

ニチアスの保冷技術

基幹産業事業本部 工事業部 工事技術部

1. はじめに

当社では自社製の断熱材製品を主体として用いたプラントの保温・保冷工事を事業のひとつとしている。保温・保冷工事の対象は -253°C の液体水素プラントから千数百 $^{\circ}\text{C}$ 以上となる焼却炉や工業炉に至るまで幅広い温度領域にわたるが、本稿では特に保冷工事の概要について解説する。

2. 保冷の市場

一般に断熱は対象となる流体の温度領域により、常温よりも高い温度範囲は保温、常温未満の温度範囲は保冷と区別しており、それぞれ使用される断熱材やその施工方法が異なる。

保冷工事の対象となる、冷熱を利用する産業分野はエネルギー、石油化学、食品製造および物流など多岐にわたる。その一例を図1にまとめた。例えばエネルギー産業で使用される天然ガスは輸送効率を高めるため -162°C のLNG（液化天然ガス）として輸送される。また、食品物流では生鮮食品や冷凍食品の生産、保存から消費に至るコールドチェーンにおいて冷凍・冷蔵倉庫、保冷車、冷凍・冷蔵ショーケースといった施設や機器が利用される。

これらの産業で使用される設備、機器は低温流体を扱うため、周囲への冷熱の遮断が必須である。保冷の不備は機器の結露や、運転負荷の増大など種々の障害に結びつくため、保冷技術が果たすべき役割は重要である。その意味で保

冷技術は目立たないながらも、冷熱利用産業全てを縁の下で支えており、現代社会にはなくてはならない存在といえる。

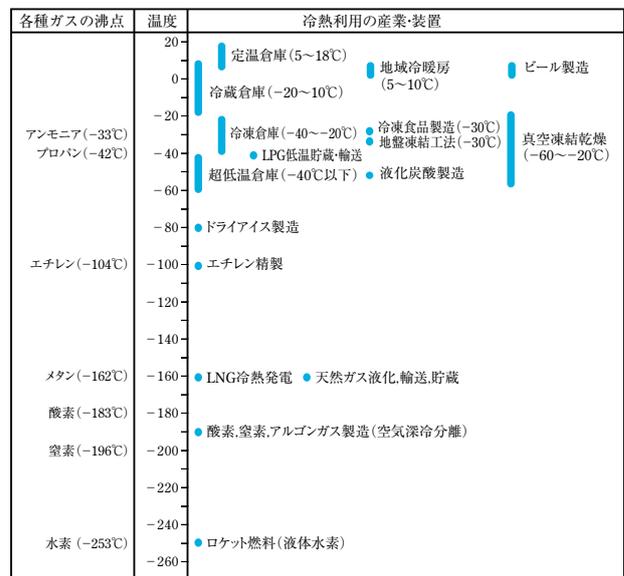


図1 冷熱利用の産業と装置の例

3. 保冷工事の概要

当社が事業とする保冷工事は主としてプラントが対象であり、エネルギー、石油化学、冷凍冷蔵倉庫、地域冷暖房施設など広範囲にわたる。実際の保冷工事では対象となる装置、機器の温度や構造などの仕様に合わせて選定すべき断熱材（保冷材）や保冷構造、施工方法が決められる。ここでは代表的なものに関してその概要を説明する。

3.1 LNGタンク

天然ガスは発電用燃料、都市ガスの原料や化学原料などとして使用されており、ほとんどが海外から輸入される。ガス田から採掘された天然ガスは隣接するプラントで液化され、 -162°C のLNGとしてLNG船により海上輸送される。輸入されたLNGは、受入基地でLNGタンクに受入、貯蔵され、ガス化プラントで気化させて利用される。LNGのこのような流れはLNGチェーンと呼ばれる(図2)。

LNG受入基地周辺には冷熱発電や、ガス液化分離設備、冷凍倉庫などLNGの冷熱を利用する各種の設備が集約されており、冷熱の効率的な利用が図られている。国内のLNGの受入基地を図3に示す。

LNG受入基地に設置されるLNGタンクは構造により地下タンクと地上タンクに大別される。

地下タンク(図4, 5)は国内では1970年に初めて建設され、その後大容量化が進み、最新のものでは容量25万kLを誇る。保冷材には厚さ約200mm程度の板状に加工した硬質ウレタンフォームの両面に表面材を設けた保冷パネルが用いられ、これを躯体内面にアンカーで固定する構造となっている(図6)。タンク本体はステンレス薄板を使用したメンブレンタンクが保冷パネルの内面側に配置される。当社は地下タンクの大半に自社製硬質ウレタンフォーム「フォームナート®」を供給、施工してきた。

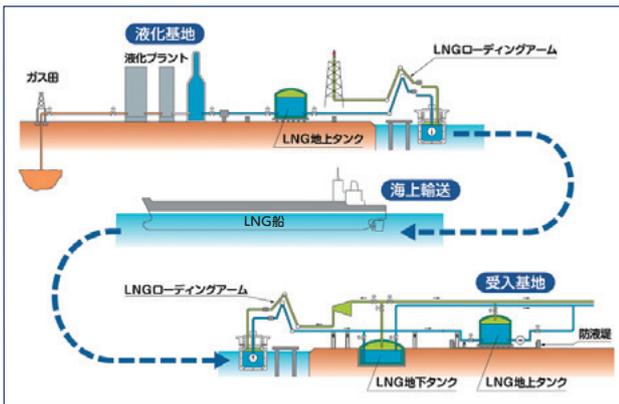


図2 LNGチェーン



図4 地下タンク

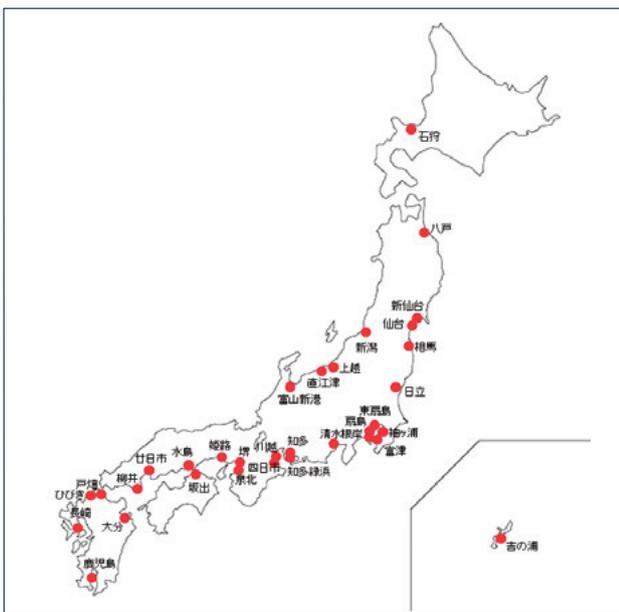


図3 国内のLNG受入基地

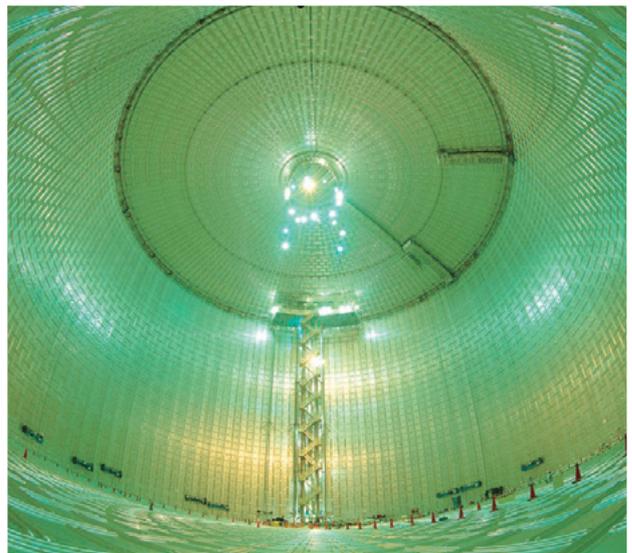


図5 地下タンクの内部

(見えているのはメンブレンと呼ばれるステンレス薄板で構成されたタンク内槽)

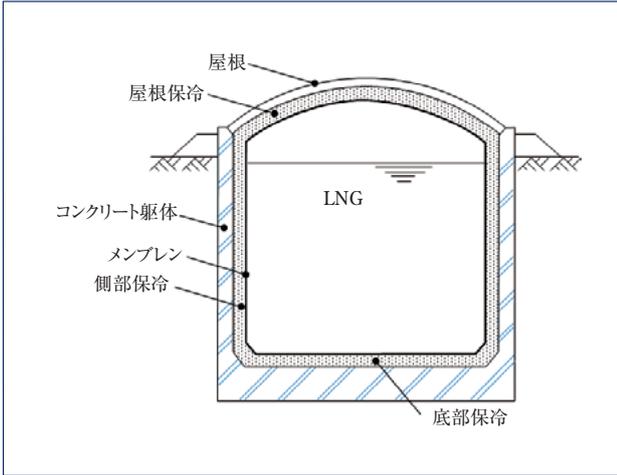


図6 地下タンクの一般構造

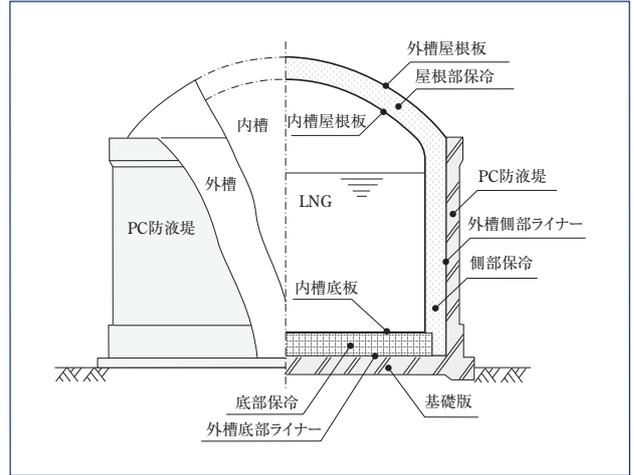


図8 PC-LNGタンクの一般構造

(近年の地上タンクは防液堤とタンク外殻が一体化したPC-LNGタンクが主流である)



図7 地上タンク

(LNG受入基地。写真奥が地上タンク。手前はLNG船からLNGを受入れるための配管)

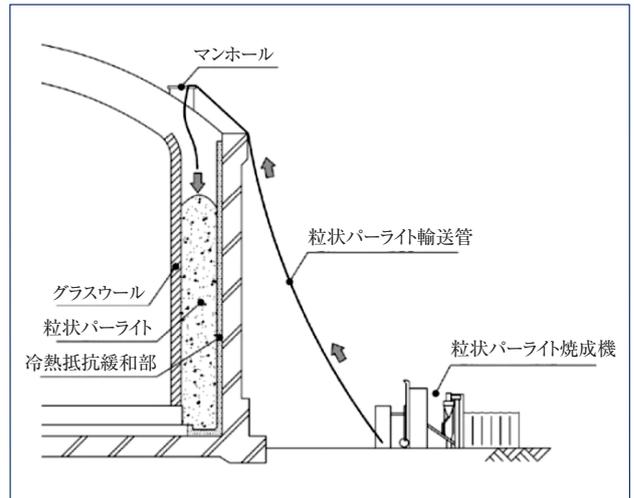


図9 PC-LNGタンクのパーライト充填工事

(タンク外に設置した焼成機でパーライトを焼成してタンク上部まで空気圧送し、タンク内殻と外殻の間に充填する)

一方、地上タンク（図7）はLNGを貯蔵する内殻と保冷材を保持する外殻の二重殻構造となっている。地上タンクは万一の流出事故に備えてタンクの周囲に防液堤が設けられるが、近年は防液堤とタンク外殻が一体化され、立地面積が少ない利点を持つPC-LNGタンクが主流である（図8）。PC-LNGタンクも地下タンクと同様に容量20万kL級と大型化し、外径80mを越える大規模な構造物である。

保冷材としては、タンクの床部にはLNGの液圧を支持するために強度が高い泡ガラス、軽量

断熱コンクリートなどが使用され、タンク側部は粒状パーライトが使用される。タンクの側部断熱工事は粒状パーライトをタンク内に空気圧送して二重殻の間の空間に充填する作業となる（図9）。

表1にこれらのLNGタンクの建設に関わる当社の保冷工事の主要な実績をまとめた。

3.2 LNG配管

LNGタンクにはLNGの受入、払出し配管や、気化器など多種の付帯設備が設けられ、それらも保冷が必要となる。これらの施工は設置時だ

表1 当社のLNGタンクの保冷工事主要実績

形式	案件	建設時期	タンク容量
地下タンク	東京ガス(株) 根岸	1970	10,000kL
	東京ガス(株) 根岸	1972	60,000kL
	東京ガス(株) 袖ヶ浦	1974	60,000kL×2基
	大阪ガス(株) 泉北	1974	45,000kL
	東京ガス(株) 袖ヶ浦	1974	60,000kL×5基
	東京ガス(株) 根岸	1976	95,000kL
	東京ガス(株) 袖ヶ浦	1976	62,000kL
	東京ガス(株) 根岸	1978	95,000kL
	東京電力(株) 袖ヶ浦	1980	60,000kL
	東京ガス(株) 根岸	1980	95,000kL
	東京電力(株) 東扇島	1981	60,000kL
	東京ガス(株) 袖ヶ浦	1981	130,000kL
	東京電力(株) 東扇島	1983	60,000kL×2基
	東京電力(株) 新袖ヶ浦	1984	90,000kL×2基
	東京電力(株) 富津	1984	90,000kL
	東京電力(株) 富津	1984	90,000kL
	東京電力(株) 東扇島	1986	60,000kL
	東京ガス(株) 袖ヶ浦	1988	140,000kL
	東京ガス(株) 根岸	1978~1990	60,000kL×2基
	東京電力(株) 富津	1989	125,000kL
	東京ガス(株) 根岸	1992~1994	60,000kL×2基
	東京ガス(株) 根岸	1993~1995	200,000kL×2基
	清水エル・エヌ・ジー(株) 袖師	1995~1996	80,000kL
	東京ガス(株) 扇島	1996	200,000kL
	仙台ガス局 新港	1996	80,000kL
	知多エル・エヌ・ジー(株) 知多	1996	160,000kL
	東京電力(株) 富津	1997	125,000kL
	清水エル・エヌ・ジー(株) 袖師	1999~2000	94,000kL
	西部ガス(株) 熊本	1999	2,000kL
	東邦ガス(株) 知多緑浜	1999~2001	200,000kL
	東京電力(株) 富津	2001	125,000kL×2基
	東京ガス(株) 扇島	2001	200,000kL
西部ガス(株) 熊本	2006	2,000kL	
東邦ガス(株) 知多緑浜	2008~2009	200,000kL	
清水エル・エヌ・ジー(株) 袖師	2008~2009	160,000kL	
東邦ガス(株) 知多緑浜	2015~2016	220,000kL	
東京電力(株) 富津	2017~	125,000kL×2基	
中部電力(株) 四日市火力発電所	1987	80,000kL×4基	
大分エル・エヌ・ジー(株) 柳井	1989	80,000kL×5基	
中国電力(株) 柳井	1989	80,000kL×6基	
東邦ガス(株) 四日市	1989	80,000kL×2基	
大阪ガス(株) 泉北第2	1993	140,000kL×2基	
マレーシアサラワク	1982	65,000kL×4基	
東京ガス(株) 袖ヶ浦	1986	45,000kL×1基	
東京電力(株) 袖ヶ浦	1988	45,000kL×2基、60,000kL×4基	
インドネシアアルーン	1992	140,000kL×4基	
大阪ガス(株) 泉北第一	1993	45,000kL×3基	
関西電力(株) 姫路	1995	80,000kL×2基	
岡山ガス(株) 築港工場	2003	7,000kL×1基	
北海道ガス(株) 函館みなと工場	2006	5,000kL×1基	
台湾中油社 Northern LNG Receiving Terminal	2009	160,000kL×3基	
沖縄電力(株) 吉の浦火力発電所	2012	140,000kL×2基	
中部電力(株) 川越火力発電所	2013	180,000kL×2基	
JX日鉱日石エネルギー(株) 釧路LNG基地	2013	10,000kL×1基	
東北電力(株) 新仙台火力発電所	2013	160,000kL×2基	
東部ガス(株) 秋田	2014~2015	14,000kL×1基	
地上タンク(二重殻タンク)			
地上タンク(PC-LNGタンク)			

けでなく、保冷材などの経年劣化のため定期的なメンテナンスが必要である。当社ではメンテナンス工事として配管内部にLNGを通じた状態での冷間保冷施工なども実施している。代表的な配管の保冷構造を図10に示した。

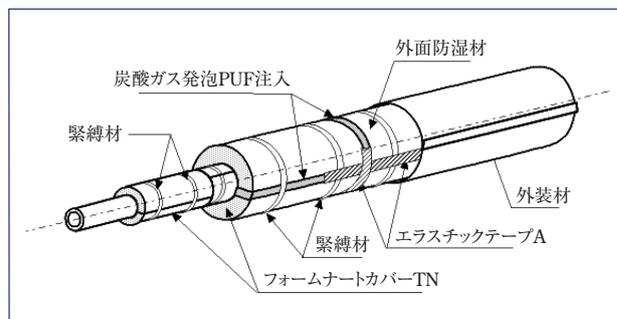


図10 代表的な配管の保冷構造

3.3 LNG船

LNGの海上輸送に使用されるLNG船は、積荷であるLNGの冷熱から船体を保護するため、高度な防熱設計^(※1)と施工技術が必要となる(図11)。



図11 今治造船株式会社殿建造のLNG船TRINITY ARROW (GTT Mark III型、貨物容量155千kL)

写真は今治造船株式会社殿ご提供(本船および同型船の防熱材にはノンフロンタイプでは世界初となる当社製R-PUFが採用された)

LNG船は搭載されるタンクの構造により、球形タンクを備えたMOSS型、メンブレンタンクをもつGTT Mark III, GTT NO96型、自立角型タンクを持つIHI-SPB型が代表的な形式である(図12)。

LNG船の防熱工事では当社のグループ会社である株式会社イノクリートがこれら4種全ての施

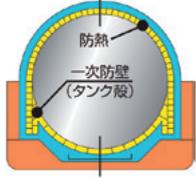
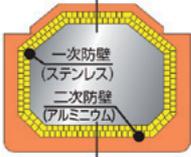
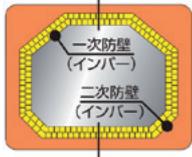
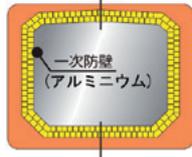
形式	MOSS	GTT Mark III	GTT NO96	IHI-SPB
タンク構造	アルミニウム独立球形タンク 	ステンレスメンブレンタンク 	インバーメンブレンタンク 	アルミニウム自立角型タンク 
防熱材	プラスチックフォーム	ガラス繊維補強硬質ウレタンフォーム	パーライト	硬質ウレタンフォーム

図12 LNG船の主な形式

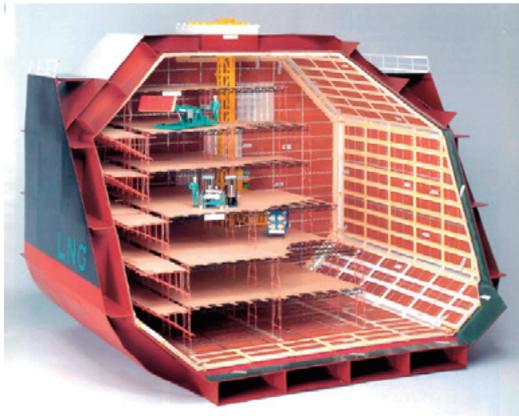


図13 GTT Mark III 型LNG船の防熱工事の様子 (模型)



図14 ノンフロンR-PUFを用いたGTT Mark III型の防熱パネル

工実績を持つ。特にGTT Mark III型については、防熱材として当社はノンフロン品では世界初となるガラス繊維補強硬質ウレタンフォーム (R-PUF) を開発し、その製造から防熱工事まで一貫して実施した実績がある (図13, 14)。

※1 LNG船の場合、積荷のLNG冷熱から船体を保護するという意味で、保冷ではなく「防熱」という用語が用いられる。

3.4 冷凍・冷蔵倉庫

食品物流の中で大きな比重を占める冷凍・冷蔵倉庫は、18℃から-40℃以下の広い温度域で運用されており、倉庫のきめ細かい温度管理のため、高い断熱施工技術が必要となる。この施工についても当社グループ会社の株式会社イノクリートが行っており、発泡ポリスチレンによるパネル工法や硬質ウレタンフォームの吹付け発泡工法などを採用している。冷凍・冷蔵倉庫の保冷工事については本号の別稿を参照されたい。

3.5 宇宙ロケット

純国産のH-II A, B両ロケットの推進薬 (燃料)

には液体水素および液体酸素が用いられている。ロケットは通常のプラント機器と異なり、推進薬の極低温と空力加熱や推進薬の燃焼熱による高温とが保冷材の内外に同居する過酷な環境であり、保冷材や保冷構造の設計にも特別な配慮が要求される。

当社ではH-Iロケット以来、継続して保冷材を提供させていただいている。現在のH-II A, Bロケットには機体を構成する推進薬タンクやその付帯配管の断熱材として自社開発したポリイソシアヌレートフォーム^(※2)「フォームナート® PIF」を供給している (図15)。液体水素は-253℃という極低温であり、保冷の信頼性を確保するために推進薬タンクには吹付け発泡、配管には接着施工を採用し、保冷材が対象物に強固に密着、固定される構造になっている。

※2 ポリイソシアヌレートフォームは硬質ウレタンフォームを変性して耐熱性を持たせた発泡プラスチックの一種である。

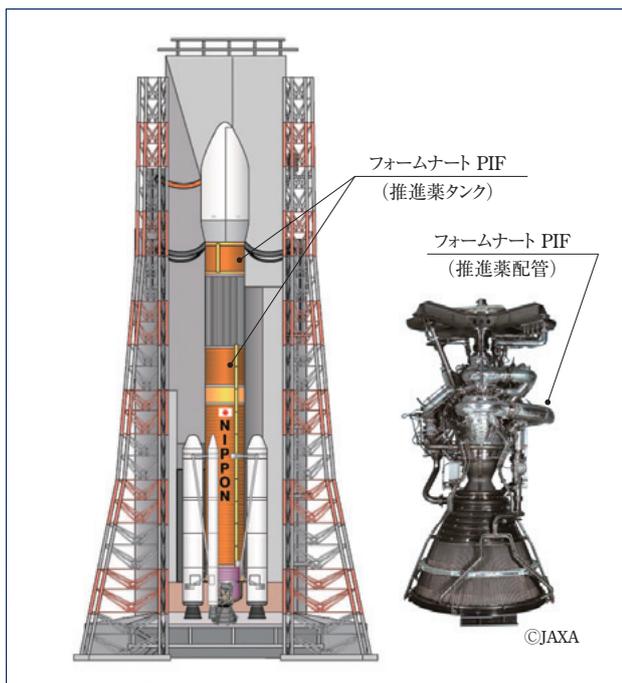


図15 ロケットの保冷

(タンクおよびエンジン周り配管の保冷に「フォームナート PIF」が用いられる)

層を施工対象物と一体的に形成可能であることが他の材料にはない最大の特長である。

当社では「フォームナート®」ブランドの保温板、保温筒や、現場施工用の注入発泡原液の製品を品揃えしている(図16～18)。これらの「フォームナート®」製品は全て発泡剤に炭酸ガスを主として使用したノンフロン製品である。



図16 硬質ウレタンフォーム保温材
「フォームナート ボード TN」, および「フォームナート カバー TN」
(2004年オゾン層保護地球温暖化防止大賞優秀賞受賞)

4. 保 冷 材

保冷の設計において必要なことは、冷熱による霜や氷の発生を防止することだけではなく、保冷材内部に外気から湿分を浸透させないことが、保冷性能を長期間にわたり維持するために重要である。このため通常、保温に使用されるロックウールやけい酸カルシウムのような繊維質、あるいは多孔質保温材は保冷には使用せず、独立気泡から構成され、透湿性が小さい発泡プラスチックが主として用いられる。

4.1 硬質ウレタンフォーム

保冷材として最も多用されているのが硬質ウレタンフォームである。保冷施工においては、冷気を漏らさず表面に霜や氷が発生しないように、保冷構造には外気に通じる隙間を設けない工夫が求められる。その点、硬質ウレタンフォームは2成分の液体原料を常温で化学反応させて生成させるため、工場における成形品製造はもとより、施工現場においても原液を直接に施工対象物にスプレーや注入して発泡させ、継目がない保冷

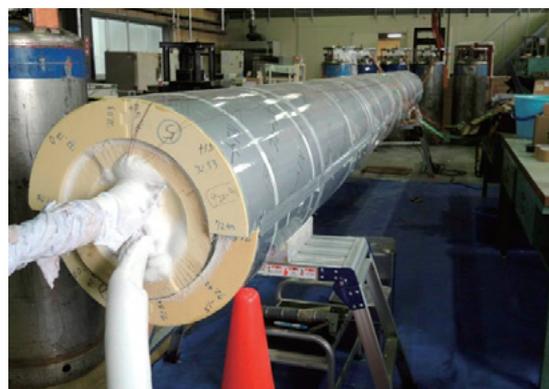


図17 「フォームナート カバー TN」のLNG温度における性能実証試験

(極低温での使用に即した試験により性能実証を行っている)



図18 「フォームナート カバー TN」による配管保冷施工

4.2 その他の保冷材

硬質ウレタンフォーム以外には発泡ポリスチレンなど独立気泡の発泡プラスチック材料のほかに、用途に応じて特色ある保冷材が使用されることがある。

(1) エアロジェル保冷材

最近では高性能保冷材として米国 Aspen Aerogels, Inc. の製品である「Cryogel® Z」(図19)が一部で使用されるようになってきた。「Cryogel® Z」は繊維系保温材のマットにシリカエアロジェルを担持させたものをアルミニウム箔と複合化した保冷材であり、空気分子の平均自由行程よりも空隙の大きさが小さい多孔質構造のシリカエアロジェルの特性を活かした高い断熱性を持ち、同時にマットの柔軟性による施工性の良さを兼ね備えた点が特長の保冷材である。



図19 「Cryogel Z」

(2) 軽量断熱コンクリート

軽量断熱コンクリートは保冷材としては特殊であるが、3.1項で紹介したLNG地上タンクの底部用断熱材のほか、万一のLNG漏洩事故におけるLNGの初期蒸発を抑制する目的でLNG地上タンク周辺に施工される。当社製品としては黒曜石系軽量骨材を使用したTOMBO™ No.5870「ライトン®」での施工実績がある。

4.3 断熱サポート

断熱サポートは断熱性能と荷重支持の2つの機能を兼ね備えた製品であり、極低温流体の配管を支持するために使用される。断熱サポートは配管の冷熱から配管架構を保護し、同時に配管や流体

の自重を支える重要な役割を担っており、低温配管には欠かすことができない。当社では、高密度の硬質ポリウレタンフォームを主構成部材とするTOMBO™ No.5010「フォームナート® サポート」、TOMBO™ No.5012「フォームナート® アンカーサポート」、TOMBO™ No.5014「フォームナート® フルサポート」を用意している(図20～22)。



図20 LNG配管に取り付けられた「フォームナート サポート」
(写真は配管に保冷材が施工される前の状況)



図21 「フォームナート フルサポート」
(写真は36°配管用の製品)



図22 「フォームナート サポート」の性能実証試験
(サポートの性能実証は配管を実使用温度まで冷却した状態で設計荷重を負荷して行っている)

5. 保冷の設計と施工

5.1 保冷の設計

保冷の設計は保冷材の選定、保冷厚さの算定、保冷構造および施工方法の選定の3つに大別される。

保冷材は「フォームナート®」製品に代表される硬質ウレタンフォーム保温材を選定することが基本となるが、施工対象の構造、立地による施工上の制約や、運転条件などを考慮して他の材料を採用あるいは併用する場合もある。

保冷厚さの算定は、詳細はJIS A9501「保温保冷工事施工標準」に譲るが、例として配管の場合は基本的な考え方として運転時の周囲温度、湿度条件を設定し、その条件において保冷材表面が結露しないように保冷厚さを決定する。JIS A9501では標準的な条件として周囲温度30℃、相対湿度85%が例示されている。また、結露しない要件としては保冷材表面温度が運転時の周囲条件における露点を越えるように設定する。具体的にはJIS A9501に従い、露点+0.3℃とすることが多い。わずか0.3℃と思われるかもしれないが、保冷材表面温度をさらに高めようとするとも図23に示すように保冷材厚さが著しく厚くなるため、経済性と実際の外気の湿度変動を考慮し、実用的条件として上述のように設定されている。

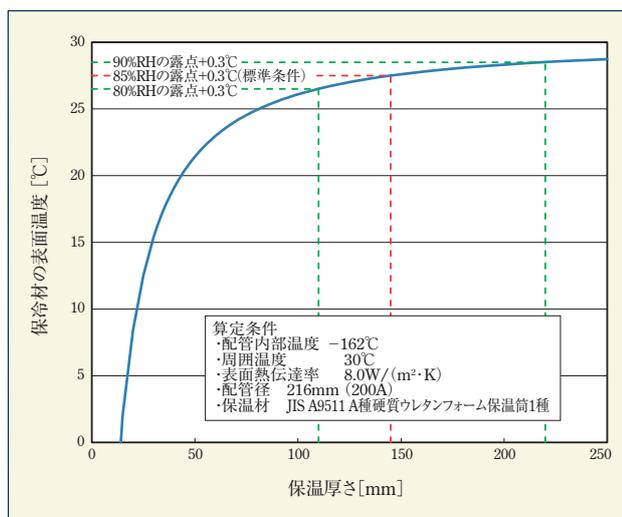


図23 LNG配管の保冷厚さと保冷材表面温度の関係

(JIS A9501記載の熱伝導率参考値を用い、配管径8B、管内部温度-162℃、周囲温度30℃とした場合。湿度85%RH(露点27.2℃)に対応する保冷厚さは145mmであるが、例えば湿度90%RH(露点28.2℃)でも結露しないようにするには保冷厚さ220mmが必要となる)

保冷構造は断熱性能以外にも、外気と施工対象の温度差に起因して保冷材内部に発生する熱応力に対する健全性、外気中の湿分の保冷材内部への侵入防止、そして施工のしやすさ、施工品質の高さ、経済性が主要な設計ポイントとなる。

5.2 施工方法

保冷の施工方法は対象物の形状、構造、運転温度、保冷材の種類によりさまざまである。硬質ウレタンフォームを例とすると、対象物の形状によって最適な施工方法が任意に選択できる。例えば、冷凍倉庫の壁面のように広い面を保冷する場合はスプレー施工やボードを貼り付ける工法が、配管の保冷など複雑な構造に対しては成形品と注入発泡の組合せなどの方法が適する。その反面、保冷工事現場において硬質ウレタンフォームの原液を用いて保冷施工するにはそれに応じた化学的知識と熟練が必要である。

6. おわりに

以上、当社の保冷工事と製品について紹介した。特にLNGを対象とする保冷工事は約50年の歴史があり、技術的には既に成熟期にある。今後は、既存のプラントの保全に関連する技術や、高齢社会における人手不足への対応として、施工の省人化が重要な課題となってくると考えられる。

既に一部で「Cryogel® Z」を用いた既存の保冷構造の改修工事や、工程が複雑で熟練を要する硬質ウレタンフォームの現場注入発泡作業を簡易化するための新技術開発などの取り組みをおこなっているところである。これらに関してはまた折を見て紹介することとしたい。

本稿に関するお問い合わせは基幹産業事業本部 工事事業部 工事技術部までお願いいたします。

*「TOMBO」はニチアス㈱の登録商標または商標です。

*「フォームナート」、「ライトン」はニチアス㈱の登録商標です。

*「Cryogel」はAspen Aerogels, Inc.の登録商標です。