

(53) 圧縮空気地下貯蔵空洞の温度変化に関する解析的検討

清水建設 正会員 ○若林 成樹
清水建設 正会員 羽根 義

清水建設 正会員 木下 直人
東海技研 北坂 秋秀

Theoretical Evaluation of Thermodynamics Behavior of Rock Cavern for Compressed Air Energy Storage

Naruki WAKABAYASHI, Naoto KINOSHITA, Tadashi HANE
Akihide KITASAKA

Shimizu corporation
Tokai gikenn corporation

Abstract

This paper proposes a theory for predicting the temperature changes inside the compressed air energy storage cavern, the theory which was obtained by applying the first law of thermodynamics to a semi-open system. The proposed theory and FEM non-steady heat conduction analysis were combined, and the short-term and long-term temperature changes of the stored air and of the surrounding rock were predicted using duration of air inflow/outflow, mass fluctuations of the stored air and heat transfer coefficient as parameters. Effect of the latent heat and the temperature of inflow air were also investigated. Numerical analysis on 10 different cases revealed that the temperature inside the cavern may radically change depending on the rockmass conditions and the operational mode of the facility, and that the temperature may continue to rise over an extended period of time.

1. はじめに

北海道上砂川町で容量30,000m³の圧縮空気エネルギー貯蔵発電のパイロットプラントの建設が計画されている¹⁾。貯蔵空洞は砂質泥岩中に4本掘削され、それぞれ内径6m、長さ265mである。海外で稼働中の岩塩空洞を利用したフントルフ、マッキントッシュの施設に較べて、岩盤の熱伝導性が低い、内側は滑らかな気密材のため熱伝達性が低い、日負荷の平準化が目的なので1日の流入出時間が6時間程度と短く、圧力変動幅が3.9～7.8MPaと大きい、等のためパイロットプラントの空洞温度は大きく変動する可能性がある。

空洞温度の予測は施設の運転効率・排水量の予測、気密材の材質・耐久性の検討、周辺岩盤・セグメントに作用する熱応力の評価等に必要となる。本論文では熱力学の第一法則を半開放系に適用して得られる貯蔵空気温度の予測式を示した。この予測式と非定常熱伝導解析を組み合わせ、圧縮空気の流入出時間、貯蔵空気重量変動幅、空洞との熱伝達係数、流入空気温度、潜熱の有無をパラメータにして貯蔵空気、空洞周辺岩盤の短期・長期的な温度変化を予測した結果を示す。

2. 温度予測理論式

貯蔵空気温度が空洞内で均一と仮定した場合の温度推定の基礎式を以下に示す。変数は表-1にまとめている。圧縮空気が流入出するため、空洞は半開放系と考えられる。熱力学の第一法則（エネルギー保存則）を適用すれば、圧縮空気の流入出に伴う内部エネルギーの変化は

$$d(m \cdot u)/dt = dm/dt (h + (W^2/2)) + dQ/dt \quad -(1)$$

ここで $(W^2/2)$: 運動エネルギー

運動エネルギーはエンタルピーに較べてはるかに小さいため無視し、さらに

$$du = c_v \cdot dT \quad (2)$$

$$h = u + P \cdot v = u + R \cdot T \quad (3)$$

式(2)、(3)を式(1)に代入し、 dT について解けば

$$dT = T \cdot (R / C_v) \cdot (dm/m) + dQ / (m \cdot C_v) \quad (4)$$

式(4)は貯蔵空気の温度変化は空気の質量変化と空気への流入熱量から求められることを示している。流入熱量 dQ は次式のように岩盤からの熱量（右辺第一項）、空洞内の既存空気と流入空気との温度差による熱量（第二項）、蒸発・結露による潜熱量（第三項）で表される。潜熱量は流入、貯蔵空気とも常に飽和していると仮定している。

$$dQ = \alpha \cdot S \cdot (T_r - T - dT/2) dt + dm \cdot (T_a - T - dT/2) \cdot C_v + \{ [w(T + dT) - w(T)] \cdot V - (dm \cdot R \cdot T_a / P) \cdot w(T_a) \} \cdot q_s \quad (5)$$

式(4)と非定常熱伝導解析を組み合わせ、貯蔵空気・周辺岩盤温度の変化を推定した。また、貯蔵空気温度が求められれば状態方程式から圧力も計算される。

$$P = m \cdot R \cdot T / V \quad (6)$$

3. 解析モデル

解析は図-1に示すように1/64の2次元モデルで行った。空洞内側の気密材は考慮していない。解析領域は30mとし、初期岩盤内温度、貯蔵空気温度は288Kで一定、初期空洞内圧力は3.9MPaと仮定した。圧縮空気と接する内側境界は熱伝達境界とし、圧縮空気とセグメントとの熱伝達を考慮している。また、外側境界は288Kの温度固定境界とした。解析に用いた熱物性値²⁾を表-2に示す。

表-2 解析に用いた熱物性値

材料	熱伝導率 (W/mK)	比熱 (kJ/kgK)	密度 (kg/m ³)
コンクリート	1.40	0.88	2300
砂質泥岩	2.21	0.88	2460

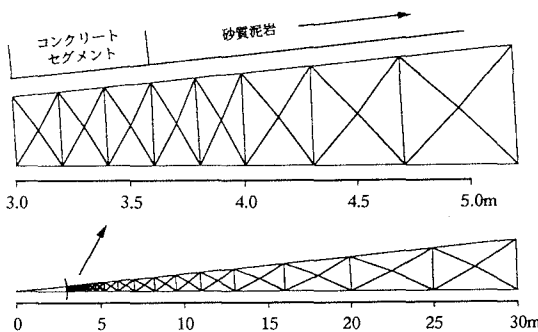


図-1 解析モデル

表-1 変数一覧

m	: 貯蔵空気質量
u	: 比内部エネルギー
c_v	: 空気の定容比熱
T	: 貯蔵空気温度
T_a	: 流入空気温度
P	: 貯蔵空洞内の圧力
V	: 貯蔵空洞容量
v	: 比体積
R	: 空気の気体定数
t	: 時間
h	: 比エンタルピー
W	: 空気流速
Q	: 流入熱量
T_r	: 空洞表面温度
α	: 熱伝達係数
S	: 空洞表面積
$w(T)$	: 温度Tの飽和水蒸気量
q_s	: 潜熱

表-3 解析ケース一覧表
(流入パターン番号は図-2参照)

解析 ケース	流入パターン			熱伝達 係数 (W/mK)	流入空気 温度 (K)	潜熱 ○考慮 ×無視
	番号	空気重量 ×10 ⁶ (kg)	時間 (h)			
流入 出時間	1-1	① 1.42~2.82	6	8.6	323	×
	1-2	② "	9	"	"	"
	1-3	③ "	12	"	"	"
	1-4	④ "	3	"	"	"
空気重量	1-1	① 1.42~2.82	6	8.6	323	×
	2-2	⑤ 1.42~2.32	"	"	"	"
	2-3	⑥ 1.42~2.02	"	"	"	"
熱伝達係数	1-1	① 1.42~2.82	6	8.6	323	×
	3-2	" "	"	17.2	"	"
	3-3	" "	"	25.8	"	"
空温 気度	1-1	① 1.42~2.82	6	8.6	323	×
	4-2	" "	"	"	288	"
潜熱	1-1	① 1.42~2.82	6	8.6	323	×
	5-2	" "	"	"	"	○

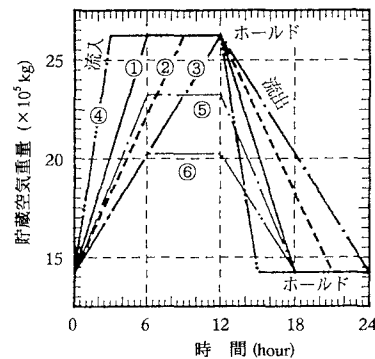


図-2 圧縮空気の流入出パターン

4. 解析ケース

流入出のパターンを図-2に、解析ケースの一覧を表-3に示す。ケース1-1を基本に圧縮空気の流入出パターン（流入出時間を4段階、貯蔵空気重量変動幅を3段階）、熱伝達係数（大気圧下での風速0、5、10 m/secを想定して3段階）、流入空気温度（323 Kと288 Kの2種類）、潜熱（有無の2種類）を変化させた10ケースで1100サイクル（3年後）まで解析した。

5. 空洞温度・圧力の短期的な変動傾向

1) 温度・圧力変動の解析例

解析結果の一例としてケース1-1の貯蔵空気温度・圧力、空洞表面温度、岩盤内温度変化を図-3～6に示す。

貯蔵空気温度は1サイクル目で初期の288 Kから流入に伴い最初は急激に、その後は緩やかに320 Kまで上昇する。ホールド中に岩盤への熱伝達のために303 Kまで低下する。また、流出に伴い最初は急激に、その後は緩やかに270 Kまで低下し、ホールド中に岩盤からの熱伝達で289 Kまで回復する。このように1サイクル目では270～320 Kの幅50 Kで変動する。100、1100サイクル目の変動パターンは全体に温度が13、23 K程度上昇するだけで1サイクル目とほとんど変わらない。

空洞内圧力は1サイクル目で流入直後に最高の8.0 MPaに達し、流出直後に最低の3.7 MPaまで低下する。100、1100サイクル目の変動パターンは1サイクル目とほとんど変わらず、それぞれ全体に0.2、0.3 MPa程度上昇しているだけである。

空洞表面温度は空気温度より緩やかに変化する。1サイクル目で284～305 Kの幅21 Kで変動する。100、1100サイクルでも変動パターンはほぼ同じであるが、全体に15、23 K上昇している。

岩盤内温度も徐々に上昇するが、1日のサイクルで変化するのは表面からほぼ0.6 mまでの領域に限られている。

ケース1-1以外の全てのケースにおいても、1日の変動パターンは1サイクル目も

1100サイクル目もほとんど変化していない。ただ、サイクルを経るにつれ、全体に温度、圧力が上昇しているだけである。また、岩盤内温度も表面から0.6 m程度が変動するだけである。

2) 貯蔵空気温度の短期的な変動傾向

流入出時間を変化さ

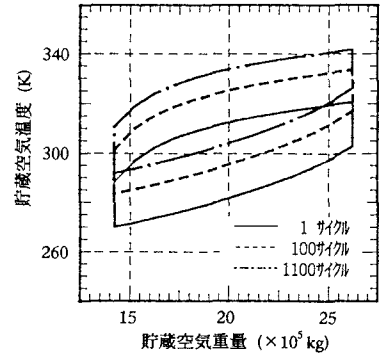


図-3 貯蔵空気温度の短期的な変動（ケース1-1）

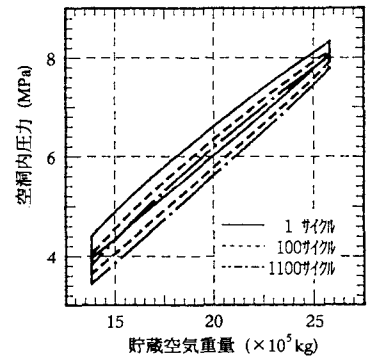


図-4 空洞内圧力の短期的な変動（ケース1-1）

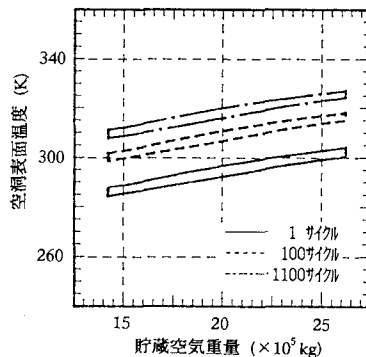


図-5 空洞表面温度の短期的な変動（ケース1-1）

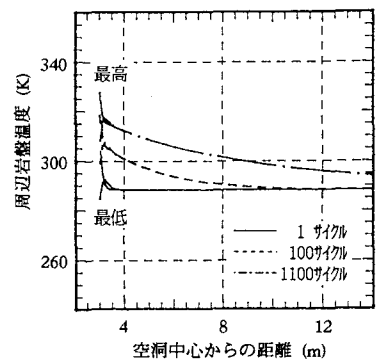


図-6 空洞周辺岩盤温度の短期的な変動（ケース1-1）

せた場合の1サイクル目の貯蔵空気温度の変動を図-7に示す。流入出時間が12、9、6、3時間と短くなるにつれ、1サイクル目の貯蔵空気温度の変動範囲は277～312K、275～315K、270～320K、261～332Kと急激に大きくなる。

貯蔵空気重量変動幅を変化させた場合を図-8に示す。変動幅が減少するにつれ、空気温度の変動は270～320K、274～314K、278～307Kと小さくなる。

熱伝達係数を変化させた場合を図-9に示す。熱伝達係数が大きくなるにつれ、空洞表面との熱伝達が良くなり貯蔵空気温度の変動範囲は270～320K、275～315K、276～313Kと小さくなる。

流入空気温度、潜熱が及ぼす影響を図-10に示す。流入空気温度を288Kとした場合は267～314Kで変動し、流入空気温度を323Kとした場合より3～6K程度低くなっている。また、潜熱を考慮しても270～320Kの変動で、潜熱を考慮しない場合と同じであり、影響はほとんど認められない。

いずれの場合とも1100サイクル目は全体的に温度が上昇するだけで変動幅はほとんど変化しない。

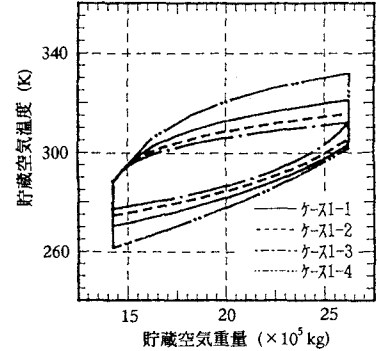


図-7 貯蔵空気温度の短期的な変動
(流入出時間の影響、1サイクル目)

6. 貯蔵空洞温度の長期的な変動傾向

流入出時間を変化させた場合の貯蔵空気・空洞表面の最高・最低温度の長期的な変化を図-11に示す。1日の空気・表面の温度変動幅はサイクルを経てもほとんど変化しないが、平均温度は徐々に上昇してゆく。流入出時間が短くなるにつれ、1100サイクル後では空気および空洞表面の平均温度はそれぞれ18、20、22、25Kと上昇しやすくなる。

貯蔵空気重量、熱伝達係数を変化させた場合も同様に1日の空気・空洞表面の温度変動幅は変化せず、平均温度のみ徐々に上昇し続ける。貯蔵空気重量を多くしたり、熱伝達係数を小さくするにつれ、温度は上昇しやすくなる。

流入空気温度、潜熱の影響を図-12に示す。同様に1日の変動幅は変化せず、平均温度のみ上昇する。流入空気温度を323Kから288Kに下げることによって1100サイクル後の平均温度の上昇は22Kから5Kに低下する。また、潜熱を考慮しても20K上昇し、考慮しない場合の22Kに比べて2Kの低下にとどまっております。また、潜熱の影響は少

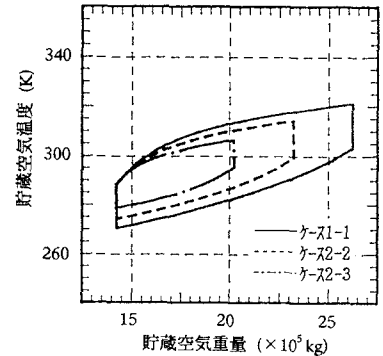


図-8 貯蔵空気温度の短期的な変動
(貯蔵空気重量の影響、1サイクル目)

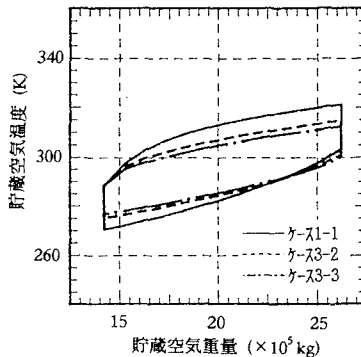


図-9 貯蔵空気温度の短期的な変動
(熱伝達係数の影響、1サイクル目)

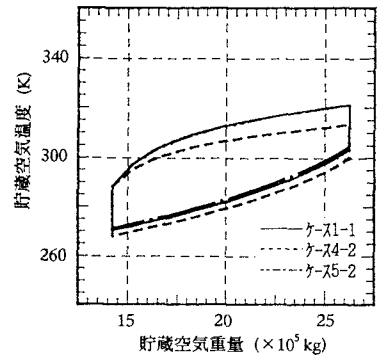


図-10 貯蔵空気重量の短期的な変動
(流入空気温度・潜熱の影響、1サイクル目)

ない。

7. 考察

砂川パイロットプラントの稼働条件に近い本解析(ケース1-1, 3-2, 3-3, 4-2, 5-2)の1日の貯蔵空気温度の変動幅は36~50 Kで、海外で稼働中のフントルフ: 16 K³⁾、マッキントッシュ: 14 K⁴⁾の変動幅に較べてかな

り大きくなっている。これは、1日の圧力変動が3.9~7.9 MPaと大きいこと、流入出時間が6時間と短いこと、岩盤の熱伝導性が悪いためと考えられる。

フントルフでは10 K程度の対流による上下方向の温度差が報告されている³⁾。パイロットプラントのようなトンネル状の空洞では対流に加え、流入出による流れで空洞上下・奥行き方向で温度差が生じ、均一と仮定している本解析結果よりさらに大きく温度変動する領域があることが考えられる。また、実際は空洞圧力の変動幅が一定になるように稼働されるため貯蔵空気重量の変動幅を一定とした本解析結果と長期的な温度変動が異なる可能性がある。さらに、本解析では地上施設から貯蔵空洞への配管部での流入空気温度の変化や気密材を考慮していない、熱伝達係数は大気圧下の値を用いていることに留意する必要がある。

8. 結論

本論文ではエネルギー保存則を半開放系に適用して得られた貯蔵空気温度予測式を示した。この予測式と非定常熱伝導解析を組み合わせることで流入出時間、貯蔵空気重量、熱伝達係数、流入空気温度、潜熱をパラメータにした解析を実施した結果、以下のことが得られた。

- 1) 一定重量の空気を繰返し流入出させた場合、貯蔵空気・空洞表面温度の短期的な変動幅は長期間経てもほとんど変化しないが、平均温度は上昇し続ける。従って、温度を評価する際には短期的な変動だけでなく長期的な変動も考慮する必要がある。
- 2) 岩盤温度の変動は短期的には空洞表面から0.6 m程度の領域に限られる。
- 3) 流入出時間を短くしたり、貯蔵空気重量の変動幅を大きくすると貯蔵空気、空洞表面温度の短期的な変動幅は大きくなり、長期的にも平均温度が上昇しやすくなる。
- 4) 岩盤の熱伝達係数が大きくなると貯蔵空気温度の変動幅は小さくなり、逆に岩盤表面温度の変動幅は大きくなる。また、長期的な温度上昇は少なくなる。
- 5) 高压で貯蔵する場合、潜熱を考慮にいれても短期的な温度変動はほとんど変化せず、長期的にはわずかに温度が上昇しにくくなるだけである。
- 6) 流入空気温度を低下させれば空気温度の変動幅は小さくなり、長期的な温度上昇も小さくなる。

<参考文献>

- 1) 財団法人 新エネルギー財団, CAES-G/T発電の基礎的技術と課題, PP41~73, 1992
- 2) 中田雅夫ら, 岩盤空洞周辺の緩み領域の調査について, 第23回岩盤力学に関するシンポジウム, PP16~20, 1992
- 3) 財団法人 新エネルギー財団, 圧縮空気エネルギー貯蔵発電(CAES-G/T)の現状と将来展望について, PP29~43, 1991
- 4) 同上1), PP75~99

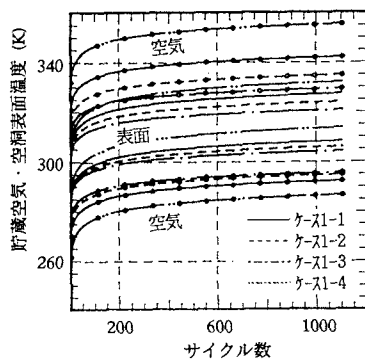


図-1-1 貯蔵空気・空洞表面温度の長期的な変動(流入出時間の影響)

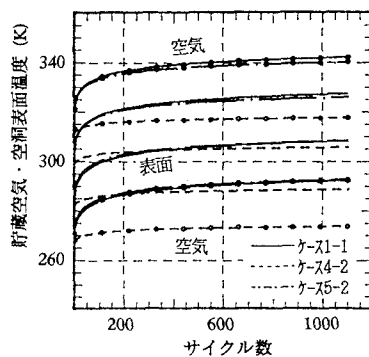


図-1-2 貯蔵空気・空洞表面温度の長期的な変動(流入空気温度・潜熱の影響)