

岩盤内地下空洞の利用例

ドイツとスウェーデンにおける高圧空気貯蔵と スウェーデンにおける石油の石炭備蓄への転用事例一

高橋 学¹⁾・高津浩明²⁾・鶴田 修³⁾・小出 仁¹⁾

1. はじめに

一般に、北欧における地下空間開発は長い歴史を持っている。今日、その用途は多岐にわたり、Broch (1989)によれば、オイル、ガス、鉱物、小麦粉、塗料、冷凍食品、飲料水貯蔵、下水処理プラント、駐車場、工場、電話中継所、スイミングプール、スポーツホール、等々に利用されている。ノルウェーにおいては、今世紀前半までは“地下空間利用”といえば、鉄道トンネルがほとんどであり、軍事的な利用価値が見直されたのは第二次世界大戦後の10年間である。水力発電所は過去30年間で合計200基以上が建設され、地下発電所は年間5基のペースで建設されている。水力発電用に掘削されるトンネルの長さだけでも、年間で100-150kmのオーダーに達する。このような地下空間への依存度はノルウェー以外の北欧の国にも当てはまることであり、地上施設よりもコスト的な利点があることによる。近年の地下空間への依存度は農業分野にまで広がりつつあるという。

一方、日本においては都市機能の高度化にともない、大都市圏への一極集中が進み、地価の高騰が社会問題となっている。このような背景から、都市域の地下空間を有効にかつ総合的に利用する構想が各省庁、地方自治体、民間企業から相次いで出されている。例えば、通産省では平成元年度より平成7年度までの期間に渡り、「大深度地下空間開発技術」という大型プロジェクト(指定研究)を発足させ、多くの産業施設の地下空間利用のための技術開発を目指している。また、北海道上砂川町において、廃坑となった鉱山の堅坑を利用した地下無重力実験センターは営業を開始している。建設省では道路地下空間利用計画をたて、道路や公園の地下化の検討を行っている。運輸省では大深度地下鉄構想、厚生省では大深度水道管路構想、科学技術庁では地下総合開発を目指したジオトピア構想等がある。

さらに、地方自治体においては東京都が環状7, 8号線に地下調整池、地下河川を建設し、洪水を防止するための地下河川構想や、首都高速道路公団が新宿一丸の内一東京湾の副都心を結ぶ地下高速道路構想等を提案している。また、民間企業各社からも数多くの地下空間利用プロジェクトが提案されている。

このような地下空間構想以外にも、燃料貯蔵分野においては、既に地下空間が有効に利用されている。その際、地下空間の持つ大容量化が容易であることや安全の確保が地上よりも容易である等の利点が活用されている。串木野、菊間、久慈といった地下式石油備蓄基地はほぼ完成に近づいている。また、半地下式とも呼べる地中式が秋田県で、現在建設中である。

エネルギー貯蔵分野においても地下空間利用はおおいに検討されている。例えば、割安な夜間の電力を利用し、ガスタービン(G/T)発電用圧縮空気を貯蔵する構想もある。CAES (Compressed Air Energy Storage) と呼ばれ、夜間に圧縮貯蔵された空気を電力が必要とされる昼間に取り出し、燃焼用空気としてガスタービンにて発電を行うシステムである。圧縮空気の貯蔵方式により、定圧式と変圧式とがある。現在、使用中のものはドイツ(旧西ドイツ)フントルフ(Huntorf)にある岩塩層を利用した発電所1カ所のみである。

筆者は1989年8月末から9月にかけて、フランスで開催された“Rock at great depth”に参加した後、現在使用中のドイツ・フントルフ発電所、スウェーデンで建設中のグレンゲスベルグ(Grängesberg)圧縮空気貯蔵試験サイト、そしてストックホルム市内で実施中のフェールテン(Värten)石炭貯蔵地下施設を見学する機会があったのでここで簡単に紹介する。CAESに関しては、国内において現在計画中もしくは施工実施中の段階であり、ドイツ・フントルフ発電所との岩盤等の違いによる技術的対応を、今後注目したい。なお、この見学に際しては先方との事務連絡その他で、清水建設株式会社に多大なるご協力を頂きました。深く感謝申し上げます。

1) 地質調査所 環境地質部
2) 東京電力㈱ 技術部
〒100 東京都千代田区内幸町1-1-3
3) 東電設計㈱ 第1土木本部応用地質部
〒105 東京都港区西新橋1-4-6



第1図 ブレイメンとフントルフの位置図

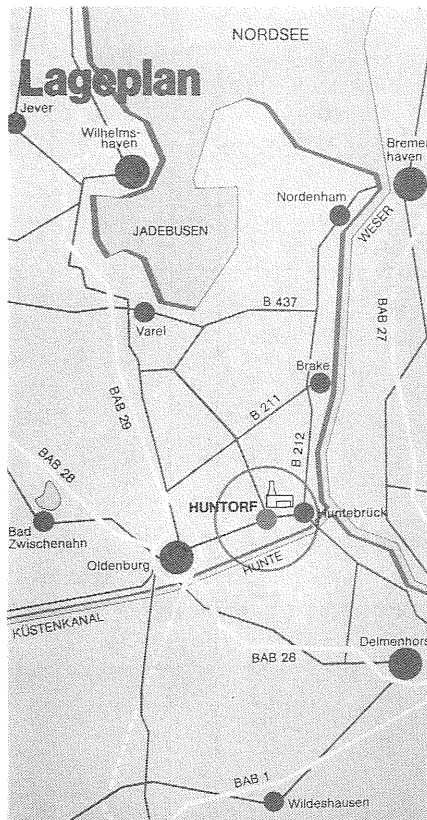


写真2 フントルフ発電所（中央の円内）の位置図

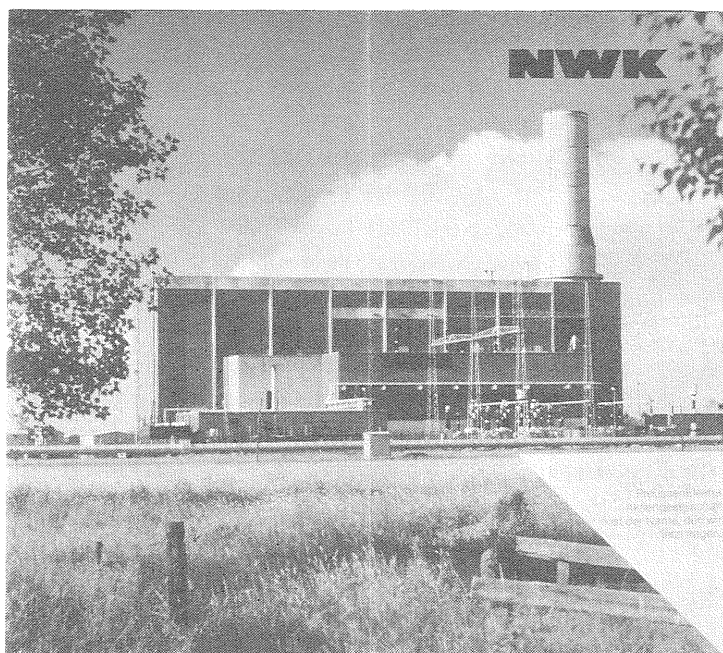


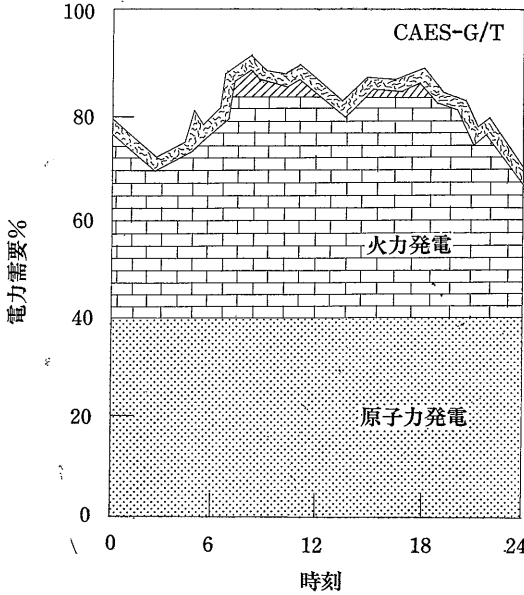
写真1 フントルフ発電所とその周辺の風景。周囲は広大な草原地帯である。

2. フントルフ CAES-G/T

2.1 発電所の位置

第1図は旧西ドイツの全体図であり、フントルフはドイツの北部、ブレイメン市から北西約30kmに位置している。ブレイメン市から車で40分程度で発電所(写真1)に到着する。発電所の周囲は、一見北海道の草原地帯を思わせる様に牛がのんびりと牧草を食んでいる何の変哲もない“田舎”である。発電所の東にはヴェーザー(Weser)川、南側にはその支流のフンテ(Hunte)川が流れている(写真2)。フンテ川は、後述するが、岩塩層を溶かした溶液を直接流した場所でもある。

フントルフ発電所は世界最初でしかも現在稼働している唯一のCAES-G/Tであり、運転実績は既に十数年を経ている。見学当日案内・説明してくれ



第2図 北西ドイツの冬期における平均的な一日の電力需要

たのは、Pressen Elektra(プロイセン電力)の Peter. Maaß 氏である。彼は当発電所建設時から関わっており、現在は発電所長の役割を担っている。

2.2 ドイツの電力事情

北西ドイツ電力会社(NWK, Nord West deutsche Kraftwerke)における冬期の平均的な一日の電力需要を第2図に示した。特徴を示すと以下の様になる。

- AM 3: 00 電力需要が最小になる。いわゆる深夜帯である。
- AM 8: 30 家庭ないし工場における人間活動の開始時間帯と思われる。
- AM 11: 00 昼食時間帯にさしかかる前の料理の準備によるピークと思われる。
- PM 6: 00 冬期の照明や暖房に対する需要の増加。

第2図は併せて発電の種類を示している。原子力発電は全発電量の1/4と一定量で供給している。これはいわゆる基底発電量 (base load) と呼ばれるものである。中間の発電 (intermediate load) には、通常の火力(石炭、天然ガス、石油) 発電が割り当てられる。そして、第3のピーク発電 (peak load) は CAES を利用したガスタービンによって賄われ、全電力需要の13%に達する。ガスタービンの施設の運転はあくまでもピーク時の補助として用いられるものであり、この施設の運転・停止などの出力制御はすべて自動化されている。

2.3 地下空洞について

フントルフー帯は厚さ5000mにも及ぶ岩塩層が発達し、発電所周辺は深さ400m、厚さ数10mに及ぶ不透水層がドーム状に形成されているとのことである。写真3から推定すると、岩塩層は-550m レベルから出現しているので、ここで言う不透水層とは-450~-550m レベルにおける、岩塩層の上に位置している Mantelanhydrit がこれに相当するものと考えられる。ちなみに、地質は地表から第四紀(Quartär)、新第三紀中新世(Miozän)、古第三紀漸新世(Oligozän)、上・下部始新生、白亜紀(Kreide)、不透水層、岩塩の順となる。この不透水層の存在は岩塩層を空洞化させる事なく今日まで保存するのに役立っている。写真4は不透水層のボーリングコアであるが、所々に黒っぽい不純物が混じっていたり、透明な結晶が確認されるが、全体は灰色に近い。不透水層という定義をしていたが、結晶内及び結晶粒界には沢山の亀裂が肉眼で観察出来るので、透水性はかなり高い値を示すと思われる。Gloyna and Reynolds (1961) のデータによれば、岩塩の透水係数は $5 \times 10^{-8} - 2 \times 10^{-7} \text{ (cm/sec)}$ のオーダーである。コアの入手を申し出たが、ここには余分なものはないとの返事であり、残念であった。Maaß 氏の説明によれば、この岩塩の一軸圧縮強度は 200 kg/

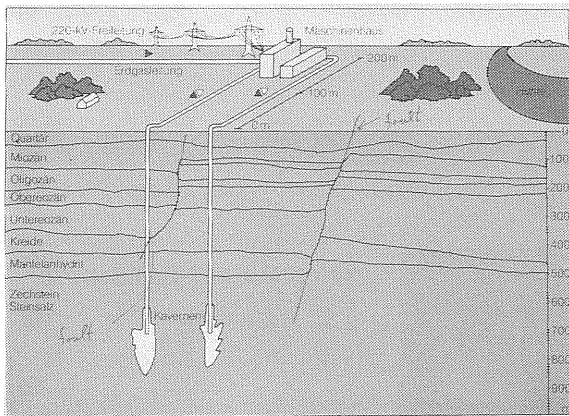


写真3 発電所直下の地質概況

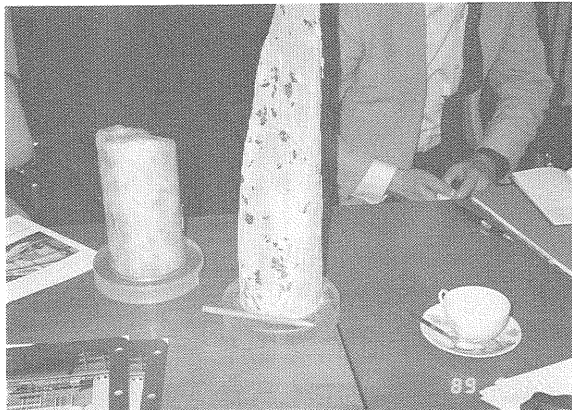


写真4 不透水層のボーリングコアの状況

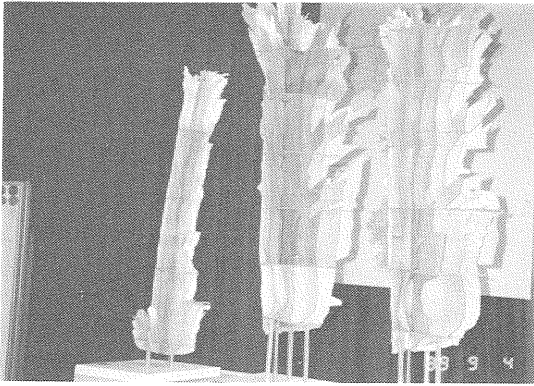


写真5 物理計測結果に基づく空洞形状のモデル

cm²程度との事であった。Maaβ氏の説明の大半は岩塩層に孔を開けるための技術に費やされた。以下、空洞削掘に関して述べる。

空洞の掘削は基本的には、口径500mmのボーリングを地下650—800mまで掘り、鋼管を挿入した後、水を供給し、底部の岩塩層を溶かし、鋼管を引き上げながら空洞を拡大し、実施した。鋼管は2重の構造をしており、溶解用の水を送る鋼管の外側に、溶解した塩水をポンプアップ移送する為の鋼管が設置されている。こうして作られた空洞は平均直径55m、高さ150mのほぼ円筒形をし、その容積は150,000m³に及ぶ。空洞掘削の期間は約18カ月、最後の水抜き(残滓)に3カ月もかかった。水抜きの為のポンプは米国の石油関連の会社から購入したが、工期終了までに3台も買い替えた。1975年12月に溶解を開始。溶解した水はポンプアップした後、近くのHunte川に直接流した。1975年当時は現在ほど環境問題に神経質ではなかったのでこのような事が簡単にできたが、現在なら適当な処理を施すことは当然であろう。溶解時の空洞の大きさをソナーで計測し、チェックしながら水の注入量を決めた。空洞内の温度は40—45℃と高く、しかも湿度も高いので、酸化作用が空気中の8倍の速度で進行し、鋼管をF・R・Pに取り替えざるを得なくなった。

空洞は11年間で(1989年当時)2%減少しており、当初の予想を大きく上回っている。夏場には9ton/hourの割合で水が増えている。空洞の計測管理は地中工事の世界的な技術コンサルタントであるKBB (Kavenn Ban Betnels) Companyが担当しており、2年毎に水位の計測と4年毎に全体容量・形状を測定している。空洞形状のモデルを写真5に示す。空洞の形状の制御は、塩水に対して不活性でしかも塩水よりも軽い“buffer gas”を用いて実施された。漏気の検出や防火工事はまったく必要がなかった。なぜなら、フントルフの岩塩鉱床は地表から500mの地下深くに存在し地上への影響の心配はほとんど

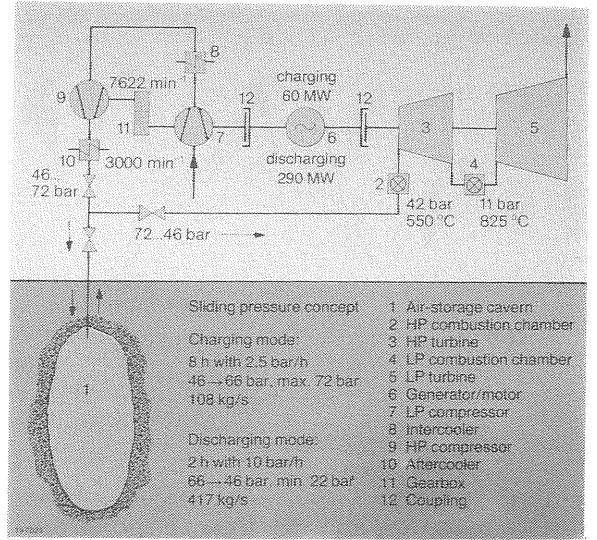


写真6 発電システムの概念図

ど無いものと見なしていたからである。こうして出来上がった空洞の規模は2基合わせて30,000m³の貯蔵体積となった。

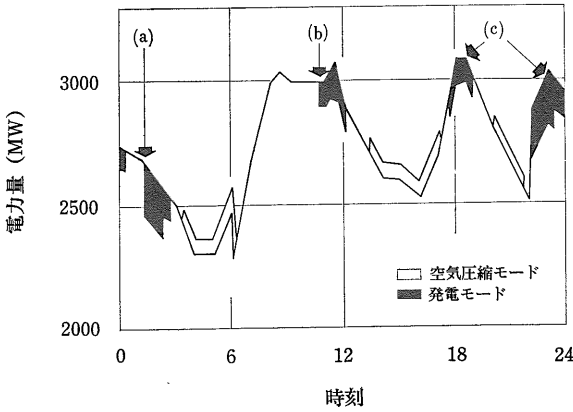
2.4 発電システムについて

当発電所の発電システムを写真6に示す。基本的には、ガスタービン、駆動用電動機を兼ねる発電機、コンプレッサー(圧縮空気を作る)、そして高圧空気貯蔵用地下施設からなる。発電過程において、地下岩塩空洞内の高圧空気(66bar, 最大72bar)(1)は高圧燃焼器(2)にて42barに減圧し、150℃まで温度を高めた後、タービン(3)、定圧燃焼器(11bar, 825℃)(4)を通り、タービン(5)に達し、発電を行う。一方、電力需要の低い時に、高圧空気製造過程において発電機と空気圧縮機(7,9)との間のクラッチを接続し高圧空気を得る。圧縮機を出た高圧空気は冷却器(8,10)で50℃前後に冷却された後、地下空洞に蓄えられる。

電力需要がピークの時には、ガスタービンは290MWの発電能力フルに出力する。ガスタービンが作動している間、空気圧は最大10bar/hourで消費される。従って、最大負荷時にガスタービンが2時間運転すると空洞内の圧力は20bar下がる。空気製造過程では2.5bar/hourで圧縮することができるので、20barまで増圧するのに約8時間必要となる。

2.5 代表的な運転例

フントルフ発電所はあくまでも、ピーク時の他の発電施設の補助的な役割を担う、いわゆるピーク発電所である。1979年1月22日の運転状況を第3図に示した。まず、(a)で示される他の施設の肩代わり発電である。AM



第3図 1979年1月22日の運転状況

1:10に他の発電所がストップしたので、フントルフ発電所は直ちに発電をスタートさせ、フル出力に達した。発電は2:45頃終了し、AM3:20からAM7:00まで圧縮空気貯蔵のための運転をした。(b)は一日のピーク時の不足電力を賄うための発電運転を示している。ここでも2時間の発電に対し、4時間の圧縮空気加圧運転を行っている。(c)は午後6時と10時の夜のピーク時に、他の発電所の運転を経済的にするための運転であり、最適経済運転といえる。

3. グレンスベルグ岩盤内高圧ガス貯蔵実験場

3.1 位置

スウェーデン・グレンゲスベルグ(Grängesberg)で現在建設中のライニング方式の空洞のパイロットプラントを見学する機会があったので、以下簡単に紹介する。

ストックホルムの北西およそ240kmにあるボルレンゲ(Borlänge)までスカンジナビア航空の100人乗り程度の飛行機で、およそ40分のフライトであった。ここから、パイロットプラントのあるルドビカ(Rudobica)までは、タクシーで100分程度のドライブであった。パイロットプラント近くに人家は無く、道路の法面に突然坑口が顔を出しているような状況である(写真7参照)。タクシーの運転手もここを捜し当てるのに苦労をしたようであった。第4図は当パイロットプラントのあるルドビカ(Rudobica)の位置を示している。ここは現在、ライニングの種類を選定する為の検証実験を実施しているときであり、具体的な結果については技術的なノウハウと関連するので教えてもらえなかった。もちろん、建設中なのでパンフレットの類も無かったので、同年スウェーデンで開催されたシンポジウム「Storage of gases in rock caverns」に発表された論文「Storages of natural gas

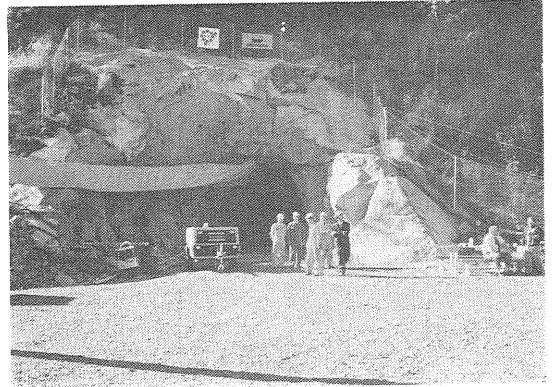


写真7 グレンゲスベルグパイロットプラントの坑口の様子



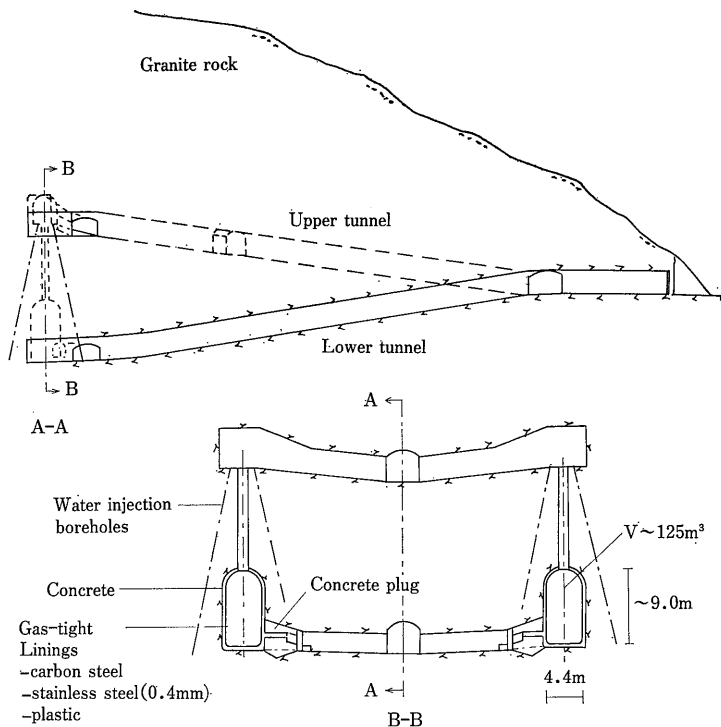
第4図 グレンゲスベルグパイロットプラントのあるルドビカの位置図

in lined rock caverns-pilot plant」を要約し、それに当日教えて頂いた事をつけ加える事にする。

3.2 パイロットプラントの目的

このプラントの目的は列挙すると以下の様になる。

- ・全システム、理想圧下での岩石—コンクリートガスの気密ライニングに関する試験
- ・プラグや開口部の詳細に関する技術試験
- ・極限における設計や建設技術を高めるための試験を行う。一番の関心は気密ライニングの適用と品質管理である。
- ・種々の応力レベルに対する母岩の力学的挙動を評価することができる。
- ・母岩とコンクリートの排水システムの開発とガス透



第1表 グレンゲスベルグ鉄鉱山における岩盤物性値

圧縮強度	199.3MPa+23%
引張強度	24.0MPa+ 2%
ヤング率	61.3MPa+ 6%
ポアソン比	0.17MPa+21%

第5図 岩盤内に展開しているトンネルと空洞のレイアウト

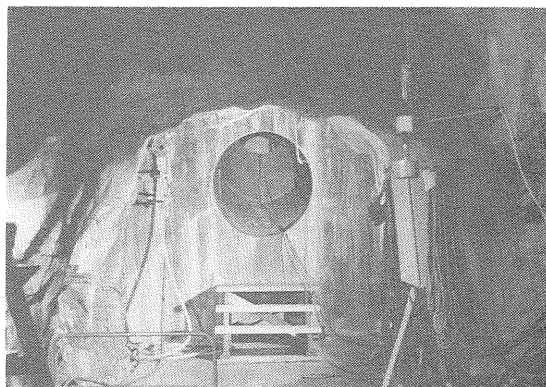


写真8 トンネルから空洞方向を見た場合、手前はコンクリートプラグである。

オーダー)が共役をなして存在し、異方性はかなりあるものと思ひ質問してみた。しかし、「あることはあるが、従来からの技術力と経験により、技術的に問題にする程ではない」との答が帰ってきた。第1表は近くのグレンゲスベルグ鉄鉱山の供試体を用いて得られた物性値である。

プラントはそれぞれ、125 m³ の容積を持つ三つの空洞から成っている。ここでは、三種類のライニング材料が試験されている。

- 1) ステンレス鋼
- 2) 炭素鋼
- 3) プラスチック

今後、予定されるガス貯蔵施設の大きさは、直径35-40m、高さ70-80mのおよそ80,000 m³ の容積の数個の空洞で構成されることになるだろう。

(1) 圧力支持

圧力支持媒体は基盤岩であり、空洞周辺には破碎帯の存在は許されない。天盤の持ち上がりや鉛直変位を抑えるために、十分な被りが必要である。

(2) 気密ライニング

ライニングの気密性はあくまでも高いことが要求される。最大5mm幅の亀裂を想定し、これに合わせて設計される。

- 1) ステンレス鋼

気のモニターの可能性。

本プロジェクトはフィンランドの Neste, ノルウェーの Statoil, スウェーデンの Swedegas, Sydkraft, Vattenfall, BPA, Skanska のジョイントプロジェクトである。

3.3 パイロットプラントの概要

第5図に岩盤内に展開しているトンネルと空洞(写真8)のレイアウトが示されている。岩盤は亀裂のない細粒花崗岩でかなり均質であるとのことであったが、現地でトンネル表面を見た限りでは規模の大きな亀裂(10m



写真9 空洞内部のステンレスライニングの様子

厚さ0.4mm、幅60cmのものを重ね合わせていく。この時、各シートの両端を折り曲げ、溶接のための溶接しろを作り、さらにこの上からステンレスシートで覆い、溶接するものであり(写真9)、気密性が高くなっている。また、ステンレスシートの持つ特性として、腐食に強く、靱性に富んでいる点が挙げられる。

2) 炭素鋼

厚さ6mm、これはコンクリート打設時の型枠の役割をする。コンクリートに接する側をエポキシタールでコーティングし、鋼板の応力を均一にさせ、しかも腐食抵抗を増加させる。

3) プラスチック

種々の目的毎の累層からなり、厚さ12mmである。グレンゲスベルグでは短期・長期にわたる室内試験が必要であり、現在実施中である。プラスチック材料に対しては高圧及びガスという条件下では種々の必要・十分条件を満たさなければならない。最終的なチェックのために、より多くの実験が必要となる。

(3) 排水システム

この地下水位は空洞の上20-30mにある。被りは約50mである。ライニングを守るためには、当然ながら排水設備は必要である。同時に、ガス漏れの検出とその位置決めも可能となるので、設置箇所は地質と水の流れを伴う亀裂の位置によって決まる。局所的な地質条件によっては、空洞周辺からのポアホールにより2次排水システムも必要となる。

(4) Testing Phase

試験は可能な限り、水を用いて実施された。しかし、気密性を確かめるために空気圧も用いられた。以下の手

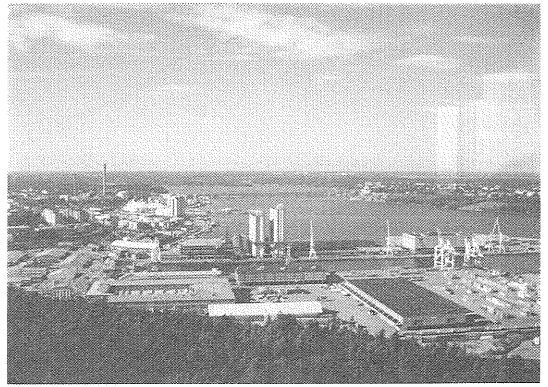


写真10 ストックホルム市内の中心にあるテレビ塔から見た港の様子。右側の2本の煙突はフェールテン火力発電所のものである。

順で実施される予定である。

- | | |
|---------------|------------|
| 1. 空気圧による繰り返し | 15—60bar |
| 2. 空気による気密性 | 30bar (一定) |
| 3. 水圧による繰り返し | 15—165bar |
| 4. 空気による気密性 | 150bar |
| 5. 水圧による繰り返し | 15—200bar |

計測は以下のとおり。

- 空洞内の圧力
- 岩盤とライニングの変形
- 空洞、岩盤、ライニングの温度
- 還元及び排水の量
- ガス検知

我々の見学時には3)の実験が終了したばかりであった。圧力は1—150barで100回以上の繰り返しを行った。これは年に2回空洞を満杯にし、放出を繰り返すと仮定し、40年以上の耐用年数を想定しているからである。スウェーデンの南部では深い空洞があり、既に実用段階に入っているとのことであったが、ライニングを何にするかは決まっておらず、ここグレンゲスベルグでの実験結果により決定されるだろうとのことであった。実験途中でもあり、細かな実験結果などについては公表できないとのことであった。

4. フェールテン (Värten) 石炭貯蔵施設

4.1 位 置

燃料貯蔵施設としての石炭貯蔵の地下施設は、日本においては実施例がなく、現在スウェーデンにおいて実施中ののが2例あるだけである。この内の1例はストックホルム市内にある。ストックホルムの中心から3km東方の港に面した Värten 火力発電所(写真10)ではコストの



写真11 空洞壁面の油分の除去作業。砂を混ぜた高圧水を吹き付けて落としている。



写真12 Swellexロックボルトの外観。三角形と四角形の板に工夫が施されている。

面から石油から石炭へと燃焼媒体の変更を実施している。これに伴い2基あった石油地下備蓄施設を石炭備蓄用に転換する必要があった。当日、案内・説明してくれたのは、北欧の有名な建設会社 Skanska の社員で Mr.

Lans Söderberg (プロジェクトマネージャー、数回日本を訪れた経験がある)、Mr. Arne Fjällhed (業務開発マネージャー) と Mr. Bengt Johanssen の3氏である。

4.2 空洞について

北欧の岩盤は、極く一部を除いてほとんどが緻密な結晶質岩石であり、フェールテンの石炭地下貯蔵施設も片麻岩からなっている。石油貯蔵から石炭貯蔵へ代えるためには、以下のような問題を解決しなければならない。

- 1) 岩盤表面に付着している石油分の除去が必要。
- 2) 石炭の搬入・搬出のためのホイールロード、コンベアー、人員のための安全で十分な広さの空間を維持するためのしっかりした支保工が必要。

まず、第1点目は砂を混合させた水を高圧で岩盤表面に吹き付け、付着した油分を除去するという方法を採用した。写真11は空洞下部の壁面の油分除去作業の様子を示している。空洞内は高圧ジェット噴射の高音と水による湿度で視界が非常に悪く、かつ足元も油分と水分でぬかるみの状態となっていた。2点目の支保工の充実に關しては、吹き付けコンクリートとロックボルトの採用により対応していた。特に、ロックボルトに關しては、Swellex ボルトと呼ばれる、先端部に三角形の板 (Fastener) と四角のワッシャーが取り付けられた構造 (写真12) のものを採用していた。これは吹き付けコンクリートの支持をも兼ねた工法となっている。空洞は横型で、大きさは高さ30m、幅18m、長さ420mのが2基、合計220,000 m³の貯蔵容積を持つ。このうちの1基が石炭貯蔵用に改造されているのである。

文 献

- Broch, E(1989): Use of underground in Norway. Proc. Int. Conf. Storage of Gases in Rock Caverns, 3-13.
- Gloyne, E. F and Reynolds, T. D. (1961): Permeability Measurements of Sock Salt, J. Geophys. Res., 66, no, 11, 3913-3921.
- Lindbo, T., Sandstedt, H. and Karlsson, P (1989): Storage of natural gas in lined rock caverns-pilot plant. Proc. Int. Conf. Storage of Gases in Rock Caverns. 367-370.

TAKAHASHI Manabu, TAKATSU Hiroaki, TSURUTA Osamu and KOIDE Hitoshi (1991): Utilization of the underground rock cavern-high pressurized air storage in Germany and Sweden, and diversion of oil storage site to coal storage site in Sweden.

<受付: 1991年8月1日>