

水力発電所のランナ更新技術

Technologies for Rehabilitation of Hydraulic Runners

阿部 泰久 中村 高紀

■ ABE Yasuhisa

■ NAKAMURA Takanori

水力発電所の建設は、世界的に1960年代から急速に増加し、1980年代にかけて年間10～20GWの規模で新設されてきた。その後、一部地域での建設は減少傾向であるが、その代わりに、建設から30～50年近く経過した発電所において、大規模な改修工事が行われるようになってきている。これらの改修工事では、単なる性能や機能復帰ばかりではなく、ランナの高効率化などの様々な最新技術を取り入れている。東芝は、ランナの高効率化技術に基づき改修工事に積極的に取り組んでおり、近年、海外を中心に大型機の大規模改修などで大きな成果を上げている。

The construction of hydroelectric power stations increased rapidly during the 1960s and grew by 10 to 20 GW annually over the following 20 years. Since this period of growth, there has been a need for large-scale rehabilitation work of hydraulic equipment constructed 30 to 40 years earlier. In these rehabilitation projects at hydroelectric power stations, not only is it necessary to restore the performance and functions of equipment, but also to improve runner efficiency, etc. Toshiba has actively concentrated on these rehabilitation projects with technologies for the improvement of runner efficiency and obtained good results in this market, especially in overseas large-scale power stations.

1 まえがき

水力発電所の建設は、図1に示すとおり、世界的に1960年代から急速に増加し、1980年代にかけて年間10～20GWの規模で新設されてきた。その後、建設から30～50年近く経過した発電所において、大規模な改修工事が行われるようになってきている。

このような状況下、東芝は過去に納入した機器はもとより、他社納入の機器についても積極的に改修工事に取り組んでいる。

これらの改修工事では、単なる性能や機能の復帰ばかりではなく、ランナの高効率化による出力増大などの性能向上技術、制御装置のデジタル化などの機能向上技術、溶射などの

保守省力化技術など、様々な最新技術が取り入れられている。ここでは、水車の高効率化技術を中心に、当社が提供している改修技術や近年の更新例について述べる。

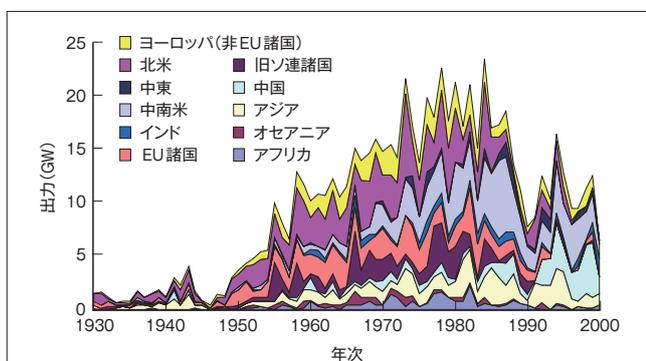
2 水車の高効率化技術

水車の運転範囲は、ランナに発生するキャビテーション、静止部と回転部の干渉や吸出し管での渦の挙動による振動などによって制限されることがある。水車のキャビテーションは、ランナ羽根出口側に発生するものと羽根入口側に発生するものとに類別される。羽根出口側に発生するキャビテーションは特に大流量側で発生しやすいため、出力増大に影響する。一方、羽根入口側に発生するキャビテーションは、設計落差から離れた高い落差の運転条件で発生するため、変落差特性の改善に影響する。

このように広い運転範囲で高性能な水車を開発するには、各運転点での特性を考慮した全体最適化設計が必要となる。ここでは、既設水車の改修を行い水力性能の大幅な改善を図るために用いるフランス水車ランナの最適設計手法と、キャビテーション性能と水車効率の向上事例について述べる⁽¹⁾。

2.1 高精度流れ解析技術 (CFD)

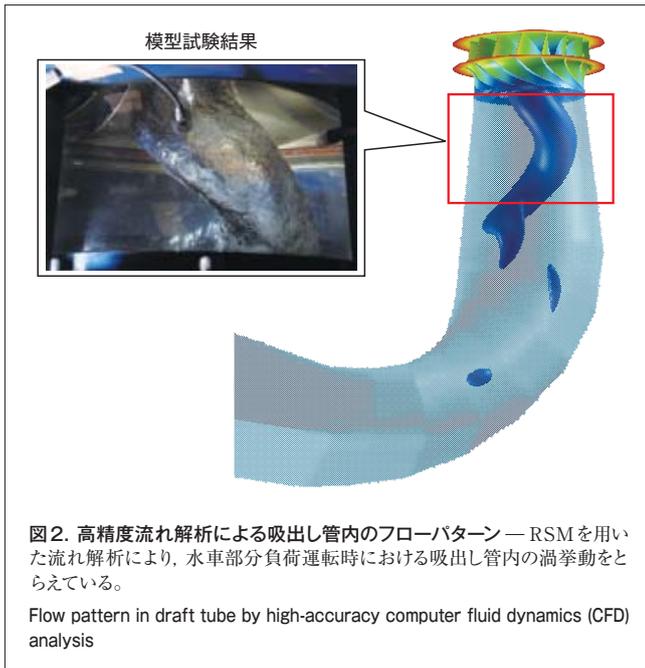
水車開発は、設計段階での流れ解析による形状最適化と模型試験での最適化の2段階で進められるのが一般的である。その水車機器の設計最適化に用いるk-ε乱流モデル^(注1)を用いた定常流れ解析は、設計レベルでの流路の最適化を迅速に図るうえで非常に有効なツールである。しかし、水車の性



出典：Platts社 世界の発電所

図1. 水力発電所建設実績 — 1960年代から1980年代にかけて水力発電所が10～20GWの規模で新設された。

Trends in hydroelectric power station construction



能と信頼性のいっそうの向上を図るためには、非設計点での非定常的な複雑流れを精度よく予測する必要がある。

当社は、非線形等方k-εモデルやレイノルズ応力モデル(RSM)を用いた最新の流れ解析技術⁽²⁾(CFD: Computational Fluid Dynamics)により水車内部の複雑な流動現象の解明を追究し、高度な模型試験及び流れ計測技術によるフィードバックでノウハウを蓄積して、より高精度なCFDの確立を目指している。解析例を図2に示す。

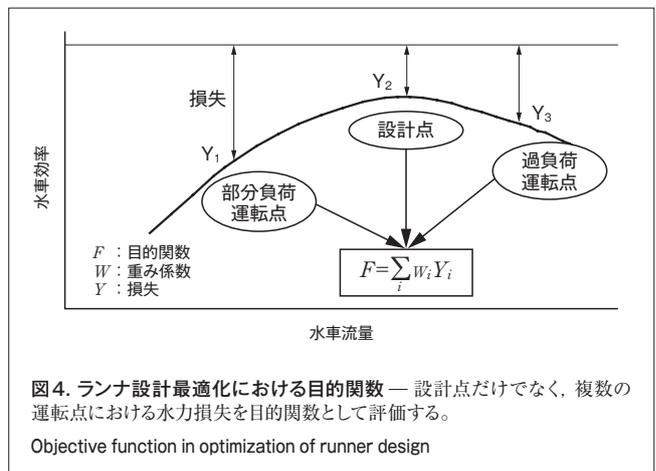
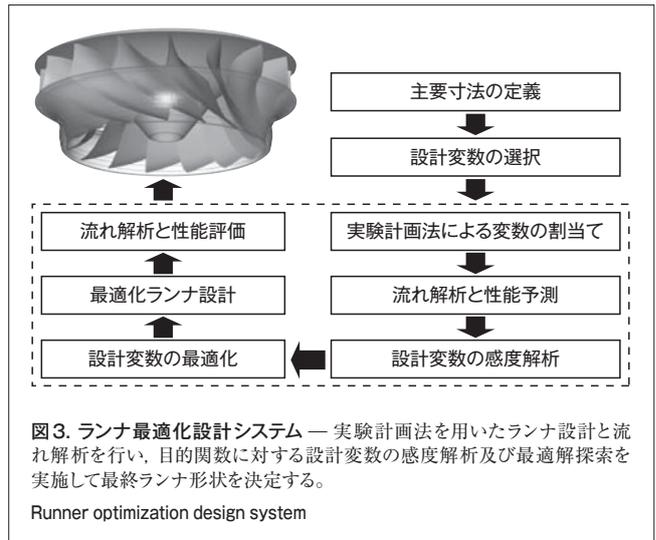
2.2 ランナ設計最適化手法

水車の設計においては高度な流れ解析技術とともに、その設計最適化手法の構築が重要である。改修における水車の開発では、広い運転範囲での効率向上と高キャビテーション性能を実現することが要求されるため、ランナの設計段階において複数の特性値を同時に評価する必要がある。

当社では、部分負荷運転域(小流量領域)から過負荷運転域(大流量領域)までの広い運転範囲で、効率特性とキャビテーション性能を主な評価関数とした多目的最適化手法によりランナ開発を行っている。ランナの形状は次のようにして最適化する(図3)。

- (1) ランナ形状を定義する多数の設計変数を実験計画法により割り当ててランナを設計
- (2) 設計された複数のランナに対して流れ解析を行い、水力性能を評価

(注1) 乱流モデルとは、乱流の渦を直接解くのではなく、空間的又は時間的に平均化処理をして解く数学モデル。k-ε乱流モデルはその一つで、kは乱れの運動エネルギー(乱流エネルギーと言う)、εは乱流エネルギーの散逸(乱流エネルギーkが熱エネルギーとして単位時間に失われる量)を表している。



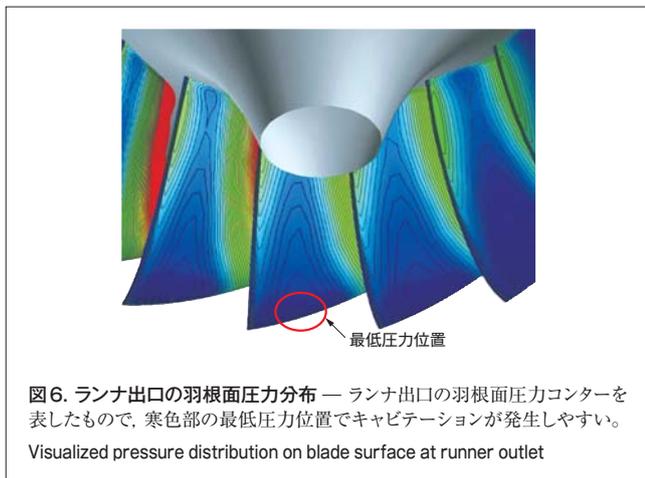
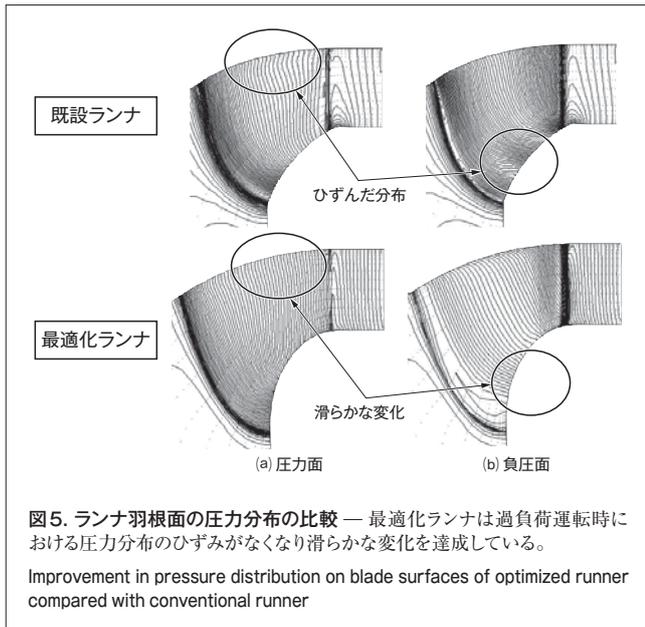
- (3) 目的関数であるランナの水力損失を最小とする設計変数を探索 目的関数としては部分負荷運転点(小流量)、設計点、過負荷運転点(大流量)の三つの運転点におけるランナ水力損失とし(図4)、キャビテーション性能に関する過負荷運転点でのランナ出口羽根面の最小圧力と高落差運転点でのランナ入口羽根面の最小圧力が、制約条件として通常考慮される。
- (4) 流れ解析によるランナ設計の最適化 流れ解析は、水車やポンプ水車への実績が多いRNG(ReNormalization Group) k-ε乱流モデルを適用する。

2.3 ランナ最適化の実施例

最近の改修プラントでの実施例を紹介する。

2.3.1 オーストラリア Murray No.2発電所 この発電所は最高落差400 m、定格出力137 MWのフランシス水車が3台設置されている発電所で、水車機器は他社製である。

改修の目的は出力アップと効率向上であったが、このような既設改造の場合は、構造上の制約を考慮して最適化するランナの設計変数を選定する必要がある。

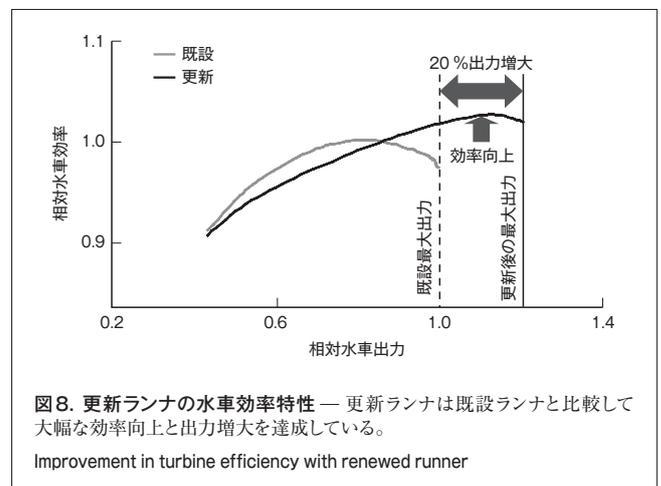
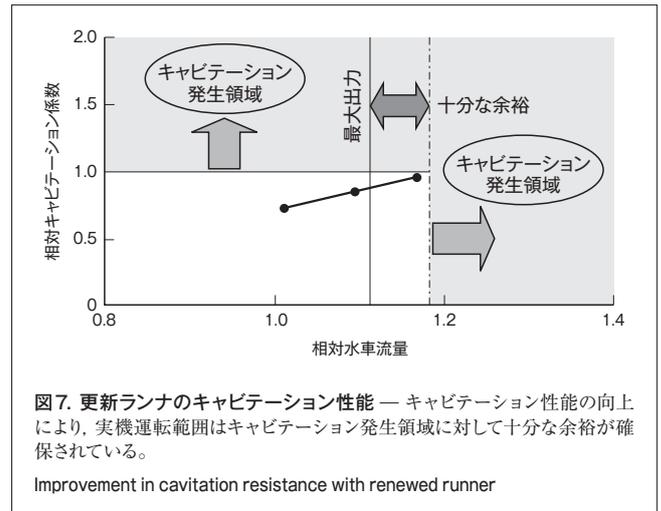


このプラントでは、水車最大出力における羽根出口キャビテーションと高落差時の入口キャビテーションが運転範囲内で発生しないように拘束条件をつけ、その中で水力損失のもっとも小さいランナ形状を抽出した。

過負荷側運転時におけるランナ羽根面の圧力分布を図5に示す。最適化したランナの羽根面圧力は、既設ランナと比較して滑らかに変化しており、流れの乱れが少ないことがわかる。

同じく、ランナ出口における羽根面の圧力分布をカラーコンター（等高線図）にて表示した結果を図6に示す。寒色系は低圧であり、この部位においてキャビテーションが発生しやすいことを示している。実際、模型試験検証でもこの部位でキャビテーションが発生することを確認した。

羽根出口におけるキャビテーション性能の試験結果を図7に、最低落差運転時における水車効率の比較を図8に示す。目的関数とした複数の運転条件における効率特性と制約条件としたキャビテーション性能の全体最適化により開発した更新



ランナは、すべての水力性能の面で既設ランナを上回ることを確認した。

2.3.2 オーストラリア Tumut-3発電所 この発電所は、255 MWのフランシス水車6台と194 MWの揚水ポンプ3台から成る揚水発電所であり、このフランシス水車6台中3台は、各々その下に揚水ポンプが直結される立軸のタンデム形揚水機である。この種の揚水機は、始動停止時に電力系統へ与えるかく乱が少なく、かつ、揚水から発電あるいはその逆の運転モード切替えの時間も短いことから、系統容量が小さく系統の信頼性が低い同国には適している。

今回の改修は、運転開始から約40年経過したフランシス水車6台のランナ更新であるが、Murray No2と同様のランナ最適化手法を適用した結果、更新ランナにより10%の出力増大と過負荷側での大幅な効率向上を達成し、タンデム機のランナ設計においても有効であることを確認した。

3 その他改修技術

水車の高効率化以外にも、改修時に取り入れられる性能向

上、機能向上、及び保守省力化技術は以下のとおりである。

3.1 性能向上技術

3.1.1 水車の性能向上技術 水車の性能向上技術としてスプリッターランナが挙げられる。スプリッターランナは、長翼と短翼を周方向に交互に配置することで、短翼による長翼流路間の整流効果と、翼枚数増加に伴う翼負荷の減少によって、部分負荷領域や低落差領域で発生する二次流れ損失と不安定流れを抑制することができ、変落差・変流量特性が向上する⁽³⁾。

3.1.2 水車発電機の性能向上技術 水車発電機においても、新技術の適用と解析精度向上により、風損や電気損失などの低減を図っている。また、スラスト軸受に樹脂系の素材を採用して高面圧化を図り、軸受を小型化して軸受損失の低減を図っている。

3.2 機能向上技術

30年以上前は、GOV（調速制御装置）は機械式、AVR（励磁制御装置）はアナログ式、監視制御装置及び保護リレーはリレー式が一般的であったが、近年はすべてデジタル化し、制御、監視、及び保護機能の多様化や高度化を図っている。

3.3 保守省力化技術

3.3.1 超高速フレイム溶射 土砂摩耗対策として、当社は超高速フレイム溶射（HP-HVOF（High-Pressure, High-Velocity Oxygen-Fuel）溶射）を開発した⁽⁴⁾。これは、優れた耐土砂摩耗性能を持つ当社独自開発の溶射粉末材料TCC（Toshiba Cermet Coating）を用い、水車部品材料に対して4倍以上の耐摩耗特性を実現している。ランナ、上下カバー、ラビリンスシールなどに適用して効果を発揮している。

3.3.2 配管ライニング 埋設配管は取替えが極めて困難であり、しかも屈曲部や異口径配管継手や分岐が多いため、腐食や孔食がある場合、改修のネックとなっていた。その対策として、当社は東京電力（株）と共同でライニング技術を開発した⁽⁵⁾。これは、腐食や孔食が発生した配管の内面に特殊なライニング材を塗布することで、腐食や孔食をふさぎ、延命化を図るもので、既に国内外の水力発電所に適用し、効果を発揮している。

3.3.3 刷子シール 軸受油槽からの油霧対策として、当社は刷子シールを開発した⁽⁴⁾。これは、一般的なラビリンスシールとは異なる接触形で、ナイロン系耐摩耗樹脂の繊維を円環状に束ね、主軸に押し付けることで、主軸との間にすき間を生じず、油霧の漏えいを防止するもので、国内外で多数の実績があり、効果を発揮している。

4 更新例の紹介

近年、海外を中心に大型機の大規模改修が行われているが、当社が2004年以降に実施及び受注した海外ランナの更新物件を表1に示す。

表1. 近年の海外ランナ更新実績

List of hydraulic runner rehabilitation projects

プラント名 (国名)	水車出力 (MW)	台数	初号機 出荷 (予定含む)	その他 改修の 有無	備考
Da Nhim (ベトナム)	42.0	4	2004	有	
Tumut-3 (オーストラリア)	280.0	3	2006	-	タンデム機 発電専用機
	283.0	3			
Murray No.2 (オーストラリア)	157.4	4	2005	-	既設他社
Siguragura (インドネシア)	73.2	4	2007	有	
Noxon Rapids (米国)	115.8	1	2009	-	既設他社
Benmore (ニュージーランド)	93.2	6	2008	有	既設他社
春川 (韓国)	31.9	2	2008	有	

5 あとがき

水力発電は、再生可能で二酸化炭素を排出しないクリーンなエネルギーとして重要な位置づけであり、水力発電所の大規模改修は、今後も世界的に増加していくものと考えられる。

当社は、水車の効率向上技術をはじめ、ここで述べた改修技術を駆使するとともに、更なる研究開発に取り組み、様々なニーズに応えていきたい。

文 献

- (1) 榎本保之、ほか。フランス水車ランナのキャビテーション性能向上に関する研究。キャビテーションに関するシンポジウム（第13回）。
- (2) 黒澤貞男。高性能水車開発を支援する高度解析技術。東芝レビュー。61, 6, 2006, p.76-77。
- (3) 手塚光太郎、ほか。発生電力量の増大に向けて。東芝レビュー。58, 7, 2003, p.37-41。
- (4) 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。
- (5) 梅田成実、ほか。経年配管の再生・長寿命化。東芝レビュー。59, 4, 2004, p.52-55。



阿部 泰久 ABE Yasuhisa

電力システム社 火力・水力事業部 水力プラント技術部主務。
改修のエンジニアリング業務に従事。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



中村 高紀 NAKAMURA Takanori

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 回転機器開発部グループ長。水力発電機器の水車性能開発に従事。日本機械学会会員、ターボ機械協会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center