

液化アルゴンタンク（角型メンブレンタンク）の建設報告

Construction Record of Liquid Argon Tank (Prismatic Membrane Tank)

降 駒 導 爵 エネルギー・プラントセクター工務・生産センター建設部 主査
神 谷 英 司 エネルギー・プラントセクタープラントプロジェクトセンターエンジニアリング部
仲 地 唯 渉 エネルギー・プラントセクタープラントプロジェクトセンタープラントプロジェクト統括部 技師長

アメリカのフェルミ国立加速器研究所 (Fermilab) から「 LBNE 35 ton prototype project 」で使用する -189°C の液化アルゴンタンクの設計、調達および建設アドバイザを受注した。この角型液化アルゴンタンクの受注は LNG (液化天然ガス) メンブレンタンクで蓄積された当社のメンブレンシステムが高く評価された結果である。ただし、タンクが角型であること、防液堤なしのタンクに要求されているメンブレンからの万一の漏えい時にコンクリート外槽を常温に保つセカンダリバリアシステムを採用したことが従来の LNG 地下メンブレンタンクに比べて新規な点である。

IHI was awarded a contract to perform EP+SV works from Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) in USA for a prismatic liquid argon storage tank (-189°C), which is to be used as prototype for the LBNE Project. Fermilab decided this contract due to IHI's membrane cryostat technologies from its EPC (Engineering, Procurement, Construction) experience in underground LNG storage tanks. The structure for the prismatic liquid argon storage tanks, however, differs to that of underground membrane LNG storage tanks due to the shape of the argon storage tank being prismatic and the difference in the secondary barrier system used to maintain ambient temperature of the outer concrete tank in case of leakage from the membrane inner tank.

1. 緒 言

Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) プロジェクトは、ニュートリノの特性と、そのほかの高エネルギー素粒子物理現象を計測するための、巨大な液化アルゴン検出器 ($14\,000\text{ m}^3$ のタンク 4 基) にメンブレンタンク技術を使用することを考えている。LBNF プロジェクトは、ここで紹介する Long-Baseline Neutrino Experiment (LBNE) プロジェクトを基にアメリカ以外の国の参加を得て国際プロジェクトへと発展している。

当社はアメリカエネルギー省との契約下で Fermi Research Alliance, LLC によって運営されるフェルミ国立加速器研究所 (Fermi National Accelerator Laboratory : Fermilab) から「 LBNE 35 ton prototype project 」で使用する角型メンブレン式液化アルゴンタンクの業務のうち設計、調達および建設アドバイザの部分を受注した。

Fermilab の LBNE プロジェクトの目的は、① LNG (Liquefied Natural Gas) 用のメンブレンタンクが液化アルゴンタンクとして適用できることの確認 ② タンクからの不純物が除去でき、液化アルゴンの純度を十分に保つシステムの確立 ③ 純度の高い液化アルゴン中にニュートリ

ノを打ち込み発生する電離電子 (Drift electrons) の飛跡検出能力に優れている TPC (Time Projection Chamber) 検出器の試作実験である。なお、要求純度は酸素当量で 200 ppt (200×10^{-12}) 以下である。

設置場所はアメリカイリノイ州バタビア (Fermilab 構内) である (第 1 図) 。



(注) ★ : タンク設置場所イリノイ州バタビア

第 1 図 タンク設置場所
Fig. 1 Construction site

2. タンクの主仕様

タンクの主仕様は以下のとおりである。

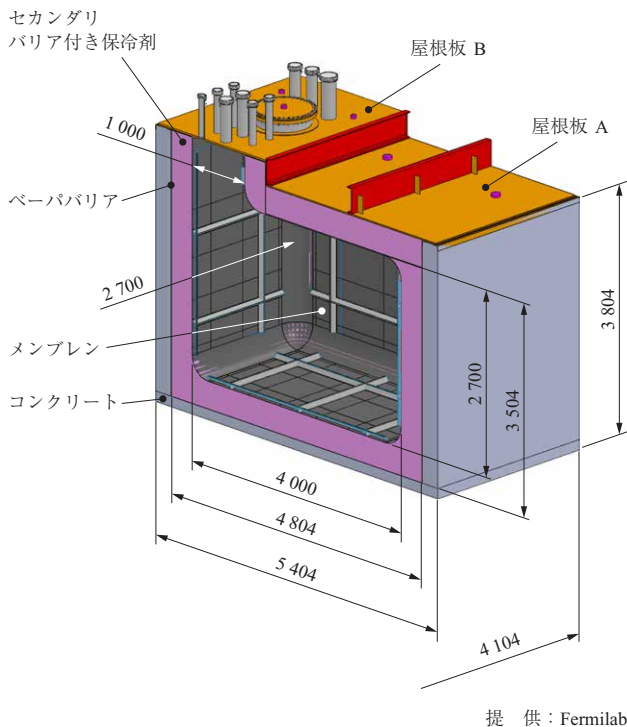
タンク形式	角型メンブレンタンク
内容物	液化アルゴン
容量	28 m ³
寸法	2.7 m (幅) × 2.7 m (高さ) × 4.0 m (長さ)
設計温度	-189℃
設計圧力	20.7 kPaG
液密度	1 393 kg/m ³
主要材料	
メンブレン	SUS304, 板厚 2 mm
保冷材	PUF (硬質ポリウレタンフォーム), 厚さ 400 mm (200 mm × 2 層)
セカンダリバリア	保冷材内の 2 層のガラスクロス樹脂 ペーパーバリア 軟鋼, 板厚 1.2 mm

タンクの概要図を第 2 図に示す。

3. 今回のタンクで新規に採用した技術

3.1 メンブレン

タンク内には液化アルゴンを貯蔵するためのシール材と



第 2 図 タンク概要図 (単位: mm)
Fig. 2 Liquid argon tank configuration (unit: mm)

してステンレス鋼 (SUS304) 製のメンブレン材を設置している。本プロジェクトでは角型タンクのため円筒形の LNG 地下タンクで経験のない直角コーナ部が存在し、その部分にもメンブレンを取り付ける必要があった。基本方針としてできる限り既製品を用いることで対応することにした。直角コーナ部に適した材料である既製品球体を 1/8 に切断し、コーナ部メンブレンを製作して直角コーナ部に採用した。

コーナ部メンブレンにはタンク内に液化アルゴンが入り、低温になった時の熱収縮中心点となるようにメンブレンアンカーをすべてのコーナ部メンブレンに設置した。第 3 図にコーナ部メンブレンを示す。

また、第 2 図に示すように屋根部は屋根板 A および屋根板 B の 2 段になっており、そこには段差があるため屋根板 A と屋根板 B のつなぎ目部分の両端には屋根部コーナメンブレン (通称: ラップコーナメンブレン) が存在することになった。直角コーナ部と同様に既製品の配管エルボの切断片とロール板を突合せ溶接で組み合わせた部材を採用した。第 4 図に屋根部コーナメンブレンを示す。

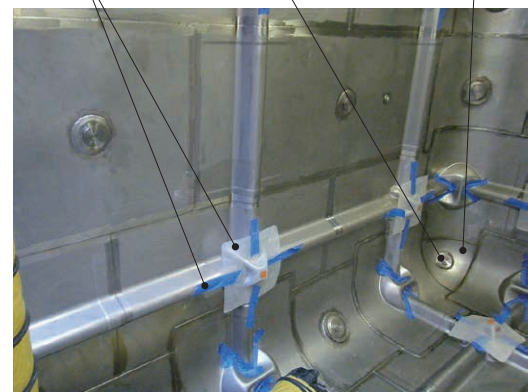
屋根部コーナメンブレン突合せ溶接継手部の全線には RT (放射線透過試験) および PT (浸透探傷試験) を実施して健全性を確認した。

3.2 保冷材 (PUF) 内のセカンダリバリアシステム

保冷材 (PUF) は厚さ 400 mm に対して工場で製作した PUF パネルを 200 mm × 2 層の構造とした。さらに層間の PUF パネル同士の隙間 (目地部) が上下の PUF パネルで貫通しないように PUF パネルの配置を工夫した。

メンブレンが万一破損した場合、外槽のコンクリートを

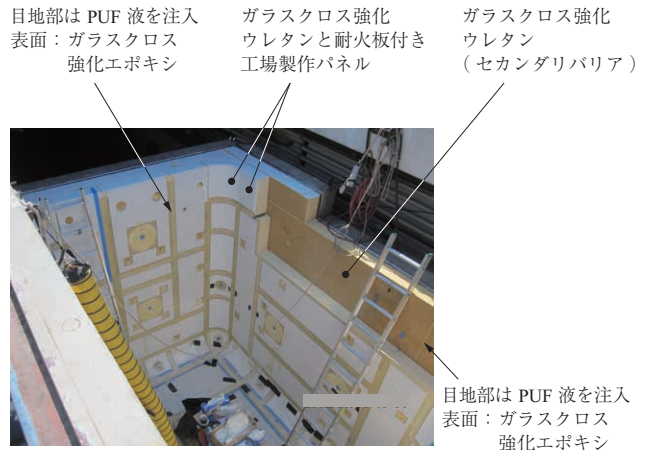
建設中の保護カバー メンブレンアンカー コーナ部メンブレン



第 3 図 コーナ部メンブレン
Fig. 3 Rectangular corner membrane



第4図 屋根部コーナメンブレン
Fig. 4 Corner membrane of roof part



第6図 保冷パネルとセカンダリバリア施工状況
Fig. 6 Insulation panels and secondary barrier work

常温に保ち強度が保持できるように保冷層の中に2層構造（表面と中間）から成るセカンダリバリアを設けている。第5図にセカンダリバリアの概念図を示す。PUFパネル間の目地部にはPUFを注入し、さらに液密構造を構成するために表面にガラスメッシュを貼りつける構造とする。セカンダリバリアの機能はPUFやメンブレンを固定するアンカー廻りにも適用して完全にシールができるようにした。施工状況を第6図に示す。セカンダリバリアが十分に機能することを確認するために、PUFパネルおよびアンカー部のPUF注入部は真空試験を実施して漏えいがないことを確認した。第7図にセカンダリバリアの真空試験状況を示す。

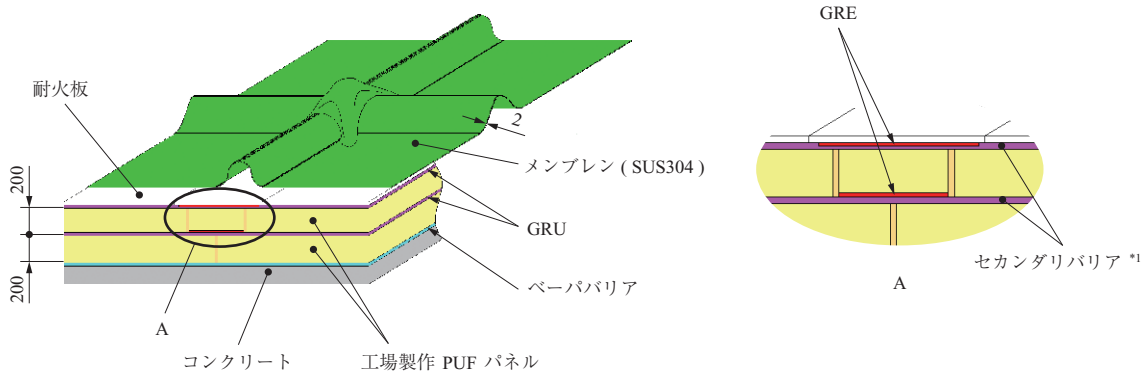
このIHIセカンダリバリアシステムは、ヨーロッパ規格EN14620で規定されている防液堤なしのプレストレストコンクリート(PC)地上LNGメンブレンタンクに使用される方式である。



第7図 セカンダリバリアの真空試験状況
Fig. 7 Vacuum box test applied to the secondary barrier system

3.3 ベーパバリア

外槽のコンクリートは気密性が確保されないため、外部からの湿分の侵入、メンブレン裏面からの外部への気体漏えいを防ぐために機械的にシールする必要があった。そのためコンクリート内面に鋼製のベーパバリア（板厚1.2mm）を全面に設置した。ベーパバリアにはメンブレ



第5図 セカンダリバリアの概念図（単位：mm）
Fig. 5 Concept of secondary barrier system (unit: mm)

（注）GRE：ガラスクロス強化エポキシ
GRU：ガラスクロス強化ウレタン
*1：GRU+GRE 表面および中間層の2層構造

ンと同様の気密性能が要求されているため、溶接継手にはヘリウムリーク試験を適用して気密性が満足できていることを確認した（第8図）。

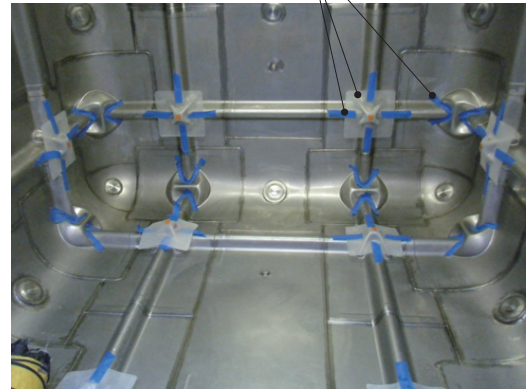
3.4 モックアップテスト

本プロジェクトは試作用のタンクのため、IHI が現在扱っているタンクとしては非常に小さい容量（28 m³）であった。タンクが小さいため作業スペースが狭く、作業手順を工夫する必要があり事前に底部コーナ、屋根部コーナはメンブレンと PUF パネルに実物を使用したモックアップ試験を日本で実施した後輸出した。現地据付けおよび溶接は Fermilab の研究員によって行われる。その際、彼らにモックアップの実施状況を示すことができたことは非常に有効であった。その結果、無事にタンクを完成することができた（第9図）。



第8図 ヘリウムリーク試験（ベーパーバリア）
Fig. 8 Helium gas leak test of vapor barrier

建設中の保護カバー



第9図 タンク内部（メンブレン溶接後）
Fig. 9 Internal view of tank after welding of membrane

4. プロジェクトスケジュール

2011年にFermilabからLNGメンブレン式地下タンクの技術が液化アルゴンタンクに適用できるかの質問から始まり、2011年8月より本液化アルゴンタンクの具体的な設計を開始した。2012年10月にタンクの機械工事が終了しFermilabへ引き渡された。第10図にプロジェクトスケジュールを示す。

5. Fermilab による試運転および運転結果

2013年12月20～21日、28時間を掛けてタンクのクールダウンが行われ-183℃（-298°F）へ達した後、-184℃（-299°F）に保持された19 m³（5 000 gal（US））の液化アルゴンがタンクへ注入された。Fermilabのプ

項	目	年 月	2011					2012											
			8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	エンジニアリング	・ベーパーバリアモックアップテスト	→																
		・屋根部コーナメンブレン	→																
		・底部コーナメンブレン試作	→																
		・底部コーナ保冷モックアップテスト	→																
		・図面および計算書																	
		・建設要領書																	
		・検査要領書																	
2	調 達	・メンブレン																	
		・保冷材																	
3	梱 包 & 輸 送																		
4	現 地 工 事 担当：Fermilab IHI：監督指導	・外槽鉄筋コンクリート																	
		・溶接士訓練																	
		・ベーパーバリア																	
		・保 冷																	
		・メンブレン																	

第10図 プロジェクトスケジュール
Fig. 10 Project schedule

— 謝 辞 —

プロジェクトチームはこの一連の作業をとおして液化アルゴンの純度確保、循環および凝縮が順調にできることを確認した。

ついでアルゴン要求純度、酸素当量で 200 ppt (200×10^{-12}) 以下、および要求エレクトロン寿命 1.5 ms 以上に対して、計測純度は酸素当量で約半分の 100 ~ 120 ppt、計測エレクトロン寿命は約 2 倍の 2.5 ~ 3.0 ms となり、“SUCCESS” の e-mail が Fermilab から IHI にもたらされた。Phase 2 のテストプログラムは、宇宙線およびニュートリノの検出装置となる TPC をタンク内へ設置して 2015 年 5 月から始まる。

6. 結 言

将来的には本プロジェクトと同じメンブレン形式の大容量 (14 000 m³) タンク 4 基が計画されている。もし実現して当社が実施することになれば、今回の経験を活かしてさらに発展させていきたい。また、当社の低温タンクの技術が世界的な研究の一部に貢献できるように、今後も技術の向上に努めていきたい。

本タンクの建設に当たり、Fermilab の Mr. David Montanari, Mr. Bruce R. Baller, Mr. Barry L. Norris, Mr. Bob M. Kubinski を含む多くの方々に、また日本国内では明星工業株式会社、日本工業検査株式会社に多大なるご協力をいただきました。ここに記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 丸山和純, 田中雅士: 液体アルゴン飛跡検出器開発研究の現状 高エネルギーニュース Vol. 30 No. 2 2011 年 8 月 pp. 73 - 82
- (2) 永野間淳二: 暗黒物質探索に向けた液体アルゴン TPC 検出器の研究・開発 早稲田大学理工学研究所 ASTE Vol. A18 2011 年
- (3) 平賀 宙, 若林雅樹, 仲地唯渉, 宮崎正治: The challenges with the world's largest 250 000 KL LNG tank LNG 第 16 回国際会議 2010 年 4 月