UDC 621.224+621.313.322

最近の水力発電機器の動向

Modern Trends of Hydro-electric Power Plant

富村正彦* Masahiko Tomimura

I. まえがき

昭和48年末に突如として世界を襲ったオイルショックを契機として，世界各国のエネルギー資源有限に対する認識が深まり，貴重な循環エネルギーである水力の開発が見直されるようになった。特に非産油国では，国産エネルギーの活用という点から懸命な開発が進められ，また従来は安い燃料を使用した火力発電に比べ，採算ベースに乗らなかった地点も，燃料の値上りの結果，経済的に引き合うようになったことも相まって，昨今は世界的に水力開発が活発に進められている。

世界の包蔵水力についての最近の調査資料は見当たらないが，1966年のWorld Power Conferenceで発表されたデータによると，一般水力だけで38億kWあり，そのうち9.7％が開発済みであった。この調査後10年を経過した現在，当時の倍の開発が進んで20％近く開発済みと仮定するとしても，なお30億kWの未開発水力が残っている。1966年における地域別の開発状況は次のとおりである。

ヨーロッパ	65％
北米及び中米	28％
アジア	3％
南　米	2％
アフリカ	1％
全世界	9.7％

我が国における包蔵水力は，昭和51年9月に発表された資料によると，5,244万kW（1,286億kWh）あり，そのうち未開発水力は，2,796万kW（409億kWh）といわれている。

水力発電には一般水力と揚水式とがある。一般水力は純粋に電気エネルギーを生み出すのに反し，揚水式は火力，原子力の余剰電力を利用するので，火力，原子力の運転効率を高め，間接的に燃料の節約をするという点で意味があるほか，ピーク電力を最も経済的に供給する方式としても高く評価され，日本，ヨーロッパ，アメリカにおいては多く建設されている。しかし，開発途上国においてはピーク需要が大きくないので，揚水式はまだ必要はなく，エネルギー自給の線に沿って専ら一般水力が建設されている。

II. 一般水力の動向

一般水力として最近の代表的なものとしては，Guri（730 MW），Grand Coulee III（700 MW），Churchill Falls（475 MW），Revelstoke（467 MW）などの超大容量フランシス水車や，低落差のものではDjerdap（178 MW ランナ径9.5 m），Volga（130 MW ランナ径9.3m），Bonneville II（77 MW ランナ径8.4 m）などの超大形カプラン水車，Rock Island（53 MW ランナ径7.4 m），Saratov（47.3 MW ランナ径7.5 m），Altenwörth（46.7 MW ランナ径6.0 m），赤尾（34 MW ランナ径5.2 m）などの大形バルブ水車がある。これらの例からも知れるように，最近の水力機械はスケールメリットを求め，大形化，大容量化が著しく，この10年の間に最大容量の記録は200 MWから700 MWにまで急伸し，間もなく1,000 MW機の出現も夢でなくなった。

第1表　大容量水車の一例
Table 1. Example of large capacity water turbine

	発電所名	国名	台数	出力(MW)	落差(m)	回転速度(rpm)	ランナ径(m)	運転開始
フランシス水車	Guri	ベネゼーラ	10	730	146	112.5	7.0	建設中
	Grand Coulee III	アメリカ	3	700	88	85.7		〃
	〃	〃	3	600	88	72	9.7	1977
	Sayan	ソ連	10	650	194	136	6.5	建設中
	Krasnoyarsk	〃	10	508	93	94	7.5	1966
	Cabora Bassa	モザンビーク	13	484	102	107	7.2	1976
	Churchill Falls	カナダ	11	475	320	200	5.85	1972
	Revelstoke	〃	4	467	127	112.5	6.9	建設中
	Itaipu	ブラジル	8	715	108			計画中
	Grand Inga	ザイール	52	750	135			〃
カプラン水車	Djerdap	ユーゴスラビア	12	178	27.2	71.5	9.5	1970
	Jhon Day	アメリカ	12	158	28.7	90	7.9	1970
	Volga	ソ連	16	130	25.9	68.2	9.3	1950
	大鳥	日本	1	100	51	125	6.1	1963
	Bonneville II	アメリカ	8	77	18	69.2	8.4	建設中
バルブ形水車	Rock Island	アメリカ	8	53	12.1	85.7	7.4	〃
	Saratov	ソ連	2	47.3	10.6	75	7.5	1970
	Altenwörth	オーストリア	9	46.7	18.1	103.4	6.0	建設中
	Peage-de-Roussillon	フランス	4	40	12.5	93.8	6.25	
	赤尾	日本	1	34	17.4	128.6	5.2	建設中

* 水力部

水車が大形化，大容量化するとそれに伴って技術的に種種の問題が出てくる。まず問題になるのはランナである。ランナは水車運転中にランナ内を通過する水により，非常に激しく脈動する強大な圧力を受ける。従来の中容量以下のランナの場合は，羽根の長さが短く，羽根の固有振動数が水圧脈動の周波数に比べ相当高い所にあるので問題はなかったが，超大形機となると，ランナ羽根の固有振動数が低くなり，水圧脈動の周波数と共振してランナに割れを生じ，大事故を起こす危険がある。したがって，超大形機の場合には在来のモデルをそのまま拡大したものではなく，水圧脈動をできる限り低く抑え，また固有振動数が低くならないように羽根の形状，肉厚を決定しなければならない。超大形ランナでは，更に製作面で鋳造能力，外周加工の機械の能力及び現地までの輸送の問題がある。従来はこのような場合，ランナを半円状に二分割し，現地でボルト締めで組み立てる方法を採った例が多い。

Grand Coulee III ではランナ径9.7 m，重量も470 t の超大形であり，二分割してもなお製造及び輸送能力を超えるため，羽根，バンド，クラウンを別々に分けて工場で加工し，現地にばらばらの状態で発送し，それぞれを溶接により組み立てる方法が採られた。このため，現地溶接用に450 t のランナを載せられる巨大なポジショナや，焼鈍炉が作られ，更に外周加工用の特殊機械まで用意された。

Cabora Bassa（484 MW）の場合（ランナ径7.2 m，重量165 t）は，ランナ羽根の応力の最も少ない部分で上下に輪切りにした状態で，それぞれの部分を工場で溶接により作り，焼鈍，機械加工したものを別々に現地へ送り，現地で溶接により結合した。この場合は現地焼鈍を行っていない。

超大形スパイラルケーシング製作上の問題に対しては，高抗張力鋼を使用するという常識的な方法には限度があり，鋼板ケーシングの外周の鉄筋と共同で力を分担する方式や，ケーシングを二枚重ねの鋼板で作る方式が検討されている。二枚重ね方式では2枚の鋼板に均等に力を分担させることが最も難しい問題である。フランスのBrommat発電所（240 MW 250 m）においては，内外二重ケーシングの間にノンシュリンクコンクリートを充てんして，うまく解決した。

低落差用水車は，高・中落差用に比べ多くの水量を使用しないと同じ出力が得られないので，土木設備及び機械共にコストがかさみ経済性が悪く，従来は開発が後回しにされていた。しかしながら技術の進歩により，超大形水車の製作が可能になりスケールメリットによる経済性が出てきたこと，及び水資源の有効活用という観点から近来盛んに開発されるようになってきた。Bonneville II 発電所では18 m の落差を利用して，77 MW カプラン水車（ランナ径8.4 m）8台を新設し，既設の10台と合わせ1,130 MW の大発電所を建設中である。Rock Island 発電所では落差12.1 m を利用し，53MW バルブ形水車（ランナ径7.4 m）8台を据え付けるための工事が進められている。

バルブ形水車は，

(1) 水車の中の流れが軸流で曲がりが少ないので，水車内での損失水頭が少なく，超低落差に用いても効率がよい。

(2) うず巻ケーシングが不要なので，発電所建屋の寸法が著しく縮小される（特に多数台の水車を並置する場合その効果は大きい）。

という利点から，超低落差用として早くから製作されていたが，製作上の困難から余り大形のものができなかった。最近は技術の進歩により超大形のものが製作可能となったので，ヨーロッパではほとんどの大水量低落差開発にバルブ形水車が，立軸カプラン水車に代わって採用されるようになった。

バルブ形水車は，水車及び発電機の殻（バルブ）の部分が直接水中に浸っているので水密の問題のほかに，バルブの受ける浮力，定常運転時の外圧，負荷しゃ断時の逆推力など様々の力を受けるので，これによるたわみを十分考慮しなければならない。また，横軸大容量推力軸受の開発も超大形バルブ水車の設計製作には不可欠である。

一般に低落差地点は，川の中・下流に位置するのが多く，このあたりでは川の両岸に平野が広く広がっているので，ここに高いダムを構築して水をせき止めると，水没地域が両岸の著しく広い範囲に及ぶので，どうしても十数m程度ごとに小刻みに低落差のダムを作っていかなければならない。

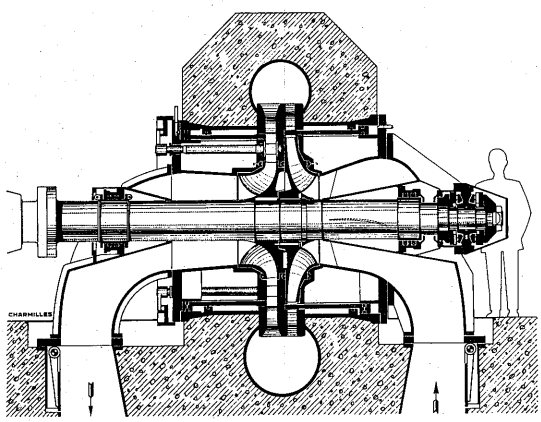
バルブ形水車はこのような低落差に最適であるので，今後の低落差開発の主流を成すものと思われる。

III. 揚水発電の動向

揚水発電には，ポンプ-水車-発電電動機とを一軸に直結したタンデム式と，可逆ポンプ水車と発電電動機とを組み合わせた可逆式とが実用化されている。

タンデム式はポンプ，水車それぞれを単独に設計できるので性能は最もよく，負荷調整が容易，始動停止及び切換時間が短い，多段式として容易に揚程を高くとれるなどの利点があるが，機械代及び発電所建屋のコストは高くなる。

可逆式ポンプ水車は，機械の価格面ではタンデム式に比べ安価だが，同一ランナで水車及びポンプの両方の性能を満足しなければならないという設計上の困難がある



第1図　Isogyre形ポンプ水車断面図
Fig. 1.　Section of Isogyre pump-turbine

ため，効率はやや劣る，振動が多いなどの欠点のほか，単段式の場合は最高揚程は700m位までがせいぜいである。

可逆式ポンプ水車の欠点を改善するために，Isogyre形ポンプ水車が考案され，最近Hendeck III発電所に460m 55MWの実用機が設置された。このポンプ水車は一つのケーシングの中に，回転方向が同一の水車ランナとポンプランナが取り付けられ，ランナ外周の円筒状仕切り機構をスライドさせることにより，ポンプと水車運転とを切り換える方式のものである。

第2表　各種形式の揚水機器の経済比較（600m 300MW機について）
Table 2.　Economic comparison of machine type for pump storage plant

	タンデム式	可逆式ポンプ水車	Isogyre形ポンプ水車
ポンプ最高効率	91.5%	89.2%	89.6%
水車最高効率	93.2%	90.1%	92.6%
機械価格	100%	66.5%	81.5%
（水力機械価格）	(69.5%)	(35.5%)	(50.0%)
（電気機械価格）	(30.5%)	(31.0%)	(31.5%)
総合コスト*	100%	101.2%	97.5%

注）*：揚水用電力料金を考慮に入れたもの。

第3表　大容量ポンプ水車の一例
Table 3.　Example of large capacity pump-turbine

発電所名	国名	台数	出力(MW)	落差(m)	回転速度(rpm)	運転開始
Bath County	アメリカ	6	457	385	257	建設中
Raccoon Mountain	〃	4	384	317	300	〃
Helms	〃	3	358	532	360	計画中
Ludington	〃	6	343	110	113	1972
新高瀬川	日本	4	336	264	214	建設中
Bear Swamp	アメリカ	2	320	229	225	1974
南原	日本	2	318	294	257	1976
Bajina Basta	ユーゴスラビア	2	315	621	428.5	建設中
奥多々良木	日本	4	310	411.3	300	1974
玉原	〃	4	308	518	428.5	建設中
Dinorwic	イギリス	6	306	535	500	〃

Isogyre形ポンプ水車は通常の可逆ポンプ水車に比べると，効率が高い，騒音振動が小さい，運転状態の切換が容易などの利点はあるが，構造が複雑であり，大容量機に採用するにはまだ信頼性に欠ける。第2表は600m 300MW級の揚水発電所を計画するに当たりタンデム式，可逆式ポンプ水車，Isogyre形ポンプ水車の比較についてヨーロッパで発表されたデータを示す。

揚水の分野においても大容量化への傾向は目覚ましいものがあり，Raccoon Mountain（384MW），Ludington（343MW），Bath County（457MW），新高瀬川（336MW），南原（318MW），Bajina Basta（315MW）など，300MWを超える大容量機が続々と出現している。

また，純揚水式の場合は比較的容易に高揚程地点が得られるので，揚水機の場合には大容量化と同時に高落差化の傾向が著しい。

Bajina Basta（621m）は単段式可逆ポンプ水車の世界最高揚程のもので，そのほかに太平（512m），奥吉野（526m），沼原（500m），Chongpyong（500m）など，500m以上の単段式可逆ポンプ水車が日本のメーカにより製作されている。

ヨーロッパにおいても揚水地点の高揚程化の傾向は著しく，1,000mを超えるものが建設され，あるいは計画中である。1,000m級となると従来は多段式タンデム形の領域であったが，ヨーロッパではこれらの超高揚程に対して多段の可逆式ポンプ水車を開発し，Ste. Helene（931m 82.5MW）では既に運転を開始し，Chiotas Piastra（1,070m 170MW）など建設中のものもある。

現在運転中または建設中のものは，4段式ないし5段式で，

(1)　構造上ガイドベーンが取り付けられないので，水車運転時の負荷調整ができない。

第4表　高揚程ポンプ水車の一例
Table 4.　Example of high head pump-turbine

	発電所名	国名	台数	出力(MW)	落差(m)	回転速度(rpm)	運転開始
単段式	Bajina Basta	ユーゴスラビア	2	315	621	428.5	建設中
	Dinorwic	イギリス	6	306	535	500	〃
	Helms	アメリカ	3	358	532	360	計画中
	奥吉野	日本	6	207	526	514	建設中
	玉原	〃	4	308	518	428.5	建設中
	太平	〃	2	256	512	400	1975
	沼原	〃	3	230	500	375	1973
	Chongpyong	Korea	2	206	500	450	建設中
多段式	Edoro	イタリア	8	150	1,260		建設中
	Chiotas Piastra	〃	8	170	1,070	600	〃
	Ste. Helene	フランス	4	82.5	931	600	1975
	Piedilago	イタリア	8	150	870		計画中

(2) 水車始動時の系統並列が困難。

(3) ポンプ始動時に水面押し下げができないので始動時に大きな入力を必要とし，系統にじょう乱を起こす。

などの問題があった。そこでこの欠点をなくすためにガイドベーン付2段式可逆ポンプ水車の開発研究が進められている。将来700 m以上の揚水機としては，ガイドベーン付2段ポンプ水車の出現が期待される。

揚水地点の高落差，大容量化に伴いランナは径が大きく偏平なものとなり，強度上からランナベーン，ガイドベーン，ステーベーンなどの厚みが増し，効率低下やキャビテーション特性の悪化を生じやすい。そのため，モデルテストにより効率性能の向上，キャビテーション性能の改善，過渡特性，不安定特性等を十分に検討しなければならない。

また，大容量高落差ポンプ水車においては，普通水車に比べ振動が多く，そのうえ高い静水圧を受けるので，構成各要素が強度的に過酷となるため，疲労強度，耐圧，剛性などに特に慎重な考慮を払って設計製作する必要がある。近年急速に進歩した有限要素法などの解析技術は，複雑な構造のランナ，スピードリング，上下カバーなどの応力及びひずみ解析に大いに威力を発揮している。

IV. 発電機及び発電電動機の動向

水車及びポンプ水車の大容量化に伴い，これに直結する発電機，発電電動機も大容量化している。一般水力の場合は比較的落差が低いので回転速度も低く，低速度大容量機となり，揚水機の場合は高揚程化のため高速度大容量機への傾向が著しい。

一般水力用としては，Grand Coulee III (615 MVA 72 rpm)，Guri (805 MVA 112.5 rpm)，Krasnoyarsk (590 MVA 94 rpm)，Sayan (650 MVA 136 rpm)，Revelstoke (485 MVA 112.5 rpm) などがある。

揚水用としてはRaccoon Mountain (425 MVA 300 rpm)，Bajina Basta (315 MVA 428.5 rpm)，Bear Swamp (333 MVA 225 rpm)，高瀬川 (367 MVA 214 rpm)，奥清津 (280 MVA 375 rpm)，Chiotas Piastra (180 MVA 600 rpm)，St. Fiorano (106 MVA 600 rpm) などの大容量高速機が多数製作されている。

大容量高速発電機の製作においては，回転子の強度及び冷却特性など体格上のリミットや回転部軸系と軸受部の剛性から決まる危険速度の問題，推力軸受の許容荷重の限度など幾多の技術上の困難が伴う。特に大形機の場合は，鉄心長に沿って各部均等に通風することや熱膨張による伸びの対処が肝要である。

Grand Coulee IIIの場合は固定子鉄心内径が18.3 mもあるので，温度上昇時固定子鉄心は，半径方向に11.4 mmも変動する。この伸びを無理に押さえ込むと強大な応力が発生し，永年の運転で破壊にも達するのでうまくこの伸びを吸収する方法が採られなければならない。

Grand Coulee発電機の場合，通常の鋼板製ステータフレームとすると巨大なため，内径の機械加工が困難でしかも12分割しなければ輸送が不可能となるので，特殊なビーム構造が採用された。すなわち，14本のIビームを現地で固定子鉄心外周に等間隔に下端をコンクリート基礎に埋め込んで立て，これに半径方向ビーム，接線方向ビームを組み合わせて強固に固定し，そのIビームの内径側に調整可能な鉄心固定金具を取り付け，鉄心が真円になるよう調整しながら積んで行くという，現地組立式フレーム構造が採用された。

高速大容量化の製作リミットを拡大するために，直接水冷式発電機が開発された。固定子及び回転子コイルを中空とし，その内部に純水を通して冷却するもので，固定子コイルの構造，絶縁ホースなどの部品の開発，回転部への純水導入装置の開発や素線のろう付け技術の開発など多くの技術的困難はあるが，冷却効果がよいので発電機を小形化することができ，その結果製作限界を飛躍的に高めることができる。直接水冷式はその反面小形化された結果，CD^2の減少，過渡リアクタンスの増大，短絡比の減少などの問題があるが，これらは送電系統を含め総合的に検討する必要がある。

直接水冷式を採用したものとしては，Sajanoshushensk (650MW)，Krasnoyarsk (590 MVA)，Raccoon Mountain

第5表 直接水冷式発電機製作例
Table 5. Example of direct water-cooled generator

発電所名	国名	台数	出力 (MVA)	回転速度 (rpm)	運転開始
Sayano	ソ連	10	650	136	建設中
Krasnoyarsk	〃	10	590	94	1966
Raccoon Mountain	アメリカ	4	425	300	建設中
Rodund II	オーストリア	1	310	375	1975
Nurek	ソ連		300	200	(1968)
Wehr	西ドイツ	4	290	600	1974
Inguri	ソ連		260	250	(1968)
Seitevare	スウェーデン	1	225	200	1967
Tonstad	ノルウェー	2	190	375	1968
Volga	ソ連	16	160	68.2	1964
Banova	スイス	2	86	428.6	1966
新黒部川第三	日本	1	60	450	1973
可部	〃	1	40	450	1975
利賀川第二	〃	1	33	720	1973
Chererovets	ソ連		20	93.6	1964
Leck	西ドイツ	1	4.45	166.7	1966
Bremm	〃		825	125	計画中

（425 MVA）などのほか，我が国でも新黒部川第三（60MVA），利賀川第二（33 MVA），可部（40 MVA）などが製作された。

大容量高速の発電電動機の場合始動方式が問題になる。大容量機の始動方式としては，従来は直結電動機始動が一般的であったが，高速機となると機械が細長くなるので，その上部に始動用電動機を直結することが振動特性上困難となってくる。最近のサイリスタの著しい進歩により，サイリスタ式周波数変換装置を用いた同期始動方式が採用される気運にある。Raccoon Mountain（425 MVA 300 rpm）や，奥吉野（220 MVA 514 rpm）はこの方式が採用されている。

V. あとがき

上述のように一般水力は低・中落差低速度大容量機へ，揚水機は高落差高速度大容量機の方向へ非常なスピードで進展している。これらの要求に対処するため，各製作者は種々の基礎研究及び製作技術の開発，材料の改良を懸命に進めている。最近はコンピュータを利用した解析技術が著しく発達したため，水車やポンプ水車の効率，キャビテーション特性，揚水特性などを計算によりある程度予測することができるようになり，モデルランナの特性が飛躍的に向上した。また水車，発電機の各部の応力，たわみの解析が詳細にできるようになったので，信頼性の高い経済的設計が可能となった。製造面においてはエレクトロスラグ法など自動溶接技術の著しい発達，機械加工のNC化などによる製品の質の向上がみられる。これらの努力の結果，今後更に大容量化に進むものと思われる。

当社における水車・発電機の世界的記録品の紹介
（カナダ・レベルストーク発電所向け）

当社は，カナダ・BCH＆P社からレベルストーク発電所用の超大形水車及び発電機を各々4台受注し，設計・製作中である。ここにその機器仕様の概要を紹介する。

本発電所計画は，ロッキー山系の豊富な水資源を利用するカナダにおける一大プロジェクトとして，世界の注目を集めているものである。

水車

形式：立軸フランシス水車

出力 { 定格出力：466 MW
　　 { 最大出力：495 MW

落差 { 基準落差：126.8 m
　　 { 最高落差：130.15 m

定格流量：420 m³/s

回転速度：112.5 rpm

比速度：181（m-kW）

ランナ径：7,000 mm

ランナ重量：160 t

発電機

形式：立軸三相同期発電機

出力 { 定格容量：485 MVA（温度100℃）
　　 { 過負荷容量：550 MVA（温度120℃）

電圧：16 kV

周波数：60 Hz

力率：0.95（遅れ）

回転速度：112.5 rpm（64 pole）

巻線接続：8並列人接続

固定子内径：13,600 mm

スラスト荷重：2,100 t

水車ランナは160 tと超大形となり，輸送制限上，二分割して輸送し，現地にて溶接及びフランジにて結合する。また，発電機固定子のコア積み，コイル入れ作業等も一切現地にて組み立てられる。

e-Front runners

＊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。