

ニアフィールド長期力学挙動評価技術の開発

高山裕介^{*1}

これまで保守的な仮定の導入による評価の様式化・単純化により、地層処分という技術の成立性や信頼性が示された。しかしながら、今後は、処分事業の進展につれてサイト条件等の情報が拡充し、それを利用しつつ、サイト間やデザイン間の適切性の比較やそれに基づく処分施設設計が実施されると考えられる。その場合、様式化・単純化された評価技術では、サイト情報等が反映されたより現実的な検討は困難な場合がある。そのため、保守的に簡単化・様式化された評価手法に加え、より現実性のある評価手法の開発が必要である。本講演では、複合現象評価技術開発の必要性と、その技術開発の一環として実施している長期力学挙動評価技術開発の概要およびそれを用いた解析事例を紹介した。

Keywords: 地層処分、複合現象評価技術、長期力学挙動評価技術、岩盤クリープ、セメント系材料、ひび割れ

1 はじめに

従来の地層処分に関する安全評価では、保守的に簡略化されたモデルや保守的設定に基づくパラメータが用いられてきた。今後の処分サイト選定段階における安全評価には、実際のサイトの地質環境条件等を反映することに加え、様々な処分概念や設計オプション間の比較、サイト間の優劣等が、より具体性をもって検討されると考えられる。従来の様式化された保守的な評価モデルではサイト間やデザイン間の相違を定量的に表現することができず、より現実に即した挙動を評価する手法が必要となる可能性がある。

地層処分対象となる放射性廃棄物のうち、特に、TRU廃棄物の地層処分システム（Fig. 1）の場合は、周辺岩盤、支保工、緩衝材として使用されるベントナイト系材料、廃棄体や坑道内部の埋戻し材として使用されるセメント系材料等の複合的な材料で構成される。これらの材料間で多様な相互作用が生じ、これらが有機的に影響しあいながら処分場の状態は変遷していく。この現象は、変質の促進あるいは抑制の正負のフィードバックループを内包する非線形の連成現象であるとされる[1]。こうした非線形挙動を示す現象の例として、廃棄体パッケージの容器や構造躯体に使用される金属材料の腐食膨張によって周囲のセメント系材料に引張応力が作用することにより、ひび割れが発生する現象があげられる[2]。個々のひび割れが連結して施設全体を貫通する場合には、ひび割れを流路として地下水が流れることによってひび割れ面からのカルシウムの溶出が起こると考えられる。これにより、割れ近傍の領域を中心に剛性や強度が低下して施設全体の応力場が変化し、新たなひび割れが発生する可能性がある。この場合には、流入する地下水の量が増加し、カルシウム溶出が促進されると考えられる。化学・力学・物質輸送をそれぞれ個別に評価しても、このような事象の評価は不可能である。そのため、化学・力学・物質輸送の連成および材料間の相互作用がもたらす非線形現象を評価するための複合現象評価技術の開発が進められている（例えば[3]）。複合現象評価技術を開発することにより、より現実的な処分場の状態変遷の評価や、それに基づくより現実的な核種移行の場の設定が可能となる。その結果、保守的な設定による評価結果の妥当性を確認す

Development of evaluation technique for long-term mechanical behavior of near-field by Yusuke TAKAYAMA (takayama.yusuke@jaea.go.jp)

*1 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第 34 回「バックエンド」夏期セミナーにおける講演内容を加筆・修正したものである。

ることも可能となる。さらに、人工バリアに期待している安全機能の確認、経済合理性等の観点からの適切な設計、核種移行や安全機能に与える影響が大きな因子の明示化に繋がり、効果的な研究開発の促進等の効果も期待される。

複合現象評価技術の一部として、化学および物質輸送と連携して処分施設の力学挙動を評価する技術が必要となる。そのため、長期力学挙動解析コードMACBECE (Mechanical Analysis considering Chemical transition of BEntonite and CEment materials) の開発が進められている（例えば[4,5]）。以下にその概要とそれを用いた解析事例を紹介する。

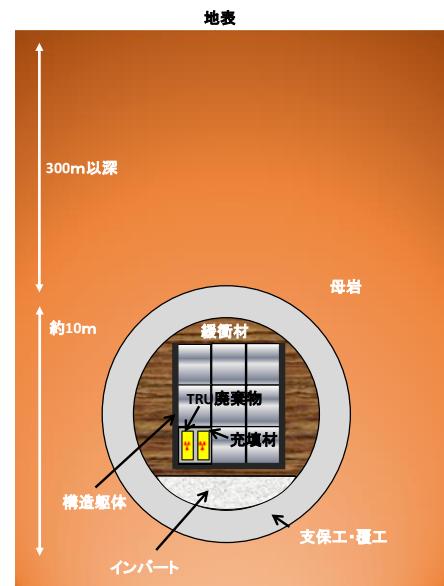


Fig. 1 TRU 廃棄物の地層処分システムの概念図

2 ニアフィールド長期力学挙動評価技術

MACBECE は、セメント系材料やベントナイト系材料の化学的変遷による力学特性の変化を考慮して、周辺岩盤を含めた処分施設の長期的な力学挙動を解析し、処分施設の変形と物質輸送特性の変化を評価することが可能な解析コードである。他の力学解析コードと比較して、材料の化学的変質に伴う力学特性の変化を取り扱う点や、各材料の特徴に応じてそれぞれ異なる力学モデルが組み込まれていることにより、材料間の力学的相互作用を評価できる特徴がある。MACBECE で取り扱う力学現象を Table 1 にまとめた。

Table1 MACBECE で取り扱う力学現象

期間	MACBECEで取り扱う力学現象例	化学反応解析からの入力情報
処分施設建設・操業時	・岩盤の掘削による応力変化 ・岩盤クリープ ・自重による変形 ・緩衝材の膨潤圧発生	
処分施設閉鎖後	・岩盤クリープ ・金属の腐食膨張 ・変質によるセメント系材料の強度・剛性変化 ・セメント系材料のひび割れ ・変質による緩衝材の膨潤性の低下	・カルシウムの溶出 ・スメクタイト部分密度、交換性ナトリウム率変化

処分施設建設・操業時では、岩盤の掘削による地圧の応力解放が生じるとともに、岩盤クリープも発生する。その後、覆工やインバートを施工し、下部の緩衝材を敷設する。構造躯体や TRU 廃棄物および充填材を設置することにより下部緩衝材に荷重がかかり、下部緩衝材が圧縮する。処分施設閉鎖後は、数百年かけて処分施設が冠水し、セメント系材料を想定している部位（覆工・インバートおよび TRU 廃棄物・充填材等）は、セメント構成成分が徐々に溶出し、その強度や剛性が時間をかけてゆっくりと低下する。さらに、金属材料の腐食膨張等に由来してセメント系材料に引張応力が発生し、ひび割れが生じる。緩衝材であるベントナイトにも地下水が浸潤すると、ベントナイトが膨潤する。長期的には、セメント系材料からのカルシウムによるイオン交換やベントナイト中の膨潤性鉱物であるスメクタイトの溶解に伴いベントナイトの膨潤性能が低下していくことが考えられる。MACBECE に用いられているこれらの現象モデルの概要を以下に示す。

岩盤には、大久保らが提案するクリープモデル[6,7]を用いている。金属材料は、腐食の進展に伴い、健全部と腐食部の割合に応じて剛性を変化させ、腐食膨張による応力増分（腐食速度、腐食膨張率から膨張ひずみ速度を算出し、それと剛性を掛け合わせて算出）を節点荷重として載荷する手法を用いて腐食膨張を評価している。セメント系材料には、別途実施する化学反応解析により求められるカルシウムの溶出に応じて強度と剛性が低下することを表現する非線形弾性構成モデルを用いている。また、圧縮応力を正とした場合の最小主応力が引張強度に達した場合、ひび割れが発生したと判定する。その際、ひび割れ判定要素にひび割れ解放力を載荷し、剛性を低下させることでひび割れを表現している。緩衝材には、大野らが提案する弾粘塑性構成モデルである Exponential Contaractansy model (EC モデル) [8]を用いている。EC モデルは、Sekiguchi and Ohta が提案する弾粘塑性構成モデル[9]を拡張したモデルである。修正 Cam-Clay モデル[10]に類似した降伏曲面を設定することも可能であり、汎用性の高いモデルである。また、別途実施する化学反応解析により求められるベントナイトのイオン交換およびスメクタイトの溶解量に応じた膨潤圧の低下量を節点荷重として載荷させることにより、ベントナイトの変質による膨潤性能の低下を考慮している[11]。これらの各材料のモデルを組み合わせることにより、岩盤を含めた処分施設全体の長期の力学挙動を解析することが可能となる。

3 TRU 廃棄物処分施設の長期力学解析例

3.1 岩盤クリープによる処分施設の変形量の評価

TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ（以下、第 2 次 TRU レポート）[1]では、処分施設の建設段階における周辺岩盤の応力状態の解析、セメント系材料やベントナイト系材料の化学的変遷を考慮した処分施設の変形解析を別々の解析コードで実施してきた。岩盤のクリープによる処分施設への影響については、岩盤のクリープ解析によって得られた 30cm 程度の内径変位量を強制的に処分施設外側の変位として与えている。しかしながら実際は、岩盤と処分施設は互いに影響しあいながら変形を起こすと考えられる。そこで、Fig. 2 に示すメッシュ図を用いて、Table 2 に設定した解析ケースに対して解析を実施している[4]。その結果、10 万年後の鉛直内空変位は、CASE1～3 でそれぞれ、12.0, 13.0, 14.7 (cm) であり、これは第 2 次 TRU レポートの評価（約 30cm）の半分程度であった。処分施設の各材料と周辺岩盤の力学挙動を同時に解析することで、処分施設の力学的な状態変遷をより現実的に評価することが可能となったと考えられる。

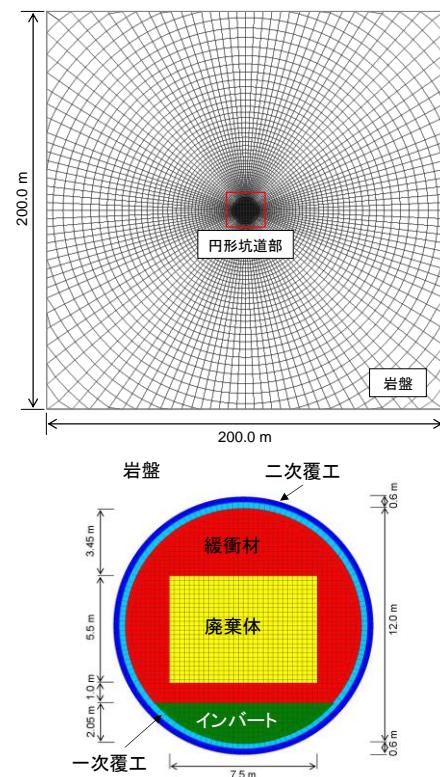


Fig. 2 岩盤クリープによる処分施設の変形量の評価に用いたメッシュ図

Table2 解析ケース

解析ケース	緩衝材	セメント系材料
CASE1	変質無	廃棄体領域の外側領域の 1m でカルシウムが 25% 溶出
CASE2	イオン交換	カルシウムが 25% 溶出、一次覆工および二次覆工のカルシウムがすべて溶出
CASE3	スメクタイトの溶解	

3.2 セメント系材料の割れを伴う挙動が透水性の時空間変化に与える影響

第2次TRUレポートでは、放射性核種を含む地下水がセメント系材料のひび割れ内部に移行する現象が想定されているものの、直接的にこのような現象が核種移行評価の数学モデルで表現されているわけではなく、領域全体を砂並みの透水係数に設定した多孔質媒体モデルでの評価が行われている。このような設定の妥当性検証や、より現実に即した評価を行うためには、まずはひび割れを伴う場の状態変遷を評価する技術開発が必要である。セメント系材料のひび割れは、セメント系材料の変質による強度低下や、金属材料の腐食膨張や岩盤クリープ等による力学的作用により生じると考えられる。そこで、金属の腐食膨張や岩盤クリープ、材料の変質による劣化を考慮した解析を実施し、セメントのひび割れ挙動を調べると共に、セメントの割れを伴う挙動が透水性の時空間変化に与える影響を調べた[3]。Fig.3に解析に用いたメッシュ図、Fig.4にひび割れの分布図、Fig.5にひび割れの情報をもとに場の透水係数を評価した結果を示す。時間の経過に伴い局所的なひび割れが発生し、それにより局所的に透水性の高い領域が発生しているのが確認された。本解析では、セメント系材料は時間の経過に伴い線形的に変質すると仮定したが、今後、処分場の化学的変遷解析や物質輸送解析等との連成による複合現象評価を実施することで、より現実的な場の状態変遷を評価することが可能となる。

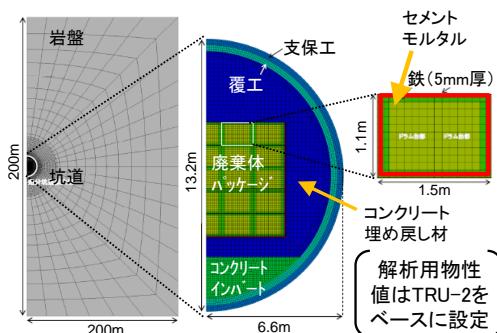


Fig. 3 セメントの割れを伴う挙動が透水性の時空間変化に与える影響の評価に用いたメッシュ図

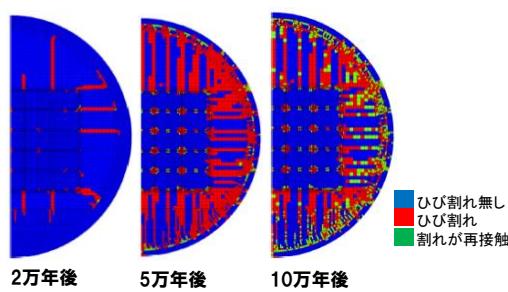


Fig. 4 ひび割れ挙動

4 おわりに

本講演では、複合現象評価技術開発の必要性と、その技術開発の一環として実施している長期力学挙動評価技術の

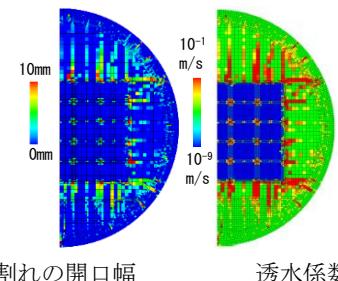


Fig. 5 10万年後の割れの開口幅および透水係数分布

概要およびそれを用いた解析事例を紹介した。本講演では複合現象の力学部分について紹介したが、複合現象評価技術開発は多くの研究分野にまたがる裾野の広い研究開発である。従って、多様な専門家（地質、化学、材料、土木、水理、微生物、計算工学 etc）の知識を集約して、研究開発を実施していくことが必要と考えている。

本研究は、経済産業省からの委託事業である「地層処分技術調査等事業 セメント材料影響評価技術高度化開発」（平成23～26年度）および「地層処分技術調査等事業 処分システム評価確認技術開発」（平成27～29年度）の成果の一部を含むものである。

参考文献

- [1] 電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構：TRU廃棄物処分技術検討書－第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ、JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02(2005).
- [2] 独立行政法人日本原子力研究開発機構：平成26年度地層処分技術調査等事業 セメント材料影響評価技術高度化開発－4カ年研究成果の取りまとめ－報告書(2014).
- [3] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構：平成27年度地層処分技術調査等事業 処分システム評価確認技術開発報告書(2016).
- [4] 三原守弘、平野史生、高山裕介、京川裕之、大野進太郎：TRU廃棄物地層処分施設の化学的変遷を考慮した長期力学挙動解析コードの開発、原子力バックエンド研究、Vol.24, No.1, pp.15-26, (2017).
- [5] 平野史生、大谷芳輝、京川裕之、三原守弘、清水浩之、本田明：TRU廃棄物処分システムの性能評価の観点からの人工バリアの透水性に対するセメント系材料のひび割れの影響に関する検討、日本原子力学会和文論文誌、Vol.15, No.2, pp.97-114, (2016).
- [6] 大久保誠介、何昌栄、西松裕一：一軸圧縮応力下における時間依存性挙動、日本鉱業会誌、Vol. 103, pp.177-181, (1987).
- [7] 大久保誠介：コンプライアンス可変型構成方程式の解析的検討、資源・素材学会誌、Vol.108, pp.601-606, (1992).
- [8] 大野進太郎、飯塚敦、太田秀樹：非線形コントラクターシー表現式を用いた土の弾塑性構成モデル、応用力学論文集、Vol.9, pp.407-414, (2006).
- [9] Sekiguchi, H. and Ohta, H. : Induced anisotropy and time

dependency in clay, Constitutive Equation of Soils,
Proceedings of the 9th International Conference on Solid
Mechanics and Foundation Engineering, Specialty Session
9, pp.306-315, (1977).

- [10] Roscoe, K. H. and Burland, J. B.: On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay, Engineering plasticity, ed. J. Heyman and F. A. Leckie, Cambridge University Press: Cambridge, UK, 535-609, (1968).
- [11] Sahara, F., Murakami, T., Ito, H., Kobayashi, I. and Yokozeki, K. : Development of a mechanical analysis system considering chemical transitions of barrier Materials, WM'06 Conference, (2006).