

環境負荷の低減に貢献する高性能・高機能水車発電機技術

Hydro Generator Technologies with High Performance and Functionality to Reduce Environmental Burden

久保 徹 石塚 博明 太田 仁志

■ KUBO Toru ■ ISHIZUKA Hiroaki ■ OHTA Hitoshi

水力発電は、始動指令から定格出力運転まで5分程度と非常に短時間で始動できるだけでなく、負荷へ追従する応答速度が速く、電力系統の電力品質向上に欠かせない大規模な再生可能エネルギー源として、近年改めて注目されている。

東芝は、地球温暖化防止とエネルギーの安定供給に対して“地球内企業”としての責務を果たすため、再生可能エネルギーである水力発電の適用拡大に取り組んできた。当社の水車発電機製造の歴史は、1894年にわが国初の事業用水力発電所として開発された蹴上発電所に納入した発電機までさかのぼり、今年2010年で116年になる。以来製造した水車発電機や発電電動機の総台数は1,400台を超え、総出力も52,000 MVAを超える国内有数のメーカーである。

In recent years, attention has been focused on hydroelectric power generation not only because of its excellent characteristics such as high-speed startup, but also due to its ability to improve the quality of power systems as a large-scale renewable energy source.

Toshiba has been contributing to the expansion of hydroelectric power as a renewable energy source for both the prevention of global warming and stable electricity supply, as a corporate citizen of planet Earth. We have supplied more than 1,400 hydraulic turbine generators and generator motors throughout the world, with a total capacity of 52,000 MVA, since we manufactured Japan's first utility hydro generator for the Keage Power Station in Kyoto in 1894.

1 まえがき

水力発電は、地球温暖化をはじめとする環境負荷を増大させにくい大規模発電方式であり、一世紀以上にわたりその技術を発展させてきた。水力発電機器の高効率、高性能、高信頼性への要求に応えるため、東芝はこれまで長年にわたり技術開発、性能向上に取り組み、水力発電システムを世界中に提供してきた。ここでは、これまでに当社が培ってきた水車発電機や発電電動機の最新技術、並びに、環境調和型製品として環境負荷を低減する取組みについて述べる。

2 水車発電機の性能向上技術

2.1 樹脂軸受

軸受すべり面に四フッ化エチレン樹脂 (PTFE) 系材料を用いた樹脂スラスト軸受^(注1)は、1994年から適用を始めて、国内外向けに2009年末時点での総製作台数は100台に達し、総容量は4,800 MVAを超えている(図1)。この樹脂軸受の適用により、オイルリフタ^(注2)などの補機類の省略だけでなく、保守の簡素化や省力化、信頼性向上、長寿命化などの点で優れた運転評価を得ている。また、顧客からの要望により既存の他

(注1) 回転体の軸方向に働く力(スラスト)を支持する軸受。
 (注2) スラスト軸受の滑り面に高圧の潤滑油を供給し、滑り面の摩擦トルクを低減する装置。

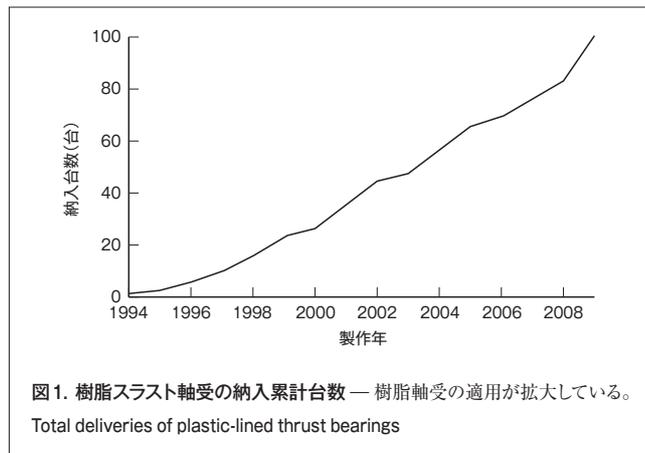


図1. 樹脂スラスト軸受の納入累計台数 — 樹脂軸受の適用が拡大している。
 Total deliveries of plastic-lined thrust bearings

社製発電機にも当社の樹脂軸受を適用する例も増えている。

スラスト軸受損失を低減するためにはスラスト軸受寸法を小さくする必要があるが、その結果、軸受面圧が従来から適用されてきた錫(すず)を主成分としたホワイトメタルの適用限界に近づいてきた。この樹脂スラスト軸受は、ホワイトメタルでの適用限界平均面圧である5 MPaよりも高面圧化を実現している。更に、高面圧化を目指して、当社の300 t実荷重軸受試験装置による検証の結果、ホワイトメタルの約1.5倍の平均面圧7 MPaを超えても適用できる見通しを得ており、スラスト軸受をいっそうコンパクトにすることで、軸受損失を低減できるようになった。

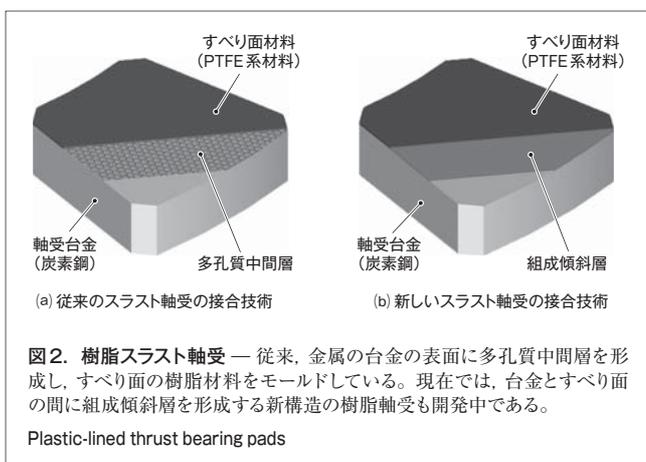
近年では、国内だけでなく海外でも樹脂軸受の適用を要求される傾向にあり、当社の差異化技術として適用が拡大している。これまで海外向けでは中国の董箐発電所納入水車発電機 (244 MVA) にも使用され、国内向けには、可逆回転機で現在運転中の東京電力(株)安曇発電所納入発電電動機 (109 MVA) に続き200 MVA 級発電電動機への適用が決定している。

中小容量の発電所では、所内設備を簡素化するため“給水レス”化が志向されており、樹脂軸受の適用による損失低減効果と合わせて、空冷軸受の適用範囲が拡大している。空冷軸受の難易度を示す指数 (平均軸受面圧×軸受平均周速度) では、北海道電力(株)新忠別発電所納入水車発電機 (10.7 MVA) が991 MPa・m/sで、当社の最高実績となっている。

樹脂軸受のキーテクノロジーは、軸受台金の金属材料とすべり面の樹脂との接合技術である。当社では、独自の技術により金属の台金の表面に多孔質中間層を形成し、すべり面の樹脂材料をモールドする方法を採用してきたが、これに代わる製造方法として、すべり面材料と軸受台金の間に組成傾斜層を形成し、従来に比べ簡素化した構造も開発中である (図2)。

スラスト軸受に加えて、横軸発電機用の樹脂ジャーナル軸受^(注3)は、1997年に初めて適用した700 kVA機以降、2009年末の東京電力(株)八ツ沢発電所納入水車発電機 (12 MVA) まで適用範囲が拡大している。立軸発電機の樹脂ガイド軸受も同様に適用範囲が拡大し、九州電力(株)上椎葉発電所納入水車発電機 (50 MVA) のように、水車軸受と合わせてすべての軸受を樹脂化する例も増えてきた。

これらの軸受は、樹脂スラスト軸受と同様に、高面圧化による小型化と構造の簡素化ができる特長があり、軸受損失の低減により空冷軸受の適用範囲が拡大できるとともに、摩耗が少ないため長寿命であり、潤滑油の汚れも少なく、保守の簡素化や省力化も併せて実現している。



(注3) 横軸機に用いられる円筒型滑り軸受。

更に、樹脂軸受の保守簡素化につながる技術として電動ポンプなどの付帯設備を省略した、スラスト軸受回転板のポンプ作用による軸受潤滑油の自己ポンプ循環方式の適用範囲を積極的に拡大している。

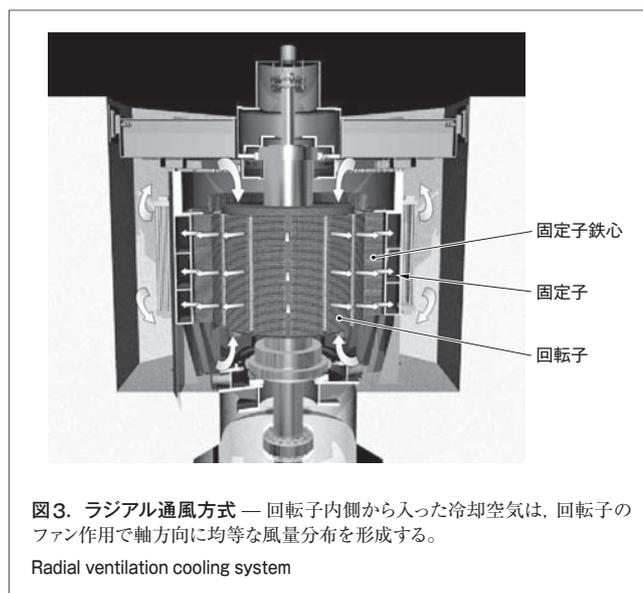
2.2 発電機の冷却・通風方式

水車発電機や発電電動機の冷却は、回転子自身の回転によるファン効果を利用したラジアル通風方式^(注4)が主流になっている。ラジアル通風方式は、電動ファンなどを省略することで発電機の構造を簡素にできる特長があり、鉄心やコイルを冷却するために必要な風量を効果的な通風路に流すことで、固定子鉄心の軸方向に均等な風量分布が実現できる (図3)。

発電機の回転が高速になると回転子スポーク径が小さくなるため、ラジアル通風方式では、高速・大容量機に必要な冷却風量の確保が難しいと言われてきた。この通風方式の適用範囲拡大を図るため、実物の縮小模型装置により500 MVA 級-500 min⁻¹機まで適用できることを検証した。次期揚水発電所の発電電動機へ適用する予定である。

また、通風損失の観点からは、回転子形状による摩擦損失の低減と通風動力損失の低減が求められる。ラジアル通風方式では、コイルエンドカバーなどの整流要素形状の工夫により、簡素化した流路の構成が比較的容易に実現できる。最近のラジアル通風を適用した水車発電機や発電電動機では、これらの施策により通風損失の低減を図っている。

中小容量の水車発電機には、空気冷却器を省略した出口管通風方式が用いられることがある。発電所付帯設備の簡素化のため給水装置を省略したり、外部からの冷却水量の確保が難しい場合には有効な手段である。寒冷地向けでは、冬期間、発電所内にこの排熱を循環させて、副次的に有効活用す



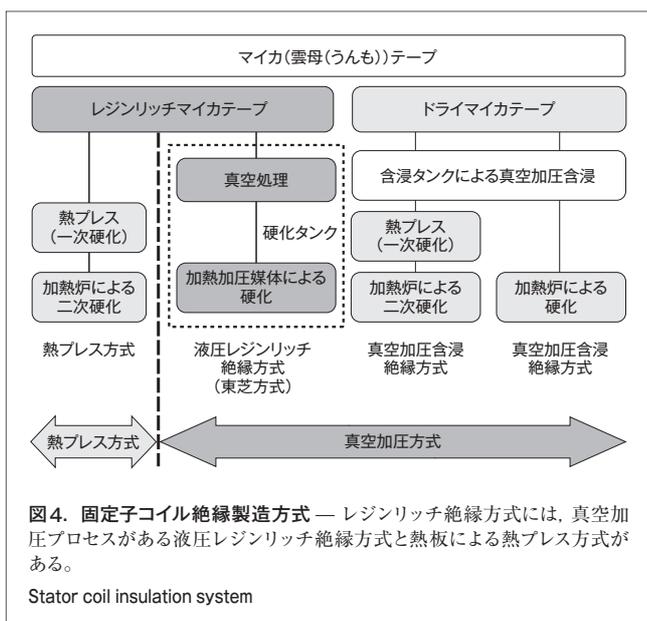
(注4) 回転子に径方向の通風ダクトを備え、冷媒を循環させる通風方式。

ることで、運用面でも二酸化炭素 (CO₂) の排出低減に貢献しているケースもある。

2.3 固定子コイルの絶縁方式

固定子コイルの絶縁方式は、真空加圧含浸絶縁方式とレジンリッチ絶縁方式に大別される。レジンリッチ絶縁方式には、真空加圧プロセスがある液圧レジンリッチ絶縁方式と、熱板による熱プレス方式がある (図4)。当社の水車発電機には液圧レジンリッチコイルが適用され、長期間にわたる多数の製造実績と運転実績があり、顧客から高い評価を受けている。

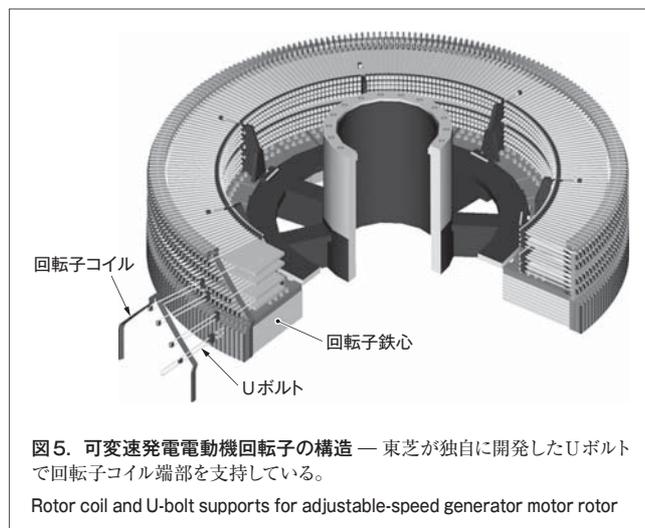
液圧レジンリッチ絶縁方式の特長として、真空加圧処理により絶縁層中の微小欠陥を抑制できるほか、環境面にも配慮されている。世界的に長年にわたって使われてきた加熱・加圧媒体のアスファルトに代えて、粉塵 (ふんじん) になりにくく作業環境を汚損しない代替材を開発し採用している⁽¹⁾。この代替材はコイルへの粉塵の付着量が少なく、作業環境の改善に加えて廃棄量の低減にも貢献している。液圧レジンリッチコイルは火力発電用タービン発電機にも適用されており、定格電圧 27 kV の発電機への適用実績もある。



2.4 可変速発電電動機

これまで培った水車発電機の大容量化及び高速化の技術開発を応用して、当社は世界初の可変速揚水発電システムを1990年に東京電力(株)矢木沢発電所に納入した。以降、世界でもトップクラスの納入実績がある。

近年、CO₂排出量を削減することを目的に、発電出力が不安定な風力や太陽光のような再生可能エネルギーを利用した発電方式が多く適用されている。それに伴って、電力システムの周波数調整能力、あるいは、電圧変動抑制や調整能力が不足してきており、これらの機能を兼ね備えた可変速揚水発電シ



テムが国内外で注目されている。

更に、既存の揚水発電所の付加価値を高めるため、定速機から可変速機への改造計画が、わが国だけでなく先進諸国でも進められている。当社は、新設だけでなく可変速機への改造の経験がある数少ないメーカーとして、顧客のニーズに応じた最適なシステムを提供できる体制を整えている。

当初から可変速機に改造できる設計を採用したり、既存設備の発電電動機固定子を流用するなど、回転子をはじめとする改造範囲を限定して可変速システムを構築することで、改造工事期間の短縮を図るばかりでなく、製造時のCO₂排出低減や廃棄物の削減もできる。

可変速機は回転子の構造が定速機と大きく異なる。可変速機の回転子コイル端部は運転中に遠心力の作用を受けるため、特別な支持構造が必要になる。当社は、差異化技術として、回転子コイル端部を独自のUボルトで支持する方式を開発し、適用している (図5)。このUボルト方式は、巻線型誘導電動機などにも適用しているバインド線支持方式よりも組立工期が短く、現場での組立スペースが小さくできるなどのメリットがある。

3 インドティースタV発電所への適用例

インドのティースタV発電所 (170 MW×3台) は、ヒマラヤ山系の豊富な水を活用し、上流から下流にわたる水系全体を利用して電源開発が行われたものである (図6)。東芝グループは、発電所の付帯設備を含む発電所一式の発電機器を納入し、2008年に運転を開始した。この水車発電機 (208 MVA) では、2章に述べた低損失のラジアル通風方式と銅損、鉄損などの低減による高効率設計を指向した。現地で実施された効率試験の結果、発電機効率は同クラスの水車発電機として、最高レベルを記録した。



図6. ティースタV発電所 — 2008年の運用開始以降、インドの電力供給に貢献している。

Teesta-V Power Station, India

4 環境に優しい製品

4.1 環境負荷低減への取組み

東芝グループでは、地球温暖化防止策の一つとして、環境調和型製品を提供するとともに、設計から廃棄に至るライフサイクルを通じて、環境負荷低減に注力している。東芝グループで掲げている“環境ビジョン2050”⁽²⁾を実現するため、特定化学物質の使用の全廃、欧州などの地域で規制されているRoHS（電気機器に含まれる特定化学物質の使用制限）指令やREACH（化学物質管理規制）にも対応した設計及び製造技術の確立にも積極的に取り組んでいる。

発電機の製造や据付けの過程で、固定子コイルの絶縁材料であるワニスをはじめとして、多くの化学物質を使用しているが、環境負荷の少ない水溶性ワニスや鉛フリーはんだなどへ切り替えている。また当社は、アスベスト材の使用が法令で規制される以前の1980年代半ばから、固定子コイルの絶縁材料やプレーキシューに“脱アスベスト材”を使用する取組みを先駆けて行っている。

4.2 ライフサイクルを通じた環境効率の向上

水力発電は発電時にCO₂を排出しない基幹エネルギーである。一方、開発や製造時のCO₂排出量も低減させ、製品のライフサイクルを通じて環境効率の向上も要求されている⁽³⁾。

環境効率の改善度は“ファクター”とも呼ばれ、製品の付加価値と環境影響から算出される⁽⁴⁾。ファクターを高めるには二つのアプローチがあり、製品の付加価値の向上、すなわち、これまで述べてきた高信頼性・高性能・高機能化を図るとともに、近年注目されているライフサイクルアセスメント（LCA）手法を活用して、製造段階に限らず、ライフサイクルを通じて環境影響を低減する環境マネジメントにも積極的に取り組んでいる。

4.3 固定子鉄心の清掃方法

既設機の固定子コイルを巻き替える更新工事の際、固定子鉄心は更新や撤去せずに流用する場合がある。その場合、新しいコイルを組み立てるにあたり、流用する固定子鉄心を、ブ

ラシなどを用いて手作業で清掃していた。そこで、現地工事期間を短縮することを目的に、ドライアイスペレットによるブラスト清掃方式を開発した。

この方法は、高密度ドライアイスペレットを専用ノズルで吹き付けて汚れを落とすが、ドライアイスペレット自身は昇華し消失する。このため清掃が容易になり、作業日数は従来比で約1/10に低減できただけでなく、作業者が誤って固定子鉄心を傷つけることもない。また、溶剤などを使用しないため作業環境が改善でき、環境負荷を低減した清掃方法である。

5 あとがき

水力発電は長い歴史を持ち、CO₂排出量の少ない電源として、近年環境保全の観点で改めて注目されている。ほかの大規模電源と異なり、機動性や調整能力に優れ、系統安定度向上に寄与できる特長を持っている。水力発電で培った技術は、同期調相機、フライホイール発電機、回転型周波数変換機、周波数変動抑制装置などほかの電力設備にも応用され、エネルギーの安定供給に貢献している。

今後も、地球に優しい発電方式であり、ライフサイクルにおいても環境負荷の少ない環境調和型発電機器を引き続き提供していく。

文 献

- (1) 幡野 浩, ほか. タービン発電機固定子コイル絶縁の技術動向. 電気学会誌. 126, 11, 2006, p.720-722.
- (2) 東芝ホームページ. 環境ビジョン2050. <http://www.toshiba.co.jp/env/jp/management/vision2050_0_j.htm>, (参照2010-05-11).
- (3) 本藤祐樹, ほか. ライフサイクルCO₂排出量による発電技術の評価. 電力中央研究所報告. Y99009, 2000, 105p.
- (4) 東芝ホームページ. 東芝グループ環境レポート2009. <http://www.toshiba.co.jp/env/jp/report/index_j.htm>, (参照2010-05-11).
- (5) 中野富二男. 環境保全, 機器の長寿命化に貢献する水力発電技術. 東芝レビュー. 58, 7, 2003, p.46-49.



久保 徹 KUBO Toru

電力システム社 京浜事業所 水力機器部グループ長。
水車発電機の設計に従事。日本機械学会会員。
Keihin Product Operations



石塚 博明 ISHIZUKA Hiroaki

電力システム社 京浜事業所 水力機器部主査。
水車発電機の設計に従事。電気学会会員。
Keihin Product Operations



太田 仁志 OHTA Hitoshi

電力システム社 火力・水力事業部 水力プラント技術部主査。
水力発電プラントのシステムエンジニアリング業務に従事。
電気学会会員。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.