

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04992

研究課題名(和文) 中性子イメージングによる溶融ガラス内白金族粒子挙動の可視化計測

研究課題名(英文) Visualization of platinum group particle behavior in molten glass using neutron imaging

研究代表者

伊藤 大介 (Ito, Daisuke)

京都大学・複合原子力科学研究所・助教

研究者番号：30630024

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：溶融ガラス内における金属粒子挙動を計測するため、中性子イメージングを用いた可視化手法を構築した。高速度カメラと中性子イメージンテンシファイアを組み合わせたシステムを用いて、ガラス溶融時の中性子透過画像を取得し、溶融過程を可視化した。また、溶融状態のガラスに対して金属球を落下させ、球沈降過程の動的観察を行った。得られた画像から沈降速度を算出し、溶融ガラス中の沈降速度の温度依存特性を調べるとともに、過去の知見との比較によって本手法の有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、高レベル放射性廃棄物のガラス固化プロセスの高効率化のために必要な計測手法の開発を行った。本手法を利用することで、溶融ガラスのような1000度を超える超高温流体の可視化計測が可能になり、溶融ガラス内における金属粒子挙動の解明に向けた重要な実験データを提供することができる。また、溶融ガラスのみでなく、溶融金属や溶融塩といった特殊な高温流動場への適用性を有する。

研究成果の概要(英文)：Dynamic neutron imaging technique was developed to measure metallic particle behavior in molten glass. An imaging system with a high-speed camera and neutron image intensifier was applied to obtain neutron transmission images and the transient melting process of the glass was shown. A metallic sphere was dropped into the molten metal and the falling behavior of the sphere was observed. The particle velocity was estimated from the neutron transmission images. The temperature dependence of the falling velocity in the molten glass was investigated, and the effectiveness of the present method was represented by comparing it with the previous results.

研究分野：原子炉熱流動、混相流計測、放射線イメージング

キーワード：中性子イメージング 溶融ガラス 固液二相流 沈降速度 ストークス則 動的観察

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高レベル放射性廃棄物 (HLW) の処分に関しては、未だ明らかな道筋が示されておらず、早期の決定が不可欠である。さらに、現状も発電炉からの使用済み燃料の蓄積は続いており、早急な判断が迫られている。そのような HLW の処理として、HLW を溶融ガラスに混合した後、ガラス固化し、地層処分する方法がある。その際に用いられるガラス溶融炉の概略図を図 1 に示す。溶融炉上部から高レベル廃液とガラスを供給し、溶融・混合させた後、キャニスターへ注入し、固化させる。溶融炉内で溶融したガラスは、高レベル廃液に含まれる様々な金属や放射性核種の混入のため、複雑な混相流挙動を示す。特にルテニウム、ロジウム、パラジウムといった白金族元素は溶融ガラスに融解せず、炉内では固体粒子として存在する。さらにそれらは溶融ガラスに比べて電気伝導率が非常に大きく、溶融炉内の電場により偏析や堆積が生じ、結果的に炉内の通電加熱特性に大きな影響を与え、さらには溶融ガラスの高粘性化が起こる。その結果、溶融ガラスの加熱不良が生じ、溶融炉出口の閉塞のためガラス固化プロセス運転が正常にできなくなる可能性がある。そのため、溶融金属内における流動や固体粒子の挙動に関して知見の蓄積が必要となる。しかしながら、溶融ガラス内は 1000°C を超える高温場であり、炉内の流動を直接観察することは一般的な手法では非常に困難である。また、数値解析によって実機相当の現象の把握が可能であるが、溶融ガラスに関する基礎的な実験データが不足しているため、現時点では解析手法の検証が十分とは言えない。そのため、実験的な手法の構築が必要である。

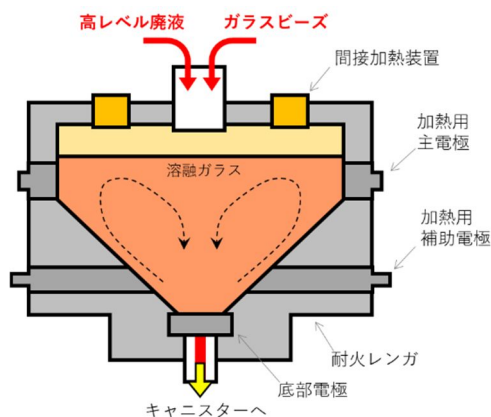


図 1 ガラス固化処理装置

2. 研究の目的

本研究では、中性子イメージングによって高温溶融ガラス内における金属元素等の固相挙動を可視化・計測し、ガラス溶融・固化装置内部における白金族元素の沈降・堆積特性に関する基礎的なデータの取得を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 実験装置 ガラス溶融実験に使用した実験装置の概略図を図 2 に示す。ガラスの加熱には SiC ヒーターを搭載した電気加熱炉 (200V30A) を使用した。炉内最高加熱温度は 1500 である。ガラス溶融のための容器として、ジルコニア製のつぼ (49 × 37 × 120H) を炉内に設置し、溶融実験を行った。加熱炉はプログラムコントローラによって温度制御された。また、炉上部に金属球を落下させる機構を設置し、遠隔で球の落下を制御した。金属球には、融点の高いタングステンカーバイト (WC) 球を用いた。球の直径は 10mm である。

(2) 中性子イメージング 中性子イメージング実験は、京都大学複合原子力科学研究所 B-4 スーパーミラー中性子導管実験室 (中性子束: 7.5×10^7 n/cm² s) において行った。本研究においては溶融ガラス内における金属粒子挙動の動的観察のため、中性子イメージング intensified (中性子 I.I.) と高速度カメラを組み合わせた撮像システムを用いた。試験部を透過した中性子は、中性子 I.I. によって可視光に変換され、高速度カメラで撮影される。溶融ガラスは非常に高い粘性を有するため、金属球の沈降速度は低い。そのため、本実験では撮像速度を 10fps とした。

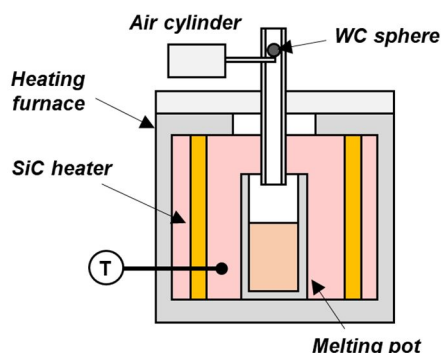


図 2 実験装置概略図

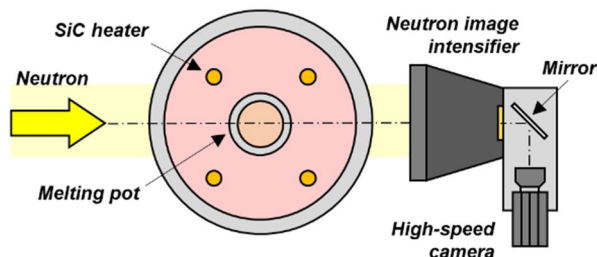


図 3 中性子イメージングシステム

4. 研究成果

(1) 中性子イメージングのためのガラス選定 ガラス固化処理では、HLW を溶融ガラスに混合させたのち、固化させる。その際、ガラスの原料としては、ホウケイ酸ガラスが候補として挙げられている。しかしながら、ホウ素は中性子吸収材としても用いられるため、ホウ素を含むホウケイ酸ガラスは高い中性子減衰特性を有し、中性子イメージングによる可視化が困難である。図4にソーダ石灰ガラスとホウケイ酸ガラスの中性子透過画像を示す。それぞれの材質のガラスビーズをアルミ円筒容器に入れ、中性子透過画像を取得した。ホウケイ酸ガラスでは中性子の減衰が大きいのに対して、ソーダ石灰ガラスでは、十分な中性子透過特性を示していることが分かる。本研究ではソーダ石灰ガラスを対象に可視化計測を行うこととした。ソーダ石灰ガラスの軟化点は約730、融点はおよそ1000程度である。

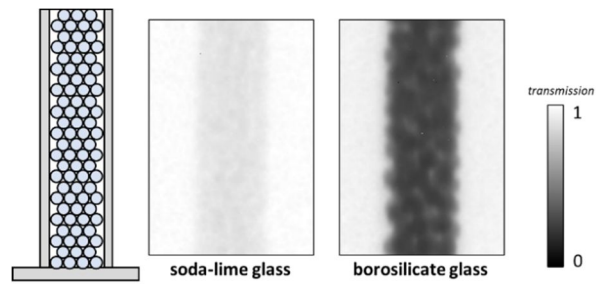


図4 ガラスビーズの中性子透過画像（室温条件）

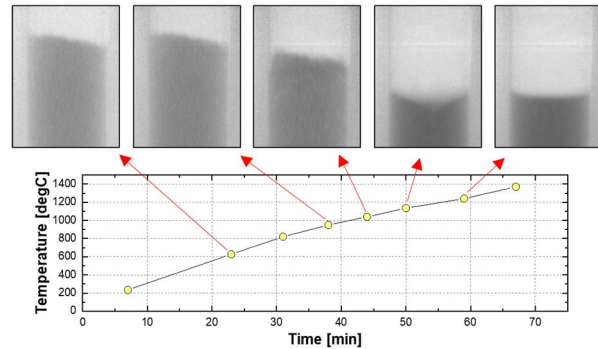


図5 ガラス溶融過程の可視化

(2) ガラス溶融過程の可視化 図5にガラス溶融過程の可視化結果を示す。ジルコニアるつばにソーダ石灰ガラスビーズを入れ、炉内温度を徐々に上昇させた。炉内の温度を一定にするため、温度を上昇させたのち、10~20分程度待ってから撮影を開始した。温度が低い条件では、ビーズの状態が存在しているが、1000に近づくとガラスの軟化が始まり、見かけ体積が減少している。さらに温度を上げることで、ガラスは溶融状態となり、るつば内において液面が形成されていることが中性子透過画像から確認できる。

(3) 金属球沈降過程の可視化 溶融ガラス中におけるWC球の沈降過程の可視化結果を図6に示す。結果は1分毎の中性子透過画像である。溶融ガラス液面に落下したWC球が、ガラス中をゆっくりと沈降していく様子が観察された。本結果より、ガラス中の沈降速度が非常に小さいことが分かる。

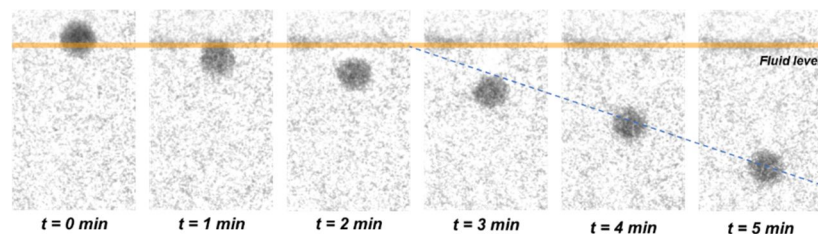


図6 溶融ガラス中におけるWC球沈降過程の可視化

(4) 溶融ガラス中における沈降速度の評価 球沈降過程の可視化結果から算出した沈降速度を図7に示す。温度の上昇にともなって、ガラス粘性が低下し、速度が増加した。また、過去の文献で示されているソーダ石灰ガラスの粘性係数からストークスの式を用いて求めた粒子沈降速度を図7の実線で示す。本手法によって得られた結果がよく一致していることが分かる。以上より、中性子イメージングによる溶融ガラス内金属粒子挙動の可視化計測の有効性を示した。

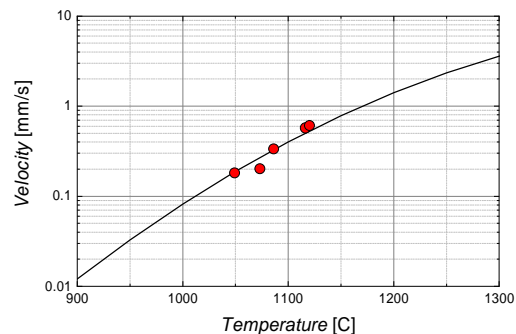


図7 沈降速度の比較

<参考文献>

L. Shartsis and S. Spinner, Viscosity and density of molten optical glasses, *J. Res. Natl. Inst. Stand.*, **46-3** (1951) pp. 176-194.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Daisuke Ito, Yasushi Saito	4. 巻 15
2. 論文標題 Evaluation of Motion Blur in High-Speed Neutron Imaging at Kyoto University Research Reactor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Research Proceedings	6. 最初と最後の頁 262-267
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Daisuke Ito, Yasushi Saito, Naoya Odaira, Kei Ito
2. 発表標題 Measurement of particle behavior in molten glass using dynamic neutron imaging technique
3. 学会等名 The 19th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics（国際学会）
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 伊藤 大介, 伊藤 啓, 齊藤 泰司
2. 発表標題 混相流可視化のための中性子イメージングの高度化
3. 学会等名 混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究分担者	齊藤 泰司 (Saito Yasushi) (40283684)	京都大学・複合原子力科学研究所・教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------