

# 圧縮空気エネルギー貯蔵に関わる熱力学的考察

中田 雅夫<sup>1</sup>・山地 宏志<sup>2</sup>・中山昭彦<sup>3</sup>・櫻井 春輔<sup>4</sup>・志田原 巧<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 三井建設(株) 技術本部 技術研究所 (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)  
<sup>2</sup>正会員 工博 三井建設(株) 技術本部 技術研究所 (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)  
<sup>3</sup>正会員 Ph. D. 神戸大学 工学部 建設学科 (〒657-0013 神戸市灘区六甲台町1-1)  
<sup>4</sup>正会員 Ph. D. 工博 神戸大学 工学部 建設学科 (〒657-0013 神戸市灘区六甲台町1-1)  
<sup>5</sup>正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 (〒270-1166 千葉県我孫子市我孫子1646)

本論文は圧縮空気エネルギー貯蔵におけるエネルギー収支の実際を圧縮空気貯蔵試験の試験結果を基に評価し、その結果から貯蔵効率評価のためのモデルを提案したものである。貯蔵試験結果から比較的簡便な計測によって、貯蔵、漏気、及び熱伝播のエネルギー収支が把握できること、また場合によると周辺岩盤への熱損失がエネルギー貯蔵効率に影響を及ぼしうることが明らかとなった。また、この過程がエネルギー保存則に基づく比較的簡便なモデルで工学的に十分な精度で評価しうることが示された。これらの知見は地下空洞の恒温性を利用した各種地下空洞へも適用し得るものと考えられる。

**Key Words :** *compressed air energy storage, energy equilibrium, heat transfer*

## 1. はじめに

人工的に掘削された地下空洞を利用した圧縮空気貯蔵ガスタービン発電システム（以下、CAES/GT）が注目されつつある<sup>1), 2)</sup>。CAES/GTは揚水発電プラントと同様に、エネルギーをオフピーク時に貯蔵し、ピーク時に使用するピーク対応発電システムの一つであるが<sup>1)</sup>、現在の主流を成す揚水発電プラントが所要の有効落差を確保して上下二つの貯水ダム、及び地下発電所を構築せねばならず、その立地可能地点が限定されるのに比べ、貯蔵空洞周辺の地山が貯蔵圧を支持し得るならば、その立地地点をさほど選ぶ必要がないという利点を有し、各種地山条件に対し多くの貯蔵方式が構想されている<sup>3), 4), 5), 6)</sup>。

CAES/GTが所要の発電性能を発揮するためには、発電量をまかなうに足る空気質量が貯蔵空洞内に貯蔵されねばならない。このためには、熱的に安定した貯蔵空洞が構築されるか、もしくは貯蔵過程におけるエネルギー収支が正しく評価され、これに応じた空気の供給・排気運転が実施される必要がある。

貯蔵空洞に供給される圧縮空気はコンプレッサーで加圧後、数十℃まで冷却される<sup>7)</sup>が貯蔵空洞内に供給された後に再度の圧縮過程を受けるため最終的な貯蔵温度は供給空気温度を大きく超えることがある<sup>8)</sup>。貯蔵温度が高いと貯蔵空気は膨張し、所定よりも小さな空気質量で貯蔵可能な貯蔵圧を超えてし

まい発電に必要な空気質量をまかなうことができない。

これとは逆に、貯蔵過程において貯蔵空気の持つ熱量が周辺岩盤へ逸散して行くと、貯蔵空気温度及び貯蔵圧が時間の経過とともに低下して行く。この場合、圧縮空気の再生器やガスタービンなどに熱応力が発生する等で発電系への悪影響を及ぼし、システム効率を低下させる恐れがある<sup>9)</sup>。また、はなはだしくは発電可能な最低貯蔵圧以下へまで貯蔵圧が低減することすら考え得る。

このようにCAES/GTでは熱的に安定した条件下で圧縮空気が貯蔵されることが望ましく、これを実現するためには貯蔵過程におけるエネルギー収支を正しく評価することが不可欠となる。吉田<sup>8)</sup>はこのようなCAES/GT特有の熱流体問題を提起し、熱力学的にこれを解くことを試みているが、実用的なエネルギー評価手法を与えるには至っていない。

筆者らは神岡鉱山茂住坑内において圧縮空気貯蔵実験場を構築し、圧縮空気貯蔵実験に関わる各種の実証実験を実施してきた。本論文は、その実証実験時に得られた計測結果を基に、岩盤内圧縮空気貯蔵における熱力学的問題を論議し、そのエネルギー効率に関する評価手法を提案するものである。

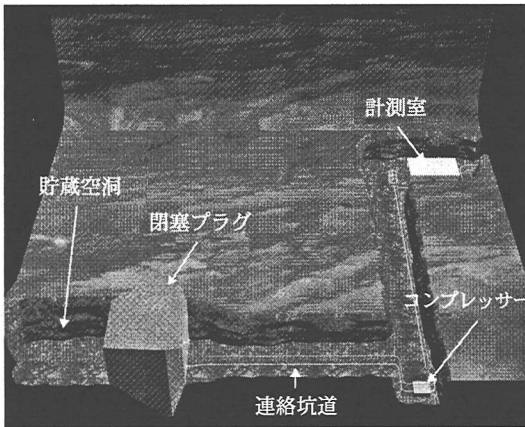


図-2.1 圧縮空気貯蔵実験場施設概要

表-2.1 計測項目一覧

計測項目	計測点数	測定計器
供給空気量	1	流量計
供給空気圧力	1	圧力計
供給空気温度	3	気体温度計
貯蔵空気圧力	7	圧力計
貯蔵空気温度	29	熱電対
岩盤温度	5	熱電対

## 2. 圧縮空気エネルギー貯蔵試験の概要

### (1) 神岡圧縮空気貯蔵実験場概要

神岡鉱山茂住坑内に圧縮空気貯蔵実験施設を構築した。図-2.1に実験施設配置を模式的に示す。当該実験施設建設地点の土破りは約1000mに達し、力学的には非常に安定した条件にある。図-2.1に示すように当該貯蔵実験場は貯蔵空洞、閉塞プラグ、機械室、及び計測室から構成されており、貯蔵空洞寸法は5.5m（幅）×4.5m（高さ）×9.0m（奥行き）で実験貯蔵容量は204m<sup>3</sup>を有す。

当該地点の地質は飛騨変成岩類、及びこれら変成岩類を横切って狭長に分布する変塩基性岩類、または変成岩類を取りまくように分布する花崗岩、及び堆積岩からなる手取層群から構成される<sup>9)</sup>。当該地点の基岩を形成する飛騨変成岩類は、日本最古の岩石と考えられており、主に角閃石片麻岩、黒雲母片麻岩等の片麻岩類と、晶質石灰岩及び伊西岩からなる。これらの岩石はいずれも一軸圧縮強度で150MPa～250MPaと非常に硬いが、岩盤としては大小の亀裂が比較的数量多く発達している<sup>10)</sup>。

なお、試験時における地下水位は常に空洞レベルより下であることが、空洞周辺に設けた間隙水圧測定結果より確認されており<sup>9)</sup>、目視観察においても不定期な滴水が観察された以外は概ね乾燥した地山条件と推測された。

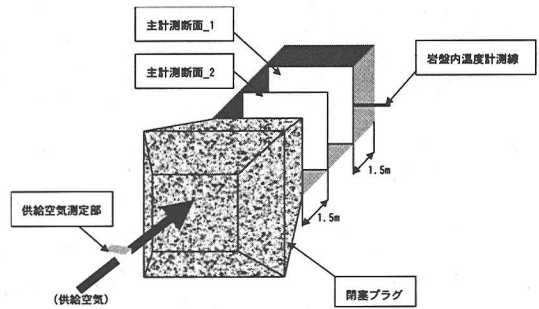


図-2.2 計測位置概念図

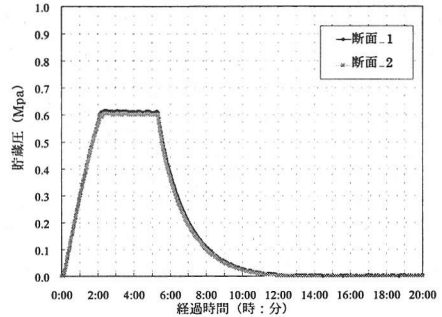


図-2.3 貯蔵圧荷パターン

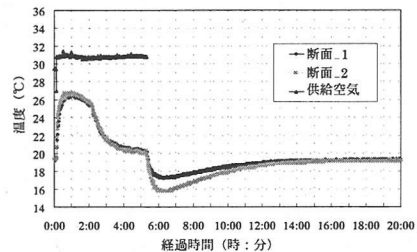


図-2.4 供給空気温度・貯蔵空気温度の経時変化

### (2) 素掘り空洞における圧縮空気エネルギー貯蔵試験の概要

一般に圧縮空気エネルギー施設では漏気によるエネルギー損失を防ぎ、所要の気密性を確保するために何らかの気密対策工が施工される。しかし、ここでは貯蔵空洞周辺岩盤が固有に持つ熱的特性を把握することを目的として、貯蔵空洞を仕切る閉塞プラグを除いて、一切の気密対策を施さないものとした。したがって、当該貯蔵試験時にはかなりの漏気が発生するものと予想され、ここで採用するエネルギー収支の評価法は漏気によるエネルギー損失も厳密に評価し得ることが不可欠となる。

当該貯蔵試験時の計測項目は表-2.1に示すものであるが、貯蔵空洞内の圧力分布、並びに温度分布に関しては有為な差が現れなかったために、以下では図-2.2に概略的に示す主計測断面\_1, 2で計測された

表-3.1 実計算に用いた計測緒元の単位

緒元		記号	単位
空気供給ライン	供給空気絶対温度	$T_s$	K
	供給空気圧力	$P_s$	atm
	供給空気質量	$q_s$	$Nm^3$
貯蔵空洞	貯蔵空気絶対温度	$T_c$	K
	貯蔵圧	$P_c$	atm
	貯蔵空洞容量	$V_c$	$m^3$

値を用いることとする。

図-2.3に圧縮空気エネルギー貯蔵試験時の貯蔵圧の経時変化を示す。図に示すように、当該貯蔵試験では最大貯蔵圧を0.6Mpaとし、最大貯蔵圧到達後は貯蔵空気温度を安定させるため、漏気量に応じて必要量を供給しつつ3時間一定圧を継続してシャット・インを行い、漏気に伴う貯蔵圧低下を観測しつづけた。この間の供給空気温度、並びに貯蔵空気温度の経時変化を図-2.4に示す。

図より明らかなように、供給空気温度は昇圧時、一定圧保持時を通じ31℃前後で安定している。しかし、貯蔵空気温度は昇圧開始前に19℃であったものが、昇圧開始とともに鋭く上昇を始める。ところが、27℃付近で頭打ちとなり、緩やかな下降カーブを呈し始め、一定圧保持とともに急勾配で低下し20℃付近で安定する。さらに、シャット・インと同時に再度の温度低下を呈し、昇圧開始前の温度よりも下降する。この時、主計測断面\_1と2の温度に最大で2℃程度の差が生じるが、これは貯蔵空洞内に漏気発生箇所に向かう空気の流れが生じ、温度勾配が形成されたものと推測できよう。この、温度低下はシャット・イン後、約一時間で温度上昇へと転じ、最終的には昇圧開始前と同じ19℃で安定する。以下に当該貯蔵試験時のエネルギー収支評価を行う。

### 3. 貯蔵試験結果に基づく貯蔵空洞の性能評価

#### (1) 物質貯蔵性能の評価

当該貯蔵試験におけるエネルギー収支を評価する前に、エネルギー貯蔵の媒体となる物質、すなわち圧縮空気質量の貯蔵性能を評価することを考えよう。今、質量保存則より、次の関係が与えられる。

$$\frac{d(\rho_c V_c)}{dt} = m_s - m_f \quad (3.1)$$

ここで、 $\rho_c$  : 貯蔵空気密度

$V_c$  : 貯蔵空洞容量

$m_s$  : 供給空気質量

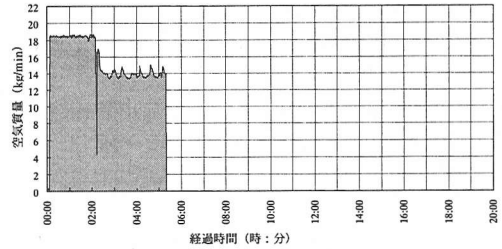


図-3.1 熱検証試験時の供給空気質量の経時変化

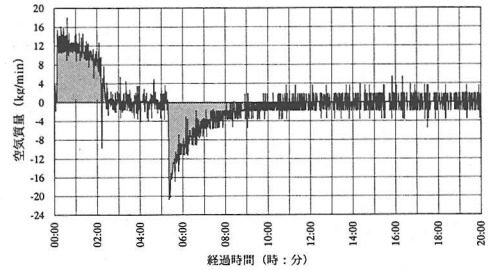


図-3.2 熱的検証試験時の貯蔵空気質量の経時変化

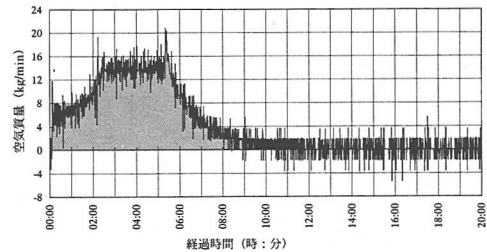


図-3.3 熱的検証試験時の漏出空気質量経時変化

$m_f$  : 漏出空気質量

式(3.1)において、貯蔵空気密度  $\rho_c$  は状態方程式より、次のように与えられる。

$$\rho_c = \frac{P_c}{RT_c} \quad (3.2)$$

ここで、 $P_c$  : 貯蔵圧

$R$  : ガス定数

$T_c$  : 貯蔵空気絶対温度

したがって、貯蔵空洞内の空気質量増分  $\Delta m_c$  は昇圧による空洞変位を無視し、一定容量  $V_c$  を仮定すれば、式(3.1)、(3.2)より次のように与えられる。

$$\Delta m_c = \frac{V_c P_c}{RT_c} \left( \frac{\Delta P_c}{P_c} - \frac{\Delta T_c}{T_c} \right) \quad (3.3)$$

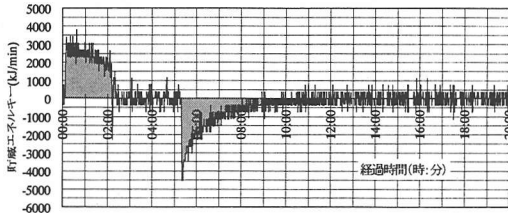


図-3.4 貯蔵されるエネルギーの経時変化

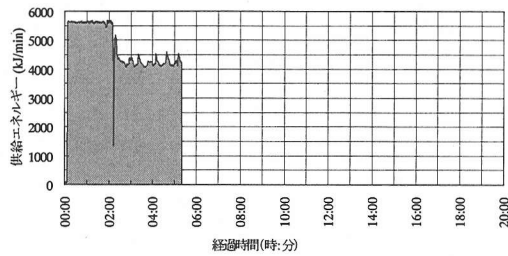


図-3.5 供給エネルギーの経時変化

ここで、 $\Delta P_c$  : 貯蔵圧増分

また、供給空気質量は標準状態換算の供給体積流量  $\delta v_s$  より、以下のように求められる。

$$m_s = \rho_{atNormal} \times \delta v_s \quad (3.4)$$

ここで、 $\rho_{atNormal}$  : 標準状態の空気密度

式(3.1)~(3.4)から、計測項目として供給空気質量、貯蔵圧、並びに貯蔵空気温度を選べば、貯蔵空気質量と漏出空気質量が算定されることが分かる。

図-3.1には計測された毎分の供給空気質量経時変化を、また図-3.2は式3.3より算定された毎分の貯蔵空気質量増分をそれぞれ示す。図-3.1に示すように当該貯蔵試験では、加圧過程で約18kg/min、一定圧過程で13.5~15kg/minの空気質量を供給した。これに対し、貯蔵空洞内の空気質量増分は加圧過程の初期で約14kg/minであったものが貯蔵圧が0.6Mpaに達した付近では約3~4.0kg/min程度の増加しか見せず、貯蔵圧の増大とともに漏気量が増大していることが分かる。これらを基に、式(3.1)の質量保存則から漏出空気質量の経時変化を求めると図-3.3を得、前述のように貯蔵圧と漏気量は強い相関を示している。

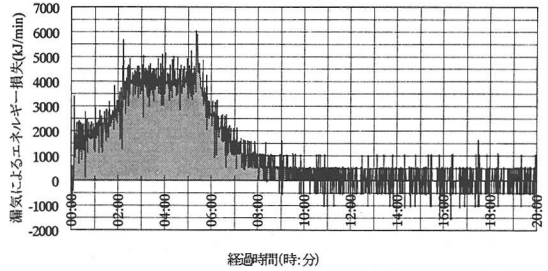


図-3.6 漏気によって損失されるエネルギーの経時変化

## (2) エネルギー貯蔵性能の評価

### a) 圧縮空気エネルギー貯蔵性能評価の基礎式

空洞内に貯蔵された空気は、高速の回転運動を呈さない限り、比較的緩やかな空気流を形成し、その流速は音速に比べ非常に小さなものとなる。このような場合、貯蔵空気の運動エネルギーは内部エネルギーの変化過程で無視し得るので、貯蔵空洞内の空気が持つ総エネルギー  $E_c$  は次のように示される。

$$E_c = \int_V \rho e_c dV = \rho_c e_c V_c \quad (3.5)$$

ここで、 $V_c$  : 貯蔵空洞容量

$\rho_c$  : 貯蔵空気密度

$e_c$  : 単位質量当たりの内部エネルギー

熱力学第1法則によると、貯蔵空洞が閉じた系であれば、総エネルギー  $E_c$  の変化  $dE_c$  は外部からなされた仕事  $\delta W$  と外部から流れ込んだ熱量  $\delta Q$  との和に等しい。すなわち、

$$dE_c = \delta W + \delta Q \quad (3.6)$$

いま、圧縮空気貯蔵過程を考えれば式(3.6)の右辺に空気の流入・流出によるエネルギー変化の項を加えなければならない。すなわち、流入する空気によって与えられるエネルギー  $dE_s$  と漏気によって失われるエネルギー  $dE_f$  との差を加えなければならない。また、外部よりなされる仕事  $\delta W$  は供給空気のなす仕事  $\delta W_s$  と漏出空気がなす仕事  $\delta W_f$  との差で与えられる。したがって、式(3.6)は次のように改められる。

$$dE_c = (dE_s - dE_f) + (\delta W_s - \delta W_f) + \delta Q \quad (3.7)$$

この式から、 $\delta Q$  は空気の流入・流出に係わらない

熱の移動を示すことが分かる。ここで、供給空気、及び漏出空気の単位質量当たりの内部エネルギーを  $e_s, e_f$ 、密度を  $\rho_s, \rho_f$ 、空気圧を  $P_s, P_f$ 、さらに体積流量を  $\delta v_s, \delta v_f$  とすると、次の関係が与えられる。

$$\begin{aligned} dE_s &= e_s \rho_s \delta v_s \\ dE_f &= e_f \rho_f \delta v_f \\ \delta W_s &= P_s \delta v_s \\ \delta W_f &= P_f \delta v_f \end{aligned} \quad (3.8)$$

また、体積流量と空気質量の間には次の関係を設けることができる。すなわち、

$$\begin{aligned} \frac{\delta v_s}{dt} &= \frac{m_s}{\rho_s} \\ \frac{\delta v_f}{dt} &= \frac{m_f}{\rho_f} \end{aligned} \quad (3.9)$$

式(3.8)、(3.9)を式(3.7)に代入するとエネルギー収支式は次のように与えられる。

$$\frac{dE_c}{dt} = (e_s + \frac{P_s}{\rho_s})m_s - (e_c + \frac{P_c}{\rho_c})m_f + \delta Q \quad (3.10)$$

なお、式(3.10)においては漏出空気は漏出発生の際に貯蔵空気の貯蔵圧と貯蔵温度を有するものとして  $P_f = P_c$  及び  $T_f = T_c$  とおいた。

理想気体である空気の内部エネルギーは温度のみの関数で、しかも温度変化の大きくない場合には、次の関係がある。

$$\frac{de}{dT} = C_v \quad (3.11)$$

ここで、 $C_v$  : 空気の定積比熱

したがって、式(3.10)の内部エネルギーは全て温度の関数として、次のように書き改められる。

$$\frac{C_v V_c}{R} \frac{dP_c}{dt} = (C_v + R)m_s T_s - (C_v + R)m_f T_c + \delta Q \quad (3.12)$$

ここで、 $R$  : 気体定数  
 $V_c$  : 貯蔵空洞容積

式(3.12)において、左辺は貯蔵空気の貯蔵圧測定から与えられ、右辺第1項は供給空気の温度と供給質量測定から与えられる。さらに、右辺第二項は漏気

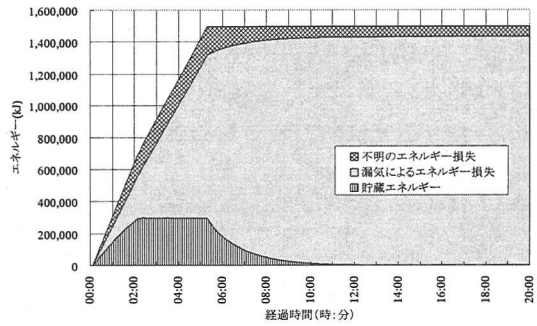


図-3.7 貯蔵過程期間中のエネルギー収支

によるエネルギー損失で漏出空気質量が質量収支より推定できれば、貯蔵空気の温度測定より与えられる。以下では記述の便宜のため式(3.12)を以下のように表記することとする。

$$\frac{dE_c}{dt} = Q_s - Q_f - Q_m \quad (3.13)$$

ここで、 $E_c$  : 貯蔵空洞内のエネルギー

$Q_s$  : 供給空気の熱量フラックス

$Q_f$  : 漏出空気の熱量フラックス

$Q_m$  : 未定の損失熱量フラックス

#### b) 圧縮空気エネルギー貯蔵実験のエネルギー収支

当該貯蔵試験におけるエネルギー収支を評価する。当該貯蔵試験における計測項目は表-2.1及び2.2に示すものであり、既に見たように質量収支から漏出空気質量は既に算定されている。したがって、貯蔵エネルギー増分  $dE_c/dt$ 、供給エネルギーフラックス  $Q_s$ 、及び漏出エネルギーフラックス  $Q_f$  等は式(3.12)より個別に計算することができる。図-3.4~3.6はこのようにして求めた貯蔵エネルギー増分  $dE_c/dt$ 、供給エネルギーフラックス  $Q_s$ 、及び漏出エネルギーフラックス  $Q_f$  の経時変化を示したものである。

図-3.5に示すように、当該検証試験では加圧過程において約5,570kJ/min、一定圧保持過程において4,200kJ/minの熱量を供給しつづけた。

これに対し、貯蔵空洞内に圧縮空気エネルギーとして貯蔵されるエネルギーは、加圧過程の初期において2,930kJ/minであったものが、貯蔵圧の増大とともに1,870kJ/min程度にまで低下している。これとは逆に漏出空気によるエネルギー損失は貯蔵の初期において2,300kJ/minであったものが、貯蔵圧の増大とともに3,350kJ/min程度にまで増大しており、

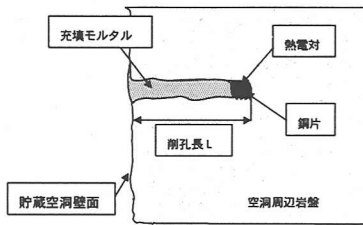


図-4.1 周辺岩盤温度測定法概要図

漏気の増大に伴うエネルギー損失がそのままエネルギー貯蔵性能の低下に結びついていることが分かる。また、一定圧保持状態では毎分の供給エネルギー4,200kJ/minに対して平均で3,980kJ/min程度が漏気により損失している。

これらを基に累積の総エネルギー収支を求めれば図-3.7を得る。図に示すように当該試験中に供給されたエネルギーは総計1,499,060kJであり、0.6MPaの一定圧保持中には圧縮空気エネルギーとして294,200kJが貯蔵され、最終的に1,431,420kJのエネルギーが漏気により放出されたこととなる。この結果、空気の流入・流出によらない熱移動量 $Q_m$ は最終状態で約67,810kJ外部へ損失したものと推定される。

0.6MPaの一定圧保持中に貯蔵されるエネルギーが294,380kJであることを考えれば、これは有効貯蔵エネルギーの23%に匹敵するエネルギーが漏気以外の原因で損失していることになり、圧縮空気貯蔵のエネルギー効率を正しく評価するためにはこの熱量損失の原因を特定し、その対策を講ずる必要がある。

#### 4. 貯蔵空洞周辺岩盤への熱放出に関する評価

空気の流入・流出によらない熱移動量 $Q_m$ の大部分は周辺岩盤への熱放出によるものと考えられよう。しかし、図-2.4に示したように当該貯蔵実験では加圧過程における貯蔵空気温度の上昇が最大で約7℃と比較的小さなため、その周辺岩盤への熱放出は比較的小さなものではないかと考えられる。いずれにせよ、エネルギー収支とは別個にこれを評価し、その放出量を同定することが貯蔵空洞の熱効率を評価する上で不可欠となろう。以下では、貯蔵実験時に実施した貯蔵空洞周辺岩盤の温度計測結果からその熱放出量を評価することを試みた。

##### (1) 貯蔵試験時の空洞周辺岩盤温度

図-4.1に模式的に示す方法で岩盤温度を測定した。すなわち、直径15mmの測定穴を測定深度まで穿孔し、銅片に熱電対を巻き付け、これを測定穴底面の岩盤

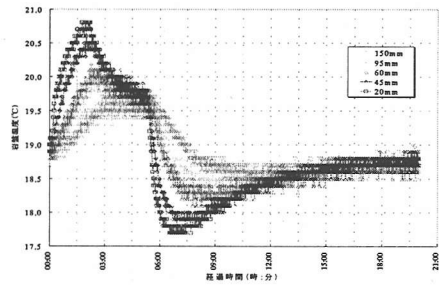


図-4.2 熱的検証試験時の岩盤温度経時変化

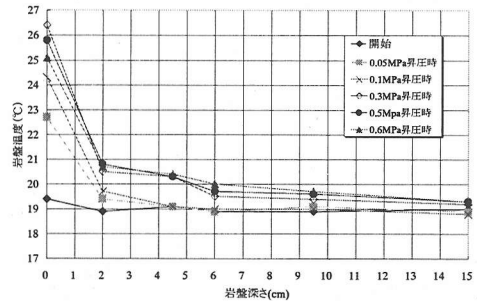


図-4.3 加圧過程における岩盤温度分布の変化

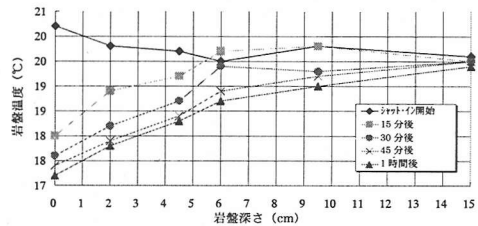


図-4.4 シャット・イン後の岩盤温度分布の変化

に密着させたのち、モルタルで測定穴を充填する。測定深度は空洞壁面より20, 45, 60, 90, 150mmの5点とした。

図-4.2には貯蔵実験時の各計測点における岩盤温度の経時変化を示し、図-4.3及び4.4はそれぞれ加圧過程、及びシャット・イン後の岩盤温度分布を示したものである。これらの図から知れるように加圧過程において、岩盤内温度は空洞壁面で最大値を取り深度方向へ低減して行く曲線分布を成し、20mm点では最大で約2.7℃の温度上昇を示す。これに対し、シャット・イン後はこれとまったく別の分布、すなわち岩盤表面付近から岩盤深度方向へ温度が上昇する分布を示す。今、150mm点の温度変化に注目すると、貯蔵開始前に19.0℃であった岩盤温度が一定圧保持過程において最大の19.5℃まで上昇し、シャット・イン後では最小の18.7℃までに低下する。した

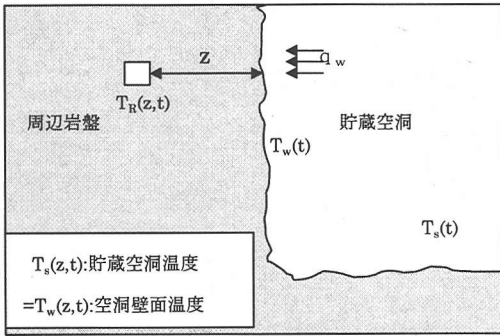


図-4.5 空洞周辺岩盤熱収支モデルの概念図

表-4.1 計算に用いた空洞周辺岩盤の熱物性

乾燥状態		含水状態	
$k_R$	$c_R$	$k_R$	$c_R$
$\text{kJ/m}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{K}$	$\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{K}$	$\text{kJ/m}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{K}$	$\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{K}$
0.00596	0.1294	0.000298	2.588

がって、その温度変化の幅は最大で0.8℃、初期からでは、0.5℃の変動しか示さないほぼ安定した状態にあるものと評価できる。したがって、当該貯蔵試験において貯蔵空気の温度変化が及ぼす影響圏は高々数100mmに過ぎないものと判断されよう。これは、岩盤温度計測個所の側壁が幅9m、高さ4.5mもあることを考えれば、近似的に半無限媒体としてのモデル化が許容されるものと判断される。

## (2) 周辺岩盤へ放出される熱量の評価

前述の計測結果をもとに、貯蔵空洞側壁を半無限媒体としてモデル化し、空洞壁面温度  $T_w(t)$  が空洞壁面の至る所で均一と仮定する(図-4.5参照)。熱が空洞壁面垂直方向にだけ伝播するものとするれば、その熱伝導は次の一次元拡散方程式で示される<sup>11)</sup>。すなわち、

$$c_R \frac{\partial T_R(z,t)}{\partial t} = k \frac{\partial T_R(z,t)}{\partial z^2} \quad (4.1)$$

ここで、 $c_R$  : 岩盤の熱容量  
 $T_R$  : 岩盤温度  
 $k_R$  : 岩盤の熱伝達係数

ここで、空洞壁面における熱伝達量を  $q_w(t)$ 、岩盤の初期温度  $T_0$  をとすると、初期条件及び境界条件は以下のように与えられる。

### 初期条件

$$t=0 : T_R(z,t) = T_0 \quad (4.2)$$

### 境界条件

$$z=0 : -k_R \frac{\partial T_R}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_w(t) \quad (4.3)$$

$$z=\infty : T_R(\infty, t) = T_0$$

この解は、次のように与えられる<sup>12)</sup>。すなわち、

$$T_R(z,t) = T_0 + \frac{\sqrt{c_R z}}{2\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{z}{\tau}} \frac{T_w(t-\tau) - T_0}{\tau^2} e^{-\frac{c_R z^2}{4\tau}} d\tau \quad (4.4)$$

したがって、貯蔵空洞温度を空洞壁面の岩盤温度と

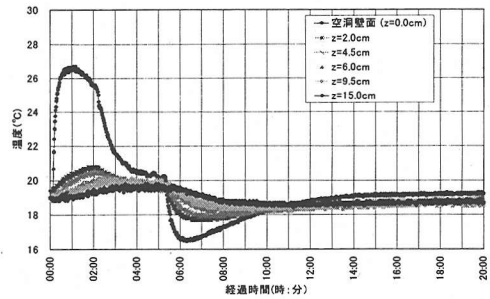


図-4.6 貯蔵温度と周辺岩盤内温度の経時変化

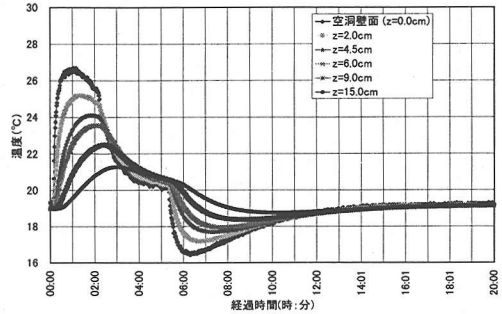


図-4.7 乾燥状態の温度シミュレーション

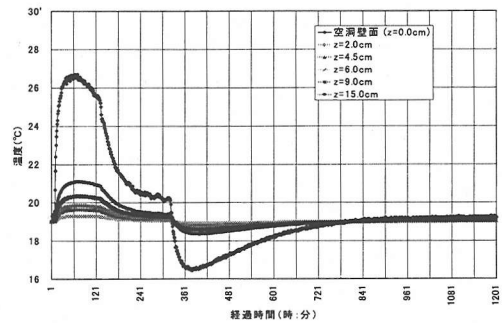


図-4.8 湿潤状態の温度シミュレーション

仮定して式(4.4)中の $T_w(t)$ に代入することで、数値的に岩盤温度、並びに周辺岩盤へ放出される熱量を求めることができる。

#### a) 貯蔵空洞周辺岩盤の熱物性の特定

周辺岩盤への放熱量を正しく評価するためには、周辺岩盤の熱容量 $c_R$ 及び岩盤の熱伝達係数 $k_R$ を知る必要がある。しかし、顕著な漏水が見られない場合でも、貯蔵空洞周辺岩盤は一定の含水状態にあると考えられる。一般に、含水状態にある岩石の熱物性を室内試験から求めることは難しく、また現地の平均的な含水状態を室内において再現することはほぼ不可能に近い。このため、乾燥状態にある火成岩の熱容量 $c_R$ 及び岩盤の熱伝達係数 $k_R$ を初期値<sup>13)</sup>として、試行錯誤的に両物性を変化させ、周辺岩盤の温度計測結果を説明しうる熱物性を同定することとした。

図-4.6は貯蔵空洞周辺岩盤内温度の経時変化を貯蔵空気温度との関係で示したものであり、図-4.7及び4.8はそれぞれ乾燥状態及び最終的に同定した湿润状態の熱物性値を用いて式(4.4)から数値的に周辺岩盤の温度変化を求めたものである。図-4.7より明らかなように、乾燥状態の熱物性を用いた計算結果では深さ方向に滑らかな温度分布が形成され、鋭敏な熱伝播が生じることが分かる。計測に現れた温度分布の特徴は貯蔵空洞壁面と直近の温度計測点( $z=15\text{mm}$ )の間に大きな温度勾配が発生し、最大では $6^\circ\text{C}$ 近い温度差が生じる点にある。このため、熱伝播が鈍くなる方向に熱容量 $c_R$ 及び岩盤の熱伝達係数 $k_R$ を変化させるところ、表-4.1に示す熱物性において図-4.8のような計算の温度変化を得ることができた。

図-4.6と4.8を詳細に比較すれば、計測値に現れている熱伝播の時間的な後れが数値シミュレーションには現れていない。または、シャットイン後の岩盤内温度の低下が、若干、鈍いなどの点が指摘されるが、工学的には十分良好な一致を示すものと判断される。

この熱物性は表-4.1に見るように熱伝達係数 $K_R$ 、熱容量 $C_R$ とともに、乾燥状態の値と1オーダー以上異なっている。これは前述のように、含水によって岩盤固有の熱物性が水の値に近づいた以外に、空洞壁面近傍に形成される気体-個体間の温度境界の影響や、岩盤中の水分移動に伴う熱移流の影響等を受けたためと考えられる。したがって、この熱物性はあくまでもエネルギー貯蔵効率を評価する上での等価値である。

#### b) 周辺岩盤への熱損失の評価

一次元の熱伝播を仮定するとき、任意時刻 $t$ にお

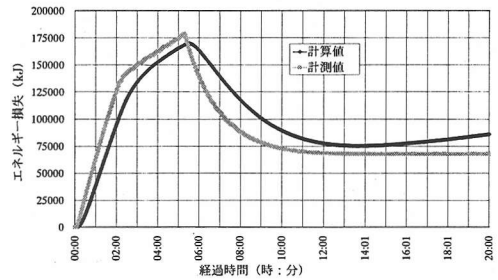


図-4.9 漏気によらない累積熱量損失の計測値と岩盤への熱伝播の計算値の比較

いて周辺岩盤中へ逸散した熱量の累積 $Q_r$ は式(4.2)より次式で与えられる。すなわち、

$$Q_r = A_w \int_0^t q_w(t) dt = -k_R A_w \int_0^t \left. \frac{\partial T_R}{\partial z} \right|_{z=0} dt \quad (4.5)$$

ここで、 $A_w$ ：貯蔵空洞壁面面積

式(4.5)を数値的に解く場合、 $z \neq 0$ では常に有限の値を持つものの、 $z=0$ すなわち空洞壁面上では $t=0$ で発散する。このため、周辺岩盤中へ逸散した熱量 $Q_r$ を評価するために、貯蔵空洞壁面の近傍( $z=0.000001\text{cm}$ )における流入熱量を $Q_r$ の近似値として用いることとした。当然のことながら、計算に用いる熱物性は表-4.1に湿润状態の熱物性として示した値である。

図-4.9に計測より求めた漏気によらない熱損失の累積と式(4.6)から求めた周辺岩盤への熱伝播の累積を比較して示す。この図より明らかなように、損失熱量の累積が最大となるのは、いずれの場合でもシャット・イン直前であり、計測では約178,730kJ、計算では約169,970kJの累積逸散熱量を示している。

一方、シャット・イン後には貯蔵空気温度が空洞壁面温度よりも低下するため、周辺岩盤から貯蔵空洞へ向かう可逆な熱伝播が発生している。したがって、周辺岩盤へ逸散したままとなる不可逆な熱量損失の累積は図-4.9上の最終状態における損失熱量で示され、計算値で約85,860kJ、計測値では約67,810kJとなり、最大値に対する比率はそれぞれ50%及び38%となっている。

計測値と計算値を比較すると最大で10.1%程度の差異が生じているが、貯蔵空洞周辺岩盤の熱物性や湿润状態のばらつき、不連続面の存在やそれに介在する粘土鉱物等の影響を考えると、工学的な判断ではほぼ両者は一致するものと考えられ、漏気によら



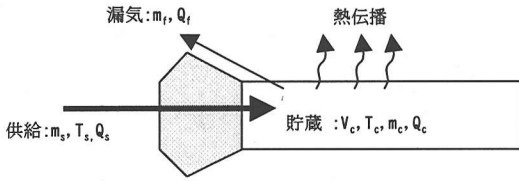


図-5.1 圧縮空気エネルギー貯蔵における熱収支の模式図

ない熱損失量  $Q_m$  のほぼ全量が熱伝播によって周辺岩盤へ表出されるものと見なしてよからう。

### 5. 圧縮空気エネルギー貯蔵のエネルギー効率評価

前述まで議論より、圧縮空気エネルギー貯蔵におけるエネルギー収支は供給空気質量  $m_s$  とその温度  $T_s$ 、及び漏気質量  $m_f$  が与えられるならば貯蔵空気温度を求める問題として表記される。すなわち、式(3.12)の左辺を状態方程式により貯蔵空気温度の関数に置きかえると次式を得る。

$$C_v V_c (\rho_c \frac{\partial T_c}{\partial t} + T_c \frac{\partial \rho_c}{\partial t}) = (C_v + R) m_s T_s - (C_v + R) m_f T_c - Q_c(T_c) \quad (5.1)$$

今、当該貯蔵試験において計測された供給空気質量  $m_s$  とその温度  $T_s$ 、及び漏気質量  $m_f$  を用い各時刻における貯蔵空気温度を数値的に求め、計測温度との比較で表すと図-5.2を得る。なお、計算に用いた貯蔵空洞周辺岩盤の熱物性は表-4.1に湿潤状態の熱物性として示した値であり、また計算は絶対温度で行ったが比較検討を明瞭にするため図-5.2は摂氏温度で示した。

図に示すように計算から与えられた貯蔵空気温度は加圧開始直後に急激な温度上昇を示し、最大では38℃にも達するが、直ちに30℃近くに低下し、加圧最終付近では計測値とほぼ同じ温度を示すようになる。また、一定圧貯蔵時では開始直後に比較的急激な温度低下を示すが、全体としては計測値と良好な一致を示す。さらに、シャット・イン後では、直後に8℃付近まで急落するものの、シャット・イン後90分程度で計測値とほぼ一致し最終状態へ至っている。

このように、計算から求めた貯蔵空気温度  $T_c$  は供給エネルギー  $Q_s$  の急変時、すなわち加圧開始、一定圧貯蔵開始及びシャット・イン時において敏感な反応を示すのに対し、計測された貯蔵空気温度  $T_c$  は

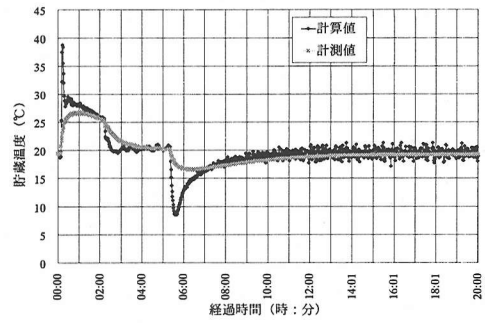


図-5.2 貯蔵空気温度の計測値と計算値の比較

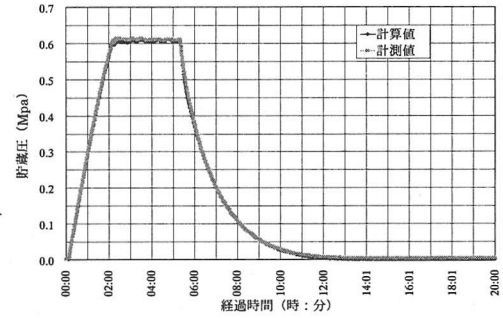


図-5.3 貯蔵圧の計測値と計算値の比較

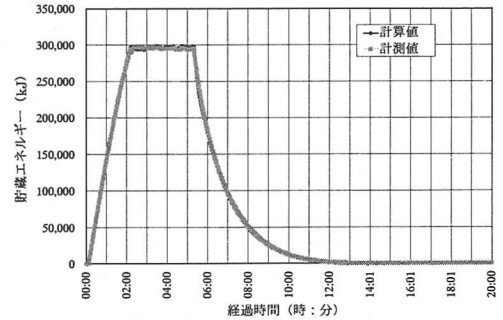


図-5.4 貯蔵エネルギーの計算値と解析値の比較

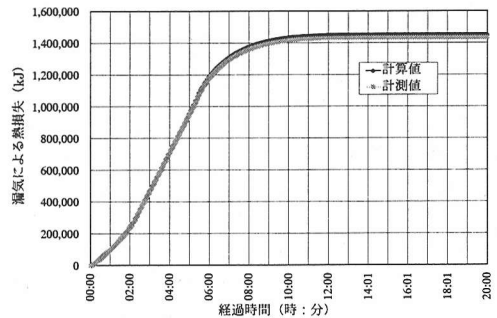


図-5.5 漏気による熱量損失の計測値と計算値の比較

急変時でも滑らかな変動を示す。これは、計算に前進差分の近似を用いたために、熱量バランスの急変が鋭敏に反映されたものと考えられる。無論、前進

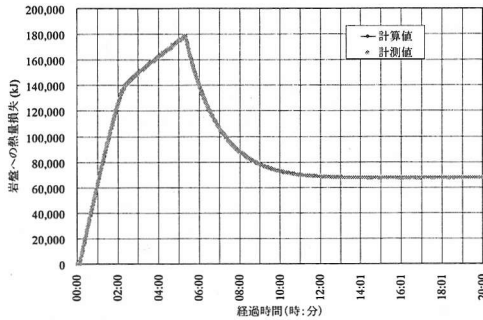


図-5.6 周辺岩盤への熱量損失の計測値と計算値の比較

差分のままでも時間増分  $\Delta t$  を緻密に取るなどの方法である程度まで熱量バランス急変時の鋭敏さを改善することはできようが、本論文において目的とするエネルギー収支評価のためには貯蔵空気温度をさほど厳密に評価する必要はない。

すなわち、図-5.2 に示した貯蔵空気温度  $T_c$  の計算値を基に貯蔵空気圧  $P_c$ 、貯蔵エネルギー  $E_c$ 、漏気による熱量損  $Q_f$  失及び周辺岩盤への熱量損失  $Q_r$  等の累積を求め計測値との比較で示すと図-5.3～5.6 を得る。これらの図に見るように累積のエネルギー収支においてはいずれも有為な差が生じておらず、十分な計算精度が得られていることが分かる。

これをより詳細に検討するために、貯蔵空気温度  $T_c$  に最も鋭敏な貯蔵エネルギー  $E_c$  の毎分の変化を吟味する。図-5.7 及び 5.8 は貯蔵開始後一時間、及びシャット・イン後 1 時間の貯蔵エネルギー増分  $\Delta E_c$  の計算値を計測値と比較してそれぞれ示したものである。図-5.2 に示したように貯蔵開始直後、及びシャット・イン直後の 1 時間は計算の貯蔵空気温度  $T_c$  が敏感な変化を示し計測との乖離が最も大きい区間である。

しかし、これらの図に示すように貯蔵エネルギー増分  $\Delta E_c$  としてみるならば計算値と計測値の乖離はかなり小さい。例えば、貯蔵開始直後では 9～13 分の間に約 1,260kJ の差違が生じている以外は、顕著な差違は生じておらず 19 分以降は 126kJ 以下の差違に収まっている。また、シャット・イン後でも最大で 1,470kJ 程度の差違しか生じておらずシャット・イン 13 分後以降はほとんど計測値と一致している。

このように、貯蔵空気温度  $T_c$  に現れる計算と計測の乖離はエネルギー収支にあまり敏感に反映されず累積としてみればその影響は至って小さなものに過ぎない。したがって、前述の方法でかなり良好なエネルギー収支の評価が実施されるものと判断される。

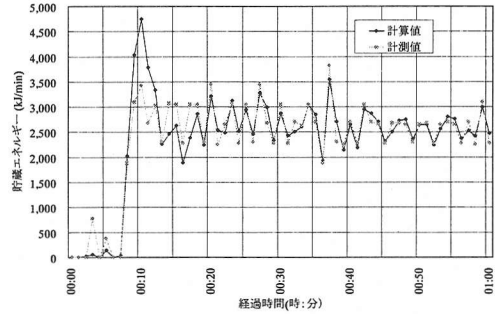


図-5.7 貯蔵開始後 60 分間の貯蔵エネルギー増分の計測値と計算値の比較

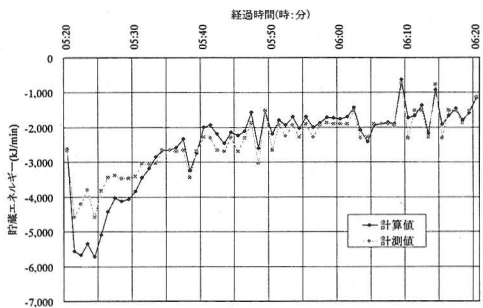


図-5.8 シャット・イン後 60 分間の貯蔵エネルギー増分の計測値と計算値の比較

無論、貯蔵空気温度  $T_c$  は運転時に計測可能な指標でありこれを適確に予想できることが望ましいことは言うまでもない。

## 6. おわりに

従来の研究においては、圧縮空気エネルギー貯蔵施設の貯蔵効率を熱的収支を考慮して評価されることはなかった。これは、熱収支問題の取り扱いが複雑で、要求される測定精度も土木計測の精度を超えるものと考えられていたためであろう。しかし、ここで見たように供給空気の体積流量、供給圧、供給温度が測定され、貯蔵空気の貯蔵圧と貯蔵温度が測定されるならば比較的簡便に精度良く熱収支を評価することが可能である。これらの測定項目は圧縮空気貯蔵施設において不可欠なものであり、特別な費用が発生するものではない。

このような簡便な取り扱いが可能となったのは貯蔵空気の運動エネルギーが内部エネルギーに対して十分に小さく無視し得るためである。もしも、貯蔵空気が音速に近い流速で循環・回転運動するならば運動エネルギーを無視することはできない。しかし、

今日提案されている貯蔵空洞形状、貯蔵圧、並びに貯蔵空気質量を考えるならば、これはほぼありえない仮定といえよう。

さらに、貯蔵空洞周辺岩盤の熱的物性が適切に設定されるならば、測定結果を用いずとも圧縮空気エネルギー貯蔵の熱収支が精度良く評価されることも明らかとなった。この方法に従えば、様々な貯蔵形態に対する熱収支を評価することが可能であり、最も効率的な貯蔵形態を決定することが可能となる。これは、圧縮空気エネルギー貯蔵問題に留まらず、今日提案される岩盤空洞内への熱水貯蔵や高压ガス貯蔵等に対しても同様の手法が援用される。

謝辞：本研究は神岡鉱業(株)、三井建設(株)、(財)電力中央研究所、三井金属資源開発(株)の四社による共同研究「岩盤気密方式による圧縮空気貯蔵」において得られた成果の一部である。共同研究に携わられた各位に厚くお礼を述べるとともに、研究に際して有為なご助言とご協力を賜った神岡鉱業(株)地下利用事業室の皆様には心よりの感謝の意を表します。

また、北海道大学石島洋二教授には、全研究を通して、貴重なご指導、ご助言を賜りましたことを厚くお礼申し上げます。さらに、通産省工業技術院地質調査所高橋学氏には岩盤内温度計測の実施に当たり様々なアイデアを提供していただきました。ここに厚く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 天野喜久男, 沢田隆, 小林順二: 圧縮空気エネルギー貯蔵タービン発電システム～圧縮空気地下貯蔵施設的设计について～, 電力土木, No. 267, pp. 87-95, 1997.
- 2) 山地宏志: 圧縮空気貯蔵 (CAES) における岩盤試験・調査, 第10回岩盤システム工学セミナー「岩盤試験・計測結果の利用の課題と現状」, 社団法人システム総合研究所岩盤システム工学委員会編, pp. 327-345, 1993.
- 3) 中田雅夫: CAES/GT発電システムにおける土木技術-

各種貯蔵法式の特徴とその利用形態-, 第5回圧縮空気エネルギー貯蔵発電セミナーテキスト-岩盤内気体貯蔵技術とCAES-, pp. 17-40, 1995.

- 4) Lindblom, U.E. : The development of hydro-carbon storage in hard rock caverns, Int. Conference on Storage Gases in Rock Caverns, pp. 15-30, 1989.
- 5) Pollak, R. : Status of First V.S. CAES Plant, EPRI Journal, December, pp. 49-52, 1988.
- 6) Asserhoj, O. : Commercial and strategic Considerations regarding natural gas storage, Norsk Petroleumforening, Conference on Gas I Norden, 20p, 1990.
- 7) 土木学会エネルギー土木委員会: 圧縮空気貯蔵発電システムと土木技術, 社団法人土木学会, 1997.
- 8) 吉田英生: CAES/GT発電システムにおける熱収支, 第5回圧縮空気エネルギー貯蔵発電セミナーテキスト-岩盤内気体貯蔵技術とCAES-, pp. 85-99, 1995.
- 9) 中田雅夫, 山地宏志: 神岡鉱山における圧縮空気貯蔵実験, 第4回圧縮空気エネルギー貯蔵発電セミナーテキスト-パイロットプラントの現状と地下貯槽技術-, pp. 113-133, 1994.
- 10) 志田原巧, 中川加明一郎, 池川洋二郎, 大山隆弘, 鈴木浩一, 日比野敏, 新孝一, 大隅多加志, 中田雅夫, 山地宏志, 田村富雄, 茂住洋史, 斎藤修二, 新宮和喜: 岩盤気密方式による圧縮空気貯蔵実験に基づく調査・試験の提案, 電力中央研究所報告, 総合報告U31, 1997. 1.
- 11) Wylie, C.R. : Advanced Engineering Mathematics (邦訳: 工業数学), Third edition, McGraw-Hill, 1960.
- 12) Fletcher, C.A.J. : Computational Techniques for Fluid Dynamics (邦訳: コンピュータ流体力学), Springer-Verlag, 1987.
- 13) 稲田善紀, 真鍋孝信, 大橋俊太郎, 吉川雅章: 熱水の地下貯蔵による空洞の安定性に関する研究, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 407-412, 1987.

(1997. 10. 9受付)

## THERMO-DYNAMICAL APPROACH TO COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE SYSTEM

Masao NAKATA, Hiroshi YAMACHI, Akihiko NAKAYAMA,  
Shunsuke SAKURAI and Takumi SHIDAHARA

This paper describes the results of the measurements of energy budget during a pilot test of storing energy by compressing air into an unlined natural rock cavern and proposes a thermos-fluid model for evaluating the energy storage efficiency. It also shows that relatively simple measurements enable evaluation of the energy stored, leaked and transmitted into surrounding rock and that the energy loss to the rock can be significant. The entire storage process can be described by a relatively simple control-volume analysis based on the conservation laws. The method can be applied to evaluate efficiency of storing other fluids in underground cavern.