

# エネルギーイノベーションプログラム 「革新的ガラス溶融プロセス技術開発」 (事後評価)

## プロジェクトの詳細 (公開)

### - ① 気中溶融(インフライトメルティング)技術開発 -

(国)東京工業大学  
東洋ガラス(株)  
旭硝子(株)  
(一社)ニューガラスフォーラム

2013年 8月 16日

1/54

## 発表内容

公開

- |  |             |
|--|-------------|
| (1)①-(1)超高効率気中加熱技術の開発                              | 東洋ガラス       |
| (2)①-(1)-e) 原料・ガラス品質評価<br>(2)-a)c) 高付加価値ガラスへの適用性評価 | } 旭硝子       |
| (3)①-(2)プラズマ・酸素燃焼炎加熱技術の開発                          | 東工大渡辺研      |
| (4)①-(3)-a)気中溶融特有の現象と融液挙動の解明                       | 東工大矢野研      |
| (5)①-(3)-b)シミュレーション技術の開発                           | ニューガラスフォーラム |

2/54

## ① 気中溶融（インフライトメルティング）技術開発

## —(1) 超高効率気中加熱技術の開発

## 東洋ガラス株式会社

2013年 8月16日

3/54

## ①—(1)、②、③—(1) 目標と達成状況

公開

	目標	成果	達成度
①—(1) 超高効率気中加熱技術の開発	・カレットなしソーダ石灰ガラスを900kcal/kg-glass以下で、かつ必要なガラス化率を達成。	・ソーダ石灰ガラス用造粒原料を使用して、開発した気中溶融用酸素バーナを設置した1t/dの試験炉で気中溶融を行い、目標とするエネルギー原単位とガラス化率を達成した。	○
a) 1t/d溶融試験炉設計・製作と改良 b) 炉条件適正化(炉形状、バーナ改善) c) 炉運転条件の適正化	・液晶用ガラスを3,000kcal/kg-glass以下で溶融。	・液晶用ガラス用造粒原料を使用して1t/dの試験炉で気中溶融を行い、エネルギー原単位2,800kcal/kg-glassとガラス化率を達成した。	◎
d) 炉材評価 e) 原料・ガラス品質評価 f) 実用炉の概念設計による課題の抽出	・標準的ガラスびん生産品と同等の組成均質性を得る。	・1t/dの試験炉で気中溶融したソーダ石灰ガラスは目標とする組成均質性、泡品質、色調などを達成することができた。	○

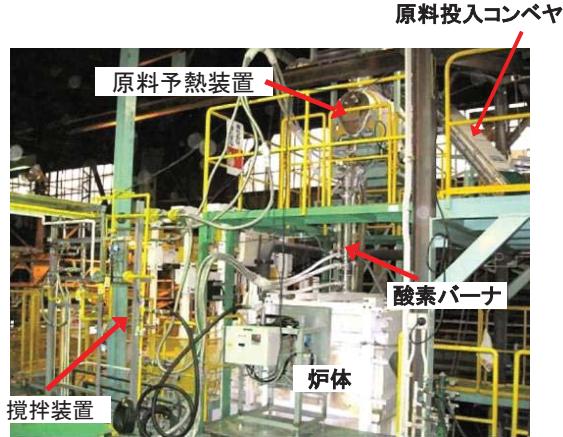
◎ 大幅達成、○ 達成、△ 達成見込み、× 未達

4/54

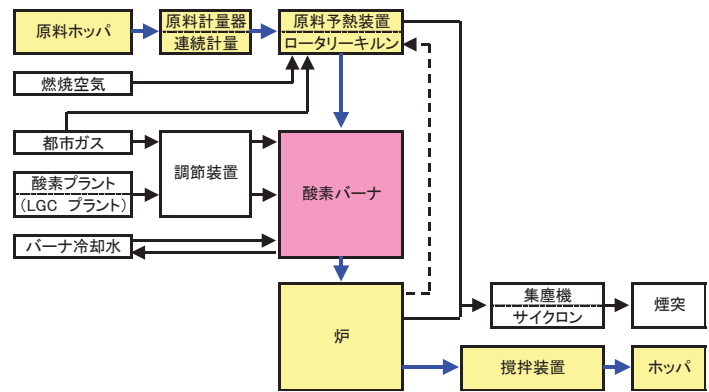
①一(1) 研究開発成果; 溶解量1 t/d 都市ガス・酸素炎燃焼試験炉 公開

- 溶解量1 ton/d の都市ガス・酸素炎燃焼試験炉で、ソーダ石灰造粒原料を用いて合計22回の気中溶融実験を行い、合計56トンのガラスを溶融した。
- 最長121時間の連続溶融を行い、開発試験炉の長期運転の可能性を確認した。

試験炉外観



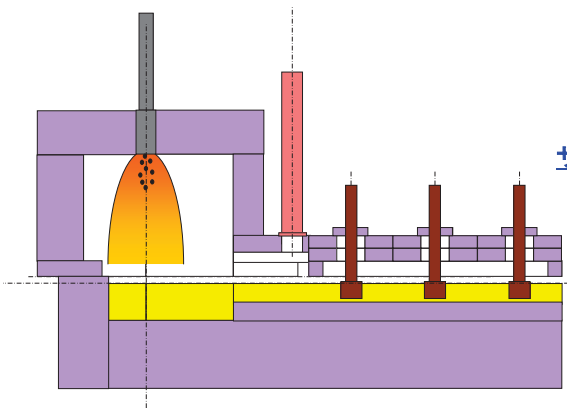
試験炉全体設備フロー図



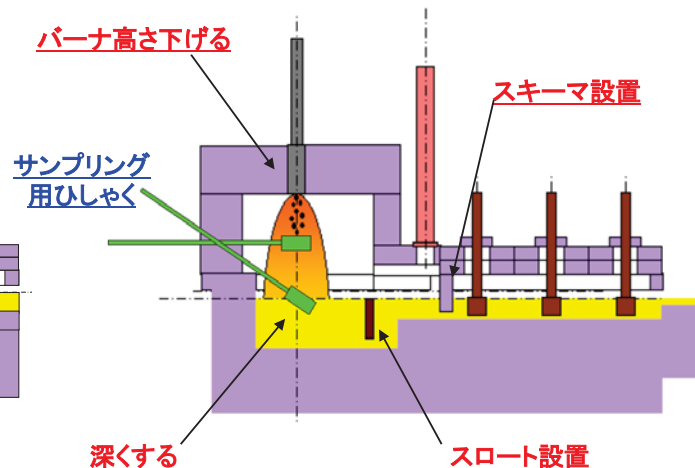
①一(1); 試験炉改良履歴 公開

- 気中での溶融状況や落下直後の溶融ガラスをサンプリングするための採取口を試験炉に設置した。
- 溶融エネルギーを減少させるに依り泡層が急激に増加したため、泡層流出防止のためのスロートを設置するなどの改造を行った。

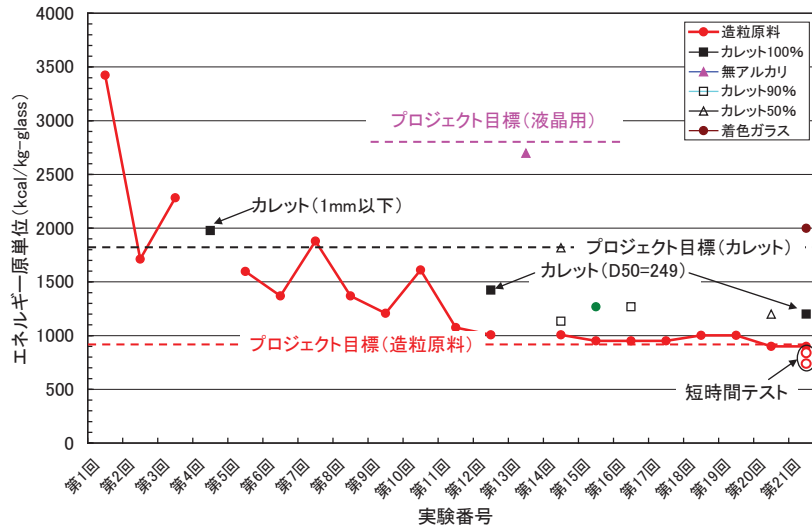
開始時(第一期)



終了時(第三期)



- ・ 気中溶融に適した酸素バーナの開発、運転条件の適正化、泡層の流出防止のためのスロート設置、燃焼室高さの適正化などの改造により、**ソーダ石灰ガラス**の溶融エネルギー最終目標値原単位 **900 kcal/kg-glass** を達成した。また、短時間ではあるが 900kcal/kg-glass 以下での運転を行い、さらに改善できる見通しを得た。
- ・ **液晶用ガラス**について、溶融エネルギー原単位 **2,800 kcal/kg-glass** での連続溶融を確認した。



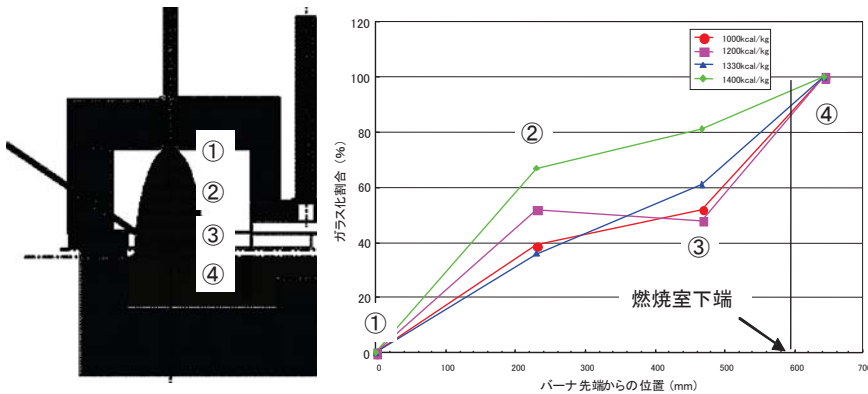
- ・ 造粒原料の気中溶融に適した酸素バーナの開発により、ソーダ石灰ガラスの溶融エネルギー最終目標値原単位 900 kcal/kg-glass、液晶用ガラスの溶融エネルギー原単位 2,800 kcal/kg-glass を達成した。
- ・ 開発した酸素バーナは微粒カレットにも使用できることも確認した。

酸素バーナの溶融能力の推移

バーナ形式	オリジナル	改良1	改良2
エネルギー原単位 (kcal/kg-glass)	1600	940	955
炉内状況			
フレーム形状			

- 飛翔中の原料および着地直後のガラスの調査から、原料はほとんど飛翔中に熔融していると考えられる。
- 先導研究で見られたアルカリ成分の揮散(残留率95%)は、実用上問題がない程度(残留率99%)に減少した。

飛翔中の造粒原料熔融状況



熔融ガラスの組成分析値

	mass%	
	Batch(anal.)	Molten Glass(anal.)
SiO <sub>2</sub>	71.4	71.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.0	2.1
CaO	10.1	10.2
MgO		0.06
Na <sub>2</sub> O	15.6	15.4
K <sub>2</sub> O		0.04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1	0.1
TiO <sub>2</sub>		0.01
SO <sub>3</sub>	0.5	0.3
Total	99.7	100

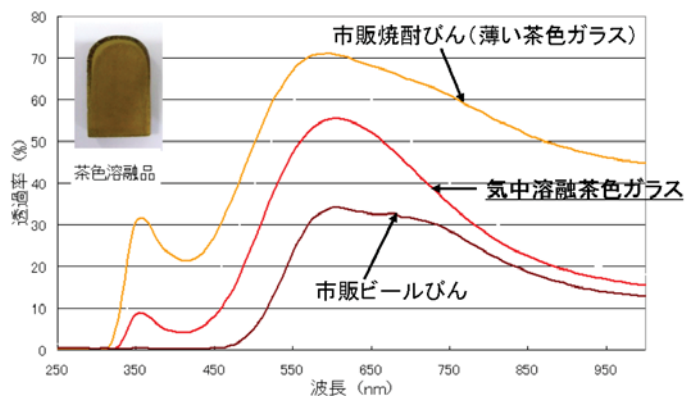
Note: Analysis is done by the AGC

- 従来熔融法で使用している調合比を基準に作製した還元性ガラス用造粒原料(旭硝子担当)に気中熔融法を適用した。
- 熔融ガラスは、従来熔融法によるアンバーガラスより薄い色であったが、所定の色調が得られる見通しを得た。

熔融したアンバーガラス(冷却後)



アンバーガラスの透過率曲線(同一厚さ)



- 従来法で使用されている各種炉材を試験炉壁に装填して耐久試験を行い、使用可能なことを確認した。
- 気中溶融炉で炉材の侵食が少ない理由として、開発したバーナからの原料の飛散が少ないことが考えられる。

使用後の試験炉燃焼室内部



排ガス分析値

炉形式	気中溶融炉			小型空気燃焼炉
	造粒	カレット50	カレット	非造粒
原料名	都市ガス13A			LPG
測定日	2012/12/15	2012/11/9	2012/12/17	2008/5/13
ばいじん濃度	g/m <sup>3</sup> N	0.30	0.092	0.075
ばいじん量	g/h	15	2.0	4.0
硫酸化物濃度	ppm	120	63	47
硫酸化物量	m <sup>3</sup> N/h	0.0061	0.0014	0.0025
窒素酸化物濃度	ppm	290	680	80
窒素酸化物量	m <sup>3</sup> N/h	0.015	0.015	0.0042
ふっ素化合物	mg/m <sup>3</sup> N	1.9	3.4	1.1
	v/v ppm			
酸素濃度	%	20.4	23.5	28.7
排ガス量				
湿り	m <sup>3</sup> N/h	76	34	59
乾き	m <sup>3</sup> N/h	51	22	53
排ガス流速	m/s	4.0	1.5	2.2
排ガス温度	°C	650	504	371
排ガス水分	%	32.8	36.4	10.9
排ガス組成				
CO <sub>2</sub>	%	>20	>20	>20
CO	%	neg.	neg.	neg.
O <sub>2</sub>	%	21.0	24.0	28.0

11/54

①—(1) テーマのまとめ

- 溶解量1 ton/d の都市ガス・酸素炎燃焼試験炉で、ソーダ石灰造粒原料を用いて合計22回の気中溶融実験を行なった。最長121時間の連続溶融を行い、開発試験炉の長期運転の可能性を確認した。
- 気中溶融に適した酸素バーナの開発、運転条件の適正化、泡層の流出防止のためのスロート設置、燃焼室高さの適正化などの改造により、ソーダ石灰ガラスの溶融エネルギー最終目標値原単位 900 kcal/kg-glass を達成した。また、短時間ではあるが 900kcal/kg-glass 以下での運転を行い、さらに改善できる見通しを得た。
- 液晶用ガラスについて、溶融エネルギー原単位 2,800 kcal/kg-glass での連続溶融を確認した。
- 還元性ガラスであるアンバー色ガラスの溶融実験を行い、所定の色調が得られる見通しを得た。
- 粗溶融状態のガラスの均質度が市販のびん・食器ガラスと同程度であることを確認した。
- 各種炉材を試験炉壁に装填して耐久試験を行い、シーメンス炉用炉材が使用可能なことを確認した。

12/54



## ①気中溶融(インフライトメルティング)技術開発

## —(1)超高効率気中加熱技術の開発

## e)原料・ガラス品質評価

## —(2)プラズマ・酸素燃焼炎加熱技術の開発

## a)複合加熱の基礎検討—2

## c)高付加価値ガラスへの適用性評価

## 旭硝子株式会社

2013年 8月16日

13/54

## ①—(1)e) 目標と達成状況

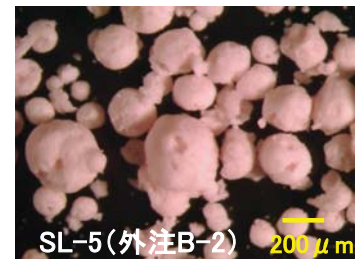
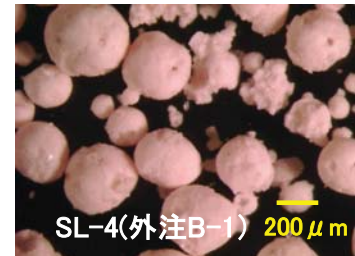
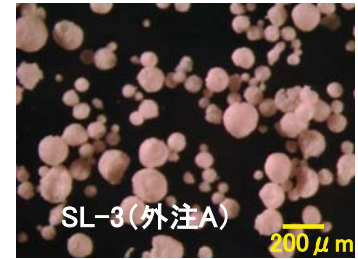
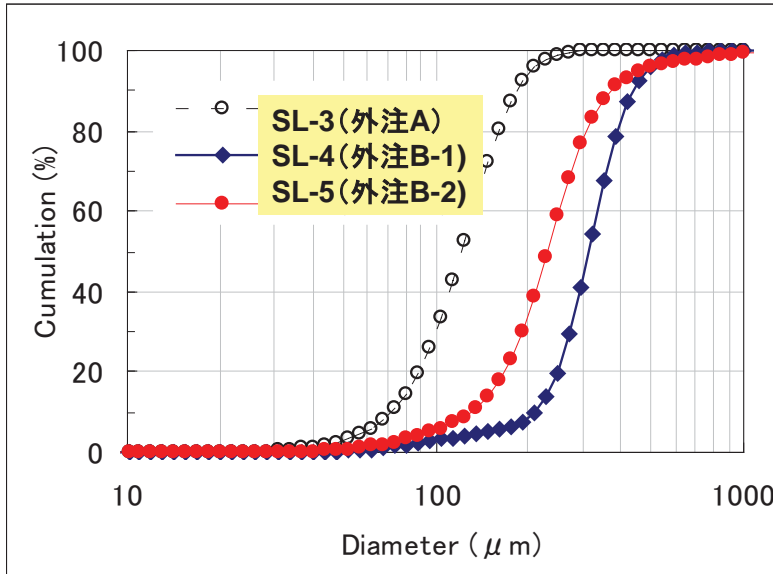
公開

	目標	成果	達成度
①—(1) 原料・ガラス品質評価  ・ガラス造粒生原料を作製・評価して支給。 ・実用性判断に必要な情報を得るため気中溶融ガラスを評価。 旭硝子は特にガラス中の溶存ガス、マイクロなガラス均質性を評価。 東洋ガラスと相互に協力して課題を達成。	試験炉での連続溶融試験に必要なガラス造粒生原料1種類以上を作製・評価して支給する。  エネルギー効率、コスト、連続生産性等の実用性判断に必要な情報を得るために分担して、ガラス中の溶存ガス、マイクロなガラス均質性および酸化還元状態等の評価を行い、相互に協力して試験炉の製作及びエネルギー低減技術の開発課題を達成する。  組成均質性の目標値は標準的なガラスびん生産品と同等レベルとする。	・大型の噴霧乾燥(スプレードライ)設備によって、気中溶融に適した平均径が約100 $\mu$ mの汎用(ソーダ石灰)ガラス造粒体を10ton/ロット規模で組成、粒径等のばらつき少なく、複数回作製した。  ・アンバー色瓶ガラス並びに液晶用ガラスについても、1t/d規模の試験炉溶融で使用可能な造粒原料を作製した。  ・それらの造粒体を原料として1t/d規模の試験炉にて気中溶融したガラスで、目標とする組成均質性、泡品質、色調等を達成することができた。	○

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

14/54

造粒体の量産



- ・外注A、Bの大型スプレードライ設備で造粒
- ・東洋ガラス炉試験用に外注Aによる平均径約100μmの造粒体を主に量産

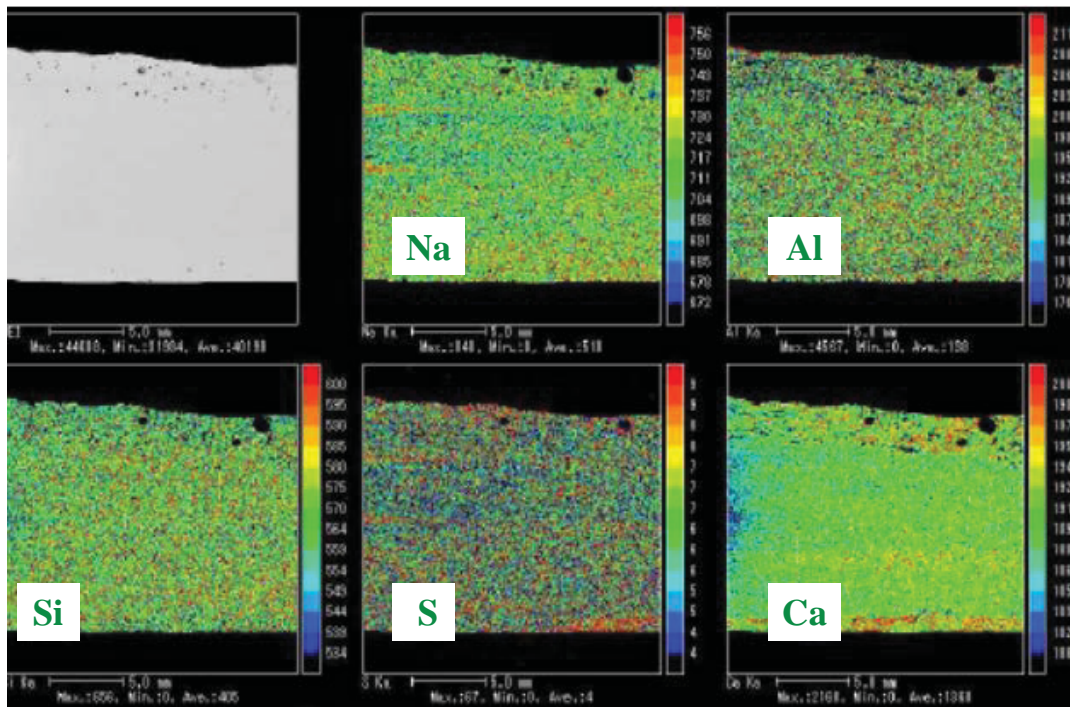
造粒体の製造実績

Lot .	組成	色	製造先	平均径 (μm)	支給量 (ton)	
SL-1~3	ソーダライム	クリアー	外注A	100~130	14.0	
SL-4			外注B	310	7.9	
SL-5				240	8.4	
SL-6~8			外注A	100~130	34.2	
SL-9~10					グリーン	2.3
SL-11~12					クリアー	11.7
SL-13					アンバー	5.8
BS-400	ホウケイ酸			1.3		

ソーダライム(クリアー、グリーン、アンバー)、ホウケイ酸の造粒体を最大10ton/ロット規模で複数回製造し、東洋ガラス社へ支給した



## 気中溶解ガラスの均質性: 着地直後のガラス融液のEPMA像 ビーム径: 75μm



着地直後すでにカレット気中溶融並みの均質性  
溶解槽出口では市販びんガラス並みの均質性(テーマ③-(2)参照)

17/54

## ①—(1)e) テーマのまとめ

公開

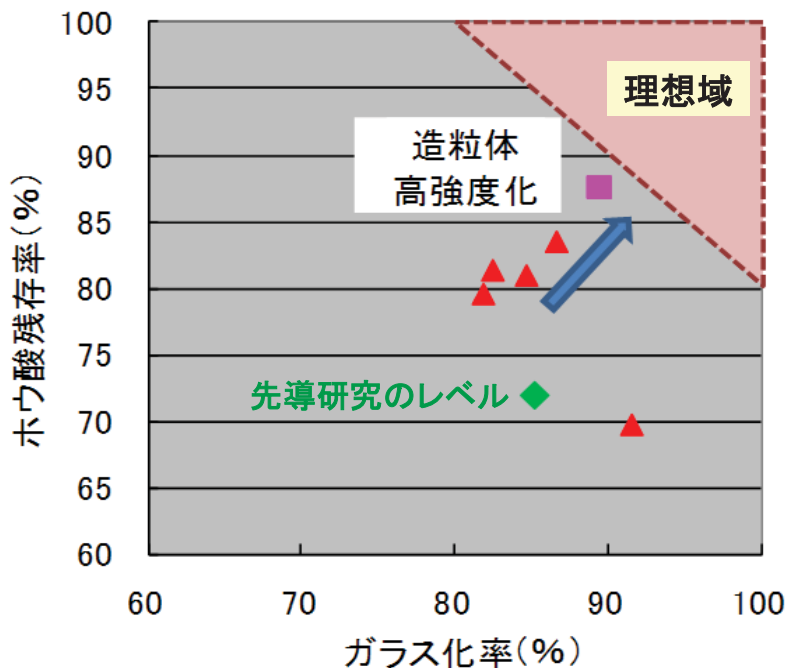
1. 大型のスプレードライ設備によって、気中溶融に適した造粒体を10ton/ロット規模で複数回作製した。
2. ソーダ石灰ガラス造粒体だけではなく、アンバー色瓶ガラスならびに液晶用ガラスについても東洋ガラス炉試験用に作製した。
3. 東洋ガラス炉試験において、飛翔粒子、バーナー直下素地、フォアハース素地の組成、品質、色調等の評価を実施し、ガラスびん生産品と同等レベルの組成均質性を確認した。

18/54

	目標	成果	達成度
①— (2) a)	複合加熱の基礎検討	・高温保持した白金坩堝でプラズマ気中溶融した液晶ガラス組成のガラスメルトを捕集し、泡を評価した結果、坩堝待機温度を高温にすることによって、ブロック中の泡を目標である0.1vol%以下にすることができた。 ・試験炉構築に向けた課題を抽出した。	○
①— (2) c)	高付加価値ガラスへの適用性評価  ・プラズマを用いた気中溶融ガラスの特徴を明らかにする。 ・同特徴を生かした特殊ガラス(例、ガラス転移点>700℃の難溶融ガラス)の溶融を試み、従来法では製造困難なガラスに対しての本プロセスの適用性を判断する。	・先導研究において課題であった液晶用硼珪酸ガラスの気中溶融で生じる硼酸の揮散を抑制するための方法を検討した結果、微細な珪砂を1次原料として作製した高強度な造粒体を使うことが有効であることが分かった。 ・プラズマの方が酸素燃焼よりも硼酸の揮散を抑えられることがわかった。 ・特殊ガラスとして、無アルカリ無硼酸のCaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> 系及びMgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> 系ガラスの気中溶融可能性を検討し、いずれも造粒体作製及び気中溶融で問題ないことが分かった。 ・難溶融性ガラスをプラズマ気中溶融すると高投入速度でも高いガラス化率が得られ、熱源としてプラズマの有用性が示された。	○

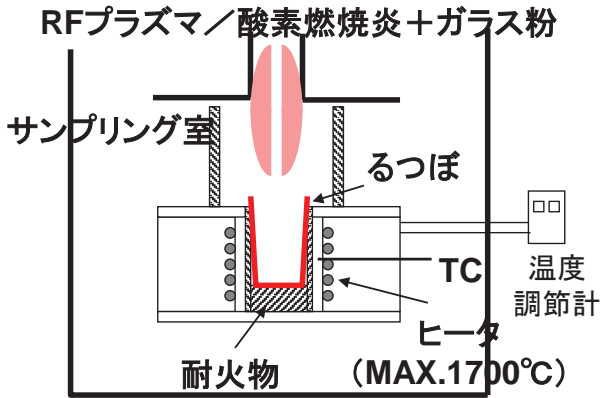
◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

液晶用ガラスの応用: B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>揮散抑制



「プラズマ加熱」+「造粒体の高強度化」によって、B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の揮散を抑制できた

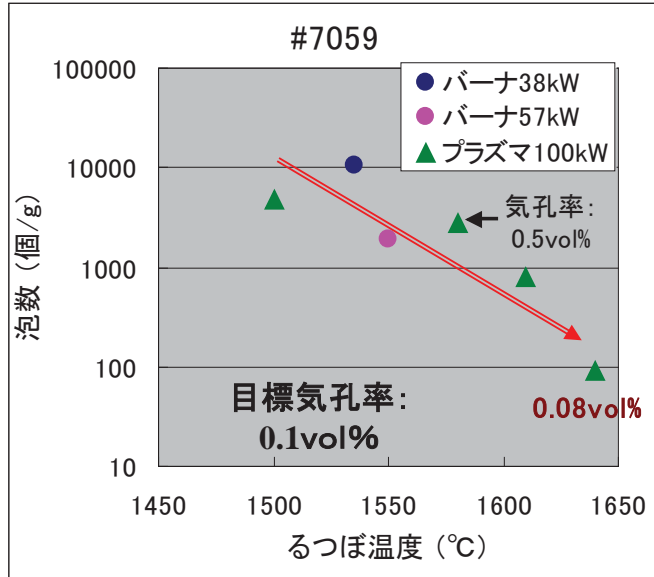
液晶用ガラスの応用:メルト採取による泡評価



メルト採取装置の概念図



気中溶解の様子(RFプラズマ加熱)

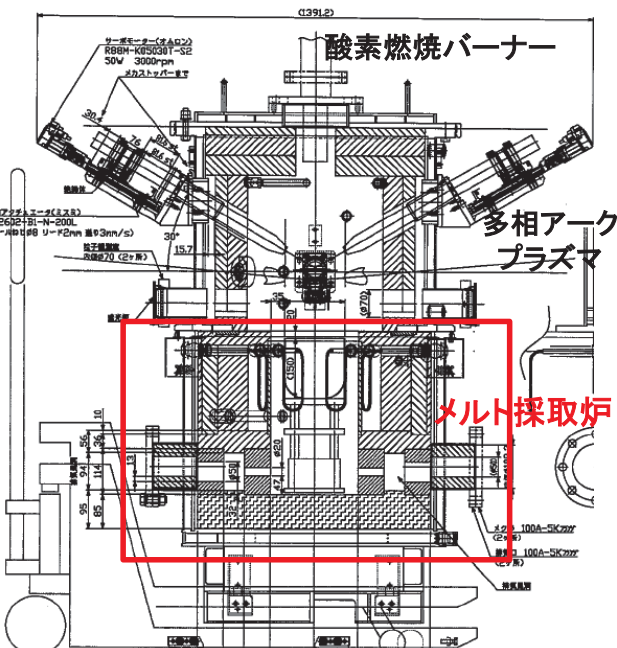


RFプラズマ溶解ガラスブロックの採取に成功し、目標品質(泡密度)の達成を確認した

液晶用ガラスの複合加熱:東工大との共同実験設備

東工大の複合加熱炉  
(多相アークプラズマ+酸素燃焼炎)  
下部にメルト採取炉を設置

メルト採取実験条件



熱源	プラズマ 単独	複合加熱	バーナ 単独
出力(kW)	50	60 (プラズマ) 9 (バーナ)	40
原料投入量 (kg)	2		
原料投入速度 (g/min)	50、110		
るつぼ温度 目標(°C)	1550		

## 液晶用ガラスの複合加熱：得られたガラスの特徴

- ・B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>揮散：プラズマ、複合加熱は、バーナーと比べて少ない
- ・W電極からの不純物：いずれもガラス中にはほとんど含まれず
- ・含水量(β-OH)：プラズマ、複合加熱、バーナーの順に多くなる
- ・泡数：複合加熱がより多い傾向

成分 (wt%)	造粒体 平均	プラズマ		複合加熱		バーナー	
		50g/min	110g/min	50g/min	110g/min	50g/min	110g/min
SiO <sub>2</sub>	50	51.4	51.1	50.9	51.3	53.1	52.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.9	9.7	9.6	9.4	9.4	9.6	9.6
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (残存率%)	16	13.9 (87)	14.3 (89)	14.6 (91)	14.4 (90)	11.4 (71)	13.5 (84)
BaO	24.3	24.4	24.4	24.4	24.3	25.3	24.2
SO <sub>3</sub>	0.36	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
WO <sub>3</sub>	—	0.03>	0.03>	0.03>	0.03>	0.03>	0.03>
β-OH /mm		0.16	測定不能 (泡多数)	0.35	0.37	0.55	0.52
泡数 個/g		2600	測定不能 (泡多数)	14000	33000	6900	3300
気孔率 vol%		0.36	測定不能 (泡多数)	0.7	0.65	0.2	0.55

泡が多いことが課題として残った。清澄技術開発必要。

23/54

## 難溶融性ガラスの応用：検討ガラス系

- 無アルカリ、無ホウ酸系
- 単純組成系(基礎検討、展開の多様性)
- 実用化されているガラスに近い系

wt%	Mg(MAS)系	Ca(CAS)系	Sr系	Ba系	参) #7059
SiO <sub>2</sub>	65.0	62.1	55.4	57.0	50.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.0	14.6	13.2	10.0	10.0
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					15.0
MgO	10.0				
CaO		23.3			
SrO			31.4		
BaO				33.0	25.0
mol %	1	2	3	4	5
SiO <sub>2</sub>	68.7	64.9	68.1	75.2	63.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.6	9.0	9.6	7.8	7.5
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					16.5
MgO	15.8				
CaO		26.1			
SrO			22.4		
BaO				17.1	12.5
計算値	1	2	3	4	5
膨張	25.2	55.7	56.3	49.3	42.8
密度	2.46	2.67	2.87	2.99	2.71
歪点	729	712	691	705	574
Tlogn=2	1686	1627	1534	1739	1646
Tlogn=4	1314	1228	1446	1489	1238
共融点	1440	1170	1400	1350	

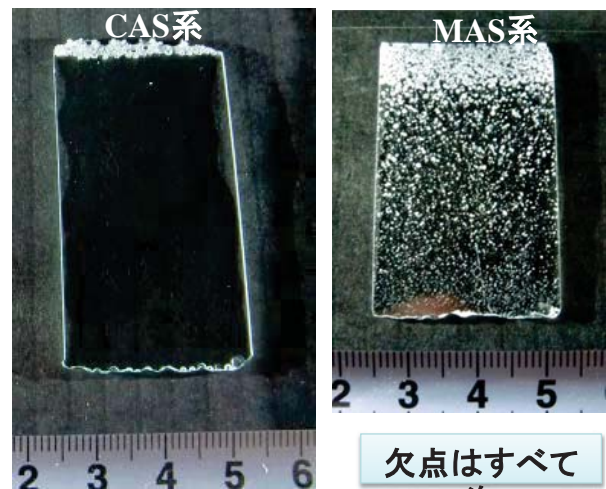
24/54



## 難溶性ガラスの応用: CAS系、MAS系のプラズマ溶解(2)

条件: CAS、MAS系造粒体⇒RFプラズマ100kW溶融(投入:約80g/min)  
⇒メルト採取(るつぼ待機温度:1620℃)

	CAS系		MAS系	
	造粒体	プラズマ 溶融後	造粒体	プラズマ 溶融後
組成 (wt%)				
SiO <sub>2</sub>	61.7	60.4	64.6	63.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.5	14.9	26.1	27.2
CaO	23.6	24.1	—	—
MgO	—	—	8.8	9.3
SO <sub>3</sub>	0.23	0	0.25	0
泡数(個/g)		0.7		4020



気中溶解ガラスブロックの断面写真(t=1mm)

CAS系、MAS系とも、プラズマ気中溶解で未融物のない  
ガラスブロックを得ることが出来た。CAS系は泡も少ない。

25/54

1. 液晶用ホウケイ酸ガラスの気中溶融で生じるホウ酸の揮散を抑えるには、プラズマ加熱および高強度造粒体の使用が有効であることを明確にした。
2. プラズマ気中溶融した液晶用ガラスブロックの採取に成功した。また、るつぼ待機温度を上げることにより、目標の泡密度まで低減することができた。
3. 東工大と共同で多相アークプラズマおよび酸素燃焼炎の複合加熱による気中溶融の特徴と課題を抽出した。
4. 特殊ガラスとして、無アルカリ無ホウ酸であるCaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>系およびMgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>系ガラスの気中溶融性を検討し、プラズマ溶融にて高いガラス化率が達成できた。

26/54



# ①気中溶融(インフライトメルティング)技術開発 —(2)プラズマ・酸素燃焼炎加熱技術の開発

東京工業大学 渡辺研究室

2013年 8月16日

27/54

## ①—(2) 目標と達成状況

公開

	目標	成果	達成度
①—(2) 複合加熱の a) 基礎検討  エネルギー効率が高い燃焼炎と高温領域を容易に発生できる多相アークを組み合わせることによる新しいインフライト溶融のための高温発生技術を確認する。	30分以上のハイブリッド加熱連続運転でプラズマ変動±10%以内を達成。	多相交流アークプラズマと酸素燃焼炎の複合加熱の安定化を目指し、多相アークの放電相数、シールドガス流量、流速等、電極径を変化させて複合加熱の安定性を評価した。 ガラス原料供給量の増加に伴い、プラズマ変動が大きくなることがわかったが、供給量110 g/minにおいても、30分間の運転で目標値である10%以下の変動率が得られた。	○
①—(2) 電極の長寿命化 b)	多相アーク電極消費量を20 mg/min以下にする。	多相交流アークに用いるプラズマトーチを開発した。 電極は直接水冷したタンゲステンとし、適切な流量のアルゴンシールドガスを流すことで、電極消費の大幅な低減化(3.6mg/min)を達成し、約1週間の連続運転が可能であることが示された。	◎

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

28/54



プラズマ変動

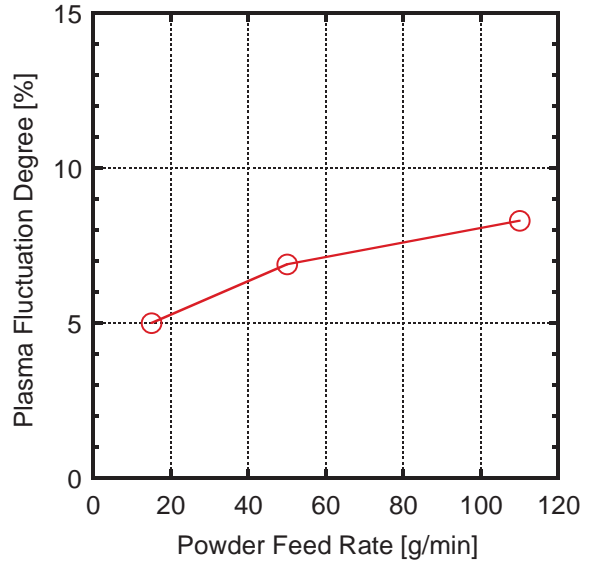
アーク電圧、電流はアークプラズマの種々の変動を反映  
 → 電力変動よりプラズマ場の変動を評価

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [P(t) - \bar{P}]^2 dt}$$

$$F.D. = \frac{\sigma}{P} \times 100$$

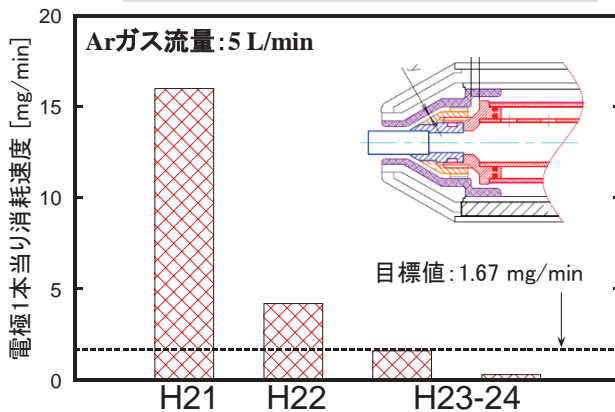
$P(t)$ : 時刻 $t$ における電力値[kW]  
 $P$ : 定常運転中の電力平均値[kW]  
 $\sigma$ : 標準偏差[kW]  
 $\tau$ : 定常状態での運転時間[s]  
 $F.D.$ : プラズマ変動[%]

原料供給量とプラズマ変動の関係  
 (ハイブリッド加熱時)



➤ 原料供給時(110 g/min)においても、30分間の運転においてプラズマ変動は**10%以内を達成**。

プラズマトーチの改良過程

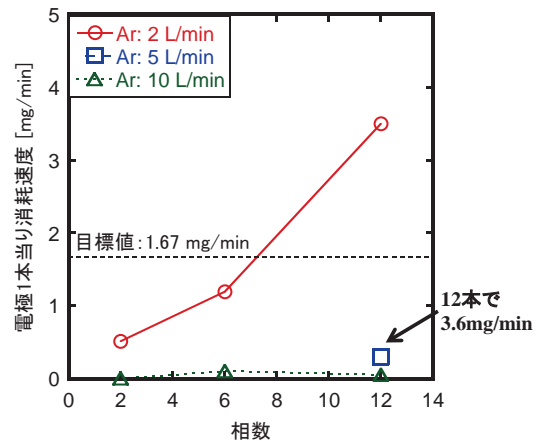


放電電極部	2%トリア入タングステン	
電極径	Φ3.2 mm	Φ6.0 mm
冷却方式	間接水冷	直接水冷
発熱部-冷却部間距離	40	貫通型 ろう付型 28 15

電極寿命 約40分 約3時間 約1日 **約1週間**



電極消耗に及ぼす放電相数の影響

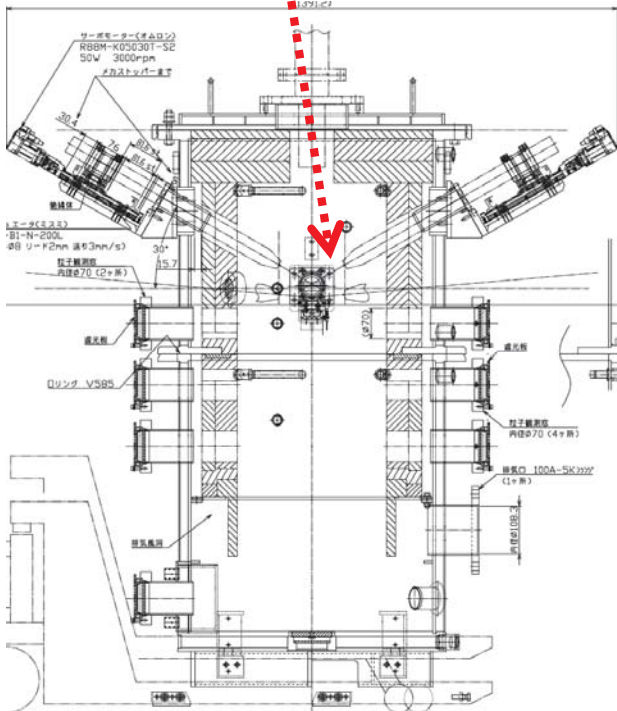


➤ 電極径Φ6.0 mm, 直接水冷型トーチの開発により消費量を**大幅削減**(12本で3.6 mg/min)  
 ➤ 相数の増加, アルゴン量の減少に伴い消費量増加

消耗メカニズムの解明が必須

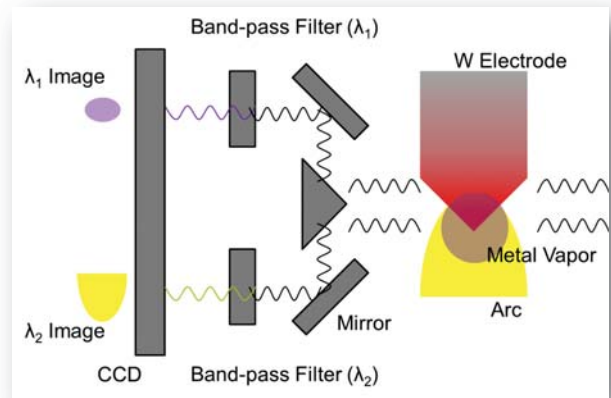
✓ 高速度カメラ ×  
 バンドパスフィルター

観察方向



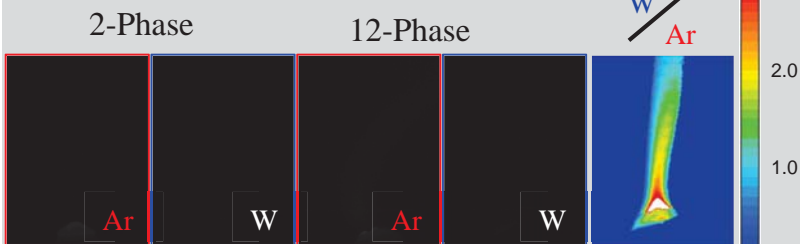
装置詳細設計図

高速度カメラとバンドパスフィルター  
光学系システム



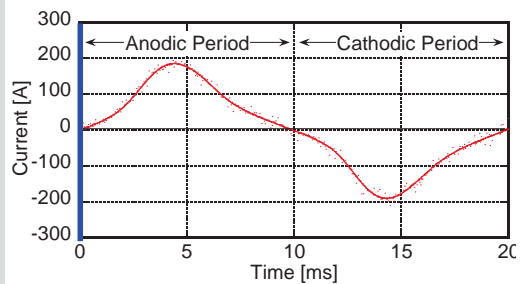
適切な波長を選択することで、着目している蒸気だけを選択的に高速度カメラ観察

金属蒸気の動的挙動

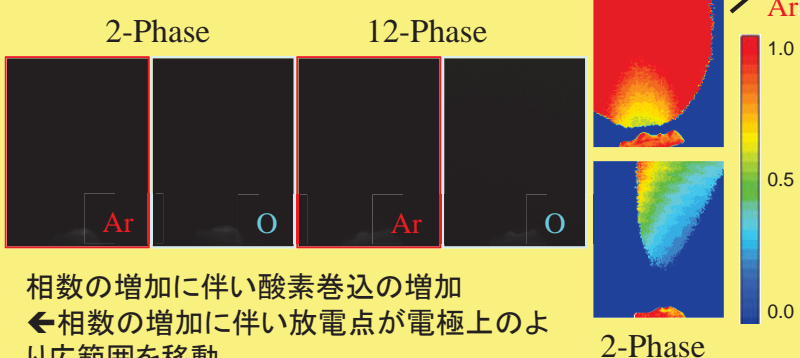


アーク中のタングステン蒸気のみを発光観察に成功  
→主に陽極時に蒸発していることを実験的に確認

電流波形(動画と同期)



アーク中への酸素巻込挙動



相数の増加に伴い酸素巻込の増加  
←相数の増加に伴い放電点が電極上のより広範囲を移動

相数の増加に伴い酸素巻込量が増加  
→タングステンの酸化による融点低下(W: 3695 K, WO<sub>3</sub>: 1750K)  
→消費量増加

多相アークの電極消耗挙動を明らかにした

# ①気中溶融（インフライトメルティング）技術開発

## －（３）共通基盤技術

### a) 気中溶融特有の現象と融液挙動の解明

東京工業大学 矢野研究室

2013年 8月16日

35/54

### ①－（３）a) 目標と達成状況

公開

	目標	成果	達成度
①－（３） a) 気中溶融特有の現象と融液挙動の解明 ・高速清澄、高速混合を安定して行うために必要な、気中溶融により形成される融液の性質を定量的に把握する ・融液挙動をその場で直接観察し、気中溶融の条件との対応関係を明確にする	気中溶融法より作製されるガラスの特徴を明らかにするために、本手法の特有の現象を解析評価する設備を構築開発し、それらを用いて気中溶融現象および、気中溶融で形成されたガラス融液の挙動や性質を調べ、気中溶融条件と関係およびガラスの清澄（高品質化）の可能性について明らかにする。	酸素燃焼火炎を利用した気中溶融装置の中で飛翔溶解する原料の加熱状態をその場観察することに成功し、酸素バーナー火炎のオペレーション条件と飛翔、昇温との関係を明らかにした。 気中溶融炉溶解槽に堆積したガラス融液の溶存ガス、残存気泡に含まれるガス成分の分析評価装置を構築し、溶存ガス量とエネルギー原単位、気泡内ガス成分とエネルギー原単位の間関係を明らかにした。 気中溶融法に特有な溶存成分ガス成分を特定し、それらの量的関係を示した。 気中溶融ガラスの融液の性質を理解するために、矩形波ボルタノグラム測定を実施し、原料の違いにより生じる酸化還元平衡の差を明らかにした。	◎

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

36/54



続 き

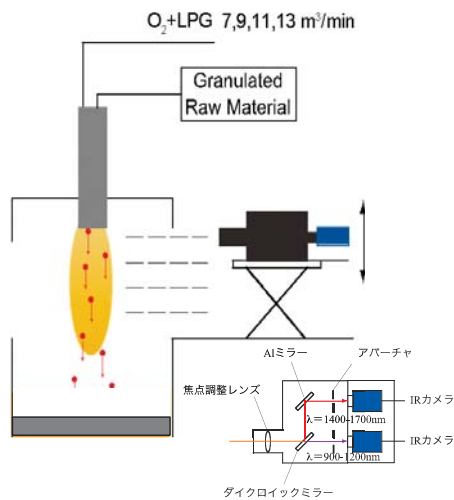
	目標	成果	達成度
①—(3)a) 気中溶融特有の現象と融液挙動の解明		<p>気中溶融の原料の種類やそれらが混合される場合に生じる影響を示唆する基礎データを提供した。</p> <p>気中溶融ガラス内に残存した気泡の清澄挙動に関する情報を得るための融液直接観察炉を構築し、24時間にわたる長時間観察とそのデータ解析から、清澄(しめ)の現象を定量的に確認し、その温度範囲、速度を求めた。また、気中溶融ガラスの高品質化に関する可能性を示すデータを提供した。</p> <p>これらを通して、気中溶融ガラスにおいて特有の現象や性質、および既往の溶融プロセスとの類似点などを明らかにすることができた。</p>	◎

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

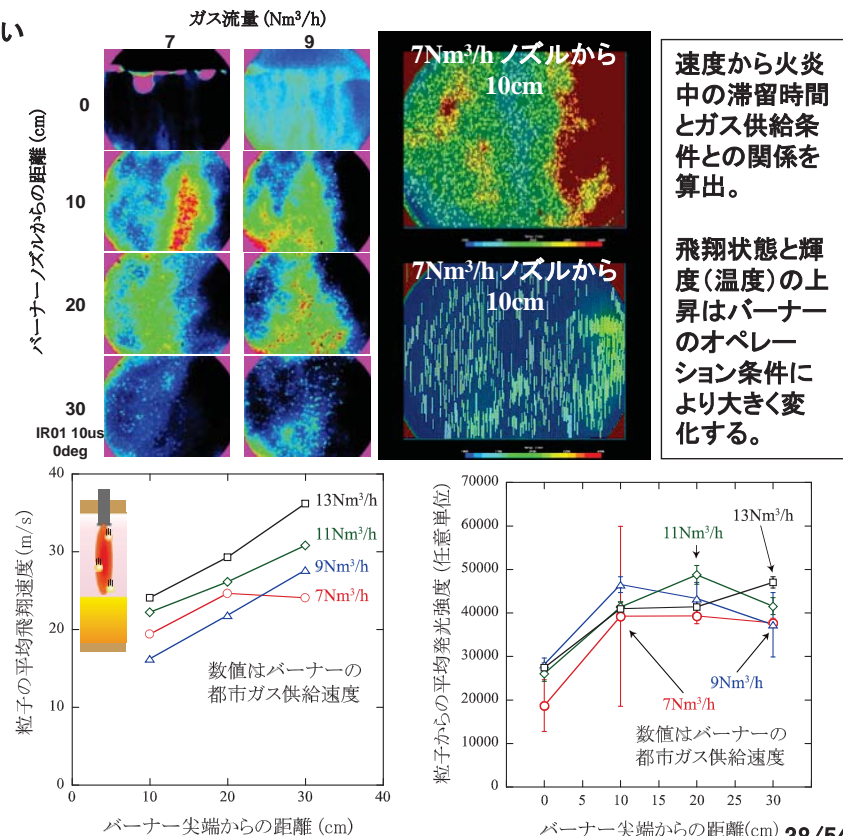
①—(3)a) 研究開発成果

気中溶融高温場を飛翔するガラス原料のその場観察

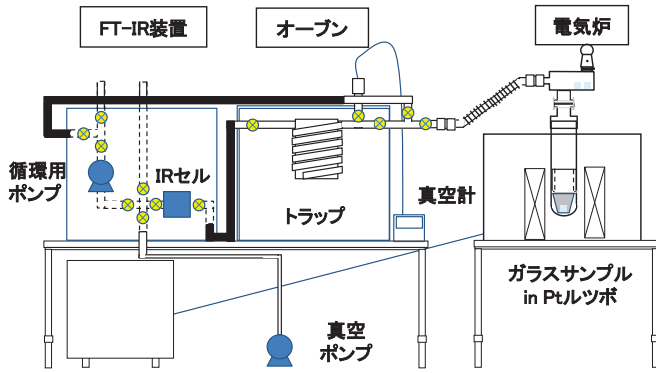
2波長帯赤外線カメラにより気中溶融している粒子の軌跡、速度、温度を評価



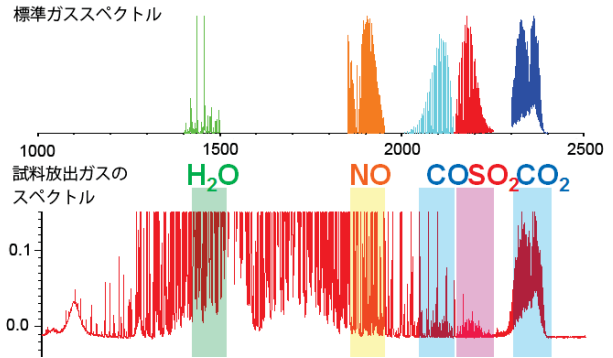
東洋ガラス川崎工場気中溶融炉における観測実験



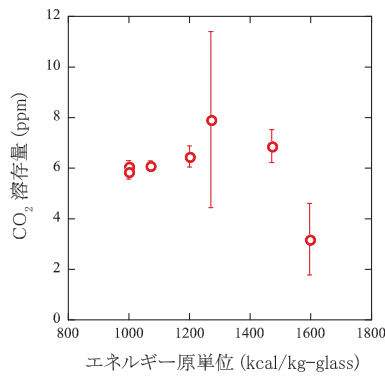
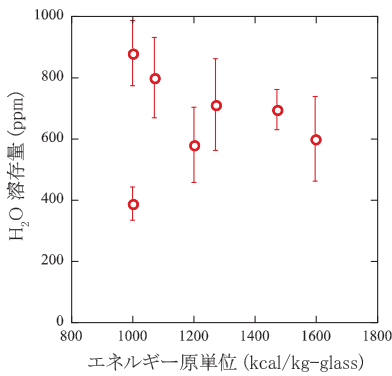
気中溶融溶解槽に堆積したソーダ石灰ガラスの溶存ガス分析



構築した溶存ガス分析装置の概略図



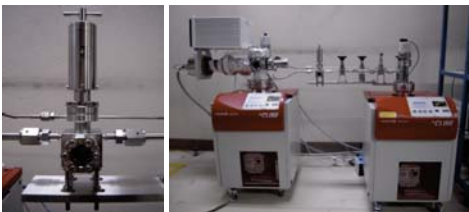
溶存ガス分析スペクトルの一例



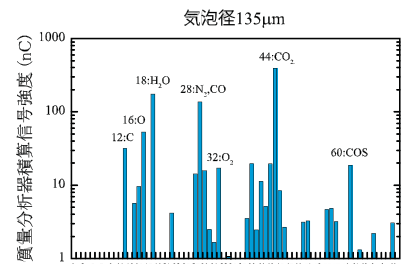
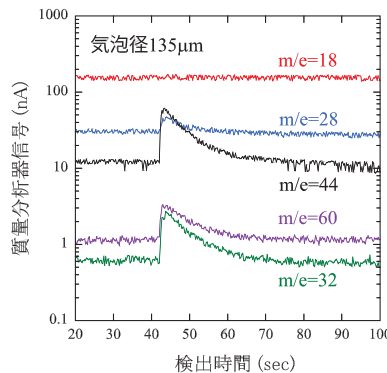
- 気中溶融ガラスに溶存するガスの分析を行うための装置を構築し、製造された気中溶融ソーダ石灰ガラスの溶存放出ガス量のエネルギー原単位依存性を評価した。
- 溶存ガス量は、ガスの種類によりそれぞれ特有のエネルギー原単位依存性を示すことを明らかにした。
- 特に水分が入量は省エネルギー溶融を進めるほど高まり、従来法で製造されているガラスに比して2-3倍の含有量になることが分かった。

気中溶融溶解槽に堆積したソーダ石灰ガラスの中に残存する気泡のガス分析

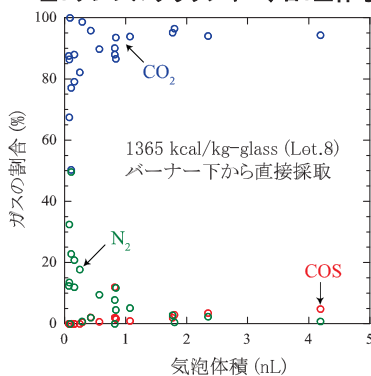
四重極質量分析器を用いた気泡のガス分析装置を構築、校正し、気中溶融ソーダ石灰ガラスの残留気泡を分析。



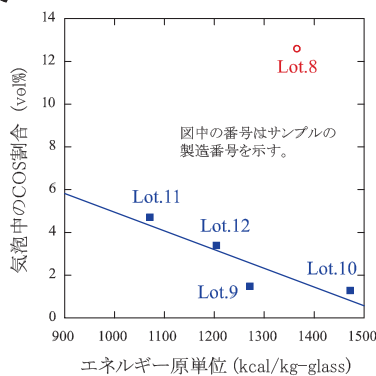
構築した気泡ガス分析装置。  
左: サンプルクラッシャー、右: 全体写真



左: 気泡破断時の放出ガス信号  
上: 各質量数の積算信号強度



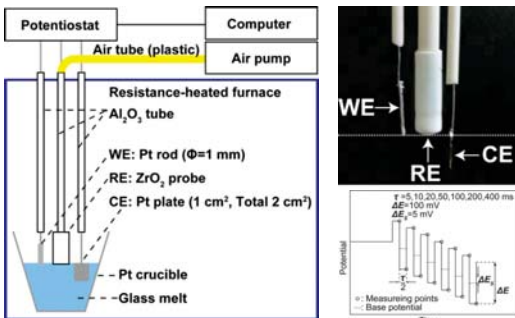
酸素燃焼バーナー直下から直接採取した試料中の残留気泡のガス分析の気泡体積依存性



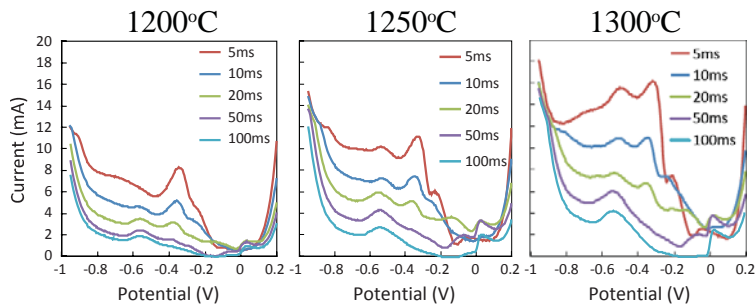
気中溶融ガラス中の残留気泡内のCOSガス割合とエネルギー原単位の関係

- 気中溶融法で作製したガラス中に残存している気泡に内包されているガスについて調べるための気泡ガス分析装置を構築し、種々の条件で製造した気中溶融ソーダ石灰ガラスについて分析を行った。
- 気中溶融ガラスに残存していた溶存ガス基本組成は、CO₂とCOSであり、その割合はエネルギー原単位および炎形成条件により変化することを明らかにした。また、気泡体積が1nL以下の大きになると組成変化が急速に進行し、CO₂の減少、N₂の増加が生じることを明らかにした。
- また気中溶融炉での試料採取場所により異なり、熱履歴とに変化することを示した。

気中溶融ソーダ石灰ガラス融液のボルタノグラム測定による融液の性質の評価



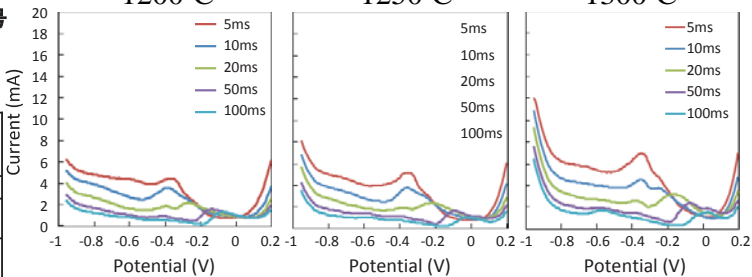
矩形波ボルタノグラム装置の概略図と電極、矩形波信号



気中溶融ガラスAについて測定した矩形波ボルタノグラム

ボルタノグラム測定ガラス試料の組成、溶融条件

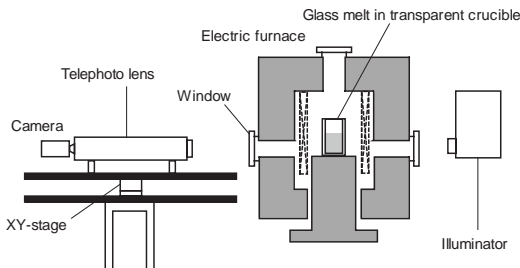
	気中溶融 ガラスA	気中溶融 ガラスB	気中溶融 ガラスC	市井流 板ガラス
SO <sub>3</sub> (wt%)	0.2	0.2	0.2	0.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (wt%)	0.1	0	0	0.1
水分量 (ppm)*	880	330	650	300
原料	造粒原料	造粒原料	造粒原料 + カレット	バッチ + カレット
原料予熱	なし	あり	なし	
溶融投入エ ネルギー SEC(kcal/k g-glass)	1,000	1,000	1,200	シーメンス 炉にて製造



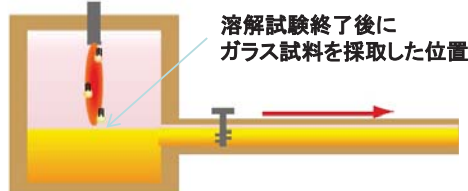
気中溶融ガラスCについて測定した矩形波ボルタノグラム

気中溶融条件により、融液中の酸化還元状態は異なる。造粒原料のみを使用した場合と、カレットと造粒原料の混合使用の場合では、融液中の硫黄の挙動に違いを与え、融液の性質が異なることを明らかにした。また、市井のシーメンス炉で製造されたガラスとも異なるボルタノグラムを与え、酸化還元平衡が異なっていることを示した。

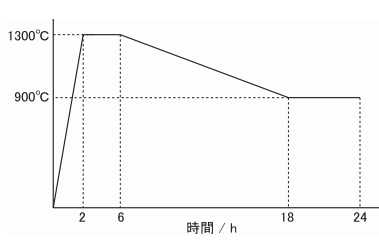
気中溶融ソーダ石灰ガラス融液の長時間観察による気泡挙動の解析／評価



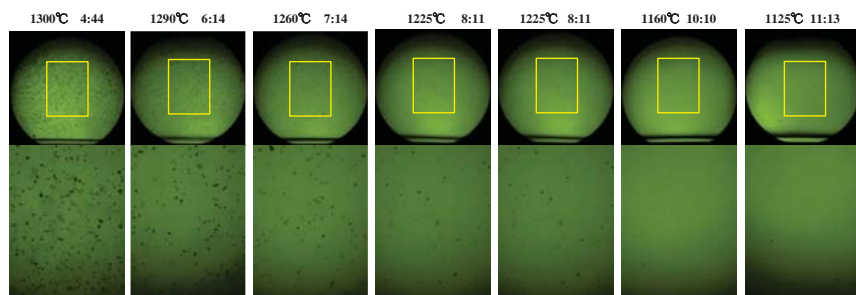
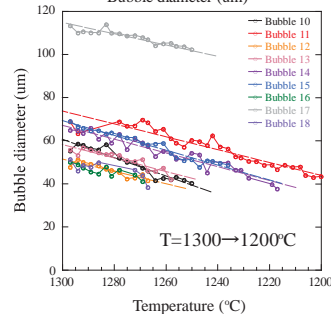
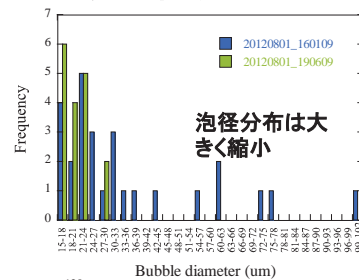
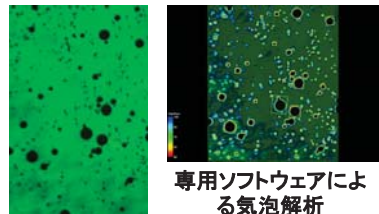
気泡挙動観察のための直接観察炉



溶解試験終了後にガラス試料を採取した位置



融液直接観察溶融の温度プログラム



- 残留気泡は、溶融過程で縮小し、清澄されることを確認した。
- 気泡収縮は900°C以上の温度域で生じ、温度が高いほど速度は大きいことを明らかにした。
- 気泡内ガスの主成分であるCO<sub>2</sub>が融液へ溶解しその速度はしめの効果の大小決定していると推定された。

- 1) 気中溶融法によって形成される高温場中の造粒原料およびガラスカレットの飛翔状態、熱状態に関する情報を得るための飛翔状態観察装置を構築し、気中溶融装置における飛翔状態をその場観測し、溶融条件による違いを明らかにした。
- 2) 気中溶融ガラスに溶存している気体の分析を行うため、溶存ガス分析装置を構築し、気中溶融ソーダ石灰ガラスに溶存しているガスの分析を行い、溶融条件による違いを明らかにした。
- 3) 気中溶融ガラスに残存している気泡に含まれるガスの成分分析を行うための気泡分析装置を構築し、気中溶融ソーダ石灰ガラスに含まれる気泡の分析を行い、溶融条件による違いを明らかにした。
- 4) 気中溶融ガラス中の酸化還元挙動を理解するため、矩形波ボルタノグラム測定装置を構築し、気中溶融ソーダ石灰ガラスに対して測定を行い、溶融条件による違いを明らかにした。
- 5) 気中溶融法ガラス中の気泡の消失挙動・清澄挙動を把握するため、ガラス融液観察システムを構築し、気中溶融ガラス中の残存気泡の観察と解析を行い、清澄による高品質化に関する情報を入手した。

## ①気中溶融（インフライトメルティング）技術開発

### — (3) 共通基盤技術

#### b) シミュレーション技術

## ニューガラスフォーラム

2013年 8月16日



	目標	成果	達成度
①—(3) シミュレーション技術 b) シミュレーション技術  気中溶融プロセスの実用化を円滑化するため、シミュレーションモデルの構築と、シミュレーション予測の高精度迅速化技術を開発する 1) 気中溶融プロセス・シミュレーションの高精度化・迅速化 2) 新しく経験された事象のモデル化 3) 実用炉設計、スケールアップの効率化	未着手部分のモデル化、各モデルの高精度化、操作性向上および計算の迅速性を図り、インフライト溶融プロセス全体のプログラムを完成させるとともに、試験データとの整合性を確認  多相プラズマ解析モデル 液体燃料燃焼解析モデル 攪拌解析モデル 耐火物侵食解析モデル 熱精算解析モデル 動的泡層解析モデル 使いやすさ・解りやすさ改良 熱流動解析モデル高速化  試験炉の熱収支内訳をシミュレーションで±5%の精度で予測	多相プラズマモデル、液体燃焼モデル、融液攪拌モデル、耐火物侵食モデルおよび動的泡層モデルを新たに開発した。  並列計算ロジックの導入、燃焼炎の融液内部への輻射を考慮した熱流動解析、算式の簡素化等により、シミュレーションを高速化した。  メッシュ生成機能および描画機能を整備しプログラムの操作性を向上させた。  1ton/day 試験炉の熱収支内訳を5%以内の精度でシミュレーション予測した。	○

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

45/54

## 先導研究の成果を踏まえた新しいモデル群を開発

- ① 多相プラズマ解析モデル
- ② 液体燃料燃焼解析モデル
- ③ 攪拌解析モデル
- ④ 耐火物侵食解析モデル
- ⑤ 動的泡層解析モデル
- ⑥ 使いやすさ・解りやすさの改良
- ⑦ 熱流動解析モデルの高速化
- ⑧ 熱精算解析モデル



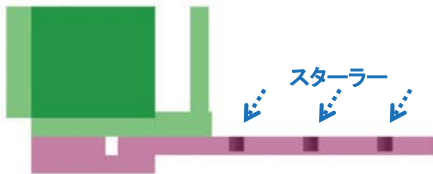


③ 攪拌解析モデル

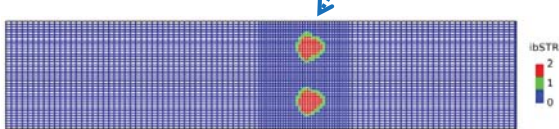
一对のスターラー図



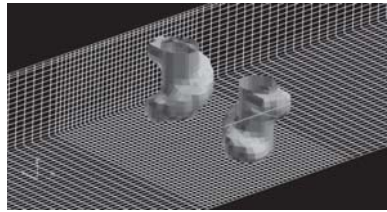
東洋ガラス試験炉のフィーダーに配置したスターラー



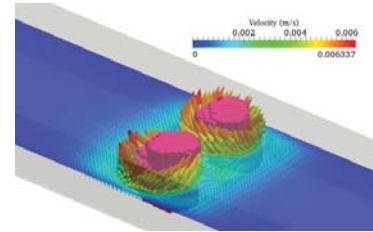
フィーダー部のメッシュ図



スターラーモデルの図

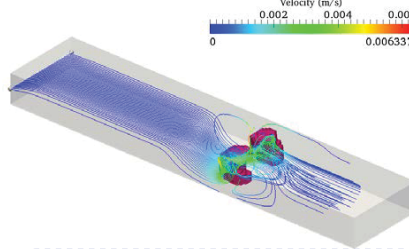


解析結果



ガラス温度 1250°C  
 流量 1600 kg/day  
 スターラー回転数 30 rpm

スターラー回りの流線



$$S = \frac{A}{\sqrt{kt}} \exp\left[-\frac{(B-Ct)^2}{kt}\right]$$

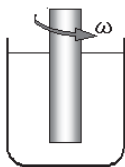
S: 濃度

攪拌性能の評価 = 混合拡散係数  $k$

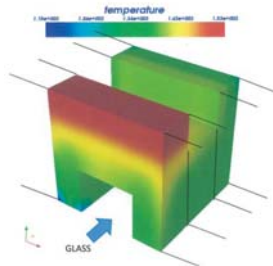
スターラー なし	: 0.42
スターラー 1対	: 0.91
スターラー 3対	: 12.61

④ 耐火物侵食解析モデル

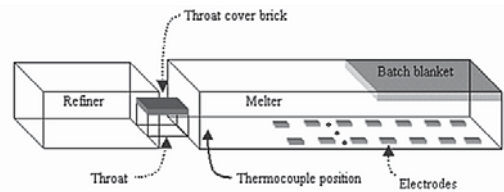
円柱状供試耐火物の動的侵食試験



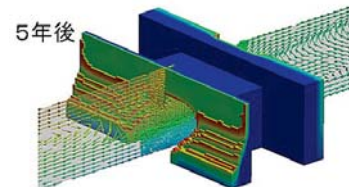
ガラス溶融炉の耐用年数を支配する要因 = スロート



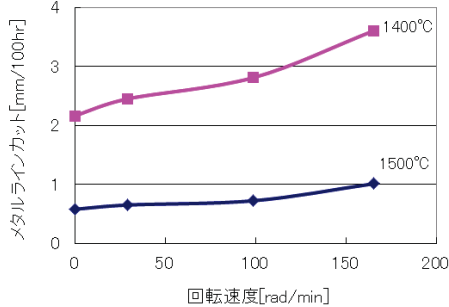
CRT炉におけるスロートの侵食測定



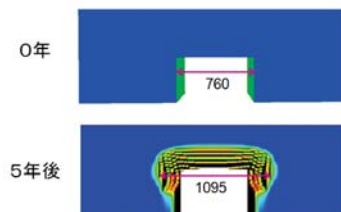
侵食されたスロート



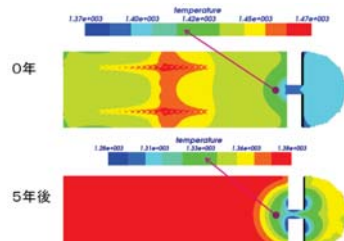
AZS耐火物の侵食試験結果



観測事象1=トンネル幅

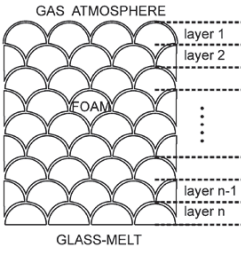


観測事象2=炉底温度の変化

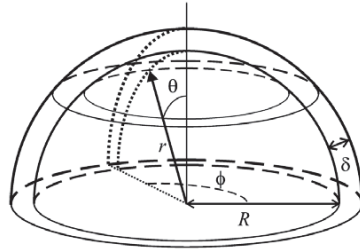


⑤ 動的泡層解析モデル

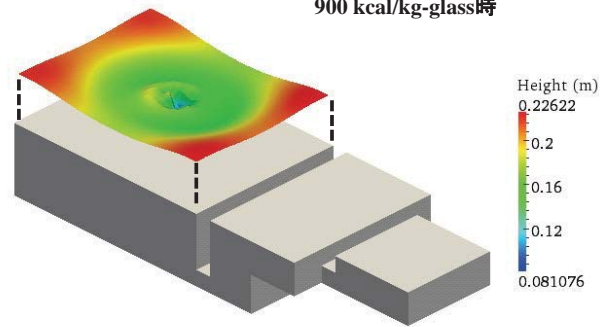
泡層の構造



単一気泡の構造



東洋ガラス試験炉の泡層厚さ(鳥瞰図)



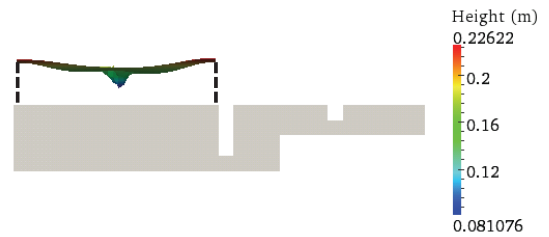
泡膜の減少速度式

$$\frac{d\delta}{dt} = dR \left[ \frac{A}{(1+\delta)^3} + \ln(R(1+\delta))B + C + (1+\delta)^2 \right]$$

- R: 気泡半径
- θ: 空間角度
- δ: 膜厚
- t: 時間
- A,B,C: 定数

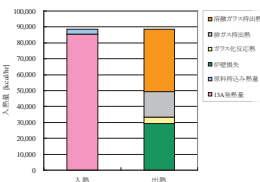
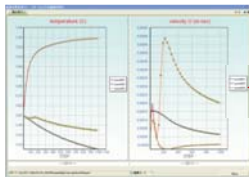
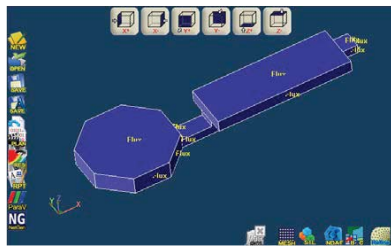
ここで、δ が臨界厚さ以下になれば、泡は破裂して、消失するものとみなす

東洋ガラス試験炉の泡層厚さ(断面図)

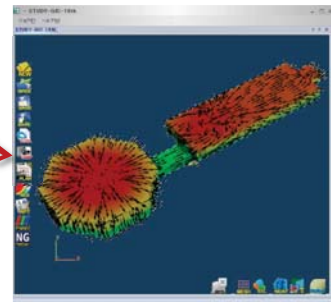
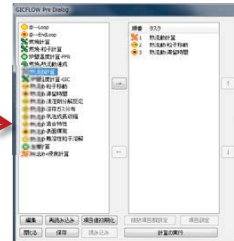
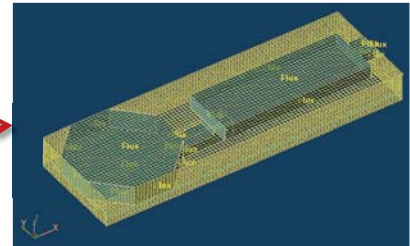
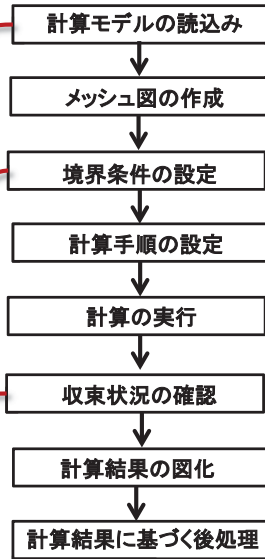


出典: A model for foam formation, stability, and breakdown in glass-melting furnaces  
J. Schaaf, R.G.C. Beerkens; J of Colloid and Interface Science 295 (2006) 218-229

⑥ 使いやすさ・解りやすさの改良



描画の手順



⑦ 熱流動解析モデルの高速化

熱流動解析の基礎方程式



計算の高速化手法

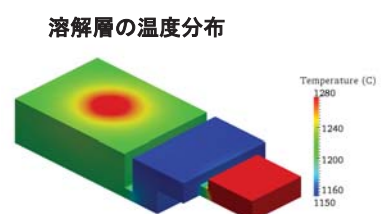
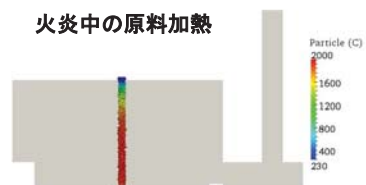
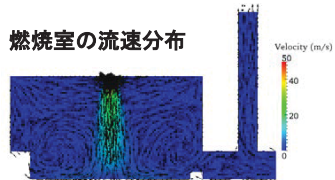
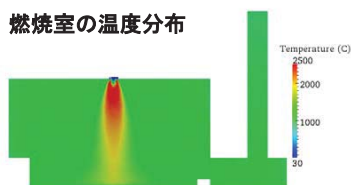
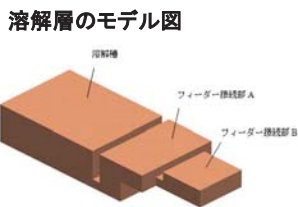
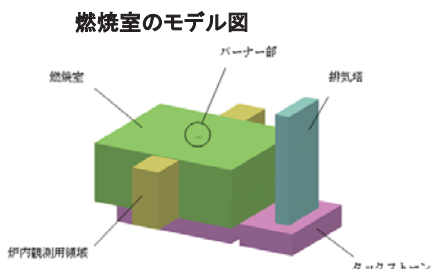
初期モデル(圧力方程式をCG法で計算)	1.0 倍
圧力方程式の間欠的適用法	2.0 倍
圧力方程式のAMG(代数的マルチグリッド)解法	5.0 倍
並列化(対象空間の分割)モデル	3.5 倍

並列計算用PC仕様  
 CPU: Xeon  
 64 bit、6 CPU  
 Windows7  
 GICFLOW

総計:  $1.0 \times 2.0 \times 5.0 \times 3.5 = 35.0$  倍

⑧ 熱精算解析モデル

東洋ガラス試験炉の実測値と解析値



**最終目標**  
 東洋ガラス(株)の試験炉について解析モデルを作成し、燃焼、気中溶解加熱、熔融ガラスの熱流動の一連の解析を実施する。また、試験炉の実測値との熱収支比較も行い、実測値に対して±5%の予測精度を達成する。

右表のとおり達成した

	入熱		差異[%]	
	実測値[kcal/hr]	解析値[kcal/hr]		
燃料発熱量	83,642	85,576	+2.3	
原料持込み熱量	3,116	3,116	0.0	
合計	86,758	88,692	+2.2	
出熱	実測値[kcal/hr]		差異[%]	
	炉壁損失	28,188	29,298	+3.9
	ガラス化反応熱	3,951	4,006	+1.4
	排ガス損失	16,597	16,128	-2.8
	ガラス持出熱	38,021	39,260	+3.3
合計	86,758	88,692	+2.2	



# エネルギーイノベーションプログラム 「革新的ガラス溶融プロセス技術開発」 (事後評価)

## プロジェクトの詳細 (公開)

### - ② ガラスカレット高効率加熱技術の開発 -

東洋ガラス(株)

2013年 8月16日

1/7

### ①-(1)、②、③-(1) 目標と達成状況

公開

	目標	成果	達成度
②-(1) - (2) ガラスカ レット高効 率加熱技 術の開発	・カレットのみで 1,800kcal/kg-glass以下、 1200℃までの昇温時間 1分以内を達成。	・粒径0.1～0.5mmの微粒カレットを 用いることで、造粒原料と同様に気 中溶融ができることを確認し、エネ ルギー原単位1,080 kcal/kg- glassと 目標昇温時間を達成した。	◎
気中溶融に適合したカ レットの高効率溶融技 術を開発 1)高速高効率加熱技 術の開発 a)カレット気中加熱法 b)カレット・原料混合 気中溶融法 c)カレット加熱法 (電気溶融技術等) 2)カレット超予熱技術 の開発	・粗粒カレットを用いるプ ロセスと、粉碎して細粒 カレットとして利用するプ ロセスとのエネルギー使 用率、設備コスト、ハンド リングの容易さ等を考慮 して最適なプロセスを選 定	・既存のカレット生産ラインの最終 工程にロータリー粉碎機を設置した 安価に微粒カレットを生産できるカ レット生産ラインを提案した。 ・カレットが気中溶融できることによ り、カレットが主原料であるびんガラ スや短繊維ガラスの溶融に気中溶 融が適用できることを示した。	○

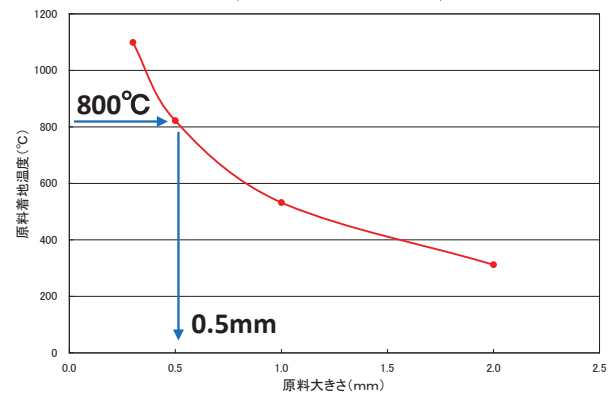
◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

2/7



- カレット粒径を変えて気中溶融実験を行い、1 mm 以下であれば気中溶融が可能であった。
- コンピュータシミュレーションにより粒径 0.1～0.5mm が適正サイズであることが分かった。
- 粒径106～325 $\mu\text{m}$  のカレットを用いてエネルギー原単位1,080kcal/kgで連続溶融実験を行ない、プロジェクト原単位目標1,800kcal/kg以下で連続運転が可能であることを確認した。

原料サイズと着地時温度 (シミュレーション)



カレットサイズと溶融状況

カレットサイズ	106～325 $\mu\text{m}$	1mm以下	1～4mm
炉内状況			

3/7

②； 微粒カレットと造粒原料の混合原料の気中溶融

- 微粒カレットと造粒原料を混合した原料を使用して気中溶融実験を行い溶融可能であることを確認した。
- さらに、混合原料を用いると泡層の発生が少なくなった。清澄対策の有望な手段になる可能性がある。

カレット混合原料の溶融状況

カレット90 + 造粒原料10	カレット50 + 造粒原料50

混合原料溶融時の泡層高さ






造粒原料	造粒原料50% + カレット50%
溶融エネルギー1200kcal/kg-glass	

泡層位置が80mm低い

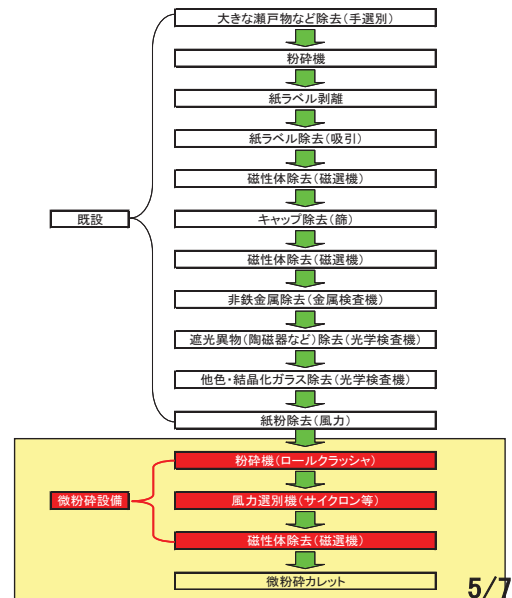
4/7

- 原料粉碎で一般的に使用されているボールミルとロールクラッシャで微粒カレットの作製を行った。
- 粉碎効率がやや悪いが、乾式で粉碎が可能であり、低価格、現状のカレット生産ラインに容易に設置できるロールクラッシャを選定した。

### カレット微粉碎結果

粉碎設備	ボールミル	ロールクラッシャ
		
粉碎方法	湿式	乾式
原料	粒径5~20mmのカレット 	
粉碎結果 (500μmの割合)	70% 	連続粉碎できず 42% 

### 微粉碎フローチャート



5/7

## ②; ロータリーキルンによる予熱

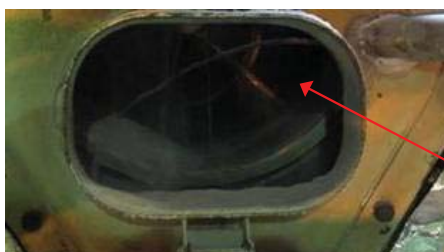
- 開発した攪拌子付き間接加熱式ロータリーキルンを使用して、粒径106~325μmの微粒カレットを398°C(予熱温度目標300°C)まで融着なしで予熱できた。熱効率は32%であった。
- この技術は従来法にも展開可能である。

### 開発したロータリーキルン

外観

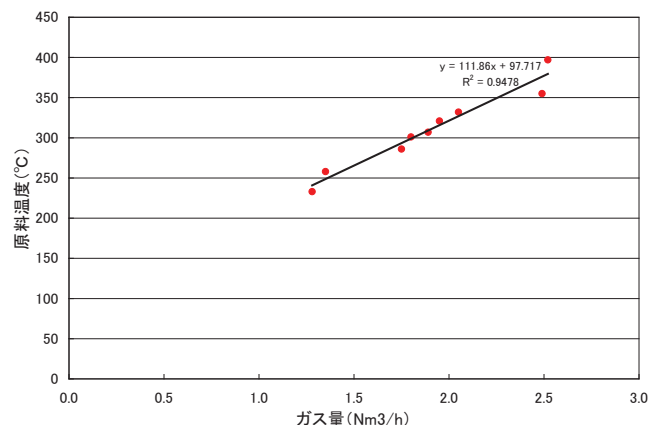


内部



攪拌子

### ロータリーキルンの加熱能力



6/7

## (1) 高速高効率加熱技術の開発

- カレット粒径を変えて気中溶融実験を行い、1 mm 以下であれば気中溶融が可能であり、粒径0.1～0.5mm が適正サイズであることが分かった。
- 粒径106～325 $\mu$ m のカレットを用いてエネルギー原単位1,080kcal/kgで連続10時間、1,200kcal/kgで20時間の溶融実験を行ない、プロジェクト原単位目標1,800kcal/kg以下で連続運転が可能であることを確認した。
- 微粒カレットと造粒原料を混合した原料を使用して24時間の気中溶融実験を行い溶融可能であることを確認した。
- 気中溶融に使用する微粒カレットの生産ラインとして既存のカレット製造ラインの後工程にロールタイプ粉砕機を設置する方法を提案した。

## (2) カレット予熱技術の開発

- 粒径106～325 $\mu$ m の微粒カレットを原料として、開発した攪拌子付き間接加熱式ロータリーキルンを使用して398 $^{\circ}$ C(予熱温度目標300 $^{\circ}$ C)まで融着なしで予熱できた(間接加熱式ロータリーキルンの熱効率は32%)。

7/7

「革新的ガラス溶融プロセス技術開発プロジェクト」  
(事後評価)第1回分科会 資料7-3

## エネルギーイノベーションプログラム 「革新的ガラス溶融プロセス技術開発」 (事後評価)

### プロジェクトの詳細 (公開)

#### － ③ ガラス原料融液とカレット融液との高速混合技術開発 －

(独)物質・材料研究機構  
東洋ガラス(株)

2013年 8月 16日

(1) ③-(1) 攪拌技術の開発

東洋ガラス

(2) ③-(2) 均質性評価技術の開発

物質・材料研究機構

2/18

公開

## ③ ガラス原料融液とカレット融液との高速混合技術開発

### —(1) 攪拌技術の開発

東洋ガラス株式会社

2013年 8月16日

3/18

	目標	成果	達成度
③—(1) 攪拌技術の開発  インフライトメルト法に適合する「カレット融液」、「原料融液」の高速混合技術を開発。	・確立した評価方法で均一に混合するまでの時間として2時間以内を達成。	・均質槽に設置したねじ形攪拌子(2本/対×3対)を使用して、2時間以内の攪拌で目標とする均質度を達成した。	○

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

③—(1) 研究開発成果； 攪拌子形状評価

- 着色剤が流出するまでの時間は「ねじ形攪拌子」が長いことが分かった。

経過時間(分)	0	20	40	60	80	100
箱形 右回転 15回/分						
ねじ形 右回転 15回/分						

- 攪拌子の回転は速いほど、攪拌効果が高いことも分かった。

経過時間(分)	0	1	3	5	7	9
5回/分						
15回/分						
30回/分						

蛍光染料を使用。  
混合が良いものほど  
全体に光る



- 耐火物製ねじ形攪拌子(2本/組)を3セット均質槽に設置し、20回転/分で運転して均質度を評価した。



ねじ形攪拌子



均質度評価サンプル採取位置

攪拌子設置状況



攪拌時の内部

(均質度評価用サンプル採取口より撮影)

- 攪拌子下流で回収したガラスは、攪拌子上流で採取したガラスに比べ脈理は少なく均質であった。

攪拌前後のシュリーレン像  
(カレット0%)

攪拌子	形	ねじ
	使用数	1対(2本)
	回転数	7.3回/分
	回転方向	上向き
ガラス温度	1300℃	
原料	造粒原料	
原料投入量	85kg/h	
採取位置		
採取ガラス	攪拌前	攪拌後

左側写真の撮影方向

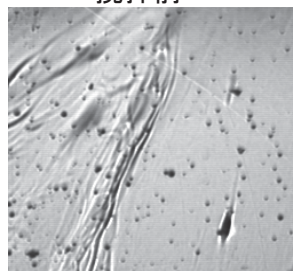
第16回実験(カレット100%)で得たガラス



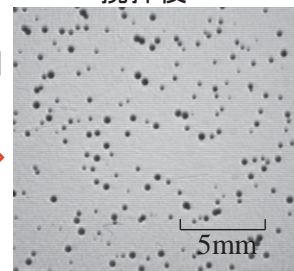
第20回実験(カレット50%)で得たガラス

攪拌前

攪拌後



1時間  
53分



シュリーレン像代表例(NIMS撮影)

- 試験炉均質槽の1/2サイズの高速攪拌技術開発用物理モデル実験装置を作製し、形状を変えた攪拌子を使って攪拌効果を比較した。
- その結果、「ねじ形攪拌子」がもっとも攪拌効果が高く、高速で回転するほど攪拌効果が大きくなることが分かった。
- モデル実験の結果をもとに気中溶融試験炉下流に「ねじ形攪拌子」(耐火物製)2本一組を3列取り付けた攪拌装置を有する均質槽を設置した。
- 造粒原料とは組成の異なる板ガラスカレットと造粒原料を投入重量比1:1の割合で混合した原料を気中溶融したのち、攪拌子の回転数20回転/分、攪拌装置の通過所要時間は2時間で攪拌し、攪拌子前後のガラスの均質度を調査した。
- 攪拌後のガラスはびん・食器ガラスと同等の均質であり、目標を達成した。

8/18

## ③ ガラス原料融液とカレット融液との高速混合技術開発

### —(2) 均質性評価技術の開発

(独)物質・材料研究機構

2013年 8月16日

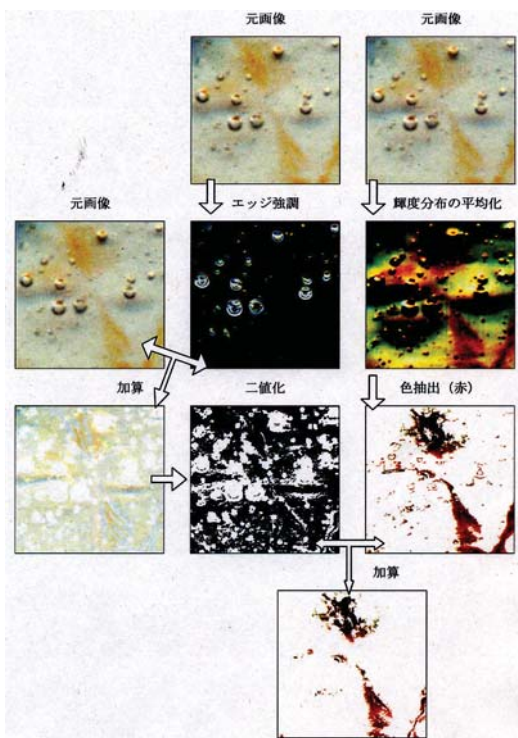
9/18

	目標	成果	達成度
<p>③—(2) 均質性評価技術の開発</p> <p>粗溶解レベルの泡のあるガラスについて均質化過程を追跡するために、泡と成分ムラとを分離して定量評価する技術を開発する</p>	<p>カレット攪拌プロセスを追跡するため、カレット混合試験溶解から得られる泡と成分のムラの両方を多量に含んだガラス試料からある程度均質化が進んだガラスに至る広範な均質性を同一基準で定量評価する均質性評価法を新たに開発し、試験溶解ガラスの均質性を評価する。</p> <p>また、市販ガラス製品の均質性と試作ガラスの均質性レベルを比較し、均質化達成度を評価する。</p>	<p>1) 泡は可視画像から、成分ムラはシュリーレン画像から解析する手法を開発した。</p> <p>2) 泡の個数およびサイズ分布解析法を開発した。</p> <p>3) シュリーレン画像から成分ムラの規則性を特徴付ける動径分布解析法を開発した。</p> <p>4) シュリーレン画像から成分ムらの程度を特徴付ける平均的な指標として画像輝度分布の標準偏差の有効性を明らかにした。</p> <p>5) シュリーレン画像の画像解析から成分ムらの大きさ分布を解析する手法を開発した。</p> <p>6) 市販ガラス製品の均質性評価から実用ガラス品質評価指標を作成した。</p> <p>7) 気中溶解によるガラスは、粗溶解段階であっても容器ガラスレベルの品質に達している。高品質ガラス製造には脱泡処理工程の追加が必要。</p>	○

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

③—(2) 研究開発成果

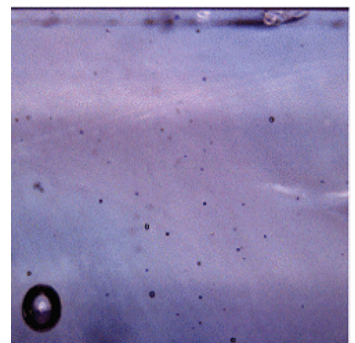
均質性評価技術1: 泡と成分ムラの分離法



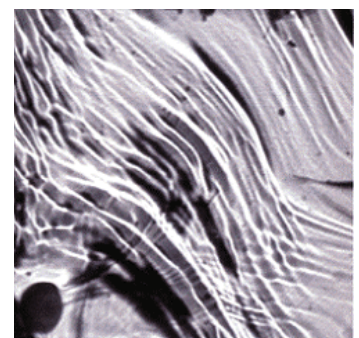
画像処理で泡とムラによる濃淡画像の分離は可能であることが分かったが、大きな泡を取り除いた後の補間が難しく好ましくない。

泡多数の場合はムラ解析が実質上意味がないことを考慮し、泡については可視画像をもとに大きさや個数を解析し、ムラについてはシュリーレン像を用いて解析することにした。

可視画像: 泡解析用



シュリーレン像: ムラ解析用





均質性評価技術2: 泡の定量法及び解析例

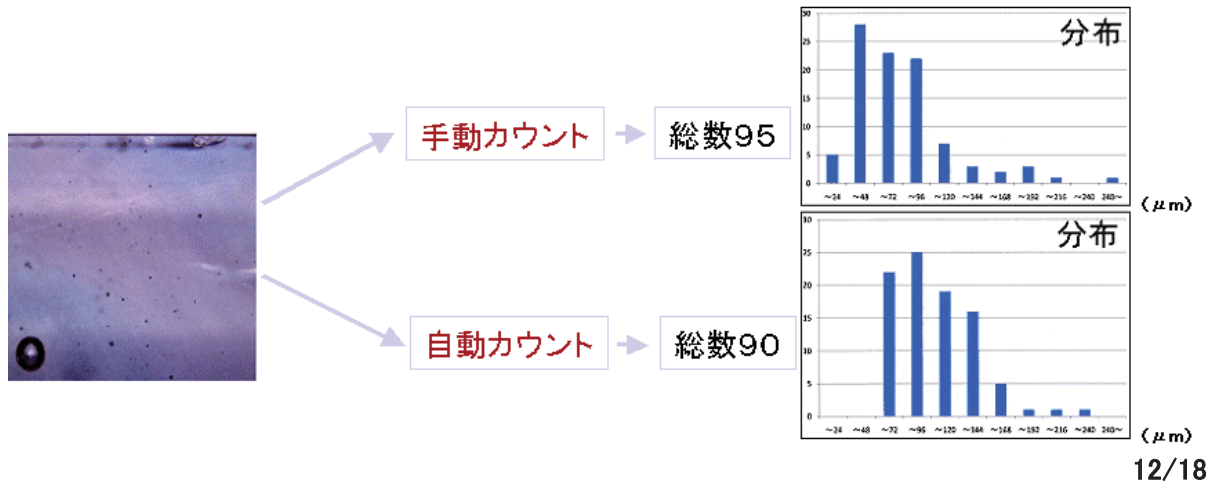
・マニュアル法:

試料の可視画像を、上中下3カ所にピントを合わせて撮影した3枚の写真を元に目視で数える。大きさはスケールで目視により測り集計する。

・自動法:

試料の可視画像を、上中下3カ所にピントを合わせて撮影した3枚の写真を合成し、エッジ強調処理を施した後画像処理ソフトのカウントルーチンで数える。

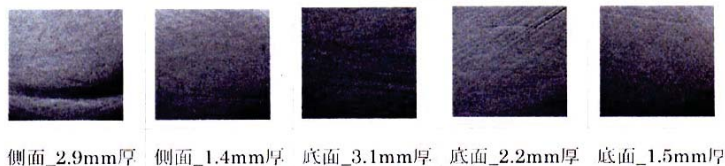
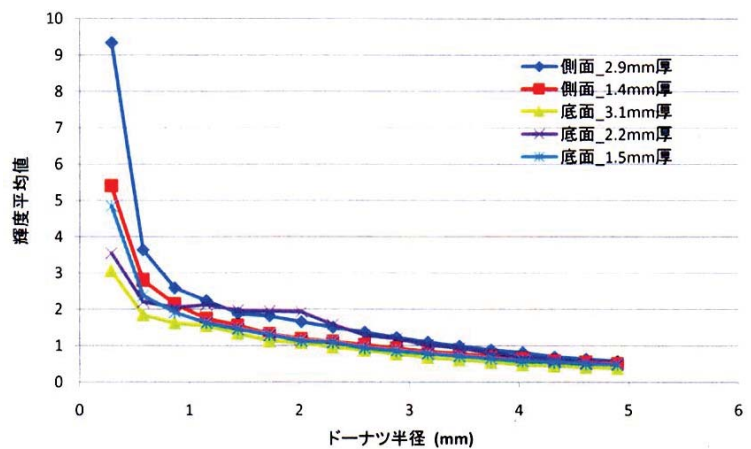
大きさはルーチンの自動計測で集計する。



均質性評価技術3: ムラの規則性定量法及び解析例

手順:

- 1) シュリーレン画像をフーリエ変換する。
- 2) フーリエ変換像の中心から同心円状に円環を切り出し、逆フーリエ変換して実画像とし、その輝度を測定する。
- 3) 2)を繰り返して最終的にムラの規則性を特徴付ける動径分布曲線を得る。



均質性評価技術4: **ムラの程度**の平均的定量法及び解析例

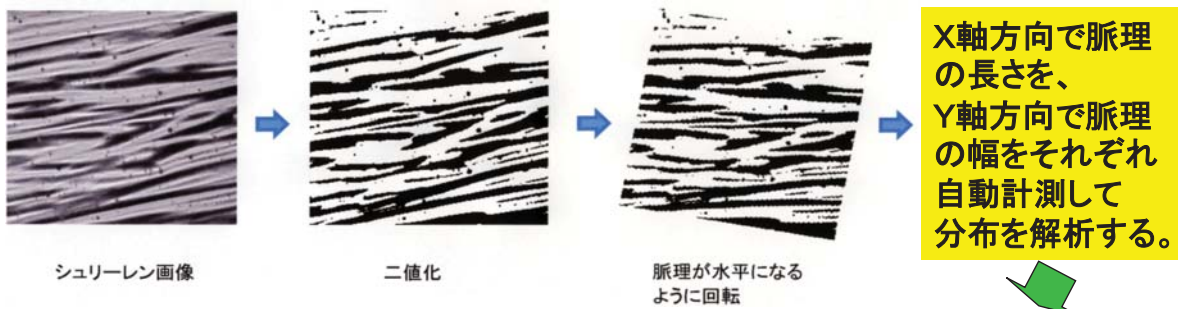
平均的な均質度を示す新しい指標として  
シュリーレン像の輝度分布の標準偏差 (ピクセル単位)を求めた。

試料厚み  $\longrightarrow$  増

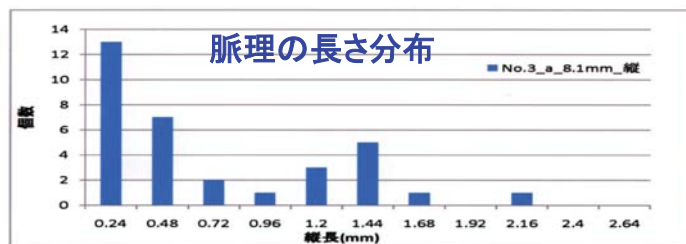
	No.3_a_2.2mm	No.3_a_8.1mm	No.3_a_14.0mm	No.3_a_19.1mm	No.3_a_25.7mm
輝度平均値	137.22	125.64	76.76	73.81	67.05
標準偏差	50.39	62.16	50.53	49.15	45.43

多少の変動はあるが試料厚みに関わらずほぼ同一の標準偏差値となっている。

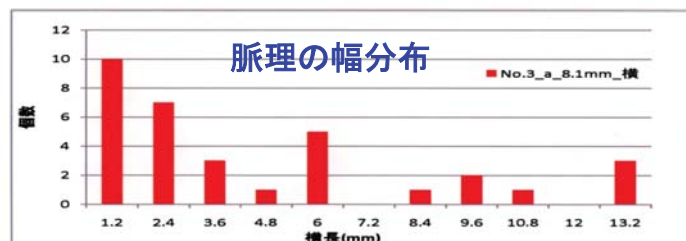
均質性評価技術5: **ムラサイズ分布**解析法及び解析例



縦(pixel)	縦(mm)	No.3_a_8.1mm_縦
5	0.24	13
10	0.48	7
15	0.72	2
20	0.96	1
25	1.2	3
30	1.44	5
35	1.68	1
40	1.92	0
45	2.16	1
50	2.4	0
55	2.64	0
合計		33



横(pixel)	横(mm)	No.3_a_8.1mm_横
25	1.2	10
50	2.4	7
75	3.6	3
100	4.8	1
125	6	5
150	7.2	0
175	8.4	1
200	9.6	2
225	10.8	1
250	12	0
275	13.2	3
合計		33





市販ガラス製品の均質性評価と実用品質評価指標

食器	サンプル名	部位	メーカー	厚さ	標準偏差	泡(／g)	脈理数	泡個数
食器	サンプル名	部位	メーカー	厚さ	標準偏差	泡(／g)	脈理数	泡個数
	コップ2	底面		7	41.6	0.00	139	0
食器	コップ1	底面		3.4	46	0.00	88	0
				8	37.1	0.00	76	0
瓶	珍味瓶	底面	日本耐酸瓶工業	2.6	28	0.00	39	0
	イタリアビール瓶	底面		3	14.9	0.00	0	0
瓶		底面		2.8	36.9	8.27	31	16
		底面		1.5	32.7	4.82	40	5
瓶	うに	底面	石塚硝子	3.2	70.5	0.00	23	0
		側面		6.2	61.5	0.00	14	0
瓶	うるか瓶	底面	石塚硝子	5	63.9	0.00	47	0
	オロナミンC	底面	日本山村硝子	2	22.1	0.00	59	0
瓶	UCOコーヒー瓶	底面		5	67.2	0.29	47	1
	コーラ瓶	底面	日本山村硝子	2.8	67.4	0.00	53	0
瓶	かつま酒盗瓶	底面	日本山村硝子	3	57.9	0.00	41	0
	外国製リンゴジュース	底面		1.7	45.2	0.00	36	0
瓶	サントリー角瓶	底面	東洋ガラス	2.8	16.3	0.00	0	0
		底面		1.5	19.3	0.00	0	0
瓶	スーパードライ	底面	東洋ガラス	3.1	10.0	0.00	43	0
		底面		2.2	14.6	0.00	58	0
瓶		側面		1.5	17.9	0.00	0	0
		側面		2.9	23.3	0.00	9	0
瓶	唐辛子瓶	底面	拍洋硝子	1.4	18.4	0.00	18	0
		側面		2.5	59.5	0.00	11	0
瓶	試薬瓶	底面		3.9	77.6	0.00	58	0
		底面		6.7	6.8	4.32	34	20
瓶	ジュース瓶	底面	日本山村硝子	3.4	7.4	2.55	44	6
		側面		5.3	61.4	0.00	11	0
瓶	ドリンク瓶	底面	日本山村硝子	2.2	45.1	0.00	28	0
	リンゴジュース	底面	日本山村硝子	2.4	18.0	0.00	0	0
瓶	ケチャップ瓶	底面	日本耐酸瓶工業	3.1	8.5	0.00	0	0
	ワイン瓶	底面	石塚硝子	4	19.5	0.00	58	0
瓶		底面	日本山村硝子	4.7	11.7	2.77	75	9
		底面		2.7	15.8	4.82	0	9
瓶	牛乳瓶	底面	石塚硝子	3	26.53	0.00	61	0
	オリーブオイル瓶	底面	スペイン	3.8	7.2	0.00	56	0
瓶		側面		2.4	33.5	0.00	64	0
	ヘネシー瓶	底面		4.4	9.2	0.00	35	0
瓶		側面		4.6	10.0	0.00	44	0
	サントリーVO瓶	底面	石塚硝子	6	13.0	0.00	18	0
瓶		底面	石塚硝子	3.2	10.0	0.00	29	0
	日本酒4合瓶	底面	日本山村硝子	5.4	14.9	0.00	31	0
瓶	焼酎瓶	底面	東洋ガラス	4.7	29.6	0.00	128	0
		底面						
板状	青板	正面		6	4.4	0.00	0	0
		側面		7.5	22.6	0.00	11	0
板状	タッチパネル	正面	旭硝子	3.2	7.7	0.00	0	0
		側面		6.5	13.6	0.00	22	0
板状	型板ガラス	正面	旭硝子(中央)	5.4	12.2	0.00	0	0
		正面	旭硝子(右側)	5.8	18.4	0.00	0	0
板状		正面	旭硝子(左側)	4.2	19.7	0.00	0	0
		正面						

市販ガラス製品  
均質度標準偏差指標

食器：28-46  
瓶：7-77  
板：4-20  
(4~23)

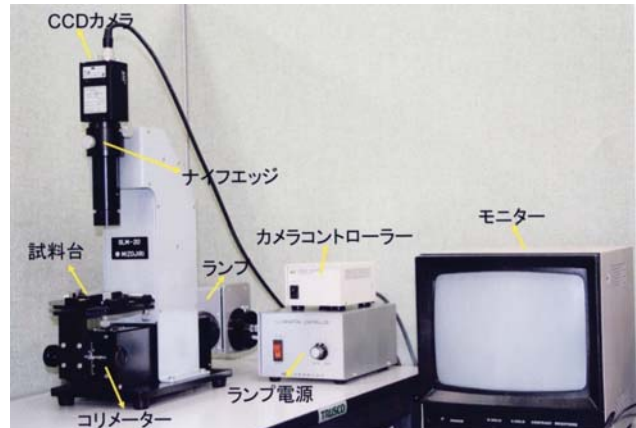
東洋ガラス試験溶融炉による気中溶解試験溶融ガラスの均質性評価結果の例

テストNo.	泡	脈理数	標準偏差	原単位 (kcal/kg)	原料	攪拌
14前	29個/g	31	18	1131	カレット(90%) +SL-8	前
14後	31個/g	9	30	1131	カレット(90%) +SL-8	後
15前	146個/g	14	23	1264	SL-10	前
15前	103個/g	7	27	1264	SL-10	後
16前	464個/g	84	57	1076	カレット	前
16前	130個/g	27	32	1076	カレット	後
17前	164個/g	38	19	948	SL-6	前
17後	4個/g	29	17	948	SL-6	後
18前一液面付近	438個/g	57	42	1491	SL-7	前
18前一底付近	0個/g	10	79	1491	SL-7	前
18後	~144個/g	0	32	1491	SL-7	後
19前	367個/g	45	58	1000	SL-11	前
19後	152個/g	22	68	1000	SL-11	後

気中溶解ガラスの品質について  
燃料原単位 948kcal/kg-glassにおいても

- ・泡に関しては、実用レベルではなく、脱泡処理工程が必要である。
- ・標準偏差での均質性評価では、粗溶融にもかかわらず、実用容器ガラス品質レベルに達している。

- 1) 泡と成分ムラを分離して定量できる均質性評価法として、光学研磨試料片の光学透過像を画像解析(異物の形、大きさ、存在量の把握と分類およびスペクトル化)により分離定量する手法を採用した。
- 2) 透過画像としては可視画像と成分のムラを敏感に検出できるシュリーレン像を使用した。画像のデジタルデータをパーソナルコンピュータに取り込み、画像解析には、市販の画像解析プログラムを使用した。  
(使用画像処理ソフトは  
Imsoft社のImage Factory)
- 3) 均質性評価のバックデータとして、市販ガラス製品の品質評価を実施し、ガラス品質の評価指標を作成した。



使用した小型シュリーレン観察装置 18/18