

水車技術の進歩

新倉 祥之(にいくら よしゆき)

大和 昌一(やまと しょういち)

秋山 稔(あきやま みのる)

① まえがき

1980年前後は石油価格の高騰により水力発電設備が見直され、大形プロジェクトが多数建設された。富士電機においてもカナダのレベルストーク発電所 4 台×495MW フランシス水車をはじめ、多くの記録品を製作した。その後、低成長時代を反映し年々総出力、単機平均出力とも小形化している。したがって、将来の計画を考慮すると全体としては中小容量機が主体になっていくであろう。

富士電機は今日の中小容量機の時代になることを早くから予想し、1975年から標準化・簡素化を積極的に推進してきた。特に、中小水力標準化モデルプラントである山梨県の奈良田第三発電所が無事に現地試験を完了し運転に入っていることは国内で高く評価されている。表 1 に最近 5 年間に運転開始した主な水車を示す。以下に最近の水車機器に関して、技術的特徴を中心にその概要を紹介する。

② 大・中容量水車

2.1 最近の設計及び開発

(1) レーザ流速計を応用した水車の研究開発

模型水車を試作・実験してトライアンドエラーで開発する方法は、多大な時間と費用を要していた。富士電機は1976年からコンピュータによる水車内部流れの数値解析プログラムの開発に取り組み、模型試験との対比を繰り返すことにより、短期間で最適設計が可能となった。この流れ解析プログラムの精度をより向上させるためには、解析結果と実際の流れとの比較をする必要がある。模型試験設備において高精度の流速測定を行う目的で、1985年から2焦点レーザ流速計を導入した。この流速計は流れの中に2本のレーザビームを入れ、流水中の粒子が焦点を横切る際に発生する散乱光を検出し、その粒子が2本のレーザビームを通過する時間を測定することにより流速を求める装置である。ビームの1本を他方の回りに回転させることにより、流速だけでなく流れの方向をも測定することができる。したがって、ピトー管のような測定方法では測定装置を挿入する

表 1 最近 5 年間に運転された主な水車

機 種	発 電 所 名	諸 元			運転開始年月
		出 力 (MW)	落 差 (m)	回転速度 (rpm)	
一般水車	Revelstoke	495	130.15	113	1984 - 5
	Pieman	119	92	167	1986 - 6
	新大井	33	44	180	1982 - 10
	Sultan River	57	340	257	1984 - 5
	Pyramid	43.3	218.2	200	1982 - 10
	大淀川第二西郷	39.7 19.2	55.7 26.16	240 212	1985 - 3 1983 - 8
カ	第二新郷	40.6	22.45	136	1984 - 8
	Main Canal Headworks	26.8	12.8	112.5	1986 - 7
	S 形チューブラ水車	8.7 2.15	10.7 14.01	120 300	1985 - 10 1983 - 11
揚水	倉見水川	0.71 0.617	77.5 30.72	730 270	1983 - 11 1986 - 3
	フランシス形ポンプ水車	(T) 13.7 (P) 15.0	(T) 31.9 (P) 32.6	188	1984 - 11



新倉 祥之
昭和40年入社。水車の開発、設計業務に従事。現在、川崎工場水力設計部長。



大和 昌一
昭和45年入社。水車の計画、設計業務に従事。現在、川崎工場水力設計部課長補佐。



秋山 稔
昭和52年入社。水車の設計、計画に従事。現在、川崎工場水力設計部。

図1 カプラン水車模型ランナ入口流れの比較

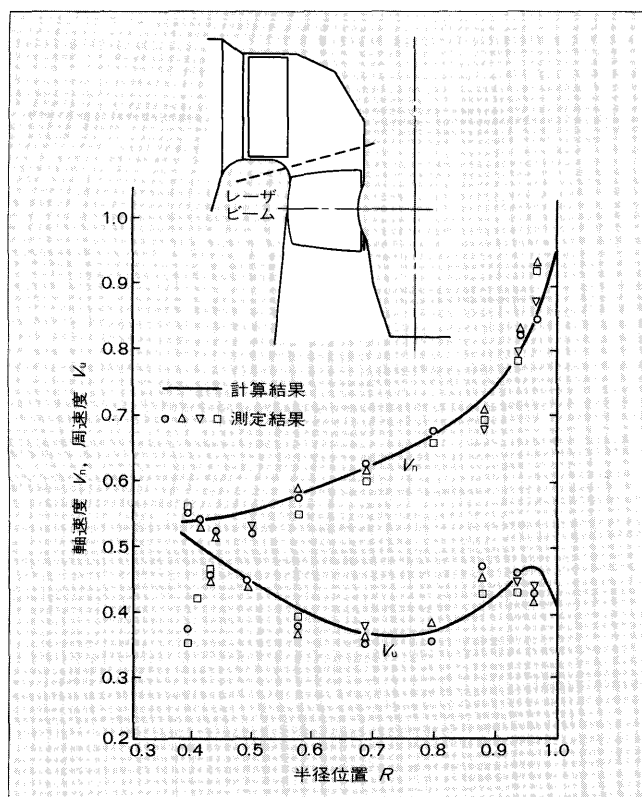
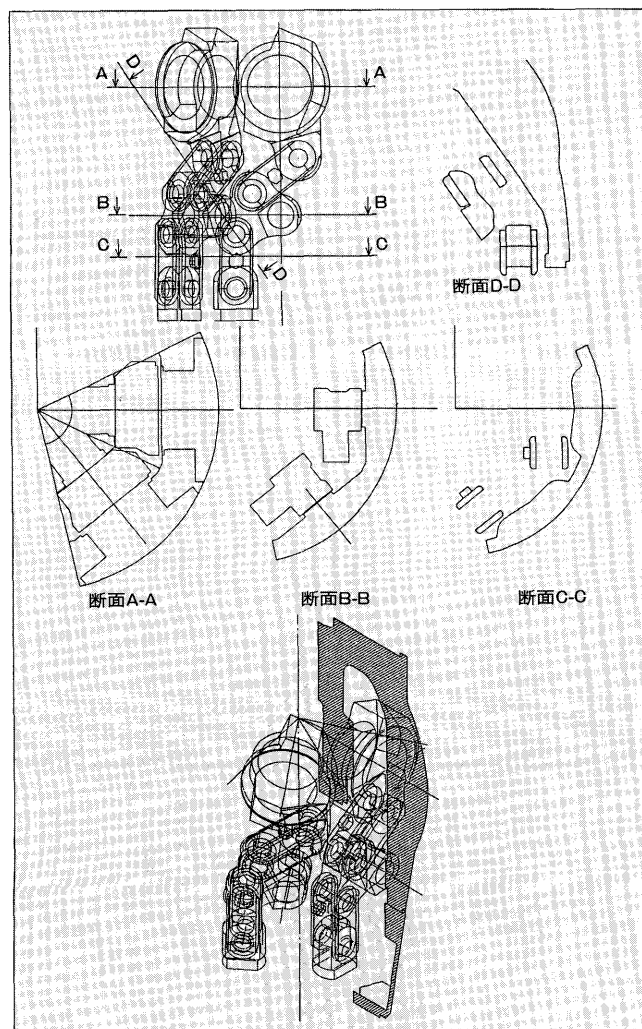


図2 ランナボス内リンク機構



ことによる流れの乱れが生じ、精度よい測定ができないのに対し、レーザ流速計は流れを乱すことなく、しかもガイドベーンとランナ間のような狭い流路の流れも高精度で測定できる特徴を持っている。

カプラン模型水車のランナ入口流れを、レーザ流速計で測定した結果と流れ解析プログラムで計算した結果の比較を図1に示す。今後は、数多くの模型設備によるランナ回りの流れを測定することにより、コンピュータによる流れ解析プログラムの精度がより向上するであろう。

(2) 水車設計におけるCAD技術

水車部門は1980年からCAD/CAM化を進め、設計の合理化を図ってきた。現在では、構造の標準化がほぼ完了している中小水力機器を中心に、CADによる自動設計を行っている。また、非標準品に対しては対話形式の編集設計により対応している。

CADは計画図や製作図だけでなく、大形製品部品の材料展開・ネスティング・水車ランナの翼面のNC加工などにも利用されている。また、コンピュータを利用していることから三次元の計算もできるので複雑な形状をした多数の部品が、ある部品の中に収納できるか確認することも可能である。図2は可動羽根水車のランナボス内において、ランナベーン全閉から全開まで隣り合うリンク機構が干渉するかどうかをチェックした一例である。

CAD導入時は、立軸フランシス形小容量機を対象にCAD/CAM化を進めてきたが、その後圧油・給排水系統図やブレハブ図などの配管関係のソフトウェアを充実させるなど、設計製図の生産性は従来に比べ大幅に向上している。

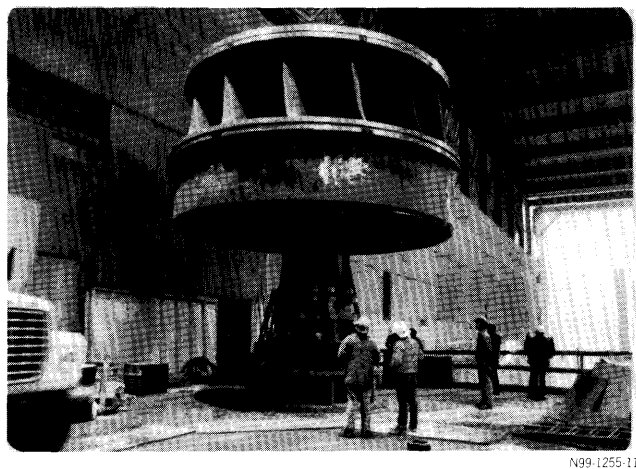
2.2 フランシス水車

カナダ・ブリティッシュコロンビア州水力発電公社(B.C.H.)レベルストック発電所は、1984年5月から12月までの間に4台すべて順調に営業運転に入り、今日に至っている。レベルストック発電所は、単機水車最大出力495MWと富士電機の記録品であり、設計から現地試験までの一貫した富士電機の品質管理技術レベルの高さを示すプラントと自負している。本発電所は単機容量で世界の十指に入るプラントであるが、全台数の水車と発電機が同一製作者であることは他に余り例はない。

ランナは外径7m、重量約160tに達し、輸送制限により二分割構造とした⁽⁴⁾。ランナクラウン側はボルト結合され、ランナバンド側は現地で溶接された。したがって、現地で一体としたランナは溶接部を特殊切削機械で外周加工した後、動バランス試験が行われた。図3は現地でランナの動バランス試験を行っているところである。水車効率試験はマルチパスによる超音波法により行われ、保証効率を満足する結果が得られた。

他方、1986年6月にはオーストラリア・タスマニア電力庁(H.E.C.)パイマン発電所1号機(最大出力119MW、フランシス水車2台)が運転開始した。富士電機はH.E.C.に10プラント以上の納入実績があり、この発電所は現在運転されている中でゴードン発電所(最大出力157MW、フラン

図3 レベルストーク発電所のランナ



シス水車3台)に次ぐ容量のものである。タスマニア電力庁では調相運転が義務づけられている発電所が多く、年間3,000時間以上の調相運転を行った例もあり、このための特別な配慮が設計時になされている。また、水面押下げには鉄管圧力水を用いた富士電機独特のジェットポンプ方式が採用され、長時間調相運転を可能にしている。

2.3 バルブ水車

富士電機は早くから超低落差発電所用としてバルブ水車の開発を行ってきたが、1978年に運転された赤尾発電所(最大出力34MW)の成功により大容量化・大形化へと技術の継承・発展がなされた⁽⁵⁾。

1984年に運転された東北電力(株)第二新郷発電所は水車出力40.6MWで、現在運転されている国内のバルブ水車では最大容量である。最高有効落差22.45mとバルブ水車としては高落差の機械であるため、特に水車・発電機に作用する諸荷重をいかに合理的に土木基礎に伝えるかを事前に十分検討した。土木施工方法の経済性から水車の入口部及び放水路断面は円形としたので、水理実験でその影響を調査し設計に反映した。⁽⁶⁾

バルブ水車ということから回転部の GD^2 が小さく、一方、放水路長さが比較的長いので、水車負荷遮断時の吸出し管側水圧変動が厳しいと予想された。したがって、事前

図4 据付中の第二新郷発電所向けバルブ水車(40.6MW)

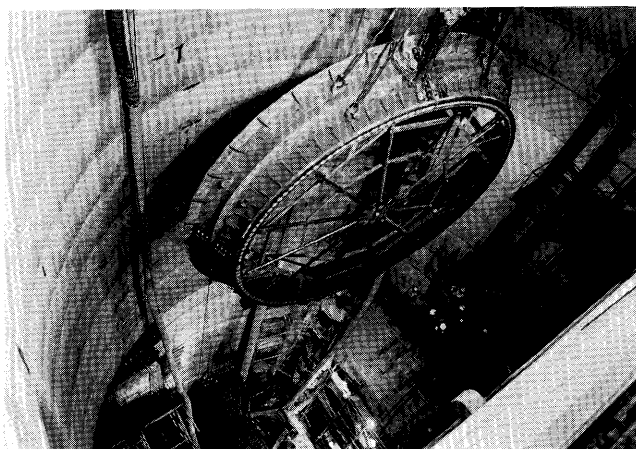


図5 メインカナルヘッドワークス発電所の負荷遮断特性

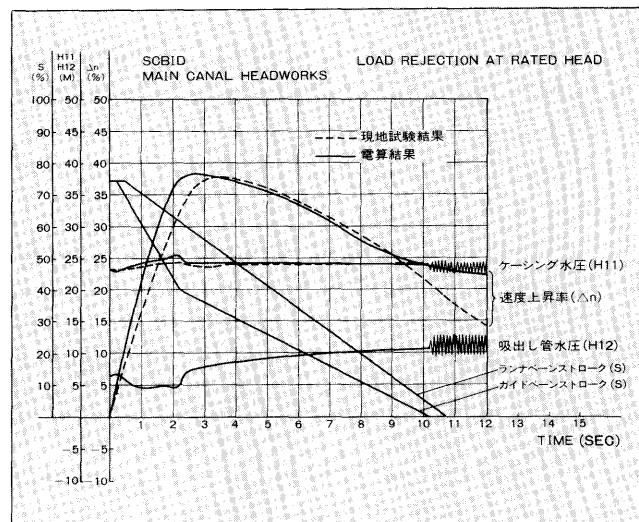
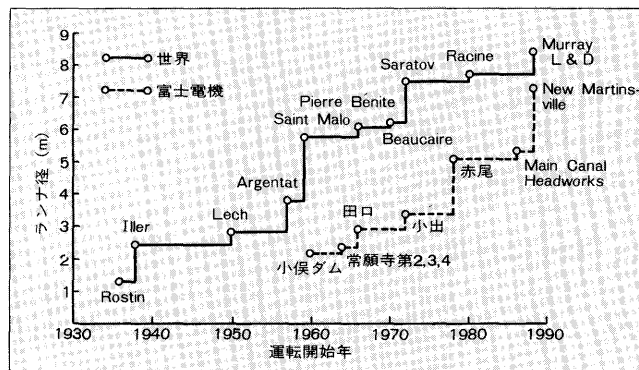


図6 バルブ水車ランナ径推移



にあらゆるケースにおける負荷遮断特性をコンピュータでシミュレート計算を行い、最適ガイドベーン閉鎖モードを決定したため、現地試験では何の問題もなく十分保証値を満足する結果を得ることができた。⁽⁷⁾

また、大容量バルブ水車ではバルブ全体のたわみ、振動をいかに小さくするかがポイントであり、設計時点での有限要素法による応力解析と実験のモード解析法を用いて合理的構造としている。⁽⁸⁾

1986年に運転開始した米国ワシントン州のメインカナルヘッドワークス発電所は、水車出力26.8MW、有効落差12.8mのバルブ水車1台である。計画当初はS形チューブラ水車2台、立軸カプラン水車1台及びバルブ水車1台の3ケースを検討した結果、建設単価の最も安いバルブ水車1台に決定された。⁽⁹⁾ 図5は水車負荷遮断特性の設計時と現地試験結果の比較を示す。

図6は、バルブ水車のランナ径推移を世界及び富士電機の実績で示したものである。両者とも1970年代から大形化の傾向は著しいが、現在鋭意製作中の米国オハイオ州のニューマーチンズビル発電所(20MW、バルブ水車2台)は、有効落差が5m前後での運転が多いため、ランナ羽根枚数は3枚でランナ径は7.3mと、世界有数の大形機である。

2.4 立軸カプラン水車

この5年間に、九州電力(株)大淀川第二発電所(最大出力39.7MW、落差55.7m)及び西郷発電所(最大出力19.2m、落差26.16m)が運転に入った。大淀川第二発電所は、カプラン水車としては高落差であり、容量的にも国内6位にランクされる。

また、現在米国アイダホ州ラッキーピーク発電所向け(最大出力46MW 2台、最大出力11.5MW 1台)カプラン水車を据付中であるが、有効落差は72.2mとカプラン水車の限界といえる高落差である。この発電所は、既設用鉄管に水車を新たに設置するため、鉄管設計水圧が小さいので(水圧上昇値としては約7%)、水圧上昇率を小さくするためガイドベーン閉鎖時間は90秒で設計した。したがって、速度上昇値は無拘束速度に近い状態が1分間以上続くことになる。カプラン水車では、ランナベーン開度とガイドベーン開度の関係により無拘束速度は大きく変化する。そこでこの発電所に対しては、ガイドベーン、ランナベーン閉鎖モードをコンピュータシミュレーションで行い、速度上昇率を85%とした。設計に際してはこの長時間の高い速度上昇時に機械振動が大きくなるよう主軸系だけでなく、水車本体まわりの固有値解析を行い、小さな補強リブに至るまで共振現象を生じないよう配慮された。

2.5 ペルトン水車

ペルトン水車は、ノズル切換による部分負荷時の高効率運転、ニードル緩閉鎖による低い水圧上昇率、デフレクタによる下流地域への責任放流など他機種にはみられない大きな特徴を持っている。富士電機はこのペルトン水車の製作・開発に不断の努力を続けてきたが、現在ではジェット干渉の改善された高比速度6射ペルトンランナが開発され、国内外から注目されている。

米国ワシントン州のサルタン発電所(最大出力57MW 2台)が1984年5月に運転に入った。この発電所は富士電機としてはじめて水面押下げ運転を行うように設計されたものである。洪水時に放水庭水位が高くなっても水車ハウジング内に圧縮空気を送り、ピット内の水面を押し下げる

ことにより発電運転が可能となり、年間発生電力量を増加させることができる。そのために、放水庭には空気の漏れをなくし、流水中に混じった空気を回収するためのカーテンバップルを設け、ハウジングなどは機密に作られている。ハウジング内への給気量はこのカーテンバップルの位置によって大きく変化するが、サルタン発電所では模型試験によりその最適位置を決め、給気用コンプレッサ容量を小さくしている。この水面押下げは、米国アラスカ州のテラレイク発電所(最大出力13.7MW、1984年12月運転開始)でも行われている。

米国のピラミッド発電所(最大出力43.3MW 2台)、サンフランシスコ発電所(出力25.18MW 2台)は、ロサンゼルスへ導かれた給水管の水を利用して発電している。したがって、水車停止時にも放水することが義務づけられており、そのときはニードル全開、デフレクタ全閉のデフレクタ放流運転を行っている。特にサンフランシスコ発電所では1983年運転開始以来、1,500時間の放流運転実績がある。放流運転時のデフレクタによりさえぎられた噴流のハウジング内の流れパターンを模型試験により観察した。エネルギーの大きな噴流が衝突する箇所にはジェットによる損傷を防止するようステンレス鋼肉盛や補強を施すことにより、長時間放流でも機器に何ら悪影響を及ぼさないことが実証された。

③ 小容量水車及びメンテナンスフリー化

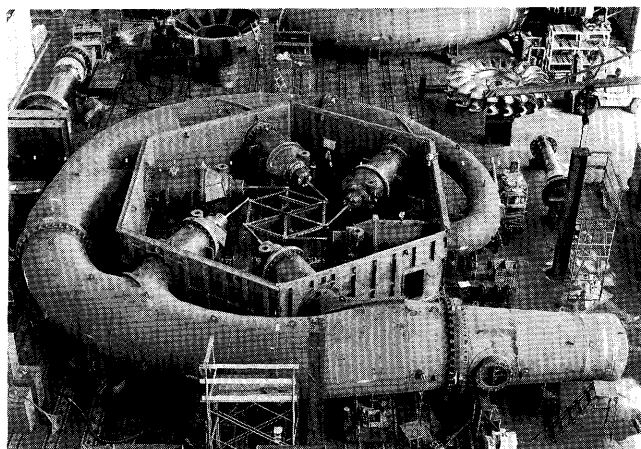
3.1 奈良田第三発電所

1985年に無事運転された山梨県の奈良田第三発電所は、いわゆる中小水力標準化モデルプラントである。このプラントは1年間のうち半分は、流量が50%以下の部分負荷運転の多い流込み式発電所である。したがって、中高落差用水車の新技術として開発された新世代(軽負荷)フランスランナを採用し、部分負荷の改善を図った。

現地効率試験結果を相対効率にて図8に示す。なお、軽負荷ランナは部分負荷効率の改善だけではなく、水圧脈動低減の効果もあり、振動も少なく所期の目的は達成された。

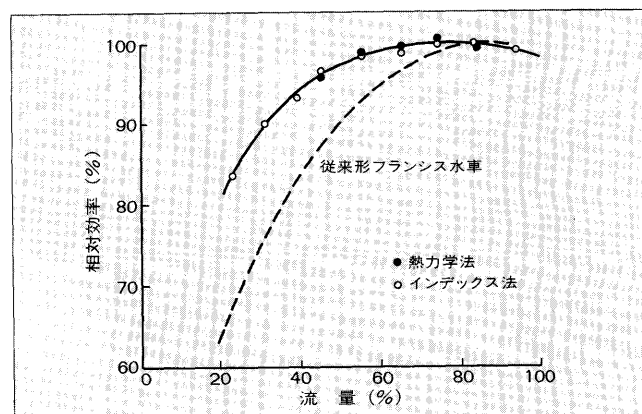
奈良田第三発電所のガイドベーンは従来の油圧による操作ではなく、電動サーボモータを採用し、発電所のオイル

図7 ピラミッド発電所の分岐管の工場組立



N10-107-23

図8 奈良田第三発電所の現地効率試験結果



レス化, エアレス化を図った。電動サーボモータの電動機容量を小さくする目的で, 開閉時間を20秒とし, 水車負荷遮断時の最大速度上昇値を無拘束速度とした。これに伴い, 現地にて10分間の無拘束速度連続運転試験を行ったが, 各軸受の振動は非常に小さな値であった。

3.2 水潤滑軸受及び水ボス水車

水車の軸受は昔から油潤滑軸受が使用されてきたが, メンテナンスフリーを目的に油を使わない水潤滑軸受の開発が1980年から行われ, 現在までに約10プラントの実機に採用されている。

水潤滑軸受は潤滑剤として水を使用し, 軸受は綿織布強化フェノール樹脂にガラス織布強化フェノール樹脂を層状に巻き付けた構造である。軸受の潤滑方式は, 動圧軸受方式を採用している。軸と軸受の間の相対すべりと水の粘性によってくさび状の水膜を作り, 負荷面に発生した水膜の圧力によって軸受荷重を支えることから, 静圧軸受方式のように圧力を持った給水は必要なく自蔵式とすることが可能である。図9に立軸力プラン水車の水潤滑軸受組立図を示す。

可動羽根水車のランナは, ボス内部のランナベーン軸受, 操作機構の軸受及び各しゅう動部の潤滑のために, 従来はボス内部に潤滑油を封入していた。この方式は, ランナベーン軸のシール部から浸水・漏油を防止するため構造が複雑となることと, 保守・点検が容易でない欠点があった。そこで, ボス内部の各軸受を無給油軸受とし, 潤滑剤は水を利用する可動羽根水車ランナの無給油化(水ボス水車)を研究・開発し実用化された。本方式はメンテナンスフリ

図9 水潤滑軸受組立図

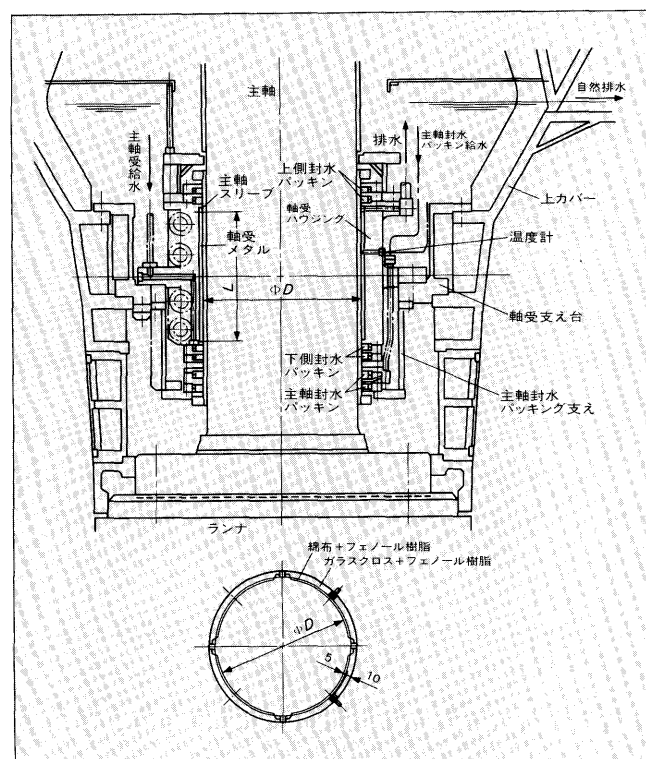
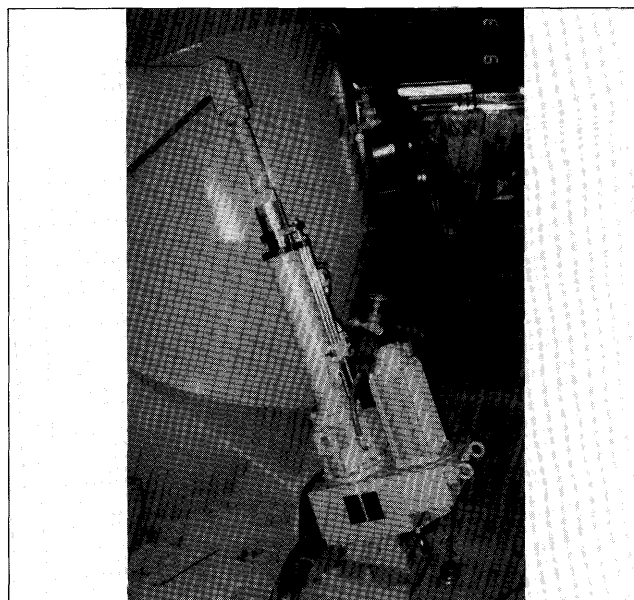


図10 横軸フランシス水車の電動サーボモータ



ーを目標に開発された構造で, 現在の市場のニーズに合致した製品である。

3.3 電動サーボモータ

水車の流量を調節するガイドベーンの操作は, 古くから圧油により行われていた。圧油方式は, 多数の部品から構成される圧油及び空気圧縮装置が必要となり, しかも作動流体に油を使用していることから保守・点検が複雑となる。富士電機は, このような補機を簡素化し, しかもメンテナンスフリーとなる電動サーボモータの開発を1978年から行い, 現在までに20プラント以上の実績がある。⁽¹³⁾

電動サーボモータは, 電動機の回転運動を減速歯車, ボールねじを介して直線運動に変換してガイドリングに接続し, ガイドベーンを開閉する装置である。当初は, 交流電動機を用い非常用として直流電動機を設けていたが, 現在では直流を電源としたブラシレスモータだけで操作し, 入口弁のない場合には非常用として機械的に閉鎖できる装置を設けるシステムを標準としている。

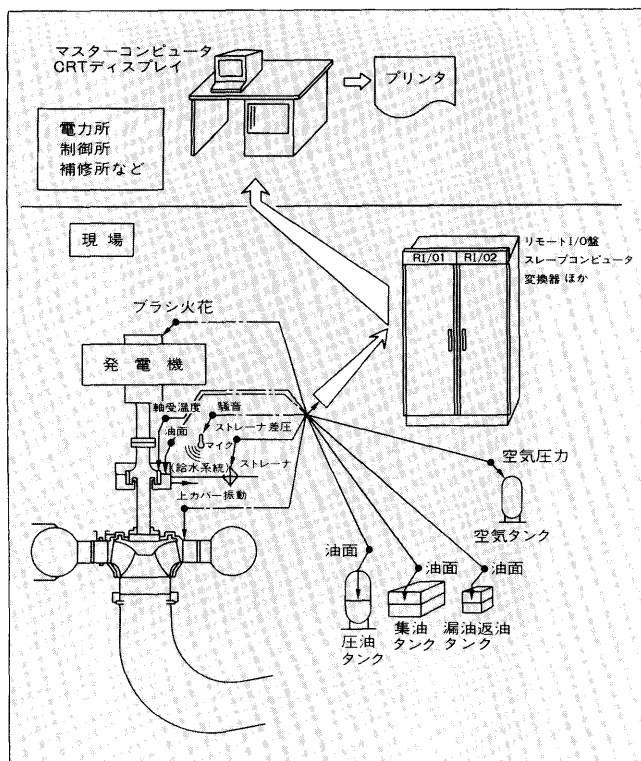
図10は電動サーボモータを有した横軸フランシス水車の一例である。電動サーボモータを採用することにより, 従来の圧油式と比較して圧油・空気圧縮装置が不要となるので経済的であるとともに, 機器配置が簡単になり, 発電所の建屋面積を縮小することができる。

3.4 予防保全

水力発電設備の保全は, 故障発生後修理する事後保全や定期的にある部品を交換する時間基準保全という形で実施されてきた。しかし, 近年の水力発電所は信頼性向上や自動化技術の発達に伴い, 制御システムが複雑となっている。一方, 設備の合理化や省力化が進む中で, 熟練した保守員による巡視点検業務は困難となりつつある。

このような状況から最近の水力発電所は, 従来の人による巡視点検の代わりに, 機械による定量的な状態監視によ

図11 自動点検システム構成図



り行う予知保全の考え方が導入され始めた⁽¹⁴⁾。

水車関係の状態監視項目としては、軸受温度、水圧、振動、液面、漏・排水、給水、騒音、差圧などが掲げられ、現在幾つかのプラントで各種の状態における予防保全のアルゴリズムを確立している。

図11は、現在、富士電機が採用している立軸フランシス水車の自動点検システム構成図の一例である。

④ 余水路省略など土木設備の合理化

中小水力の新技术開発と経済性を図るため、③章で述べたような水車を中心とした新構造が開発された⁽¹¹⁾。その後、より大きな経済性を追求する目的で土木設備を含めたプラント全体の合理化が検討されている。その一つに、流込み式発電所に設置される余水路を省略する案がある。

4.1 土木設備だけによる余水路省略(ずい道空容量の活用)

使用水量が比較的小さく河川幅が比較的広い地点、又は負荷遮断時の余水を取水設備から放流しても河川の水位上昇が30分につき30～50cm以下になる場合には、ヘッドタンクのかさ上げやずい道の空容量を利用することにより余水路を省略できる。

富士電機の納入した山梨県湯島発電所(出力2.1MW 横軸ペルトン水車)、栃木県深山発電所(出力2.46MW 横軸ペルトン水車)、中国電力(株)安蔵川発電所(出力3.4MW 立軸フランシス水車)は、この方法が採用されている。

4.2 土木設備と放流弁の併用による余水路省略

フランシス水車で使用水量が比較的大きく、負荷遮断時

土木設備の対応だけでは河川の水位上昇が基準値を超える場合、若しくはずい道内水圧が許容値を超え、土木設備の補強対策に費用がかかる場合は、放流弁を水車上流に設置し余水路を省略できる。

放流弁を通過した水のエネルギーが大きい場合は、弁下流に減勢工などの土木設備が必要となる。

この放流弁は、以前国内においても多くの例がある制圧機に似ているので、制御を含めてその信頼性は高いと考えられるが、現在までに余水路省略の目的で設置された実績はない。

4.3 土木設備とデフレクタ放流の併用による余水路省略

ペルトン水車は、流量を調節するニードルのほかにジェットを遮断するデフレクタがあるので、ニードルを開閉することなくデフレクタにより主機の停止ができる。すなわち、負荷遮断時取水口ゲート緩閉鎖とデフレクタ放流の併用によって余水路を省略できる。

国外では、下流地域への工業用水、飲料水若しくはかんがいのために、水車を停止したままデフレクタ放流を行っている例があるが、放流中に異常な騒音や振動は発生しておらず、放流後の点検でも損傷は起きていない。

一方、発電所外部事故は統計によると5分以内に復旧することが多い。この場合は、負荷遮断後ニードルは水位調整運転、デフレクタは無負荷運転(デフレクタで遮断されたジェットの一部分でランナを定格回転速度に保つ)を行う。復旧後、デフレクタだけの制御で同期並列を行い、負荷増加の制御も行うことになる。既設機の現地特殊試験結果によると従来のニードル制御による同期投入と比べ、所要時間、精度、系統に与える影響などの差はないことが確認された。

現在までにペルトン水車において余水路省略に伴うデフレクタ放流やデフレクタ制御の実績はないが、技術的には何ら問題はない。

ペルトン水車の開発地点は一般に落差が高いので、余水路省略によるコストダウン効果は大きいと予想される。

⑤ 既設改造及び更新技術⁽¹⁵⁾

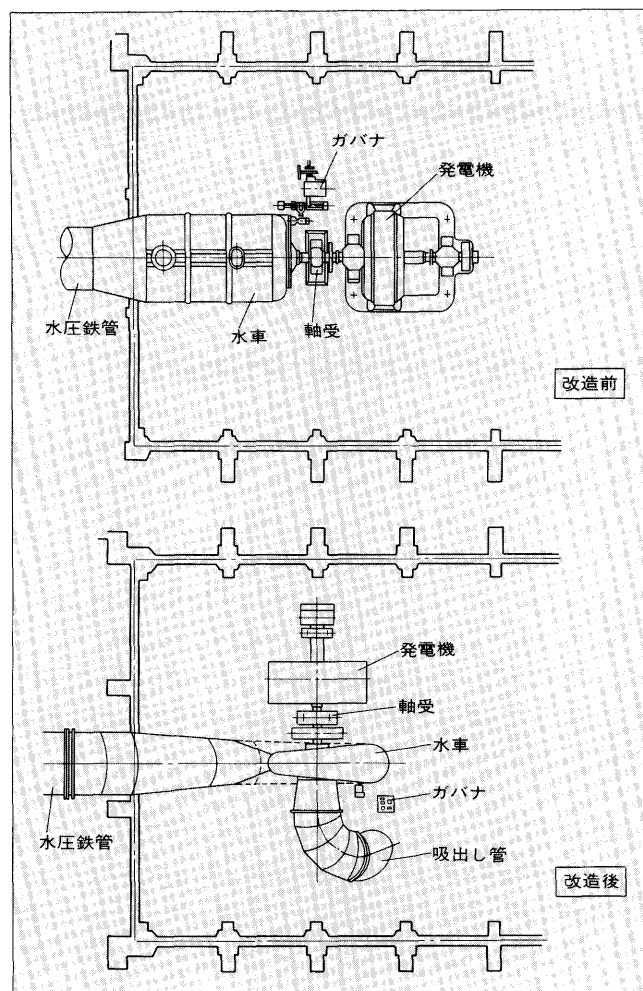
5.1 水車の更新(スクラップアンドビルド)

老朽化した水車すべてを更新し、既設機と同一諸元により性能向上を図り、最新技術の構造を採用する更新計画が多い。

図12は、北海道電力(株)徹別発電所の例である。既設機は、60年以上運転された横軸二輪単流前口双子フランシス水車(フロントル水車)であった。老朽化の著しい水車・発電機だけを更新し、横軸単輪単流フランシス水車(出力2.39MW)とした。

更新計画をする際には最適な水車選定が必要である。この選定に際しては年間の水圧、水量データを基に統計的手法を用いて変落差率、変流量率から年間発生電力量の最も大きなタイプの水車が自動的に決定できるようなプログラ

図12 横軸フランシス水車の更新例



ムを開発し、経済性のよい水車の決定が可能となった。

5.2 ランナの特性改善

最近、老朽化によるランナ取替えだけでなく、既設水車の仕様及び運用方法が建設時から変更され、ランナの更新を計画する例も多い。ランナだけの更新はケーシング、ガイドベーン、吸出し管は既設機流用となるので、水力性能の改善はランナだけで行わなくてはならない。この場合、富士電機は流れ解析プログラムによる性能予測技術を駆使して、模型水車ランナを製作することなく、性能の改善された新ランナを開発している。

現在設計中の米国ワシントン州ウエルズダム発電所（最大出力89MW）は、ランナ径7.4mを超す立軸カプラン水車10台である。この発電所は、老朽化に伴いカプラン水車の長所である高効率運転ができず、ランナだけの更新が計画された。製作者決定にあたっては、第三者機関での模型試験における性能の競争に委ねられた。結果は、富士電機の優れた技術が高く評価され受注に至り、現在製作中である。

⑥ あとがき

以上、富士電機の水車技術の概要を述べた。ここ5年間は、大容量機から小容量機まで多種・多様の水車において特徴のある技術の発展があったので、誌面の都合上品質管理や製造技術に触れることができなかった。

冒頭で述べたように、今後の水力は中小容量機が主体となるのであろうが、水力発電所は出力が小さくなるほど発電原価が上昇する傾向にある。したがって、プラント全体の経済効果を高めるような新技術の開発を行っていかなくてはならない。

最後に、現在の富士電機の水車技術は、国内ユーザーの皆様の御指導に負うところ大であり、ここに心から感謝の意を表す次第である。

参考文献

- (1) 久保田喬・大和昌一：最近の水車・ポンプ水車技術の動向，ターボ機械，Vol.14，No.1，p.46-51（1986）
- (2) 山田始：奈良田第三発電所で実証試験，電力と技術，'85夏季特集，No.4，p.55-57（1985）
- (3) 軽負荷ランナ・フランシス水車モデルプラント奈良田第三発電所，新電気，Vol.39，No.16，p.68-70（1985）
- (4) 松山英明ほか：カナダ・レベルストーク発電所納入495MWフランシス水車と発電機，富士時報，Vol. 53，No. 6，p.373-379（1980）
- (5) 上田庸夫ほか：大容量バルブ水車・発電機，富士時報，Vol. 53，No.6，p.365-372（1980）
- (6) Ueda, T. : Large capacity bulb units in Japan, Water Power & Dam Construction, 1983, March, p.19-24
- (7) 梶井丈一郎ほか：水力発電所用ガバナ安定解析プログラム（SHYTAP）の開発，昭和60年度電気学会全国大会講演論文集，No.1066（1985）
- (8) 坂田昌良・新倉祥之：大型バルブ水車の振動解析技術，ターボ機械，Vol.14，No.6，p.27-33（1986）
- (9) Fazalare, R.W. : Bulb Turbine selection for the Main Canal project, Water Power & Dam Construction, 1985, October, p.33-37
- (10) 久保田喬：軽負荷ランナの開発，電気情報，No.310，p.64-68（1983）
- (11) 岡井洋一ほか：山梨県奈良田第三発電所納入軽負荷フランシス水車，富士時報，Vol.59，No.2，p.160-165（1986）
- (12) 中川美千男：水車主軸用水潤滑軸受の研究開発，電気情報，No.310，p.50-53（1983）
- (13) 金田武ほか：最近の富士水力発電技術，富士時報，Vol.55，No.4，p.238-247（1982）
- (14) 佐田登志夫・高田祥三：設備診断技術，ターボ機械，Vol. 13，No.3，p.7-12（1985）
- (15) 宗宮誠一・赤羽賢太郎：水車プラント改造技術，ターボ機械，Vol.12，No.7，p.55-59（1984）



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。