

高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールドの熱-水-応力-化学連成挙動に関する室内試験（COUPLE）

核燃料サイクル開発機構 正会員 ○鈴木英明*、伊藤 彰、藤田朝雄
非会員 吉田 泰**、川上 進、油井三和

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア定置後のニアフィールドの挙動は、ガラス固化体の発熱、周辺岩盤から人工バリアへの地下水浸潤、地下水浸潤による緩衝材の膨潤圧の発生、緩衝材／間隙水化学の変化など、熱的、水理的、力学的、化学的なプロセスが相互に影響することが予想される。核燃料サイクル開発機構は、オーバーパック腐食や核種移行の重要な環境条件となる緩衝材／間隙水化学の時間的／空間的変遷の把握や人工バリアを中心とした化学的変遷を考慮したニアフィールド長期健全性評価に向けて、「第2次取りまとめ」以降、ニアフィールドの熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究を進めている¹⁾。本研究の一環として、人工バリアおよびその周辺岩盤の熱、水理、応力、化学場の明確化の観点から、熱-水-応力-化学の連成挙動を定量的に把握することを目的として、連成試験設備（COUPLE）を用いて熱-水-応力-化学連成試験を実施した。また、既存の解析手法を用いて実測値との比較を行った。

2. 試験方法および試験条件

試験は、モルタルで製作した模擬岩体の中心に、模擬人工バリア孔を削孔し、そこに、廃棄体を模擬した中心ヒーターおよびベントナイトブロックで製作した緩衝材を設置した（図1）。中心ヒーターおよび緩衝材の外径は、第2次取りまとめ²⁾人工バリア仕様の1/7スケールである。そして、180日間、中心ヒーターの温度を100℃、模擬岩体の周囲の温度を70℃に設定し、緩衝材中に温度勾配を形成させた。緩衝材に浸潤する水は、モルタルと反応した高いpHを示す溶液である。試験条件を表1に示す。模擬岩体中には、熱電対、間隙水圧計、緩衝材中には、熱電対、サイクロメータ、湿度計、土圧計、pH計を配置し、連続的な計測を行なった。また、循環水であるモルタル反応溶液の成分分析を定期的に行なった。試験終了後に、緩衝材のサンプリングを行ない、緩衝材間隙水のpH、陽イオン交換容量、メチレンブルー吸着量、交換性陽イオン組成の分析、さらに、X線回折、SEMによる固相分析を実施した。

表1 試験条件

模擬岩体	単位体積重量[kg/m ³]：水 251／セメント 193／細骨材 1001 セメント：普通ポルトランドセメント、細骨材：人工軽量骨材 寸法：1m×1m×1m
緩衝材	クニゲル V1 (70wt%) と ケイ砂 (30wt%) の 混合 体 乾燥密度：1600kg/m ³ 、初期含水比：13% 寸法：直径 0.29m × 高さ 0.93m
境界条件	中心ヒーター：100℃、模擬岩体側面：70℃、変位固定
雰囲気	大気下、室温
試験水	イオン交換水

3. 試験結果

(1) モルタル反応溶液の pH

モルタル反応溶液である循環水 pH の経時変化を図2に示す。計測には、Ion Sensitive Field Effect Transistor (以下、ISFET) 電極 pH 計を用いた。循環水の pH は、試験期間中、10.5 から 10 に低下した。これは、連続的な calcite の沈殿によるアルカリの消費によるもので、実際に循環水中には calcite の析出が確認されている。図中には、地球化学解析コード (PHREEQC) により求めたモルタル-水反応の解析結果を合わせて示す。解析は、モルタルに含まれるセメント水和物量を算出し、そのセメント水和物がイオン交換水と反応するものとした。化学反応は平衡論を仮定し、二次鉱物として calcite を仮定した。また、大気下の反応であることから、CO₂ ガスの影響を考慮した。解析の結果、モルタル反応溶液である循環水の pH は 10.4 であった。

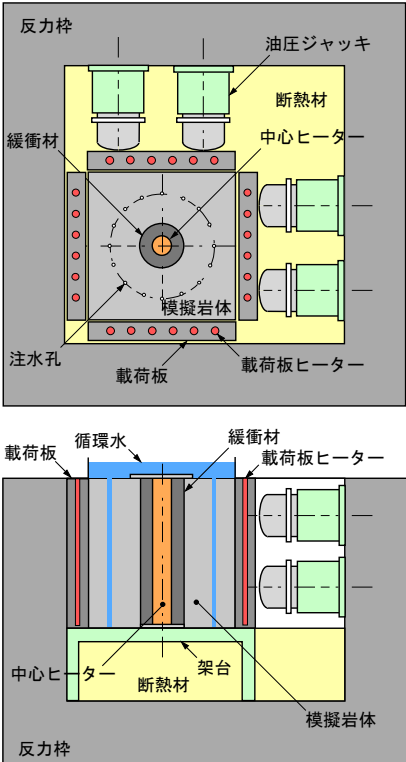


図1 連成試験設備（COUPLE）概略

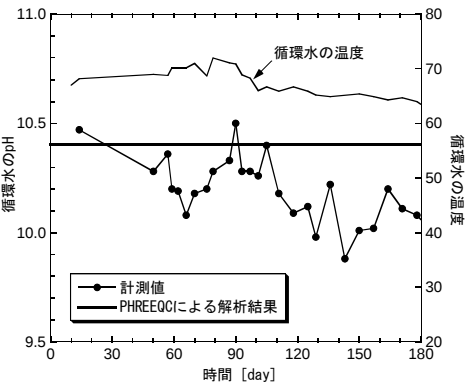


図2 モルタル反応溶液の pH

(2) 温度

90 日後の温度分布を図 3 に示す。図中には、熱-水-応力連成解析コード THAMES によって求めた温度の解析結果を合わせて示す。解析条件を図 4 に示す。これより、熱電対による計測値と解析値は良く一致し、緩衝材中には、約 $1^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ の温度勾配が形成されていることが分かる。

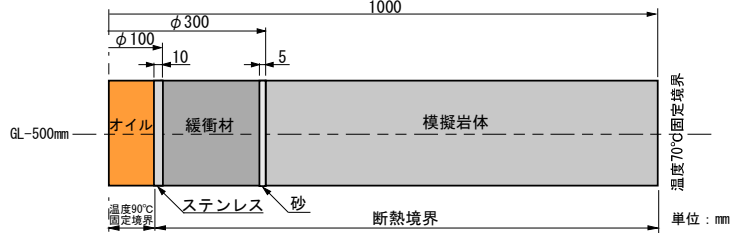


図 4 解析ジオメトリ

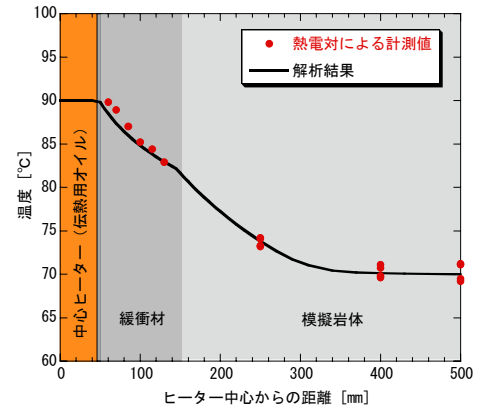


図 3 試験体中の温度分布

(3) 緩衝材中の水分および間隙水 pH

緩衝材中の水分と間隙水 pH の変化を図 5 に示す。図中には、上記の THAMES による含水比の解析結果を合わせて示す。サイクロメータは、緩衝材が飽和したためと考えられる理由により、60 日程度で計測不能となったが、飽和に至るまでの浸潤過程は解析結果と概ね一致している。ISFET 電極 pH 計によって測定した緩衝材間隙水の pH は、緩衝材が飽和した 60 日以降、僅かながら上昇傾向にあり、また、模擬岩体（モルタル）に近いほうが大きくなっている。なお、緩衝材中に埋設したガラス電極製の pH 計は、約 30 日後に計測不能となった。

図 6 は、試験終了後の緩衝材サンプリング試料の間隙水 pH の測定結果である。計測には、プローブ形状の異なる二種類の ISFET 電極 pH 計および pH 試験紙を用いた。pH 試験紙による測定は、窒素ガス雰囲気制御ボックス内で、緩衝材サンプリング試料を圧縮し、間隙水を圧密排水させて pH 試験紙を発色させた。その結果、ISFET 電極 pH 計と pH 試験紙による測定値は概ね一致しており、ISFET 電極 pH 計によって得られた値は妥当であると考えられる。そして、緩衝材中の間隙水 pH には勾配が生じていることが分かった。

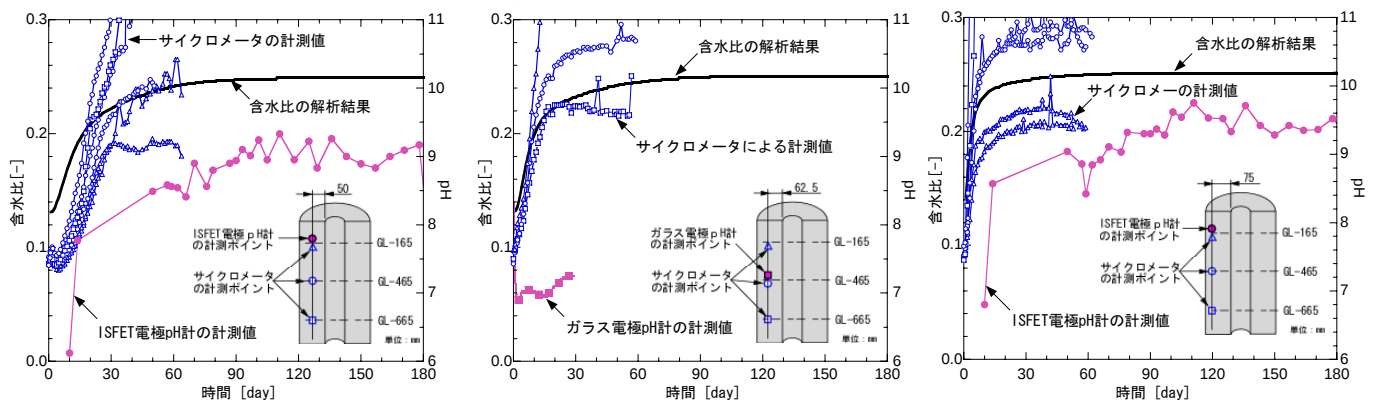


図 5 緩衝材中の水分と間隙水 pH の変化

4. おわりに

本検討から、化学反応に影響を与える温度場については、十分な評価を行なえることが確認できた。また、緩衝材中の化学場の一指標となる間隙水 pH の時間的、空間的な変化を計測により把握することができた。本試験は、大気下 (CO_2 存在下) で実施しているため、モルタル-水反応、モルタル反応溶液-緩衝材反応をより複雑にしていることや、循環水中での calcite の沈殿は、溶液の pH および Ca 濃度を低下させ、緩衝材の化学的な影響が生じにくい環境となっているものと考えられる。今後は、軟岩系岩盤におけるコンクリート支保工を想定し、可能な限り CO_2 を排除した系で試験を実施し、人工バリアおよびその周辺岩盤における熱-水-応力-化学の連成挙動の定量的な把握に取り組んでいく予定である。

他方、本試験により、計測センサーの耐久性や計測範囲の問題が明らかとなった。今後、幌延深地層研究施設等での原位置人工バリア試験における性能確認モニタリングに向けてセンサーの開発も課題である。

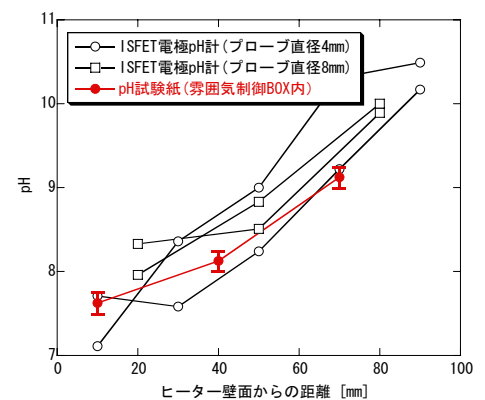


図 6 試験終了後の間隙水 pH の分布

【参考文献】 1) 伊藤彰ほか：“高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールドの熱-水-応力-化学連成挙動に関する数値解析の取り組み”，土木学会第 58 回年次学術講演会 P. 359-360 CS7-041 (2003)，2) サイクル機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性，地層処分研究開発第 2 次取りまとめ，分冊 2，地層処分の工学技術”，JNC TN1400 99-022 (1999)