

使用済み核燃料の存在とその処分に着目した中学校理科授業の実践

栢野彰秀*・野崎朝之**・大山朋江**・園山裕之***・岡田昭彦**・前島美佐江****・高橋里美*****

Akihide KAYANO・Tomoyuki NOZAKI・Tomoe OHYAMA・Hiroyuki SONOYAMA
Teruhiko OKADA・Misae MAEJIMA・Satomi TAKAHASHI

Practice of a Junior High School Science Class Focusing on the Existence of Spent Nuclear
Fuel and its Disposal

ABSTRACT

島根原子力発電所の稼働に伴って産出される使用済み核燃料の存在を意識させる導入の工夫を行なった上で、放射線教育と使用済み核燃料の処分を考えさせる理科学習を、島根大学教育学部附属義務教育学校後期課程第9学年を対象に行った。使用済み核燃料の処分にに関する班での話し合いとその処分にに関する生徒の判断について検討を加えた。使用済み核燃料は、主に地中に埋めて処分する、または宇宙に処分する、という話し合いが各班で行われた。処分方法に関する最終的な生徒の判断は、34人中19人が「地中に埋める」であった。「地中に埋める」という判断を行った生徒のうち17人は、「遮へい」や「コンクリートで固める」という放射線教育で得た科学的な根拠を使用して判断した。

【キーワード：中学校理科，放射線教育，使用済み核燃料，処分】

1. 問題の所在

島根県の県庁所在地である松江市には原子力発電所が立地する。松江市主要部の多くが原子力発電所から10km圏内となる。緊急防護措置準備区域（UPZ）となる原発から30km圏内には、松江市だけでなく出雲市や隣県の境港市と米子市も含まれ、約47万人が居住する。UPZ内に立地する学校では、毎年一度、県の原子力防災訓練に基づく避難訓練が実施されている。

原子力発電所が稼働すると使用済み核燃料が発生する。わが国では、使用済み核燃料は再処理して抽出した有用物質を燃料に加工する「原子燃料サイクル」が基本政策となっている。このため、わが国の原子力発電所から発生した使用済み核燃料は再処理施設で再処理されている。この際、再利用できない高レベル放射性廃棄物も同時に発生する。わが国では、高レベル放射性廃棄物は自国内で地層処分することが法律で定められている。

これらのことから、特に原子力発電所立地地域においては、原子力発電所から発生する使用済み核燃料を発端とした原子燃料サイクルに基づく高レベル放射性廃棄物の地層処分にに関する学習の必要性が導出できる。

そこで、高レベル放射性廃棄物の地層処分にに関する学習の前段階として、島根大学教育学部附属中学校理科部（当時）は2012年度から、放射線の基礎知識、性質、影響、利用、防護を学習内容とした放射線教育を開始した。2013年度以降は、栢野ら（2014）が改良・開発した自然放射線の飛跡の観察をつけ加えた放射線教育を行っている（園山ら、2014）。その後2015年度以降は、放射線教

育によって得た科学的知識を活用して、島根原子力発電所で原子力災害が起こったと仮定した場合の生徒の行動の判断をつけ加えた放射線教育を実施した（栢野ら、2016）。

これまでに述べた教科「理科」における放射線教育を拡大して、2017、2018年度は、理科と社会科が連携して高レベル放射性廃棄物の地層処分を取り扱った授業を実施した。これら2カ年の授業実践では、理科が放射線・放射性物質・放射能等の基礎知識とその利活用を取り扱った放射線教育を実施した。その後、理科の授業で獲得した科学的知識を活用して高レベル放射性廃棄物の地層処分を考える授業を社会科が構想し、実施した。これらの詳細は栢野ら（2019）に加え、栢野ら（2020）の2つの報告がなされている。

前2カ年間の授業実践の際、「日本では高レベル放射性廃棄物は地下に処分することがもう決まっているのだから、この問題を今考える必要があるのですか？」という、授業の前提に対する生徒の疑問が筆者らに少なからず聞こえてきた。「原子力発電所」＝「高レベル放射性廃棄物を取り扱った授業実践が必要」と、筆者らは短絡的に捉え、高レベル放射性廃棄物の地層処分ありきの授業になっていたのではないかと反省した。この点を克服する授業を行いたいと考え始めたのが、本授業実践に取り組んだ問題意識である。

本稿では、特に授業の導入部分において前2カ年間の授業展開に工夫を加えた授業を2019年度において実践したので、その実際を報告する。

* 島根大学学術研究院教育学系
** 島根大学教育学部附属義務教育学校後期課程
*** 島根県教育センター
**** 松江教育事務所
***** 松江市立宍道中学校

2. 授業改善の視点

(1) 前2カ年間に於ける授業

前述したように2017、2018年度に、理科と社会科が連携して高レベル放射性廃棄物の地層処分を取り扱った授業を実施した。これら2カ年間の授業実践では第一に、放射線教育の後、高レベル放射性廃棄物の存在とその地層処分地選定が極めて難航していることを事実として生徒に捉えさせた。その後、高レベル放射性廃棄物の地層処分を考えさせる授業を展開した。理科も社会科もそれぞれ教科の単元に位置づけて、それぞれ教科の目標を達成するような授業展開を行った。しかし、高レベル放射性廃棄物自体が生徒にとって全くなじみのないものであることに加えて、高レベル放射性廃棄物の地層処分を取り扱う授業を行うというのが生徒にとって唐突であったのではないかと筆者らは考えた。そのため、先に述べたような生徒の疑問が発せられたのであろうと筆者らは捉えた。この点の克服が授業改善の第一の視点である。

(2) 地元で立地する原子力発電所から出された廃棄物

放射線教育や高レベル放射性廃棄物の地層処分を取り扱う授業を行うとき、何らかの形で原子力発電所も学習対象とされることが多い。この時、地震・津波に対する備えや放射線・放射性物質の閉じ込め等の発電所の安全性が取り扱われることが多い。原子力発電所については目立つ特徴であるその安全性だけでなく、次の2点も学習内容として重要である。一つは、原子力発電所の稼働に伴い、放射性を帯びた産業廃棄物が発生する。今一つは、現在、放射性産業廃棄物は使用済み核燃料の形で原子力発電所内に多くの量が仮に保管されている。である。

高レベル放射性廃棄物の地層処分を取り扱う授業を行うとき、次の3点は必ず取り扱うように学習内容が作られている(NUMO,2018)。一つ目は、使用済み核燃料から有用成分を取り出した残渣をガラスで固めた物をガラス固化体といい、ガラス固化体は何重ものバリアを設けた上、地中に埋める。二つ目は、現時点でガラス固化体25,000本分(=ガラス固化体貯蔵管理中2,300本+原子力発電所等で保管されている使用済み核燃料18,000トン)が存在する。三つ目は、高レベル放射性廃棄物の5つの処分方法それぞれの利益・不利益の検討。である。

これらを考慮し本授業実践では、生徒の住む地元の松江市に立地する島根原子力発電所から出される使用済み核燃料の存在に気付かせるような学習の導入を行って、「島根原子力発電所から出た使用済み核燃料はどのように処分すればよいのだろうか?」という点を生徒に学習課題として捉えさせる授業を構想する。従って、今回は理科一教科だけで授業実践が可能となる。この点が授業改善の第二の視点である。

3. 行われた授業の実際

(1) 授業展開の概要

表1には、第2章に基づいて構想し実践された授業展開の概要が示されている。

表1 授業展開の概要

時間	学習テーマ(◎), 学習内容(・), 生徒の活動(○)
事前	・島根県原子力防災訓練に基づく避難訓練での全校向けミニ授業
1	◎使用済み核燃料への着目 ・いろいろな発電方法の長所と課題(水力発電, 火力発電, 原子力発電, 太陽光発電, 風力発電, 地熱発電, バイオマス発電) ・原子力発電所に設置された貯蔵プールに保管されている使用済み核燃料の存在 ◎学習課題: 島根原子力発電所から出た使用済み核燃料はどのように処理すればよいのだろうか? ○意見交換: 使用済み核燃料をどうする?
2	◎放射線の基礎知識の理解 ・放射線・放射性物質・放射能 ・原子の構造, 原子核の壊変, 半減期 ・放射線の種類(α線, β線, γ線, 中性子線, X線) ○観察: 霧箱を用いた放射線の飛跡の観察(自然放射線, 教室内の塵から出る放射線)
3, 4	◎放射線の性質の理解 ○実習: 放射線測定器の使い方 ○観察: 霧箱を用いたX線の飛跡の観察 ○実験: 遮蔽実験 ○実験: 距離実験 ・放射線の利活用(品種改良, 殺菌, 紙の厚さの検査, テニスのガット, 医療等) ・放射線の人体への影響(内部被ばくと外部被ばく, 被ばくと汚染, 除染) ・原子炉内での核反応, 核燃料と使用済み核燃料, 使用済み核燃料の再利用
5, 6	◎使用済み核燃料の処分を考える ・島根原子力発電所で保管されている使用済み核燃料の存在の再確認(貯蔵プールの役割, 燃料集合体, 使用済み核燃料の再利用) ・使用済み核燃料の処理(使用済み核燃料→再処理→高レベル放射性廃棄物の発生→種々の処理方法(地層処分, 宇宙処分, 海洋底処分, 氷床処分, 長期管理)→地層処分の方法→地層処分地) ○判断: 使用済み核燃料の処分を考える

表1中で、ゴシック体で示された箇所が授業改善のための工夫(課題提示の工夫)を行った箇所とそれに関連する活動となる。明朝体で示された部分は一般的な放射線教育である。

授業実践は2020年2月4日から2月21日にかけて、6時間の授業が島根大学教育学部附属義務教育学校第9学年4クラス約140人の生徒を対象に行われた。実施教科は理科、使用教科書は東京書籍版『新編新しい科学3』（2019）、実施単元は「科学技術と人間」単元中の「エネルギー資源の利用」及び「放射線の性質と利用」小単元である。

（2）各時間の授業の概要

① 事前

島根県原子力防災訓練に基づく避難訓練が全校生徒を対象に行われた。避難訓練の後には、次の2点に関する全校向けミニ授業を実施した。一つは、放射線災害の時は屋内に避難して、窓を閉め、エアコンを切って部屋の真ん中に集まる。今一つは、電球と光と電球の明るさを例えにした放射線・放射性物質・放射能の理解。である。

② 第1時間目

後期課程第9学年第7単元「科学技術と人間」における第2章「エネルギー資源の利用」の授業では、水力発電、火力発電、原子力発電、太陽光発電、風力発電、地熱発電、バイオマス発電が取り扱われる。この時、いろいろな発電方法の長所と課題を生徒に挙げさせた。

原子力発電の長所と課題を生徒に発表させたときに、島根原子力発電所から発生する使用済み核燃料に着目させるために、次の2点について説明を加えた（図1）。



図1 第1時間目の授業風景

一つは、原子力発電所の稼働とともに放射性を帯びた使用済み核燃料が産業廃棄物として発生する。今一つは、これらは原子力発電所内の貯蔵プールで安全に配慮して保管されている。である。

その後、「島根原子力発電所1号機は廃炉になったのでもう使わない。建屋は解体する。でも、核燃料はまだ残って貯蔵プールの中にある。」という事実をもとに、貯蔵プールに保管されている「使用済み核燃料をどうする？」という話題での意見交換を行わせた。

生徒から出された主な意見は、「放射線が高いので地

中に埋めることになっている。」「うめる」、「安全になったらうめる」、「宇宙に持って行く」等であった。

これらの生徒の発言からは、使用済み核燃料は地中に埋めて処分することは何となく知っていると考えられる。使用済み核燃料から有用資源を回収し、残った残渣である高レベル放射性廃棄物をガラス固化体にして、地層処分することについては知っていないと捉えられる。

「安全になったらうめる」という生徒の発言に対しては、授業者がすぐに「何年後の話？」と質問し直した。その生徒は「相当かかる。300年くらい。」と答えた。種々の放射性物質の半減期を学習していない段階の生徒が考える長い年月とは、百年単位の期間であることが推測できる発言であった。

③ 第2時間目

本時は放射線の基礎知識の理解の時間であった。放射線・放射性物質・放射能について生徒の理解を深めるために、再度電球と光と電球の明るさを例えにした演示を行った（図2）。



図2 放射線・放射性物質・放射能の理解

その後、学習プリントを用いて原子の構造、原子核の壊変、半減期、放射線の種類（ α 線、 β 線、 γ 線、中性子線、X線）について説明を加えた。本時の最後には、霧箱を用いて自然放射線の飛跡と教室内の塵から出る放射線の飛跡の観察を行った（図3）。放射線はどこにも存在することが分かった霧箱の観察となった。



図3 霧箱の観察

④ 第3, 4時間目

本時は、放射線の性質の理解の時間であった。放射線測定器の使い方の実習を行った後、霧箱を用いてX線の飛跡の観察(図4)を行った。



図4 X線の飛跡の観察

その後、放射線の遮蔽実験と距離実験を行い、放射線は密度の大きい物質で遮へいできることに加え、放射線源からの距離が遠くなれば遠くなるほど放射線量は減少することを実体験した。その後、放射線の利活用(品種改良, 殺菌, 紙の厚さの検査, テニスのガット, 医療等)、放射線の人体への影響(内部被ばくと外部被ばく, 被ばくと汚染, 除染)、原子炉内での核反応、核燃料と使用済み核燃料の相違、使用済み核燃料の再利用について、説明を加えた。

第4時間目の最後に、原子炉内で起こっている核反応、核燃料と使用済み核燃料の成分変化、使用済みの核燃料の再利用について説明を加えることで、使用済み核燃料は放射性を帯びていることに加え(図5)、原子燃料サイクルに基づいて再利用される、についての2点を生徒に再確認させた。



図5 使用済み核燃料と放射性

⑤ 第5, 6時間目

本時は使用済み核燃料の処分を考える時間であった。後ほど使用済み核燃料をどのように処分するか判断させるために、授業の冒頭で、島根原子力発電所1, 2号機から出された使用済み核燃料の保管量(2,678体)及び、2号機に装填されている燃料集合体数(560体)、2, 3号機に装填する予定の新燃料保管量(1,046体)の存在

について説明を加えた(島根県, 2019)。

貯蔵プールの役割, 燃料集合体, 使用済み核燃料の再利用について説明を加えた後、使用済み核燃料の再処理に伴う高レベル放射性廃棄物の発生と処理(使用済み核燃料→再処理(有用資源の分離を含む)→高レベル放射性廃棄物の発生→ガラス固化→種々の処分方法の検討→地層処分の方法→地層処分地)について説明を加えた。この時、使用済み核燃料から発生した高レベル放射性廃棄物は種々の処分方法が検討されたが、わが国では地層処分が行われることが決められたことについても説明を加えた(NUMO, 2018)。地層処分の方法を詳細に説明した後、地層処分地が未だ決まらないことも説明を加えた。

その後、「原子力発電所から出た使用済み核燃料はどのように処分すればよいのだろうか?」という課題の下、各班での話し合いを行われた後、生徒個人の判断を文章でワークシートに記入させた。

4. 表出された生徒の考え

上述したように、授業実践は第9学年4クラス約140人の生徒を対象に行われた。しかし、授業評価のためのデータ収集の制約のため、生徒から表出された諸データに検討を加え、考察を行ったのはそのうちの1クラス34人である。

(1) 各班で話し合われた処分方法

各班での話し合いの課題は「原子力発電所から出た使用済み核燃料はどのように処分すればよいのだろうか?」であった。各班での話し合いも当然、使用済み核燃料の処分方法について話し合われるはずである。そこで、生徒のワークシートに、どのような処分方法が記述されているか、記述された処分方法に関連してどのような書き込みが行われているか、の2点について検討を加えた。どのような処分方法が記述されかについての結果が表2に示されている。

表2に示された○印は、班の生徒全員のワークシートに該当の処分方法の記述があったことを示す。△印は、班の一部の生徒に記述があったことを示す。-印は、どの生徒にも記述がなかったことを示す。

表2を見ると、「ア. 地中・無人島に埋める」、「イ. 宇宙へ持って行く」、「キ. 火山の中へ入れる」に○印と△印の記入が多いことが分かる。一方、「ウ. 海底に埋める」、「エ. 南極に埋める」、「オ. 地表で管理」、「カ. セメントで固める」には、-印の記入が多いことが分かる。以降、処分方法はア～キの記号で表記する。

○印と△印の記入が多かったア. については、現実的な処分方法として班内で話し合われたと考えられる。イ. については、ほとんどの生徒がワークシートにロケット打ち上げの際の事故の危険性や最終的には宇宙ゴミになること、予算的な問題に関する記述を行っていた。生徒はこの処分方法は現実的でないとは考えてはいるが、班での話題になっていると考えられる。「宇宙のブラック

表2 各班で話し合われた処分方法

処分方法 \ 班	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ア. 地中・無人島に埋める	○	○	○	○	△	○	△	△	○
イ. 宇宙へ持って行く	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ウ. 海底に埋める	—	—	—	—	—	—	△	—	—
エ. 南極に埋める	—	—	—	—	—	○	—	—	—
オ. 地表で管理	—	—	—	—	—	—	△	○	—
カ. セメントで固める	—	—	—	△	△	—	—	—	—
キ. 火山の中へ入れる	○	○	○	○	△	—	○	△	○

ホールに送る」(生徒1), 「太陽へ」(生徒2)等の考えが書かれていた。「太陽に打ち込んでとこしてしまう」や「ブラックホールにのみ込ませる」という考えは話していて楽しいため、話題になったのであると考えられる。キについても、「火山に入れてマグマの熱で」(生徒3)に代表されるように、イ.と同じで話していて楽しいため話題になったと考えられる。

ウ. エ. オについては、現実的に妥当でないと個人で考えているため、班での話題になっていないと考えられる。

これらのことから、地中や無人島に埋める処分や、宇宙へ持って行って処分する方法について各班で話し合われた傾向があるといえる。

(2) 処分に関する生徒個人が行った判断

生徒個人が行った最終的な処分に関する判断を表3に示した。

表3 生徒が行った最終的な判断

処分方法	人数
地中に埋める	19
宇宙に持って行く	2
南極の氷に埋める	1
海底に沈める	1
地上で長期管理	1
その他	10

表3より、34人中19人の生徒が「地中に埋める」処分を最終的な判断としたことが分かる。「地中に埋める」以外の処分方法は合計5名であることも分かる。その他に分類された10人は、「様々な方法で核燃料を処分する(偏った方法にしない)。(生徒5), 「どこかの島に専用の施設を作って保管する。(生徒6)のような、複数の処理方法を併用する考えや、地中に埋めるのかそれとも地上で保管するのかが分からない記述等であった。

表2及び表3の結果をまとめると、班での話し合いの場面では、話し合っていておもしろい話ができる「宇宙へ持って行く」や「火山の中に入れる」という処分方法に加え、誰が考えてもその処分方法に落ち着くだろうと

思われる「地中に埋める」という処分方法がともに話し合われる傾向がある。だが、最終的な判断を行う際には、費用や技術的問題、リスクなどを考えた上、わが国では既に決められている「地中に埋める」という処分方法に決定するしかないと考えようになっていったと考えられる。

(3) 「地中に埋める」と考えた生徒の特徴

「地中に埋める」判断をした19人の生徒のうち17人は、「地中に埋めるのがこの考えの中で1番現実的だし、遮へいをしっかりして奥深く埋めるのが良いと思った。」(生徒7)のような記述を行っている。「遮へいをしっかりする」や「コンクリートなどで固めて」のような、放射線や放射性物質を地中にうめて閉じ込めて人間に放射線の影響が出ないようにという主旨の記述となっていた。

しかし、「地中にうめるという考え方は、地震に対応できるような構造にしてうめれば良いと思います。」(生徒8)や「地下水への影響」(生徒4)のように、地層処分を行った後の地震の影響や、万が一の地下水への放射性物質の漏洩などのことを併せて書いていた生徒はわずか2名であった。前2カ年間に於いて、高レベル放射性廃棄物の地層処分を直接取り扱った授業を展開した際には、地層処分の有利な点と考慮しなければならない点を考えさせる活動を充分に行わせた。だが、本授業実践では、使用済みの核燃料の処分はどうするかという点から始まった授業となるので、この点の充分な話し合いが行われない上での判断となったためと考えられる。

5. まとめ

生徒の住む地元の松江市に立地する原子力発電所の稼働に伴って産出される使用済み核燃料の存在を意識させる導入の工夫を行なった上で、その処分に関する班での話し合いや処分に関する生徒の判断について検討を加えると、次の2点が明らかになった。

1. 使用済み核燃料の処分については、主に地中に埋めて処分するか、それとも宇宙に処分するか、に関する話し合いが各班で行われた。
2. 34人中19人の生徒の判断は、「地中に埋める」処分方法であった。「地中に埋める」という判断をした生徒のうち17人は、「遮へい」や「コンクリートで固め

る」という放射線教育で得た科学的な根拠を使用して判断した。

これらの点からは、今回筆者らが構想した文脈での授業の導入と展開は、今後も続いて検討する価値があると思われる。

それとともに、次の3点の課題も明らかになった。

1. 第5, 6時間目に、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関連する学習を行ったにもかかわらず、使用済み核燃料を再利用することなく処分する方法を生徒が話し合ったのか、それとも使用済み核燃料を再処理した際に発生した高レベル放射性廃棄物の処分方法を話し合ったのか、不明である。この点を明らかにする方途の検討。
2. 使用済み核燃料を地中に埋めて処分した後に発生するかもしれない地震に対する考えや、将来的に放射性物質が地下水などに混じって出てきはしないかという点に対する考えまでに及んだ生徒はわずかであったため、この点を克服する理科の授業展開の工夫。
3. 理科の授業が終わった後の社会科との関係の在り方。

付記

本稿は、2020年5月に行われた日本科学教育学会第9回日本科学教育学会研究会（栢野彰秀，野崎朝之，大山朋江，園山裕之，岡田昭彦，前島美佐江，高橋里美：「島根大学教育学部附属義務教育学校後期課程における放射線教育（13）－使用済み核燃料の存在とその処分に着目させた授業実践報告－」）、及び2020年8月に行われた日本理科教育学会第70回全国大会（栢野彰秀，野崎朝之，大山朋江，園山裕之，岡田昭彦，前島美佐江，高橋

里美：「島根大学教育学部附属義務教育学校後期課程における放射線教育（14）－使用済み核燃料の存在とその処分に着目させた授業の評価－」）において口頭発表した内容にさらに検討を加えてまとめたものである。

参考文献

- NUMO（2018）：「高レベル放射性廃棄物の処分問題」を学ぶ基本教材教師用解説編,p.6,2018.
- 栢野彰秀，大山朋江，園山裕之，野崎朝之，木下勝，高橋里美，秦明德（2016）：原子力発電所立地地域における放射線教育－行動の判断を授業を通して－,エネルギー環境教育研究,10,2,29-36.
- 栢野彰秀，岡田昭彦，大山朋江，野崎朝之，園山裕之，高橋里美（2019）：中学校理科と社会科で連続して行った高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する授業実践,エネルギー環境教育研究，13,2,17-24.
- 栢野彰秀，高橋里美，秋田幸彦，勝部翔太郎，長谷川涼，別木政彦，渡部康弘，秦明德（2014）：自然放射線を観察する霧箱の作製,エネルギー環境教育研究，8,2,95-100.
- 栢野彰秀，前島美佐江，園山裕之，野崎朝之，大山朋江，岡田昭彦，高橋里美（2020）：高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する話し合い場面の抽出事例研究，エネルギー環境教育研究，14,2,13-22.
- 島根県（2019）：しまねの原子力2019.
- 園山裕之，高橋里美，秋田幸彦，勝部翔太郎，長谷川涼，別木政彦，渡部康弘，栢野彰秀，秦明德（2014）：島根大学教育学部附属中学校における放射線教育の取り組み，日本科学教育学会研究会研究報告，28,7,94-99.