

熱 - 水 - 応力 - 化学連成解析モデルを用いた海水系
地下水環境下における緩衝材の浸潤挙動評価
(受託研究)

Assessment of the Infiltration Behaviour of Buffer Material in Seawater-type
Groundwater Environments Using a Coupled THMC Analysis Model
(Contract Research)

鈴木 英明 高山 裕介 佐藤 久 綿引 孝宜
佐藤 大介

Hideaki SUZUKI, Yusuke TAKAYAMA, Hisashi SATO, Takanori WATAHIKI
and Daisuke SATO

核燃料・バックエンド研究開発部門
核燃料サイクル工学研究所
環境技術開発センター
基盤技術研究開発部

Department of Geological Disposal Research
Nuclear Backend Technology Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

March 2023

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの転載等の著作権利用は許可が必要です。本レポートの入手並びに成果の利用(データを含む)は、
下記までお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission.
Availability and use of the results of this report, please contact
Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2023

熱－水－応力－化学連成解析モデルを用いた海水系地下水環境下における
緩衝材の浸潤挙動評価
(受託研究)

日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門
核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター
基盤技術研究開発部

鈴木 英明*、高山 裕介、佐藤 久*、綿引 孝宜**、佐藤 大介*

(2022年11月18日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分における過渡期のニアフィールド状態は、熱的作用（熱輸送、熱膨張）、水理的作用（地下水浸透、温度勾配による水分移動）、力学的作用（応力変形、膨潤圧の発生）および化学的作用（物質移行、間隙水の濃縮希釈、鉱物の溶解沈澱など）などが相互に影響を及ぼし合って変化する複合的な現象が生じると考えられている。このような過渡期における複雑なニアフィールド環境を把握することを始めとして、安全評価における核種移行の初期状態の設定や、オーバーパックの腐食寿命評価に必要なニアフィールド環境条件に関する情報の提供を目的として、熱－水－応力－化学（THMC）連成解析コード（Couplys）の開発が進められてきている。

本研究では、海水系地下水環境下におけるニアフィールドの再冠水挙動の評価を適切に行うため、海水系地下水を想定した溶液を緩衝材材料に浸潤させた室内試験結果に基づき、不飽和浸透流解析と物質移行解析および地球化学解析を連成させる手法により、緩衝材の透水性が間隙水中の塩濃度に依存して変化するとした水理モデルを設定した。

また、廃棄体の発熱によってオーバーパック近傍で緩衝材の水分が低下し乾燥する現象について、気液二相流解析コード（TOUGH2）を用いて、廃棄体の発熱を想定した人工バリア体系での気相の流れと水蒸気量の勾配によって生じる水蒸気移動を含む緩衝材の浸潤挙動評価を実施した。そして、得られた浸潤プロファイルに基づき、温度および間隙水飽和度の依存性を考慮した温度勾配による水分移動モデルの設定を行った。

さらに、これら設定したモデルを Couplys に適用し、幌延深地層研究計画に基づき実施された人工バリア性能確認試験を対象とした解析評価を実施した。そして、原位置で計測された緩衝材の浸潤挙動に関するデータとの比較を通じてモデルの適切性を確認した。

核燃料サイクル工学研究所：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

*検査開発株式会社

**株式会社 NESI

Assessment of the Infiltration Behaviour of Buffer Material in Seawater-type
Groundwater Environments Using a Coupled THMC Analysis Model
(Contract Research)

Hideaki SUZUKI*, Yusuke TAKAYAMA, Hisashi SATO*, Takanori WATAHIKI**
and Daisuke SATO*

Department of Geological Disposal Research, Nuclear Backend Technology Center,
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories,
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 18, 2022)

It is anticipated that the coupled thermal-hydraulic-mechanical and chemical (THMC) processes will occur, involving an interactive process with radioactive decay heat arising from the vitrified waste, infiltration of groundwater from the host rock into the buffer material, swelling pressure of buffer material due to its saturation and chemical reaction between bentonite and pore-water in the near-field of a geological disposal system for high-level radioactive waste repository. In order to evaluate these phenomena in the near-field, the THMC model has been developed.

In this study, For the purpose of evaluating the near-field infiltration behavior in seawater-type groundwater environment, a hydraulic model was set in which the permeability of the buffer material change depending on the salt concentration in the pore-water.

In order to evaluate the drying phenomenon of the buffer material due to waste heat, a temperature gradient water transfer model was set in consideration of the dependence of temperature and pore-water saturation.

The THMC analysis of the in-situ experiment of engineered barrier system (EBS) experiment at the Horonobe Underground Research Laboratory was carried out. The validity of the model was then checked through comparison with measured data.

Keywords: THMC Model, Buffer Material, Seawater-type Groundwater, Permeability,
Temperature Gradient Water Movement, Geological Disposal

* Inspection Development Company Ltd.

** NESI Inc.

目次

1. はじめに.....	1
2. 海水系地下水環境下における緩衝材の水理モデルの設定.....	4
2.1 概要.....	4
2.2 海水系地下水の浸潤を想定した緩衝材の浸潤試験.....	4
2.3 浸潤試験の再現解析.....	7
2.4 まとめ.....	14
3. 温度勾配による水分移動モデルの設定.....	15
3.1 概要.....	15
3.2 温度勾配条件下での緩衝材の浸潤解析.....	17
3.3 まとめ.....	23
4. THMC 連成解析モデルによる人工バリア性能確認試験の再現解析.....	24
4.1 概要.....	24
4.2 解析条件.....	24
4.3 解析結果.....	29
4.4 まとめ.....	34
5. おわりに.....	35
謝辞.....	37
参考文献.....	38

Contents

1. Introduction.....	1
2. Setting up a hydraulic model of buffer material in a seawater-type groundwater environment.....	4
2.1 Outline of hydraulic model of buffer material.....	4
2.2 Infiltration testing of buffer material.....	4
2.3 Analysis of infiltration tests of buffer material.....	7
2.4 Summary.....	14
3. Setting up temperature gradient water transfer model of buffer material.....	15
3.1 Outline of temperature gradient water transfer model.....	15
3.2 Infiltration analysis of buffer material under temperature gradient conditions.....	17
3.3 Summary.....	23
4. THMC analysis of the in-situ experiment of engineered barrier system.....	24
4.1 Outline of analysis.....	24
4.2 Input parameters and boundary conditions.....	24
4.3 Results.....	29
4.4 Summary.....	34
5. Conclusion.....	35
Acknowledgements.....	37
References.....	38

図リスト

図 1-1	過渡期の THMC 連成解析モデル.....	3
図 2-1	海水系地下水環境下における緩衝材の水理特性の変化の概念図.....	4
図 2-2	浸潤試験装置概略図.....	5
図 2-3	供試体中への浸潤量の測定結果.....	6
図 2-4	供試体中の含水比分布の測定結果.....	6
図 2-5	浸潤溶液中の NaCl 濃度と固有透過度の関係.....	9
図 2-6	緩衝材の浸潤試験を対象とした浸潤量の再現解析結果.....	12
図 2-7	同一浸潤量での間隙水飽和度分布の比較.....	13
図 2-8	緩衝材の浸潤試験を対象とした水分分布の再現解析結果.....	13
図 3-1	TOUGH2 による排気条件と非排気条件での浸潤解析結果の比較.....	20
図 3-2	TOUGH2 による浸潤解析結果と それに基づく温度勾配水分拡散係数の推定結果.....	21
図 3-3	THAMES における緩衝材の温度勾配水分拡散係数.....	23
図 4-1	人工バリア性能確認試験の解析評価に用いた解析メッシュモデル.....	26
図 4-2	人工バリア性能確認試験の解析評価における温度の境界条件.....	27
図 4-3	人工バリア性能確認試験の THC および TH 連成解析による 間隙水飽和度コンター（全体像）.....	31
図 4-4	人工バリア性能確認試験の THC および TH 連成解析による 間隙水飽和度コンター（緩衝材水平断面）.....	32
図 4-5	緩衝材中の間隙水飽和度に関する計測結果と THC および TH 連成解析結果との比較.....	33
図 4-6	比抵抗トモグラフィーによる計測結果から 推定された間隙水飽和度コンター.....	33
図 4-7	THC および TH 連成解析による間隙水飽和度の時間変化.....	34

表リスト

表 2-1	浸潤試験条件.....	5
表 2-2	浸潤試験を対象とした緩衝材の解析物性値.....	10
表 2-3	浸潤試験を対象とした解析ケース.....	10
表 3-1	水と空気の移動に着目した時の THAMES と TOUGH2 の支配方程式の比較.....	16
表 3-2	THAMES における温度勾配水分拡散係数に関わるパラメータの設定.....	23
表 4-1	人工バリア性能確認試験の解析評価における初期間隙水組成.....	27
表 4-2	人工バリア性能確認試験の解析評価に用いた物性値.....	28
表 4-3	人工バリア性能確認試験の再現解析ケース.....	28

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるニアフィールドの状態は、廃棄体からの発熱、人工バリア内への地下水の浸潤、緩衝材の膨潤変形、地下水と鉱物との間での化学的反応などが相互に影響を及ぼしあって変化するため、その挙動を評価するためには複合的な現象として取り扱う必要がある。このような連成プロセスの現象理解に向け、国内外において多くの原位置試験やモックアップ試験が行われ、また、長期的なプロセスを定量化するために、連成解析モデルの開発や原位置試験などに基づく検証なども進められている。

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構という）は、これまでに人工バリアを設置した時点から緩衝材が飽和に至るまでの過渡的な期間を対象として、ニアフィールドで生じる熱的（熱膨張と熱輸送）、水理的（地下水浸潤）、力学的（膨潤圧の発生）なプロセスが相互に影響を及ぼし合う連成現象を把握するためのツールとして、大西ら（Ohnishi et al., 1985 [1]）によって開発された熱-水-応力（THM）連成解析モデル（THAMES）（例えば、Chijimatsu et al., 2000 [2]）の高度化を進めている。高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発第2次取りまとめ（以下、第2次取りまとめという）（核燃料サイクル開発機構, 1999 [3]）では、THAMESによって釜石鉱山における原位置試験の粘土熱負荷試験を対象としたモデルの妥当性の評価を行った上で（Chijimatsu et al., 2001 [4]）、ニアフィールドの長期挙動解析により、人工バリアの再冠水時間などを評価した。その後も、FEBEXプロジェクトにおける原位置試験を対象とした再現解析や（例えば、操上ほか, 2004 [5]；日本原子力研究開発機構, 2019 [6]）、国際共同研究 DECOVALEX を活用したモデル間の比較を通じた検証（例えば、Rutqvist et al., 2005 [7]；Sugita et al., 2016 [8]）などが行われてきている。

さらに、オーバーパックの腐食挙動や放射性核種の溶解度などに影響を及ぼすと考えられる間隙水化学の定量化や、第2次取りまとめにおけるリファレンスケースのシナリオ上で選択された特質（Feature）事象（Event）、プロセス（Process）（以下、FEP という）の妥当性の検証といった課題を解決するため、THM 連成プロセスに、緩衝材の間隙水化学の影響を考慮した THMC 連成解析モデルを開発した（伊藤ほか, 2004 [9]；Fujita et al., 2006 [10]）。THMC 連成解析コード（Couplys）は、熱-水-応力連成解析コード（THAMES）、物質移行解析コード Dtransu（Nishigaki et al., 2001 [11]）および地球化学解析コード PHREEQC（Parkhurst, 1999 [12]）の独立した三つの解析コードを連成プラットフォーム上に搭載し、各解析コード間で連成対象変数の授受を行う解析システムである。平成19年度から平成21年度の3年間は、経済産業省資源エネルギー庁から受託した「地層処分技術調査等委託費（高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム化学影響評価高度化開発）」において、緩衝材中での塩濃縮析出現象をはじめとする間隙水化学の把握を目的とした THMC 連成モデルの高度化を進めてきた（日本原子力研究開発機構, 2008 [13]；日本原子力研究開発機構, 2009 [14]；日本原子力研究開発機構, 2010 [15]）。そして、第2次取りま

とめにおいて FEP 除外事象であったオーバーパック周辺での塩濃縮析出現象について、緩衝材が不飽和な状態にある期間にオーバーパックと緩衝材の境界で塩類が濃縮し析出するものの、緩衝材の飽和後には再溶解して散逸するとして解析結果が得られている（木村ほか, 2011 [16]）。また、幌延深地層研究計画におけるオーバーパック腐食試験（花室, 2014 [17]）を対象として、THMC 連成解析コード（Couplys）を用いた THMC 連成解析を実施し、廃棄体を模擬したヒーターの発熱と地下水の浸潤にともなう緩衝材間隙水の化学的な環境変化に着目した評価と、原位置において計測されている緩衝材の間隙水の pH や pe との比較を行った。その結果、間隙水の pH はスメクタイトの酸・塩基反応を考慮し、また、pe は緩衝材中に含有する黄鉄鉱が初期間隙中に存在する酸素を消費する反応を考慮することで実測値を再現可能であることが示されている（日本原子力研究開発機構, 2020 [18]）。

以上のように、これまでに開発を進めてきた THM および THMC 連成解析モデルは、人工バリア体系の原位置試験などに基づく検証解析を通じた適切性の確認や、ニアフィールドの長期挙動に関する予測解析による現象理解とプロセスの定量化などの事例が蓄積されてきている。しかしながら、これらのほとんどは降水系地下水環境条件下に対するものであり、海水系地下水環境条件下における原位置試験データに対する連成解析モデルの適用や検証が行われた事例が少ないのが現状である。

本研究では、これまでに開発を進めてきた THMC 連成解析モデルを、より多様な地質環境条件に適応できるようにするため、海水系地下水環境条件下における緩衝材の浸潤挙動を適切に評価するモデルの検討を行った。そのため、①緩衝材の透水性に及ぼす間隙水組成の影響を考慮した水理モデル、②廃棄体の発熱によってオーバーパック近傍で緩衝材の水分が低下し乾燥する現象を評価する温度勾配水分移動モデルを開発した。本研究において高度化を実施した部分を THMC 連成解析モデルの概念図と合わせて図 1-1 に示す。このうち、緩衝材の透水性に及ぼす間隙水組成の影響を考慮した水理モデルについては、飽和・不飽和浸透流解析と物質移行解析および地球化学解析を連成させ、海水系地下水が浸潤する過程において、初期に存在する間隙水と地下水が混合して形成される間隙水組成を計算し、透水性が間隙水組成に依存して変化するものとした。そして、種々の塩濃度の水溶液を緩衝材に浸潤させる室内試験の結果に基づき、間隙水飽和度に応じて間隙水中の塩濃度が及ぼす透水性への影響が変化するとして水理モデルのパラメータ値の設定を行った。一方、温度勾配による水分移動モデルについては、多孔質媒体に対する水、蒸気および熱の輸送を連成させた気液二相流解析コード（TOUGH2）（Pruess, 1991 [19]）を用いて、廃棄体の発熱を想定した人工バリア体系での気相の流れと水蒸気量の勾配によって生じる水蒸気の移動を含む緩衝材の浸潤挙動評価を行った。そして、計算によって得られた浸潤プロファイルに基づき、THAMES における温度勾配水分拡散係数として、温度および間隙水飽和度の依存性を考慮した温度勾配水分移動モデルを設定した。さらに、上述した二つのモデルを Couplys に反映させ、原子力機構が幌延深地層研究計画において実施している人工バリア性能確認試験（花室, 2014 [17]）を対象とした再現解析を実施した。解析は、廃棄体を模擬したヒ-

ターの発熱による温度勾配が形成された環境条件が海水系地下水の浸潤と緩衝材の間隙水組成とともに変化する水理特性に与える影響を考慮した。そして、原位置で得られている緩衝材中の浸潤挙動に関する計測値との比較を通じて、海水系地下水環境に対する連成解析モデルの適用性を確認した。

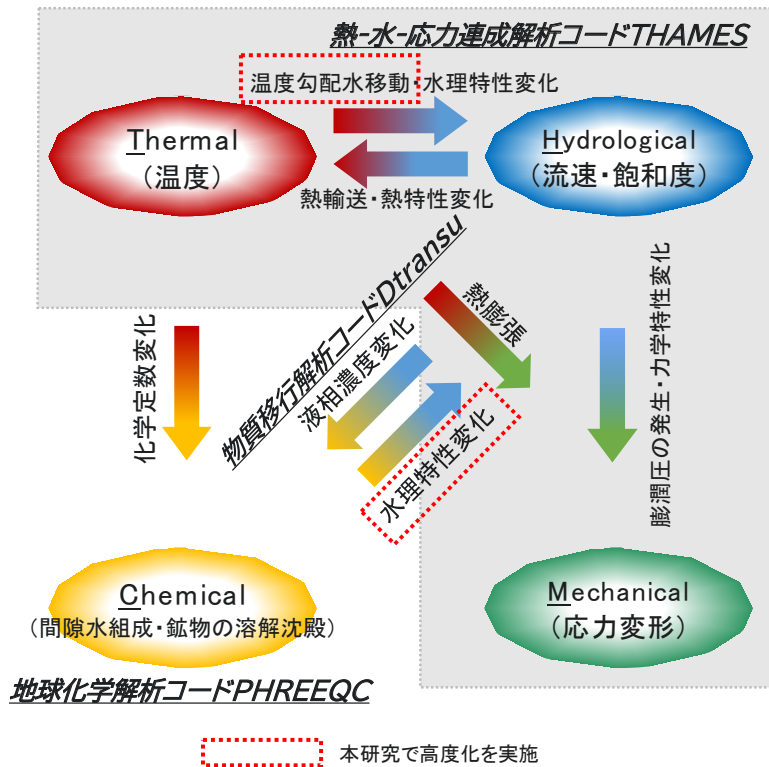


図 1-1 過渡期の THMC 連成解析モデル

2. 海水系地下水環境下における緩衝材の水理モデルの設定

2.1 概要

ベントナイトの透水性は、イオン強度などの間隙水組成の影響を受けることが知られている。このため、海水系地下水環境下における緩衝材の浸潤挙動を適切に評価するためには、間隙水組成が透水性へ及ぼす影響を考慮する必要がある。

図 2-1 に示すように、海水系地下水の浸潤過程における緩衝材の間隙水組成は、初期に存在する間隙水と浸潤した地下水とが混合して形成され、間隙水組成に応じて透水性などの水理特性が変化すると考えられる。そして、海水系地下水が透水性へ及ぼす影響は、海水系地下水の浸潤過程においては、岩盤に近い緩衝材の外側で大きく、浸潤が遅い緩衝材内部では小さいと推察される。

このように、海水系地下水環境下における緩衝材の間隙水組成は、時間・空間で変化するため、それに依存して変化する透水性の影響を考慮した水理モデルが必要となる。

本章では、緩衝材への海水系地下水の浸潤を想定して行った室内における浸潤試験とその結果を述べるとともに、その結果に基づき実施した Couplys を用いた水理解析と物質移行を考慮した地球化学解析との連成解析手法により、試験で得られた浸潤挙動を再現可能とする水理モデルの検討について述べる。

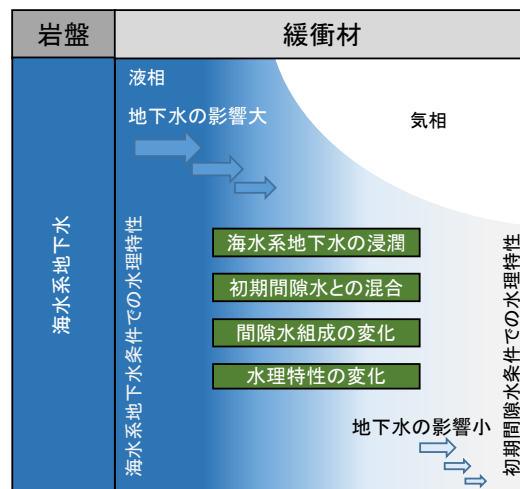


図 2-1 海水系地下水環境下における緩衝材の水理特性の変化の概念図

2.2 海水系地下水の浸潤を想定した緩衝材の浸潤試験

2.2.1 試験条件

海水系地下水環境下における緩衝材の浸潤挙動を把握するために、圧縮成形したベントナイト試料（以下、供試体）に、蒸留水、幌延地下水相当および人工海水相当の NaCl 濃度

の溶液を浸潤させる試験を実施した。供試体は、国産ベントナイトであるクニゲル V1、ケイ砂 3 号およびケイ砂 5 号を重量比 0.7 : 0.15 : 0.15 で混合したケイ砂 30wt%混合ベントナイトであり、乾燥密度は 1.8 Mg/m³、供試体寸法は直径 50 mm、高さ 50 mm である。試験は、図 2-2 に示すように、金属製の容器内を用いて体積を拘束した供試体の下部より金属焼結フィルターを通してビュレット内の試験水を吸水させた。そして、ビュレットの目盛りの変化を記録して浸潤時間と浸潤量の関係を把握した。試験水は、蒸留水、幌延地下水相当の NaCl 濃度の溶液（1.29wt%）および海水相当の NaCl 濃度の溶液（2.62wt%）とした。また、供試体中の水分分布を把握するため、浸潤を開始してから 1 日後、4 日後、11 日後および 21 日後に供試体の浸潤方向に対して、2.5mm から 5mm の厚みの薄片に切り出して、それぞれの含水比を測定し含水比分布を求めた。含水比分布の測定は、試験水の NaCl 濃度が 1.49wt%の溶液条件のみ実施した。この濃度は、幌延地下水のイオン強度に準じて設定した。試験条件を表 2-1 に示す。

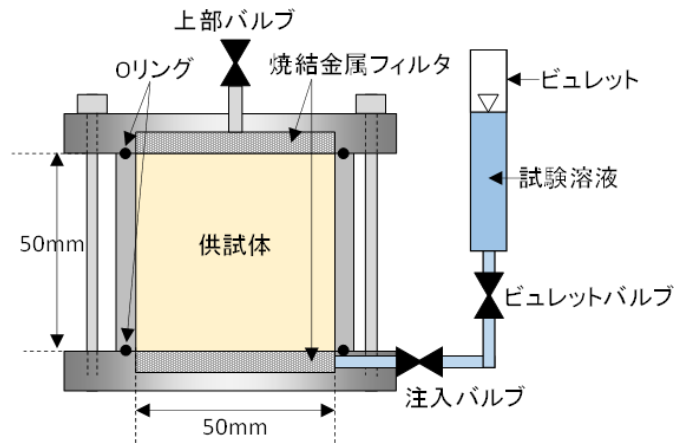


図 2-2 浸潤試験装置概略図

表 2-1 浸潤試験条件

材料	ケイ砂 30wt%混合ベントナイト
ベントナイトの初期含水比	約 8 %
乾燥密度	1.8 Mg/m ³
供試体寸法	直径 50 mm、高さ 50 mm
試験水	① 浸潤量を測定する試験の場合 ・ 蒸留水 ・ NaCl 濃度 1.29wt % の水溶液 ・ NaCl 濃度 2.62wt % の水溶液 ② 水分分布を測定する試験の場合 ・ NaCl 濃度 1.49wt % の水溶液
試験温度	室温

2.2.2 試験結果

供試体中への浸潤量の測定結果を図 2-3 に示す。これより、浸潤させる溶液中の NaCl 濃度が高いほど、同一時間での浸潤量が多くなる結果となっている。また、図 2-4 には供試体中の水分分布の測定結果を示す。なお、切り出した薄片の厚さの中間を浸潤面からの距離としてプロットしている。これより、供試体中の含水比は、時間の経過とともに増加していることがわかる。

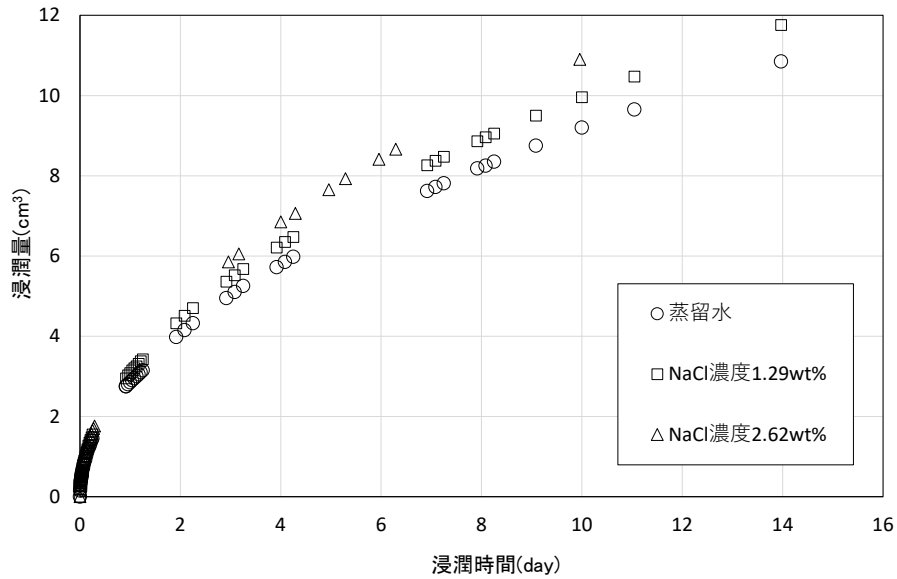


図 2-3 供試体中への浸潤量の測定結果

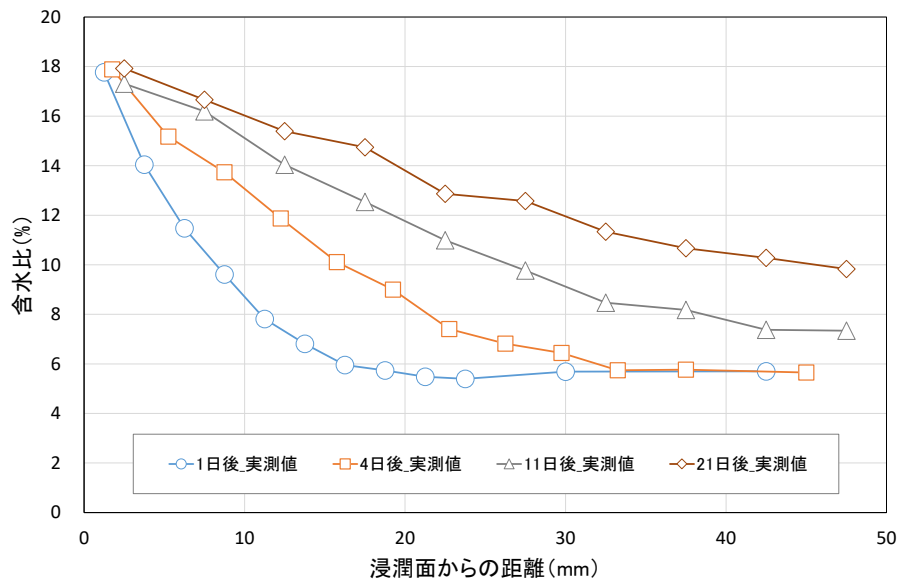


図 2-4 供試体中の含水比分布の測定結果

2.3 浸潤試験の再現解析

2.3.1 解析条件

浸潤試験の再現解析には、Couplys を用いた。解析メッシュは、浸潤面から鉛直上向き方向への一次元のみ浸潤を考慮したモデルとし、浸潤方向長さ 50mm を要素数 100 でモデル化した。解析における境界条件として、緩衝材の浸潤面の圧力水頭を、試験で設定されている水位の 0.5mH₂O で拘束した。また、浸潤試験における浸潤溶液条件に合わせて浸潤面の NaCl 濃度を拘束した。温度は、全領域で 20°C とした。

本解析で用いた物性値を表 2-2 に示す。このうち、緩衝材のサクシオン Ψ (mH₂O) と体積含水率 θ (-) との関係を表す水分特性曲線については、次式に示す van Genuchten モデル (van Genuchten, 1980[20]) を用いた。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta} = [1 + |\alpha\psi|^n]^{-m} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2-1)$$

ここで、 S_e は有効間隙水飽和度 (-)、飽和時の体積含水率 $\theta_s = 0.329$ (-)、最小体積含水率 $\theta_r = 0.000$ (-)、 α と n はフィッティングパラメータである。水分特性曲線については、間隙水飽和度 S_r (-) と間隙率 n_e (-) を用いて次式のように整理されている (鈴木・高山, 2020[21])。これより、式 (2-1) 中の α および n は、式 (2-2) との比較によって、ケイ砂 30wt% 混合ベントナイト、乾燥密度は 1.8 Mg/m³ の場合で、 $5.00 \times 10^{-3} \text{m}^{-1}$ および 1.38 と推定されている (大野ほか, 2019[22])。

$$S_r = 0.9675 n_e^{-1.77} \psi^{-0.371} \quad (2-2)$$

比透水係数 k_r (-) は、間隙水飽和度 S_r (-) の関数として、Corey モデル (Corey, 1954[23]) の指数部分を変数としたモデルによって、FEBEX や人工バリア性能確認試験の緩衝材に対して設定された次式を用いた (ENRESA, 2000[24]; 日本原子力研究開発機構, 2018[25])。

$$k_r = S_r^3 \quad (2-3)$$

また、物質移行パラメータのうち、実効拡散係数は、第 2 次取りまとめにおいて安全評価に用いた値として、乾燥密度 1.6 Mg/m³ に対して設定された値を用いた (核燃料サイクル開発機構, 1999[26])。また、縦分散長は供試体高さの 1/100 とした。

緩衝材の固有透過度の NaCl 濃度依存性を考慮するため、図 2-5 を用いた。図中のプロットは、透過させる溶液として、左から蒸留水、幌延地下水相当の NaCl 濃度および人工海水相当の NaCl 濃度に対する透水試験によって得られた固有透過度である（松本ほか, 1997[27]；菊池・棚井, 2005[28]；菊池ほか, 2003[29]）。そして、図中の直線は、透過溶液中の NaCl 濃度と固有透過度の関係を指数関数で近似したものであり、次式のようになる。

$$\kappa = 1.376 \times 10^{-20} \exp(1.035c) \quad (2-4)$$

ここで、 κ ：固有透過度 (m^2)、 c ：透過溶液中の NaCl 濃度 (wt%) である。なお、固有透過度とは、多孔質媒体の透過抵抗を表すものであり、透水係数との関係は次式で表される。

$$k_w = \frac{\kappa \rho_w g}{\mu} \quad (2-5)$$

ここで、 k_w ：透水係数 (m/s)、 ρ_w ：透過溶液の密度 (Mg/m^3)、 g ：重力加速度 (m/s^2)、 μ ：透過溶液の粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) である。これより、式 (2-4) の固有透過度を透水係数で表すことができる。

飽和・不飽和浸透流解析におけるダルシー則は次式である。

$$v = k_w kr \frac{\Delta H}{\Delta x} \quad (2-6)$$

ここで、 v ：ダルシー流速 (m/s)、 kr ：比透水係数 (-)、 $\Delta H/\Delta x$ ：全水頭勾配 (-) である。したがって、透水係数 k_w を、式 (2-4) および式 (2-5) で設定することで、透水係数 k_w の NaCl 濃度依存性を考慮することができる。

また、後述するように、これらの式を用いた解析結果は、実測値に比べて浸潤が速く、実測値を再現することができなかった。この要因として、図 2-1 に示したように、地下水の浸潤が進まず水分が上昇していない部分では NaCl 濃度が浸潤に与える影響が小さくなるものと考えられ、不飽和時の水理特性である比透水係数や水分ポテンシャルについても間隙水中の NaCl 濃度によって変化している可能性がある。しかしながら、これら不飽和時の水理特性の NaCl 濃度依存性を室内試験から取得し、モデル化することは困難である。そこで、本検討においては、式 (2-4) を次式のように拡張し、不飽和時の水理特性の NaCl 濃度依存性を考慮することで、間隙水飽和度が小さくなるほど浸潤挙動に与える NaCl 濃度の影響が小さくなるようにモデル化した。

$$\kappa = 1.376 \times 10^{-20} \exp(1.035c \times S_r^{A_c}) \quad (2-7)$$

ここで、 S_r ：間隙水飽和度、 A_c ：塩水条件での浸潤試験の再現解析から決定するフィッティングパラメータであり、後述するように、幌延地下水相当および人工海水相当の NaCl 濃度の溶液を浸潤させた試験結果の両方を同時に再現するために適当な値として 12.0 に設定した。なお、上式は間隙が飽和した状態では、式 (2-4) に帰着する。

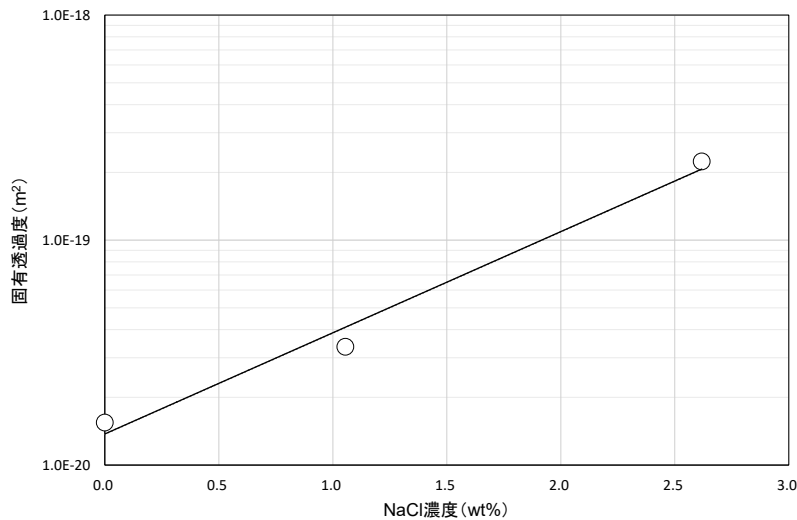


図 2-5 浸潤溶液中の NaCl 濃度と固有透過度の関係

浸潤試験の再現解析として、蒸留水、幌延地下水相当および人工海水相当の NaCl 濃度の溶液条件に対して、以下の 4 ケースについて実施した。caseA、caseB および caseC は、供試体中への浸潤量の時間変化を、caseD は供試体中の水分分布について評価を実施した。

caseA：一般的な飽和・不飽和浸透流解析として実施する。本ケースでの固有透過度は、間隙水組成に依存せず一定値となる。固有透過度は、表 2-3 に示した通りであり、式 (2-4) に基づき、蒸留水、幌延地下水相当および人工海水相当の NaCl 濃度として、それぞれ 0 wt%、1.29 wt% および 2.62 wt% として設定した。

caseB：水理解析と物質移行を含む地球化学解析を連成させ、式 (2-6) で示したダルシー則に、式 (2-4) で示した固有透過度の NaCl 濃度依存性を考慮した。間隙水中の NaCl 濃度は、初期に含有する間隙水と浸潤水が混合した値として計算され、それに基づき固有透過度が設定されることになる。

caseC：固有透過度の NaCl 濃度依存性に加えて、不飽和時における水理特性の NaCl 濃度依存性も考慮するモデルとして式 (2-7) を用いる。このモデルでは、間隙水飽和度が小さくなるほど水理特性に及ぼす NaCl 濃度の影響が小さくなる。

caseD：浸潤溶液中の NaCl 濃度が 1.49wt%の溶液条件に対して、供試体中の水分分布を把握する。使用する水理モデルは caseC と同様であり式 (2-7) である。

以上、解析ケースを整理すると表 2-3 のようになる。表中の「H」は一般的な飽和・不飽和浸透流解析手法の水理解析である。また、「C」は物質移行を含む地球化学解析である。本検討では、緩衝材のイオン交換反応や間隙水と含有鉱物との水-鉱物反応については、浸潤時間が最長でも 3 週間程度であることから考慮しないものとし、間隙水中の Na および Cl の移行を評価の対象とした。このため、ここでの「C」は物質移行解析のみの解析となる。

表 2-2 浸潤試験を対象とした緩衝材の解析物性値

真密度	Mg/m ³	2.64
乾燥密度	Mg/m ³	1.80
空隙率	-	0.328
初期間隙水飽和度	-	0.340
固有透過度	m ²	表 2-3 の通り
水分特性曲線	-	$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta} = [1 + \alpha\psi ^n]^{-m}$ $m = 1 - \frac{1}{n}$ $\theta_s=0.328$ 、 $\theta_r=0.00$ 、 $\alpha=0.005$ 、 $n=1.38$
比透水係数	-	$k_r = S_r^3$
実効拡散係数	m ² /s	1.2×10^{-10}
縦分散長	m	5.0×10^{-4}

表 2-3 浸潤試験を対象とした解析ケース

解析ケース	解析手法	浸潤溶液	固有透過度
caseA	H	蒸留水	1.38×10^{-20} m ²
		NaCl 濃度 1.29wt%水溶液	5.23×10^{-20} m ²
		NaCl 濃度 2.62wt%水溶液	2.07×10^{-19} m ²
caseB	HC 連成	蒸留水	式 (2-4)
		NaCl 濃度 1.29wt%水溶液	
		NaCl 濃度 2.62 wt%水溶液	
caseC	HC 連成	蒸留水	式 (2-7)
		NaCl 濃度 1.29wt%水溶液	
		NaCl 濃度 2.62 wt%水溶液	
caseD	HC 連成	NaCl 濃度 1.49 wt%水溶液	式 (2-7)

H：水理解析、C：物質移行を含む地球化学解析

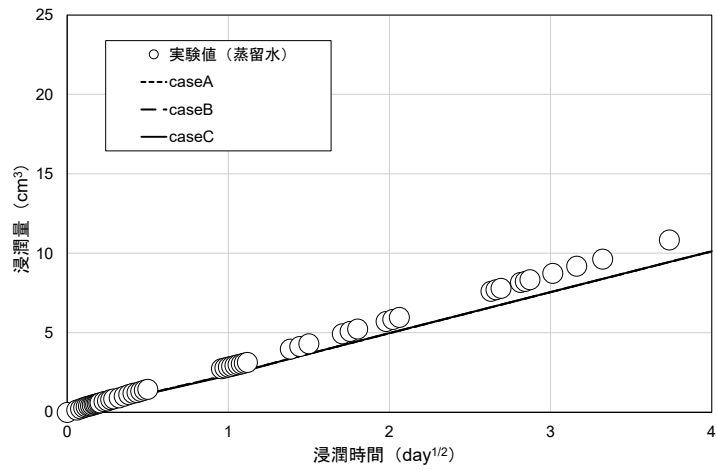
2.3.2 解析結果

浸潤試験によって得られた供試体へ浸潤した試験水量の時間変化を、解析結果と比較して図 2-6 に示す。図中の横軸は、浸潤時間の平方根である。図 2-6 (a) で示した蒸留水の場合については、caseA、B および C の間で透水性が変わらないため同一の結果となる。図 2-6 (b) および図 2-6 (c) は、幌延地下水相当および海水相当の NaCl 濃度の溶液を浸潤させた場合である。いずれの場合も caseA の解析結果は、実測値に比べて浸潤が速くなっている。caseA は、一般的な飽和・不飽和浸透流解析であり、固有透過度は、間隙水組成に依存せず一定として計算される。実測値との乖離は、表 2-3 で設定した固有透過度が大き過ぎるためであり、浸潤面に近く間隙水が浸潤水で満たされた部分と、浸潤面から遠く浸潤水が到達していない部分で同一の固有透過度を与えられることが適切でないことを示すものである。また、caseB についても、実測値に比べて解析結果の浸潤が速くなっている。caseB は、式 (2-4) に示す固有透過度の NaCl 濃度依存性を考慮するモデルであるが、これだけでは実測値を再現することができなかった。そして、caseC は、式 (2-7) に示すように、固有透過度が NaCl 濃度に依存して変化するのに加えて、不飽和時の水理特性についても NaCl 濃度の影響を考慮し、間隙水飽和度が小さくなるほど水理特性に及ぼす NaCl 濃度の影響が小さくなるモデルである。これによって、蒸留水、幌延地下水相当の NaCl 濃度の水溶液および海水相当の NaCl 濃度の水溶液を浸潤させた浸潤試験の結果を再現することが可能となった。

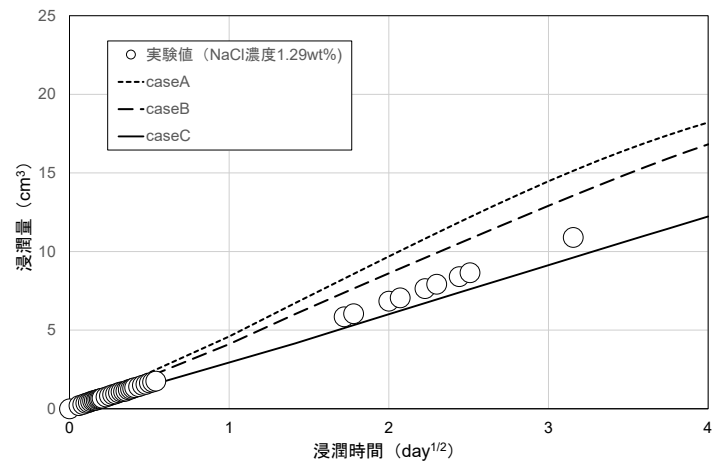
図 2-7 は、caseC による解析結果の一例として、供試体への浸潤量が 8 cm^3 となった時点での間隙水飽和度の分布を比較したものである。浸潤溶液の NaCl 濃度の増加とともに分布形状が一様な下に凸の形状から、浸潤面側から上に凸の逆 S 字状の曲線の形状に変化していく傾向が読み取れる。これは、間隙水飽和度が高い領域で NaCl 濃度の影響が大きくなり透水性が高くなるためと考えられる。

図 2-8 は、caseD の解析結果であり、図 2-4 で示した水分分布の測定結果と比較したものである。図中縦軸は、含水比を間隙水飽和に換算しており、5mm 毎に切り出した試料の乾燥密度が 1.8 Mg/m^3 として求めている。これより、式 (2-7) を用いた解析結果は浸潤試験によって得られた水分分布の結果をよく再現している。

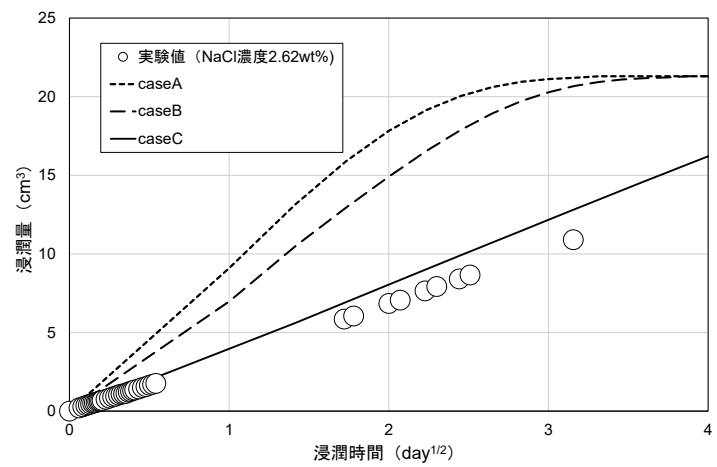
以上、水理解析と物質移行を含む地球化学解析（ここでは、鉱物反応を考慮していないため物質移行解析のみ）とを連成させ、式 (2-7) で示した間隙水飽和度が高くなるほど水理特性に及ぼす間隙水中の NaCl 濃度の影響が大きくなるモデルを適用することによって、蒸留水から海水程度の NaCl 濃度の試験水が浸潤する挙動を再現することが可能となった。



(a) 蒸留水の場合



(b) 幌延地下水相当のNaCl濃度溶液の場合



(c) 人工海水相当のNaCl濃度溶液の場合

図 2-6 緩衝材の浸潤試験を対象とした浸潤量の再現解析結果

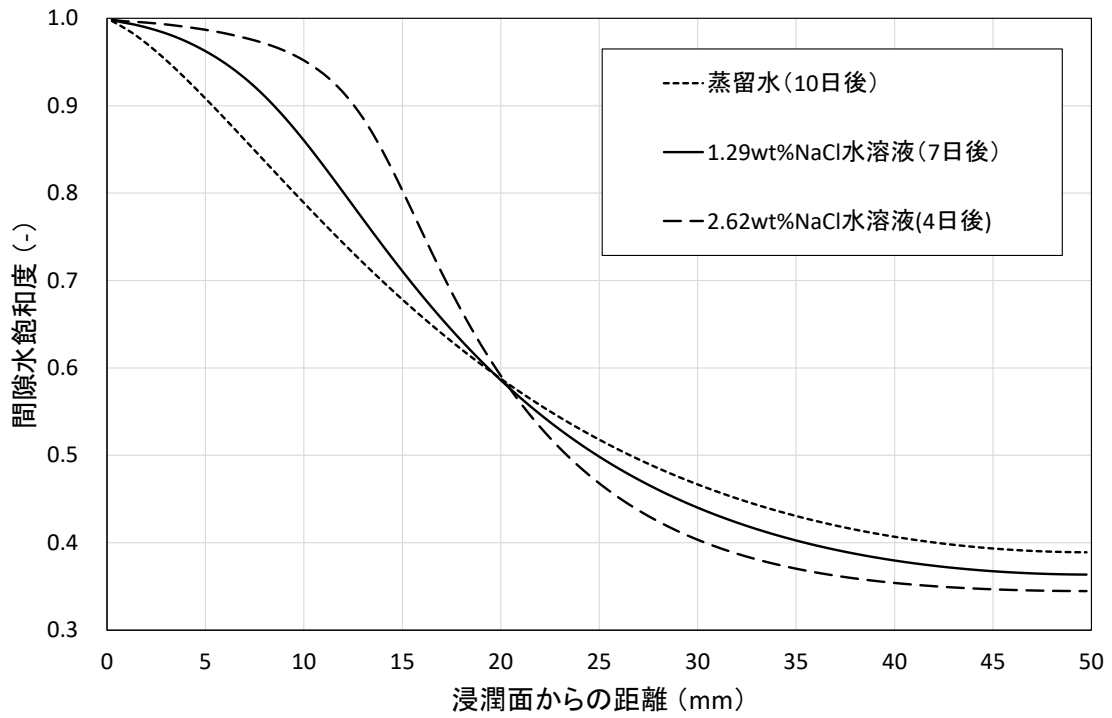


図 2-7 同一浸潤量での間隙水飽和度分布の比較

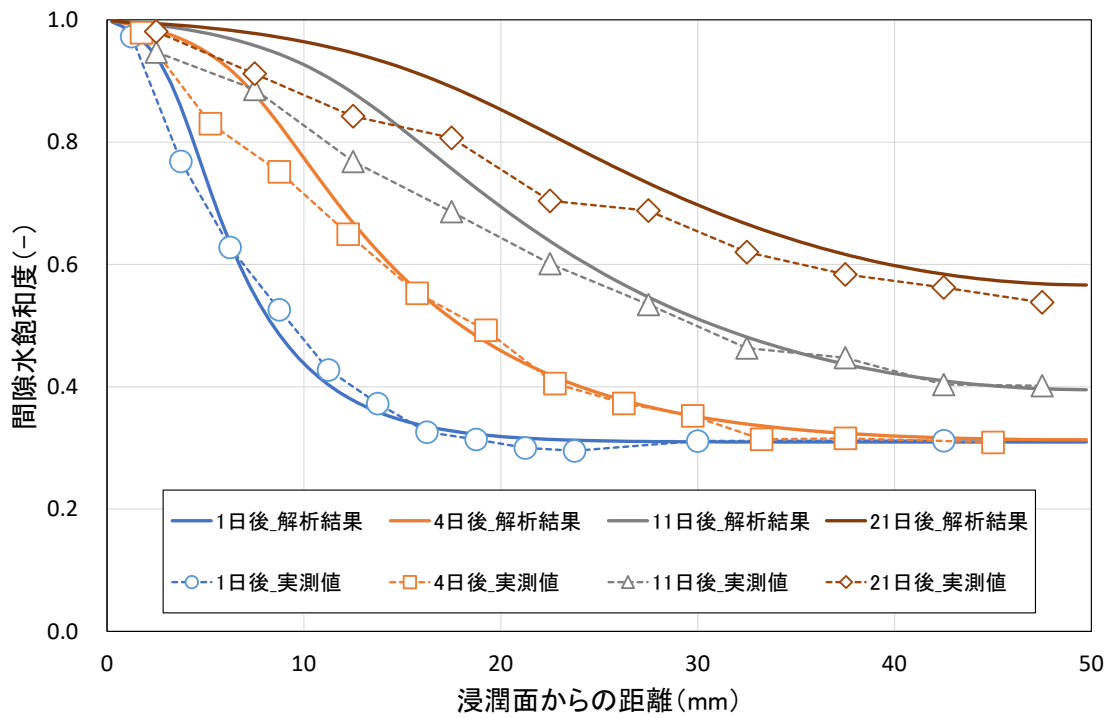


図 2-8 緩衝材の浸潤試験を対象とした水分分布の再現解析結果

2.4 まとめ

これまでに開発を進めてきた THMC 連成解析モデルを、より多様な地質環境条件に対応できるようにするため、海水系地下水環境下における緩衝材の浸潤挙動を適切に評価するモデルの検討を行った。そして、緩衝材中への海水系地下水の浸潤を想定した浸潤試験の結果に基づき、飽和・不飽和浸透流解析と物質移行を含む地球化学解析とを連成させる手法によって、間隙水組成とそれによって変化する透水性の影響を考慮し、間隙水飽和度が高いほど間隙水中の NaCl の濃度が透水性に与える影響が大きくなるとしたモデルを設定した。

本モデルによって、蒸留水から海水程度までの NaCl 濃度の試験水を緩衝材に浸潤させる実験結果を再現することが可能となった。

3. 温度勾配による水分移動モデルの設定

3.1 概要

THAMES における多孔質媒体中の水分移動は、次式に示すように、ダルシー則に加えて温度勾配による水分移動が考慮できるようにモデル化されている (Ohnishi et al., 1985[1])。

$$\mathbf{F}^w = -k_r k_w \nabla h - D_T \nabla T \quad (3-1)$$

ここで、 \mathbf{F}^w : 流量フラックス (m^3/s)、 k_r : 比透水係数 (-)、 k_w : 透水係数 (m/s)、 h : 全水頭 (m)、 D_T : 温度勾配水分拡散係数 (m^2/sK)、 T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$) である。THAMES では、圧力勾配による移動フラックスは透水係数で、温度勾配による移動フラックスは温度勾配水分拡散係数を用いて表現される。

一般的に、土中の液相水は温度や間隙水飽和度などの変化に応じて水蒸気へと状態変化し、水蒸気は気相の流れや水蒸気量の勾配により移動すると考えられている。このような水蒸気の発生や気相の移動を考慮できる解析コードとしては、多孔質媒体に対する水、蒸気および熱の輸送を連成させた二相流解析コードの TOUGH2 (Pruess, 1991[19]) がある。TOUGH2 は、DECOVALEX プロジェクトなどを通じて過渡期におけるニアフィールドの再冠水挙動に対しての適用性の検討が行われており、多くの適用実績を有する解析コードである (例えば、Gens, 2021[30])。一方、THAMES は、第 2 次取りまとめの人工バリア設計思想に準じて緩衝材中の温度が 100°C 以下となることを前提とし、解析パラメータ取得の難易性や不確実性を鑑み、液状水と蒸気水のそれぞれの取り扱いはずらずに、両者を合わせた地下水移動として支配方程式が構築されている。

水と空気の移動に着目した時の THAMES と TOUGH2 の支配方程式を比較して表 3-1 に示す。また、両者の解析コードの主な特徴をまとめると以下ようになる。

- ▶ THAMES では温度勾配による水分移動をモデル化している。一方、TOUGH2 では、水の蒸発・凝縮の解析評価が可能である。水蒸気は理想気体として取り扱われ、拡散と気相空気の圧力勾配による流れによって移動する。また、空気の溶解・気化の解析評価が可能であり、気相空気は理想気体として取り扱われ、気相空気はダルシー則、溶存空気は拡散と液相水の圧力勾配による流れにより移動する。
- ▶ THAMES での気相圧力 P_g は、大気圧として温度によらず常に一定である。一方、TOUGH2 での気相圧力 P_g は、空気圧 P_a と蒸気圧 P_v の足し合わせで表現される。

このように、TOUGH2 では、液相水が温度や間隙水飽和度などの変化に応じて水蒸気へと状態変化し、水蒸気は気相の流れや水蒸気圧力の勾配により移動するモデルである。これに対して、THAMES では複雑な水蒸気の挙動を温度勾配による水分移動として単純化している。

表 3-1 水と空気の移動に着目した時の THAMES と TOUGH2 の支配方程式の比較

構成関係		THAMES	TOUGH2
水	流れ	$\mathbf{F}^w = -k \frac{k_r \rho_l}{\mu_l} \nabla h - D_T \nabla T$	$\begin{aligned} \mathbf{F}^w &= \mathbf{F}_l^w _{adv} + \mathbf{F}_g^w _{adv} + \mathbf{F}_g^w _{dis} \\ &= -k \frac{k_r \rho_l}{\mu_l} (\nabla P_l - \rho_l \mathbf{g}) - X_g^w k \frac{k_{rg} \rho_g}{\mu_g} (\nabla P_g - \rho_g \mathbf{g}) - \rho_g \overline{\mathbf{D}}_g^w \nabla X_g^w \end{aligned}$
	蒸発 ／凝縮	非考慮	$P_v(T, S_l) = f_{VPL}(T, S_l) \cdot P_{sat}(T)$... Kelvin's equation $P_v(T, S_l) V_g = nRT \quad \dots \text{状態方程式}$
空気	流れ	非考慮	$\begin{aligned} \mathbf{F}^a &= \mathbf{F}_g^a _{adv} + \mathbf{F}_l^a _{adv} + \mathbf{F}_l^a _{dis} \\ &= -k \frac{k_{rg} \rho_g}{\mu_g} (\nabla P_g - \rho_g \mathbf{g}) - X_l^a k \frac{k_{rl} \rho_l}{\mu_l} (\nabla P_l - \rho_l \mathbf{g}) - \rho_l \overline{\mathbf{D}}_l^a \nabla X_l^a \end{aligned}$
	溶解 ／気化	非考慮	$P_a = K_h x_l^a \quad \dots \text{Henry's equation}$ $P_a V_g = nRT \quad \dots \text{状態方程式}$
水／空気	気相圧	$P_g = \text{大気圧}$	$P_g = P_a + P_v$
	保水性	$P_g - P_l = -P_0 \left(\left[\frac{(S_l - S_{lr})}{(S_{ls} - S_{lr})} \right]^{-1/m} - 1 \right)^{1-m}$... van Genuchten モデル (他のモデルも使用可能)	$P_g - P_l = -P_0 \left(\left[\frac{(S_l - S_{lr})}{(S_{ls} - S_{lr})} \right]^{-1/m} - 1 \right)^{1-m}$... van Genuchten モデル (他のモデルも使用可能)

これまで、THAMES に用いられる温度勾配水分拡散係数については、実験結果に基づく再現解析によって設定が行われてきた。具体的には、圧縮ペントナイト供試体に温度勾配を形成させ、供試体内の水分を移動させる実験を行い、実験で得られた水分分布を再現する値として温度勾配水分拡散を求めてきた（例えば、藤田ほか、1999[31]）。この温度勾配水分拡散係数は、間隙水飽和度や温度に対する依存性があると考えられ、これらの依存性を考慮したモデルもある（例えば、Börgesson and Hernelind, 1999[32]）。しかしながら、温度勾配水分拡散係数の間隙水飽和度や温度依存性を調べるためには、数多くの室内試験を実施する必要があることや、高温条件などでは境界条件を制御することが難しく、試験の実施そのものが困難な場合も想定される。

そこで、TOUGH2 を用いて、廃棄体の発熱を想定した人工バリア体系での気相の流れと水蒸気圧力の勾配によって生じる水蒸気移動を含む緩衝材の浸潤挙動について評価を実施

した。そして、TOUGH2 で得られた浸潤プロファイルに基づき、THAMES で必要となる温度勾配水分拡散係数を求めた。

3.2 温度勾配条件下での緩衝材の浸潤解析

3.2.1 解析モデル

幌延深地層研究計画において実施している人工バリア性能確認試験の人工バリア体系に準じて、廃棄体からの発熱と周辺岩盤からの地下水の浸潤を想定した温度勾配条件下での緩衝材中の浸潤挙動について、TOUGH2 および THAMES により熱-水連成現象として解析評価を実施した。

解析モデルは、緩衝材のみを対象とした長さ 70cm の一次元の解析領域とし、これを要素数 140 でモデル化した。温度の境界条件として、岩盤との境界面となる緩衝材外側の温度を 30°C とした。緩衝材中に温度勾配を形成させるため、オーバーバックとの境界面となる緩衝材内側の温度を、それぞれ、50°C、70°C および 90°C の条件で拘束した。また、温度勾配を形成させない場合として、緩衝材内側の温度を 30°C とした条件についても解析を実施した。岩盤から地下水が浸潤する条件として、岩盤との境界面の圧力水頭を 0mH₂O で拘束した。緩衝材は、人工バリア性能確認試験に準じて、クニゲル V1 にケイ砂を 30 wt% 混合したものであり（以下、30 wt%ケイ砂混合体という）、乾燥密度は 1.8Mg/m³、初期間隙水飽和度は人工バリア性能確認試験における緩衝材製作時の平均的な値の 0.58 とした（中山ほか, 2016[33]）。緩衝材の初期温度は全領域で 30°C とした。

なお、TOUGH2 による解析では、間隙空気が残存した場合に浸潤挙動に及ぼす影響を把握するため、オーバーバックとの境界面となる緩衝材内側を排気境界とした場合と、非排気境界とした場合について評価を行った。

3.2.2 解析物性値

緩衝材（30 wt%ケイ砂混合体）の蒸留水に対する固有透過度 κ (m²) は、有効粘土乾燥密度 ρ_b (Mg/m³) との関係において次式が得られている（松本ほか, 1997[27]）。

$$\kappa = \exp(-42.100 + 1.1447\rho_b - 2.123\rho_b^2) \quad (3-2)$$

$$\rho_b = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{100 - \rho_d \frac{R_s}{\rho_s}} \quad (3-3)$$

ここで、 ρ_d : 乾燥密度 (Mg/m³)、 R_s : ケイ砂混合率 (%)、 ρ_s : ケイ砂の土粒子密度 (Mg/m³) であり、2.64 Mg/m³（核燃料サイクル開発機構, 1999[3]）である。

水分特性曲線は、van Genuchten モデル (van Genuchten, 1980[20]) の式 (2-1) と式 (2-2) を、比透水係数 k_r (-) は、式 (2-3) を用いた。

TOUGH2 で用いる比透気係数 k_{rg} は、圧縮ベントナイトに対して取得された比透気係数のデータ (棚井ほか, 1996[34]) に基づき、Fatt らのモデル (Fatt and Klikoff, 1959[35]) を用いた。

$$k_{rg} = [1 - S_r]^3 \quad (3-4)$$

TOUGH2 での溶存空気と水蒸気の拡散係数については、平成 24 年度の実規模スケールにおける二相流現象の予察的解析 (日本原子力研究開発機構, 2013[36]) に用いられた値に準じ、水蒸気の拡散係数は 5×10^{-5} (m²/s)、溶存空気の拡散係数は 2×10^{-9} (m²/s) とした。

THAMES における温度勾配水分拡散係数については、低水分領域と高水分領域で水蒸気の移動が小さくなる Borgesson らのモデル (Börgesson and Hernelind, 1999[32]) に準じて次式を用いた。

$$\begin{aligned} D_T &= D_{Tb} & 0.3 \leq S_r \leq 0.4 \\ D_T &= D_{Tb} \cdot \cos^a \left(\frac{S_r - 0.4 \pi}{0.6} \right) & S_r \geq 0.4 \\ D_T &= D_{Tb} \cdot \sin^b \left(\frac{S_r \pi}{0.3} \right) & S_r \leq 0.3 \end{aligned} \quad (3-5)$$

ここで、 D_T は温度勾配水分拡散係数 (m²/s K)、 D_{Tb} は間隙水飽和度が 0.3~0.4 における温度勾配水分移動係数 (m²/s K)、 a および b は、それぞれ高水分領域と低水分領域において D_T の低下量を決定するパラメータである。さらに、温度勾配水分拡散係数の温度依存性については、第 2 次取りまとめで用いたモデルに準じて次式で設定した (核燃料サイクル開発機構, 1999[3])。

$$D_T = D_{Tb} \times \exp(\alpha_T \times (T - T_0)) \quad (3-6)$$

ここで、 T は現在温度 (°C)、 T_0 は温度勾配が形成される際の低い側の温度 (°C)、 α_T はパラメータである。

そして、式 (3-5) および式 (3-6) 中のパラメータは、前述した TOUGH2 による浸潤解析結果をフィッティングにより再現するものとして設定した。

熱伝導率 λ (W/m K) は、乾燥密度 ρ_d (Mg/m³) と含水比 ω (%) の関数として次式が得られている (鈴木・高山, 2020[21]) 。

$$\lambda = -2.01 + 7.56 \times 10^{-2} \omega - 7.00 \times 10^{-4} \omega^2 + 1.56 \rho_d \quad (3-7)$$

また、比熱 c (kJ/kg K) については、含水比 ω (%) の関数として次式が得られている (菊池・棚井, 2003[37])。

$$c = \frac{67.32 + 4.18\omega}{100 + \omega} \quad (3-8)$$

3.2.3 解析結果

①浸潤挙動におよぼす間隙空気の影響

はじめに、TOUGH2 を用いて、間隙空気の存在が浸潤挙動に与える影響を把握するため、オーバーパック境界面となる緩衝材内側を排気境界とした場合と非排気境界とした場合の解析を実施した。解析結果として、オーバーパック側となる緩衝材内側の間隙水飽和度の時間変化を比較して図 3-1 に示す。図中には、一例として内側の温度の境界条件を 30°C とした場合と 90°C とした場合を比較して示している。これより、緩衝材内側の温度を 30°C とした場合、間隙水飽和度が 80%以上において、封入された空気の影響によって非排気条件の浸潤が排気条件に比べてやや遅くなっているものの、両者の結果に大きな差異は見られない。一方、内側を 90°C とした条件においては、温度の影響によって緩衝材内側は乾燥し、非排気条件、排気条件ともに間隙水飽和度は 0.2 程度まで低下しているが、その後の間隙水飽和度の上昇は、非排気条件に比べて排気条件の浸潤が遅くなっている。さらに、浸潤が進み間隙水飽和度が 90%以上になると、封入された空気の影響によって非排気条件では間隙水飽和度の上昇が排気条件に比べて遅くなる結果となっている。このように、緩衝材中の温度勾配が大きい条件においては、間隙空気の存在が浸潤挙動へ影響を与えることが確認された。実際の現象として、幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験においては、緩衝材内側において間隙圧の大きな上昇が確認されていないことから、緩衝材内部の間隙空気は地下水の浸潤に伴い緩衝材の外側へ抜けている可能性が指摘されている (雑賀, 2020[38])。本検討では、第 4 章で示すように、人工バリア性能確認試験の再現解析が主眼であることから、緩衝材内側を排気境界とした場合の TOUGH2 の解析結果に基づいて、THAMES における温度勾配水分拡散係数のパラメータ値を推定することとした。

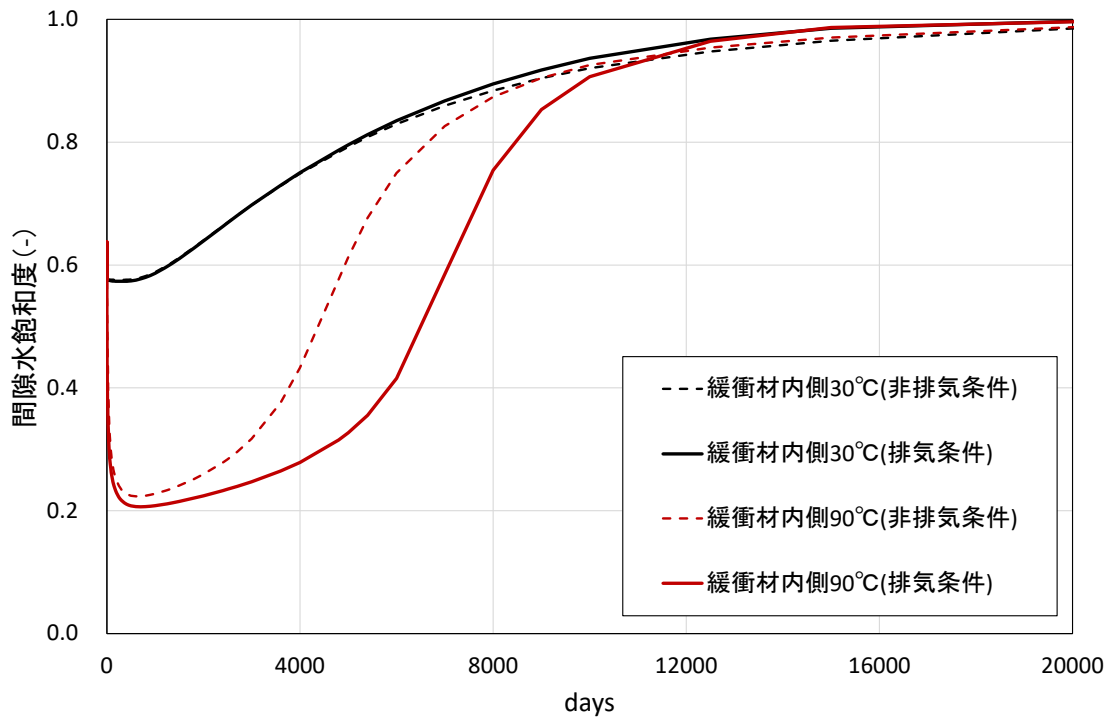
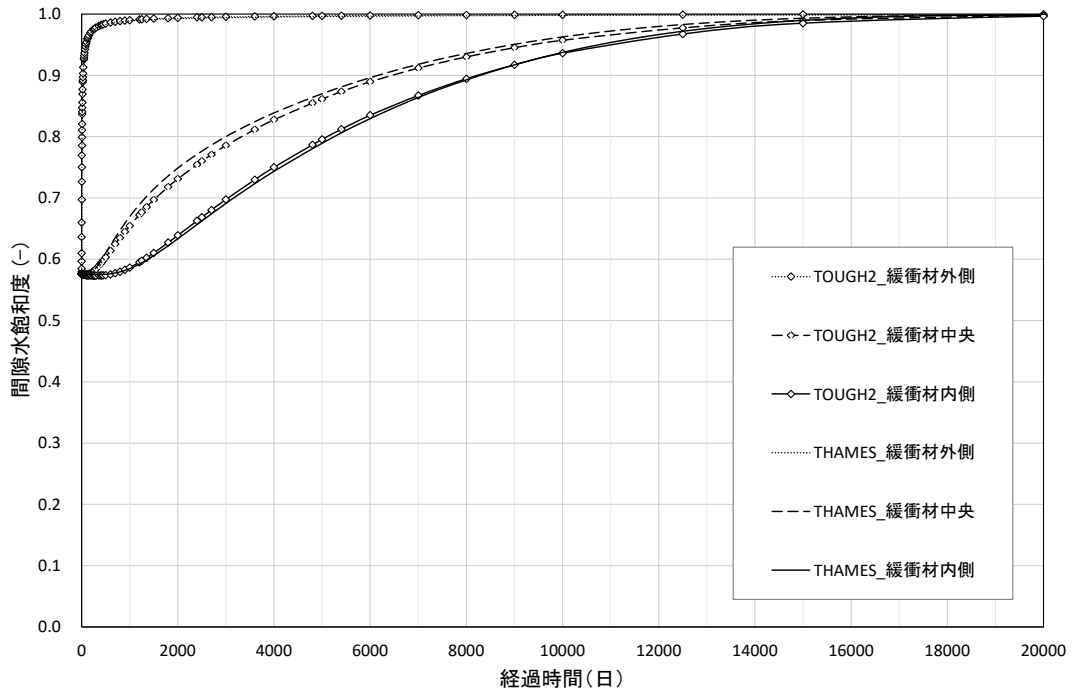


図 3-1 TOUGH2 による排気条件と非排気条件での浸潤解析結果の比較

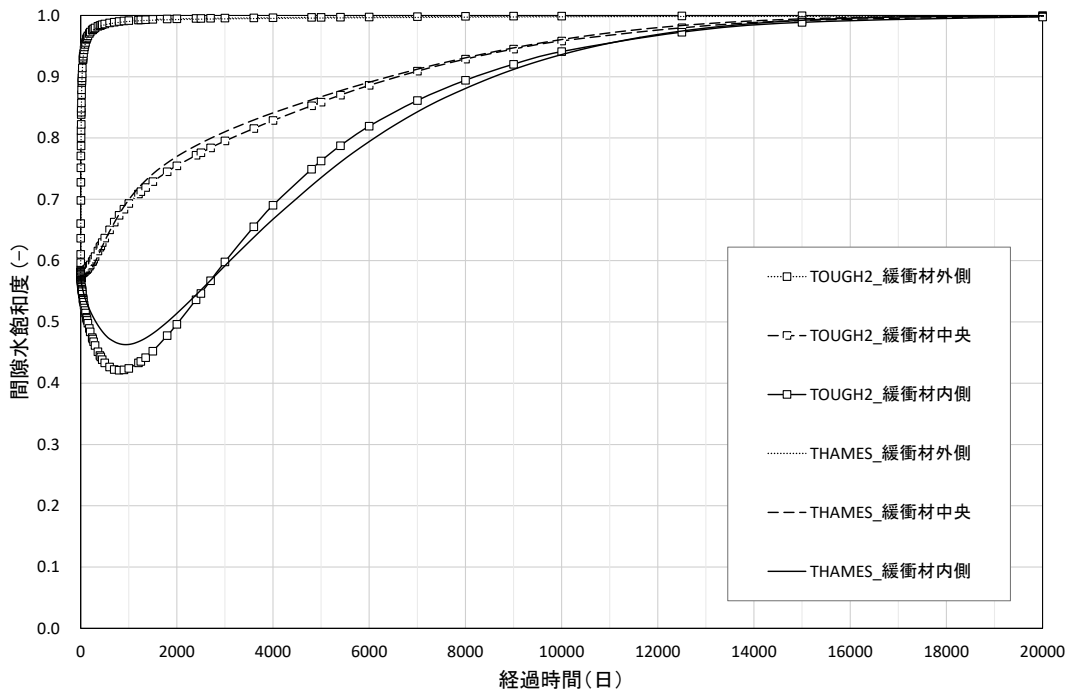
②温度勾配水分拡散係数の設定

間隙水飽和度の時間変化について、TOUGH2（排気条件）の解析結果と、TOUGH2 の結果を再現した THAMES の解析結果を比較して、オーバーパック側の設定温度毎に図 3-2 (a) ～ (d) に示す。解析出力点は、オーバーパック側の緩衝材内側、浸潤面側となる緩衝材外側および緩衝材中央部分の 3 ヶ所である。図中、点付きの曲線は TOUGH2、点なしの曲線は THAMES による解析結果である。これより、緩衝材内側の温度を 30°C とした条件以外では、温度勾配による水分移動によって一時的に緩衝材内側で間隙水飽和度が低下しており、この現象は、緩衝材内側の温度が高い程、乾燥が促進する結果となっている。

TOUGH2 の解析結果を再現するための温度勾配水分移動に関わる式 (3-5) および式 (3-6) 中のパラメータ値を表 3-2 に示す。これより、THAMES における温度勾配水分拡散係数の間隙水飽和度および温度との関係は図 3-3 のようになる。

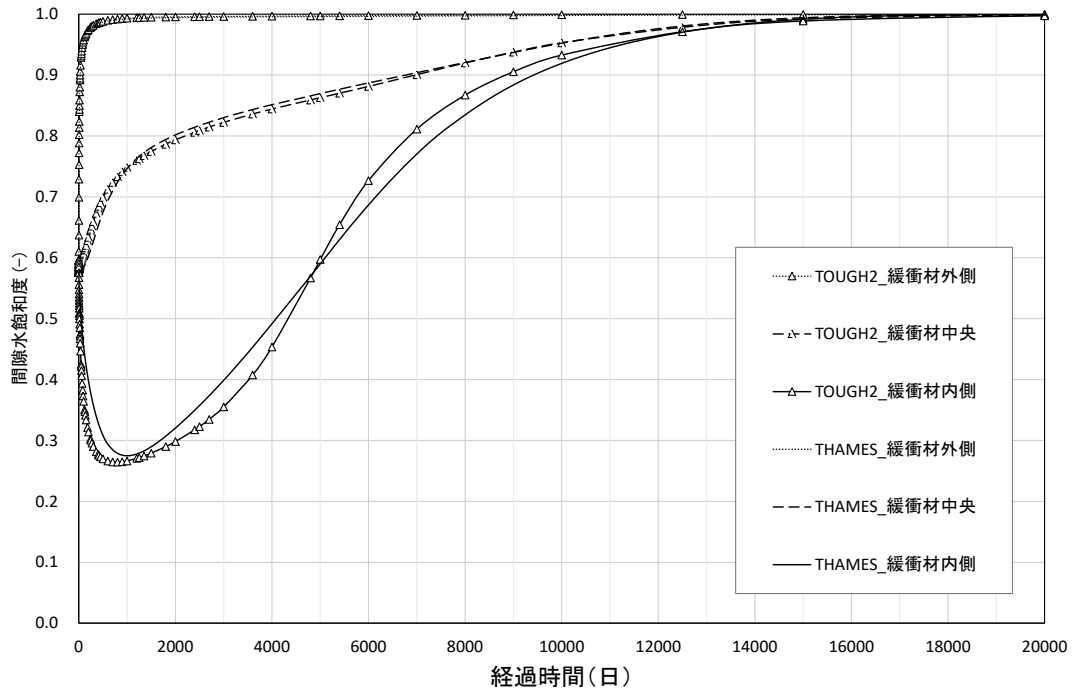


(a) 緩衝材内側を30°Cとした場合

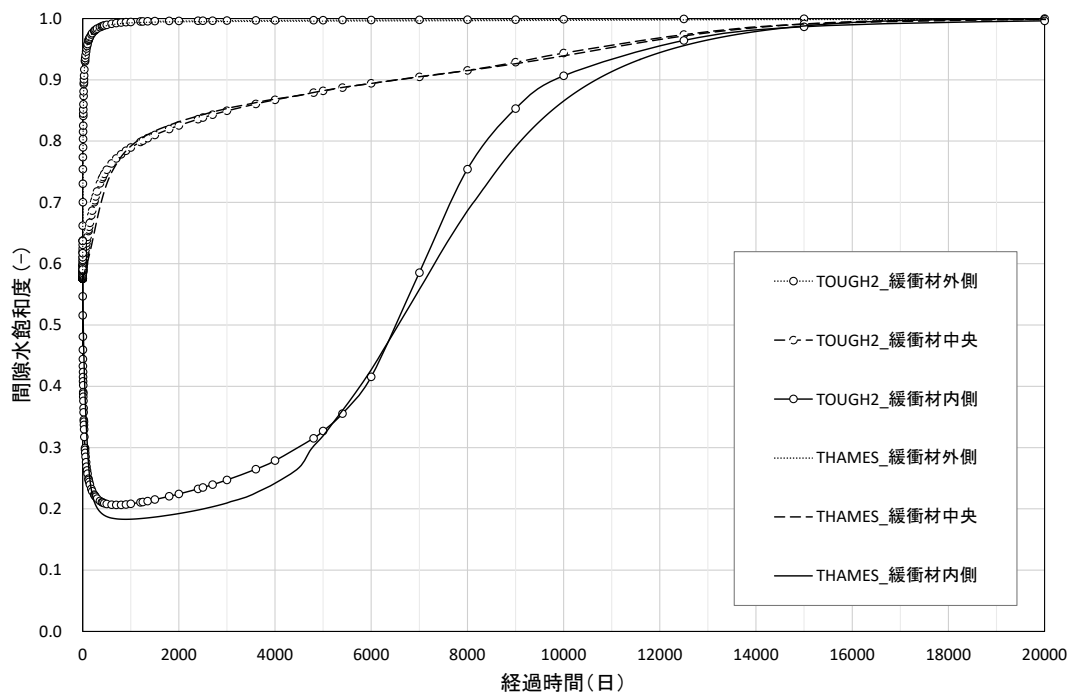


(b) 緩衝材内側を50°Cとした場合

図 3-2 TOUGH2 による浸潤解析結果とそれに基づく温度勾配水分拡散係数の推定結果 (1/2)



(c) 緩衝材内側を70°Cとした場合



(d) 緩衝材内側を90°Cとした場合

図 3-2 TOUGH2 による浸潤解析結果とそれに基づく温度勾配水分拡散係数の推定結果 (2/2)

表 3-2 THAMES における温度勾配水分拡散係数に関わるパラメータの設定

D_{Tb}	m^2/sK	3.00×10^{-12}	式 (3-5)
a	-	2.5	
b	-	10.0	
α_T	-	0.03	式 (3-6)
T_0	$^{\circ}C$	30.0	

ただし、ケイ砂 30wt%混合ベントナイト、乾燥密度 $1.8Mg/m^3$ において

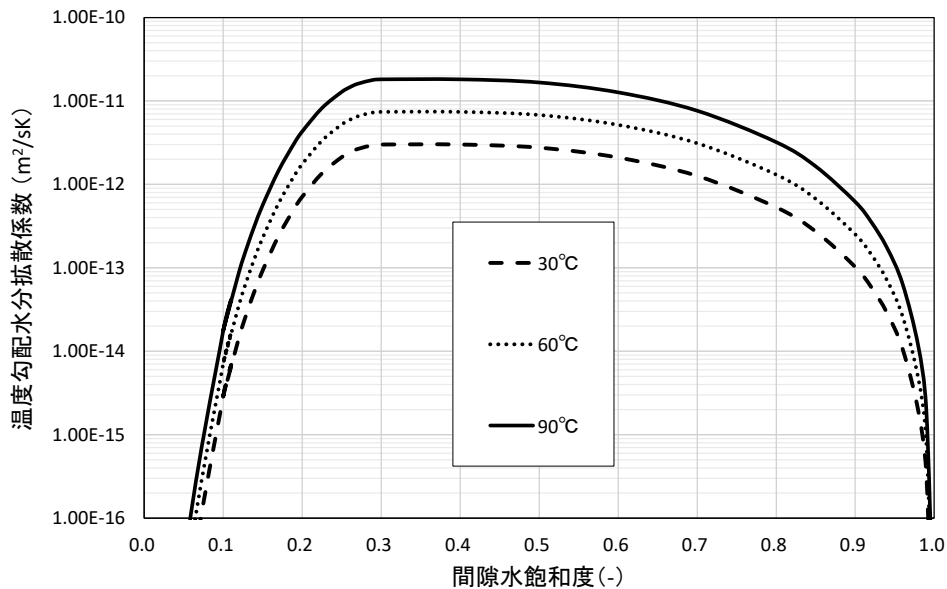


図 3-3 THAMES における緩衝材の温度勾配水分拡散係数

3.3 まとめ

THM 連成解析モデルにおけるパラメータの一つである温度勾配水分拡散係数は、間隙水飽和度や温度に依存して変化するため、様々な条件で温度勾配水分拡散係数を求める手法として、TOUGH2 との比較を検討した。このパラメータは、廃棄体の発熱によってオーバーパック近傍で緩衝材の水分が低下し乾燥する現象を表すものである。本検討では、多孔質媒体に対する水、蒸気および熱の輸送を連成させた TOUGH2 を用いて、廃棄体の発熱を想定し気相の流れと水蒸気量の勾配によって生じる水蒸気の移動を含む緩衝材の浸潤挙動評価を行った。ここでは、幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験への適用を考慮して条件を設定した。そして、得られた浸潤プロファイルに基づき、温度勾配水分拡散係数として、温度および間隙水飽和度の依存性を考慮した温度勾配水分移動モデルを設定した。本手法によって、 $100^{\circ}C$ 超のような多様な条件での温度勾配水分拡散係数の推定にも適用できる可能性がある。

4. THMC連成解析モデルによる人工バリア性能確認試験の再現解析

4.1 概要

ここでは、第2章で示した海水系地下水環境下における緩衝材の水理モデルおよび第3章で示した温度勾配による水分移動モデルを反映させた Couplys を用いて、原子力機構が幌延深地層研究計画において実施している人工バリア性能確認試験を対象に緩衝材の浸潤挙動に着目した再現解析を実施した。そして、原位置で得られた緩衝材の浸潤挙動に関する計測データとの比較を通じて Couplys の妥当性を確認した。

4.2 解析条件

幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験は、幌延の地質環境を一つの事例として実規模の処分孔竖置き方式の人工バリアを設置し、人工バリアの定置から再冠水までの現象を模擬したものである。試験は、平成27年1月から令和2年6月までの約5年間、廃棄体を模擬したヒーターの温度を100°Cに設定した試験が行われている。そして、人工バリア中に設置された様々な計測機器によって、温度や間隙水飽和度の時間変化などのデータが得られており、このうち、2015年1月から2019年6月までの約1600日間の計測データが整理されている（中山ほか、2019[39]）。

解析では、この1600日間を評価の対象として、人工バリア性能確認試験を構成する廃棄体を模擬したヒーターを内蔵したオーバーパック（以下、模擬オーバーパックという）、緩衝材、緩衝材と岩盤の隙間に充填した砂層、埋め戻し材、支保コンクリート、路盤、コンクリートプラグおよび岩盤について、32,722節点、29,226要素でモデル化した（図4-1参照）。モデル化の範囲は、温度に対して外側境界の影響が生じないように廃棄体を模擬したヒーターから25m程度を確保した。

熱的な境界条件として、図4-1左側に示した図のモデル上下面および背面は、初期温度での固定境界、モデル前面および左右両面は断熱境界とした。また、模擬オーバーパックの表面温度、緩衝材と岩盤の隙間に充填した砂層中の温度は、計測値に整合させるように設定した（図4-2参照）。このような温度の変動は、設定温度の変更や、緩衝材や埋め戻し材の浸潤を促進させるための注水の影響によるものである。初期条件としての温度は、全領域で23°Cとした。

水理的な境界条件としては、モデル上下の両面および背面は、後述する初期の地下水位での固定境界、モデル前面および左右の両面は不透水境界とした。また、上述したように、緩衝材の底部および埋め戻し材中で注水が行われており、注水管が設置された位置に相当する節点に、それぞれ0.3MPa、0.1MPaの水圧を与えた。水理に関する初期条件として、岩盤については、原位置での地下水位の計測結果に基づき人工バリア性能確認試験が実施さ

れている地表面から-350m を基準面として全水頭を 22mH₂O とした。支保コンクリート、路盤、コンクリートプラグおよび砂層は、飽和を仮定した。緩衝材の初期間隙水飽和度は製作時の平均的な値の 0.58 とした。埋め戻し材については、原位置で締固め施工した下側部分を乾燥密度 1.2Mg/m³、含水比 35.2%とし、これより間隙水飽和度を 0.80 とした。また、ブロックを積み重ねる方法で施工した上側部分を乾燥密度 1.4Mg/m³、含水比 33.6%とし、これより間隙水飽和度を 0.91 に設定した（中山ほか，2016[33]）。

地球化学に関する境界条件は、モデル上下面および背面を地下水組成の濃度で拘束した。地下水組成については、幌延深地層研究計画における試錐調査のうち、HDB6 孔で採取された地下水に対する分析結果に準じて設定した（藤田ほか，2008[40]）。それ以外の初期間隙水組成については、後述する設定鉱物あるいはセメント水和生成物と純水との平衡状態を仮定し、地球化学解析コード PHREEQC を用いた計算によって求めた（表 4-1 参照）。

緩衝材および埋め戻し材の設定鉱物としては、玉髄、方解石、黄鉄鉱とし、イオン交換反応および酸・塩基反応を考慮した（核燃料サイクル開発機構，1999[26]）。このうち、間隙水中の NaCl 濃度に直接的に影響を与えるのはイオン交換反応となる。また、試験坑道の底面に設置されているコンクリート路盤、コンクリートプラグおよび支保コンクリートで考慮するセメント水和物生成物としては、初期水和物の主成分である Ca(OH)₂ および CSH とした（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005[42]）。

解析に用いた物性値として、岩盤については、HDB-6 孔の岩石コアの室内試験結果（山本ほか，2005[41]）や、原位置での透水試験結果（太田ほか，2007[43]）に基づき、深度から物性値を推定する木村ら（木村ほか，2011[16]）の手法に従い、人工バリア性能確認試験が実施されている地表面から-350m の物性値を設定した。支保コンクリート、路盤およびコンクリートプラグは同一と仮定し、第 2 次 TRU レポート（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005[42]）における軟岩系岩盤に対する吹き付けコンクリートの仕様に準じて、間隙率および真密度を設定した。また、熱物性値はコンクリート標準示方書（土木学会，2007[44]）に基づき設定した。埋め戻し材については、それぞれの密度に応じた物性値を与えた（日本原子力研究開発機構，2018[25]）。このうち、熱伝導率 λ (W/mK) および比熱 c (kJ/kgK) については、圧縮成形した埋め戻し材のブロックの測定結果を採用し、次式により与えた（日本原子力研究開発機構，2016 [45]）。

$$\lambda = 0.339 + 2.97 \times 10^{-2} \omega \quad (4-1)$$

$$c = \frac{40.00 + 4.18\omega}{100 + \omega} \quad (4-2)$$

ここで、 ω 含水比 (%) である。

緩衝材は、ブロックの設計時の乾燥密度である 1.8 Mg/m^3 とした (中山ほか, 2016[33])。緩衝材の熱伝導率 $\lambda \text{ (W/mK)}$ は、含水比 $\omega \text{ (%)}$ との関係で以下のように整理されている (菊池・棚井, 2005[46])。また、比熱については、式 (3-8) にある。

$$\lambda = 0.728 + 8.00 \times 10^{-3} \omega - 1.15 \times 10^{-2} \omega^2 - 4.50 \times 10^{-4} \omega^3 \quad (4-3)$$

緩衝材の固有透過度は、第 2 章で示した間隙水中の NaCl 濃度で変化するモデルとして、式 (2-7) を用いた。また、温度勾配水分拡散係数は、第 3 章で示した温度および間隙水飽和度の依存性を考慮した式 (3-5)、式 (3-6) および表 3-2 に示すパラメータを用いた。

緩衝材と岩盤の隙間に充填した砂の層の物性値は、DECOVALEX において本原位置試験を対象としたベンチマーク解析で用いられた値に準じた (Sugita et al., 2016[8])。

緩衝材の実効拡散係数は、第 2 次取りまとめで示された海水系間隙水に対する値とし、それ以外は、泥質岩・凝灰岩に対して設定された値とした (核燃料サイクル開発機構, 1999[26])。また、縦分散長は、緩衝材厚さおおよそ 1m の 1/10、横分散長は 1/100 とした。

熱力学データベースは、核燃料サイクル開発機構が開発した解析的温度補正式の係数が整備された JNC-TDB 990900c1.tdb (Arthur, 1999 [47]) を用いた。

以上、解析に用いた物性値を整理して表 4-2 に示す。

本解析に用いる Couplys では、応力変形と熱および水理特性の相互作用が考慮されていないため、応力変形が緩衝材の浸潤挙動の解析結果に影響を与えることはない。ここでは、節点変位を拘束して応力変形を考慮せずに THC 解析として実施した。そして、緩衝材の固有透過度は、第 2 章で示した間隙水中の NaCl 濃度で変化するモデルを用いた解析ケースに加えて、蒸留水および幌延地下水に対して得られている値を用いたケースについても解析を実施し、人工バリア性能確認試験における緩衝材の浸潤挙動について比較を行った。解析ケースを表 4-3 に示す。

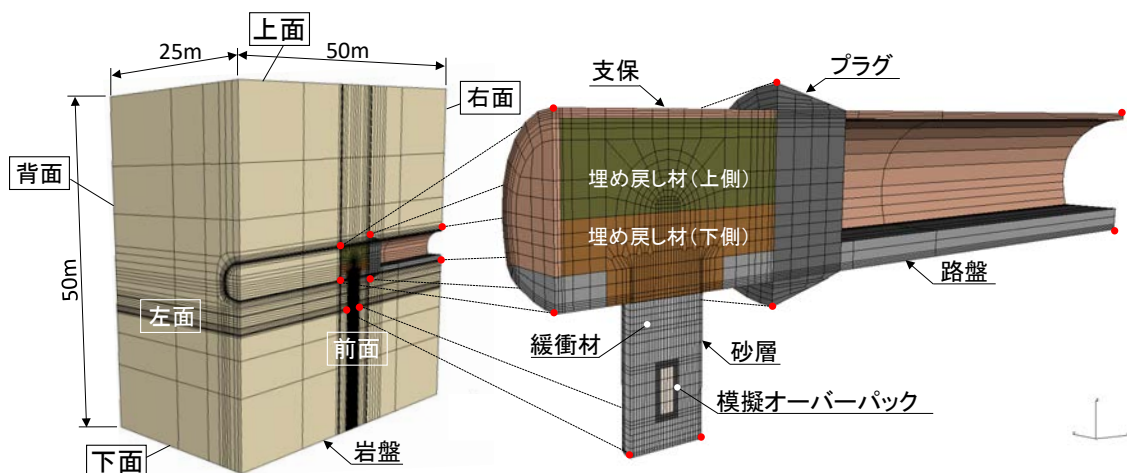


図 4-1 人工バリア性能確認試験の解析評価に用いた解析メッシュモデル

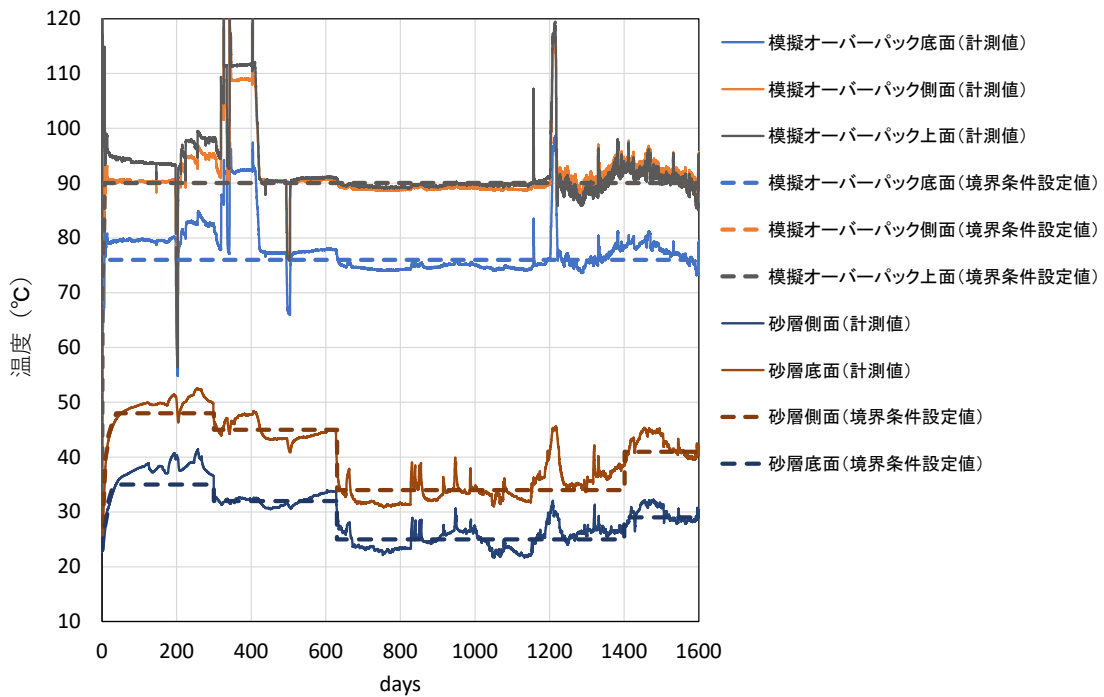


図 4-2 人工バリア性能確認試験の解析評価における温度の境界条件

表 4-1 人工バリア性能確認試験の解析評価における初期間隙水組成

	岩盤・砂層	路盤・支保・プラグ	埋め戻し材・緩衝材
pH	6.80	12.55	7.30
pe	-2.80	9.05	14.30
Al(mol/m ³)	3.70×10 ⁻⁴	1.00×10 ⁻⁷	1.00×10 ⁻⁷
全 C(mol/m ³)	4.10×10 ¹	1.84×10 ⁻²	6.21×10 ⁰
Ca(mol/m ³)	2.10×10 ⁰	7.56×10 ⁰	7.14×10 ⁰
Cl(mol/m ³)	2.20×10 ²	1.00×10 ⁻⁷	6.61×10 ⁰
Fe(mol/m ³)	1.50×10 ⁻²	1.00×10 ⁻⁷	1.00×10 ⁻⁷
K(mol/m ³)	2.10×10 ⁰	1.00×10 ⁻⁷	9.16×10 ⁻¹
Mg(mol/m ³)	5.80×10 ⁰	1.00×10 ⁻⁷	1.97×10 ⁻¹
Na(mol/m ³)	2.30×10 ²	1.00×10 ⁻⁷	1.96×10 ²
S(mol/m ³)	6.30×10 ⁻³	1.00×10 ⁻⁷	9.64×10 ¹
Si(mol/m ³)	1.10×10 ⁰	6.65×10 ⁻¹	9.56×10 ⁻²
溶存酸素(mol/m ³)	1.00×10 ⁻⁷	6.65×10 ⁻¹	6.65×10 ⁻¹

表 4-2 人工バリア性能確認試験の解析評価に用いた物性値

パラメータ	単位	岩盤	砂層	支保路盤 プラグ	埋め戻し材 (下側)	埋め戻し材 (上側)	緩衝材	模擬オーバーバック
真密度	Mg/m ³	2.454	2.51	2.620	2.593	2.593	2.680	7.800
乾燥密度	Mg/m ³	1.354	1.4	2.280	1.200	1.400	1.800	—
初期空隙率	—	0.448	0.442	0.130	0.538	0.460	0.328	—
初期間隙水飽和度	—	1.00	1.00	1.00	0.80	0.91	0.58	—
熱伝導率	W/mK	1.23	2.04	2.56	式(4-1)		式(4-3)	53.0
比熱	kJ/kgK	1.27	1.28	1.05	式(4-2)		式(3-8)	0.46
固有透過度	m ²	1.33×10 ⁻¹⁵	1.00×10 ⁻¹³	9.10×10 ⁻¹⁸	3.00×10 ⁻¹⁸	1.76×10 ⁻¹⁹	表 4-3 参照	—
水分特性曲線	—	—	—	—	式(2-1) $\theta_s=0.538$ $\theta_r=0.000$ $\alpha=3.80\times 10^{-3}$ $n=1.29$	式(2-1) $\theta_s=0.460$ $\theta_r=0.000$ $\alpha=3.80\times 10^{-3}$ $n=1.29$	式(2-1) $\theta_s=0.329$ $\theta_r=0.000$ $\alpha=5.00\times 10^{-3}$ $n=1.38$	—
比透水係数	—	—	—	—	式(2-3)			—
温度勾配水分拡散係数	m ² /s K	—	—	—	—	—	式(3-5) 式(3-6)	—
実効拡散係数	m ² /s	9.0×10 ⁻¹²			3.00×10 ⁻¹⁰			—
縦分散長	m				0.1			—
横分散長	m				0.01			—

表 4-3 人工バリア性能確認試験の再現解析ケース

解析ケース	解析手法	緩衝材の固有透過度	備考
ケース 1	TH	1.38×10 ⁻²⁰ m ² (透過液が蒸留水とした場合 の設定値)	式 (2-4) において、NaCl 濃度を 0%として設定
ケース 2	TH	5.23×10 ⁻²⁰ m ² (透過液が幌延地下水とした 場合の設定値)	式 (2-4) において、NaCl 濃度を 1.29wt%として設定
ケース 3	THC	式 (2-7)	間隙水中の NaCl 濃度によって透 水性が変化するモデル

TH : 熱-水理連成解析、THC : 熱-水理-化学連成解析

4.3 解析結果

人工バリア性能確認試験を対象とした THC 連成解析結果および TH 連成解析結果として、ケース 1 からケース 3 の間隙水飽和度のコンターを比較して図 4-3 および図 4-4 に示す。図 4-3 は人工バリア性能確認試験の全体像であり、解析対象範囲から岩盤および模擬オーバーパックを非表示としている。また、図 4-4 は、緩衝材の 1/2 の高さにおける水平断面の表示である。これらの結果より、緩衝材の間隙水飽和度は緩衝材外側から上昇し、時間の経過とともに浸潤が進んでいることが分かる。そして、ケース 2 の場合の間隙水飽和度の上昇が最も速くなっている。また、ケース 1 とケース 3 は、同じような浸潤挙動を示しており、模擬オーバーパック近傍の緩衝材の間隙水飽和度が初期よりも低下し乾燥している様子が読み取れる。

次に、緩衝材中の浸潤挙動に関する THC 連成解析結果および TH 連成解析結果を、緩衝材中に設置された水分計によって計測された間隙水飽和度の時間変化と比較して図 4-5 に示す。評価期間は、廃棄体を模擬したヒーターによる熱負荷を開始した 2015 年 1 月から 2019 年 6 月までの約 1600 日間である。図中の計測値は、緩衝材中に設置したサイクロメータによって計測されたサクションを、式 (2-1) で与えられる水分特性曲線を介して間隙水飽和度に変換している。計測点は、緩衝材外周部の 3 ヶ所であり、センサー番号は PS003、PS006 および PS009 である。なお、サイクロメータは、緩衝材中に計 9 台が設置されているが、計測値が得られたものは、ここで示した緩衝材外周部に設置された 3 台であった（中山ほか, 2019[39]）。図中の解析結果は、緩衝材の固有透過度として、蒸留水を透過液とした透水試験によって得られた固有透過度を用いた場合（ケース 1）、幌延地下水を透過液とした透水試験によって得られた固有透過度を用いた場合（ケース 2）、および間隙水中の NaCl 濃度によって透水性が変化するモデルの場合（ケース 3）を比較して示している。これより、間隙水飽和度の上昇は、ケース 1 の場合が計測値よりもやや遅く、ケース 2 の場合でやや速くなっている。そして、ケース 3 の場合が計測値と最も整合的な結果となっている。なお、1400 時間以降の計測値の振動は、緩衝材が飽和したことにより計測不能になったものと推察される。

緩衝材の間隙水飽和度の分布に関して、比抵抗トモグラフィー測定結果から推定した緩衝材の水平断面における間隙水飽和度コンターを図 4-6 に示す（中山ほか, 2019[39]）。中心の白い部分は、模擬オーバーパックである。これより、緩衝材外周部では地下水の浸潤によって間隙水飽和度が上昇しているのに対し、模擬オーバーパック近傍では間隙水飽和度が 0.25 以下にまで低下し、その水分分布の状態が 2018 年 7 月までの 1,300 日間は維持されている様子が読み取れる。さらに、THC 連成解析結果および TH 連成解析結果として、ケース 1、ケース 2 およびケース 3 の緩衝材の外周部、模擬オーバーパック近傍およびその中間の位置における間隙水飽和度の時間変化を比較して図 4-7 に示す。これより、いずれのポイントにおいても、ケース 2 の幌延地下水に対する固有透過度を用いた場合の間隙水飽和

度の上昇が最も速く、ケース 1 の蒸留水に対する固有透過度を用いた場合の間隙水飽和度の上昇が最も遅い結果であった。各ケースの解析結果のうち緩衝材内側において、ケース 2 の間隙水飽和度は 0.4 程度まで低下した後に上昇に転じ、1600 時間後の間隙水飽和度は 0.9 程度まで増加しており、図 4-6 で示した比抵抗トモグラフィーによる計測結果とは異なる挙動を示している。これに対して、ケース 1 およびケース 3 の場合は、間隙水飽和度が 0.3 程度まで低下した後の上昇は緩やかなものとなっている。これは、図 4-6 に示すように、2015 年 6 月から 2018 年 7 月の間で間隙水飽和度コンターの変化が見られない測定結果と整合的な結果となっている。なお、図 4-6 で示したように、比抵抗トモグラフィー測定から求めた緩衝材内側の間隙水飽和度は 0.2 以下にまで低下する結果になっているのに対して、図 4-4 および図 4-7 に示した解析結果でのそれは 0.3 程度となっている。このような差異が生じている原因として、比抵抗トモグラフィーの測定精度の問題や、図 4-2 に示すように、模擬オーバーパック表面温度の計測値が一時的に 110°C を超えており、これによって緩衝材内側の乾燥が進んだ可能性がある。

以上、人工バリア性能確認試験における緩衝材の浸潤挙動の評価では、緩衝材の間隙水組成が及ぼす水理特性の影響を考慮し、間隙水中の NaCl 濃度によって透水性が変化するとしてモデルを用いたケース 3 が、緩衝材外周部および内側両方の浸潤挙動を再現する結果となった。

このように、海水系地下水環境下での緩衝材の浸潤挙動評価においては、設定する固有透過度によって、岩盤に近い緩衝材外周部よりも緩衝材内側の浸潤挙動への影響が大きくなることが明らかとなった。これは、温度勾配による水分の移動によって地下水の浸潤が抑制され、間隙水飽和度が上昇していない模擬オーバーパック近傍においては、緩衝材の水理特性へ及ぼす海水系地下水組成の影響が小さいためと考えられる。すなわち、幌延地下水を透過液とした透水試験によって得られた固有透過度を用いて、間隙水飽和度が上昇していない不飽和領域までを評価する一般的な飽和・不飽和浸透流解析手法を用いることが適切でないことを示すものである。

このようなことから、海水系地下水環境下における緩衝材の水理特性については、図 2-1 に示すように、初期に存在する間隙水と地下水とが混合することで形成される間隙水組成に基づき設定される必要があると考えられ、海水系地下水環境下における緩衝材の浸潤挙動を適切に評価するためには、水理解析と物質移行を含む地球化学解析とを連成させ、間隙水組成によって変化する水理特性の影響を考慮した解析評価手法が必要となる。

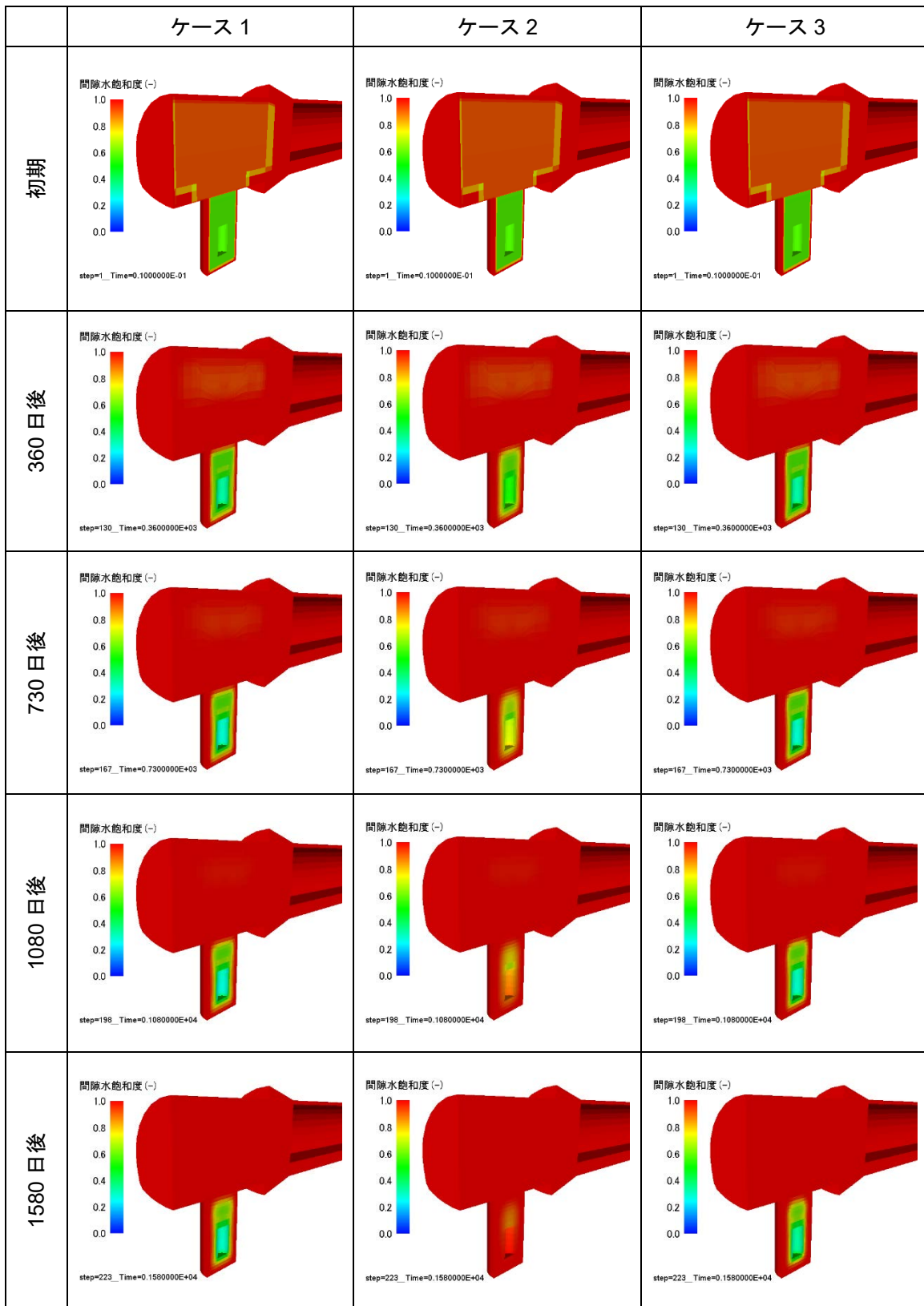


図 4-3 人工バリア性能確認試験の THC および TH 連成解析による間隙水飽和度カウンター (全体像)

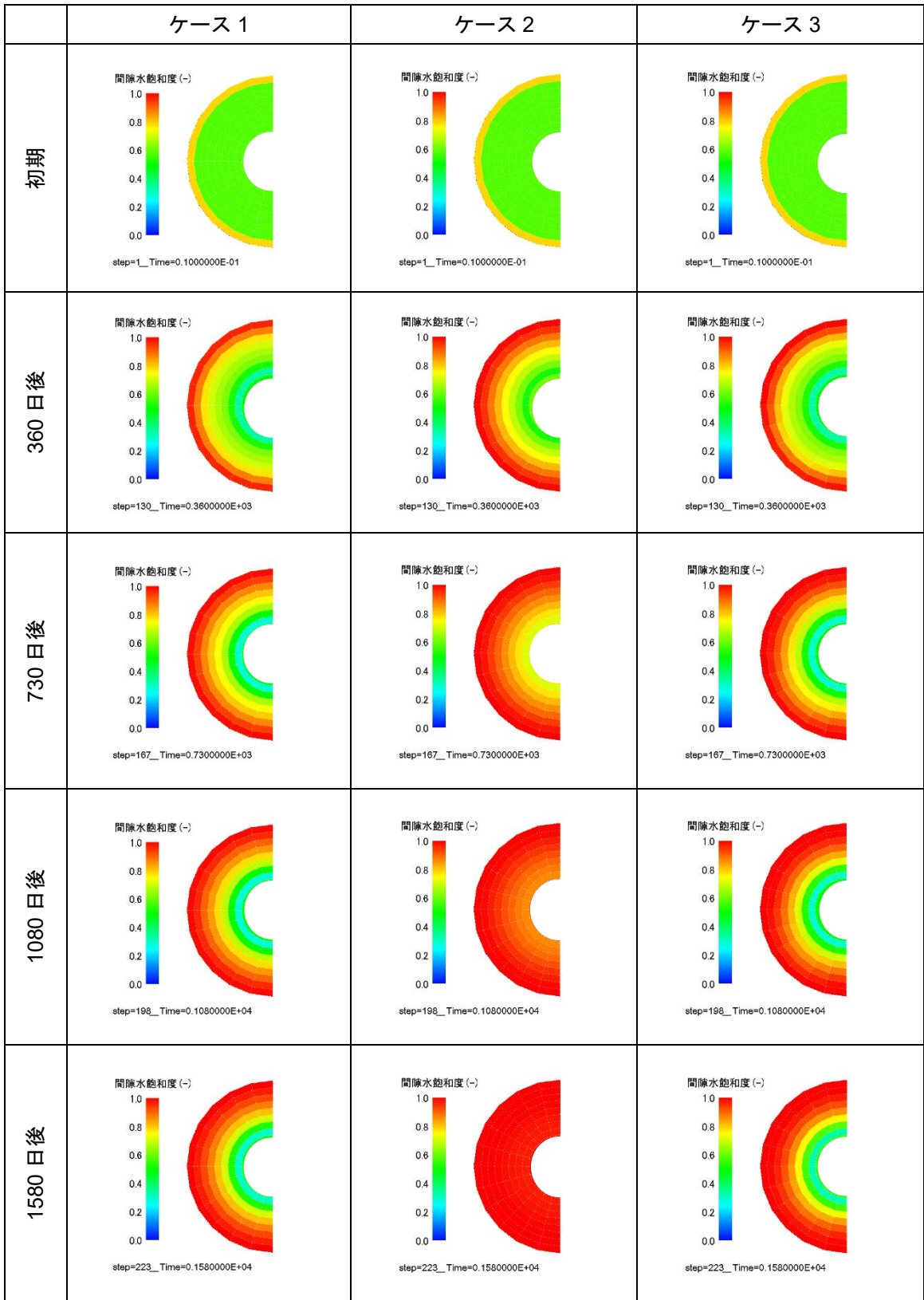


図 4-4 人工バリア性能確認試験の THC および TH 連成解析による間隙水飽和度コンター (緩衝材水平断面)

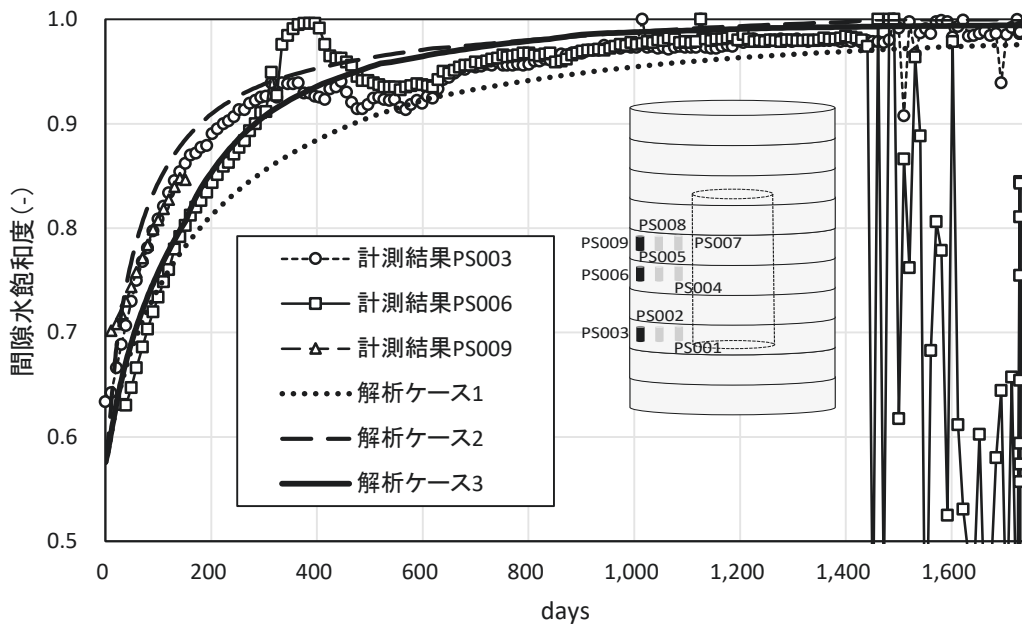


図 4-5 緩衝材中の間隙水飽和度に関する計測結果と THC および TH 連成解析結果との比較

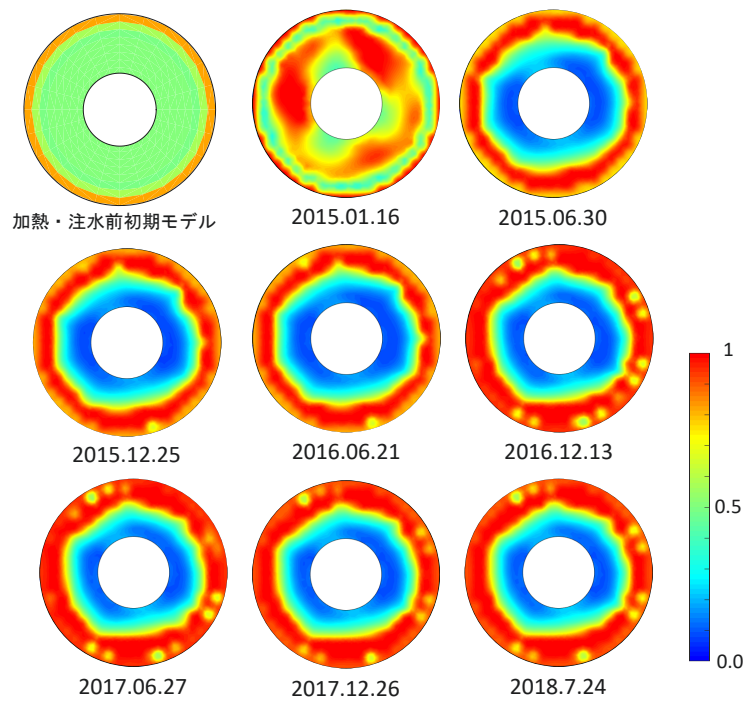


図 4-6 比抵抗トモグラフィーによる計測結果から推定された間隙水飽和度コンター (中山ほか, 2019[39], 図 4.1.1.5-6, p.51)

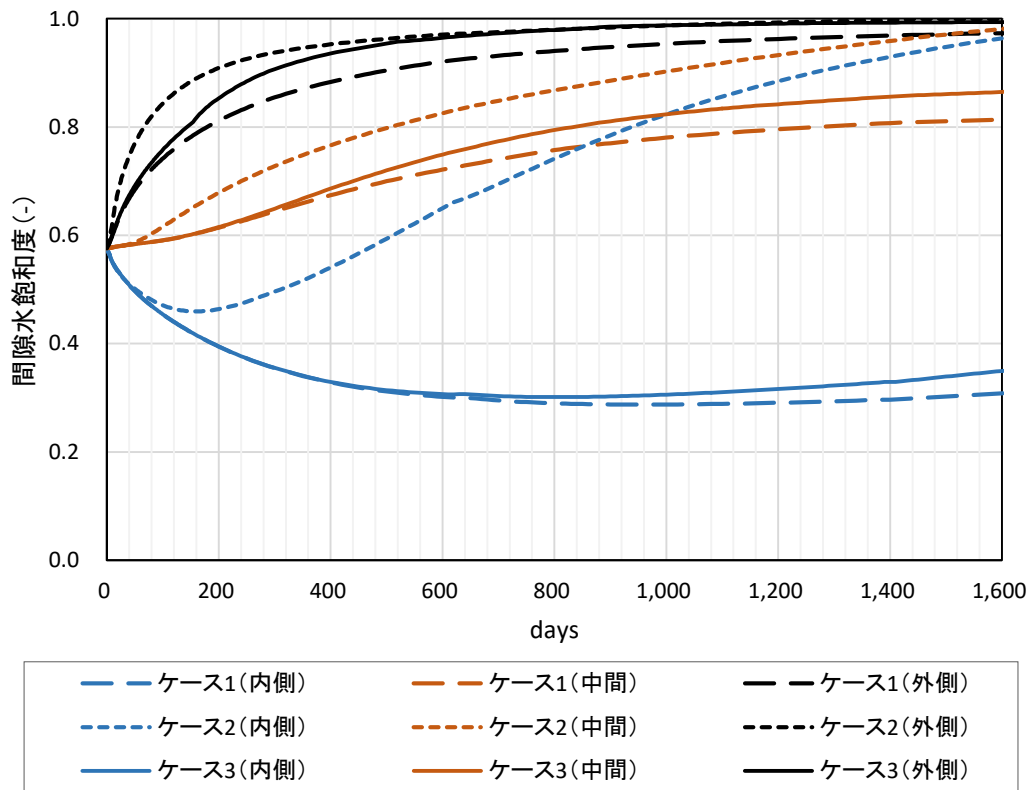


図 4-7 THC および TH 連成解析による間隙水飽和度の時間変化

4.4 まとめ

これまでに開発を進めてきた THMC 連成解析モデルを、より多様な地質環境条件に対応できるようにするため、海水系地下水環境下における緩衝材の透水性に及ぼす間隙水組成の影響を考慮した水理モデルを構築した。また、廃棄体の発熱によってオーバーパック近傍で緩衝材の水分が低下し乾燥する現象を評価する温度勾配水分移動モデルの設定を行った。そして、これらの評価モデルを取り入れた Couplys の適切性を確認するため、原子力機構が幌延深地層研究計画において実施している人工バリア性能確認試験を対象として、廃棄体を模擬したヒーターの温度を上昇させてから 1600 日後までの変遷について評価を実施した。その結果、原位置で得られている緩衝材中の浸潤挙動に関する計測値と整合的な結果が得られた。これにより、廃棄体の発熱によってオーバーパック近傍で緩衝材が乾燥する現象と合わせて、海水の 1/2 程度の NaCl 濃度の幌延地下水が浸潤する緩衝材の浸潤挙動を適切に評価できることを確認した。

5. おわりに

人工バリアを設置した時点から緩衝材が飽和に至るまでの過渡的な期間を対象とした解析評価ツールとして、THMC 連成解析モデルの開発が進められている。過渡期における THMC 連成解析モデルによる数値実験的なアプローチは、ニアフィールドで生じる現象の理解を始めとして、安全評価における初期条件の設定や、オーバーパックの腐食評価に資する情報を提供する有効な手法として処分技術の信頼性向上への寄与が期待できると考えられている。また、THMC 連成解析モデルを用いたニアフィールドにおける熱的、水理的、力学的挙動の定量的評価は、ニアフィールドで生じる現象の不確実性の特徴やその幅を把握することや、連成挙動として扱うべき現象を明らかにすることに資する。例えば、緩衝材の力学挙動が熱や水理挙動に及ぼす影響に着目して THAMES の高度化を行い、緩衝材が埋め戻し材側に膨出する力学挙動が緩衝材の最高温度や緩衝材の再冠水時間へ及ぼす影響は小さいことなどを示している（鈴木・高山，2020[21]）。

本研究では、これまでに開発を進めてきた THMC 連成解析モデルを、より多様な地質環境条件に対応できるようにするため、海水系地下水環境下での緩衝材の浸潤挙動を評価可能とするモデルの検討を行った。そして、室内における浸潤試験結果に基づき、初期に存在する間隙水と浸潤溶液とが混合して形成される間隙水組成とそれに依存して変化する透水性の影響を考慮した評価モデルを構築した。また、廃棄体の発熱によってオーバーパック近傍で緩衝材の水分が低下し乾燥する現象を評価するモデルについては、多孔質媒体に対する水、蒸気および熱の輸送を連成させた TOUGH2 を用いて、廃棄体の発熱を想定した人工バリア体系での気相の流れと水蒸気量の勾配によって生じる水蒸気の移動を含む緩衝材の浸潤挙動に関する評価結果に基づき、温度および間隙水飽和度の依存性を考慮した温度勾配水分拡散係数の設定を行った。さらに、これらのモデルを Couplys に取り込み、原子力機構が幌延深地層研究計画において実施している実規模での処分孔堅置き方式の人工バリアを用いた人工バリア性能確認試験を対象として、廃棄体を模擬したヒーターの温度を上昇させてから 1600 日後までの変遷について THMC 連成モデルによる再現解析を実施した。そして、原位置で得られている緩衝材中の浸潤挙動に関する計測値との整合性を確認し、海水系地下水環境下における緩衝材の浸潤挙動評価に対する本解析モデルの妥当性を示した。これによって、降水系地下水から海水系地下水までの地下水水質の変化に応じた緩衝材の浸潤挙動の違いを評価可能となった。

今後は、THMC 連成解析モデルの適用性の確認として、廃棄体の温度がピークに達した後人工バリアの温度が低下していく過程を含めたより長期のニアフィールド環境の評価が可能かどうかを確認する。このため、幌延深地層研究計画の人工バリア性能確認試験で実施されている廃棄体を模擬したヒーターの温度を低下させていく冷却過程を含めた期間を対象として再現解析を実施し、計測結果との比較を通じてモデルの適切性を確認していく予定である。そして、解析モデルの信頼性を向上していくため、国際共同研究 DECOVALEX

などを活用し、原位置試験などを対象とした予測解析や再現解析を実施し、各国とのモデルや解析結果との比較を通じて適切性を確認するとともに検証事例を蓄積して行く必要がある。

現時点での Couplys は、図 1-1 で示したように、力学特性と地球化学特性との相互作用が考慮されていないため、応力変形が間隙水化学（あるいは、間隙水化学が応力変形）に及ぼす影響を評価できない。前述したように、ニアフィールドで生じる現象を連成現象として扱うべきかどうかを把握するための手法として、THMC 連成解析モデルによって応力変形と間隙水化学の相互作用を考慮した定量的な評価は有効と考えられる。このようなことから、力学解析と地球化学解析との間や、力学解析側から熱解析および水理解析側へ解析結果を提供するスキームを追加し、THMC 連成解析モデルを高度化していくことが望まれる。また、第 4 章で示したように、人工バリア性能確認試験では、一時的に 100°C を超えた温度環境となっているが、このような高温条件での物性値やモデルが整備されていないため再現解析の中で考慮することができなかった。一方で、幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験では、令和 2 年度以降に緩衝材の最高温度を 100°C 以上とした条件での試験が行われ、人工バリアやその周辺岩盤で生じる現象を把握する計画となっている（中山, 2022[48]）。このようなことから、緩衝材の温度が 100°C を超えた条件下での THMC 連成解析モデルの適用性の確認を始めとして物性値の取得やモデル開発も必要となってくる。

他方、過渡期の THMC 連成解析モデル開発の目的である安全評価における核種移行解析の初期状態の設定や、オーバーパックの腐食寿命評価に必要となるニアフィールド環境条件に関する情報の提供と、これらの情報が反映される評価技術体系の整備も課題となる。

謝辞

本報告書は、経済産業省資源エネルギー庁から日本原子力研究開発機構が受託した「令和2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（JPJ007597）（ニアフィールドシステム評価確証技術開発）」、「令和3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（JPJ007597）（ニアフィールドシステム評価確証技術開発）」および「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（JPJ007597）（ニアフィールドシステム評価確証技術開発）」の成果の一部である。

参考文献

- [1] Ohnishi, Y., Shibata, H. and Kobayashi, A. : Development of finite element code for the analysis of coupled Thermo-Hydro-Mechanical behaviors of a saturated-unsaturated medium, Proc. of Int. Symp. on Coupled Processes Affecting the Performance of a Nuclear Waste Repository, Berkeley, 1985, pp.278-283.
- [2] Chijimatsu, M., Fujita, T., Kobayashi, A. and Nakano, M. : Experiment and validation of numerical simulation of coupled thermal, hydraulic and mechanical behaviour in the engineered buffer materials, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., Vol.24, 2000, pp.403-424.
- [3] 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, 703p.
- [4] Chijimatsu, M., Fujita, T., Sugita, Y., Amemiya, K. and Kobayashi, A. : Field experiment, results and THM behavior in the Kamaishi mine experiment, Int. J. Rock Mech. Min., Vol.38, 2001, pp.67-78.
- [5] 操上広志, 千々松正和, 小林晃, 杉田裕, 大西有三：グリムゼル試験場における熱－水－応力連成原位置試験の解析, 土木学会論文集, No.757/III-66, 2004, pp.127-137.
- [6] 日本原子力研究開発機構：平成31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, 2019, 405p.
- [7] Rutqvist, J., Chijimatsu, M., Jing, L., Millard, A., Nguyen, T.S., Rejeb, A., Sugita, Y. and Tsang, C.F. : A numerical study of THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository – BMT1 of the DECOVALEX III project. Part 3: Effects of THM coupling in sparsely fractured rocks, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol.42, 2005, pp.745-755.
- [8] Sugita Y., Kwon S., Lee C., Massmann J., Pan P-Z and Rutovist J. : DECOVALEX-2015 project Task B2 final report, KTH Architecture and the Built Environment, 2016, 89p.
- [9] 伊藤彰, 川上進, 油井三和：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－化学連成モデル／解析コードの開発（研究報告）, JNC TN8400 2003-032, 2004, 46p.
- [10] Fujita, T., Fujisaki, K., Suzuki, H., Kawakami, S., Yui, M., Chijimatsu, M., Neyama, A., Ishihara, Y. and Hishiya, T. : Development on Computer System of the Coupled Thermo-Hydro-Mechanical and Chemical Process in the Near-Field of the High-Level Radioactive Waste Repository, Proceedings of the GEOPROC2006 International Symposium 2nd International Conference on Coupled Thermo-

- Hydro-Mechanical-Chemical Process in Geosystems and Engineering, Nanjing, China, May 22-25, 2006, pp.416-421.
- [11] Nihigaki M., Hishiya T. and Hashimoto N. : Density Dependent Groundwater Flow with Mass Transport in Saturated – Unsaturated Porous Media, Proceeding of the First Asian – Pacific Congress on Computational Mechanics, 2001, pp.1375-1380.
- [12] Parkhurst, D. L. : User’s Guide to PHREEQC (VERSION 2) A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report, 99-4259, 1999, 327p.
- [13] 日本原子力研究開発機構：平成 19 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発報告書，2008，260p.
- [14] 日本原子力研究開発機構：平成 20 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発 報告書，2009，327p.
- [15] 日本原子力研究開発機構：平成 21 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発 報告書，2010，319p.
- [16] 木村誠，九石正美，藤田朝雄，中間茂雄，鈴木英明：緩衝材中の化学影響評価に向けた熱－水－応力－化学連成解析モデルの開発，JAEA-Research 2010-034，2011，131p.
- [17] 花室孝広：幌延深地層研究計画 平成 25 年度調査研究成果報告，JAEA-Review 2014-039，2014，69p.
- [18] 日本原子力研究開発機構：平成 31 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，2020，342p.
- [19] Pruess, K. : TOUGH2 - A General- purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat flow, LBL20700 Lawrence Berkeley National Laboratory, 1991, 102p.
- [20] van Genuchten, M. Th. : A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc., Vol. 44, 1980, pp.892-898.
- [21] 鈴木英明，高山裕介：ニアフィールドにおける過渡期の熱－水－応力連成挙動に及ぼす緩衝材の密度変化の影響評価（受託研究），JAEA-Research 2020-015，2020，52p.
- [22] 大野宏和，高山裕介，中山雅：幌延URL における人工バリアの性能確認試験；熱－水－応力連成解析検討，日本原子力学会 2019 年春の大会予稿集，2019.
- [23] Corey, A. T., : The interrelation between gas and oil relative permeabilities, Producers Monthly, Vol.19, 1954, pp.38-41.
- [24] ENRESA : FEBEX project final report, publication tecnica 1/2000, 2000, 362p.
- [25] 日本原子力研究開発機構：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 処分システム評価確証技術開発報告書 平成30年3月，2018，906p.
- [26] 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3 地層処分システムの安全評価，

- JNC TN1400 99-023, 1999, 526p.
- [27] 松本一浩, 菅野毅, 藤田朝雄, 鈴木英明: 緩衝材の飽和透水特性, 動力炉・核燃料開発事業団報告書, PNC TN8410 97-296, 1997, 134p.
- [28] 菊池広人, 棚井憲治: 幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験, JNC TN8430 2004-005, 2005, 96p.
- [29] 菊池広人, 棚井憲治, 松本一浩, 佐藤治夫, 上野健一, 鐵剛志: 緩衝材の飽和透水特性Ⅱ－海水性地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響－, JNC TN8430 2003-002, 2003, 47p.
- [30] Gens, A., Alcoverro, J., Radim, B., Hasal, M., Michalec, Z., Takayama, Y., Lee, C., Lee, J., Kim, G. Y., Kuo, C. W., Kuo, W. J., Lin, C. Y.: HM and THM interactions in bentonite engineered barriers for nuclear waste disposal, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.137, 2021, 19p.
- [31] 藤田朝雄, 鈴木英明, 千々松正和: 温度勾配による緩衝材内の水分移動と膨潤応力の測定, JNC TN8400 99-020, 1999, 50p.
- [32] Börgesson, L. and Hernelind, J.: Coupled thermo-hydro-mechanical calculations of the water saturation phase of a KBS-3 deposition hole, TR-99-41, 1999.
- [33] 中山雅, 松崎達二, 丹生屋純夫: 幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験、一大口径掘削機の開発, 模擬オーバーパック, 緩衝材および埋め戻し材の製作－, JAEA-Research 2016-010, 2016, 57p.
- [34] 棚井憲治, 菅野毅, Christophe Galle.: 圧縮ベントナイトの水素ガス移行特性評価, PNC TN8410 96-289, 1996, 25p.
- [35] Fatt, I. and Klikoff, W. A.: Effect of Fractional Wettability on Multiphase Flow Through Porous Media, *AIME Transactions*, vol.216, 1959, pp.71-76.
- [36] 日本原子力研究開発機構: 平成24年度 地層処分技術調査等事業 処分システム化学影響評価高度化開発報告書 平成25年3月, 2013, 268p.
- [37] 菊池広人, 棚井憲治: 緩衝材の熱物性測定試験 (III), 面熱源法による緩衝材熱物性の取得, JNC TN8430 2003-009, 2003, 27p.
- [38] 雑賀敦: 幌延深地層研究計画 平成30年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2019-018, 2020, 122p.
- [39] 中山雅, 雑賀敦, 木村駿, 望月陽人, 青柳和平, 大野宏和, 宮川和也, 武田匡樹, 早野明, 松岡稔幸, 櫻井彰孝, 宮良信勝, 石井英一, 杉田裕, 笹本広, 棚井憲治, 佐藤稔紀, 大澤英昭, 北山彩水, 谷口直樹: 幌延深地層研究計画における地下施設での調査研究段階 (第3段階: 必須の課題2015-2019年度) 研究成果報告書, JAEA-Research 2019-013, 2019, 276p.
- [40] 藤田朝雄, 谷口直樹, 松井裕哉, 棚井憲治, 西村繭果, 小林保之, 平本正行, 前川恵輔, 澤田淳, 牧野仁史, 笹本広, 吉川英樹, 柴田雅博, 若杉圭一郎, 濱克宏, 操上広志, 國

- 丸貴紀, 石井英一, 竹内竜史, 中野勝志, 太田久仁雄, 瀬尾俊弘, 宮原要, 内藤守正, 油井三和: 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書 分冊「地層処分研究開発」, JAEA-Research 2007-045, 2008, 140p.
- [41] 山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘通, 名合牧人, 田所照夫, 中垣真一: 幌延深地層研究計画における試錐調査(HDB-6, 7, 8)のうちHDB-6孔, JNC TJ5400 2005-004, 2005, 1182p.
- [42] 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, 一第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ一, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005, 590p.
- [43] 太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 紫野一則, 濱克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗: 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」, JAEA-Research 2007-044, 2007, 434p.
- [44] 土木学会: コンクリート標準示方書「設計編」(2007年制定), 2007, 623p.
- [45] 日本原子力研究開発機構: 平成27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 処分システム評価確証技術開発報告書 平成28年3月, 2016, 720p.
- [46] 菊池広人, 棚井憲治: 幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験(試験報告), JNC TN8430 2004-005, 2005, 96p.
- [47] Arthur, R. C, Sasamoto, H., Shibata, M., Yui, M. and Neyama, A : Development of Thermodynamic Databases for Geochemical Calculations, JNC TN8400 99-079, 1999, 287p.
- [48] 中山雅: 幌延深地層研究計画 令和2年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2021-053, 2022, 133p.

This is a blank page.

