

ラオス人民民主共和国ナムグム2水力発電所の商業運転開始

Commercial Operation of Nam Ngum 2 Hydroelectric Power Station in Laos

富田 義賢

手塚 光太郎

大久保 将史

■TOMITA Yoshitaka

■TEZUKA Kotaro

■OKUBO Masashi

ラオス人民民主共和国（以下、ラオスと略記）の首都ビエンチャンから100 kmほど北にあるナムグム川に建設が進められてきたナムグム2水力発電所が、2010年12月に商業運転を開始した。この発電所は独立系発電事業（IPP：Independent Power Producer）物件であり、独立系発電事業者NN2PC（Nam Ngum 2 Power Company）社とEPC契約^(注1)をしたチョーカンチャン（CH.Karnchang）社から2006年に東芝が受注した物件である。

当社は水車、発電機、制御装置のほか、所内電気品など発電所主要機器を供給し、それらの据付け及び試験などのサイト業務も担当した。ナムグム2水力発電所は今後、タイ王国（以下、タイと略記）への電力供給基地として寄与すると期待される。

The Nam Ngum 2 Hydroelectric Power Station of the Nam Ngum 2 Power Company Ltd., located about 100 km north of Vientiane, the capital of the Lao People's Democratic Republic, successfully started commercial operation in December 2010. The CH. Karnchang Public Company Ltd., the prime contractor for this project providing engineering, procurement, and construction (EPC) services, awarded Toshiba a contract for the main generating equipment in August 2006.

We have carried out the design, manufacturing, installation, and testing of the main equipment for the power station including turbines, generators, and a supervisory control and data acquisition (SCADA) system, as well as the electrical equipment. The Nam Ngum 2 Hydroelectric Power Station is expected to serve as a power supply base for the Kingdom of Thailand.

1 まえがき

ラオスは人口612万人を擁する内陸国家であり、近年、アジアの経済成長とともに電力需要が増しているタイへ電力を供給するため、豊富な水力資源を活用して水力発電所が盛んに開発されている。

ナムグム2水力発電所は、ラオスでは4件目の外国資本によるIPP物件であり、NN2PC社が独立系発電事業者、タイ第2位のゼネコンであるチョーカンチャン社がEPC契約者となり、ラオス政府による社会経済開発計画の主要事業の一つとして建設された。東芝の高い水力発電技術と豊富な実績、並びに東芝水電設備（杭州）有限公司（Toshiba Hydro Power (Hangzhou) Co., Ltd.：以下、THPCと略記）と連携した低コスト水車及び発電機がNN2PC社から高い評価を受けて2006年8月に受注し、今回、商業運転を開始した。

2 発電所の概要

ナムグム2水力発電所は、ラオスの首都ビエンチャンの北方、約100 kmに位置し、ナムグム川の2番目の発電所としてナムグム1発電所の上流に建設された水力発電所である（図1）。上

(注1) Engineering（設計）、Procurement（調達）、及びConstruction（建設）を含む、プロジェクトの建設請負契約。



図1. ナムグム2水力発電所の発電機フロア — 2010年12月に全台商業運転を開始した。

Generator floor of Nam Ngum 2 Hydroelectric Power Station

ダムはロックフィルダム^(注2)であり、その直下に半地下式の発電所が建設されており、合計出力600 MWの水車発電機が設置されている。当社は発電所の主要機器として、水車や、発電機、制御装置、所内電気品などを担当し、納入、据付け、及び調整試験を行った。

(注2) 岩石や土砂を積み上げて建設する型式のダム。

3 水車

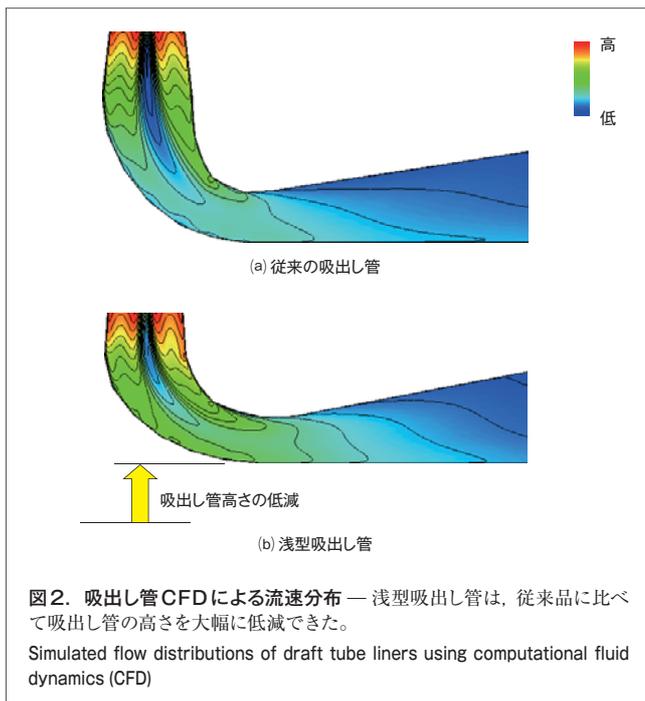
水車の主な仕様は、次のとおりである。

- (1) 型式 立軸単輪単流渦巻きフランシス水車
- (2) 水車仕様
 - (a) 有効落差：最高 159.5 m, 基準 154.5 m, 最低 130.0 m
 - (b) 水車出力：定格 209.2 MW, 最大 218.3 MW
 - (c) 定格回転速度：214.3 min⁻¹
 - (d) 水車比速度：179.9 m-kW (基準落差, 定格出力点)

3.1 水力設計と模型試験

この水車の水力設計のもっとも重要な特長は、水車中心と吸出し管最下点との鉛直方向の距離である吸出し管高さが小さいことである。吸出し管高さが小さくなると土木掘削量が減るため土木コストを圧縮できるという利点があるが、一方で水力性能が悪化するという問題がある。チョーカンチャン社によるこの発電所の仕様では、吸出し管高さが当社の標準的な設計値に比べ10%低減させた値に相当するため、高い目標効率ともあいまって厳しい水力設計が求められた。そこで、当社が研究開発を進めていた、数値流体解析 (CFD: Computational Fluid Dynamics) を駆使することで水力性能を低下させずに吸出し管高さを低減する技術を適用した。これは、多目的遺伝的アルゴリズム (MOGA: Multi-Objective Genetic Algorithm) によって、これまでの枠にとらわれずに流路形状を最適化できる。この結果、吸出し管高さを従来に比べ大幅に低減することに成功した (図2)。

また、水車の水力性能を検証するために、実機水車と完全に相似形の水車を用いた模型試験を実施した。ランナ形状の



チューニングを経て、加重平均効率や、水車出力、水圧脈動、無拘束速度など、全ての項目で保証値を満足することを確認した。

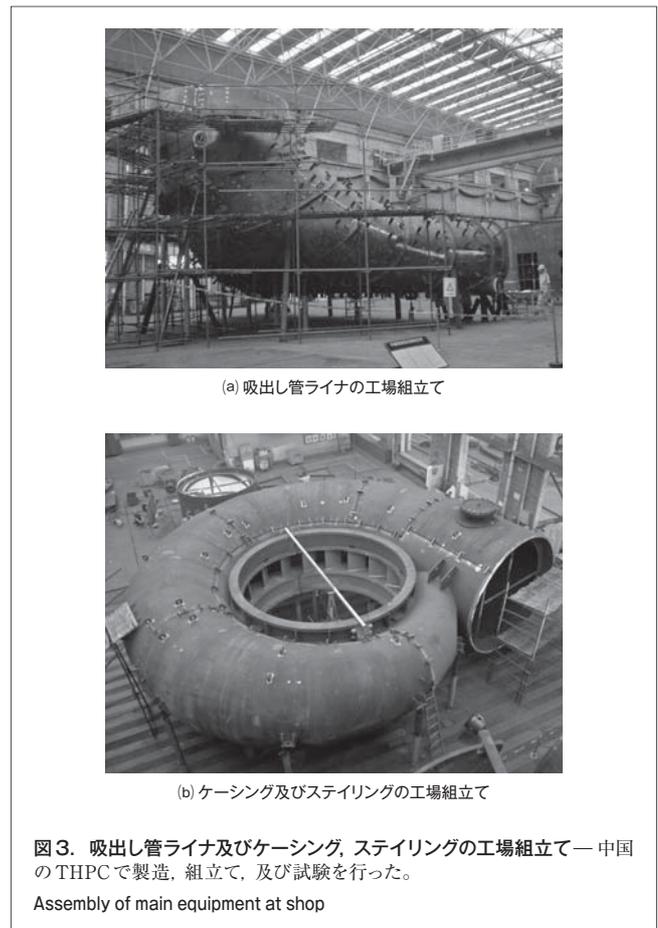
3.2 実機水車の設計及び製作

模型試験で最適化された模型水車の流路形状を基に、実機水車の設計を行った。ランナはクラウン、羽根、及びバンドを溶接で組み立てる構造にし、海外調達した各素材を当社の工場で溶接して組み立てた。また、ランナ強度については有限要素法 (FEM: Finite Element Method) 計算によって、十分な強度が確保されていることを確認した。

水車本体及び吸出し管ライナは、当社で設計した図面を基にTHPCで製造と組立てを行うことで、高品質と低コストの両立を実現しており、更に当社とTHPCが一体となって製造工程管理を行うことで、納期どおりの製品出荷を実現した (図3)。

3.3 実機水車の現地試験

2008年8月から各号機の水車、発電機及び制御装置の据付け工事を順次開始し、無水及び有水試験を経て2010年末に現地水車効率試験を実施した。この試験は熱力学法^(注3)を用



(注3) 水が機器を通過する前後の水温を測定して、その温度差から、水車で発生する損失を求め、水車の効率を算出する方法。

いて行い、試験結果から保証効率を満足することを確認した。また、運転状態についても、広い運転範囲で静かに安定したものになっていることを確認した。

4 発電機

4.1 発電機的设计

水車発電機的主要仕様は、次のとおりである。

- (1) 型式 立軸回転界磁全閉空気冷却器付三相交流同期発電機
- (2) 発電機仕様
 - (a) 定格容量：228 MVA（過負荷容量：250.6 MVA）
 - (b) 定格電圧：15 kV
 - (c) 周波数：50 Hz
 - (d) 力率：0.9
 - (e) 回転速度：214.3 min⁻¹
 - (f) 極数：28

今回開発した発電機では、次に示すような近年の研究開発成果を全て適用して高効率化を図った（図4）。

- (1) ラジアル通風方式の発電機に、磁極間の通風仕切り板と回転子上下の通風カバーを設置した通風最適化構造を採用して、風損を低減

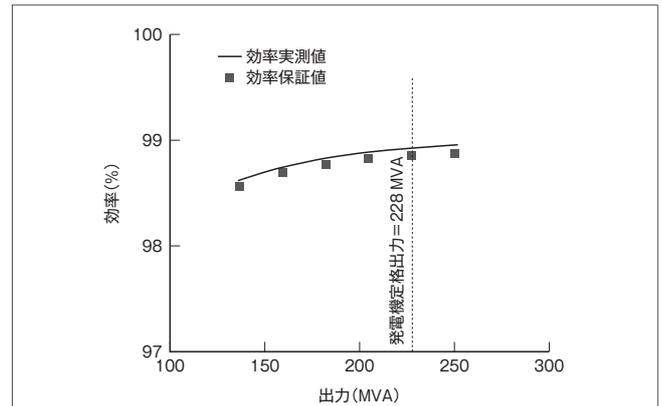
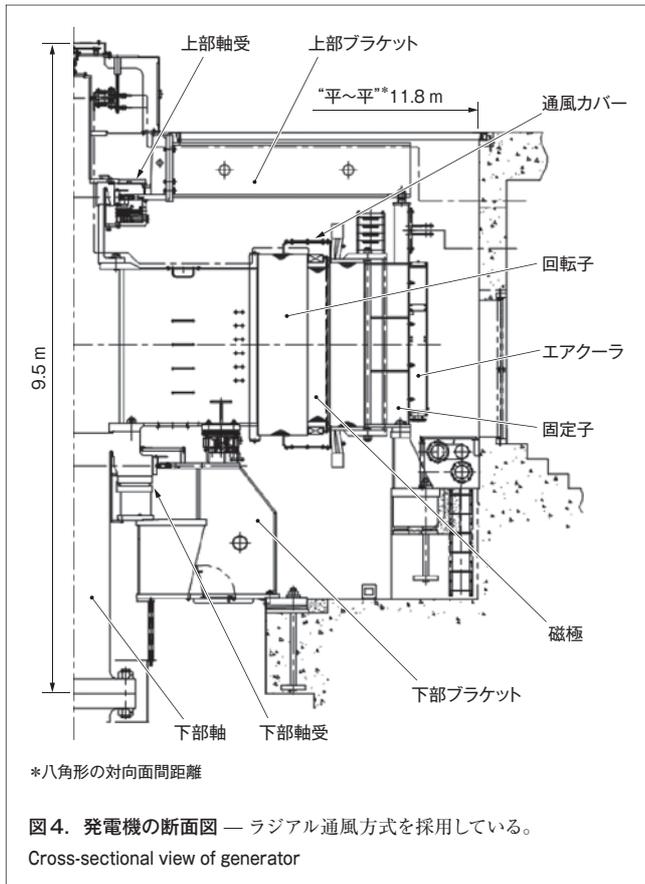


図5. 発電機効率試験結果 — カロリー法で実施した現地効率試験結果は、保証値を満足している。

Result of generator efficiency test at site

- (2) 回転板なし構造を採用することで軸受寸法を最小化して、軸受損を低減
- (3) 高級鉄心材を使って、鉄損を低減
- (4) 固定子コイルと鉄心設計の形状を最適化して、鉄損及び漂遊負荷損を低減
- (5) 固定子コイルと回転子コイルに銅材料を最大限使って、銅損を低減

4.2 実機発電機の現地試験

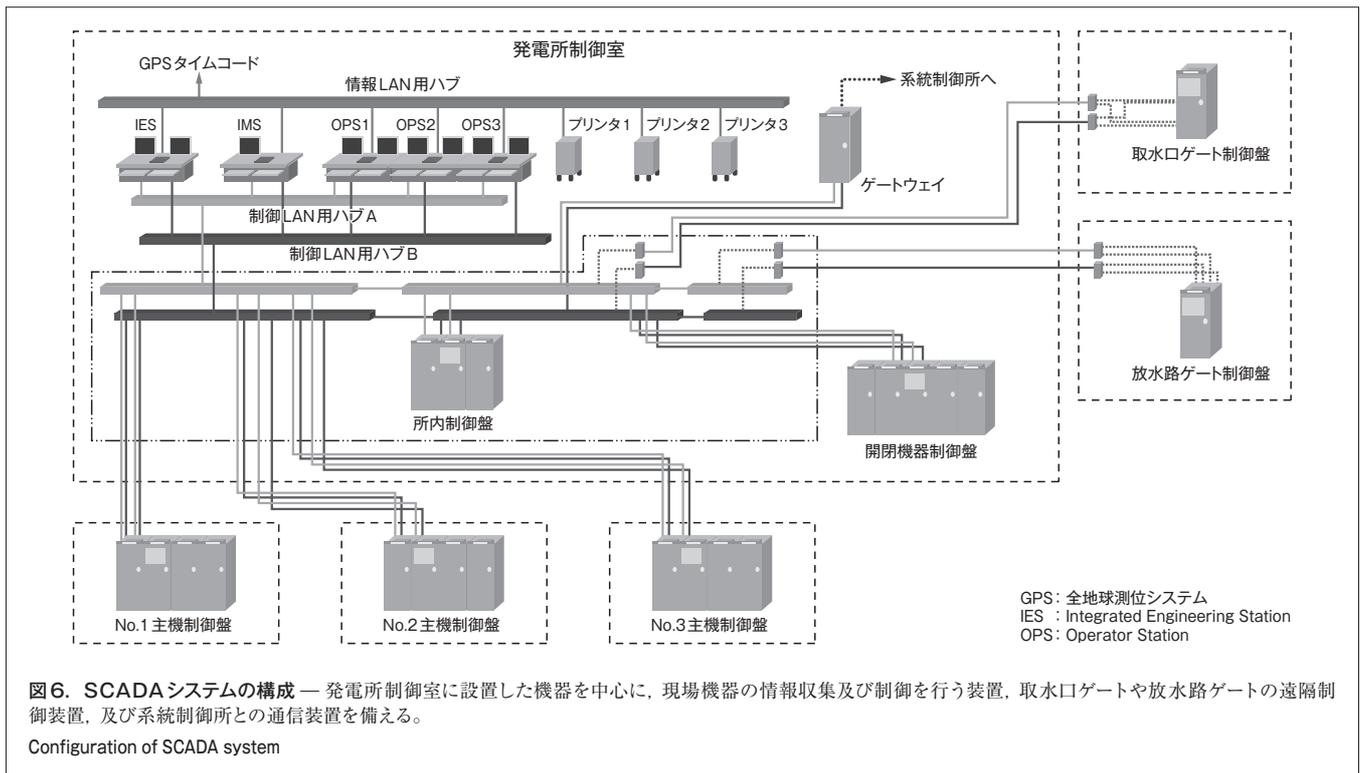
2010年末に実施した現地発電機効率試験は、カロリー法^(注4)を用いて行った。スラスト軸受損を含む定格運転時の規約効率としては世界トップレベルの高効率を達成し、全運転範囲にわたり保証効率を満足できた。また、各種インピーダンスやTdo^(注5)などの発電機特性も顧客要求値を満足し、顧客から高い評価を得た（図5）。

5 プラント監視制御装置⁽¹⁾

この発電所のプラント監視及び制御装置であるSCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) システム構成を図6に示す。

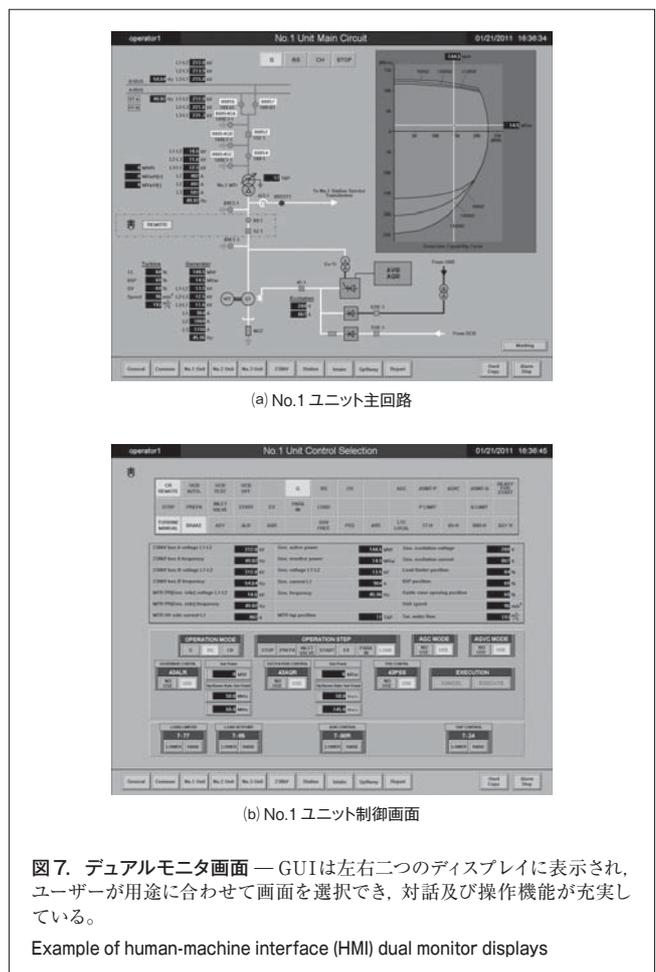
このシステムは、主機3ユニット分の各運転モード（発電、ブラックスタート^(注6)、及びラインチャージ^(注7)）における制御及び保護や送電線及び発電所の共通制御を行う制御装置に加

- (注4) 発電機の発生損失は全て熱となって外部へ放出され则认为、各冷却装置に流れる冷却水の温度差を測定して発電機で発生する損失を求め、発電機の効率を算出する方法。
- (注5) 直軸開路時定数 (d-axis open-circuit transient time constant) のことで、電機子電流が100%から36.8%まで減衰する時間。
- (注6) 主機が停止し、かつ発電所外部からの電源供給がまったくない状態から、主機を始動させ、無負荷運転状態（系統に並列可能な状態）までもっていくこと。
- (注7) 試充電のことで、電圧が0Vの系統に発電機を並列し、徐々に系統電圧を上げて系統の健全性を確認する。



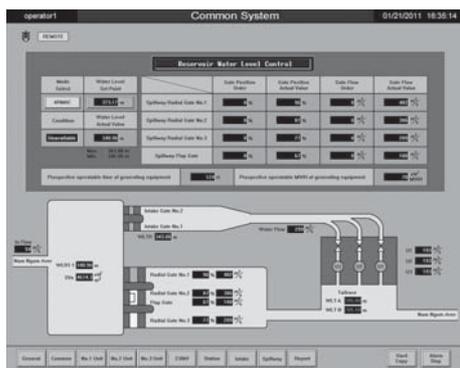
え、系統制御所との通信装置（ゲートウェイ）や売電量測定装置（Energy Meter）、ダム及び放水路（Intake/Spillway）のゲート制御装置とのインタフェースを備えた共通制御装置で構成されている。これらの構成装置を各機能別コントローラに分散したDCS（Distributed Control System）で構築している。このシステムの主な特長を以下に示す。

- (1) 分散型プラント制御コントローラに統合コントローラを採用した。主CPUに二重化した待機切替えシステム（Duplex System）を適用し、高信頼性を実現した。
- (2) 上位系の監視制御装置と各コントローラとの間の制御LANに、二重化したツリー構造のReal-Time Ethernet 100 Mビット/s ネットワークTC-net™を適用し、信頼性の高い高速データ伝送を実現した。更に、上位系の監視制御装置を情報LAN（Information Network Ethernet 100 Mビット/s）で接続し、情報や外部設備（プリンタなど）を共有化した。
- (3) IMS（Information Management System）が持つ長期データ保存機能によって、長期間のプラント運転履歴を参照できるようにした。
- (4) 統合コントローラの基本ソフトウェアを適用し、次に示す施策で機能及び性能を向上させた。
 - (a) 汎用GUI（Graphical User Interface）ソフトウェアを適用して画面作成機能の利便性を向上させた。
 - (b) ヒューマンマシンインタフェース（HMI）をデュアルモニタ化し、オペレーターが用途に応じて画面を選べる



ようにして、対話・操作機能を充実させた(図7)。

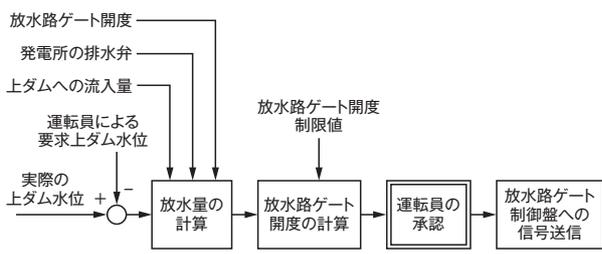
- (c) 汎用通信(ゲートウェイ)ソフトウェアの適用によって、TC-netTMと他社装置を接続できるようにし、主機負荷を系統運用に応じて制御できるようにした。
- (d) サーバ/クライアント化を適用したエンジニアリングツールによりデータのマスタ管理機能を実現した。
- (e) 貯水池の自動監視制御システムによって水位を調整して、ダムを効率的に運用できるようにした(図8)。



(a) 貯水池の自動監視制御システム画面



(b) ダム放水路



(c) 貯水池の自動監視制御システム ロジック図

図8. 貯水池の自動監視制御システム画面とダム放水路 — ダム放水路ゲートを制御室から遠隔操作し、ダム水位を調整できる。

Automatic reservoir measuring and control system display and spillway gate

6 あとがき

ナムグム2水力発電所は、2006年から主要機器の設計が開始され、2007年4月の水車模型試験実施、その後のTHPCでの水車及び発電機の製造、2008年8月の主機の据付け開始、2010年8月の有水試験開始を経て、2010年12月に予定どおり全号機の商業運転が開始された。当社は、高性能水車発電機のほか主要電機機器を一括納入し、当初の計画どおりに完工させたことで、顧客から高い評価を得た。

地球温暖化を防止しながら大規模な電力需要に応える環境調和型エネルギーとして、今後水力発電に対する需要は継続していくと考えられる。当社はナムグム2水力発電所で得た経験を生かして、更に顧客満足度の高いプラント建設業務を進めていく。

文献

- (1) 木下賢太郎 他. 高信頼性と操作性を向上させた水力発電所の監視制御システム. 東芝レビュー. 65, 6, 2010, p.19-22.



富田 義賢 TOMITA Yoshitaka

電力システム社 火力・水力事業部 水力プラント技術部主務。
水力発電プラントのエンジニアリング業務に従事。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



手塚 光太郎 TEZUKA Kotaro

電力システム社 京浜事業所 水力機器部主務。
水車・ポンプ水車の水力設計・ランナ設計に従事。日本機械学会、ターボ機械協会会員。
Keihin Product Operations



大久保 将史 OKUBO Masashi

電力システム社 京浜事業所 水力機器部主務。
水車発電機の設計に従事。電気学会会員。
Keihin Product Operations