

富士電機技報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2020
Vol.93 No.



特集 低炭素社会実現に向けた富士電機の発電プラント事業



特集 低炭素社会実現に向けた富士電機の発電プラント事業

気候変動抑制に関する国際的な枠組みである「パリ協定」の発効以降、世界で“脱炭素”の動きが加速し、温室効果ガスを排出しない再生可能エネルギー市場がグローバルに拡大しています。国内では、エネルギー基本計画によるエネルギーミックスの実現に向けた取組みに加え、電気の供給体制を強く持続的なものにする取組み「エネルギー供給強靱化法」が2020年6月に成立しました。

本特集では、富士電機の発電分野における最新のトピックスや技術を通じて、強靱（きょうじん）かつ持続可能な電気供給体制の確立や低炭素社会実現に向けた取組みを紹介します。

表紙写真

インドネシア・ムアララホ地熱発電所
（写真提供：PT.SEML）



目 次

特集 低炭素社会実現に向けた富士電機の発電プラント事業

〔特集に寄せて〕低炭素社会のための地熱資源の開発	141 (3)
海江田 秀志	

〔現状と展望〕低炭素社会実現に向けた富士電機の 発電プラント事業の現状と展望	142 (4)
堀江 理夫 ・ 上野 康夫 ・ 北西 啓一	

インドネシア・ムアララボ地熱発電所	148 (10)
服部 康之	

大型の水力発電所向けハイブリッドサーボシステム	153 (15)
磯野 与志雄 ・ 笹川 剛	

国内最大級の蓄電池併設型メガソーラー発電所	159 (21)
椎橋 哲也 ・ 名塚 武洋 ・ 佐藤 智希	

韓国向けりん酸形燃料電池	165 (27)
川上 幸次 ・ 堀内 義実	

日本初の内陸型大型 GTCC (ガスタービンコンバインドサイクル発電) プロジェクト ― 発電機現地製作技術 ―	170 (32)
谷藤 怜 ・ 中山 大樹 ・ 水本 貴之	

オンラインガス分析による回転機固定子巻線の劣化診断	175 (37)
中山 昭伸 ・ 石井 佑一	

高速増殖原型炉もんじゅにおける燃料体取出し技術	179 (41)
古賀 和浩	

先進固化技術“SIAL [®] ”による放射性廃棄物処理	185 (47)
関根 伸行 ・ 見上 寿 ・ 小野崎 公宏	

新製品紹介論文

LAN 式回転機故障予兆監視システム「Wiserot」	189 (51)
-----------------------------	----------

こんなところに富士電機	192 (54)
-------------	----------

略語・商標	194 (56)
-------	----------

Contents

Fuji Electric's Power Generation Business to Realize a Low-Carbon Society

[Preface] Geothermal Energy Development for the Low-Carbon Society	141 (3)
---	-----------

KAIEDA, Hideshi

Fuji Electric's Power Generation Business to Realize a Low-Carbon Society: Current Status and Future Outlook	142 (4)
---	-----------

HORIE, Tadao UENO, Yasuo KITANISHI, Hirokazu

Muara Laboh Geothermal Power Plant in Indonesia	148 (10)
--	----------

HATTORI, Yasuyuki

Hybrid Servo System for Large Hydropower Station	153 (15)
---	----------

ISONO, Yoshio SASAKAWA, Takeshi

Japan's Largest Class Storage-Battery Equipped Mega Solar Power Plant	159 (21)
--	----------

SHIIBASHI, Tetsuya NAZUKA, Takehiro SATO, Tomoki

Phosphoric Acid Fuel Cells for the Korean Market	165 (27)
---	----------

KAWAKAMI, Koji HORIUCHI, Yoshimi

First Inland GTCC Thermal Power Plant in Japan: Generator Onsite Manufacturing	170 (32)
---	----------

TANIFUJI, Satoshi NAKAYAMA, Hiroki MIZUMOTO, Takayuki

Online Gas Analysis for Deterioration Diagnosis of Rotating Machinery Stator Winding	175 (37)
---	----------

NAKAYAMA, Akinobu ISHII, Yuichi

Unloading and Handling Technology of the Fuel Assembly in Prototype Fast Breeder Reactor "Monju"	179 (41)
---	----------

KOGA, Kazuhiro

Radioactive Waste Treatment Using the Advanced "SIAL®" Solidification Technology	185 (47)
---	----------

SEKINE, Nobuyuki MIKAMI, Hisashi ONOZAKI, Kimihiro

New Products

Diagnostic System for Rotating Machine Vibration "Wiserot"	189 (51)
---	----------

Fe-Products Found in Society	192 (54)
-------------------------------------	----------

Abbreviations and Trademarks	194 (56)
-------------------------------------	----------

特集に寄せて

低炭素社会のための地熱資源の開発

Geothermal Energy Development for the Low-Carbon Society

海江田 秀志 KAIEDA, Hideshi

一般財団法人 電力中央研究所首席研究員 工学博士
日本地熱学会 会長

わが国では低炭素社会を目指して温室効果ガス（GHG：Greenhouse Gas）の排出を、2013年度比で2030年に26%、2050年には80%削減するという目標を設定し、再生可能エネルギーの主力電源化を進めている。地熱は発電出力が安定した再生可能エネルギー資源であり、2018年7月に策定された第5次エネルギー基本計画に基づく、2030年までに国内の総発電設備容量を現在の約55万kWから155万kW程度まで増大させる必要がある。このため、国も「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」（FIT）における地熱発電の価格を比較的高く設定したり、国立・国定公園などでの開発規制を緩和するなど地熱開発を支援しており、FITの導入後温泉を利用した出力数kW～数千kWのバイナリー地熱発電所や、2019年に運転を開始した出力約4.6万kWの山葵沢地熱発電所など、70余りの地熱発電所が建設されている。しかし、地熱開発には発電コストや既存発電所の出力低下などの課題もあり、これらの解決に向けた技術開発が進められている。

これまでの地熱開発では地下に天然に存在する蒸気や熱水の溜まり場（貯留層）に地表から坑井を掘削し、自然に噴出する蒸気や熱水で発電する。貯留層は地下数百mから3,000m程度までの範囲にあり、地表からの調査ではその位置や容量などの評価が難しく、坑井が貯留層に当たらない場合や、蒸気や熱水の生産量の減衰により追加の坑井が必要となる場合、蒸気や熱水中の溶存成分によりスケールや腐食対策が必要となる場合などがあり、開発リスクや発電コストの上昇に繋がっている。

これらの課題解決策の一つとして、貯留層への水の補給、貯留層内の透水性改善、貯留層の造成を人工的に行う増産（人工）地熱システム（EGS：Enhanced/Engineered Geothermal Systems）の技術開発が進められている。アメリカのガイザース地熱発電所やイタリアのラルデレロ地熱発電所では、蒸気のプロダクションが減衰した貯留層に都市排水や発電後の凝縮水を注入して生産量を回復させており、わが国でも柳津西山地熱発電所で貯留層への河川水の注水が試験的に行われている。また、ドイツやフランスでは水圧破砕で貯留層内の亀裂を拡大させて透水性を高め、熱水や蒸気のプロダクションを増大させて発電している。さらに、アメリ

カでは高温で緻密な岩盤（高温岩体）に人工的に貯留層を造成して、1990年代初めには約9千kWの熱抽出に成功したが、わが国でも高温岩体から数百～数千kWの熱抽出に成功したが、当時は発電コストが高いとされ実用化に至らなかった。現在、アメリカではユタ大学が中心となり、高温岩体発電の商業化を目指した実証実験が進められている。

一方、アイスランドでは2009年に深さ2,100mの坑井から温度450℃で圧力14MPaの過熱蒸気が生産され、1本の坑井で3万kW程度の発電の可能性が示された。これは超臨界地熱資源として注目され、わが国でも内閣府の“エネルギー・環境イノベーション戦略”で温室効果ガス排出削減の有望な革新技術の一つとされている。現在、過熱蒸気中の溶存成分による地熱材料の浸食や腐食対策をはじめ、超臨界環境における岩盤の特性評価、および掘削や熱抽出技術などの研究開発が行われている。

その他、地上設備ではバイオマスや太陽熱などで地熱蒸気を加熱して発電効率を高めるハイブリッド発電や、発電後の熱水などでバイナリー発電を行う複合発電なども実用化されつつあり、最近では熱水の代わりに二酸化炭素を地下に循環させて地熱発電に利用する技術開発なども進められている。

地球の内部は非常に高温で99%は1,000℃以上とも推定され、膨大な熱エネルギー資源が蓄えられている。しかし、現状は開発リスクや発電コストから火山周辺の地下浅部での開発に限られている。それでもわが国には111個の活火山があり、従来型の地熱資源のポテンシャルは世界第3位で2,374万kWと評価されている。高温岩体資源や超臨界地熱資源なども合わせると、そのポテンシャルは桁違いに増えると予想される。また、富士電機が世界最大級（14万kW）の発電設備をニュージーランドに納入したほか、国内のメーカーが世界の地熱発電所のタービンの約7割を納入し、途上国の地熱開発にも技術協力するなどわが国の技術は世界の地熱開発にも貢献している。

わが国は地熱資源に恵まれており開発技術も持っている。さらに、地熱は発電だけでなく発電後の熱水は地域冷暖房や農業・漁業など地域振興にも活用できる。地元と協調した地熱開発が低炭素社会の構築に貢献することを期待したい。

低炭素社会実現に向けた富士電機の 発電プラント事業の現状と展望

Fuji Electric's Power Generation Business to Realize
a Low-Carbon Society: Current Status and Future Outlook

堀江 理夫 HORIE, Tadao

上野 康夫 UENO, Yasuo

北西 啓一 KITANISHI, Hirokazu

① まえがき

富士電機は、“豊かさへの貢献”“創造への挑戦”“自然との調和”を経営理念に掲げ、エネルギー・環境事業で持続可能な社会の実現に貢献していくことを経営方針の柱の一つに据えている。この方針の下、発電プラント事業分野は、脱炭素社会実現への貢献として、エネルギーミックス^(※1)の実現や、エネルギーインフラの強靱（きょうじん）化に向けて取り組んできた。さらに、社会環境の変化に合わせて注力分野を再生可能エネルギー（再エネ）分野（地熱発電、水力発電、バイオマス発電、太陽光発電、風力発電）に定め、従来の運転効率や保守性の向上などに加えて、時間帯や気象影響による、電力需要変動に対する調整能力の向上、出力安定化技術の提案といった技術開発と製品化に取り組んでいる。

本稿では、富士電機が取り組んでいる低炭素社会実現に向けたエネルギー分野を中心に、代表的貢献事例を取り上げ、現状と展望を述べる。

② 電力をめぐる国内外の事情

世界の電力需要は、経済協力開発機構（OECD：Organisation for Economic Co-operation and Development）非加盟国を主体にして、2040年頃まで年率1%前後で伸長し続けるという予想がある。

一方、地球温暖化対策として、太陽光発電や風力発電などの再エネ電源開発が急速に増えてきている。

さらに、今後“持続可能な発展シナリオ”として国連気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）で合意された「パリ協定」における共通の目標（温度上昇2℃以下）到達に向けて、新たな政策・施策が各国から展開されている。

国内では、2016年4月の電力小売全面自由化や2017年4月のガス自由化以降、新電力などの販売電力におけるシェアは増加傾向にあり、2019年12月時点で16.2%（2019年12月）となっている。

「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」（FIT）は、2012年7月に導入され、発電量における再エネの比率を2011年の10.8%から2017年度時点の16.0%強に押し上げることに貢献してきた。“再生可能エネルギーの最大限の導入と国民負担の抑制との両立”を図るため2016年に制度が見直された。また、「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」は2022年4月1日に改正され、法律名も「再生可能エネルギー電気の利用の促進に関する特別措置法」となる。次に示すように再エネ利用を促進する法改正の四つのポイントが提示されている。⁽¹⁾

- ① FIT制度^(※3)に加えて FIP制度^(※4)を導入
- ② 再エネのポテンシャルを生かした系統整備
- ③ 再エネ発電設備の適切な廃棄
- ④ 長期未稼働についての認定の失効

③ 地熱発電分野

天候などの自然条件に左右されない安定的な再エネ

（※1）エネルギーミックス

エネルギーミックスとは、“社会全体に供給する電気を、さまざまな発電方法を組み合わせてまかなうこと”をいう。2018年7月に閣議決定された第5次エネルギー基本計画による2030年における発電方法の組合せは、自然エネルギーが22～24%、原子力が20～22%、火力発電は56%としている。2015年に決まった“2030年における発電方法の組合せ（エネルギーミックス）”の実現を目指し、さらに、2013年と比べて“CO₂排出量含む温室効果ガスの26%削減”という目標も考慮されている。

（※2）バイオマス発電

バイオマスとは、動物・植物などを由来とする有機性資源のことである。バイオマス発電は、これを火力発電の燃料として利用し、発電する。バイオマスは、廃棄物系と栽培作物系があり、燃料として利用するときには、乾燥させる場合と、チップやペレット状に加工する場合がある。

（※3）FIT 制度

FITとは、Feed-in Tariffの略である。太陽光や風力、水力、地熱、バイオマスの再生可能エネルギー源を用

いて発電された電気を、国が定める価格で一定期間、電気事業者が買い取ることを義務付けて再生可能エネルギーの普及拡大を図る制度である。

（※4）FIP 制度

FIPとは、Feed-in Premiumの略である。再生可能エネルギー源を用いて発電された電気の売電価格にプレミアムを上乗せして、再エネが自立したエネルギー源となり、普及がさらに進むことを目的とした制度である。

として、温泉発電を含む地熱発電が国内外で見直されている。

フラッシュサイクル発電^(※5)が採用できる地熱源は限定されるものの、フラッシュサイクル発電設備は大型のものを含め増加傾向にある。現在も開発中の生産井の案件が多く発電設備の増加が見込まれる。図1に地熱タービンで世界最大の単機容量(140MW)を備えるニュージーランド・ナアワプルア(Nga Awa Purua)⁽²⁾地熱発電所の外観を示す。このプラントは世界最大のトリプルフラッシュ方式^(※6)地熱プラントである。

一方で、低位^(※7)の熱源を活用できるバイナリーサイクル^(※8)発電は、利用できる地熱源が広がるため大きなポテンシャルを持っており、年間の新設規模でフラッシュサイクル発電を抜くのも時間の問題と予想されている。

インドネシア、フィリピン、メキシコ、アイスランド、ケニア、ニュージーランドなどの地熱発電が盛んな国々では、引き続き地熱発電所の開発計画や建設計画がある。国内でも、FITの買取り価格が維持されているため、再エネにおいて地熱発電は拡大基調を示している(148ページ、「インドネシア・ムアララボ地熱発電所」参照)。また、投資リスクのある地熱源探査や坑井の掘削に対して、国からの支援制度に基づいて、現在では多くの計画や開発が行われている。

地熱発電分野における世界のトップメーカーとして、プラントの経済性や運転効率の改善および機器の耐腐食性、スケール抑制、信頼性、保守性などを向上させ



図1 ナアワプルアの地熱発電所の全景

(※5) フラッシュサイクル発電

坑口から噴出する蒸気に多くの熱水が含まれる場合、気水分離器によって蒸気のみを抽出し、直接蒸気タービンを回す発電方式である。

(※6) トリプルフラッシュ方式

気水分離後の蒸気のみを利用するフラッシュ方式において、従来、「気水分離」は1段階か多くても2段階であるが、それではせっかくの蒸気圧を生かしきれず

効率的ではなかった。そこで生み出されたのが、富士電機のトリプルフラッシュ方式である。この方式では、その名のとおり3段階でより多くの蒸気を抽出する。地球の熱をとことん使う、ムダを抑えた発電である。気水分離器で分離された熱水は、還元井と呼ばれる井戸をとおり再び地下に戻される。

(※7) 低位

100℃前後の熱水や工場などで利用されるプロセス蒸

汽のために技術開発を続けている。また、アフターサービスについても、火力発電分野と同様にサービス拠点やサービスメニューを拡充し、顧客のプラントの安全・安定・経済的な運用のためにサービスの提案活動を積極的に行っている。

フラッシュサイクル発電では、インドネシア、ケニア向けのプラントを建設中である。バイナリーサイクル発電においては、作動媒体が代替フロン系とノルマルペンタンの2基の5MWの国内最大規模のプラントを完成させた。さらに、小容量域の国内向けバイナリーシステムにも取り組んでいる。

4 水力発電分野

国内の水力発電は100年を超える歴史の中で経済性の良い地点から順次開発されてきたため、新規開発地点が奥地化・小規模化し、初期投資の負担が課題となっている。また、計画から開発までのリードタイムが長いことから、社会・経済環境の変化を受けやすい傾向にある。

富士電機は、1936年に水力発電機器1号機を納入した。以来、高落差ペルトン水車から低落差のバルブ水車に至るまで、あらゆる種類の水車の開発、設計、製作、納入を行ってきた。1997年には、1938年から技術協力関係にあったドイツのフォイト社と共同出資で富士・フォイトハイドロ株式会社を設立し、フォイトグループの最新技術とグローバルな調達網を活用して水力事業の継続、拡大を図っている。

水力発電は、CO₂排出量の少ないクリーンな純国産エネルギーとして、天候に左右されず安定的な運用が可能という特徴があることから、電力供給の基礎を担うベースロード電源として位置付けられている。

再エネの導入拡大を支援する施策として、FITの導入により追い風が継続しており、中小水力の新規開発に加えて50～60年前の国内水力開発期に建設された発電所の更新案件がかつてないほどに全国で活況を呈している。

三次元の流れ解析技術を駆使し、個々の発電所にベストフィットさせることで、出力増大だけでなく、年間発電電力量の大幅向上を実現している。今後、油圧

気、排熱のための温水など、これまで有効利用されていなかった低い温度領域をいう。

(※8) バイナリーサイクル発電

温度が低い蒸気や熱水などの熱源利用する場合には、ペンタンなどの低沸点の媒体に熱を伝えて高圧の蒸気を作り、タービンを回す発電の方式である。フラッシュサイクル発電方式では利用できない低位(低温)熱源に適した発電方式である。

を使わない環境に優しい油レス技術や、保守性と寿命を向上させた次世代の水力発電設備を提案し、環境負荷低減に貢献していく（153 ページ、「大型の水力発電所向けハイブリッドサーボシステム」参照）。

⑤ 太陽光発電分野

再エネの普及による低炭素社会の実現に向け、2012 年に FIT が導入されて以降、わが国では当初の政府予想を上回る速度で、大規模な太陽光発電（メガソーラー発電）が普及し、2020 年 3 月時点で運用している設備は 40 GW に達している。さらに、メガソーラー発電は、政府の主力電源化の方針に沿って今後も市場が拡大していくものと想定される。

その実現のためには、解決しなければならない技術課題がある。一つ目の課題は、系統安定化である。富士電機は 2016 年から、メガソーラー発電向けの系統安定化システム開発に取り組んできた。具体的には北海道電力株式会社管内で要請された出力変動緩和基準「連系点電力の変化率が 1% 以下/分」を達成させる技術開発である。後述の論文で紹介する“国内最大級の蓄電池併設型メガソーラー発電所”は、DC 容量 92.2 MW、リチウムイオン電池容量 25.3 MWh を配置した総出力 AC59.4 MW の発電所であり、2020 年 2 月 1 日から FIT 売電が開始され、順調に稼働している（159 ページ、「国内最大級の蓄電池併設型メガソーラー発電所」参照）。

もう一つの課題は、コストを抑制しつつ、出力変動に伴う系統電圧変動を抑制できるシステムの実現である。富士電機は、特別な静止型無効電力補償装置（SVC：Static Var Compensator）などを追設せずに、パワーコンディショナ（PCS：Power Conditioning System）が持つ無効電力補償機能を用いて、系統電圧の電圧変動率を規定値以内に抑制できるシステムを開発した。

一方、こうした国内の実績を踏まえ、グローバルな視点でも低炭素社会実現の取組みを強化している。特に、東南アジアは今後も大きな経済成長が期待され、電力需要は高まっている。また、元々日射量が多いため、再エネであるメガソーラー発電に掛ける期待は大きい。ただし、いずれの国においても系統線は拡充の途上にあるため、ピークカットや変動抑制の技術が必須となっている。

富士電機では、この市場に焦点を当て、過積載率^(※9)

を 200% にまで高め、メガソーラー発電所の発電量の向上に貢献する製品として、DC1,500 V 対応の大容量 2,500 kVA の新型 PCS を開発した。

富士電機は、グローバルな視点で低炭素社会の実現を目指し、系統制約対応機器や蓄電池制御技術を生かして各国や地域の特性を考慮しつつ、低コストで安定した電源としてのメガソーラー発電の普及に貢献していく所存である。

⑥ 風力発電分野

欧米諸国において低炭素化は、メガソーラー発電と並び風力発電、特に、洋上風力発電が牽引している。わが国においても、再エネの重要な分野として風力発電にも FIT の適用が設けられていて、より大規模に風力発電を普及させる目的で、2018 年 12 月に「海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用に関する法律」（再エネ海域利用法）が公布され、需要が長期的に増加していくものと期待されている。

具体的には、北海道・東北地区の陸上・洋上案件に対して、系統制約の観点から設置に厳しい制約が従来設けられていた。しかし、この導入の促進策により、これらの地域において多数の計画が動き出している。富士電機は、自社の得意とする系統連系や電力安定化などの設備とプラントエンジニアリング力を軸として、数十 MW 級の風力発電所の EPC 案件を手掛けている。

北海道と東北は、風力発電に適する風況の良い地域であるが、送電網の容量が比較的小さく、風況の変化に伴う出力変動による電力品質への影響が課題となっていた。例えば、北海道電力株式会社では“風力発電設備の出力変動緩和対策に関する技術要件”が 2016 年度に発表され、新規に建設する風力発電所においては蓄電池などを設置し、電力系統の周波数調整に影響が出ないレベルに出力変動を抑えることが条件とされている。

富士電機は、同管内において太陽光発電での変動抑制システムを多数納入してきた実績があり、このような要件に対しても十分に応えることができる技術力・システム供給力を持っている。また、これらのシステムの最適化、すなわち、プラントのコストをトータルで低減することに大きく貢献できる新型蓄電池 PCS（「PVI1400CJ-3/2600」、DC1,400 V 2,600 kVA）も開発しており、2021 度に発売して市場に展開する予定である。

(※9) 過積載率

太陽光発電は日がかげると発電量が低下するため、あらかじめ余裕を持たせて太陽光パネルを設置する方策が取られる。一方、発電した電気を電力会社の系統に

接続しようとする際に、系統連系協議を行って容量が定められ、適切な PCS が選定される。過積載率とは、定格容量に対してどれだけの太陽光パネルを設置しているかを示すもので、120 ~ 170% が一般的である。

この値を大きく取ることができれば投資回収を早めることができる。経済産業省のホームページにも“過積載にはメリットもあるので、禁止にはしません”となっている。

さらに、今後の洋上風力発電の普及を視野に入れたときに、275 kV 受変電設備の設計・供給や長距離送電において課題である電圧変動対策や高調波共振対策などを解決する必要がある。また、顧客のさまざまな要望に応える必要もある。そこで、これらの課題の解決や要望に応えるため、シミュレーション技術やケーブルの浮遊容量による影響対策についても技術を蓄積している。

⑦ 燃料電池分野

低炭素社会の実現に寄与するものとして、水素の利活用がある。その代表機種である燃料電池は、近年、家庭用燃料電池コージェネレーションシステム^(注)（エネファーム^(注)）や燃料電池自動車（FCV）、屋内用フォークリフト、携帯基地局用の非常用電源、欧米や韓国での発電事業など、さまざまな用途において普及が加速している。

発電には水素が必要であるので、水蒸気改質と呼ばれる化学反応を使った水素製造方法により、都市ガスやLPG、下水消化ガスなどのバイオガスが使用できるようにしている。また、将来水素社会が到来すると、直接水素を利用する機会が増加する。

燃料電池は燃料を燃焼させることなく電気化学反応により発電するため、発電装置の大きさに依存せず、発電出力が小さくても高い発電効率を得られるという特徴がある。また、燃料の燃焼を伴わないため、排ガス中に大気汚染物質をほとんど含まず、低騒音・低振動である。また、発電とともに排出される熱を利用することで、90%という高い総合効率を提供することが可能である。

燃料電池は、表1に示すように使用される電解質の種類によって、りん酸形燃料電池（PAFC：Phosphoric Acid Fuel Cell）、固体高分子形燃料電池（PEFC：Polymer Electrolyte Fuel Cell）、熔融炭酸塩形燃料電池（MCFC：Molten Carbonate Fuel Cell）、固体酸化物形燃料電池（SOFC：Solid Oxide Fuel Cell）などがあり、動作温度や発電効率、主な用途などが異なる（表1）。

富士電機は、排熱温度や電解質の安定性に優れたりん酸形燃料電池に着目し、1973年に開発に着手し

表1 燃料電池の種類と発電効率、用途

タイプ	りん酸形 (PAFC)	固体高分子形 (PEFC)	熔融炭酸塩形 (MCFC)	固体酸化物形 (SOFC)
作動温度	190~200℃	70~90℃	600~700℃	700~1,000℃
発電効率	40~45%	35~40%	45~50%	45~60%
主な用途	業務用	家庭用 自動車用	業務用	業務用 家庭用

た。国の支援、ガス会社および電力会社の協力の下、50 kW ~ 5 MW のさまざまな容量で 90 台を超えるフィールドテストを実施した。1998 年には、これらの経験とノウハウを反映させた 100 kW 商用機の販売を開始し、2020 年 3 月までに世界で 100 台を出荷し、82 台が稼働している。この内、33 台はドイツ、韓国をはじめとした国外に納入した。また、32 台は燃料として再エネである消化ガスを使用している。富士電機の燃料電池発電装置の最長累積運転時間は 13 万時間（15 年）に到達していて、高い耐久性と信頼性を実証している。

富士電機は、低炭素社会の実現に向けて、りん酸形燃料電池の設置性の向上、機能の高度化、用途の拡大および低価格化に取り組んでいる。燃料電池の普及促進策を進めるドイツや韓国などの国々における展開を進めている。また、国内では再エネとして FIT が適用可能な消化ガスへの展開を推進している。また、上述した水素社会の到来に向けて、直接水素を燃料として利用するプロセスに最適化し、省スペース化、低コスト化を図った水素燃料専用りん酸形燃料電池を開発しており、低炭素社会実現への一助となるように鋭意取り組んでいる（165 ページ、「韓国向けりん酸形燃料電池」参照）。

⑧ 火力発電分野

COP21 をはじめとする国際会議において、CO₂ の削減目標が示されるなど世界的なエネルギー供給の低炭素化への動きの中、化石燃料を用いた発電設備は縮小傾向である。

国内においても、2020 年 7 月に表明された石炭火力の縮小方針ののっとり、非効率な石炭火力を将来的にフェードアウトさせる新たな規制措置について具体的な検討が進められている。

しかしながら、現状の高い依存度とエネルギーの安定供給の観点からも、化石燃料による発電は減少することはあってもなくなることはないと思料される。再

〈注〉エネファーム：東京ガス株式会社・大阪ガス株式会社・JXTG エネルギー株式会社の商標または登録商標

（* 10）コージェネレーション

コージェネレーション（cogeneration）とは、一般的には熱併給発電と呼ばれているもので、発電と同時に

温熱を供給することによって、エネルギーを有効利用する高効率なシステムである。燃料電池はこの特性に優れており、りん酸形では、発電効率 42%、排熱効

率 49% となり、最大 91% までエネルギー利用効率を高めることが可能である。

エネの比率増加に伴う電力システムの安定性維持の観点から、高効率で環境負荷の低いガスタービンコンバインドサイクル（GTCC）発電の需要は継続が見込まれる。

このような動向において富士電機は、火力発電においても、経済性の向上と環境負荷の低減を実現するため効率を向上させ、火力発電設備のライフサイクルにおける顧客価値の創出に貢献している。具体的には、蒸気条件の高温・高圧化をはじめ、中・小容量タービンの再熱サイクル^(※11)の採用、蒸気タービンの小型化やケーシング数の削減など、確実に信頼性の高い技術を提供している。

これら、今まで蓄積してきた技術やノウハウを駆使して、内陸型の大型 GTCC 発電所を 2019 年度に引き渡し、系統全体のレジリエンス向上に貢献〔170 ページ、「日本初の内陸型大型 GTCC（ガスタービンコンバインドサイクル発電）プロジェクト—発電機現地製作技術—」参照〕するとともに、現在は超々臨界圧火力発電、バイオマス発電などの案件を抱え、工期どおりの竣工（しゅんこう）を目指して設計、製作、建設を進めている。

アフターサービスにおいては、単なる定期補修や延命化だけではなく積極的に最新技術を適用して効率向上や運用改善、種々の診断技術を適用した予防保全によって稼働率の大幅な向上などに取り組んでいる（175 ページ、「オンラインガス分析による回転機固定子巻線の劣化診断」参照）。また、米国、台湾、韓国、東南アジア、中近東などの国外のサービス拠点の充実を図るとともに、現地で行う補修技術を開発して発電所の停止期間の短縮に貢献している。さらに、ロボット技術を活用した診断システムなどを積極的に開発し、診断による設備の停止期間の大幅短縮に取り組んでいる。

今後も、顧客の多種多様なニーズに確実に応えながら積極的なサービスの提案活動を行い、顧客価値を創造していく。

⑨ 原子力分野

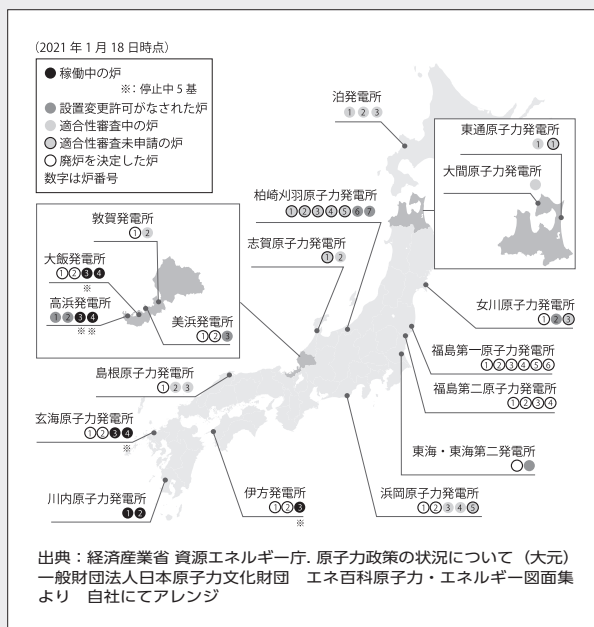
原子力発電は、第 5 次エネルギー基本計画における電力の需給見通しで 2030 年において 20～22% を担う電源と位置付けられている。このエネルギーミックス比率は、2013 年と比べてエネルギー起源の CO₂ 排出含む温室効果ガスの 26% 削減という目標とも整合が取れたものとなっている。ただし、安全の確保が大

前提であり、福島第一原子力発電所の事故の教訓を生かした新規制基準を満足することが再稼働や建設継続の必須条件である。このため、既に 24 基の廃炉が決定し、2019 年末において 9 基が再稼働済みであり、27 基が再稼働を目指している。国内の原子力発電所の稼働状況を図 2 に示す。

現在、原子力損害賠償・廃炉等支援機構（NDF）を中心に廃炉計画の達成に向けた汚染水対策や、燃料デブリを取り出すための技術開発および装置設計が、国を挙げて鋭意進行中である。同時に、使用済燃料を再処理し、回収するウラン・プルトニウム混合物を平和的に有効利用しようという核燃料サイクルについても鋭意推進されている。原子力の分野では、当面、原子力発電所の再稼働と廃炉に向けた取組みの両面から継続したソリューション技術が求められている。

富士電機は、原子力発電所の廃止措置において、高速増殖原型炉“もんじゅ”の燃料取出し・燃料洗浄のほか、解体廃棄物を処理するセメント固化設備の設計を進めている（179 ページ、「高速増殖原型炉もんじゅにおける燃料体取出し技術」参照）。

また、原子力施設の運転や廃炉の過程で発生する放射性廃棄物の安全な処理・処分や保管を可能とするため、種々の優れた特徴を持ったジオポリマー材料を活用する固化技術の研究・開発を、米国の Jacobs



社と共同で進めている（185 ページ、‘先進固化技術 “SIAL®” による放射性廃棄物処理’ 参照）。

さらに、核燃料サイクルに貢献するためにウラン・プルトニウム混合酸化物（MOX：Mixed Oxide）燃料の製造設備、遠隔ハンドリング装置、耐震配電盤、防火・消火などにおいて、新規制基準に対応した技術や製品を提供している。

10 あとがき

エネルギーシステムの一翼を担う、発電すなわち創エネルギーの役割は、電力を効率的に創り出すことにとどまらず、電力および熱の有効な利活用にも広がっていくはずである。富士電機はこれからも、お客さまに目を向け、声を聞き、お客さまと力を合わせ、お客さまの価値創造を達成していくために、たゆまぬ技術革新とサービスの向上に努めていく。

そして、安全・安心で環境にやさしい創エネルギーと社会インフラソリューションの提供により、持続可能な社会の実現に大きく貢献し続けていく所存である。

参考文献

- (1) 経済産業省 資源エネルギー庁 スペシャルコンテンツ。 “「法制度」の観点から考える、電力のレジリエンス ⑤再エネの利用促進にむけた新たな制度とは? ”。 https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/denjihokaisei_05.html, (参照 2020-10-08)。

(2) 山田茂登, “富士電機の地熱発電所建設事例”, 2019 年度 第5回研究会2020.1.16. 一般財団法人 エンジニアリング協会, 地熱発電・熱水活用研究会 資料5-3. https://www.ena.or.jp/gec/project_info, (参照 2020-09-23)。



堀江 理夫

富士電機株式会社執行役員、発電プラント事業本部長。



上野 康夫

火力・地熱プラント事業運営に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部発電事業本部長。



北西 啓一

太陽光・風力など再生可能エネルギー事業運営に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部エンジニアリング統括部長。富士グリーンパワー株式会社代表取締役社長。



インドネシア・ムアララボ地熱発電所

Muara Laboh Geothermal Power Plant in Indonesia

服部 康之 HATTORI, Yasuyuki

富士電機のインドネシアにおける地熱発電所のシェアは約 50% を占め、同国の電力関係者から高い評価と信頼をいただいている。2019 年 12 月に営業運転を開始したインドネシア・スマトラ島に納入したムアララボ地熱発電所（発電容量 85.26 MW）は、住友商事株式会社と現地エンジニアリング会社の PT.Rekayasa Industri がコンソーシアムを組織し、PT.Supreme Energy Muara Laboh から一括請負工事契約として受注した。住友商事株式会社の下、富士電機はテクニカルリーダーとしてプラント全体のエンジニアリングを推進したほか、蒸気タービン、発電機、電動機、制御盤などを納入した。

Fuji Electric has a market share of approximately 50% in geothermal power plants in Indonesia, being highly regarded and trusted by the country's electricity industry. On December 2019, the Muara Laboh geothermal power plant (power generation capacity: 85.26 MW) in Sumatra, Indonesia started operation, for which a consortium of Sumitomo Corporation and PT. Rekayasa Industri, a local engineering company, had concluded a turnkey contract with PT. Supreme Energy Muara Laboh. As a subcontractor to Sumitomo Corporation, we were responsible for the engineering of the entire plant as the technical leader and delivered equipment, such as steam turbines, generators, motors and turbine governor regulators.

① まえがき

世界における地熱発電の設備容量は年々増加傾向にあり、図1に示すように 2010 年時点の 10,716 MW と比較すると 2018 年は 14,600 MW と約 1.4 倍に増加している。中でもインドネシアの伸長は目覚ましく、2010 年から 2018 年までの間で約 1.6 倍の伸びを示している。

富士電機は、インドネシアを重要な市場と捉え、これまでもインドネシアの多くの地域に地熱発電設備を納入している。

今回、富士電機がプラント全体のエンジニアリングと主要機器の供給を担当し、2019 年 12 月に営業運転を開始したインドネシア・スマトラ島の発電容量 85.26 MW の

ムアララボ地熱発電所について述べる。

② インドネシアの地熱資源

インドネシア国内には、発電容量にして 29,000 MW 相当の地熱資源があると推定されており、世界第 2 位の資源保有量である。富士電機は、ウルブル 1～4 号機（計 226 MW スマトラ島）、ワヤンウィンド 1 号機（110 MW ジャワ島）、ワヤンウィンド 2 号機（117 MW ジャワ島）など、地熱発電としては世界的にも最大級の発電容量の設備を納入している。その一方で、既に開発され発電に利用されている資源量は 7% 程度にとどまり、開発の余地が大きく残されている。インドネシア政府としても、世界的

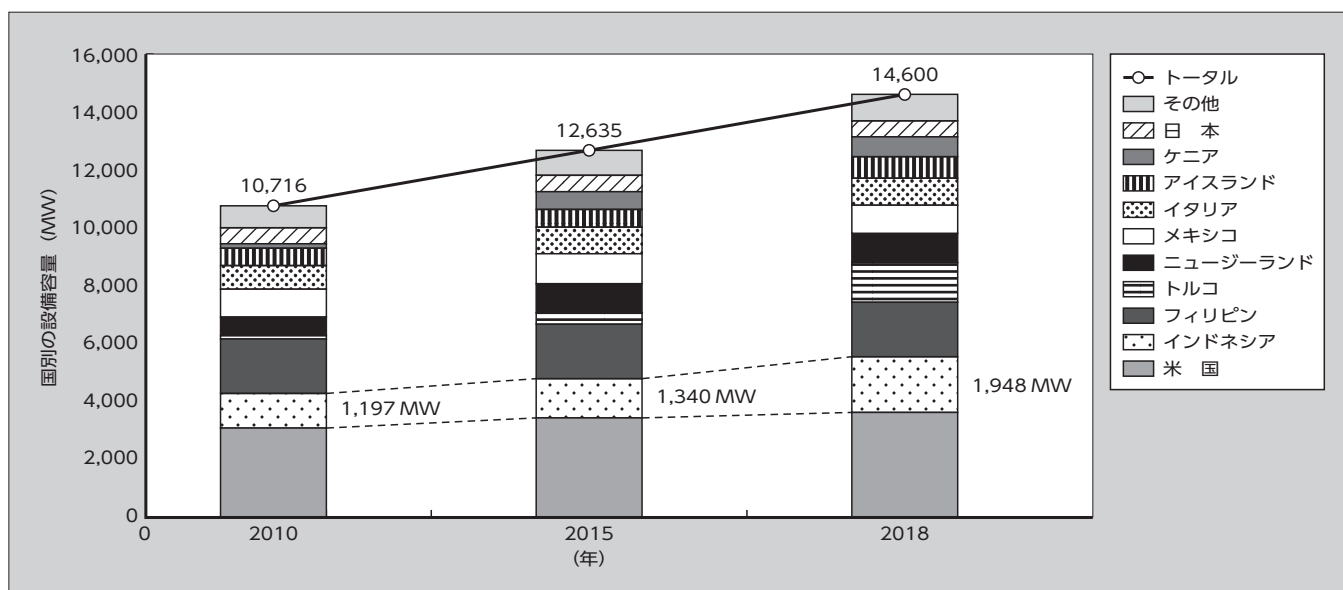


図1 世界の地熱発電市場の動向

な環境意識の高まりを受け、発電過程で CO₂ を排出しない地熱発電設備の総容量を 2025 年までに 7,200 MW まで増やす政策を発表しており、将来的にも地熱発電設備のさらなる需要拡大が見込まれる。

地熱発電設備の発電容量は、生産井から供給される地熱資源（蒸気、熱水）の圧力や温度、流量などの条件によって決まるため、ムアララボ地熱発電所のように大容量の設備を建設できるということは、インドネシアには非常に高いエネルギーを持つ良質な地熱資源が存在していることを示している。中でも、スマトラ島には最大のポテンシャルがあると推定されており、本稿で述べるムアララボ地熱発電所のほか、近年のインドネシア地熱発電プロジェクトの多くがスマトラ島で進行している。

③ プロジェクトの概要

図 2 に示すように、本プロジェクトは住友商事株式会社（住友商事）がインドネシアの大手エンジニアリング会社である PT. Rekayasa Industri (REKIND) とコンソーシアムを組織し、このコンソーシアムは 2017 年 3 月に独立系発電事業者の PT. Supreme Energy Muara Laboh (PT. SEML) から一括請負工事 (EPC) 契約として受注した。

PT. SEML はインドネシアの国営電力企業である PT. PLN と電力販売契約 (PPA) を結んでいる。富士電機は住友商事の下、テクニカルリーダーとして参画し、プラント全体のエンジニアリングを推進したほか、発電設備の設計・供給、指導員の派遣などを担当した。

図 3 に本地熱発電所の建設地を示す。本地熱発電所は、スマトラ島西部に位置する。図 4 に発電所の全景を示す。

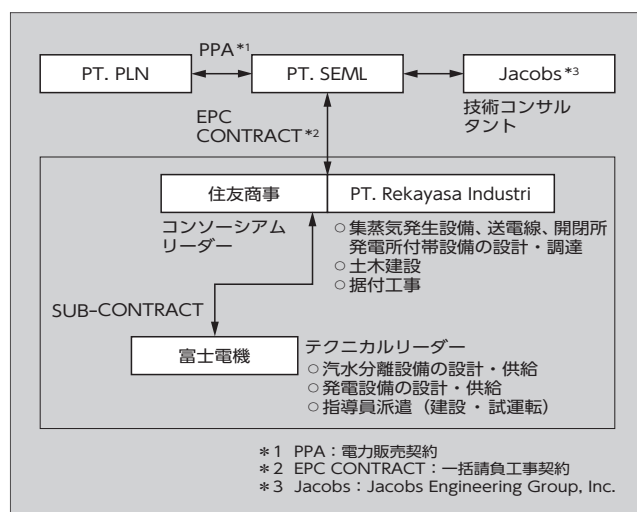


図 2 プロジェクト体制

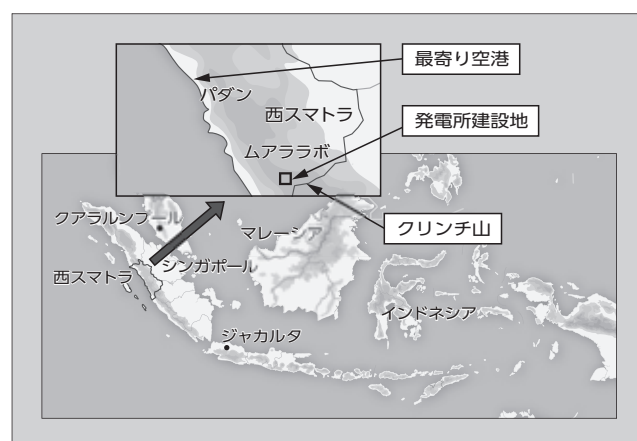


図 3 ムアララボ地熱発電所建設地点

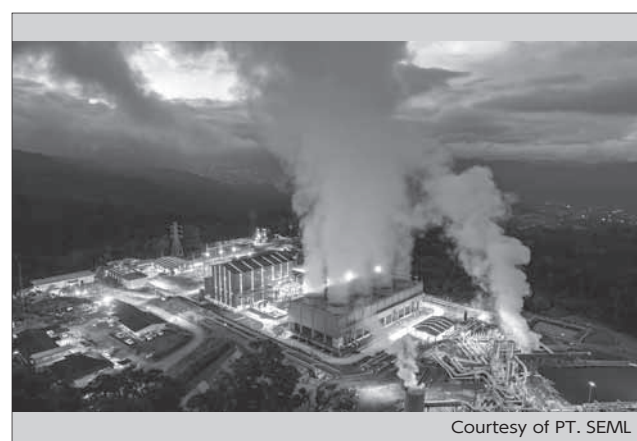


図 4 発電所全景

④ 発電設備の概要

図 5 に本地熱発電所の主要系統設備を示す。

地下から熱水と蒸気を取り出す生産井や、熱水を地下に戻す還元井と発電所は、輸送配管によって結ばれている。本地熱発電所の地熱資源は、複数の生産井から採取される蒸気と熱水の混ざった二相流の状態では取り出される。二相流は、輸送配管によってセパレータ（汽水分離設備）に集められ、そこで蒸気と熱水に分離される。本地熱発電所ではダブルフラッシュシステムを採用しており、まず高圧セパレータにて高圧蒸気と熱水に分離し、分離した熱水をフラッシュさせ、再度低圧セパレータで気液分離することで低圧蒸気を取り出す。セパレータからタービンまでつながる蒸気配管では、流体から液分や湿分を適切に排出しないと、ウォーターハンマ

〈注 2〉ダブルフラッシュシステム：2 段階で汽水分離を行い、高圧蒸気と低圧蒸気を抽出して無駄なく地熱資源を利用する方式である。

〈注 3〉フラッシュ：高温高圧の熱水が低圧力環境下において再蒸発することである。

〈注 1〉 PT：株式会社（Perseroan Terbatas）

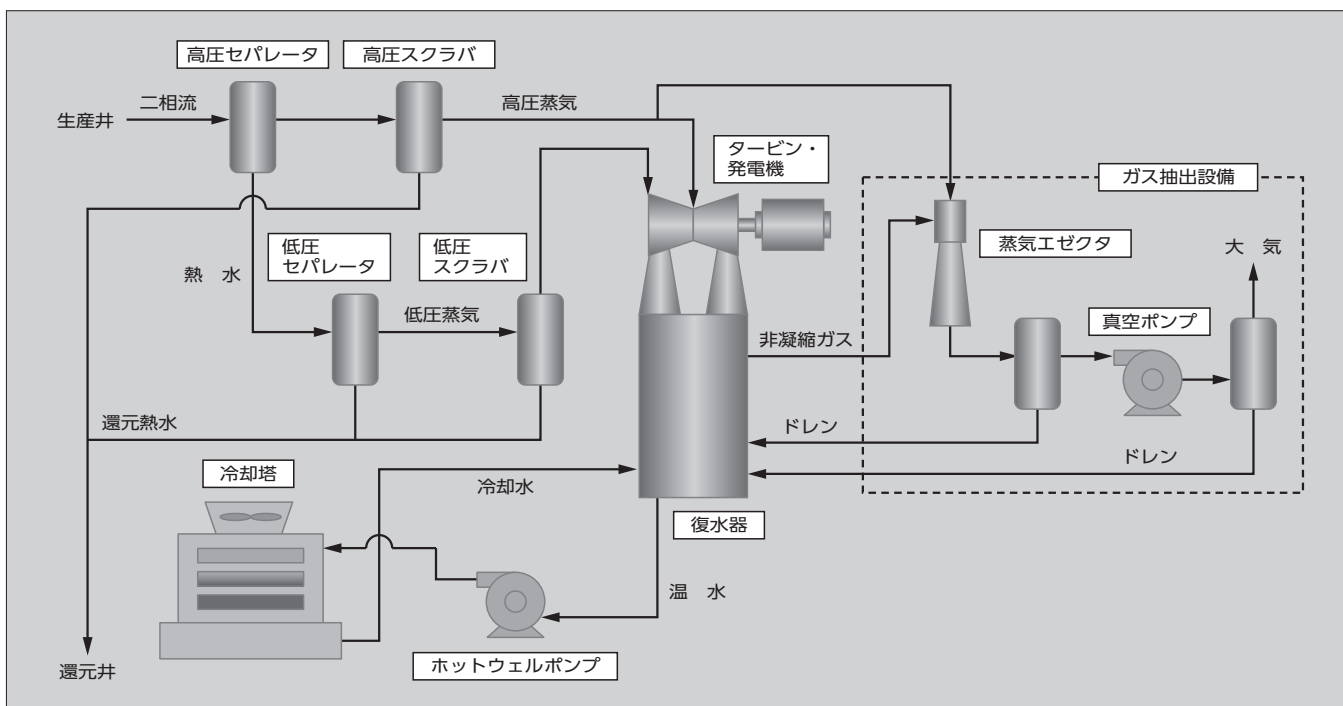


図5 地熱発電所の主要系統設備

により配管や連結する機器の損傷につながる可能性があるため、一定の間隔でドレンポッドを設置し、液分を取り除く設計としている。高圧蒸気と低圧蒸気は一定圧力に制御され、スクラバによって湿分をさらに除去した後、蒸気タービンに送って発電に使用する一方、分離した熱水は還元井を経て地下に戻る。

地熱発電所の発電容量は、生産井から得られる蒸気特性（圧力・温度・流量）に依存するため、自然条件によって決まる。その決められた蒸気条件の中でプラント全体の性能を最適化するためには、冷却設備やガス抽出設備といったコールドエンドと呼ばれる設備の機能で、復水器内の圧力をできるだけ低くし、タービンの入口と出口のエネルギー落差を大きくとることが重要なポイントとなる。

冷却設備は主に、復水器、ホットウェルポンプおよび冷却塔で構成されている。発電に使われた蒸気を凝縮する復水器から温水をホットウェルポンプにて冷却塔に送り出し、冷却塔にて冷やされた冷却水が復水器に戻り、蒸気の凝縮に使用され循環する系統となっている。また、ガス抽出設備は、蒸気中に含まれる非凝縮ガス（CO₂、H₂S、空気など）を、蒸気エゼクタと真空ポンプによって復水器から取り除き、系外に排出する機能を持っている。地熱蒸気中には多くの非凝縮ガスが含まれるため、火力発電所などの設備と比較して大容量のガス抽出設備が必要となる。非凝縮ガスを適切に排出できないと、復水器内の真空度が低下し、タービンの仕事量が減り、プラント全体の性能（効率）が悪化するため、ガス抽出設備の役割は重要である。

〈注4〉ウォーターハンマ：配管内圧力の急激な変化により、内部流体が急速に動かされ衝撃が発生する現象である。

ここまでの地熱発電設備としての主要な設備であり、その他には、補助冷却水設備や薬品注入設備など、発電プロセスに関わる一連の設備も富士電機の供給範囲であった。

5 主要設備の基本仕様

表1に主要設備の基本仕様を示す。本地熱発電所に納入した製品のうち、蒸気タービン、発電機、電動機、制御盤（TGR：Turbine Governor Regulator）は富士電機製である。一方、冷却塔や汽水分離器、FRP製配管などはインドネシア国内から調達し、同国内での調達比率を高めることでPT. SEMLの要望に応えた。

6 プロジェクトの特徴

6.1 悪い交通の便かつ悪天候

本地熱発電所は、スマトラ島西部のバリサン山脈の最高峰であるクリンチ山（標高3,805m）から約10km離れており、パダンにある最寄りの空港からでも車で5時間程かかり、周辺に小さな集落があるだけの隔離された地域である。本地熱発電所は、標高1,400mの山中ということもあり、雨期、乾期に関係なく雨が多いほか、通信ネットワークもつながりにくいなど、多くの悪条件が重なっていた。輸送路についても、大部分が山道であることから、急な勾配や狭い道幅の箇所が多く、大型の機器を輸送するため入念な調査と事前準備を十分に行い、全ての機器を無事現地に届けることができた。

特に、輸送したパーツの中で最も質量があった大型の発電機固定子（約100t）を、険しい山道の中、輸送することは大きなリスクがあったが、事前に問題点を洗い出して

表1 主要設備の基本仕様

	蒸気タービン	発電機	ガス抽出設備	冷却塔
				
型式	○単気筒ダブルフロー ○反動式 ○下向き排気	○全閉空気冷却ターボ発電機	○ハイブリッド式 蒸気エゼクタ・真空ポンプ	○強制通風対交流型
基本仕様	○発電端出力：85.26 kW ○入口蒸気圧力： 高圧 0.84 MPa abs 低圧 0.39 MPa abs ○回転数：3,000 min⁻¹	○容量：105 MVA ○励磁方式：ブラシレス ○電圧：11 kV ○周波数：50 Hz ○定格効率：0.85（遅れ）	○構成： 2×50% 2段エゼクタ+真空ポンプ 1×50% 3段エゼクタ（バックアップ）	○セル数：8 ○躯体：コンクリート製 ○設計湿球温度：18.3℃

対策を講じたことで、実際の輸送（図6）ではトラブルなく運搬できた。現地において、日本からの支援を受けにくい環境の中、現地で指導員などを積極的に採用し、富士電機の人員とチームを形成して対応に当たり、据付けや試運転などの業務を遂行し、無事顧客への引渡しを完遂した。

6.2 独立系発電事業者による高い要求レベル

本プロジェクトは、独立系発電事業者によるプロジェクトファイナンス案件であり、従来の同国向け案件と比較して、厳しくプロジェクトの採算性を問われた。PT. SEMI は出資者に対して、融資に値するプロジェクトであることを示す必要があることから、コンソーシアムに対し、プロジェクト期間をとおして、技術、品質、納期、安全などあらゆる観点で要求を満たしていることを説明するよう求めてきた。これに対し、技術仕様書や図面、品質記録、工程進捗状況などを随時更新し、顧客の求める最新状況が常に明確となるよう情報を整理し、速やかに対応した。



図6 発電機固定子の輸送状況

〈注5〉プロジェクトファイナンス：企業がプロジェクトから得られるキャッシュフローをもとに資金を調達する方法である。

富士電機および REKIND は、地熱発電設備を熟知した顧客やコンサルタントからの厳しい指摘に応え、真摯な対応を心掛けることで顧客との信頼関係を構築することができた。その結果、地熱発電所を無事納期どおりに完成させることに成功した。

7 あとがき

インドネシア・ムアララボ地熱発電所について述べた。インドネシアは国策として地熱発電所を使用した地熱エネルギーの利用拡大を掲げている。富士電機は、同国の持続可能な開発目標に向けて、継続して協力していく所存である。

また、富士電機は近年、ケニアやメキシコといった新しい市場を開拓しているほか、日本国内の地熱発電プロジェクトも遂行している。今後も国内外に関わらず、世界的な低炭素社会の実現に向け、地熱発電技術を生かして積極的に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) “Geothermal Power Generation in the World 2010–2014 Update Report”, <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGASTandard/WGC/2015/01001.pdf>, (accessed 2020-07-14).
- (2) “2016 Annual U.S. & Global Geothermal Power Production Report”, https://www.eesi.org/files/2016_Annual_US_Global_Geothermal_Power_Production.pdf, <https://www.thinkgeoenergy.com/the-top-10-most-read-geothermal-news-of-2019-on-thinkgeoenergy/>, (accessed 2020-07-14).
- (3) THINK GEONERGY. <https://www.thinkgeoenergy.com/the-top-10-most-read-geothermal-news-of-2019-on-thinkgeoenergy/>, (accessed 2020-07-14).



服部 康之

火力・地熱発電プラントの機械・配管エンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部発電事業部火力・地熱プラント総合技術部。

特集

低炭素社会実現に向けた富士電機の発電プラント事業



大型の水力発電所向けハイブリッドサーボシステム

Hybrid Servo System for Large Hydropower Station

磯野 与志雄 ISONO, Yoshio

笹川 剛 SASAKAWA, Takeshi

老朽化した水力発電設備の更新工事において、20 MW を超える大容量水車に対し、初めてハイブリッドサーボシステム（HSS）を導入した。富士電機と電源開発株式会社は、共同開発した“HSS による入口弁操作”と“アキュムレータ複合制御”の導入により、システム構成の簡素化、保守の合理化、信頼度向上を図り、従来に比べて HSS 適用範囲の拡大とコストダウンを可能にした。この改良技術は、再生可能エネルギーである水力発電の発展に大きく貢献できるものと認められ、令和元年度新エネルギー財団会長賞を受賞した。

In a replacement project for aging hydropower facilities, Fuji Electric introduced our hybrid servo system (HSS), which is the first for large-capacity turbines exceeding 20 MW. Fuji Electric and Electric Power Development Co. Ltd. jointly developed “inlet valve operation with HSS” and “control system that combines HSS and an accumulator”. Using these technologies simplified the system configurations, streamlined the maintenance and increased the reliability, eventually allowing HSS to expand the application and decrease the costs. These enhanced technologies were recognized as a major contribution to the development of hydropower generation, a renewable energy source and were awarded the New Energy Foundation Chairman’s Award.

1 まえがき

国内の水力発電所は、戦後の復興期を支える主要電源として 1950 年代から盛んに建設された。その多くが運転開始から 50 ～ 70 年ほどが経過し老朽化が進み、更新時期を迎え、大規模な設備更新が行われている。

電源開発株式会社（J-POWER）の静岡県にある秋葉第一発電所では、運転開始から約 60 年間経過して老朽化した設備の一括更新工事をすることにした。

J-POWER は、富士・フォイトハイドロ株式会社（FVH：水力発電設備の設計、製作、据付、試験に特化した富士電機とフォイトハイドロ社が共同出資して設立した会社）と検討を進めた結果、設備信頼度の向上、安全性・保守性の確保、コストダウンなどさまざまな観点から、水車操作機構に、最新のハイブリッドサーボシステム（HSS：Hybrid Servo System）の導入を決めた。

このシステムは、従来の圧油装置に比べて環境リスクが低く、機器の簡素化・省スペース化が可能で保守性に優れているが、水車に適用できる大容量の電動サーボモータがないという課題があるため、大容量水車への実績がなかった。

本稿では、課題を克服し、2 万 kW 以上の大容量水車への複数ユニットからなる HSS の採用と、J-POWER と FVH が 2 件の特許を取得している HSS の新しい制御方法などについて述べる。

2 HSS の導入の経緯、課題

2.1 HSS の導入の経緯

図 1 に従来の油圧式のシステム構成を示す。水力発電所では、水車の上流側に設けた入口弁を使って、運転・停止

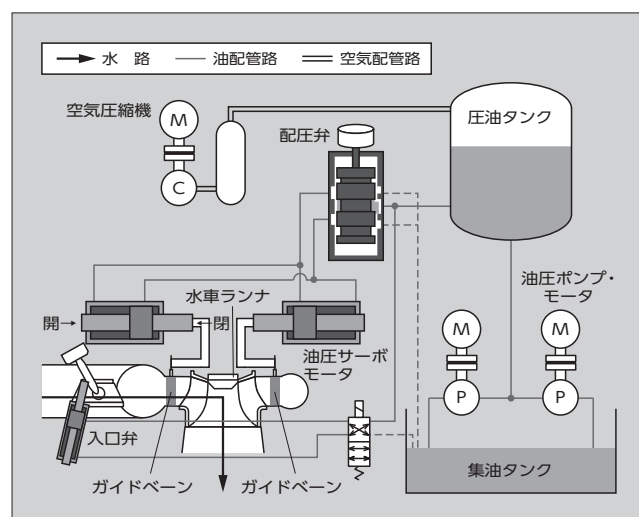


図 1 従来の油圧式のシステム構成

に伴い水路を開閉する。ガイドベーン（案内羽根）を水車ランナの手前に設け、この開度を調整することで水量を増減し、出力を調整している。

入口弁とガイドベーンの操作には、従来、油圧サーボモータを用いる油圧式が主に使用されてきた。しかし、多くの補機を必要とするため保守・点検の負担が大きいこと、数千リットル以上もの操作油を必要とするため漏油した場合の環境へのリスクが大きいことなどが課題であった。一方、油を使わない電動サーボモータを用いる電動式は、周辺機器が大幅に簡素化できるが、操作力が小さく、適用範囲が小容量水車に限られるという課題があった。

そこで、2002 年に FVH は世界で初めて、中・小容量向け水車の操作機構に油圧式と電動式を融合した HSS を開発した。図 2 に、HSS の基本装置構成を示す。入口弁の操作機構を除いて、従来の油圧サーボモータを、圧油タ

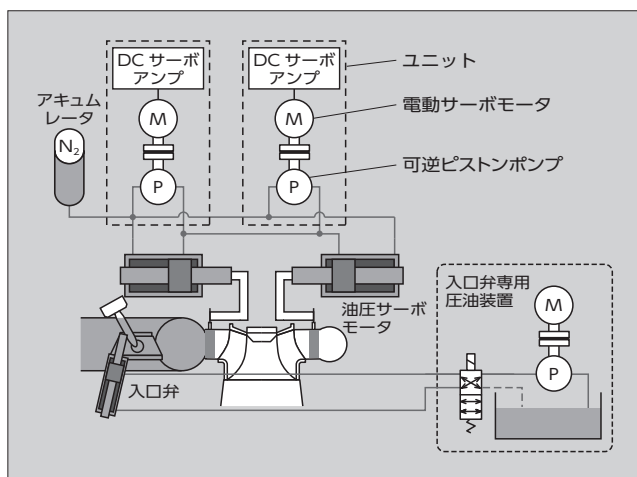


図2 HSSの基本装置構成

ンクなど圧油装置を使わない電動サーボモータに替えたことが特徴である。HSSは、簡素で無駄のない装置構成で、油量や部品点数の削減、省スペース化を実現した。

しかし、大容量水車向けに十分な容量を持ったDC電源の電動サーボモータがないため、大容量水車では従来の油圧式を選定するしかなかった。

2014年に発電所出力45,300kW（22,650kW×2台）の秋葉第一発電所の一括更新プロジェクトが始まった。J-POWERとFVHは、HSSを過去に採用実績がなかった大容量水車への導入に挑んだ。

2.2 大容量水車へのHSS導入の課題

秋葉第一発電所のような大容量水車に中・小容量水車向けのHSSの設計思想をそのまま適用すると、11kWより大きな容量のDC電源電動サーボモータがないため、複数のユニット並列の装置構成とする必要があり、部品点数が多くなり、保守の負担増が懸念された。なお、本稿では図2に示すとおり、DCサーボアンプと電動サーボモータ、可逆ピストンポンプの組合せをユニットと称する。

そこで、J-POWERとFVHは、大容量機へHSSを採用するに当たり、ユニット台数を増やさずに、かつ装置構成を単純にしつつ要求仕様を満足できるように、HSSを改良することにした。これを実現する上で、次に示す課題があった。

(1) 入口弁の操作機構における課題

HSSを適用する場合、入口弁を開閉させるために入口弁専用の操作機構が別に必要となる。秋葉第一発電所の入口弁はφ3,600mmと大口径で十分な容量のDCモータがなく電動式は採用できないため、当初は油圧式の入口弁専用操作機構を設置することとしていた（図2）。しかし、油を使った補機が増えるという課題があった。

(2) 多ユニット構成における課題

大容量水車にHSSを適用するためには、多ユニット構成となることから、部品点数の増加や設備信頼度、保守性、コストなど多くの課題があった。また、多ユニット構成のHSSでは、1ユニットでも故障すれば、水車を停止しな

ければならない重故障に相当するので、故障時の復旧迅速性や設備稼働率も課題となっていた。

3 HSSの改良

3.1 HSSによる入口弁操作

出力調整に伴い、HSSは操作油圧を常に変動や反転しながらガイドベーンを操作している。一方、運転中は入口弁の全開状態を保持するため、一定油圧を印加し続ける必要がある。従来のHSSでは、入口弁とガイドベーンの操作機構は別々に設けていた。しかし、ガイドベーン操作用のHSSでガイドベーンと入口弁の両方を操作できれば、入口弁専用の操作機構を省略し、コストダウンが可能になる。

さまざまな検討を行い、水車の起動停止時には、基本的に入口弁とガイドベーンの同時操作が不要な点に着目し、HSS故障時のバックアップとしてガイドベーン急閉鎖用に設けたアキュムレータ（蓄圧器）を活用することにした。図3に改良後HSSの装置構成を示す。従来の入口弁専用

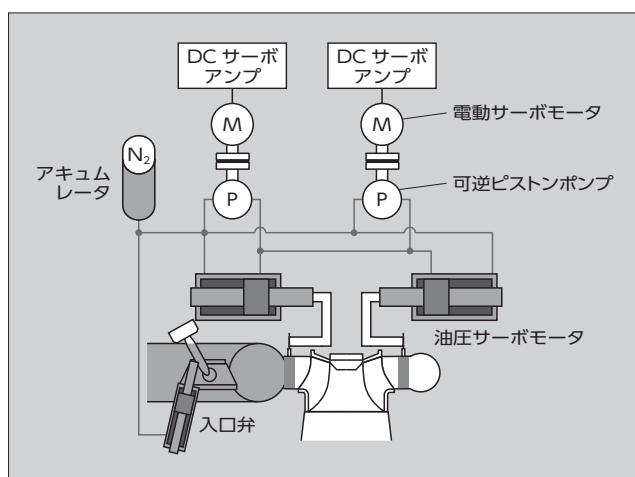


図3 改良後HSSの装置構成

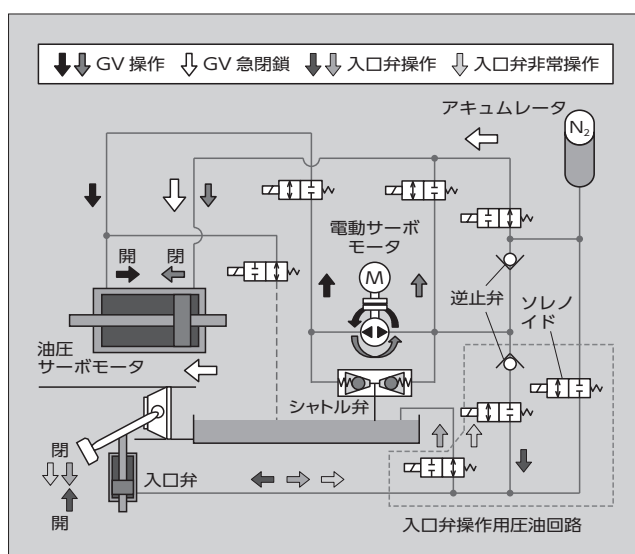


図4 改良後HSSの入口弁操作システム

圧油装置に替わり、アキュムレータを入口弁操作に用いた。また、図4に改良後HSSの入口弁操作システムを示す。油圧回路に三つのソレノイドと一つの逆止弁を追加したことにより、HSSで入口弁の操作が可能となった。

これにより、制御装置、保護装置を含む入口弁専用の油圧装置を省略した非常にシンプルな装置構成が実現した。⁽²⁾

3.2 アキュムレータ複合制御

次に、HSSの制御について説明する。図5に従来の負荷遮断概念図、図6にアキュムレータ複合制御の負荷遮断概念図を示す。図5と図6では、入口弁操作用圧油回路は省略した。また、負荷遮断とは、送電線の事故などにより、運転中の発電機の負荷が遮断され、水車の回転数が急上昇する状態を極力軽減するべくガイドベーンを急閉鎖する一連の動作のことである。

従来のHSSの負荷遮断の場合、図5に示すように、各ユニットの電動サーボモータ、可逆ピストンポンプが連動して、急閉鎖と調速制御を行う。水車の容量が大きくなると、ユニット数を増やす必要があった。また、多ユニット構成のHSSにおいて1ユニットでも故障すれば、要求性能（負荷遮断時のガイドベーン急閉鎖と調速制御）を満足できなくなるため、水車を停止しなければならない。少しでも発電所の稼働率を上げるため2ユニット構成のHSSにおいて、1ユニットでも運転継続が可能な方法を検討した。

図5に示すシステムには、HSSのバックアップとしてアキュムレータが設けられている。事前に蓄圧した油を使うことで、HSSが故障しても高速でガイドベーンを急閉鎖し水車を安全に停止することができる。ただし、一方向の単純操作なので、負荷遮断時の調速制御（定格回転速度からの偏差によりガイドベーンの開度を調整すること）はできない。一方、今回開発した図6に示すアキュムレータ複合制御仕様のHSS⁽³⁾では、ユニット1台でも、あらゆる状況に対応できるように、それぞれの長所をうまく組み合わせる方法とした。負荷遮断直後の回転速度の偏差が大きい時はアキュムレータで急閉鎖し、ガイドベーン開度ある

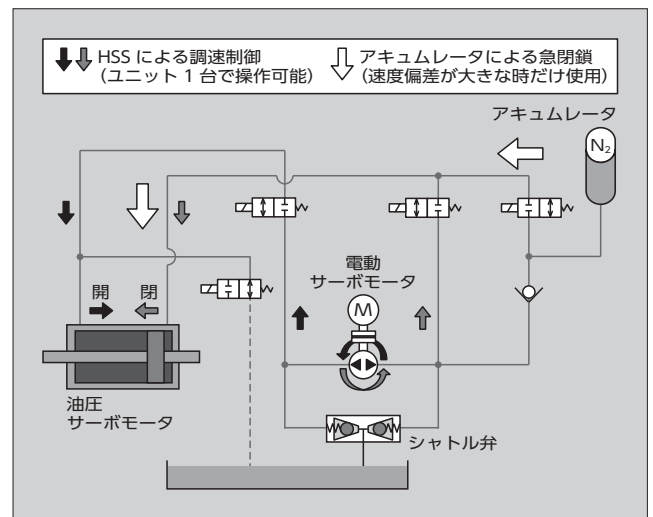


図6 アキュムレータ複合制御の負荷遮断概念図

いは速度偏差が小さくなればユニット1台で調速制御に切り替える。

図7にユニット2台（従来仕様）と1台（アキュムレータ複合制御）における4/4（最大出力）負荷遮断時のオシロスコープの波形を示す。ユニット2台の場合には、発電機回転速度の上昇率 ΔN が49%であるのに対して、ユニット1台（アキュムレータ複合制御）の場合には ΔN は51%であった（表1）。

ユニット1台でもアキュムレータと組み合わせることで、ユニット2台と同程度の負荷遮断操作が可能なることを確認した。

ユニット2台運転に比べるとユニット1台のアキュムレータ複合制御では多段折れの閉鎖特性となっている。しかし、回転速度に異常はなく、滑らかに制御が移行できおり、次のことが確認できた。

(a) 不動時間 τ

遮断器が開放してからガイドベーンが動き出すまでの不動時間 τ は0.15秒で、十分な即応性を確保している。

(b) 等価閉鎖時間 T_c

腰折れがなく同じスピードでガイドベーンを全閉する場

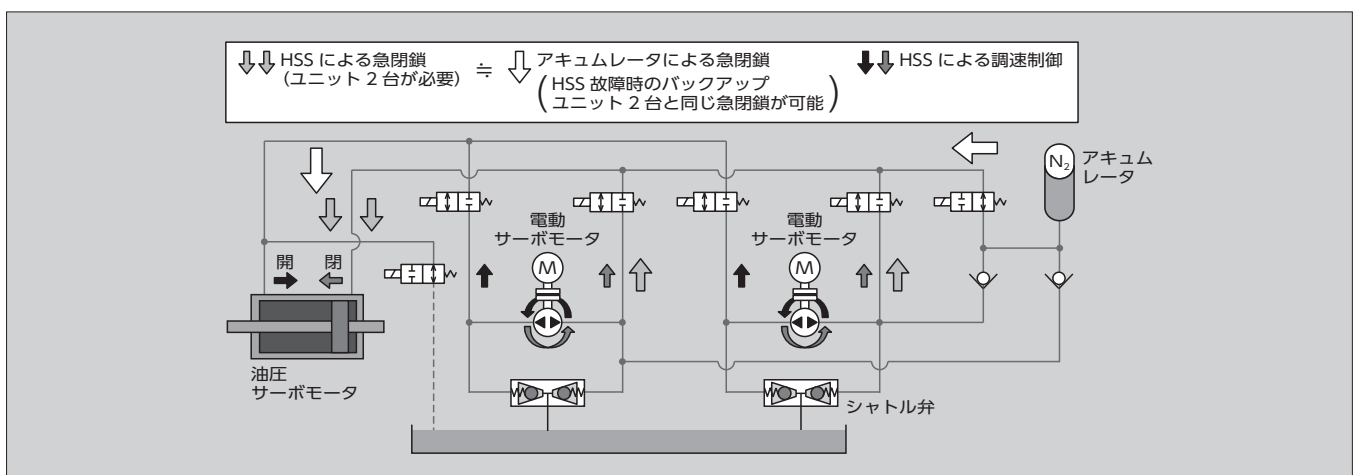


図5 従来の負荷遮断概念図

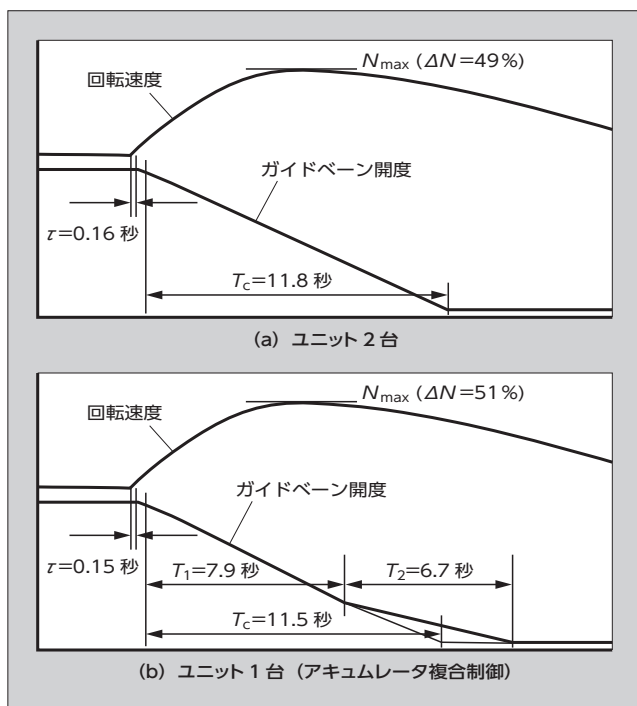


図7 4/4 負荷遮断時のオシロスコープ比較図

表1 負荷遮断試験結果

項 目	ユニット台数	
	2台	1台
遮断出力 P	23,700 kW	24,100 kW
不動時間 τ	0.16秒	0.15秒
回転速度上昇率 ΔN	49%	51%
等価閉鎖時間 T_c	11.8秒	11.5秒

合に要する等価閉鎖時間 T_c は 11.5 秒で、十分な負荷遮断性能を確保している。

当初の設計では、2 ユニット構成の HSS (図 3) が必要だった水車に対して、今回開発した新しい制御方法により要求性能を満たす 1 ユニット構成の HSS を図 8 に示す。通常は図 3 の 2 ユニット構成で運用しており、1 ユニット

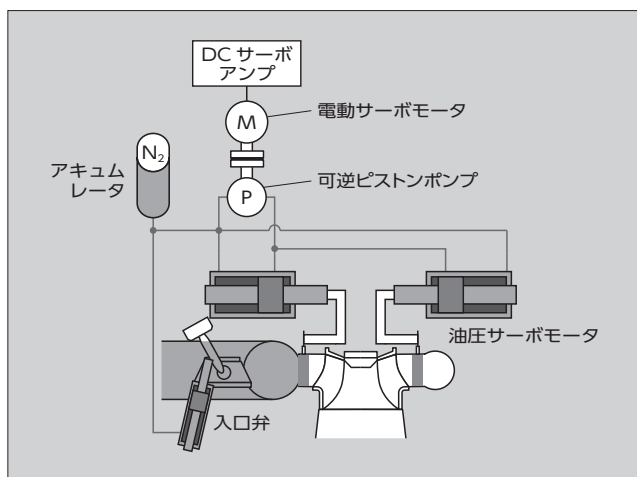


図8 改良後に可能となったシステム構成

故障時に図 8 のシステム構成に自動で切り替わり、事故停止することなく運転継続が可能となり、設備信頼度の向上を実現した。今後、HSS はユニット 2 台のシステム構成とともに、コストメリットが高いユニット 1 台のシステム構成も、顧客のニーズに合わせて提供していく。

④ HSS の優位性と可能性

今回の開発により、入口弁専用の操作機構が不要になり、入口弁操作に HSS を活用することにより電動化範囲を拡大した。

また、ガイドベーン操作において、従来の HSS の考え方では電動サーボモータの容量は、水車の要求仕様 (16 秒以下での急閉鎖) を基に設計していた。しかし、アキュムレータ複合制御を適用すると、通常の開閉時間 (60 秒) を基に設計できるので、HSS の電動サーボモータの設備容量が約 1/2 となり、コストダウンが可能となった。また、このアキュムレータの複合制御により、従来の HSS 単独の時よりも 2 倍以上の設備の稼動が可能となるため、HSS の適用範囲を大幅に大容量化できるようになった。

HSS の新しい機構と制御方法を開発したことにより、既設機や従来技術に比べ、次の優位点がある。

(1) 油流出リスクによる環境影響の低減

操作油量が既設 5,700 L から 400 L に 93% 削減した。

(2) シンプルなシステム構成による保守簡素化

圧油装置・圧油タンク・コンプレッサ・入口弁専用圧油ユニットなどの補機が不要となり、さらにサーボアンプの自己診断機能や従来の圧油装置が備えていた油ストレーナが不要となり、日常点検業務を大幅に削減できた。

(3) コンパクト化による省スペース

操作油の高圧化でサーボモータを大幅にコンパクト化した。さらに、複合制御の採用により必要なユニット台数を減らし、機器設置スペースを 50% 以下に削減した。

図 9 に更新前後の実際の機器構成の比較を示す。

(4) 安全性・復旧迅速性

自動復帰式電磁弁を用いて油圧シーケンスを工夫し、電源喪失などの異常時であっても、確実にガイドベーンおよび入口弁を閉鎖できるシステムを実現した。HSS を構成する油圧機器は短納期で信頼性の高い汎用品を採用し、設備信頼度や安全性、復旧迅速性を向上させた。

(5) コストダウン

HSS ユニット 2 台のところを、1 台で運転が可能となり、入口弁専用の圧油装置が不要となった (表 2)。

(6) 適用範囲の拡大

従来電動化できなかった大口径・大容量の入口弁や大容量水車に HSS の適用が可能となった。

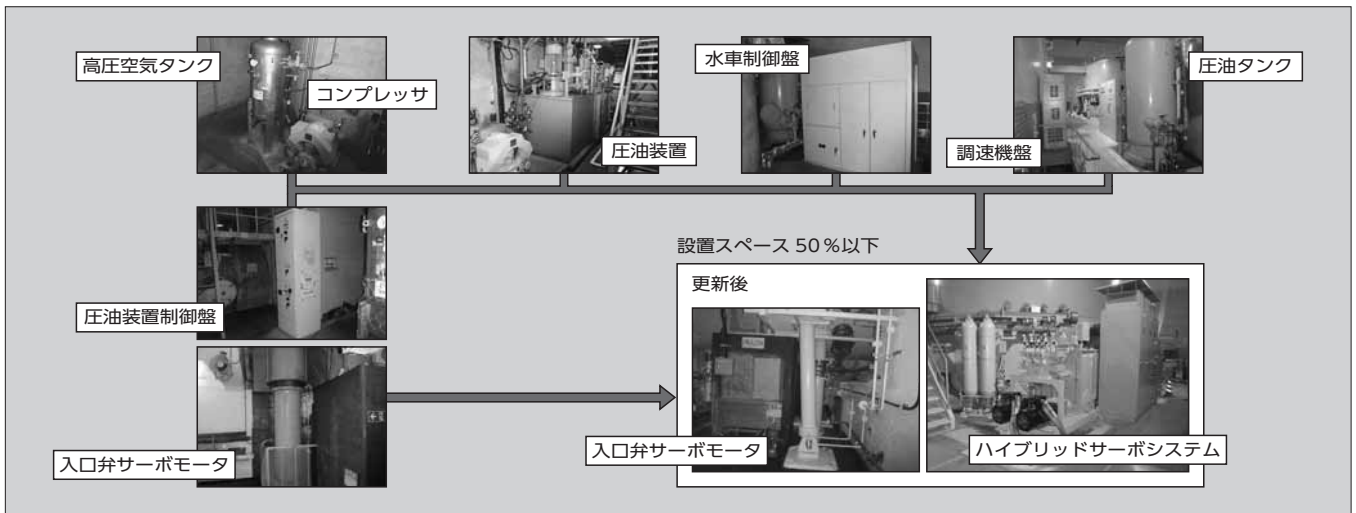


図9 更新前後の機器

表2 コストダウン効果

内 容	イニシャルコスト	ランニングコスト
入口弁専用圧油装置の省略	トータルで80%削減 ○コストダウン：圧油装置、圧油装置制御回路 ○コストアップ：ソレノイド、逆止弁	トータルで100%削減 ○入口弁専用圧油装置がなくなり、メンテナンスそのものが不要
ユニット台数削減 (2台→1台)	トータルで35%削減 ○コストダウン：ユニット1台減 ○コストアップ：制御ソフトウェア	トータルで40%削減 ○1台分の定期点検や故障対応が不要 ○アンプユニット交換（10年ごと×1台）が不要

⑤ 新エネルギー大賞受賞

現在、FIT や補助金を利用した水力発電設備のスクラップ & ビルド（S&B：Scrape & build）案件が多くあり、また、オーバーホール工事に合わせて、油圧サーボモータを用いたシステムから、操作油が削減できて環境リスクを低減し、コンパクトで保守性に優れ、コストダウン可能なHSS の適用が拡大しつつある。さらに、補修部品の納期が長期化する傾向にある電動サーボモータを採用している発電所において、保守性や故障時の復旧の迅速性を向上させるため、HSS に更新する案件も、今後増えてくることが予想される。

再生可能エネルギーの主力電源化に向けて、太陽光発電や風力発電の導入促進が予想される中、水力発電は系統の安定化には柔軟な出力調整能力を確保できる再生可能エネルギー電源であるため、今後さらにその期待は高まるものと考えている。

なお、J-POWER と富士電機が開発したハイブリッドサーボシステム技術は、設備信頼度・保守性の向上とコストダウンを同時に実現し、今後の水力導入拡大に貢献できるものとして評価され、令和元年度新エネルギー財団会長賞を受賞した⁽⁴⁾。図10に、表彰式の様子を示す。



図10 新エネルギー大賞受賞

⑥ あとがき

大型の水力発電所向けハイブリッドサーボシステムについて述べた。

今回の開発に当たっては、前例のない操作補法・制御への挑戦となるため、電源喪失時でも安全かつ確実に水車を停止させる油圧回路設計、速度偏差をより速く確実に捉える検出方法の在り方、インタロック条件の設定など、設計、製作、試験の各断面においてさまざまな課題に直面したが、各担当者の不斷の努力と水力の有効活用につながる新技術を開発したいという強い思いによって完成させることができた。ここに、あらためて全関係者に深く感謝の意を表する。

また、1950年代に国内の水力開発が盛んに行われ、大容量化が進められた水力発電所が今、S&Bの時期を迎えている。秋葉第一発電所の一括更新工事においては、HSSの新技術の開発を始め、いろいろな新技術を積極的に導入して、“次の60年も、人々から求められる安全・安心で安定したエネルギーを提供し続ける、環境に優しく保守性の優れた水力発電所”に生まれ変わらせることができた。

今後とも、環境に優しく保守性の優れた技術を供給できるように、着実に新技術を開発および導入を進めていく所存である。

参考文献

- (1) 笹川剛ほか. “老朽化水力発電設備の近代化更新技術”. ターボ機械. 日本工業出版, 2019, vol.47, no.2, p.71-80.
- (2) 電源開発株式会社. 富士・フォイトハイドロ株式会社. ハイブリッドサーボシステムおよびそれを備えた水車操作機構. 特許第6139041号. 2017-02-20 (出願日).
- (3) 電源開発株式会社. 富士・フォイトハイドロ株式会社. ハイブリッドサーボシステム. 特許6298207号. 2017-09-29 (出願日).
- (4) 一般財団法人新エネルギー財団ホームページ. 令和元年度新エネルギー財団会長賞 “水力発電所ハイブリッドサー

ボシステムの改良・導入”. https://www.nef.or.jp/award/kako/r01/b_05.html, (参照2020-07-03).



磯野 与志雄

水力発電のシステム技術、営業・技術に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部発電事業部水力プラント部兼富士・フォイトハイドロ株式会社営業部。



笹川 剛

水力発電所の現場保守・運用業務、水力開発計画・設計・建設業務に従事。現在、電源開発株式会社再生可能エネルギー本部水力発電部プロジェクト推進室。



国内最大級の蓄電池併設型メガソーラー発電所

Japan's Largest Class Storage-Battery Equipped Mega Solar Power Plant

椎橋 哲也 SHIIBASHI, Tetsuya

名塚 武洋 NAZUKA, Takehiro

佐藤 智希 SATO, Tomoki

東急不動産株式会社、三菱 UFJ リース株式会社と日本グリーン電力開発株式会社が共同出資する GPD すずらんソーラー株式会社から、富士電機が一括請負契約にて受注し、2020 年 2 月にすずらん釧路町太陽光発電所の建設が完了し、商業運転を開始した。自然変動電源である太陽光発電は、主に日射量によって出力が大きく変動し、電力系統の周波数変動や電圧変動などに影響を及ぼすことが懸念されている。富士電機は、これまで培ってきた出力変動抑制技術と蓄電池設備を用いることにより、電力会社が示す出力変動緩和対策の基準を満足することができた。

The Suzuran Kushiro-cho Solar Power Plant was completed and came online on February 2020. Fuji Electric undertook an engineering, procurement and construction (EPC) contract for the power plant with GPD Suzuran Solar K.K., which is jointly established by Tokyu Land Corporation, Mitsubishi UFJ Lease & Finance Company Limited, and the Green Power Development Corporation of Japan. Solar power generation, which is a fluctuating natural power source, produces large output fluctuations due to variations in solar radiation. As a result, there is concern that this will impact the frequency and voltage fluctuations of power grids. Fuji Electric used its unique output fluctuation mitigation technology along with storage battery equipment to meet the standard of the output fluctuation mitigation measures established by a power company.

① まえがき

2020 年 2 月にすずらん釧路町太陽光発電所の建設が完了し、商業運転を開始した。本発電所は、北海道釧路郡釧路町の約 163 ha の土地に太陽電池容量 92.2MW (302,500 枚)、リチウムイオン電池容量 25.3 MWh を配置した総出力 AC59.4MW のメガソーラー発電所であり、蓄電池併設型としては国内最大級の規模である。富士電機の持つ出力変動抑制技術と蓄電池設備を用いることにより、北海道電力株式会社から示されている出力変動緩和対策の基準（1%/分以内）を満足している。本プロジェクトは東急不動産株式会社、三菱 UFJ リース株式会社と日本グリーン電力開発株式会社が共同出資する GPD すずらんソーラー株式会社から、富士電機が一括請負契約（EPC 契約）にて受注した。建設工事は、2017 年 7 月に開始し、2020 年 2 月にお客さまへの引渡しを完了した。

本稿では、すずらん釧路町太陽光発電所の建設工事と発電設備・蓄電池設備について述べる。

② すずらん釧路町太陽光発電所の概要

本発電所は、太陽電池モジュール、サブ変電所、蓄電池設備と受変電設備を釧路町の遊休地に建設設置した。

図 1 にすずらん釧路町太陽光発電所の全景を示す。太陽電池の直交流出力 92.2 MW を、富士電機製の 1,000 kW パワーコンディショナ（PCS）60 台にて 59.4 MW の交流出力に変換する。併設する蓄電池設備で出力変動抑制制御を行いながら、受変電設備にて 66 kV に昇圧後、自営送電線を経由して、北海道電力株式会社に送電する。

本発電所の年間発電電力量は、約 105,518 MWh が見込まれており、一般家庭の年間消費電力量の約 21,300 世

帯分に相当する。

図 2 に全体システムの構成図を示す。



図 1 すずらん釧路町太陽光発電所の全景

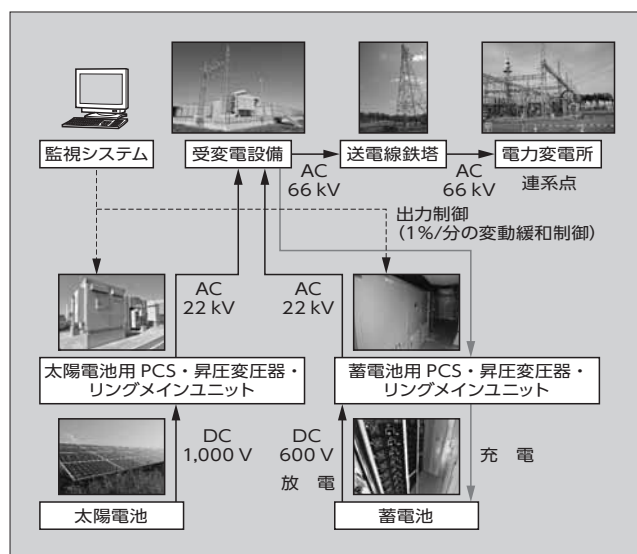


図 2 全体システム構成図

3 太陽光発電設備の主要機器仕様

太陽光発電設備は、太陽電池モジュールが発電した直流電力を PCS に集約し、交流出力に変換して送電する設備である。

3.1 太陽電池モジュール

太陽電池モジュールは、寒冷地でも安定した発電性能を発揮する、単体出力 305 W の単結晶シリコン系のモジュールを採用した。図 3 に示すように、太陽電池架台に 20 枚の太陽電池モジュールを 4 段 5 列に配置し、直列に接続してアレイを構成している。1 アレイ当たりの出力電圧は DC656 V、出力容量は 6.1 kW である。アレイで発電した電力は、接続箱で回路を集約して、サブ変電所にある PCS の入力端子に接続される。



図 3 太陽電池架台と太陽電池モジュール

表 1 太陽電池の仕様

項 目		内 容
基本仕様	セルタイプ	単結晶シリコン
	セル使用数量	60枚
	モジュール寸法	1,650×992×40 (mm)
	最大耐荷重	5,400Pa (正荷重) 2,400Pa (負荷重)
	質 量	19 kg
	モジュール納入数量	302,500枚
電氣的特性	最大出力 P_{max}	305 W
	モジュール効率	18.63%
	最大出力動作電圧 V_{pm}	32.80 V
	最大出力動作電流 I_{pm}	9.30 A
	開放電圧 V_{oc}	40.30 V
	短絡電流 I_{sc}	9.83 A
	P_{max} 温度係数	-0.39%/℃
	V_{oc} 温度係数	-0.29%/℃
	I_{sc} 温度係数	0.05%/℃
	システム最大電圧	1,000 V
	試験条件 (STC)	セル温度25℃、AM1.5、 照射量1,000 W/m ²

表 1 に採用した太陽電池の仕様を示す。

3.2 太陽電池架台・基礎

太陽電池架台を支える基礎は、全てくい基礎で構成されている。本発電所の大部分は釧路地方特有の軟弱地盤である。それに対応するために、打ち込み先端部分に羽根が付いたくいを採用した。地盤強度が比較的強い部分（標準貫入試験にて N 値 4 以上が確認された場所）には 1 枚の羽根が付いたくいを使用し、弱い部分（N 値 4 未満）には 2 枚の羽根が付いたくいを使用した（図 4）。

また、風荷重に耐えられるように、最長で深さ 12.5 m までくいを打ち込み、支持力を確保した。一基のアレイごとに 4 本のくいを打ち、くい総数 60,500 本を設置した。くいの上に取り付ける太陽電池架台は、20 年間の運用に耐えられるよう、高耐食性めっき鋼板を採用した。モジュールの取付角度は、積雪対策と設置効率を考慮して

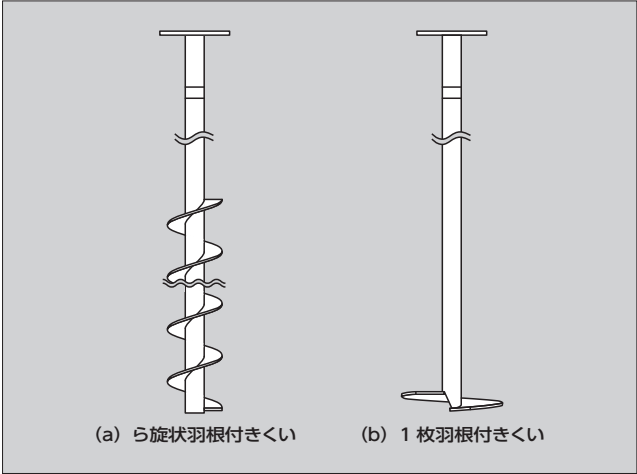


図 4 くい構造図

表 2 太陽電池架台の仕様

項 目		基本仕様
架台基礎	基礎構造	くい基礎
	材 質	一般構造用炭素鋼
	長 さ	4.5 ～ 12.5 m
	数 量	60,500本
	先端形状	羽根付き
	設置場所	屋 外
太陽電池架台	材 質	高耐食性めっき鋼板
	アレイ構成	4段5列
	数 量	15,125基
	設計風荷重	30 m/s
	積雪荷重	70 cm

〈注〉 N 値：標準貫入試験（JIS A 1219）によって求められる地盤の強度のことである。ボーリングロッドの先端に取り付けられた標準貫入試験用サンプラーを、規定貫入量である 30 cm 打ち込むのに要する打撃回数のことである。

20 度とした。設置した太陽電池アレイ総数は、15,125 基である。

表 2 に太陽電池架台の仕様を示す。

3.3 サブ変電所

サブ変電所は、太陽電池で発電した電力を直流から交流に変換するパワーコンディショナ（PCS）と、その電力を昇圧する変圧器、変電設備に接続するケーブルを分岐するリングメインユニット盤で構成される。

PCS は、富士電機製品の特徴である屋外型外気強制冷却方式の新型 PCS「PVI1000BJ」（図 5、表 3）を採用した。本 PCS は旧型「PVI1000」からさらなる小型・軽量



図 5 新型太陽電池用 PCS「PVI1000BJ」

表 3 太陽光発電 PCS の仕様

項 目	基本仕様
型 式	PVI1000BJ-3/1000
定格電圧	DC750V、AC380V
最大システム電圧	1,000V（DC）
容 量	1,000kW（990kWに制限運転）
定格周波数	50/60Hz
出力効率	>0.99（定格出力時）
出力電流ひずみ率（総合）	<5%（定格出力時）
出力電流ひずみ率（各次）	<3%（定格出力時）
装置最高効率	98.8%
装置効率（EURO効率）	98.5%
過負荷耐量	100%連続
騒 音	80dB（A）
系統保護	OV、UV、OF、UF
単独運転検出方式（受動）	電圧位相跳躍検出
単独運転検出方式（能動）	ステップ注入付周波数フィードバック方式
電圧上昇・抑制機能	無効電力出力・有効電力抑制
FRT機能	あ り
冷却方式	強制空冷
寸 法	W2,622×D1,252×H1,920（mm）
質 量	約1,800kg
数 量	60台

化を図り、据付面積の削減や現地輸送、据付工事が効率的に行える。

PCS により交流に変換された電力は、昇圧変圧器で 22kV に昇圧後、リングメインユニット（RMU）を経由して変電設備の 22kV 配電盤に接続される。

3.4 蓄電池設備

蓄電池設備は、リチウムイオン電池と蓄電池用 PCS、昇圧変圧器、RMJ 盤で構成される。本設備は、太陽光発電所の欠点である日射が急変した際の出力電力の急変を抑制するために使用される。蓄電池用 PCS は、受変電設備からの出力変動抑制の指令を受けて、蓄電池の充放電を行う。PCS から出力された電力は、昇圧変圧器で 22kV に昇圧後、RMU を経由して変電設備の 22kV 配電盤に接続される。蓄電池モジュールには、充放電特性の良いリチウムイオン電池を採用した。

リチウムイオン電池の出力特性は、周囲温度に大きく依存するため、エアコンにより推奨使用温度に制御された蓄電池用コンテナ（図 6）に収納している。

表 4 に蓄電池設備用 PCS の仕様を示す。

3.5 受変電設備

太陽電池用 PCS と蓄電池用 PCS から出力された電力は、変電所に設置された 24kV 特高配電盤（図 7（b））に接続され、主変圧器で 66kV に昇圧し、ガス絶縁開閉装置（C-GIS 図 7（a））を通じて、北海道電力株式会社に送電される。発電所から連系点までは、直線で約 2km の距離があるため、自営送電線を構築し、接続した。

表 5 に蓄電池設備の仕様を、表 6 に受変電設備の仕様を示す。



図 6 蓄電池コンテナ（右奥）と蓄電池用 PCS コンテナ（手前）

表 4 蓄電池設備用 PCS の仕様

項 目	基本仕様
型 式	PVI800-3/750
定格電圧	DC550 V、AC270 V
最大システム電圧	800 V (DC)
容 量	750 kW
定格周波数	50/60 Hz
出力力率	>0.99 (定格出力時)
出力電流ひずみ率 (総合)	<5% (定格出力時)
出力電流ひずみ率 (各次)	<3% (定格出力時)
装置最高効率	98.1%
装置効率 (EURO効率)	97.8%
設置場所	屋内 (コンテナ内設置)
騒 音	75 dB (A)
系統保護	OV、UV、OF、UF
単独運転検出方式 (受動)	電圧位相跳躍検出
単独運転検出方式 (能動)	ステップ注入付周波数フィードバック方式
電圧上昇・抑制機能	無効電力出力・有効電力抑制
FRT機能	あ り
冷却方式	強制空冷
寸 法	W2,750×D900×H1,950 (mm)
質 量	約2,580 kg
数 量	64台

表 5 蓄電池設備の仕様

項 目		基本仕様
蓄電池	電池種類	リチウムイオン電池
	数 量	5ラック×64バンク
ラック	容 量	79.1 kWh
	電 圧	504.0 ~ 705.6 V
	最大放電電力	158.3 kW (2C)
	標準充電電流	64 A (0.5C)
	運転温度	23℃±5℃
	収納モジュール数	12モジュール
	数 量	320台
モジュール	容 量	128 Ah (6.6 kWh)
	電 圧	42.0 ~ 58.8 V
	収納セル数	28個
	内部セル結線	14直列×2並列
	モジュール総数	3,840台
セ ル	容 量	64 Ah (235.5 Wh)
	電 圧	3.0 ~ 4.2 V

表 6 受変電設備の仕様

項 目		基本仕様
C-GIS	型 式	SDDa608
	定格電圧	72 kV
	定格電流	1,200 A
	受電形式	架空1回線受電
	設置場所	屋 外
	台 数	1台
主変圧器	型 式	油入自冷式三相変圧器
	定格電圧	22 kV (一次) / 66 kV (二次)
	定格容量	60,000 kVA
	結線方式	星形 (一次) / 三角 (二次)
	絶縁種別	A 種
	数 量	1台
24 kV特高配電盤	型 式	屋外自立閉鎖型
	定格電圧	24 kV
	定格母線電流	1,600 A
	定格周波数	50 Hz
	総盤面数	25面



図 7 受変電設備

④ 出力変動抑制制御

自然変動電源である太陽光発電は、主に日射量によって出力が大きく変動し、電力系統の周波数変動や電圧変動などの影響を及ぼすことが懸念されている。

このような自然変動電源における出力変動に対して電力品質を維持する観点から、一部の電力会社では大規模太陽光発電および大規模風力発電設備を新規に連系する場合には、出力変動の抑制を技術要件としている。

今回、設備を納入した地域を管轄する北海道電力株式会社が示す出力変動緩和対策の主な基準に従って、太陽光発

電の出力変化速度を発電所定格出力の1%以下/分とする必要がある。この出力変化速度の基準を守るため、本設備では太陽光発電出力に応じて蓄電池を充放電させることで太陽光発電所の連系点における合成出力を平滑化する出力変動抑制制御を備えている。

4.1 制御概要

本設備のシステム構成と制御構成を図8に示す。出力変動抑制制御において、変動成分除去フィルタによりPV出力 P_g から変動成分を除去した値である安定化目標値 P_a とPV出力 P_g の差分を充放電指令値 P_o としている($P_g - P_a = P_o$)。充放電指令値 P_o により変動成分の逆位相の出力 P_b が蓄電池から出力されるため、PV出力の変動が打ち消され連系点の合成出力($P_g + P_b$)が平滑化される。

また、変動成分除去フィルタのフィルタ時定数 T_f は図8に示すようにシステムコントローラ内で可変としており、これを可変時定数制御と言う。

この可変時定数制御は、蓄電池の充放電指令値 P_o の大きさに応じて変動成分除去フィルタのフィルタ時定数を最適に設定する制御である。具体的には、PV出力の変動が大きい場合はフィルタ時定数を長くし、PV出力の変動が小さい場合はフィルタ時定数を短くする制御である。この可変時定数制御により、連系点出力の出力変化速度を1%/分以下に維持しつつ、フィルタ時定数を固定する制御方法よりも無駄な充放電を抑制することができ、蓄電池総容量の削減につながる。

図9に出力変動緩和のシミュレーション結果を示す。太陽光発電の出力変動を打ち消すように蓄電池を充放電させ、連系点電力を平滑化させていることが分かる。このとき、連系点電力の出力変化速度は1%/分(594 kW/分)以下で推移している。

4.2 制御性能の評価

運用開始までの連続運転試験中、太陽光発電の出力変動が比較的激しかった2020年2月1日の実測結果を図10に示す。

図10において、11時30分頃から14時にかけて太陽

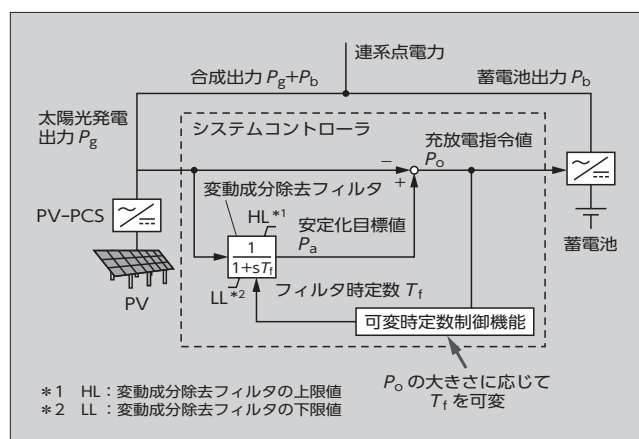


図8 出力変動緩和制御の概要

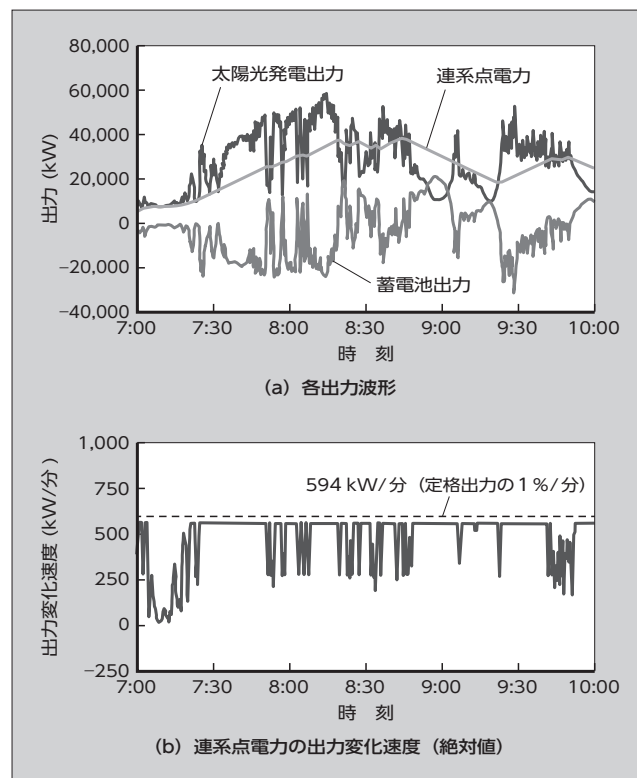


図9 シミュレーション結果

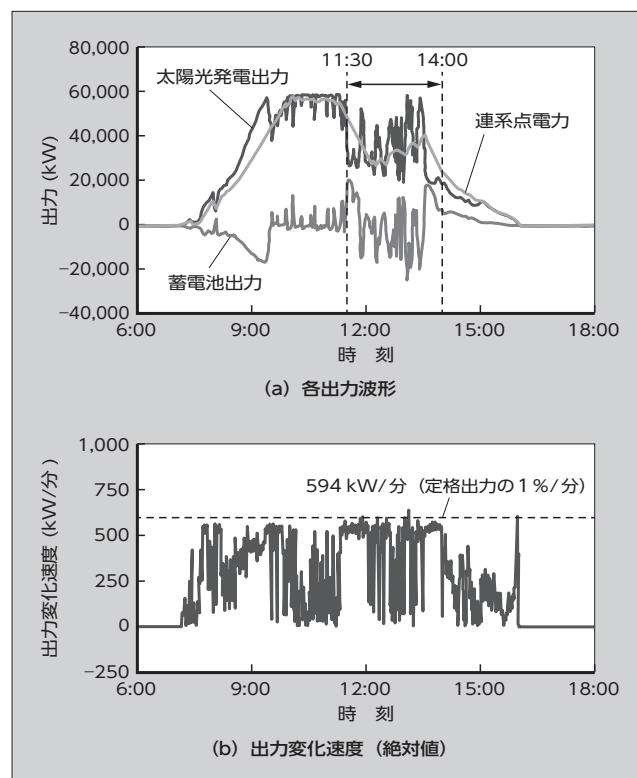


図10 2020年2月1日 連続運転試験結果

光発電の出力が大きく変動しているが、蓄電池の充放電により連系点電力は出力変化速度1%/分以下になるよう制御され、安定的に連系点電力の平滑化を実現している。測定誤差などにより、594 kW/分を超える場合があるが、制御の許容範囲内である。

表7 発電所建設工事の概略工程

No.	工 種	年 月		2017												2018												2019												2020																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
				4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
I	土木工事																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				</

5 建設工程

すずらん鉦路町太陽光発電所の建設工事は計画どおり、2017年7月の工事着工から、2020年2月の引渡しまで、2年8か月で試運転調整を完了した。工事は、用地に進入するための工事用道路の整備と用地の草刈りから開始した。土木工事を先行して進め、太陽電池架台工事が完了した部分から電気工事を後追いする形で進めた。工期中盤以降に、PCSや蓄電池などの電気設備を現地に据付け、電気配線工事を行った。工事完了後、試運転調整を実施して顧客への引渡しを完了した。

表7に発電所建設工事の概略工程を示す。

6 あとがき

国内最大級の蓄電池併設型メガソーラー発電所について述べた。

ここで培った蓄電池の技術により、太陽光発電所のデメリットといわれている出力の不安定さを解消することができる。また、系統安定化のみならず、今後発展が見込まれ

ている分散型電源の出力安定化にも応用が可能である。引き続き再生可能エネルギーの導入の拡大に貢献していく所存である。



椎橋 哲也

太陽光発電所 EPC 建設工事のエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部エンジニアリング統括部再エネプラント技術部課長補佐。



名塚 武洋

太陽光発電所 EPC 建設工事のエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部エンジニアリング統括部再エネプラント技術部課長。



佐藤 智希

電力システムのシミュレーション・制御・解析に関する研究・開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所デジタルプラットフォームセンタースステム制御研究部主任。電気学会会員。

韓国向けりん酸形燃料電池

Phosphoric Acid Fuel Cells for the Korean Market

川上 幸次 KAWAKAMI, Koji

堀内 義実 HORIUCHI, Yoshimi

韓国では、燃料電池を含む新エネルギーも対象とする「再生可能エネルギー利用割合基準制度」(RPS)が採用されており、燃料電池の導入が拡大してきている。富士電機がターゲットとする韓国中小規模発電事業者向けりん酸形燃料電池に必要な仕様として、韓国の燃料ガスへの対応、設置面積の削減と現地工事の簡素化、寒冷地対応があり、これまでの研究・開発、運用を通じてこれらの仕様を実現している。また、遠隔監視による安定稼働と国内の長時間運転実績に基づく高信頼性を獲得している。これらの特長を生かし、サウナなど温浴施設への導入が進んでおり、今後の拡大が期待されている。

The introduction of fuel cells has been expanding in South Korea following the adoption of the Renewable Portfolio Standard (RPS), a regulation that covers new energy sources including fuel cells. Small- and medium-sized power producers in South Korea, Fuji Electric's target customers, define the specifications for phosphoric acid fuel cells including compatibility with Korean fuel gases, installation area reduction, simplified on-site construction, and cold tolerance. Fuji Electric has achieved these specifications through our research and development and operations. In addition, we provide stable operation using remote monitoring and ensure high reliability based on our prolonged operation in Japan. With these features, the fuel cells have been being introduced into warm bath facilities, such as saunas, and are expected to be widespread.

① まえがき

富士電機は、1998年に100kW級りん酸形燃料電池(PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell)を商品化し、2010年に周辺機器を含めてパッケージ化して商品性を向上させた、オールインワンパッケージ型「FP-100i」の販売を開始した。比較的能量コストが割高な中小規模の施設にターゲットを絞り、発電容量100kWの電気と温水を利用するコージェネレーションシステムに特化することで、2020年3月までに国内外で累計100台を納入している。

燃料電池は、水素と酸素との電気化学反応から直接電気を発生させる発電装置であり、低炭素社会の実現に向けた次世代エネルギーの一つとして、導入が進んでいる。燃料電池は他の内燃機関のコージェネレーションシステムと比較し、多様な燃料を利用可能なことに加えて、100kW以下程度の小容量でも発電効率がよくランニングコストやCO₂排出量が低減可能であり、環境性に優れていることなど、多くの特徴を持っている。

近年、韓国にて燃料電池の導入が急速に進んでいる。本稿では、韓国で燃料電池の導入が進む背景と、韓国向けりん酸形燃料電池に必要なとされる仕様や特徴、さらに韓国への納入事例について述べる。

② 韓国の新・再生可能エネルギー導入政策と燃料電池市場

韓国では、再生可能エネルギー(再エネ)電力普及促進策として、2002～2011年の間、「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」(FIT)を実施してきた。さらに、2012年から発電設備容量500MW以上の大規模発電事業者に対し「再生可能エネルギー利用割合基準制度」

(RPS: Renewable Portfolio Standard)により、一定割合の電力を再エネもしくは燃料電池を含む新エネルギーで発電することを義務付けている。義務供給量比率は2012年の2%から目標年の2022年には10%を目標とするものであり、自ら新・再エネ発電により電力を供給するか、あるいは新・再エネ発電事業者が発行するグリーン電力証書(REC: Renewable Energy Certificate)を購入することにより、義務供給量を達成する必要がある^{(1)～(3)}。このように、大規模発電事業者はRPS制度に基づく新・再エネ発電を実施する必要があること、また、中小規模発電事業者は、売電収入に加え、新・再エネ発電によるRECクレジット取得・販売による収益が見込めることから、近年特に燃料電池の導入が拡大している。

富士電機の100kWりん酸形燃料電池の主要ターゲットは上述のRECクレジットを活用した中小規模発電事業者である。燃料電池発電の売電スキームの概要を図1に示す。

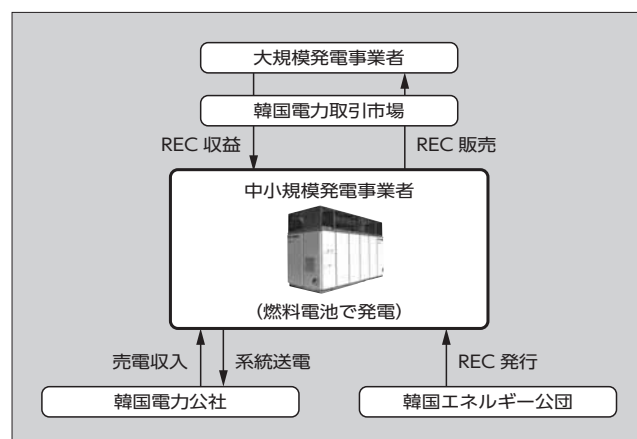


図1 韓国中小規模発電事業者の燃料電池発電の売電スキーム

③ 富士電機の燃料電池

3.1 概要と主な仕様

図2に、オールインワンパッケージ型の富士電機のりん酸形燃料電池 FP-100i の外観を示す。

表1に、FP-100i の主な仕様を示す。使用する燃料に応じて3種類の燃料電池をラインアップしており、インフラが整備されている都市ガス、再エネとして活用されているバイオガス（下水消化ガス）、また次世代の燃料として期待されている純水素を燃料にして発電が可能となっている。FP-100i はコージェネレーションとしての用途に加え、オプション機能として、LP ガスをバックアップ燃料として独立給電が可能な災害対応型、クリーンな低酸素空気が供給可能な火災予防対応型などを用意している。

図3に、FP-100i の構造を示す。FP-100i は、現地で容易に据付けができるようにパッケージ構造を採用している。また、トラック輸送を考慮して横幅を2.2 m、高さを2.5 m（据付け後は3.4 m）としている。従来、別置であった窒素供給設備、水処理設備の付帯設備もパッケージに内蔵するとともに、排熱処理用の空冷式ラジエータを天

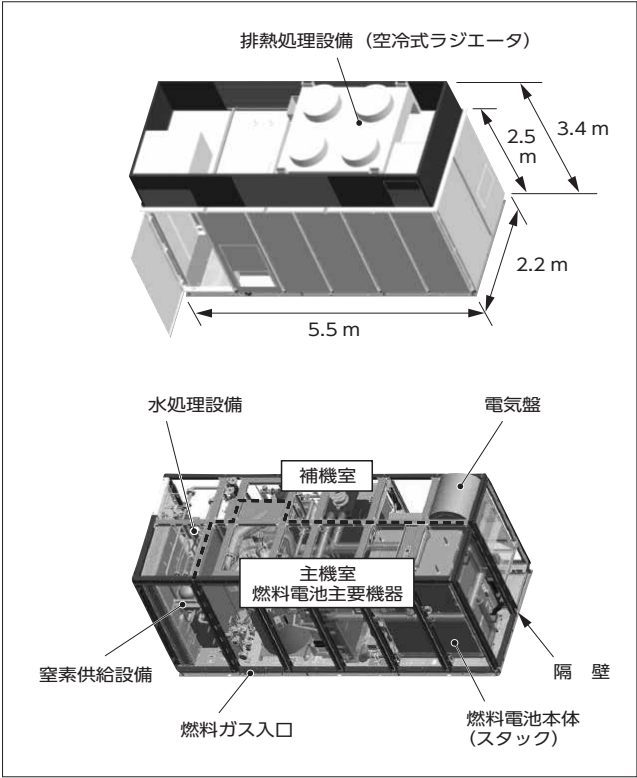


図3 「FP-100i」の構造

井に設置したため、現地据付け時の配線および配管の工事の大幅削減と設置面積の半減を実現している。

3.2 納入実績・稼動状況

図4に100 kW 燃料電池の納入実績を、表2に納入先の国と使用するガス種、表3に納入先の施設を示す。

1998 年以降 2020 年 3 月までの間に国内外で 100 台納入しており、燃料ガス種は、都市ガスや天然ガス、消化ガス、純水素とさまざまなガス種に対応している。主な納入先の施設は、下水処理場やオフィス・商業ビル、工場・ガス会社、サウナ、病院となっている。燃料電池は主として、コージェネレーションシステムとして使用されている。

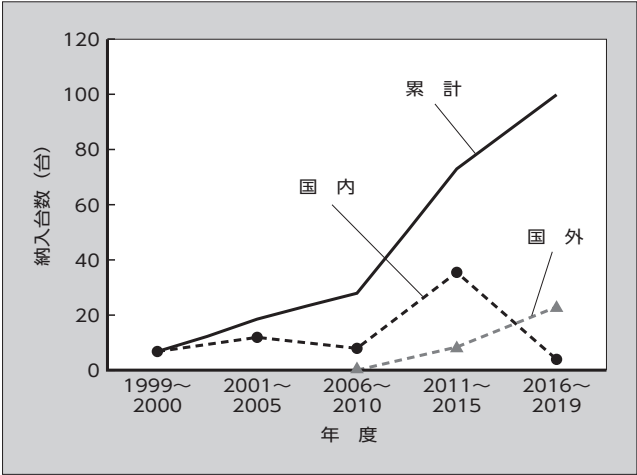


図4 100 kW りん酸形燃料電池の納入実績（2010 年度以降、FP-100i を納入）

表1 「FP-100i」の主な仕様

項 目	仕 様		
燃 料	都市ガス	バイオガス	純水素
出 力	105 kW（発電端）		
出力電圧/周波数	210 V/50 Hzまたは60 Hz		
発電効率（LHV）＊	42%	40%	48%
熱出力	123 kW	116 kW	99 kW
総合効率（LHV）	91%	84%	93%
排ガス	NO _x ：5 ppm以下 SO _x 、ダスト：検出限界以下		NO _x 、SO _x 、 ダスト：なし
外形寸法	W2.2×D5.5×H3.4（m）		
質 量	14 t		13.5 t

＊LHV：ある一定の状態に置かれた単位量の燃料が断熱的に完全燃焼し、その燃焼ガスを元の温度まで冷却したときに放散される熱量を“発熱量”という。発熱量には、水蒸気の潜熱を含める高位発熱量（HHV：Higher Heating Value）と、これを含めない低位発熱量（LHV：Lower Heating Value）がある。

表2 国別納入台数とガス種類

	国名	台数	ガス種類			
			都市ガス	天然ガス	消化ガス	純水素
国内	日本	67	28	6	32	1
国外	米国	2	—	2	—	—
	ドイツ	10	—	10	—	—
	韓国	19	1	18	—	—
	フランス	1	—	1	—	—
	南アフリカ	1	1	—	—	—
合計		100	—			

表3 PAFC 納入先の施設

納入先施設	国内	国外
下水処理場	31	0
オフィス・商業ビル	6	4
工場・ガス会社	8	10
サウナ	0	8
病院	7	0
大学	5	1
倉庫	0	5
その他	10	5
小計	67	33
合計	100	

納入機の中には、セルスタックや改質器などの主機の交換などの装置の大幅改修、すなわちオーバーホールを経て累積運転時間が13万時間（約15年）の実績となるものが开始出现しており、富士電機のりん酸形燃料電池の信頼性や耐久性が実サイトで実証されている。

図5に2020年3月時点の納入台数および累積移動時間が1万時間、3万時間、6万時間を超過した装置の台数を示す。これまでの運転実績の経験に基づいた知識と、後述する遠隔監視システムを活用することで、運転障害の原因解析や対策の検討・実行により安定した稼働ができています。

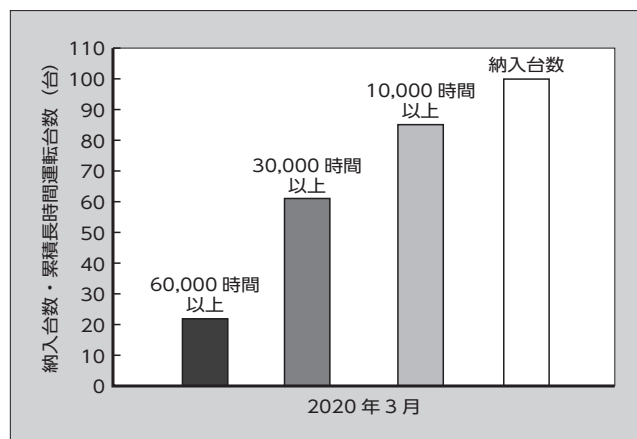


図5 累積長時間運転の燃料電池台数推移

4 韓国向け燃料電池

韓国向け燃料電池に必要な仕様につき、次に述べる。

4.1 韓国燃料ガスへの対応

表4に日本と韓国の典型的な燃料ガスの比較を示す。韓国の燃料ガスは、メタンの割合が高く、日本の都市ガスよりも発熱量が低い。富士電機はこれまでの国内外の設置や運転実績に基づいて、改質器に供給する水蒸気や燃料ガスの流量を算出し、設置場所ごとの燃料ガスの組成、発熱量に応じて最適な流量の比率を設定して対応している。

4.2 現地工事の簡素化

FP-100iは、オールインワンパッケージ型のため、韓国の中小規模発電事業者向けに設置面積が大きく取れない市街地などの狭小地においても設置が可能である。また、配線配管工事を短時間で完結できるため、韓国でのFP-100iの導入拡大に貢献している。

4.3 寒冷地対応

韓国のソウルなどの高緯度もしくは高地において、冬季に -10°C 以下の厳寒の気候となる場合がある。

従来は、気温が -5°C を下回る寒冷地では屋内設置としていたが、図3に示すように、FP-100iではパッケージ内に隔壁を設けて凍結防止が必要な補機室エリアを区画化し、当該エリア内の機器放熱と給排気量を最適制御することにより、外気温 -20°C の場合でも当該エリア内が 0°C を下回らない構造とすることで、寒冷地においても屋外設置を可能とした。

この寒冷地対応により、冬季に厳寒温度となる韓国においても順調に運転を行っている。

4.4 遠隔監視による安定稼働

韓国で稼働しているりん酸形燃料電池に対し、富士電機が開発したインターネットを用いたクラウド型燃料電池遠隔監視システムを使い、運転状態監視やソフトウェア変更などを日本国内から行っている。これにより、国外であっ

表4 日本と韓国の燃料ガスの比較

成分名	分子式	都市ガス13A (日本・東京ガス)	天然ガス (韓国・大邱市)
メタン	CH_4	89.60%	93.10%
エタン	C_2H_6	5.62%	4.47%
プロパン	C_3H_8	3.43%	1.53%
ブタン	C_4H_{10}	1.35%	0.69%
ペンタン	C_5H_{12}	—	0.02%
窒素	N_2	—	0.20%
合計	—	100.00%	100.00%
発熱量 (LHV*)	単位 MJ/Nm^3	40.6	38.5

* LHV：低位発熱量（表1の脚注を参照）

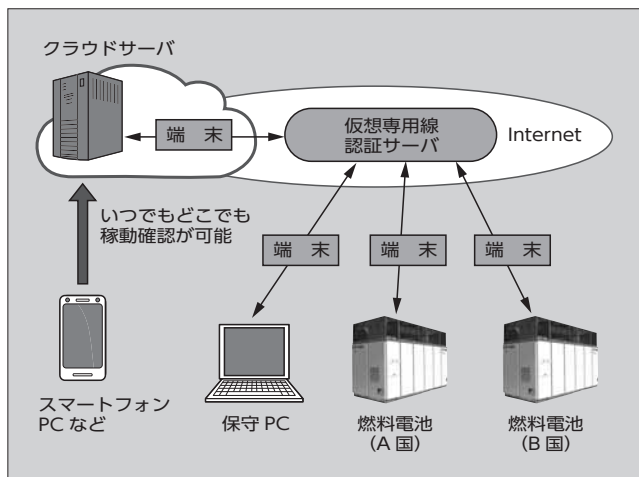


図6 クラウド型燃料電池遠隔監視システム

ても、異常が発生した際に、迅速に対応できる。図6に、遠隔監視システムの概要を示す。クラウドサーバへの稼働データの保存と、保守PCから燃料電池ソフトウェアの遠隔更新を実現している。また、携帯端末からクラウドサーバにログインすれば、時間や場所を問わず稼働データが閲覧できる。

5 韓国納入事例

上述のとおり、韓国政府の新・再エネ導入優遇策を受け、2017年以降、FP-100iの韓国向け納入が増加している。その中で、いくつか納入事例について述べる。

図7に、ユイル産業に納入した事例を示す。当初5台を納入し、その後追加納入し、現在8台の燃料電池が発電している。

図8に、KT（旧 Korean Telecom）の保養所に納入した事例を示す。狭小地への設置であったが、必要設置面積が小さいことを生かし、設置することができた。また、この保養所は高原地域で冬季は降雪があり、厳寒となる気候であるが、年間を通じて順調にコージェネレーション（発電＋排熱利用）を行っている。

図9に、千戸サウナヘルスに納入した事例を示す。サウナ施設の建屋横の駐車場を有効活用するため、鉄骨フレー



図8 納入事例：KT 保養所向け 100kW × 1台



図9 納入事例：千戸サウナヘルス向け 100kW × 2台

ム2階建て構造体を新設し、その上部にFP-100iを設置した。通常、サウナ施設は市街地にあり、設置スペースが制限される場合が多く、本事例のように設置方法を工夫した結果、顧客の希望に応えることができた。

図10にサウナの東湖ヒューランドに納入した事例を示す。本施設も市街地にあり、サウナ建屋の屋上の屋内ゴルフ練習場の空きスペースに3台を設置した。

上述以外にも、小規模発電事業者として熱需要の大きいサウナ施設、温水プールなどへの納入事例が増えてきており、FP-100iの発電時の排熱を効率的に活用している。



図7 納入事例：ユイル産業向け 100kW × 8台



図10 納入事例：東湖ヒューランド向け 100kW × 3台

⑥ あとがき

韓国向けりん酸形燃料電池について述べた。FP-100iの仕様や特長を生かし、今後もコージェネレーション利用の中小規模発電事業者向け中心に拡販していく。また、バイオガスや水素など多様な燃料への対応も強みに韓国新市場への導入も目指していく。

富士電機は、長年培った燃料電池技術を活用し、燃料電池の特長を生かした各種アプリケーションの開発と適用拡大を進め、国内外で地球温暖化対策を目的とする低炭素社会および持続可能な社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 李秀澈ほか. 日韓の再生可能エネルギー政策転換の成果と課題. 環境経済政策学会2014年度大会報告資料.
- (2) 鄭承衍ほか. 日韓の再生可能エネルギー政策の転換とその

成果. 名城論叢. 第14巻第4号, 2014年3月, p.61-76.

- (3) 一般社団法人 海外電力調査会. 各国の電力事業（主要12か国）. 韓国. <https://www.jepic.or.jp/data/w11skra.html>, (参照 2020-08-18).



川上 幸次

水処理計測機器、環境処理装置の開発・設計、燃料電池のエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機コリア株式会社営業本部開拓営業 Team 燃料電池技術統括。



堀内 義実

燃料電池および新エネルギーのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社 発電プラント事業本部エンジニアリング統括部品品質保証部長。電気学会会員。



日本初の内陸型大型 GTCC（ガスタービンコンバインドサイクル発電）プロジェクト ― 発電機現地製作技術 ―

First Inland GTCC Thermal Power Plant in Japan: Generator Onsite Manufacturing

谷藤 怜 TANIFUJI, Satoshi

中山 大樹 NAKAYAMA, Hiroki

水本 貴之 MIZUMOTO, Takayuki

富士電機は、日本初となる内陸型大型ガス火力発電設備である株式会社コベルコパワー真岡 真岡発電所に、コンバインドサイクル発電設備一式を一括請負工事として受注し、ガスタービン用発電機 2 台と蒸気タービン用発電機 2 台を納入した。内陸部への発電所の建設であるため、特に発電機は内陸輸送による道路の許容荷重や輸送寸法制限により、完成状態で輸送することができない。そこで、内陸輸送を可能とするために、固定子分割構造のような新構造の採用だけでなく、現地製作における製造技術を確立したことにより、内陸部への設置に対応可能な発電機の現地製作を可能にした。

Fuji Electric undertook an engineering, procurement and construction contract to deliver gas turbine combined cycle power generation facilities to the Moka Power Plant operated by Kobelco Power Moka Inc., the first large-scale inland gas thermal power plant in Japan. The facilities include two generators for the gas turbine and two generators for the steam turbine. Although the plant was constructed inland, we could not use inland transportation to deliver the main equipment especially the generators after completion due to the regulations such as the dimensions and the load capacity. Therefore, we adopted new structures, such as block stator structures, to use inland transportation and established onsite manufacturing technology, making it possible to locally manufacture generators for inland installation.

① まえがき

ガスタービンと蒸気タービンから構成されているコンバインドサイクル発電方式は、発電効率が高く、環境負荷が低いという利点があり、近年、広く採用されその重要性は高まっている⁽¹⁾⁽²⁾。コンバインドサイクル発電方式の大型火力発電所は、蒸気の冷却に海水などを用いる水冷式を採用しているため臨海部が立地に適している。しかし、臨海部では地震や津波に遭う危険が伴う。そのため、電力を安定供給するため、これら大型発電における自然災害への対策が国内での専らの課題となっている。これに対して内陸部は、地震に伴う津波被害に遭うことがない。そのため、内陸への大型火力発電設備の設置は、震災時においても電力を安定的に供給できる可能性が高くなり、臨海部で発電される電力への依存度が高い首都圏全体にとって分散立地により電力の安定供給に貢献し、貴重なバックアップ電源となることが期待される。

このたび富士電機が、日本初となる内陸型大型ガス火力発電設備である株式会社コベルコパワー真岡 真岡発電所に 2×624 MW コンバインドサイクル発電設備一式を一括請負工事（EPC）として受注し、富士電機のガスタービン用発電機 2 台と蒸気タービン用発電機 2 台の合計 4 台の発電機を納入した。本プロジェクトは、地震や津波といった自然災害リスクが低く分散立地の大型電源としての意義があり、内閣官房と経済産業省により、国土やエネルギー基盤強靱（きょうじん）化に関する先導的な事例として選ばれた。

本プラントは、最新鋭の開放サイクル 1 軸形ガスタービンと、ガスタービンとは別の軸系列の蒸気タービンで構成されている。発電機は、ガスタービン発電に間接水素冷却発電機、蒸気タービン発電に間接空気冷却発電機を用い

ている。内陸となるため、復水器は空冷式で水を冷却循環する大型空冷復水器を採用している。

一方、内陸部への発電所の建設であるため、各種大型機器の現地製作が必要になる。特に発電機は、内陸輸送による道路の許容荷重や輸送寸法制限により完成状態で輸送することができない。その対策として、内陸設置を可能とした新構造および現地製作に適した発電機を開発した。ガスタービン発電機の主な仕様を表 1 に、断面図を図 1 に示す。

本稿では、内陸設置に対応したガスタービン用水素冷却⁽⁴⁾発電機の特徴と適用技術について述べる。

表 1 プラント仕様

項 目	仕 様
出 力	470 MVA
電 圧	22 kV
力 率	0.9
周波数	50 Hz
冷却方式	○固定子：間接水素 ○回転子：直接水素
水素ガス圧	0.5 MPaG
回転数	3,000 min ⁻¹
励磁方式	サイリスタ直接
全 長	13.9 m
質 量	456 t

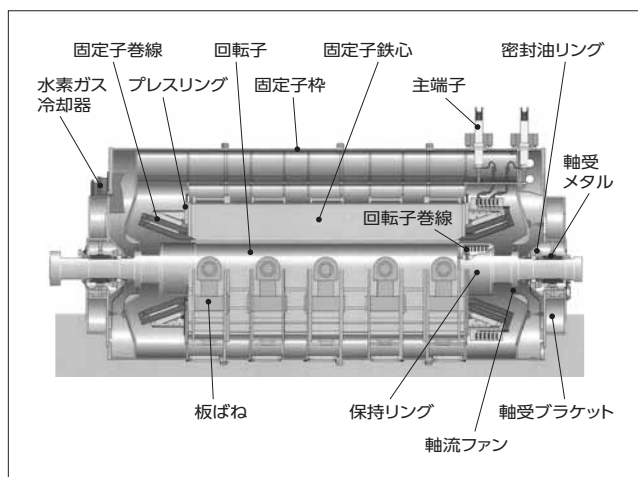


図1 ガスタービン発電機断面図

② 内陸設置に対する発電機の課題

発電機の内陸輸送は特殊なケースなため、輸送部門で輸送経路の計画策定と、道幅や経路周辺物の高さなどの実態調査を行い、道路管理者や警察と協議を行った。その結果、輸送対象物には、長さ 26 m、幅 3.5 m、高さ 4.68 m、質量 164 t 以下という制限があった。この制限があるため、発電機の固定部（固定子枠と固定子の総称）は完成状態で輸送ができない。そのため、分割して輸送した後に現地で製作・組立を行う必要があった。ここで、固定部の通常の製作工程を図 2 に示す。製作工程は、固定子枠製作、中子（なかご）製作（鉄心積みおよびコイル入れ）、固定子枠と中子の組立作業からなり、各作業は大型の専用設備を用いる。そのため、このような現地製作・組立を行うためには、輸送制限に対応する新構造の開発だけでなく新たな専用設備の導入も必要である。さらに、作業場所の確保や作業設備の整備を行い、環境面での対策を講じた製作方法を確立することが必須である。これら、現地製作に関する課題を表 2 に示す。

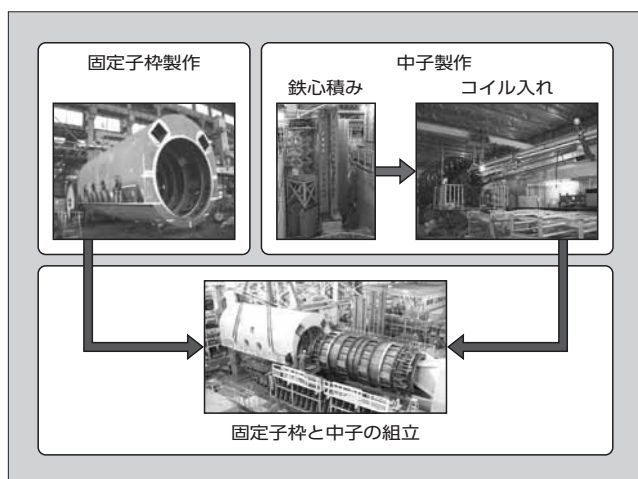
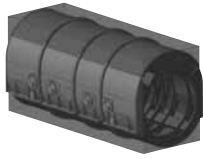


図2 発電機の製作工程

表2 現地製作における課題

問 題	課 題
輸送制限 ○ 固定子枠が輸送制限を超過する。 ○ 固定子鉄心が輸送制限を超過する。 	現地輸送を可能とする施策の立案 <設計アイテム> ○ 輸送可能な固定子枠構造の開発：固定子枠の分割構造化 固定子鉄心の現地製作を可能とする施策の立案 <設計アイテム> ○ 固定子鉄心締付強度向上の技術開発
現地製作<設備> ○ 専用設備が無い。 ○ 天井クレーンの能力・容量が不足している。 	現地製作を可能とする施策の立案 <現地製作アイテム> ○ 固定子枠：新構造に対する現地組立技術の確立 ○ 鉄心積み作業：現地用専用設備の開発 ○ 固定子巻線組立：現地用専用設備の開発 ○ 固定子組立：固定子枠と中子組立作業方法の確立
<環境> ○ 建屋が建設途中となるため作業環境が悪い。 	<現地製作アイテム> ○ 鉄心積み作業：雨水対策、粉じん対策、防さび対策 ○ 固定子巻線組立：雨水対策、粉じん対策、防さび対策

③ 内陸設置型間接水素冷却発電機に適用した技術

3.1 固定子分割構造

固定子枠は中子を覆うための大型部品（長さ約 10 m、幅約 5 m、高さ約 5 m、質量約 85 t）であり、冷媒である昇圧した水素ガスを保持するとともに、冷却経路を形成するために内部構造が複雑となっている。水素ガスは冷却性能に優れる一方、酸素と混合すると爆発しやすい性質を持っている。そのため、固定子枠は、水素ガスに対する完全な気密性と爆発圧力に対して十分な強度が求められる。

固定子枠の製作は製缶（溶接）、機械加工、組立の三つの作業工程からなる。現地にて工場と同様の作業が行うことができれば、製品品質の問題はない。しかし、製品の計画段階では、現地の作業環境が不明確な中、製品品質の低下や、問題が生じたときの現地工程のリカバリーの難しさといったことが大きなリスクとなることが予想された。そこで、製品品質を確保するため、現地作業を必要最小限に抑えることが、製品設計の上で最も重要であり、図 3 に示す固定子枠の分割構造を開発した。本構造は、長手方向に 4 分割した固定子枠をボルト締結により一体化するものである。現地では固定子枠の組立てと、固定子枠内部にある一部部品の溶接だけで製作できる構造にして、現地作業を極力削減している。

3.2 固定子鉄心端部ブロック固め構造

固定子鉄心は、0.5 mm 厚の電磁鋼板を扇状に打ち抜き、

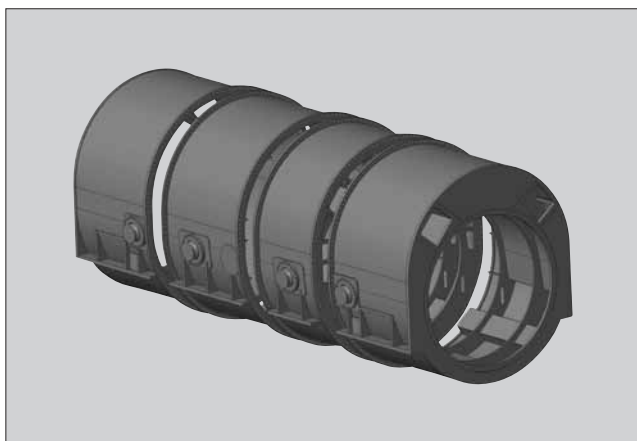


図3 分割固定子枠

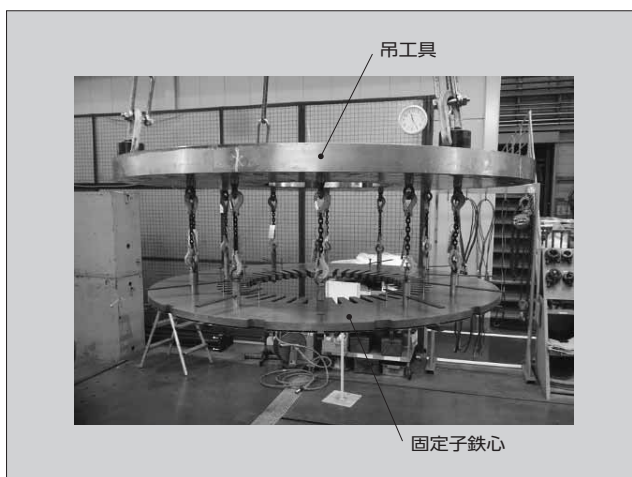


図5 固定子鉄心ブロック固め

絶縁ワニスを塗布して、数十 mm のブロックに積層する。積層方向のブロック（図4⑥）ごとにダクトピース（図4⑦）を配置することで冷却のための通風経路を形成する。これらを積み上げていくことで固定子鉄心は全長で約 6 m となる。これら数万枚に及ぶ電磁鋼板の積層物は、鉄心の両端に配置しているプレスリングと周上に配置する締付スタッドおよび鉄心取付梁（はり）により締め付け、さらに外周側からサポートリングで固定する（図4）。

通常、固定子鉄心を工場で製作する場合、積層した固定子鉄心と固定子巻線を一体で絶縁樹脂を含浸する全含浸絶縁システムを採用している。全含浸は鉄心、巻線とくさびの間に樹脂を充填し、強力に固着することでゆるみを防止している。

しかし今回、現地には全含浸設備がない。そこで、図5に示すように鉄心の両端部の数ブロックを工場にて積層して、真空含浸するドーナツ状のブロック固め鉄心を開発した。本構造は、通常採用している全含浸絶縁システムと同等の樹脂固めの効果を得ることができる。これにより、経年的な鉄心のゆるみを防止し、漏れ磁束による鉄心端部にかかる電磁力に耐えうる構造を実現した。また、これらドーナツ状のブロック固め鉄心を工場で製作した後で現地に納入することで、現地鉄心積み製作工期を短縮し、納期の制約にも対応できた。

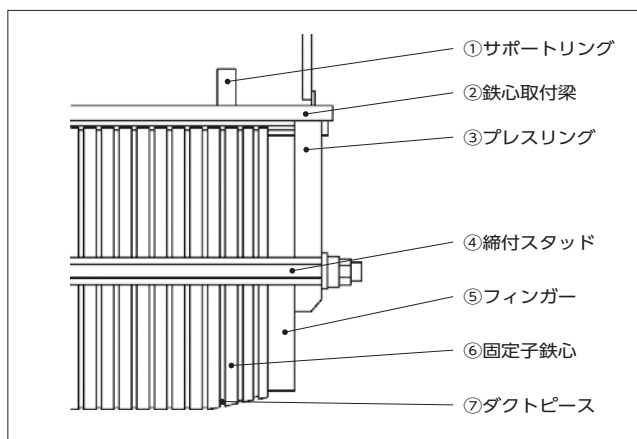


図4 固定子鉄心エンドの構造

3.3 現地製作における製造技術

現地製作では、品質、コスト、納期に加え、作業環境と安全を工場と同等以上に作り上げることが重要である。今回、発電機の現地製作を行うに当たり、工期を短縮するため、固定子枠本体の準備と、現地製作用の設備の準備を同時並行で作業を始めなければならなかった。土木建築側と現地の作業区画の調整を行い、発電機固定子の専用設備を搬入した。搬入に備えて、現地での温度湿度や粉じん量などの作業環境を詳細に洗い出し、管理する対象項目とした。また、安全を考慮することも重要だった。

(1) 現地への専用設備の設置と搬入

発電機固定子の製作に必要な大型の専用設備の設置と搬入のため、まず土木建築側やプラント全体の施工計画との調整により発電機製作の作業区画を確保した。次に、作業区画に対する最大荷重を算出し、各作業区画に耐荷重要求を行い、土木建築側と調整した。

(2) 現地作業時の粉じん対策

発電機固定子の製作時に、絶縁材料への異物の混入を防ぐため、粉じん対策が重要である。そこで、鉄心積みと固定子巻線（コイル）組立のおおのこの作業で養生ハウスを設置した。特に鉄心積み作業は、10 m に及ぶ高所作業となるため耐震強度を考慮した大型の養生ハウスを設置した。養生ハウスは、部品搬入出のため上部や側面の開閉構造を設けた構造とし作業性を良好にしている。養生ハウスには空調設備を設け、日々の温湿度管理により結露対策を行った。また、粉じん測定を作業前点検として定期的に行い、工場の環境レベルを順守することで現地の品質管理を図った。

(3) 品質管理

現地での戻り工程の撲滅には、検討段階でのリスクの低減や現地での品質管理の確立が重要である。リスク低減については、現地の作業環境を考慮した作業手順書を作成し、想定されるリスクをつぶし込み、必要により設計計画において現地製作を考慮した構造とすることで対策を講じた。また、可能な限り工場で製品を作り込むようにした。さら

に、工場での組立確認を行うことで事前に問題点を洗い出し、それらの対策を行った。一方、品質管理については、現地での顧客に対するレビューや製品監査の担当者と手順を整え、各作業開始前には関係者がレビューを行って工場と同等以上の管理体制を整えた。また、顧客とは立合いだけでなく、細かい作業ステップごとに品質を確認する顧客モニタリングの機会を設定して品質確認の仕組みを構築した。これらの対策に加え、現地と工場の担当者同士が情報の交換を密にするため、IT 機器を用いてリアルタイムで製品状態に関する情報を共有するとともに、Web 会議により進捗状況や品質を確認した。

4 発電機の現地製作

(1) 固定子枠組立

工場での固定子枠組立は、横に倒したまま行っているが、今回の現地作業では、作業スペースが制限されているため、縦積みで行った。各分割固定子枠の位置合わせは、精度良く行わなければならない。精度を出すためには、建屋床の水平度の管理だけでなく、各分割固定子枠の上下左右位置やそれぞれの周方向位置の緻密な調整が必要である。そこで、各種調整治具の開発や安全対策を講じた機内外の足場を製作し、本作業を完遂した。分割固定子枠組立後は、一体となった固定子枠の横転作業を行う。通常、工場での横転作業は天井クレーン 2 基を用いるが、現地の既存の建屋クレーンの能力が不足していた。そこで、屋外での横転作業を計画し、油圧クレーン 2 基を用いた横転を物流会社と共同で行った。そのときの横転作業の実際の様子を図 6 に示す。

(2) 固定子鉄心積み

鉄心積み作業時の様子を図 7 に示す。定盤の水平度調整や垂直型の定盤の位置調整を行うため、微動装置を開発した。その結果、調整は工場管理値を十分に満足するとともに、調整作業の簡素化につながった。

(3) 固定子巻線組立

固定子巻線組立作業時の様子を図 8 に示す。本作業は、現地の既存建屋の天井クレーンの可動範囲外となり使用で



図 7 固定子鉄心の組立



図 8 固定子コイル組立

きなかったため、移動式の設備組立用治具や部品の移送治具を開発して作業を完遂した。安全面については、本プラントサイズに合わせた昇降足場の導入や手すり付きスライド足場の設置などにより安全強化を図った。また、養生ハウス内での溶剤塗布作業時は、養生ハウス内にさらに簡易ハウスを設置して作業環境を整備し、さらに排気装置の導入やエアラインマスクによる安全に配慮した対策を行った。

(4) 固定子枠と中子の組立

発電機の固定子は円筒形の固定子中子に固定子枠を挿入する作業によって完成となる。通常は天井クレーンを用いるが、固定子完成後の質量が、現地の既存建屋クレーンの容量を超過していた。そこで、天井クレーンに代わるパワージャッキシステム（PJS）を導入した。PJS は、大型のジャッキを門型に配置してレール上を動かすことで大物品をつり上げ、走行方向に限定して移動させる装置であるが、横行方向に対して細かな精度で動かすことができない。今回、PJS での横行方向の調整ができないことを克服するため、仮置き治具や固定子中子を微動調整するための装置を開発し、組立作業時の位置調整を図った。そのときの PJS での組立作業写真を図 9 に示す。中子の周方向の位置調整については PJS の片側ジャッキアップ量を変化させることで中子を周方向に回し、調整を行った。また、固定子中子に固定子枠を挿入する作業においては、PJS の片側



図 6 分割固定子枠の横転

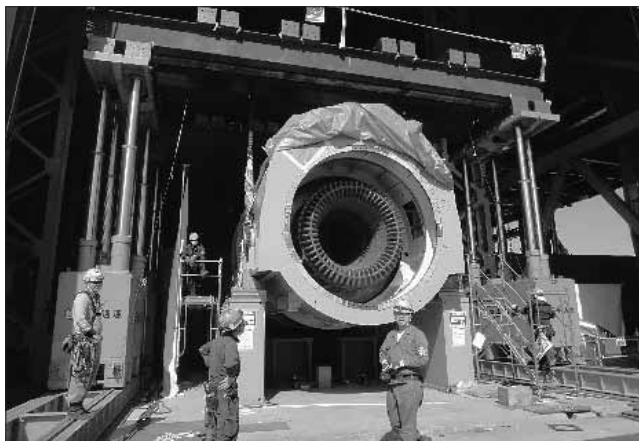


図9 固定子中子と分割固定子枠の組立作業

の進行方向の速度を変化させることで中子と固定子枠の互いの平行度を調整した。これら微動調整治具やPJSでの微調整により組立作業を完遂した。

⑤ あとがき

日本初の内陸型大型 GTCC（ガスタービンコンバインドサイクル発電）プロジェクトにおける発電機現地製作技術について述べた。設計開発では、輸送制限に対する固定子枠の分割方式を開発し、また、鉄心積みに関する端部の技術向上例を述べた。現地製作の製造技術では、各種導入設備例や作業環境対策について述べた。これらにより富士電機は、内陸設置に対する発電機の導入を可能にする技術を確認して、現地工程を順守し、発電機の引渡しを完了した。

今後もお客さまのニーズに合わせた製品を供給するために必要な技術を開発し、社会に貢献していく所存である。

参考文献

(1) 池田忠司ほか. コンバインドサイクル発電設備. 富士時報.

2005, vol.78, no.2, p.116-120.

- (2) 山崎勝ほか. 一軸式コンバインドサイクル発電設備用全含浸絶縁水素間接冷却タービン発電機. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.2, p.113-117.
- (3) 内閣官房. 電力インフラの強靱化に資する日本初の本格的な（120万kW級）内陸型火力発電所の建設. 国土強靱化 民間の取組事例集, 2015, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/minkan_torikumi/, (参照 2020-07-08).
- (4) 中山大樹ほか. 内陸火力発電所に適した発電機の納入事例. 日本ガスタービン学会誌. vol.48, no.1, p.26.

谷藤 怜

大型回転機的设计・開発に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部川崎工場回転機部課長補佐。



中山 大樹

大型回転機の製造技術に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部川崎工場回転機部課長補佐。



水本 貴之

大型回転機的设计・開発に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部川崎工場回転機部。電気学会会員。



オンラインガス分析による回転機固定子巻線の劣化診断

Online Gas Analysis for Deterioration Diagnosis of Rotating Machinery Stator Winding

中山 昭伸 NAKAYAMA, Akinobu

石井 佑一 ISHII, Yuichi

回転機の固定子巻線絶縁は、運転中の電気や機械、熱、環境などの複合ストレスによって経年劣化する。特に、固定子巻線の絶縁表面が劣化すると腐食性ガスが発生する。その結果、回転機内部の金属部品が破損し、突発的な事故になる場合がある。これを解決するため富士電機は、簡便な測定システムによって腐食性ガスを定量測定し、固定子巻線絶縁の表面の劣化度を判定する手法を確立した。このオンライン（運転中）ガス分析に従来のオフライン（停止中）の点検を組み合わせ、より多面的で緻密な評価診断が可能となり、絶縁劣化の状態をタイムリーかつ正確に把握することができる。

The stator winding insulation of rotating machines deteriorates over time due to the composite stress of the electrical, mechanical, thermal and environmental factors during operation. In particular, corrosive gases will be emitted when the insulating surface of the stator winding deteriorates. This can damage the metal parts inside rotating machines, potentially leading to a sudden accident. To solve this problem, Fuji Electric established a method that uses a simple measurement system to quantitatively measure corrosive gases and determine the degree of surface deterioration of stator winding insulation. Combining this online (during operation) gas analysis with conventional offline (during stoppage) inspections can perform more multifaceted and detailed assessments and diagnoses, allowing operators to quickly and accurately understand the state of insulation deterioration.

1 まえがき

発電機やモータなどの回転機の固定子巻線絶縁は、運転に伴う電気、機械、熱や環境の複合ストレスによって、経年とともに劣化する。特に、固定子巻線の絶縁表面が劣化すると、絶縁表面の部分放電によって O_3 （オゾン）や NO_x （窒素酸化物）などの腐食性ガスが発生する。さらに、 NO_x と空気中の水分とが結び付いて HNO_3 （硝酸）が発生する。その結果、回転機の内部の金属部品が腐食して折れるなどの破損が生じる。この破損した部品が遠心力で飛散し、回転機の健全な主要部分に衝突することによって損壊などの突発的な事故へとつながる場合もある。

富士電機の回転機では、絶縁劣化が原因で発生した腐食性ガスによって損壊などの事故に至ったことはないものの、この種の不具合や事故を未然に防ぐ最適な保守・保全プランを提供できるようにするため、簡易的な測定システムを使って運転中に O_3 や NO_x を定量測定し、固定子巻線の絶縁表面の劣化度を推定する手法を確立した。

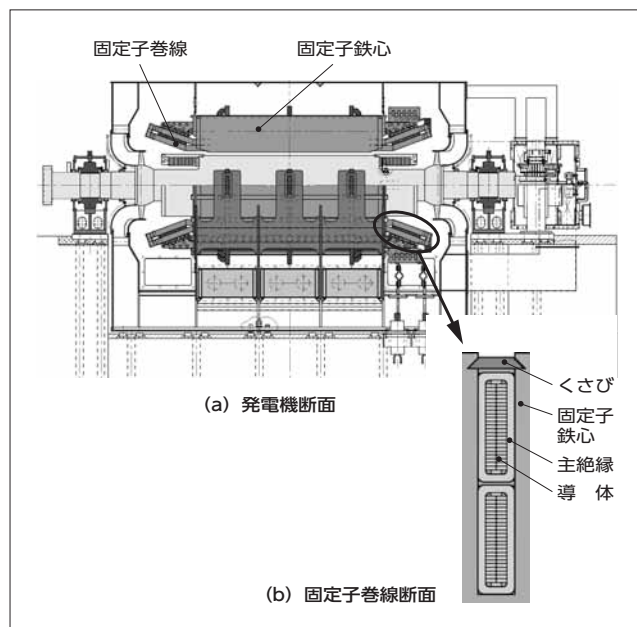


図1 発電機断面と固定子巻線

2 特徴と測定方法

(1) 特徴

図1に、回転機の一例として、発電機断面とその固定子巻線を示す。従来、定期点検時（定検）の診断や検査によって、回転機の不具合や劣化状態を把握していた。そのため、定検の間隔が長い場合や、定検の延伸があれば検査回数が減少し、不具合が把握できていない状態が長く続くことになる。

一方、オンライン（運転中）ガス分析による劣化診断では、次のような特徴がある。

(a) 運転中にいつでも測定ができる。

(b) 従来のような絶縁診断のための、大きな器材や多くの人員は不要である。

(c) 短時間（半日程度）で測定が完了できる。

(d) O_3 と NO_x の定量測定から固定子巻線の絶縁表面の劣化度の評価ができる。

(e) 停止時や定検時の精密診断や絶縁診断と組み合わせれば、より多面的で緻密な評価診断ができる。

(2) 測定方法

図2に、発電機でのオンラインガス分析の測定例を示す。回転機の運転中に固定子フレームのアクセスカバーを固定するねじを外したねじ穴から機内ガスを採取し、 O_3 や NO_x ガス検知管によってガス濃度を測定する。診断は、

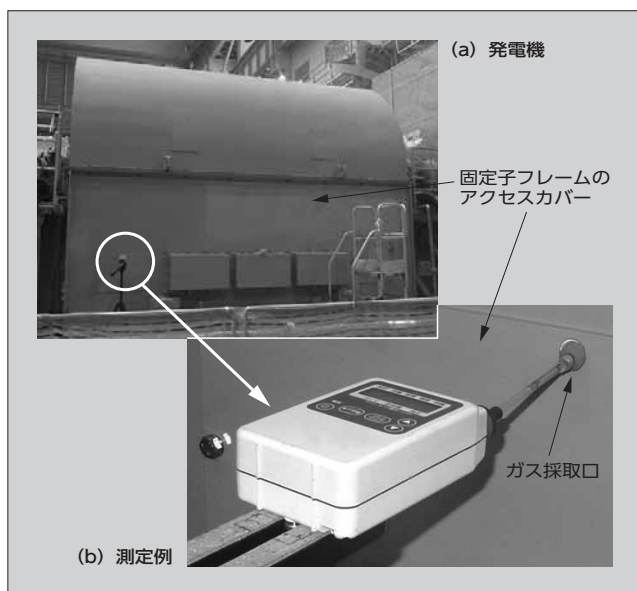


図2 発電機のオンラインガス分析の測定例

固定子巻線の絶縁表面の劣化度合いに応じて発生するガスの種類、濃度が変化するため、 O_3 、 NO_x ガスを測定することで、固定子巻線の絶縁表面の劣化度合いを評価する。

3 開発概要

運転中に、回転機の固定子巻線には少なからず部分放電が発生し、経年劣化によりその量は増加していく。まず、部分放電の測定値を基に、その時発生する O_3 と NO_x の濃度を求めた。

3.1 部分放電と発生ガスの関係

固定子バーコイル（固定子巻線を模した直線状のモデルコイル）を用いて、劣化に伴う部分放電発生と O_3 、 NO_x のガス濃度の関係を調査した⁽¹⁾。

表1に、未劣化のものと回転機の固定子巻線絶縁に疑似的に劣化損傷をさせた4種類のサンプルを示す。これらを用いて回転機のフレームを模擬した金属ケースにモデルバーを入れ、約3 kV/mmの電界を加え、最大放電電荷量 Q_{max} を部分放電計測器で測定した。ガス検知管を使って1 h 電界を加え続けた後のケース内の O_3 と NO_x の濃度を

表1 サンプルの種類

モデルバー		備考
a	○未劣化	比較用試料
b	○固定子鉄心内におけるOCP*の浸食を想定 ○モデルバー表面のOCPが部分的に消失	—
c	○固定子鉄心内におけるOCPの浸食を想定 ○モデルバー表面のOCPが全周消失	—
d	○鉄心外（鉄心出口）におけるOCPの浸食を想定 ○モデルバー表面のOCPの一部が、全周消失	表面にOCP残部あり
e	○主絶縁層内部が劣化（ボイドや剥離）	OCP劣化による表面放電と比較

*OCP：外部コロナ防止層（OCP：Outer Corona Protection）

測定した。

図3、図4、図5に測定結果を示す。鉄心内のOCPが部分的に消失したモデルバー(b)と全周において全てのOCPが消失したモデルバー(c)の Q_{max} は比較的高い。また、モ

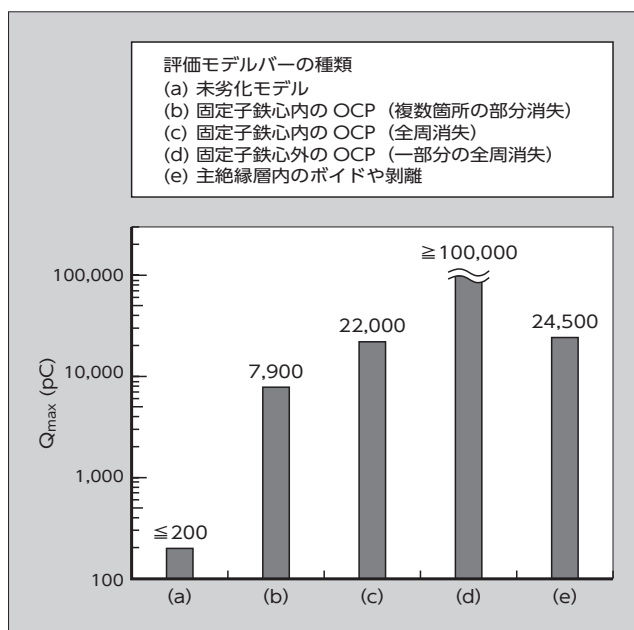


図3 モデルの種類と Q_{max}

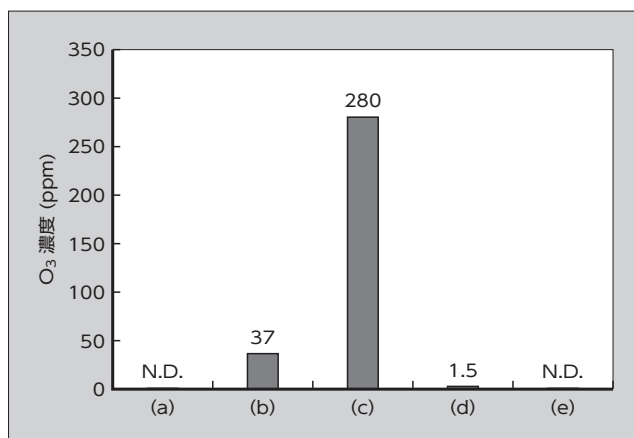


図4 モデルの種類と O_3 濃度

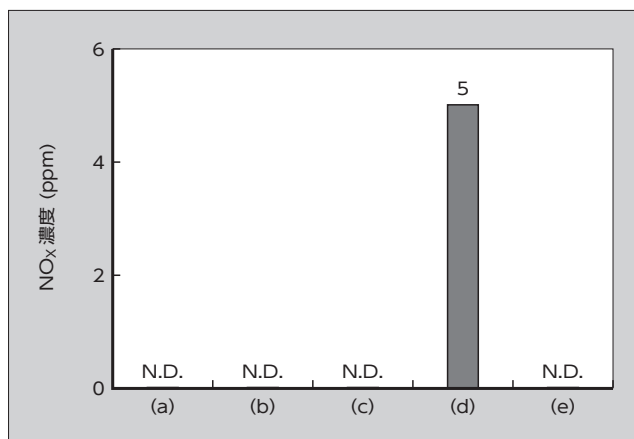


図5 モデルの種類と NO_x 濃度

デルバー(b)と(c)で、 O_3 が 37 ppm と 280 ppm と高い濃度であったが、 NO_x は検出限界以下であった。

また、鉄心出口を想定して OCP の一部が消失したモデル(d)では、 Q_{max} が 100,000pC 以上と最も高い。 O_3 は 1.5 ppm と前述のモデルバー(b)や(c)に比べ少なく、代わりに 5 ppm の NO_x が検出された。また主絶縁層内部の劣化を想定したモデルバー(e)では、 Q_{max} は 24,500 pC と鉄心内の OCP を全面的に消失したモデルバー(c)の 22,000 pC と同程度であったが、 O_3 、 NO_x とともに検出限界以下であった。

これらのことから、 O_3 や NO_x の発生は、固定子バー表面における放電によるものが主であり、それぞれの発生量は、放電の発生部位と Q_{max} の大きさが関係しているといえる。

3.2 外部コロナ防止層 (OCP) の材質と発生ガスの関係

3.1 節において、OCP の劣化状態によって表面放電による最大放電電荷量とガスの発生量が変化することが分かった。

次に、OCP の基材の材料 (3 種：ポリエステル系、アラミド系、ガラス系) 依存性を調査した⁽²⁾。モデルバーを高温高周波課電試験装置により加速劣化させ、OCP の劣化に伴う浸食開始時間を計測した。続いて、OCP の浸食が進行したモデルバーをガラス管に入れ、約 3 kV/mm の電圧を印加し、片方から 100 ml/min の空気を流した際の、 O_3 濃度をガス検知管により測定した。

図 6 に、OCP 基材の違いによる浸食開始時間の測定結果を示す。浸食開始時間は、OCP の材質が、ポリエステル系では 100 h 程度と短く、アラミド系では 520 ~ 740 h 程度、ガラス系では 800 h 程度と最も長かった。また、各材質とも浸食開始時間は電界強度にあまり依存しないことが分かった。固定子巻線表面の OCP の放電劣化を抑制して、耐久性を確保するためには、使用する絶縁材料の選択が重要であることが分かった。

図 7 に、OCP の浸食が進行したモデルバーによる、浸食面積と発生ガス濃度の関係を調べた結果を示す。固定子

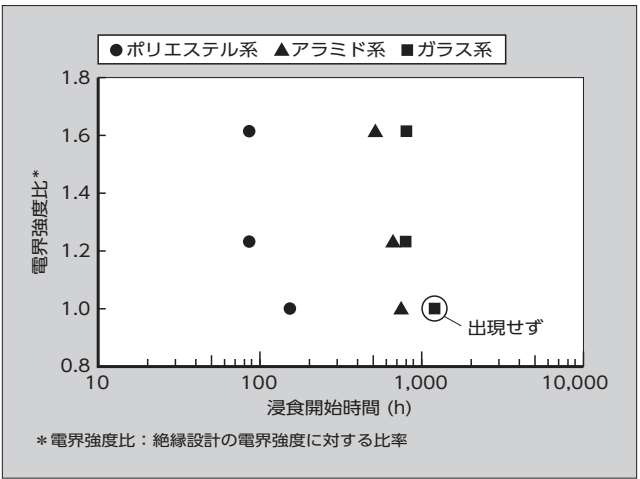


図 6 OCP 基材の違いによる浸食開始時間

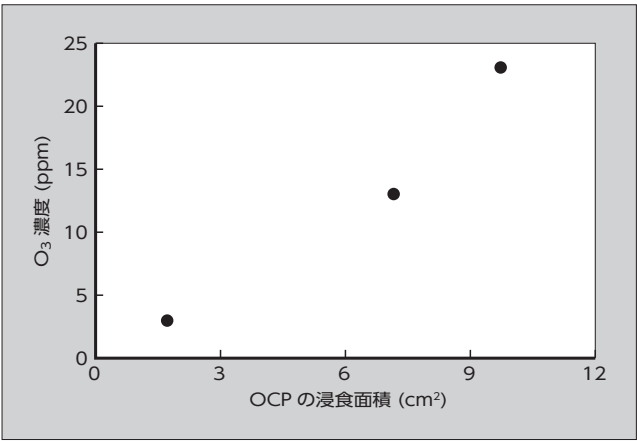


図 7 OCP の浸食面積と O_3 濃度の関係

巻線表面の OCP の浸食が進むと発生する O_3 の発生量が増加することが分かった。

これにより、OCP の浸食開始時間は、OCP 材質による影響が強く、その浸食面積が大きいほど、 O_3 ガスの発生量が多くなることが分かった。

4 適用事例

4.1 実機の測定

このオンラインガス分析の主な適用機は 3.3 kV 以上の空気冷却タービン発電機である。2017 年に運転時の測定を開始し、これまで、国内と国外の自社および他社発電機の診断を継続している。

測定結果の概要を表 2 に示す。測定対象には、新設の発電機から製造後 36 年経過した発電機も含まれている。新設の発電機を含む測定対象の 55% において O_3 と NO_x が検出限界以下となったので、固定子巻線表面の絶縁に問題がない状態であると判断している。

オンラインガス分析の測定推奨頻度を表 3 に示す。測定を継続してトレンド管理を行い、劣化の急変点を把握することが重要である。 O_3 と NO_x が検出された発電機に対しては、生成した HNO_3 による酸性雰囲気によって金属部品の腐食劣化などが懸念されるので半年ごとのオンライン

表 2 測定実績の概要

O_3 の検出	NO_x の検出	全測定数からの割合 (%)
未検出	未検出	55
≥ 0.1 ppm	未検出	27
≥ 0.1 ppm	≥ 0.05 ppm	18

表 3 測定の推奨頻度

腐食性ガスの検出有無		推奨頻度	備 考
O_3	NO_x		
未検出	未検出	約1年ごと	—
検 出	未検出	約1年ごと	—
検 出	検 出	約半年ごと	精密診断 (開放点検) や絶縁診断の推奨

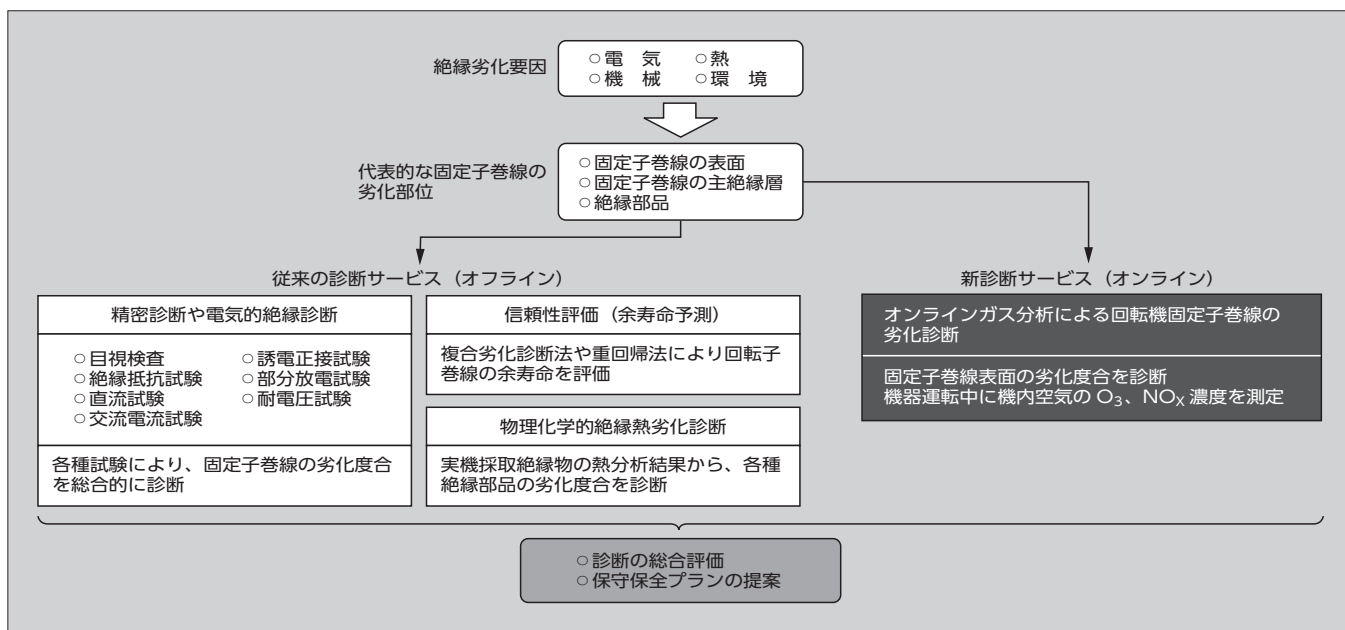


図8 オンラインガス分析と従来の診断サービスを組み合わせた固定子巻線の総合評価

分析を推奨している。さらに、劣化の大きさを把握するとともに健全性の根拠を得るため、次節で述べるようにオフライン（停止中）点検における精密診断や絶縁診断とオンライン分析と組み合わせることを推奨している。

4.2 オンラインとオフラインの組合せ

回転機の点検には、簡易点検と精密診断や電氣的絶縁診断を行う本格点検がある。図8に示すように、従来のオフライン診断サービスとこのオンラインガス分析を組み合わせることで総合評価を行えば、より多面的で緻密な評価診断ができる。絶縁劣化の状態をよりタイムリーにかつ正確に把握でき、補修や更新の判断根拠として扱うことができる。

5 あとがき

オンラインガス分析による回転機固定子巻線の劣化診断について述べた。

富士電機は定期的なオンライン分析による診断を推奨している。たとえ不具合がなくても、オンライン分析を継続することにより、巻線絶縁表面の健全性や劣化の起点を把握することもできる。劣化が認められる場合には劣化度の推移が把握でき、運用のリスクに関する一つの指標が得ら

れることになる。

今後は、オンラインガス分析の測定データと定検で得られる実際の劣化や損傷の状態とを結び付け、より効果的で精度の高い評価ができるように推進していく。

参考文献

- (1) 石井佑一ほか. 発電機固定子巻線の部分放電と発生ガス. 電気学会全国大会. 2-049, 2018.
- (2) 石井佑一ほか. 発電機固定子巻線における外部コロナ防止層の浸食と発生ガス. 電気学会全国大会. 2-053, 2019.



中山 昭伸

回転機絶縁の開発、タービン発電機の構造設計に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部サービス統括部火力・地熱サービス技術部主任。



石井 佑一

回転機絶縁の開発に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部川崎工場回転機部。電気学会会員。

高速増殖原型炉もんじゅにおける燃料体取出し技術

Unloading and Handling Technology of the Fuel Assembly in Prototype Fast Breeder Reactor “Monju”

古賀 和浩 KOGA, Kazuhiro

高速増殖原型炉もんじゅは、現在、廃止措置の第1段階である燃料体取出し期間にある。燃料体取出しでは、富士電機が納入した燃料取扱設備が使用され、燃料体の処理などが予定どおり行われた。富士電機は、事業者のJAEAに技術員を派遣するなどの技術支援を行い、未経験の事象を克服しながら完遂に貢献した。また、燃料体取出しの実施により、その技術を実証した。今後も、燃料取扱設備の実機運転データを継続して取得する予定である。実機運転データを評価し、低炭素社会を担う新型炉として次期高速炉の当該設備の設計に反映することで、高速炉開発への貢献が期待できる。

The prototype fast breeder reactor Monju is currently in its first stage of decommissioning. The fuel handling facility system provided by Fuji Electric was used to unload and handle the fuel assembly as scheduled. Fuji Electric provided technical assistance, such as dispatching engineers to the JAEA, and overcame problems that has not arisen before to complete the project, thus proving our solid technology for the unloading and handling of the fuel assembly. We will continually acquire and evaluate actual operation data on the fuel handling facility system. Reflecting the results into the design will contribute to the development of next-generation fast reactors, which are essential part of supporting a low-carbon society.

1 まえがき

高速増殖原型炉もんじゅは、高速増殖炉（核燃料の増殖を狙った原子炉）の原型炉である（図1）。一般的な原子炉である軽水炉では冷却材に水を使用しているが、高速増殖炉ではナトリウム（液体金属）を使用している。

2016年にもんじゅの廃止措置移行が決定された。2017年6月に廃止措置の第1段階である“燃料体取出し^{（注）}”を開始し、2022年12月までの約5年半で完了する予定である（図2）。燃料体取出しでは、富士電機が納入した燃料取扱設備を使用し、2020年6月までに2回の“燃料体の処理”と1回の“燃料体の取出し”が予定どおり行われた（図3）。

富士電機は、事業者の国立研究開発法人 日本原子力研



図1 高速増殖原型炉もんじゅ
（写真提供：日本原子力研究開発機構）

区 分	第1段階 燃料体取出し期間	第2段階 解体準備期間	第3段階 廃止措置期間Ⅰ	第4段階 廃止措置期間Ⅱ
年 度	2018～2022	2023～2047		
主な 実施事項	燃料体取出し作業			
		ナトリウム機器の解体準備		
			ナトリウム機器の解体撤去	
	汚染の分布に関する評価			
		水・蒸気系など発電設備の解体撤去		
				建物など解体撤去
	放射性固体廃棄物の処理・処分			

図2 廃止措置の全体工程

（資料提供：日本原子力研究開発機構）

〈注〉燃料体取出し：燃料体取出しは、“燃料体の処理”と“燃料体の取出し”を合わせた総称である。燃料体とは、原子炉に装荷する核燃料の取扱い用集合体である。

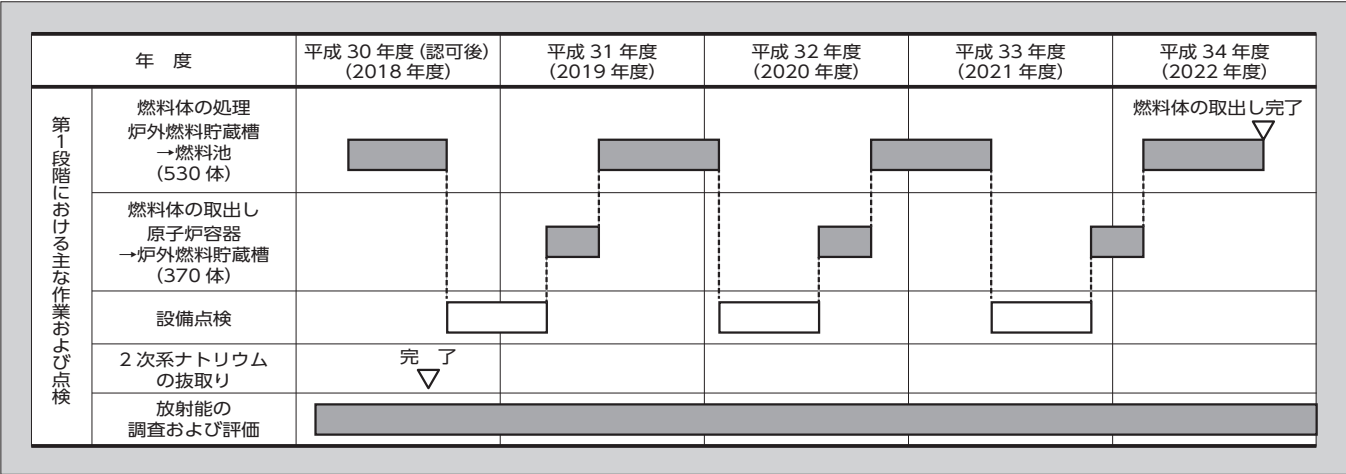


図 3 第 1 段階（燃料体取出し期間）の工程
（資料提供：日本原子力研究開発機構）

究開発機構（JAEA）に協力して技術員を派遣するなどの技術支援を行い、未経験の事象を克服しながらそれらの完遂に貢献した。

本稿では、燃料体取出しにおける燃料体取扱い操作の実施内容および技術の概要を述べる。

② もんじゅの状況

廃止措置移行後のもんじゅでは、停止中の原子炉に燃料体などが装荷されたままである。国や自治体からは、燃料体や、水との反応性が高く危険物であるナトリウムの早期取出しが最優先事項として求められていた。

第 1 段階（～ 2022 年 12 月）で、全 530 体の燃料体の処理と、全 370 体の燃料体の取出し操作を完了する計画である。その中で、2020 年 6 月までに、合計 260 体の燃料体の処理と、100 体の燃料体の取出し操作を計画どおりに行った。

③ 燃料体取出し技術

燃料体取出しに用いる燃料取扱および貯蔵設備を図 4 に示す。また、図 5 に燃料体取出しの移送経路を、表 1 に燃料体取出し作業の工程と使用する設備を示す。使用する設備には、燃料体の着脱、昇降、移送、冷却、洗浄、気密保持、遮蔽など、さまざまな機能が求められ、複数の設備が分担、かつ合理的に連携している。

また、燃料体取出しには、ナトリウム中や水中の燃料体を遠隔で安全に取り扱う高度な技術が求められる。特にナトリウムは液体金属であるため、ナトリウム中の燃料体の様子を目視できない。

燃料体などに付着したナトリウムは、空気中の酸素や水蒸気と極めて反応しやすいため、空気との接触を防止する必要がある。また、固化（凝固）を防止するために、常時 100℃以上に維持する必要がある。そのため、これらへの対応が燃料体の取扱いを難易度の高いものとしていた。

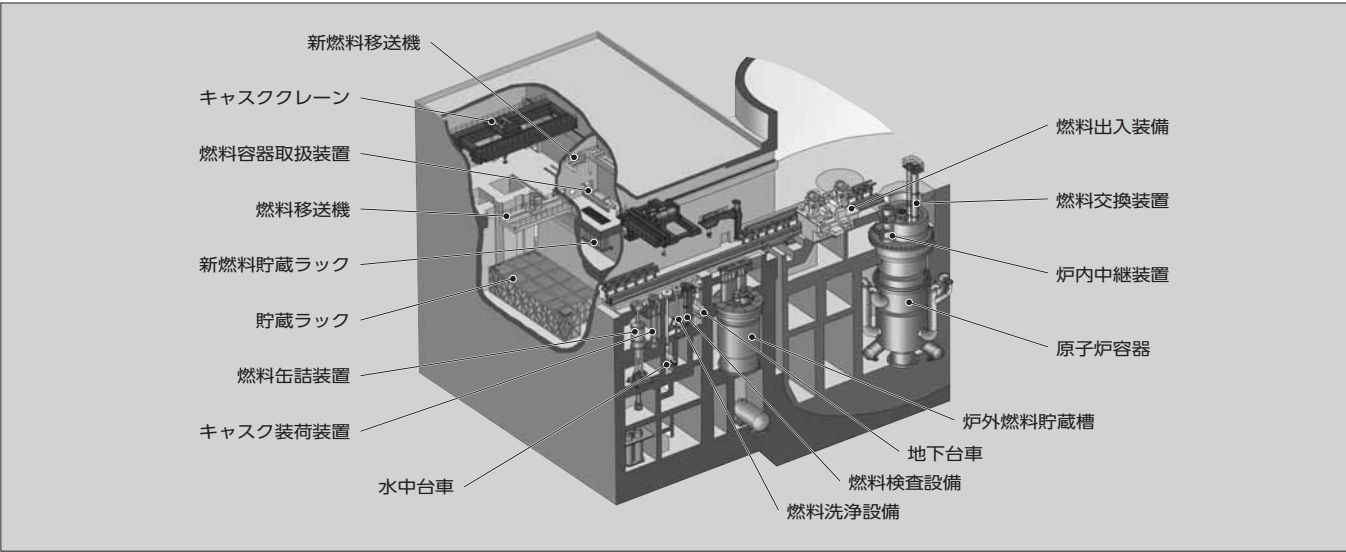


図 4 燃料取扱および貯蔵設備

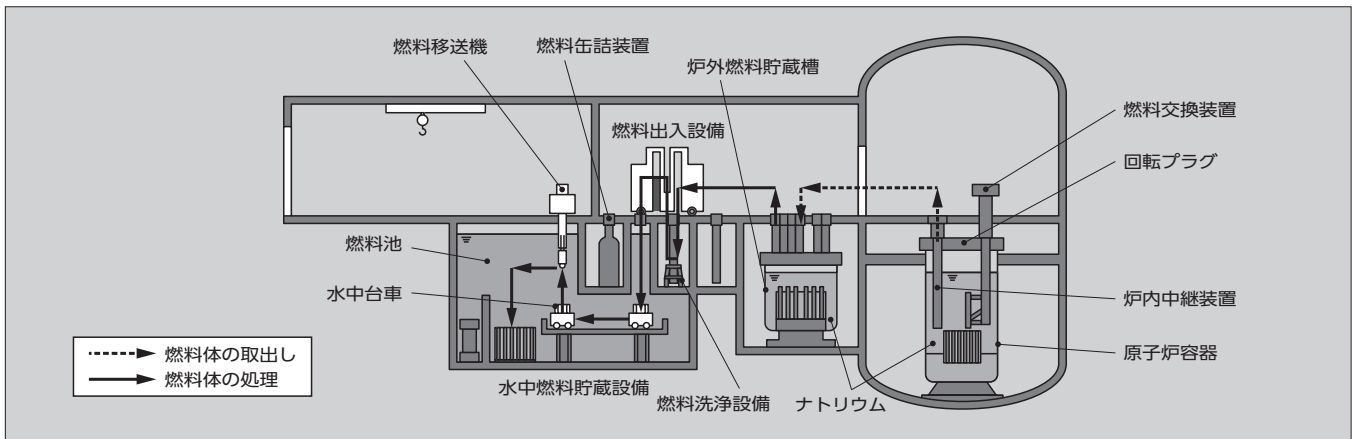


図5 燃料体取出しの移送経路

表1 燃料体取出し作業の工程と使用する設備

工 程	内 容	使用する設備
燃料体の取出し	燃料体を原子炉容器から炉外燃料貯蔵槽に移送すること	燃料交換設備
		燃料出入設備
		炉外燃料貯蔵槽
燃料体の処理	炉外燃料貯蔵槽に一時貯蔵していた燃料体を燃料洗浄設備に移送して付着ナトリウムを洗浄（除去）し、燃料池に貯蔵すること	燃料出入設備
		炉外燃料貯蔵槽
		燃料洗浄設備
		燃料缶詰装置
		水中台車、燃料移送機、貯蔵ラック
		地下台車、新燃料移送機、新燃料貯蔵ラック
		燃料池

3.1 燃料体の処理

燃料体の処理工程では、炉外燃料貯蔵槽に一時貯蔵していた燃料体を燃料洗浄設備に移送して、付着したナトリウムを洗浄（除去）し、燃料池の貯蔵ラックに貯蔵する。

(1) 使用設備

燃料体の処理の操作では、燃料取扱および貯蔵設備（図4）のうち、次の設備を使用する。

(a) 燃料出入設備（図6）

燃料出入設備は、原子炉容器および各設備（炉外燃料貯蔵槽など）間で燃料体などを移送するもので、燃料体の処理の操作で主体となる設備である。この燃料出入設備は、次に示すようにナトリウムが付着した燃料体などを取り扱う燃料出入機本体 A、ナトリウム除去後の燃料体などを取り扱う燃料出入機本体 B の 2 基の取扱機や他の機器から構成されている。

① 燃料出入機本体 A

燃料体などをナトリウム中または、ナトリウム金属粒子が分散したナトリウムミスト雰囲気中で取り扱う機器で、本体内はアルゴンガスを気密保持している。

② 燃料出入機本体 B

燃料体などを水中または湿分雰囲気中で取り扱う機器で、本体内は空気を気密保持している。

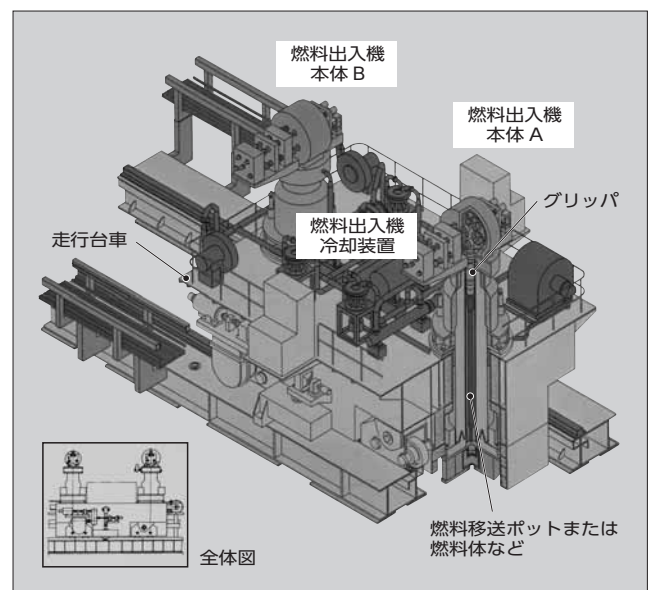


図6 燃料出入設備

③ 燃料出入機冷却装置

燃料出入機本体に収納した使用済燃料体の発熱に対して、冷却ガスを供給、排気（循環）する機器や配管などから構成され、本体 A 用と本体 B 用がある。

④ 走行台車

本体 A、本体 B および冷却装置を搭載して走行し、本体を各設備に精度良く位置決めする。

(b) 炉外燃料貯蔵槽

燃料体などの中継貯蔵、使用済燃料体の放射能減衰待ち貯蔵をナトリウム中で行う設備である。

(c) 燃料洗浄設備

使用済燃料体などに付着したナトリウムを蒸気および水で洗浄（除去）する設備である。この設備では、ナトリウムと水の急激な反応を防止するため、最初は蒸気を供給し、ナトリウムと水を徐々に反応させることとしている。

(d) 燃料缶詰装置

洗浄後の燃料体などを水缶詰する設備である。水缶詰とは、燃料缶詰装置において燃料体を水と共に缶詰缶に

封入することをいう。

(e) 水中台車、燃料移送機、貯蔵ラック

燃料出入設備から裸状態または缶詰缶に水缶詰した使用済燃料体などを受け入れ、所外搬出待ち貯蔵を水中で行うための設備である。

(f) 地下台車、新燃料移送機、新燃料貯蔵ラック

燃料体の処理の操作前に、所内に搬入された模擬体（燃料体の外形を模擬したもの）および缶詰缶を受け入れ、室内大気中で一時貯蔵を行うための設備である。

また、燃料体の処理では、模擬体および缶詰缶を燃料出入設備に受け渡す設備である。

(2) 燃料体の処理操作の概要

水缶詰する場合の燃料体の処理操作の概要は、次のとおりである。安全を確保するとともに複数の設備を連携できるようにするため、盤面上で点滅する押しボタンを押せば遠隔で自動化操作できる設計としている。

(a) 炉外燃料貯蔵槽は約 200℃の液体ナトリウムを保持している。この貯蔵槽に貯蔵した使用済燃料体を取り出し、洗浄そして水缶詰して貯蔵ラックに貯蔵する。

(b) 取り出した燃料体を貯蔵していた炉外燃料貯蔵槽の同じ位置に、新燃料貯蔵ラックに貯蔵していた模擬体を取り出して貯蔵する。炉外燃料貯蔵槽に装荷する前には、ナトリウムとの温度差を抑えるために予熱をする。

この燃料体と模擬体の取扱いは 1 体ずつ安全を確保して行いつつ総操作時間を短縮するため、(a)と(b)の工程をそれぞれ細分化して逐次操作や並行操作を適切に組み合わせた操作プログラムとしている。

(3) 燃料体の処理の実績

(a) 1 回目：2018 年 8 月～2019 年 1 月

燃料体 100 体の処理操作を目標とした。しかし、4 章で述べるようにいくつかの未経験の事象が発生したため、それぞれ 86 体の燃料体の処理と模擬体の移送にとどまった。

(b) 2 回目：2020 年 2 月～6 月

燃料体 130 体の処理操作を目標とした。1 回目の経験を踏まえた対策が効果を発揮し、計 174 体の燃料体の処理と、計 140 体の模擬体の移送を完遂した。

3.2 燃料体の取出し

燃料体の取出し工程では、原子炉（炉心）の燃料体を取り出して炉外燃料貯蔵槽に装荷（一時貯蔵）し、燃料体を取り出した後の炉心位置には、模擬体を装荷する。

(1) 使用設備

燃料体の取出しの操作では、燃料取扱および貯蔵設備（図 4）のうち、次の設備を使用する。

(a) 燃料交換設備

原子炉容器内のナトリウム中で燃料体などを移送する次の設備から構成される。

① 燃料交換装置

燃料体などを炉心から引き抜いたり、炉心に挿入し

たりする設備である。

② 炉内中継装置

燃料交換装置と燃料出入機本体 A の間で、燃料体などの受渡しを行う設備である。

(b) 燃料出入設備（図 6）

燃料体の取出し操作では、原子炉容器（炉内中継装置）と炉外燃料貯蔵槽の間で、燃料体などを移送する設備である。

(c) 炉外燃料貯蔵槽

(2) 燃料体の取出し操作の概要

燃料体の取出し操作は、燃料体の処理と同様に、遠隔自動で行う。

原子炉（炉心）の使用済燃料体を引抜き、移送して炉外燃料貯蔵槽に貯蔵する。この燃料体が装荷されていた炉心の同じ位置に、炉外燃料貯蔵槽に貯蔵した模擬体を取り出し、移送して挿入する。この燃料体と模擬体の取扱いは 1 体ずつ行い、操作フローは安全の確保と総操作時間の短縮を両立するため、工程をそれぞれ細分化して逐次操作や並行操作を適切に組み合わせた操作プログラムとしている。

(3) 燃料体の取出しの実績：2019 年 9 月～10 月

目標どおり、計 100 体の燃料体の取出しと、計 100 体の模擬体の移送を完遂した。

4 未経験の事象への対応

1 回目の燃料体の処理は、初めてとなる本格的な操作であった。そのため、多くの未経験の事象が発生した。主要な事象とその対策について述べる。

(1) ナトリウム化合物の付着によるトルク上昇

(a) 事象の概要

燃料体の取扱いは、燃料出入機本体 A（図 7）の内部のグリッパ（図 8）の爪が開閉して燃料体などを着脱する。上部のグリッパ駆動装置からのステンレステープの巻取りや巻出しによって、燃料体などの着脱と昇降を行う。このグリッパ爪の開閉時のトルクが設計段階の想定値よりも上昇した。

(b) 原因の推定

実際にグリッパを目視確認したところ、グリッパの表面には多くのナトリウム化合物が付着しており（図 9）、この付着物が爪の開閉などを阻害していることを確認した。燃料体などを取り扱うとグリッパやステンレステープにナトリウムが付着し、この付着したナトリウムが水酸化ナトリウムや酸化ナトリウムなどの化合物となって固化し、各摺動部を固着させてトルクが上昇した。

燃料洗浄設備の洗浄工程では、洗浄終了後に燃料洗浄槽内の水を排水し、燃料出入機本体 A からナトリウムが付着した燃料体を受け入れるために燃料洗浄槽内を乾燥させる。しかし、乾燥工程やガス置換が十分ではない場合、本体 A と燃料洗浄槽が接続した際に、グリッパなどが露点の高い雰囲気さらされたり、本体 A 内に湿分が移行したりしたことが原因であると推定した。

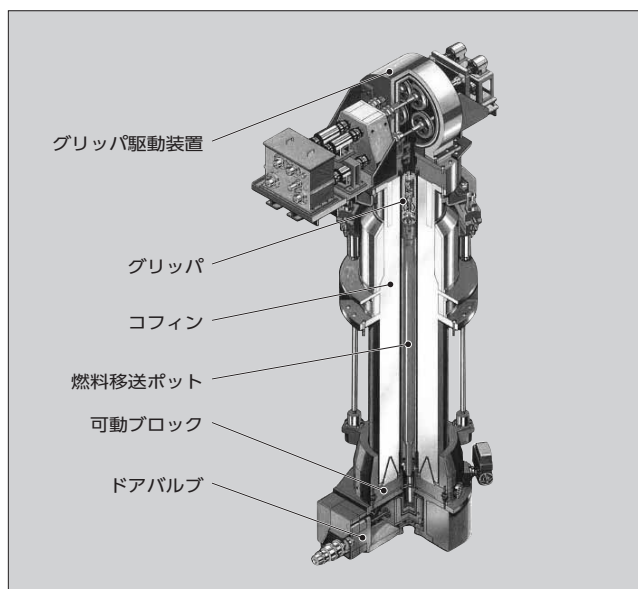


図7 燃料出入機本体 A
(本体 B も基本的には同一構成)

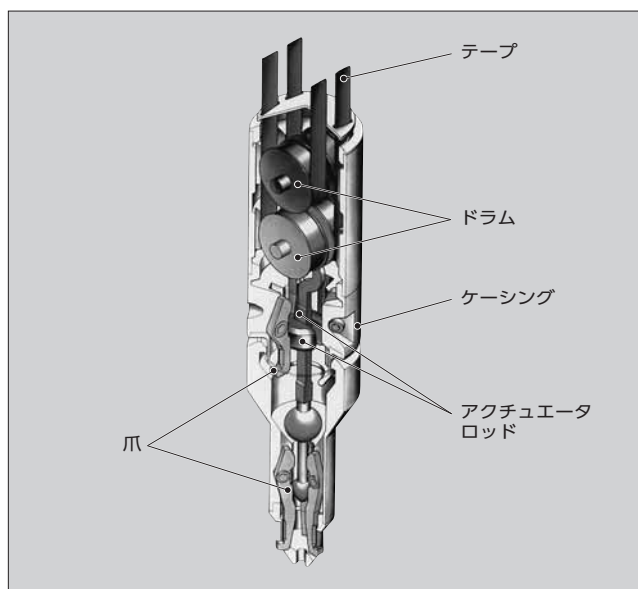


図8 燃料出入機本体 A グリップ

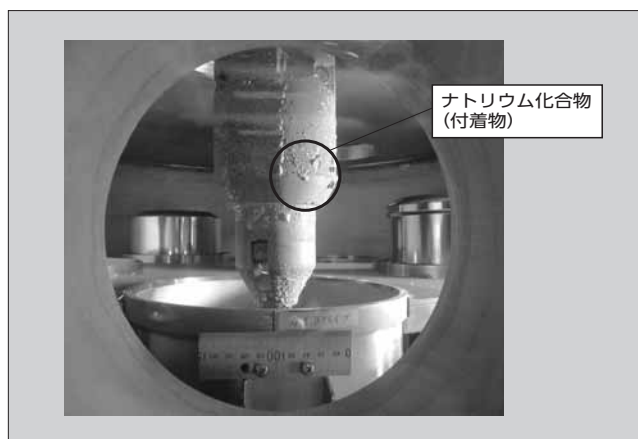


図9 グリップ下部の外観

そこで、燃料洗浄槽内の露点温度を測定したところ、洗浄後の乾燥が十分ではないことが分かった。燃料洗浄槽内の乾燥不足による残留湿分により、グリップなどに付着したナトリウムが化合物化したと判明した。

(c) 対策の実施

燃料洗浄槽内の乾燥機能を強化するため、燃料洗浄槽や近傍の配管にヒータおよび保温材を追加するとともに、総操作時間が長くない範囲で乾燥工程の時間を長くしたり、ガス置換回数を増やしたりすることとした。これらの対策を講じてから、2 回目の燃料体の処理に臨んだ。

(d) 対策の効果

2 回目の燃料体の処理では、1 回目で確認されたような異常なトルク上昇は初期に一度確認されたものの、それ以降は確認されず、安定したトルクを示した。

また、燃料洗浄槽内の露点温度も -60°C 以下まで低下して安定するようになり、明らかな改善が確認された。

(2) ナトリウム化合物付着によるドアバルブ全閉不良

(a) 事象の概要

燃料体の取扱いでは、燃料体を本体内に収納後、下部のドアバルブを全閉する。しかし、このドアバルブの全閉状態が不完全であったため、弁座のシール漏れが発生した。

(b) 原因の推定

ドアバルブ弁体上に滴下したナトリウムが弁体とケーシングの間の隙間に浸入して水酸化ナトリウムや酸化ナトリウムなどの化合物となって固化し、弁体の動きや弁座のシール性を妨げたものと考えた。化合物の生成の原因は、前項のグリップ爪の開閉時のトルク上昇の場合と同様に湿分の除去が不十分であったことである。

(c) 対策の実施

前項と同様に燃料洗浄槽内の乾燥工程を改善した。

(d) 対策の効果

2 回目の燃料体の処理では、1 回目で確認されたようなドアバルブ全閉不良は一度もなく、安定したドアバルブの開閉を確認した。

5 あとがき

高速増殖原型炉もんじゅにおける燃料体取出し技術について述べた。富士電機は、燃料体取出しにおいて、国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構に協力して燃料体取扱い操作期間において技術員を派遣するなどの技術支援を行い、未経験の事象を克服しながら完遂に貢献した。

また、燃料体取扱い操作を通して燃料体取出し技術を実証した。各取扱い操作では、燃料取扱設備の実機運転データを取得済みであり、今後も引き続き取得する予定である。今後実機運転データを評価し、低炭素社会を担う新型炉として次期高速炉の当該設備の設計に反映し、メーカーとして積極的に高速炉の開発に貢献する所存である。

参考文献

- (1) 古賀和浩ほか. 高速増殖原型炉もんじゅ 廃止措置と燃料体取出し作業に向けて. FAPIG. 2018, No.194.
- (2) 古賀和浩ほか. 高速増殖原型炉もんじゅ 燃料体取出し作業の開始. FAPIG. 2020, No.196.
- (3) 原子力規制委員会. もんじゅ廃止措置安全監視チーム会合資料.



古賀 和浩

高速炉もんじゅなどのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部発電事業部原子力バックエンド技術部。



先進固化技術 “SIAL[®]” による放射性廃棄物処理

Radioactive Waste Treatment Using the Advanced “SIAL[®]” Solidification Technology

関根 伸行 SEKINE, Nobuyuki

見上 寿 MIKAMI, Hisashi

小野崎 公宏 ONOZAKI, Kimihiro

放射性廃棄物処理の固化材として、セメントに比べて物理的、化学的に安定であり、放射性核種や重金属などの閉じ込め性が高いジオポリマーが注目されている。富士電機は、ジオポリマーを用いた先進固化技術 “SIAL[®]” の国内適用に向けて、原子力発電所で発生したフィルタスラッジおよび使用済みイオン交換樹脂を用いた実証試験を国内で初めて実施した。放射性廃棄物を 40 wt% まで充填した固化体の圧縮強度は、埋設処理に要求される値よりも高いことを確認した。また、代表的な放射性核種の分配係数は、埋設施設の設定値を満足する良好な結果であることを確認した。

Geopolymer has been attracting attention as a solidifying agent for radioactive waste treatment because it is physically and chemically more stable than cement and provides better confinement of radionuclides and heavy metals. Fuji Electric conducted the first demonstration test in Japan using the filter sludge and spent ion exchange resin disposed by nuclear power plants to facilitate the application of the geopolymer-based advanced solidification technology “SIAL[®]”. We confirmed that solidified products filled with radioactive waste up to 40 wt% had higher compressive strength than required for geological disposal. In addition, we confirmed that the partition coefficients of representative radionuclides sufficiently satisfied the configuration values for geological disposal facilities.

1 まえがき

原子力発電所は安定して大量の電力を供給する。一方で、運転に伴い濃縮廃液などの液体状廃棄物や、使用済みのイオン交換樹脂などの固体状廃棄物といった放射性廃棄物が発生する。これらの放射性廃棄物は、セメントやアスファルト、プラスチックなどの固化材によってドラム缶内に安定・固化され、廃棄体として青森県六ヶ所村にある日本原燃株式会社の六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターに埋設処分される。

放射性廃棄物の固化材としてセメントが主流になりつつある中で、セメントと同じ無機系材料であるジオポリマーが、新しい固化材として近年注目されている。この材料は、セメントに比べて物理的、化学的に安定であり、放射性核種や重金属などの閉じ込め性が高いという特徴を持つ。

国外では、AllDeco Ltd.（現在の Jacobs 社）がジオポリマーを使った先進固化技術 “SIAL[®]” を開発し、2003 年にスロバキア共和国原子力規制局（UJD SR）、2006 年にチェコ原子力安全局（SUJB）から放射性廃棄物処理の固化材としてのライセンスを取得し、世界で初めて放射性廃棄物処理に適用した。富士電機は、Jacobs 社が保有する SIAL[®] の国内の放射性廃棄物処理への適用に向けて開発を進めている。本稿では、その技術の特徴と実証試験について述べる。

2 “SIAL[®]” の特徴

ジオポリマーは、アルミナシリカ粉末とアルカリシリカ

溶液から形成される無機系材料の縮合体である。SIAL[®] は、アルミナシリカ粉末としてメタカオリン（SIAL-B 材）、アルカリシリカ溶液として水ガラス（SIAL-A 材）が使用され、セメントと同様に室温で固化する。また、SIAL[®] は、SIAL-A 材、SIAL-B 材および種々の添加材の配合組成を最適化することにより、硫酸塩やほう酸塩などの無機塩が高濃度で含まれる濃縮廃液や有機物を含むイオン交換樹脂、焼却灰やオイルなどの安定・固化において、セメントに比べて、廃棄物の高充填化や前処理を行うことなく直接固化ができるなど優れた特性が期待できる。

3 “SIAL[®]” の基本性能

3.1 セメントとの性能比較

SIAL[®] の基本性能を把握するため、コールド試験^{（注2）}によってコバルト（Co）、ストロンチウム（Sr）、セシウム（Cs）の分配係数^{（注3）} K_d を評価し、セメントとの性能を比較した。

表1に、SIAL-A 材と SIAL-B 材からなる SIAL[®] とセメ

表1 分配係数の比較

初期濃度 100 ppm

元 素	分配係数 (m^3/kg)		
	Co	Sr	Cs
SIAL [®] 固化体	0.28	0.95	0.55
セメント固化体	37	0.004	0.0003

〈注2〉コールド試験：放射線または放射性物質を用いないで行う予備試験または模擬試験

〈注3〉分配係数：分配係数は分配平衡モデルでの特性を表す指標で、放射性核種などの元素の閉じ込め性を表し、数値が高いほど閉じ込め性が高い。

〈注1〉SIAL：Jacobs Slovakia s.r.o の商標または登録商標

ントの分配係数の比較を示す。セメントに比べ、SrやCsの閉じ込め性が高く、Coの閉じ込め性は低いものの、十分な閉じ込め性を基本特性として持っていることを確認した。

$$K_d = (V/W_s) \cdot (C_0 - C_i) / C_i$$

K_d : 分配係数 (m^3/kg)

C_0 : 初期の溶液中の元素濃度 (ppm)

C_i : 反応終了時の溶液中の元素濃度 (ppm)

V : 溶液の体積 (m^3)

W_s : 固化体の質量 (kg)

3.2 無機塩の固化

放射性廃棄物に含まれる可能性のある炭酸塩やほう酸塩、硫酸塩などの無機塩がジオポリマー固化に及ぼす影響を調査するため、SIAL®の基本的な配合組成で固化試験を行った⁽²⁾。

まず、混練後の粘度の時間変化を確認した。表2に、混練直後の初期粘度を示す。初期粘度は、無機塩の充填率が高くなると上昇する。図1に、無機塩充填率10 wt%における、初期粘度を基準とした粘度上昇倍率の時間変化を示す。基準となる未充填時の粘度上昇変化に比べ、炭酸塩は硬化促進、メタほう酸塩は硬化遅延が確認された。硫酸塩はわずかに凝結促進の効果が見られた。硫酸塩では、2時間以降粘度が測定上限値を超えたためデータを表記していない。これらの結果から、ジオポリマー固化における無機塩の影響は、従来のセメントの場合と同様の傾向を示すことを確認した。また、無機塩を充填した固化体の圧縮強度を評価した。充填率40 wt%の無機塩が固化できることを確認した。圧縮強度は図2に示すように、10 wt%に比べ低下するものの、炭酸塩では32 MPa、メタほう酸塩では

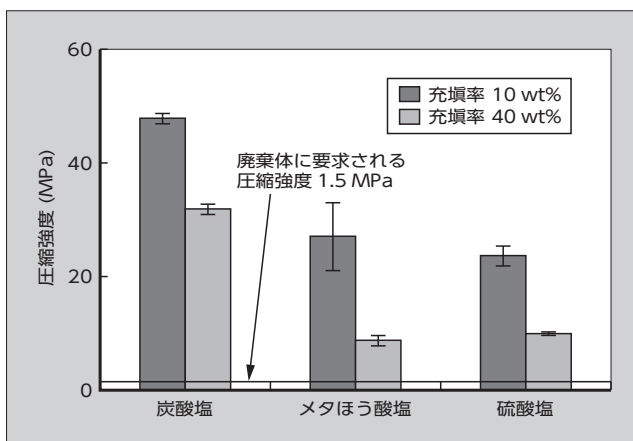


図2 圧縮強度の比較

9 MPa、硫酸塩では10 MPaであり、廃棄体に要求される圧縮強度1.5 MPa以上を満足し、十分な強度を持っていることを確認した。

なお、これら無機塩を含む放射性廃棄物のSIAL®を使った固化の実運用に際して、取扱いやすい粘度や要求値を満たす圧縮強度となるように充填率や配合組成を最適化していく予定である。

4 放射性廃棄物処理の実証試験

SIAL®は国外の放射性廃棄物処理で商業化されているが、国内の評価基準は異なるため、国内の原子力発電所で発生した放射性廃棄物を用いた実証試験が必要である。日本原子力発電株式会社の協力の下、敦賀発電所で発生した放射性廃棄物を用いて国内基準に沿った実証試験を行った。

試験に用いた放射性廃棄物は、フィルタスラッジ (FS: Filter Sludge) と使用済みイオン交換樹脂 (SR: Spent Resin) である。原子炉浄化システムなどでは、ろ過助剤をブリコートしたフィルタが使用されており、FSはフィルタ洗浄により発生したろ過助剤や鉄さびなどを含むスラッジ状の放射性廃棄物である。また、SRは液体中のイオン性不純物を除去するために使用されたイオン交換樹脂の放射性廃棄物である。これらの放射性廃棄物には、さまざまな放射性核種が含まれている。

4.1 コールド試験による配合組成の最適化

放射性廃棄物を固化するためには、放射性廃棄物ごとに固化材の配合組成の最適化が必要となる。そのため、事前に、放射性廃棄物を模擬した試料を使ったコールド試験を実施した⁽³⁾。その結果、FSおよびSRの模擬試料ごとにSIAL®の配合組成を最適化することで、充填率40 wt%の固化が可能で、要求される圧縮強度1.5 MPa以上を確認した。

4.2 ホット試験によるSIAL®の実証

実証試験として、表3と図3に示す放射性廃棄物を用いてコールド試験で求めた組成でSIAL®を配合したジオポ

表2 初期粘度の比較

無機塩の充填率 (wt%)		0	10	40
初期粘度 (Pa・s)	炭酸塩	3	5	10
	メタほう酸塩		9	10
	硫酸塩		21	23

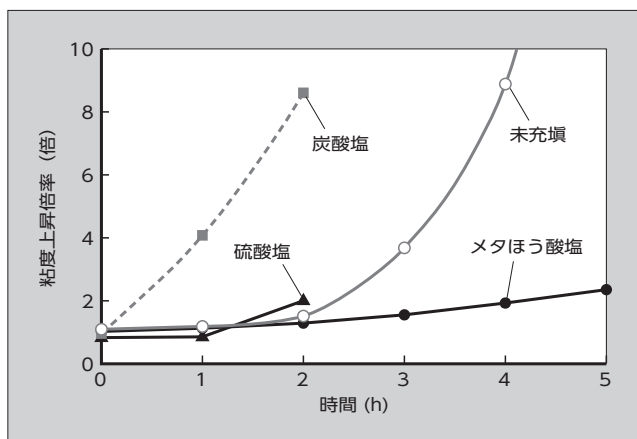


図1 粘度上昇倍率の比較 (充填率10 wt%)

表 3 ホット試験に用いた放射性廃棄物

	表面線量当量率 (mSv/h)	含水率 (%)
FS	0.27	74 ~ 75
SR	0.50 ~ 0.60	52 ~ 55



(a) フィルタスラッジ (FS)



(b) 使用済みイオン交換樹脂 (SR)

図 3 放射性廃棄物の外観

リマーのホット試験^(注4)を行った。FSに含まれるセルロースの分解物であるイソサッカリン酸 (ISA) はプルトニウムなどの α 核種^(注5)の溶解度を大幅に増加させることが報告されており、分配係数の低下、つまり放射性核種が溶け出しやすくなることが懸念される。そこで、FSに含まれるISAの分配係数への影響を調査した。また、実際の埋設後に溶出したISAがSRに影響を及ぼすことも懸念されたので、確認のためSRも調査した。

4.3 ホット試験による実証試験方法

(1) 放射性廃棄物の固化

コールド試験で配合組成を最適化したSIAL®を用いて、放射性廃棄物を固化した。放射性廃棄物の充填率はコールド試験と同様に40 wt%とした。SIAL®と放射性廃棄物を混練した後、養生28日後の固化体について性能評価を実施した。

〈注4〉ホット試験：放射線または放射性物質を用いた試験

〈注5〉 α 核種：核分裂をする際に α 線 (He原子核) を放出する放射性核種

表 4 分配係数測定条件

項 目	条 件
試 料	FS固化体、SR固化体 形状：粒状 (0.5 ~ 5 mm)
試験溶液	平衡水
固液比	固体 / 液体 = 1 / 10
ISA初期濃度	ISAなし、10 mM
試験時間	168 時間
試験環境	窒素雰囲気下

(2) 圧縮強度

作製した固化体について一軸圧縮強度を測定した。

(3) 分配係数測定試験

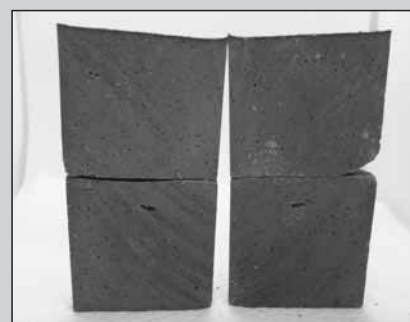
代表的な放射性核種について分配係数を評価した。表4に分配係数測定条件を示す。ISAは、固化材や廃棄物への収着、核種濃度に対して過剰 (保守側) となるように、初期濃度を10 mM (M=mol/L) に設定した。

4.4 結果と評価

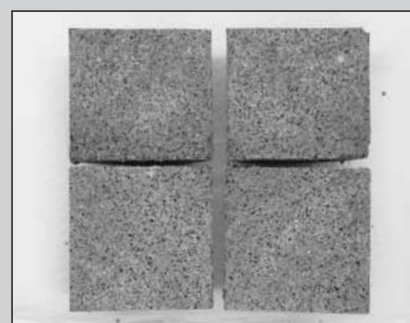
(1) 均一性と圧縮強度

図4に、放射性廃棄物の固化体の断面写真を示す。FS固化体、SR固化体ともに均一に固化していることが確認できた。表5に示すように、圧縮強度はFS固化体で14 MPa、SR固化体で7.7 MPaであった。いずれも埋設処理に要求される圧縮強度1.5 MPa以上であり、十分な圧縮強度があることを確認した。

(2) 分配係数の結果



(a) フィルタスラッジ (FS) 固化体



(b) 使用済みイオン交換樹脂 (SR) 固化体

図 4 固化体の断面写真 (寸法 ϕ 50 × 100 mm)

表 5 固化体の表面線量当量率と圧縮強度

	表面線量当量率 (mSv/h)	圧縮強度 (MPa)
FS固化体	0.12	14
SR固化体	0.08	7.7

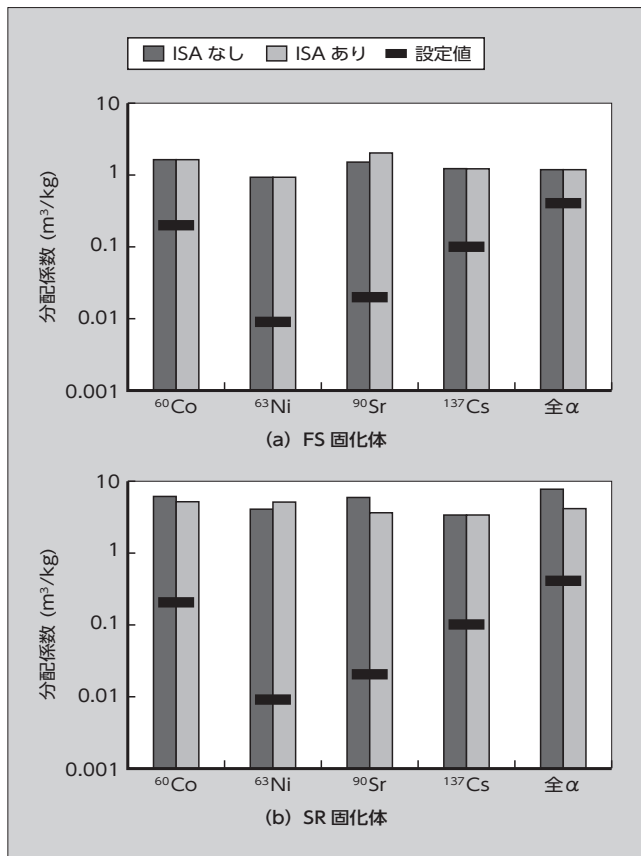


図 5 主要核種の分配係数

表 6 ISA の影響評価結果

	分配係数の増加率（倍）				
	⁶⁰ Co	⁶³ Ni	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	全α
FS固化体	1.0	1.0	1.3	1.0	1.0
SR固化体	0.9	1.2	0.6	1.0	0.5

図 5 に、FS 固化体と SR 固化体の分配係数を示す。代表的な放射性核種の分配係数は、六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターの 3 号廃棄物埋設施設の設定値を満足する良好な結果が得られた。また、表 6 に示すように ISA の分配係数への影響は、SR 固化体において、⁹⁰Sr と全 α（α 線を放出する全核種）の分配係数がわずかに低下した

が、全ての核種は 3 号廃棄物埋設施設の分配係数の設定値よりも高い性能を維持している。ISA の影響が最も懸念される全 α でも、大きな影響がないことを確認した。

5 あとがき

先進固化技術“SIAL®”による放射性廃棄物処理について述べた。ジオポリマーは国外での実績があるが、国内での適用には中長期的な安定性について合理的な説明が行えるようにすることが課題である。今後、実運用を想定した 200 L ドラム缶による実規模スケールの実証試験や長期的な性能変化などの評価を進めていく所存である。

放射性廃棄物処理の実証試験は、日本原子力発電株式会社殿、Jacobs 社殿のご協力により実施された。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- (1) 須田裕貴ほか. “固化体機能評価”. 2018 年春の年会予稿集. 日本原子力学会, 2018, O15.
- (2) 安田昌樹ほか. “SIAL® による固化阻害物質の影響評価”. 2020 年春の年会予稿集. 日本原子力学会, 2020, B05.
- (3) 関根伸行ほか. “模擬フィルタスラッジおよびイオン交換樹脂の SIAL® の固化試験”. 2020 年春の年会予稿集. 日本原子力学会, 2020, B06.



関根 伸行

有機感光体材料、パワー半導体封止材料の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部発電事業部原子力バックエンド技術部。日本原子力学会会員。



見上 寿

放射性廃棄物処理・処分技術、被ばく・遮へい評価技術、廃止措置シナリオ検討に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業部発電事業部原子力バックエンド技術部主査。日本原子力学会会員、日本保健物理学会会員、環境放射能除染学会会員。



小野崎 公宏

放射性廃棄物処理・処分のエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部営業統括部営業第四部担当課長。

LAN 式回転機故障予兆監視システム「Wiserot」

Diagnostic System for Rotating Machine Vibration "Wiserot"

税所 俊治* SAISHO, Toshiharu

生産ラインで稼働しているモータやファン、ポンプ、ブロワなどの機械設備が突発的に故障すると、復旧までに数時間から数日間を要する事態となり、その間の生産停止による莫大（ばくだい）なロスコストが発生する。このような突発故障を未然に防ぐため、モータをはじめとした機械設備の異常振動を監視する予防保全の取組みが増えている。また、近年、企業や事業所では、保全業務に IoT（Internet of Things）技術の導入を上位方針とすることも増え、その施策として振動計測に取り組む事例も拡大している。しかし、振動計測を保全業務に取り入れたくても、保全担当者自身が注意や危険などの判定基準値となるしきい値を設定するのは非常に困難であり、導入に踏み込めないケースも多い。回転機故障予兆監視システム「Wiserot」は回転機メーカーである富士電機の故障予兆監視のノウハウを集約して、担当者の困り事を解決するシステムである。富士電機は、従来よりも高い分解能で精密診断したいというニーズに対応するため、従来の無線式 Wiserot と併用が可能で、大容量データが扱える LAN 式 Wiserot の提供を開始した。

1 LAN 式「Wiserot」

従来の無線式 Wiserot は、設置作業の容易性を考慮した設計で、314MHz 特定小電力無線とバッテリー搭載により完全な無線化を実現したが、不具合箇所を正確に特定するために必要な大容量データ伝送には不向きであった。今回、大容量データ伝送に対応するため、有線通信および常時電源供給（AC アダプタ採用）による LAN 式振動センサを製品化した。設置場所や状況に応じて、無線式と併用して運用することが可能である。図 1 に LAN 式振動センサの外観を、図 2 にシステム構成図を示す。

- (a) 大容量データ伝送が可能になり、従来の 4,096 点のデータ量から、262,144 点までデータ伝送が可能になった。これにより、FFT 周波数解析の分解能が従来の 6.25 Hz から 0.09 Hz に大幅に改善し、精密診断が可能になり、ベアリングの不具合箇所が正確に特定できるようになった。
- (b) Ethernet 通信の採用により、従来の無線中継器（LAN アダプタ、送受信機）が不要となる。これに



図 1 LAN 式振動センサ

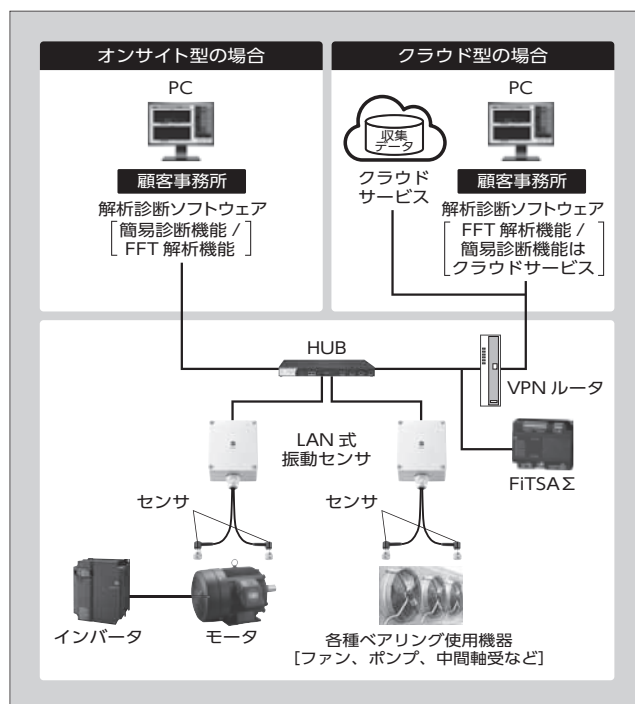


図 2 LAN 式「Wiserot」のシステム構成図

より、シンプルなシステムが構築でき、現地取付け作業時に専門性を要していた無線環境調査も不要になる。

* パワエレシステム インダストリー事業本部フィールドサービス統括部事業企画部

〈注 1〉 Ethernet：富士ゼロックス株式会社の商標または登録商標

2 「Wiserot」の概要

Wiserot は、信号の周波数帯を切り替えることによりモータや機械設備の機械振動とベアリング振動を計測して、設備の故障予兆を監視することができる。

なお、既に製品化済みの無線式 Wiserot（図3）は、鉄鋼、化学、自動車、食品、飲料など分野を問わず導入されている。国外日系企業からのニーズも多く、国内だけでなく EU、インド、東南アジア、台湾と中国の国外無線認証を取得している。今回製品化した LAN 式 Wiserot は無線式と同様に、次に示すような機能を持っている。

(1) 設備一括監視

故障予兆を監視する対象設備の状態（良好、注意、危険）を一覧画面で表示する。注意や危険など状態変化が発生した設備については、設備個別のトレンド監視画面で故障兆候が確認できる。

(2) トレンド監視

機械振動、ベアリング振動、温度のトレンドグラフにより中長期的な傾向監視を行い、しきい値判定（良好、注意、危険）による絶対判定や相対判定を行うことができる。

(3) FFT 周波数解析による原因分析

トレンドグラフで故障予兆を確認後、さらに故障要因を分析する際に使用する。機械振動の周波数分析を行うことでアンバランスやミスアライメントなどの機械的な

故障判別ができ、ベアリング振動の周波数分析を行うことでグリス切れや内輪傷、外輪傷といったベアリングの故障判別や不具合箇所を特定することができる。

また、図2に示したように、Wiserot のシステムは顧客の要望に応じて、オンサイト型とクラウド型を選ぶことができる。

3 診断判定方法

機械的振動とベアリング振動の測定は表1に示す計測帯域で行う。

(1) 機械的振動判定（低周波振動）

アンバランスやミスアライメントなどの機械的振動に対して、機械振動の測定と評価の一般的指針である JIS B0906 に準拠した絶対判定基準データを搭載しており、回転機の定格容量に応じて“良好、注意、危険”の判定を行う。また、設置箇所の剛性など顧客設備固有の条件に応じて、任意の相対判定基準値を設定することも可能であり、設備や設置環境に応じたきめ細い運用が可能である。

(2) 軸受けベアリングの振動判定（高周波振動）

ベアリング傷やグリス切れなどの軸受けベアリング振動の異常判定の基準となるしきい値の設定は、従来、顧客の担当者だけでは困難であった。しかし、本システムは、回転機メーカーとして富士電機独自の絶対判定基準 Q 値を搭載している。そのため、Q 値の判定基準値は対象設備のベアリング型式と回転数を入力するだけで自動的にしきい値のチューニングを行うので、しきい値の設定を容易に行うことができる。

(3) インバータキャリア振動ノイズの除去機能

インバータで駆動される回転機は、高周波振動の領域にキャリア振動ノイズが重畳される。そのため、ベアリングの状態監視として高周波振動を計測する際に、ベアリング本来の振動に加えキャリア振動ノイズが重畳されると誤判定を招き、本来正常であるベアリング振動が危険と誤判定される恐れがある。

Wiserot は、独自のフィルタ処理技術によりキャリア振動ノイズを除去し、ベアリング本来の振動だけを計測することで正確な判定を実現している。

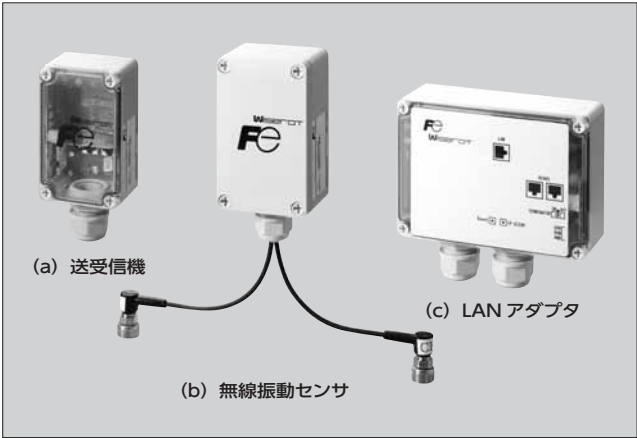


図3 無線式「Wiserot」

表1 診断項目と判定基準

診断項目	計測帯域	振動種類	判定項目	判定基準
機械的振動	低周波 (10 ～ 250 Hz)	速度 (mm/s)	実効値	振動評価基準 (JIS B0906) に準拠した絶対判定
		変位 (μm)	オーバオール、 回転数成分 (n)、電磁成分 (2f)	相対判定
軸受けベアリングの振動	高周波 (1 k ～ 10 kHz)	加速度 (G)	実効値	相対判定
			Q 値 (軸受診断評価値)	富士電機独自規格による転がり軸受け絶対判定

*さまざまな現場の状況に対応できるよう、ユーザーによるしきい値設定を変更できる。

発売時期

日本国内：2020 年 4 月から受注開始

国外向け：2022 年度受注開始予定

お問い合わせ先

富士電機株式会社

パワエレシステム インダストリー事業本部フィールド

サービス統括部事業企画部

電話（03）5435-7278





当社製蒸気タービン・発電機



インドネシア・スマトラ島西部の 地熱発電所建設プロジェクトに参画

インドネシアの電力インフラ整備を支え、経済・社会発展に貢献

世界第2位の地熱資源量を誇るインドネシア。同国のスマトラ島西部の山間地、最寄りの空港から車で約5時間の場所にある、ムアララボ地熱発電所(発電容量85.26MW)が2019年12月に商業運転を開始した。この発電所で生み出されたインドネシア約42万世帯分の電力はスマトラ島西部全域に供給される。住友商事(株)と現地エンジニアリング大手のRekayasa Industri社とのコンソーシアム(共同事業体)が発電所建設をEPC(設計・調達・建設)で一括請負した。当社は住友商事(株)の下でプラント全体のエンジニアリングと主要機器の調達などを担当、川崎工場製の蒸気タービン・発電機と鈴鹿工場製の電動機、TGR※などを納入した。

地熱発電は、地中からの蒸気の力でタービン・発電機を回転させて発電するため、化石燃料を使わずCO₂を排出しない。そのため地球温暖化を背景とした環境意識の高まりを受け、世界では地熱発電所の普及が進んでいる。近年経済成長が著しいインドネシアの中には、いまだに電気を利用できない地域があるため、同国政府は電力インフラの整備に向け、地熱発電総容量を現在(2019年)の約2,000MWから2025年までに7,200MWに増やす計画としている。

当社は地熱発電の納入実績が数多くあり、地熱発電用蒸気タービンの世界シェア約40%(2000年から2019年の納入実績)を誇るトップランナーだ。とりわけインドネシアでは19台の地熱発電用蒸気タービンを納入し同国でのシェア50%

(2019年1月時点)を誇る。これらの導入実績などが、最終顧客で独立系発電事業者のPT. Supreme Energy Muara Laboh(以下、SEML社)から評価され受注獲得につながった。

SEML社にとって本案件は、初の地熱発電プロジェクトであり、成功に向けて強い思いを持っていた。そのため、当社がこれまで手掛けた同国での他の地熱発電案件に比べ、仕様や品質、安全などに対する要望の水準が高かった。これらの要望に応え続けた結果、当社はSEML社に認められ良好な関係を築くことができ、お互いに協力しながらチームとして本案件を履行し、納期通りの完工を達成した。

「インドネシアの発展に寄与できたことがとても嬉しい。今後も地熱発電はもとより当社の再生可能エネルギー事業を拡大させ、安全・安心で持続可能な社会づくりに貢献し続けていきたい」と営業担当の本藤さんは喜びと抱負を語った。

※タービン・発電機用統合制御装置



プロジェクトに携わったSEML社、住友商事(株)、当社担当者の皆さん

自動販売機が小型の売店に 「マスク自販機」を神戸の病院に設置

神戸ほくと病院



院内に設置されたマスク自販機



スパイラルラック方式の収納棚

新型コロナウイルス感染症の拡大により、外出時のマスク着用は日常の光景になりつつある。「ウィズコロナ」の新しい生活様式が求められるなか、当社はマスクなどの衛生用品を取り扱える専用の自動販売機（以下、マスク自販機）を開発。6月22日、1号機を神戸ほくと病院に設置した。

「従来マスクは受付窓口で販売されていましたが、繁忙時は職員の手が足りず、販売方法の見直しが求められていました」と話すのは、同病院の福祉用品、物販設備管理を担う（株）エイチ・ジーの堀越代表取締役。当社のマスク自販機はマスクはもちろん、入院患者に必要なスリッパ、歯ブラシなど、さまざまな物品を1台で販売できる。人手不足に対応でき、小型の「無人店舗」として活躍できる点なども顧客ニーズと合致した。

当社は、国内の飲料自動販売機で5割強のシェアを占める最大手だ。これまでもコンビニ店舗内で自動販売機を使った夜間無人営業を提案するなど、人手不足等の社会課題の解決に貢献してきた。「生活必需品であるマスクを、いつでもどこでも手軽に入手できる。ウィズコロナ時代、当社ができる新たな社会貢献を考えました」と商品企画部の佐藤 大輔さんは話す。

マスク自販機は、既存機種である物品・食品自動販売機を改良した。ボタンや返却レバー、商品の取り出し口などに抗菌処理を施し、より衛生面に配慮した。収納棚には、ピッチ（間隔）を調整すれば陳列できる商品のサイズや数を自在に変えられる、スパイラルラック方式を採用している。また、高温環境下における商品の劣化を防ぐために庫内温

度を18℃に保ち、夏場の冷やしマスク販売にも対応する温度設定の機種も揃える。

既に公共交通機関や小売業界などから、複数の引き合いを受けている。当社営業の竹岡 慎一さんは「強みは、さまざまな物品を搭載できる汎用性。人との接触機会を減らし、安全・安心に商品を提供できる顧客価値を武器に、マスク自販機の普及を目指す」と今後の抱負を語る。

たとえばこんなSDGs



●目標11

住み続けられるまちづくりを

当社はマスク自販機の開発・普及を通して、手軽に衛生用品を手に入れられる環境を構築し、感染症拡大防止など人々の安全・安心な生活の実現に貢献します。



富士電機 関西支社 営業第六部と食品流通本部 営業統括部 商品企画部の皆さん

略語（本号で使った主な略語）

C-GIS	Cubicle type Gas Insulated Switchgear	キュービクル形ガス絶縁開閉装置
DCCT	DC Current Transformer	電流検出器
EGS	Enhanced/Engineered Geothermal Systems	増産（人工）地熱システム
EPC	Engineering, Procurement and Construction	一括請負工事
FIP	Feed-in Premium	
FIT	Feed-in Tariff	再生可能エネルギーの固定価格買取制度
FS	Filter Sludge	
GHG	Greenhouse Gas	温室効果ガス
GTCC	Gas Turbine Combined Cycle	ガスタービンコンバインドサイクル
HHV	Higher Heating Value	高位発熱量
HSS	Hybrid Servo System	ハイブリッドサーボシステム
IoT	Internet of Things	
ISA	Iso Saccharinic Acid	イソサッカリン酸
JAEA	Japan Atomic Energy Agency	国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
LBS	Load Break Switch	高圧交流負荷開閉器
LHV	Lower Heating Value	低位発熱量
LIB	Lithium Ion Battery	リチウムイオン電池
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	熔融炭酸塩形燃料電池
MOX	Mixed Oxide	プルトニウム混合酸化物
OCP	Outer Corona Protection	外部コロナ防止層
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development	経済協力開発機構
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	りん酸形燃料電池
PCS	Power Conditioning System	パワーコンディショナ
PEFC	Polymer Electrolyte Fuel Cell	固体高分子形燃料電池
PJS	Power Jack System	パワージャッキシステム
PPA	Power Purchase Agreement	電力販売契約
REC	Renewable Energy Certificates	グリーン電力証書
RMU	Ring Main Unit	リングメインユニット
RPS	Renewables Portfolio Standard	再生可能エネルギー利用割合基準制度
S&B	Scrape & Build	
SOC	State Of Charge	充電状態
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	固体酸化物形燃料電池
SR	Spent Resin	
SVC	Static Var Compensator	静止型無効電力補償装置
TGR	Turbine Governor Regulator	

商標（本号に記載した主な商標または登録商標）

エネファーム	東京ガス株式会社・大阪ガス株式会社・JXTG エネルギー株式会社の商標または登録商標
Ethernet	富士ゼロックス株式会社の商標または登録商標
SIAL®	Jacobs Slovakia s.r.o. の商標または登録商標

その他の会社名、製品名は、それぞれの会社の商標または登録商標である。

訂正：富士電機技報. vol.93, no.1, p.4、右側 1 ～ 2 行目

(正)

製造実行システム（MES：Manufacturing Execution System）や製品情報管理

(誤)

製造実行システム（MES：Manufacturing Excution System）や製造情報管理

訂正：富士電機技報. vol.93, no.1, p.23、左側 22 行目

(正)

例えば、制御周期を最小 0.25 ms としたときは、最大 12 軸（1 バス当たり 4 軸で 3 台の SPH5000M を使用）までの多軸モーション制御が可能である。

(誤)

例えば、制御周期を最小 0.25 ms としたときは、最大 12 軸（1 バス当たり 4 軸で 3 台の SPH5000M を使用）までの多軸モーション制御が可能である。シーケンス制御やモーション制御を、マルチ CPU に機能分散して並列実行させることで、アプリケーションプログラムの実行時間の高速化が可能である。

訂正：富士電機技報. vol.93, no.1, p.35、左側 9 行目

(正)

DV：Disturbance Variable

(誤)

DV：Deviation Variable

訂正：富士電機技報. vol.93, no.1, p.45、図 13 キャプション

(正)

図 13 オンライン機能フロー

(誤)

図 13 オフライン機能フロー

訂正：富士電機技報. vol.93, no.1, p.65、参考文献左側 1 行目

(正)

(1) 鳴海克則ほか. 製鉄所のエネルギー管理を最適化する「鉄鋼EMSパッケージ」. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.3, p.177-181.

(誤)

(1) 鳴海克則ほか. 鉄鋼所のエネルギー管理を最適化する「鉄鋼EMSパッケージ」. 富士電機技報. 2014, vol.86, no.3, p.177-181.

訂正：富士電機技報. vol.93, no.1, p.87、略語（本号で使った主な略語）、11 行目

(正)

DV：Disturbance Variable

(誤)

DV：Deviation Variable

27 行目

(正)

MES：Manufacturing Execution System

(誤)

MES：Manufacturing Excution System

39 行目

(正)

PDM：製品情報管理

(誤)

PDM：製造情報管理

訂正：富士電機技報. vol.93, no.2, p.133、略語（本号で使った主な略語）、下から 4 行目

(正)

SVC：Static Var Compensator

(誤)

SVC：Static Var Generator



主要事業内容

パワーエレクトロニクス エネルギー

確かな技術で電力インフラを支え、エネルギーの安定供給、最適化、安定化に貢献します。

エネルギーマネジメント

エネルギーマネジメントシステム (EMS)、電力流通、スマートメータ、変電

施設・電源システム

データセンター、無停電電源装置 (UPS)、配電盤

器具

受配電・制御機器

パワーエレクトロニクス インダストリー

パワーエレクトロニクス応用製品に計測機器、IoT を組み合わせ、工場の自動化や見える化により生産性の向上と省エネを実現します。

オートメーション

インバータ、モータ、FA コンポーネント、計測機器、FA システム、物流システム、駆動制御システム、計測制御システム、工業電熱

社会ソリューション

鉄道車両電機品、EV システム、放射線管理システム、船舶用排ガス浄化システム

情報ソリューション

情報制御システム

電子デバイス

高い品質、変換効率を実現、小型化・省エネ化に貢献します。

半導体

産業分野、自動車分野

ディスク媒体

発電プラント

高度なプラントエンジニアリング力で、設計・製作から現地据付・試運転・アフターサービスまで一貫して提供します。

再生可能・新エネルギー

地熱発電、水力発電、太陽光発電、風力発電、燃料電池

火力発電

原子力関連設備

食品流通

自動化・省エネを食の安全・安心とともに提供します。

自販機

飲料・食品自動販売機

店舗流通

店舗設備機器、金銭機器、エネルギー管理システム

*本誌に掲載されている論文を含め、創刊からのアーカイブスは下記 URL で利用できます。

富士電機技報 (和文)

https://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents_02_03.html

FUJI ELECTRIC REVIEW (英文)

<https://www.fujielectric.com/company/tech/contents3.html>

富士電機技術期刊 (中文)

<http://www.fujielectric.com.cn/jtkw.html>



次号予定

富士電機技報 第93巻 第4号

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

富士電機技報企画会議

幹 事 中山 和哉

企画メンバー 斎藤 哲哉 桑山 仁平 眞下 真弓 前田政一郎

渡部 雅教 熊谷 明恭 片桐 源一 出野 裕

吉田 隆

特集委員 片桐 源一

事務局 荻野 慎次 堀口 道子

編集室 木村 基 小野寺拓也 小野 直樹 高橋 徹

富士電機技報 第93巻 第3号

令和2年9月20日 印刷 令和2年9月30日 発行

編集兼発行人 近藤 史郎

発行所 富士電機株式会社 技術開発本部
〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目11番2号
(ゲートシティ大崎イーストタワー)

編集・印刷 富士オフィス&ライフサービス株式会社内
「富士電機技報」編集室
〒191-8502 東京都日野市富士町1番地
電話 (042) 585-6965
FAX (042) 585-6539

発売元 株式会社オーム社
〒101-8460 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地
電話 (03) 3233-0641
振替口座 東京 6-20018

定価 770 円 (本体 700 円 + 税 10%)

*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。

© 2020 Fuji Electric Co., Ltd., Printed in Japan (禁無断転載)



Innovating Energy Technology

エネルギー技術を、究める。

電気、熱エネルギー技術の革新の追求により、
エネルギーを最も効率的に利用できる製品を創り出し、
安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献します。

F **富士電機**

Innovating Energy Technology

エネルギー技術を、究める。

電気、熱エネルギー技術の革新の追求により、
エネルギーを最も効率的に利用できる製品を創り出し、
安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献します。



耐食・材料・熱水利用技術
地熱発電プラント



デバイス技術
IGBTパワー半導体



パワーエレクトロニクス技術
メガソーラー向けPCS
(パワーコンディショナ)



パワーエレクトロニクス技術
インバータ



パワーエレクトロニクス技術
UPS(無停電電源装置)



熱交換・冷媒制御技術
ハイブリッドヒートポンプ式
自動販売機

F 富士電機

本誌は、環境に配慮した FSC® 認証紙および
植物油インキを使用しています。また、ユニ
バーサルデザイン(UD)の考えに基づいた
見やすいデザインの文字を採用しています。



雑誌コード 07797-9

定価 770 円 (本体 700 円+税 10%)