II—38　水道施設の水力発電について

札幌市水道局　正会員　岡　本　成　之
正会員　平　賀　岑　吾
佐々木　春　代

1．はじめに

札幌市水道局では、昭和54年度から藻岩浄水場の改修に着手し、電気設備、ポンプ設備、薬注設備、計装設備等の更新を図ったところであるが、その一環として昭和12年創設以来の施設である藻岩取水場並びに導水管路の改修を昭和57年度に実施した。

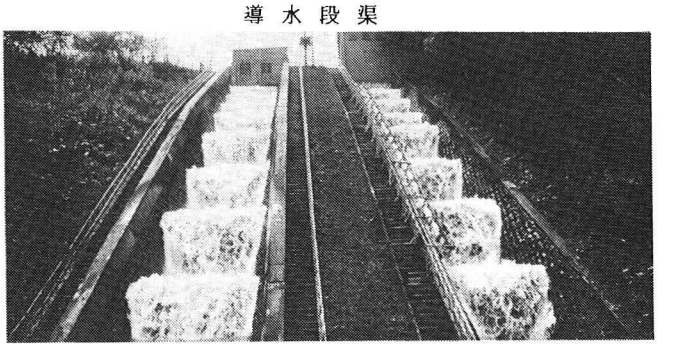
その結果、従来は導水圧を破圧するために開放していた段渠部分をペンストックに替えて直結したことから、大きな残存水圧が生じたため、これを回収し有効利用すべく藻岩浄水場構内に水力発電所を設置し、昭和59年度から実運転を開始している。本稿では、導水管路の改修と発電計画の概要及び技術的検討点を中心に述べたい。

2．藻岩取水場の改修と発電計画

創設の藻岩第1浄水場(35,800 噸)は、原水を北海道電力藻岩発電所発電水槽から分水し、藻岩取水場に着水後、間知石張りコンクリート造10段の段渠を下り破圧池から導水管φ 700㎜で約3㎞を自然流下で導水するものであった。この藻岩取水場は、昭和33年の藻岩第2浄水場新設に伴い取水量を62,200噸に増加するために、段渠を更に1条増設し、導水管についてもφ 600㎜を1条増設した。これらの導水管路は、その大部分が標高40m前後の藻岩山麓沿いに布設されており、創設当時の管材質や継手では、藻岩取水場から浄水場までを直結した場合には耐圧的に問題があり、この水圧減少のために段渠が設けられたものと思われる。

しかし、藻岩原始林の中に人里離れて設けられたこの藻岩取水場における勤務は、労働環境として厳しく改善の必要があった。また、創設時に布設した導水管φ 700㎜は、普通鋳鉄管の鉛コーキングによる印ろう継手であったため、以前から漏水事故を何度も経験していた。このため、導水管φ 700㎜を現在の高耐圧ダクタイル鋳鉄管に布設替えし、あわせて

導水段渠



表—1　発電計画概要

1	名　　称	札幌市水道局藻岩浄水場水力発電所
2	位　　置	札幌市中央区伏見4丁目6番（電話 581—0335）
3	構　　造	RC構造、地下1階、地上2階、延床面積336.56㎡
4	出　　力	330 KW
5	周 波 数	50Hz
6	使用水量	1.057 ㎥/sec
7	有効落差	45.12 m
8	理論出力	467 KW
9	取水設備	・取水河川名　石狩川水系豊平川
		・取水地点　札幌市南区白川1814番の227 地先豊平川左岸
		・取水方法　北電藻岩ダム構内取水口より取水し、導水路（延長約10.5㎞）を経て、北電藻岩発電所発電水槽まで導水した後分岐井から取水
10	取 水 口	・放水地点　札幌市中央区伏見4丁目6番
		・標準断面　円形、直径1.00m
		・延　　長　44.2m
		・材　　質　ダクタイル鋳鉄管
11	水圧管路	・材質及び延長　鋼管／φ900 ～518.0m、φ700 ～216.0m、φ600 ～2,310.0m
		ダクタイル鋳鉄管／φ900 ～500m、φ700 ～2,189.5m
12	水　　車	・種　　類　クロスフロー水車・出　力　370 KW・回転数　450 rpm
		・調 速 機　電動式
13	発 電 機	・種　　類　三相交流誘導発電機・容　量　400 KVA ・6,600V・3相
		・周 波 数　50Hz・回転数　1,015 rpm ・結線法　△結線
		・冷 却 法　自己通風式
14	制御方式	常時監視制御方式
15	発電方式	水道用水従属発電　水路式
16	運転開始	昭和59年 4月 2日
17	年間可能発生電力	2,840,000 KWH
18	設備利用率	98.2%
19	建 設 費	210,000 千円
20	藻岩浄水場使用電力量	1,350,000 KWH ／年

段渠部分を鋼管のペンストックに改修したもので、水路が直結されたことによって、取水量を藻岩浄水場から直接遠隔制御することが可能となり、併せて取水場の無人化を図ることができた。 藻岩浄水場における取水量制御は、電磁流量計φ 700㎜とダブルニードル弁φ 600㎜を浄水場管理室から計算機制御によって行うことを基本としたが、導水管路直結によって生じた残存水圧 45.12mを回収し有効利用するために、表－1に示す発電計画を策定した。発電計画の策定に当っては、以下の事項を基本とした。

（1）発電所の設置位置は藻岩浄水場構内とする。

（2）発生電力は、藻岩浄水場内で自家消費する。

（3）発電は、導水量による従属発電とし、発電時の水量制御は水車ガイドベーンで行う。

（4）発電は、常用の円山配電線受電時のみとし、予備線受電時又は北海道電力停電時には停止するものとし、単独運転は行わない。

（5）発電システムの付加によって、従来からの浄水場管理が複雑になったり、人員増をきたすことがないこと。

（6）発電操作によって生ずる水撃圧の上昇は、極力抑えること。

3．技術的検討点

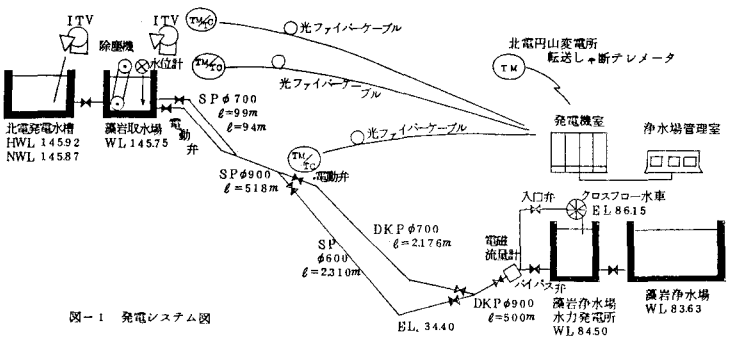
3－1導水管路の耐圧性と水撃圧の上昇について

導水管路改修では、総落差35.5mの段渠をφ 700㎜2条の鋼管ペンストックに替えて導水管に直結することから、従来よりも約 3.5㎏/㎠静水圧が上昇し、既設φ 700㎜普通鋳鉄管とφ 600㎜鋼管の各種弁類フランジ継手部が最大静水圧11.2㎏/㎠の高圧には耐えられないことから、φ 700㎜普通鋳鉄管は全面布設替えとした。

φ 600㎜鋼管は試掘調査の結果、管厚 6.0mm以上が確保されており塗覆装にも異常が認められず、良好な状態で埋設されていたことから、管体としては水圧の上昇に対して十分耐え得るものと判断した。しかし、各種弁類フランジ部分については、 7.5㎏/㎠仕様であったため、10～20㎏/㎠仕様に変更を要し、仕切弁4箇所，安全弁1箇所，空気弁8箇所，排泥弁2箇所，検査入孔5箇所を取替えた。

また、新たに布設したφ 700㎜ダクタイル鋳鉄管についても同仕様の仕切弁9箇所，空気弁10箇所，排泥弁2箇所を設置した。

改修の結果、導水管路の構成は、図－1のシステム図に示すように、水道用塗覆装鋼管とダクタイル鋳鉄管のφ 600㎜～φ 900㎜から成っており、分岐合流のある異種材質異口径の長距離複合管路となっている。



図－1 発電システム図

このため、水撃圧対策には十分な考慮を払い、特性曲線法に基ずく計算機利用の水撃圧シュミレーションをくり返し、水車ガイドベーン動作時間を 120秒，バイパス弁動作時間を約7分と極力長くとることにした。

また、通常時にはガイドベーンとバイパス弁の開閉動作が連動するシーケンスとし安全を期した。

管路の耐圧計算は、ダクタイル鋳鉄管については、

$$T = Tn + 1.5 < To$$

$$T1 = \frac{(Ps+Pd)\sqrt{(Ps+Pd)^2 + 4.2\ (0.108Wf + 0.076Wt) \cdot \frac{4}{3.5}\ S}}{\frac{4}{3.5}\ S} \cdot d$$

$$T2=\frac{(Ps+Pd)\sqrt{(Ps+Pd)^2+4.2\ (0.122Wf+0.011Wt)\cdot\dfrac{4}{3.5}S}}{\dfrac{4}{3.5}S}\cdot d$$

ここで、T：余裕圧 1.5mmを加えた設計管厚(mm)，To：実管厚(mm)，T1：管頂部設計管厚(mm)

T2：管底部設計管厚(mm)，Ps：静水圧（㎏/㎠），Pd：水撃圧（㎏/㎠），d；口径(mm)，

Wf：土破り土圧（㎏/㎠），Wt：トラック荷重土圧（㎏/㎠），S：ダクタイル鋳鉄抗張力(4,200㎏/㎠)

また、鋼管については、

$\sigma h + \sigma d < 1.35\sigma a$

ここで、σh：内圧による円周方向応力度（㎏/㎠），σd：外圧による曲げ応力度（㎏/㎠）

σ：鋼管許容応力度(1,100Kg／㎠)

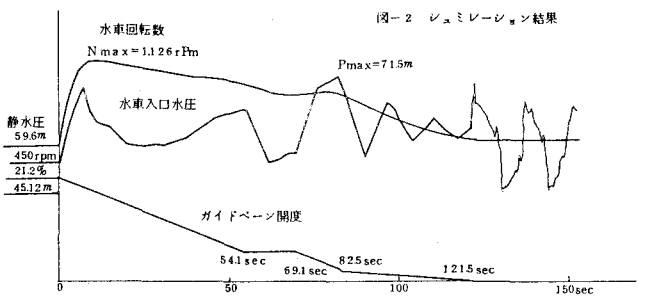
として、それぞれ求めた。鋼管で耐圧的に最も不利な地点は、鋼管部分のEL 34.40m地点であり、ここでのシュミレーションによる設計内圧は、12.13㎏/㎠、うち水撃圧は 1.0㎏/㎠であり、許容設計内圧は 12.73㎏/㎠、うち水撃圧1.59㎏/㎠と計算された。

他方、負荷しゃ断試験において、管路各点に自記録式水圧測定器を設置し数度にわたる水撃圧の上昇を測定したが、上記地点における最大内圧は11.9㎏/㎠、うち水撃圧は 0.7㎏/㎠であり、シュミレーション結果よりも水撃圧上昇が少ないことが判明し、より安全であることが確められた。

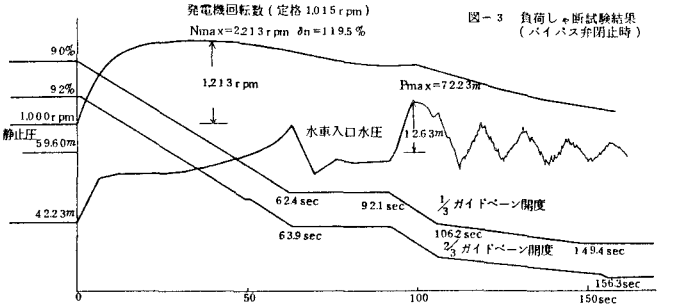
水車入口におけるシュミレーション結果ならびに負荷しゃ断試験結果を示すと図－２，３，４のようになる。

管路全線の安全性確認のためには、最大静水圧を連続して12時間以上かけて、各点での静水圧に変化が無いことを確かめられた。

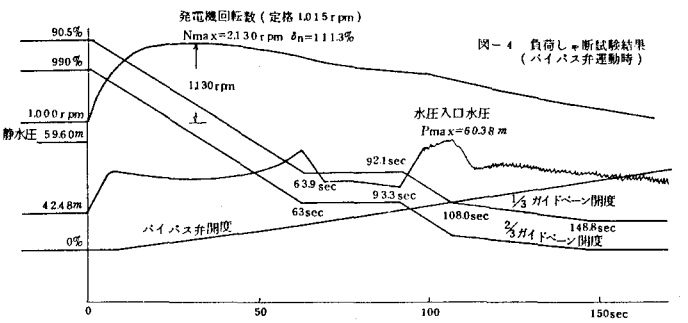
図－２　シュミレーション結果



図－３　負荷しゃ断試験結果（バイパス弁閉止時）



図－４　負荷しゃ断試験結果（バイパス弁運動時）



３－２発電設備について

発電設備の検討にあたっては、従来からの浄水場管理を複雑にしないように、特に配慮した。

水車の形式は、使用水量と有効落差から選定されるが、今回の発電条件である使用水量 1.057㎥/sec、有効落差 45.12mに適用可能な水車としてクロスフロー水車とフランシス水車について検討した。本市の場合は、特に枯葉による目詰りが懸念されることから、その影響を受けることが少ないと報告されており経済的にも優れたクロスフロー水車を採用した。水車の材質は、原水が河川表流水であることから、濁質粒子によるランナ摩耗を防ぐため、ステンレス鋼を採用した。

さらに、調速機については、単独運転を行わないことからD級とし、万一の油漏れ事故による水道原水汚染を防ぐため、電動サーボモータ方式とした。

発電機の形式は、同期と誘導に分類されるが、本市の場合は藻岩浄水場日平均負荷電力 154KWに対して、ろ過池洗浄時には最大負荷が 600KWにも上昇し、発電量 330KWでは過不足を生じるため、北海道電力一般配電線と接続し並列運転とし、余剰電力については北海道電力に売電することに北電側からの同意を得て決定した。商用電力との並列運転の場合、誘導発電機の方が構造もシンプルで保守管理が容易であり、価格も安く有利であることから、北海道電力と、①発電機並列時の突入電流による電圧降下、②発電機運転に伴うピーク時の一般配電線電圧分布について技術的折衝をすすめ、同じく同意を得て誘導発電機を採用した。発電設備の運転は同一構内の浄水場管理室から制御されるが、発電に係る管理業務を極力少なくするために自動化し、保護装置については「常時監視をしない発電所の施設」を満足する設備とした。

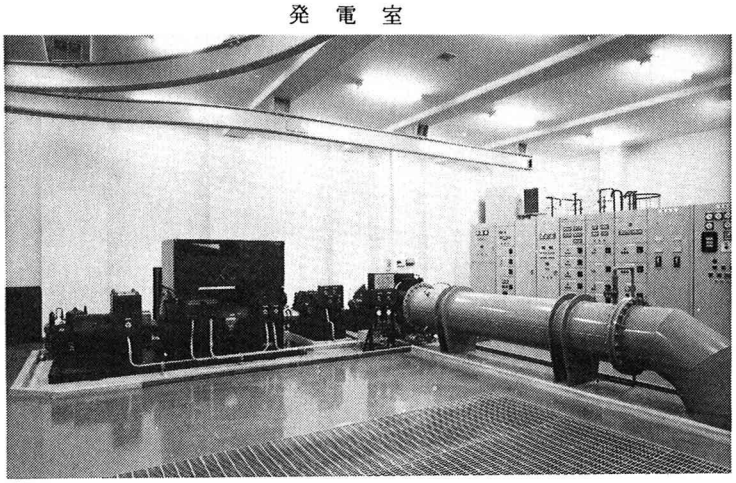
さらに、北海道電力との並列運転に伴う条件の１つに、誘導発電機の無効電力 100%補償のコンデンサ設置を求められていた。 100%補償を行った場合は、負荷しゃ断時に回転速度の上昇とともに自己励磁現象によって発電機端子電圧が上昇し、発電機と水車の固有GD^2(76Kgm²) だけでは保護継電器動作時で定格電圧の２倍を超えることから、保護継電器動作時も電圧上昇を、機器に悪影響を及ぼさない範囲に抑えるためフライホイール(600Kgm²) を設置した。

３－３水車バイパス弁について

発電停止時にあっても浄水場原水の取水は継続する必要がある。このため水車バイパス弁は、発電停止時の水量調整弁として機能させるため、操作性，耐久性，確実性等を検討し、ダブル型としては我国初めてのφ 600㎜ニードル弁を採用した。

本市では、水量調整弁の採用は初期の段階ではスルース弁が主体であったが、近年の施設ではほとんどがバタフライ弁に移行している。しかし、昭和46年の白川浄水場新設に伴う約11Kmm離れた平岸配水池への送水量調整や、平岸配水池から西岡配水調整池への流入量調整は、従来にない水量，水圧ともに大幅に変動する系の制御が必要となり、キャビテーション，操作性，耐久性等の観点から本格的な調整弁の検討が必要となり、スリーブ弁，ロート弁（ともにφ1000㎜）が採用されるようになった。このような経緯を踏まえ、本計画においても、水車バイパス弁兼取水量調整弁として、バタフライ弁，ロート弁，スリーブ弁，ジェットフローゲート，ニードル弁等について種々検討した結果、①弁１次側で約49ｍ、２次側で約3.5mと水圧差が大きいため、耐キャビテーションに優れている。②河川表流水を原水としており、砂，枯葉等異物の混入があるため、目詰りしない構造である。③既設施設内に設置することから設置スペースが小さい。④１台の弁で制御可能である。⑤堅牢で耐久性がある。等の条件を満足するダブルニードル弁を選定した。

発　電　室



取水量の調整は、発電時には水車ガイドベーンで行い、発電停止時には水車ガイドベーンを全閉にし、水車バイパス弁によって行うものであり、すべて浄水場管理室のＣＲＴ画面から操作することとし、現場手動による任意操作も可能とした。

特に、長距離複合管路に対する水撃圧上昇を抑えるため、弁開閉時間を 0～100%開度で17分と可能な限り長くとったことから、実使用範囲の 6～28% では約７分となり、本弁単独操作時の水撃圧上昇はほとんど無視できる程度になっている。

３－４通信システムについて

無人化された取水場と浄水場間の通信のため、テレメータ・テレコントロール設備とＩＴＶ設備を設置し、本市水道局としては初めて光ファイバケーブルを採用した。

これらの通信システムの設計にあったては、管理室勤務者の監視判断業務が著しく煩雑とならぬよう留意し、特に発電設備の運転と密接な関係にあることから、情報の精度・信頼性が高く、安全性・保全性に優れたものを目指した。テレメータ・テレコントロール設備の仕様は、１対向の構成とし、取水場水位、電動弁開・閉、停止指令、全開・全閉及び一括故障の状態表示等の情報伝送には、時分割サイクリックデジタル方式、伝送速度 200ビット／秒の汎用タイプを使用した。

送受信器盤の設置場所は、取水場と水力発電所の他、導水管分岐箇所の合計３箇所とし、監視制御盤を並列として、情報伝送系の保守点検時には切換スイッチで現場操作可能とした。

従来からテレメータ通信には、公社線を利用しており、自営線の場合でも同軸ケーブルを用いて十分な機能を確保してきている。しかし、無人化された取水場監視のためには、単なるデータ監視に留まらずＩＴＶ設備による鮮明なカラー動画像を浄水場管理室で監視する必要がある。そこで、取水場から浄水場までの約 3.5Kmを無中継伝送可能な光ファイバケーブルの採用に踏み切ったものであり、光ファイバケーブルの優れた特性から、信頼性の高い安全な通信システムを確保することができた。

光ファイバの仕様は、コア径50μm，クラッド径 125μmのＧＩ型マルチモードファイバで、伝送損失3dB/Km以下、伝送帯域100Hz.Km以上となっており、伝送波長は0.85μmである。またケーブルは、耐湿性に優れたＬＡＰシース被覆の４芯のものを取水場から導水管分岐箇所の屋外送受信器盤まで使用し、それ以降浄水場までは、導水管路電動弁の開閉操作やポンプ圧送系の山鼻取水場ＩＴＶ設備、テレメータ・テレコントロール設備のために伝送量が増えることから10芯とした。

光ファイバケーブルは、北電柱に共架する方法と地下埋設する方法があるが、安全性と経済性の面から地下埋設とした。鞘管の埋設ルートは、導水管ルートと競合しスペース的に極めて困難であることと、布設替えによって導水管としての使命を終えた既設導水管φ 700㎜の有効再利用を図るため、これを鞘管として使用した。ケーブル通線にあたっては、まず小型索引車をラジコン操作してリード線の通線を行い、次にケーブルを約 200ｍごとに設けたマンホールに人員を配置し補助にあたりながら通線した。

今回の光ファイバケーブルの採用により、ＩＴＶ画像が極めて鮮明となり、監視制御の精度，信頼性の向上が図られ、特に水源汚染問題として近年多発している油汚染事故の早期発見，監視にも十分役立っている。

４．運転実績と経済効果について

昭和59年度上半期における運転実績は、表－２のとおりである。

上半期の設備稼動率は、浄水場管理職員のトレーニング期間や初期点検のために休止期間を多くとった他浄水場運転に係る諸作業のため発電を休止する期間があったことから、86.2%となった。しかし、今後は休止時間も少なくなり、設備稼動率が上げられ、経済効果も更に上るものと考えられる。

発電に係る建設費に 210,000千円を要した他、水利使用料として 400千円／年を北海道河川課へ支払う必要があるが、藻岩浄水場買電料金の減少や北海道電力への売電料金収入（5.20円／KW）、通産省の中小水力発電開発費補助金の交付等により、約10年で資金の回収が図られるものと考えられる。さらに今後の課題として、余剰電力の場内有効利用方法を開発し、発電によるメリットを更に上げるることを目指す考えであ

る。

5．おわりに

水力発電は、貴重な国内資源であり、かつクリーンな循環エネルギーであることから、地域の特性に応じた開発利用の推進が期待されており、本市においても小規模ながら有効エネルギーを回収するために水力発電所を完成させたことは、大いに意義があるものと評価される。

今回の発電によって、藻岩浄水場の電力が賄われる他、余剰電力は北海道電力一般配電線を経て一般家庭でも使用されるものである。

表－2　水力発電に伴う収支状況

1）　昭和５９年度上半期藻岩浄水場電力量状況

電力状況	浄水場使用電力 (A)＝⑧＋ⓒ	水力発電 (B)＝⑧＋ⓑ	浄水場消費電力ⓐ	北電売電力ⓑ	北電買電力ⓒ
電力量	770,200 KWH	1,253,000 KWH	654,400 KWH	598,600 KWH	115,800 KWH

2）　昭和５９年度上半期電力料金収支状況　［単位：円］

	使用電力を全て北電から売買した場合			水力発電の場合	
	基本料金	電力料金	電気税	北電買電力料金	北電売電力料金
	3,965,808	12,077,709	26,472	5,790,771	3,112,720
上半期集計	16,069,987 …①			5,790,771 ②	3,112,720 ③
収支状況	①－②＋③＝ 16,069,987 －5,790,771 ＋3,112,720 ＝ 13,391,936 円／上半期				

3）　運転実績

電力状況				原単位［kwh/m³］			発電運転状況			
項目		状況	備考	項目	原単位	備考	運転時間	累計	３７８５ 時間 ００分	
発電平均		２３８ kw	A／(日×24)	浄水場	0.083	C／配水量				
	売電比率	４７.８%	a／A×100	藻岩取水場	0.0004	藻岩受電／取水量	停止時間	累計	８０７ 時間 ００分	
	消費比率	５２.４%	b／A×100							
	発電消比率	７７.６%	b／C×100	山鼻取水場	0.158	山鼻受電／取水量	稼動率	累計	８６.２%	運転時間／100（日数×24）
	買電量	２２.４%	B／C×100							
A：発電量　a：売電量　b：場内使用量　B：買電量　C：場内消費電力量（C＝b＋B）										

本計画は、今後ますます増えることが予想される小水力発電の一例として、水道事業体としては全国で２番目に完成したものであるが、長距離複合管路を利用したものとしては全国初のものであり、規模においても総合的技術を駆使した点でも特長的なものである。したがって、当初から種々困難な問題が予想されたが、水道局が一丸となって発電プロジェクトチームを結成し、基本計画，各種許認可申請をはじめ実施設計，施工に至るまですべてを成し得たことは、他に例をみないことであろう。これは、この発電計画があくまでも水道事業体としての立場から、いかなる場合も浄水場管理の安全性を第１として考え、その上にたって発電を行ってゆくべきであるとの観点からとった措置によるものである。

長距離複合管路を発電用の水圧管路として利用する際の各種技術的問題点の克服，水量調整弁としてのダブルニードル弁の採用，光ファイバケーブルによるＩＴＶ及びテレメータ・テレコントロール通信システムの採用等単に水車や発電機の技術に留まらず、発電システムとして総合技術力を結集することができたことは、一つの成果であると考えている。