

Ⅲ-A320

圧縮空気エネルギー貯蔵のエネルギー収支

三井建設株式会社	正会員	山地宏志
神戸大学工学部	正会員	中山昭彦
三井建設株式会社	正会員	中田雅夫
神戸大学工学部	正会員	櫻井春輔

1. はじめに：本文は神岡鉱山茂住坑内において実施された圧縮空気貯蔵実験の計測結果を基に、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。

2. エネルギー貯蔵性能の評価：圧縮空気貯蔵試験のエネルギー収支を計測結果に基づいて評価する方法はこれまでにいくつかの文献で紹介した。その基礎式は以下のようなものである（図1参照）。

$$\frac{C_v}{R} V_c \frac{\partial P_c}{\partial t} = (C_v + R) m_s T_s - (C_v + R) m_f T_c + Q \quad (1)$$

ここで、 R ：ガス定数、 C_v ：空気の実積比熱、 V_c ：貯蔵空洞容量、 P_c ：貯蔵圧、 m_s ：供給空気質量、 T_s ：供給空気温度、 m_f ：漏出空気質量、 T_c ：貯蔵空気温度、 Q ：周辺岩盤への熱放出等である。以下では、供給空気質量 m_s 、供給空気温度 T_s 、並びに漏出空気質量 m_f を与えることで、貯蔵過程の貯蔵圧 P_c 、貯蔵空気温度 T_c 、及び周辺岩盤への熱放出 Q を数値的に求めることを試みる。今、周辺岩盤への熱放出が近似的に一次元伝播するものとするれば、その放出熱量 Q は次式で与えられる。

$$Q_r = A_w \int_0^t q_w(t) dt = -k_R A_w \int_0^t \frac{\partial T_R}{\partial z} \Big|_{z=0} dt \quad (2)$$

ここで、 A_w ：貯蔵空洞壁面面積をしめす。式(2)において岩盤温度 T_r は次のようなものである⁷⁾。

$$T_R(z, t) = T_0 + \sqrt{\frac{c_R z}{2\sqrt{\pi}}} \int_0^t \frac{T_w(t-\tau) - T_0}{\tau^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{c_R z^2}{4\tau}} d\tau \quad (3)$$

また、式(1)を状態方程式を用いて書き改めると、次式を得る。

$$C_v V_c \left(\rho_c \frac{\partial T_c}{\partial t} + T_c \frac{\partial \rho_c}{\partial t} \right) = (C_v + R) m_s T_s - (C_v + R) m_f T_c - Q(T_c) \quad (4)$$

結局、エネルギー収支の評価式は貯蔵空気温度 T_c を求める問題と等価となる。式(4)を差分化し、貯蔵実験時に計測された供給空気質量 m_s 、供給空気温度 T_s 、並びに漏出空気質量 m_f を与えて計算を実施する。

3. エネルギー貯蔵性能の評価：図2は前述の方法で求めた貯蔵空気温度の計測値と計算値を比較したものである。計算は絶対温度で実施したが比較を容易とするため図は摂氏温度で表示した。

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。

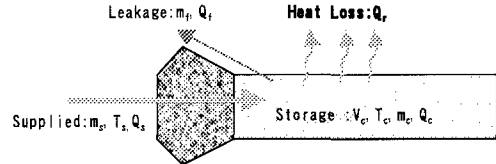


図1 圧縮空気エネルギー貯蔵における熱収支の模式図

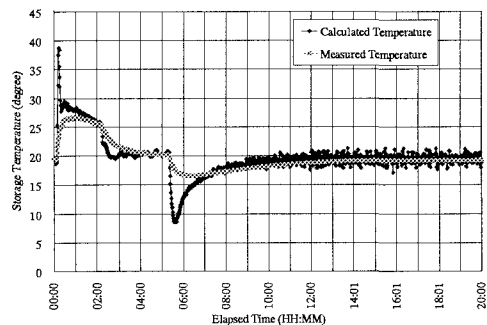


図2 貯蔵空気温度の計算値と解析値の比較

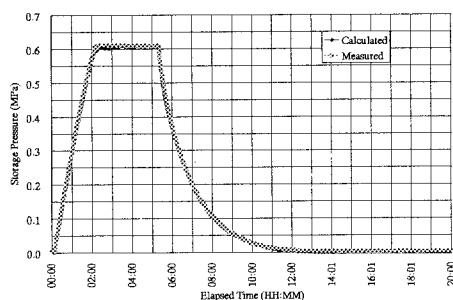


図3 貯蔵圧の計算値と解析値の比較

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、前進差分のままでも時間増分 Δt 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緻密に評価する必要はない。すなわち、図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 、漏気による熱量損失 Q_f 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3～6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。

4. おわりに：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、熱収支問題の問い扱いが複雑で、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。

謝辞：本研究は神岡鉱業㈱、三井建設㈱、(財)電力中央研究所、三井金属資源開発㈱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は、ここに深甚の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㈱地下利用事業室、皆様には心よりの感謝を述べさせていただきます。

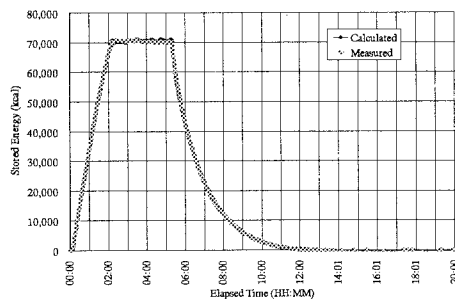


図4 貯蔵エネルギーの計算値と解析値の比較

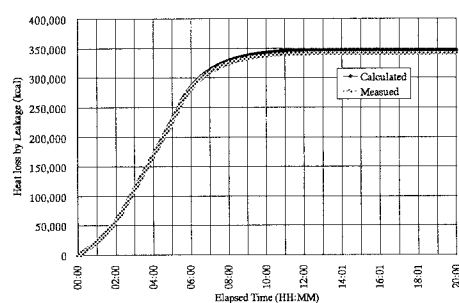


図5 漏気による熱量損失の計算値と解析値の比較

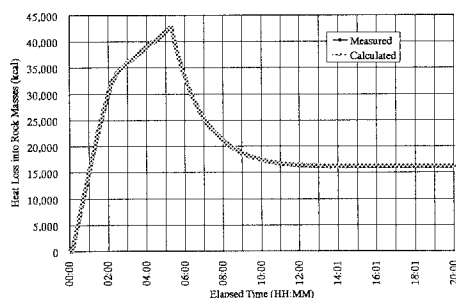


図6 周辺岩盤への熱量損失の計算値と解析値の比較