

持続的岩盤割れ目シーリング剤（コンクリーション化剤）の開発と実用性

吉田英一*1

地下環境を長期に活用する場合、地下水の流れを左右する亀裂などの水みちを効果的にシーリングし、閉塞させることは、安全性を高める上でも必須の課題となる。とくにセメント系シーリング剤は、注入後も溶出することが確認されており、長期のシーリングには限界があると考えられている。そのような背景のもと、球状コンクリーションの形成プロセスを応用して開発したコンクリーション化剤（コンシード®）の機能実証試験を幌延深地層研究センターの地下 350 m 実験坑道で行ってきた。その結果、2～3 年で当初の透水性が 1/100～1/1,000 に抑えられ、地震による影響も修復可能であることを確認することができた。この新規技術は、地層処分のみならず地下水の水みちシーリングに関することであれば、幅広く応用が可能である。

Keywords: コンクリーション, 炭酸カルシウム（カルサイト）, 長期シーリング

A capability to permanently seal any fluid flow-paths in bedrock is needed to ensure the long-term safety and effectiveness of many underground activities. Cementitious materials are commonly used as seals, however these materials unavoidably undergo physical and chemical degradation. To solve these problems, a durable sealing method using 'concretion-forming resin' (Conseed®) has been developed by learning from natural spheroidal calcite (CaCO_3) concretion formation that often leads to fossil preservation in intact rock. The seal forms due to calcite super-saturation caused by ions released from 'Conseed®' reacting with groundwater constituents. The sealing capability of the developed resin was tested by *in-situ* experiments involving sealing of flow-paths developing in an EDZ and fault zones in Neogene mudstone in an underground research laboratory (URL), Hokkaido, Japan. All data from the *in-situ* experiments showed a rapid decrease in the hydraulic conductivity down to almost 1/1,000 of the initial permeability due to calcite precipitation over a period of a few years. The seal self-healed rapidly even after physical damage caused by earthquakes initially increased the permeability of previously sealed rock.

Keywords: Concretion, Calcium carbonate, Calcite, Durable sealing

1 はじめに

地層処分において、地下環境を利用する最大の理由は、少なくとも 1000 年以上もの長期的時間スケールでの廃棄物隔離が求められることにある。これは地表の著しい物質循環環境（風化現象に代表される水との反応に伴う元素移動環境）に保管・管理するのではなく、石油や鉱物資源が長期に渡って保持されてきた地下環境に委ねる方が、技術的かつ倫理的にも現実的であるという考えに基づいている[1]。この考え方は、オクロ天然原子炉現象をはじめとするナチュラアナログの基本的考え方でもある[2]。

一方で、放射性廃棄物を長期に埋設・隔離するためには、地下にアクセスするためのボーリング孔や搬入立坑、トンネルが必須である。しかし、これらは漏洩した放射性元素を拡散させる地下水の「水みち」となるリスクを背負う。この矛盾を解消するには、これらの人工的「水みち」を、長期的にシーリングすることが求められる。

現在、工学的に用いられるセメントを基本とする地下水シーリング（グラウチング）素材において、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ることが確認されている[3]。したがって地層処分の安全評価では、セメント系材料のバリア機能は考慮されていない。このような背景において、安全性をより高めるには、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。このような観点に基づいて、着目したのがコンクリーションである。

Rapid and durable bedrock flow-path sealing by 'concretion-forming resin': a new grouting technique learnt from carbonate concretions by Hidekazu Yoshida (dora@num.nagoya-u.ac.jp)

*1 名古屋大学博物館

Nagoya University Museum

〒464-8601 名古屋市千種区不老町

本稿は、日本原子力学会バックエンド 2025 年度夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

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。とくに CaCO_3 （カルサイト）を主成分とするコンクリーションは、保存良好な化石を内包するなど最もよく知られた鉱物素材であり、メートルサイズでも数年程度で形成されることが明らかとなった [4, 5, 6] (Fig.1)。その形成・成長は、海底堆積物中の生物遺骸から拡散・放出される有機酸起源の炭酸と海水中のカルシウムイオンとの過飽和・沈殿反応に伴う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）され、数百万年以上もの長期に渡って生物殻がコンクリーション中に保存され、風化・変質することなく産出する。



Fig.1 An example of spherical concretion containing well-preserved mud-crab, ca.16Ma from NY. (courtesy of Mizunami Fossil Museum)

2 コンクリーション化剤による原位置試験

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 号など）を開発してきた (Fig.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。

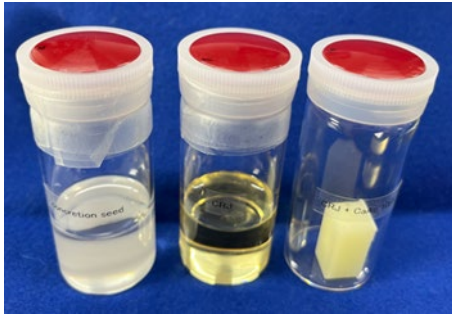


Fig.2 Concretion-forming resin (Conseed®). Two types Conseed® developed and applicable for usage.

地層処分の場合，地下処分坑道や処分ピット周辺岩盤に形成される，掘削損傷領域（Excavation Damaged Zone(EDZ)）や岩盤中の断層およびその破碎帯は，核種の選択的移行経路となるリスクがあり，そのシーリングは地層処分の長期的バリア機能を担保する上でも重要な課題の1つである．その背景のもと，EDZ 亀裂および岩盤中断層を対象に，コンクリーショニング剤によるシーリング実験を約 4 年半かけて行ってきた．**Fig.3** は，地下 350 m の実験坑道での床盤直下に広がる EDZ を対象としたコンクリーショニング化実証試験のレイアウト図である．この EDZ には，床盤岩盤の約 1 m 区間に 20~30 本もの亀裂が確認できる．この割れ目密度は，稚内層中の割れ目密度の 20~30 倍である．これらの人工的な亀裂は，ネットワ

Layout of in-situ experiment

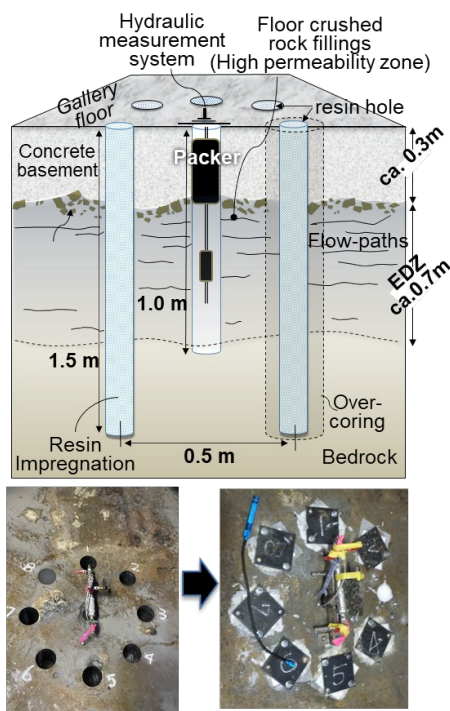


Fig.3 Layout of in-situ evaluation experiment of durable sealing by Conseed®.

ークを形成し，地下水の選択的な移行経路となる．そのため EDZ の透水係数は，稚内層の平均的な透水係数の 100~1000 倍高い 10^{-5} m/s オーダーまで上昇することが確認されている [7]．

この EDZ を対象に，コンクリーショニング化による水みちの長期シーリング実験を行った結果，地下坑道周辺 EDZ の透水係数が，半年で 2~3 オーダー低下し，周辺母岩とほぼ同レベルの透水性に改善されることが確認できた．さらに本試験中に，地下研究所付近の震源の深度が 2~7 km と推定される最大 M5.4 をはじめとする直下型地震が 2 日間で約 12 回発生し，その影響によって 1 オーダーの透水性上昇が生じたものの，その約 3 ヶ月後には地震発生前の透水性へと戻ったことも確認された (**Fig.4**)．

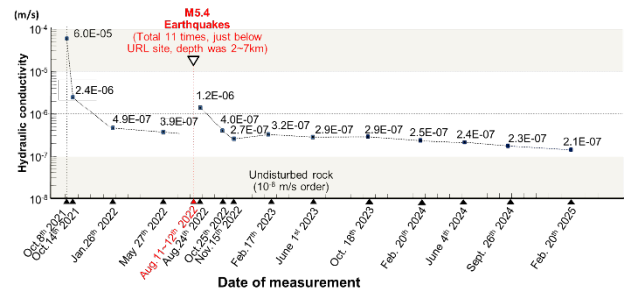


Fig.4 Monitoring of hydraulic conductivity in EDZ after Conseed® installed.

オーバコアリングによるコンクリーショニング化の範囲を確認したところ，コンクリーショニング剤注入孔周辺の少なくとも半径 50 cm の範囲の EDZ 中の亀裂が，カルサイトによってシーリングされていることも明らかとなっている (**Fig.5**) [7]．



Fig.5 SEM photo-micrographs of calcite fillings distributed in EDZ fractures.

断層破碎帯のコンクリーショニング剤によるシーリング効果についても，約 2 年半に渡った実験を行ってきた結果，EDZ 中の亀裂シーリングの場合と同様，透水性の持続的低下が確認された．断層破碎帯中の水みちは，一般的に亀裂と圧砕された岩盤充填による微細空隙が混合し，複雑な組織を有する．そのような複雑な構造の水みちにおいても，コンクリーショニング化によるカルサイト充填は，空隙を閉塞させ，周辺岩盤と同等の透水レベル (10^{-8} m/s) まで低下させる働きを有することが認められた [8] (**Fig.6**)．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では認められない現象である。

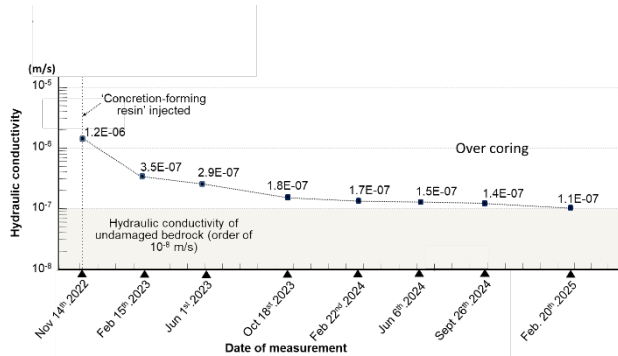


Fig.6 Monitoring of hydraulic conductivity in fault zone after Conseed® installed.

断層破碎帯についてもカルサイト充填状態を確認するために、オーバーコアリングを行なった。その結果、コンクリーション化剤を注入したボーリング孔から、約2年半で半径約30 cmの範囲でコンクリーション化が及んでいること。またそのシーリングは、断層角礫中のミクロンサイズ以下の微細空隙にまで至っていることが分かった(Fig.7)[8]。

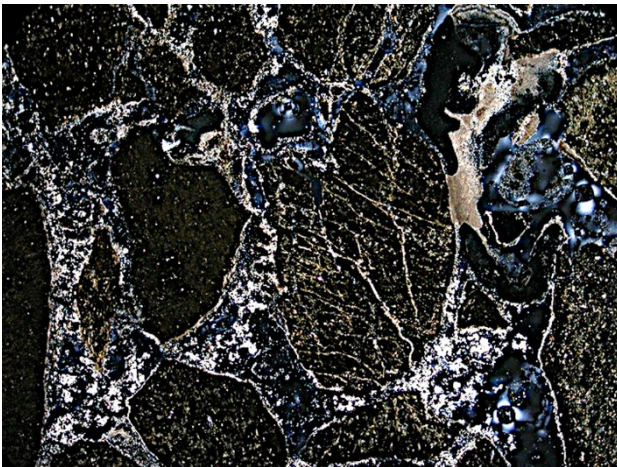


Fig.7 Calcite fillings distributed in fault gouge.

これは、コンクリーション化剤から供給されたイオンが、微細空隙中で過飽和状態となり、カルサイトを沈殿させ広がっていることを示している。このような微細な空隙組織までが充填・閉塞されるのは、微粒子のグラウト剤では期待しにくい現象であり、コンクリーション化剤によるユニークなシーリング効果と言える。

3 今後の展開

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ほか石油廃孔といった既存空洞も含まれる。さらには新規および既存トンネルの掘削や修復にも

応用可能である。現在、それらに関する共同研究も展開しており、その実証試験の成果や情報を共有するための「コンクリーション化応用化研究会」を立ち上げ、分野間の情報共有を進めている。今後は、石材を用いた文化財修復なども視野に入れてコンクリーション化剤の適用性評価も行なっていく予定である。

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で進められている。また、さまざまな分析や実験解析に関しては、名古屋大学、東京大学、日本大学、岐阜大学におけるコンクリーション研究メンバーとの議論が非常に重要な役割を果たしている。最後に、本研究は中部電力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] Nuclear Energy Agency. The forum on stakeholder confidence report on dialogue in the long-term management of radioactive waste. OECD Publishing Paris. (2021).
- [2] Savage, D., The scientific and regulatory basis for the geological disposal of radioactive waste. *John Wiley & Sons*, p437. (1995).
- [3] 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).
- [4] Yoshida, H., Ujihara, A., Minami, M., Asahara, Y., Katsuta, N., Yamamoto, K., Sirono, S., Maruyama, I., Nishimoto, S., Metcalfe, R. Early post mortem formation of carbonate concretions around tusk-shells over week-month timescales. *Scientific Reports*, 5:14123 doi: 10.1038/srep14123 (2015).
- [5] Yoshida, H., Yamamoto, K., Minami, M., Katsuta, N., Sirono, S., Metcalfe, R. Generalized conditions of spherical carbonate concretion formation around decaying organic matter in early diagenesis. *Scientific Reports*, doi:10.1038/s41598-018-24205-5 (2018).
- [6] Yoshida, H., Yamamoto, K., Ohe, T., Katsuta, K., Maruyama, I., Metcalfe, R. Diffusion controlled formation of spherical carbonate concretion in muddy sedimentary matrices. *Geochemical Journal*, 54, 233-242 (2020).
- [7] Yoshida, H., Yamamoto, K., Asahara, Y., Maruyama, I., Karukaya, K., Saito, A., Matsui, H., Mochizuki, A., Jo, M., Katsuta, N., Umemura, A., Metcalfe, R. Post-earthquake rapid resealing of bedrock flow-paths by concretion-forming resin. *Communications Engineering*, Springer Nature, doi:10.1038/s44172-024-00216-1 (2024a).
- [8] Yoshida, H., Yamamoto, K., Asahara, Y., Maruyama, I., Karukaya, K., Saito, A., Matsui, H., Mochizuki, A., Katsuta, N., Metcalfe, R. Rapid and long-lasting bedrock flow-path sealing by a 'concretion-forming resin'. *Geological Society of London DOI:https://doi.org/10.1144/EGC1-2023-35* (2024b).