

## 課題目標・目的及び研究成果

<p>1. 当初の目的・目標</p>	<p>高速炉サイクル実用化の最大の課題は経済性にある。このため、システムが単純でコンパクトかつ高熱効率の第4世代原子炉の開発が急務となっている。ナノ構造伝熱面は従来の伝熱促進技術と異なり、圧力損失の増大無しに伝熱性能を増倍出来る可能性を有する。本研究開発は、ナノ構造伝熱面の表面状態解析や伝熱特性評価を実施し、次世代炉の炉心機器に適したナノ構造伝熱面創成技術の開発を目指すもので、コンパクトで高効率な第4世代原子炉実現の先行研究として実施するものである。</p> <p>本計画は化学エッチング法や物理エッチング法などの方法でナノ構造伝熱面を一般構造材料であるステンレス鋼(SUS316)、FBR用として開発進められている高クロム鋼(12Cr鋼)ならびに酸化物分散強化型鋼(ODS鋼)基板上に創成し、その表面状態の解析および伝熱特性を評価して炉心機器に適したナノ構造伝熱面創成技術の確立を図る。すなわち、本研究開発は、大きく分けて(1)ナノ構造伝熱面創成研究および(2)ナノ構造伝熱面伝熱特性評価研究(高温耐久性評価を含む)を行う。</p>
<p>2. 研究成果</p>	<p><b>【事業項目1】</b>          本研究開発においては、これまでナノ構造伝熱面の形成が適用されていなかった、鉄鋼材料、すなわち SUS316、12Cr 鋼ならびに ODS 鋼に対して適用できる、3 種類のナノ構造伝熱面の創成技術、金属酸化物ナノ粒子を浸漬塗布法およびスラリー塗布法により基板上に積層させたもの、並びにヘリウムイオンビーム照射による物理エッチング法により基板に直接微小多孔質層を形成させたナノ構造伝熱面の形成技術の開発に成功した。いずれの基盤および方法においてもナノ構造伝熱面の特徴である 100nm からサブミクロンオーダーの多重スケールを有する多孔質となっていることを電子顕微鏡観察の結果、明らかにした。</p> <p>本研究開発で使用したナノ粒子は主に酸化銅 II(CuO)であるが、H20 年度においてより高温での安定性に優れると考えられる酸化チタン(TiO<sub>2</sub>)を用いて SUS316 鋼と浸漬塗布法の組み合わせのみであるが、ナノ構造伝熱面の形成に成功した。この塗布条件は H18-20 年度に試験をして探索した結果と同様であり CuO 粒子を用いた本研究開発結果では 12Cr 鋼および ODS 鋼に対しても、TiO<sub>2</sub> 粒子の適用は可能であると考えられる。</p> <p><b>【事業項目2】</b> 伝熱特性評価研究では、軽水を冷却媒体として、平板体系での対流伝熱および燃料棒を模擬した環状流路内での上昇流での伝熱特性に関する試験を行った。</p> <p>平板体系の実験ではすべての基板材料と製作方法、粒子材料で比較しうるナノ構造伝熱面の伝熱促進効果の基礎データを取得した。その結果、SUS316 鋼、12Cr 鋼および ODS 鋼を基板とし、CuO 粒子を使用したスラリー塗布法によるナノ構造伝熱面の伝熱促進結果はほぼ同程度の値を示し、基板材料による違いは観察されなかった。これに対し、CuO 粒子を使用したスラリー塗布法および浸漬塗布法、ならびに物理エッチング法による SUS316 基板上のナノ構造伝熱面では、製作手法による</p>

伝熱促進効果への違いが見られ、物理エッチング法、浸漬塗布法、スラリー塗布法の順で伝熱促進効果が高いという結果が得られた。平滑面に対する伝熱促進比は物理エッチング法、浸漬塗布法で約 1.4 から 1.7 程度、スラリー塗布法で約 2 倍というものであった。材料の異なるナノ粒子による違いを CuO 粒子および TiO<sub>2</sub> 粒子を用いて比較した結果、両者の平滑面に対する伝熱促進比は TiO<sub>2</sub> 粒子を使用した場合若干低いものの、ほぼ同程度の 1.7 程度であった。

燃料棒を模擬した環状流路内での上昇流での伝熱特性試験では、燃料棒を模擬したヒータを試験流路内に挿入し、試験流路とヒータで形成される環状流路内の上昇流の伝熱特性をスラリー塗布法によりヒータ上で形成したナノ構造伝熱面の有無で比較した。特性データは試験流路出入口水温、ヒータ表面温度、ヒータ出力から得られる熱伝達係数と対流による熱輸送の比を示すヌセルト数を用いて評価した。その結果、ナノ構造伝熱面を施工したヒータの場合、未施工のヒータと比較して 20-25% のヌセルト数の増加、すなわち熱伝達係数の増加を示し、ナノ構造伝熱面の伝熱促進効果を確認することができた。また、試験部出入り口での圧力損失を測定した結果、ナノ構造伝熱面を施工した場合でも未施工の試験部とほぼ同じ圧力損失であった。本結果はナノ構造伝熱面を適用することにより圧力損失の増加無し、すなわち、冷却材の駆動動力(ポンプ動力)の増加無し、機器の伝熱性能向上を図ることができる。

Na 冷却炉ではより高温の条件で使用される想定され、さらに Na 冷却では Na の酸化を防ぐため、Na 中の酸素分圧が非常に低く抑えられる。ナノ構造伝熱面の高温耐久性の基礎実験として、低酸素分圧、すなわち真空下での高温暴露試験を実施した。試験条件は Na 冷却での酸素分圧に相当する真空度  $1.7\sim 3\times 10^{-5}\text{Pa}$ 、温度を燃料棒の表面温度に相当する 650°C に設定し、100 時間保持した。試験片の基盤は SUS316 鋼である。本高温暴露試験の結果、CuO 粒子を用いたナノ構造伝熱面(スラリー塗布および浸漬塗布)では、その特徴である微細な多孔質形状を失った。これに対し、浸漬塗布法に TiO<sub>2</sub> 粒子を用いたものおよび物理エッチング法によるナノ構造伝熱面の構造は高温暴露試験前後で電子顕微鏡観察でも大きな構造の変化はなかった。本研究開発により TiO<sub>2</sub> など低酸素分圧で高温の環境下での安定性に優れるナノ粒子を用いることによりナノ構造伝熱面を炉心機器へ適用する可能性があることを示した。

#### 【事業全体】

本研究開発と取り扱ったナノ構造伝熱面では、強制対流における伝熱促進の問題である圧力損失の増大を招くことなく、伝熱特性を向上できることを実験的に示すことができた。これまでは、冷却構造内にフィンやねじりテープを挿入して伝熱促進を図っているが、その欠点として、圧力損失の増加すなわち、冷却媒体を流動させるために必要なポンプ動力の増加が生じていた。

本研究開発により TiO<sub>2</sub> 等の高温安定性に優れたナノ粒子を使用することにより、高温・低酸素分圧環境でもナノ構造伝熱面の適用可能性を広げることが可能となった。

#### 【得られた成果の外部発表】

(1) 江里幸一郎、谷川尚、榎枝幹男、「ナノ構造伝熱面の伝熱特性に関する

	研究」第46回日本伝熱シンポジウム講演論文集、(2009)
--	-------------------------------