

第3章

施設 / 材料
特性評価技術

3-1	処分環境を考慮したベントナイト特性評価技術 …	46
3-2	セメント系材料の長期耐久性試験・評価技術 ……	51
3-2-1	余裕深度処分におけるセメント系材料の 長期耐久性評価に向けた純水および計画 サイト地下水模擬溶液を用いた溶脱挙動 の把握	
3-2-2	高温負荷による普通・低熱ポルトランド セメント硬化体の細孔構造変化とイオン 拡散性に及ぼす影響	
3-3	ベントナイト長期挙動試験・評価技術 ……………	54
3-4	処分場の品質管理技術 ……………	56
3-5	新しい人工バリア材料開発 ……………	58
3-5-1	高耐久性高結晶型コンクリートの溶脱耐久性 評価	
3-5-2	アルカリ環境下でのサポナイトの溶解速度	
3-6	地下空洞の長期安定性評価技術 ……………	61
3-6-1	ボーリングコアによる岩盤評価技術	
3-6-2	ニアフィールド岩盤の計測・評価技術	
3-6-3	熱 - 水 - 応力 3 連成解析技術	

3-1 処分環境を考慮したベントナイト特性評価技術

(1) 背景

ベントナイトは、透水係数が小さいことなどの理由により、高レベル放射性廃棄物の地層処分施設における緩衝材や埋戻し土、および低レベル放射性廃棄物処分施設における低透水層や埋戻し土などとして用いられることが検討されている。また、低透水性の確保のために適度な膨潤性を有することも必要である。

ベントナイトの透水係数は、高レベル放射性廃棄物処分では、地下水に含まれる可能性がある海水を起源とする塩分により、透水係数が増大すること、ならびに膨潤性が低下することが懸念されている（図3-1-1）。そこで、海水の影響によるベントナイトの透水係数の増大、ならびに膨潤性の減少を実験的に検討するとともに、施工管理や事前の予測を行う数値シミュレーションのために、その影響をモデル化する必要がある。さらに、海水による膨潤圧の低下は、高レベル放射性廃棄物処分におけるオーバーバックの沈下を増大させる可能性があるため、その影響を定量的に評価する必要もある。

一方、高密度ベントナイトは、緻密であるため透気性が低く、地下深部の還元性環境下における金属廃棄物の腐食などにより発生する可能性がある水素ガスを、速や

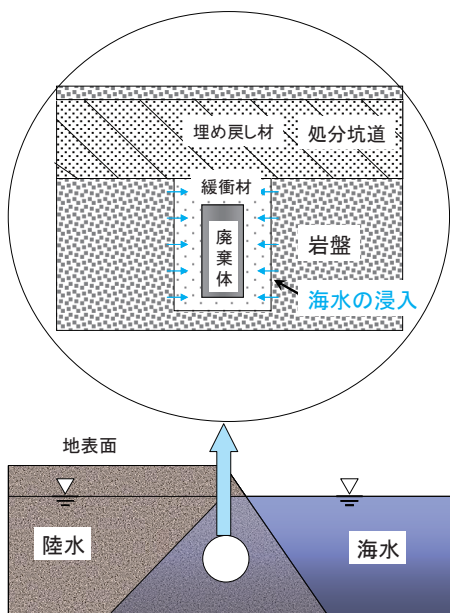


図3-1-1 海水などの塩類による影響を検討する背景 (高レベル放射性廃棄物処分の場合)

かに排出しないことが予想されている。そのため、ガス圧上昇による周辺施設や岩盤への影響の評価などを行う必要がある。このためには、ガス移行現象のメカニズムの解明とそれを踏まえたモデル化、ならびにシミュレーション評価技術の開発が必要である。

(2) 目的

各種ベントナイトの透水係数、ならびに膨潤圧に及ぼす海水の影響メカニズムを解明するとともに、そのモデル化を行う。また、実験的に把握した飽和した高密度ベントナイト中のガス移行特性とガス移行メカニズムを解明し、ガス移行モデルを作成するとともに数値解析コードを開発し、その適用性を検証する。

(3) 主な成果

(a) 海水の濃度が透水係数と膨潤圧に及ぼす影響の把握およびそのモデル化^{1,2)}

各種ベントナイトの透水性、ならびに膨潤性に及ぼす人工海水濃度の影響を実験的に把握した。さらに、ベントナイトの透水係数ならびに膨潤圧に支配的な影響を及ぼす鉱物であるモンモリロナイト結晶（以下、結晶と略称）の集合状態を、人工海水中の塩分による結晶の凝集による1スタック（モンモリロナイト結晶の集合体の単位）あたりの結晶の数の増加として表わしたモデルを開発した（図3-1-2）。このモデルに対して、モンモリロナイト結晶間に作用する引力・斥力、ならびにそれらに及ぼすベントナイトの密度、人工海水の濃度の影響を考

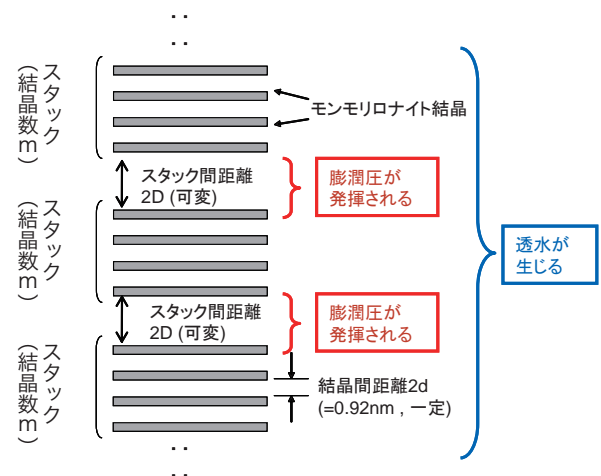


図3-1-2 新しく提案したモンモリロナイトの構造モデル

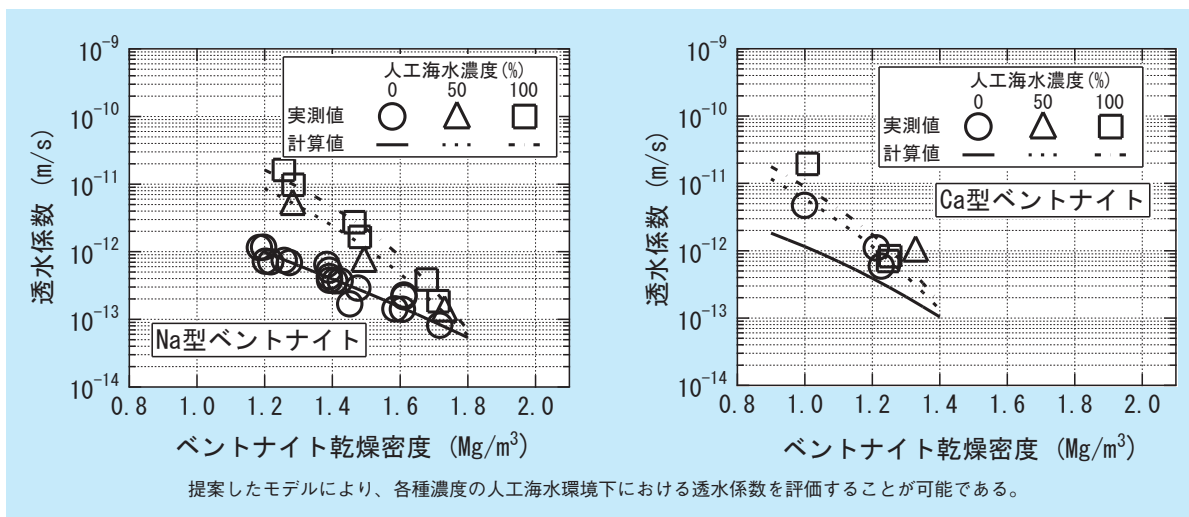


図 3-1-3 透水性係数の実測結果と計算結果の比較の例

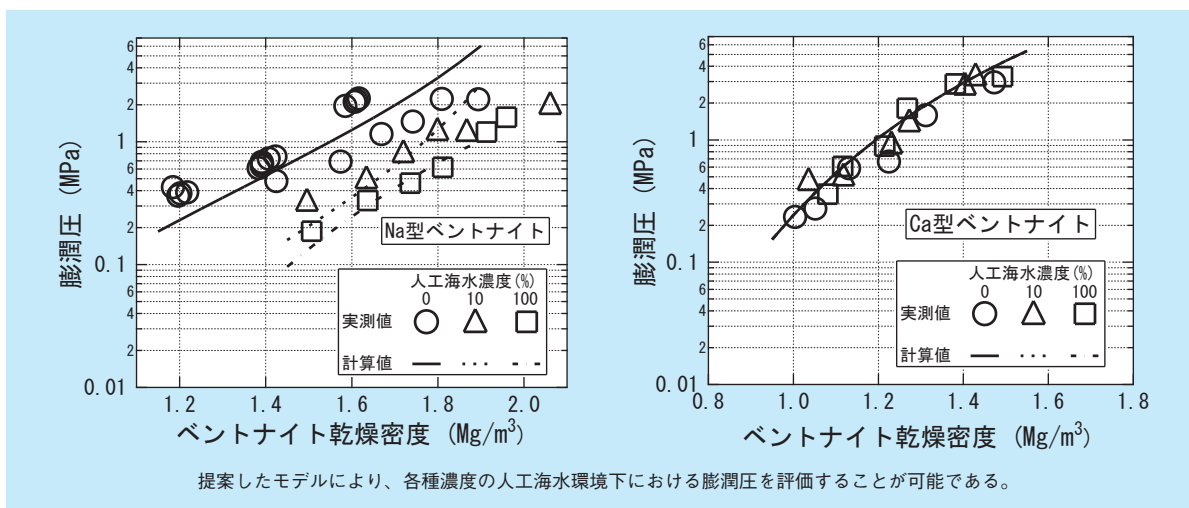


図 3-1-4 膨潤圧の実測結果と計算結果の比較の例

慮してベントナイトの透水性係数と膨潤圧を計算し、各種ベントナイトの種々の人工海水濃度に対する透水性係数と、膨潤圧の実測結果とを比較した。その結果、透水性係数と膨潤圧の実測結果の再現性は、人工海水の濃度やベントナイトの種類によって異なるが、全ての場合において良好に整合していることが分かった (図 3-1-3、図 3-1-4)。

(b) 高レベル放射性廃棄物処分におけるオーバーパックスの沈下量ならびに沈下量に及ぼす人工海水濃度の影響の評価^{3,4)}

遠心荷重模型実験装置 (図 3-1-5) を用いて、廃棄体 (図 3-1-6) の沈下実験を行った。本装置による実験結果に対しては、空間と時間に関する明快な相似則が存在

するため、原理的には、例えば実物の 1/100 のスケールで実験を行った場合には、実物で 1,000 年かかる廃棄体の沈下挙動を、約 1 カ月に短縮して再現することができる。得られた知見を以下に示す。

蒸留水環境下における緩衝材のベントナイト乾燥密度と廃棄体の沈下量の関係を調べるため、廃棄体の密度 6.48Mg/m³ に対し、膨潤後のベントナイト乾燥密度が 1.15Mg/m³、1.35Mg/m³、1.55Mg/m³ の条件で、廃棄体の沈下実験を行った。その結果、ベントナイト乾燥密度が大きくなるに従い、廃棄体の沈下量が指数関数的に減少することを確認した (図 3-1-7)。

さらに、希釈した人工海水条件下において、3 種類のベントナイト乾燥密度における実験を行った。その結果、

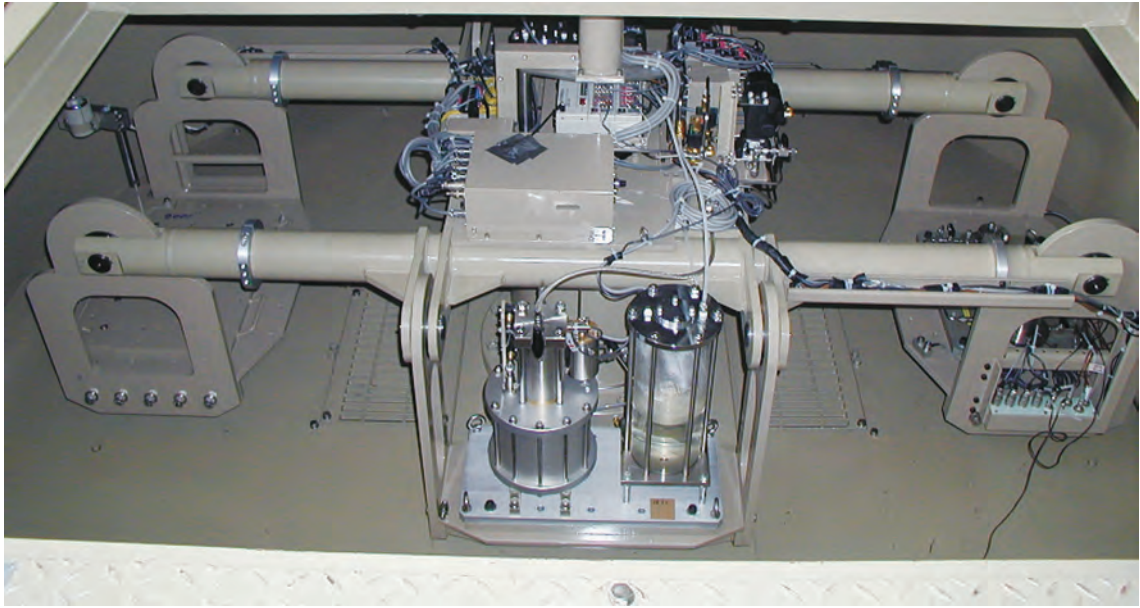
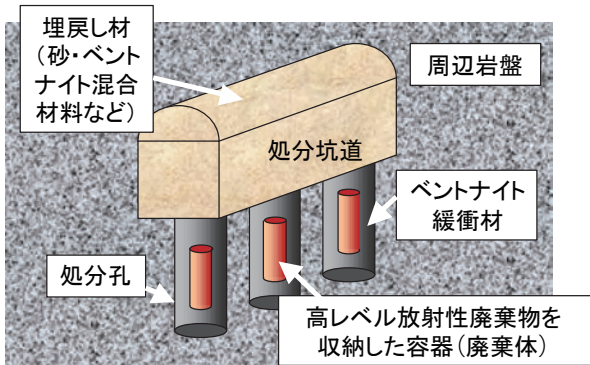
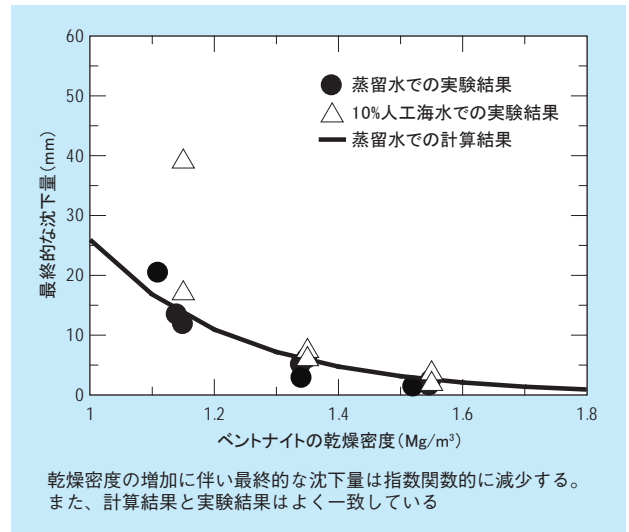


図 3-1-5 締固めたベントナイト上の廃棄体の長期沈下量を測定するための遠心载荷装置



廃棄体周辺には、止水性や核種吸着性などの性能を要求される緩衝材としてベントナイトが設置される。

図 3-1-6 高レベル放射性廃棄物処分施設の概念図(例)



乾燥密度の増加に伴い最終的な沈下量は指数関数的に減少する。また、計算結果と実験結果はよく一致している

図 3-1-7 試験結果と計算結果の一例

希釈した人工海水環境下における廃棄体の沈下量は、蒸留水環境下における沈下量とおおむね同等(図 3-1-7)であった。

当研究所の提案する蒸留水、ならびに塩分環境下のベントナイトの膨潤モデル式と応力・変形の釣り合い条件から、蒸留水環境下における廃棄体の沈下量を簡易に予測する手法を提案した。本手法を用いた沈下量の計算結果は実験結果と良好な一致を示しており、提案手法の妥当性が確認された(図 3-1-7)。

(c) ベントナイトのガス移行メカニズム解明とモデル化・数値シミュレーション手法の開発⁵⁻⁷⁾

飽和した高密度ベントナイトを対象として、ガス移行試験を行った。それによると、供試体に加えるガス圧を漸増させた場合、ガス圧がベントナイト供試体の実験開始前の土圧と同程度に達した段階で、最初の破過(排水・排気側に気泡が出現した時をもって定義する)が生じた。さらにガス圧を増加させると、供試体が収縮するため供試体端部と容器の間に空隙が生じ、大破過(排気

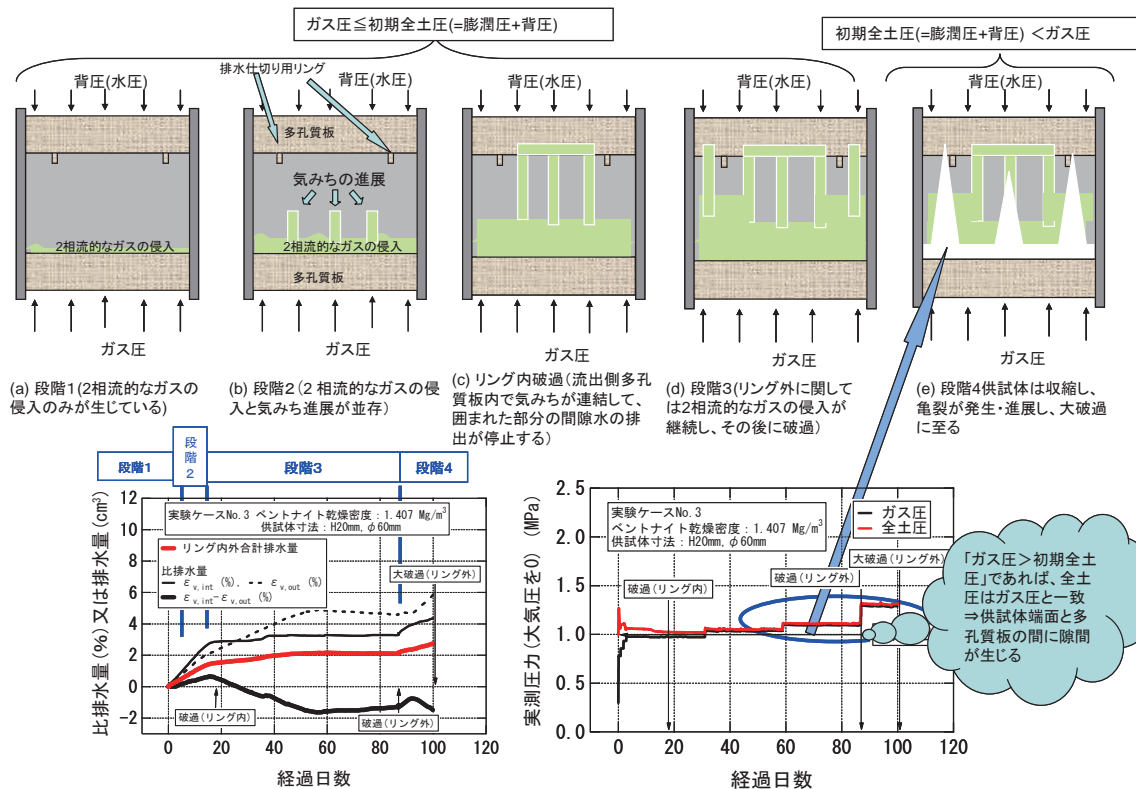


図 3-1-8 実験結果より推定された飽和した高密度ベントナイトの透気メカニズム

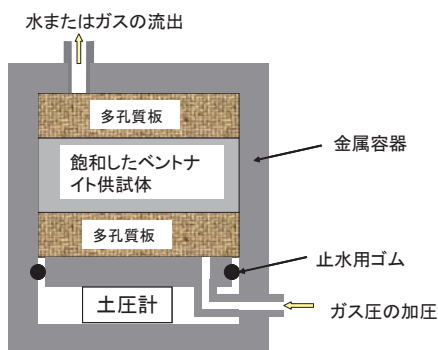


図 3-1-9 ガス加圧実験に使用した装置

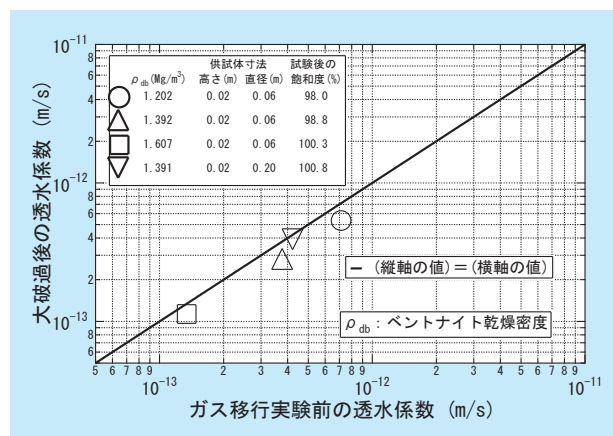


図 3-1-10 大破過に伴う透水係数の変化

量が急激に増大した時をもって定義する)が生じた。これらの実験事実に基づき、ガス浸入開始から大破過に至るメカニズムを推定した(図 3-1-8、図 3-1-9)。また、大破過後に測定したガス流量は、破過後から大破過に達するまでの流量の $10^8 \sim 10^{10}$ 倍程度であり、大破過が施設内に蓄積したガス圧の低下に有効に作用する可能性があることが判明した。一方、大破過後の供試体の透水係数は、試験前と同程度であった。このことにより、大破過によるベントナイトのバリア性能の低下は、無視するかまたはかなり小さいと考えてよいことが分かった

(図 3-1-10)。

次に、ベントナイトの変形を考慮したガス相ならびに水相の連続性を定式化するとともに、新たにベントナイトの不飽和応力ひずみ関係式を提案し、これらに不飽和有効応力の定義式、応力の釣合式などを加えて現象を支配する方程式を誘導し、それに基づいて力学連成気液二相流モデルに基づくガス移行解析コードを開発した。さらに、そのコードを用いて当研究所が実施したガス移行実験の数値シミュレーション計算を行った結果、本ガス

移行解析手法を用いれば、精度よく実測ガス移行挙動評価ができることが明らかとなった（図 3-1-11）。

従来型の気液二相流モデルは、ベントナイト変形の影響を厳密に考慮することはできないが、実務に用いられる機会が多い。そこで、既存の気液二相流解析コードの適用性を検討した。その結果、ガス圧による亀裂発生・伝播の条件式を改良し、気液二相流モデルにおける亀裂発生・伝播の条件式として適用するなどの改良を加えることにより、気液二相流解析コードでガスの侵入開始からガス

流量の急増に至る全過程のガス移行試験結果を再現できることが分かった（図 3-1-12）。

(4) 今後の展開

塩水の影響、高温履歴の影響、コンクリート溶脱水の影響などの化学的な影響をモデル化するとともに、力学的な影響と連成することにより、処分環境下におけるベントナイトの挙動評価手法の総合化を図る。

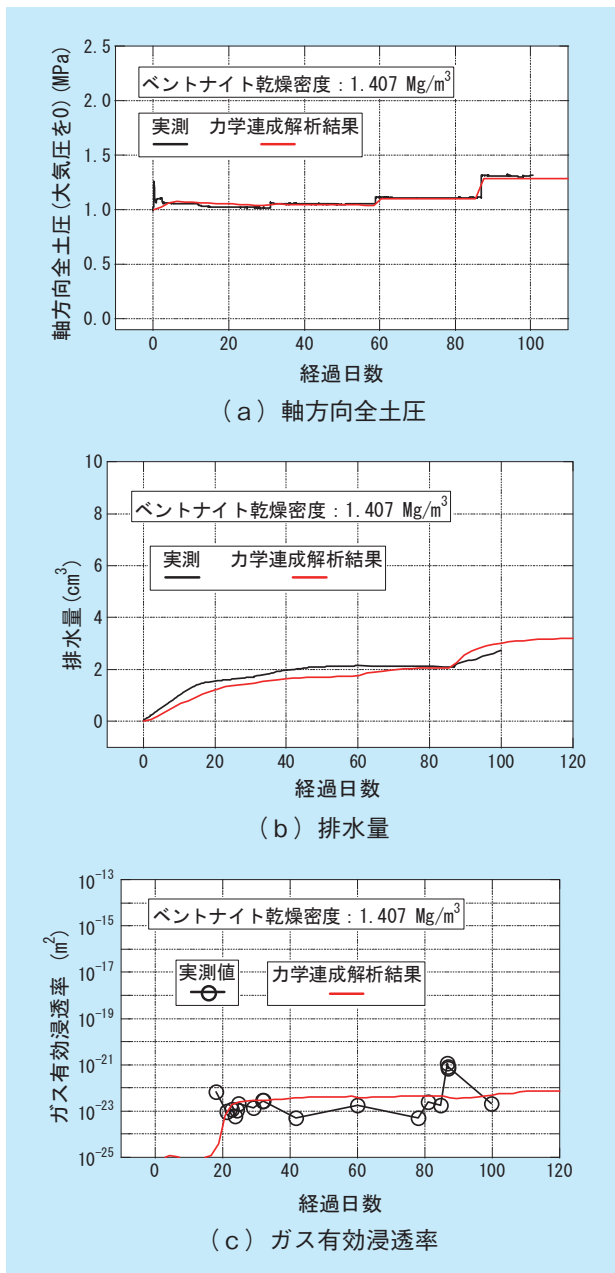


図 3-1-11 実測結果と計算結果の比較

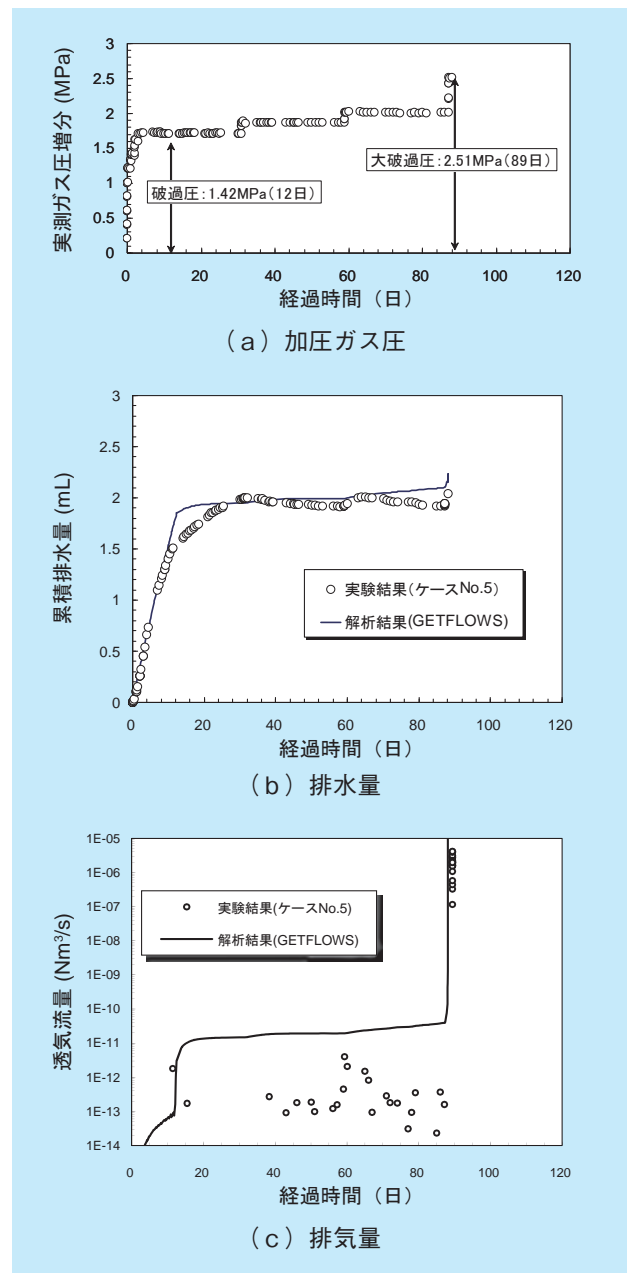


図 3-1-12 ガス圧による亀裂発生・伝播の条件式を導入した来型 2 相流解析結果と実測結果の比較

3-2 セメント系材料の長期耐久性 試験・評価技術

3-2-1 余裕深度処分におけるセメント系材料の 長期耐久性評価に向けた純水および計画 サイト地下水模擬溶液を用いた溶脱挙動 の把握¹⁾

(1) 背景

現在、低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分について、施設設計や安全評価の検討が進められている。地下深度約50～100mへの建設が予定されている同処分施設では、セメント系材料が使用される計画であり、放射性核種の漏えいに対する安全性を評価する上で、セメント系材料の長期性能評価が重要な課題となっている。従来、セメント系材料の劣化現象として、地下水接触による溶脱^{注1)}が取り上げられており、実環境に即したより現実的な溶脱の評価が求められている。

(2) 目的

余裕深度処分施設に用いられるコンクリートとして計画されている配合（計画配合）について、溶脱抵抗性における計画配合の優位性を評価する。また、公表されている日本原燃六ヶ所村試験空洞の地下水が溶脱挙動に及ぼす影響を評価する。

(3) 主な成果

(a) 溶脱抵抗性における計画配合の優位性評価

計画配合を参考に、低熱ポルトランドセメントにフライアッシュを30%置換したセメントペーストおよびモルタル供試体を作製し、3年にわたる純水交換型浸漬試験を実施した。その結果、普通ポルトランドセメントを使用した供試体や高炉スラグ微粉末を置換使用したその他の供試体と比較し、CaやSiの溶出量が低減され、供試体中のCa濃度の低下深さ（溶脱フロント）も小さくなることが明らかとなり、本実験範囲内において、計画配合の溶脱抵抗性に関する優位性が確認された（図3-2-1）。

注1) セメント硬化体が長期間水と接することにより、水酸化カルシウムなどのセメント水和物が徐々に溶出し、硬化体組織が多孔化する現象

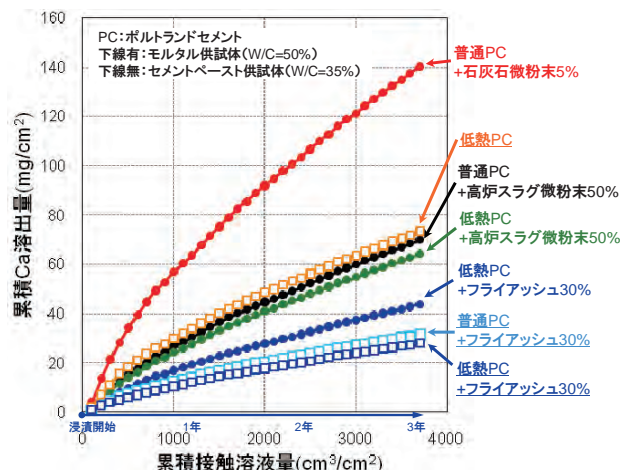


図 3-2-1 長期純水浸漬試験におけるカルシウム溶出量の推移

表 3-2-1 計画サイト地下水模擬溶液の組成

測定濃度平均値 (mg/dm ³)							測定pH 平均値
Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	
14.4	1.4	4.2	4.1	14.7	12.5	31.8	7.6

注) 30mg/cm³程度の炭酸水素イオンを含む。

(b) 計画サイト地下水模擬溶液への浸漬試験における溶脱挙動の把握

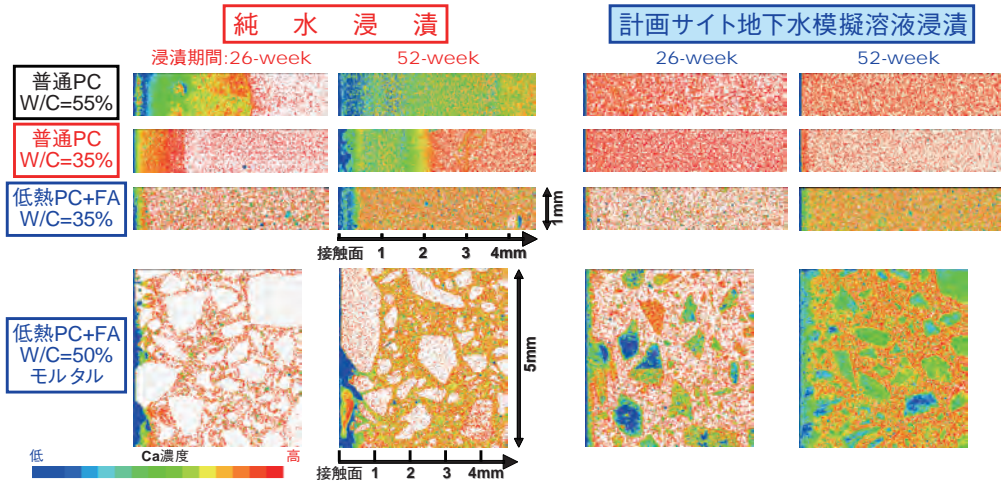
施設の計画サイトにおける地下水模擬溶液（表3-2-1）に浸漬した場合、浸漬溶液のpH上昇量、ならびにCaやSiの溶出量が、純水浸漬と比較し大幅に減少することが確認され（図3-2-2）、この溶脱抑制現象は、沈殿鉱物の同定や元素分布の分析結果から、供試体表層におけるCalcite（CaCO₃、炭酸カルシウム）の沈殿反応に起因するものであることが分かった。

(c) 実施された吹付けコンクリートと岩盤の界面分析

日本原燃の試験空洞において、実施された吹付けコンクリートを岩盤とともにコア採取し、吹付けコンクリートと岩盤の界面近傍を対象に、元素分布の分析を行った。その結果、界面にCa/Cモル比が1前後と推定される炭素濃度の高い領域が認められ、Calciteの沈殿が示唆された（図3-2-3）。

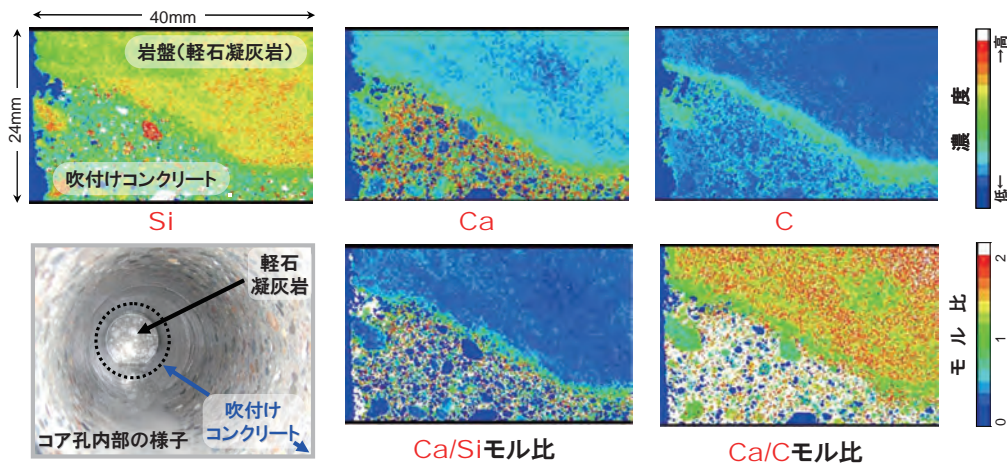
(4) 今後の展開

地下水流動や地下水中のイオン拡散性などの地下環境特性に基づいたセメント系材料の長期変質解析を実施する。



純水浸漬では、表層より水酸化カルシウムなどのセメント水和物が溶脱し、徐々にカルシウム濃度が低下するのに対し、地下水模擬溶液へ浸漬した場合は、セメント種類や水セメント比に拘わらず、カルシウム濃度の低下が大幅に抑制された。

図3-2-2 純水および計画サイト地下水模擬溶液へ浸漬したセメント系材料のカルシウム濃度分布



施工後約1年間、岩盤中の地下水と接触していたと考えられる吹付けコンクリートと岩盤の界面において、カルシウムと炭素の濃度が高い層が認められ、この領域のCa/Cモル比が1程度であることから、Calcite (CaCO₃)の沈殿が示唆された。

図3-2-3 処分計画サイト付近の試験空洞に施工された吹付けコンクリートと岩盤の界面近傍の元素分布

3-2-2 高温負荷による普通・低熱ポルトランドセメント硬化体の細孔構造変化とイオン拡散性に及ぼす影響²⁾

(1) 背景

放射性廃棄物処分では、放射性核種の崩壊熱が人工バリアの核種移行抑制機能に悪影響を及ぼさないよう、設計・評価が進められている。その影響が有意と認められれば、廃棄体の収納設計や容器仕様の変更などで対応が取られる。より合理的な評価を実施するためには、廃棄体に近接する人工バリアへの熱影響を十分把握しておく

必要がある。熱負荷の程度によっては、人工バリアを構成するマイクロ構造であるセメント水和物の化学的性質や細孔構造に変化が生じる場合もあるため、拡散係数や分配係数といったバリア性能に及ぼす熱影響を、定量評価することが求められている。

(2) 目的

処分環境をもとに設定した温・湿度条件が、普通および低熱ポルトランドセメント硬化体の細孔構造変化に及ぼす影響を実験的に分析評価する。

(3) 主な成果

材料要因として、水セメント比（35、55%）やセメントの種類（普通、低熱ポルトランドセメント）を変化させたセメントペースト供試体（1年間20℃湿空養生）を用いて高温負荷試験を実施し、環境条件（温度条件60、80℃、湿度条件40、90%RH、水中、負荷期間3、6、12カ月）が細孔構造変化に及ぼす影響を、水銀圧入式ポロシメータ^{注2)}によって分析した。また、90%RH条件で高温負荷試験を行った普通ポルトランドセメントペースト供試体については、酢酸イオンの有効拡散係数の測定結果を踏まえ、細孔構造変化の影響を調べた。これらの検討により、以下の成果を得た。

(a) 湿度条件が細孔構造変化に及ぼす影響

湿度条件40%RHにおける高温負荷（60、80℃）により、セメント水和物からの水和水逸散によって、セメントペースト供試体のしきい細孔径^{注3)}は大きい径へとシフトし、累積細孔量^{注4)}が増加した。この傾向は、セメントの種類や水セメント比によらず、負荷温度が高いほど、負荷期間が長いほど顕著であった。

(b) 温度条件が細孔構造変化に及ぼす影響

①水セメント比35%の場合、水分供給が比較的良好な条件（90%RH、水中）の高温負荷（60、80℃）では、負荷温度が高いほど、負荷期間が長いほどしきい細孔径は小さくなったが、直径10nm程度以下の径の細孔量が増加し、累積細孔量が増加した。この現象には、高温負荷によるカルシウムシリケート水和物（以下C-S-H）の組織構造変化が影響していることも一因として挙げられるが、高温負荷による水酸化カルシウム含有量の増加、つまり未反応セメントの水和進行が認められたことから、高温下で異なる形態のC-S-Hが生成されるなど、セメントの水和反応が関与している可能性が示唆された。

注2) 試料の細孔構造を分析する測定装置の一つ。試料に圧入する水銀の圧力レベルと浸入量から、対応する細孔径と細孔量を算出し、細孔構造を比較評価することができる。

注3) 水銀圧入式ポロシメータを用いた細孔構造の分析において、水銀の圧入量が急激に増加する圧力に対応した細孔径を指す。しきい細孔径は、気体、液体、イオンなどの物質移動抵抗性と密接に関連する指標とされ、多くの研究例がある。

注4) ここでは、水銀圧入式ポロシメータによって測定される細孔直径範囲3.3nm～33μmの細孔総量を指す。

②水セメント比55%の場合では、水分供給が比較的良好な条件においても、高温負荷により、しきい細孔径が、大きな径へとシフトする傾向が認められた。

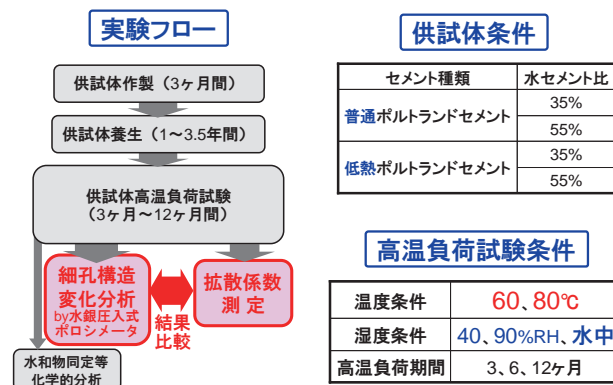


図 3-2-4 実験フローと実験条件

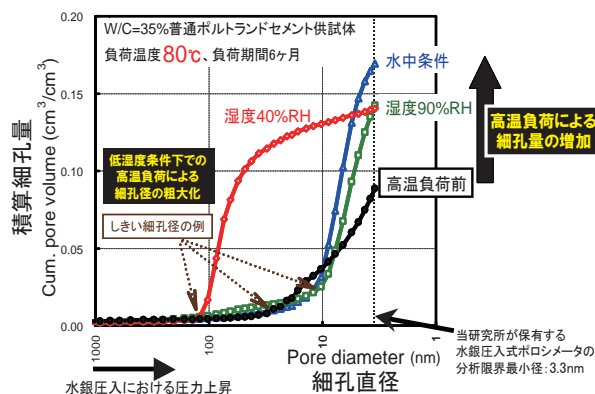


図 3-2-5 80℃高温負荷における湿度条件の影響比較

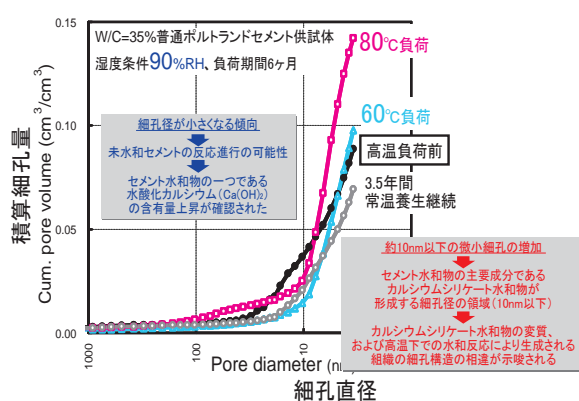


図 3-2-6 湿度90%RH 雰囲気における高温負荷が細孔構造の変化に及ぼす影響

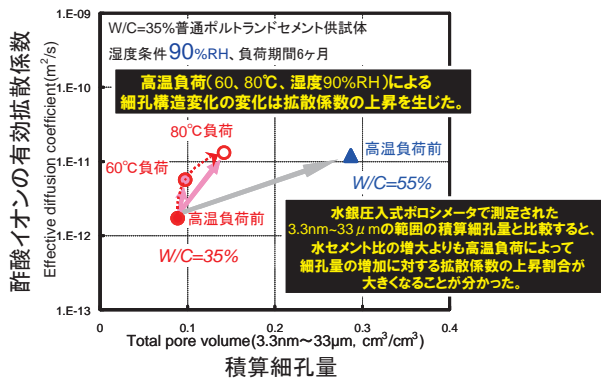


図 3-2-7 高温負荷による積算細孔量の増加と拡散係数の上昇割合

(c) 高温負荷による細孔構造変化がイオン拡散性に及ぼす影響

- ① 90% RH 雰囲気 で 6 カ月間高温負荷試験を実施した普通ポルトランドセメント供試体では、高温負荷による累積細孔量の増加が、酢酸イオンの有効拡散係数の上昇につながることを明らかにした。
- ② 高温負荷を受けた場合の累積細孔量の増加に対する有効拡散係数の上昇割合は、水セメント比の増大や溶脱による拡散係数の上昇と比較して大きいことを示した。
- ③ 約 10nm 以下の径の細孔量増加は、セメント硬化体マトリックスを形成する C-S-H 自体の変質に由来し、その多孔化によって拡散係数の上昇割合が大きくなったものと考えられる。

(4) 今後の展開

より広範囲の温湿度条件での細孔構造変化を把握して、高温負荷による細孔構造変化が拡散係数に及ぼす影響をモデル化し、高温によるセメント水和物の変質がその性能に与える影響のメカニズム解明を図る。

3-3 ベントナイト長期挙動試験・評価技術¹⁾

(1) 背景

低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分施設を安全で合理的に設計するためには、人工バリアの長期耐久性評価を精度よく行う必要がある。余裕深度処分施設で低透水層として使用されるベントナイト系材料は、セメント系材料の溶脱に伴って生成するアルカリ性の溶液の影響で、ベントナイトの構成鉱物が溶解し、期待される特性が変化することが懸念されている。特に、スメクタイトは、ベントナイトの低透水性や膨潤力と密接に関係する主成分鉱物であるから、セメント系材料の溶脱水の組成を考慮した条件でスメクタイトの溶解挙動を評価することは、低透水層の長期耐久性評価においても、処分施設の合理的な設計・性能評価を実施するためにも重要である。

(2) 目的

セメント系材料の溶脱水の組成を考慮した条件でフロースルー溶解実験(図 3-3-1、写真 3-3-1)を実施し、スメクタイトの溶解挙動を実験的に評価する。

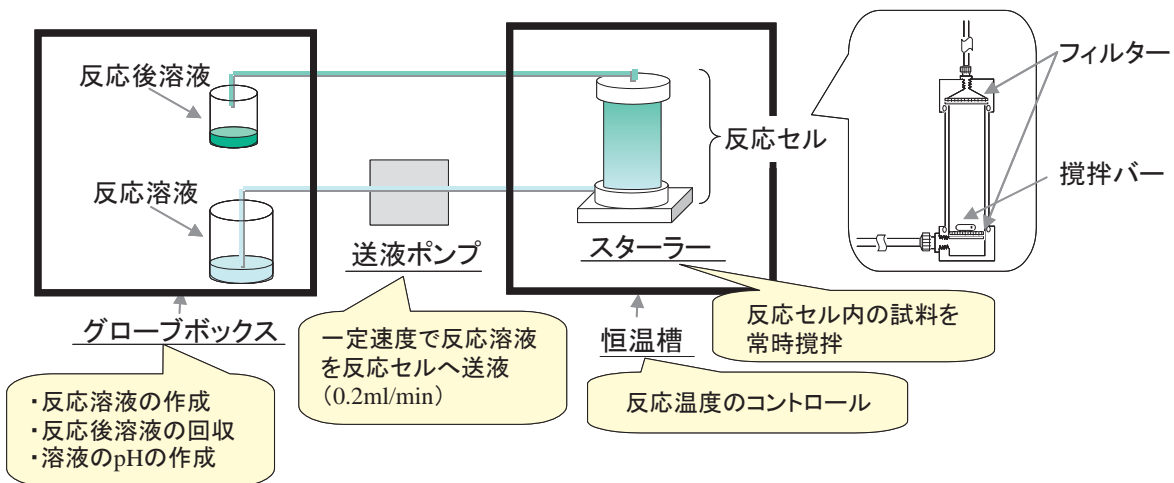


図 3-3-1 フロースルー溶解実験の概略図

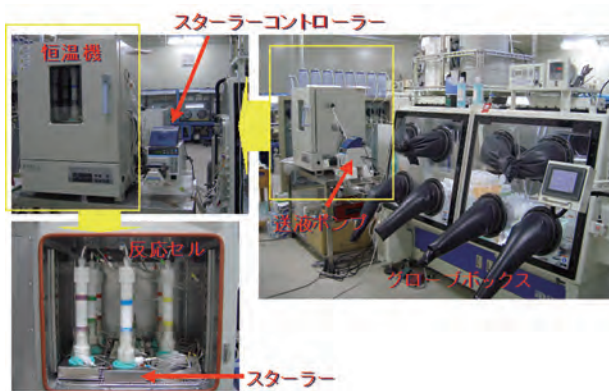


写真 3-3-1 フロースルー実験装置

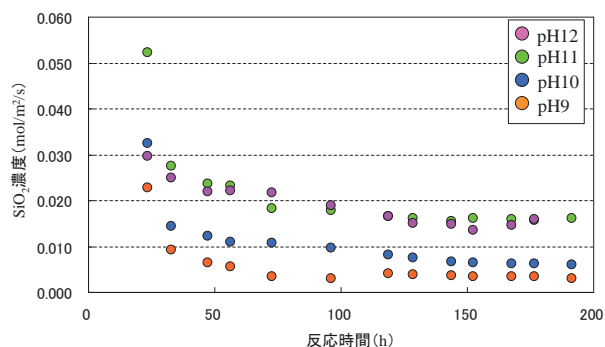


図 3-3-2 反応後溶液中の溶出 SiO_2 濃度の経時変化

(3) 主な成果

(a) スメクタイトの溶解に及ぼすアルカリ溶液の種類の影響評価¹⁾

これまでに報告されているスメクタイトの溶解速度は、 NaOH-NaCl や KOH-KCl 溶液中で得られたものしかない。しかし、処分施設で生成するアルカリ溶液は、セメント系材料の溶脱に起因する。そのため、セメントの主成分 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) を含む $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{CaCl}_2$ 溶液中で溶解実験を実施し、既往の結果と比較した。 $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{CaCl}_2$ 溶液中でのスメクタイトの溶解に起因する SiO_2 の溶出挙動は、既往のものと同様に反応初期に高い溶出を示すものの、その後溶出量は減少し、一定の値を示すようになった(図 3-3-2)。一定の値を示すようになった状態(定常状態)における SiO_2 濃度や Al 濃度を用いて、スメクタイトの溶解速度を算出した。その結果、 SiO_2 濃度から算出した溶解速度も、 Al 濃度から算出した溶解速度もほぼ同様の値を示した。このことは、スメクタイトの溶解が、化学量論的に進行していることを示唆している。また、既往の溶解速度と本研究での溶解速

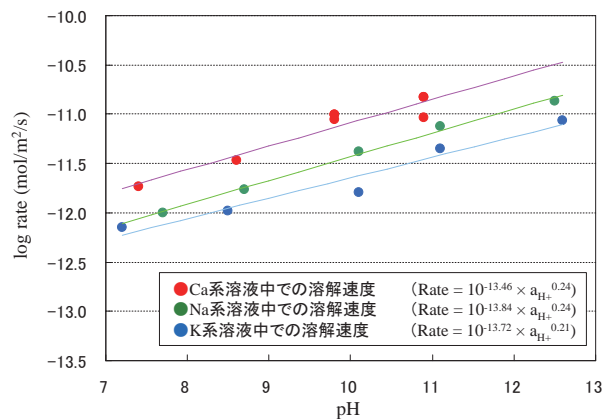


図 3-3-3 $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{CaCl}_2$ 溶液中での溶解速度と pH の関係

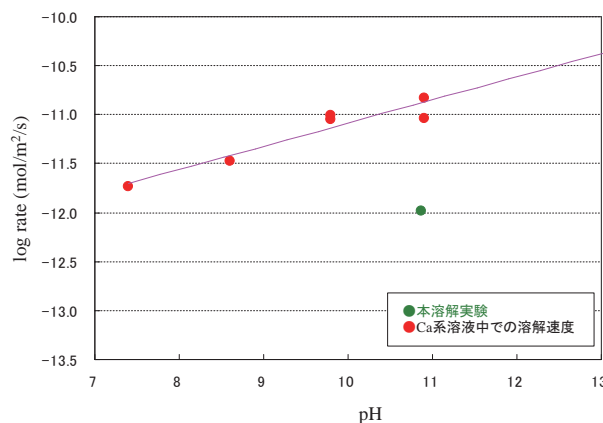


図 3-3-4 フライアッシュ混合低熱セメント溶脱水中での溶解速度と $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{CaCl}_2$ 溶液中での溶解速度

度を図 3-3-3 に示した。この結果から、アルカリ溶液の種類は、スメクタイトの溶解速度の pH 依存性に大きく影響しないことが明らかとなった。

(b) コンクリート溶脱水中でのスメクタイトの溶解挙動評価

実際のセメント系材料の溶脱水中でのスメクタイトの溶解挙動を評価した。溶脱水の作成に使用したセメント系材料は、フライアッシュ混合低熱セメント (LPC-FA) である。溶解実験の結果、溶脱水の組成によっては、液固比が大きな条件下でも二次生成物の沈殿が示唆された。一方で、二次生成物の沈殿が生じなかった溶解実験における溶解速度は、 $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{CaCl}_2$ 溶液中での溶解速度よりも遅い結果となった(図 3-3-4)。このことは、溶脱水中に SiO_2 や Al が含まれることで、溶液組成がスメクタイトの溶解平衡に近づいているために、溶解速度が

遅くなったものと推測される。上記の成果により、余裕深度処分施設の環境条件を考慮した溶解速度は、既往の溶解速度（溶解平衡から離れた条件での溶解速度）よりも遅い可能性があることが明らかとなった。

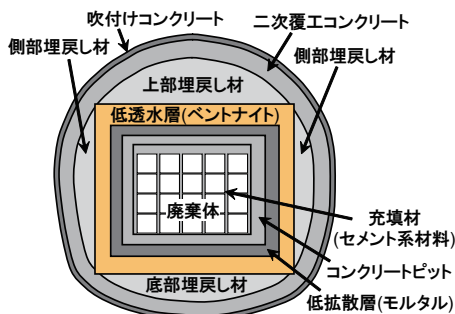
(4) 今後の展開

余裕深度処分施設での人工バリア間（ベントナイト系材料とセメント系材料）の相互作用を評価する。

3-4 処分場の品質管理技術¹⁾

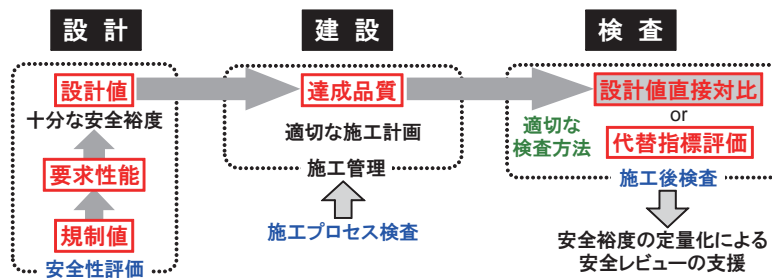
第3章の冒頭で示したように、放射性廃棄物処分施設の長期安全確保を行うには、放射性廃棄物処分施設は廃棄体を収納した後、順次埋め戻しされ、人手による維持管理が困難であることから、施設の建設・操業段階、埋戻し以降に人工バリアに生じるとされる各種影響要因を考慮した設計・施工が必要となる。

一方、施設建設にあたっては、設計・施工時に所定の機能を持った施設を建設するための品質管理技術、また施設竣工時には所定の機能を達成できていることを確認す



力学的特性、低拡散性、長期耐久性など、部材種類に応じてさまざまな性能が確保される。

図 3-4-1 余裕深度処分施設の設計概念図



十分に余裕を持った性能設計、ならびに施行後の品質検査によって処分施設の安全性を確保することが肝要と考えられる。

図 3-4-2 セメント系材料を対象とした処分施設の安全性確保システム概念の一例

るための技術が必要となる。

そのため、当研究所では、放射性廃棄物処分施設におけるセメント系材料の品質検査システムを構築する技術開発にも取り組んでいる。以下に、その技術開発の一つであるコンクリート表層の反発度ならびに透気性の非破壊評価の研究成果を示す。

(1) 背景

低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分施設（図 3-4-1）では、放射性核種の漏えいに対する長期安全性を説明するため、施工されたセメント系材料部材において設計性能が満足されていることを確認することが重要となる（図 3-4-2）。過去に類例を見ないセメント系材料の長期耐久性が要求される余裕深度処分においては、既存の品質検査技術の適用性について検証しておく必要がある。

(2) 目的

非破壊検査技術として、物質移動抵抗性の評価手段として期待される表層透気試験、ならびに強度特性評価として実績が豊富な反発度試験に着目し、それぞれの適用性を評価する。

(3) 主な成果

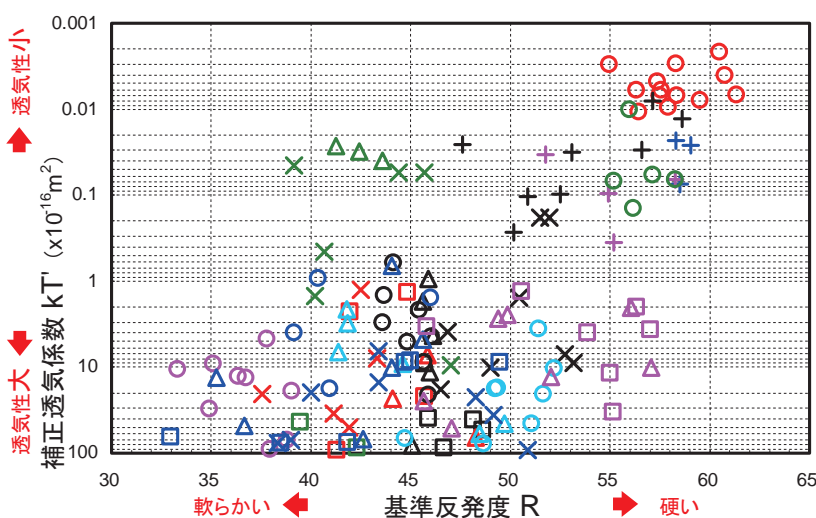
表層透気試験として Torrent 法表層透気試験^{注5)}を、反発度試験にはテストハンマー試験を採用した（表 3-4-1）。表層透気試験では、コンクリートの含水の影響を

注5) R. Torrent によって 1992 年に開発・公表されたコンクリートの非破壊透気試験方法。同法による測定値は、RILEM (The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures) が推奨する室内透気試験 CEMBUREAU 法のデータと強い相関が認められている。

表 3-4-1 セメント系材料の品質評価を対象とした非破壊試験技術の例

品質分類	非破壊試験技術	測定項目	品質評価項目例	実務適用実績
強度特性	テストハンマー試験	反発度	圧縮強度、弾性係数	豊富
	超音波試験	超音波伝播速度	圧縮強度、弾性係数	ほとんどない
	衝撃弾性波試験	衝撃弾性波伝播速度	圧縮強度、弾性係数	ほとんどない
物質移動抵抗性	表層透気試験	透気速度	透気係数	欧州で少々
	表層透水試験	透水速度	透水係数	ほとんどない
	表層吸水試験	吸水速度	吸水係数	欧州で少々

構造物の検査実務として実績が豊富なのは、強度特性評価を対象としたテストハンマー試験のみであり、今後、物質移動抵抗性評価に資する非破壊試験技術の確立が強く望まれている。



構造物区分	略号	経年	プロット
PC桁	桁A	57	+
	桁B	55	+
	桁C	54	○
	桁D	4	+
RC橋脚	橋脚A	69	○
	橋脚B1	66	△
	橋脚B2		□
	橋脚C1	56	○
	橋脚C2		△
	橋脚D1		○
	橋脚D2	43	△
	橋脚E	37	×
	橋脚F1		△
	橋脚F2	33	□
橋脚F3		×	
トンネル覆工	覆工A	93	×
	覆工B	74	□
カルバート	カルバートA	68	△
	カルバートB	45	○
マスコンクリート	マスコンn	25	○
	マスコンe		△
	マスコンs		□
	マスコンw		×

反発度が高いものほど透気係数が小さくなる傾向はあるが、必ずしも一対一の関係にはない。コンクリート表層の物質移動抵抗性に及ぼす、各構造物における配合や施工方法の違いの影響が、強度特性への影響と等価ではないことを示唆している。

図3-4-3 表層透気試験から得られた透気係数とテストハンマー試験で測定された基準反発度の関係

確認する目的から、Wenner法（四電極法）によって電気抵抗率を測定した。これらの非破壊試験方法を、経年約4～93年の計16種類の実構造物、および配合や養生条件が異なる8種類の室内供試体に適用し、両試験による測定結果を対比した。以下に主な成果を記す。

(a) 表層透気性と反発度の関係

反発度が高いものほど表層透気係数は小さくなる傾向が認められたが、必ずしも一対一の関係にないことが明らかとなった。これは、コンクリート表層の物質移動抵抗性に及ぼす配合や施工品質の影響が、強度特性への影響と等価ではないことを示すものと考えられる。バリア性能として低拡散性が要求される余裕深度処分施設においては、強度特性のみならず、物質移動抵抗性に着目した非破壊検査技術が有用であることが分かった（図3-4-3）。

(b) 表層透気性および反発度に及ぼす配合や養生条件の影響

室内供試体を対象にした実験では、配合や養生条件に応じて測定された表層透気性と反発度の関係に相違が認められた。特に、養生期間が不足した場合、表層透気性がより敏感に悪化し、中性化が進行した場合では反発度がより顕著に増大した。

(c) 表層透気試験で取得される透気係数の電気抵抗率による補正方法

表層透気係数を、Torrentらが提示する電気抵抗率との関係式（透気に及ぼす含水の影響を考慮した式）に基づき補正した値は、材齢経過に伴う緻密化によって低下が期待されるにも拘わらず、本実験範囲内において上昇する結果となった。これは、空隙構造や含水状態の変化が比較的大きな初期材齢へのTorrentらの式の適用に

おける課題を示唆するものであり、含水影響に関する適切な評価方法が必要であることが分かった。

以上、表層透気試験および反発度試験の両非破壊試験方法が、それぞれ物質移動抵抗性、強度特性の独立評価に資するものであり、検査に取り入れることで、より合理的な品質判定が可能となることが分かった。なお、本研究成果の一部は、土木学会コンクリート委員会「構造物表面のコンクリート品質と耐久性性能検証システム研究小委員会」、および「歴代構造物品質評価／品質検査制度研究小委員会」の活動を通じて得たもの^{2,3)}である。

(4) 今後の展開

強度特性や物質移動抵抗性を対象とした各種非破壊評価が、余裕深度処分施設においてセメント系材料に要求される性能評価とどのように関連付けられるか明らかにし、品質検査システムの構築について検討する。

3-5 新しい人工バリア材料開発

放射性廃棄物処分施設を構成する人工バリアには、放射性廃棄物に含有される放射性核種の特長、あるいは天然バリア特性により、長期の核種移行抑制機能が必要とされる。

そこで当研究所では、先に示したような核種以降抑制機能に影響を与えることが懸念される各種要因の特性評価と併せて、長期に耐久性が期待できる新材料の開発研究も実施している。

これまで、当研究所では低アルカリ性セメント（市販セメントの pH12.5～13.0 に対し、低アルカリ性セメントは 11.0 前後の pH を示す）の研究を実施してきたが、ここでは、セメント系材料の新材料として高耐久性高結晶型コンクリート、ベントナイト系材料の新材料としてサポナイトに関する研究成果を示す。

3-5-1 高耐久性高結晶型コンクリートの溶脱耐久性評価

(1) 背景

我が国の放射性廃棄物処分施設において使用される支保工などのコンクリート部材は、主に一定期間の強度維

持および体積維持が要求される。普通ポルトランドセメント（OPC）を用いたコンクリートは、地下水に溶けやすい水酸化カルシウムなどの水和物を多く含むため、地下水との長期間の接触で Ca^{2+} などが溶脱することで、コンクリート部材自体が低密度化し、さらにその一部が消失することで坑道の安定性を低下させる可能性が示唆されている。その対応策の一つとして、溶解度の低い安定鉱物を主要構成物とするセメント材料の使用の可能性が考えられ、当研究所では、高耐久性セメント材料の開発の一環として、結晶度の高い鉱物であるゾノトライト ($\text{Ca}_6(\text{Si}_6\text{O}_{17})(\text{OH})_2$)、ならびにその随伴生成物であるトバモライト ($\text{Ca}_5(\text{Si}_6\text{O}_{18}\text{H}_2) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) を主要構成物とする材料開発を行っている。

(2) 目的

ゾノトライト高含有型高耐久性セメント材料の溶脱特性を把握する。

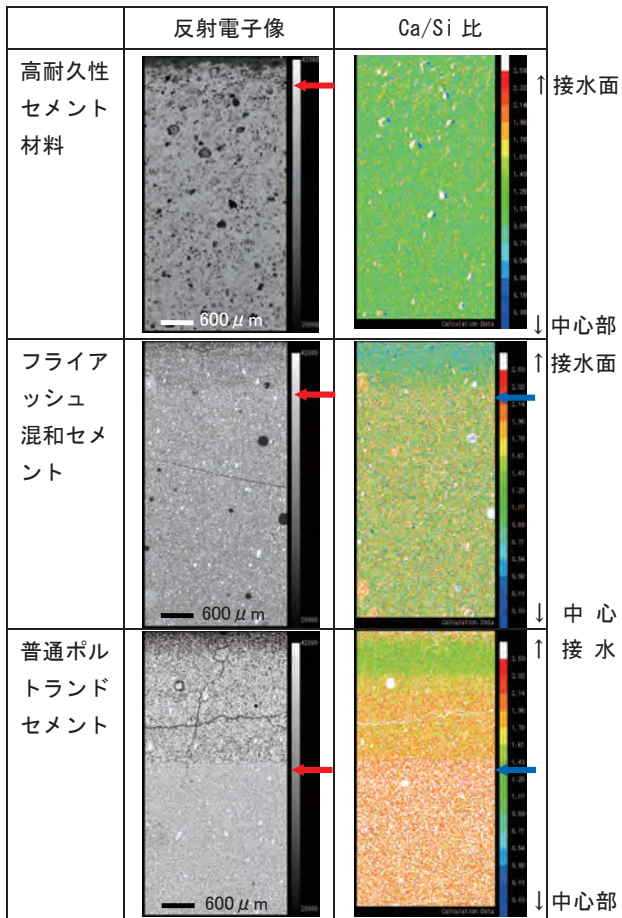
(3) 主な成果

(a) ゾノトライト高含有型セメント材料の溶脱耐久性評価^{1,2)}

微粉末石英および普通ポルトランドセメントの配合は、これまでに最適と判断された各々 30%、52% とした。この配合をもとにオートクレーブ養生 (220℃ -24 時間) を施してペースト硬化体を製造した。主要生成物相がゾノトライトならびにトバモライトとなる硬化体は、副生成物であるカルシウムシリケート水和物 (C-S-H) などが溶脱しても、溶解度の低いそれらの結晶相（主要生成物相）は残存する。C-S-H などの副生成物を構成する Ca および Si については、ほぼ同時に溶脱することを確認した。これらを踏まえ、硬化体の溶脱変質部においても Ca/Si 比がほぼ変化しない、固相の低密度化領域の拡大速度抑制効果に着目した場合、普通ポルトランドセメントおよびフライアッシュ混和セメント硬化体に比べて、溶脱耐久性が高いことが分かった（図 3-5-1）。

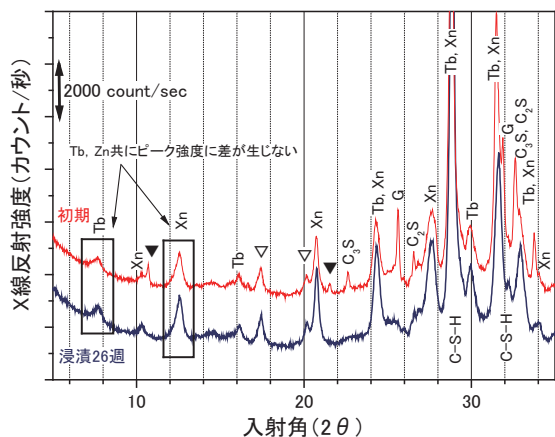
(b) 化学的構造および細孔特性の安定性評価

溶脱挙動がほぼ収束した状態における硬化体に含まれるゾノトライト、ならびにトバモライトの減少傾向は認められず（図 3-5-2）、また、それらの結晶相を構成する Si イオンの結合状態に変化は認められなかった（図 3-5-3）。硬化体の溶脱変質は、主に C-S-H などの副生成



注) ← 低密度化フロント → 溶脱変質フロント
試料中のひび割れは、分析前の試料調整時に発生したものである。

図 3-5-1 EPMA (電子線マイクロアナライザー) による硬化体内の元素濃度分布測定、変質フロントの判定 (ブロック試料、浸漬 82 週間)



注) XRD (X線解析) 分析による。
Xn: ゼノトライト Tb: トバモライト ▽: Katoite (C_3ASH_4)
CC: カルサイト Q: クオーツ

図 3-5-2 構成鉱物相の比較 (薄板試料、浸漬 54 週)

物の溶脱変質によりもたらされ、孔径 100 ~ 1000nm の範囲でわずかに細孔容積率が増加することを確認した (図 3-5-4)。

(c) 周辺環境への影響低減効果

ゾノトライトならびにトバモライトを主要構成物とする硬化体の、溶脱変質に伴う浸漬液の pH ならびに Ca^{2+} 濃度は比較的 low、母岩およびベントナイト系人工バリア材料への悪影響を低減する効果が期待できる。

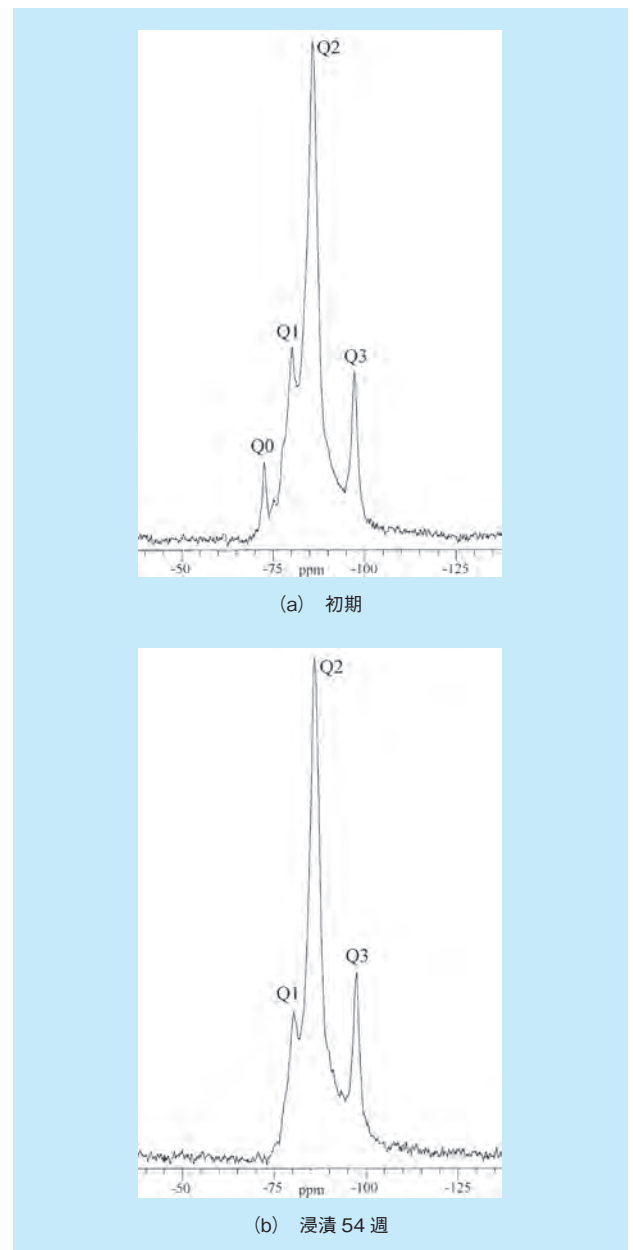
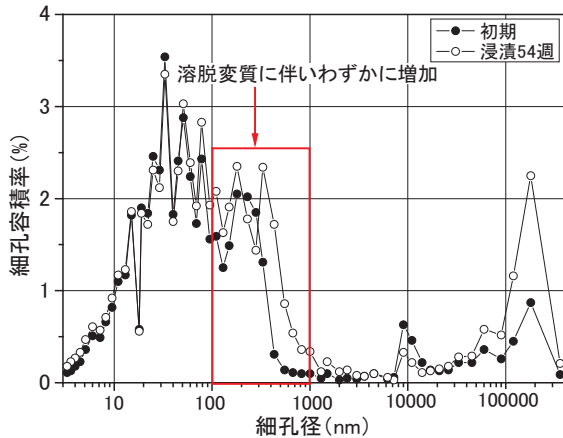


図 3-5-3 ^{29}Si -NMR スペクトルの変化 (薄板試料、浸漬 54 週間)



注) 溶脱変質に伴い100~1nmの細孔容積率がわずかに高まる。

図 3-5-4 細孔径分布の変化

(4) 今後の展開

溶脱イオン量は、硬化体密度の影響を受けると推察されるため、硬化体密度の向上、すなわち空隙率に大きな影響を及ぼすと考えられる練混ぜ水量の抑制に伴う構成物相の変化と溶脱イオン量の関係を明らかにする。

3-5-2 アルカリ環境下でのサポナイトの溶解速度

(1) 背景

放射性廃棄物処分施設を通過する地下水流量を抑制するための、人工バリア候補材料として検討されているベントナイト系材料は、セメント系材料の溶脱に伴って、生成するアルカリ性の地下水の影響で緩やかに変質し、バリア性能が長期的に変化することが懸念されている。その長期的なバリア性能の変化を精度よく予測するためには、ベントナイトのアルカリ変質挙動を理解する必要があり、定量的な検討が行なわれている。一方で、上述

のような検討と並行して、アルカリ環境下で変質しにくい材料の人工バリアとしての適応可能性を検討することは、今後の処分施設設計を合理化する上での方策の選択肢を増やし、また、現状の検討よりも長期間バリア性能を維持させることにもつながる可能性がある。

(2) 目的

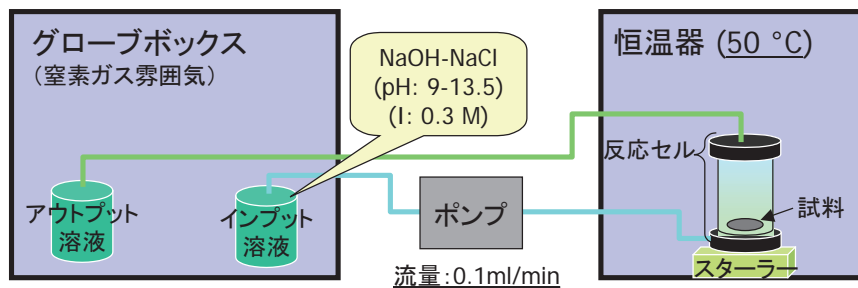
ベントナイトと類似した特性を持つとされているサポナイト^{注6)}のアルカリ環境下での溶解速度を実験的に明らかにし(図 3-5-5)、モンモリロナイトの溶解速度と比較することでその有用性を評価する。

(3) 主な成果

(a) サポナイトの溶解速度³⁾

サポナイトの溶解に伴う SiO₂ の溶出は、反応初期に高い溶出濃度が観察されたが、徐々に濃度は低下し、ほぼ一定の濃度を示した(図 3-5-6)。既往の溶解速度算出方法に基づき、サポナイトの溶解に伴う溶出 SiO₂ 濃度(図 3-5-6)と溶解に寄与する反応表面の面積(図 3-5-7)を用いて溶解速度(mol/m²·s)を算出した。溶解速度の算出に使用した反応表面積は、溶解に寄与する反応表面をサポナイト粒子の端面と仮定し、原子間力顕微鏡を用いて粒子端面面積を測定した(図 3-5-7)。その結果、サポナイトの溶解速度は、pH9.8(サポナイトの電荷ゼロ点と類似)を境に低 pH 側と高 pH 側で増加した(図 3-5-8、表 3-5-1)。

注6) モンモリロナイト(鉱物名)と同様にスメクタイト族(族名)に分類される粘土である。両鉱物の大きな違いは、化学組成にあり、サポナイトは、八面体に Mg を主として含み、モンモリロナイトは Al を含む。



本溶解実験は、インプット溶液を一定流量で反応セルに送液し、試料を溶解させて、回収されたアウトプット溶液中の溶出元素濃度を測定することで溶解速度を算出する方法である。本研究での実験条件は、図中のとおりである。

図 3-5-5 サポナイトの溶解実験の概略図

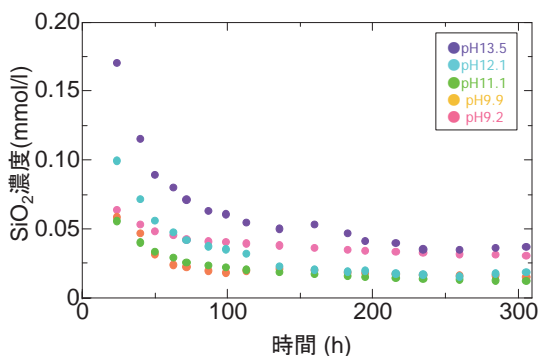
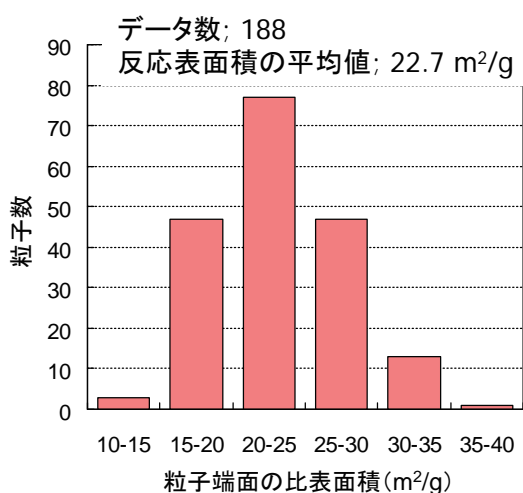
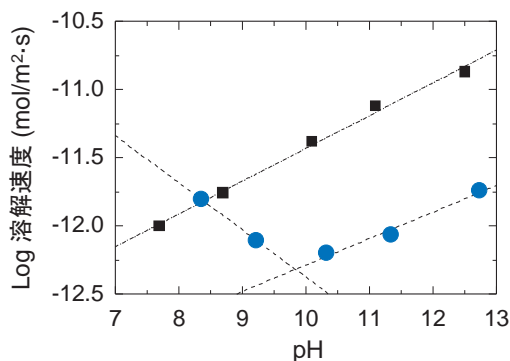


図 3-5-6 サポナイト溶解実験におけるアウトプット溶液中の SiO₂ 濃度の経時変化



モンモリロナイトなどスメクタイトの溶解に寄与する反応表面は、原子間力顕微鏡を用いた溶解のその場観察から、粒子の端面であることが明らかにされている。本研究でもサポナイトの溶解反応表面を粒子の端面と仮定して、その比表面積を測定し、溶解速度の算出に使用した。

図 3-5-7 サポナイトの粒子端面の比表面積



pHの値は、室温での測定値から実験条件の50℃におけるpHに補正した値。

図 3-5-8 サポナイト (●) とモンモリロナイト (■) の溶解速度 (モンモリロナイトの溶解速度は Sato et al. (2004) から引用)

表 3-5-1 各 pH 条件におけるサポナイトの溶解速度

pH	溶解速度 (mol/m ² ·s)
8.4	1.57 × 10 ⁻¹²
9.2	7.84 × 10 ⁻¹³
10.3	6.29 × 10 ⁻¹³
11.3	8.60 × 10 ⁻¹³
12.7	1.82 × 10 ⁻¹²

pHの値は、室温での測定値から実験条件の50℃におけるpHに補正した値。

(b) サポナイトとモンモリロナイトの溶解速度の比較³⁾

サポナイトの溶解速度は、pH8.5以上で既往のモンモリロナイトの溶解速度よりも遅く、最大で1桁程度遅い(図3-5-8)。セメント系材料を使用する放射性廃棄物処分施設において、ベントナイトを補完する形でサポナイトを使用する場合には、少なくともベントナイト分散液のpH (pH9程度)以上のpH条件が生じるものと推測される。そのため、セメント系材料を使用する放射性廃棄物処分施設では、サポナイトの方がアルカリ溶解に関しては有利である可能性が示唆された。

(4) 今後の展開

サポナイトとモンモリロナイトの、アルカリ環境下での安定性に違いをもたらすメカニズムを検討する。また、サポナイトの埋蔵量やコスト面も考慮して、人工バリア材料としての適用可能性を検討する。

3-6 地下空洞の長期安定性評価技術

3-6-1 ボーリングコアによる岩盤評価技術

概要調査に基づく精密調査地区選定段階においては、最終処分法に基づき、地層が掘削に支障のないことを確認する必要がある。また、処分施設を建設できることを、確認しておくことが不可欠である。そこで、地表からの調査のみが行われる概要調査段階において、地下施設の建設可能性を評価するために必要な技術開発に取り組んだ。概要調査は地表から行われるので、地下深部の岩盤をボーリング調査によって評価することになる。そこで、ボーリングコアに基づいた岩盤の工学的物性や、施工性の評価技術の高度化を図った。

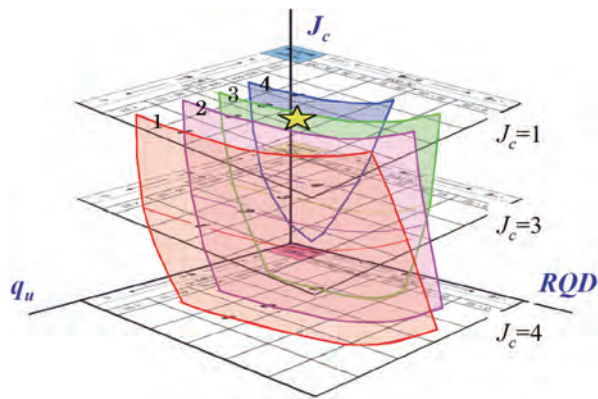


図 3-6-1 3つの要素 (qu、RQD、Jc) の3次元空間における物性値などの分布の模式図

処分施設が建設できることを具体的に確認するためには、設計に必要な物性を評価することが必要であり、複数候補地点を比較するために、支保や掘進速度なども評価することが重要である。ボーリングコアの情報から、これら岩盤工学特性を合理的に評価する必要がある。そのためにボーリングコアから評価可能な3つの項目、コアの一軸圧縮強さ (qu)、RQD (Rock Quality Designation; コア長100cmのうち、長さ10cm以上で棒状コアになっているものの合計をcmで表したもの)、割れ目の状態 (Jc) ごとにランク分けして、岩盤に評点を与える手法 (評点式岩盤評価法と呼ぶ) が有効であると考えた。例えば、海外でも広く使われている RMR (Rock Mass Rating) 法はこの3項目を網羅しており、代表的な評点式岩盤評価法といえる。しかし、RMRの評点から岩盤物性などを推定する計算式なども提案されているものの、日本の岩盤にはあまりフィットしないとも指摘されている。そこで RMR 法などとも共通の評価項目を用いて、かつ日本の岩盤に適切な独自の方法の検討を行った。RMRのように3つの要素 (qu、RQD、Jc) の評点から1つの総合点を算出するのではなく、評点の3次元空間の中で強度その他の岩盤工学特性を表示することにした。図 3-6-1 は、その概念を示している。ただし、実際の表示では、Jc一定のいくつかの断面で切った RQD-qu 図を用いる。

(1) 岩盤せん断強度の評価

図 3-6-2 に一例として、Jc=3 断面での粘着力のデータを RQD-qu 図上にプロットした¹⁾。ここで、qu は 150MPa 以上、100 ~ 150MPa、50 ~ 100MPa、25 ~

割れ目状態 Jc=3 (RMR: 20)		RQD (%)				
		100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	25 - 0
大 ↑ 硬さ ↓ 小	150 <	奥美濃 (板取側) 新高瀬 4.22	5-6 3.5	小丸川 6.0 3.92	3.28	2.53
	100-150	奥多良木増原 奥只見 2.8	2.51	下郷 1.5	葛野川 1.5	
	50-100	2.89		2.64 本川 3.1	2.13	1.53
	25 - 50	1.67		1.49	1.12	0.71
	25 >	0.97		0.83	0.57	0.30

図 3-6-2 岩盤の粘着力 (MPa) の分布と等高線 (Jc=3 断面を2次元で表示)

50MPa、25MPa 未満の5段階に区分した。RQD、Jc も5段階に区分し、区分の境界は RMR と同様とする。なお、データは日本のダム地点の2,000点近い岩盤せん断試験データをグループ化したものであり、参考のために地下発電所地点の単独試験データもプロットしている。これらのデータに基づき、岩盤せん断強度の等高線を描いて評価基準²⁾とした。

(2) 岩盤弾性係数の評価

この分析に用いることのできたデータは、地下発電所の平板載荷試験データのみであり点数が少ない。また、これらの地下発電所地点は、ほとんどの場合 Jc= 1 に相当する。このため、他の Jc 区分は除くものの、RQD と qu の変化に伴う岩盤弾性係数を、おおむね実績と整合的に推定できる評価基準を作成することができた。

(3) 掘進速度

既設トンネルについて、工法別 (NATM、TBM) に掘進速度と qu、RQD、Jc との関係を、施工実績から検討した¹⁾。

一般的傾向として、qu が大きい岩盤では、掘進速度は qu の変化の影響をあまり受けず、RQD の変化が大きく影響すると考えられる。一方、逆に qu の小さい岩盤では、掘進速度は RQD の影響をあまり受けなくなると考えられる。図 3-6-3 には、一例として NATM 工法

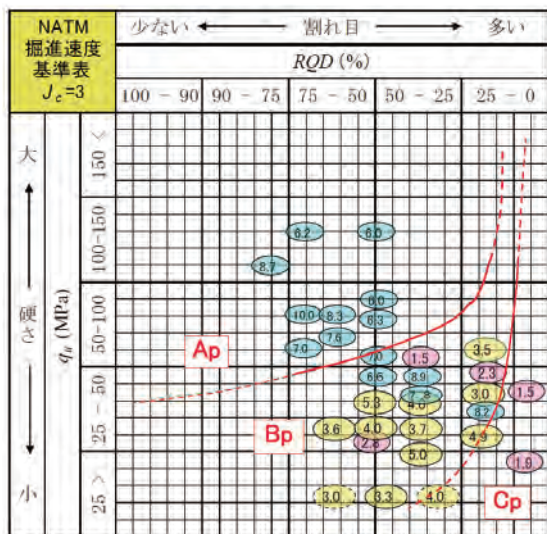


図 3-6-3 NATM の場合の掘進速度の分布と区分線 (Jc=3 断面を 2 次元で表示)

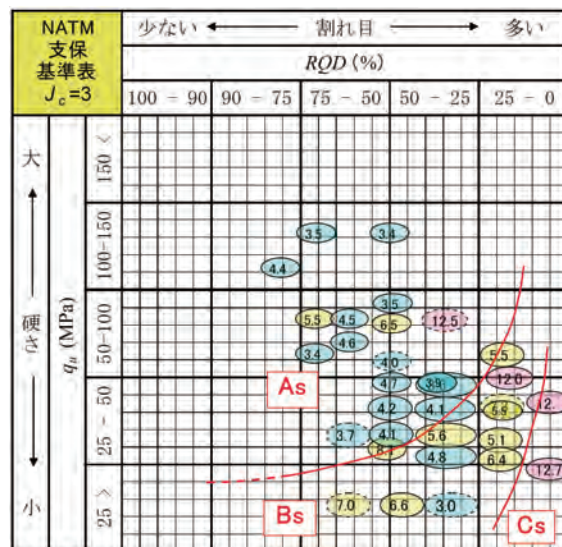


図 3-6-4 NATM の場合の支保の分布と区分線 (Jc=3 断面を 2 次元で表示)

の場合の掘進速度データのプロットならびに掘進速度を Ap、Bp、Cp に区分した線を示す。

また、Jc 別に見たそれぞれの区分線は、Jc=1～2 から Jc=3 では変化が少なく、Jc=3 から Jc=4～5 ではやや大きく変化することが分かった。

一般的には、岩盤が良好 (qu、RQD が大きく Jc が小さい) になるほど掘進速度が大きくなるが、TBM 工法の場合には、Jc=1～2 のとき、qu、RQD とともに大きい良好な岩盤では、掘進速度がやや小さくなる。これはカッターの磨耗が激しく、カッター交換を頻繁に行う必要があることが原因と考えられる。

(4) 支保

既設トンネルについて、工法別 (NATM、TBM) に支保と qu、RQD、Jc との関係を施工実績から検討した¹⁾。評価基準図の一例を、図 3-6-4 に示す。

評価基準図の支保の区分線は、NATM 工法でロックボルト 10 本/m より多い、5～10 本/m、5 本/m 以下、TBM 工法で無支保、ファイバーコンクリート、リング支保におおむね対応するようにした。それぞれ支保の程度を (軽い) As > Bs > Cs (重い) とすると、区分線の形状は掘進速度の場合と同様であり、いずれも右下に凸の曲線となった。

割れ目状態 Jc 別に見たそれぞれの区分線は Jc=1～2 から Jc=3 ではやや変化するのに対して、Jc=3 から Jc

=4～5 では大きく変化しており、これも掘進速度の検討結果と同様であった。

以上(1)～(4)に示したように、ボーリングコアの情報から岩盤の強度、変形性や掘進速度、支保の程度を推定する手法を構築した。

本研究成果は、原環機構受託報告「概要調査における地質環境特性 (岩盤、地下水) の調査技術、評価手法の高度化」の成果の一部を取りまとめたものである。

3-6-2 ニアフィールド岩盤の計測・評価技術

高レベル放射性廃棄物処分施設では、ガラス固化体から発生する熱の影響を考慮した、処分空洞周辺 (ニアフィールド) の長期挙動評価技術が求められている。我が国では、割れ目が少なく透水性の低いという特徴を有する堆積軟岩が広く分布しており、処分施設の候補岩体の 1 つとして考えられている。しかし、堆積軟岩を対象とした原位置の加熱実験は見あたらず、事例研究を通じた熱、水、応力の相互作用の現象解明と、長期挙動評価手法の確立が望まれている。

そこで、堆積軟岩サイトにおける原位置加熱実験を実施し、温度が変化する環境下での岩盤の温度・ひずみ計測手法の開発、および比抵抗トモグラフィーによる高温域進展のモニタリング手法の確立を行った。試験を実施した堆積軟岩サイトは、上総層群の泥岩層に構築した地

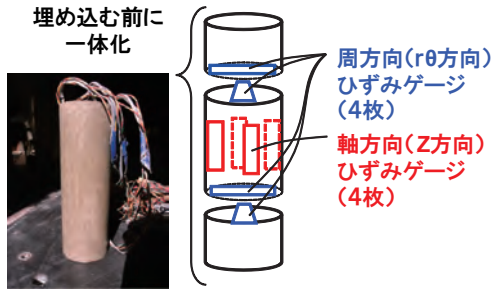


図 3-6-5 コアセンサー試作版

下空間実験場である。

(1) 温度が変化する環境下での岩盤の温度・ひずみ計測手法の開発

温度が変化する条件で、岩盤内のひずみを正確に測定する方法は確立されていない。そこで、コアにひずみゲージと熱電対を貼って岩盤内に埋め戻すひずみ計測方法（コアセンサー）を開発した³⁾（図 3-6-5）。原位置加熱実験により、開発した計測方法を用いて、岩盤内部のひずみと温度を同時に計測し、温度が変化する条件での岩盤内部のひずみを計測することができた。また、温度と半径方向のひずみの計測結果は、次項 3-6-3 記載の熱-水-応力連成解析コードの解析結果とよく一致した（図 3-6-6）。しかし、鉛直方向のひずみについては、計測結果と解析結果が異なるため、今後、計測および解析の両面からの原因解明が必要である⁴⁾。

原位置加熱実験の結果として、岩盤内部の温度変化については、初期温度約 16℃ の条件で直径 30cm のヒーター孔に 90℃ の温度が負荷される時、ヒーター孔の孔壁から約 20cm 程度の範囲が 40℃ を上回る温度となった（図 3-6-7）。また、岩盤内部のひずみは、温度の変化に応じて主として熱膨張で生じていることが分かった。

(2) 比抵抗トモグラフィーによる高温域進展のモニタリング手法の確立

ガラス固化体から発生する熱の影響を評価するため、多数の熱電対をニアフィールドに設置することは、現実的には困難であることが予想される。そこで、原位置加熱実験において、地表部およびヒーター孔周辺の地中に配置した電極を用いて、比抵抗トモグラフィー法の繰り返し測定を行い、比抵抗の変化から高温域の進展状況をモニタリングする手法の適用性を検討した⁵⁾。その結果、

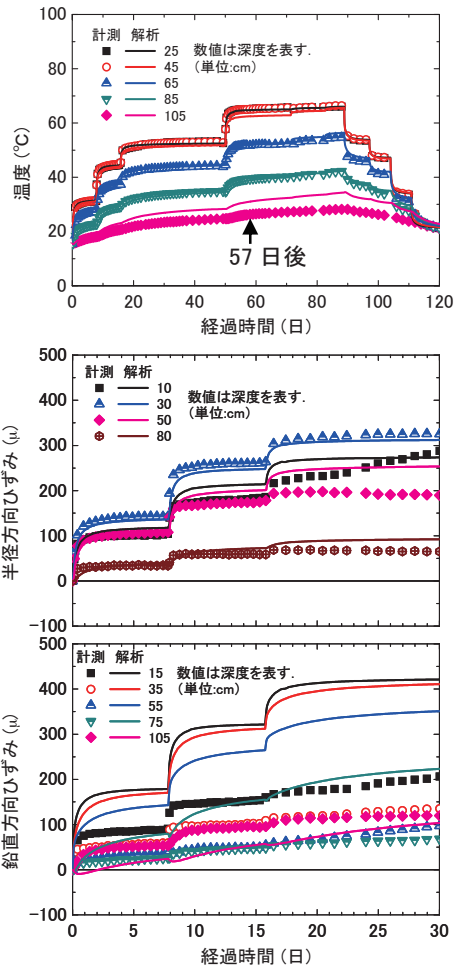


図 3-6-6 コアセンサーによる計測結果と解析結果の温度およびひずみの比較

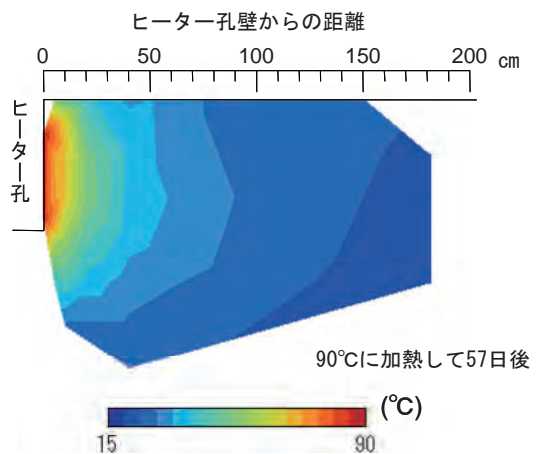


図 3-6-7 計測結果から得られた温度コンター

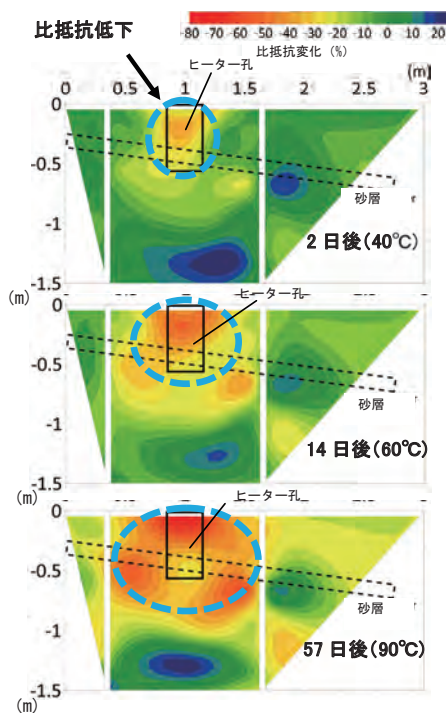


図 3-6-8 比抵抗トモグラフィの結果

ヒーター孔の温度の上昇に伴い、比抵抗の低下域が徐々に広がる様子が計測され、高温域の進展状況をモニタリングできる可能性が示された(図 3-6-8)。

3-6-3 熱-水-応力 3 連成解析技術

人工バリア定置後のニアフィールドでは、長期にわたり、廃棄体の発熱、地下水の再冠水、緩衝材・埋戻し材の膨潤、岩盤のクリープなどが進行する。廃棄体からの熱は熱ひずみを生じさせるとともに、地下水の移動に影響を与え、それがさらに緩衝材の膨潤挙動に影響を与える。また、緩衝材、岩盤の熱物性は、飽和度の影響を強く受ける。このように、ニアフィールドは熱-水-応力が連成する複雑な環境となり、処分施設の設計・安全評価において、この長期的な連成現象を考慮する必要がある。そこで、当研究所では、熱-水-応力の連成による影響を予測するための数値解析コード LOSTUF の開発を進めてきた⁶⁾。

(1) 解析コード LOSTUF の概要

LOSTUF の開発においては、支配方程式として、エネルギー保存則、地下水の質量保存則、力の釣り合い式を連立させることにより、多孔質媒体での熱-水-応力

連成の定式化を行い、有限要素法プログラムに導入した。また、ニアフィールドでの長期的な力学挙動を評価するため、岩盤のクリープモデル、拡散二重層理論に基づく膨潤評価式を用いた、緩衝材の膨潤挙動モデルを導入した。

(2) 解析コードの検証

この解析コード LOSTUF には、実スケールでの連成現象を定量的に予測できる性能が求められる。

LOSTUF の予測性能を検証するため、以下のような熱-水-応力連成実験に対して適用してきた(括弧内は実験の実施者)。

- ・堆積軟岩での原位置加熱実験(当研究所)⁴⁾
- ・ベントナイトへの室内加熱浸透試験(CEA、フランス; CIEMAT、スペイン)⁷⁾
- ・花崗岩地下実験サイトでのプロトタイプ試験(AECL、カナダ)⁸⁾

(3) LOSTUF の適用例

ここでは、上記のうち、フランスの CEA が実施したベントナイトの室内加熱浸透試験に対する解析結果を紹介する。

試験は、圧縮ベントナイトにより作成された直径 200mm、高さ 200mm の円柱型試験体を圧力容器に封入し、下面を 150°C に加熱することで温度勾配を形成した(フェーズ 1)後、上面から 1.0MPa で水を注入する(フェーズ 2)ものである。試験中は、温度、相対湿度、軸応力の経時変化を計測した(図 3-6-9)。

図 3-6-10 ~ 図 3-6-12 に温度、相対湿度、軸応力の計測結果と、当研究所が実施した解析の結果を合わせて示す。温度は下面が加熱されたフェーズ 1 に上昇し、フェーズ 2 では一定に保たれる結果となった。解析は、その経時変化をよく再現している。相対湿度については、まず、フェーズ 1 において、ヒーターから遠い計測点(HR7)で上昇傾向となり、ヒーターから近い計測点(HR3)では下降傾向となる。これは、ヒーター側から水分が移動していることを表している。一方、フェーズ 2 では、水が注入されるため、全ての計測点で相対湿度が上昇する。解析結果は、この挙動を再現している。軸力については、フェーズ 1、2 ともに上昇傾向を示す。解析値は、フェーズ間で一旦ロードセルをはずし、荷重

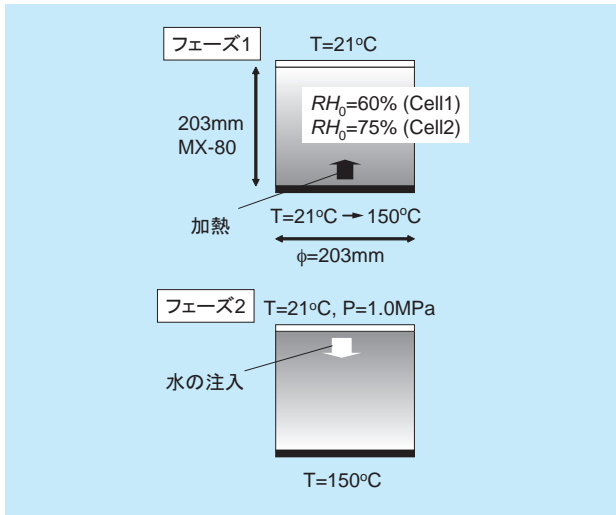


図 3-6-9 加熱浸透試験の模式図

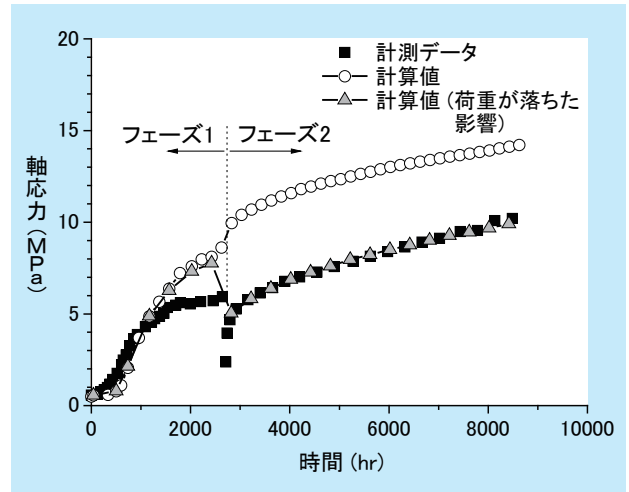


図 3-6-12 解析と計測の比較 (軸応力)

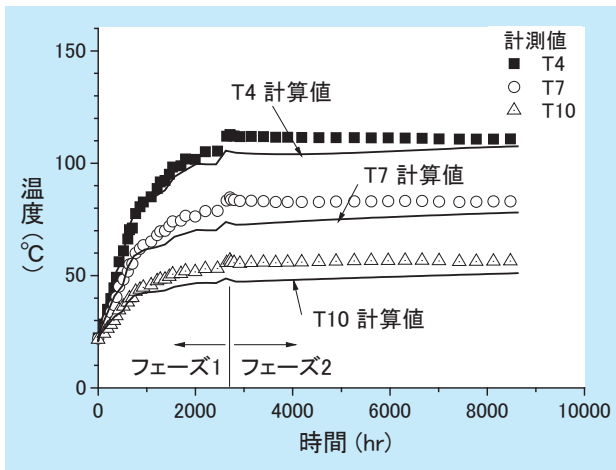


図 3-6-10 解析と計測の比較 (温度)

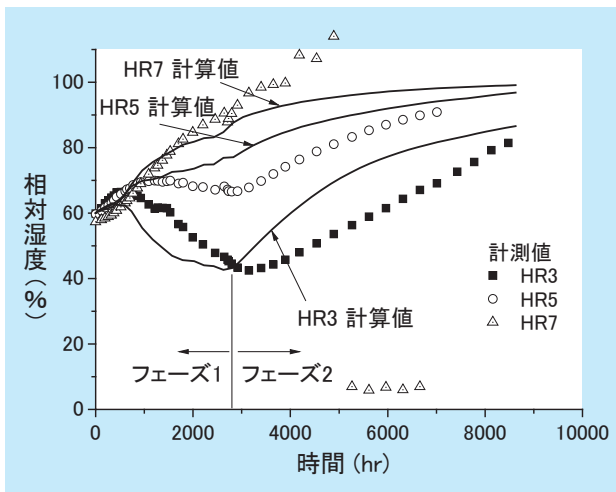


図 3-6-11 解析と計測の比較 (相対湿度)

が落ちた影響を考慮するケースとしないケースの2ケースを示している。解析はほぼ傾向を捉えているが、フェーズ1での応力を過大に予測している。

(4) 今後の展開

これまでの LOSTUF の適用事例からは、温度分布、再冠水挙動については精度よく再現できている。一方、緩衝材の膨潤挙動などの力学挙動については、再現性に乏しい場合もあり、モデルの高度化を進める必要がある。また、長期的には地化学作用が熱-水-応力連成挙動に影響を与える可能性があり、熱-水-応力-化学の4連成についても検討を進めている。

参考文献

3-1

- 1) 田中幸久、中村邦彦：海水の濃度と高温履歴がベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響、電力中央研究所研究報告 N04007、2004年10月。
- 2) 田中幸久、長谷川琢磨、中村邦彦：海水の濃度が各種ベントナイトの透水係数ならびに膨潤圧に及ぼす影響のモデル化、電力中央研究所研究報告 N07008、2007年12月。
- 3) 中村邦彦、田中幸久：高レベル放射性廃棄物処分孔での廃棄体の沈下挙動-遠心模型実験と簡易沈下予測法の提案-、電力中央研究所研究報告 U03074、2004年3月。
- 4) 中村邦彦、田中幸久：高レベル放射性廃棄物処分孔でのオーバーバックの沈下挙動-ベントナイト種類の影響と沈下予測手法の高度化-、電力中央研究所研究報告 N05029、2006年8月。
- 5) 田中幸久、廣永道彦、工藤康二：飽和したベントナイトのガス移行メカニズムとそのモデル化、電力中央研究所研究報告 N07005、2007年10月。

- 6) 田中幸久：飽和した高密度ベントナイトのガス移行解析手法の開発－力学連成気液2相流によるモデル化と適用性の検討－、電力中央研究所研究報告 N08065、2009年6月。
- 7) 田中幸久、廣永道彦、森 敦史：放射性廃棄物処分施設へのガス移行解析コードの適用に関する研究－気液2相流解析コードの選定と適用－、電力中央研究所研究報告 N09003、2009年12月。

3-2

- 1) 蔵重 勲、廣永道彦：地下水で炭酸水素イオンによるセメント系材料の溶脱抑制メカニズムに関する検討（その1）、電力中央研究所研究報告 N06028、2007年4月。
- 2) 蔵重 勲、吉田崇宏、千田大詩、廣永道彦：高温負荷による普通・低熱ポルトランドセメント硬化体の細孔構造変化とイオン拡散性に及ぼす影響、電力中央研究所研究報告 N07041、2008年7月。

3-3

- 1) 横山信吾、佐藤 努、大谷裕介、高山英樹、中村邦彦、田中幸久、廣永道彦：低レベル放射性廃棄物処分施設における人工バリアの耐久性評価－アルカリ環境下でのベントナイト系材料中のモンモリロナイト溶解に関する研究－、電力中央研究所研究報告 N07006、2007年11月。

3-4

- 1) 蔵重 勲、廣永道彦、松田芳範、岸 利治：放射性廃棄物処分施設におけるセメント系材料の品質検査システムの構築（その1）－コンクリート表層の反発度ならびに透気性の非破壊評価－、電力中央研究所研究報告 N08081、2009年8月。
- 2) 土木学会 構造物表面のコンクリート品質と耐久性性能検証システム研究小委員会（335委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集、2008年4月。
- 3) 土木学会 歴代構造物品質評価／品質検査制度研究小委員会（216委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集、2009年11月。

3-5

- 1) 山本武志：結晶性トバモライトを含む耐熱コンクリートの開発－ペーストによる検討－、電力中央研究所研究報告 U02020、2003年1月。
- 2) 山本武志、廣永道彦：ゾノトライト高含有型高耐久性セ

メント材料の溶脱特性評価、電力中央研究所研究報告 N08006、2008年11月。

- 3) 横山信吾、佐藤 努：アルカリ環境下におけるサボナイト溶解の速度論的研究－放射性廃棄物処分施設における人工バリア材料としての適応可能性検討－、電力中央研究所研究報告 N07020、2008年3月。

3-6

- 1) 澤田昌孝、新 孝一、秦野輝儀、津田延裕、三和 公、土 宏之：概要調査段階の処分空洞建設性評価－ボーリングコアを利用した評点式岩盤評価法－、第38回岩盤力学シンポジウム、2009年。
- 2) Koichi Shin, Masataka Sawada, Yoshiki Inohara, Tadashi Miwa, Makoto Asakawa, Takumi Shidahara and Teruyoshi Hatano: An Engineering Rock Mass Classification To Estimate Rock Properties, Support And Excavation Rate, World Tunnel Congress 2009.
- 3) 岡田哲実他：堆積軟岩における原位置加熱実験（その1）－泥岩の熱・力学特性調査と温度・ひずみ計測手法の高度化－、電力中央研究所研究報告 N08054、2009年7月。
- 4) 澤田昌孝他：堆積軟岩における原位置加熱実験（その2）－熱・水・応力連成解析の軟岩地山への適用に向けての基礎検討－、電力中央研究所研究報告 N08055、2009年7月。
- 5) 窪田健二他：堆積軟岩における原位置加熱実験（その3）－比抵抗トモグラフィ法を用いた高温域進展状況のモニタリング－、電力中央研究所研究報告 N08056、2009年7月。
- 6) 澤田昌孝、岡田哲実、長谷川琢磨：高レベル放射性廃棄物処分地下施設の長期挙動予測評価プログラムの開発－緩衝材膨潤評価式の数値モデル化と熱・水・応力連成解析スキームの構築－、電力中央研究所研究報告 N05028、2006年6月。
- 7) 澤田昌孝、岡田哲実、長谷川琢磨：スウェーデン・ハードロック地下研究施設における高レベル放射性廃棄物処分のための国際共同研究（その9）－人工バリアタスクフォースにおけるベントナイトの室内加熱浸透試験の解析－、電力中央研究所研究報告 N07002、2007年7月。
- 8) 田中靖治他：スウェーデン・ハードロック地下研究施設における高レベル廃棄物処分のための国際共同研究（1999-2008）－地下水環境評価法と性能評価手法の実証－、電力中央研究所総合報告 N06、2009年8月。