

揚水式発電について

吉 田 登*

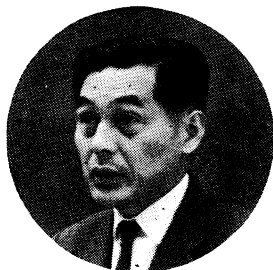
1. はじめに

戦後、急激に上昇する電力需要にこたえるため急ピッチで電源開発が進められてきたが、水力発電だけでは急増する需要をまかなうことができず、一方では大容量高効率の火力発電所の研究開発が進み、有利な水力地点の減少ということもあって、電力供給形態は水主火従から火主水従へと移ってきた。これにしたがって水力発電が供給源としてはたす役割も次第に変化し、負荷に対する即応性という面からピーク供給源として水力発電が重視されるようになり、これにともなって揚水式発電が改めて注目されるようになってきた。

揚水式発電は水力発電の一つの形態であり、時間的に変動する電力需要に対処するピーク供給力として働くものと、季節的に変動する水力発電電力を補給するために設けられるものとに大別して考えられるが、わが国では今後ますます電力供給力における火力発電の比重が増加することが予想され、これにともなってピーク供給力として揚水式発電が重視されてくる傾向にあると思われる。実際 37 年度電力長期計画によれば、わが国のこれまでの発電力は水力 12 986 mW、火力 10 459 mW であったものが今後 10 年間の開発予想によると水力 7 680 mW、火力 39 220 mW であり、このうち揚水発電所は 3 060 mW で水力の約 40% を占めている。また、これを工事資金の面からながめてみると、火力には 15 582 億円が必要とされ、水力は 7 554 億円であるが、このうち揚水発電所には 2 242 億円の支出が予定されている。

2. 揚水発電の発達

揚水発電は 1892 年スイスの Zürich 近郊の Lettern 発電所に 700 HP のポンプがすえつけられたことによって、その第一歩を踏み出した。しかし、揚水発電が実用の段階に入ったと考えられるのは、1900 年代に入ってからである。当時の揚水発電は電動機とポンプ、水車と発



電機が全然別個になっており、経済的にはあまり有利ではなかったことと思われるが、スイス、イタリア、オーストリアなどの水力発電系統では電力需要の変動と水力供給力の変動とに対処するために、豊水期の余剰電力を利用して貯水池や天然湖沼に揚水し、これを渇水期に利用する季節調整が行なわれていた。1920 年代に入ると、ポンプ運転用電動機と発

電機に同一の交流機を使用する発電・電動機が開発され横軸を用いる場合は発電・電動機の両側に水車とポンプをすえつけ、立軸の場合は最上段に発電・電動機を中段に水車を、最下段にポンプがすえつけられた。この形式の揚水発電所は当時代表的な火主水従国であったドイツで深夜の火力余剰電力を利用して揚水を行ない、ピーク時に発電を行なう日調整を目的に建設された。1920 年代から 1930 年代にかけてドイツでは Niederwartha, Herdeck, Hausern, Bringhausen, Bleiloch などの揚水発電所があいついで完成し、イタリア、フランス、アメリカなどでも揚水発電所の建設が始まった。

一方、揚水発電所の基本条件ともいえる建設費の低減という面から、水車を逆回転させることによってポンプとして使用する可逆型水車の研究開発が進められ、1931 年にはイタリアの Lago Baitone に 600 kW 2 台が、ついで 1934 年にはドイツの Baldeney 発電所に 4 800 kW の可逆水車がすえつけられた。しかし、これらの水車は建設費の低減という面では効果をあげたが、運転効率の点ではあまりかんばしくなかったので、ポンプおよび水車の効率を高めるために発電・電動機を 2 速度で運転する研究が進められ、1932 年完成したドイツの Bleiloch 発電所の発電・電動機は水車運転時には 176.5 rpm の 1 速度であるが、ポンプ運転時には 150 rpm および 176.5 rpm の 2 速度で運転できるようになった。これが極数変換型発電電動機である。

当時、わが国では水主火従の時代であったので、ヨーロッパの山岳地域と同様な考え方から、1934 年常願寺川水系小口川の最上流にある小口川第 3 発電所にポンプが

* 正員 工博 関西電力KK建設部長

すえつけられた。これは水車ポンプ別置型で最大出力 14 000 kW ペルトン水車 2 台を使用し、ポンプ軸馬力 4 350 HP のものであった。また野尻湖を上方池に利用する池尻川揚水発電所も同じく 1934 年に建設された。

第 2 次世界大戦の勃発とともに一次下火となっていた揚水発電所の建設も、戦後はアメリカにおいて高効率可逆水車の研究が進められ、1950 年代に入って Flatiron (1954 年)、Hiwasel (1956 年) が建設された。またブラジルにおいても Pedreira (1954, 1953 年)、Vigarrio (1915 年)、などが、アメリカの技術によって開発された。このうち Flatiron では本格的な極数変換型発電電動機を使用している。

この時代ヨーロッパ諸国では、可逆水車の開発は行なわれず、ポンプ水車別置型による、高揚程、大容量揚水発電所の開発が進んでいた。その代表的なものは、1956 年に建設されたオーストリアの Lünersel 揚水発電所であり、ここにすえつけられたポンプは揚程 970 m、5 段、容量 49 000 kW 6 台という驚くべきものである。

1951 年わが国でも戦後初めての本格的揚水発電所である沼沢沼発電所がポンプ・水車別置型で開発された。この時代のわが国の電力供給形態はいぜんとして水主火従時代であったので、沼沢沼発電所も天然湖沼である沼沢沼の大きな貯水容量を利用し、豊水期の余剰電力によって揚水を行なう形式のものであった。

また、1957 年にはカナダの Sir Adam Beck Niagara 揚水発電所に初めて斜流プロペラ型ポンプ水車がすえつけられた。この機械はこれを実用化した Deriaz の名をとりデアリア型といわれているが、中低落差で非常に高い効率を発揮するといわれており、わが国においても穴内川発電所にすえつけられる予定となっている。一方、可逆水車の発達次第に大容量、高落差へとその適用範囲を広げ、わが国では 1959 年大森川発電所にこれが採用されて以来、畑薙第 1、王滝川、城山、八木沢などの発電所で採用されている。この間アメリカでは Taum Sauk に出力 17 900 kW のポンプ水車が建設された。これは揚程 235 m、揚水量 73.6 m³/sec という画期的なものである。

ちょうど、この 1950 年代後半からわが国の電力事情が次第に変転をみせ、大容量、高効率のベース用火力発電所の建設がさかんになり、それまでの水主火従時代から、火主水従時代へと移行してきた。これは 1930 年代にドイツで、また 1940 年代にアメリカですでおこっていた現象ではあるが、揚水用電力として水力発電の余剰電力を利用することがむずかしくなり、深夜の火力発電増電力を期待しなくならなくなった。しかし、可逆型ポンプ水車の開発や土木技術の進歩などによって揚水発電所の建設費の低減が行なわれ、水火併用の利点をも

発揮することによって、最近の本格的揚水発電所建設時代となってきたのである。

戦後、わが国では、1951 年に沼沢沼発電所が建設されて以来、現在、既開発地点は大森川、諸塚、畑薙第 1 など 6 カ地点 25 万 kW、工事中のものは 8 カ地点 168 万 kW に達し、計画中のものは 20 カ地点 306 万 kW といわれている。

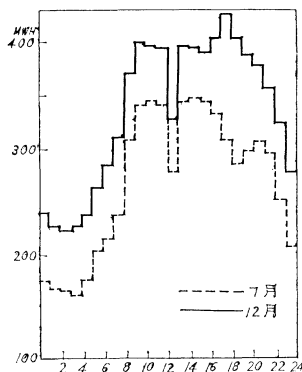
このように揚水発電所発達史の歴史は電力系統における供給力の変遷と機械発達史の歴史といえる。実際、揚水発電所の可否は系統の供給力の構成から要望される経済性にみあう発電所を建設できるか、どうかにかかっているのである。

3. 揚水発電の形式

(1) 調整池式と貯水池式

一般に電力需要は毎日時間的な変動がおこり、図-1 のように日中の数時間にわたって需要が増大する。この時間をピーク時と称し、これに対して深夜の需要が減少する時間をオフピーク時と称する。

図-1 昭和 36 年 7 月第 3 水曜日および 12 月第 3 水曜日発受電実績



このように毎日の時間的需要変動に応じて発電を行なうのが日調整発電である。また休日には当然需要が減少するので、これを供給力で調整することになる。そこで普通の週間調整池式水力発電所では休日に出力をおとすことになるが、週間調整池式揚水発電所では休日に週日より多くの揚水を行なうことにな

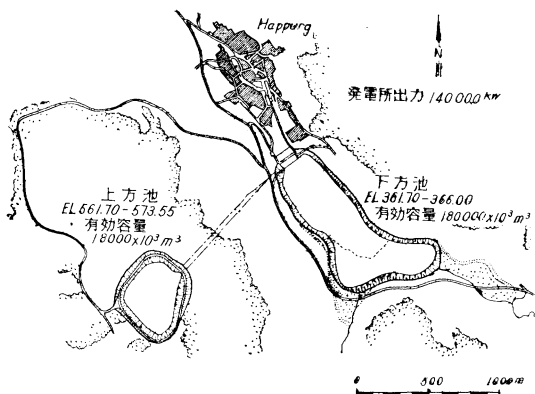
る。このように日および週間にわたって、その供給力を調整する発電所を調整池式発電所という。また図-1 でも明らかなように電力需用も季節的变化を示すが、それとともに水力発電所の供給力も渇水期には減少する。これに対処するために大きな貯水池をもって季節的な調整を行なうものが、貯水池式発電所である。これを年間調整あるいは年間調整と称している。

(2) 純揚水式発電と自流併用式揚水発電

揚水式発電所の発電機能上最も一般的な形式分類が純揚水式発電と自流併用式揚水発電である。ここにいう純揚水式発電とは揚水発電所の上方池に流入する水量が皆無であるか、あるいは自流があってもそれが発電上に影響しない程度の量であるものを称する。この形式では発電に使用される水は揚水によって上方池に貯えられた量

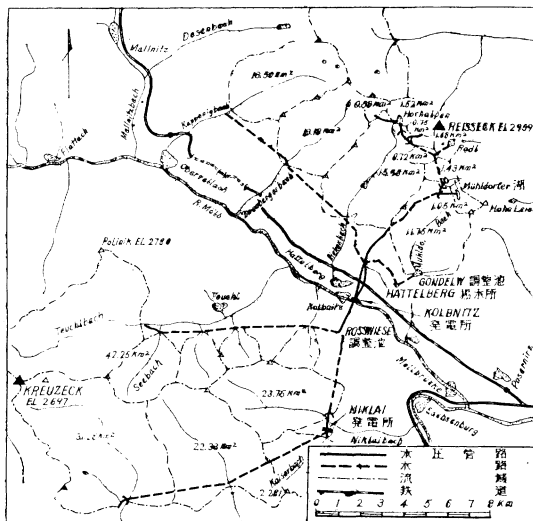
だけであるから、日調整あるいは週間調整を目的に計画されるものが多い。これに用いる上方池は、天然湖沼が最適であるが、落差や下方池の問題などから実際に利用されているものは数少なく、わが国の沼沢沼発電所程度であろう。天然湖沼を利用できない場合は当然人工池となるが、わが国では城山発電所のように溪流をダムでせき止める溪流せき止型のものも多く、ヨーロッパおよびアメリカなどでは台地を掘削し、堤防を盛り立てて池を作るプール型のもが多く、アメリカの Taum Sauk, ドイツの Happurg (図-2), ルクセンブルグの Vianden などがある。

図-2 Happurg 揚水発電所



一方、下方池としては天然湖沼、既設人工貯水池、海洋などが一般に考えられるが、揚水発電に必要な一定水量の水を上下方池間を反復移動させることによって揚水発電を行なう循環式揚水発電所のような場合は、上下方池への補給水量は最初の湛水を除くと浸透と蒸発による

図-3 Reissech-Kreuzsch 計画



ロスだけあればよく、下方池を非常に小さな河川に設けることも可能であり、下方池の建設費を安くできるので、この場合には下方池の新設も考慮される。

これに反し、自流併用式揚水発電は上方池を高えん堤で締切ったり、上部自流のある天然湖沼をかき上げしたりして用いることが多いので、大容量の貯水池を持つものが多い。この場合、自流分による発電力の上に揚水分による発電力が付加されてピーク継続時間が延長され、経済性が上がってくることはもちろんであるが、上方池容量が大きく上部自流分だけでは十分有効に貯水池が利用できないような地点では、上方池からの放流以外の下部自流があれば、これを揚水によって上方池に汲み上げ、年間調整の効果をあげる場合もある。このような実例はヨーロッパ諸国の水力を主とする系統には多くみられ、オーストリアの Lünensee, Reissech-Kreuzsch 計画 (図-3) などがある。また、前者の例としてはアメリカの Hiwasel が有名である。

(3) 機械装置による形式

a) 水車・発電機, ポンプ・電動機別置型 この形式はポンプおよび水車をそれぞれ別個な水力機として作成できるので、効率の点からは理想的であるが、機械装置費とともに建家の建設費も高くなる欠点があるため、最近の大型機械にはあまり用いられていない (表-1)。

表-1 揚水発電所主機配置の種類

主機・種類	軸方向	
	横軸	立軸
電機および水力機 ともに別置形	(P) — (M) — (T) — (G)	(M) — (G) (P) — (T)
電機のみ兼用形	(T) — (MG) — (C) — (P)	(MG) (T) (C) (P)
電機および水力機 ともに兼用形	(PT) — (MG)	(MG) (PT)

b) 水車・ポンプ別置型 これは発電機および電動機に同一の同期機を使用する形式であり、電動機と建家の一部を節約することができる。ポンプ運転時と水車運転時の回転方向は同じであるが、回転数も同一にする場合はポンプおよび水車の性能に応じて自由に選ぶことができないので、a) よりも効率が落ちることになる。また同一条件下ではポンプのほうが水車よりもキャビテーションが起きやすいので、回転速度はポンプによってきめられることが多い。したがって、水車の回転数は一般のものよりも少なくなり、大形となる。

この形式では片方を運転するときは他方を切り離すか空転させる必要があるので、特殊な軸継手を用いたり、

表-2 揚水発電所のポンプおよび水車

発電所名	所有国	P: T:	H (m)	P (kW)	N (rpm)	形式	台数	発電所形式	完成年
Häusern	ドイツ	{ P T	210	19 700	333	片吸込 2 段	4	V(MG-P-T)	1930
			210	34 300	333	フランシス	4		
Witznau	ドイツ	{ P T	248	29 300	333	2 段	4	V(MG-P-T)	1943
			260	55 900	333	フランシス	4		
Waldshut	ドイツ	{ P T	167	18 100	250	片吸込 2 段	4	H(P-MG-T)	1951
			143	45 000	250	フランシス	4		
Herdecke	ドイツ	{ P T	166.3	2 700	300	両吸込 2 段	4	H(P-MG-T)	1930
			163	33 700	300	フランシス	4		1942
Bleiloch	ドイツ	{ P T	36 50 58	18 100	150 176.5	両吸込 1 段	2	H(MG-P-T)	1932
Geesthacht	ドイツ	{ P T	—	30 800	214	両吸込 2 段	3	H(P-MG-T)	1957~12
			76	44 300	214	フランシス	3		
Rodud	オーストリア	{ P T	355 —	37 500 49 400	500	両吸込 1 段	1	H(P-MG-T)	1952
Lünersee	オーストリア	{ P T	970	41 100	750	両吸込 5 段	6	V(MG-T-P)	1956
			970	47 100	750	四射ベルト	6		
Limberg	オーストリア	{ P T	385	63 800	500	2 段	3	H(P-MG-P)	1955
			364	57 800	500	フランシス	3		
Altendorf	スイス	{ P T	486	18 700	500	5 段	2	V(MG-T-P)	1947
			421~478	16 500	500	二射ベルト	6		
Cotilia	イタリア	{ P T	120~152	27 800	337.5	両吸込 1 段	2	H(P-MG-T)	1942
			141.5	23 300	337.5	フランシス	2		
Hohenwarte	ドイツ	{ P T	67.8	17 600	136.5/167	1 段	—	V(MG-T-P)	1939
			67.3	20 700	136.5/167	フランシス	—		
Ffestiniog	イギリス	{ P T	326	61 900	428	—	4	V(MG-T-P)	1962
			326	75 000	—	—	4		
Provvidenze	イタリア	{ P T	287	46 000	500	—	2	H(P-MG-P)	1950
			287	50 000	500	—	3		
Pragnères	フランス	{ P T	400	1×5 200 4×10 450	1 000	3 段	5	H	1953
			400	73 000	—	—	2		
Niederwartha	ドイツ	{ P T	154	20 000	375	—	4	—	1928
			154	22 000	—	—	4		
小口川第三	北陸電力	{ P T	668	3 800	1 200	6 段	1	H(M-P) H(G-T)	1931
			625	8 950	514	ベルト	1		
池沢川	東北電力	{ P T	84	1 120	1 200	1 段	1	H(P-MG-T)	1934
			74	1 350	1 200	フランシス	1		
沼沢沼	東北電力	{ P T	211	21 000	500/600	2 段	2	H(P-MG-T)	1951
			200	23 000	—	フランシス	2		
諸塚	九州電力	{ P T	241.4	55 000	300	2 段	—	V(MG-F-P)	1961
			—	54 000	300	フランシス	—		

圧縮空気を用いてケーシング内の水をおしきげたりする(表-2)。

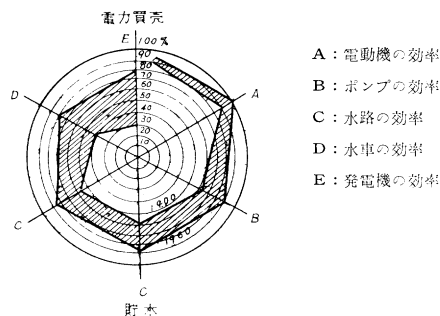
c) ポンプ・水車可逆型 これはポンプと水車に同一の水力機を用いるもので、ポンプ運転時と水車運転時の回転方向は逆となるが、発電機と電動機は兼用する。建家の一部を小さくすることならびに機械装置を安くすることは可能であるが、性能はポンプ運転時および水車運転時ともあまりよくなく効率が低下する欠点がある。現在、最も多く用いられているものはフランシス型ポンプ水車で、1950年代以降研究開発が進められてきた(表-3)。また最近、斜流プロペラ型ポンプ水車の研究も進められ表-4のような実例がある。

4. 揚水発電の効果

(1) 揚水発電所の効率

揚水発電所はエネルギー経済的にみれば、一定量のロスを生じながら水力発電力を時間的に調節する(間接的に火力発電力を調節することもある)ものであるからロスを発生させる原因となる揚水発電所の総合効率が重要視される。図-4に示すように総合効率は1900年代

図-4 1900~1960年における揚水発電所の効率の向上



には30%程度であったものが、最近では70%を超えるようになってきている。図-5に現在工事中のルクセンブルクのVianden発電所の効率を示すが、これは水車・ポンプ別置型であり、効率は可逆型水車を使っているものよりも高いが、それでもなお発生電力は供給電力の77%にしかならず、23%のロスが生じていることがわかる。

(2) 循環式揚水発電とその効果

循環式揚水発電とは揚水発電に必要な一定水量の水を上方池と下方池間を反復移動させることによって揚水発

表一3 フランシス型ポンプ水車

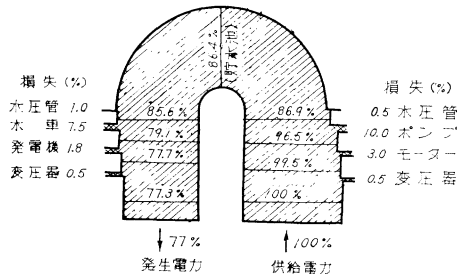
発電所名	所有国	P : ポンプ T : 水車	H (m)	P (kW)	N (rpm)	形式	台数	完成年
Lago Baitone	イタリア	{ P T	65 60	— 600	810 610	横軸	2	1931
Pedreira	ブラジル	{ P T	28 28	42.5* 11 930	138.5 138.5	立軸	1	1945
Vigario	ブラジル	{ P T	30 29	40 10 800	150 150	—	4	1951
Santa Cecilia	ブラジル	{ P T	14.7 13.7	40 5 220	106.7 106.7	—	4	1951
Pedreira	ブラジル	{ P T	23.8 24.4	12 100 14 200	150 150	立軸	3	1953
Flatiron	アメリカ	{ P T	73.2 88.5	8 350 8 950	300 257	立軸	1	1954
Edgard de Souza	ブラジル	{ P T	23.8 25.0	14 200 12 100	150 150	立軸	1 (3)	1955
Hiwassee	アメリカ	{ P T	62.5 73.2	75 000 89 500	105.9 105.9	立軸	1	1956
Tuscarora	カナダ	{ P T	25.9 22.9	96.2* 70 900	112.5 112.5	立軸	12	1959
大森川	四国電力	{ P T	127.8 118	14 300 14 800	400 400	立軸	1	1959
Providenza	イタリア	{ P T	262 259	17 52 200	375 375	立軸	1	1961
畑薙第一	中部電力	{ P T	103.2 101.8	34 800 45 200	200 200	立軸	2	1961
Smith Mut	アメリカ	{ P T	62.5 54.8	129 65 000	105.9 105.9	立軸	2	1691
Taum Sauk	アメリカ	{ P T	235 220	73.6* 17 900	200 200	立軸	2	1961
王滝川	関西電力	{ P T	125 119	30 33 000	277/231	立軸	1	1963
矢木沢	東京電力	{ P T	85 81	80 73 500	150 150	立軸	3	1964
城山	神奈川県	{ P T	158 153	43 64 500	—	立軸	4	1964

* 印は流量 Q(m³/sec)

表一4 斜流プロペラ形ポンプ水車一覧表

発電所名	所有国	P : ポンプ T : 水車	H (m)	P (kW)	N (rpm)	形式	台数	製作者	完成年
Sir Adam Beck	カナダ	P T	27.4 25.3	41 000 33 600	92.3 92.3	立軸 ポンプ水車	6	E E	1957
Valdecanas	スペイン	P T	72.5 74.1	82 000 82 000	150 150	立軸 ポンプ水車	1	E E	1962
穴内川	四国電力	P T	71.0 69.5	13 000 13 200	360 360	立軸 ポンプ水車	1	日立	1963
黒又第二	電源開発	P T	80 79	20 500 19 500	300/333	立軸 ポンプ水車	1	富士	1963

図一5 1900~1960年における揚水発電所の効率の向上



電を行なうものであり、上方池あるいは下方池の自流量とは無関係に運転が続けられる形式である。そこで、その発電所自体が一個の大きな蓄電器とも考えられる。このために上方池の容量と下方池の容量は同量である必要があり、容量が異なる場合は揚水による発電能力はいずれか小さいほうによって決定されることになる。

この形式の最も典型的なものは、アメリカの Taum Sauk であり、これを形式化したものを図一6 (a) に示すが、上方池にはもちろんのこと、下方池にも大きな自流はない。この形式を循環式純揚水発電という。この場合は上下に池を作る必要があり、建設費が割高となるが、これをさけるために下方池として大きな川や湖の利用が行なわれているが、将来は海洋の利用も行なわれるだろう。この形式では上下に大きな貯水容量をもった池を作ることはむずかしいので、大部分が調整池式となっている。そこで火力を主とする電力系統で、オフピーク時に本来ならば出力を落さねばならない火力発電所を需要量より多く発電し、これによって生じた余剰電力を利用して揚水を行ない、これをピーク時に発電に利用する。こうすれば火力発電所の負荷変動が少なくなり、高効率運転を行なうことができる。しかし、この場合は揚水発電所が発生する電力のすべてが火力発電所をよけいに運転したことによって得られたものであり、また前項で述べたような総合効率の

影響を受けて、発生する電力は火力によって供給された電力の 70% 程度となる。

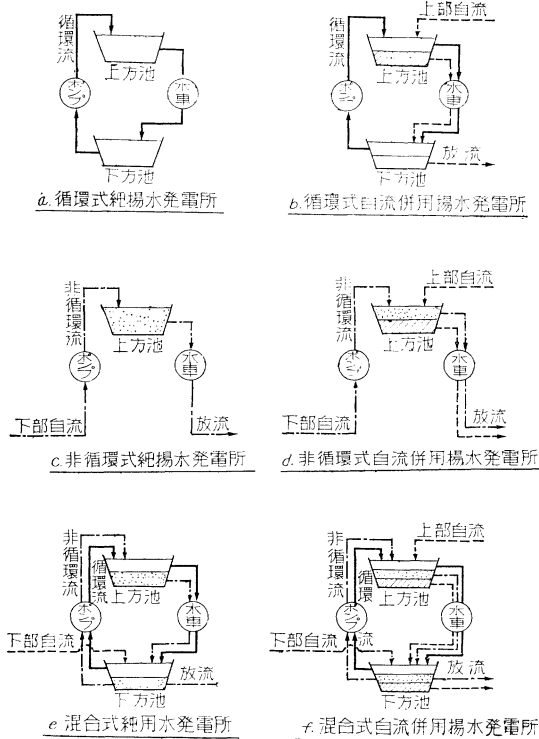
この揚水用火力発電を減少させるものが、上方池への自流である。すなわち上方池への自流は揚水によって下方池から上方池へ汲み上げられる水と同じ効果をもって、この自分流だけは揚水運転を行なわなくてもよい。つまり揚水ポンプの運転目的は純揚水の場合と同じように循環式ではあるが、循環流量は発電用に使われる水よりも自分流だけ少なくなる。これを形式化したものが図一6 (b) に示す循環式自分流併用揚水発電である。この形式のものは相当量の自流をうるために河川を高く堰で縮切り、これによって得られる落差と貯水量を利用しているものが多い。

(3) 非循環式揚水発電とその効果

循環式揚水発電では、揚水運転自身が電力需給を調節することを目的として行なわれるのに対して、非循環式

揚水発電は揚水運転が需給調節の直接の目的ではなく、一つの手段となって働いていると考えられるものである。図-6 (c) および (d) にこれを形式化したものを示すが、下方池容量は上方池容量に等しいだけの大きさをもつ必要はなく、極端な場合はポンプを回わせるだけのポケットがあればよいが、このときは揚水される水は下部の自流分だけとなる。このような揚水発電所はその

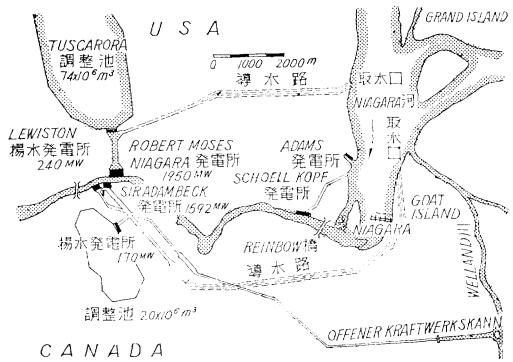
図-6 揚水発電の形式



発電所自体が電力を調整することよりも、むしろ下流の発電所群の出力調整を主目的としているのであるから、エネルギー経済的にも新しい電力を生みだしている場合がある。そこで発電設備を持たない揚水所も意義をもつことになる。このような揚水所はヨーロッパ諸国の水力を主とする系統にはよくみられるが(図-3)、揚水を行わなければむだに流れ去ってしまう水を揚水によって上方池にくわえ、これを発電に有効に利用するいわゆる溪流取水効果を揚水に期待するものである。また同じように揚水発電所の場合は、豊水期やオフピーク時に下流の発電所群が不要とする水を上方池にくわえ、これを渇水期やピーク時に発電に利用し、自己の発電力を確保すると同時に下流発電所群の出力を確保することを主目的としている。

一般にこのような発電所の上方池は貯水容量が大きく貯水池式となっているものが多いが、特殊な例として図

図-7 ナイアガラ開発計画



一7 に示すナイアガラ瀑布を発電に利用しているアメリカの Robert Moses Niagara 発電所およびカナダの Sir Adam Beck 発電所は4月1日から9月15日までの日中(A.M. 8.00~P.M. 8.00)は $2830 \text{ m}^3/\text{sec}$ を、その他は $1415 \text{ m}^3/\text{sec}$ を瀑布のほうに観光放流しなければならず、ちょうどピーク時に出力の低下をまねくことになり、これを補給する調整池が計画されたが、これにはばく大な費用がかかることがわかった。そこで導水路に隣接する台地に上方池を設け、これに揚水発電所を付加してオフピーク時に揚水を行ない、これをピーク時に利用して発電所の出力補給を行なっている。これは揚水に貯水池増設効果を期待するものである。

(4) 混合式揚水発電

循環式あるいは非循環式の区別は前述のとおりであるが、実際には下方池に自流があり、しかも下方池が日調整あるいは週間調整能力を持ち、上方池が年間調整容量をもつものがある。この場合は下流の発電所群に対しては非循環式の効果すなわち下流増があり、自分自身だけでも循環運転を行なえる揚水発電所である。この形式のものを混合式揚水発電といい、自流の有無によって図-6 (e) あるいは 図-6 (f) のように区別される。

5. 土木技術上の問題

揚水発電所は普通の水力発電所に揚水設備を付加したものと考えられる。したがって技術的にも水車運転の場合に起こる問題のほかに揚水運転時に生ずると予想される諸現象について考慮しておかなければならない。

(1) 振動

揚水運転時に起こる振動は、現在のところさけることができないものと思われる。その原因としては揚水のためにポンプのインペラーによってかきまぜられる水が、それによって衝撃を受けて水圧変動を生ずることによるものと、圧力の時間的変化をもった水の脈動または渦流によると考えられている。したがって、これらの振動の影響を受けると予想される水圧管、吸入管(吸出管)ポ

ンプの基礎などの構造物については、模型実験やその他の研究によって、その対策を考えなければならない。

一般には、構造物の支持状態を変えたり、断面を変化させたり、補強材を付けてその固有振動数を変化させて共鳴を起こさないようにして振動を減少させる方法が用いられている。

(2) サージングとウォーターハンマー

普通の水力発電所では負荷遮断時と負荷急増時においてサージングとウォーターハンマーの現象が起こる。揚水発電所では以上の場合のほか、揚水運転によるポンプの起動時とポンプ運転停止時にもこれらの現象が起こる。一般には起動時においては、最悪状態は起こらないようであるが、揚水量を急増するときには下部の水位がダウンサージングによって水頭の不足をまねきキャビテーションの原因となることがある。揚水発電所でサージングとウォーターハンマーを考慮しなければならないのは、ポンプ急停止の場合とポンプトリップの場合である。ポンプ急停止とは電動機電源遮断と同時にインペラーのまわりの吐出弁(ガイドベーン)を閉鎖する停止法であり、ポンプトリップとは電源遮断を行っても吐出弁、その他の弁が閉鎖しないときに起こる現象である。この場合は、それまでポンプとして正回転していたものが、水の逆流により回転速度がだんだん低下して0になり、つづいて逆回転を始めて最終的にはそのときの落差、弁の開度の状態による無拘束速度に達することになる。

これらによって起こるサージング、ウォーターハンマーに対しても機器はもちろんのこと、調圧水槽、水圧管、吸入管などに対しても考慮して設計しなければならない。

これらの解析には一般の水力発電で行なっているように図式解法にもとづくものや理論式を使って数値計算による方法が考え出されているが、実際の設計にあたっては模型実験をとまなうのは当然である。

(3) 海水揚水の問題

循環式揚水発電の一形式として海水を利用することが考えられる。この場合は需要地に近い地点を求めることができるので、送電ロスが少なくすむ利点はあるが、土木設計施工上および機器設計製作上に多くの問題点も存在する。すなわち、土木技術上は構造物に対する海洋生物付着の防止、塩害に対する耐久性、海水中の構造物の施工法などの問題があり、発電用機器に対しては耐食性材料の研究、防食法の研究、生物付着の防止などが要求される。

また、これ以外にも、屋外機器の塩害の防止、上方池からの海水ろうえいや放流などによる塩害の調査研究など今後取り組んでいかねばならぬ問題が多い。

6. おわりに

以上、揚水式発電の概要について述べたが、今後、わが国で必要とされることは、電力供給力における火力および原子力発電の比重はますます大きくなり、豊渇水による水力の供給力の差はあまり問題とならなくなることが予想される。そこで、このような汽力を主とした電力系統では毎日の時間的需要変動に応じるために水力発電をピーク化させることが有効であるが、これとともに揚水式発電は需要変動に対してもまた供給予備力としても今後いっそう重要性をおびてくると予想される。

(1963.5.25・京都大学にて講演)

豆 知 識

整備すすむアメリカのハイウェイ網

米商務省公共道路局が最近発表したところによると、本年3月31日現在の米国のスーパー・ハイウェイ総延長は昨年3月31日にくらべて約3200km伸びて約23200kmに達した。この中には有料道路約3680kmが含まれている。米国のスーパー・ハイウェイ網は1972年までには約65600kmに伸びる予定である。

公共道路局によると本年3月31日現在建設中の州間道路は約7520kmで昨年3月31日に建設中だった州間道路を約400km上回っている。

スーパー・ハイウェイが古い道路や、改良工事中の道で寸断されているが、州間道路第5号のようにシアトルからカリフォルニア州北部へ通じているものはほとんど

分断されていない。

またスーパー・ハイウェイと有料道路を利用すれば、オクラホマ・シティーからカンサス・シティー、オクラホマ・シティーからセントルイスまでは完備した道路がととのっているといえる。デトロイトとマッキナック・ブリッジを結ぶ州間道路75号もほぼ完備している。東北部では有料道路が圧倒的に多いけれどもウイルミントン、プロヴィデンス間、フィラデルフィア、シカゴ間、オーガスタ、シカゴ間は完備した道路が存在する。

南部ではフロリダ州に州間道路4号があり、アッシュヴィル、ダーラム間、アッシュヴィル、チャールストン間にスーパー・ハイウェイが完備されつつある。

このように米国のハイウェイ計画は次第にととのいつつある。