

水力発電機器の技術動向

Recent Trends of Hydro-Generating Equipment

昭和50年代は300 MW・500 m級の大容量・高落差揚水発電所建設の時代であったが、昭和60年代に入ってほぼ一段落した。しかし、昭和50年代の後半から水力発電設備にも運用・保守・制御などの面で新しいニーズや考え方が生まれ、これらに対する技術的な対応を迫られてきている。その一つは、将来の電源構成を見通したうえでの系統負荷調整能力の確保などのニーズから生まれた揚水機の可変速化であり、他の一つは、事故の未然防止、保守点検の省力化を目的とした状態監視、予測保全技術の導入である。

本稿では、これらの新しいニーズに対する技術の動向、成果について概説するとともに、最近の低落差用バルブ水車・揚水発電の高落差化・中小水力の更新に対する新技術の適用などについて述べる。

千葉規矩* *Noritsune Chiba*

吉澤孝典* *Takanori Yoshizawa*

1 緒言

水力発電は自然エネルギーの有効利用の観点から、その経済性、環境面、地域開発との協調などに配慮しながら着実に開発が進められてきた。その中で特に揚水発電は、負荷の追従性に優れたピーク供給力として、原子力を中心としたベース供給力の有効利用という面から開発に重点が置かれ、更に経済性の面から高落差・大容量化が進められてきた。昭和48年に世界初の528 m、230 MWの揚水発電所が運転に入ってから、50年代には500 m、300 MW級の揚水が次々と建設されてきた。昭和60年代に入って、原子力とのバランスなどでその建設も一段落した感があるが、60年代の後半から70年代にかけての運開を目指して次の建設計画が進められており、800 m級の揚水も検討されている。

これと並行して、昭和50年代の後半から揚水発電の運用に関して新しい考え方が生まれ、揚水機によるAFC(Automatic Frequency Control)運転、系統安定度向上などを目的として、揚水機の可変速化に関する研究開発が進められてきた。日立製作所は関西電力株式会社との共同研究で、次期大形揚水である関西電力株式会社大河内発電所(以下、大河内発電所と言う。)への適用を目標に開発を進め、昭和62年に関西電力株式会社成出發電所(以下、成出發電所と言う。)で22 MVAの世界初の可変速実証機を完成するに至っている。

一般水力では、海外の主として発展途上国で大形水力発電所の建設が進められており、昭和61年には現在世界最大容量の水力発電所であるベネズエラ・グリ発電所(合計1万MW)が完成している。国内では良好な開発地点の減少から大形一般水力の開発はほとんどなくなっているが、従来あまり利用されていなかった低落差地点の開発が着目されつつあり、低落差用バルブ水車として世界最大容量の65.8 MWバルブ水車

が開発された。

一方、中小水力では新規開発はこのところ低調であるが、それに代わって老朽化設備の更新が活発に行われており、高効率、高信頼性、保守の省力化を目指して種々の新技術が採用されてきている。また、最近の老朽化診断技術の進歩は、更新時期の的確な予測を可能にさせている。

更に、近年のセンサ技術の進歩とマイクロコンピュータの信頼性向上によって、事故の未然防止と点検業務の省力化を目的とした、いわゆる予測保全技術の開発が進められている。現時点ではまだ特定の機器について状態監視を行い、データを集め、機器の異常状態の兆候を早期発見するという段階であるが、将来データベースとして蓄積されればAI(人工知能)としてこの方面での活躍が期待される。

以下、水力発電機器の最近の技術的動向について概説する。

2 揚水発電の高落差・大容量化

揚水発電は昭和40年代の後半から高落差・大容量化が急速に進められた。その先駆けとなったのが昭和48年に完成した電源開発株式会社沼原発電所向けの500 m、230 MWのポンプ水車で、これは世界初の528 m級ポンプ水車として記録的なものであると同時に、その後の500 m、300 MW級揚水発電への道を開いた。

昭和50年代に入ると次々と高落差・大容量揚水発電の建設が進められ、現在までに世界で建設された500 m級の揚水発電所は12箇所、32台にも上っており、その中には600 m級のものも含まれている(図1)。

更に最近では、単段の限界に近い800 m級揚水についても検討が開始されており、基本特性や基本設計に加えてランナの

* 日立製作所電力事業部

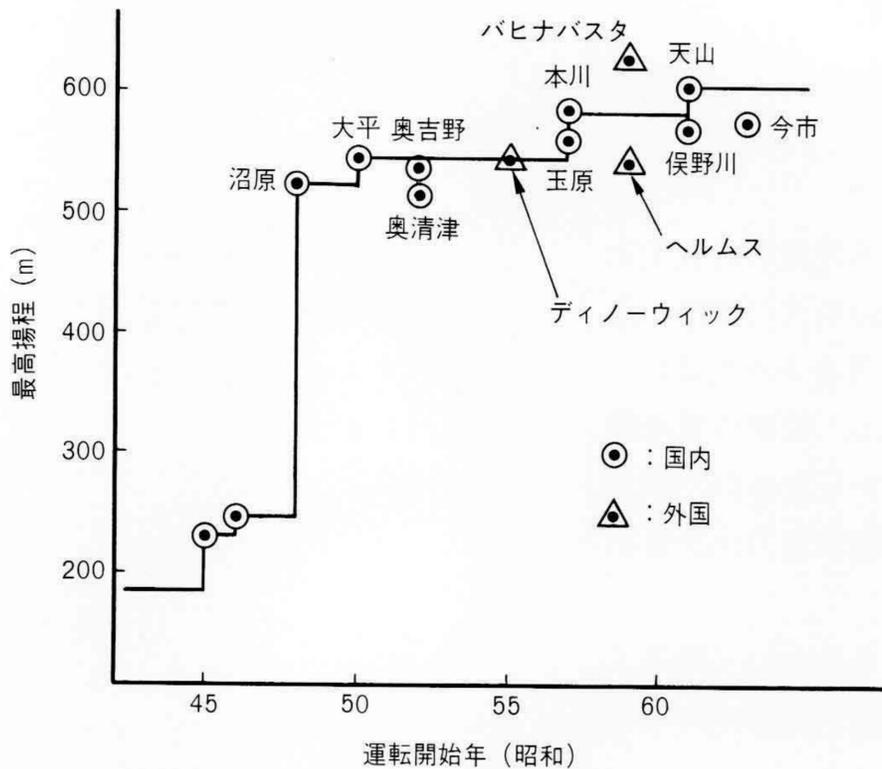


図1 高落差ポンプ水車揚程(単段) 昭和50年代以降500 m級の高揚程ポンプ水車が續々建設されたことを示す。

強度, 変動応力, 振動特性などについて詳細な検討が行われつつあり, 800 m級揚水の実現に向けて動き出している。

高落差・大容量化の技術は必然的に機器の高速化をもたらすことになり, 機器の設計上, 強度, 振動などで条件がより厳しくなるが, 計算機による解析(流れ解析, 乱流解析, 振動解析など), モデルによる確認試験, 鋳造シミュレーションによる鋳物の高信頼化などを含めた十分な検討を行うことによって単段800 m級揚水の実現も間近となるであろう。

800 mを超える超高落差の揚水については, まだ実施計画は未定であるが, 二段ポンプ水車の適用が考えられる。これに対して日立製作所は, 昭和61年に米国EPRIとの共同研究によって, 1,500 m, 655 MWの二段ポンプ水車の水力特性, 基本設計について開発を完了しており, 実機への適用を待っている(図2, 3)。

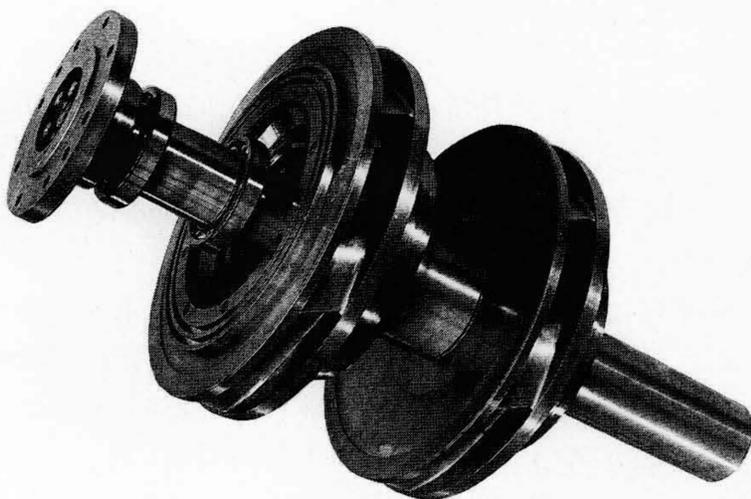


図2 2段ポンプ水車モデルランナ 工場でモデル試験に使用された1,500 m, 655 MW 2段ポンプ水車のモデルランナ(米国EPRIとの共同研究)を示す。

一方, 発電電動機もポンプ水車の開発に伴って大容量・高速化が進められてきたが, 300 MVA, 400 min⁻¹を超えると回転子の強度, 通風冷却の設計などには特に慎重な検討が必要になってくる。回転子はリングリムの採用, ポールとリムの結合部はダイヤモンド形や複列T形テールなどの新構造が必要になってくる。また, 通風冷却についても十分な検討が必要で, 水流モデルによる通風試験を行って解析結果の確認が行われている。

その他, 揚水の始動方式としてはサイリスタ始動が定着し, 制御装置はエレクトロニクスの進歩によってデジタル化が進み, デジタル運転制御装置, デジタルAVR(Automatic Voltage Regulator), デジタル调速機制御装置などの採用が一般化してきており, 電力システムでその役割がますます重要になってきている大容量揚水発電所の信頼性向上, 保守性の向上に寄与している。

3 揚水発電の可変速化

電力システムでベース供給力を受け持つ原子力発電の比率が増加し, 夜間電力の大部分が原子力でまかなわれるようになると, 周波数の調整能力が不足してくることが予想される。

このような状況のもとに従来揚水運転時に負荷調整能力を持たなかった揚水機を可変速化することによって, 電力調整能力を持たせようという新しい考え方が生まれてきた。

可変速運転自体は従来から一般産業用ファンやポンプで速度制御用として用いられてきたが, 今回開発を進めている大容量揚水機の可変速化は, 従来の方式とは全く異なった回転子交流励磁方式であり電力制御を主目的としたものである。これは発電電動機の回転子を円筒形三相分布巻線とし, 励磁装置としてサイクロコンバータによる周波数変換装置を用いて交流で励磁を行う方式で, 系統に接続したままで励磁電流の周波数を変えることによって揚水機の回転速度を変化させ, 負荷(入力)を調整できるようにしたものである。従来, 揚水運転はある揚程では一定負荷として運転されてきたが, この

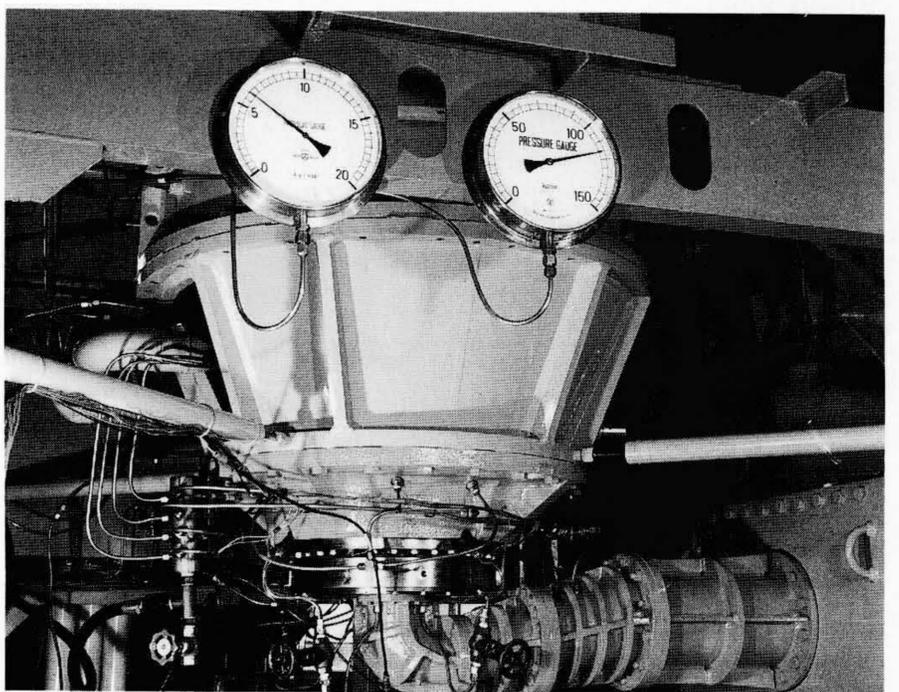


図3 2段ポンプ水車モデル試験 1,500 m, 655 MW 2段ポンプ水車の模型試験中の写真を示す。

方式を採用することによって、一定揚程でも負荷(入力)を変化させることができるので、夜間での負荷変化に対応したAFC運転が可能になる。

更に、発電運転でも回転速度が変えられるので、落差が変化しても常に高効率で運転ができるほか、キャビテーションや振動などのために一定回転速度運転では運転できなかった範囲まで運転が可能となるので、低落差及び部分負荷領域での運転範囲を拡大することができる。またこのシステムは、発電運転時に水車側の負荷トルクと無関係に出力が調整できるので、高速励磁制御によって過渡安定度向上に役立つことも期待できる。その他、可変速揚水機では揚水始動時の系統への影響を少なくしたり、調相運転や待機運転時の損失を減らすことも可能である(図4)。

以上述べたように種々の利点を持つ可変速揚水発電システムは、基礎研究、理論検証、モデル試験、シミュレーション解析などを経て、実機による検証の段階に入った。それまでの研究の成果をベースにして、成発電所で既設機を改造し、22 MVAの可変速実証機を製作した。これは世界最初の可変速水力発電機であり、昭和62年6月から実系統に接続した運転を行い、種々の試験を継続中である。更にこれと並行して、総合的動特性を把握するため総合アナログシミュレータを作り、水路系を含む総合試験を実施中である。

これらすべての試験検討結果は、大河内発電所での300 MW級世界初の可変速揚水発電システムに適用される予定である。

なお、可変速揚水発電システムに関しては、他電力会社でも検討及び共同研究が進められており、深い関心が寄せられている。

また一般水力でも、先に述べた効率向上、運転範囲の拡大など可変速化による利点が考えられるので、今後一般水力に対する可変速化もその経済性を考慮しながら検討が進められるものと思われる。

4 低落差用バルブ水車

水力開発を純国産エネルギーの有効利用という観点から考

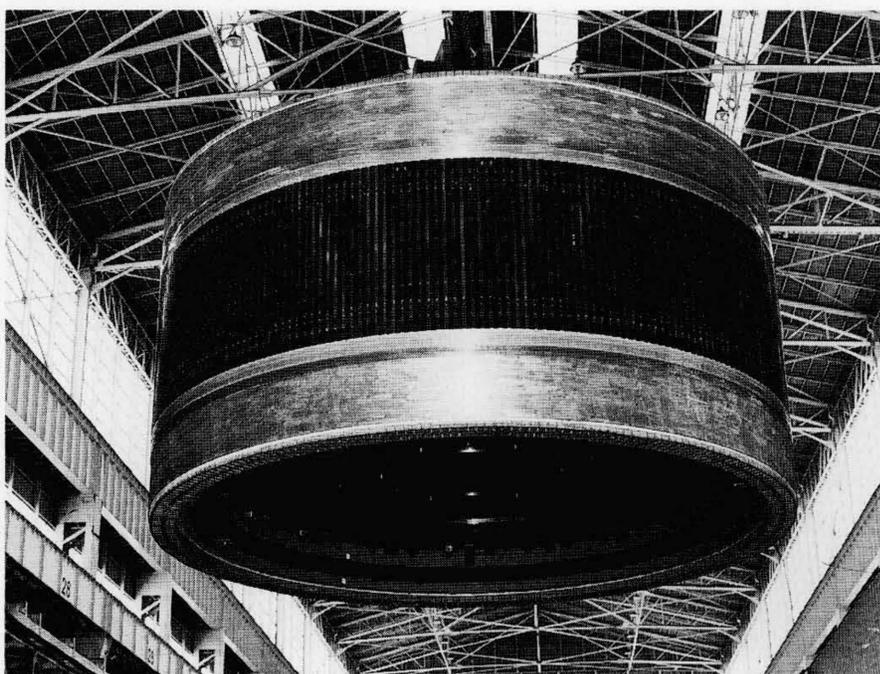


図4 22 MVA可変速発電機ロータ 可変速の実証機として成発電所で試験運転中の発電機ロータを示す。

えると、今まであまり利用されていなかった低落差地点の見直しが必要になってくる。

低落差用水車としては、既にバルブ水車、S形チューブラ水車、クロスフロー水車などが開発されているが、中・小容量から大容量まで広い範囲で適用できる低落差用水車としては、バルブ水車が最適である(図5)。

バルブ水車は、流路を構成するケーシング及び吸出し管が円筒形直線配置であるため水路損失が少なく高効率で、土木の掘削量も立軸機のエルボ形吸出し管や渦巻ケーシングに比べて少ないなどの利点があり、低落差・大流量地点開発での経済性向上に寄与することが可能となる。

このような状況のもとに、電源開発株式会社只見発電所(以下、只見発電所と言う。)向けとして65.8 MW/67.2 MVAバルブ水車発電機を製作・納入、現在据付け工事中であるが、これは現在運転中の米国ロックアイランド発電所の53 MWバルブ水車発電機をしのぐ世界最大容量機である(図6)。

この大形バルブ水車発電機の開発に当たっては、高性能、高信頼性確保のため最新の技術と設備によって種々の試験を実施した。各部が大形であるため剛性、強度面での十分な検討はもちろんのこと、バルブ本体に作用する水圧荷重や自重を、いかにバランスよくコンクリート支持部に伝達するかについては、コンクリート部を含む $\frac{1}{8}$ の模型を作り9.8 MN {1,000 tf} 試験機によって各種の強度試験を行い、応力解析結果とも比較して十分な安全率を持っていることを確認している。このほか3次元振動試験による振動応答測定、3次元流体解析及びコンピュータグラフィックによる振動モードシミュレーション、水流モデルによる通風試験、実物大モデルによる推力軸受の確認試験など、高度な技術を用いた解析や試験を行っている。

5 中・小水力の既設設備更新と新技術

昭和40年代は火力、原子力の成長期で、水力に関しては大容量揚水発電だけに重点が置かれており、中・小水力はあまり顧みられなかった。しかし、第一次オイルショックを経て

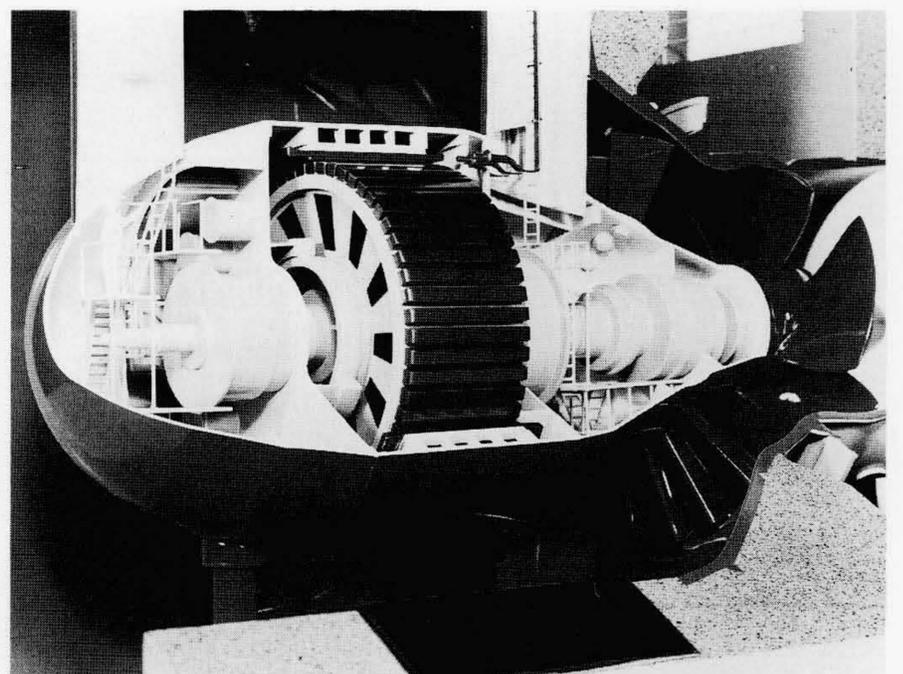


図5 65.8 MW/67.2 MVA只見発電所用バルブ水車発電機縮尺模型 低落差・大流量に適したバルブ水車発電機の構造を分かりやすく示した。

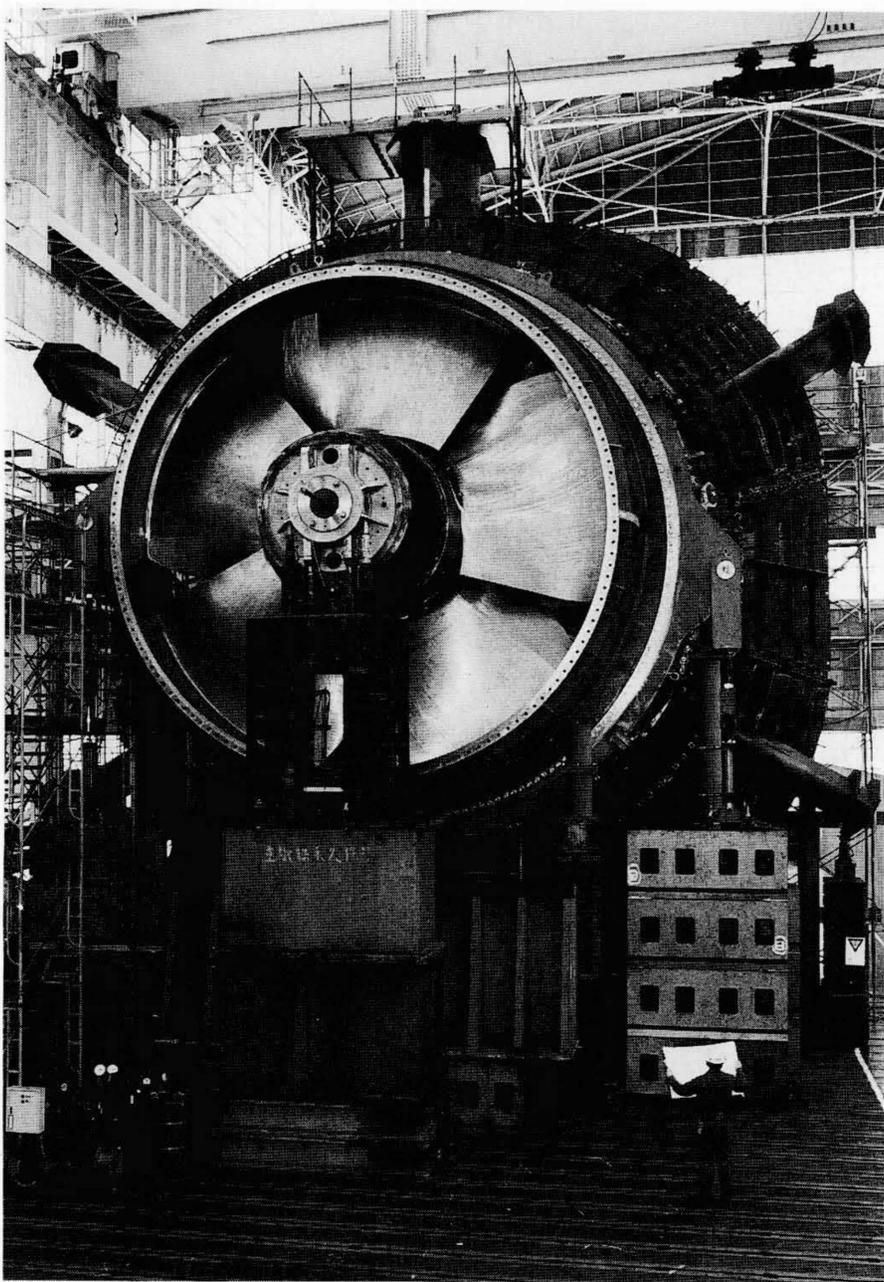


図6 65.8 MWバルブ水車工場組立 世界最大容量のバルブ水車でランナ外径は6.7 m, 5枚羽根構造である。

昭和50年代に入り水力発電に対する見方が変わり、純国産再生エネルギーとして注目されるようになり、大容量水力だけでなく中・小水力の開発が見直されるようになった。一方、水力機器も建設後40~50年以上を経過すると効率低下や老朽化が進み、部分的改造や交換では継続運転を維持することが困難になってくる。そこでケーシングまで含めた全面改修、いわゆるS&B(スクラップアンドビルド)が行われるようになった。電力会社の設備だけを見ても既に改修済みのものが全国で合計約300台に達しており、更に全面改修の対象としては当面約1,000台が考えられる。電力会社設備以外のものや既輸出品などを含めると相当の数になり、しかも時間の経過とともに増加してくるので、今後の全面改修の潜在需要はますます増大するものと考えられる。

中小水力の新規開発を促進し既設設備の改修更新を可能にする第一の要因は経済性である。特に後者の場合、単に建設当初の原形に戻すだけでは経済的に引き合わない場合が多い。したがって、計画を進めるに当たっては各種の新技术を導入し、特性改善、高効率化、出力増強、信頼性向上、長寿命化、保守の簡素化などを図り、トータルコストミニマムを実現する必要がある。そのため特に中・小水力向けの各種新技术が開発されている(表1)。更に、最近では、いわゆる予測保全の技術としての老朽化診断技術が確立されてきたが、これにより老朽設備の改修・更新時期を的確に予測できるようになりつつあり、既設の改修・更新を進めるうえで大きな支援となっている。

6 機器状態監視と予測保全

電力エネルギーの需要は年々増加の傾向にあるが、同時にその質の向上に対する要求が高まってきている。

近年、水力発電所は無人化が進み、従来のような日常点検

表1 中・小水力の新技术 中・小水力に適用されている新技术の主なものを示す。

目的	項目	水車関係	発電機関係	制御関係
無保守化	冷却水レス	自蔵自冷軸受 ヒートパイプ セラミック封水	風冷軸受 ヒートパイプ, ヒートシンク 粘性セルフポンプ 管通風式発電機	デジタル制御保護装置
	油なし	電動サーボモータ 水中軸受	電磁ブレーキ セラミックス軸受	エレクトロニクス化
	長寿命化	新合金材セラミックス 耐土砂摩耗材 金属溶射	ブラシレス励磁装置 磁性流体シール F種絶縁Bライズ	無接点化
性能向上	高効率化	軽負荷ランナ 高比速度化	低損失コア 低粘度潤滑油	機能集約形一体制御盤
小形・軽量化	高速化	高比速度化 パイプライン バタフライ弁	二軸受化 NR設計	デジタル化によるコンパクト化
トータルコストミニマム	余水路省略 土木費削減	デフレクタ放流 ドラフト形状, ランナ特性	— 一体輸送コモンベース	デジタル化によるケーブル削減 光ケーブル

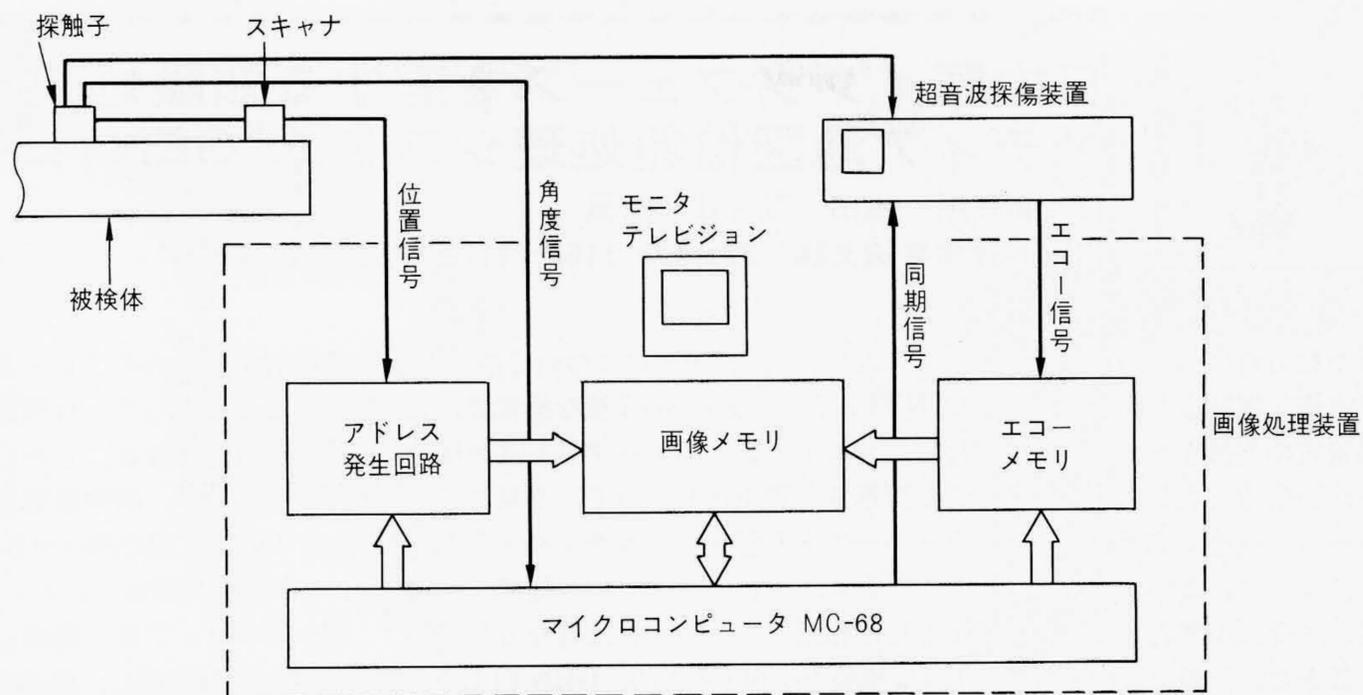


図7 超音波探傷画像表示装置ブロック図 鋳鋼品の内部欠陥検出に威力のあるBスコープ機能図を示す。

による初期の異常発見ができないため、点検業務を自動化し設備の異常を事前に把握して無人発電所の運転信頼度、稼働率の向上を図ることが重要になってくる。これに対して最近のエレクトロニクス技術、情報伝送技術の進歩は、各種の日常業務の自動化を可能にし、センサ技術の進歩とあいまって無人発電所の運転状態を遠方から常時監視できる装置を生み出した。

現在はまだデータ収集を行い分析を始めた段階であるが、データの分析検討が完了すれば、その機器固有の正常運転状態とそれを外れた異常状態との区別ができ、異常状態検出のアルゴリズムを作ることによって単なる状態監視から一歩進んで異常状態の自動検出が可能となり、機器の予測保全システムに結びつけることができる。

現状では状態監視として、振動軸振れ、各種温度、油圧、油面などが個々に行われているが、将来はマイクロコンピュータ技術やセンサ技術の進歩、大量のデータの蓄積などによって更に高度な処理が可能になり、自動判断ができるシステム〔予測保全AI：Artificial Intelligence(人工知能)システム〕に発展していくものと思われる。

水力機器の異常は上記の運転状態の変化だけでなく、経年変化によって材料や部品に劣化、摩耗、破壊などの形で現れてくる。例えば、水車の場合には鋳鋼や鋳鉄品に局部欠陥があると、経年とともに欠陥が進展したり繰返し応力によって疲労破壊を起こす場合がある。また、発電機の代表例としてはコイル絶縁がある。コイル絶縁は初期のアスベストコンパウンドコイルからポリエステルレジンコイル、エポキシレジンコイルへと変わってきているが、コンパウンドやポリエステルの絶縁は既に20年以上を経過しており劣化が著しい。

これらに対しても最近新しい診断技術が確立されつつある。その一つは超高波探傷技術の進歩で、いわゆるB-スコープ(縦断画像表示)と言われる探傷法が開発され、これによって鋳造欠陥やその他の内部欠陥の位置や大きさの検出精度が飛躍的に進歩した(図7)。

他の一つはコイルの絶縁診断技術であり、これには劣化の

種々の要素をコイルの経年(Y)とその発電機の起動・停止の回数(N)からマクロ的に推定する N - Y マップ法とコイル電気的特性である電流、誘電正接($\tan\delta$)、放電電荷量などを測定して残存破壊電圧を求めるDマップ法があり、いずれも既設設備の改修・更新の際コイルの寿命予測に使われている。

これらの技術は今後更に改良が加えられ、寿命診断技術として精度を高めることによって、既設改修・更新計画の適切な提案と予測保全に大きな役割を果たすことになろう。

7 結 言

水力発電機器の最近の技術の進歩について、その主な点について概説した。水力発電は今後もベース供給力である原子力の増加に伴って大容量揚水発電の開発が着実に進められるであろうし、また一般水力でも国内では中・小水力が主体であるが、特に既設の改修・更新が増加していくものと思われる。

したがって、技術面でも新技術の開発にいっそうの努力を重ね、エレクトロニクス技術の進歩も採り入れて信頼性、運転性、保守性のいっそうの向上を図り、水力発電の経済的開発に貢献していきたいと念願している。

終わりに、開発と実用化に終始御指導、御支援をいただいている電力会社及び関係機関の各位に対し心から感謝する次第である。

参考文献

- 1) 妹尾, 外: 水車及びポンプ水車に関する最近の技術進歩, 日立評論, 64, 11, 789~794(昭57-11)
- 2) 鈴木, 外: 発電機及び発電電動機に関する最近の技術進歩, 日立評論, 64, 11, 795~800(昭57-11)
- 3) 湊, 外: 可変速水力発電システムの開発, 電気学会論文誌, Vol.107, No.3(昭62-3)
- 4) 伊藤, 外: タービン発電機及び水車発電機の予防保全, 三菱電機技報, Vol.60, No.6, 3~8, (1986)

日本語インタフェースを有する知識処理型マルチメディア地図情報処理システム“GENTLE”

日立製作所 嶋田 茂・江尻正員

情報処理学会論文誌 27-12, 1162~1173 (昭61-12)

市役所・県庁など地方自治体での地域計画策定や、電力・水道・電話などの公共企業体での設備計画策定の支援などでは、対話応答特性の良い地図情報処理システムの実用化が望まれている。最近、グラフィック技術の進展などによって、このような要求にこたえる実用システムの発表が多くなされるようになってきた。一般にこのような図面情報に基づくシステムでは、図形データのほかに、名称・属性等のテキストデータ、航空写真等の画像データなど、いわゆるマルチメディア情報を効率的に統合管理することが求められる。また、このようなシステムでは、一般に大規模かつ複雑になる傾向にあるため、効率的で親しみやすいマンマシンインタフェースが重要になりつつある。このような要求への対応として、このたびLispを用いた地図情報エキスパートシステムのプロトタイプ(GENTLE)を開発した。まずこのGENTLEのエキスパート

システムとしての位置づけについて述べる。GENTLEは、ユーザーの多様な検索要求に対し、マルチメディアデータベースの構造的な複雑さを意識させないで、平易にインタフェースする意味でのエキスパートシステムであり、いわゆるノウハウ知識をベースとした専門家システムとは異なる。このような機能を実現するため、GENTLEのマルチメディアデータベースは、図形や画像など各メディア別に管理されたデータを、ポインタレベルで関係形データベース管理システムにより統合化するとともに、各データベースのスキーマ情報を知識ベースに記憶している。このような構成によって、検索や編集などの諸機能が一元的な操作手順により実行可能となるほか、既存のデータベースの活用が容易となったり、更には効率的な分散形データベースの実現も可能となる。更に、建築物・道路などといった主題に関する知識や、あいまいな検索要求

を理解するためのフレーム構造などを記憶することによって、自然語インタフェースが実現可能となる。しかし、この場合に問題となるのが、検索要求文に含まれる地名などの固有名詞の扱いがある。GENTLEでは、地名に関するシンタックス(例えば、「～県～市～町～丁目～番地」、「～街道」、「東～」など)を利用し、地名を推定する方法を用いることによって構文解析のスピードを上げている。そして、特にこの日本文による検索要求の表現の中に「～に含まれる」、「～の通る」といった要素間の幾何的位相関係を扱う場合には、マルチメディアデータベース内にこのような幾何的關係が直接記述されていなくても、既に存在する要素の幾何演算処理を自動的に実行することによって、目的の関係を得るような推論検索が可能となるようにした。以上の内容を実際の住宅地図を用いた検索システムにまとめ、その有効性を確認した。

酸化物燃料を用いた大型高速炉の高燃焼度炉心概念の提案と炉心構成の最適化

日立製作所 渡 孔男

日本原子力学会誌 29-10, 913~928 (昭62-10)

現在まで我が国でのFBR実証炉としては、電気出力を100万kWとし、U・Pu混合酸化物燃料を使用した運転サイクル長さ約12箇月、取出し平均燃焼度約9万MW d/tの炉心概念の検討が広く行われてきた。

一方、近年軽水炉技術の高度化にかんがみ、FBRでもよりいっそうのコスト低減が要求され、運転サイクルの長期化による稼働率の向上と合わせ、燃料の高燃焼度化が一つの大きな設計課題となっている。

以上の背景に基づき、大型FBR炉心を対象として、プラント稼働率の向上、熱的余裕の増大、高燃焼度化を目標に、FBR炉心性能の向上に関する研究を行った。検討方法としては、FBR炉心設計の基本に立ち戻って、炉物理的観点から酸化物燃料の燃焼特性を分析し、FBR炉心設計の高燃焼度・長期サイクル運転化に伴う問題点を摘出するとともに、その改善策を立案した。

従来のFBR炉心としては、Pu富化度差を利用し出力分布の平坦化を行った均質2領域炉心概念や、炉心内のPu富化度は一様とし、炉心中央部に内部ブランケットを挿入することにより、出力分布の平坦化を

行った軸方向非均質炉心概念がある。このような炉心は、高燃焼度化につれ、運転サイクル末期で前者は核分裂性Pu富化度差がなくなり、また後者では、内部ブランケット領域でのPu蓄積効果が大きくなる結果、いずれも期待どおりの平坦な出力分布が得られなかった。

本研究ではこれらの効果を改善するため、従来とは全く異なる新しい炉心概念を提案したものである。すなわち、高燃焼度炉心での出力分布の平坦化は、炉心内のPu富化度は一様とし、燃料体積率の違いによる中性子無限増倍率の差を利用した炉心概念が好ましく、また燃焼に伴う出力分布変動の抑制は、上記炉心概念での燃料体積率の小さな内側炉心領域の炉心高さ方向中心面に、薄い円盤上の内部ブランケットを配置した軸方向非均質炉心概念(改良型軸方向非均質炉心)が優れていることを、炉物理的観点から明らかにした。

また酸化物燃料に対して、核分裂性Pu富化度が8~9%で炉心の臨界が保てれば、燃焼期間が30万MW d/tの範囲で、燃焼に伴う反応度損失量がほぼ零になることが判明

した。このためには、炉心高さの増大及び燃料要素径の太径化に加え、炉心燃料集合体のラップ管削除が一つの有効な手段であることを、大型FBR炉心の反応度に対する感度係数を用いることによって示した。

以上の検討結果に基づき、電気出力150万kWの大型FBR炉心を対象として、連続運転サイクル長さ3年、取出し平均燃焼度15~20万MW d/t、燃料寿命9年、最大線出力密度430 W/cmの制限条件下で、改良型軸方向非均質炉心の炉心構成の最適化を行った。

一例として、燃料要素径10.5 mm、炉心高さ150 cm及びラップ管を削除した仕様から成る改良型軸方向非均質炉心は、出力分布、中性子束分布がよく平坦化され、かつ燃焼に伴う出力分布変動が約5.5%と小さく、また燃焼反応度損失がほぼ零となる結果が得られた。

今後、本研究で提案した炉心概念を基に、ラップ管削除型炉心の熱流動及び構造の面での検討を加え、FBR炉心性能の向上を追求してゆきたいと考えている。