

# 耐熱金属材料の最近の動向と今後の展望

竹 山 雅 夫\*

## 1. は じ め に

耐熱金属材料は、エネルギー、環境、経済(3E)、安全安心、持続可能な社会の構築(2S)これらに全て深く関わる非常に重要な材料である。現在我国の総発電量の約9割は火力発電で賄われている<sup>(1)</sup>。昨年政府が公表した2030年における我国の電源構成(ベストミックス)は、再生可能エネルギー22~24%、原子力20~22%、火力56%(石炭26%、LNG 27%、石油3%)である。この電源構成を基に、我国における温暖化ガス排出量を2030年までに2013年比で26%削減するという目標を発表した。すなわち温暖化ガス総排出量を約15億トンから約4億トン削減する必要がある。この電源構成は、東日本大震災(以降は震災)前と比較すると、火力の割合は変わらず、原子力の割合(震災前は約30%)を下げ、その分を再生可能エネルギー(震災前は約10%)で補うというものである。ここで、再生可能エネルギーの中身は、約半分が水力(揚水)発電であり、風力や太陽光などの自然エネルギーが9%(震災前は1%)、残りはバイオマスや地熱である。低炭素化社会を実現する上において、原子力及び自然エネルギーの割合を増やすのは多に結構である。しかし、資源の乏しい我国が国際競争力を維持するためには、エネルギーの安定供給による経済発展は不可避であり、現在の社会情勢を考えるとそれを原子力に求めるのは厳しいといわざるを得ない。また、自然環境に左右される自然エネルギーはたとえその目標が達成出来たとしてもエネルギーの安定供給源とはなりえない。ベースロード電源の主役は間違いなく火力である。しかし、火力発電は化石燃料を熱源とするため温暖化ガスの排出量が高い。したがって、低炭素化社会の実現とエネルギーの安定供給を両立させるには、発電技術の高効率化は喫緊の課題となる。中でも、排出量が多い石炭火力の新設に

は発電効率の高い設備の導入を義務づける動きがあり、資源エネルギー庁が発表したロードマップにも、次世代高効率火力発電における技術開発が明確にうたわれている(図1)<sup>(2)</sup>。この実現には、耐熱材料の高温化、高強度化が鍵を握ることはいうまでもない。

耐熱材料の中のもう一方の柱は航空機エンジン用材料である。現在、世界では約20,000機の航空機が飛行しているが、2030年には40,000機になると予想されている<sup>(3)</sup>。すなわちジェットエンジンは今後新たに4万台が製造され、さらに、現用のエンジンの約7割がリプレイスされる予定である。したがって、世界では、新たな高効率エンジンの開発が行われており、そのためには発電プラント用材料と同様、材料の高温化、軽量高強度化が求められる。我国でも、2014年から始まった国家プロジェクト、SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)において、重要課題として「革新的構造材料」が取り上げられ、その重要研究開発項目としてジェットエンジン材料を中心とした「耐熱材料・金属間化合物」が物材機構及び東工大を中心として行われている<sup>(4)</sup>。

著者は現在、過去60年に渡って日本の耐熱金属材料を牽引してきた日本学術振興会耐熱金属材料第123委員会(産学協力委員会)の委員長を務めており、当委員会では、4つの分科会:耐熱鋼、超合金、先進耐熱材料・プロセス、耐環境特性、をもって耐熱材料の発展に貢献している<sup>(5)</sup>。本稿では最近123委員会が主催した2つの国際会議「Advanced High-Temperature Materials Technology for Sustainable and Reliable Power Engineering (123HiMAT-2015)」<sup>(6)</sup>及び「5<sup>th</sup> International Workshop on Titanium Aluminides (IWTA 2016-Tokyo)」<sup>(7)</sup>を中心に、最近欧米で開催された耐熱材料の国際会議(Euro Superalloys 2014, Superalloys 2016, EPRI 2016 (8<sup>th</sup> Int. Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants))をも踏まえ、4つの分

\* 東京工業大学物質理工学院材料系; 教授(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1, S8-8)

Recent Trends and Future Prospects on Heat Resistant Metallic Materials; Masao Takeyama (Department of Materials Science and Engineering, School of Materials and Chemical Technology, Tokyo)

Keywords: steam power plant, jet engine, ferritic heat-resistant steels, austenitic heat-resistant steels, superalloys, advanced heat-resistant materials, environmental-resistant properties, laves phases, TCP phases, TiAl, intermetallics

2016年12月12日受理[doi:10.2320/materia.56.145]

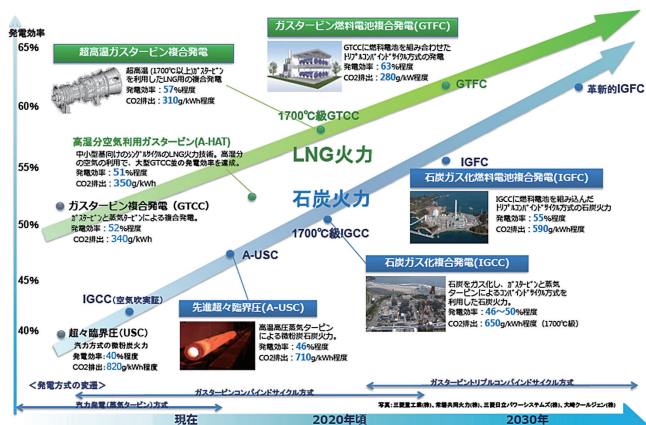


図1 2030年頃までに技術の確立が見込まれる次世代火力発電技術。

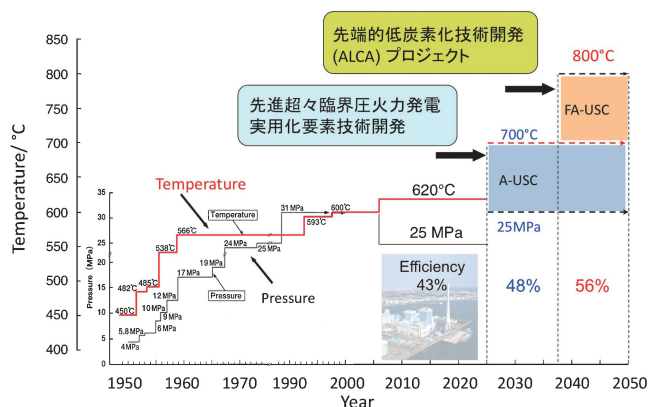


図2 我国の火力発電の蒸気温度のこれまでの変遷と将来への取り組み。

科会の分野に沿って著者等の最近の研究も含めて耐熱金属材料の現状と今後の動向について述べる。

## 2. 耐 熱 鋼

耐熱鋼分野の研究の中心は、フェライト系及びオーステナイト系共に、火力発電の耐用温度の上昇に耐え得る材料開発と信頼性(寿命予測)の向上である。我国の火力発電材料の技術は世界最高であり、礮子の超々臨界圧(USC)発電所の蒸気温度は620℃、発電効率は43%に達している(図2)。この社会の安全装置であり電力の安定供給の主役である火力発電の発電効率の更なる向上に向けて種々の取り組みが行われている：(1)再々加熱技術(Double Re-heat Technology)の適用、(2)需要変動に対応する運転自由度(Operation Flexibility)の確保、(3)蒸気温度の高温化(700℃以上)。 (1)は、高压タービンから排出される蒸気をボイラで再加熱して中圧タービンに導入し、発電効率の向上を図る。 (2)は、欧州のように風力発電をベースとして、気象条件の変化による電力変動に瞬時に対応できる運転自由度の高い火力発電プラントの開発であり、クリープ特性に加えて低サイクル疲労特性の向上が求められる。 (3)は、蒸気温度700℃以上とする先進超々臨界圧発電プラント(A-USC)の実現に向けた材料開発が日、米、欧で行われ、我国では実用化に向けた実証試験が行われている<sup>(8)</sup>。また、最近では、800℃級の火力発電に適用可能な材料開発も行われている(図2)<sup>(9)</sup>。

### (1) フェライト系耐熱鋼

蒸気温度620℃以下の超々臨界圧(USC)発電プラントでは、火炉(ボイラー)の主蒸気管及びタービン部材に高Crフェライト系耐熱鋼が使われるが、この材料は数万時間使用するとクリープ破断強度が低下するいわゆる「腰折れ」が生じる。また、この鋼では、溶接部においてクリープ破断強度が母材に比べて約1オーダー低下するという問題(Type IV破壊)も抱えている。したがって、クリープ強度低下やType IV破壊のメカニズム解明、寿命を管理するためのクリープ損傷評価に関する研究が盛んに行われている。高Crフェラ

イト系耐熱鋼はUSCプラントでは主要な材料であり、今後の更なる長時間クリープデータの蓄積が必要となる。また、この材料の耐用温度を650℃まで上昇させる研究も行われている。

その他のフェライト系耐熱鋼としては、マルテンサイト変態が生じない $\gamma$ ループの外側までCr濃度を高め、Laves相などのTCP(Topologically close-packed)型金属間化合物を強化相とする鋼<sup>(6)</sup>、また、ODSに関する研究も行われており<sup>(6)</sup>、今後の展開が期待される。

### (2) オーステナイト系耐熱鋼

オーステナイト系耐熱鋼の研究は、A-USCのボイラへの適用を目指した高強度化に関する研究が主である。従来のオーステナイト系耐熱鋼は炭化物を強化相とし、USC発電プラントの熱交換器用チューブに利用されている。しかし、700℃級のA-USCになると、Cuを添加した鋼や低熱膨張型の合金開発等の展開はあるものの、既存の材料も含めて、いずれも要求される強度(10万時間クリープ破断強度>100MPa)が足りない。したがって、現状はGCP(Geometrically close-packed)型金属間化合物 $Ni_3Al(\gamma')$ を強化相とするNi基合金を中心に候補材の開発が進められている(図3)<sup>(9)</sup>。

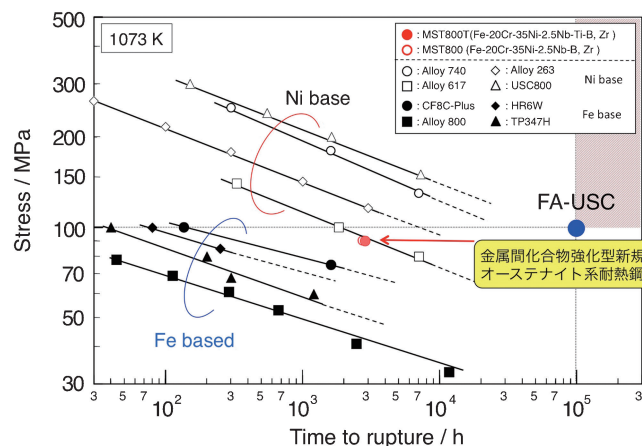


図3 A-USC用の候補材Fe基及びNi基合金の800℃における応力/破断時間曲線。

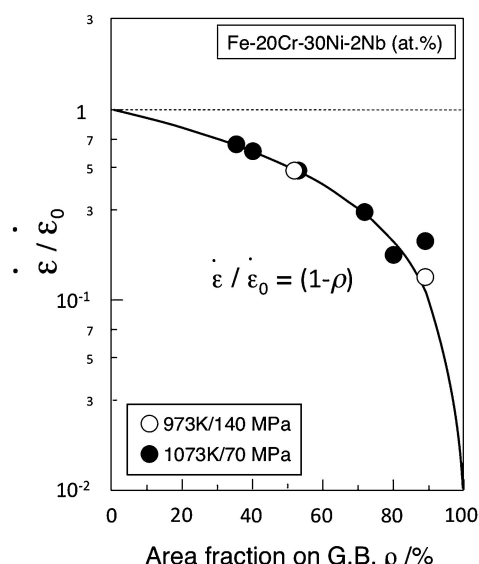


図4 新たに提案された金属間化合物強化型オーステナイト系耐熱鋼のFe<sub>2</sub>Nb Laves (TCP)相による粒界被覆率 $\rho$ とクリープ抵抗との関係。

ところが、最近のオーステナイト系において最も注目すべきは、TCP型金属間化合物Laves相(Fe<sub>2</sub>Nb)を強化相に用いる新たなオーステナイト系耐熱鋼の研究である<sup>(5)(10)(11)</sup>。著者等によって構築された組織設計指導原理に基づいて提案されたモデル鋼(Fe-20Cr-30Ni-2Nb(at%))は700℃級のA-USCに要求されるクリープ破断強度を十分満たす優れた強度特性を有し<sup>(9)(12)</sup>、また、その指導原理を応用して組織設計した800℃級の鋼(Fe-20Cr-35Ni-2.5Nb(at%))は、Ni基合金Alloy 617に匹敵するクリープ破断強度を有する(図3)<sup>(9)</sup>。

この新たな化合物強化型オーステナイト系耐熱鋼はTCP相とGCP相の2種類の金属間化合物の析出を利用し、優れた短時間での時効硬化性は粒内に短時間で整合析出するGCP相(Ni<sub>3</sub>Nb)により、また、その優れた長時間クリープ破断強度は結晶粒界に優先的に析出する平衡相TCP Fe<sub>2</sub>Nb Laves相によって大半の粒界が被覆されることによる粒界析出強化(Grain-boundary Precipitation Strengthening: GBPS)によって得られる<sup>(10)-(14)</sup>。

GBPSの基礎的な強化機構は、図4に示すように、鋼のクリープ速度 $\dot{\epsilon}$ がLaves相による粒界被覆率 $\rho$ の増加に伴い次式 $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0(1-\rho)$ ( $\dot{\epsilon}_0$ は被覆率 $\rho=0$ の時のクリープ速度)の関係を持って減少する、というものである。この強化機構の特徴は、その強化の効果が被覆率50%程度では不十分であり、80%以上になって著しく顕在化することにある。すなわち被覆率が90%から99%になると $\dot{\epsilon}$ は1オーダーも減少する。なお、この鋼の引張延性は、粒界の9割程度がLaves相で被覆されても、室温において20%以上、高温クリープ下においても50%以上を有することが実証されている。また、この鋼は、800℃においてもNi基合金と同程度の優れた耐水蒸気酸化性を有する<sup>(3)(15)(16)</sup>。

前述したように、現在A-USCの候補材はNi基合金を中心に開発が進められているが、Ni基合金に匹敵する強度を

有するオーステナイト鋼が開発されれば、コスト面でも計り知れないメリットがある。チューブへの成型も確認出来ており、今後実用化に向けた大型化や溶接性等の要素技術研究成果が期待される。

このLaves相と同様のTCP相であるFeCr- $\sigma$ 相の粒界析出強化を利用して新たなオーステナイト系耐熱鋼の設計指導原理の構築も行われている<sup>(17)(18)</sup>。最近欧州でもPower Austeniteと称して $\sigma$ 相を強化相とする新たな材料開発研究(Fe-(25-33)Cr-(22-38)Ni-Si-Mo-Nb-B-N-C)が行われ、長時間使用下において優れた耐酸化・耐食特性を有するとの報告がなされている<sup>(19)</sup>。TCP相はこれまで有害相と見なされ、材料設計においては避けられてきたが、今後この相を積極的に利用した新たな展開が起きる可能性は十分にある。

### 3. Ni基超合金

Ni基合金の材料開発研究は大半が先に述べたA-USC発電プラント用及び地上用ガスタービン材料に関連したものであり、航空機用の材料については次節で述べるTiAl基合金を除けば大半はコーティングの研究である。また、最近では3Dプリンターの登場もあり、材料開発の研究よりは成型プロセス技術に関する研究が圧倒的に多い。

700℃級A-USCボイラー材では、図3に示す候補材であるHR6W, Alloy263 Haynes282, Alloy617及びUSC141のクリープ特性に及ぼす組織、微量合金元素、予ひずみの影響、低サイクル疲労特性評価、強化因子や再熱割れに関する研究の他、配管厚肉部材への適用を念頭に置いたインゴット製造や大径管の試作、母材/溶接金属の低サイクル疲労挙動等、ボイラー材としてのプロセス要素技術に関する研究が行われている。また、長時間クリープ挙動に関するデータベースの構築に関する研究も行われている。一方、A-USCのタービン側については、Alloy 617及び800℃級として開発されたUSC800などローター材の組織特性および機械特性に関する研究が行われている。

ガスタービン材料の研究の主流は、タービン温度の向上を目指した高圧タービン動翼(HPT)のコーティングが中心である。1700℃級ガスタービンのHPT動翼の熱サイクル疲労による遮熱コーティング材(TBC)の剥離寿命の評価、耐食・耐酸化コーティングやアルミナ処理を施した際の母材/コーティング材界面の組織形態と剥離との関係、コーティング材そのものの高温安定性、低熱伝導率、難焼結性などの研究報告が主である。また、ディスク材としては、ディスクの大型化に向けた铸造性、相安定性及び鍛造プロセスの最適化に関する研究が行われている。

航空機用の動翼に関しては、コーティング材にき裂が生じるとそれが母材まで貫通することが問題となっており、クラック先端におけるメタル/スケール界面の応力解析などそのメカニズムの解明に向けた研究が盛んに行われている。また、最近では砂漠の上空を飛行するとエンジンに砂が取り込まれ、それによって熔融塩腐食が生じ、遮熱コーティング材の損傷要因となるCMAS(Calcia-Magnesia-Alumina Silicate)の研究も盛んである。

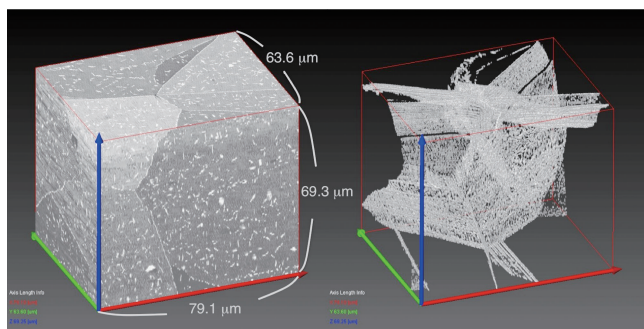


図5 レーザー削摩により構築したLaves相強化型オーステナイト系耐熱鋼の3次元像(左)とその粒界のLaves相のみを抽出した3次元像(右)。

ディスク材に関しては、これまでは疲労特性が重要であったが、最近のエンジンの高温化にともなって、クリープ/疲労の重畳効果に関する研究がより重要となる。

もう一つ注目すべきは、合金粉末を利用した3次元積層造形(additive manufacturing)法による製造プロセス、いわゆる3Dプリンターである。この造形手法は、冷却孔が内部に組込まれる動翼など、複雑形状部品の成型には非常に有効であり、今後この製造プロセスは間違いなく成長する。しかし、現状、形は出来ても特性が出ないという問題があり、成型性のみならず、組織制御や特性に及ぼす組織・組成の影響など、基礎的な研究が今後盛んになる。

この分野での最近の流行は組織の3次元観察と解析である。放射光や中性子線を用いて材料内部の広い範囲の組織を3次元にて解析し、組織形成過程や損傷を引き起こす組織の解明に関する研究が行われている。また、最近、Pollockらはフェムトセカンドレーザを用いたTriBeamトモグラフィという新規な手法を用いて数百μmオーダーの三次元組織解析を行っている<sup>(20)</sup>。図5は、前述したLaves相強化型オーステナイト系耐熱鋼にTriBeamトモグラフィを適用し、粒界に析出したLaves相のみを抽出した3次元組織の一例である。FIBによる方法はその解析範囲がせいぜい10数μmに限られるが、広範囲な3次元組織解析は結晶粒全体がどのように変形するか、また、内部欠陥によってき裂がどのように進展するかを可視化することにより、組織と特性の関係をもより深く理解する上において今後ますます重要となり、発展する分野である。

#### 4. 先進耐熱材料・プロセス

この分野で現在最もホットな研究対象はTiAl基合金である。Leap X, GE9Xなど今後開発される新型エンジンには全てTiAlの導入が予定されている。鋳造TiAl基合金(Ti-48Al-2Nb-2Cr(at%))は既にGENxエンジンの低圧タービン(LPT)ブレードの最終段とその前段に使用され、2012年からB787型機にて商用飛行を開始しているが、2016年1月には鍛造TiAl基合金(TNM: Ti-43Al-4Nb-1Mo-B(at%))がギアードターボファンエンジンPW1100GのLPTに使用され、ドイツ国内限定ではあるが、A320neo型機にて商用

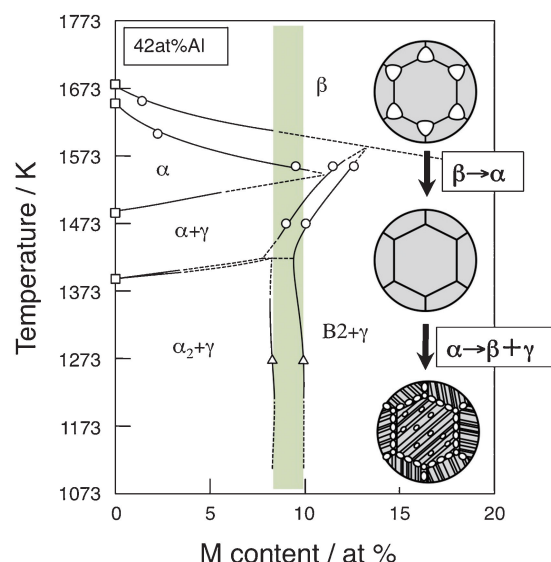


図6 Ti-Al-M 3元系合金に現われる特有な相変態経路( $\beta \rightarrow \beta + \alpha \rightarrow \alpha \rightarrow \alpha + \gamma \rightarrow \beta + \alpha_2 + \gamma$ )を示すTi-42Al-Mの縦断面図およびその相変態を用いて得られる組織の模式図。

飛行を始めた。

ところで、この熱間鍛造性と靱性を同時に付与する鍛造TiAl基合金の開発は、著者らが20年以上前に公表した組織設計指導原理を欧州の研究者と企業がいち早く取り入れて実現したものである<sup>(21)-(24)</sup>。その原理とは、図6に示すように、Ti-Al-M(M:  $\beta$ -Ti安定化元素)3元系特有の相変態経路( $\beta \rightarrow \beta + \alpha \rightarrow \alpha \rightarrow \alpha + \gamma \rightarrow \beta + \alpha_2 + \gamma$ )を利用する。すなわち、M元素を添加すると、その種類によらず高温側および低温側にて熱力学的に安定な $\beta$ 相が存在し、中間の温度域では不安定になる組成域が生じる(図中のバンド域)。熱間鍛造は高温側の $\beta$ 相( $\beta + \alpha_2$ 相領域)を利用して行う。その後の冷却過程において $\beta \rightarrow \alpha$ 変態にて $\beta$ 相を消失させ、その後 $\alpha \rightarrow \alpha + \gamma$ 変態にて組織をラメラ化する。その後、低温側にて $\beta$ 相が安定に存在する領域にて時効し、 $\beta$ 相をラメラ粒界およびラメラ界面に析出させるというものである。

TiAl基合金は比重がNi基合金の約半分であるため、その用途の拡大は燃費の向上につながる。したがって、この合金の研究は、成型性のプロセス技術に加えて、耐用温度の向上に向けた組織設計、クリープ/疲労特性、損傷許容応力の向上に力点が置かれることになる。特に重要なのが材料設計の基礎となる状態図である。現在市販されている状態図計算のためのデータベース(DB)は20年前から更新されておらず、信頼性に欠ける。また、損傷許容応力すなわちき裂進展特性の評価も大変重要になる。文献は散見されるものの、3点まげ試験や予き裂を導入していないなど、その方法はまちまちであり、信頼できるデータがない。現在我々は、SIPプロジェクトにて2020年代での実機搭載を目標に、LPTのより高段側および高圧圧縮機(HPC)翼への適用が可能な高性能TiAl基合金の組織設計および製造プロセス要素技術開発研究を産学連携にて遂行している<sup>(4)</sup>。

TiAlの研究においても一つ注目すべきは積層造形であ

る。GEは現在この手法を用いてLPTブレードを製造すべく、そのプロセス技術の確立について精力的に研究を行っている。しかし、実のところ翼形状にはなるが機械的性質の再現性に問題があるようだ。この手法を用いた製造技術についてはSIPの中でも行っている。TiAl基合金はラメラ組織が基本となるため、ラメラ粒の配向の仕方によって特性が変化する。したがって、粉末の急冷凝固を伴う積層造形法では、ラメラ組織の配向性を積極的に利用するのか、それとも配向性を低減してランダムにするのが選択肢となる。TiAl基合金は冷却中に種々の固相相変態が生じるため、伝熱物性値の取得や凝固・変態歪みの除去のための熱処理法も重要となろう。パラメータが無数にある製造条件(レシピ)の確立に加えて、良質の粉末の製造技術や不純物元素の制御、粉末のリサイクル化、組織制御など、解決すべき課題は多いが、近い将来この手法は現状の精密鋳造法に取って代わる可能性は十分ある。既存のNi基合金のように、合金の開発元に熱処理条件を規定されてしまうことにならないよう、標準化に対してイニシアチブを取ることが重要である。レシピを作るスピード勝負ばかりではなく、異なる発想に基づいたプロセス技術の確立が必要に感じる。

その他の先進耐熱材料としては、Co基合金と高融点金属基合金が挙げられる。Co基合金は、Co-Al-Wを中心に研究が進められている。この合金系は、Ni基超合金と同様、fcc  $\gamma$ -(Co, Al, W)母相中にL1<sub>2</sub>型構造の $\gamma'$ -Co<sub>3</sub>(Al, W)相がcuboidalに析出する。この系を発見したのも日本である<sup>(25)</sup>。この系の研究は、合金元素の添加によるL1<sub>2</sub>相の相安定性能の向上と機械的性質に集約される。この系の面白い点は、Ni基合金とは異なり、引張クリープ試験下によって生じるラフト化の方向が応力軸と平行になることである。今後の展開としてはNi基合金に比べてどれだけ優位性を示せるかである。

高融点金属基合金においては、bcc母相を複数のシリサイド系金属間化合物で強化するMo系とNb系の基礎研究が行われている<sup>(8)</sup>。特に前者についてはTiCを添加して組織制御により靱性の改善とクリープ強度の向上を目指す研究が盛んに行われている。これらの合金はいずれも1500℃超級のガスタービンやジェットエンジンへの適用を目指しており、無冷却で利用することによって燃費の大幅な向上が図られる<sup>(26)</sup>。したがって、今後の展開としては強度や靱性改善もさることながらバックセメンテーションなどコーティングによる耐酸化性の向上に向けた研究が重要である。

Fe-Al系(D0<sub>3</sub>, B2型)合金もオーステナイト系耐熱鋼の代替材料として欧州を中心に基礎と応用研究が行われている。この材料の特徴は高価なNiを含まないことにあるが、bcc構造に共通する800℃以上での強度の急激な低下をどう克服するかが今後の展開の鍵を握る。Laves相を強化相に用いるなどの試みはあるが、新たなBreakthroughが必要である。

## 5. 耐環境特性

耐環境特性については前節までにいくつかポイントを述べたが、オーステナイト系およびTiAl系においていくつか興

味深い研究が行われている。オーステナイト系においては、我々が提案したFe<sub>2</sub>Nb Laves相強化型耐熱鋼が優れた耐水蒸気酸化性を有することは既に述べたが、これは固溶Nbの存在によって酸化初期に均一なCr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>保護皮膜の形成が促進され、スケールの成長を抑制することに起因する<sup>(6)(9)</sup>。すなわち、Nbの添加は保護性連続被膜を得るのに必要な合金中のCr濃度を低減させる効果がある。また、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を保護皮膜として利用することを目的に、Fe-Ni-Cr系合金におけるAlの影響、さらにはAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の形成を促す合金元素としてCuが有効との報告がなされている<sup>(9)</sup>。いずれも興味深い結果であり、今後はその機構解明が待たれる。

TiAl系においては、以前からNbの添加が耐酸化性の向上に有効であることは以前から知られているが、その機構の解明およびその知見を合金設計に活かすべく、系統的な基礎研究は重要である。また、フッ素の添加はAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の保護被膜の形成を促し、TiAl基合金の耐用温度を1000℃以上まで上げられるとの報告があり<sup>(7)</sup>、今後実用化に向けてその効果の有効性を検証する研究も必要となろう。

高温材料にとって耐環境特性は避けて通れない。あらゆる材料において耐用温度の向上が求められる中、機械的特性を満足することがまず第一であることは言うまでもないが、耐熱材料の組織設計において今後一層バルク(組織・強度)の専門家と表面(酸化)の専門家が融合することが重要である。

## 6. おわりに

本稿では、最近の耐熱材料について特に注目されている材料を中心に、その動向と展望を簡単に述べた。紙面の都合上カバーし切れなかった点があればご容赦願いたい。詳細は昨年開催された国際会議123HiMAT-2015のプロシーディングス<sup>(6)</sup>あるいはその報告書<sup>(27)</sup>を参照頂きたい。

近年、耐熱材料の設計においては、これまでの経験、実験結果をデータベース(DB)化し、計算科学(AI)によって特性予測まで行う動きがある。これは10年以上前から米国にてMGI(Materials Genome Initiative)やICME(Integrated Computational Materials Engineering)として始まり、我国ではMaterials InformaticsやMaterials Integrationとして追随している。この流れは今後も続くであろう。しかし、計算によって優れた材料が創成されたという話は著者が知る限り無い。DBは常にアップデートされなければ陳腐化する。したがって、計算科学も結構だが、同時に実験も行われなければならない。良い材料は生まれない。Feが相変態することも知らずに数値だけで材料設計など出来るわけがない。資源の無い我国において、モノづくり技術は大変重要であり、計算ばかりが過度にもてはやされると、材料設計の基礎となる金属学が衰退することになりかねない。特に高温材料は、使用中に時々刻々と組織が変化し、それが材料特性と密接に関連する。したがって、時間軸を取り入れた組織変化を如何に組み入れるかが鍵となる。

本稿でも述べたが、最近の耐熱鋼ではTCP相を強化相として利用する研究が増えてきている。これまではTCP相は硬くて脆い有害相と見なされ、それを避ける組織設計がなさ

本報告の一部は、先端的低炭素化技術開発 (ALCA) における研究課題「革新的800℃級火力発電プラント用超耐熱鋼の設計原理」、および、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「革新的構造材料」の研究開発項目「耐熱合金・金属間化合物等の開発」における研究開発課題「ジェットエンジン用高性能 TiAl 基合金の設計・製造技術の開発」の支援による成果である。また、(株)日本学術振興会第123委員会各分科会主査および協力会委員各位の協力に謝意を表します。