波方基地プロパン貯槽 熱流体理論解析による気密試験の圧力・温度挙動の予測と実測値の評価について

大黒 雅之[1*]・下茂 道人[1]・板垣 賢[2]・黒瀬 浩公[3]・前島 俊雄[4]

[1]大成建設株式会社　技術センター（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）
[2]大成建設株式会社　土木本部土木設計部（〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1）
[3]東電設計株式会社　土木本部（〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12）
[4]独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構　石油ガス備蓄部（〒105-0001 東京都港区虎ノ門2-10-1）
*E-mail: masayuki.oguro@sakura.taisei.co.jp

岩盤貯槽における気密試験では，圧縮空気を用いて貯槽内圧力を設計圧力以上まで加圧した後，一定期間貯槽内圧力の変動量を計測し，気密性を確認する．ここで，貯槽内圧力は貯槽内温度や貯槽内気相体積の変化の影響を受けて変化することから，事前にこれらの挙動を予測し，試験期間を通して貯槽内圧力が設計圧力を下回らないように加圧停止圧力を決定する必要がある．

波方基地プロパン貯槽の気密試験においては，熱流体理論に基づく解析により，気密試験時の圧力・温度挙動の事前予測を試みた．また加圧時の計測値から解析パラメータを見直し，解析精度の向上を図った．本稿では，圧力・温度挙動の解析結果と，それに基づく加圧停止圧力の設定について報告する．

Key Words : *LPG underground storage, rock cavern, air-tightness test, thermal analysis*

1. 気密試験概要

波方国家石油ガス備蓄基地では，LPG貯槽として水封式地下岩盤貯蔵方式が採用されている．LPG貯槽においては気密性の確保が重要であり，LPGの貯蔵に先立ち岩盤貯槽の気密性を確認するための気密試験を実施した．

気密試験は，圧縮空気を用いて貯槽内を設計圧力まで加圧した後，試験期間（連続72時間）における貯槽内の圧力変動量ΔPを計測し，貯槽内空気の物質量が変化しないことを確認する．**表-1**に波方基地における気密試験条件を示す．

圧力変動量ΔPは式(1)に示すように温度変化や気相体積変化などの漏洩以外の影響を補正して算出され，圧縮空気の漏洩が無ければ0となるのが理想である．

$$\Delta P = P_i - P_t^{'} - \Delta P_t^{''} \qquad \text{式(1)}$$

P_i：気密試験開始時貯槽内圧力（Pa）

$P_t^{'}$：t時間後の貯槽内圧力（貯槽内温度，貯槽気相体積の変化による影響補正）（Pa）

$\Delta P_t^{''}$：t時間後までに貯槽内湧水へ溶解して排出される空気量による影響補正（Pa）

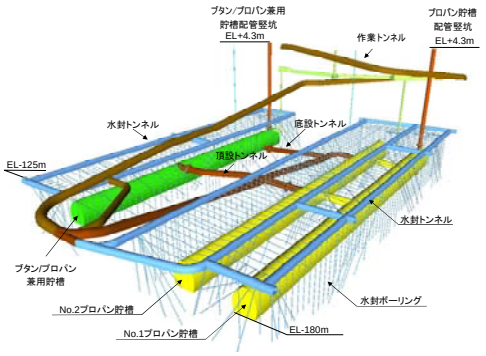


図-1　波方基地鳥瞰図

表-1　気密試験条件

項　　目		条　　件
試験気体		空気
試験圧力		設計圧力(0.97MPaG)以上
水位	地下水位観測孔水位	限界地下水位(EL-15m)以上
	配管竪坑水位 給水竪坑水位 水封水供給配管水位	限界地下水位(EL-15m) を保持
気密試験期間		72 時間
気密試験開始前温度		±0.1℃/日以内
昇圧速度		2kPa/hr(0.05 MPa/日)以下
減圧速度		1kPa/hr(0.025 MPa/日)以下

2. 波方基地プロパン貯槽気密試験計測結果

波方基地プロパン貯槽の気密試験時における貯槽内計測機器配置図を**図-2**に示す．また，**図-3**には貯槽加圧前から気密試験終了後までの期間における貯槽内圧力計測値と貯槽内温度計計測値（平均値）の経時変化グラフを示す．貯槽内圧は，280kPaGおよび700kPaGで加圧を一旦停止し，貯槽気密性の段階確認を実施して最高圧までの昇圧を行った．

加圧期間における貯槽内温度の挙動として，**図-3**に示されるように，加圧直後または加圧速度上昇直後は貯槽内温度は急激に上昇するが，その後は上昇勾配が徐々に緩やかとなる傾向を示している．また，加圧停止後または加圧速度低下後は貯槽内温度は急激に低下し，その後時間の経過とともに収束する傾向を示している．これは以下の理由による．

加圧後の空気温度Tは以下の式で表される．

$$C \cdot T = C_0 \cdot T_0 + W + Q_r + Q_w + Q_a \qquad \text{式(2)}$$

ここに，C：現時刻における空気の熱容量

C_0：前の時刻における空気の熱容量

T_0：前の時刻における温度

W：圧縮による熱量

Q_r：岩盤との熱伝達量

Q_w：水床との熱伝達量

Q_a：送気された温度との混合による熱量

各熱量と温度変化の概念図は**図-4**に示すとおりとなる．すなわち，加圧直後からWによる寄与熱によって温度が上昇するが，その後時間遅れを伴うQ_r，Q_w，Q_aによる寄与熱の影響で温度変化が徐々に収束することになる．

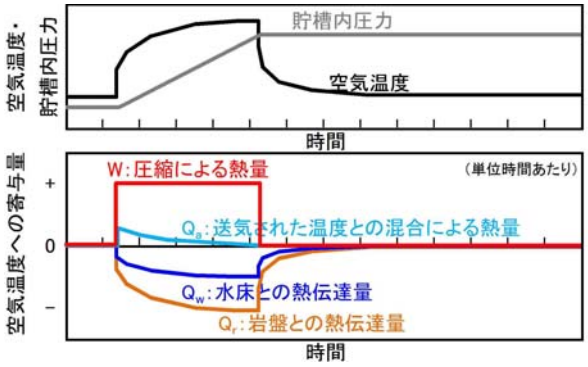
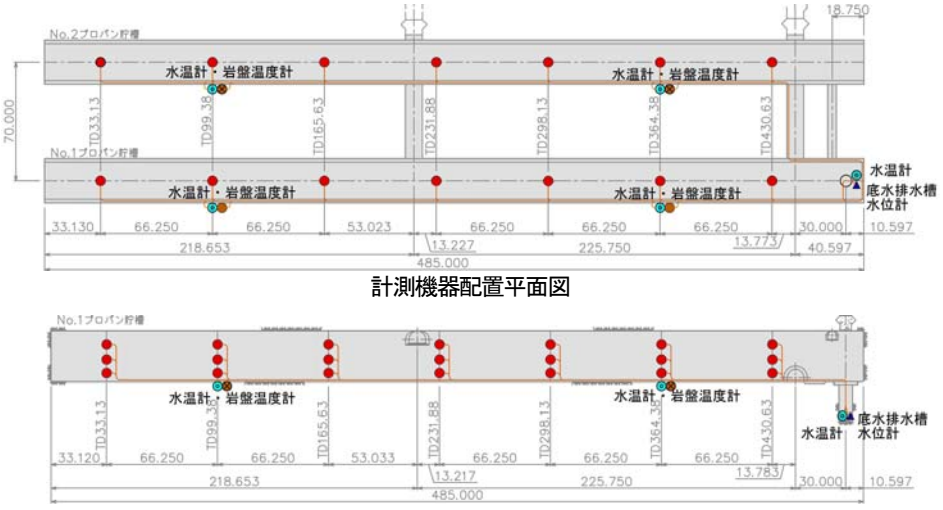


図-4　温度変化と寄与熱の経時変化概念図



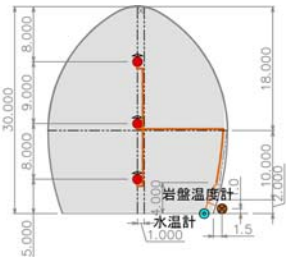


図-2　気密試験貯槽内計測機器配置図

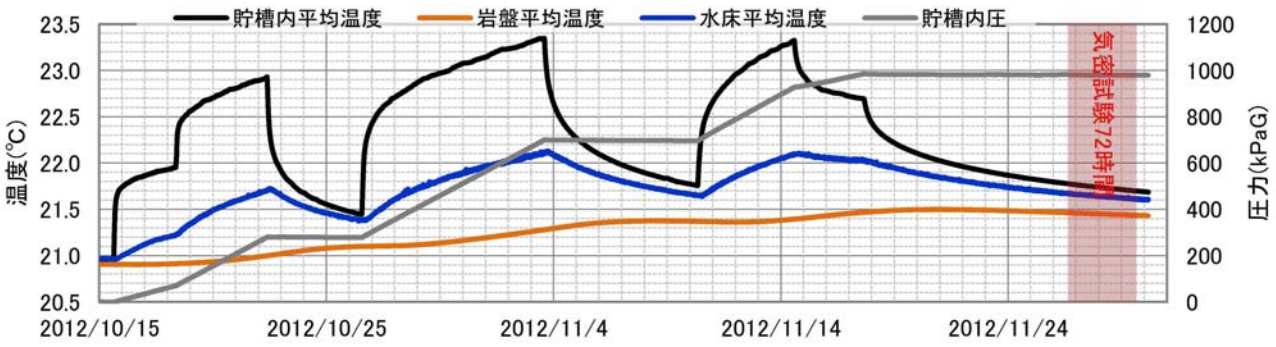


図-3　貯槽内圧・貯槽内温度・底水排水槽水位経時変化図

3. 熱流体理論に基づく圧力・温度挙動予測解析

気密試験においては，最高圧に到達して加圧を停止した後，貯槽内温度の安定化（温度変化率±0.1℃／日以内）を待って試験を開始するため，その間は貯槽内温度の低下に伴う貯槽内圧力の低下や，空気を溶存した貯槽湧水の排水による貯槽内圧力の低下などが生じることとなる．そのため，気密試験期間終了までの間，貯槽内圧を設計圧力である970kPaG以上に保つためには，これらの要因による加圧停止以降の貯槽内圧低下量を事前に予測し，これを考慮して加圧停止圧力（最高圧力）を決定しておく必要がある．

波方基地プロパン貯槽においては，気密試験時における貯槽内圧力・温度挙動の予測手法として熱流体理論に基づく解析を実施し，温度安定化期間の予測と最高圧力の決定を行った．

(1) 基礎式

表-2 に，熱流体理論解析に用いた基礎式を示す．予測解析においては，これらの基礎式を時間ステップに離散化して解を求めている．

(2) 入力物性値

表-3 に熱流体理論解析の入力物性値を示す．貯槽内空気～岩盤～水床間の熱伝達率や，岩盤の熱伝導率，岩盤の比熱は，貯槽加圧開始後に得られた貯槽内温度計測結果をフィードバックして入力値を修正した．また，岩盤温度および水床温度の実測値の再現性を向上させるため，水床と壁面の放射による熱交換を考慮するとともに，水床下の岩盤温度の熱伝導解析を追加した（**表-2**）．

表-3　熱流体理論解析入力値（最終）

項目	入力・物性項目		入力値	出典
初期条件	V	初期空洞内体積(m³)	642,595	3D計測結果
	T_{wb}	初期水床温度(K)	20.96	実測値
	T_0	初期空洞内温度(K)	20.96	実測値
	T_1	初期空洞壁面温度(K)	20.91	実測値
	T_i	初期岩盤温度(℃)	20.91	実測値
	T_g	岩盤ベース温度(℃)	20.50	調整
	T_{wb0}	湧水温度(℃)	20.96	実測値
	$hwbt$	初期底水排水槽水位(m)	13.2	H=10.8m～13.2m
計算条件	T_m	コンプレッサ注入空気温度(℃)	16.78	チラー制御:17±2℃
	qm	コンプレッサ注入空気量(kg/s)	昇圧注入量	実測値
	a	圧力-湧水量係数(m³/hr/MPa)	−19.74	調整
	b	圧力-湧水量係数(m³/hr)	42.47	調整
	γ	湧水への空気溶解飽和度(m³/m³)	0.214	Weissの式より計算 ・貯槽内圧：0.99MPaG ・塩分：4% ・水床温度：21.1℃ ・SATPでの表記 ・大気圧では0.020
	$qwp0$	底水排水ポンプ流量(m³/hr)	50	実測値
	S_{wb}	水床表面積(m²)	21,302	3D計測結果
	V_{wb}	水床容積(m³)	4,472	3D計測結果
	S_{wr}	水床に接する岩盤面積(m²)	22,020	3D計測結果
	$Swbt$	底水排水槽断面積(m²)	49.625	EL-192.2～189.8における平均値
	S	水床除く空洞壁面面積(m²)	77,023	3D計測結果
物性値	Cp	空気の定圧比熱(J/kgK)	1,006	理科年表(丸善)
	Cpw	水の比熱(J/kgK)	4,179	伝熱工学資料(日本機械学会編)
	ρ_w	水の密度(kg/m³)	998.5	実測値
	ρ_g	岩盤の密度(kg/m³)	2,700	設計値
	α	空洞空気～壁面熱伝達率(W/m²K)	昇圧時 3.6～6.7 停止時 1.1	調整
	α_{wb}	空洞空気～水床熱伝達率(W/m²K)	昇圧時 1.1～1.5 停止時 1.0	調整
	α_{wr}	水床～周囲岩盤熱伝達係数(W/m²K)	9.2	調整
	λ	岩盤の熱伝導率(W/mK)	2.295	調整（1.35倍）
	a_r	岩盤の比熱(J/kgK)	968	調整（1.1倍）
	ε_{wb}	水の放射率（—）	0.95	調整
	ε	岩盤の放射率（—）	0.80	調整

表-2　熱流体理論解析の基礎式

【状態方程式】 $PV = mRT$

【空洞内空気量】 $\dfrac{dm}{dt} = qm - mw$

【空洞内ｴﾈﾙｷﾞｰ収支】 $Cp\dfrac{d(mT_0)}{dt} = CpT_{in}qm + S\alpha(T_1 - T_0) + S_{wb}\alpha_{wb}(T_{wb} - T_0) + V\dfrac{dP}{dt}$

【壁面】 $S\alpha(T_1 - T_0) + S\alpha_r(T_1 - T_{wb}) = -\lambda\dfrac{\partial T_1}{\partial z}$　水床と壁面の放射による熱交換を考慮

$\alpha_r = \dfrac{S_{wb}}{S}\cdot\left[4\varepsilon\sigma(0.5T_1 + 0.5T_{wb})^3\right]$

【岩盤内】 $\dfrac{\partial T_i}{\partial t} = \dfrac{\lambda}{\rho_g \cdot ar}\left(\dfrac{\partial^2 T_i}{\partial z^2}\right)$

【水床】 $V_{wb}Cp_w\rho_w\dfrac{\partial T_{wb}}{\partial t} = S_{wb}\alpha_{wb}(T_0 - T_{wb}) + S_{wb}\alpha_{rwb}(T_1 - T_{wb}) + S_{wr}\alpha_{wr}(T_{wr} - T_{wb}) + Cp_w\rho_w qw(T_{wb0} - T_{wb})$

水床と壁面の放射による熱交換を考慮

$\alpha_{rwb} = 4\varepsilon_{wb}\sigma(0.5T_1 + 0.5T_{wb})^3$

$S_{wr}\alpha_{wr}(T_{wr} - T_{wb}) = -\lambda\dfrac{\partial T_{wr}}{\partial z}$　水床下の岩盤温度の熱伝導解析を追加

【貯槽体積】 $\dfrac{dV}{dt} = qw - qwp$

【湧水量】 $qw = a \times P + b$

【底水排水槽排水量】 $qwp = \begin{cases} qwp\ 0 \cdots hwb < hwb\ 1 \\ 0 \cdots\cdots hwb > hwb\ 2 \end{cases}$

【底水排水槽水位】 $S_{wbt}\dfrac{dhwbt}{dt} = qw - qwp$

【湧水への空気溶解量】 $mw = \dfrac{P_{SATP}\cdot\gamma'}{R\cdot T_{SATP}}\cdot qw$

V ：空洞内体積(m³)
Cp ：空気の低圧比熱(J/kgK)
m ：空洞内空気の質量(kg)
qm ：コンプレッサ注入量(kg/s)
mw ：湧水への空気溶解量(kg/s)
T_0 ：空洞内気温(℃)
T_1 ：壁面温度(℃)
T_i ：岩盤内温度(℃)
S ：空洞内壁面面積(m²)
S_{wb} ：水床表面積(m²)
P ：空洞内気圧(Pa)
λ ：熱伝導率(W/mK)
z ：岩盤方向距離(m)
ar ：岩盤の比熱(J/kgK)
α ：空洞空気～壁面熱伝達率(W/m²K)
α_r ：水床～壁面放射熱伝達率(W/m²K)
α_{wb} ：空洞空気～水床熱伝達率(W/m²K)
α_{rwb} ：壁面～水床放射熱伝達率(W/m²K)
α_{wr} ：水床～周囲岩盤熱伝達係数(W/m²K)
V_{wb} ：水床容積(m³)
Cp_w ：水の比熱(J/kgK)
ρ_w ：水の密度(kg/m³)
ρ_g ：岩盤の密度(kg/m³)
T_{wb} ：水床温度(℃)
T_{wb0} ：湧水温度(℃)
T_{wr} ：水床周囲岩盤温度(℃)
S_{wr} ：水床に接する岩盤面積(m²)
qw ：湧水量(m³/s)
qwp ：底水排水槽排水量(m³/s)
$hwbt$ ：底水排水槽水位(m)
$hwbt2$ ：排水ポンプ停止水位(m)
$qwp0$ ：排水ポンプ設定水量(m³/s)
S_{wbr} ：底水排水槽断面積(m²)
γ' ：空気の実効溶解度(m³/m³SATP)
a ：湧水－圧力係数(m³/Pa/s)
b ：湧水－圧力係数(m³/s)
ε ：岩盤の放射率
ε_{wb} ：水床の放射率
σ ：Stefan-Boltzman定数(W/m²K⁴)
P_{SATP} ：標準状態圧力　SATP※
R ：空気の気体定数
T_{SATP} ：標準状態温度　SATP※

※SATP：標準環境温度と圧力，
standard ambient temperature and pressure，
温度25℃(298.15K)，気圧1bar(10^5Pa)の状態

4. 解析結果と実測値の比較

波方基地プロパン貯槽の加圧開始以降から気密試験終了時までの貯槽内温度・圧力挙動について，解析値と実測値の比較を**図-5**，**図-6**に示す．

図-5の解析は，貯槽内圧700kPa停止期間後に，停止期間中における貯槽内温度の変化勾配に着目して，貯槽内温度の再現性を高めることを目的として実施したものである．加圧停止期間における温度変化は，加圧に関する熱量WおよびQ_aの影響が小さくなり，岩盤および水床との熱伝達量Q_rおよびQ_wの影響が大きくなる（**図-4**）ことから，この期間の温度計測値を利用して，入力値のうち，空洞空気～壁面熱伝達率，空洞空気～水床熱伝達率，水床～周囲岩盤熱伝達率，岩盤の熱伝導率，岩盤の比熱の値を調整し，再現性の向上を図った．

図-6の解析は，最高圧に到達し加圧停止後に，温度安定化期間初期の貯槽内温度，岩盤温度，水床温度の変化に着目し，全ての温度の再現性を高めて気密試験期間終了までの間の圧力低下量，温度変化量を高精度で予測することを目的に実施したものである．前回解析と同様に空洞空気～壁面～水床間の熱伝達率の調整のほか，特に前回解析における岩盤温度，水床温度との乖離を縮めるため，水床と壁面の放射による熱交換を考慮し，水床下の岩盤温度の熱伝導解析を追加することとした．

その結果，貯槽内温度，岩盤温度，水床温度それぞれの計測値と解析値の誤差の二乗和は，前回解析と比較して小さくなり，特に岩盤温度および水床温度の再現性が大きく向上した．

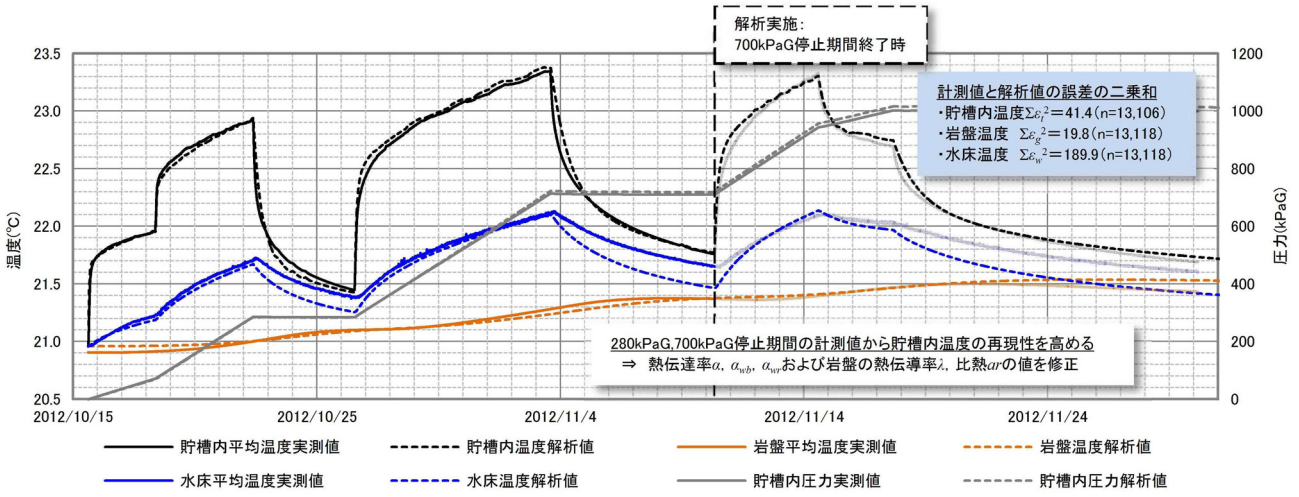


図-5　温度・圧力挙動の実測値と解析値の比較（貯槽内圧700kPa停止期間後における解析）

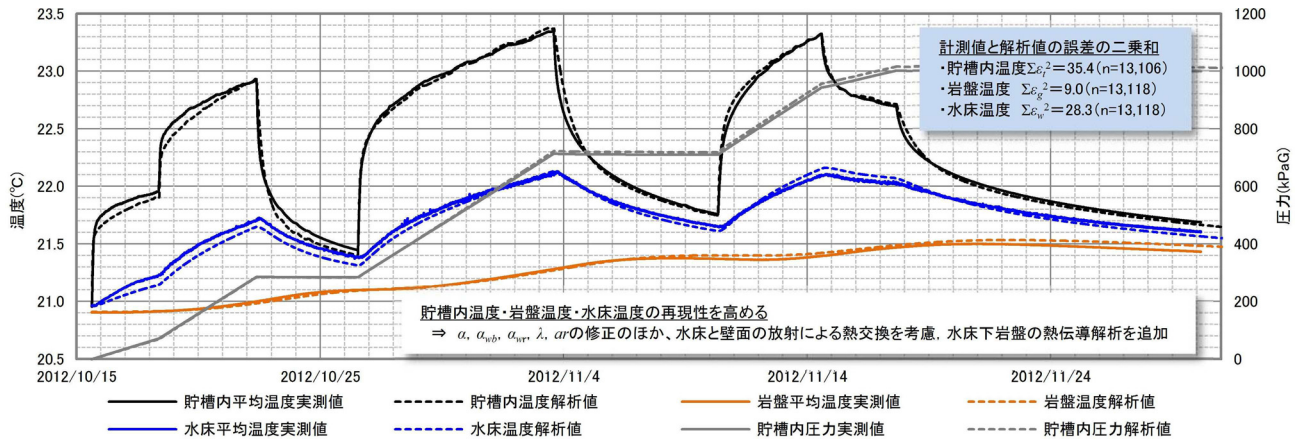


図-6　温度・圧力挙動の実測値と解析値の比較（最終）

5. 温度安定化期間の予測と最高圧力の決定

波方基地プロパン貯槽の設計圧力は970kPaGであり，加圧停止後，温度安定化期間を経たのち実施する気密試験の期間中は，設計圧力以上の貯槽内圧を確保する必要があった．

そこで，前述の熱流体理論解析を用いて，加圧停止後に貯槽内温度の変化量が±0.1℃／日以内となるために必要な時間を予測するとともに，加圧停止後の貯槽内圧力の低下量を予測し，その結果に基づいて加圧停止圧（最高圧力）を決定した．以下にその結果を示す．

(1) 温度安定化期間の予測結果

加圧停止以降の温度変化量解析結果と実測値の比較を図-7に示す．実測値では加圧停止後63時間で温度変化量が±0.1℃以内となったが，解析値は加圧停止後71時間であり，その差は8時間で誤差は10%程度であった．

(2) 圧力低下量の予測と最高圧力の決定

熱流体理論解析によって加圧停止以降の圧力低下量を算出した結果，4kPa程度となった．この結果に基づき，さらに他の低下要因も考慮して最高圧力を決定することとした．

他の圧力低下要因の一つとして，大気圧が挙げられる．貯槽内圧の設計圧力970kPaGはゲージ圧で与えられており，大気圧の変動により貯槽内圧は変化することから，試験期間中の大気圧変動についても考慮して最高圧力を決定することとした．

最高圧力決定時点での過去2か月間（2012年9月15日～2012年11月15日）の大気圧変動幅は，最大で2.5kPaであり，最高圧力決定にあたってはこの変動幅を考慮するものとした（図-8）．

このほか，圧力低下要因として，試験期間中の底水排水槽水位変動に伴う貯槽気相体積変化が考えられる．熱流体理論解析においては底水排水槽水位変動を考慮しているが，試験期間中の排水ポンプOn/Off運転水位が解析条件の水位から変更になる場合を想定し，設備上の最大水位変動幅を見込むものとした．底水排水槽水位の最大変動幅は8.9mであり，これによる貯槽気相体積変化ΔVは469m^{3}となる．この気相体積変化による貯槽内圧力変動量ΔPは，

$\Delta P = P$(設計圧力)$\times \Delta V / V$(貯槽体積)$=0.71\text{kPa} \fallingdotseq 1\text{kPa}$

となる．

以上より，熱流体理論解析に基づく圧力低下量予測値4kPa，大気圧変動幅2.5kPa，底水排水槽水位変動による圧力変動幅1kPa，および安全率（＝2.0）を考慮して，最高圧力を下記のとおり985kPaGとした．

970 ＋ （4＋2.5＋1）× 2.0 ＝ 985 kPaG

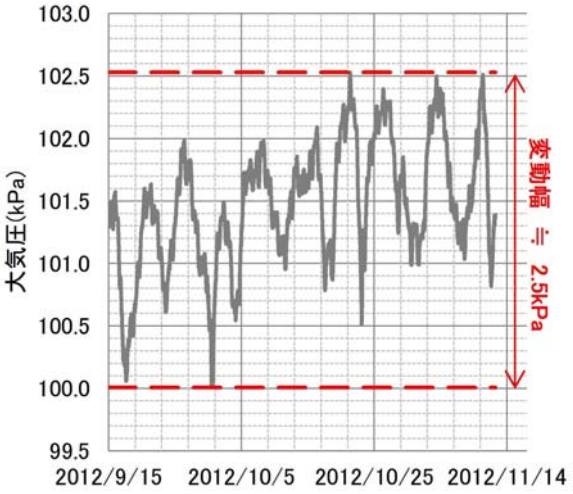


図-8 過去2か月間の大気圧変動幅

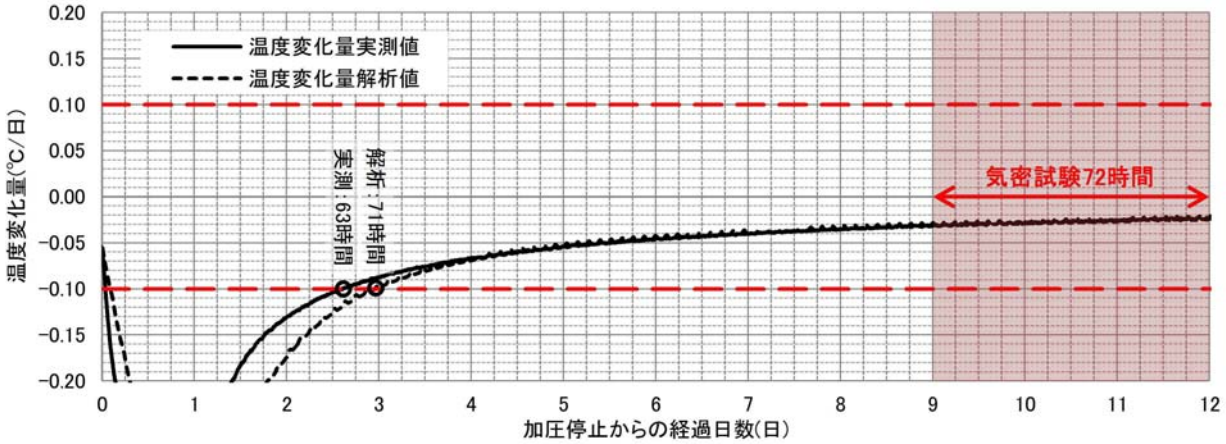


図-7 温度変化量実測値と解析値の比較

⑶ 圧力低下量実測値との比較結果

加圧停止以降の貯槽内圧力低下量の実測値と解析値との比較結果を**図-9**に示す.

圧力低下量実測値は解析値とほぼ等しく，他の要因や安全率を見込んで設定した設定値以内に十分収まっており，貯槽内圧は設計圧力970kPaGを下回ることなく，気密試験を終了することができた.

6. まとめ

波方基地プロパン貯槽の気密試験においては，熱流体理論に基づく解析を行い，加圧～気密試験期間までの圧力・温度挙動の予測を行った.

最高圧力までの加圧過程においては，途中で加圧停止期間（280kPaGおよび700kPaG）を設けることで，気密性の段階確認を行うとともに，その期間の温度計測値を解析にフィードバックすることにより，その後の予測解析精度の向上を図ることができた.

また，岩盤温度および水床温度の計測結果から，解析において水床と壁面の放射による熱交換や水床下の岩盤温度の熱伝導を考慮することにより，さらなる高精度化を図った.

その結果，再現性の高い解析結果に基づく最高圧力の設定によって，貯槽内圧は設計圧力を下回ることなく試験を終了することができ，岩盤貯槽としての所要の気密性を確認することができた.

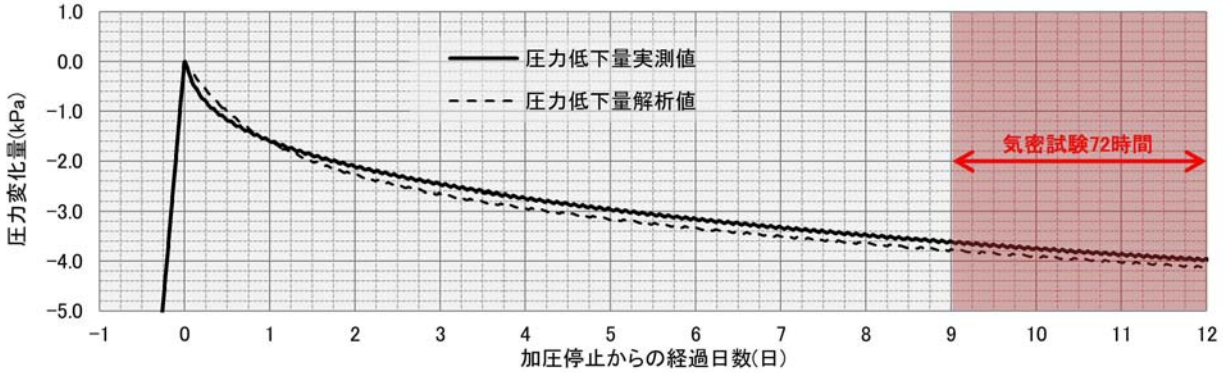


図-9 加圧停止以降の貯槽内圧力低下量実測値と解析値の比較

EVALUATION OF MEASURED VALUE AND THEORETICAL VALUE OF TEMPERATURE AND PRESSURE BASED ON THERMAL ANALYSIS OF COMPRESSIBLE AIR AND SOLID AT AIR-TIGHTNESS TEST FOR NAMIKATA PROPANE STORAGE CAVERNS

Masayuki OGURO, Michito SHIMO, Ken ITAGAKI, Hiroki KUROSE and Toshio MAEJIMA

To make sure of storage performance, air-tightness test was carried out at NAMIKATA PROPANE STORAGE CAVERNS. Cavern pressure should be constant when its air tightness is maintained. But measured value of cavern pressure changes by temperature and air volume change in the cavern. At air-tightness test for NAMIKATA PROPANE STORAGE CAVERNS, thermal analysis of compressible air and solid was carried out for prediction of cavern pressure and temperature during air-tightness test. This paper reports the result of air-tightness test and evaluation of measured values and theoretical values of temperature and pressure.