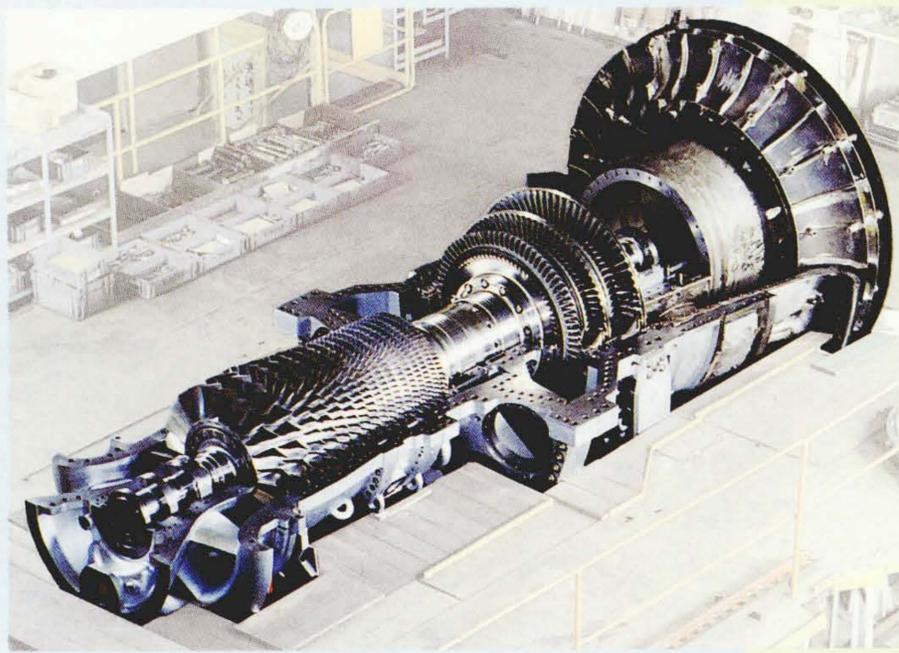


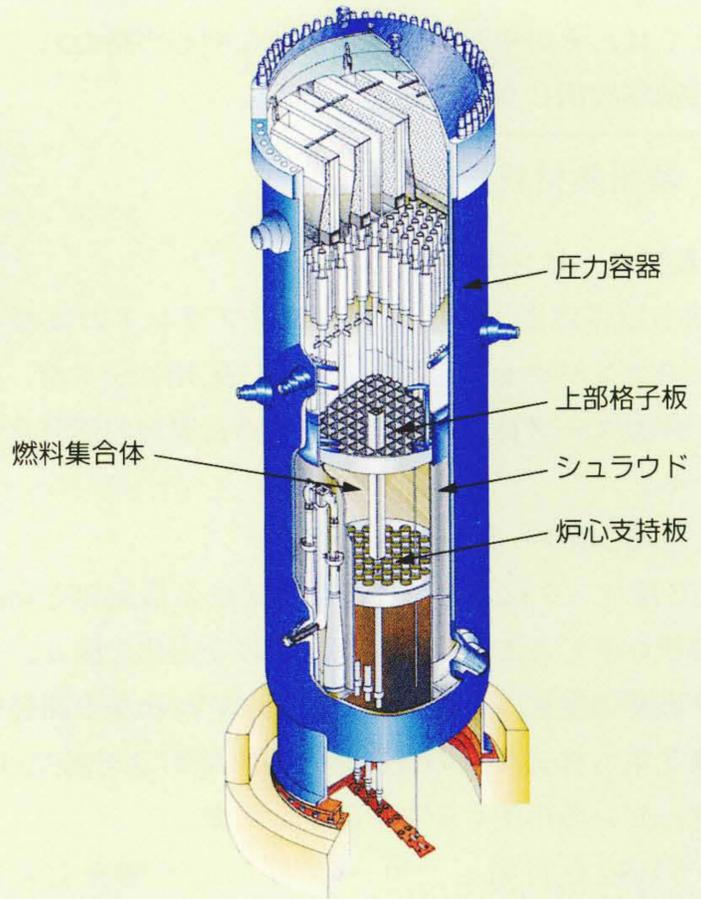
電力機器の革新を担う材料基盤技術

Fundamental Materials Technologies for Supporting High Reliability of Power Plants

諏訪正輝* Masateru Suwa 児玉英世* Hideyo Kodama
岩柳隆夫* Takao Iwayanagi



(a) 高温ガスタービン "H25"



(b) 沸騰水型軽水炉

電力機器の革新を担う材料基盤技術

日立製作所が自主開発した高温ガスタービン“H25”には、静翼、ディスク、シュラウド、トランジションピースなどに新合金を搭載している。これらは、次世代ガスタービン技術の発展につながるものである。沸騰水型軽水炉では、上部格子板、シュラウド、炉心支持板や燃料集合体での材料の長寿命、高信頼化が今後とも重要な課題である。

エネルギー消費の中に占める電力の割合の増大、ピークの先鋭化などに対処するベストミックスが、わが国のエネルギー基本政策である。

火力発電設備ではLNG、石炭火力やコンバインドサイクルでの高効率、コンパクト化、環境負荷低減の要求が高まり、また将来の切り札として期待されている石炭ガス化複合発電や石炭燃焼複合発電などの加圧流動床開発が促進されつつある。原子力発電では軽水炉の安全確保の大前提の下、設備利用率のいっそうの向上、高経年化対策および長寿命化が望まれている。また、核融合炉を

含めた将来型の炉の開発も推進されている。

このような背景の下で日立製作所は、電力機器の高効率化、高信頼性、経済性、環境問題への適合を目指して各種技術の開発を進めている。機器革新での材料の役割はきわめて大きく、種々のニーズにこたえて、材料ナノレベル制御技術、すなわち原子、分子レベルでの材料構造制御、プロセス制御、計測分析技術を駆使して、発電プラント用材料や、絶縁、防食、接合などの材料基盤技術の開発を進めている。

*日立製作所 日立研究所 工学博士

1. はじめに

アジアを中心とした世界的規模での電力需要の伸びにより、地球環境に適合した高信頼性発電設備が求められている。エネルギー機器の革新を担う点で、材料技術は重要である。このニーズにこたえて日立製作所は、超耐熱・耐照射性材料などの開発、材料基盤技術の高度化を推進中である。

ここでは、その中から、最近、特に関心の持たれている材料基盤技術について述べる。

2. 超耐熱材料技術

2.1 蒸気タービン用材料

高効率超超臨界圧火力(USC)発電プラントおよびタービンのコンパクト化を目指して、USC用ロータ材、高低圧一体型ロータ材、および43インチ長翼材の開発を進めている。

2.1.1 USC用タービンロータ材

600℃用ロータ材としては、合金組成の最適化と高温強度の担い手である炭化物の高温での安定化を図り、クリープ破断強度を向上させた12CrMoWVNb鋼を開発した。東北電力株式会社の世界最大級の原町2号機1,000 MWタービンの中圧ロータを図1に示す。

650℃USCを目指したロータ材として開発した12CrWCoMoVNbB鋼は、Wを増加してCoやBを添加することにより、炭化物と金属間化合物の分散、および固溶効果の組合せでロータ材を強化してクリープ破断強度を向上させたものである¹⁾。

2.1.2 高低圧一体型ロータ材

蒸気タービンの高中圧部と低圧部の一体化(一車室

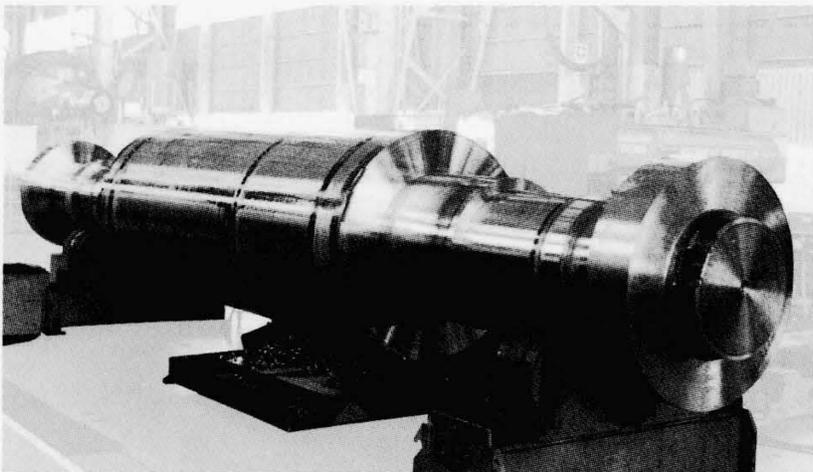


図1 600℃超超臨界圧 1,000 MW蒸気タービン用中圧ロータの外観(直径: 1,230 mm, 長さ7,680 mm)

開発鋼をESR(Electroslag Remelting)法で製造した鋼塊から加工したロータを示す。

化)、および低圧最終段翼の長大化が図れれば、コンパクト化が可能となる。高低圧一体型タービンを実現するために、高中圧部に要求される高い高温強度と、低圧部に要求される高い低温靱性を兼ね備えたロータ材を開発した。直径1,700 mm, 長さ8,800 mmの大型ロータは、10万時間クリープ破断強度が従来のCrMoV鋼ロータの1.2倍であり、衝撃強さが10倍と、優れた機械的性質を持っている。

2.1.3 43インチ長翼材

従来の12Cr鋼翼材に、主としてNbを添加して高強度化した12Cr鋼を開発した。これにより、43インチ長翼(1,092 mm)を製造し、引張強さ1,275 MPaが達成できることを確認した(従来材は約1,128 MPa)。

2.2 高温ガスタービン用材料

ガスタービンの燃焼温度は年々上昇し、現在は燃焼器出口温度1,400℃級(複合サイクル総合効率48%)が実用化されており、さらに1,500℃級(同54%)の開発が期待されている。高温ガスタービンでは、特に回転部品である動翼とそれを支持するディスク、さらに材料の耐熱性を改善するための遮熱コーティング〔TBC(Thermal Barrier Coating)〕が重要である。

2.2.1 単結晶動翼の製造技術

結晶粒界のない単結晶合金では、大幅な耐用温度の向上が期待できる。そこで、翼長200 mmを超え、かつ内部に複雑冷却孔を持った単結晶動翼の大型化精密鑄造技術を新たに開発した。

2.2.2 ディスク材

従来の12Cr鋼のSi, Mnを低減し、Nbを添加して高強度・高靱性を図った12Cr鋼を開発した(図2参照)。新合金では、結晶粒の微細化および結晶粒界の偏析防止を図

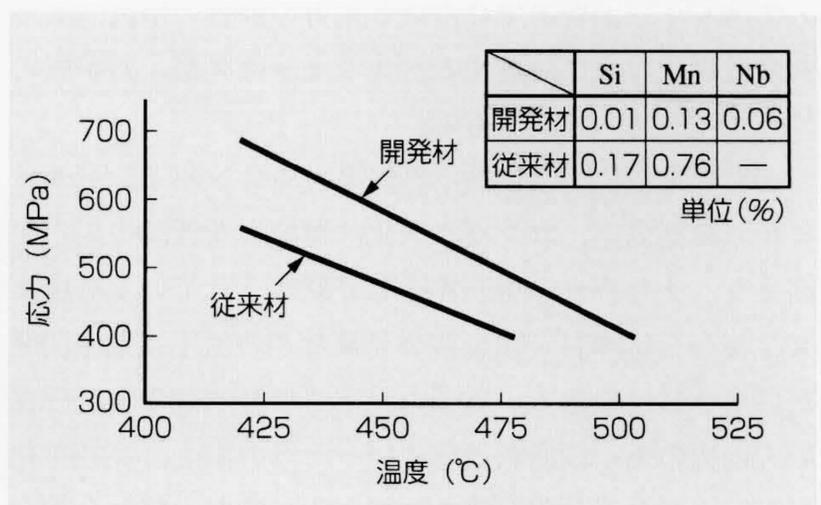


図2 12Cr鋼の10⁵時間クリープ破断強度

NbCの微細分散により、クリープ破断強度を大幅に向上させている。

り、脆(ぜい)化特性も改善している。

2.2.3 セラミック遮熱コーティング

高温燃焼ガスに直接さらされる燃焼器、動翼、静翼には、遮熱用セラミックコーティング(TBC)を開発した。特に動静翼では、燃焼器に比べて過酷な環境にさらされるため、遮熱のほかに熱応力緩和と環境遮断機能を付与した四層構造のTBCを開発した。開発したTBCは、実機模擬加熱試験により、従来の二層構造TBCに比べて約2倍の耐久性と、約90℃の遮熱効果が確認できた。

3. 原子カプラント用材料

3.1 軽水炉用材料

軽水炉の高信頼化・長寿命化に対応して、炉内および燃料構造物用材料にはいっそうの高耐食性や放射能低減への寄与が求められている。日立製作所は、これらの要求にこたえるための材料開発を進めている。

3.1.1 炉内構造物用高耐食ステンレス鋼

軽水炉の長期運転では、炉内構造物に使用されているオーステナイトステンレス鋼は、中性子照射量が高くなると粒界型の応力腐食割れ感受性を示す可能性があると考えられている。この現象は、中性子照射に誘起される粒界型応力腐食割れであることから、IASCC(Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking)と呼ばれている。

日立製作所は、中性子照射による結晶粒界への元素偏析がIASCCの材料主要因であることに着目し、P、Nの低減効果を検討してきた。米国商用炉での実炉照射検証で、PおよびNを低減した316L鋼は、304鋼に比べて耐IASCC性が格段に向上していることが明らかになった。現在、これらの知見および材料の製造性などの点を総合的に考慮して、実用化の検討を進めている。

さらに将来的には、IASCCフリーの材料を目指して原子レベルでの検討を進めている。基本的概念は、中性子照射で結晶粒界から耐食性に必要なCrが欠乏する現象を原子拡散制御によってなくすことにある。Zr添加によって原子空孔の結晶粒界への移動を抑制した原子空孔トラップ型、およびMn添加でCr原子のアンダーサイズ化を図った原子サイズ調整型の二通りの合金について検討を進めている。400℃での電子線照射実験の結果、ZrやMnを添加したステンレス鋼の結晶粒界Crの欠乏が抑制できることを確認している。

3.1.2 軽水炉燃料構造材料

軽水炉燃料の高燃焼度化には、ノジュラ腐食と呼ばれる、局部酸化が発生しない燃料被覆管用ジルコニウム合

金(ジルカロイ)が要求される。Fe、Ni量を増すことで、アニオン欠陥量を低減してノジュラ腐食が抑制できる新合金の開発に成功した²⁾。

3.1.3 しゅう動部用Coフリー耐摩耗材料

ピンやローラなどのしゅう動部用材料には、従来、耐摩耗性に優れたCo基合金が使用されている。日立製作所は、放射能低減を目的として、Coフリー合金の開発を進めている。Ni基やFe基合金母相への炭化物分散によって耐摩耗性のいっそうの向上が図れることを明らかにした(図3参照)。

3.2 核融合炉用材料

核融合炉では、最も大きな熱負荷を受けるダイバータの開発が重要な課題である。ダイバータとして炭素繊維炭素複合材(C-C材)を銅ヒートシンク材に接合した強制水冷構造が、日本原子力研究所を中心に検討されている。日立製作所は、耐熱負荷20 MW/m²、長さ1.5 mの曲面大型ダイバータ試験体を同研究所に納入した。このダイバータの特徴は、複雑で長尺構造のヒートシンク材とC-C材とが、高い信頼性で金属的に接合されている点である。さらに、現状の無酸素銅に代わる高強度・高熱伝導性のヒートシンク材を開発中である。

4. 共通基盤技術

4.1 絶縁

絶縁材料は、電力機器の信頼性、安全性を確保するために大きな役割を果たしている。日立製作所は、絶縁材料・プロセスの高性能化と低コスト化の両立を目指して

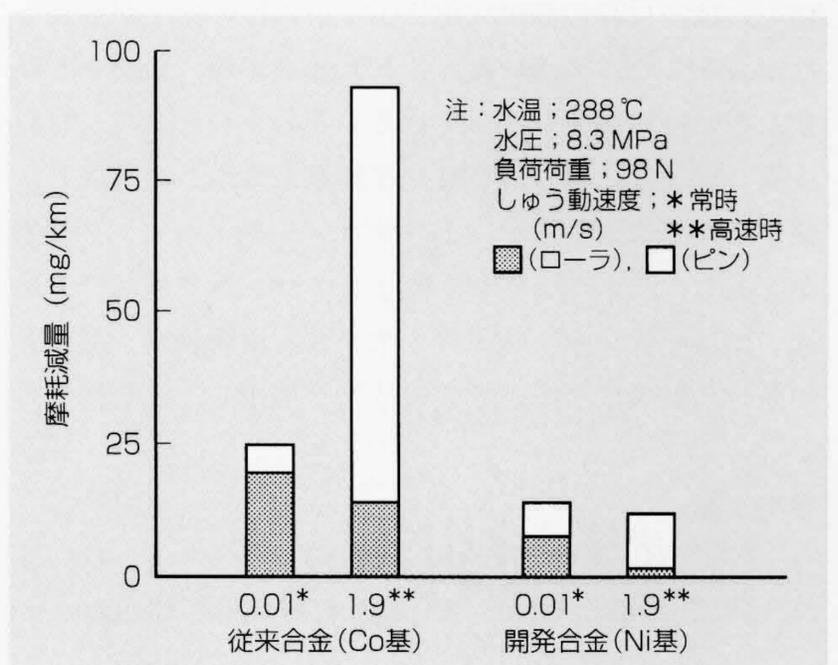


図3 開発合金(Coフリー)の高温水中摩耗量

開発合金は、炭化物分散と母相の組織制御によって良好な耐摩耗性を持っている。



図4 熱劣化診断の様子

大口径(1.5 mm)プラスチック光ファイバなどを組み合わせて開発した携帯型装置(2 kg)を用いて、エレベーター用モータの寿命を診断している。

抜本的な見直しを進めている。高信頼性絶縁層であっても高温での使用環境にさらされると、熱劣化が進行することは免れない。絶縁材料の余寿命を非破壊法で簡便に診断できれば、事故を未然に防止するとともに、絶縁機器の計画的交換が可能になる。そのため、この目的にかなう寿命診断基礎技術を確立した(図4参照)。この技術は、絶縁材料の熱劣化度を近赤外光の2波長の吸光度比から推定できることを見だし、これにより、あらかじめ作成した診断マスターカーブと実測データの比較から余寿命を推算するものである。現在、汎用性のある診断技術と位置づけ、その適用拡大を図っている。

4.2 防食技術

各種製品の低コスト化、メンテナンスフリー化を図るためには、材料の高耐食化による信頼性の向上が重要となる。そこで、表面被覆、インヒビタ処理、カソード防食などの技術開発を進めている。その一つとして、材料表面に保護性に富む薄い酸化皮膜をあらかじめ形成し、使用環境での耐食性を向上させるプレフィルミング技術を開発した。これまでに、原子力プラントや吸収式冷凍機の機器配管から、磁気ディスク装置用薄膜ヘッドなどの微小な製品に至るまでこの技術を適用し、高い防食効

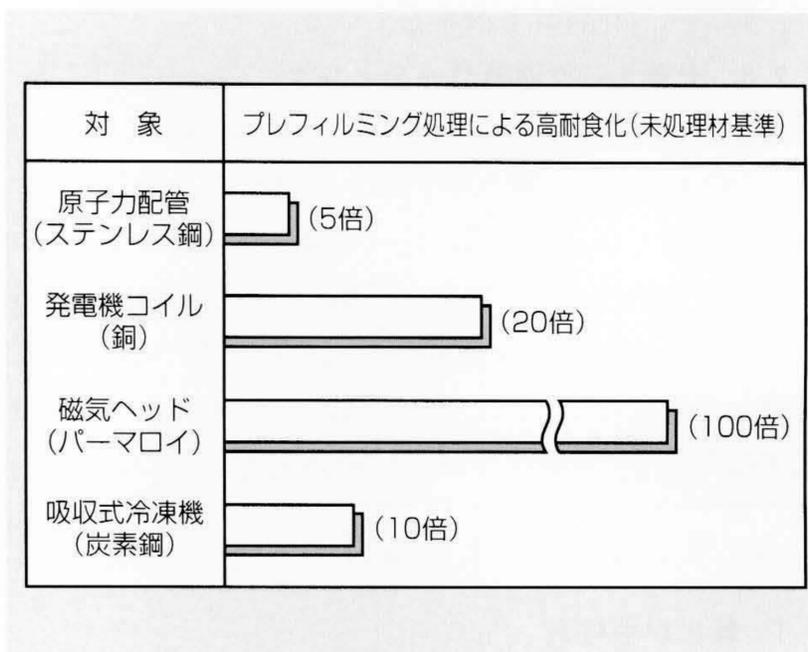


図5 プレフィルミング技術による高耐食化

未処理に比べて大幅な耐食性の向上が実現できる。

果を得ている(図5参照)。現在、この考えをさらに進め、イオン移動の制御や自己修復機能を持つ耐食皮膜を人工的に形成する人工不動態化処理技術を開発中である。

4.3 接合技術

電力機器の高信頼化を図るため、材料に優しく高信頼な接合技術の開発を進めている。その一つとして、高エネルギー密度熱源で深溶込み溶接ができ、かつ溶接変形が少ないレーザー溶接を開発中である。例えば、炭素鋼とステンレス鋼から成るガス絶縁開閉装置のような、きわめて溶接が難しい異種材やアルミニウム合金製大型構造物への適用を目指している。

5. おわりに

ここでは、電力機器用の材料基盤技術について述べた。ここに述べた材料技術開発は、電力会社をはじめとするユーザー各位のご理解、ご指導の下で進めたものである。

今後とも信頼性、経済性、耐環境性などの向上を目指し、ナノメゾスコピックレベルの材料組織制御技術を駆使して極限材料技術を開発し、電力エネルギーのベストミックスに貢献していく考えである。

参考文献

- 金子, 外: 蒸気温度650℃を目標としたタービン材料の開発, 火力原子力発電, Vol.46, No.9, 968~977(1995-9)
- M. Inagaki, et al.: Effect of Alloying Elements in Zircaloy on Photo-Electrochemical Characteristics of Zirconium Oxide Films, ASTM STP 1132, 437~460(1991)