

送・変電、火力発電プラントなどの電力機器では、高効率化、高信頼性、低コスト化などのニーズに対応して、高分子材料、金属材料、無機・セラミック材料の各分野で、材料プロセス制御、マイクロ組織・結晶の制御、複合化などの基礎技術に立脚した材料開発を進めている。各材料分野の代表的な事例として、送・変電分野では高信頼性・低コストを旨とした高分子材料、火力機器では蒸気・ガスタービンにおける高温・コンパクト化を推進する耐熱金属材料、また耐熱セラミックスの高靱性化などがある。

In order to meet current requirements in the electric power equipment field including improved efficiency, high reliability and low cost, Toshiba is proceeding with the development and application of advanced polymer, metal and ceramic materials for various types of power equipment, based on fundamental material technologies such as the control of microstructures, processing and composites.

This paper introduces typical materials developed such as polymers for substation and distribution equipment, heat-resistant steels and alloys, and high-toughness ceramic composites for fossil-fuel power plants, and related material technologies.

1 まえがき

電力機器には高効率化、高信頼性、経済性、環境問題への適合などの要求がますます高まっており、機器の革新における材料の役割はきわめて大きい。電力機器における材料の使用環境は幅広い。例えば、使用温度をみても極低温から1,000°Cを超えるものまで広範囲に及び、要求特性も電気的、機械的、化学的性質などさまざまである。

当社は、このようなニーズに対応した性能発現メカニズムに基づき、固有の基礎技術、すなわち材料のマイクロ組織や結晶の制御、材料プロセス制御、複合化技術などを駆使して、高分子・無機・金属・セラミックスの各分野で材料開発・適用化を進めている(図1)。

ここでは、各材料分野で当社が手がけている材料開発のトピックスを紹介する。

2 高分子材料の開発動向

電力機器に適用される高分子材料は、高耐熱化、高強度化、高絶縁性能化が着実に進み、さらに将来の適用を旨とした新機能化が進んでいる。

ここでは、高靱性耐熱注型材料と複合がい管などに使用される耐候性・耐汚損性材料について紹介する。

エポキシ樹脂注型部品は、一般にその内部に導体、シールド部材、金属・セラミック部品などを埋め込んで注型・硬化させるので、注型樹脂と埋込み部品間の熱膨張差によ

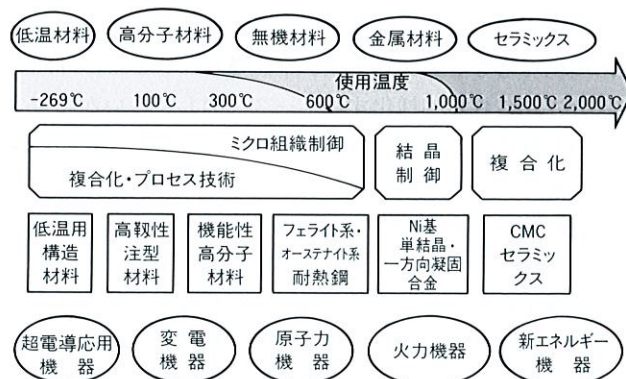


図1. 材料の使用環境と材料技術 広範囲の使用環境、要求特性に対して、材料基礎技術に基づいた材料開発を展開している。

Material technologies for various electric power equipment

り応力が働く。従来はエポキシ樹脂にアルミナ、シリカのような熱膨張率が小さく、硬い無機粉末を分散させ熱膨張率を埋込み部品の材質に近づけるとともに、クラックを入りにくくする技術を用いてきた。機器の縮小化のためには注型樹脂の耐熱性向上が望まれる。その場合、一般には樹脂がもろくなる性質がある。

そこで、当社ではシリカなどの無機充てん剤とともに、柔軟性のある高分子樹脂をエポキシ樹脂中にマイクロ分散させ、ハイブリッド構造にすることで、靱性を向上させることにより、耐熱性向上とを両立させる技術(ポリマーアロイ技術)の開発を進めている。

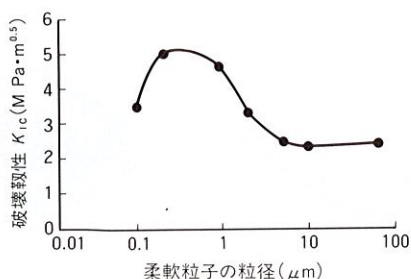


図2. 高靱性注型樹脂の破壊靱性に及ぼす柔軟粒子径の効果 最適な柔軟粒子径を選定すれば破壊靱性(応力集中部に対する材料の強さ)が大幅に向上する。

Effect of soft particle diameter on fracture toughness of toughened casting resin

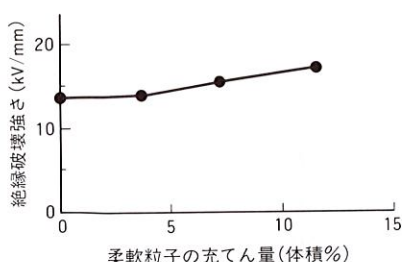


図3. 高靱性注型樹脂の絶縁破壊強さに及ぼす充てん量の効果 柔軟粒子を充てんしても絶縁破壊強さは低下しない。

Effect of soft particle amount on electric strength of toughened casting resin

図2は、添加する柔軟粒子の粒径と破壊靱性の関係を示すが、最適な粒径を選ぶことにより樹脂の靱性を約2倍高めることができ、かつ図3のように電気的特性を低下させることがないことを確認している。

屋外で使用されるがいし・がい管には国内ではもっぱら磁器が使用されてきた。一方、内部がFRP(繊維強化プラスチック)の棒または円筒、外部が耐候性、防水性、耐トラッキング性(湿潤状態における表面放電により導電性のパスを形成しにくい性質)に優れた合成ゴムの笠のできた高分子複合がいし・がい管も開発され、欧米では使用されている。高分子複合がい管は磁器がい管に比べ安価で軽量であり、耐震性、防爆性に優れるが、わが国での使用環境に適合するかどうか十分なデータが必要である。シリコンゴムの笠材を用いた場合にはその内部に含まれる低分子シリコンが徐々に表面に向け拡散し、じんあい表面に付着した場合でもその表面を覆い、長期にわたり防水性を維持する性質がある。雨水はシリコン表面で小さい玉になり、連続した水膜ができにくいいため、漏れ電流を抑制し、耐電圧を向上させる作用がある。

図4は軽量、防爆性などの利点を考慮してガス遮断器の短絡試験用に使用した複合がい管ブッシングである。複合

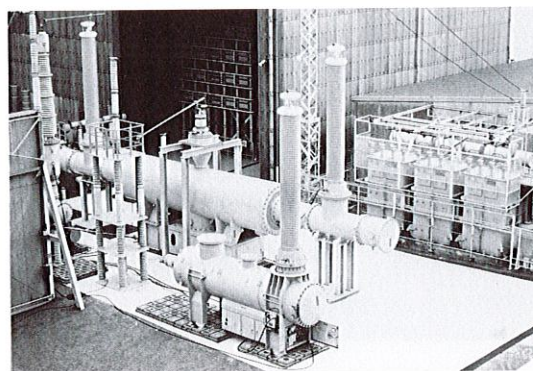


図4. 複合がい管ブッシングを用いたガス遮断器の短絡試験状況 複合がい管の利点を生かして試験に利用

Short-circuit test of gas circuit breaker using composite insulator bushing

がい管はこのように種々の利点のある材料であり、国内においても関心が高まりつつある。

3 耐熱金属材料の開発動向

火力発電プラントでは、高効率化のために蒸気温度の高温化を進めており、当社は600°Cを大幅に超える高温蒸気タービン用に、高温部の主要材料である12%Crフェライト系耐熱鋼の開発を進めている。ここでは、高温強度に最適なマイクロ組織、すなわち析出粒子の分散状態や固溶強化などの強化因子を抽出して、合金組成と特性の最適化を図り、図5のタービンロータ用12Cr鋼の例のように、高温強度を向上させてきた。

今回開発した新12Cr鋼は、従来の強化因子のよりいっそうの強化に加え、金属間化合物の分散による強化などの新たな強化メカニズムを導入し、すでに開発している改良12Cr鋼よりもさらに優れた高温強度を達成している。この開発材の製造性は、最新鋭の溶解法を適用したモデルロータ

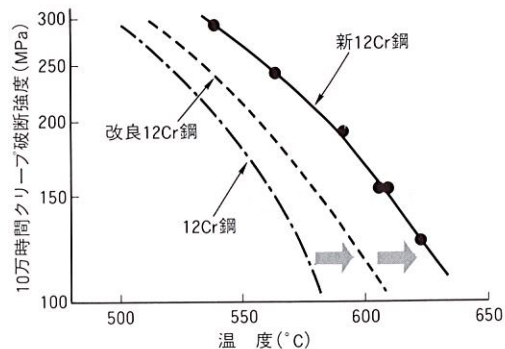


図5. 蒸気タービン高温ロータ材の高温強度 新12Cr鋼の優れた高温強度を大型モデルロータで確認した。

Superior high-temperature strength of new 12Cr rotor steel

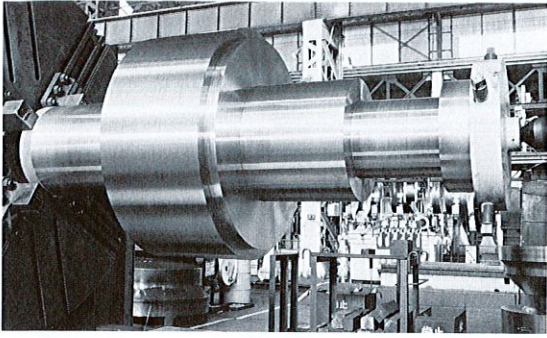


図6. 新12Cr鋼のモデルロータ 部分実寸サイズモデルロータを試作し、良好な品質と機械的性質を確認した。
Model rotor of new 12Cr rotor steel

を試作し(図6)、良好な品質と各種強度を確認している。
同様の合金設計手法を羽根材や鋳鋼品へも適用し、各製品の要求特性に応じた材料開発を進めている。
また、高中圧部と低圧部を1本のロータの中にもつ単車室蒸気タービンの大容量化のため、すでに実用化している高圧一体型タービンロータ材を、さらに高強度化・高靱性化した第二世代のロータ材を開発している。ここでは、低圧部の室温での強度と靱性、高中圧部の高温強度という相反する特性のそれぞれに有効な合金元素添加量の最適化を図るとともに、高中圧部と低圧部で異なる最適熱処理条件を同一ロータに与えるため、従来から実績のある傾斜焼入れ法を採用している。実機ロータの特性は、高圧部では現用高圧ロータ材と同等の高温強度を維持しつつ、低圧部では図7に示すように、世界最高の高強度、かつ高靱性を達成した。

一方、高温化が進むコンバインドサイクル発電のガスタービン用高温材料では、高温強度の優れた一方向凝固(DS)、単結晶(SC)の結晶制御Ni基超合金、耐食・耐酸化コーティングなどの材料開発・評価を進めている。

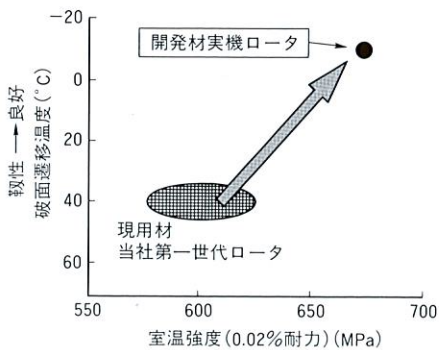
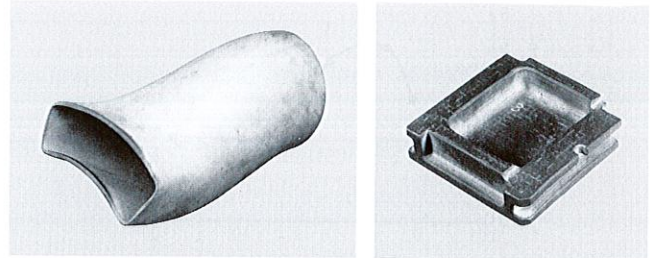


図7. 第二世代高低圧一体型ロータ材低圧部の特性 優れた強度と靱性を兼ね備えていることを実機ロータで確認した。
Superior strength and toughness of new integral rotor steel



トランジションピース

シュラウド

図8. セラミック基複合材料の試作部品例 長繊維複合化プロセスなどの開発と部品試作による評価を進めている。

Trial gas turbine components of ceramic matrix composites

4 耐熱セラミックスの開発動向

耐熱セラミックスの分野では、ガスタービン高温部品の耐環境や遮熱の点から、セラミック(遮熱)コーティング技術の開発とともに、SiCやSiNの耐熱セラミックスを金属材料の限界以上の高温で適用することを目指して、長繊維の複合化により、靱性が大幅に向上したセラミック基複合材料(CMC: Ceramic Matrix Composites)を開発している。ここでは、長繊維とマトリックスの最適な複合化プロセスなどの独自の技術開発と、ガスタービンのシュラウドなど高温部品(図8)の試作評価を進めている。

5 あとがき

以上、当社における代表的な材料開発を紹介したように、電力機器のニーズに対応して、高分子・金属・無機材料の各分野で基礎技術に立脚した材料開発を進めている。今後とも新技術の開発、固有技術の高度化を図り、電力機器の革新を材料の面から支えていく所存であり、ユーザ各位のご指導、ごべんたつをお願いするしだいである。



後藤 一敏 Kazutoshi Goto

重電技術研究所 技監。
重電機器用絶縁材料の開発に従事。電気学会、日本化学会会員。
Heavy Apparatus Engineering Lab.



井上 良之 Yoshiyuki Inoue

重電技術研究所 化学・絶縁材料技術開発部グループ長。
回転機および変電機器用絶縁材料の開発に従事。電気学会、IEEE 会員。
Heavy Apparatus Engineering Lab.



山本 優 Masaru Yamamoto, D.Eng.

重電技術研究所 金属材料・強度技術開発部主幹、工博。
発電プラント用材料の開発に従事。日本鉄鋼協会会員。
Heavy Apparatus Engineering Lab.