

富士時報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

特集 創エネルギー技術

5

May 2010

Vol. 83 No. 3



富士時報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

特集 創エネルギー技術

5

May 2010

Vol.83 No.3

目次

特集 創エネルギー技術

〔巻頭言〕 エネルギーの未来予想図 191 (1)
石田 政義

創エネルギーの現状と展望 192 (2)
米山 直人 ・ 大澤 悟 ・ 吉岡 浩

地熱発電システムの見組みと最新技術 196 (6)
山田 茂登 ・ 牧元 静香 ・ 柴田 浩晃

蒸気タービンの最新技術 201 (11)
中村 憲司 ・ 田部井 崇博 ・ 高野 哲

回転機の最新技術 207 (17)
真下 明秀 ・ 中山 昭伸 ・ 日和佐 寛道

水車の性能改善技術 212 (22)
鈴木 良治

原子力の熱利用を拡大する小型高温ガス炉 218 (28)
岡本 太志 ・ 大橋 一孝

りん酸形燃料電池「FP-100i」 223 (33)
長谷川 雅一 ・ 堀内 義実

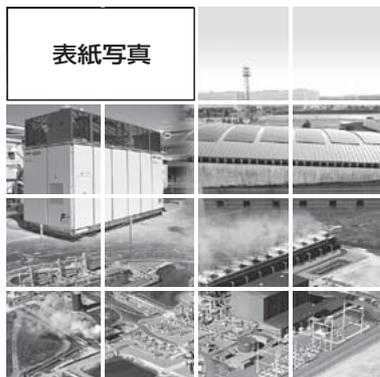
下水汚泥消化ガスを利用した燃料電池 228 (38)
福村 琢 ・ 黒田 健一

フィルム型アモルファス太陽電池の高出力化技術 233 (43)
藤掛 伸二 ・ 佐藤 広喜

フィルム型アモルファス太陽電池モジュールとその適用技術 237 (47)
中村 哲郎 ・ 横山 尚伸 ・ 柳瀬 博雅

解説 発熱量 (HHV, LHV), 規格化発電効率 240 (50)

表紙写真



日本は、2020年までの目標としてCO₂排出量を1990年度比で25%削減することを国際公約として掲げた。これは、さらなる省エネルギーや高効率なエネルギー利用を行わなければ達成不可能な数値である。

富士電機は、長年培った効率改善技術や自然エネルギーを活用した発電システムを駆使し、CO₂削減による地球温暖化防止、環境保護および持続可能な社会の実現に貢献していく。

表紙写真は、「創エネルギー」をキーワードに、地熱発電や火力発電関連機器、フィルム型アモルファス太陽電池、2009年に販売開始した新型100kW燃料電池が、環境への貢献や企業の社会的責任(CSR)を果たしていることを表している。

エネルギーの未来予想図

石田 政義 (いしだ まさよし)

筑波大学大学院 システム情報工学研究科
構造エネルギー工学専攻 教授 博士(工学)



私は子供のころから電気を起こすということに魅せられていた。模型用のモータに豆電球を直接つないで、シャフトを指で回すと、勢いに合わせて光がともることが妙におもしろかった。当時、自分の小遣いでは買えなかった太陽電池などは、いつも垂涎(すいぜん)の的で写真を眺めていた覚えがある。電気には無限の可能性を信じていたように思う。よく分かりもしないのに、『ラジオの製作』なる雑誌を見て、簡単な回路を組んでは完成や不具合に一喜一憂していたものである。思えば、それまでにできなかった機能が手に入れられたことに幸福感を味わっていたのだろう。確かに電気はあらゆる面で革新と恩恵をもたらしてくれた。それでは「この先どうなるのだろうか」がここで考えてみたいテーマである。幼心に描いた夢を今でも追っているという立場では、良くも悪くもまことにおめでとう人生ではないかと顧みている。好きなことで食えるのは満足であるものの、夢が夢でなくなってきたジレンマにさまざま意味で思慮不足を実感するのである。時代には潮目があることをいや応なく身に染みて思い知らされた。エネルギーを自在に扱って求めるままの新鮮さを獲得することが、環境という名の下に必ずしも善ではなくなってしまった。

環境負荷低減に資するとされる新しいエネルギー技術には、太陽光発電や燃料電池コージェネレーションをはじめとして、さまざまに期待を集めていることは言うまでもない。しかしながら、商品化段階と言われながらも必ずしもテイクオフした訳ではなく、個人的にはどうしてもまだまだ足元の不安定さを感じてしまう。その主な理由は、経済的にも技術的にも自立できておらず、補助金なしでは普及が難しく、系統とセットでなければ使えない、まるで“寄生”状態にすぎないからである。このことはある意味当たり前で、もとよりハンディキャップを背負わなければならないのだ。化石燃料は本来の実力よりも安価であり、環境負荷の外部コストを負担しなくてよく、規格標準が規定されているアウェーでの勝負を強いられていることが大きい。

当筑波研究学園都市では本学を中心に周辺研究機関と共につづば3Eフォーラムを設立し、2030年までにCO₂排出量半減を目指すとのいかにも大胆かつチャレンジングな目標を公に宣言した。これはクールアース50に向け、最

先端研究を担う地域としての総力を発揮して具体的成果を示せなければ、国全体としての目標実現はあり得ないとの決意による。当然ながら容易な道のりではない。科学技術が成熟段階にあり変換効率が極限に近い現況においては、旧来のマクロ工学上で原理的に許容される余地が小さく、相対的に飛躍的な性能向上は望めるはずもない。そこで起死回生のピンチヒッターに、材料や異分野への未踏領域に糸口を求めるのが通例なのだが、度を越えた依存と期待は禁物であろう。新材料は打ち出の小槌(こづち)になりうるものの、おおむね長い開発期間を要する上、いわば“当たるも八卦(はっけ)”つまりハイリスクハイリターンの危うさが伴う。また、ブームに乗って騒がれる新興技術は、当初において実体が乏しいため、本質的な実力をはるかに上回って過剰評価されがちである。

本稿の総括として、私自身がこれからのエネルギー技術開発をどう考えるかを述べたい。大きな鍵を握るシナリオは、近未来を含め現在有する駒(要素技術)を使うのに、最も戦略的で都合の良い盤とルール(システムチックなハードとソフト)をゼロから再構築することである。できることを優先的かつ合理的に実行するべきで、もはや不確実な進歩を悠長に待つてはいられない。そして経済偏重主義からの脱却である。安くて便利な物を求めるばかりでは、持続可能な環境を残せないことに気付かなければならない。もちろん遠い将来を見据えた基礎研究、すなわちすぐには芽が出ない種も安易に棄てずに一定のバランスで維持しておく必要がある。肝に銘じるべきは倫理観であろう。個人も組織も自己満足のための仕事では決して長続きはしない。人のため、世界のため、未来のための行動力が不可欠であり、普遍の実効性を追求する姿勢こそがサバイバルを切り抜けられる原動力になるのではないかと。自然の恵みであるエネルギーは、本来人類全体の共有財産のはずである。経済とは助け合いの精神が根本であったことを思い出して、独り占めではなく、利益も技術もシェアすると発想を変えれば新たな広い展望が拓けるように思う。“言うはやすく”とのそしりは免れないけれども、今後のエネルギー技術開発はそのような方向に向かってほしいと願っている。

創エネルギーの現状と展望

Present Status and Future Outlook of Energy-Creating Technologies

米山 直人 Naoto Yoneyama

大澤 悟 Satoru Ohsawa

吉岡 浩 Hideki Yoshioka

富士電機は、“エネルギーと環境”をキーワードに新しい事業経営を進めている。グリーンエネルギー創出のため、次の取り組みをしている。地熱発電では、タービンの耐食性向上技術の開発やバイナリー発電に注力している。原子力分野では、発電や水素製造などにも利用できる次世代の高温ガス炉の研究開発を行っている。太陽電池では、設置場所の可能性を拡大する軽量で曲がるフィルム型の普及に向け本格的な量産を開始した。100 kW リン酸形燃料電池「FP-100i」を商品化し、防災向けや消化ガス利用、水素ステーション向けなど、用途の拡大を図っている。

Fuji Electric is promoting a new type of business management based on the keywords of “energy and the environment” and has adopted the following approaches to the creation of green energy. For geothermal power generation, Fuji is focused on developing technology for improving the corrosion resistance of turbines and on binary power generation. In the nuclear power field, Fuji is researching and developing a next-generation high-temperature gas cooled reactor that can be used for power generation, hydrogen production and the like. For solar cells, Fuji has begun full-scale mass-production aiming to popularize lightweight, flexible, film-type cells capable of being installed at a wider range of sites. Fuji has also commercialized a 100 kW phosphoric acid fuel cell named the FP-100i, and is expanding its range of applications to include disaster prevention, digestion gas use, hydrogen stations, etc.

1 まえがき

世界のエネルギー需要は、特に新興国の経済発展と人口の増加に伴って今後も大幅に増加するものと見込まれている。その中でも電力需要の伸びは大きく、世界エネルギー機構（IEA）の2009年度レポート（World Energy Outlook 2009）では、2030年まで年率2.5%で増加するものと予想され、追加発電容量は48億kW以上必要であるとされている⁽¹⁾。

一方で、気候変動を抑制し持続可能な社会を実現するために“温室効果ガスの排出低減”が最重要課題テーマとなっている。このまま化石燃料の消費が増加すると大気中の温室効果ガス濃度はCO₂換算で1,000ppmを超えることは避けられず、地球の平均気温は6℃上昇し大規模な気候変動が生じるといわれている。IEAレポートでは、持続可能な地球環境を維持するためには地球の気温上昇を2℃以内にする必要があり、地球の平均気温の上昇が2℃を超える可能性を50%に抑えるには大気中の温室効果ガス濃度をCO₂換算で約450ppmに安定させる必要があるとしている。温室効果ガスの排出低減は、緊急課題として国連気候変動コペンハーゲン会議（COP15）での世界的な枠組作りや各国政府の政策的な取り組みが活発に進められている。各国の政策には現実化している気候変動の深刻な脅威に対処するため、経済刺激政策に低炭素化の促進が盛り込まれ、その具体策が推進されている。

低炭素社会を実現するには、エネルギーの消費量を抑えて省エネルギー（省エネ）社会を構築することが必要である。電気エネルギーを作り出す創エネルギー分野では、化石燃料を使用する火力発電の高効率化やCO₂を排出しない原子力発電の推進が行われている。さらに、再生可能エネルギーを利用する地熱や水力、太陽光、風力、太陽熱発

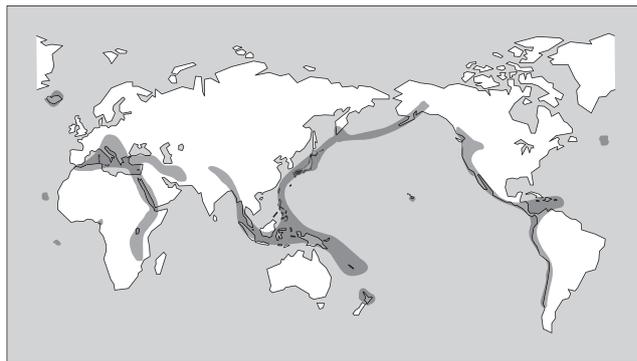
電などを積極的に導入することが求められている。

富士電機は、“エネルギーと環境”をキーワードに新しい事業経営を進めている。エネルギーソリューション分野ではグリーンエネルギーの創出とグリッドソリューションに注力し、環境ソリューション分野では需要側の省エネと環境対策に向けたソリューションを提供している。本特集では、低炭素社会を構築するための創エネルギーの代表的な取り組みと展望を紹介する。

2 地熱発電

地熱資源は、地球のプレートとプレートがぶつかり合い火山が多い地域に存在する。地域的には太平洋を囲む環太平洋地域、アフリカ北東部、欧州では地中海域やアイスランドなどである。これまで地熱発電は、米国やメキシコ、欧州ではイタリアやアイスランド、アジア地域ではインドネシアやフィリピン、オセアニア地域ではニュージーランドなどで積極的に開発されてきた（図1）。これらの地域では、再生可能なエネルギーとしてさらに開発が拡大する

図1 地熱発電有望地域



動きになっている。また、地熱発電の開発が遅れているアフリカ東海岸や中南米の国々でも地熱発電開発計画が進められることになっている。日本の地熱資源量は世界第三位といわれているが、「自然公園法」による制約などで開発が停滞し、現在までに開発された発電容量は約 500 MW にとどまっている。今後、政府の開発支援策の導入により新規開発の促進が期待されている。

富士電機は 1960 年に地熱発電設備を納入して以来、継続的に地熱発電に注力し、地熱タービンの高効率化や地熱タービンに特有な腐食対策などの研究開発を行ってきた。特に地熱蒸気には、タービンを腐食させる物質やタービン翼にスケールが付着し性能を低下させるなど多くの問題がある。腐食や摩耗に強いタービン素材やコーティング技術などの研究開発を行い、成果を出している。また、地熱ガス雰囲気中に設置する発電機や電気制御機器の防食技術を確立し、高性能で高信頼性の地熱発電設備を製作、納入してきた。最近ではタービン発電設備だけではなく、地熱井で生産される蒸気や熱水をタービンの運転に最適な蒸気に生成する蒸気発生設備やその付帯設備の設計・製作も行い、地熱発電所全体のエンジニアリングをターンキーで行うことにも取り組んでいる。

今までは、地熱蒸気をそのままタービンに送り発電する大型のフラッシュ発電に取り組んできた。これに加え、これまで発電に利用できなかった低温の地熱資源も有効に活用できるバイナリー発電の開発を行った。地熱バイナリー発電は、水に比べて沸点が低いペンタンなどの媒体を地熱蒸気の熱で蒸発させタービンを駆動するものである。バイナリー発電装置は地熱資源の温度が低く、また蒸気量が少ない地点でも使用することができる中小型地熱発電装置であり、今まで利用されなかった遊休エネルギーの有効活用が期待できる設備である。

新しい地熱発電方式として高温岩体発電 (EGS) も注目されている。現在の地熱発電は、地下が高温で、そこにある自然の貯留層から地熱蒸気や熱水を資源として取り出すものである。高温岩体発電は地下に存在する高温の岩体を人工的に水圧破碎し、そこに水を送り込んで蒸気や熱水を

得る方法である。高温岩体発電は、米国、オーストラリア、ドイツなどで研究が進められており、今後地熱利用を拡大するものとして期待されている。

地熱発電は天候などに左右されず安定的に発電でき、稼働率も高い再生可能エネルギーであり、今後地熱資源の開発はより活発になると予想される (図 2)。

③ 原子力発電 (高温ガス炉)

原子力発電も CO₂ を排出しないエネルギーとして、世界的に開発が進められようとしている。特に米国では電力の安定供給と温暖化防止策として原子力の導入が計画されている。最近では中東やアジア地域でも導入が積極的に進められようとしている。現在計画されている原子力発電は軽水炉が主であるが、原子力エネルギーの用途拡大や分散化電源として利用できる高温ガス炉が次世代の原子炉として期待されている。

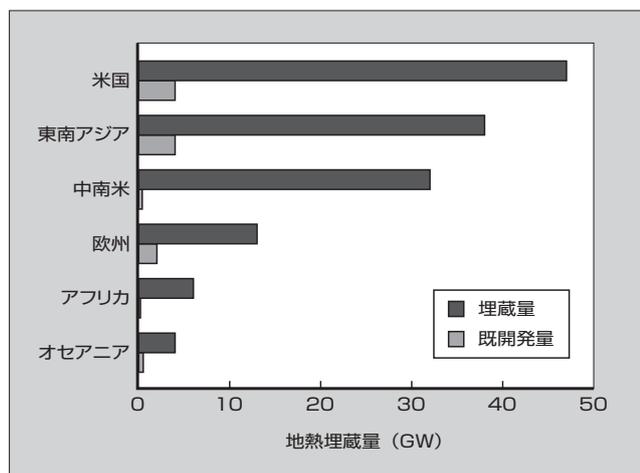
高温ガス炉は、700 ~ 950℃ という高温の熱が利用できるため、発電プラントとしても 50% 近い効率の直接ガスタービン発電が可能である。さらに、熱化学法により水から直接水素を製造することや、あるいは高温蒸気による化学プラントのプロセス用熱源として利用することも可能な原子炉である。高温ガス炉は、これまでの発電利用に限られていた原子力の利用範囲を大幅に拡大して一次エネルギーとしての化石燃料を代替し、CO₂ の排出量を大幅に削減できる可能性を持っている。このため、国内外で活発に開発が進められようとしている。各国の開発の主流となっているのは、高温ガス炉固有の安全性が活用できる出力規模を限定した小型高温ガス炉である。この炉は、原子炉の熱出力を最大でも 60 万 kWt (電気出力 30 万 kWe) 程度に制限することにより、万一の事故時にも原子炉が自然に止まり、自然に冷え、周辺公衆の退避を必要とするような大量の放射性物質放出の恐れがないという特性を持っている。そのため、電力の需要地域に近接して建設することや、分散型電源として建設することも可能である。

富士電機はわが国初の高温ガス炉として、独立行政法人日本原子力研究開発機構 (原子力機構) で運転中の高温工学試験研究炉 (HTTR) における計画の当初から、開発・設計の協力を行ってきた。実機建設時には炉心設計、安全解析を行い、また炉内構造物、燃料取扱貯蔵設備、放射線管理設備などの主要設備の設計・製作・建設を担当してきた。この経験によって蓄積した技術基盤を基にして、原子炉出口温度 950℃、熱出力 60 万 kWt を目標とした実用規模高温ガス炉の実現に向けて研究開発を進めている。

米国でもエネルギー省が高温ガス炉プロジェクトを立ち上げ、その実現のための研究、開発計画が具体的に始まっている。富士電機も高温ガス炉の概念設計チームの一員として参加することになっている。

地球温暖化防止や来るべき水素社会に向けた長期的な取り組みの一環として、今後も国内外の関係諸機関との連携により、高温ガス炉の実用化に向けた活動を進めていく。

図 2 地熱資源埋蔵量⁽²⁾



4 アモルファス太陽電池

太陽電池をめぐる状況は、この10年で大きく変ぼうした。全世界での生産量は20倍以上となった。日本メーカー中心から日米欧さらには中国・東南アジア諸国など多くのメーカーが市場参入し、結晶シリコン系以外にも薄膜系など新しい太陽電池の生産量も多くなってきている。

各国の普及政策に目を向けると、欧州ではドイツを中心にフィードインタリフ制度（FIT）の導入により急速に普及が進んでいる。これまで停滞していた米国でも、2009年の政権交代を受け太陽電池産業が動き始めようとしている。

国内ではこれまで住宅用を中心に導入普及が進められてきた。これに加えて公共・産業用にも支援が拡大されるとともに、2009年11月からは「太陽光発電の新たな買取制度」がスタートし、余剰電力を対象にこれまでより高い価格での買取が始まった。また、政権交代を受け、民主党政権のマニフェストに挙げられている「再生可能エネルギーの全量買取制度」についても議論が進められており、さらなる導入拡大のための具体的施策が検討されている。

富士電機では1978年に太陽電池の開発に着手した。当初はガラスを基板に用いたa-Si/a-Si タンデム太陽電池を開発していた。1993年からはより安価なプラスチックフィルムを用いた薄膜太陽電池（a-Si/a-SiGe）の開発に移行し、これらの技術開発成果を基に2006年11月に熊本県に太陽電池専用工場を完成させ本格量産を行っている。

富士電機の太陽電池（図3、図4）は、プラスチックフィルムを基板に用いているため、これまでの太陽電池にはない“軽量”で“曲がる”特徴がある。耐荷重の点で建屋の補強なしでは設置が困難であった体育館や工場などの大型屋根やビル壁面などのような新しい分野への適用も始まっている。また、表面にガラスを用いていないため割れる心配がなく、高い安全性が要求される高速道路の防音壁面などへの適用も検討されている。さらに、モジュール表面はエンボスのついた樹脂で覆われているため、ガラスと比較して光の反射が少なく、運用時の安全性から防眩（ぼ

うげん）が要求される空港施設などへの設置も検討されている。今後事業をさらに拡大させるためには、モジュールの出力向上および顧客ニーズに応える製品開発が必要であり、これらを成し遂げて地球環境保護にも貢献していく所存である。

5 燃料電池

2009年に販売を開始した100kW燃料電池発電装置「FP-100i」は、同年に“日経優秀製品・サービス賞 優秀賞”を受賞した。従来の都市ガスや下水消化ガスを燃料としたコージェネレーション装置としての用途に加え、災害対応や副生ガスへの対応、水素供給対応などの機能を付加することで市場拡大を目指している。燃料電池は発電装置内に改質装置を備えているため、都市ガスや消化ガスなどさまざまな燃料に対応が可能である。LPガスを備蓄していれば、常時は都市ガスで運転し、災害などで電気や都市ガスが遮断された場合でも、燃料をLPガスに切り替えて運転が継続できる。

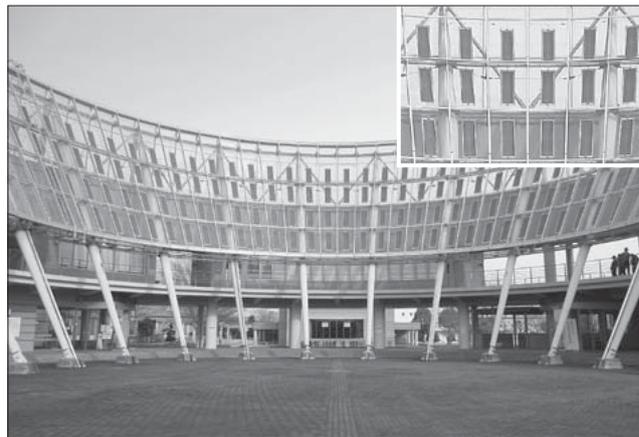
食塩電解工場などで副生される純水素を燃料にすると発電効率率は48%と高効率発電が可能となり、CO₂削減効果も年間約760tが見込まれる。純水素対応の100kW燃料電池は、2010年度からの実証試験で運転を開始する予定である。水素供給機能を持った燃料電池は、今後の水素エネルギー時代の先駆けとして、小規模な水素ステーション向けの用途に適している。消化ガスを燃料にすれば、CO₂を発生させない、いわゆるグリーン水素を安定的に製造できる。また、下水処理場から発生する消化ガスを燃料とする消化ガス発電では、2002年からの運転実績がある。カーボンニュートラルな発電ということで100kWの燃料電池で年間約800tのCO₂削減効果が見込まれる。これはグリーン電力証書として認定されるため、経済的にも短期間での設備投資費用の回収が可能となる。

富士電機は、FP-100iの年産20台規模の工場体制を2009年4月に整備し、前述の用途開発による普及拡大を図ることでCO₂削減に貢献していく所存である。

図3 さいたまスーパーアリーナ



図4 熊本県立技術短期大学校アカデミックプラザ



6 あとがき

富士電機では低炭素社会の実現のため、前述のほかにも創エネルギーへのさまざまな取組みを行っている。

火力発電分野ではタービンおよび発電機の高効率化の研究開発を推進している。ガスコンバインド発電分野ではシーメンス社との連携で高効率、高性能なガスコンバインドサイクル発電設備に取り組んでいる。

水力発電分野ではフォイトハイドロ社との連携で高効率な水力発電設備の研究開発も進めており、グローバルな体制で創エネルギーソリューションを提供していく。

風力発電も CO₂ を排出しない自然エネルギーとして導入が世界的に進められている。今後は陸上設置の風力発電だけではなく、洋上風力発電も積極的に進められる計画であり、単機容量がより大型化（3MW 以上）する。富士電機は今までに培ってきた豊富なパワーエレクトロニクス技術をベースに、この大型化に適応した高性能なパワーコンディショナや永久磁石発電機の開発を進めている。風力発電の分野でも特に重要なコンポーネントを中心に取り組んでいく。

また、自然エネルギーの大量導入により電力システムの安定化対策など新しい課題が出てきているが、富士電機は既に風力発電所に電力安定化装置を導入し、電力システムの安定化に成果を出している。さらに、今後期待されるスマートグリッド技術とともにグリッドソリューションにも取り組んでいく。

これらのエネルギーソリューションの提供によって、低炭素社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) International Energy Agency, World Energy Outlook 2009.
- (2) Global Geothermal Markets and Strategies, Emerging Energy Research.



米山 直人

富士電機システムズ株式会社取締役執行役員、エネルギーソリューション本部長。電気学会会員。



大澤 悟

太陽電池の販売および太陽光発電システムのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリッドソリューション事業部太陽光システム統括部長。



吉岡 浩

燃料電池の研究・開発に従事。現在、富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリッドソリューション事業部グリッドソリューション統括部新エネルギーシステム部主席。化学工学会会員。



地熱発電システムの取組みと最新技術

特集

Fuji Electric's Recent Activities and Latest Technologies for Geothermal Power Generation

山田 茂登 Shigetomo Yamada

牧元 静香 Shizuka Makimoto

柴田 浩晃 Hiroaki Shibata

富士電機は1980年代に地熱発電への取組みを始め、現在では市場で上位のプラントメーカーとして認知されるに至った。最近完成させたインドネシア・ワヤンウィンドゥとニュージーランド・カウエラウの二つの地熱発電所の概要を紹介する。世界で初めて実用化した蒸気性状自動分析装置は、異常診断機能や運転支援機能を備えており、プラント利用率の向上に貢献している。低温の地熱媒体も利用できるようなバイナリー発電技術の開発を経て200kWの実証試験を終了し、2010年度内に市場投入する予定である。

Fuji Electric has been involved in geothermal power generation since the 1980s, and is now recognized as a leading company for supplying geothermal power plants. This paper introduces two recently completed geothermal power plants, Wayang Windu in Indonesia and Kawerau in New Zealand. The world's first practical application of a steam purity automatic analyzing device equipped with a fault diagnosis function and an operation support function helps to improve the utilization rate of the plant. A binary power generating system, developed so that low-temperature geothermal resources can be utilized, has successfully completed a 200 kW pilot unit operation, and is slated to be introduced to the market during 2010.

1 まえがき

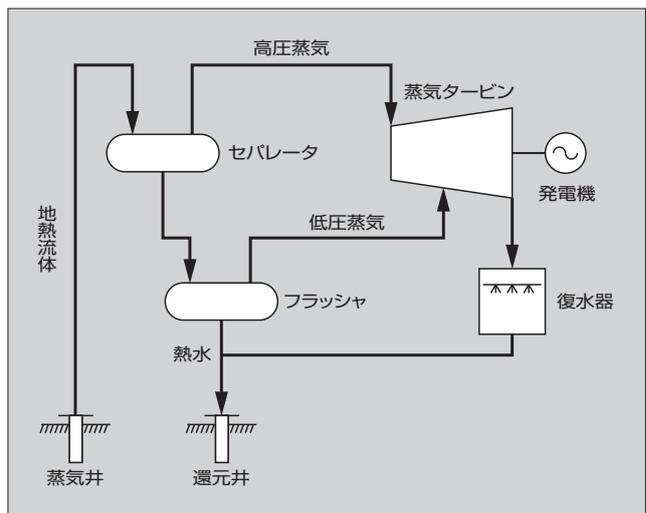
地熱エネルギーは再生可能エネルギーであり、CO₂の排出が非常に少ないエネルギーとして知られている。財団法人電力中央研究所によれば、1kWh当たりのCO₂排出量は石炭火力の975g、LNG複合発電の519gに対し、地熱発電は15gであると試算されている⁽¹⁾。

富士電機は、1960年に日本で初めての地熱発電設備を箱根小涌園に納入した。その後、1980年にエルサルバドルのアウアチャパン地熱発電所向けに35MWの地熱発電設備を納入して、本格的に地熱発電の市場に参入した。1980年代には米国やフィリピン向けに30台、約80万kWの地熱発電設備を納入し、地熱発電設備のトップメーカーの1社として認知されるに至った。1990年代には15台、約70万kWを納入した。1980年代に比べて減少したかに見えるが、フィリピン向けの77.5MW×3台、インドネシア向け110MW×1台の地熱発電所全体を範囲とする納入実績を含み、地熱発電設備の製造メーカーから発電所一式の建設を担当するプラントメーカーへと転換した時期である。21世紀に入ってから順調に実績を伸ばし、2010年初頭には単機容量世界最大の139MWの地熱発電所の完成に向けて現地で試運転を行っている。

前述の実績は、すべてフラッシュ式と呼ばれる地熱発電方式によるものである。フラッシュ式地熱発電は、井戸から取り出した地熱蒸気と熱水の混合流体からセパレータにより分離した蒸気だけを蒸気タービンへ送って発電する方式である。図1にフローを示す。最近10年間に納入されたフラッシュ式の地熱発電設備において、富士電機は約40%のシェアを占めている。

本稿では、富士電機の最近の実績を紹介するとともに、フラッシュ式に加えて新たに開発した地熱バイナリー発電

図4 地熱発電システムの蒸気フロー（ダブルフラッシュサイクル）



システムや世界で初めて実用化した地熱蒸気性状自動分析装置についても紹介する。

2 近年の地熱発電の実績

表1に近年の実績を示す。2007年から2009年までの3年間に、398MW×7台の地熱発電設備を納入・完成させた。2010年以降も248MW×4台を出荷し完成させる予定である。表1に掲載の11件のうち、プラント名に※印をつけた7件は、前述の地熱発電所全体を契約範囲とするものであり、地元工事業者と協業して取り組んでいる。

ワヤンウィンドゥ、カウエラウ、ナアワプリアは、地熱流体を蒸気と熱水に分離するセパレータおよび地熱蒸気から不純物を可能な限り除去するスクラビング設備からな

る蒸気分離設備を含むプロジェクトである。

2.1 ワヤンウィンドゥ地熱発電所⁽²⁾

ワヤンウィンドゥ地熱発電所は、インドネシアのジャワ島に位置する。1997年に110MW×2台からなる地熱発電所を受注した。アジア経済危機により2号機の計画が凍結されたため、1999年に1号機発電設備と2号機用の基礎工事を含む発電所全体の土木建築工事を完成させた。その後2007年に建設が再開された2号機は、容量を117MWに増強して2009年に完成させた。図2に地熱蒸気生産井と発電所の遠景を示す。

前述のとおり、2号機用の基礎工事は、1999年の1号機の完成時点で同じ仕様で完了していたため、2号機用の機器は1号機と同じサイズでなければならなかった。そこでこの制約のもと、復水器の冷却系の設計を見直すことにより、タービン排気圧力を1号機に比べて下げる設計とした。

表1 最近の地熱発電の実績

国	プラント名	容量 (MW)	備考
フィリピン	北ネグロス発電所*	49.7	2007-6 完成
インドネシア	ラヘンドン発電所 2号機*	20	2007-6 完成
アイスランド	スヴァルトセンギ発電所 6号機	33	2008-2 完成
インドネシア	カモジャン発電所	63	2008-2 完成
ニュージーランド	カウエラウ発電所*	95.7	2008-8 完成
インドネシア	ワヤンウィンドゥ発電所*	117	2009-2 完成
インドネシア	ラヘンドン発電所 3号機*	20	2009-3 完成
ニカラグア	サンハシント発電所 3号機	38.5	2010-2 出荷
アイスランド	レイキャネス発電所 3号機	50	2010-3 出荷
ニュージーランド	ナアワフルア発電所*	139	2010-5 完成
インドネシア	ラヘンドン発電所 4号機*	20	2011-9 完成予定

※地熱発電所全体を契約範囲とするもの

図2 ワヤンウィンドゥ地熱発電所の遠景



その結果、タービンおよび発電機は1号機と同一設計ながら1号機の110MWから2号機では117MWへ出力を上げることができた。

2.2 カウエラウ地熱発電所⁽³⁾

カウエラウ地熱発電所はニュージーランドの北島の北東部に位置する。発電所の敷地は滑走路の跡地なので、幅150m、長さ350mの長方形の平地である。この敷地に発電設備に加えて、地熱蒸気と熱水の混合流体である二相流を受け、タービンに蒸気を供給するダブルフラッシュ式の蒸気分離設備も配置した。図3にカウエラウ地熱発電所の遠景を示す。

蒸気分離設備は、タービンに可能な限り清浄な蒸気を供給するための設計を取り入れている。蒸気セパレータに分離効率の高い設計を採用するとともに、発生蒸気に微量に含まれるミストに溶解する可能性の高いシリカなどスケール成分を除去するためのスクラビング設備も採用している。スクラビング設備では、蒸気配管中に水を噴霧して微量のミストを捕捉し蒸気配管途中でドレンとして排出させるとともに、スクラバにより最終的にミストなどの湿分を系外に排出させる。図4に蒸気分離設備の外観を示す。

カウエラウ地熱発電所では、世界最大級の798mmター

図3 カウエラウ地熱発電所の遠景



図4 蒸気分離設備の外観



ピン最終段翼を持つ大型の地熱タービンを採用し、定格出力 95.7MW、最大出力 113MW を実現した。発電所は 2006 年 11 月の契約から 22 か月という短期間で 2008 年 8 月に完成させ、顧客に引き渡した。

③ 地熱バイナリー発電システム

燃料価格の高騰や地球温暖化対策、CO₂ 排出量抑制などにより再生可能エネルギーの利用推進が注目されている。再生可能エネルギーの中でも、地熱発電システムは天候・時間帯に影響を受けにくく安定した発電が可能である。富士電機がこれまで実績を重ねてきたフラッシュ式地熱発電は高温・高圧の地熱蒸気が必要であり、発電可能な地熱資源の確保が課題であった。

図 5 地熱発電システム適用範囲

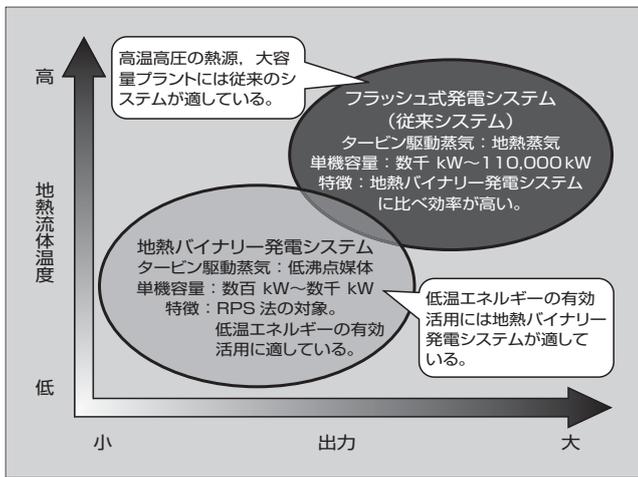


図 6 地熱バイナリー発電システム概念図

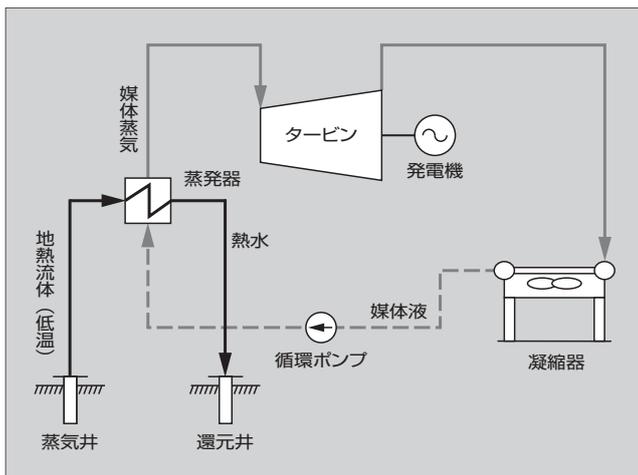


表 2 地熱バイナリー発電システム実証試験機の主要仕様

熱源	135℃地熱(温泉)蒸気
出力(設備容量)	定格: 190kW (最大: 220kW)
作動媒体	イソペンタン (C ₅ H ₁₂ , 沸点 28℃)
冷却方式	空気冷却式

図 5 に、地熱流体の温度と出力による地熱発電システムが適用される範囲の概念を示す。温度が高く出力の大きい発電システムには従来型のフラッシュ式を、温度が低く出力の小さい発電システムにはバイナリー式を適用する。

地熱バイナリー発電システムは、地熱流体を熱源として水に比べて沸点の低い媒体を気化させてタービンを駆動し発電する。沸点の低い媒体を使用するので、比較的温度の低い地熱流体を熱源としても発電に十分な圧力を得ることができる。図 6 に地熱バイナリー発電システムの概念図を示す。

富士電機では地熱発電システムの商品シリーズを拡充するため、地熱バイナリー発電システムの商品化開発を計画し、2006 年 8 月から 2009 年 10 月まで、鹿児島県霧島市の大和紡観光株式会社霧島国際ホテルの協力のもと実証試験を実施してきた。実証運転の結果、計画どおり定格 190kW および最大 220kW での連続運転を達成した。表 2 に実証試験機の仕様を、図 7 に設備の外観を示す。

商品化に際しては市場ニーズの調査結果により、第 1 段

図 7 地熱バイナリー発電システム実証試験設備

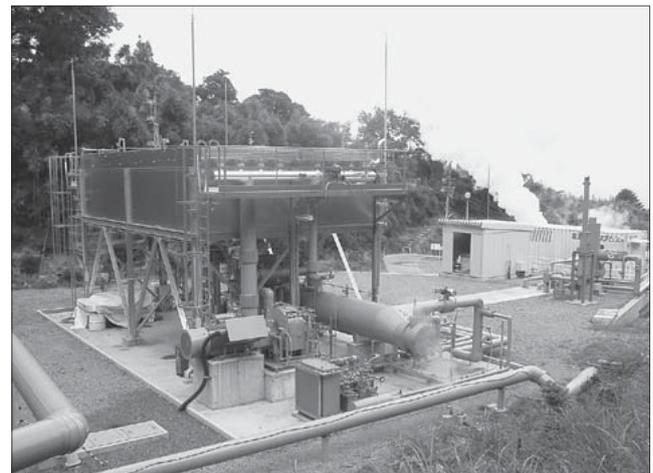


表 3 地熱バイナリー発電システム商品機の主要仕様

熱源	135℃地熱蒸気+地熱熱水
出力(設備容量)	2,000kW
作動媒体	ノルマルペンタン (C ₅ H ₁₂ , 沸点 36℃)
冷却方式	空気冷却式

図 8 2,000kW 地熱バイナリー発電システムの概観

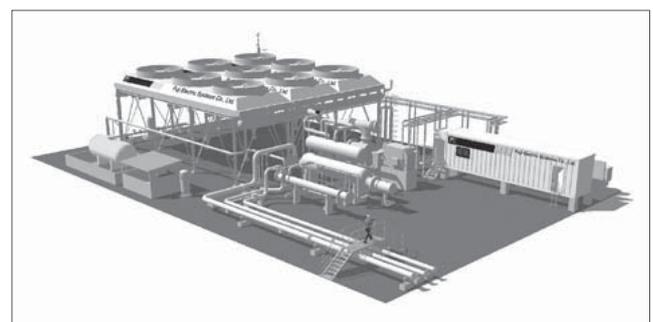
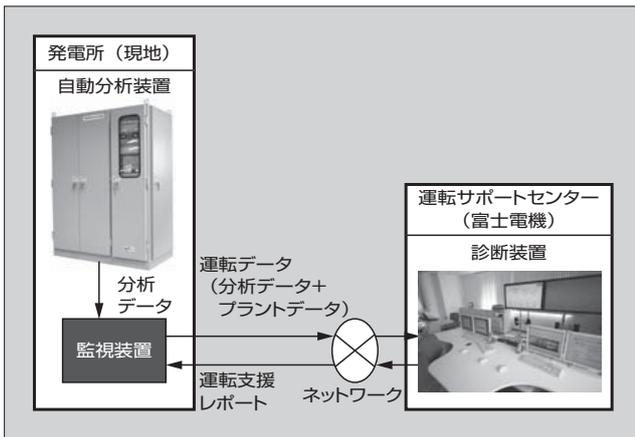


図9 地熱蒸気性状自動分析装置の構成図



階として2,000 kWを標準出力とする開発を行った。表3に主要仕様を示し、図8に概観図を示す。

作動媒体は、設備・配管への充填(じゅうてん)、抽出時の取扱いを容易にするため、常温・常圧下では液相であるペンタン系とした。実証試験設備ではイソペンタンを採用した。真夏日・猛暑日に充填・抽出を実施する場合に気温が沸点を超えることから取扱いが難しく、2,000 kW商品機ではより沸点の高いノルマルペンタンを採用した。地熱熱源が得られる場所は山間部などで冷却水の確保が困難なことが多いため、空気冷却式とした。

この地熱バイナリー発電システム商品機は2010年度中に初号機を市場投入できるように計画している。今後、海外市場での大容量化の方向に対応した出力のシリーズを増やす計画である。

4 地熱蒸気性状自動分析装置

地熱発電所の蒸気には、例えば塩化物イオン、シリカなどの熱水を起源とする溶存成分が多く含まれ、タービン腐食やスケール付着の最大の要因になっている。地熱蒸気中の溶存成分の計測は、数か月に1回行われていることが多い。この場合、蒸気性状の悪化に気付いたときには既にタービンスケールの付着が進行し、発電出力に影響を及ぼしていることが多い。また、近年では、坑内洗浄や熱水のpH調整に使用する薬剤の蒸気中へのキャリーオーバーによって蒸気性状が悪化することもある。そこで、地熱蒸気中の溶存成分濃度を高頻度でモニタリングすることによって、タービンの腐食抑制やスケール生成速度を予測して、腐食やスケール付着などの不具合発生の前兆を診断するシステム開発を行った。

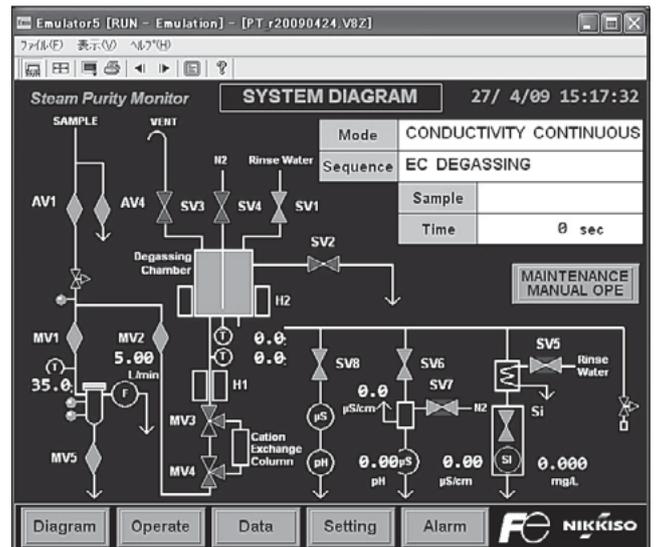
4.1 地熱蒸気性状自動分析装置の概要

この装置は図9に示すように、自動分析装置と診断装置から構成されている。その機能は次のとおりである。

(1) 自動分析機能

タービンが必要とする蒸気性状に対する管理項目をリアルタイムで計測できる。地熱蒸気性状自動分析装置の系統

図10 地熱蒸気性状自動分析装置の系統図



図を図10に示す。自動分析できる項目は次の六つである。

- (a) pH
- (b) シリカ濃度
- (c) 塩化物イオン濃度(計算値)
- (d) 電気伝導率
- (e) 酸導電率
- (f) 非凝縮性ガス濃度

(2) 診断機能

地熱蒸気性状の診断に統計的手法を採用して、異常診断に加えてスケール付着可能性の予兆診断を行う。自動計測したデータを用いて、その時点の蒸気性状を評価する。

(3) 運転支援機能

タービン内のスケール付着や腐食の防止策として、蒸気性状改善や運用改善に必要なガイダンスを提供する。ガス量のオンライン計測によって、ガス抽出装置において運転すべき系列のガイドラインを提供する。

4.2 地熱蒸気性状自動分析装置の効果

蒸気性状自動分析装置を導入し、スケールや腐食成分の常時監視をすることで次の効果が期待できる。

(1) プラント利用率の向上

プラント運転支援レポートを提供し、蒸気発生設備の状態把握ができる。さらに、スケール抑制対策の実施やタービンスケール付着度合いの予測を行うことにより、タービン開放点検の間隔が延伸できる。

(2) ガス抽出装置の経済的運用

ガス量の変化に応じた運転すべき系列を富士電機が提案することにより、蒸気消費量や消費電力量の削減が可能になる。

本装置は、国内地熱発電所において6か月の実証試験を経て、第1号商用機をニュージーランド・ナアワプルーア地熱発電所に納入し、2010年1月から試運転を開始した。さらに、アイスランドの地熱発電所にも2010年に納入する予定である。

特集

5 あとがき

富士電機は、これまでに60台、2,324MWの地熱発電設備を納入し、地熱発電プラントメーカーとしても市場に認知されるに至った。この実績に加え、低温地熱資源を発電利用できる地熱バイナリー発電システムを商品ラインアップに加えることにより、幅広い顧客のニーズに応じていくことができるものと確信している。

世界に視点を移すと、従来の地熱資源の発電利用に加えて、EGS (Enhanced Geothermal System: 高温岩体発電システム) と呼ばれる人工的に地熱蒸気を生成するシステムの研究が、米国、オーストラリア、ドイツなどで進められている。富士電機は、この新しい地熱資源の発電利用にも貢献するために、業界の動向に注目している。

今後も幅広く地熱資源の発電利用に取り組み、地球温暖化の原因となるCO₂の排出削減に貢献する所存である。

参考文献

- (1) 電中研ニュース 338. 電力中央研究所.
- (2) Design and Construction of Wayang Windu Unit 2 Geothermal Power Station, Yamaguchi N., GRC Transactions. Geothermal Resource Council, vol.33, p.773-777.

- (3) Technical Features of Kawerau Geothermal Power Station, New Zealand, Muto T., GRC Transactions. Geothermal Resource Council, vol.33, p.721-725.



山田 茂登

地熱発電プラントのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリーンエネルギーソリューション事業部グリーンエネルギーソリューション統括部火力・地熱技術部主席。日本地熱学会会員。



牧元 静香

地熱発電プラントのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリーンエネルギーソリューション事業部グリーンエネルギーソリューション統括部火力プラント設計部。



柴田 浩晃

火力発電エンジニアリングに従事。現在、富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリーンエネルギーソリューション事業部グリーンエネルギーソリューション統括部火力・地熱技術部。



蒸気タービンの最新技術

Recent Technologies for Steam Turbines

中村 憲司 Kenji Nakamura

田部井 崇博 Takahiro Tabei

高野 哲 Tetsu Takano

グローバルな環境問題に対応して、火力発電の中心機器である蒸気タービンの高効率化、運転信頼性向上への要求が高まっている。蒸気タービンの運転条件を高温・高圧にすることにより火力発電の効率向上を図るとともに、将来的な700℃以上の高温条件への対応のため、経済産業省の先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発に参画し、高温弁の材料評価と信頼性検証を実施している。さらに、地熱発電用蒸気タービンでは、表面コーティングなどの耐食性向上技術を開発し、信頼性を向上させている。また、低沸点媒体を使った地熱バイナリー発電用タービンの開発も進行中である。

In response to global environmental issues, higher efficiency and improved operational reliability are increasingly being requested for steam turbines, essential equipment for thermal power generation. By increasing the temperature and pressure of the steam turbine operating conditions, more efficient power generation is realized, and in order to realize a turbine applied with the higher temperature conditions of 700°C for the future, Fuji Electric is participating in the METI-sponsored development of advanced ultra-supercritical power generation, and is evaluating and verifying the reliability of materials used for high-temperature valves. In addition, for geothermal steam turbines, Fuji has developed surface coatings and other technology for enhancing corrosion resistance in order to improve reliability. Fuji is also moving ahead with the development of geothermal binary power-generating turbines that utilize a low boiling point medium.

1 まえがき

近年、CO₂削減などの環境対策が世界規模で行われている。火力発電に対する効率向上への要求は、かつてないほど強い。成熟したエネルギー変換機としての蒸気タービンに対しても、さらなる高効率化が求められている。長期にわたって安定的な電力の供給を継続するために、運転の信頼性や操作性、保守性の向上が同時に求められている。

富士電機では、入口蒸気温度条件を高くして、プラント全体で大幅に効率を向上するため、従来に比べて高温の蒸気下で使用に耐える、高強度・高寿命の材料や応用技術の開発に取り組んでいる。同時に、蒸気タービン自体の効率を向上するため、各コンポーネント、特に、効率に大きな影響を及ぼす翼列および蒸気シール部に対して新技術を開発し、実用化している。

富士電機は、通常の蒸気タービンだけでなく、再生可能な地熱エネルギーの分野においても、1960年に実用地熱発電設備を製作してから、50年近くにわたり60台を超える地熱タービンの製作納入を行ってきた。現在では、世界的なトップメーカーの一つに数えられている。本稿では、この分野における技術についても紹介する。

2 高温・高圧蒸気条件採用による効率向上

2.1 主要コンポーネントの高温材料技術⁽¹⁾

エネルギー価格の長期的な上昇に加えて、環境問題、中でもCO₂排出規制がプラント熱効率のいっそうの向上を促している。新設機には高温・高圧蒸気条件が採用される傾向にある。現在製作されている大容量機は、主蒸気圧力25 MPa abs, 主蒸気温度600℃, 再熱蒸気温度620℃の蒸気条件が主流となっている。

図1に大容量蒸気タービンの主要コンポーネントに関する高温材料技術を示し、以下にその各項目について説明する。

(1) 高温タービン用材料の開発

高温化を進めるには、タービンの基本的な構造は従来と変えず、高温クリーブ特性の優れた材料に改良することにより、高い信頼性を確保している。特に、600～620℃級の蒸気発電プラントでは、主要コンポーネントであるロータ(図2)やケーシング材(図3)に、改良12%Cr鋼を使っている。

(2) オーバレイ溶接

高温強度が要求される高圧、中圧ロータには12%Cr鋼製のロータを用いている。しかし、これには次の理由により、低Cr鋼ロータに比べて摺動(しゅうどう)特性が劣るといった課題があった。

- (a) 熱伝導率が低い。
- (b) 表面に酸化皮膜が生じにくい。
- (c) 潤滑油中のカーボンとCrとの炭化合物が生じやすい。

この対策として、ジャーナル部、スラストカラー部、軸受台貫通部のロータ表面に低Cr鋼をオーバレイ溶接し、ロータ表層のCr量を1%Cr鋼と同等にすることで、焼き付き、かじりによる車軸の損傷を防止している。

(3) シールドリング付き静翼(図4)

高圧および中圧タービン初段には、ロータ表面に高温の入口蒸気が直接接しないようにシールドリング付き静翼を採用している。初段静翼通過後の低温蒸気をロータ表面に流して、ロータ表面の温度を低温に保ち、クリーブ寿命消費率の増加を抑えている。

(4) ボルテックスクーリング(図4)

ダブルフロータイプの中圧タービン初段には、シールド

図1 大容量蒸気タービンの高温材料技術

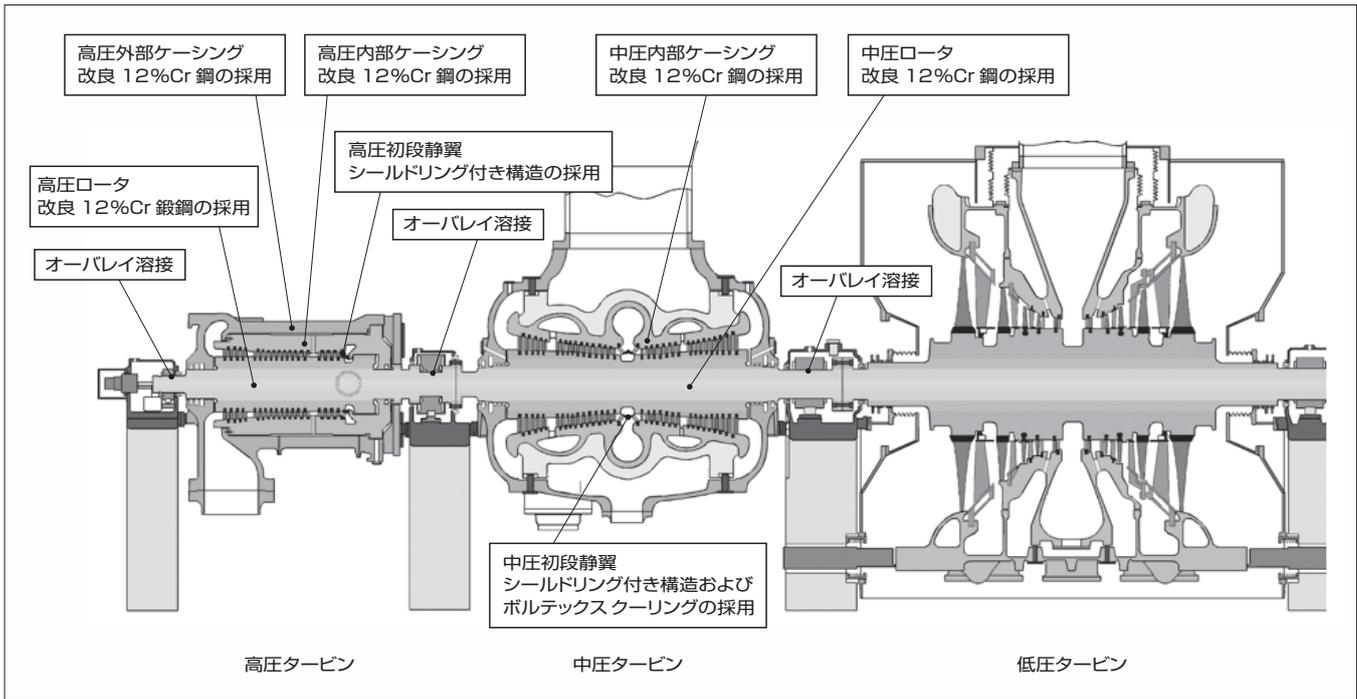
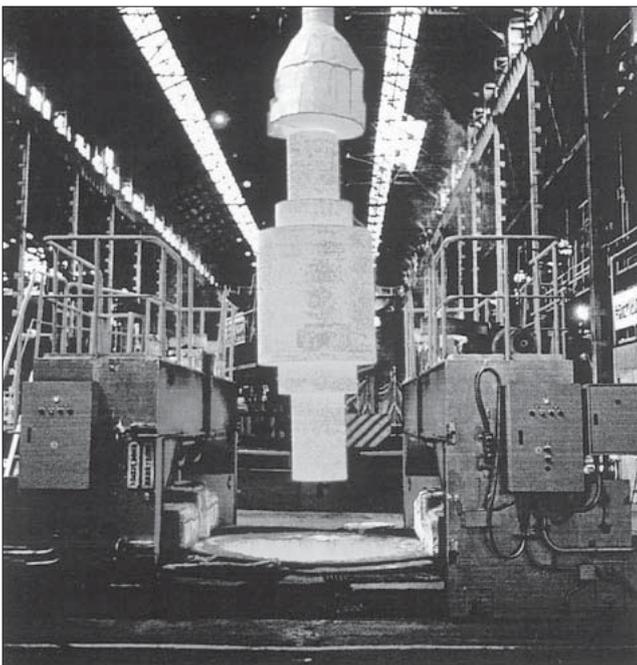


図2 製作中の試作ロータ

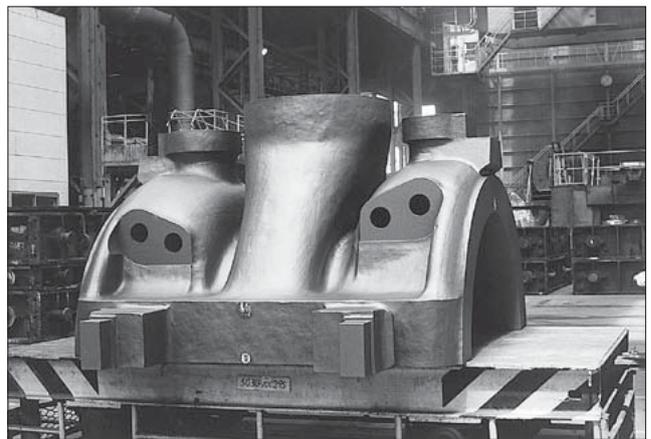


リングに開けた接線方向の蒸気流入口から再熱蒸気の一部が高速の旋回流となって噴出し、ロータ表面を冷却するポルテックスコーリングを採用している。中圧タービンでは前述のシールドリングとの併用で、ロータの表面温度が高温になるのを防ぎ、クリープ寿命消費率の増加を抑えている。

2.2 700℃級高温弁の要素技術開発

従来型の石炭火力発電よりも熱効率の飛躍的な向上が期待できる先進超々臨界圧火力発電技術 (A-USC) を実用

図3 製作中の中圧内部ケーシング



化するため、蒸気温度 700℃ 以上、蒸気圧力 24.1 MPa 以上の蒸気条件に耐えられる電力産業用大容量ボイラ・タービンシステムの開発が必要である。その要素技術開発を行うため、2008 年度から経済産業省は、先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発費補助金に係る補助事業者の募集をしている。富士電機は、この補助金事業の技術開発項目の一つである高温弁要素技術開発についての取りまとめを実施している。

(1) 要素技術開発概要

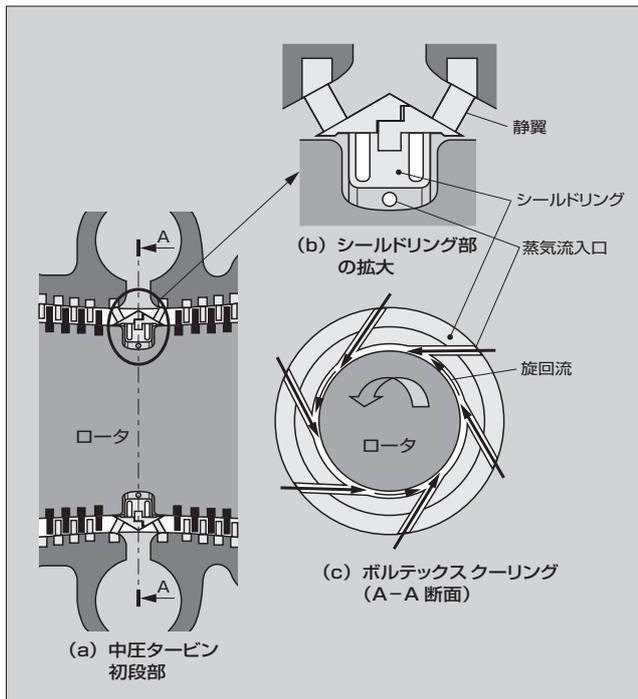
高温弁には、蒸気タービン入口に配置され蒸気流量制御動作や、保護装置には作動した際の危急遮断動作など蒸気タービンを安全に運用・停止するための重要な役割があり、常に高い信頼性が要求される。高温の蒸気にさらされるため、摺動部には耐酸化スケーリング性や耐摩耗性、耐かじり性、耐摺動特性に優れた表面硬化処理を適用する。蒸気温度が 700℃ 以上の高温環境である A-USC プラントでは、

材料強度の関係から主要材料にニッケル基合金を用いなければならない。ニッケル基合金および従来の表面硬化処理した材料の700℃以上の蒸気環境下における摺動特性および高温酸化特性は明らかになっていない。

富士電機は高温摩耗試験機(図5)を製作し、摩耗量を測定することで耐摩耗性の確認を実施し、摺動特性を評価した。また、耐酸化スクリーニングについては水蒸気酸化試験で検証中である。

各検証試験の結果を基に摺動部および気密部の材料選定を行い、おのこの摺動部における隙間(すきま)の設計につなげる。

図4 中圧タービン流入部のシールドリング付き静翼とボルテックススクリーニング



(2) 開発スケジュール

本開発は2008年度より国の補助事業として、国内タービン・ボイラメーカーと研究機関などが主体となって、各要素技術開発、材料開発、システム設計を図6のスケジュールで推進している。富士電機は高温弁の開発取りまとめ担当として、実物大の入口弁を製作し、2013年度からの実弁・回転試験により、実際と同じ蒸気条件下での機能検証を実施する計画である。

③ 要素技術開発による効率向上⁽²⁾

3.1 新世代小型低圧翼

一般の大型蒸気タービンのために開発した新世代低圧翼の設計手法を翼長560mm以下の低圧翼の設計にも適用し、大幅な性能向上を図った高効率な小型低圧翼シリーズを開発した(表1)。

新世代小型低圧翼シリーズの主な特徴は、次のとおりで

図5 高温摩耗試験機

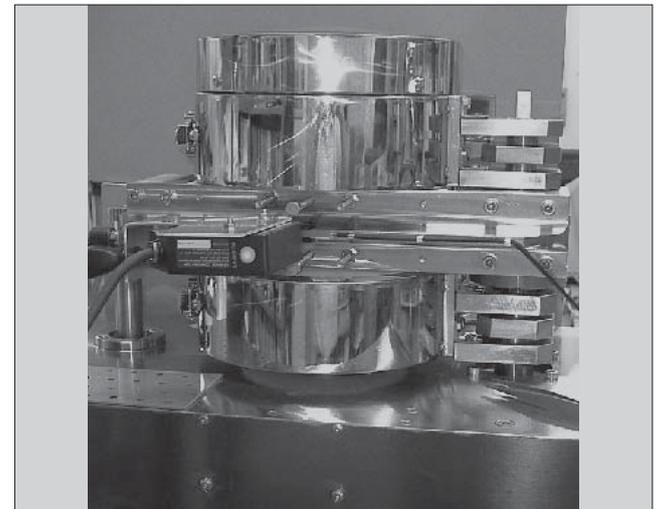


図6 A-USC 開発スケジュール

		2008 (H20)	2009 (H21)	2010 (H22)	2011 (H23)	2012 (H24)	2013 (H25)	2014 (H26)	2015 (H27)	2016 (H28)
システム設計, 設計技術開発		基本設計, 配置最適化, 経済性計算								
要素開発	ボイラ	材料開発	大径管, 伝熱管用新材料開発, 材料改良							
			高温長期材料試験 (3~7万時間)							
	材料製造性検証	溶接技術開発・試験, 曲げ試験								
	タービン	材料開発	材料改良仕様策定など	実サイズ部材試作						
			ロータ, ケーシングなどの大型溶接技術, 試作							
		高温長期材料試験 (3~7万時間)								
高温弁	構造・要素・材料開発	試設計		試作						
実弁試験・回転試験 (高温弁含む)				設備計画	設備設計	設備製造, 据付	試験, 評価			

ある。

(a) 最新のCFD（数値流体力学）技術を駆使した設計による高効率化

(b) 低圧翼各段の負荷を増加させ、タービン全体の翼段数を減少させることによるコンパクト化の実現

(c) 旧世代翼の豊富な運転実績に基づく高信頼性の継承

また、本シリーズは、計画段階において地熱タービンへの適用が考慮されており、前述の特徴に加えてさらに次の特徴を兼ね備えている。

(a) 腐食雰囲気に対する材料選定と強度設計による高信頼性

(b) 全段の脚部にシンプルな逆T字脚を採用し応力集中の発生による強度および信頼性の低下を防止

(c) 全段に囲い輪を付け翼端の漏れ損失の低減による高効率化

図7に、シリーズで最も大きい555mm翼の採用したロータを示す。

3.2 シール技術

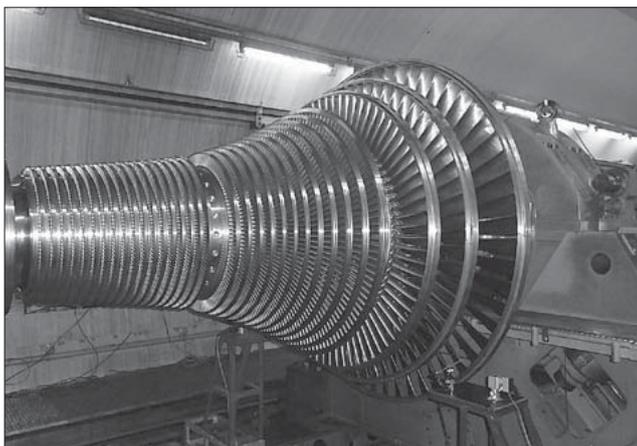
蒸気タービンの性能向上には、上述のタービン翼開発以外にも効率向上するための技術開発が必要である。

蒸気タービンの回転体と静止体の間には、起動、通常運転、停止の全運用域において、回転体と静止体とが接触しないようなクリアランスを設ける必要がある。そのため、通常運転中に必要とされるものよりも大きなクリアランスが必要となり、効率向上を阻む要因となっていた。次のシール技術によって、図8に示す蒸気タービンの翼端および軸端シール部の漏れ蒸気量を低減し、効率向上と運転時の信頼性の確保を図る。

表1 高効率小型低圧翼シリーズ

50 Hz 用 (公称環状面積)	60 Hz 用 (公称環状面積)
555 mm 翼 (3.2 m ²)	462 mm 翼 (2.2 m ²)
487 mm 翼 (2.5 m ²)	406 mm 翼 (1.7 m ²)
348 mm 翼 (1.6 m ²)	290 mm 翼 (1.1 m ²)

図7 555 mm 翼を採用したロータ (回転振動試験実施時)



(1) ブラシシール

ブラシシールは、シール部分静止側に設置する耐摩耗材ワイヤの集合体である。図9に軸端シール部のシールフィンの一部をブラシシールに置き換えて検証した例を示す。ワイヤは、従来のシールフィンと比べて、回転体との接触による影響が極めて小さく、運転時のクリアランスを最小

図8 シール技術適用箇所

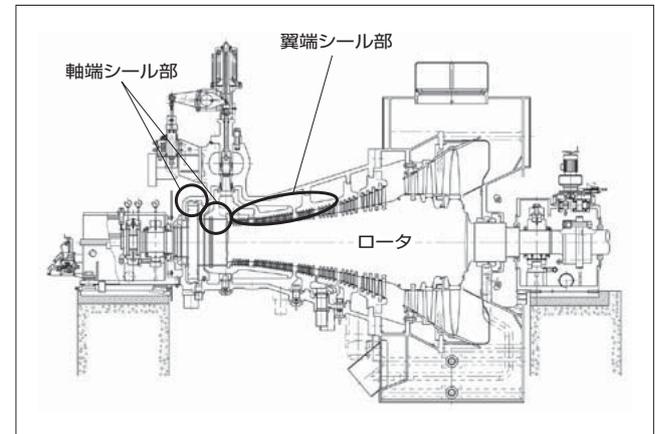


図9 ブラシシール

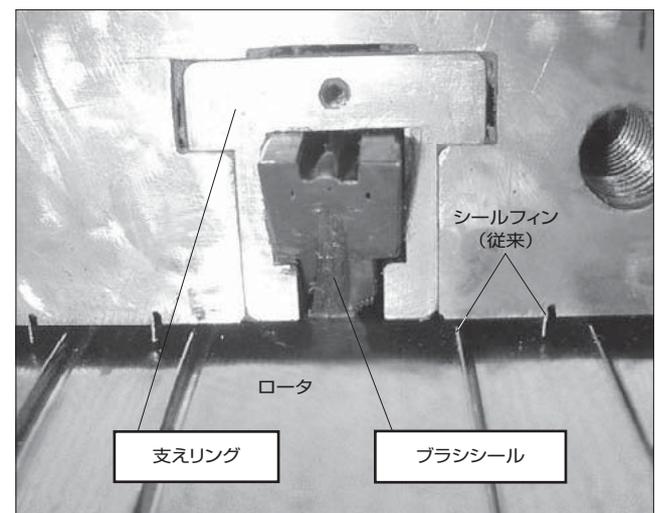


図10 アブレイダブルコーティング

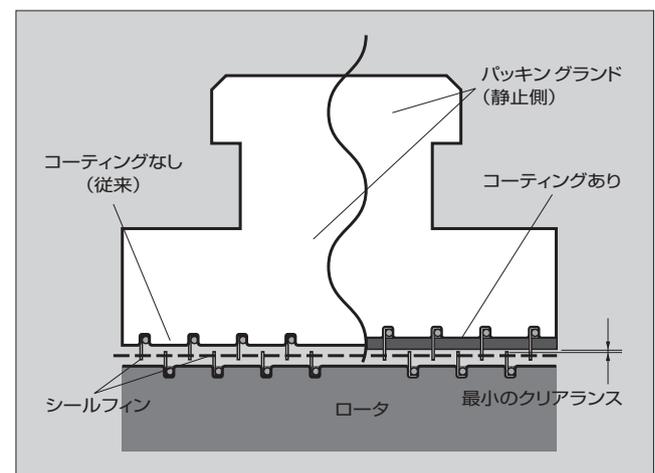


図 11 ロータへの溶射コーティング実施状況



に保つことができる。

組立検証試験、摩耗特性試験、漏れ特性試験の実施を完了し、国内発電設備の蒸気タービンから実用化している。

(2) アブレイダブルコーティング

アブレイダブルコーティングは、翼端および軸端シール部の回転側シールフィンに対向する静止側内面に、快削性金属のコーティングを施すものである。図10にアブレイダブルコーティングを施したパッキングランドの略図を示す。これにより、蒸気タービン運転時のシールフィンとの接触による影響を小さくすることができる。また、接触時にシールフィンがコーティング材を削り込むので、運転時に最適かつ最小のクリアランスが形成できる。

コーティング材とシールフィンとの接触試験により摩耗特性の確認を完了し、2010年度から実機適用を推進する。

4 再生可能エネルギー利用

地熱エネルギーは再生可能なクリーンエネルギーであり、地球温暖化防止の観点からも今後の利用の伸長が期待されている。

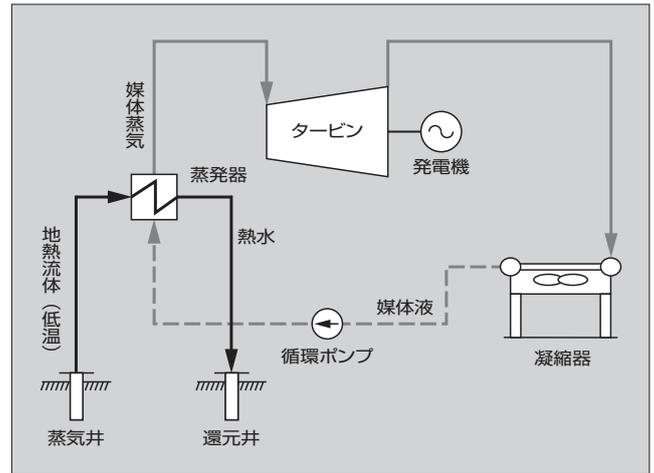
4.1 地熱発電用タービン⁽³⁾

地熱蒸気には塩化物、硫酸塩、硫化水素、二酸化炭素など、種々の腐食性化学物質が多量に含まれている。セパレータ（汽水分離器）やフラッシュ（減圧蒸発装置）などで除去した後でも、タービン内に入ってくる蒸気に含まれる腐食成分は、一般火力向けタービンに比べて100～1,000倍も多い。部材の全面腐食、応力腐食割れ（SCC）、腐食疲労、エロージョンコロージョンなどの耐食性向上技術が必要である。これらの課題に対応するための主な技術として、コーティング技術とショットピーニング技術の開発を行った。

(1) コーティング技術

コーティング技術は、腐食性の高い地熱蒸気流にさらされるロータや静翼ホルダなどの部材の全面腐食やエロージョンコロージョンを抑制するため、部材表面への溶射

図 12 地熱バイナリー発電システム概念図



コーティングを実施する方法である（図11）。

実験室における基礎実験や地熱サイトにおける腐食試験を行い、最も耐食・耐エロージョン性に優れた方法として、WC-CoCr系の溶射材をHVOF溶射（High Velocity Oxy-Fuel Thermal Spray, 高速フレーム溶射）によりコーティングする施行技術を確認し、実機に適用している。

(2) ショットピーニング技術

ショットピーニング技術を開発し実機に適用した。これは翼やロータの高応力部位に鋼球を高速で打ちつけることにより、部材表面に圧縮残留応力を発生させ、応力腐食割れや腐食疲労に対する耐力を向上させる技術である。ショットピーニング処理を施した翼材とロータ材の応力腐食割れ試験および腐食疲労試験を行った結果、大幅な耐力向上効果が得られることが確認できた。

4.2 地熱バイナリー発電用タービン

近年は、高温の地熱井からだけでなく、エネルギーを取り出すのが難しく、利用されていなかった低温の地熱エネルギーからも電力の回収が可能となるバイナリー発電が、その立地点の多さから注目を集めつつある（図12）。

低温の熱エネルギーは熱落差が低くエネルギーを取り出すのが難しいため、利用されずに廃棄されている。この低温の熱エネルギーからエネルギーを回収するためには、従来の水蒸気よりも沸点が低い媒体を使用しなければならない。低温の熱エネルギーを用いた発電を実用化するためには、従来の媒体の特性にはない低沸点媒体特有の技術的問題を確認する必要がある。すなわち、①エネルギー特性、②流体特性、③強度特性、④シール特性などの分析、解析および評価方法の確立である。

バイナリー発電の主要な機器である蒸気タービンは、作動流体に低沸点媒体を使用している。そのため、次の2点の技術課題について開発を進めている。

(1) 低沸点媒体を使用した最適な流路・翼列の設計

翼を含む流体通路形状を最適化するために、その設計手法の確立と検証をあらためて行う必要がある。水蒸気と全く異なる物性値を持つ低沸点媒体に対して、熱力学、流体

特集

力学，材料力学上の特性に適した最適設計ツールを開発し，流路形状・翼列設計技術の構築を行う。

(2) シール技術の開発

使用する低沸点媒体は可燃性なので，外部への漏洩（ろうえい）をゼロにする必要がある。しかし，通常，蒸気タービンに使用しているシール構造では漏れの生じる可能性がある。そこで，完全に内部流体の漏洩を防止できる新しいシール構造の開発と技術の確立および検証を行っている。

⑤ あとがき

富士電機は，地熱タービンも含めた蒸気タービンの信頼性と性能の向上を図ってきた。

今後とも高性能・高効率で使いやすい蒸気タービンを供給するため，開発に努めていく所存である。

参考文献

- (1) 酒井吉弘ほか. 富士・シーメンスの大容量高温・高圧蒸気タービン. 富士時報. 2000, vol.73, no.12, p.644-649.
- (2) 中村憲司. 反動タービンの性能設計技術. ターボ機械. 2006, vol.34, no.4, p.201-206.

- (3) 酒井吉弘ほか. 最新の地熱タービン. 富士時報. 2008, vol.81, no.5, p.314-319.



中村 憲司

蒸気タービンの開発・設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリーンエネルギーソリューション事業部川崎工場火力タービン部主査。日本機械学会会員。ターボ機械協会会員。



田部井 崇博

蒸気タービンの開発・設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリーンエネルギーソリューション事業部川崎工場火力タービン部。ターボ機械協会会員。



高野 哲

蒸気タービンの開発・設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリーンエネルギーソリューション事業部川崎工場火力タービン部。



回転機の最新技術

Recent Technologies for Rotating Machines

真下 明秀 Akihide Mashimo

中山 昭伸 Akinobu Nakayama

日和佐 寛道 Hiromichi Hiwasa

富士電機では、中規模火力発電プラント向けに世界最大容量クラスとなる型式定格 300 MVA 空気冷却タービン発電機の製作・出荷を完了した。大容量空気冷却発電機を実現するためには、詳細に機内の通風状態を把握する必要がある。このため、通風上重要な部位に対しては流れ解析を用い、その結果を反映した通風回路網計算にて全体通風への影響を把握し、冷却効率の向上を図った。また、風力発電用の 3,000 kW 級のダイレクト駆動大容量永久磁石発電機では、発熱部により近い場所での冷却する機内通風方式や回転子への磁石配置を工夫してコギングトルクの発生を抑えている。

For mid-sized thermal power plants, Fuji Electric has completely developed and shipped 300 MVA type rating air-cooled turbine generators, which are the world's largest capacity class. In order to realize a large-capacity air-cooled generator, the ventilation behavior inside the generator must be understood in detail. Therefore, computational fluid calculations of ventilation flow analysis were performed for important regions, and the cooling effect was sufficiently improved with the optimized entire ventilation based on ventilation network calculations that reflected those results. Also, for the 3,000 kW-class of direct-drive permanent magnet generators for wind power generation, the method for cooling the interior of the generator at locations closer to heat-generating parts and the arrangement of magnets on the rotor to reduce cogging torque were designed.

1 まえがき

回転機は電気エネルギーを機械エネルギーへ、またはその逆の機械エネルギーを電気エネルギーへ変換する機械である。その原理は 19 世紀半ばに発見され、成熟した機械ではあるが、さまざまな市場ニーズに対応するために、現在においても材料、設計技術、製造方法の改良が行われている。

近年、火力発電分野では中規模火力やコンバインドサイクル、地熱発電において経済性や保守性、運転性などを向上させた発電設備の市場ニーズが高まっている。富士電機では、水素冷却タービン発電機と比較して、水素ガス供給装置や水素ガス密封油装置を必要としない、保守性に優れた空気冷却タービン発電機の大容量化に取り組んできた。このほど、世界でも最大容量クラスとなる型式出力 300 MVA の空気冷却タービン発電機を設計製作し、工場試験を経て出荷を完了したので、本発電機に関する最新技術について紹介する。

また、温室効果ガス削減の観点から自然エネルギーに注

目が集まっている。この一翼を担う風力発電に対し、風力用の永久磁石発電機の開発を行っており、2010 年度中に完成予定である試作機の内容についても紹介する。

2 大容量空気冷却タービン発電機

2.1 仕様と設計

図 1 に型式出力 300 MVA 空気冷却タービン発電機の外観を、表 1 に主な仕様を示す。

本発電機の設計には、富士電機の空気冷却タービン発電機の標準系列に基づいた信頼性のある技術をベースとして、大容量化のための最新技術を投入している。

(1) 発電機構造

発電機の構造は図 2 に示すとおり、両端の軸受に支持された回転部分である回転子と、固定子、固定子フレームから成る。タービン発電機は高速回転であり、遠心力に対応するため軸方向に長い構造となる。

(2) 固定子構造

固定子は、固定子鉄心を固定子枠にばね板を介して弾性

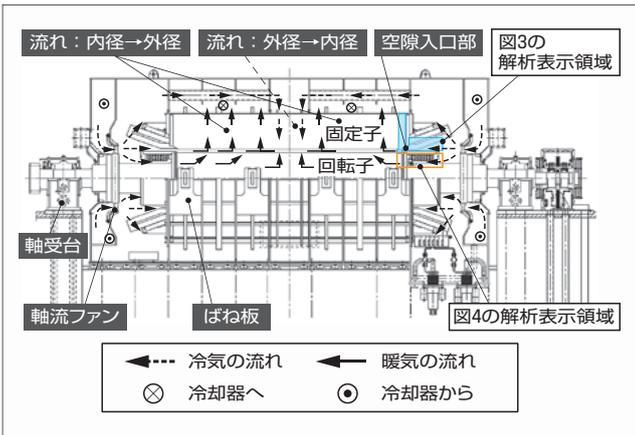
図 1 300 MVA 空気冷却タービン発電機の外観



表 1 300 MVA 空気冷却タービン発電機の仕様

出力	300 MVA	
電圧	16 kV	
力率	0.85	
回転数	3,000 r/min	
周波数	50 Hz	
温度上昇	B クラス (IEC 60034-1)	
冷媒温度	40 °C	
冷却方式	固定子	空気間接
	回転子	半径方向空気直接

図2 発電機断面と通風経路



支持し、鉄心の電磁振動が固定子枠や基礎へ伝達するのを抑制する構造である。大容量化に伴い鉄心長が拡大するので、ばね板の個数や支持位置などについて最適な設計を行っている。

(3) 回転子構造

回転子は、外径、軸長ともに富士電機の水素冷却方式を含めた実績の最大寸法に近い。軸受台には、メンテナンス性を重視したスタンド形を採用している。ベアリングスパンが長いので、危険速度や振動の評価を特に精査して設計に反映している。軸長の拡大に伴う加工時の軸たわみが起因となる2倍波サイクル振動の問題に対しては、大型の水素冷却発電機と同様の機械加工工程を採用するなどして2倍波サイクル成分振動の低減を図っている。

2.2 通風・冷却

固定子巻線には間接冷却方式を、回転子巻線には導体の半径方向に通風路を設けた半径方向直接冷却方式を採用している。

通風経路は、図2に示すように回転子両端の軸流ファンから各部に冷却空気を送り込み、固定子の冷却風の流路は軸方向中央部で外径側から内径側に、両端部では内径側から外径側へ流すようにしている。

これらの通風・冷却の設計には、富士電機の空気冷却タービン発電機の試作実験機や実機から得られたデータ、近年の流れ解析を適用した検証結果などを反映している。いくつかの例を次に述べる。

(1) 固定子通風経路の最適化

図2に示した固定子通風経路は、固定子の軸方向寸法の拡大による中央部の温度上昇を抑制し、軸方向の温度分布を均一化するものである。温度を均一化するためには、外径から冷却風を流す領域と内径から冷却風を流す領域の配分、および各部での風量・風速の最適化が必要である。これらの課題を解決するためには、冷却ダクトの配置だけではなく、風量配分に影響する種々のパラメータを把握する必要がある。その一つとして、固定子と回転子間の空隙(くうげき)入口の寸法と形状が挙げられる(図2)。この空隙入口は、機内の全冷却風量のうち約半分が通過し、寸

図3 空隙入口部の流れ解析

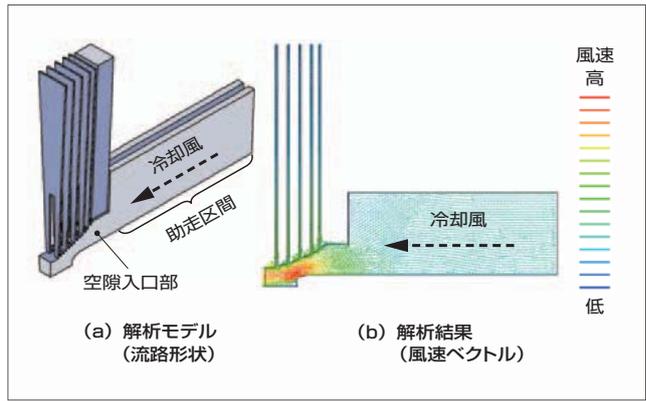
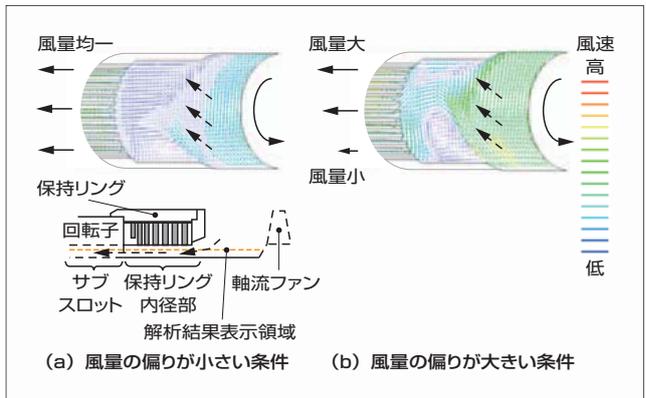


図4 回転子保持リング内径部流れ解析



法や形状によって圧力損失が変化し、風量分布へ比較的大きな影響がある。一方、空隙距離や入口の形状は、電気的な仕様や鉄心端部の磁束集中低減などの観点や保持リング強度上の寸法から決定されるパラメータでもあり、電気的な仕様と通風の最適化を両立させた設計が必要となる。

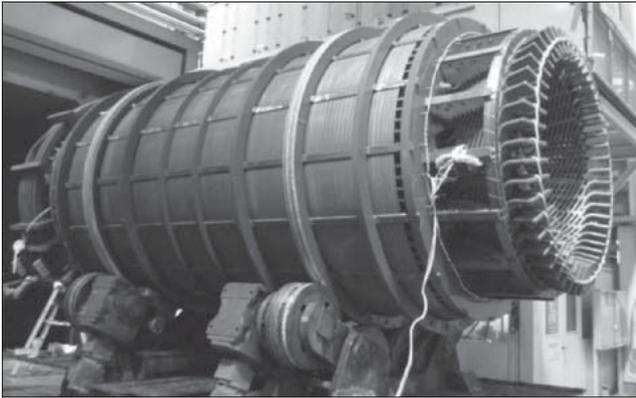
そこで、図3に示すような流れ解析を用いて、空隙入口の寸法・形状と圧力損失との関係を把握し、通風回路網計算にその結果を組み込んで全体通風分布への影響を評価して最適化を図った。この回路網計算の妥当性は、これまでの風量分布測定データとの比較から確認した。

(2) 回転子の周方向風量分布最適化

軸流ファンから出た冷却風は、回転子コイルエンド内側の空間を通過してスロットの底に設けられているサブスロットと呼ばれる軸方向通風路に流入した後、各導体中を径方向に流れながら冷却して回転子外径に排気される。軸流ファンから出た冷却風は、回転子の回転とファンの翼角度によって回転子コイルエンド内側へ周方向に斜めに流入し、コイルエンド内側の構造物との干渉によって偏った分布となる場合がある。この流れの偏りが大きいと、回転子導体へ流入する冷却風量が周方向において不均一となり、導体温度の分布も不均一なものとなる。この問題に対しては、コイルエンド内側空間の寸法やファン翼角度、流入風量などの因子と、流れの偏りの関係を流れ解析によって検証し、設計の最適化を図った。

図4に解析による検証の一例として、流れの偏りが小さ

図5 固定子外観



い条件のモデル（良い例）と、大きい条件のモデル（悪い例）での解析結果を示す。条件の違いにより流れの偏りが異なるのが分かる。回転子の通風に関しては実測が難しいことから、このような流れ解析を用いた検証により最適化が実現されている。

2.3 固定子巻線全含浸絶縁の適用

固定子巻線の絶縁には全含浸絶縁方式を採用している。全含浸絶縁は固定子巻線と鉄心が一体で絶縁樹脂に含浸されることから、鉄心、巻線、くさびのすき間に樹脂が充填（じゅうてん）できる。くさびや巻線の緩みを防止できるため、緩みにかかわるメンテナンスが低減できる。また、上述のとおり巻線と鉄心との間に空隙がないので、巻線から鉄心への熱伝達が良くなり、巻線単体で含浸する方式に比べて冷却性能が向上するなどの利点がある。

タービン発電機全含浸システムには、信頼性を確保する観点から次の絶縁技術を採用している。

- (a) 高耐熱性エポキシ樹脂
- (b) 高含浸性集成マイカテープ
- (c) 高耐電圧寿命対応の内部電界緩和層
- (d) 高耐ヒートサイクル性対応の熱応力緩和層

全含浸工程においては、樹脂の粘度、硬化剤の配合比率などを厳しく管理するだけでなく、モニタリングシステムによって温度、真空度、加圧時の圧力、静電容量による樹脂の含浸状態を常時監視・制御している。図5に、工場での全含浸工程完了後の固定子の外観を示す。

2.4 工場試験結果

本発電機の工場試験では、巻線温度上昇や短絡比、リアクタンスなどの特性をいずれも満足し、表1に示した定格条件における規約効率も98.60%という良好な結果が得られた。

図6に、小型の風速計をダクト内に設置して実測した固定子鉄心ダクトの風速分布を示す。設計値に対して、ほぼ一致した結果が得られている。図7に、銅損温度試験での固定子巻線温度測定結果を示す。軸方向の温度分布が均一化できており、巻線温度分布からも前述の通風冷却の最適化が達成されていることが確認できる。

図6 固定子鉄心ダクト風速測定結果

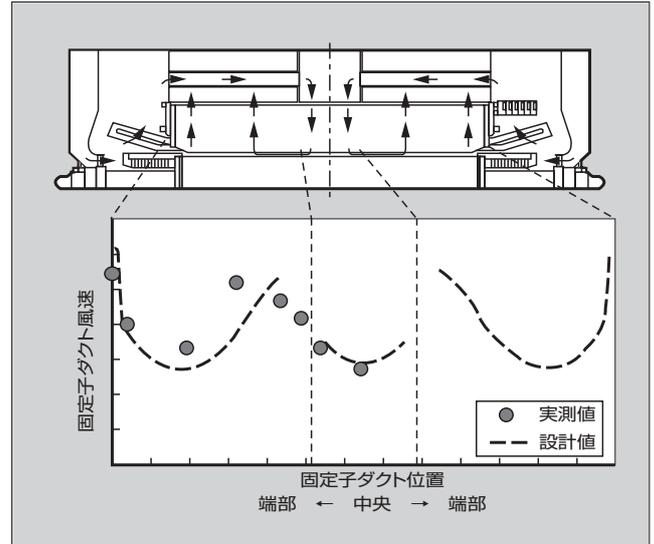
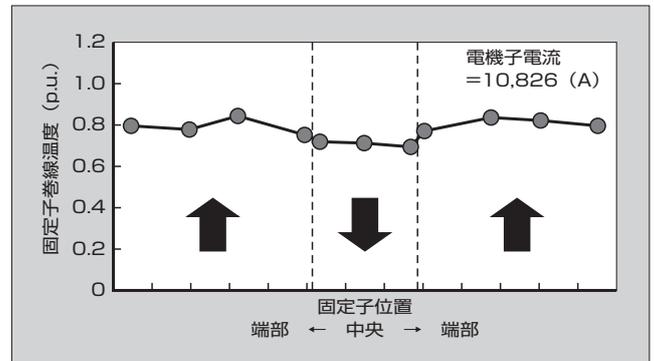


図7 固定子巻線温度測定結果（銅損温度試験）



等価温度上昇試験法による巻線温度上昇値は、固定子・回転子巻線ともに規格保証値（IEC 60034-1）を十分に満足した。

3 風力用大容量永久磁石発電機の開発

3.1 開発仕様

風力発電システムの現在の主流は、風車の回転数を増速する増速機と、巻線形誘導発電機および励磁容量分の電力変換器から成るダブルフェッド方式である〔図8(a)〕。この方式は、発電機と変換器の小型化によって価格面で有利である反面、増速機や発電機のブラシなどのメンテナンス部品が増加する。一方、増速機を介さないダイレクト駆動方式は、低速の永久磁石発電機と発電容量分の電力変換器（フルコンバータ）により構成されている〔図8(b)〕。この方式の特徴は、システムが大型化する代わりにメンテナンス性が向上し、フルコンバータによって広い可変速範囲に対応できる。特に低風速領域での発電効率が向上するなど、運用上の利点が多い⁽³⁾。このほかにも、効率を重視しつつ機器の大型化を避けるために、増速機付きの永久磁石発電機システムもある。

富士電機で開発中のダイレクト駆動システムに適用する

特集

図8 風力発電システムの例

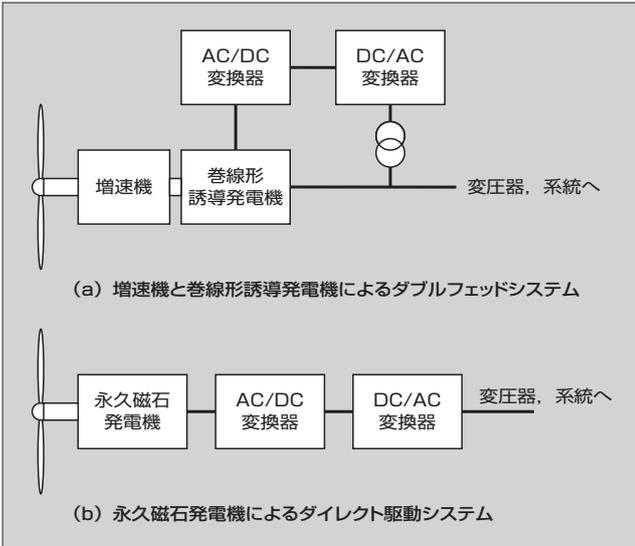
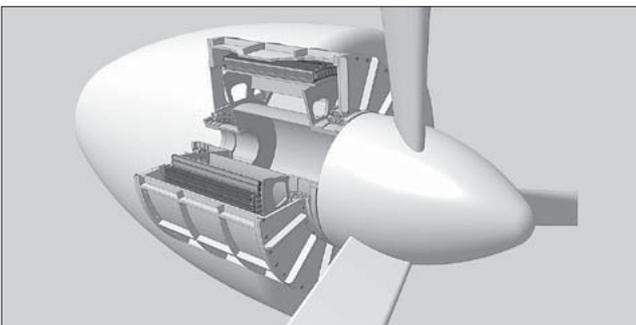


表2 風力用の低速大容量永久磁石発電機の仕様

出力	3,000 kW
電圧	690 V
効率	95%
回転数	15 r/min
温度上昇	Fクラス (IEC 60034-1)
冷却方式	機内強制空冷

図9 発電機断面図 (風車搭載イメージ)



低速大容量永久磁石発電機の出力は、陸上設置の風力では最大クラスとなる3,000 kW級としている。主な開発仕様は表2に示すとおりである。図9は、発電機の三次元断面図である。

3.2 通風・冷却

ダイレクト駆動用発電機の課題の一つに質量の低減がある。陸上の輸送やつり上げ時のクレーンの制限により、質量が決められている。小型・軽量化のためには発電機の冷却性能の向上が重要となる。

図10に発電機内部の冷却風の通風路を示す。矢印が冷却風の流れる経路である。永久磁石発電機は、磁石を回転子の軸方向に連続的に並べるため、回転子に冷却ダクトを設けることが容易ではない。この場合、冷却風は回転子と

図10 発電機内部通風路概略図

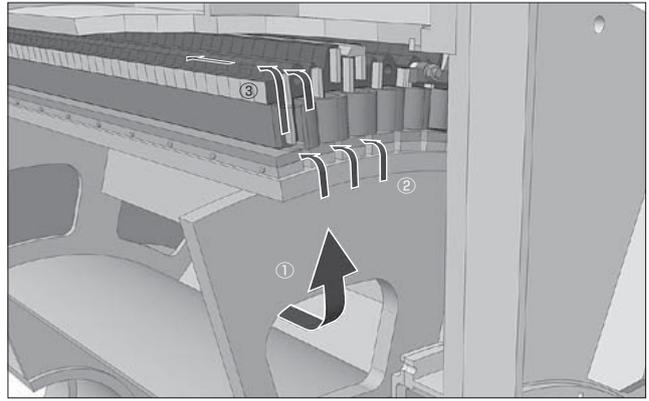
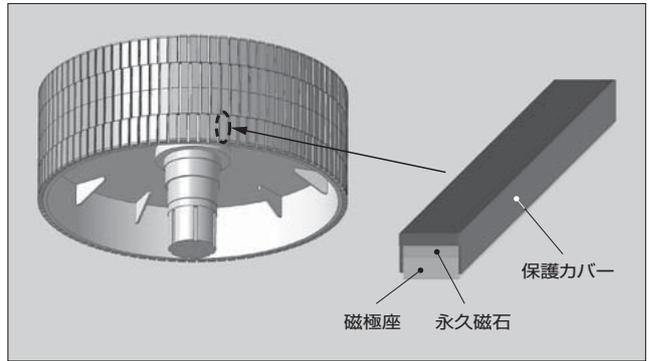


図11 回転子磁石配置



固定子の間のギャップのみが流路となり、冷却効果が低い。そのため、フレームにフィンを設け、外気で冷却する外皮冷却方式が採用されることが多い。

今回は固定子鉄心とフレームの間に空間を設け、そこに風を流すことで固定子鉄心の外周が冷却できるようにした(図10③の流路)。発熱部により近い場所で冷却するため、外皮冷却よりも30~40%冷却性能が向上することを机上検討で確認している。

3.3 構造

次にダイレクト駆動用発電機の特徴的な構造の一部を紹介する。

(1) 巻線構成

巻線構成として採用している集中巻きは、小型の永久磁石電動機では頻繁に使用されている方法である。通常的方式に比べ、コイルエンド部の短縮が可能で、巻線損失と全長の短縮で質量低減に貢献する。

(2) 回転子形状

回転子に配置する磁石は、大型機の場合、膨大な数になる。このため着磁した磁石を一つずつ装着するには多大な時間が必要である。

これを改善するため、磁石は無着磁のまま、いったん磁極座に装着し磁極座ごとに着磁する。この分割磁極をさらに軸方向に複数個並べて1極分の磁極を成すようにする。磁極座を段状に配置することでスキュー配置となり、コギングトルクの低減が可能であり、振動や騒音の低減に有効

である。分割磁極を4段とし、スキュー配置した例を図11に示す。

(3) 軸構造

軸は中空軸とし、メンテナンスのために風車側に人が渡れる構造としている。図9は回転軸の構造であるが、軸をナセル側に固定する固定軸方式についても検討している。

4 あとがき

回転機の最新技術として、従来機種では空気冷却タービン発電機の大容量化に適用した技術を、新機種では風力用永久磁石発電機の開発で適用した技術を紹介した。成熟機種といわれてはいるが、今後も新機種だけでなく従来機種に対しても最新技術を開発・適用して、市場ニーズにマッチした回転機を製作していく所存である。

参考文献

- (1) 木村誠ほか. 全含浸絶縁水素冷却タービン発電機の完成. 電気学会回転機研究会資料. 2007, RM-07-43, p.61-66.
- (2) 竹田政寛ほか. 大形回転機の全含浸絶縁技術の進歩. 富士時報. 1997, vol.70, no.9, p.484-488.

- (3) 木村守. 大容量風力発電用発電機の実験比較. 電気学会誌. 2009, vol.129, no.5, p.288-290.



真下 明秀

回転機の開発に従事。現在、富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリーンエネルギーソリューション事業部川崎工場回転機部課長補佐。電気学会会員。



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、富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリーンエネルギーソリューション事業部川崎工場回転機部主任。



日和佐 寛道

大型回転機的设计・開発に従事。現在、富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリーンエネルギーソリューション事業部川崎工場回転機部課長。電気学会会員。



水車の性能改善技術

Technology for Improving Hydraulic Turbine Performance

鈴木 良治 Ryoji Suzuki

クリーンな再生エネルギーである水力発電を推進し、性能向上を図ることにより、温室効果ガス削減と電力系統の安定化に寄与することができる。水車の効率やキャビテーションなどの改善と、安定運転範囲拡大のため、CFD（Computational Fluid Dynamics）を有効に適用している。特に、近年大きなウェイトを占める既設水力発電所の改修では、落差や流量の範囲、頻度などの運転実績を分析した結果を元に CFD を活用して設計している。既設水車の寸法の制約の中で効率を改善し、年間発生電力量の増加に寄与している。

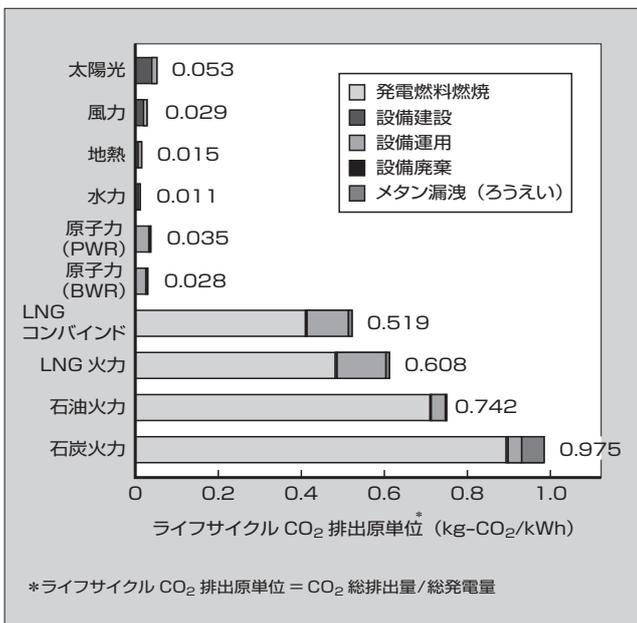
Hydropower is a clean renewable energy, and promoting the usage and improving the performance of hydropower can help contribute to a reduction in greenhouse gas emissions as well as enhance the stability of electrical power grids. The application of CFD (computational fluid dynamics) is an effective technique for improving the efficiency of turbines, mediating cavitation-related issues, and also for expanding the stable operation of turbines. The renovation of existing hydropower stations has become a major topic. In particular, in this renovation, CFD is used based on the results of analysis of the operation history, which includes the ranges and frequencies of the head and the discharge of water, to design new turbines that can contribute to improving the efficiency and increasing the annual power generation while maintaining the dimensional constraints of the existing turbines.

1 まえがき

風力発電や太陽光発電などのいわゆる新エネルギーに比べ、水力発電はクリーンな再生可能エネルギーとして必ずしも社会一般に認知されていない。しかし運転中の CO₂ 排出量だけでなく、原料の採掘・輸送、設備の建設や保守、廃却の際に消費されるエネルギーも含めた総排出量を総発電電力量で除したライフサイクル CO₂ 排出原単位（図 1）で比較すると、水力発電は極めて CO₂ 排出量の少ないエネルギー源である。持続可能な社会の構築のため、水力発電は大いに見直されるべきである。

海外に目を転じて、水力発電の重要性が高まっている

図 1 日本⁽¹⁾の電源種別ライフサイクル CO₂ 排出量



のは同様である。特に開発途上国の著しい電力需要の伸びを地球環境悪化につなげないためにも、水力発電の推進が望まれる。水力発電所は、運用のための燃料コストや CO₂ の排出がほとんどなく、CDM（クリーン開発メカニズム）などを利用すれば、途上国のエネルギー源として非常に優れた特徴を持っている⁽²⁾。

加えて、水力発電のすばやい負荷調整能力も重要である。電力系統では、時々刻々変化する電力需要と発電量が合致していないと、周波数変動などの弊害が生じる。今後、風力や太陽光など変動の大きい新エネルギーの導入が加速するにつれて、水力発電の電力系統安定化への寄与はますます重要性を増すと予想されている。

本稿では、高効率の水力発電設備を提供するための最新の技術を紹介する。

2 水車の性能向上技術

水力発電用の水車は 100 年以上の歴史を持ち、開発し尽くされた成熟機械であるとの認識が一般的である。確かに数十年前に水車の最高効率は 90% に達しており、開発の余地は少ないようにも見える。しかし実際には、コンピュータを使った流れ解析や強度解析をはじめとする技術の進歩に支えられ、格段の進歩を遂げている。性能の向上は、単に最高効率の向上だけでなく、落差や流量のより広い範囲で安定した高効率運転を可能にしている。

2.1 水車設計のための流れ解析技術

水車性能向上の第一の要因は、流れ解析（CFD：Computational Fluid Dynamics）技術の大幅な進歩である。現在水車の設計に一般的に用いているのは完全三次元粘性流れ解析で、比較的簡単な乱流モデルを用いている。CFD

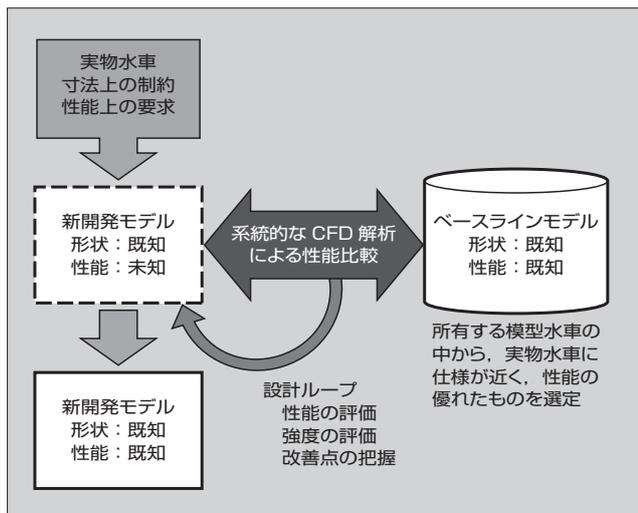
を用いることにより、短時間で設計の最適化を行えるようになった。CFDの精度向上は、コンピュータ技術の飛躍的な進歩に負うところが大きいですが、高精度の模型試験との組合せによるCFD利用技術の向上を忘れることはできない。

CFDは今日ではあらゆる分野で広く適用されるようになってきている。工業的な設計ツールとして、物理現象の基礎方程式を厳密に数値的に解くことは、まだ非現実的である。したがって設計ツールとしてのCFDは、仮定や簡略化によって計算容量を抑えたものとなっている。誰がどのよう

なモデル化を行っても正解が得られるというものではない。それを補完するものが、膨大な模型試験結果との比較検証を通じて蓄積されたCFD利用技術、すなわちノウハウである。

加えて、設計のプロセスも重要である。新しい水車をゼロから設計しようとする、模型試験を行うまでは設計の良否の判断材料はCFDの結果だけである。しかし前述のように、CFDではある程度の誤差が避けられない。それだけを頼りに設計を進めると、意図した結果が得られない場合がある。そこで、既に模型試験で性能が確認されているモデルの中から、仕様が近く、性能の優れたモデルをベースラインとして選定する。図2のように新モデルとベースライン両者のCFD結果を比較して相対的な損失の増減を評価し、新モデルの性能を予測することにより、新モデルだけのCFDによる絶対評価よりも誤差を小さくすることができる。このような設計手法により、最高効率点から離れた運転条件でも性能予測精度が向上し、広い運転範囲における効率の改善を行ってきた。

図2 流れ解析 (CFD) を活用した水車モデル開発のプロセス



2.2 水車の種類とCFD適用による性能向上例

代表的な発電用水車を表1に示す。利用できる水源の落差と水量に応じて、適切な水車が選定される。各機種の特徴について簡単に解説し、次いでいくつかの性能向上例について述べる。

(1) 水車の種類

ペルトン水車は高落差・小流量の地点に適用される。流

表1 代表的な発電用水車

形式	主要部品	適用落差	水量	全体構造	ランナ
ペルトン	分岐管 ノズル ランナ	200 m 以上	小	 ノズル 分岐管	
フランシス	ケーシング ステーベーン ガイドベーン ランナ 吸出し管	50 ~ 500 m	中	 ステーベーン ケーシング ランナ 吸出し管 ガイドベーン	
カプラン	ケーシング ステーベーン ガイドベーン ランナ 吸出し管	3 ~ 80 m	大	 ランナ 吸出し管 ステーベーン ガイドベーン	

水のエネルギーを主軸の回転エネルギーに変換する水車の主要部品をランナと呼ぶが、ペルトン水車のランナは円周上にお椀（わん）のようなバケットを配置した独特の形状を持っている。ランナの周囲に配置された1～6本のノズルから高速のジェットを空中に噴射し、バケットに当ててランナを回転させる。ジェットが流入する際の抵抗を減らし、バケットから流出する水がほかのバケットやジェットと干渉しないよう、バケットの形状は最適化されている。

中程度の落差に適用されるフランシス水車は、最も一般的な形式である。オウム貝の貝殻のような形状をしたケーシングで旋回を与えられた水は、ステーベーン、ガイドベーンの二重翼列を通して半径方向内向きにランナへ流入する。ガイドベーンの変角により、流量が調整できる。ランナは円盤状のクラウンと円筒状のバンドの間に多数の羽根が配置された形状をしている。ガイドベーンから流入した水のエネルギーを受けて回転し、下流の吸出し管へ軸方向に水を排出する。

低落差・大流量の地点に適用されるカプラン水車では、フランシス水車と同様のケーシング、ステーベーン、ガイ

図3 二相流解析（キャビテーションモデル）によって予測されたランナ翼面上の気泡

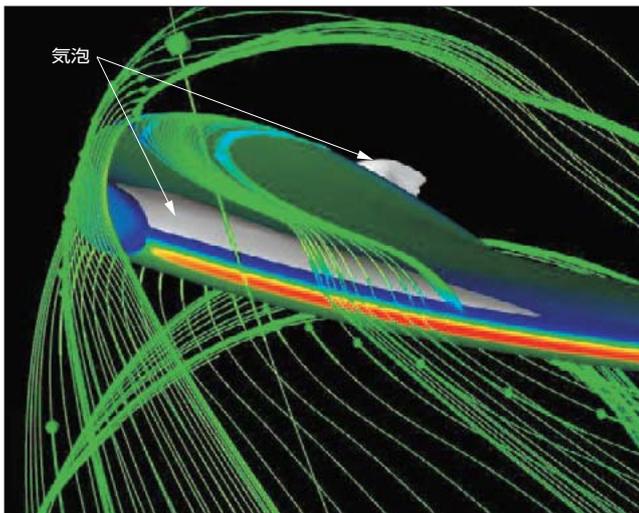
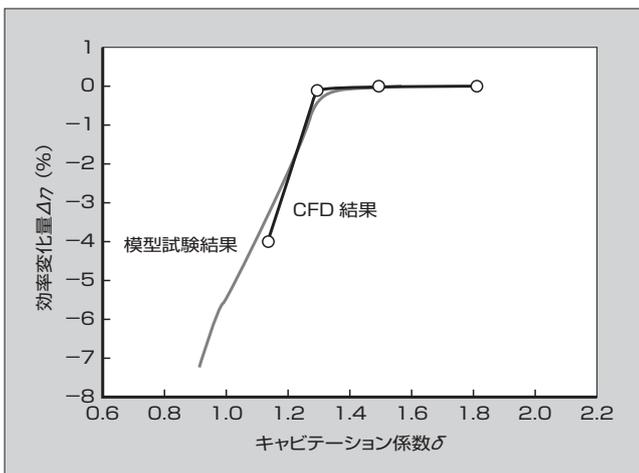


図4 キャビテーションによる効率低下のシミュレーション例



ドベーンを通過した水が、ランナの手前で軸方向に向きを変え、プロペラ状のランナに流入する。小流量から大流量までの広い範囲で高効率を保てるよう、ランナの羽根は角度を調整できるようになっている。

(2) CFDによるキャビテーションの抑制

効率に劣らず重要な水車特性に、キャビテーションがある。キャビテーションとは流水中で局所的に圧力が低下した場合に気泡が生じる現象で、物理的には沸騰と同じ現象である。長年にわたって同じ個所で気泡が崩壊し続けることによって壁面に損傷を与えるので、実物水車で発生しないように注意しなければならない。キャビテーションを改善することによって、水車を小型化したり水車の据付け深さを浅くしたりして、機器コストや土木工事費を削減できる。そのため、初期建設コストの割合が高い水力発電ではプロジェクトの経済性向上に極めて重要である。

水車のキャビテーションを改善するためには、設計段階におけるキャビテーションの予測精度を上げる必要がある。近年では、従来のような水だけのCFDではなく、水（液相）と水蒸気（気相）を同時に扱う二相流解析の技術を適用し、流れ場の中の気泡の形成を解析するキャビテーションモデルが使われるようになってきた。従来の単相流解析では、水流中の圧力変化を解析することによってキャビテーションの発生し始める条件は比較的正確に予測できた。しかし、キャビテーションが発達して気泡が水の流れに影響を与えるような状態のシミュレーションはほとんど不可能だった。キャビテーションモデルの適用により、気泡の影響を受けて水の流れ場が変化し、効率性能にも影響が及ぶ状況も正確に予測できるようになった。図3、図4に、カプラン水車の一種であるバルブ水車のランナに発達したキャビテーションの解析例を示す。図3で白く表示されたキャビテーションによる気泡の存在により、流線が影響を受けて曲がっている様子が分かる。水の流れが変化するという事は、水車の効率にも影響があるということの意味する。キャビテーションが発達すると水車効率が低下することはよく知られており、図4ではこの様子がCFDによって高い精度で予測できることが分かる。

また、以前は困難だったペルトン水車ランナのCFDが、

図5 ペルトン水車ランナのCFD例

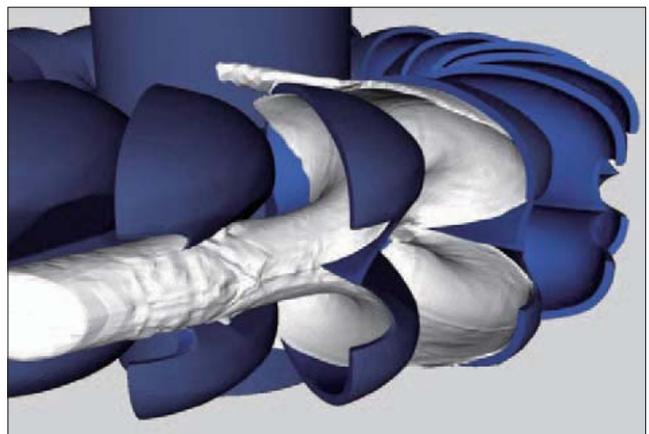
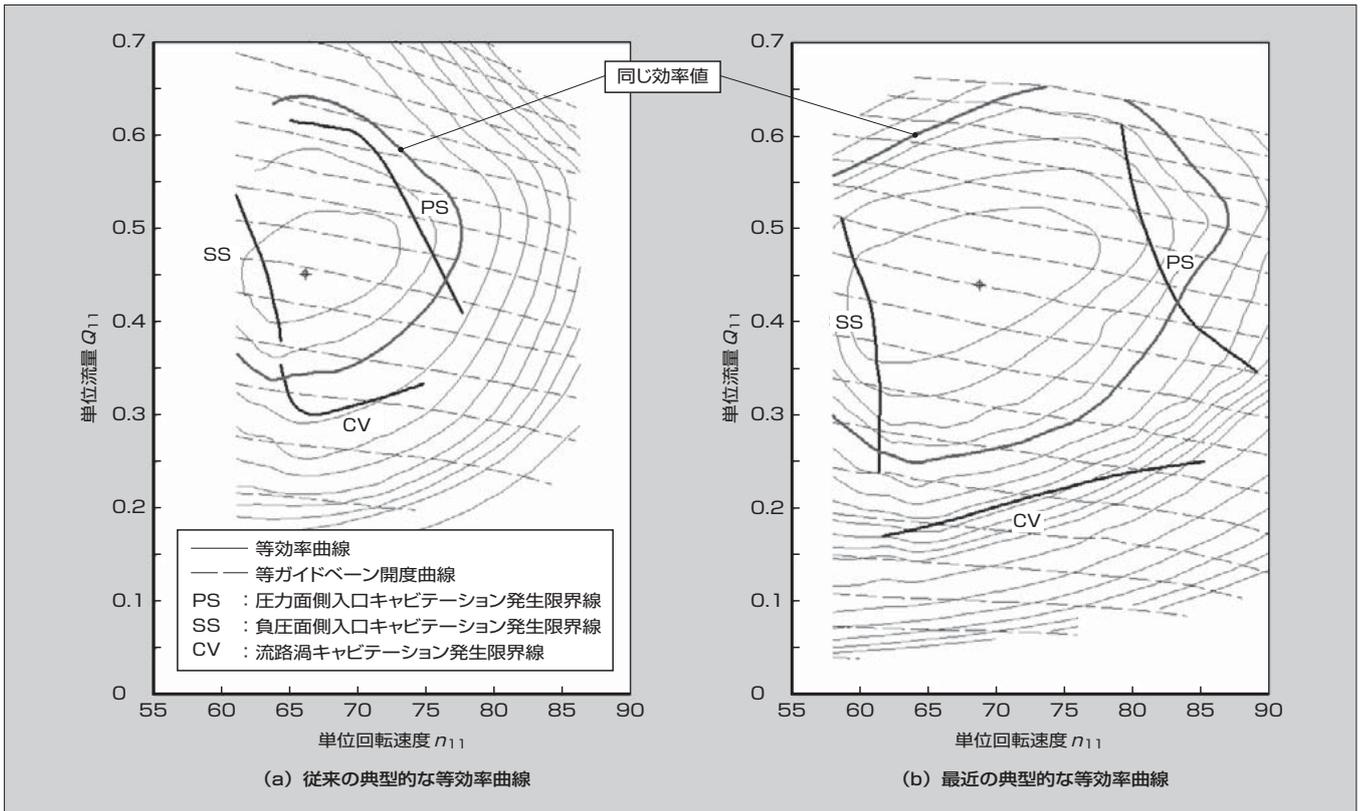


図6 フランス型水車性能の新旧比較



21世紀初頭から可能になり、ランナの開発に威力を発揮している(図5)。

図6は、新旧の典型的なフランス水車の等効率曲線(目玉曲線)を比較して示したものである。地図の等高線と同様、効率の等しい位置が同心円状の実線で示されている。破線は、ガイドベーン開度が一定の場合の流量特性(等ガイドベーン開度曲線)を示す。縦軸と横軸は、単位流量 Q_{11} と単位回転速度 n_{11} である。それぞれ、式(1)、式(2)で定義される。

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}} \dots\dots\dots(1)$$

$$n_{11} = \frac{nD}{\sqrt{H}} \dots\dots\dots(2)$$

- Q : 流量 (m³/s)
- D : ランナ径 (m)
- H : 有効落差 (m)
- n : 回転速度 (r/min)

Q_{11} は流量に比例し、 n_{11} は有効落差の平方根に反比例する。したがって図中の上方は大流量に、左方は高落差、右方は低落差に相当する。新旧のモデルは、ほぼ同じ比速度である。新モデルは、最高効率点から離れた場所での効率の低下が比較的少なく、なだらかな効率特性となっている〔図6(b)〕。比較のために、ある同じ効率値の等効率曲線を太線で示す〔図6(a)、図6(b)〕。新モデルでは太線より内側の等高線の本数が多く、最高効率が大幅に向上していることも分かる。また、落差の変化によってランナへ

の水の流入角度が変化し、羽根の入口からキャビテーションが発生するようになる。新モデルでは、その発生限界(負圧面側:SS、圧力面側:PS)の間隔も広がっている。さらに低流量域で羽根と羽根の間に発生する流路渦キャビテーションの発生限界CVも、最高効率点から離れたところへ移動している。すなわち、新モデルはキャビテーションを伴わずに安定して運転できる落差、流量範囲が大幅に広がっている。

このように、CFDをはじめとする新技術は、効率の大幅な向上や水車の運転範囲の大幅な拡大を実現し、運転条件が自然条件に左右される水力発電所の運用の自由度を上げることによって、CO₂排出低減や電力システムの安定化に寄与している。

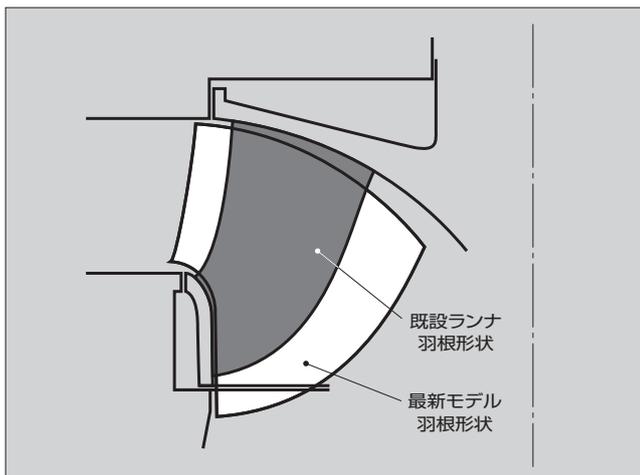
③ 既設発電所の改修による性能改善

日本をはじめとする先進諸国では、大規模な新設水力発電所の建設は減少し、既設発電所の改修による性能向上や保守省力化が中心となっている。最近ではランナやガイドベーンを最新設計のものに更新して、既設水車の性能を大幅に向上したいという市場要求が高まっている。特にCO₂排出量を25%削減するという政府方針が表明されて以来、既設水車にキャビテーションや土砂摩耗などの損傷がほとんどない場合でも、ランナを更新して出力増大を図りたいとの要求も出始めている。

新設発電所の場合には、水車の形状はかなり自由に設計できるが、既設水車のランナを更新する場合には既設水車

特集

図7 フランス水車ランナの更新



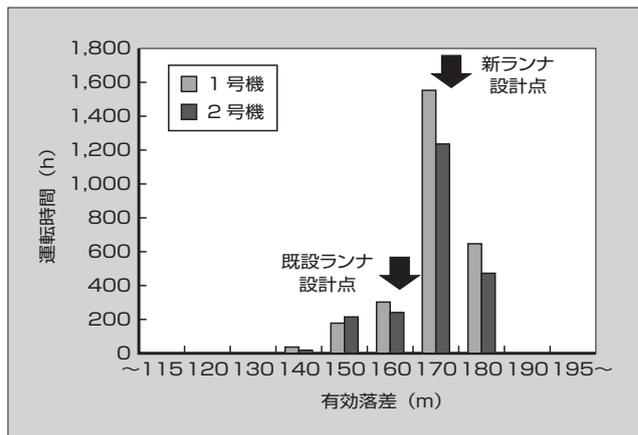
の仕様や寸法の制約を受ける。特にフランス水車の場合には、図7の例のように数十年前に設計された既設ランナの羽根形状（網かけ部）と、性能の優れた最新のランナの羽根形状（白抜き部）が大きく異なることが多く、最新ランナをそのまま適用することができない。したがって一般的に、フランス水車ランナの更新のためには、その都度新規にランナを設計する必要がある。既設水車の寸法上の制約の中で高い性能を実現しなければならないため、一般的に改修ランナの設計は新設発電所用のモデル開発より高い技術が要求される。

ランナやガイドベーンを更新して性能向上を図る場合、発電所の運転実績を調査・検討することが非常に重要である。同一河川の発電所建設やダム運用の変化などさまざまな要因によって、発電所建設時に想定されていた落差や流量の範囲や頻度が変化している場合がある。新しいランナやガイドベーンは、実際に運転頻度の高い条件にあわせて設計しなければ、その価値を最大限に発揮することができない。また、落差範囲の変化などによって既設ランナにキャビテーションによる損傷がある場合なども、運転記録の分析によって、新ランナでのキャビテーション回避のための重要な情報が得られる。

図8は、国内のある発電所でランナを更新した際の、運転記録の分析結果の一例である。発電所建設時には、最高落差185mと最低落差118mの運転範囲の中で、基準落差は162.5mと指定された。この付近の運転頻度が最も高いと想定し、既設水車は基準落差付近を重視して設計した。しかし、ランナ更新に当たって発電所の運転記録を分析したところ、基準落差より高落差での運転が多く、また図示はしていないが低流量での運転頻度も高いことが明らかとなった。一方、最低落差付近での運転はほとんどないことも分かった。そこで新ランナの設計点は、既設機より高落差側へ移動し、低流量での運転も十分考慮した設計とした。

海外では、ランナやガイドベーンの更新に当たって、最大流量を増やして大幅な出力アップを図ることが少なくない。日本国内では、発電所ごとに認可されている最大使用

図8 既設発電所の運転実績の分析



水量を変更することが難しく、既設機と同じ最大流量で新ランナを設計・製作するのが普通である。しかし前述のCO₂排出の大幅削減に寄与するため、最大使用水量も含めて見直し、発電所の価値を最大化しようとの検討も進んでいくものと期待している。

4 そのほかの環境配慮技術

本稿では、水車の性能向上を中心に述べてきた。富士電機では、水力発電所の環境負荷を低減するためのさまざまな技術も開発し、適用してきている。直接的に河川の水質汚濁を防止する油レス化などに加え、発電所機器の長寿命化や保守の省力化なども、広義の環境配慮技術といえる。

また、既存ダムの河川維持放流を利用した発電や、上下水道や農業用水、砂防ダムなどの遊休落差・圧力を利用した発電など、発電所建設のための直接的環境影響を最小化できる発電方式も注目され、それに適したマイクロ水車も適用が広がりがつつある。富士電機では、落差や流量に応じてマイクロチューブラ水車、横軸フランス水車、横軸3射ペルトン水車など、マイクロ水力に適した水車を用意し、多くの地点に納入している。

5 あとがき

水力は、ほかの再生可能エネルギーと比較してもエネルギー密度が極めて高く、機器の効率と設備利用率が高い、環境にやさしいエネルギー源である。一方、ダム建設が環境に与える影響がクローズアップされ、マイナスイメージが先行してきた感もある。しかし、ダムが洪水の防止や渇水時の水確保、かんがい、船舶の安定航行などに果たす役割も見逃すことはできない。

中国やインドをはじめとする途上国が、増大するエネルギー需要を石炭火力などですべて賄うことはできない。ダム建設などによる環境負荷を最小限に抑える努力を継続しつつ、水力発電を増やすことや、あるいは既設発電所の高性能化、長寿命化を図ることにより地球環境の維持・改善に貢献する所存である。

参考文献

- (1) 本藤祐樹ほか. ライフサイクルCO₂排出量による発電技術の評価－最新データによる再推計と前提条件の違いによる影響－. 電力中央研究所報告Y99009.
- (2) 板倉正和ほか. これからの小水力発電. 富士時報. 2003, vol.76, no.9, p.581-585.
- (3) 塚本直史, 稲垣正洋. フランス水車ランナの更新技術. 富士時報. 2003, vol.76, no.9, p.568-571.
- (4) 早馬弘, 藤井恒彰. 最新の水車技術と適用事例. 富士時報.

2008, vol.81, no.5, p.335-340.

- (5) Fisher, R. K., 井筒研吾. 環境にやさしい水車. ターボ機械. 2008, vol.36, no.3, p.129-133.

**鈴木 良治**

水車設計, 特に水車性能開発とランナ設計に従事。現在, 富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリーンエネルギーソリューション事業部水力統括部水力設計部担当部長。日本機械学会会員, ターボ機械協会会員。



原子力の熱利用を拡大する小型高温ガス炉

特集

Modular High-temperature Gas-cooled Reactor for the Expansion of the Nuclear Heat Utilization

岡本 太志 Futoshi Okamoto

大橋 一孝 Kazutaka Ohhashi

小型高温ガス炉は、軽水炉と比べて格段に高温（～950℃）の熱が利用できるとともに、固有の安全特性にも優れた原子炉である。発電以外の分野へ原子力の利用を拡大し、CO₂排出量の大幅な削減が可能のため、活発に開発が進められている。富士電機は、わが国初の高温ガス炉である高温工学試験研究炉の開発で培った技術を生かして、小型高温ガス炉の実用化のための研究開発を進めている。主な研究テーマは、炉心冷却材有効流量確保のための耐熱炉心拘束機構の開発、事故時の安全特性向上を狙った出力分布平坦（へいたん）化炉心の開発、自然放熱による原子炉除熱特性の評価精度向上などである。

The modular High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) is a new generation type of the reactor with the inherent safety. The HTGR can supply heat of very high temperature of approximately 950 degrees C compared to that of the Light Water Reactor. Its development has started in many countries as it has a potential to expand the nuclear heat utilization to reduce CO₂ emission. Fuji Electric is focusing on the R&D towards the practical use of the modular HTGR based on the technologies gained during the development of Japan's first HTGR, HTTR. Major activities of our R&D work are development of the heat resistant core restraint mechanism to maximize the effective core coolant flow rate fraction, development of the flattened power profile core to improve its safety characteristics during an accident, and improvement of the evaluation accuracy of the heat removal capability from the core by the natural convection, core conduction and radiation.

1 まえがき

小型高温ガス炉は、優れた固有の安全特性を持っている。これに加え、利用できる温度が300℃程度の軽水炉と比べて格段に高温（～950℃）の熱を利用できる次世代型の原子炉である。この炉は、高温の熱を直接用いるタービンによる高効率発電や、熱化学法による水からの直接水素製造、あるいは高温蒸気による化学プラントのプロセスなどの熱源として利用が可能である。発電だけに限られていた従来の原子力の利用範囲を大幅に拡大し、1次エネルギーとしての化石燃料の代替としてCO₂排出量の大幅な削減を行える可能性があり、国内外で活発に開発が進められている。

本稿では、この高温ガス炉の設計概念や特徴、国内外の開発動向について概説するとともに、富士電機における高温ガス炉開発への取組み状況について紹介する。

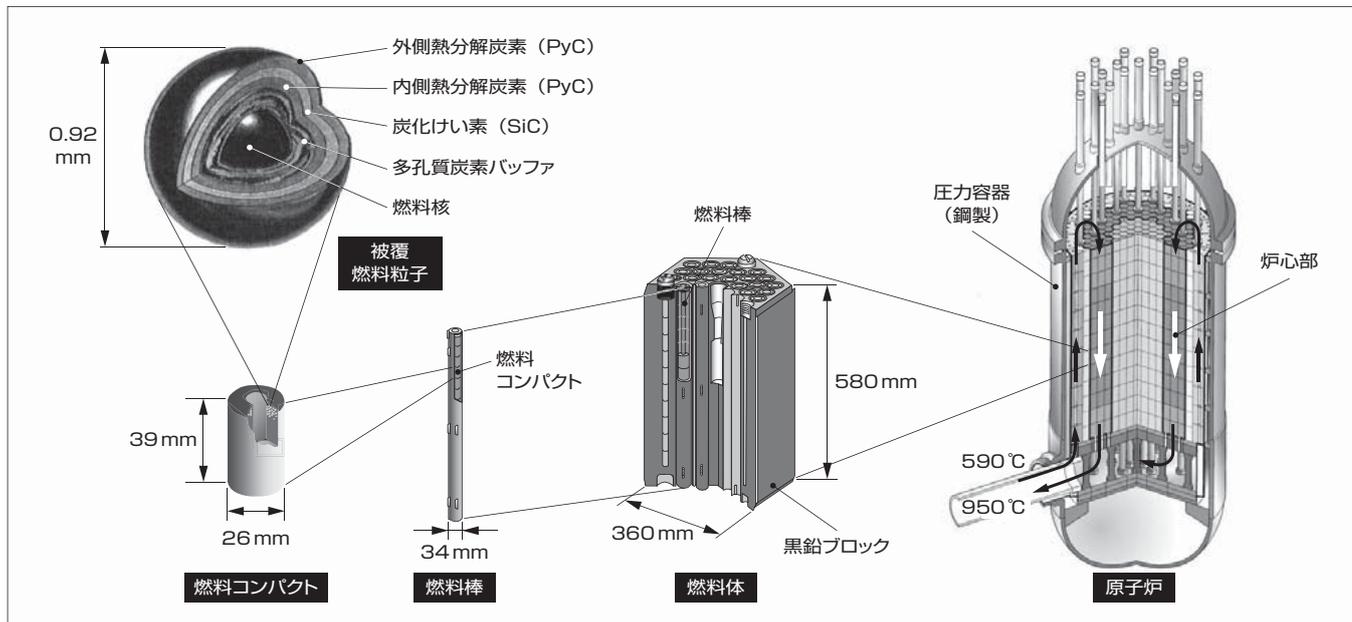
2 高温ガス炉の特徴

2.1 高温ガス炉の構造と軽水炉との比較

高温ガス炉の原子炉構造の例を図1に示す。

軽水炉では金属被覆の燃料を使用している。これに対し、高温ガス炉はセラミックで被覆した直径約1mmの被覆燃料粒子を用いる。この被覆が核分裂によって生まれる放射性物質を閉じ込める役割を果たす。この被覆燃料粒子は

図1 高温ガス炉の原子炉構造



耐熱性に優れている。1,000℃を超える高温で長期運転しても、また、事故時に制限温度の1,600℃という超高温になっても被覆の健全性を損なわず、確実に放射性物質を燃料内に閉じ込めることができる。

燃料内で発生した熱を原子炉外へ取り出すための冷却材には、化学的に不活性なヘリウムガスを用いる。ヘリウムは高温でも燃料や構造材と化学反応を起こすことはない。

原子炉の核分裂連鎖反応を効果的に維持するためには、核分裂で発生した高速の中性子を減速させる必要がある。軽水炉では、冷却材でもある軽水を減速材として用いている。高温ガス炉では、中性子の吸収が少なく、放射線に強く、耐熱性に優れ、熱伝導性の良い黒鉛を用いる。この黒鉛は炉心構造材としての機能も兼ねている。また、熱容量が大きいので、事故時の急激な温度上昇を抑える役割も果たす。

2.2 小型高温ガス炉

高温ガス炉は耐熱性の高い被覆燃料粒子を使用している。大きな熱容量を持つ減速材黒鉛が事故時の大きな熱だめとなる。この特性と炉心の負の温度フィードバック特性とが相まって、事故時の出力の異常上昇を抑制し、温度上昇が緩慢になるといふ、優れた安全特性を持つこととなる。

原子炉の熱出力をある程度の規模以下に限定することにより、この安全上の特性を徹底的に活用することができる。万一の事故時にも原子炉が自然に止まり、自然に冷え、周辺公衆の退避を必要とするような大量の放射性物質を放出する恐れのない原子炉を造り出すことができる。それが、小型高温ガス炉であり、原子炉の熱出力は最大でも600MWt（電気出力約300MWe）程度としている。スケールメリットによる経済性向上を狙って最近では1,700MWeレベルにまで到達している軽水炉の大型化路線とは一線を画している。原子炉の安全性を高めて事故時に必要な設備などの簡素化をすることにより、原子炉出力を下げても経済性を確保しようというものである。

小型高温ガス炉の安全上の特徴を次に示す。

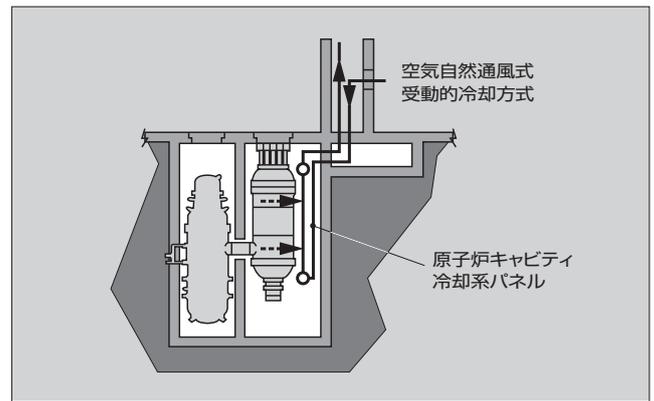
(1) 事故時の自然冷却

前述のように、小型高温ガス炉は原子炉を小さくすることにより、事故時にも自然放熱で原子炉を十分に冷やすことができるようにしている。例えば、冷却系配管が破断して冷却材のヘリウムが喪失する事故（減圧事故）が起きて、原子炉建屋から土壌、大気などへの自然放熱によって、原子炉は十分に冷却でき、燃料が健全性を維持できる温度（制限温度）以下に保持される（図2）。

(2) 事故時に自動的に原子炉停止

一般に、低濃縮ウランを燃料とした原子炉では、炉心の温度が上昇すると負の反応度フィードバックが働き、自然に核反応が抑制されるという特性を持たせられる。高温ガス炉の通常運転時の燃料温度は、事故時の制限温度に対し十分な余裕を持っているため、事故時に制御棒による緊急停止動作などを行わなくても、原子炉はこの負の反応度フィードバック特性により自動的に停止する。

図2 原子炉から炉室冷却パネルへの自然放熱



(3) 事故時に放射性物質を燃料中に閉じ込め

前述のように、万一の事故時に運転員が何もしなくても、また安全設備が何も機能しなくても、自然界の物理現象のみで燃料の健全性を維持することができる。そのため炉内に蓄積した放射性物質は燃料中に確実に閉じ込められるので、軽水炉における耐圧・耐リークの格納容器の設置は不要となる。

2.3 高温熱の用途

現在の原子力発電の主流となっている軽水炉は、利用できる温度の上限が300℃程度であるため、蒸気タービン発電以外の用途の利用はごく限られている。これに対し、高温ガス炉は、700～950℃の熱が利用できるため、発電プラントとしても50%近い効率の直接ガスタービン発電ができる。さらに、原子炉から得られた熱を、電力変換を介さず、熱化学法による水からの水素製造や高温蒸気による化学プラントのプロセス熱源に直接利用することができる。また、蒸気タービンサイクルと接続して、化学コンビナート用に電力とプロセス蒸気を併給するコージェネプラントとしての利用もできる。したがって、高温ガス炉は、従来の発電利用に限られていた原子力の利用範囲を大幅に拡大して1次エネルギーとしての化石燃料を代替し、CO₂排出量の大幅な削減に寄与できる可能性がある。

③ 高温ガス炉開発の現状と富士電機の実績

3.1 高温ガス炉開発の歴史と富士電機の実績

(1) 高温ガス炉開発の歴史

高温ガス炉の開発は、1959年に発足したOECD（経済協力開発機構）のドラゴンプロジェクトによる英国への実験炉建設に始まる。その後、1960年代から1970年代にかけて、米国およびドイツ（当時、西ドイツ）において、それぞれ実験炉と原型炉の建設・運転が行われた。原型炉の規模は約300MWeであり、いずれも蒸気タービンを用いた発電プラントとしての性能実証が行われた。

1970年代までの両国の高温ガスの開発は、軽水炉などと同様に大型炉指向を基本として進められてきた。しかし、スリーマイルアイランドやチェルノブイリの事故をきっかけ

けに、動的機器に依存せずに原子炉の安全性が確保される固有安全炉概念への関心が世界的に高まり、それまでの大型炉から小型高温ガス炉へと開発方針が大きく変更された。そして、米国、ドイツとも高温ガス炉の開発の中心は、蒸気タービン発電を用いた小型の高温ガス炉へと移っていく。

2000年代に入ると、地球環境保護や温暖化防止の観点から、米国では、原子炉出口温度 950℃以上を目指した小型高温ガス炉とそれに接続する水素製造システムの開発が、エネルギー省の予算による NGNP（次世代型原子力プラント）計画として開始されることになる。

ドイツでは、1980年代に小型高温ガス炉の開発が開始され、精力的に研究が進められた。その後の原子力開発全体の中止という連邦政府の政策変更により、1990年代初めにこの開発は中止された。しかし、ドイツの高温ガス炉の技術は中国および南アフリカに受け継がれ、両国とも高温ガス炉実証炉の建設計画を進めようとしている。

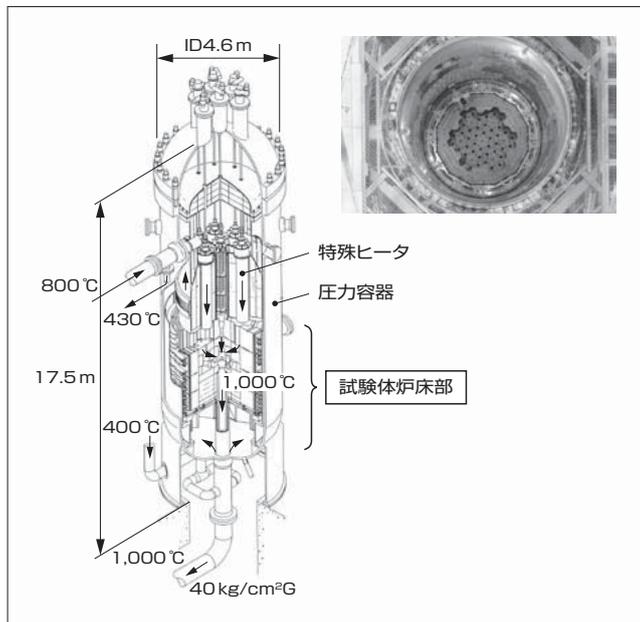
近年は、特に水素製造やプロセス用熱源としての利用に対する関心が各国で高まり、米国の提唱で始まった国際的な研究開発協力の枠組みである第4世代原子炉システム国際フォーラム（GIF）においても、候補プラントの一つとして取り上げられ、国際協力も進められている。

わが国では、1960年代末から、当時の日本原子力研究所〔現在の独立行政法人日本原子力研究開発機構（原子力機構）〕において、発電以外の多目的利用を目指した高温ガス炉の研究開発を開始した。その後、わが国初の高温ガス炉となる高温工学試験研究炉（HTTR）の建設を1990年に開始した。2001年には定格運転に至り、2004年には950℃という高温ヘリウムガスの炉外取出しにも成功している。⁽¹⁾

(2) 富士電機の実績

富士電機は、原子力機構が研究開発を開始した当初から、HTTR の設計・研究開発に協力してきた。高温構造機器

図3 炉内構造物実証試験部（HENDEL-T2）



の試験では、炉内構造物強度試験、炉心耐震試験、ブロック間シール特性試験、材料の熱特性試験など設計・製作に必要な要素技術の開発を行った。富士電機の社内に高温高圧ヘリウムループを設置し、機器の構造や信頼性などの実証試験を行った。HTTR の各種高温構造機器の実証試験を行うためのヘリウムループ HENDEL では、富士電機はプラント全体の取りまとめを行った。同時に、炉心の冷却材流動特性評価のための“燃料体スタック実証試験部”（HENDEL-T1）、炉床部構造評価のための“炉内構造物実証試験部”（HENDEL-T2）（図3）の設計・製作・据付けを行い、大型構造機器の性能・健全性の実証に関する研究開発に協力した。炉床部については、地震時応答の基本データ取得と地震時健全性実証を目的に、1/5スケールおよび1/3スケールの耐震試験装置の製作・据付け・試験も⁽⁴⁾行っている。

HTTR 本体の建設にあたっては、富士電機は副幹事会社として原子炉の取りまとめを行うとともに、原子炉システム設計では炉心設計、安全解析を原子力機構に協力して実施したほか、炉内構造物、燃料取扱設備、放射線管理設備などの主要設備の設計・製作・建設を担当した⁽⁵⁾。炉心上部から見た炉内構造物の外観を図4に示す。また燃料取扱設備の主要機器である燃料交換機を図5に示す。

HTTR 建設完了後も富士電機は、原子炉建屋内で貯蔵・冷却した後の使用済燃料を、敷地内で長期保管するための乾式貯蔵設備である使用済燃料貯蔵設備の建設や、HTTR の炉内で材料クリープ試験を行うための照射下クリープ試験装置の設計・製作⁽⁷⁾などを担当している。

3.2 高温ガス炉開発の取組み

高温ガス炉による水素製造を実現するためには950℃以上の原子炉出口温度の高温化が必要である。これまでにHTTR などの小型の試験炉ではこれを達成した実績があるものの、実用化のためにはまだ課題が多い。例えば熱出力600MWtの小型高温ガス炉の実用化を考えた場合、小型炉といえどもHTTRの熱出力30MWtの20倍の出力規模となる。この出力に対しても固有安全性を確保するためには、通常時および事故時の燃料温度制限を満足すること

図4 高温工学試験研究炉（HTTR）炉心最上段の外観

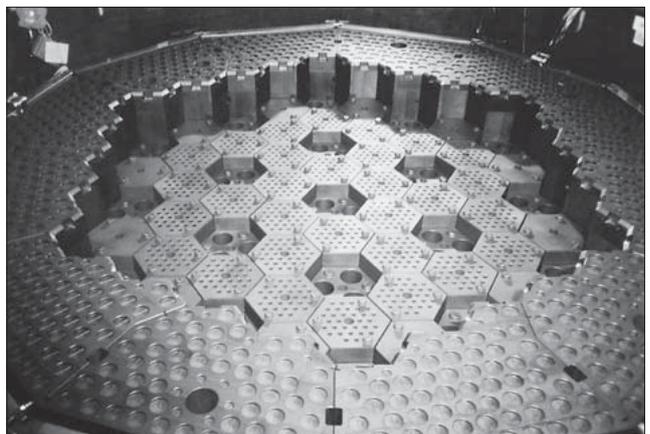


図5 高温工学試験研究炉（HTTR）燃料交換機

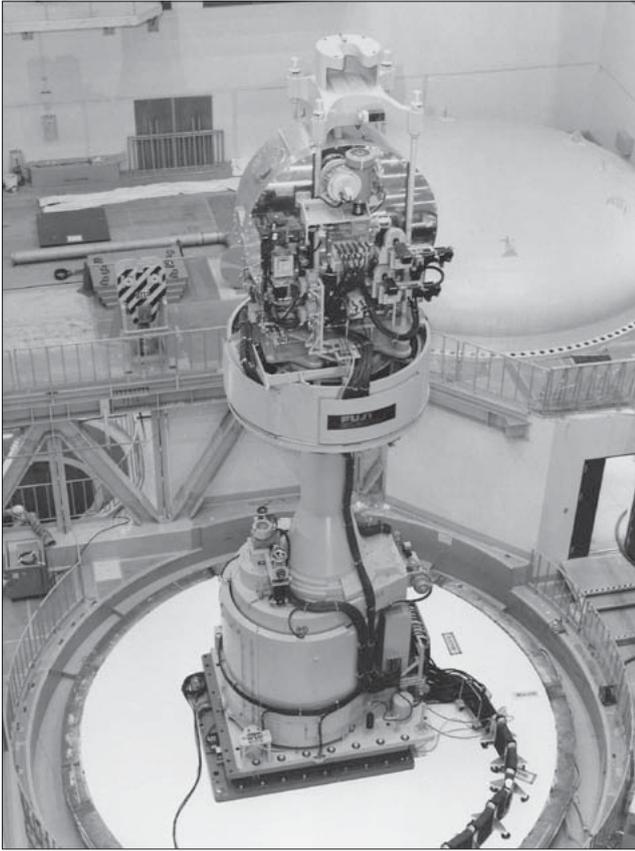
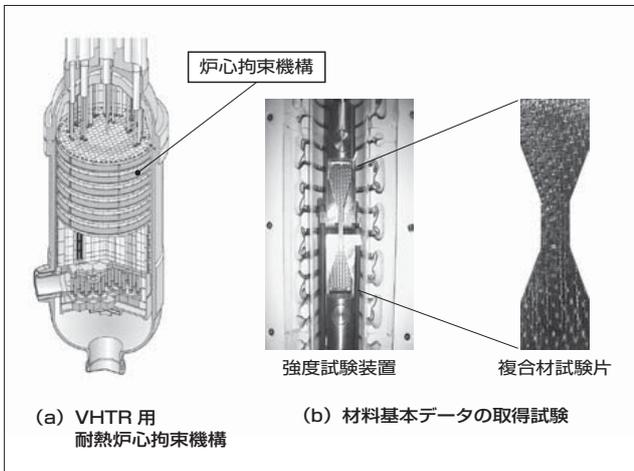


図6 超高温ガス炉（VHTR）用耐熱炉心拘束機構



が必要である。通常運転時には炉心冷却材の有効流量確保の対策が必須となる。事故時の燃料温度については、一方でプラント稼働率確保のために燃料の燃焼期間を長く取りつつ、出力分布の最適化を行う必要がある。また、固有安全性を確保しつつ出力の限界を極めるためには、原子炉容器からの自然放熱による除熱性能の評価において、過度に保守的にならないことも重要である。

富士電機では、前述の観点の下に、熱出力 600 MWt、出口温度 950℃を目標とした実用規模での小型高温ガス炉の実用化を目指し研究開発を進めている。現在実施している主な研究開発テーマを紹介する。

図7 出力分布平坦化炉心

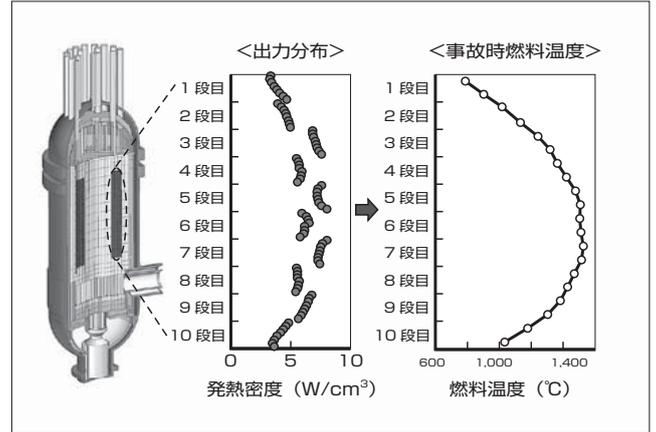
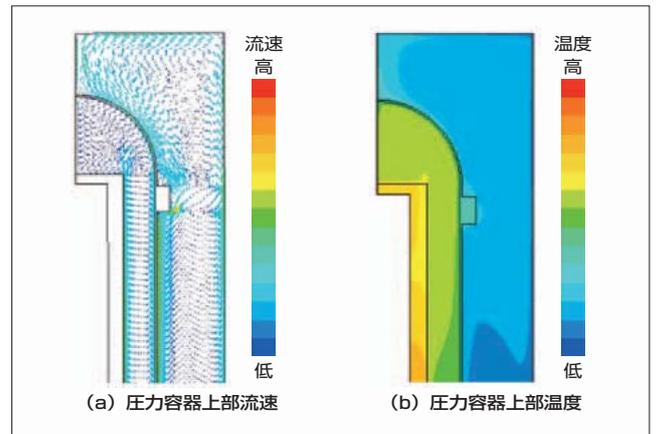


図8 原子炉自然放熱挙動の解析例



(1) 耐熱炉心拘束機構

原子炉出口温度を 950℃まで高温化しても、燃料温度を過度に上昇させないために、黒鉛ブロックが積層している炉内構造物を外側から締めつけてブロック間のギャップを流れるバイパス流量を極力抑制し、燃料部を流れる冷却材の有効数量を確保する必要がある。HTTR の場合には、原子炉入口温度が 400℃程度であったため、金属材料を用いた拘束機構を設置した。しかし、水素製造用の高温ガス炉の場合にはプラント熱効率確保の観点から、原子炉入口温度に 500～600℃程度が要求される。そのため金属材料ではなく、耐熱性に優れたセラミックス複合材を材料に用いることとし、構造概念、材料基本データの取得試験、強度評価手法の開発などを進めている（図6）。

(2) 出力平坦（へいたん）化炉心の検討

小型高温ガス炉の固有安全性を確保するためには、事故時の燃料温度が制限値以下になることが必要である。事故時の除熱が原子炉容器からの自然放熱で行われるため、事故時の燃料最高温度は軸方向の最大出力点近辺に表れる。したがって、事故時燃料温度を低減するには、炉心の軸方向出力分布を平坦化する必要がある。富士電機では、原子炉熱出力 600 MWt、原子炉入口温度が 590℃、出口温度が 950℃という基本条件に加えて、燃料の交換サイクルとバッチ数として 550日×2バッチを設計目標に、図7に示

すように、減圧事故時の燃料温度が制限温度 1,600℃を越えないような出力平坦化炉心概念の構築を進めている。

(3) 原子炉自然放熱挙動の評価

通常時および事故時の原子炉圧力容器の冷却は、放射と自然対流という二つの伝熱現象により行われる。したがって、これらの現象による除熱能力をより精度良く評価できれば、設計余裕の合理的な低減や、より安価な材料の使用などが可能になる。そこで、自然放熱による除熱特性評価の精度を向上させるため、原子力機構が過去に実施したモデル実験データ⁽⁸⁾などを有効に活用して評価手法の検証を進めている。原子炉容器模擬装置を対象にした熱流動解析結果の例を、図 8 に示す。

4 あとがき

小型高温ガス炉は、その優れた固有の安全特性に加え、水素製造や化学プラント向けプロセス用熱源などの発電以外の分野へ利用を拡大することにより、CO₂ 排出量の大幅な削減を行う可能性を持つ次世代型の原子炉である。富士電機は、今後も国内外の関係諸機関と連携を図り、高温ガス炉の実用化に向けた取組みを全力で進めていく所存である。

参考文献

- (1) S. Fujikawa, et al. Achievement of Reactor-Outlet Coolant Temperature of 950℃ in HTTR. Journal of Nuclear Science and Technology. 2004, vol.41, no.12, p.1245-1254.

- (2) 下村寛昭ほか. HENDEL T1試験部の建設. FAPIG. 1984, no.107.
- (3) 秋定俊裕ほか. HENDEL T2試験部の建設. FAPIG. 1986, no.114.
- (4) 塩沢周策ほか. 高温工学試験研究炉 炉床部耐震試験. FAPIG. 1990, no.125.
- (5) 高温工学試験研究炉 (HTTR) 特集. 富士時報. 1998, vol.71, no.4.
- (6) 木曾芳広ほか. 高温ガス炉関連技術. 富士時報. 2003, vol.76, no.6, p.317-328.
- (7) 柴田大受ほか. HTTRのI-I型材料照射試験用設備の開発. FAPIG, 2002, no.161.
- (8) IAEA-TECDOC-1163, Heat Transport and Afterheat Removal for Gas Cooled Reactors Under Accident Conditions, IAEA, 2000.



岡本 太志

原子力システム技術、高温ガス炉の技術開発に従事。現在、富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリーンエネルギーソリューション事業部グリーンエネルギーソリューション統括部原子力開発部長。日本原子力学会会員。



大橋 一孝

高温ガス炉の安全設計や原子炉の設計・開発に従事。現在、富士電機ホールディングス株式会社技術開発本部エネルギー・環境研究センターエネルギーシステム研究部マネージャー。日本原子力学会会員。



りん酸形燃料電池「FP-100i」

Development of the FP-100i Phosphoric Acid Fuel Cell

長谷川 雅一 Masakazu Hasegawa

堀内 義実 Yoshimi Horiuchi

富士電機は、1998年から100kWりん酸形燃料電池の商品機を25台納入した。累積運転時間は、当初の開発目標の寿命(4万時間)を超え、信頼性・耐久性が実証されている。2009年度に新たに開発した普及型りん酸形燃料電池「FP-100i」の販売を開始した。FP-100iは周辺設備を一体化してユーザの利便性の向上と、装置の設置環境の拡大を図っている。今後の普及拡大へ向けた展開では、災害対応機能付き燃料電池や純水素や副生水素利用の燃料電池のほかに、電気自動車用の水素ステーションに水素を供給できる水素供給機能付き燃料電池などの用途開発を進めている。

Since 1998, Fuji Electric has delivered twenty-five 100kW phosphoric acid fuel cell units. The cumulative operation time of these fuel cells has exceeded the lifespan targeted by the original development (40,000 hours), and their reliability and durability have been proven. In 2009, Fuji Electric began selling the "FP-100i," a newly developed low-cost phosphoric acid fuel cell. Integrated with peripheral devices, the FP-100i features improved ease-of-use and is able to support installation in a wider range of environments. As part of future efforts to popularize and expand usage of the FP-100i, application development will be promoted for fuel cells equipped with disaster response capability, fuel cells that use pure hydrogen or by-product hydrogen, fuel cells equipped with hydrogen supply capability for supplying hydrogen stations for electric vehicles, and so on.

① まえがき

燃料電池は、水素と酸素との化学反応から直接電気を発生させる発電装置であり、次世代エネルギーの一つとして大きな期待が寄せられている。

燃料電池のメリットは、燃料を化学反応させることにより直接電気を取り出すため、エンジンやガスタービンなどの従来の内燃機関のように燃料を燃焼反応させ、発電機にて電気を取り出す方式と比べロスが少なく、発電効率が高いことである。さらに、大規模発電所と比べ消費者の近くで発電する分散型電源として使用できるので、エネルギー損失が少なく、かつ、排熱利用ができることである。燃料電池は都市ガスなどを利用し、装置内で水素に改質(変換)したのち、その水素を燃料として発電する。つまり水素があれば発電ができ、その水素は広い範囲の燃料から改質ができるため燃料の多様性もメリットである。このため、燃料電池は地球温暖化防止に対する世界的な関心の高まりにより、温室効果ガス削減のツールの一つとして期待され、開発と実用化に向けた取組みが活発になっている。

富士電機は、100kWりん酸形燃料電池を販売してきた。さらなる普及を目指し、新たにりん酸形燃料電池「FP-100i」を開発し2009年度から販売を開始した。本稿では、富士電機が納入したりん酸形燃料電池の現状と、最新型のFP-100iの特徴および今後の展開について述べる。

② りん酸形燃料電池の現状

富士電機は、1973年にりん酸形燃料電池の開発に着手した。オンサイト向けにはこれまで50kW、100kW、500kWを開発し、ガス会社および電力会社の協力の下100台を超えるフィールドテストを実施してきた。これら

の経験とノウハウを反映した100kW商品機の販売を1998年から開始し、現在までに25台を出荷している。

表1に100kW商品機の納入実績とその累積運転時間および運転状況を示す。主な納入先は、病院、ホテル、オフィスビル、下水処理場などである。電気と温水を利用するコージェネレーションシステムとして使われている。

販売当初のオーバーホール周期(セルスタック、改質器などの主機の交換時間)が40,000時間の商品機は、現在運転中のすべてのサイトで、目標の40,000時間を達成した。その中でもホテルへ納入した装置はオーバーホールを実施し、富士電機の最長記録となる累積91,568時間を達成した。

2006年からは、オーバーホール周期が60,000時間対応機を販売している。また、2006年の「消防法」の改正により、燃料電池が非常電源として位置付けられるようになった。2008年に、富士電機の100kW商品機が消防法認定の第一号を取得した。常時はコージェネレーションとして運用し、災害発生時は非常電源として特定負荷への給電を継続できるようになっている。認定試験では、いかなる方向からの水の飛まつによっても不具合が発生しないという厳しい防噴流形防水試験に合格している。2009年にはFP-100iが国内で販売している製品やサービスを対象とし、特に優れた新製品、サービスを表彰する“日経優秀製品・サービス賞 優秀賞”を受賞した。

このように富士電機のりん酸形燃料電池の信頼性や耐久性は、実サイトで実証されている。

③ りん酸形燃料電池の特徴

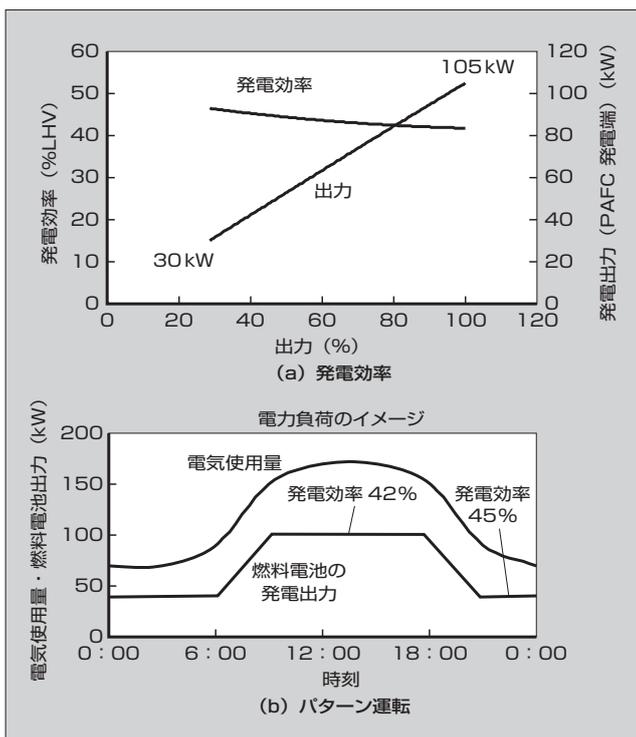
燃料電池は、使用する電解質の種類によって、アルカリ形、固体高分子形、りん酸形、熔融炭酸塩形、固体酸化物

表 1 100 kW りん酸形燃料電池商品機の納入実績と稼動状況⁽¹⁾*

納入先	燃料	オーバーホール 周期時間 (h)	納入時期	累積運転 時間 (h)	運転状況	オーバーホール 実施状況	
病院	都市ガス (13A)	40,000	1998年8月	44,265	終了		
ホテル			1999年3月	91,568	終了	実施済	
大学			2000年4月	41,735	終了		
オフィスビル			2001年3月	42,666	終了		
オフィスビル			2001年3月	48,734	終了		
オフィスビル			2000年7月	64,117	運転中	実施済	
オフィスビル			2000年7月	48,269	運転中		
実証施設			バイオガス	2001年7月	10,952	終了	
研修施設			都市ガス (13A)	2001年12月	66,442	運転中	実施済
下水処理場			消化ガス	2002年3月	68,157	運転中	実施済
			2002年3月	68,391	運転中	実施済	
病院	都市ガス (13A)	40,000	2003年7月	58,160	運転中	実施済	
大学			2003年10月	49,731	運転中	実施済	
展示施設			2003年11月	53,199	運転中	実施済	
オフィスビル			2004年1月	51,486	運転中	実施済	
病院			2004年3月	48,825	運転中		
展示施設			2006年3月	34,646	運転中		
病院			2006年3月	32,155	運転中		
病院			2006年3月	32,377	運転中		
下水処理場			消化ガス	2006年12月	29,680	運転中	
					2006年12月	29,181	運転中
			2006年12月	29,068	運転中		
			2006年12月	29,198	運転中		
庁舎	都市ガス (13A)	60,000	2007年9月	20,633	運転中		
オフィスビル			2009年1月	10,700	運転中		

*稼動状況は2010年4月1日現在

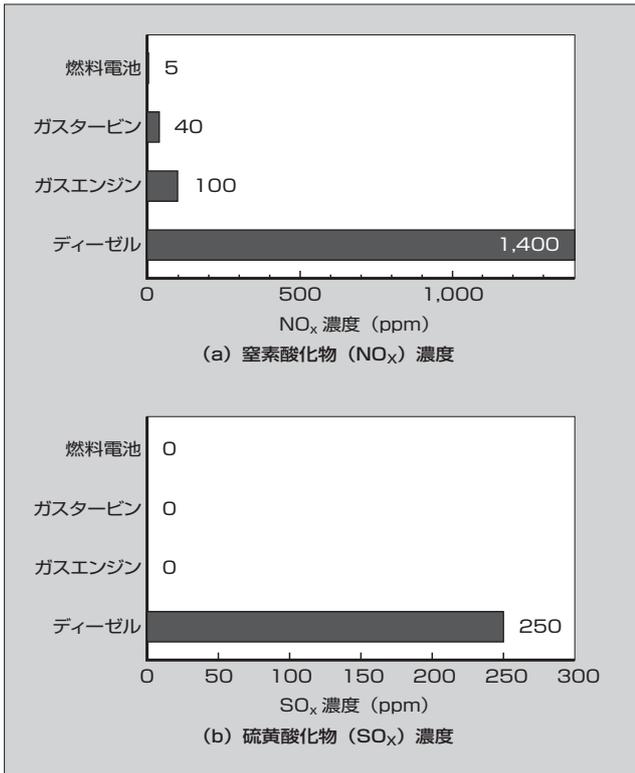
図 1 りん酸形燃料電池の発電効率とパターン運転のイメージ



形があり、動作温度、規模、用途などが異なる。この中で、最も早く商用化されたのはりん酸形である。富士電機の100 kW りん酸形燃料電池商品機の特徴を次に示す。

- 低出力から高出力まで発電効率が高い
 図1に示すように、部分負荷でも高い発電効率を維持して出力調整運転ができる。昼間は100 kWの定格で運転し、夜間など電気使用量が低減する場合は出力を下げる部分負荷運転といったパターン運転が可能である。
- 多様な燃料が利用可能
 発熱量の異なるLPガス、都市ガス、消化ガス、水素などさまざまな燃料ガスに対応できる。この特長を生かして燃料の切替えができ、災害時に都市ガスなどのライフラインが停止しても、備蓄してあるLPガスなどへ切り替えて運転が継続できる。
- 優れた環境性
 装置から排出されるガス中の窒素酸化物、硫黄酸化物は図2に示すようにほかの発電機よりも非常に少ない。また、化学反応で発電するため発電部に回転体がなく、さらにパッケージ内配置とパネル構造を工夫し、騒音を機側1mで65 dB(A)以下に抑えている。病院、ホテルなどの静けさが要求される施設にも容易に設置ができる。

図2 各種発電機の排ガス分析値



(4) 年間連続運転が可能

安定的な運転を継続するために、停止点検は年1回、それ以外にフィルタ交換などの定期的なメンテナンスは運転中に交換できるように設計しているため、1年間の連続運転が可能である。

4 普及型りん酸形燃料電池「FP-100i」の開発

りん酸形燃料電池を普及拡大させるためには、ユーザの利便性の向上、設置可能な環境条件の拡大などが必要であった。FP-100iの仕様を表2に示す。外観の特徴は、燃料電池導入による環境貢献や企業の社会的責任(CSR)向上のPR効果を狙い、一般の人たちにも見てもらえる場所に設置できるように、装置外周は吸気ダクトや排気ダクトの凹凸はなく、屋根上に設置された機器はフェンスで覆い、装置全体を直線的なデザインで仕上げている。色は茶系とホワイト系のツートンカラーとし、従来の発電装置の硬いイメージと異なり、周囲の建物や自然と調和できるようにやさしいイメージに仕上げた。FP-100iの外観を図3に示し、次に特徴を記す。

4.1 設置面積の削減と現地工事の簡素化

燃料電池は周辺設備として、排熱処理設備、窒素設備、水処理装置、熱利用設備、電気盤、中和器が必要である。従来それらはサイトで掘付け工事と配管、配線接続が行われていた。FP-100iではそれらを一体化し、設置面積の削減と現地工事の簡素化をした。メンテナンススペースを含めた必要な設置面積は75m²から43m²に削減した(図4)。

表2 「FP-100i」の仕様

定格出力	100kW AC
出力電圧	3φ3W, 210V/220V
周波数	50Hz/60Hz
発電効率	42% (LHV)* 発電端 (消化ガス: 40%)
熱出力 (右欄の①または②のどちらかを選択)	①高温排熱回収タイプ 50kW (90℃) 総合効率: 62% (LHV)*
	②中温排熱回収タイプ 123kW (60℃) 総合効率: 92% (LHV)*
排ガス	NO _x : 5ppm以下 (O ₂ 0%) SO _x , dust: 検出下限
燃料消費量	都市ガス: 22m ³ (Normal)/h [消化ガス: 44m ³ (Normal)/h]
運転方法	全自動運転, 系統連系, 単独運転
寸法	W2.2 × L5.6 × H3.4 (m)
質量	15t (消化ガス16t)

*低位発熱量 (LHV: Lower Heating Value): 240ページ「解説1」参照

図3 「FP-100i」の外観



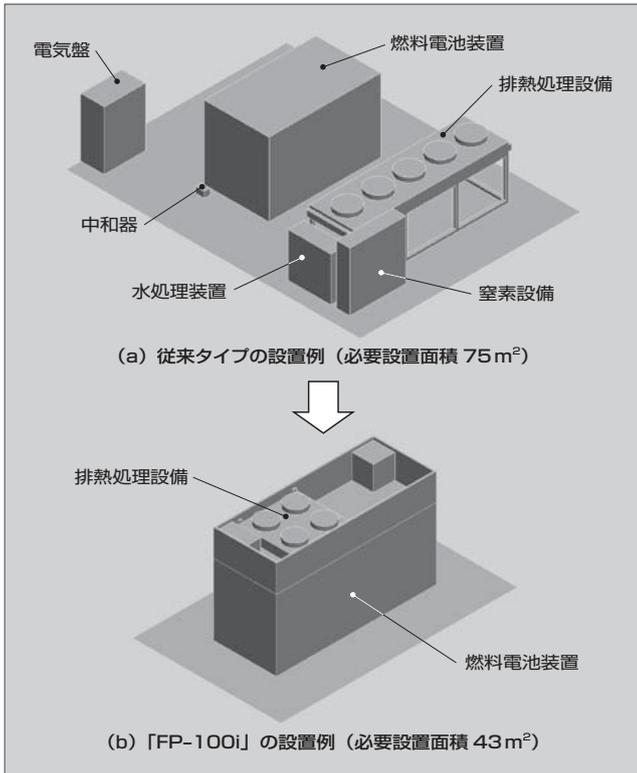
なお、装置の屋根に載せる排熱処理設備は、輸送制限から現地にて組立を行うが、配線接続のコネクタ化と、配管施工を2本に削減し現地工事の簡素化を図った。また、周辺設備を装置へ搭載するためには、各機器の小型、軽量化も図っている。その主な内容を次に記す。

(1) 排熱処理設備の軽量化

従来、排熱処理設備冷却器の冷却水は、装置内を循環するりん酸を若干含んだ冷却水であった。途中で熱交換器を設け、排熱処理設備の冷却水を装置内の冷却水と分離して、冷却水による腐食を防いだ。その結果、冷却器のチューブ材質をステンレス製から銅製へ変更でき、熱伝導率が向上した。さらに、冷却フィンのピッチの縮小化や筐体(きょうたい)構造に薄板板金構造を採用するなどし、冷却器質量を1,350kgから600kg(約1/2)に削減した。軽量化により冷却器を装置の屋根上に設置でき、一体化を実現した。

(2) 窒素ポンベの削減

図4 設置面積の削減と現地工事の簡素化



燃料電池は、装置の停止時に安全のために配管と機器内の可燃性ガスを窒素ガスにより置換する必要があるため、窒素設備を設けている。窒素ボンベ（7m³/本）は従来、1系列を3本とし、2系列計6本を設けていたが、可燃性ガスの置換時間の最適化により1系列を2本、2系列で計4本に削減し一体化した。削減のためには実機を用いて検証試験を行い、配管と機器内が窒素ガスに置換され十分に安全なガス濃度まで低下できることを確認している。

4.2 低温への対応

装置を設置する周囲温度条件は、従来-5℃から+40℃であった。FP-100iは装置内の換気方法と機器配置を見直し、-20℃から+40℃まで対応可能とした。これにより寒冷地での屋外設置が可能となった。

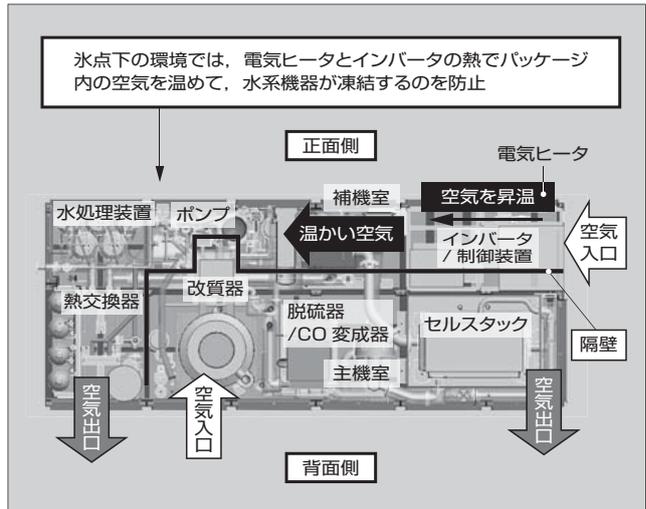
熱流体解析により、装置内の換気の流れと温度分布を解析し、換気流量と機器配置の最適化を図った。-20℃から+40℃までの温度の範囲で、支障なく装置が運転継続可能なことを実機にて確認した。具体的には、図5に示すようにインバータとポンプ、水処理装置、タンクなどの機器を設けた補機室と、セルスタックと改質系機器を設けた主機室を壁で分けた。さらに、補機室吸気口には、冬場の周囲温度が低いときのために電気ヒータを設け、電気品保護と水を扱う機器の凍結防止を図っている。

4.3 輸送への対応

燃料電池の海外での普及を図るためには海上輸送が必要となるので、次の二つの開発を行った。

(1) 輸送時の保温電源削除

図5 装置内配置と換気流れ



りん酸形燃料電池は、セルスタックの電解質にりん酸を使っている。高濃度のりん酸は常温にて凍結するため、従来、輸送中は発電機などにより電気を供給し電気ヒータで保温していた。船の輸送では保温が困難なため、保温を不要とする必要がある。そこで輸送中のりん酸濃度を下げること凍結を防止する方法を開発した。この方法を実機にて検証し、保温なしの輸送を可能とした。

(2) 緩衝装置の開発

燃料電池装置は1Gの輸送振動に耐えるように、1Gで設計している。しかし、港湾で船へ積み込むクレーン作業などでは、1G以上の衝撃が加わる可能性がある。そのため、輸送中は装置下部に緩衝装置を取り付けることで、3Gまでの衝撃にも耐えられるようにした。

4.4 耐震性の向上

耐震性の向上を図るため、計画段階から装置架台とスタックの強度解析を実施し設計へ反映させた。さらに、実機を振動試験機に搭載し、新潟中越地震相当の実際の地震波による振動試験を行い、振動試験完了後に装置は問題なく発電できることを確認した。

5 今後の展開

富士電機のりん酸形燃料電池は、従来、都市ガスを燃料とするコージェネレーション用途がほとんどであったが、燃料電池の燃料源が水素である特性を生かし、新たな用途開発を進めている。図6に用途拡大の説明図を、その主な内容を次に記す。

5.1 純水素、副生水素（製油所、化学工場副生ガス）利用燃料電池

純水素、副生水素利用燃料電池は、燃料の改質を必要とせず、水素を直接供給し発電する装置である。苛性（かせい）ソーダ工場などから発生する純水素（99.9%の高濃度水素）を燃料とする場合、より高い発電効率システムを構

図6 りん酸形燃料電池の用途拡大⁽²⁾

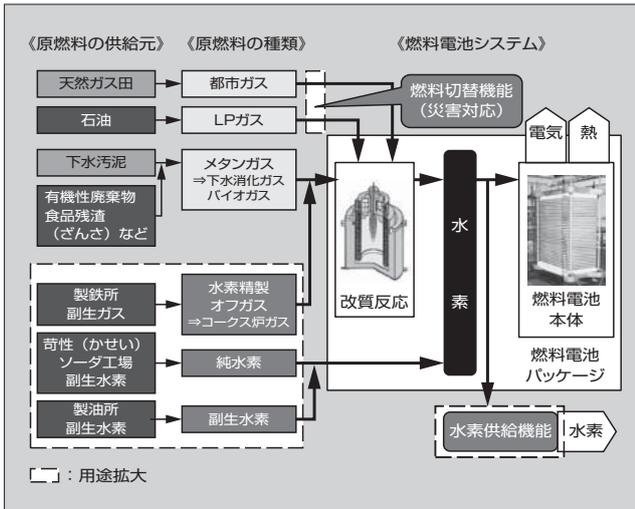
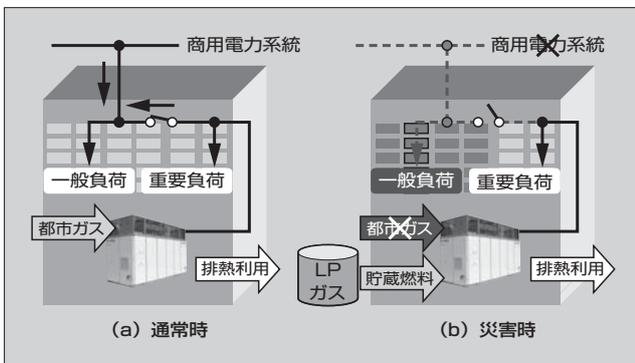


図7 通常時と災害時の電源供給方法⁽²⁾



築することができる。その理由は、燃料電池から出てきた排水素はそのまま排気せず、燃料電池本体入口に戻して再利用（リサイクル方式）し、高い水素利用率を実現できるからである。最大48%（発電端）の高発電効率システムを構築することができ、純水素をボイラ利用する場合と比較しCO₂削減効果は1.6倍もある。

5.2 災害対応機能付き燃料電池

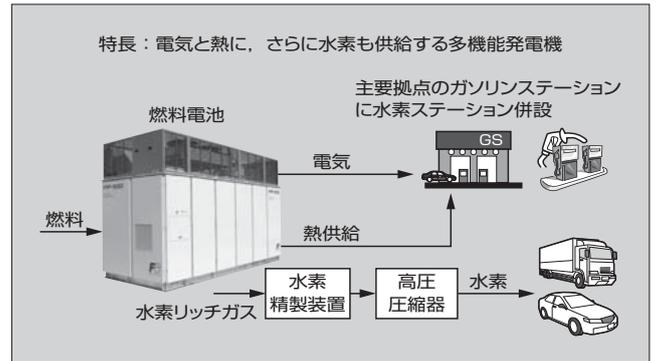
災害などで電気や都市ガスが遮断された場合、非常用発電機で電力を供給するのが一般的である。防災拠点などに災害対応機能付きりん酸形燃料電池を導入すれば、通常は電力と熱を供給し、災害時も燃料を都市ガスから備蓄LPガスに切り替えて発電が継続でき電力と熱の供給が可能である。

LPガスの発熱量は都市ガスの発熱量の約2倍であるため、水素をつくる改質条件が異なるものの、りん酸形燃料電池は燃料改質系で、いったん水素に改質して発電するため、停止することなく発電を継続できる。なお、LPガスの運転では、出力は70kWとなり、50kgボンベで約3時間の給電が可能である。図7に通常時と災害時の電源供給方法を示す。

5.3 水素供給機能付き燃料電池

水素供給機能付き燃料電池は、電気と熱に加え、水素供

図8 水素供給機能付き燃料電池



給もできるトリジェネレーションが可能な装置である。昼間はコージェネレーションで電気と熱を利用し、負荷が少ない夜間には発電出力は下げ、余っている水素製造能力により水素ガスを取り出し、供給できる。燃料電池車に必要な水素ステーション、小容量の水素が必要な事業所などへ適用が可能である。図8に概略図を示す。

6 あとがき

燃料電池は、地球温暖化防止と地球環境の保護に貢献する装置であるため、普及拡大させることが社会貢献へとつながる。本格的に普及させるためさらなる用途拡大とユーザメリットの向上を推進していく所存である。

これまでの関係機関およびユーザ各位のご指導、ご協力に感謝するとともに、今後ともなおいっそうのご理解とご支援をお願いするものである。

参考文献

- (1) 腰一昭ほか. りん酸形燃料電池の現状と今後の展開. 富士時報. 2008, vol.81, no.3, p.198-202.
- (2) 堀内義実ほか. “りん酸形燃料電池の普及について”. 第16回燃料電池シンポジウム講演予稿集. 燃料電池開発情報センター. 2009, p.163-166.



長谷川 雅一

燃料電池発電装置の装置開発および設計業務に従事。現在、富士電機システムズ株式会社環境ソリューション本部産業ソリューション事業部千葉工場燃料電池部。



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、富士電機システムズ株式会社環境ソリューション本部産業ソリューション事業部千葉工場燃料電池部課長。電気学会会員。

下水汚泥消化ガスを利用した燃料電池

Fuel Cell that Utilizes Sewage Sludge Digestion Gas

福村 琢 Taku Fukumura

黒田 健一 Kenichi Kuroda

富士電機は、下水汚泥消化ガスを燃料とする 100 kW リン酸形燃料電池の商品機を計 6 台納入し、良好な運転実績と導入効果を得た。山形市浄化センターでは、累積運転時間も当初の開発目標寿命（4 万時間）を超え、下水汚泥消化ガスにおけるリン酸形燃料電池の長期間の信頼性・耐久性、導入効果を実証した。熊本北部浄化センターでは、再生可能エネルギーである下水汚泥消化ガスの電力価値をグリーン電力証書として売却し、注目を集めている。国内外の拡販展開に向けて、標準化設計と高効率化、海外認証の取得を進め、市場性を高めていく予定である。

Fuji Electric has delivered a total of six 100 kW phosphoric acid fuel cell units that utilize sewage sludge digestion gas as fuel, and has achieved a good operating track record and introduction effect. At the Yamagata Purification Center, the cumulative operating time has exceeded the initial development target lifetime of 40,000 hours and the long-term reliability, durability and introduction effect of phosphoric acid fuel cells in sewage sludge digestion gas has been verified. At the Kumamoto Hokubu Purification Center, the sale, as tradable green certificates, of the power value of the renewable energy source of sewage sludge digestion gas is attracting attention. To expand sales both in Japan and overseas, Fuji plans to enhance the marketability of this fuel cell by moving ahead with efforts to standardize designs, improve efficiency and acquire overseas certifications.

① まえがき

近年、地球温暖化を防止するための、循環型社会への転換や低炭素社会の構築に向けた法整備や技術開発が進められている。環境調和型の石油代替エネルギー資源として、再生可能エネルギーが注目を集めている。その中でバイオマスエネルギーは、将来的に世界レベルで大量に導入されるといわれている。

日本では、大量に廃棄されている廃木材、木くず、汚泥、生ごみ、廃棄食用油、畜産廃棄物などの“廃棄物バイオマス”の利用が、地球温暖化防止も含めた環境対策の面で有益であると期待されている。

富士電機では、1999 年からメタン発酵ガスによるリン酸形燃料電池の適用開発に着手し、良好な運転結果を得てきた。これをもとに、下水汚泥消化ガスに適用した 100 kW リン酸形燃料電池を 2002 年 3 月に山形市浄化センターへ納入し、2006 年 12 月には熊本北部浄化センターへ納入した。

本稿では良好な運転結果を得た導入サイトの稼働実績、導入効果などを紹介する。

② 下水消化ガスを利用した燃料電池発電

下水処理場は各家庭から出た生活排水などを集め、水の汚れを表す指標である生物化学的酸素要求量（BOD：Biochemical Oxygen Demand）を 1/10～1/20 程度にまで低減し、川や海に返す施設である。下水や汚泥の処理に伴い大量のエネルギーを消費するため、全国の下水処理場で使用する電力は日本の総電力使用量の約 0.7% に相当する。地球温暖化防止のためにも、下水処理における電力のクリーン化が大きな課題となっている⁽¹⁾。

下水処理場では公共水域の水質保全のため、川や海へ流れ込む汚濁物質の量を減らしている。汚水をきれいにしている際に取り除いた汚れは、下水汚泥と呼ばれる。この下水汚泥を減量化・安定化するため、酸素がない状態で有機物を分解処理する嫌気性消化処理を行うと、メタンガスを主成分とする大量の下水汚泥消化ガスが発生する。

現在、下水汚泥の嫌気性消化処理は国内の下水処理場のうち、約 260 施設で行われている。総発生量が約 2.6 億 m³/年になる消化ガスは、汚泥消化槽（消化タンク）の加温や消化ガス発電、汚泥燃焼の補助燃料に利用されている⁽²⁾。近年は、発電効率や環境面で優れている燃料電池発電の導入が進んできている。

消化ガスの主成分は、CH₄（メタン）60%、CO₂ 40% である。低位発熱量（LHV：Lower Heating Value）（240 ページ「解説 1」参照）は、約 22.5 MJ/m³（Normal）と都市ガスの約半分である。不純物として硫化水素、シロキサン、アンモニアなどを含んでいる。これらは燃料電池で使用している触媒を被毒するため、硫化水素を除去する脱硫塔やシロキサンやアンモニアなどを活性炭で除去する前処理装置を設け、あらかじめ除去する必要がある。

また、消化ガスは季節や人口変動の影響を受ける。実運転では CH₄ 濃度の変動（55～65% 程度）がある。燃料電池は、CH₄ 濃度変動に伴う燃料電池システム内の温度の変化をとらえて、制御定数を自動的に変更し、変動後も安定した運転が継続できるという従来のガスエンジンにはない優れた特徴を持っている。

③ 山形市浄化センターでの運転実績

(1) システム概要

山形市浄化センター（図 1）は敷地面積 7.74 ha、処理人

口 69,000 人の下水処理場である。1 日最大 3,800 m³ の消化ガスを発生させている。

100 kW 燃料電池 2 台と 178 kW ガスエンジン 1 台でシステムを構成している。燃料電池 2 台は、ベースロード用として 24 時間 100% 負荷で運転している。ガスエンジンはピークカット用として主に昼間運転している。燃料電池の排熱は、消化タンクの加温に利用している。

図 2 に山形市浄化センターにおける燃料電池発電設備 (100 kW × 2 台) のシステムフローを、表 1 に燃料電池発電設備の仕様を示す。

(2) 運用実績と導入効果

山形市浄化センターの消費電力は約 1,000 kW であり、2 台の 100 kW リン酸形燃料電池とガスエンジンを合わせて約 40 ~ 50% を負担している⁽³⁾。2002 年 3 月に運転を開始した。運転時間 44,000 時間を経過した時点で装置内の主機 (セルスタック、改質器など) のオーバーホールを実施した。現在 68,000 時間を経て安定運転を継続中である。

2002 年には第 7 回新エネ大賞“新エネルギー財団会長賞”を受賞し、燃料電池を用いた下水処理場のコージェネ

レーションによるエネルギーの有効利用が可能であることが周知となった。図 3 に、年間稼働実績 (2002 ~ 2009 年度) を示す。8 か年にわたり、燃料電池は約 97% と高い稼働率で運転を継続している。同時に所内消費電力の約 24 ~ 32% は燃料電池によって安定的に賄っていることが分かる。

また、同図に所内買電量と燃料電池による電力供給率 (所内消費電力量に対する燃料電池の発電量の割合) を示す。2006 年度から所内買電量が減少する傾向を示している。燃料電池の安定運転の実績から、燃料電池の高出力を維持したベース運転とガスエンジンによるピークカット運転とすることで、所内買電量の低減と契約電力の削減を図ることができた⁽⁴⁾。さらに、2006 年度からの燃料電池の発電量の上昇は、燃料電池の高出力・高稼働率を維持するよ

表 1 山形市浄化センターにおける燃料電池発電設備の仕様

項目	仕様
定格出力	100 kW (送電端)
出力電圧・周波数	210V, 50Hz
発電効率	38% (定格時, 送電端, LHV*)
総合効率	87% (定格時, LHV*)
原燃料	消化ガス [CH ₄ (メタン) 60%, CO ₂ 40%]
消費量	45 m ³ (Normal)/h
運転形態	全自動運転・系統連系
熱効率	20% (90℃温水) 29% (50℃温水)
排ガス	NO _x : 5 ppm 以下, SO _x : 検出限界以下
騒音特性	65 dB(A) (機側 1 m 平均値)
代表寸法	W2.2 × L4.1 × H2.5 (m)
質量	12 t

*低位発熱量 (LHV: Lower Heating Value): 240 ページ「解説 1」参照

図 1 山形市浄化センターにおける燃料電池発電設備の設置場所

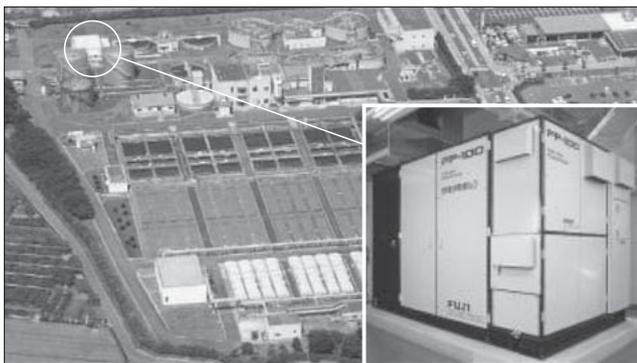
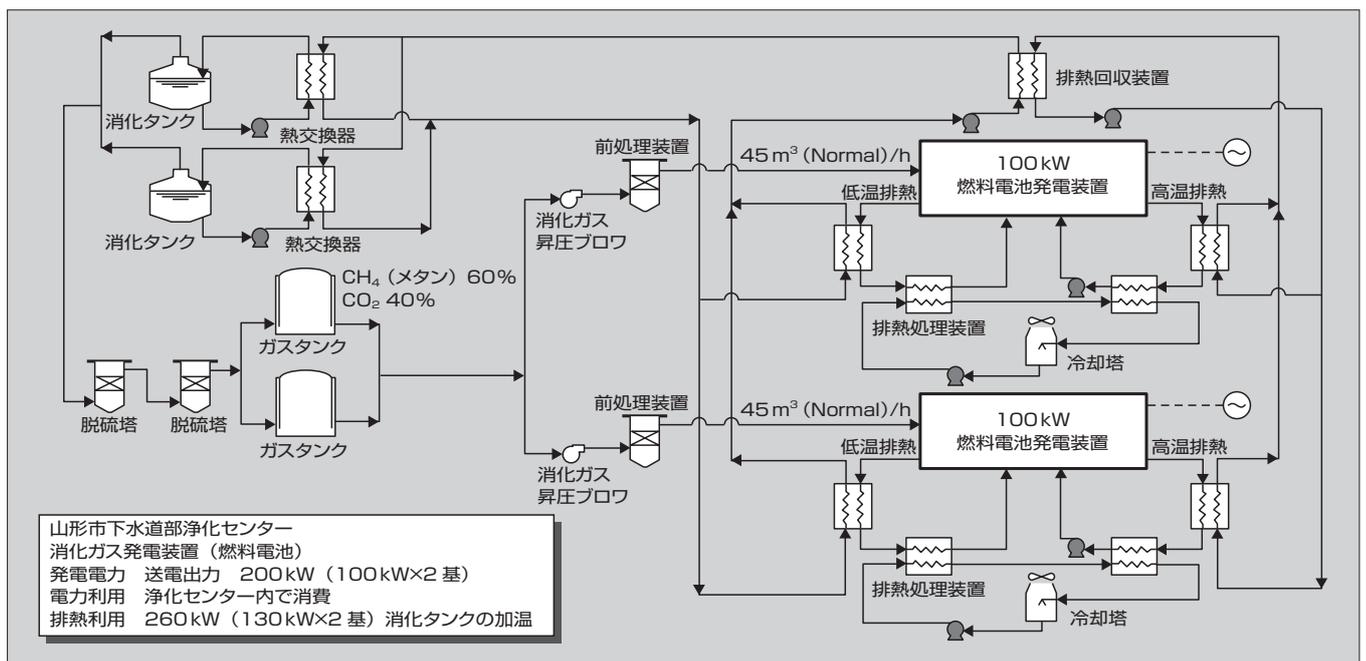


図 2 山形市浄化センターにおける燃料電池発電設備 (100 kW × 2 台) のシステムフロー



う顧客側で積極的に運転管理したことによる。⁽⁴⁾

(3) CO₂ 排出量削減効果

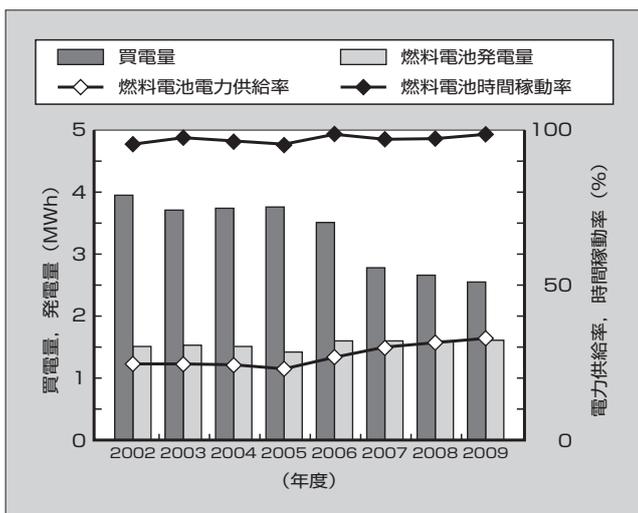
石油や天然ガスなどと異なり、下水汚泥や有機性廃棄物の嫌気性発酵によって生じる消化ガスやバイオガスは、燃料とする場合でも大気中のCO₂を増やさないため、今後いっそうその利用が加速すると期待される。

2008年度実績における燃料電池発電による発電量1,601,320 kWh/年と排熱利用量1,003,121 kWh/年（燃料電池の排熱によるCO₂換算値はボイラ燃料をA重油にした場合として算出）を元に、CO₂排出量削減効果を計算すると約940t-CO₂/年となった。これを森林（スギ）樹木に換算すると約67,000本分の年間二酸化炭素吸収量に相当する。

このように、燃料電池の安定運転実績と、燃料電池の優れた特長を生かした高出力運転と高稼働率を維持する顧客側の積極的な運転管理によって、所内買電量の低減とCO₂排出量削減に大きく貢献することができた。

また、8か年の運転実績から、りん酸形燃料電池はガス組成が不安定な下水汚泥消化ガスでも長期間にわたり安定して稼働できることを実証した。

図3 山形市浄化センター年間稼働実績（2002～2009年度）



4 熊本北部浄化センターでの運転実績

(1) システム概要

熊本県は、循環型社会をつくるために「バイオマス利活用の推進、新エネルギー対策」を重要施策として位置付けている。熊本北部浄化センターは、熊本市のベッドタウンとして市街化が進んでいる熊本市北東部に位置し、熊本市を含む4,146ha、約21万人の区域を対象としている。嫌気性消化処理を行っており、消化ガス発生量は平均4,200m³/日である⁽¹⁾。従来、消化ガスは消化タンクの加温熱源としてボイラなどで一部利用され、残りは焼却処分されていた。この未利用な消化ガスを有効利用するため、消化ガス量のすべてを高効率で環境負荷が低いりん酸形燃料電池での発電に活用し、同浄化センターの年間所内消費電力の約半分に相当する約3,000MWh（所内全電力量約6,000MWh/年）を消化ガス発電で賄うこととした。図4に燃料電池発電設備設置外観を示す。

運転方法は逆潮のない系統連系である。100kWのりん酸形燃料電池を4台稼働させ、所内消費電力、ガスホルダ

図4 熊本北部浄化センターにおける燃料電池発電設備設置外観



図5 熊本北部浄化センターにおける燃料電池発電設備の概略システムフロー

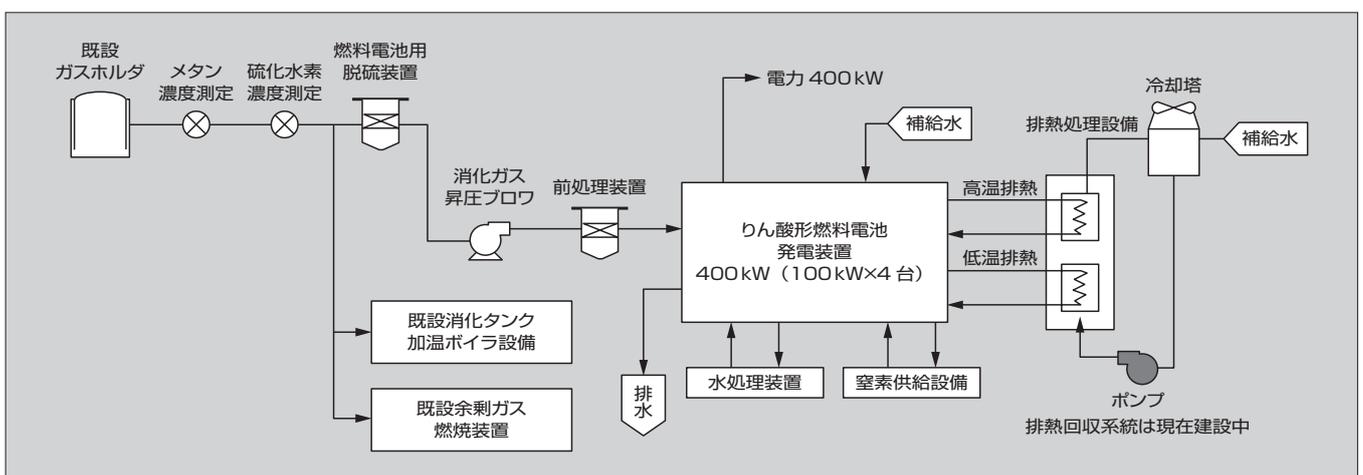
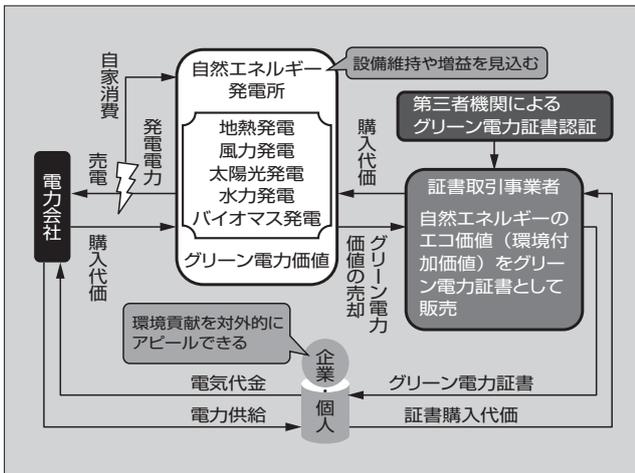


図6 グリーン電力証書取引の仕組み



貯留量に応じて発電電力制御（負荷追従運転）を行っている。図5に熊本北部浄化センターにおける燃料電池発電設備の概略システムフローを示す。燃料電池反応で発生する排熱を、現在、消化タンクの加温に有効利用するため、排熱回収系統の設備を建設している。

(2) 運用事例と導入効果

燃料電池発電設備（100kW×4台）は2006年12月に運転を開始した。2010年3月末には29,000時間が経過し、安定運転を継続している。2008年度の燃料電池4台の発電量は、年間約286万kWhであり、同浄化センター内の年間所内消費電力の46%分を賄っている⁽¹⁾。

(3) CO₂排出量削減効果

消化ガス発電によるCO₂排出量削減効果は、2008年度の発電にて約1,487t-CO₂/年になる。その量は森林（スギ）の樹木換算値とすると、約110,000本分の年間CO₂吸収量に相当する。

なお、現在建設中の排熱回収系統が完成すると、CO₂排出量削減効果がさらに高まる。

(4) グリーン電力証書

消化ガスは再生利用可能なエネルギーであるため、生み出された電力はCO₂削減や化石燃料の使用量削減といった“グリーン電力価値”（環境付加価値）を持っている。同時に生み出された電気そのものと切り離して、グリーン電力証書として取引することができる。図6にグリーン電力証書取引の仕組みを示す。

グリーン電力の発電設備を持たない企業や個人といった電力需要家は、この証書を購入することにより、使用する電力を“グリーン電力”と見なすことができ、環境対策に貢献できる。また、水力、風力、太陽光、バイオマス、地熱などの自然エネルギー発電所は、グリーン電力価値を売却することで増益を期待することができる。

熊本県では、熊本北部浄化センターの下水汚泥の処理過程で発生する消化ガスで発電する年間約250万kWh分のグリーン電力価値を、2009年2月に株式会社九電工に一括売却した⁽¹⁾。地方公共団体がグリーン電力価値を公募によって売却するのは初めての試みであり、多方面より注目

を集めている。なお、発電電力は従来どおり熊本北部浄化センターの所内にて全量を使用している。

5 今後の展開

2020年までにCO₂排出量を1990年比の25%を削減するという日本が提示した国際公約は、発電所やビルの省エネルギーや高効率なエネルギー利用、再生可能エネルギーの利用や活用を徹底的に行わなければ達成不可能である。再生可能エネルギーの有効利用とCO₂排出量削減のため、今後は下水汚泥消化ガスを利用する燃料電池が、前述したりん酸形燃料電池の導入実績・導入効果を基に普及していくものと予想される。

また、現在大量に廃棄されている生ごみ、汚泥、廃棄食用油、畜産廃棄物などの“廃棄物バイオマス”を利用した燃料電池は、環境負荷が低い技術であるため、今後の普及拡大が望まれている。

さらに、海外におけるバイオマス市場に目を向けると、未開拓エリアが多数存在することが分かっている。

今後は、日本国内だけでなく海外への展開も加速するため、標準化設計や燃料電池の高効率化に向けて最適設計を進めていくとともに、海外認証の取得や海外メンテナンス体制強化を図り、富士電機のりん酸形燃料電池の市場性を高めていく予定である。

6 あとがき

富士電機は、長年培った燃料電池技術とりん酸形燃料電池の特長を生かした適用用途の拡大とユーザメリットの向上を推進し、地球温暖化防止および環境保護に貢献するために努力していく所存である。

これまでの関係機関およびユーザ各位のご指導・ご協力に感謝するとともに、今後ともご理解とご支援をお願いするものである。

参考文献

- (1) 緒方和則. 熊本北部浄化センターでの下水汚泥バイオガス発電. クリーンエネルギー. 2010, vol.19, no.1, p.11-14.
- (2) 久保田康幹ほか. バイオマスエネルギー利用の燃料電池の現状と展望. 富士時報. 2002, vol.75, no.5, p.295-298.
- (3) 腰一昭ほか. りん酸形燃料電池の現状と今後の展開. 富士時報. 2008, vol.81, no.3, p.198-202.
- (4) 遠藤直樹. バイオガスを用いたコージェネレーションシステム稼働実績. クリーンエネルギー. 2010, vol.19, no.1, p.15-20.

特集



福村 琢

新エネルギーおよび燃料電池発電プラントの設計に従事。現在、富士電機システムズ株式会社環境ソリューション本部産業ソリューション事業部千葉工場燃料電池部主務。



黒田 健一

燃料電池プラントエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機システムズ株式会社環境ソリューション本部産業ソリューション事業部千葉工場燃料電池部主査。



フィルム型アモルファス太陽電池の高出力化技術

High Output Power Technology for Film Substrate Amorphous Solar Cells

藤掛 伸二 Shinji Fujikake

佐藤 広喜 Hiroki Sato

新型フィルム型アモルファス太陽電池を、2010年1月に熊本工場生産開始した。この太陽電池は、従来型に比べて出力を約2割向上させた。高出力化するために、製造装置や製造条件を見直して、セル面積の拡大や無効領域を縮小して発電領域を拡大した。さらには、電極などのパターンを最適化して集電性を改善した。出力電圧を従来の約半分の157Vに低下させることで、各種パワーコンディショナへの適合性も向上させた。また、熊本工場生産した太陽電池を工場内の屋根に取り付けた。8か月間の発電特性は良好で、規格化発電効率率は0.98と高い実績値を示した。

Production of Fuji Electric's new model of film substrate solar cell began in January 2010 at Fuji Electric's Kumamoto factory. This cell is improved in output power by about 20 percent compared to the existing model. To increase the output power, Fuji reviewed the manufacturing equipment and manufacturing conditions to enlarge the cell area, reduce the size of the ineffective area, and enlarge the power generating area. Additionally, Fuji optimized electrode and other patterns to improve the current collecting performance. By decreasing the output voltage to 157 V, which is approximately half of that of existing models, the adaptability to various power conditioners is improved. Also, the solar cells produced at the Kumamoto factory were installed on a building roof at the factory. Over the past 8 months, good power generating performance has been realized, and the normalized generating efficiency of 0.98 indicates a high record of accomplishment.

1 まえがき

太陽光発電用の太陽電池市場の急速な拡大が続いている。2008年の世界の太陽電池生産量は6.9GWに達している。特に、薄膜シリコンやCdTe, CIGSなどの薄膜太陽電池がシェアを伸ばしつつある。

富士電機は、2006年11月に熊本県に太陽電池量産工場を建設し、2007年4月に本格生産を開始した。「FWAVE」という名称の太陽電池は、プラスチックフィルム基板を用いたアモルファスシリコン系太陽電池であり、次のような特徴を持っている。

- (a) 発電層が1 μm 以下の薄膜なので、シリコン原料の使用量が抑えられる。
- (b) セル製造工程は一貫したロールツーロールプロセスであるため、生産性が高い。
- (c) 1枚のフィルム基板内に直列接続構造を作り込めるため、高電圧が得られる。

(d) 軽量、フレキシブルといった特徴のあるモジュールが実現できる。

フィルム型アモルファス太陽電池をより広く普及させていくためには、性能による差別化およびワット単価の低減を目的としたさらなる高出力化や、魅力あるモジュールなどの技術開発が必要不可欠である。本稿では、2010年1月に生産を開始した新型フィルム型アモルファス太陽電池における出力向上の取組みについて紹介する。併せて、熊本工場生産した太陽電池の屋外発電特性についても紹介する。

2 新型フィルム型アモルファス太陽電池

2.1 太陽電池の構造と開発の狙い

富士電機のフィルム型アモルファス太陽電池のデバイス構造を図1に示す。フィルム基板の上に、バンドギャップが異なるa-Siセルとa-SiGeセルを積層した二層タンデム構造を採用している。ナローギャップ材料であるa-SiGeを

図1 フィルム型アモルファス太陽電池の構造

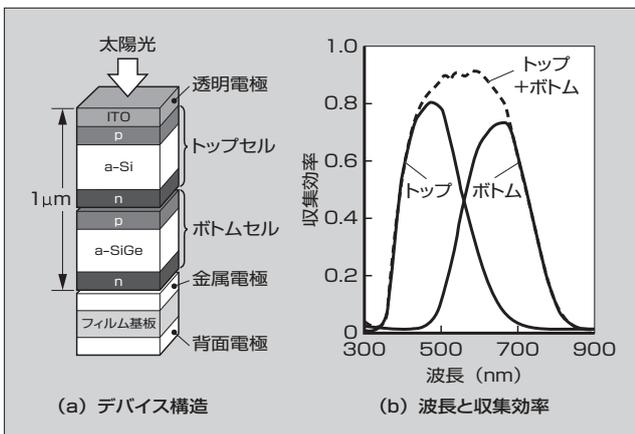
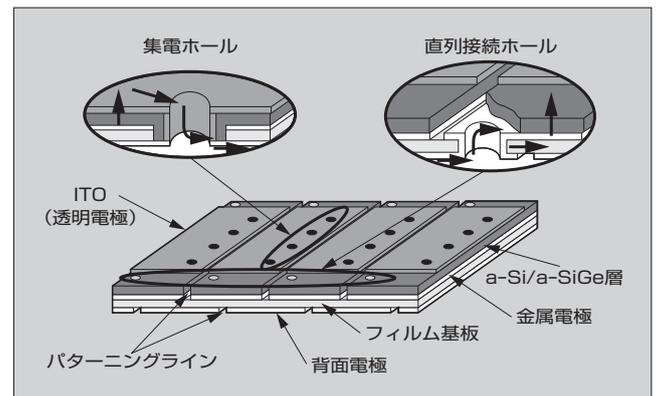


図2 SCAF構造太陽電池の概念図



ボトムセルに適用することで長波長感度が向上し、a-Siセル単独のときよりも約1~2割高い出力が得られる。

直列接続構造としては、図2に示すSCAF (Series-Connection through Apertures formed on Film) と名付けた独自の構造を採用している。耐熱性のプラスチックフィルム基板を挟んでサブストレート型セルと背面電極を両面に形成し、レーザーで分割している。直列接続は2種類のホールにより行い、集電ホールで集めた電流を背面電極で収集し、直列ホールでユニットセル間の接続を行う。この構造を採用することでインバータ接続に、最適な高電圧を容易に得ることができる。

今回の新型フィルム型アモルファス太陽電池の開発では、こうした基本構造をそのまま維持し、発電面積の拡大やパターン最適化により高出力化を追及した。併せて、より使い勝手の良いモジュールを目指し、出力電圧の変更も行った。

2.2 太陽電池の仕様と開発

富士電機のフィルム型アモルファス太陽電池のモジュールの一つには、フレキシブルモジュールがある。図3にその外観を示す。表1は標準サイズのフレキシブルモジュールを例にとり、従来型と新型のモジュールの仕様を比較したものである。新型のモジュールでは従来型に比べて約20%出力を向上させている。次にその開発内容を示す。

(1) セル発電領域の拡大

現行のプロセス装置の改良により、成膜の均一性を確保し、有効成膜領域を約8%広げた。さらに、マスク領域やレーザーパターニングラインなどの発電に寄与しない無効領域を縮小した。これら二つの効果を合わせて、セルの発電領域を約11%拡大することができた。なお、表1に示すとおり、新型ではセルサイズ変更によりモジュールの長手方向寸法が約8%長くなっている。

(2) 直列段数の変更

富士電機のフィルム型アモルファス太陽電池は、1章でも述べたように直列接続構造により高電圧を得られるというメリットがある。従来型のモジュールは、パワーコンディショナに直結することを狙って表1に示すように動作電圧を高く設定した。一方で、電圧仕様が異なる各種PCに対応することが難しくなるという問題があった。そこで、

国内外の各種パワーコンディショナの仕様を調査し、電圧の違いに対しては太陽電池モジュールの外部直列接続数で対応するように変更した。新型のモジュールは、表1に示すように動作電圧は従来型の約半分である。これにより、各種パワーコンディショナに対応できるようになった。この場合、太陽電池モジュールの直列接続数の代表的な値は、国内家庭用が1直、国内産業用が2直、海外産業用が3直である。

(3) パターン最適設計

新型フィルム型アモルファス太陽電池では、セル面積拡大および直列段数の変更の影響で、ユニットセルの幅がこれまでの12mmから27mmに広がっている。この変更に合わせて直列接続パターンも再設計した。

フィルム基板では、前述のとおり、SCAF構造と名付けた直列接続構造を採用している。この構造は、図2から分かるとおり、透明電極の集電一つをとっても、電位分布は集電ホール近傍では極座標的、分割ライン近傍では矩形(くけい)的というように、ガラス基板セルに比べると複雑である。これまでは、二つの座標系を組み合わせた分布定数回路によるシミュレーションを行っていたが、より高精度な有限要素法(FEM)によるSCAF構造太陽電池のシミュレーション技術を開発した。

図4に、従来型および新型のユニットセルのFEMによる解析結果を示す。図中の電極は、図2に示した3種類の電極(透明電極、金属電極、背面電極)に対応し、それぞれの電位分布を色で視覚化している。これらの電極は、スルーホールでつながっているため、理想的には同電位(0V)である。しかしながら、実際には透明電極などでの抵抗ロスがあるため、最大0.2~0.3Vの電位差が発生している。

新型フィルム型アモルファス太陽電池では、ユニットセルの短辺幅を広くして電流が大きくなっているため、直列ホールの数を片側1個から3個に増やした。また、集電ホールも1列から3列に変更した。集電ホールの面密度は従来の約1.4倍に増加し、集電性向上に対応して、新型の方が透明電極上の電位分布が小さくなっていることが分かる。また、集電ホールの配列については、長手方向や幅方向のピッチをパラメータとした検討を実施した。図5は検

図3 フレキシブル太陽電池モジュールの外観



表1 標準サイズのフレキシブルモジュールの仕様比較

	従来型	新型
セル内直列段数	68直列	33直列
モジュール内接続	4直列	4直列
公称最大出力(W)	90	110
公称最適動作電圧(V)	316.9	157
公称最適動作電流(A)	0.284	0.702
公称開放電圧(V)	429	212
公称短絡電流(A)	0.389	0.88
寸法(mm)	460 × 3,399	460 × 3,687
厚さ(mm)	1	1

図 4 従来型および新型太陽電池のユニットセルの FEM による解析

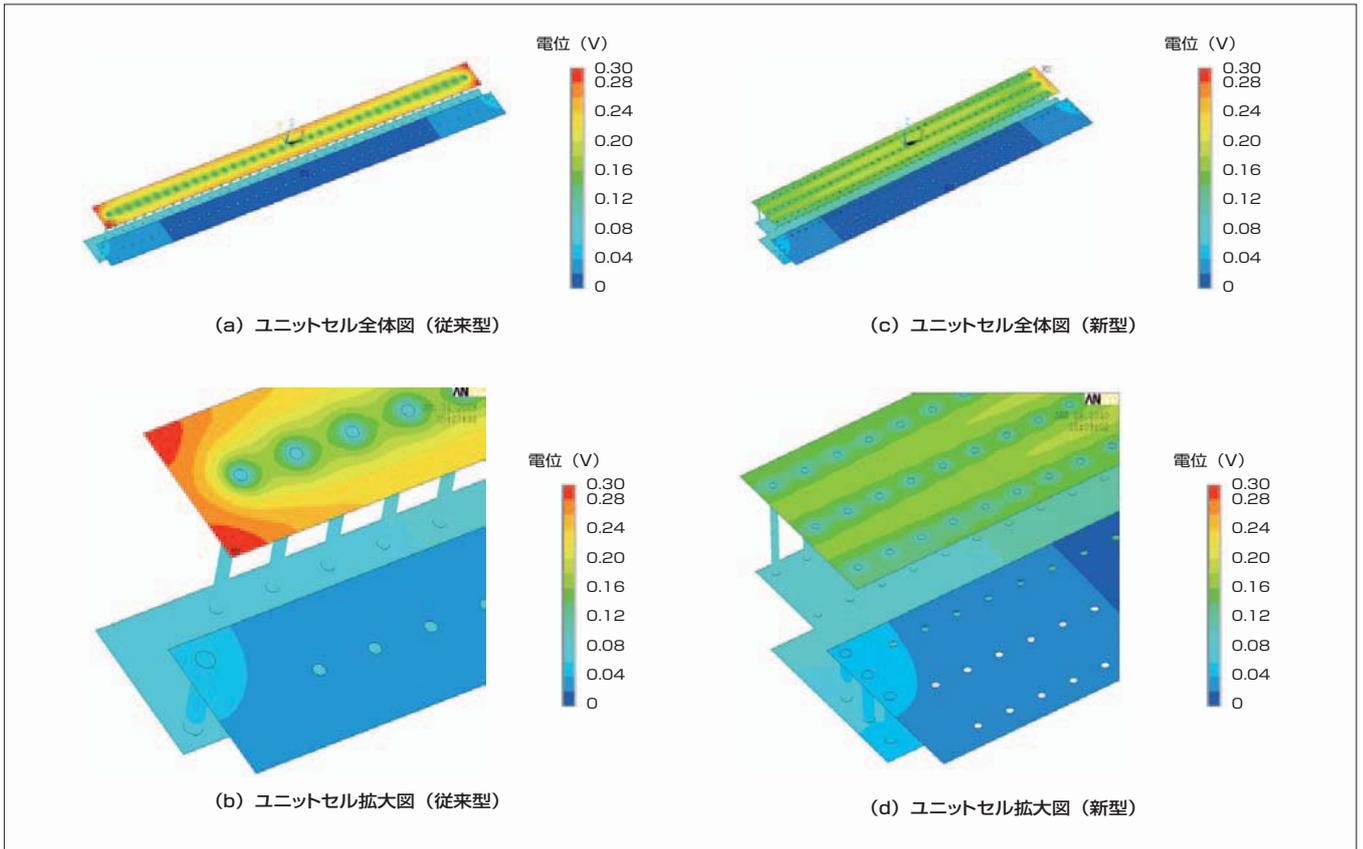
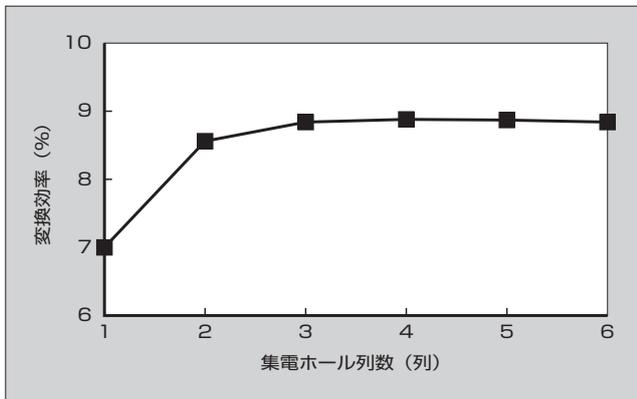


図 5 集電ホール列数と変換効率の関係

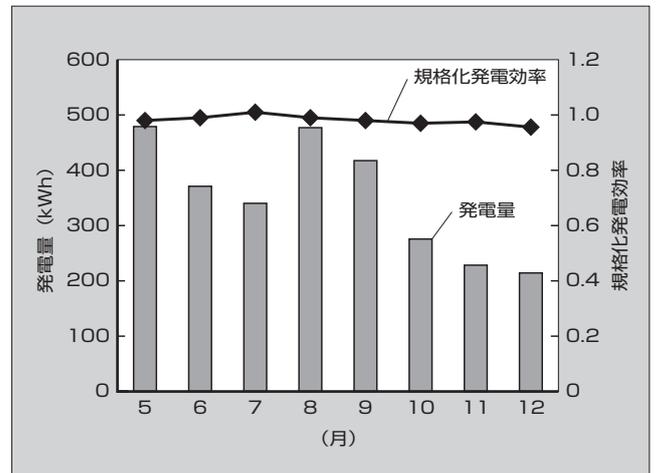


討結果の一例であり、変換効率 10% の小面積セルをもとにシミュレーションした集電ホールの列数とユニットセル変換効率の関係である。この結果から、列数 3 以上で変換効率はほぼ一定になると考えられる。実際に列数を変えたセルの試作を行い、同様な結果が得られたことから集電ホール数は 3 列に決定した。

③ フィルム型アモルファス太陽電池の屋外発電特性

熊本工場で生産したフィルム型アモルファス太陽電池の屋外発電性能を評価するため、工場内の屋根にモジュールを設置して発電量を評価した。

図 6 熊本工場で生産した太陽電池モジュールの発電特性



評価に用いたのは、定格電力 22.5 W の横葺 (ぶ) き鋼板タイプのモジュールである。このモジュール 126 枚でアレイを構成し、2009 年 5 月から発電量を評価した。図 6 に発電量および規格化発電効率 (240 ページ「解説 2」参照) の月変化を示す。ここで、発電量は直流であり、実際に電力として利用できる交流発電量は、この値にパワーコンディショナの効率 93% を掛けた値である。また、規格化発電効率は発電効率と定格変換効率の比であり、屋外での発電性能の指標となる。通常の結晶シリコン太陽電池を例にとると、規格化発電効率は年間平均で 0.8 ~ 0.85 程度である。これに対し、図 6 の結果では、規格化発電効率は

1 付近にあり、8 か月間の平均は 0.98 となり、結晶シリコン太陽電池よりも優れた値である。今後、光劣化による若干の低下は考えられるが、過去に実施した長期屋外暴露試験の結果から 0.95 程度で安定化すると考えられる⁽³⁾。したがって、熊本工場で生産したフィルム型アモルファス太陽電池の屋外発電性能は良好であると結論できる。屋外発電特性が優れている原因は、主に温度依存性および照度依存性の双方が結晶シリコン太陽電池よりも優れているためと考えられる。

②章で述べた新型フィルム型アモルファス太陽電池の屋外発電特性については、各種太陽電池モジュールとの比較を開始したところである。一方で、屋外発電特性に影響を及ぼすと考えられる分光感度、変換効率の温度依存性や照度依存性についての評価を完了し、それぞれ従来型のセルとほぼ同じであることを確認した。したがって、新型フィルム型アモルファス太陽電池についても良好な発電特性が得られるものと考えられ、長期屋外試験により実証していきたい。

④ あとがき

フィルム型アモルファス太陽電池の高出力化の取り組みや屋外発電性能について紹介した。新型フィルム型アモルファス太陽電池では出力が約 20% 向上し、同時に電圧変更により、パワーコンディショナへの適合性も改善させた。今後は、さらなる高出力化検討とともに生産性向上を進め

ていく。これらの技術開発を通してフィルム型アモルファス太陽電池を普及させ、地球環境に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) Yoshida, T. et al. A New Structure A-Si Solar Cell with Plastic Film Substrate. 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. USA. 1994, p.441-444.
- (2) 市川幸美, 原嶋孝一. アモルファスシリコン太陽電池の開発. 富士時報. 2000, vol.73, no.4, p.249-252.
- (3) 井原卓郎, 西原啓徳. アモルファスシリコン太陽電池の屋外発電特性. 富士時報. 2002, vol.75, no.5, p.272-276.



藤掛 伸二

アモルファスシリコン太陽電池の開発に従事。現在、富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリッドソリューション事業部熊本工場設計部課長。工学博士。電気学会会員、応用物理学会会員。



佐藤 広喜

アモルファスシリコン太陽電池の開発に従事。現在、富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリッドソリューション事業部熊本工場設計部。

フィルム型アモルファス太陽電池モジュールとその適用技術

Film Type Amorphous Silicon Photovoltaic Module and its Application Technology

中村 哲郎 Tetsuro Nakamura

横山 尚伸 Hisanobu Yokoyama

柳瀬 博雅 Hironori Yanase

富士電機の太陽電池モジュールはプラスチックフィルム基板の上に作製した太陽電池を、ガラスを使用せず封止している。軽量で柔軟性に富み、薄く、割れない特徴があり、建物の補強工事をしなくても設置ができる。さまざまな材料や曲面を持った鋼板と張り合わせることで、屋根材や壁材などの意匠性の高い建材と一体化できる。また、防水シートなどの非建材との一体化や据付け方法を工夫すれば、設置箇所や利用方法などの可能性や付加価値の拡大ができる。集積型直列構造がセルに作り込まれているので、簡単な配線のみでモジュール化が可能で、大面積化が容易であるという利点もある。

Fuji Electric's photovoltaic modules are formed by encapsulating solar cells fabricated on a plastic substrate without using glass. These modules are lightweight, flexible, thin and unbreakable, and can be installed on a building without requiring that the building structure be reinforced. Laminating these modules to various materials such as a curved steel plate enables the modules to be integrally formed with advanced building materials such as roofing materials or wall materials. Also, integrating with non-building materials, such as a waterproof sheet, and improving the installation method will expand the range of possible installation sites and usage methods as well as increase the added value. The cells are formed with a series-connection structure that enables modularization of the cells with only simple wiring and facilitates the fabrication of larger cells areas.

1 まえがき

太陽光発電は、ここ10年間で生産量が年率30～40%と急拡大し、これをけん引したのが世界各国の環境・エネルギー政策である。背景には、温室効果ガス削減という地球規模の課題がある。富士電機では温室効果ガス削減の一つの答えとして、太陽電池の製造・販売・普及に取り組んでいる。

太陽電池には素材の違いによりさまざまな種類がある。富士電機は1978年からアモルファスシリコン太陽電池の研究開発を行っている。アモルファスシリコン太陽電池は、可視光領域での光吸収係数が大きいことから1 μm 程度まで薄膜化が可能である。また、太陽電池の公称出力は基準温度25 $^{\circ}\text{C}$ での値である。実際に屋外で使用する場合の動作温度はそれよりも高いケースが多い。結晶シリコン系に比べてエネルギーバンドギャップが大きいこと、高温時も出力が落ちにくい特性があるアモルファスシリコンは、実用性の高い太陽電池といえる。このアモルファスシリコンをフレキシブルなプラスチックフィルム基板上に作製し、樹脂で封止することで“軽い、曲がる（フレキシブル）、割れない”フィルム型モジュールとして、2004年10月に販売を開始した。

2 太陽電池モジュール

図1に示す富士電機の太陽電池モジュールの特徴は次のとおりである。なお、モジュールのタイプとしては、建材と一体化した“建材一体型”と“非建材型”に大別できる。

- (a) 集積型直列接続構造が製造段階で作り込まれている。そのため、モジュール化では簡単な配線のみで、大面積化が容易であり、屋根や壁面全体をカバーすること

ができる。

- (b) 受光面のガラスや固定のためのフレームなどを排除し、その表面を耐候性樹脂で覆うことで従来にはない、軽い、曲がる、割れないモジュールを構成することができる。
- (c) さまざまな材料と張り合わせることで、従来の据置型モジュールに加え、屋根材や壁材などの建材と一体化させた周囲と調和するモジュールが実現できる。

2.1 建材一体型

これまで市販されてきた建材一体型太陽電池モジュールは、ガラスでカバーしたものが主体であった。ガラスでカバーしたモジュールは、面積当たりの重量が重くなる。そのため屋根の補強工事が必要となったり、サイズに制限があったりした。富士電機では、建物、特に大型の公共・産業用建物の屋根への適用を目的として、フィルム型太陽電

図1 フレキシブル太陽電池モジュール

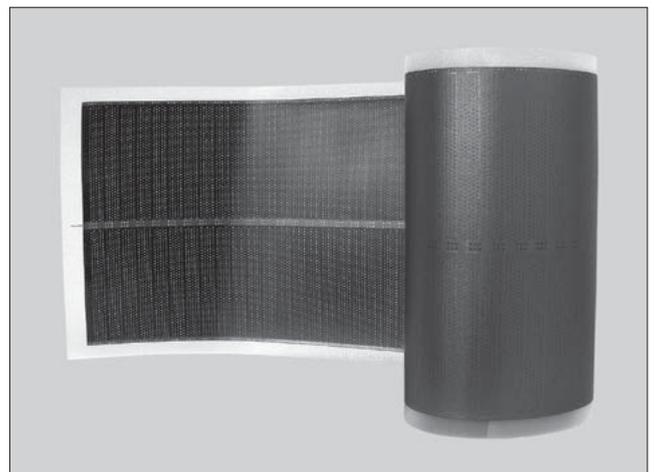


図2 横浜みなとみらい



図3 防水シート型



池モジュールを直接鋼板にラミネートした軽量な建材一体型太陽電池モジュールを供給している。通常の鋼板屋根と同じ方法で施工できるため、低コストで意匠性に優れた太陽電池付き鋼板屋根が実現できる。また、フレキシブルであるため、図2に示すように鋼板を湾曲させて曲面に設置でき、ドーム上の屋根やデザイン性が要求されるような場所において高い意匠性を発揮することができる。また建築防水の分野では、防水シートを用いた工法が工期短縮・低コストという点で伸びており、さらにシート状の太陽電池と一体化することで高い付加価値を得ることができる(図3)。

2.2 非建材型

代表的な非建材型モジュールは、標準仕様で耐候性に優れたふっ素系樹脂材料によって封止している。フレキシブル性を損なわず、耐久性にも優れた太陽電池モジュールである。使用者のニーズに対応して、設置方法や端子取付けの方法を提案している。また、さまざまな使い方の可能性を秘めている。自動販売機、浄水場被覆、省エネルギー対応機器(環境家電など)、高速道路の防音壁、防水シートなど幅広い分野において検討を行っている(図4)。

図4 ソーラー筏(いかだ)



図5 熊本県庁の駐輪場屋根



既設の屋根をターゲットにした鋼板折り曲げ型のモジュールの販売も行っている。

既設建物へ太陽電池を設置する場合、建物の耐荷重を越え太陽電池を設置することはできない。耐荷重が小さい建物の場合、補強を施す必要がある。鋼板折り曲げ型モジュールは鋼板を含めた質量が $4 \sim 8 \text{ kg/m}^2$ 程度と、他社の据置型と比較して質量を約半分に抑えているので、建物の補強を必要としない(図5)。

③ モジュールの設置技術

太陽電池の設置場所として、建物の屋根もしくは専用の架台が一般的である。しかし、設置可能面積の制約があるため、普及に制限がかかっている。その問題を解決するため、より簡便に設置できるモジュールの開発、設置の実証試験を行っている。フィルム型モジュールは樹脂のみで構成されているため、部分的固定には適さない。鋼板などの構造物への面での固定が必要であった。しかしモジュールの中に固定用の金属を埋め込み、固定用の穴を設けることで構造物へ容易に固定できるようにした。また約 2 kg/m^2 と非常に軽量化した。

図6は、富士電機東京工場のエントランスへの導入例で

図6 富士電機東京工場のエントランス



図7 実証検証中の太陽電池モジュール



どの使用予定がない土地を有効に利用し、ワイヤや置き石などでモジュールを設置し、別の用途に土地の利用が決まると移動させるという一時設置、簡易設置も視野に入れ検証を行っている。

樹脂のみを使用したフィルム型は、主に海外のシステムインテグレータをターゲットにした商品である。表面の材料には、耐候性に優れたふっ素系樹脂材料を使用していて長期信頼性に優れたモジュールである。顧客が希望する被着体に接着剤で固定できるよう、富士電機では接着剤に関するノウハウを蓄積し、設置マニュアルを充実させ顧客に提供している。

4 あとがき

フィルム型アモルファス太陽電池モジュールとその適用技術を紹介した。フィルム型アモルファス太陽電池の“軽い、曲がる、割れない”という特長を生かし、お客さまの要求にマッチした商品の開発、設置技術の提案を行うことにより太陽電池の普及を促し、地球温暖化防止に貢献する所存である。



中村 哲郎

アモルファス太陽電池モジュールの開発に従事。現在、富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリッドソリューション事業部熊本工場設計部課長。



横山 尚伸

燃料電池発電装置の開発、アモルファス太陽電池のモジュール化開発に従事。現在、富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリッドソリューション事業部熊本工場設計部課長。



柳瀬 博雅

太陽電池モジュール樹脂材料の開発に従事。現在、富士電機システムズ株式会社エネルギーソリューション本部グリッドソリューション事業部熊本工場設計部。

ある。軽量でかつ薄いモジュールであるため壁と一体化でき、周囲と調和した自然な外観になる。

東京工場での試験設置を受け、現在、国のプロジェクトに参画し、くまもとテクノ産業財団や熊本大学と連携しながら設置の実証検証中である(図7)。休田地、遊休地な



解説

解説 1 ^{(1),(2)} 発熱量〔高位発熱量 (HHV : Higher Heating Value), 低位発熱量 (LHV : Lower Heating Value)〕

ある一定量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。発熱量には高位発熱量 (HHV : Higher Heating Value) と低位発熱量 (LHV : Lower Heating Value) がある。

燃焼過程において、水素と酸素の反応で生成する水蒸気および燃料中の水分が蒸発して発生する水蒸気の蒸発潜熱、燃焼ガス中の生成水蒸気が凝縮したときに得られる凝縮潜熱が放出される。これを含めた熱量を“高位発熱量 (高発熱量または総発熱量)”，含めない熱量を“低位発熱量 (低発熱量または真発熱量)”という。

熱量計算に使用する基準発熱量は、国や統計あるいは機器によって異なることから、使用においては注意が必要である。

高位発熱量を使用している主なものは、次のとおりである。

- (a) 総合エネルギー統計をはじめとする統計類
- (b) 日本の火力発電所の発電効率

- (c) 「エネルギーの使用の合理化に関する法律」(省エネ法) で使用する発熱量
- (d) 日本の CO₂ 排出量計算に使用する発熱量
低位発熱量を使用する主なものは、次のとおりである。
- (a) ボイラ設備の熱効率
- (b) ディーゼルエンジン, ガスエンジン, ガスタービンなどの原動機の熱効率
- (c) コージェネレーションシステムの性能表示
- (d) IPCC (気候変動に関する政府間パネル) の CO₂ 排出量計算に使用される発熱量

参考文献

- (1) 省エネルギーセンター. 省エネルギー. 2004, vol.56, no.8, p.17.
- (2) 日本冷凍空調学会. “最近気になる用語153 高位発熱量と低位発熱量”. 日本冷凍空調学会ホームページ. <http://www.jsrae.or.jp/annai/yougo/153.html>, (参照 2010-05-12).

解説 2 規格化発電効率

太陽電池モジュールの屋外での発電性能を示す指標として、発電効率が用いられる。発電効率は、一定期間 (月, 年間など) の積算日射量に対するモジュール単位面積当たりの発電量の割合を示す。通常、モジュールの性能は、定格変換効率で評価される。定格変換効率は、基準状態^(注) (25℃, 1kW/m², 分光分布 AM1.5) における変換効率で

〈注〉AM (エアマス) は太陽の光が地上に入射するまでに通過する大気量を表す。

AM1 : 真上から太陽光を受けたとき。

AM1.5 : 光の通過距離が AM1 に比べ 1.5 倍, 太陽高度 42 度に相当する。光の通過距離が増えるので, 青い光が吸収され, 赤い光が多くなる。

ある。発電効率は定格変換効率よりも低くなる。屋外では、基準状態よりも高温, かつ, 低照度となることが主因である。

この屋外での効率の変化を表す指標として規格化発電効率を導入した。

$$\text{規格化発電効率} = \text{発電効率} / \text{定格変換効率}$$

太陽電池モジュールの規格化発電効率は、発電層の種類や、使用環境 (モジュール温度, 照度) に依存する。国内の標準的な使用環境における通常の結晶シリコン太陽電池を例にとると, 年間を通しての規格化発電効率は 0.8 ~ 0.85 程度である。また, アモルファスシリコン太陽電池の方が結晶シリコン太陽電池よりも高い値を示す。



みんなのe顔つくりたい。 e-Front runners

私たちは、それぞれの分野で最先端をめざす e-Front runners。
地球環境(environment)と調和しながら、
豊かな社会づくりのために(enrichment)、
たゆまぬ進化(evolution)を続けます。
富士電機グループの一人ひとりが、「e」の最前線を走りながら
豊かで、明るい社会づくりに貢献します。

主要事業内容

エネルギーソリューション

再生可能エネルギーを利用して電気エネルギーを創る。電気エネルギーをスマートグリッドで賢くマネジメントする。こうしたエネルギーにかかわる最適なソリューションを、富士電機グループが培ってきた技術を駆使して地球社会にお届けします。

グリーンエネルギーソリューション…世界トップクラスの地熱発電設備や高い技術力を誇る火力発電設備などを通じて、安全で安定したエネルギー供給を環境に配慮しながらグローバルに展開しています。

グリッドソリューション……………太陽光発電、風力発電、電力安定化、エネルギー最適運用などのキーテクノロジーをベースに、グリッドソリューション事業を展開しています。

環境ソリューション

産業・輸送・社会のインフラ構築で培ってきたグループのコア技術、人材、サービスのノウハウを結集し、パワーエレクトロニクス技術をベースにさまざまなシーンで低炭素社会に貢献するソリューションをお客様にお届けします。

産業ソリューション……………受変電技術、エンジニアリング技術、パワーエレクトロニクス技術によって幅広い産業や社会インフラ分野を支え、省エネに配慮した最適なソリューションサービスをご提供します。

輸送ソリューション……………鉄道や電気自動車、ハイブリッド車などの環境対応車関連などにパワー半導体、インバータ・モータを組み込み、高効率化と省エネに貢献します。

社会ソリューション……………ビル、店舗、IDC（インターネットデータセンター）などの総合的な省エネソリューションをご提供します。

デバイス・器具・自販機

さまざまな産業機器や環境対応車の環境負荷低減に貢献する半導体や、情報機器の記録媒体として活躍するディスク媒体、ソリューションを支えるコンポーネント器具、環境に配慮した自販機など、あらゆるシーンでお客様のお役に立つ製品をご提供します。

半導体・感光体……………主要製品 [パワーIC/IGBT モジュール / パワーディスクリット / 複合デバイス / 圧力センサ / プリンタ・複写機用感光体 / 画像周辺機器]

ディスク媒体……………主要製品 [アルミ媒体 / ガラス媒体 / アルミ基板]

器具……………主要製品 [電磁開閉器 / 操作表示機器 / マニュアル・モータ・スタータ / 配線用遮断器 / 漏電遮断器 / 高圧真空遮断器 / 低圧・高圧ヒューズ / ガス警報器 / エネルギー監視機器]

自販機……………主要製品 [自動販売機 / 飲料ディスペンサ / 自動給茶機]

富士時報 第 83 巻 第 3 号 平成 22 年 4 月 30 日 印刷
平成 22 年 5 月 10 日 発行
定価 735 円（本体 700 円・送料別）

編集兼発行人 重 兼 壽 夫

発行所 富士電機ホールディングス株式会社 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)

編集室 富士オフィス&ライフサービス株式会社内 〒191-0065 東京都日野市旭が丘一丁目 9 番 4 号
「富士時報」編集室 電話 (042) 585 - 6965
FAX (042) 585 - 6539

印刷所 富士オフィス&ライフサービス株式会社 〒191-8502 東京都日野市富士町 1 番地
電話 (042) 587 - 5555

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

* 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。
富士時報 (和文) http://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents_02_03.html
FE REVIEW (英文) <http://www.fujielectric.com/company/tech/contents3.html>

* 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。

© 2010 Fuji Electric Holdings Co., Ltd., Printed in Japan (禁無断転載)

FE e-Front runners

その太陽電池は、
無限の可能性を秘めている。

FWAVE

フィルムタイプ アモルファス太陽電池

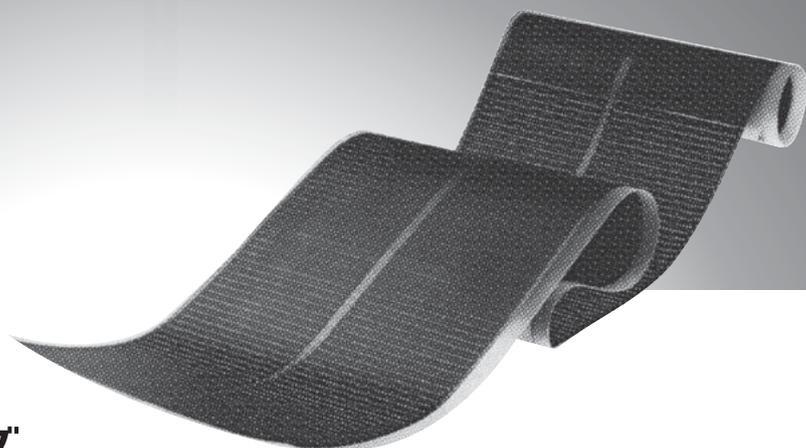


柔軟で軽い

環境にやさしい

直流出力電圧が高い

同じ定格の結晶系太陽電池よりも年間発電量が多い



FE 富士電機システムズ

富士電機システムズ株式会社 〒141-0032 東京都品川区大崎1-11-2(ゲートシティ大崎イーストタワー) TEL.03-5435-7114 www.fujielectric.co.jp/fes/

