

# 幌延深地層研究計画における立坑掘削時の地下水からの脱ガスの予察解析

山本 肇<sup>1\*</sup>・下茂 道人<sup>1</sup>・國丸 貴紀<sup>2</sup>・操上 広志<sup>2</sup>

<sup>1</sup>大成建設株式会社 技術センター（〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1）

<sup>2</sup>日本原子力研究開発機構（〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432-2）

\*E-mail: hajime.yamamoto@sakura.taisei.co.jp

わが国的新第三系～第四系地層中には、地下水中にメタンを主体とする天然ガスが溶存していることが多い。そのような地質環境下において立坑などの地下空洞を掘削すると、周辺地下水圧の低下により脱ガスが生じることがある。このような地下構造物の建設時に発生するガス湧出の数値解析による評価例は少ない。筆者らは、幌延深地層研究計画における地下研究施設を対象として、二成分ガス（メタン、二酸化炭素）の溶解と脱ガスを考慮した気液二相流体解析コードを適用し、立坑掘削時のガス・地下水の湧出量や不飽和領域の広がりをシミュレートした。その結果、1)脱ガスによる湧水量への影響は比較的小さいこと、2)脱ガスが生じると周辺地下水圧の低下速度が遅くなること、などが分かった。

**Key Words :** natural gas, shaft excavation, multiphase flow simulation, sedimentary rock, Horonobe

## 1. はじめに

わが国的新第三系～第四系地層中には、地下水中にメタンを主体とする天然ガスが溶存していることが多い。そのような地質環境下で地下空洞を掘削すると、周辺地下水圧の低下によって脱ガスが生じることが多い。このようなガス湧出については、これまでも安全管理や設計の目的で簡易式を用いた評価がなされているが<sup>1)</sup>、数値解析を適用して評価した例は少ない。

日本原子力研究開発機構は、北海道幌延町において、堆積岩を対象にした地層科学研究・地層処分研究開発を目的とした幌延深地層研究計画を実施中である<sup>2)</sup>。本計画で建設中の地下研究施設は3本の鉛直立坑（東立坑、西立坑、換気立坑）と水平な試験坑道から構成される予定である。本計画の研究段階は、地上からの調査研究段階（第1段階）、坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）、および地下施設での調査研究段階（第3段階）に分けられる。

第1段階では、地表からのボーリング調査により、地下水中にメタンを主体とする天然ガスの存在を確認した。原位置の圧力条件の下では、メタンガスの大部分は地下水中に溶存していると想定される。しかし、第2段階で行う地下研究施設の建設のために立坑などの坑道掘削を行うと、周辺の地下水圧が低下してガスの溶解度が減少

するため、顕著な脱ガスが生じる可能性がある。従って、安全対策上の見地から、ガス発生量を事前に評価し、必要な対策を講じる必要がある。一方、地層科学的研究の視点から、立坑周辺のガス湧出は、水相の相対浸透率の低下による湧水量の減少など、地下水挙動に対する影響が考えられるほか、不飽和帶中の酸素拡散や二酸化炭素の脱ガスによる分圧低下による酸化還元電位やpHなどの化学条件への影響も考えられる<sup>3)</sup>。このような影響を事前に評価することは、今後の第2段階以降の調査試験計画のために重要と考えられる。

そこで、筆者らは、立坑掘削時のガス・地下水の湧出量や不飽和領域の広がりを評価することを目的として、当地下研究施設周辺の溶存ガス量の検討を行うとともに、ガス（メタン、二酸化炭素）の溶解と脱ガスを考慮した気液二相流体シミュレーションを予察的に実施した。その結果を以下に報告する。

## 2. 地下水中の溶存ガス量の検討

地上からの調査段階で実施したボーリング調査では、ボーリング孔を用いて岩盤の透水性を把握するための透水試験を実施した<sup>2)</sup>。透水試験では、図-1に示すように、ボーリング孔内の区間をパッカで区切り、孔内に設置

したポンプにて一定流量で揚水したときの圧力の経時変化から、透水係数や貯留係数を評価した。このような試験において、揚水された地下水からは圧力低下に伴う溶存ガスの脱ガスによりガスが発生したことが報告されている<sup>2)</sup>。ガス流量は、地上に設置したセパレータタンク内において、水とガスを分離後に流量計にて測定した。

試験区間の圧力下では全てのガスが地下水中に溶存していると仮定すると、地下水中の溶存濃度は次式で計算される。

$$c = \frac{Q_{\text{gas}} / Q_{\text{water}}}{V_m} + m_0 \quad (1)$$

ここに、 $c$ ：溶存濃度 (mol/l) ,  $Q_{\text{gas}}$ ：ガス流量 (l/s) ,  $Q_{\text{water}}$ ：水流量 (l/s) ,  $V_m$ ：ガスのモル体積 (大気圧下で 22.4 l/mol) ,  $m_0$ ：ガス溶解度 (大気圧) である。(1)式の成立条件は、1) ガス流量と地下水流量の比が時間的に一定であること、2) 試験区間深度で全てガスは地下水中に溶存していること、3) セパレータタンク内が大気圧であること、4) セパレータタンク内で地下水と大気が平衡状態に至っていること、などである。

試験区間深度の圧力  $P$  におけるガスの溶解度  $m$  は、 $K_H$  をヘンリイ一定数として次式で求められる。

$$m = (P / K_H) \times 55.5 \quad (2)$$

計算した溶存濃度と溶解度の関係を図-2に示す。なお、ガス成分は100%メタン ( $\text{CH}_4$ ) と仮定し、メタンのヘンリイ一定数は、4335 MPa (温度25°C)とした。図-2中、破線よりも下にプロットされる試験区間では、ガスが地下水中に溶存しているという仮定の成立を示唆する。一方、上にプロットされる場合には、フリーガスの形態での存在を示唆する。今回計算した溶存濃度は、一部の試験を除き、試験区間圧力下での溶解度を下回っており、ガスの大部分は地下水中に溶存していると推定される。

### 3. 解析手法

数値解析コードには、空気、メタン、二酸化炭素からなる三種類のガスの溶解や脱ガスを考慮するため、TMVOC<sup>4)</sup>を用いた。

TMVOCは、TOUGH2V2.0をベースに開発され、水、ガス、揮発性有機化合物 (VOC) の非等温・多成分・3相系の流体解析コードである。各相内での物質移行 (移流・拡散) だけでなく、各相間の物質移行 (蒸発、溶解) を計算できる点が特徴である。ガス成分は、酸素、二酸化炭素、メタン、空気などから選択できる。

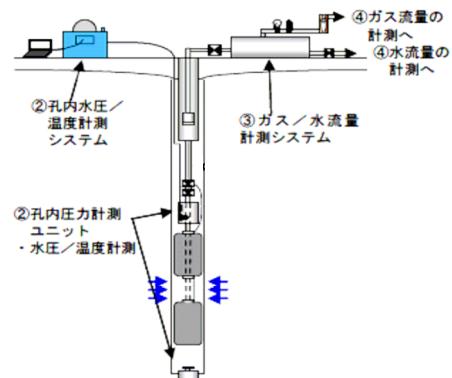


図-1 揚水試験の概要<sup>1)</sup>

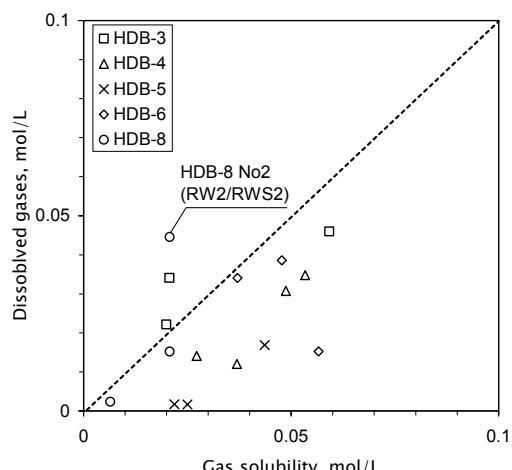


図-2 計算した溶存濃度(縦軸)と溶解度(横軸)の関係

### 4. 揚水試験中のガス湧出解析

TMVOCを用いて揚水試験中のガス湧出シミュレーションを行ない、ガス湧出量の実測値を再現できる二相流パラメータ (特に相対浸透率) の抽出を試みる。図-2の結果のうち、溶存濃度の推定値が溶解度を最も大きく上回っており、試験深度でのフリーガスの発生が示唆されるHDB-8孔No2区間の揚水試験 (RW2/RWS2) を解析対象とする。

#### (1) 解析モデル

解析グリッドは半径3km、均質な1次元軸対称モデルとし、ボーリング孔直径と層厚は、HDB-8区間の試験条件に合わせて各々0.08m、16.05mとする。岩石物性は、水理試験や室内試験結果に基づき、透水係数： $2.2 \times 10^{-6}$  m/s、空隙率：40%、岩石の圧縮率： $1 \times 10^{-10}$  1/Paとする。初期圧力1.545MPa (気相全圧=水圧を仮定)、温度25°C (一定) とする。ガス成分はメタンのみとし、初期状態の地下水溶存量は飽和溶解度に達していると仮定する。境界条件は外周部を静水圧固定境界とし、最内側 (ボーリング孔壁部) を平均揚水量による一定流量境

界とする。

相対浸透率と気液飽和度の関係として、次式のVermaモデル<sup>4),6)</sup>を用いる（図-3a）。

$$k_{rl} = \hat{S}^3$$

$$k_{rg} = A + B\hat{S} + C\hat{S}^2 \quad (3)$$

ここで、 $\hat{S} = (S_l - S_{lr})/(S_{ls} - S_{lr})$ 、 $k_{rl}$ ：水相の相対浸透率、 $k_{rg}$ ：気相の相対浸透率、 $S_l$ ：液相飽和度、 $A$ 、 $B$ 、 $C$ ：定数である。

毛管圧力 $P_{cap}$ と気液飽和度との関係には、次式のvan Genuchtenのモデルを用いる（図-3b）。

$$P_{cap} = -P_0 \left[ \left( \hat{S} \right)^{1/\lambda} - 1 \right]^{1-\lambda}, \quad -P_{max} \leq P_{cap} \leq 0 \quad (4)$$

ここで、 $P_{max}$ ：毛管圧力の最大値、 $\lambda$ 、 $P_0$ ：定数である。なお、用いた二相流パラメータは図-3中に示した。

## (2) 解析結果

HDB-8孔No2区間の揚水試験における解析値と実測値の比較を図-4に示す。図より、圧力、流量（地下水、ガス）とともに、計算値は実測値を良く表現していることが分かる。なお、本文では、圧力は気相圧力とする。不飽和部では、圧力から毛管圧力を差し引いたものが水圧となる。ボーリング孔近傍における圧力と気相飽和度の変化を図-5に示す。時間とともに圧力が低下し、脱ガスによる気相飽和度の増加域が広がっていくのが分かる。ただし、気相飽和度の最大値は孔壁面でも0.1%未満である。つまり、今回の解析では、気相飽和度が非常に小さい（不飽和と呼ぶこと自体が微妙な）範囲での挙動の可能性があり、二相流パラメータを十分に検討するには至っていない。今後、幅広い範囲の気相飽和度における相対浸透率を評価するには、試験区間圧力を十分に低下させ、ガス湧出を促進した二相流状態の水理試験が必要と考えられる。

## 5. 立坑掘削時のガス湧出の予察解析

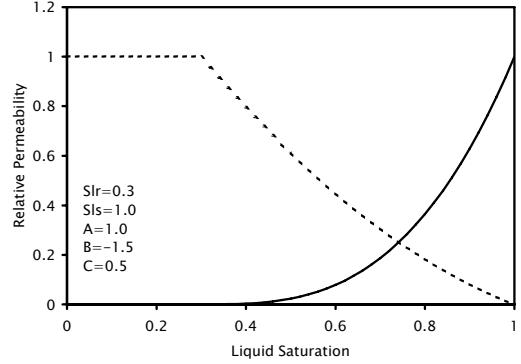
### 5.1 解析モデル

#### (1) 解析グリッド

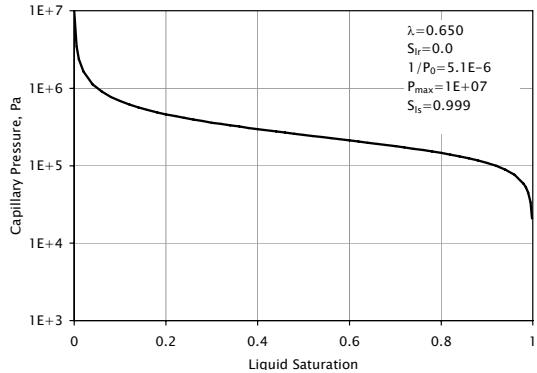
解析グリッド（グリッド数：960）を図-6に示す。解析モデルは、1本の立坑を中心とする2次元軸対称モデルとした。外側境界は3kmに設定し、内側境界は立坑壁面（半径：3.25m）とした。底面境界は地表から深度1.5kmに設定した。

#### (2) 水理モデル

立坑掘削地点近傍のボーリング孔（HDB-6）のデータに基づいて設定した水理パラメータを表-1に示す。絶対浸透率は、水理試験による透水係数、空隙率と圧縮率は、コア試験値（各々、有効空隙率と弾性係数）を参考に設



(a) 相対浸透率 (Verma モデル<sup>4),6)</sup>)



(b) 毛管圧力 (van Genuchten モデル)

図-3 二相流パラメータ

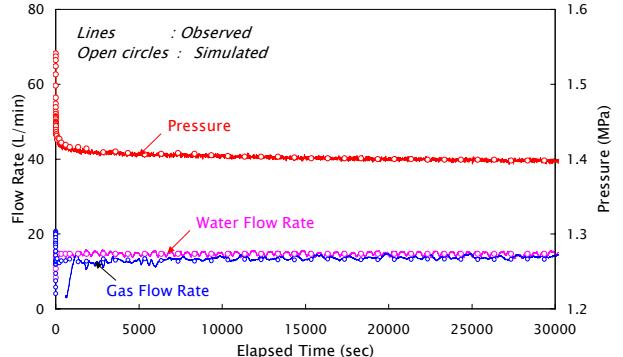


図-4 揚水試験のシミュレーション結果

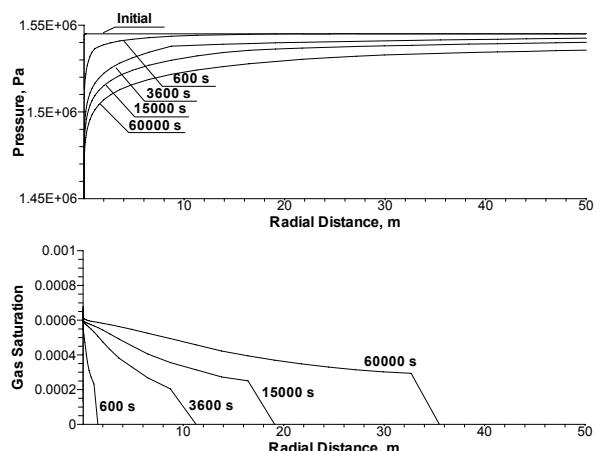


図-5 ボーリング孔周辺の圧力と気相飽和度の変化

定した。相対浸透率／毛管圧力と気液飽和度の関係式ならびにパラメータは、前述の揚水試験の解析と同じものを用いた（図-3）。なお、本モデルの透水係数は、立坑全体の平均的な透水性を反映しており、局所的な高透水帯を対象とした前出の揚水試験よりも3オーダー小さい。

### （3）初期のガス溶存状態

立坑掘削前の自然状態において、地下水中の溶存ガス濃度は各深度の圧力に応じた溶解度とし、フリーガスは存在しないと仮定する。溶存ガス成分としては、ガス成分分析<sup>1)</sup>で確認された主要成分であるメタン（CH<sub>4</sub>）と二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）を考える。

### （4）解析ケース

表-1の溶存ガス種の欄中に記した3つの解析ケースを設定する。ケース1では溶存ガスを考慮しない。ケース2Aと2Bでは、各々、メタン100%、メタン80%+二酸化炭素20%、の溶存ガスを考慮する。

### （5）境界条件

境界条件は、上面境界を大気圧条件（圧力：1atm、気相飽和度：100%、気相成分：空気100%）で固定し、底面を不浸透境界とした。外側境界は静水圧固定境界（水相飽和度100%）とし、溶存ガス濃度も先に求めた値に固定した。内側境界となる立坑の掘削済箇所は、大気圧（=1atm）、気相飽和度100%にて順次固定した。

### （6）立坑掘削のモデル化

立坑掘削は50mステップに簡略化し、掘削進行速度は20m／月とした。ただし、実際の施工では、立坑掘削ステップは1～2mと考えられる。解析期間は立坑掘削開始時から20年間とした。

### （7）初期状態

初期状態として与えた圧力ならびに水溶メタン濃度の深度方向分布を図-7に示す（ケース2Aの例）。圧力は、立坑掘削予定地点近傍のHDB-6孔の水圧とほぼ整合的である。水溶メタン濃度の分布も、2で推定した濃度（図中の○プロット）と大きく矛盾しない。

## 5.2 解析結果

### （1）圧力・気相飽和度

圧力と気相飽和度の分布（立坑掘削開始から10年後）を図-8に示す。まず、不飽和領域について見ると、溶存ガスを考慮しないケース1（図-8a）では、不飽和域は立坑壁面と地表面付近の地下水位低下域に限られる。溶存ガスを考慮したケース2A、2B（図-8b,c）の不飽和領域は、立坑からの約150m水平方向に広がっている。ケース2Aよりも2Bの方が不飽和領域が若干広いのは、CO<sub>2</sub>はCH<sub>4</sub>よりも溶解度が大きいので、CO<sub>2</sub>を含む後者の方が脱ガス量が多いためである。

次に、立坑周辺の圧力分布を見ると、ケース1の方が

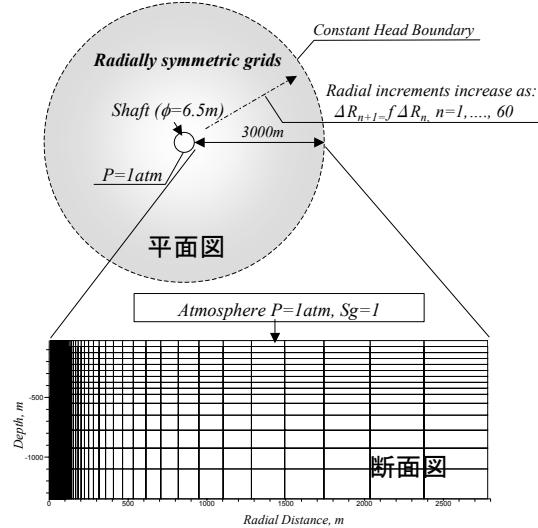


図-6 解析グリッド

表-1 解析条件一覧

項目	設定値
絶対浸透率	$1 \times 10^{-16} [\text{m}^2]$ (透水係数 $1 \times 10^{-9} [\text{m/s}]$ )
空隙率	40%
岩石の圧縮率	$1.0 \times 10^{-9} [\text{1/Pa}]$
地下水中的溶存ガス種	ケース1：なし ケース2A：CH <sub>4</sub> ケース2B：CH <sub>4</sub> (80%)CO <sub>2</sub> (20%)
ガスの溶存状態	飽和状態
ヘンリイ一定数(25°C)	CH <sub>4</sub> : 4335[MPa], CO <sub>2</sub> : 168[MPa]

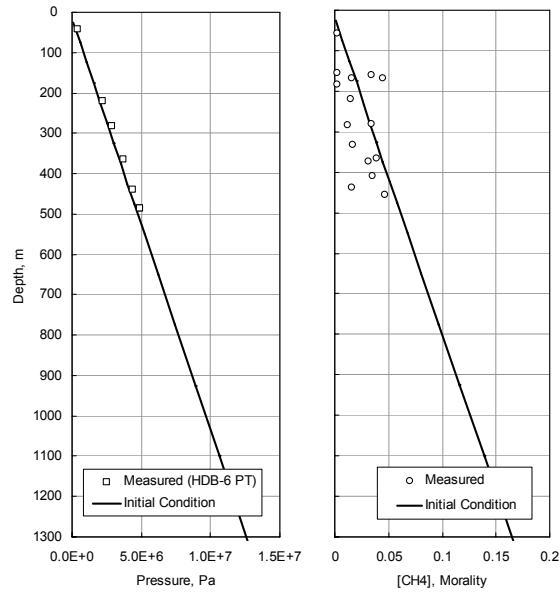


図-7 初期状態の設定（ケース2A）

ケース2A/Bよりも圧力低下量が大きい。図-8中のA点（立坑からの距離50m、深度275m地点）の圧力経時変化を図-9に示すが、圧力低下の速度はケース1の方がケース2A/Bよりも明らかに速いことが分かる。ケース2A/Bでは脱ガスに伴って空隙内の流体の圧縮率が増加し、圧力が低下しにくくなっている。

## (2) 湧水量・ガス湧出量

図-10に、立坑への湧水量とガス湧出量の経時変化を示す。50mの掘削ステップごとに湧水量、ガス湧出量のピークが見られる。ガス湧出は深度とともに増加し、流量がほぼ安定した10年後以降の湧水量は約20m<sup>3</sup>/日、ガス湧出量は200~250m<sup>3</sup>/日（ガス／水比で10以上）となった。ケース2 Aよりケース2 Bの方がガス湧出量が多い理由は、前述のとおり、CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の溶解度の差によるものである。

図-11に、溶存ガスの有無による湧水量への影響を示す。脱ガスにより気相飽和度が上昇すると、水の相対浸透率が減少して湧水量が減少することが考えられる。実際、20年後の湧水量を見ると、溶存ガスを考慮したケースの方がやや湧水量が少ない（図-11a）。ただし、その差は微小であり、溶存ガスの有無による湧水量への影響は小さいといえる。これは、図-8に示したように、立坑近傍でも気相飽和度は5%未満しか上昇しておらず、相対浸透率の減少量が小さいことが考えられる。

累積湧水量を図-11bに示した。溶存ガスを含むケースの方が累積湧水量がやや多くなっている。その理由は、前述の通り、脱ガスが生じると、周辺圧力が低下しにくく、各ピーク後の湧水量の減少が緩慢になるためである。

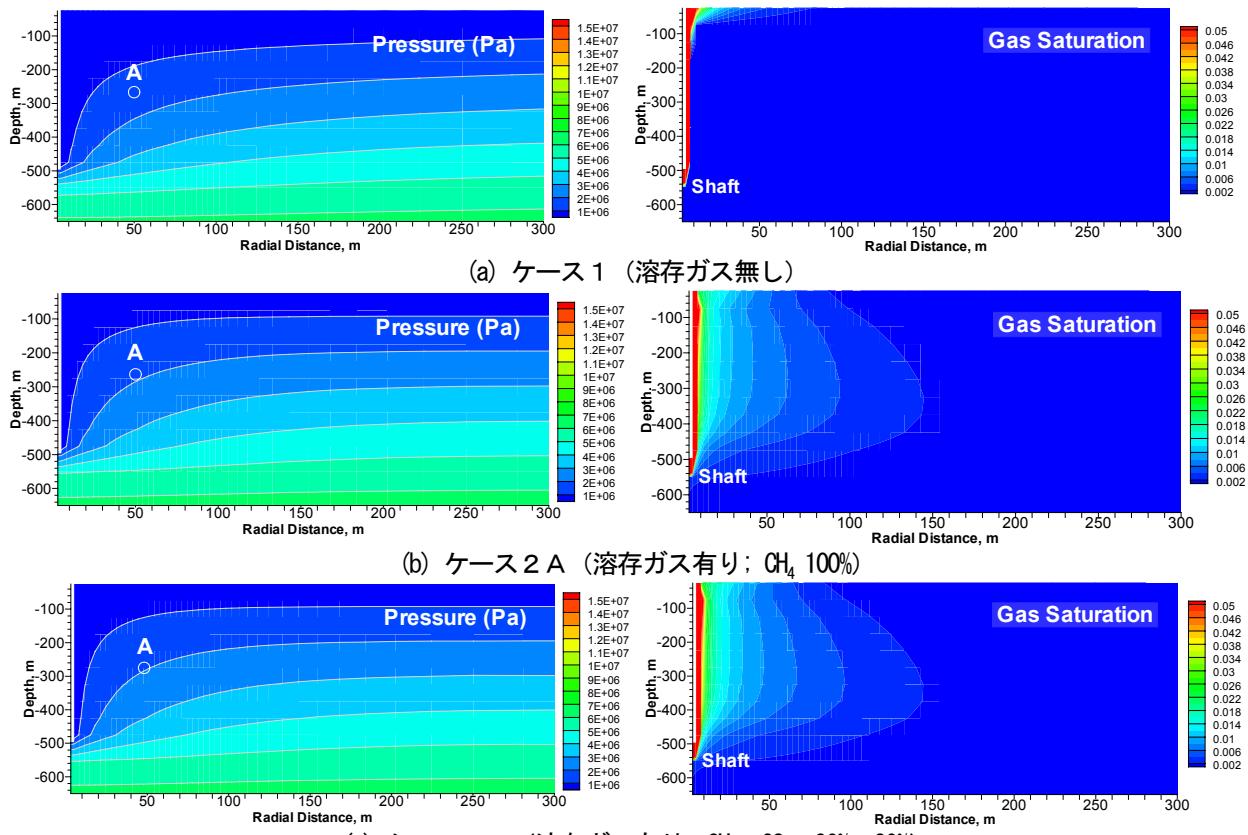


図-8 立坑周辺の圧力、気相飽和度（掘削開始から10年後、立坑は左端の深度0~500m）

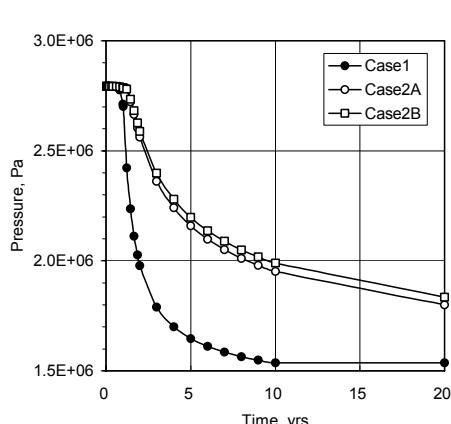


図-9 圧力の経時変化の例（A点）

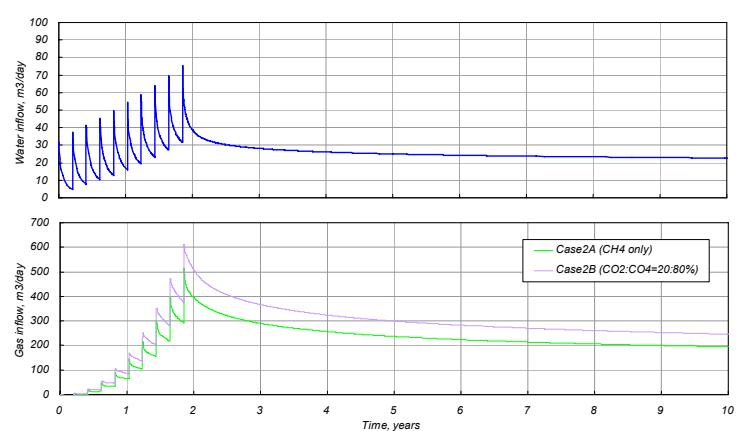


図-10 立坑への地下水・ガス湧出量（ケース2 A, 2 B）  
(湧水量については、両ケースの差が小さいのでケース2 Aのみ示してある)

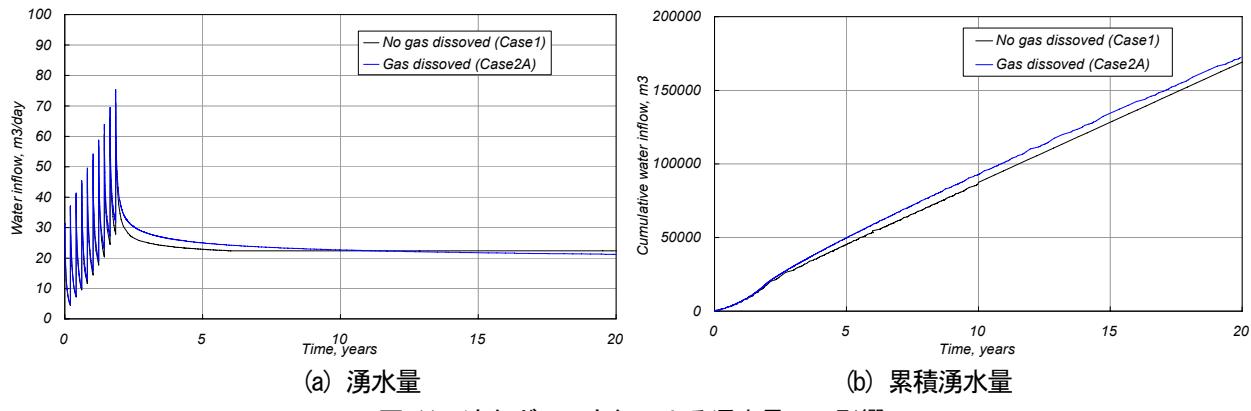


図-11 溶存ガスの有無による湧水量への影響

## 7. まとめと今後の課題

今回の結果をまとめると以下のとおりである。

- 揚水試験時のガス湧出量データを検討した結果、一部の試験を除き、揚水試験で検出されたガスは地下水中に溶存していると推定される。
- 揚水試験のシミュレーションにより、実測のガス湧出量の再現した。ただし、相対浸透率の評価の信頼性を高めるには、試験圧力をさらに低下させ、脱ガスを促進した二相流状態の水理試験が必要である。
- 立坑掘削時の湧水およびガス湧出量の予測解析を実施した結果、湧水量に対する溶存ガスの有無の影響は比較的小さい。ただし、1)脱ガスが生じると空隙内流体の圧縮率が増加するため、掘削後の周辺地下水圧が低下しにくくなり、各掘削段階で生じる立坑湧水量のピーク後の流量減少の速度は緩慢になる。  
2)気相の発生は水の相対浸透率を低下させるので、恒常湧水量はやや減少する。
- 今回の脱ガスを考慮したケースでは、2)よりも1)の影響が大きく現れ、脱ガスを考慮しないケースよりも短期的には湧水量がやや多い。ただし、掘削ステップや二相流パラメータ（相対浸透率、残留飽和度等）の設定により結果が変わること可能性があり、感度

解析的な追加検討が必要である。特に、湧水量の絶対値は、浸透率の設定でかなり変わることがある。今後は、立坑の詳細構造や掘削工程を考慮するとともに、立坑周辺の水理地質構造を反映したモデルを構築し、将来的には、立坑掘削中のガス湧出量や不飽和帯に関する測定データを利用したマッチング解析などにより、ガス湧出モデルの信頼性を高めていきたい。

## 参考文献

- 核燃料サイクル開発機構,幌延深地層研究計画,平成13年度調査研究成果報告, TN1400 2002-004, 2004.
- ずい道等建設工事における換気技術指針（設計及び粉じん等の測定）,建設業労働災害防止協会, 2003.
- 山本肇, 下茂道人, 藤原靖, 國丸貴紀, Tianfu Xu, 幌延深地層研究施設周辺の地下水水質形成シミュレーション, 第35回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.237-pp.242, 2005.
- Pruess, K. and Battistelli, A., TMVOC, a Numerical Simulator for Three-Phase Non-isothermal Flows of Multicomponent Hydrocarbon Mixtures in Saturated-Unsaturated Heterogeneous Media, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-49375, 2002.
- Yamamoto, H. and Pruess, K., Numerical simulation of leakage from underground LPG storage caverns, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-56175, 2004.
- Verma, A., and Pruess, K., Thermohydrological conditions and silica redistribution near high-level nuclear wastes emplaced in saturated geological formations, J. Geophys. Res., v. 93, p. 1159-1173, 1988.

## PRELIMINARY SIMULATION OF DEGASSING OF NATURAL GASES DISSOLVED IN GROUNDWATER DURING SHAFT EXCAVATION IN HORONOBE UNDERGROUND RESEARCH PROJECT

Hajime YAMAMOTO, Michito SHIMO, Takanori KUNIMARU, Hiroshi KURIKAMI

In Neogene-Quaternary sedimentary basins, natural gases such as methane are often dissolved in groundwater significantly. In this paper, two-phase flow simulations incorporating the degassing of methane, and carbon dioxide, were performed for the shaft excavation in Horonobe underground research project. The results drawn from the simulations are summarized as follows. 1) As depth increases, degassing and gas inflow occurs significantly. 2) Degassing increases the compressibility of pore fluids, resulting in slow changes in groundwater pressures. 3) Although the occurrence of gas phase decreases water mobility, the influence of the dissolved gas on the groundwater inflow rate to the shaft was small.