

材料強度の原子論と格子欠陥制御工学

Atomistic of material strength and lattice defect control engineering

教授 丸山 公一
Professor Koichi Maruyama



准教授 吉見 亨祐
Associate Professor Kyosuke Yoshimi



助教 中村 純也
Assistant Professor Junya Nakamura

Weight saving and mechanical property development of materials are very important issues for the reduction of environmental burdens and the construction of infrastructure for the sustainable society. Maruyama group is challenging to create new structural materials with the viewpoint of atomistic approaches of material strength and deformation and lattice defect engineering in crystals.

究極の耐熱性を有する 超高温材料の創製と超高温特性の評価

ほとんどの原子力発電所が操業停止を余儀なくされている我が国では、電力供給の大半を火力発電に頼らざるを得ない状況になっている。しかし昨今、火力発電のための燃料調達でコスト増となり、ほぼすべての電力会社が電気料金の値上げに踏切る、もしくは検討する事態となっている。火力発電は主に、石炭を使った水蒸気タービン発電と液化天然ガスなどを使ったガスタービン発電に分けられるが、コスト増の原因は液化天然ガスにあると考えられ、ガスタービン発電の高効率化は我が国にとって今や最重要課題となっている。ガスタービン発電の高効率化には、タービン入口温度の上昇が必須であるが、高圧タービンブレードに使用されているニッケル基超合金の耐熱性が限界に達しており、現在のシステムではこれ以上のタービン入口温度の上昇は極めて困難である。そこで当グループでは昨年来より、ニッケル基超合金の耐熱性をはるかに凌ぐモリブデン基超高温材料の開発を進めてきた。その結果、モリブデンに Mo_5SiB_2 、TiC、 Mo_2C などを分散・複合化した新規なモリブデン合金「モシブチック合金」(Fig. 1)の開発に成功し、特許出願した(特願2013-005292)。

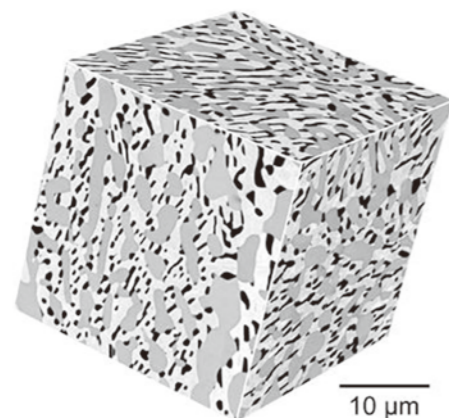


Fig. 1 3-dimensional microstructure of a Mosibitic alloy consisting of Mo solid solution (bright phase), Mo_5SiB_2 (dark phase), and TiC (black phase).

この合金は、従来の耐熱モリブデン合金 MHCの2~3倍の高温強度である上、密度はニッケル基超合金と同等、さらに融点は2000°C以下であるため溶解鑄造法で作製が可能となった(Fig. 2)などの際立った特徴を有している。これら関連の成果は、第150回日本金属学会春期講演大会(横浜国立大学)の基調講演、材料物性工学談話会平成24年度



Fig. 2 Appearance of a Mosibitic alloy produced by a plasma-melting technique.

第1回講演会(京都大学)の招待講演、CREEP2012 (Kyoto)やMS&T '12 (Pittsburgh)の招待講演を通して報告されたほか、東北大学オープンキャンパス期間中開催された市民公開講座「12夏 最先端・次世代材料の研究最前線」や第2回3大学主催連携公開講演会「グリーン・ライフイノベーションへの材料研究最前線」(大阪大学中之島センター:日刊工業新聞 平成24年8月23日, 日経サイエンス 2012年9月号に掲載)で広く一般市民にも紹介された。さらに、第151回日本金属学会秋期講演大会(愛媛大学)では、当グループの学生が第19回優秀ポスター賞を受賞した。

Al合金:ナノスケール析出物の結晶構造

時効硬化型 Al合金は、中、高強度軽量材料として自動車や航空機など広範囲な分野で構造材料として利用されている。この合金系は熱処理によって著しく強度が増加するため、合金を強化するためには微細に析出するナノスケール化合物相の析出を制御する事が重要であるが、非常に多くの種類の化合物が合金中に析出するため組織が複雑とな

り、析出挙動を正確に理解することは依然難しい。当グループでは、原子分解能分析電子顕微鏡を始めとする透過型電子顕微鏡を用いた化合物相の結晶構造解析(Fig. 3)や析出組織観察をもって、Al合金中に析出する化合物相の同定と合金組成による組織変化を系統的に調査する事で、Al合金の組織制御法ならびに強度向上のための手掛かりを見出した。また関連研究の発表で、当分野の学生が、日本金属学会第5回格子欠陥制御工学研究会にて若手優秀講演賞受賞した。

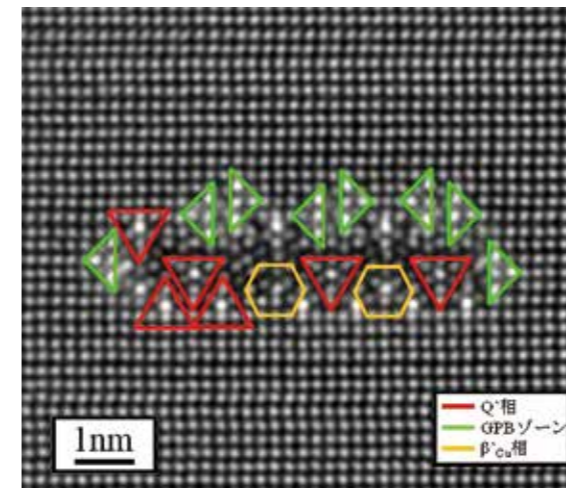


Fig. 3 HAADF STEM images of characteristic bright dot periodicity in a precipitate with a complex structure at an early aging stage.

酸化物粒子による高温材料の強化

内燃機関を高温で運転すれば、省エネルギーとCO₂排出削減が達成できます。そのためには、高温での使用に耐える材料が不可欠です。材料の多くは分散粒子を導入して転位運動を抑制することで強化されています。高温で強い材料を作るには、高密度に分散させた微細な粒子を長期間に渡ってそのまま保つ必要があります。Fig. 4に3種類のフェライト系耐熱鋼の高温加熱中の硬さ変化を示します。窒化物粒子(VN)を含む試作鋼は700°C、300時間の加熱で硬さが大きく低下します。これはVN粒子の凝集・粗大化が早いからです。炭化物粒子(M_{23}C_6)で強化した市販鋼では、硬さ低下が緩やかになり、高温でより長時間の使用に耐えることができます。酸化物粒子(Y_2O_3)を含む材料は更に高い熱安定性を示します。700°Cから825°Cに昇温すると、原子の拡散が早まり、軟化速度が約100倍早くなります。しかし酸化物粒子分散強化鋼は、825°Cでも、炭化物強化

市販鋼の700°Cでの軟化速度と同程度です。このように熱安定性が高い酸化物粒子を分散強化した鋼は、高い組織安定性を持ち、第4世代の原子炉で使える耐熱材料として注目されています。当分野ではこの酸化物粒子の熱安定性の起源を研究しています。鋼中の Y_2O_3 粒子は、Fig. 5の高分解能STEM明視野像に示すように、母相との間に高い整合性を持って析出しています。この高い整合性が、高い熱安定性の起源の一つと考えられます。

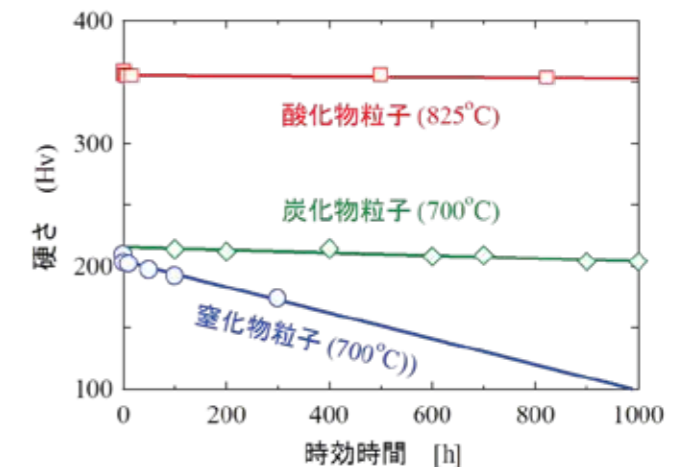


Fig. 4 高温加熱ともなう硬さ低下

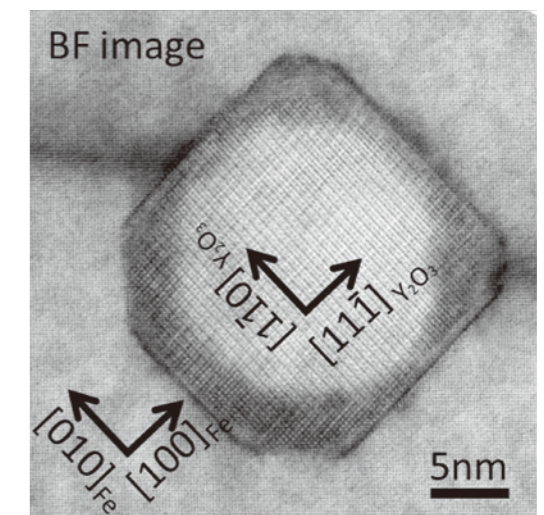


Fig. 5 ODS 粒子の結晶方位関係