

# グラスライニング創業70年を迎えて

## 70 Years Progress of Glasslining Business



宮内啓隆\*  
Hiroataka Miyauchi



大川敦彦\*\*  
Atsuhiko Okawa



多田篤志\*\*  
Atsushi Tada



北岡俊男\*\*\*  
Toshio Kitaoka



椿野直樹\*\*\*\*  
Naoki Tsubakino

グラスライニング製機器は、戦後の経済成長とともに発展し、今日の化学、医薬、食品産業において、欠かすことのできない耐食機器として使用されている。本報では、株式会社神戸製鋼所の珐瑯部門から始まったグラスライニング70年の歩みをグラス、製造技術・設備ならびに反応機として重要な攪拌機の変遷を追って振り返る。とくに、国内市場において高度化するグラスライニング製反応機のニーズに対応した当社の機能性グラスを紹介する。加えて、当社がさらなる歩みを進めるための将来的な展望をグローバルな視点から述べる。

Glasslined equipment has been developed with postwar economic growth, and nowadays widely used in chemical, pharmaceutical and food industry as a corrosion-resistant material that can't be replaced. This report reviews 70 years progress originated in Kobe Steel, Ltd., through historical development of glass, manufacturing facility and agitator. Particularly, series of our functional glass satisfying sophisticated needs of the domestic market are presented. In addition, our future prospects for further progress are indicated based on the global point of view.

### Key Words :

グラスライニング  
機能性グラス  
攪拌技術  
製造設備

Glasslining  
Functional glass  
Mixing technology  
Manufacturing facility

### まえがき

株式会社神鋼環境ソリューション（1954～1989年：神鋼ファウドラ株式会社、1989～2003年：神鋼パンテック株式会社）は1954（昭和29）年に設立された。しかしその生立ちをたずねるならば、さらに古く1946年にまで遡ることになる。この年、当社の前身である株式会社神戸製鋼所の珐瑯部門が事業を開始した。

「珐瑯（ほうろう）」とは、鋼板の表面にガラス質の釉薬を焼付けることで鋼板表面に美観や装飾性、

清潔性を持たせた材料であり、食器や台所用品、建材パネル等に広く使用されていた材料である。一方、「グラスライニング」は邦名「耐酸珐瑯」とも呼ばれ、この「珐瑯」の技術を発展させたことでより耐食性の高い材料となっている。

本年2016年は、当社のグラスライニング技術の礎となった珐瑯製品の製造開始から70年目にあたる。本稿にてその技術や設備などの変遷、加えて近年国内市場における多様化する機能性ニーズに対応したグラスや将来の展望について述べる。

## 1. グラス（釉薬）の変遷

一般的に鋼板は腐食環境には弱く、通常使用する場合は表面を塗装やメッキなどの防食処理により環境遮断をすることでその耐食性を高めている。しかしながら、より腐食環境の厳しい酸や高温の溶液などを使用する設備に対して、一般の塗装やメッキなどでは鋼板の防食をすることはできない。

グラスライニング材料は、酸や各種薬剤に対する耐食性が高いガラスを鋼板の表面に焼付けた金属とガラスの複合材料であり、構造物として高い強度を持ちながら、かつ化学的耐食性も高い材料として知られている。したがってグラスライニング材料においてこのガラス自体の機能や性能は製品の生命線とも言えるもので、当社においては創業期から、ガラスを原料から自社製造することを基本とし、現在もこの基本姿勢は受継がれている。まずはこのガラス（釉薬）の変遷について紹介する。

### 1.1 黎明期（珐瑯からグラスライニングへ）

1946年から株式会社神戸製鋼所の珐瑯部門で製造を開始した洗面器や食器などの家庭用品の珐瑯製品は海外向けの輸出品として好評を博していた。

一方、神戸製鋼所が立地する神戸市東部は灘の銘酒の産地として有名であり、この灘五郷の各酒造会社は戦災により被害を受けていた。当時使用していた木製のタンクは焼け、珐瑯製のタンクは破損し当時材料不足のため、新品のタンクの入手が困難であったことから、タンクの修理・再生は各酒造会社の要望するところであった。これに応え、1948年に珐瑯製酒タンク用の焼成炉として大型炉を導入、翌1949年からは修理のみならず新品の酒タンクの製造を開始した。

同時に、この酒タンクの製造と並行し、それまでの珐瑯用釉薬をベースに、より耐食性を高めたグラスライニング用のガラス（釉薬）の研究を進め1950年には製薬会社ユーザへ500 LTの反応機を納入した。

### 1.2 グラスライニング技術の確立

酒タンクの修理・製造のみならず、化工機分野への適用拡大に伴い、機器製造における大容量タンクに関する設計・製作技術上の問題、より高いガラスの耐食性能、耐熱性などの問題を解決すべく、当時世界のグラスライニング機器メーカーでもっとも優れていた米国ファウドラ社をパートナーとし、当社は1954年に神鋼ファウドラ株式会社として設立された。

### 1.3 標準ガラスの変遷

当社が現在まで、その時代毎に標準のガラスとし

て使用してきたガラスを表1「グラスライニング70年の略史年表」に示す。

設立時の標準ガラス #5300は  $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ 系ガラスでアルカリ成分は15%で大きな特長は無いが熔融軟化性に優れスムーズで綺麗な表面状況を示した。

その後、当社の標準ガラスはその主な用途である化学・医薬産業の化学的高耐食性能のニーズに合わせるべく、耐熱衝撃性、耐酸性、耐水性の向上も進めた #5900ガラスとなった。

その後 #6100ガラスを経て、60年代の終わりには  $\text{ZrO}_2$  を含む珪酸塩ガラス #3300を開発し、耐酸性、耐水性、耐アルカリ性を飛躍的に向上させた。

その後、より耐酸性能、耐水性能を向上させた #3100ガラスを経て、80年代半ばに、 $\text{ZrO}_2$ の他に当社独自の成分を添加することでグラスライニングの施工性、耐酸性、耐水性、耐アルカリ性の全ての性能を究極までバランス良く向上させた #9000ガラスの開発に至った。このガラスについては、その施工性、性能バランスの良さ故、現在も標準ガラスとして使用されている。

上記の各標準ガラスの耐食性比較を図1に示す。

### 1.4 耐付着表面改質「Ag処理」

60年代から、グラスライニング製の反応機がポリマなどの合成樹脂の重合に使用されていたが、初期の使用時には付着は問題ないものの、長期間使用するに従い、内容物のポリマがグラスライニング表面に付着し、製品の歩留まり、品質の低下や機器洗浄による稼働率の低下などが大きな問題となっていた。この問題に対して、ガラスで行われている表面改質技術を応用し、グラスライニング層表面に化学的な処理を行うことで表面改質させ、ポリマなどの付着を減少させる「Ag処理」技術を開発した。

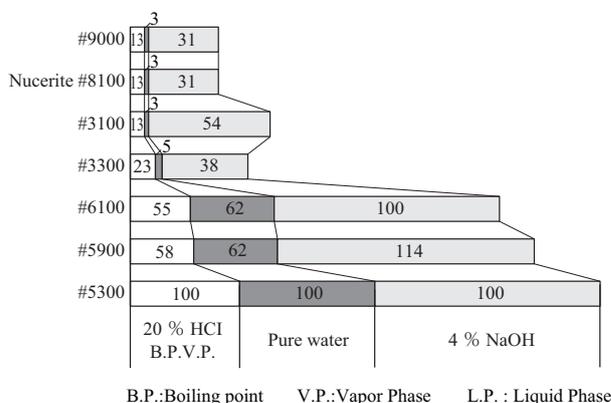


図1 標準ガラスの耐食性比較

表1 グラスライニンング70年の略史年表

項目	年 代							
	1940～	1950～	1960～	1970～	1980～	1990～	2000～	2010～
当 社 活 動	1946 ㈱神戸製鋼所珪酸部門が珪酸製品の製造を開始 1948 酒タンク修繕を開始 1949 酒タンク製造開始 1949 化工機用「耐酸軸葉」の採用	1950 化工機 1号機納入 1954 神鋼フアウドラ(機)設立	1963 技術センターの設置 1966 「工業用グラスライニンング製大型反応器の開発」により石油学会技術進歩賞受賞	1975 化工機のアフターサービス会社「神鋼フアウドラサービス(機)」を設立	1989 「神鋼バンテック(機)」社名を「神鋼環境ソリューション」に変更 1994 大証2部上場 1995 阪神淡路大震災	1992 グラスライニンング神戸工場を播磨製作所へ移設・統合 神戸ハイテクパーク内に「技術研究所」を建設	2003 社名を「神鋼環境ソリューション」に変更	
グラスライニンング用グラス	1954～標準グラス「#5300グラス」 1963～標準グラス「#5900グラス」 1963～標準グラス「#6100グラス」 1969～標準グラス「#3300グラス」	1977～標準グラス「#3100グラス」 1970～耐付着表面改質「Ag処理グラス」	1981～グラスライニンング用フリット(ガラス)の国産化開始 1985～標準グラス「#9000グラス」	2003～医薬用グラス「PPG」導入 2010～耐静電気グラス「ECOGL」 2004～耐静電気グラス「ECOGL」 2011～低溶出グラス「#9000AF」 2015～高伝熱グラス「#9000HT」	1991～耐アルカリグラス「#4300グラス」 1982～SUS用グラス「#3800グラス」			
機 操 業	1954～フアウドラー翼					1991～高効率攪拌翼「フルゾーン」 2001～新標準攪拌翼「ツインスター」		
グラスライニンング製品	1946 ㈱神戸製鋼所珪酸部から商標「フランクキャット」ブランドで珪酸鉄器を輸出 1950 珪酸製建築用パネルの生産開始 1955～大型酒タンク・ビールタンク製造開始 複化ビニル製専用グラスライニンング製重合槽の製造開始 ポリオレフィン等の合成樹脂、合成ゴム製造のためのグラスライニンング機器の製造開始	1961～ポリプロピレン、ネオプレン、シリコン樹脂、繊維、ゴム用接着剤、医薬品製造用送付機の製造開始 グラスライニンング機器の製造増加 1963～ユニテリテリ型酒タンク 1966～グラスライニンング製フラインク	1971～グラスライニンング製薄膜蒸発器、CMP対応機器、コンカルドライヤー、プレントナー、濾過乾燥機、多管式熱交換器など様々なグラスライニンング製機器を開発・販売開始。	1981～低温用グラスライニンング機器、GMP対応機器、コンカルドライヤー、プレントナー、濾過乾燥機、多管式熱交換器など様々なグラスライニンング製機器を開発・販売開始。				
工場・設備	1946 ㈱神戸製鋼所山手工場 軸葉溶解用つばば、電気炉 1948 酒タンク焼成用石炭ガスマッフル焼成炉1号炉完成 自動挿入・矯正機付2号炉増設	1953 重油焼成炉 3号炉完成 引継ぎ、4号炉5号炉導入 1955 都市ガス重油併用新1号炉(東洋最大)	1962 神戸工場完成 1963 世界最大箱型電気炉8号炉完成 1968 大型組立工場増設	1976 大型電気炉8号炉の合理化工事 1985 PC制御によるアクセサリ用3号炉	1986 中製缶体用ラジアンテナチューブ炉5号炉完成	2000 3号炉を電気からガスラジアンテナチューブ炉へ改造 2001 NEDO省エネ設備として1号炉を電気からガスラジアンテナチューブ炉へ改造	2013 ベトナム・ロンドウック工場 操業開始 2016 工場照明LED化	

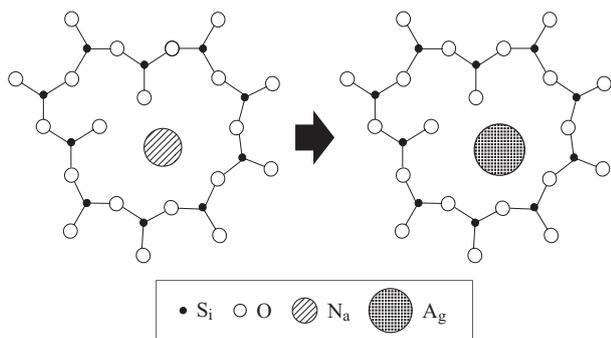


図2 Ag 処理技術ガラス骨格模式図 (Na<sup>+</sup> から Ag<sup>+</sup> にイオン結合が変化)

ガラスライニング層において付着増加の要因として考えられるのは表面の電気化学的な性状、および粗度などの物理的な性状の変化が考えられる。様々な方向から検討、実験を行い、ガラス中の Na イオンを Ag イオンで置換 (図2 参照) することで、ガラスの耐水性を3倍に向上させることができた。耐水性向上のメカニズムとしては、通常、腐食の初期段階においてガラス表層から動きやすい Na イオンが溶出しガラス表層の電気化学的な性状が変化してしまうが、この Na イオンを Ag イオンに置換することでイオンが動きにくくなった結果、耐水性が向上したと考えられる。加えて、耐水性が向上したことで長期間表面粗度の変化も少なくなり、耐付着性能が長期間継続する好結果となった。70年代以降、数多くの合成樹脂重合用のガラスライニング重合反応機に使用されている。

ガラスライニングの表層を改質するこの表面改質技術は当社独自の技術であり、後々の新しい機能性ガラスの開発においても、本技術がその礎となっている。

### 1.5 耐衝撃性ガラス ヌーセライト #8100

ガラスライニングは、金属とガラスという熱膨張率の異なる材料を複合させることで、焼成後にガラス層に残留圧縮応力が掛かるよう設計された材料であるため、通常のガラスより機械的強度が強化されており、数倍割れにくくなっているが、<sup>1)</sup> それでも「ガラスは割れる」というイメージが強い。そこで「割れないガラスを」というニーズに応え開発したのが「ヌーセライト」である。この名称はライニング可能な結晶化ガラスを意味している。ガラス層中に結晶を生成させることで耐衝撃性、熱伝導率、耐摩耗性を向上させている。ただし、一般的には非晶質であるガラスと比較すると結晶化ガラスの耐食性が低下するため、化学的耐食性が要求されるライニング層の最表層には高耐食性標準ガラスを施工し、

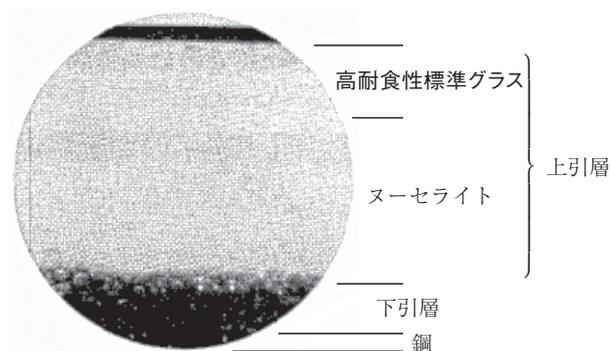


図3 耐衝撃ガラス「ヌーセライト」の複層構造 (神鋼ファウドラニュース1982 Vol.26 No.3より)

その下層に耐衝撃性結晶化ガラスを施工する「複層構造」とすることで、この問題を解決した (図3 参照)。

ガラスライニング製機器使用中に、何らかの衝撃をガラス面に与え破損させてしまった場合も、通常のガラスライニング層では衝撃により全層が破損してしまうのに対して、ヌーセライトの場合、破損は表層の標準ガラスのみで下層の結晶化ガラス層でクラックの進展が食止められ、破損によるガラスの剥離面積が通常の標準ガラスのみの場合より小さくなることから、Ta などによる補修がし易いという特長がある。60年代から90年代まで標準ガラスが進化する中、下層にこのヌーセライトを施工し、最表層に最新の標準ガラスを施工したガラスが攪拌翼やパッフルなどのアクセサリに数多く適用された。

現在は Ta 補修した状態で使用し続けるユーザが少なくなり、一定の役目を終えたガラスとなったが、後述する機能性ガラスにおいても当社のガラスライニングはしばしば、この「複層構造」を採用しており、他社には見られない特長となっている。

### 1.6 極低温用高耐食ガラス #3800

通常の炭素鋼を使用したガラスライニング機器は、低温用鋼板 SLA325A を使用することで -45℃ までの使用が可能であるが、それ以下の使用温度においては、素地金属にオーステナイト系のステンレス鋼板を必要とする。しかしステンレス鋼の熱膨張率 ( $17.3 \times 10^{-6}/K$ ) は通常の炭素鋼 ( $11.5 \times 10^{-6}/K$ ) に比して大きいため、炭素鋼用のガラスをそのままステンレス鋼に適用すると、熱膨張率の差異に起因するガラス層中の残留圧縮応力が過大となりガラス層の破損の原因となる。

このことを解決するためステンレス鋼板用ガラスとして、この熱膨張率も考慮した新たなガラス成分設計を行い #3800 ガラスを開発した。これにより、-196℃ の極低温までガラスライニング機器が使用

できるようになった。

### 1.7 耐アルカリガラス #4300

主に酸性成分よりなるガラスはアルカリ溶液に対しては酸に対するほど耐食性は高く無い。とくに温度、濃度の少しの上昇で加速度的に腐食が顕著となるため、一般的に高温、高濃度のアルカリ雰囲気においては耐食金属材料が用いられることが多い。

しかしながら工程中で酸性・アルカリ性の両方で使用される場合や金属イオンの溶出が問題となるニーズに対して、耐酸性は標準ガラス #9000 の約半分の性能であるが、耐アルカリ性能については標準ガラス #9000 の約 2 倍の性能を持つ耐アルカリガラス #4300 を 1991 年に開発した。#4300 ガラスの耐アルカリ性能を図 4 に示す。

一般的に、ガラスライニングの施工原理として、ガラスを細かく粉砕した泥漿状の釉薬を鋼板表面に吹付け、高温で焼成することで、ガラスの粒同士が軟化流動・融着しガラス層を形成する。一方、ガラスの腐食初期段階においては、ミクロ的にはガラス表面の腐食・減肉は均一には進行せず、ガラスの粒同士が融着した境界部分が選択的に腐食することが知られている。このことから、この #4300 ガラスはガラス自体の耐アルカリ性を高める成分をガラス組成として添加するのに加え、ガラスの粒同士の境界部に耐アルカリ性を高める成分を添加することで、ガラスライニング層全体の耐食性能を向上させた。

このように、市場の耐食性向上のニーズに応じて新しいガラスを開発し適用範囲を広げ、種々の厳し

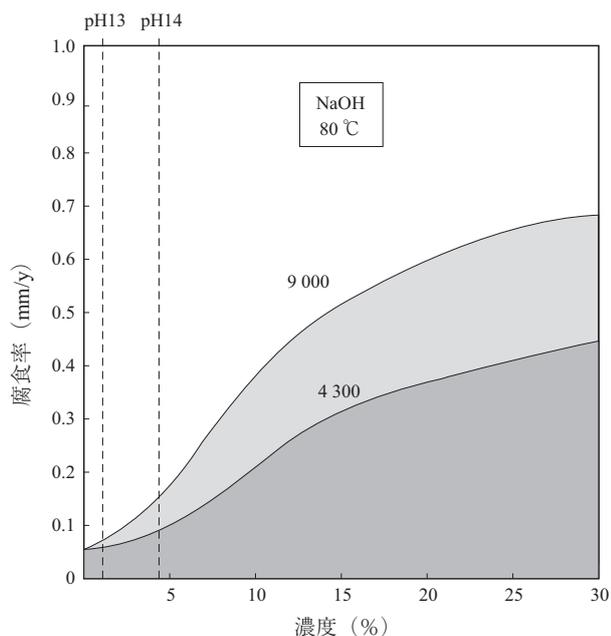


図 4 #4300 ガラスの耐アルカリ性

い用途で使用可能となった。

更に近年、ガラスライニング製機器にも耐食性だけでなく + a の付加価値を求められるようになった。

それはガラスライニング製機器自体の使いやすさ、後述する攪拌性の改善、洗浄性向上、メンテナンス性向上等ガラスの耐食性以外の価値であり、これらのニーズに対して改良・改善を重ねることとなった。

とくにガラスについては、耐食性に加え安全性向上と高度なファイン化のユーザーニーズに応え、耐静電気、低溶出、省エネといった新たな機能性を持たせたガラスの開発へと展開していった。

### 1.8 医薬用ガラス PPG

21 世紀に入って、まず始めに商品化されたガラスが PPG (Pfaudler Pharma Glass) である。これまでの標準ガラスは「濃紺色」であり場合によっては視認性に問題が有る場合があったが、PPG の特長は、写真 1 に示すように明るく視認性に優れ見やすい「ライトブルー色」である。これにより、缶内の付着等を目視で確認しやすくなり洗浄性が向上した。また標準ガラスよりも耐アルカリ性が 20 % 向上しており定置洗浄目的でアルカリ洗浄を行う反応機にも有効なガラスである。

PPG は提携解消後も友好的な関係を続けている Pfaudler GmbH が医薬用途向けに開発したガラスであり、国内医薬市場でのニーズを見込み、2003 年から技術提携し製作・販売を行っている。PPG 販売以降好評を頂き、この明るい色調のガラスへの要求が国内では強くなってきている。

### 1.9 耐静電気用ガラス ECOGL シリーズ

2004 年には、絶縁性のガラスライニング機器内で発生する静電気による機器破損等のトラブルに対処

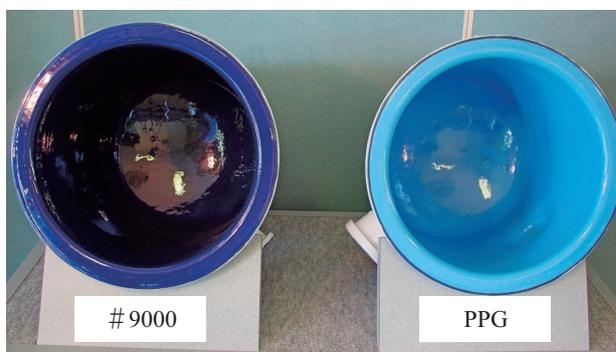


写真 1 PPG と #9000 のガラス色調比較

※ Pfaudler Pharma Glass (PPG) は Pfaudler GmbH との技術提携品です。

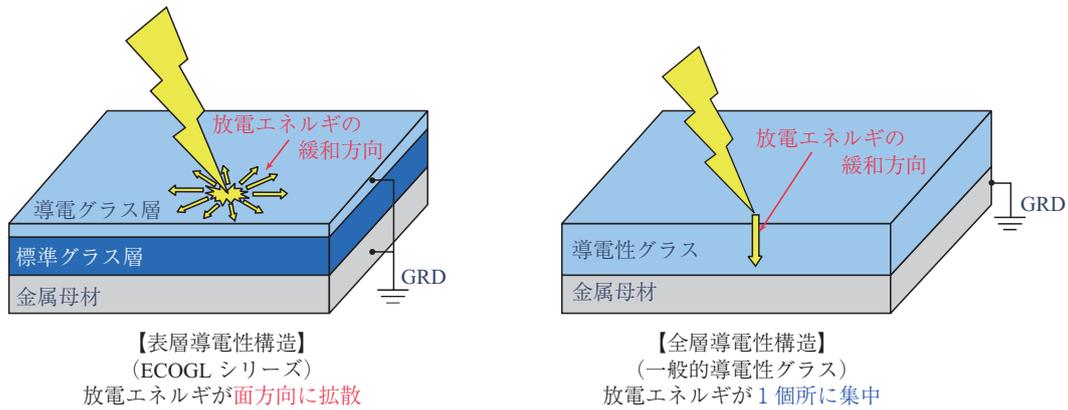


図5 各導電性構造の放電に対する挙動

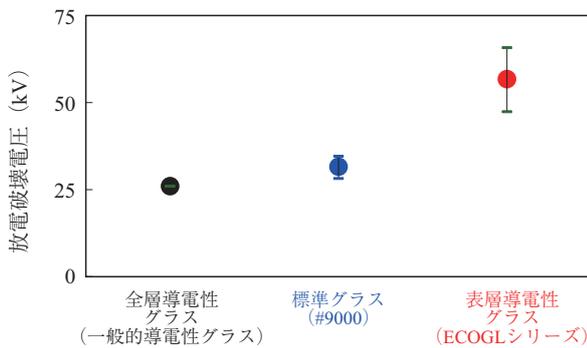


図6 模擬放電印加時のガラス放電破壊電圧

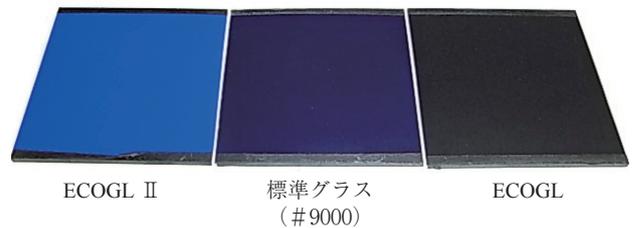


図7-(a) 各ガラスの色調

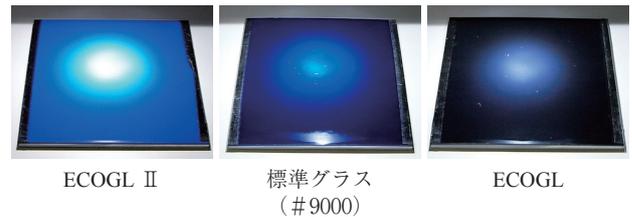


図7-(b) ライト照射時の各ガラスの視認性 (300 mm 直上より LED ライトにて照射)

するガラスとして導電性ガラス「ECOGL (Electrical Conductive GL)」を商品化した。このガラスは、ソーライトより続く当社独自の複層構造のガラスであり、表層部のガラス層のみを導電性にする構造を採用している。ガラス層に導電性を付与することでガラスの帯電は防止できるが、内容物が絶縁物を攪拌する限り、静電気の発生・帯電は避けられない。場合によっては攪拌により内容物の帯電が大きくなると、導電性を有するガラスでも放電が発生してガラスの破損が生じる場合がある。しかしながら、表層部のみを導電性にするにより、内容物の帯電が大きくなり放電が発生した場合でも図5に示すように、放電のエネルギーを面方向で緩和し、下層の絶縁ガラス層で静電気による破損を防ぐため、ガラス層全体としては破壊されにくくなる。一方、全層を導電性ガラスにした場合、一旦放電が発生してしまうと、一点に放電のエネルギーが集中するため、逆にガラス層が低い電圧でも破壊されてしまう。模擬放電を印加した場合のガラスの破壊電圧を図6に示す。このように表層部のみを導電性としたECOGLが放電によるガラス破損に対して強いことは、実験的にも確認されており、現時点でECOGLはガラス

ライニング業界でもっとも静電気による放電に対して強いガラスである。

2010年には、視認性向上のニーズを受け図7のような明るい色調で視認性が向上し、導電層の厚みを増し、より厳しい腐食環境で使用できるように改良したECOGL IIを商品化した。この当社独自の表層導電構造は静電気トラブルの解決に貢献し多くのユーザーに採用頂いている。またこの導電性ガラスは欧米に先駆け日本で開発・実用化された技術であり今後欧米でも同様のニーズが具体化する可能性もある。

#### 1.10 低溶出ガラス#9000AF, #9500

ガラスは化学的耐食性に優れた材料であるが、腐食された際にわずかながらガラスの成分が溶出する。とくに溶出しやすいのはNaやK等のアルカリ金属成分であり、電子材料等を生産する分野では、

この微量な溶出を可能な限り低減することが求められる。

当社は70年代より前述の「Ag 処理」のようなガラス表面の改質技術を有しており、完成後のガラスにこの技術を応用し、表面近傍のアルカリ金属成分等を除去して微量な溶出を低減させたガラス #9000AF を2005年に開発した。

また2011年には、ガラス中の Na 成分の含有量を極限まで低減することで、Na の溶出を従来の1/10に減少させた新たな低溶出ガラス #9500を開発した。#9500ガラスは耐食性が向上しているため、結果として図8に示すように、Na 成分以外の溶出も従来品以下に低減している。また耐食性が向上していることから、低溶出性が必要とされる分野だけでなく、より腐食性の厳しい用途で採用されているケースもある。

### 1.11 高熱伝導性ガラス #9000HT

ガラスは樹脂材料ほどではないが、1.0 W/mK と熱伝導の悪い材料であり、ガラスライニング製機器はライニングされているガラス層が伝熱の律速となっている場合が多い。この伝熱性を改善すべく2015年に高熱伝導性ガラス #9000HT を開発した。

#9000HT は、ガラス層厚みを低減するとともに、熱伝導の良好なガラス層を挿入することによって、熱伝導を向上させており、例えば図9に示すような条件においては、ガラスライニング製反応機の総括熱伝達係数 (U 値) は従来の1.5倍以上に向上する。このため昇温・冷却時間の短縮、温度応答性が向上し温度制御性が向上するといった効果がある。後述する高効率攪拌翼 (フルゾーン) と組み合わせれば、機器と内容物間の熱の移動が良好になり、さらなる伝熱性の向上が可能となる。また接液部のガラスは、従来より広くご使用頂いている当社標準ガラス #9000を施工しているため、内容液に接するガラス

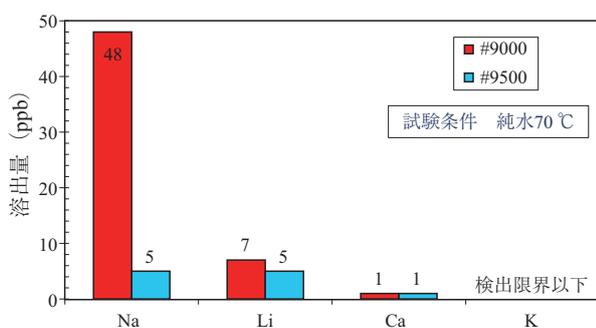


図8 #9500の溶出性

材質の変更を気にすることなく、これまで同様にご使用頂くことが可能である。

#9000HT は省エネ効果があることから、導入に際しては生産性向上設備投資促進税制等の優遇措置の対象となる場合もある。

## 2. 工場・設備の変遷

当社の前身である株式会社神戸製鋼所の珪瑯部門が、山手工場の一角に1946年珪瑯工場を建設した。釉薬溶解のるつぽ炉を新設し、焼成炉は海岸工場から電気炉を移設した。その後も生産設備の拡充に取り組み、順調な発展を辿ってきた。酒タンクの需要と化工機の受注も著増していた1962年に隣接する神戸製鋼所溶接棒工場の茨木市移転とともに当工場跡地を取得し、工場を約2倍に拡張した。1963年には、Siemens 社の施工指導の下、世界最大の箱型超大型電気焼成炉8号炉を建設、1968年には重厚長大化する産業界、とくに石油化学工業界の需要に応えるべく大型組立工場を建設した。

1976年には東播磨地区10万 m<sup>2</sup>の敷地にステンレス製大型機器の製作に対応した「播磨製作所」を竣工。その後1992年にはガラスライニング製品についても本社 (灘工場) から播磨製作所に全て移転、統合した (写真2, 3参照)。さらに2013年には医薬・ファインケミカル用機器のクリーンな雰囲気での組立試運転の必要性から作業性も考慮しエアコン装備した「F組立エリア」も建設し小型機器から大型機器まで、またクリーンな組立を要求される機器まで一貫して対応可能な工場となった (図10)。以下に各設備の変遷について紹介する。

### 2.1 焼成炉

ガラスライニング機器の製造において、中核をなす設備は焼成炉である。ガラスライニング用の焼成

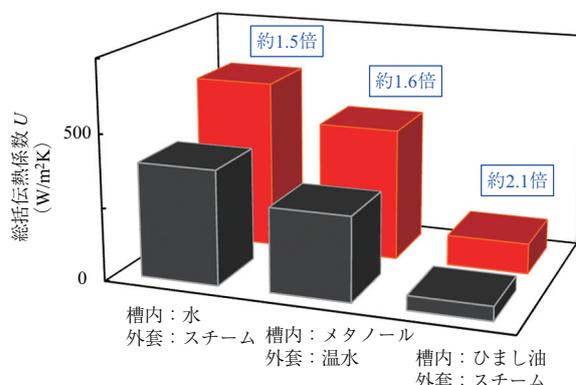


図9 種々のプロセスにおける U 値概算結果 (黒) 9000 + 3枚後退翼, (赤) 9000HT + フルゾーン翼



写真2 播磨製作所 全景



写真3 播磨製作所 鳥瞰図

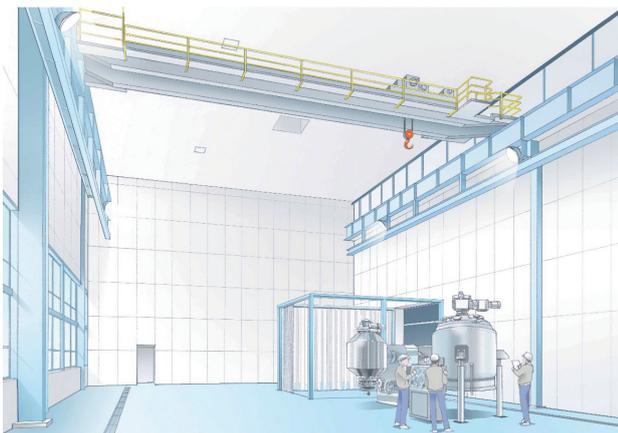


図10 F組立エリア

炉は、熱源と炉の型式が時代とともに大きく変わってきた。石炭焼きマッフル炉に始まり、重油焼き直火炉、ガス焼き直火炉、電気炉へと進歩してきた。また、環境負荷低減向けにいち早く取組み、NEDO（独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合機構）



図11 リジェネレイティブバーナー

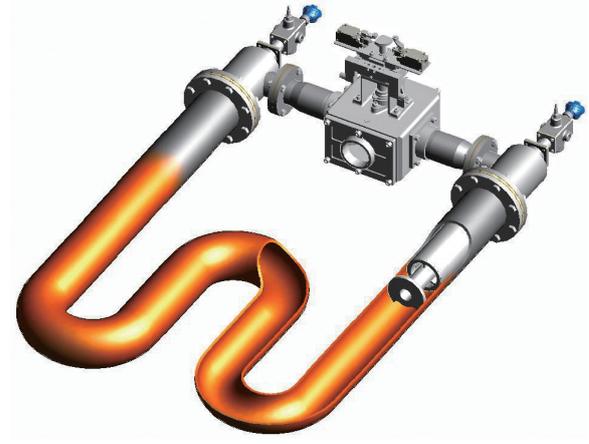


図12 ラジアントチューブ

の高性能工業炉導入フィールドテストを経て、電気炉から都市ガスの高効率リジェネレイティブバーナー搭載の高性能ガラスライニング焼成炉へと順次変更・導入を行った。そして間接加熱式のラジアントチューブ方式を採用したことで、高い輻射熱が得られ品質向上を実現できた（図11, 12参照）。主要炉に電気式からガス式高性能ガラスライニング焼成炉を採用したことで、CO<sub>2</sub>排出量を年間1300トン削減することができ、地球に優しい工場づくりの第一歩となった。また、Factory-Automation 技術を最大限活用し、主要炉において自動温度制御システムならびに自動搬送焼成システムを採用し、省人化を推進してきた。

## 2.2 ガラス原料溶解設備

ガラスライニングの生命線はガラスフリットにあると云われ、当社ではガラス原料溶解設備を備えている。高度化、多様化するユーザーズに因應べく、新しいガラスフリットをスピーディに自社開発

する環境を整えている。必要なガラスの機能に応じた成分に基づき、原料を計量・混合・溶解を経て急冷し、グラスフリットを製造する。製造グラスフリットは物性試験を行い、品質を確認している。計量誤差を小さくし、ヒューマンエラーの介在する余地を無くしコンタミを防ぐために釉薬原料自動計量搬送システムを導入し、トレーサビリティ確保のため原料の計量データまで全て記録されている。また中間原料であるグラスフリットを貯蔵するための自動倉庫も設けた。原料混合時間を大きく短縮できる混合機（PSミキサー）と溶解されたガラスの急速冷却粉碎装置（いずれも当社開発製品）など、さながら粉体プラントとなっている。

### 2.3 省エネ・自動化・安全性向上

省エネについては1996年～2001年に掛けて順次、前出の焼成炉を電気炉から高効率都市ガス炉へ変更していった効果がメインとなるが、その後、周辺機器についても省エネを推進し、省エネの基本であるインバータ機器、ヒートポンプ方式の空調、工場・事務所照明のLED化等、環境負荷低減に向け取り組んでいる。

また自動化設備も積極的に採用している。溶接ロボット導入はもとより、従来手作業で行ってきた鏡板の芯出し・ノズル孔等の罫書き作業をCAD図面データを用いて自動で高精度で行う「鏡板罫書きロボット」をロボットメーカーと共同で開発し、品質向上、省人化に向け取り組んでいる（写真4参照）。

製造工程の自動化と合わせて、作業の安全性を向上させる設備改善も行っている。最近の例として、グラスライニング機器をより安全に組立・試運転検査を可能とする「自動昇降機能付き組立デッキ」を、また作業用クレーンについても衝突回避機能付き



写真4 罫書きロボット

に改善し、安全に作業できるよう設備改善を行っている。

## 3. グラスライニング製製品の変遷

### 3.1 グラスライニング製反応機の誕生

1946年の珪瑯部門が事業開始して以降、神戸製鋼所では酒タンクの修理・製造の過程で進めていた釉薬の研究と並行して、日本の化学工業界の将来性にいち早く着目し、化学工業用の耐酸釉薬の研究を続けていた。

1949年9月にはその基礎的研究がほぼ完了し、引き続き実用化に向け検証を行い、翌1950年に製薬会社から500LT反応機を受注した。（写真5参照）

### 3.2 PVC用大型グラスライニング製重合機とファウドラー翼

1954年の神戸製鋼所と米ファウドラー社との共同出資により神鋼ファウドラー株式会社が設立されたが、同年初頭からの不況の影響もあり、化工機部門の生産は伸悩み状態であった。しかし、同年4月、合成樹脂・合成繊維用機器を相次いで受注、1955年に政府の合成樹脂5カ年計画が実施されたことにより化工機をめぐる環境はにわかには好転した。それまで、乳化重合法により国内で生産されていた塩化ビニール樹脂（PVC）の品質が、欧米から輸入した樹脂より相当劣ることが判明し、塩ビ各社は懸濁重合法へ製法転換すべく、欧米からの技術導入が行われた。そして、この懸濁重合法の心臓部となる重合機を米ファウドラー社が米国塩化ビニール樹脂製造各社に納入していたことから、当社は米ファウドラー

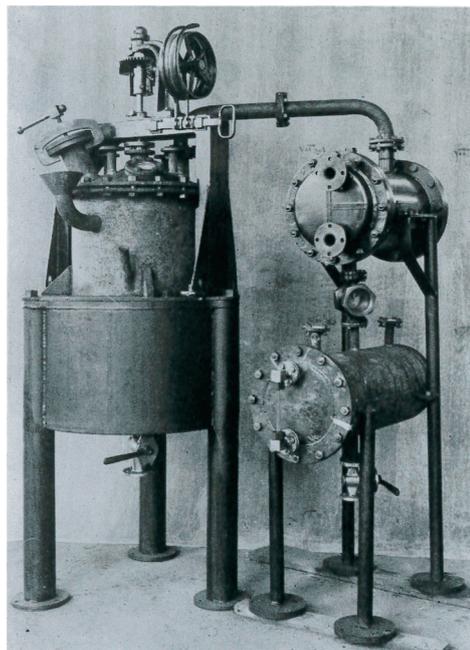


写真5 化工機第1号機

社から図面提供を受け国産化を開始した。その結果、塩化ビニール樹脂製造用に14 000 L グラスライニング製重合機（写真6参照）が次々と採用されはじめた。この14 000 L グラスライニング製重合機の登場によって、国内の塩ビ重合機は、材質がステンレスからガラスライニングに、攪拌翼の形状が従来のパドル型やタービン型からいわゆるファウドラ翼（図13参照）と言われる3枚後退翼に変わり、攪拌翼の回転数がタービン翼と比べて低速回転となり、軸封部がグランドシール式からメカニカルシー



写真6 14 000 L 重合機

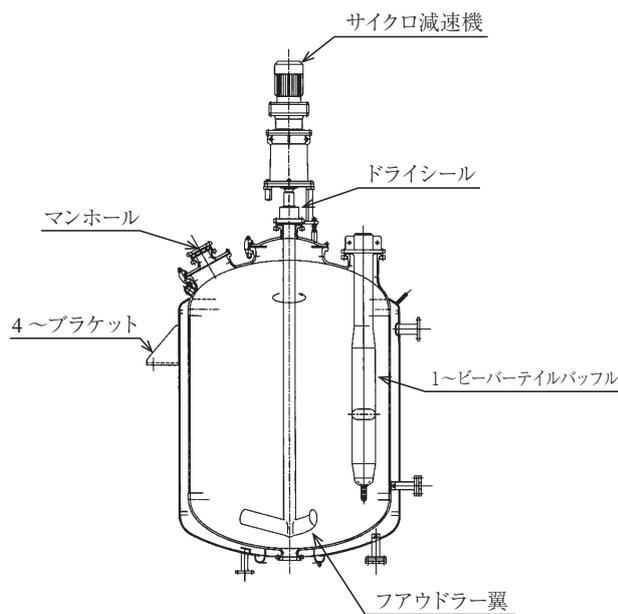


図13 ファウドラ翼反応機

ル式に変わるなど技術革新を遂げた。

ガラスライニング製ファウドラ翼は断面がオーバル形状の3枚後退翼で、通常は槽の底鏡部に配置し、低粘度から中粘度の広い粘度範囲で多目的の攪拌に適している。攪拌翼より吐出した液流は槽壁に沿って上昇し液面部で反転して槽中心部を下降するというパターンで、槽内に一つの大きな上下循環混合を起こさせることを特長としている。前述の塩化ビニール樹脂重合機用の攪拌翼として認知されガラスライニング製反応機に標準的に採用した結果、約60年という長い年月を経た現在も、ガラスライニング製反応機用の代表的な標準攪拌翼の一つとしてガラスライニング業界で採用され続けている。

### 3.3 高効率翼フルゾーン

前項で説明したようにガラスライニング製反応機用の攪拌機はファウドラ翼が標準となったが、ファウドラ翼が対応できない高粘度域を含む広粘度範囲用の攪拌翼として1990年にガラスライニング製『フルゾーン』（図14参照）を開発した。フルゾーンはステンレス製反応機用として

- ① 広い粘度範囲での効率良い均一混合
- ② 低粘度用タービンや高粘度用ダブルヘリカルリボンが適用しにくい中粘度領域での混合効率の向上
- ③ 槽内全体におよぶ大きな一つの循環流の形成を通じての効率良い混合の達成

を目的として開発され、これをガラスライニング可能としガラスライニング製反応機に適用した。

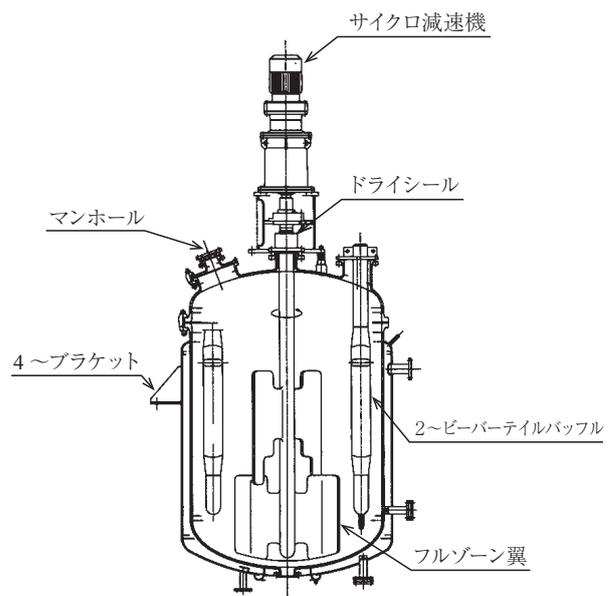


図14 フルゾーン翼反応機

フルゾーンは上下にそれぞれ異なる機能を持つ特殊ワイドパドルを2段、立体的に組合せた特長的な形状であり、上下翼間隔と上段翼のフィンにより上段・下段翼の各々の吐出流を融合、槽内全域におよぶ大きな循環流を形成する一方、下段翼には上下翼の吐出力バランスを考慮した後退翼を採用することで効率良い吐出を実現した攪拌翼である。1991年の上市以降、乳化重合・晶析・水添反応・溶解等の様々なプロセス改善に貢献していたこともあり、上市当初からグラスライニングへの適用ニーズはあった。当初板翼で構成されたその構造からグラスライニング施工が困難であったが、板翼へのグラスライニング施工技術の改善を繰り返すことにより、同年にグラスライニング製フルゾーンが完成した。

1990年代以降、グラスライニング製反応機の用途は石油化学からファインケミカル・医薬にシフトしており、幅広い用途に適用できる高性能攪拌翼として採用されている。

### 3.4 グラスライニング用新標準攪拌翼ツインスターの登場

グラスライニング製反応機の攪拌翼は、従来のファウドラ翼に加えて、前述のフルゾーンが選択肢として追加されたが1990年代後半から低中粘度域の攪拌におけるグラスライニングユーザ特有のニーズとして

- ① 多品種少量生産への移行に伴い、一つの反応機で少液量から呼称容量までの幅広い液量において効率の良い攪拌が得られること
- ② サニタリー性、コンタミレスを保つためにシンプルかつ洗浄性の高い翼形状であること
- ③ クロスコンタミの原因となる分割部（本体フランジ等）が少ない密閉型の攪拌槽に取付が可能な攪拌翼であること

というように多様化・高度化しつつあった。

このようなニーズに対しファウドラ翼のコンパクトさとフルゾーンの少液量対応・攪拌能力をベースにシンプルで高い攪拌性能を有する攪拌翼として、2001年に『ツインスター』（図15参照）を開発した。

ツインスターはフルゾーンと同様に板翼を採用し翼下面を下鏡に沿わせることで少液量攪拌を可能とした。また後退した2枚板翼により吐出流を強化したことで、フルゾーンにはおよばないがファウドラ翼では対応困難な攪拌（粒子浮遊、高粘度液攪拌）まで対応できる新しいグラスライニング製攪拌翼として市場に受け入れられた。

開発翌年の2002年にはファウドラ翼との年間販

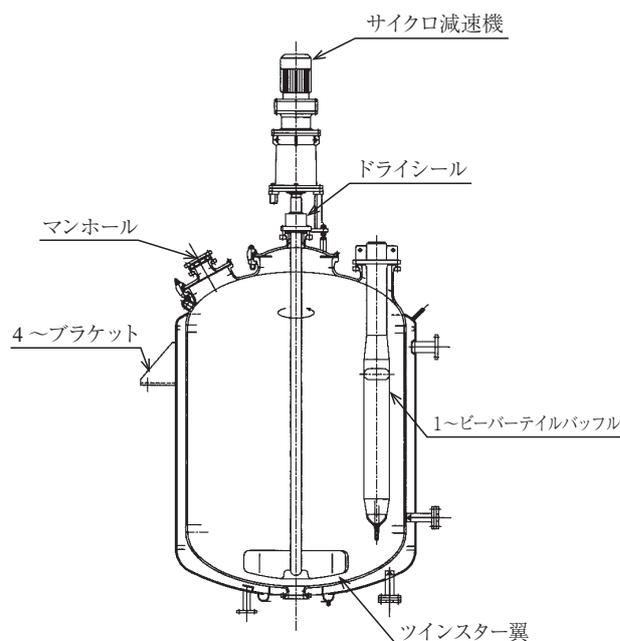


図15 ツインスター翼反応機

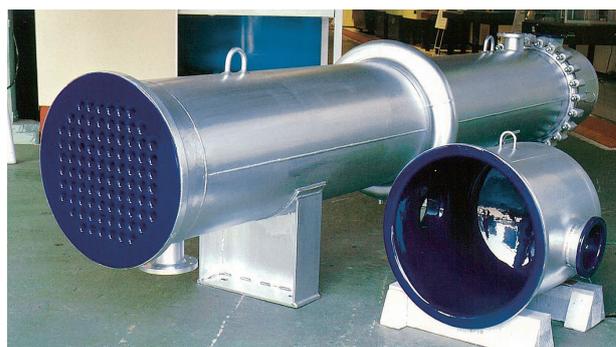


写真7 グラスライニング製多管式熱交換器

売台数が逆転し、2003年には単年度納入実績が100台を超え、グラスライニング製攪拌機の新標準翼となった。現在累計販売台数2,000台に迫るヒット商品となったことは、ユーザニーズを的確に捉え、それを上手く解決（開発）し商品化した成功例である。

### 3.5 グラスライニング製多管式熱交換器

化学、医薬品工業における製造ライン中には、プロセスのメイン機器となる前述のような反応機の周辺機器として、種々の材質、構造の熱交換器が使用されている。当社でもグラスライニング製熱交換器として、二重管式熱交換器、多重缶式熱交換器を数多く製造していたが、単位伝熱面積当たりの容積が大きいため、「もっとコンパクトなグラスライニング製熱交換器を」というユーザニーズに応える形で、80年代半ばに世界初となるグラスライニング製多管式熱交換器（写真7参照）を開発した。

多管式熱交換器は、シェル（胴）内に多数のチューブ（管）を有する、1パス型熱交換器であり、グラスライニングされたチューブ内面側をプロセス流体、シェル側を加熱または冷却媒体が通過することにより、プロセス流体の熱交換を行うものである。このチューブ内面のガラスは従来のグラスライニングと異なり、中空ガラス管を鋼管内面に溶着させるインサート方式を採用しており、含泡率が少なく、ピンホールが発生し難いものとなっている。管板とチューブは溶接一体構造としており、この熱容量差が極めて大きい部材接合部のグラスライニングは、当社の開発した特殊焼成方法により可能となった。

カーボン製熱交換器と比べると、伝熱面積当たりの総括伝熱係数は低いものの、近年の医薬・ファイン用途でのコンタミレスのニーズの高まりから、グラスライニング製多管式熱交換器の需要も高まりつつあり、生産体制を一新し完全内製化も実現し、さらなる高品質化を進めている。

#### 4. 今後の展望

グラスライニング機器の世界市場は現在約400～500億円（当社推定）であるが、近年の欧米の経済成長率の低下もあり右肩上がりとは言えない状況である。地域的には欧米では主にバルク製品用途に使用されており成長率低下および新興国への生産移転によりグラスライニング機器市場は減少傾向であり、逆に新興国（とくにインド、中国、東南アジアの一部）では経済成長ならびに欧米からの生産移転

もありグラスライニング機器マーケットは拡大する傾向にある。

一方国内マーケットは約70～100億（当社推定）であり、その用途は主に医薬・電材等のファインケミカルであり、製造工程の複雑さ、「ものづくり」の観点から新興国への生産移転も少なく、大幅に伸びることは期待できないが堅調に推移するものと見込まれる。

また、国内のグラスライニング機器に対するニーズは、コモディティ化した一般的な機器と、スペシャリティ化したより高付加価値の機器に二分化していくと予想され、とくに後者の高付加価値グラスライニング機器が増加すると見込まれることが他地域とは異なる。その結果グラスライニング機器には耐食性に加え現状以上に高度な、また複合した機能を有したガラスが要求され、またさらなるファイン化に対応したクリーンさ、洗浄性向上も要求されると考えられる。

##### 4.1 機能性ガラスとハイブリッド化

機能性ガラスの今後の方向として下記の様な展開が考えられる。

- ① 現行機能性ガラスのさらなる高性能化
- ② 複数の機能性を合わせ持ったガラス（ハイブリッド化）
- ③ 新たな機能性ガラスの開発

上記の中で、とくに②の「複数の機能性を持ったガラス」は、単に現在ある機能性ガラスのフリットを単に混合するだけでは要求する性能を発揮することはできず、また焼成（ライニング）も困難なことが予想される。そのためガラスの成分設計から検討し、そのフリットをライニングする生産技術まで検討する必要がある。

##### 4.2 コンタミレスと洗浄性の向上

グラスライニング製機器は本来その表面性状（親水性が高い、平滑度が高い）から、洗浄性は優れている。しかし化学機器として使用する上ではやはりノズル内部、フランジ部、ガスケットスキマ等、機器のデッドスペースの洗浄性の悪い箇所もある。これらを無くすることがベストであるが困難な場合も多く、その部分を洗浄するツールが重要となっている。

攪拌機（軸封）については、ツインスター、ファウドラ翼、フルゾーンの3本柱に加え、2012年にさらなるクリーン化に対応すべく無摺動クリーン攪拌機「スイングスター」を開発した（図16参照）。スイングスターは独自の旋回攪拌方式と、従来の攪拌機軸封に採用されていた回転型シールに代わる新

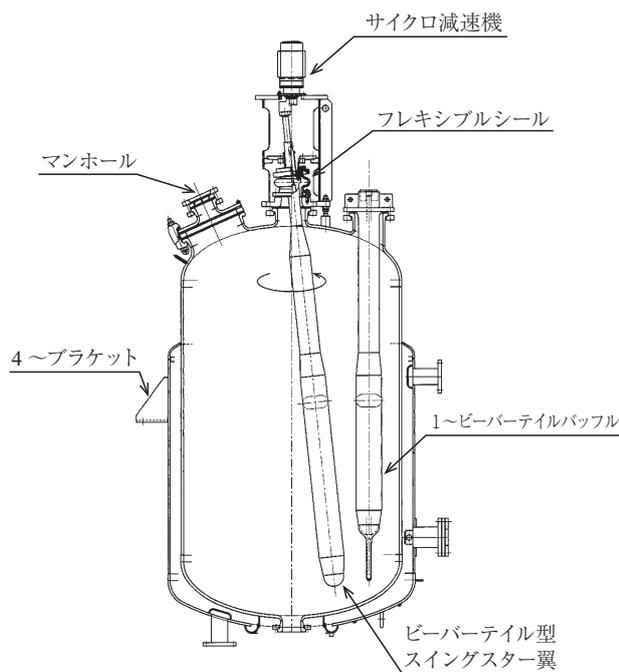


図16 スイングスター翼反応機



写真8 LD工場（ベトナム工場）

開発の無摺動フレキシブルシールを採用した新しい攪拌機である。

このフレキシブルシールは、摺動部自体が無くシール液も不要であり摺動材の摩耗粉やシール液の混入というコンタミを防止することが可能である。またシール構造もシンプルであり洗浄性にも優れておりクロスコンタミの防止にも有効である。

新しい攪拌機構と軸封方式で、製品の高純度化が進む電子材料分野や医薬・医療品分野に提案し徐々に実績を増やしている。

#### 4.3 海外市場でのさらなる成長

世界のガラスライニング機器市場の動向としては、前述のように、欧米先進国市場の縮減、新興国市場の拡大が見込まれる状況にある。

当社はこれまでも台湾、韓国をはじめタイ、シンガポールに多くのガラスライニング製機器を輸出してきたが、今後さらに海外市場での拡販で成長を求める計画である。

例えば ASEAN 主要国の中央に位置するベトナムは、近年、旺盛な需要を背景に、依然5%台のGDP成長率を維持しており、石油化学プラントや製鉄所の稼働により素材産業の発展も期待できる。

このような状況の下、当社は2013年にベトナムに製造拠点を構え、東南アジア初のガラスライニング製機器製造工場として稼働させた（写真8参照）。新工場の生産品目は、ガラスライニング製熱交換器、反応機、貯槽等を予定しており、コストセンタとしての日本向け製品のみならず、順次東南アジア市場向けに製造・販売を展開する計画である。本来ガラスライニングは他の高級耐食性金属に比してとくに耐酸性に優れ安価なコストパフォーマンスに優

れた複合材料であり、ビジネスモデルとしては地産地消モデルが適している。現地生産により東南アジア地域におけるガラスライニング製機器の需要増に対し、素早い対応が可能となり、海外市場への進出を加速する拠点と考えている。

#### むすび

当社のガラスライニングは、(株)神戸製鋼所珪瑯部門からスタートし、ファウドラ社との提携で成長し、現在ガラスライニング国内トップメーカーとして独自に海外にも目を向けて、世界のガラスライニング市場をめざし着実に活動を進めている。ここまで成長できた最大の要因は、国内ユーザからの厳しい品質向上、機能性向上の要求に応え、新製品開発、品質向上を継続してきたことは言うまでもなく、今後もこの対応は当社の基本である。

この厳しい国内市場で培われてきた当社のガラスライニング技術は国際的な視点で見ても高いレベルにあり、ここ10年程でガラスライニング開発先進国は欧州から日本へ移ったと言っても過言では無い。今後は東南アジア、新興国での潜在的な海外市場にも目を向けると同時に、最先端技術を武器に世界的に信頼されるガラスライニングメーカーとして歩みを進めていく所存である。そして、時代とともに移り変わる市場ニーズにあった新製品開発や事業展開を推進めることで、国内および海外の多様な産業の発展に貢献していきたいと考えている。

#### [参考文献]

- 1) 澤田雅光 神鋼ファウドラ技報 Vol.29 No.2 (1985) ライニンググラス
- 2) 飛翔 神鋼パンテック40年史 (1995/3)
- 3) 神鋼ファウドラニュース Vol.17 No.3, No.4 (1973) グラスライニング製重合機のポリマー付着とガラスの表面処理(イオン交換処理)(その1)(その2)
- 4) 神鋼ファウドラニュース Vol.16 No.3 (1972) グラスライニング製反応機について
- 5) 菊池雅彦他 神鋼パンテック技報 Vol.35 No.1 (1991) 高効率攪拌翼『フルゾーン』の開発
- 6) 中村隆彦他 神鋼パンテック技報 Vol.45 No.1 (2001年) グラスライニング製新型攪拌翼『ツインスター』
- 7) 榎本正 神鋼ファウドラ技報 Vol.29 No.3 (1985) グラスチール製多管式熱交換器
- 8) 小川智弘他 神鋼環境ソリューション技報 Vol.9 No.2 (2012年) 無摺動クリーン攪拌機『スイングスター®』