

地下環境研究のフロンティア ～地質学に関わる新展示企画アプローチ～

Research frontier for utilization of underground geological environment

西 本 昌 司*

NISHIMOTO Shoji

1. はじめに

私たちの足下でありながら宇宙に匹敵するほど未知の領域が広がるフロンティア、それが「地下環境」である。地下環境とはどのような世界なのだろうか。この疑問を解明しようとする研究が近年盛んである。将来の産業および社会への技術的貢献として「地下環境利用」が期待される社会情勢となりつつあるからに他ならない。ここで言う地下環境利用とは、地上と同じような人間にとって快適な空間を地下につくって利用しようというのではなく、地表の影響を受けない地下環境の特性を活用しようとするものである。だが、これほど「地球環境」が一般的な話題となるような現代にあっても、地下環境について語られることは少ないのではないだろうか。地上と地下の環境は繋がっているにもかかわらず、また、人間の生活環境とも密接に関わっているにもかかわらず、地下のことはあまり話題にあがらないように感じる。その原因の1つには、理科教育における地質情報と社会的要求をつなぐ視点¹⁾の欠落が上げられるかもしれない。

考えてみれば、博物館施設における地質学に関する展示というのは、化石や鉱物標本を中心とする自然史的アプローチがほとんどであった。近年の地球環境への関心の高まりによって、地球システムへの理解が求められるようになり、地球創成期のことがわかってくるようになると、地球と生物進化の歴史に関するテレビ番組等が制作されたり、視聴覚メディアを駆使した地球環境変動や生物進化に関する展示²⁾に力が注がれた。そのような状況下で、自然史系博物館の展示が地球史を中心に展開されることは自然なことであった。しかし、地球科学は、単に過去を探る自然史だけでなく、資源・エネルギー

ギー・廃棄物・土壌汚染・防災などの実社会との関わりが強い分野をカバーする総合科学であることも忘れてはならない。そういう意味で、応用地質学的・地質工学的なアプローチによる展示は、科学から工学を全般的に扱う総合科学館向きであり、恐竜展のような派手さには欠けるものの、次世代へ伝えるべき知識をじっくり見せるような常設展に適したテーマだとは言えないだろうか。

このような考えのもと、名古屋市科学館改築に伴う新展示設計においては、地下環境利用の観点を盛り込むこととした。本文では、現代社会との関わりが強い地下環境利用のフロンティアについて紹介し、新展示企画や説明員研修等に資することとした。

2. 地下環境利用研究の実例

2-1. 地熱発電

地熱発電とは、地下深部に存在する地熱貯留層より地熱流体（熱水と蒸気）を取り出し発電する方法であり、日本における地熱エネルギー資源賦存量は、2000m以浅の浅部地熱系で2207万kW、2000m以深の深部地熱系で4723万kW、合計6930万kWとされる³⁾。日本は世界的に見ても地熱資源は膨大であるにもかかわらず、その発電量（約53万kW）は全発電量の0.32%に過ぎず、インドネシア（2,779万kW）と米国（2,300万kW）に次ぎ世界第3位である⁴⁾。それは、十分な熱水や蒸気が得られない開発リスクが伴うことや、有望な地域が国立公園などに指定されている場合が多く景観や自然保護など開発に制約があるためと考えられる。しかし、火力発電に比べて二酸化炭素排出量が圧倒的に少ない⁵⁾地熱発電は、地球温暖化問題への関心の高まりにより、いわゆるクリーンエネルギーとしてその重要性が再認識されつつある^{6) 7)}。海外では地熱開発が積極的に

*名古屋市科学館学芸課

進められており、フィリピンでは2013年に243万5000kW、インドネシアは2025年に950万kWと高い目標を掲げている⁸⁾。地熱発電に不可欠な高温の地下水が対流する「地熱系」が形成されるためには、熱源だけでなく十分な水の供給と地熱流体が貯留される地下の地質構造（地熱貯留層）が必要である。つまり、そのような地質条件の場所を探査することが欠かせない。

一方、従来の地熱発電に加えて、別の地熱発電も開発されている⁹⁾。高温岩体発電である。英語では「Hot Dry Rock」と表され、その名のとおり高温ではあるが地熱貯留層が発達していないような岩盤のことを指している。地下は深いほど高温となり、深度5 km以浅でも200℃を超えるような花崗岩などの高温岩体は広く存在する。そこで、透水性の低い高温の岩盤に坑井を2つ掘削し、一方から高压の水を圧入することで岩盤中に割れ目をつくり人工的に地熱貯留層をつくる。そして、もう一方の坑井から、熱水や蒸気は地上に噴き出させて発電するという方法である。つまり、地下深部の高温岩体を熱交換器として利用しようとするアイデアといえる。この方法であれば、地熱貯留層を探査する必要がなくなる分、開発リスクを下げられると考えられる。

いずれの方式にせよ、地熱発電の開発には地質学的視点が欠かせない。日本では、岩手県葛根田地域での地下約3 kmに伏在する花崗岩体への掘削で、高温岩体に関する知見が多く得られている⁹⁾。地熱発電設備の長期利用のためには地下深部での透水性の確保が課題となるが、鉱物の沈殿により岩盤内の割れ目や坑井が目詰まりを起こすことがある¹⁰⁾。そこで、地下深部における地下水（熱水）の水質や、その形成要因として岩石と水がどのような反応を起

こすのかといった知識が必要となる。二酸化炭素と岩石の反応速度は高温ほど速く、炭酸塩鉱物が沈殿しやすいことが知られており、二酸化炭素を地熱エネルギーで生じた高温岩体と化学反応させて地下深部の帯水層へ封じ込める技術も研究開発されている^{11) 12)}。このほか、蓄電池生産に欠かせないリチウムを水に溶かして、地熱発電所の排水から回収することも計画されている¹³⁾。このように地熱開発は一石二鳥以上の効果が期待されている。我が国でも地熱発電が見直されつつあり、今後法整備が進めば、その開発が促進されると見られている¹⁴⁾。

2-2. 二酸化炭素地中貯留

温室効果ガスである二酸化炭素排出量を、省エネだけで削減するのは限界があると言われる。解決の鍵とされているのが、二酸化炭素を大気に放出することなく回収・貯留する技術（炭素隔離貯留技術（CCS）= Carbon Capture and Storage）である^{15) 16)}。そのひとつとして、二酸化炭素を地下に安全に閉じ込めようとする「二酸化炭素地中貯留」がある。2005年のIPCC特別報告書「Carbon Dioxide Capture and Storage」においても有用な技術であると評価され¹⁶⁾、地球温暖化に対する有効な対策として期待が強まっている。CCSによる二酸化炭素貯留ポテンシャルは、地中貯留で1,745Gt、海洋隔離で4,000Gt以上が見込まれている¹⁷⁾。しかし二酸化炭素の地中貯留には技術的問題が少なくない。地下における二酸化炭素の挙動には未だ不明の点が多く、地下深部において、二酸化炭素がどのように地下に封じ込められるのか、岩石とどのような反応が起こるのか、地表への漏洩はないのかなど解明すべき課題がある。そこで、我が国においても2000



図1 八丁原地熱発電所の全景。大分県九重町にある九州電力株式会社による日本最大の地熱発電所。総出力は11万kW。

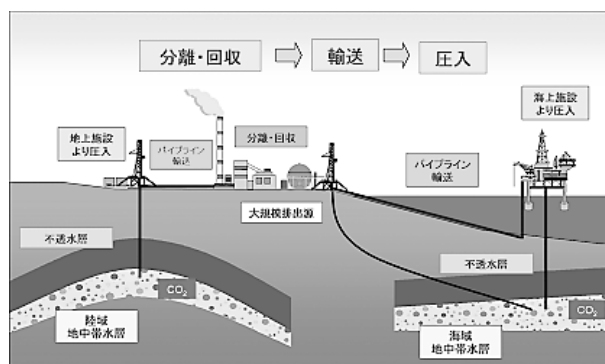


図2 二酸化炭素地中貯留の概念図（RITEウェブサイトより）

年から2008年にかけて新潟県長岡市において、地球環境産業技術研究機構（RITE）などが主体となり、計1万トン以上のCO₂を地下約1,100mの帯水層に圧入する実験が行われ、複雑な地質条件の日本においても二酸化炭素地中貯留が可能なが示された¹⁸⁾。

地中で二酸化炭素がトラップされるメカニズムには、物理（構造）トラップ（physical trapping）、残留ガストラップ（residual-gas trapping）、溶解トラップ（Solubility trapping）、鉱物トラップ（mineral trapping）の4つが考えられている¹⁹⁾。物理トラップは、泥質岩層のような不透水層（キャップロック）の下部など、物理的に貯留される地質構造によって二酸化炭素が閉じ込められるメカニズムである。残留ガストラップは、地下水中のガスが多孔質岩の間隙などの隙間に閉じこめられるメカニズムである。溶解トラップは地下水に溶解することで、鉱物トラップは岩石との反応により炭酸塩として固定されてしまうメカニズムである。

最終的には、長期にわたり安定的に貯留できるような鉱物トラップされるのが理想的であるが、これには時間がかかりすぎる。そこで、残留ガストラップを活用し、その後、地下水に徐々に溶解させて、最終的には鉱物トラップにより固定することが考えられている²⁰⁾。残留ガストラップは、不透水層の下に貯留層が存在すれば可能で、そのような地質構造がCO₂の大量排出源がある地域近傍に多く存在することから注目されている。また、効率的な鉱物トラップのため、高温の地下深部花崗岩体や蛇紋岩にCO₂溶解水を注入させることも検討されている^{11) 12)}。これらの二酸化炭素地中貯留が実用化できれば、地球温暖化対策として有望な技術になるだろう。

2-3. 放射性廃棄物地層処分

原子力発電は、発電時に二酸化炭素を放出せず、わずかな燃料で長期間の発電が可能であり、輸入先の政情が石油と比べて安定であることから、電力安定供給と地球温暖化対策を進める上で必要な発電とされている²¹⁾。しかし、核燃料使用に伴い

放射性廃棄物が発生する。今後の原子力政策の如何を問わず、すでに半世紀に及ぶ原子力発電によって放射性廃棄物は蓄積しており、その処分は解決すべき課題である。

我が国における原子力発電所から発生する放射性廃棄物は「高レベル放射性廃棄物」と「低レベル放射性廃棄物」に分けられる。高レベル放射性廃棄物は、使用済燃料から再利用のためウラン・プルトニウムを回収した後に残る廃液であり、その処分方法として最も有力とされているのが「地層処分」である。地層処分では、放射性廃棄物をガラス固化させた後に30～50年専用の施設で貯蔵・冷却した後、地下300メートル以深の地下深部に埋設することで、長期にわたって人間の生活環境から隔離する。このために、オーバーパックや緩衝材といった「人工バリア」と、地下環境による「天然バリア」とを組み合わせた「多重バリア」を構築しようと考えられている²²⁾。天然バリアにおいては、岩石の吸着・固定といった機能を活用する。

地層処分の安全性を担保するためには、地下環境を放射性元素がどう移動しうるのか²³⁾、地層処分後の長期的な安定性についても、地層処分後に天然バリアとして機能するかどうかという視点からの地質学的研究²⁴⁾が不可欠となる。このため、1980年代頃から世界各国でそのような研究が始められ、日本でも2000年代になって地下研究施設の建設が日本原子力研究開発機構（JAEA）によって始められた。地層処分の対象となりうる地質体を大別すると結晶質岩（花崗岩などの火成岩類）と堆積岩になる。そこで、前者については岐阜県瑞浪市に、後者については北海道幌延町に、それぞれの地下環境を調査研究する「地下研究所」が建設されている。そこで計画的に得られた貴重な試料や観測データを用いる

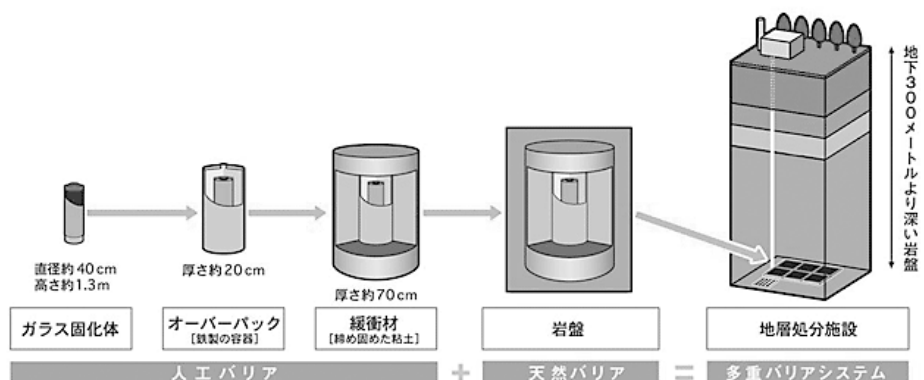


図3 放射性廃棄物地層処分における多重バリア（NUMOウェブサイトより）

ことで、地下深部における岩石と水の反応プロセスや断層・割れ目帯における物質移動に関する地球化学的・水理学的研究はすでに始まっている。世界的にも、変動帯における地下研究施設はこの2カ所のみであり、その成果は、単に地層処分のみならず、変動帯の地下環境システムの解明に貢献するだろう。

2-4. 石油・液化石油 (LP) ガスの地下備蓄

資源に乏しい日本において消費される石油や液化石油 (LP) ガスは、ほとんど輸入に頼っており、その多くが中東地域に偏っている。これらの供給安定性を確保するため、石油とLPガスの備蓄が行われている。地下備蓄については、石油天然ガス・金属鉱業資源機構 (JOGMEC) が行っており、石油地下備蓄は、岩手県久慈市、愛媛県菊間市、鹿児島県串木野市の3地点で1994年より開始、LPガスの国家備蓄基地は岡山県倉敷市と愛媛県今治市の花崗岩中に建設されている^{25) 26)}。地下備蓄は、花崗岩などの強固な岩盤に空洞 (トンネル) を掘削し、その空洞をタンク代わりにする方法である。空洞内に入れた石油やLPガスは、そのまわりにある地下水の水圧で閉じこめられる (水封式)。LPガス地下備蓄の場合、貯蔵圧力を10気圧程度にして液化させるため、地下約150m以上の大深度に掘削する必要がある。地上タンクに比べ大容量の備蓄が可能であり、広大な敷地を必要としないことなど環境保全の面や経済性の面でメリットがある。トンネル壁面は素掘りのままに残され、空洞が長期にわたり安定性を維持できることが必要となる。このため岩盤の力学的安定性が重要であり、実験室内での高圧実験をもとに、断層や節理を含めた割れ目の形態と岩盤物性が研究されている²⁷⁾。

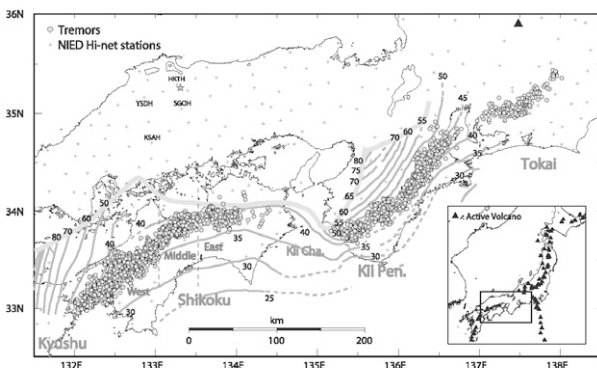


図5 2001年の深部低周波微動の震源分布³⁰⁾



図4 LPガス地下備蓄基地の建設現場 (愛媛県今治市, 2008年12月撮影)

2-5. 地震波等の観測

1995年の兵庫県南部地震以降、日本における地震観測網は急速に整備された²⁸⁾。日本における詳細な微小地震の分布やその活動を監視する目的で、防災科学技術研究所 (NIED) により運営されているのが、高感度地震観測網 (Hi-net) である。人間が感じるができない極く小さな地震波を感知することができ、地表付近で生じる人為的なノイズをできるだけ避けるため、地下深部の安定した地盤上での観測が必要である。そこで、深さ100mのボーリング孔の底部に地震計などの計器を設置し観測を行っている。2006年からは、産業技術総合研究所 (AIST) が地下水等総合観測点を深さ600m程度の地下深部に設置している²⁹⁾。

このような地震観測網が整備されたことにより、これまで認識されていなかった地球科学的現象が発見された。微弱な振動が長時間 (数十秒から数日) 継続する現象「深部低周波微動」である。西南日本の沈み込み帯で発生している深部低周波微動の震央分布は、沈み込むフィリピン海プレート面と平行に深さ30km付近に帯状となっていることと、地域によって異なる周期 (3~6か月) で繰り返し発生しているらしい³⁰⁾。深部低周波微動は、東海地方の地下に沈み込んだフィリピン海プレートと陸側プレートの境界面で短期的スロースリップイベント (ゆっくりすべり) の発生と同期しており、浅部では付加体変形、深部では沈み込んだフィリピン海プレートの海洋地殻または付加体堆積物の脱水分解と関係しているものと考えられている^{31) 32)}。また、体内をCTで見るように地球内部の三次元構造を画像

化する地震波トモグラフィーは、地震観測網によるデータを組み合わせることで分解能が向上し、沈み込んだ太平洋プレートが、日本海溝・伊豆小笠原海溝会合点下で（近畿地方下深さ約300kmから黄海下深さ約700kmにわたり）裂けていることも示された³³⁾。

こうした地震波による日本列島地下構造の推測が進むにつれ、「蛇紋岩」という岩石が注目されてきた。蛇紋岩は、マントル物質（かんらん岩）より粘性が低い（変形しやすい）特徴があり、地下における蛇紋岩の分布が地震の発生しやすい地域と関連している可能性がある³⁴⁾ からだ。日本列島下のマントルはかんらん岩なのか蛇紋岩なのか直接確認できれば、地下構造推測の確実性をあげることができるはずである。観測・実験やモデル計算だけでは、複雑な地下環境を単純化しすぎてしまう恐れがあり、地下深部の岩石を直接採取し観察できることが望まれる。

そこで、巨大地震の発生場所を構成する掘削するプロジェクトも始まっている³⁵⁾。巨大地震が起こっている場所の地質体を観察することで物性を把握し、歪みなどの時間変化を長期観測しようとするものである。ここで活躍するのが海洋科学技術機構（JAMSTEC）の地球深部探査船「ちきゅう」である。海底下数千メートルを掘り抜くため、掘削用ドリルパイプの外側にライザーパイプを配置し、特殊な粘性流体である泥水（でいすい）を循環させながら孔内圧力を高め掘削する（ライザー掘削）。近い将来、地震発生帯の岩石や地層を目にすることができるようになるだろう。そうすれば、地下環境が詳細に理解できるようになり、プレート運動や地震発生メカニズムの解明に貢献されるものと期待される。このように、観測データの解析を実験やモデル計算と組み合わせて、プレート沈み込み帯における地下深部の流体循環を含めた付加体形成過程や地震発生メカニズムの解明が進められている。日本列島の成り立ちや地球史解明の点においても、大陸地殻形成メカニズム（たとえば「サブダクションファクトリー³⁶⁾」）の検証といったことに貢献していくと思われる。

2-6. 地下資源探査

地下環境利用と言えるものではないが、地下環境システムの解明に役立ち、社会的関わりの強い地下

資源探査についても触れておきたい。地下資源として有用な鉱物が濃集した部分を「鉱床」という。鉱床ができるためには、特定の元素が集中する何らかの自然現象があったはずである。たとえば、日本唯一の金属鉱山である菱刈鉱山のようなタイプの金鉱床は、金を溶かしこんでいる熱水が割れ目を伝って地表近くに上がってきて、金の溶解度が低下したところで金を沈殿させたものと考えられる³⁷⁾。金鉱床がどのような地質構造のところにあるのか、鉱床に見られる鉱物の特性などからその成因がわかるようになると、それらの知見を活かして金鉱床の探査が行える。

最近では、従来砂岩中にあるとしか考えられていなかった石油が、花崗岩の割れ目中から発見され³⁸⁾ 注目されている。石油や天然ガスはプランクトンなどの遺骸からできると考えられており、もともとは有機質に富んだ泥岩に含まれる。これが分離して移動し、不透水層の下にある空隙の多い地層中にトラップされている。地層中で生成する石油が、マグマが固結してできる花崗岩中にあるとは到底考えられなかった。石油がどのようにして花崗岩中に移動して貯留されているのか、そのメカニズムは今のところ謎である。それが分かれば、今後の石油探査に生かせるのはもちろん、地下環境において、流体がどのような所にトラップされるかという点で二酸化炭素地中貯留技術にも応用できると考えられる。

2-7. 地下生物圏

地下生物圏の把握も重要な課題である。これまで、生命と地球環境の関係は地球の表層のみを対象とし

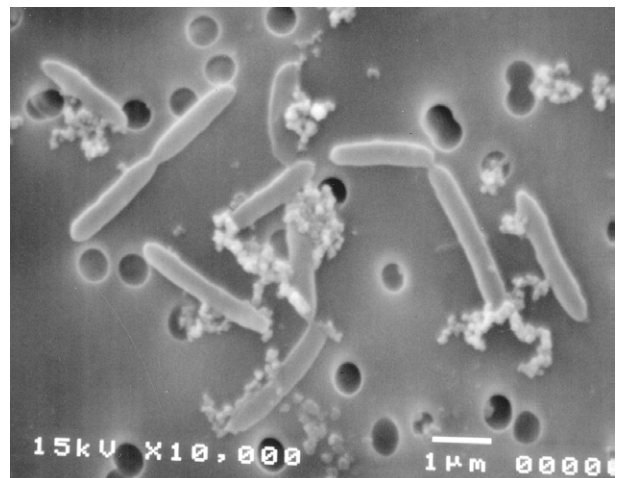


図6 地下深部（深度153m）の地下水から分離された硫酸還元菌の電子顕微鏡写真⁴²⁾

て考えられてきた。ところが、海底下を含めた地下環境に多様な微生物が生息していることが明らかになってきている^{39) 40)}。新生物の発見などもあって、注目の研究分野である。地球深部探査船「ちきゅう」などで採取された海底堆積物の研究からは、海底下では数が少ないと考えられてきたアーキア(古細菌)が大量に生息していることが発見されている⁴¹⁾。しかし、その存在量や多様性、生命の起源や地球環境への寄与の程度などについては不明の点が多く、無酸素で栄養分が少ない高圧高温条件下に生息する生物は、地表生物とは異なる生態だと推察される。

地下の微生物は、硫酸イオン、硝酸イオン、鉄、メタン、マンガン、二酸化炭素などの無機物を「エサ」としている⁴²⁾。このため、地下物質の酸化・還元ならびに溶解・沈殿反応を促進・後退させるなど、地下環境に多大な影響を与えていると考えられ^{40) 42)}、土壌や地質汚染の改善や地層処分に応用できる可能性がある。また、海底資源として注目されるメタンハイドレートの生成にも重要な役割をしている可能性があり、資源探査に有用な知見が得られるかもしれない。地下生物圏の研究は、未知の微生物を発見・記載するという基本的なところから始まったばかりであるが、今後は遺伝子解析などの手法も加えられ、地下微生物による地下環境への影響が明らかにされていくことだろう。

3. 地下環境利用に活かす研究

これまで述べてきた地下環境利用のための研究は、どれも地下環境システムを知ろうとするものである。言い換えれば、地下環境にある様々な機能(「地下環境機能⁴³⁾」)を理解し、それをうまく活用しようとしているのである。その研究内容は、地質構造、物質循環、水/岩石反応の3点に集約されるだろう。研究対象物は、地下環境のほとんどを構成する岩石と水が主となる。

地質構造を調査するという事は、岩石がどのような広がりを持って分布しているのか、地下水の通り道となる割れ目が発達しているのか、断層があるのかなど、地下環境全体の3次元的に知るということである。それは地下環境の形成履歴の推察につながる。

物質循環の研究は、大気や海洋との関連を含め、地下環境システム全体を把握するうえで不可欠である。地下環境における物質移動を担うのは短期的に

はほとんど地下水によると考えられるので、熱水を含めて地下水が、どこをどのように流れているか知ることが重要となる。生物活動も物質循環に影響している。

岩石と水との反応(水/岩石反応)は、岩石が変質や溶解などによって元素が移動し物性が変化するということであり、地下の物質移動を規制するものである。水に溶けた元素は、移流によりすみやかに移動したり、特定の鉱物に吸着したり、あるいは割れ目を移動後に沈殿して鉱物結晶をつくるだろう。地下水や熱水の化学的特性(溶存元素/pH/Ehなど)を決めるのは、水/岩石反応の結果と考えられる。このため、岩石中に生じた割れ目と地下水との反応プロセス解析といった研究⁴⁴⁾が、様々な条件下における水/岩石反応を理解するために行われている。

これらの調査のために有効なのは、ボーリングや坑洞掘削を行うことにより直接観測や試料採取することである。これにより地下水の水位、水質、湧水量、透水係数などや、岩石の構成鉱物や組織、空隙率や圧縮強度などの物性データを得ることができる。やや広域的には、割れ目頻度も測定できる。放射性元素をトレーサーとして用いた岩石中の浸透や拡散による物質移動速度を測定することも可能となる。このようにボーリングや地下研究施設は、地下環境を研究するうえで極めて有効であり、いわば「地下環境ののぞき窓」となる。これらに合わせて必要となるのが、室内実験やモデル計算に基づくシミュレーションである。ボーリングコアの迅速な分析と解析技術の開発も合わせて進める必要があるだろう。

ところで、地下環境の変化は地表環境に比べると緩慢であり、長期にわたる環境変化を調べる必要がある。とくに、二酸化炭素地中貯留や放射性廃棄物地層処分などでは、数百年から数万年もの長期間にわたり二酸化炭素や放射性物質などが地中に留まっていることを示す必要がある。しかし、それを実験や観測だけから検証することは不可能だ。そこで、過去に発生した地下環境における水/岩石反応や物質循環などの現象を観察することで、自然界の元素移動を理解しようという研究が行われている。つまり、自然現象を、自然が様々な条件下で“実験”した結果として捉え、観察・検証し、地下環境利用に応用するのである。ひとことで言うなら「自然界の

類似した現象に学ぶ」ということであり、このような研究手法を「ナチュラルアナログ」と呼んでいる^{43) 24)}。例えば、太古の地下でウラン核融合が発生したことを示す地質（天然原子炉）を観察することで、放射性廃棄物地層処分の安全評価に活かそうとする研究⁴⁵⁾などがある。このような研究は、地質から読み取れる地下の履歴を、人間社会の未来に活かそうとするものと言える。

未来の地下環境研究は、さらに地下深部の高温高压の世界へも広がっていくに違いない。私たちがすむ地球表層は、地球全体からすれば極めて限定的な環境にすぎず、長期的に見れば、地球内部の活動に支配されている。したがって、地球全体のシステムを理解するためには、地球の大部分を占める固体地球の理解が欠かせない。だが、地下深部の高温高压条件下では、地質構造、物質循環、水／岩石反応、いずれをとっても、常温常圧下と比べてはるかに異なることが推測される。直接観察できない地下深部環境の研究は、地下環境の知見とあわせて、地球の成因論やテクトニクスとも絡めながら進展していくに違いない。

4. 地下環境研究の難しさ

ここまで述べてきたような研究には地下ならではの難しさが伴う。

まず、複数の現象が重なり合って形成された地質構造が複雑なことである。とくに新しい造山帯にあたる日本列島の地質は極めて複雑で、安定大陸の比ではない。従来の地質学では、地表踏査を行なうことで地下構造を推測していたが、日本では地表の岩石の風化が激しく、国土が森林に覆われ露出も少なく、地質調査自体が困難であった。それでも、地質調査所（現在の産業技術総合研究所地質調査総合センター）や大学等の研究者による長年にわたる調査により、詳細な地質図が全国的に作成されているのは幸いなことであった。おかげで、地下の地質構造を予測しやすい。だが、地下環境は、深くなればなるほど地表踏査からは想像もできない構造をなしていることも多い。

次に、地下環境が目に見えない世界であることである。見えない地下構造を可視化するため、地震（弾性波）探査や地中レーダーといった物理探査や、室内モデル実験に基づくシミュレーションなどが有効な手段となっている。もちろん、直接地下の岩石

を見たり観測したりできれば、それに超したことはない。だが、直接地下環境を観察・観測するためのボーリング掘削や地下研究施設建設は、深くなればなるほど技術的な困難さが増すだけでなく、時間もコストも膨大となる。

そして、地質があまりに長期にわたる自然現象の結果であるため、それ自体を実験で再現することが不可能であることだ。これについては、地球の歴史に学ぶしかない。掘削や分析の技術がいくら発展しても、岩石に刻まれている情報を解読することは、結局経験を積んだ研究者にしかできない。

このような困難があるからこそ、地下環境研究は未開拓の分野として残されてきたとも言える。地下深部掘削や地下研究施設による直接的な観察・観測と、それらに基づくモデル実験やコンピュータシミュレーション等を組み合わせた研究および技術開発によって、それを乗り越えるしかないようだ。そのためには広範囲にわたる科学者・技術者が結集することが不可欠であり、まさに研究のフロンティアと言えるだろう。一方で、自然に対する観察眼を持つ人材の持続的な育成も欠かせないことは言うまでもない。

5. おわりに

地下環境研究の現場に立ってみると、その研究と地球史の研究が表裏一体であることがわかる。過去を解明していくことで、未来が拓かれているのだ。そして、水の挙動が、地下深部でさえも重要な役割を果たしているということに、地球がどこまでも水惑星であると感じさせられる。将来人類が月や火星で活動するようになれば、これらの研究成果は間違いなく応用できるはずだ。地下環境研究のフロンティアは、地球だけでなく宇宙にもつながっている。

このように未来を拓いている地下環境研究も、その研究対象は地下深部から掘り出した地味な岩石がほとんどである。展示化にあたっては、それらから何が読み取れるのかという科学的視点をどう伝えるかが課題となる。地下環境研究においてモデル実験やシミュレーション技術が活用されているように、展示化においても実物標本とともにそれらを効果的に活用することで、少しでも魅力的な展示としたいと思う。

地下環境利用をテーマとした常設展示は日本初と

思われ、科学館展示として先進的な内容と言って良いだろう。その企画にあたっては、国内外の関係機関より書き切れないほど多くの研究者・技術者の方よりご指導いただいた。とくに、名古屋大学博物館吉田英一教授には先端研究の一端に触れさせていただく機会を多く作っていただいた。京都大学大学院地質工学研究室の山田泰広准教授には二酸化炭素地中貯留（残留ガス実験装置）の展示化にご協力いただいた。乃村工藝社の柳原朋子氏、小林敬之氏をはじめ、プランナー・デザイナーの方々には展示の具体化に知恵を絞っていただいた。ここに、地下環境利用のフロンティア研究を進める多くの研究者や技術者のご尽力に心より敬意を表するとともに、将来の社会基盤を創り出すステップとなるであろう彼らの地道な研究内容が広く一般に知っていただけるような展示化を図ることで謝意を表したい。

参考文献

- (1) 横田修一郎 (2008) 地質学と社会の交差点－“応用地質学”の位置づけを考える。日本応用地質学会中国四国支部 講演要旨。
- (2) 高橋信裕 (2006) 博物館と展示の類型－国立のミュージアムを事例に－。文化環境研究所ジャーナル 9 月号。
- (3) 野田徹郎 (1990) 全国地熱資源総合調査の経緯と NEDO による最近の資源量評価 地質調査所月報, 41, 189-190.
- (4) 伊藤久敏, 海江田秀志 (2003) 地熱発電開発の現状。未利用地熱資源の開発に向けて－高温岩体発電への取り組み－, 電中研レビュー 49, 8-15.
- (5) 電力中央研究所 (2000) 発電方式別にみた CO₂ 排出量の特徴。電中研ニュース 338.
- (6) 菅原由依子 (2009) Technology 技術事始／地熱発電 米国中心に海外で開発ラッシュ 蓄積された日本技術が開花するか。日経エコロジー。
- (7) 新妻弘明ほか (2002) 企画調査研究「地球環境適応型地熱開発戦略」報告書。東北大学。
- (8) 海江田秀志, 浅沼 宏 (2008) 高温岩体発電技術の海外の現状。日本エネルギー学会誌 87, 834-839.
- (9) Muraoka et al. (1998) Deep geothermal resources survey program: igneous, metamorphic and hydrothermal processes in a well encountering 500 °C at 3729 m depth, kakkonda, Japan. *Geothermics* 27, 507-534.
- (10) Savage, D. et al. (1987). Hydrothermal alteration of granite by meteoric fluid: an example from the Carnmenellis Granite, United Kingdom. *Contrib. Mineral. Petrol.* 96, 391-405.
- (11) 地球環境産業技術研究機構 (RITE) (2008) 平成 19 年度プログラム方式二酸化炭素固定化・有効利用技術開発 (ジオリアクターによる排ガス中の CO₂ の地中直接固定化技術開発) 成果報告書。
- (12) 上田晃 (2009) ジオリアクター：地熱を利用した CO₂ 固定化研究。岩石鉱物科学 38, 122-128.
- (13) Bourcier, W. L., Lin, M., Nix, G. (2005) Recovery of Minerals and Metals from Geothermal Fluids. Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-CONF-215135.
- (14) 江原幸雄 (2009) わが国の地熱エネルギー利用の現状と課題。日本地球惑星科学連合ニュースレター - vol. 5, 6-7.
- (15) Okagawa, A. (2008) Comments on Endogenous progress and possibility of policy intervention to technological research and development. 内閣府経済社会総合研究所「ポスト京都議定書」の政策課題に関する国際共同研究 研究報告会。
- (16) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2005. In: Metz, B., Davidson O., de Coninck, H.C., Loos, M., Meyer, L.A. (Eds.), IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, pp 431.
- (17) Schrope, M. (2008) Going underground. *Nature Reports Climate Change* 154-155.
- (18) 久留島守広 (2008) CO₂ 回収・地中貯留 (CCS) 技術の現状と展望。NEDO 海外レポート No.1020.
- (19) 薛自求, 中尾信典 (2008) CO₂ 地中貯留～世界各国の技術動向と政策動向および日本の課題～。地学雑誌, 117, pp.722-733.
- (20) Juanes, R., E. J. Spiteri, F. M. Orr Jr., and M. J. Blunt (2006), Impact of relative permeability hysteresis on geological CO₂ storage, *Water Resour. Res.*, 42, W12418, doi:10.1029/2005WR004806.
- (21) 内閣府原子力委員会 (2005) 原子力政策大綱 (<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/taikou/ket-tei/siry01-3.pdf>)
- (22) 原子力発電環境整備機構 (NUMO) (2003) 地層処分－その安全性。p150.
- (23) Miller, W., Alexander, R., Chapman, N., McKinley, Smellie, J. (2000) *Geological Disposal of Radioactive Wastes and Natural Analogues*. Pergamon.
- (24) Yoshida, H. et al., (2009). Retardation capacity of altered granitic rock distributed along fractured and faulted zones in the orogenic belt of Japan. *Engineering Geology* 106, 116-122.

- (25) 大竹健司, 皆川宗仁 (2001) 周辺環境に配慮した LP ガスの水封式地下岩盤貯槽方式 - 岡山県倉敷地点 -. 石油/天然ガス レビュー 2001-5,
- (26) JOGMEC (2007) エネルギーの安定供給を支える 国家石油ガス備蓄波方基地建設, *JOGMEC NEWS* vol.11.
- (27) 加藤元彦, 前島俊雄, 中島秀一 (2007) 地下 150m に LPG 岩盤貯槽を建設, 資源土木, 2007 年 3 月号, 48-53.
- (28) Okada, Y. et al. (2004) Recent progress of seismic observation networks in Japan-Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net. *Earth, Planets Space*, 56, XV-XXVIII.
- (29) 小泉尚嗣ほか, 2009. 東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測点整備について. 地質ニュース 662, 6-10.
- (30) Obara, K. (2002) Nonvolcanic Deep Tremor Associated with Subduction in Southwest Japan. *Science*, 296, 402-403.
- (31) 小原一成 (2003) 深部低周波微動の時系列的特徴 - トリガー現象と周期性 -. 地学雑誌 12, 837-849.
- (32) 小原一成 (2009) フィリピン海プレート沈み込みに伴う浅部および深部スロー地震群. 地質学雑誌, 115, 437-447.
- (33) Obayashi, M., Yoshimitsu, J., Fukao, Y. (2009) Tearing of Stagnant Slab. *Science* 324, 1173 - 1175.
- (34) 瀬野徹三, 山崎雅 (2005) 西南日本前弧ウエッジマントルの蛇紋岩化の地域性 - テクトニクスに対して持つ意味 -. 月刊地球 27, 472-480.
- (35) 倉本真一 (2009) 南海トラフ地震発生帯掘削計画の概要. 地質学雑誌 115, 483-487.
- (36) Tatsumi, Y. (2005) The subduction factory: How it operates in the evolving Earth. *GSA Today* 15, 4-10.
- (37) 森下祐一 (2004) 北薩・串木野地域における一つの金鉱床成因研究物語. 地質ニュース 599, 59-68.
- (38) Kim Anh ed. (2008) *Fractured Basement Reservoir*. Science and Technics Publishing House. p.438.
- (39) Pendersen, K. (2000) Exploration of deep intraterrestrial microbial life: current perspectives. *FEMS Microbiology Letters* 185, 9-16.
- (40) Konhauser, K. (2006) *Introduction to Geomicrobiology*. Blackwell Publishing, p.440.
- (41) Lipp, J. S., Morono, Y., Inagaki, F., Hinrichs, K. (2008) Significant contribution of Archaea to extant biomass in marine subsurface sediments. *Nature* 454, 991-994
- (42) 天野由記 (2007) 地底生物の世界. *Woman's Voice* 2, 8-9.
- (43) 吉田英一 (2003) 地下環境機能 - 廃棄物処分の最前線に学ぶ -. 近未来社. p.174.
- (44) Nishimoto, S., Yoshida, H., (2010) Hydrothermal alteration of deep fractured granite: Effect of dissolution-precipitation process. *Lithos* 115, 153-162.
- (45) (財) 原子力環境整備促進・資金管理センター (2005) 自然が生み出した原子炉.