

(64) 液化ガスの岩盤備蓄における水封・気密機能解析へのアプローチ

埼玉大学工学部 佐藤 邦明

1.はじめに

液化ガスにはLPGやLNGがあるが、LPガスの大量貯蔵の方式には地上タンク方式、地中タンク方式及び岩盤地下タンク方式がある。大容量の貯蔵が可能となる岩盤地下貯蔵方式が安全性、環境保全、土地の有効利用等の側面から採用されている。LPガスの岩盤地下貯蔵方式は、地下水位以下の岩盤に掘削した空洞（貯槽、タンク）に常温か低温のいずれかでLPガスを貯蔵する。前者は、空洞周辺の地下水位が空洞内のLPガスの蒸気圧より高くしてガスの漏えいを防止する、いわゆる水封方式により貯蔵する方法であって、後者は低温LPガスを地下水位以下の空洞周辺に凍結ゾーンを形成させて貯蔵する方法である。LPガスの岩盤地下貯蔵方式として一般に常温貯蔵方式が採用されている。従って、水封方式ということになる。そのため空洞周辺の水圧を得るため設置深度はプロパンガスで約120m、ブタンガスで60m程度となり、良好な岩盤条件が要求され、貯蔵ガスの水封・気密を保つことが最も大切となる。

こういった事から本報では水封・気密条件と岩盤割れ目系における気液2相流の取扱いについて考えてみることにする。

2.水封・気密の保持条件

(1)漏気と気液2相流の形態

図-1には空洞内のLPガスが漏気をする条件にあったとした場合の漏気形態と岩盤割れ目中の気液2相流の形態を概念的に示したものである。図中の(a)図のように、空洞周辺から地下水が流入してLPガスは空洞内に保持されるが、天端の部分にはガスが存在して漏気の対象となる。その場合、次のステップに従って漏気、気泡拡散が進むことになる。

①空洞天端付近の水圧 p_l が空洞内ガス圧 p_g にガスの割れ目入口の表面張力 p_c を加えた値 ($p_l = p_g - p_c$) より小さく、いわゆる漏気のしきい圧力をこえる。

②割れ目内に侵入したガスが表面張力によって気泡状になって、図中(b)、(c)、(d)、(e)図のような形で浮力によって上方に移行・拡散する。

③上述②のステップがさらに進むと、空洞天端近傍から(f)図のように気液2相流となって移行する。これらの漏気・2相流のプロセスにおいて、水封・気密の保持条件は上述①であり、最も重要な鍵となるわけで、②、③は一度漏気したガスが割れ目（及び岩石）中を移行・拡散するプロセスであるから一応分けて考えるべきである。原理的に水封・気密条件は、

$$p_l \geq p_g - p_c \quad , (1) \quad p_c \propto \frac{4T}{\delta} \quad , (2)$$

$$p_l \geq wH \quad (3)$$

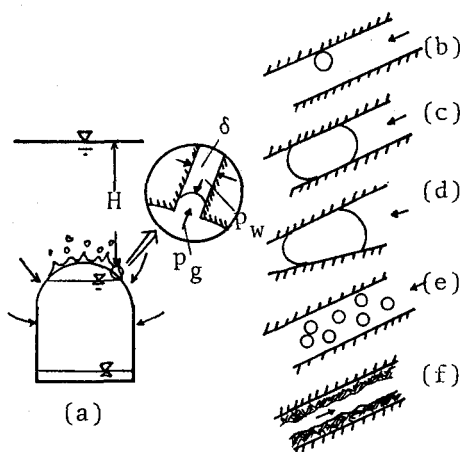


図-1 漏気と気液混相・2相流の形態概念

w : 水の単位体積重量、 p_l : 水圧、
 p_c : 毛管圧力、 δ : 割れ目幅、
 T : 表面張力、 H : 空洞天端の地下水位、
 p_g : ガス圧力。

式(1)における毛管圧力 p_c は割れ目幅に逆比例するから小さい割れ目ほど漏気が起こりにくいことになる。実用上、空洞設置深度 H は基本的には水封・気密機能から決められ、今日2つの考え方がある。一つは空洞天端の鉛直動水勾配 I_o が限界値 I_c より大きい事、他は上述の式(1)に余裕を見込んだ考え方である。つまり、¹⁾

$$I_o = \frac{\text{水封圧} - 10 \times (\text{貯蔵圧})}{H} > I_c, (4), \quad H \geq \alpha p_d + a, (5)$$

がある。ここに、 H ：地下水位、水封圧：貯槽天端の水圧(m)、貯蔵圧：貯槽内の圧力(Kg/cm^2G)、 p_d ：設計圧力(Kg/cm^2)、 α ：係数、 a ：余裕深さ(m)である。

式(4)の鉛直動水勾配は地下水の水圧を水理学的に考えたものであり、また、式(4)及び式(5)の考え方は必ずしも科学的に統一されたものではなく、国情によって経済性、地質条件、安全性に対する見解による違いがある。しかし、浸透流解析や室内実験からすると、 $\alpha=10$ 、ガスの場合、 $a=20\sim40m$ とかなり安全側にとられているのが実情である。

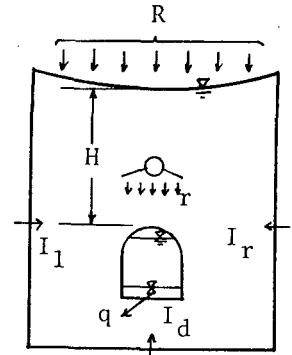


図-2 水収支概念

(2)地下水収支の考え方

水封方式によってLPガスを岩盤貯蔵する際は上述のように地下水が常ず安定して存在しなければならないから、地山の地下水の水収支が式(4)や(5)を満足するように確保されねばならないことになる。図-2のように、地山水収支コントロール境界内の地下水貯留量 S とすると、

$$dS/dt = [I + R + (r)] - q = 0, (6)$$

q ：空洞湧水量、 R ：降雨浸透量、 t ：時間

I ：総地山流入量($= I_l + I_r + I_d$)、

r ：必要に応じて設ける水封水量、

が長期的に満足されねばならない。

実際に、マクロ的に式(6)が満足されるか否かを知るためには各項目の値を対象地山で知らねばならないことになる。 I 、 q 、 r は地山の透水性と地下水の境界条件に支配され、 R は降水に関係する。現状では実測をふまえて数値シミュレーションによる傾向がある。その場合に最も大切なことは降雨浸透量 R を適切に計測・予測することである。

3.気泡2相流の取扱いと基本式の構成

2で述べた事が確実に確保されれば、以下に述べることは実用上は不要になるはずであるが、環境アセスメントの段階で必ずしもそうとばかりはいえないであろう。ここで、この事を解析・評価するに当たってどう現象を考え、解析すればよいかオーソドックスな水理学的論点について述べる。それには少なくとも、次の3つの見方ができる。つまり、①ガス気泡が割れ目中をどう動くか、②気液混相流の取扱いはどうするか、③気液2相流をどう扱うか、である。いうまでもなく、①～③は元来別々に生じるわけではなく、共存する。しかし、現状では便宜上別々に考えざるを得ない。以下にそれぞれの力学的背景について述べる。

(1)単一ガス気泡の運動

単一ガス気泡は基本的に図-1、(b)、(c)、(d)図の中のいずれか近い形態をとるとする。本報では単一ガス気泡の運動を逐一解析するには紙数が不足するので、考え方を述べることにする。まず、運動方程式は

$$(\rho_a + \beta \rho_w) \frac{d q_a}{d t} = [\text{浮力} - \text{接触摩擦力} - \text{抗力} + \text{表面張力} + F(O^2)], \quad (7)$$

の形となる。ここに、 ρ_a 、 ρ_w ：それぞれガス、水の密度、 β ：仮想質量係数、 q_a ：ガス速度、 t ：時間、 $F(O^2)$ ：バセット力のような微小力である。²⁾

式(7)において、接触摩擦力と抗力の中に割れ目中の地下水流速が関与し、表面張力は割れ目の幾何形状に支配され、図-1、(d)図のような気泡形状の場合には運動を支配する(b)、(c)図の場合は不要)。

式(7)を解くに当たって、気泡の体積が深度によって変る事を考慮して、

$$p V = p_o V_o, \quad (8) \quad p = \rho_w g h, \quad (9)$$

p ：気泡ガス圧力、 V ：気泡体積、

p_o 、 V_o ：各々地下水面でのガス圧力、体積

h ：気泡の地下水面からの深さ

を用いて、連成して解かなければならない。

式(7)と(8)を組合せて解くことはさほど難しいことではなく、摩擦と抗力に関する摩擦係数と抗力係数、及び仮想質量係数は予め実験的に決めておかなければならない。流体力学的に考え、仮想質量係数 β と摩擦力が予想外に大きいことが判っている。

(2) 気液混相流の基礎式の構成³⁾

一般に、混相流は固液、気液、液液といった形態が知られ、気液混相流の取扱いは次のような考え方に立って進められる。いま、岩盤の割れ目系の気液混相流と気液2相流を図-3のようにモデル化すると、(a)間隙水と気泡が混存した状態、(b)気体ガスと間隙水の界面が明瞭な界面をもつ状態、のようになる。

いま、(a)図のような空隙率 m の割れ目系に着目すると、液体とガスの割れ目系空隙率に占るボリューム関係は、

$$m_g = (1 - \Lambda) m, \quad (10) \quad m_e = \Lambda m, \quad (11)$$

とかける。ここに、 m_g ：空隙中のガスの占る体積、 m_e ：空隙中の液体の占る体積、 Λ ：含液率とす。

まず、ガスと水の運動方程式はダルシーの法則に従うとして、ガス及び液体の流速ベクトル V_g 、 V_l は

$$V_g = -\frac{C_g}{\mu_g} \text{grad } p, \quad (12) \quad V_l = -\frac{C_e}{\mu_l} \text{grad } p, \quad (13)$$

となる。ここに、 C_g 、 C_e ：各々ガス、水に係る定数、 μ_g 、 μ_e ：各々ガス、流体の粘性係数、 P ：圧力である。

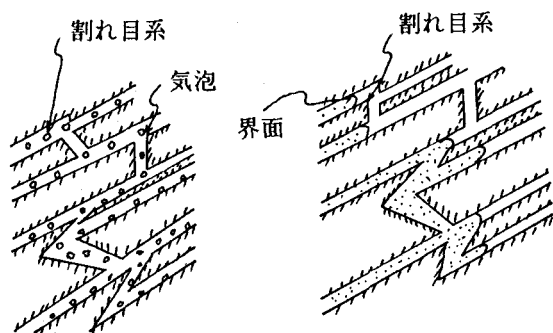
一方、水の保存式は、

$$- \text{div } V_e = m \frac{\partial \Lambda}{\partial t} \quad (14)$$

となる。

一方、ガスの密度 ρ_g は圧力に比例し、

$\rho_g = a p$ 、水中への単位体積中の溶解質量 $M = s p$ とする(a 、 s ：定数)。ガスの保存式



(a) 気液混相流

(b) 気液2相流

図-3 岩盤割れ目系における気液混相流と2相流

$$-div(aV_g + sV_l)p = \frac{\partial}{\partial t}\{M\Lambda m + \rho_g(1-\Lambda)m\}, \quad (15)$$

が成立つ。

式(12)～(15)を解くことによって気液混相流を物性と条件を与えて解くことができる。

(3)気液2相流の基本式⁴⁾

図-3(b)図のようにガスと水に明瞭な界面が存在して2相流となる場合を考える。流速は重力を考慮してダルシーの式によって、

$$V_g = -\frac{C_g}{\mu_g}(grad p_g - g\rho_g), \quad (16), \quad V_l = -\frac{C_l}{\mu_l}(grad p_l - g\rho_l), \quad (17)$$

である。ここに、 p_g 、 p_l ：各々ガス、液体の圧力、 g ：重力ベクトル、 ρ_g 、 ρ_l ：各々ガス、液体の密度とする。

保存式は、

$$m\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g S_g) = -div(\rho_g V_g), \quad (18), \quad m\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l S_l) = -div(\rho_l V_l), \quad (19)$$

であり、 S_g 、 S_l ：ガス、液体の飽和度、 $S_g + S_l = 1$ である。

また、密度 $\rho_g = \rho_g(p_g)$ 、 $\rho_l = \rho_l(p_l)$ であり、圧力 $p_l - p_g = p_c(S_g)$ となる。

図-1(f)図のように、含水岩盤中でガスが見掛け上透気するような場合には定数 C_g (固有浸透係数)が小さくなったと考えて、ガスのみの基本式と状態方程式を用いて解くことができる。⁵⁾

むすび

エネルギーの岩盤地下備蓄において、L P ガスの大量備蓄は安全性、環境保全、土地確保の上から有利であり、クリーンエネルギーへの志向に叶うものである。本報は今日進められつつあるL P ガスの岩盤備蓄の確立に関与して基本事項となる水封・気密機能に注目して、力学的側面に力点を置いて考えた。論点を絞ると、水封・気密条件が満足されることが基本となるが、環境アセスメントの側面から漏気ガスの挙動を検討しておくことは大切である。両者を考えるに当たって問題は貯液空洞天端近傍の岩盤割れ目と岩の透気性を知ること、及びL P ガスの表面張力、ガスの浸透形態を知っておくことが重要である。石油の岩盤備蓄の場合と基本的に違う点はL P ガスの貯蔵が圧力に依存する点にある。

参考文献

- 1) 日本L P ガス協力技術保安委員会タンク部会：L P ガス岩盤地下貯蔵に関する基礎技術調査報告書：昭和61年
- 2) 宮下国一郎・佐藤邦明：岩盤節理モデル中の気液2相流に関する実験的研究、土質工学会論文報告集、Vol. 24、No. 4、1984、pp155～162
- 3) Aravin, V. I & S. N. Numerov: Theory of Fluid Flow in Undeformable Porous Media, Trans. Russian, Israel Program for Scientific Trans. Jerusalem, 1965, pp54～62
- 4) A. E. Scheidegger: The Physics of Flow Through Porous Media, Third Edition, Univ. of Toronto Press, 1957, pp247～249
- 5) 佐藤邦明・伊藤洋・坂口雄彦・清水昭男：岩石におけるL P Gの透気に関する基礎実験、第7回岩の力学国内シンポジウム、1987、pp253～258

(64) An approach to analysis of water seal system for rock store of liquified gas

by Kuniaki Sato *

Various types of underground caverns for the purpose of energy store have been constructed in rock ground. When we examine the safety evaluation of gas storing caverns, it is one of the key subjects to find hydraulic condition of water seal system and characteristics of gas seepage in rocks. From such points of view this paper presents how to evaluate the gas leakage from store cavern and how to analyze the gas motion through the fracture opening. Two conclusions are pointed out: the threshold of gas leakage relates with the depth of cavern, gas pressure and capillarity pressure, and the equation of motion with a gas bubble is derived in addition to fundamental equations of gas-liquid flow in fractures.

* Hydrosience and Geotechnology Laboratory, Faculty of Engineering, Saitama University, Urawa, Saitama