

最近のアメリカ向け 大容量ポンプ水車および発電電動機

Recent Large Capacity Pump-turbines and
Generator-motors to U. S. A.

高瀬 光雄* 岡田 昌康*
Mitsuo Takase Masayasu Okada
立石 貞夫* 玉造 貞一*
Sadao Tateishi Teiichi Tamatsukuri

要 旨

1969年にあいついで受注したアメリカ向け揚水発電機器、すなわちラディングトン、ブレンハイム・ギルボア、キャストイク納入のポンプ水車および発電電動機は、その容量、落差、規模の大きさにおいて注目されるべき画期的なものである。その大部分は、現在工場で製作中であり、一部はすでにアメリカへ輸送され据付中である。本稿はこれら揚水発電所の概要と揚水発電機器を紹介するものである。

1. 緒 言

近年、世界的にみて電力需要の伸びはめざましく、それに伴い大容量火力、原子力発電所の建設が盛んであり、これら新鋭発電所と既設の発電所を含めた電力系統全体の効率的運用のための揚水発電所の役割は非常に重要なものとなってきている。また揚水発電所建設の経済的な見地から、発電機器の高落差大容量化が急速に進められている。

アメリカにおいても、高落差大容量揚水発電所の建設、計画が急激に進められており、1969年に日立製作所があいついで受注したラディングトン、ブレンハイム・ギルボア、キャストイクの3発電所もその規模の大きさでは世界的なものである。特にラディングトン発電所のポンプ水車の単機容量 343 MW は、現在運転中の世界最大容量発電所である関西電力株式会社喜撰山発電所用機器の約 1.4 倍という画期的なものである。また、ブレンハイム・ギルボア、キャストイク両発電所は高落差大容量発電所として注目される。

これら3発電所の落差・容量が従来および現在計画されている揚水発電所の落差・容量に対して、どのような位置にあるかを示すため、図1に揚水発電所ポンプ水車の容量推移を示した。

また、これら3発電所の揚水発電機器の輸出先が、すべてアメリカであることは、今後の日立製作所および日本の重電機の対米輸出にとって非常に意義深いものである。図2はこれら3発電所を含む、対米輸出の日立ポンプ水車納入発電所概略位置を示したものである。

ここでは、これら3発電所の概要および発電機器の特徴について紹介する。

2. ラディングトン揚水発電所

2.1 発電所概要

ラディングトン揚水発電所は、コンシューマ電力会社およびデトロイトエジソン電力会社の二つの民間の電力会社が共同で、アメリカ・ミシガン州ラディングトン市南方約 6.5 km のミシガン湖岸に建設するものである。この発電所はミシガン湖を下部貯水池とし、付近の丘陵に巨大な人工湖を建設して上部貯水池とし、その間の約 100 m の落差を利用して揚水発電を行なうものである。図3および図4はラディングトン揚水発電所付近の平面および断面計画図を示したものである。また図5は、ミシガン電力系統におけるラディングトン揚水発電所の運転計画を示したものである。この発電所では、

* 日立製作所日立工場

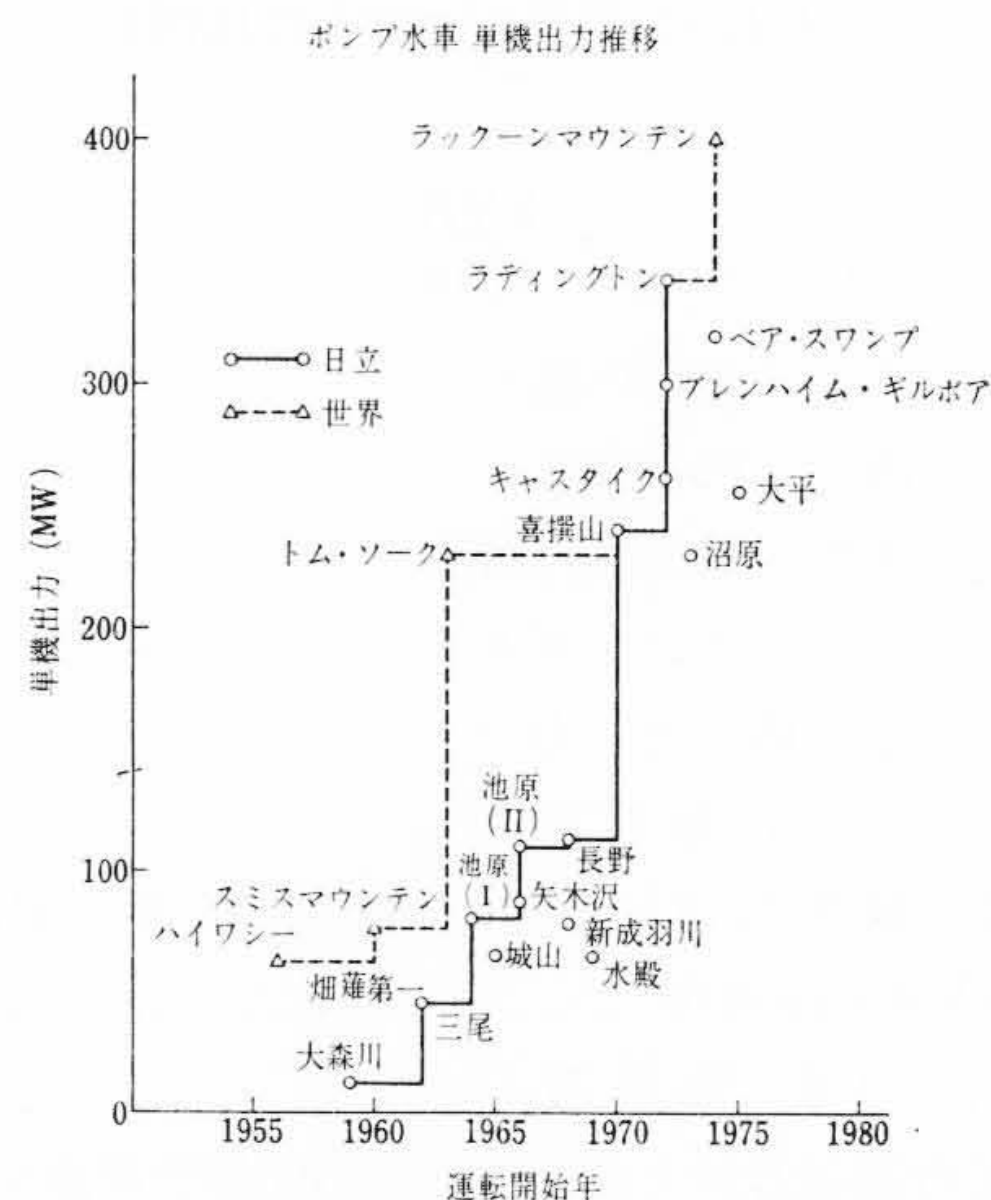


図1 ポンプ水車単機出力推移



図2 アメリカ輸出日立ポンプ水車納入発電所

コンデンサ運転が実施され、系統全体の運用効率を上げる役割を受持っている。

なお、このラディングトン発電所用発電機器の輸出に際しては、現地における据付作業もあわせて受注し、日立製作所の責任により実施することになっている。

ポンプ水車および発電電動機は、容量の記録品であると同時に、

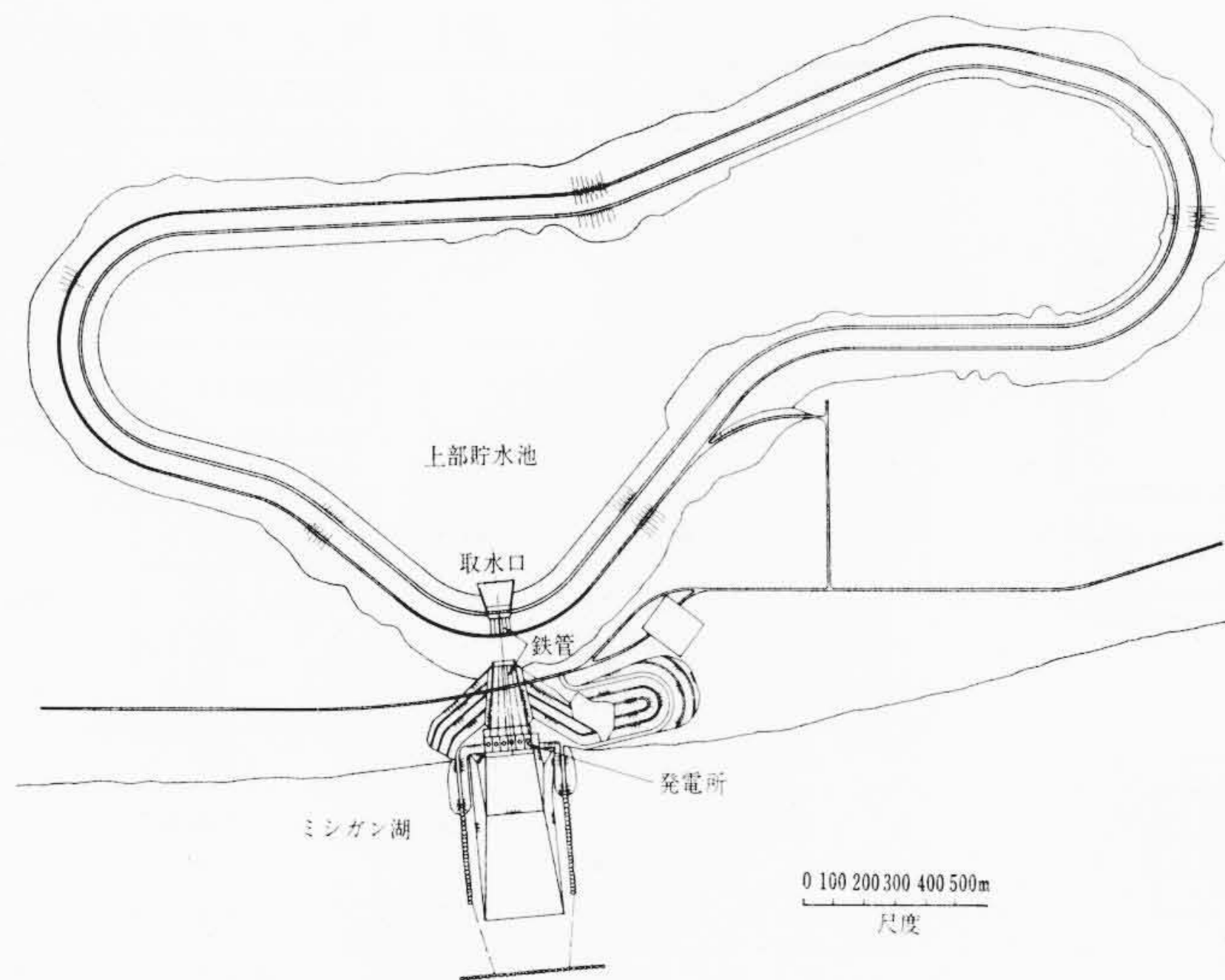


図3 ラディングトン発電所平面計画図

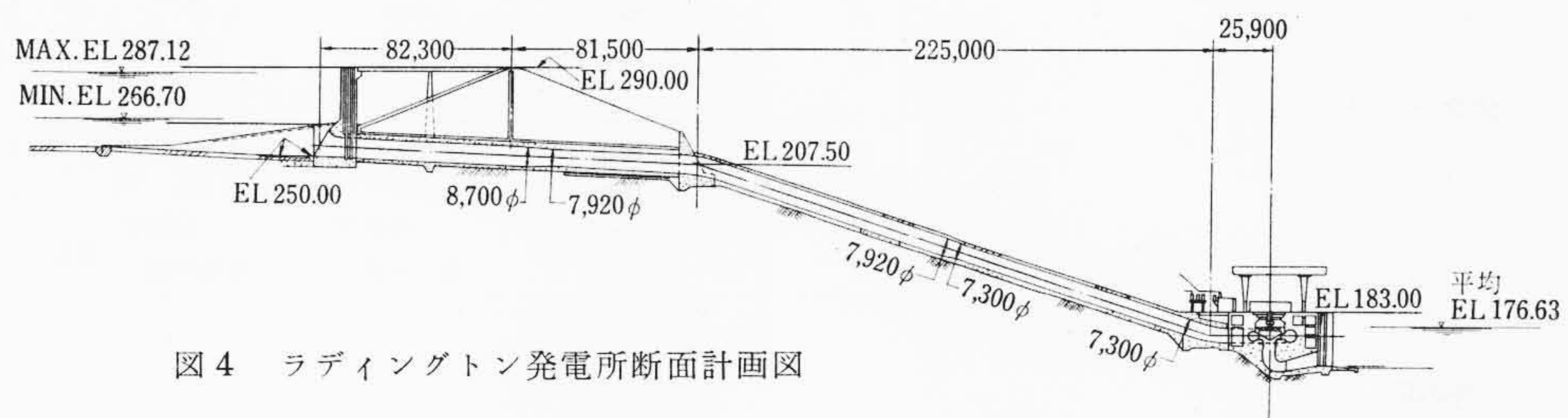


図4 ラディングトン発電所断面計画図

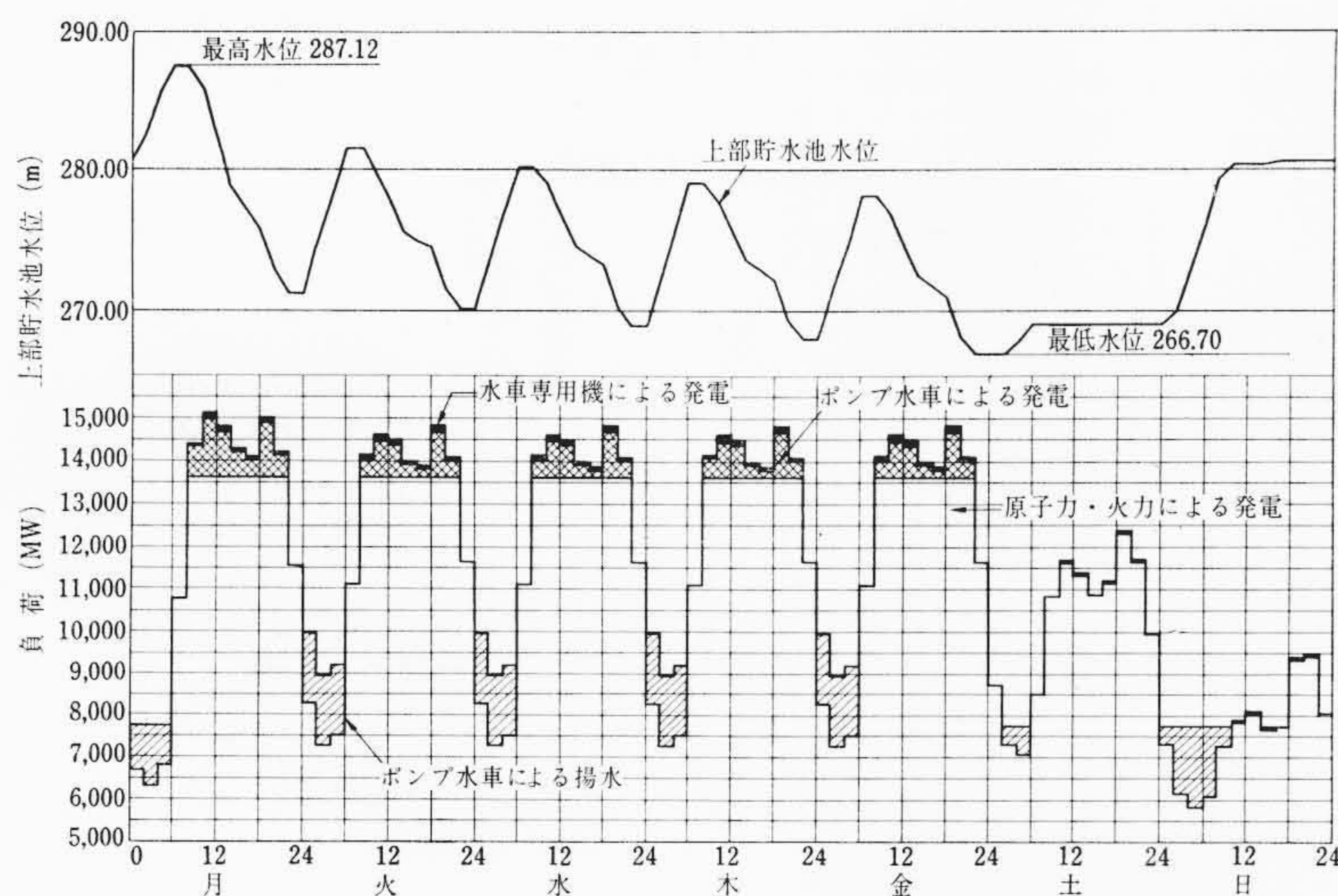
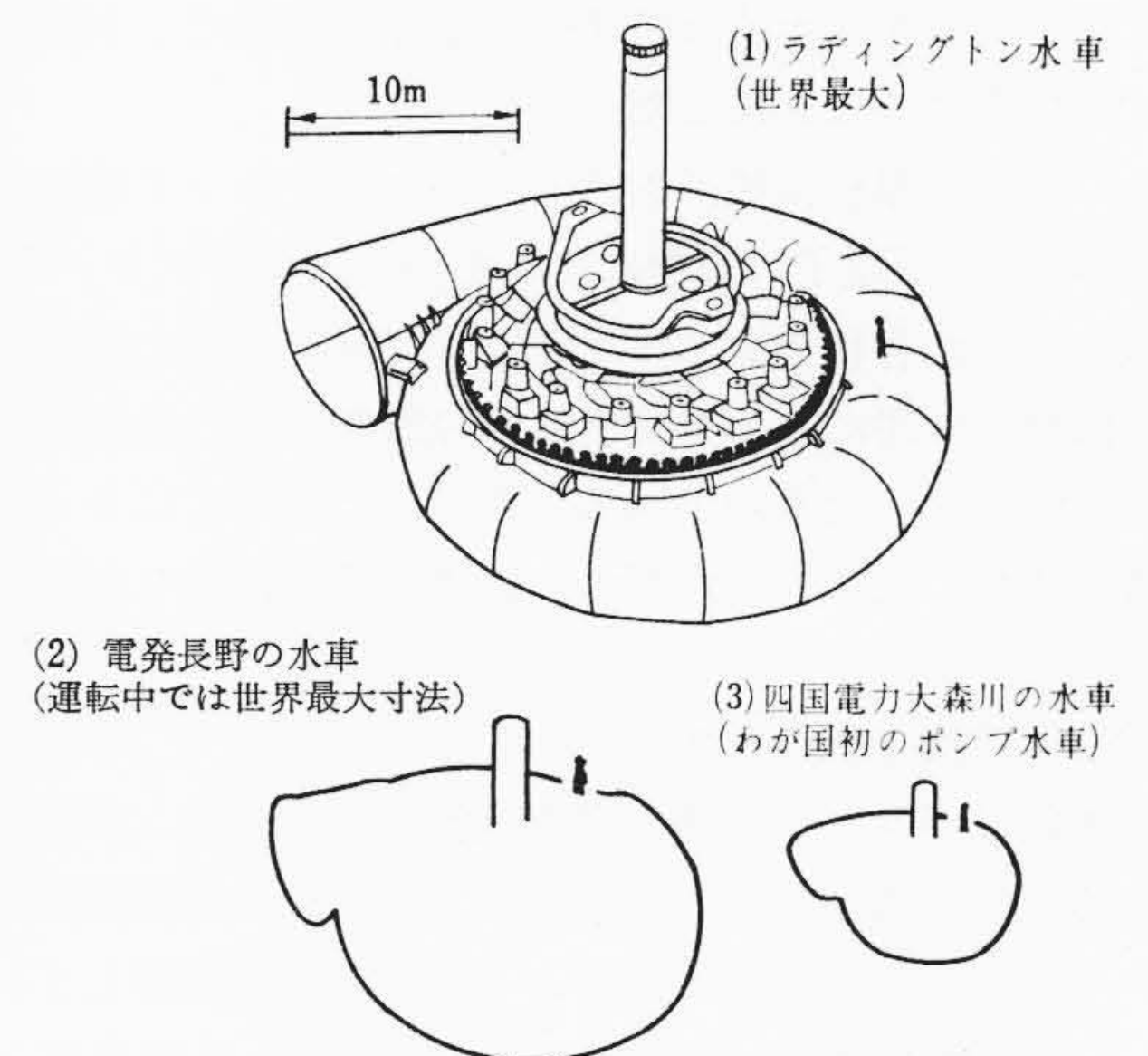
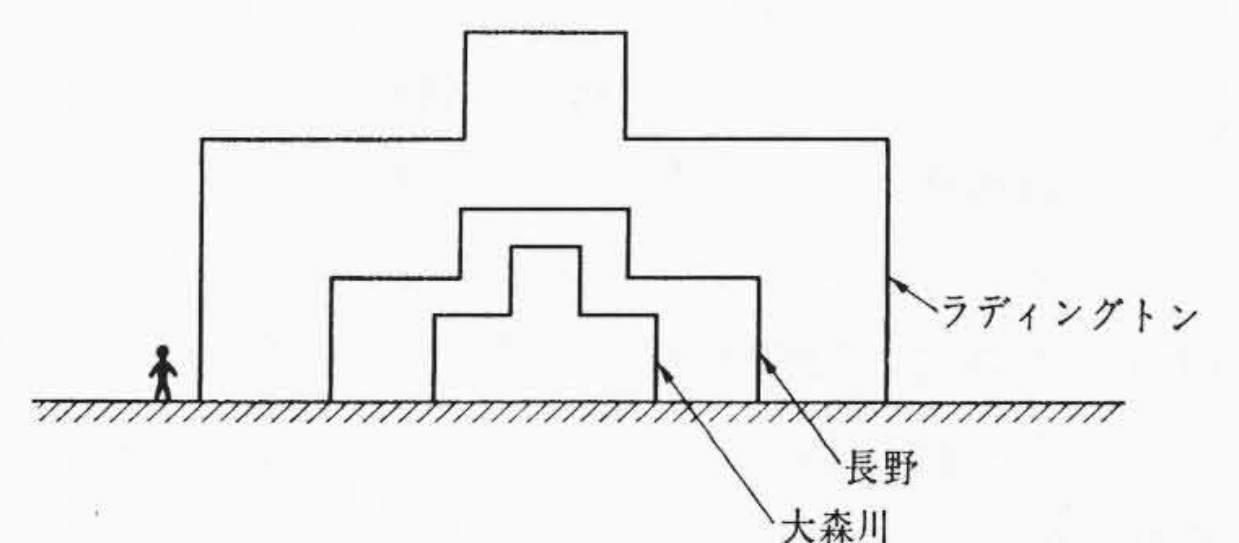


図5 ラディングトン発電所運転計画(週計画)



(イ) ポンプ水車の大きさ比較



(ロ) 発電電動機の大きさ比較

寸法的にも記録品である。図6にわが国最初のポンプ水車を設置した大森川発電所、および現在運転中では世界最大寸法である電源開発長野発電所のポンプ水車、発電電動機の大きさを本発電所のものと比較した。また図7はランナの大きさを比較した。

2.2 ポンプ水車

表1はラディングトンポンプ水車の仕様を、図8は水位仕様を示したものである。このポンプ水車は、落差に比べ出力が大きいいため高比速度ランナとなっているので、特にキャビテーション特性のすぐれたランナが必要である。

構造に関する特徴は次に示すとおりである。

図6 ポンプ水車および発電電動機の大きさ比較図

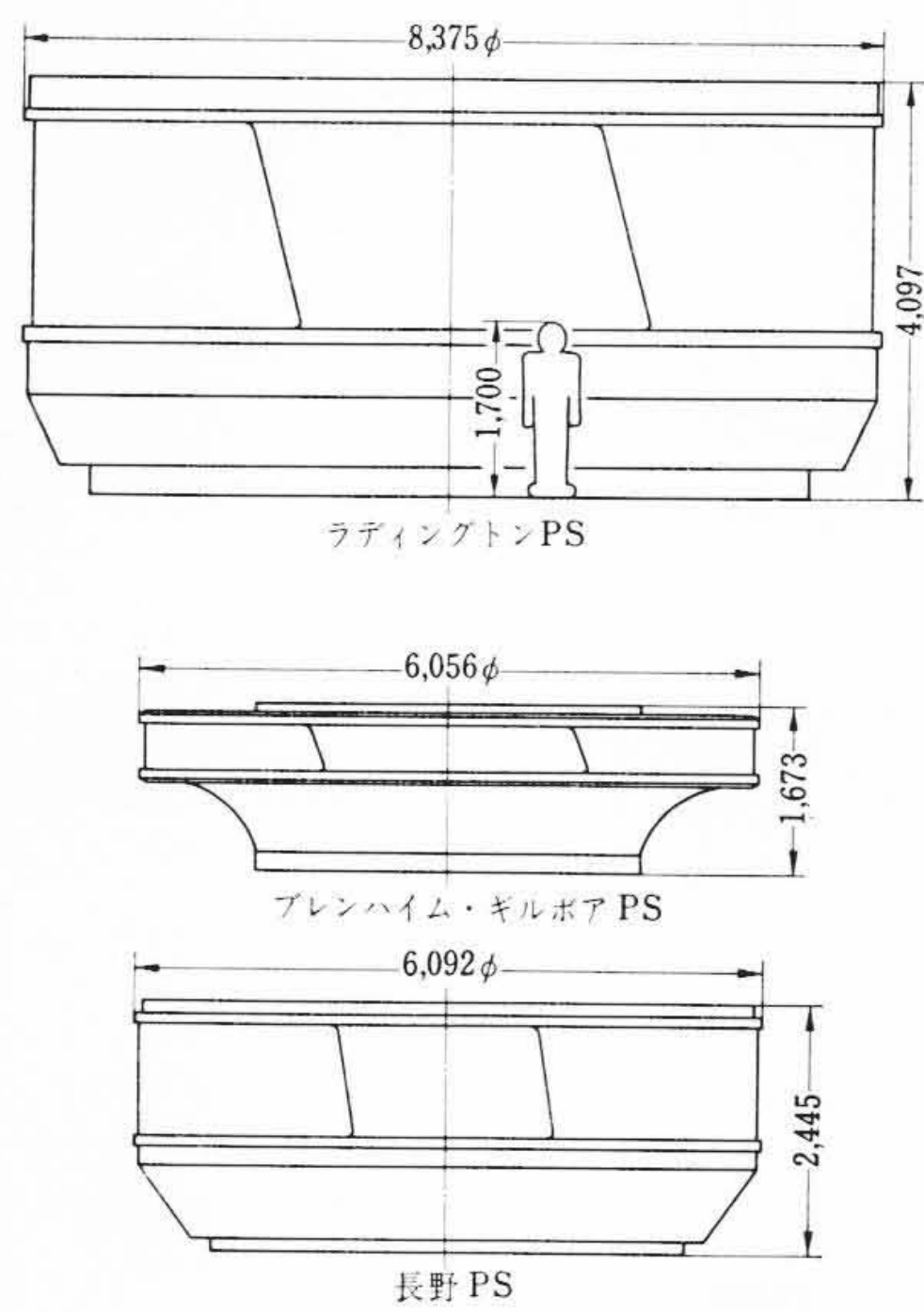


図7 ポンプ水車ランナ比較図

表1 ポンプ水車仕様比較表

発 電 所 名				LUDINGTON	BLENHEIM-GILBOA	CASTAIC	BEAR SWAMP	
顧 客 名				Consumers Power Company & Detroit Edison Company	PASNY (Power Authority of the State of New York)	DWP (Department of Water & Power of the City of Los Angeles)	NEP (New England Power Service Company)	
コ ン サ ル タ ン ト				EBASCO	UHL, HALL & RICH		Charles. T. Main	
台 数				6	4	6	2	
回 転 速 度				rpm	112.5	257	257	225
水車運転	最大出力			kW	343,000	300,000	261,000	320,000
	最高落差			m	107.7	338.3	327.7	228.6
	最低落差			m	87.2	305.4	274.3	201.2
	比 速 度			m-kW	190	97	94	143
ポンプ運転	最高揚程			m	113.6	357.3	381	240.8
	最低揚程			m	93	330.7	265.2	208.8
	最大揚水量			m ³ /s	314	81	91	125.4
寸法・構造ほか	ランナ	最大径分割数	mm	8,375	6,000	5,840	5,800	
			個	2	1	1		
			—	普通鋼, ステンレス肉盛溶接	普通鋼, ステンレス肉盛溶接	ステンレス溶接	普通鋼, ステンレス肉盛溶接	
	主軸	軸長構造	mm	2,000	1,220	1,170	1,200	
			mm	9,000	4,475	7,220	5,796	
			—	溶接 GM と 一体	S F	S F		
	ケーシング	入口最大径幅構造	mm	7,320	2,820	2,640	3,360	
			mm	22,200	13,800	13,400	—	
			—	60HT	60HT	60HT	60HT	
—			現地溶接	現地溶接	SR と 一体 フランジ	現地溶接		

(1) 溶接構造ランナの採用

寸法および重量的に一体鋳鋼の製作限界をはるかに越えるものである。また2分割、またはそれ以上の分割鋳造に対しても、鋳造技術、強度的な制約および費用の点で問題があり、種々検討を加えた結果、ランナクラウンをはじめ、シラウドリング、羽根フランジリブ類に至るまですべて単品を溶接により組立てる構造方式を採用することにした。

これは、厚板溶接におけるエレクトロスラグ溶接法の飛躍的な進歩、および電子計算機による曲面処理プログラム HAPT-DS をもとにした各種アプリケーションプログラムの開発ならびに NC 製図機の使用によるランナはねの製作などの総合技術を背景として可能となったものである。なお、ランナにはキャビテーション壊食防止のため、流水面の一部に不銹鋼板張りおよび肉盛を施している。

(2) 溶接主軸の採用

主軸はポンプ水車軸と発電機軸を共通にし、中間のフランジをなくした共通主軸で、鋳鋼製のフランジと厚板圧延鋼板の胴板のエレクトロスラグ溶接法による溶接構造を採用している。

(3) 60 kg/mm² 高抗張力鋼製の現地溶接構造ケーシングの採用

溶接技術の信頼性が確立され、工場および現地耐圧試験は実施されなかった。図9は工場組立中のケーシングである。

- (4) すべて材料には、JIS 規格材料を使用している。
- (5) 调速機は顧客指定により、日立製作所よりアメリカのウッドワード社に発注、製作された。
- (6) 入口弁は設置されず、水のしゃ断はすべてガイドベーンにより行なわれる。

また系統の位相調整のための、コンデンサ運転およびスピニングリザーブ運転も行なわれる。

本発電所主機の運転シーケンスの骨組は、図10に示すとおりである。

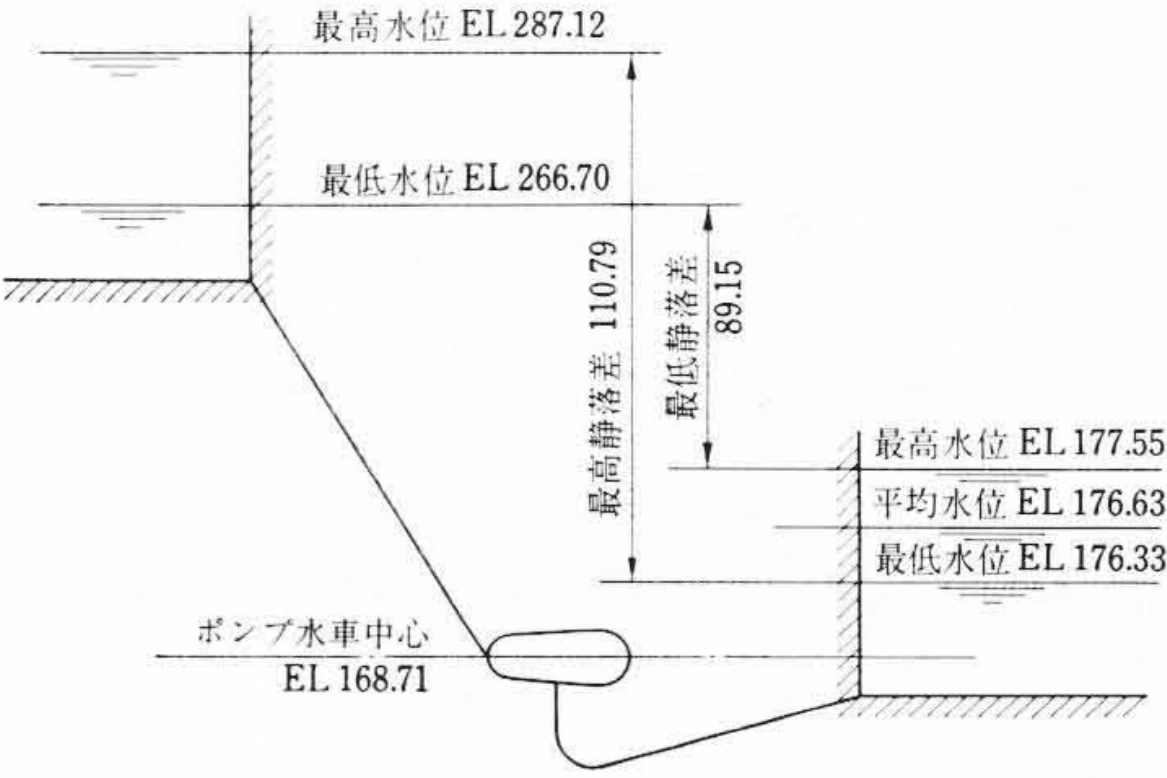


図8 ラディングトン発電所水位仕様

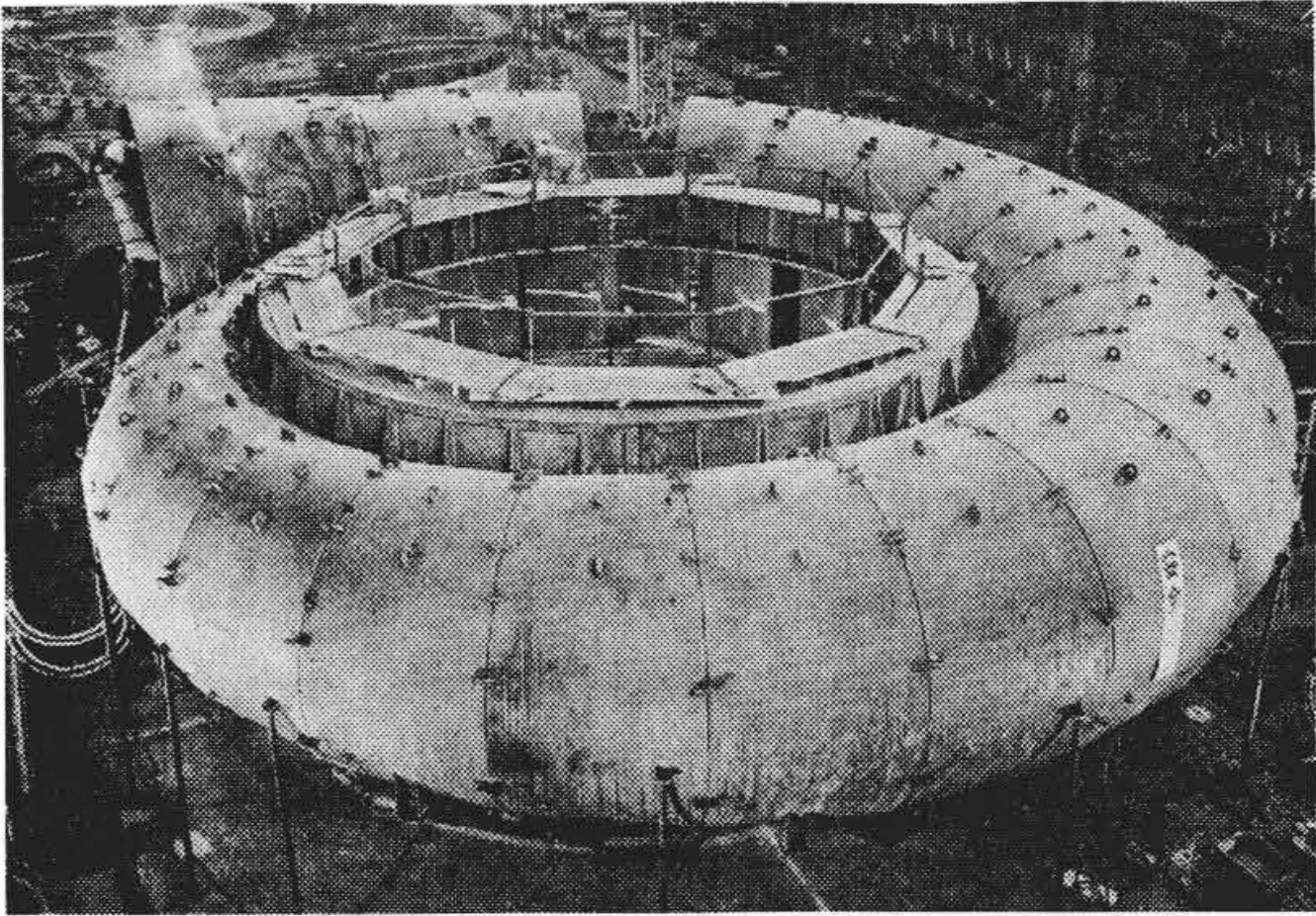


図9 ラディングトン発電所ケーシング (工場組立中)

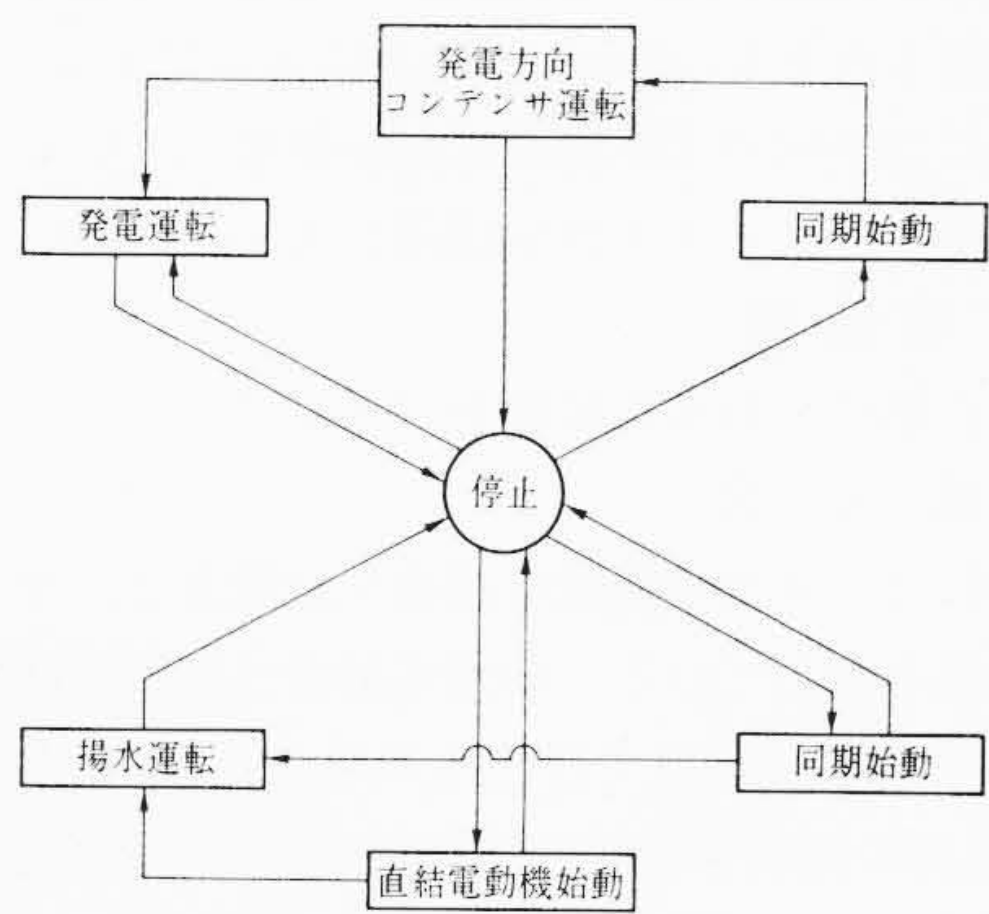


図 10 ラディングトン発電所運転シーケンス(案)

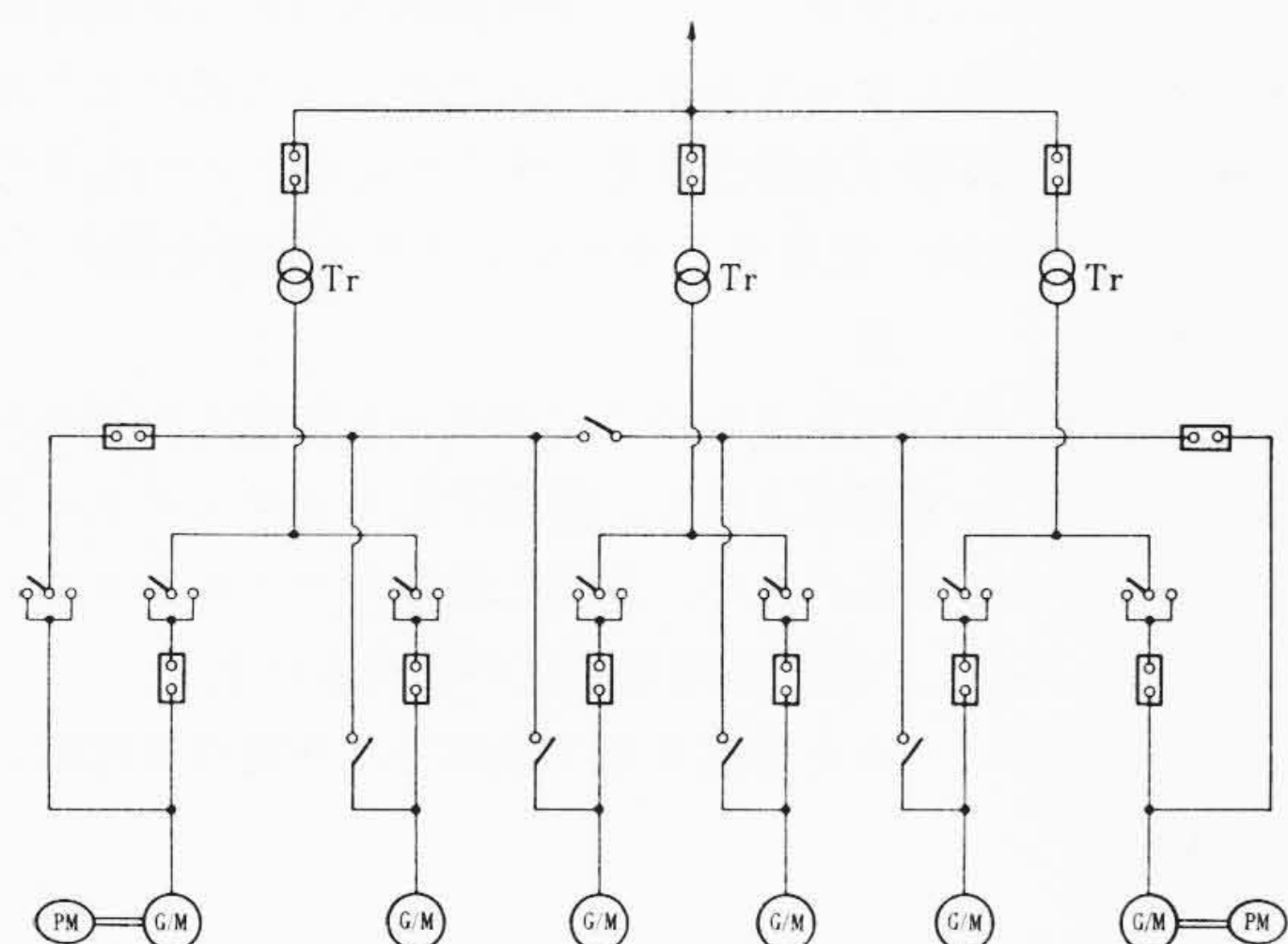


図 11 ラディングトン発電所の単線結線図

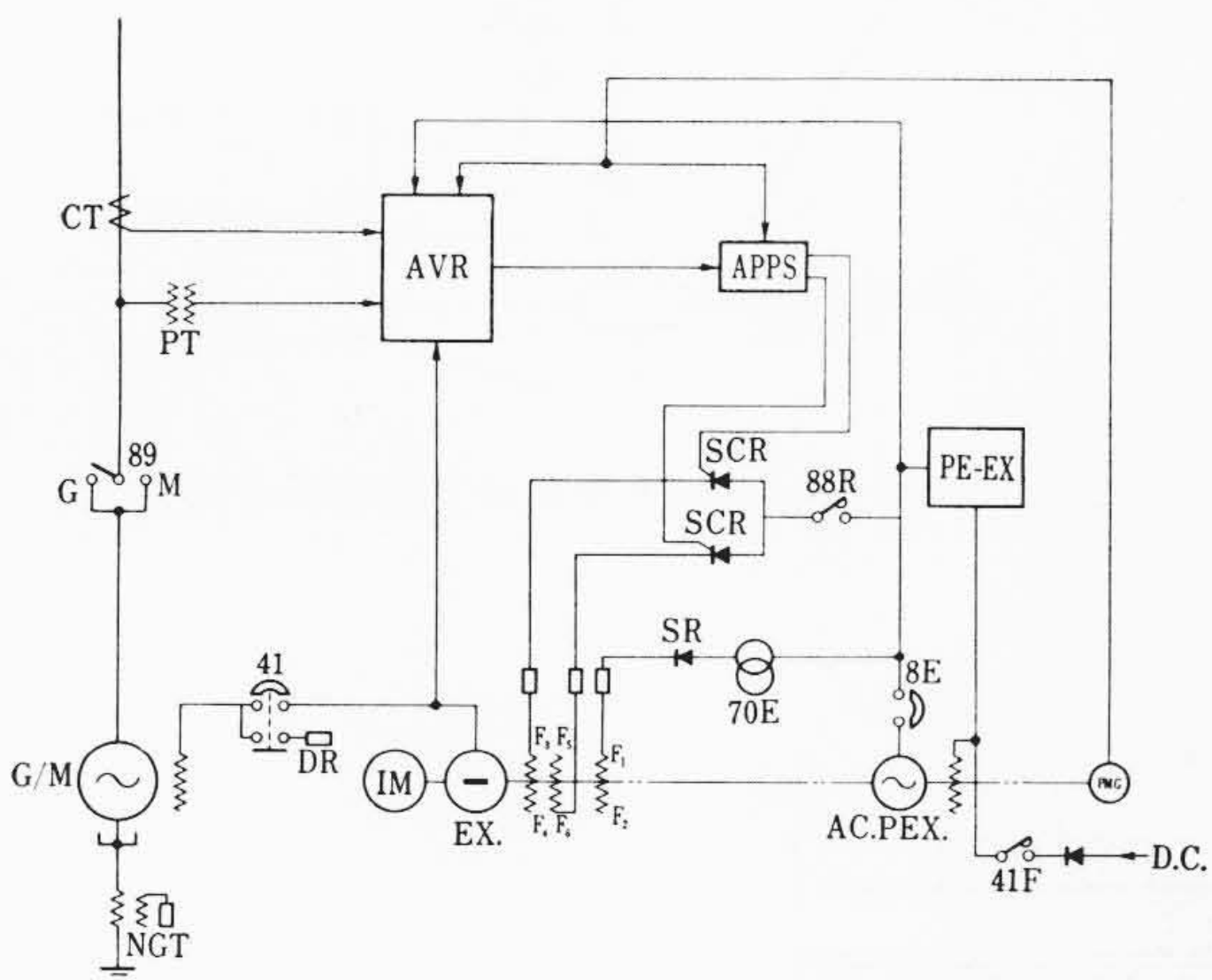


図 12 励磁装置接続図

2.3 発電電動機

仕様を表 2 に示す。おもな特徴を以下に述べる。

(1) 始動方式

本発電所は図 11 に示すような、6 台の発電電動機が設置され、しゃ断器を介して 3 台の主変圧器に接続されている。発電電動機はすべて共通の始動母線に接続されており、かつそれぞれ別置励磁装置を有しているの、いずれも同期始動可能である。さらに No. 1 および No. 6 号機は直結された始動電動機を有しており、他

表 2 発電電動機仕様比較表

発電所名		LUDINGTON	BLLENHEIM-GILBOA
台数		6	4
出力	温度上昇 60℃	325,000 kVA	278,000 kVA/365,000 HP
	温度上昇 80℃	388,000 kVA	320,000 kVA/420,000 HP
定格電圧		20,000 V	17,000 V
回転速度		112.5 rpm	257 rpm
周波数		60 Hz	60 Hz
力率		0.85	0.9/1.0
無拘束速度		174.5 rpm (155%)	388 rpm (151%)
単位慣性定数		7.5 kW-s/kVA	5.3 kW-s/kVA
推力軸受荷重		2,200 t	1,628 t
風道外径		20 m	14 m 角
固定子ベース上全高		10.7 m	11 m
励磁方式		別置直流励磁機	直結直流励磁機
始動方式		同期始動 (ただし 6 台中 2 台は直結電動機始動可能)	直結電動機始動

注：LUDINGTON は発電機、電動機とも同一定格である。

機を同期始動したのち自力で始動し、揚水運転が可能である。

(2) 励磁方式

励磁装置は図 12 に示すように、誘導電動機によって駆動される直流主励磁機をサイリスタ式 AVR で制御する方式である。サイリスタ式 AVR の電源は、直流主励磁機直結の自励交流副励磁機より与えられる。

(3) 諸定数

発電電動機の短絡比(SCR)、単位慣性定数(H)、過渡リアクタンス(x_{du}')、励磁系の即応度(NER)は、与えられた系統条件のもとにおける過渡安定度計算を行ない、安定度が保持される最も経済的な値について検討した結果、 $SCR \geq 1.3$ 、 $H \geq 7.5 \text{ MW-s/MVA}$ 、 $x_{du}' \leq 25\%$ (325 MVA ベース)、 $NER \geq 2$ と決定された。

(4) ロータの構造

ロータスパイダは、8 本のアームと 1 個のスパイダボスから構成されており、スパイダボスは、スラストカラーと一体溶接構造である。スパイダアームは、箱形のスキンストレス構造で、軽量化と風損の低減が図られている。シャフトは、ポンプ水車と一体の鋼板溶接製で、スパイダボスとシャフトは、特殊な結合ピンで結合される。

ロータリムには高張力鋼板を使用し、通風のためのダクトを有している。ロータリムはピット内で積まれるので、完全なロータをつり上げる必要がない。そのためロータ重量約 1,000 t に対し、クレーン容量は 326 t になっている。

本機の通風は、通風モデルにより検討を行ない、ロータスパイダの構造に通風に合理的なものとするとともに、ロータに通常取り付けられるファンを省略し、構造の簡素化と通風損の軽減を図っている。

(5) スラスト軸受

スラスト軸受は、荷重 2,200 t の高荷重軸受で 20 個のパッドからなっている。支持方式は、各パッドの荷重バランスの良いピボットスプリングを用いるとともに、レベル調整が容易にできるようにピボットスプリングの下に調整ボルトを設けている。

冷却はセルフポンプ方式である。

(6) トップカバー

風道上部が屋外に露出している半屋外形であり、トップカバーは雨に対するシール、積雪による荷重に対する強度、日射による伸熱びなどに対しじゅうぶん耐える構造のものである。

3. ブレンハイム・ギルボア揚水発電所

3.1 発電所概要

ブレンハイム・ギルボア揚水発電所は、ニューヨーク州電力局が、ニューヨーク市北方約 160 km のハドソン川上流のスコハリー溪谷にダムを建設して下池とし、付近の山頂に上部貯水池を建設し、その間の約 350 m の落差を利用して揚水発電を行なうものである。図 13 は発電所付近の平面および断面計画図を示したものである。

図 14 は発電所計画図である。

3.2 ポンプ水車

表 1 はブレンハイム・ギルボアポンプ水車の仕様を、また図 15 は水位仕様である。

このポンプ水車の特徴は次のとおりである。

- (1) 高落差・大容量ポンプ水車であり、単機出力 300 MW は、現在計画されている揚水発電所も含め、世界最高級である。
- (2) ランナは普通鋳鋼一体鋳造であり、流水面の一部に不銹鋼肉盛を実施している。
- (3) ケーシングには、60 kg/mm² 高抗張力鋼を使用し、現地溶

接構造を採用した。耐圧試験は現地で実施される。

- (4) 全台数 4 台とも、ポニーモータによってポンプ起動される。
- (5) 材料にはすべて JIS 規格材料を使用している。
- (6) 入口弁にはロータリ弁を採用している。

3.3 発電電動機

仕様を表 2 に示す。おもな特徴を以下に述べる。

(1) 始動方式

本発電所には、4 台の発電電動機が設置され、すべて直結された始動電動機を有している。始動電動機は、22,000 HP, 6.9 kV, 24 極の巻線形誘導電動機で自己冷却形である。始動電動機の世界速度制御は、二次側に接続された液体抵抗器により行なわれ、液体抵抗器に発生する熱は、付属の冷却器により即時除去する方式である。

(2) スラスト軸受

スラスト軸受は荷重 1,628 t、周速 32 m/s にも及ぶため、荷重バランスのよいピボットスプリング支持、半径方向の荷重変形の少ない半径方向二点支持、パッド間冷油送入方式など高速高荷重軸受に適した構造となっており、セルフポンプ方式により油槽外に設置された冷却器で冷却される。ベアリングランナは、2 分割構造で、始動、停止時に使用するオイルリフター装置を備えている。

(3) 風道

発電電動機の風道は正方形のコンクリート側壁と、パネル式の上カバーとによって構成される。固定子わくとコンクリート側壁との間のスペースが広いので、ここに前述のオイルリフターをはじめ、HTD セット、中性点接地装置が収納される。

励磁機の外被はパネルを組合せて構成し、外観はほぼ直方体となっている。

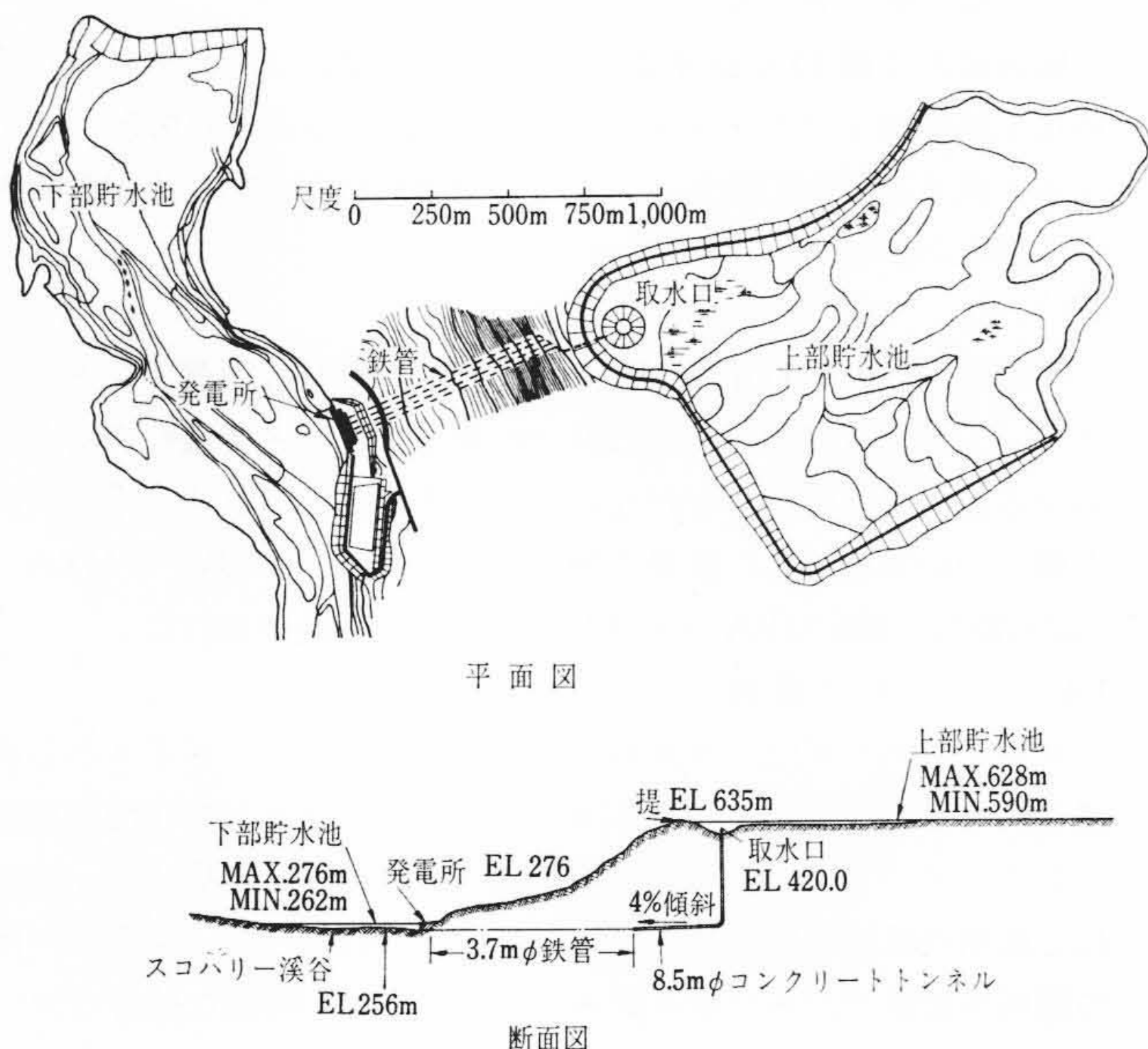


図 13 ブレンハイム・ギルボア発電所付近計画図

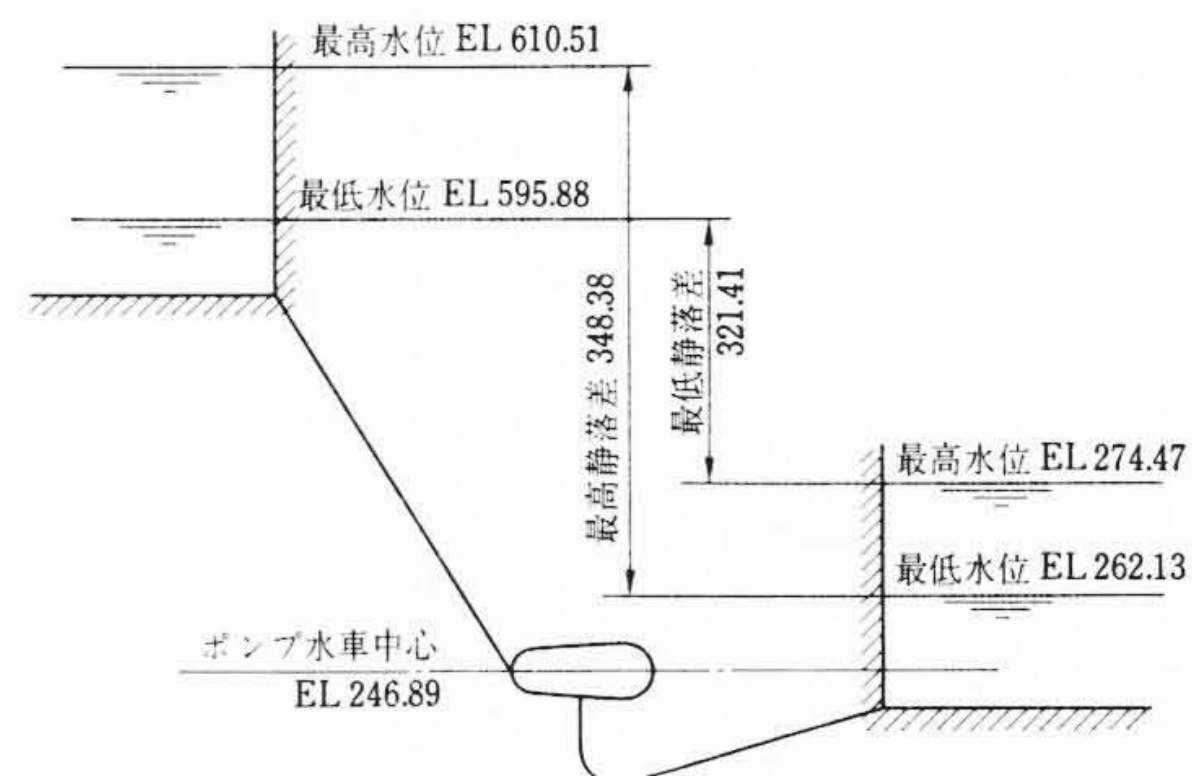


図 15 ブレンハイム・ギルボア発電所水位仕様

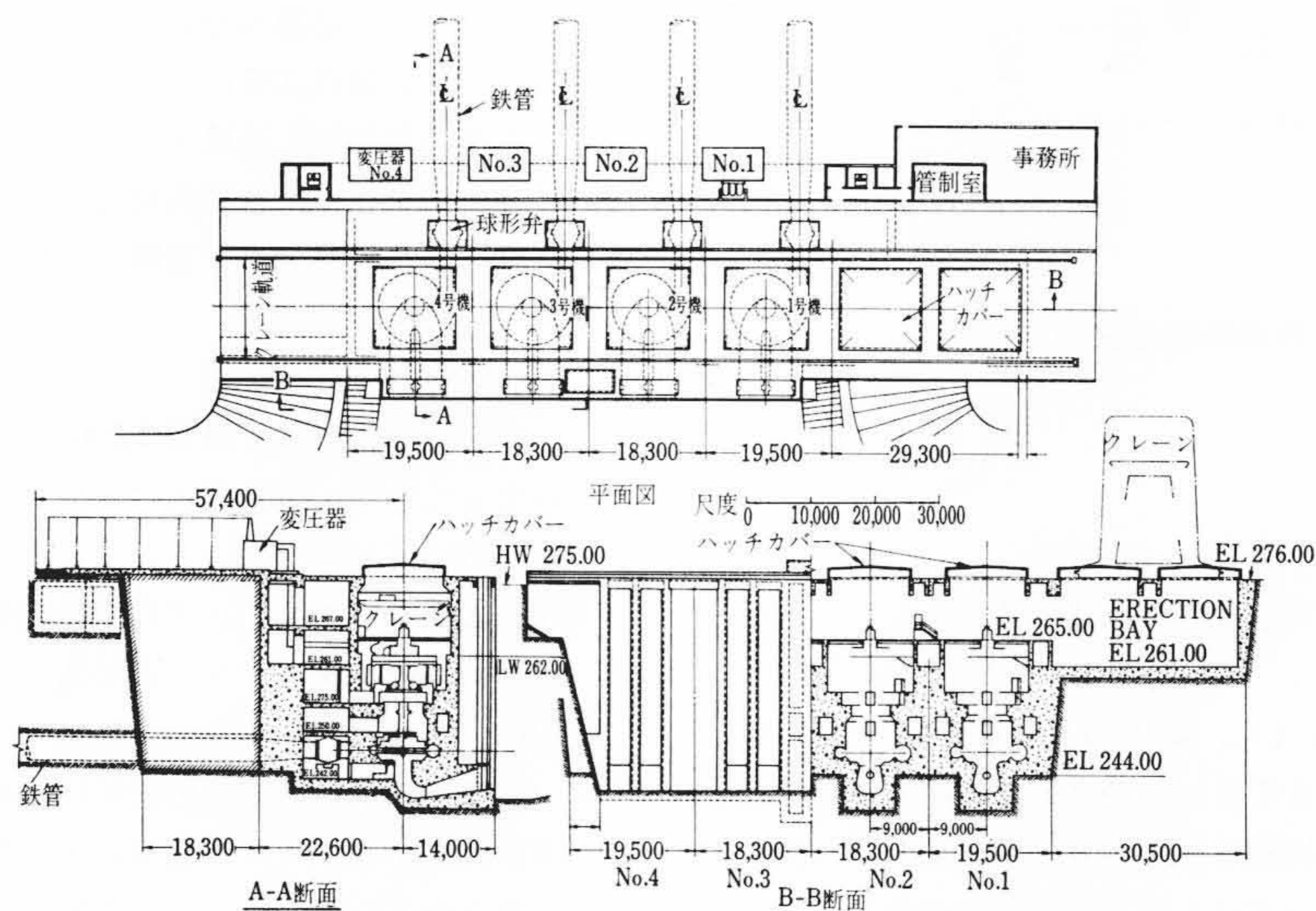


図 14 ブレンハイム・ギルボア発電所計画図

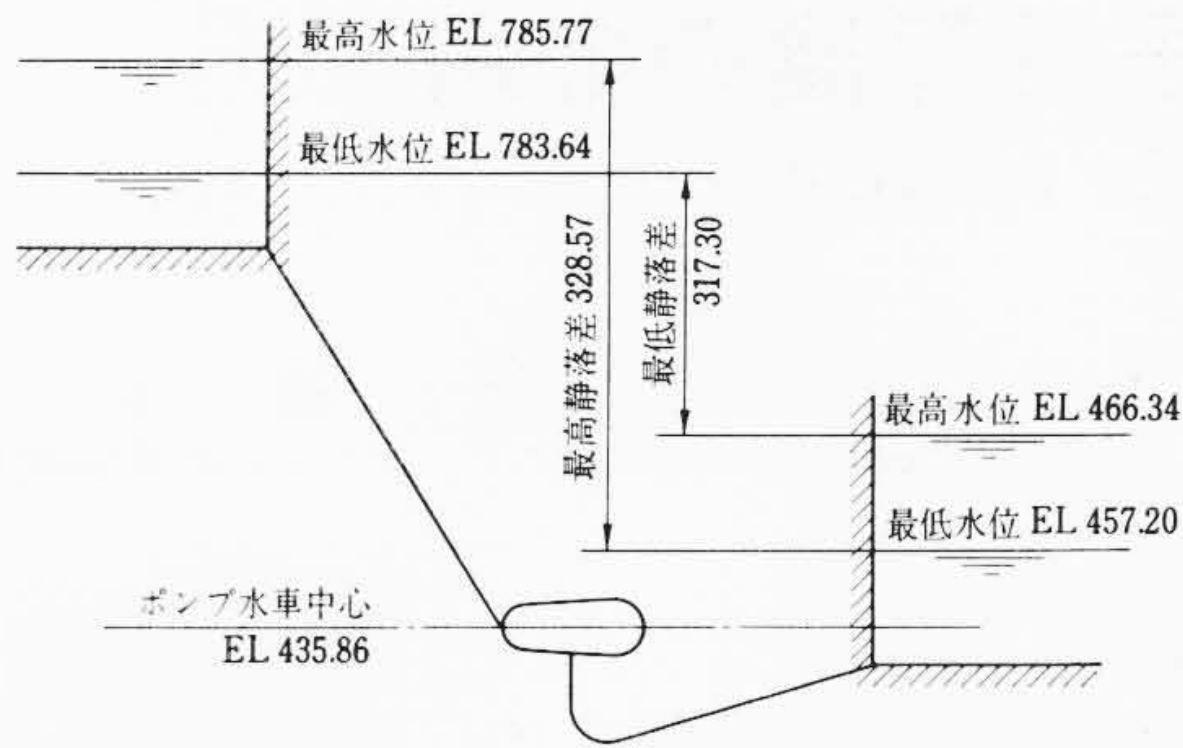


図 16 キヤスタイク発電所水位仕様

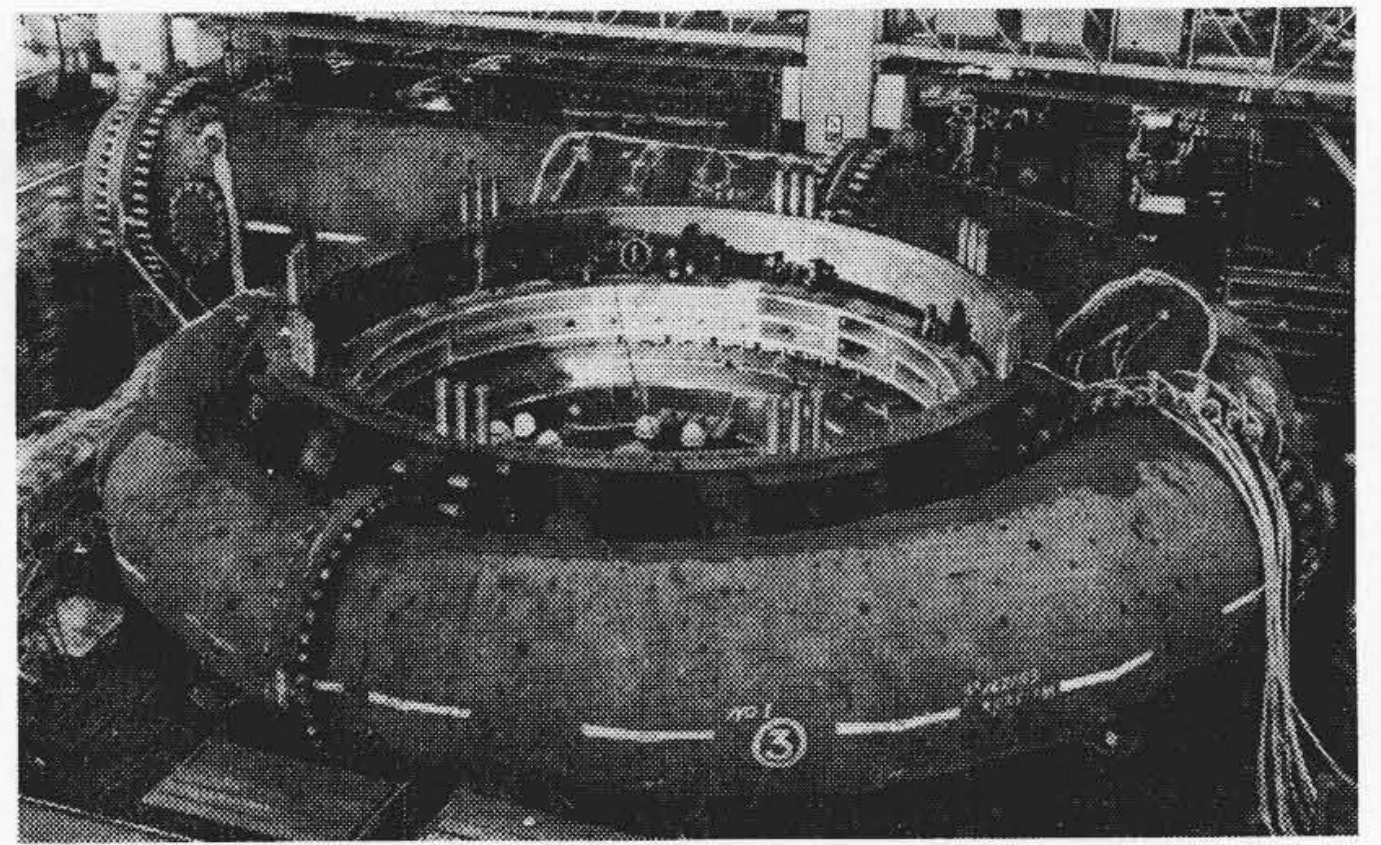


図 17 キヤスタイク発電所ケーシング（工場耐圧試験中）

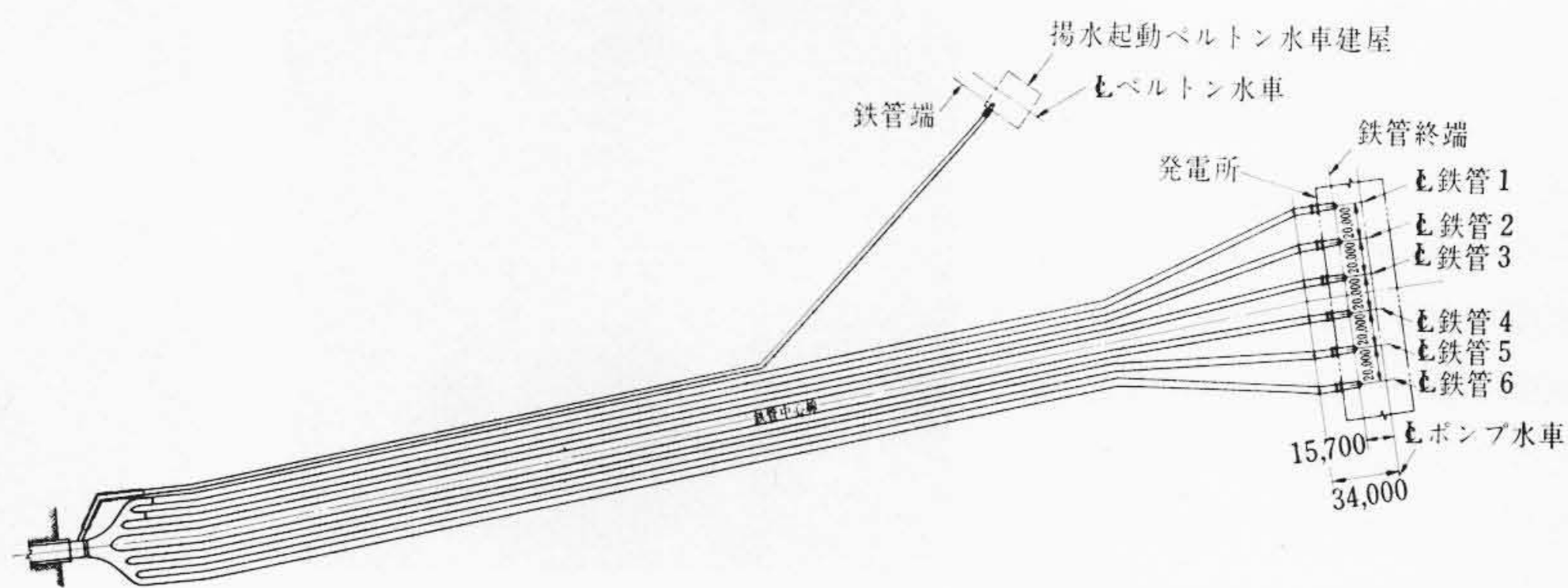


図 18 キヤスタイク発電所鉄管平面計画図

4. キヤスタイク揚水発電所

4.1 発電所概要

キヤスタイク揚水発電所は、ロスアンゼルス市北西約 70 km の地点に、サンタクレラ川水力開発の一環としてロスアンゼルス市水利電力局が建設するものである。上池として既設のピラミッド貯水池を使用し、新たに建設したキヤスタイク貯水池を下池とし、その間の落差約 350 m を利用して、単機出力 261 MW ポンプ水車 6 台により合計出力 1,566 MW の大容量揚水発電を行なうものである。

4.2 ポンプ水車

表 1 はキヤスタイクポンプ水車の仕様を、図 16 は水位仕様を示したものである。

このポンプ水車の特徴は次のとおりである。

- (1) 仕様はほぼブレンハイム・ギルボアポンプ水車と同じであるが、特に異なるところは、比較的落差変動範囲が大きいことである。また運転計画上水車効率を重点としている。
- (2) ランナは、高 Ni 不銹鋼による一体鋳造構造を採用している。
- (3) ケーシングは、60 kg/mm² 高抗張力鋼製で、現地フラン

ジ接続方式である。顧客指定により、700 m の水圧力で工場耐圧試験を実施している。図 17 は工場耐圧試験中のケーシングである。

- (4) ポンプ起動方式としては、6 台のポンプ水車のほかに、小容量のペルトン水車 1 台を付設している。このペルトン水車により、各ポンプ水車を低周波同期起動する方式をとっている。
- (5) 上部貯水池までの距離が非常に長く、また鉄管長さも約 1 km 以上となる。さらに図 18 に示すように 1 本の圧力トンネルより小ペルトン水車用の鉄管を含め、7 本の鉄管を分岐させる構造が採用されている。

5. 結 言

ラディングトン、ブレンハイム・ギルボア、キヤスタイク揚水発電所の概要と、そこに納入するポンプ水車および発電電動機の特徴を述べた。これら 3 発電所はその規模が大きく、設計計画上考慮された点も多い。本文がわが国の揚水発電所の計画に少しでも役立てば幸いである。