

気液二相流を考慮した岩盤空洞周りのガス移行解析

愛媛大学大学院 学生会員 ○石中亮 愛媛大学大学院 正会員 安原英明
愛媛大学大学院 正会員 木下尚樹

1. はじめに

現在、我が国では石油やLPGを地下の岩盤タンクに貯蔵している．これらを貯蔵する方式として水封式地下岩盤貯槽方式がある．この方式は、地下水と人工的に供給した水によって岩盤タンク方向への水の流れを作り、岩盤タンク内の気化ガスが漏洩するのを防止するものである¹⁾．仮にこの水封機能が停止した場合、岩盤タンク方向への水の流れがなくなりガス漏洩につながる．そこで、本研究では、数値解析を用いて水封機能の有無がガス漏気を与える影響について精査するとともに、ガス漏気量の定量的評価を行った．ここで、ガス漏気に影響を与えるパラメータとして水封の有無の他に、岩盤の絶対浸透率や相対浸透率、岩盤タンク内圧、気圧条件が考えられる．これらのパラメータを変化させガス漏気挙動の変化に及ぼす影響を定量的に評価するとともにガス漏気のメカニズムを検討した．

2. 解析モデル

本研究では、TOUGH2を組み込んだPetraSimを用いて数値解析を行った．岩盤タンクから地表までの領域を1次元モデルで再現し地下水を水、気化ガスを空気として気液二相流解析を実施した．支配方程式として二相流ダルシーの法則を用いた．

$$u_l = -k \frac{k_{rl}}{\mu_l} (\nabla P_l - \rho_l g) \quad (1)$$

$$u_g = -k \frac{k_{rg}}{\mu_g} (\nabla P_g - \rho_g g) \quad (2)$$

ここで、 u_l : 液相のダルシー速度 [m/s], k : 絶対浸透率 [m²], k_{rl} : 液相の相対浸透率 [-], μ_l : 液相の粘性係数 [Pa・s], P_l : 液相の圧力 [Pa], ρ_l : 液相の密度 [kg/m³], g : 重力加速度 [m/s²], u_g : 気相のダルシー速度 [m/s], k : 絶対浸透率 [m²], k_{rg} : 気相の相対浸透率 [-], μ_g : 気相の粘性係数 [Pa・s], P_g : 気相の圧力 [Pa], ρ_g : 気相の密度 [kg/m³], g : 重力加速度 [m/s²]である．解析条件を表2、表3に示す．

3. 解析結果

3.1 ガス漏気挙動：水封機能あり

水封が機能する条件の解析結果を示す．亀裂部を模擬した絶対浸透率 4.0×10^{-11} m²で、岩盤タンク内圧を40 kPaと設定して解析を実施した時の岩盤タンクの空洞から飽和領域までのガス飽和度の経時変化を示す(図2)．図より、ガス飽和度は変化せず、ガス漏気は起こっていないことが確認された．つまり、水封が機能している場合は亀裂を有する岩盤においてもガス漏気が発生しないことが再確認された．

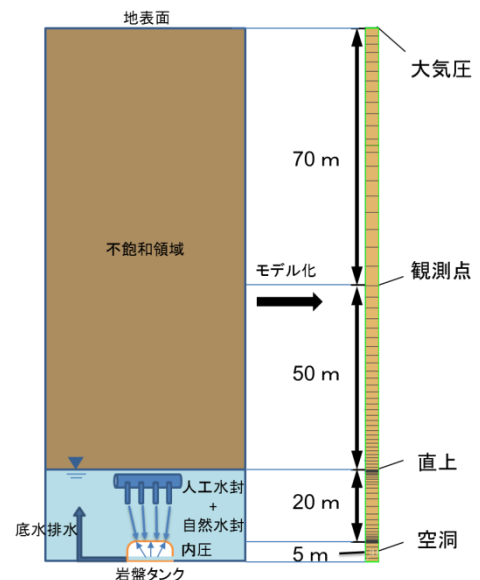


図1 岩盤タンク概念図と解析モデル

表2 境界条件

シナリオ	水封あり	水封なし
絶対浸透率 [m ²]	4.0×10^{-15} 4.0×10^{-11}	4.0×10^{-15} 4.0×10^{-11}
ガス差圧 ΔP [kPa]	4, 40	4, 40

表3 解析条件

パラメータ	値
密度 [kg/m ³]	2600
間隙率 [-]	0.05
比熱 [J/kg・s]	1000
湿熱伝導率 [W/m・c]	2.0
気温 [°C]	25
解析期間 [年]	100

3.2 ガス漏気挙動：水封機能なし

次に、水封が機能しない条件の解析結果を示す。健岩を模擬した絶対浸透率 $4.0 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ で、岩盤タンク内圧を 4 kPa と設定して解析を実施した時の岩盤タンクの空洞から飽和領域までのガス飽和度の経時変化を示す（図 3）。図より、ガス飽和度が時間の経過とともに増加していることが確認された。これは、水封機能の停止に伴い飽和領域の水位が低下してガス飽和度が増加し、その結果、ガスの流路が形成されることでガス漏気に繋がったと考えられる。これにより、この条件より危険側の条件（絶対透過率や岩盤タンク内圧がより大きい場合）でも同様にガス漏気が起これらと考えられる。従って、水封が機能していない場合は、ガス漏気に対する対策が必要であることが判明した。

3.3 ガス漏気挙動の定量的評価：水封機能なし

次に、各解析条件におけるガス漏気挙動の違いについて検討した結果を示す。表 3 に定常状態における各条件のガス漏気量を示す。岩盤タンク内圧を変化させると、ガス漏気量は 1 オーダー程度変化し、絶対浸透率を変化させると、4 オーダー程度変化することがわかった。また、図 3 に漏気ガスが地表面に到達するまでの時間を示す。絶対浸透率が $4.0 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ の時、ガスは数年から数十年のオーダーで地表面まで到達しているのに対し、絶対浸透率が $4.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ の時は、ガスは数時間から数日のオーダーで地表面まで到達していることが確認できる。つまり、絶対浸透率が $4.0 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ の時、ガス漏気量は微小で地表面に到達するまでの時間も長いのでガス漏気の危険度は低いと判定できる。ところが、絶対浸透率が $4.0 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ の時、ガス漏気量は比較的多く、地表面に到達する時間も短いのでガス漏気に対する危険度は高いと判定できる。

4. おわりに

本研究の解析結果より、水封が機能していればガス漏気は発生せず、水封が機能していない場合はガス漏気が発生することが再確認された。また、水封が機能していない場合でも、周辺岩盤が健全であればガス漏気量は小さく危険度は低いことが確認された。しかし、亀裂部のような透過率が高い領域では、ガス漏気に対する危険度が高いことがわかり、何らかの対策が必要であることが判明した。

5. 参考文献

- 1) 蒔田敏昭：岩盤タンクによる石油の地下備蓄について、圧力技術，Vol.29，pp.12-21，1991。

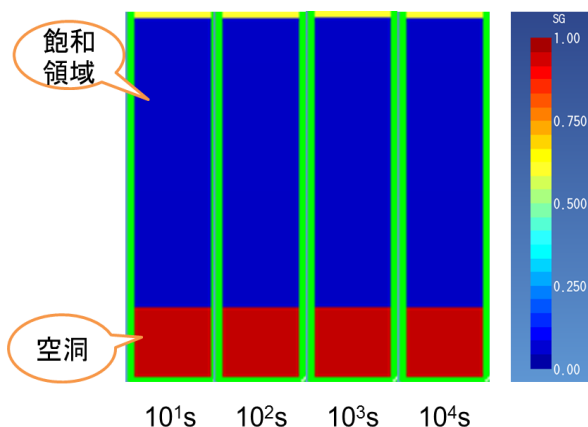


図 2 ガス飽和度の経時変化(水封あり)

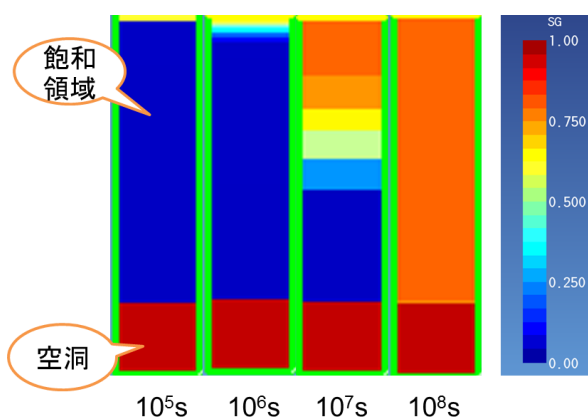


図 3 ガス飽和度の経時変化(水封なし)

表 3 ガス漏気量

ガス漏気量 [kg/s/m ²]	ΔP=4 kPa	ΔP=40 kPa
$4.0 \times 10^{-15} \text{ m}^2$	4.4×10^{-9}	8.3×10^{-8}
$4.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2$	4.4×10^{-5}	8.3×10^{-4}

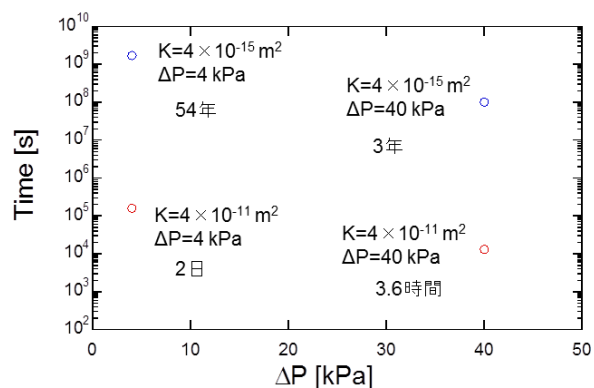


図 4 ガスの地表面までの到達時間