

山形 一郎  
YAMAGATA Ichiro

柴田 千里  
SHIBATA Chisato

中村 高紀  
NAKAMURA Takanori

加藤 真敏  
KATO Masatoshi

電力系統の効率的運用に寄与する揚水発電は、時代のニーズを取り入れながら現在も着実に進化している。電力貯蔵の規模と需要変化への即応性から、揚水発電はもっとも優れた電力平準化手段の一つであり、今後も揚水発電への期待は大きい。その経済性を高める目的から、高落差・高速・大容量化による建設コストの削減とともに、性能の向上並びに信頼性の向上が求められ、当社は新世紀に向けてその技術進化をリードし続けている。

Pumped storage continues to steadily evolve in order to meet the needs of the times as a technology contributing to the effective operation of electric power systems. Considering the scale of electric power storage and the speed of response to variations in power demand, pumped storage is one of the best solutions to ensure that electric power output remains constant to the greatest degree possible. High expectations are therefore being placed on this technology in the future as well.

For the purpose of economization, it is necessary to reduce construction costs by achieving higher head, higher speed, and larger output of pumped storage units, as well as higher performance and reliability. Toshiba will remain a leader in such technical evolution in this field in the coming new century.

## 電力系統の効率的運用に寄与する揚水発電

わが国では、電力系統の効率的な運用のために多数の揚水発電所が建設されている。大容量の電力貯蔵能力を持ち、ベース供給を担う大型火力・原子力発電の経済的運用を可能にするピーク供給力、あるいは瞬時予備力として、揚水発電はもっとも優れたシステムの一つである。揚水発電は、電力供給の安定性、経済性を考慮した電源のベストミックスの観点から、今後も電源構成上の重要な位置を占めると考えられる。

当社は、1965年に運転開始した大容量純揚水発電所の先駆けである神奈川県城山発電所以来、国内に46台、海外に20台の揚水発電設備を納入してきた。この間、揚水発電所の経済性向上のため、高落差・高速・大容量化と高性能化の進歩は著しい。

## 当社ポンプ水車技術の発展

当社の水車製造は2000年で100年目を迎える、その総出力は3,900万kWに及ぶ。揚水発電所に採用されるポンプ水車は、建設コストの観点から高落差・大容量化の傾向が著しく、当社は常にその技術をリードしてきた。

東京電力㈱葛野川発電所機(4台中2台を当社が製作中)の揚程782mがブルガリア チャイラ発電所機(当社製)の揚程701mを抜いて現在の世界最高揚程である。従来の単段ポンプ水車では、適用比速度(回転速度×揚水量<sup>1/2</sup>／揚程<sup>3/4</sup>)やランナ(羽根車)の加工限界などの技術的制約により適用最高落差は900m程度であるが、将来の超高落差対応として、当社は1,500m-350MW級の二段ポンプ水車の基礎技術を確立しており、いっそうの進化も可能である。

## ポンプ水車の性能向上

わが国の揚水発電技術は、特に高落差化と信頼性の向上に重きを置いて開発が行われてきたが、近年では、発電所の建設費低減と運用効率向上に対する技術開発が中心となっている。例えば、広い落差変化幅に対応できるポンプ水車が開発されて、ダム水深の有効利用により発電所の経済性が向上しつつある。また、出力調整変化幅を大きく取ることができる広範囲負荷調整能力を持つポンプ水車も開発されつつある。

落差と負荷に関する運転範囲拡大のため、以下のような技術課題が挙げられる。

- (1) ポンプ高揚程・低揚程運転時のキャビテーション<sup>(注1)</sup>性能の向上
- (2) 水車低負荷時のキャビテーション性能の改善

### (注1) キャビテーション

高速水流中の低圧部が、飽和蒸気圧まで低下して空洞(気泡)が発生する現象。気泡は、下流の圧力回復部で崩壊するときに高圧を発生し、母材を損傷する。

### (注2) $k - \varepsilon$ 乱流モデル

粘性流体の基礎方程式を数値的に解く手法の一つで、乱流エネルギー $k$ とエネルギー散逸率 $\varepsilon$ の二つのパラメータを用いた解析方式。

### (3) ポンプ高揚程側の逆流限界の改善

これらはいずれも設計点から離れた運転領域であり、羽根間での流線のねじれや局部的な剥離(はくり)の発生を伴う複雑な流れとなっている。このような流れはすべて粘性に起因するので、非設計点流れの改善には粘性を考慮できる乱流解析が不可欠である。

現在、当社では  $k-\varepsilon$  乱流モデル<sup>[注2]</sup>による三次元乱流解析を一般的に用いている。この乱流解析も、当初はランナ、ガイドベーン(可動案内羽根)、ステーベーン(固定案内羽根)などの個々の要素への適用に限られていたが、最近では、これら一連の

流路要素を一体モデルとして扱うことができるようになった。これにより、流路要素相互の流れの影響まで考慮した高精度な流れ解析が可能になり、全体としてのベストマッチングを検討できるようになった。

図1は、一体モデルによるポンプ流れの解析例で、計算領域全体の圧力分布を示したものである。

図2は、ポンプ高揚程側の解析結果を示しており、ランナの羽根間入口部のバンド側で発生する大規模な剥離を伴った逆流現象がよくとらえられている。

図3は、水車30%負荷運転におけるランナ羽根面の圧力分布である。羽根先端部のバンド側で局部的な圧

力低下が見られ、この位置からキャビテーションが発生することがわかる。ポンプ入口キャビテーション性能も同様の手法で十分予測できる。

このような定常(時間平均)乱流解析は、設計レベルでの流路の最適化を迅速に図るうえで非常に有効なツールとして機能している。しかし、ポンプ水車のいっそうの性能・信頼性向上を図るためにには、非定常(時間変化)解析による流れの評価が必要不可欠である。例えば、ポンプ水車において非定常性の強い流れとして、ランナとガイドベーンの動静翼干渉が挙げられる。静止翼列であるガイドベーンと、その内側で回転するランナとの相対的な位置関係は時

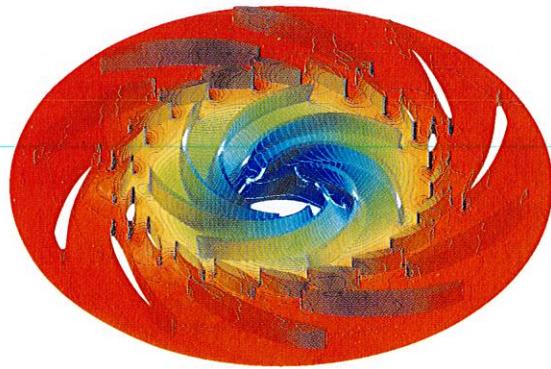


図1. 一体モデルによるポンプ運転時の解析結果 ランナ・ガイドベーン・ステーベーンを一体で解析することにより、流路要素全体のベストマッチングを検討することができる。

Result of pump mode computation using unit model (runner - guide vane - stay vane)

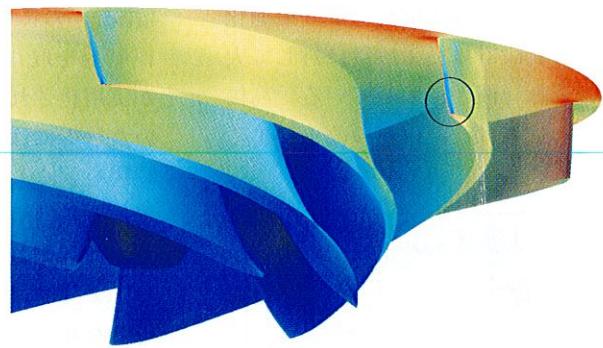


図2. ポンプ高揚程側におけるランナ入口の流れ ポンプ高揚程側の流れ解析で、ランナ入口部で発生する逆流現象がとらえられている。

Flow pattern of runner inlet in pump operation (high head region)

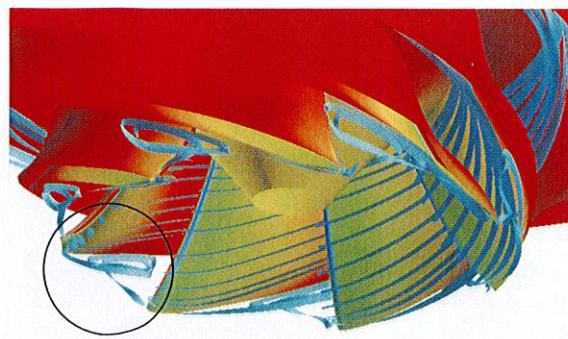


図3. 水車運転時のキャビテーション発生の予測 水車低負荷運転時に発生するランナ入口キャビテーションが一体乱流解析により高精度に予測できる。



図4. 非定常流れ解析結果 ポンプ運転におけるランナと静止部翼の干渉のようすを示す。

Result of unsteady flow analysis (pump operation)

間とともに変化し、特に水車流れでは、ガイドベーンからの粘性後流が下流側のランナの非定常的な流動損失を引き起す。したがって、ランナとガイドベーンとの干渉に起因する流動損失を正確に把握する場合、非定常解析が有効である。

図4は、ポンプ逆流近傍の解析例で、フローパターンの様相を示したものである。解析結果では、ランナとガイドベーンの干渉に伴う速度分布の変化がとらえられており、定常乱流解析や模型試験では得にくい情報を知ることができる。

これら定常・非定常の乱流解析の適用で、ポンプ水車の性能は飛躍的に向上した。以下に、高落差ポンプ水車における改善事例を紹介する。

図5は、ポンプ運転範囲の比較を示しており、乱流解析により最適化された新設計は従来設計に対して大幅に運転範囲が拡大している。高揚程側の拡大は逆流限界の改善による

もので、ランナの翼負荷分布適正化の効果である。低揚程側の拡大は、主にキャビテーション性能の改善によるもので、解析に基づく新しい羽根先端形状によって達成した。

図6は、水車出力範囲の比較を示しており、水車入口キャビテーション性能が、ポンプと同様の設計思想に基づく羽根形状の改良によって大幅に改善され、下限出力を下げることができた。また、部分負荷効率も2%以上向上した。

以上述べたように、乱流解析は高性能ポンプ水車の開発に必要不可欠なツールとなっている。最近では、流速と圧力の空間平均成分の時間変化を解くLES(Large Eddy Simulation)や、Navier-Stokes方程式を直接解くDNS(Direct Numerical Simulation)のような更に高精度に大規模剥離を取り扱える新しい解析技術が実用化されつつある。これらを用いた解析には、現状ではまだ多大な時間を要し、設計ツールとして実用されるには至っていないが、最近の超並列計算のような計算機技術の進歩によって、ここ数年のうちに実用となり、ポンプ水車の性能も更に向上するものと考えられる。

#### ■新構造による総合的コスト削減

今後、ポンプ水車の構造合理化及び保守点検簡素化のニーズがいっそう高まると考えられる。

ポンプ水車の主要部品である上カバーは、発電所までの輸送上の寸法制限や分解・組立作業のため、4分割又は2分割構造が一般的である。上カバーを分解・組立するために、水車ピットには高さ方向にスペースが必要である。また、オーバホール工事で上カバーを分解・再組立する場合には、複雑な作業手順を踏まなければならないので、作業期間は、通常約3か月にも及んでいる。

当社が提案するコンパクト一体型上カバーは、従来、上カバーで支持していたガイドベーン上部スピンドル部をステーリングで支持することで上カバー構造のコンパクト化と一体化を実現したものである。上カバーはそのまま上方に吊り出すことができる。また、一体構造のため分解・組立の作業スペースが不要となり、水車ピットの高さを1m以上低くすることができる(図7)。下カバー回りは露出構造となっており、ガイドベーンは下カバーと共に下方に降ろして分解する。

なお、ポンプ水車における下カバー回りの露出構造は、海外では事例が多い。チャイラ発電所の当社製超高落差ポンプ水車(揚程701m)でも露出構造を採用している。

図8に、従来構造上カバーとコンパクト一体型上カバーのオーバホール工期を試算比較した。コンパクト一体型上カバーの適用で、約1か月

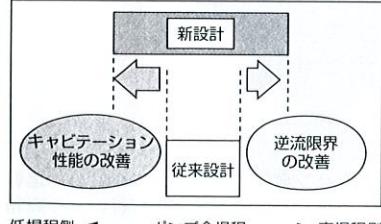


図5. ポンプ運転範囲の拡大 新設計ポンプ水車は、従来設計に対して逆流限界とキャビテーション性能が大幅に改善され、運転範囲が拡大している。  
Expansion of pump operating range

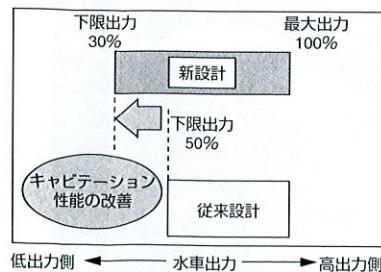


図6. 水車出力範囲の拡大 新設計ポンプ水車は水車入口キャビテーション性能の改善により、従来設計と比較して水車出力範囲を低出力側へ拡大できる。  
Expansion of turbine operating range

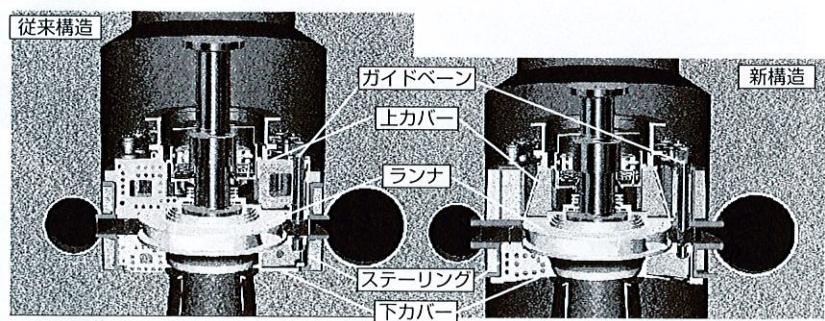


図7. 新旧上カバー断面構造の比較 コンパクト一体型上カバーは構造が簡素化され、水車ピットが縮小される。  
Comparison of pump-turbine cross sections of conventional type and new head cover type

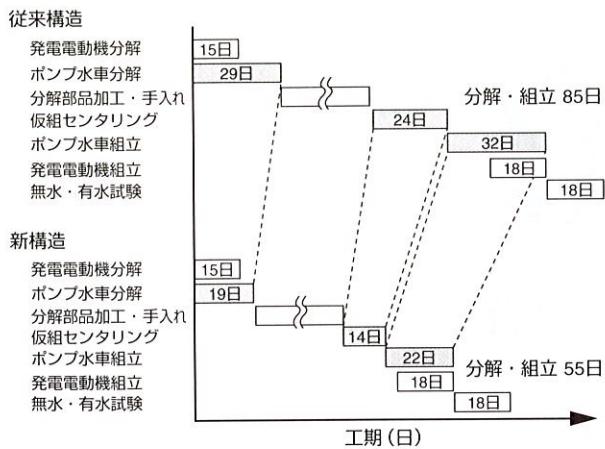


図 8. 分解・組立工期の比較 上カバーの分解・組立作業の簡素化により、オーバホール期間が約1か月短縮される。

Comparison of overhaul terms of conventional type and new head cover type

もの工期短縮が図れる。

以上のように、コンパクト一体型上カバーは、発電所の建設コストの低減、分解・組立作業の大幅な改善と工期の短縮に寄与する。揚水発電所の合理化を目指した新構造として今後、大いに期待できる。

## 当社発電電動機技術の発展

当社の水車発電機製造は99年で105年目を迎える、その総出力は4,300万kVAに及ぶ。常に業界のトップ

メーカーとして、記録に残る水車発電機を数々製造してきた。

揚水発電所の経済性を高めるため、発電電動機の大容量化、高速化の技術開発を年々進めてきた(図9)。

水車発電機の容量Qは次式で表わされる。

$$Q \propto \alpha \cdot B \cdot D \cdot L$$

ここに、

$\alpha$  : 電圧・電流に関わる係数

B : 磁束の変化率

D : 固定子鉄心内径

L : 固定子鉄心積厚

磁束の変化率Bは、回転子周速に比例するので、回転速度Nとするとき、Bは( $\pi \cdot D \cdot N$ )に比例するから、上式は次のように表わされる。

$$Q \propto \alpha \cdot (D^2 \cdot L) \cdot N$$

したがって、大容量化のためには、 $\alpha$ を大きくするため電圧・電流を大きくする、( $D^2 \cdot L$ )を大きくするため固定子鉄心の内径と積厚を大きくする、回転速度Nを大きくする方法がある。すなわち、高電圧・大電流化、大型化、高速化である。

図10に大容量化への技術的課題

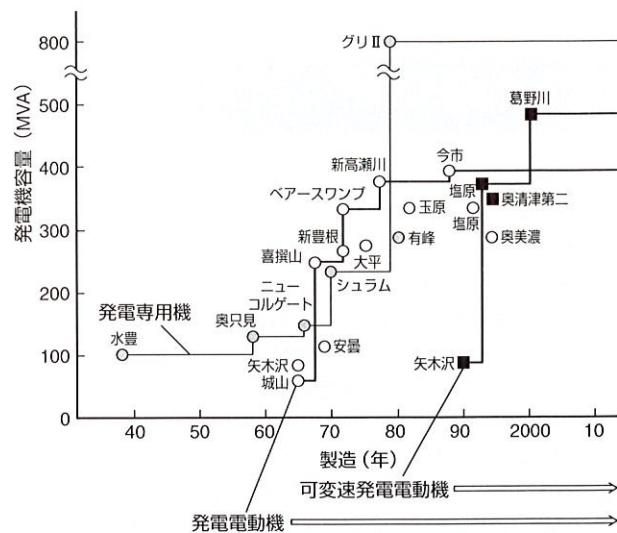


図 9. 水車発電機製造実績の推移 大容量化の記録が更新されてきた。

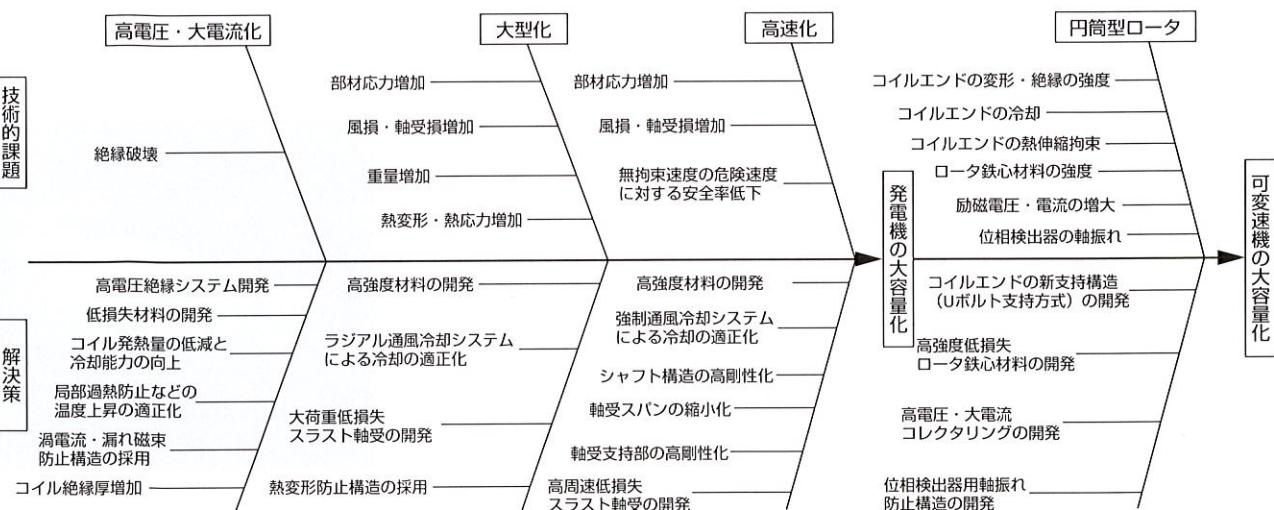


図 10. 発電機大容量化への技術的課題と解決策 多くの技術課題を一つずつ解決しながら大容量化が進められてきた。

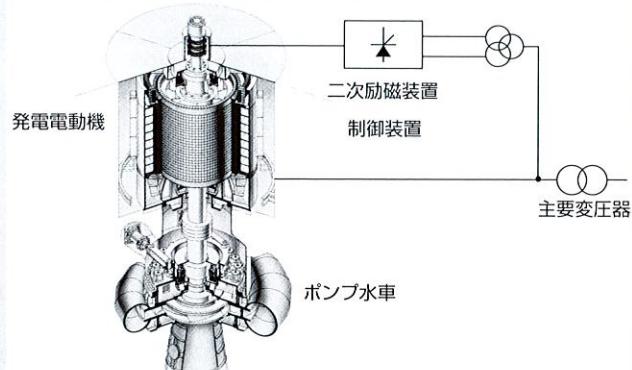
Technical themes and solutions for enlarging hydro generator capacity

## 可变速揚水発電システム

揚水発電は、系統の余剰電力でくみ上げた水で必要な時に発電する大規模な電力貯蔵システムであり、可变速揚水発電システムは、その回転速度を変えて運転するものである。揚水運転時の入力調整による系統周波数調整、発電運転時の効率向上や運転範囲拡大、大きなフライホイール効果を生かした高速負荷応答などのメリットがある。

90年以来、国内で7台(うち4台が当社製)の可变速揚水発電システムが運転開始しており、日本はこの技術で世界を大きくリードしている。

可变速発電電動機は、巻線型の回転子を持ち、これに系統周波数と回転速



可变速システムの構成

度の周波数との差分の低周波交流を流して、系統との同期を保つ。

現在、当社は  $475\text{MVA} - 500\text{min}^{-1} \pm 4\%$  の高速大容量機を設計中である。

可变速揚水発電システムのフライホ

ール効果と高速負荷応答を応用したフライホイール発電システムも実現しております。今後これを発展させた電力系統の安定化システムが期待されています。

と解決策を示す。現在の空冷限界容量  $Q$  は、継続的技術革新により初期の約3.5倍となり、例えば、 $500\text{min}^{-1}$  機で  $600\text{MVA}$  に拡大している。

85年以降、揚水運転時の周波数調整制御により系統の経済的な運用が可能な、可变速揚水発電システム(図み記事参照)の開発が行われた。可变速発電電動機に必要な技術は、図10に示すように、固定子は従来から培われてきた発電電動機の技術で対応できたが、回転子は磁極を装着した突極型ではなく三相分布巻線を持つ円筒型となるため、新たな開発課題が多数出現した。当社は、可变速機特有の円筒型回転子に対し、従来構造とまったく異なる機能を持つUボルトによる回転子コイルエンド新支持方式構造を創意開発した。

当社は、当初から  $500\text{MVA}$  級大容量可变速発電電動機の実用化を目指して電力会社とともに開発を進め、90年世界初の可变速揚水発電システムを矢木沢発電所(東京電力株: 85 MVA 可变速発電電動機)に完成させ、続いて塩原発電所(東京電力株: 360 MVA)、奥清津第二発

電所(電源開発(株)): 345 MVA)の可变速発電電動機を完成させた。

現在、従来実績を大幅に超える高速大容量( $475\text{MVA} - 500\text{min}^{-1} \pm 4\%$ )可变速発電電動機の総合的信頼性を確認するため、実物大直径回転子による回転通電検証試験の実施を準備中である。

### ■可逆回転新素材スラスト軸受の開発

従来、軸受すべり面材料としては金属のすずを主成分としたホワイトメタルが使用されてきた。ホワイトメタルは始動・停止過程での摩耗や面荒れに対して細心の注意が必要で、軸受の信頼性や低損失化(高面圧化)の面で不利な点があった。

そこで当社は、これに代わる軸受すべり面材料として四つ化エチレン樹脂系材料を使用し、摩擦・摩耗特性に優れた新素材軸受を開発して、20台以上の一方回転発電専用機に適用してきた。また最近、可逆回転(両方向回転)の  $100\text{MVA}$  級発電電動機への適用にも成功した。新素材軸受は始動渋滞の解消、保守の簡素化、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。

その開発にあたっては、始動・停止過程の過渡現象を精密に再現できる試験装置による回転試験と、図11に示すすべり面のシミュレーション解析技術を併用した。

今後、大型化のための製造技術の開発、低損失化(高面圧化)のための解析・検証試験を通して、適用範囲を高速大容量発電電動機に拡大することを目指している。図12に高速大容量発電電動機における、新素材軸受の高面圧化による損失低減の可

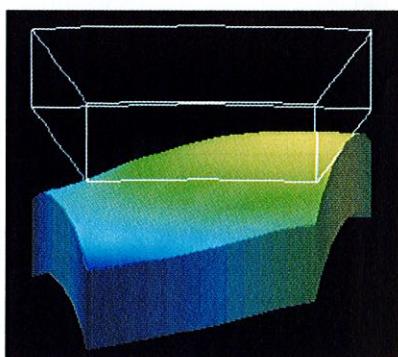


図11. 軸受変形のシミュレーション解析

あらゆる運転状況下での、軸受静止板の変形と油膜厚さをシミュレーションできる。  
Simulation of deformation of thrust bearing

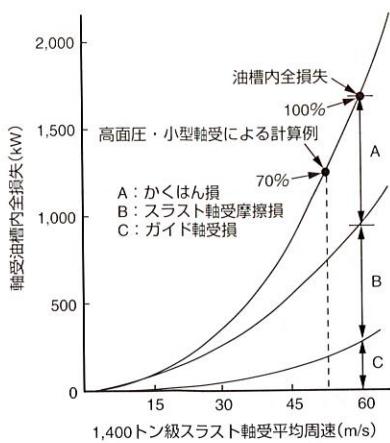


図12 新素材軸受の高面圧化による損失低減 高面圧・小型化により回転周速を下げて軸受損失を低減できる。  
Reduction of loss of new material type thrust bearing by increasing pressure

能性を示す。

### ■発電電動機の将来像

発電電動機の体格は、容量や回転速度だけで決定されるものではなく、ポンプ水車側が要求するはずみ車効果や固定子内径、系統が要求する短絡比などを満足する必要がある。これら外部要因による要求が、将来、仮に負荷遮断時無拘束速度設計の採用などによって緩和されれば、発電電動機設計上の自由度が増し、その体格・形状は自己最適化に向けて急激に変化すると思われる。

将来的には、いっそうの高効率・低損失化、コンパクト化、高信頼性化、組立分解工期短縮化、メンテナンスフリー化、そしてコストダウンのため、新材料を含めた画期的な新技術の導入が行われるであろう。

軸受損失の更なる低減策として考えられるのは、強力な磁気軸受であろう。回転部を浮上させることができれば、数百kW以上に及ぶ軸受損失をなくすことができるばかりでなく、潤滑油関係の補機や保守をなくす面でも待望される技術となる。

また、低損失電気材料や冷却方法の開発は、高効率化、コンパクト化などに直結するのでこの方向への注

力が効果的である。

### ■今後の展望

従来の揚水発電所は、上池・下池が地表に建設されており、環境保全などの面から、開発地点の確保が難しくなってきていている。その対応として、地下貯水池式揚水発電構想が具体化されつつある。これは地下に掘削した大規模空洞を下池として利用するもので、現在、通産省資源エネルギー庁を中心に具体的な検討が行われている。下池となる地下空洞に、既存の廃坑などが利用できれば経済性が向上する。環境保全、需要地近傍での立地による送電損失削減や、開発の進む高落差揚水発電機器の適用によるいっそうの高落差化など多くのメリットのある方式である。

この方式を更に進化させた形態が、地下貯水池式海水揚水発電であり、海を上池とするものである<sup>(1)</sup>。周囲を海に囲まれたわが国に最適な方式とも言え、海岸に建設される原子力発電所などの近傍に建設できる可能性もある。高落差で海水を使用するため、耐腐食性を持つ高強度材料の開発などの課題があるが、解決に向け開発が進んでいる。

なお、海を下池とした海水揚水としては、通産省資源エネルギー庁が電源開発(株)に委託して建設したパイロットプラントである沖縄やんばる海水揚水発電所(揚程160m)において機器の耐腐食性などについて長期実証試験が実施されている。また、この発電所にも可変速揚水発電システムが採用されており、単独系統である沖縄の電力系統の安定化に寄与するものと期待される。

世界の電力市場における規制緩和の中で、売買電力市場の運用や価格決定ルールが模索されている。このような規制緩和市場においても、緊急対応の備蓄としての役割、オフピーク電力とピーク電力の価格差によ

る収入、更には可変速揚水機による揚水運転時周波数調整や系統安定度向上など、様々な機能を持つ揚水発電は、重要な役割を担うものと考えられる。

以上述べてきたように、高経済性、高信頼性、高性能を目指して、揚水発電技術の進化に当社は取り組んでおり、時代のニーズを反映した揚水発電機器を生み出している。

ここで紹介したような新方式の揚水発電所を含め、揚水発電の建設が更に進められることを期待する。

### 文 献

- (1) 飯島治夫, 他, 揚水発電の将来展望, 動力, 230, 9, 1995



山形 一郎  
YAMAGATA Ichiro

電力システム社 京浜事業所 原動機部参事。水車及びポンプ水車の開発・設計・製造に従事。日本機械学会、電気学会、ターボ機械協会会員。Keihin Product Operations



柴田 千里  
SHIBATA Chisato

電力システム社 京浜事業所 発電機部主幹。水車発電機、発電電動機及び可変速発電電動機の研究・開発・設計に従事。Keihin Product Operations



中村 高紀  
NAKAMURA Takanori

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 回転電機技術担当。水車及びポンプ水車の開発に従事。日本機械学会、ターボ機械協会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



加藤 真敏  
KATO Masatoshi

電力システム社 電力事業部 水力プラント技術部主査。揚水発電システムのエンジニアリングに従事。Power Systems Div.