

(技術資料)

マイクロチャネル機器 (DCHE) の製作技術

Manufacturing Technology of Diffusion-bonded Compact Heat Exchanger (DCHE)



三輪泰健*1
Yasutake MIWA



野一色公二*1 (工博)
Dr. Koji NOISHIKI



鈴木朝寛*2
Tomohiro SUZUKI



高月謙一*2
Kenichi TAKATSUKI

The Diffusion-bonded Compact Heat Exchanger (DCHE) is a compact heat exchanger, and the demand for it is expected to increase in applications for weight saving or those calling for a compact plot area, as well as for use in floating plants. Kobe Steel has been working on the development and establishment of the manufacturing technology of DCHE, which is a compact and high strength micro channel heat exchanger. Its heat transfer performance has been evaluated by comparing it with the conventional shell & tube type heat exchanger, and its strength and fatigue have been evaluated using Kobe Steel's stress analysis technology and fatigue test. This paper introduces the features of DCHE and the activity involved in its development.

まえがき = 現在、小さな設置面積や高効率な機器が求められる海洋資源開発の案件が増加しており、洋上設備向けのコンパクトで高性能な熱交換器が注目されている。このコンパクト熱交換器の一種であるマイクロチャネル熱交換器は、流路サイズが数mm程度で単位体積あたりの伝熱面積が大きく¹⁾、コンパクト化が可能であり、軽量化も期待できる。

そこで当社は、これまで40年以上の納入実績があるアルミ製ろう付けプレートフィン熱交換器 (Brazed Aluminum Plate-Fin Heat Exchanger, 以下ALEX[®]注) という) の設計・製作技術²⁾を適用したマイクロチャネル熱交換器DCHE (Diffusion-bonded Compact Heat Exchanger, 以下DCHEという) の開発に取り組んできた。

本稿では、DCHEの構造や特徴を紹介するとともに、伝熱性能および機械的強度の検証結果を報告する。

1. DCHEの構造および特徴

1.1 DCHEの構造 (ALEXとDCHEの比較)

ALEXは、熱交換を行うろう付けされたコア本体および流体をコア内に導くためのヘッダ・ノズルから成る (図1)。コア本体は、仕切板、フィンおよびサイドバーで構成され (図2)、それぞれの部材を必要なサイズに切断して配置したものを多数積層し、真空炉でろう付することによって製造される。材料は、ろう付の健全性や軽量化の観点からアルミ合金が使用されている。

一方、DCHEの製造工程を図3に示す。ALEXと同様に積層構造であり、ほぼ同様の製作工程であるが、流路の加工方法および接合方法が大きく異なる。流路の加工

脚注) ALEXは当社の登録商標である。

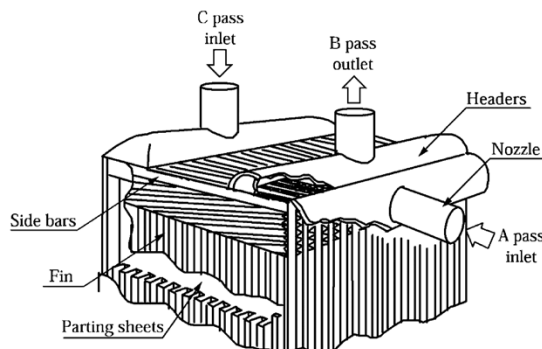


図1 ALEX構造図
Fig. 1 Structure image of ALEX

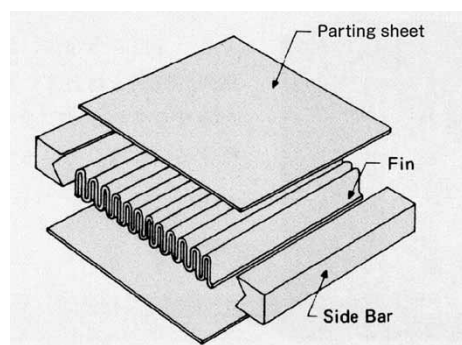


図2 ALEXの主な構成部材
Fig. 2 Main parts of ALEX

は、フィン成形の代わりに化学エッチングを利用し、材料プレートに直接形成する。このため、各層は1枚のプレートから構成されており、積層する組立作業が容易である。

また接合には、ろう付よりも強固な接合が可能な拡散接合を採用している。材質は、適用用途にもよるが、アルミ合金よりも強度が高く、耐食性を有するステンレス

*1 機械事業部門 開発センター 商品開発部 *2 機械事業部門 機器本部 機器工場

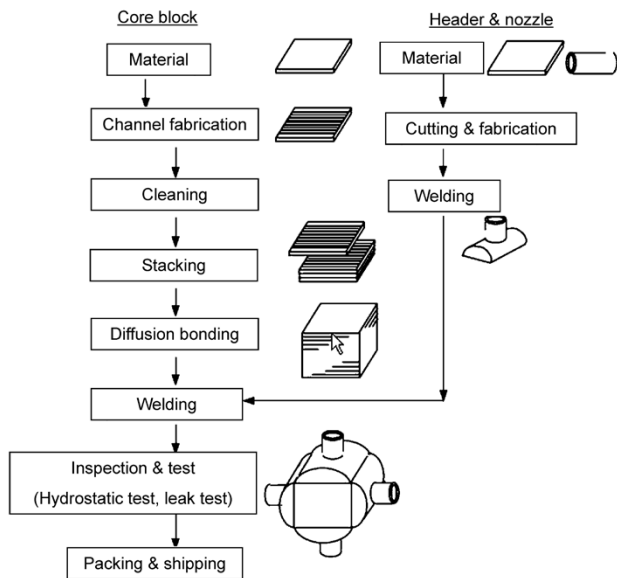


図3 DCHE製作の流れ
Fig. 3 Manufacturing flow of DCHE

鋼などを用いることでALEXが適用できない用途への適用が可能となる。

1.2 DCHEの特長

DCHEは、ALEXの設計・製造技術を適用することが可能であり、とくに複数の流体を同時に熱交換することができる特長がある³⁾。3流体を例とした流れのイメージを図4に示す。このように、プロセス条件に従って各流体の流路設計を最適化することによって一基の熱交換器で多流体を同時に熱交換することができ、複数の多管式熱交換器を一体化することも可能である。

材質についてはこれまで、ステンレス鋼やニッケル基合金、チタンなどを対象にした流路加工および接合性を評価している。また、ステンレス鋼を用いる場合は、流路サイズが数mm程度であるうえ、強度が高いため薄肉化が可能であり、比較的熱伝導が悪いステンレス鋼であっても高い伝熱性能が期待される。

さらに、拡散接合により接合強度がろう付より高く、ALEXが適用できないような13MPa以上の高圧用途や運転変動があるような用途への適用も可能である。

1.3 DCHEの適用用途

DCHEは、多流体を一度に扱える熱交換器であるとともに、材質や流路サイズの選定によっては、設計圧力100MPa、設計温度900℃まで使用することが可能である。適用用途としては、次のようなものが考えられる。

- (1) 洋上設備のようにコンパクト性が要求される機器
例：圧縮機の間・後方冷却器
- (2) 設置場所が高所でコンパクト性、軽量性が求められる機器
例：蒸留塔などの塔類の蒸発器，凝縮器
- (3) 運転条件が厳しい用途（高圧，流体間温度差が大きい，運転変動がある等）
例：高圧水素ステーション用水素冷却器

ただし、ALEXが適用できるような設計圧力（13MPa以下）の場合や運転変動がないような用途に対しては、経済性の観点からALEXが推奨される。

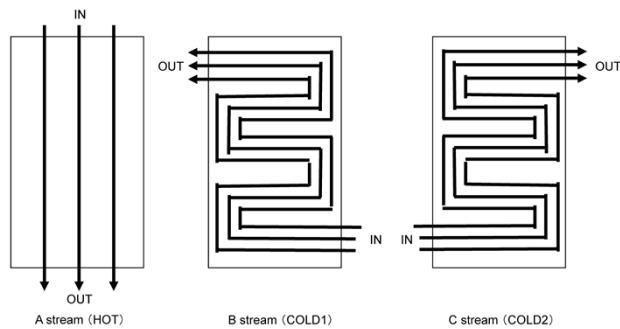


図4 複数流体の流れ(3流体の例)
Fig. 4 Stream images of multi pass (3 stream examples)

2. 伝熱性能の検証

2.1 性能計算手法

DCHEの性能計算には、これまで多数の実績のあるALEXの計算手法を活用した。具体的には、図5に示すように、ALEXのフィン形状をDCHEの流路形状に読替えることによってALEXの設計手法を適用することができる。このALEXとDCHEの読替えについては、各部材の強度計算にも適用可能である。

また、圧力損失および伝熱性能の詳細計算に用いる係数（無次元数）は、流路形状ごとに小形コアを製作して圧力損失および伝熱性能を計測することによって取得し、その結果を性能計算に反映している。

2.2 性能確認試験

性能計算手法の検証および性能確認を目的に、圧縮機の後方冷却器にDCHEを適用した。設計圧力9MPaGの圧縮機の後方冷却として、これまでは図6上に示す多管式熱交換器が採用されてきた。これを同様の伝熱性能および圧力損失の条件にて設計を行ったDCHE（図6下）に置換え、圧力損失および伝熱性能の測定を行った。

この両機器において各種運転条件で性能を確認した結果、DCHEの伝熱性能および圧力損失が設計どおりであることを確認した。これにより、ALEXの設計手法を用いた設計がDCHEに適用できることが検証できた。また、伝熱性能および圧力損失を同一とした場合、DCHEは多管式熱交換器に比べ、容積が約1/10、重量は約

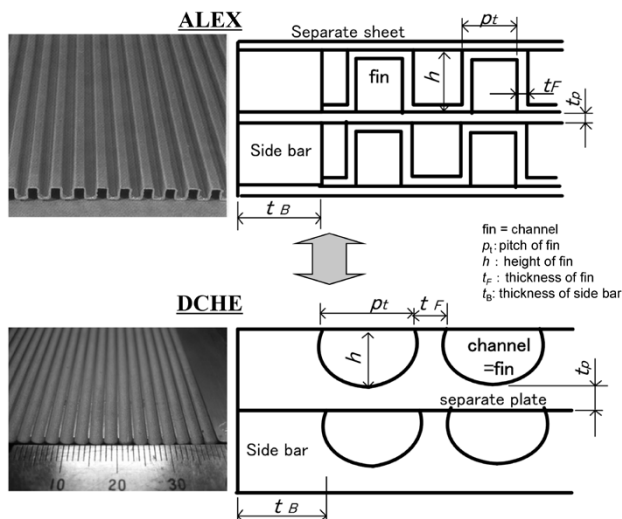
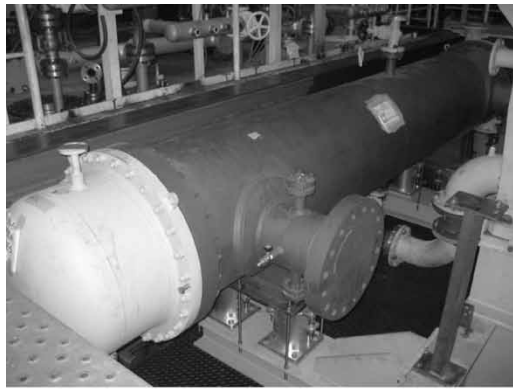
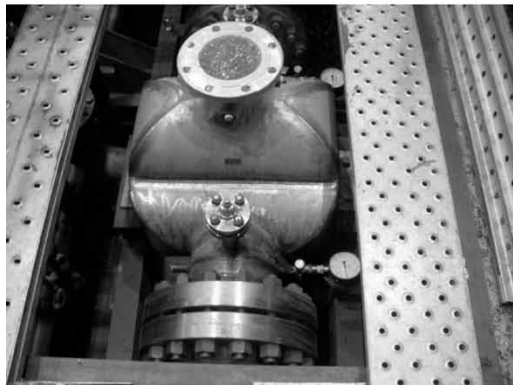


図5 ALEXフィン形状とDCHE流路形状の関係
Fig. 5 Relationship of form between ALEX fin and DCHE channel



(a) Shell & Tube
Φ650 × 4,200TL-TL (5,500kg)



(b) DCHE
330 × 350 × 650 (700kg)

図6 シェル&チューブ式熱交換器およびDCHEの設置状況
Fig. 6 Outside view of Shell & Tube and DCHE at same condition

1/8と非常にコンパクトになることが実証できた。なお、従来の機器に対するコンパクト性および重量低減の効果は、運転圧力が高くなる場合や、高い伝熱性能が求められる場合により大きくなる。

3. 拡散接合部の機械的強度の検証

3.1 拡散接合

DCHEで最も重要な製作工程は拡散接合である。拡散接合とは、JIS Z3001に「母材を密着させ、母材の融点以下の温度条件で、塑性変形をできるだけ生じない程度に加圧して、接合面に生じる原子の拡散を利用して接合する方法」として定義され⁴⁾、摩擦圧接や冷間圧接（常温圧接）などの各種の圧接と同じく、固相接合法に分類される^{5), 6)}。拡散接合品の断面観察結果の一例を図7に示す。

DCHEでは、流路を有する数百枚のプレートを積層し、伝熱性能および耐圧性能を維持するように均一に接合する必要がある。このため、解析などの理論的な検証のほかに、接合試験による検証が重要となる。

3.2 法規・規格対応

DCHEは、高圧ガスや液化ガスを取扱うことが多く、国内では高圧ガス保安法、海外では米国機械学会（THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 以下ASMEという）のボイラおよび圧力容器基準に対応した製品が要求されることが多い。ASME規格合格品の一例を図8に示す。各製品におい

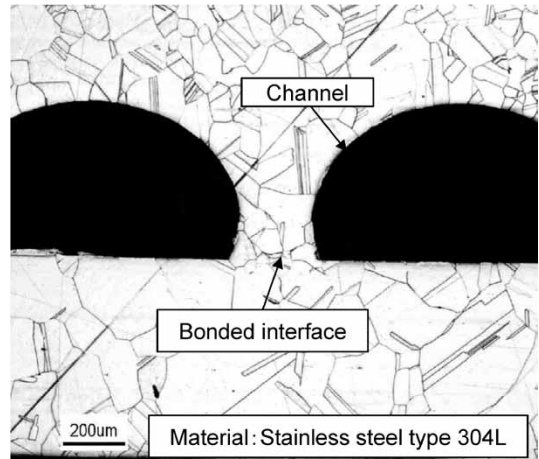


図7 流路および拡散接合部断面観察の一例

Fig. 7 Channel and cross-section observation of diffusion bonding



図8 ASME規格合格のDCHE
Fig. 8 DCHE with U-stamp of ASME

ては、規格で要求される非破壊検査、耐圧試験、および気密試験に合格することによって健全性を確認するが、事前に拡散接合技術を検証しておくことは不可欠である。接合性は、ALEXと同様に以下の項目について評価する。

- ① 拡散接合部の健全性評価（材料に起因する接合性）
- ② 流路形状に対する強度評価（形状に起因する接合性）

次項より各項目の検証結果について述べる。

3.2.1 拡散接合部の健全性評価

製品に用いる接合方法は、拡散接合施工条件（Diffusion bonding Procedure Qualification Record, 以下DPQRという）として材料ごとに接合方法の詳細を決定し管理している。このDPQRの健全性評価としては、DPQRに示された接合方法に従ってサンプルを製作し、サンプルから採取した試験片を用いて機械試験を実施した。その結果、接合体の場所（試験片の採取位置）および方向（接合面に対して垂直または平行）にかかわらず、母材の引張強度、耐力、および伸びのおおのおおにおいて、規格値以上の強度を有することを確認している。

3.2.2 流路形状に対する強度評価

上述のとおり、DPQRに基づいて接合条件を決定しているが、同一材料で同一接合条件であっても、一般的に流路形状によって熱交換器全体としての強度は異なる。そこで、流路形状に対する強度は、計算のほかに、実際に試験体を製作して破壊試験を実施することによって評価する。破壊試験は、拡散接合試験体を水圧や油圧により昇圧し、部材が破断した圧力を破壊圧力として測定する。破断が生じた圧力は、流路が内圧を保持できず膨れが生じ、内容積が増加して内圧が急激に降下することか

ら容易に確認できる。

破壊試験の一例として、材料にステンレス鋼SUS316Lを用いた試験体により試験を行い、高圧用の流路形状で最大450MPa以上の破壊圧力を有していることを確認した。この流路形状において安全率を4とした場合、設計圧力は100MPa以上となる。また、各流路タイプごとに複数の破壊試験を実施しているが、破壊圧力のばらつきは±数%以内であり、安定した接合を実現している。

4. 疲労強度の検証

DCHEの適用用途の一つとして、高圧水素ステーション向けの熱交換器がある。この用途では、80MPa程度の超高圧水素を冷却水で冷却するため、従来は二重管式熱交換器が使われてきた。しかしながら、接続継手の数が多いことや、機器サイズが大きいことが課題であった。とくに、ガソリンスタンドとの併設が想定されている水素ステーションにおいては小形化が大きな課題となっている。

水素ステーションでのDCHEの具体的な適用用途には以下がある。

- ① 圧縮機のインタクーラ、アフタクーラ（設計圧力95MPa、設計温度 \sim 180 $^{\circ}$ C）
- ② ディスペンサ用プレクーラ（設計圧力92MPa、設計温度 -50° C \sim 50 $^{\circ}$ C）

上記の用途で使用する場合、静的な機械的強度に加えて、日々の起動停止や圧縮機による圧力変動などに対する疲労強度を考慮する必要がある。そこで、以下の条件（Test 1 および Test 2）にて解析による強度評価を実施するとともに、実機相当の試験体を用いて表1に示す高圧環境の疲労試験を実施し、機械的強度の検証を行った。Test 1 は用途①の圧縮機のクーラを想定し、Test 2 は用途②のディスペンサ用のプレクーラを想定している。

4.1 応力解析による評価

本機器に用いた流路形状での解析モデルを図9に示す。また、運転状態での解析結果例を図10に示す。流路端部にて生じたピーク応力値に基づき、圧力変動時のピーク応力、平均応力、および応力振幅など疲労強度評価に必要な値を算出した。オーステナイト系ステンレス鋼の平均応力補正済の設計疲労曲線を用いて疲労強度評価を行ったところ、運転条件に対して十分余裕があり使用上問題のないことを確認した。

4.2 疲労試験による評価

図11、12に示すように、表1に示す圧力変動繰返し

表1 圧力変動試験条件
Table 1 Pressure fluctuation condition

	Test 1	Test 2
Test media	Water	Hydrogen
Temperature of test device	20 $^{\circ}$ C	-40 $^{\circ}$ C
Range of pressure fluctuation	86.5MPa	90MPa
Cycle of pressure fluctuation	100,000 cycle	70,000 cycle

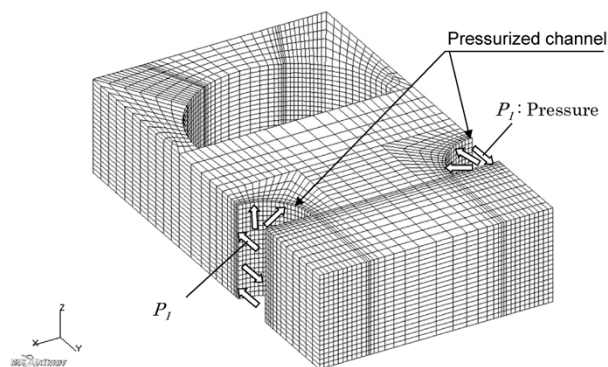


図9 応力解析モデル図
Fig.9 Stress analysis model

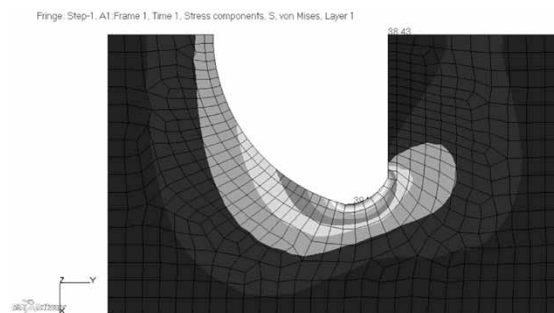


図10 実機想定モデルの応力解析結果
Fig.10 Stress analysis of production simulation model

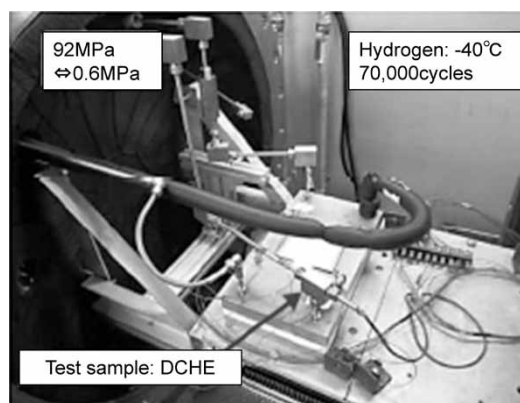


図11 圧力変動繰返し試験（Test 2）
Fig.11 Cycle test of pressure fluctuation（Test 2）

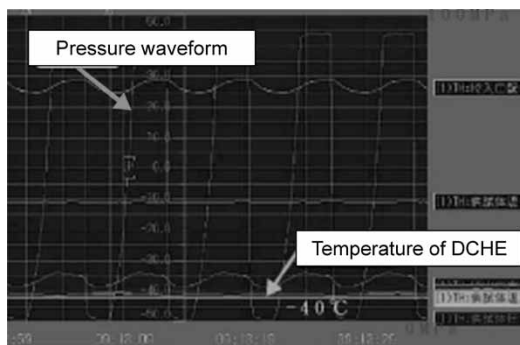


図12 試験状況（Test 2）
Fig.12 Cycle test of pressure fluctuation（Test 2）

試験を行った。その結果、両試験とも試験体は所定の回数を超えても破壊せず、試験装置からの流体（水または水素）の漏洩（ろうえい）も確認されなかった。さらに、圧力繰返し試験終了後、試験流体としてヘリウムを用いた気密・漏洩試験を行い、各部から漏洩のないことを再

度確認している。また、この結果より、先の解析および疲労強度評価手法が妥当であることを確認できた。

そのほか、拡散接合部における耐水素脆化試験として、拡散接合試験体から採取した試験片を対象に、水素チャージ後に引張試験および低ひずみ速度引張試験を実施し、高圧水素環境であっても脆化の影響が認められないことを確認している。

以上により、水素ステーション稼動時の起動・停止などを考慮した圧力変動繰返し試験においても、拡散接合品の接合品質に問題のないことを確認した。

これらの結果を基に、図13に示す水素圧縮機用のア

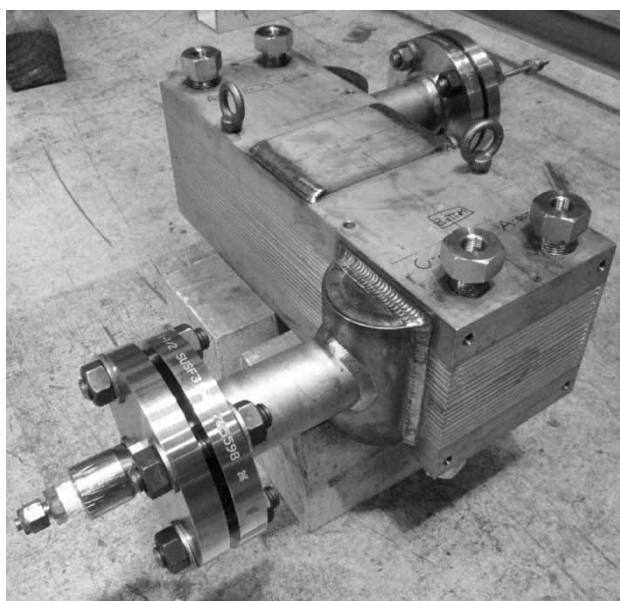


図13 水素ステーション向けDCHE
Fig.13 Outside view of DCHE for hydrogen station

フタクーラを高圧ガス保安法特定設備検査規則に基づいて製作した。機器サイズは従来の二重管式熱交換器に比べわずか1/30~1/100と非常にコンパクトであり、今後、採用拡大が期待される。

むすび=本稿では、コンパクト熱交換器の一つであるDCHEの紹介を行った。とくに、拡散接合技術の検証では、解析に加えて機械試験や疲労試験を行うことによって定量的に評価し、接合品質に問題のないことを報告した。今後、高圧用途で信頼性が求められる水素ステーション向けにおいてDCHEの適用拡大が期待される。一方、洋上設備向けの用途では、さらなる大形化、高性能化が不可欠であり、製造技術のさらなる向上に取り組んでいる。今後もDCHEの製作実績を重ね、製品の信頼性を向上させるとともに、さらなる用途拡大のために開発を継続していく。

最後に、表1 Test 2で紹介した実験を実施いただいた(株)タツノに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 化学工学会反応工学部会マイクロ化学プロセス分科会. マイクロ化学プロセス分科会講演会資料 2010-1-15, p.1-10.
- 2) 野一色公二ほか. R&D神戸製鋼技報. Vol.53, No.2, p.28-31.
- 3) 野一色公二. PETROTECH JAN 2012. VOL.35, NO.1.
- 4) JIS Z3001-1, 2008, p.27.
- 5) 橋本達哉ほか. 現代溶接技術大系 第9巻 固相溶接・ろう付. 産報出版, 1980, p.95.
- 6) 大橋 修. Q&A拡散接合. 産報出版, 1993, p.31.