

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：25101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K12393

研究課題名(和文) 初中等教育における放射線計測実験の定量化・精密化とその教育効果の研究

研究課題名(英文) A study of quantification and refinement of radiation measurement experiments and their educational effect in primary and secondary education

研究代表者

足利 裕人 (ASHIKAGA, HIROTO)

公立鳥取環境大学・環境学部・教授

研究者番号：00612342

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：学習指導要領で放射線の扱いが重視されるようになった。初中等学校の生徒が、日常的に接する放射線を自ら定量的に測定し、その数値を正しく解釈・評価し、リスクを判断する能力を育成する教材を開発した。また、初中等学校の理科教員が文科省の放射線副読本を用いた授業を展開するときを感じる障壁の高さを下げ、困難を和らげる定量実験を開発した。主なものに、ガンマ線のエネルギースペクトルによる放射線核種の同定、外部放射線から身を守る三原則の実験、霧箱中の飛跡で求めるベータ線のエネルギー分布の測定、温泉水中のトロン(ラドン220)を用いた鉛212の半減期の測定などがある。

研究成果の概要(英文)：Treatment of radiation has been emphasized in the course of study. We developed teaching materials so that students in primary and secondary schools measure radiation quantitatively themselves, train their ability to correctly interpret and evaluate the numerical values, and to judge risks. We also developed a quantitative experiment that reduces the difficulty for science teachers at primary and secondary schools by lowering the height of the barriers that they feel when using the radiation side reader of the Ministry of Education. Concerning the identification of radiation nuclides by the energy spectrum of gamma rays, experiments of three principles for people to protect themselves from external radiation, the measurement of beta ray energy distribution by tracks in a cloud chamber and the measurement of the half-life of  $^{212}\text{Pb}$  using  $^{220}\text{Rn}$ (thoron) in hot spring water.

研究分野：物理教育

キーワード：放射線 教材 計測 半減期 ベータ線 ガンマ線 トロン 霧箱

### 1. 研究開始当初の背景

2011年3月の福島第一原子力発電所事故以前は、放射線に関する政策の決定やその前提となる基礎知識や計測技術の普及などは、ごく少数に限られた専門家が国民からの負託を受けて実施してきた。ところが3・11事故の後には国民のすべてが日常的に接する放射線の知識をあるレベルで有し、測定ができ、判断ができることが「国民的素養」として求められるようになった。我々はそのための放射線教育システムの必要性を痛感し、その後文部科学省が放射線副読本を教育現場に配布し、その後多くの改善点を加え、2014年3月には「新しい放射線副読本」が発刊された。一方、実際の教育現場では30年間もの間放射線教育は本格的には実施されて来なかったことから、教員の知識や指導力不足、放射線測定器の不足による十分な実験が行えない、などの問題が指摘されていた。

### 2. 研究の目的

我々は、中学校、高等学校の教員が、放射線副読本を用いた授業を展開しようとする際に感じると思われる障壁の高さを下げ、困難をやわらげることを目指して実験開発を行うこととした。これまで学校教育で行われてきた実験は、取りつきやすいが奥の浅い実験が多かった。この反省を元に、高性能で高性能な測定機器を使用し、放射線をより本質的・定量的に理解する実験開発および、効果の高い指導方法をめざすこととした。

### 3. 研究の方法

(1) 測定器の使い分け (シンチレーションカウンターで核種を同定する)

ガイガーカウンターとシンチレーションカウンターの仕組みを理解するテキストを作成し、基準となる試料のガンマ線スペクトルと比較した。ガイガーカウンターはアルファ線、ベータ線、ガンマ線すべてを測定することを実際に体験し、シンチレーションカウンターは

ガンマ線しか測定できないが、精度よくエネルギーを測定でき



図1 線のエネルギー分布測定

るため、スペクトルが得られることを理解させる。

(2) 外部放射線から身を守る三原則 (距離による放射線量低減)

放射線副読本には、放射性から身を守る三原則が紹介されている。ここでは離れる (距離をとる) について分かりやすい実験教材を開発した。

点状の放射線源からの放射線量は、距離の逆2乗減衰法則によるが、実際のガイガー計

数管で実験すると、その構造から放射線源と計数管の距離の取り方に問題があることが分かった。そこで、奥行きのある体積検出器モデルを仮定し、距離の逆2乗則が結果として与えられる工夫を行った。

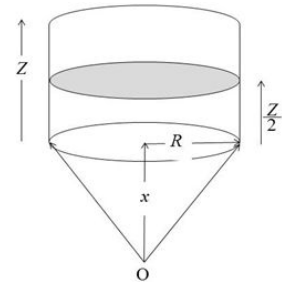


図2 体積検出器モデル

(3) 外部放射線から身を守る三原則 (線と線のしゃへい)

しゃへいは放射線量低減にとどまらず、放射線の種類とそれぞれの性質を学ぶ教材として有用である。

アルファ線、ベータ線、ガンマ線それぞれの性質を理解し、防護対策を知ることが、実環境下でのリスクの判断、適切な対応を行えるようになるため、実験装置の工夫を行

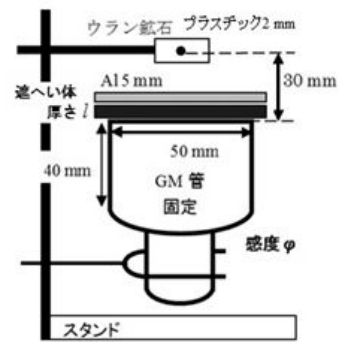


図3 しゃへい実験装置

った。ウラン鉱石はこれらの放射線を出すため、放射線を区別して測定でき、しゃへいの方法について学ぶ実験教材を開発した。

(4) 霧箱中の飛跡で求めるベータ線のエネルギー分布の測定

ベータ崩壊は核と電子と反ニュートリノによる三体崩壊過程である。崩壊のエネルギーはベータ線と反ニュートリノに分配されるので、ベータ線のエネルギーは連続スペクトルを示すことが知られている。高校物理のレベルでベータ線の連続的エネルギー分布を測定でき、相対論の検証ともなる実験の開発を行った。

磁場中の荷電粒子がローレンツ力を受けて円運動を行うことはよく知られているので、本研究では磁場をかけた霧箱中で、

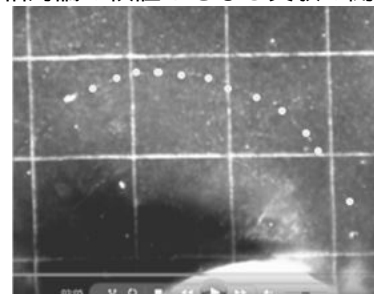


図4 磁場中でのベータ線霧箱中で、

ベータ線の飛跡の半径を測定し、その半径からベータ線のエネルギーを計算し、エネルギー分布を決定することを試みた。霧箱は高等学校物理の原子分野の実験によく利用され

ているが、従来線の観察だけで終わることが多かった。ベータ線を理解するための新しい教材として開発を進め、より確実に観察・測定できる方法をさぐっている。

(5) 磁場による偏向を用いたベータ線のエネルギー分布の測定

現在の教育現場では、電子線の磁場による偏向を演示する装置として陰極線管が利用されている。しかし、ベータ線については高エネルギーであることと、線源の管理に多くの問題があることから、教育現場で実験として利用できるものは霧箱以外になかった。本研究では、市販のベータ線源と GM 計数管を使って、ベータ線の磁場による偏向を計測する装置を試作し、ベータ線の連続的なエネルギー分布を求める教材とすることを旨とした。磁場は教育現場でも利用できるように数種類の磁束密度の異なる強力磁石を用い、10度おきに GM 管の角度を変えて計測できるようにした。

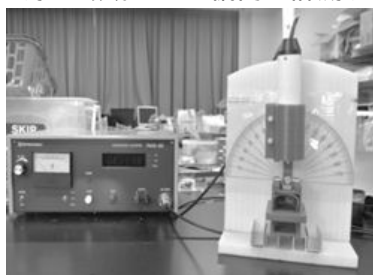


図5 磁場偏向装置

(6) 温泉水中の<sup>220</sup>Rn(トロン)を用いた<sup>212</sup>Pbの半減期の測定

放射線源として比較的安易に入手ができる温泉水を使用し、<sup>212</sup>Pbの半減期を求める教材の開発を行った。鳥取県の三朝温泉はラドン温泉として有名であるが、ウラン鉱にはトリウムが含まれることが多く、<sup>220</sup>Rn(トロン)を含む源泉もいくつか存在する。我々はウラン系列の娘核種<sup>214</sup>Pbの半減期を求める先行研究を行ってきたが、トロンは半減期も短く、温泉水中にはほとんど存在せず、選択的に崩壊後浴室の岩石に沈積している。本研究では、最もトロン濃度の高い旅館大橋の巖窟の湯を用い、トロンをバーミキュライトに吸着させることにより、トロンの娘核種の<sup>212</sup>Pbのガンマ線スペクトルより、0.239 MeVのピーク(図6の左端)を選び、その面積の時間

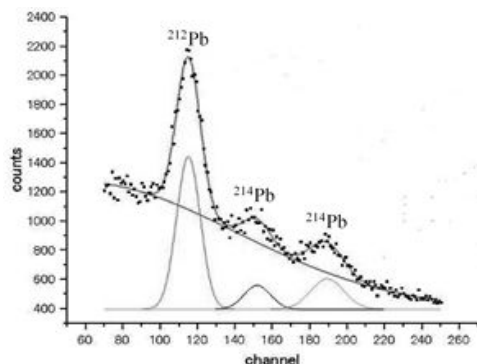


図6 温泉水のガンマ線スペクトル

減衰からピーク面積の減衰の割合を求め、半減期を求める教材とした。

(7) アミノ酸の赤外吸収スペクトルを利用した放射線線量計測の試み

アラニンガンマ線線量計が実用されていることにヒントを得て、平成28年度からアラニン薄膜に学生実験用<sup>90</sup>Sr線源からのベータ線を照射してその赤外吸収スペクトルに変化が起きるかどうか調べてきた。

(8) 福島放射線量定点観測

福島県川俣町と飯館村の境に位置する花塚山で放射線量定点観測7年目を経過した。環境放射線計を用い、典型的な除染されていない場所として、放射線量の経時変化を測定してきた。

4. 研究成果

(1) 測定器の使い分け(シンチレーションカウンターで核種を同定する)

一例として神戸の土と関東の土をガイガーカウンターで測定すると、同程度の放射線が検出されることがある。しかし、シンチレーションカウンターでスペクトルを調べると、前者は花崗岩中のカリウム40に起因し、後者は原発事故で飛散した放射性セシウムによるものであることを示すことができ、スペクトルの測定的重要性を示した。

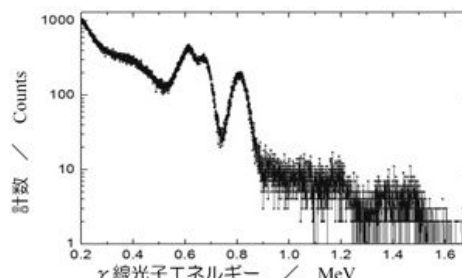


図7 原発事故による汚染土のスペクトル

中高校生に理解しやすい表現は、「放射線があるかないかはガイガーで、信頼性はシンチで」、あるいは、「迅速測定はガイガーで、精密測定はシンチで」である。

(2) 外部放射線から身を守る三原則(距離による放射線量低減)

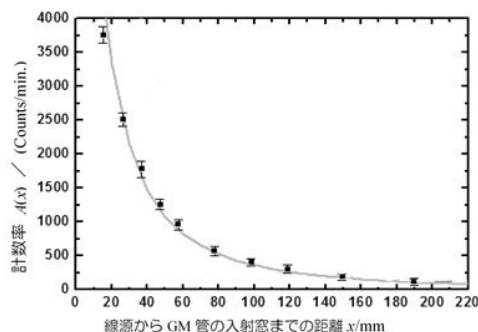


図8 体積検出器モデルによる計算結果

本実験を中高校生に指導するには体積検出器モデルは高度であるため、中央面検出器モデルを考案し、図8のように良好な結果を得た。教師や高校生から「人体がベータ線を浴びるときは表面被ばく、ガンマ線は体積被ばく」との意見が出た。新しい知見である。

(3) 外部放射線から身を守る三原則(線と線のしゃへい)

生徒たちは、アルファ線は、実際の環境中でも大気数 mm で止めることができるため、外部被ばくはほとんど考慮に入れる必要がないが、体内摂取してしまえば体内で止まり、大きなエネルギーすべてを人体に与えるので、内部被ばくは特に避けることを理解させた。ベータ線はアルミなどの軽い金属数 mm 程度で止めることができるが、質量の大きい物質の制動放射の影響で新しく X 線等の放射線が生まれることや、ガンマ線は透過力が強く質量持たないため、完全に止めることはできないことへの理解を深めた。

指導用では、授業時間を考慮して測定回数は3回ずつにし、アルミニウムの厚さを 0.24、0.48、0.96、1.92、5.0、10.0 mm の6点で測定を行い、グラフからウラン鉱由来のベータ線のアルミニウム中での飛程と半価層を検討させた。

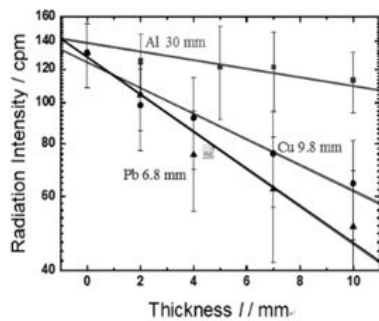


図9 ガンマ線と半価層の測定

(4) 霧箱中の飛跡で求める線のエネルギー分布の測定

霧箱は高校物理の原子分野の定番実験であるが、ここでは霧箱に強力磁石を組み合わせることで、安価な装置にもかかわらず、線の諸性質(電荷が負、実体は電子、など)が検証でき、さらにエネルギー分布や、従来適当な教具を欠いていた相対論の学習教材となりうる。相対論では、エネルギー  $E$ 、運動量  $p$ 、静止質量  $m$  の間には、光速を  $c$  として以下の関係式が成り立つ。

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

この式を用いないと、ローレンツ半径で求めた古典論による  $v$  の値はことごとく光速を超えてしまう。図は測定した速度分布を示す。

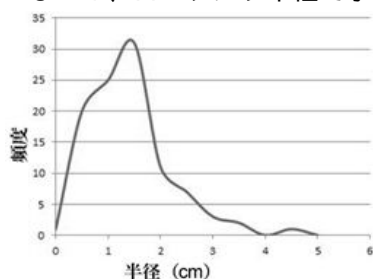


図10 ベータ線の速度分布

電磁気学でのローレンツ力の学習には、従来高価な「電子の比電荷測定装置」しか利用できなかった弱点をも補うことができた。これから求めたエネルギー分布は、ベータ線に特徴的な曲線を示し、最大エネルギーは 2.4 MeV 付近にある。トリウム系列のうち本研究で解析の対象とした  $^{212}\text{Pb}$ 、 $^{228}\text{Ac}$ 、 $^{208}\text{Tl}$ 、 $^{212}\text{Bi}$  の4種のうち、 $^{212}\text{Bi}$  の値 2.248 MeV) に近く、本研究の妥当性を示すものと考えた。我々はさらに公立鳥取環境大学の学生実験においてデータの蓄積を行うとともに、鳥取市の青翔開智高等学校の SPP 事業、大阪府立生野高等学校の SSH 事業等で検証を行った。

(5) 磁場による偏向を用いた線のエネルギー分布の測定

磁場を大きくしていくと、ベータ線の角度分布のピークがより高角度側に傾くことが分かる。また、磁場が弱いときと比べて、磁場を強くしていくときの偏向角の広がりが大きくなっている。これは、ベータ線の運動エネルギーが連続的であり、幅を持つからであると考えられる。ここでは、各磁場の強さにおける

エネルギー分布のグラフの面積を一定と仮定して、グラフ解析ソフトを用いてピークの高さを求めた。

図11は、各磁場の強さでの、偏向角に対する分布を測定したものであり、

図12 シミュレーション

そのシミュレーション結果である。これらと比較して、本研究で用いた正規分布モデルで、ベータ線のエネルギー分布の磁場による偏向が、ある程度証明可能であることが分かる。線源は  $^{90}\text{Sr}$  を用いたが、学校現場で使える閃ウラン鉱やラジウムセラミックボール等も利用可能である。

(6) 温泉水中の  $^{220}\text{Rn}$ (トロン)を用いた  $^{212}\text{Pb}$  の半減期の測定

トロンは吸着後すぐ壊変するため、同時に吸着したラドンを電子レンジにかけて熱処理して気相中にとばし、4時間ごとにガンマ線スペクトルを測定し、 $^{212}\text{Pb}$  のピーク面積の減衰を調べた。各ピークの減衰の様子を図13

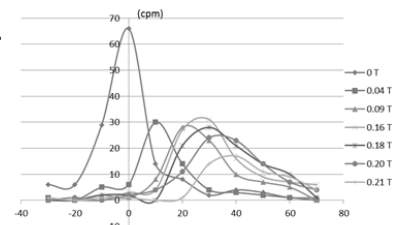


図11 磁場偏向の計測結果

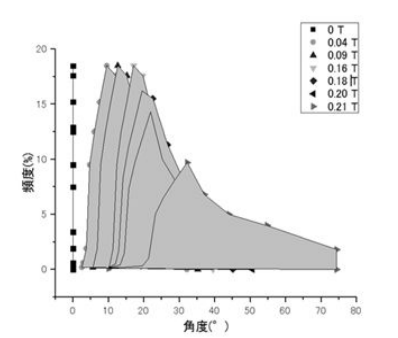


図12 シミュレーション

に示した。これにより、半減期は  $13.2 \pm 0.63$  時間となった。文献値 10.64 時間との誤差は約 24 %であった。

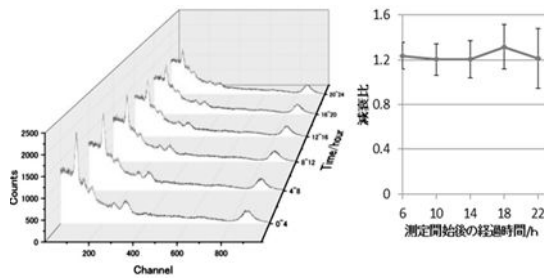


図 13 ガンマ線スペクトルの時間減衰

本研究ではラドンとトロン中の濃度検出器である RADUET(弘前大学・放医研開発)を、水面からの高さを変えて約 3 ヶ月間設置した。ラドン濃度の平均は、 $42.7 \pm 24$  Bq/m<sup>3</sup> になり、トロン濃度の平均は、 $104 \pm 68$  Bq/m<sup>3</sup> となった。トロンは半減期が短いので、空気中に存在できる時間が少ない。

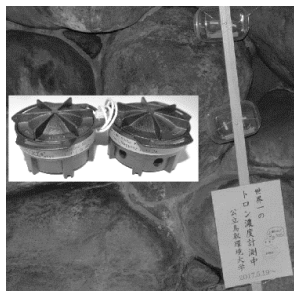


図 14 トロン濃度の測定

(7) アミノ酸の赤外吸収スペクトルを利用した放射線線量計測の試み  
実験を重ねた結果、この線源では赤外吸収スペクトルに有意な変化が検出できないことが分かった。平成 29 年度はアルファ線源の利用を検討したが、適切な線源が見つからず実験は将来の課題となった。

(8) 福島県の放射線量定点観測  
放射線量の時間減衰は原子炉事故でのセシウム 134 と 137 の初期放出量を等しいと仮定した理論値と一致しており、教科書に使える結果として利用価値が高いものとなっている。

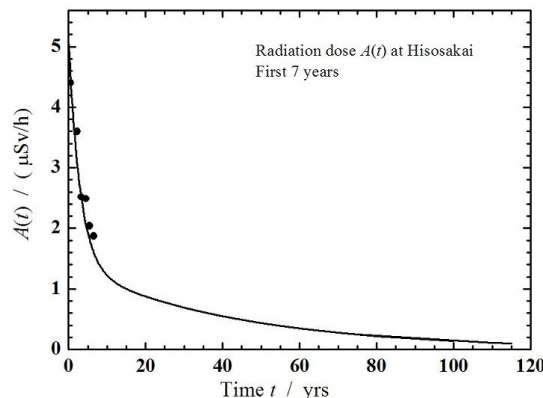


図 15 比叡境の環境放射線の推移

なお、これらの研究成果は総合印刷出版より「文部科学省放射線副読本を活用した授業のための実験教材および教師用テキスト」として出版し、関係機関等に配布している。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 5 件)  
足利 裕人、温泉水を用いた <sup>214</sup>Pb の半減期の教材化、応用物理学会、2016

足利 裕人、三朝の温泉水を用いた <sup>214</sup>Pb の半減期の測定、日本物理教育学会、2016

足利 裕人、トロン温泉の教材化、応用物理学会、2017

足利 裕人、トロン温泉の教材化、日本物理教育学会、2017

足利 裕人、温泉水中の <sup>222</sup>Rn (トロン) を用いた <sup>212</sup>Pb の半減期の測定、応用物理学会、2018

〔図書〕(計 1 件)

中川和道、足利裕人、総合印刷出版、文部科学省放射線副読本を活用した授業のための実験教材および教師用テキスト、2018、78

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者  
足利 裕人 (ASHIKAGA HIROTO)  
公立鳥取環境大学・環境学部・環境学科・教授  
研究者番号：00612342

(2) 研究分担者  
中川 和道 (NAKAGAWA KAUMICHI)  
神戸大学・人間発達環境学研究科・名誉教授  
研究者番号：00134403

(3) 連携研究者  
竹谷 篤 (TAKETANI ATSUSHI)  
独立行政法人理化学研究所・光量子工学センター・副チームリーダー  
研究者番号：3022095