火力プラントの効率向上に寄与する 高強度鍛造 Ni 基合金の合金設計及び革新的製造技術

Alloy Design and Innovative Manufacturing Technology of High-Strength Ni-base Forged Alloy for Efficiency Improvement in Thermal Power Plant

今野 晋也*1 Shinya Imano
佐藤 順*2 Jun Sato
鴨志田 宏紀*3 Hironori Kamoshida
芝山 隆史*3 Takashi Shibayama
太田 敦夫*3 Atsuo Ota

三菱日立パワーシステムズ(株)(MHPS)では火力発電プラントに用いる Ni 基鍛造合金の開発期間の短縮，開発費削減と大型品試作時のリスク低減を可能とする合金設計技術を確立し，当該技術を用いて製造性に優れた耐用温度 800℃級の蒸気タービン材料，ガスタービンに用いる大型 Ni 基ディスク材を開発し実機適用検討を進めている。また，航空機エンジンに適用されている高強度鍛造材で問題になる製造性を金属組織の制御により，飛躍的に改善する製造プロセスを開発し，当該技術を用いて，航空機エンジン用高強度鍛造材料の火力プラントへの適用検討を進めている。

1. はじめに

火力発電プラントは，その作動温度を上昇させることで発電効率を向上させることができる。MHPS では，火力プラントの高温部材に用いる耐熱材料を開発し，効率向上に寄与してきた。Ni 基鍛造材料は高温強度と靭性に優れているが，溶解，鍛造，切削加工などの製造性が悪く，航空機エンジン部品に適用されているNi基鍛造材料を，部材サイズの大きい火力プラントに適用することは困難であった。MHPS では，強度特性と製造性を机上検討と模擬実験により予測することを可能とする合金設計技術を確立し，蒸気タービンロータやガスタービンディスクに適用できる Ni 基鍛造合金を開発した。また，加工性の観点から航空機エンジンにも適用が容易ではない高強度 Ni 基合金の加工性を飛躍的に向上させる製造プロセスを開発した。本報では，上記の開発技術と開発材について紹介する

2. 強度特性と製造性を両立する合金設計技術の確立

2.1 計算状態図を用いた机上設計

Ni 基合金では，母相であるγ相(FCC 相)にγ相と結晶格子が整合するγ'相($L1_2$構造)を析出させることで，高い強度を得ており，γ'相の析出量が Ni 基合金の強度特性を支配している。γ'相やその他の相の析出量は，計算状態図(Thermo-Calc 等)を用いることで予測が可能である。図1は，Thermo-Calc と Ni-Data[(1)]を用いた計算結果の一例であり，使用温度におけるγ'相の析出量から，強度特性を推定することが可能である。γ'相は強度特性を向上させるが，鍛造中に析出すると延性を低下させ，割れ等を発生させるため，γ'相の固溶温度から熱間鍛造可能

*1 三菱日立パワーシステムズ(株) 研究所火力システム研究部 グループ長 博士(工学)
*2 三菱日立パワーシステムズ(株) 研究所火力システム研究部 博士(工学)
*3 三菱日立パワーシステムズ(株) 研究所火力システム研究部

な温度が推定できる。また，σ 相などの有害相が析出すると長時間のクリープ強度や靭性を低下させることから，有害相の析出温度は長時間信頼性の指標となる。しかし，従来の計算状態図では，大型鋼塊製造時に問題となるマクロ偏析（重力偏析）を予測することができなかった。Ni 基合金は，特性向上のためにNiとは比重の異なる多くの元素を含むため，重力偏析が起きやすく，大型品製造時のネックとなっていた。

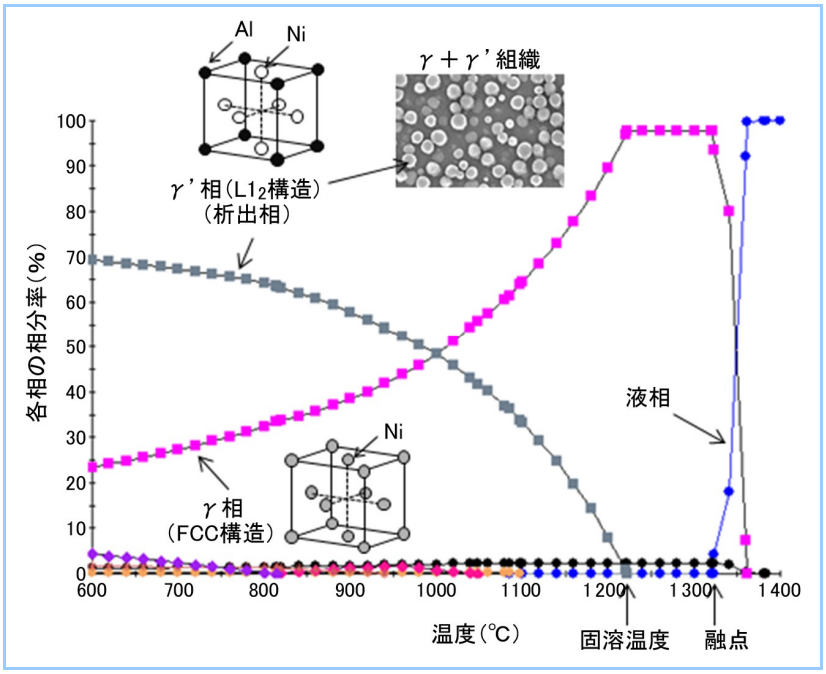

図1　Ni 基合金の相平衡計算結果の例

図2は，凝固試験装置と固液界面を模式的に示した図である。凝固が進行すると，固液平衡に応じて溶湯中に合金元素の濃縮が起こり，溶湯中で密度差（$\Delta\rho = \rho_0 - \rho$）が生じる。この密度差を駆動力として，溶湯の流動が起きることで偏析が生じると考えられている[2]。溶湯の密度は，成分と温度から計算することができるが，計算状態図から凝固中に生じる溶質元素の濃化を計算することで，固液界面近傍の濃化液相の密度を推定することができる。また，密度の計算には，固相が形成されて液相の流動が起こらなくなるまでの温度低下も考慮している。本手法を用いることで，大型の Ni 基鍛造材の製造性と高温強度特性を両立する成分の机上検討を可能とした。

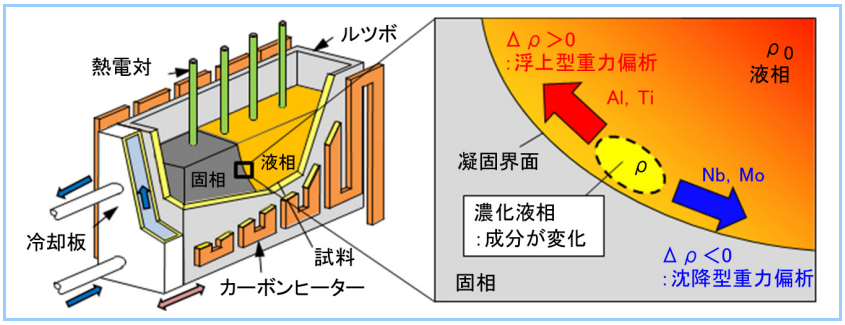

図2　凝固試験装置と偏析メカニズム

2.2　大型鋼塊模擬材による評価

計算の妥当性を検証するために，大型鋼塊と同等の凝固条件を再現する装置を開発し，大型鍛造品の鋼塊製造性確認に活用している。机上検討で有望成分を絞り込んだ後に，10kg 程度の素材で 10 トン超の鋼塊の凝固条件を模擬した試験片を作製し，偏析の有無を確認することで，大型鋼塊製造性を評価することができる。また，この試験片に対して，大型鍛造品と同様の温度，加工履歴を与えることで，大型鍛造材を模擬した特性評価を行うことができるようになっている。このように机上検討と大型品を模擬した小型試験により成分を絞り込むことで，開発期間を短

縮するとともに，大型品の試作リスクの低減が可能となった。

次章からは，このような計算と実験の両方を組み合わせた合金設計技術に基づいて，各種の用途に向けて開発した材料について説明する。

3. 製造性に優れた耐用温度 800℃級蒸気タービン材料

3.1 高温強度と熱間鍛造性を両立させる合金設計

石炭火力発電プラントの蒸気温度は 600℃を超え，従来利用されてきたフェライト系耐熱鋼の使用温度限界に近づいている。そのため，フェライト系耐熱鋼より高強度な Ni 基合金を用いて，蒸気温度を700℃まで上昇させるA-USC（Advanced Ultra Super Critical，先進超々臨界圧）への取り組みが国内外で進められている。耐用温度 700℃級の候補材料としては Alloy617 や Alloy263 などが存在するが，より耐用温度の高い高強度材を用いれば，一層の効率向上が可能となるだけでなく，部材の薄肉化による材料費の低減など，経済性の観点からも有意義と考えられる。

高強度化のためには，前述のようにγ’相の析出量を増加させることが効果的だが，γ’相が高温まで安定となるため，γ’相固溶温度が上昇し，鍛造性が悪化する（図3）。筆者らは，γ’相の安定性に及ぼす合金元素の影響を計算状態図により解析し，従来のNi基合金でγ’相を安定化させる元素として添加されているNb，Ta，Tiを無添加とし，Alのみでγ’相を安定化させることで，固溶温度を低く抑えながらも使用温度でのγ’相析出量を大幅に増加させられることを見出した。この知見に基づき，高温強度と熱間鍛造性の観点から新しいNi基合金（USC800 初期成分）の成分を決定した。図4にγ’相析出量の計算結果を示すが，USC800 のγ’相固溶温度は鍛造部材として広く利用されているAlloy263と同等であるが，使用温度におけるγ’相の析出量は2倍以上大きいことから，優れた鍛造性と高温強度の両立が期待できる。

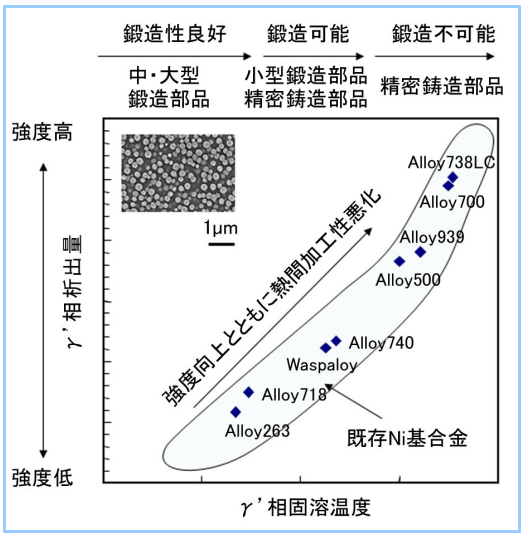

図3 γ’相の固溶温度と 700℃における析出量の相関

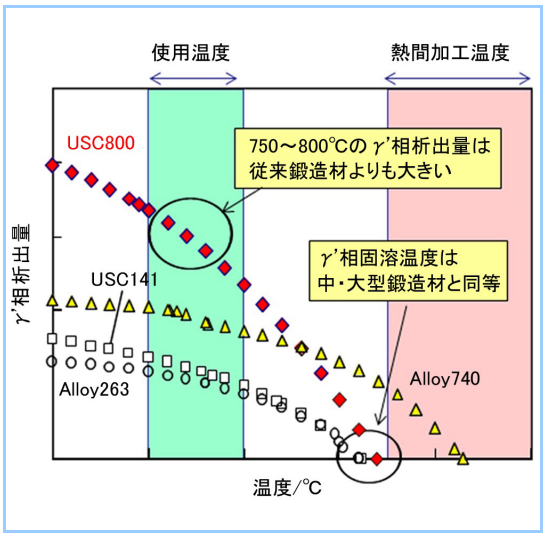

図4 γ’相析出量の温度依存性

3.2 大型鋼塊製造性を改善する合金設計

図5に前章で記した手法により計算した USC800 初期成分の溶湯密度差（Δρ）を示す。初期成分ではΔρが正の方向に大きいことから，大型鋼塊の凝固時に浮上型の偏析欠陥が発生すると判断した。検討の結果，浮上型の偏析を助長するWと沈降型の偏析を助長するMoの添加量を調整することで，Δρの絶対値を最小化できることが分かった。この知見をもとにW/Mo比を最適化し，γ’相の析出量や固溶温度を変えることなく，マクロ偏析の発生を抑制し，大型鋼塊の製造性，鍛造性，高温強度を両立する USC800 の最終成分を決定した。図5に示すように，大型鋼塊模擬材による評価により，初期成分では，浮上型の偏析欠陥が発生するものの，最終成分では偏析欠陥が発生しないことを確認した。

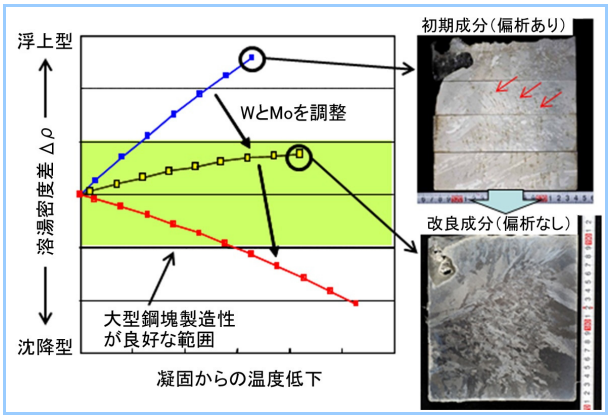

図5 MoとW量の調整による溶湯密度差(Δρ)の変化

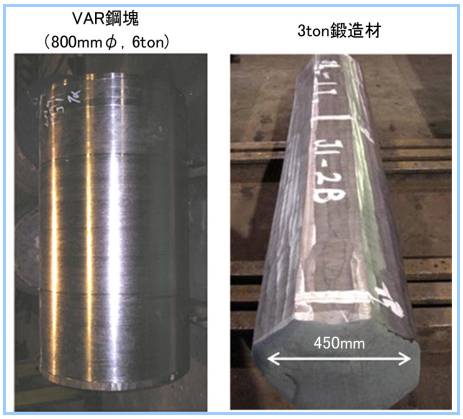

図6 USC800の試作結果

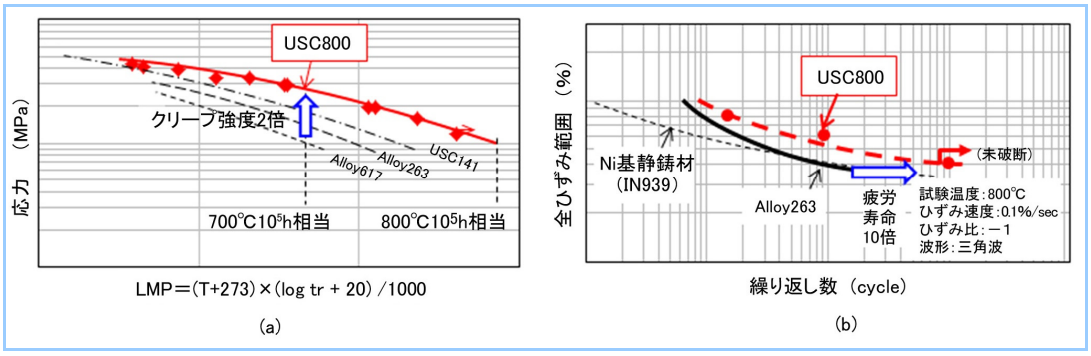

図7 USC800の(a)クリープ特性と(b)低サイクル疲労特性

3.3 試作材の評価結果

図6に，USC800により試作した大型鋼塊(外径800mm)と試作した大型鋼塊から作製した鍛造材の外観を示す。開発材の鍛造性は良好であり，また，試作品の破壊調査から偏析欠陥がないことを確認した。図7に，USC800のクリープ特性，及び低サイクル疲労特性を示す。クリープ耐用温度(100MPa，10^5時間)は800℃に到達し，700℃におけるクリープ強度は，約250MPaであり，A-USC候補材であるAlloy617，Alloy263に比べて約2倍以上のクリープ強度を有している。また，ガスタービン燃焼器に用いられているAlloy263に比べて5～10倍の低サイクル疲労寿命が得られており，疲労強度が重視されるガスタービン部材としても有望である。試作した鍛造素材から，型鍛造部材，大型配管，チューブ，ボルト，板材，棒材や線材が容易に成形できることが分かっており，蒸気タービン部材だけでなく，広範囲な火力プラント部材に適用できる可能性がある。

4. 強度特性に優れた大型Ni基ディスク材

産業用ガスタービンのディスク材には，フェライト鋼などの製造性に優れた鉄鋼鍛造材料を用いるのが主流であったが，一部の燃焼温度の高い高効率機では，耐用温度の高いNi基鍛造合金が用いられている。航空機エンジンや小型ガスタービンに広く用いられているAlloy718は，ガスタービンディスク材として優れた強度特性を有しているが，鋳造時に重力偏析が発生しやすいため小型の鋳塊や製品の製造に限定されている。MHPSでは，2章に記した合金設計技術により，Alloy718の成分改良を行い，強度特性を低下させることなく，製造性を改善し，大型ディスクの製造が可能な新しいNi基ディスク材料(FX550)を開発した。

図8に示すように，Alloy718では凝固中に発生する溶湯密度差(Δρ)が負側に大きく，沈降型の重力偏析が発生するが，Alloy718の添加元素であるMoとWの添加量を調整した開発材では溶湯密度差(Δρ)が0に近くなっており，大型ガスタービンのディスクに用いられているAlloy706と同等レベルとなっている。また，大型鋼塊模擬材による評価によりAlloy706と同等の大型鋳塊が製造できる見通しを得ている。図9は，Alloy718と開発材について，安定な析出相の相分率を計算した結果である。同等の強度特性を得るため，強度に寄与する析出強化相(γ'相と

γ’’相)と組織(結晶粒径)制御に寄与するδ相の相分率をAlloy718と同等としている。図 10 にFX550 により試作したディスク素材及びディスク素材製造に用いたビレットの断面マクロ組織を示す。断面マクロ組織観察から，重力偏析が発生しないことを確認し，ディスク素材の破壊調査から，Alloy718と同等以上の強度特性が得られることを確認した。

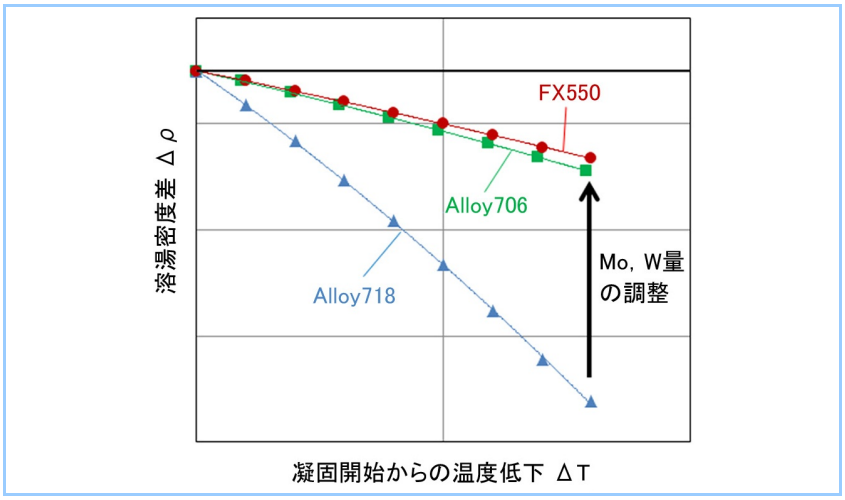

図8 Mo，W量の調整による溶湯密度差(Δρ)の改善

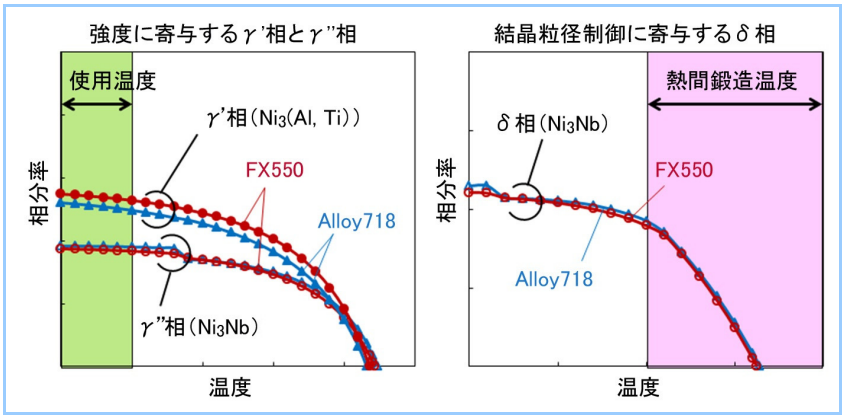

図9 FX550の析出強化相とδ相の相分率

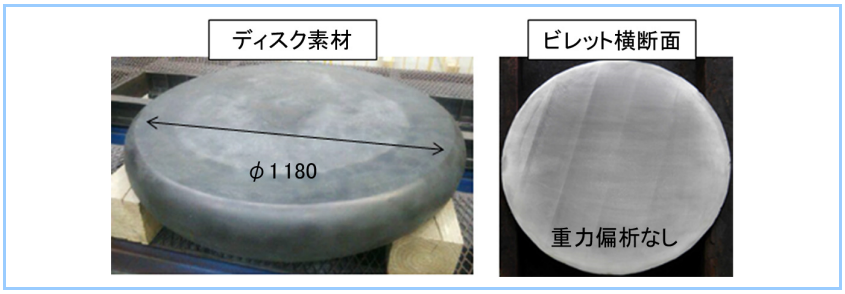

図 10 FX550 ディスク素材外観及びビレット横断面マクロ組織

5. 高強度 Ni 基合金の革新的製造プロセス

析出強化型のNi基合金の強化機構を図 11 に示す。Ni基合金は図11(a)に示すように母相(γ相)中に析出物(γ’相)が格子整合性をもって析出することで，その整合界面が強度に寄与することが知られている。筆者らは，図 11(b)に示すようにγ相とγ’相の界面を非整合化することで，その強化能力を消失させ，軟化させることができ，この原理を用いることで，γ’相が 40%以上析出する航空機エンジン用高強度 Ni 基鍛造材の加工性を飛躍的に改善できることを見出した。また，加工後の熱処理により，γ’相を再度，整合析出させ当初の強度を得られることを確認している。図 12 はAlloy718の1.5倍以上の高温強度を有するNi基鍛造材(AD730[4])について，920℃において引張試験を行った後の試験材の外観を示す。図 12(a)は，従来のプロセス，図 12(b)は，

上記の軟化処理を行った試験材の結果である。従来のプロセスではほとんど変形せずに破断しているが，上記の軟化処理を行った試験材では，大きく変形した後に破断しており，加工性が大幅に改善することを示している。その他の試験により，熱間鍛造性が Alloy718 と同等レベルに改善できること，冷間加工により板材や線材の作製が可能であることも確認している。開発したプロセスを用いることで，製造性の観点から，火力プラントへの適用が困難であった航空機エンジン用高強度 Ni 基鍛造材をガスタービンや蒸気タービン部材に適用することが可能となる。

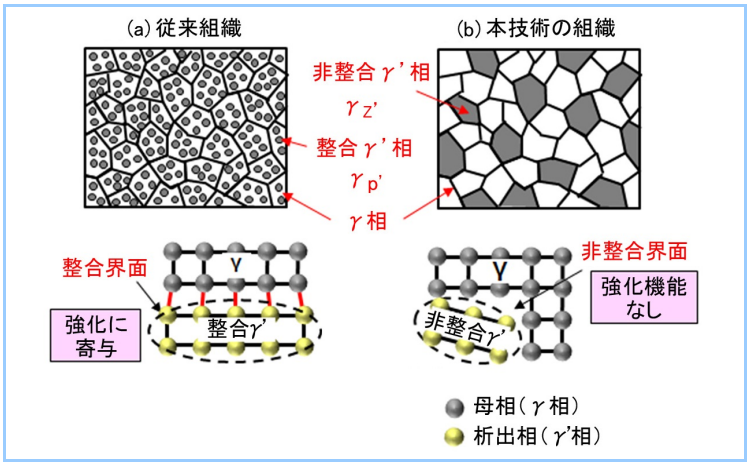

図 11 Ni基合金の強化機構

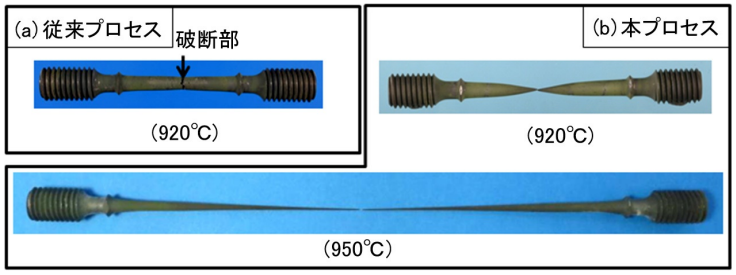

図 12 本プロセス適用 AD730 の引張試験材外観

6. まとめ

火力発電プラントの高効率化に寄与する鍛造Ni基合金の合金設計手法を確立し，開発した技術を用いて，耐用温度 800℃級蒸気タービン材料とガスタービン用大型ディスク材を開発し，実機適用に向け試作検証を進めている。また，ガスタービンの動翼に用いられている精密鋳造材と同等レベルのクリープ強度と1.5倍以上の引張強度と疲労強度を有するものの製造性の観点から火力プラントには適用が困難であった高強度航空機エンジン材の製造性を飛躍的に改善する製造プロセスを開発し，高強度航空機エンジン材をガスタービン部材に適用できる見通しを得た。

本報の成果の一部は，国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の戦略的省エネルギー技術革新プログラム“耐用温度 800℃級蒸気タービン用新鍛造材料の実機適用性の検証”，内閣府の戦略的イノベーション創出プログラム“高強度 Ni 基ディスク材料の実用的加工プロセスの開発”及び経済産業省の先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発の成果の一部である。

参考文献

(1) Saunders, N. et al., J-Ph. Proc. Symp. Materials Design Approaches and Experiences, eds. J.-C. Shao et al., Warrendale, PA, TMS, (2001) p.185-197
(2) 梶川耕司ほか, Ni 基超合金のフレッケル偏析の生成, 鉄と鋼, Vol.95 No.8 (2009) p.613-619
(3) Beardmore, P. et al., Trans. Metall. Soc. AIME, Vol.245 (1969) p.1537
(4) Devaux, A. et al., AD730™ – A NEW NICKEL-BASED SUPERALLOY FOR HIGH TEMPERATURE ENGINE ROTATIVE PARTS, Superalloys 2012, p.911-919