

(解説)

天然ガス処理プラント用高压大型ALEX[®]の開発

Development of High-pressure Large ALEX[®] for Gas Processing Plants



野一色公二*(工博)
Dr. Koji Noishiki



寺田 進*
Susumu Terada



後藤正宏*
Masahiro Goto

Brazed aluminum plate-fin heat exchangers (ALEX) have been widely used in gas processing plants, LNG plants and other cryogenic plants due to their large heat exchange capacity per unit volume, as well as their light weight. Recently, their use in high-pressure applications has increased as higher efficiencies and compactness become increasingly important. Analytic and experimental approaches were developed by Kobe Steel to produce even higher efficiency, high pressure ALEX. The results of these efforts yielded a large, high pressure ALEX capable of withstanding pressures up to 12.7 MPa. A few of these are currently being used commercially at some plants. This paper introduces their design.

まえばき = 現在、石油の代替エネルギーならびにクリーンエネルギーとして注目されている天然ガス分野において、ガス田からの原料天然ガス中からメタン、エタンなどを分離するガスプロセッシングプラント及び天然ガス液化(LNG)プラントが数多く建設され、今後も多くの建設計画がある。この分野のプラントでは、原料天然ガスを前処理にて不純物を除き、腐食性の無いガスにすることで、伝熱性能に優れたアルミニウム製の熱交換器が広く使用されている。その中でも主要な機器として注目されているのがアルミろう付プレートフィン熱交換器(ALEX)である。ALEXは、1MPa以下の低圧で使用される深冷空気分離装置向けに開発されたが、低温に使用でき多流体を一度に熱交換できるため、天然ガス関連やエチレンの深冷分離用などの化学プラントでも広く使用されている。

最近の天然ガス処理プラントでは、プラントの高効率化及びコストメリットを得るため、設計圧力が10MPa程度と高く更に処理量が増加する傾向にあるため、主要機器であるALEXに対してもこれまで以上に高压大型化の要求があるとともに、高い信頼性が求められている。この高压大型化の傾向は、天然ガス関連のみならず従来の空気分離装置においても同様に見られる。

本解説では、ALEXの特徴とともに当社の解析技術及び実機サイズによる確認試験を中心に高压大型ALEXの開発経緯を報告する。

1. ALEXの構造及び特徴

ALEXは、図1に示すように、熱交換を行うろう付されたコア本体及び流体をコア内に導くためのヘッダ・ノズルから成る。コア本体は、図2に示すように仕切板、フィン及びサイドバーで構成された層を多数積層し真空炉でろう付することによって形成される。コア本体に用

いられるフィンは、おもに図3のストレートフィン、パ

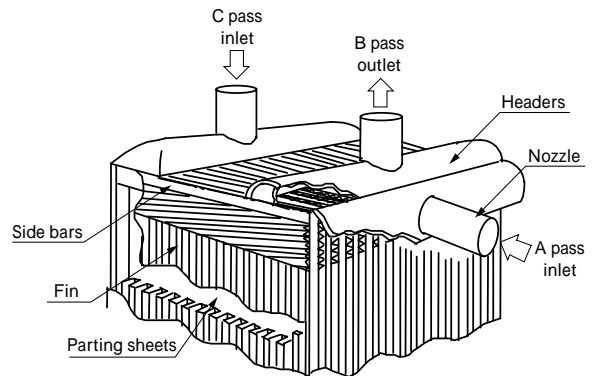


図1 プレートフィン熱交換器の外観
Fig. 1 General view of plate-fin heat exchanger

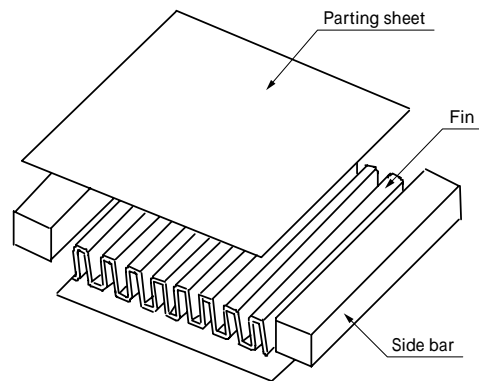


図2 コア単層の構成
Fig. 2 Unit layer assembly of core

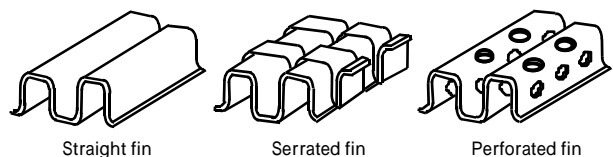


図3 主要フィンの種類
Fig. 3 Main types of fin

*都市環境・エンジニアリングカンパニー 高砂機器工場

ーフォレイトフィン、セレートフィンの3種があり、伝熱性能及び流路に許される圧力損失から判断し最適なフィンタイプを採用している。ALEXはこの構造の特徴を生かし、層内のフィンの置き方や組合わせを工夫することで複数の流体を同時に熱交換することができ、1基の熱交換器で13流体を同時に熱交換することもある。

また、薄いアルミの板であるフィン及び仕切板を通して熱交換を行うため、流体間の温度差が1.5程度あれば熱交換可能であり、熱効率の良いプロセス条件の選定が可能である。

用途によるが単位体積当りの伝熱面積が $1000\text{m}^2/\text{m}^3$ 以上と大きいため、従来の多管式熱交換器に比べ機器の大きさをコンパクト化できることが特徴である。

ろう付できるコア本体のサイズは、真空炉のサイズにより決まるが、複数のコア本体を溶接で接合しヘッドとノズルを共通化することで一つの熱交換器とするか、各コア本体のヘッド部に溶接したノズルを配管で結合することで任意の流量を処理できる。

2. 高圧大型 ALEX の開発背景

天然ガスからエタン、メタンを分離回収するガスプロセスングプラントでは、原料天然ガスの圧力が高く運転圧力で6MPaを超え、機器に求められる設計圧力は、10MPa以上になることがある。最近のガスプロセスングプラントの傾向としては、運転圧力を高くしプラント全体の効率を上げるとともに1プラント当りでの処理量を増加することで、初期投資の低減を図っている。このような傾向は、単体機器についても同様で、機器をコンパクト化するとともに配管を減らすなどして機器構成を簡素化し、コストダウンを達成することが求められている。

また、プラント内において、従来多管式熱交換器が用いられていた機器においても、腐食性流体で無い場合コンパクトな設計が可能で ALEX へ変更される場合が増加しており、天然ガス関連のプラントでは、ALEX の重要性は増している。この機種の変換においてもコスト評価が重要であり、ALEX を高圧大型化することで、コストダウンを達成することが重要である。

3. 高圧用 ALEX の開発

ALEX 開発当初の1965年から1985年ごろまでは、溶融塩中でのろう付が行われていたため均一なろう付は難しく、大型で耐圧性能が10MPaを超える機器の製作は困難であった。しかし、1985年からろう付方法が真空炉内でのろう付に変更されることで、均一なろう付が可能となり、高圧対応の機器の製作が可能となってきている。

ただし、ALEX においてプロセス上許される圧力損失は限られているため、コア本体の設計とともに圧力損失が大きいヘッド及びノズルの製作範囲も、ALEX の高圧大型化には重要な要素となる。現状、流体をコア本体へ分配するヘッドの成形性及び溶接厚さの制限から、ALEX 1基で取扱う流体の量が制限されるため、処理量の多い大きなプラントでは、ALEX を複数コア採用せざる

を得ず、ALEX 間の配管が多くなりプラントの設置面積の増加及びコストが高くなる傾向にあった。

このような問題点を克服するために、一般の圧力容器と同様に ALEX の高圧・大型化に求められる技術として、以下のものが上げられる。

- 1) コア本体のろう付の信頼性向上
 - 2) 高強度・高性能フィンの開発
 - 3) 厚肉溶接技術の確立
 - 4) 実機による耐圧性能確認
- それぞれの項目に関して以下に報告する。

3.1 ろう付の信頼性向上

ALEX の主要技術であるろう付に対しては、1985年に溶融塩ろう付から真空炉内ろう付に変更して以来、20年近い実績ならびにこれまで培ってきた技術を採用することで、近年では非常に高いろう付技術が確立されている。さらに、ろう付で最も重要なろう付温度管理については、大型高圧用コアにおいて温度測定点を増やし炉内の温度測定の精度を向上させることで、さらに安定したろう付が可能となりろう付の信頼性が向上した。試験体を用いた破壊試験を行っても破壊試験圧力にバラツキが少ないことから、安定したろう付が得られていることが確認できている。

3.2 高強度・高性能フィンの開発

ALEX の強度を決定するフィン部は、強度部材であると同様に熱交換器の大きさに関係する圧力損失、伝熱性能を左右する重要な因子となる。当社が開発した解析技術を利用し、伝熱性能及び圧力損失の傾向を机上で得ることが可能である。この技術によって、圧力損失が少なくかつ伝熱性能が向上する高強度フィンの設計が可能となった。セレートフィンの伝熱計算結果の一例を図4に示す。

実機的设计に用いる伝熱及び圧力損失のデータは、解析を用い選択したフィンを用いた小型試験体を製作し、空気・蒸気系において伝熱性能及び圧力損失を計測し、そのデータを無次元化することで得ている。

また、破壊強度に関しては、ASME (THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS) のボイラ及び圧力容器基準において、小型試験体の破壊試験の破壊試験圧力に安全率4を考慮した値を最高使用圧力とすることができる。

このように設計した高強度・高性能フィンにおいて、当社は現在、ASME 基準対応にて13MPa程度までのフィ



図4 フィン部の伝熱解析の例
Fig. 4 Example of heat transfer analysis for fin

ンが製作可能である。

上記の性能確認試験及び破壊試験から、高圧対応で高性能フィンの開発が可能となり ALEX のコンパクト化の要素技術として利用している。

3.3 厚肉溶接技術の確立

ALEX の高圧・大型化を可能にするには、高強度のフィンのみならず各部材の厚肉化が必要である。特に流体を分配するヘッダは、ALEX 1 基当りの処理量を増すためにヘッダ内径を大きくし、肉厚を厚くすることが必要となる。

これまでの厚肉ヘッダについては、オレンジピール型と呼ばれる溶接により桶型のヘッダを製作していたが、10MPa の高圧を想定した場合、これまでの実績以上の厚肉化を行うと溶接量がさらに増加し、溶接作業性及び溶接時間のみならず品質面から高圧用途での信頼性にも影響する可能性があった。そこで、ヘッダ内に溶接部が無い一体型ヘッダの製作においてプレス方法を改善することで、これまで 30mm 程度の肉厚しか対応できなかったプレス成型は、写真 1 のようにヘッダ内径が大きくかつ 60mm の厚肉プレスヘッダの製作が可能となった。

しかし、ヘッダは、フィンとサイドバーと仕切板で複雑に構成されたコア本体に溶接で取付けられるため、ヘッダの厚肉化に伴いコア本体への溶接による熱歪みが問題となる。この熱歪みがある量を超えると、ろう付部や仕切板の破断などが生じ大きな問題となる可能性がある。

よって、これまでに確立されてきた解析技術¹⁾²⁾を用いヘッダとコア本体部に発生する歪みを予測し、コア本体のろう付部が割れなどの欠陥が生じない条件を確認した。図 5 にコア本体とろう付部変形量の予測結果の一例を示す。この解析では、ヘッダとコア本体を模擬した溶接部の試験体を作成し、溶接部で発生した歪み量の実測値を反映させることで、より精度の高いものとしている。

この高圧用厚肉プレスヘッダの採用は、コスト面、作業時間の短縮のみならず溶接構造を減らすことで、より信頼性の高い機器が製作可能となった。またこの解析技術で得られたヘッダ溶接によるコア本体への熱歪みの影響は、高圧用途のみならず低圧用途においても使える技術であり、ALEX の信頼性を高める要素技術の一つとなる。

3.4 実機サイズによる確認

高強度フィン、厚肉プレスヘッダ及び溶接技術は、解析及び実験により確認されたが、実機において問題無いか実機サイズの試験体を用い確認試験を行った。まず、圧力変動幅 10MPa の高圧環境下による疲労試験を行い、ろう付部及び溶接部の強度確認を行ったのち、設計圧力 12.7MPa 大型試験体を製作し耐圧試験を行い、高圧大型 ALEX の健全性を確認した。

3.4.1 高圧疲労試験³⁾

高圧環境下でのろう付部及び溶接部健全性を確認するために、実機サイズの試験体(幅 1000mm, 高さ 1000mm, 長さ 1500mm)に対して圧力変動幅 10MPa の高圧環境下で疲労試験を行った。



写真 1 高圧用プレスヘッダの外観
Photo 1 Outside view of press-type header for high pressure use

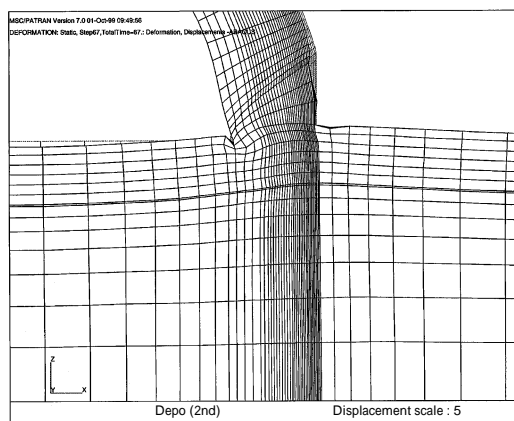


図 5 ヘッダとコア本体の変形の解析結果
Fig. 5 Result of deformation analysis between header and core body

まず、小型試験体を用いた試験では、大型試験体に採用するフィンを 1 段用いた小型試験体 500mm 幅 × 500mm 長さにおいて各種条件で疲労試験を行い、各フィンの内圧(フィンに発生する応力)疲労試験におけるフィンろう付部のピーク応力範囲と破壊回数との関係である S-N 曲線を得た。各フィンタイプの発生応力は、図 6 のようにフィン部をモデル化することで、有限要素法解析を用い予測した。このデータを大型試験体の疲労強度推定に利用した。

次に大型試験体において、圧力変動幅 10MPa の内圧疲労試験を行う前に、疲労試験データをもとに写真 2 に示す大型試験体の疲労強度解析を行い、発生応力の高い箇所を解析で予測すると、図 7 に示すようにヘッダ近傍部

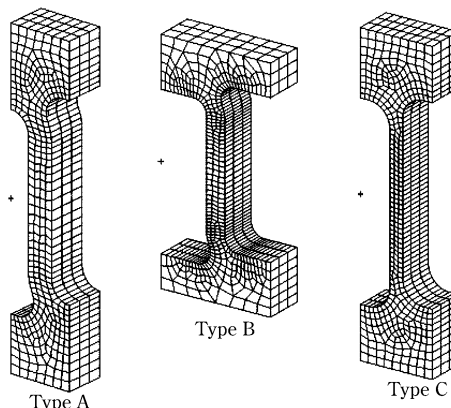


図 6 フィンと仕切り板境界部のメッシュ分割例
Fig. 6 Typical mesh division for fin-parting sheet junction

のフィン部に高い発生応力が現れると予測された。

実際の試験においては、予想繰返し回数 10 万回を越えても破壊が生じなかったため、試験を終了し気密試験にて外部に漏れが無いことを確認した。次に、コア本体を切断し内部の目視検査を行った。発生応力が高いと予測されたヘッダ近傍を含め溶接部及びろう付部は、き裂や特別な変形などは認められず高圧環境下でも問題無く使用できることが認められた。

本解析では、小型試験体で得られた疲労試験データを大型試験体の解析に利用することで、精度の高い解析が行えたと考える。本試験において、小型試験体による疲労試験のデータが得られたことで、今後の任意の形状の ALEX についても疲労解析が可能となった。

また、大型試験体において 10MPa の変動圧力範囲 (10MPa - 0MPa) で 10 万回の繰返し試験後、ろう付部及び溶接部が健全であったことから、高圧用途において ALEX の信頼性が得られたと判断した。

3.4.2 高圧耐圧試験

上記開発で得られた基礎技術を合わせ、設計圧力 12.7MPa の写真 3 に示す熱交換器 (幅 1200mm, 高さ 1200mm, 長さ 2100mm) を製作し、設計圧力の 1.5 倍の 19MPa の圧力にて耐圧試験を行い、各部位の変形も無く 12.7MPa の耐圧性能を有することを確認した。このように、実機サイズの大型高圧の ALEX は 12.7MPa の耐圧性能を有する。

むすび = ALEX は、最大限のコストメリットを達成するため大型、高圧化の傾向にあり、クリーンエネルギーである天然ガス向け装置を中心に今後も採用が期待される。

本報告で述べた開発の結果、ALEX の高圧大型が可能となり、実際に設計圧力 9.6MPa でコアサイズ幅 1250mm, 高さ 1200mm の高圧大型 ALEX 8 基が 2000 年に納入され、問題無く運転されている。

ALEX は、製造開始後 30 年以上の機器であり、多管式熱交換器と同様に熱交換器として認知されてきたが、実際に採用される用途は限られている。最近の傾向として、従来タイプの多管式熱交換器の代替品として採用されつつある。今後は、廃熱回収などエネルギーの有効利用として、ALEX のようなコンパクト熱交換器が目目されているが、当社としても ALEX の用途拡大のために開発活動を継続していきたいと考える。

参考文献

- 1) T. Mizoguchi et al. : Pro. ASME Pressure Vessel & Piping Conference, 82-PVP-29 (1982).
- 2) T. Nakagawa et al. : Pro. ASME Pressure Vessel & Piping Conference, 84-PVP-7 (1984).
- 3) S. Terada et al. : Pro. ASME Pressure Vessel & Piping Conference, 01-PVP-418 (2001).



写真 2 疲労試験用大型コアの外観
Photo 2 Outside view of testing apparatus of large size core for fatigue test

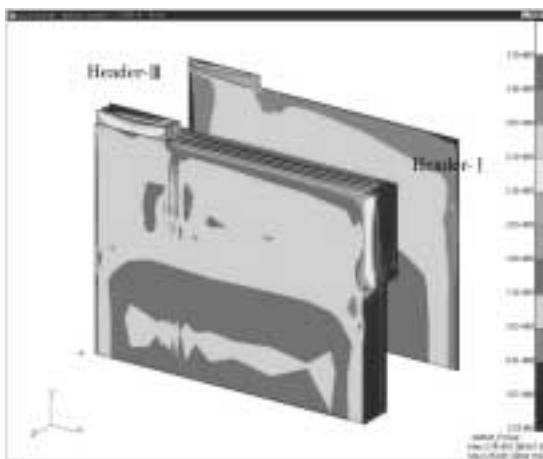


図 7 ヘッダ近傍の分配部に発生した高い応力
Fig. 7 Occurrence of higher stress at distributor near the header



写真 3 高圧耐圧試験用大型コアの外観
Photo 3 Outside view of testing apparatus of large size core for high pressure test