

# 原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2024.10.NO.151

## 目次

- センターの活動状況 ..... ①  
緩衝材の施工技術オプションの整備 – 緩衝材の流出及び膨出の評価方法に係わる検討 – ..... ③

## センターの活動状況

### 成果等普及活動の実施状況

#### 2024年度 第1回原環センター講演会の開催

2024年度第1回原環センター講演会を対面及びオンラインで開催し、100名（対面18名、オンライン82名）の方に参加いただきました。

原環センターでは、緩衝材と孔壁の隙間処理及び緩衝材の膨出を抑制するための施工技術オプションの整備を進めています。本講演では、緩衝材の施工技術オプションに対して、適切な施工技術を選択するための流出量及び膨出量の評価方法の検討状況について紹介しました。

開催日時：2024年7月5日（金）15：00～16：30

対面会場：原環センター 第1、2会議室

演 題：緩衝材の施工技術オプションの整備 – 緩衝材の流出及び膨出の評価方法に係わる検討 –

講 演 者：地層処分工学技術研究開発部 菊池 広人



## 2024 年度 第 2 回原環センターセミナーの開催

第 2 回原環センターセミナー「放射性廃棄物処分の安全評価の基礎Ⅱ」を以下のとおり開催しました。このセミナーでは、安全評価の基礎知識を深めたい技術者・研究者を対象に、安全評価とセーフティケースに特化した講義を行いました。講義後の総合討論では、質疑応答を通じて、安全評価への理解をさらに深めていただきました。

開催日時：2024 年 7 月 19 日（金）9：30～17：30

開催会場：京都アカデミアフォーラム in 丸の内

講 師：公益財団法人原子力安全研究協会

技術顧問 朽山 修 氏

プログラム：

講義 4：放射性廃棄物処分のセーフティケースと安全評価

講義 5：放射性廃棄物処分の安全評価

講義 6：放射性廃棄物の地層処分における

リスクコミュニケーション

総合討論



## 2024 年度 第 2 回原環センター講演会の開催

2024 年度第 2 回原環センター講演会を対面及びオンラインで開催し、69 名（対面 15 名、オンライン 54 名）の方に参加いただきました。

TRU 廃棄物の処分では、水の放射線分解や金属の腐食等によるガスの発生が避けられません。ガスの発生により処分場への影響が懸念される事項として、施設内汚染水の押出しによる核種移行の加速や発生ガスの蓄圧により、緩衝材の破過現象が発生し施設内汚染水の短絡移行経路が形成されること等が挙げられます。原環センターでは、処分場での現象に則して 3 次元のガス移行挙動を把握するためのガス移行モックアップ試験、ガス移行試験結果を反映したガス移行解析手法の開発を実施してきました。

本講演では、これまでのベントナイト系材料のガス移行試験に基づく現象理解とそれに基づくガス移行解析手法の現状と今後の展望について紹介しました。

開催日時：2024 年 9 月 6 日（金）14：30～16：10

対面会場：原環センター 第 1、2 会議室

演 題：ベントナイト緩衝材中のガス移行現象の理解と移行解析手法の開発－現状と今後の展望－

講 演 者：地層処分バリアシステム研究開発部 八木 翼



# 緩衝材の施工技術オプションの整備 — 緩衝材の流出及び膨出の評価方法に係わる検討 —

地層処分工学技術研究開発部  
菊池 広人

## 1. はじめに

わが国では、高レベル放射性廃棄物の処分方法として、地下 300 m 以深に地層処分することが法律により定められている。原子力発電環境整備機構が取りまとめた包括的技術報告書（以下、NUMO-SC という）では、天然バリア（岩盤）と人工バリア（廃棄体（ガラス固化体）を格納したオーバーパック（金属製容器）を緩衝材（粘土）で覆った人工構造物）を組み合わせた多重バリアにより、長期にわたり放射性物質を人間の生活環境から隔離し、その動きを抑え閉じ込めることとしている。

人工バリアの定置方法としては、縦置き方式と横置き方式があり、前者にはブロック成形した緩衝材を処分孔内に積み上げる方法（以下、縦置き・ブロック方式という）、後者には横置き・PEM 方式（PEM：地上施設で廃棄体と人工バリアを一体化し地下施設に定置する技術）の設計オプションが示されている<sup>1)</sup>。

縦置き・ブロック方式の施工・操業等の一連の技術については、NUMO-SC においてその実現性が示されている。しかし、わが国の地下水の比較的多い環境においては、緩衝材の定置後から坑道の埋戻しまでの 300 日程度の期間（NUMO-SC では、新第三紀堆積岩類で 284 日と設定）に、湧水による処分孔からの緩衝材の流出や膨出により平均的な密度の低下による長期安全性への影響や膨出による坑道における操業（埋戻し材の施工等）への影響が懸念される。

NUMO-SC では、流出の対策として、湧水の多い場合、グラウチングや処分孔を使用せずに予め予備区画を設ける方策が示されている。また、膨出の対策として、緩衝材の上部にキャップ（蓋）を設置（ロックボルト方式や坑道天盤支持方式）することが検討されている<sup>2)</sup>。しかしながら、これらの方法は、必要以上に利用できない処分孔が発生すること、対策の施工や撤去により岩盤の破損や多大な作業負担等が懸念される。

これまでに原環センターでは、使用できない処分孔を減少（利用率の向上）させるために、施工の省力化も考慮しつつ、処分孔の壁面（孔壁）と緩衝材との隙間の処理に関する隙間処理技術オプションについて、隙間未充填、ケイ砂充填及びベントナイトペレット充填を先行的な検討対象として、技術選択

の評価項目等の整備を進めてきた<sup>3)</sup>。また、許容可能な緩衝材の流出量を予測できる評価手法（方法論）を構築し、併せて、施工の際に同時に問題となる緩衝材の膨出挙動の把握に資するデータを文献や試験等により取得することとした。

本稿においては、これまでに進めてきた緩衝材の流出に係わる評価方法の検討及び 2023 年度以降に着手した緩衝材の膨出に関する検討について紹介する。

## 2. 緩衝材の流出に係わる評価方法の検討

### 2.1 目的

緩衝材の流出に関しては、2000 年以降にスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（以下、SKB という）が先行して検討を進めている。SKB は処分孔に設置した緩衝材の健全性を評価するために、緩衝材の流出量と処分孔への地下水の排水量の相関関係をべき関数によりモデル化（以下、Erosion model という）し、評価期間における緩衝材の総流出量を予測する方法を提案している。また、国内では、緩衝材ブロック外周部と孔壁の間の隙間を残置した条件や隙間にペレットを充填した条件でのカラム試験を実施し、パイピング現象とそれに伴う緩衝材の流出挙動に関する検討を進めている<sup>4) 5)</sup>。

しかしながら、これまでに提案されているモデルは、北欧の地質環境を踏まえて SKB が導入した定流量条件による要素試験（流量を一定にした強制注水条件による試験）をベースとしたモデルであるため、わが国の地質環境への適用性を確認し、必要に応じて適切なモデルを開発する必要があると考えられる。

### 2.2 原位置流出試験を通じた Erosion model の適用性の確認と課題の抽出

実環境における緩衝材の流出挙動を把握するため、図 1 に示す幌延深地層研究センターの地下施設（以下、幌延 URL という）の深度 350m 調査坑道 5 に設けられた試験孔 2（以下、試験孔という）を利用した実規模 1/4 スケールの原位置での流出試験（以下、原位置流出試験という）を実施し、自然湧水環境下における原位置流出試験の結果と既往のモデル（Erosion model）との比較を通じて課題を抽出し、緩衝材の流出量をより適切に評価できるモデルの開発手法を検討した。

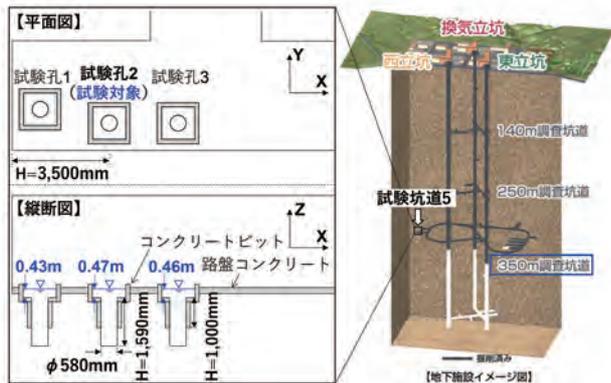


図1 幌延 URL 試験坑道5 試験孔2の位置、寸法、水位 (幌延 URL ホームページより引用<sup>6)</sup>、一部加筆)

### 2.3 原位置流出試験の概要と試験条件

図1に原位置流出試験に用いた試験孔の位置、寸法及び水位を示す。試験を実施した幌延 URL 深度350mは、新第三紀の堆積岩(稚内層)が分布しており、地下水流動の経路になる程度の連続性・連結性を有する亀裂が支配的な湧水場である。試験孔は、路盤に設置されたコンクリートピット底盤から掘削し、直径580mm、深さは1,590mmである。深さ約1.0mまでモルタルで補修をしているため、緩衝材を設置する0.5m以浅の壁面は凹凸が少ない。0.5m以深では、6箇所から地下水の流入を確認しており、亀裂帯の一部から地下水が染み出ている。試験孔の水位は、コンクリートピット底盤から上に0.43~0.47mの位置で推移する。試験孔からの排水量は、0.40L/minであり、試験孔付近の地下水は、塩化物イオン濃度が0.87%程度の塩水ある。

図2に原位置流出試験装置の概略図を示す。緩衝材の形状は中空円柱状のドーナツ型とし、緩衝材と試験孔の隙間が20mmになるように外径を540mm、内径を210mm、高さを500mmとした。試験に使用した緩衝材ブロックは、周方向を扇形に8分割し、高さ方向を5分割したものを静的な締め固め方法で製作した。

緩衝材の材料には、Na型ベントナイトであるクニゲルV1を用い、混合材にケイ砂3号とケイ砂5号を7:1.5:1.5の乾燥質量比で混合したケイ砂30wt%混合ベントナイトを使用した。乾燥密度は、地下水の浸潤に伴い膨潤し、緩衝材ブロックと試験孔との間に設けた隙間を充填した後に乾燥密度が1.6Mg/m<sup>3</sup>になるように初期乾燥密度を1.92Mg/m<sup>3</sup>とした。また、隙間処理技術オプションは、隙間未充填とした。

試験装置は、緩衝材定置治具として緩衝材ブロックを載せる底盤、緩衝材ブロックの膨出を抑制する上蓋、及びオーバーパックを模擬した円柱状の鋼管で構成されており、上蓋をフランジとジャッキで抑

える構造である。試験装置の底盤には、孔底から地下水が供給されるように水抜き穴が千鳥配置されており、底盤の上に緩衝材ブロックを5段に積み重ねた後、膨出抑制の上蓋を取り付けて組み立てた。試験孔へ設置する際は、深さが551mmになるようにケイ砂3号を試験孔内に敷き詰め、緩衝材ブロックが冠水しないように排水処理ポンプを用いて試験孔の地下水を排水し、組み立てた試験装置を試験孔内へ設置した。試験は、排水を停止することにより開始とした。

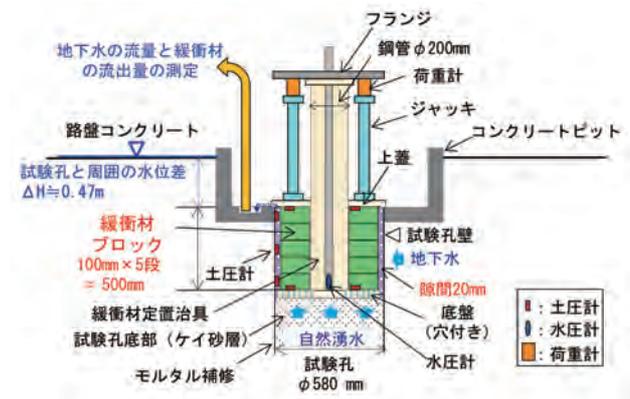


図2 原位置流出試験装置の概略図

### 2.4 原位置流出試験の結果

図3に緩衝材ブロック底部の圧力水頭と試験孔からの排水量を示す。試験開始直後の圧力水頭は、緩衝材ブロック上面の位置から排水されるため、緩衝材ブロック底面の圧力水頭は緩衝材の高さ(0.45m)と等しい。また、試験開始直後の排水量は0.39L/minであり、試験開始前に測定した0.40L/minと同程度であった。その後、地下水の浸潤に伴い緩衝材が膨潤変形することによって、緩衝材ブロックと試験孔の間の20mm隙間が徐々に自己シールし、排水量が低減するとともに圧力水頭は増加する傾向を示す。

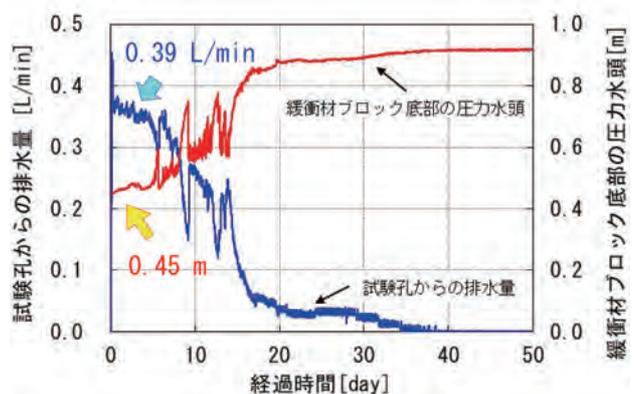


図3 緩衝材ブロック底部の圧力水頭と試験孔からの排水量

また、試験開始後に、排水量は時間の経過に伴い徐々に減少し、44日後にはゼロとなった。この時の圧力水頭は、初期の0.47mから0.45m程度増加した0.9mであり、試験孔の通常の水位と一致する。

図4に緩衝材の総流出量と流出物濃度の経時変化を示す。ここで緩衝材の総流出量とは、試験孔からの排水中に含まれる流出物の濃度と排水量から次式(1)により求めた。

$$M_s = \sum_{i=1}^n C_i Q_i \Delta t_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

$M_s$ は緩衝材の総流出量 (mg)、 $\Delta t_i$ は地下水の採水間隔 (min) であり、 $C_i$ は排水中の流出物濃度 (mg/L)、 $Q_i$ は採水間隔中における排水量 (L/min) である。 $i$ は採水回数である。

試験開始後、緩衝材の流出物濃度は、緩衝材表面への不均質な浸潤や膨潤に伴う微細粒分の水中への分散や水流による移送の影響により、ばらつきが生じるも経時的に増加する。その後、徐々に減少する傾向を示し、44日目以降は排水量がゼロ(図3)となったため採水を終了した。

緩衝材の総流出量は、試験開始から15日以降はほぼ一定となっている。これは、緩衝材ブロックと試験孔の隙間が縮小することで、流出物濃度、排水量がともに低下したためである。排水量の経時変化を見ると試験開始から約15日頃までは試験孔壁と緩衝材の隙間で水みちの縮小と拡大を繰り返しながら徐々に流量は低下しており(図4)、その間の緩衝材の総流出量は最終的な総流出量の約97%を占める。

このような実環境(自然湧水環境)における試験結果から、緩衝材の総流出量の評価では、初期の評価が重要であることが示唆される。また、これまでにErosion modelのベースとしていた定流量条件による要素試験とは異なり、緩衝材と孔壁の隙間の縮小やその後に残存する水みちの縮小に伴い、初期の隙間や水みちを介した地下水の排水量は経時的に変

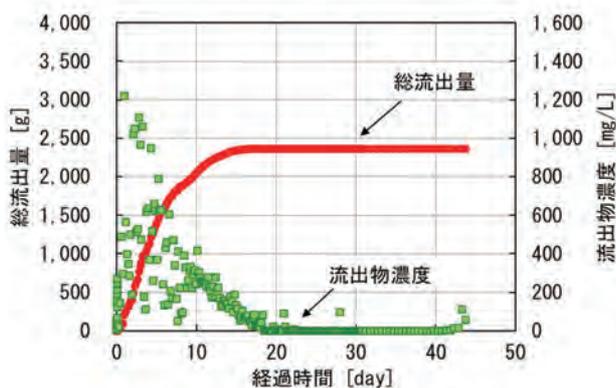


図4 緩衝材の総流出量と流出物濃度の経時変化

化することや緩衝材の流出に影響する孔内への湧水の駆動力となる地下水の水圧は試験孔の水位が上限となり、隙間の縮小により水圧が上昇し、上限に達すると湧水は止まることを確認した。

## 2.5 既往のモデルと原位置流出試験の評価

緩衝材の総流出量を予測する方法として前述したSKBが提案するErosion model(式(2))を以下に示す。

$$M_s = \alpha \times (M_w)^\beta \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $M_s$ は緩衝材の総流出量 (g)、 $M_w$ は地下水の総流入量 (L) である(総流入量は原位置流出試験の総排水量に相当)。 $\alpha$  (g/L)、 $\beta$  (-) は、総流入量に対する総流出量の変化率を表すパラメータであり、これらは定流量条件による要素試験に基づき設定している。NUMO-SCでは、 $\alpha=9.0$ g/L、 $\beta=0.85$ を設定したErosion modelに基づく緩衝材の許容流出量を処分孔の利用可否の判断指標としている。

図5に原位置流出試験の結果とErosion model( $\alpha=9.0$ ,  $\beta=0.85$ )との比較を示す。図3の原位置流出試験結果を踏まえて、排水量がゼロとなる44日後(地下水の総排水量7,079L)における総流出量をErosion modelで求めた結果、原位置流出試験の実測値2,370gに対して、式(2)から求めた評価値は16,900gとなり、実測値の7倍以上となる。

このような比較結果から、Erosion modelをわが国の地質環境或いは処分事業へ適用する際の課題として、次のようなことが示唆された。

- 1) 定流量条件による要素試験をベースとしたErosion modelは、条件や仕様(緩衝材の材料及び形状、隙間幅など)の異なる試験装置を用いた結果に基づくものであり、今後、評価したい対象(原位置流出試験や将来の実環境)や条件等が必ずしも一致しない点において、モデルの適用性が不透明である。
- 2) SKBが提案するErosion modelは、処分孔の利用可否判断のために、許容孔内湧水量の基準値を安全側に設定することを目的としており、原位置における湧水量を正確に評価することを目的としていない。
- 3) 図3に示されるように、原位置環境下では時間経過に伴い孔内からの流量が低下することから、わが国の地質環境を考慮した場合、定流量条件による要素試験の結果に基づくErosion modelは、緩衝材の総流出量を過大に評価する可能性がある。

一般的に湧水量が多いことが想定されるわが国の

地下環境において処分孔の利用率を高めるためには、条件や仕様ならびに処分孔の環境条件に応じて、様々な影響因子（材料組成、孔内湧水環境など）を踏まえた、より精緻な流出量の評価方法を開発する必要がある。

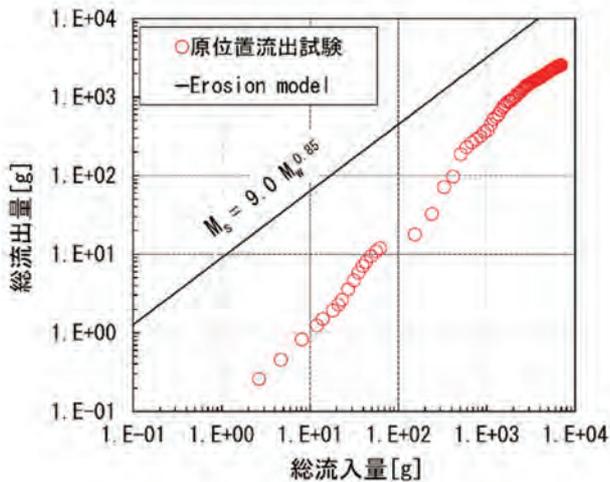


図5 原位置流出試験の結果と Erosion model との比較

## 2.6 原位置流出試験結果を踏まえた研究方針

前述した課題を踏まえ、以下に示す研究方針のもと緩衝材の流出量評価モデルの検討を進めた。

- 1) 緩衝材の総流出量を過大に評価する Erosion model とは異なり、実環境における緩衝材の流出挙動をより現実的に評価できるモデルを開発する。
- 2) 緩衝材の施工方法は、原位置での追加作業を要しない方法を基本とする。但し、緩衝材ブロックの施工時に設ける隙間の処理方法については、①隙間未充填、②ケイ砂充填、③ペレット充填の3つの隙間処理オプションを念頭に置く。本稿では、①隙間未充填オプションについて紹介する。
- 3) 緩衝材の流出挙動に影響を及ぼす多様で複雑な影響要因のすべてを考慮したモデルではなく、将来の処分事業において処分孔の利用可否や適切な対策（施工技術オプション）の選択といった工学的な判断を支援できるモデルを開発する。
- 4) モデル開発のための実環境や実規模での多数の試験実施は現実的ではないことから、より現実的なモデル開発手法の構築を指向する。

以上を踏まえて、原位置で把握が可能な情報である、孔内外水頭差  $H$ 、孔内湧水量  $Q$ 、緩衝材の流出が懸念される期間  $t$  を主な引数とした関数  $M_{BENT}(t, H, Q)$  として総流出量を評価できるモデル（以下、流出量評価モデルという）を念頭に、要素試験で基本

モデル（以下、ベースモデルという）を開発し、実環境や実規模へと拡張することとした。

ベースモデルの開発に必要な要素試験を以下に留意して設計した。

- 実規模スケールの一部を切り出した緩衝材ブロック界面と孔壁の間の微小領域を対象
- 緩衝材表面に作用する水圧や重力を一様に分布させ、緩衝材の浸潤過程における流出挙動を単純化して把握するため、岩盤と緩衝材の隙間を縦方向ではなく横方向に装置を設置
- 塩水系地下水（イオン濃度、pH など）の場合、細粒分が凝集し、団粒化する可能性があるため、ベースモデル開発では、一旦、その影響を除外（ベースモデルの拡張パラメータとして加味）

図6に示す要素試験は定水位条件により実施し、緩衝材ブロックの界面が孔壁に到達するタイミング（変曲点  $T_a$ ）を境に、変曲点  $T_a$  までの期間を  $T_1$ 、変曲点以降の期間を  $T_2$  と区分してデータの整理と分析を行った。

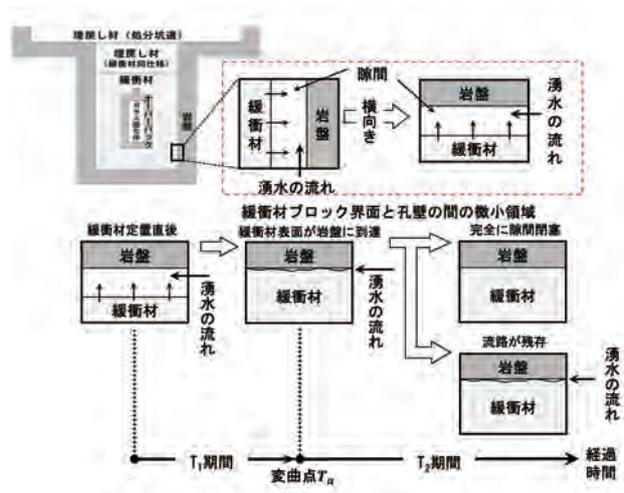


図6 要素試験の対象モデル

## 2.7 緩衝材の流出量評価モデルの検討

図7に要素試験装置の概略を示す。既述の原位置流出試験の緩衝材ブロックと同様に、供試体にはケイ砂を 30wt% 混合したベントナイトを使用した。供試体の寸法は高さ 200mm、幅 200mm、奥行 20mm とし、乾燥密度は供試体が膨潤により試験セルに設けた 20mm の隙間を充填した後に乾燥密度が  $1.6 \text{Mg/m}^3$  になるように初期乾燥密度を  $1.92 \text{Mg/m}^3$  に圧縮成形した。また、含水比は約 10% に調整し、通水液にはイオン交換水を使用した。通水口側には、多孔質板、排水口側にワイヤーメッシュを設置した。

初期流量の設定は、原位置流出試験と要素試験の流路（隙間）断面積比により流量を換算し、1、10、

20mL/min に調整した。また、水頭差の設定は、原位置流出試験の圧力水頭で設定した 0.5m を下限値として、坑道高さを踏まえて現実的に想定される幅として 0.5、1.0、2.0m とした。試験装置から排水される流量は、排水口の直後に設置した流量計で測定した。緩衝材が膨潤し、孔壁（試験装置上部）へ到達するまでの時間は、試験装置上部に設置した土圧計により管理した。緩衝材の総流出量（g）、流出物濃度（mg/L）、排水流量（mL/min）、膨潤圧（kPa）の経時変化を取得し、試験期間は、総流出量の収束を以って試験終了とした。

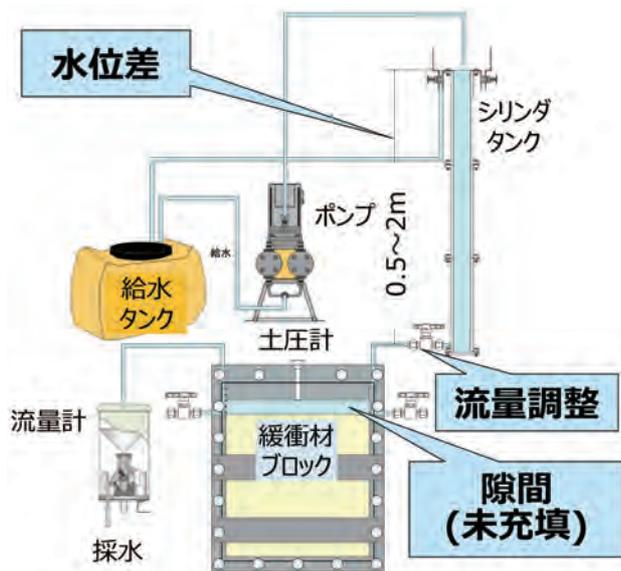


図7 要素試験装置の概要

## 2.8 要素試験の結果

本稿では、水頭差 1.0m、初期流量 10mL/min の試験結果を一例として、試験開始直後から緩衝材の膨潤圧発生までの期間（T1）及び膨潤圧発生以降の期間（T2）に区分して図8に示す試験結果を説明する。

T1 期間は、膨潤圧の結果より試験開始から約 13 日後までと判断できる（図8下図）。その間、排水流量は右肩下がりに減少し（図8下図）、流出物濃度は期中半ばにピークアウトした後、期中後半でゼロに近づく（図8上図）。したがって、T1 期間の緩衝材の総流出量（排水流量、流出物濃度、及び時間の積）は、期中前半で増分が著しく、期中後半で緩やかな傾向を示す。T1 期間の総流出量は、全体量を占めており、T1 期間に集中している。T2 期間は、T1 期間と同様に排水流量は時間の経過と共に減少し（図8下図）、流出物濃度はゼロ付近で推移した。したがって、T2 期間の緩衝材の総流出量は、経時的に微増に留まった。

上記試験結果は、全試験ケースで確認され、原位置流出試験（図4）の傾向とも整合する。

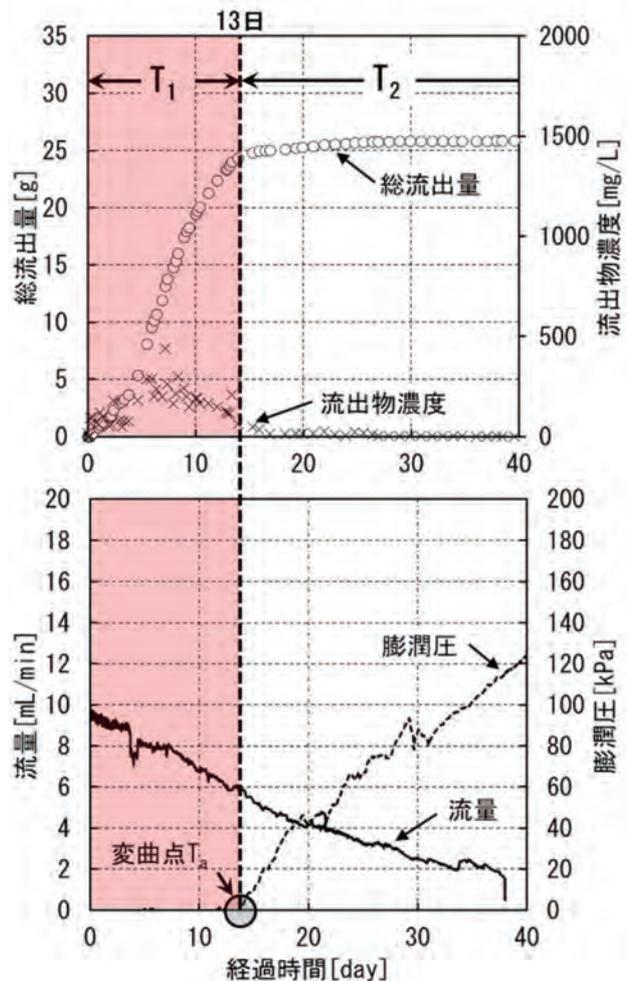


図8 要素試験結果の一例  
（水頭差 1.0m、初期流量 10mL/min）

また、各試験結果を初期流量、水頭差ごとに整理した結果、水頭差と比べて初期流量との相関が比較的強いことが窺えることから、流出量評価モデルの開発では、緩衝材の流出量に対して相対的に影響が大きい初期流量の影響を考慮して、孔内湧水量  $Q$ 、緩衝材の流出が懸念される期間  $t$  を引数とした関数  $M_{BENT}(t, Q)$  で一般化を試みた。

## 2.9 緩衝材の流出量評価モデルの開発

流出量評価モデルの開発には、図8に示されるような総流出量は非線形であるため、1つの式で定式化するのではなく、T1 期間と T2 期間に区分して、べき関数（累乗近似）により定式化することとした。なお、本評価モデル開発の詳細については、菊池他（2024）<sup>7)</sup> を参照されたい。

図9に要素試験の一例として、初期流量 20mL/min の経過時間と総流出量の関係を示す。試験開始から1日までのデータに関しては、全体の傾向に対して測定点のばらつきが大きいので、T1 期間の総流出量を定式化する際は、試験開始1日経過後からの

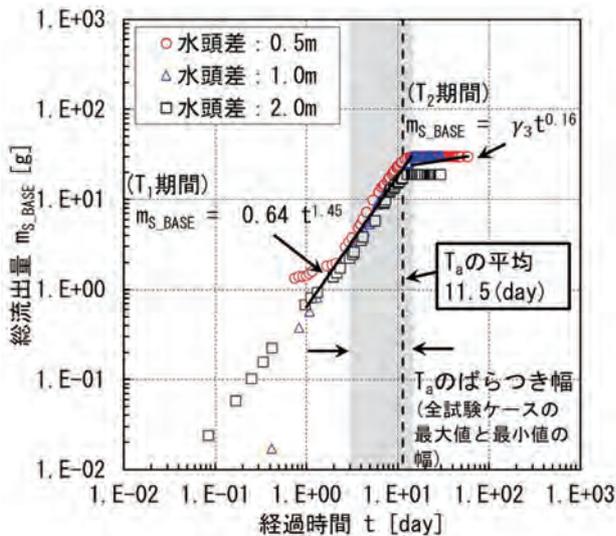


図9 要素試験結果の例 (初期流量：20mL/min)

データを用いて累乗近似 ( $m_{S,BASE} = a t^\beta$ ) した。

係数  $a$  は、試験開始から 1 日経過した時点の総流出量を表しており、初期流量との相関性が確認できる。係数  $\beta$  は、経過時間  $t$  あたりの総流出量の変化を示しており、初期流量に関わらず一定の値を示す。係数  $a$  には初期流量を引数とした関数 ( $a = 0.015Q + 0.30$ ,  $Q$  は初期流量 (mL/min)) を、係数  $\beta$  には平均値 ( $\beta = 1.5$ ) から設定した。

以上から、T1 期間の総流出量を式 (3) で表現する。

$$m_{S,BASE} = (0.015Q + 0.30)t^{1.5} \dots\dots\dots (3)$$

T2 期間の総流出量の定式化についても、累乗近似 ( $m_{S,BASE} = \gamma t^\delta$ ) での表現を試みた。T1 期間と T2 期間の不連続部のずれを解消する必要がある。すなわち、変曲点  $T_a$  (日) における総流出量 (係数  $\gamma'$ ) の値について、T1 期間と T2 期間における各式で得られる値を連続的に整合させる必要がある。

係数  $\gamma'$  の値を式 (4) で  $t = T_a$  とした時の値とすれば、試験開始から 1 日経過した時点の総流出量  $\gamma$  と係数  $\gamma'$  の間には、 $\gamma' = \gamma T_a^\delta$  の関係が成り立つことから、定式化に必要な  $\gamma$  は式 (5) を用いて決定することができる。

T2 期間における係数  $\delta$  は、総流出量と経過時間の傾きを表しており、図 9 に示す T2 期間のデータを用いて累乗近似で取得した。係数  $\delta$  と初期流量との関係は、初期流量に関わらず一定の傾きを示す。

$$\gamma' = (0.015Q + 0.30)T_a^{1.5} \dots\dots\dots (4)$$

$$\gamma = \gamma' / T_a^\delta \dots\dots\dots (5)$$

したがって、係数  $\gamma$  は式 (5) で求めることとし、係数  $\delta$  には平均値 ( $\delta = 0.13$ ) を設定した。以上から、T2 期間の総流出量を式 (6) で表現する。

$$m_{S,BASE} = (0.015Q + 0.30)T_a^{1.37}t^{0.13} \dots\dots\dots (6)$$

なお、全試験ケースで取得された変曲点  $T_a$  の発現タイミングは、図 9 に示すようにばらついており、緩衝材表面の不均一な膨潤挙動などが要因と考えられる。今回の試験ケース数では、流量との関係性が明瞭化できていないため、ここでは全試験ケースで取得された  $T_a$  の平均値 ( $T_a = 11.5$ ) を設定した。

さらに、ベースモデルから原位置流出試験スケールへの拡張を試みた。スケールについては、緩衝材と孔壁が接触する面積 (以下、接触面積という) の比率でアップスケーリングさせる。すなわち、ベースモデルにおける接触面積  $4.0 \times 10^{-3} \text{m}^2$  に対する原位置流出試験のスケールにおける接触面積  $9.1 \times 10^{-1} \text{m}^2$  の面積比 228 倍を、ベースモデルで推定した総流出量  $m_{S,BASE}$  に乗ずることで表現する。

なお、水質及び縦横の違いによる影響 (要素試験はイオン交換水、横向き) については、試験の再現性や信頼性を得るための試験点数が確保されていないため、本検討では、水質及び縦横の違いによる効果 (影響) は、ベースモデルの拡張に反映していない。

## 2.10 緩衝材の流出量評価モデルの適用性確認

前章で構築した流出量評価モデルと原位置流出試験結果を比較し、モデルの適用性を確認した。

図 10 に原位置流出試験結果ならびに流出量評価モデルと Erosion model による評価結果を示す。評価期間  $t$  は、NUMO-SC に示される新第三紀堆積岩類において想定されている 284 日と設定した。なお、原位置流出試験の試験期間は 125 日であるが、40 日以降、流出が停止しているため、125 日以降もこの状態が持続するものと仮定した。流出量評価モデルによる総流出量は、試験開始から 4 日までは、原位置流出試験と同じ軌跡を示すが、4 日から 10 日程度まで立ちあがり、その後、漸増する挙動を示す。Erosion model の総流出量も同様に試験開始から 10 日程度までは、原位置流出試験と同じ軌跡を示すが、それ以降も上昇傾向を示す。評価期間 284 日後における総流出量は、原位置流出試験が 2,453g に対して、流出量評価モデルは 5,054g、Erosion model は 263,697g となった。以上の結果から、定水位条件による要素試験に基づいて緩衝材の流出量評価モデルを開発したことで、定流量条件による要素試験に基づく Erosion model と比較して原位置流出試験による総流出量の経時変化の傾向がより再現できる様になった。また、Erosion model は原

位置流出試験の結果に対して2オーダー程度の違いがあるが、流出量評価モデルは同一オーダーとなり原位置流出試験の結果に近づくことができた。これらのことから、より現実的な評価を行える見通しが得られた。

今後、課題として残されている水質や重力（縦横）の影響を考慮した拡張モデルの構築に取り組み、実規模スケールに適用する評価方法を構築する。

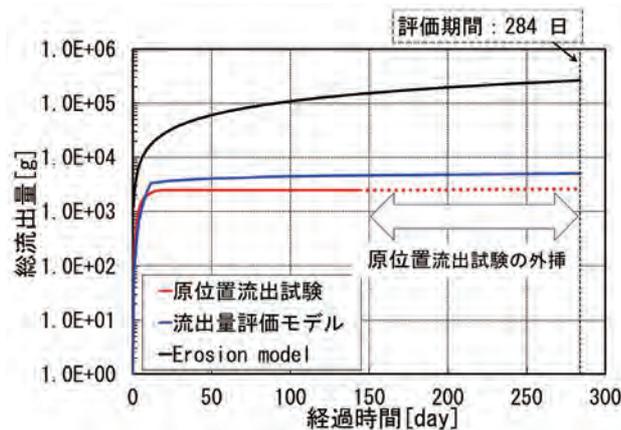


図10 流出量評価モデルの適用性確認

### 3. 緩衝材の膨出に関する検討

#### 3.1 目的

緩衝材の膨出に関しては、これまでに対策工として坑道の埋戻し前に緩衝材上部にキャップ（蓋）を設置し、ロックボルトで固定する方法やH形鋼にて坑道天盤で支持する方法が検討されている<sup>2)</sup>。しかし、これらの方法は、比較的大掛りな工法であるため、岩盤の破損や多大な作業負担等が懸念される。また、具体的に緩衝材の膨出がどの程度生じるか把握されていない。NUMO-SCでは、処分孔内の湧水対策として防水シートを設置して緩衝材と湧水の接触を防止する方法が示されており、この方法は膨出対策にも有効と考えられるが、処分坑道を埋め戻す際に防水シートを除去する必要がある。そのため、これらの懸念や施工の省力化を踏まえた緩衝材の膨出への対応策を検討しておく必要があると考えられる。

そこで、緩衝材の膨出に関する検討として、研究アプローチ（方針・方法論）の具体化のための予備調査として、先行検討事例の調査や計算による膨出量の把握や対応策を検討した。

#### 3.2 海外における先行検討事例

海外の先行検討としては、SKB とフィンランドの地層処分実施主体である Posiva とともに同じ処分概念を採用していることから、最適化

された施設の観点から、設計要件や設計における説明のつかない不当な違いは避けるべきとの考えにより、安全機能、性能目標、技術的設計要件については双方の合意の下で設定している<sup>8)</sup>。

緩衝材の膨出については、室内試験の結果から湧水量が増加するにつれて膨出量が増加することや実規模試験や解析結果から湧水量が0.8mL/min以下であれば設計要件を満たすことが示されている。

また、実規模試験の結果から、埋戻し前の膨出量は、湧水が比較的少ない場合、90日間で平均40mmであり、実規模大の解析により求めた埋戻し後の膨出量135mmを加え、緩衝材の総膨出量を175mmと想定している。

#### 3.3 緩衝材の膨出量の予測

実規模スケールにおける埋戻しまでの300日間の緩衝材の膨出量を把握するため、淡水条件において緩衝材の上部方向への一次元の膨出量を膨潤特性理論評価式<sup>9) 10)</sup>を用いて計算した。

膨出量は、図11に示すようにA、B及びCの領域に緩衝材を区分した。緩衝材の不飽和領域と飽和領域は完全に分離しているものとし、領域間の境界面にせん断応力は生じないものと仮定した。また、領域A及びBの緩衝材は、緩衝材の自重による鉛直圧が作用する。また、領域Cの緩衝材は、緩衝材の自重に加え、オーバーバックの自重も作用する。地下水位は、処分坑道の底盤と同じ高さに設定し、孔壁からの湧水量は考慮せず、緩衝材と岩盤との界面は水で満たされているものとした。300日後の地下水の浸透距離は、長尺供試体を用いた透水試験結果を基に78mmとした。なお、オーバーバックの熱影響等は考慮していない。

計算の結果、各領域の膨出量を平準化すると560mm程度であった。また、膨出対策の検討として、

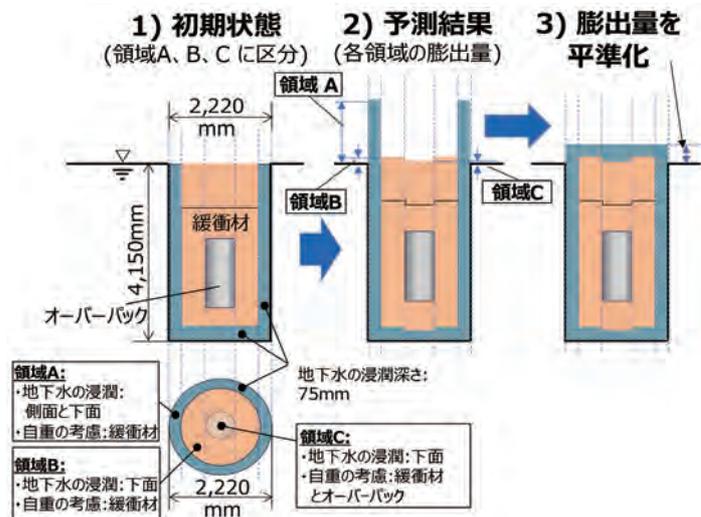


図11 緩衝材の膨出量の予測

緩衝材の上部に6,000kgの落とし蓋（地下施設で取り扱いは可能であるようオーバーパックの質量と同様とした）を設置した条件での計算も合わせて実施した。その結果、落とし蓋を設置した場合、各領域の膨出量を平準化すると220mm程度となり、落とし蓋を設置することで、膨出量を抑えられる結果を得た。上記の計算結果を踏まえ、処分孔を深くし、緩衝材の上部に空間（膨出しろ）を設ける方法も適用性があるものと考えられる。

### 3.4 緩衝材の膨出量の管理方法（素案）

前章の膨出量の計算結果から、実規模スケールでの300日後の膨出量は、560mm程度であり、対応策として膨出しろや蓋（上載圧）に一定の効果が見込めることがわかった。ただし、蓋による上載圧で完全に膨出を抑制するには緩衝材の膨潤圧に相当する約200tonの荷重が必要となる。

また、膨出しろを設け、緩衝材ブロックの初期密度を上げることで、膨出を許容しても緩衝材の設計要件を密度に収めることが可能と考えられるが、施工品質の観点から、操業時に限られた期間（300日程度）の膨出量の計測・管理が必要であると考えられる。

これらの点を踏まえ、隙間処理技術オプションにおける膨出量の管理方法（素案）を図12に示す。緩衝材の上面には、地下水との接触により凹凸が出来ることや乾燥密度の低下を防止するために、カバー（蓋）を設置することとした。

室内での模型試験により、膨出量の把握やそれによる解析方法の検証を進め、管理方法の適用性の確認をしていくことが有効と考えられる。加えて、原位置試験により管理方法の有効性を確認することで、緩衝材の膨出に関わる対応策を構築できると考えられる。そのため、今後の予備調査では、より現実的に膨出量の把握をしつつ管理方法（案）の具体化を進め、試験等による検討計画を具体化することが必要であると考えられる。

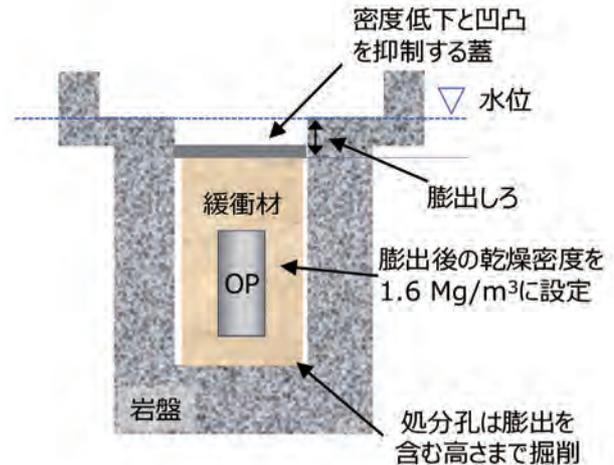


図12 緩衝材の膨出量の管理方法（素案）

## 4. まとめ

本稿では、竖置き・ブロック方式における緩衝材の定置後から坑道を埋戻しまでの期間を対象とした緩衝材の流出に係わる評価手法の検討や緩衝材の膨出に関する検討について述べた。

緩衝材の流出に係わる評価手法の検討については、要素試験に基づく流出量の評価モデルと原位置の実環境スケールへと拡張する評価方法を構築し、従来のモデルよりも現実的な評価ができる見通しが得られた。

また、緩衝材の膨出に関する検討については、今後の研究方針や方法論の具体化のための予備調査を実施し、緩衝材の膨出に関する検討の必要性や評価手法の構築に向けた見通しが得られた。

なお、本稿の内容は、経済産業省資源エネルギー庁から受託して実施した、高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（JPJ007597）ニアフィールドシステム評価確証技術開発（平成30～令和4年度）及び地層処分施設施工・操業技術確証試験（令和5年度）の成果の一部である。

（本稿は、2024年7月5日に開催した2024年度第1回原環センター講演会「緩衝材の施工技術オプションの整備－緩衝材の流出及び膨出の評価方法に係わる検討－」に基づいて作成したものです。）

## 参考文献

- 1) 原子力発電環境整備機構, 包括的技術報告, わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイト選定に向けたセーフティーケースの構築－, NUMO-TR-20-03, 2021.
- 2) 核燃料サイクル開発機構, 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.
- 3) 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書, 2022.
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 処分工学システム工学確証技術開発 平成25年度～平成29年度の取りまとめ報告書, 2018.
- 5) Suzuki, K., Asano, H., Yahagi R., Kobayashi, I., Sellin, P., Svvarmar, C. and Holmqvist, M., Experimental investigations of piping phenomena in bentonite-based buffer materials for an HLW repository. Clay Minerals Vol.48, Issue 2, pp.363-382, 2013.
- 6) 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター, 地下施設設備の状況. [https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/status/kouji/shisetsuseibi\\_kouji.html](https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/status/kouji/shisetsuseibi_kouji.html) (accessed 2023-11-22).
- 7) 菊池広人, 宇田俊秋, 林 大介, 江守 稔, 木村駿, 縦置き・ブロック方式における緩衝材の流出量評価手法の検討, 原子力バックエンド研究, Vol.31 NO.1 pp.11-20, 2024.
- 8) Posiva and SKB, Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Conclusions and recommendations from a joint SKB and Posiva working group. Posiva SKB Report 01, 2017.
- 9) Komine, H., Ogata, N., New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials, Canadian Geotechnical Journal, vol.40, No. 2, 2003, pp.460-475.
- 10) Komine, H., Ogata, N., Predicting Swelling Characteristics of Bentonites, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol.130, No.8, 2004, pp.818-829.

## 質疑応答

**質問1** 現実的な流出は（もしあるとすれば）、処分孔周りの卓越した岩盤亀裂への流出により起こると思います。これを考慮した評価の実施の予定はありますか？

**回答1** 本報告においては、操業時に緩衝材の定置後初期に起こり得る処分孔からの緩衝材の流出に関して検討を致しました。ご質問の処分孔周りの岩盤亀裂への流出に関しては、既往の研究において検討されてため、今後、当センターとして評価する予定はございません。

**質問2** 流出・膨出とも対策の必要性判断には長期の評価（緩衝材性能が健全に保たれる期間？）が必要になりますが、実施のご予定はありますか。

**回答2** 岩盤亀裂中への流出及び処分坑道閉鎖後の緩衝材と埋戻し材との間に発生する膨出に関しては、既往の研究において長期挙動の評価がされておりますので、今後、当センターとして評価する予定はございません。

**質問3** 配合率70%の試験例を聴くことができましたが、この配合仕様は今後再検討されたりするのでしょうか？そういう視点での考察はやはり解析的な視点が要るかと思いました。

**回答3** 実際の地下環境条件を例題として、緩衝材の流出量評価モデルを含む緩衝材の流出特性の評価方法（方法論）を開発することを目的としており、この評価手法を用いれば緩衝材の仕様に応じた要素試験は必要ですが、流出量を評価することができると考えております。また、本評価手法を用いれば閉鎖後の緩衝材の初期状態がわかり、この初期状態を性能評価の初期状態に設定することができます。性能評価の解析結果によっては、必要に応じて配合仕様を検討することになるかと考えております。

---

編集発行

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター  
〒104-0044 東京都中央区明石町6番4号（ニチレイ明石町ビル12階）  
TEL 03-6264-2111（代表） FAX 03-5550-9116  
ホームページ <https://www.rwmc.or.jp/>