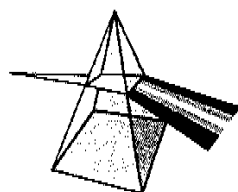


【技術報告】



円筒電極直接通電型ガラス溶融炉の開発

正木 敏夫 児嶋 慶造 小林 洋昭
河村 和廣 五十嵐 寛*

東海事業所 環境技術開発部
* 東海事業所 技術開発推進部

資料番号: 105-4

Development of Joule-Heated Cylindrical Electrode Melter

Toshio MASAKI Keizoh KOJIMA Hiroaki KOBAYASHI
Kazuhiro KAWAMURA Hiroshi IGARASHI*

Waste Technology Development Division, Tokai Works

* Technology Development Co-ordination Division, Tokai Works

東海事業所のTVF (Tokai Vitrification Facility: ガラス固化技術開発施設) で運転されているガラス溶融炉は、運転に伴い材料が侵食されるため定期的に交換する必要がある。交換後は解体処理されるが、その多くが高レベル固体廃棄物となる。ガラス溶融炉の高度化技術開発の観点から、次世代のガラス溶融炉は寿命に達した後の二次廃棄物発生量が少なく、廃棄物中に含まれる白金族元素に対し構造的により安定な運転が可能なが望まれる。このような必要性から円筒電極直接通電型溶融炉 (JCEM) の開発を進めている。

本報では、JCEMの開発経過として、小型試験装置での処理能力及び白金族元素の影響評価並びに工学試験装置の処理能力の評価試験について述べる。

Glass melter of TVF (Tokai Vitrification Facility) at Tokai Works needs periodical replacement because of corrosion on materials of the melter during glass melting operations. The replaced melter can be dismantled and most of its part are classed as high level radioactive solid waste. With technological development, the next-generation melter should produce less secondary radioactive waste and offer more reliable operation against noble metals in radioactive liquid waste. A joule-heated cylindrical electrode melter (JCEM) has therefore been developed.

This report describes experimental evaluations of the processing rate and effect of noble metals for a small-scale JCEM and the processing rate of an engineering-scale JCEM.

キーワード

廃棄物処理、ガラス固化、ガラス固化技術開発施設、円筒電極直接通電型溶融炉、JCEM、ガラス溶融炉、二次廃棄物、白金族元素、高放射性廃液、処理能力

Waste Treatment Vitrification, TVF, Joule-Heated Cylindrical Electrode Melter, JCEM, Glass Melter, Secondary Radioactive Waste, Noble Metal, High Level Radioactive Liquid Waste, Processing Rate

1. はじめに

東海事業所の環境技術開発部では、これまでのガラス溶融炉技術をさらに進展させ、より高性能なガラス溶融炉の開発を進めている。小型・軽量化、廃炉時の二次廃棄物の発生量を減少させ、長期的に安定運転が可能なガラス溶融炉を開発するために、炉材料開発、加熱技術開発及び白金族元素対策技術開発などの課題を受け、二次廃棄物発生量の少ない炉体交換型溶融炉と、一基当たりの処理能力が大きい直接通電型耐火物製溶融炉のそれぞれの利

点を生かした円筒電極直接通電型溶融炉 (Joule-Heated Cylindrical Electrode Melter: JCEM) (以下、JCEMという) の開発を行ってきた。

本報では、JCEMの開発経過として、小型試験装置での処理能力及び白金族元素の影響評価並びに工学試験装置の処理能力の評価試験について述べる。

2. ガラス溶融炉技術

ガラス溶融炉は溶融ガラスを保持する構成材料

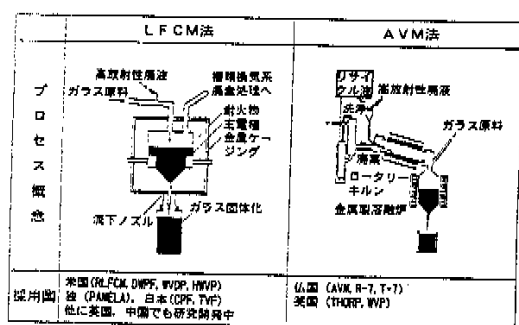


図1 ガラス溶融プロセスの比較

の種類により、金属製溶融炉と耐火物製溶融炉の2種類に大別される。図1に金属製溶融炉として代表されるフランスのAVM (Aterier Vitrification de Marcoule) 法及び耐火物製溶融炉として代表的な日本、アメリカ、ドイツのLFCM (Liquid Fed Ceramic Melter) 法を示す。

2.1 金属製溶融炉

金属製溶融炉には加熱方法の違いにより、中周波誘導加熱または抵抗発熱体により外部からガラスを加熱する方式 (外部加熱式金属製溶融炉)¹⁾と、マイクロ波により原料を直接加熱する方法^{2)~4)} (内部加熱式金属製溶融炉) がある。

外部加熱方式では原料の溶融に必要な熱量を、主に加熱された金属製容器からの熱伝達により供給する。このため、廃棄物の処理能力を増加させるために溶融表面積 (原料が供給されるガラス液面の面積) を増加したとしても、その効果は余り期待できない。したがって、外部加熱方式の溶融炉の一基当たりの処理能力をある値以上に高めることは原理的に困難である。例えば、フランスのガラス固化施設AVH (Aterier Vitrification de La Hague) では、一基当たりの最大処理能力が35kg-glass/hといわれている¹⁾。このことより、施設としての処理能力を満足させるために溶融炉及びその周辺機器を複数系列設置しなければならず、施設建設費の増加及び運転操作の複雑化という問題が生じている。

マイクロ波加熱方式では溶融表面積を増加させることにより原理上処理能力に上限はないが、マイクロ波による加熱特性から内容物の表面付近のみ加熱され、溶融炉が大型化するとガラスの内部まで十分に加熱することができないという問題点がある。

また、金属製溶融炉は溶融ガラスに接触する金

属部材の耐食性が比較的低く、また冷却されていないため寿命が短いという課題がある。

以上のように金属製溶融炉には処理能力が低く、寿命が短いという問題点はあるが、溶融炉が寿命に達した後の炉材料自体から発生する二次廃棄物発生量は比較的小さいという利点があり、フランスの例では8g/kg・ガラス (単位ガラス製造量当たりの廃棄物発生量) と報告されている¹⁾。

2.2 耐火物製溶融炉

耐火物製溶融炉は溶融ガラスに対する耐食性の高い耐火れんがを選定し (例えば、クロミアールミナ系耐火れんが)、十分な腐食代をとれば溶融炉の寿命を長くすることができる。また、加熱方式として電極を介してガラスに直接電流を流すことによりガラス自体を加熱する直接通電方式を用いた溶融炉では溶融表面積を大きくすることにより処理能力を高くすることができ、原理上処理能力に上限はないという利点がある。

セラミック製溶融炉でマイクロ波加熱だけで熱源を与える方式の報告例⁵⁾もあるが、この場合はマイクロ波透過性を確保しつつ、高耐食性を有する耐火物が実用化されていないことが問題となる。

しかし、いずれの加熱方式にせよ、耐火物製溶融炉では使用寿命に達した後は耐火物自体が二次廃棄物となるので、その発生量も比較的多く、米国の例では80g/kg・ガラスあるいは体積比で製造ガラスの2%の二次廃棄物発生量が報告されている⁶⁾。筆者らは、TVFガラス溶融炉の二次廃棄物発生量は84g/kg・ガラスと見積った。また、PAMELA (ベルギー・西独開発) において1985年10月1日よりホット運転を開始し1988年5月6日に運転を終了したK-4溶融炉 (重量18.6トン) は、この間207.4トンのガラスを製造した⁷⁾ので、二次廃棄物発生量は90g/kg・ガラスと計算される。

さらに、動燃事業団の初期のモックアップ溶融炉及びPAMELAのK-4溶融炉に採用した平底構造のガラス溶融炉では、廃棄物に含まれる白金族元素がガラスに難溶性の導電性物質を形成して炉底に堆積する傾向があり、電極間電流が導電性堆積物に集中し十分な処理能力が得られないという問題が生じた^{8), 9)}。

3. JCEMの開発

3.1 基本構造

図2にJCEMの概念を示す。この溶融炉では、

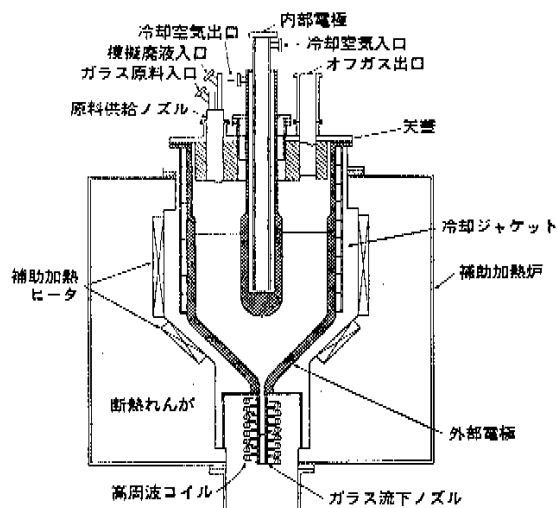


図2 円筒電極直接通電型溶融炉 (JCEM) の概念
(JCEM: Joule-Heated Cylindrical Electrode Melter)

耐火れんが製炉体の内側に耐熱合金製外部電極とその内側に内部電極を配置し、両者の間でガラスに電流を通じ、ガラス自身に発生するジュール熱によりガラスを加熱する。この方式は白金族元素等の導電性堆積物があっても、原理的に短絡しにくい構造である。

腐食等により寿命に達した内部電極及び外部電極は新しいものと交換できるようにし、耐火物構造はそのまま使用を継続する。このように、交換対象を限定することにより廃炉時の二次廃棄物発生量を低減することが可能である。

3.2 直接通電電極及び上部構造

外部電極の底部にはガラス抜き出し用の流下ノズルを設け、下方部分には流下ノズルに向かって 30° ～ 60° の勾配を設けている。これはガラス中に含まれる導電性堆積物を通常の運転で流下ノズルから抜き出すためのものである。流下ノズルはフリーズバルブで、ガラスを流下する際にはノズルを誘導加熱用のコイルまたは抵抗発熱体により加熱する。

内部電極は、棒状で上方から挿入され上蓋で絶縁材を介して支持される。また、上蓋と外部電極は電気的に絶縁する。溶融ガラス等の内容物は外部電極によって保持する。

内部電極及び外部電極の電流表面密度の比較的高い部分は、溶融ガラスあるいは炉内雰囲気による侵食または腐蝕を抑制するため、空気による強制冷却を行う。

廃棄物はガラス原料とともに上蓋に取り付けられたノズルから供給され、溶融表面に堆積して、溶融ガラスからの熱伝達により蒸発、乾燥、仮焼を経てガラス化する。上蓋部には処理に伴って発生する廃ガスを放出するノズルを設ける。処理に必要な熱量は主として加熱された溶融ガラスからの熱伝達により供給される。また、外部電極と内部電極の冷却空気は、溶融ガラス液面下を冷却している過程で加熱され、ガラス液面より上方部を通るときに輻射により溶融表面に堆積した原料層を上方から加熱し、処理能力を向上させる効果を持つと考えられる。

3.3 補助加熱炉 (耐火れんが構造炉体)

補助加熱炉は抵抗発熱体等の補助加熱装置を有し、この加熱装置はガラス溶融炉の起動時に直接通電可能な温度までガラスを昇温するために使用する。また、ガラスの発熱密度が比較的低くなる部分については、ガラスの抜き出しに適切な温度に維持するために補助加熱する。

溶融ガラスから周囲への熱の放散を抑制するため外部電極の周囲を断熱用の耐火れんがで取り囲む。耐火れんがは金属製のケーシングにより支持する。この耐火れんが構造は万一外部電極が損傷し、溶融ガラスが漏洩しても耐火れんが構造内に溶融ガラスを閉じ込める安全上の役割をも果たす。すなわち、溶融ガラス等内容物は外部電極内に保持されるが、放射性物質の閉じ込めに対する最終バリアは耐火れんがとケーシングから構成される炉体である。この点で、閉じ込めに対する考え方はセラミック製溶融炉と同様であり、外部電極が付加されている分だけ閉じ込め機能が多重化されていると考えることができる。

4. ガラス溶融技術の比較

以上述べた各種廃棄物処理用ガラス溶融技術について材料、加熱方法、処理能力、解体後の二次廃棄物発生量及び白金族元素の運転に及ぼす影響を表1にまとめた。表には処理能力、解体後の二次廃棄物発生量及び白金族元素の運転に及ぼす影響についても併せて示す。

JCEMは一基当たりの処理能力が原理的に無制限で解体後の廃棄物発生量が低いこと、また寿命が長くかつ交換に要する期間が短いこと、さらに原理的に運転に対する白金族元素の影響を受けないといった、AVM/AVHとLFCMの各々の長所を有する、より優れた溶融炉となっている。

表1 固化方式の比較

☐ : 他方式に比べて優れている点

5.1 JCEM小型試驗裝置

(1) 目的

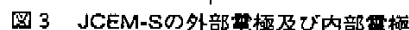
(2) 構造概要

外部電極は、補助加熱装置により加熱することも可能である。外部電極は、補助加熱炉内に設置されるが、補助加熱炉の主要構成は断熱材で、金属製のケーシングで覆われている。本試験装置の溶融表面積は 0.0214 m^2 で、TVF溶融炉の 0.66 m^2 の約30分の1の規模である。

図3に外部電極及び内部電極の構造を示す。

外部電極には、冷却を行うための空気冷却ジャケットをその全周に配した。

動燃技報 No.105 1998.3



内部電極の設置高さは可変であるが、標準的な位置として外部電極の45°勾配の始点を内部電極の下端としている。溶融ガラスの低レベル (L) は内部電極の下端から40mm、高レベル (H) は同87mmであり、L~H間の容量は1ℓ (2500g) である。直接通電の加熱容量は6kWである。

補助加熱炉はセラミックファイバーの断熱材で炉体を構成し、ステンレス製のケーシングで覆った構造で、外部電極の支持、断熱及び補助加熱を行う機能を有する。

補助加熱炉の内側には、起動及び補助加熱のためのヒータ1及び2を設置している。ヒータ1は外部電極の直胴部、ヒータ2は外部電極の勾配部を加熱する。また、流下ノズル加熱のための流下ノズルヒータ1及び2を設置してある。それぞれのヒータの加熱容量は、順に3kW、1.5kW、0.6kW及び0.4kWである。

JCEM-Sの流下方式は、電気ヒータ 2 段加熱方式である。外部電極下部に取り付けてある流下ノズルを補助加熱炉に設置してある流下ノズルヒータ 1 及び 2 により、流下の開始や流下速度の制御を行う。

流下の停止は、流下ノズルヒータ 1 及び 2 の加熱を停止するとともに、流下ノズルの周囲に設置した冷却空気リングから、冷却空気を流下ノズルに吹きつけることにより行う。

5.2 熔融処理試験

白金族元素を含まない低模擬度廃液供給試験においてはケース L-1 ~ L-9 まで、白金族元素を含む高模擬度廃液供給試験においてはケース H-1 ~ H-13 までの合計 22 バッチの試験を行った。以下にそれらの試験条件を示す。

(1) 試験廃液

1) 名称

低模擬度廃液 1 (白金族元素非含有) 及び高模擬度廃液 1 (白金族元素 Ru、Pd 及び Rh 含有)

2) 廃液組成の計算条件

- ① 計算コード ORIGEN-2/82
- ② 炉型 PWR
- ③ 燃焼度 45,000 MWD/MTU
- ④ 比出力 38 MW/MTU
- ⑤ 燃焼期間 1,184 日
- ⑥ 冷却期間 4 年
- ⑦ 濃縮度 U-235 4.5wt%

(2) バッチ条件

JCEM-S の 1 バッチとは、装置の L 液位 ~ H 液位のガラス量、すなわち 1 回の流量量を意味し、その容量は溶融ガラス量で 1 ℓ (2,500g) である。

(3) 原料供給条件

低模擬度廃液供給試験では、目標として、

- ① 500mℓ/h 3 バッチ (L-1 ~ L-3)
- ② 700mℓ/h 3 バッチ (L-4 ~ L-6)
- ③ 1,000mℓ/h 3 バッチ (L-7 ~ L-9)

の 3 条件の廃液供給速度を設定し、高模擬度廃液供給試験では、目標として、

- ④ 500mℓ/h 5 バッチ (H-1 ~ H-5)
- ⑤ 700mℓ/h 5 バッチ (H-6 ~ H-10)
- ⑥ 1,000mℓ/h 3 バッチ (H-11 ~ H-13)

の 3 条件の廃液供給速度を設定した。

なお、高模擬度廃液供給試験における白金族元素の供給量は酸化物換算で RuO₂: 279g、PdO: 131g、Rh₂O₃: 41g、計 451g である。

(4) JCEM-S の運転条件

① 直接通電

溶融ガラス温度が 1,150℃ となるよう、直接通電電力を制御した。ただし、内部電極表面電流密度が 3 A/cm² 以下となるようにした。

② 補助加熱ヒータ 1

補助加熱ヒータ 1 による加熱は行わない。

③ 補助加熱ヒータ 2

補助加熱ヒータ 2 による加熱は、補助加熱ヒータ 2 温度が 970℃ となるよう自動制御した。

- ④ 内部電極冷却空気流量 : 70 ℓ/min

- ⑤ 外部電極冷却空気流量 : 100 ℓ/min

- ⑥ 原料供給ノズル冷却空気流量 : 60 ℓ/min

- ⑦ オフガスノズル冷却空気流量 : 60 ℓ/min

- ⑧ 炉内圧力

~120mmAq ~ -52mmAq

5.3 試験結果

- ① 低模擬度廃液供給試験では廃液供給速度約 450 ~ 1,100mℓ/h で 9 バッチ溶融運転を行い、33 ℓ の廃液を処理し、23kg のガラスを製造した。

廃液供給速度 700mℓ/h では安定した処理運転が行われたが、廃液供給速度 1,000mℓ/h では、その 3 バッチ目に原料供給過剰がみられた。このことより、JCEM-S の廃液処理能力を判断するためには数バッチの連続供給が必要であることが判った。今回の試験からは溶融炉試験装置の処理能力としては 700mℓ/h 以上 1,000mℓ/h 以下という値を得、その溶融効率 ([廃液処理能力] / [溶融表面積]) は 32.7 ℓ/hm² 以上 46.7 ℓ/hm² 以下と TVF モックアップ溶融炉の 22.4 ℓ/hm² の 1.46 倍以上 2.08 倍以下となった。

- ② 低模擬度廃液供給試験において溶融ガラス温度を 1,120 ~ 1,160℃ に保つのに必要な直接通電電力は 3.6 ~ 4.1kW であり、ほぼ直接通電のみの加熱により溶融運転が可能であった。

- ③ 廃液供給速度と直接通電電力との関係については、溶融ガラス液位が等しいケースで評価した結果、廃液供給速度を高めるにつれて直接通電電力が上昇する現象がつかめた。

- ④ 廃液供給速度と炉内雰囲気 (溶融ガラス液面の上部空間) 温度との間には相関がみられ、廃液供給速度の増大にともない炉内雰囲気温度が低下した。廃液供給速度が 700mℓ/h 及び 1,000mℓ/h の時の炉内雰囲気温度は、それぞれ 650℃ 及び 600℃ と評価された。

- ⑤ 図 4 に示す熱収支計算結果から、原料溶融熱、オフガス系への放出熱、外部電極冷却空気除熱及び炉外表面からの放熱量は廃液供給速度と相関があり、JCEM-S の廃液供給運転において熱収支を把握することにより原料の過剰供給か否かが判断できることが判った。

- ⑥ 高模擬度廃液供給試験では廃液供給速度約 450 ~ 1,100mℓ/h で 13 バッチ溶融運転を行い、48 ℓ の廃液を処理し、36kg のガラスを製造した。

廃液供給速度 600mℓ/h では安定した処理運転が行われたが、廃液供給速度 700mℓ/h 以上では原料供給過剰の傾向がみられた。このことより、高模擬度廃液供給試験での JCEM-S の廃液処理能力としては 600mℓ/h という結果を得、

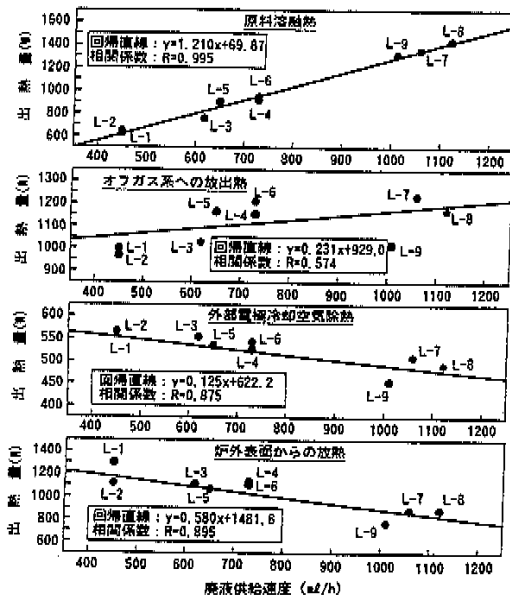


図4 JCEM-Sの熱収支計算結果

その溶融効率 28.0 l/hm^3 となり低模倣度廃液供給時の14%減となった。

- ⑦ 高模倣度廃液供給において、溶融ガラス温度を $1,130 \sim 1,160^\circ\text{C}$ に保つのに必要な直接通電電力は $2.4 \sim 3.5 \text{ kW}$ 、投入電力は $2.8 \sim 3.9 \text{ kW}$ であり、これは低模倣度廃液供給試験と比較して少ない直接通電電力であった。この原因は高模倣度廃液供給試験では導電性の白金族元素が外部電極の底部に存在することにより、溶融ガラス温度測定部付近の発熱密度が相対的に高くなり、溶融ガラス温度の指示値が高くなったためと考えられる。
- ⑧ 廃液供給速度と直接通電電力及び投入電力と

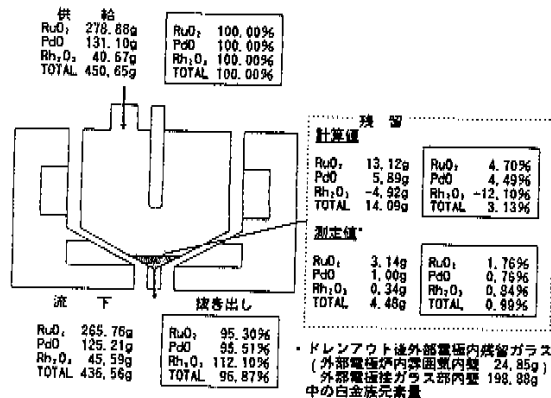


図5 JCEM-Sにおける白金族元素収支

の関係については、廃液供給速度が高くなるにつれて溶融ガラス温度を約 $1,150^\circ\text{C}$ に保つための直接通電電力あるいは投入電力が下降し、低模倣度廃液供給試験と異なった結果となった。これは、白金族元素の存在により溶融ガラス温度測定部付近の発熱密度が高くなり、溶融ガラス温度の指示値が高くなったことによるものと考えられる。

- ⑨ 高模倣度廃液供給試験においても低模倣度廃液供給試験と同様に廃液供給速度と炉内雰囲気温度との間には相関がみられ、廃液供給速度の増大にともない炉内雰囲気温度が低下した。廃液供給速度の上昇に伴う炉内雰囲気温度の低下の度合いは、高模倣度廃液供給時の方が大きかった。安定して溶融運転が可能であった廃液供給速度 600 ml/h の時の炉内雰囲気温度は 570°C であった。
- ⑩ 熱収支計算結果から、高模倣度廃液供給試験におけるJCEM-S各部の出熱量は、低模倣度廃液供給試験でのそれより小さかった。しかし、出熱割合は同等であった。
- ⑪ JCEM-Sにおいても、白金族元素を含有するガラスの流下では、従来のLFCMと同様に、流下の初期に白金族元素濃度が高く、流下後期は濃度が低くなる傾向にあった。白金族元素の全抜き出し量が50%となるのは、平均して流下重量の36%の時点であった。
- ⑫ 抜き出し率については、白金族元素の量と濃度の2とおりについて評価した結果、抜き出し量では、低模倣度ガラスから高模倣度ガラスへの交換が進むに従って、徐々に白金族元素量が多くなっていく傾向が見られ、抜き出し濃度では最初のバッチの流下から100%近くとなった。
- ⑬ 白金族元素の収支については、炉内の RuO_2 、 PdO 、 Rh_2O_3 の量は、供給により炉内に徐々に蓄積するが、流下によりほぼ全量抜き出されることがわかった。また、試験全体の収支としてみると、白金族元素の抜き出し率は RuO_2 : 95.3%、 PdO : 95.5%、 Rh_2O_3 : 112.1%となり満足する結果を得た (図5)。

6. JCEM工学試験装置の開発

6.1 JCEM工学試験装置

(1) 目的

JCEM工学試験装置 (以下、JCEM-Eという) は、JCEM-Sの試験結果を受けて、TVFの廃液処理量を実現する規模のJCEMとして設計した。JCEM-Eの開発・試験は、その設計精度の確認及

び以降のホット試験用JCEMの設計のためのデータを取得することを目的とした。

(2) 構造概要

JCEM-Eは、JCEM-S同様主要炉体を金属製電極及び耐火レンガ製炉体で構成したジュール加熱型溶融炉である。電極材料を耐熱合金製とし、溶融ガラスを保持する外部電極と溶融ガラス中に挿入した内部電極間で通電し、ガラスを加熱するものである。外部電極は補助加熱炉内に設置される。図6にJCEM-Eの構造を示す。

電極間の直接通電加熱に加えて補助加熱装置により加熱することも可能である。補助加熱炉は主として断熱材から構成され、さらにそれらを金属製のケーシングで覆った構造である。本装置の溶融表面積は 0.35 m^2 で、TVF溶融炉の 0.66 m^2 の約半分、JCEM-Sの16倍の規模である。

(3) 外部電極及び内部電極

外部電極は内径700mm、外径760mmの円筒容器で、炉底部は 45° の勾配を設け、その下部に内径26mm、外径60mm、長さ350mmの流下ノズルを接続している。材料は外部電極の接ガラス部（溶融ガラスが接触する部分）及び流下ノズルにInconel 690 相

当材、上部空間部にNCF 601を用いている。

外部電極には、冷却を行うための空気冷却ジャケットをその全周に配した。

外部電極の上部には、電気絶縁材（アルミナ）を介して、SUS316Lの天板を設け、その下には断熱のために耐火断熱レンガ（AZ-GS）を設置してある。天板には原料供給ノズル、オフガスノズル（エアフィルムクーラー）、温度計、液位計、覗き窓及び外部電極間と直接通電を行うための内部電極用フランジを設置してある。

内部電極の接ガラス部は、内径80mm、外径200mm、その上部は内径80mm、外径120mmのInconel 690相当材製の円柱電極で、その内部を空気冷却できる構造としている。内部電極の設置高さは標準的な位置として外部電極の 45° 勾配の始点から50mm上を内部電極の下端としている。溶融ガラスの液位は、低液位（L）は外部電極の 45° 勾配の始点から400mm、高液位（H）は同710mm及び高高液位（HH）は同740mmであり、L→HH間の容量は120ℓ（300kg）である。

外部電極と内部電極の直接通電系統は、最大200kWの電源供給が可能である。

(4) 補助加熱炉

補助加熱炉は断熱レンガ、セラミックボード等で炉体を構成し、SUS304製のケーシングで覆った構造で、外部電極内のガラスの断熱及び補助加熱を行う機能を有する。

補助加熱炉の内側には、熱上げ及び補助加熱のための補助加熱ヒータ1、2及び3を設置してある。ヒータはカンタルAF帯製である。ヒータ1は外部電極の直胴部を、ヒータ2は外部電極の勾配部の上部を、ヒータ3は外部電極の勾配部の下部を加熱する。それぞれのヒータの容量は順に30kW、15kW及び13kWである。

(5) 流下機構

本装置の流下方式は、高周波2段加熱方式であり、外部電極下部に接続している流下ノズルを高周波コイルより加熱する。なお、高周波コイルは外部電極の熱膨張に起因する流下ノズルの変位に追従させるために、流下ノズルに取り付けている。高周波コイルの巻数は20段であり、全段加熱及び上部15段の上段加熱の2種類が選択できる。

(6) 原料供給ノズル

外部電極の上部蓋に取り付け、模擬廃液及びガラス原料を炉内に供給するノズルである。

(7) 廃気ノズル

外部電極の上部蓋に取り付け、炉内で発生する廃気を廃気系に排出するノズルである。廃気に混

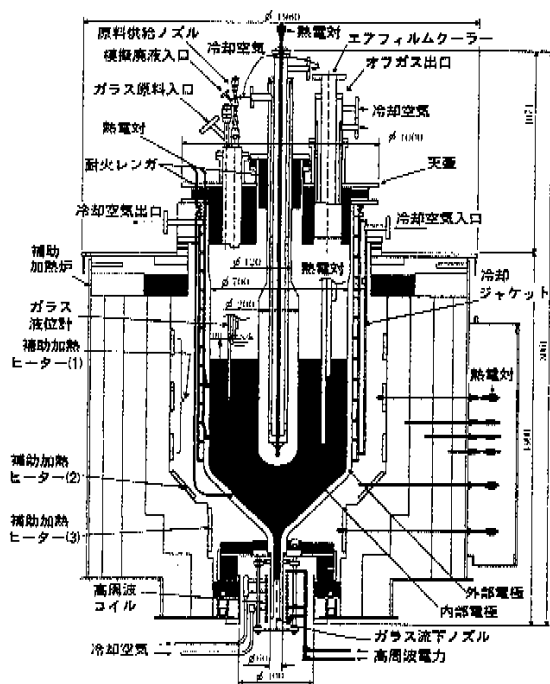


図6 JCEM工学試験装置（溶融表面積： 0.35 m^2 ）
[JCEM : Joule-Heated Cylindrical Electrode Melter
(円筒電極直接通電型溶融炉)]

在するダスト等による閉塞を防止するエアフィルムクーラを設けている。なお、エアフィルムクーラ用空気は、その性能維持のために約200℃まで加熱して供給する。

6.2 熔融試験

白金族元素を含まない低模倣度廃液供給試験において、ケース1～3までの合計10バッチの試験を行った。以下にそれらの試験条件を示す。

(1) 試験廃液

1) 名称

低模倣度廃液2（白金族元素非含有）

2) 廃液組成の計算条件

模倣廃液は、TVF設計標準廃液（ORIGEN-79準拠）に、熔融炉廃気処理系及び槽類換気系で発生する二次廃液を回収して、蒸発濃縮により生成した高レベル廃液の混合を考慮した。

(2) バッチの定義

JCEM-Eの1バッチとは、装置のL液位～HH液位までのガラス量で1回の流下量に相当する。JCEM-Eでは熔融ガラス量で120ℓ（300kg）である。

(3) 原料供給条件

本試験では、

- ① ケース1：11.3ℓ/h（ガラス製造速度7.00kg/h〔TVF公称能力×0.8〕）
- ② ケース2：12.8ℓ/h（ガラス製造速度7.88kg/h〔TVF公称能力×0.9〕）
- ③ ケース3：14.2ℓ/h（ガラス製造速度8.75kg/h〔TVF公称能力〕）

の3条件の廃液供給速度を設定した。各ケースとも処理運転が定常状態となる3バッチ以上の連続運転を基本とした。ただし処理不可能と判断された場合は3バッチ未満でもそのケースを終了した。

(4) JCEM-Eの運転条件

- ① 熔融炉炉内圧：－100mmAq
- ② 熔融ガラス温度：1,150±50℃
- ③ 外部電極温度：900℃以下
- ④ 内部電極温度：1,100℃以下
- ⑤ 外部電極冷却空気流量：20N m^3 /h
- ⑥ 内部電極冷却空気流量：40N m^3 /h
- ⑦ 内部電極表面電流密度：0.5A/cm以下（平均値）
- ⑧ 炉内雰囲気温度：400℃以上
- ⑨ 原料供給ノズル冷却空気流量：15N m^3 /h
- ⑩ エアフィルムクーラ先端パージ空気流量：40N m^3 /h
- ⑪ エアフィルムクーラ本体パージ空気流量：40N m^3 /h

⑫ 炉内圧力計パージ空気流量：2N m^3 /h

⑬ 補助加熱：補助加熱ヒータ1、2及び3の加熱はガラス流下時以外行わない。

6.3 試験結果

(1) 処理能力評価

表2に低模倣度廃液供給試験におけるJCEM-Eの運転状況を示す。ガラス製造速度8.75kg/hのケースでは、どの運転監視項目をみても過剰供給による変動があった。ガラス製造速度7.88kg/hのケースでは、3バッチを通して運転監視項目の大きな変化が無く供給ができたことから、連続的に熔融処理が可能であると判断されるが、運転に支障がでる程度ではないにせよ熔融表面が一時的に不安定になる事象が起こった。3バッチ目において、若干未熔融原料層が増大している可能性があり、処理能力としては、上限ぎりぎりでの運転であったと推定される。ガラス製造速度7.00kg/hでは4バッチを通して安定した運転が可能であった。これらより、運転状況から判断される最大ガラス製造速度は7.00～7.88kg/hの間にあると判断した。

(2) ガラス流下特性

JCEM-Eでのガラス流下開始の条件として、補助加熱ヒータ2及び3の設定温度がそれぞれ980℃及び1000℃（外部電極勾配部温度が1025℃前後に相当）の時、流下ノズル上段温度600℃以上という目安を得た。

(3) 電極侵食量評価

1) 内部電極侵食速度は最大で0.002mm/day、LとHHの中間液位以下での平均で0.0002mm/dayであり、TVF熔融炉の設計侵食速度0.03mm/dayより小さい。

2) 外部電極については、ほとんど侵食は認められなかった。

(4) ガラス固化体品質評価

本試験で製造された固化ガラスの物性及びガラス組成はTVF標準ガラスとほぼ同等であることが確認された。また、ガラス中に結晶の析出も認められなかった。

表2 処理能力評価試験におけるJCEM-Eの運転状況

項目	ガラス製造速度 8.75kg/h	7.88kg/h	7.00kg/h
炉内温度分布の推移	変動	安定	安定
炉内雰囲気温度の推移	400℃を割る	安定	安定
熔融表面の状態	変動	若干変動	安定
炉内圧力	変動	安定	安定
処理能力評価	×	○	○

7. おわりに

高性能溶融炉の開発の一環として実施した、実験室規模のJCEM-S及びプラントを前提とした工学規模のJCEM-Eの試験の成果を述べた。

JCEM-Sの試験では、円筒電極直接通電型溶融炉の概念を初めて具体化し溶融ガラスの製造運転試験を行い、JCEMが高レベル放射性廃液処理用溶融炉として必要な基本的機能を有しているだけでなく、溶融効率でもTVFモックアップ溶融炉の約1.5倍の優れた性能を有していることが確認された。また、廃液中の白金族元素に対し長期的な運転の安定性を確認する試験を実施し、白金族元素が炉内に堆積及び落積することなく、白金族元素の抜き出し率はほぼ100%となり、JCEMが白金族元素に対して安定な運転が可能なものであることを確認した。

JCEM-Eの試験では、低模擬度廃液を用いて10バッチの連続供給運転を実施し、処理能力を把握することができた。現在、白金族元素を含む高模擬度廃液を用いて連続供給運転を実施し、処理能力と白金族元素抜き出し性の評価を行っている。今後はTVFなどの実プラントに向けた検討を行っていく予定である。

以上により、高レベル廃棄物固化技術高度化が目的としている小型、長寿命及び寿命に達した後の二次廃棄物発生量を低減できるガラス溶融炉の見通しが得られた。

参考文献

- 1) Sombret, C.G. : "Melters and Furnace Equipment Used for Radioactive Waste Conditioning", *Proc. of the 1987 Int. Waste Management Conf.* Hong Kong, Nov.29-Dec.5, 1987, p259-263, (1987).
- 2) 山田俊一, 他 : "マイクロ波溶融装置", 日本無線技報, 第16号, p69-77, (1981).
- 3) Ohuchi, M., Miyata, K. et al. : "Melting of Plutonium-Contaminated Residues by Powering Microwave", *Proc. of the 4th Int. Symp. on Ceramics in Nuclear Waste Management*, Indiana-polis Indiana, Apr. 24-26, 1989, p113-121, (1989).
- 4) Komatsu, F., Takusagawa, A. et al. : "Application of Microwave Treatment Technology for Radioactive Wastes", *Waste Management*, Vol.10, p211-215, (1990).
- 5) Hardwick, W.H., Gayer, R. et al. : "The Vitrification of High Level Wastes Using Microwave Power", *Int. Seminar on Chemistry and Process Engineering for High-Level Liquid Waste Solidification*, Julich F.R.Germany, June 1-5, 1981, Vol. 1, p52-67, (1981).
- 6) Chapman, C.C., McElroy, J.L. : "Slurry-fed Ceramic Meller-A Broadly Accepted System to Vitrify High-Level Waste", *Proc. of the 1989 Joint Int. Waste Management Conf.* Kyoto Japan, Oct.22-28, 1989, p119-126, (1989).
- 7) H. Wiese, E. Ewest, : "Industrial Vitrification of High-Level Liquid Wastes with the PAMELA plant in Belgium", *Proc. of Nuc. and Hazardous Waste Management Int. Topical Meeting*, Pasco USA, Sep.11-15, 1988, p75-77, (1988).
- 8) N. Sasaki, M. Karino, et al. : "Solidification of the High-Level Liquid Waste from the Tokai Reprocessing Plant", *Proc. of Fuel Reprocessing and Waste Management*, Aug.26-29, 1984, Jackson USA, Vol.1, p147-160, (1984).
- 9) H. Wiese and E. Ewest, : "Industrial Vitrification of High-Level Liquid Wastes in the PAMELA plant", *Proc. of the Sympo. on Waste Management at Tucson USA*, Feb.28-Mar.3, 1988, Vol.2, p173-179, (1988).