

# 低摩擦・耐摩耗性に優れた水潤滑軸受材料

Material with Low Friction and High Wear Resistance for Water-Lubricated Bearings

タン トロン ロン 児島 貴信 小熊 証

■ THAN TRONG Long ■ KOJIMA Takanobu ■ OGUMA Tadashi

水力発電機器には油潤滑方式の水車軸受が使われているが、近年、潤滑油の河川への流出による環境汚染防止の観点から水潤滑方式の適用要求が高まっている。

東芝は、水潤滑条件下で低摩擦係数と耐摩耗性に優れた四フッ化エチレン (PTFE) 系軸受材料を開発し、水力発電機器の水車軸受に適用した。これまで、複数の発電所において、高い軸受性能と信頼性が実証され、順調に営業運転を継続している。今回、より高面圧、高温、及び土砂摩耗の使用環境に耐えられる、更に高性能な水潤滑軸受材料を開発した。

To prevent environmental pollution from leakage into rivers of lubricant oils in the oil-lubricated bearings of hydroelectric power systems, demand has recently arisen for water-lubricated bearings.

Toshiba has been making efforts to develop an appropriate material for water-lubricated bearings with a low friction coefficient and high wear resistance. We have already developed a bearing material using polytetrafluoroethylene (PTFE) as a base material and applied it to water-lubricated bearings in a number of hydroelectric power stations. These water-lubricated bearings have demonstrated good bearing characteristics and high reliability and have been contributing to smooth operations. We have now developed an advanced high-performance material for water-lubricated bearings that can be applied to high-pressure, high-temperature conditions and abrasive environments caused by sand grains in river water.

## 1 まえがき

東芝は、水力発電機器用に、1990年頃に従来のホワイトメタルに代わって、四フッ化エチレン (PTFE) を用いた高性能の油潤滑軸受を開発した。これまで300台以上の適用実績があり、高い軸受性能と信頼性が実証されている。

一般に、水車軸受にも油潤滑方式が使われているが、近年、潤滑油の河川への流出による環境汚染を防止する観点から、水潤滑軸受の適用に対する要求が高まっている。

水を潤滑媒体とした場合、水の動粘度が約1 mm<sup>2</sup>/sと油の約1/50のため、運転中に十分な厚さの水膜が形成されず、材料間の直接接触による激しい摩耗損傷が課題となっている。

そこで当社は、水潤滑環境で低摩擦係数と耐摩耗性に優れた軸受材料として、母材のPTFEに炭素繊維 (C<sub>f</sub>) とチタン酸カリウムウイスカ (KTiO<sub>w</sub>) を充填したC<sub>f</sub>-KTiO<sub>w</sub>/PTFEを開発した。これまで9台の水車軸受への適用実績があり、順調に営業運転を継続している。

水車には、水を複数のノズルから円周状に配置したバケットに衝突させて水車に直結した回転軸を回転させるベルトン水車や、水を渦巻状のケーシングから流入させて軸方向にその流れを変えて水車羽根を回転させるカプラン水車などが用いられている。前者は、ダム水量が少ないと1本のノズルで運転するため、水車羽根に作用する力のアンバランスで回転軸が一方向に押し付けられ、軸受が高い面圧を受ける。後者は、

フェノール樹脂製の軸受に河川水が流入するのを防止するため、水車の回転軸を取り囲むようにパッキンが設けられているが、摩耗の進行に伴い回転軸とパッキンとの隙間が大きくなり、河川水が浸入して土砂摩耗を起こすことがある。

今回、ポンプ水車を除く全ての水車形式の軸受に適用できるように、高面圧、高温、及び土砂摩耗の使用環境に耐えられる、更に高性能な水潤滑軸受材料を開発した。ここでは、この摩擦・摩耗特性について述べる。

## 2 摩擦・摩耗特性

開発した軸受材料の組成を表1に示す。充填材はPAN (Polyacrylonitrile) 系のC<sub>f</sub>と二硫化モリブデン (MoS<sub>2</sub>) で、母材にはPTFEを用いた。比較のため、これまでの軸受材料<sup>(1), (2)</sup>も示す。

表1. 軸受材料の組成

Chemical compositions of materials for water-lubricated bearings

供試材料	成分	記号
開発材料	炭素繊維-二硫化モリブデン/PTFE	C <sub>f</sub> -MoS <sub>2</sub> /PTFE
比較材料	炭素繊維-チタン酸カリウムウイスカ/PTFE	C <sub>f</sub> -KTiO <sub>w</sub> /PTFE
	炭素繊維-酸化亜鉛ウイスカ/PTFE	C <sub>f</sub> -ZnO <sub>w</sub> /PTFE
	カーボン粒子-グラファイト粒子/PTFE	C-Gr/PTFE
	炭素繊維/PPS	C <sub>f</sub> /PPS

PPS: ポリフェニレンサルファイド

摩耗試験は、JIS K 7218 (日本工業規格 K 7218)「プラスチックの滑り摩耗試験方法」に準じ、20～60℃の水道水を潤滑流体として、面圧0.5～3.8 MPa及び速度0.25～1 m/sで行った。摺動(しゅうどう)距離は1.8～7.2×10<sup>3</sup> mとした。試験中の水温は、冷却又は加熱して一定に保持した。

供試材のディスク及び相手材のSUS316Lステンレス製リングの表面平均粗さR<sub>a</sub>は、それぞれ約0.30 μm及び約0.03 μmとした。

一部の摩耗試験では、同一の試験片で、速度を1 m/sと一定にして面圧を0.5～3.5 MPaまで段階的に増圧した場合の摩擦係数の変化を調べた。同様に、面圧を2 MPaと一定にして速度を1～0.25 m/sまで段階的に減速した場合の摩擦係数の変化を調べた。

また、河川氾濫時の河川水に含まれる土砂含有量を想定して、JIS Z 8901で規定されている試験用粉体2種(中位径27～31 μm, SiO<sub>2</sub>(二酸化ケイ素)95%以上)を1,000 ppm混合した水道水(以下、粉体含有水道水と呼ぶ)を潤滑流体とした土砂摩耗模擬試験を行った。

比摩耗量(m<sup>2</sup>/N)は、単位荷重(N/m<sup>2</sup>)及び単位滑り距離(m)当たりの摩耗量(m)とした。

摩耗試験後の摺動面の形態は、光学式三次元非接触測定機で三次元表面形状、断面プロファイル、及びRaを計測して調べた。充填材の分散状態及び摩耗挙動は、走査型電子顕微鏡(SEM)による観察及び電子線プローブマイクロアナライザ(EPMA)による分析で調べた。

### 2.1 摩擦係数と面圧の関係

水温20℃及び速度1 m/sで、面圧を0.5～3.5 MPaまで段階的に増圧した場合のC<sub>f</sub>-MoS<sub>2</sub>/PTFEの摩擦係数の変化を図1に示す。摩擦係数は、摺動距離とともに微小な上下変動はあるが、明らかに面圧の増加に伴って上昇している。

速度1 m/sで摺動距離が1.8×10<sup>3</sup> mに達した時点で計測した摩擦係数と面圧の関係を図2に示す。図中の矢印は段階的に増圧した方向を示している。面圧0.5～1.5 MPaまでは、摩擦係数に顕著な依存性は見られず、0.002以下と極めて小さい。面圧2.0～3.5 MPaでは、摩擦係数は0.005～0.05と緩やかに上昇し、

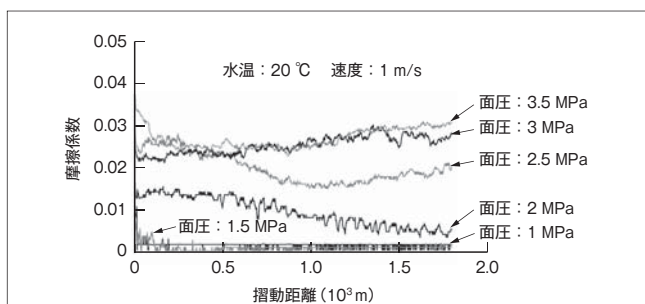


図1. C<sub>f</sub>-MoS<sub>2</sub>/PTFEの摩擦係数と面圧の関係 — 面圧が増加すると摩擦係数が上昇するが、面圧3.5 MPaでも摩擦係数は0.03程度と小さい。  
Relationship between friction coefficient of C<sub>f</sub>-MoS<sub>2</sub>/PTFE and surface pressure

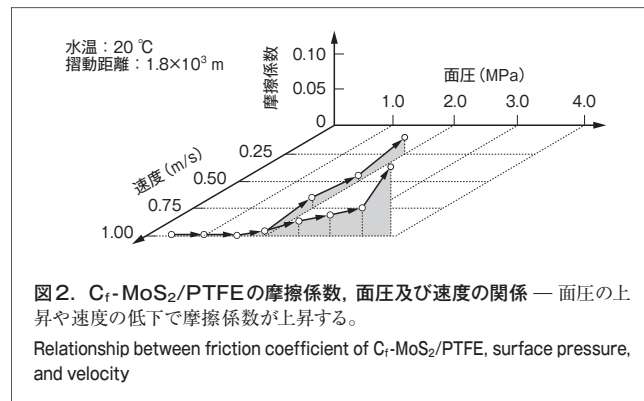


図2. C<sub>f</sub>-MoS<sub>2</sub>/PTFEの摩擦係数、面圧及び速度の関係 — 面圧の上昇や速度の低下で摩擦係数が上昇する。  
Relationship between friction coefficient of C<sub>f</sub>-MoS<sub>2</sub>/PTFE, surface pressure, and velocity

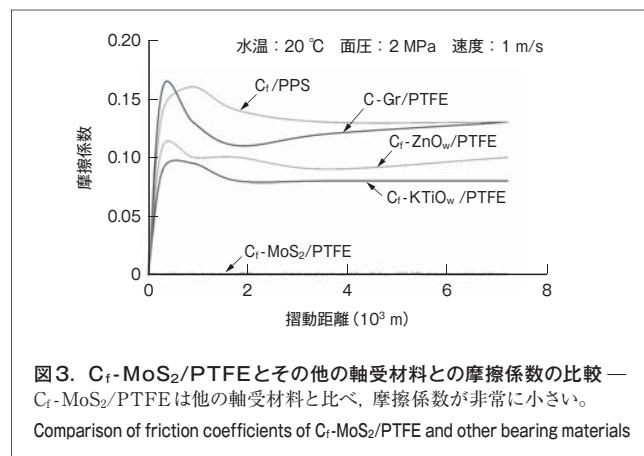


図3. C<sub>f</sub>-MoS<sub>2</sub>/PTFEとその他の軸受材料との摩擦係数の比較 — C<sub>f</sub>-MoS<sub>2</sub>/PTFEは他の軸受材料と比べ、摩擦係数が非常に小さい。  
Comparison of friction coefficients of C<sub>f</sub>-MoS<sub>2</sub>/PTFE and other bearing materials

面圧3.8 MPaで急激に上昇するが、値は0.10以下と小さい。

C<sub>f</sub>-MoS<sub>2</sub>/PTFEとその他の軸受材料との摩擦係数の比較を図3に示す。C<sub>f</sub>-MoS<sub>2</sub>/PTFEの摩擦係数が非常に小さいことがわかる。

### 2.2 摩擦係数と速度の関係

水温20℃及び面圧2.0 MPaで、速度を1 m/sから0.25 m/sまで段階的に減速した場合のC<sub>f</sub>-MoS<sub>2</sub>/PTFEの摩擦係数の変化を図4に示す。摩擦係数は、速度1 m/sで大きく変動しているが、全般的に摺動距離とともに減少する傾向が見られる。

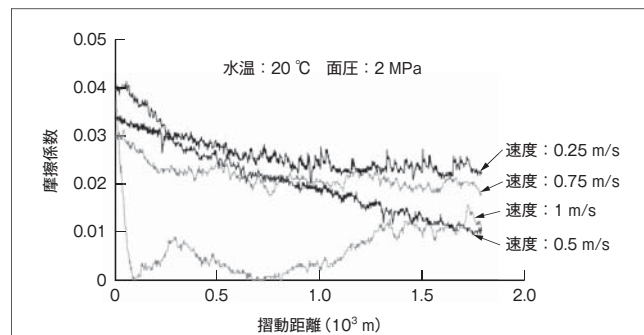
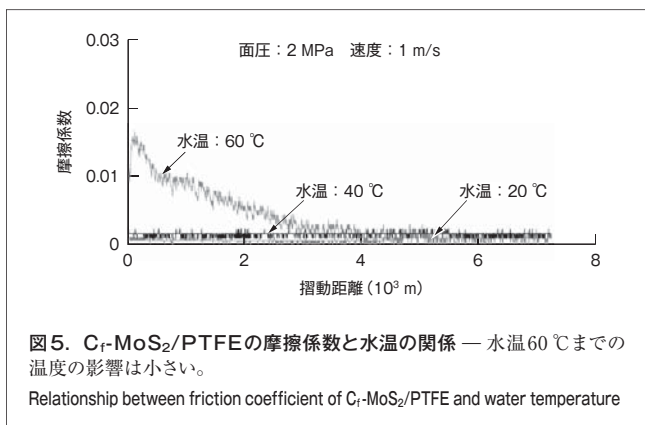


図4. C<sub>f</sub>-MoS<sub>2</sub>/PTFEの摩擦係数と速度の関係 — 速度が低下すると摩擦係数が若干上昇する傾向が見られる。  
Relationship between friction coefficient of C<sub>f</sub>-MoS<sub>2</sub>/PTFE and velocity



面圧2 MPaで滑動距離が $1.8 \times 10^3$  mに達した時点で計測した摩擦係数と速度の関係も図2に示してある。摩擦係数は、減速するにつれて若干上昇する傾向が見られるが、その影響は小さい。速度が0.25 m/sまで減速し、十分な水膜が形成されない場合でも、摩擦係数は0.05以下と小さく、充填材が潤滑性能を発揮していることを確認した。

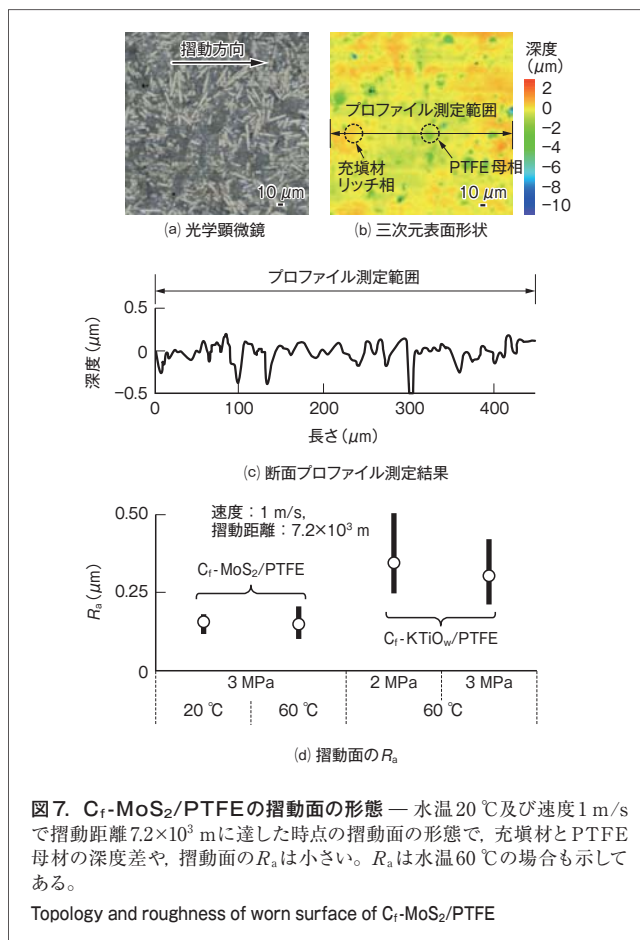
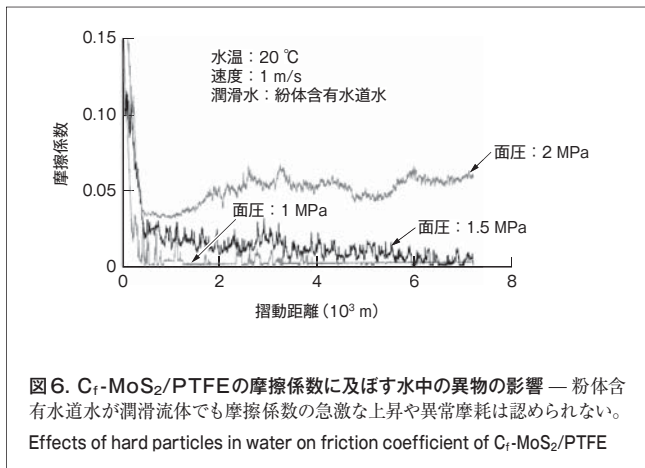
### 2.3 摩擦係数と水温の関係

面圧2 MPa及び速度1 m/sで、水温20～60℃までの各温度で保持した場合の $C_f$ - $MoS_2$ /PTFEの摩擦係数と水温の関係を図5に示す。摩擦係数は、60℃で試験開始時に若干高いものの、滑動距離とともに20℃及び40℃の値0.002程度まで減少する。

今回の試験の面圧と速度の範囲では、60℃までの水温が $C_f$ - $MoS_2$ /PTFEの摩擦係数に与える影響は小さいことがわかった。

### 2.4 摩擦係数に及ぼす水中の土砂の影響

$C_f$ - $MoS_2$ /PTFEの土砂摩耗模擬試験結果を図6に示す。摩擦係数は、1.0～1.5 MPaの低面圧領域では粉体を含有しない潤滑水の場合と同程度である。また2.0 MPa以上の高面圧領域では粉体を含有することで摩擦係数が若干上昇するが、急激な上昇や、粉体により滑動面が削り取られるようなアブレイブ摩耗による損傷は認められない。



### 2.5 滑動面の形態

水温20℃、面圧3 MPa、及び速度1 m/sで滑動距離 $7.2 \times 10^3$  mを経た $C_f$ - $MoS_2$ /PTFEの滑動面の三次元表面形状、断面プロファイル、及び $R_a$ を図7に示す。 $R_a$ については、水温60℃の場合も同時に示してある。高密度の充填材が均一に分散している。また、充填材リッチ相とPTFE母相の深度差が $1 \mu$ m以下と小さく、 $R_a$ も $C_f$ - $KTiO_w$ /PTFEと比較して小さい。

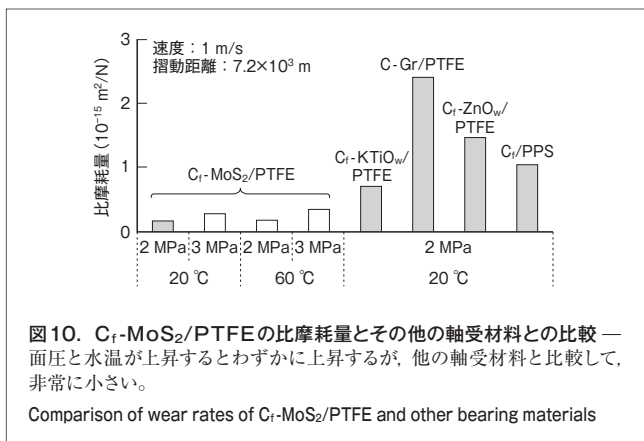
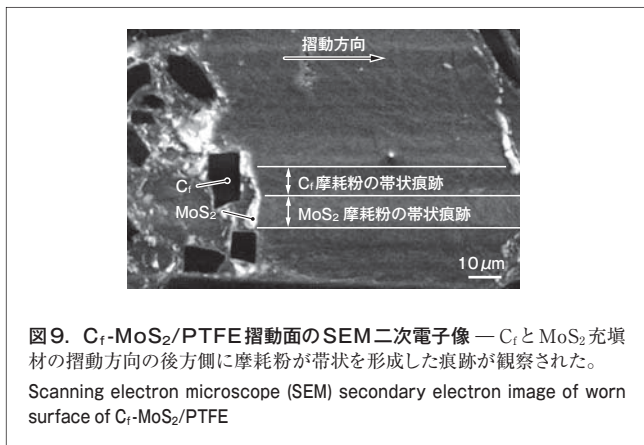
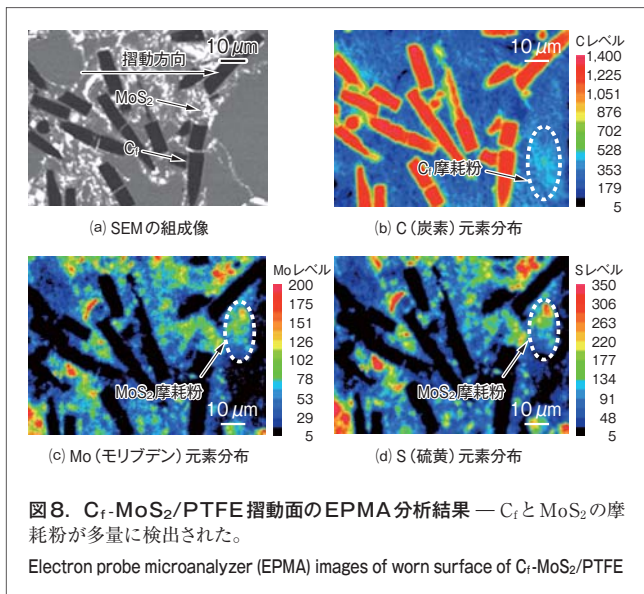
同じ試料での滑動面のSEM反射電子組成像及びEPMA分析結果を図8に示す。図中に点線で囲んだ部位に、摩耗試験前にはなかった $C_f$ と $MoS_2$ の摩耗粉が多量に検出された。

また、図9に示すSEM二次電子像から、 $C_f$ と $MoS_2$ 充填材のそれぞれで、滑動方向の後方側で複数の摩耗粉が帯状の痕跡を形成しているのが観察された。

### 2.6 比摩耗量

$C_f$ - $MoS_2$ /PTFEの比摩耗量は、図10に示すように、水温及び面圧が上昇するとわずかに増加する傾向が見られるが、その影響は小さい。

また、水温20℃、面圧2 MPa、及び速度1 m/sの同一滑動条件での比摩耗量は、 $C_f$ - $MoS_2$ /PTFE <  $C_f$ - $KTiO_w$ /PTFE <  $C_f$ /PPS <  $C_f$ -ZnO<sub>w</sub>/PTFE < C-Gr/PTFEの順に大きくなるが、特に $C_f$ - $MoS_2$ /PTFEは、その他の材料と比較して非常に小さい。



### 3 充填材 $C_f$ 及び $MoS_2$ の効果

$C_f$ - $MoS_2$ /PTFEの充填材である $C_f$ と $MoS_2$ は、層状の結晶構造で、層間は弱いファンデルワールス (Van der Waals) 結合なので、容易に滑りが生じ、摩擦抵抗の低減に寄与している。

一方、摺動過程で発生した摩耗粉も潤滑機能を果たしている。潤滑機能を効果的、かつ持続的に発揮するには、 $C_f$ と $MoS_2$ の摩耗粉が摺動面の凹凸や摺動傷にトラップされず、平滑な摺動面に残存する状態を維持することが必要である。

そこで今回は、平滑な摺動面を維持するため、PTFE母材と摩耗速度に近い $C_f$ と $MoS_2$ を充填材に選定し、大きさと分散密度を考慮して適正な充填量と比率を配合した。

その結果、摺動面のPTFE母相と充填材リッチ相の深度差が小さくなる (図7) とともに、 $C_f$ と $MoS_2$ のそれぞれで摺動方向の後方側に摩耗粉が残存し (図9)、継続的に潤滑する役割を担った。これにより、その他の材料と比較して摩擦係数及び比摩耗量が顕著に減少したと考えられる。

$C_f$ - $KTiO_w$ /PTFEは、耐摩耗性を向上させた実用的な軸受材料であるが、今回開発した $C_f$ - $MoS_2$ /PTFEでは、摺動特性を更に一段と向上させることができた。特に、0.5 ~ 2.0 MPaの低面圧の領域では、今までに見ない低摩擦係数とこれによる優れた耐摩耗性を持つ水潤滑軸受材料が得られた。

### 4 あとがき

低摩擦係数と耐摩耗性に優れた水潤滑軸受材料を開発した。現在、水力発電機器用の各種軸受への適用に向け、実機サイズでの性能・信頼性試験を実施している。

今後、これらの機器以外への適用も目指し、環境負荷の低減や、軸受の性能向上、損失の低減などによる機器の性能・効率向上に貢献していく。

### 文献

- (1) タン トロン ロン 他. 水力発電用水車の水潤滑軸受. 東芝レビュー. 67, 4, 2012, p.48-51.
- (2) タン トロン ロン 他. 樹脂軸受の実用化による水力発電機器の効率向上. 日本エネルギー学会誌. 90, 4, 2011, p.300-305.



タン トロン ロン THAN TRONG Long, D.Eng.  
電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 高機能・絶縁材料開発部技術主幹, 工博. 高機能材料開発に従事。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center



児島 貴信 KOJIMA Takanobu  
電力システム社 京浜事業所 水力機器部。  
水力機器の設計・開発に従事。  
Keihin Product Operations



小熊 証 OGUMA Tadashi  
東芝プラントシステム(株) 電力プラント事業部 水力機器システム部. 水車設計・開発に従事。  
Toshiba Plant Systems & Services Corp.