

地下発電所の計画に於ける二・三の考察

岩手県電力局 佐 藤 源 藏
企 上 関 島 正 志

1. 緒 言

1907年に世界最初の地下発電所が建設されてから、世界中に広く、又色々の種類の方式のものが建設されている。又、日本でも本格的な地下発電所が建設されている。岩手県電力局が地下300mの岩洞第一発電所を計画した際に、約700mに近い斜坑の掘削や湧出し、又地中深くでの湧水など施工上の問題、及び鋼板内張圧力斜坑など技術的な問題など未知、未経験の事柄が多くあつたが、地下発電所方式に踏み切った。今ここに工事も終り、未知、未経験であつた問題も明らかになつたので報告と共に地下発電所の開発について必要なことについて、併せて述べることにする。

2. 発電所の形式の選定

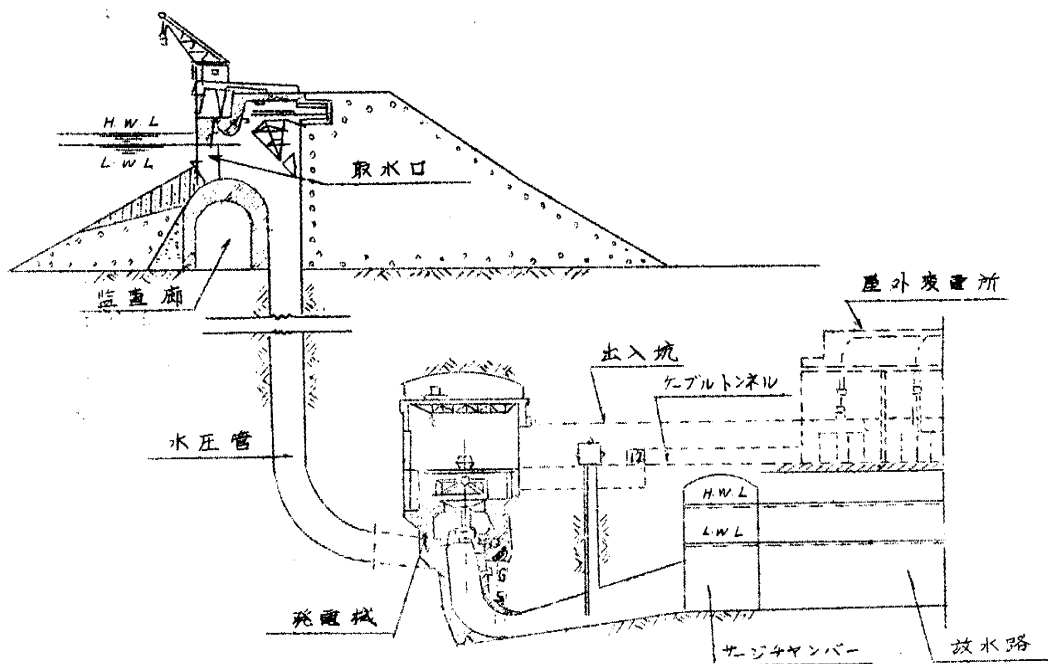
ある開発地点を地表発電所形式にするか、地下発電所形式にするかについて、検討する場合は少ない。このことは地下発電所は特殊の地点に於てのみ最も経済的な解決を与える、と云うことを示している一つの理由になる。地下発電所は地形学的及び地質学的な条件により定まる。地質学的に言つて“岩が通常の硬岩中をトンネル工法により経済的に掘削し得るものなら、地下構造物の設置を考えることができる。”これが大まかに云つて地下構造物設置の可否の目安である。開発方式は次の二つに分けられる。

1) “head development” 方式

第1図に示すように落差は取水口と発電所に集中される。この方式では圧力隧道と調圧水槽は不要で、その代りに長い放水隧道が必要になる。

第 1 図

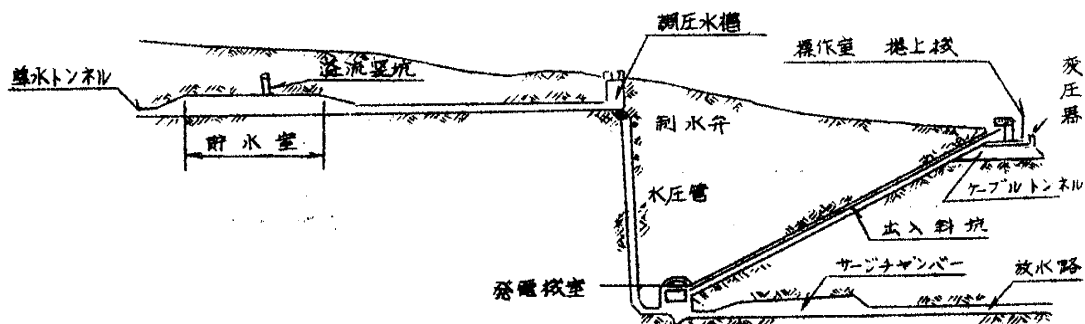
Head - Development 方式 (スウェーデン)



ii) tail development 方式

第 2 図

Tail - Development 方式 (フランス)



第2図に示すように発電所は取水口に対して自由な位置におかれ地表との連絡に便ならしめる。一般に出入坑は短く引き出しケーブルも短くて済むことが多い。

ある特殊の地点で、いづれの方法を採用するにしても、出入坑が短く、無圧の無巻きの放水隧道が許されるならば、経済的になることが多い。

3. 経済比較の实例

例として岩洞第一発電所の場合をとる。この発電所は岩洞貯水池のバックウォーターの終点近くで取水し、長さ約5 Kmの圧力隧道をもつ *tail development* 方式の地下発電所で、総落差は444.3mである。この落差を地表発電所方式で利用すれば、地形上二つの発電所を設けねばならない。従つてここでは地下の一発電所、地表の二発電所（大・中・小発電所）につき昭和32年当時の単価により比較する。

今全損失水頭として圧力水路の摩擦損失水頭の1.2倍の値をとると、平均使用水量に対して地表発電所は有効落差が2.6%減となり、従つて年間発生電力量は地下発電所の $215 \times 10^6 \text{ KWH}$ に対して $209.4 \times 10^6 \text{ KWH}$ となり、年間のKWHの建設単価は、地下発電所では8.92円、地表発電所では8.98円になる。このほかに地下発電所地点は良質な閃緑花崗岩で湧水も少いと予想された反面、地表発電所地点は花崗岩地帯であるが、風化が相当進んでいて発電所基礎の掘削が深くなることが予想されたこと、一つの発電所なら運転経費が少なくて済むこと、又負荷の変動にも全出力で応じることができることなどの点から地下発電所方式を採用したのである。

工	種	単位	数量	単価	会 額	摘 要
発電所						
圧力配道の掘削	ℓ = 486.8 m	m ³	37.100	3,200	118,720.000	作業坑を含む
“ 巻立		“	11.800	6,200	73,160.000	セメントを含む
鉄管斜坑の掘削	ℓ = 687 m	“	6.100	6,000	36,600.000	
“ 埋立コンクリート		“	4.600	7,100	32,200.000	セメントを含む
鉄管路作業坑の掘削	ℓ = 330 m	“	3.300	5,000	16,500.000	
水正鉄管	ℓ = 687 m	t	730	240.000	175,200.000	
発電所本屋の掘削		m ³	16.000	4,000	62,000.000	“
“ コンクリート		“	3.700	10,600	39,220.000	セメントを含む
“ 鉄筋		t	260	88.000	22,880.000	材料加工費
“ 型枠		m ²	7.500	1,000	7,500.000	
発電所斜坑の掘削	ℓ = 536 m	m ³	16.400	5,000	82,000.000	
“ 巻立		“	4.600	6,500	29,900.000	セメントを含む
水車発電機 水車 21500 KW×2 発電機 22000 KW×2					524,000.000	
変圧器 24500 KVA×2					80,000.000	
連絡用インクライン台車					20,000.000	
放水配道の掘削		m ³	39.700	2,900	115,130.000	作業坑を含む
“ 巻立		“	9.100	5,700	51,870.000	セメントを含む
計					1,486,800.000	

岩洞第一発電所 (地下発電所)

発電所	工 種	単位	数 量	単 価	全 額	備 考
大平発電所 (地表発電所)	圧力隧道の掘削	$\ell = 4990 \text{ m}$				
	巻立	m^3	44.600	3200	142,720.000	作業坑を含む
	発電所、鉄管路の土砂掘削	"	14.000	6200	86,800.000	セメントを含む
	岩	"	40.100	300	12,030.000	
	コンクリート	"	21.200	750	15,900.000	
	鉄筋	t	8.000	4,900	39,200.000	セメントを含む
	型枠	m^2	150	80,000	12,000.000	材料加工費
	水圧鉄管	$\ell = 1575 \text{ m}$				
	水車発電機 水車 17600 kW $\times$ 2 発電機 18000 KVA $\times$ 2	t	1.565	200,000	313,000.000	
	灰 圧 器 18,000 KVA $\times$ 2				480,000.000	
	小 計				77,000.000	
	取水暗渠の土砂掘削	$\ell = 493 \text{ m}$				
	コンクリート	m^3	4.900	400	1,960.000	
	取水隧道的掘削 (無圧) の掘削	"	1.300	5,700	7,410.000	セメントを含む
中里発電所 (地表発電所)	巻立	"	8.300	2,900	24,070.000	作業坑を含む
	発電所鉄管路水増の土砂掘削	"	2.100	5,700	11,970.000	セメントを含む
	岩	"	10.200	300	3,060.000	
	コンクリート	"	6.200	750	4,650.000	
	鉄筋	"	3.000	4,900	14,700.000	セメントを含む
	型枠	t	112	80,000	8,960.000	材料加工費
	水圧鉄管	$\ell = 267 \text{ m}$				
	水車発電機 水車 3000 kW $\times$ 2 発電機 3100 KVA $\times$ 2	t	85	200,000	17,000.000	
	灰 圧 器 3100 KVA $\times$ 2				120,000.000	
	放水口の土砂掘削				20,000.000	
	コンクリート	m^3	2900	400	1,160.000	
	鉄筋	"	200	4,900	980.000	セメントを含む
	放水隧道の掘削	"	7900	2,900	22,910.000	作業坑を含む
	巻立	"	2,200	5,700	12,540.000	セメントを含む
	小 計				274,530.000	
計					1,461,250.000	

4. 施 工

i) 斜坑の掘削

本発電所工事には作業斜坑が多く300m以上の斜坑を4本掘削した。その中で代表的な発電所斜坑の掘削について述べる。この斜坑は工事終了後は、出入り斜坑として使用するので、断面は大きく $25m^2$ で傾斜角は $22^\circ 48'$ 斜長は536mである。坑口より130mの区間は、断面を二つに分けて全断面を掘削したが日平均掘進は1m掘削量は $25m^3$ だが、それから下は 5.3×3.0 の單坑掘削に切りかえた所、前者のそれは $2.5m$ 及び $3.8m^3$ で後者の方が工法としては優れている。又第1表に示した様に礫出しは全作業の $\frac{1}{2}$ を費しているが、このことについては研究の余地がある。

第1表 発電所斜坑掘進サイ7Ⅱ 24hr

作業区分	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	計(分)	割合(%)
削 孔	-		100			150			100		130	480	33.3
発 破	100					60						160	11.1
換 気		130					100					230	16.0
礫出準備			70					40				110	7.6
礫 出				400					360			760	52.8

ii) 発電所本屋の掘削

先づ天井アーチを掘削して巻き立てた後、3本の竖坑を掘削して、それを礫ビンにして全断面を掘り下げた。使用機械は斜坑と同じでTY-24#レックドリル4台、ロッカーショベル4台(斜坑では2台)と、礫出し用として75HP、50HPのインクラインの複線捲上げ機を主力として放水路を通り約416mの斜坑に50HPの単線捲上げ機を設置した作業坑を併用して日平均掘削量は $56m^3$ である。

iii) 湧 水

湧水は斜坑 100 m について $0.2 \text{ m}^3/\text{min}$ 位を想定して排水の設備をしたが、最大量で $0.2 \text{ m}^3/\text{min}$ であり、坑口から 300 m 以下は皆無に近い位である。

5. 圧力竖坑

圧力竖坑は要するに水圧の一部又は全部を岩盤にもたせる方式で、水圧鉄管に比べて鉄の重量が少なくて済む。圧力竖坑は大きく分けて次の二つになる。一つは第3図に示すように内部に鋼板を張り岩盤との間をコンクリートで填充し更にグラウトをする方式。他は第4図に示すように、先づ岩盤をコンクリートで巻き、

その内側にすき間をつくり、コンクリートの管体をつくり、その後捨て巻き部と管体のすき間へグラウトを注入して管体にプレストレスをかけて内圧に抵抗させる方式である。

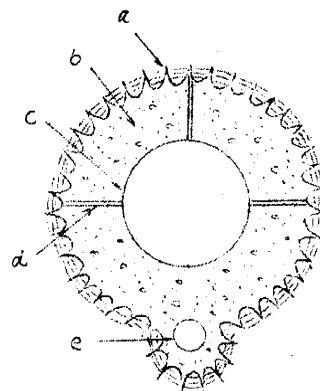
i) 竖坑縦断

竖坑のルートは取水口から放水路まで含めた発電所の最も経済的な位置に従い礫運搬やコンクリートの巻

立に都合が良いように水平角を定める。水平角は $35^\circ \sim 45^\circ$

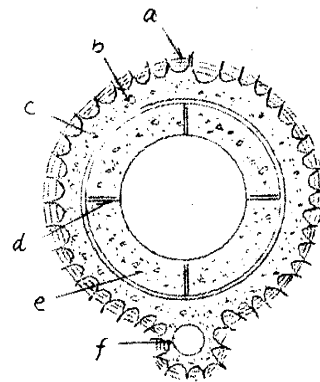
第 3 図

a 地 山
b 填充コンクリート
c 鋼板内張
d グラウト孔
e 排水管



第 4 図

a 地 山
b 捨てコンクリート
c 注入モルタル
d グラウト孔
e 管体部
f 排水管



の間が普通良いとされている。

ii) 竖坑の内径

竖坑の内径を決める式として次の式を示す。

$$P = 9.8 h \eta \sum Q_i T_i \quad \text{K.W.H} \quad \dots \dots \dots (1)$$

今 η を一定と仮定し、 h を摩擦損失水頭の2割増しとすると
年間損失電力料金は

$$A = 121.38 \eta r^2 L D_1^{-1/2} \sum Q_i^3 T_i = 10.517.923 (7 \eta r^2 L D_1^{-1/2} g_0^3) \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{但し} \quad \eta_2 = \frac{\sum Q_i^3 T_i}{8670 g_0^3}$$

$$\text{鋼板内張り費として} \quad C_p \mu \pi D_1 t L (1 + \varepsilon) \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{填充コンクリート費として} \quad \frac{D_1^2 - D_2^2}{4} \pi L C_c \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$\text{掘削費として} \quad \frac{D_1^2}{4} \pi L C_e \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{年間金利は} \quad B = \lambda \left\{ C_p \mu \pi D_1 t L (1 + \varepsilon) + \frac{D_1^2 - D_2^2}{4} \pi L C_c + \frac{D_1^2}{4} \pi L C_e \right\}$$

求める D_1 は $A + B$ を最少にする様に定める。

記号は次の通り。

Q : 通水量	T : Q の流れる時間
η : 水車発電機の合成効率	D_1 : 竖坑内径
L : 鉄管及び圧力竖坑の長さ	D_2 : 掘削孔径
C_p : 鉄管1t当りの建設費	h : 損失水頭
C_e : 掘削の単価	r : K.W.H の電気料金
n : 粗度係数	g_0 : 最大使用水量
t : 鉄管の厚さ	μ : 鉄の比重
C_c : コンクリートの単価	P : 年間損失電力量
λ : 年間の金利	

5. 結 論

少し断片的になつたが、ここで岩洞地下発電所に例をとつてみる。当初の計画と変つた点は、銅板内張斜坑が鉄管隧道斜坑に変わったこと、発電所斜坑や放水隧道の岩盤の良好な箇所はガナイト工を施工する予定が全区間コンクリートで巻き立てたことなどである。この変更の理由は岩盤が実際に悪かったからではなく（一部悪い所もあったが）大きな理由は完成後の安全についての考え方である。このように重大な変更をしたにもかかわらず本工事は予定の金額内で竣工した。従つて、圧力竖坑や岩盤の強度について安全性が確立されるなら、地下発電所に適した地点では一層経済的な開発が可能だと云える。