

ポンプ逆転水車を採用した朱鞠内発電所

大竹 良治* 永野 有太** 小口 孝文**

Introducing the Reverse Running Pump Turbine to Shumarinai Power Station

by Ryoji OOTAKE, Yuta NAGANO, & Takafumi KOGUCHI

We delivered the reverse running pump turbine with the 800 x 700 mm pump diameter and auxiliary machinery to Hokkaido Electric Power Co., Inc. Shumarinai Power Station, and performed installation and commissioning on site. The reverse running pump turbine is less expensive than the reversible pump-turbine, and has almost the same efficiency in terms of pumping and generating operations. To introduce the reverse running pump turbine, we conducted a model test with a miniature pump in advance to identify operation characteristics. We also decided on the equipment specifications and control methods based on the results of the hydraulic transient analysis. This facility adopts rotation speed control using inverters and converters in order to operate properly as conditions change on-site. The completion of this power station enables previously unutilized irrigation discharge water to be collected as electric energy.

Keywords: Reverse running pump turbine, Hydroelectric power station, Unutilized energy, Variable-speed operation, Frequency control, Model test, Hydraulic transient analysis

1. はじめに

北海道北部にある人造湖の朱鞠内湖は北海道電力(株)が運営する雨竜発電所の上池となっている(図1, 2^{1), 2)}。



図1 朱鞠内湖の位置
Fig. 1 Location of Lake Shumarinai

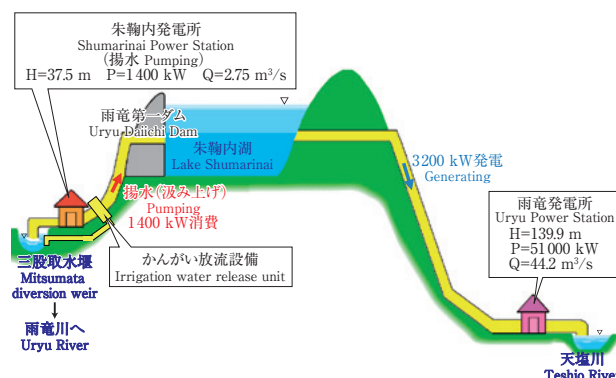


図2 発電所の概要
Fig. 2 Scheme of power stations

その雨竜発電所(出力51 MW, 落差139.9 m, 水量44.2 m³/s)では朱鞠内湖の周囲からの自然流下水のほか、朱鞠内揚水所からのポンプで汲み上げた河川水も発電に利用している。

旧朱鞠内揚水所(揚程37.5 m, 水量2.75 m³/s, 入力1400 kW)のポンプでは下池の三股取水堰から朱鞠内湖に揚水しており、この水を雨竜発電所で三股取水堰よりも標高の低い天塩川に放流する発電運転を行っている。これによって、雨竜発電所では、旧朱鞠内揚水所の電動機入力1400 kWよりも大きい3200 kWの発電出力が得られる。

* 風水力機械カンパニー 国内事業統括 システム・ソリューション 技術建設統括部 ポンプシステム技術室

** Ebara Engineering Singapore Pte. Ltd.

** 風水力機械カンパニー 国内事業統括 システム・ソリューション 技術建設統括部 事業企画推進室

	1月/Jan.	2月/Feb.	3月/Mar.	4月/Apr.	5月/May	6月/Jun.	7月/Jul.	8月/Aug.	9月/Sep.	10月/Oct.	11月/Nov.	12月/Dec.
取替前 Before replacement	停止 Pump stop								揚水運転 Pump operation			
	揚水運転可能 Pump operation possible						揚水禁止 Pump operation prohibited		揚水運転可能 Pump operation possible			
	非かんがい期 Non-irrigation season				かんがい・放流期間 Irrigation season				非かんがい期 Non-irrigation season			
取替後 After replacement	揚水運転 Pump operation				かんがい・放流の 必要無い場合揚水 Pumping operation if there is no need of irrigation		発電運転 Turbine operation		揚水運転 Pump operation			
	揚水運転可能 Pump operation possible						揚水禁止 Pump operation prohibited		揚水運転可能 Pump operation possible			
	非かんがい期 Non-irrigation season				かんがい・放流期間 Irrigation season				非かんがい期 Non-irrigation season			

図3 年間の運用

Fig. 3 Annual operation modes

旧朱鞠内揚水所での揚水運転可能期間は9月から翌年5月にかけての年間およそ9箇月間であり、5月から8月にかけては雨竜川下流の農業用水を確保するため、朱鞠内湖から雨竜川に揚水時と同じ送水管を通してそこから分岐した放流バルブによってかんがい放流を行っていた。

しかし、1950年に運用開始した旧朱鞠内揚水所の設備は老朽化による障害が多発し揚水運転可能な9箇月間のうち12月以降の約5箇月間は冬期間の運用を停止していた(図3)。

そこで、老朽化設備の更新と未利用エネルギーとなっていたかんがい放流水の有効活用を目的とし、これまでの揚水専用設備から、発電と揚水の両機能を併せもつ設備に更新し、朱鞠内発電所として新設することとした。

当社は、北海道電力株が発注したこれらの工事のうち元請業者の富士電機株から主に機械設備の更新を請け負い2012年11月までに機器製作及び現場工事を行った。

ここでは、その概要と特徴について紹介する。

2. 設備の概要

本発電所の建設に当たっては既存の揚水所設備を有効利用することで、自然環境に与える影響の大きなダムや導水路などの新設設備が不要となり、また工事期間や建設コストの縮減が図られた。

主な更新機器としては、既存ポンプに替わるポンプ逆転水車(口径800×700mm)(写真1)2台と周辺機器及び電気設備であり、ダム本体や送水鉄管、かんがい放流設備、発電所建物、ポンピットを含む基礎、揚重装置、作業用止水弁などは既設設備を再使用している。

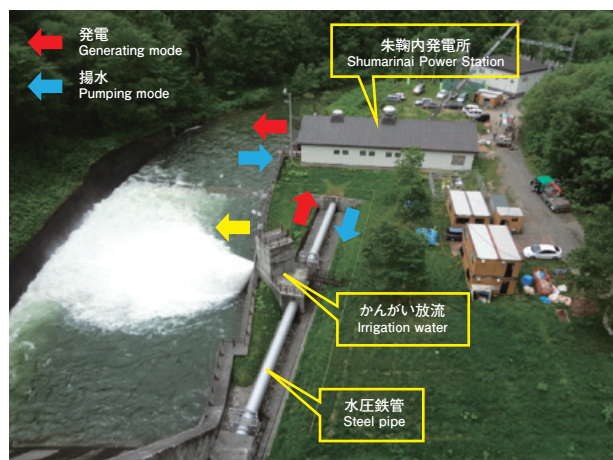
写真2に発電所全景、図4に発電所平面図、図5に発電所断面図、表1に主要更新機器一覧を示す。



15-03 01/247

写真1 ポンプ逆転水車

Photo 1 Reverse running pump turbine



15-03 02/247

写真2 発電所全景

Photo 2 General view of power station

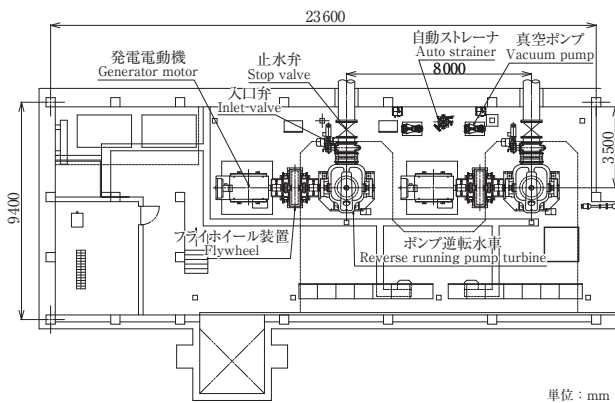


図4 発電所平面図
Fig. 4 Plan view of power station

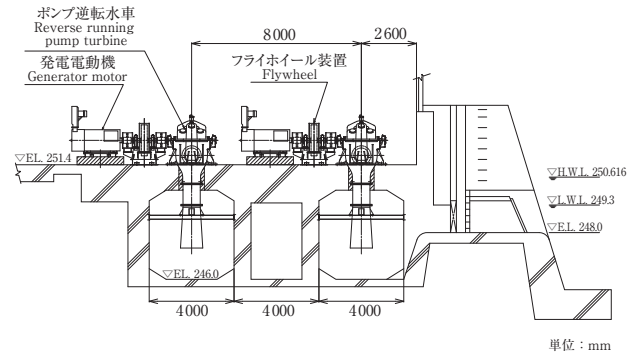


図5 発電所断面図
Fig. 5 Sectional view of power station

表1 主要更新機器一覧

Table 1 List of major updated equipment

機器・設備名称 Name of equipment	形式 Type	数量 Quantity	基本仕様 Specifications
ポンプ逆転水車 Reverse running pump turbine	横軸両吸込渦巻型 Horizontal double suction volute type 口径 800×700 mm Diameter	2 台 units	ポンプ：流量1.375 m ³ /s×全揚程37.5 m×回転速度705 min ⁻¹ ×原動機出力700 kW Pump Discharge Total pump head Speed Output 水車：流量2.18 m ³ /s×有効落差33.3 m×回転速度600 min ⁻¹ ×水車出力632 kW Turbine Discharge Effective head Speed Output
フライホイール装置 Flywheel unit	-	2 台 units	材料：SF490 Material MR ² =988 kg・m ² (GD ² =MR ² ×4)
[発電電動機] [Generator motor]	三相誘導発電電動機 Three-phase squirrel-cage induction motor	2 台 units	電動機：電圧285～360 V×出力390～700 kW×回転速度580～705 min ⁻¹ Motor Power voltage Output Speed 発電機：電圧190～305 V×出力169～570 kW×回転速度400～600 min ⁻¹ Generator Power voltage Output Speed
入口弁 Inlet valve	電動バタフライ弁 Motor operated butterfly valve	2 台 units	口径700 mm×電源DC110 V Diameter Electric power supply
入口管 Inlet pipe	-	2 式 sets	口径700 mm×材料SS400 Diameter Material
封水給水装置 Sealing water supply unit	自動ストレーナほか Auto strainer	2 台 units	口径50 mm×スクリーン40 Mesh Diameter Screen
真空ポンプ Vacuum pump	水封式真空ポンプ Water ring vacuum pump	2 台 units	口径40 mm×原動機出力3.7 kW Diameter Output
ビット水中ポンプ Submersible motor pump	ボルテックス水中ポンプ Submersible vortex pump	1 台 unit	口径65 mm×原動機出力3.7 kW Diameter Output
[電気設備] [Electric equipment]		1 式 set	変換器用変圧器盤 入力盤 入力フィルタ盤 Transformer panel Power input panel Power input filter panel コンバータ盤 インバータ盤 Converter panel Inverter panel

[] は、当社納入範囲外機器を示す。
Brackets [] indicate equipment which we do not deliver.

3. 設備の特徴

3-1 ポンプ逆転水車の採用

一般的に揚水発電所ではポンプ水車が用いられている。ポンプ水車とは、プラントごとの条件で専用設計された水車を一般の電気使用量が少ない夜間などにはポンプとして揚水運転を行い、その他の時間には水車として

発電運転を行うものである。

これに対して今回は次の理由から横軸両吸込渦巻ポンプをもとに設計したポンプ逆転水車を採用した。

- ・ポンプ逆転水車はポンプ水車に比べ、設計製作期間が短く本体価格も比較的安価であり、また既設ポンプと同形式とすることで既存の建屋、土木設備が再使用しやすくなり建設コストが縮減できる。

- ・ポンプ水車で揚水運転したときの最高効率の水車効率に比べ一般に約25%低下するが、ポンプ逆転水車を水車運転しても効率はあまり変わらない。また本

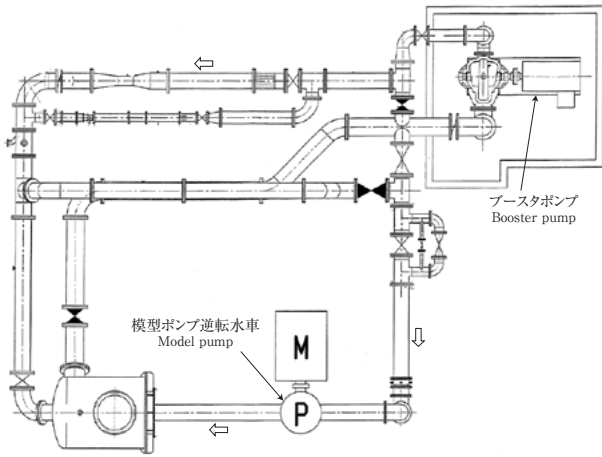


図6 模型試験装置
Fig. 6 Model test equipment

設備の運転日数は揚水運転の方が発電運転に比べ約4倍長くポンプ揚水時の効率が高いことが望まれた。なお、ポンプ逆転水車の採用に当たっては運転制御方法などの検討に必要な運転特性を把握するため、事前に実機比1/2.6の模型ポンプ逆転水車を作製しJIS B 8327-2002「模型によるポンプ性能試験方法」、JIS B 8103-1989「水車及びポンプ水車の模型試験方法」に基づき性能試験を行った(図6)。

この模型試験によって無拘束速度や正転逆流域を含む完全特性データを得たほかに、揚水運転時の逆流発生範囲の確認と圧力変動率と騒音の測定も含めた吸込性能試験によって最適な回転速度が把握できた(図7, 8)。

3-2 今回条件と対応策

一般の水車ではガイドベーンが可動することによって、落差に合わせた水量制御が可能であり、水車の通常停止時は入口弁とともにガイドベーンを閉鎖し止水を行う。

しかし、今回の標準ポンプを用いたポンプ逆転水車は可動ガイドベーンを有しないため、次に示す対応が求められた。

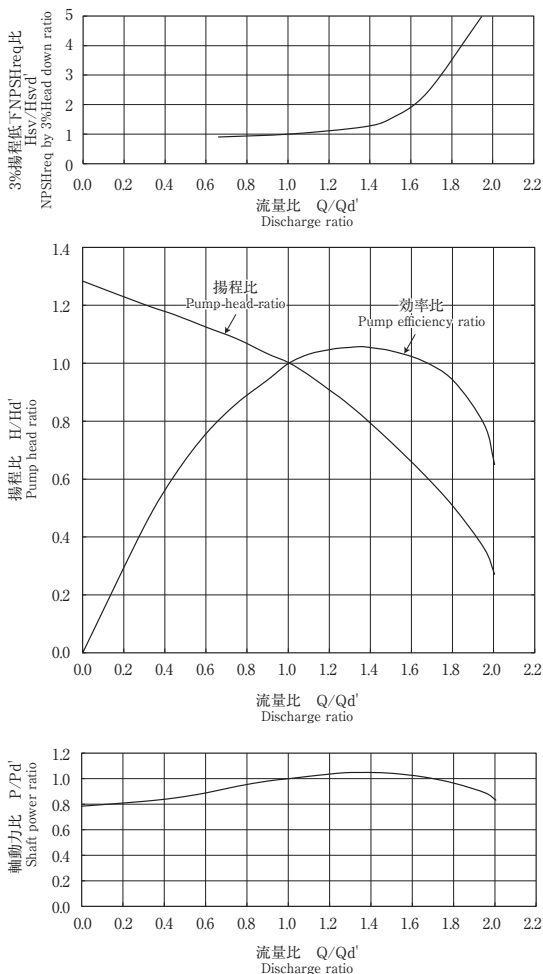


図7 ポンプ性能曲線(模型ポンプ)
Fig. 7 Pump characteristic curve of model pump

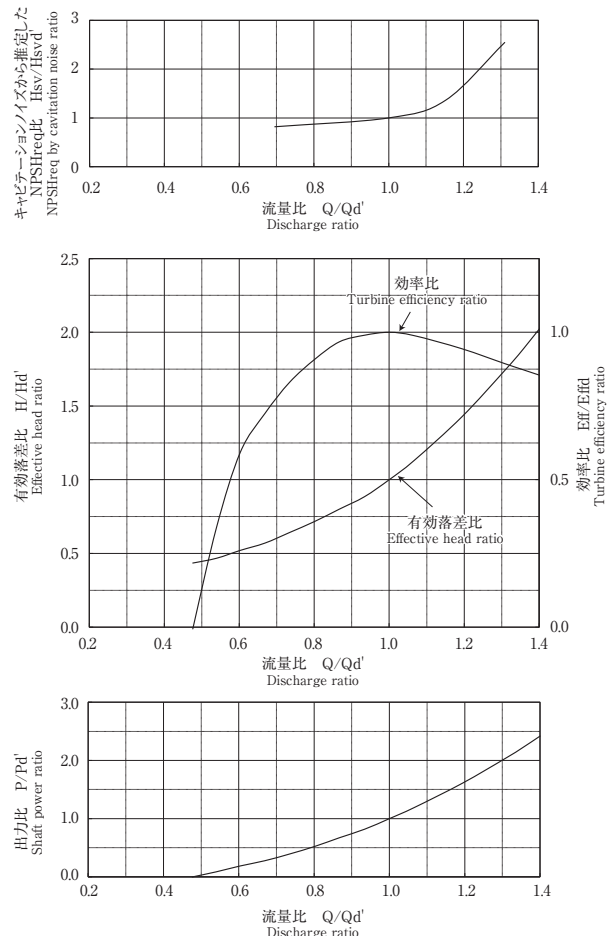


図8 水車性能曲線(模型ポンプ)
Fig. 8 Turbine characteristic curve of model pump

(1) 揚水、発電流量制御

朱鞠内湖の水位は年間を通して大きく変化し、最高と最低の実揚程の差は約14 mある。ポンプ揚水の設計仕様は最高実揚程において2台運転時に最大取水量として2.75 m³/s送水であり、固定速運転では実揚程が下がると最大取水量を超過してしまう。また、現地は北海道内でも有数の寒冷地であり冬期間渇水期は河川表層が結氷することで吸込側水位が追従しづらくなる。これによってポンプ揚水の始動・停止回数が増加し、機器寿命に悪影響を与えると同時に、運転時間に比べ停止時間が長くなることで送水管内の滞留水が凍結してしまう懸念があった。

さらにかんがい放流水を利用する発電運転時は、水車運転流量だけでは放流量が不足する場合に発電運転と同時に既存の放流バルブからも放流するため、送水管路損失水頭及び有効落差が大きく変化する。

これらの条件に対して固定速運転のポンプ逆転水車では水量制御が不可能であり、低効率の不安定領域での運転となる懸念があった。

これに対応するために可変速装置を用いて回転速度制御を行うこととした。

回転速度制御を行うにはいくつかの方式があるが、発電電動機はかご形誘導電動機とし、今回は設備の容量が余り大きくないことから、ここ数年で低廉化した2 MW以下の標準品インバータ、コンバータを適用した一次側周波数制御とした。この方式の採用によってトータルコスト縮減と大幅な可変速範囲の制御が可能となった。

揚水運転時の回転速度設定は渇水期と通常期の期間ごとに2段階とし、通常期は揚程が変化しても最大取水量を超過しない回転速度とした。また渇水期は模型試験で確認した逆流発生域から最低流量を決定し、下限となる回転速度とすることで始動、停止頻度を低減させた(図9^{1), 2)}。

発電運転時の回転速度設定は有効落差を基準に水車性能で高効率運転となる回転速度とした(図10)。

なお、揚程及び有効落差は朱鞠内湖と下流調整池の計測水位と、ポンプ逆転水車入口に設けた圧力計の計測値から演算し求めている。

(2) 河川放流量制御

本発電所では発電運転時に朱鞠内湖のダム水を河川へ放流を行う際に河川の急激な水位上昇防止のため20分ごとに放流の増加限度が定められており、放流開始から20分までは1.2 m³/sである。しかし、ポンプ逆転水車の発電運転流量は1台で2.18 m³/sあり限度量を超過してし

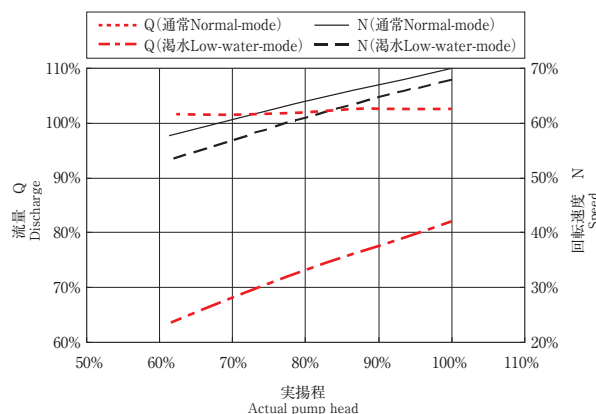


図9 ポンプ運転設定値
Fig. 9 Pump operation setting mode

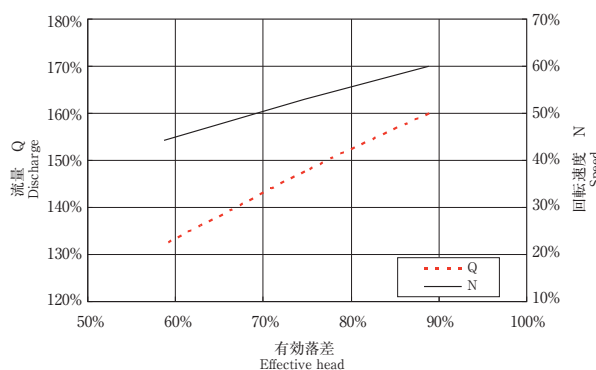


図10 水車運転設定値
Fig. 10 Turbine operation setting mode

まう。これに対し回転速度制御ではポンプ逆転水車の特性上、限度量以下にはできないため入口弁開度制御で流量調整を行うこととした。

なお、入口弁は小開度での運用によるキャビテーション壊食が懸念されたが、運転頻度と運転時間を考慮の上、弁体材料を耐壊食性の良いステンレス鋼とした。

(3) 過渡現象の検討

今回、送水鉄管は既存管を再使用するため、発電所として運用した際も既存鉄管の許容水圧以下で運転する必要があった。

鉄管内圧力が最も上昇するのは上流の朱鞠内湖からの流下水を入口弁閉鎖で遮断の際の水撃現象発生時であり、この圧力上昇を抑えるには入口弁の閉鎖時間を長くすることが有効であった。しかし、一方で揚水運転中の動力消失時などには入口弁が逆流防止弁を兼ねるため、閉鎖時間を長くした場合、先に述べた河川放流量が増加してしまう。

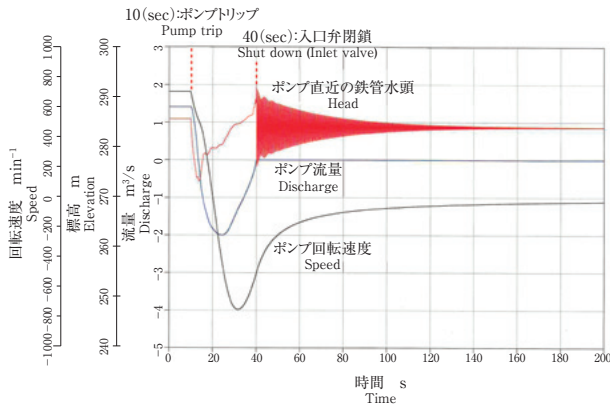


図 11 ポンプトリップ時の過渡現象解析

Fig. 11 Hydraulic transient analysis (Pump trip mode)

これに対し特性曲線法を用いた当社の流体過渡現象解析プログラムを用いて解析を行い、止水弁の閉鎖時間による鉄管の水圧上昇値を求め、圧力上昇が送水鉄管の許容圧以下となる最適なバルブ閉鎖時間を決定した（図 11）。

この結果をもとに、現地でポンプトリップ時の入口弁閉鎖による圧力上昇試験を行い、流下水の遮断時において既存鉄管の許容水圧以下となることを確認した。

また、水車運転における負荷遮断時の過渡現象についても同様に解析を行い、異常な圧力及び速度変動がないことを確認した。

4. おわりに

ポンプの取替えによって、かんがい放流期間を除く年間をとおした揚水を可能にすることで（図 3）、2012年11月からの約8箇月間の運転実績として、兩竜発電所で発電した電力のうち、朱鞠内発電所で揚水した水量分は、揚水で消費した電力を差し引いた純粋な利得分である「発電電力量増加分」として約 2900 MWh^{1), 2)} の効果をもたらした。また、これとは別に朱鞠内発電所自体での発電運転では従来無効放流されていたものが3箇月間で約 500 MWh^{1), 2)} の電気エネルギーとして回収されている。

朱鞠内発電所は可変速制御に一次周波数制御方式を採用しており、このような可変速ポンプ逆転水車は国内で初めての導入である。当社は北海道電力(株)及び富士電機(株)との共同応募にて「標準品を活用した可変速揚水発電所の新設」として、平成 25 年度新エネ大賞新エネルギー財団会長賞を受賞することができた。

このような未利用エネルギーの再生技術は他地域での応用も期待でき、電力の安定化にも貢献できると考える。

おわりに、設計段階から現地試運転に至るまでの北海道電力(株)及び富士電機(株)関係者各位の御指導と御協力にあらためて感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 木村宏義・他, ポンプ逆転水車および可変速制御に標準品のインバータを利用した朱鞠内発電所, ターボ機械第 42 巻 7 号 (2014).
- 2) 大和昌一, 国内の小水力発電の動向, スマートプロセス学会誌第 3 巻 2 号 (2014 年 3 月).