

## 審査の結果の要旨

氏 名 名 倉 勝

核融合炉ブランケットは核融合炉の中で重要な機器であり、数多くのブランケットシステムが提案されているが、その中でも液体 Li ブランケットシステムは Li 自体の高いトリチウム(T)増殖率と軽さから、有望なブランケットシステムと考えられている。このブランケットシステムでは Li の流れと外部磁場との間の相互作用により、MHD(Magneto Hydrodynamic)圧力損失を生じる。この MHD 圧力損失は Li の流れる配管内面に絶縁コーティングを施し、Li と配管を絶縁することによって軽減できるが、この絶縁コーティングは MHD コーティングと呼ばれ、重要課題として開発が進められている。

これまでにコーティング材料候補の Li 浸漬試験が行われてきたが、その中で酸化エルビウム( $\text{Er}_2\text{O}_3$ )が高い耐食性を示しており、有望な材料とされてきた。しかし、 $\text{Er}_2\text{O}_3$ を高温の Li に長時間浸漬した際にどのような化学反応が起こりうるのかは明らかにされておらず、幅広い化学環境での挙動解明が必要である。そのような背景のもとに、本研究は、主に焼結体を用いて  $\text{Er}_2\text{O}_3$  の Li 中の化学挙動を調べ、さらに防食方法について検討・実証を行ったもので、全体は 9 章から構成されている。第 1 章は序論であり、以上の本研究の背景と本研究の目的について述べている。

第 2 章では、本研究で用いた試験用の材料と実験手法について述べている。第 3 章からが結果と考察について述べたものであり、まず第 3 章では、 $\text{Er}_2\text{O}_3$  と高温 Li との化学反応についての実験結果と考察を述べている。はじめに  $\text{Er}_2\text{O}_3$  が高温 Li とどのように反応するのかを明らかにするため、 $\text{Er}_2\text{O}_3$  焼結体の静止 Li への浸漬試験を行った。試験片を一定時間浸漬した後に Li から取り出し、各種分析機器を用いた分析を行った。腐食後の試験片の X 線回折図形には新たな物質のピークが現れていたが、既存のデータとの比較によりこのスペクトルは  $\text{LiErO}_2$  のものであると推測された。そこで  $\text{LiErO}_2$  を別途合成し、ピークパターンの比較を行ったところ、腐食試験片のピークパターンと良い一致を見せた。このことから、 $\text{LiErO}_2$  が  $\text{Er}_2\text{O}_3$  上に生成していることが確かめられた。

第 4 章では、腐食反応メカニズムの解明を行った結果について述べている。上記の  $\text{LiErO}_2$  が生成する反応をより詳しく調べるために、静止 Li への浸漬試験を様々な条件で行った。Li 中の O 濃度を変化させて浸漬試験を行ったところ、高い O 濃度ほど反応が進むことが確かめられた。また、腐食反応速度は Li 中の O 濃度の一次反応を仮定した式と良い一

致を見せた。これらのことから、 $\text{LiErO}_2$ は  $\text{Er}_2\text{O}_3 + 2\text{Li} + \text{O}(\text{Li}) \rightarrow 2\text{LiErO}_2$  という反応式で生成するとしている。

第5章では、 $\text{LiErO}_2$ の合成と電気抵抗測定の結果について述べている。 $\text{Er}_2\text{O}_3$ はLi中で $\text{LiErO}_2$ を生成することが本研究により明らかになったが、 $\text{LiErO}_2$ の研究例が少ないために、その生成がMHDコーティングにどのような影響を与えるかが明らかではなかった。 $\text{LiErO}_2$ の物性、特に電気抵抗率がMHDコーティングの絶縁性を損なう可能性があるため、 $\text{LiErO}_2$ を新たに合成して物性を確かめた。まずは報告例がある固相焼結法を用いて $\text{LiErO}_2$ の合成を試みたが、純粋な $\text{LiErO}_2$ を得ることが出来なかったため、新たに液体金属Li中で合成する方法を考案して合成を試みたところ、比較的純度の良いと考えられる $\text{LiErO}_2$ が得られた。この $\text{LiErO}_2$ をペレット状に成形して電気抵抗値を測定したところ、 $\text{Er}_2\text{O}_3$ よりも3桁以上小さいことが分かった。そのため、腐食が進み $\text{Er}_2\text{O}_3$ が $\text{LiErO}_2$ に変化すると電気抵抗値が著しく減少してしまうと結論している。

第6章では、流動Li腐食試験の結果について述べている。高速増殖炉や超臨界水プラントといった高温液体における材料腐食研究の分野では流体中の温度分布と流速が大きな影響を及ぼすことが知られている。特に、温度勾配に応じた物質移動は材料腐食の問題になることが多い。そこで、材料腐食試験用の小型Li循環装置を設計し、大きな温度勾配が存在する流動腐食試験を行うことで実機に近い環境での腐食挙動を確かめた。2回の流動Li中腐食試験を行ったところ大きな質量移行は観察されず、静止Li中の腐食試験と同様に $\text{LiErO}_2$ の生成が試験片に生じた主な変化であった。また、一部の試験においては生成した $\text{LiErO}_2$ が流動によって侵食された形跡がSEMにより観察され、流動環境においても $\text{LiErO}_2$ の生成が $\text{Er}_2\text{O}_3$ のLi中腐食の問題と結論された。

第7章では、防食方法の検討とその実証結果について述べている。流動と温度勾配のある環境においても $\text{Er}_2\text{O}_3$ は $\text{LiErO}_2$ を生成するのが主要な化学挙動であり、 $\text{LiErO}_2$ の生成は電気絶縁性の減少あるいはコーティングの侵食を招く。また、 $\text{LiErO}_2$ の生成反応式はLi中のO濃度が低いほど反応が抑えられることを示している。そこで、Li中のO濃度を低減することにより、腐食が抑えられるかどうかの検討を行った。金属イットリウム(Y)を加えたLi浸漬試験や低O濃度Liへの複数回の浸漬試験を行ったところ、適切なO濃度領域であれば $\text{Er}_2\text{O}_3$ は化学的に安定であり、O濃度に応じてErから $\text{Er}_2\text{O}_3$ への変化、および $\text{LiErO}_2$ から $\text{Er}_2\text{O}_3$ への変化が容易に生じることがわかった。そのため、Li中のO濃度をコントロールすることで $\text{Er}_2\text{O}_3$ を安定にし、防食することが出来るとしている。

これらの知見を踏まえて、自然対流LiにおいてもOを低減による $\text{Er}_2\text{O}_3$ の防食が可能か実証試験を行った。この試験で用いたLi循環装置はこれまでに製作したものと同様の設計にO回収ベッドを新たに設置したものである。取りだした試験片を分析すると腐食がある程度軽減されていた。つまり温度勾配と流動が存在する環境においてもLi中のOを適切にコントロールすることで $\text{LiErO}_2$ の生成を抑えることが可能であり、 $\text{Er}_2\text{O}_3$ コーティングの健全性を保つことができることが示された。

第8章では、成膜とブランケットシステム実機に関する検討の結果が述べられている。コーティングを用いた腐食試験を行い、成膜手法や実機における検討を行った。コーティングには腐食以外にも熱サイクルによる割れやコーティング-基板界面の腐食などが存在するため、今後のMHDコーティング研究は成膜手法や成膜条件が重要な課題となってくる。実際にV合金に成膜した $\text{Er}_2\text{O}_3$ コーティングの浸漬試験を行ったところ、多量の剥離が観察された。そこで本研究で解明されたLi中の $\text{Er}_2\text{O}_3$ の化学挙動を踏まえ、新しい成膜手法の検討を行った。その一つとしてErをLi中で酸化させるという新たな成膜手法に関する初等的な試験を本研究で行ったところ、 $\text{Er}_2\text{O}_3$ 層の生成が確認され、今後の開発に繋がる可能性があることがわかった。また、ブランケットの運転条件やO濃度制御方法に関する調査を行い、今後の核融合リチウムブランケットシステム開発に必要な検討を行った。

第9章は結論であり、本研究で得られた成果を総括している。

以上をまとめると、本論文は、核融合リチウムブランケットに用いられるMHDコーティング用の絶縁素材として、 $\text{Er}_2\text{O}_3$ のLi中化学挙動の研究を行った結果について取りまとめるとともに、 $\text{LiErO}_2$ の生成がコーティングの絶縁性能に致命的な影響を与える可能性があることを示し、さらに核融合リチウムブランケットで $\text{Er}_2\text{O}_3$ を扱う際の防食方法や成膜方法と実機での運転条件を検討して提言としてまとめたものであり、原子力工学、特に核融合炉工学に貢献するところが少なくない。

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。