

水力発電機器改修におけるライフサイクルコンセプト

Life-Cycle Concept in Repair Work on Existing Hydroelectric Power Plants

稲垣 泰造
INAGAKI Taizo

南波 聰
NAMBA Satoshi

三浦 正広
MIURA Masahiro

水力発電機器改修(以下、水力改修と略記)においては、発電設備の簡素化、合理化、運転・保守の省力化、無公害化のニーズが高まっており、当社はトータルメンテナンスコストの削減をねらいとして、オーバホール周期の同期化、オーバホールまでの保守ミニマム化、ランニングコスト低減を目指したライフサイクルコンセプトを提案している。このコンセプトの下、新技術・新商品の適用とともに長寿命化技術の開発、高度流れ解析を応用した主機性能向上を実現し、水力発電所のリフレッシュに取り組んでいる。

In repair work performed on existing hydroelectric power plants, requirements are increasing for their simplification, rationalization, labor-saving in operation and maintenance, and realization of pollution-free operation. In this field, we have proposed a life-cycle concept aimed at synchronizing the overhaul cycles of the respective equipment, minimizing maintenance in the next overhaul, and saving running costs, in order to reduce the overall maintenance costs.

Under this concept, we are making efforts to refresh existing hydroelectric power plants through the development of technologies to extend the life of equipment and advanced flow analysis to enhance the performance of hydraulic turbines, together with the application of other new technologies and new products.

1 まえがき

水力改修においては、3レス化と言われる圧油レス化、冷却水レス化、ブラシレス化が主流である。今後は、それらの適用範囲の拡大を図るとともに、既設設備の出力増強などの新鋭化が極めて重要である。当社は、これらのニーズに対応した技術開発を従来から推進している。ここでは、将来を見据えた最新技術について述べる。

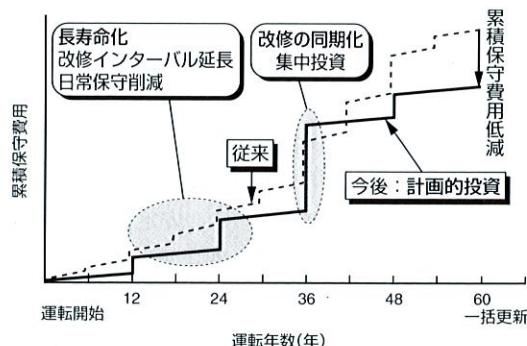


図1. 当社の提案するライフサイクルコンセプト 機器の長寿命化、改修の同期化などにより効率的な投資を行い、トータルメンテナンスコストの低減を図る。

Proposed life-cycle concept

2 ライフサイクルコンセプト

長寿命化技術に支えられた改修インターバルの延長と日常保守点検の削減、更に各機器の改修を同期化させることによる集中投資を行い、トータルメンテナンスコストのミニマム化を図るという、当社のライフサイクルコンセプトを図1に示す。

3 レス化技術の適用範囲拡大

3.1 電動サーボモーターシステムの適用範囲拡大

電動サーボモーターシステムは設備簡素化、保守省力化、環境への配慮などを目的として、近年では多くの中小容量の水力発電所で採用されている。このシステムは、パワーエレクトロニクス技術とデジタル制御技術の発達により実用化されたもので、更なる高機能・高信頼性・大容量化

が進められ、適用範囲の拡大を図っている。大容量化への流れとローラねじを図2に示す。

特に当社では、独自の技術によりフランシス水車、カブラン水車、ペルトン水車などのあらゆる形式の水車に電動サーボモーターシステムの実用化を果たしているが、更に、水車の適用容量を拡大するために、電動サーボモータの大容量化に取り組んでいる。ここでは、この大容量化のために、新たに開発したガイドペーン操作用の二連式電動サーボモーターシステムと、従来のボールねじに代わってローラねじを使用した、大容量ランナペーン操作用電動サーボモーターシステムについて述べる。

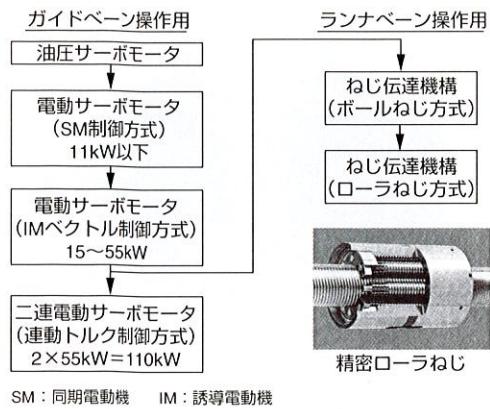


図2. 電動サーボモータの大容量化への流れ ガイドベーン用では二連式サーボモータを、ランナベーン用ではローラねじにより大容量化を図る。

Flow of large-capacity electric servomotor system

3.2 二連式電動サーボモータシステム

現在採用されている電動サーボモータシステムは、1台のサーボモータで駆動する方式であるが、電動サーボモータの最大容量は、電動機の最大出力で55 kWが製作限界であり、これによって適用される水車の容量は制約を受けている。当社では、より大きい水車を電動化するために、複数台のサーボモータでガイドベーンを操作する多制御方式電動サーボモータシステムを開発し、将来的には100 MW程度の水車まで適用することが可能となった。現在、2001年5月運転開始予定の新潟県奥三面発電所(34.5MW フランシス水車)向け製品(推力115kN-5.5kW)を製作中である。

二連式電動サーボモータの制御は、二組の独立した制御系を均等の負荷配分で安定に運転させる必要がある。二連式電動サーボモータシステムの2台の電動サーボモータは、それぞれにサーボアンプを持ち、トルク、速度制御により安定な運転を行っている。二つの制御系に設定値や特性の違いが生じた場合には、負荷の配分がアンバランスとなり、そのアンバランスは急激に拡大発散して、いずれかが過負荷トリップする事態となる。これを防止して安定な運転を行ふため、当社では、連動トルク制御を採用した。二連式電動サーボモータシステムの構成を図3に示す。

3.3 ランナベーン操作用サーボモータのねじ伝達機構

当社のランナベーン操作用電動サーボモータは、主軸と操作機構の回転同期を、遊星歯車機構を用いて行う機械同期方式であり、電動機、同期装置、減速装置及びねじ伝達機構で構成されている。サーボモータの限界容量としては、ねじ伝達機構の許容推力でほぼ決まり、現状は、これにボールねじを使用しているので、ボールねじの製作上限である650 kN程度が限界容量となる。このため、カプラン水車

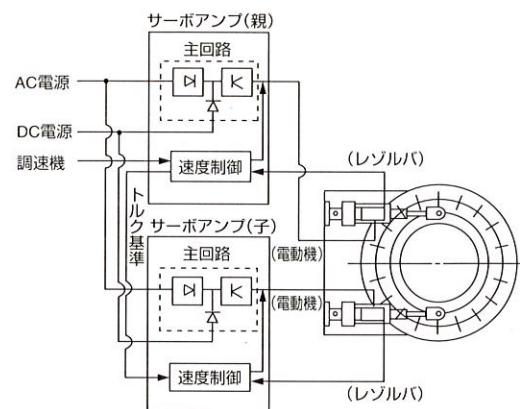


図3. 二連式電動サーボモータの構成 連動トルク制御を採用し、親側のトルク基準を子側に出力して、子側はそのトルク基準により運転する方式とした。親子それぞれのアンプで閉ループを構成し、安定した制御ができる。

Configuration of dual-action type electric servomotor

の容量としては8 MW程度が上限となっていた。当社では、電動化適用範囲拡大のために、このボールねじに代えて、高負荷容量を持つローラねじを使用したランナベーン操作用電動サーボモータを開発した。ローラねじを適用した電動サーボモータの推力は1,500 kN程度までが可能となり、20 MW程度のカプラン水車まで適用範囲を拡大することができた。

4 長寿命化技術

4.1 水車流水面への表面改質技術

含有土砂を多く含む河川に使用される水車の流水面は、高速の土砂噴流により摩耗損傷を受ける。その結果、機器の性能低下や構成部品の短寿命化をきたし、頻繁に部品を交換する必要がある。したがって、水車の流水面を構成する部品の耐食・耐摩耗特性を向上させる技術の開発が急務である。従来からも、耐食・耐摩耗に優れたステンレス材料(SCS6材など)の適用や損傷部位への肉盛溶接、大気プラズマ溶射(APS: Air Plasma Spray)などの表面改質技術の適用によって、機器の補修及び延命化を図っているが、いずれも大きな効果を発揮するまでには至っていない。

近年、溶射技術は、高速ガス炎溶射(HVOF: High Velocity Oxygen Fuel)の開発により、溶射皮膜の密着性や粒子間結合力などの皮膜性能が大きく向上してきており、耐食・耐摩耗コーティングプロセスとして注目されている。当社は、HVOFよりも更に性能の良い超高速ガス炎溶射(HP-HVOF: High Pressure - HVOF)を用い、最適皮膜材料を開発することで、耐食・耐摩耗性能を大きく向上させる水車流水面の表面改質技術を確立した。溶射材料はタンゲステンカーバイド(WC)を基材とした複合材料であり、超高

圧の溶射ガスによって音速以上の粒子速度で被溶射面にコーティングする。このため、溶射皮膜が緻密(ちみつ)(気孔率: 1%以下)となり、膜厚も1mm以上の厚膜が形成可能である。また、皮膜表面硬度が1,300(MHV:マイクロビックカース)と非常に硬いため、優れた耐土砂摩耗性能を持っている。図4は、耐土砂摩耗特性の比較試験結果である。既に、実機適用を開始しており、土砂磨耗に対する効果を確認している。HP-HVOFによる表面改質技術は、水車の長寿命化、メインテナンス周期の延長に大きく貢献できる。

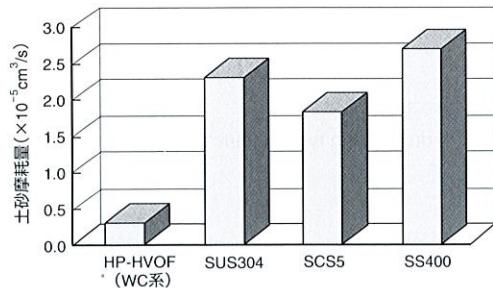


図4. 耐土砂摩耗特性比較 HP-HVOF 溶射材は優れた耐土砂摩耗特性を示している。

Comparison of volume erosion rates of several materials

4.2 新素材軸受

4.2.1 新素材軸受の特長 当社では、水車・発電機の軸受に対し独自に開発した新素材軸受の採用を図っている。新素材軸受は、すべり面材料に従来の軸受がホワイトメタルを適用しているのに対し、充填(じゅうてん)材を添加した四つ化エチレン樹脂系材料を適用している。新素材軸受は、摩擦・摩耗特性に優れており、次のようなメリットがある。

- (1) すべり面材料の摩耗量が極めて少なく、軸受の寿命が2倍以上になることが期待できる。
- (2) 焼付きに至ることがなく、信頼性が向上する。
- (3) 定期的な軸受すべり面の仕上げ、点検が不要であり、保守の簡素化が図れる。
- (4) スラスト軸受押上げ装置の省略も可能であり、システムの簡素化が図れる。
- (5) 高面圧化が可能で、軸受を小型化できるので、軸受損失が低減され、空冷化適用範囲が拡大する。
- (6) すべり面の樹脂系材料は、それ自身が電気絶縁物のため、軸受にて確実な軸絶縁が可能となる。

以下、新素材軸受の適用について述べる。

4.2.2 新素材スラスト軸受 1994年4月に国内で初適用して以来、これまでに17発電所で合計23台に採用し、いずれの機械も順調に運転を続け、その優れた特性を發揮している。特に、99年6月には109MVA発電電動機に初適用

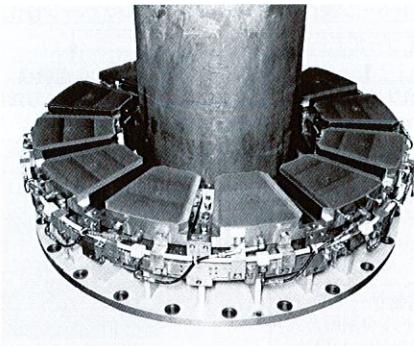


図5. 109 MVA 発電電動機用新素材スラスト軸受 109 MVA 発電電動機への採用により、将来、300MVA級への適用拡大のめどが立った。

Thrust bearing made of new material for 109MVA generator-motor

し、良好な結果が得られた。109 MVA 発電電動機に採用した新素材スラスト軸受を図5に示す。当社開発の発電電動機用新素材スラスト軸受(可逆回転仕様)技術は、世界をリードするものであり、国内はもとより海外からも注目を浴びている。

発電専用機では、軸受損失の低減が図れる特長を生かし、空冷軸受の適用範囲が拡大し、冷却水レスとなり保守の簡素化が進んでいる。更に、2000年12月には海外でも初適用の予定である。

4.2.3 新素材円筒ジャーナル軸受 97年に初適用して以来、すでに3台の納入実績がある。ジャーナル軸受を図6に示す。ジャーナル軸受のすべり面形状は、スラスト軸受が平面であるのに対し曲面となるため、すべり面材料の接合が困難であったが、その接合技術を確立した。これは、国内メーカーでも当社だけである。この軸受の採用で高面圧化による軸受損失低減が図れ、軸受の空冷化を可能とした。

一方、立軸機用セグメントガイド軸受に対しても、新素材軸受の適用が図られている。円筒ジャーナル軸受の場合

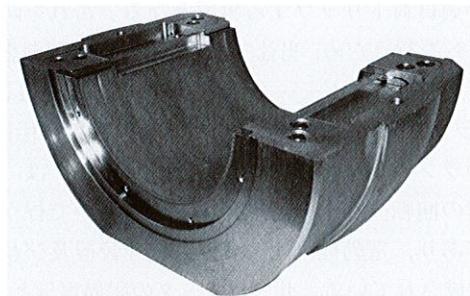


図6. 新素材円筒ジャーナル軸受 橫軸機用ジャーナル軸受にも新素材を適用した。

Journal bearing made of new material

より、更に高度なすべり面材料の接合技術を確立した。これにより、更なる空冷軸受の適用範囲の拡大が図れる。

4.2.4 新素材軸受適用範囲の拡大 現在、300MVA級発電電動機への適用のめどが立っており、今後、更に適用範囲を拡大していく。また、大容量機に装備されるスラスト軸受押上装置の省略など、総合経済性の追求も同時に進めていく。

5 設計・製造革新の事例

5.1 溶接ランナ

従来、水車ランナは一体で鋳造する方法が主流であった。しかし、このようなランナを製造できる高度技術を持つ鋳鋼メーカーが減少傾向にあり、一体鋳造ランナ製造における納期確保が困難になってきた。この問題を解決するため当社では、ランナの構成部品であるクラウン、バンド、及び羽根を個別に製作して、溶接組立する製造方法の開発に早くから取り組んできた。

その成果として、ロボットによる自動溶接において、複雑な三次元設計形状データから、あらかじめ溶接機器がランナに干渉しないように溶接手順を教え込むシステム(オフラインティーチング)と、狭い空間でも溶接できる溶接ノズルを開発し、作業の合理化と品質の向上を図った。

また、三次元形状をした羽根については、従来の鋳造製造法に代えて、板材をプレス加工して製作する方法を開発し、製作期間短縮を図っている。現在は、主に中・大型水車ランナに適用しているが、今後は、小型の水車ランナ、及び更なる高度技術を要する高落差ポンプ水車ランナにも適用し、ランナの品質向上と短納期化を実現していく。

5.2 新型調速機アクチュエータ

5.2.1 新型調速機アクチュエータ 調速機の性能は、発電所全体の制御性を左右し、発生する電力の質を決めると言っても過言ではなく、プラントの主要変数を制御する調速機の責務は重大である。また、よりいっそうの速応性及び安定性の改善が進められている。当社は、従来の調速機の次世代機種として、信頼性に優れ、保守の簡素化を図ったコンパクトでシンプルかつ高性能の新型調速機アクチュエータを開発・商品化し、初号機を関西電力(株)奥吉野発電所6号機(207MW・526m⁻¹・514min⁻¹、油圧5MPa、配圧弁口径100mm)に納入し、99年3月に運転入りした。

調速機盤(アクチュエータ)を図7に示す。

5.2.2 新型調速機の特長

- (1) 操作油の汚染に強いコンバータの採用とリンク、カム機構の省略により、制御に対する信頼性が高い。
- (2) ブロック化、マニホールド化によりスペースが半減しコンパクトになった。
- (3) 機械式リンク機構を大幅に省略してシンプル化した

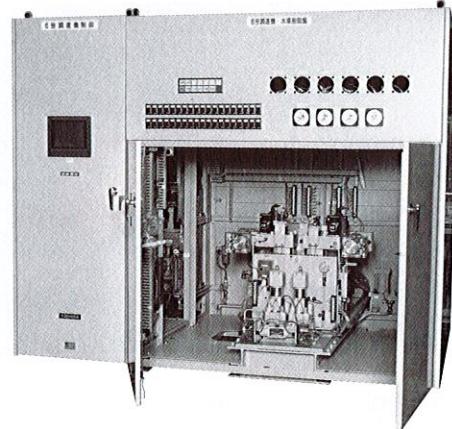


図7. 新型調速機アクチュエータ 保守の簡素化を図ったコンパクトでシンプル、高性能のアクチュエータを開発・商品化した。
New style governor actuator

ので、調整要素が少なく保守、調整が容易となった。

(4) 制御ユニットの二重化が可能である(オプション)。

6 水車性能改善

近年、水力改修にあたっては単なるリピート改修ではなく、自然環境に影響を与えずに性能改善を行い、発電能力を向上させるという動きが活発になっている。当社は、このニーズにこたえるため、最新の流れ解析技術を駆使して、短期間に高性能化を図っている。この技術を適用して設計した最近の改修案件実績を表1に示す。

以下にその改修事例として、ニュージーランド エビモア発電所を紹介する。この発電所の既設水力機器は、海外メーカー(68年製)のもので、改修にあたって厳しい国際入札のなかで当社が受注したものであるが、現在、現地受入れ試験が完了し順調に運転されている。改修範囲は図8に示すように、ランナは今回開発した高性能品に更新し、静止部であるステーベーン、ガイドベーンについては高性能化への改造を実施した。

表1. 性能改善を考慮した改修案件

Plant rehabilitation taking performance improvement into consideration

客先名	発電所名	要 項		改修範囲	運転開始年
		出力(MW)	台数		
神奈川県企業庁	城山3, 4号機	65	2	ランナ、ガイドベーン更新	1998
関西電力(株)	新高津尾	14.85	1	一式更新	1999
MERIDIAN ENERGY Ltd. (NewZealand)	エビモア	56.1	4	ランナ更新、ステーベーン、ガイドベーン改造	1999
関西電力(株)	喜撰山	240	1	ランナ更新	設計中
関西電力(株)	小牧3, 4号機	21.2	2	一式更新	設計中
関西電力(株)	滝越1, 2号機	14.4	2	吸出し管以外一式更新	設計中



図 8. 水車改修範囲 ランナは更新し、ステーベーン、ガイドベーンは改造して性能向上を図った。

Scope of rehabilitation in hydraulic turbine

性能に対しては、最高効率点の向上とともに、低負荷側の性能の向上も要求された。これに対して、三次元で乱流を考慮できる高度な流れ解析手法を適用し、流路形状を最適化した。ランナ内のフローパターン例を図 9 に示す。

この解析では、図 9 のように流动状態ばかりでなく、ランナ内で低圧になって、ランナにダメージを与える有害な気泡(キャビテーション)が発生しないかなども詳細かつ定量的に評価できることから、設計段階で最適化を容易に行うことができる。また、ステーベーンの改造についても同様に解析した。エネルギー分布図を図 10 に示す。既設形状の図 10 (a) では損失が大きいことがわかる。最終的には、図 10 (b) に示すような形状に改造した。

これらの改修による性能比較を図 11 に示す。既設機に比べ最高効率が向上し、また、低負荷側の効率も大幅に向上させることができた。

今後は、設計手法の精度を更に向上させるとともに、流れ解析と強度解析を組み合わせて、水車流路形状を自動的に最適化する設計システムを構築し、設計期間の大幅短縮を目指す。

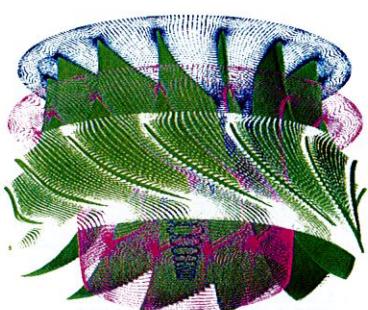


図 9. ランナ内のフローパターン例 高度流れ解析により、詳細な流动状態が把握できる。

Example of flow pattern in runner

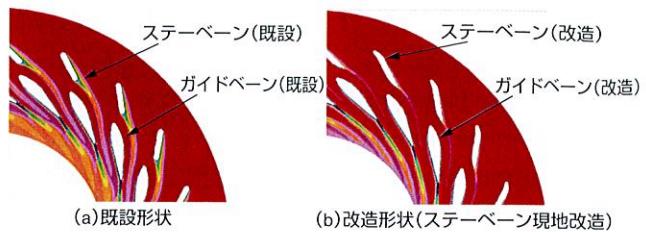


図 10. ステーベーン、ガイドベーン回りのエネルギー分布例
既設形状に比べ、改造形状はエネルギーの低い緑、青色部が少なくなっており、大幅に性能が向上している。

Example of energy distributions around stay vanes and guide vanes.

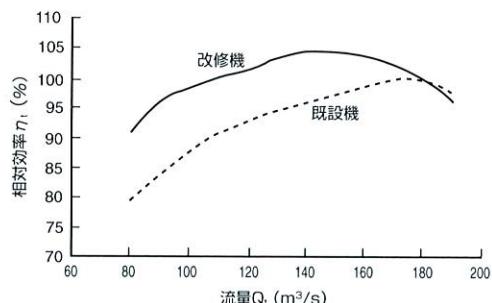


図 11. 改修前後の水車性能比較 模型試験で、改修後の水車性能が改修前に比べて大幅に向上したことを検証した。

Comparison of performances before and after rehabilitation

7 あとがき

当社の水力改修における、経済的なライフサイクルの実現を目指した新技術について述べた。紙面の都合で制御装置の改修に関する将来像については、他の論文に譲ることとした。このライフサイクルコンセプトの下、更なる新技術の開発・研究に取り組み、水力発電所のリフレッシュに貢献していく。



稲垣 泰造
INAGAKI Taizo

電力システム社 京浜事業所 原動機部主幹。
水車の設計に従事。
Keihin Product Operations



南波 聰
NAMBA Satoshi

電力システム社 京浜事業所 発電機部主務。
水車発電機の設計に従事。
Keihin Product Operations



三浦 正広
MIURA Masahiro

電力システム社 電力事業部 水力プラント技術部参事。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。
Power Systems Div.