



家庭から宇宙まで、エコチェンジ



# 三菱電機技報

11

2016

Vol.90 No.11

電力・先端医療事業のグローバル展開を目指す技術革新



## 目次

### 特集「電力・先端医療事業のグローバル展開を目指す技術革新」

電力・先端医療市場における経営戦略……………	巻頭言 1
織戸浩一	
インフラの変革を支える技術……………	巻頭論文 2
濱本総一	
IoT・ICT技術を応用した電気事業向けソリューション ……	7
高橋浩一・井上俊宏	
電力・燃料・蒸気需給管理システム……………	11
齊藤正裕・佐内孝太郎・齋藤 裕	
発電機及び付帯電気品のアフターサービス技術……………	15
仁木直人・山田祥一郎	
原子力計装制御システムのグローバル展開に向けた製品開発 ……	19
永井貞光・谷口 学・北村信吾・上田 威	
原子力計装制御システムの サイバーセキュリティ対策の現状と展望……………	23
稲葉隆太・町田慎弥	
火力発電所向け交流界磁ブラシレス励磁システム……………	27
片岡道雄・宮武亮治・平松孝士	
水素間接冷却タービン発電機“VP-Xシリーズ”と 要素技術の既設機への展開……………	33
舟崎陽一・空 信之・近藤雅浩・古賀清訓・前田英昭	
発電プラント計装制御システムと タービン発電機のデザイン開発……………	37
深川浩史・山田 亘	
粒子線治療装置の技術革新……………	41
築島千尋・大谷浩司	
ITERトロイダル磁場コイルの製法確立と実機製作 ……	45
久野和雄・湊 恒明・長谷川 満	
車両放射能汚染検査装置……………	49
西沢博志・中西正一・林 真照・垣内英明・松尾慶一	

Technical Innovation Aimed at Global Development of Electric Power and Advanced Medical Business  
Management Strategy on Power and Advanced Medical Market  
Koichi Orito

Technologies to Realize Changes of the Infrastructure  
Soichi Hamamoto

Solutions for Electric Power Industry by Applying IoT and ICT Technologies  
Koichi Takahashi, Toshihiro Inoue

Supply-demand Optimization System of Electric Power, Fuel and Steam  
Masahiro Saito, Kotaro Sanai, Yutaka Saito

After-sales Service Technologies of Generators and Incidental Electrical Equipment  
Naoto Niki, Shoichiro Yamada

Product Development of Instrumentation and Control Systems for Overseas Nuclear Power Plant  
Tadaaki Nagai, Manabu Taniguchi, Shingo Kitamura, Takeshi Ueda

Present and Future of Cyber Security Measures for Instrumentation and Control Systems of Nuclear Plant  
Ryuta Inaba, Shinya Machida

AC Magnetic Field Brushless Excitation System for Thermal Power Plants  
Michio Kataoka, Ryoji Miyatake, Takashi Hiramatsu

Indirectly Hydrogen-cooled Turbine Generator "VP-X Series" and Application of Element Technologies to Existing Generators  
Yoichi Funasaki, Nobuyuki Sora, Masahiro Kondo, Kiyonori Koga, Hideaki Maeda

Design Development of Power Plant Instrumentation and Control Systems and Turbine Generators  
Hirofumi Fukagawa, Wataru Yamada

Technological Innovation of Particle Therapy System  
Chihiro Tsukishima, Hiroshi Otani

Development of ITER Toroidal Field Coil Manufacturing Process  
Kazuo Kuno, Tsuneaki Minato, Mitsuru Hasegawa

Radioactive Contamination Inspecting Equipment for Vehicle  
Hiroshi Nishizawa, Masakazu Nakanishi, Masateru Hayashi, Hideaki Kakiuchi, Keiichi Matsuo

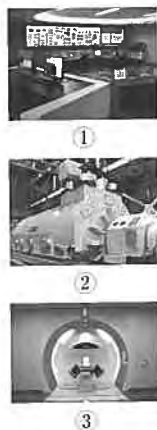
## 特許と新案

「表示監視制御装置」「放射線モニタリングポスト」……………	53
「回転照射型粒子線医療装置」……………	54

### 表紙：電力・先端医療事業のグローバル展開を目指す技術革新

三菱電機は、原子力、火力、水力などの発電プラント事業を核としつつ、先端医療事業や発電サービス事業など、既存技術の更なる強化と応用技術の開発の両面で事業拡大を進めている。

- ①は、米国向け中央計装運転検証設備である。米国運転員による運転検証を実施し、人間工学設計の米国規制ガイドラインへの適合性を示すために、当社米国拠点に構築した。
- ②は、900MVA級水素間接冷却タービン発電機である。最新の冷却・低損失化技術の適用によって、水素間接冷却機として世界最大級の出力と最高レベルの効率を達成した。
- ③は、最新型のコンパクトな陽子線治療装置の照射室である。津山中央病院に陽子線治療装置“MELTHEA-V”を納入した。



# 巻/頭/言

## 電力・先端医療市場における経営戦略

Management Strategy on Power and Advanced Medical Market

織戸 浩一

Koichi Orito



日本の電力事業は高度経済成長とともに目覚ましい発展を遂げてきた。電力需要は生活水準の向上などを背景に増加し続け、三菱電機は、原子力、火力、水力発電所向け発電システムから送変電設備、系統制御システムまでを一貫して提供し、電力の安定供給に貢献してきた。しかし、2011年の東日本大震災以降、電力事業は大きな転換期を迎えている。加えて、現在進行中である電力自由化などの電力システム改革によって、その市場は更に大きく変化している。

また、当社は発電システム関連技術を発達させた加速器、超電導分野でも豊富な実績を持っており、特に粒子線治療装置は国内トップシェアを誇っているが、そのメリットが世の中に認知されてきた一方で、更なる普及拡大に向けた最先端の技術開発が急務である。

どちらの市場でも、その大きな変化を更なる成長のチャンスととらえ、戦略的に成長領域にパワーシフトを図りつつ、これら事業インフラ拡大に貢献していきたいと考えている。

### (1) 電力自由化

日本政府は、電力安定供給の確保、電気料金の最大限抑制、電気利用の選択肢や企業の事業機会拡大を目的に、電力小売全面自由化や送配電部門の法的分離を推進中で、2017年にはガス小売全面自由化も計画されている。当社はこれまで電力システム改革のコアとなる機器やシステムを多数納入してきた。エネルギーサービスの多様化、取引市場の活性化が見込まれる中、この成果を最大限に活用しつつ、市場分析をもとに、スマートメータ通信インフラ技術や需給予測・需給計画・電力市場管理等の機能パッケージ活用とAI(人工知能)を適用した各種フィールド情報の分析などの新技術との融合を推進する。また、エネルギーセンシングを含めた電力IoT(Internet of Things)分野の事業化やプラント全体及び電力流通設備の最適な設備運用・維持管理のアセットマネジメントなど激変する電力ICT(Information and Communication Technology)市場における中核SIer(System Integrater)を目指し、培ったコア技術を活用して更なるグローバル市場の開拓を推進する。

### (2) 発電システム

原子力分野では、国内市場はプラント再稼働による安全対策工事を主とした案件に加え、廃止措置市場や中間貯蔵施設などBE(Back End)市場を中心とした新領域への参入を推進する。海外市場では、新設プラント建設や運転延命化の流れによる設備更新が各国(トルコ・ロシア・米国・中国ほか)で計画されており、安全系認証取得など当社の強みをいかした選択と集中による事業展開を加速する。火力発電分野は、保全需要は堅調ではあるものの、国内外ともに激しい性能／価格競争が継続しており、発電プラント新設事業規模の確保に加え、市場環境変化に対する客先ニーズをとらえた発電サービス事業拡大や、プラント運用技術を活用した燃料需給最適化システム、予防保全を目的とした遠隔監視・異常兆候監視などの発電ソリューション事業の3つの柱を主に事業展開を図っていく。また、エネルギー有効利用などの社会的ニーズから、発電機の高出力化・高効率化・コンパクト化が求められており、コスト競争力を具備した新型発電機の開発に加え、発電機点検ロボットを活用した修繕計画立案などのアフターサービスメニューの拡充を図る。

### (3) 先端医療

日本におけるがんの死亡率は1981年に死因のトップとなった以降も増え続け、現在では死因の約3割を占めるまでになっている。がん治療に関しては、これまで外科療法、放射線療法、化学療法を中心に、治療技術が発展してきた。この中で、放射線療法の一つである陽子線や炭素イオン線を使用した粒子線治療は、治療後のQOL(Quality Of Life:生活の質)にも優れているとして期待されている。当社は、高線量照射と高精度スキニング照射の2つの照射方法を実現するセレクトビームノズルや敷地面積を極小化する先端的な機能を実現し、粒子線治療装置の普及拡大を図る。

当社は各市場に対し、既存技術、応用技術、新開発要素技術をベストマッチングさせた製品を国内外に提供し、効率的なエネルギー利用と医療技術の発展に貢献していく。



濱本総一\*

# インフラの变革を支える技術

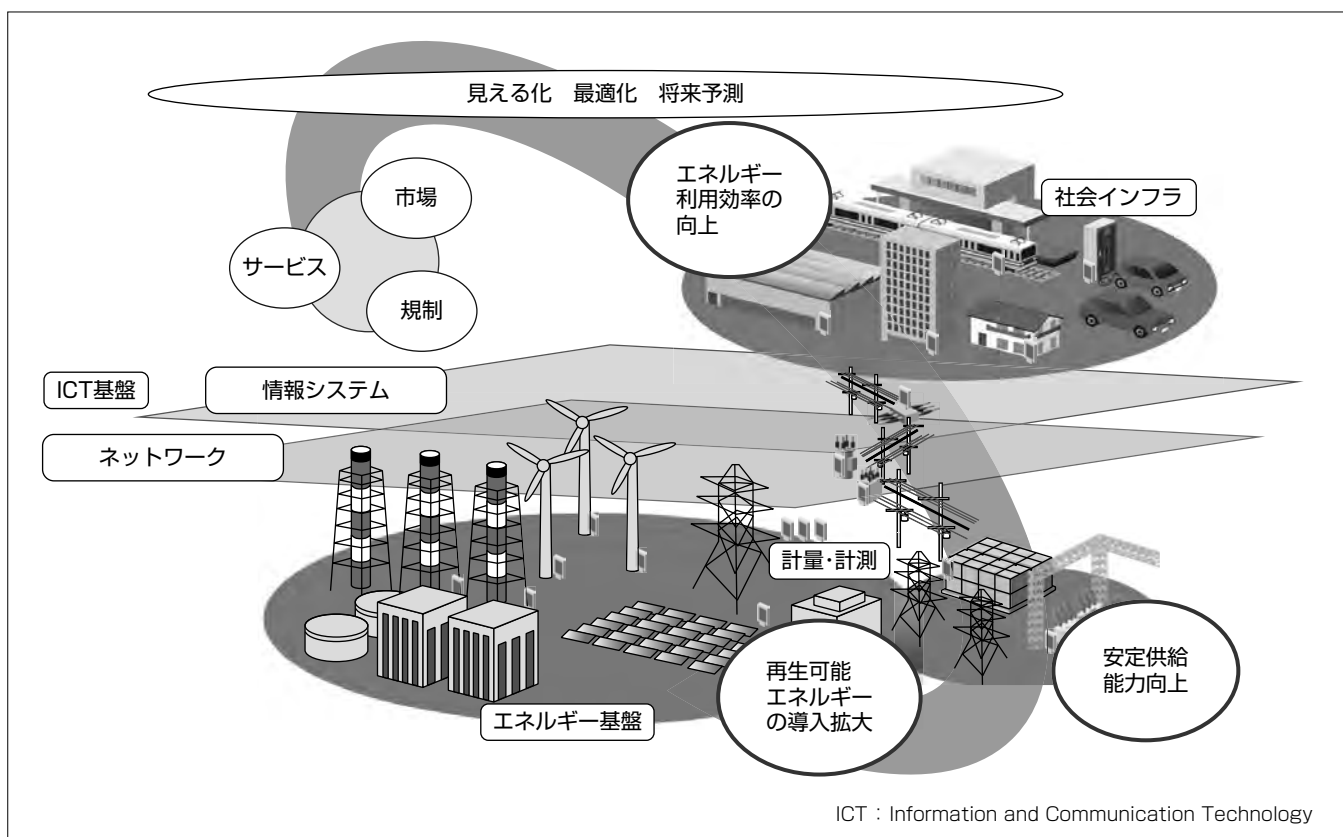
*Technologies to Realize Changes of the Infrastructure*

*Soichi Hamamoto*

## 要 旨

現在の経済成長と技術革新は安定した電力の供給によってもたらされている。大規模電源開発と長距離送電、配電網の整備、電力システムの安定運用は社会を支え、多くの技術革新をもたらしてきた。近年、エネルギーへの関心の高まりも相まって、需要だけではなく供給源としての電気も非常に身近なものとなってきているが、そこには大規模集中と小規模分散を柔軟にシステムに統合すること、市場の中で高い自由度で運用するという高難度の技術課題が内在している。再生可能エネルギーを含む分散型の電源が大量に導入された場合でも調和のとれた電力システムの実現では、設備状態の把握、運用変更によるシステム全体の安定性、さらには、過去の蓄積データからの健全性評価など実

態の把握と予測の精度を高くし、効率的に実施することが重要となってくる。このように、機器本体、現場制御、情報システムはより密接な連携、情報の相互接続性を確保しながら高度化することが期待されている。この高度化では、膨大なデータを収集し管理することに加え、気象などの基盤情報活用や機器劣化予測のためのモデル化とシミュレーション方法の確立、システム運用への組み込みなど設備・システム設計に深く根差したものとすることが必須である。エネルギー、医療など重要な社会インフラを支える基盤技術が新たな価値創出で更に重要性を増す中、三菱電機は長年培った実績に基く先進技術を取り入れた技術開発に取り組んでいる。



## 持続可能な社会を目指して

ICTの進化、標準化や測定機器設置コストの低減とともに多様な計量・計測データがデジタル化され、これまで分断されていた情報システムと現場制御システムの融合が始まる。ICTの活用は、分野ごとの合理化や最適化から今まで想定されなかったデータ活用を発生させ、インフラ全体の最適化に向けた変革が進む。当社はエネルギー、医療など重要な社会インフラを支える技術を基盤に、新たなパラダイムでの技術革新に貢献していく。

# 1. ま え が き

現在の経済成長と技術革新は安定した電力の供給によってもたらされている。大規模電源開発と長距離送電、配電網の整備、電力システムの安定運用は社会を支え、多くの技術革新をもたらしてきた。例えば、発電設備の大容量化、高効率化、省力化など社会的要請に応じた製品・システムの継続的な開発も重要な社会インフラを支える原動力として、様々な課題を解決しながら強固な電力インフラの礎となっている。近年、エネルギーへの関心の高まりも相まって、需要だけではなく供給源としての電気も非常に身近なものとなってきているが、そこには大規模集中と小規模分散を柔軟にシステムに統合すること、市場の中で高い自由度で運用するという高難度の技術課題が内在している。電力システム改革での新たな競争原理の導入と国際競争力の強化、市場参加者が多様化する中でのエネルギーの安定供給、ICTの進化がもたらす社会全体の変化など、新たなパラダイムにおける数々の技術革新にも当社の培ってきた基盤技術を活用することができる。

本稿では、エネルギー、医療など重要な社会インフラを支える技術が新たな価値創出で更に重要性を増す中、先進技術を取り入れた当社の技術開発への取り組みについて述べる。

# 2. インフラ技術の貢献

## 2.1 グローバル目標

“国連持続可能な開発サミット”(2015年9月)で採択された、“持続可能な開発のための2030アジェンダ”の開発目標の1つに“すべての人々の、安価かつ信頼できる持続可能な近代的エネルギーへのアクセスを確保する”と示されている。また、2015年12月にフランス・パリで開催されたCOP(Conference Of the Parties)21(国連気候変動枠組条約第21回締約国会議)で、2020年以降の温暖化対策の国際枠組み“パリ協定”が採択された。これらグローバル目標達成の中核にインフラ技術の革新や既存インフラの価値向上がある。例えば、温暖化対策でも、地球温暖化の状況を可視化して正確に把握することを可能とする技術は、その対策を効果的に進める推進力となる。温室効果ガス観測技術衛星の高性能な観測センサと広域な測定数の飛躍的増加が温室効果ガスの濃度分布測定精度向上に寄与するとともに、情報処理技術による気候変動予測精度の向上が実現されている。正確な数値の把握は、正しい評価と合理的な対策を導く。

## 2.2 電力システム

### 2.2.1 電力システムへの期待

米国で電気の工業利用から大容量発電所、長距離送電線の建設が始まり、電気利用の多様化と配電網の普及など電力インフラの構築によって電気の活用が20世紀の生産性向上の原動力となった。電気は輸送が容易で様々な用途に

適した量に変換しやすいという利点を持ち、この有効活用がエネルギー利用の高度化、効率化と一体となって社会を支えている。引き続き、電気は21世紀における持続可能な社会実現に向けた原動力であり、より環境負荷の低いエネルギー活用、発電方式の開発、機器の高効率化、再生可能エネルギーの導入など特に温室効果ガスの削減に向けた技術応用への期待は大きい。既存のインフラ技術に常に先進技術を取り入れていくことはこれらの基盤をなす重要な取り組みである。当社でも大容量化・高効率化・コンパクト化を可能とする新型発電機“VP-Xシリーズ”を開発し、大出力領域でも高効率で保守面に優れたタービン発電機の提供を開始している。さらに、この開発で得た新開発要素技術を既設機にも適用し、既存インフラを含めた高効率利用、環境負荷の低減への貢献を広く進めている。

### 2.2.2 電力システムインフラの変革の動き

経済産業省の“長期エネルギー需給見通し”で、2030年のエネルギーミックス(総発電電力量に占める各電源構成)は次のとおりである<sup>(1)</sup>。再生可能エネルギー22~24%程度、原子力20~22%程度、LNG(Liquefied Natural Gas)火力27%程度、石炭火力26%程度、石油火力3%程度(再生可能エネルギーのうち、太陽光・風力は8.7%程度)である。電源構成についての基本的な考え方は、“安全性、安定供給、経済効率性及び環境適合に関する政策目標を同時達成する中で、徹底した省エネルギーの推進(対策前比17%削減)、再生可能エネルギーの最大限の導入、火力発電の効率化などを進めつつ、原子力発電依存度を可能な限り低減する”というものである(図1)。

一方、欧州委員会では、“2030 climate and energy framework (2030気候及びエネルギー政策枠組み)”を設定し、エネルギーミックスで更なるエネルギー削減を27%とした上で、再生可能エネルギーの割合を27%とすることを目標に掲げ、原子力発電はベースロード電源としてエネルギー安全保障の中で重要な役割を担う。課題達成のため、域内エネルギー市場の改善に向けて、加盟国間のエネルギーイ

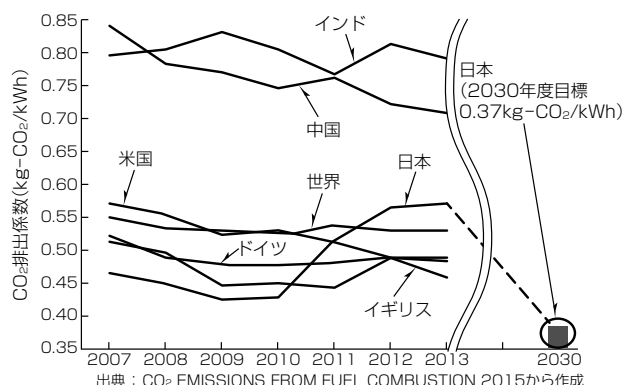


図1. 各国のCO<sub>2</sub>排出係数実績と日本の2030年度目標(資源エネルギー庁)<sup>(2)</sup>

インフラの相互接続の割合を増大させることを目指し、域内エネルギー市場を完成させ、インフラネットワークの不足部分を補強するとしている。また、米国では、老朽化した送配電網の整備とエネルギー効率の向上が急務となり、送配電グリッドの近代化が進められている。米国エネルギー省がGrid2030として“A National Vision for Electricity’s Second 100 Years(次の百年に向けた国家電力ビジョン)”や“National Electric Delivery Technologies Roadmap(電力供給技術ロードマップ)”“A Vision for Modern Grid(送電網の近代化ビジョン)”といったロードマップを示し、スマートグリッドをエネルギー安全保障ロードマップの中核として改革を推進している。

非OECD(Organisation for Economic Cooperation and Development)諸国では、経済成長に伴い、石油消費が増加し、世界の石油消費に占める非OECD諸国のシェアは1973年の26%から2013年には50%となり、逆にOECD諸国のシェアは74%から50%にまで低下してきている。一方で、再生可能エネルギーの導入は非OECD諸国でも推進、拡大する方向にあるなど、電力システムの変革における先進的な技術を非OECD諸国のシステムへも積極的に反映させていくことは必須の課題である。電力システムの変革は社会システムの多様性、持続可能性を担保する重要なファクタであり、当社は長年培ったインフラ技術とその技術革新によって電力の安定供給、持続可能な社会の実現に向けたグローバルな貢献を目指している。

### 3. 運用の高度化技術

電力システム改革における電力の市場化は、保有設備を確実に運用することに加え、その運用を市場の中で最適にするという新たな課題を生む。設備運用は経済合理性の追求における収益最大化の中で一層重要度を増すものとなる。設備資産そのもの、関連する業務、運用・保守を見える化するための情報の高度融合、情報量増大における標準化への対応は、運用の高度化に向けて第一に適応しなければならない課題である。

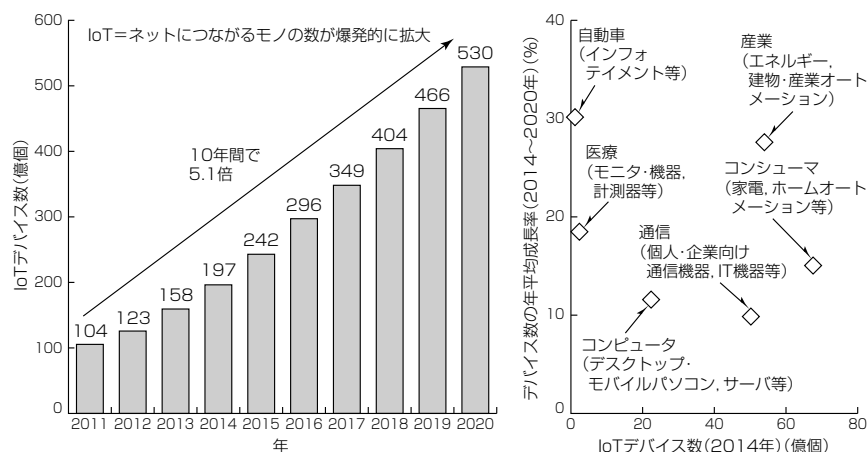
発電設備では使用燃料による差異、運用性能による差異に加え、期待性能を安定に、長期にわたり発揮させることが運用益の最大化につながる。長期運用の根幹をなす設備の保全活動は、壊れたら修理する事後保全、運用による摩耗、定期点検による異常部位の交換・修繕などの定期予防保全(運用時間に応じた保全：Time Based Maintenance)、さらには、稼働中の運用データに対し診断技術を高度活用した予知保全(機器、設備の状態に応じた保全：Condition Based Maintenance)に大別される。生産活動への影響度や合理性に基づく判断によって、現場巡視も含めこれら保全活動を組み合わせて設備保全は網羅されている。中でも情報通信技術の浸透によって、発電機の現場保守でも、測

定された膨大なデータを活用した絶縁寿命の評価を行うオンライン部分放電監視システムによる運転中の早期異常検知、簡略点検下での点検項目の充実や本格点検時の事前準備の拡充を目的としたロボット点検の導入などによって、これまでなし得なかった網羅的なデータ収集を可能とし、データマイニングなどの解析を行う情報処理技術の適用可能性が高まってきている。

ICT化の進展がもたらす変化のうち大きな変化に、IoT(Internet of Things)がもたらす変化、ビッグデータの利活用の進展がもたらす変化が挙げられている。しかし、新たな設備、システムは費用対効果の面で円滑に導入が進まない状況が生じやすい。運用設備の重要度に加え、熟練技術者からの技術継承問題への対応、経済活動における必須の価値としての認識が広がること、標準化や測定機器設置コストの低減とともに付加価値の高いサービスを伴いその設備活用と運用の高度化が両輪となって進展することが期待される。主要な社会インフラである電力では、安定運用に対する要求が高く、停止を伴う定期点検などでは代替の電力供給を考慮した上で計画的な運用変更が行われる。さらに、CO<sub>2</sub>フリー電源として再生可能エネルギーなどの分散型の電源が大量に導入された場合でも調和のとれた電力システムの実現では、電源の代替方法を考慮するための設備状態の把握、状態変動に対するシステム全体の安定性を向上させる多様な設備の導入・運用を含めて実態の把握と予測を効率的かつ正確なものとするのが重要となる。当社で開発した発電機用交流界磁ブラシレス励磁システムは、パワーエレクトロニクス技術応用による可動機器の削減など発電機の運用の自動化、保守の省力化に適応するものである。ICT化に加えてこのような分散設置に適応する設備の導入が両輪となって全体システムを統合した運用の高度化を実現し、付加価値の高いサービスへの投資を生む新たな循環が期待できる。

ICT化の進展で保全と運用はより密接な連携、情報の相互接続性を確保しながら高度化することが期待されている。膨大なデータを収集し管理すること、機器劣化予測のためのモデル化とシミュレーション方法を確立すること、システム運用への組み込みなど機器・設備・システム設計に深く根差したものとするのが必須である。これらは情報通信技術の応用と運用技術、インフラ技術の融合によって初めて実現できるものであり、現場運用、機器設計の知見を前提として、フィールドデータの統合的管理から関連する情報を抽出し運用へのフィードバック、設備管理の視点から収集データを選定し管理を精緻化するなどの高度化を図っていくこととなる。同様に、当社はサービス事業拡大でユーザーの現場運用と当社が持つ機器設計の知見を融合させるシステム基盤を提供しながら基幹製品の価値の最大化を目指している。ICTサービスは大きくその全体像を変化させており、現在は、ICTインフラ整備中心からICTイ



図2. IoTの推移・予測(総務省)<sup>(3)</sup>

ンフラ整備に加えてICTの本格的な利活用の時代へ移る過渡期と位置付けられている。また、あらゆるモノがネットワークにつながり、そこから生成されるビッグデータを活用することで様々な価値が創造されるIoT時代の到来といわれる(図2)。高効率、高性能な機器・設備、監視制御の導入に加え、それらインフラを運用するための高度なインフラマネジメントを実現する要素を一体で織り込むことがライフサイクルコスト低減など更なるインフラの質の向上を実現する。

#### 4. サイバーフィジカルシステム

多様なデータがデジタル化され、分断されていた情報システムと現場制御システムが融合したサイバーフィジカルシステムによって、今までは想定されていなかったデータの活用が発生する。IoTの進展によって機器の動作、状態がセンサで自動的にデジタルデータ化され、リアルタイム化も進みつつある。新たな価値創造を可能とする先進のICTは、多様なモノや環境の状況をセンサなどのIoTデバイスやレーダなどのセンシング技術で把握し、それらからの膨大な情報を広域に収集し、ビッグデータ解析を行った上で将来を予測し、多様な社会システムのリアルタイムな自動制御を行うとされている。

一方で、実際の運用現場では、例えば運転とメンテナンスは相互に関連はするものの、基本的には互いの制約条件は切り離して各々独立して計画を立案しており、両者の相関関係を考慮した計画立案は実施されていない。この方法は、互いの制約条件の優先順位が決定される場合に一定の解を得るための現実的な方法として採用されているものである。複雑化、多様化するシステムではこれら制約条件も互いに関連し合い、分離した問題として取り扱うことが困難となるが、収集されたデジタルデータを高度情報処理技術によって有用な情報に変え、これまでは困難であった又は想定していなかった情報を相互連携させて情報から新たな価値(知見)を生み出す作業を高速に繰り返すことを可能としていく。統計的アプローチ又は物理的アプローチを用いて現象をモデル化してシミュレーションする技術が中核となり、現場に

おける知識が集約され、情報システムでの最適化処理、現場での自動制御の拡大、さらには、将来予測にまで拡張した全体最適を実現する一連のシステムが浸透していくものと考えられる。

情報社会では、分野ごとの合理化や最適化が主たる目的であったが、ICTの更なる進化は、これまでは実現できなかったデータの収集、蓄積、解析、解析結果の実世界へのフィードバックといった一連のサイクルを社会規模で可能にしていく。

例えば、電力の市場化の進展、太陽光・風力などの制御困難な再生可能エネルギーの大量導入に対応した複雑化する送配電ネットワークでも、ネットワーク上のあらゆる地点の状態、環境情報を収集し、ネットワークの電圧・周波数の安定制御、電力取引業務などとの連携、いわゆるスマートグリッドの実現で、相互の情報連携、情報の相互接続性は高度な技術課題を解決するための必須要件である。

情報処理技術の分野では最適化や予測アルゴリズムなどの高度化に加え、人工知能(Artificial Intelligence: AI)への取組みも加速している。また、情報の相互接続によって、これまで系統的に隔離されていた重要インフラ向け制御システムでもサイバー攻撃は無縁ではなくなり、重要インフラを持っている事業者にも自主的かつ積極的なサイバーセキュリティの確保が要求され、サイバーセキュリティ対策は重要インフラの安定運用の基盤となってきている。セキュリティ監視対応が進んでいる情報通信分野の監視対象はシステム内のデータ(個人情報、資産情報など)であるが、制御システムのセキュリティ監視対象はプラント設備、及び制御装置であり、通信データなどの状態監視以外に、プラントパラメータ、設備動作情報などのプラント運転情報も取り込んだセキュリティ監視の実現など、技術開発領域とその応用は新たな広がりを見せ始めている。

IoTの進展とともに、情報システムと運用制御システムの融合を実現した製品の高度利用システムは、エネルギーだけではなく、交通、医療などの各分野で、相互関係を考慮した統合的な計画の立案と適正な運用を実現し、安全性、安定性、経済性を並立させるシステムとして導入が期待されている。

#### 5. 最適化技術

近年、取得できる情報の網羅性、多様性の高まりの中で、製品への要求も複雑化・多様化しており、業務の合理化・効率化に向けた最適化アルゴリズムが必要とされるなど数理計画の分野が拡大している。一方で、その適用に当たっては、たとえ最適解が計算できたとしても、業務効率向上の目的を満足させるためには高速で安定な処理が求められる。当社は工場自家発電プラント運転計画の最適化問題や

電力システムの経済負荷配分問題に対し高速に計算できるアルゴリズムの研究に取り組み、高速化、安定性を実現したアルゴリズムの実適用を進めている<sup>(4)(5)</sup>。

工場自家発電プラントのコスト最小化やエネルギー消費最小化となる運転計画を立案するFEMS(Factory Energy Management System)で、工場のエネルギー需要などの予測値が確定的であるという前提で最適化を行うことは比較的容易であるが、実際には予測どおりではなく工場の操業の突発的変動によって自家発電プラントが供給する電力や熱のバランスが計画どおりではなくなるケースが発生する。この突発的変動の要因となる不確実な事象は、電力会社との電力契約を逸脱する、又は、製品の品質に影響を与えるおそれがあるなどの理由で単純に確率分布における裾野として切り捨てることはできない。実際の工場自家発電プラントの運用では、このような確率分布の裾野に現れる突発事象に備えて余裕を持った運転が行われているものと考えるが、エネルギーコストの観点からは最も経済的な運用とはならない。さらに、電力の市場化によって自家発電と電力市場との関係は複雑化する方向にあって事業機会も多様化していくため、再生可能エネルギーの導入も含め環境負荷低減と経済性の両立を追求し、確率分布の裾野にある不確実性を考慮しながら運転最適化を実現するニーズは、今後、更なる高まりが予想される。また、電力システムでの経済負荷配分問題では、各種の制約を満たし、種々の性能を持つ火力発電機の総合燃料コストが最小となるように、各火力機が請け負うべき需要量を配分する。これは電気事業者の需給管理システムの中核をなす処理であり、結果として得られる発電量は事業者の収益を左右する。この問題は、多時刻にわたる出力を一括して決定する必要がある、大規模かつ複雑な連続系最適化問題となるが、当社の持つ高速・安定な求解アルゴリズムは最適化技術の基盤技術の1つとして活用されている。例えば、燃料コストが最小となるように、単位時間当たりの発電量を決定する。このとき制約条件として、発電機の出力上下限や各時刻の需給バランスを考慮、計画期間の燃料消費制約を加味した場合、一般二次計画問題として定式化することができる。大規模な非線形最適化問題を高速・安定に解くことが重要となる(図3)。

システムの大規模化、データ量の飛躍的増加に伴い、高速・安定な処理は業務の効率化により一層直結するようになる。さらに、当社ではこれらの技術を応用した電力と燃料の相互運用を最適化する電力・燃料・蒸気需給管理システムの開発を進め、市場取引と設備運用計画を整合させ、契約管理や既存システムとのデータ連携も備えた統合型の最適化システムを実現し、将来予測を行うアプリケーションとの統合など、継続的に技術応用の拡大を図っている。

また、先進医療分野における粒子線治療装置でもアダプ

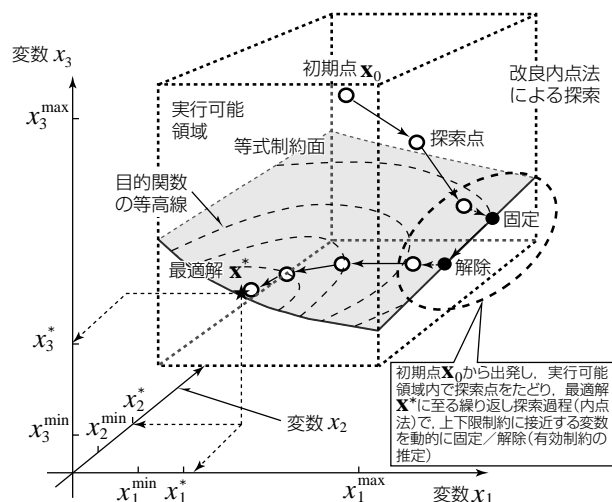


図3. 一般二次計画問題の探索イメージ<sup>(5)</sup>

ティブ治療として、最適化手法を活用した研究開発が盛んに行われている。患部画像を用いた粒子線照射時の位置決め精度向上技術から、患部状態を把握しながら照射量を決定して最適な治療計画を導くなど、重要インフラの各分野でICTを活用した自動化と高度解析技術による高速で安定な最適化技術の進展が期待されている。

## 6. む す び

当社は、火力、原子力、水力といった電力供給の中核を担う発電システム、電力システム改革における柔軟な運用を実現する新たな電力流通システム、先進医療システムなど、社会インフラの技術革新に取り組み、さらに、複雑化、多様化するシステムを最適に高度に活用する時代に向けて、情報通信技術、監視制御技術、情報処理技術における先進技術を結集し、その高度運用と安定運用を実現していく。また、インフラの基盤となる発電機、パワーエレクトロニクス応用機器、加速器などの重電機器開発・製造を通じて安全性、安定性、経済性を並立させ、多様化する要求に幅広く応え、持続可能な社会の実現に向けたインフラの変革に貢献していく。

## 参 考 文 献

- (1) 経済産業省：長期エネルギー需給見通し（2015）
- (2) 資源エネルギー庁：平成27年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2016）（2016）
- (3) 総務省：平成27年 情報通信に関する現状報告（平成27年版情報通信白書）（2015）
- (4) 橋本博幸，ほか：高速・安定な二次計画法の開発と実用問題への適用，三菱電機技報，**83**，No.5，305～309（2009）
- (5) 北村聖一，ほか：不確実性を考慮した工場自家発電プラントの運転最適化，電気学会論文誌C，**133**，No.4，822～830（2013）



# IoT・ICT技術を応用した 電気事業向けソリューション

高橋浩一\*  
井上俊宏\*

*Solutions for Electric Power Industry by Applying IoT and ICT Technologies*

*Koichi Takahashi, Toshihiro Inoue*

## 要 旨

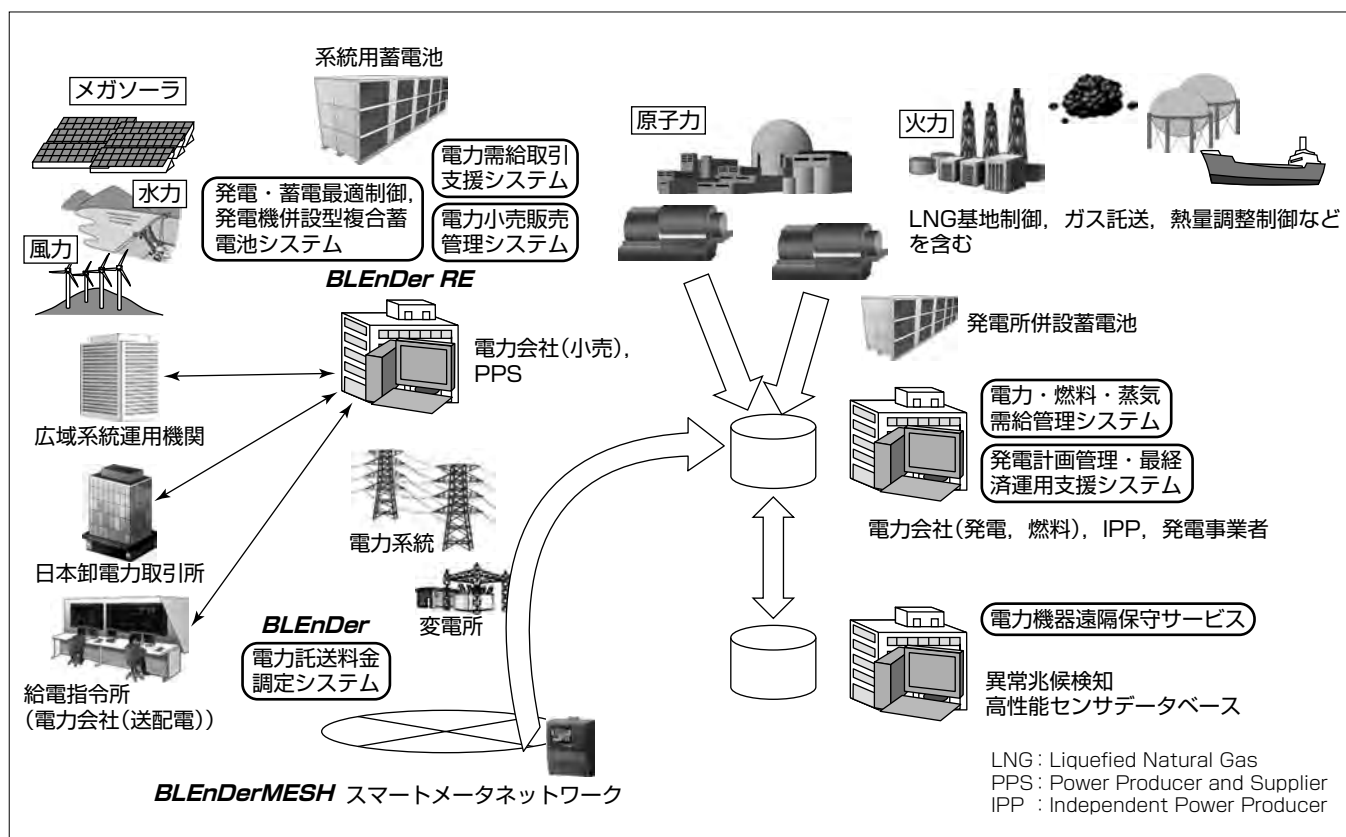
日本国内で電力小売の自由化が開始されて以来、三菱電機では、電気事業を行う上で必要な各種電力取引市場や電力会社とのインタフェースなどの業務を効率的に行えるパッケージソフトウェア“BLENderシリーズ”を開発して提供している。また、2016年4月にスタートした、一般の低圧需要家を対象にした電力小売自由化のスタートに必要なスマートメータシステムも開発した。

一方、インターネットやコンピュータ技術の急速な発展・普及によって、IoT(Internet of Thing)によってモノ

がインターネットにつながり、新しいサービスを開発する動きが活発となっている。

あらゆる機器をネットワークに接続し、大量の情報を収集し、工場や設備の稼働状態を最適にし、さらに、設備の保守・保全を最適に運用するための実証実験が様々な業種で行われている。

当社では、こうした技術動向や潜在的なニーズをとらえ、電力機器のアフターサービスを高度化するために、高度な予防保全サービスの開発を進めている。



## IoT・ICT技術を応用した電気事業向けソリューション

電気事業の業務を効率化するシステムや発電機を始めとする電力機器の稼働状態を最適化するシステムだけではなく、スマートメータネットワークから集められる膨大な情報と最先端のICT(Information and Communication Technology)技術によって新しい予防保全サービスを創出し、電力の安定供給、効率的な設備運用に貢献していく。

## 1. ま え が き

近年、人に対するサービスが中心であったインターネットサービスがIoTというキーワードで、モノ(センサなど)がインターネットにつながることによって新しいサービスやソリューションに対するニーズが高まってきており、それらを解決するためのデータ分析、AI(Artificial Intelligence)技術の開発が各社で進められている。

電力・産業分野でも、機器や設備(モノ)から集まってくるいわゆるビッグデータを分析して、電力の安定供給や工場の稼働率の向上に寄与するためのシステムやサービスの開発が求められている。

一方、2016年4月からの電力小売完全自由化に向けて当社ではこれまで、電力市場向けパッケージやスマートメータシステムを開発してきた。この開発の中で培ってきた、予測技術や通信技術とIoT時代に備えて開発してきたICT技術を応用して電力機器に対する新しいソリューションを開発する必要がある。

本稿では、電力市場向けパッケージソフトウェアBLENderシリーズとスマートメータシステム、2020年の発送電分離に向けた制度変更に伴うシステムの高度化への対応など、IoT・ICT技術を応用したソリューションの実現について述べる。

## 2. 電力市場向けパッケージ

### 2.1 BLENderシリーズ

電気事業を行う上で、電力会社(送電部門)とのインタフェースは必要不可欠で、HTTP(HyperText Transfer Protocol)やJX手順などが適用されている通信プロトコルも多様化してきている。当社では、これらの業務を効率的に行えるパッケージソフトウェアBLENderシリーズを提供している。

BLENderは次の7つのパッケージから構成されている。

#### (1) “BLENder LF”

需要予測を高精度に行うために、気象情報及び実績データの管理、予測値の計算を行う。

#### (2) “BLENder Trader”

日本卸電力取引所での電力取引及びその他の相対取引を行い、市場データ、取引データを管理する。

#### (3) “BLENder PM”

需要予測に対して、各種制約条件を満足する発電所ごとの計画値を計算し、必要な電力取引量を計算する。

#### (4) “BLENder BP”

システムに登録された計画値から、電気事業連合会が規定したビジネスプロトコル標準のXML(eXtensible Markup Language)形式に変換して自動的にデータ送信する。

#### (5) “BLENder BM”

需給バランスを保つために、発電、需要電力量の収集、発電指令の送信、需給バランスの監視を行う。

#### (6) “BLENder RM”

需要家、発電所、電力会社(送電部門)の料金計算を行う。

#### (7) “BLENder DM”

電気事業による収益拡大を図る上で最も重要な情報である計画・実績など、各種データを蓄積し、データの分析を行う。

当社では、顧客のニーズや制度改革に合わせて、各種パッケージの更なる強化、高度化を進めている。

### 2.2 再生可能エネルギー対応型EMSへの対応

近年、太陽光発電(PhotoVoltaic：PV)や風力発電(Wind Turbine：WT)など再生可能エネルギーの導入が進んでいる。これらの発電出力は気象条件に大きく左右されるため、その出力変動による電力系統への影響が出ないようにするため、既存の発電機や蓄電池と組み合わせた運用が必要となる。当社では、再生可能エネルギーを既存の発電機や蓄電池と協調をとりながら、安定的かつ経済的に運用管理・制御するエネルギーマネジメントシステム(EMS)“BLENder RE”を開発、提供している。BLENder REの特長は次の3点である。

#### (1) 再生可能エネルギーに対応

電力系統内に設置された太陽光、風力のような再生可能エネルギー、蓄電池やバイオマスといった分散電源の動特性を把握し、監視、制御することで監視対象エリアのエネルギーバランスを整え、電力、熱エネルギーを最適運用する。

#### (2) 多様な状況に対応可能な制御モード

スマートグリッド運用のための階層制御モード、再生可能エネルギー導入後の電力取引に対応したバーチャルプラントモード、離島や小規模電力系統部を対象としたマイクログリッドモードなど、最適なモードを選択できる。

#### (3) 複数の目的に対応

運用コスト最小化、CO<sub>2</sub>排出量最小化など複数の目的に対応した需給運用の最適化ができる。

当社は、尼崎地区(兵庫県尼崎市)に大規模なスマートグリッド実証実験設備を構築しており、このシステムを採用している。

#### 2.2.1 最適運用計画技術

##### (1) 計画精度向上のための予測手法

PV出力、WT出力、需要を予測するとともに、予測値に対する予測誤差範囲を補償することで、需給計画の信頼性を高めている。

##### (2) 最新実績データの活用

周期的に更新される気象予測に加え、直近の実績を用いて、常に最新の予測データを更新することで、天候等で変化するPVやWTの出力変動、電力需要の変動に追従した最適な制御を実現している。

##### (3) 不確定性を考慮した需給運用計画

PV出力、WT出力変動の不確定性を考慮した確率的手法の採用によって、PVやWTの導入が増えた場合でも、停電確率を悪化させることなく、燃料コストを削減できる。

## 2.2.2 リアルタイム監視制御技術

### (1) 計算時間短縮のための高速最適化技術

高速最適化技術として、内点法と有効制約法を活用し、問題の答えを求める時間を大幅に短縮し、さらに、エネルギーマネジメントに特化したチューニングを実施している。

## 3. スマートメータシステム

### 3.1 スマートメータシステムの導入

スマートメータシステムはエネルギーの効率的な運用への対応や、計量データの更なる活用など、社会的要請に基づき導入が進められている。スマートメータシステム導入の目的は、次のとおりである。

- (1) 電気使用状況の見える化
- (2) 需給逼迫(ひっばく)時のデマンド側での需要抑制
- (3) 料金メニューの多様化
- (4) 新サービス提供者に対するメータデータの提供
- (5) 電気を供給する顧客への更なるサービス向上
- (6) 将来のスマートグリッド対応

スマートメータシステムを導入することによって、メータデータの幅広い分野への活用や、配電ネットワーク運用業務の更なる効率化への活用が期待できる。

以上、スマートメータシステム開発に適用した技術について述べる。

### 3.2 スマートメータ通信システム

スマートメータ通信システムは、数百万～数千万台のスマートメータとオンラインでネットワーク接続される大規模な通信システムである。スマートメータは様々な環境に設置されることから、複数の通信媒体を利用して設置環境に合わせたネットワーク構築を実現する必要がある。このシステムでは次の3つの通信技術が適用されている。

#### (1) 無線マルチホップ通信

ゲートウェイまでマルチホップ転送によって通信を行う方式であり、特定小電力無線など電波法による無線局の免許が不要である通信媒体を利用する。

#### (2) 電力線通信(Power Line Communication : PLC)

無線通信不可の場所に適用するため、既存の電力線を通信回線として利用する。

#### (3) 1:N通信(携帯電話など)

携帯電話などの通信キャリアによるデータ通信サービスを利用する。

スマートメータ通信システムに適用している規格は、IEEE802.15.4/4e/4g, IPv6(Internet Protocol version 6), IETF RFC6550 RPL(IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks)など多くの国際標準

規格に対応している。

### 3.3 無線マルチホップ通信技術の適用

無線マルチホップ通信技術は、隣接の通信端末を中継して通信を行う方式で、直接電波の届かない拠点間での通信が可能であり、特定小電力無線を使っても低コストで広範囲なネットワークを構築できる。また、通信経路を網目状(メッシュ)に構成することで、無線電波変動や電波障害に対して、迂回(うかい)路を自動的に探索して、安定的に通信が可能となる。

無線マルチホップ通信技術をスマートメータシステムへ適用する場合、大規模化マルチホップネットワークの構築と通信端末の低コスト化、低消費電力化が課題となる。

当社では、これらの課題を解決するため、スマートメータ用マルチホップ通信ミドルウェア“BLEnDerMESH”を開発した。特徴は、次のとおりである。

#### (1) 通信経路の構築に必要なトラフィックを極力抑制

- ・通信経路維持に定期的な制御トラフィックが不要
- ・経路情報の更新はエラー発生時に絞り経路探索頻度を削減
- ・送信タイミング制御によって、無線での衝突による再送を抑制

#### (2) 上位側(センター)で無線メッシュネットワーク管理を実現

- ・通信端末からネットワーク管理情報を効率的に収集

#### (3) 無線メッシュ通信部のプログラムを最小限で実現

- ・シンプルかつ確実な方式の採用によって、遠隔でのプログラム更新時間を短縮

#### (4) 低消費電力を実現

- ・無線送信を極力抑えることによる低消費電力化を実現

### 3.4 スマートメータデータ管理システム

#### 3.4.1 システムの概要

スマートメータデータ管理システムは、計量データやスマートメータで検知するイベント情報を一元的に管理し、収集したデータの健全性確認(精査)、スマートメータへの遠隔コマンド制御などを実現している。収集した計量データはIEC61968/61970 CIMモデルに準拠しており、託送管理システムや料金計算系システムなどの様々なシステムがメータデータなどに容易にアクセスできるオープン性を確保している(図1)。

#### 3.4.2 セキュリティ対策

スマートメータデータ管理システムは、需要家の計量データを蓄積し、他システムへのデータ提供、スマートメータの遠隔開閉ができる。このため、個人情報の漏洩(ろうえい)、サイバーテロへの対策が重要であり、システム開発では、アメリカ標準技術研究所(National Institute of Standards and Technology : NIST)のセキュリティガイドラインを参考に、セキュリティ対策を実施した。

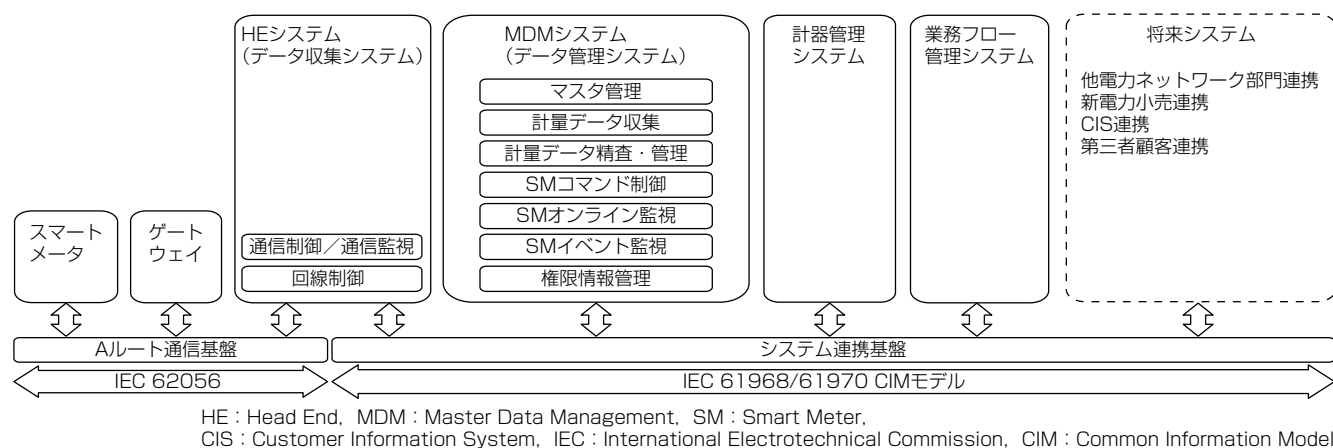


図1. スマートメータデータ管理システム

#### 4. 電力機器予防保全サービスの実現に向けて

プラントや機器を通信回線につないで、遠隔監視することは、以前から行われてきたが、通信インフラや計算機技術の向上によって、コンピュータのストレージやCPU資源がインターネット上のどこにあって同じことができるクラウドサービスが普及し、大量のセンサデータを蓄積して複雑な統計解析などのデータ分析を行う環境を構築しやすくなった。

##### 4.1 高性能センサデータベース

大量のセンサデータを分析することで、これまで検出できなかった機器故障の兆候を検出する。その結果をもとに機器や設備の保全計画を立てて稼働率を上げるといふ、IoT時代のニーズに対応するため、発電所での大量のデータを高速に蓄積・検索・集計する“高性能センサデータベース”を開発した。このシステムはセンサデータ向けに、700通り以上の圧縮パターンの組合せからサイズが最小になるものを選択して圧縮・蓄積する。また、サイズが異なる最大100万個の圧縮データをストレージブロック内に取り出しやすく並べることで、検索・集計時のストレージアクセス回数を削減可能とした。

##### 4.2 異常兆候検知技術

機器の予防保全のため、当社の異常兆候検知技術について述べる。大量のデータから有用な情報を発見するために、学習、検知、表示の機能がある(図2)。

###### (1) 学習機能

大量のデータから正常の基準となる学習データ(バンドモデル)を作成する。このときに大量のデータからデータのばらつきを考慮した正常モデルを作成する。

###### (2) 検知機能

検知対象データとバンドモデルを比較し、バンドモデルの範囲から外れたデータを異常兆候と判定する。

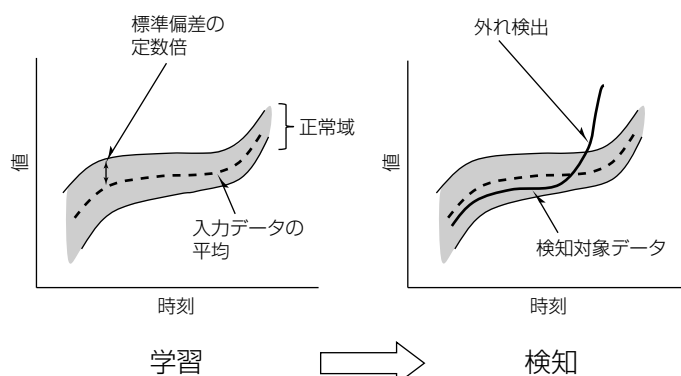


図2. データモデルの学習と異常兆候検知

###### (3) 表示機能

異常兆候の原因である可能性が高い信号をリストで表示し、検知対象データのグラフも表示する。

現在、異常兆候として“いつもとちがう”というのは検知できるが、これらの結果を機器や設備の予防保全の最適化に活用するためには“なにがどれくらいおかしいのか?”までを推測する必要がある。これを実現するため、当社の機器設計情報やこれまでの故障やトラブル調査時に収集した情報に基づく知見をデジタル化し、最新のAI技術を活用して故障予知・診断の精度を向上させていく計画である。

## 5. む す び

当社では、これまで電力流通向けパッケージ開発や、電源の多様化に対応した需給管理システム及びスマートメータシステムを開発してきた。これらのシステムに加え、IoT時代に対応した新しいデータベース技術や異常兆候検知技術、スマートメータ通信システムで構築した新しい通信インフラを活用し、2020年の発送電分離に向けた制度変更に伴うシステムの高度化へ対応や、IoT・ICT技術を応用した電力機器の最適な予防保全サービスを創出していく。

齊藤正裕\*  
 佐内孝太郎\*\*  
 齋藤 裕\*

# 電力・燃料・蒸気需給管理システム

Supply-demand Optimization System of Electric Power, Fuel and Steam

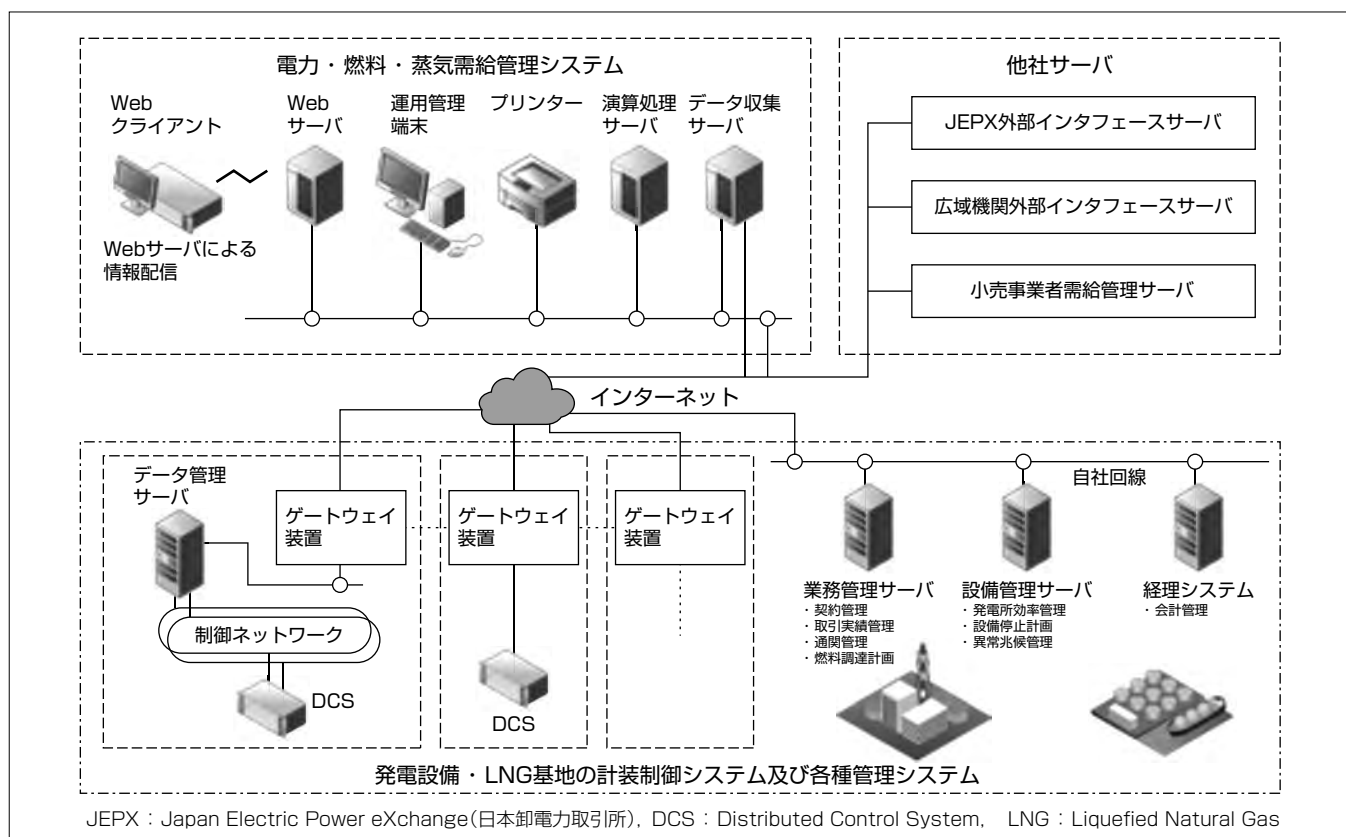
Masahiro Saito, Kotaro Sanai, Yutaka Saito

## 要 旨

2020年の発送電分離及び総括原価廃止に伴う競争激化に対応するため、電力事業者は事業プロセスの再評価、エネルギーポートフォリオ改善、アセット運用高度化による市場競争力強化に注目している。特に、取引契約の活性化や再生可能エネルギー導入による発電所の運用変化を見据えて、市場活用の拡大や、発電設備と燃料設備との一体運用による設備運用高度化が急務となっている。

そこで、電力市場及び燃料市場の中長期的な予測に基づき、様々な制約条件を踏まえて、高い収益性と発電計画・燃料調達の整合性を確保した取引・運用計画を導出する電力・燃料・蒸気需給管理システムの開発を行っている。

このシステムは、従来の電力需給管理システムと、“燃料設備の設備制約”、“蒸気供給に応じた熱効率特性変化”、“燃料・電力取引量の最適配分”、“燃料消費量の変化に応じた配船計画”を考慮した燃料需給管理システムを組み合わせ、繰り返し最適化演算を適用することで、電力と燃料が個別に実施するよりも多くの収益を得るための計画を策定することを実現する。これによって、“設備運用コスト最小化”と“燃料・電力取引活用による利益最大化”、“ローリングによる燃料在庫の精緻化”、“燃料調達計画の調整力確保”を実現し、スポット市場活用による設備運用の経済性と柔軟性を両立させる。



## 電力・燃料・蒸気需給管理システムの全体構成

従来の電力需給管理システムに、燃料需給管理システムを新規開発し、それらを組み合わせて収益最大化を図るシステムを開発している。設備・運用・取引などの各種制約条件を考慮し、電力と燃料の最適な運用計画を策定する。

## 1. ま え が き

2020年の発送電分離及び総括原価廃止に伴う競争激化に対応するため、電力事業者は事業プロセスの再評価、エネルギーポートフォリオ改善、アセット運用高度化による市場競争力強化に注目している。特に、取引契約の活性化や再生可能エネルギー導入による発電所の運用変化を見据えて、市場活用の拡大や、発電設備と燃料設備との一体運用による設備運用高度化が急務となっている。

そこで、電力市場及び燃料市場の中長期的な予測に基づき、様々な制約条件を踏まえて、高い収益性と発電計画・燃料調達の整合性を確保した取引・運用計画を導出する、電力・燃料・蒸気需給管理システムの開発を行っている(図1)。

本稿では、電力・燃料・蒸気需給管理システムの役割、特徴、機能について述べる。

## 2. システムの役割

### 2.1 販売量の変化を捉えた短・長期的な計画

再生可能エネルギー導入量の増加、取引契約の活性化によって、電力事業者が供給する電力量、燃料消費量は、短・長期的に変化しやすい状況にある(図2)。

このため、電源運用や市場取引の傾向を見通して、短・長期で発電運用と燃料運用の整合性を確保できる次のような電力・燃料の需給計画を算出していく必要がある。

- (1) 将来の販売契約や再生可能エネルギー発電量の変化を予測し、燃料消費量の想定から中長期の燃料調達計画を作成する。
- (2) 実運用で発生した実績と計画との乖離(かいり)を織り込みながら短・長期計画を継続的に補正して計画の精度向上を図る。

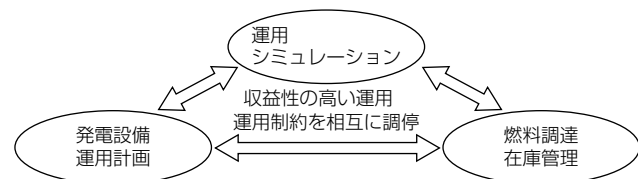


図1. 運用最適化の概念図

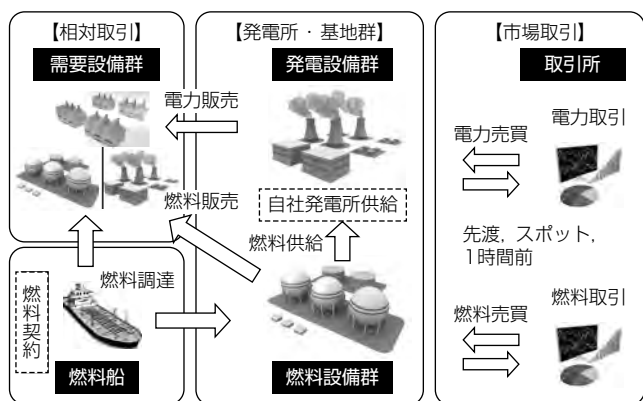


図2. 電力と燃料の売買

### 2.2 販売価格を踏まえた最経済な取引計画

発電事業者は燃料基地から燃料販売することも可能であり、電力市場だけでなく燃料市場も睨(にら)んだ運用が重要になってくる。設備運用に必要なコストを基に、電力と燃料の相対取引と市場取引を総合的に評価し、収益が最大となる市場での取引量を決定する必要がある(図3)。

### 2.3 設備制約の変化に応じた柔軟な設備運用計画

発電設備及び燃料設備の異常や点検が発生すると、設備性能の低下を踏まえて、供給計画全体を見直す必要がある。発電設備及び燃料設備の設備制約は、発電計画及び燃料計画の双方に影響する要素であり、発電と燃料を一体管理し、設備制約の変更に柔軟に対応することが必要となる(図4)。

### 2.4 配船制約を踏まえた燃料調達計画

燃料需要に応じた基地からの燃料供給を計画する際、LNG船や基地の運用制約を踏まえ、基地別に配船計画を立てる必要がある。特に、既存の燃料契約やスポット契約といった契約面の制約条件を考慮し、契約別の調達量及び配船のタイミングを決定していく必要がある(図5)。

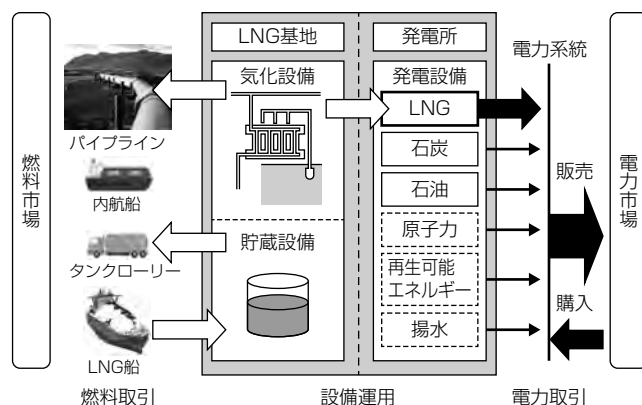


図3. 電力・燃料市場を見据えた裁定取引

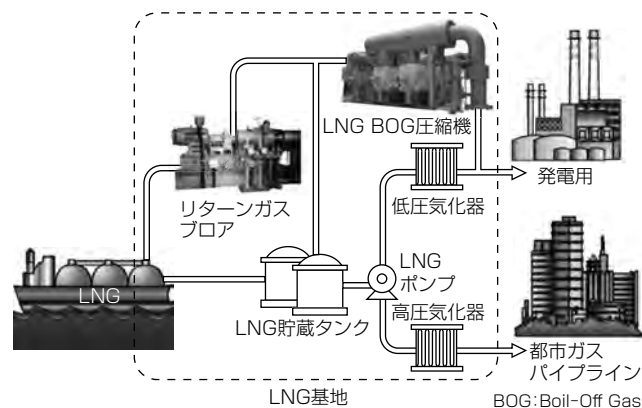


図4. LNG基地運用を支える設備群

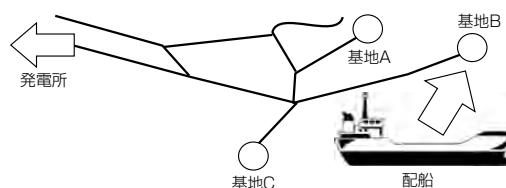


図5. 配船制約と燃料調達計画



### 3. システムの機能

このシステムの主要機能である“条件設定”、“契約管理”、“燃料需要想定”、“需給計画”について述べる。

#### 3.1 条件設定

条件設定は、設備モデルと制約条件で構成する。

##### (1) 設備モデル

発電所及びLNG基地の設備構成、設備間の接続状態をモデル化したものである。モデル化の目的は、最適化演算に設備制約や運用制約を織り込むために、各設備を数式化することにある。そのため、実際の設備から需給最適化にかかわる要素をピックアップしてモデル化している。また、長期計画を導出の際には、演算時間の短縮化のため、複数の燃料タンクを巨大な単一タンクとして扱う等の簡略モデルを採用している(図6)。

##### (2) 制約条件

設備運用や取引業務を行う上で考慮すべき制約で、設備の構造的特性に基づく“設備制約”、設備の運用範囲に基づく“運用制約”、取引上の契約や社内ルールに基づく“取引制約”がある。

設備制約は、LNGタンクの最大容量、ガス配管の最大流量、気化器における単位時間当たりの気化能力など、設備仕様起因する制約である。この制約は、設備の交換、改修などが発生しない限り変更はない。

運用制約は、設備の故障や点検などによって、一時的に設備の能力が制限される状況を制約としたものである。この制約は、設備状態や運用方針に応じて時間単位で設定される。

取引制約は、相対取引や市場取引の契約内容や業務ルールに準ずる制約のことである。例えば、契約内容によって、一定期間に一定量の取引が義務付けられるケースや契約不履行時にペナルティが発生するケースが該当する。

#### 3.2 契約管理

契約管理は、燃料調達契約、燃料販売契約、電力販売契約など、電力や燃料に関する取引契約に関する情報を管理するものである。

燃料に関する契約情報には、契約期間や量のほかに、燃料の質、具体的には燃料の組成や熱量などの情報も含まれる。燃料の組成や熱量は、燃料の産地ごとに大きくばらつきがあるが、発電設備は設備別に熱量下限値を持っており、燃料供給時には熱量制御が必要となる。熱量の高い燃料と低い燃料を用いて発電所に燃料供給を行う場合、異なる燃料種の複数タンクから適正な比率で払い出すなどの基地運用が必須であり、需給計画策定の上で契約情報が重要となる。

#### 3.3 燃料需要想定

燃料需要想定は燃料消費量の時系列的变化を想定したものである(図7)。燃料需要の内訳は、相対取引などの“供給契約枠”とスポット取引などの“市場取引枠”に分けられる。

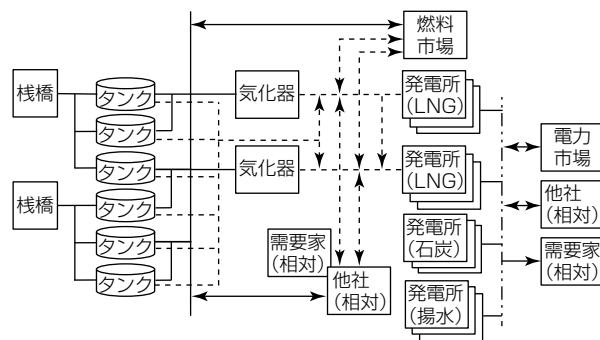


図6. 設備モデルの概念図

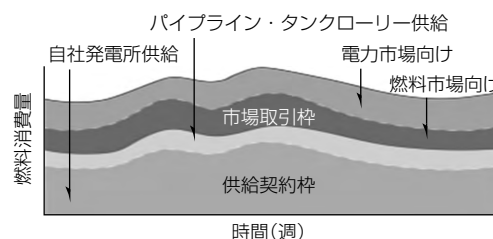


図7. 燃料需要想定

供給契約枠は、自社発電所で発電に使用する燃料消費量と、ガスパイプラインやタンクローリーなどによる他社への燃料供給量の合計である。供給契約枠の燃料消費量は、相対契約している取引先の利用想定量であり、需給計画策定では取引先が想定する燃料消費量の見込値として扱う。

市場取引枠は、燃料市場でのガス又はLNG取引と、電力市場での電力供給に必要な発電用の燃料の合計である。市場取引枠の取引量は、電力・燃料市場の市場価格に連動して変動することになる。

#### 3.4 需給計画

従来の電力需給管理システムでは、エリア需要に合わせて電源構成と各発電所の発電計画を立て、発電計画を基に長期の燃料調達契約を行っている。再生可能エネルギー発電量や市場価格の変化によって、発電計画(燃料消費計画)に差異が現れると、燃料調達契約に縛られて最適な計画にならない。

そこで、このシステムでは、“燃料設備の設備制約”、“蒸気供給に応じた熱効率特性変化”、“燃料・電力取引量の最適配分”、“燃料消費量の変化に応じた配船計画”を新たに考慮することとした。これによって、“設備運用コスト最小化”と“燃料・電力取引活用による利益最大化”、“ローリングによる燃料在庫の精緻化”、“燃料調達計画の調整力確保”を実現し、スポット市場活用による設備運用の経済性と柔軟性を両立させた計画を策定できるようになる。

##### (1) 最適化演算

燃料需給エンジンは電力需給エンジンに調達可能な燃料量をデータ連携し、電力需給エンジンは燃料制約に基づいた発電計画と各発電設備の供給余力を算出する。次に、供給余力と燃料在庫量を勘案し、利益最大となる燃料市場及び電力市場の売買量を算出する。算出された売買量に応じ

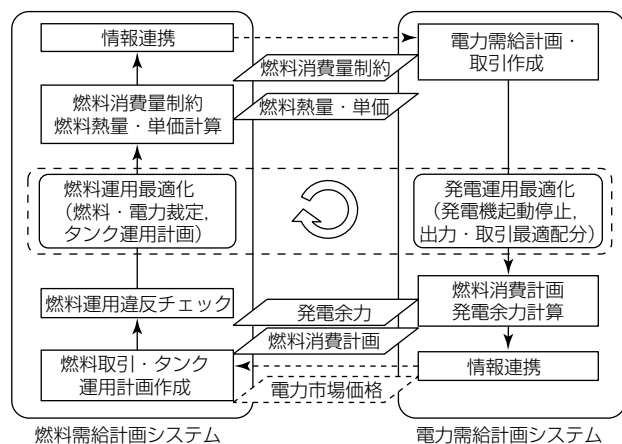


図8. 燃料需給と電力需給の連携による需給計画の最適化

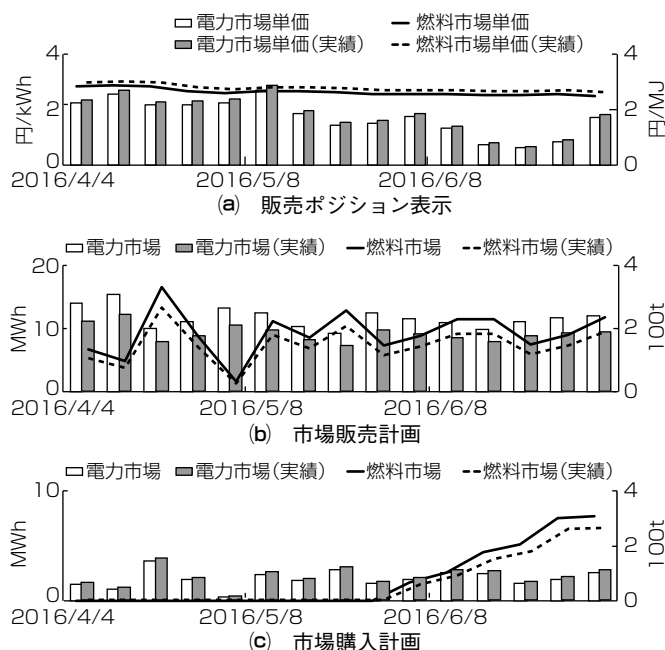


図9. 電力・燃料需給計画

て各発電所の発電計画と燃料供給計画を見直し、電力需給エンジンはコスト最小と利益最大となる需給計画及び取引計画を最適化する(図8)。このプロセスを繰り返し演算で連携させ、両計画を整合させていく。

## (2) 計算結果表示

電力・燃料需給計画については、電力・燃料の運用方針が計画結果に反映されていることを確認できるように、電力・燃料のそれぞれの市場単価と販売ポジション、売買計画と売買実績を重ね合わせて表示するようにした(図9)。

収益計画については、電力と燃料から得られる収益の総合収支を表示したり、電力と燃料の個別収支を表示したりすることで、需給計画を多面的に評価できるように配慮している(図10)。

## 4. 外部システムとの連携

このシステムは、Webベースのシステムで、サーバ側

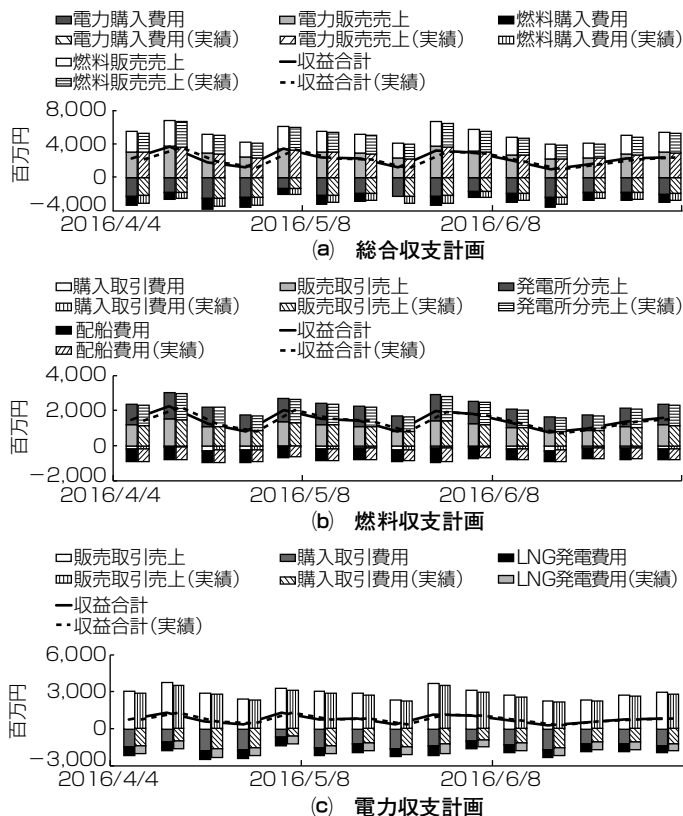


図10. 電力・燃料売買の収益計画

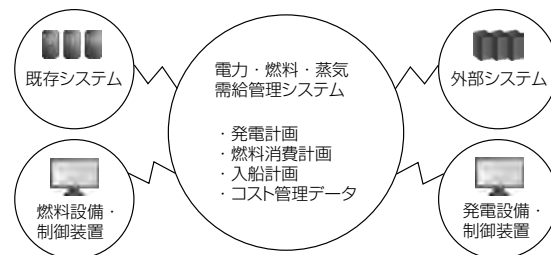


図11. システム連携

はクラウド環境とオンプレミス環境のどちらにも対応可能である。プラント側(プラント実績データ)、業務システム側(設備管理、経理システム)、外部システム(JEPX、広域機関)などと連携させることで、データの自動取り込みや計画の自動送信などが可能である(図11)。

外部システムとの連携のため、JX手順など標準的な伝送プロトコルをサポートする予定であり、またRDB(Relational Database)やCSV(Comma-Separated Values)ファイル、Webサービスなどの汎用的なシステム連携手段についても標準実装する予定である。

## 5. む す び

電力・燃料・蒸気需給管理システムは、2017年度に市場投入を目指して現在開発中である。電力・ガスのシステム改革の進展や総括原価廃止による競争激化に応じ、このシステムの重要性が増すものと考えている。制度変更や市場環境の変化に素早く対応し、継続的に機能拡充を図っていく。

# 発電機及び付帯電気品の アフターサービス技術

仁木直人\*  
山田祥一郎\*

After-sales Service Technologies of Generators and Incidental Electrical Equipment

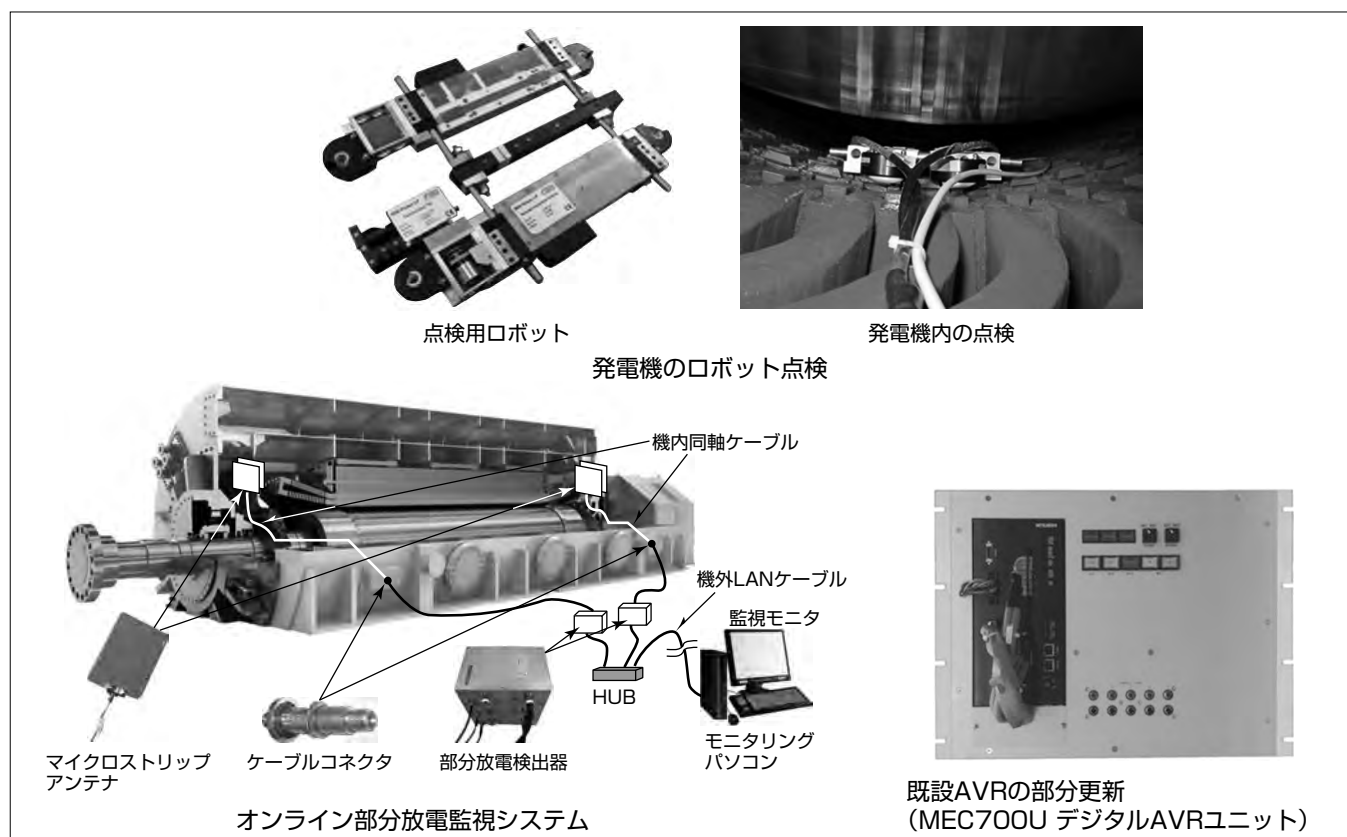
Naoto Niki, Shoichiro Yamada

## 要 旨

近年、三菱電機の発電向けビジネスでは、アフターサービス事業の強化に注力しており、顧客のニーズを把握して、発電機を主体とした電力機器の高度な予防保全サービスの提案を推進している。

従来の大型リハビリによる延命化提案等に加えて、新たなアフターサービスメニュー(技術)として、発電機本体向けに、回転子を引き抜かずに異常の早期検知が可能なロボット点検、オンラインでの部分放電を監視することで運転中の異常兆候を初期段階で検知するオンライン部分放電監視システム、最新要素技術の既設発電機リハビリ工事へ

の適用等によるアフターサービス事業の拡大を進めている。また、発電機の端子電圧を制御するための自動電圧調整装置(AVR)を始めとする電気品では、既設AVRを容易に最新機種へ更新するためのレトロフィットユニット化、既設サイリスタ起動装置(SFC)向けにメンテナンスの簡易化、メンテナンスコスト低減を目的とした分配器レスシステム、顧客のライフサイクルコスト低減に寄与するLTSA(Long Term Service Agreement：長期メンテナンス契約)、遠隔監視技術を使った提案等を進めている。



## 既設発電所向けサービスメニュー(技術)

発電機の点検用ロボットは、簡略点検下での点検項目を充実させ、本格点検時の事前準備の拡充を目的としている。オンライン部分放電監視システムは、オンラインでの部分放電を監視することで運転中の早期異常検知、絶縁寿命の評価を行う。また、“MEC700U デジタルAVRユニット(レトロフィットモデル)”は、既設の当社製AVRの主要制御部分を容易に最新機種へ更新する。

# 1. ま え が き

近年、当社の発電向けビジネスでは、アフターサービス事業の強化に注力している。一方で、海外向けアフターサービス事業では、大手発電機メーカー等の同業他社や現地のアフターサービス専門会社が当社納入の既設設備に対するアフターサービス事業、リハビリ工事等へ参画しており、非常に厳しい競争環境下におかれている。このため、既設設備納入者にしかできないその知見を活用した保全提案等、他社との差別化が重要となっている。発電機リハビリ工事による延命化等、従来の大型リハビリ工事の受注拡大に加え、顧客のニーズを把握して、定期点検での点検業務の高度化、信頼性や機能向上を目的とした追加設備の設置や部分的な更新、LTSA等、新たなアフターサービスメニュー(技術)を確立することが急務となっている。

本稿では、様々なアフターサービスメニューの中から、①発電機のロボット点検、②オンライン部分放電監視システム、③既設AVR部分更新(MEC700U デジタルAVRユニット)について述べる。

## 2. アフターサービスメニュー

### 2.1 発電機のロボット点検<sup>(1)</sup>

#### 2.1.1 ロボット点検の導入背景と効果

発電機の安定運転には日常の点検と定期的な保守が重要であり、特に主要構成部品の中で、固定子の鉄心と楔(くさび)、回転子表面を定期的に点検する必要がある。しかし、これらの点検には回転子の引き抜きが必要となる。従来はこの回転子の引き抜き点検(本格点検)で異常が確認された場合、許される工期の中で修理を行うため十分な補修ができないことや、工期の延長が問題となることがあった。

点検用ロボット(図1)は固定子と回転子の空隙(エアギャップ)に挿入し、ロボットに搭載した磁石で固定子鉄心に吸着させ軸方向に移動させることで発電機を分解することなく、カメラによる目視点検、固定子楔の打音点検、EL-CID(エルシド)点検を実施でき、本格点検前に実施する簡易点検の充実化を実現している(図2)。

また、簡易点検の際、異常を事前に認知することで、早期の本格点検の要否が検討でき、本格点検前に必要な補修



図1. 点検用ロボット



図2. 発電機内の点検

部材の準備をして、対象となる部分を重点的に点検するとともに、速やかに修理を行うことが可能となる。

#### 2.1.2 ロボット点検の内容

##### (1) 目視点検

点検ロボットに搭載したカメラによって、固定子鉄心及び回転子表面の傷や過熱痕、固定子及び回転子のスロット内構成物のズレや摩耗粉の発生などの異常を検出できる(図3)。

##### (2) 打音点検

点検ロボットに搭載したハンマーと加速度センサによって固定子楔をタッピングし、固定子楔に生じる振動を検出することで、固定子楔の緩み量を定量化し緩みの分布を把握するとともに、点検結果を蓄積して傾向管理を行うことでスロット内構成物の健全性を評価する。固定子楔の緩みを固い、やや緩い、緩いの3段階にマップ化することで、傾向管理を行うことが可能となる(図4)。

##### (3) EL-CID点検

固定子に多心線を巻き直流電流を流して固定子鉄心を励磁する。固定子鉄心に層間短絡部がある場合、ロボットに取り付けたチャトック巻線によって短絡部の電流を検出することで、固定子鉄心の異常検知が可能となる。

### 2.2 オンライン部分放電監視システム<sup>(2)</sup>

#### 2.2.1 システム構成

電極間に電圧を加えた際、その間の絶縁物中に発生する放電や電極と誘電体の間に発生する放電などは部分放電と呼ばれる。タービン発電機では高電圧が印加される固定子巻線で部分放電が発生し、部分放電が長時間にわたり発生することで、絶縁の劣化につながる可能性があることが知

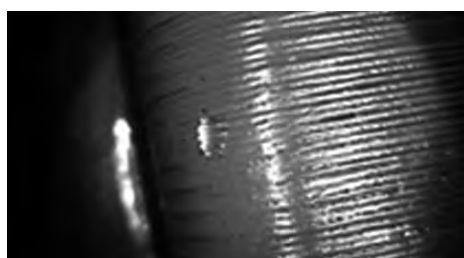


図3. カメラによる点検結果(固定子鉄心傷)

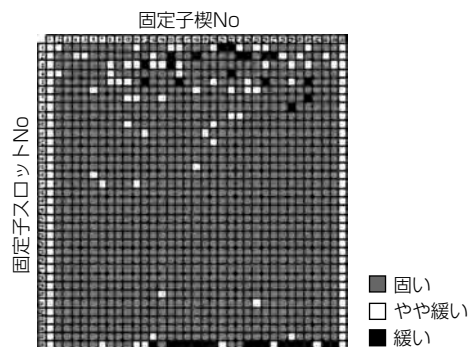


図4. 固定子楔の打音点検結果

られている。タービン発電機の固定子巻線では、主絶縁が熱、電気、環境及び機械的なストレスを受けることで劣化すると、劣化の進行に応じて部分放電が大きくなる傾向があるため、部分放電を定期的に計測することによって主絶縁の劣化状況を把握できる。

オンライン部分放電監視システムは、発電機が通常の負荷運転状態でこの部分放電を常時監視することで絶縁劣化を評価、傾向監視するシステムである。このシステムは図5に示すとおり、マイクロストリップアンテナ、ケーブルコネクタ、部分放電検出器、モニタリングパソコン、監視モニタ、各種ケーブルなどで構成している。

マイクロストリップアンテナは小型軽量で発電機回転子を引き抜くことなく短時間で容易に取付けが可能であり、固定子巻線全体で発生した部分放電を高感度に検出できる。

## 2.2.2 部分放電データの取得

オンライン部分放電監視システムで取得できるデータは“位相特性”と“強度のトレンド”の2つに大別でき、これらのデータから部分放電データの評価を行う。

### (1) 部分放電の位相特性

マイクロストリップアンテナで受信した部分放電信号は図6に示すとおり強度と位相の情報を持っており、一定時間の全ての信号をプロットすることで、位相特性が得られる。

### (2) 部分放電強度のトレンド

部分放電のデータを繰り返し取得しこれを時系列に並べると図7の部分放電強度のトレンドグラフとなる。長期間にわたって部分放電強度のトレンドを監視することで、部分放電が一定レベルにあるのか、上昇傾向にあるのかといった傾向管理に基づいた情報が得られる。

## 2.2.3 異常兆候検知時の対応

異常兆候が検知された場合は発電機を停止し、固定子巻線の端部の目視点検、楔の目視及び打音点検、電気試験による絶縁診断を行い、異常の有無を確認するとともに、必要に応じて補修を施すことで事故を未然に防ぐ。

## 2.3 MEC700U デジタルAVRユニットによる既設AVRの部分更新

AVR(自動電圧調整装置)は、タービン発電機の励磁装置内に設置されており、定常運転時に同期機の電圧を一定に保持する機能を持っている。負荷が変化するとき電圧を維持し動態安定度を向上させること及び電圧の急変時、速やかに電圧を回復する機能によって負荷遮断時の電圧上昇を抑制し、過渡安定度を向上させる等の目的を持っている。

図8に示すとおり、当社は1944年からこの装置の製作を行っており、デジタルAVRを1990年に投入するとともに、後続モデルの製作を行っている。最新機種MEC700

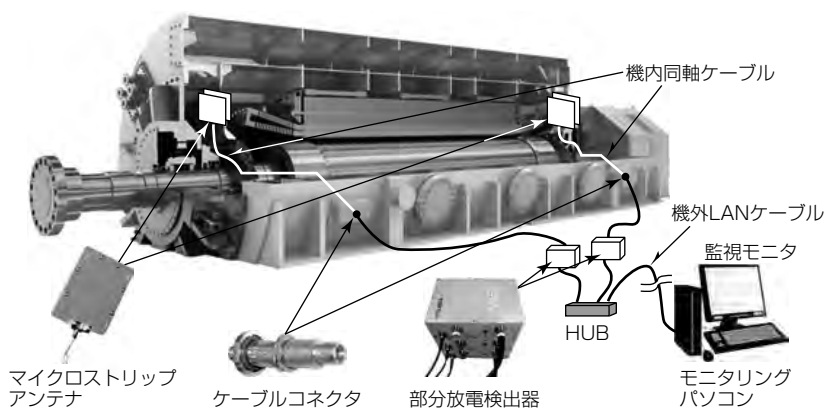


図5. オンライン部分放電監視システムのシステム構成

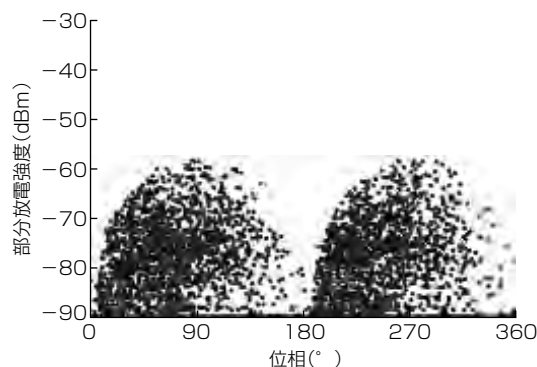


図6. 部分放電の位相特性

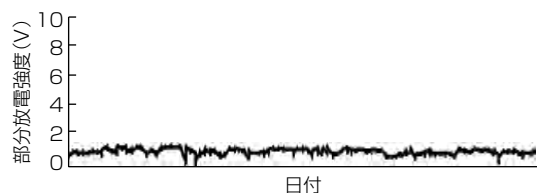


図7. 部分放電強度のトレンド

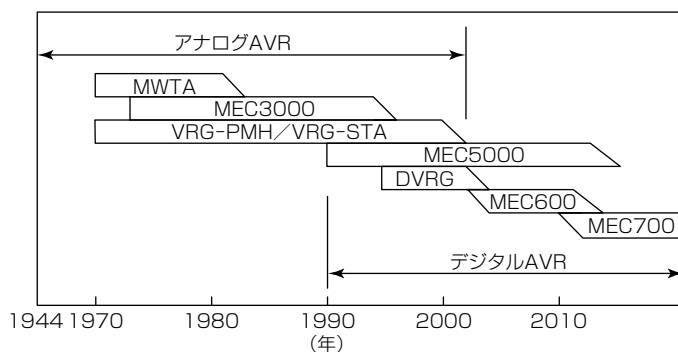


図8. 当社製AVRの変遷

デジタルAVRモジュール(図9)は、最新のデジタル技術を採用しており、従来機と比較して高機能かつコンパクトである。

AVRを始めとする電気品の期待寿命は、装置ごとで構成目目が異なり若干の差異があるが、15~20年程度であり、従来は一式での更新を提案・推奨している。一式更新では、既設外線ケーブルの解線、既設設備の撤去、新製設

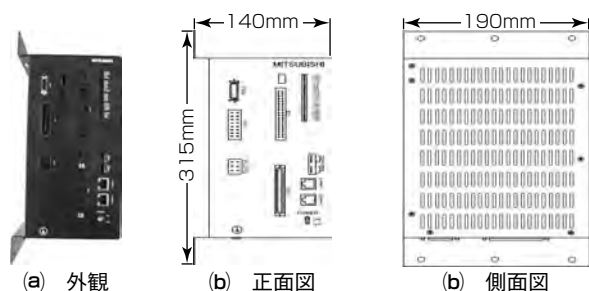


図9. MEC700 デジタルAVRモジュール

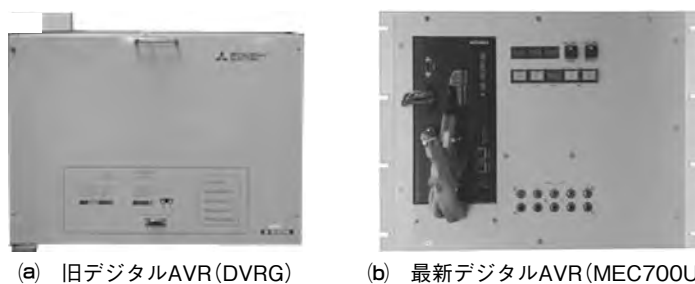


図10. 新旧デジタルAVRユニット

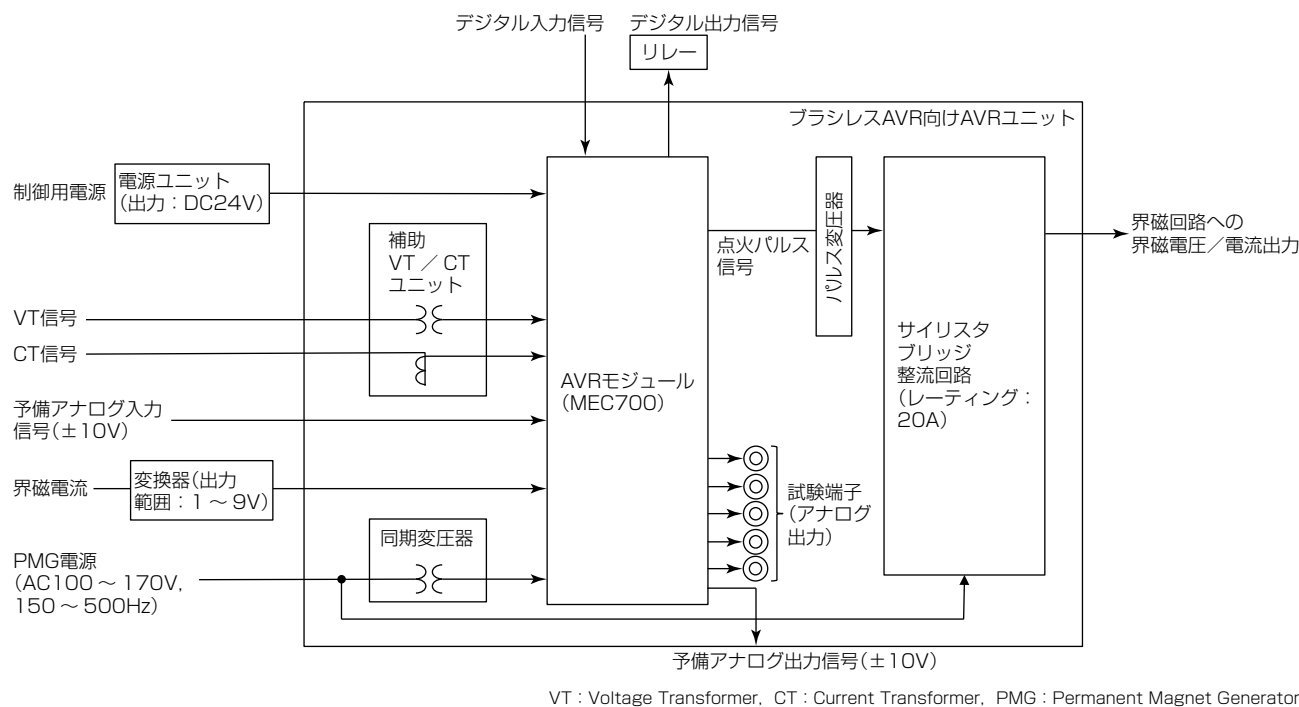


図11. MEC700U デジタルAVRユニットのシステム構成

備の搬入・据付け、既設外線ケーブルの再接続、装置の試験等が必要となり、特に海外顧客にとっては、現地工事期間の長期化、更新時の高コスト等が課題となっている。

MEC700U デジタルAVRユニットは、ブラシレス励磁式発電機向け既設設備の主要部品だけを部分的に更新する目的として既設アナログAVR“VRG-PMH-IVユニット”，及びデジタルAVR“DVRGユニット”のレトロフィットモデルとしてユニット化したものである(図10)。既設アナログAVRユニット及びデジタルAVRユニットは、AVRモジュールに加え、ユニット内に全波整流するためのサイリスタ素子ユニット等を収納した構成である。MEC700U デジタルAVRユニットは、部分更新を実現するため、外観(外形寸法、外部インタフェース取り合い)、機能(AVRモジュール、サイリスタモジュール等)に関して、既設のAVRユニットと同じ構成を持っている(図11)。MEC700U デジタルAVRユニットで更新することで、パネル(筐体(きょうたい))、ケーブルインタフェース等の既設設備は流用でき、現地工事の工期短縮、更新工事のコスト低減、最新機種への更新を実現している。

### 3. む す び

発電機及び付帯電気品の新たなアフターサービスメニュー(技術)としてロボット点検、オンライン部分放電監視システム、既設AVRの部分更新(MEC700U デジタルAVRユニット)について述べた。これらのサービスメニュー以外でも信頼性、機能向上、効率改善を目的とした追加設備の設置や部分的な更新、LTSA(長期メンテナンス契約)等のサービスメニューの確立を継続的に推進しており、これらサービスメニューの適用を通じて、既設発電所の信頼性向上、稼働率向上、メンテナンス性向上等に寄与していく。

### 参 考 文 献

- (1) 増永 顕, ほか: タービン発電機の予防保全技術, 火力原子力発電, **66**, No.10, 630~634 (2015)
- (2) 佐古 浩, ほか: マイクロストリップアンテナによるタービン発電機のオンライン部分放電計測, 三菱電機技報, **87**, No.11, 636~639 (2013)



# 原子力計装制御システムのグローバル展開に向けた製品開発

永井貞光\* 上田 威\*  
谷口 学\*  
北村信吾\*

Product Development of Instrumentation and Control Systems for Overseas Nuclear Power Plant

Tadaaki Nagai, Manabu Taniguchi, Shingo Kitamura, Takeshi Ueda

## 要 旨

世界のエネルギー消費量は年々増加傾向にあり、特に新興国では経済発展に伴い消費電力量が急激に増加している。そのための安定した電力供給源として原子力発電所が期待されており、新興国を中心に2035年までに300基以上の建設が計画されている。

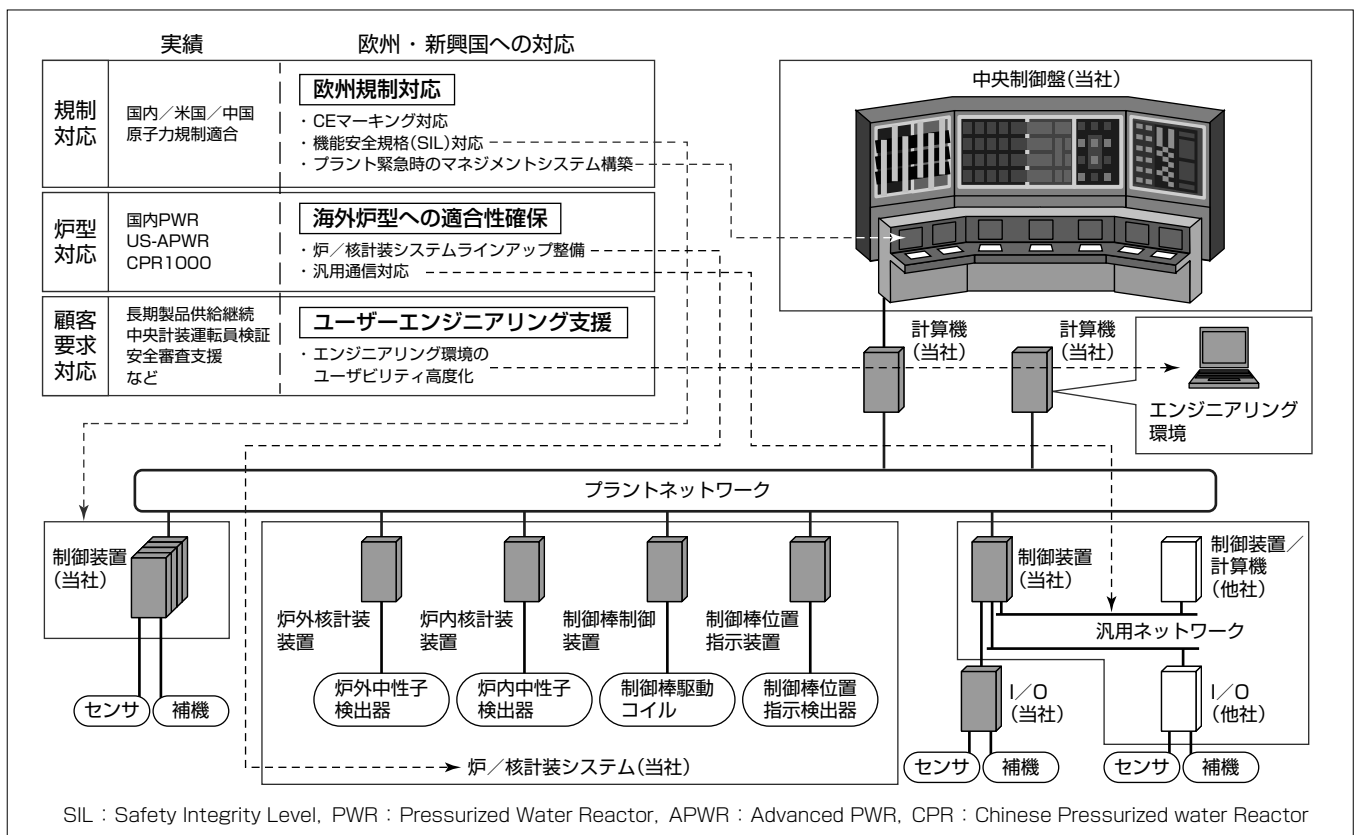
三菱電機は、高い安全性・信頼性が求められる原子力計装制御システムを国内を中心に50年以上にわたり供給してきた。国内で培ってきた技術を活用し、新興国の原子力発電所の安全性・信頼性を高めるため、当社の原子力計装制御システムのグローバル展開に取り組んでいる。

その内容としては、主に規制対応、炉型対応、海外顧客要求対応の3つの取組みが挙げられる。規制対応としては、

新興国で採用されている先進国の規制に適合するため欧州規制対応(CE(Conformite Europeenne)マーキング)、原子力向けの一部設備に求められる機能安全規格への適合(第三者認証)、プラント緊急時の国際原子力機関(IAEA)の新規要件に対応した運用を支援・管理するシステム構築を進めている。

炉型対応としては、各原子炉の型式に対応した炉／核計装システムのラインアップ整備、他メーカー設備とのネットワーク接続を可能とする汎用通信機能の拡充を進めている。

海外顧客要求対応としては、新興国の作業員でも、保守可能なようにプラント運転監視システムのユーザーエンジニアリング支援を図っている。



## グローバル市場進出に向けた標準的な原子力計装制御システム構成

原子力計装制御システムは、主に中央制御盤・制御装置／計算機・炉／核計装システムで構成される。複数メーカーによるシステムを構築可能とするため、システム間は汎用ネットワークで接続、炉／核計装システムは各炉型に適合したラインアップを整備、制御装置／計算機のソフトウェアはエンジニアリング環境のユーザビリティ高度化によって作業員の保守容易化を図っている。

## 1. ま え が き

世界のエネルギー消費量は、新興国の経済発展・人口増加によって年々増加しており、インフラ基盤構築のための基幹電源として原子力発電所が注目されている。そのため新設の原子力発電所建設が、新興国を中心に2035年までに300基以上計画されている。新興国では、原子力発電所建設に関する規制・要求整備が不十分であるため、先行する米国や欧州先進国の規制・要求が適用される。

当社は、国内原子力発電所向け計装制御システムを長年にわたり継続して供給してきた。また、中国での計装制御システム納入、米国での設計認証活動を経験してきた。

これらの経験をベースに新興国で適用される可能性がある米国・欧州規制や炉型要求を加え、さらに、海外で求められるビジネス形態への対応を図ることで、原子力計装制御システムの製品ラインアップを拡充している。

本稿では、当社が推進する原子力計装制御システムのグローバル展開に向けた製品開発に関する取り組みについて述べる。

## 2. 実績とグローバル化拡大に向けた取り組み

### 2.1 国内外での実績

当社は、安全性・信頼性が求められる原子力計装制御システムの開発／設計／製造／試験を自社で一貫して実施してきた。原子力分野での長きにわたる取り組みの中で、多種多様な製品要求に応じる柔軟性及び製品の長期供給継続性を強みとして、規制対応力、炉型対応力、顧客要求対応力を向上させてきた。

国内では、国内原子力発電所24プラントに原子力計装制御システムを50年以上にわたり提供してきた。また、計装制御システムのデジタル化に伴い、アナログ設備のデジタル化既設更新、中央制御盤更新工事及び総合デジタル計装制御システム新設納入を完遂してきた。

海外では、米国での設計認証活動及び中国での計装制御システム納入を実施してきた。米国向け設計認証活動では、三菱重工業㈱とともに米国標準審査指針で定められる安全審査項目のうち、人間工学設計(中央計装運転員検証を含む)と計装制御システムの設計認証に取り組み、ドラ

フトSER(Safety Evaluation Report)発行に至った<sup>(1)</sup>。中国CPR1000では、中国原子力規制当局(NNSA)の安全審査に適合する計装制御システムを納入した<sup>(2)</sup>。また、安全系計装制御システムを製作する能力を持った海外企業として、当社はHAF(He Anquan Fagui)604認証を取得した。

### 2.2 更なるグローバル化拡大に向けた取り組み

中国・米国での商談実績を基に新興国への展開に向けて、国内にはない次の海外ビジネス要件に対応する。

- (1) 海外規制(国際規制・規格)
- (2) 多種多様な原子炉型
- (3) 保守形態の違い

これらの要件を踏まえて、原子力計装制御システムのグローバル展開に向けて、更なる規制対応／炉型対応／顧客要求対応として、次の取り組みを実施する(図1)。

#### (1) 規制対応…要件(1)

新興国に適用されている先進国規制に適合するため米国規制に加え欧州規制対応として、CEマーキング対応、機能安全規格(SIL)対応、プラント緊急時に対するIAEAの新規要件対応を実施する(3章)。

#### (2) 炉型対応…要件(2)

海外炉型への適合性を確保するため、原子炉に依存する炉／核計装システムのラインアップを整備するとともに、他社メーカー設備とのネットワーク接続を可能とするための汎用通信機能を拡充する(4章)。

#### (3) 顧客要求対応…要件(3)

システム導入後の運用・保守を新興国のユーザーでも実施可能とするため、プラント運転監視システムに係る画面・データベースなどのエンジニアリング環境を整備する(5章)。

## 3. 欧州規制対応

### 3.1 CEマーキング対応

欧州規制を採用する新興国への製品供給に当たり、CEマーキング取得に向けて、計装制御システムでは、EMC(Electro Magnetic Compatibility)／低電圧／機械／RoHS(Restriction of Hazardous Substances)指令に適合していることを示す必要がある。

具体的には、低電圧指令や機械指令において人災事故防

	日本	米国	中国	欧州・新興国
規制対応	国内原子力規制適合	米国原子力規制委員会設計認証取得中	HAF604認証取得済み	欧州規制対応 ・CEマーキング対応 ・機能安全規格(SIL)対応 ・プラント緊急時のマネジメントシステム構築
炉型対応	国内PWR(デジタル化対応・新設建設・既設更新など)	US-APWR	CPR1000	海外炉型への適合性確保 ・炉／核計装システムのラインアップ整備 ・汎用通信対応
顧客要求対応	多種多様な製品要求・長期製品供給継続など	中央計装運転員検証など	NNSA安全審査支援など	ユーザーエンジニアリング支援 ・エンジニアリング環境のユーザビリティ高度化
	参考文献(1)参照		参考文献(2)参照	本稿で述べる当社活動範囲

図1. グローバル化拡大に向けた活動

止の観点で、警告表示、充電部及び可動部への接触防止などに対する適合性について、またEMC指令では、特に放射系ノイズに関する適合性を確認中である。また、2017年から産業用制御装置もRoHS指令の対象となる。そのため、電子回路の部品及び塗料などの見直し及び製造ラインの構築を実施し、CEマーキングに適合した原子力発電所向け計装制御システムを供給可能としている。

### 3.2 機能安全規格(SIL)対応

近年、発電所を含めた各分野のプラントでは、事業者から国際電気標準会議(IEC)規格IEC 61508をベースとした機能安全規格に適合した設備の導入が求められる。特に欧州圏では、設備信頼性の客観的指標として、2次系の大型機器に対して機能安全レベルが条件とされる。機能安全のレベルは、安全機能の作動失敗確率をSIL1~4のクラスに分類し、ハードウェアやソフトウェアにおける障害発生時のシステムの安全性を客観的、定量的に評価したものである。具体的には、主タービンを保護するシステムに対する機能安全レベルとして、安全機能の作動を必要とした場合に $10^{-3}$ ~ $10^{-4}$ の失敗確率を満足するSIL3レベルが求められる。

当社では現在、上記信頼性レベルを確保可能な構成として、多数決ロジックを実装した出力部、4重化の演算部を備えながらもコンパクトなシステムを開発している(図2)。安全規格のアセスメントは、計画、設計、検証の各プロセスに及び、その客観性を確保する上で、第三者審査機関による認証活動を進めている。

### 3.3 プラント緊急時のマネジメントシステム構築

福島第一原子力発電所事故の教訓や国際放射線防護委員会(ICRP)勧告を考慮する形で、原子力災害に対する“緊急時の準備と対応(EPR)”を強化するための一般安全要件(GSR7)が2015年11月にIAEAから公表された。

今後、IAEA GSR7の要件への対応として、プラント緊急時における管理・運用を正確かつ迅速に行うためのプラントマネジメントシステムの必要性が高まると予想している。当社では、事故発生時の作業の進捗と設備・人員のリソースを発電所内、国・自治体などの複数拠点でリアルタイムに情報共有を可能とするマネジメントシステムを開発している。このシステムでは、重み付けによって重要な情報を優先して提供することで適切な意思決定を支援する。

さらに、このシステムの最適化を進める上で、原子力発電事業者と連携することによって、ニーズを取り込みプラント運用に展開していく計画である。

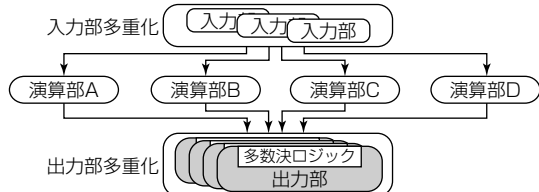


図2. SIL3対応システムの構成

## 4. 海外炉型への適合性確保

### 4.1 炉／核計装システムのラインアップ整備

炉計装／核計装システムは、原子炉容器に直結した検出器及び制御棒駆動機構と直接接続し、原子力プラントの運転・監視・保護をするシステムである(図3)。原子炉容器及び炉心設計に依存するシステムであり、炉型によって設計が異なるため、炉／核計装システムを導入するために各炉型に適合したラインアップを整備している。

当社ラインアップ整備の取組みのうち、炉内核計装装置(In-core Instrumentation System : ICIS)と制御棒駆動(Control Rod Drive Mechanism : CRDM)コイルについて述べる。

#### 4.1.1 炉内核計装装置(ICIS)

国内プラントでは、原子力発電をベースロード電源として負荷一定運転を実施している。一方、海外プラントでは負荷追従運転が主流となりつつある。負荷追従運転を実現するために、炉心の中性子束分布情報を軸方向及び水平方向に対してより詳細に測定・監視する必要がある。よって、ICISでは、中性子検出器を原子炉容器内に固定することで、炉内の中性子束分布を常時詳細に測定できる検出器固定(FID)型ICISの採用が主流となっている。FID型ICISでは、検出器として自己出力型中性子検出器(Self-Powered Neutron Detector : SPND)が採用される。しかしながら、SPNDからの出力信号は、国内プラントにおける検出器(電離箱)からの出力信号( $10^{-3}$ A程度)と比較すると微小な電流値であることに加え、中性子検出のために使用する材料によって広い電流域( $10^{-9}$ ~ $10^{-6}$ A)となる。

当社では、信号処理部でのアナログ／デジタル回路の分離、部品配置の最適化によってS/N比(Signal to Noise ratio)を改善した。これによって、広範囲にわたり微小電流信号を高精度に計測可能な信号処理部を開発し、製品化に向け取り組んでいる。

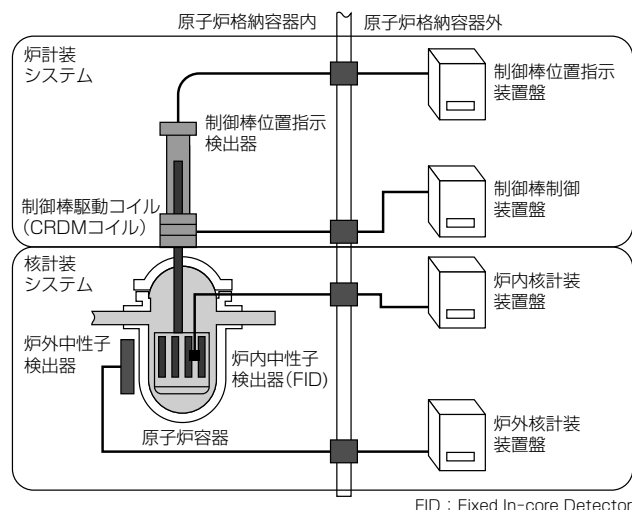


図3. 炉／核計装システム

#### 4.1.2 制御棒駆動 (CRDM) コイル

CRDMコイルは制御棒を動作させるための制御棒駆動機構の構成部品であり、制御棒駆動機構は原子炉容器の上部に設置される。また、海外では様々な炉型の原子力発電所が建設されており、炉型によって炉心仕様が異なるため、それぞれの仕様に適合した制御棒駆動機構が存在する。

当社では、国内プラントで培ったCRDMコイルの材料選定と製造工法の新規考案によって、仕様の異なるCRDMコイルを柔軟に製作可能とした。これによって、国内プラントだけでなく、炉型ごとの制御棒駆動機構に対応したCRDMコイルメニューを拡充した。

#### 4.2 汎用通信対応

当社は、これまで常用系だけでなく安全系にも適用可能とすることを考慮し、許認可での立証性にも配慮した独自プロトコルのネットワークを開発し、適用してきた。安全系ほど厳格な立証性を要求されることがなく、合理的で効率的なシステムが求められる常用系では、各メーカーの設備、機器間の取り合いが必要となる。このため、当社独自プロトコルに加え、他社設備との接続性を確保可能な汎用プロトコルに対応する。当社では、原子力計装分野でシェアが高いインタフェースから順に独自ネットワークに加える形でラインアップを拡充する開発を進めている(図4)。

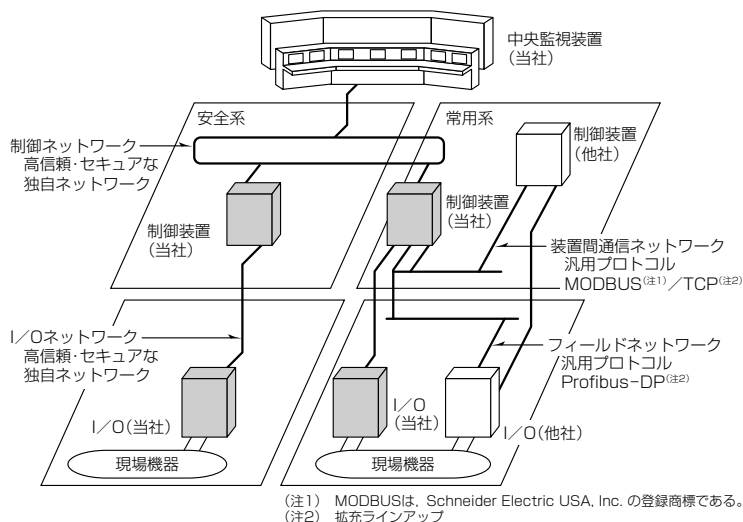


図4. ネットワーク構成図

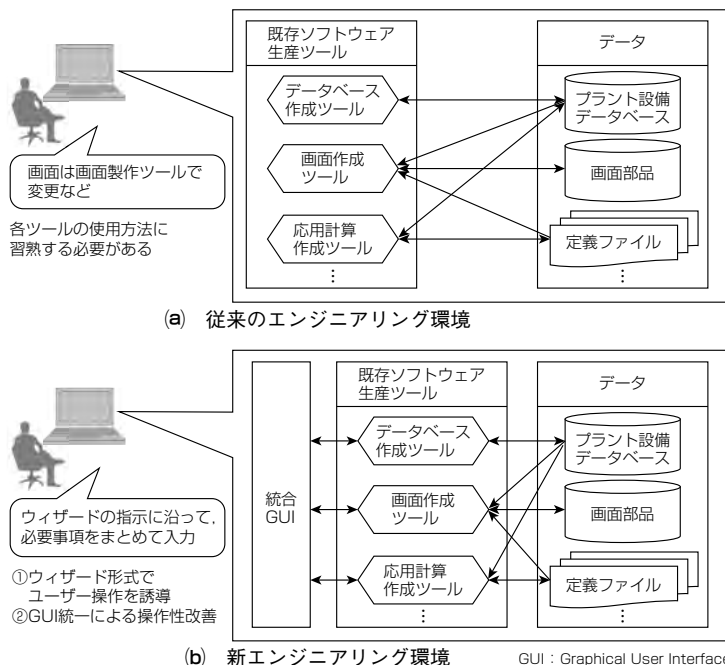


図5. エンジニアリング環境の新旧比較

#### 5. ユーザーエンジニアリング支援

##### 5.1 エンジニアリング環境のユーザビリティ高度化

国内では、顧客からソフトウェア生産の全てを請け負う形で、プラントの運転監視に係る画面・データベースなどの設計/製作/試験を実施してきた。国内原子力計装制御システムで使用しているエンジニアリング環境は、当社ソフトウェア専門のエンジニアが、新規システム構築や大規模なソフトウェア改造を柔軟に実施するために画面・データベースなどの対象に特化した専用ツールを組み合わせた構成・機能としている(図5(a))。

一方海外では、新興国を始めとして経験が少ない作業員が計装制御システム導入後のソフトウェア改造を実施することが考えられる。これに対応するためのエンジニアリング環境最適化、ユニバーサルデザイン化開発を進めている。具体的には、システムとして共存しえない設定の組合せをあらかじめ選択肢から除外するなど、当社エンジニアの運用に依存していた部分をユーザーが意識せずに適切に選択可能なようにユーザーエンジニアリング機能の最適化を図っている。また、エンジニアリング環境のGUI統一、ウィザード形式導入によるユーザー操作の誘導によって、操作の容易化と習熟の早期化を図っている(図5(b))。

#### 6. む す び

当社は海外ビジネス要件に合致するグローバル展開可能な原子力計装制御システムの製品開発を推進している。

今後も、安定した電力供給の支えとなるように技術力及び国際競争力の向上を図り、国内及び海外の原子力発電に貢献していく。

#### 参 考 文 献

- (1) 平島将士, ほか: 米国原子力プラント向けデジタル計装システムの規制対応活動, 三菱電機技報, 87, No.11, 627~630 (2013)
- (2) 松本 等, ほか: 中国CPR1000型原子力発電所向け計装制御設備の実現, 三菱電機技報, 87, No.11, 631~635 (2013)

# 原子力計装制御システムの サイバーセキュリティ対策の現状と展望

稲葉隆太\*  
町田慎弥\*

*Present and Future of Cyber Security Measures for Instrumentation and Control Systems of Nuclear Plant*  
Ryuta Inaba, Shinya Machida

## 要 旨

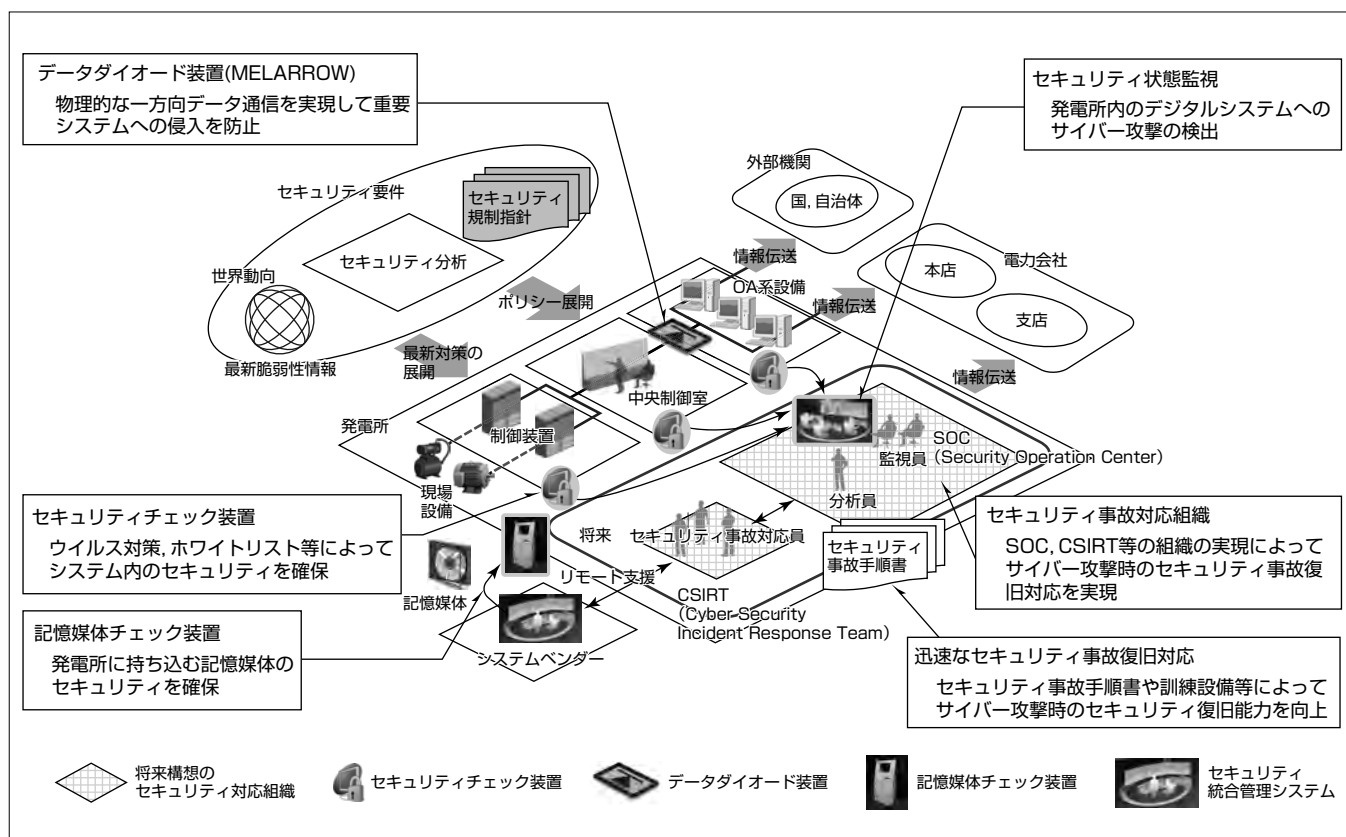
サイバー攻撃の増加を背景に、国内では、サイバーセキュリティ基本法が制定され、重要インフラ(国民生活と社会経済活動が大きく依存する、電力、金融、航空などの13分野)の事業者自主的、かつ積極的なサイバーセキュリティの確保を要求している。また、経済産業省は電力制御システムのサイバーセキュリティ確保を目的に、電力制御システムセキュリティガイドラインを2016年度内に制定する計画である。いずれも、技術面(アクセス管理、マルウェア<sup>(注1)</sup>対策等)、運用面(事故対応組織、手順書の整備など)の対策の実施、PDCA(Plan Do Check Action)によるセキュリティ対策の向上を要求している。今後、重要

インフラ事業者はこれら要件を満足したサイバーセキュリティ対策を実現していく必要がある。

三菱電機は、計装制御システムへの技術面の対策としてセキュリティチェック装置、データダイオード装置、記憶媒体チェック装置などのセキュリティデバイスの開発を実施し、原子力発電所への納入を実現した。

現在は、運用面の対策実現に向け、セキュリティ状態監視、セキュリティ事故対応組織、迅速なセキュリティ事故復旧対応などの基本方針の策定に向けた取組みを推進している。

(注1) 悪意のあるソフトウェア。ウイルス、トロイの木馬など。



## 計装制御システムにおけるサイバーセキュリティ対策の全体構成

発電所のサイバーセキュリティ確保のため、中央計装や計装制御に用いられるデジタル設備に対するセキュリティ対策を講じるとともに、万が一のサイバー攻撃に備え、セキュリティ状態を監視するSOCや、セキュリティ事故時の復旧対応を行うCSIRTなどを配置し、セキュリティ統合管理システム、セキュリティ事故手順書などを整備することで迅速な対応を実現する。

## 1. ま え が き

近年、デジタルシステムに対するサイバー攻撃は増加の傾向にあり、その攻撃対象は制御システムにまで及んでいる。2015年末にウクライナで発生して20万人以上に影響を与えた大規模な停電もサイバー攻撃が原因とされており、システムの停止だけではなく、サービスの停止にまで至った。

従来、原子力分野では発電所の安全への取組み(安全設計)を継続して行ってきた(プラントの深層防護、誤操作防止、設備多重化など)。セキュリティ対策に関しても、安全機能を持つ設備には、直接的な外部ネットワークへの接続禁止、独自装置・プロトコルなどを採用してきた。

一方で、高度化するサイバー攻撃への対応、内部脅威対応、最新の規制指針対応など、新たな観点でのサイバーセキュリティ対策が求められている。

本稿では、原子力計装制御システムのセキュリティ要件、セキュリティ技術対策及びセキュリティ運用対策について述べる。

## 2. 計装制御システムでのセキュリティ要件

セキュリティ対策には一般的に、技術面の対策(ウイルス対策、アクセス管理など)と、運用面の対策(セキュリティ事故時体制、手順書、パッチ管理など)が必要である。対策の要件はセキュリティ分析の結果や、各事業分野の規制指針・ガイドラインから抽出できる。

### 2.1 セキュリティ分析からの要件

セキュリティ対策を検討する際、セキュリティ分析によって、現状の問題点を正確に抽出して対策を講じることが重要である。セキュリティ分析手法には、米国国立標準技術研究所(NIST)によって策定されたセキュリティ分析のガイドラインNIST SP800-30<sup>①</sup>や、ISO/IEC27001に記載のセキュリティリスク軽減を図るためのガイドラインISMS(Information Security Management System)<sup>②</sup>などの手法が存在する。いずれも対象システムを体系的に分析し、セキュリティの脅威をリスク値として数値化(定量化)することで、適切な対策を講じることが可能とする。

NIST SP800-30に基づき、セキュリティ分析を行った結果、抽出される脅威と対策例を表1に示す。

表1. NIST SP800-30に基づいて抽出された脅威と対策例

対象	脅威例	対策例
装置	装置内情報への不正アクセス	・アクセス管理 ・暗号化
	装置を悪用したサービス妨害	・ホワイトリスト
	装置に感染したマルウェアによるサービス妨害	・ウイルス対策 ・ホワイトリスト
	記憶媒体(USBメモリ等)によるマルウェア感染	・ウイルス対策 ・記憶媒体チェック装置
通信路	通信データの盗聴、改ざん	・暗号化 ・ログ監視

## 2.2 セキュリティ規制指針からの要件

原子力分野のサイバーセキュリティ規制指針として、国際原子力機関(IAEA)発行のNuclear Securityシリーズ<sup>③</sup>(注2)、米国原子力規制委員会(NRC)発行のRG5.71<sup>④</sup>(注3)などが存在する。これら規制指針には、次の技術面、運用面の要件があり、対策を講じる必要がある。

- (1) セキュリティレベルの異なるセグメント間のデータ通信の物理的な一方向化
- (2) 記憶媒体のライフサイクル管理(記憶媒体の輸送から、発電所受入れ、導入、破棄までのセキュリティ管理)
- (3) セキュリティ状態監視
- (4) セキュリティ事故対応組織の確立
- (5) 迅速な復旧対応

(注2) IAEA策定の核セキュリティに関する国際的文書。基本文書、勧告文書、実施指針、技術文書などの幅広い要件。

(注3) 米国原子力規制委員会(NRC)策定のサイバーセキュリティに関する規制指針。

## 2.3 原子力向けセキュリティ要件

2.1節、2.2節で抽出した“原子力向けセキュリティ要件”を表2に示す。

## 3. 計装制御システムのセキュリティ技術対策

原子力向けセキュリティ要件(表2)のうち、技術要件①～③の対策実現に向け、セキュリティチェック装置(技術要件①)、データダイオード装置(技術要件②)、記憶媒体チェック装置(技術要件③)の開発を行った。各装置の特長を次に示す。

### 3.1 セキュリティチェック装置

デジタル装置に対する一般的なセキュリティ機能(ウイルス対策、ホワイトリスト、アクセス管理など)を搭載し、セキュリティ確保を実現するとともに、複数装置のセキュリティ状態を集約することで、同一ネットワーク上の装置のセキュリティの一元管理を可能とした(図1)。

### 3.2 データダイオード装置

データダイオード装置“MELARROW<sup>⑤</sup>”データ通信を物理的に一方向化するネットワーク装置(図2)である。IEEE802.3ahの単方向通信の技術によってデータの物理的一方向通信機能を実現した。

セキュリティレベルの異なる境界に設置することで、セキュリティレベルの低いネットワークからの不正侵入を遮

表2. 原子力向けセキュリティ要件

分類	No.	要件概要
技術要件	①	不正アクセス、マルウェア感染、サービス妨害、データ改ざん等への対策
	②	セキュリティレベルの異なるセグメント間のデータ通信の物理的な一方向化
	③	記憶媒体のライフサイクル管理
運用要件	①	セキュリティ状態監視
	②	セキュリティ事故対応組織の確立
	③	迅速な復旧対応



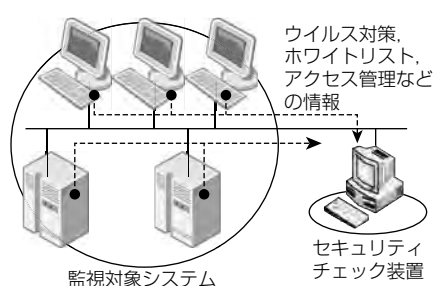


図1. セキュリティチェック装置の概念図



図2. データダイオード装置(MELARROW)



図3. 記憶媒体  
チェック装置

断可能にした。米国の原子力発電所では、この装置の導入が要件となっている。

### 3.3 記憶媒体チェック装置

プラント設備のソフトウェア改造時などに、発電所へ持ち込む可搬型記憶媒体(DVD, USBなど)のセキュリティを管理することによって、サイ

## 4. 計装制御システムのセキュリティ運用対策

原子力向けセキュリティ要件(表2)のうち、運用要件の対策実現に向け、セキュリティ状態監視(運用要件①)、セキュリティ事故対応組織の確立(運用要件②)、迅速な復旧対応(運用要件③)の基本方針策定に向けた取組みを推進している。次に運用要件の実現に向けた課題とその対策方針について述べる。

### 4.1 セキュリティ状態監視

計装制御システム向けセキュリティ状態監視は、情報システムで導入されている汎用セキュリティデバイス(侵入検知システム(Intrusion Detection System: IDS<sup>(注4)</sup>、ファイアウォール、セキュリティ情報イベント管理システム(Security Information Event Management: SIEM<sup>(注5)</sup>)での監視の仕組みに計装制御システムの特質を踏まえて実現する。

情報システムのセキュリティ監視対象は主にシステム内のデータ(個人情報、資産情報など)であり、その情報がサーバ内に格納されているため、汎用セキュリティデバ

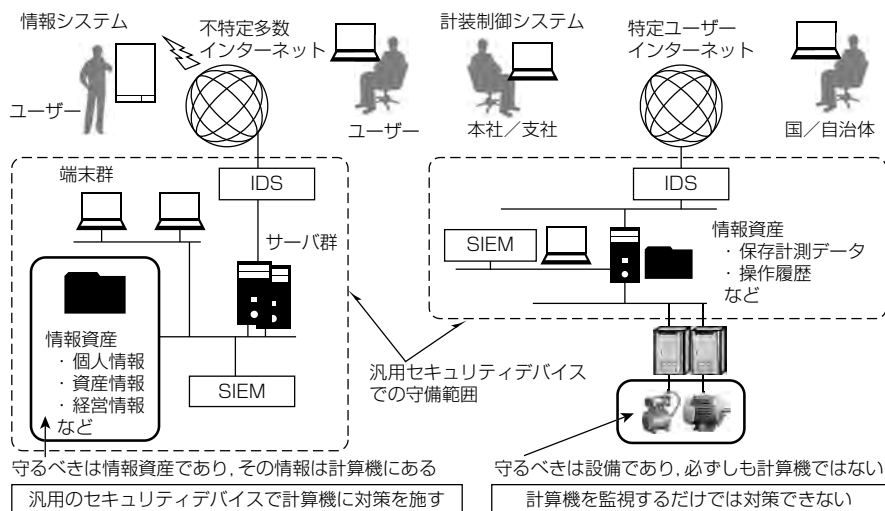


図4. 情報システムと計装制御システムのセキュリティ監視の違い

スによるセキュリティ監視が効果的である。

一方、計装制御システムのセキュリティ監視対象には、システム内のデータに加えてプラント設備、及び制御装置がある。これらは、汎用セキュリティデバイスでは監視をサポートしているケースが少なく、情報システムのセキュリティ監視の仕組みだけでは実現できない(図4)。

計装制御システム向けのセキュリティ監視では、汎用セキュリティデバイスでの監視の仕組みに加え、プラント設備のパラメータ情報や、プラント運転情報の異常からセキュリティ事故を検知・分析するセキュリティ統合管理システムを実現する。将来的には、入退室情報などの物理セキュリティ情報とサイバーセキュリティ情報を組み合わせ、システム操作の妥当性(承認された人が承認された設備を用いて適切な操作をしているか)を判断することで、より高度な監視を実現する。

(注4) ネットワーク上の不正アクセスを検知し、管理者に通報するシステム。

(注5) 機器やソフトウェアのログを一元的に管理し、セキュリティ上の脅威となる事象を検知・分析するセキュリティソフトウェア。

### 4.2 セキュリティ事故対応組織の確立

一般的に、セキュリティ事故対応を行う組織として、セキュリティ監視に当たるSOCやセキュリティ事故が発生した際に緊急対応に当たるCSIRTといった部門を構築し、セキュリティ事故対応に備える。

サイバー攻撃は犯罪であるため、これらの部門以外に、法務部門、広報部門、IT部門などとの連携が発生し、外部機関では、警察、国など、幅広い部門との連携が発生する。

発電所には、プラント運転状態を監視する中央制御室や、不正侵入、施設への入退室などの物理セキュリティを監視する詰所などの既存の監視組織が存在する。計装制御システム向けのSOC、CSIRTを構築する際は、これら既存組織との連携(業務統合・分担)を考慮した組織を策定する必要がある。

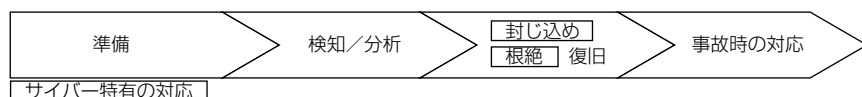


図5. セキュリティ事故発生時の復旧対応フロー

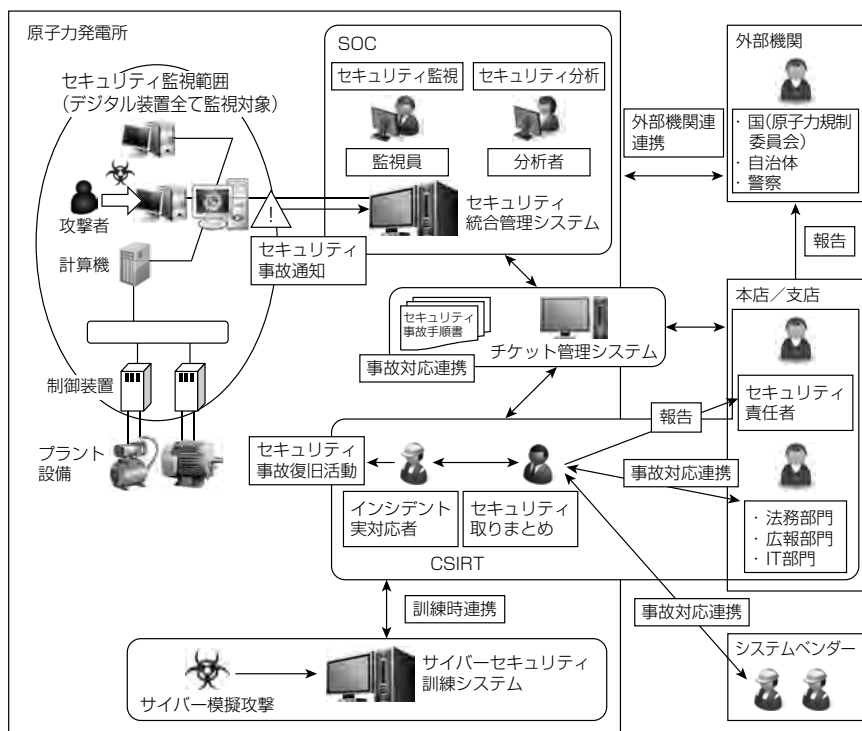


図6. セキュリティ運用の全体像

また、関連組織が幅広く存在するため、セキュリティ事故発生時の情報共有が困難となる。米国政府向けの技術支援、研究開発を行う非営利組織であるMITRE社が発行している“Ten Strategies of a World-Class Cybersecurity Operations Center<sup>(6)</sup>”では、セキュリティ事故の情報や対応状況をチケット(Ticket)として管理し、関係部門間でチケットを共有するシステム(Ticketing System)の必要性を提示している。計装制御システム向けにもSOC、CSIRT、関連組織にこのチケット管理システムを適用し、関連組織間での情報共有を実現していく。

#### 4.3 迅速な復旧対応

セキュリティ事故発生時は被害が拡大する前に一刻も早い復旧が求められる。緊迫した状況下でミスなく対応するために、図5の対応フローに沿った手順書を整備し、発電所の作業員で対応可能な警報表示方針で実現する。

4.1節で述べたとおり、情報システムはシステム内の個人情報、資産情報などの情報資産の機密性を保持する必要がある。そのため、セキュリティ事故と判断されるとシステムを停止して情報資産の機密性を保持した状態で復旧対応に当たる手順書を準備することが多い。

一方、計装制御システムは、プラント運転の継続、つまり、可用性を保持する必要がある。そのため、プラント運転への影響(停止判断)に着目したセキュリティ事故通知方

針、手順書の策定が必要である。

また、サイバー攻撃特有の作業(封じ込め、根絶)は、従来の設備故障などによるプラント事故対応では実施しない作業となる。新しい作業に対しての習熟性を向上させるためには、日常的なセキュリティ事故対応の教育・訓練が重要である。サイバー攻撃を模擬発生させ、事故対応の訓練を実現するシステムを現在開発中である。

#### 4.4 運用要件を実現した発電所セキュリティ運用の全体像

4.1節から4.3節の実現によって発電所のセキュリティ運用全体像は図6のようになる。

### 5. む す び

3章の活動を通して、原子力計装制御システムに必要となるセキュリティデバイスを開発し、原子力発電所に段階的に納入してきた。今後は、4章の運用面に関する課題解決をSOC、CSIRT、セキュリティ統合管理システムなどによって実現し、原子力発電所の更なる

安全性の実現に貢献していく。

また、サイバーセキュリティ対策には専門的な技術が不可欠であることから、当社の研究所とも連携して活動を継続していく。

### 参 考 文 献

- (1) Guide for Conducting Risk Assessments, NIST Special Publication 800-30, (2012)
- (2) ISO/IEC 27001:2013 Information technology-Security techniques-Information security management systems-Requirements
- (3) Nuclear Security Series Publications  
<http://www-ns.iaea.org/security/nss-publications.asp>
- (4) Regulatory Guide 5.71: Cyber security programs for nuclear facilities, U.S.Nuclear Regulatory Commission (2010)
- (5) サイバーセキュリティ装置“MELARROW”, 三菱電機技報, 90, No.1, 11 (2016)
- (6) Zimmerman, C., : Ten Strategies of a World-Class Cybersecurity Operations Center, The MITRE Corp. (2014)

# 火力発電所向け 交流界磁ブラシレス励磁システム

片岡道雄\*  
宮武亮治\*  
平松孝士\*

AC Magnetic Field Brushless Excitation System for Thermal Power Plants

Michio Kataoka, Ryoji Miyatake, Takashi Hiramatsu

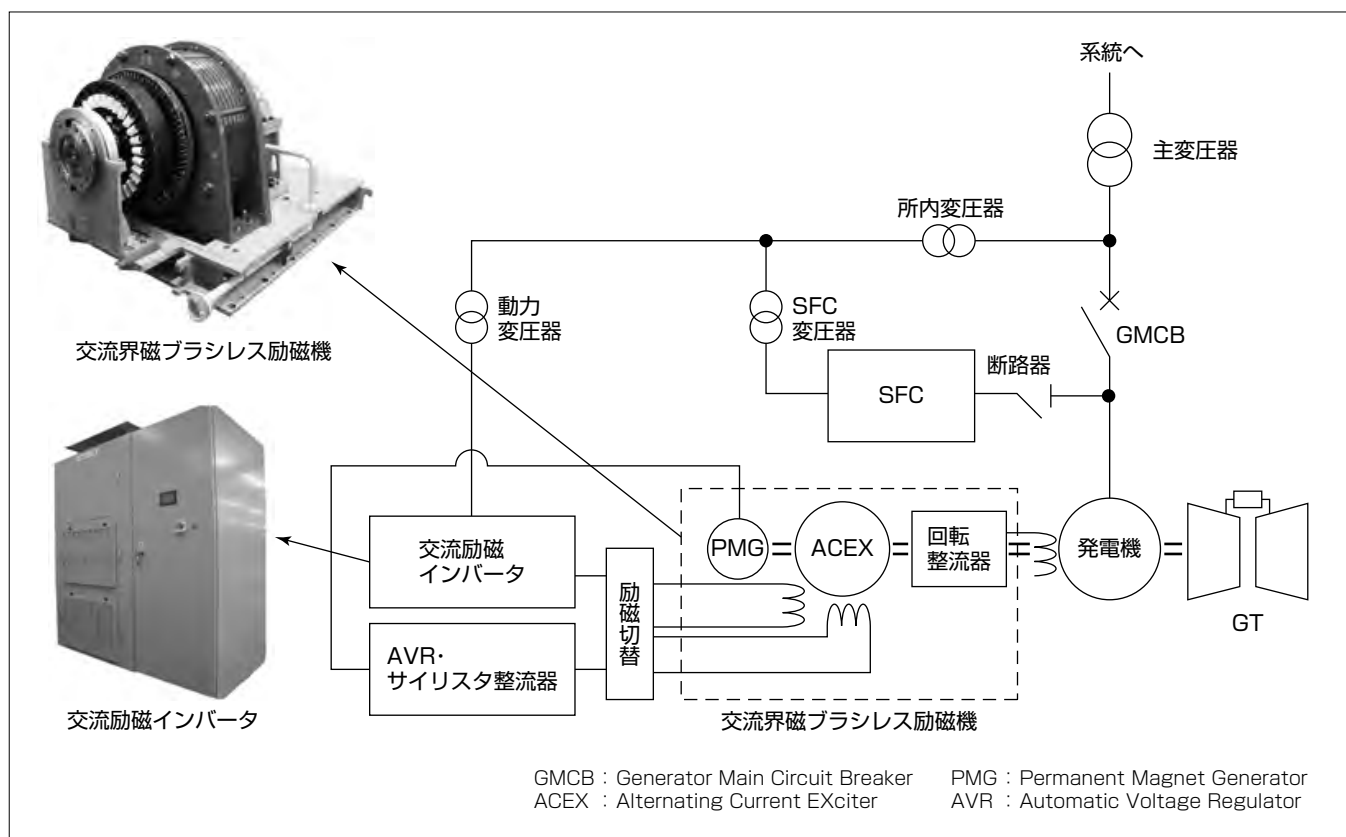
## 要 旨

世界的な電力需要の増加，地球環境に対する負荷低減などの社会的ニーズによって，今後も熱効率がよく，CO<sub>2</sub>排出量が少ないガスタービン(GT)を使用したガスタービンコンバインドサイクル発電の需要が多く見込まれている。

GTは圧縮機・燃焼器・タービンで構成され，着火まではGT単独で起動できないため起動装置が必要である。三菱電機では発電機とSFC(Static Frequency Converter：静止形周波数変換器)を組み合わせ，発電機を同期モータとしてGT軸を回転・昇速させるSFC起動方式を標準的に採用している。

SFC起動では，起動開始3 r/minから発電機界磁巻線に所要の直流電流を供給する必要がある。従来型ブラシレス励磁方式では，このような低速回転数では所要の直流電流が供給できないため，当社SFC起動の励磁は全てサイリスタ励磁方式となっており，保守性に優れたブラシレス励磁方式を適用できない状況であった。

今回，SFC起動に対応した交流界磁ブラシレス励磁システムを開発した。それに伴って，試作機を製作して検証試験を実施した。



## 交流界磁ブラシレス励磁システムとガスタービン用SFC起動方式回路

交流界磁ブラシレス励磁システムはGTの回転軸に接続された発電機の界磁巻線を励磁するものである。GT起動時は，従来の直流界磁ではなく，交流励磁インバータがブラシレス励磁機の交流界磁を行うことで，回転停止時でも発電機が同期モータとして動作する界磁を確立する。これによって，保守性に優れたブラシレス励磁方式によるSFC起動が可能となる。なお，定格回転数到達後は，直流界磁に切り替える。

## 1. ま え が き

近年、電力需要の増加、地球環境に対する負荷低減などの社会的ニーズによって、GTを使用したガスタービンコンバインドサイクル発電の需要が多く見込まれている。

GTは着火までは単独で起動できず、起動装置が必要になる。このため、当社では発電機とSFCを組み合わせ、発電機を同期モータとして、GT軸を回転・昇速させるSFC起動方式を標準的に採用している。

SFC起動では、起動開始3r/minから発電機界磁巻線に所要の直流電流を供給する必要がある、ブラシレス励磁方式を適用できない状況があった。

今回、SFC起動に対応した交流界磁ブラシレス励磁システムを開発した。それに伴って、試作機を製作して検証試験を実施した。

本稿では、開発システムの構成、特長、検証試験結果について述べる。

## 2. 現状のシステムと開発の狙い

### 2.1 タービン発電機励磁方式

現在、発電機では次の2つの励磁方式が主に採用されている(表1)。

#### 2.1.1 ブラシレス励磁方式

図1にブラシレス励磁方式の機器構成を示す。発電機回転子と同一軸上に、交流励磁機(ACEX)の電機子巻線、回転整流器、永久磁石発電機(PMG)が設置され、ACEXの電機子巻線は回転整流器を介し発電機界磁巻線に接続されている。ACEXの電機子巻線で発生した交流出力は、

表1. 励磁方式比較

項目	ブラシレス励磁方式	サイリスタ励磁方式
ブラシ保守	不要	○ 点検、交換が必要
装置スペース	小	○ 大(励磁変圧器・バスダクト・サイリスタ励磁装置要)
励磁系 電圧応答時間	標準形：0.5～2秒 超速応形：0.1秒以下	△ 約0.05秒

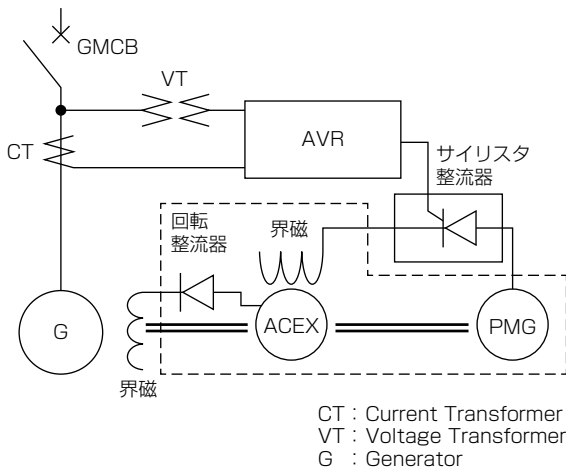


図1. ブラシレス励磁方式の機器構成

回転整流器で三相全波整流された直流電流となり、発電機界磁巻線に供給される。発電機界磁に必要な直流電流は、回転部で発生するため、ブラシ及びスリップリングは不要である。

発電機の界磁エネルギーは、GTによって発電機、ACEX、PMGが回転することで供給される。このため、ブラシレス励磁方式のサイリスタ整流器の容量は、ACEXの界磁損に対応した励磁容量となり、2.1.2項で述べるサイリスタ励磁方式の装置容量よりも小さくなる。なお、ブラシレス励磁方式では、ACEXを介し、発電機界磁巻線に電圧を印加するため、ACEXの応答時間の影響を受け、サイリスタ励磁に比べ応答時間は遅くなる。しかし、超速励磁では励磁系電圧応答時間を0.1秒以下とすることができる。

#### 2.1.2 サイリスタ励磁方式

図2にサイリスタ励磁方式の機器構成を示す。サイリスタ励磁方式は、励磁変圧器(Exciter Transformer : ExTr)を介し系統から受電し、サイリスタ励磁装置で交流を直流へ変換し、発電機回転子軸上の銅製スリップリングにカーボンブラシを機械的に接触させ、発電機界磁巻線を直流励磁する。このため、サイリスタ励磁方式は起動時に系統電源からエネルギー供給を受けることで、回転速度によらず任意の励磁電流を発電機界磁巻線に通電可能である。一方、サイリスタ励磁装置と励磁変圧器・バスダクトは、発電機界磁損を供給する容量が必要であり、装置スペースが大きい。また、スリップリングとブラシが必要であることから、ブラシ交換やカーボンダスト清掃などの定期的な保守が必要である。

### 2.2 ガスタービン起動方式

現在100MVAを超えるガスタービンの起動方式として、主に次の2つの方式が用いられる。

#### 2.2.1 モータ起動方式

モータ起動方式は図3の構成になっており、GTの回転軸を、固定速の誘導モータとトルクコンバータを用いて速度調整し、GTを起動する方式である。励磁はブラシレス励磁とサイリスタ励磁の両方に対応可能だが、通常はブラシレス励磁が用いられる。

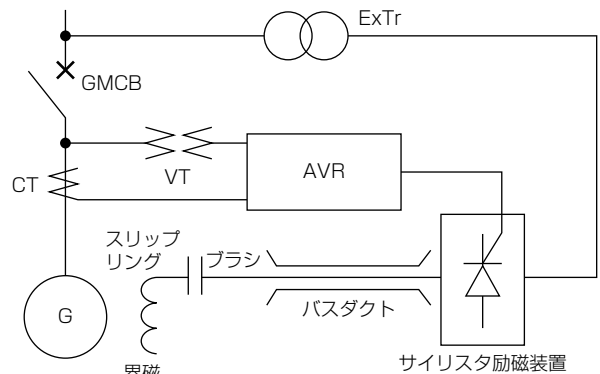


図2. サイリスタ励磁方式の機器構成

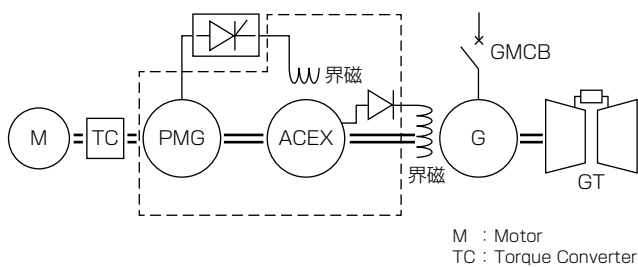


図3. モータ起動方式

## 2.2.2 SFC起動方式

SFC起動方式は図4の構成になっており、SFCで発電機を同期モータとして運転し、GT軸を回転／昇速させる方法である。GT起動時にSFCと発電機電機子巻線を接続し、SFCから発電機電機子巻線に交流の電流を通電し、回転に必要なエネルギーを供給する。発電機を同期モータとして運転する際、発電機界磁電流はAVRとサイリスタ励磁装置で制御する。

SFC起動時の発電機界磁電圧( $V_f$ )と端子電圧( $V_{gen}$ )の動きを図5に、SFC制御と励磁制御のモードを表2に示す。定格回転数0～20%の励磁制御では発電機界磁電圧一定制御になるため、発電機端子電圧は回転数に比例する。また、定格回転数20～70%の励磁制御では発電機端子電圧一定制御になるため、励磁電圧は回転数増加とともに低下する。

先に述べたように、SFC起動で発電機を同期モータ運転するためには、起動開始3r/minから発電機界磁巻線に無負荷定格電圧相当の直流電流を通電する必要がある。従来型ブラシレス励磁方式では、このような低速回転数では所要の直流電流が供給できないため、当社SFC起動の励磁は全てサイリスタ励磁方式となっている。

## 2.3 開発の狙い

表3は先に述べたGT起動方式と励磁方式の組合せ比較である。モータ起動はサイリスタ励磁とブラシレス励磁のどちらの方式も可能であるが、Aのサイリスタ励磁は保守性・スペースでメリットがなく納入実績が少ない。また、Bのブラシレス励磁はブラシ保守が不要で励磁変圧器・バスダクトの装置スペースが不要となるメリットがあり、納入実績がある。

次にSFC起動方式では、先に述べたようにCのサイリスタ励磁が現在の標準であり、起動用モータ及びトルクコンバータがなく、軸長が短く建屋を小さくでき、1台のSFCで複数台のGTを起動できる等のメリットを持つ。

今回の開発は、発電機のブラシレス励磁システムとして交流励磁インバータと交流界磁に対応したブラシレス励磁機を使用し、SFC起動を可能とするブラシレス励磁方式を実現した。これによってブラシレス励磁とSFC起動方式の両方のメリットを得ることを狙いとした。

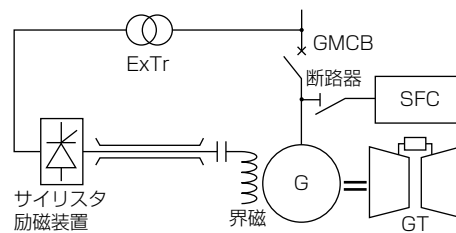


図4. SFC起動方式

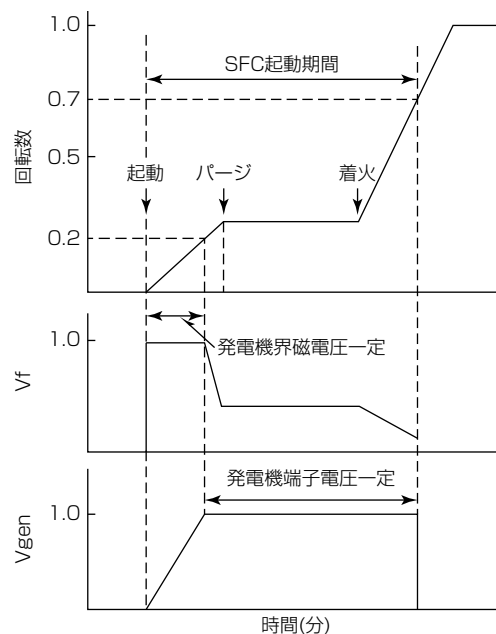


図5. SFC起動時の発電機界磁電圧と端子電圧の動き

表2. SFC起動時の制御

回転数	SFC制御	励磁制御	発電機端子電圧
定格0～20%	トルク一定	発電機界磁電圧一定	回転数に比例
定格20～70%	出力一定	発電機端子電圧一定	一定

表3. 起動－励磁方式の組合せ比較

組合せ	起動方式	励磁方式	保守性		スペース		備考
			ブラシ	モータ	軸長	装置	
A	モータ	サイリスタ	△	△	△	△	DC界磁納入実績少
B	モータ	ブラシレス	○	△	△	○	DC界磁納入実績あり
C	SFC	サイリスタ	△	○ (モータなし)	○	△	DC界磁現標準
D	SFC	ブラシレス	○	○ (モータなし)	○	○	AC・DC界磁開発

## 3. 交流界磁ブラシレス励磁システム

### 3.1 システム構成

この開発では500kW級交流界磁ブラシレス励磁機と交流励磁インバータを試作し、工場で組合せ試験を実施した。

#### 3.1.1 構成

交流界磁ブラシレス励磁によるSFC起動の回路を図6に示す。交流界磁ブラシレス励磁システムは、①dq軸二相界磁巻線を施したブラシレス励磁機、②SFC起動時に

三菱電機技報・Vol.90・No.11・2016



### 3.2.2 基本仕様

開発した交流界磁BLの基本仕様を表4に示す。250MVAタービン発電機と組み合わせた場合、定格負荷3,600r/min時に必要な直流出力は520kWであり、SFC起動3～2,400r/min時に必要な直流出力は60kWである。今後の発電機高出力化を考慮し、交流界磁BL及び交流励磁インバータ装置は、SFC起動時の直流出力85kWまで対応可能な設計とした。

SFC起動開始3r/minでは速度起電力が低く、ACEXの磁気飽和の影響を受けてACEX界磁電流が増加するため、ACEXの磁気装荷を下げ、交流励磁インバータの容量を抑制した。また、PMG容量を増加させたため、発電機定格負荷時の励磁系電圧応答は、応答時間0.1秒以下、電圧速度3.3pu/秒以上となり、交流界磁BLは超速応励磁の要求を満足する設計となる。

### 3.2.3 検証結果

交流界磁BLの負荷特性を図9に示す。

2.2.2項で述べたとおり、SFC起動で定格回転数20%以上の運転では、直流出力一定とならず、直流出力は回転数増加とともに低下する。検証試験は負荷特性確認のため、0～3,600r/minで直流出力85kW一定の条件で試験を実施した。界磁電流 $I_d$ 、 $I_q$ 及び界磁電圧 $V_d$ 、 $V_q$ につ

表4. 交流界磁BLの基本仕様

対象	タービン発電機	定格250MVA 3,600r/min
構成	交流励磁機	固定子
		回転子
	回転整流器	三相全波整流器
	副励磁機	永久磁石同期発電機
仕様	定格負荷	直流出力
		520kW
		回転数
	SFC起動	3,600r/min
		励磁
		直流励磁サイリスタ装置
超速応励磁	電圧応答時間	0.1秒以下(注1)
		電圧速度
		3.3pu/秒以上

(注1) 電圧応答時間0.1秒は、IEEE421.1規定値である。

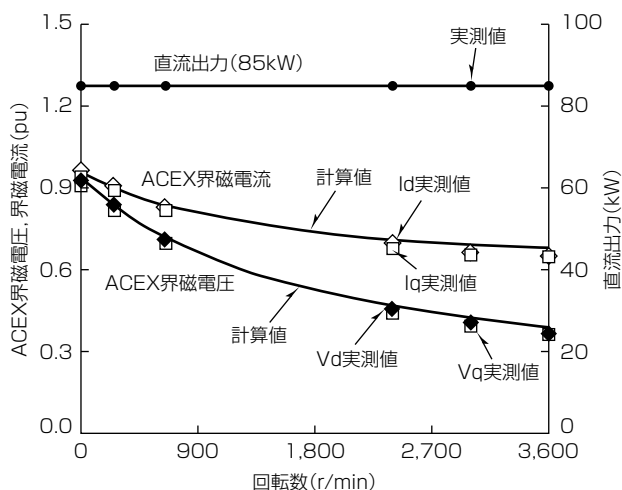


図9. 交流界磁BLの負荷特性

いて、設計値と実測値はよく一致しており、設計の妥当性を確認した。直流出力85kW一定の条件では、回転数上昇とともに、回転子軸からエネルギーが供給されるため、ACEXの界磁電流、界磁電圧は減少することを確認した。ほかの検証項目(温度、損失、励磁速度)についても、実測値はほぼ設計値どおりとなり、IEC(International Electrotechnical Commission)、JEC(電気規格調査会)などの規格を満足し、問題ないことを確認した。

### 3.3 交流励磁インバータ

SFC起動に対応した交流界磁ブラシレス励磁システムを実現するため、交流励磁インバータを開発した。

#### 3.3.1 機能

交流励磁インバータの外観を図10に示す。交流励磁インバータは、GT起動時にプラント制御装置及びSFCと協調して、発電機の励磁制御を行う。

交流励磁インバータは、コンバータ、インバータ、スコット変圧器、制御回路部で構成される。入力された三相交流電圧はコンバータで直流に変換され、インバータのIGBT素子をPWM(Pulse Width Modulation：パルス幅変調)スイッチングして三相交流電圧を発生させる。この三相交流電圧は、スコット変圧器で二相交流電圧に変換され、ACEXのdq軸二相界磁巻線を励磁する。

#### 3.3.2 基本仕様

開発した交流励磁インバータの基本仕様を表5に示す。交流界磁BLの界磁巻線が必要とする電力容量、界磁電圧/電流を基に、定格出力容量212kVA、定格電圧1,520V、定

格電流70Aとした。

#### 3.3.3 制御方法

交流励磁インバータの内部構成を図11に示す。交流励磁インバータは、SFC起動時の励磁装置として必要となる次の2つの制御を持っており、表2に示すSFC起動時の励磁制御に従い、SFC起動の過程で制御方式が切り替わる。



図10. 交流励磁インバータ

表5. 交流励磁インバータの基本仕様

構成	コンバータ	三相全波整流
	インバータ	三相2レベルインバータ
		600A級 IGBT
仕様	スコット変圧器	三相入力、二相(位相差90°)出力
	出力容量	212kVA
	定格出力	1,520V/70A
制御	入力電圧	三相400V級 50/60Hz
	SFC起動	発電機界磁電圧推定制御
	界磁励磁制御	発電機端子電圧制御

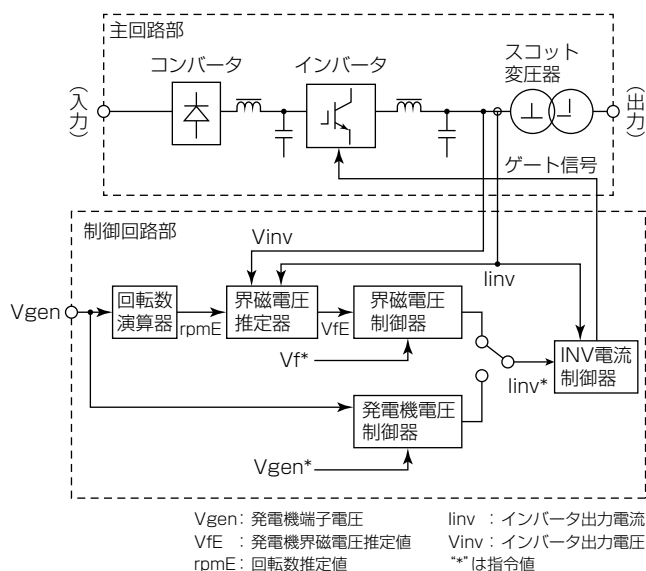


図11. 交流励磁インバータの内部構成

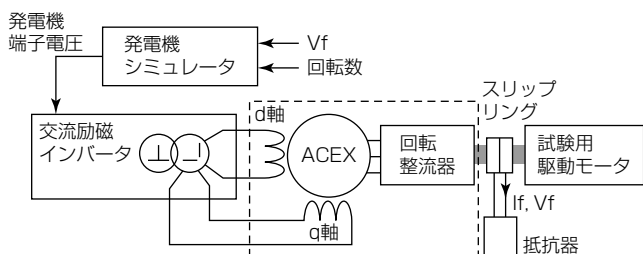


図12. 組合せ試験回路

#### (1) 発電機界磁電圧推定制御

発電機界磁電圧 ( $V_f$ ) は、先に述べた図6に示すように回転軸上にあることから、スリップリングとブラシがなければ計測することができない。このため、発電機界磁電圧推定制御では、インバータ出力電流  $I_{inv}$ 、出力電圧  $V_{inv}$ 、回転数推定値  $rpmE$  を使用し、交流界磁BLの等価回路を基にした演算式によって発電機界磁電圧を推定演算し、この値をフィードバック値とした制御を行う。

#### (2) 発電機端子電圧制御

発電機端子電圧制御では、発電機端子電圧をVTで取り込み、フィードバック制御している。回転数が定格の20～70%では、発電機端子電圧を一定に制御しており、通常のAVRと同様の制御を行う。

### 3.4 組合せ試験

#### 3.4.1 試験構成

交流界磁BLと交流励磁インバータの工場組合せ試験回路を図12に示す。交流界磁BLのdq軸界磁巻線は交流励磁インバータに接続し、直流出力は試験用のスリップリングとブラシを介して抵抗器に接続する。交流界磁BLの軸は試験用駆動モータにカップリング接続され、可変速の運転が可能になっている。なお、発電機端子電圧信号として、回転整流器出力電圧 ( $V_f$ ) と回転数を基に発電機端子電圧を演算する発電機シミュレータの信号を用いた。

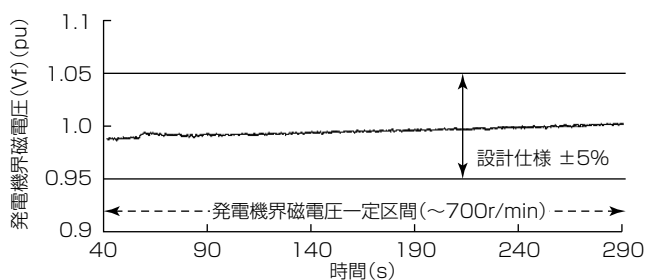


図13. 発電機界磁電圧推定制御の試験結果

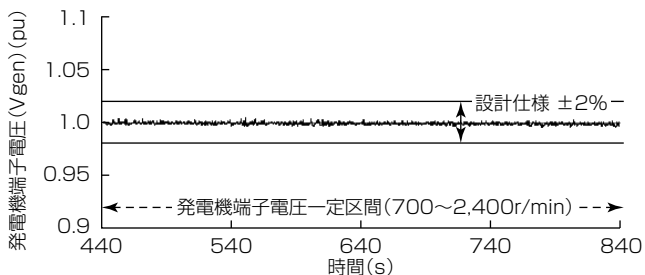


図14. 発電機端子電圧制御の試験結果

#### 3.4.2 試験結果

交流界磁BLをSFC起動時と同様の運転パターンで可変速駆動し、制御精度を確認した。

##### (1) 発電機界磁電圧推定制御

回転数上の発電機界磁電圧推定値を算出し、この値を発電機界磁電圧検出値と見なしたフィードバック制御試験を実施した。図13に示すように制御基準値1.0puに対して、実測値は±2%以内であり設計仕様±5%を満足し、制御上の問題がないことを確認した。

##### (2) 発電機端子電圧制御

図14に示すように制御基準値1.0puに対して、実測値は±1%以内であり設計仕様±2%を満足し、制御上の問題がないことを確認した。

## 4. む す び

ガスタービンのSFC起動に対応した500kW級交流界磁ブラシレス励磁システムを開発した(発電機容量250MVA相当)。従来のサイリスタ励磁によるSFC起動方式に比べ、ブラシ交換が不要で、励磁変圧器・バスダクトがなくなるなどの保守面・装置スペース面で優れたシステムとなっている。

今後、このシステムなどによって発電プラントの保守省力化、省スペース化に寄与していく。

## 参 考 文 献

- (1) 木村秀夫, ほか: 火力発電所用サイリスタ起動装置, 三菱電機技報, 67, No.5, 480～484 (1993)
- (2) 中屋 偉, ほか: 関西電力(株)赤穂発電所1号タービン発電機用超速応ブラシレス励磁装置, 三菱電機技報, 62, No.7, 610～615 (1988)

# 水素間接冷却タービン発電機“VP-Xシリーズ”と要素技術の既設機への展開

舟崎陽一\* 古賀清訓\*  
空 信之\* 前田英昭\*  
近藤雅浩\*

*Indirectly Hydrogen-cooled Turbine Generator "VP-X Series" and Application of Element Technologies to Existing Generators*  
Yoichi Funasaki, Nobuyuki Sora, Masahiro Kondo, Kiyonori Koga, Hideaki Maeda

## 要 旨

CO<sub>2</sub>排出による地球温暖化や世界的な電力需要の高まりを背景に、タービン発電機には大出力化・高効率化及び高い信頼性が求められている。三菱電機では、高効率で構造が比較的簡素な水素間接冷却タービン発電機の大出力化・高効率化の開発を進めてきた。その結果、水素間接冷却機として世界最大出力<sup>(注1)</sup>となる900MVA級の出力を可能とする新型発電機“VP-Xシリーズ”の開発に成功した。900MVA級実機検証機での技術検証試験によって、性能及び各部の健全性の確認も完了している。

これまで水冷却方式でしか対応できなかった900MVA

級の大出力域まで水素間接冷却方式を適用可能となり、固定子冷却水供給装置などの付帯設備が不要となることから、水冷却方式に比べて保守面で有利となる。

また、VP-Xシリーズは従来の水素間接冷却機に比べて、大出力化、高効率化、コンパクト化を実現するために、新たに開発した複数の要素技術を適用しているが、これらの要素技術を既設機に部分的に適用することで、大出力化・高効率化が可能となる。新たなアップグレードサービスとして、部分交換・更新を推奨することで、既設機の大出力化・高効率化の要望にも応えていく。

(注1) 2014年12月8日現在、当社調べ



## 900MVA級水素間接冷却タービン発電機

最新技術を適用した900MVA級水素間接冷却タービン発電機を設計・製作し、工場試験によって設計の妥当性と信頼性を確認した。これらの技術成果を基に、新型発電機VP-Xシリーズを200～900MVAの出力領域でラインアップ化した。

## 1. ま え が き

CO<sub>2</sub>排出による地球温暖化や世界的な電力需要の高まりを背景に、火力発電プラントでは自然資源の更なる高効率利用が急務となっている。また、ガスタービンコンバインドサイクル発電プラントや石炭火力発電プラントでは大出力化の需要が高まっており、タービン発電機としては大出力・高効率で、かつ電力の安定供給を可能とする高い信頼性が求められている。当社では高効率で構造が比較的簡素な水素間接冷却タービン発電機の大出力化の開発を進めてきた。今回水素間接冷却機として世界最大出力となる、900MVA級の出力を可能とする新型発電機VP-Xシリーズを開発し、900MVA級実機検証機での技術検証試験による性能及び各部の健全性を確認した。

本稿では、VP-Xシリーズの開発内容、及びその開発成果を利用した既設機のアップグレードサービスについて述べる。

## 2. VP-Xシリーズ検証機の仕様

VP-Xシリーズ検証機の主な仕様を表1に示す。

最新技術の適用によって、水素間接冷却機として世界最大出力となる900MVA級の出力と世界最高レベルの効率を達成した。また、大出力ながらも冷却性能強化による出力密度改善及び最適配置構造によって、水素間接冷却方式の従来機に比べて発電機体格を約20%縮小しており、輸送性の向上と設置場所の省スペース化を実現している。

図1に冷却方式で分類した2極タービン発電機のラインアップを示す。

当社では、空気冷却、水素間接冷却、水冷却の3種類のラインアップを持ち、発電出力に合わせて最適な冷却方式を選定している。VP-Xシリーズの完成によって、これまで水冷却方式でしか対応できなかった900MVA級の大容量域まで水素間接冷却方式を適用可能となった。水素間接冷却方式は、固定子冷却水供給装置などの付帯設備が不要となるため、保守面で有利となる。

表1. VP-Xシリーズ検証機の主な仕様

最大出力	870MVA
力率	0.90(遅れ)
回転速度	3,600min <sup>-1</sup>
周波数	60Hz
極数	2
効率	99%
冷却方式	水素間接冷却

冷却方式	発電機出力(MVA)
空気冷却	100 200 300 400 500 600 700 800 900 1,000 1,500~
水素間接冷却	300 400 500 600 700 800 900 1,000 1,500~
水冷却	700 800 900 1,000 1,500~

図1. 2極タービン発電機のラインアップ

## 3. VP-Xシリーズに適用した最新技術

VP-Xシリーズの開発コンセプトである大出力化、高効率化、コンパクト化は、複数の新開発要素技術の適用によって達成された。それら適用技術の主なものについて述べる。

### 3.1 大出力化技術

タービン発電機の出力 $P$ は一般に次の式(1)で表される。

$$P=K \cdot D^2 \cdot L \cdot N \cdots \cdots (1)$$

$K$ : 冷却方式などで決まる係数

$D$ : 固定子内径

$L$ : 固定子鉄心長

$N$ : 回転数

大出力化は冷却改善によって $K$ を大きくするか、体格( $D$ ,  $L$ )を大きくすることで達成することができる。VP-Xシリーズは、先に述べたとおり冷却性能を強化することで発電機の体格増大を抑えつつ大出力化しているが、発電機出力が制限される温度上昇は図2に示すとおり運転条件によって異なる。そのため各部の温度上昇を抑制する冷却技術の開発が必要であり、ここでは新開発の各冷却技術について述べる。

#### 3.1.1 固定子コイル主絶縁の高性能化

タービン発電機の固定子コイルは高電圧に耐えうるように導体部を絶縁層(主絶縁)で保護しており、水素間接冷却方式での固定子コイル冷却は、導体部で発生した熱を主絶縁を介して水素ガスで冷却する方式のため、大出力化を実現するためには主絶縁の熱伝導率向上が課題となる。固定子コイル主絶縁は、ガラスクロス、マイカ層、熱硬化樹脂を主材料として構成される。これら構成材料のうち、熱硬化樹脂が最も熱伝導率が低く、これまで主絶縁の熱伝導率を向上させるため、熱硬化樹脂に高い熱伝導率を持つ充填剤を添加する対策がとられてきた。しかし、従来の製造方法では、含浸工程時に充填剤が流出し、含浸後に充填剤が減少する課題があった。そこで、今回、製造プロセスの最適化を行い、充填剤の流出を大幅に低減させることに成功

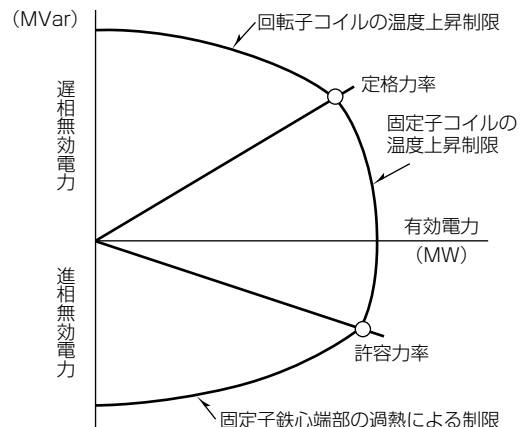


図2. タービン発電機の可能出力特性

した。これによって、多くの実績を持つ絶縁構成材料を変更することなく、主絶縁の高熱伝導化を実現した。

### 3.1.2 通風路形状の最適化

図3に水素間接冷却タービン発電機の通風構造を示す。

VP-Xシリーズには、従来型発電機で十分実績のある信頼性の高い通風冷却方式を選定した。この冷却方式は、固定子半径方向への単一通風を特徴としている。

各部の通風路形状は、CFD(Computational Fluid Dynamics)解析及び部分モデル風洞試験を用いて、圧力損失が小さくかつ冷却性能に優れる形状に最適化した。例として、図4に回転子ダクト入り口形状の最適化構造を示す。

形状最適化によって、圧力損失は従来形状の約60%低減することをCFD解析及び部分モデル風洞試験で確認した。また、機内温度分布が均一となるよう通風・熱回路網計算を用いて各部通風量を調整した。工場試験で各部の温度・風量を計測し、計測値が設計値とよく一致すること及び設計基準値を満足することを確認した。

### 3.1.3 固定子鉄心端部の損失・温度解析技術

タービン発電機の固定子鉄心端部は進相運転時に漏れ磁束が増加するため、磁性シールドなどを設置することで過熱対策を施している。

VP-Xシリーズは出力密度を従来機から約20%増加させているため、固定子端部の漏れ磁束を起因とする損失が増加して鉄心端部の過熱が懸念された。そのため、渦電流を考慮した三次元電磁界解析による損失・温度評価を実施した。三相短絡時での温度解析結果と実機検証試験での温

度計算結果がよく一致して高い計算精度を持つこと、及び実負荷進相運転時での温度解析結果が許容値を十分満足することを確認した(図5)<sup>(1)</sup>。

### 3.2 高効率化技術

発電時に生じる損失は電気損や機械損など多岐にわたる。各損失を低減する新技術を適用して発電効率の向上を図ってきた。ここでは新開発の損失低減技術について述べる。

#### 3.2.1 高効率ファン

機内に加圧封入した水素ガスは、回転子軸の両端に取り付けられたファンによって機内循環され各部の冷却を行うが、風損の発生を伴う。発電機機内の風損は、ファン動力損と機内の通風経路内で発生する圧力損失、摩擦損に大別される。VP-Xシリーズでは、CFD解析を用いたファン翼形状最適化及びファン入り口の吸い込み風路構造の適正化によってファン効率の向上を図り、従来構造と比較して約10ポイント改善した。ファン設計の妥当性は、モデルファンを用いた風洞試験で確認した上で実機へ適用した(図6)。

#### 3.2.2 低損失軸受

回転軸を支持する軸受には振動特性に優れ比較的低損失な直潤型テイルテイングパッド軸受(給油ノズルで摺動(しゅうどう)部に直接給油する方式)を従来採用してきた。VP-Xシリーズでは、従来の直潤型テイルテイングパッド軸受からパッド数を最適化することによって、軸受損失を従来品から約30%低減した。実機検証試験から、設計どおり軸受損失が低減すること及び軸振動特性が良好であることを確認した。

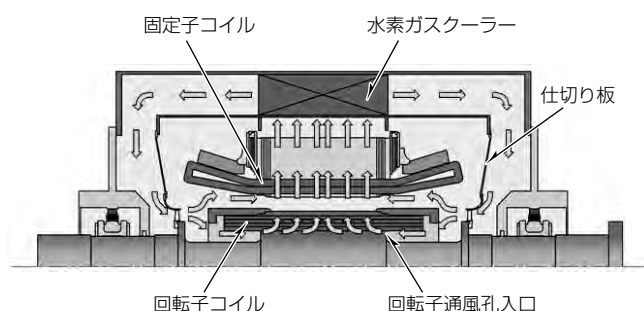


図3. 水素間接冷却タービン発電機の通風構造

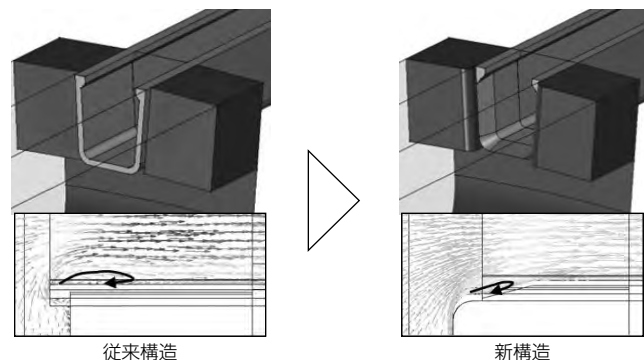


図4. 回転子ダクト入り口形状の変更

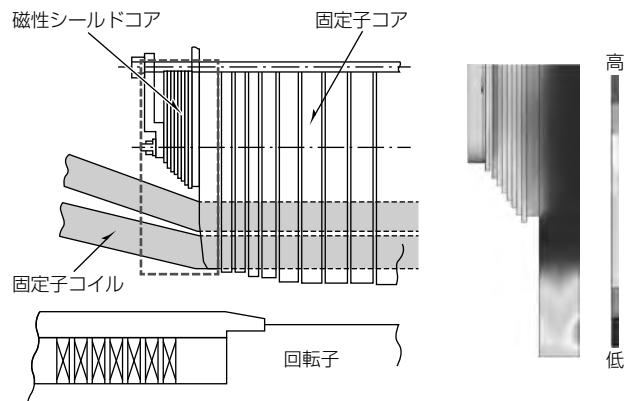


図5. 固定子鉄心端部温度分布(三相短絡時)

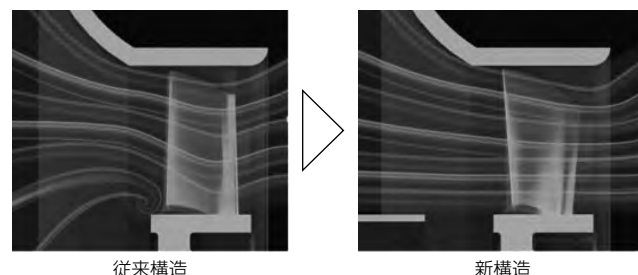


図6. ファンの高効率化

### 3. 2. 3 端部漂遊損低減

固定子端部の漏れ磁束は鉄心端部や端部構造物に鎖交して渦電流による損失が生じる。先に述べたとおり、VP-Xシリーズでは従来機に比べて端部漏れ磁束が増加するため、損失を低減する構造、材料を採用している。例として、図7に端部構造物の仕切り板(高圧部と低圧部を仕切る板(図3)に非磁性材料を採用した効果について示す。固定子コイルエンドの近傍に位置することから損失低減効果が大きく、端部漂遊損を約5%低減する効果を得ている。

### 3. 3 コンパクト化技術

鉄道輸送による輸送制限への対応や設置場所の省スペース化の要求など、タービン発電機にはコンパクトな設計が要求される。VP-Xシリーズでは、水素ガス冷却器のフィン性能を向上させることで熱交換性能を従来機から約30%改善し、水素ガス冷却器の小型化を実現した。加えて、水素ガス冷却器を最適に配置することで、固定子フレーム外径を従来機から約20%縮小させた(図8)。固定子フレーム設計は、FEM(Finite Element Method)解析を用いて構造を最適化した。また、工場試験で強度・振動特性に問題ないことも確認した。

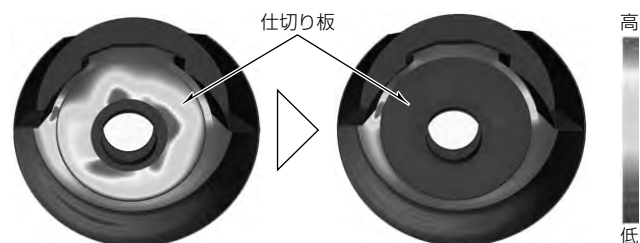


図7. 発電機固定子端部構造物の低損失化

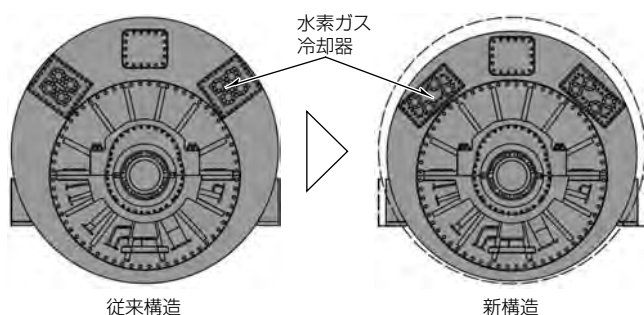


図8. 発電機固定子フレームの小型化

## 4. 新開発技術のアフターサービスへの展開

当社では、既設機に対してVP-Xシリーズの新開発要素技術を部分的に適用することによって、大出力化・高効率化を実現するアップグレード技術を確立し、新たなアフターサービスメニューとして顧客への提案活動を開始した。次にアップグレードメニューの例を示す。

- (1) 固定子コイルの高性能絶縁適用コイルへの換装による大出力化
- (2) 回転子ダクト入り口形状の変更など冷却強化による大出力化又は高効率化
- (3) 高効率ファンへの換装による高効率化
- (4) 低損失軸受への換装による高効率化
- (5) 固定子端部構造物の損失低減構造・材質への換装による高効率化

どのアップグレードメニューでも、適用に際しては既設機の対象部位とその周辺の構造及び各種特性を詳細に把握した上で、変更となる部位の機能的・構造的な特性変化を正確に予想して設計する技術が重要である。

当社は発電機メーカーとして、新設機の高性能化だけでなく、既設発電機の長期運用化、高性能化にも貢献していく。

## 5. む す び

新型の水素間接冷却タービン発電機VP-Xシリーズは、200~900MVAの出力領域でラインアップ化し、2015年4月から販売を開始した。

また、VP-Xシリーズの開発で得られた新開発要素技術を既設機に部分適用して長期運用化、大出力化、高効率化を図ることによって、火力発電プラントの近代化に貢献していく。

## 参 考 文 献

- (1) 空 信之, ほか: 870 MVA水素間接冷却方式タービン発電機固定子鉄心端部損失解析, 平成27年電気学会全国大会論文集, 5-043 (2015)

# 発電プラント計装制御システムとタービン発電機のデザイン開発

深川浩史\*  
 山田 亘\*

Design Development of Power Plant Instrumentation and Control Systems and Turbine Generators

Hirofumi Fukagawa, Wataru Yamada

## 要 旨

重要な社会インフラである発電プラントを支える電力機器は、世界的な電力需要の高まりによって、電力安定供給のための高度化や、運用の容易性・安全性の向上が求められている。そのため、従来はユーザー側に高度な習熟や運用を求めてきた専門性の高い産業機器でも、“分かりやすい”“間違えない”といった使いやすさへの配慮が必要となっている。このような課題に対し、三菱電機では、“ユニバーサルデザイン(Universal Design：UD)”や“空間・環境デザイン”を適用し、製品ライフサイクル全体を考慮した開発を推進している。

発電プラント計装制御システムの“MELSEPシリーズ”、“MELTACシリーズ”では、ハードウェアとソフトウェアの両方にユニバーサルデザイン視点の配慮を行い、素早く

正確な情報把握と操作を行えるようにした。

タービン発電機“VP-Xシリーズ”では、大容量でありながら外付け部品や配管をなくしたコンパクトな外観を創出し、点検効率や安全性の向上、輸送コストと環境負荷の低減を実現した。また、精度や信頼性を表現しながらも、機械的な威圧感のない外観としている。

これらのデザイン開発の取組みによって、グッドデザイン賞や全国発明表彰を受賞した。電力機器のような大規模な社会インフラシステムの開発では、デザインと技術の両方によって品質を高めていくことがますます重要になると考えられる。今後も継続的に研究開発を進め、より良い社会の実現を目指していく。



発電プラント計装制御システム



タービン発電機

## 電力機器のデザイン開発事例

発電プラント計装制御システムの開発では、ユニバーサルデザインの視点で幅広いユーザーの使いやすさを実現した。タービン発電機の開発では、輸送・組立て・保守点検の容易性、安全性など、製品ライフサイクル全体の“在り方”をデザインした。



## 1. ま え が き

電力機器は電力インフラを構成し、人々の生活を支える重要な役割を担っている。近年、世界的な電力需要の高まりを背景に電力安定供給が急務となっており、電力機器の性能向上とともに、運用の容易性や安全性への対応が顧客から求められている。このような課題に対して、“ユニバーサルデザイン”や“空間・環境デザイン”を適用し、製造から輸送、保守にいたるまでの製品ライフサイクル全体を考慮した開発を推進している。

本稿では、電力事業における事例として、発電プラント計装制御システムMELSEPシリーズ、MELTACシリーズと火力発電所向け水素間接冷却タービン発電機VP-Xシリーズのデザイン開発について述べる。

## 2. 発電プラント計装制御システムMELSEPシリーズ・MELTACシリーズのデザイン開発

### 2.1 開発の背景

国内電力会社へ多数の納入実績があるこれらのシリーズは、前機種の市場投入から年数が経過し、新機種投入時期を迎えている。従来、これらプラント計装制御システムは、ヒューマンエラーが深刻な影響を及ぼす専門性の高いシステムとして、高度な教育や習熟をユーザー側に求めてきた。しかし、近年の熟練者減少やシステムの高度化によって、ユーザーの習熟度向上を支援するとともに、“分かりやすい”“間違えない”といったシステム自体の使いやすさに配慮することが急速に求められてきている。そこで、今回の開発では、制御ユニットなどのハードウェアと、ソフトウェア(Human Machine Interface : HMI)である監視制御画面のそれぞれにUDの理念を適用し、未熟練者を含めた幅広いユーザーにとっての使いやすさを実現した。

### 2.2 ハードウェアのデザイン開発

制御盤内に設置されるユニット群(CPUユニット、PIO(Process Input Output)ユニット)のデザインでは、作業の優先度に合わせて、筐体(きょうたい)に表示する情報の並び順を整理した(図1)。機器名称の表記位置や、黒枠内

に配した動作状況の表示ルールを統一することで、読み間違いなどのヒューマンエラーを抑制する。

また、PIOユニットは、機器種別のイニシャルを強調することで、同じ形状の機器が多数並ぶ盤内の個々の機能を一目で理解できるようにした。例えば、デジタル入力(Digital Input)のPIOユニットの場合、“D”と“I”を強調表示することで、ほかの種類のPIOユニット(アナログ入力など)と容易に区別することができる。作業頻度が少なく習熟困難な機器であっても、緊急時に素早く正確な対応が可能となる。

PIOユニットの筐体デザインでは、内部の風路を改良してコンパクト化を実現した。従来、要素が多く複雑に見えるやすい放熱孔を製品の顔である正面に配する構成は避けられてきたが、この製品では放熱孔を表示面の1段奥にすることで、縦1本のスリットとしてすっきりと見えるデザインとし、機能性と意匠性の両立を図った。

### 2.3 ソフトウェア(HMI)のデザイン開発

監視制御画面のデザインでは、情報把握や操作の容易性に配慮したレイアウト、グラフィック表現を行った。警報や稼働状況など、プラント全体にかかわる情報を画面上部に集約し、中央部に配した号機ごとの詳細情報と切り分けた。さらに、左上から右下へ順を追って操作を進めれば設定が行えるよう、表示要素の配置を整理している(図2)。

また、ボタンの各種状態(通常時・押下時)やランプの表現を明確に分けるなど、識別性の高い部品デザインの採用によって、誤操作を抑制する。

### 2.4 UDフォントの採用

文字の表記にUDフォント(UDの考え方によって、読み取りやすさや誤読防止への配慮がなされたフォント)を採用した。適切な文字サイズとコントラストを用いて、視認性を確保している。

### 2.5 課題解決の効果

先に述べたように、ハードウェアとソフトウェアの両方に対して、素早く正確な情報把握と操作を行えるようにデザインの取組みを実施した。運転員が日常的に目にする監視制御画面だけでなく、制御盤内に設置された機器にいた

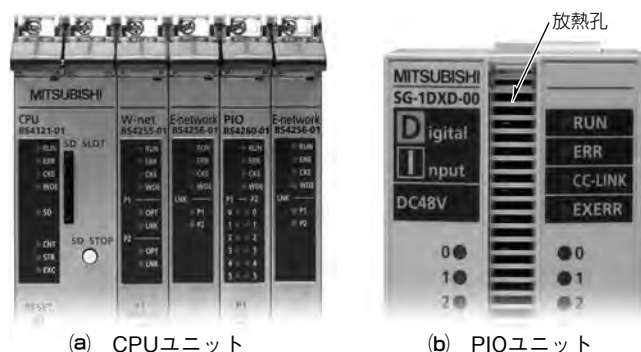


図1. CPUユニットとPIOユニットの情報表示



図2. 監視制御画面の情報レイアウト

るまで、一貫してUD視点の配慮を行うことで、緊急時対応を含めた業務全体の、ヒューマンエラー抑制、作業負荷軽減、効率化を実現している。

### 3. タービン発電機VP-Xシリーズのデザイン開発

#### 3.1 開発の背景

タービン発電機など大型電力機器は、一般の人の目に触れることが少なく、また、価格面や効率性が重視されることから、主に美観を目的とするような外観デザインへの要求は低かった。しかし、近年、グローバル市場の拡大とともに供給国や事業者が多岐にわたると、タービン発電機に対する要求は輸送・組立て・保守といった製品ライフサイクル全体にも及ぶようになり、作業側側立った改善ニーズが高まっている。

そこで、作業の容易性や安全性なども含め、作業者と製品の関係がどうあるべきかというデザイン視点での開発アプローチによって、顧客に対する付加価値向上を試みた。

#### 3.2 コンパクトでシンプルな構造

電力需要の高まりとともに、発電容量の大きなタービン発電機が求められている。従来、大容量の発電機に採用される冷却方式は水冷却が主流であった。しかし、水冷却方式は発電容量が大きい代わりにサイズが大きく、さらに、配管や付帯設備を伴うため、輸送・組立て・保守作業が複雑化するという欠点がある。水冷却方式の次に発電容量を大きくできるのは水素間接冷却方式である。この方式は水冷却機よりサイズが小さく、構造及び付帯設備も簡素にすることが可能である。しかし、従来技術では大容量化に伴う発電機内部の温度上昇を抑えることができないという課題があり、発電容量限界は700MVAまでであった(図3)。

VP-Xシリーズの開発では、水素間接冷却方式の簡素な構造を活用しながら、水冷却方式に匹敵する発電容量の実現を目指した。まず、本体内部の回転子を下方にずらし、上部に生まれた空間に冷却機と風路を格納する構造で冷却用の配管や付帯設備をなくして機械的な威圧感が少ないシンプルな外観を創出した(図4)。それによって点検箇所そのものが削減され作業効率や安全性の向上にも貢献している。

また、①高効率ファン、②薄型クーラー、③通風抵抗の

冷却方式	発電機容量(MVA)												
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1,000	1,500~		
水冷却													
水素間接冷却													
空気冷却													

図3. 冷却方式と発電容量

少ない回転子冷却構造、④高性能固定子絶縁材などの最先端技術を導入することで(図5)、発電効率を向上させている。これによってVP-Xシリーズは水素間接冷却機では世界最大<sup>(注1)</sup>の900MVA級出力という水冷却方式に匹敵する発電容量でありながら、従来の88%の設置面積というコンパクト化を実現している(図6)。

(注1) 2014年12月8日現在、当社調べ



図4. 外付け配管のない冷却構造

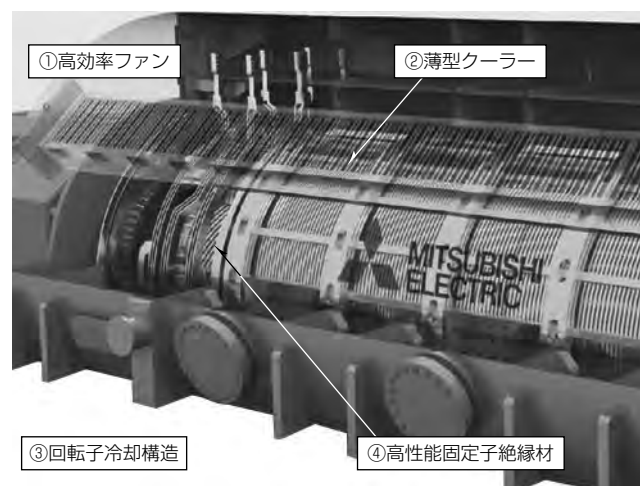


図5. 内部構造

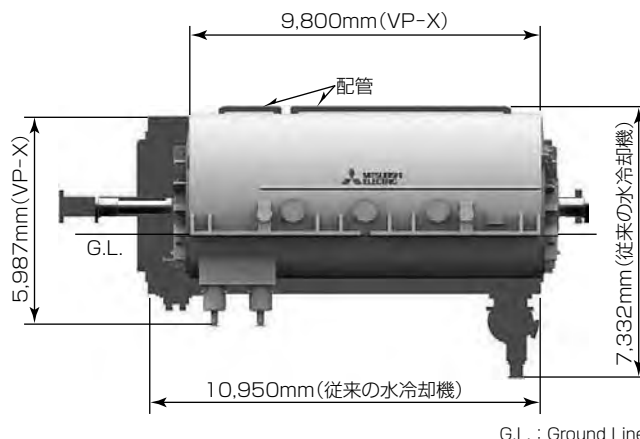


図6. 従来の水冷却機とVP-Xシリーズのサイズ比較

### 3.3 快適な作業環境

製品サイズをコンパクト化したことに加え、作業者の移動の妨げとなり得る凹凸部分を極力減らすことで、作業スペースにゆとりを与え、安全で快適な作業環境を提供している。また、業界標準的にベージュに塗られていた本体色にはライトグレーを採用し、明るく活力ある作業空間の形成を目指した(図7)。

### 3.4 精度感の表現

製造に当たり加工箇所や形状に応じて加工条件を調整し、寸法計測時に温度補正を行うことなどで、10mを超える大型製品でありながら0.01mm単位の精密な部品精度を確保している。シンプルな円筒の持つ力強さを活用しながらも、細部をシャープな印象に仕上げることで、高効率発電機としての信頼感を感じさせるデザインを目指した。



(a) 従来機



(b) VP-Xシリーズ

図7. 従来機とVP-Xシリーズ



(a) トレーラー輸送



(b) 鉄道輸送

図8. トレーラー輸送と鉄道輸送

### 3.5 環境負荷低減

構造をシンプル化したことで分解・組立て箇所を削減し、輸送性と設置性が向上した。510MVA以下の機種については、コンパクト化することで米国鉄道網の多くの路線での輸送寸法制限に対応することで、従来のトレーラー輸送から鉄道輸送への切替えを可能とした。トレーラー輸送に係る大量の作業人員と輸送時間、運送経路の補強などのコスト増を抑制するとともに環境負荷の低減につなげている(図8)。

## 4. む す び

電力機器のデザイン開発について述べた。電力機器は専門性が高い分野であるため、デザイナーと開発者が一体となり、関係者へのヒアリングや業務フローの評価などを粘り強く進めることで、ユーザーにとって本当に使いやすい製品・システムを実現した。

1つ目の事例である発電プラント計装制御システムでは、このシステムにおける一貫したUDの取組みが評価され、2014年度のグッドデザイン賞を受賞した<sup>(1)</sup>。熟練者の減少やシステムの高度化に対し、デザインによるユーザビリティ改善の期待が今後も高まっていくと考えられる。

2つ目の事例であるタービン発電機のデザイン開発では、産業機器におけるデザインの可能性を広げた製品であることが評価され2014年度のグッドデザイン賞<sup>(2)</sup>、及び平成28年度全国発明表彰の発明協会会長賞を受賞した<sup>(3)</sup>。今後はタービン発電機以外の大型電力機器についても、作業員の快適性向上や設置環境の改善など、デザインが貢献できる領域の拡大に努めていく。

電力機器のような大規模な社会インフラシステムの開発では、デザインと技術の両方によって品質を高めていくことがますます重要になると考える。今後も継続的に研究開発を進め、より良い社会の実現を目指していく。

## 参 考 文 献

- (1) 公益財団法人日本デザイン振興会：Good Design Award, 発電プラント計装制御システム MELSEPシリーズ, MELTACシリーズ (2014)  
<https://www.g-mark.org/award/describe/41822>
- (2) 公益財団法人日本デザイン振興会：Good Design Award, 高効率タービン発電機VP-Xシリーズ (2014)  
<http://www.g-mark.org/award/describe/41401>
- (3) 公益社団法人 発明協会：発明協会会長賞, コンパクトでシンプルなタービン発電機の意匠 (2016)  
<http://koueki.jiii.or.jp/hyosho/zenkoku/2016/jiii.html>

# 粒子線治療装置の技術革新

築島千尋\*  
大谷浩司\*\*

Technological Innovation of Particle Therapy System

Chihiro Tsukishima, Hiroshi Otani

## 要 旨

身体的負担が少なく、がん患部を集中的に治療できる粒子線治療への期待が高まっている。三菱電機では次世代対応の高線量率ブロードビーム照射(格子照射)と高精度スキャニング照射の開発に取り組んでいる。前者は、高線量率ブロードビーム照射として線量率を従来の3倍以上に高めることができ、治療時間を短縮することができる。陽子線タイプの治療装置を岡山大学・津山中央病院共同運用がん陽子線治療センターに納入し、既に治療が開始されている。後者は、精密に患部に線量を集中させ、正常組織のダ

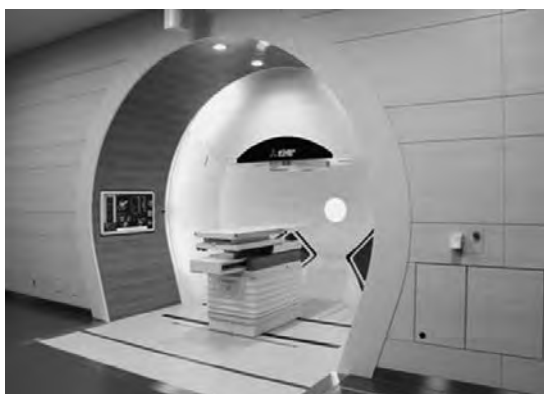
メージを最小限にできる。陽子線タイプでは単一照射室で複数の照射法が使用できる照射ノズルを照射室ごとに備えるメリットがあり、スキャニング照射との切替えが可能な“セレクトビームノズル”としてステップアップする予定である。一方、炭素線タイプでも、放射線医学研究所主導で開発された重粒子線治療装置の小型化技術を用いた民間普及機を、九州国際重粒子線がん治療センターに納入した。既に稼働中のブロードビーム用治療室2室に加え、現在高精度スキャニングが可能な新治療室の稼働を準備中である。



岡山大学・津山中央病院共同運用がん陽子線治療センター



九州国際重粒子線がん治療センター



陽子線回転ガントリー治療室  
(画像提供：津山中央病院)



炭素線スキャニング治療室(築機未承認)  
(画像提供：公益財団法人佐賀国際重粒子線がん治療財団)

## 技術革新が進む粒子線治療装置

粒子線治療装置は、最新の技術の導入が進んでいる。小型回転ガントリー及び高線量率照射機能を搭載する陽子線治療装置を岡山大学・津山中央病院共同運用がん陽子線治療センターに納入し、高精度スキャニング照射用治療室の整備が進む炭素線治療装置を九州国際重粒子線がん治療センターに納入した。

## 1. ま え が き

がんは、1981年から日本での死因の第1位であり、2010年には年間35万人が亡くなり、生涯のうちに約2人に1人ががんにかかると推計されている<sup>(1)</sup>。放射線治療は、外科治療、化学治療と並び、がん治療の中心を担っているが、患者への身体的負担が小さく、社会復帰が容易でQOL (Quality Of Life)に優れていることから今後の更なる普及が期待される。放射線治療の中でも粒子線治療は、従来のX線を用いた治療と比べ、線量の集中性に優れ、患部形状に合わせた照射が可能なことから、国内外への導入が進み、国内の粒子線治療施設は15施設を数える<sup>(2)</sup>。当社は15施設のうち、8施設の建設に参画して装置を納入し、現在2施設が建設中である。粒子線治療装置は普及が進んでいるものの、今後も更なる進化が求められている。

本稿では、粒子線治療装置での当社の技術開発状況について述べる。

## 2. 粒子線治療装置の最新技術

粒子線治療装置は、陽子線を用いるタイプと炭素線を用いるタイプの2種類が普及している。陽子線は水素イオン、炭素線(重イオン線とも呼ばれる)は炭素イオンを加速し、患部に照射する。陽子線、炭素線とも、物理的に体内で吸収される線量の分布特性に特徴を持っている。粒子線治療はこの特徴を活用し、患部に集中的に照射することができる。従来使われているX線、 $\gamma$ 線は体表付近で吸収線量がピークとなり徐々に減衰するのに対し、陽子線、炭素線は身体表面から深部にあるがん病巣で最大値をとる(図1)。これをブラッグピークと呼び、この特性によって線量の集中性が実現される。

当社では粒子線の特性を踏まえ、照射の高度化を目指すために、次の3つの技術開発を進めている。

- (1) 治療時間を短縮するための高線量率照射
  - (2) 複雑な患部形状を照射するための高精度スキャンング
  - (3) 患部に最適な照射法を提供するセレクトビームノズル
- 次にそれぞれについて、述べる。

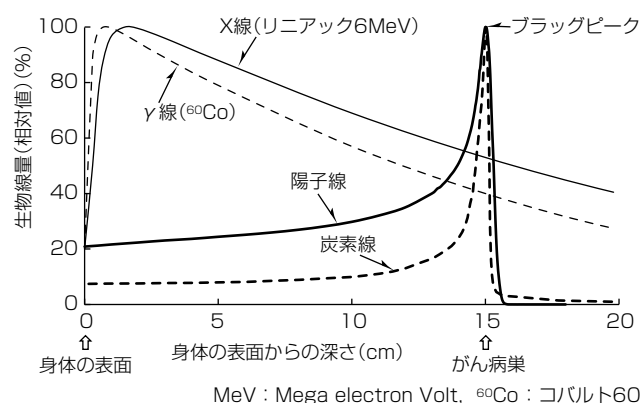
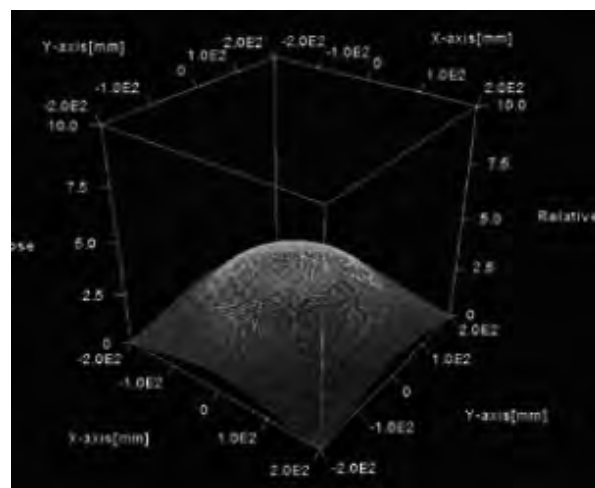


図1. 各種放射線の線量分布特性

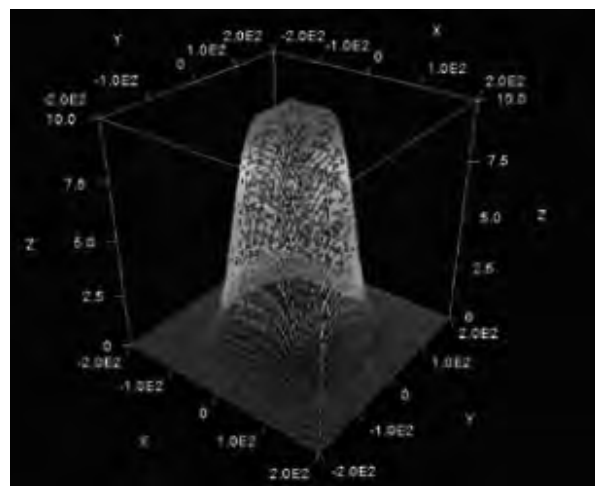
## 2.1 高線量率照射

粒子線の良好な線量集中性を活用してがん患部に放射線投与を行う。粒子線の特性を活用して精度よく患部に高い線量を集中させるために、患部は粒子線の照射位置に対してミリ単位であらかじめ位置決めされる。患者は治療台と呼ばれるベッドの上で固定具を装着するなどして照射を行う数分の間、動きを抑える工夫がとられている。したがって、粒子線の強度(線量率)を向上させて、照射時間を短縮することは、より高精度に照射するための重要な要素であり、さらには、患者の負担を軽減することにつながる技術となる。

当社はこの課題を解決するため照射方法の改善を図り、最新型の陽子線治療装置“MELTHEA-V”では“格子照射法”と呼ぶ新たな照射方法を開発した。格子照射法では比較的細く絞ったビームを格子点状に走査し、照射野を均一に塗りつぶす方法である。この方法は従来に比べて、ビームを拡大するための散乱体を薄くできるため、照射野外のビームが大幅に削減され、線量率が向上する。図2に計算による従来照射法と格子照射法の比較を示す。従来のブロードビーム照射法に比べて格子照射法では所定の照射野に線量を集中できる特徴がある。



(a) 従来照射法



(b) 格子照射法

図2. ブロードビーム照射法の線量集中性の比較

## 2.2 高精度スキャンニング照射

近年、最先端の粒子線照射方法として注目されているのがスキャンニング照射法である。ブロードビーム照射法は、加速器から取り出したビームを各種照射系機器によって散乱、拡大し、均一に塗りつぶした一様照射野から患部形状にマッチした必要な領域だけを切り出して患部に照射する方法である。一方、スキャンニング照射法は、加速器から取り出したビームを散乱させずにビーム径を細いまま患部に照射する技術である。患部がビーム径に適合した小さな領域(スポット)に分割され、スポットごとに患部を塗りつぶしていく(図3)。

スキャンニング照射法では、ブロードビーム照射法に比べて患部に合わせて三次元的に線量分布を最適化できるので粒子線の特徴である良好な線量集中性をより高めることができる。

高精度な照射を実現するためにはスポットのサイズをなるべく小さくすることが有利である。これによって精密に患部形状を塗りつぶすことで患部周囲の重要臓器などの正常細胞への被ばくが抑えられる。一方で、スポットサイズの縮小は患部を塗りつぶすために必要なスポット数が増加し、結果的に照射時間が長くなることにつながるため、1つ1つのスポットを高速で移動させる技術が必要となる。

当社ではこのビームの移動速度(走査速度)を従来機の約5倍である100m/秒とし、スポットごとの移動時間を最小化した。さらに、これによって照射時間を延ばすことなく照射を数回に分割して高速で繰り返す照射(リペイント照射)が可能となり、肺など患者の呼吸に伴って動く臓器

に対しても均一な照射を実現することが可能である。

## 2.3 セレクトビームノズル

陽子線治療装置用に、先に述べた高線量率照射(格子照射)と高精度スキャンニング照射の2つのレパートリーを単一の照射ノズルで実現可能とするのがセレクトビームノズルである。単一のノズルの内部で装置構成を切り替える機構を設け、高線量率照射と高精度スキャンニング照射をシームレスに切替え可能な設計とし、治療する症例ごとによって照射法を素早く変更できる。精密な照射が必要な部位には高精度スキャンニング照射法を適用し、高線量率を活用して短時間で照射したい部位には格子照射法を用いるなどによって、治療の効率化と治療品質の向上の両立を図ることができる。陽子線では上流の照射系機器の散乱によってビームサイズが比較的大きくなる(～5mm)ため、スキャンニング照射に多葉コリメータを併用することで側面の線量分布(ペナンプラ)を向上させることも可能である。図4に計算による線量分布の比較を示す。セレクトビームでは側面の端部分布をよりシャープに形成できている。

## 3. 粒子線治療装置のタイプ

陽子線は装置を小型化できるため都市部等への普及が望まれており、炭素線はより優れた線量分布や生物学的効果を活用し、広域での普及が望まれている。ここでは陽子線タイプと炭素線タイプについて装置の導入状況について述べる。

### 3.1 陽子線タイプ

これまで複数の治療室を持つ大規模装置が導入されてきたが、最近では、都市部などの狭い敷地にも設置できる1室タイプの装置ニーズが高まっている。当社では都市部での様々な敷地制約に対応できるように回転ガントリーの小型化、加速器ビームラインの小型化、遮蔽計算の高精度化による建屋壁厚の最適化を図り、新たな装置レイアウトを開発した。このレイアウトは岡山大学・津山中央病院共同運用がん陽子線治療センター向けに採用され、この病院では2016年4月から治療が開始されている(図5)。さらに、加速器と治療室を階層構造とすることによって敷地面積を極小化した立体配置も可能となり、建設中の医療法人伯鳳会 大阪陽子線クリニック(仮称)、神戸ポートアイラ

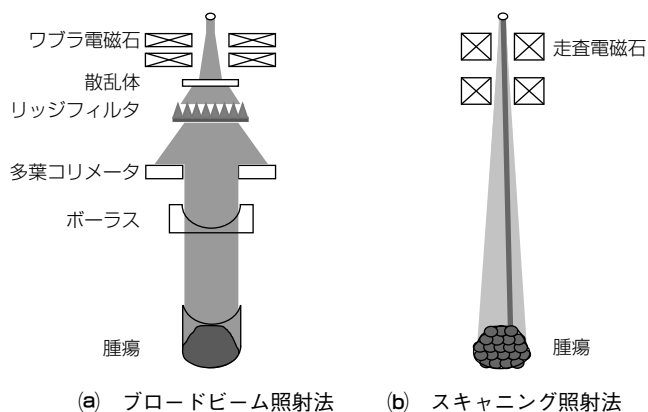


図3. 照射法の比較

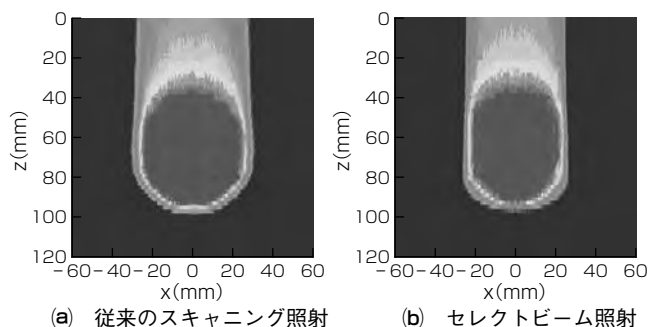


図4. 線量分布の比較



図5. 岡山大学・津山中央病院共同運用がん陽子線治療センター





画像提供：津山中央病院

図6. 陽子線回転ガントリー治療室



図7. 九州国際重粒子線がん治療センター

ンドに建設される小児がん重点を置いた新粒子線治療施設向けに採用されている。3施設とも小型回転ガントリーに、先に述べたセレクトビームノズルの最新機能を具備する構成としている。装置を小さくする一方で治療室の開口径は従来モデルと同等の大きさを確保しており、自在な照射が可能である(図6)。なお、スキャンニング照射法は現在薬機申請を準備中である。

### 3.2 炭素線タイプ

炭素線タイプでは、放射線医学総合研究所主導で開発された重粒子線治療装置を民間普及機として製品化し、九州国際重粒子線がん治療センターで2013年8月から治療が開始されている(図7)。このセンターでは年々治療患者数が増えてきている中、既に稼働中のブロードビーム用治療室2室に加え、今後更に見込まれる治療患者数の増加に対応するため、2014年から3か年計画で新治療室の稼働を整備中である。さらに、新治療室に高精度スキャンニングを導入し、機能アップを実現する(図8)。センターでは治療を止めずに整備を進めるため、工事のための休止期間は設けず、夜間、週末及び2週間の夏期保守期間に限定して工事を進めており、現在薬機申請を準備中の状況である。

炭素線は陽子線よりもビームサイズを小さくできるため( $\sigma < 2\text{mm}$ )、精細な線量分布を形成しやすい特長がある。一方で、均一な照射野を形成するために、ペンシルビームの安定性と正確なスキャンニング走査量が要求される。



画像提供：公益財団法人佐賀国際重粒子線がん治療財団

図8. 炭素線スキャンニング治療室(薬機未承認)

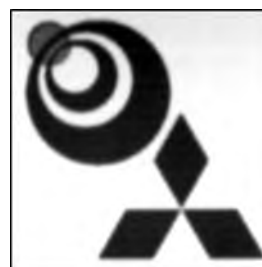


図9. スキャンニング照射デモ描画

九州国際重粒子線がん治療センターでの試験結果では、ビーム位置安定性 $\pm 0.1\text{mm}$ 以下、走査精度 $\pm 0.3\text{mm}$ 以下とともに良好な装置性能が得られている。図9は $245\text{mm} \times 245\text{mm}$ の平面領域に炭素線を用いてデモ描画した結果である。図形の円形、くさび形状部分など精彩に描画できていることが分かる。現在、治療計画装置を含めたビーム検証を実施中であり、治療に向けたコミッショニングを進める予定である。

### 4. む す び

がん治療の最先端治療装置である粒子線治療装置での技術革新状況を述べた。今後も照射法の技術開発に努める一方、粒子線治療装置の普及に向けて、装置の改善を進めていく。陽子線タイプのコミッショニングには、(株)ひょうご粒子線メディカルサポートの赤城 卓氏、清水勝一氏の支援を得た。また、炭素線タイプでは放射線医学総合研究所の古川卓司氏、水島康太氏、原 洋介氏の設計支援並びに九州国際重粒子線がん治療センターの溝田 学氏、網島義一氏、日向猛氏にコミッショニングの協力を得て進めている。本稿をむすぶに当たり各位に感謝申し上げる。

### 参 考 文 献

- (1) 厚生労働省：がん対策推進基本計画(2012)
- (2) 公益財団法人医用原子力技術研究振興財団HP：切らずに治す粒子線治療  
[http://www.antm.or.jp/05\\_treatment/04.html](http://www.antm.or.jp/05_treatment/04.html)



# ITER トロイダル磁場コイルの 製法確立と実機製作

久野和雄\*  
湊 恒明\*\*  
長谷川 満\*\*\*

*Development of ITER Toroidal Field Coil Manufacturing Process*

*Kazuo Kuno, Tsuneaki Minato, Mitsuru Hasegawa*

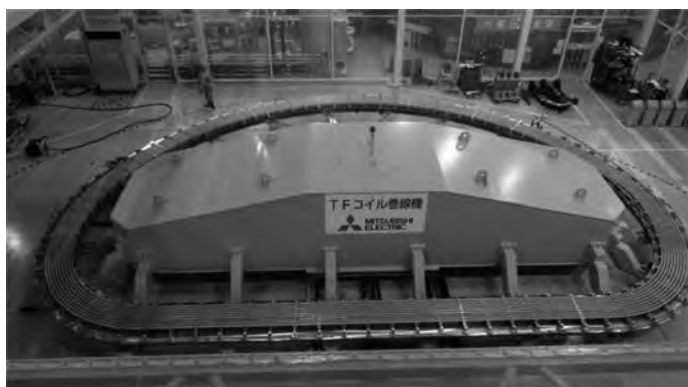
## 要 旨

国際熱核融合実験炉ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)は長時間の核融合反応の実証を目指し、日本・欧州連合(EU)・ロシア・米国・韓国・中国・インドの国際協力で製作が進められている。三菱電機は、1970年代から核融合実験炉の事業に取り組んでおり、多くの製作実績を活用することで、現在ITERの支援及び発電を実証する原型炉への補完研究を目的としたJT-60SA(Super Advanced)用超電導コイルとともにITERのトロイダル磁場コイル(以下“TFコイル”という。)の製作に参画している<sup>(1)(2)</sup>。

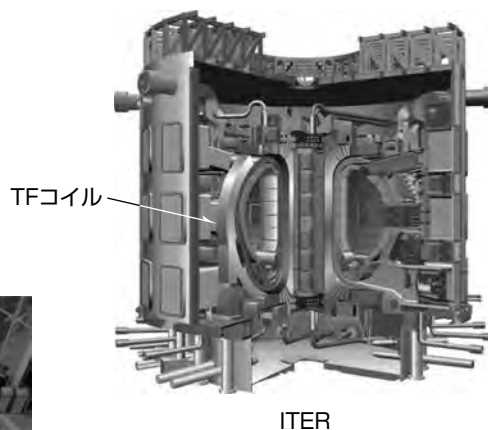
ITERのTFコイルは1コイルが幅9m、高さ15m、質量300トン、巻線バック質量110トンの世界最大の核融合

用大型超電導コイルである。TFコイルの製作は三菱重工業(株)(MHI)と共同受注し、MHI二見工場内で協力して製作を進めている。三菱電機は巻線部分を担当している。

超電導線は高磁場の発生が可能なNb<sub>3</sub>Sn(ニオブ3スズ)であり、巻線後にNb<sub>3</sub>Sn生成のための熱処理が必要である。また、電磁力が強大で、電磁力支持のため導体をラディアルプレートと呼ばれる構造物に組み込む必要がある。これらの点及び超大型コイルであることによって製作が難しく、製法確立のために各種の試作を行い、技術課題を解決するとともに製作設備の準備を進め、実機量産を開始する段階となっている。



TFコイル巻線



画像提供：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

## 国際熱核融合実験炉ITERとTFコイル巻線

ITERは直径約30m、質量23,000トンの大型炉である。核融合反応させるプラズマを強力な磁場で閉じ込めるため、大型の超電導コイルが使われる。プラズマ閉じ込めを担うTFコイルは日本とEUで分担して製作される。TFコイルの1コイルのサイズは9×15(m)である。

# 1. ま え が き

三菱電機は2012年ITERのTFコイルの製作をMHIと共同受注した。巻線部を三菱電機が担当し、ラディアルプレートなどの構造物をMHIが担当している。TFコイルは大型で重いため(巻線パック質量110トン)、製作の効率化、製作中の輸送を少なくする等の観点から、MHI二見工場の大型機器工場内で巻線の製作を行っている。2社が同一工場で作製に取り組むことによって、得意分野をそれぞれが担当して協力する体制ができている。また、巻線製作のための各種設備の製作が終わり、実機製作が軌道に乗り出した。

本稿では、ITERのTFコイルの製作法と試作・実機製作の状況について述べる。

# 2. TFコイル巻線

TFコイルはコイルケースと巻線パック(WP)からなる(図1)。図2は巻線の断面である。導体はNb<sub>3</sub>Sn超電導素

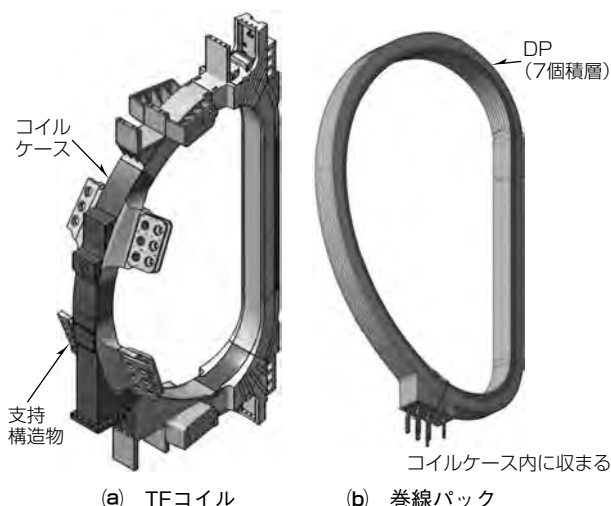


図1. ITERのTFコイル

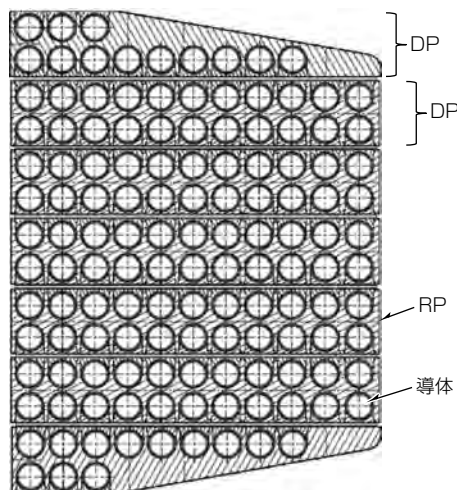


図2. 巻線の断面

線をより線にし、直径43.7mmのSUSジャケットで囲われている。導体は絶縁されて、ラディアルプレート(RP)と呼ばれるステンレスの補強板に収められる。WPは7個のダブルパンケーキ(DP)を積層して、全体を絶縁し、樹脂で固めて製作される。WPの製作手順を図3に示す。

TFコイル製作の特徴を次に挙げる。

- (1) 実績のない超大型コイルであり、各プロセスに技術課題がある。多くの試作開発を実施して、課題を解決している。
- (2) 製作方法の検討とともに設備を計画し、準備する必要がある。全ての製作設備を新たに製作した。
- (3) 不具合による後戻りは致命的となる。十分な検討と品質管理を行う。

# 3. 巻 線

巻線、熱処理後にRPの狭い溝に収納するため、大径(直径43.7mm)の導体であるにも関わらず、高精度の巻線が必要である。特にRPの溝周長と合わせるため、周長を0.01%程度で管理する必要がある。高精度巻線のため、次のような開発又は対策を実施している。

- (1) 導体曲げシミュレーションコード開発
- (2) 高精度の巻線対応の巻線ヘッド開発
- (3) 導体測長システム開発
- (4) 巻線室の温度管理
- (5) 回転テーブル上の導体受け台を高精度にアラインメントし、これに導体を収納して精度を保証
- (6) 熱処理によって超電導線が約0.07%(1ターン当たり23mm)伸びる現象がある(図4)。試作及び実機製作結果を巻線寸法へ反映して製作

これらを実施することで、問題なくRPへの巻線挿入ができている。巻線の周長誤差は要求仕様0.01%に対し、実績

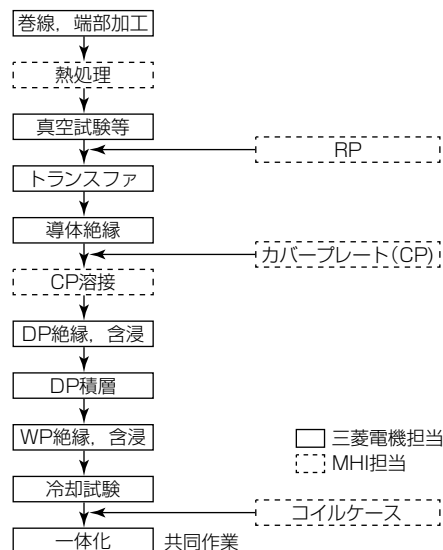


図3. WPの製作手順

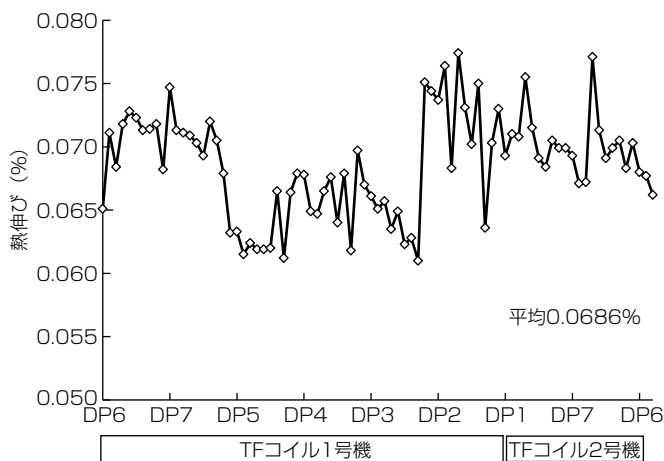


図4. 熱処理による導体の伸び

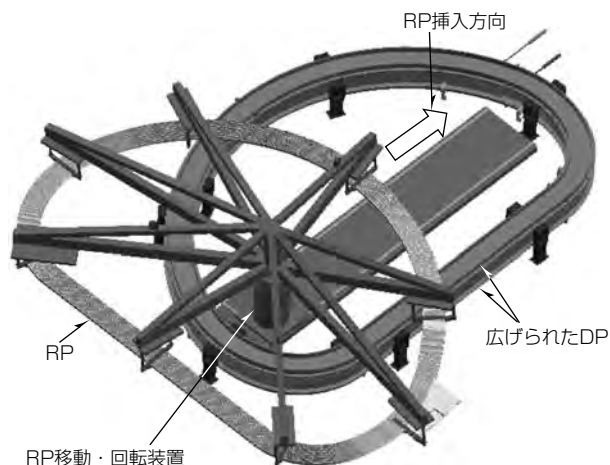


図6. トランスファ装置

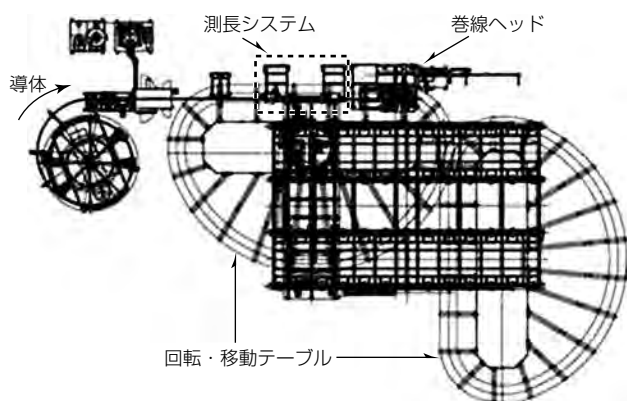


図5. 巻線装置

平均0.0012%である。開発された測長システム、巻線ヘッド等で構成された巻線装置を図5に示す。装置は全体が同期して制御され、シミュレーション結果で自動に巻かれる。

#### 4. トランスファ

巻線及び熱処理されたDPの層間にRPを挿入し、RPの溝内に導体を挿入する。1本の導体で巻線されたDPであるため、層間の渡り部を横切ってRPを挿入できず、RPを複雑に操作して、挿入を行う。熱処理後の導体であるため、導体に発生する歪(ひずみ)を0.1%以下に管理して、作業する。このための装置が図6、図7に示すトランスファ装置である。挿入の動作はトランスファ試験の結果を反映してプログラムされており、安全に作業することができる。RP挿入後、導体をRP溝内に収納し、反転した後、残った側の導体を挿入する。

#### 5. 導体絶縁

RPの溝内に挿入された導体を一旦持ち上げ、導体絶縁してクエンチ検出テープを巻いた後、再度溝に収納するための装置が導体絶縁装置である。ほかの装置同様、独自開発したものであり、D型のDPに沿って、テーピングマシン、導体昇降装置等が周回して、絶縁を施す(図8、図9)。



画像提供：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

図7. トランスファ(RP挿入)作業

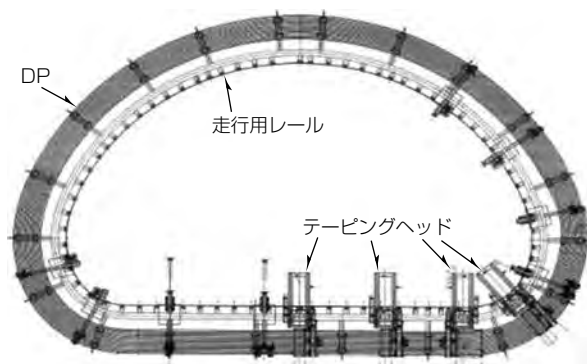


図8. 導体絶縁装置



画像提供：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

図9. 導体絶縁作業

#### 6. DP含浸

CP溶接及びDP絶縁されたDPにレジンを注入し、加熱硬化を行う。耐放射線性の高いシアネートエステル樹脂とエポキシ樹脂を混合して、使用することになっている。ま



画像提供：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

図10. DP含浸装置全景(含浸容器を傾斜させた状態)



画像提供：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

図11. 含浸・加熱硬化後のDP

た、冷却による樹脂の割れを防ぐため、樹脂リッチにならないように(ガラス繊維の割合を高く)、絶縁を施工する。含浸工程は各種の試作を行い、そのプロセスと条件を決めている。

図10は樹脂を含浸容器内に注入する際の写真であり、樹脂内にボイドが発生することを避けるため、含浸容器を傾斜させ、下から樹脂を注入している。実機製作前に2種類のダミーDPを製作し、含浸を含めた製作プロセスの最終確認を実施している。図11は含浸・加熱硬化後のDPの外観、図12はダミーDPを含浸して切断したものの含浸状況を示す。導体絶縁内部まで、一様に含浸できていることが確認された。

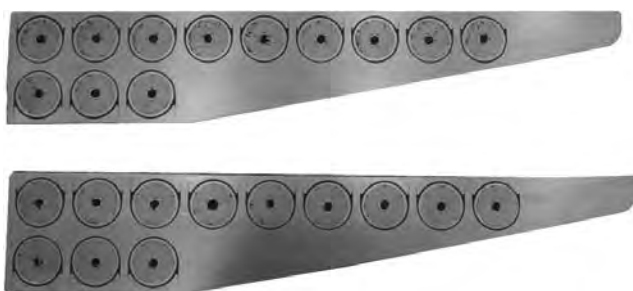
DP含浸工程は含浸準備及び含浸後の手入れ等に時間がかかるため、2台の含浸容器を用意してDP製作ピッチを守るよう計画している。

## 7. WP製作

含浸されたDPは7個積層され、対地絶縁後、再度含浸を行って、WPとなる。

図13はWP含浸のための容器を示したものである。DP積層後に、WP周囲に容器壁を組み立て、溶接して含浸容器を構成する構造としている。周囲をクランプで加圧した状態で全体を3°傾斜させ、含浸を行う。

含浸後、最終的なWPの試験として、液体窒素による冷却試験を行う。冷却履歴を与えた後、真空リークテス



画像提供：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

図12. 含浸状況(ダミーDPを含浸して切断したもの)

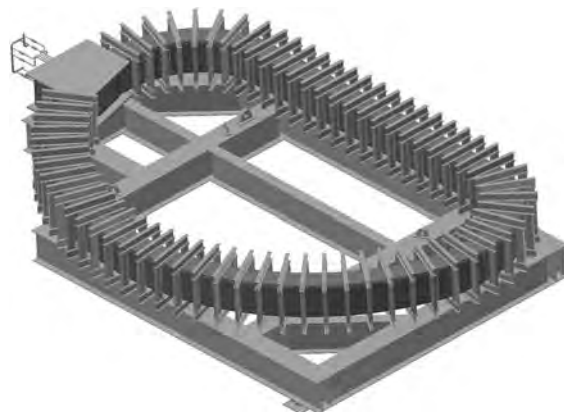


図13. WP含浸のための容器

トと電気試験を実施し、WPの健全性を確認するためである。この試験の試行として、ダミーDPを用いた試験を行い、ほぼ計画どおり冷却でき、また真空リークテスト、電気試験とも問題なくパスしている。

## 8. む す び

ITERのTFコイルの製作は発注元の量子科学技術研究開発機構による指導の下、ITER機構、EU国内機関(F4E)等とも技術交流を行って製作を進めている。

現在までに、DP製作に関する試作は終わり、実機製作もDP含浸まで進んでいる。DP製作に関しては、軌道に乗り出した段階である。

WP製作及びコイルケースとの一体化はこれから取り組む作業である。若干の技術課題が残っているが、これらについて早急に解決を図り、十分な品質管理を行って製作を成し遂げたい。

TFコイルの製作によって得られる技術を、将来の原型炉の設計・製作にも活用できるように取り組む。

## 参 考 文 献

- (1) 野元一宏、ほか：核融合用大型超電導コイルの製作、三菱電機技報、87, No.11, 652～655 (2013)
- (2) Hasegawa M., et al. : Manufacturing of JT-60SA equilibrium field coils, Proceedings of ICEC 24-ICMC 2012, 571～574 (2012)

# 車両放射能汚染検査装置

西沢博志\* 垣内英明†  
中西正一\*\* 松尾慶一†  
林 真照\*\*\*

*Radioactive Contamination Inspecting Equipment for Vehicle*

*Hiroshi Nishizawa, Masakazu Nakanishi, Masateru Hayashi, Hideaki Kakiuchi, Keiichi Matsuo*

## 要 旨

放射線管理区域に出入りする車両の放射能汚染を自動で検査する装置を開発した。福島第一原子力発電所事故で発生した放射性廃棄物を貯蔵する中間貯蔵施設などでは、電離放射線障害防止規則に基づき、管理区域から持ち出す物品の汚染検査を行うことが規定されている。大型トラックも汚染検査の対象であり、現状は携帯型測定器による手作業で汚染検査がなされている。しかし、多大な時間と手間がかかるため、検査場で渋滞が発生することが予想される。このような課題を解決するため、三菱電機は迅速かつ確実な検査が実施できる“車両放射能汚染検査装置”を三菱電機プラントエンジニアリング(MPEC)と共同で開発した。中間貯蔵施設のように周辺のバックグラウンド線量率が比較的高い地域でも車両表面のわずかな汚染を検出す

るため、放射性セシウムからの $\beta$ 線を高感度に検出する一方、周辺からの $\gamma$ 線に対する感度を極力低く抑えた大面積放射線検出器を新たに開発した。さらに、車両全体を効率良く検査するため、門型の可動検査ゲートにそれぞれ独立に動く5台の検出器ユニットを搭載した。検出器ユニットには、車両表面との距離を一定に保ちながら検査できるように距離センサを備えている。これによって、周辺線量率が数 $\mu\text{Sv/h}$ の地域でも、特別な遮蔽体なしで車両表面の汚染を迅速かつ確実に検知できる。例えば、従来は10トンダンプトラック1台の検査に10人による手作業で10分程度かかっていたが、今回開発した装置では自動で4分以内の検査が可能である。



## 車両放射能汚染検査装置

門型の可動検査ゲートに複数の大面積プラスチックシンチレータからなる検出器ユニット5台が搭載されている。可動検査ゲートが車両の先端から後端まで移動する間に、検出器ユニットがそれぞれ独立に車両表面に近接して走査され、車両表面全体を検査する。これによって、車両表面の放射能汚染を迅速かつ確実に検知することができる。

## 1. ま え が き

福島第一原子力発電所事故で発生した放射性廃棄物を貯蔵する中間貯蔵施設では、除染廃棄物や土壌の搬入のため、1日当たり1,500～2,000台程度の車両が出入りすると見積もられている。厚生労働省が労働者の放射線被ばくの低減対策として施行している“電離放射線障害防止規則”では、管理区域から持ち出す物品については汚染検査を行うことが規定されており、中間貯蔵施設などで大型トラックが管理区域から出る場合にも汚染検査が必要となる。現状は携帯型測定器による手作業で検査がなされているが、多大な時間と手間がかかることが課題であり、汚染検査場で渋滞が発生することも予想される。

そこで、検査の迅速化・省力化及び作業員の被ばく低減を目的として、三菱電機は自動で検査を実施できる車両放射能汚染検査装置をMPECと共同で開発した<sup>(1)</sup>。三菱電機が放射線検出器の基本設計と開発を行い、MPECが装置の全体設計と製作を行った。この装置は、大面積の放射線検出器によってトラック表面を自動走査して汚染の有無を確認することができる。そのため、手作業による汚染検査に比べ更に確実な検査が可能となる。また、現場で汚染検査に携わる作業員の人数や作業時間を減らすことができるため、作業員の放射線被ばくの低減に貢献できる。

本稿では、車両放射能汚染検査装置の計測方式、検出器・装置構成、評価結果について述べる。

## 2. 計 測 方 式

検査対象核種である放射性セシウム( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ )からは $\beta$ 線(内部転換電子を含む)と $\gamma$ 線が放出される。表1に放射性セシウムから放出される主な $\beta$ 線と $\gamma$ 線(エネルギー及び1壊変当たりの放出率)を示す。

周辺線量率が比較的高い除染現場や廃棄物保管場の周辺では、汚染限度40Bq(ベクレル)/ $\text{cm}^2$ 以下(除染特別地域などの場合)を検出・判定するためには周辺からのバックグラウンド(BG)放射線との弁別が不可欠となる。例えば、面積100 $\text{cm}^2$ 、表面密度40Bq/ $\text{cm}^2$ の $^{137}\text{Cs}$ による汚染があったとすると、この汚染部位から数十cm離れたところに及ぼす $\gamma$ 線線量率の増加分は単純計算で数nSv/h程度となる。中間貯蔵施設周辺の空間 $\gamma$ 線線量率はおよそ1～

表1. 放射性セシウムから放出される主な $\beta$ 線,  $\gamma$ 線  
(エネルギー及び1壊変当たりの放出率)

核種	$\beta$ 線(内部転換電子を含む)	$\gamma$ 線
$^{137}\text{Cs}$	$\beta$ : 最大514keV(94.4%) $\beta$ : 最大1,176keV(5.6%) 内部転換電子: 624keV(7.6%)	662keV(85.1%)
$^{134}\text{Cs}$	$\beta$ : 最大89keV(27.3%) $\beta$ : 最大658keV(70.2%)	569keV(15.4%) 605keV(97.6%) 796keV(85.5%)

keV: kilo electron Volt

10 $\mu\text{Sv/h}$ 程度と想定されるため、法定限度程度のわずかな表面汚染を $\gamma$ 線で検出するためには、周辺からのバックグラウンド放射線の影響を大幅に低減させて検査する必要がある。

そこで、周辺からのバックグラウンドの影響を低減する有効な方法として、検査対象からの $\beta$ 線を計測することが考えられる。表2に $\beta$ 線計測と $\gamma$ 線計測の方式について、それぞれ特徴を示した。

$\beta$ 線計測方式の特徴は、検出器の厚さを薄くして $\gamma$ 線のほとんどを透過させることによって、 $\gamma$ 線に対する感度を低く抑えていることである。これによって周辺からのバックグラウンド $\gamma$ 線を遮蔽するための鉛などの遮蔽物が不要となり、数百kgから数トンの重量物が不要となるメリットがある。ただし、 $\beta$ 線計測方式では検出器を測定対象に近づけることが必須となる。これは $\beta$ 線の空気中の飛程が数十cmと短いためである。図1に検査対象核種の1つである $^{137}\text{Cs}$ から放出される $\beta$ 線及び内部転換電子のエネルギースペクトルを示す。エネルギーの平均は約250keVである。例えば、250keV電子の空気中の飛程は約45cmであるが、検出器入射窓での $\beta$ 線のエネルギー損失も考慮すると、検査対象物との距離は少なくとも35cm以内にする必要がある。一方で、 $\beta$ 線の飛程が短いことは汚染部位の識別が容易になることを意味する。すなわち、遠方から飛来する $\beta$ 線は検出器に入射できないため、検出器直近だけの汚染を計測できる。

それに対し、 $\gamma$ 線の場合は飛行距離が長いので遠隔での測定が可能であるが、透過力も強いので、物体の反対側の

表2. 計測方式の比較

	$\beta$ 線計測方式	$\gamma$ 線計測方式
測定概要		
検出対象との距離	△(数10cm以内)	○(数mでも可)
$\gamma$ 線バックグラウンドの影響低減	◎(数 $\mu\text{Sv/h}$ でも可)	×(0.1 $\mu\text{Sv/h}$ 以下に低減が必要)

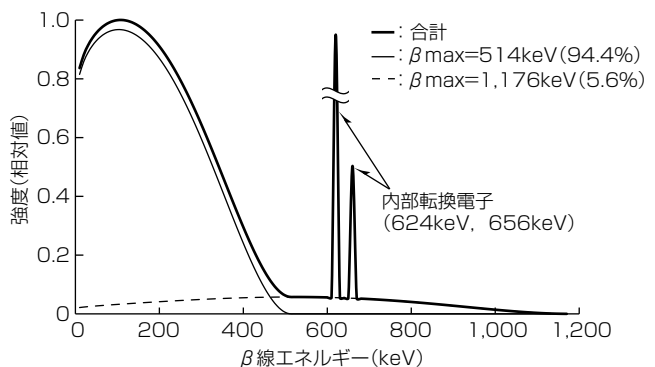


図1.  $^{137}\text{Cs}$ から放出される $\beta$ 線及び内部転換電子のエネルギースペクトル

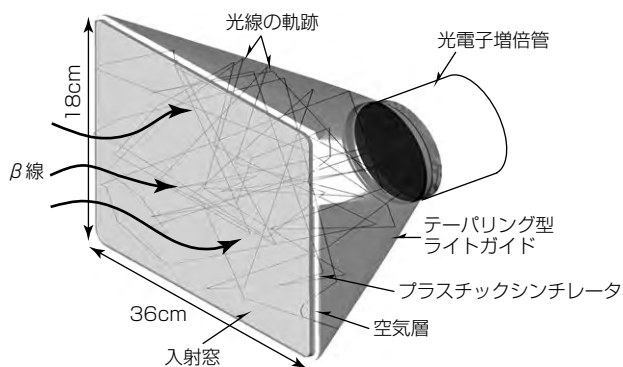


図2. 検出器の光線追跡シミュレーション

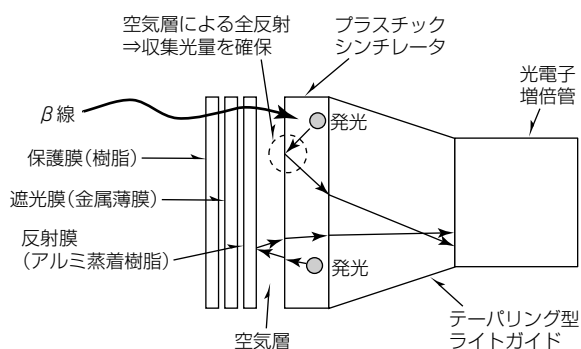


図3. 検出器構成の模式図

面を含めたあらゆる方向からの $\gamma$ 線を計測してしまう。そのため、汚染部位を特定するにはコリメータを設けるなどの特殊な機構が必要となる。

これらから、車両放射能汚染検査装置では $\beta$ 線計測方式を採用することにした。実現の課題は、高感度かつ大面積の $\beta$ 線検出器を開発することと、検出器を車両表面から一定の距離に近づけ、これを車両表面全体にわたり自動走査することである。

### 3. 大面積放射線検出器

#### 3.1 構成

トラック車両など、広い検査対象面積を持つ物体の表面汚染を効率良く検査するためには、薄い平板状の大面積プラスチックシンチレータの適用が考えられる。しかし、検出器を大面積化する場合、一般的にはシンチレーション光の収集効率が低下し、感度の低下と不均一性の問題が生じる。そこで、図2に示すように、発生した光を効果的に収集するため、光線追跡シミュレーションを用いてライトガイドと反射体の形状を最適設計した。また、検出器入射面での $\beta$ 線のエネルギー損失を抑制しつつ、発光したシンチレーション光を効率良く回収できるようにするための入射窓構造を考案した。

図3に検出器の構成、図4に外観を示す。有感部の面積は約 $18 \times 36$ (cm)であり、一般的なGM(Geiger-Mueller)管式サーベイメータ(有感部直径5 cm)の約30倍の面積を

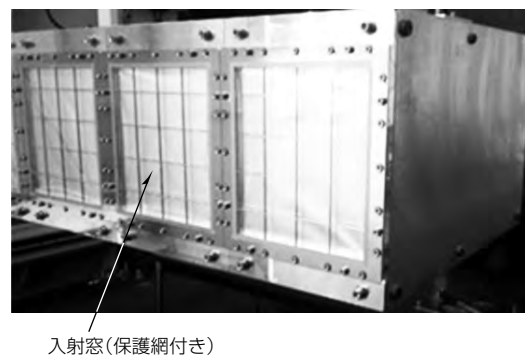


図4. 検出器

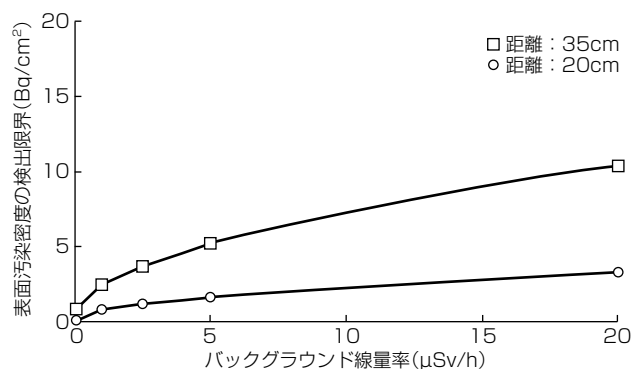


図5. 検出限界の評価結果(検査時間3秒)

持つ。長方形のシンチレータと円形の光電子増倍管受光部は、テーパリング型のライトガイドで結合した。シンチレータの入射窓側には薄い空気層を設け、屈折率差による全反射によって、発生したシンチレーション光を効率良く反射して光電子増倍管受光部へ導光されるようにした。

#### 3.2 性能評価

試作した検出器の表面汚染密度の検出限界を評価した。検出限界は、 $^{137}\text{Cs}$ の $\beta$ 線標準面線源を用い、検出器と検査対象物の距離に対する機器効率を求め、 $\gamma$ 線バックグラウンドに対する応答の実測値からCurrieの式(危険率5%)を用いて評価した。検査時間3秒、距離20cm及び35cmの場合の評価結果を図5に示す。バックグラウンド線量率が $20 \mu\text{Sv/h}$ でも、検出限界がおおむね $10 \text{Bq/cm}^2$ 以下を達成できる<sup>(2)</sup>。

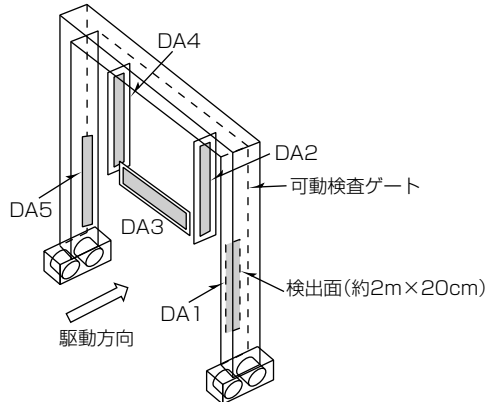
### 4. 車両放射能汚染検査装置

大面積放射線検出器を用いて、トラックの表面汚染を自動で検査できる車両放射能汚染検査装置を開発した。図6に装置全体の写真を示す。測定対象車両は10トンダンプトラックであり、車両の外表面と荷台面の汚染を計測するために、検出部を5つのユニットに分けている。1つの検出器ユニットには5台の大面積放射線検出器が内蔵されており、検出面は全体で約 $2 \text{m} \times 20 \text{cm}$ である。図7に検出器ユニットの構成と検査部位を示す。5つの検出器ユニットが搭載された門型の可動検査ゲートが車両の先端から後





図6. 車両放射能汚染検査装置



検出器ユニット	検査部位
DA1, DA5	車両側面
DA2, DA4	荷台内部側面
DA3	車両前後面, 天井面, 荷台面

図7. 検出器ユニットの構成

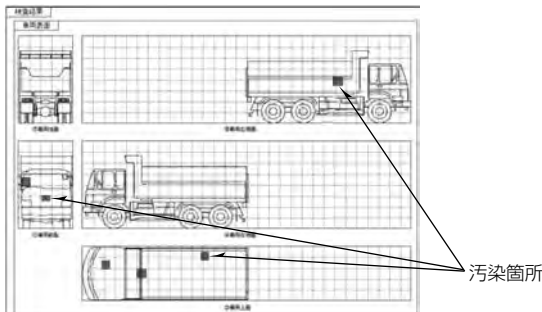


図8. 検査結果の表示例

端まで移動する間に、DA1からDA5の5つのユニットが独立に直進及び回転運動し、車両表面全体を走査する。車両側面はユニットDA1とDA5、荷台の内側側面はユニットDA2とDA4、車両の前後面・天井面、荷台面はユニットDA3が受け持つ。各検出器ユニットに搭載された距離センサによって、検出器と車両表面の間は一定の距離が保たれる。その結果、 $\beta$ 線の検出効率がほぼ一定となるため校正定数の不確かさが小さくなり、検査精度が確保される。汚染検査結果は、例えば図8のように判定基準を超えた箇所が画面に表示される。これによって、従来のサーベ

表3. 車両放射能汚染検査装置の主な仕様

測定環境	屋内
測定対象車両	10トンダンプトラック
測定線種	$\beta$ 線
放射線検出器	プラスチックシンチレータ
周辺線量率	2.5 $\mu$ Sv/h以下
検出限界	15Bq/cm <sup>2</sup> 以下
検査部	車両前後面, 側面, 天井面, 荷台面 (タイヤ, タイヤハウス, 車両底面は除く)
検査時間	可動検査ゲート1台: 4分以内 可動検査ゲート2台: 2分以内
検査結果	トラック全体のイメージ図上に汚染部位を赤色表示 検査結果を検査データとして保存可能

イメータを用いた手作業に比べて更に確実に効率的な検査が可能となる。

福島県内で標準面線源を用いた機能試験を実施した結果、表面汚染40Bq/cm<sup>2</sup>を確実に検知することを確認できた。従来は10トンダンプトラック1台の車両表面の汚染検査に、10人による手作業で10分程度かかっていたが、今回開発した装置では約3分30秒で検査することができ、作業員の人数と負担を大幅に削減できる。さらに、可動検査ゲートを増設して2台にすることで、更なる時間短縮(1分50秒程度)も可能である。開発した車両放射能汚染検査装置の主な仕様を表3に示す。

## 5. む す び

中間貯蔵施設などの放射線管理区域に出入りする車両の放射能汚染を自動で検査する装置を開発した。この装置によって、従来は多くの作業員で行ってきた手作業による検査の時間・手間を大幅に削減でき、かつ確実に検査を実施できる。東北地方や福島県の復興・再生には、現在は仮置場に保管されている膨大な量の除染廃棄物を速やかに中間貯蔵施設に運搬・搬入することが不可欠である。また、30年後の福島県外での最終処分も決定しており、廃棄物や施設に出入りする物品・車両などの管理を確実に実施し、周辺環境の保全にも努めなければならない。この装置が、東日本大震災からの復興・再生に役立てば幸いである。

## 参 考 文 献

- (1) 三菱電機プラントエンジニアリング(株)ニュースリリース 2015年7月13日: 除去土壌などの運搬車両の汚染検査の効率化, 省力化に貢献 放射性物質による車両汚染の自動検査装置を開発  
<http://www.mpec.co.jp/documents/20150713.pdf>
- (2) 西沢博志, ほか: 測定的大幅な効率化が可能な表面汚染検査用大面積 $\beta$ 線検出器, 第4回環境放射能除染研究発表会・国際シンポジウム, P2-04 (2015)