

# 関西電力株式会社御岳・新黒部川第三発電所 納め中間羽根付高性能ランナの実用化

Practical Application of High-Performance Francis Turbine Runner with Splitter Blades to the Power Stations of Ontake and Shin'kurobegawa No.3 of Kansai Electric Power Co., Inc.

原野 正実 Masami Harano

谷 清人 Kiyohito Tani

野本 悟 Satoru Nomoto



関西電力株式会社御岳発電所納め中間羽根付ランナの外觀

ランナは、主羽根13枚と中間羽根13枚で構成している。羽根枚数は、ランナ入口側から、すなわち水平に見ると26枚であるが、出口側、すなわち下から見上げると13枚である。写真はランナを下から見上げた状態を示しており、ランナ出口の主羽根と主羽根の間に、長さが主羽根よりも短い中間羽根が見える。

水力発電は、地球温暖化を加速させるCO<sub>2</sub>をほとんど排出しないクリーンなエネルギーを生産し、環境保全の観点から重要な役割を担っている。しかし、水力発電所の建設は、さまざまな土木工作物を伴うため、自然界の生態系への影響が否定できない。そのため、近年、既設の水力発電所を改修することで新たなエネルギーの増強を図ることが注目されている。一方、わが国の水力発電

所は、水量と系統負荷調整の関係で、部分負荷運転という非効率的な運用の発電所が相当数を占めている。

このような背景の下で、日立製作所は、関西電力株式会社との共同研究で部分負荷効率を向上させたフランシス型の中間羽根付ランナを開発した。今回、発電所の設備更新では、わが国で初めて、御岳発電所に2台、新黒部川第三発電所に1台の中間羽根付ランナを納入した。

## 1 はじめに

わが国初の中間羽根付ランナ(フランシス水車)が関

西電力株式会社御岳発電所に採用され、その1号機が2003年4月に、2号機が2004年5月にそれぞれ営業運転を開始した。これは、1945年運転開始の水車を、現状

の電力需要に合った水力特性を持つ最新の水車にスクラップアンドビルドしたものである。

また、同社新黒部川第三発電所2号機にも中間羽根付ランナが採用され、2005年1月に営業運転を開始した。こちらは、細密点検に合わせてランナを交換したものである。

中間羽根付ランナは、関西電力株式会社と日立製作所が最新の流体解析技術、模型試験、強度解析などを用いた共同研究の結果、実用化したものである。これまでのランナの羽根と羽根の間に長さが短い中間羽根を装入することによってランナ内の流れを整流して、特に部分負荷運転時の効率を向上させ、水圧脈動に誘発される機器振動を減少させた。

中間羽根付ランナは、水資源の利用効率を向上させ、火力発電所での燃焼増加を抑制することでCO<sub>2</sub>排出低減に貢献している。

ここでは、中間羽根付ランナの特徴と適用結果について述べる。

## 2 中間羽根付ランナの特徴

### 2.1 形状的特徴

シュラウドリングを取り除いた状態の中間羽根付ランナの三次元形状図を図1に示す。羽根の入口直径をそろえるようにして、主羽根とそれより長さの短い中間羽根を交互に配列している。

このような形状を採用することにより、ランナは以下の特徴を持つようになる。

(1) ランナ出口側の羽根の枚数が少ないので、羽根を下流側(内径側)へ延ばすことができる。これによってランナ出口での旋回流が小さくなることから、変流量特性がよくなる。また、部分負荷運転時の水車効率が向上し、最大出力運転時の水車効率も向上する。同時に、部分

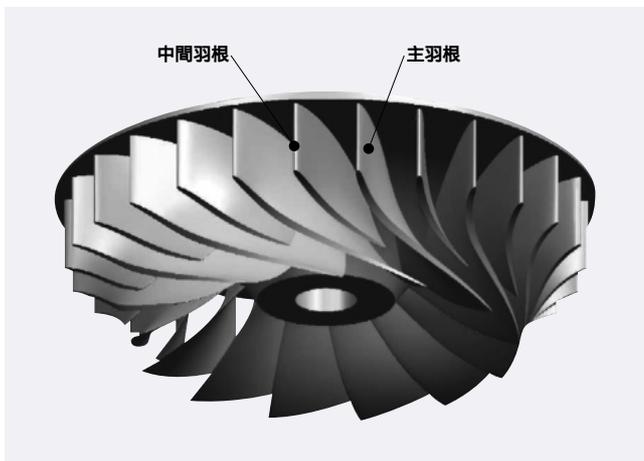


図1 中間羽根付ランナの概略構成  
中間羽根の長さは、水車仕様によって変化する。

負荷と最大出力運転時の吸出し管内の旋回流が弱くなり、ドラフト振動や上カバー振動、低周波振動が抑制される。

(2) ランナ入口側の羽根の枚数が多くなることから、羽根入口側で翼負荷がとれるようになり、出口側キャピテーション特性がよくなる。また、羽根1枚当たりの翼負荷が軽減され、入口側キャピテーションが発生しにくくなる。さらに、入口部での流れがはく離しにくくなり、変落差特性がよくなる。

### 2.2 流れパターン

部分負荷運転時の乱流れ解析による流れパターンを図2に示す。従来ランナは、羽根入口先端で流れがはく離し、渦を巻いた状態が見られ、羽根出口付近では流れがシュラウド側に偏っていた。しかし、中間羽根付ランナでは、羽根入口先端での流れのはく離が抑制され、ランナ内部でもクラウンシュラウド方向での流れの偏りはなく、その状態を保ったまま羽根出口から流出



図2 ランナ内の流れパターン  
帯は流線を示し、色が濃いほど流速が速いことを示す。

していることがわかる。このような流れの様相の変化は効率の改善をもたらす。

### 2.3 適用比速度

通常のフランシス水車ランナのランナ出口直径 $D_2$ に対するランナ入口直径 $D_1$ の比 $D_1/D_2$ と、比速度 $n_s$ の関係を実績データの近似式<sup>1)</sup>から求めたものを図3に示す。中間羽根付ランナでは羽根入口側に中間羽根を装入することから、ランナ内の流路が狭まり形状であり、羽根の長さがある程度確保できるほうが特性改善効果が大い。この観点から、 $D_1/D_2 > 1$ が望ましい。したがって、比速度150以下が中間羽根付ランナの好適適用範囲となる。

## 3 実機への適用

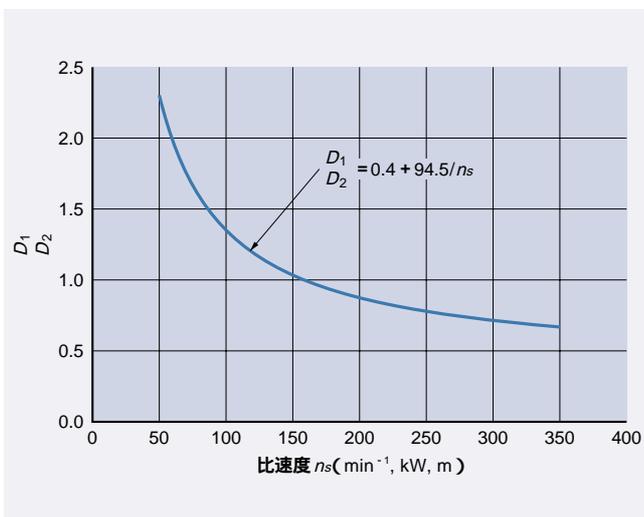
### 3.1 水車の主な仕様

関西電力株式会社御岳発電所と新黒部川第三発電所のフランシス水車の仕様を表1に示す。

### 3.2 流体設計

ランナの設計は、御岳発電所では中間羽根付ランナの初採用ということもあり、CFD(Computational Fluid Dynamics)を用いた性能設計を行い、模型試験によって検証した。新黒部川第三発電所では、御岳発電所での結果によって中間羽根付ランナについてもCFDによる設計の有効性が確認されたので、CFDだけによる流体設計とした。

いずれの発電所でも、ランナ羽根の枚数は、主羽根13枚、中間羽根13枚とした。



注:  $D_1$  (ランナ入口直径),  $D_2$  (ランナ出口直径),  $n_s$  (比速度)

図3 フランシス水車におけるランナ入口直径と出口直径の関係  
比速度150以下が中間羽根付ランナの好適適用範囲となる。

表1 実機適用対象発電所のフランシス水車の主な仕様  
関西電力株式会社御岳発電所と新黒部川第三発電所のフランシス水車の主な仕様を示す。

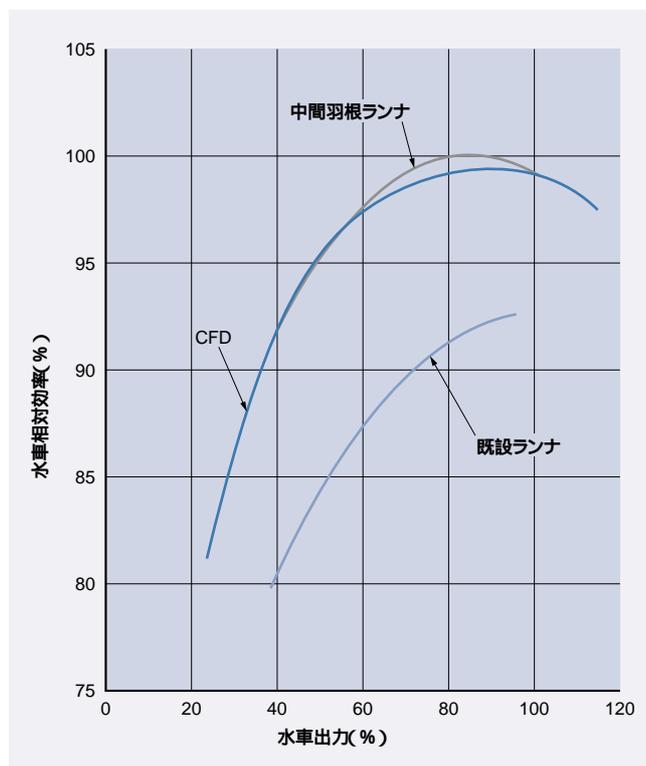
発電所	御岳発電所	新黒部川第三発電所
形式	VF-1RS	VF-1RS
最高落差	229 m	290 m
最大出力	2万3,800 kW	6万kW
回転速度	600 min <sup>-1</sup> (60Hz) 500 min <sup>-1</sup> (50Hz)	450 min <sup>-1</sup>
ランナ径	1,575.2 mm	2,256 mm
水車比速度	104 min <sup>-1</sup> , kW, m	92 min <sup>-1</sup> , kW, m

### 3.3 ランナの製造

中間羽根付ランナでは、クラウン、シュラウドおよび羽根の三つの部品から成る溶接構造を採用している。溶接ランナとすることにより、溶接前にクラウン、シュラウドおよび羽根を、それぞれ単独にNC( Numerical Control )加工で仕上げることが可能になる。溶接にあたっては、溶接による変形量をあらかじめ予測してクラウン、シュラウドと羽根を仮組立する。

### 3.4 現地試験

新黒部川第三発電所では模型試験を省略していることから、現地効率試験を実施し、得られた特性とCFDを用いて得られた特性、および既設ランナ(ランナ交換前測定)の特性とを比較した。その結果を図4に示す。中間羽根付ランナの効率特性は、既設ランナのそれと比較し



注: 略語説明 CFD(Computational Fluid Dynamics)

図4 新黒部川第三発電所での現地効率試験結果  
中間羽根付ランナの水車出力と効率基準の評価を示す。

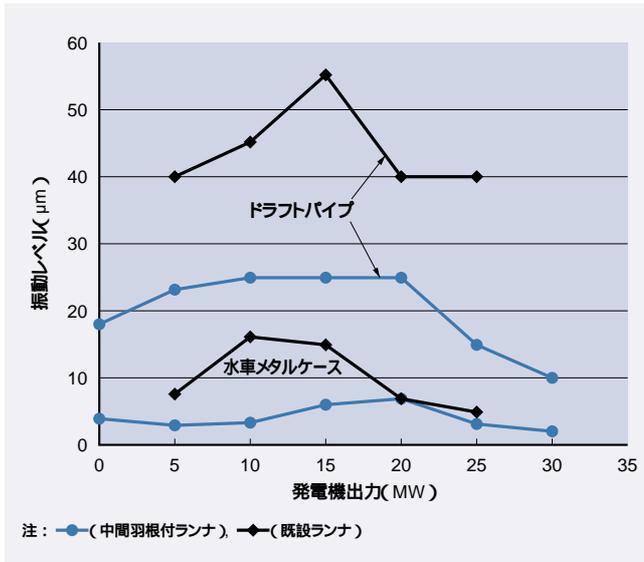


図5 水車メタルケースとドラフトパイプの振動測定結果  
振動レベルが大きい部分負荷運転時の特性を示す。

て最高効率点で7%、40%部分負荷で11%向上している。また、中間羽根付ランナの効率特性は、CFDを用いた予想効率によく一致している。

水車各部(水車メタルケースとドラフトパイプ)の振動測定結果を既設ランナのそれと比較したものを図5に示す。中間羽根付ランナの振動レベルは大幅に低減しており、機器の運転状態が改善されていることがわかる。

## 4 おわりに

ここでは、中間羽根付ランナの特徴および関西電力株式会社御岳発電所と新黒部川第三発電所納め中間羽根付ランナの実用化について述べた。

効率向上による年間発生電力量とこれによるCO<sub>2</sub>削減量の試算結果によると、御岳発電所の年間発生電力量は約500万kWh増加し、CO<sub>2</sub>削減量は年間3,200 tとなっている。また、これら2発電所では土砂による摩耗が激しいものの、中間羽根付ランナは流れの整流作用があるこ

とから、ランナ内を通過する土砂がランナ羽根に衝突する度合いを減らし、その摩耗量が低下することが期待できる。解析レベルではあるが、中間羽根付ランナでは、従来ランナと比較して、羽根出口での摩耗量が $\frac{1}{10}$ 程度に低減できる結果も出ている<sup>2)</sup>。このタイプのランナの採用により、ランナの延命化が図れることになる。

日立製作所は、地球温暖化防止が課題となる中で、さらに高効率で環境保全に対応できる水車の開発、設計に取り組んでいく考えである。

なお、御岳・新黒部川第三発電所納め中間羽根付高性能ランナの実用化では、関西電力株式会社の関係各位に多大なるご指導、ご助言をいただいた。ここに、深く謝意を表する次第である。

### 参考文献

- 1) F. de Siervo, et al. : Modern Trends in Selecting and Designing Francis Turbines, Water Power & Dam Construction, pp.28-35 (Aug.1976)
- 2) 高松, 外: 中間羽根付ランナの耐土砂摩耗性評価, 第52回ターボ機械協会(新潟)講演会(2004.10)

### 執筆者紹介



原野 正実

1983年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所 水力タービン部 所属  
現在, 水力発電所水車機器の構造設計に従事  
E-mail: masami.harano.eq@hitachi.com



谷 清人

1993年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所 水力タービン部 所属  
現在, 水力発電所水車の流体設計に従事  
E-mail: kiyohito.tani.rg@hitachi.com



野本 悟

1996年日立製作所入社, 電力グループ 電力・電機開発研究所 ターボ機械プロジェクト 所属  
現在, 水力発電所水車の流体解析に従事  
E-mail: satoru.nomoto.qx@hitachi.com