

高温等方加圧焼結装置の導入と革新的核融合材料開発研究

菱沼良光・能登裕之

核融合炉開発は、現在、国際熱核融合実験炉 (ITER) の建設が進み、核融合エネルギーの科学・技術的な実現可能性を実証する段階まで進みつつあります。その一方で、これに続く原型炉 (商用化される前段階の炉) を見据えた設計・開発研究活動も本格化する段階を迎えており、核融合炉を構成する各種機器の更なる高性能化が要求されています。特に、高温プラズマと近接する炉壁材料に求められる要求レベルは非常に高く、より安全、より長寿命という観点からの新材料の研究開発が世界的に行われています。核融合科学研究所でも、核融合工学研究プロジェクトの下ヘリカル核融合炉への応用を想定した高性能・高機能材料開発が着実に進められており、更なる研究を加速するツールとして、高温等方加圧焼結装置を導入しました。本記事では、高温等方加圧焼結装置の特長やそれを使用した最近の研究例を紹介します。

核融合炉内のプラズマと近接する炉壁材料は、高温プラズマが生成している間は定常的に高い温度となり、一般的な鉄や銅等の材料を炉壁材料として使用した場合には熔融するおそれがあります。そのために、炉壁材料は可能な限り融点の高い材料で作る必要があるわけですが、一般的に高融点の材料は溶かしながら様々な形状へ成形加工することは非常に困難になります。特に、高融点材料の1つであるタングステンは硬くて脆い特性があり、タングステン部材を製造するためには、“溶かして固める”のではなく、“押し固める”方法が取られています。硬くて脆い金属粉末を押し固める手法にはいくつか種類がありますが、現在注目されているのが、今回導入した高温等方加圧 (HIP) になります。

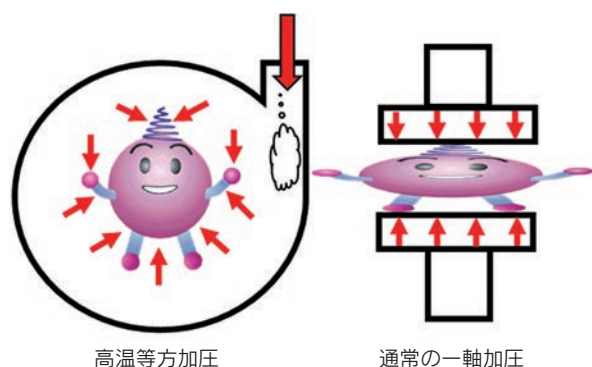


図1 加圧方法の違い

一般的に、加圧焼結といえば、上下もしくは左右の一方からの圧力を負荷しながら熱処理することになります。しかしながら、この方法では部分的に圧力のムラができたりして、緻密な焼結ができません。一方、HIP法では高压のガスを用い試料全体を加圧することにより、あらゆる方向から均一に高い圧力を加えることができ、結果的に高密度な焼結が可能になるのです (図1)。このような原理のもと、単純な等方加圧による焼結の他にも、例えば複雑な形状をした部材や切削加工が不可能な材料において、目的形状の金型に金属粉末を充填してHIP処理することで目的の部材を成形することができます。このようにHIP処理は非常に拡張性の高い手法と言えます。今回導入した装置は、グラファイトの炉体と2段ガス圧縮機を用いており、空気中に含まれる不純物の影響を受けない雰囲気の中で、2000℃で約2000気圧の超高温・超高压力の焼結が可能となっています。また、HIP処理が可能な空間が大きく、研究室等で基礎試験に用いられる数センチ単位の小さな部材から、実規模を想定した数十センチ単位の大きな部材まで幅広い成形加工対応が可能であることも特長です。金属粉末を充填した軟鋼カプセルのHIP前後の様子を図2に示します。HIP処理によってカプセルが等方的に加圧された様子がわかります。例えるならば、深海に地上の空き缶を沈めた時に周りから押しつぶされたのと同じ状態です。また、HIP処理は焼結だけでなく、異なる材料どうしの接合にも有効であると考えており、これまで不可能であった材料の組み合わせにおいても、高温・等方的な

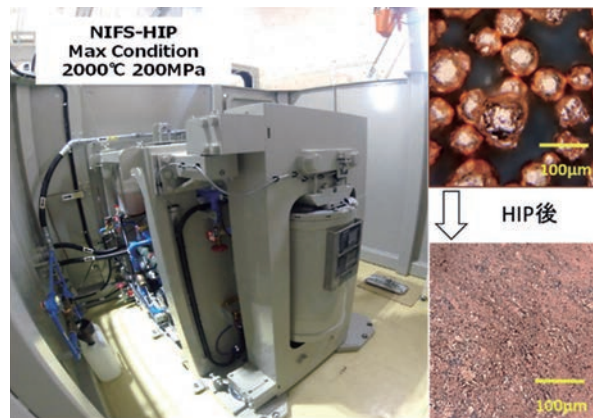


図2 (左) HIP装置外観 (右) カプセルに充填した金属粉末におけるHIP前後の組織例

高圧環境が作用して新しい異材接合技術を見出す可能性があります。

さて、HIP装置を用いた研究例を紹介します。我々は、核融合炉内に設置されるダイバータと呼ばれる機器のヒートシンクとして期待される銅合金、放射線遮蔽材として期待される炭化タングステンの大型焼結体等の材料開発やこれらに供する新しい拡散接合技術開発を展開しています。ダイバータにはプラズマから生成した超高温の熱粒子が定常的に照射され、熱除去のために高い熱伝導特性が要求されます。このような高い熱伝導性を持った材料として銅がよく知られていますが、銅そのものは高温環境において強度が極端に低下する問題を持っています。そこで、我々は銅の高い熱伝導性を最大限活かすことのできる、高温下での優れた機械強度特性が付与された新規高性能銅合金の開発に着手しました。注目したのは酸化物分散強化 (ODS) と呼ばれる手法です。ODS法は金属母材中にナノメートル (10億分の1メートル) 程度サイズの酸化物を分散させることによって機械強度特性や耐照射特性を著しく向上させる技術です。このODS法の知見を基に、高速回転する容器内での粉碎・混合の要素を持った機械的合金化 (MA) 法とHIP法による高密度焼結を組み合わせた新しい酸化物分散強化銅 (ODS-Cu) の試作に成功しました。

図3は、合金過程で形成したナノ粒子 (アルミニウム酸化物) が微細にCu母材に分散していることを示しています。(a)は製作した金属組織を観察した結果であり、分散粒子と考えられる白色領域が確認できます。また同じ部分に関し、Cu元素のみを測定するEDS像 (濃度分布) をみると、白色だった部分には母材となるCu元素が欠乏しています。一方でAlのEDS像からは、同じ部分においてAl元素の存在が確認できます。つまりこれはCu母材中にナノレベルの別相が存在することを意味しています。またこの粒子分散後には硬さの上昇も確認されており、このナノ粒子による強化であると考えております。このように、今回得られた新規性のあるMA-HIP法の結果は、原型炉へ向けた材料研究開発の新たな展開にとって非常に興味深いものであります。

HIP装置は様々な応用が可能な拡張性の高い装置であり、HIP装置を基点とする学際領域の拡大や新しい技術開発に資する可能性があります。大学共同利用機関である核融合科学研究所では、産学連携を含めた外部利用を積極的に推進しています。HIP装置を用いた新しい研究開発の提案をお待ちしております。

(核融合システム研究系 准教授)

(核融合システム研究系 助教)

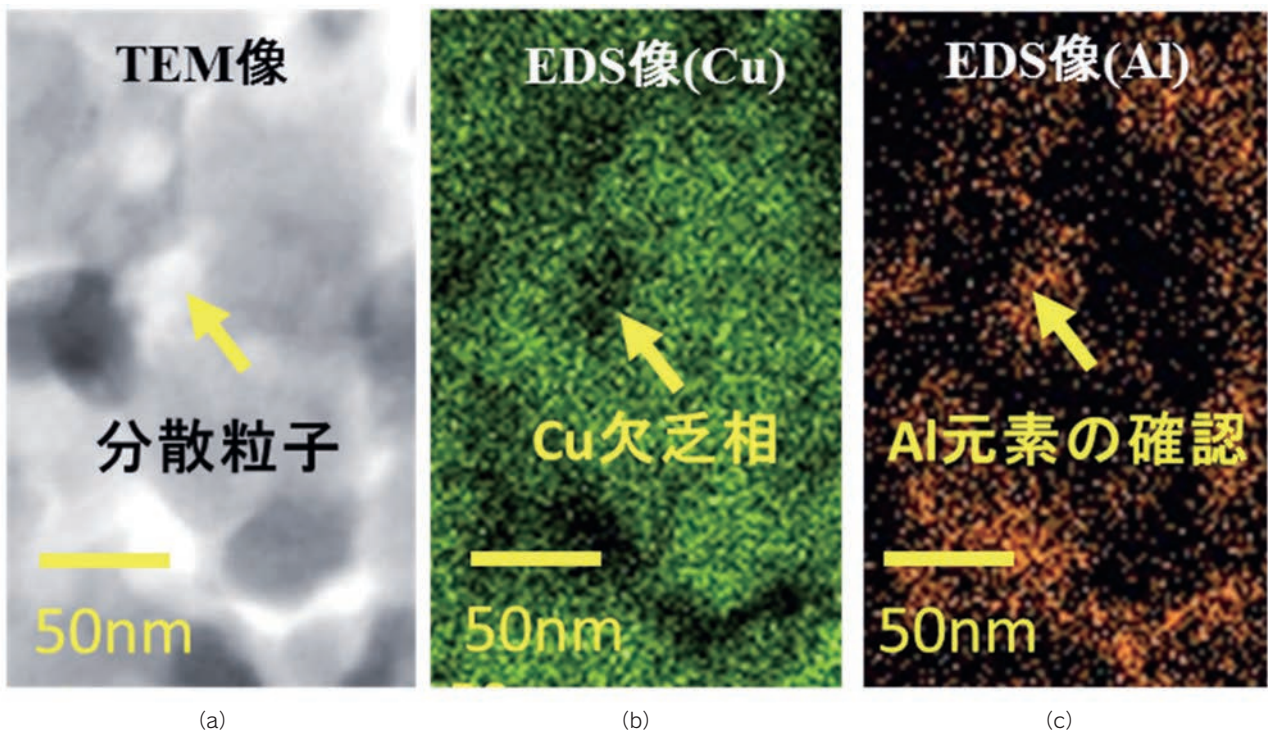


図3 試作した ODS-Cu の透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察とエネルギー分散型 X 線分析 (EDS) による組成解析
(a) 分散粒子を白色部分として確認。 (b) Al 酸化物の部分には Cu は確認できない。 (c) Al 酸化物の部分に際立って Al を確認。