

地層処分におけるグラウト技術の高度化開発（その 11）
ーグラウト影響評価技術の開発ー

(独) 日本原子力研究開発機構	正会員	○笹本 広
同上		内藤守正
(株) クインテッサジャパン	正会員	藤崎 淳

油井三和
Colin Walker
高瀬博康

1. はじめに

地下坑道の掘削、施工段階での湧水対策としてセメント系材料によるグラウトが用いられた場合、高レベル放射性廃棄物地層処分の観点では、岩盤の長期的な変質劣化やそれに伴う天然バリア性能への影響等が懸念される。セメント系材料としては、土木分野で幅広く用いられ実績も多い普通セメント（OPC）以外に、岩盤等への影響を最小限に抑制するためセメント浸出液の pH を 11 よりも低く抑えた低アルカリ性セメント（LoAC）の利用が想定される。本開発では、処分システムでのセメント系グラウト材の利用を想定し、岩盤の長期的な影響評価に基づくセメント材料の適用性評価に関わる手法を提示することを目的に実施している。本報告では、セメント系グラウト材料の利用に伴う岩盤の長期的な影響評価のためのアプローチおよび評価に必要となるモデルやデータベースの開発・整備状況とともに、これらを用いた検討例について紹介する。なお、本開発は、経済産業省資源エネルギー庁の「平成 19 年度¹⁾・平成 20 年度²⁾地層処分技術調査等委託費（高レベル放射性廃棄物処分関連：地下坑道施工技術高度化開発）」の一部として実施したものである。

2. アプローチ

図 1 に全体的なアプローチを示す．本開発では評価に必要となるモデルやデータベースの開発を主とする．構築したモデルおよびデータベースを用いて室内試験との比較によるモデルの確証，原位置情報を考慮した解析や原位置試験結果との比較によるモデルの確証を行う．また，高 pH 溶液による岩盤への影響範囲の予測結果等を参考に，処分場の長期性能という観点で適切なセメント材料を選定するための考え方を整理する．これらを通じて，ある具体的な地質環境が与えられセメント系グラウトが施工された場合における長期的な岩盤変質劣化やグラウト材料の適用性に関する評

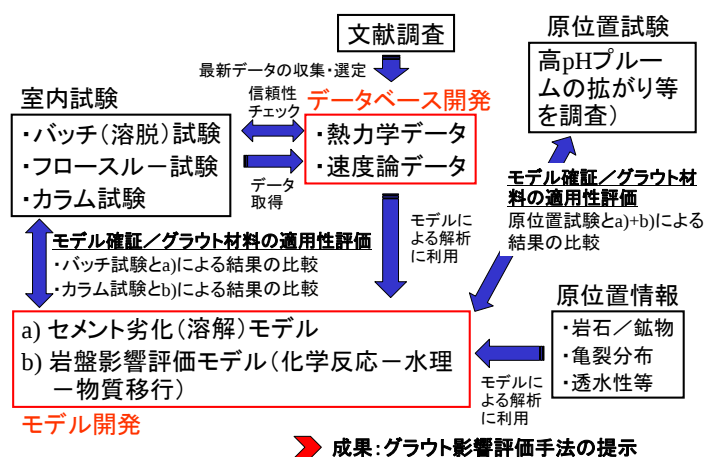


図1 グラウト影響評価技術開発の全体アプローチ

3. モデル開発

① セメント劣化モデル:セメントの劣化は、水和反応の継続とその後の水和生成物と水との反応による溶脱反応により進行すると考えられる。今回は、反応初期に生じる水和反応のモデル化を試みた。OPCの水和反応についてはエーライト (Ca_3SiO_5) の反応速度に基づいたモデル化の例³⁾があることから、それを基にポゾラン材として添加されるシリカフューム:SF ($\text{SiO}_{2(am)}$) の水和反応も考慮し、LoACの水和反応のモデル化を行った。図2に水和モデルによる計算結果と実験値の比較を示す。時間の経過に伴う溶液のpHの変化傾向は、両者とも類似しており、モデル計算結果によれば、約7年後にはpHは11を下回ると推定された。また、さらに時間が経過すると、約15年後にはpH≒10程度で平衡状態になることも示唆された。

② 岩盤影響評価モデル：不均質な岩盤を対象に、セメント劣化に伴い発生する高 pH 溶液の移行挙動を

キーワード：地層処分，グラウト，セメント材料，化学反応，高 pH 溶液

連絡先：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 日本原子力研究開発機構、TEL: 029-282-1111

岩盤との化学反応を考慮しつつ推定するモデルを開発した。3次元不均質岩盤中での水理-物質移行解析は、解析コード PARTRIDGE 2⁴⁾を用いて行い、各流線（亀裂）における開口幅と実流速の関係を整理した。その結果をもとに、代表的な特性を有する亀裂を抽出し、亀裂中での高 pH 溶液と岩盤との化学反応を考慮した1次元の物質移行体系を対象に解析コード QPAC⁵⁾を用いて行い、亀裂開口幅、実流速の変化や岩盤の変質を評価可能とした。

4. データベース開発

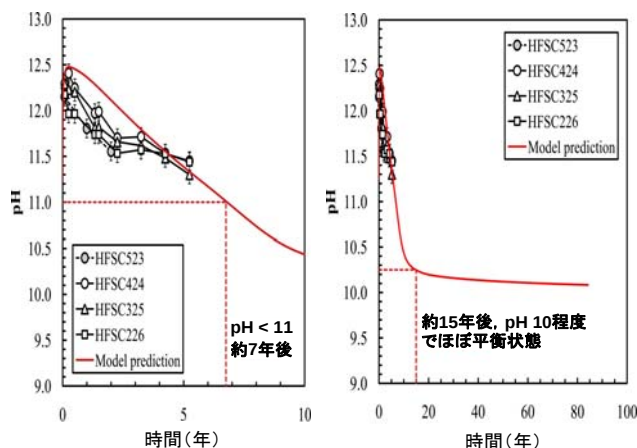
熱力学データについては、文献調査によりデータを収集・整理するとともに、信頼性の高いデータを選定し、また実験値に乏しい場合は、地球化学の分野において従来から検討されている鉱物の化学組成や結晶構造等に基づく半経験的な計算手法によりデータを導出し、整備した。これまでに、沸石および CSH 鉱物についてのデータ整備を行った。速度論データについては、普遍的な造岩鉱物の1つである長石のうち Ca に富んだ成分については高 pH 条件での溶解速度データに乏しいため、フロースルー型の溶解試験装置を用い、溶解速度を測定した。

5. 処分システムの長期性能の観点からのグラウト材料の適用性評価に関する検討例

これまでに構築したモデルを基に、岩盤の長期的な劣化評価を解析し、処分システムの長期性能の観点からのグラウト材料の適用性についての評価を行った。検討にあたっては、結晶質岩の亀裂中に高 pH 溶液が流入し、岩盤との化学反応に伴い、亀裂開口幅（ここでは初期の亀裂の空隙体積を1とした場合の体積比率として表示）、実流速、岩盤マトリクスの空隙率がどのように変化するかを解析した。解析では、グラウト材料として OPC および LoAC を想定し、セメント固相の考慮の有無（セメント固相を考慮する場合：時間とともにセメント溶液組成が変化、固相を考慮しない場合：一定組成のセメント溶液）による比較も行った。解析結果の一例（1,000年後）を図3に示す。図3は、一定組成のセメント溶液が亀裂に流入した場合の OPC と LoAC に対する亀裂中空隙の体積比率の経時変化を比較したものである。OPC の場合、LoAC に比べて亀裂中での二次鉱物の生成に伴う空隙の体積比率の低下割合が大きく、初期状態と著しく異なる。このような変化は、セメント固相（ソース）条件に依存するため、長期的な影響評価を行う場合、評価結果の不確実性を増大させる要因になると考えられる。処分システムの長期性能の評価は数万年以上という時間スケールを対象とするため、不確実性の小さいものを採用することが重要であり、そのような観点からグラウト材料の適用性を評価する場合、LoAC の方がより適切な材料と考えられる。

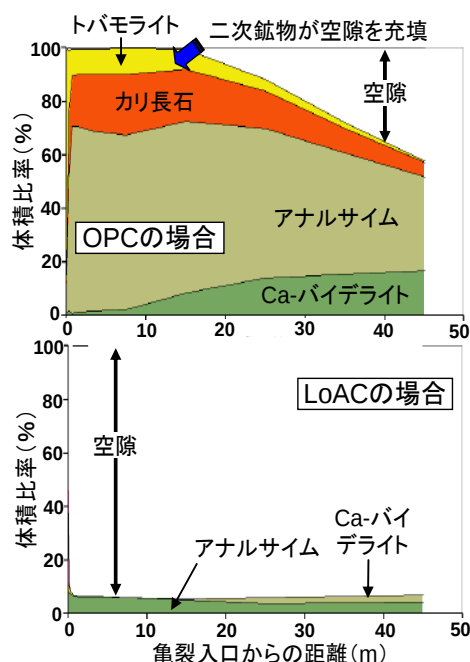
参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構：平成19年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物関連、地下坑道施工技術高度化開発報告書（2008）
- 2) 日本原子力研究開発機構：平成20年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物関連、地下坑道施工技術高度化開発報告書（2009）
- 3) Lothenbach, B. and Winnefeld, F.: Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement, Cement and Concrete Research, 36: pp.209-226 (2006).
- 4) 高瀬博康ほか：幌延深地層研究計画における不確実性を考慮した安全評価手法の検討（委託研究）、JAEA Research 2007-066 (2007).
- 5) Benbow, S. and Robinson, P.: QPAC 1.0 User Guide, Quintessa Limited (2007).



注釈：グラウト材料の候補となる低アルカリ性セメント（HSC: High volume Silica Fume Cement）の経時変化に関わるデータが不足していたため、支保工材料の候補であるHFSC（HSCにフライアッシュ：FAを添加）の実験データを対象とした。HFSCの後に書かれている数字は、OPC、SF、FAの含有量の比を意味する。右図は左図の時間スケールを長くしたものである。

図2 水和モデルによる計算結果と実験値の比較



注釈：OPCの場合、pH≒13の溶液、LoACの場合、pH≒10の溶液が各々1,000年間、亀裂中に流入した際の結果。解析は開口幅0.1mmの平行平板亀裂で、亀裂長50m、実流速1E-7 m/s、マトリクス部の空隙率0.5%、25℃の条件で行った。なお、現状では、二次鉱物としての選定の妥当性について、一部、検討が必要なもの（例：カリ長石）も含まれている。

図3 亀裂中空隙の体積比率の経時変化例(1,000年後)