

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3月修了 環境システム学専攻 47-196656 小池弘美

指導教員：飯本武志 教授

キーワード：自然放射線源、NORM、放射線教育、文部科学省学習指導要領

1. 背景

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]内でも、放射線に関する基礎知識について1つも説明できない回答者は今でも80%に上る。この結果より、放射線に関する基礎的な知識の普及と定着が重要であり、例えば中学校等での放射線教育の拡充が有効になろう。放射線教育を実験と組み合わせて行うには一般的には放射線源が必要となるが、学校には放射線管理区域がないのが一般的であり人工の放射線源の使用は困難である。一方、自然起源放射性物質 (Naturally Occurring Radioactive Materials; NORM)は身近に存在し、比較的放射能濃度(比放射能)が高い物質も知られている。それらを素材とし安定的な教育用線源が製作できれば、上記の目的を達成できる可能性がある。素材になる候補として、減塩塩や湯の華などがあり、これらは市販物質のため簡単に入手でき、人・場所を問わず使用できる。先行研究では当該材料を粉末化し特別に用意された治具へ入れ、プレス機で圧縮する工程が検討されていた。

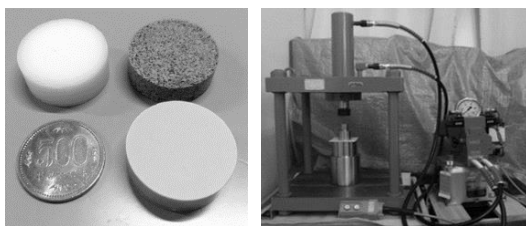


図1.(左)自然放射線源(左上から塩化カリウム,昆布,湯の華)、(右)プレス成形機

これまでに成形後の形状のばらつきや産地、製造業者別に関しての報告があるが、圧縮成形時の物理プロセスは明らかではなく、実際の利用に伴って線源に組み合わせる測定器の種類や教育の目的に応じた自然放射線源の活用方法の検討までではない[2]。

2. 研究目的と方針

教育現場での使用を目的とした自然放射線源には、放射線学的な安定性だけではなく耐久性も求められる。成形条件を実験的に定め、成形プロセスを理論的に解明することも必要となる。また、含有核種の比放射能や放射能分布の均一性、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物理的な特徴についても系統的な精査が必要である。

本研究では、安定的な自然放射線源の作製に関する成形条件を実験的に定め、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習熟度別の利用方法を検討、提案することを目的とする。

3.自然起源放射性物質を用いた新たな線源「自然放射線源」の開発

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を検討した。

3.1 一般的な物理的特徴に関する検討

線源の安定的な成形に大きな影響を与える主な要因として物質の水分量や粒径、圧縮時圧力等がある。これらが自然放射線源の成形に与える影響を検討した。

3.1.1 水分量

供試素材として全国各地から集めた15種類の湯の華や、インスタントコーヒー、昆布、塩化カリウムを選択した。これらの水分量を、土壌水分計を用いて測定した。その結果、湯の華の場合、成形に成功した水分量は2%前後であり、3%以上や1%以下となると液体の滲出が見られたり、圧縮後取り出す際に崩れてしまうものがあることが判明した。土壌水分計での測定であるため、適切に水分量を測定できているかに疑問は残るが、同一物質間であれば相对比较が可能であると考え、結果を整理した。

3.1.2 粒径

目開き 150、300 μm のふるいを用いて粒径を①300 μm 以上、②300 未満 150 μm 以上、③150 μm 未満に分級した。3 区分に分級された物質を圧縮し、各粒径 2 個ずつの線源を作製し、密封線源に課される衝撃試験を参考にした耐久度試験を実施した。

その結果、湯の華、インスタントコーヒーについてはすべてが③、塩化カリウムについては②と③に分級された。昆布は 3 つの区分に分けられた。耐久度試験では、湯の華とインスタントコーヒー、昆布のいずれもが粒径別の耐久度に差はみられなかった。塩化カリウムについては①に比べ②の線源の耐久度が低くなった。

3.1.3 圧縮時圧力

線源 1 個の素材としての物質重量を一定とし、圧縮時の圧力を 10-60MPa 内で 10MPa ずつ変化させて線源を作製し、耐久度試験を行った。

湯の華、コーヒーについては圧力変化で耐久度に差はみられなかった。しかし、塩化カリウムについては 40MPa 以上の高圧力で製作した場合、耐久度が上昇することが判明した。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。昆布、塩化カリウムについて 40MPa 以上で成形完了時の厚さが安定した。湯の華は 10-30MPa では厚さの変化が大きいが、30MPa 以上の部分では小さく安定していた。塩化カリウム以外の物質では衝撃試験結果に大きく差はなかったが、厚さを安定させるためには 40MPa 以上の高圧力での圧縮が必要であることが判明した。

3.2 放射線学的な特徴に関する検討

素材に含まれる核種の種類や放射能を求めるために、粉末化した素材を U8 容器に封入し γ 線スペクトロメトリを行った。測定器には Ge 半導体検出器を選択した。1% 程度の誤差を担保するために最も高い計数ピークが 10,000 カウントを超えるように測定時間を設定した。ピーク効率の取得の際に用いた標準線源は U8 容器に高さ 50 mm 94g で詰められている。しかし、実際の試料の重量は 60-107g と幅があり、放射線

の自己吸収割合の変動の影響を無視できない可能性がある。ここではモンテカルロシミュレーションを用いて測定器と標準線源を再現し、線源の重量密度に対応する補正係数を取得した。ここでは、例として、湯の華と塩化カリウムの測定結果を示す。湯の華では 278keV や 583keV などにピークが出現し、 ^{212}Pb や ^{208}Tl が含まれることが判明した。塩化カリウムは 1460keV に強いピークがあり ^{40}K が含まれていた。トリウム系列を多く含む湯の華では α 線を放出する核種が多いため、各線種の特徴を理解する実験に活用できる可能性がある。塩化カリウムは ^{40}K を多く含むため γ 線もしくは β 線の特徴を学ぶ教育に適している可能性が高い。上述にしたがって体積線源としての密度補正を行い、たとえば塩化カリウムで作成した自然放射線源の ^{40}K について、比放射能 23.6Bq/g を決定することができた(表 1)。

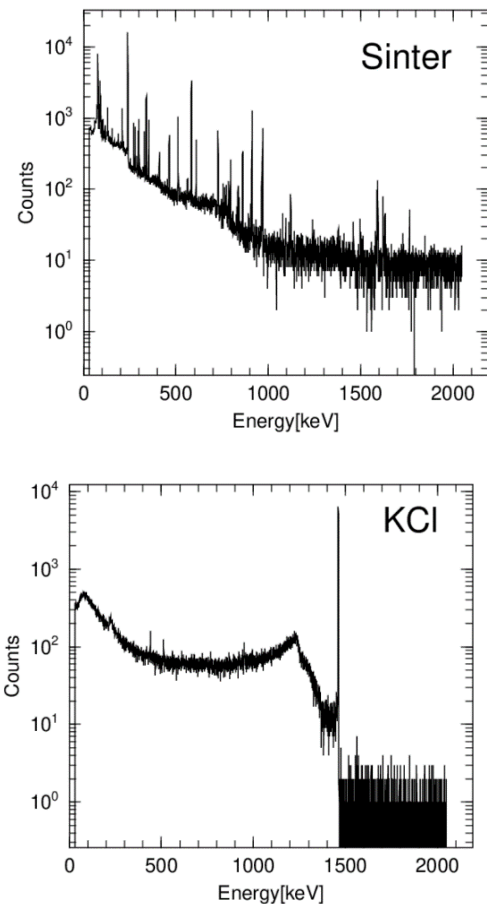


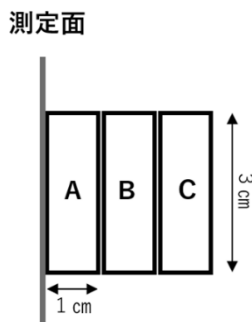
図 2.湯の華(上)と塩化カリウム(下)の γ 線エネルギースペクトル

表1. 評価された4種の物質の比放射能

物質	核種	比放射能 [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、モンテカルロ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評価をした。想定する環境の視点は以下の2つである。1つ目は線源と検出器の距離と（単位面積当たりの放射線入射数を示す）フラックスとの関係、2つ目は自然放射線源の積み重ねによる自己吸収の割合である。後者のジオメトリを図3に示す。A-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。線源個数を1個とし、A-Cそれぞれに置いた場合の計数を模擬する。次に線源を3個とし、A-Cすべてに置いた場合を模擬する。前者の和と後者の計数率を比較することで自己吸収の割合を実測と計算で評価する。



図内A,B,Cは線源を示す

図3. 自然放射線源による自己吸収の評価ジオメトリ

前者について、線源が点で存在する場合、 γ 線は距離の逆二乗則に従うことが知られている。しかし、自然放射線源のような体積線源の場合はいつも距離の逆二乗則に従う

とは限らない。ここでは距離別の放射線フラックスの変化に関するシミュレーション結果に、距離の逆二乗則の式をフィッティングした(図4)。その結果、ここで想定した線源と検出器とジオメトリによれば、距離の逆二乗則にしたがうと仮定して結果を処理、理解しても、実験的には大きな誤解は生じないことが示された。これにより、自然放射線源の「距離の逆二乗則実験」の適用可能性を示すことができた。一方、GMサーベイメータを利用した実測定での γ 線の検出効率は1%以下と他の測定器に比べ低いため、今回開発した材料での自然放射線源の計数はバックグラウンドレベルに埋もれてしまい、 γ 線源としての利用は難しいことが判明した。

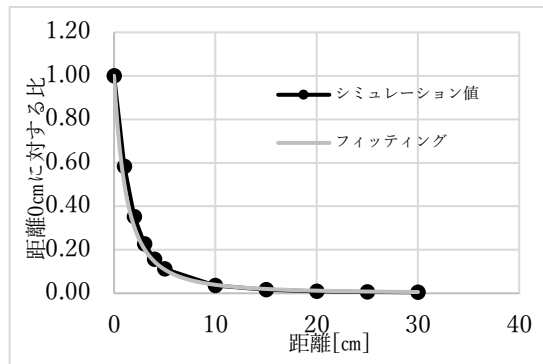


図4. 距離の逆二乗則との関係

(距離の逆二乗則でフィッティング)

β 線源としては実測定と計算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し、 β 線特有の空気中の動態、飛程の性質をよく反映した結果となった。

また、後者について、自然放射線源による自己吸収に関する実測定では、各線源位置に1個線源を置いた時の計数率の和に比べ、すべての位置に線源を積み上げた場合とで計数率が約50%小さく、主に β 線の自己吸収の影響を明確に確認することができた。

これらにより、開発された自然放射線源（特に塩化カリウム）は β 線源としての教育現場での利用可能性が高いことが判明した。また、湯の華については α 線を放出する核種が多量に含まれている特徴から、実測定ではバックグラウンド（ ~ 0 cpm）に対し自然放射線源-検出面距離が4cmまでであれば α 線の存在を十分に確認でき、教育現場での利用価値が高いことが判明した。

5. 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等に従い、カリキュラムや時間割が決められている。開発された自然放射線源の利用を効果的に展開するために、放射線教育に力を入れている福島県の放射線教育に関する学習内容を参考に、効果的な自然放射線源の使用方法を検討した。ここでは主に4章で整理された放射線学的な線源の特徴から、教育現場においても実施できる実験実習例を具体的に提案した。また、それらをのなかから「 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した。習熟度別の授業の実践例として、小学生＋中学生向けの基礎レベルと高校生向けのより高度な応用レベルの2種類のワークシートを提案した。

学習指導要領や福島県の放射線教育・防災教育では小学生、中学生については「放射線、放射性物質の存在を知る」や「放射線の種類、性質を知る」等、放射線の基礎知識について学び、身の回りの出来事と結びつけるような学習項目が多い。ここでは、初学者向け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、グラフの作成とその形状に注目させることにした。また遮蔽体の厚みを増加させ、計数率が減じていくことから、放射線の物質透過性と物質による遮蔽特性を学習する。

高校生の学習指導要領では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。ここでは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確認するに留まらず、相互作用等の物理現象としての考察に踏み込むことにした。初学者向けの内容に加え、 β 線の飛程と制動放射について扱う。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。 β 線の飛程を計算させるプロセスを経て、放射性核種の種類とエネルギー、飛程の関連性を意識させることができる。調べ学習に基づいて考察を進めることで、2021年4月以降に正式導入される新学習指導要領で重点項目とされた「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“アクティブラーニング”を取り入れたことにもなる。

ここで提案したその他の実験実習についても、学習指導要領の記述に沿った目的の明確化と工夫により、対象者の習熟度に適合した実験実習を構成することができる。自然放射線源を利用した効果的な放射線教育を、学校教育の現場で無理なく実際に行うことができることを示すことができた。

6. 結言

自然放射線源の開発を行い、水分量や粉末粒径、圧縮時圧力に関する成形条件を実験的に定め、安定した製作手順を決めることができた。放射線学的な特徴を精査し、4つの材料物質についての比放射能を求めた。また、開発した自然放射線源近傍における放射線分布を定量的に評価した。GMサーベイメータを用いる場合、 β 線源として塩化カリウムが利用できることが判明した。 α 線源としては湯の華の利用可能性が高いことが示唆された。本研究成果により、新しい学習指導要領に基づいて、対象者の習熟度別に効果的な実験実習を実際の教育現場で行うことができるであろう。

今後はさらなる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等の条件以外についても追加的な検討を行う必要がある。また、塩化カリウム、湯の華より作成された自然放射線源はIAEAによる改訂基本安全原則によれば、計画被ばくとして扱うべき濃度レベルを超える場合があることが本研究のプロセス内で明らかになった。NORMの具体的な管理方法は、国際社会でもいまだ合意に至っていない。今後このような線源の合理的な扱いについてより深い議論が必要である。本成果がその初歩となり、その進展が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/01jigyoku/tyousa/kenkyu2019.html> (2020年12月20日取得)
- [2] 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