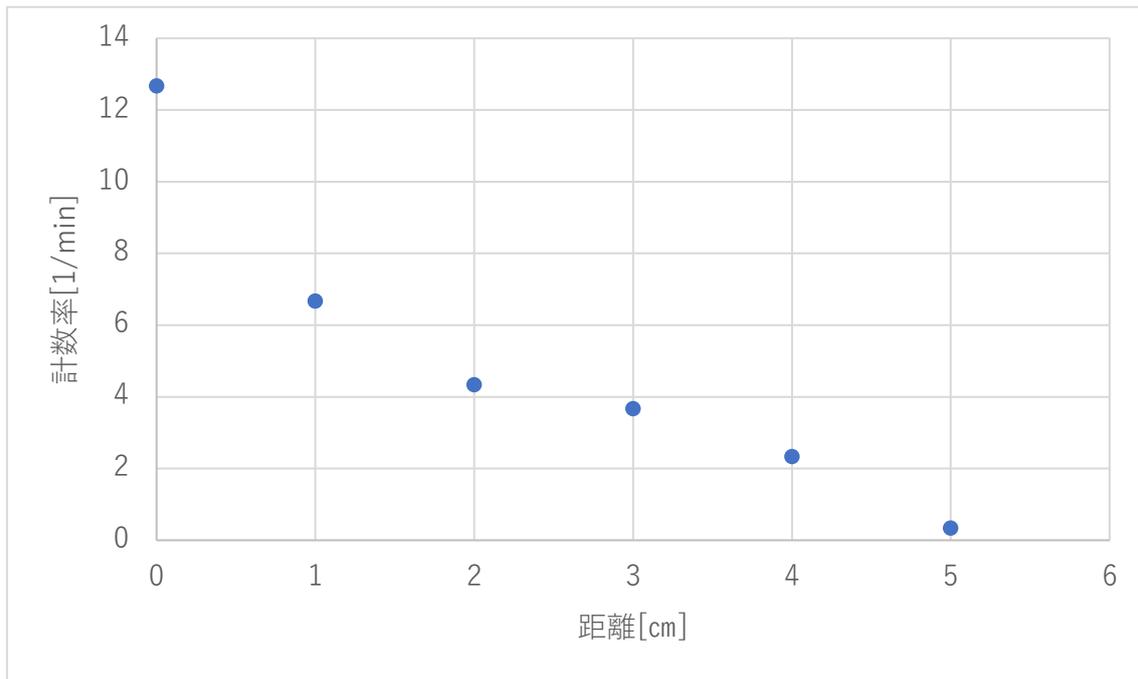


図 4.10 α 線の距離と計数率の関係

4.2.5 開発された自然放射線源の特徴のまとめ

初めに、塩化カリウムを材料とした自然放射線源の特徴を整理する。シミュレーション上では体積を持つ線源ではあるが γ 線は距離の逆二乗則に従うことが判明した。しかし、実測定では γ 線の検出効率は数%と高くないため、バックグラウンドレベルと変わらず、 γ 線として自然放射線源を利用することは現在の材料では難しいことが判明した。 β 線については、シミュレーションと実測定ともに自然放射線源—検出面距離が離れると直線的に計数率が減少することが明らかになり、 β 線の飛程の性質が反映される結果となった。これより、 β 線源としての自然放射線源は教育現場での利用可能性が高いことが判明した。

昆布とインスタントコーヒーについては比放射能が塩化カリウムの 10 分の 1 以下であり、 β 、 γ 線ともに教育現場での利用可能性が低いことが判明した。

湯の華については α 線を放出する核種が含まれており、実測定ではバックグラウンドが 0cpm に対し自然放射線源—検出面距離が 4cm までであれば α 線の存在を確認できる計数が得られた。そのため、教育現場での利用可能性が高いことが判明した。

5. 放射線教育における自然放射線源を使用した実験実習の提案とその習熟度別展開

5.1 開発された自然放射線源を用いた教育現場における実験のラインナップ

放射線分布の整理より得られた情報から、教育現場において実施が可能であると予想される実験例を提案する。今回開発した自然放射線源では、 γ 線については自然放射線源－検出面間距離が 0 cmの表面測定でもバックグラウンドとの計数率の差が見られず、教育実験内で γ 線を対象とすることは難しいことがわかった。ここでは、 β 線源と α 線源としての利用について提案する。

5.1.1 β 線における教育実験

5.1.1.1 表面測定

目的

身近に存在する様々な物質から β 線が出ていることを確かめる。

使用する器材

- ・ 自然放射線源(塩化カリウム、昆布、インスタントコーヒー) 各1個
- ・ GM サーベイメータ

手順

- ① GM サーベイメータの電源を入れる
- ② 自然放射線源を置かず、バックグラウンドの計数率を測定する
- ③ 自然放射線源－検出面距離を 0cm にセットし、計数率を測定する

データの扱い方

③の計数率から②のバックグラウンドの計数率を差し引き、バックグラウンドと計数率に差があることを確認する。

5.1.1.2 距離依存性実験

目的

距離を変え計数率を取得することで、 β 線は距離が大きくなるにつれ計数率が小さくなり下がることを確認する。

使用する器材

- ・ 自然放射線源(塩化カリウム) 1個
- ・ GM サーベイメータ
- ・ 定規等距離を測ることができるもの

手順

- ① GM サーベイメータの電源を入れる
- ② 自然放射線源を置かず、バックグラウンドの計数率を測定する
- ③ 自然放射線源－検出面間距離を 0cm にセットし計数率を取得する
- ④ 距離を 1cm ずつ離し 5 cm まで計数率を取得する

データの扱い方

③④で測定した各距離における計数率から②のバックグラウンドの計数率を差し引く。
横軸を自然放射線源－検出面距離とし、縦軸を減算後の計数率としグラフを作成する。

5.1.1.3 アルミニウム板による β 線の吸収実験

目的

自然放射線源と検出器間の中に遮蔽体としてアルミニウム板を挟み、アルミニウム板の厚さを変更することで、 β 線と遮蔽体厚の関係を確認する。

使用する機器

- ・ 自然放射線源(塩化カリウム) 1個
- ・ GMサーベイメータ
- ・ アルミ箔(アルミホイル)
- ・ アルミ板 0.5mm

手順

- ① GMサーベイメータの電源を入れる
- ② 自然放射線源を置かず、バックグラウンドの計数率を測定する
- ③ アルミ箔を使わず、自然放射線源-検出面距離を0cmとし計数を取得する
- ④ アルミ箔を自然放射線源と検出面の間に挟み、係数を取得する
- ⑤ アルミ箔を折りたたむ
- ⑥ 折りたたんだアルミ箔を自然放射線源と検出面の間に挟み、計数を取得する。
- ⑦ ⑤⑥を繰り返す

データの扱い方

- ④⑥⑦で測定した計数率から、②で測定したバックグラウンドの計数率を差し引く。

5.1.1.4 自然放射線源による自己吸収実験

目的

自然放射線源－検出面距離を 0 から 2cm まで 1 cm ごとに線源を移動させ取得した計数率の和と、自然放射線源－検出面距離が 0cm のところから自然放射線源を 3 個連結させ取得した計数率を比較する。自然放射線源を 3 個連結させた場合の計数率のほうが少ないことを確認する。このことから、自然放射線源自身による減衰があることを理解する。

使用する器材

- ・ 自然放射線源(塩化カリウム) 3 個
- ・ GM サーベイメータ
- ・ 定規等距離を測ることができるもの

手順

- ① GM サーベイメータの電源を入れる
- ② 自然放射線源を置かず、バックグラウンドの計数率を測定する
- ③ 自然放射線源－検出面距離が 0cm のところに自然放射線源を 1 個セットし、計数率を取得する
- ④ 自然放射線源－検出面距離が 1 cm のところに自然放射線源を 1 個セットし、計数率を取得する
- ⑤ 自然放射線源－検出面距離が 2cm のところに自然放射線源を 1 個セットし、計数率を取得する
- ⑥ 自然放射線源－検出面距離が 0cm のところから自然放射線源を 3 個重ねてセットし、計数率を取得する

データの扱い方

③④⑤⑥で取得した計数率から、②で測定したバックグラウンドの計数率を差し引く。③④⑤の計数率を足し合わせる。その後⑥の計数率と比較する。

5.1.2 α 線に関する教育実験

5.1.2.1 表面測定

目的

身近に存在する様々な物質から α 線が出ていることを確かめる。

使用する器材

- ・ 自然放射線源(湯の華) 1個
- ・ ZnS(Ag)シンチレーション式サーベイメータ

手順

- ① ZnS(Ag)シンチレーション式サーベイメータの電源を入れる
- ② 自然放射線源を置かず、バックグラウンドの計数率を測定する
- ③ 自然放射線源を置き、計数率を測定する

データの扱い方

③での計数率から、②で測定したバックグラウンドの計数率を差し引く。

5.1.2.2 距離依存性実験

目的

α 線は自然放射線源－検出面距離を長くするにつれ計数率が減少することを確認する。 β 線の距離依存性実験結果と比較することで、 α 線の飛程が β 線より短いことを理解する。

使用する器材

- ・ 自然放射線源(湯の華) 1個
- ・ ZnS(Ag)シンチレーション式サーベイメータ
- ・ 定規等距離を測ることができるもの

手順

- ① GMサーベイメータの電源を入れる
- ② 自然放射線源を置かず、バックグラウンドの計数率を測定する
- ③ 自然放射線源－検出面間距離を0cmにセットし計数率を取得する
- ④ 距離を1cmずつ離し5cmまで計数率を取得する

データの扱い方

③④で測定した各距離における計数率から②のバックグラウンドの計数率を差し引く。
横軸を自然放射線源－検出面距離とし、縦軸を減算後の計数率としグラフを作成する。

5.1.2.3 遮蔽体による吸収実験

目的

遮蔽体として紙を利用し、紙を自然放射線源と検出器間の中に挟むことで α 線は遮蔽されることを理解する。

使用する器材

- ・ 自然放射線源(湯の華) 1個
- ・ ZnS(Ag)シンチレーション式サーベイメータ
- ・ 紙

手順

- ① ZnS(Ag)シンチレーション式サーベイメータの電源を入れる
- ② 自然放射線源を置かず、バックグラウンドの計数率を測定する
- ③ 紙を使わず、自然放射線源－検出面距離を 0cm とし計数を取得する
- ④ 紙を自然放射線源と検出面の間に挟み、係数を取得する

データの扱い方

③④で測定した計数率から、②で測定したバックグラウンドの計数率を差し引く。

5.2 自然放射線源を利用した実験実習の習熟度別展開

学校では文部科学省が定める学習指導要領に従い、カリキュラムや時間割が決められている。教育現場にて本研究で開発した自然放射線源の使用を進めるためには、学習指導要領に沿った形で使用方法を提案する必要がある。また、知識を身につけるためには効果的な自然放射線源の使用方法を学年、単元に合わせ整理することが重要である。

5.2.1 自然放射線源を利用した実験内容と学習指導要領の対応関係[18][19]

小学校、中学校、高等学校において各学年、教科における学習項目を整理する。

初めに、小学校について扱う。文部科学省による学習指導要領では放射線に関する項目は4年生社会におけるエネルギー消費の分野で扱われている。2011年に発生した福島第一原子力発電所での事故に配慮しこの単元を扱うという記述がある。そこで放射線教育に力を入れている福島県における指導要領を参考に、5.3にて実験実習の扱い方を整理する。

次に中学校について扱う。2年理科では電流とその利用という単元で電流について学ぶ。学習指導要領解説内には「真空放電と関連させてX線にも触れるとともに、X線と同じように透過性などの性質をもつ放射線が存在し、医療や製造業などで利用されていることにも触れる。」とある。また、3年理科では科学技術と人間という単元にて「様々な様々なエネルギーとその変換に関する観察、実験などを通して、日常生活や社会では様々なエネルギーの変換を利用していることを見いだして理解すること」とある。これより、放射線において必要が学習項目として透過性や距離依存性等の放射線の性質と、放射線・放射性物質の利用が挙げられる。技術・家庭科、保健体育では食品等には放射性物質が含まれ、生活や健康のために基準値を定め安全を確保する仕組みがあることを学ぶ。これより自然放射線の存在の認識が学習項目として挙げられる。

高等学校では、学習指導要領内に物理基礎、物理、化学基礎、地学、地理歴史、家庭科、保健体育にて放射線に関する記述がある。これより、自然放射線の存在、放射線・放射性物質の性質、放射線・放射性物質の利用に関する学習が必要である。中学生とは異なり、様々な性質を確認するだけでなく、放射線の遮蔽を物質との相互作用と関連づけるところから、身近な所での利用まで一貫して扱う必要がある。

全体として、来年度以降に導入される新指導要領では、アクティブラーニングの視点で学習を進めていくことが求められている点が特徴的である。アクティブラーニングとはある自らの主体的な活動を通じて、自らで考え、学ぶプロセスのことである。

5.2.2 β 線の遮蔽体による吸収実験計画

ここでは、5.1.1で提案した各種実験のなかから、「 β 線の遮蔽体による吸収実験」を例題として、学習項目との関連性や、習熟度別の実験実習計画の具体的な展開例を示す。その他の各種実験においても、本例題と同様に、習熟度別の指導が可能となる。それらについては、別論文に展開を委ねることとする。

5.2.2.1 本実験と学習項目の関連性

本実験では、自然放射線源を使用するため自然放射線の存在と、 β 線の性質、放射線・放射性物質の利用について学ぶことができる。扱い方を工夫することで、小学生や中学生、高校生と習熟度に応じて様々な学習内容に対応することができる。初めに、小学校を想定する。福島県の放射線教育・防災指導資料では小中学生への放射線教育について学習内容と指導内容が整理されている。小学生では、放射線等に関する知識を得るための内容として、特に小学生で重点的に学習する項目は「放射線、放射性物質の存在を知る」である。また、放射線等から身を守るための内容としては「放射性物質が一度に大量に放出された場合の避難の仕方を知る」「外部被ばくや内部被ばくをしないための生活の仕方を知る」がある。本実験では身近に存在する物質で作製された自然放射線源を使用するため、「放射線、放射性物質の存在を違って知る」「身の回りや自然界の放射線を知る」「食物と放射線量の関係を知る」を満たすことができる。遮蔽体の厚さを変更し計数率の減少を確認することで、 β 線の性質や外部被ばく防護の3原則中にある遮蔽について学ぶことができる。「放射線の種類、性質を知る」「放射線の透過性について知る」を満たすことができる。これに加え、検出器を用いて測定を行うため、測り方と単位を身近に感じることができる。そのため「放射線の単位、測り方を知る」についても学習が可能である。

次に中学校を想定する。自然放射線源を利用するため、身近な物質に放射性物質が含まれることを体感することができる。したがって3年理科「科学技術と人間」における放射線に関する学習項目を満たす。理科だけではなく、技術・家庭科と保健体育において食品の安全確保や健康に関する放射線を学習することになっており、放射線や放射性物質の存在を確認することが重要である。自然放射線源を使用することで技術・家庭科、保健体育の学習につなげることができる。中学生であれば、横軸にアルミニウムの厚さをとり、縦軸に計数率を取ることで、遮蔽体の厚さによって β 線の計数率が減少することを確認できる。2年理科「電流とその利用」距離による減衰の学習につなげることができる。

高等学校における学習内容は大きく異なると考えられる。2.6章の高等学校における学習指導要領理科編では物理の原子核について、放射線の遮蔽を物質との相互作用と関連付け学習することが求められている。中学生に対する実験のような遮蔽体の厚さの違いによる計数率の単純な減少を見るだけでなく、結果をグラフに示した際になぜそのようなグラフを示すかが重要となる。以下に本実験を実際に行った際の、アルミニウムの厚さと計

数率の関係を示す。結果はすでにバックグラウンドを差し引いてある。本論文での実験条件によればアルミニウムの厚さが $700\mu\text{m}$ まではほぼ直線的に減少しているが、 $700\mu\text{m}$ 以降は計数率が 9cpm 付近に集まっている。これは β 線の制動放射の影響である。制動放射によって X 線が発生する。X 線は透過力が高くアルミニウムを透過し検出器に入射し計数されるため、係数が完全に 0 にはならない。グラフを作成後、アルミニウムの厚さを増加させても計数率が 0cpm とならないのはなぜか問いかけることで、相互作用まで学ぶことが可能である。また、アルミニウムの厚さと計数率の関係を測定後、未知の厚さのアルミニウム板を自然放射線源と検出器の間に挟み測定を行い、厚さを予想することができる。これは厚さ計の原理と同様であるため、放射線の利用方法の学習につながることも可能である。これは保健体育の生活習慣病などの予防と回復や、化学基礎の原子の構造、物理基礎の物理学が拓ひらく世界の学習につながる。自然放射線源を使用しているため、身近な所に放射線が存在することを実感できる。これは家庭科の食品の汚染、寄生虫、食品の選択と調理、生活の科学と文化における食品に放射性物質が含まれることを学習する項目につながる。また、地学の地球の活動と歴史では学習指導要領解説内に「放射線測定機器を用い、岩石から自然放射線が出ていることを実感させた上で」という表現もあり、身近に放射線が存在することを確認できる本実験は有効である。

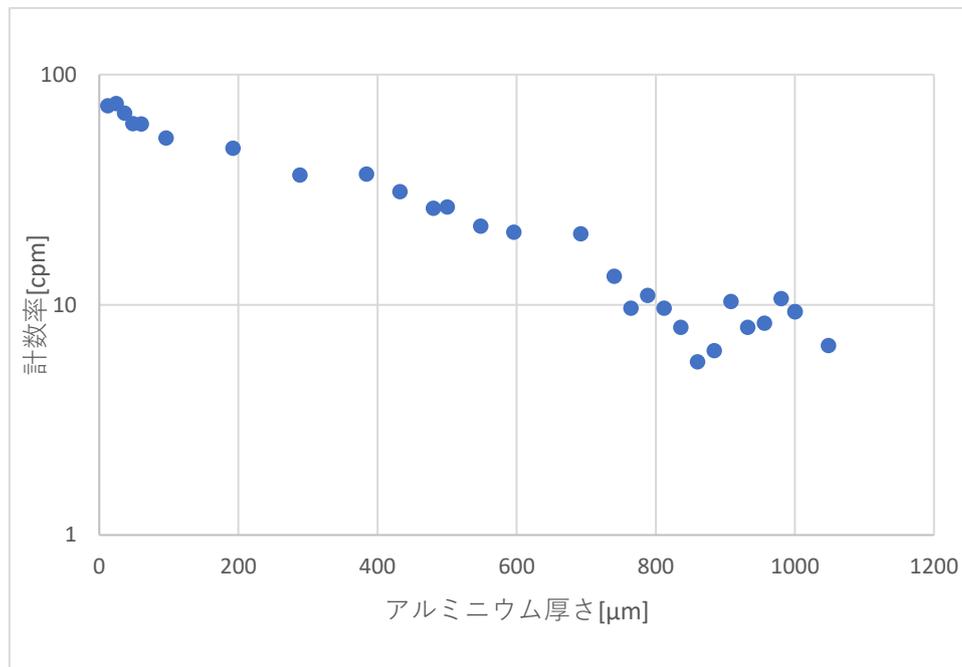


図 5.1 β 線における遮蔽体厚と計数率の関係

5.2.2.2 習熟度別の実験実習計画

実際に実験実習にて扱うワークシートを作成した。1つ目は小学校高学年や中学生等放射線について初めて学ぶ人向けのものとなっている。2つ目は高校生向けであり、放射線の相互作用等の学習が含まれ、1つ目のワークシートよりも高度なものとなっている。

1つ目のワークシートは小学生、中学生などの初学者向けとなっている。ここでは遮蔽体の厚さが増加すると計数率が減少すること、放射線には透過性があることを学ぶ必要がある。遮蔽体の厚さを増加させることで計数率が減少することを示すことができればよい。ため、測定点を細かく取らず、アルミニウムの厚さ 8 箇所測定を行う形とした。

考察では、遮蔽体の厚さが増加すると計数率が減少することを理解させるために、グラフの形状に注目させる。グラフが右下がりになることから2番目のアルミニウムの厚さが増加すると計数率が減少することを認識させる。また、遮蔽体の厚みを増加させても計数率が 0cpm にならないことから、放射線には物を通り抜ける透過性があることを学習する。データを記録し処理していく中で、平均値の算出やグラフの作図が必要である。本実験を通して放射線だけではなく、実験データの扱い方や算数の計算の復習にも活用できる。

2つ目はより高度な内容となっている。高校生の場合、単純に遮蔽体の厚さを増加させることで計数率の減少を見るだけではなく、相互作用等の原理の理解が求められる。グラフの形状を詳細に再現する必要がある。したがって、制動放射の影響が出始める $700\mu\text{m}$ 以降はアルミニウム箔 4 枚分である $48\mu\text{m}$ ずつ測定を行い、これ以外の部分ではアルミニウム箔 8 枚分の $96\mu\text{m}$ ごとの測定としている。考察の際に取り上げる項目として、小学生でも扱った遮蔽体の厚さが増加すると計数率が減少すること、放射線には透過性があることに加え、 β 線の飛程と β 線の制動放射を扱う。考察の1, 2については小学生と同様である。考察3, 4, 5は β 線の飛程に関する項目である。考察5にて β 線の飛程を計算させることが目的であり、考察3, 4ではその準備として自然放射線源に含まれる放射性核種の同定と、その核種の β 線のエネルギーを調べさせる。アルミニウムの厚さが $0\text{--}600\mu\text{m}$ の部分では制動放射の影響が少ない。この範囲の点をもとに一次関数を作図し式を求める。これより x 軸との交点の座標を算出することで測定から β 線の飛程を算出することができる。また、考察5.2では β 線の飛程の式を用いて計算のみで飛程を算出し、考察5.1の測定より算出した値と比較を行う。

考察6ではアルミニウムの厚さ $700\mu\text{m}$ 以上の場合に計数率の変化が少なくなる理由を考えさせる。これより β 線の制動放射について学習することができる。

5.2.2.3 教員が持つべき放射線に関する知識

β 線の遮蔽体の吸収に関する知識は以下の通りである。

- ① 放射線の性質
- ② 遮蔽に関する基礎知識
- ③ β 線の飛程の特徴について
- ④ β 線の飛程に関する近似式
- ⑤ β 線の制動放射について

小学校では①②に関する知識を有しておく必要がある。実験実習内では β 線を利用しているが、この実験実習を通して γ 線等の性質に触れる可能性もある。詳細な原理までは必ずしも必要ではないが、 α 、 β 、 γ 線の特徴と、遮蔽と共に扱われることの多い外部被ばく防護の3原則についても知識を有しておく必要がある。

高等学校では、上記の項目すべてにおいて基本的な原理や近似式等の知識が必要である。

他の実験についても学習指導要領との整理を行うことで、対象者の習熟度に合わせた実験を構成することができ自然放射線源を利用し効果的な放射線教育を行うことができる。

物質による放射線の吸収

目的

物体によって放射線が吸収されることを理解する。物体の厚さによって吸収される量が変化することを学ぶ。

使用するもの

- ・ 自然放射線源(塩化カリウム) 1 個
- ・ GM サーベイメータ
- ・ アルミニウム箔(アルミホイル)
- ・ 厚さ 0.5mm のアルミニウム板

実験方法

- ① GM サーベイメータの電源を入れる
- ② 自然放射線源を置かず、バックグラウンドの計数率を測定する
- ③ アルミ箔 2 枚を自然放射線源と GM サーベイメータの間に挟み、計数率を取得する
- ④ アルミニウム箔の枚数とアルミニウム板の枚数を変え、アルミニウムの厚さを変えて計数率を取得する
- ⑥ ④を繰り返す

バックグラウンド	カウント
----------	------

測定器と自然放射線源の間に挟むもの			測定値(カウント)			平均値 (カウント)	自然放射線源からの 放射線数 ①-②
アルミニウム 厚さ	アルミニウム箔 枚数	アルミニウム板 枚数	1 回目	2 回目	3 回目		
96 μ m	8 枚	0 枚					
192 μ m	16 枚						
384 μ m	32 枚						
500 μ m	使わない	1 枚					
596 μ m	8 枚						
692 μ m	16 枚						
884 μ m	32 枚	2 枚					
1000 μ m	使わない						

図 5.3 高等学校向けワークシート

アルミニウムによるβ線の遮蔽実験

目的

自然放射線源と検出器間に遮蔽体としてアルミニウム板を挟み、アルミニウム板の厚さを変更することで、β線と遮蔽体厚の関係を確認する。

使用するもの

- ・ 自然放射線源(塩化カリウム) 1 個
- ・ GM サーベイメータ
- ・ アルミニウム箔(アルミホイル)
- ・ 厚さ 0.5mm のアルミニウム板

実験手順

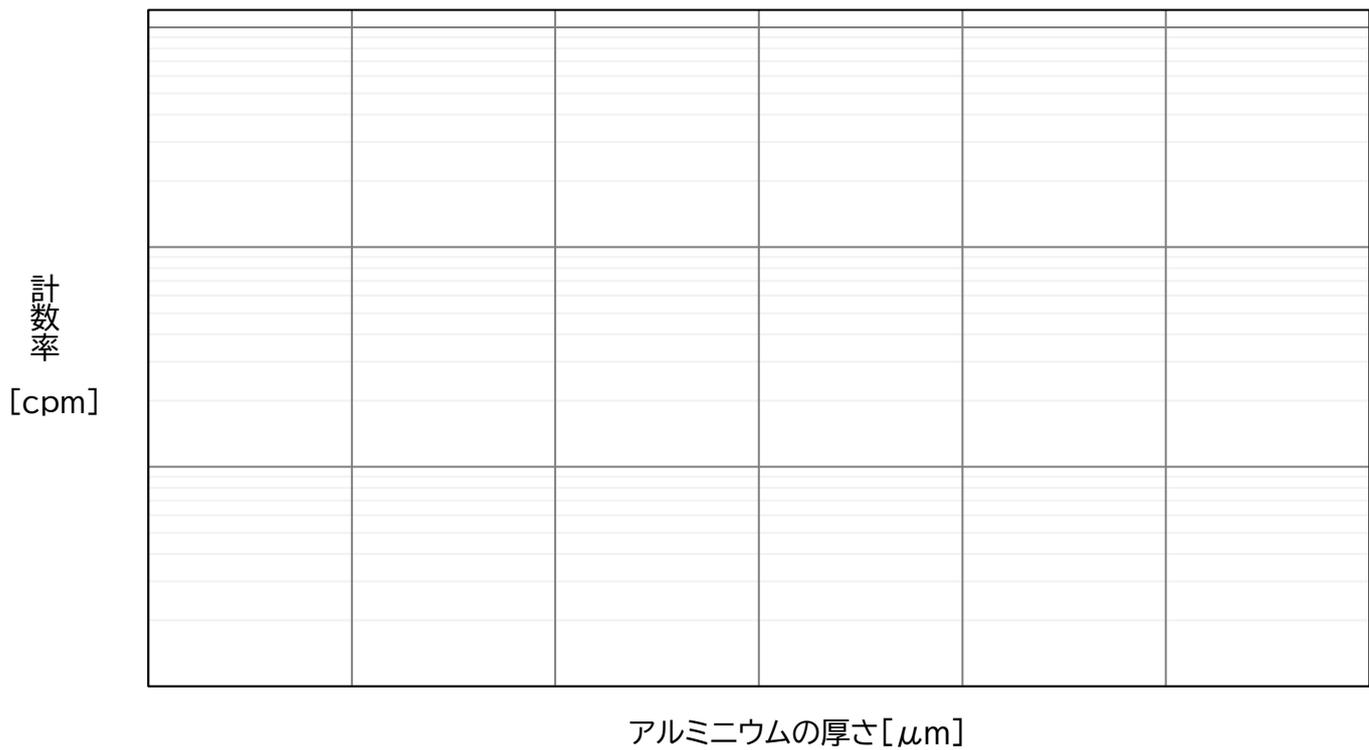
- ① GM サーベイメータの電源を入れる
- ② 自然放射線源を置かず、バックグラウンドの計数率を測定する
- ③ アルミ箔 2 枚を自然放射線源と検出面の間に挟み、計数率を取得する
- ④ アルミニウム箔の枚数とアルミニウム板の枚数を変え、アルミニウムの厚さを変えて計数率を取得する
- ⑤ ④を繰り返す

バックグラウンド [cpm]	
-------------------	--

遮蔽体			測定値[cpm]			平均値 [cpm]	正味計数率 [cpm]
アルミニウム 厚さ[μm]	アルミニウム箔 枚数[枚]	アルミニウム板 枚数[枚]	1 回目	2 回目	3 回目		
96	8	0					
192	16						
288	24						
384	32						
480	40						
500	0	1					
596	8						
692	16						
788	24						
836	28						
884	32						
932	36	2					
980	40						
1000	0						
1048	4						
1096	8						

図 5.3 高等学校向けワークシート

横軸をアルミニウムの厚さ、縦軸を計数率としグラフを完成させよ。



考察

1. アルミニウムの厚さが増えると、測定される放射線の数はどうなるか
2. アルミニウムの厚さを増やしても放射線が測定されていることから、放射線にはどのような性質があるか
3. 塩化カリウムに含まれる放射性核種は何か。
4. 1.で挙げられた核種におけるβ線のエネルギーは何 MeV か。

図 5.3 高等学校向けワークシート

5. β 線の飛程について

5.1 グラフよりこの物質から発生する β 線の多くが遮蔽されるときアルミニウムの厚さはどれくらいか

5.2 アルミニウム中の β 線の飛程は計算上何 cm くらいか。 β 線の飛程は以下の式で求められる。

$$R = 0.542E - 0.133 \quad (0.8\text{MeV} < E), \quad R = 0.407E^{1.38} \quad (0.15\text{MeV} < E < 0.8\text{MeV})$$

R: 電子の飛程を g/cm²で示したもの、E: エネルギー[MeV]

6. グラフより、アルミニウムの厚さがある厚さを超えると計数率の変化が小さくなり水平に近づくのはなぜか。

6 結語

本研究では自然起源放射性物質を利用した自然放射線源の開発を行った。以下に結論をまとめる。

6.1 結論

2011年に発生した東京電力・福島第一原子力発電所の事故以降、放射線教育の拡充が重要視されている。教育現場で使用できる自然起源放射性物質から作製される自然放射線源の開発を行い、その利用法について検討した。

3章では自然放射線源に関する特徴の試験と放射線学的な特徴に関する試験を行った。自然放射線源に関する特徴の試験では使用物質の水分量や粉末の粒径、圧縮時圧力について実験的に成形条件の整理を行った。以下に得られた知見を示す。

- ・物質の水分量は湯の華については2%台の水分量のものでは成形が可能であった。圧縮時に液体が滲出するものに関しては3%以上、圧縮後取り出す際に割れてしまうものは1%以下の水分量であった
- ・異なる種類の試料間の直接比較はできそうにないが、同一物質間であれば結果の比較が可能であった
- ・塩化カリウムは150 μ m以上300 μ m未満の粒径で衝撃試験の結果が良く、成形に適していた
- ・圧縮時圧力は昆布、インスタントコーヒー、湯の華では衝撃試験結果に大きな差はみられず、塩化カリウムでは40MPa以上の高圧力の場合で衝撃試験結果が変化し、高圧力であると耐久性が増加していた

放射線学的な特徴に関する試験では、開発された自然放射線源について以下のような知見が得られた。

- ・インスタントコーヒー、昆布、塩化カリウムには放射性核種として ^{40}K が含まれており、その比放射能は順に1.7、2.9、23.6Bq/gであった(表6.1)
- ・湯の華には放射性核種として ^{208}Tl 、 ^{212}Bi 、 ^{228}Ac 、 ^{212}Pb が含まれており、その比放射能量は順に2.3、7.5、4.9、7.8Bq/gであった(表6.1)

表 6.1 各物質、各核種における比放射能

物質	核種	最終放射能 [Bq/g]
インスタントコーヒー	K-40	1.7
昆布	K-40	2.9
塩化カリウム	K-40	23.6
湯の華	Tl-208	2.3
	Bi-212	7.5
	Ac-228	4.9
	Pb-212	7.8

4章ではモンテカルロシミュレーションと実測定によって自然放射線源近傍の周辺環境における放射線分布の定量化を行った。以下に得られた知見を示す。

- ・ GM サーベイメータによる γ 線の検出効率は1%以下と高くないため、 γ 線源として塩化カリウムで作製された自然放射線源を利用することは難しいが、 β 線源としては教育現場での利用可能性はきわめて高い
- ・ 湯の華で作製された自然放射線源は α 線源として教育現場での利用可能性が高い
- ・ コーヒーや昆布は、自然放射線の存在を認識するための表面測定は可能である。しかし、比放射能が塩化カリウムと比較すると比放射能が低いため遮蔽体を使用したり、自然放射線源－検出面距離を離す場合の利用は難しい。

5章では放射線教育における自然放射線源を使用した実験実習の提案とその習熟度別の展開を行った。自然放射線源を使用し実施ができる実験実習を整理し、ここでは「 β 線における遮蔽体による吸収実験」を例に習熟度別に実験内容を整理した。 β 線における遮蔽体による吸収実験は小学生、中学生などの初学者向けの実験と高校生向けのより高度な実験とで実験条件と考察内容を工夫することで習熟度別の実験を提案することができた。他の実験についても同様に習熟度別の展開が可能であることが示唆された。

6.2 今後の展望

安定的な線源の成形条件を確定するために、本研究で扱った水分量や粉末粒径、圧縮時圧力以外の条件についても検討を行う必要がある。放射線は様々な所で活用されており、たとえば医療分野では電子線や γ 線が主に使用されてきた。しかし、近年、 α 線の内用療法等の研究が進んでおり、今後 α 線放出核種の利用が加速すると考えられる。医療現場での α 線の活用の前に、 α 線に関する正しい知識を関係者全員がもつ必要がある。そのような目的に、湯の華で作製された自然放射線源は放射線の理解促進に大変に有効であろう。また、放射線（能）計測の精度管理のための施設間の分析比較の標準試料としても、自然起源放射性物質が利用できる可能性がある。

このような観点から、本研究で開発した、圧縮成型された自然放射線源が、自然起源放射性物質の効果的な利用を拓げるきっかけになるかもしれない。幅広い分野での利用方法の整理、開発が今後期待される。

一方、塩化カリウムや湯の華で作成された自然放射線源は、IAEAによる改訂基本安全原則（GSR Part 3）によれば、計画被ばく線源として扱うべき濃度レベルを超えるケースがあることも本研究のプロセスで明らかになった。自然起源の放射性物質（NORM）の具体的な管理については、日本国内はおろか、国際社会もそのコンセンサス解をもっていない。今後このような線源の扱いについてのより深い議論とガイドラインや、場合によっては法整備も必要であり、その進展が、たとえばウランやトリウムを含む放射性廃棄物処分等の国際的難題の解決のための一助となるかもしれない。

参考文献

- [1] 日本原子力文化財団「2019年度原子力に関する世論調査」
(<https://www.jaero.or.jp/data/01jigyou/tyousakenkyu2019.html> 2020年12月20日取得)
- [2] 柴田徳思. 放射線概論 第8版, 通商産業研究社, 2012
- [3] 河野 孝央: 化学肥料で作った教育用放射線源(自然放射能線源). 健康文化, 46号, pp.85-89
- [4] T. Kawano: Disk Shaped Radiation Sources Fabricated by Compression and Formation of Sinter Powder, J. Nuclear Science and Technology, Supplement 5, pp.752-755
- [5] T. Kawano: Radiation Sources Fabricated from Kelp Powder for Educational Purposes, Radiation Safety Management 8, pp.1-7
- [6] 河野 孝央: 乾燥昆布 18種の自然放射能線源材料としての比較評価. RADIOISOTOPES, 64(2), pp123-131, 2015
- [7] 河野 孝央, 安藤 佳明, 泉 雄一: 10種のインスタントコーヒーで作るコーヒーブロック線源の比較評価, RADIOISOTOPES, 64, pp.737-744, 2015
- [8] 河野 孝央: 減塩しおで作る自然放射能線源および教材としての実用性評価. RADIOISOTOPES, 67, pp.559-569, 2018
- [9] IAEA Safety Glossary Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection 2018 Edition
- [10] 飯本武志, 米原英典, 小佐古敏荘: 自然起源の放射性物質の存在とその安全の考え方, 安全工学 48 巻 4 号 pp. 215-221, 2009
- [11] 自然起源放射性物質(NORM) データベース, 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構, <https://www.nirs.qst.go.jp/db/anzendb/NORMDB/index.php> (閲覧日: 2021年1月8日)
- [12] 日本フライアッシュ協会 <http://www.japan-flyash.com/> (閲覧日: 2021年1月8日)
- [13] 「肥料製造学」塩化加里, BSI 生物科学研究所 <http://bsikagaku.jp/f-industry/KCl-industry.pdf> (閲覧日: 2021年1月7日)
- [14] No.7 ゲルマニウム半導体検出器による γ 線スペクトロメトリー 2020年4訂, 原子力規制委員会
- [15] PHITS, 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構, <https://phits.jaea.go.jp/Newsj.html> (閲覧日: 2021年1月8日)
- [16] Tatsuhiko Sato, Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Ogawa, Takuya Furuta, Shin-ichiro Abe, Takeshi Kai, Pi-En Tsai, Norihiro Matsuda, Hiroshi Iwase, Nobuhiro Shigyo, Lembit Sihver and Koji Niita, Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55(5-6), 684-690 (2018)

- [17] 波戸芳仁, 平山英夫: EGS5 コードの概要と使用例, Jpn. J. Med. Phys. Vol. 33 No. 2 pp. 82-87, 2013
- [18] 学習指導要領「生きる力」学習指導要領とは何か?
https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/idea/1304372.htm (閲覧日: 2020 年 12 月 30 日)
- [19] ふくしま 放射線教育・防災教育指導資料(活用版), 福島県教育委員会,
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/edu/gimukyoiku29.html> (閲覧日 1 月 12 日)
- [20] 高橋 実, セラミックス粉体成形の基礎的解明と材料創製への展開, 粉体 No.53, pp3-14, 2010
- [21] 船越嘉郎, 梶浦武彦, 麻生川達雄, 圧縮成型におけるキャッピング現象の支配因子とその防止法について, 「材料」第 18 巻 第 189 号, pp89-95
- [22] 井上正清, 和田信一郎, 角藤やす子: 土壌水分含量測定法の研究, 九州大学先端科学技術研究センター年報: 2, pp86-87
- [23] JIS Z 8815_1994 ふるい分け試験方法通則
- [24] JISZ4821-1:2015 密封放射線源-第 1 部: 一般要求事項及び等級
- [25] NIST Standard Reference Database 126, National Institute of Standards and Technology
<https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html> (閲覧日: 2020 年 12 月 28 日)

謝辞

本研究を進めるにあたり、研究の着想から論文執筆まで多くのご支援とご指導を頂きました飯本武志教授に深く感謝致します。また、副査の大友順一郎准教授には面談を通じて異なる角度から大変有意義な助言をいただきました。感謝いたします。

株式会社日本遮蔽技研の河野孝央氏には自然放射線源の作製時に必要な技術や技能を賜りました。深く御礼申し上げます。

公益社団法人日本アイソトープ協会の萩原聡昭氏、椎名卓也氏、赤堀省吾氏、山下貴大氏、浅野夏海氏には自然放射線源の作製から Ge 半導体検出器等を使用した測定、教育利用の面まで多くの部分でサポートを頂きました。深く御礼申し上げます。

公益財団法人日本分析センターの太田智子氏、阿部剛氏、今野裕太氏には蛍光 X 線分析装置の使用をご快諾いただき、使用方法等重要な示唆を賜りました。深く御礼申し上げます。

公益財団法人日本科学技術振興財団の掛布智久氏には放射線教育に関する情報をご提供いただきました。深く御礼申し上げます。

そして、飯本研空室の秘書の中村仁美氏、吉山文氏には研究生生活を送る上で様々なサポートをしていただきました。ありがとうございます。また、共に切磋琢磨した修士課程 1 年生、研究生生活内で様々なご指導を頂いた博士課程の先輩方には大変お世話になりました。深く感謝いたします。

最後に学生生活をここまで支えてくださった両親に深く感謝いたします。