

エネルギー・ミックスを 支える現場から

技術者たちの思い

東北大学大学院
工学研究科
(宮城県仙台市)



今回の取材先は
東北大学大学院
工学研究科の
千田・関研究室

千年万年先を考える 研究開発の最前線

脱炭素を目指したいいろいろな動きの中で、「エネルギー・ミックス」の考え方があらためて注目されています。今年度のeレポートは、エネルギー・ミックスの一翼を担う現場とそこで働く技術者に焦点を当てレポートします。



東北大学青葉山キャンパスにある工学研究科量子エネルギー工学専攻の千田・関研究室。もとは原子核工学専攻でしたが、1996年の改組で、量子エネルギー工学専攻へと領域を拡張し、人々の社会や暮らしに直結する地球環境やエネルギーに関わる研究を行っています

本誌532号では、青森県むつ市にあるリサイクル燃料貯蔵株式会社(RFS)を訪ね、原子力発電所から発生する使用済燃料を再処理するまでの間、安全に貯蔵・管理する「中間貯蔵施設」の現場を取材しました。しかしRFSでの使用済燃料の貯蔵は最長50年間と決まっており、その後は再処理や、最終処分へと引き継いでいく必要があります。最終処分の方法は「地層処分」、つまり地下300m以上の安定した地盤内に埋設するということは決まっていますが、最終処分場がどこになるのかは現在も検討されている最中です。

廃棄物に含まれる放射性物質の半



研究概要の説明の中で、エネルギーのベストミックス、原子燃料サイクルなどのテーマの解説もありました

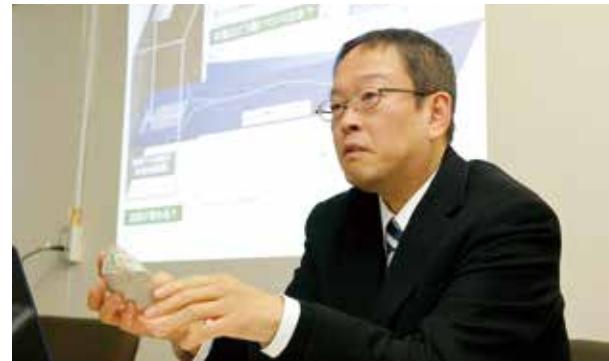
減期、つまり放出される放射線量が半分になる期間は物質によってさまざまですが、中には数十万年を超えるものもあります。今回は放射性廃棄物の地下埋設処分後、何千年、何万年という超長期的なスパンにおいて放射性物質を安定に閉じ込める「バリアシステム」に関する研究を行っている東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻の核エネルギー工学分野「千田・

関研究室」を訪れました。大学の研究室での実験と発見が遙か未来の安心をつくる土台としてどう機能しているのか、そして若手研究者や学生たちが大学の研究室でどのようなことをを行い、どのような将来を見出しているのかを伺つてきました。

「地層処分場は地上1～2km²、地下6～10km²と想定されています。地下はこの青葉山キャンパスから仙台駅までの広さが、すべて処分場になるくらいのイメージです。場所の選定から建設、操業と閉鎖まで100年以上かかり、その後も10万年以上にわたり放射性物質を閉じ込める必要があります。人間の寿命をはるかに超えてくる課題にどう取り組み、それを社会にどう伝えていくかに日々取り組んでいます」。

取材先概要
東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻
核エネルギー工学分野 千田・関研究室

所在地／宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01-2
スタッフ構成／事務補佐スタッフ、大学院生7名、学部生4名など
HPアドレス／<https://www.qse.tohoku.ac.jp/lab/nefee/>
発足／1996年より現分野名に改組



概要を説明していただいた千田太詩准教授。地層処分における多重バリアシステムの研究を続け、原子力バックエンド工学を追求しています



発電所で電気をつくるフロントエンド（燃料をつくる・使う側）に対し、使い終わった燃料や廃棄物をどう安全に管理・処理・処分するかを考えるのがバックエンド。どちらもエネルギーサイクルを考える上で重要だよ！

このように説明するのは、研究室を率いる准教授の千田太詩先生。助教の関亜美先生と事務補佐スタッフ、大学院生7名・学部生4名の学生と

ともに、物質や熱・エネルギーがどのように地層内を移動していくのかを調べる移動現象論や、物質同士が接した場合にどう変化するかを知る反応工学、地層がどのような構造・性質になっているかを知る地球化学、放射性物質がどう振る舞うのかを調べる放射化学など、多くの学問に基づく「原子力バックエンド工学」に取組んでまいりたい。

時間とともに
天然バリアがより強固に

千田・関研究室の重要な研究テーマの一つが「放射性廃棄物処分システム」が持つ、バリア性能の自己修復・向上効果」に関する研究です。地層処分では、放射性廃棄物を安全に隔離するため、何重もの「壁」、すなわちバリアを設けます。一つは、ガラス固化体や金属製容器、緩衝材など人間がつくる人工バリアであり、もう一つは地下の安定した岩盤そのものである天然バリアです。この多重バリア

システムが放射性物質の移動を遅らせ、放射線量が十分に低減するまで生活圈へ達するのを防ぐ役割を担つています（図1上部）。



「決して大規模な研究室ではありませんが、スタッフと学生、お互いの顔が見える範囲で手を動かすことを大事にしています」と千田先生。左の写真は助教の閻先生

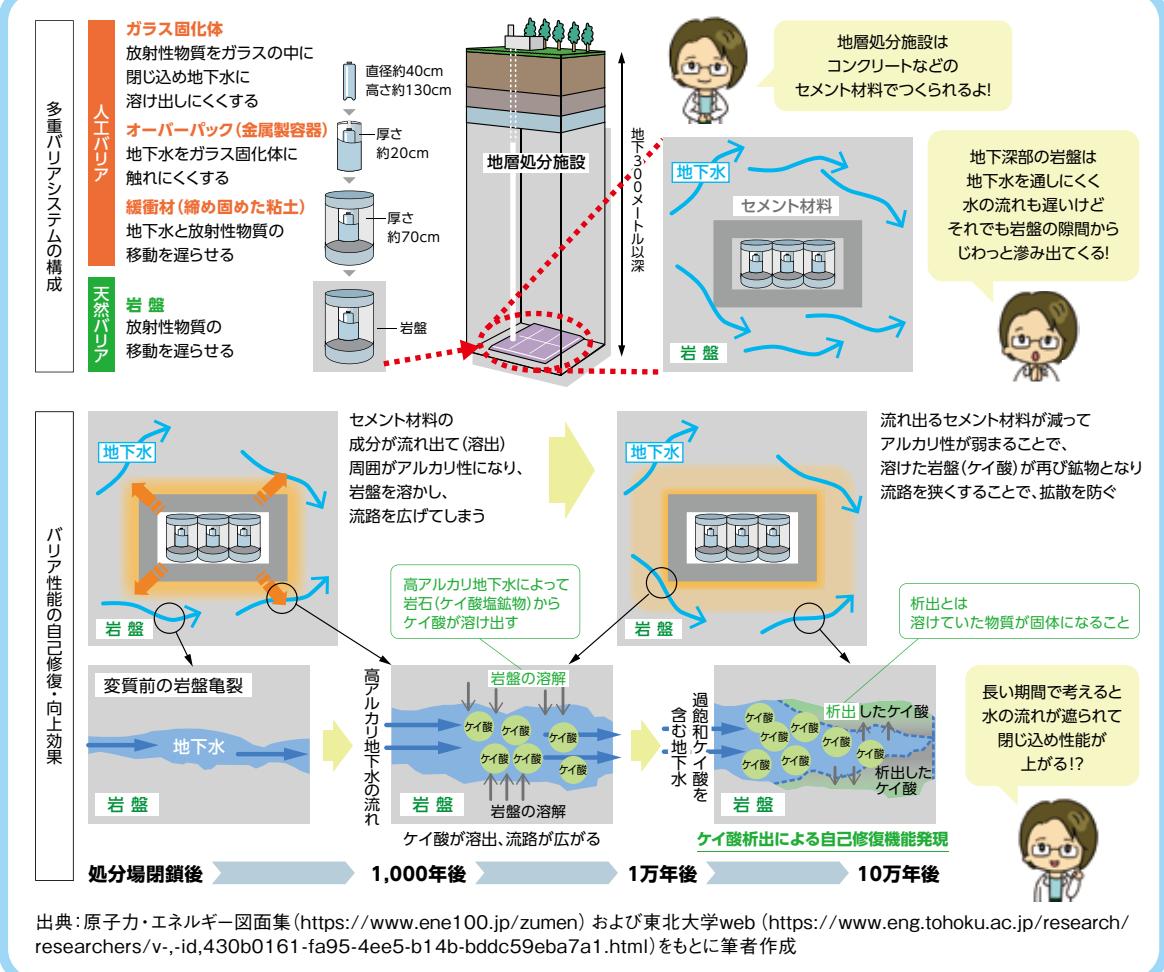
カルシウム(Ca)や水酸化ナトリウム(Na)などのアルカリ成分を溶出させ、周囲の地下水をpH 12～13ほどの強いアルカリ性にします。このアルカリ性の水が岩盤に広がるとどうなるのか？実は、これが長年の懸念材料でした。日本の地下に広く分布する花崗岩などの岩石には、ケイ酸塩鉱物が多く含まれています。アルカリ性の温泉、宮城県では鳴子温泉のような「美肌の湯」と呼ばれる温泉では、岩の浴槽がヌルヌルしていることがあります。同じことが地下でも起きるのではないか。つまり、セメントから溶け出したアルカリ性の水が岩盤を溶かし、細かい亀裂を広げてしまい、地下水が流れやすくなってしまうのではないか。そうなれば、天然バリアの閉じ

が認め性能が低下してしまうという懸念があつたのです【図1下部／処分場閉鎖後→1000年後】。

ところが、地下環境で生じる現象を深く掘り下げて研究した結果、意外な事実が見えてきました。高アルカリ性によつて一時的にはケイ酸が地下水中に溶け出してしまうのですが、さらに時間が経過したり、セメント材料から少し距離が離れてアルカリ性が弱まることで、地下水に溶け込んでいたケイ酸が周囲の岩盤の中で固体化し、「二次鉱物」と呼ばれる新しい鉱物を生成する可能性があるというのです。これにより、一度は広がつた亀裂が閉じられ、放射性物質の流出を食い止めるとともに、この二次鉱物が元の岩盤よりもより強く放射性物質を吸着する可能性があります【図1下部／1000年後→10万年後】。

つまり、もともと「バリアを劣化させる要因」だと考えられていたセメントの成分溶出に伴う処分環境の変化が、実はバリア性能を自然に修復し、

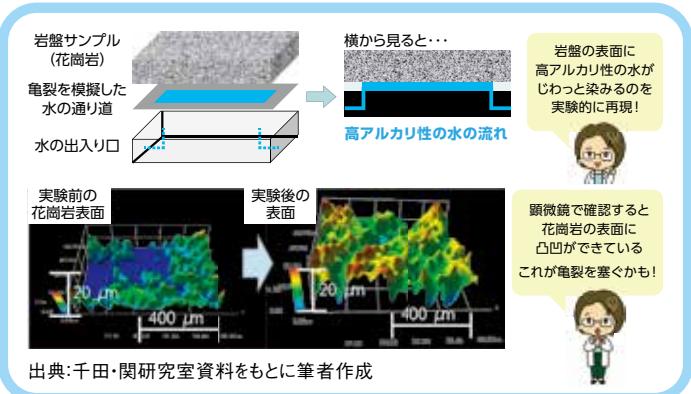
図1 放射性廃棄物の地層処分における多重バリアシステムの構成と、バリア性能の自己修復・向上効果



さらに向上させる効果を生み出すかもしれません。

「最終処分場は、人間がメンテナンスしない期間の方がはるかに長く続きます。そのため複数の候補地を比較した上で、できるだけ条件の良い場所を選ぶことが望ましいです。しかし、どのような場所でもセメントの影響や地震などによって亀裂が多くなる可能

●図2 地下水が染みた花崗岩が変質する実験



出典:千田・関研究室資料をもとに筆者作成

研究テーマが、フライアッシュ(微細な石炭灰)の活用です。一般的なセメントの原料は石灰石と粘土などを高温で焼いてつくるため、その過程で二酸化炭素を排出します。一方、フライアッシュは追加で焼く必要がないため、新たな二酸化炭素をほとんど出しません。

火力発電所で石炭を燃やした際に発生するフライアッシュを、セメント原料の一部として地層処分場の建設に活用することで、地層処分における二酸化炭素排出量の削減が期待できます。

「廃棄物を処分するのに、別の産業副産物を使う。そしてそれが二酸化炭素排出量の削減にもつながる、ということです」と千田先生。

ただし、課題もあります。フライアッシュには微量の有害成分が含まれており、これらが地下水に溶け出してしまっては困ります。また、セメント材料として使用した際に放射性物質をしつかり閉じ込められるのか、という点も確認が必要です。そこで千



実験室での各種計測や分析など細かいデータと向き合い、地道に数値を確認していくことも大事な研究の一つです。育児中の関先生は「夫も大学の研究職なので、お互いに理解し合って、分担して育児を行っています」と話します



研究成果を広める論文の執筆や学会発表、研究費を獲得するための申請書の作成なども研究者の仕事。「限られた時間の中で何を優先するか、スケジュール調整には苦労しています」と関先生

性もあります。私たちの研究成果に基づけば、将来的には岩盤のバリア性能が自己修復し安定することが期待され、処分システムの信頼性をより高めていくかも知れません」と千田先生はこの研究の意義と未来像について語ります。

研究室では、実際に花崗岩の表面にカルシウムを含む高アルカリ性の水流す実験を行い、水を流した後の花崗岩の表面に微少な凹凸が生成することを確認しています【図2】。この二次鉱物が放射性物質とのように結びつき吸着するのかを、蛍光分析という手法を使って分子レベルで観察し、得られた知見をもとに、放射性物質の閉じ込め効果がさらに向上するセメント材料ができないかという新しい課題にも取り組んでいます。

火力発電の石炭灰が埋設処分の重要な材料に

もう一つ、カーボンニュートラルの観点からも興味深い千田・関研究室の

田・関研究室では、フライアッシュを混ぜたセメント系材料が放射性物質をどれだけ吸着できるのか、有害成分を内部に固定し続けられるのか、長期間にわたって安定な状態を保てるのかといった点を、実験とデータ解析で入念に調べています。

その研究を加速させたのが、助教の関亜美先生です。同じ東北大学の環境科学研究科で、フライアッシュを研究対象として博士号を取得後、民間企業での1年間の研究開発職を経て、2021年4月に着任しました。

「企業での経験も貴重でしたが、学生時代からゆくゆくは教育にも携わりたいと思っていました。ただ学生結婚をした後、私の就職を機に夫は仙台、私は東京と遠距離になつたのですが、そのタイミングでコロナ禍になりましたときにこの研究室で助教を公募すると、学生時代の指導教員から紹介があり応募しました」。

原子力工学や放射性廃棄物処理のテーマには馴染みがなかつたといいます

が、研究室内での綿密な情報共有を大切にするとともに、ときには学外の研究者との協業やナノテラス（本誌527号参照）を活用した最先端の分析・解析を取り入れたりと、新たなフィールドを切り開いています。

—自分自身の研究成果が認められることがもちろんですが、指導している学生がそれまでの試行錯誤や苦労を経て、学会や学位審査の際に堂々と発表してくれる姿を見るのは励みになります。学生が卒業する際に『この研究室で良かった』と言ってくれるのは、ほんとうにうれしいですね』と笑顔で話してくれました。



千田先生は東北大学で学位取得後、電力中央研究所を経て母校へと戻ってきました。関先生とともに、原子力エネルギーの未来に向けて研究に取り組んでいます

「世代をまたぐ研究だからこそ着実に次世代につながっていく」

「私たちの分野は、何千年とか、とくには何万年というスケールで物事を考えないといけません。でも、そういう長期の話って、結局は“基本的な事象”にどれだけ正しく向き合えるかなですよ」。千田先生の基礎的知見を外さなければ長い時間の評価もブレないという言葉は、普段そんな長いスパンで物事を見ることがなかつた私

取材を終えて



「大学では研究だけでなく、教育や運営も自分で行う必要がある。その分、多様な人と関わることができるのが大学の醍醐味」と語る千田先生

原子力エネルギーの 有効利用のために 研究の進展が重要

再生可能エネルギーによるエネルギー自給に未だ時間を要する現状において、温室効果ガス削減が期待できる原子力エネルギーの利用は有効であると考えます。第7次エネルギー基本計画で示された電源構成においては、現在9%程度の割合に留まる原子力を2040年度に2割程度まで利用拡大する見通しが示されています。原子力エネルギーの継続利用において、社会の大きな懸念といえるバックエンドの堅実な進展は重要であり、その一助となるべく研究に取り組んでいます。

エネルギー・ミックスを支えるのは、発電所や送電網といった目に見えるインフラだけではありません。その背後には、バックエンドという「見えない課題」があり、それに向き合う研究者たちがいます。第7次エネルギー基本計画では、原子力発電を現状の9%から2040年度に2割程度まで引き上げることを見込んでおり、それに



核エネルギーフロー
環境工学分野
千田大詩准教授

にはとても衝撃的で、研究や未来社会に対する真摯さを強く感じました。千田・関研究室の研究では、学生が自分の手を動かし、自分の目で見て「あ！ なんだ！」と気づく瞬間を何より大切にしているといいます。学会におけるセミナー、講座開催への協力や地層処分について学ぶイベントに千田先生も学生たちも積極的に参加しているそうです。こうした取り組みなどを通じて、研究室の学

伴う放射性廃棄物の排出も避けられません。その「出口」となるバックエンドの確実な道筋を研究し続けている千田・関研究室の取り組みは、原子力を責任を持って使い続けるための、なくてはならない基盤研究です。

数千年先の未来を見据えて、今日も実験室で研究を続ける人々がいる。その事実が、私たちの社会の安心を静かに支えているのだと、あらためて実感した取材でした。

A portrait of Dr. Miemi Seido, a woman with short brown hair and glasses, wearing a dark cardigan over a white shirt, standing in a laboratory setting. She is smiling at the camera. The background shows laboratory equipment and glassware on shelves.

2008年東北大大学院工学研究科バイオロティクス専攻博士後期課程修了、博士(工学)。人間協調型ロボットの研究をしていた学生時代からロボット技術を中心とした解説やレポート記事を執筆。千葉工業大学未来ロボット技術研究センター(fuRo)主任研究員や東北大大学男女共同参画推進センター特任助教(運営)などを経て、現在は「物書きエンジニア」として科学技術の魅力を伝える活動を行うかたわら、東北大大学工学研究科で学術研究員として勤務。2024年3月より日本ロボット学会・理事(兼任)。著書に「絵でわかるロボットのしくみ(講談社/2014)」などがある。

関先生は本専攻・当研究室に着任されてから5年になります。原子力や量子エネルギーとはあまり関わりのない分野からの参入にもかかわらず、関連研究を大いに進めていただけで、放射性廃棄物処分分野において将来のキーパーソンの一人に数えられていくものと期待しております。また、研究室運営や所属学生のケアなどにも精力的に取り組む様子は、たいへん心強く感じています。多忙な毎日かと思いますが、健康には十分気をつけてがんばっていただきたいと思います。

また原子力エネルギーの研究、特に放射性廃棄物処分という分野は、次世代の育成が非常に重要です。このことをいつも意識して研究にあたっています。