

都市型CAESタンクの実証試験

山下 幸夫 高野 金 幸

Practical Tests for a New Urban CAES Tank

Yukio Yamashita Kaneyuki Takano

Abstract

CAES is a system for storing electric power in which compressed air is manufactured by electric surpluses at night and stored in a large tank deep underground. The design and structure have not been decided yet for an urban CAES constructed in unconsolidated ground, and so several practical tests are being carried out to acquire fundamental data on the design and structure. A reinforced concrete tank is lowered to 200 meters inside a shaft filled with water and compressed air at 20 atmospheres is supplied to the tank.

Tests showed that heavy mud-water effectively generates pre-stress in the concrete tank structures. The champagne effect did not occur during CAES test driving. This effect was also shown by theoretical analysis on dissolutions and diffusions of high pressure air in water. This paper describes the results of the tests and analysis.

概 要

CAES(Compressed Air Energy Storage)は、夜間の余剰電力を圧縮空気のエネルギーに変えて貯蔵し、これを昼間にとりだしてガスタービン発電するものである。地下深部に大規模な圧縮空気の貯蔵タンクが必要となるが、岩盤強度が期待できない都市型CAESでは、タンクの構造および設計・施工法さえ確立していないのが現状である。そこで、これらの基礎資料を得ることを目的として、鉄筋コンクリート製タンクを地下200mの深度に沈設して、最大圧力20気圧の圧縮空気の受け払いに関する各種の試験を行った。試験の結果、重泥水による外水圧を利用することによりタンク全体を圧縮応力状態の下におくことができ、高い内圧を受ける圧力容器にもかかわらず、コンクリート構造として安全に設計できることが確認できた。また、シャンペン現象の発生もなくCAES運転を安全に行い得ることが明らかになった。

1. はじめに

都市近郊の未固結地盤内に水没式立坑を施工し、その内部に縦型のCAESタンクを築造して圧縮空気を貯蔵する構想は、10年ほど前に東海大学の林正夫教授(当時、電力中央研究所)によって提唱された¹⁾。斬新なアイデアが各界から注目され、現在では産官学の共通の研究テーマのひとつとして、基礎的研究段階から実証試験へ、さらに実用化にむけたフェージビリティスタディへと歩を進めるまでの段階に至っている。

しかし、近い将来このシステムを実現化させるためには、現状でまだ不明確な点がいくつか残されている。ひとつは圧縮空気貯蔵タンクの設計法および施工法の問題である。もうひとつは、CAES運転中に発生することが懸念されているシャンペン現象の解明であり、圧力補償水の水理学的特性について理論的および実験的に把握することが必要である。

そこで財団法人エンジニアリング振興協会では、参加企業12社による上記課題の解明を目的とした実証研究を行った²⁾。ここでは、その実証研究の中から当社が主体的に実施した内容の一部について以下に述べる。

2. 都市型CAESの技術的課題

2.1 コンクリート製圧力容器の可能性

都市型CAESでは、地下150~200mの大深度に圧縮空気の貯蔵タンクを築造し、その内部に15~20気圧の高圧空気を貯蔵する。直径が30mあるいは40mといった大口径のタンクになると、経済性の面から、現場打設の鉄筋コンクリート構造とせざるを得ないものと考えられる。

ところが現行の高圧ガス保安法では、貯蔵する空気圧が1MPa(約10気圧)を超えるような圧力容器の構造材料としてコンクリートは指定されていない。引張強度が小さいためである。コンクリート構造を採用するためには、安全性を証明して通商産業大臣の特別認可を取得することが必要となる。

そのためひとつの方策として、比重の重い重泥水によってコンクリート製タンクの躯体にプレストレスを導入することを検討した。Fig. 1に重泥水的作用原理を示す。真水に代えて比重2.0の重泥水を貯蔵タンクの外周面に作用させることにより、タンク全体を外水圧が卓越した状態にすることができる。そのため高い内圧を受ける圧力容器にもかかわらず、タンク周方向応力を圧縮応

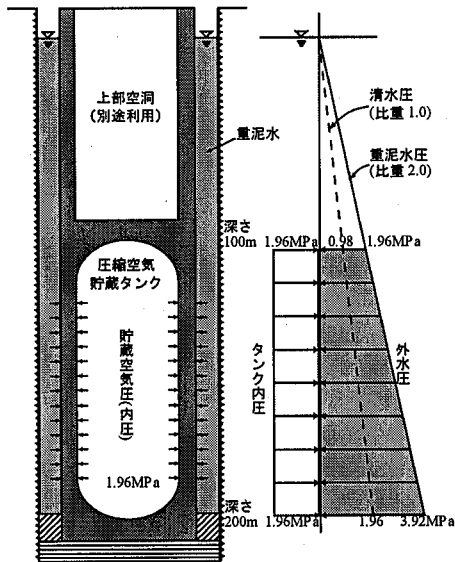


Fig. 1 重泥水の作用原理
The Principle of Acting of Heavy Mud-Water

力状態下におくことができ、コンクリートでも安全に圧力容器の設計ができるようになる。

Table 1に比重2.0の重泥水の配合例を示す。重泥水はバライト（天然重晶石の粉末，比重4.2～4.4）を主成分として，これに天然粘土と増粘剤および分散剤などを添加して作成する。

2.2 CAES運転とシャンペン現象

都市型CAESで採用しようとする技術に，Fig. 2に示すような圧力補償水による連通システムがある。地上の調整池とタンク内を送水管で連通したもので，CAES運転中に貯蔵空気の圧力をほぼ一定に維持することができる。定圧式とよぶ貯蔵効率の優れた方法であるが，唯一の欠点としてシャンペン現象の発生が懸念されていた³⁾。

すなわち，貯蔵タンク内で圧力補償水に溶け込んだ高圧空気が，夜間の加圧運転中（空気貯蔵時）に送水管に送り込まれて過飽和の状態になり，シャンペンの泡のように空気を解放する現象である。せっかく貯蔵したエネルギーの一部が失われるばかりでなく，圧力バランスが崩れて，タンク内の水面位置が低い場合には，貯蔵空気圧が一気に吹き出すブローアウト現象を誘発することも懸念される。実証試験による確認が必要である。

3. 実証試験の目的と内容

上述した都市型CAESの技術的課題を解明するために，重泥水の効果の確認とシャンペン現象を含めた圧力補償水循環の水理学的特性の把握を目的として，実証試験を行った。

Fig. 3に試験装置の概要を示す。試験は通産省工業技術院資源環境技術総合研究所の敷地内にある，直径1.5m，深さ200mの既存の水没立坑を用いて行った。この立坑内に鉄筋コンクリート製の貯蔵タンクを沈設して，最大圧力1.93MPaの圧縮空気を貯蔵する。

Table 1 重泥水の配合表(比重2.0)
A Combination of Heavy Mud-Water

材料	成分	効果	配合(重量)
水道水			100.00
バライト	天然重晶石	加重剤	183.30
クニゲルVO	天然粘土	増粘作用	8.50
ドリスカル	合成高分子ポリマー	増粘作用	0.20
SSMA	合成低分子ポリマー	分散作用	0.50
消石灰	無機薬品	PH調整	0.16
37%ホルマリン	有機薬品	防腐作用	0.05

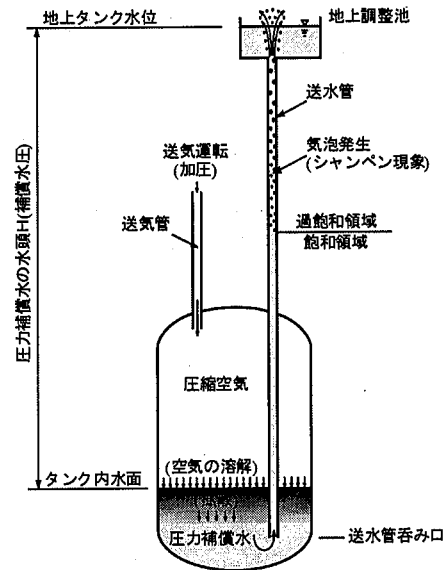


Fig. 2 シャンペン現象概念図
Process of the Champagne Effect

貯蔵タンクには送気管および送水管が付属されており，それぞれ地上のコンプレッサおよび調整池と接続される。圧縮空気はコンプレッサで製造され，送気管を経てタンク内に貯蔵される。試験では以下の圧力範囲で貯蔵空気圧を制御した。

- 1) 加圧時：貯蔵空気圧 1.93MPa(貯蔵タンク水位 LWL)
- 2) 減圧時：貯蔵空気圧 1.75MPa(貯蔵タンク水位 HWL)

なお，試験終了後の立坑の現況復帰を考慮して，試験用タンク全体を吊り構造とした。また重泥水は，貯蔵タンクの外周に重泥水型枠を別途設けてその内面に充填することとした。

Fig. 4に貯蔵タンクの詳細図を示す。貯蔵タンクは外径1.0m(内径0.7m)，高さ25mの鉄筋コンクリート製である。将来の大規模タンクの築造方法を想定して，高さ方向に7分割して下部より順次，コンクリート打設と沈設とを繰返しながら施工した。型枠材の薄肉鋼板は気密膜の代用としてそのまま残置することにした。

具体的な試験内容は次のとおりである。

- 1) 重泥水圧の作用効果を確認するため，沈設中および圧縮空気貯蔵の各作業過程で，コンクリート躯体に発生する周方向応力をコンクリート応力計を用いて測定した。また，重泥水のゲル化に対する安定性を確認する目的で，水圧計を用いて重泥水圧を継続的に測定した。

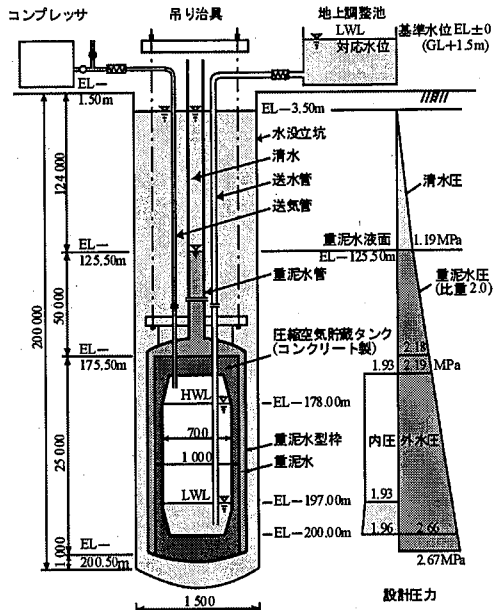


Fig. 3 試験装置の概要図
An Outline of Setting for CAES Experiment

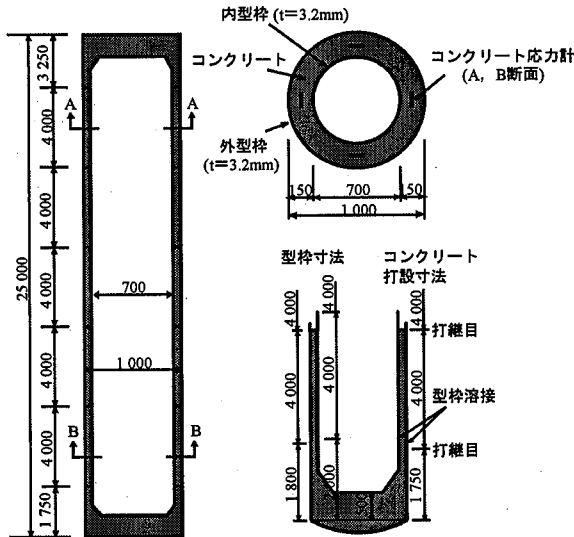


Fig. 4 貯蔵タンクの詳細図
Details of Test Tank

2) 都市型CAESが実用化された場合の運転状況を想定して、24時間サイクル運転の試験を行った際のシャンペン現象の有無を確認した。また、送水管内の流速を5倍程度に速めた5時間サイクルの試験を行い、流速とシャンペン現象との関係を確認した。

4. 試験結果とその考察

4.1 重泥水に関する事項

4.1.1 重泥水的作用効果 Fig. 5に各作業過程でコンクリート躯体に発生した周方向応力の測定結果を示す。これより、貯蔵タンク内に所定の圧力の圧縮空気を貯蔵した場合でもタンク躯体の応力は圧縮状態を維持しており、想定したとおり、重泥水によるプレストレスが有効に作用していることが確認できた。引張強度が小さいコンクリートの欠点を補い、圧力容器の構造材料として使

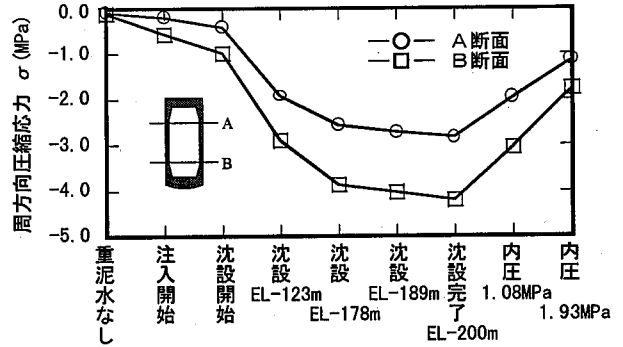


Fig. 5 重泥水によるプレストレス効果
Measured Pre-Stresses by Heavy Mud-Water

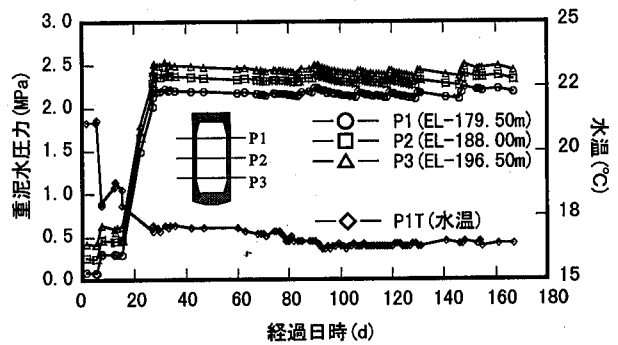


Fig. 6 重泥水圧の経時変化
The Results of Measured Heavy Mud-Water Pressures

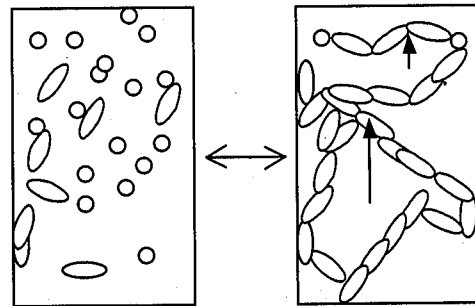


Fig. 7 重泥水圧の変動原理 (林ら⁴⁾)
A State of Periodically Recurring Gel and Liquid

用できることを示すものである。

4.1.2 重泥水の安定性 Fig. 6に貯蔵タンクの3断面で測定した重泥水圧の経時変化を示す。どの測定断面でも重泥水圧には若干の周期的な変動が水温とは関係なく認められる。このことについて林ら⁴⁾は、別途実施した重泥水のレーザー共焦点顕微鏡観察の結果から、Fig. 7に示すように、重泥水の中ではゲル化と流動化の現象が交互に繰返されていることを指摘している。すなわち、荷電粒子が連鎖状に結合してフロックを形成しゲル化する、浮力を受けて移動する過程で破壊され、再び元の流体に戻るものである。重泥水の液体としての挙動を維持するうえで重要な現象であり、重泥水の安定性に寄与している。

ただ、経時的には重泥水圧はやや低下する傾向を示しており、ゆるやかなゲル化が進行しているものと思われる。このことについても林らは、重泥水を攪拌すること

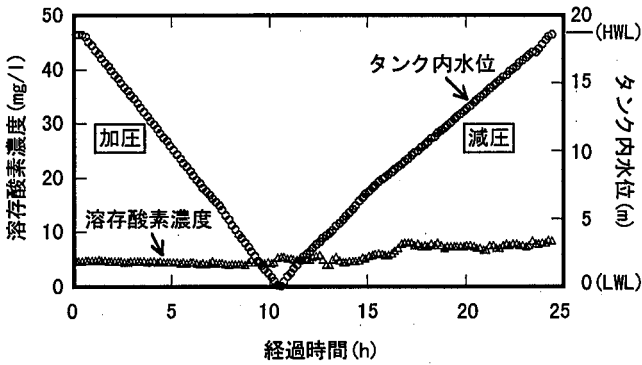


Fig. 8 溶存酸素濃度の変化 (24時間運転)
Measured Dissolved Oxygen Concentration

によって圧力が回復することを確認しており⁴⁾、適切な対応をとれば、長期間の使用に対しても重泥水の安定性を確保できるものと思われる。

4.2 シャンペン現象に関する事項

4.2.1 CAES運転試験結果 シャンペン現象は、貯蔵タンク内で形成された圧力補償水の高濃度空気溶存層が送水管内に送り込まれて上昇する過程で、過飽和の状態になったときに発生する。今回の試験では通常の24時間サイクル運転に加えて、送水管内の流速を速めるなどのより厳しい条件を設定して幾種類かの試験を行ったにもかかわらず、どのケースについてもシャンペン現象は発生しなかった。

Fig. 8は、24時間サイクル運転中に送水管呑み口付近で測定した、圧力補償水中の溶存酸素濃度の変化を示したものである。溶存空気量を直接測定する方法がないため、ここでは溶存酸素計により酸素量を測定した。測定値はいずれも5~9mg/lで変化している。この値は大気圧下での溶存酸素濃度に相当するものであり、したがって送水管内で過飽和の状態は形成されず、当然シャンペン現象も発生しないことになる。

4.2.2 高压空気の溶解・拡散に関する理論的考察

貯蔵タンク内の気液界面で圧縮空気が水中に溶解して、それがどの程度の速度で拡散していくかは、シャンペン現象の発生とも密接に関係する重要な現象である。これらの現象はヘンリーの法則と一次元拡散式を用いて理論的に解くことができる²⁾。

Fig. 9に理論解析の結果を示す。溶存空気層の拡散速度は意外に遅く、高濃度の溶存空気層が形成されにくいことが明らかになった。たとえば1年経過したあとでも、溶存空気濃度の上昇がみられるのは気液界面からせいぜい80~90cm程度の深さである。

実際のCAES運転では1日1サイクルの圧縮空気の受け払いが行われ、その際にタンク内の圧力補償水の大部分が地上で大気解放された水と入れ替わる。電気事業法による定期点検で1年に1回タンク内が空にされ、圧力補償水が更新されることを考慮すると、溶存空気層の拡散現象としては1年の期間をみておけば充分であろう。したがって、タンク内の送水管呑み口からLWLまでの水深を

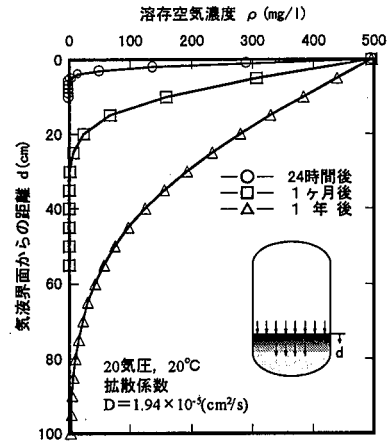


Fig. 9 溶解拡散現象の理論解析

The Results of Theoretical Analysis on Dissolutions and Diffusions of High Pressure Air in Water

1m程度にとっておけば、年間を通して送水管内に高濃度の空気溶存層が送り込まれることはなく、シャンペン現象はまず起こらないと理解してよいと思われる。当然、貯蔵空気のプロアアウトも発生しないことになる。

5. むすび

大規模な都市型CAESでは、圧縮空気の貯蔵タンクを鉄筋コンクリート構造とすることが有力である。ここでは実際にコンクリート製の貯蔵タンクを築造して、20気圧の加圧条件の下で実証試験を行い、圧力容器として安全に設計し得ることを確認した。重泥水によるプレストレスの導入は、想定どおりの効果があることが確認された。将来の40~50年に及ぶ長期間の使用に対してはなお検討の余地が残されているが、適切な対応をとることによって安定的に使用できる見通しである。

また、シャンペン現象が発生すると貯蔵空気の一部が失われることになるが、今回の試験結果からこのようなエネルギー損失を考慮しなくてもよいことが改めて確認できた。

参考文献

- 1) 林 正夫：地下空間利用の構想・圧縮空気貯蔵ガスタービン発電システム（深部の水没式タンク・廃坑利用などの考察）、土木学会誌，Vol.72, No3, p.54-56, (1987.3)
- 2) 財団法人エンジニアリング振興協会・地下開発利用研究センター：都市型電力貯蔵に関する実証研究・報告書，(1997.3)
- 3) Vann, R. D. and Schainker, R. B. : Bubble Formation and the Champagne Effect, EPRI, RP1791-7 Final Report, (1986.2)
- 4) 林 正夫, 西村宏之ほか：重泥水により作動する高出力CAESに関する物性の基礎実験，第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，p.275-280, (1998.1)