



## 坑道掘削に伴う地下水の水理および 水質変化に関する解析評価

— 幌延深地層研究計画における水平坑道掘削影響試験の予察解析 —

Numerical Simulation of Coupled Hydro-Geochemical  
Behavior Induced by Tunnel Excavation

- Preliminary Analysis for In-situ Test on Excavation Disturbed Zone of the Drift  
in Horonobe URL Project -

鈴木 英明 木村 誠 藤田 朝雄

Hideaki SUZUKI, Makoto KIMURA and Tomoo FUJITA

地層処分研究開発部門

ニアフィールド研究グループ

Near-Field Research Group

Geological Isolation Research and Development Directorate

JAEA-Research

February 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政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。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてに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ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 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  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, 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, 2009

坑道掘削に伴う地下水の水理および水質変化に関する解析評価  
—幌延深地層研究計画における水平坑道掘削影響試験の予察解析—

日本原子力研究開発機構  
地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

鈴木 英明<sup>\*</sup>、木村 誠<sup>\*</sup>、藤田 朝雄

(2008年12月17日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、処分場仕様の信頼性、処分場閉鎖の判断材料および安全評価におけるシナリオを定量的に提示するためには、ニアフィールドで起こる熱的、水理的、力学的、化学的なプロセスが相互に影響を及ぼし合う連成挙動を解析評価するためのモデル(熱-水-応力-化学連成解析評価モデル)を開発する必要がある。

本報告書は、これまでに開発してきた熱-水-応力-化学連成解析評価モデルが、実現象をどの程度予測できるかを確認することを目的として、幌延深地層研究計画で予定している坑道掘削影響評価試験の予察解析として実施した解析結果について報告するものである。予察解析では、深度140mの声問層を対象として、坑道掘削に伴う坑道周辺の水理場と地下水水質の変化に着目し、地球化学反応を考慮した水理-物質移行連成解析を実施した。その結果、水分飽和度95%以下となる不飽和領域は、坑道壁面より約5m程度の範囲で発生し、これに伴って地下水中に高い濃度で溶解している炭酸が脱ガスすることにより生じる地下水のpHなどの地球化学特性が変化することが分かった。本結果は、今後実際に得られる地質環境データの理解および上述のようなモデルの予測精度の把握に資する。

## Numerical Simulation of Coupled Hydro - Geochemical Behavior Induced by Tunnel Excavation

—Preliminary Analysis for In-situ Test on Excavation Disturbed Zone of the Drift  
in Horonobe URL Project—

Hideaki SUZUKI\* Makoto KIMURA\* and Tomoo FUJITA

Geological Isolation Research Unit  
Geological Isolation Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 17, 2008)

It is necessary to consider disturbances caused by an excavation on mechanical, hydrological and chemical conditions so as to well understand and simulate the long-term behavior of near-field performance after emplacement of the engineered barrier system (EBS) at a repository for disposal of high-level radioactive waste (HLW).

This paper presents the results of preliminary analysis of an in-situ test on Excavation Disturbed Zone (EDZ) at a horizontal drift tunnel of GL.-140m level in the Koetoi formation at the Horonobe URL project, using the coupled Thermo-Hydro-Mechanical and Chemical (THMC) model which has been developed so far. The coupled analysis was carried out taking account of hydraulic and geochemical disturbance induced by an excavation. As a result of analysis, an unsaturated zone with less than 95% of water content occurs within a range of about 5 m from the tunnel wall surface, and thereby carbon dioxide dissolved in groundwater is degassed. It is indicated that the degasifying leads to geochemical changes including chemical composition and pH of groundwater.

*Keywords : HLW Disposal, EBS, Near Field, Coupled THMC, Numerical Simulation, EDZ, Oxidation-reduction Potential, CO<sub>2</sub> Degasification, pH*

---

\*Collaborating Engineer

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 掘削に伴う周辺岩盤の水理特性の変化に関する解析評価 .....	2
2.1 目的 .....	2
2.2 解析の概要 .....	2
2.3 解析領域の設定 .....	3
2.4 解析に使用するパラメータの設定 .....	3
2.4.1 岩盤の物性値・初期地圧の設定 .....	3
2.4.2 岩盤の力学・水理特性 .....	3
2.5 解析結果 .....	4
3. 坑道周辺岩盤の地下水水質変化に関する解析評価 .....	13
3.1 目的 .....	13
3.2 解析の概要 .....	13
3.3 解析条件 .....	13
3.3.1 水理学的条件の設定 .....	13
3.3.2 地球化学条件の設定 .....	14
3.3.3 境界条件 .....	15
3.4 解析結果 .....	16
4. 考察 .....	25
5. おわりに .....	27
参考文献 .....	28

**Contents**

1. Introduction .....	1
2. Study of hydraulic characteristics due to excavation .....	2
2.1 Analysis objective .....	2
2.2 Outline of analysis .....	2
2.3 Geometry of analysis .....	3
2.4 Parameters .....	3
2.4.1 Physical property of host rock and initial conditions .....	3
2.4.2 Parameters of mechanistic and hydraulic properties for host rock .....	3
2.5 Results .....	4
3. Study of geochemical reaction due to unsaturated around the drift .....	13
3.1 Analysis objective .....	13
3.2 Outline of analysis .....	13
3.3 Analysis conditions .....	13
3.3.1 unsaturated hydraulic conditions .....	13
3.3.2 geochemical conditions .....	14
3.3.3 boundary conditions .....	15
3.4 Results .....	16
4. Consideration .....	25
5. Conclusions .....	27
References .....	28

表 目 次

表 2.1	人工バリア定置に至るまでのニアフィールドの主な変化	5
表 2.2	主要なパラメーター一覧	5
表 3.1	解析で考慮する岩盤中の鉱物	17
表 3.2	地下水組成	17
表 3.3	解析コンター	24

図 目 次

図 2.1	解析領域	6
図 2.2	深度 140m 水平坑道断面（一般部）	7
図 2.3	真密度と間隙率	7
図 2.4	初期応力分布	8
図 2.5	弾性係数とポアソン比	8
図 2.6	透水係数－間隙率関係（室内）	9
図 2.7	透水係数の深度依存性（原位置）	9
図 2.8	固有透過度－間隙率関係（解析）	10
図 2.9	最大主応力図（引張+）	10
図 2.10	最小主応力図（引張+）	11
図 2.11	間隙率分布	11
図 2.12	固有透過度分布	12
図 3.1	熱－水－応力－化学連成解析モデルの計算フローの概要	17
図 3.2	不飽和水分特性	18
図 3.3	解析境界条件	19
図 3.4	水分飽和度の解析結果	20
図 3.5	不飽和領域気相中の二酸化炭素濃度の解析結果	20
図 3.6	地下水の pH の解析結果	21
図 3.7	不飽和領域気相中の酸素濃度の解析結果	21
図 3.8	地下水の pe の解析結果	22
図 3.9	黄鉄鉱濃度の解析結果	22
図 3.10	Fe(OH) <sub>3</sub> アモルファス濃度の解析結果	23
図 4.1	深度 400m の稚内層を対象とした不飽和領域の解析結果	26

This is a blank page.

## 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環境のより現実的なプロセスの理解と信頼性の高い評価を行うためには、処分場建設にともなう生じる応力場、水理場、化学場の変化などの掘削影響を把握しておく必要がある。例えば、処分坑道周辺で地下水水位が低下すれば緩衝材の再冠水時間に影響を及ぼすことや、坑道周辺で不飽和領域が発生した場合には、岩盤内に空気が浸入することによって地下水の化学的環境が変化し、オーバーパックの腐食などに影響を及ぼすことも考えられる。

これまでに、地層処分システムで想定される熱的、水理的、力学的、化学的な挙動が相互に影響を及ぼしあう連成現象を予測評価するために開発を進めている熱-水-応力-化学連成解析モデル<sup>1)</sup>を用い、坑道周辺の不飽和化にともなう地下水水質の変化に関する解析評価を通じて、坑道掘削影響評価のための解析ツールの整備を行ってきている<sup>2)</sup>。

本研究は、幌延深地層研究計画で予定している深度 140m の声問層を対象とした坑道掘削影響評価試験<sup>3)</sup>のための予察解析として、坑道掘削に伴う地下水の水理場および地球化学的な環境の変化に関する評価を実施した。本解析評価では、はじめに、坑道掘削時の応力状態の変化に伴う水理特性の変化を考慮するため、力学的な影響による水理場の変化に対する代表的な指標として岩盤の固有透過度を選択し、応力場の変化による間隙率の変化が固有透過度の変化と等価であると仮定した。そして、坑道掘削にともなう岩盤の間隙率の変化を弾性解析によって求め、それに基づいて透水特性を決定した。次に、この透水特性の変化を考慮して、地球化学反応を考慮した水理-物質移行連成解析を実施した。本解析では、不飽和領域の発生に伴う地下水水質への影響として、地下水中に高い濃度で溶存している炭酸の脱ガスと、坑道から大気が侵入することによる地下水の酸化還元電位の変化に着目した。

## 2. 掘削に伴う周辺岩盤の水理特性の変化に関する解析評価

### 2.1 目的

人工バリアとその周辺岩盤を含むニアフィールド環境においては、廃棄体からの発熱、緩衝材の再冠水、緩衝材の膨潤および間隙水の変化など、熱的、水理的、力学的、化学的作用が相互に影響し合うことが想定されており、そのような種々の影響因子を考慮可能な連成解析手法の開発が進められている<sup>1)</sup>。また、平成20年度の幌延深地層研究計画<sup>3)</sup>によると、坑道掘削前後の坑道周辺環境の変化を把握可能な調査技術や調査機器の開発を実施するとともに、掘削に伴う力学特性、水理特性などの変化に関する様々なデータを取得する予定となっている。これら原位置での計測データは、これまでに開発してきた技術や評価モデルの適用性を確認する場を与えるものである。

坑道掘削から人工バリア定置に至るまでのニアフィールドの主な変化を表2.1に示す。まず、①の初期状態に対して、②坑道掘削-1によって応力場が変化することにより、周辺岩盤の力学特性や水理特性に影響を与えることが考えられる。さらに、坑道内では地下水中に溶解していたガスに対処するために換気が行われるため、条件によっては、③坑道掘削-2において坑壁からの不飽和領域が周辺へと広がり、それに伴う地球化学反応によって地下水組成が変化することが想定される。また、温度に関しても同様に、坑道内の気温が初期状態における地温と相違がある場合には温度の影響が生じることとなる。②や③のように熱的、水理的、力学的および地球化学的な場が変化した状態において人工バリアが定置され、④定置後、廃棄体からの放熱によって場の変化が生じると思われる。

本章では、幌延深地層研究所で計画されている深度140mの声問層を対象とした坑道掘削影響評価試験で得られる計測データと比較するための予察的解析として、③を対象とした地球化学反応を考慮した水理-物質移行連成解析を実施するにあたり、②坑道掘削-1における力学的影響による掘削損傷領域として、透水特性の変化に関する解析評価を行った。本章で得られた坑道周辺岩盤の透水特性は、第3章で実施する地球化学反応を考慮した水理-物質移行連成解析で考慮する。

### 2.2 解析の概要

坑道掘削後の周辺岩盤における力学的影響を評価するため、汎用非線形有限要素解析プログラムABAQUS<sup>4)</sup>を用いた弾性解析を実施した。解析は、定常解析とし、重力場における自重解析により初期応力場を求めた後に、坑道部分の要素を削除する方法で坑道掘削を表現した。

水理的影響に関しては、水理場を決定付ける代表的な指標として岩盤の固有透過度に着目した。固有透過度は原位置岩盤あるいは岩石コアに対して実施された原位置透水試験、室内透水試験によって間隙率と有意な関係にあることが知られていることから<sup>5)</sup>、ABAQUSによって得られた力学的な影響による間隙率の変化が透水特性の変化と等価で

あると仮定して水理場の変化を評価することとした。なお、掘削直後の間隙変化を把握することを目的としているため、ここでは掘削後の支保工を考慮していない。

### 2.3 解析領域の設定

解析領域は幌延深地層研究所の東立孔深度 140m の声問層に位置する水平坑道周辺を対象とし、2次元平面ひずみモデルを用いた。解析領域を図 2.1 に示す。水平坑道の坑道断面は支保設計（実施設計）<sup>6)</sup>に準じて、図 2.2 に示す深度 140m 水平坑道断面（一般部）を用いた。

### 2.4 解析に使用するパラメータの設定

解析で設定した主なパラメータを表 2.2 に整理した。

各パラメータの設定方法は後述する通りであるが、これまでに幌延深地層研究所で取得された物性値を整理し、深度 140m での値を推定して設定した。

#### 2.4.1 岩盤の物性値・初期地圧の設定

岩盤の物性値として真密度と間隙率は、図 2.3 に示すように、HDB-6 孔を用いた試錘調査<sup>7)</sup>により得られた各物性値の深度分布から、近似直線を仮定し、深度 140m の値を推定した。岩盤内の初期応力については、HDB-3、HDB-6 孔における水圧破碎法による初期応力測定結果として、鉛直土被り圧に対する水平面内最大主応力、最小主応力が図 2.4 のように得られており、空洞安定性の検討は、鉛直応力：水平面内最大主応力：水平面内最小主応力=1.0：1.3：0.9 を採用している<sup>8)</sup>。ここでは、平均的な値として鉛直応力：水平応力=1：1.1 を用いた。

#### 2.4.2 岩盤の力学・水理特性

##### 1) 弾性係数・ポアソン比

岩盤の力学パラメータとして弾性係数とポアソン比に関しては、HDB-6 孔を用いた試錘調査<sup>7)</sup>で各深度の試料に対して行われた一軸圧縮試験結果から、図 2.5 のように深度分布の近似直線を仮定し、深度 140m の値を推定した。

##### 2) 固有透過度と間隙率の関係

間隙率と透水係数は声問層・稚内層によらず良い一義的な相関関係にあることが知られており、室内透水試験によって図 2.6 の結果が得られている<sup>5)</sup>。図 2.6 の室内試験結果によると、2.4.1 で設定した間隙比から深度 140m の間隙率を算定すると  $n \approx 60.2\%$  となり、初期透水係数は  $10^{-10} \text{m/s}$  オーダーとなる。一方、原位置で実施した水理試験結果<sup>5)</sup>からは、図 2.7 のように各地層において透水係数の深度依存性が見られており、深度 140m での声問層の透水係数は  $10^{-9} \text{m/s}$  オーダー程度となり、上記の室内試験結果と比べると原位置透水

係数は1オーダー以上に大きいことが推測される。このことから、図 2.6、図 2.7 の深度 140m における透水係数の推定値の比（原位置透水係数／室内透水係数）として、38.02 を用いて室内試験から得られた透水係数と間隙率関係を原位置結果として補正し、解析では図 2.8 に示すように、間隙率と固有透過度の関係として式(2.1)を仮定した。

$$K = 1.30 \times 10^{-20} n^3 - 2.0 \times 10^{-15} \quad (2.1)$$

ここで、 $K$  : 固有透過度 ( $\text{m}^2$ )

$n$  : 間隙率 (%)

## 2.5 解析結果

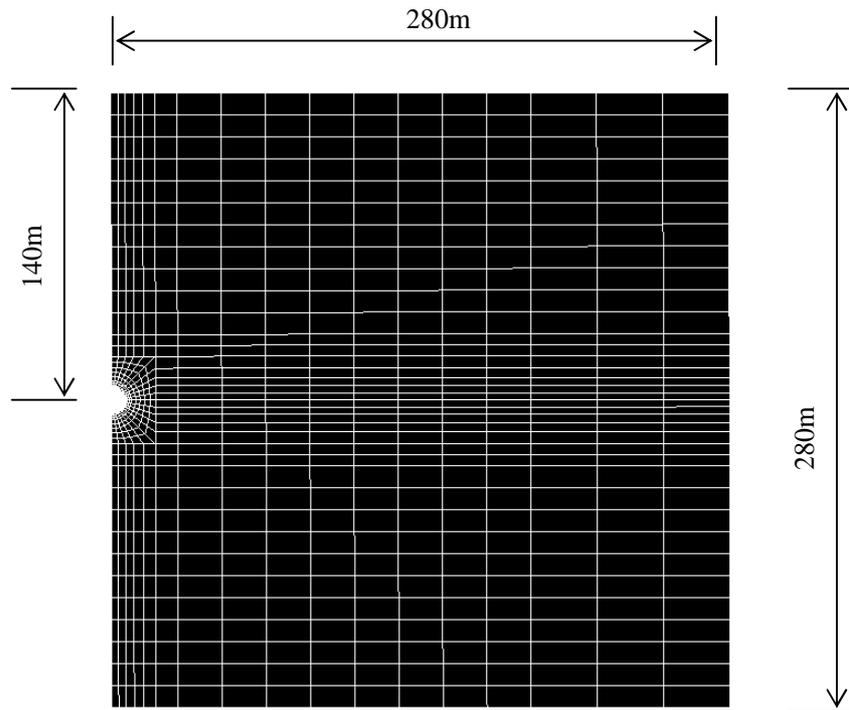
解析結果として最大主応力、最小主応力図を図 2.9、図 2.10 に示すが、坑道壁面の上部と下部で顕著な引張応力が生じ、坑道側面方向は圧縮応力が生じている傾向にあり、図 2.11 に示す間隙率の変化として表れている。間隙率としては坑道の掘削によって初期間隙率  $n \doteq 60.2\%$  に対して  $\pm 2.5\%$  程度の変化が生じている。式(2.1)により換算した固有透過度のコンター図を図 2.12 に示す。換算された固有透過度は  $6.46 \times 10^{-16} \sim 1.02 \times 10^{-15} \text{m}^2$  の範囲にあり、掘削に伴う間隙の変化によって初期固有透過度に対して  $\pm 23\%$  程度の変化が生じることになる。この固有透過度の分布を第 3 章で示す岩盤透水性の初期条件とした。

表 2.1 人工バリア定置に至るまでのニアフィールドの主な変化

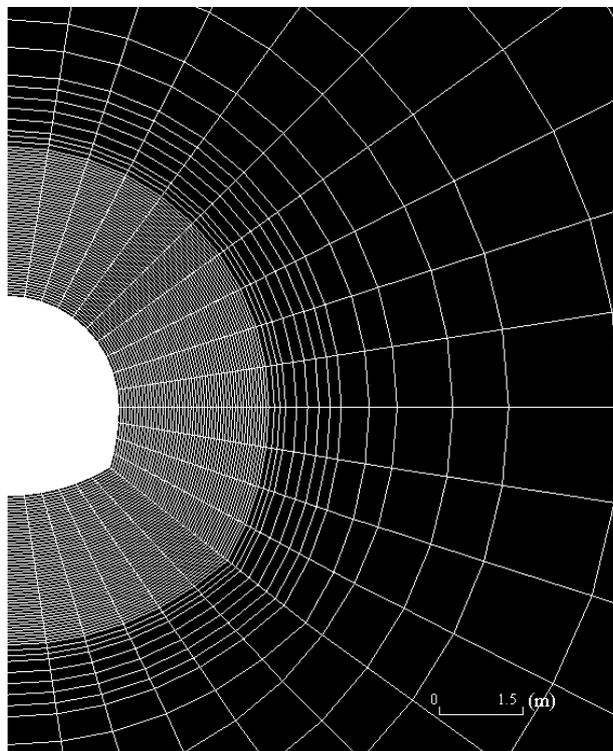
対象	①初期状態	②坑道掘削-1	③坑道掘削-2	④人工バリア定置後
概念図				
概要		掘削損傷領域の発生	不飽和領域の発生と地下水水質の変化	廃棄体からの発熱の影響

表 2.2 主要なパラメーター一覧

入力項目	記号	単位	値
間隙率	$e$	-	0.60175
真密度	$\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>	2193.0
ヤング率	$E$	Pa	$3.4736 \times 10^8$
ポアソン比	$\nu$	-	$1.3654 \times 10^{-1}$



(a) 全体領域



(b) 坑道周辺

図 2.1 解析領域

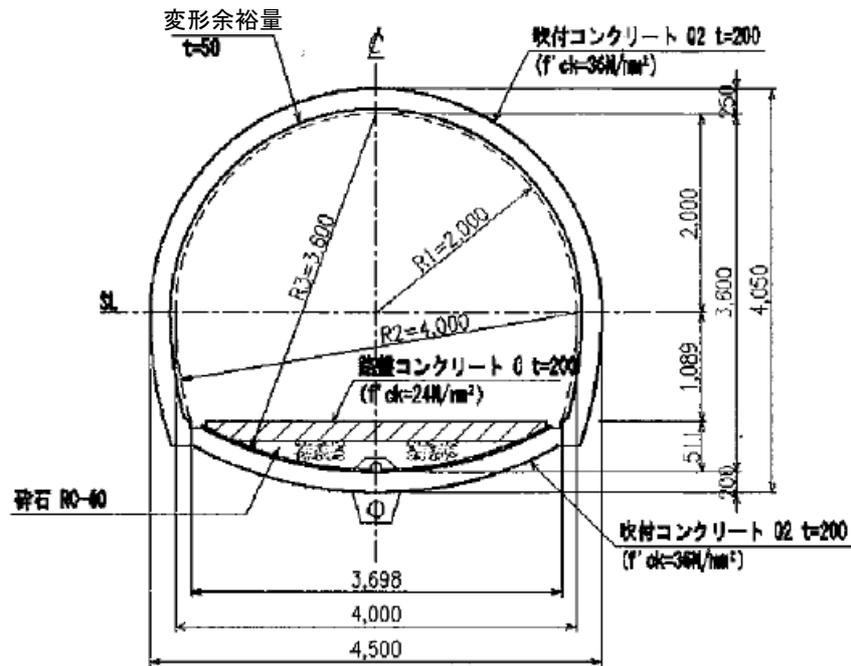


図 2.2 深度 140m 水平坑道断面（一般部）<sup>6)</sup>

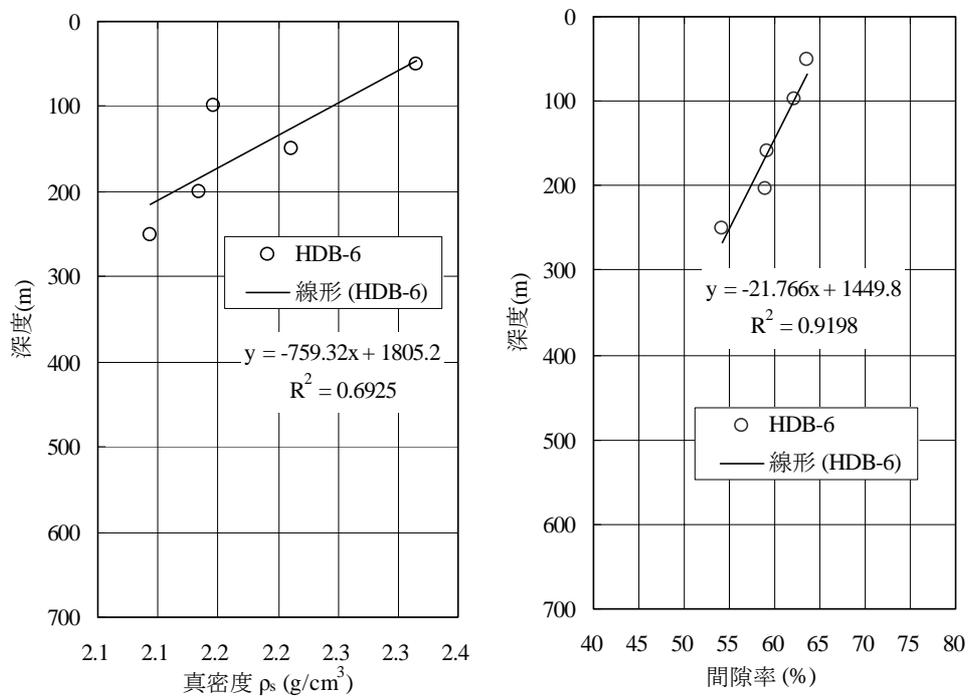


図 2.3 真密度と間隙率

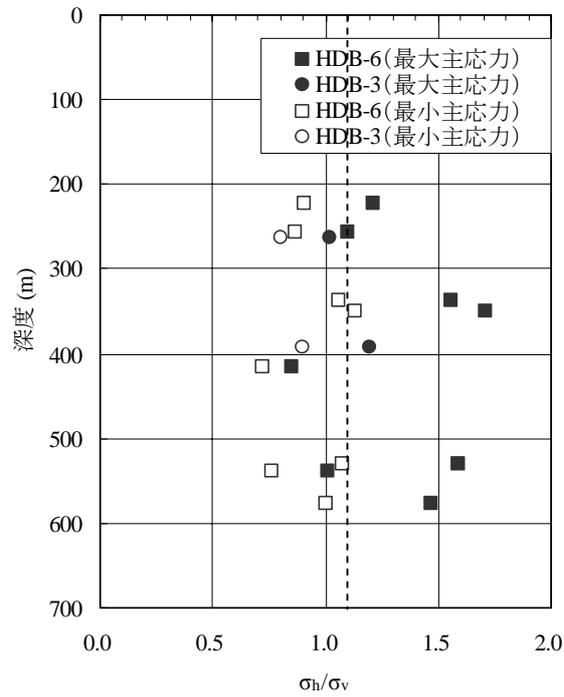


図 2.4 初期応力分布

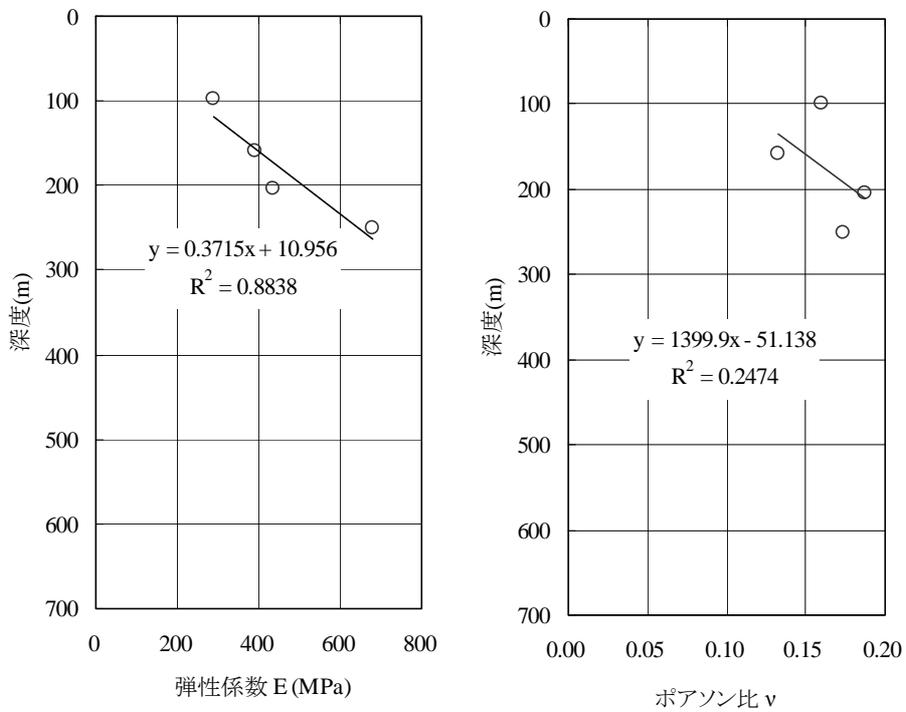


図 2.5 弾性係数とポアソン比

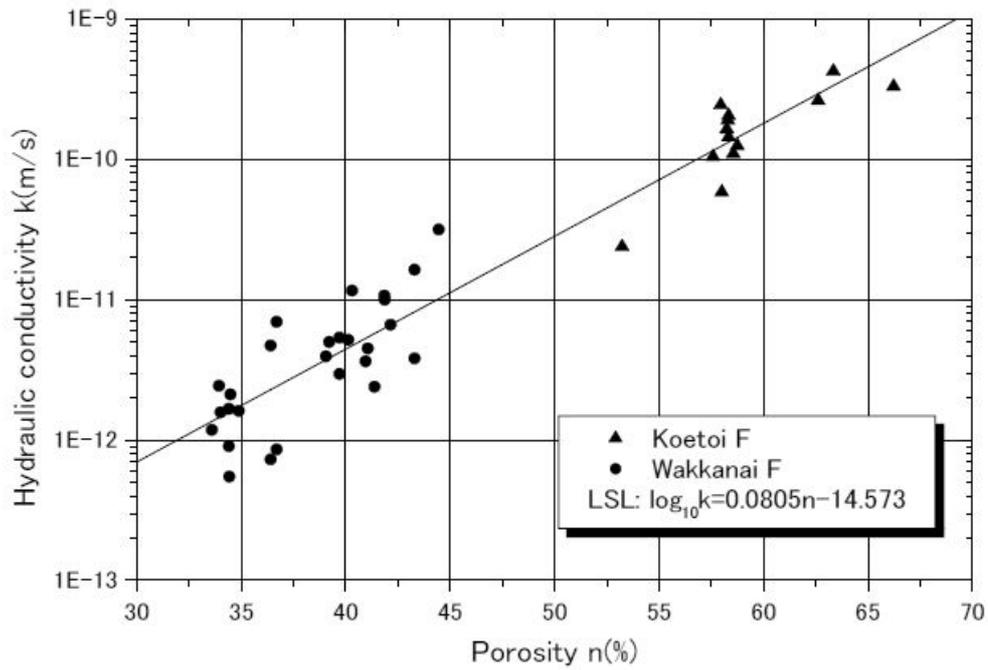


図 2.6 透水係数—間隙率関係 (室内)<sup>5)</sup>

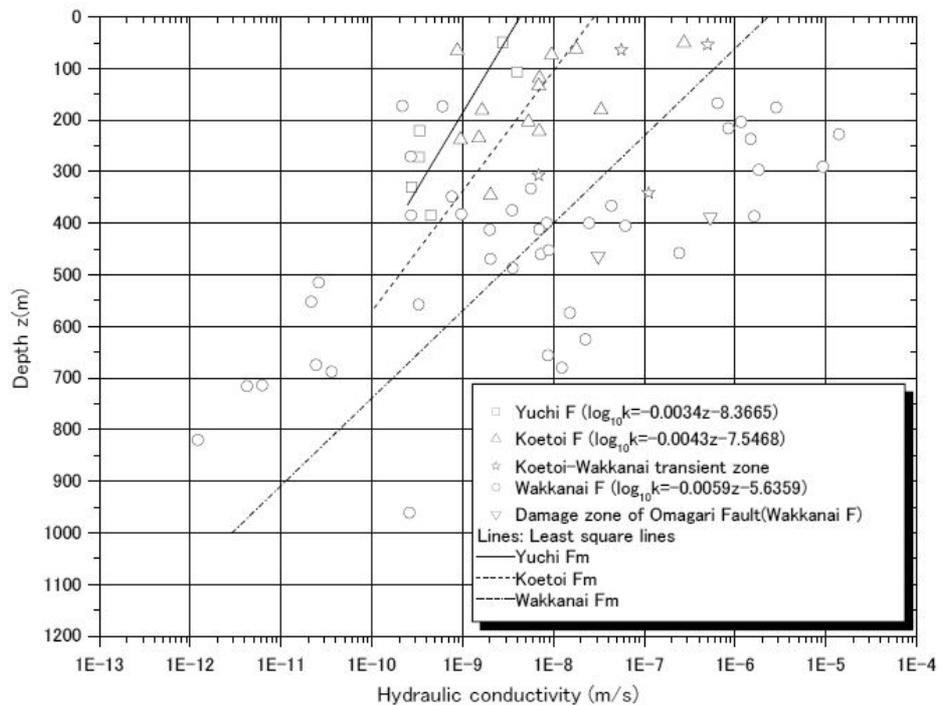


図 2.7 透水係数の深度依存性 (原位置)<sup>5)</sup>

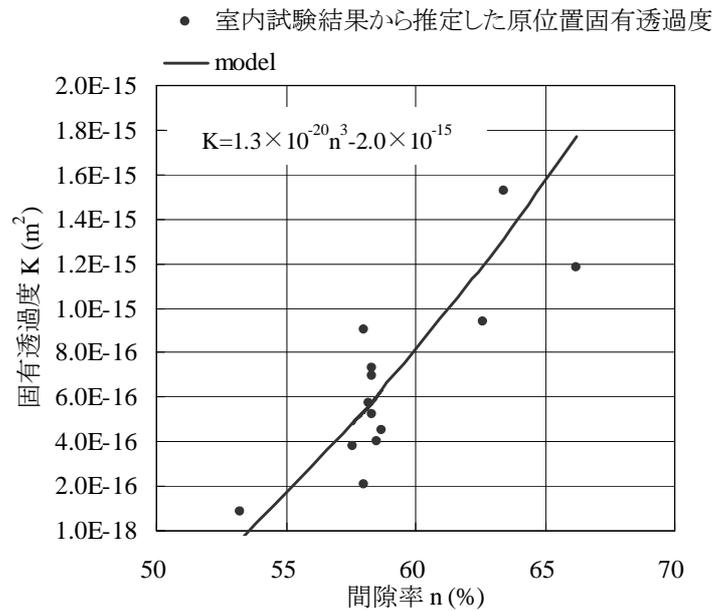


図 2.8 固有透過度－間隙率関係（解析）

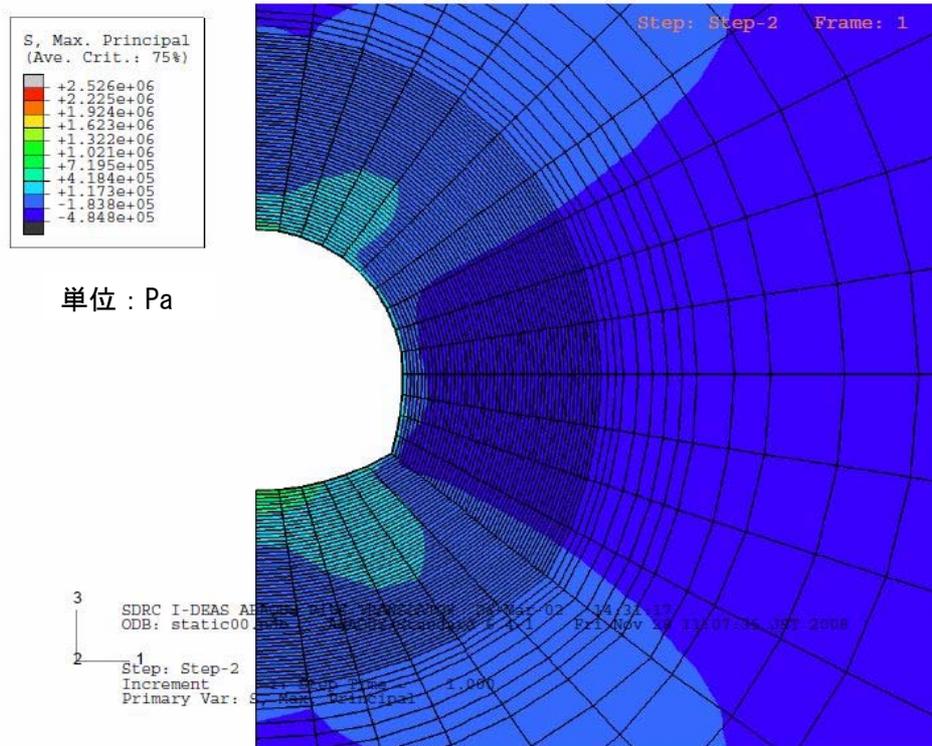
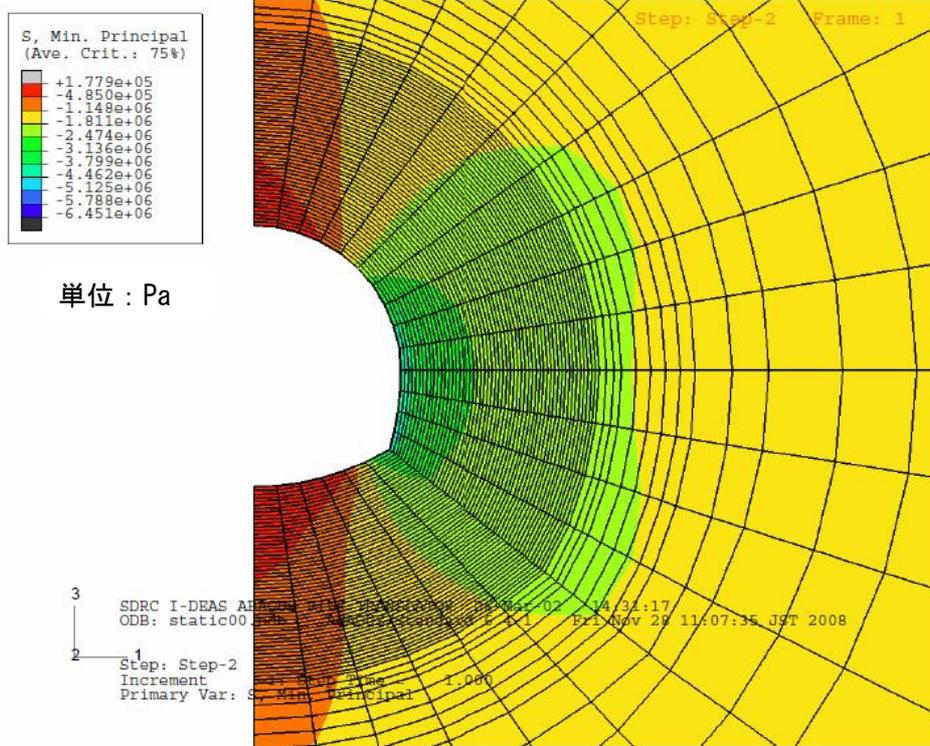
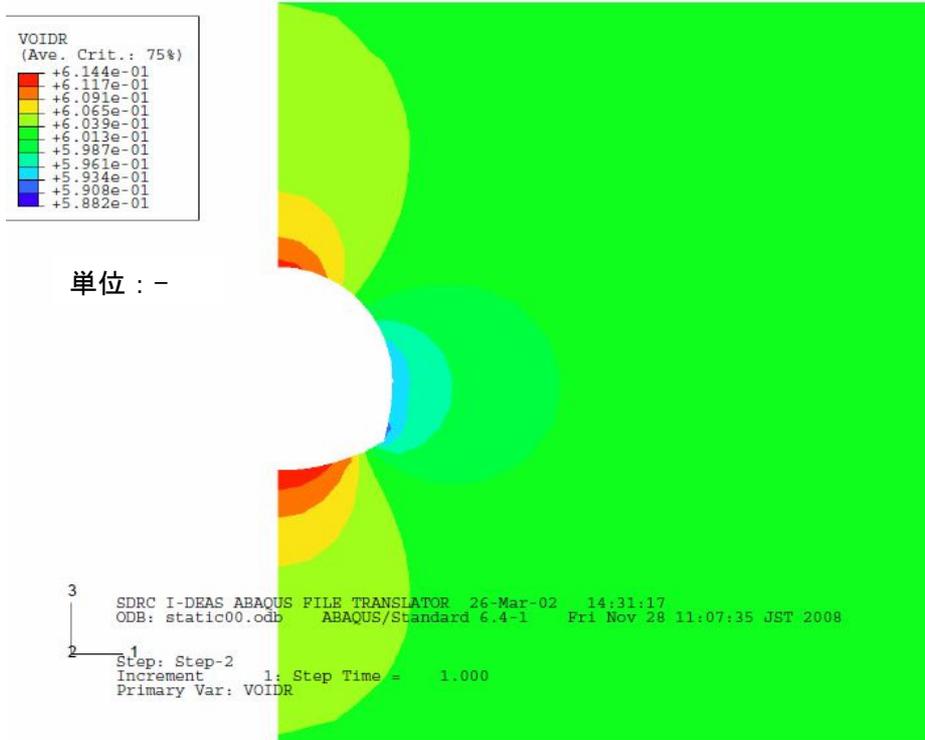


図 2.9 最大主応力図（引張(+)）



単位 : Pa

図 2.10 最小主応力図 (引張(+))



単位 : -

図 2.11 間隙率分布

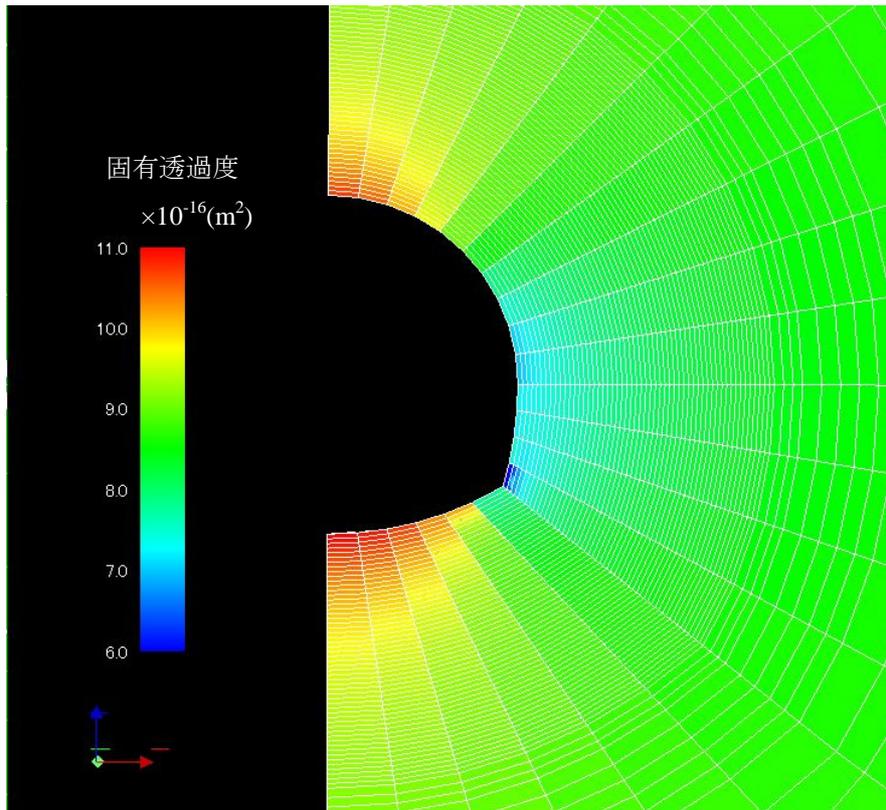


图 2.12 固有透過度分布

### 3. 坑道周辺岩盤の地下水水質変化に関する解析評価

#### 3.1 目的

掘削に伴い坑道周辺岩盤では、発破損傷や応力再配分などの影響により、亀裂の発生や進展、応力状態の変化、間隙水圧の変化などが生じ、不飽和領域が形成される可能性もある<sup>9)</sup>。岩盤中に不飽和領域が生じると、岩盤内に空気が侵入することにより地下水の酸化還元電位が変化し、地下水中の溶存ガスの脱気ガスなどに伴い地下水の地球化学的性質が変化することが予想される。

本章では、幌延深地層研究計画の中で予定されている深度 140m の水平坑道の掘削影響評価試験<sup>3)</sup>を対象とした予察解析として、坑道周辺での不飽和領域の発生に伴う地下水水質の変化について、地球化学反応を考慮した水理-物質移行連成解析結果について述べる。なお、坑道掘削後は、支保として、鋼製支保、ロックボルト、吹付けコンクリートが施工される予定となっている<sup>6)</sup>。長期的には、コンクリートの高アルカリ性間隙水の影響によりシリカ鉱物が溶解するなど地下水水質に影響を及ぼすと考えられるが<sup>10)</sup>、ここでは、数年程度の掘削影響評価試験の予察解析として、不飽和化の発生とそれに伴う酸化還元電位の変化、脱ガスによる地下水 pH の変化に着目するため支保を考慮していない。

#### 3.2 解析の概要

不飽和領域の発生にともなう地下水水質の変化を評価するため、ここでは、地層処分システムで想定されるニアフィールドの連成現象を評価するために開発した熱-水-応力-化学連成解析モデル/解析コードを用いて<sup>1)</sup>、地球化学反応を考慮した水理-物質移行連成解析を実施した。これまでに開発した連成解析モデルの計算フローの概要を図 3.1 に示す。ここでは、坑道掘削後の岩盤の透水特性については、前章で求めた岩盤の固有透過度に基づき設定した。

#### 3.3 解析条件

##### 3.3.1 水理学的条件の設定

声問層のサクシオンや不飽和透水係数などの不飽和水理特性の測定値がないことから、ここでは、不飽和水理特性を表す関数モデルとして、飽和-不飽和浸透流解析の際に一般的に用いられている次式の van Genuchten モデル<sup>11)</sup>によって設定した。ここで、 $\psi$  : サクシオン (cmH<sub>2</sub>O)、 $S_e$  : 有効飽和度 (-)、 $\theta_r$  : 最小体積含水率 (-)、 $\theta_s$  : 飽和体積含水率 (-)、 $K_r$  : 比透水係数 (-)、 $K_s$  : 飽和透水係数 (m/s)、 $\alpha$  と  $m$  はパラメータである。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ 1 + |\alpha\psi|^n \right]^{1-\frac{1}{m}} \quad m = 1 - 1/n \quad (3.1)$$

$$K_r = \frac{K}{K_s} = \sqrt{S_e} \left[ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (3.2)$$

van Genuchten モデルのパラメータである  $\alpha$ 、 $m$  については、泥岩を対象とした既往の研究結果<sup>12)</sup>を代用することとし、 $\alpha = 0.001$ 、 $m = 0.4$  とした。これより、不飽和水理特性は図 3.2 のようになる。

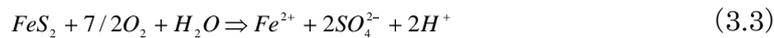
### 3.3.2 地球化学条件の設定

#### (1) 鉱物

幌延深地層研究計画（第一段階）において採取されたボーリングコアの鉱物組成調査により、対象深度の声問層中には、珪藻類、石英類および黄鉄鉱が確認されている<sup>13)</sup>。ここでは、地球化学解析コード PHREEQC<sup>14)</sup> を用いた化学平衡計算により、地下水組成を支配していると考えられる岩盤中の鉱物として、石英 ( $\text{SiO}_2$ , quartz) および黄鉄鉱 ( $\text{FeS}_2$ , pyrite) を本解析で考慮する鉱物として設定した。なお、熱力学データには、熱力学データベース 011213c2.tdb<sup>15)</sup> (<http://migrationdb.jaea.go.jp/>) を使用した。

また、岩盤中の鉱物の濃度については、HDB-6 孔の深度 162.2m~162.32m のボーリングコアを対象とした X 線回折法による半定量分析結果<sup>13)</sup> に基づいて設定した (表 3.1)。ここでは、対象とする声問層の乾燥密度を表 2.2 より  $900\text{kg/m}^3$  として算出した。

石英については、水-鉱物反応を平衡モデルで、黄鉄鉱については、次式に示すように、酸素を消費する挙動を溶解速度モデルで考慮した。



黄鉄鉱の溶解速度  $r$  ( $\text{mol/m}^2\text{s}$ ) は、文献より次式を使用した<sup>16)</sup>。文献では、黄鉄鉱の比表面積は  $0.047\text{m}^2/\text{g}$  が与えられており、本解析における固相中の濃度は、 $45\text{mol/m}^3$ 、分子量  $120\text{g/mol}$ 、空隙率  $0.602$  に設定していることから、黄鉄鉱の単位体積あたりの表面積を約  $0.42\text{m}^2/\text{l}$  と設定した。ここで、 $m_{\text{DO}}$  : 溶存酸素濃度 ( $\text{mol/l}$ )、 $m_{\text{H}^+}$  : 溶液中の水素イオン濃度 ( $\text{mol/l}$ ) である。

$$r = 10^{-8.19} \frac{m_{\text{DO}}^{0.5}}{m_{\text{H}^+}^{0.11}} \quad (3.4)$$

また、二次鉱物として、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$  アモルファスを考慮した。

## (2) 地下水水質

対象とする深度 140m の声問層の地下水水質組成は、深層ボーリング調査における HDB-6 孔の採水データ<sup>5)</sup> から設定した。なお、Eh については測定値がないため、解析によって求めることとした。前述のように、対象とする声問層中には、酸化還元状態に影響を与えると考えられる黄鉄鉱が含まれていることや、地下水中の S 濃度が高いことから、地下水に対して黄鉄鉱の飽和 (SI=0) を仮定し、化学平衡計算により Eh を決定した。

以上より求めた地下水組成を表 3.2 に示す。

## (3) 物質移行パラメータの設定

物質移行パラメータのうちの分散長については、岩盤中の水分が飽和から不飽和へと変遷する移流支配であることから、分散の効果は無視することとした。また、岩盤の間隙水中の分子の拡散係数については、「第 2 次取りまとめ」の安全評価で設定した各元素の平均的な値として  $7.50 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  とした<sup>17)</sup>。減衰係数および遅延係数については、地球化学解析と連成させることから考慮しないものとした。

本解析モデルにおける気相中のガスの移行については、濃度勾配を駆動力とする拡散のみの取扱いとなっている。本解析で考慮する気相中のガスは、酸素および二酸化炭素とし、間隙気相中のガスの拡散係数は、文献値よりそれぞれ、 $1.80 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $1.35 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  とした<sup>18)</sup>。

### 3.3.3 境界条件

坑道内は、地下水中に高い濃度で溶存している炭酸の脱ガスに対応するため、十分な換気が行われていることから、坑道内の相対湿度は低く保たれていると考えられる。坑道内の相対湿度は、幌延深地層研究所の建設の際に計測されることが考えられるため、ここでは、坑道内の相対湿度を 50% と仮定し、坑道壁面はこの相対湿度と平衡であると仮定した。相対湿度と水の化学ポテンシャル (J/kg) との間には以下の関係がある<sup>19)</sup>。

$$\varphi = \frac{RT}{M} \ln\left(\frac{P_v}{P_s}\right) \quad (3.5)$$

ここで、 $P_v$  は水蒸気圧 (Pa)、 $P_s$  は飽和水蒸気圧 (Pa)、 $M$  は水の分子量 (kg/mol)、 $R$  は一般気体定数 (J/mol K)、 $T$  は絶対温度 (K) である。これより、坑道壁面は、-9240m  $\text{H}_2\text{O}$  のサクションで拘束した。

また、坑道内は大気とし、大気分圧の酸素と二酸化炭素を考慮した。

地下水面は地表面とした。

解析の境界条件を図 3.3 に示す。

### 3.4 解析結果

水分飽和度に関する解析結果を図 3.4 に示す。グラフ横軸は、坑道壁面からの距離であり、出力結果は図 3.3 で示した深度 140m のライン上である。これより、坑道周辺に不飽和領域が生じ、1000 日後、水分飽和度が 95% 以下の不飽和領域は坑道壁面より内部に 5 m 程度の範囲で生じる結果となっている。なお、計算上の不飽和領域(水分飽和度 99.99%) は、坑道壁面から内部に約 50m の範囲となっている。

図 3.5 は、不飽和領域気相中の二酸化炭素濃度の解析結果である。不飽和領域が生じることにより、地下水中に高い濃度で溶存していた炭酸が脱ガスして不飽和領域気相中の二酸化炭素濃度が上昇し、500 日程度までは高い二酸化炭素濃度を示している。しかしながら、水分飽和度の変化がなくなる 500 日以降は、新たな二酸化炭素の脱ガスが生じなくなるため、不飽和領域気相中の濃度が低下し 1000 日後には大気中の二酸化炭素濃度と同じ値となる。炭酸の脱ガスが生じる範囲は、上記のように計算上の水分飽和度が 99.99% となる範囲と同じになる。

図 3.6 は、地下水の pH の解析結果である。坑道周辺での地下水の pH は、初期の 8.2 から一時的に僅かに上昇するが、1000 日後には初期の値に戻る結果となっている。これは、次式に示すように、地下水中に溶存していた炭酸の脱ガスの影響によるものと考えられ、pH の時間的な変化は、炭酸の脱ガスの挙動に呼応したものとなっている。

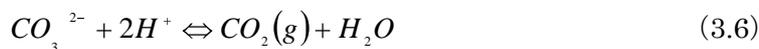


図 3.7 は、不飽和領域気相中の酸素濃度の解析結果である。岩盤中で考慮した黄鉄鉱が酸素を消費するため、気相中の酸素濃度が上昇する範囲は、坑道壁面より 20cm 程度となっている。そして、図 3.8 に示すように、酸化還元電位の指標である pe については、坑道壁面から 20cm 程度の範囲で上昇が見られたが、その他の部分については、初期の還元状態が保たれる結果となっている。

なお、図 3.9 に示すように、岩盤中で考慮した黄鉄鉱は溶解して濃度が低下し、二次鉱物として設定した  $Fe(OH)_3$  アモルファスが坑道壁面近傍で沈殿し、1000 日後には約  $37mol/m^3$  の沈殿が生じる結果となっている (図 3.10)。

最後に、水分飽和度、不飽和気相中の二酸化炭素濃度のコンター図を整理して表 3.3 に示す。

表 3.1 解析で考慮する岩盤中の鉱物

鉱物	含有率(wt%)	分子量(g/mol)	濃度(mol/m <sup>3</sup> )
石英 (SiO <sub>2</sub> , quartz)	10.1	60.1	1512.5
黄鉄鉱 (FeS <sub>2</sub> , pyrite)	0.6	120.0	45.0

表 3.2 地下水組成

組成	濃度(mol/l)
C	2.581 × 10 <sup>-1</sup>
Ca	2.645 × 10 <sup>-3</sup>
Cl	7.052 × 10 <sup>-2</sup>
Fe	2.101 × 10 <sup>-9</sup>
K	3.069 × 10 <sup>-3</sup>
Mg	2.715 × 10 <sup>-3</sup>
Na	1.087 × 10 <sup>-1</sup>
S	2.495 × 10 <sup>-2</sup>
Si	1.592 × 10 <sup>-4</sup>
pH	8.2
Eh (pe)	-24.9mV (-4.2)

\*pe = 16.9Eh (25°C)

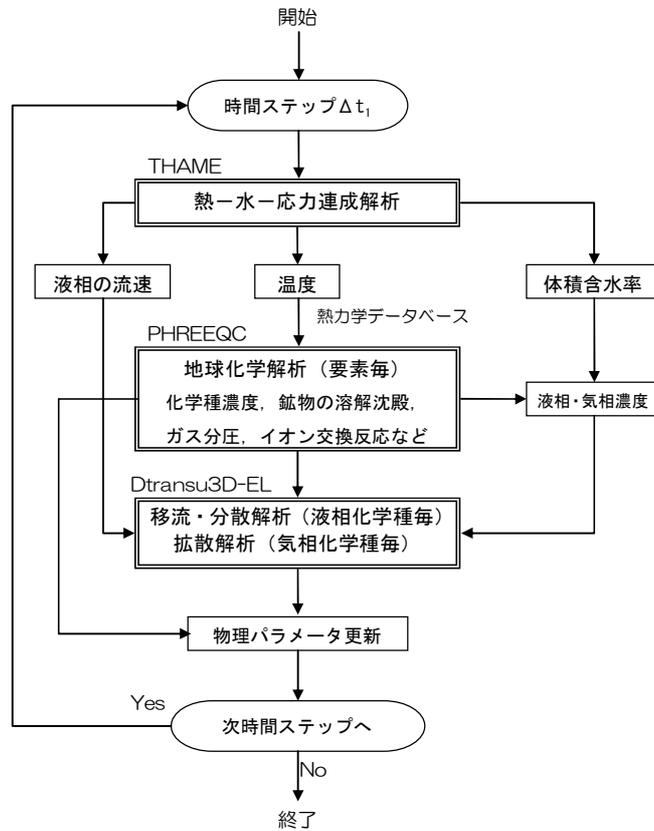
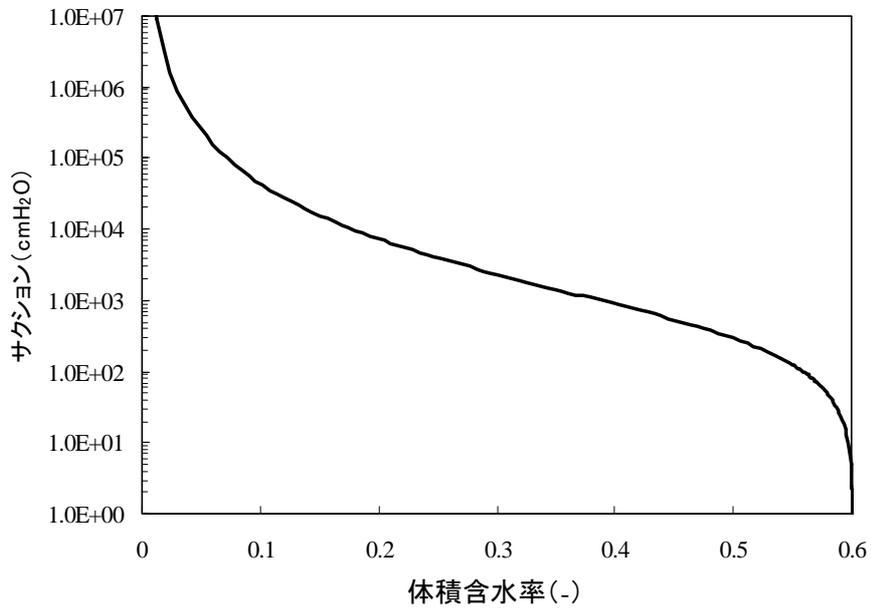
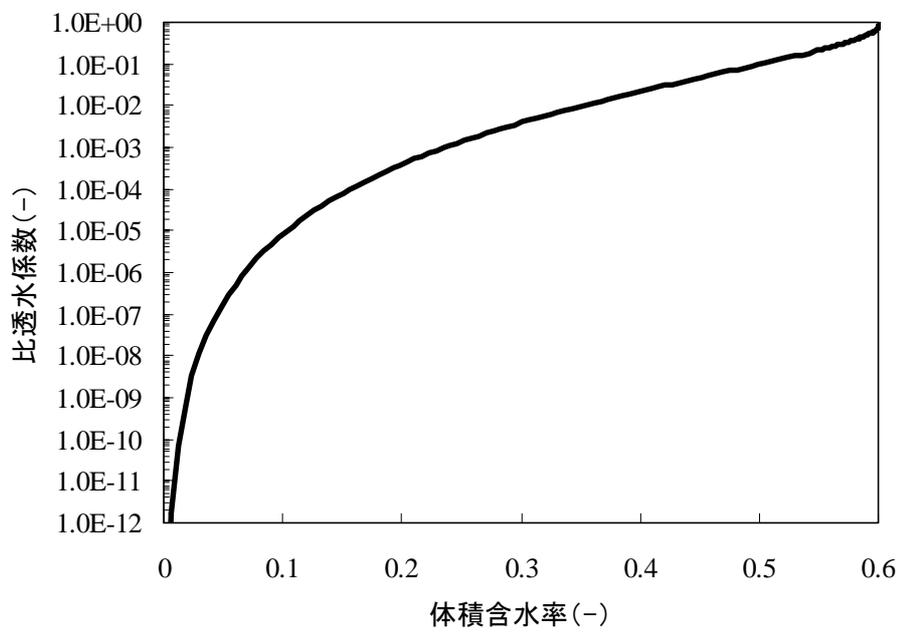


図 3.1 熱-水-応力-化学連成解析モデルの計算フローの概要



(b) 水分保持曲線



(c) 比透水係数

図 3.2 不飽和水分特性

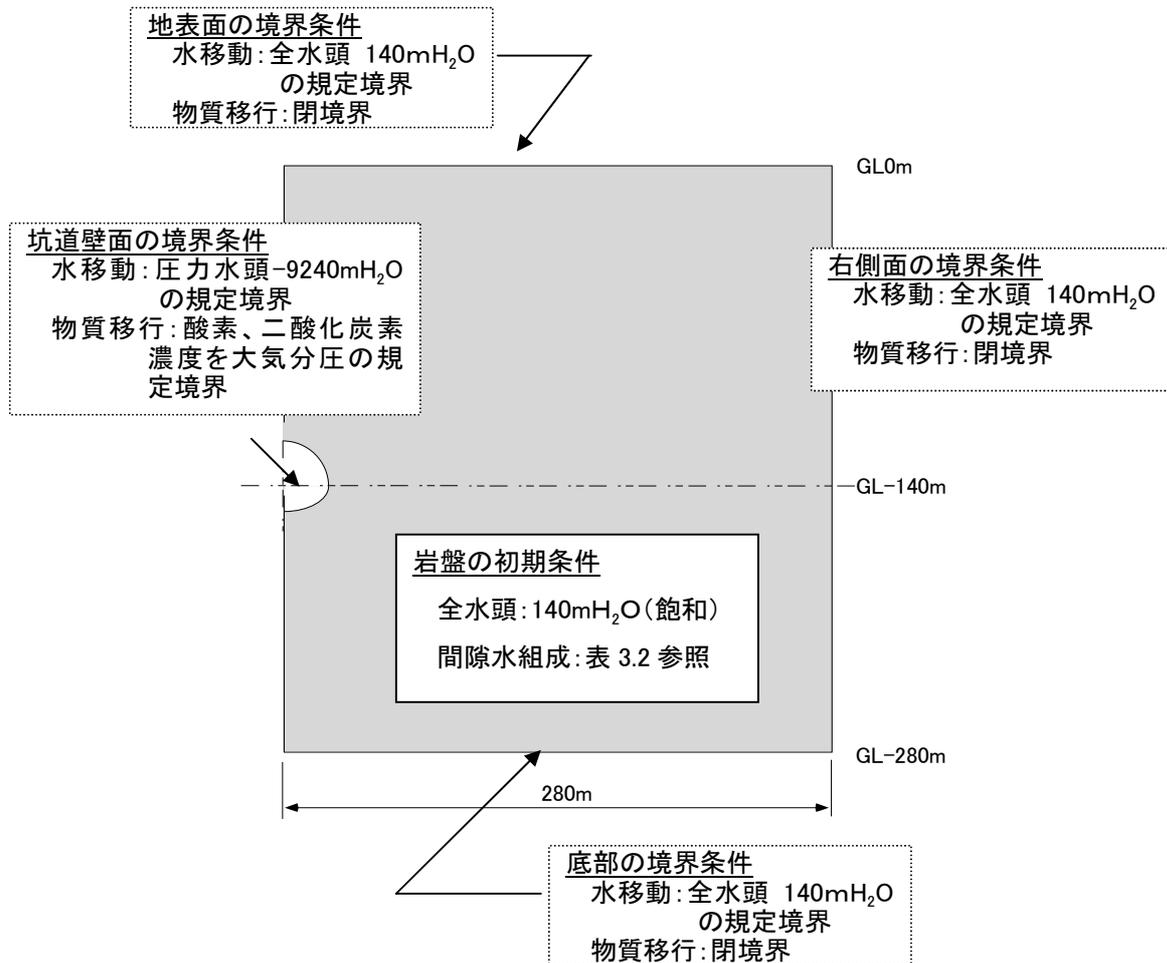


図 3.3 解析境界条件

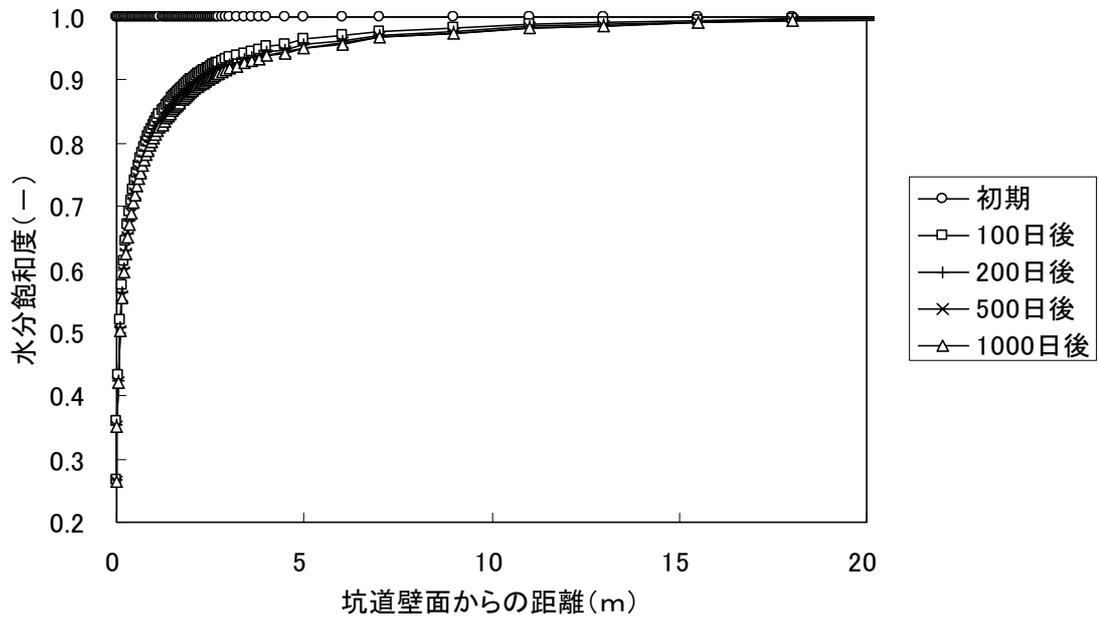


図 3.4 水分飽和度の解析結果

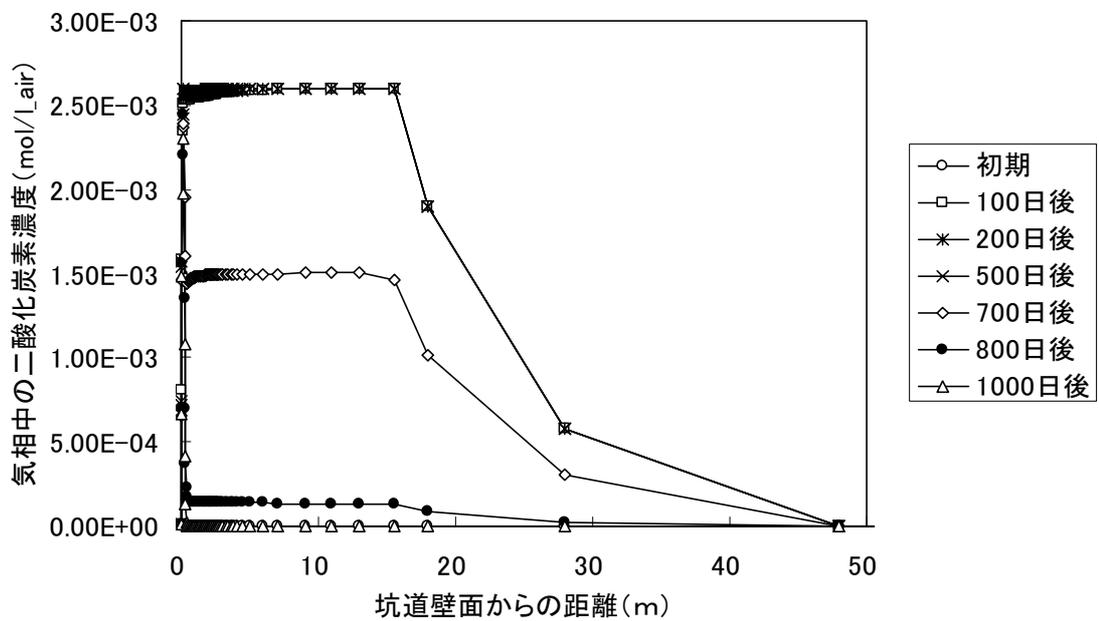


図 3.5 不飽和領域気相中の二酸化炭素濃度の解析結果

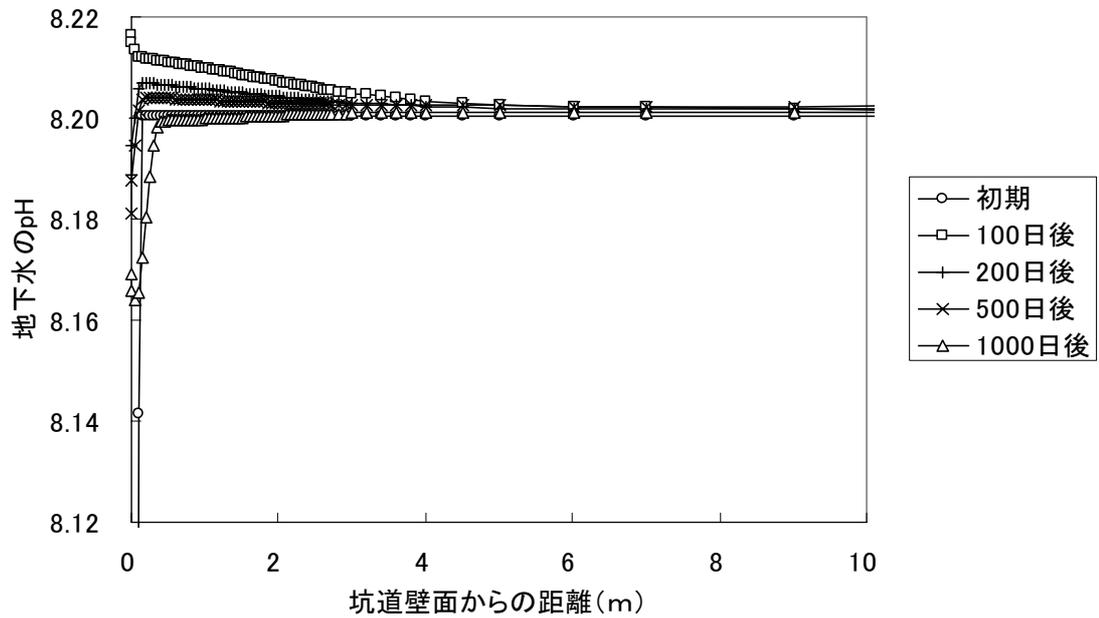


図 3.6 地下水の pH の解析結果

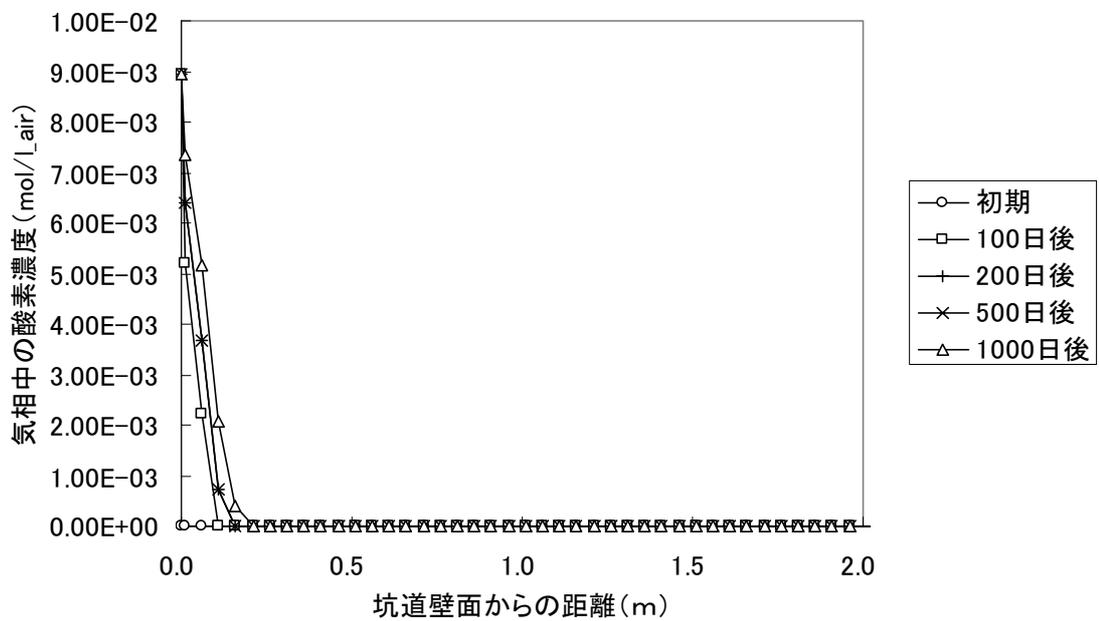


図 3.7 不飽和領域気相中の酸素濃度の解析結果

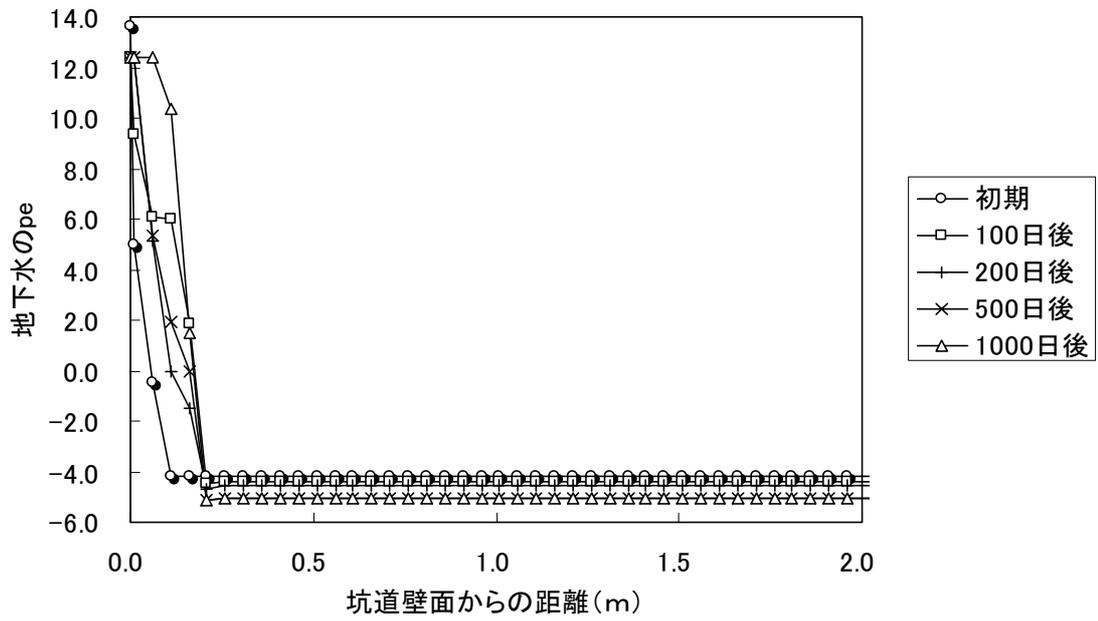


図 3.8 地下水の pe の解析結果

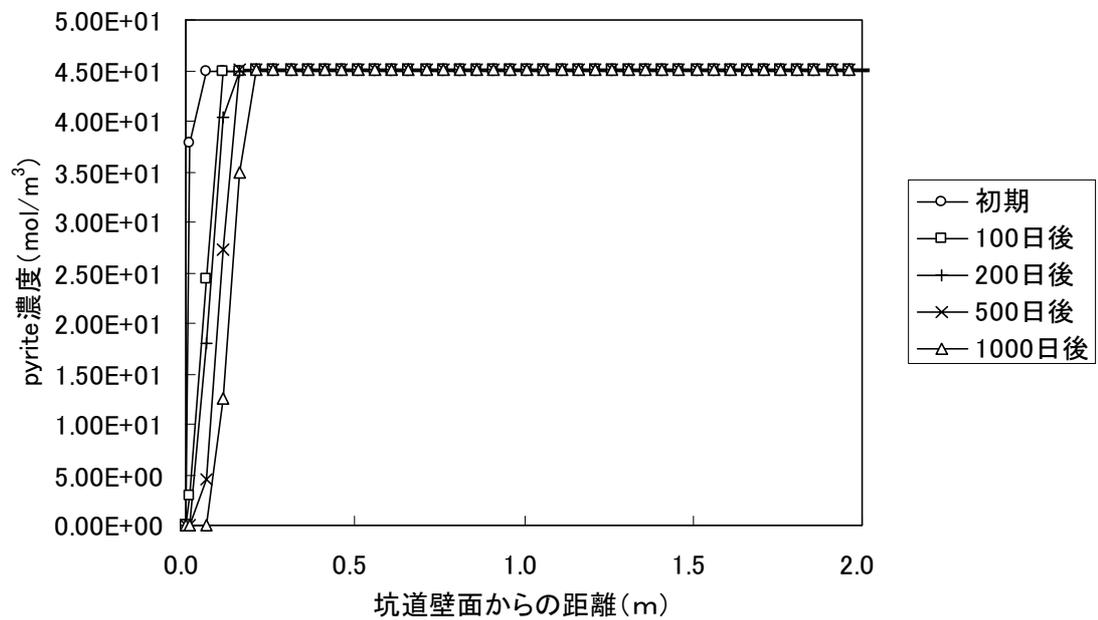


図 3.9 黄鉄鉱濃度の解析結果

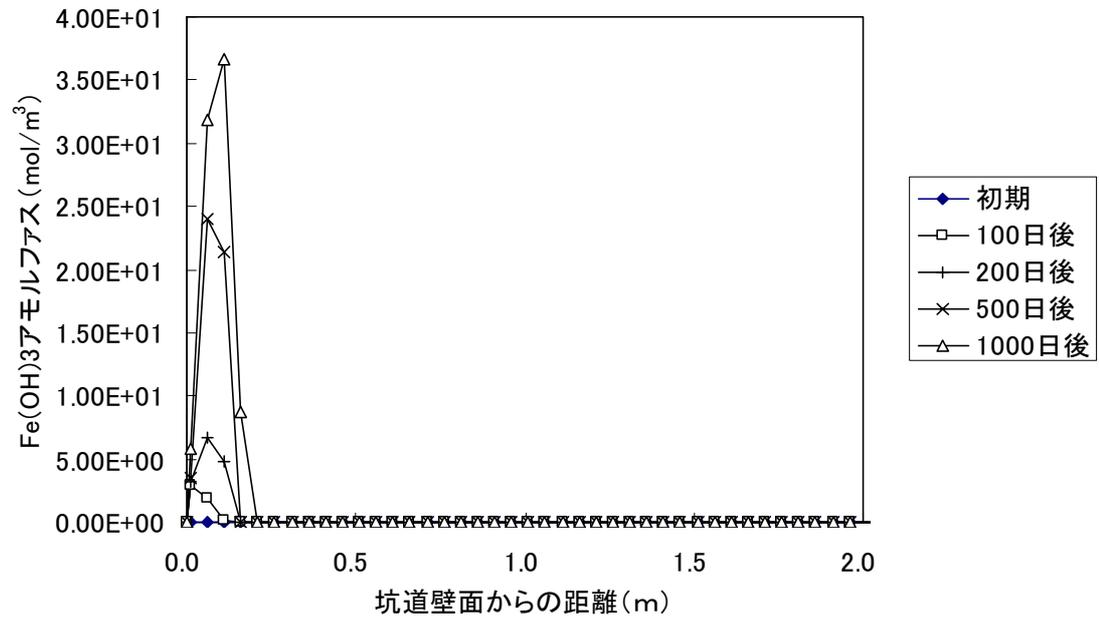
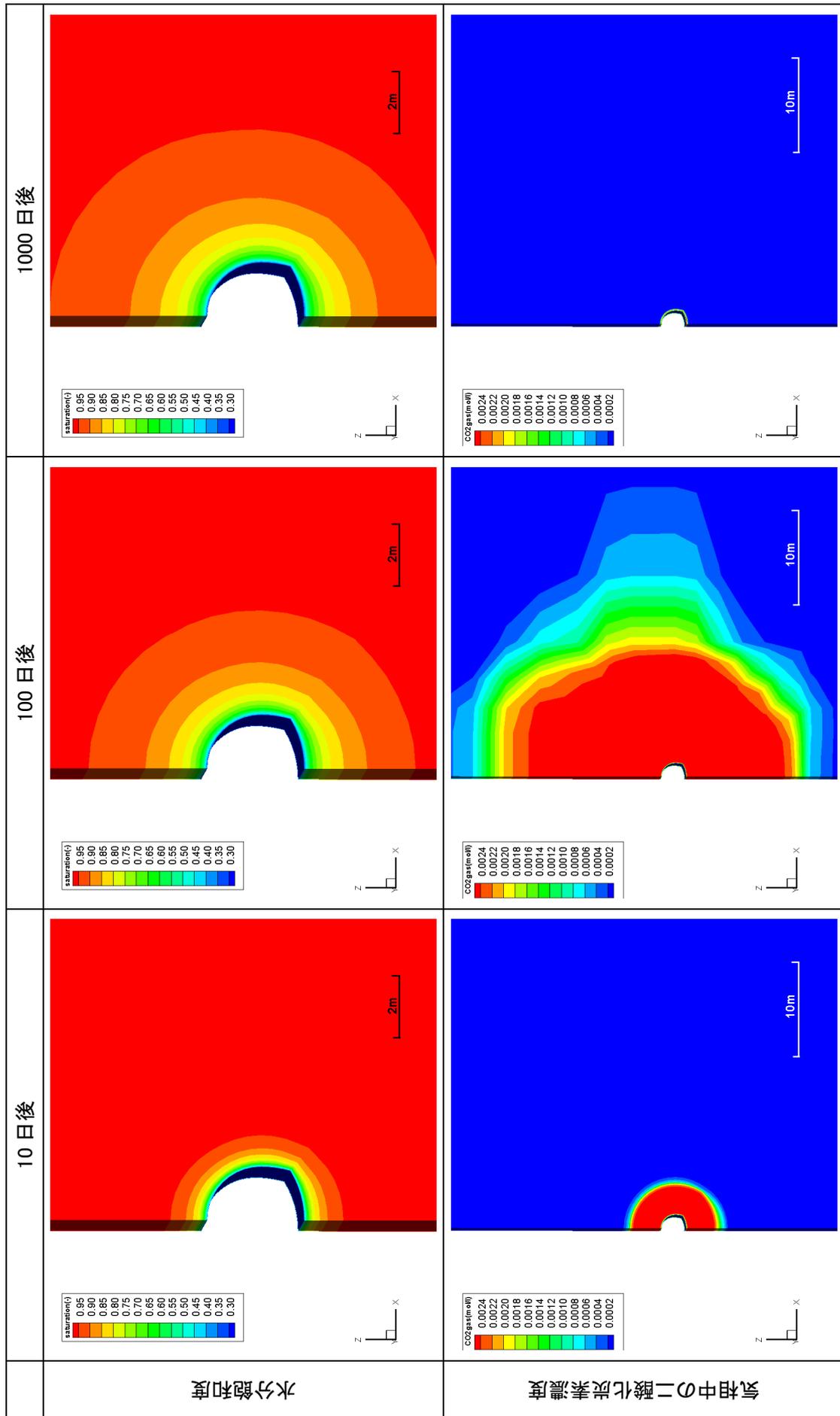


図 3.10 Fe(OH)<sub>3</sub> アモルファス濃度の解析結果

表 3.3 解析コンタナー



#### 4. 考察

不飽和領域の発生にともなう岩盤中への空気の侵入が、地下水の水質変化に及ぼす影響が大きいことが分った。

これまでの感度解析的な検討によって、不飽和領域の形成には、不飽和水理特性や境界条件の影響が大きいことが確認されている<sup>20)</sup>。

今回の解析評価で設定した岩盤の不飽和浸透特性は、既往の研究結果として得られている泥岩（間隙率 0.2～0.365）の水分保持曲線<sup>12)</sup>を参考に設定しているが、対象とする声問層（ここでは、間隙率を 0.602 に設定）とは、空隙率や透水係数が異なることから、不飽和浸透特性が異なり、それによって発生する不飽和領域の範囲も異なる可能性がある。

また、坑道壁面からの水分の蒸発を表現するために、本解析では、坑道内の相対湿度を 50%と仮定し、坑道壁面の水分ポテンシャルがこの相対湿度と熱エネルギー的に平衡であると仮定したが、より現実的な境界条件の設定方法としては、坑道壁面の水分飽和度を測定し、水分保持特性に基づいてそれと等価な水分ポテンシャルを与える方法や、坑道壁面からの水分の蒸発量を計測し<sup>22)</sup>、境界条件として蒸発量をフラックスで与える方法もある。

既報の深度 400mの稚内層を対象とした同様の解析では<sup>21)</sup>、砂岩の水分保持曲線を用い、坑道壁面の相対湿度を 95%と仮定して計算を行っている。1000 日後の飽和度の解析結果を図 4.1 に示すが、今回の解析結果とは、水分飽和度の低下量や、不飽和領域の範囲などが異なる結果となっている。

このように、設定する不飽和水理特性や境界条件によって結果が異なることから、対象となる岩盤の不飽和水理特性および坑道壁面の水分飽和度、あるいは坑道壁面からの蒸発量を測定し、実測値に基づく解析評価を行う必要がある。

また、水理特性の空間的な分布も不飽和領域の形成の影響を与えると考えられる。今回は、弾性解析による応力変化に基づく空隙率の変化から固有透過度を算定しているが、坑道掘削に伴う水理場の変化の評価としては十分ではないと考える。例えば、MBC モデル<sup>23)</sup>など岩盤中の不連続面をモデル化し、掘削によって発生する亀裂の開口やせん断すべりなどを考慮した解析手法により水理特性の空間的な分布を求めることも有効な方法のひとつと考えられる。

不飽和領域の発生に伴い、坑道壁面より岩盤内に大気が岩盤内に浸入する。本解析では、坑道壁面より 5mの範囲で不飽和領域（水分飽和度 95%以下）が生じているが、これに対し、酸化還元電位が上昇する範囲は坑道壁面より 0.2m程度と極めて狭い範囲となっている。既報では、岩盤中で黄鉄鉱が酸化を消費する反応を考慮しない場合には、不飽和領域の範囲に呼応して、地下水中の溶存酸素濃度が上昇、酸化還元電位が低下する結果が得られている<sup>2)</sup>。今回設定した黄鉄鉱が酸素を消費する速度式は、200 $\mu$ m 程度に粉碎した黄鉄鉱の試料と酸素とを積極的に反応させる実験によって取得したものであり、岩盤中で

の酸素の消費速度とは大きく異なる可能性がある。このため、酸化還元電位が坑道壁面近傍のみとなった可能性がある。本解析においては、設定する速度式が地下水の酸化還元電位を支配する要因であることから、岩盤中における黄鉄鉱の酸化速度の精査が必要である。

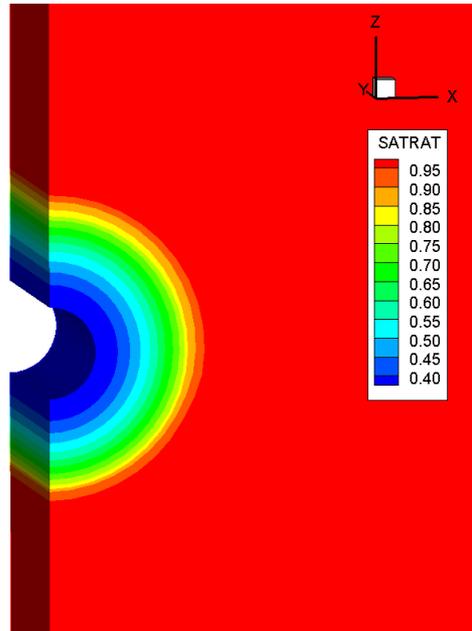


図 4.1 深度 400m の稚内層を対象とした不飽和領域の解析結果 <sup>21)</sup>

## 5. おわりに

幌延深地層研究所で計画されている深度 140mの声問層を対象とした坑道掘削影響評価試験の予察解析として、坑道掘削後の水理場の変化と、それに伴う地球化学的な環境の変化に関する評価を実施した。本解析評価では、坑道掘削時の応力状態の変化に伴う水理特性の変化を考慮するため、事前に汎用数値解析コード ABAQUS を用いた弾性解析を行った。力学的な影響による水理場の変化に対する代表的な指標として固有透過度を選択し、応力場の変化による間隙率の変化が透水空間の変化と等価であると仮定し、坑道掘削後の透水特性を決定した。そして、この透水特性の変化を初期条件として、坑道周辺の不飽和化にともなう地下水水質変化に関する評価を行うために、地球化学反応を考慮した水理-物質移行連成解析を実施した。その結果、飽和度が 95%以下の不飽和領域は、坑道壁面より約 5m程度の範囲で発生し、これに伴って、地下水中に高い濃度で溶解している炭酸が脱ガスし、地下水の pH が変化することを把握することができた。また、本解析評価を通じて、不飽和領域の形成が不飽和水理特性や境界条件に対して感度を持つことが分かった。

今後は、対象となる岩盤の不飽和透水特性や、坑道壁面の水分飽和度などのデータを取得し、実測値に基づく解析評価を行う必要がある。また、吹付けコンクリートなど支保工を考慮した解析を実施し、不飽和領域の形成および地下水水質への影響について把握する必要がある。そして、原位置での計測データとの比較により、評価手法の妥当性を確認していくとともに、適用事例の提示を行う予定である。

参考文献

- 1) 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”、核燃料サイクル開発機構、JNC TN8400 2003-032. (2004)
- 2) 鈴木英明、藤崎淳、藤田朝雄：“坑道周辺における不飽和領域の生起にともなう地球化学反応を考慮した水理 - 物質移行連成解析”、JAEA-Research 2008-003 (2008)
- 3) 中山雅、真田祐幸、山口雄大、杉田裕：“幌延深地層研究計画平成 20 年度調査研究計画”、JAEA-Research 2008-063 (2008)
- 4) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. : “ABAQUS/Standard User’s Manual version 5.6 (1997)
- 5) 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、柴野一則、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)
- 6) 森岡宏之、山崎雅直、松井裕哉、尾留川剛：“幌延深地層研究計画における地下施設の支保設計（実施設計）”、JAEA-Research 2008-009. (2008)
- 7) 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)
- 8) 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 (2007)
- 9) 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 1、わが国の地質環境”、TN1400 99-021 (1999)
- 10) 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)
- 11) M. van Genuchten : “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils”, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 44, pp.892-898 (1980)
- 12) 堤和大、渡辺邦夫、菅伊三男、山脇真二：“岩石の不飽和特性の逆推定法”、応用地質 35 巻 2 号、pp.23-30 (1994)
- 13) 平賀正人、石井英一：“幌延深地層研究計画（第一段階）において採取されたボーリン

- グコアの鉱物組成・全岩化学組成および地表ガスの化学組成”、JAEA-Data/Code 2007-022 (2007)
- 14) D.L. Parkhurst.: “User’s Guide to PHREEQC-A Computer Program for Speciation, Reaction-Path, Advective-Transport, and Inverse Geochemical Calculations” U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4227 (1995)
  - 15) 吉田 泰、柴田雅博：“OECD/NEA で整備された熱力学データベース利用環境の整備 その 2 - Tc, U, Np, Pu, Am および auxiliary の熱力学データの更新 -”、サイクル機構 技術資料、 JNC TN8400 2004-025 (2005)
  - 16) Mark A. Williamson J. Donald Rimstidt : “The kinetics and electrochemical rate-determining step of aqueous pyrite oxidation”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol.58, No.24, pp. 5443-5454. (1994)
  - 17) 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 3、地層処分システムの安全評価、JNC TN1400 99-023 (1999)
  - 18) 中野政詩：“土の物質移動学”、東京大学出版会 (1991)
  - 19) 塩沢 晶：“サイクロメータによる土壌水のポテンシャル測定”土壌の物理性、Vol.62,pp.53-61 (1991)
  - 20) 鈴木英明、伊藤彰、杉田裕、川上進：“水理的ゆるみ域がおよぼす処分坑道周辺の不飽和領域形成に関する感度解析”、JNC TN8400 2002-008 (2002)
  - 21) 鈴木英明、藤田朝雄、藤崎淳：“幌延地質環境を事例とした坑道周辺の不飽和化にともなう地球化学反応を考慮した水理-物質移行連成解析”、日本原子力学会、2008 年秋の大会予稿集、pp.679 (2008)
  - 22) Chandler,N., Cournut,A. Dixon,D., Fairhurst,C., Hansen,F., Gray,M., Hara,K., Ishijima,Y., Kozak,E., Martino,J., Masumoto,K., McCrank,G., Sugita,Y. Thompson,P., Tillerson,J., Vignal,B.: “ The five year report of the Tunnel Sealing Experiment: an international project of AECL, JNC, ANDRA and WIPP”, AECL Report No. AECL-12727 (2002)
  - 23) 瀬野康弘、森孝之、郷家光男、中間茂雄、佐藤稔紀：“掘削損傷領域を考慮した研究坑道周辺岩盤挙動の 3 次元予測解析”、トンネル工学報告集第 17 巻、pp.359-366 (2007)

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比誘電率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) とよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(b)</sup>	1 <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	Vs
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C	K
光強度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(f)</sup>
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg
酸素活性化	カタール	kat	s <sup>-1</sup> mol

- (a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
- (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
- (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
- (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
- (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
- (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
- (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CF-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘り	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m <sup>1</sup> s <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m <sup>1</sup> s <sup>-2</sup> s <sup>-2</sup>
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>-3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼンタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクタ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	zepto	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	yocto	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バール	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
ステルブ	sb	1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フォト	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe <sub>g</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 $\hat{=}$ 」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	fm	1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.185 J (「15°C」カロリー), 4.1868 J (「IT」カロリー) 4.184 J (「熱化学」カロリー)

