特 集

低温貯槽の大型化と
溶接技術の動向

② LNG 地下式貯槽の 現状と大容量化*

中 野 正 文**, 高 木 信以智**

中野 正文

高木信以智

Recent Trend in Design and Construction Technology for the Large LNG Inground Tank*

by Masafumi Nakano**, Shinichi Takagi**

キーワード：LNG 地下式貯槽，大容量化，9% Ni 鋼，ティグ
溶接，高強度コンクリート，NATM 法

1. はじめに

東京ガスは東京電力と共同で、日本で初めての LNG (液化天然ガス) を昭和 44 年にアラスカから受入れた。その後、エネルギー源の多様化、長期安定供給、および公害防止等の観点から、日本の LNG の受入量は飛躍的に増大し、平成 4 年度現在で年間約 3900 万トンにも達している。これに伴い、LNG 貯槽が国内各地に多数建設され、稼動している。大容量の LNG 貯蔵が可能な貯槽型式としては LNG 地下式貯槽と LNG 地上貯槽の 2 型式がある。

東京ガスでは以下の理由により地下式貯槽を採用している。①地下に設置されるため耐震性が高く、また内容物が地盤沈下に貯えられるため万一の事態にも地表への液流出がない本質安全性を有している。②地表上は屋根だけで周囲と調和のとれた景観を保てる。③防液堤が不要で土地の有効利用等の面で優れている。

LNG 地下式貯槽は東京ガスが中心になり開発を行い、最初の LNG 地下式貯槽 (容量 1 万 kl) を昭和 45 年に東京ガス根岸工場に建設した。その後、土地の有効利用、建設コストの低減の観点から、LNG 貯槽の大容量化を進め、最先端技術を取り入れ改善を重ねた結果、世界最大の 20 万 kl LNG 地下式貯槽の建設を可能とした。現在、国内では 52 基が稼動し、4 基が建設中であり、国外では 3 基が稼動し、3 基が建設中である。図 1 に LNG 地下式貯槽 1 基当たりの貯蔵容量の変遷を示す。

図1 LNG 地下式貯槽の容量の変遷

本稿では、最新の技術を取り入れ現在、東京ガス (株) 根岸工場に建設中の世界最大の 20 万 kl LNG 地下式貯槽を中心にして、地下式貯槽の技術を紹介する。

2. 地下式貯槽の構造概要

日本における LNG 地下式貯槽は、鉄筋コンクリート (RC) 構造躯体、屋根、金属薄膜メンブレン、保冷材等により構成される。形状は外圧の大きい地下構造物に最適な円筒形であり、直径および深さは①基地レイアウト②地盤条件③経済性を考慮して決定される。

躯体は底版および側壁から成り、土水圧等の外力を保持する。貯槽上部を覆う屋根は、外部からの入熱を制限するため 9% Ni 鋼屋根に PUF (硬質ポリウレタンフォーム) を取付ける構造としている。さらに、立地条件を考慮しコンクリート覆工を行ない安全性を一層高めている。内面に設けられるメンブレンは LNG の液密・気密を保つ機能と超低温に対す

*原稿受付 平成 5 年 12 月 13 日

** 東京ガス (株) Tokyo Gas Co., Ltd.

図 2 20 kl LNG 地下式貯槽

表 1

項 目	仕 様
内 径 × 液 深	6 8 . 1 m × 5 5 . 1 m
メ ン ブ レ ン	ステンレス鋼 (SUS304) 2 mm 厚さ
保 冷 材	P U F 200 mm 厚さ
屋 根 構 造	
コンクリート	5 0 cm 厚さ
鋼製屋根	9 % Ni 鋼 7 . 6 mm 厚さ
保冷材	P U F 3 5 0 mm 厚さ
コングリート躯体	
側壁厚さ	1 . 6 m
底版厚さ	1 . 6 m
設 計 条 件	
液密度	0 . 4 7 kg / ℓ
液温	- 1 6 2 °C
最高圧力	2 , 4 0 0 mm H ₂ O
BOG発生量	0 . 1 % / day (運転開始後 1 ヶ月後)

る十分な熱収縮吸収機能を持つ。保冷材はメンブレンと躯体の間に設置され、LNG の蒸発量を抑制すると共にメンブレンが受ける液圧・ガス圧を躯体に伝達する。貯槽の側部及び底部には、LNG による周辺地盤の凍結を抑えるために、ヒータ設備が設けられている。20 万 kl LNG 地下式貯槽の構造概要図および仕様を図 2 および表 1 に示す。

主要な付帯設備は、液抽出管、液受入管、ボイルオフガス出管などの配管類、安全弁、液面計等であり、これら配管・ノズルはすべて屋根部を貫通して設けられ、貯液部に貫通口はない。

メンブレンに作用する液圧・ガス圧は保冷材を介して躯体で支持されていたため耐圧部材としての機能は要求されない。しかし、LNG に対する液密・気密性を有することが要求され、メンブレンの信頼性が直ちに貯槽の信頼性を左右することになる。

メンブレン材料としては、低温における機械的性質がよいこと、溶接性、加工性が優れていることから、オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304) が採用されている。

メンブレンは、約 190°C の温度変化により生ずる熱収縮を吸収する機能としてコルゲーションが配置されている。このコルゲーションの配置の基本要素は、図 3 に示すように旋回收縮型と平行収縮型の 2

図 3 メンブレン要素

種類がある。

メンブレン構造としては設計上想定される液圧、ガス圧、および温度荷重等の静的荷重とその繰返し荷重に対して安定した変形挙動と十分な強度を有することを確認しなければならない。これらの確認は、理論解析またはモデル試験により行われている。

3. 地下式貯槽の新技術と大容量化

東京ガスが建設中の容量 20 万 kl の LNG 地下貯槽は、内径 68.1 m、液深 55.1 m であり、平成 4 年 1 月から建設を開始した。本貯槽は、今までに培ってきた建設技術および運転実績を踏まえ、技術的改良と経済性の追求および土地の有効量を最大限に図った貯槽である。大容量化の課題であった①メンブレン、保冷材の大液深下での強度評価②大深度に適應した土木技術③建設工程の短縮④コスト低減等を技術開発により解決した。

また、従来に比して高い設計圧力に対応した溶接方法、環境問題を考慮した保冷材、側壁へ高強度コンクリートの採用、鋼製屋根のコンクリート覆工等の新技術も取り入れた。

以下に、この大容量地下式貯槽の技術的特徴について述べる。

3.1 高圧化と屋根の大型ブロック化

本貯槽の鋼製屋根は 9% Ni 鋼を用い屋根板、リングプレート、屋根骨より構成されている。9% Ni 鋼の溶接方法は品質、作業条件、作業効率を考慮し以下の溶接方法を採用した。屋根板の溶接には自動ティグ、ティグ+被覆アーク溶接を、厚板のリングプレートの溶接にはサブマージアーク溶接を、屋根骨の溶接には被覆アーク溶接を採用している。また、非耐圧部である屋根板と屋根骨の溶接にはガスメタルアーク溶接を適用した。

本貯槽は LNG の受入時に発生するボイルオフガス量 (BOG) を抑制するため、設計圧力を従来の約 2 倍の 2400 mm H₂O と高くし BOG を処理するためのコンプレッサーの台数を削減した。これに対応し、鋼製屋根板の溶接方法を従来の重ね溶接から突き合わせ溶接に変更した。

また、鋼製屋根を屋根板、屋根骨、屋根裏保冷の大型ブロックとして工場内作することにより、溶接作業の自動化率の向上、品質の一層の向上、現地工

図4 屋根ブロック概要図

事の工期短縮を可能とした。工場内作では、ティグ溶接、サブマージ溶接等の自動溶接を中心にブロックの製作を行った。図4に屋根ブロック概要図を示す。

3.2 回転ティグ溶接の開発

2mmのステンレスの薄板の溶接にはティグ溶接を採用している。メンブレンの施工に当っては、メンブレンに要求される液密・気密性を保証するため、溶接作業に最も注意を払っている。溶接作業の確実性および工期短縮の観点から、可能な限り自動溶接を適用すべく自動溶接機の開発を進め、この結果複雑な形状のコルゲーション部についても自動溶接が可能となった。本貯槽ではメンブレンの溶接の80%以上を自動溶接で施工している。

また、本貯槽では液深が55mと深く、内圧も高いため、メンブレンに作用する液圧も従来に比して高くなる。そのためメンブレン構造の各要素に対して数多くの理論解析またはモデル試験を行い、メンブレンが高液圧に対応可能であることを確認している。

また、本貯槽では従来のパルスティグ溶接に替わって、回転ティグ溶接(図5)を採用した。回転ティグ溶接は溶接速度が従来よりも早く、メンブレン重ね部の段差により生ずるアーク長の違いを電流の変化として読みとり自動的に位置修正を行う機能も有している。本方式により、作業効率、品質の一層の向上を可能とした。

3.3 代替フロンを使用した PUF の開発

従来は保冷材の発泡剤としてフロン11(CFC11)を採用していたが、規制対象フロンであるため、東京ガスでは早くから代替フロンを使用した PUF の

図5 回転ティグ溶接機

開発に取り組んだ。その結果、HCFC141bの代替フロンを発泡剤として使用した PUF を、地下式貯槽用として開発することができた。この PUF は圧縮強度、熱伝導率とも従来 PUF とほぼ同等の性能を有している。

また、貯槽の大型化に合わせ、保冷材の大型化について検討を行い、従来の約2倍の大きさの大型 PUF パネルの採用を加能とし、施工の効率化、工期の短縮を図った。

3.4 大深度掘削技術

20万klという大容量化には①大口径化、②大深度化、の2つの方法があるが、今回は、土地の有効利用および経済性の観点から大深度化を採用した。

本貯槽の建設では直径76m、掘削深度57mという世界でも例のない大規模大深度掘削となる。大深度化に伴う技術的課題は、地盤条件による掘削可能深さの評価である。根岸工場の地盤は地表面から約10mが軟弱なシルト層であり、それ以深は土丹層が分布している。この土丹層は、節理・亀裂がほとんど存在しない良質な軟岩である。このため、これまで実施した土丹層の力学的な挙動、先行貯槽での計測・試験結果をもとに山留工法の検討を行い、上部軟弱層部では鋼矢板とリングコンクリートを組合せた山留工法、土丹層部ではロックボルトと吹付コンクリートを用いた堅型 NATM 工法(ニュー・オーストリアン・トンネリング・メソッド)を駆使して、内部掘削を平成4年11月に終了した。

3.5 高強度コンクリートの開発

地下式貯槽の側壁は、土圧、水圧等の外荷重による円周方向軸圧縮力が卓越する部材であり、側壁厚はこの軸圧縮力が主に支配的となって決定される。このため、側壁に使用するコンクリートの高強度化を実現することにより、側壁厚をそれほど厚くすることなしに貯槽の大型化を図ることができ、より経済的な建設が可能となる。

当社は大型地下式貯槽の側壁に高強度コンクリー