

# 水封式岩盤タンクにおける 岩盤を対象とした水封分類法

植出 和雄<sup>1</sup>・岡本 明夫<sup>2</sup>・宮下 国一郎<sup>3</sup>

<sup>1</sup>日本地下石油備蓄株式会社 業務部 (〒105-0012 東京都港区芝大門 2-10-12)

<sup>2</sup>工博 日本地下石油備蓄株式会社 業務部 (〒105-0012 東京都港区芝大門 2-10-12)

<sup>3</sup>正会員 工博 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

水封式岩盤タンクにおいては、掘削時における空洞周辺岩盤の水理特性に関する観察及び評価が重要な検討事項であったが、空洞建設時点ではこの評価を行うに際しての体系的な評価指標は作られていなかった。筆者等は、水封機能の保全の観点から、岩盤に対する水理特性の観察及び評価方法を石油地下備蓄基地建設の実績をもとに検討し、従来の岩盤分類に相当する「水封分類」を新たに構築した。

ここでは、岩盤の割れ目の分布状況、連続性、湧水状況等に対する評価指標を明確化するとともに、評価結果及びその後の経時的な観察結果等に対応したグラウト、注水強化等の対応・処置パターンを構築した。

**Key Words:** *water-sealed rock cavern, rock classification system, water-sealing capability, water-sealing evaluation*

## 1. はじめに

現在、岩手県久慈市、愛媛県菊間町、鹿児島県串木野市の3地点においては、計500万klの原油の地下国家備蓄事業が順調に行われている<sup>1), 2), 3)</sup>。備蓄原油は水封式岩盤タンクに貯蔵されているもので、原油は岩盤タンク周辺の地下水圧によりタンク内に安全裡に封じ込められている(水封機能)。

水封式岩盤タンクでは、水封機能を確実に発揮させるためには岩盤の水理特性に関する十分な調査と対応が必要である。調査は、建設前には、ボーリング孔等を利用した岩盤状況や岩盤の透水性、割れ目(水みち)の分布状況、地下水位、水文状況等の調査が行われる。また掘削時には作業用トンネルや岩盤タンク等の壁面観察により、岩盤状況、湧水状況や水みちの分布状況が調査、評価され、その結果によって、必要な場合にはグラウトや注水強化等の水封機能の保全のための対策が講じられる。しかし、建設時点においてはその評価の拠り所となる水封機能の観点から見た岩盤の体系的な分類はなく、掘削時のこれらの調査状況に応じてデータを分析・評価し対応を検討したのが実状となっている。

また、地下備蓄施設がわが国に比べて数多く建設されている海外においても、良好な岩盤条件に恵まれていることもあって、このような岩盤分類は現在のところ作ら

れていない。

本報告は、このような現状に対し、掘削岩盤の水理特性を適切に評価し、また評価結果に応じた適切な対応がとれることを目的として、その岩盤の評価指標となる「水封分類法」を構築し提案するものである。これは、従来の岩盤分類による力学的特性に重点をおいた岩盤評価と同様の考え方で、水封機能を健全に保持するという観点から岩盤を評価、分類したものである。また、評価結果に対する対応策として、「対応・処置パターン」を構築し、掘削後の水封機能を保持していく方策を整理した。これは、同様に従来の岩盤分類に基づく支保パターンに対応したものとなっている。

## 2. 水封機能の特徴

石油地下備蓄3基地は、海岸付近において新鮮で堅硬な花崗岩あるいは安山岩が分布している水理的に安定したところを対象として構築されている。これらの岩盤タンク位置周辺の新鮮岩盤の対数平均をとった透水係数は $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{cm/s}$ オーダーの低い値を示している<sup>2)</sup>。

水封式岩盤タンクは、原則としてコンクリート等による覆工は行わず、吹付コンクリート及びロックボルト等によって空洞を補強し、図-1に示すように、岩盤タン



図-1 水封式石油地下備蓄の原理<sup>1)</sup>

ク周辺の地下水圧によって貯蔵する油、ガスを封じ込めるものである<sup>2)</sup>。すなわち、岩盤タンク周辺の地下水圧を貯蔵物の圧力より高くすることによって岩盤タンクへ向かう地下水流動を生じさせ、その地下水流の動水勾配により貯蔵物の外部への漏洩を防止する機構となっている。地下水流の動水勾配は、周辺地下水位（水圧）と岩盤タンク内圧力とのポテンシャル差から算出される。この必要動水勾配は、石油地下備蓄の場合には実証プラントにおける実証実験結果を考慮して0.8を基準とした<sup>2)</sup>。

水封式岩盤タンクには、自然水封方式と人工水封方式がある。自然水封方式は、自然の地下水圧だけを利用する方式であり、人工水封方式は、自然地下水圧を補強するため、岩盤タンク上方に水封トンネルを設け、これから水平あるいは鉛直方向のボーリング（水封ボーリング）列を配置して岩盤タンク周りに水封のカーテンを作り、人工的に給水を行うものである（図-2）。

自然水封方式及び人工水封方式ともに、水封機能を保持するためには、上記した岩盤タンク周辺岩盤における所要の地下水圧の確保と連続的な地下水流動場の形成が必要となる。一般に、岩盤内の地下水は、一旦低下あるいは割れ目等の水みち内に不飽和域が生じるとその回復が困難と考えられ、地下水位は設計時に設定した水理モデルによる数値解析等により求められた管理範囲内に掘削期間中から継続的に保持しておくことが重要である。

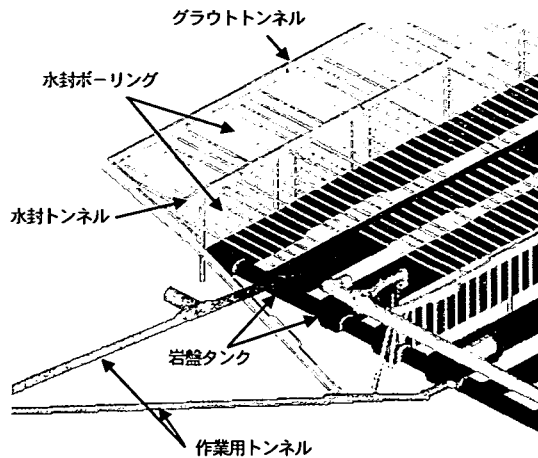


図-2 水封式石油地下備蓄の構造<sup>4)</sup>  
(串木野基地の例、部分表示)

### 3. 水封分類の提案

#### (1) 水封分類の必要性

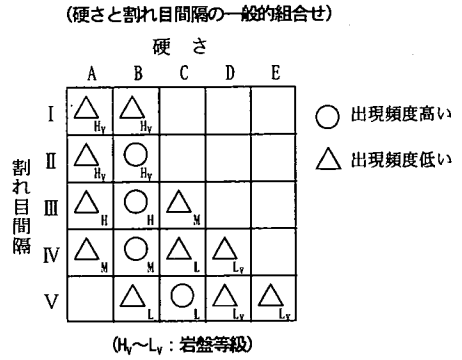
石油地下備蓄基地の建設においては、岩盤分類には深部の地下空洞を対象として新たに検討した分類法<sup>3)</sup>を用いた。この岩盤分類は、分類の主要要素を岩盤の「硬さ」（ハンマー打撃による割れ具合を表現したもの）と「割れ目間隔」（隣り合う明瞭な割れ目間の離れ）の2要素として各々を5ランクに区分し、その評価結果を組合せて岩盤をHv, H, M, L, Lvの5段階に分類するものである（表-1）。5段階の分類にあたっては、表-1に示す割れ目の状態、湧水の状況、風化・変質の各補助要素についての評価を加え、岩盤状況を総合的に評価するようになってきている。しかし、この割れ目の状態と湧水の状況に関しては、これら結びつけて水理的な観点から体系的に評価を行うものとはなっていなかった。

岩盤タンク掘削時の水封機能の保全に関しては、掘削時に多量の湧水が生じ、これが原因となって地下水位が大きく低下するようであれば、これを低減させるためにグラウトを実施するというのをその都度行ってきたというのが実状となっている。実際には、このような現象に対する一定の評価方法が定まっていなかったことから、現象の把握が十分にできていなかった場合もあり、また分析及び対策の実施に時間を要し、掘削時に空洞周辺に部分的に不飽和域が残ったところもみられるなど、その対応が十分とは言えない面があった<sup>4)</sup>。

すなわち、石油地下備蓄基地建設の経験から、水封機能の保全に関しては、掘削切羽において割れ目の分布状況、性状や湧水状況等を体系的にまた迅速に評価し、その評価結果に対してきめ細かな対応をしていくことが重

表-1 地下備式岩盤分類<sup>3)</sup>

「硬さ」			「割れ目間隔」		
	ランク	基準	ランク	基準	
硬 ↑  ↓ 軟	A	ハンマー強打でも容易に割れない。	I	100cm 以上	
	B	ハンマー軽打で割れない。	II	40~100cm	
	C	ハンマー軽打で容易に割れる。ハンマー軽打で小岩片となっても小岩片は硬い場合がある。	III	20~40cm	
	D	ハンマー軽打でへこむ。岩片は手で砕くことができる。	IV	5~20cm	
	E	ハンマーピックが容易に刺さる。岩片は指でつぶすことができる。	V	5cm 以下	



※ 出現頻度は、「硬さ」と「割れ目間隔」の組合せに対応する岩盤の出現する可能性の高低を示す。

(分類の補助要素)

割れ目の状態	[1] 風化・変質なし	湧水の状況	① 坑壁がかわいている	風化・変質	1. 全く風化・変質が認められず、構成鉱物まで新鮮なもの
	[2] 変色あり		② 坑壁がしめっている		2. 一部の鉱物・割れ目がわずかに風化・変質している
	[3] 鏡肌を呈する		③ 坑壁がぬれている(わずかに滴水)		3. 一部の鉱物が風化・変質し、割れ目沿いにも風化・変質が進む
	[4] 固結した挟在物をもつ (再固結した破砕物等)		④ 滴水あり(天盤: 小雨状) (側壁: 水の流れ明瞭)		4. 未風化・未変質の部分が角縁~円礫状に残留している状態
	[5] 礫状・砂状の挟在物をもつ		⑤ 湧水あり(土砂降り状)		5. 構成鉱物の大部分が風化・変質し、二次鉱物に変わっている状態
	[6] 粘土状挟在物をもつ				
	[7] 方解石脈・沸石脈・石英脈等を伴う				
	[8] 明らかに開口している				

要であるということが教訓として認識された。また、維持管理を行っていく上でも、このような評価及び対応が行える指標等の作成が必要となっていた。

## (2) 石油地下備蓄基地における事例の検討

筆者等<sup>4)</sup>は、石油地下備蓄3基地の建設時に生じたいくつもの地下水位低下現象に着目し、水位低下に起因した割れ目の状態とその湧水状況との関係を実績データをもとに分析、検討し、水封機能の保全の観点からこれらの割れ目を分類した。図-3にこれを概念的に表わした図を示す。なお、現場では湧水箇所からの湧水は空洞側溝に区間堰等を設けて集水して測定している。

同図は単一割れ目(水みち)の状態(幅)と湧水の経時的な変化状況との関係を表わしたものであるが、割れ目がLの状態の場合には、地下水位は割れ目沿って短期間に低下し、割れ目沿いに不飽和域が発生することを示している。この程度はMからSの状態であるほど少なく、Sの状態が最も安定していることを示している。

このように、L、M、S、は割れ目の湧水状況、湧水の連続性を表現したもので、上記したようにLは時間の経過とともに湧水が無くなる割れ目を表わし、Mは同様に湧水量が減少するもの、Sは湧水量がほとんど変化しないものを表わしている。

図-4に串木野基地における掘削時の割れ目の評価状況及び湧水状況の経時的な変化状況を表わした図を展開図例として示す。水封機能の保全には割れ目の状態と湧水の経時的な変化状況が極めて重要な管理点となり、Lの状態のような割れ目については、すみやかにグラウト等の対策を行い、湧水の低減及び地下水位低下の抑制をはかっていく必要があった。この割れ目は、典型的なものとしては、これを含む岩盤の透水係数が $10^{-4}$ cm/sオーダーの値を示すものであり、岩盤タンクの対象岩盤である $10^{-6}$ cm/s程度以下の透水性を示す岩盤に比べて高い透水性を示していた。

しかし、実際には透水性がそれほど高くなく、湧水が少ない割れ目においても、割れ目内の水が抜けて結果的

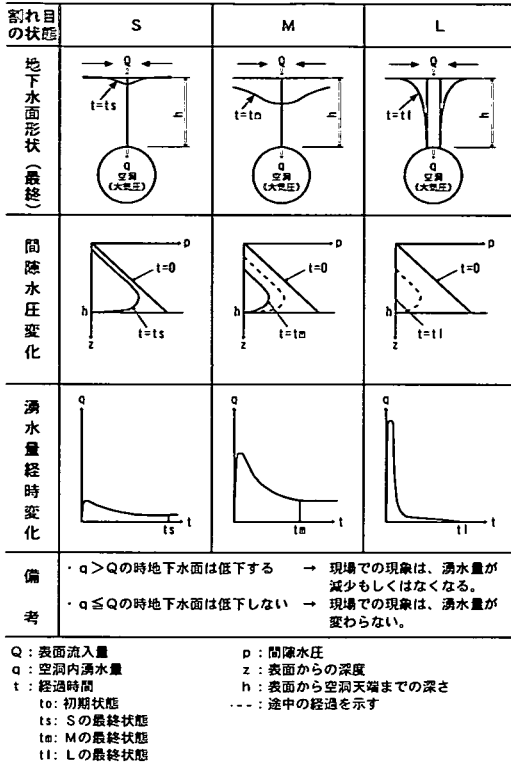


図-3 割れ目の状態と湧水量の経時変化状況<sup>6)</sup>

にはLと同様な割れ目であったということもあり、湧水量の多寡にかかわらず、このような割れ目をいかに早期に発見し、確実に対応して、地下水位の顕著な低下や不飽和域の発生を防止するかが大きなポイントとなる。

図-5 に串木野基地の地質図を示す。串木野基地では岩盤タンクを横断する方向にいくつかの顕著な断層がみられていたが、なかでも同図に示す F9 及び F13 の断層沿いにおいては、開口割れ目を伴う破砕部が頻繁にみられ、その周辺では地下水位は顕著な低下を示していた。これらの割れ目はLに相当すると判断され、グラウトによる破砕部の透水性の改良と水封トンネル・水封ボーリングの追加設置による注水強化策を広範囲に実施している<sup>2),7)</sup>。図-4はこの断層周辺の割れ目状況及び湧水の変化状況を1つの岩盤タンクを例に示したものである。

また、図-4、図-5 に示す安山岩貫入岩 LB(An)や地質境界付近では、割れ目からの湧水に起因した水位低下が部分的にみられたことから、早期に注水及びグラウトを実施することにより地下水位の安定化をはかっているが、このような割れ目はMに相当するものと判断された。また、これら以外のところについては、岩盤の湿りや滴水状況等に大きな変化はみられず、また水位低下もわずかなSタイプに相当する割れ目が概ね分布していた。

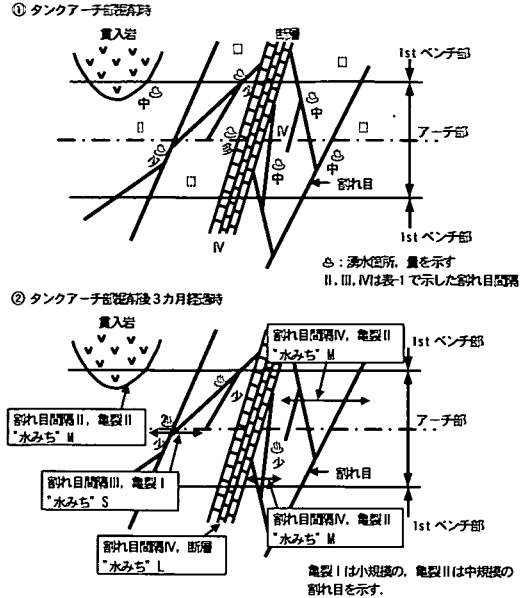


図-4 割れ目の分布状況と湧水量の変化状況図例<sup>6)</sup>  
(岩盤タンクアーチ～1stベンチ壁面展開図)

これらの観察結果から、断層、貫入岩あるいは地質境界等の地質構造には十分な留意が必要であることが知見として得られている。

### (3) 水封分類の基本的な考え方

ここでは、(2)に示した石油地下備蓄基地建設時の事象から評価される割れ目と湧水状況の関係をさらに発展させて、水封機能の保全の観点から、岩盤をどのように評価していく必要があるかについてその考え方を示す。

2. で述べたように、水封式岩盤タンクは、十分な地質調査等を行ったうえで、水理的に安定した堅硬な岩盤地域を選定し立地されている。岩盤タンク周辺の新鮮岩盤部の対数平均透水係数は $10^{-6}$ cm/s オーダー以下の岩盤であり、基本的には岩盤タンク等の掘削によってタンクレベルまで地下水位が低下してしまうような岩盤地域は対象となっていない。また、これに近いような場合でも、水封トンネル及び水封ボーリングを設置し、人工的に給水することによってこれを抑制しながら掘削するようはかっている。このように、基本的には掘削により岩盤タンク周辺岩盤において大幅な地下水位低下は生じさせないというのが建設上の大きな前提となっている。

また、岩盤内の不飽和域の発生を抑制し、岩盤タンク完成時における水封機能を確実なものとするには、掘削期間中から周辺岩盤内には設計時に検討した所要の動水勾配に対応する地下水圧を確保し、また安定した連続的な地下水流動場を形成しておくことが重要である。

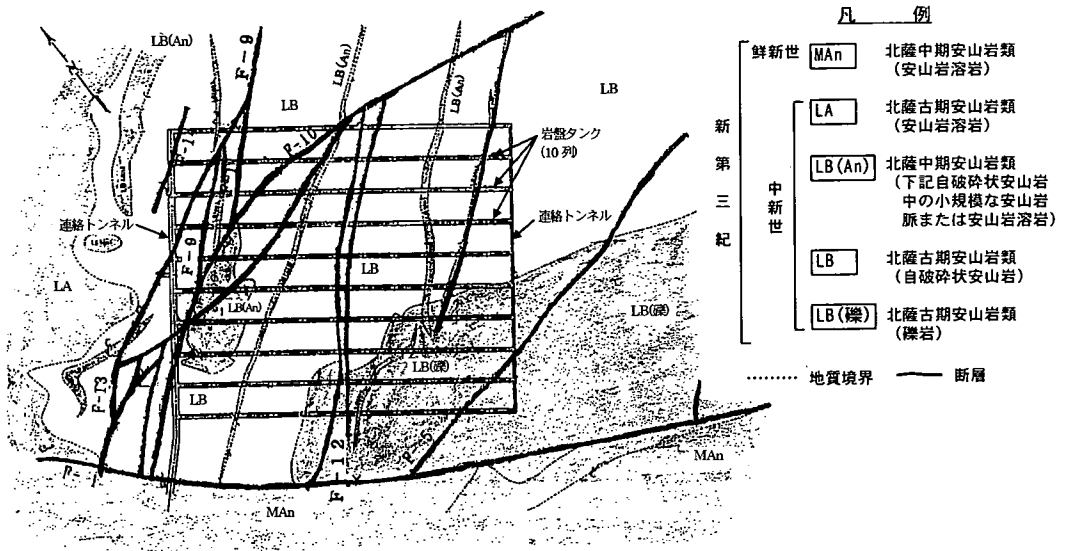


図-5 串木野基地地質平面図 (EL-27.5m レベル) ⑥

岩盤タンクの対象とする岩盤は、その付近に既にトンネル等の構造物がある場合、あるいは過去に地下構造物の構築の経験を経ている場合、また周辺で地下水を汲み上げている場合、等の自然地下水の附存状態に対して何らかの人為的な擾乱要因がある場合を除けば、掘削前には、その地域の水文特性に応じて季節的に変動する地下水位のもとで、地下水位以下の岩盤は飽和状態で安定した状態にあると考えられる (図-6①)。

この水理的に安定状態にある岩盤に顕著な水位低下や不飽和域の発生をもたらす原因は掘削行為であり、この掘削が周辺の水理状態に大きな変化をもたらさずに“穏やか”に行われれば、地下水位以下が飽和状態に保持されながら、空洞等が形成される新たな境界条件、水収支条件のもとで2次的に平衡した地下水位及び地下水流動場の形成がなされるはずである (図-6②)。ここで、“穏やか”に表現したのは、図-6③に示すような顕著な破碎帯や水みちに起因する局所的な湧水や顕著な地下水位低下を生じさせない状態を意味したものであり、設計時に設定した岩盤の水理モデルにより算定される湧水量及び地下水位低下に概ね対応した変化を許しながら掘削を行うことを表わしている。すなわち、図-6②に示したように周辺岩盤からの継続的な地下水補給を受けつつ、地下水位以下の飽和域において水みち内に“地下水の不連続を生じさせない”ような変化状態を表わす。

このように、ここで提案する水封分類は、このような水理的に“穏やか”な掘削を行うことが掘削時における水封機能保持のキーポイントであると考え、以下の2点を基本理念として検討を行った。

- ①地下水位が管理レベル付近まで顕著に低下するような湧水は許容しない。

- ②湧水箇所の湧水が時間とともに無くなるような地下水の不連続は生じさせない。

#### (4) 水封分類

ここでは、これまで示してきたことをもとに、掘削直後の切羽の岩盤の割れ目状況、湧水状況等について水封機能の保全の観点から観察し、これを評価・分類することを目的とした水封分類を示す。

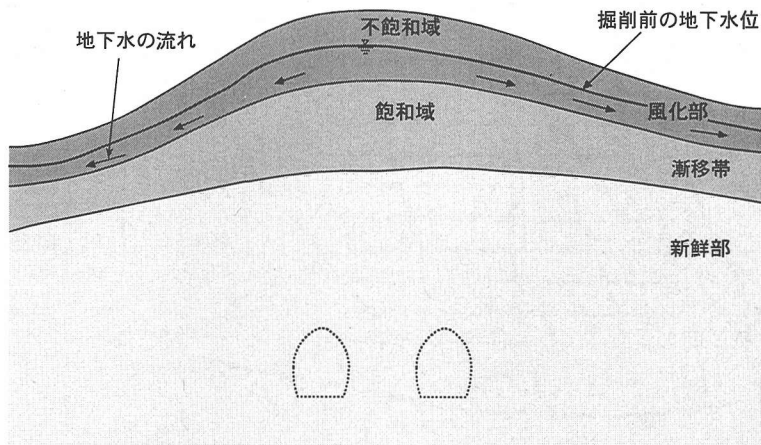
岩盤タンクの建設を行う場合には、周辺岩盤においては一定の範囲内毎に観測孔を設け、地下水位や間隙水圧等のモニタリングを行って周辺地下水の水理状況を監視することから<sup>2)</sup>、ここでは掘削中にはこのようなモニタリングを行うことを前提としている。

水封分類及び評価方法を表-2及び表-3に示す。表-2は本分類の核となる分類表を示したものであり、岩盤を割れ目や破碎帯の有無、水みちとしての連続性、粘土等の介在の有無、湧水の状態等から分類し、水封機能の保全の観点から岩盤の良、不良を評価するものである。表-3はこの評価内容、根拠の詳細を示している。また、図-7に、表-2に示した各分類における割れ目等の状況及び湧水状況を空洞周辺における模式図として示した。

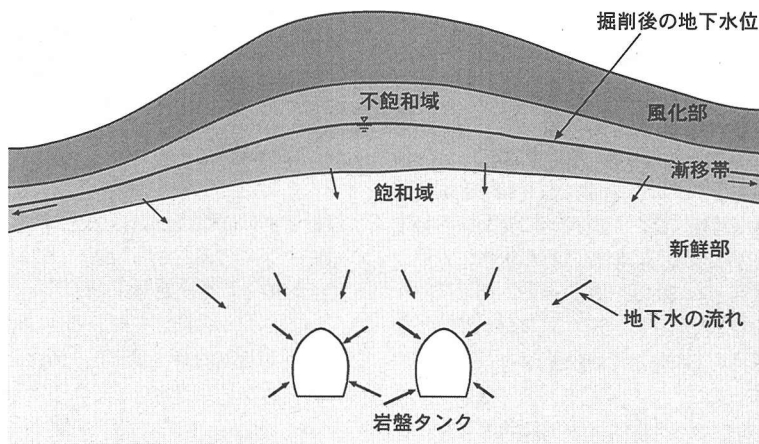
この分類では、岩盤の透水性の観点から、割れ目がほとんどなく、あるいは割れ目や破碎帯があってもこれらは密着しており極めて透水性が低いものを“優良”とし、岩盤及び割れ目・破碎帯に分けてAとBに分類した。この“分類A”及び“分類B”は見た目上は壁面からの湧水が無いようにも見え、水封というよりは“岩封”(岩盤自体の水密性、気密性が極めて高く岩盤そのものが気密容器となっている)状態にあるとも言える岩盤である。

また、割れ目が不規則にみられ、マクロ的にはダルシ

①掘削前の地下水位



②理想的な掘削による地下水位状況



③顕著な破碎帯等があった場合の局所的な湧水に伴う不飽和域の発生の可能性

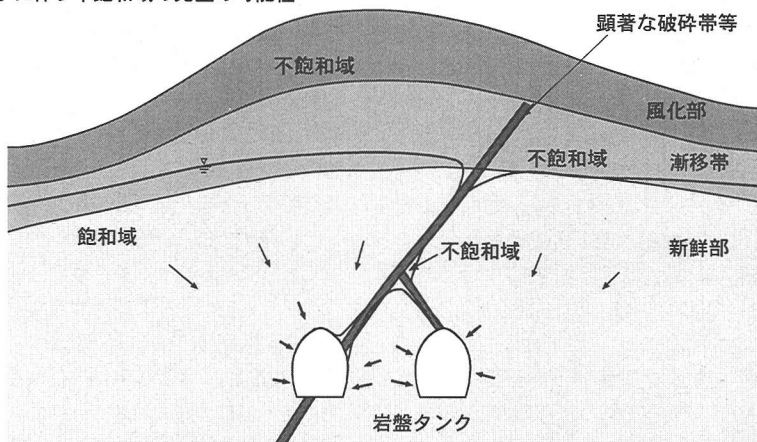


図-6 岩盤空洞の掘削に伴う地下水位の変動及び不飽和域の発生の可能性について概念的に表わした模式図

表-2 掘削岩盤に対する水封分類

分類 (模式図は図-7)	評価基準	評価 (詳細は表-3)	対応 (詳細は表-4)
A	岩盤には明瞭な割れ目はみられず、緻密なため、壁面は湿っていることが分かる程度で、乾いたようにも見える。	優良	I
B	幅及び連続性が明瞭な割れ目あるいは粘土を伴う破碎帯であるが、これらは密着しており、湧水はほとんどあるいは全くみられない。		
C	岩盤には不規則な割れ目が発達し、水が全体的に浸潤しているかまたは設定した水理モデルに対応した適度な湧水が全体的に生じている。	良	II
D1	幅及び連続性が明瞭な割れ目であり、割れ目からは明瞭な湧水が生じている。	注意1	III
D2	一部に粘土を介在した破碎帯であるが、破碎帯は浸潤しているかまたは湧水が概ね全体的に生じている。		
E	粘土化した破碎帯であるが、空隙が不規則にみられ湧水が部分的に生じている。	注意2	IV

注1) 本表は割れ目状況、湧水状況を基本に分類したものであり、掘削された全ての岩盤に対して適用する。

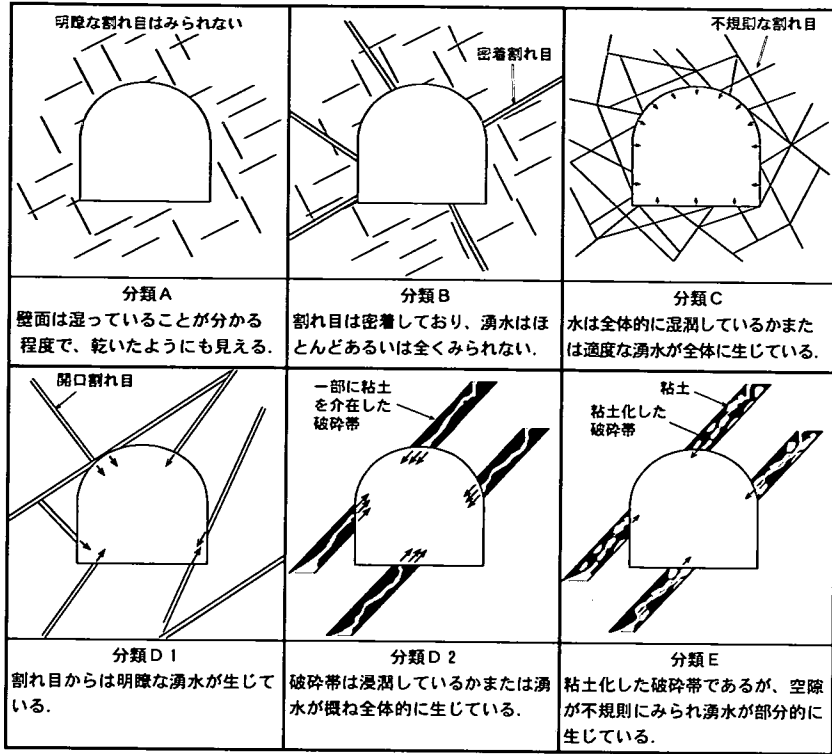
注2) 湧水が生じている場合は導水等によってその量を計測する。

注3) 明瞭な割れ目及び破碎帯についてはその性状、幅、走向、傾斜等を記録する。

注4) 上記分類のいずれにも相当しないと考えられる岩盤、割れ目、破碎帯等については、割れ目状況、湧水状況が近い分類にあてはめてその後の対応等を行うものとするが、その特徴を記載し、別途検討、評価するものとする。

表-3 水封評価の解説

評価	解説
優良	<ul style="list-style-type: none"> <li>岩盤が極めて良好であるためその透水性は低く、岩盤自体の水密性、気密性が極めて高いと考えられる。</li> <li>割れ目及び破碎帯は密着しており、同様に水密性、気密性は高いと考えられる。</li> <li>壁面は乾いているようにも見えるが、岩盤及び割れ目、破碎帯の水密性が高いことによるもので、水封機能上は問題とはならない。</li> </ul>
良	<ul style="list-style-type: none"> <li>岩盤には不規則な割れ目が存在するが、水理上は巨視的には均質・等方体とみなされ、ダルシ-則に従う水理モデルに対応した地下水流動が生じていると考えられる。</li> <li>水封機能上は理想的な岩盤である。</li> </ul>
注意1	<ul style="list-style-type: none"> <li>主要な水みちとなるものであり、その透水性及び湧水状況によっては、周囲からの地下水補給が十分にされない場合が考えられ、その場合には地下水位の局所的あるいは全体的な低下を生じ、また水みち内部や周辺及び上部岩盤における不飽和域の発生をもたらし可能性がある。</li> <li>湧水の絶対量とその経時変化状況及び周辺地下水位状況が重要な検討点となる。</li> </ul>
注意2	<ul style="list-style-type: none"> <li>破碎帯の幅は不規則に膨縮し、また水みちも粘土等の介在によってその幅が不規則に変化していることが考えられる。すなわち水みちとしては一概には連続していないことが考えられる。</li> <li>この種の破碎帯が最も留意が必要な破碎帯であり、放置しておくとも時間とともに部分的に水が抜けて不飽和域が生じ、またこれが空洞周辺から奥部へ拡大していく可能性も考えられる。</li> </ul>



注) / は湧水を表わす

図-7 各分類における割れ目等の状況、湧水状況の解説 (模式図)

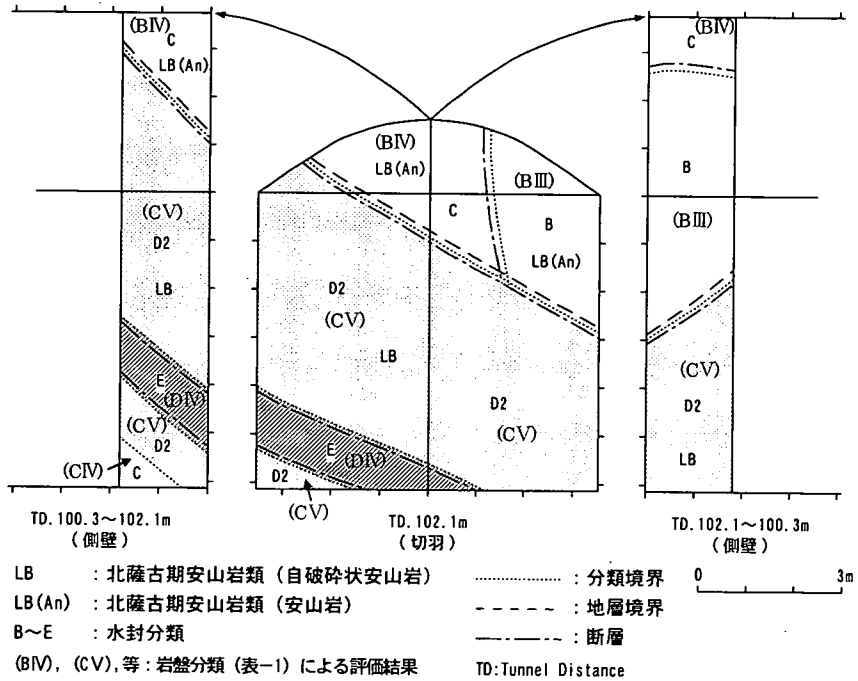


図-8 水封分類による観察結果の記録方法例 (串木野基地の頂設導坑の岩盤分類に従ったスケッチ図を、筆者等が水封分類による記載に加筆修正したもの)



一則に従う水理モデルにほぼ対応した地下水流動を示すと考えられる岩盤については“良”とし、これをCに分類した。この“分類C”は水封機能上は最も理にかなった岩盤であると言える。

“注意1”は顕著な水みち（高透水帯）となる開口割れ目、破碎帯に対するものであるが、粘土等の介在が無いか、またはあったとしても粘土等が水みちとしての流動環境に及ぼす影響がほとんど無いと考えられるものを言い、開口割れ目に対しては“分類D1”、部分的に粘土がみられる破碎帯に対しては“分類D2”とした。

“注意2”は粘土化した破碎帯に対するもので、これを“分類E”とした。粘土化した破碎帯は、破碎帯自体及び粘土化した部分の厚さが岩盤内で不規則に変化していることが考えられ、水みちとしての幅が不規則に膨縮しているとともに、透水性も一様ではないことが考えられる。従って、湧水によって部分的に地下水が抜けて地下水の連続性が保たれなくなる可能性があり、このような破碎帯周辺には不飽和域が生じる可能性が高いことから、水封機能上は最も留意する必要がある。

なお、表-2及び表-3に示した分類にはあてはまらないと考えられる岩盤や割れ目、破碎帯等については、割れ目の状況、湧水状況が近い分類にあてはめてその後の対応を行うものとするが、スケッチの際にはその特長を記録し、別途検討、評価するものとする。

表-2及び表-3に従って観察した結果は、図-8に示すような様式のスケッチ図に記録し、次の対応・処置等のフォローを行うための資料とする。同図は従来の岩盤分類に従って作成したスケッチ図に本分類による観察結果を記録したものであるが、本例は岩盤分類に従った分類境界と本分類による分類境界が一致した例を示している。これらは岩盤によって当然ずれる場合もあり、掘削岩盤ごとに、岩盤状況と割れ目状況、湧水状況との関連がこのスケッチ図によって明確にされていくことになる。また、これらのスケッチ結果は空洞全体の地質展開図、地質断面図等に記載し、全体的な地質状況や破碎帯等との対応等について検討を加え、同様にそのフォローを行う際の資料として用いる。

#### (5) 対応・処置パターン

表-4は、表-2及び表-3で評価、分類した“優良”、“良”、“注意1”、“注意2”という掘削直後の岩盤評価に対してどのような対応・処置をとるべきかを示したものであり、従来の岩盤分類における支保パターンに対応させたものである。

“対応I”は特に処置する必要がないことを示しており、日常的なパトロールによって壁面状況の観察を継続する程度で良いことを示している。これは支保パターンでは無支保に相当するものである。

“対応II”は、その後の壁面の浸潤状況、湧水状況の観察により、壁面が乾いてくるようであれば、周辺岩盤からの地下水の補給が十分になされていないものと判断されることから、このような場合には周辺岩盤に対する注水による対応等が必要となることを示している。この場合、地下水の補給が十分ではないと考えられる範囲は空洞周辺のゆるみ域内（透水性が非ゆるみ域より高くなっていると考えられる。）に留まっていることも考えられるが、ここでは万全を期すという観点から、このゆるみ域を含む周辺岩盤に注水孔を設けて注水を継続的に行うこととした。

“対応III”は、(2)で検討した割れ目の評価、分類を基本としたもので、湧水量や地下水位の変化状況によってはグラウト及び注水による対応が必要なことを示している。特に、湧水量が初期の値から大きく減少する場合には注意を要することから、掘削後の壁面状況の観察及びその経過に応じた十分な対応が必要である。

“対応IV”は、水封機能に対して最も留意する必要がある水みちが不規則となっている破碎帯を対象としたものであり、この場合にはグラウト及び注水による対応をすみやかにとっていくことが重要である。また、このグラウトによる処理は空洞周りの対象範囲に対して十分に行っておく必要がある。

図-8に示したスケッチ例は、串木野基地における岩盤タンクの切羽の1例であり、自破碎状安山岩LBに安山岩LB(A<sub>n</sub>)が一部貫入してきている切羽のスケッチ図に本分類を記載したものである。本例では、切羽にみられるLBは断層破碎帯の主要部となっており、特に“分類E”で示した範囲は粘土化した破碎帯であり、また“分類D2”は一部で粘土化がみられる脆弱化したところとなっていた。これらの部分は当初は浸潤している状態であったが、時間の経過とともに乾いてきており、3.(2)で述べたその後のこの切羽にみられる破碎帯全域に対する長期にわたるグラウトの実施につながっている。建設時には本例に示した分類による記載は行っておらず、その後の周辺の地下水位低下状況や全体的な湧水状況等からグラウトの実施にいたっているもので、本方法による観察及びフォロー(“対応III”、“対応IV”)を行っておけばさらに迅速なまた的確な対応が行えたものと考えている。“分類B”及び“分類C”の領域については特にグラウトを行う必要性はなかった。

以上に示した各対応の目指すところは、岩盤タンク周辺岩盤に恒常的な連続した地下水流動場を確保することであり、これが水封機能を確保する基本条件となっていることに基づいている。そのためには、ここに示したような各岩盤状況に適合した対応を確実に行っていく必要がある。またこの対応を誤ると水封機能を確保することが困難になる可能性があるということを示している。本

表-4 水封対応・処置パターン

対応	対応・処置パターン
I	<ul style="list-style-type: none"> <li>吹付け面の状況を観察する程度で、特に処置を行う必要性はない。</li> </ul>
II	<ul style="list-style-type: none"> <li>吹付け面の浸潤状況を追跡観察し、乾いてくるようであれば、水封トンネル等からその付近に対して注水孔を追加設置し、継続的に注水を行う。</li> <li>この追加注水孔による処置は、その壁面が当初と同程度に浸潤してくることをもって処置完了とするが、必要な場合はさらに注水孔を追加する。</li> <li>注水孔は恒久設備とするとともに、必要に応じて、周辺に間隙水圧計を設置して水圧状況を監視する。</li> </ul>
III	<ul style="list-style-type: none"> <li>初期湧水量が管理基準値を超えている場合には、直ちにグラウトを行い、透水性を改良する。</li> <li>初期湧水量が管理基準値を下回っている場合は、湧水量の経時変化を計測し、その状況によって以下の処置を講じる。               <ol style="list-style-type: none"> <li>Sタイプ：湧水量が少なくまた経時的にほとんど減少しない場合には、特に処置は行わずに状況を監視する。</li> <li>Mタイプ：湧水量がゆるやかに減少してある一定量に落ち着き、かつ周辺地下水位も管理基準値以下には下がっていない場合には、特に処置は行わずに状況を監視する。</li> <li>Lタイプ：湧水量が急激に減少し、ゼロに近いところまで減少するようであれば、すみやかにグラウトを実施して透水性を改良するとともに、その後、水封トンネル等からその付近に対してIIと同様な注水孔を追加設置し、継続的に注水を行う。</li> <li>Sタイプ及びMタイプの場合においても、湧水量がゼロに近いところまで減少するようであれば、Lタイプと同様の処置を講じる。</li> </ol> </li> <li>グラウト及び注水孔による処置は、湧水量がある一定値に回復し、また周辺地下水位も管理基準値以上で落ち着いていることをもって処置完了とする。</li> <li>注水孔は恒久設備とするとともに、必要に応じて、周辺に間隙水圧計を設置して水圧状況を監視する。</li> </ul>
IV	<ul style="list-style-type: none"> <li>湧水の経時変化状況の監視が困難であるが、湧水が枯れる可能性が大であり、すみやかにグラウトを実施して透水性を改良するとともに、水封トンネル等からその付近に対してIIと同様な注水孔を追加設置し、継続的に注水を行う。</li> <li>グラウト及び注水孔による処置は、壁面に恒常的な浸潤がみられることをもって処置完了とする。</li> <li>注水孔は恒久設備とするとともに、必要に応じて、周辺に間隙水圧計を設置して水圧状況を監視する。</li> </ul>

- 注1) 湧水量の管理基準値はあらかじめ数値解析等により設定しておくが、施工の進展に伴う水理状況に関する情報の集積及び解析へのフィードバック等により、必要な場合にはその値を見直し、修正することも考える。
- 注2) 湧水状況の監視により、これが経時的に減少あるいは乾いてくるような場合、あるいは周辺地下水位が管理基準値に近づくような場合には、注水孔を設置する等の対策を講じることを検討する。
- 注3) 間隙水圧計による計測値は、数値解析により求められるその位置における予測値と比較検討し、計測値が十分な水圧を示していないと判断される場合には、追加の注水孔を設置する等の対策を講じることを検討する。
- 注4) グラウトによる改良及び注水孔の配置等については、状況に応じて最適な方法を検討するものとする。また、空洞奥部の水みちの保全の観点から、グラウトはできる限り空洞近傍を対象としたものとするのが重要である。

方法はその考え方を体系的に明らかにしたものである。

なお、表-4 の注釈に示したように、グラウトは岩盤タンク近傍の限られた範囲とすることが重要で、いたずらに空洞遠方までグラウトを拡大することは、貴重な水みちを逆に不規則に閉塞することになり、新たな不飽和域の生成や必要間隙水圧の減少をもたらすことが考えられるため、その範囲の設定には十分留意する必要がある。

#### 4. 水封分類の適用及び期待される効果

本提案による水封分類法は、適用に際しては、不飽和域の発生を抑制する必要がある範囲において、掘削空洞全面に適用していくことが重要である。すなわち、新たに構築される空間は全て地下水流動場を乱す要因となることから、この水封分類法を必要空間全てに対して適用して初めて施設の全体的な水封機能を保全することが可能となると考えられる。これをスポット的に適用した場合には、重要な水みちを見逃し、部分的に不飽和域を生じさせる可能性が考えられる。

施設の水封機能は、一部にでも不具合があった場合にはそこから貯蔵物が漏洩し、全体の水封機能が崩れてしまう可能性が考えられることから、施設全体に対して総合的に管理することが重要である。本方法は、特にこの観点を重要視して検討を行ったものであり、本方法による十分な観察と対応により水封式岩盤タンクの水封機能を施工段階から確実に構築していくことが可能となると考えられる。

#### 5. おわりに

本方法は、石油地下備蓄基地の建設時における実績をもとに、水封機能の保全の観点から岩盤を評価、分類し

対応する方法を示したものである。本方法はその1つの基本形を提案したものであり、これで全てのケースがカバーできると考えているものではない。すなわち、ここで示した基本的な考え方をもとに、各施設毎の諸条件、特性、また岩盤状況、施工状況等を考慮しつつ最適な方法を構築していくことが重要であると考えられる。

また、本方法は周辺環境への地下水位低下の影響を十分考慮する必要がある場合を含めて、安定した地下水流動場を構築する必要がある地下構造物全般に対しても同様に適用していくことが可能と考えられる。

#### 参考文献

- 1) 蒔田敏明：地下石油備蓄基地建設の概要，資源・素材学会誌，Vol. 107, No. 13, pp. 927-938, 1991.
- 2) 土木学会：大規模地下空洞の情報化施工，pp. 246-293, 1996.
- 3) 日本トンネル技術協会：大規模地下空洞(8)―事例石油地下備蓄一，トンネルと地下，Vol. 29, No. 12, pp. 75-82, 1998.
- 4) 日本地下石油備蓄協会：串木野地下備蓄基地工事記録（岩盤土木），1994.
- 5) 蒔田敏明，福竹養造，星野延夫，井口敬次，新見健：深部地下空洞を対象とした岩盤分類法―石油地下備蓄基地における岩盤分類と総合評価―，応用地質，第32巻，第5号，pp. 240-251, 1991.
- 6) 岡本明夫，中澤保延，長谷川誠，小島圭二：岩盤の「割れ目」に対応した水封評価法，資源と素材，Vol. 114, No. 1, pp. 19-27, 1998.
- 7) 長谷川誠，宮下国一郎：串木野地下石油備蓄基地における水封設計及び施工管理，岩盤構造物の設計法に関する研究報告書(シンポジウム発表論文編)，pp. 1-4, 日本学術協力財団・地盤工学会，1997.

(2002.6.7 受付)

## ROCK CLASSIFICATION SYSTEM BASED ON WATER SEALING FUNCTION FOR ROCK MASS AROUND WATER-SEALED ROCK CAVERN

Kazuo UEDE, Akio OKAMOTO and Kuniichiro MIYASHITA

In water-sealed rock caverns for storing oil, monitoring and evaluating the hydraulic characteristics of the rock mass around the cavern during excavation are very important issues. When the rock caverns were initially constructed at Kuji, Kikumura and Kushikino sites in Japan in 1986 to 1995, however, no systematic rock classifications for such evaluation were available. The records of construction of the caverns at the sites are therefore reviewed to propose "rock classifications based on water sealing function" corresponding to usual rock mass classifications. The standards for evaluating the distribution and continuity of rock fractures, and seepage condition are classified. Grouting, water injection increase and other measures are recommended as patterns according to the results of evaluations including time-based monitoring of seepage condition on the walls of the caverns.