

(解説)

LNG液化基地向けアルミろう付プレートフィン型熱交換器 (ALEX[®])

Brazed Aluminum Plate-fin Heat Exchanger for LNG Liquefaction Plant (ALEX[®])



三橋頭一郎*1
Kenichiro MITSUHASHI

Since the growing demand for natural gas as a clean natural resource is expected to continue, the construction of new LNG liquefaction plants is being planned in various parts of the world. The Brazed Aluminum Plate-fin Heat Exchanger ALEX[®] used in the LNG liquefaction process has excellent characteristics in both its construction cost and running cost compared with those of the conventional shell & tube heat exchanger; and it has been used more than 40 years as the heat exchanger most suitable to complicated low-temperature multi-fluid processes such as those of an air separation plant, or energy and chemical plant. This paper introduces the advantages that ALEX possesses over conventional shell & tube heat exchangers. Various special techniques required especially for the heat exchanger of an LNG liquefaction plant, such as two-phase flow distribution, improvement in mercury corrosion resistance, and stress analysis, are also explained.

まえがき = 当社は国内外の低温プラントに6,000機以上のアルミろう付熱交換器ALEX[®]を納入している。近年は、クリーンな化石燃料として天然ガスの需要が伸びており、液化して輸送するためのLNGプラントの建設計画が活発化している。本稿では、LNG液化プラントでも使用されているALEXを紹介し、他の熱交換器に比べた経済的なメリットや省エネルギーへの貢献など、その優位性について説明する。

1. 構造

ALEXの基本構造を図1、伝熱コア部の構成を図2に示す。ALEXは、コアと呼ばれる伝熱部に流体の出入り口となるヘッダやノズルを溶接接合して製作される。コアはフィン、仕切板、サイドバーを積層して真空ろう付

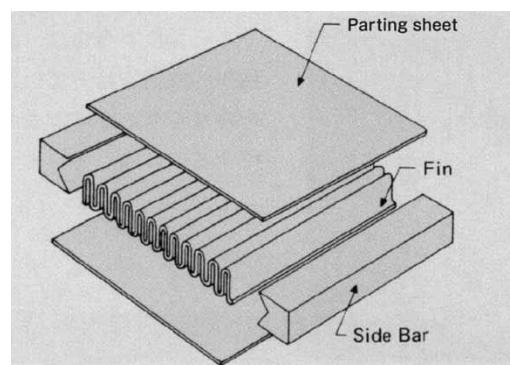


図2 ALEXコアの構成部材
Fig. 2 Parts for ALEX core block

法によって接合され、流体を流すための流路層を構成する。隣接する流路の各層にそれぞれ高温流体および低温流体を流すことにより、フィンと仕切板を通じて効率的に熱交換される仕組みである。

2. 優位性

最も一般的な熱交換器として知られる多管式熱交換器に比べ、ALEXは以下に示すような様々な優位性を持つ。

①コンパクト・軽量

高密度に成型された薄肉フィンを使用するため、1 m³あたり1,000 m²以上の伝熱面積を有し、多管式熱交換器の1/20~1/30程度のサイズで設計可能。プラントにおける機器設置面積の削減と機器設置架台の負担軽減が可能になる。

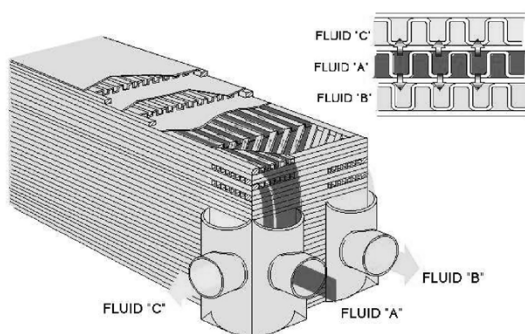


図1 ALEX基本構造図
Fig. 1 Basic construction of ALEX

脚注) ALEXは当社の登録商標である。

*1 機械事業部門 機器本部 機械工場

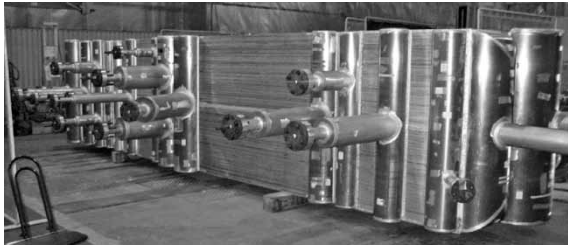


図3 多流体ALEX(14流体)の例
Fig. 3 Multi-stream ALEX having 14 streams

[多管式熱交換器では1 m³あたり40~70m²が一般的]

②多流体設計

100段を超える流路を積層できるため、1機のALEXで多流体を同時に熱交換することが可能。(図3は14流体のALEXの例)

複数の熱交換器を一つに統合することにより、プラントエリアを節約できるだけでなく、据付用架台や接続配管を大幅に減らすことができるため、機器コストに加えてプラント建設コストも低減できる。

[多管式熱交換器では2~3流体が一般的]

③省エネルギー

完全な対向流熱交換が可能であること、およびアルミニウムの高い伝熱性能により、1.5℃の非常に小さい流体間温度差のプロセスにも対応が可能。

冷凍サイクルでは、冷熱を発生させるために冷媒を減圧し再度圧縮する必要があるが、ALEXの使用により冷媒の減圧幅を小さくできるため、再昇圧幅も軽減でき、圧縮機動力のランニングコストの低減が可能になる。

[多管式熱交換器では最小温度差3~5℃が一般的]

3. 用途

上述のように、ALEXは産業用の熱交換器として極めて優れた利点を数多く持つことから、様々な産業用プラントで幅広く使用されている。その一方でいくつかの制約もあり、その代表的な点に触れておく。

まず、ピッチの細かい伝熱フィンを使用するためコンパクトである反面、流体中の固形異物が詰まりの原因になる。上流にメッシュストレーナを設けることで解決できるが、ストレーナが頻繁に詰まると連続運転に支障をきたす。このため、流体中に固形異物がない用途に限られる。また、使用できる温度は材料の制約から約200℃まで、圧力は適用法規によって異なるが90~130気圧まで使用が可能である。

これらの制約の範囲内で使用できる産業用途、とくに天然ガス関連プラントやエチレンプラント、空気分離プラントなど、-100℃以下の運転温度で複数の流体を熱交換する複雑なプロセスでは最も適した熱交換器として世界中で使用されている。

4. LNG液化基地向けALEX

天然ガスを液化してLNGを生産するプロセスは、ガスの性状や採用される液化プロセスの種類によって異なるが、おおむね以下の工程に分類される。

前処理：天然ガスからメタンガスを分離

予冷：メタンガスを液化温度手前まで予冷

液化：メタンガスを液化

減圧：液化したLNGをタンクに貯蔵するため減圧

ALEXは上記全ての工程において採用実績があり、具体的には以下の熱交換器として使用されている。

前処理：ガスプロセッシングプラント用各種熱交換器(蒸発器、凝縮器、ガス熱交換器など)

予冷：天然ガス予冷熱交換器(Pre-cooler)

液化：天然ガス液化熱交換器(Main exchanger)

減圧：減圧ガス冷熱回収熱交換器(Flash gas exchanger)

LNG液化基地用のALEXは、運転温度域の広さ(常温から-160℃)、運転プロセスの複雑さ、天然ガス中の異物といった面で特殊な配慮が必要であり、そのいくつか代表的なものをここで紹介する。

(1) 保冷箱パッケージ

ALEXは通常、熱交換器単体として出荷されてプラントの機器受け架台に設置されるが、LNG液化熱交換器のように使用温度が-160℃と低い場合は、コールドボックス(図4)と呼ばれる鉄製の箱にパッケージ化して納入され、パーライト(粉状の保冷材)を充填して運転される。外部の湿気が侵入して保冷性能を劣化させるのを防ぐ目的から、保冷箱内部は窒素が微圧で保持される構造となっている。

また、この窒素を定期的にサンプリングして分析することにより、内部の熱交換器から可燃性のガスが漏れていないかどうかを確認することも可能である。

(2) 二相流の分散構造

LNGを液化する冷凍サイクルは、消費動力を最小限にするために図5の例のように非常に小さい温度差で



図4 コールドボックスの例
Fig. 4 Example of cold box package

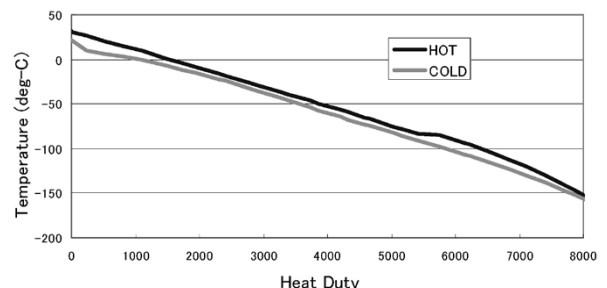


図5 冷凍サイクルの温度 vs 熱量カーブの例
Fig. 5 Temperature vs duty curve of refrigeration cycle

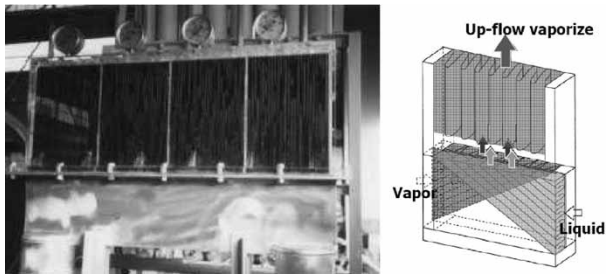


図6 ALEXの入口部二相流分散構造実験装置

Fig. 6 Experimental equipment for two phase inlet distributor of ALEX

運転される。この伝熱的に厳しい運転条件で所定の能力を発揮させるためには、流体を熱交換器内に均等に分散させ、全ての伝熱面積を有効に機能させる必要がある。とくに二相流の均等分散には特殊な技術が必要であり、当社は図6のような独自の実験によって様々なプロセスに適した分散装置を開発している。

(3) 水銀対策

アルミニウム合金は水銀によって短期間で腐食する性質があるため、プラント上流の水銀除去ユニットによって天然ガス中に含まれる水銀はほぼ完全に除去される。しかし熱交換器の腐食のリスクは依然として残るため、補助的な役割ではあるが、耐水銀腐食性の改善が求められる。

当社は、独自の実験データをベースとした耐食性向上技術を開発し、必要に応じて提供している。開発にあたってはまず、コアに使用される合金3003とヘッダ・ノズルに使用される合金5083の耐水銀腐食性を確認した。その結果、5083は3003に比較して腐食速度が3倍程度であることがわかった。そこで、5083の耐食性能を3003と同等程度まで向上させることとした。具体的には、コアへ溶接する前のヘッダ・ノズルを炉内に入れ、1~10時間、250~350℃、大気雰囲気の中で熱処理を行う。これによって良好な酸化膜を形成させ、ボトルネックとなるヘッダ・ノズルの耐食性を向上させることができる。コアへの溶接時には、図7のように熱影響部を3003の裏当金で保護することによって耐食性を保持させる。ユーザによる水銀除去装置の設置、メンテナンス時の窒素封入(乾燥維持)と併用することでより水銀腐食のリスクを低減できる。

(4) コアの熱応力解析技術

ALEXのコアは、図1、2に示すように薄肉のフィンが100段以上積層された構造であり、応力解析を行うためのモデル化には特殊な技術が必要になる。当社はこのフィンのモデル化にあたって、実験によって裏付けられた適切な等価モデルを用い、複雑なコア部の応力を解析する技術を開発した^{1)~6)}。図8はコア部の変形を解析によって求めた一例を示す。また、図9は、解析技術の妥当性を確認するために実施した様々な実験の一例(急冷実験)を示す。こうした解析技術を活用することにより、運転中の破損原因の調査や想定される異常運転に対

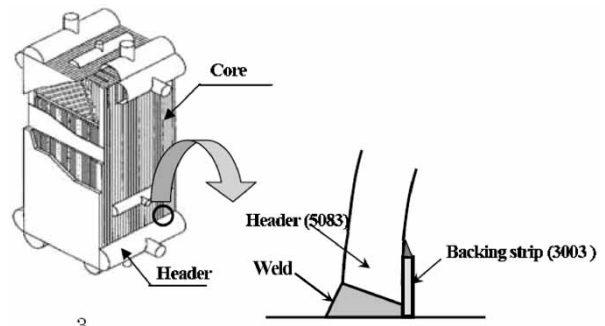


図7 ALEXの耐水銀腐食性向上技術

Fig. 7 Improvement technique of mercury corrosion resistance for ALEX

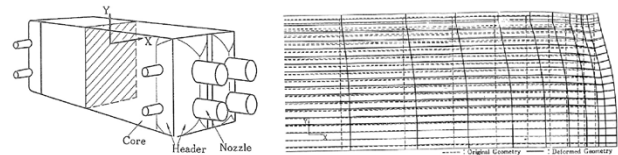


図8 ALEXの伝熱コア部の応力解析事例

Fig. 8 Example of stress analysis for ALEX core

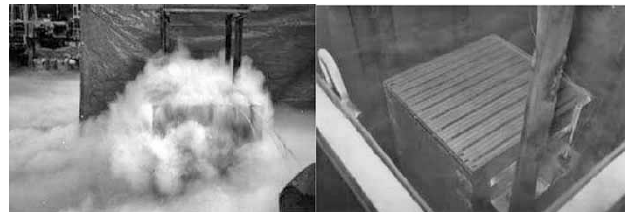


図9 ALEXの応力解析手法確立のための熱応力発生実験

Fig. 9 Thermal stress testing to establish stress analysis of ALEX

する応力評価など、様々な顧客ニーズ、アフタサービスに対応している。

むすび = 本稿で紹介したとおり、LNG液化基地向けALEXには様々な特殊な技術が必要であり、これに応えるために様々な技術開発を行ってきた。LNG液化熱交換器としての需要は、シェールガスや海洋ガス田開発という新たな展開によって今後も増加する傾向にある。当社は、これらの市場で求められる新たな技術課題を解消し、ALEXをさらに拡販することによって産業分野における省エネルギーに貢献していく。

参考文献

- 1) 神田邦昭ほか. アルミニウム熱交換器ALEXの疲労強度. R&D神戸製鋼技報. 1979, Vol.29, No.1, p.75-80.
- 2) 野一色公二ほか. 天然ガス処理プラント用大型高圧ALEXの開発. R&D神戸製鋼技報. 2003, Vol.53, No.2, p.28-31.
- 3) T. Mizoguchi et al. Pro. ASME Pressure Vessel&Piping Conference. 1982, 82-PVP-29.
- 4) T. Nakagawa et al. Pro. ASME Pressure Vessel&Piping Conference. 1984, 84-PVP-7.
- 5) S. Terada et al. Pro. ASME Pressure Vessel&Piping Conference. 2001, 01-PVP-418.
- 6) T. Nakaoka et al. International Conference on Pressure Vessel technology. Vol.1 ASME 1996.