

非平衡組成セラミックの金属特性発現

Appearance of metallic properties in ceramic materials with non-equilibrium compositions

田中 照也

Teruya Tanaka

核融合研

NIFS

1. はじめに

核融合炉の開発研究では、機器やセンサーにおける電気絶縁、また、計測系における光情報伝達のために様々なセラミック機能材料の使用が考えられている。これら材料中の電子のエネルギー準位にバンドギャップが存在することで発現するセラミックの電氣的・光学的特性に対する放射線照射効果を、2023年4月から活動を開始する見通しの核融合科学研究所の超高流束協奏材料ユニットにおける研究テーマの一つとして取り組む。

2. 液体ブランケット用絶縁材料の照射効果研究

ユニット活動の開始に際して、核融合炉内でも最も厳しい中性子照射環境にさらされる液体ブランケット用セラミック電気絶縁候補材料に対する照射効果研究に重点を置いた取り組みを展開する。過去にITER計測系の開発を目的として実施されていた Al_2O_3 電気絶縁材に対する最大はじき出し損傷量3dpa (displacement per atom)の照射効果研究[1]と比較して、液体ブランケットのMHD圧力損失低減用セラミック電気絶縁候補材料である Er_2O_3 、 Y_2O_3 、 ZrO_2 、 MgO 、 Al_2O_3 、 SiC 等に対しては最大100dpaと各段に高い照射損傷量が想定されており、イオンビームを用いた数十dpaレベルの照射実験の積み重ねによる絶縁特性変化の研究が必要となる。

3. 非平衡組成変化と金属特性発現

上述の酸化物セラミック材料は厚み1~10 μm 程度の絶縁被覆としての開発研究が進められている。このセラミック被覆を低放射化フェライト鋼等の冷却流路金属壁の表面に成膜して核融合炉で使用した際には、Liを含む冷却材からLi原子が、また、金属壁側からはFeやCr等の原子が、高速中性子との核反応に伴う反跳現象により、深さ数 μm ~10 μm まで入射し続ける(図1)[2]。これにより、ブランケットの寿命

目標である5年程度の間、不純物濃度を超える金属原子が入射し、組成が変化していくことになる。また、厚みがmmオーダーの板材としての使用が想定されているSiC絶縁材についても、核変換に伴う材料中へのMg等の金属原子生成が特性を変化させる可能性が議論されている[3]。これら反跳や核変換といった中性子環境下特有の非平衡過程によって金属元素が過剰な組成に変化していく際の電気絶縁性能の低下、すなわち金属特性の発現に至るメカニズム及び核融合炉における使用限界を、金属原子を分散させたセラミック試料に対するイオンビーム照射実験により調べる(図2)。この実験の中では非平衡過程で入射した金属原子が核融合炉の①高温(500 $^{\circ}\text{C}$ –1000 $^{\circ}\text{C}$)、②電界(1-10kV/mm)、③磁場(5-10T)、④高エネルギー荷電粒子による原子のはじき出し効果(~20dpa/年)、といった過酷な環境要因が重畳する中で、どのような挙動を示して準安定状態に自己組織化するのか、また、絶縁特性変化との関係について明らかにしていく必要がある。

4. 学術研究としての展開、新規材料の探索

液体ブランケット用電気絶縁材料を対象とした照射効果研究であるが、同時に電子線誘起発光スペクトル測定等、光学特性の評価を実施する。発光スペクトルの変化は結晶性低下や欠陥生成等の結晶状態変化を定量的に捉える手段になりうる。また、光学特性は電気絶縁特性と比較して結晶の電子状態をより直接的に反映するため、材料中の結晶構造や微細組織の変化と電気絶縁特性変化の関係を明らかにする際の根拠となるとともに、純粋な固体物理の現象として他分野の材料研究者と学術的な議論を始める際の糸口になることが期待される。

さらに、電子のエネルギー準位・状態が特性を支配する機能材料では、理論計算による照射効果のメカニズム研究においても、構造材料研究と同様の分子動力学法等による欠陥生成や

微細構造変化のシミュレーションに加えて、電子準位・状態計算を組み合わせることで、材料物性の理論計算研究者との学術的な議論が可能になると期待でき、共同研究の広がりが望める。

以上のように各種非平衡組成セラミック材料に対する照射実験において準安定状態の結晶構造や微細組織を明らかにし、さらにシミュレーション・理論計算に基づいた電気・光学特性変化のメカニズム解明へつなげる研究の道筋が確立できれば、核融合炉材料に含有されない金属原子を分散させた際の挙動や特性変化も予測して議論できるようになる。これにより過酷条件が重畳した核融合炉模擬環境を利用して、導電性を制御したセラミック材料や特徴的な光学特性を持つセラミック材料等の新規材料の探索を進めることが可能となる。

本研究は科研費基盤研究(B) 22H01209により立ち上げている。

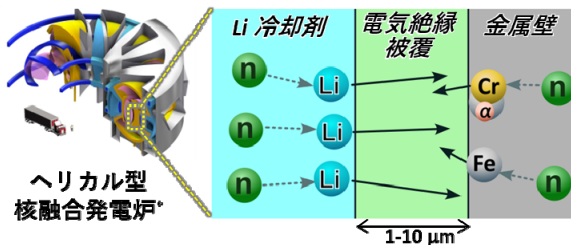


図1. 液体ブランケットのMHD圧力損失低減用セラミック絶縁被覆に周囲から入射する反跳金属原子 [2]

* A. Sagara et al., Fusion Engineering and Design 89 (2014) 2114.

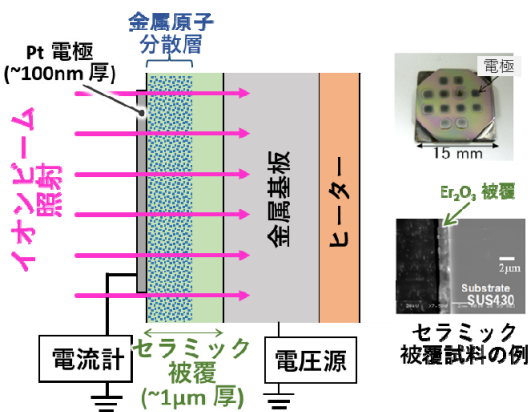


図2. 金属原子分散セラミック被覆試料へのイオンビーム照射実験の概略図

参考文献

- [1] L.L. Snead et al., Journal of Nuclear Materials 226 (1995) 58-66.
- [2] T. Tanaka et al., Journal of Nuclear Materials 569 (2022) 153917.
- [3] T. Koyanagi et al., Journal of Nuclear Materials 511 (2018) 544-555.