

高压ガス地下貯蔵の実績とわが国の動向

櫻井春輔*・Halvor KJORHOLT**・田村富雄***・山地宏志***

欧米では既に多くの岩盤内高压ガス貯蔵の実績があるが、わが国では鉱業におけるわずかの例を除きほとんどない。本論文では、文献に顕われる海外の岩盤内高压ガス貯蔵の実績を紹介するとともに、漏気防止工の概念を整理し、若干の考察を行った。さらに、神岡鉱山におけるエアレシーバの漏気防止工を紹介し、わが国においても地質条件等を十分に吟味することで、高压ガス貯蔵が可能であることを示す。

Key Words : pressurized gas, storage in rock caverns, underground storage experience, gas tightness requirements, leakage control

1. 緒言

近年、国土の有効利用などを目的として、高压ガスの地下貯蔵が検討されている。たとえば、電力の平準化を目的としたCAES-GT (Compressed Air Energy Storage-Gas Turbine) システムやLPGの常温高压貯蔵等はこの好例であろう。

しかしながら、わが国における高压ガスの地下貯蔵実績は、後述するエアレシーバを除くと皆無に等しい。さらにわが国は環太平洋火山帯に位置し、過去に多くの造山作用並びに風化作用を受けたため著しく複雑な地質条件を有する。従って、今後、わが国の高压ガス地下貯蔵の可能性を検討するためには、多くの研究、並びにフィージビリティ・スタディが実施されねばならない。

本文はこれらの研究やフィージビリティ・スタディに資することを目的として、文献に現れた海外の高压ガス貯蔵の実績を紹介するとともに、岩盤空洞内への高压ガス貯蔵における各種漏気対策の有効性を検討し、わが国におけるその適用の可能性を探るものである。

2. ガス貯蔵方式

ガスの貯蔵方式は貯蔵目的、貯蔵施設の構造、稼働時の貯蔵ガス圧及び貯蔵温度によって分類される。今日、大容量ガスの貯蔵施設としては次の四つの方式が検討もしくは用いられている。すなわち、1) 半地下式貯蔵、2) 多孔質岩層中への貯蔵、3) 岩塩ドーム内への貯蔵、4) 空洞内への貯蔵である。

また、稼働時の貯蔵ガス圧に関しては次の二つの方式

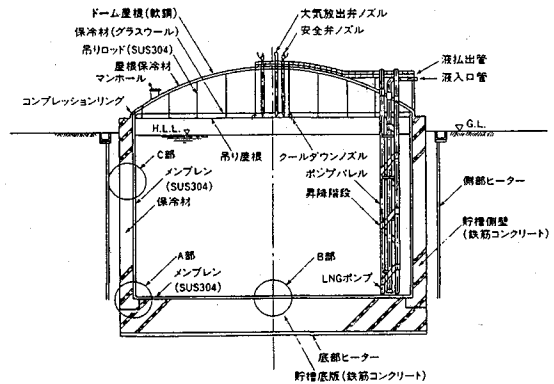


図-2.1 半地下式貯蔵方式の一例¹⁾

が検討もしくは用いられている。すなわち、1) 変圧式ガス貯蔵、2) 定圧式ガス貯蔵である。

以下、これらに関する概要をわが国における状況を加味し概述する。

(1) 貯蔵施設の構造

a) 半地下式貯蔵

半地下式貯蔵は一般に低温液化ガスの貯蔵に用いられる。すなわち、大気圧下でガスを沸騰点以下にまで冷却し、これをタンク内へと貯蔵する。この方式は、LPGやLNG等の大容量貯蔵方式として完成された技術である。LNGの場合の貯蔵方式の概要を図-2.1に示す¹⁾。この貯蔵方式に関しては、電力各社並びにガス各社の多年の努力により、わが国が世界におけるトップの技術力を有し、その発電量は1988年末時点で全発電量の20.1%にも達する²⁾。

一方、表-2.1に示すように炭化水素の標準沸点(大気圧における)はブタンを除き零度を大きく下回る。従って、液化天然ガス(LNG)貯蔵は、液化並びに冷却保持のため多大なコストを要する。このため、貯蔵コスト低減を目的として天然ガスの素掘り空洞内への貯蔵が研

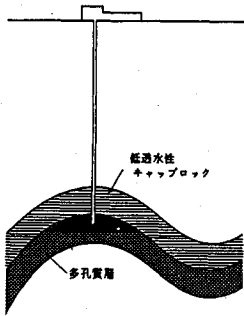
*正会員 工博, Ph. D. 神戸大学教授 建設工学科 (〒651 神戸市灘区六甲台町1丁目)

**Ph. D. Research Engineer SINTEF (Foundation for Scientific and Industrial Research at the Norwegian Institute of Technology)

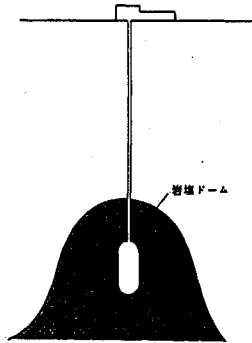
***正会員 三井建設(株) 技術研究所

表—2.1 大気圧におけるガスの標準沸点

貯蔵ガス	標準沸点 (°C)
水素	-252.8
窒素	-195.8
酸素	-183.0
メタン	-161.5
エタン	-88.6
プロパン	-42.1
イソブタン	-11.7
n-ブタン	0.5



図—2.2 多孔質層中へのガス貯蔵概要



図—2.3 岩塩ドーム内へのガス貯蔵概要

究されている^{3),4)}。

b) 多孔質層中への貯蔵

多孔質層中へのガス貯蔵の原理を図—2.2に示す。図に示すように、ガスは多孔質層中の空隙内に水と置換されて貯蔵される。このとき、多孔質層上部には低透気性のキャップ・ロックが存することが必要であり、このキャップ・ロックが漏気防止バリアとして働く⁵⁾。

ガス貯蔵に適した多孔質層としては滞水層もしくは油・ガス田跡が挙げられるが、このような地質はわが国においては秋田、新潟地域の一部を除きほとんど期待できない⁶⁾。

c) 岩塩ドーム内への貯蔵

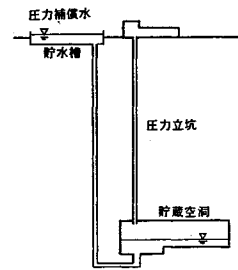
岩塩ドーム内へのガス貯蔵の概要を図2-3に示す。岩塩ドームはソリュション・マイニングによって構築され、ドーム内へと達する1本もしくは複数のボーリング孔によって、ガスが供給・排出される^{7),8)}。

しかしながら、多孔質層中への貯蔵と同様にわが国においては岩塩層が期待できず、世界的にみても一部の地域にしか存在し得ない。

d) 空洞内への貯蔵

わが国において最も期待されるガスの大容量貯蔵方式は、岩盤内空洞への貯蔵であろう。対象とする岩盤は種々考えられるが、貯蔵空洞としては、素掘りもしくはライニングを施した空洞が考えられる⁹⁾。

素掘りの場合、空洞周辺の岩盤が貯蔵圧を支持するとともに漏気防止バリアとしても働く。この場合、水封によって気密性を保つことが考えられる。一方、ライニングを施した場合、空洞周辺岩盤は貯蔵圧を支持するだけ



図—2.4 定圧貯蔵方式の概要図

であり、漏気防止バリアとしてはライニングが働く¹⁰⁾。

(2) 運営時の貯蔵圧

高圧ガス貯蔵のガス圧は定圧方式もしくは変圧方式で運営される。定圧方式の場合、貯蔵空洞は上方の貯水槽と圧力立坑もしくは圧力トンネルによって連結され、圧力補償水の移動によって一定圧力が保持される。その概要を図—2.4に示す。

変圧方式の場合、貯蔵容量は常に一定であるが、貯蔵圧が変動する。このため、機能上必要とされる最小貯蔵圧以上で常時運転されねばならない。従って、有効なガスの貯蔵量は、最大貯蔵圧から運営に必要な最小貯蔵圧を差し引いたものとなる。尚、この場合、貯水槽及び圧力立坑等が不要であることは言うまでもない。

3. 高圧ガスの貯蔵実績

高圧ガスを人工的に貯蔵しようとする最初の試みは19世紀の末にまで遡る。1889年、ドイツのHelibronn近郊の鉱山内に圧縮空気を貯蔵する施設(エアレシーバ)が建設された¹¹⁾。この目的は、貯蔵した空気によってドリルや鉱山機械を動作させ、稼働コスト及び投資コストを低減させようとするものであった。

それ以来、多くの高圧ガス貯蔵施設が建設されてきたが、その多くは圧縮空気もしくは炭化水素の貯蔵施設である。ここでは、その各々についての概要を概説する。

(1) 圧縮空気貯蔵の実績

圧縮空気の貯蔵施設の代表的なものは先に述べたエアレシーバである。図—3.1にその概要を示す¹²⁾。これは、わが国でも神岡鉱山及び佐々連鉱山において建設されている。

スウェーデンを例にとれば、1919年に最初の施設がStriberg 鉱山に建設されて以来、1920年代の終わりには10以上ものエアレシーバが建設された^{13),14)}。その貯蔵空洞の容積は数百~数千 m³で、貯蔵圧は0.7 MPa~1.2 MPaの範囲である。ただし、これらの中には、余りにも漏気が甚だしいために、放棄されたものもある。

これまでの、エアレシーバの稼働より得られた知見は次のようなものがある。

- 1) 一般に、貯蔵空洞が地表面に近いほど、漏気の発

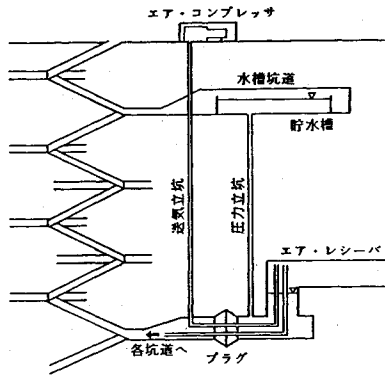
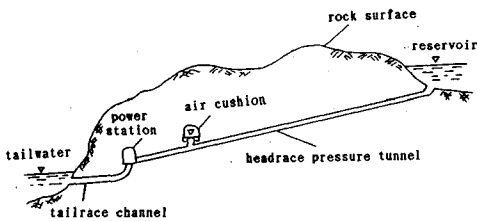
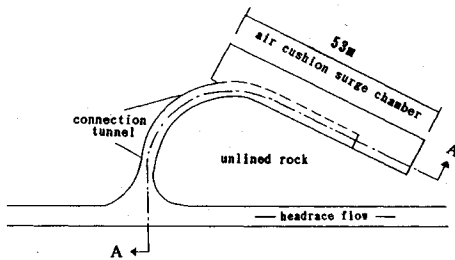


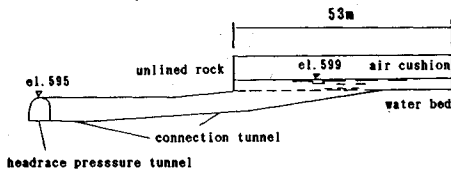
図-3.1 エアレシーバの概要図



(a) 縦断面図



(b) 平面図



(c) 横断面図

図-3.2 エア・クッション・サージ・チャンバーの概要図¹⁷⁾

生が甚だしくなる¹⁴⁾。

2) 図-3.1に示すように圧力補償用の貯水槽が地山内に設けられた場合、貯蔵空洞周辺の岩盤が飽和され、漏気防止に効果がある¹⁵⁾。

圧縮空気貯蔵施設の他の例としては、エア・クッション・サージ・チャンバーがある。これは水力発電に従来用いられてきたサージ・タンクに取って替わるものであ

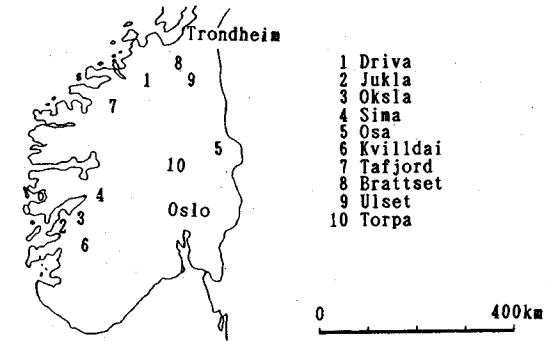
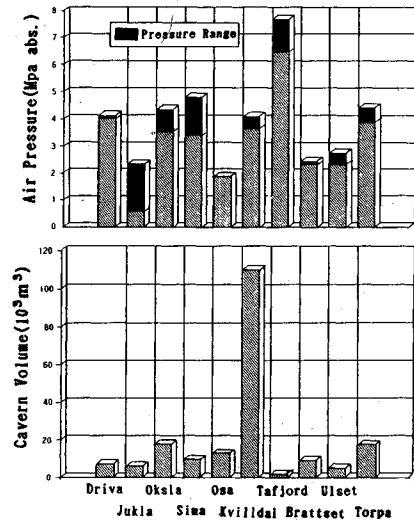


図-3.3 現在稼働中のエア・クッション・サージ・チャンパーの総覧¹⁷⁾

り、短い連結トンネルを介して圧力トンネルと連結される¹⁶⁾。その概要を図-3.2に示す¹⁷⁾。

最初のエア・クッション・サージ・チャンパーはノルウェーのDriva発電所に建設され、1973年に認可が降りている¹⁸⁾。これまで10箇所に施設が建設されているが、その全てが図-3.3に示すようにノルウェーにある。尚、貯蔵圧は4.0 MPaをこえるものが6つあり、7.7 MPaを越えるものもある。

今日、圧縮空気貯蔵に関して最も注目される施設はCAESであろう。これは、ガス・タービン発電とのコンビネーションによって電力のピーク需要に対応するものである^{19), 20)}。尚、最初のCAESのアイデアは1940年代前半に示された¹²⁾。

1991年末時点ではドイツ(290 Mw, 1979年認可)²¹⁾、及びアメリカ合衆国(110 Mw, 1991年認可)に実用CAESプラントがある。これらは岩塩ドームを利用したものである。一方、イタリアでは滞水層を利用して25 Mwの試験プラントを建設し、試験中である。その他、イスラエル、ソ連、フランス、ルクセンブルグ等でも検討中である。わが国においては、北海道に実証プラント

表一-3.1 天然ガス貯蔵施設の
国別内訳

国名	件数
アメリカ合衆国	392
カナダ	27
ソ連	46
東ヨーロッパ	14
オーストラリア	1
西ドイツ	28
フランス	13
イタリア	10
オーストリア	4
ベルギー	3
イギリス	2
デンマーク	1
その他	1
合計	542

表一-3.2 天然ガス貯蔵施設の
貯蔵形態別内訳

貯蔵形態	件数
廃棄ガス・油田	432
滞水層	82
岩塩ドーム	33
鉱山内	4
合計	542

が建設される予定である。このほか、圧縮空気貯蔵の特殊な例としては、坑道形式の風洞実験施設に対して圧縮空気を供給するための貯蔵施設がスウェーデンにある。これは1951年に稼働が開始されており、貯蔵容量は11,000 m³、貯蔵圧は0.9 MPaである²²⁾。

(2) 可燃性ガスの貯蔵実績

a) 天然ガスの貯蔵実績

最初の天然ガス貯蔵は1915年にカナダのオンタリオにおいて実施された。これは枯渇したガス井を利用した施設であるが、翌年には同様の施設がニューヨーク州バッファロー近郊に設けられた¹³⁾。滞水層を利用した施設は1946年にケンタッキー州において、また岩塩ドームを利用した施設は1961年にミシガン州においてそれぞれ最初に建設された。

1989年までに世界中で542箇所の天然ガス貯蔵施設が建設されている。その国別内訳を表一-3.1に、また貯蔵形態別内訳を表一-3.2に示す。これらの総貯蔵容量は240×10⁹ m³に達し、年間の総消費量の12%にも相当する²³⁾。わが国においても、関原ガス田Ⅲ層において昭和43年から天然ガスの貯蔵が実施されている。貯蔵層の地質は、西山層の火砕岩質及び安山岩質集塊岩であり、貯蔵圧力は最大で11.9 MPaである⁶⁾。

現在までのところ、天然ガスの貯蔵を目的として掘削された空洞は存在しないが、少なくともフィンランド、スウェーデン、アメリカ合衆国及びチェコスロバキアにおいてその計画が進められている²⁴⁾⁻²⁶⁾。これらはいずれも、素掘り空洞を想定しており、ライニングは施されない。また、ガスの貯蔵容積は数百万～数億 N m³の範囲が考えられており、貯蔵圧は土被りが400～1000 mの範囲であることから10 MPa以下であると推定される。

表一-3.3 岩盤空洞を利用したLPG貯蔵施設の概要¹⁷⁾

地点名	立地国	認可年度	貯蔵ガス	空洞容積 (m ³)	岩種	クォーター・カデン	土被り (m)
<i>Geotherberg</i>	スウェーデン	1968	プロパン	20,000	片麻岩	なし	90
<i>Lysekil</i>	スウェーデン	1975	ブタン	10,000	花崗岩	有り	90
<i>ÖF</i>	スウェーデン	1977	プロパン	120,000	花崗岩	有り	130
<i>Sundsvall</i>	スウェーデン	1989	プロパン	59,000	片麻岩	有り	90
<i>Karlskann</i>	スウェーデン	1989	プロパン	45,000	片麻岩	有り	100
<i>Rafnes</i>	ノルウェー	1977	プロパン	100,000	花崗岩	有り	100-150
<i>Hongstad</i>	ノルウェー	1989	ブタン	10,000	片麻岩	有り	70
	ノルウェー	1989	プロパン	10,000	片麻岩	有り	90
	ノルウェー	1989	プロパン	10,000	片麻岩	有り	90
<i>Porvoo</i>	フィンランド	1976	ブタン	115,000	片麻岩	有り	60
	フィンランド	1988	プロパン	100,000	片麻岩	有り	なし
	フィンランド	1988	プロパン	50,000	片麻岩	有り	なし
<i>Petit Couronne</i>	フランス	1966	プロパン	50,000	片麻岩	有り	なし
	フランス	1966	ブタン	12,500	片麻岩	有り	なし
<i>Laverra</i>	フランス	1972	プロパン	123,000	片麻岩	有り	150
<i>Vexin</i>	フランス	1980	プロパン	130,000	片麻岩	有り	150
<i>Donges</i>	フランス	1980	プロパン	80,000	片麻岩	有り	120
<i>Lavera</i>	フランス	1984	ブタン	133,500	片麻岩	有り	130
	フランス	1984	ブタン	49,500	片麻岩	有り	110
	フランス	1985	プロパン	120,000	石灰岩	有り	なし
<i>Killingholm</i>	イギリス	1987	ブタン	120,000	石灰岩	有り	180
	イギリス	1987	ブタン	120,000	石灰岩	有り	180

b) LPGの貯蔵実績

LPGの貯蔵圧はガスの種類と貯蔵温度に依存するが、一般に1.0 MPaを越えることはない。たとえば、プロパンの0℃と25℃における気化圧は各々0.5 MPaと1.0 MPaである。また、ブタンでは0.1 MPaと0.3 MPaである。

岩盤空洞を利用した最初のLPG貯蔵施設は、1950年にアメリカ合衆国テキサス州の頁岩地帯に建設された²⁷⁾。それ以降、約70の貯蔵施設が頁岩、石灰岩、泥岩及び花崗岩等の各種岩盤を掘削し建設された。また、これ以外にも岩塩ドームを利用した施設がかなりの数存在する¹³⁾。

ヨーロッパでは1966年にフランスで認可された施設が初めてであり、2年後にはスウェーデンのGothenbergにスカンジナビア半島における最初の施設が建設された。表一-3.3²⁰⁾は文献で紹介されたLPG貯蔵施設のうち、岩盤空洞を利用して建設された施設の概要を示す。表に示されるように、ヨーロッパの貯蔵施設ではしばしば水封方式等が採用されている。わが国でも、倉敷市水島においてLPG貯蔵実証プラントが建設中である^{28), 29)}。

4. 漏気防止

(1) 漏気防止基準及び漏気の実義

わが国において、高圧ガスの地下貯蔵を考える場合、その地質的な制約条件から岩盤空洞を利用した貯蔵方式が最も妥当と考えられる。この場合、所定の貯蔵圧を確保し、また環境圏へのガス流出を防止するために水封方式等、何らかの漏気防止工を施す必要がある。

一般に、環境圏への有害な影響を与えるガスに関しては著しくきびしい規制条件が課せられる。例えば、ノルウェーの防火防爆理事会 (The Directorate for Fire and Explosion Prevention ; DBE) の定めるところによれば、“可燃性、爆発性もしくは環境圏へ有害な影響を与える

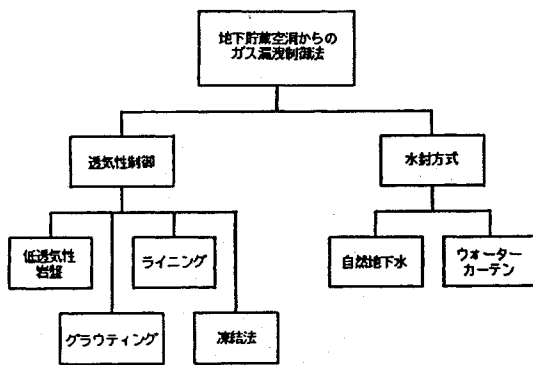


図-4.1 ガス貯蔵空洞からの漏気防止の分類

ガスの貯蔵に関しては完全に密 (completely tight) でなければならない”とある。

この様なカテゴリーの貯蔵形態を以下では無漏気貯蔵と呼ぶ。すなわち、漏気量は計測可能であり、且つ防火・防爆上十分に安全な値、もしくは環境や人体に有害な影響を与えない値以下に抑える。

一方、環境に有害な影響を与えないガス及び圧縮空気等に関しては、漏気によって発生する経済的損失と、漏気防止を行うために必要なコスト等のトレード・オフによって定まる値以下に漏気量を抑えれば良い。このようなカテゴリーの貯蔵形態を以下では弱漏気貯蔵と呼ぶ。

このように、貯蔵されるガスの特性によって貯蔵施設に要求される漏気性能は異なり、これを実現するための対策工も異なってくる。

(2) 漏気防止工

図-4.1 はガス貯蔵空洞からの漏気防止手法を示す。ここでは、二つの主要な漏気制御原則が示されている。すなわち、“透気性制御”と“水封方式”である。

“岩盤透気性の制御”とは貯蔵空洞周辺の透気性を十分に低く保ち、漏気量を許容値以下に抑えることである。これを実現するために、今日検討されている対策工を以下に列記する。すなわち、

- 1) 貯蔵周辺岩盤のグラウティング
- 2) 耐透気性に優れた材料 (鋼板, プラスティック, ゴム等) を用いたライニング
- 3) 貯蔵空洞周辺地盤を冷却して, 周辺岩盤に凍結バリアを形成させる
- 4) 亀裂面もしくは亀裂開口部に透気性を低下させる微生物を植え付ける

一方、“水封方式”の制御原理は、地下水の存在によって漏気量が低減されるという事実に基づくものであり、漏気量の低減 (言い替えば水封の程度) は貯蔵圧に対する地下水圧の大きさで決定される。また、水封方式による漏気制御には二つの方法がある。すなわち、“自然地下水による制御”と“人工水封による制御”である。

(3) 無漏気貯蔵に対する漏気防止工

無漏気貯蔵に関しては、岩塩ドーム及び滞水層への貯蔵が最も適していると考えられる。しかしながら、今後のガス貯蔵需要の増大を考えれば、その適地は著しく少ない。従って、以下では岩盤を掘削した空洞内にガスを貯蔵する問題を取り扱うものとする。

無漏気貯蔵に対する漏気制御の方法として考えられるものはライニング工法、凍結工法及び水封方式の三つである。

a) ライニング工法

スウェーデンとフィンランドにおいて小規模なライニング方式の高圧ガス貯蔵実験が行われている。スウェーデンの実験施設は土被り 50 m 地点の 3 つの空洞からなり、各々の空洞容積は 125 m³ (実用プラントの 1/10 規模) である。また各空洞はプラスチック、6 mm 厚の普通鋼、さらに 0.4 mm 厚のステンレス鋼によってライニングが施されている³⁰⁾。

現在までのところ、普通鋼によるライニングでは 30 MPa の貯蔵圧に対して健全性が示されているが、プラスチック及び 0.4 mm 厚のステンレス鋼を用いたライニングに関しては良好な結果が得られていない。

フィンランドの実験施設は、U-test Cavern と呼ばれ、ライニングと低温貯蔵の組み合わせによって漏気対策が施されている³¹⁾。空洞容積は 100 m³ であり、また土被りは 45 m である。ここでは、FRP プレート及び、FRP 吹き付けの二つのライニング方式が試験されている。

U-test Cavern は 50 MPa の貯蔵圧と、-80℃ の貯蔵温度を目標として実験が実施されているが、現在までのところ貯蔵圧では最高 0.7 MPa、貯蔵温度に関しては -40℃ までしか達していない。

b) 凍結工法

凍結貯蔵はライニング方式に比べると若干信頼性に欠ける。しかしながら、冷却によってガス密度を増加させることにより、貯蔵容量を大きく増大させることができ、さらに周辺地盤の凍結により良好なバリアが形成されるため、この工法が近年注目を集めている^{27), 32)}。

トロントハイムの Ladehammer にある冷凍食品貯蔵庫跡では、貯蔵空洞周辺が約 20 m の厚さで凍結状態にあり、ボアホールを用いた原位置試験の結果によれば標準的なこの領域の固有透過係数は 10⁻²¹~10⁻¹⁹ m² の範囲にあった³³⁾。天然ガス貯蔵を含む実用面への適用では、このオーダの固有透過係数は十分に無漏気貯蔵としての条件を満たす。尚、実験圧が 3 MPa まで増大すると、亀裂の開口によって、顕著な固有透過係数の増大 (3 桁以上) が生じるが、除荷に伴い亀裂が閉塞する。

c) 水封方式

水封方式には、自然地下水を利用する水封方式と人工

水封方式の二つがあり、人工水封方式には、ウォーター・カーテンが利用される。

1969年にウォーター・カーテンの特許を取得した I. Janelid 教授によれば、“ウォーター・カーテンは貯蔵空洞周辺の岩盤が飽和状態に保たれるよう、貯蔵空洞に向かう動水勾配が形成せねばならない”とされている³⁴⁾。

ウォーター・カーテンは1972年にフランスの Lavera プロパン貯蔵施設において、初めて取り入れられ、1983年からはエア・クッション・サージ・チャンバーにも用いられ良好な結果を得ている。

このように、水封方式は良好な実績と高い信頼性を有するが、高圧ガスの貯蔵を考える場合、亀裂面内に貯蔵ガスが浸入し始める際の貯蔵圧力や要因、及び漏気ガスが亀裂面内を移動するメカニズム等解明せねばならない問題が少なくない。また、貯蔵圧に対して地下水圧を大きくしなければならぬために、土被りが大きくなり経済性に課題がある。

以上を約言すれば、今日の漏気制御技術の現状では、無漏気貯蔵の対策工として有効であると判断し得る工法はない。今日、最も期待される対策工は、プロトタイプ試験にも供されている鋼ライニングによるものである。また、水封方式は可能性としては高いものの設計上明らかにされるべき点が多い。凍結工法は実用性やその利点が明かとなりつつあるが、研究すべき課題が多い。

(4) 弱漏気貯蔵に関する対策工

上述の無漏気貯蔵に関する対策工は弱漏気貯蔵にも適用される。これら以外に、今日の技術レベルで弱漏気貯蔵の対策工として最も期待されるのはグラウティングである。

グラウティング工は懸濁液グラウティング(主として、セメントをベースとしたもの)と、化学溶液グラウティングに分類される。

ノルウェーの過去の実績では約1ルジオン以上の岩盤に対しては、懸濁液を、またそれ以下の岩盤に対しては化学溶液を用いている。しかしながら、化学溶液はセメントベースの懸濁液に比べかなり高価なことや長期的な耐久性に課題があるため、流動性の良い超微粒子セメントによるグラウティングが開発されつつある。

微生物の生成物をシール材として用いようとする対策工も考えられている。これは、ある種のバクテリアが水と炭化水素の間で成長し、スライム状もしくはゲル状の化合物を生成するという事実に立脚している³⁵⁾。しかし、これはまだ単にアイデアの段階である。

以上を要約すると、グラウティングに関しては、漏気対策工として大きな期待が持たれるが、今日の技術レベルで考えれば、弱漏気貯蔵に関しても上述の無漏気貯蔵に関する漏気対策工と組み合わせて用いられるべきであろう。

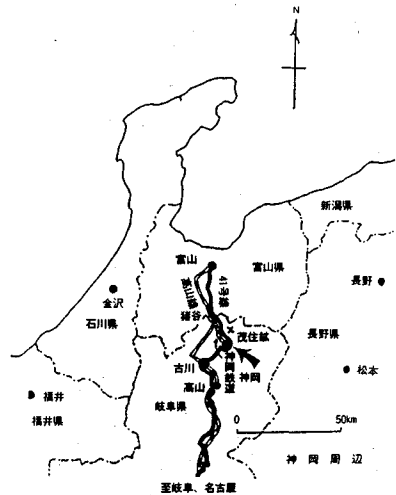


図-5.1 神岡鉦山位置図

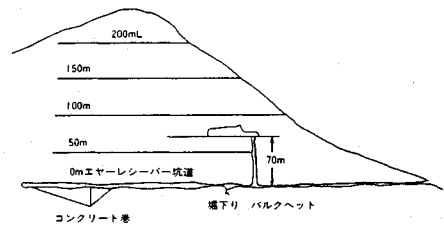


図-5.2 神岡鉦山におけるエアレシーバ縦断面位置図³⁶⁾

5. わが国における高圧ガス貯蔵の可能性

わが国においても高圧ガスの地下貯蔵の需要が高まりつつあるが、経済性や立地箇所等を考慮すれば、常温の坑道形式貯蔵が最も現実的であろう。本章では、この形式の数少ない稼働実績である神岡鉦業(株)におけるエアレシーバを紹介する³⁶⁾(図-5.2)。

先にも示したように、エアレシーバは昼間の圧縮空気需要ピーク時に備え、深夜電力を利用して製造した圧縮空気を貯蔵する施設であり、電力負荷の低減、圧縮空気の安定供給及びコンプレッサー容量の低減等の利点を備える。わが国では昭和33年に神岡鉦山で初めて建設され、佐々運鉦山においても建設された。神岡鉦山の所在地を図-5.1に、またエアレシーバ位置断面図を図-5.2に示し、さらにその構造概要を図-5.3に示す。また、主要設備の緒元を表-5.1に示す。

図-5.2に示すように、当該エアレシーバは定圧貯蔵方式で、貯蔵圧0.7MPaに合わせ、70m上方に貯水槽が構築されている。尚、昭和42年に貯蔵圧を0.85MPaに昇圧する高圧化工事が実施された際、貯水槽も新設され、現在は85m上方に位置する。

当該エアレシーバの構築に先立って、漏気予測の予備試験が実施され、予想漏気量が5.2%と推定された。と

表-5.1 エアレシーバ主要設備緒元³⁶⁾

摘要	巾 m	高さ m	延長 m	容量 n ³
坑道レシーバ	2.1~10.0	2.0~5.0	665	7970
水槽坑道	5.0~10.0	3.0~3.5	325	8250
連絡立坑	1.5	2.0	71	
堀下り	1.5	2.0	15	

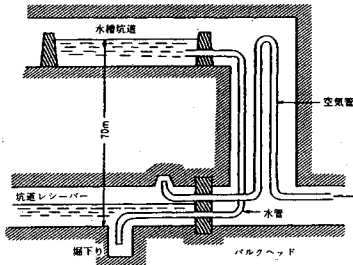


図-5.3 神岡鉱山におけるエアレシーバ構造概要³⁶⁾

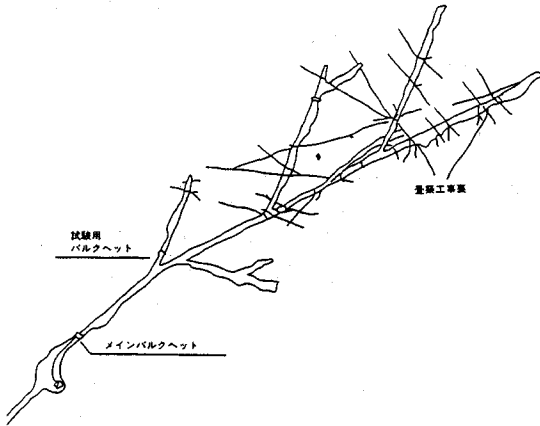


図-5.4 エアレシーバ付近の節理系分布図³⁶⁾

ところが、予期に反し30%を越える漏気量が発生した。これは約6000HPのコンプレッサー1台分の漏気量に相当する。この原因は図-5.4に示す節理系であると判断されたため、グラウト工及び吹付けコンクリート覆工を漏気防止工として実施した。しかし、気密性はほとんど改善されなかった。このため、石灰水工法を漏気防止工として採用した。

石灰水工法とは、貯水槽に消石灰を投入し、飽和溶解させ、これをエアレシーバに通水させる。このとき、飽和石灰水は坑道レシーバの節理系に浸入し、その上昇水面は坑道高さに至る。次いで、圧縮空気を坑道レシーバ内に圧入すると、空気の一部は節理を通過して漏気するが、その際、大気中に0.03~0.04%含まれているCO₂が節理面内の石灰水と反応してCaCO₃及びCa(HCO₃)₂を生成し、節理面内で沈積、閉塞させ漏気を防止させるものである。この工事は昭和31年1月より開始され、繰り返し行われた。この漏気量減少の状況を図-5.5に示す。図に示されるように漏気量は初期には急速に低減し、ほ

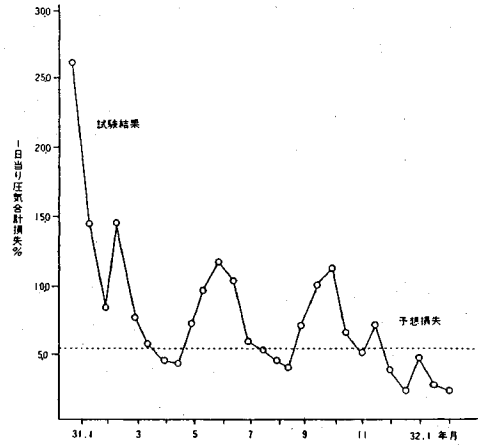


図-5.5 漏気防止工後の漏気量減少状況³⁶⁾

ぼ一年後には供用可能なレベルへ達している。

神岡鉱山における石灰水工法の採用は、わが国においても地山、貯蔵ガス、貯蔵圧等に応じ、適切な漏気防止工を採用すれば十分に高圧ガスの坑道形式貯蔵が可能であることを示す好例であろう。尚、神岡鉱山においては現在、CAES-G/Tのため5MPaの貯蔵圧に対する基礎実験が、神岡鉱業(株)、三井建設(株)、(財)電力中央研究所、三井金属資源開発(株)の4者の共同研究として実施されている³⁷⁾。

また、CAES-G/Tに関しては発電システムの環境影響評価技術確立、並びに実用性確認を行うため、通産省が(財)新エネルギー財団に委託した実証プラントが三井砂川炭坑跡地に建設される予定となっている^{38),39)}。この他、LPG地下備蓄に関して、石油公団が資源エネルギー庁の委託を受けて実証プラントを日本鉱業(株)水島製油所・第二原油基地内に建設中である^{28),29)}。このプラントでは漏気防止工として水封方式が採用されている。

このように、わが国においては高圧ガスの地下貯蔵はその端緒に付いたばかりであるが、社会的需要の高まりと精力的な研究の結果、各種貯蔵の可能性が実証される日も近いと思われる。

6. 結 言

高圧ガスの地下貯蔵はすでに海外において多くの実績を有する。このような海外の実績をわが国に適用する場合は、わが国の特殊な地質条件が大きな問題となる。勿論、岩塩層や滞水層のような特殊な地質条件はわが国には期待できない。しかしながら、人工空洞内への貯蔵に関しては、神岡鉱山の例にみられるように、適切なサイト選定及び漏気対策工を施すことによって、十分に高い信頼性を有する貯蔵が可能となる。

また、漏気防止に有効と判断される二つの対策工、す

なわちライニング方式及び水封方式に関しても鋭意研究が重ねられており、その確立が可能と考えられる。水封方式に関しては現在稼働実績がないものの、3箇所の石油備蓄基地及び水島におけるLPG地下備蓄実証プラントの運開が近づいており、データの蓄積が進むものと考えられる。さらに、グラウト工に関しては、水力における豊富な実績をどの様にしてガス貯蔵へと生かすかが重要な課題となろう。

最後に、有益な御助言と資料を提供して下さいった神岡鉱業(株)齊藤修二元鉱山部長、並びに地下空間利用推進室関係者にこの場を借りて感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 電力土木協会編：電力施設地下構造物の設計と施工，1986。
- 2) 資源エネルギー庁：平成元年度電力施設計画の概要，電力土木，No.221，1989。
- 3) Goodall, D.C.: Prospects for LNG Storage in Unlined Rock Caverns, Proc. of Int. Conf. on Storage of Gases in Rock Caverns, pp.237~244, 1989。
- 4) Lindblom, V.E., D.C. Goodall and T.L. Brekke : Underground Bulk Storage of Hydrogen in Mined Caverns, University of California Berkley, Research Report VCB/GT/84-13, 180p, 1984。
- 5) Allen, R.D. : Porous media reservoir stability criteria for compressed air energy storage, U.S. Doe. Rep., pp.211~216, 1983。
- 6) 石油技術協会：日本の石油工業と技術，1973。
- 7) EPRI : Pioneering CAES for Energy Storage, EPRI Journal, January/February, pp.31~39, 1989。
- 8) Pollak, R. : Status of First V.S. CAES Plant, EPRI Journal, December, pp.49~52, 1988。
- 9) Anderson Ulf H. : Steel lined rock caverns, Proc. of Storage of Gases in Rock Caverns, pp.145~150, 1989。
- 10) Goodall, D.C. and H. Kjørholt : Estimation of Gas loss from pressurized unlined caverns without water curtains, Storage of Gases in Rock Caverns, pp.49~56, 1989。
- 11) Aufrecht, W.R. and K.C.Howard : Salt Characteristics as they Affect Storage of Hydrocarbons, Journal of Petroleum Tech., pp.733~738, Aug., 1961。
- 12) 厨川道雄：地下岩盤内レシーバー，トンネルと地下，pp.37~42, Vol10, No.3, 1979。
- 13) Foh, S., M.Novil, E.Rockar, and P.Randolph : Underground Hydrogen Storage, Inst. of Gas Technology, p.145, 1980。
- 14) Janelid, I. : Sealing of underground caverns, Norwegian Group for Rock Mech., Bergmekanikkdagen, pp.24 A.1-24 A.4, 1975。
- 15) Tessem, S. : Experiences with unlined underground chambers for compressive air, Norwegian Group for Rock Mech., Bergmekanikkdagen, pp.22.1~22.5, 1975。
- 16) Goodal, D.C., H.Kjørholt, T.Tekle, and E.Broch : Air Cusion Surge Chambers for Underground Power Plants, Water Power and Dam Construction, pp.29~34, Nov., 1988。
- 17) Kjørholt, H. : Gas Tightness of Unlined Hard Rock Caverns, Doctor thesis, University of Torondheim, 1991。
- 18) Rathe, L. : An Innovation in Surge-Chamber Design, Water Power and Dam Construction, Jun./Jul, pp.244~248, 1975。
- 19) Mehta, B.R. and D.Spencer : Siting compresses -air energy plants, Tunneling and Underground Space Technology, Vol.3, No.3, 1988。
- 20) Noren, D., L.O.Emmelin and S-E.Paulsson : Compressed air power plants-, Air-store, Sealing of the underground Compressed Air Storage, A.B. Vattenbyggnadsbyran(VBB), 23p, 1970。
- 21) Crotagino, F. and P.Quast : Compressd-air storage caverns at Huntorf, Int. Symo. on Subsurface Space, pp.593~600, 1980。
- 22) Moller, E. : Compressed Air Supply System, Volvo Flygmotor R&D Capabilities, Test Facilities and Laboratories, Sweden, 1p, 1979。
- 23) Asserhoj, O. : Commercial and strategic considerations regarding natural gas storage, Norsk Petroleumforening, Conference on Gass i Norden, 20p, 1990。
- 24) Sarkka, P. : Storage of natural gas-Plants in Finland, Norwegian Tunneling Society (NFF), Fjellsprengningskonferansen, pp.4.1~4.8, 1988。
- 25) Karlsson, P-O. : Storage of natural gas-Swedish Plants. Norwegian Tunneling Society (NFF), Fjellsprengningskonferansen, pp.5.1~5.10, 1989。
- 26) Hoffman, C.M. and R.B.Lange : An innovative approach to peak gas storage in large urban-a hard rock natural gas cavern in New York City., Int. Confernece on Storage Gases in Rock Caverns, pp.15~30, 1989。
- 27) Lindblom, U.E. : The development of hydrocarbon storage in hard rock caverns, Int. Confernece on Storage Gases in Rock Caverns, pp.15~30, 1989。
- 28) 石田稔：“LPGの地下貯蔵の動向”平成二年度資源・素材関係学協会合同秋季大会分科会研究資料，特別企画—地下空間，pp.9~12, 1990。
- 29) 石田稔，宮永佳晴：“LPG地下備蓄実証プラント建設工事”，土木施工，32巻，9号，pp.29~38, 1991。
- 30) Sandstedt and Karlsson : Int. Confernece on Storage Gases in Rock Caverns, pp.15~30, 1989。
- 31) Sarkka I. : The U-test cavern for gas storage at extremely low temperatures, Int. Confernece on Storage Gases in Rock Caverns, pp.245~250, No 3670503, 1989。
- 32) Goodal, D.C., T.Utheim and E.Thorbergsen : Back analysis of heat loads on selected thermal storages, Int. Confernece on Storage Gases in Rock Caverns, pp.229~236, 1989。
- 33) Blanke, J. : permiability of frozen rock mass-afield study, Diploma Thesis, Norwegian Inst. of Technology, Dept. of Geology and Mineral Resources Engineering, Trontheim, 113p., 1990。
- 34) Janelid, I. : Method of preventing leakage during storage of a gas or a liquid in a rock chamber by artificially supplying a gas or liquid to rock chamber, U.S. Patent, No

- 3670503, 1972.
- 35) Barbo, T.F. and Danielsen : Bacterial impairment of water curtain between oil storage caverns in rock, Int. Symposium Subsurface Space, pp.245~250, 1980.
- 36) 齊藤修二, 竹村友之: 神岡鉱山における圧縮空気貯蔵の実例と CAES の基礎実験について, 平成 2 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会分科研究会資料[C]特別企画一地下空間, pp.13~18, 1990.
- 37) 志田原巧, 中田雅夫: 神岡鉱山における岩盤空洞への圧縮空気貯蔵実験の現況, 応用地質, 第 33 巻, 第 2 号, 口絵, 1992.
- 38) 葛山文治: わが国における CAES-G/T パイロットプラント建設計画の概要, 圧縮空気エネルギー貯蔵発電の現状と将来展望について, 第 1 回 CAES-G/T セミナーテキスト, pp.45~65, 1991.
- 39) 堀 正幸: 圧縮空気貯蔵施設に関する技術課題, 圧縮空気エネルギー貯蔵発電の現状と将来展望について, 第 1 回 CAES-G/T セミナーテキスト, pp.67~87, 1991. (1992. 7. 20 受付)

STATUS QUO OF UNDERGROUND STORAGE OF PRESSURIZED GAS AND ITS ORIENTAION IN JAPAN

Shunsuke SAKURAI, Halvor KJORHOLT, Tomio TAMURA
and Hiroshi YAMACHI

Underground storage of pressurized gas has been well experienced in Europe and America. However, it is difficult to find storage works in Japan, because of its poor geological condition which we are usually encountered during construction. In this paper, a survey has been conducted and technical reports on the Underground storage of pressurized gas on abroad have been carefully investigated in order to discuss the capadbility of that in Japan. We also demonstrate a few condition to make possible underground storage in Japan.