

BOG 再液化システムにおける動的解析

伊藤 裕(工博)*・大塩 章*・岡本秀寿**・新居敏則***・山根政美***・阿生山年宏****

*エンジニアリング事業部・エネルギー・原子力プラント技術部 **エンジニアリング事業部・計電装技術部

エンジニアリング事業部・化学プラント技術部 *エンジニアリング事業部・品質保証室

Dynamic Simulation of Cold Energy Storage and Process Control for BOG Re-liquefied Systems

Dr. Yutaka Ito・Akira Oshio・Hidetoshi Okamoto・Toshinori Nii・Masami Yamane・Toshihiro Abuyama

A BOG re-liquefaction system using LNG cold energy storage was developed in collaboration with Osaka Gas Co., LTD. The system is characterized by excellent operational performance. Development required dynamic simulations of melting and freezing phenomena at temperature of $-130 \sim -160$, and control system analysis for two phase flow dynamics. This paper presents these dynamic simulations.

まきがき = 天然ガスはわが国では原子力・石炭・石油と並んで重要な一次エネルギーとして位置付けられており、その需要は今後も増加していくと考えられる。産地国で液化された天然ガスは、LNG（液化天然ガス）として日本へ運搬され、受け入れ基地で気化されて都市ガス原料や火力発電用に使用される。

このたび、当社は大阪ガス㈱と共同開発をおこない、受け入れ基地の LNG タンクで発生するボイルオフガス (BOG) を LNG 冷熱の蓄冷によって再液化処理する新しいシステム¹⁾を実用化した。本システムをもちいれば、BOG を気体状態で圧縮送出する従来の方式にくらべて圧縮動力(電力量)を 30~60% 削減することができる。

本稿ではこの BOG 再液化の原理を示すとともに、システムの運転上不可欠である極低温 LNG 冷熱の蓄冷現象の解析、および、系の安定制御に実用的動的解析という 2 種類のシミュレーションを紹介する。

1 BOG 再液化システムの概念

第 1 図に従来の高圧圧縮送出による BOG 処理方式と、今回開発したシステムを示し、写真 1 に本システムの全景を示す。受け入れ基地ではタンカーで運ばれてきた LNG は LNG タンクで貯蔵されるが、外部入熱によって LNG タンク内で LNG が気化して BOG が発生する。タンク圧を数 kPa に維持するために現状では第 1 図中の破線のように高圧圧縮機により BOG を抜き出している。そして 2~7MPa 程度まで昇圧して LNG 気化器で気化したガスとともにユーザーに向けて払い出している。しかしこの方式では BOG を気相圧縮するため、

多大な動力を必要とし、受け入れ基地で使用する全電力の中でこの圧縮動力は大きな比重を占めていた。

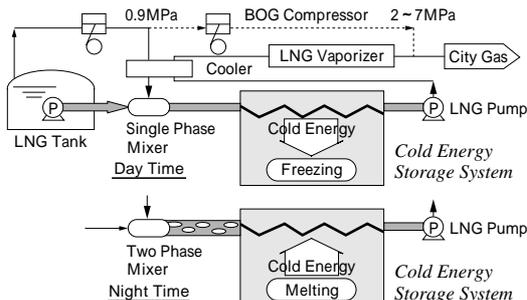
蓄冷技術をもちいた BOG 再液化システムはこの BOG 圧縮動力を削減するために開発されたものである。第 1 図中に本システムの流れを実線で示す。この図のように BOG を高圧まで圧縮するのではなく、いったん 0.9 MPa 程度に圧縮し、熱交換器で予冷して、この BOG を混合器内で LNG と混合する。昼間の LNG が多量にある場合、BOG は LNG との混合によりすべて再液化するが、まだ十分冷たいので蓄冷式熱交換器（以下、蓄冷容器と呼ぶ）を通る間に蓄冷剤を凝固させて蓄冷がおこなわれる。この BOG と LNG の混合流は LNG ポンプで液相圧縮され LNG 気化器へ送られる。夜間の LNG 流量が少ない場合、BOG は LNG と混合しても完全に液化されず気液二相流となる。しかしこの気液二相流は蓄冷容器を通過する際、蓄冷剤を融解しながら冷熱をえて、最後には完全に液化するので、ポンプによる液相圧縮をおこなうことができる。

第 1 表に従来の BOG 圧縮機方式と再液化方式の動力比較を示す。本システムはこのように LNG 流量が減少して混合器で気液二相流となっても、蓄冷容器によって常時ポンプ入口で液相が確保でき、高圧まで液相圧縮が可能になるので、BOG の圧縮機動力を大幅に削減する

第 1 表 動力の比較

Table 1 Comparison of required power

System	Discharge Pressure MPa	Required Power kWh/ton-BOG
Compressor (Conventional)	2.0	146
	7.5	227
BOG Re-liquefaction	2.0~7.5	98



第 1 図 BOG 再液化システムの概念
Fig. 1 Concept of BOG re-liquefaction



写真 1 BOG 再液化システム全景
Photo.1 Facility of BOG re-liquefaction

ことができる。

2 蓄冷熱交換器のシミュレーション

本システムの特徴は蓄冷式熱交換器という一種のバッチ装置を運転することであり、凍結・融解性能を予測する動的なシミュレーションはプラント設計および運転に不可欠である。

2.1 凍結・融解問題の解析方法

凍結・融解のように系の境界が移動する Moving Boundary Problem については座標変換をおこなって凍結固体内の熱伝導方程式を解く境界固定法²⁾ (Boundary Fixing Method) や、第 2 図のように凝固潜熱を比熱の変化とみなして数値解を求める等価比熱法³⁾などが挙げられる。本開発初期には両方の解析を試みたが、境界固定法は対象物に応じて座標変換の解析をやり直さなければならない煩雑さがある。設計段階でシミュレーションをもちいて設備仕様を決定する際、多くのケーススタディをおこなう必要があったので、本開発では理論的厳密性よりも計算機の計算時間が短くてすみ、凍結・融解にも共通して同じ計算コードで対応できる等価比熱法を採用することにした。

2.2 蓄冷式熱交換器の構造とモデル化

BOG 再液化でもちいた蓄冷容器は第 3 図に示すようにアルミ製の押し出し成形品で、伝熱管の周囲に 12 枚のフィンが設けられている。この中央の伝熱管の中を LNG が通り、フィンチューブ全体が蓄冷媒体の中に浸漬されているので伝熱管およびフィンの表面上で蓄冷媒体の凍結と融解がおこなわれる。このような構造での現象を下記のようにモデル化する。

- フィンチューブを軸方向に分割し、その要素内の蓄冷媒体の温度分布と蓄熱量を計算対象とする。
- 軸方向の蓄冷媒体の熱移動は考えない。
- 微小要素内の蓄冷媒体、フィンチューブを第 3 図のようにフィン伝熱面積に等価な円筒に置き換える。
- この等価的な系に対し、円筒座標系の非定常熱伝導方程式をたて、前進差分によって解を求める。
- 凍結・融解温度に達した場合、蓄冷媒体の比熱を変化させて、潜熱の授受に対応させる(等価比熱法)。

2.3 基礎方程式と離散化

円筒座標系の熱伝導方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{C_p} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

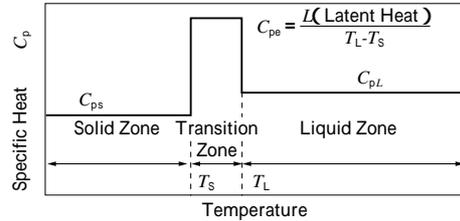
(T :温度, t :時間, r :半径, λ :熱伝導率, ρ :密度, C_p :比熱)
次に式(1)を 2 次の打ち切り誤差で離散化する。

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T(i+1, k) - T(i-1, k)}{2r} \dots\dots\dots (2)$$

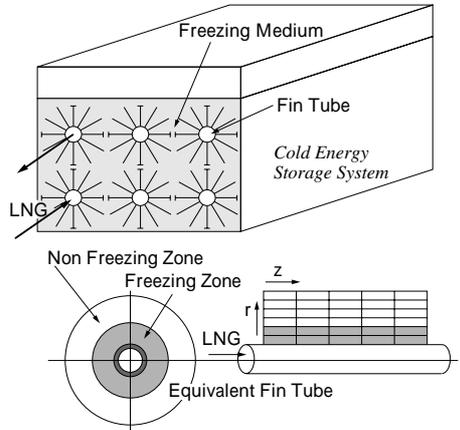
$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{T(i+1, k) - 2T(i, k) + T(i-1, k)}{r^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T(i, k+1) - T(i, k)}{t} \dots\dots\dots (4)$$

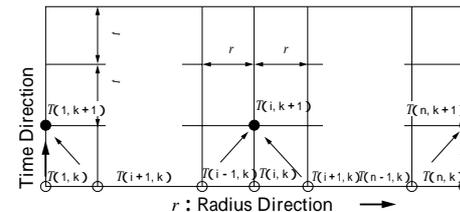
式(2)~(4)を式(1)に代入すれば、 i 番目の要素の、 t 時間後の温度 $T(i, k+1)$ が求められる。これを第 4 図に示すすべての点 $i=1 \sim n$ までの格子の点について計



第 2 図 等価比熱の概念
Fig. 2 Concept of equivalent specific heat



第 3 図 解析モデル
Fig. 3 Analytical model



第 4 図 差分の計算の格子
Fig. 4 Calculation grid

算をおこなえばよい。境界条件として $i=1$ 番目のところで、LNG との熱交換がおこなわれるものとする。

$$\frac{1}{2} C_p r \frac{T(1, k+1) - T(1, k)}{t} = h \{ T_{LNG} - T(1, k) \} - \{ T(1, k) - T(2, k) \} \dots (5)$$

(h : 熱伝達率, T_{LNG} : LNG 温度)

$i=N$ 番目のところでは熱伝導を下記のように表現する。

$$\frac{1}{2} C_p r \frac{T(N, k+1) - T(N, k)}{t} = - \{ T(N-1, k) - T(N, k) \} \dots (6)$$

また j 番目の軸方向の微小区間 z における熱移動は式(7)、式(8)で表す。なお、 h_w は熱伝達率、 T_{LNG} 、 G_{LNG} 、 H 、 Q はそれぞれ LNG の温度、流量、エンタルピ、微小区間の移動熱量を表す。

$$Q(j) = D z h_w (T_{LNG}(j) - T_w(j)) \dots\dots\dots (7)$$

$$H(j+1) G_{LNG} = H(j) G_{LNG} - Q(j) \dots\dots\dots (8)$$

2.4 遷移域での温度修正項

t 後の温度が液相から遷移域を経て固相線温度に飛越した場合の処置を第 5 図のように分類して考える。

[Case-1] $T > T_L$ かつ $T' < T_L$

$$T^{*+} = T_L - \frac{C_p}{C_{pL}} (T_L - T') \dots\dots\dots (9)$$

[Case-2] $T' > T_s$ かつ $T' < T_s$

$$T'^{+} = T_s - \frac{C_{ps}}{C_p}(T_s - T') \quad (10)$$

[Case-3] $T' > T_L$ かつ $T' < T_L$

$$T'^{+} = \frac{C_{pL}}{C_p}(T' - T_L) + T_L \quad (11)$$

[Case-4] $T' > T_s$ かつ $T' < T_s$

$$T'^{+} = \frac{C_p}{C_{ps}}(T' - T_s) + T_s \quad (12)$$

2.5 解析結果

第6図に本等価比熱法で求めた計算結果と運転結果との比較を示す。本図は蓄冷媒体を -147 に冷却凍結しておき、 0.8MPa の压力下で、システムに LNG を 40ton/h BOG を 15ton/h 流した場合の蓄冷容器出口温度の時間的挙動である。このように LNG が少ない場合には蓄冷容器の入口状態は気液二相流であるが、蓄冷容器に蓄えられた冷熱で BOG は完全に液化され、出口温度はこの図のように9時間以上にわたって -130 以下を維持し、つねに液相圧縮できることがわかる。なお、本压力下での LNG 沸点は -126 である。第6図中に本シミュレーション結果も示す。この図に示されるように等価比熱法によって蓄冷式熱交換器の特性が定性的にも定量的にも十分に把握できることがわかる。

3 制御方式のシミュレーション

BOG 再液化システムでは蓄冷性能のほかに、安定運転のために制御システムの動的解析も重要である。本章ではこの点について示す。

3.1 問題点

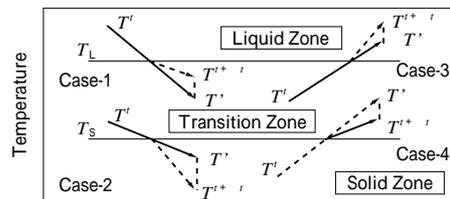
第7図に本システムの機器と制御構成を示す。蓄冷容器は必要蓄冷量を確保するため4系統で構成されている。安定した再液化運転のためには、各蓄冷容器の負荷を均等に保つように各蓄冷容器を流れる LNG の均等流量制御が必要である。また LNG 流量は LNG の時間的な負荷変動およびそれに対応した LNG ポンプの発停に追従しなければならない。さらに系内で減圧沸騰を避けるため圧力制御も必要である。蓄冷容器内は LNG と BOG の気液二相流で流れるが、気液の流量比率が変わることにより流量変化に対する圧力損失が逆転し、圧力・流量が不安定となる現象が発生する場合もある。このように多くの因子が含まれる再液化システムにおいて安定した LNG の均等流量制御および圧力制御の方式を決定するために、関連する機器・配管・制御系をモデル化し、その流量・圧力特性についてシミュレーションをおこない、最適な制御方式を決定した。

3.2 モデル化の範囲

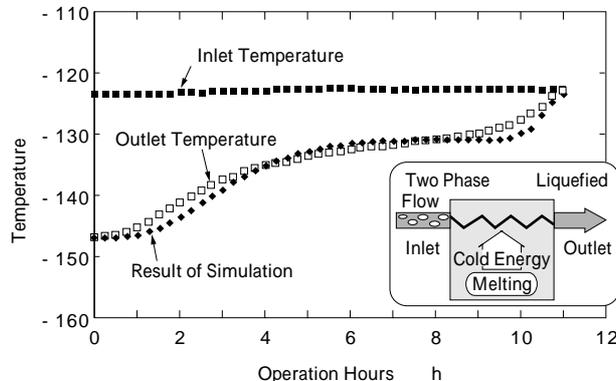
シミュレーションのためのモデル化の範囲は、LNG 貯槽出口のプライマリーポンプから蓄冷容器出口の気液分離器までの機器・配管・制御装置である。BOG の発生量は基地運転条件で変化するが数分間では変動しないので、本解析の時間範囲では BOG は一定流量で供給されるものとし、供給系統の機器はモデル化の範囲から除外した。

3.3 数式モデル

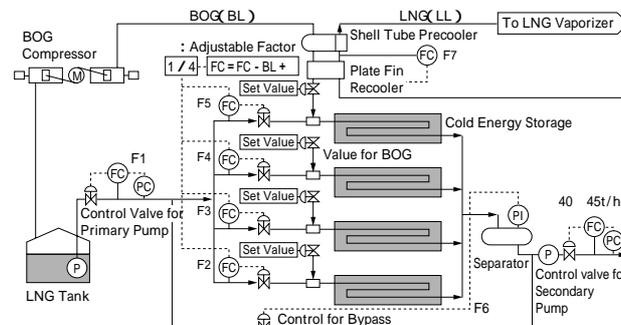
各構成機器・配管・制御機器を以下のように数式化



第5図 遷移域における温度の補正
Fig. 5 Temperature modification in transition zone



第6図 シミュレーション結果
Fig. 6 Result of simulation



第7図 プロセス制御のフロー図
Fig. 7 Schematic drawing of process control

し、モデルを作成した。実際のモデルの作成およびシミュレーション計算は、The MATH WORKS Inc. 社の MATLAB Ver. 4.2 およびその上でモデル作成する Simulink 1.3 Release (WINDOWS 版) を使用した。

- 1) プライマリーポンプ：一次関数の $Q - H$ 曲線
 $\text{圧力 (kg/cm}^2\text{)} = 15 - \text{流量 (m}^3\text{/h)}/40$
- 2) 調節弁：リニア特性の調節弁
 $\text{流量} = \text{定数} \times \text{調節弁開度} \times \text{差圧}$
- 3) 蓄冷容器： 1.5m^3 の容器 (ただし 25% はガス)
 $d(\text{容器内の LNG 量})/dt = \text{入口 LNG 量} + \text{BOG 量} - \text{出口 LNG 量}$
 $\text{容器内の圧力} = \text{容器内 LNG 量}/(\text{容器容積} \times 0.25)$
- 4) 蓄冷容器内の圧力損失：二相流を考慮しない場合は、流量に対し 2 次の関数で圧力損失が増加する、また二相流を考慮した場合は、LNG 流量の変化により気液の比率が変わり LNG 流量変化に対する圧力損失が逆転する部分が存在する。この二つのケースのモデルを使用した。
- 5) 気液分離器： 11m^3 の容器
 $d(\text{容器内の LNG 量})/dt = \text{入口 LNG 量} - \text{出口 LNG 量}$
 $\text{容器内の圧力} = \text{容器内の LNG 量}/(\text{容器容積} \times 0.001)$

ただし、0.001 は LNG の弾性係数

3.4 シミュレーションの結果

3.4.1 ケース 1 (蓄冷器内の二相流を考慮しない場合)

4 台の蓄冷容器は上下 2 段×2 列に設置されている。上段の蓄冷容器入口の調節弁開度を全開付近で固定し、上下の蓄冷容器の LNG 流量差を補正する目的で、上段よりも LNG の流れやすい下段に入口のみ流量制御を設けた場合のシミュレーション結果を第 8 図に示す。この図のように LNG の要求流量 (F7) に変動が発生したとき、蓄冷容器の LNG 流量 (F2~F5) が不安定になる。これは蓄冷容器の流量は蓄冷容器入口と気液分離器との差圧と、蓄冷容器入口の調節弁開度により流量が決まるからである。下段の蓄冷容器流量を増加させようと調節弁が開くと上段の蓄冷容器流量が減少し蓄冷容器圧力損失が少なくなり、蓄冷器入口と気液分離器との差圧が小さくなる。これがさらに下段蓄冷容器の流量を下げる要因となり流量が不安定となる傾向が認められる。

3.4.2 ケース 2 (蓄冷器内の二相流を考慮しない場合)

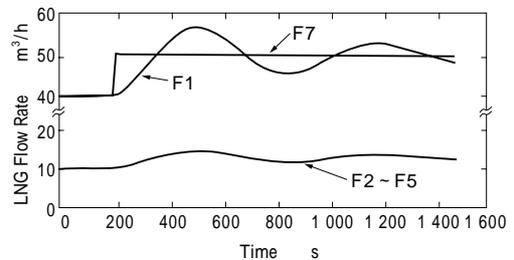
上記の問題を解決するため、各蓄冷容器の入口流量制御を生かし、その設定値を気液分離器の出口流量の 1/4 とし、気液分離器の圧力を蓄冷器のバイパスラインの流量調節でおこなわせるようにした。第 9 図に解析結果を示す。LNG の要求流量 (F7) に変動が発生したとき、バイパスラインの流量 (F6) がこの変動にすばやく応答し、その後徐々に蓄冷容器流量 (F2~F5) が変化し安定に制御できる。

3.4.3 ケース 3 (蓄冷器内の二相流を考慮した場合)

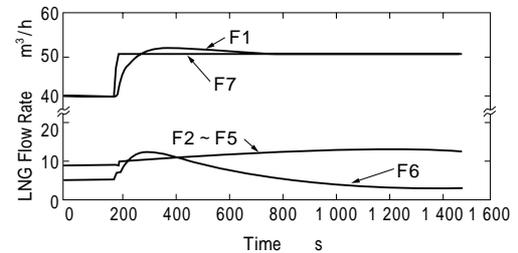
ケース 2 の制御方式においても蓄冷容器圧力損失に二相流を考慮すると、第 10 図 (a) に示すように気液分離器の圧力設定により蓄冷容器入口流量に十数秒周期のハンチングが発生することがわかった。そこで圧力設定を適切にし、蓄冷器入り口の調節弁の開度をある程度に閉めた場合、第 10 図 (b) のように流量に対する二相流の圧損の逆転現象が調節弁の圧力損失の二乗特性により打ち消され、短周期のハンチングが押さえられることがわかった。以上のシミュレーション結果により、ケース 3 の制御方式をプラントに採用することを決定した。

3.5 運転結果

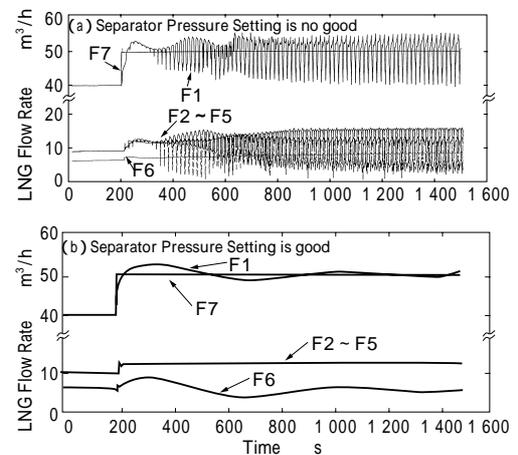
ケース 1 の制御系では、蓄冷器入口 LNG 流量・気液分離器の圧力のハンチングが発生する危険性がある。実際の運転でも不安定な傾向が見られたのに対し、ケース 3 の制御方式にすれば安定化することが判明した。第 11 図に運転結果を示す。運転結果はシミュレーションの結果と定性的に良く一致し、蓄冷容器入口 LNG 流量・気液分離器の圧力のハンチングが発生せず安定している。また気液分離器の圧力設定を適切にすることにより十数秒の短周期ハンチングも解消した。気液分離器の圧力設定は、低すぎると BOG の再ガス化および蓄冷容器の性能低下につながるため、LNG の要求流量および BOG 流量の関数として運転するようにした。このようにプラント制御の動的解析をおこなうことで、安定な制御方法を構築することができた。



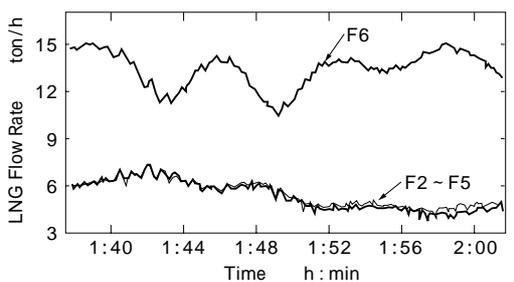
第 8 図 ケース 1 の LNG 流量シミュレーション結果
Fig. 8 Simulation result of LNG flowrate for Case 1



第 9 図 ケース 2 の LNG 流量シミュレーション結果
Fig. 9 Simulation result of LNG flowrate for Case 2



第 10 図 ケース 3 の LNG 流量シミュレーション結果
Fig. 10 Simulation result of LNG flowrate for Case 3



第 11 図 運転結果
Fig. 11 Operation results

むすび=LNG 冷熱の蓄冷をもちいた BOG 再液化はまったく新しいプロセス概念であり、現在、大阪ガス堺北製造所第二工場順調な運転がおこなわれている。従来の圧縮機の場合に比べて、本システムの導入によって BOG 圧縮動力を大幅に減少させることが可能となり、LNG 冷熱利用の向上にも貢献している。本開発にあたって多大なご協力を戴いた大阪ガス様に深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 岩田幸雄ほか: エネルギー・資源, Vol.18 No.4 (1997), p.326.
- 2) 斉藤武雄: 数値伝熱学, (1986), 養賢堂.
- 3) 大中逸雄: コンピュータ伝熱・凝固解析入門 (1985), p.167 丸善.