

(資料 1-2-3)

第 1 回 天然ガス燃料船の普及促進に向けた総合対策検討委員会 ロールオーバー対策検討実施計画

1 検討の目的

既存 LNG 輸送船の場合、本船は積み地で積載した LNG を揚げ地で全量荷揚げするよう運用されている。そのため、揚げ地へ向けた航海中のタンク内は 1 種類（組成）の LNG のみで満たされている。一方で、天然ガス燃料船の場合、本船は燃料タンク内の LNG をすべて使い切る前に LNG の補給を受ける（積み増す）こととなる。そのため、補給を受ける場所や供給者によっては、LNG の組成が異なる可能性がある。

LNG 補給時に、タンク内 LNG よりも軽質の LNG をタンク上部から注入（Top-fill）、またはタンク内 LNG よりも重質の LNG をタンク下部から注入（Bottom-fill）した場合、軽質分と重質分との間で層状化が生じる可能性のあることが陸上 LNG タンクの運用経験から知られている。一旦、層状化すると、上部の LNG は更なる入熱により、液体温度が上昇し、タンク内間隙部に BOG として軽質分（メタン）を発生させることから、重質化する。一方、下部の LNG は入熱により、液体温度が上昇するものの、上部には軽質の LNG が存在するため BOG を発生させることができないまま、軽質化する。ここで、上下部の LNG の密度差が一定以上小さくなると、タンク内にロールオーバーと呼ばれる対流が生じる。ロールオーバーによりタンク上部に上がった重質 LNG からは急激に BOG が発生するため、タンク内圧力は急激に上昇し、最悪の場合、タンクの損傷に至ることも想定される。

本調査においては、ロールオーバー発生を防ぐための適切な運用方法を策定し、最終的には LNG の船外からの補給方法および船内での管理・使用方法を含めた運用ガイドラインを策定する。なお、本調査結果については、IMO BLG 17 への提案することを念頭に実施する。

2 検討の内容

本検討においては、以下の 6 点について調査・検討を実施する（一部は実施済み）。

2.1 産出地別の天然ガス組成に係る調査

天然ガスは、メタン（ CH_4 ）、エタン（ C_2H_6 ）、プロパン（ C_3H_8 ）、ブタン（ $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ 及び $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ ）などで構成されるものの、メタンが成分の大半を占める。しかし、その成分の割合は、産出地により異なることから、ロールオーバーの発生が懸念される天然ガス燃料船の場合には、燃料供給を受ける LNG の組成に十分な注意を払う必要がある。

そこで、本調査においては、主要な産出地の天然ガス組成について情報を収集した。主な産出地の組成は表 2.1.1 に示すとおりである。

表 2.1.1 主な産出地の天然ガス組成

ガス田	国名	CH4 (%)	C2H6 (%)	C3H8 (%)	C4H10 (%)	C5以上 (%)	CO2 (%)	N2 (%)	O2 (%)	その他 (%)	メタン価
Lacq Profond	フランス	69.0	3.0	0.9	0.5	0.5	9.3	1.5		15.3	83.9
Gron-ingen	オランダ	81.3	2.9	0.4	0.1	0.1	0.9	14.3			95.4
Frigg	英国・ノルウェー(北海)	95.7	3.6	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4			96.9
Alberta	カナダ	91.9	2.0	0.9	0.3			4.9			96.0
Kenai	米国(アラスカ)	99.8	0.1					0.1			108.1
Hassi R'mei	アルジェリア	83.7	6.8	2.1	0.8	0.4	0.2	5.8		0.2	76.9
Afan	ナイジェリア	81.0	6.5	5.9	3.3	1.4	1.7	0.2			60.2
Chaivo	サハリン	92.8	3.9	1.7	0.8	0.3	0.3		0.2		84.4
茂原	日本	98.0					0.5	1.4	0.1		108.4
Lurnut	ブルネイ	90.1	5.1	2.8	1.4	0.1		0.1			77.7
Das Island	U.A.E	75.1	23.1	1.7	0.1	0.1					65.2
Ras Laffan	カタール	89.9	6.6	2.3	1.0			0.2			79.3
Arun	インドネシア	87.7	6.9	3.1	1.8	0.1		0.4			73.2
Badak	インドネシア	90.8	4.7	3.0	1.3	0.1		0.1			78.2
Centra Luconia	マレーシア	91.6	4.1	2.7	1.4	0.1		0.1			79.5
Bintulu	マレーシア	89.3	5.6	3.5	1.5						75.4
Withnell Bay	オーストラリア	87.5	8.3	3.2	0.9	0.0		0.1			75.1

(化学便覧 応用編、日本化学会編、丸善出版)

2.2 陸上タンク分野において蓄積された知見の収集

世界の複数の産地より LNG を受け入れる大規模な陸上 LNG 基地においては、以前よりロールオーバーの危険性が認識されており、タンク内の層状化を防ぐための対策が取られている。それでも、過去には欧州の LNG 基地においてロールオーバーが発生した事例があることから、本検討においては調査することとした。

2.2.1 陸上LNG基地でのロールオーバーの発生事例調査

陸上 LNG 基地におけるロールオーバー発生事例については、GIIGNL の技術研究グループが 1970~1982 年の間に発生した事例について調査している。その結果、当該期間には 22 の受入基地で 41 件のロールオーバーが発生していることが報告され、その大半の要因は同一タンク内に異なる組成の LNG を受け入れたことであった。

その中でも、1971 年にイタリアのラ・スペティア (La Spezia) LNG 受入基地で発生した事例は深刻であったことから、ロールオーバーは世界で大きく注目されることとなった。当該事例の詳細は以下に示すとおりである。

- ▶ 陸上タンクは容積が 50,000 m³で、側面底部に 24 インチの受入配管、4 インチの再循環系統タンクトップにそれぞれ配置
- ▶ LNG 受入れ時には 5,170 トンのヒールがあり、そこに LNG 運搬船 “Esso Brega” より 18,200 トンを受入れ
- ▶ 同船は LNG 荷揚げ前、LNG 基地沖合のラ・スペティア湾に 1 ヶ月以上停泊していたため、積み荷 LNG は液温度が上昇し、重質化
- ▶ 同船からの LNG 受入れ中の約 10 時間に、陸上タンク内ではヒールからと思われる BOG が急増し、合計 30 トン程度発生したことにより層状化したものと推測 (再循環

系統の使用有無は不明)

- 受入れ後、タンク内液面は BOG の大量発生により推定 4m 低下
- その後、静定期間が続くも、荷役開始 31 時間後、ロールオーバーが発生
- タンクの安全弁が 1 時間 15 分にわたり継続的に開放され、安全弁停止後も更に 2 時間にわたり、高いレートでベントから大気放出
- 気化ガスの放出レートは最大で推定 10 トン/h にまで達し、ボイルオフが落ち着くまでに合計 86 トンが大気放出
- 安全弁が開放し始めた時点で、LNG 基地管理者は港湾当局や地元の緊急機関に連絡するとともに、LNG 輸送船もバースから離棧
- 陸上タンクには過度な圧力による損傷はなかったものの、設計圧力の 50mbar を 20mbar 超える圧力まで到達
- 負傷者もなし

2.2.2 陸上タンク分野において蓄積された知見の収集

本調査においては、陸上タンク分野において蓄積された知見について、以下のとおり調査を実施した。

その結果、LNG タンク内にてロールオーバーを発生させないためには、ロールオーバー現象の前段階である「層状化」を防ぐことが何よりも重要であることが明らかになった。そのため、陸上 LNG タンクにおいては、層状化及びロールオーバーの回避に向け、以下のような手順・対策が取られている。

なお、本調査においては、今後も大規模な陸上 LNG 基地を所有・運営する国内ガス会社へのヒアリングを通じてタンク運用に係る知見・ノウハウを収集することを予定している。

- ① 適切な方法での LNG の受け入れ（軽質 LNG はタンク下部より注入し、重質 LNG はタンク上部より注入）
- ② 可能な限り貯蔵期間を短縮
- ③ ジェットミキシングノズルを設置
- ④ タンク外での LNG 再循環設備の設置（配管系統の整備およびリサーキュレーションポンプの設置など）

2.3 船用 LNG タンクにおけるロールオーバーの発生事例調査

過去には、LNG 運搬船においても 2 件のロールオーバー発生事例が報告されている。特に(2)の事例においては、これまでタンク内の対流を増加させるため、ロールオーバーが発生しないと考えられていたモス型タンクの LNG 運搬船においても、ロールオーバーの発生が報告されている。各事例の詳細を以下に示す。

(1) 1960年の事例

- 北アフリカの LNG 払出基地において、LNG 輸送船が LNG を受入れ
- 荷役開始 1 時間後にプラントが停電し、12 時間の荷役中断後、荷役を再開
- 荷役再開時に出荷ラインが再循環されなかったため、当該ライン内にあった液温の高い LNG が本船へ積み込まれ、本船カーゴタンク内の層状化を誘発
- 荷役自体は問題なく完了し、本船は揚げ地に向かったものの、12 時間後、洋上にて本船カーゴタンク内の圧力が突如上昇
- 圧力の上昇により安全弁が作動したものの、損傷などはなかった

(2) 2008年の事例

- 125,000 m³のモス型 LNG 輸送船（1 カーゴタンクあたりの容量は 25,000 m³）がトリニダードで LNG を積み込み（液密度：427kg/m³）、極東地域にて荷揚げ
- その後、2 基のカーゴタンクに 8,500 m³のヒール（液密度：434kg/m³）を残したまま、地中海への荷役に向け、航海を続行
- 航海に出て 8 日後に本船は引き返し、日本の港で LNG を積み込むよう指示を受け、揚荷した基地を出港してから 17 日後にはヒールが 5,000 m³まで減少
- 日本国内の積み地に到着したものの、当該 LNG 基地は通常揚げ地として使用されているため、一般的なレベルの半分以下のレートで本船へ積み込み
- 更に、カーゴタンクが許容限度以下に冷却されていることを確認するため、本船は数時間にわたり荷役を中断
- これらの要因が重なり合い、カーゴタンク内で LNG の層状化を促進
- 出港 24 時間後、日本国内での積み込み時にヒールを有していた No.3 および No.4 タンクで液面レベルの上昇を確認
- その 5 日後、本船が揚げ地バースへの入港に向け待機中、両タンクの内圧上昇が確認されるとともに、No.4 および No.5 タンクで液面レベルの低下が起き、ロールオーバーが発生
- 船員は No.1、No.2 および No.5 タンクからのガス系統バルブを閉止し、最大で 200bar にまで達していた No.3 および No.4 タンクからの BOG を可能な限りボイラーに送るよう操作
- その後、本船がバース着棧後、本船ガス系統の安定化を図るため、陸上のフレアにガスを送ることにより、通常の荷役へ移行
- 本件では、カーゴタンクの内圧が設計圧力を超えることはなく、カーゴタンク安全弁の解放による大気放出も回避

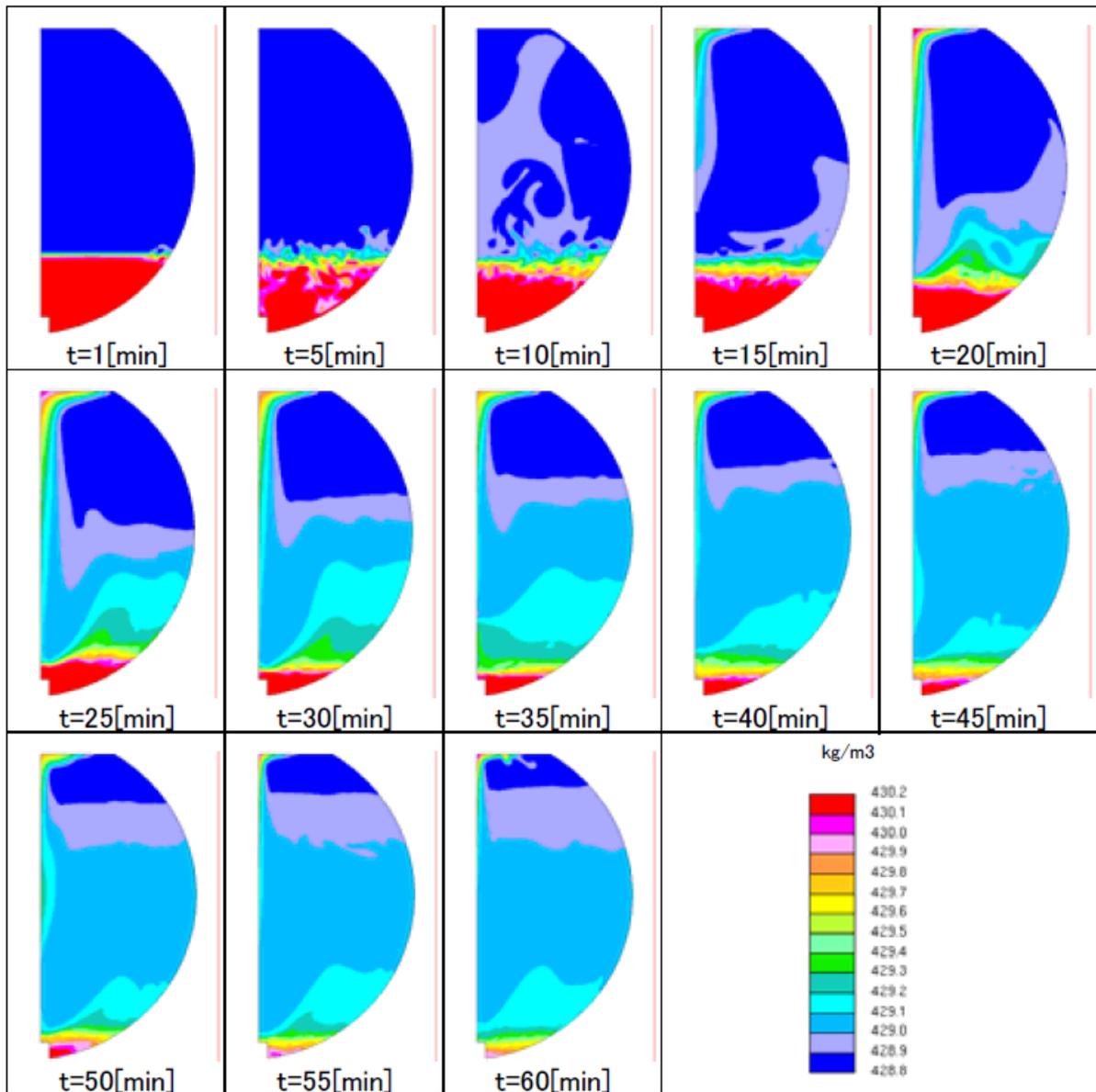
2.4 船用LNG燃料タンクを想定したCFDシミュレーションの実施

ロールオーバーの発生を防ぐための運用方法を策定するにあたっては、組成の異なるLNGを受け入れた際のタンク内におけるLNGの状況を把握することが肝要である。本調査においては、タンク内におけるLNGの状況を把握するため、CFD¹シミュレーションを実施する。CFDシミュレーションの実施ケース（案）を表 2.4.1に示す。

表 2.4.1 CFDシミュレーションの条件（案）

	タンクタイプ	タンク内圧 (bar)	タンク容量 (m3)	ポンプ容量 (m3/hr)	LNG組成 (kg/m3)		供給方式	初期液位 (%)
					タンク内	供給		
1	タイプB	0.6	2,000	1,000	470	425	Top-fill	10
2								50
3							Bottom-fill	10
4								50
5			8,000	250	425	470	Top-fill	50
6								50
7							Bottom-fill	50
8								50
9	タイプC	6.0	2,000	1,000	470	425	Top-fill	10
10								50
11							Bottom-fill	10
12								50
13			1,000	250	425	470	Top-fill	50
14								50
15							Bottom-fill	50
16								50

¹ CFD : Computational Fluid Dynamics (数値流体力学)



(三菱重工)

図 2.4.1 大型 LNG 運搬船モス型タンクでの CFD ロールオーバーシミュレーション結果の例

2.5 小型LNGタンクを使用した圧力急上昇再現試験の実施

前節のCFDシミュレーションの実施とともに、本調査においては、実際に組成の異なる2種類のLNGを使用することにより、ロールオーバーを模したタンク内の圧力急上昇の再現試験を実施する。ここでは、液温の調節により、組成を変えた2種類のLNGを作成し、それらを小型LNGタンクに封入することで、ロールオーバーの再現を試行する。その際のデータを計測し、分析することにより、安全確保に向けたロールオーバー対策の策定に役立てる。圧力急上昇再現試験の小型タンク仕様を表 2.5.1に示す。

なお、ここで得られたロールオーバーの現象については、別途 CFD によるシミュレーションを実施することにより、実機での試験結果との CFD シミュレーション結果を比較検証する。その結果によっては、CFD シミュレーション計算にフィードバックすることも検討する。

表 2.5.1 小型 LNG タンクを使用した圧力急上昇再現試験の小型タンク仕様 (案)

タンクタイプ	タイプC
タンク形状	円筒型
タンクサイズ (m ³)	1 ~ 3
タンク設計圧力 (Mpa)	0.6
LNG 温度	調整により2種類設定
供給方法	Top-filling、Bottom-filling

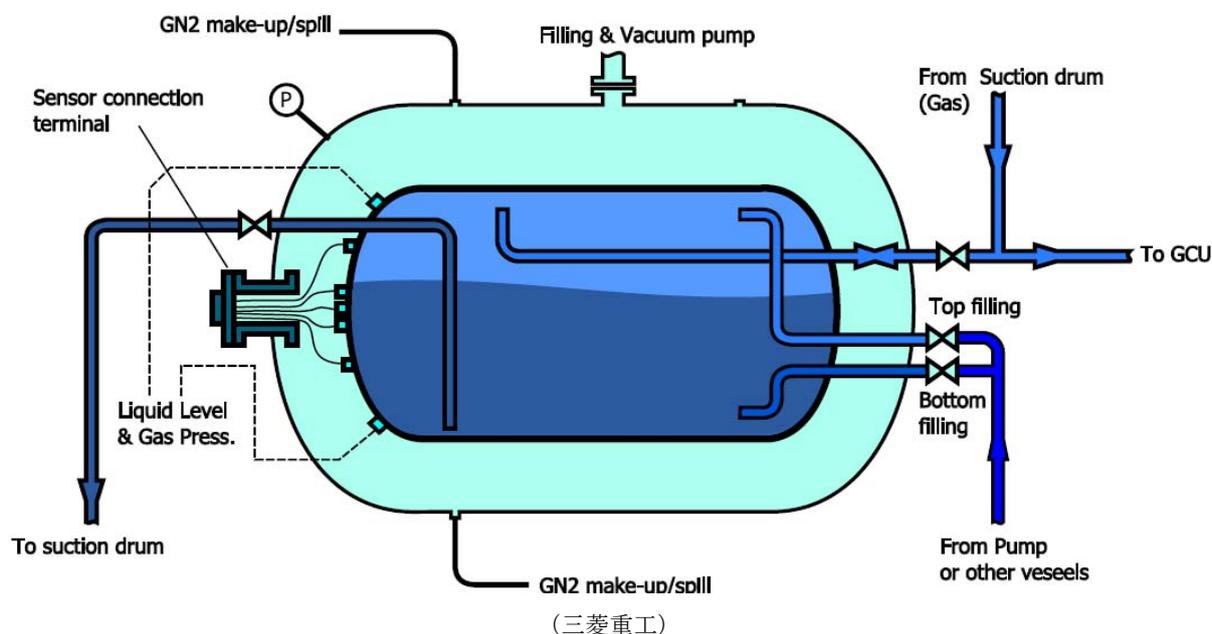


図 2.5.1 LNG 圧力変化確認試験装置 (案)

2.6 ハード・ソフト両面におけるロールオーバー対策の策定

上記検討結果を基に、ソフト面については天然ガス燃料船の運航においてロールオーバーの発生を防ぐことが可能な運用ガイドラインを策定する。また、ハード面についてはロールオーバーに繋がるタンク内 LNG の層状化を早期に検知可能な方法・設備について検討し、対策を策定する。

ここで作成した運用ガイドラインおよびハード面での要件については、IMO BLG 17 に対して、積極的に提案していくこととする。