

報告番号	甲 第 14511 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **Sn および Sn-Bi-Li-Er 合金の水素プラズマ相互作用に関する研究**
(Study on hydrogen plasma interaction of Sn and Sn-Bi-Li-Er alloy)

氏 名 田村 晃汰

論 文 内 容 の 要 旨

本論文では、液体金属を用いた核融合炉におけるプラズマ対向機器の候補材料である、Sn および Sn-Bi-Li-Er 合金(SBLE)への非熱平衡水素プラズマ照射を自作の小型プラズマ装置によって実施し、昇温脱離法，原子吸光分光法，高速度カメラによる挙動観察等を用いて、水素プラズマ照射を受けた Sn，SBLE と非熱平衡水素プラズマとの相互作用について評価し、得られた測定結果から、核融合炉機器への応用性の検討，および核融合炉環境下での挙動についての考察を行った。そして、Sn が他の核融合炉プラズマ対向機器と比較して非常に低い水素吸蔵性，低スパッタリング収率を示すことを示し、Sn が液体金属ダイバータの候補として非常に有用であることを示した。SBLE については、これまで測定例のなかった SBLE の水素プラズマ照射実験を行い、その結果、液化 SBLE がプラズマ照射下において激しく発泡することを見出し、この現象に Li が大きく寄与をしていることを明らかにし、発泡機構について考察した。以下に、本論文の内容について記述する。

第 1 章では、まず近年の世界的なエネルギー需要や環境対策への動向から、化石燃料を用いた発電手段の代替として核融合炉を用いた核融合発電が有望であることについて述べた。続いて、商用発電用核融合炉の実現において最も重要な機器であるダイバータ，ブランケットについて触れ、それらへの工学的要求，現状の課題について述べた。そしてそれらを解決することが期待される，Sn 系液体金属を用いた液体金属ダイバータ，カートリッジ式液体金属ブランケットのコンセプトについて解説した。そして、液体金属ダイバータの候補材料として Sn を，カートリッジ式液体金属ブランケットで用いられるブランケット流体の候補材料として Sn-Bi-Li-Er 合金(SBLE)を挙げ、それらと水素同位体プラズマ相

相互作用に関する先行研究および課題について述べた。そして、非熱平衡水素プラズマ照射を行った際の Sn および SBLE の挙動を、実験室レベルのプラズマ装置を用いて調査することを目的とすることを述べ、各章の構成について記述した。

第 2 章では、第 3 章から第 5 章にて用いた真空装置、測定機器および測定手法について解説した。本研究にて使用したプラズマ装置は、全 3 種類である。これらは使用する測定機器や実験方法に応じて、独自のアイデアに基づいて設計、自作した真空装置である。まず、第 3 章で述べる H₂プラズマ照射 Sn の昇温脱離実験で用いたプラズマ装置は、円筒形のプラズマ生成用真空チャンバーと、昇温脱離測定用チャンバー、サンプル交換チャンバーの計 3 つの部位から構成され、サンプル導入からプラズマ照射、昇温脱離測定までを真空環境下で完結させることが可能である旨を述べた。加えて、装置のプラズマ生成方式である DC グロー放電について、並びに第 3 章で使用した測定手法である昇温脱離法(TDS)、プラズマ照射 Sn 中の水素深さ方向分布測定に用いたグロー放電発光分光法(GD-OES)、四重極質量分析計(QMA)について解説した。続いて、第 4 章で使用したプラズマ装置について記述した。ここでは、プラズマ生成方式が内部アンテナ型誘導結合型プラズマへ変更され、TDS 装置よりも高密度なプラズマの生成が可能な点をラングミュアプローブ法による、電子密度、電子温度、プラズマ電位の測定結果と併せて示した。また、試料への DC 負バイアス印加が可能である点を述べた他、第 4 章で Sn スパッタリング収率測定に用いた、原子吸光分光法について解説した。最後に、第 5 章で述べる SBLE への水素プラズマ照射実験装置等について述べた。ここでは、SBLE 装置の基本構成と高速度カメラによるプラズマ照射時の SBLE の挙動観察を行うことを述べ、さらに QMA と高速度カメラによる同時測定を可能にした別セットアップについても解説した。さらに、後述する発泡現象に寄与する元素を特定するために行った X 線光電分光法(XPS)の原理について述べた。

第 3 章では、固体 Sn、および液体 Sn へ DC グロー放電によって生成した H₂プラズマの照射を行った際の、Sn の水素吸蔵量測定について述べた。水素吸蔵量測定には昇温脱離法(TDS)を採用し、TDS 測定の際に必要な、装置 TDS 部の実効排気速度、QMA の感度係数および、実験装置で生成されるプラズマのイオン組成などを求めた。その結果、実効排気速度、QMA 感度係数が算出され、加えて本装置で生成されるプラズマのイオン種は H₃⁺が支配的であることが示された。そして TDS 測定においては、まず H₂プラズマ照射を固体 Sn 試料に対して行い、水素吸蔵量を測定した。プラズマ照射時間を変化させることで水素イオンフルエンスを変化させつつ固体 Sn の水素吸蔵量を測定したところ、水素吸蔵量の線形的な増加が見られた。この結果から Sn の水素吸蔵比を求めたところ、10⁻³という値が得られた。これを固体ダイバータ材料である W、炭素繊維強化プラスチック(CFC)などと比較したところ、同様のプラズマ照射条件における W、CFC よりも固体 Sn は低水素吸蔵性を示すことが示された。続いて、液体 Sn へ H₂プラズマ照射を行い、同様に TDS 測定を行ったところ、吸蔵水素の存在を示す信号は検出されず、定量的な水素吸蔵比は算出できなかったものの、液体 Sn が固体 Sn よりさらに低い水素残留性を持つことを示唆する結

果が得られた。

第4章においては、 H_2 プラズマ照射時のSnのスputタリング挙動の測定について述べた。スputタリングの測定には原子吸光分光法(AAS)を用いることとした。今回用いるプラズマ装置では、AASによって観測されるSn原子の光吸収による測定光透過率の変化は0.03程度と小さいことが予測されたため、透過率変化を精度よく測定できるよう、光強度の積算、繰り返し測定を行える測定系を構築した。AAS測定においては、Sn試料への印加バイアス電圧を変化させた際の透過率変化から、スputタされるSn原子密度を算出した。そして、Sn原子密度のICP電力依存性を測定したところ、ICP電力の増加に対応した線形増加が確認された。そこで、試料からのスputタリングで放出されるSn原子のフラックスを計算し、イオン粒子フラックスと比較することでスputタ収率を算出したところ、 ~ 0.01 atoms/ion という値が得られた。加えて、試料温度の増加により、スputタ収率が增大するという傾向も観測された。このスputタ収率を、先行研究によって示された水素イオンビーム照射によるSnスputタ収率から算出した推定値と比較したところ、およそ20%程度スputタ収率が増加していることが示唆された。加えて、液体金属ダイバータの候補材料である液体Li、液体Sn-Liの水素イオンビームによるスputタ収率との比較から、Snがこれらと比較してスputタリングされにくい材料であることが示された。

第5章においては、SBLEへの H_2 プラズマ照射実験と、その際に見られる発泡現象について述べた。SBLEを真空中で液化させ、 H_2 ガス環境下での攪拌を行った後に H_2 プラズマ照射を行ったところ、SBLEの発泡現象が観測された。さらに、直流負バイアス印加によってLi原子に由来したオレンジ色の発光が見られることも発見され、また、高速度赤外線カメラによる測定の結果、泡の破裂によって液滴放出が発生することが示された。その後装置セットアップを変更し、QMAによる発泡現象の定量的な測定を試みた。まず、QMAにより発泡中の H_2 分圧変化を測定したところ、泡内部に H_2 ガスが蓄積されていることが明らかとなった。続いて、SBLEへのイオン粒子フラックスを変化させつつ高速度カメラとQMAによる同時測定を行ったところ、イオン粒子フラックスの増加によって泡破裂あたりの H_2 放出量および時間平均的な H_2 放出量が増加することが示された。加えて、時間平均的な H_2 放出量のイオン粒子フラックス依存性を調査したところ、高イオン粒子フラックス下において泡の寿命が短くなることに起因した、 H_2 放出量の非線形増加が見られることが示された。さらに、泡殻の組成を調査するために、前述の液滴放出によって飛散する液滴を収集し、X線光電子分光法による組成分析を行った。その結果、バルクの組成比と異なり、泡殻がほぼLiで構成されていることを示唆するデータが得られた。そして、上記の測定から得られた結果より、SBLEにおける泡発生機構の考察、Li組成が発泡現象に及ぼす影響などについて議論した。さらに、核融合炉での使用を想定した場合、発泡現象への対策が不可欠であることについても言及した。

第6章では、本論文の内容を総括するとともに、今後の展望について述べた。今後の展望として、Snについては、水素の同位体である重水素、三重水素プラズマを照射した際に

水素吸蔵量，スパッタリング収率が変化する可能性に言及しつつ，これらとの比較実験が必要である旨を述べた。SBLE については，核融合炉対向機器へと応用する上では，今回発見された発泡現象について，Li 組成比依存性や， H_2 ガス下での攪拌の有無による比較実験など，より詳細な調査を行うことが重要であることを述べた。