

ガス浮遊法により迫る炉心溶融物の物性

環境エネルギー工学専攻 エネルギー量子工学コース

教授 大石 佑治

1. はじめに

2025年1月より、大阪大学大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻 システム量子工学領域の教授を拝命しました、大石佑治と申します。これまで准教授として本学にて研究と教育に従事してまいりましたが、このたび新たな立場となり、研究のさらなる展開とともに、学生及び若手研究者の育成にも一層尽力していく所存です。

私の出身は東京大学工学部で、2005年に卒業後、東京大学大学院新領域創成科学研究科にて修士課程を修了（2007年）、その後博士課程を2009年に退学し、2011年に博士（科学）の学位を同大学院より取得しました。博士課程では「四重極および多重極イオントラップを用いた水素化ボロンクラスターの創製」に関する研究に取り組みました。ユニークなイオントラップ装置を駆使して新たなクラスターを生成し、その安定性や反応経路を第一原理計算により理論的に解析するという、実験と計算を融合させた研究でした。ユニークな装置を活用し、未知の物質のふるまいを明らかにするという当時の研究スタイルは、自作した装置によって高温融体の物性を明らかにすることを目指し、測定手法そのものを開発していくという現在の研究スタイルと、根底ではつながっているように思います。

2009年10月より、大阪大学大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻に助教として着任し、当初は核燃料や熱電材料といったエネルギー材料に関する研究に従事していました。2015年頃からは、山中伸介教授のご指導のもと、浮遊法を用いた炉心溶融物の物性評価に本格的に取り組むようになり、今日の高温融体に対する非接触物性測定技術の開発へと研究の軸足を移してきました。

2. ガス浮遊法で挑む高温物性評価

私の研究室では現在、極めて高温の液体、特に原子炉事故時に生成される炉心溶融物を対象に、粘性・表面張力・密度・比熱といった熱物性を非接触で高精度に測定する技術の開発に取り組んでいます。中核となるのが、自ら設計・構築してきたガス浮遊法（Aerodynamic levitation, ADL）システムです（図1）。

高融点物質の物性を測定する際、従来の手法では容器との反応が避けられず、精密な評価が困難でした。これに対し、ガス浮遊法はガス流で試料を浮かせ、レーザー加熱で熔融することで、非接触かつ清浄な状態での測定が可能となります。

私が作製した装置では、ガス流の安定化を図るためにノズル構造に工夫を凝らしており、3000 Kを超えるような極限条件下でも試料を安定して浮遊・熔融させることが可能です。

このノズル構造は2024年に特許出願（特願2024-054199）しており、実験技術としても高い独自性を有しています。これまでに ZrO_2 や $ZrO_2-Al_2O_3$ などの酸化物融体に対して粘性や比熱を測定しており、今後は金属材料にも適用範囲を広げ、物性測定を加速していく予定です。現在は、複数の物性（粘性・表面張力・密度）をごく短時間で同時に測定できる新しい手法の確立に取り組んでおり、測定的高速化と精度向

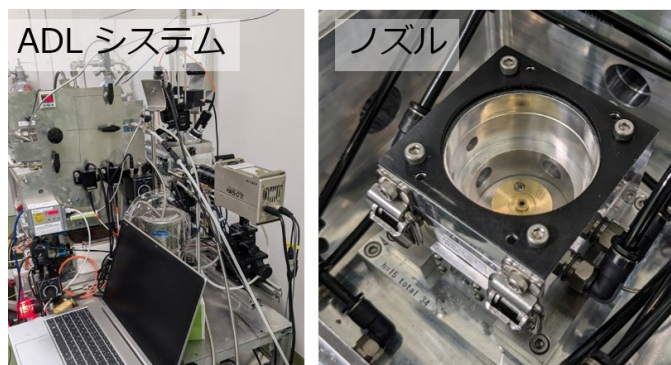


図1 自作したADLシステムの写真

上を両立させることで、広範な材料評価に対応できるシステムを目指しています。これは、従来法では蒸発の影響が避けられなかったような高融点・高揮発性の物質にも適用可能な手法であり、測定技術としての汎用性の高さも大きな特徴です。

さらに、得られた物性データを蓄積・体系化することで、液体物性に関する高温領域のデータベースを構築し、将来的にはこれを液体構造情報とAIで結びつけることにより、未知物質の物性推定や材料設計への応用にもつなげていきたいと考えています。また、 ZrO_2 のような高融点酸化物に対して世界で初めて粘性の実験値を取得し (Heliyon, 2019)、また、比熱測定の新技術も提案しています (J. Chem. Thermodynamics, 2022)。こうした基盤研究は、材料科学の進展のみならず、原子力・製造・先端セラミックス産業においても有用な成果となることが期待されます。

3. UO_2 の浮遊溶融と今後の展望

炉心溶融物を構成する物質の中でも特に取り扱いが難しいのが、二酸化ウラン (UO_2) のような極めて高融点で雰囲気敏感な酸化物です。自作した ADL システムにより、この UO_2 の浮遊・溶融に成功し、溶融状態における形状を安定して観察できる技術を確認しつつあります (図 2)。 UO_2 の浮遊溶融自体は他グループによっても実現されていますが、浮遊状態での物性測定を実際に行った例は未だありません。その背景には、従来の測定法では測定に時間を要し、その間に UO_2 の蒸発が進んでしまうという大きな技術的制約があります。そこで現在開発を進めている、**ごく短時間で粘性・表面張力・密度を同時に測定できる新手法**を UO_2 に適用することで、この課題を克服できるのではないかと考えています。この手法を用いれば、蒸発の影響を抑えながら浮遊溶融状態にある UO_2 の物性を高精度に評価できる可能性があり、これまで未踏であった領域へのブレイクスルーが期待されます。

今後は、この技術を発展させて、U-Zr-O 系の模擬炉心溶融物や、U-Zr 系的高速炉用金属燃料への応用を進めていく予定です。これにより、事故時の流動・凝固挙動の解明に資するだけでなく、次世代原子炉設計や高温材料工学における基盤データの提供にも貢献できると考えています。

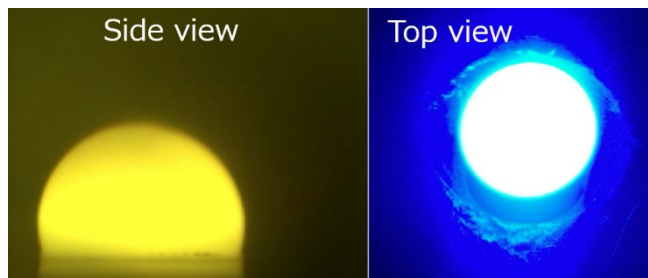


図 2 浮遊溶融する UO_2 の様子

4. おわりに

福島第一原子力発電所の廃炉においては、事故時に生成された炉心溶融物がどのように流動・凝固したかを理解することが極めて重要です。私の研究は、その挙動を高度に再現するための物性データを提供することで、廃炉作業の効率化と安全性向上に寄与できると信じています。また、粘性や表面張力といった物性は、合金製造やセラミックス製造など多くの産業プロセスにおいても必要不可欠な情報であり、高精度かつ迅速な物性評価技術の社会実装は、製造業の高度化にもつながります。

教育面では、現象の背後にある物理を深く理解させることを通じて、「考える力」を育むことを重視しています。測定や観察の中で得られる「気づき」は、考察を深め、新たな理解へとつながる重要な出発点になります。物質の挙動がどのような物性や現象を反映しているのかを常に注意深く観察し考察する中で、観測されたある挙動が物性推定に利用できることに気づき、新たな評価手法の着想につながることもあります。こうした気づきを起点に、考えを深めていける人材を育てていきたいと考えています。

(東京大学工学部マテリアル工学科卒 2005 年卒、
同大学大学院新領域創成科学研究科修士課程 2007 年修了
博士課程 2009 年退学、博士 (科学) 2011 年取得)