

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	朴 昶虎/ PARK CHANGHO
論文題目	Study on Compatibility of Advanced Materials Exposed to Liquid Pb-Li for High Temperature Blanket System (高温ブランケットシステムの為の液体リチウム鉛と先進材料の共存性に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、液体リチウム鉛(LiPb)を用いた核融合炉ブランケットに使用される先進セラミック材料 SiC 系材料と LiPb の共存性の理解と、ブランケット設計に有用な知見の取得を目的としている。SiC 材料が液体金属 LiPb の作用によって生じる材料変質層の形成の特性を流動場において測定、解析してそのメカニズムを論じた結果をまとめたもので、全6章からなっている。</p> <p>第1章は序論で、エネルギー源としての核融合プラントの意義と位置づけ、特に人類の持続可能な発展において、電力のみならず燃料供給が重要であることを指摘しつつ、各種の核融合エネルギー変換をそのエネルギー利用と材料の観点で分析して、特に高温熱利用が燃料供給に有用であることに留意している。核融合エネルギー変換を行うブランケットについてこれまでの設計をレビューし、高温熱の取り出しにおける先進セラミック材料の役割と可能性を論じ、特に液体金属 LiPb と SiC 複合材の組み合わせが現実的であり、その設計検討が進んでいることを指摘している。引き続き第2章では、そのブランケット設計において高温液体流動 LiPb と SiC 複合材の共存性の知見が不足していること、設計の観点から、材料の要求性能への影響の定量的な評価が必要であることを論じ、この研究の問題設定を行っている。</p> <p>第3章では、本研究の主要な実験手段として高温液体 LiPb 中で円盤状試料を回転する装置の開発過程とその実用上の問題を論じている。特に装置構成材料が共存性評価に与える影響から、液体金属と鉄鋼系金属材料、酸化物セラミック材料の使用が困難であることを指摘して、装置構成上必要な接液材料として Mo のみが見出された。回転円盤の径方向に異なる相対接触速度を得る一方、雰囲気酸素、水分の影響が無視できないことから、アルゴン雰囲気グローブボックスで実験を行い、予備実験で不純物元素が SiC 材料上にさまざまな変質層を生成することと、実験上の留意点を述べている。</p> <p>第4章では、共存性試験後の試料に対し、元素分布と微小组織の分析を行い、その変化を定量的に評価して原因を考察した。試料にCVD材と、SiO₂、Al₂O₃、Y₂O₃等を助剤として添加したSiC繊維との複合材(NITE材)を用い、900℃、1000時間までのAr環境下での試験により、材料表面に生じる変質層の形成速度および累積時間依存性を得た。変質層への影響は相対流速と相関がみられ、その組成分析からLi複合酸化物LiAlO₂、Li₄SiO₄の介在を見出して、酸化物反応、$2Li_2O+SiO_2 \rightarrow Li_4SiO_4$などの寄与を示唆した。この変質反応は従来知られていない新たな現象であり、既往の報告の矛盾や不一致を説明できる。これらの酸化物は液体LiPbおよびSiC系材料の双方に本来含まれるものではないが、製造および使用の過程で不可避免的に混入することから、その制御が共存性の上で重要であることを指摘した。焼結助剤として酸化物を添加した材料では変質層の形成が早く、この効果を防止するためにはSiO₂の含有量の少ないCVD材でコーティングすることが有効であることを示唆した。</p> <p>第5章ではこの変質現象の核融合炉ブランケット設計上での影響を考察し、分析した。核融合炉ブランケットでは LiPb はトリチウム製造のための増殖材および熱媒体として強磁場中を流動し、SiC はそれに対し、特に電気絶縁により MHD 圧力損失の低減のために用いることから変質層の影響の設計上留意すべき特性として、総合的な電気伝導度の変化を評価した。すなわち液</p>			

体金属の作用で SiC 材料の健全性および機能に影響を生じる懸念として、特に複合酸化物による電気伝導度の変化が MHD 圧力損失や電磁的特性に影響を与える可能性を指摘した。変質層生成の速度、形状から電導度を測定評価して、それが変化前の SiC 材よりむしろ小さいことから、起こりうる影響は、変質層の微小亀裂に侵入した液体金属によるものが主であり、無視できないという評価を得た。

第6章はまとめと結論であり、本論文で見出した共存性現象とその影響の評価を、核融合エネルギー開発上の重要な知見であるとともに、その評価のひとつの方法論としてまとめている。すなわち、単なる構造材ではなくブランケットにおいて特定の機能を持つ SiC 材に対して、共存性問題による変化は強度変化や減肉ではなく、設計機能上の変化が許容範囲であるかどうかを評価し、またその結果を設計に反映すべきであると結論している。さらにこの考えに従い、この研究の延長上の課題として、設計上考慮すべきパラメータとして磁場や温度分布などの検討を加え、総合的な影響を評価する必要があることを指摘した。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、核融合炉ブランケットとして液体リチウム鉛合金(LiPb)を用いたシステムを構成する時に使用される、先進セラミック材料 SiC 系材料と LiPb の共存性に関する実験的研究の報告である。共存性にかかわる相互作用として生ずる現象を新たに見出してそのメカニズムを究明し、ブランケット機能への影響を評価した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

(1) 高温流動液体金属の材料への作用と、その接触流速依存性を評価するため、円盤試料を高温液体中で回転し、材料変質の接触流速を径方向に変化させる装置を製作し、相対速度をパラメータとして変化量を測定する方法を新たに開発した。特に装置構成材料としての鉄鋼系材料や酸化セラミックなどの素材の影響や、雰囲気中の酸素や水分の影響が大きいことを見出し、実験時の対策の必要性を指摘した。

(2) 試料にCVD材と、SiO₂、Al₂O₃、Y₂O₃等を助剤として添加したSiC繊維との複合材 (NITE材) を用い、900°C、1000 時間までのAr環境下での試験により、材料表面に生じる変質層の形成速度および累積時間依存性を示した。その組成分析からLi複合酸化物LiAlO₂、Li₄SiO₄の介在を見出し、酸化物反応、 $2\text{Li}_2\text{O} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Li}_4\text{SiO}_4$ などの寄与を示唆した。この変質反応は従来知られていない新たな現象である。これらの酸化物は液体LiPbおよびSiC系材料の双方に本来含まれるものではなく、製造および使用の過程で不可避免的に混入することから、その制御が共存性の上で重要であることを指摘した。

(3) 核融合炉ブランケットを想定した条件でのLiPbの作用で生じるSiC変質層の影響を論じ、設計上留意すべき特性を考察して、液体金属の作用でその健全性および機能に及ぼすと懸念される影響として、特に複合酸化物による電気伝導度の変化がMHD圧力損失や電磁的特性への影響がある可能性を指摘した。生成変質層の電導度を測定評価して、それがSiC材より小さいことから、起こりうる影響は、変質層の微小亀裂に侵入した液体金属によるものがより支配的である可能性を見出した。

以上、本論文はSiC材料と液体金属の、核融合炉条件における作用について従来知られていない過程とその影響を見出しており、その方法論を通じて核融合工学とエネルギー科学に大きく貢献するもので、得られた成果は、学術上、実際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成25年8月28日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日：平成25年10月1日以降

