

## 審査の結果の要旨

氏名 澤田明彦

次世代のエネルギー源として注目されている D-T 核融合炉においてトリチウム増殖材と冷却材を兼ね備える自己冷却型液体ブランケットはさまざまなメリットがあるが、プラズマ閉じ込め磁場中で液体金属を高速で流動させた場合、配管と液体金属の間で電流が生じ、その電流と磁場とのローレンツ力により流動方向と逆向きに力が発生する MHD 圧力損失が存在する。絶縁性のセラミックスコーティングはこの圧力損失低減の手法として非常に有効であるが、還元力の極めて高い液体リチウム中での使用という化学的に非常に過酷な条件がコーティング開発の重要な課題となっている。本論文は、MHD 圧力損失低減のためのセラミックスコーティングの化学的な観点からの開発を目的とし、高温での耐リチウム腐食材料の選定と、これらを用いたコーティングの基礎研究を行い、候補材としての適性を評価したものであり、7章から構成される。

第1章は序論であり、核融合炉とコーティング開発の現状について現在までの研究状況がレビューするとともに、本論文の目的と構成についてのまとめであり、本論文の新規性と開発上・学術上の重要性について述べている。

第2章では、液体リチウムとセラミックス材料の候補材との共存性の観点から、候補材の選定を行っている。熱力学的データから選定した、酸化カルシウム、酸化イットリウム、酸化エルビウムおよび窒化アルミニウムのセラミックスの焼結体試料を用いて 800 1000 時間までの液体リチウム浸漬試験を行っている。その結果、酸化カルシウムについては 600 以上で大きく試料が損傷する事が示された。窒化アルミニウムでは試料中の酸素濃度の差により質量損失に差が生じ、これについて試料中の酸素がリチウムに溶出するためであると考察している。酸化イットリウムおよび酸化エルビウムについては十分な安定性がある事が示されている。これらの結果から、本章では、コーティング候補材として窒化アルミニウム、酸化イットリウム、酸化エルビウムを選定しており、次章でのコーティングの試作へ展開させている。

第3章では、第2章により選定した3種類のセラミックスを用いてコーティングの試作と特性試験を行っている。製膜速度が速く目的の材料をターゲットとして用いるため組成ずれ等が起こりにくいと考えられる RF スパッタリング法を用いてコーティングの試作を行った。作製したコーティングは XRD 測定の結果、結晶性のものが得られていることが示された。作製したコーティングの液体リチウム浸漬試験の結果、コーティングの破損が見られ、特に窒化アルミニウムコーティングでは破損の度合いが大きかった。コーティングは窒化アルミニウムの酸素の固溶限度を大きく超える酸素を含んでおり、結晶粒界に析出した酸化アルミニウムが液体リチウムに溶解したことでコーティング全体に大きくクラックが発生することで剥離が起こりやすくなった可能性が考察されている。一方、酸化イットリウムおよび酸化エルビウムでは剥離の度合いは小さかったが、コーティングにクラックが発生している事が示された。本章で得られた結果より、窒化アルミニウムコーティングは更なる酸素不純物の低減が必要である事、また、酸化イットリウムおよび酸化エルビウムコーティングは、高結晶化することで耐腐食性の向上が得られる可能性がある事が示され、次章でのそれを目指したコーティングの高度化へ展開している。

第4章では、より高結晶で焼結体に近いコーティングを作製するため粒子のエネルギーや作製温度を高めることを目的とし、酸化イットリウムに電子ビーム蒸着法、酸化エルビウムにアークソースプラズマ蒸着法を用いてコーティングの作製を行っている。電子ビーム蒸着法により作製した酸化イットリウムコーティングの XRD 測定を行ったところ、ピークがシャープなものが得られ、RF スパッタリング法で作製したものに比べて結晶性の高いものが得られることが示された。アークソースプラズマ蒸着法により作製した酸化エルビウムコーティングの XRD 測定を行ったところ、基板温度低温（室温付近）で作製したコーティングでは JCPDS と異なるピークが得られ、結晶状態が焼結体とは異なるものが出来ている可能性があることが示された。本章では、これらのコーティングがいずれも RF スパッタリング法で作製したものに比べてピークがシャープで高い結晶性を持っていると結論し、次章でのこれらの試料を用いた耐腐食特性評価につなげている。

第5章では、第4章で作製した酸化イットリウムおよび酸化エルビウムのコーティングを用いて、液体リチウムとの共存性を調べている。電子ビーム蒸着法により作製した酸化イットリウムコーティングを用いて液体リチウム浸漬試験を行ったところ、X線回折において酸化イットリウムのピークが殆ど消失し、 $\text{LiYO}_2$ のピークが大きく現れており、不安定性が示された。酸化エルビウムコーティングの液体リチウム浸漬試験では、700 の浸漬試験結果が500 の浸漬試験結果より破損の度合いが低いという結果が示された。XPS測定により高温で作製したコーティングにはコーティングと基板の間にエルビウムとバナジウムの間層の存在が示唆され、700 の浸漬試験後にはそれが消失しており、500 では中間層から腐食し剥離したという考察を行っている。本章では、700 のリチウムに触れさせることでこれらの問題が解消しリチウムとの共存性の高いコーティングを得られる可能性があることが示された。

第6章は総合討論であり、これまでの実験により得られたことを各候補材料についてまとめ、それらの候補材料としての工学的な評価についてまとめている。

第7章は結論であり、核融合炉液体リチウムブランケットにおける MHD 圧力損失低減のためのコーティング材料を選定し、実際にコーティングの試作を行うことで700 1000 時間までの安定性を示すことができ、酸化エルビウムが魅力的な候補材となりうる事が結論された。

以上のように、本論文では、D-T 核融合炉におけるリチウムブランケット概念において重要な開発課題である MHD 圧力損失低減のためのセラミックスコーティングの化学的な観点からの開発のために、高温での耐リチウム腐食材料の選定と、これらを用いたコーティングの基礎研究を行い、候補材としての適性を評価したものである。これらは、先進核融合炉ブランケットに関する重要な要素研究でありその開発に寄与するところが少なくないだけでなく、システム量子工学、特に、薄膜工学や高温腐食科学といった学問分野における重要な学術的知見を与えている。よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。