

最近の水力技術の動向について

水力部長

黒川 幹郎

1 まえがき

水力発電は、純国産エネルギーであり、石油代替エネルギーとして重要な位置を占めているとともに、電力供給の信頼度が高く、発電コストも長期的に安定しているなどの特徴を有している。また、揚水発電は、河川流域の大小にかかわらず、落差の大きい二つの貯水池が得られれば、出力の大きな発電所の開発が可能であることに加えて、起動停止および負荷変動対応が容易であることから、主としてピーク負荷供給力として計画されている。

資源エネルギー庁による「第5次発電水力調査（中間報告）」によれば、わが国の未開発包蔵水力は、2,717地点、出力1,300万kW、年間可能発生電力量473億kWhと報告されている。これらのうち、出力5,000kW未満の地点数が75%、10,000kW未満の地点数は約90%を占めており、今後の水力開発の主体は中小水力であることが示されている。このことは、当社管内においても同様で、至近年における当社の水力電源開発計画は、第1表のとおりであり、奥美濃（揚水、出力1,000MW）を除けば、いずれも中小水力となっている。

第1表 当社至近年度水力電源開発計画

発電所名	出力(kW)	運開年度	発電方式
松川	14,500	60	流れ込み
烏川第三	16,200	60	〃
新上麻生	61,400	62	調整池
赤石	39,000	63	〃
奥美濃1、2号	500,000	65	揚水
3、4号	500,000	69	〃
杉原	24,000	66	〃
二軒小屋	26,000	66	流れ込み
北又渡	24,200	66	〃
赤石沢	19,000	67	〃

さらに、今後は自然条件の有利な地点がますます少なくなると同時に、河川維持流量の確保による経済性の低下、洪水調節ダムとの競合などの厳しい条件下で水力開発を進めていくことになるの



で、従来以上に新技術・新工法を中心とする建設コスト低減などの推進が何よりも必要である。

当社における水力開発の歴史を見ると、常にその時代の新技術・新工法の導入に積極的に取り組んできており、その実績は、第2表に示すように大規模な発電機器、ダム、水路などに見るべきものが多い。

今後の水力開発は、中小水力が主体となるとはいえ、揚水の開発も数は少ないが、安定した電力供給のためには着実に建設する必要がある、大規模発電設備の技術開発もまた重要な課題である。

2 土木関係技術

(1) トンネル・地下空洞建設技術

トンネル工事は、水力発電所建設の中でも主要な工事の一つであり、その工事工程が全体工程に影響を与えることも多いため、その計画、設計、施工については、常に新技術・新工法を積極的に採用する努力が払われている。

ア NATM(New Austrian Tunnelling Method)

トンネル技術の中で近年、大きな進歩を遂げているのは掘削工法としてのNATMである。NATMは、ロックボルトと吹付コンクリートを主たる支保材として、地山が本来持っている耐荷支保能力を積極的に活用しながら、現場計測の管理のもとにトンネル掘削を行う工法である。わが国においてはオーストリアのラブセビッツ(Rabcewicz)が1964年に技術雑誌「Water Power」に発表して以来、ロックボルト工と吹付

第2表 当社の水力開発における新技術・新工法の実績

運開年 (昭和)	発電所名	土木工作物		電気設備	
		項目	効果・特記事項	項目	効果・特記事項
36	畑薙第一	中空重力ダム内発電所	<ul style="list-style-type: none"> 発電所建屋節減 (中空重力ダムとしてダム高は当時世界一) 	<ul style="list-style-type: none"> 可逆ポンプ水車 全溶接ケーシング 	<ul style="list-style-type: none"> 揚水技術確立 (当時本邦最大) 製作費節減
39	横山	表面取水ゲート	<ul style="list-style-type: none"> 水温低下防止(本邦初) 		
44	高根第一	アーチダム、全地下発	<ul style="list-style-type: none"> 設備の経済的配置 	<ul style="list-style-type: none"> 斜流ポンプ水車 	<ul style="list-style-type: none"> 小形化、効率向上
	高根第二	円筒形半地下発	<ul style="list-style-type: none"> コンパクト設計 力学的に有利な形状 	<ul style="list-style-type: none"> 入口弁省略 	<ul style="list-style-type: none"> 建屋縮小、機器代節減
51	馬瀬川第一	ロックフィルダム		<ul style="list-style-type: none"> 斜流ポンプ水車 	<ul style="list-style-type: none"> 台数減(世界最大容量)
		全地下発			<ul style="list-style-type: none"> 加工数減、重量減
		大ラジアルゲート	<ul style="list-style-type: none"> 洪水吐幅減(本邦最大) 	<ul style="list-style-type: none"> 平行形ケーシング 	<ul style="list-style-type: none"> 建屋縮小、機器代節減 (入口弁略機では本邦最高)
		ジェットフロゲート	<ul style="list-style-type: none"> 高水頭での流量調節可能(本邦最大) 	<ul style="list-style-type: none"> 入口弁省略 	<ul style="list-style-type: none"> (落差かつ揚水機では唯一)
		選択取水設備	<ul style="list-style-type: none"> 濁水軽減(世界最大) 		
53	中呂			<ul style="list-style-type: none"> 水冷式発電機 	
55	中御所			<ul style="list-style-type: none"> 全含浸ステータ 	<ul style="list-style-type: none"> 信頼度向上・工期短縮
56	奥矢作第一第二	2段式揚水発電所	<ul style="list-style-type: none"> 断層回避 	<ul style="list-style-type: none"> ポンプ水車高速化 275KV CVケーブル 	<ul style="list-style-type: none"> 小形化、ランナー一体化 防災設備簡素化(世界初)
		黒田ダム高上げ	<ul style="list-style-type: none"> 既設利用、貯水量増 	<ul style="list-style-type: none"> オイルレスメタル (水中、空中とも大容量機) の本格採用 	<ul style="list-style-type: none"> 保守省力化
		水圧管特殊分岐	<ul style="list-style-type: none"> 経済設計(本邦初) 		
		第一発調圧水槽	<ul style="list-style-type: none"> PC構造(本邦最大) 		
		第二発水圧鉄管	<ul style="list-style-type: none"> 内圧の地山負担 		
57	新七宗	余水吐を放水口に直結	<ul style="list-style-type: none"> 起動制限の除去 	<ul style="list-style-type: none"> ブラシレス励磁装置 	<ul style="list-style-type: none"> 保守簡便
58	小坂川	トンネル、コンクリート吹付による永久覆工	<ul style="list-style-type: none"> 工事費節減、工期短縮 (本邦初) 	<ul style="list-style-type: none"> えん堤線の水中複合ケーブル化 	<ul style="list-style-type: none"> 信頼性向上、保守省力化
		立坑内の鉄管据付新工法	<ul style="list-style-type: none"> 溶接作業改善 		
		余水路衝撃立坑型減勢工			
(60)	松川			<ul style="list-style-type: none"> 内蔵式サーボモータ 	<ul style="list-style-type: none"> 建屋縮小

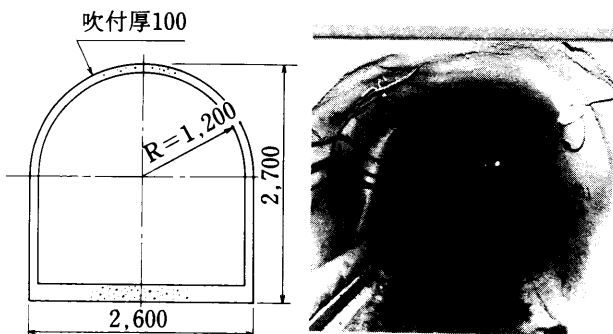
工の急速な進歩と相俟って多くのトンネルに実用化されてきた。

電力関係においても、初期の段階においては良好な地質条件下においてNATMが採用されていたが近年では全面接着型ロックボルトの普及や吹付技術の進歩によって、大幅にNATMが採用されており従来の鋼製支保工～矢板工法は、地質条件の悪い場合などに適用されている。

当社においては、奥矢作第一、第二発電所（55年運開）の建設に際して、水路トンネル、鉄管路などの掘削にロックボルト・吹き付け工法を大幅に取り入れたのが最初である。各工区での吹付採用率は、地質条件に大きく影響されてはいるものの、大断面水路の建設で平均吹付採用率59%の実績が得られたことは、その後の水路トンネルの設計施工に資するところ大きいものがあつた。

一方、中小水力発電所の小断面水路トンネルにおいても、当社小坂川水力発電所（58年11月運開）では、前記のように近年技術革新の著しいNATMを採用し、わが国で初めて本格的に吹付コンクリートを永久覆工とすることによって、コンクリート巻立を省略し、トンネル工期短縮、経済性向上に大きな成果をあげた。なお、当発電所は、水路総延長6.5kmに対して吹付率70%であり、全区間を巻き立てた場合に対して約8カ月の工期が短縮できた。

イ 高能率施工機械の導入



第1図 水路標準断面（吹付部）

トンネルの掘削進行速度を速めることは、経済性を高めるのに大きく寄与する。近年、せん孔機械に油圧削岩機が採用されるようになり、急速施工が多く現場で行われている。

小坂川水力発電所の小断面幌形トンネル（内寸法 幅 2.4m、高さ 2.4m）を有する導水路掘削工事では、これら油圧削岩機を門型としたアウトリガーを装備し、削岩機自体を上方に持ち上げ、その下をずり積機、ずり運搬機が通過できる方式を採用した。これにより、せん孔機とずり積・運搬機械の入換の能率が上がり、また、ずり運搬に28m³のシャトルカーを使用することにより、トンネル掘削速度向上に効果を上げた。（一発破進行2m、最大月進237m、平均月進147m…2号下口の実績）

ウ TBM工法

わが国では、TBM（Tunnel Boring Machine）は昭和30年代末に導入されたが、目覚ましい実績を上げるようになったのは昭和50年代からである。

まず、54年に電発下郷発電所の水圧管路斜坑掘削（掘削長500m×2条 55年12月掘削完了）、続く57年に関西電力新愛本発電所の導水路（導水路延長10.8kmのうちTBM掘削3.4km）でそれぞれTBMが採用され成功を収めた。上記2例ではいずれも西独WIRTH社の機械を使用した。その後通産省および新エネルギー財団によってわが国の地質条件に適応しやすい全地質型TBMが開発され、電発早木戸発電所（出力11.2MW、58年1月着工、導水路延長4.4kmのうちTBM掘進長1.1km）、中国電力安蔵川発電所（出力3.2MW、58年8月着工、導水路延長4.2kmのうちTBM掘進長2.4km）の導水路掘削に適用されている。

今後の計画に際してTBM工法を採用するか否かは、トンネル掘削工事費の経済性を高めること、即ち掘削進行速度を高めることが鍵であると考えられる。（平均月進：新愛本225m、早木戸115m）このためには、トンネル経過地の地質がTBMに適す

るか否かの調査方法を確立すると同時に、破碎帯など不良な地質、高圧地下水に遭遇した場合の対策などを確立しておく必要がある。

エ 大規模地下空洞

近年、地下発電所空洞周辺岩盤の安定について工事と現場計測の実績が蓄積され、数値解析手法が発達するに伴い、地下発電所空洞の設計施工が見直されている。

従来、発電所空洞上部の岩盤は剛性の高い天井アーチコンクリートで支えた後、30数mの直立側壁を掘削するのに対して、地下空洞全体を馬蹄形または卵形としてPCストランド、ロックボルトおよびコンクリート吹付で補強して仕上げる方式が一、二の発電所で採用されている。この工法は、地質条件によっては有利になることも多く、経済性向上と相俟って採用される地点も増大するものと考えられ、当社においても近く本格工事を始める赤石、奥美濃の地下発電所の設計の検討事項とする予定である。

(2) ダム技術

ダムは水力発電所の代表的な主要構造物であり、当社においても、井川(中空重力、堤高103.6m、32年運開)、畑籬第一(中空重力、堤高125m、37年運開)、同第二(中空重力、堤高69m、36年運開)、高根第一(コンクリートアーチ、堤高133m、44年運開)、同第二(中空重力、堤高69m、44年運開)、岩屋(ロックフィル、堤高127.5m、51年運開)など大規模ダムを建設し、さらに奥美濃(上大須ダム：ロックフィル、堤高98m、川浦ダム：コンクリートアーチ、堤高102.5m)、赤石(コンクリート重力、堤高58m)、杉原(コンクリート重力、堤高58m)などの建設を計画している。

ダムの建設に際しては、いずれの場合も新技術を積極的に導入して設計施工がなされており、当社の場合、既設ダムの建設に際して採用された新技術は第2表に示したとおりである。

ダムに関連した新技術の最近の動向は次のとおりである。

ア ダムの耐震設計

ダムの安全性の確保は、単に発電施設の機能維持という観点のみでなく、社会的安全の確保という立場からも重要な課題である。

フィルダムについては、築堤材料(ロック、フィルター、コア各材料)の動的振動特性を求めることが可能となってきたこと、堤体の地震時の振動特性が明らかになってきたこと、および複雑高度な数値解析が容易になってきたことなどによって、比較的精度の良い地震応答解析が可能となってきた。当社奥美濃発電所下池の上大須ダム(ロックフィル、堤高98m)は、築堤材料の非線形な力学的性状を考慮した地震応答解析を行って設計を進めている。

アーチ式コンクリートダムについては、当社川浦ダム(堤高102.5m)が地震時に受ける貯水の影響を明らかにするため、周辺岩盤を含めた堤体と貯水との連成振動を考慮した三次元地震応答解析手法を開発して、耐震設計を進めている。この手法は、地震活動性の特に高い地点におけるコンクリートダムの耐震設計に大いに役立つものである。

イ ダムの施工技術

近年、コンクリートの運搬・打設をダンプトラック、ブルドーザーおよび振動ローラーの汎用機械によって行うRCD工法が開発され、わが国においては主として建設省が実用化を進めている。

(実施例 大川ダムマット部30万 m^3 、島地川ダム堤高90m、堤体31万 m^3 など)この他、コンクリートポンプ、ベルトコンベアなどを利用した方法も試行されている。

昭和30~40年代に建設された多くのダムでは、石炭火力から副産されたフライアッシュ(以下F.A.と略記する)が、セメント量の低減、コンクリートの発熱抑制ならびに長期強度増大を目的としてセメントの代替物に使用された。しかし、最近の石炭火力は海外炭を使用すること、NO_x対策のため燃焼温度を低下させていることなどによって

石炭灰は未燃焼カーボンが多く、セメント代替としてコンクリートに使用するのに障害となっており、現状では良質な灰の一部がF.A.として使用されているに過ぎない。

また、コンクリートダムは、熱発生に伴う亀裂防止のため、打継目を設けるブロック打設工法が一般に採用されている。最近、この打継目のうち縦継目を省略するレヤー打設工法が比較的高いダムにも採用されている。(今市発電所：今市ダム堤高75.5m、C+F=140kg/m³、F.A.率30%、新愛本発電所：出し平ダム、堤高76.7m)これらのダムでは、F.A.を使用してコンクリートの熱発生抑制効果を期待している。また、前記のRCD工法においてもF.A.を使用して、低セメント配合(島地川ダム、C+F=120kg/m³、F.A.率30%)としており、今後、石炭灰産出量の増加に伴って、F.A.を利用する方向で推移すると考えられるが、少しでも品質の良い石炭灰が産出されるよう、火力発電側の配慮を期待したい。

(3) 中小水力コストダウンのための技術開発

前にも述べたとおり、当社の水力開発の歴史の中でも第2表のとおり、常にその時代の新技術・新工法を導入し、コスト低減を進めてきた。さらに、今後の水力開発は中小水力が主体となることから、経済性の確保のためには、建設コストの低減が必須の条件となっている。

通産省においても、発電設備の合理化、新技術導入のため、技術基準の改定を積極的に行っており、58年9月12日の改定では、主として次の事項が導入されている。

- ① 高さ15m未満のダムの設計洪水位の取扱いを15m以上のダムと切り離し緩和した。
- ② ヘッドタンクの余水吐き、余水路、制水門の省略の条件の追加
- ③ 水車の入口弁の省略条件の追加
- ④ ゲート・水圧鉄管に使用する材料の追加

この他、通産省、新エネルギー財団および電力レベルで行われている研究は

- ① 高さ5m以上のゴム引布製起伏ダム
 - ② TBM
 - ③ FRPM管の水圧鉄管への適用
 - ④ 余水路省略
- などがある。

これら水力発電におけるコスト低減のための技術開発についての詳細は、研究資料第74号(60.3)に紹介したので参照されたい。

3 電気関係技術

(1) 揚水機器

わが国で揚水発電所の建設が本格化したのは、37年完成の畑薙第一発電所以来のことである。当時は現在から考えると全く未知の領域に挑んだ工事であって、種々の新現象に遭遇して難渋したがそれらを一つ一つ解明・克服して、今日の揚水技術確立の礎となった。

高根第一発電所では、世界最高揚程の斜流ポンプ水車を、また馬瀬川第一発電所では世界最大容量の斜流ポンプ水車を開発した。

奥矢作では、2発電所を巧妙に同時制御する二段揚水技術を確立した。

本年着工した奥美濃の主要機器規模は、奥矢作第二および国内の既設揚水発電所の延長上ないしは、その範囲内に入るが、当社としては初めてのサイリスタ始動方式、電気ブレーキなど新技術の採用が計画されている。また、河川自流に影響されない純揚水発電所は、高落差化するほど、池容量、水路工作物、機器ともに小形化できることから、超高落差ポンプ水車の研究を実施済である。現在国内では600m、国外では700m級が単段フランシス・ポンプ水車の最高揚程であるが、模型試験などの結果から、単段で800m級まで、その上は1,200m級までは2個のランナを串形配置した二段ポンプ水車で対処可能であることが確認されており二段ポンプ水車でも単段に比し遜色のない特性が得られる。

発電電動機は、これまですべて同期機が用いられているが、可変速機を用いることにより、ポン

プ、水車それぞれの最適ポイントでの運転が可能となり、揚水量可変、系統安定度の向上などのメリットが得られるので、一部でこの研究が行われている。

(2) 水車

水力発電の経済性向上に最も有効であるのは、発電電力量の増加であって、河川流量を余すところなく電力に変換するため、その地点に最適な水車形式を選定することが重要であり、機種が多様化が進んでいる。

個々の機種についても、効率向上が追求されており、元来各種水車とも最高効率は90%前後と、他のエネルギー変換方式に比し著しく高効率であるが、これをさらに0.数%でも高めるための努力が現在も続けられている。その一例が大型電子計算機の使用により可能となった水車ランナ内などの流れ解析手法である。

三次元曲面であるランナベーンの形状決定は、従来は模型試験が唯一の手段であり、相当な費用と手間がかかったが、最近では計算機により形状を決定し、模型試験は最終的確認にとどめる、といった方向に進みつつある。

このような技術の成果の一つに、フランス型の宿命であった部分負荷時の効率低下を著しく改善した新ランナ（軽負荷ランナ）を挙げることができる。

最近の水力開発地点は、中程度の落差で大容量の得られる有利な地点はほとんどなくなり、未開発地点は、河川最上流部での高落差小水量地点、あるいは下流部の低落差地点などが中心となってきている。

高落差地点は、地形上調整池を設けられない場合が多く、必然的に流れ込み式となって、河川流況の影響を直接受けることになるが、この点ペルトン水車はノズル使用本数を加減することにより流量の広い範囲に亘ってフラットな効率特性が得られ最適である。ペルトン水車は、一時期ほとんど採用例をみなかったが、当社では最近、中御所

小坂川、松川、烏川第三と連続的に採用しており基本的構造は変わらないものの、細部については種々の改良を加えてきている。中でも画期的なものは、松川発電所に採用した内蔵サーボモーターであって、水車据付スペースを大幅に縮小し、建屋と山腹の切り取り、擁壁を減ずることができた。（建屋敷地面積約20%減）

低落差地点には、一般的なカプラン水車に加えてチューブラ型、S型プロペラ、また小容量機には、構造の簡単なクロスフロー型と多彩な機種の中から選定することにより、従来は放棄されていた地点の開発も可能となっている。

建設費低減のために最も効果の高いのは、主機回転速度の高速化である。水力学的特性上、水車速度には地点の諸元と機種ごとに定まる上限があるが、水車設計の進歩により、年々speed upが図られており、発電機がその分、小形化するばかりでなく、クレーン、建屋、基礎を含めた経済性向上に寄与している。

(3) その他

補機類の簡素化は、小容量機から逐次実現されている。例えば、圧油装置を不要にする電動サーボモーターは、中小容量発電所の場合、現地据付工程の相当部分を占める配管工事が合理化されるとともに、所内消費電力を低減する効果もある。

ブラダ型圧油装置は、圧油タンク内ゴム袋に窒素ガスを封入したもので、圧縮空気発生装置を省略できる。

また、ガイドベーン、入口弁などの潤滑には、グリースを用いるのが一般的であるが、最近では固体潤滑材を全面的に採用し、保守の省力化と水質保全に役立っている。

4 結言

新技術の導入や設備の簡素化はinitial costの低減に大いに貢献している一方、設備の統一性、保守管理業務の画一性を崩す反面のあることも否定できない。これらの調和を図りつつ、今後も積極的に技術開発に取り組んでいきたい。