

課題目標・目的及び研究成果

1. 当初の目的・目標	<p>鉛ビスマス冷却高速炉を実現するためには、鉛ビスマスに接触する炉心材料や構造材料の液体金属による腐食や脆化を防ぐための材料開発及びシステム開発が極めて重要な研究課題である。そこで本業務では、構造部材の液体金属腐食を防ぐための、「ナノ・マイクロ複合微粒子(NMCP; Nano- and Micro-Composite Particles)防食被覆法」の確立と、ナノ・マイクロ複合微粒子防食被覆の「その場補修」を可能とする「ナノ粒子分散鉛ビスマスシステム」構築のための基礎的技術を開発することを目的とする。</p> <p>本事業では、LBE-FRの構造部材をLBE腐食から保護するための、革新的な防食被覆法の技術開発ならびに「ナノ粒子分散鉛ビスマスシステム」の構築のための基礎的技術開発を行う。研究開発項目は以下の三つである。</p> <p>(1)ナノ・マイクロ複合微粒子防食被覆法の開発</p> <p>①ナノ・マイクロ複合微粒子の製造・評価</p> <p>ナノ・マイクロ複合微粒子(NMCP; Nano- and Micro-Composite Particles)防食被覆法に適切な微粒子を明らかにするために、微粒子の製造と、微粒子の形態評価実験を行う。</p> <p>②ナノ・マイクロ複合微粒子による被覆法の開発</p> <p>構造材料表面に剥離の無い安定なNMCP防食被覆を形成するために、ゾルゲル法によるNMCP被覆形成実験を行う。</p> <p>(2)鉛ビスマスに対する耐食性評価</p> <p>①回転型腐食試験機の開発</p> <p>NMCP防食被覆のLBEに対する耐食性を評価するために、回転型LBE腐食試験機的设计、製作、予備試験を行う。</p> <p>②防食被覆の耐食性評価</p> <p>(1)②で開発したNMCP防食被覆のLBEに対する耐食性を評価するために、(1)①で開発した回転型腐食試験機を用いて腐食実験を行う。</p> <p>(3)ナノ粒子分散鉛ビスマスシステムの構築</p> <p>①ナノ粒子分散法の開発</p> <p>LBE中においてナノ粒子を適切に分散させることができるシステムを開発するために、ナノ粒子の種類や量と分散状態の関係を調査するとともに、電位制御によるLBE中ナノ粒子分散状態の制御実験を行う。</p>
-------------	---

	<p>②防食被覆その場補修法の開発</p> <p>(3)①で開発したシステムによるNMCP防食被覆のその場補修の可能性を検証するために、NMCP防食被覆に対して、LBE中にナノ粒子を分散させた環境下における腐食実験を行う。</p>
<p>2. 研究成果</p>	<p>【事業項目1】 ナノ・マイクロ複合微粒子防食被覆法の開発</p> <p>LBE環境下において、アルミニウム系の被覆の耐食性が比較的優れていることが報告されているが、多くの場合、基板材料の特性に悪影響を与える懸念のある高温処理であることに加え、LBE温度が600℃を越えると被覆の健全性を保つことは困難であるとされている。そこで、多様な組成を有する被覆を低温で形成可能な化学プロセッシングである「ゾルゲル法」によって、600℃程度のLBE環境における耐食性に優れた被覆の形成を目指した。アンモニア水によってpH調整された硝酸アルミニウムを基本とするゾルゲル溶液に対して、シーディング粒子としてαアルミナの複合微粒子を添加することによって、本来1200℃程度の焼成温度が必要なαアルミナ被覆について、400℃という低温焼成に成功した。また、5回程度の繰り返し処理によって、数10μm程度の膜厚を持つNMCP被覆の形成が確認された。このようなプロセスによって形成されたNMCP被覆は、500℃、100h程度までのLBE腐食環境においては健全性を示したものの、650℃、100hにおいては剥離が確認された。そこで、シーディング材として、より微細な複合微粒子を用いることにより、NMCP被覆の密度を上げるとともに、酸化アルミニウムに微量のイットリウムを添加することによって粒界強度を上昇させる効果があると報告されているため、被覆の強度を上昇させることを目指して微量の硝酸イットリウムを添加したゾルゲル溶液を用いたところ、650℃において、少なくとも100時間まで基板材料のみならず被覆自身の減肉や被覆部へのLBEの浸透が確認されない共存性に優れた防食被覆の開発に成功した。今後の長時間腐食試験や実環境を想定した熱サイクル下腐食試験によって、本手法の有用性を確認する必要があるものの、650℃という高温において健全性を保つ被覆の報告例は見られず、所期の目標を上回る特性を有するNMCP被覆の形成に成功した。</p> <p>【事業項目2】 鉛ビスマスに対する耐食性評価</p> <p>①回転型腐食試験機の開発</p> <p>被覆材の耐食性を適切に評価するためには、流れによる機械的影響と腐食の相互作用についても考慮する必要があるため、流動条件下で実施することが求められる。LBEの流動条件下での腐食実験は、従来大掛かりなループを必要とするために、本研究のような被覆材のスクリーニン</p>

グには適しているとは言い難い。そこで、流動LBE環境を、試験片を回転させることによって相対的に模擬することが可能となる回転型腐食試験機の設計及び製作を実施し、アルゴン雰囲気グローブボックス内に設置した。本装置は、最高温度700℃（常用650℃）において、試料回転速度を100～10,000rpmまで対応可能であり、最高5m/s程度の流速が想定されているLBE-FR環境については十分対応可能であり、所期の開発目標を達成した。このように比較的簡便且つ安価な装置による流動的なLBE中での腐食試験を実施可能とした技術シーズは、耐食性被覆のみならず炉心材料や構造材料の開発等に対しても寄与することが可能である。また、先進核融合炉ブランケットシステムの冷却・増殖材として期待されている液体リチウム鉛合金と先進材料の共存性評価においても、本装置の有効性が確認され、現在同型機が実際に使用されている。

②防食被覆の耐食性評価

①の装置を用いて、当初予定していた600℃を超える650℃での腐食試験を行ったところ、基板材料のみならず被覆自身においても減肉やLBEの浸透が確認されず、開発したNMCP被覆の優れたLBE耐食性を確認した。

【事業項目3】ナノ粒子分散システムによる防食被覆その場補修法の開発

防食被覆をシステムに適用する場合、被覆に損耗が生じた際の自己修復が期待できないことから、システム設計・保守の観点から適用可能な部位が限定される懸念が有る。そこで、冷却材が液体金属であるという点を活かして、冷却材より酸化しやすい元素を冷却材中に添加することによって、被覆の損耗部に酸化析出させることを目指したその場補修の可否について、基礎的な検討を行った。結果として、LBE中へ金属アルミニウム微粒子を添加し温度を低下させることによって、溶解度以上のアルミニウムをLBE中や被覆或いは基板材料中の酸素と反応させて被覆表面上に酸化析出させることによるその場補修について、その効果は僅かではあるものの確認することが出来た。一方、損耗部における酸化析出を促進させることを期待して、Haefner効果と呼ばれるエレクトロマイグレーション現象による元素移動に基づく電位・電流制御法についても検討したが、明確な補修については実証することが出来なかった。本手法によるその場補修の可能性の検討という点では所期の目標を達成したものの、LBE-FRに対して適用可能なその場補修法としては、他の元素の添加等、更なる検討が必要であるという結論に至った。

【事業全体】

LBE冷却高速炉を実現する上で重要課題のひとつである構造部材の液

体金属腐食を防ぐための防食被覆法として、想定されるほとんどの構造材料に対して適用可能な被覆形成温度である400℃での焼結を含む改良型ゾルゲル法を基盤としたNMCP防食被覆法を開発に成功し、100時間という短時間ではあるが650℃の流動LBEにおいて構造材料（ニッケル基合金）の腐食を防止することが可能であることを、新たに開発した回転型腐食試験機によって明らかにした点である。

【得られた成果の外部発表】

- (1) 日本原子力学会2008年秋の年会（高知工科大学）「改良型ゾルゲル法を用いた鉛ビスマス炉用耐食性被覆の開発」