

# 板ガラス製造技術発展の系統化調査

Historical Development of Flat Glass Manufacturing Technologies

森 哲

Tetsu Mori

## ■ 要旨

日本の本格的な板ガラス工業は、1909（明治42）年の旭硝子の兵庫県尼崎市の工場（現、関西工場）における、ベルギーから技術導入した手吹円筒法による生産開始から始まった。ガラスの溶解は、蓄熱室をもつ反射炉形式のジューメンス式ガラスタンク窯によるものであった。1920（大正9）年には、日米板硝子（現、日本板硝子）が米国からコルバーン法を導入し、福岡県北九州市の工場（後の若松工場）で、日本で初めて連続的機械法により生産を開始している。その間、旭硝子も手吹円筒法から機械吹円筒法に進み、1928（昭和3）年には連続的機械生産のフルコール法に転換している。

ガラス製造に欠かせないタンク窯の耐火物として、1925（大正14）年、米国で高アルミナ質の電鑄煉瓦（コルハートブラック）が発明され、日本においても製造が開始され、それまでの高アルミナ質焼成煉瓦に比べて、板ガラスタンク窯の寿命が数倍に延び、板ガラスの品質面においても大きく貢献した。

戦後、板ガラス2社は、いち早く生産設備の復旧に努め、不足していた住宅の建設に支障のないよう、板ガラスを供給した。戦後の復興需要に続いて本格的な住宅・工場・ビルの建設ラッシュにより需要は大幅に増加した。こうした背景のもと、1958（昭和33）年に宇部曹達工業が中心となって、セントラル硝子を設立した。昭和30年代に入り、建築様式の変化、モータリゼーションの台頭により、それまでの2mm厚みの普通板ガラス中心から、厚板化、大板化、磨き板化が進み、板ガラス3社は海外からの技術導入も含めて、生産性の向上、品質改善、工場・設備の増設に取り組んだ。

また、コルハートブラックより、さらに熔融ガラスに対して耐食性のあるジルコニア質電鑄煉瓦が米国で発明された。日本においても燃料を発生炉ガスから重油に切り替えると共に、ガラスタンク窯の多くの部分に、この電鑄煉瓦を採用することにより、タンク窯の寿命が飛躍的に延び、板ガラスの品質が格段に向上した。この時の重油専焼窯に対する電鑄煉瓦の適切な使用方法の考え方は、基本的には現在まで引き継がれている。

高度成長期の昭和40年代に入ると、板ガラス工業にとって革命的な発明である、英国のピルキントン社のフロート法を各社が技術導入し、成形関連の飛躍的発展が始まった。

その後が発生した環境問題、2度の石油危機から、各社は公害防止に対応すると共に、成形方法の特性から、規模の拡大に有利なフロート板ガラス窯を大型化することにより、生産性の向上と、省エネルギー化を勢力的に進めていった。さらに、当初3mm厚みまでの磨板ガラスの代替であったフロート板ガラスは、まず、欧米でも取り組まれたが、日本が量産化で先行した自動車用合わせガラスの薄板化の要請により、2mm厚みまで対応できるようになり、次に同じく日本が得意のディスプレイ向けの液晶基板用の超薄板ガラスまで量産化に成功した。こうして、薄板ガラスを得意とした普通板ガラス窯はその役割を終え、昭和60年代初めにはほぼ停止し、フロート板ガラス窯全盛時代となった。

そして最近の生活様式の変化、安全や省エネルギーなどの社会的要請から、フロート板ガラスを加工した、合わせガラス、強化ガラス、複層ガラス、熱線反射ガラス、および鏡など的高级機能商品の使用比率が高まってきた。現在では、日本の板ガラス製造技術は世界的に高く評価され、製品の品質についてもトップレベルに位置している。

本報告書では、主として、戦後の約50年について、ユーザーの要請や時代の変化に対応して、また、周辺技術の応援を得て、わが国の板ガラス製造技術がどのように発展していったかを纏め、若干の考察も加えた。

## ■ Abstract

The first industrial flat glass manufacturing in Japan began at the Asahi Glass Factory in Amagasaki (the site of the current Kansai Factory) in 1909 with a cylinder blown process introduced from Belgium. The glass was melted in a Siemens-type glass tank furnace, a reverberatory furnace with a regenerator. In 1920 the America-Japan Sheet Glass Company (now the Nippon Sheet Glass Company) introduced the first Colburn process to Japan. Production began with a continuous manufacturing process in Kitakyushu, Fukuoka (later to become the Wakamatsu Factory). In the meantime, Asahi Glass also introduced a cylinder drawn process following an early cylinder blown process, and, in 1928, shifted to made use of the Fourcault process.

A high-Alumina containing electro fused cast brick (Corhart Black) was invented in the US in 1925 and was used as a key refractory for the glass melting tank furnace. When it was introduced to Japan, the life span of glass tank furnaces became several times longer than that of the previous high-Alumina containing burned brick. Consequently, the quality of glass was remarkably improved.

After World War II, the need for housing to be quickly constructed led two flat glass manufacturers to apply their energies to restoring plants so that flat glass could be supplied to the construction. Following the postwar demand for reconstruction, a serious rush to build new houses, factories, and office buildings stimulated significant increases in demand. Against this background, Central Glass, mostly capitalized by Ube Soda Industry, was founded in 1958. As Japan entered the late 1950's, changes in house construction methods and the increasing speed of motorization, caused common use sheet glass, mostly 2 mm thick at that time, to become thicker and larger as well as more polished. Thereby, three flat glass manufacturers worked on increasing productivity, improving quality, and increasing factory capacity, and used imported technology to do this.

Furthermore, a Zirconia containing electro fused cast brick with a higher corrosion resistance against the molten glass than that of Corhart Black was invented in the US. In Japan, too, while the main fuel in use was no longer producer gas but heavy oil, this brick was incorporated into many parts of the glass tank furnace. This resulted in a remarkable extension of the tank's life and the remarkably improved quality of flat glass. Technology which dated from that time enabled the electro fused cast brick to be used correctly in oil firing furnaces, and has been passed down to the present with very few changes.

Entering the faster growth period of the late 1960's, manufacturers introduced the UK Pilkington Brothers' float process, a revolutionary invention for flat glass industries.

The manufacturers, while coping with environmental concerns and two oil crises, increased the unit capacity of float glass tank furnaces, resulting in improved productivity and energy savings. Moreover, 3mm and more polished plate glass was replaced by float glass, and then beginning minimum 3mm thickness of float glass could be reduced to 2mm in Japan, because of the demand for thinner laminated glass for use in vehicles. Mass-production of these thinner glasses by Japanese manufacturers took the lead over glass produced in Europe and US, even though reduction in thickness had been implemented there first. Extra-thin glass for liquid crystal displays, (one of the highest quality products produced in Japan) were successfully mass-produced as well. Thus, sheet-glass furnaces that were mainly producing thin glass almost stopped production in the late 1980's, and the float-glass furnace reached its best days.

In response to recent changes in life style as well as the demands for safer products and energy saving, float glass based products that have high-grade performance, laminated glass, tempered glass, sealed insulating glass, solar reflective glass, and mirror, are now used more than ever. Japanese flat-glass manufacturing technologies are highly valued throughout the world because of the outstanding quality of the products.

This report, with some author's consideration, shows how flat-glass manufacturing technologies have been developed in Japan over the past 50 years after 2nd World War in response to both consumer demands and changes to technology.

## ■ Profile

**森 哲**

*Tetsu Mori*

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

昭和37年3月	京都大学工学部工業化学科卒業
昭和37年4月	旭硝子株式会社入社 板ガラス製造および技術開発に従事
昭和63年4月	本社ファイン硝子事業部長
平成6年4月	関西工場長
平成7年4月	参与・関西工場長
平成11年4月	同社定年退職
平成11年5月	(株)旭硝子ファインテクノ技術顧問
平成12年5月	同社退職
平成18年4月	国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

## ■ Contents

1.はじめに.....	121
2.板ガラス製造技術の概要.....	122
3.戦後復興と高度成長への始動 (昭和20, 30年代).....	131
4.高度経済成長期とフロートガラス時代の到来 (昭和40, 50年代).....	143
5.市場ニーズの多様化、構造変化 (昭和60年代以降).....	157
6.考察・まとめ.....	160
謝辞.....	161
付録.....	164

# 1 | はじめに

板ガラス工業は、文字通り平らなガラスを製造する分野であり、今日では、高度の製造技術と高額な資本を必要とする典型的な装置産業となった。そして、世界的にも少数の大企業に集約されてきている。板ガラスの製品には、連続製造工程（溶解-成形-徐冷）により直接製造される一次製品と、一次製品を強化、表面処理や組み立てなどの加工処理した二次製品に分けられる。

今回の技術発展の系統化に関する調査範囲として、二次製品は余りにも広範囲に及びその技術も専門的になるので、特徴的な連続設備の「ガラスタンク窯」を有する一次製品対象の板ガラス製造技術とした。また、対象期間も大きな技術発展のあった戦後の50年を中心とした。

第2章では、結晶体とは異なるガラス特有の性質、組成に少し触れ、板ガラス製造の主要工程および技術に関して、その歴史的な流れ、終戦時までの日本の板ガラス工業の展開を説明する。

第3章では、戦後の生産の再開状況、燃料転換、生産性・品質向上活動、および新しい耐火煉瓦の登場な

どについて、技術導入と関連させて述べる。そして昭和30年代からの需要構造の変化と板ガラス各社の技術的対応を詳述する。

第4章では、昭和40年代に入って、世紀の革命的な発明である、英国のピルキントン社のフロート法の導入によって始まった板ガラス製造態様の大きな変化、また環境問題、石油危機への対応とその後の変遷、海外への進出状況などについて述べる。この変化、変遷の流れは現在に至るまで続いているものであり、日本の板ガラス製造技術が世界のトップレベルに至る過程を追った。

第5章では、昭和60年代以降になって、市場ニーズの多様化・構造変化に伴う、数多くの板ガラス二次製品の登場があり、その概要を紹介する。

第6章では、フロート法の導入から始まった大きな成形技術の変化が、いかにして、その後の日本の板ガラス製造技術および製品品質を世界のトップレベルに引き上げていったかを考察し、今後のグローバル競争の熾烈化の中で、さらに進展するために技術面で取り組んでいくべき課題と対応について、少し触れる。

## 2 板ガラス製造技術の概要

ガラスは、いわゆる結晶体とは異なるので、はじめにガラス特有の性質、組成について少し触れ、次に、板ガラス製造の主要工程および技術に関して、その歴史的な流れ、終戦時までの日本の板ガラス工業の展開の概略を述べる。

### 2.1 ガラスの定義<sup>(1)</sup>

ガラス工業および工学の分野では、以下のとおりである。

多くの液体は冷却すると一定の温度で凝固して結晶体となる。しかしある種の液体は冷却すると次第にその粘性を増し、一定の温度で凝固することなくますます粘性を増して行き、ついには結晶することなく硬い固体となる。このような物質は常温から加熱するとしだいに軟化してふたたび液体となるが、結晶物質において現れるような一定溶融点を示さない。このような非結晶性の凝固物は、ガラス状態にあるといい、このような物質をガラスという。しかし現在では溶融—冷却という方法以外の蒸着やゾルゲル法などのつくり方もある。したがって、最新のガラス工学ハンドブックによれば、以下の2つの条件を満たす固体がガラスと定義されている。

- (1) 原子配列がX線的に無秩序である。
- (2) ガラス転移現象を示す。

ここで (1) はガラスが不規則な構造の非晶質であることを示している。図2.1はシリカ ( $\text{SiO}_2$ ) に例をとって、結晶とガラスの原子配列を比較したものである。(b) は不規則網目で (a) の結晶と比較すると、原子の配列が不規則である。(2) は非晶質のなかでとくにガラスといえるものを区別する条件である。従来のガラスはすべてガラス転移現象を示す。図2.2に示すようにガラスを加熱すると膨張するが、ガラス転移温度  $T_g$  でガラスは過冷却液体に変わって膨張の程度が大きくなる。過冷却液体を冷却するときには、逆に液体が  $T_g$  で固体のガラスに変わる。これがガラス転移である。

### 2.2 ガラスの組成

前節で述べたような特有な性質をつくりだすガラスの組成は、我々に身近なガラスでは古くから現代のガラスまでそれほど変わっていない。主な成分はケイ酸

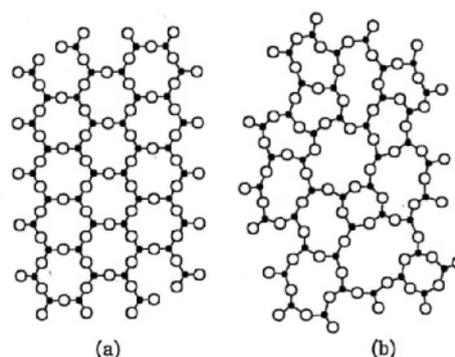


図2.1 シリカ結晶 (a) およびシリカガラス (b) の構造の二次元表示

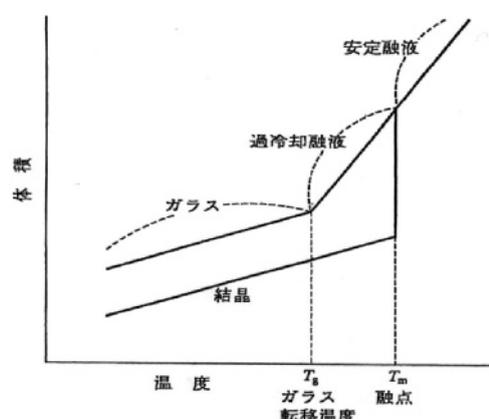


図2.2 ガラス形成液体の体積の温度変化

(シリカ・ $\text{SiO}_2$ ) である。

ケイ酸だけでもガラスはできる。天然の水晶を溶融して急冷すると人工の石英ガラスができる。これは非常にすぐれたガラスで、膨張係数が小さく、物理的・化学的に欠点は少ないが溶融するのに非常に高温を要する ( $1700^\circ\text{C}$  以上)。工業的にガラスを多量に製造するために、溶融温度を下げるの必要があり、溶融助剤としてソーダ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) を加える。しかしケイ酸とソーダでできたガラスは不安定で、水に溶けて水ガラスになる。このために石灰 ( $\text{CaO}$ ) を加えると溶融温度は少し高くなるが、水に溶けないソーダ石灰ケイ酸系のガラスができる。いわゆる板ガラス、びんガラス、食器等、現在最も多量に製造されているソーダ石灰ガラスである。

工業的に製造することができるガラスの成分を選定する標準として、<sup>(2)</sup>

- (1) 原料は同質のものが多量にしかも安価に得られること。
- (2) 経済的に限られる温度で均質の泡のないガラスが得られること。

- (3) 溶融ガラスが耐火物を強く侵さないこと。
- (4) 製品が実用に耐える程度の化学的耐久性を有すること。
- (5) 適当な温度範囲で加工性が充分にあり、かつ加工中に失透（結晶の析出）しないこと。

等が挙げられる。

特に成形温度と失透との関係から、板ガラスの組成はソーダ石灰ガラスであり、世界的にもほぼ一定している。表2.1に板ガラスの主成分を示す<sup>(3)</sup>。

表2.1 板ガラスの主成分  
(ソーダ石灰ガラス)

成分	含有率(%)
SiO <sub>2</sub>	70~74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1~2
CaO	7~12
MgO	1~4
Na <sub>2</sub> O	13~15

## 2.3 板ガラス製造工程の概要と歴史的流れ<sup>(4) (5)</sup>

ガラス製造における原料から製品に至るまでの変化は、内容的には物理的・化学的にきわめて複雑である。しかし実際の工程そのものは簡単に表せる。目標のガラス組成に相応する原料調合比が決定されれば、原料を粉末または粒状で混合し、これに適当な割合で屑ガラス（カレット、cullet）を配合して溶解する。ガラス化を完了した後、さらに温度を上げて溶解を完全にするとともに、気泡を放出させ均質化させる（清澄）。つづいて成形作業に適した粘度にするために、作業温度まで冷却する過程を経て成形作業にかかる。成形したガラスに熱的歪が残らないように徐冷操作にかける。板ガラスの場合、溶けたガラスを板状にするのが成形作業であり、徐冷後切断検査し製品とする。板ガラスの成形以外にも製びん成形、電球バルブ成形等数多の成形方法がある。一般的な製造工程を示す。

原料調合-溶解-清澄-成形-徐冷-切断-製品（一次製品）

この工程は特に溶解（溶融）と成形が重要であり、20世紀の近代化にも大きく関係している。

ガラス工業が20世紀の近代的な工業としての形をととのえるに至った顕著な功績は、19世紀後半、主としてドイツのジーメンス（Siemens）兄弟の仕事に帰せられる（有名なジーメンス兄弟、長兄は電気技術者でドイツ電気工業の開祖、ジーメンス社の創業者）。それまではろつば窯による作業が一般的であり、溶解・

清澄・成形の各操作段階が日々周期的に反復されるものであり、生産性はきわめて低いものであった。それを一変させたのがフリードリッヒ・ジーメンス（Friedrich Siemens）と彼の兄弟たちの協力によって1867年に考案された“ジーメンス式ガラスタンク窯”であった。それはコークス炉ガスまたは発生炉ガスを燃料とした鋼の溶解用平炉の加熱方式（蓄熱室をもつ反射炉、1856年発明）をガラス溶解に応用し、しかも広い被熱面をもったタンクの中を溶融ガラスを移動させることにより、溶解、清澄、成形の全操作を連続的に行うものであった。しかも、この蓄熱式加熱方法により高温を得ることが容易となり、ガラスの溶解技術が一大進歩をとげた。このジーメンス兄弟考案の連続窯はその後19世紀末にはドイツ人オッペルマン（A.Opperman）、ベルギー人ゴップ（E.Gobb）などにより改良され、ますます大型で高性能を発揮するようになった（2.6節で触れるが、1909年、日本で最初に板ガラスを工業的に生産した旭硝子 尼崎工場の連続窯はゴップの設計によるものであった<sup>(6)</sup>）。

今日、光学ガラスを除くほとんどあらゆる種類のガラス製品の製造に適用されるいろいろな形式の連続式タンク窯の基本方式は、この時点で確立されたと云える。

さらに、板ガラス工業の場合も他のガラス工業と同様に20世紀に入って成形機械の発達によって著しい進歩があった。それまでの窓用板ガラスは作業する人の呼気によってできるだけ大きな球または円筒を吹成し、これを二次的に展開する「クラウン法」（人口球吹法、Crown Glass Process）および「手吹円筒法」（Cylinder Blown Process）によりつくられてきた。その後、

- (1) 1902年、米国のラバース（Lubbers）の開発による、直径0.6m、長さ12mに達する巨大な円筒を機械的に吹成して、延展炉で軟化させつつ平板におし広げる「ラバース式機械吹円筒法」（Cylinder Drawn Process）
- (2) 1910年、ベルギーのフルコール（E.Fourcault）による自動平板引上法「フルコール法」
- (3) 1916年、米国のコルバーン（I.W.Corburn）による自動平板引上法「コルバーン法」
- (4) 1922年、米国のフォード自動車会社（Ford Motor Co.）で自動車王ヘンリーフォード（Henry Ford）考案の「ロールアウト法」

この方法はガラスタンク窯の末端部からガラス素地を2本の水冷ロールではさんで圧延する方法であり、後工程の徐冷、研磨の工程までを一貫す

る流れ作業方式「フォード方式」として工業化された。

(5) 1925年、米国のピッツバーグプレートグラス社 (Pittsburgh Plate Glass Co.) によって開発された自動平板引上法「ピッツバーグ法」

と相次いで成形、研磨方法が開発され、この後これらの方式が永く基本的に継承された。そして、1952年、英国ピルキントンプラザーズ社 (Pilkington Brothers Ltd.) による画期的な「フロート法」の発明があり、今日フロート板ガラス時代へとつながっている。

連続式タンク窯、成形方法および研磨方法について、2.5節以降でもう少し詳しく説明する。

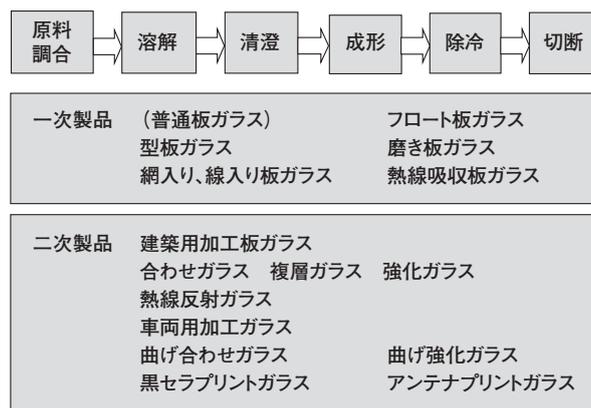


図2.3 板ガラスの製造工程と主要製品

## 2.4 板ガラスの種類と板ガラス原料

### 2-4-1 板ガラスの種類

板ガラスは組成上からソーダ石灰ガラス ( $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ ) に属し、製造工程 (溶解-清澄-成形-徐冷-切断) から直接製品とする一次製品と、この一次製品を強化、表面処理や組み立てなどの加工処理した二次製品とに分けられる。板ガラスの製造工程と主要製品を図2.3に示す<sup>7)</sup>。

なお、一次製品の分類において、透明板ガラスは、フロート板ガラスが出現した当初は、普通板ガラス (フルコール法、コルバーン法、ピッツバーグ法、旭式引上げ法)、磨き板ガラス、およびフロート板ガラスに分けられていた。その後、昭和50年代後半以降フロート板ガラスが全盛となってからは普通板ガラスは姿を消し、また磨き板ガラスについても、フロート方式では製造できない網入り・線入り板ガラスの磨き板ガラスだけが製造されている。

また、最近めざましい発展を遂げている平板ディスプレイ用ガラスは、形状は板ガラスであるが、組成、成形方法が異なるものもあり、エレクトロニクス用ガラスとして別に分類され、現在では次の2種類が挙げられる。①液晶 (LCD) 用ガラス基板—ソーダ石灰ガラス・無アルカリガラス、②プラズマディスプレイ (PDP) 用ガラス基板—高歪点アルミノケイ酸塩ガラスであり、第5章で説明する。

### 2-4-2 板ガラスの原料<sup>8)</sup>

板ガラスの主な原料は、けい砂、ソーダ灰、ぼう硝、長石、石灰石、苦灰石、ガラス屑 (カレット) である。このほかに副原料として、ガラス溶融時の清澄 (泡抜き、均質化) および溶融促進の目的で添加される原料や、建築や車両用の熱線吸収板ガラスなどに着色剤と

して添加される原料がある。

ガラス製造の溶解の基本原料はあくまでも、けい砂とアルカリ源 (ソーダ灰) であり、以下にけい砂とソーダ灰について技術的変遷の概略を述べる。

工業的に生産される板ガラスには、通常70~74%のシリカ ( $\text{SiO}_2$ ) が含有されている。このシリカの原料はガラス用けい砂であり、天然けい砂と人造けい砂がある。天然けい砂には、海浜または砂丘に堆積した石英の円粒からなる浜砂、花崗岩の風化地域に沈積した粘土質砂層から得られる水洗けい砂とがある。人造けい砂には、風化のため組織の置換した砂岩や石英片岩を機械的に粉砕してつくられるけい砂がある。

旭硝子の場合を例にとり原料けい砂の変遷を見てみる。その変遷から原料入手への戦争の影響、原料の開発経緯が理解できる<sup>9)</sup>。

1909 (明治42) 年、初めて兵庫県尼崎の工場で、手吹き円筒法により工業的に板ガラスの生産を開始した時には紀州白浜の浜砂 ( $\text{SiO}_2$  92%程度) が用いられた。不純分が多く、原料として適さなかったが、ほかになく、やむを得ずこれによっていた。その後、全国の海岸が調査され、1914 (大正3) 年~1917 (大正6) 年に、朝鮮木浦西方の大黒山島 ( $\text{SiO}_2$  95%) および朝鮮黄海道九味浦 ( $\text{SiO}_2$  97%) の砂が見出された。この時点 (1920年) において、白浜の海岸砂の使用は鉱量と品質面から終わり、結局太平洋戦争の終戦までの長期間、旭硝子の窯の原料けい砂は朝鮮九味浦の砂が主に使用された。

一方で、鉄分の少ないけい砂を求めて (欧米品に比べて板ガラス製品の青味が強い) 調査が続けられ、仏印 (ベトナム) カムラン湾のけい砂が導入された (1925年から始まり日華事変の進展により1939年に停止)。

さらに、国内では人造けい砂として伊豆けい砂が開

発された。1938（昭和13）年から伊豆けい岩の加工粉碎品が使用され、特に終戦後しばらくは伊豆けい砂が主役であった。現在も粒度分布に問題はあるが使用されている。次いで、1949（昭和24）年頃愛知県瀬戸地方のけい砂が開発された。粘土質砂層から採取される水洗けい砂（陣屋けい砂）である。当初は水洗けい砂をふるい分けるだけであったが、コニカルミル粉碎、テーブル選鉱法による粘土・不純分の除去と、順次供給能力を増加させていった。1965（昭和40）年に、金属鉱石の選鉱法である浮遊選鉱法をけい砂に応用するという画期的な取組みにより、資源としてフル利用していなかった粘土質砂層から長石、鉄分を除去してカムランけい砂に近い品質の原料けい砂の生産に成功し、しかも長石まで併産できることになった（大畑けい砂、大畑長石）。その間、1960（昭和35）年からカムランけい砂の輸入を再開するも、1965（昭和40）年ベトナム戦争で停止した。

その後、東南アジア、オーストラリア地域の情報収集が進められ、1984（昭和59）年頃には、オーストラリア（ケープフラッター）の天然けい砂（SiO<sub>2</sub> 99.8%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.01%）が輸入され、現在の主流となっている。

粒度についても、ソーダ灰との組み合わせで、溶解に関する重要な要件である。けい砂の粒度が細かい場合には、初期のソーダ灰との反応が速く、発泡と共にダストの飛散も増し、反応時の泡層も厚くなるので、板ガラスのような平炉形の窯では熱放射がガラス素地内に浸透しにくくなる。このため製品に微細な泡が形成されやすい。一方、粒度分布の幅が広いときには、細粒がまず溶解し、粗粒は未溶融砂利やコード（すじ）の原因となりやすい。シリカ純度、鉄分、粒度分布からみて、海外けい砂は特に溶解の要件にかなっている<sup>(10)</sup>（表2.2、2.3）。

アルカリ源については、歴史的にみると18世紀後半

に起こった産業革命にまでさかのぼることができる。それまで、ガラス原料のアルカリ源は木灰や海草灰に依存していたが、1790年、フランスのルブラン（Leblanc）が食塩からソーダ灰（Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>）の製造方法（ルブラン法）を発明し、原料面での近代化の第一歩となった。その後、1863年にはベルギーのソルベイ（Solvey）により、化学技術史上で重要な発明とされる、アンモニア・ソーダ法（ソルベイ法）が発明され、ルブラン法より品質的に優れたソーダ灰が供給されることになった。そして、1867年には、すでに述べたドイツのジーメンス兄弟によって発明された蓄熱式ガラスタンク窯の登場もあり、ガラス工業が画期的な進歩を遂げることになる。

日本では、1909年の工業的な板ガラス生産の当初からソーダ灰は輸入に頼っていた。しかし、第一次世界大戦の勃発（1914年）により、板ガラス製造のためのソーダ灰の輸入に困難をきたし、1917（大正6）年に旭硝子が九州牧山工場（現北九州工場）で、わが国における最初のアンモニア・ソーダ法（以降、ア法と呼ぶ）による工場の操業を開始している。続いて、1918（大正7）年には日本曹達工業（現トクヤマ）が生産を開始した。その後、多くのア法によるソーダ製造会社が発立され、生産が続けられた。1936（昭和11）年にはセントラル硝子の母体となる宇部曹達工業が発立され、同じくア法によるソーダ灰が生産されている。

最近ではソーダ灰はア法による製造のほか、か性ソーダの炭酸化によるものもあり、また米国では天然のソーダ灰が精製され、ガラス原料として使用されている。わが国にも輸入され、板ガラスのみならず多くのガラスメーカーで使用されている。

アルカリ源としては、ソーダ灰のほかに、けい砂の溶解および清澄に重要な役割を果たす原料として、ほう硝（Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>）があり、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>が分解してNa<sub>2</sub>Oとしてガラス中へ供給される。

表2.2 代表的なガラス用けい砂の化学分析値（wt%）

	フラッター (オーストラリア)	サラワク (インドネシア)	カムラン (ベトナム)	陣屋 (愛知県)	瀬戸 (愛知県)	宇久須 (静岡県)
SiO <sub>2</sub>	99.80	99.78	99.70	97.00	95.90	95.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.03	0.08	1.50	2.22	1.5
TiO <sub>2</sub>	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.012	0.02	0.023	0.09	0.075	0.1
CaO	<0.01	tr	0.01	0.02	<0.01	tr
MgO	<0.01	tr	0.01	0.04	<0.01	tr
R <sub>2</sub> O	n.d.	n.d.	n.d.	0.8	1.41	0.15

tr：存在の可能性あり， n.d.：未検出

表2.3 代表的なガラス用けい砂の粒度分布 (wt %)

粒度 (mm)	フラタリー (オーストラリア)	サラワク (インドネシア)	カムラン (ベトナム)	陣屋 (愛知県)	瀬戸 (愛知県)	宇久須 (静岡県)
>1.0	—	—	—	—	—	3.4
1.0~0.5	5.0	3.8	1.2	13.7	3.9	36.0
0.5~0.3	25.0	2.8	16.7	38.6	} 83.1	14.8
0.3~0.2	66.1	58.8	41.7	22.8		7.2
0.2~0.1	3.7	28.2	37.2	19.4		10.0
<0.1	0.1	6.4	3.2	5.4	12.3	28.5

## 2.5 板ガラス製造の主要工程および技術

### 2-5-1 溶解 (溶融)

板ガラス原料の溶解は連続式タンク窯で行われる。連続式タンク窯は、19世紀後半ドイツのジーメンス兄弟が三室式るつぼ窯の非連続性を改良しようとして、鉄鋼の平炉を参考に考案した窯 (炉) であり、基本的構造は現在も変わっていない。耐火煉瓦で構成された大型の槽の中で、原料投入、溶融、清澄、冷却、成形が連続して行われる。槽の中にガラス原料を入れ、その上部に焰を流し、焰からの直接の放射と、天井および横壁からとの放射によりガラス原料を溶融する反射炉の一形式で、溶解槽、冷却槽 (作業槽) および熱回収設備 (蓄熱室) から成り立っている。槽に入っているガラスの量は数百トンから2,000トン位までである。石炭発生炉ガスを燃料とする側面加熱式タンク窯の溶

解槽の立面図を示す<sup>(1)</sup> (図2.4)。

板ガラスの主原料は、けい砂、ソーダ灰、ほう硝、長石、石灰石、苦灰石、屑ガラス (カレット) などであり、燃料は1955 (昭和30) 年頃を境に、石炭発生炉ガスから重油に転換された。

溶解槽の一方の口から投入された原料バッチは溶解槽で1,500~1,600℃に加熱され、溶融、清澄されて冷却槽 (作業槽) に入り、ついで成形機械により成形される。溶解槽と冷却槽との接続形式については技術変遷があり第3章で詳述する。

タンク窯の溶解槽を出る排ガスの温度は1,400℃以上の高い温度であり、排ガスの保有熱量を蓄熱室で回収する。蓄熱室には空積煉瓦が積んであり、排ガスを通して、煉瓦を加熱した後、同じ室へ空気あるいは燃料ガスを流して予熱する。蓄熱室についても燃料の発生炉ガス (石炭) から重油への切り換えがあり、その技術変遷について第3章で詳述する。

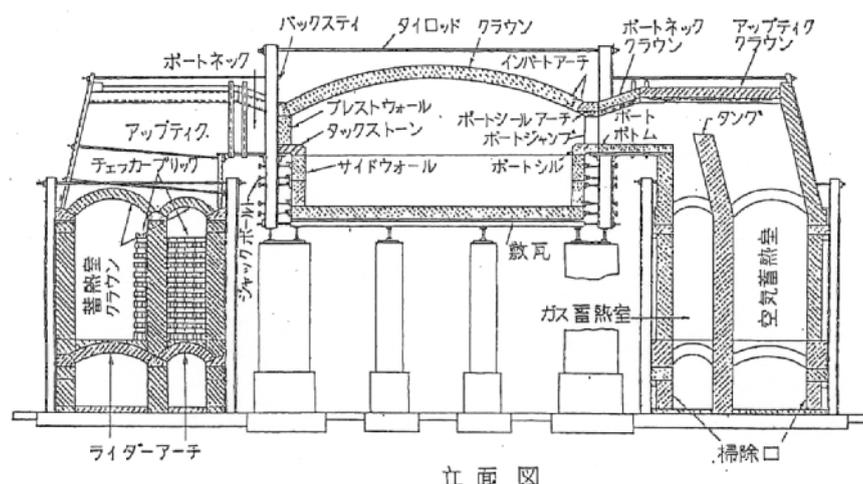


図2.4 発生炉ガス側面加熱式タンク窯

## 2-5-2 成形

### (1) 自動平板引上法が登場するまでの板ガラス成形法

#### ①クラウン法 (Crown Glass Process) <sup>(12)</sup>

7世紀頃シリア人が発明した方法である。鉄パイプの先に溶融ガラス素地を巻き取り、これを西洋梨の形に吹き、別の鉄棒の先端に熱いガラス素地をつけて梨の下端に熔着し、図2.5のように切り離し、再加熱して軟化し、鉄棒を高速回転し遠心力によって平らな円板とする。

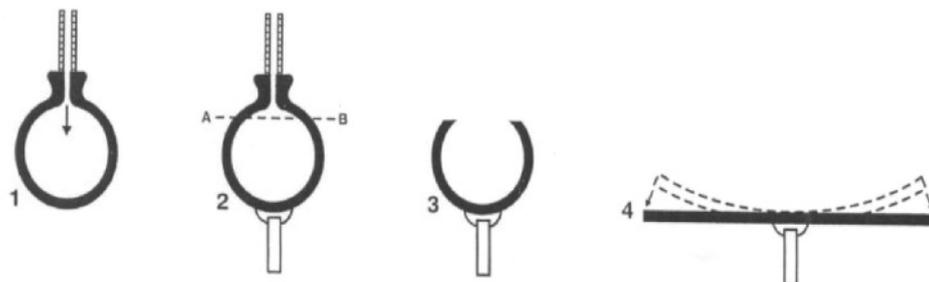


図2.5 クラウン法製造工程図

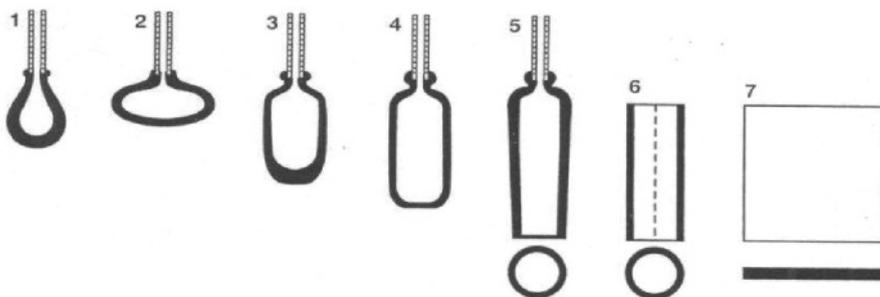


図2.6 手吹円筒法製造工程図

#### ③ラバース式機械吹円筒法 (Cylinder Drawn Process)

革新的な大量生産方式の始まりと言われるもので、1902年米国人のラバース (J.H.Labbers) が完成した。これはガラス素地をガラスタンク窯から大型つぼに移し、この中に吹口金具を押し込み、圧搾空気を吹き込みながら吹口を徐々に引上げる方法。縦割りして板状にするのは手吹円筒法と同じである。

ラバース式は手吹円筒法に対して大規模な生産に寄与したが、間欠的方式で能率が悪く品質も良くなかった。やがて、自動平板引上法が開発されるにおよんで、日本の場合では、1933年を最後に終わりを遂げた。

### (2) 自動平板引上法による普通 (透明) 板ガラスの成形法 <sup>(13)</sup>

#### ①フルコール法 (Foucault process)

ベルギー人、フルコールが発明し1910年代に開発が進められた方式である。溶融窯の前端の引上げ室にデビトーズ (debiteuse) とよばれる中央に細長いスリ

#### ②手吹円筒法 (Cylinder Blown Process)

1800年頃からクラウン法に代わって板ガラス成形の中心となっていたが、19世紀半ばのドイツのシーメンス兄弟の蓄熱式加熱方法による連続式ガラスタンク窯の出現で一大進歩したガラス溶解技術と共に、手吹円筒法により、従来より品質のよい薄いガラスがつくられるようになった。溶融素地を吹棹で円筒状に吹き、その両端を切り離し、円筒を縦割りして、窯内で再加熱して押し広げる方法である (図2.6)。

ットのある耐火物をガラス面に少し押し込み、スリットから盛り上がってくるガラスを鉛直に引上げる方法。板ガラス帯はすぐ水冷器によって両面から冷却され、引上げ塔を上がっていく。この方式で製造できる板ガラスは厚み1~8mm、幅1.5~2.5m程度である。この方式では一つの溶融窯に3~11機の多数の引上げ機が設置でき、需要に応じた厚みや面積の製品を同時に生産できる (図2.7)。

この方式では、ガラスの立上がりでデビトーズのスリット表面の薄層ガラスが失透 (結晶が析出すること) して成長し、引上げられるガラスに細い筋を刻印しやすい (線状痕がでやすい) ことが問題である。

#### ②コルバーン法 (Colburn Process)

米国人、コルバーンによって発明され、1916年リビーオーエンス社 (Libbey Owens Co.) で完成された方式である。溶融窯前端に続く浅い引上げ室のガラスの自由表面からガラス帯が引上げられ、ガラス面に近い両端で、ナールロール (knurl roll) とよばれる溝

の刻まれた一对の水冷ロールによってガラス帯の立上がり部を固定する。ガラスは立上がり線に向かって流れる間に冷却器で一様に冷却され、粘度の高い表面ガラスが引上げられて帯状ガラスが形成される。ガラス面から約60cmくらい鉛直に引上げられたところで、端部を主にガス炎で加熱軟化され、ベンディングロール (bending roll) によって水平方向に曲げられ、徐冷レヤーに送られる。

コルバーン法では、ベンディングロールの表面の滑らかさが最も重要である。この方法では、1つの窯に2機の引上げ機を設置しているのが普通である。ガラス帯の厚みは1~8mm、幅2.5~4mである (図2.8)。

### ③ピッツバーグ法、(Pittsburgh Process)

1925年、米国のピッツバーグ社 (Pittsburgh Plate Glass Co.) によって採用された方式で、フルコール式と同様な鉛直引上げ法であるが、ガラス面に浮かしたデビトーズの代わりに、ガラス面から5~10cm下にドロバー (draw bar) とよぶ細長い耐火物を沈め、その直上のガラス面から、その上に設置した一对の水平冷却器の冷却によって板ガラス帯を引上げる方法。ガラス帯の厚みは通常3~8mm、幅2~3.2mである。この方式は引上げ室内の溶融ガラスの温度がフルコール法より約100℃高く、失透 (結晶の析出) の問題は少ないが、自由表面から引上げることで、溶融ガラスの化学的不均質があると厚みの不均一を生じやすい問題がある。1つの窯に接続される引上げ機の数に2~9機程度である (図2.9)。

前記フルコール法の弱点を大きく改良した旭式引上げ法 (図2.10) および磨板ガラスにとってかわった革命的技術のフロート法については、第4章で詳しく説明する。

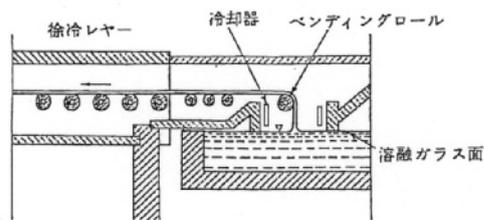


図2.8 コルバーン式引上法

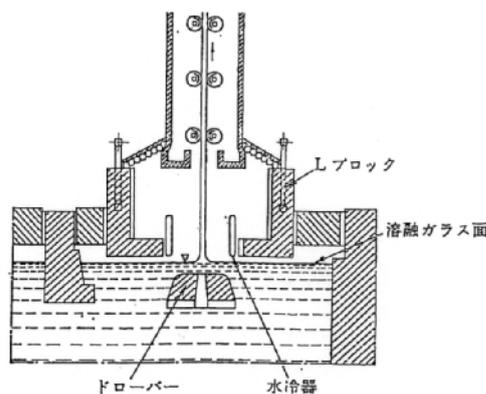


図2.9 ピッツバーグ式引上法

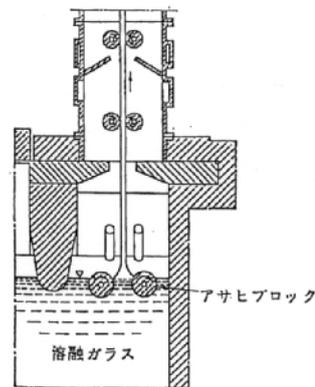


図2.10 旭式引上法

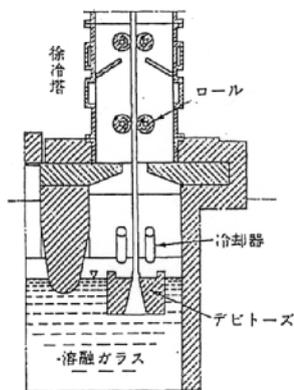


図2.7 フルコール式引上法

### (3) 型板ガラス、網入板ガラス、磨素板ガラス成形法<sup>(14)</sup>

#### ①ロールアウト成形

基本的には1920年代に米国のフォード自動車会社などによって開発された水平連続圧延法に由来するものである。溶融窯の前端に接続する堰から溶融ガラスを一对の水冷ロールの間に供給し、ロールのギャップで成形する。型板ガラスの場合、通常下ロールに刻んだ型模様をガラスに転写する。ガラスの厚みはギャップで決まり、またガラス引出し量はロールの回転速度で決まる。厚み2~10mm、幅1.5~2.5m程度 (図2.11)。

網入板ガラスの場合、ロールアウトのギャップに網を入れるのが一般的で、下部挿入法、上部挿入法があり、この他に2セットの対ロールの途中で網を入れるサンドイッチ法 (ダブルフロー法) がある。

磨板ガラスは永い間、ロールアウト成形法により磨素板ガラスをつくり、これを磨くことにより製造されていた。また網入磨板ガラスも同様にロールアウト成形法により網入の磨素板ガラスをつくり、これを磨くことにより製造されていた。

しかし、フロート法の発明により、フロート板ガラスが磨板ガラス相当の品質確保が可能となったことから、透明の磨板ガラスは市場から姿を消し、フロート法で製造できない網入磨板ガラスのみ、その磨き用素板をロールアウト成形法でつくっている。

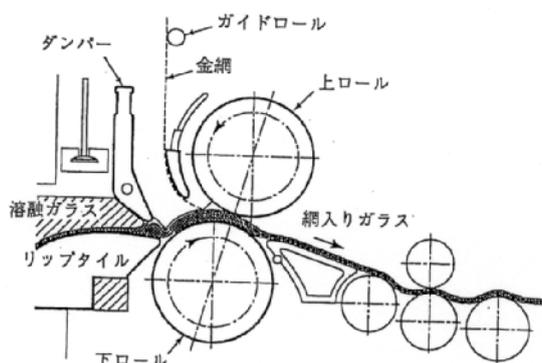


図2.11 型板・網入りガラス成形法（上部挿入法）

金網を挿入しない場合は、ダンパーなどを取り外し、さらに上下ロールを下げると通常のロールアウト成形法になる。

### 2-5-3 磨き法<sup>(15)</sup>

ロールアウト法ではガラスを冷却し成形する際に、ガラスはロールの低温度の表面に接触するため、その表面は平滑にならない。またフルコール法、コルバーン法、ピッツバーグ法では、ガラスが引上げられる間に、粘性が急激に変化する温度範囲でガラスが非常に大きく引き伸ばされるため、ガラス温度の不均一やガラスの化学的不均質に基づく引き伸ばしの不均一が大きく、製品のゆがみは避けられない。表面が平滑で、かつ透視でも反射でもゆがみのないガラス板は、まずロールアウト法により磨素板をつくり、これをグラインディング (grinding 荒摺り) により完全に平らにし、ついでポリッシング (polishing) で表面の微細な凹凸を除去する方法でつくられる。

磨き法は16世紀に発明され、最初はポットで熔融したガラスを板の上に鑄込んで素板をつくり、この表面を磨いていたが、第一次大戦直後にドイツのビショー (M.Bicherou) がポットの熔融ガラスを回転ロールで圧延成形し素板を製造するビショー法を開発した。

1922年には前項の成形法で述べたように、米国フォ

ード自動車会社で連続ロールアウト法による素板を磨く方法が開発された。

素板を鉄製の台に石膏で張り付け、鑄鉄板でガラス面をけい砂、ガーネットなどの研磨材で平らに削る。次いで細かい研磨材を供給してガラス面の粗さを小さくする。その後、鑄鉄板をフェルトに替え、弁柄または酸化セリウムで細かい凹凸を磨き去って平滑な面に仕上げる。当初は片面ずつ磨く方法であったが、1935年には英国ピルキントン社により、ロールアウト成形と連続磨きを直結して、成形され徐冷されたガラス素板帯の上下に磨き機を設置し、ガラスの両面を同時に磨くツイン法 (twin grinding process) が開発された。引き続き、1937年頃のサンゴバン社により、ポリッシングまで両面同時研磨できる方法にまで発展し、さらにベルギーのサンプル社によって改良が進み、デュプレックス方式 (Duplex process) とよばれる自動連続同時研磨方式につながった。窯から出てきた素板が一度も切断されることなく、両面同時に粗摺と研磨が行われるため、生産効率が一挙に増大した。

## 2.6 終戦時までの日本の板ガラス工業<sup>(16)</sup>

### (1) 明治維新政府の企画

1876 (明治9) 年、政府は工部省の経営のもとに品川硝子製造所を設立し、ガラス器と板ガラスの製造を企画したが、手吹円筒法による板ガラスの製造には、技術の未熟さから成功に至らなかった。

### (2) 旭硝子の設立

日本で最初の本格的な板ガラスの国産に向けて、1907 (明治40) 年に旭硝子 (株) が設立された。そして、1909 (明治42) 年、旭硝子 尼崎工場 (現関西工場) でベルギーからの技術導入のもとに、手吹円筒法による板ガラスの生産が開始された。1914 (大正3) 年には牧山工場 (現北九州工場) でラバース式機械吹円筒法による板ガラス製造を開始し、1916 (大正5) 年には鶴見工場 (現京浜工場) にラバース式を増設した。

この間、ヨーロッパでは1914 (大正3) 年に第一次世界大戦が勃発し、それまで日本の窓ガラス需要の8~9割を供給していたベルギー品を主体とした輸入が途絶えたため、旭硝子が国内需要を一手に引き受けるばかりでなく、アジアを中心に輸出するまでになった。

一方、大戦によって輸入原料のソーダ灰や耐火煉瓦の入手が困難になり、1916 (大正5) 年に耐火煉瓦工場を、1917 (大正6) 年にはソーダ工場を建設し、自給を開始した。さらに1925 (大正14) 年には、満州に

満鉄との共同出資で昌光硝子（株）を設立し、日本の技術の海外進出の先がけとなった。

### (3) 日本板硝子の設立

1918（大正7）年、米国のリビーオーエンス社からのコルバーン法の板ガラス製造に関する特許権を得た日米板硝子（株）（現 日本板硝子）が設立され、北九州市に板ガラス工場（後の若松工場）を建設し1920（大正9）年から生産を開始した。コルバーン法は直接板引き法であり、機械吹円筒法に比べ生産性の面で数段すぐれていて、日本ではこれから板ガラスの連続的機械生産が始まった。1931（昭和6）年に社名を日本板硝子に改め、1936（昭和11）年には四日市工場が建設された。

### (4) 本格的工業化

旭硝子も1928（昭和3）年には尼崎工場をフルコール法に改造し、それまでの円筒法から連続的機械生産方法に切り換えた。引き続き他工場も、ラバース式からピッツバーグ法、フルコール法に切り換え、生産性の向上と規模の拡大を図っていった。さらに、新しい窯用耐火物として高アルミナ質の電鑄（電気溶融鑄造）煉瓦「コルハートブラック」が米国で開発され、この煉瓦の採用は、窯の寿命、板ガラスの品質向上に大きく貢献した。旭硝子の場合、この煉瓦の採用とフルコール法操業の安定化により1932（昭和7）年にはそれまで全量輸入によってまかなわれていた品質要求の厳しい写真乾板用ガラスの製造にも成功した。コルハートブラック煉瓦は旭硝子が製造技術を導入し1932（昭和7）年には製造を開始した。

1929（昭和4）年から1931年頃の世界の経済恐慌の

後、経済活動が復興すると共に、建物の近代化が進み、板ガラスは品質の多様化が要求され、それまで単に普通板ガラスだけを生産していた旭硝子、日本板硝子も1935（昭和10）年から1936年にかけて、型板ガラス、磨板ガラスの製造技術を導入し工場を建設した。

1935（昭和10）年～1937年には日本の板ガラス工業が、国内需要のほとんどの種類を充足できるようになった。1937（昭和12）年、板ガラス製造会社5社、8工場、14窯。その月産能力は73万箱（1箱は9.29㎡）に達し世界一流の生産能力を有した。この時こそ、日本に本格的な板ガラス工業が確立した時といえる。しかし、1937（昭和12）年の日華事変勃発、1941（昭和16）年の太平洋戦争突入とともに、普通板ガラスは年々生産の縮小を余儀なくされ、磨板ガラスと安全ガラス（強化ガラス、合わせガラス）だけが航空機、艦船、自動車などの軍需物資に関連して、フル操業という異常事態を迎えていた。

### (5) 板ガラスメーカーの動き

旭硝子、日本板硝子の他に、明治以降、板ガラスの製造を企画した会社が多数生まれた。1934（昭和9）年創業の徳永板硝子、1937（昭和12）年創業の昭和板硝子、そしてユニオン硝子、大正板硝子、豊洲硝子、川南工業、徳永硝子などである。しかしいずれも技術上の困難、販売組織上の欠陥、莫大な資金負担などを克服できずに終わっている。

なお、セントラル硝子については、第3章で詳述するが、1958（昭和33）年に設立され、現在、日本の板ガラスメーカーは、旭硝子、日本板硝子、セントラル硝子の3社となっている。

# 3 | 戦争復興と高度成長への始動（昭和20、30年代）

本章では、戦後の生産の再開状況、燃料転換、生産性・品質向上活動、および新しい耐火煉瓦の登場などについて、技術導入との関係も合わせて述べる。そして昭和30年代からの需要構造の変化と板ガラス各社の技術的対応を詳述する。

## 3.1 生産の再開<sup>(17)(18)</sup>

戦時中の板ガラス製造工場は企業整備指令や原材料逼迫により、設備の廃棄、作業休止が続き、1945（昭和20）年の終戦時に操業を継続していた工場は日本板硝子の二島工場（コルバーン式引上げ窯、1950年、若松工場に改称）だけであった。二島工場の1窯は、1945（昭和20）年2月操業スタートした状況で終戦を迎えた。板ガラスの製造に必要な石炭は極端に出炭量が落ち込んでおり、加えて戦後復興のためにとられた傾斜生産方式による厳しい割り当て制度によって、思うように調達ができなかった。ソーダ灰の入手難も生産の障害であった。このほか原料けい砂の入手も容易ではなかった。

板ガラス製造工場で空襲による戦災を受けたのは日本板硝子の四日市工場だけであった（四日市工場は1944（昭和19）年12月に東海地震も被災している）。したがって原燃材料を入手できれば製造を再開できる設備もあった。三菱化成 尼崎工場（現旭硝子 関西工場、戦時中1944年、旭硝子は日本化成工業と合併、三菱化成工業と改称、戦後1950年、企業再建整備法により旭硝子は三菱化成より分離独立した）の2号窯（フルコール式引上げ窯）は1944（昭和19）年に冷却修繕を行い停止していたので、燃料である石炭の割り当てを受けて1945（昭和20）年11月から作業を開始することができた。なお1946（昭和21）年には三菱化成 牧山工場（現旭硝子 北九州工場）、日本板硝子 四日市工場も設備機械の復旧、原燃材料の手当てをして操業を再開、1949（昭和24）年には石炭をはじめとする資材事情も好転して、三菱化成（現旭硝子）3工場、日本板硝子2工場の普通板ガラス製造5工場の操業が戦後始めて勢ぞろいした。

戦後、天皇陛下は全国各地の戦災復興、産業振興ぶりを視察され、1947（昭和22）年6月に三菱化成 尼崎工場（現旭硝子 関西工場）に、1951（昭和26）年11月には日本板硝子 四日市工場にも行幸され、板ガラスの製造状況をご覧になった。

1947（昭和22）年に発表された第一次経済白書では、終戦直後の住宅不足数は420万戸となっており、不足している住宅の建設に支障のないよう板ガラスを提供することは、板ガラス工業に課せられた社会的使命であった。

こうした住宅市場の要求と、さらに朝鮮動乱は日本経済の復興の度合いを早め、工場建設、ビル建築のラッシュを引き起こし、板ガラス需要の増大に拍車をかけた。一方、車両工業の発展も続き、各種板ガラス二次製品の増大に伴い、その素材となる普通板ガラス、磨板ガラスの品質向上を促した。

板ガラスの生産量は1951（昭和26）年から1952（昭和27）年にかけて、戦前のピークであった1937（昭和12）年の460万並換箱（1並換箱は2mm厚みのガラス9.29㎡に相当し、業界特有の単位）に追いつき、これを追い越した<sup>(19)</sup>。

板ガラス製造2社は、戦争中に遅れた技術の回復のため海外技術の導入も1950（昭和25）年頃から行うが、それ以前にも独自技術や研究および社外委託研究等により、精力的に生産量の増大と品質向上を図った。

1949（昭和24）年に発表されたわが国初の技術白書において、鉱工業技術の中で、世界的に水準の高いものとして板ガラスも挙げられている（他に、製鉄、水力発電、電気機械、鉄道車両、造船、アンモニア合成、セメント）。戦争という大きなブランクを間にはさみながら、なお板ガラス工業が高度の水準を維持していた<sup>(20)</sup>。

## 3.2 燃料転換（発生炉ガスから重油へ）

### 3-2-1 発生炉ガス<sup>(21)</sup>

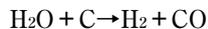
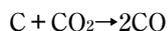
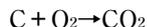
第2章、第4節で述べたように19世紀後半になると、石炭のガス化装置が発達すると共に、ドイツのジーメンス兄弟が1856年に蓄熱式の加熱方法を考案し、最初に製鋼用の平炉に応用し、次に1872年にガラスの溶融用のタンク窯を考案した。

タンク窯の溶解（溶融）槽から出る燃焼排ガスの保有熱量を蓄熱室で回収して、燃焼用空気および燃料の発生炉ガスを予熱することにより、窯を高温に保持することが可能になった。

重油や天然ガスが登場する以前では発生炉ガスが板ガラス製造に最適の燃料であった。発生炉ガスとはガス発生炉からできたガスをいう。ガス発生炉内では白

熱した炭質層に適量の空気と水蒸気を吹き込み、900～1300℃でガス発生を行う。

主な反応は、



であり、ガスの主成分はCO；20～26%，N<sub>2</sub>；50～60%，これにH<sub>2</sub>；10～13%，CH<sub>4</sub>；3～5%，CO<sub>2</sub>；3～7%である。石炭1トン当たりのガス発生量は3,000～3,500m<sup>3</sup>、発熱量は1,100～1,300kcal/m<sup>3</sup>、発生炉の出口のガス温度は500℃以上に保たれている（図3.1、3.2）。

発生炉ガス用の原料炭としては粒径が20～60mmの中塊が最適で、それより大きくても小さくてもガス化能力が低下する。粒径10mm以下の粉炭の含有量が15%以下が好ましく、灰の耐火度は1,350℃以上が適し、耐火度が高いほど炉内炭層温度を高く操業でき、生成ガスの炭酸ガスの含有量は低くなり、ガスの発熱量も増加する。

1914（大正3）年、旭硝子 牧山工場（現北九州工場）のラバース式板ガラス製造窯には図3.1に示すダウソン式ガス発生炉（国産）が設置された記録がある。ダウソン式は人力を必要とするが、そのほかの費用は比較的少なく、1958（昭和33）年頃でも一部では使われていた。しかし、炉内の乾燥層、燃焼層、灰層間の部分を均一に保ち、良質のガスを連続して生成させるために、装炭、ポーキングや灰出しなどを自動的に行うように種々機械化されたものが多用されるようになり、ウエルマン式（図3.2）がその例である。

発生炉ガスは炭酸ガス、窒素などを含み、都市ガス等に比べて発熱量は少ないが、必要空気量も少なく、生ガスの状態で予熱することが可能であり、比較的容易に高温が得られる利点があった。発生炉ガスと空気を予熱することにより、ガラス溶解（溶融）槽の温度は1,500℃以上に上げることができるようになった。こうして、発生炉ガスは板ガラス製造の燃料として終戦後に重油に切り換えられるまで使用された。

### 3-2-2 銀線ガラスの製造と重油燃焼<sup>(22)(23)</sup>

終戦後、ガラスが割れたままの小学校校舎を見た連合軍総司令部は、石炭事情のために板ガラスの供給が阻害されているものと判断し、他に流用されない校舎専用ガラスを条件として、重油の特別配給を三菱化成（現旭硝子）に申し入れた（中心となって指令したのは、総司令部経済科学局の軍属で窯業を担当したピーター・デリュウであった）。

これに応じて、校舎専用品として普通板ガラス（透

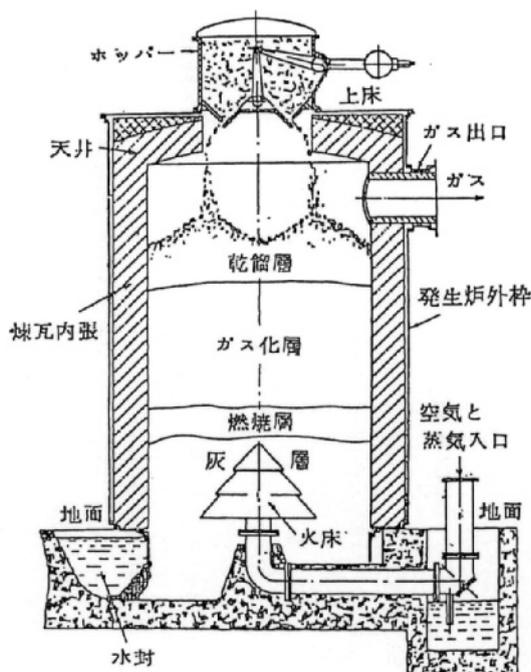


図3.1 ガス発生炉（ダウソン）式の略図

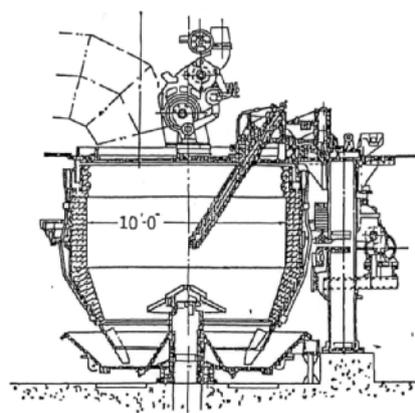


図3.2 Wellman式ガス発生炉

明板ガラス）と区別するため、鶴見工場（現京浜工場）で型板ガラス製造設備を使って、ガラスの中に金属線を入れた「銀線ガラス」（現在の線入りガラスに近い）を特に製造することにした。当時、板ガラス製造窯は石炭発生炉ガスを燃料としており、重油燃焼のため急遽独自に技術を開発する必要があった。当時の製鋼用平炉には重油の使用例もあり、研究調査が行われた。本設備の前に、1946（昭和21）年8月に臨時設備で重油の燃焼試験が行われ、ある程度の確信を得た。実施に当たっては試験結果から、槽窯の長さを短縮する（従来7吹出しの長さを4吹出しに）工事を行い、1947（昭和22）年9月に槽窯の火入れが行われ、まず従来どおりの発生炉ガスによる作業をしばらく続けた後に、重油燃焼に切り換えられた。高圧空気噴霧式（エアートマイズ）の重油バーナーが150mm口径の水冷パイプに保護されて（当時、大砲バーナーと呼ばれた）

窯の後方から人力による切換えで左右交互に挿入され20分ごとに燃焼方向が交換された。本来、発生炉ガス燃焼用の側面加熱式タンク窯であったが、後方の原料投入口の左右から挿入されていた（図2.4、3.3参照）。

ガス蓄熱室と空気蓄熱室があるが、重油燃焼の時にはガス蓄熱室はガス煙突ダンパーで閉じて作業した。燃焼用空気は大砲バーナーとは直角に4吹出しから送り込まれ、燃焼ガスとなって対向の吹出しに吸い込ま

れた。慣れない重油使用のため、万全の注意を払って慎重に作業が行われ、大きな事故は生じなかったが、バーナーの故障、温度の不調などがあり、しばらく苦労が続いた。その後、窯の操業の安定化が図られ、1947年12月に銀線ガラスが製造できるようになった（当時、実際に、主任として三交代作業勤務をした人から筆者が直接に聞き取ることができた）。銀線ガラスを図3.4に示す。

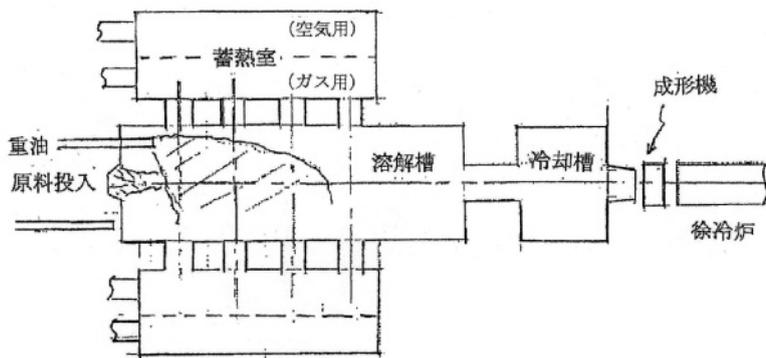


図3.3 重油燃焼窯平面図（燃焼イメージ図）  
（発生炉ガス側面加熱式タンク窯を利用）

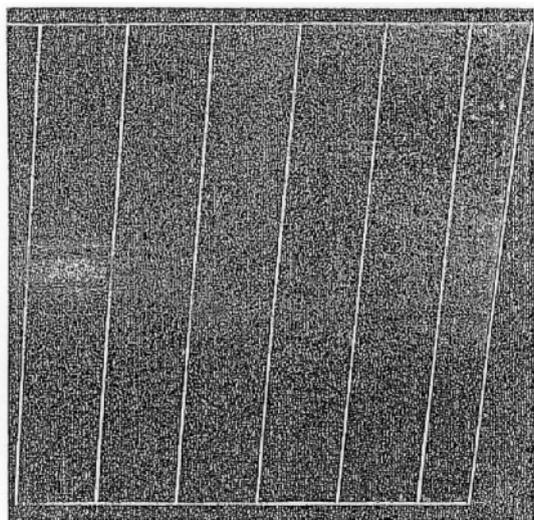


図3.4 銀線ガラス

その後「銀線ガラス」の生産は約2年続けられ（途中、同じ重油燃焼設備を準備したもう一つの窯に引き継がれて）、全国の校舎に供給され、役割を果たした。

最初に重油燃焼に切り換えた窯は1949（昭和24）年に火止めをして冷修（冷却修繕）をした後には、米国からの技術導入による本来の窯の側面からの吹出しごとのコンパクトな空気噴霧式バーナーに切り換えられていった（その後、1970年代に油圧式バーナーに切り換えられるまで、このタイプが使用された）。

連合軍総司令部の復興政策によって、はからずも燃料源として重油の供給を受けて独自技術による重油燃

焼が開始されたが、その後重油燃焼は旭硝子全工場に順次展開されていった。

日本板硝子の場合も、戦後、発生炉用石炭の確保は必ずしも潤沢ではなかったことから、新しい熱源として重油に着目し、その使用研究を2工場で1948（昭和23）年から進めていた。たまたま、1952（昭和27）年10月から12月にかけて起こった炭労の長期ストライキのため、12月から発生炉ガスと重油の混焼を始めた。その結果が予想以上によかったことから、石炭事情好転後も各工場とも重油混焼を続行、再開し、その後に重油専焼に切り換えている<sup>(24)</sup>。

なお、1959（昭和34）年操業のセントラル硝子はスタート当初から重油専焼を採用している<sup>(25)</sup>。

板ガラス製造技術面から考えると、重油の燃焼技術とは別に重油燃焼を実施する場合に最も懸念されたのが重油に含まれる硫黄分が製品品質にどのような影響を与えるかという点であった。型板ガラスはその影響は少ないと判断され、まず重油専焼に切り換えられた（1947～1960年）。続いて、普通板（透明）ガラス窯も硫黄分の影響を確認しながら板ガラス製造2社とも順次切り換えていった（1958～1960年）。しかも、切り換え当初は慎重を期して低硫黄B重油（LSB）でスタートし、その後低硫黄C重油（LSC）に1960（昭和35）年までに切り換えられた。さらに、1965～1966（昭和40～41）年には高硫黄C重油（HSC）に切り換えられ

ている。

重油の種類は、動粘度によりA重油(JIS K2205,1種)、B重油(JIS2種)、C重油(JIS3種)の3種類に大別される<sup>(26)</sup>。なお、第4章で詳述するが、現在は大気汚染防止法の観点から、硫黄分を含む重油の使用の場合、排煙脱硫技術により適切に対処されている。

ふりかえって、発生炉ガス燃焼の難点は、

- (1) ガスのカロリー変動が多く、またそれが予知できないこと。
- (2) 各吹出しのガス量配分が吹出しダンパーの開度以外にわからないこと。
- (3) ガス蓄熱室の損傷が大きいこと。
- (4) 炉圧(窯内圧力)制御の不備等がある<sup>(27)</sup>。

これに比べて重油の場合、品質が安定しており、発熱量が大きいので温度上昇(1,600℃以上)が容易であり、各吹出しの投入エネルギー量が把握でき、燃焼操作も簡単である。また、石炭と異なり灰を生じないうえ、輸送や貯蔵も容易であるなど多くの利点がある。しかし、先に述べたように重油は燃焼温度が高いため、局部過熱を生じやすく、吹出し口の耐火物を損傷することが懸念され、また硫黄分を多く含むので、ガラスの品質や耐火物、設備機械等への悪影響を与えるおそれが考えられ、発生炉ガスから重油への切り換えは慎重に進められた。

### 3.3 生産性、品質向上および技術導入<sup>(28) (29) (30)</sup>

終戦後、板ガラス製造設備の操業再開とともに、単に生産量の増大だけでなく、品質の向上についてもあらゆる努力が傾けられた。日本板硝子 二島工場の場合、戦後まもなく清澄部と引上げ部(成形部)の間にフローターを取り付けることにより、清澄・引上げ両部の雰囲気完全に隔離することに成功している。その結果、溶解槽の燃焼交換時に引上げ部へ向かって吹きつける雰囲気ガスをささげり、板ガラス表面の「くもり」の欠点がなくなるとともに、引上げ部の温度調節が容易となり、板ガラス品質は著しく向上した。また、成形板幅の拡大、厚みごとの集中生産、コルバーン引上げ法における引上げ直後の板の搬送方法の変更(ドロテーブルからマシンロール)による欠点の減少など、あるいはフルコール法引上げ板の自動採板切裁機、自動荷造機など独自技術による貢献度も高かった。さらに、1950(昭和25)年から民間輸入貿易が許可され、外貨割り当てを受けて技術導入、部材輸入が始まった。外貨割り当ての第1号として、コルバーン成形法のかなめである耐熱度の高いベンディングロー

ルが輸入された。そのほか、ガラスタンク窯の溶解部と冷却部(清澄部とも呼称)を仕切る隔壁の設計技術、原料の連続投入機、原料投入部上部の懸垂壁の設計技術などが導入され、大幅な品質向上と生産の増大につながった。

原料投入方法は手投入から機械式連続投入となり、投入量の変動が少なくなった。更に進んで、ガラス素地浴レベル(素地面)との連動による自動調節投入方式が採用された。また、機械式投入機もスクリーフィーダ方式からブランケット方式に代わっていった。すなわち、手投入時代の「点」投入からスクリーフィーダの「線」投入へ、さらにブランケットフィーダによる「面」投入に進み、受熱面の増大と溶解条件のベースである原料山配置の安定化が図られ、熱効率および品質(泡、砂利、素地の均質性)の向上につながった。

一方、溶解部と冷却部を隔壁により仕切りを完全にすることは、冷却槽内のガラス素地温度を一定に保持しやすくすると同時に、溶解槽の温度を従来より高めることができ溶解状態を改良するものであった。また、それまでのネックのような「絞り」をなくし、窯のサイドラインをストレートにして、全体のガラス素地の対流を旺盛にすることにより泡の減少と素地の均質性の向上につながり、さらに耐火物の侵食により生ずる欠点も減らすものであった。この方式は1951~56(昭和26~31)年頃に採用された。

1957(昭和32)年には、上に記した隔壁に加えて、次節で述べるジルコニア質電鍍煉瓦(電気熔融鑄造煉瓦)との組み合わせによる重油専焼の板ガラスタンク窯の設計技術が米国から導入され、その後の板ガラス製造技術を、ガラス製品の品質面、タンク窯の生産能力面およびタンク窯の寿命面において、大きく進展させることになった<sup>(31)</sup>(図3.5)。

成形についても、1960(昭和35)年頃にはフルコール式普通板ガラス特有の「波」(板ガラス引上げ塔内の熱気流に起因する波状歪み)を除去するため、国内独自技術開発と、海外との技術提携による開発とのドッキングにより大幅な改善が行われた。板ガラスを薄く引き伸ばす場合、板幅方向の温度の均一性と板幅方向の素地組成の均質性が最も重要であり、温度差や組成の不均質があると、粘性の差により板の厚みに微小な差が生じ、表面のゆがみとなる。

さらに、独自の徐冷操作技術開発により、フルコール式普通板ガラスに特有とされていた「硬さ」も大幅に改善された。

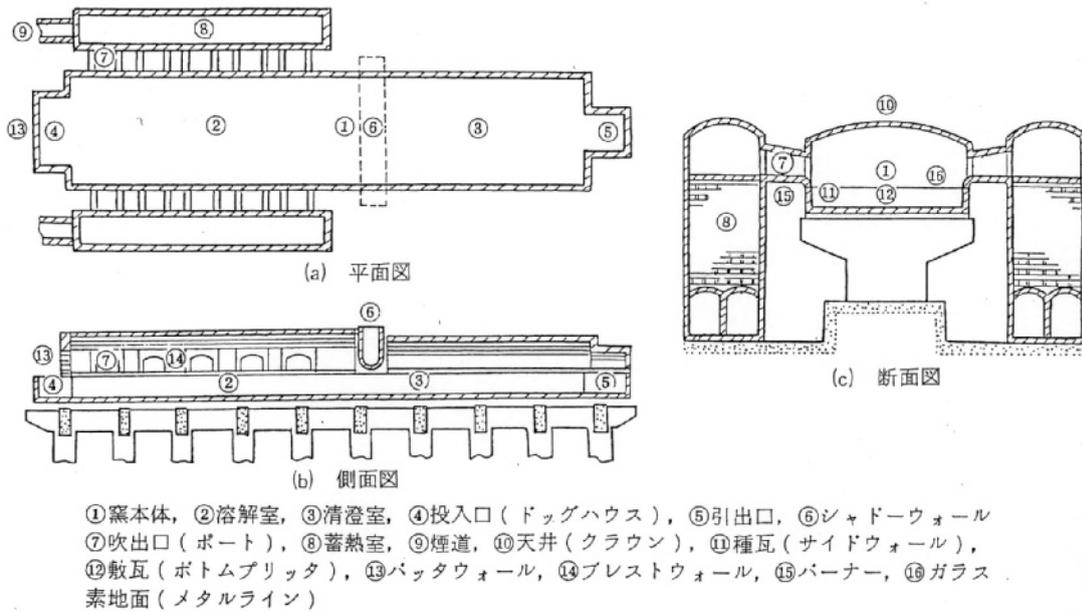


図3.5 板ガラスタンク窯(ストレートタイプ)

### 3.4 新しい耐火煉瓦の登場

#### 3-4-1 種瓦用煉瓦

ガラスタンク窯の歴史は耐火物の歴史でもあり、溶融ガラスによる種瓦の侵蝕がタンク窯の寿命(タンクライフ)の決め手であり、しかもガラス品質にも深刻な影響を与える。いかに耐食性の強い耐火煉瓦を見出すかが板ガラス製造の最重要課題であった。

前節3.3の図3.5で示した板ガラスタンク窯(板ガラス溶解炉)の断面図において、溶融ガラスに接する側壁(⑪サイドウォール)を種瓦(たねがわら)と呼ぶ。溶融ガラスは棹の先にとって容易に細工することができる。そこで、この溶融ガラスを種(たね)と称し、この種を入れている槽(タンク)の煉瓦であるため種瓦の名称がある。

溶融ガラスと接触する種瓦は、古くは天然の砂岩から切り出して使われた。その後、粘土質煉瓦に代わった。いずれも珪酸分が多く、溶け出した煉瓦片はガラスの欠点となる砂利や節になる心配は少ないが、溶融ガラスに対する耐食性は弱かった。次に耐食性を高めるために高アルミナ質に移行した。しかし、天然の高アルミナ質原料の焼成煉瓦であり、耐火度も低く、耐食性も不十分であった。

#### 3-4-2 コルハート・ブラックとコルハートZAC<sup>(32)</sup>(<sup>33</sup>)

前項3.4.1の焼成煉瓦に代わって、米国のコーニンググラス・ワークス社(Corning Glass Works)により、1925(大正14)年に、高アルミナ質天然耐火原料を電

気炉で溶融し、これを型に鑄込んで造る、耐火度、耐食性の高い、いわゆる電鑄煉瓦として、はじめての「コルハート」(後に、この煉瓦を粉砕加工した焼結煉瓦が登場するに至って、この焼結煉瓦と区別するために、コルハート・ブラックと呼称)が発明された。この新しい耐火煉瓦は、まず米国で、種瓦に使用され、その後、ヨーロッパ、日本でも使用されていった。コルハート・ブラックは、ムライト( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ )とコランダム( $Al_2O_3$ )の結晶組織と少量の非晶質から成り立っていて、それまで種瓦に使用されていた高アルミナ質の焼成煉瓦に比して格段にガラス耐食性に優れていた。種瓦が従来の焼成煉瓦からコルハート・ブラックに変わることによって、窯の寿命が数ヶ月から2~2.5年に飛躍的に延びた。こうして終戦後しばらくの期間は、種瓦にコルハート・ブラックが使用され続けた。

その後、戦後1951(昭和26)年頃には新しくジルコニア質電鑄煉瓦コルハートZAC(Corhart Zirconia-Containing Refractories)が登場した。コルハートZACもコルハート・ブラックと同じくコーニング社の発明によるものである。この煉瓦はコランダム( $Al_2O_3$ )、パッデライト( $ZrO_2$ )の結晶および共融晶の間に非晶質(マトリックス・ガラス)が充填された緻密な煉瓦で、ガラスに対する耐食性がコルハート・ブラックよりきわめて高い。高い耐食性のポイントは、溶融ガラスに対する溶解度が低いジルコニアを含有していることと、結晶間に存在する約20%の高い耐蝕性のマトリックス・ガラスにある。このガラスはソーダ

長石ガラスに近く、軟化温度が850℃で、しかも、その粘性は同粘度のソーダ石灰ガラスの数万倍であり、コランダム結晶、バデライト結晶の流出を防いでいる。

この新しい煉瓦が種瓦に使用されたことにより窯の寿命は4~5年に延びた。そして、熔融ガラスと接触するガラス槽の底の煉瓦（敷煉瓦、図3.5の⑫）にも使用され、ガラス品質が一段と向上した。しかも、このジルコニア質電鍍煉瓦はコルハート・ブラックに比較して複雑な形に鑄込むことが可能で、徐冷の際に、ひびも入りやすく、複雑な形の煉瓦も製作できるようになった。

1957（昭和32）年には、旭硝子の場合、先述のように米国のエンジニアリング会社から重油専焼窯の設計技術が導入され、種瓦以外にも多くのジルコニア質電鍍煉瓦の採用が始まった<sup>(31)</sup>。主な設計変更は、以下である。

- (1) ガラス素地面より上部の燃焼空間の横壁（図3.5の⑭）にもジルコニア質電鍍煉瓦を使用
- (2) 蓄熱室は空気蓄熱のみの単純な形状のボックスタイプになった（図3.5の⑧）。
- (3) 本窯（溶解室）と蓄熱室をつなぐ吹き出し部（図3.5の⑦）もアップテーク構造に比して簡単になり、その炉材にもジルコニア質電鍍煉瓦を使用。
- (4) 熔融ガラスと接触するガラス槽の底（図3.5の⑫）も全面にジルコニア質電鍍煉瓦を使用。

その結果として、槽窯の作業温度は一層上昇可能になり（1,550℃程度が1,600℃以上へ）、ガラス溶解能力を増加させ（フルコール法引上げ方式板ガラス窯の場合、ガラス引き出し量130T/Dから200T/Dへ）、そしてタンク窯の寿命も5年以上に延びた。

さらに、ジルコニア質電鍍煉瓦の品質の大幅な改善、種瓦用煉瓦の鑄込み方法と有効な利用方法の開発、また蓄熱室用煉瓦（特に原料バッチの飛散に対する耐蝕性の高い塩基性煉瓦）の開発などもあり、窯の寿命は1985（昭和60）年頃には10年以上に延びている。これらの耐火物技術の進展については第4章において述べる。

現在、フロート板ガラス窯が主流になっているが、窯の耐火物に関する基本設計の考え方は大きくは変化していない。

### 3-4-3 耐火煉瓦の製造販売の契約に関連して<sup>(32)</sup>

コルハート・リフラクトリーズ社の電鍍煉瓦の契約に関係する話を紹介する。コーニング社の発明（同社ファルチャー博士の発明）による高アルミナ質電鍍煉瓦を工業化するために、1927（昭和2）年にコーニン

グ社と同じく米国のハートフォード・エンパイヤー社とは、コルハート・リフラクトリーズ社（以下、コルハート社）を設立して、その製品を「コルハート」の名称で、ガラスタンク窯用として発売するようになった。日本では旭硝子はその特許の使用権を譲り受け1931（昭和6）年より生産・販売を開始した。その後、旭硝子は米国のコルハート社および、その親会社のコーニング社と、特許の使用に基づき、技術の交流も行ってきた。しかし、太平洋戦争により、米国との交信が途絶え、また、法律により特許料の支払いが不可能となったため、その間、旭硝子はコルハート社に対する特許料を毎営業期に支払信託預金としておいた。戦後、このことが旭硝子の誠実さを示すものとして、コーニング社との新しい技術提携交渉にも友好裏に推進することに貢献した。1939（昭和14）年には新しく、コルハートZACが発明されているが、戦後、いち早く旭硝子はその製造権を取得しており、そのほかの技術提携も進んだ。

なお、この特許料積み立ての行動について特筆すべきことは、当時三菱の総帥であった岩崎小弥太氏が「不幸にしてこれまで友好関係にあった外国諸会社とも戦争状態になったが、これまでの契約に基づく当方の義務は可能な限りこれを果たすように努力してほしい」旨の心得を強調されたことである。このことは当時の状況下にあっては極めて勇気ある決断であり、大局的な考え方の本質を示すものである<sup>(34)</sup>。

## 3.5 需要構造の変化と製造各社の対応

### 3-5-1 型板・磨板ガラスと日本板硝子 舞鶴工場の建設<sup>(35)</sup>

終戦後、住宅不足は深刻であり住宅建設が大きな使命であった。1948（昭和23）年頃から混乱期を脱した建築業界にはわかに活況を示し、建築用板ガラスの需要は急カーブを描いて伸びていった。さらに経済・社会の復興が進むにつれて、板ガラスの需要の面にも変化が現れてきた。建築は応急の復旧から本格的なものに移り、需要は用途に応じて多種多様な板ガラスを求めようになってきた。こうして型板ガラスや磨板ガラスなどの高級品が建築用から次第に自動車、鉄道車両、鏡、商品陳列ケースなどにも使用されるようになった。

このような活発な需要を前にして、日本板硝子は第3工場新設の方針が決まり、新しい土地で理想的なレイアウトと最新の技術によって、高級ガラス分野へ本格的に進出することになった。そして新しく舞鶴工場が建設され、1952（昭和27）年9月に型板ガラスから

生産をスタートした。舞鶴工場では外来技術に頼ることなく、すべて自社技術で行うこととなり、操業開始に備えて、あらかじめ若松工場において研究所チームによる実地製造研究が行われていた。磨板ガラスは1948（昭和23）年はじめまで四日市工場で生産されていたが、その後、建築用、鏡用、自動車用の需要が増大してきたため、舞鶴工場で生産することとなり、四日市工場の中型連続研磨設備がほとんどそのまま移設された。また、1954（昭和29）年には大型単独研磨機の操業を始め、さらに同年に中型連続研磨設備B列も完成した。こうして型板ガラス、磨板ガラス、網入り板ガラスの分野でも本格的に旭硝子と生産技術を競うようになった。その後1958（昭和33）年には大型連続研磨設備が新設された。大型連続研磨設備は、中型のものに比べ、テーブルの巾が約2倍になったので、大寸法の磨板ガラスの生産ができ、月産能力も倍増した。

### 3-5-2 セントラル硝子（株）の発足<sup>(36)</sup>

板ガラスの需要は、戦後の復興需要に続いて本格的な住宅、工場、ビルなどの建築ラッシュによって大幅に増加していった。その需要に応えるために、先述したように、戦後の板ガラス生産推移をみると、1952（昭和27）年には戦前の最高水準（1937年の461万並換箱）を超えて530万並換箱、1960（昭和35）年には1,000万並換箱を越えた。わが国における当時の板ガラス総生産・出荷量と建築着工面積の推移を図3.6（単位の函は先述3.1節の箱に同じ）に示す<sup>(19) (37)</sup>。

こうした背景のもと、1958（昭和33）年5月、宇部曹達工業（株）はソーダ灰から板ガラスまで一貫生産を行うことにより付加価値の増大を図りうることと、ソーダ製品と板ガラス製品とは景気変動の波が異なる利点などから、経営安定拡充方策として板ガラス工業に進出を決定した。宇部曹達工業を中心に、小野田セメント、協和発酵、三井物産の3社が主な出資者として加わり、セントラル硝子（株）を設立した。その後1963（昭和38）年1月、宇部曹達工業はセントラル硝子を合併し、新たにセントラル硝子（株）として発足した（セントラル硝子三十五年史による）。

1958（昭和33）年、堺工場の建設が行われ、1959（昭和34）年5月、フルコール式引上げ窯がスタートした。当初は板ガラス先行2社に対して、製品に特色を示すため、無色に近い「明色板ガラス」（鉄分含有量が0.05%以下ときわめて少ない）の生産を目指したが、砂利の流出や板割れの発生など生産は困難をきわめた。そのため、いったん中断し、冷修（冷却修繕）により所要の改造を行い、原料組成も通常の板ガラスな

み（鉄分も）にして、再スタートし、1959（昭和34）年9月より順調な生産を始めた。

この時期、板ガラス窯の重油専焼方式は未だ部分的に採用されているにすぎなかったが、この窯は重油専焼方式を採用した。

その後、セントラル硝子は、販路を開拓するとともに、1962（昭和37）年には型板ガラス窯、1964（昭和39）年にはデュプレックス方式窯およびピツパバーグ式引上げ窯などの設備を増強し、次第に第三の板ガラスメーカーとしての地位を確立していった。

### 3-5-3 ニーズの多様化（厚板化、大板化、磨板化）

元来、日本の建築物は大部分が木造であり、明り採りの紙にとって代わった板ガラスは、薄い軽量のものが適当とされ、需要の中心は2mm厚みの普通板ガラス、型板ガラスであった。

これに対して、欧米諸国では、煉瓦作り、鉄筋・鉄骨造りのいわゆる耐火構造建築が早くから発達してきたため、板ガラスにもそのような建築構造に適合する強度が要求され、需要の中心は3mm厚以上の厚板ガラスであった。

1955（昭和30）年、政府は一般国民の住宅環境改善のために、日本住宅公団を設立して、安価で品質の良い住宅の供給を目指した。板ガラス業界とサッシ業界との新しい関係も始まった。アルミサッシは1955（昭和30）年頃からビル用に使われ出し、1959（昭和34）年レディメイドサッシが販売され、次第に住宅用の規格アルミサッシも開発され、需要が増大した。

板ガラスでは、このため従来の2mm中心から、3mm普通板ガラスや4mm型板ガラスへ需要がシフトするなど厚板化が進んだ。

建築着工面積の用途別、構造別推移をみると、木造は1957（昭和32）年に75%と高い割合を占めていたが、1960（昭和35）年には61%、1963（昭和38）年には50%、1964（昭和39）年には45%となっている<sup>(38)</sup>（表3.1）。この建築の傾向は木造から非木造に移行し、建築の不燃化、大型化、高層化が進むことになる。耐火建築構造物が増加するにつれ、耐火機能をもった網入り板ガラスが普及するとともに、全般的に厚板ガラスの需要が年々増加し、1965（昭和40）年には板ガラス全生産量の約半数を占めることになった<sup>(39)</sup>（図3.7）。

特に1963（昭和38）年7月の建築基準法改正により建築物の高さの制限が緩和された。それまでは建物の高さが最高100尺（30m）を越えてはならないと規定されていた。緩和の背景には、都市人口の急増による市街地の過密化、地価の高騰と交通渋滞があり、土地

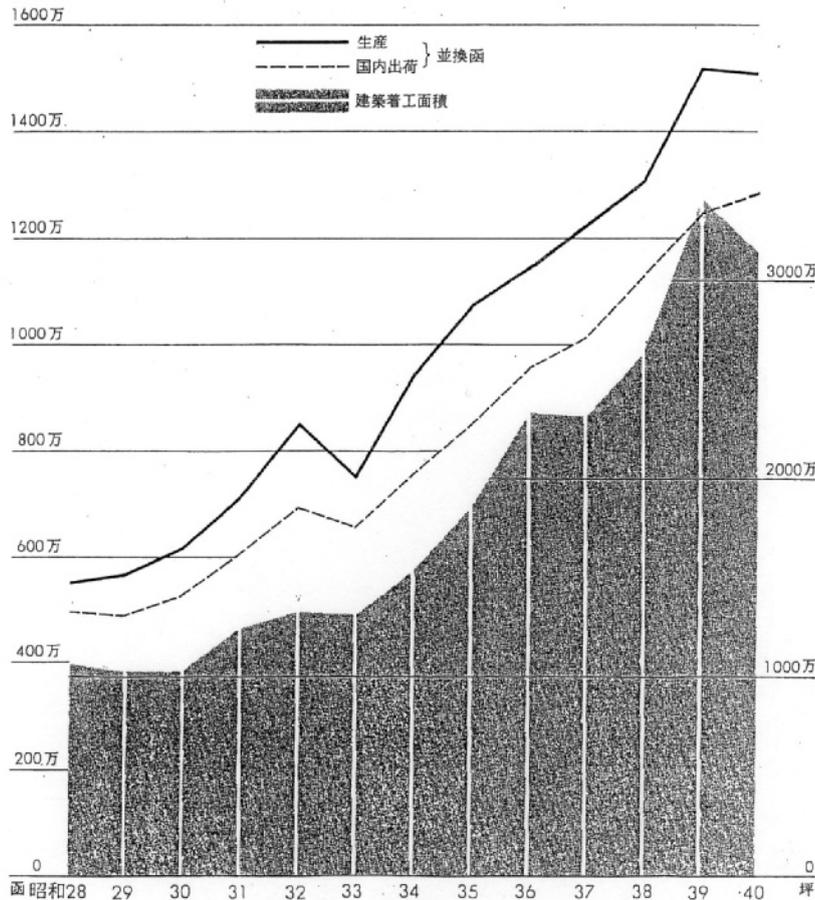


図3.6 全国板ガラス生産・出荷量と建築着工面積の推移

の有効利用目的と耐震性等の建築工法の開発、進歩があった。

高層化と共に、鉄骨を使用して建物の荷重を支え、壁はいわばカーテンをつるしたような荷重を支えない、いわゆるカーテンウォール方式が普及してきた。その結果、窓ガラスは次第に大きいものが要求されるようになり、従来は問題とならなかった普通板ガラスの表面のわずかなゆがみなどの欠点が目立つようになった。そのため普通板ガラスに代わって磨板ガラスの使用が増加した。さらに窓の面積が大きくなるにつれ、窓ガラスの熱や光の透過量が問題となってきたが、それに答えるべく1956（昭和31）年頃から熱線吸収板ガラスが登場してきた。

一方、産業用需要の中心は自動車用であり、戦後の自動車産業の発展に伴って、磨板ガラスおよびその加工品である自動車用安全ガラスの需要は1960（昭和35）年頃から飛躍的に増大した。

1965（昭和40）年には磨板ガラスの需要構造も大きく変わり、戦前その大部分を占めていた鏡用が1965（昭和40）年には30%前後となり、自動車用安全ガラスに向けられるものが44%弱に達した。さらに、1970

（昭和45）年には自動車用が50%を超え、建築用が30%強、鏡等の産業用が20%弱となり、自動車用の比率が増加している<sup>(40)</sup>。

こうした需要構造の変化と伸びの中で、防火機能をもつ網入板ガラスおよび平坦度の高いガラスの要求に応じて、在来品の普通板ガラスのほかにピッツバーグ法によって厚板ガラスを供給した。また、磨板ガラスの需要増に対処して、各社は磨素板ガラスの品質改良と合わせた磨板ラインの増強や、デュプレックス法および次章で述べるフロート法の採用に進んでいった。

### 3-5-4 網入板ガラス<sup>(41) (42)</sup>

網入板ガラスは1935（昭和10）年に旭硝子において、国内で初めて亀甲目網入りの型板ガラスの生産を開始している。亀甲目網も当初は輸入品を用いたが、1938（昭和13）年以降は国産金網を使用した。

戦後、耐火構造建築物が増加するにつれ、耐火機能をもつ網入板ガラス（火災時、網入板ガラスは火が貫通するまでに一般板ガラスより時間がかかり、それだけ延焼を防ぐことができる）の需要は着実に増加して

表3.1 建築着工面積の構造別推移

(資料：建設省調査 単位千平方メートル)

	着工面積 総計	うち木造	木造の占 める割合
昭和32年	43,669	32,531	75%
33	42,428	30,726	72
34	50,767	33,624	66
35	61,461	37,547	61
36	76,872	41,385	54
37	76,645	39,408	51
38	86,835	43,156	50
39	102,663	46,167	45
40	102,300	50,149	49
41	109,737	52,570	48

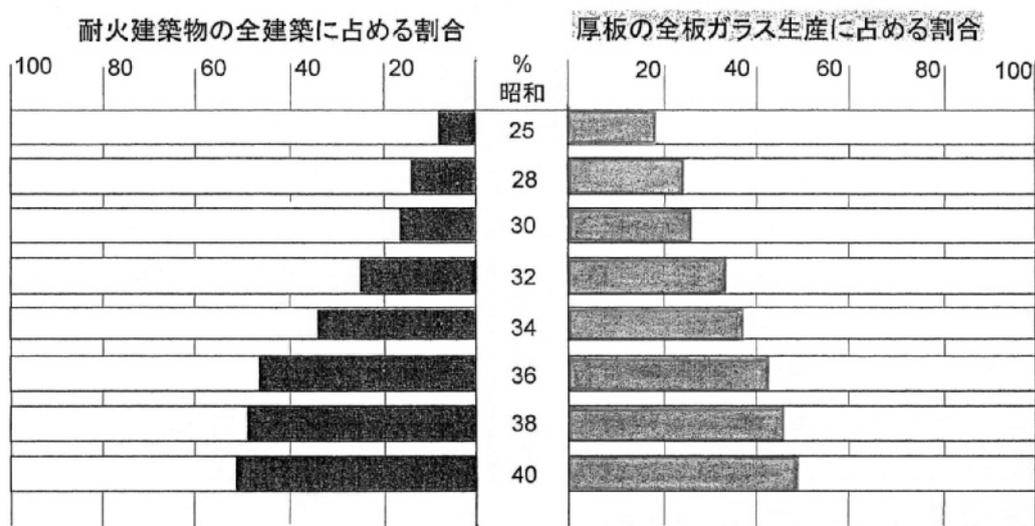


図3.7 耐火建築と厚板ガラスの関係

いった。また、網の形状も亀甲目から菱目、角目がデザインとして望まれるようになり（図3.8）、ガラスの厚み方向の網の位置も、中央部に入っているものが望まれるようになった。それまではロールアウト成形法により型板ガラスを生産するときに、2本のロールの間隙に金網を挿入する方法で生産されていたが、網の位置が厚み方向で一方に片寄りやすい傾向にあった。

日本板硝子は1961（昭和36）年に米国のミシシッピ社から、旭硝子は1964（昭和39）年に英国のピルキントン社から、それぞれサンドイッチ方式による網入り板ガラス製造技術を導入した。金網を挿入することによる泡の発生および金網が一方のガラス表面側に片寄る欠点が除去され、特に網入り磨板ガラスの生産歩留まりの向上に大きく寄与した。その後、両社とも独自技術により金網の材質、金網製造溶接方法等の開発を進めている。

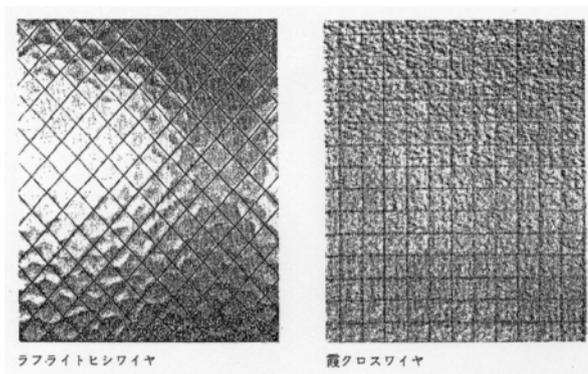


図3.8 網入り板ガラス

### 3-5-5 ピッツバーグ方式による厚板ガラス製造<sup>(43) (44)</sup>

板ガラスの需要は、1960（昭和35）年頃より、薄物から厚物へ、普通品から高級品へと移行する動きが強まり、セントラル硝子、旭硝子ともに、従来のフルロール法よりも厚物製造に適したピッツバーグ法による

製造を採用することに決めた。セントラル硝子は米国のピッツバーグプレートグラス社（PPG社）より技術導入し、1964（昭和39）年より生産を開始し、1966（昭和41）年には2基目をスタートさせた。旭硝子はベルギーのグラバーベル社より技術導入し、1966（昭和41）年よりピッツバーグ法による普通板ガラスの製造を開始した。

フルコール法では溶融ガラス素地の中に押し込められたデビトーズ（ブロック）の溝を通してガラスが引き上げられるのに対し、ピッツバーグ法では、ガラス素地の中に沈められたドローパー（ブロック）に直接触れることなくガラスは素地の自由表面から引き上げられる（図2.9）。したがって、ピッツバーグ法ではフルコール法でデビトーズに起因して発生する板ガラス面の筋や泡などの欠点が解消され、より良質の製品が得られるとともに、連続引き上げ期間もフルコール法（1～2週間）の数倍に伸び、引き上げ速度も厚板ガラスの場合50%近く速くなった。

また、フルコール法の弱みであるデビトーズの問題を大きく改良した旭式板ガラス引上げ法については、次章で記述する。

一方で、厚みの形成がデビトーズのスリット（溝）の規制を受けないため、素地の均質性がより重要視されることになり、ピッツバーグ方式の採用により、溶解技術はより進んだといえる。

### 3-5-6 セントラル硝子デュプレックス方式工場の建設<sup>(45)</sup>

磨板ガラスの需要は、昭和30年代における経済の高度成長に伴うモータリゼーションの普及、建築の高層化、高級化などにつれて次第に増加しつつあることはすでに述べてきた。

セントラル硝子は総合板ガラスメーカーとして普通板ガラス、型板ガラスと共に、磨板ガラスの供給態勢を完備すべく、いくつかの世界の有力な磨板ガラス工場を見学調査、検討の後、1960（昭和35）年、ベルギーのサンプル社（現サンロッシュ社）からデュプレックス方式を技術導入することを決定した。1963（昭和38）年に正式に技術が導入され、三重県松阪市に工場建設を開始し、1964（昭和39）年から操業を開始した。

建設にあたり、デュプレックス方式の心臓部をなす研磨機（本体）は、サンプル社とラ・ミュージズ社（ベルギー）の特約により、ラ・ミュージズ社が製作し、据付指導はサンプル社が行った。研磨機は1基44トンにおよぶ重量物で、これを粗摺、磨工程と170mにわたって一直線に44基配列するので、その基礎は入念な

施工を必要とした。そのため、独自技術で長さ20m近い鋼管杭760本の打ち込み作業を実施している。

生産ラインは、槽窯から截断まで全長約450mにおよび、窯から研磨まで一貫したラインとしては世界でサンプル社につぐ完成であった。最新の設備ではあるが、導入先のサンプル社においても、なお技術的に未完成な部分を残していたので、セントラル社の技術陣は次々と起きるトラブルを克服して運転を軌道にのせるために、相当の苦労があったと言われている。

窯で溶融したガラスは、製板機にて連続したガラスリボンにロールアウト成形され、徐冷炉を通して磨き素板を作り、次工程の粗摺り、研磨を経る一貫生産で製品となる。粗摺り・研磨工程では、上下一対の両面研磨機にてガラスを挟み、研磨盤の回転・往復運動により連続したガラスの上下面を同時に効率的に研磨する方法であり、現在、この方式では世界で唯一稼働中の連続研磨式の板ガラス製造装置である（図3.9）。

セントラル硝子より寄せられた苦労話を以下に、直接紹介する。

《フランスのサンゴバン社の子会社であるベルギーのサンプル社が、ガラスが連続したままで粗摺りと磨きが可能なトウイン方式を開発し、デュプレックス法と称した。当時としては上下面が同時に研磨できる画期的な高級磨板ガラスの製法とされ、当社はこのデュプレックス法を1963（昭和38）年に導入した。それ以来この装置を用いて磨板ガラスの分野に参入し、その後、線入り磨板ガラス、網入り磨板ガラスを生産するに至った。

デュプレックス法では、上下一対の圧延ロールで連続成形されたガラスリボンが、そのまま徐冷・粗摺り（荒摺り）・研磨（仕上げ摺り）工程を経て製品となるため、生産効率が優れている。反面、この圧延成形されたガラスは300m以上に亘って連続した状態で徐冷・粗摺り・研磨が行われるため、ガラスが蛇行しやすくなる。特に粗摺り工程では、蛇行によってガラスが製造ラインの中心からずれると板幅方向に板厚差が生じ、しかもデュプレックス法は、ガラスを研磨盤で挟み上下面を同時に研磨する方式であることから、研磨熱でガラス温度が上昇しやすく、板厚差によってガラス両サイドの熱膨張差が大きくなり、ガラスの蛇行を助長してS字型の蛇行を発生させるなど不安定な一面があった。

技術導入当初、この蛇行の発生によって粗摺り・研磨工程では、ガラス両サイドの板張り不良（板張りのアンバランス）によるガラスの割れおよび割れカレット傷などの研磨傷を多発させ、著しい生産性の低下を

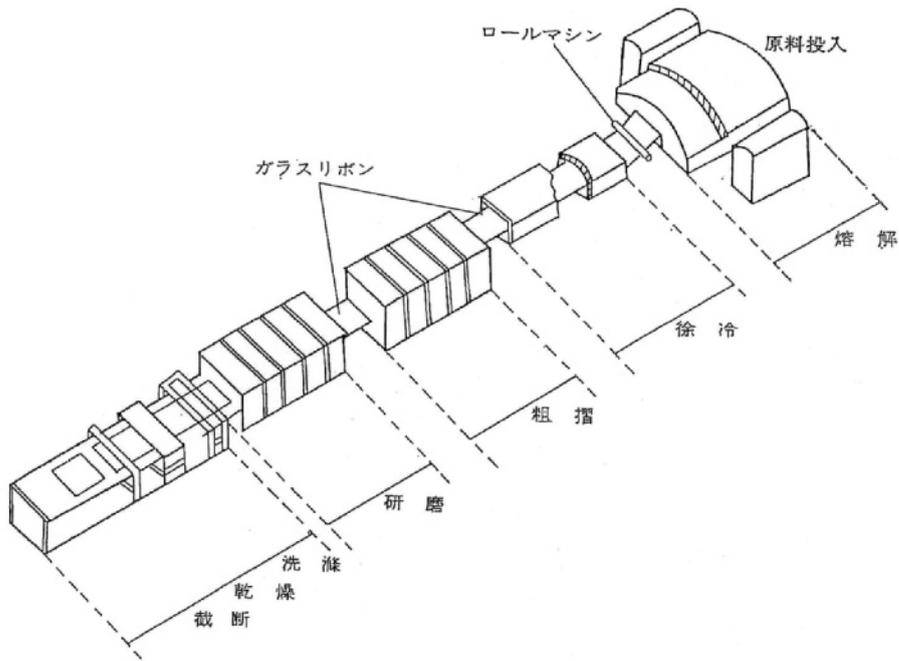


図3.9 デュープレックス方式工程図  
(セントラル硝子社史より)

招いた。しかも、ガラスの割れが発生すると、割れが発生した研磨機を停止して割れたガラスを処理することになり、その間ガラスの研磨品質を維持するために、他の研磨機の圧力をアップしてトータル圧力を維持せざるを得ず、この研磨機1台当たりの圧力アップ（研磨熱によりガラス温度がさらに上昇）によって、さらに蛇行の増大、割れの多発など悪循環を招くことになった。

また、ガラスがリボン状に連続しているため、割れの発生箇所は1箇所にとどまることは少なく、連鎖的に数台、あるいは十数台連続して割れが発生するケースが多い。特に、デュープレックス法では研磨機を停止することができても、ガラスの流れを止めることができないため、研磨機上の割れたガラスを処理する間は、流れてくるガラスを割り続けなければならない。さらに、ガラスの割れと同時に研磨機に装着されている上下の研磨用フェルトも損傷することが多く、ガラスの処理にあわせ、このフェルトの取替に追われることになった。

このように数台以上の研磨機で割れが発生した場合は、上部の研磨機を1台ずつクレーンで吊り上げながら作業することになり、生産ロスに加え、大変な労力を必要とした。しかも、設備導入当初は、作業員全員がこのような作業に不慣れであったことから、全身が研磨剤まみれ、汗まみれになりながらの作業が続いた。

デュープレックス法に於いては、ガラスの蛇行によ

る生産への影響が甚大であり、蛇行を抑えることが安定生産に繋がることになる。このガラスの蛇行のコントロールは、一般的に徐冷工程での温度コントロール、すなわち両サイドのヒーターバランス調整にて行われることが多い。デュープレックス法の場合は、ガラスが長く連続した状態であるがゆえに、僅かのヒーター調整でも敏感に反応し、また1日の外気温の変化もガラスの蛇行に大きく影響した。このため、徐冷工程の側壁・建屋などのシールを強化し、外気を遮断し影響を受け難くするなど設備面の対策を講じると共に、研磨熱の発生を抑えるため、研磨剤の一部を弁柄（酸化鉄）から研磨能力が優れている酸化セリウムに変更して研磨圧力を下げる。さらに、研磨盤への研磨液供給



図3.10 デュープレックス方式摺・研磨工程  
(セントラル硝子社提供)

量を増量してガラス温度の過剰な上昇を抑えるなどの対策を講じた。

このような多くの改善策の積み重ねによって、運転も徐々に軌道に乗り、その結果、所期の能力を発揮するに至った。≫

セントラル硝子提供の研磨工程の一部を図3.10で示す。

### 3-5-7 熱線吸収板ガラス<sup>(46) (47) (48)</sup>

熱線吸収板ガラス (Heat Absorbing Glass) は、太陽の放射エネルギーを20~70%吸収し、冷房負荷などを軽減できる板ガラスである。鉄、コバルト、セレン、ニッケルなどの微量元素をソーダ石灰ガラス成分に加えて着色させた透明板ガラスであり、現在ではブルー、グレー、ブロンズとグリーンの4種類の色調がある。可視光線の透過も低減するので、まぶしさを和らげる働きもする。美しい色調とすぐれた性能を活かし、各種建築物の窓などのほか、自動車や鉄道車両の安全ガラス (強化ガラス、合わせガラス) 製造の素板として用いられる。現在ではそのほとんどがフロート法による着色透明板ガラスであるが、そのほかに網入り・線入り板ガラスもある。

日本における熱線吸収板ガラスは、1951 (昭和26) 年頃から建築物および車両用として需要が増加しはじめ、相当量輸入されるようになった。それに対して、日本の各社はガラス組成の研究を行い、試作試験を開始し、1956 (昭和31) 年に日本板硝子がブルー系の板ガラスを生産発売し、1957 (昭和32) 年には旭硝子も同じくブルー系を発売した。その後、両社は引き続いて1965 (昭和40) 年頃までに、グレー系、ブロンズ系

を生産発売し、セントラル硝子も1967 (昭和42) 年以降、順次3種類を生産発売している。

熱線吸収板ガラスの特性は、ガラス中の $Fe^{2+}$ が赤外域波長に吸収ピークをもち、日射吸収を高め、日射を30~50%吸収する。また $Fe^{3+}$ の存在により紫外域の吸収を高める。

また、この特性に関連して、1995 (平成7) 年頃から、さらに鉄分を増加させたグリーンガラスも開発された。鉄分とほかの微量元素も加えて、自動車、鉄道車両内の冷房の効率化や車内内装材の退色防止のため、熱線吸収性能および紫外線吸収性能を高めることを目的とする板ガラスが登場している<sup>(49)</sup>。

### 3-5-8 普通板ガラス窯の生産性の開発<sup>(47) (50)</sup>

熱線吸収板ガラスの開発と関連して、成形技術についても特記せねばならない。1959 (昭和34) 年には、日本板硝子が一つの窯からロールアウト方式とコルバーン方式の併産に成功し、1963 (昭和38) 年には旭硝子が同じく一つの窯からフルコール方式とロールアウト方式の併産に成功している。当時、フロート方式が出現する以前であり、増加する自動車用、建築用の熱線吸収板ガラスの普通板、磨き板ガラスの需要に対応する形で、これらの併産方式が開発された。

また、生産方式の開発面では、日本板硝子が、1967 (昭和42) 年にはコルバーン式製造法において、それまでのワントラックツーマシンの常識を破り、世界で初めてのワントラックスリーマシンの法を開発した。これにより従来コルバーン法がフルコール法に対して、窯当たりの生産性で差をつけられていたのが大幅に改善された。

# 4 | 高度経済成長期とフロートガラス時代の到来(昭和40、50年代)

本章では、昭和40年代に入って高度経済成長期の到来とともに、板ガラス業界では、世紀の革命的な発明であるフロート法の導入によって、製造態様の大きな変化が始まったこと、また、環境問題や石油危機への対応とその後の変遷、さらに、海外への進出状況などについて述べる。

## 4.1 フロート方式の出現

### 4-1-1 フロート法の意義と原理

この製造方法は、英国のピルキントン社(Pilkington Brothers Ltd.)によって発明され、開発されたものであり、このプロセスにより製造されたフロート板ガラスは優れた平行、平滑面と火造りの光沢をもち、現在の板ガラス製造法の主流となっている。すなわち、その品質および生産性から、まず磨板ガラスがとって代われ(網入り、線入り磨板ガラスを除き)、ついで透明普通板ガラスも徐々にとって代われ、現在では透明普通板ガラスの平板引上げ法(フルコール法、コルバーン法、ピッツバーグ法、旭式引上げ法など)は発展途上国の一部で採用されているにすぎない状況になっている。

現在のフロートプロセスに類似した完全な平行平面ガラス板の製法に関して、かつて1902年、米国において溶融錫浴面にガラスを浮かせることが提案されているが、その当時、利用できるガラスの連続溶融成形技術や周辺技術が無かったため、これはアイデアの段階で終わっている。

それから約50年後の1952(昭和27)年にフロートプロセスがピルキントン社のアレステア・ピルキントン(A.Pilkington)により発明され、プロセスの開発が開始された。そして苦難の開発段階を経て、1959(昭和34)年にその成功が世界に発表された<sup>(51)</sup>。その間、7年以上の歳月と約40万ポンド(約40億円)に上る巨額な研究費が費やされた。

このフロートプロセスは短期間に世界各国の板ガラスメーカーにライセンスされていき、1963(昭和38)年の3基から、1985(昭和60)年で100基、1995(平成7)年で150基に達しようとしている。日本でも対応は早く、1964(昭和39)年8月に、旭硝子と日本板硝子の両社が同時に日本政府からフロート法の技術導入の認可を受け、1965(昭和40)年に日本板硝子、1966(昭和41)年に旭硝子が、それぞれフロートラインを

スタートさせた。1969(昭和44)年にはセントラル硝子も最初のフロートラインをスタートさせている。

フロートプロセスの原理は、重い液体の上に浮く軽い液体の上下面が完全な平行、平滑面であることにある。実際には重い液体が溶融錫であり、軽い液体が溶融ガラスである。

図4.1は溶融錫の上に浮かんだ溶融ガラスの垂直断面図を示しているが、還元雰囲気での溶融錫の上のガラスが平衡状態になったときには図の下に示した式が成立する<sup>(52)</sup>。

一般の板ガラス組成の場合には、その平衡厚みは温度などで若干異なるが、通常の場合には、ほぼ6.8mmとなる。

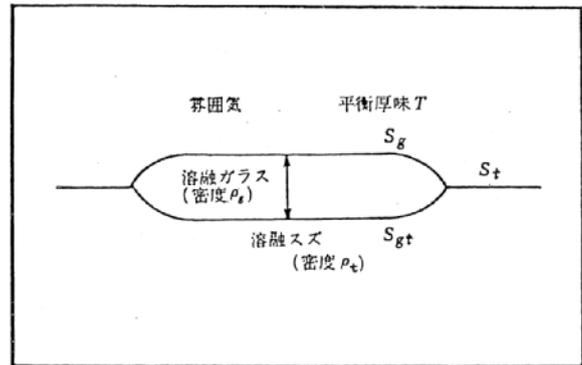


図4.1 溶融ガラスが溶融スズ上に浮かんでいる状態の断面

$$T^2 = (S_g + S_{gt} - S_t) \frac{2\rho_t}{g \rho_g (\rho_t - \rho_g)}$$

ここで、 $T$ ：ガラスの厚味

$S_g$ ：ガラスと雰囲気界面の表面張力

$S_{gt}$ ：ガラスとスズとの界面の表面張力

$S_t$ ：スズと雰囲気界面の表面張力

$\rho_t$ ：スズの密度

$\rho_g$ ：ガラスの密度

### 4-1-2 フロートプロセスの設備

フロートプロセスの設備は従来のガラス溶融窯(タンク窯)と徐冷炉(徐冷レヤー)との間にフロートバスあるいはメタルバス(溶融金属浴)と称する成形装置を組み込むことにより成り立っている。図4.2、4.3にフロート板ガラスの製造工程の概略を示す<sup>(53)(54)</sup>。

ガラス原料がガラスとして目標の組成となるように一定の割合で調合された後、ガラス溶融窯に投入され、

溶融窯では重油の燃焼により加熱溶融されている。窯内の温度は1500から1600℃以上である。溶融、清澄、冷却されたガラス素地はタンク窯の出口より耐火物ダンパーによって流量コントロールされ、連続的にフロートバスに流し込まれる。

ガラスより重い溶融状態の錫の上でガラスは浮かびながら流れていき、ガラスリボンの自重とガラス、錫、雰囲気ガスとの界面張力とバランスする厚みにまで広がっていく。一方、徐冷炉へ搬送するためのロールの上に、広がっているリボンの一端を乗せ上げてやることで、搬送ロールによる牽引力がガラスリボンに加えられることになり、連続した一定幅のリボンが形成される。図4.4にガラスリボンの形成状況の平面図を示す<sup>(55)</sup>。

溶融ガラスリボンが溶融錫の上を浮かびながら移動し、両面の凹凸が無くなり平坦かつ平行になるまで十分に高温に保持され、そして徐冷炉に送り込まれても搬送ロールで下面にキズがつかない程度に硬くなるまで、ガラスリボンはフロートバス内で冷却調整される。

こうしてフロートバス出口においては厚みの均一な、光沢のある火造りの表面をもった状態になっている。その後、徐冷炉において十分にガラスリボン内部のひずみを取り除かれ、軟らかい板質のフロートガラスが生産される。

このようにフロートバスはフロートプロセスにおける最も重要な設備であり、フロートバスの溶融金属を純粋な金属の状態に保持すること、およびバス内の温度の管理を厳密に行うことが特に重要である。

溶融金属としての錫は高温では容易に酸化されるのでフロートバス全体が密閉構造となっている。溶融金属上部雰囲気には還元性保護ガス（N<sub>2</sub>ガスおよび少量のH<sub>2</sub>ガス）が供給充填される。フロートバス内の温度はそのほとんどをガラスリボンの持ち込む熱量によって保持されるが、上流から下流に進むにつれて成形される段階において、リボンの温度降下は冷却クーラーおよび一部電気ヒーターによって厳密に管理されている。ガラスの温度は一般的にはメタルバス上流で約1050℃、下流のバス出口で約600℃に保持されている。

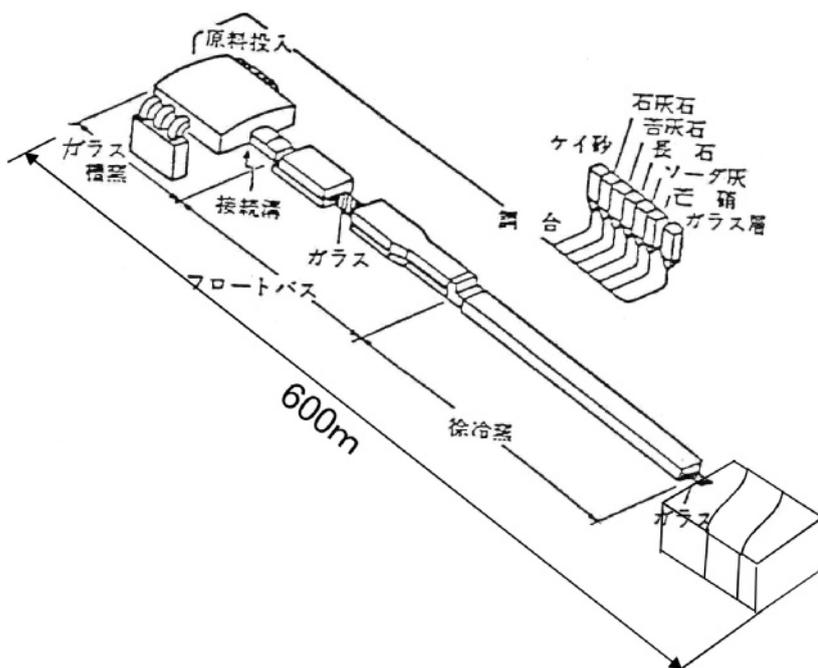


図4.2 フロート板ガラス工程図

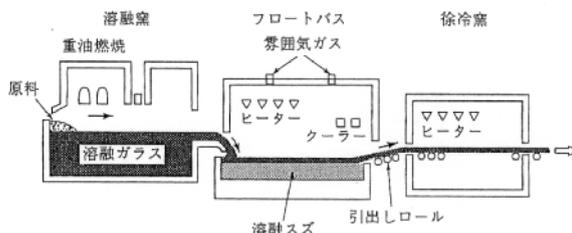


図4.3 フロートガラス製造プロセスの全体概略図

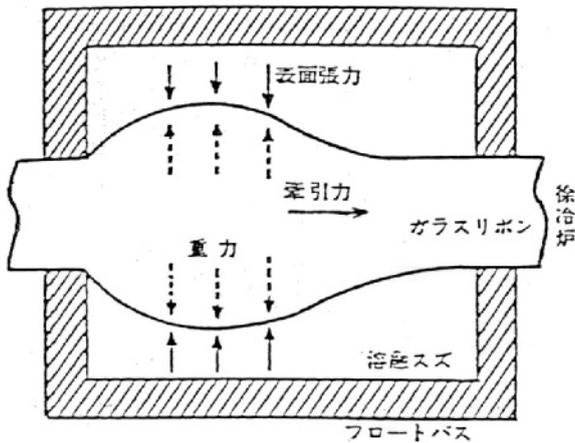


図4.4 ガラスリボン形成状況

#### 4-1-3 薄板および厚板ガラス成形方法<sup>(56)</sup>

先にフロートプロセスにおける平衡厚みは約6.8mmであることを記したが、一般にガラスの幅と厚みは、溶融ガラスのバスへの流入量と、徐冷炉の搬送ロールによるリボン牽引速度により調節される。

厚み5mmのフロートガラスは平衡厚みに近い6mmのガラスを製造する場合より徐冷炉の搬送ロールの速度を少し速くすることにより、フロートバス内でのリボンの引き伸ばしが行われて製造される。さらに、薄い厚みのガラスを製造しようとするときには、徐冷炉の搬送ロールの速度をさらに速くすればよいが、このままでは厚みが薄くなる比率以上にガラスのリボンの幅が狭くなり、実際の需要に合う広幅の薄いガラスの生産は困難となる。このために、フロートバスの中流にガラスの上面に接触して回転する縁ロールを両側に斜めに数セット使用する。このロールは引き伸ばしを大きくした場合にリボン幅が狭くなるのに逆らって突っ張る作用をするので、比較的板幅の縮小は少なく、しかも薄いガラスが生産される。薄いガラスの製造の場合にも、リボンは上流で十分に平坦な平衡厚みとなった後、高温でしかも均一な温度状態で平坦な錫の上で引っ張られるため、ゆがみの少ないガラスとなっている。図4.5 (a) に補助ロールを使用した薄板ガラス成形方法を示す。開発に関して後述するが、最近ではその厚みは3mm、2mm、1.1mm、0.5mm程度まで商業生産されている。

平衡厚みより厚いガラスの製造方法は、薄いガラスをつくるプロセスより基本的にやや単純となっている。溶融ガラスが窯からフロートバスへ流れ込んだところで、ガラスに濡れないガイドを縁部にガラスリボンの進む方向に平行にセットすることにより、溶融ガラスはガイドにより幅方向の拡がりや抑えられる。こ

の条件では、リボンの厚みは溶融ガラスの流量とスピードにより定まる。ガラスの温度はガイド内でガラスリボンの表面が水平になるようなレベルに維持され、その後少しずつ冷却され、もはや自重でガラスが拡がらない温度になるまでガイドは十分長いものが取り付けられている。このような方法で厚みが19mmないしそれ以上の板ガラスが生産される。板幅は約2.5~4m、長さは必要なだけ長くとることができる。図4.5 (b) にガイド（カーボンフェンダー）を使用した厚板ガラス成形方法を示す。

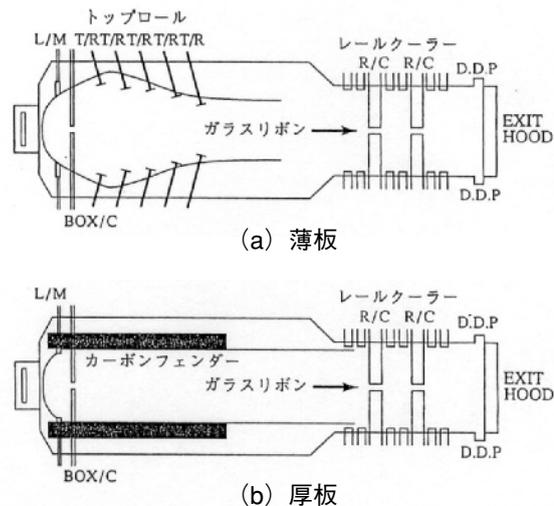


図4.5 フロート法による製造プロセス

#### 4-1-4 フロートの化学

フロートプロセスの成功はさまざまな分野の技術の進歩の組み合わせられた成果によるものであるが、開発過程で化学的な問題点の解明も一つの重要な役割を占めてきたといわれている。

フロートバスの溶融金属になぜ錫が選ばれたか、これは非常に興味深いことであり、またフロートプロセスの本質に触れる問題であり、この点について少し記述する。

まず第一に、フロートプロセスではこの金属はガラスリボンを固化させるまでの温度範囲では液体でなくてはならない。表4.1にこの要求に合う金属を挙げた<sup>(57)</sup>。さらに、密度がガラスを保持するだけに十分に大きなものでなければならない。次に、フロートプロセスにおける温度範囲の溶融金属の蒸気圧の問題が挙げられる。大きな蒸気圧をもつ場合、溶融金属蒸発物の低温における凝縮がクローズアップされる。また、当然のことながら溶融金属自身がガラスリボンとは反応しにくいものでなければならない。こうした条件をクリアーするものとして、現在は錫がフロートバスに使

用されている。

しかし、錫が最も適しているとはいえ、錫中にわずかな酸素が含まれるとガラス製造上、事情は複雑になる。酸化錫の蒸発と凝縮の問題、錫中の酸素の溶解度の変化に起因する酸素の出現と酸化錫のガラスリボン下面へのプリント、あるいは錫中の酸素濃度が増したときにガラスが2価の錫を表面から吸収する傾向などがある。これらはいずれもガラス製品の欠点に繋がるものであり、フロートプロセスでは溶融錫から酸素を除去し、またフロートバス内に酸素が入ることを防ぐ工夫がなされている。

基本的にはフロートバスはできるだけ密閉構造とし、その中に保護ガスとして非常に純度の高い窒素ガスを供給している。それでもなお酸素の侵入を防ぎきれないので、侵入した酸素を水に還元するため、若干の水素ガスを窒素ガスに混合して供給している。

ここまでフロートプロセスのごく基本的なことがらを述べてきたが、いうまでもなくフロートプロセスは、世界中の板ガラスメーカーの長年の夢であった、溶融ガラスから直接引上げる普通板ガラスのもつ火づくりの美しさと、磨板ガラスの平滑さとをあわせ持つ、画期的、革新的な板ガラス製造技術である。英国の Pilkinton 社の発明によるものであることから、これまでの記述は、公開発表された報告などに限った。

表4.1 フロートバス用保持金属の選択基準とその金属

	融点 (°C)	沸点 (°C)	密度 (g/cm <sup>3</sup> ) (1060°Cにて)	蒸気圧 (mmHg) (1027°Cにて)
選択基準	600 以下	1050 以上	2.5 以上	0.1 以下
ビスマス	271	1420	9.1	7
ガリウム	30	2070	5.5	6×10 <sup>-3</sup>
インジウム	156	2087	6.5	4×10 <sup>-2</sup>
リチウム	180	1370	0.5	55
鉛	327	1740	9.8	2
タリウム	303	1460	10.9	16
スズ	232	2270	6.5	1×10 <sup>-4</sup>

#### 4-1-5 技術導入に際しての日本各社の対応

世紀の発明であるフロート法の技術導入にたいして、いずれの会社も背水の陣で臨んだ。特に、フロート方式の心臓部であるフロートバスに関しては、部品はすべて Pilkinton 社で実績のあるものを輸入し、建設にあたっては全面的指導を受けた。また、各社はスタート前に研修チームを約1ヶ月程度派遣し運転実習をしているのも同じである。

一方、基礎、建物、溶融タンク窯、徐冷炉、切断包装場などはすべて自社技術で行っている。特に、英国ではあまり考慮されなかったフロートバスの地震対策では各社がそれぞれ独自の対策を講じた。こうして、いずれの会社も早い段階で本格生産につなげている。この点、日本の各社はいずれも、板ガラス製造に関する蓄積された技術のレベルが高く、フロート成形技術を早く修得できる基盤があったといえる。

その後の開発、進展については後述するが、スタート当初の特筆すべきことを2~3挙げると、まず日本板硝子の特厚開発がある。同社はフロートスタート後、約半年で、ピルキントン社でもまだ開発途上にあつた8mm厚み以上の特厚物の製造方法を独自技術<sup>(58)</sup>により開発し、1966(昭和41)年8月から、3、5、6mm厚みに加えて、8、10、12、15mm厚みの特厚板ガラスを世界で初めて発売している<sup>(59)</sup>。その後、1971(昭和46)年には19mm厚みの板ガラスの開発に成功し、発売を開始した。また、フロート板ガラスは磨き板ガラスにはなかった大寸法のものも生産できるので、市場でも大いに歓迎され、磨き板ガラスに代わって広く利用されるようになった。日本でフロート板ガラスの生産を開始した翌年の1966(昭和41)年には米国に向けて3,360mm×5,250mmという当時では経験したことのない大板を輸出している。舞鶴工場から神戸港まで輸送するために工場関係者や運送会社の専門家が知恵を絞って、トラックへの積み付け方法を検討したり、輸送途中にある山中の峠の曲がり具合やトンネルの高さを実測したという逸話が残っている。

旭硝子の場合は、その後少し遅れて、ピルキントン社が開発に成功した方法により特厚フロート板ガラスの生産・発売を開始している。また、旭硝子では、1966(昭和41)年のフロートラインスタート時に、フロート板ガラスの選別、切断、包装の工程に、自社開発の新設備とともに、日本の産業界では2番目に早く、米国のプロセスコンピューター (IBM1800) を採用して、全システムの自動化、合理化を行っている<sup>(60)</sup>。

## 4.2 旭式板ガラス引上げ法 (A式) の開発

1971(昭和46)年に旭硝子によって開発された方式である。すでに2.5節で述べたフルコール法の場合、ガラスがデビトーズ (中央に細長いスリットのある耐火物) から立ち上がる界面の温度は、冷却器により液相温度以下となっており、この部分に停滞する薄層のガラスが失透し (結晶を析出し)、時間の経過とともに結晶が成長し、引上げられるガラス帯上に細い筋を

刻印する（線状痕をつける）。いわゆるフルコールラインあるいは刷毛筋とよばれるものである。これが目立ってくると引上げ製造は中止され、再加熱により失透を溶かし、デビトーズの表面を清掃した後、再び引上げが開始される。引上げ開始から中止までの期間がマシンライフとよばれるが、通常1～2週間しかもたないのがフルコール法の弱点であった。

この弱点を解消するために、大きな発想の転換により旭式引上げ法が開発された。ガラスタンク窯の前端の引上げ室に、アサヒブロック（Asahi Block）とよばれる一對の鼓（つづみ）型の長軸回転体の耐火物を並べ、二つの鼓の間のスリット面から板ガラスを引上げる方式である。板ガラス引上げ作業を続けていて、失透が成長し、刷毛筋が目立ってきたときに、鼓型の回転体を互いに反対方向に内から外へきわめてゆっくりと3～5mmほど回転させ、ガラスと耐火物界面のなきさ（ガラスが立ち上がる）部分を新しくして、ガラス帯への筋の刻印を防止し、良好な火造りの表面状態の板ガラスを製造する。こうした操作を10回ぐらい繰り返す。この方式で製造できる板ガラスは厚み1～8mm、幅1.5～2.5m程度である。

この方式によるとマシンライフが2～4ヶ月であり、フルコール法の弱点が根本的に解決される。また自由表面から板ガラスを引上げるピッツバーグ法に比べて、板ガラスの幅方向の厚みの不均一を少なくできるという長所がある（図2.10参照）。

この方式は1965（昭和40）年以降、フロート法の出現、ピッツバーグ法の導入により、華やかな技術が騒がしい時期、あるいはフルコール法担当技術者にとっては「黒船の到来」に似た危機意識を持った時期に開発された。いかにフルコール法の弱点を解消し、どのようにしてフルコール法の長所を残すべきかで、フルコール法製造担当のマネージャーと若い技術者が必死にアイデアを結集して開発したものである。

開発当時、世界の板ガラス業界の動きとしては、徐々にフロート法を採用する方向に進みつつあったが、まだまだフルコール法が主流を占め、多くのフルコール方式窯が操業していた。

したがって、まず旭硝子社内のフルコール窯がこの方式（以降、A式）に切り換え、次いで旭硝子がフルコール法を技術輸出した海外の各社がA式に切り換え、さらにはフルコール方式を採用している世界各国のメーカーに技術輸出された。フルコール方式から、安い設備投資で、品質および生産性を格段に向上させる技術方式への転換のメリットは大きく、アジア、ヨーロッパ、米国、中南米など、結果として世界の15カ

国以上に技術輸出された。そして、それぞれの国において、変化する時代の要求に沿いながら、A式窯の操業が続けられた。旭硝子の場合、A式引上げ法の得意品種であった超薄板（1.1、0.7mm）を含めて、フロート法により厚板から超薄板まで全品種の生産技術が確立された時点で、最後のA式窯が1982（昭和57）年に停止した。A式技術の開発完成から、約11年間のライフであった。

A式技術の海外輸出に関して苦労話を紹介する。初期の段階で、北欧の国にアサヒブロック（A式の細長い鼓型耐火物）を輸送することになり、シベリア鉄道などによる長時間輸送での破損が心配された。国内で輸送テストを繰り返し、最終的に鼓型の両端を金具で圧力をかけて押さえておくこと（セラミクスは圧縮力に強く、引っ張り力に弱いことを利用）により、無事に北欧まで送り届けられた。

## 4.3 フロート方式の進展

### 4-3-1 規模の拡大

日本における板ガラス工業の溶融技術革新は昭和30年代から始まったといえる。すなわち、石炭の発生炉ガスから重油への燃料転換は1947（昭和22）年に始まっているが、電鍍煉瓦の有効・適切な利用による、板ガラスの品質、タンクライフを考慮した本格的な重油専焼窯の設計技術が導入されたのが、1957（昭和32）年頃であり、これにより窯の溶融条件を支配する燃焼関連の飛躍的な安定が得られるようになった。次に、高度成長期に入った昭和40年代には、フロート法の導入により成形関連の飛躍的發展が始まった。

特に、フロート成形方法は、それまでのガラス槽から直接に板ガラスを引上げる方法に比べて、水平引き出し法であり、自然の理にかなったもので、規模（溶融ガラスの引き出し量）の拡大は、タンク窯の溶融能力が向上できれば、比較的容易に可能である。

溶融能力の向上はそのままスケールアップにつながり、一窯当たりの生産量（溶融量）の増加によるコストダウンと省エネルギーにつながる。ただし、スケールアップと共に品質（泡、均質性など）の維持、向上が伴わねばならない。

通常、タンク窯のスケールアップ（窯を大型化して溶融量を増加させること）は定期修繕時（冷修と呼ぶ）、もしくは新設窯の建設時をとらえて行われる。このときのデザイン設計が生産開始後の数年間（最近では約8～10年以上）の成績を左右するものであり、スケールアップはどうしても作業成績で実績のあるデザイン

の延長線上で考えることになり、革新的なデザインの導入はリスクが大きく、なかなか難しかった。このスケールアップの信頼性を高めたのがコンピューターシミュレーション技術であった。それまでは、泡、均質性に代表される品質が良好で安定している時、いわゆる良品率の高い時の槽窯条件をとらえ、窯内各部の温度測定やガラス表面流の流速測定（耐火物ボールを浮かべて測定するので、ボール流しと呼ぶ）から温度低下率を算出したり、微量のトレーサー投入による応答時間測定から窯内部での流速の推測などを参考にして窯の主要寸法が決められていた。

これに対して、タンク窯内の素地流れをコンピューターシミュレーションなどにより定量的に議論が可能になったのは1975（昭和50）年頃からである。背景には、それより少し以前から、センサー技術の進歩（温度計、流量計など）とともに、タンク窯の運転にもプロセスコンピューターが導入され、データが蓄積されていったこと。さらには、連続して測定できない窯内部ガラス素地の温度などが苦勞を伴いながら大変地味に測定作業が続けられたことなどと、コンピューター技術の発達とが合わさって、数学モデルが組み立てられていった。このモデルの活用でスケールアップするデザインの信頼性も高まり、一段とタンク窯の大型化が進んだ。当然、耐久性の向上した耐火物、燃焼機器、原料投入機などの関連設備の改良を加えながら、かつ成形能力とのバランスを保ちながら実施されて行った。

報告文献<sup>(61) (62)</sup>によれば、1970（昭和45）年頃より、

ガラスタンク窯内で起こっていると考えられる化学反応（原料バッチの溶解）と物理反応（伝熱と流動）をできるだけ数学モデル化し、理論解析を可能とする研究開発が行われている。多くの窯の素地中に熱電対を挿入して温度分布を測定したり、オペレーションデータとの対比を行いながらモデルの高精度化を図り、槽窯（タンク窯）解析および槽窯設計に十分利用できる解析プログラムシステムが構築されている。このモデルはタンク窯の天井温度（迫温度）、原料山の溶け落ち位置、素地温度分布、素地表面流速など、いずれも計算値と測定値を比較することが可能で、良く一致している。このモデルの活用により、タンク窯の主要寸法の変更や引き出し量の増減などが、槽窯状態にどう影響を与えるかを予測することが可能となり、スケールアップなどの設計指針としてきわめて有効になっている。

溶解技術の変遷に関して板ガラス窯の溶解能力推移とエネルギー原単位（溶解量1トン当たり必要の重油使用量）の概要を表4.2に示す<sup>(63)</sup>。1950（昭和25）年頃の発生炉ガスから重油への燃料切換え、ジルコニア質電鍍煉瓦の採用、普通板ガラス成形のスピードアップ、フロート法の導入、フロート法の大型化、さらには保温の強化などにより、1988（昭和63）年頃にはエネルギー原単位は大幅に向上している。当然のことながら、溶解能力だけ単独に増強することは無意味であり、成形能力の増強とバランスを保ちながらエネルギー原単位の向上が図られた。

表4.2 板ガラス窯の溶解能力とエネルギー原単位の推移

年代	溶解能力(T/日)	エネルギー原単位(Q/ T)	備考
昭和25年頃	120~140	—	発生炉ガス
35	160~180	330	重油燃焼 電鍍煉瓦開発
45	250~300	300以下	成形スピードアップ フロート法導入
55	800~900	180	フロート法大型化
63		150以下	保温強化

### 4-3-2 不得意品種への挑戦と技術開発

#### (1) 自動車業界の牽引

日本にフロート法が技術導入された時には、平衡厚みに近い6mmから3mmの成形方法が確立されており、その後、特厚物（8～25mm）が日本板硝子はじめ、ピルキントン社により開発され、生産されていったことはすでに述べた。

日本の場合、フロート板ガラスの主要客先である自動車業界は、省エネルギーまたは軽量化に対する量産化の取り組みが早かった。特に、合わせガラス（2枚のガラスの間にポリビニールブチラール製の中間膜を挟み接着したもの）は、自動車用前面ガラスとしての安全性を確認しながら当初の3.0+3.0mmから、1970（昭和45）年頃には2.5+2.5mmに、1975（昭和50）年頃には2.3+2.3mmに、そして1978（昭和53）年頃には2.0+2.0mmの組み合わせが採用され始めている<sup>(64)</sup>。

このため、わが国の板ガラスメーカーは意欲的にフロート法による薄板ガラス製造技術の開発に取り組んだ。フロートバス内でガラスリボンを引き伸ばして、

ゆがみを生じさせないためには、まずフロートバス内へ流入するガラスの均質性を高めることと、バス内の温度管理や補助ロールの配置とスピード管理が重要であり、各社それぞれ技術を確立させ、自動車メーカーにフロート板ガラスによる合わせガラスを供給していた。

#### (2) 超薄板ガラス

自動車用ガラスの需要に続いて、1972（昭和47）年頃から電気業界の液晶ディスプレイ用ガラスの需要が生じてきた。当初は時計や電卓向け液晶基板用の薄板の需要から始まった。それまで薄板として、写真乾板用に1.6～1.1mm厚みのガラスがコルバーン法、フルコート法、旭式引上げ法などにより供給されていたが、1.1mmと、さらに薄い0.7～0.55mm厚みのガラスが液晶ディスプレイ用に求められるようになった（ガラス業界では1.1、0.7、0.55mm厚みのガラスを超薄板ガラスと呼称するようになった）。しかも超薄板ガラスは一般の建築用ガラスと比較すると、平坦度、点状欠点などのユーザーからの要求品質は格段に厳しいもので

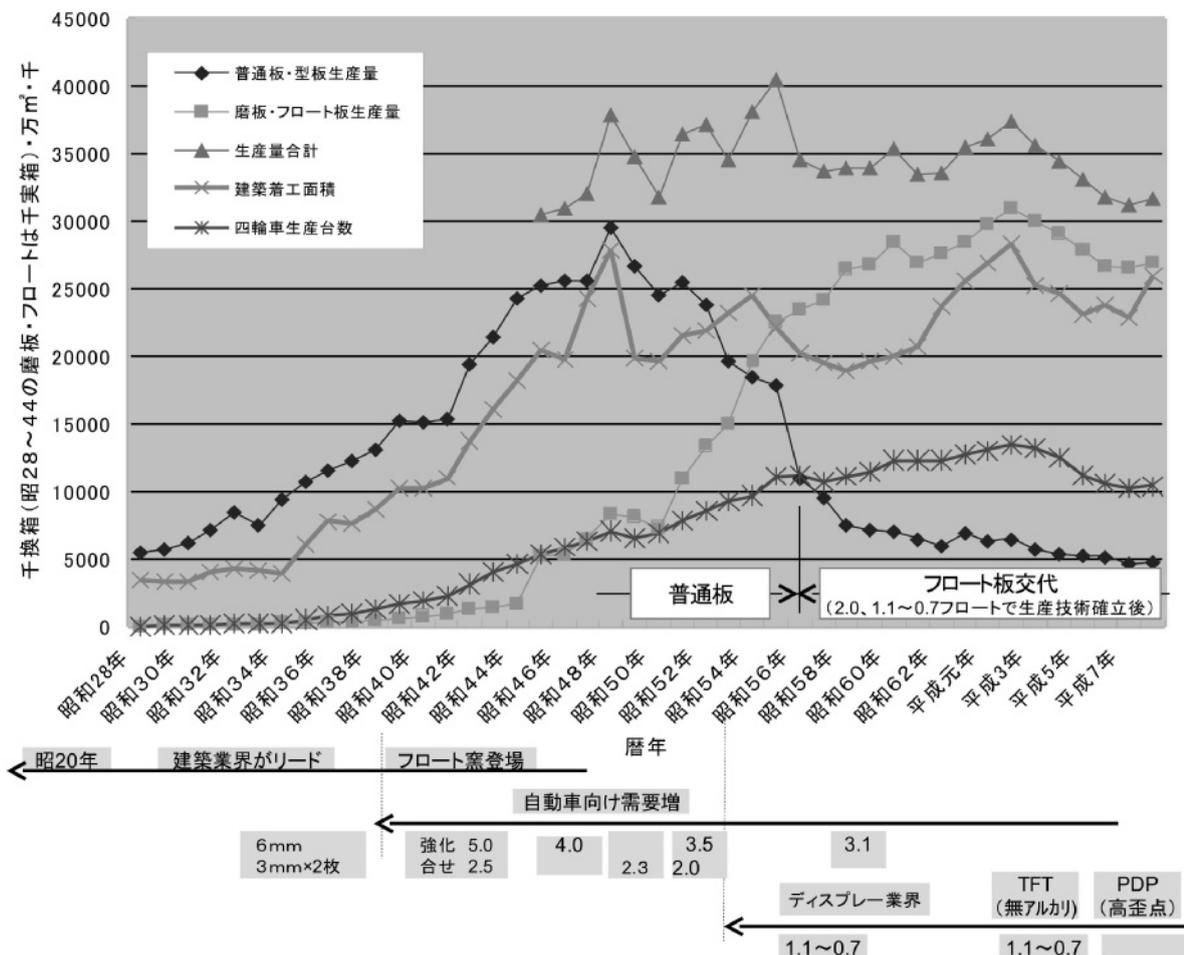


図4.6 板ガラス生産量と需要の関係推移

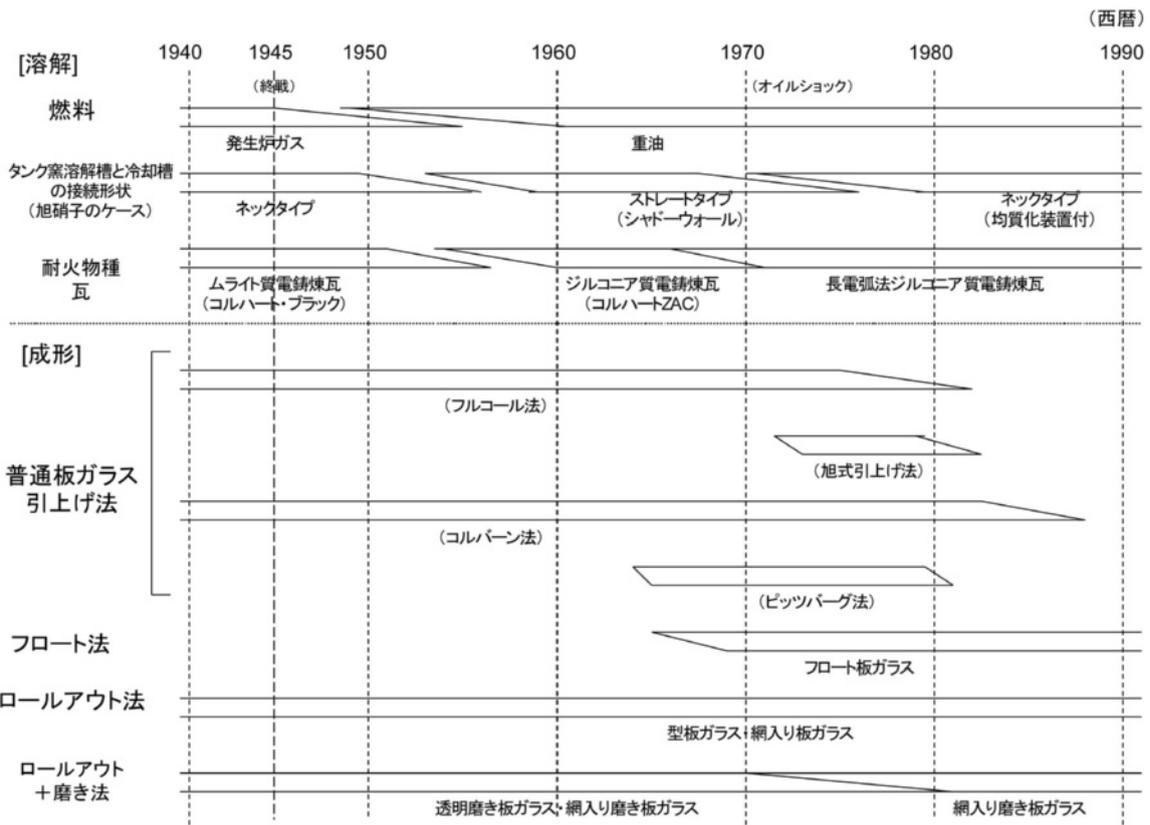


図4.7 板ガラス製造主要技術変遷の概要

あり、各社は大幅な設備・環境の改善に取り組み、開発に努めた。特に日本板硝子はコルバーン法による技術開発に注力し、1978（昭和53）年頃には超薄板ガラスの安定生産に成功し、高いシェアを占めるに至った。当時、業界内では、この種の超薄板ガラスは電子用「ファインガラス」とも称して販売された。

一方で、板ガラス各社は、それまで、自動車用ガラスで進めたフロート法による薄板ガラスの生産技術をさらに発展させて、1982（昭和57）年頃には超薄板ガラスまで量産できるようになった。こうして、普通板ガラス窯の役割は終わり、フロート板ガラス窯に交代していくことになる。板ガラス生産量が、新しい成形方法、新しい需要の出現とともにどのように推移していったかを図4.6に示した<sup>(65)</sup>（なお、図中の生産量単位の換箱、実箱は板ガラス業界特有の単位であり、1換箱は2mm厚みに換算したガラス9.29㎡に相当し、実箱は2mm厚みに換算していないガラス9.29㎡に相当）。

さらに、最近では技術開発が進み、ソーダ石灰系板ガラスのほかに、フロート法により液晶基板用無アルカリガラスまで製造されるようになった（第5章 エレクトロニクス用ガラス参照）。

#### 4-3-3 普通板ガラス製造方式の終焉

3.5節で記述したとおり、戦後、板ガラスの需要増とともに、需要構造にも昭和30年代に入って大きな変化が始まり、昭和30年代後半からの磨き板ガラスの需要増にタイミングを合わせて、昭和40年代に入ってすぐフロート法が導入された。その後、第一次オイルショックの1973（昭和48）年頃までは、普通板ガラスもフロート板ガラスも大幅に生産量が増加していった。その頃を境に、大型化の比較的容易なフロート法は順調に生産量を伸ばし続けたが、大型化に制約があり、品質も劣る普通板ガラスの生産量は減少の方向をたどる。

それでも建築用そのほか、3mm以下の厚みのガラスは、しばらく普通板ガラスがその役割を十分に果たしていた。その後、前項でも記したように、自動車の省エネルギー化、軽量化が進められ、薄くてゆがみのない3～2mm厚みのフロート板ガラスが求められるようになり、技術開発によりフロート法での生産が可能になった時点で、普通板ガラスの役割は縮小した。

さらに引き続き、電気ディスプレイ業界の要求に応じて、フロート板ガラスのさらなる薄板化技術開発により、1.1mmや0.7mmの超薄板ガラスまで生産が可能になった。この時点で、普通板ガラス窯の役割は終わ

った。

1975（昭和50）年頃から各社の普通板ガラス窯の停止が始まり、1988（昭和63）年頃までに、わが国の普通板ガラス窯はほぼ停止している。

1920（大正9）年のコルバーン法、1928（昭和3）年のフルコール法で始まり、その後のピッツバーグ法、旭式引上げ法も含めて、わが国の普通板ガラスの直接引上げ法は半世紀を超える活動に幕を下ろした。板ガラス製造主要技術変遷の概要を図4.7に示す。特に溶解と成形に関して戦後の推移が系統的に理解できるように示した。

## 4.4 海外展開<sup>(66) (67)</sup>

1971（昭和46）年8月、米国のニクソン大統領は、金とドルとの交換の停止、10%の輸入課徴金徴収、主要各国への通貨切り上げ要求などからなる緊急経済政策を発表し、世界に大きな衝撃を与えた。いわゆる「ニクソン・ショック」である。同年12月、スミソニアン協定が合意され、1ドル360円から308円となった。しかし、このスミソニアン体制も長続きせず、1973（昭和48）年2月、ドルの再切り下げとともに変動相場

表4.3 世界の主要板ガラス生産国と企業

2006年4月現在

国名	企業名	国名	企業名	
日本	旭硝子※1	カナダ	AFG Canada※1	
	日本板硝子※2		Pilkington Canada※3	
	セントラル硝子※7		PPG Canada※5	
中国	AGC Flat Glass(Daliann)※1	メキシコ	Vitro※3	
	Guangdong Float Glass※7	Vidrio Saint-Gobain※4	イギリス	Pilkington※3
	Qingdao float Glass※3	イタリア	Flovetro※4	
	Shanghai Yaohua Pilkington※2		Glaverbel Italy※1	
	Tianjin NSG Float Glass※2		Societa Italiana Vetro※3	
韓国	Hankuk Glass Industries※4	オランダ	Glaverbel Nederland※1	
台湾	Taiwan Glass※7	スウェーデン	Pilkington Bilglas※3	
インドネシア	P.T.Asahimas.Flat Glass※1	スペイン	Cristaleria Espanola※4	
シンガポール	Glavermas※1		Glaverbel Iberica※1	
タイ	Siamguard※6		Guardian Llodio※6	
フィリピン	Asahi Glass Philippines※1	SIV Espanola※3	チェコ	Glaverbel Czech※1
ベトナム	Vietnam Float Glass※2	ドイツ	Pilkington Flachglas※3	
マレーシア	Malaysian Sheet Glass Berhad※2	Vegla※4	ハンガリー	Hunguard※6
インド	Asahi India Glass※1	フィンランド	Pilkington Lahden Lasitehdas Oy※3	
	Gujarat Borosil※7	フランス	Glaverbel France※1	
	Gujarat Guardian※6	Saint-Gobain※4	ベルギー	Glacieries de Saint-Roch※4
	Haryana Sheet Glass※7	Polfloat※4	Glaverbel※1	
	Saint-Gobain Glass India※4	Sandoglass※3	ポーランド	Covina※4
Triveni Sheet Glass※7	ポルトガル	Luxguard※6	ルクセンブルグ	Luxguard※6
サウジアラビア	Gulfguard※6	ロシア	Glaverbel Klin※1	
オーストラリア	Pilkington Australia※3		Saratov※7	
ニュージーランド	Pilkington New Zealando※3	Salavat※7		
南アフリカ	Plate Glass and Shatterproof※7			
ブラジル	Cebrace※4			
	Guardian do Brasil※6			
アルゼンチン	Santa Lucia Crystal※3			
	Vasa Float※4			
ベネズエラ	Maturin※6			
アメリカ	AFG Industries※1			
	Cardinal※7			
	Guardian Industries※6			
	Pilkington North America※3			
	PPG Industries※5			
Visteon※7				

(企業グループ)

- ※1 旭・グラバーベル
- ※2 日本板硝子
- ※3 Pilkington
- ※4 サンゴバン
- ※5 PPG
- ※6 ガーディアン
- ※7 その他

制に移行し、以降円高基調が次第に強まっていった。

こうした円切り上げなどの国際環境の変化に対応して、わが国の板ガラスメーカー各社は、高級品輸出への転換をはかるとともに、それまでも、東南アジア各国の板ガラスの需要の勃興と増大を見込んで資本と技術を輸出していたが、旭硝子の場合は1956（昭和31）年のインド、1964（昭和39）年のタイに続いて、新しく1972（昭和47）年にインドネシアに、日本板硝子は1970（昭和45）年のイラン、1971（昭和46）年の韓国の資本参加に続いて、同年にマレーシアに、板ガラス製造の合弁会社を設立した。また、技術輸出として、旭硝子の1965（昭和40）年の台湾、日本板硝子の韓国があり、さらに旭硝子では先述したように、旭式引上げ法（A式）を合弁会社のみならず、フルコール方式を採用している世界各国の板ガラスメーカーに技術輸出している。

その後、日本が資本と技術を輸出したASEAN諸国の板ガラス需要は旺盛になり、また高品質に対する要求も増大し、1982（昭和57）年のインドネシアをはじめとして、フロート窯がスタートした。フロート窯が建設されるとともに、順次普通板ガラス窯が停止している。タイ、フィリッピン、マレーシア、インド、中国（大連、青島、天津など）、ベトナムと続々フロート窯が建設され、フロート窯のマニュアルを整備し、日本の派遣員から現地人の技術者主体による、操業に切り替えられていった。

一方では、板ガラス製造業特有の技術革新に伴う設備の巨大化とともに、企業の集約化、グローバル化が進められ、旭硝子が1981（昭和56）年にベルギーのグラバーベル社に、1992（平成4）年に米国AFGインダストリー社に、日本板硝子が1990（平成2）年に米国のリビー・オーエンス・フォード社に、2000（平成12）年に英国ピルキントン社にそれぞれ資本参加し、そしてセントラル硝子が2002（平成14）年にフランスのサンゴバン社と自動車用安全ガラスの共同販売会社を設立するなど、世界的にグループ化、提携が進んでいった。板ガラスの製造技術は各グループがグループ内各社の板ガラス製造技術を共有の技術として、建築業界、自動車業界に対して、競争力を高めていくことになった。特に、板ガラス製品の品質については、現在では日本の板ガラス技術が世界的に高く評価され、トップレベルに位置している。

2006（平成18）年4月現在の世界の主要板ガラス生産国と企業の一覧表を示す<sup>(68)</sup>（表4.3）。

## 4.5 省エネルギーと公害対策

### 4-5-1 省エネルギー

1973（昭和48）年10月、第四次中東戦争が勃発し、アラブ産油国は翌年1月、原油価格をそれまでの4倍にまで引き上げ、第一次オイルショックが始まった。エネルギー多消費型産業と呼ばれる板ガラス工業でエネルギー原単位（単位ガラスを熔融するために消費されるエネルギー量）の削減はコスト的に重要課題で、特にオイルショックを契機に、その技術開発が加速された。

必要エネルギーは、原料の熔融量に比例する部分と槽窯全体の温度を維持するための固定部分がある。重油使用量をY、原料熔融量（＝ガラス引き出し量）をXとすると、次式で表せる。

$$Y = AX + B$$

ここで、

A：単位ガラスを熔融するために理論的に必要な重油量であり、ほぼ定数であるが、改善の余地もある。

B：固定部分、保持熱量（ホールディングヒート）である。

したがって、重油原単位Y/Xを小さくするにはBを小さくするか、もしくはXを大きくすることが必要である。比例部分の削減対策としては、屑ガラス（カレット）の使用、原料粒度分布の最適化、熔融促進剤の添加などがある。固定部分の削減のためには、同一引き出し量をできるかぎり小さい窯容量で実現することが必要であり、理想的にはピストンフローにすることである。しかし品質保持の観点では二律背反の関係になる。昭和20年代後半以降、タンク窯のサイドラインはネック（絞り）のないストレートタイプとして、溶解槽から冷却槽への旺盛な自然対流によりガラス素地の均質性が保持されてきた（引き出し量の流れの何倍もの対流により均質性が保持されてきた）。しかし、省エネルギー意識の高まりにより、溶解槽と冷却槽の間にネック（絞り）が採用され、対流量を減らす傾向になった。このためにはガラス素地の均質化手段が必要であり、バブリング（泡の吹き込み）やスターリング（攪拌）装置の開発および熔融ガラスと接触する耐火物煉瓦の品質の向上が大いに貢献した。

さらに、先に紹介した数学モデルの応援も得て、固定部分の増加を抑えながら、規模の拡大が図られていった。

一方では、まず徹底した保温、蓄熱室の大型化などによる燃焼用空気の前熱温度アップ、バーナーの改善など幅広く行われた。特にバーナーの改善は次項で述べる窒素酸化物NO<sub>x</sub>の削減、省エネルギーの両面から重要な役割を果たしてきた。

フロート成形法による規模の拡大、保温の徹底などによる総合的なエネルギー原単位の推移はすでに4.3節の表4.2に示した。

保温と耐火物の関係を少し紹介する<sup>(69)</sup>。天井迫(てんじょうぜり、本窯、蓄熱室とも)の場合、保温の基本はベースの耐火物の材質に適切な断熱材を組み合わせることである。けい石にはケイ酸質断熱煉瓦、ジルコニア質電鍍煉瓦にはアルミナ質断熱材、塩基性煉瓦には非ケイ酸質断熱材などである。高温において、異質煉瓦や断熱材との反応によるベース煉瓦の強度低

下や溶損を防ぐことが重要である。溶解槽の炉床では、保温により炉底のガラス素地温度が上昇し、粘性が下がり、ガラス素地が敷煉瓦(一般にジルコニア質電鍍煉瓦)の目地(煉瓦の継ぎ目)を通過して下方に浸透し易くなり、最悪の場合、素地漏れを引き起こす危険がある。このため、保温する煉瓦層はガラス素地に対して、温度条件を加味して耐食性のあるものを選び、浸透防止の適切な保温構造が必要である。耐火物を使用する板ガラスメーカーと耐火物メーカーとの技術的な連携プレーにより、保温・断熱技術が進展していった。

板ガラス窯における熱流れ図の例<sup>(70)</sup>およびネックタイプのフロート板ガラス窯の断面図<sup>(71)</sup>を示す(図4.8、4.9)。また、4.3節の図4.7に示した板ガラス製造主要技術変遷の概要の中で、「溶解」欄のタンク窯溶解槽と冷却槽の接続形状を参照されたい。

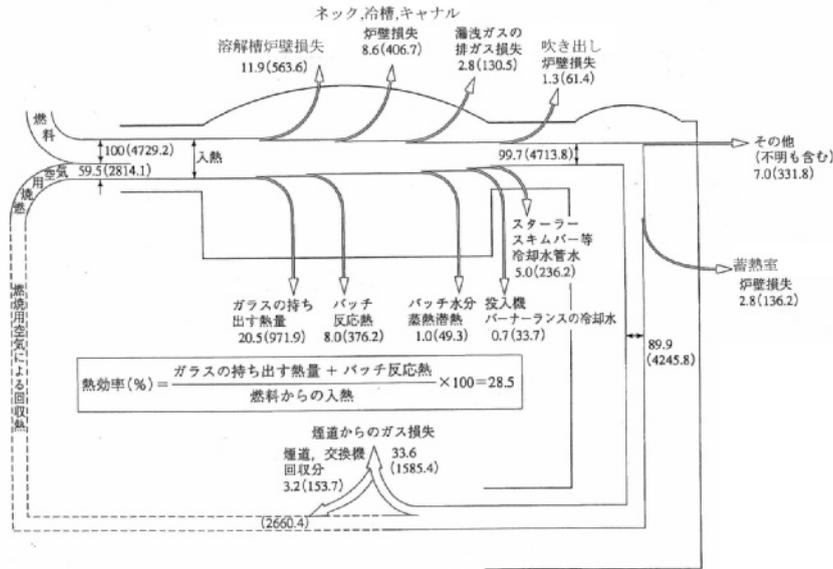


図4.8 板ガラスタンク窯の熱流れ図の例  
数字は燃料よりの入熱を100としたときの%、( )内の数字は ×10<sup>4</sup>kcal/hの絶対値

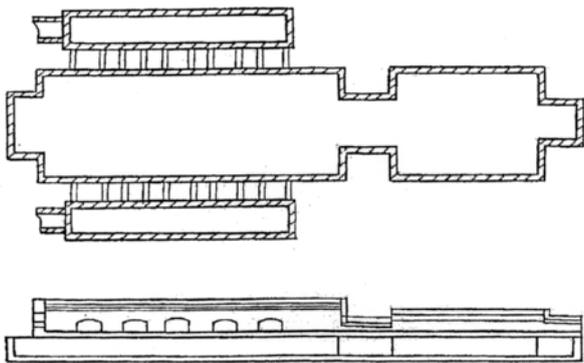


図4.9 板ガラスタンク窯 (ネックタイプ)

#### 4-5-2 公害対策

経済の高度成長、生産活動の大規模化およびモータリゼーションの進行などによって、エネルギー消費量が急増し、それに伴う環境汚染が人類共通の最大の課題となってきた。

昭和30年代後半から環境汚染による被害が増加し、種々の法規制が行われるようになった。1967(昭和42)年に「公害対策基本法」が制定され、翌1968(昭和43)年には「大気汚染防止法」が公布された。

板ガラス工業で大気汚染物質として問題となるのは、主として、燃料として使用される重油から発生する硫黄酸化物SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、およびばいじんであり、各

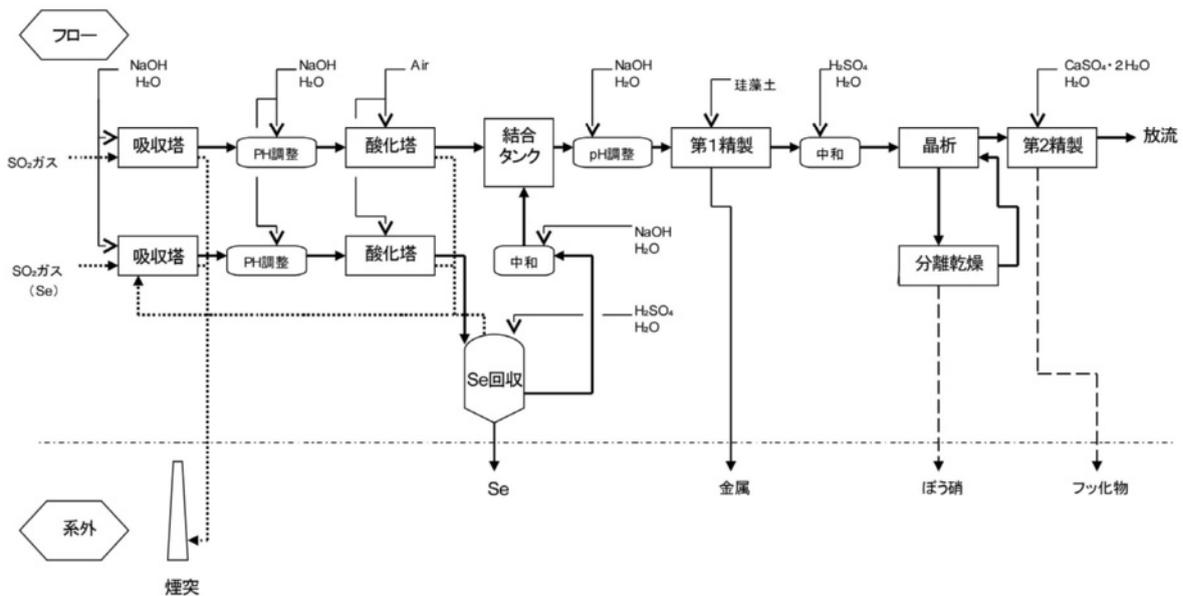


図4.10 ぼう硝回収式湿式排煙脱硫装置フロー例

社はこれらの物質の規制基準の達成に取り組んだ。このうち、SO<sub>x</sub>については大気汚染防止法制定以後、低硫黄燃料への転換で対処してきた。しかし、規制の強化、低硫黄燃料の入手難と価格アップなどのため従来の方法では対策が困難となり、高煙突化や排煙脱硫装置の設置により排出規制に対処するようになった。

1974（昭和49）年、大気汚染防止法が改正され、SO<sub>x</sub>の総量規制が実施された。これは指定地域の特定工場に対し、SO<sub>x</sub>の総量削減計画の作成と実施を義務づけたものである。各工場とも化学機械メーカーなどと協力して、排煙脱硫装置を開発し、稼働させることにより、排出基準を達成していった。特徴的なのは、排煙脱硫装置では、副産物としてぼう硝（Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>）を回収し、原料として再使用していることである。代表的なぼう硝回収式湿式排煙脱硫装置のフロー例（旭硝子提供）を示す（図4.10）。

一方NO<sub>x</sub>については、1973（昭和48）年環境基準が告知され、まず同年にボイラーなど4種類の施設の排出基準が制定された（第一次規制）。高温で溶融することが特徴であるガラス溶融炉はNO<sub>x</sub>の抑制が困難であり、1979（昭和54）年の第四次規制から規制の対象となった。各社が燃焼方法の改善に取り組み、基準を達成した。

さらに、1981（昭和56）年には総量規制が導入され、地域ごと、都府県レベルで実施されることになった。各社は燃焼改善をさらに進めて、バーナーの選択、バーナーの設置位置、重油の噴霧方法、O<sub>2</sub>計による空気比の徹底管理などにより、NO<sub>x</sub>規制値に対処した。扇型平面タイプの油圧バーナーのスルーポート方式（窯

の吹き出し口の底から挿入される）が一つの対策例である。NO<sub>x</sub>減少の理由として、

- ①噴霧空気を使用しないので、炉内へのO<sub>2</sub>の供給量が減少し、その分だけ窒素酸化物の生成が抑制される。
- ②噴霧空気を使用しないので、局部的高温がない。
- ③炎を扇形（60～95°）に拡げ、しかも上下方向の厚みが薄いため、炎の上下面における燃焼完結が早く、炎中の窒素ガスの滞留時間が短い。

などが挙げられる<sup>(72)</sup>。参考にスルーポート方式のバーナーの配置図を示す<sup>(73)</sup>（図4.11）。

ばいじんは、一般的にはろ過集塵機（バグフィルター）、電気集じん機で対応する。フロー図で示したぼう硝回収式湿式排煙脱硫装置の場合、吸収塔の下流に電気集じん機、もしくはガラス繊維製のデミスター（ミストを捕集する装置）が設置される。

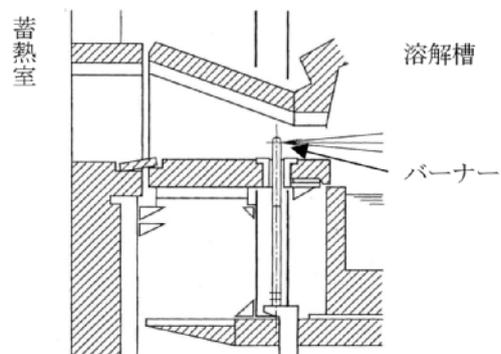


図4.11 重油高压バーナー配置図

## 4.6 耐火物の技術の進展

耐火物については、3.4節において述べたが、ガラスタンク窯の歴史は耐火物の歴史でもあり、板ガラス製造技術の変遷に大きく関係する。昭和40年代以降の耐火物技術変遷について、板ガラス製造に関するいくつかの項目について概略を述べる。

### (1) 塩基性煉瓦<sup>(74)(75)</sup>

板ガラスタンク窯の蓄熱室の天井迫（てんじょうぜり）の場合、溶解槽からの原料飛散物およびアルカリ蒸気に対する耐食性が重要であり、従来は焼成または不焼成の塩基性煉瓦（マグネシア質、マグネシア・クロミア質）が使用されていたが、昭和50年代以降、省エネルギーのため断熱保温が強化されるにつれて、耐クリープ性の比較的大きい高温焼成ダイレクトボンドのマグネシア・クロミア煉瓦が、代わって使用されるようになった。しかし、大型窯のスパンの大きい蓄熱室の天井で十分に断熱保温を施したような場合には、耐クリープ性の点で十分とはいえず、塩基性煉瓦に代わってジルコニア質電鑄煉瓦が最適であり、採用が増える傾向にある。

熱交換に重要な役割を果たす蓄熱室の空積み煉瓦は、溶解槽からくる排ガスの性状から、天井迫と同じく高温部はマグネシア煉瓦などが用いられるが、最上段部は飛散してくる原料粉末中のシリカが煉瓦の上面に堆積して、マグネシア煉瓦に亀裂を発生させ崩れていくので、それを防ぐために、ここでも2段程度ジルコニア質電鑄煉瓦が使用される場合が多くなった。

### (2) 長電弧溶融法（ロングアーク法）によるジルコニア質電鑄煉瓦の製造

昭和30年代にフランスのエレクトロレフラクテール社で発明されたもので、この方法によりジルコニア質電鑄煉瓦は著しく品質が改善された<sup>(76)</sup>。旭硝子は、1966（昭和41）年にこの技術を導入し生産を開始している。従来は、耐火物原料と電極（カーボン）を直接接触させて原料を溶融し、鑄造していた。新しい方法は、長電弧（ロングアーク）により電極と原料とが直接接触することなく溶融されるので、電極カーボンによる還元作用が弱くなった。

この結果、生産されるジルコニア質電鑄煉瓦のコランダムとバデライトの結晶間に存在する非晶質マトリックスガラスの軟化点が大きく上昇し、板ガラス素地に対する耐食性が向上し、マトリックスガラスの浸出によるガラス素地の汚染やガラス素地中への発泡性が減少した。こうして板ガラス製造面で大きく貢献した（図4.12）。

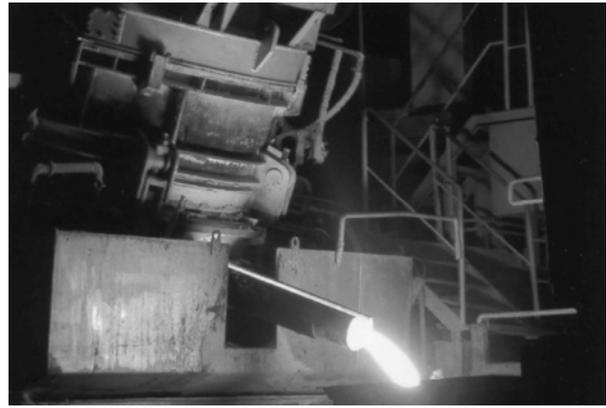


図4.12 電鑄煉瓦製造用電気炉  
（旭硝子セラミックス社提供）

### (3) ジルコニア質電鑄煉瓦の鑄造方法の変遷

電鑄煉瓦は、その製法から、鑄造時に液体が固化する際の体積収縮に起因する鑄込み巣、もしくは空洞（ブローホール、blow hole）が生じるのを避けることができない。したがって、この煉瓦を最も侵蝕の厳しい板ガラスタンク窯の種瓦として使用する場合、ブローホールをどの位置に配置して使用するかが重要である。このため、鑄造時に、このブローホールに関して技術的に工夫が加えられ、鑄込み巣や粗晶（分散気孔がある部分）のない部分を有効に利用する方法が開発されていった。図4.13に電鑄煉瓦の各種鑄造方法および図4.14にチルトキャスト（TC）煉瓦のブローホールとガラス素地レベル（GL）との関係を示す<sup>(77)</sup>。

その結果、板ガラス素地の組成による熱の透過性の違い、断熱施策の程度などにより、侵食性を考慮し、VF品、TC品、RC品など使い分けられるようになった。また、製品煉瓦について、電磁波を利用した内部品質評価技術も確立され、切断しなくても、煉瓦内部の巣、粗晶状態が判断できるようになった。

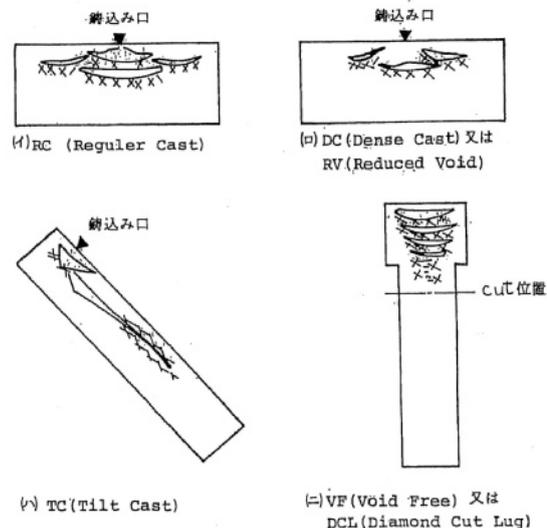


図4.13 電鑄煉瓦各種鑄造方法

(4) 高耐食性ジルコニア電鍍煉瓦<sup>(78)</sup>

旭硝子において、先に述べた長電弧法によるジルコニア質電鍍煉瓦よりさらに耐食性の高い電鍍煉瓦の組成と製法が開発され、1981（昭和56）年より生産が始まっている。ジルコニア質電鍍煉瓦の耐食性はジルコニア（ $ZrO_2$ ）の含有量とともに向上するが、煉瓦製造時の亀裂の発生などの理由から、その含有量の上限は41%とされていた。この亀裂発生機構が解明され、りん酸化合物の添加および新組成の開発により、 $ZrO_2$ 95%の含有量の高耐食性煉瓦が亀裂の発生なく生産されるようになった。

ソーダ石灰ガラスに対する耐食性は向上し、さらに、ホウケイ酸ガラスはじめ、そのほかのエレクトロニクス用ガラスなどの特殊ガラスに対する耐食性も向上したと報告されている。

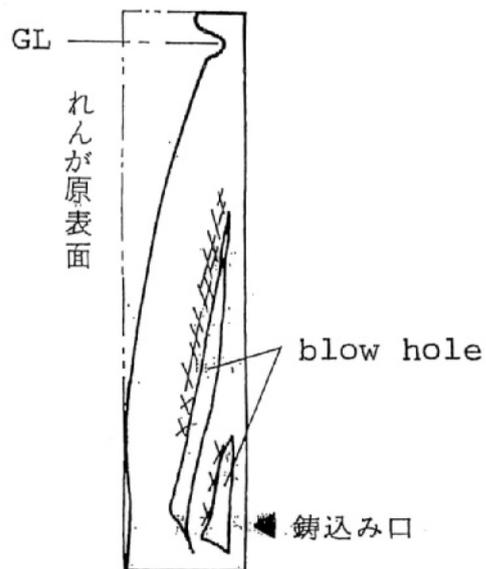


図4.14 TC煉瓦のblow holeの位置

# 5 | 市場ニーズの多様化、構造変化（昭和60年代以降）

## 5.1 建築用および車両用加工ガラス<sup>(79) (80)</sup>

1973（昭和48）年および1979（昭和54）年と、日本経済は二度にわたるオイルショックに直面し、板ガラス業界も省エネルギーや減量経営に取り組んだ。その厳しい環境下においてもフロート化は急速に進み、各社は市場ニーズの多様化、構造変化に対応すべく機能ガラスの開発に取り組んだ。一般住宅やビル建築物の省エネルギー、防犯という社会ニーズに対応できる製品の開発や、さらに地震や台風などの非常災害に対する窓ガラスの安全性の向上、ならびに学校や住宅での日常災害を防ぐための製品開発も進めた。

欧米諸国では、省エネルギーのための建物の断熱構造化が進み、また安全性についても建物の所定の場所には安全ガラスを使用する基準や規則が設定され、実施されている。日本でも省エネルギー分野では、省エネルギー法に基づき住宅の断熱基準が1979（昭和54）年に制定され、その後二度にわたって全面改訂され、欧米諸国と比較して同レベルの水準にまで強化された<sup>(81)</sup>。

安全面では、自動車用フロントガラスへの合わせガラスの使用が1985（昭和60）年に法制化され、住宅およびビルについては、建設省から「ガラスを用いた開口部の安全設計指針」の活用についての通達が1986（昭和61）年に行われ、強化ガラスおよび合わせガラスの使用が推奨された<sup>(82) (83)</sup>。こうした社会の要請、それに基づく法の制定などにより、多くの、いわゆる機能性をもった板ガラス二次製品が普及することとなった。

今回の調査における板ガラス製造技術の変遷は、連続製造工程（原料調合-溶解-成形-徐冷-切断）から直接製品とする一次製品について詳述してきた。一次製品を強化、表面処理や組み立てなどの加工処理した二次製品は広範囲に及び、その技術もより専門的になるので、ここでは代表的な板ガラス二次製品について簡単に特徴のみを紹介する。

省エネルギー面から熱線反射ガラスおよび複層ガラスがあり、安全面やその他から合わせガラス、強化ガラス、倍強度ガラス、および防火ガラスがあり、さらに従来からの鏡などが挙げられる。

### (1) 熱線反射ガラス（Solar Reflective Glass）

主として可視域から近赤外の太陽エネルギーを有効に反射するもので、フロート板ガラスの表面に金属膜

または金属酸化物膜の焼き付け（パイロリテック法）、スパッタリングなどの方法で付着させて生産する。膜としてはチタンの酸化物（ $TiO_2$ ）やチタンの窒化物（ $TiN$ ）が用いられる。優れた日射エネルギー反射性能により冷房負荷を軽減する。外観は鏡面に近く、空や周囲の景色を映し、視覚的にも美しい建物をつくる。用途は、一般建築物から超高層建築物までの外装用である。参考に6mm厚みのガラスの日射熱取得率の比較を示す（図5.1）。

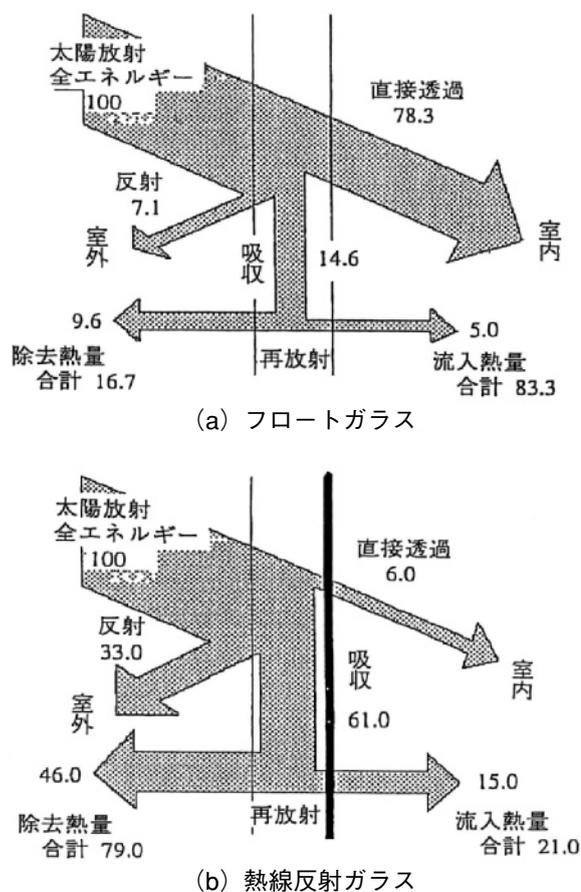


図5.1 日射熱取得率の一例

### (2) 合わせガラス（Laminated Glass）

万一、強い衝撃を受けて破損しても、強靱な中間膜によって破片の飛散が防止される。また、貫通もし難しく、きわめて安全性が高いガラスである。そのため自動車のフロントガラスや超高層ビルの窓ガラス、人の多く集まる建物の出入り口など、安全性を要求される所に使用されている。このほか、破壊しても侵入しにくいということで、盗難防止用（防犯ガラス）の需要が増大している。また、水槽用など特殊な用途にも使用される。

合わせガラスは2枚以上のガラスの間に、ポリビニルブチラール（PVB）製の中間膜をはさみ接着したものである。自動車用の曲げ合わせガラスの場合、所定の形状に切断し、面取りした後、2枚のガラスをリング状の金型に載せ、加熱軟化により金型になじませ、次いで冷却する。曲げ加工が終了したら、中間膜をはさみ接着して製品としている。先にも述べたように自動車のフロントガラスには、必ず合わせガラスを使用することが義務づけられている。

### (3) 強化ガラス（Tempered Glass）

フロート板ガラスの3～5倍の強度をもち、衝撃、圧力、熱変化などに耐え、万一破損しても破片が細粒状になる。そのため、万一負傷しても軽傷ですむところから、自動車、鉄道車両、船舶、航空機の窓をはじめ、ビルの出入り口のドアや学校、一般住宅の窓として使用されている。

板ガラスを650～680℃程度に加熱し、その後急冷（風冷強化）することにより製造される。曲げ強化ガラスの場合、加熱後、急冷する前にプレス法あるいはガスハース炉により曲げ加工される。加熱後、急冷することにより表面から厚みの約1/6の深さまで圧縮ひずみを与えることにより安定した強度が得られる。

### (4) 倍強度ガラス（Heat-strengthened Glass）

同じ厚みのフロート板ガラスの約2倍の耐風圧強度をもち、万一破損してもフロート板ガラスと同様の割れ方をする。そのため、12、15、19mm厚みのフロート板ガラスを必要とする設計風圧の高い場所でも、8、10mm厚みの倍強度ガラスで代替使用できることから、ビルの外装用ガラスとして使用される。

生産時には厳密に制御された熱処理を行い、ガラスの表面圧縮応力を所定の値の中に収めるように管理される。建築用を使用する場合、倍強度ガラスも強化ガラス同様に、エッジ部は衝撃に弱く、施工上エッジの保護に留意し、サッシに直接接触することは避けることが重要である。

### (5) 複層ガラス（Sealed Insulating Glass）

1979（昭和54）年の省エネルギー法の成立に基づき住宅の断熱基準が制定され、複層ガラスは住宅メーカーや消費者の省エネルギーに対する関心の高まりから急激に使用が広がった。

通常2枚の板ガラスの周囲を封着し、その中間に乾燥空気を密封したもので、普通の単板ガラスの約2倍の断熱効果を発揮する。また、室内外の温度差が著しいときでも、ガラス表面に発生する結露が生じにくく、壁、床などを結露による腐食から守り、さらにガラスの透視性を確保できる。そのため、空調設備をもって

いる建物はもちろんのこと、一般住宅や鉄道車両、さらには冷凍ショーケースなど広範囲な用途がある。また、複層ガラスは、特殊金属膜をガラスの表面にコーティングしたLow-Eガラス（低放射ガラス、Low Emissivity Glass）の使用により、冬季の暖房効率を高めることを目的とした寒冷地での普及のみならず、夏季の冷房効率を高めるための遮熱効果を目的として温暖な地域にまで次第に普及の範囲を拡大している。Low-Eガラスは特殊金属膜として、酸化スズのような透明導電性氧化物や、酸化物/銀/酸化物のような多層構成のものが用いられ、1μm前後から長波長の熱放射を反射する特性をもち、室内からの熱放射を再び室内に戻す役割をする。

### (6) 鏡（Mirror）

鏡は、鏡台や姿見としてはもちろんのこと、インテリア材として広く使われている。銀色のものが一般的であるが、ブロンズやグレーのものなどがある。昭和40年代に入って、板ガラスメーカー系列の鏡製造会社により連続製鏡ラインで生産されるようになり、品質、特に耐久性は向上し、鏡の欠点であるスポット状、もしくは側縁部における侵食に対する抵抗性も増大した<sup>(84)</sup>。

一般的に製造工程は次のとおりである。洗浄および前処理を施したガラスにまず銀鏡反応を利用した銀めっきを行う。銀めっきは、硝酸銀のアンモニアアルカリ性溶液にぶどう糖などの還元剤を加えて、ガラス面に銀を析出させる。この上に銀の保護のために銅めっきを行う。銅めっきは、硫酸銅溶液を亜鉛粉末などで還元して銅を析出させる。これに下塗りおよび上塗り塗料を塗布、乾燥焼付けして製品とする。

## 5.2 エレクトロニクス用ガラス<sup>(85) (86)</sup>

本調査では板ガラスの製造技術の変遷について、ソーダ石灰ガラス組成で主として建築用、車両用（産業用）に使用される板ガラスに関して記述してきたが、最近のめざましい発展を遂げている平板ディスプレイ用に使用されるガラスについては、製品となるディスプレイデバイスの要求特性により、ガラス組成、成形方法も従来の板ガラスと異なるところもあり、専門性も高くなるので、概略を述べる。

代表的な平板ディスプレイとして、液晶ディスプレイ（Liquid Crystal Display,LCD）およびプラズマディスプレイ（Plasma Display Panel,PDP）が挙げられる。

LCD用ガラス基板は、液晶表示方式の種類により、熱収縮、表面形状、耐薬品性など多くの要求特性がある。ガラスの種類としては、ソーダ石灰、低アルカリ

ホウケイ酸、そして最近ではTFT（Thin Film Transistor：薄膜トランジスター）表示方式に用いられる、無アルカリのバリウムホウケイ酸、アルミノホウケイ酸ガラスなどがあり、ソーダ石灰ガラス以外は一般に小型タンク窯により溶解される。

成形方法としては薄板ガラス用に1940年代に米国コーニング社（Corning）により開発されたスロットダウンドロー成形、1960年代に同じく同社によって実用化されたフュージョンドアウンドロー成形（フュージョン成形）があり（図5.2、5.3参照）、さらに最近ではフロート法でも無アルカリガラスが製造されている。

1984（昭和59）年にコーニング社によりフュージョン成形法を使って無アルカリバリウムホウケイ酸ガラスが製造され、その後、旭硝子、日本電気硝子、NHテクノグラスなども技術を開発し、無アルカリガラス基板を製造している。厚みは1.1～0.7mmが標準である。旭硝子はフロート法により製造している。

PDP用ガラス基板は、PDPの構造から450～600℃の温度域で多数回の熱処理を受けるため、この温度範囲で熱変形や熱収縮の少ないことが要求され、従来モノクロ時代にはソーダ石灰ガラスが使用されていたが、カラー化、大型化になって、高歪点アルミノケイ酸ガラスなどが使用されるようになった（一般ソーダ石灰ガラスの歪点が511℃に対して、例えば570℃のガラスであり、歪点とは、この温度以下では実際上ガラス中のひずみを除去することができない温度のことで、このときのガラスの粘度は $4 \times 10^{13} \text{Pa} \cdot \text{s}$ である）。成形にはフロート法などが用いられ、ガラス組成に対応してフロートバス構造の改造や装置の材質の選定などの技術開発が行われ、1996（平成8）年頃より本格生産が始まっている。

また、ガラス磁気ディスク基板用の特殊組成ガラスも、フロート法により、同じく1996（平成8）年頃に生産が実現されている。

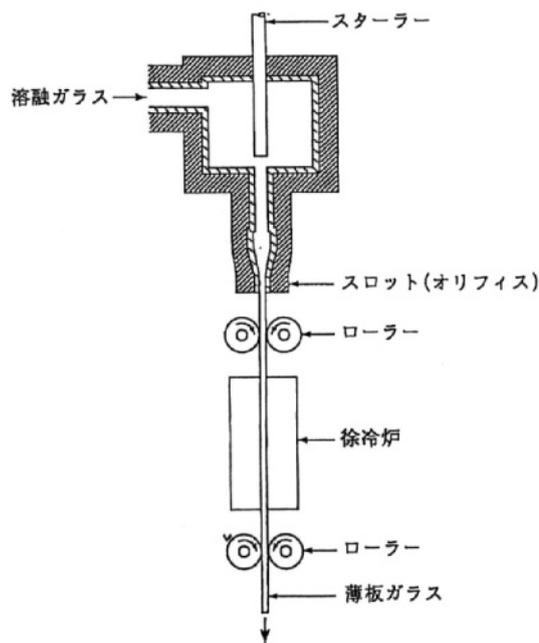


図5.2 スロット・ダウンドロー成形

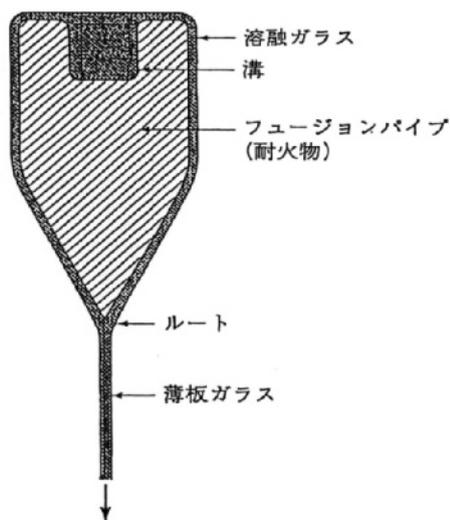


図5.3 フュージョンドアウンドロー成形

## 6 | 考察・まとめ

1909（明治42）年に手吹式円筒法からスタートした日本の板ガラス工業は、多くの技術革新を重ね、今日では、建築用、自動車用をはじめ生活のあらゆる分野に板ガラスを供給し、現代社会とは切り離して考えることのできない存在となっている。特に第二次世界大戦後の復興から始まって高度経済成長期を経て、日本の板ガラス製造技術、製品品質レベルは世界のトップレベルにあると云える。それは国内ユーザーの品質に対する厳しい要求と同業他社との激しい競争によって培われたものである。

戦後の大きな技術変遷の節目は、フロート板ガラスの登場と2度にわたる石油危機にあり、さらにはフロート法による薄板ガラス製造技術が確立された時である。それを推進させたのは自動車用安全ガラス側からの要請であった。石油危機によるフロート板ガラス窯の規模の拡大の経緯はすでに記述したので、ここでは自動車用安全ガラスについて、世界的な規模での動きと日本の行動について考察する。

1970（昭和45）年前後から世界のモータリゼーションが最盛期に入り、各国で自動車安全基準づくりが進み、自動車用安全ガラス規格の国際的な統一が急がれることになった。ISO（国際標準化機構）の1969（昭和44）年の総会で、自動車部会の中に窓ガラス分科会（TC22/SC11）が設置され、自動車用安全ガラスの規格を制定することが決められた<sup>(87)</sup>。日本においても、これに対応して自動車技術会が中心となって、板ガラス3社、板硝子協会、自動車メーカー、化学メーカー、および関係官庁からなる日本自動車規格ガラス部会が設置された。その後、1975（昭和50）年のISO分科会国際会議において、それまで各国で規格がばらばらであったのに対し、世界初の自動車用ガラスの統一規格が制定された。そのなかに、機械的特性の試験方法、光学特性の試験方法などが定められ、こうした試験方法を元に、自動車メーカーと板ガラスメーカーは協同で自動車用安全ガラスを開発していった。

一方で、自動車用ガラスの高付加価値化の展開として、①安全性の向上、②デザイン性の向上、③省エネルギー性、④高付加機能による快適と便利なカーライフ追求、などが指向された。このなかで、欧米でも進められたが、特に日本の場合、省エネルギーまたは軽量化に対する自動車用ガラスの量産化への取り組みが熱心で、強化ガラスの薄板化、合わせガラスの薄板化が進められ、その素板であるフロート板ガラスの薄板

化が要請された<sup>(88)</sup>。合わせガラスとしては、当初3+3mmでスタートし、2.5+2.5→2.3+2.3→2.0+2.0と進んだ。フロート法で不得意とされた薄板について、幾多の技術的困難を越えて、1978（昭和53）年頃には、品質的にも優れた2.0mm板ガラスの生産に成功している。その後、生産性の向上、省エネルギー化の推進を目指したフロート板ガラスの大型窯における建築用2mm厚みの量産技術も確立され、普通板ガラス窯の順次の停止が始まり、最後に、得意とした超薄板ガラスまでがフロート板ガラス窯で生産されるに及んで、完全に普通板ガラス窯は姿を消していった。

自動車用ガラスに続いて、大きなニーズとなった電気業界のディスプレイ向けの液晶基板用の超薄板ガラスは、ソーダ石灰ガラスの場合は板ガラスからの延長として、フロート法により生産されるに至ったことは上に述べたが、参考までに、TFTタイプの液晶ディスプレイ向け無アルカリガラスなどの特殊組成の超薄板ガラスは、フロート法の延長による場合と、従来からのフィルムに近い極超薄板ガラス製法（ダウンドロー法など）からの取り組みとの2通りの開発アプローチがあり、現在もこの2通りの方法により、商業生産されていることも第5章で既述したことを付け加えておく。

昭和40年代に日本にフロート法技術が導入され、その後国内ユーザーの厳しい品質要求に対して、薄板ガラスの量産技術を中心に、日本が世界に先がけて挑戦、開発推進していったことが、現在の日本の板ガラス製造技術競争力をトップレベルに押し上げていったと云える。

板ガラスの主要な市場は、住宅・建築と自動車・車両である。開発途上国への進出は数十年前からなされ、住宅・建築用ガラスを供給している。また、大口ユーザーである自動車産業の海外進出をサポートする形で、板ガラスの加工拠点が海外に置かれるようになり、その素材を供給するための板ガラス製造設備の拠点も世界中に置かれるようになった。こうした背景のもと、板ガラス製造特有の技術革新に伴う設備の巨大化とともに、企業の集約化・グループ化が進み、世界的にも少数の企業グループに集約されてきている。

このようにグローバル化が進む中で、わが国のガラスメーカーが求心力を持ち続けるには、技術面での優位性を確保することが重要であり、そのためには、(1) 日本特有の現場プロセス重視とユーザーとの密着

した協同作業、(2) 高付加価値化の推進、と共に、(3) 基礎・基盤技術におけるリードなどの多面作戦が必要である。なお、技術開発部門は製造現場から離れることなく、製造拠点に隣接して置かれることが重要である。

特に、今後はますます重要視される省エネルギー、環境問題に係わる溶融プロセスのさらなる技術開発が急がれる。(3) については、ガラス製造に関する問題を科学的にアプローチする産学官共同の研究組織「ガラスプロセス研究会」が1992（平成4）年に発足している<sup>(89)</sup>。この研究会はガラスプロセス全体の技術課題を洗い出し、そのなかから取り組むべき特定課題を抽出して分科会を設立し、共同で解決して行こうとするものである。最初の分科会テーマは「泡の発生メカニズム」で決まっており、すでに活動を開始し、工業生産に反映できる有益な研究成果が期待されている。

一方、現在の世界の企業が取り組んでいる開発技術として、①酸素燃焼技術（燃焼用空気の代わりに酸素を使用し、それに伴い、空気を予熱する蓄熱室も設置しない）、②減圧脱泡技術、③全電気溶融技術、などが挙げられる<sup>(90)</sup>。小規模の窯や特殊組成ガラスの窯では、すでに実用化されているものがあり、通常規模、大型規模のフロート板ガラス窯への展開が期待される。21世紀の板ガラス製造技術開発の目標は、19世紀後半から続く「ジューメンズ式ガラスタンク窯」からの脱却であり、種々の技術の組み合わせにより、必ずや早期に達成されるものと考えられる。

## ■謝辞

今回実施した「板ガラス製造技術発展の系統化調査」に関しては、技術データや資料・情報提供など下記の方々にご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

板硝子協会	池貝晃一氏
硝子産業連合会	小川晋永氏 (兼 日本硝子製品工業会)
日本セラミックス協会	乾信一氏
旭硝子(株)	宮田経博氏、大江正人氏 石寺博氏、山口繁実氏 豊岡大造氏、佐々木幹夫氏
日本板硝子(株)	小林史朗氏、馬場順一氏
セントラル硝子(株)	前田雄志氏、倉橋正則氏
旭硝子セラミックス(株)	工藤栄一氏、吉岡敏範氏
(株)旭硝子総研	山口和男氏
旭硝子(株) OB	兼松貞雄氏、石川浩三氏 尾島正男氏、近藤敬氏 田中道興氏、能代誠氏 村山武靖氏

## <参考資料>

付録1 板ガラス製造技術史年表

付録（資料）板ガラス製造技術関連登録候補一覧表

<参考文献>

- (1) 作花濟夫：ガラス状態 「ガラス工学ハンドブック」(山根正之,他編) p2 (1999) 朝倉書店
- (2) 功刀雅長：珪酸塩化学 「工業化学概論」(水科篤郎,他共著) p143 (1960) 丸善
- (3) 大江正人：ガラスの各論 「ガラス工学ハンドブック」(山根正之,他編) p440 (1999) 朝倉書店
- (4) 成瀬省：「ガラス工学」 第1章 p3 (1958) 共立出版
- (5) 成瀬省：ガラスとガラス工業 「ガラスハンドブック」(作花濟夫,他編) p9 (1975) 朝倉書店
- (6) 旭硝子：「旭硝子社史」 第1編39 (1967)
- (7) 大江正人：ガラスの各論 「ガラス工学ハンドブック」(山根正之,他編) p440 (1999) 朝倉書店
- (8) 鈴木由郎：ガラスの製造 「ガラスハンドブック」(作花濟夫,他編) p284 (1975) 朝倉書店
- (9) 旭硝子：「旭硝子社史」 資材p631 (1967)
- (10) 稲葉博司他：ガラスの製造 「ガラス工学ハンドブック」(山根正之,他編) p287 (1999) 朝倉書店
- (11) 成瀬省：「ガラス工学」 第9章p114 (1958) 共立出版
- (12) 板硝子協会：「日本の板ガラス」 p9 (2006)
- (13) 石川浩三：ガラスの製造 「ガラスハンドブック」(作花濟夫,他編) p406 (1975) 朝倉書店
- (14) 稲葉博司他：ガラスの製造 「ガラス工学ハンドブック」(山根正之,他編) p362 (1999) 朝倉書店
- (15) 北秀夫：ガラスの製造 「ガラスハンドブック」(作花濟夫,他編) p411 (1975) 朝倉書店
- (16) 板硝子協会：「日本の板ガラス」 p10 (2006)
- (17) 日本板硝子：「日本板硝子五十年史」 終戦から復興へp237 (1968)
- (18) 旭硝子：「旭硝子社史」 第7編p296 (1967)
- (19) 板硝子協会：「板硝子協会50年史」 統計p180 (1997)
- (20) 日本板硝子：「日本板硝子五十年史」 終戦から復興へp251 (1968)
- (21) 上田清・宮崎雄一郎：「硝子(下)」 第4章p42 (1958) 産業図書
- (22) 旭硝子：「旭硝子社史」 第7編p299 (1967)
- (23) 板硝子協会：「板硝子協会50年史」 第1章p36 (1997)
- (24) 日本板硝子：「日本板硝子五十年史」 事業の拡大p338 (1968)
- (25) セントラル硝子：「セントラル硝子三十五年史」 第4章p119 (1972)
- (26) 近藤敬：ガラスの製造 「ガラス工学ハンドブック」(山根正之,他編) p314 (1999) 朝倉書店
- (27) 速水昭：「ガラス製造の現場技術」(小川晋永,他編) Vol.1 p241 (1993) 日本硝子製品工業会
- (28) 旭硝子：「旭硝子社史」 第8編p341 (1967)
- (29) 日本板硝子：「日本板硝子五十年史」 終戦から復興へp249 (1968)
- (30) 速水昭：「ガラス製造の現場技術」(小川晋永,他編) Vol.1 p242 (1993) 日本硝子製品工業会
- (31) 旭硝子：「旭硝子社史」 部門史p684 (1967)
- (32) 旭硝子：「旭硝子社史」 第5編p187,第8編p358 (1967)
- (33) 吉木文平：「耐火物工学」 耐火物各論p338,p442 (1962) 技報堂
- (34) 宮川隆泰：「岩崎小弥太」 第5章p209 (1996) 中央公論社
- (35) 日本板硝子：「日本板硝子五十年史」 社業躍進p281 (1968)
- (36) セントラル硝子：「セントラル硝子三十五年史」 第4章p113 (1972)
- (37) 日本板硝子：「日本板硝子五十年史」 国際競争p393 (1968)
- (38) 旭硝子：「旭硝子社史」 第9編p387 (1967)
- (39) 日本板硝子：「日本板硝子五十年史」 国際競争p394 (1968)
- (40) セントラル硝子：「セントラル硝子三十五年史」 第5章p141 (1972)
- (41) 日本板硝子：「日本板硝子五十年史」 本社ビルp365 (1968)
- (42) 旭硝子：「旭硝子社史」 部門史p705 (1967)
- (43) セントラル硝子：「セントラル硝子三十五年史」 第5章p150 (1972)
- (44) 旭硝子：「旭硝子社史」 部門史p685 (1967)
- (45) セントラル硝子：「セントラル硝子三十五年史」 第5章p142 (1972)

- (46) 日本板硝子：「日本板硝子五十年史」事業の拡大p333 (1968)
- (47) 旭硝子：「旭硝子社史」部門史p704 (1967)
- (48) セントラル硝子：「セントラル硝子三十五年史」第5章p163 (1972)
- (49) 大江正人：ガラスの各論「ガラス工学ハンドブック」(山根正之,他編) p443 (1999) 朝倉書店
- (50) 日本板硝子：「日本板硝子五十年史」事業の拡大p324,さらに飛躍p427 (1968)
- (51) Glass Publication Ltd: “GLASS” February65 (1959)
- (52) L.A.B.Pilkington: “The float glass process ” Proc.Roy.Soc.Lond.A Vol314 15 (1969)
- (53) 的場成公：「フロートプロセスにおける溶融金属」金属45巻6号p33 (1975)
- (54) 稲葉博司他：ガラスの製造「ガラス工学ハンドブック」(山根正之,他編) p360 (1999) 朝倉書店
- (55) L.A.B.Pilkington: “The float glass process” Proc.Roy.Soc.Lond.A Vol314 16 (1969)
- (56) 稲葉博司他：ガラスの製造「ガラス工学ハンドブック」(山根正之,他編) p361 (1999) 朝倉書店
- (57) 的場成公：「フロートプロセスにおける溶融金属」金属45巻6号p34 (1975)
- (58) 北秀夫：ガラスの製造「ガラスハンドブック」(作花済夫,他編) p417 (1975) 朝倉書店
- (59) 日本板硝子：「日本板硝子五十年史」国際競争p421 (1968)
- (60) 旭硝子：「旭硝子社史」部門史p705 (1967)
- (61) H.Mase and K.Oda: “Mathematical model of Glass Tank with Batch Melting Process” J. of Non-Cryst.Solids No38-39 807-812 (1980)
- (62) 織田健嗣他：「連続ガラス溶融炉における溶融ガラスの流れ及び蓄熱室における熱交換のシミュレーション」セラミックス23巻6号p536-538 (1988)
- (63) 雨宮肇：「ガラス溶融プロセスの問題と新展開」日本セラミックス協会ガラス部会講演会7月 (1993)
- (64) 尾島正雄：「自動車用ガラスの歴史」自動車技術会誌 高しょう2 p16 (1992)
- (65) 板硝子協会：「板硝子協会50年史」統計p180-184 (1997)
- (66) 板硝子協会：「板硝子協会50年史」第3章p60-62 (1997)
- (67) 板硝子協会：「日本の板ガラス」年表p33 (2006)
- (68) 板硝子協会：「日本の板ガラス」 p28 (2006)
- (69) 熊倉重博：「ガラス窯用耐火物 (I)」耐火物 35巻6号p352 (1983)
- (70) 近藤敬：ガラスの製造「ガラス工学ハンドブック」(山根正之,他編) p312 (1999) 朝倉書店
- (71) 速水昭：「ガラス製造の現場技術」(小川晋永,他編) Vol1 p242 (1993) 日本硝子製品工業会
- (72) 川上徹也：「ガラス製造の現場技術」(小川晋永,他編) Vol2 p33 (1993) 日本硝子製品工業会
- (73) 近藤敬：ガラスの製造「ガラス工学ハンドブック」(山根正之,他編) p319 (1999) 朝倉書店
- (74) 熊倉重博：「ガラス窯用耐火物 (II)」耐火物 35巻7号p410-413 (1983)
- (75) 速水昭：「ガラス製造の現場技術」(小川晋永,他編) Vol1 p253 (1993) 日本硝子製品工業会
- (76) 特許出願公告 昭36-5375 仏エレクトロレフラクテール社
- (77) 熊倉重博：「ガラス窯用耐火物 (I)」耐火物 35巻6号p350 (1983)
- (78) 桑原清治・奥宮正太郎：「高耐食性ジルコニア電鍍煉瓦」旭硝子研究報告 32巻1号p37-50 (1982)
- (79) 渡部紀夫：ガラスの各論「ガラス工学ハンドブック」(山根正之,他編) p444-451 (1999) 朝倉書店
- (80) 田中淳二：ガラスの各論「ガラス工学ハンドブック」(山根正之,他編) p452-454 (1999) 朝倉書店
- (81) 板硝子協会：「板硝子協会50年史」第4章p100 (1997)
- (82) 板硝子協会：「板硝子協会50年史」第4章p92 (1997)
- (83) 板硝子協会：「板硝子協会50年史」第4章p88 (1997)
- (84) 中谷明男：ガラス工業製品「ガラスハンドブック」(作花済夫,他編) p50 (1975) 朝倉書店
- (85) 近藤敏和：ガラスの各論「ガラス工学ハンドブック」(山根正之,他編) p502-505 (1999) 朝倉書店
- (86) 岡本文雄：ガラスの製造「ガラス工学ハンドブック」(山根正之,他編) p362-364 (1999) 朝倉書店
- (87) 板硝子協会：「板硝子協会50年史」第3章p77 (1997)
- (88) 尾島正雄：「自動車用ガラスの歴史」自動車技術会誌 高しょう2 p11-16 (1992)
- (89) 板硝子協会：「板硝子協会50年史」第5章p141 (1997)
- (90) 田中千禾夫：ガラスの製造「ガラス工学ハンドブック」(山根正之,他編) p330 (1999) 朝倉書店

付録1 板ガラス製造技術史年表

年	板ガラス製造技術、開発新技術	社会、会社関連事項
1907(明治 40)		岩崎俊弥、尼崎に旭硝子株式会社設立
1909(明治 42)	旭硝子、ベルギーの手吹式円筒法により尼崎工場で操業開始(わが国で初めて板ガラスの量産化に成功)	
1914(大正 3)	旭硝子牧山工場建設、ラバーズ式(機械吹円筒法)製造開始	世界大戦で板ガラス輸入途絶える
1916(大正 5)	旭硝子鶴見工場建設(ラバーズ式)	
1917(大正 6)		旭硝子、ア法ソーダ灰初めて国産化
1918(大正 7)		日米板硝子株式会社設立
1920(大正 9)	日米板硝子、二島工場でコルバーン法操業開始(わが国で初めての板引法による板ガラス製造)	
1928(昭和 3)	旭硝子、尼崎工場でフルコール法製造開始	
1931(昭和 6)		日米板硝子、日本板硝子に社名変更
1932(昭和 7)	日本板硝子、型板硝子の製造開始	旭硝子、アルミナ系電鍍煉瓦「コルハート」製造開始
1933(昭和 8)	旭硝子、板引法への転換終了	
1935(昭和 10)	旭硝子、型板・磨板ガラス製造開始	
1936(昭和 11)	日本板硝子、四日市工場建設(コルバーン法)	宇部曹達工業株式会社設立
1941(昭和 16)		太平洋戦争始まる
1944(昭和 19)		旭硝子、日本化成工業と合併、三菱化成工業と改称
1945(昭和 20)	三菱化成、日本板硝子両社工場、操業休止相次ぎ、終戦時、日本板硝子二島工場のみ操業、11月 三菱化成尼崎工場操業再開	第二次世界大戦終結
1946(昭和 21)	三菱化成牧山工場、日本板硝子四日市工場の操業再開	
1947(昭和 22)		9月 板硝子協会設立
1948(昭和 23)	2月 三菱化成、校舎用銀線ガラス本格生産重油燃焼開始	

年	板ガラス製造技術、開発新技術	社会、会社関連事項
1949(昭和 24)	11 月 三菱化成 3 工場、日本板硝子 2 工場の普通板ガラス 5 工場の操業実現	
1950(昭和 25)		6 月 企業再建整備法により旭硝子、三菱化成より分離独立 7 月 日本板硝子、二島工場を若松工場に改称 9 月 板ガラス工業規格 (JIS) 制定
1952(昭和 27)	9 月 日本板硝子、舞鶴工場操業開始 (ロールアウト式型板、連続テーブル式磨板ガラス)	
1954(昭和 29)		11 月 旭硝子、ジルコニア系電鍍煉瓦「ジルコナイト」製造開始
1956(昭和 31)		8 月 インド旭硝子設立
1957(昭和 32)	10 月 旭硝子、米国からの技術導入による重油専焼方式の新設計窯スタート	
1958(昭和 33)		5 月 セントラル硝子株式会社設立
1959(昭和 34)	5 月 セントラル硝子堺工場フルコール法操業開始 5 月 日本板硝子、コルバーン法とロールアウト式併産	1 月 英国ピルキントン社、フロート方式を発表
1962(昭和 37)	7 月 日本板硝子、網入板ガラス (ダブルフロー式) 製造開始	
1963(昭和 38)	3 月 旭硝子、フルコール法とロールアウト式併産 5 月 旭硝子、フォード改良型連続磨板ガラス設備稼動	1 月 宇部曹達工業、セントラル硝子と合併し、セントラル硝子と改称
1964(昭和 39)	3 月 セントラル硝子、松阪工場でデュープレックス方式による磨板ガラス製造開始 8 月 日本板硝子、千葉工場操業開始 (コルバーン法) 11 月 セントラル硝子、堺工場でピッツバーグ法板ガラス製造開始	6 月 タイ旭硝子設立
1965(昭和 40)	1 月 旭硝子、網入板ガラス (ダブルフロー式) 製造開始 11 月 日本板硝子、舞鶴工場でフロート板ガラスの製造開始	

年	板ガラス製造技術、開発新技術	社会、会社関連事項
1966(昭和 41)	5 月 旭硝子、鶴見工場でフロート板ガラスの製造開始 7 月 旭硝子、尼崎工場でピッツバーグ法板ガラス製造開始 8 月 日本板硝子、フロート特厚物開発	
1967(昭和 42)	7 月 日本板硝子、一窯三機方式開発(コルバーン法)	8 月 公害対策基本法公布
1968(昭和 43)	10 月 旭硝子、尼崎工場でフロート板ガラスの製造開始	4 月 霞ヶ関ビル完成 6 月 大気汚染防止法制定
1969(昭和 44)	6 月 セントラル硝子、松阪工場でフロート板ガラスの製造開始	7 月 旭硝子、工場再編 尼崎が関西工場、牧山が北九州工場、鶴見が京浜工場に
1971(昭和 46)	6 月 旭硝子、旭式板ガラス引き上げ法を開発 8 月 日本板硝子、千葉工場でフロート板ガラスの製造開始	11 月 日本板硝子、マレーシアン・シートガラス設立
1972(昭和 47)	5 月 旭硝子、愛知工場でフロート板ガラスの製造開始	1 月 旭硝子、アサヒマスフラットガラス(インドネシア)設立
1973(昭和 48)		10 月 第1次オイルショック
1974(昭和 49)		5 月 SO <sub>x</sub> の総量規制実施
1975(昭和 50)		5 月 建築ガラス第1回 ISO 会議 ロンドンで開催 12 月 ISO 分科会(TC22/SC11) で自動車用安全ガラスの統一 規格制定
1976(昭和 51)	5 月 セントラル硝子、松阪工場にフロート板ガラス窯増設	
1977(昭和 52)		6 月 第3次 NO <sub>x</sub> 規制公布
1978(昭和 53)	6 月 日本板硝子、舞鶴工場にフロート板ガラス窯増設	1 月 窯業統計、フロート・磨板 ガラスも並厚換算に統一
1979(昭和 54)		2 月 第2次オイルショック
1981(昭和 56)	3 月 旭硝子、鹿島工場でフロート板ガラスの製造開始	3 月 旭硝子、ベルギーの グラバーベル社に資本参加
1982(昭和 57)	2 月 旭硝子、国内での普通板ガラス窯操業停止	6 月 NO <sub>x</sub> 総量規制の導入

年	板ガラス製造技術、開発新技術	社会、会社関連事項
1982(昭和 57)	10 月 セントラル硝子、国内での普通板ガラス窯 操業停止 12 月 セントラル硝子、堺工場でフロート板ガラスの製造開始	
1985(昭和 60)		9 月 自動車前面ガラスに合わせガラスの使用の義務付け
1988(昭和 63)	12 月 日本板硝子、国内での普通板ガラス窯 操業停止	7 月 旭硝子、フィリピンに リパブリック・アサヒガラス 設立
1990(平成 2)		3 月 日本板硝子、米国 LOF 社に 資本参加
1992(平成 4)	12 月 セントラル硝子、宇部工場でフロート板ガラスの製造開始	10 月 板硝子協会と学会、産業界、 官界が協力して「ガラスプロ セス研究会」発足 12 月 旭硝子、中国に大連フロート 硝子設立および米国 AFG イ ンダストリーズ社に資本参 加
1993(平成 5)		9 月 日本板硝子、中国に青島フロ ート硝子設立
1995(平成 7)		1 月 阪神・淡路大震災発生 3 月 日本板硝子、ベトナムに ベトナムフロートガラス設立
1996(平成 8)		8 月 複層ガラス需要が急拡大

付録（資料）板ガラス製造技術関連登録候補一覧表

番号	名称	資料形態	所在地	製作者	製作年	コメント
1	手吹き式ガラス円筒	実体	旭硝子(株) 関西工場	旭硝子	1909～ 1920	日本で初めて板ガラスが工業的に生産された時期のもの
2	手吹き式ガラス円筒	実体	旭硝子(株) 京浜工場	旭硝子	1909～ 1920	同上
3	ラバー式機械吹ガラス円筒	実体	旭硝子(株)AGCモノ づくりセンター	旭硝子	1930頃	人工手吹きから機械吹式に切り替えられ、フルコ ール法に転換されるまで生産された
4	磨板ガラス製造設備	実体/写真	セントラル硝子(株) 松阪工場	サンブル社 (ベルギー)	1964	連続両面磨き法(デュロープレックス法) 現在、世界で唯一稼働中の設備
5	フロート板ガラス	実体	日本板硝子(株) 舞鶴事業所	日本板硝子	1965	東洋で初めてのフロート板ガラス先端
6	長電弧法エルー式電気炉	実体/写真	旭硝子セラミックス (株)製造部	三菱電機	1966	長電弧法によるジルコニア系電融铸造煉瓦製造用 電気炉の日本第1号機
7	旭式板ガラス引上げ法(A式) 技術マニュアル	文献	旭硝子(株) 京浜工場	旭硝子	1971	フルコール法の欠点をなくし、生産性を大幅に向 上させた独自開発技術の技術輸出に関する指導書
8	板ガラス窯用排煙脱硫設備	実体/写真	旭硝子(株) 関西工場	旭硝子	1972	板ガラス窯の代表的な排煙脱硫設備

本報告は平成18年度科学研究費補助金特定領域研究『日本の技術革新—経験蓄積と知識基盤化—』  
計画研究「産業技術史資料に基づいた日本の技術革新に関する研究」(17074009)の研究成果である。

## 国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第9集

---

平成19(2007)年3月30日

- 編集 独立行政法人 国立科学博物館  
産業技術史資料情報センター  
(担当:コーディネイト・エディット 永田 宇征 田里 誠、エディット 久保田 稔男)
- 発行 独立行政法人 国立科学博物館  
〒110-8718 東京都台東区上野公園 7-20  
TEL: 03-3822-0111
- デザイン・印刷 株式会社ジェイ・スパーク