

地下埋設式バルク貯槽の発生能力

1. 制定目的

バルク貯槽を地下埋設し自然気化によってLPガスを消費しようとする場合、需要家の消費量に対して十分な量のLPガスを供給することのできる大きさのバルク貯槽を設置しなければならないが、バルク貯槽の設置状況（地中温度、充填時液温等）、需要家の消費パターン（連続消費時間等）及びLPガス供給側のバルク運用状況（残液量等）などの設計条件が個々の設置ケースで異なるので、一律の基準を設けても運用上に不都合が生じることが予想される。従って、本基準では連続消費時間の大小又は残液量の多少によって地下埋設式バルク貯槽の発生能力がどのように変化するかを計算で示し、バルク貯槽の設置基準の一部とすることを目的とする。

2. 適用範囲

地下埋設式バルク貯槽で、次の条件に該当するものの発生能力について規定する。

- ①バルク貯槽の貯蔵量は、150 kg、200 kg、300 kg、500 kg、1 t 及び 2.9 t とする。
- ②LPガスの品質は、い号（充填時液相プロパン分は、95mol%及び90mol%）とする。
- ③地中温度は、0℃、5℃及び10℃とする。
- ④充填時液温は、地中温度と同じとする。
- ⑤連続消費時間は、1時間、1.5時間、2時間、3時間、4時間、5時間、6時間、7時間及び8時間とする。
- ⑥残液量は、15wt%、20wt%、30wt%、40wt%及び50wt%とする。

3. 用語の意味

この基準で用いる主な用語の意味は、次の通りである。

- ①バルク貯槽 液化石油ガス法で規定される開放検査周期の長い貯槽をいう。
- ②縦型 バルク貯槽の胴部を地盤面に対して垂直に設置するものをいう。
- ③充填時組成 バルク貯槽に最大貯蔵量のLPガスを充填した時の液相組成をいう。
- ④地中温度 地中埋設したバルク貯槽の周囲温度とする。
- ⑤充填時液温 バルク貯槽に最大貯蔵量のLPガスを充填した時の液温をいう。
- ⑥開始液温 任意の残液量で消費を開始しようとする時の液温をいう。
- ⑦圧力の単位 本基準で用いる圧力の単位（MPa）は絶対圧力とする。
- ⑧発生能力 開始液温で自然気化消費し、消費終了時の容器圧力が0.16997MPaに低下する時の平均LPガス発生量をいう。
- ⑨連続消費時間 需要家におけるLPガス消費量（kg/h）は消費時間中必ずしも一定ではないが、発生能力の計算上、これを一定と仮定した場合の継続時間をいう。

4. 地下埋設式縦型バルク貯槽発生能力計算の基礎式

自然気化消費における地下埋設式縦型バルク貯槽の発生能力を計算しようとする場合、図1に示すように開始液温が残液量の減少と共に降下するので、これを忠実に再現する計算モデルが必要となる。本基準では、50 kg容器等の発生能力推算法¹⁾を改良した発生能力計算式及び「D液-001 地上設置式横型バルク貯槽等の発生能力」解説4で提示した液温回復計算式によって、任意の残液量における開始液温を予測する計算手法を確立し、地下埋設式に特徴的な開始液温の変化を実態に即して再現することにより、その発生能力計算精度の向上を図った。以下に、地下埋設式縦型バルク貯槽の発生能力を計算するための諸式を示す。

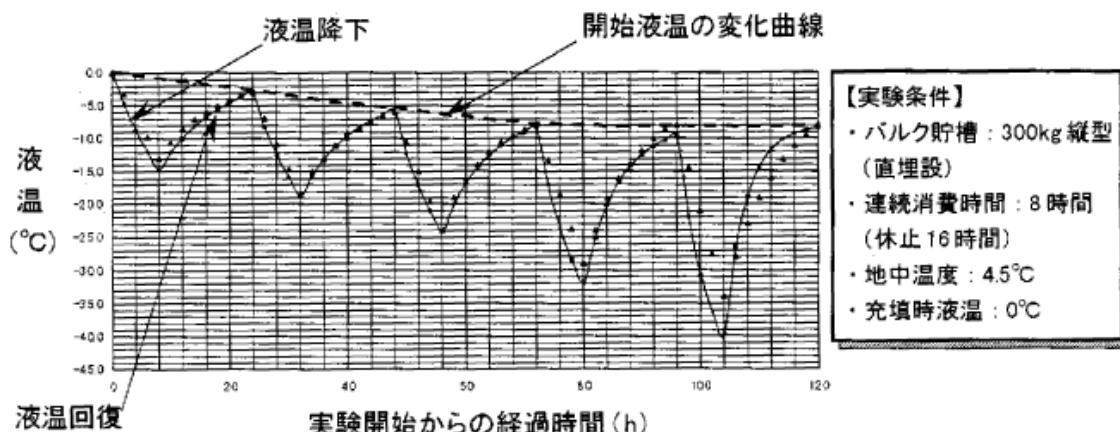


図1 地下埋設式縦型バルク貯槽の自然気化消費における液温変化状況の例

4. 1 地下埋設式縦型バルク貯槽の発生能力計算式及び液温回復計算式

$$W = \frac{UA(T_S - T_E)}{L} \cdot \frac{1}{1 - \exp(-\alpha \tau_E)} + \frac{W_P}{\tau_E} \dots (1)$$

ここで、

$$\alpha = \frac{3.6 \cdot U \cdot A}{wC_l + w_m C_m} \dots (2)$$

$$W_P = \left(V - \frac{w}{\rho_l}\right) \cdot \rho_v \cdot \frac{(P_a - P_E)}{0.101325} \dots (3)$$

W	: 発生能力	(kg/h)
U	: 総括伝熱係数	(W/m ² ·K)
A	: 伝熱面積	(m ²)
T _S	: 地中温度	(K)
T _E	: 消費終了時の液温	(K)
L	: 蒸発潜熱	(kJ/kg)
τ _E	: 連続消費時間	(h)
w	: 残液量	(kg)
C _l	: 液比熱	(kJ/kg·K)
w _m	: 顕熱に寄与するバルク貯槽の重量	(kg)
C _m	: バルク貯槽の比熱 ≒ 0.4605	(kJ/kg·K)
V	: バルク貯槽の内容積	(m ³)
ρ _l	: 液密度	(kg/m ³)
ρ _v	: ベーパー密度	(kg/m ³)

1) 大井: 「LPガス容器の発生能力推算法」 高压ガス Vol.16 No.9(1979)

P_a : 消費開始時の圧力 (MPa)

P_E : 消費終了時の圧力 (MPa)

尚、発生能力をその要因別に表すと以下の通りになる。

$$\text{【伝熱発生速度】 } W_h = \frac{UA(T_s - T_E)}{L} \cdot \frac{1}{1 - \exp(-\alpha \tau_E)} - W_l \quad \dots (4)^2$$

$$\text{【顕熱発生速度】 } W_l = \frac{(wC_l + w_m C_m) \cdot (T_a - T_E)}{L} \cdot \frac{1}{\tau_E} \quad \dots (5)$$

$$\text{【ベーパー発生速度】 } W_v = \frac{W_p}{\tau_E} \quad \dots (6)$$

ここで、
 W_h : 伝熱による発生速度 (kg/h)
 W_l : LP ガスの顕熱及びバルク貯槽の顕熱による発生速度 (kg/h)
 W_v : 気相部のベーパーの圧力低下による発生速度 (kg/h)
 T_a : 開始温度 (K)

一方、液温回復温度計算式は次式による。

$$T_R = T_a - (T_a - T_E) \cdot \exp(-\alpha \tau_R) \quad \dots (7)$$

ここで、
 T_R : 消費終了 τ_R 時間後の液温 (K)
 τ_R : 消費終了からの経過時間 (h)

4. 2 自然気化消費に伴う液相及び気相組成変化計算式

LP ガス組成をプロパン、ノルマルブタン及びイソブタンの三成分とし、自然気化消費に伴う液組成変化を以下の式で計算する。

$$\left(\frac{1 - x_{i,k-1}}{1 - x_{i,k}} \right)^{P_i} \cdot \left(\frac{x_{i,k}}{x_{i,k-1}} \right)^{P_j} = \left(\frac{W_k}{W_{k-1}} \right)^{P_i - P_j} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad \dots (8)$$

$$\text{ここで、 } p_i = \exp(K_{1,i} - K_{2,i}/T) \quad \dots (9)$$

$$p_j = \frac{\pi_{0,k} - p_i \cdot x_{i,k-1}}{1 - x_{i,k-1}} \quad \dots (10)$$

$$\pi_{0,k} = \sum_i p_i \cdot x_{i,k-1} \quad \dots (11)$$

但し、
 $k=1$ のとき $x_{i,0} = x_F$ $w_0 = w_F$
 $k=n$ のとき $x_{i,n} = x_i$ $w_n = w$

x_i : i 成分の液相組成モル分率 (—)

x_F : 充填時の液相組成モル分率 (—)

w : 残液量 (wt 比)

w_F : 充填時の液残量 = 1.0 (wt 比)

π_0 : 全圧 (MPa)

p_i : i 成分の蒸気圧 (MPa)

p_j : i 成分以外の蒸気圧 (MPa)

$K_{1,i}$, $K_{2,i}$: 定数 (表 1 に示す) (—)

T : 温度 (K)

2) (4)式を(2)式と(5)式を用いて書き換えると次式を得る。

$$W_h = \frac{UA(T_s - T_E)}{L} \cdot \frac{1}{1 - \exp(-\alpha \tau_E)} - \frac{UA(T_a - T_E)}{L} \cdot \frac{1}{\alpha \tau_E}$$

又、気相組成は、理想気体を仮定すると次式で計算される。

$$y_i = p_i \cdot x_i / \sum_i p_i \cdot x_i \quad \dots (12)$$

ここで、 y_i : i 成分の気相モル分率 (一)

4. 3 総括伝熱係数

$$U = 1.7 \cdot \left(\frac{\Delta T_E}{Z_{\text{mean}}} \right)^{0.45} \quad \dots (13)$$

ここで、 U : 総括伝熱係数 ($W/m^2 \cdot K$)
 ΔT_E : 温度差 (K)
 Z_{mean} : 平均液深さ (m)

$$\frac{1}{Z_{\text{mean}}} = \frac{1}{Z} + \frac{1}{D} \quad \dots (14)$$

D : バルク貯槽の内径 (m)
 Z : 液深さ (m)

4. 4 液深さ

任意の残液量における液深さを残液量が鏡部容積以上の場合は(15)式、それ以外の場合は(16)式で与えるものとする。

$$w / \rho_l \geq V_d \text{ のとき} \quad Z = \frac{4}{\pi D^2} \left(\frac{w}{\rho_l} - V_d \right) + Z_d \quad \dots (15)$$

$$w / \rho_l < V_d \text{ のとき} \quad \frac{4}{3} Z^3 - D \cdot Z^2 + \frac{w}{\pi \rho_l} = 0 \text{ の解} Z \quad \dots (16)$$

ここで、 w : 残液量 (kg)
 ρ_l : 液密度 (kg/m^3)
 V_d : 鏡部の容積 (m^3)
 Z_d : 鏡部の液深さ (m)

4. 5 伝熱面積

任意の残液量における伝熱面積は液深さ Z における濡れ面積とし、残液量が鏡部容積以上の場合は(17)式、それ以外の場合は(18)式で与えるものとする。

$$w / \rho_l \geq V_d \text{ のとき} \quad A = \frac{4w}{D\rho_l} - \frac{4}{D} \cdot V_d + S_d \quad \dots (17)$$

$$w / \rho_l < V_d \text{ のとき} \quad A = S_d \cdot \frac{Z}{Z_d} \quad \dots (18)$$

4. 6 発生能力に寄与するバルク貯槽の顕熱

発生能力に寄与するバルク貯槽の顕熱は $w_m C_m$ で与えられるが、この顕熱の源泉となるバルク貯槽の重量を次式で与える。

$$W_m = W_{m0} \cdot \frac{S_Z}{S_{\text{all}}} \quad \dots (19)$$

ここで、 w_m : バルク貯槽の顕熱に寄与するバルク貯槽の重量 (kg)
 w_{m0} : バルク貯槽本体重量 (kg)
 S_z : 液深さZにおける伝熱面積 (m²)
 S_{all} : バルク貯槽の全表面積 (m²)

4. 7 LPガスの物性値

$$\textcircled{1} \text{液密度} \quad \rho_l = \sum_i X_i \cdot (K_{3,i} - K_{4,i} \cdot T) \quad \dots (20)$$

$$\textcircled{2} \text{ベーパー密度} \quad \rho_v = \sum_i y_i \cdot K_{5,i} / T \quad \dots (21)$$

$$\textcircled{3} \text{蒸発潜熱} \quad L = \sum_i X_i \cdot (K_{6,i} - K_{7,i} \cdot T) \quad \dots (22)$$

$$\textcircled{4} \text{液比熱} \quad C_l = \sum_i X_i \cdot (K_{8,i} + K_{9,i} \cdot T) \quad \dots (23)$$

$$\text{但し、} \quad X_i = M_i x_i / \sum_i m_i x_i \quad \dots (24)$$

ここで、 X_i : i成分の液相組成重量分率 (—)
 M_i : i成分の分子量 (—)
 T : 温度 (K)

表1 LPガス物性値計算式の定数の値

成分	M_i	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9
C_3H_8	44.09	7.653	2301	889.18	1.323	537.6	720.13	1.2726	1.272	0.00394
nC_4H_{10}	58.12	8.198	2864	895.28	1.081	708.8	622.97	0.8749	1.233	0.00322
iC_4H_{10}	58.12	7.838	2648	901.71	1.173	708.8	646.54	1.0674	1.270	0.00327

5. バルク貯槽の主要寸法及び重量

バルク貯槽の主要寸法及び重量を表2に示す。

表2 バルク貯槽の主要寸法及び重量

種類	充填量 (kg)	内容積 (m ³)	内径 (m)	全長 (m)	スレート 部長さ (m)	スレート 部容積 (m ³)	鏡部 液深さ (m)	鏡部容積 (1/2) (m ³)	鏡部表面 積(1/2) (m ²)	全表面積 (m ²)	貯槽 重量 (kg)
150kg型	150	0.375	0.65	1.249	0.9137	0.3032	0.1625	0.0359	0.284	2.433	117.7
200kg型	200	0.500	0.80	1.141	0.7281	0.3660	0.2000	0.0670	0.430	2.689	169.2
300kg型	300	0.750	0.80	1.638	1.2255	0.6160	0.2000	0.0670	0.430	3.939	230.1
500kg型	500	1.250	1.00	1.774	1.2582	0.9882	0.2500	0.1309	0.671	5.295	396.5
1t型	1000	2.500	1.30	2.121	1.4501	1.9248	0.3250	0.2876	1.134	8.191	809.8
2.9t型	2900	6.820	1.80	3.040	2.0700	5.2675	0.4500	0.7762	2.175	19.400	2500.0

(注) 鏡部(回転楕円体)の短軸と長軸の比は、1:2とした。

6. バルク貯槽の発生能力

6. 1 地中温度と充填時温度

地下埋設式縦型バルク貯槽の発生能力計算においては、地上設置式バルク貯槽の発生能力計算式における「外気温」に相当するパラメータを主として「地中温度」とし、「充填時液温」考慮している。これらのパラメータの設定方法について、本基準では以下の通りとする。

①地中温度は、バルク貯槽を設置した地区の実測データとする。

尚、地中温度の参考データとして高圧ガス保安協会が実施したデータを解説3に掲載する。

②充填時液温は、バルク貯槽に充填した直後の液温とする。

6. 2 地下埋設式バルク貯槽の発生能力

地下埋設式縦型バルク貯槽の発生能力計算結果については、充填時液相組成 C_3H_8 分 95mol% の場合を付表1及び付図1に、充填時液相組成 C_3H_8 分 90mol% の場合を付表2及び付図2に示す。尚、付表においては、発生能力の値と共にその計算条件における開始液温も併記するものとし、「充填液温」を「充填時液温」に読み替えるものとする。

又、参考データとして、地下埋設式縦型バルク貯槽の発生能力をその貯蔵量に対して表示した結果を付表3～付表4及び付図3～付図4に示すと共に、地下埋設式横型バルク貯槽の発生能力を付表5～付表6及び付図5～付図6に示す。

6. 3 本基準の利用

地下埋設式における縦型バルク貯槽と横型バルク貯槽の発生能力は、解説5における検討の通りほぼ同等の値と考えられるので、本基準の利用に当たっては、横型バルク貯槽の発生能力についても縦型バルク貯槽の発生能力（付表1～付表4及び付図1～付図4）を使用するものとし、横型バルク貯槽としての発生能力計算データについては参考3の範囲にとどめた。

制定日

本資料の制定日は、2000年7月1日とする。

改正日

本資料の第1回改正：2008年11月26日

第2回改正：2016年3月11日