

地下利用の将来展望

小島 圭二

地下利用には、ここで述べるエネルギー関連施設では、利用構想を展望し、実現させるには、さまざまなボトルネックがある。ここでは、今までに取り組んだ、地下のエネルギー施設構想の実現への経緯、この間の技術の進展と社会のニーズの変化を述べる。次に、使いやすい地下、社会に認知される地下を目指す、建設技術と操業技術をリンクさせた、技術のシステム展開の必要性とそれに到達するいくつかのボトルネックに言及する。

キーワード：地下利用、エネルギー施設、実証試験、建設と操業技術、将来展望

1. はじめに

どうすれば、地下施設構想が動くか……エネルギー関連の施設で考える。

日本が得意とし、世界でも認められている地下利用には、地下街・地下鉄で代表される、都市の生活に密着した地下施設がある。エネルギー関連では都市地下の変電所や地域冷暖房のコジェネレーション施設なども実績をあげている。山間部では、地下発電所も市民が納得する地下施設である。しかし同じ公共・公益施設でも、キーワードが、深部、長期、危険物、放射性物質などといった新しい分野で地下を利用しようとすると、市民の不安がつのる。鉱山の事故を連想する人も多い。そしてこれらの構想は必ずしも順調には動いていない。地下利用展開のボトルネック、かつては、地下の利点の理解と技術的難関の克服とが、地下利用構想の実現の合意を得るための要であるとの認識から、これらを実証する実証試験を、国家プロジェクトとして先行させ、技術の高度化を計るとともに、実現へ向けたコミュニケーションのツールとしてきた。しかし後述する国家プロジェクトの事例でも、実現した構想は、国家石油・石油ガスの地下備蓄のみであり、地層処分、CCS (CO₂ Capture and Storage) は実証へ向けての努力が積み重ねられている段階である。そしてこの間にも、各分野での地下の利用は地道に進展し、それにともなって、従来の技術的な思い込みとは違う視点からも、いくつかのボトルネックがあることも見えてきた。「地下利用のアイデア」だけでは、プロジェクトが動かなくなった。地下の環境貢献では、

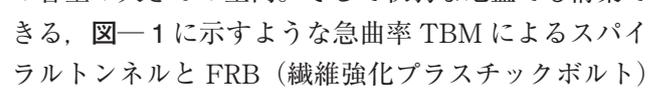
環境負荷除去の実績が市民にも浸透し、地域によっては、市民からも要望が出る都市道路の地下化や、今はやりのパッケージ型インフラの国際的な受注を目指す、例えば水ビジネスに見る技術至上主義の反省から、操業技術と連動したシステム技術への、グローバルイノベーションに対応する戦略転換もある。地下利用に関しても克服すべきボトルネックは多い。

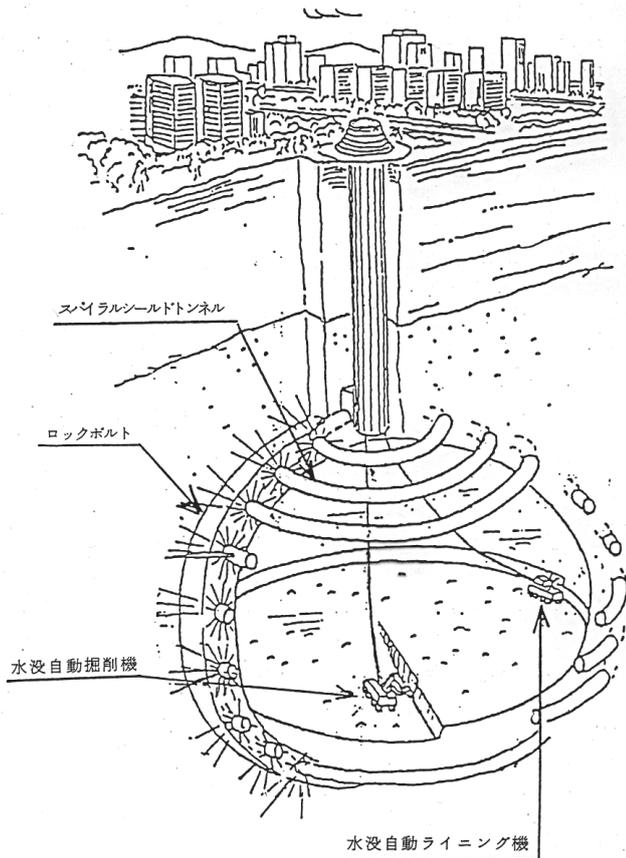
エネルギー関連施設の地下利用の将来を展望するに当たっては、急速に進歩する地下利用の技術、浅部から深部へと低圧から高圧への利用のニーズ、そして社会情勢の変化を意識しながら、新たなボトルネックを通過する方策が必要である。

2. 地下のエネルギー施設構想のトレンド

浅部から深部へ、低圧から高圧流体の貯蔵へ、そして空洞掘削から削孔へ、地下利用の将来展望を目指したエネルギー関連施設に関する国家プロジェクトの推移を振り返って見る。動くまでが大変、使いやすさをみせるのが大変な地下施設である。

(1) GEODOME

都市地下の分散型エネルギー施設に対応した、小回りの利く空洞の構築。地表施設と競合できる、同程度の容量の大きめの空間。そして軟弱な地盤でも構築できる、に示すような急曲率TBMによるスパイラルトンネルとFRB (繊維強化プラスチックボルト) による外郭の支保、泥水中での無人の掘削および内壁の支保による空洞構築技術が売り物であった。1994



図一 1 ジオドーム構想の概念図(外郭のスパイラル支保と泥水中の無人掘削)

年から実証試験を実施，1998年までかけて要素技術の実証はできたが，予算と工期の関係から，図に示すシステム全体の実証には至らなかった。これが，人が納得し，コマーシャル段階の地下利用実現の足を引っ張った要因の一つと思われる。我が国の実証試験では，往々に制度上ライフサイクルコスト的な操業実証ができない点にも，地下利用の展開のボトルネックがある。用途を特定しない多目的／汎用の地下空洞は，構想がよくても，次の段階／商用の実証へ進まない我が国の風土がある。

(2) 地下石油・液化石油ガス貯蔵

1970年代，当時のオイルショックに端を発する石油の国家備蓄は，IEA（国際エネルギー機関）による各国への石油備蓄の義務付けも加わって，急務であった。国家地下石油備蓄もこの一環として計画された。石油という可燃性の流体を，大きな地下の岩盤タンクに常圧～中圧で貯蔵・備蓄するという経験，中でも石油を水で閉じ込める水封技術は，我が国では皆無であった。このような背景から，実証試験が計画され，一挙に要素技術から操業までの要素技術と操業技術も加えた全体システムの実証が実施された。操業過程も含めて10年にわたる実証ができたのは，国が関与する，い

くつもの地下利用構想の中でこれだけである。オイルショックという社会情勢が後押ししたまれなケースと言えよう。その後のより高圧（800 kPa程度）のLPGの国家地下備蓄に関しては，他の地下利用構想と同様，LPGの要素技術の実証にとどまったが，石油備蓄の実績があることから，実現を容易にした。立地決定を経て現在建設中である。また長期の操業段階までの実証は，石油という可燃性の危険物を足元の地下に貯蔵する，地元の地権者の安心感の醸成に大きく寄与した。地下石油タンクの建設は，備蓄量を確保することが急務だった。このため，当時の状況を考慮すると，やむをえないことであるが，設計は，ほとんど石油の出し入れをしない“塩漬け型備蓄”を前提として，岩盤タンクを大きくすることで，建設コストのスケールメリットを狙った。このため製品を頻繁に出し入れする操業型備蓄には向いていないし，緊急時放出も地表の鋼製タンクなど他の形式のタンクが優先で，放出の最後の砦となっている。しかしセキュリティや災害などに関しては，地表タンクよりはるかに頑健であるということは，世界でも共通の認識である。今後の構想では，世界の石油類の需要が重質油から軽質油へ，また天然ガスの貯蔵／備蓄への機運が高まっている昨今，塩漬け型備蓄から操業型備蓄へ向けて，また地下と地表タンクをリンクさせたシステム操業によって付加価値を上げることなどが期待される。

(3) CAES → CGES → ANGAS

CAES（Compressed Air Energy Storage System；圧縮空気貯蔵発電システム）に関しては，ドイツのフントルフ，アメリカのマッキントッシュでの岩塩空洞を利用した商用施設の実績はあるが，岩盤空洞の利用では，先駆的な高圧空気の貯蔵・流通・コジェネレーション施設，中・小規模の分散型蓄電施設の構想であった。短期間ではあったが，一応操業段階までの実証試験はできた。しかし，要素技術の実証試験では，実証で問題点を見出すことも重要な役割である。この実証試験では，ゴムライニングによる密閉性能の耐久性と長期安定性などに不安が残ったが，制度上（1）と同じく，実用段階で改良を重ね，長期操業の実証をするまでには至らなかった。同様に，CGES（Compressed Gas Energy Storage System）とANGAS（Advanced Natural Gas Storage System）は，小規模の岩盤タンクを，天然ガスのパイプライン流通システムに組み込んで，天然ガス需要のピークを緩和し，同時に建設・操業コストの低減とコジェネレーションによるエネルギーの有効利用を可能にする構想

である。CAES の経験から、高圧ガスの気密性を保つライニングを、ゴムからステンレスに替え、いわば茶筒を岩盤中に埋め込んだ、要素技術の実証はできたものの、社会のパイプラインによるエネルギー流通機運の低迷から、商用での安全操業、耐久性、維持管理コストなどを見せる、実用段階での実証には至らなかった。

(4) 地層処分

放射性廃棄物の地層処分、建設技術としては、長期間、地下深部に放射性廃棄物を隔離するための岩盤の掘削と埋め戻しの技術である。また建設しながら操業をする、鉱山技術でもある。我が国でも、これを実証するための本格的な URL (Underground Research Laboratory: 地下実験施設) が、岐阜県の瑞浪市と北海道の幌延町に建設中である。世界で地層処分の R & D が始まってから 30 年、我が国でも要素技術の R & D を原位置試験を含めて、延々と積み重ねてきた。この間、急速な技術の進展があり、社会のパラダイムも変わってきた。深部と長期、建設/操業から閉鎖/隔離へのオプション技術の検討と、システム技術の検証の時代へと、世界のすう勢は移りつつある。例えば、掘削技術もスムーズブラスティングによる発破工法から TBM (Tunnel Boring Machine) へ、そしてオプション技術、システム技術としては、ボアホール削孔/Bore Hole Repository (深部削孔による地層処分のオプション構想) などがある。アメリカでは、1980 年頃から、この構想は検討されていた。そして昨今、MIT STUDY, 2010 に見られるように、また復権への道を歩み始めた感がある。処分方法を一つに絞って、社会の合意をとりつけようとしたやり方の行き詰まりからの反省とも受け取れる²⁾。そして、社会の合意の切り札として、可逆性と再取り出し (R & R: Reversibility & Retrievability) の考慮が世界のトレンドになろうとしている。

(5) CCS

空洞掘削から削孔へ、そして PVT (圧力・体積・温度) 条件のコントロールが、地下利用の新しい技術に加わった。ボアホールから深部の地層への CO₂ の圧入・貯留も建設技術としては、新しい技術である。我が国の基準作りの常として、漏気などに関する詳細な技術基準が先行する。そして「技術的に可能」の実証が優先され、環境影響評価/漏気に関する安全の実証と何がシビアアクシデントとなり得るかの検討などが後手に回っている感がある。一方、コスト面に難が

ある、従来の CCS のオプションとして、例えば CCS / ENAA 自主研究 (2011) が動き出した。比較的浅い地盤中に、排ガスをマイクロバブルにして直接圧入する CO₂ の貯留である。浅所分散型の小規模・低コストの CCS を狙ったアイデアで、環境負荷の解決が期待される。

3. 使いやすい地下へ向けて…将来展望への道

社会に受け入れられる地下への Rethinking と実績作り。

(1) スケールメリット志向からの脱却

小型・分散型の施設へのトレンドがあちこちに見られるようになった。国家備蓄の LPG 地下タンクは、製品の“塩漬け備蓄”が前提であり、コストをスケールメリットで補う大型タンクが建設中である。これとは別に、昨今のトレンドを満たし、頻繁に出し入れできる操業型の貯蔵を目指すには、出し入れと保守管理のしやすさが重要になる。建設段階の、「大きいことはいいことだ」は、必ずしも操業段階ではメリットにはならない。今後の展望としては、建設コストはかかっても、操業のしやすい、ライフサイクルコストの適正を考慮した設計・施工が重要となろう。原子力発電も、従来の大型の発電所から、地域分散型の小型発電所の構想がアメリカで検討中である。日本でもこの構想のアイデアはあるが、プロジェクトの立ち上げには至っていない。

(2) 用途転換を見越した設計へ向けて：フィンランドの重油貯蔵から石炭貯蔵への転換

フィンランドのヘルシンキ近郊に高効率の石炭火力発電所がある。ここに重油の貯槽を転換した地下の石炭貯槽がある。転換にあたっては、割れ目に浸み込んだ重質油の除去に大変苦労したと聞く。裸岩の貯槽の意外な盲点である。コスト高にはなるが、社会情勢は変化するものであるから、用途転換を可能にするライニング空洞の検討もあろう。一方、用途転換ができなかったフランスのベルギーとの国境付近にあるショーズ地下原発の事例では、施設収納にきっちり合わせた間仕切りが、新しい施設に整合しなかった。管理施設内の地下浸出水の処理コストの問題もあったであろう。結局は廃炉になった。ワンルームの単純な空間が地下には適正であろうか。スウェーデンの、1980 年代の地層処分施設の一つのアイデアに、地下水を完全にシャットアウトする WP Cave という構想があった。これも、おそらくは複雑な構造が一因で、実用には至っ

ていない。地下のボトルネックがここにも見える。これらの事例から対策の道も見える。転換が難しい地下施設の欠点を補う、将来展望につながる、一つの道が見えてくる。

(3) 安全な性能の追求一辺倒から、使いやすさと保守点検の容易な施設設計へ向けて

技術者の性能至上主義からの脱却と、地下の安全基準の再検討が必要である。例えば、石油・ガスの地下貯蔵では、鋼製タンクの基準に引張られた、漏油・漏気の考え方や気密性能検査の再検討が、将来の保守点検が容易な、使いやすいタンクへの道を開くかもしれない。

(4) 地下の不確実性への対応

モニタリングと修復技術とコミュニケーション技術。建設段階で完璧な性能を満たすのは無理な、地下の不確実性 → 操業時のモニタリングと修復技術へ先送りの認識が重要。深部地下のモニタリング・修復の悩みの深部削孔技術への期待……世界が目を見張ったチリの鉱山での人命救出劇。R & R 技術への展望が開けた。

4. 地下利用に関する要素技術の展望

- ①ゆるみ域の解消に見る TBM の実力は、世界の地層処分の試験施設では、大きな関心事の一つとして、データの蓄積は多い（スイスの Grimsel / NAGRA, スウェーデンの Äspö / SKB など）。広い意味での発破から削孔への技術のトレンドの一つである。地層処分の坑道では少なくとも、掘削によるニアフィールドの地下水の流れや水質への影響を最小限にとどめる手法として、注目されている。
- ② NATM / グラウチングか、ライニング・デンタルワークかの判断は、弱層の施工 / 操業時の不確実性の解消へ向けての維持管理技術とのリンクが重要である。地下発電所や交通施設のトンネルでは、人が入っての保守点検作業が容易であるが、地下石油タンクのように開放点検が容易にできない空洞では、弱層や水みち処理に思う、ライニング・デンタルワークへの郷愁がある。
- ③地下の利用は水との戦いでもある。水封式地下石油タンクは、操業中の水のコントロールが操業の最重要ポイントである。国家石油地下備蓄基地の水封技術に見る、自然の涵養と人工涵養・グラウチング、割れ目系の水みちの制御、そして結局は天の恵み、

雨の影響予測が頼りになる。水封技術の奥は深い。

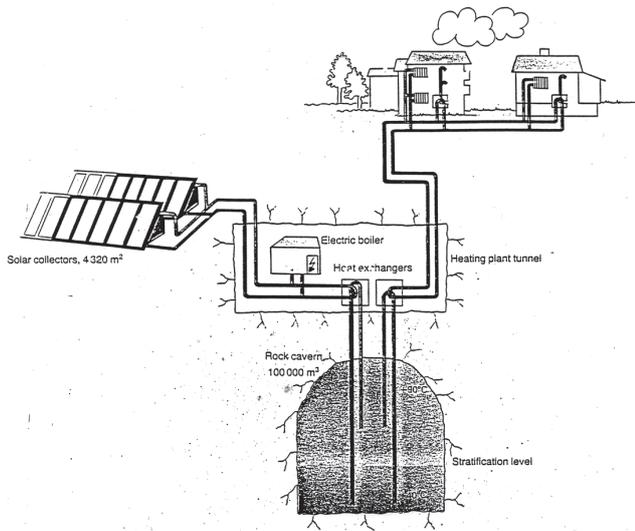
- ④削孔技術：掘るか、穴をあけるかの選択肢。脚光を浴びるか、高レベル放射性廃棄物の深部ボアホール処分、方向制御ボーリング、そして R & R にも、この削孔技術の進展に期待がかかっている。
- ⑤モニタリング技術：地下の可視化、広域・同時の経時変化の把握による地下の安全と安心の追求、干渉合成開口レーダー（INSAR）による CO₂ 圧入の地表環境影響の監視（CCS）、Micro-Seismicity による地下の岩盤の安定性の監視、無線地下通信システムによる地下の総合監視システム（原環センター）など、将来の地下利用に向けた研究開発は着々と進んでいる。
- ⑥操業技術・補修技術：操業・維持管理を見越したものの作り…水ビジネスに見られる施設建設と操業請負をパックにした、“パッケージ型インフラ”輸出に通じる、「使いやすい地下」の追求にも地下の研究開発の展望がある。

5. 地下利用に関する規制の転換への期待

- ①地表と地下の構造物の安全の考え方は、石油・ガスタンクでは、地表の鋼製タンクの基準からの脱却が必要と前述した。一般に、我が国の基準作りの欠点があここにも見える。地下備蓄に見る性能検査 / 完成検査の考え方は、漏気 / 気密試験における地表の鋼製タンクの基準の転用であり、これが建設・操業コスト高に跳ね返る。
- ②地下は、地表よりはるかに安いと考えられていたが、地下石油備蓄では、意外と高い操業コストであった。消防法に関する規制に、消防自動車と人員の常時在駐、サービストンネルの常時通気などがある。鋼板とは違う水封による漏気の考え方の隔たりがあった。
- ③“法ありき”に弱い、日本の風土：作ったことのないもの、使ったことがないものまで、詳細な基準作りに熱中、操業時に動きが取れなくなる現実がある。地下石油タンクの漏気への過度の心配、操業してみると、頭で考えたのとは大違いの現実がある。地層処分でも、研究開発が、ますます針の穴へ深入りしてみると、長期と深部の不確実性への不安が高まる。これが基準値をシビアにしようとする傾向につながっている感がある。操業してから、詳細な基準を作る風習を育てる必要がありそうである。
- ④技術者の性能至上主義 / 規制遵守から使いやすさの追求へのフレキシブルな発想の道を開く、制度の後押しも必要か。

6. 実証試験の検証と実現への長期展望

今、地層処分の URL, CCS の実用段階へ向けた実証が動き出した。しかし我が国の実証試験には、2章で述べた苦い経験がある。我が国でも、スマートグリッドのモデル地域での、実用化実証試験など、やっと操業段階、コマーシャルベースの実証が試みられるようになってきたが、まだその体質は、基本的には変わっ



図一2 雪が多く日照が短いスウェーデンでの太陽光発電と地下水貯蔵システム (写真は、小島圭二撮影 (1988))

ていない。

- ①操業検証までの予算がつかない、国が支援するプロジェクト：本来の実用化への実証ができず、いまだに治っていない海外のキャッチアップ、海外の実績で信用する体質がある。実用化には至らなかった GEODOME, CAES, ANGAS と実証には至っていない地層処分の再冠水と再取り出しなどがある。
- ②将来の展望に期待した発想と実現の意気込みがない、国が支援するプロジェクトでも、企業もリスクを負わない、負えない将来のターゲットへの挑戦がある。スウェーデンのウプサラ郊外の Lyukebo にある、雪をかぶった、昼なお暗い太陽光発電パネルと地下水タンク (図一2)、ここに学ぶものがある。30年前の1980年代から砂漠の国の太陽光発電への進出を目指して、550戸の新興住宅地へ温水を送る実用化の実証試験を着々と進めていたこの国の発想と、分散型のエネルギー施設の国内外利用を狙ったが、石油備蓄のように、時の(短期しか見ない)社会の情勢が熟していなかった、どうしても実現へ向けて動かなかった GEODOME との違い。先を見た、このバイキングの国の気概、これを大事に育ててはいけない。これが無くては、長期の展望は無いか……。

JICMA

《参考文献》

- 1) 小島圭二 (2011) 地圏科学技術研究会：エンジニアリング振興協会講演スライド
- 2) The Future of the Nuclear Fuel Cycle - An Interdisciplinary MIT Study - Summary Report, 2010 (ISBN 978-0-9828008-1-2) など
- 3) Swedish Council for Building Research & Uppsala Power and Heating Company (UKAB) のパンフレットより

【筆者紹介】

小島 圭二 (こじま けいじ)
 東京大学
 名誉教授
 地圏空間研究所
 代表

