

中学校における二酸化炭素及び放射性廃棄物の 地底・海底処理に関する授業実践

杉 江 瞬*

I 背景

1.1 二酸化炭素と放射性廃棄物の現状

社会全体において、安定的な電気エネルギーの供給は必須であり、各発電における電気生成は持続的な活動に必要不可欠である。しかし、発電量の大部分を占める火力発電では二酸化炭素、原子力発電では放射性廃棄物といった排出物が発生し、その処理方法の開発が重要な課題となっている。

2020年度の第203回臨時国会において、総理大臣より「2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことが宣言され、2021年度の地球温暖化対策推進本部及び気候サミットにおいて、2050年のカーボンニュートラルに向けて、従来の温室効果ガス削減目標を7割以上引き上げる目標が発表された。特に二酸化炭素の排出量（エネルギー起源と非エネルギー起源の合計）は、2013年度排出量実績13億トンから2030年度排出目標・目安の7億4000万トンへと、56.7%まで減少させることが設定された¹⁾。



図1 CO₂排出量の推移（LULUCF除く）

化石燃料の使用を含む人間の活動には、二酸化炭素の発生が伴っている。部門別の排出量では「エネルギー産業」が最も多く、「製造業・建設業」と「運輸」が続く状態となっている。二酸化炭素排出量において、「エネルギー産業」では特に発電・熱供給に関わる部分が大部分を占めており、化石燃料への依存度、固体燃料、液体燃料、気体燃料の使用割合によって、排出量が増減している。全体の排出量は1990年から2005年まで増加しており、2013年以降から徐々に減少傾向にある。2022年度における二酸化炭素排出量（LULUCFを除く、間接CO₂を含まない）は10億3,500万トンを記録（図1）し、温室効果ガス総排出量の91.1%を占めた。2022年度は1990年度に比べ、10.6%の減少、前年度比2.5%の減少となった²⁾。CO₂の排出量は減少しているが、目標の値まで差がある状態となっている。

放射性廃棄物とは、原子力発電で発生する使用済み核燃料の再利用できない高レベル放射性物質を

* 弘前大学地域社会研究科 客員研究員

示している。放射能レベルが十分に減衰するまでに非常に長い時間を要する放射性物質が含まれるため、継続的な安全管理が困難である。2017年度において、約1万8,000トンの使用済燃料が存在しており、各原子力発電所や青森県六ヶ所村の日本原燃六ヶ所再処理工場で管理されている。また、使用済燃料を管理できる容量は、2017年度時点で、約2万4,000トンになっており、貯蔵方法の拡充、安全な処理方法が検討されている³⁾。

1.2 中学校における環境教育

中学校の理科教育では、「環境」の内容は大きな枠組みの1つとなっている。「中学校学習指導要領（平成29年度告示）解説理科編」において、理科教育における環境やエネルギーは主に「科学技術と人間」の内容で取り扱われており、地球温暖化や温室効果ガス、放射線に関する内容もこの単元に含まれることが多い⁴⁾。自然環境の保全と科学技術の利用の在り方を認識させることが主なねらいとして、環境と人間の活動に関する観察・実験などを行い、その結果を日常生活や社会と関連付けながら理解を深めることが明記されている。学習指導要領には、「科学技術の発展と人間生活との関わり方、自然と人間の関わり方について多面的、総合的に捉えさせ、自然環境の保全と科学技術の利用の在り方について科学的に考察させ、持続可能な社会をつくっていくことが重要であることを認識させること」と記載され、自然環境との調和を図りながら、持続可能な社会を築いていくことが言及されている⁵⁾。2022年に発行された中学校理科の教科書⁶⁻¹⁰⁾に載っている内容には、温室効果ガスと地球温暖化の関係性に言及されているものが多く、地球環境と人間の活動に関する内容が記載されている。また、教科書によっては、「二酸化炭素の濃度変化」と「地球の年平均気温の変化」を比較したグラフや^{8, 9)}、温室効果ガスの排出実質ゼロを目標とするパリ協定について載っているものがあつた¹⁰⁾。しかし、実際に二酸化炭素を含む温室効果ガスを削減する方法については明記されておらず、それに関する観察・実験の仕方等もなかった。再生可能エネルギーへの言及もあるが、発電方法としての説明やエネルギー自給率を向上させる手段として載っているものがほとんどであつた。放射線に関しては、その特徴に関する説明はあつたが、放射性廃棄物やその処理方法について言及している記述等はなかった。

各排出物の処理方法に関する様々な取り組みが考えられており、二酸化炭素の処理方法として、植樹による森林拡大と光合成のCO₂吸収量の増大、工業等で石炭ではなく水素を用いた還元反応により鉄を取り出す水素還元製鉄、製造過程で発生するCO₂を回収するための技術開発、CO₂を資源として利用する「カーボンリサイクル」などがある¹¹⁾。また、放射性廃棄物の処理方法として、廃棄物を海洋に投棄し、深海底に埋めて隔離しようとする海洋処分、保管施設の拡充を図り人間による管理を目指す長期管理などがある³⁾。

日本の二酸化炭素や放射性廃棄物の処理方法の開発が求められる現状において、これから将来を担っていく生徒たちに、観察・実験から体験的に学ぶ機会を設けるべきであると考えた。

II 研究目的

排出物の処理方法は多岐にわたるが、その中で地底・海底に埋める方法に着目した。二酸化炭素の削減方法として、「CCS（二酸化炭素回収・貯留）」と呼ばれる技術で、発電所や化学工場などから排出されたCO₂を集め、地中深くに貯留・圧入するという方法があり、2012年度から北海道の苫小牧でCCSの大規模な実証実験が行われている¹²⁾。このCCSの中でも、二酸化炭素を固体化させるハイドレート化を利用した貯留方法に焦点を当てた。また、放射性廃棄物の処理に関して、地下深部には「酸素が少ない」「ものの動きが非常に遅い」「人間の生活環境や地上の自然環境から隔離されている」という特徴から地層処理の有効性が唱えられており³⁾、教材として取り上げたいと考えた。

この二酸化炭素や放射性廃棄物の地底・海底処理方法に関する内容を教材として活用したいと考え、CO₂ハイドレートと放射性物質の特徴を理解するための授業実践を検討した。

Ⅲ 実践内容

3.1 CO₂ハイドレートの生成方法

CO₂ハイドレートはクラスレートハイドレート（包接化合物）の一種である。水分子が水素結合によってつくる多面体のケージが二酸化炭素分子を包接し、その多面体同士が互いに面を共有して結晶構造を形成している。真水と気体を特定の温度圧力条件を満たすことでハイドレートを生成することができる。CO₂ハイドレートが分解せず安定的な状態となる条件として、0℃で約125.6 decibar（約1.256 MPa）以上の圧力が必要とされている（図2）¹³⁾。

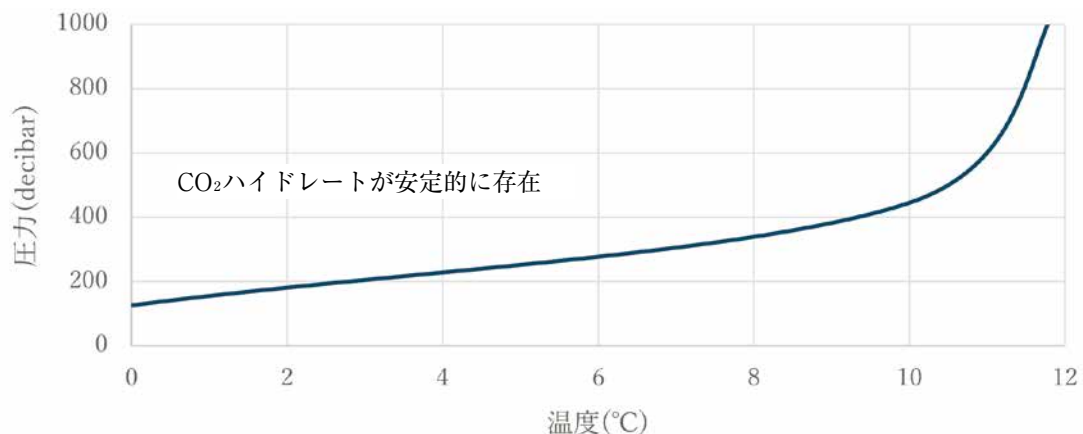


図2 CO₂ハイドレートの平衡領域

生成方法は、先行研究で行ったメタンハイドレートの簡易的短時間生成方法の手順¹⁴⁾を参考にし、実験器具として圧力容器とマグネティックスターラーを用いた。二酸化炭素と精製水を容器に密閉して、温度を0℃に保ちながら4.50～5.00 MPaの圧力で二酸化炭素と水を攪拌するという条件の下、CO₂ハイドレートの生成を行った。

実験手順として、圧力容器に精製水10mLと攪拌子を入れて組み立てた。二酸化炭素を圧力容器へ入れた後、圧力を4.90 MPa程度に調節してから攪拌を始めた。30分程度かけて攪拌し圧力の低下が見られなくなったところで、CO₂ハイドレートを取り出す（図3）。

実験のながれ

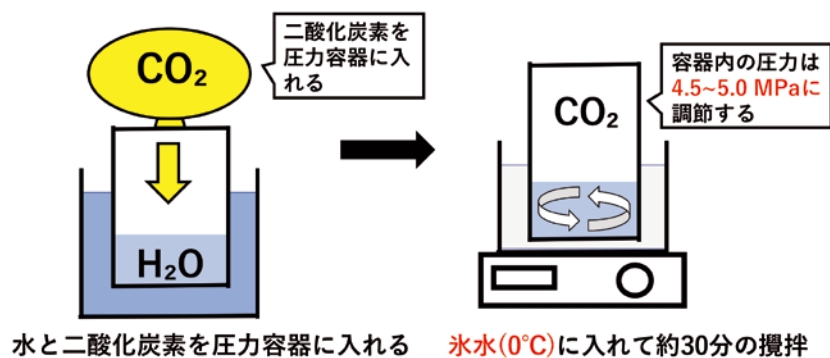


図3 CO₂ハイドレートの生成手順

3.2 放射線の特徴の実験

放射線の特徴を考える実験では、測定装置として「A2700型 Mr. Gamma」を使用した。この装置は γ 線のみを測定することができ、放射線の1つずつのエネルギーを線量当量に変換して計算することにより、正確な線量率を表示することが可能となっている¹⁵⁾。また、線源として「モナズ石」を使用した。これは鉱物（リン酸塩鉱物）の一種で、ペグマタイト、花崗岩、片麻岩、砂岩などに含まれており、 γ 線も放出している。これらを活用して、放射線の特徴を調べるために以下の実験を計画した（図4）。

実験①では、「Mr. Gamma」を使って、自然の放射線量とモナズ石の放射線量を測定して、自然放射線の確認と線量の大きさなど比較した。実験②では、様々な物質の遮蔽板を用意して、放射線の透過力を測定した。遮蔽板としてアクリル板、アルミニウム板、鉛板、ステンレス板を用いて、物質種に対する透過力を比較した。実験③では、線源までの距離と放射線量を比較した。線源までの距離を5cm、10cm、15cm、20cmと離していき、線量の変化を調べた。

放射性物質を測定してみよう

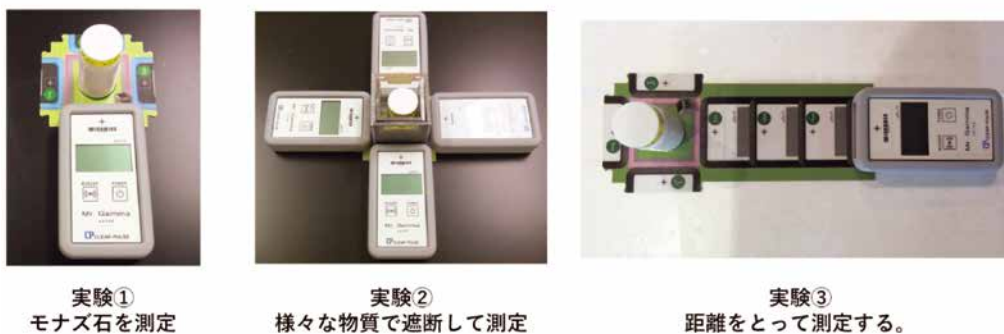


図4 放射性物質の測定実験

3.3 授業計画

本研究の授業内容（表1）では、青森県の十和田市立甲東中学校の2年生、3年生を対象に、4人で1グループを作り、地底・海底処理方法を題材とする内容を検討した。授業はCO₂ハイドレートに関わる前半と、放射線に関わる後半に分けて行った。前半では二酸化炭素の地底・海底処理を説明して、CO₂ハイドレートの生成実験を行った。後半では、放射性廃棄物の説明をして、放射線の実験を行った。

表1 授業内容

時	主な学習活動	
	9月2日月曜日 中学校3年生（70名）	9月3日火曜日 中学校2年生（76名）
前半	【二酸化炭素の処理方法について】 <ul style="list-style-type: none"> 日本における二酸化炭素と放射性廃棄物について説明 二酸化炭素の地下埋蔵処理について説明 海底に存在するメタンハイドレートの提示 【生成実験】 <ul style="list-style-type: none"> CO₂ハイドレートの作成（演示実験） 	
後半	【放射性について】 <ul style="list-style-type: none"> 放射線の説明 地層処理について説明 【放射性物質の測定実験】 <ul style="list-style-type: none"> 「Mr. Gamma」を活用して、線量の測定 物質による遮断、距離による線量の減少を確認 	

授業内容は講義と生成実験、測定実験を組み合わせ、科学的な視点から物質の特徴を発見できるように検討した。CO₂ハイドレートの生成では、安定条件と処理環境設定を比べることができるようになっており、生成条件の温度圧力が、地底・海底における低温高压の環境にいかにか合致しているか理解を促すことができるようになっている。また、生成したCO₂ハイドレートに二酸化炭素が確実に含まれているかどうかを、デジタル気体測定器を用いて確認できるようにした。放射線の測定実験では、日常生活の中である程度の被ばくしていることを「Mr. Gamma」の自然放射線の測定から理解するとともに、放射性物質から発生する線量を特定の物質によって遮断したり、距離によって線量が減少することを確認した。また、ベクレルとシーベルトの両方を提示すると、混乱が起こることを考慮してシーベルトのみを扱った。放射線の特徴から、人間の生活圏から離れており、岩盤によって遮断されている地層処理の有効性を提示できるようになっている。

本研究実践では、CO₂ハイドレート生成に関わる器具が、グループ分を用意することができないため、演示実験にした。一方で、放射線に関わる実験では「Mr. Gamma」を人数分用意することができたため、1人1人が実験できるようにした。

IV 実践結果

本実践では規模が大きい授業となったため、体育館を使用してスクリーンに映しながら、内容を進めていった（図5）。授業では発電所の電気量を比較し、火力発電と原子力発電がいかに重要であるか、また、そこで発生する二酸化炭素と放射性廃棄物が人体や生態系にどのような影響を及ぼすのかを確認した。



図5 講義の様子

二酸化炭素の削減方法について、地底・海底処理が直接的に二酸化炭素の量を減らせること、カルシウムと反応して固体状態として定着させることが可能であることを説明した。処理する時の二酸化炭素の状態についても取り上げ、物質の三態における体積が大きく異なることを示すため、固体・液体から気体への変化の様子を映像で確認した。また、その映像を用いて、気体状態での処理より固体状態の方が効率的であることを視覚情報で理解できるようにした。CO₂ハイドレートの生成実験では、授業時間の観点から二酸化炭素を予め压力容器内に封入してから進め、スクリーンで生成条件や実験手順等を映しながら行った。生成時の温度圧力と、地底・海底における温度圧力を比べたり、メタンハイドレートの例を提示したりと処理方法としての可能性を取り上げた。CO₂ハイドレートの生成の様子や、容器から取り出した時の様子、二酸化炭素の測定の様子はカメラで映しながら確認した。

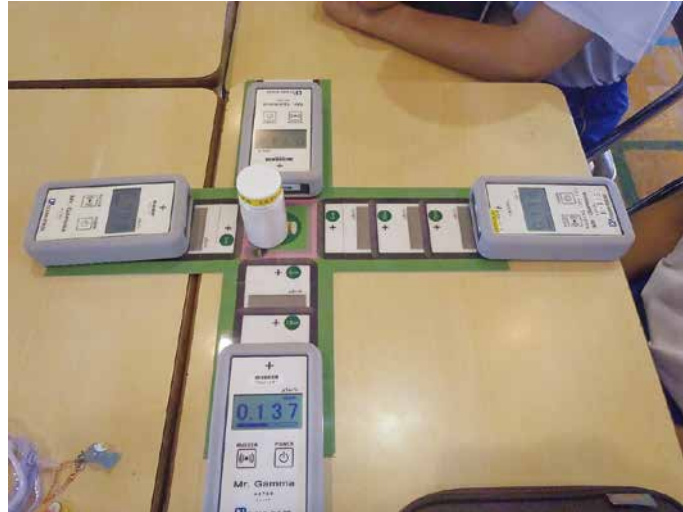


図6 放射線の実験の様子

放射性物質について、放射性廃棄物の放射能レベルが減衰するまでに非常に長い時間が掛かることや、被ばく線量と健康リスクとの関係を示す図表を用いて、自然放射線と放射性廃棄物の人体への影響を確認した。実験では4人グループであることを活用し、実験②の4種の遮蔽板に対する透過力、実験③の各線源までの距離と線量について、1人1人が担当して比較しやすいようにした(図6)。実験で得た結果から、放射線の特徴と地層処理に対する有効性を確認した。

V まとめ

甲東中学校の生徒を対象と授業実践の結果、CO₂ハイドレートの生成や放射性の実験より、科学的な特徴の理解を促すことができた。排出物の削減として、二酸化炭素や放射性廃棄物を地底・海底に処理する方法を提示できたと思われる。CO₂ハイドレートの生成条件から、地底・海底での保管の可能性があること、メタンハイドレートの存在から自然界での例があること、また、気体より固体液体状態の方が効率的に削減できることなどを伝えることができた。放射性廃棄物の処理方法として、遮蔽や距離の実験を通して放射性の特徴の理解を促すことができた。また、「Mr. Gamma」を用いることで、数値として線量の変化を確認でき、有効的な処理方法を考えることの一助になったと思われる。

多くの教科書では火力発電や原子力発電と異なる発電方法や、有害物質を発生しない代替エネルギーといった発生抑制の方法を提示する傾向がある¹⁶⁻²⁰⁾。そういった中で、本実践では発生後の処理方法について焦点を当てたものであり、講義や実験から生徒に対して、新しい選択肢を提示できたのではないかと考えられた。

参考文献

- (1) 経済産業省 産業技術環境局「我が国の地球温暖化対策に関する最近の動向」pp.1-8、2022
最終閲覧日2024年12月19日
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/chikyu_kankyo/pdf/2022_001_03_00.pdf
- (2) 国立研究開発法人 国立環境研究所 地球環境研究センター「日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2024年」、p.2-3、2024
- (3) 経済産業省 資源エネルギー庁「放射性廃棄物の適切な処分の実現に向けて」、2017
最終閲覧日2024年12月19日
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/final_disposal.html
- (4) 文部科学省「中学校学習指導要領解説(平成29年告示)理科編」、学校図書、p.63、2018

- (5) 同上書(資料)、pp.67-68
- (6) 梶田隆章、真行寺千佳子、永原裕子、西原寛「新しい科学3」、東京書籍、p.306、2022
- (7) 有馬朗人「理科の世界3」、大日本図、pp.302、2022
- (8) 霜田光一、森本信也「中学校科学3」、学校図書、p.245、2022
- (9) 室伏きみ子、養老孟司「自然の探究 中学理科3」、教育出版、p.284、2022
- (10) 矢禎一、鎌田正裕「未来へひろがるサイエンス3」、啓林館、p.306、2022
- (11) 経済産業省 資源エネルギー庁「2050年カーボンニュートラルに向けた我が国の課題と取組」、2021
最終閲覧日2024年12月19日
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/1-2-3.html>
- (12) 経済産業省 資源エネルギー庁「知っておきたいエネルギーの基礎用語 〜CO₂を集めて埋めて役立つ「CCUS」」、2017
最終閲覧日2024年12月19日
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ccus.html>
- (13) 池川洋二郎「CO₂ハイドレート貯留を支配する日本周辺の深い海における海水温の定式化」土木学会論文集G(環境)、Vol.78、No.1、pp.30-32、2022。
- (14) 杉江瞬、和田幸恵、福岡裕真、長南幸安「教材化を目指したメタンハイドレートの短時間生成の検討」、弘前大学大学院地域社会研究科年報、第20号、pp.7-10、2024
- (15) CLEAR-PLUSE(クリアパルス株式会社)「A2700型 Mr.Gammaの特長」
最終閲覧日2024年12月19日
https://clearpulse.co.jp/pdf/A2700_introduction.pdf
- (16) 梶田 前掲注(6)、pp.286-291
- (17) 有馬 前掲注(7)、pp.302-305
- (18) 霜田 前掲注(8)、pp.247-250
- (19) 室伏 前掲注(9)、pp.299-305
- (20) 矢禎 前掲注(10)、pp.230-233