

PEM 方式を適用した TRU 等廃棄物の人工バリア設計（その 2）

株式会社大林組 正会員 ○佐藤 伸, 高松 亮佑, 森岩 寛稀, 志村 友行
原子力発電環境整備機構 正会員 鈴木 覚, 山本 陽一, 後藤 考裕, 高橋 拓麻

1. はじめに

原子力発電環境整備機構（NUMO）では，操業の効率性や回収の容易性を考慮して，PEM 方式 [Prefabricated Engineered Barrier System Module: 地上施設で廃棄体を人工バリアと一体化したモジュールを地下施設に搬送し，定置する技術（以下，PEM）] を TRU 等廃棄物の処分に適用するための技術開発（以下，TRU-PEM）を進めている．本シリーズ講演では^{1), 2)}，TRU-PEM を対象とした，廃棄体パッケージ容器および TRU-PEM 容器の腐食膨張に伴う人工バリアの応力解析（以下，腐食膨張解析）および再冠水過程の熱・流体連成解析を用いて処分場閉鎖後の再冠水過程を評価した結果について報告する．本稿では，廃棄体パッケージ容器および TRU-PEM 容器の腐食膨張に関する影響検討について報告する．

2. 検討概要

本稿は，廃棄体パッケージと TRU-PEM 容器が腐食膨張することによって増加する緩衝材の応力を算定した．始めに TRU-PEM 容器を含む人工バリアと廃棄体の部分をモデル化した TRU-PEM 単体の二次元モデル（図-1）を用いて緩衝材厚さと乾燥密度の影響について検討を行った．続いて二次元モデルの検討結果に基づいて設定した緩衝材の厚さ及び乾燥密度を用いて，矩形の処分坑道に TRU-PEM を適用したケースを対象に三次元腐食膨張解析を実施した．用いた解析コードは，汎用非線形有限要素法解析コード Abaqus である．解析モデルは，全ての材料界面を不連続体でモデル化することにより，剥離及び接触による摩擦を考慮した．この時，各 PEM 容器間も不連続体とした．腐食に関する材料定数は，文献調査を実施して，腐食膨張量は体積の 3 倍，腐食速度は $2\mu\text{m/y}$ ，腐食生成物の剛性は 250MPa とした．なお，腐食膨張は線膨張によって疑似的に表現し，腐食生成物と健全部の剛性は体積比の加重平均による等価剛性を与えた．本検討において，緩衝材は完全飽和状態を仮定しているが，腐食膨張は間隙水の上昇あるいは消散よりも十分に遅いため，過剰間隙水圧の発生と消散は無視した．

3. 緩衝材厚さと乾燥密度の影響

廃棄体パッケージ容器等の金属製容器の腐食膨張により増加する緩衝材の応力は緩衝材の密度や厚さに依存する．そこで，緩衝材の乾燥密度と厚さを変化させながら腐食膨張解析を行った．TRU-PEM 単体の二次元解析モデルを図-1 に示す．廃棄体パッケージは，ドラム缶形態の廃棄体を収納する円筒型のものを対象とした．緩衝材のパラメータのうち圧縮指数 λ と膨潤指数 κ は材料となるベントナイトにクニゲル V1 を想定し，高山ら³⁾の圧密試験結果から $\lambda=0.230$ ， $\kappa=0.200$ とし，乾燥密度に係わらず一定とした．ただし，乾燥密度 1.2 ， 1.3 Mg/m^3 については，間隙比と膨潤圧から決定される初期状態が圧縮線上から右側に外れることから，耐圧要求期間内に発生する応力（ $3\sim 4\text{MPa}$ ）付近で交わるように設定した．限界状態応力比 M は JAEA 緩衝材基本特性データベースを基に乾燥密度ごとに設定した．境界条件はモデル外周の法線方向を固定し，接線方向を自由とした．検討方法は緩衝材の厚さ，乾燥密度を目的変数として解析を実施した．図-1 に示したモデルを用いて金属製容器の平均腐食深さ 2mm の時点における緩衝材の応力と厚さの関係について検討した結果を図-2

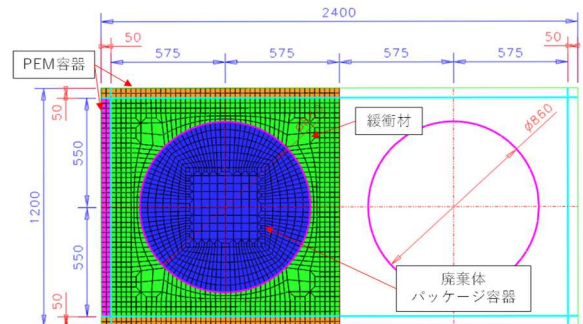


図-1 TRU-PEM単体の二次元モデル（単位：mm）

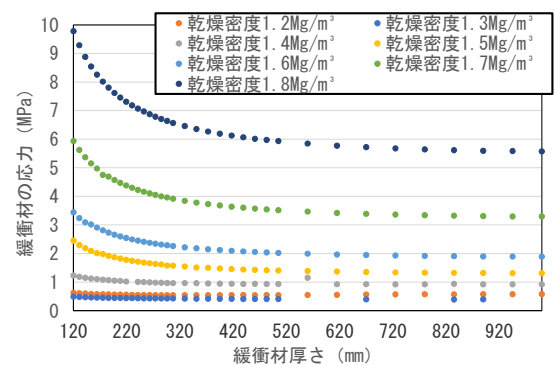


図-2 緩衝材の応力と緩衝材厚さの関係

キーワード 放射性廃棄物処分，TRU-PEM，腐食膨張

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 (株)大林組原子力本部原子力環境技術部 TEL 03-5769-1307

に示す。検討の結果、平均腐食深さ 2mm で乾燥密度が 1.6Mg/m^3 以下であれば、緩衝材の厚さに係らず 5MPa（今回、廃棄体パッケージの耐圧性能上の目安とした 15MPa から 10MPa の静水圧分を除いた圧力値）以下の緩衝材の応力となることが分かった。

4. 坑道内で生じる緩衝材の応力の評価

現実的な緩衝材の応力を取得するため、矩形の処分坑道を対象に三次元でモデル化して、腐食膨張解析を実施した。対象としたのは、円筒型廃棄体パッケージ（ドラム缶用）を収納した TRU-PEM である。構築した解析モデルを図-3 に示す。

緩衝材の材料設定のうち乾燥密度は 1.5Mg/m^3 とした。材料パラメータは二次元モデルと同じものを使用した。ただし、初期状態は、間隙比を乾燥密度から決定される値とし、初期応力を正規圧密線に載るように設定した正規圧密状態とした。解析結果のうち、上、中、下段の各々の廃棄体パッケージに加わる緩衝材の応力の経時変化を図-4 に示す。ここで、中段の緩衝材の応力が大きくなっているのが分かる。中段の緩衝材の応力が大きくなるのは、上・下段の PEM 容器の腐食膨張の影響による。目安値の 5MPa を超えるのは、中段が約 8mm、下段と上段は 9mm の平均腐食深さ以上となる場合であった。次に、乾燥密度の経時変化を図-5 に示す。5MPa を超えるときの乾燥密度は約 1.7Mg/m^3 であった。乾燥密度についても、最も圧縮を受ける中段の乾燥密度が高くなり、上部埋戻し材の緩衝性の影響を受ける、上段 0° の乾燥密度が小さくなった。図-6 に乾燥密度の分布図を示す。図より、緩衝材は全て全圧縮となるため、引張や膨張が生じて乾燥密度が低下する箇所はなかった。

5. おわりに

本稿では、廃棄体パッケージ容器および TRU-PEM 容器の腐食膨張に関する影響検討を行った。検討の結果、平均腐食深さ 2mm 以下、かつ乾燥密度 1.6Mg/m^3 以下であれば、緩衝材の応力は目安値とした 5MPa を下回る結果となった。坑道モデルについては、平均腐食深さ 8mm を超えると、5MPa を超える結果となった。ただし、引張等によって乾燥密度が低下する箇所はなかった。

参考文献 1) 鈴木, 他: PEM 方式を適用した TRU 等廃棄物の人工バリア設計 (その1), 2) 森岩, 他: PEM 方式を適用した TRU 等廃棄物の人工バリア設計 (その3), 3) 高山, 他: 緩衝材の長期圧密挙動に関する検討 (その3) クニゲル®V1 とカオリナイトの基本特性の比較, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集, III-550, 2019.

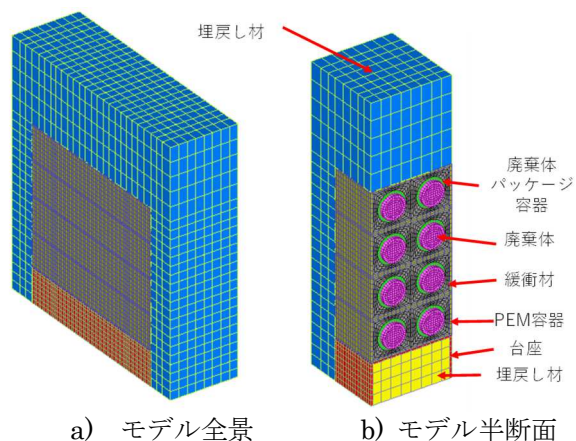


図-3 三次元坑道モデル

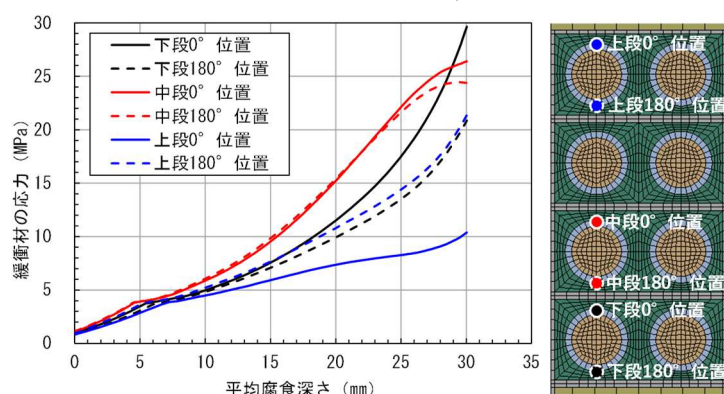


図-4 三次元坑道モデル緩衝材の応力の経時変化

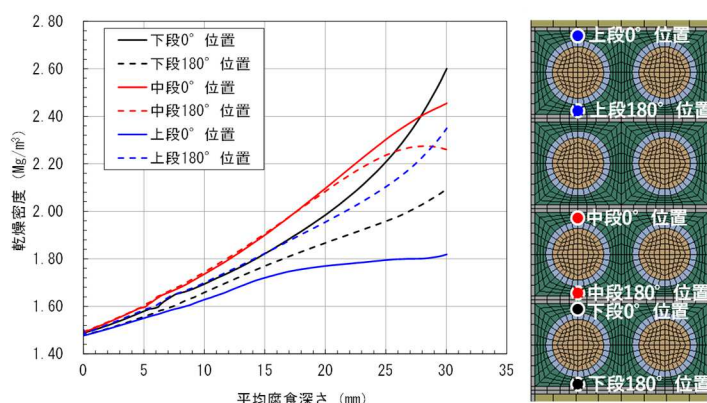


図-5 三次元モデル乾燥密度の経時変化

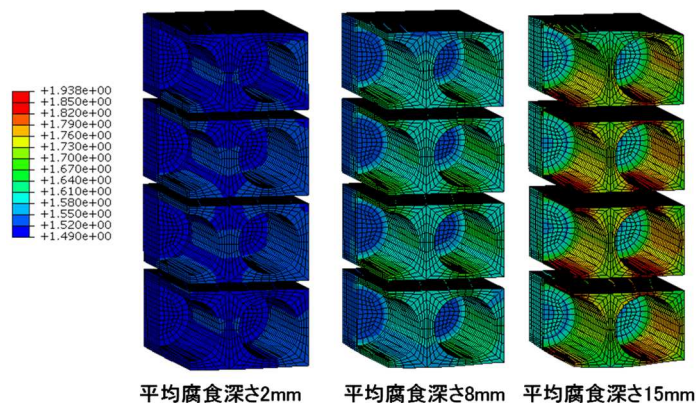


図-6 乾燥密度分布図