

CS-44

水封式圧縮空気エネルギー貯蔵(CAES)におけるシャンペン現象の解析

電力中央研究所

水理部	正会員	田中伸和
同上	正会員	山本亮介
原子力システム部	非会員	大川富雄

1. はじめに

電力使用の負荷平準化とCO₂発生量の抑制のために、ガスタービン発電所と一体となった「圧縮空気エネルギー貯蔵(Compressed Air Energy Storage)システム」が、現在、電気事業を中心に検討されている。本システムでは、夜間に圧縮貯蔵した空気を昼間に発電所燃料の燃焼用に使用するものであり、欧米では堅牢な岩塩層内に空洞が安価に建設できるため、既に実用化されている。

わが国で本システムを実用化するためには、安価な建設方法を考案する必要がある。現在、地下深部500～600mに空洞を掘削し、地下水压で圧縮空気を封じ込める方法が安価で実現性の高いものであるとされている。この方法では、地下空洞と地上の貯水池とを口径5～6mの通水管で結び一定圧力の空気を利用できる利点がある反面、50～60気圧の貯蔵槽内で空気の溶け込んだ水が空気貯蔵時に通水管内を上昇した時に減圧され、溶け込んだ空気が発泡する、所謂、シャンペン現象が生じる。この現象が生じると、貯蔵圧が減少し通水流量が増し、極端な場合には貯蔵槽内の空気が抜けてしまうブローアウトが生じる恐れがある。

そこで、このシャンペン現象を対象に、CAES貯蔵槽、貯水池ならびに通水管内での流動挙動の解析を試みた。解析に先立ち、高さ約30m、口径20cmの鉛直配管による基礎的な模擬試験を行い、現象解明と発泡現象のモデル化ならびに解析コードの検証を行った。その後、このコードを用いて実機での圧縮空気貯蔵時におけるシステムの水理学的な挙動解析を実施した。なお、以上のうち、模擬試験は東京大学、日本原子力研究所ならびに（株）清水建設との共同研究として実施した。

2. 解析コードの特徴

解析コードは2流体モデルによる気液2相流解析法に基づいて、当所で新たに作成した。基礎方程式を導出するに当たり用いた仮定を以下に示す。

① CAESシャンペン現象を対象にした場合、気泡形状や気体の析出形態などは温度よりも圧力に強く依存すると考えられるため、温度依存性は無視しうるものとして、エネルギー保存式は用いないものとした。

② 配管断面積は一定とした。また、配管の曲がりの影響は重力の作用方向と圧力損失のみで考慮した。

③ 貯蔵槽は断面積一様の密閉容器とし、そこに質量流量一定の気体が封入されるものとした。また、貯蔵槽から配管への流入部および配管から上池（水位：一定）への流出部における断面変化の影響は、圧力損失として考慮した。

④ 原研等との共同研究で行った実験の観測結果では、配管上部で流れが多相的な様相を示したが、配管上部での局所的な現象であり、全体的には流れは一次元的であると考えた。また、観測より流動様式は気泡流（気泡直径≒10mm）と判断できたので、構成方程式には気泡流のものを採用した。

⑤ 液体中に溶解した気体量は溶解量として別に取り扱うことにした。また、この溶解による液体密度の増大は無視した。

⑥ 発泡速度は液体中の気体溶解量とその場の圧力における飽和溶解量の差および気液の界面積濃度に比例して増加するものと仮定した。

3. 解析方法の概要

基礎方程式を差分法で離散化して完全陰解法により解析する方法を採用した。離散化メッシュは、等分割とし、変数は、図-1に示すように、スタッガード配置とした。また、時間変化項と移流項の離

散化は1次風上差分、圧力勾配は、中央差分とした。すなわち、図-1の(i)メッシュ中央(×印)で、圧力、ボイド率、密度、溶解量を与え、両端(○印)で、流速を定義した。

4. 解析結果

(1) 解析コードの検証

原研等との共研で得られた模擬試験の結果との比較を図-2および3に示す。計算は貯蔵槽の容積：3.58m³、貯水池水位：1m（一定）、 ΔX ：0.5m、気体：CO₂、発泡モデルの比例係数： 1×10^{-3} （図-2）、 2×10^{-3} （図-3）、気体封入速度：0.051 kg/secで行った。図より、発泡に伴う流量増加の時刻、流量変動などは良く一致するが、試験では200秒以降で流量減少が見られるのに図-2の解析ではほぼ一定の流量を示している。また、図-3ではピーク流量も一致しているが、280秒付近で一度減少した発泡が再び生じ流量が増加し始めている。なお、試験では330秒付近で気体封入を停止しているの、解析も同様とした。

(2) 実機条件の解析

地下600mに容積： $2 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、高さ12m、初期水位：11.5mの貯蔵槽を想定し、口径：5m、ベント部の長さ：70m、半径：10mの通水管を持つCAESシステムを考えて解析を行った。得られた結果を図-4に示す。図は通水管内流量の変化を示す。図より、約2000秒で発泡が生じ、一度流量増加を示した後、約400m³/minとなる。

5. まとめ

水封式地下CAESについて2流体モデルによる気液2相流の解析を述べた。その結果、定性的には流動評価が可能であると思われるが、試験との定量的な一致が見られるようにするには、発泡モデルやその比例係数などの構成方程式の改良等が必要である。今後、これらの改良を施すとともに、実機の合理的な設計に反映したいと考えている。

そのため、気泡の合体、分裂に関する基礎実験を実施し、構成方程式の高度化を行うとともに、粒子法などの新しい解析法についても検討して行きたい。最後に、計算の実施にあたり、(株)電力計算センターの神崎氏に協力してもらったことに感謝する。

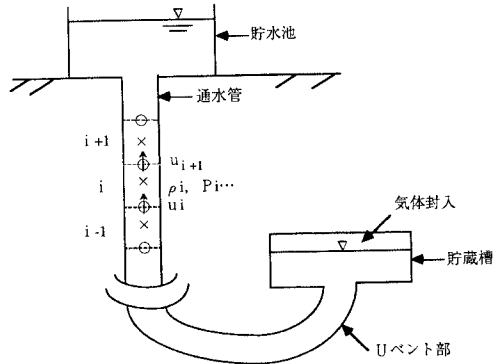


図-1 メッシュ分割と変数配置

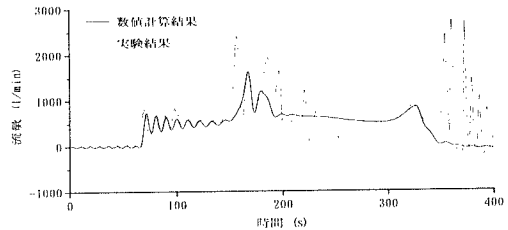


図-2 通水管内流量の時間変化($K=1 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$)
(試験と解析との比較)

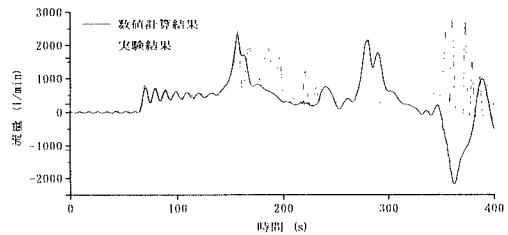


図-3 通水管内流量の時間変化($K=2 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$)
(試験と解析との比較)

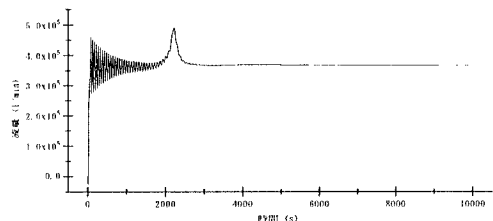


図-4 通水管内流量の時間変化
(実機：200,000m³ CAES)