

C315 チタン製熱交換器と SUS 製高耐圧プレート熱交換器の開発

Development of Ti Plate Heat Exchangers and High Pressure Resistant Stainless Steel Plate Heat Exchangers

○松 康太郎 (東京ブレイズ㈱), 石井 葉一 (東京ブレイズ㈱)

○Kotaro MATSU and Yoichi ISHII

Tokyo Braze Co., Ltd., Setagaya-ku, Tokyo, 157-0062, Japan

There are many types of heat exchangers that are widely used in variety fields. In particular, plate type brazed heat exchangers represent the most compact, rugged and co effective means of transferring heat in many refrigerant applications.

On the other hand, joining is understood to be one of the most important processes involved in making products. Many joining processes have been established and employed for manufacturing any types of heat exchangers. Of these processes, brazing in particular is useful for the joining of complex or precision parts.

In this study, Ti plate heat exchangers were developed by brazing with high corrosion resistance brazing filler metals. Also high pressure resistant stainless steel plate heat exchangers were developed with inner fin design.

Keywords: Ti heat exchangers, SUS heat exchangers, Plate heat exchangers, High-pressure resistant heat exchangers

1. 緒言

熱交換器はあらゆる産業分野で使用されており、その種類や形状は多岐にわたっている。従ってその材質やサイズも多岐にわたるため、それらの製造方法も当然多様な方法が用いられている。

一方、ものづくりを行う上で、材料を製品として利用するためには加工技術が必要不可欠であり、それが困難な材料では使用分野が制限されてしまう。数ある加工技術の中でも接合は重要な位置を占めており、あるものを形にするには必ずといっていいほど接合部分がある。

熱交換器も例外ではなく必ず接合部分があり、ほとんどの熱交換器は何らかの金属により構成されているため、その部分には様々な金属の接合方法が用いられている。

金属の接合方法で最も代表的なものとして溶接をあげることが出来る。その溶接方法の一種である“ろう付”は優れた特長を持っているため、多くの製品の接合に用いられている。中でもろう付タイプのプレート熱交換器は軽量かつコンパクト、また高性能であるなどの理由から幅広く使用され、自動車のオイルクーラーやラヂエーター等はその代表的なものである。

本稿では最近開発されたろう付タイプのプレート熱交換器でチタン製プレート熱交換器とステンレス製の高耐圧プレート熱交換器を紹介する。

2. ろう付による熱交換器の製造

ろう付の長所として、□母材を熔融することなく薄板や精密部品の接合が可能、□ろうの浸透により複雑形状部品や多数箇所接合部品の同時接合が可能、□ろう及びろう付法の選択により異種金属同士や金属と非金属との接合が可能、□最適接合条件（継手形状、ろう付方法等）において母材同等かそれ以上の接合強度を得ることが可能、□比較的作業が簡単で仕上がりも美麗であり自動化や大量生産向きであることなどが挙げられる。従って、

ろう付による熱交換器の製造は、他の方法と比較して多くのメリットがあり、実際に用いられているものも多い。中でも、小型・複雑形状のプレート熱交換器などの製造には、従来から用いられている。

3. インナーフィンタイププレート熱交換器の構造

プレート熱交換器は大別するとガスケットタイプとろう付タイプがある。ろう付タイプのプレート型熱交換器には、プレート自体にフィン形状を付けて張り合わせるプレートフィンタイプと、プレート間にインナーフィンを挟み込むインナーフィンタイプとがある。今回の開発で採用したプレート熱交換器には、接合面積が多く製品の強度を確保でき、また流水抵抗の少ないインナーフィンタイプを採用した。インナーフィンには特別形状のスタックド・Vフィンを採用し、熱交換率の向上を図った。Fig.1 に内部構造と流体通路の模式図を示した。

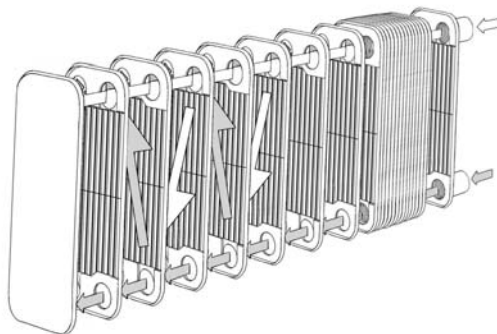


Fig.1 Flow configuration of inner-fin type brazed plate heat exchanger.

4. 開発したプレート熱交換器

4.1 チタン製プレート熱交換器

様々な環境下において熱交換器が使用されている中、腐食環境下では耐食性の良い材料が必然的に用いられてきた。ステンレス鋼は最もポピュラーな耐食材料であるが、そのステンレス鋼でさえ腐食されてしまうような環境では、それ以外の材料が用いられている。そこで最も耐食性に優れた構造材料としてチタンをあげることが出来る。

チタン製の熱交換器は世の中に存在するが、そのほとんどは溶接構造で出来ているため形状に制限がある。従って、軽量・コンパクトで高性能なプレートタイプの熱交換は、溶接構造では製造出来ないのがガスケットタイプのみが存在している。チタンのろう付タイプ熱交換器が作られなかった理由は、十分に耐食性があるろう材がこれまでに存在しなかったためである。しかし近年、構造材料のろう材として十分な耐食性を持ち、かつ低融点のチタン系ろう材が開発された。その代表的なチタン系ろう材の組成を Table 1 に示した。

Table 1 Ti based brazing filler metals

Filler Metal	Chemical Compositions (wt%)				Melting Range (°C)
	Ti	Zr	Cu	Ni	
TB-1510	37.5	37.5	15	10	842(eutectic)
TB-2020	40	20	20	20	810-867

これらのろう材を用いた熱交換器の実際の使用状況を想定し、浸漬試験にて経過時間後の腐食減量を測定することでろう材の耐食性評価を行った。比較として工業用純チタンとステンレス鋼も同時に試験した。腐食液として塩酸 (5%)、次亜塩素酸ソーダ (2%)、人工海水 (3.5%)、アンモニア水 (10%) を使用した。Table 2 に浸漬 720 時間後の各試料の耐食性試験結果を示した。○は外観で全く腐食が確認されず腐食減量の全く無かった状態で、□は外観で微量の腐食もしくは微量の腐食減量が確認された状態を示す。×は著しく腐食された状態を示す。TB-1510 はどの腐食液に対しても全く腐食されず良好な耐食性を示した。TB-2020 は次亜塩素酸ソーダに対して微量の腐食減量が確認された。比較試料として試験を行った工業用純チタンはどの腐食液に対しても全く腐食されなかったが、SUS304 は塩酸と次亜塩素酸ソーダで著しい腐食が確認された。また、アンモニアに対しても微量の腐食が確認された。

Table 2 Corrosion test result after 720 hours dipping

	TB-1510	TB-2020	CP-Ti	SUS304
HCl (5%)	○	○	○	×
NaClO (2%)	○	□	○	×
NaCl (3.5%)	○	○	○	○
NH ₃ (10%)	○	○	○	□

また、ろう付部の機械的強度をせん断試験により評価

したところ、いずれのろう材も 300MPa 以上の強度が得られた。

以上の結果より、チタン系のろう材、特に TB-1510 は母材チタンに匹敵する耐食性を持ち、実用に十分耐え得る接合強度があることが判明した。そこで、TB-1510 をろう材としたプレート熱交換器を作製した。ろう付は真空炉中で行い、ろう材の蒸発を防ぐため高純度シールドガス法 (キャリアガス法) を用いて行った。シールドガスにはアルゴンを用いた。構成部品は専用のろう付ジグで固定し、適当な荷重を加えてろう付に供した。Fig.2 に作製したチタン製プレート熱交換器の外観を示した。

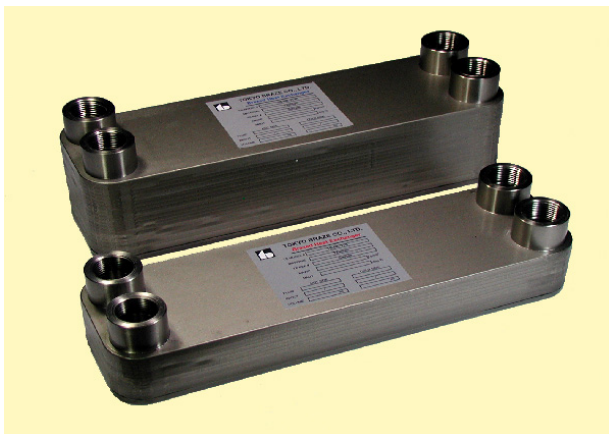


Fig.2 Appearance of Ti plate heat exchangers.

4.2 SUS 製高耐圧プレート熱交換器

家庭用ヒートポンプ給湯機であるエコキュートは 2001 年発売以来順調に普及し、昨年度は累計 100 万台を突破した[1]。しかし、エコキュートは夜間蓄熱機器であるために大きなスペースを必要とすることが未解決の課題として残っている。したがって、今後ヒートポンプ給湯機が益々普及するためには高効率・コンパクト化が必要であり、特に水と CO₂ 冷媒の熱交換器の性能向上が望まれている[2]。業務用においても従来の熱交換器を流用する場合、少なくとも数台が必要となりその占有空間は過大である上、給湯水ポンプをランクアップする必要もあることから、その適用は現実的ではない。

そこで本開発では、水と CO₂ 冷媒の熱交換器として従来用いられている銅製円管トラック巻きの熱交換器をコンパクトで高性能にするべく、ステンレス製の小型高耐圧プレート熱交換器の開発を行った。

現在商用化されている水熱交換器 (ガスクーラー) は、メーカーによって口径の大小や形状に違いがあるものの銅製円管トラック巻きの熱交換器が使われており、その熱交換能力の主要範囲は 4.5~6kW である。この水熱交換器を業務用の給湯出力 27kW 機を例として流用する場合は、少なくとも 4 台が必要となる[3]。そこで本開発では、容積当りの伝熱面積密度が高いプレート熱交換器を水熱交換器としての採用を検討した。しかし、一般的な市販のプレート熱交換器 (PHE) は伝熱性能の向上と流体隔壁の機能を兼ね備えたヘリンボーンタイプであり、こ

の構造ではCO₂レベルの高強度高耐圧には対応できない。そこで本開発では、強度確保の点で優れているインナーフィンタイプを採用した（第3項参照）。

これらの大きさと重さを比較すると、銅製円管トラック巻きの熱交換器コアの占有空間は、幅 160mm×長さ 380mm×高さ 135mm の 8.21ℓ であり、質量は 12.25kg である。一方、プレート熱交換器は占有空間が幅 88mm×長さ 434mm×高さ 35mm の 1.34ℓ で、質量は 6.26kg である。従って、プレート熱交換器の占有空間は銅製円管トラック巻きの熱交換器コアの 1/6 で質量は半分である。

Fig.3 にプレート熱交換器の構成部品の外観を示した。流路はプレートを重ねることで形成されるが、その際にフィンと 1 対のリンフォースがプレート間に挿入され、構成部品はすべてろう付けされる。リンフォースに設けられた 2 つの穴は、単なる円形のものプレート内に開口する方向に切り開かれているものがあり、その使い分けにより所定の段に供給される流体が選択される。複数の段が積層された後、最終端面にエンドプレートを置き、流体接続口にボスを置く。これらの構成部品にはすべて SUS304 を用いた。

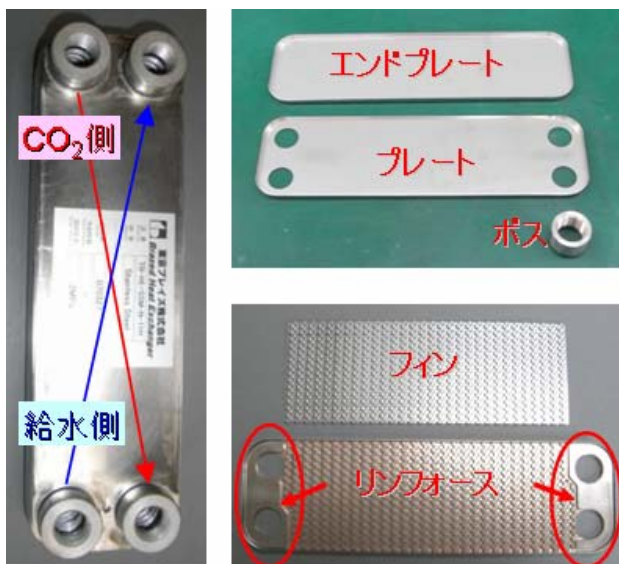


Fig.3 Component parts appearance of high-pressure resistant stainless steel plate heat exchangers.

流体はFig.1 に示すように交互に重なる段内を対向して流れる。CO₂側にはコンプレッサーから吐出された高温のCO₂が供給され、給水側を流れる給湯水を加熱する。その際、CO₂側には同伴される冷凍機油が流路内に滞留することが想定され、それを回避するためにCO₂側の流路は共に全段並列接続とし、流れを 1パスとした。段の構成は、積層厚さ方向に両端となる段を給水側流路とし、全体には 1 段のCO₂側を 2 つの給水側流路で挟む形が取られている。

ろう付は真空炉中で行い、ろう材の蒸発を防ぐため高純度シールドガス法（キャリアガス法）を用いて行った。シールドガスには窒素を用いた。ろう材には銅ろう（BCu-1）を用いた。構成部品は専用のろう付ジグで固定し、適当な荷重を加えてろう付に供した。

作製した熱交換器の性能評価を、冷温水試験、破壊（耐圧）試験、繰り返し耐圧試験、熱ストレス試験により評価した。

Fig.4 及びFig.5 に冷温水試験の結果を示した。Fig.4 では冷水側（給水側）の温度効率を、Fig.5 では圧力損失を比較した結果を示した。銅製円管コアの試験では、装置のポンプの能力限界から最大の温水流量は 2ℓ/min となったため、Fig.4 では実験範囲で得られた熱コンダクタンスの結果を踏まえて温水流量 4.5ℓ/min 程度までの温度効率を算定して線を描いた。冷温水流量が共に 4.5ℓ/min の場合の銅製円管コアの温度効率 ϵt は 0.778 であった。開発品のプレート熱交換器の試験では $\epsilon t = 0.825$ が再現した。このことから、コア比較試験に用いたプレート熱交換器の温度効率は、銅製円管コアに比べて 6% 高いことが確認できた。この結果を熱コンダクタンス KA (K:熱通過率, A:伝熱面積) で評価すると、プレート熱交換器の KA は銅製円管コアに対して 35% 大きいことが判明した。Fig.5 において、冷水側の圧力損失 ΔP に着目すると、プレート熱交換器の ΔP は銅製円管トラック巻きの熱交換器の約 1/7 であることが分かった。温水側（CO₂側）の ΔP については圧倒的な差が見られた。以上、コアの性能比較結果を Table 2 にまとめた。

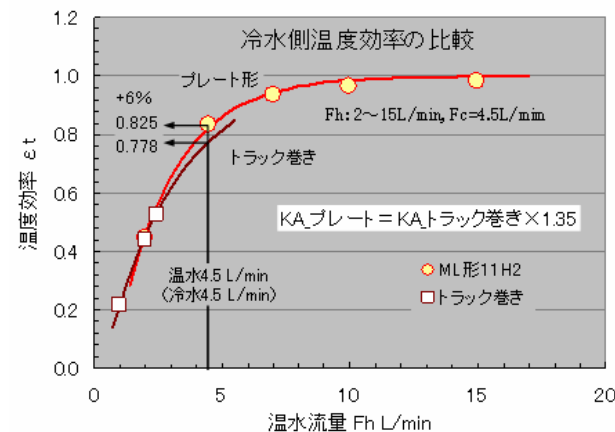


Fig.4 Comparison of thermal efficiency on cold side between plate heat exchanger and Cu tube heat exchanger.

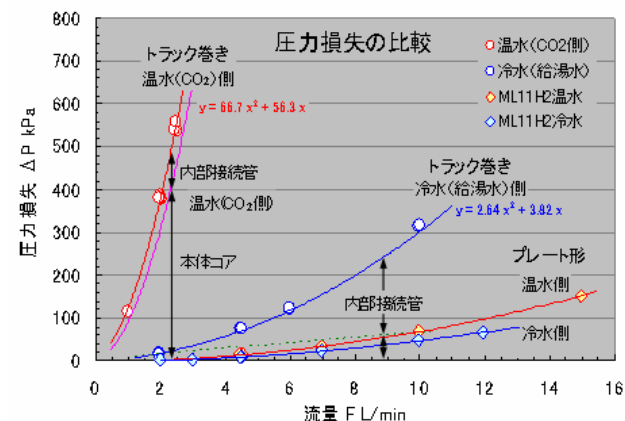


Fig.5 Comparison of pressure drop between plate heat exchanger and Cu tube heat exchanger.

Table 2 Comparison of performance between plate heat exchanger and Cu tube heat exchanger.

比較項目	銅製円管 コア	プレート 熱交換器
占有空間	1	1/6 倍
質量	1	1/2 倍
温度効率	1	1.06 倍
熱コンダクタンス	1	1.35 倍
冷水側圧力損失	1	1/7 倍

破壊（耐圧）試験は水圧による破壊強度の確認試験を実施した。試験は高温流体側の経路に圧力を印加し、低温流体側の経路は大気に開放して行った。結果、56MPaの破壊強度が確認できた。破壊はろう付部ではなく、流路を構成しているフィンの中央部で発生した。実用的なCO₂ヒートポンプ給湯機に求められる破壊強度の目標値は46MPaであるので、開発したプレート熱交換器は十分な高強度高耐圧を持つことが証明された。

次に繰り返し耐圧試験を実施した。試験は破壊（耐圧）試験と同様に高温流体側の経路に圧力を印加し、低温流体側の経路は大気に開放して行った。試験は空気圧力を1秒周期の正弦波状にゲージ圧0~14MPaの範囲で変化させ、内圧変化の繰り返しによる疲労破壊の有無を調べた。試験の結果、20万回の繰り返し加減圧を受けた後の共試体に漏れの発生は確認されなかった。

引き続き熱ストレス試験を実施し、熱交換器が繰り返し運転された場合の熱膨張による性能低下や耐圧強度の低下が起きるかの調査を行った。熱交換器入口の試験温度は、高温側を120℃（加速試験のためオイルを使用で常用温度+20℃）の運転モードにて繰り返し、運転後の熱疲労による影響を調べた。結果、20万回の繰り返し熱疲労を受けた後の共試体に漏れ発生無は確認されなかった。また、繰り返し耐圧試験及び熱ストレス試験後に破壊（耐圧）試験を実施したところ、破壊圧力に変化は確認されなかった。なお、本開発熱交換器は高圧ガス設備としての認定を取得した。

Fig.6 に作製したステンレス製高耐圧プレート熱交換器の外観を示した。



Fig.2 Appearance of high-pressure resistant stainless steel plate heat exchanger.

5. まとめ

耐食性の高いろう材の採用とインナーフィン形状のプレート熱交換器の採用により、これまでにないろう付

タイプによる従来品より耐食性・耐圧性に優れるチタン製プレート熱交換器の開発に成功した。このチタン製熱交換器は、耐食性の求められる用途はもちろん、金属イオンの溶出がほとんど無いなどの利点を生かし、純水利用の用途にもその使用が拡大している。

また、CO₂ヒートポンプ給湯機向けの熱交換器を目的として、従来の銅製円管トラック巻きの熱交換器に替わるステンレス製小型プレート熱交換器の開発を行い、従来のヘリンボーンタイプのプレート熱交換器の耐圧強度を大きく上回る破壊強度をもつ、インナーフィンタイプのプレート熱交換器の開発に成功した。性能評価として冷温水試験を実施し、新開発のプレート熱交換器が従来の銅製円管トラック巻きのガスクーラーに対して、軽量コンパクトであり、高性能かつ低圧力損失であることが確認できた。

謝辞

本研究内におけるSUS製高耐圧プレート熱交換器の開発は、独立行政法人新エネルギー・産業技術開発機構、三洋電機株式会社:「エネルギー使用合理化技術戦略的開発/エネルギー使用合理化技術実用化開発/新型ガスクーラーを用いたCO₂ヒートポンプ給湯機の小型化開発」の一環として行われました[4]。開発に際し、ご助力頂きました三洋電機株式会社・研究開発本部の沢田範雄氏に心より感謝申し上げます。

REFERENCES

- [1] C. Shikichi, Y. Toya, N. Sawada: Abstract of JSRAE Annual Conference, 471-474 (2008). (in Japanese)
- [2] Horiguchi et al.: Abstract of Japan Copper and Brass Association Annual Conference, 36-37 (2008). (in Japanese)
- [3] N. Sawada, C. Shikichi: Abstract of JSRAE Annual Conference, 569-571 (2008). (in Japanese)
- [4] <http://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/databaselist>: (2008.12).