

化石化に学ぶ長期岩盤亀裂シーリング剤（コンクリーション化剤）の開発と実用化



吉田 英一
Yoshida Hidekazu

1 はじめに 長期岩盤亀裂シーリングの必要性

高レベル放射性廃棄物の地下隔離（地層処分）やカーボンニュートラルに向けた二酸化炭素の地下貯留等、深さ数百 m～数 km の地下環境の活用が具体的に進められている。これらの特徴は、隔離期間が数百年以上、放射性廃棄物の場合は数万年以上と超長期に及ぶことである。

ではなぜ、地下環境なのか？地下環境は、地表環境に比べ物質循環・反応が緩慢で、かつ物理的に地表の生活環境（生物圏）から遠ざけられることにある。また二酸化炭素のような気体であっても、天然ガスが地下に保存されているように、地下岩盤中に長期に隔離できることを天然現象は示してくれている¹⁾。

しかし、必ずしも地下であればどこでもいいわけではない。岩盤中には亀裂や断層が存在し、これらを介して放射性同位元素や二酸化炭素が漏れるリスクを孕む。そのリスクを低減させるためには、これらを長期にわたってシーリングすることが必要となる。

特に「地層処分」においては、廃棄物に地下水が接触し、溶出した放射性同位元素が下流側へと広がらないように地下水の動きを抑制することが求められる。一方で、現在工学的に用いられているセメント系地下水シーリング（グラウチング）材では、注入後のカルシウムイオンの溶脱に伴い、シーリング状態が時間と共に損なわれ²⁾、必ずしも長期のシー



図1 保存良好な岩カニを内包する球状コンクリーション
約 1600 万年前の地層から産出（瑞浪化石博物館蔵）。横幅約 15cm

リング効果が担保できる状況にはない。同様の課題は、国内のみならず原子力エネルギーを活用している欧米でも既に認識されているものの、未だ長期的シーリングを担保できる技術、素材の開発には至っていないのが実状である。

このような背景から、地層処分では、セメント系材料による放射性元素を封じ込めるとするバリア機能は期待されていない。つまり地層処分において、バリア機能をより高めるには、セメント系素材よりも長期に渡って地下水の動きを抑制することのできるシーリング（バリア）剤の開発が必要である。それには長期に渡って地下環境においても溶解度が低く、安定に存在し続ける素材（鉱物）を用いることが望ましい。

2 球状コンクリーション

このような必要性に基づいて、着目したのが‘コンクリーション’である。コンクリーションには、主に Ca, Si, Fe を主成分とするものがある。その中でも CaCO_3 (カルサイト) を主成分とするコンクリーションは、国内外の海成堆積岩中から普遍的に産出し、球状で緻密かつ保存良好な化石を内包することから特に古生物学の分野では 1 世紀以上も前から知られ、化石研究における重要な役割を担ってきた (図 1)。しかし、保存良好な化石に着目するあまり、なぜコンクリーションは球状なのか、なぜ CaCO_3 が濃集するのか、なぜ内包される化石は保存良好なのか、といった‘化石化’も含めた基本的メカニズムの理解が不十分であったことは否めない。

筆者ら研究グループは、その形成メカニズムを明らかにすることを目的に、これまで数百を超える国内外の様々なサイズの球状コンクリーションの調査・分析を行い、以下のことを明らかにした^{3,6)}。その結果をまとめると；

- 1) 球状コンクリーションの主成分となる炭酸カルシウムの炭素成分は、内包される生物の有機炭素由来であること
- 2) 球状コンクリーションは、海底堆積物中に埋没した生物の腐敗に伴う有機酸の拡散と、海水中のカルシウムイオンとの過飽和・沈殿反応によって成長すること
- 3) 過飽和・沈殿反応に伴う成長速度は非常に速く、直径がメートルサイズのものでも数年～数十年で形成されること

といったことである。つまり、コンクリーションの形成・成長は、生物遺骸から放出される炭酸とカルシウムイオンとの反応に伴う CaCO_3 (カルサイト) の急速な碎屑物粒子間セメンテーションによる。その結果、地下水や地表水の浸透が抑制 (バリア機能)



図 2 コンクリーション化剤

液体タイプとマイクロパウダータイプの 2 種類がある

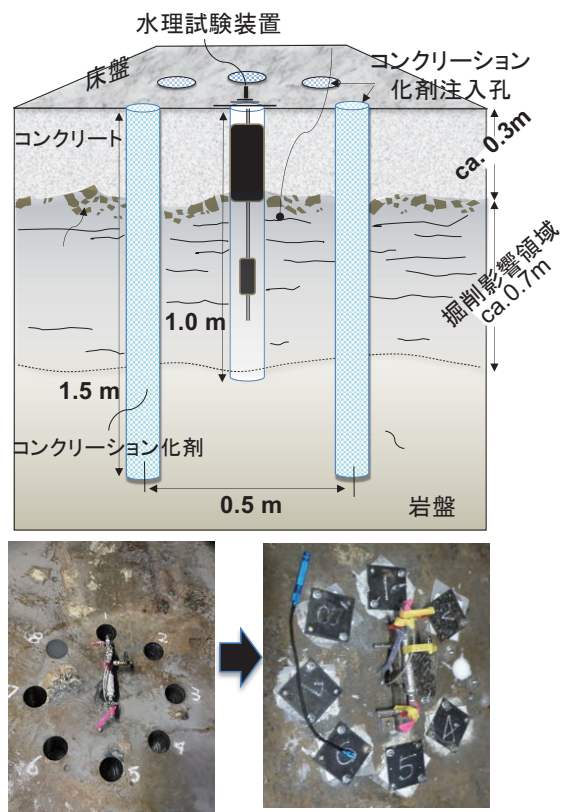


図 3 地下 350 m での原位置実証試験レイアウト

され、数十万年、数百万年以上もの長きに渡って、生物殻がコンクリーション中で風化・変質することなく保存される。これがコンクリーション中の‘化石’が保存良好な所以である。

3 コンクリーション化剤の開発と実用化実験

この特性を応用し、名古屋大学と積水化学工業は人工コンクリーション化剤‘コンシード®’ (特許第 6889508 号；7164119 号；7215762 号等) を数年かけて開発してきた (図 2)。現在、そのシーリング効果の実証試験を、日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター (北海道幌延町) の地下 350 m の実験坑道で実施している。

地層処分の場合、岩盤中の亀裂や断層破碎帯のシーリングが重要であることを述べた。地下研究所では、その背景のもと岩盤中の亀裂及び断層を対象に、コンクリーション化剤による長期シーリング実験を実施しており、現在、開始から約 5 年となる。図 3 は、地下 350 m の実験坑道での床盤直下に広がる亀裂を対象としたコンクリーション化実証試験の

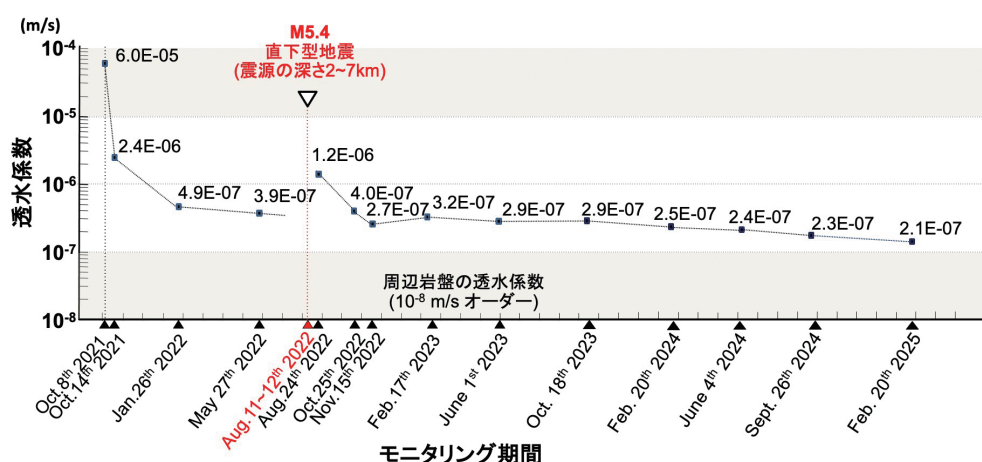


図4 コンクリーション化剤による岩盤亀裂シーリング実証実験結果

レイアウト図を示す。実験トンネル周辺の床盤岩盤中には、約1m区間に20~30本もの亀裂が生じている。これらは、地下トンネルを掘削することによって、応力がトンネル周辺に集中し形成されるものである。その亀裂密度は、周辺岩盤の自然状態の密度の20~30倍にもなる。このようなトンネル周辺の亀裂形成は、地層処分の地下坑道に限ったことではない。一般的な道路や鉄道等でも、岩盤中にトンネルを掘削すれば地圧により必ず亀裂は生じ、これらの亀裂ネットワークを介して地下水が流入し、トンネル周辺のセメントを溶出・劣化させることとなる。また地層処分の場合、これらの地下水が廃棄物と接触し、放射性元素を溶出させる原因ともなりかねない。つまり、この亀裂ネットワークをシーリングし、長期にわたって可能な限り地下水の動きを抑制することが重要になる。

地下研究所のトンネルの場合、掘削にともなうできた亀裂ネットワーク部分の透水性は、周辺岩盤部分よりも100~1000倍も高くなる。これは単位時間における地下水の透過量（フラックス）が岩盤部分よりも100~1000倍も多くなることを意味する。もしそこに廃棄物が存在した場合、それだけ地下水と反応するリスクが高くなることを示す。したがって、できれば周辺岩盤と同等レベルまで透水性を低下（改善）させることが望ましい。

では結果はどうだったのか。現在も継続中の現時点での試験結果を図4に示す。縦軸が透水係数、横軸が実施期間である。床盤岩盤亀裂ネットワーク部分の透水係数が、半年で2~3オーダー低下し、周

辺母岩と同レベルの透水性にまで修復されていることが分かる⁷⁾。

またこの実験期間中に、地下研究所付近の震源の深度が2~7kmと推定される最大M5.4をはじめとする直下型地震が2日間で11回発生した。その地震動の影響によって1オーダー透水性が上昇したものの、その約3か月後には地震発生前の状態に戻ったことが確認された。これは、地震によって亀裂が開いたものの、コンクリーション化によって再度シーリングされたことを示すものである。今回の地震は、千載一遇とも言える偶然の自然現象であるものの、それによってコンクリーション化剤には、地震後の自己修復機能があることも確認することができた⁷⁾。

岩盤中の重要な地下水の水みちである断層についても、これまで約3年に渡った実験を行っている（図5）。現状、岩盤中亀裂シーリングと同様、透水性が周辺岩盤と同レベルにまで低下してきていることが確認されている。

断層中の水みちは、一般的に細かい亀裂と圧砕された岩石粒子（一部粘土状のガウジ）による微細空隙が混合し、複雑な組織を有する。そのような複雑なミクロンスケールの微細構造の空隙であっても、コンクリーション化（ CaCO_3 ：カルサイトの生成と充填）が進行し、空隙を閉塞させ、周辺岩盤と同等の透水レベル（ 10^{-8} m/s ）まで低下させ得る働きを有することが実験から明らかとなった⁸⁾。このような長期的かつ持続的なシーリング効果は、従来のセメント系グラウト材等では認められない現象である⁸⁾。

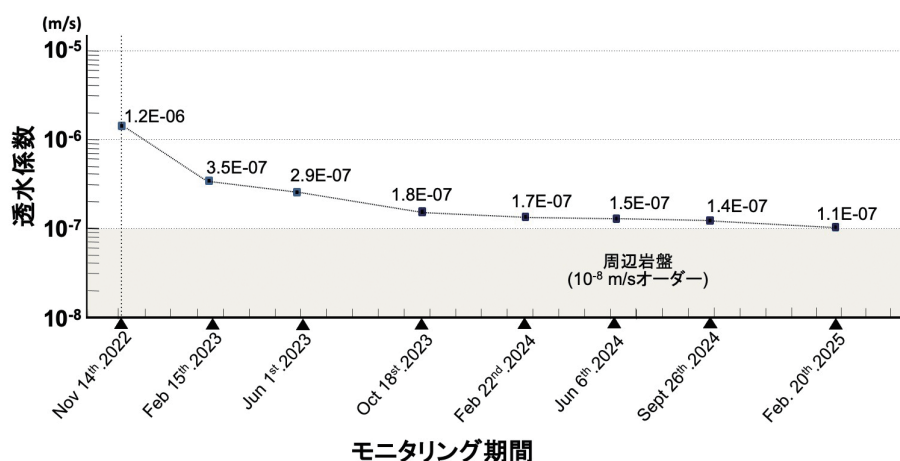


図5 コンクリーション化剤による岩盤中断層のシーリング実証実験結果

4 今後の展開

現在、地層処分に関する地下岩盤シーリングについては、スウェーデンや韓国も関心を示しており、現地での実験研究を進めていく予定である。また地下環境利用に伴う地下水水みちの長期的シーリングのニーズは、地層処分に留まらず、二酸化炭素地下貯留の他、世界中に存在する数十万本もの石油廃孔のシーリングも含まれる。これらの廃孔からは温暖化の原因ともなるメタンガスが漏出するため、恒久的なシーリングが課題となっている。

これらの長期的なシーリングのみならず、既存トンネルの掘削や修復・維持も重要であり、修復やメンテナンスにかかるコストダウンは現在のコンクリート社会においては必須と言える。その一環として、セメントとコンクリーション化剤との組み合わせによって、亀裂等を自己修復するコンクリートの開発も進められている。

更には、これらの工学的分野への応用だけでなく、遺跡文化財としての石材や煉瓦等の修復及び維持への適用性実験も実施中である。特に地表に露出し風雨に曝される部分は、雨水との反応によって亀裂が生じやすくなる。その亀裂をシーリングし、未来に向けて文化財を長期に維持・保存するうえで、‘化石化’つまり「自然」に学んだコンクリーション化技術は、そのニーズに十分に答えることのできる新技術だと言える。

現在、これらの多岐にわたる実証試験の成果や情報を共有し、実用化するための「コンクリーション

化技術応用研究会」を立ち上げ、異分野間の情報共有を進めている。今後、これらの国内外での知見を統合し、できるだけ近い将来に読者の皆さんこの技術を届けられればと考えている。

謝辞

本研究は、日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センターとの共同研究及び中部電力との特定テーマ公募研究による成果を含んでいる。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) OECD/NEA. *The forum on stakeholder confidence report on dialogue in the long-term management of radioactive waste*. OECD Publishing Paris (2021)
- 2) 日本原子力研究開発機構, 平成 28 年地層処分技術調査等事業, 資源エネルギー庁, pp.217-227 (2016)
- 3) Yoshida, H., *et al.*, *Scientific Reports*, **5**, 14123, doi: 10.1038/srep14123 (2015)
- 4) Yoshida, H., *et al.*, *Scientific Reports*, doi:10.1038/s41598-018-24205-5 (2018a)
- 5) Yoshida, H., *et al.*, *Science Advances*, **4**, eaau0872 (2018b)
- 6) Yoshida, H., *et al.*, *Geochemical Journal*, **54**, 233-242 (2020)
- 7) Yoshida, H., *et al.*, *Communications Engineering*, doi:10.1038/s44172-024-00216-1 (2024a)
- 8) Yoshida, H., *et al.*, *Geological Society of London*, DOI:https://doi.org/10.1144/EGC1-2023-35 (2024b)

(名古屋大学博物館)