

MITSUBISHI
Changes for the Better

家庭から宇宙まで、エコチェンジ



三菱電機技報

11

2013

Vol.87 No.11

発電技術特集



目次

特集「発電技術特集」

発電プラントの設計と大学基礎教育	1
仁田 旦三	
発電プラントを支える計装制御システム技術	2
武田保孝・石原 鑑	
火力発電プラント向け計装制御システム“MELSEP5”	7
西島宏樹・三木政幸・佐内孝太郎	
発電プラント向け新計装制御システムのコンセプト	11
川上益史・野村明裕・古賀靖信	
発電プラント向け新計装制御システムの要素技術	15
高橋浩一・武村英夫・諸岡史久・織田修司	
原子力プラントの安全対策に向けた技術	19
内山隆弘・小泉義夫・清水 遼	
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	23
平島将士・稲葉隆太・那須ひとみ	
中国CPR1000型原子力発電所向け計装制御設備の実現	27
松本 等・杉谷 滋・津村嘉彦・金丸剛之	
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	32
佐占 浩・岡田真一	
可変速揚水発電システムによる電力安定供給と最新海外水力発電プロジェクト	36
西都一浩・高見健太郎・難波輝晃・竹重 晋・岸田和之	
一般論文	
重要施設の外周セキュリティ強化に向けた侵入監視システム“MELSIGHT”	40
水谷晴之・藤原 潤	
最新の粒子線治療装置	44
大谷利宏・鳥羽 順	
核融合用大型超電導コイルの製作	48
野元一宏・湊 恒明・長谷川 満・堀井弘幸	
特別論文	
450MVA GCT-STATCOMによる定態安定度向上技術及び系統過電圧抑制技術	52
正城健次・天満耕司・原田英広・松田泰蔵・森島直樹	

Technology for Power Plant

Design of Electric Power Plants and Educational Method of Basic Subjects on Electrical Engineering	Tanzo Nitta
Instrumentation and Control System Technologies for Power Plant	Yasutaka Takeda, Akira Ishihara
Instrumentation and Control System "MELSEP5" for Thermal Power Plants	Hiroki Nishijima, Masayuki Miki, Kotaro Sanai
Concept of New Instrumentation and Control System for Power Plants	Masufumi Kawakami, Akihiro Nomura, Yasunobu Koga
Key Technologies Applicable to New Instrumentation and Control System for Power Plants	Koichi Takahashi, Hideo Takemura, Fumihisa Morooka, Shuji Orita
Technologies of Safety and Security Measures for Nuclear Plants	Takahiro Uchiyama, Yoshio Koizumi, Ryo Shimizu
Activities for Complying with Regulations for US-APWR Digital Instrumentation and Control Systems	Masashi Hirahatake, Ryuta Inaba, Hitomi Nasu
Application of Mitsubishi Digital Instrumentation and Control System for China CPR1000 Nuclear Power Plant	Hitoshi Matsumoto, Shigeru Sugitani, Yoshihiko Tsumura, Yoshiyuki Kanamaru
On-line Partial Discharge Measurement with Microstrip Antenna for Turbine Generators	Hiroshi Sako, Shinichi Okada
Adjustable-speed Pumped Hydro Power Generation System for Electric Power Stable Supply, and Latest Overseas Projects of Water-power Generation	Kazuhiko Saito, Kentaro Takami, Teruaki Namba, Susumu Takeshige, Kazuyuki Kishida
Perimeter Intrusion Detection System "MELSIGHT" for Critical Infrastructures	Haruyuki Mizutani, Jun Fujiwara
Latest Particle Beam Treatment Systems	Toshihiro Otani, Jun Toba
Manufacturing of Large Superconducting Coils for Fusion Projects	Kazuhiro Nomoto, Tsuneaki Minato, Mitsuru Hasegawa, Hiroyuki Horii
Enhancement of Steady-State Stability and Suppression of Over-Voltage using 450MVA GCT-STATCOM	Kenji Masaki, Koji Temma, Hidehiro Harada, Taizou Matsuda, Naoki Morishima

特許と新案

「ガス絶縁スイッチギヤ」	56
--------------------	----

表紙：発電技術特集

三菱電機は、電力の安定供給に寄与する大規模集中電源である火力・原子力・水力発電システムにおいて、より一層安全で高効率な発電技術の開発に取り組んでいる。本特集号では、発電技術の最新技術を紹介する。あわせて、重要施設の外周セキュリティ関連システム、粒子線治療装置、大型超電導コイル等の最新技術を紹介する。

①は、原子力プラント向け中央計装運転検証設備
 ②は、コンバインドサイクル発電方式の火力発電所設置のタービン発電機
 ③は、粒子線治療装置(炭素線タイプ)の治療室である。



①

②

③

巻/頭/言

発電プラントの設計と大学基礎教育

Design of Electric Power Plants and Educational Method of
Basic Subjects on Electircal Engineering

仁田 旦三
Tanzo Nitta



発電プラントに関して、大学においてその基礎的な事柄の教育はあるが、研究としてふれることは非常に難しい。たまたま超電導発電機の開発に関する研究を行い、その3台目の発電機を1992年に関西電力蹴上発電所の100周年記念事業として、商用電源に連系試験を行うことができ、発電プラントに関するごくわずかな経験を得ることができた。

発電プラントは、原動機、発電機などの機器とその保護監視システムからなる。残念ながら重要な機器である原動機に関する実質的な経験は全くないので、発電機、保護監視システムに関して述べ、少々飛躍があるが、大学における基礎教育との関連にふれてみたい。

導電材料、磁性材料、絶縁材料、構造材料と冷却技術の進歩によって、高効率・大容量の発電機が開発されてきた。この中で特に絶縁材料と冷却技術の進歩が大きく貢献してきた。ここでの基本的考えはスケールメリットである。それぞれの材料の進歩は、発電機全体の特性を大きく変えることがあり、新材料の導入において、十分考慮しなければならない。材料の中で最も進歩していないのが導電材料であり、超電導発電機開発の動機の一つである。超電導発電機においても、主磁束回路に磁性材料を使用しないため、その同期インピーダンスは非常に小さく、界磁回路時定数が非常に大きい特性がある。界磁時定数が大きいため、AVR(PSS)による安定度向上が認められないのではないかと疑問もあったが、その後の実験やシミュレーションで、励磁電流変化による界磁コイルの磁気エネルギー変化が安定度向上効果のあることや、界磁時定数が大きいことも安定度向上に貢献することなど、当初思われたことの逆の結果も得ている。前者に関しては、発電機の界磁コイルのエネルギー変化を考慮したブロック図を示すと共に、実験においてもその効果を示すことができた。常に真摯に課題の検証を行うことが必要であるという教訓を得たことを記憶している。現用の大型発電機においても界磁回路のエネルギー変化による同様の効果があるように思える。

商用系統に連系するために、保護監視システムに関しても超電導発電機独特の特性を考慮した設計を行った。また、教育的意味から、“発電プラントは電気がない”ことを考え、停電を考慮し、保護監視システム、制御システムのためのバッテリーを設置した。

この頃は、いろいろな問題を数値計算によって解析することが盛んに行われていた。特に電磁界解析の開発が進められ、そこにおいて電気磁気学、それに伴うベクトル解析などを十分に活用し、定式化、境界条件などを導くことが要求された。さらに対称座標法などの回路理論も必要としていた。

最近と言っても10年以上になるが、計算機ソフトウェアの進歩によって、ヤング率という言葉を知らなくても構造計算ができると聞き、大変驚いている。力学的素養がなくても計算できることは非常に危険と考える。

従来、電気工学は体系化がしっかりしていると言われていた。その基礎科目として、電気磁気学、電気回路がある(固体物理を含めることがある)。昔は、手計算による解を得る方法を学び、その計算と結果をもとに、電気磁気学や電気回路に関する素養が養成されたと思われる。しかし、ソフトウェアの発展で解を求めることは簡単になり、手計算の必要性がないように思われる。手計算を行わずにその素養だけを養成することは可能かどうか。新しい基礎科目教育法を考えなければならないと思われる。この状況を電気回路的に考えると、従来は手計算結果を必要としていたことから有効電力と考えることができ、素養は無効電力(電圧(ポテンシャル))に対応することとなろう。この意味から、従来と同じ教育をしていれば、現在の教育は非常に力率の悪い教育となろう。簡易計算手法の背景、手計算や解析の過程、また、その結果に対する物理的把握を更に重視した講義が必要となり、このことは、講義者、受講者の双方にとって簡単なことでなく、共に難しいことになると考える。

巻頭論文

発電プラントを支える計装制御システム技術



武田保孝*



石原 鑑**

Instrumentation and Control System Technologies for Power Plant

Yasutaka Takeda, Akira Ishihara

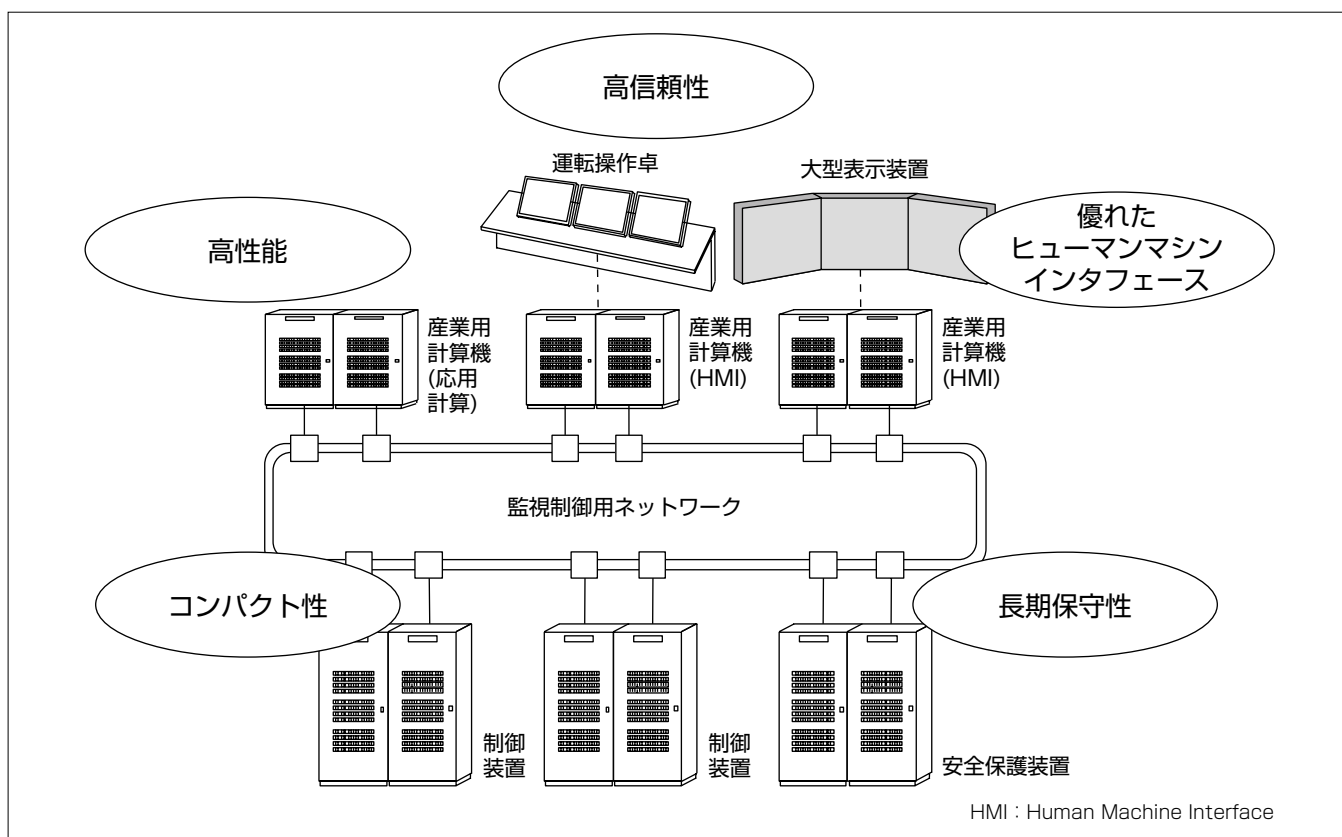
要 旨

生活水準の向上や高度情報化社会の進展によって、エネルギー消費全体における電気エネルギーの重要性は高まり続けている。電力供給に関わる計装制御システムは監視の連続性、制御の安定性等、電力安定供給に対する重要な役割を担ってきており、発電プラントの効率的運用が一層求められる中で、その果たす役割も拡大している。計装制御システムは発電所設備の一部として、堅牢(けんろう)、効率的かつ人に優しいシステムを実現することが必須となっている。

そのため、発電プラント向け計装制御システムには安定した連続運転を実現する、高いシステム信頼性、処理性能等が要求され、プラントを運転する人間が使いやすい優れ

たヒューマンマシンインタフェース設計が求められる。加えて、20年を超えるプラント寿命に対応した計装制御システムの長期保守性、装置のコンパクト性等も求められる。三菱電機では、これらの要求を満たす発電プラント向け計装制御システムの開発を進めている。

この特集号では、火力発電プラント向け計装制御システム“MELSEP5”，発電プラント向け新計装制御システムプラットフォーム、原子力発電プラントの新規制基準に対応した技術開発、米国や中国の原子力発電プラント向け計装制御システム等、具体的な開発事例を通じて当社の取組みについて述べる。



発電プラント向け計装制御システム

重要な社会インフラ設備である発電プラントの計装制御システムには、高性能、高信頼、優れたヒューマンマシンインタフェース、長期保守性、コンパクト性等の要求がある。計装制御システムを構成する個々のコンポーネントである、制御装置、監視制御用ネットワーク、産業用計算機にはこれらの要求を実現するための様々な技術が実装されている。

1. ま え が き

電力は我々の社会、経済活動を支える重要なインフラである。資源エネルギー庁の電力調査統計では、2012年度の発電量実績は約8,200億kWhであり、原動力別で火力、原子力、水力でその99%以上をカバーしている。したがって、電力の安定供給のためには、発電プラントの安定した稼働が必要不可欠である。

発電プラントは、燃料から熱エネルギーを取り出す熱源機器(ボイラ、原子炉)、熱などのエネルギー源を機械エネルギーに変換する原動機(ガスタービン、蒸気タービン)、機械エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機などの機器と、発電プラントの神経網としてこれらの機器を監視制御する計装制御システムから構成される。発電プラントは社会インフラ設備として連続した安定運転が要求されるため、その設備の一部である計装制御システムにも高い信頼性が要求される。またプラントを運転する人間に対しても使いやすく、ヒューマンエラーに配慮したヒューマンマシンインタフェース設計が求められる。

経済産業省などの予測では、我が国のエネルギー需要は今後緩やかに頭打ちとなるとされている。発電プラント向け計装制御システムを発展させていくためには、国内だけでなく海外でのビジネス展開が必要になると考えられる。海外市場では、当該国の基準、規格に加え国際的な基準、規格への適合が求められ、要求事項に対応した取組みが必要となる。

本稿では、これらの種々の要求を満たすための発電プラント向けの計装制御システム技術の動向を概観し、当社の取組みについて述べる。

2. 計装制御システム技術の動向

2.1 計装制御システムの進化

計装制御システムは、プラントから温度、圧力、流量等に代表されるプロセス情報を収集し、ポンプ、弁等の機器の制御を行う。加えて、運転員へプラント監視、操作のための機能を提供する、いわばプラントの神経系統をつかさどるシステムである。

現在の計装制御システムは、1970年代に開発された分散型制御システムDCS(Distributed Control System)を原型としている。DCSは分散された機能間を通信によって結合するという概念を実現したシステムであり、プラント機器の監視制御を行う制御装置、データの加工、ロギング、性能計算等を行い、運転員へ監視操作機能を提供する産業用計算機、及びこれらを結ぶ制御用ネットワーク等から構成される。

制御装置、産業用計算機のキーコンポーネントであるマイクロプロセッサは1970年以降現在に至るまで高性能化が

進んでいる。マイクロプロセッサのアーキテクチャ及び集積技術の進歩に伴い、演算で一度に扱えるデータ量は8ビット、16ビット、32ビット、64ビットと増加している。近年では、2つ以上のプロセッサコアを1つのパッケージに集積したマルチコア型のマイクロプロセッサが主流となりつつある。メモリ容量もKバイトオーダーからGバイトオーダーに大容量化し、システムの実行速度を決めるクロック周波数もMHzオーダーから数GHzオーダーへと高速化している。これらコンポーネントの進化に伴い制御装置、産業用計算機ともに高性能化しており、制御装置の性能向上に伴う装置台数の削減、装置のコンパクト化、システムの多重化による信頼性向上等が進んでいる。

制御用ネットワークは、信頼性、リアルタイム性の要求を満たしつつ制御装置と産業用計算機間のデータ伝送を行う。制御用ネットワークの通信速度は、汎用ネットワーク技術をベースに数kbpsから100Gbpsへと高速化が進んでいる。制御用ネットワーク独自の信頼性、性能要求を満たすための機能として、ネットワークの二重化、リアルタイムデータ伝送等の手法が発達してきている。

2.2 計装制御システムへの要求

発電プラント向け計装制御システムには、高性能、高信頼性、長期安定性、コンパクト性、運用・メンテナンスの容易性、使いやすいヒューマンマシンインタフェース等が求められ、近年ではサイバーセキュリティへの対策も求められている。

発電プラントでは、数万点のデジタル情報、アナログ情報を数ミリ秒から数100ミリ秒で処理することが求められる。運転員に対してはプラント運転状態、警報等の情報提供、プラント機器に対してはPID(Proportional Integral Derivative)制御などを行う。これらの処理をプラント運転中は間違いなくかつ連続して行うため、システム全体として高い信頼性が求められる。また、装置が故障しても影響が広がらない独立性の確保などが求められる。

一般に発電プラント自体の寿命は20年以上であり計装制御システムの長期の安定性が求められるとともに、ICT(Information and Communication Technology)機器の寿命などを考慮して容易にシステム・装置の更新が行えることが求められる。また計装制御システムの設置スペースの問題から装置のコンパクト性も求められる。

プラント運転では、運転員の情報の誤認識、誤操作がプラント運転に重大な影響を与える可能性がある。また計装制御システムの効率的な運用を支援するためには、制御システム全体、ネットワーク、装置個々の動作状態の可視化機能が必要となる。そのため、人間にとって分かりやすく使いやすい、ヒューマンマシンインタフェースが必要とされる。

発電プラント向けの計装制御システムは、通常ルータや

ファイアウォールなどのセキュリティ機器によって外部のネットワークからは遮断されているが、コンピュータウイルスStuxnetの出現⁽¹⁾によって、サイバーセキュリティへの対策が求められている。Stuxnetはウイルス伝播(でんぱ)の形態として、ネットワークだけでなくUSB(Universal Serial Bus)メモリによっても媒介され、スタンドアロンのネットワークに対しても侵入可能である点が脅威である。そのため、計装制御システムにおけるサイバーセキュリティの必要性が強く認識された。

2.3 計装制御システム技術と当社の取組み

2.3.1 全体システム構成

代表的な発電所向け計装制御システムの構成を図1に示す。計装制御システムを構成する装置としては大きく2種類に分けることができる。1つは制御・安全保護装置で、プラントの監視制御に必要なプロセス情報をセンサから取り込み、プラントを制御するための演算処理を行い、種々のアクチュエータ、プラント機器へ動作指令を出力する。制御装置は、通常の発電プラント運転に必要な圧力制御や流量制御といったプラントの制御を行い、安全保護装置は発電プラントを安全に停止させる。

もう1つは産業用計算機と呼ばれるもので、プラントから収集したデータの加工、ロギング、性能計算等、種々の応用計算処理を行う。さらに、産業用計算機は運転員へのプラント監視情報の提供、プラント機器操作等のヒューマンマシンインタフェースをつかさどる。

制御・安全保護装置と産業用計算機を接続し、相互のデータ通信を行うために監視制御用ネットワークが設けられている。また、計装制御システムの保守、メンテナンスを行うために保守用ネットワークが設けられている。

これらが計装制御システムの基本構成である。個々の制御・安全保護装置、産業用計算機はそれぞれの果たす機能

の重要度に応じ、シングル構成、二重化構成、複数分散構成等がとれるようになっている。次に計装制御システムの主要な構成要素とエンジニアリング環境、ヒューマンマシンインタフェース、サイバーセキュリティについて述べる。

なお、当社最新の火力発電プラント向け計装制御システムの全体像は、この特集号の“火力発電プラント向け計装制御システム“MELSEP5””(p.7)で詳しく述べている。

2.3.2 制御・安全保護装置

制御・安全保護装置は、プラントからの種々のデータを取り込み、産業用計算機からの設定に基づいた制御演算を行い、制御指令をアクチュエータへ出力する装置である。

制御・安全保護装置は、計算処理を行うCPUカードとプラント側に設置されたセンサやアクチュエータとの入出力を行うIOカード等で構成する。それぞれのカードは、装置の重要度から要求される信頼性を実現できるように、シングル構成、二重化構成等がとれるようになっている。また信頼性確保のためにRAS(Reliability Availability Serviceability)機能が搭載されている。

当社の最新型の制御装置では、CPUとして初めてマルチコアプロセッサを採用し高性能化を図っている。マルチコアを有効に活用するため、1台の制御装置の中で仮想的に複数の制御装置が動作できるように制御用モニタを新たに開発した。制御用モニタ上ではOS(Operating System)、アプリケーションである制御演算ロジックを、リソースを意識することなく、複数台分動作させることが可能となっている。また、制御装置内のシステムバスも従来のパラレルバスからシリアルバスへの変更を行い性能向上を図っている。

さらに、信頼性向上策の一環として一過性異常に対するリカバリー機能を強化している。一過性異常は、メモリ上のデータが宇宙線などによってデータ反転を起こすSEU(Single Event Upset)現象や外来ノイズ・静電気等によって、システム内のデータが一時的に異常になる現象である。リカバリーの対象としたのはメモリとシステムバスである。メモリは、ECC(Error Checking and Correction)による自動修復、CRC(Cyclic Redundancy Check)値/チェックサム値等によるデータ健全性のチェックとエラー検出時のデータ再送等の方法を採用している。システムバス上のデータは、シリアルバス上のデータパケット単位でのCRC値チェックと再送機能を実装することでリカバリーを実現している。リカバリー機能を強化することで一過性異常が発生しても、待機系へ切り替えることなく制御装置の運転が継続できるようになっている。

2.3.3 産業用計算機

発電プラントなど社会インフラ設備の監視制御に適用されるコンピュータは産業用計算機と呼ばれ、パソコンと比較して高品質、高信頼、故障解析の容易性といった要求を

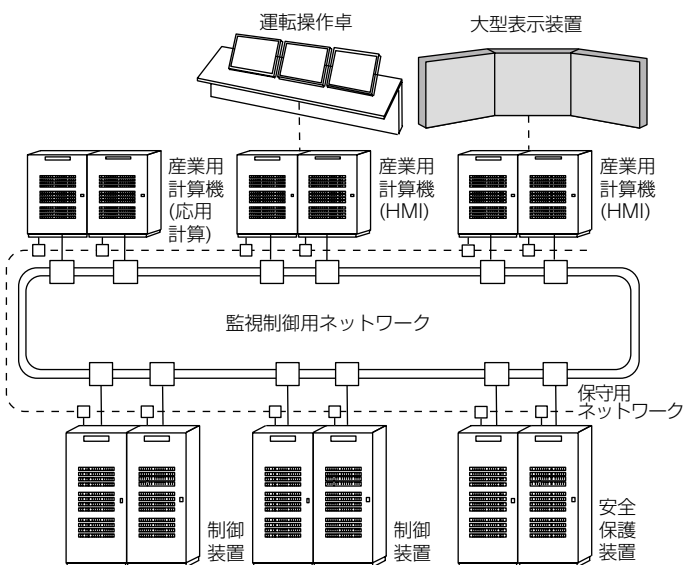


図1. 発電所向け計装制御システムの構成

実現するため、ハードウェア及びソフトウェア面での様々な強化が図られている。当社では、OSレベルでの故障解析を容易化するため、OSとしてリアルタイム処理などを強化したLinux^(注1)や制御用RTOS(Real Time Operating System)を採用している。信頼性を高く保つためにRAS機能を持たせている。さらに、マルチコアCPUを適用する際にも単に処理性能を高めるだけでなく、信頼性を強化する方式を組み込んでいる⁽²⁾。

(注1) Linuxは、Linus Torvalds氏の登録商標である。

2.3.4 監視制御／保守用ネットワーク

発電プラントの計装制御システムでは、リアルタイムにプラントの監視制御を行うための監視制御用ネットワークと制御装置や産業用計算機の保守、メンテナンス用に使われる保守用ネットワークの2つがある。

監視制御用ネットワークには、リアルタイム性、高信頼性、対故障性が要求される。そのため当社では、通信の物理媒体としては光ファイバを用い、通信プロトコルとしては定期的にデータ伝送を行うサイクリック通信方式を基本方式としている。また、故障時に短時間でのシステム復旧を実現するため、IEEE802.17 RPR(Resilient Packet Ring)などの技術を適用している⁽³⁾。保守用ネットワークとしては、リアルタイム性が要求されないため、一般産業用途で広く使われているTCP/IP(Transmission Control Protocol/Internet Protocol)プロトコルなどを採用している。

2.3.5 エンジニアリング環境

制御装置に搭載する制御ロジックは、POL(Problem Oriented Language)と呼ぶ図的な形式の言語を使用し、個別の制御機能を持つ要素を図的に結合することで記述している。制御ロジック図の作成、プログラムやデータへの変換は専用ツールで行い、これを制御・安全保護装置へローディングして使用する。また、産業用計算機のソフトウェアは、構造としてOS層の上にミドルウェアと呼ぶアプリケーションソフトウェアの共通的な機能を集めた層があり、その上でアプリケーションソフトウェアが動作する形となっている。アプリケーションソフトウェアは基本的にはプラントごとには改変をなるべく行わず、プラントごとの差異はデータ部分で吸収するような構成となっている。アプリケーションソフトウェアの一部は、制御装置用のPOLと同様に図的な形式でその処理を記述している。

これら計装制御システム用のプログラムやデータを構築するツール群を総称してエンジニアリング環境と呼んでいる。データの構築を効率的に行うため、エンジニアリング環境のツール群はWindows^(注2)を搭載したパソコン及び産業用計算機上で動作するようにしている。エンジニアリング環境内のツールは、ソフトウェア開発のV字モデルに適合するように、仕様の策定、詳細化、製作、単体試験、組合せ試験等のフェーズを連携してカバーする。

当社の最新型の監視制御システムでは、制御装置向けのPOLと産業用計算機向けのPOLのエンジニアリング環境を統合し、統合データベースによってシステム全体の情報を一元管理し、ツール間の相互連携を図っている。また、監視制御システム自体の構成も図的に定義してシステム管理を行うツールを提供している。さらに、プラント運転時にシステム運用を支援するためのツールとして、制御装置の制御ロジックの動作状態を表示するロジックモニタ、監視制御システム自体の動作を表示するシステムモニタ等の機能を実装している。

(注2) Windowsは、Microsoft Corp.の登録商標である。

2.3.6 ヒューマンマシンインタフェース

発電プラントの制御室に設置される計装制御システムのヒューマンマシンインタフェースとしては、個人用に複数のディスプレイ、運転チーム全体での情報共有用に大型表示装置を設置し、入力デバイスとしてはタッチパネル、マウス等を用いたシステムが標準的な構成となっている。

大規模プラントでは、監視操作のための対象が非常に多く、直接オペレータが把握することは難しい。そのため、計装制御システムの大きな役割の一つが、プラントの情報を集約しオペレータに提供すること、またオペレータ指示をプラントに伝えることである。

当社では、様々な観点から計装制御システム向けのヒューマンマシンインタフェースの研究開発に取り組んでいる。一例として、これまでの計装制御システムでは、制御室でプラントの運転操作を直接担当する運転員への支援が中心であったが、制御室で運転員を統括・管理する監督者の支援が必要であると考え、監督者支援のため、運転員の操作履歴を状況に対応した詳細度で提示するインタフェースを提案している⁽⁴⁾。また、コンピュータやスマートフォン等のICT機器の普及によって、ユーザーのコンピュータリテラシが向上しており、モバイル機器の発電プラントでの利用、ユニバーサルデザインのヒューマンマシンインタフェース設計への反映等を進めている。

なお、2.3.2項から2.3.6項までで述べた技術の当社の最新状況はこの特集号の“発電プラント向け新計装制御システムのコンセプト”(p.11)、“発電プラント向け新計装制御システムの要素技術”(p.15)で詳しく述べている。

2.3.7 サイバーセキュリティ

発電プラント向けの計装制御システムは、一般的に外部のネットワークからは遮断されている。それでも、プラントの安全をつかさどる安全保護システムを始めとした計装制御システムを構成する装置は、考えられる侵入手段から確実に保護されなければならない。サイバーセキュリティの観点からは、これらの装置に対する正当なアクセスを保証することと権限のない不正なアクセスを阻止することが必要となる。

サイバー攻撃における脅威としては、次の4つのカテゴリーを考慮するべきであるとされている。

- (1) 情報への権限のないアクセス
- (2) 情報、ソフトウェア、ハードウェアの遮断や改変
- (3) データの伝送回路の遮断・システムの中断
- (4) データ通信システムや計算機への権限のない侵入

サイバーセキュリティにおける課題は、計装制御システムが複雑になることによって、重要な脅威を取り込んでしまう可能性が排除できなくなることである。

当社では、脅威を識別して障壁を構築するツールとして、侵入検知やウイルススキャン、暗号化などのツールや、セキュリティ上安全が保証される領域の設定、アプリケーションやセキュリティ管理システム、セキュア・ゲートウェイとしてデータダイオード方式を適用したシステムを構築することで、発電プラント向けのサイバーセキュリティの確立に努めている。サイバーセキュリティへの当社の最新の取組み状況は、この特集号の“原子力プラントの安全対策に向けた技術”(p.19)、“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”(p.23)で述べている。

2.4 グローバル化に向けた当社の取組み

計装制御システム事業を海外展開するためには、当該国で定めている関連規格への対応が必要となる。当社では、2007年から原子力発電プラント向けの安全保護装置及び中央制御室のヒューマンマシンインタフェース設計を対象として、米国での設計認証取得活動を進めている。認証取得でキーとなる規格基準としては、産業用計算機のヒューマンマシンインタフェース設計が関連する制御室設計と、制御・安全保護装置に関するものがある。

制御室設計では、米国の規格であり国際的にデファクトスタンダードとなっている米国原子力規制委員会が定めるNUREG-0700⁽⁵⁾、NUREG-0711⁽⁶⁾がある。NUREG-0700は中央制御室におけるヒューマンマシンインタフェース仕様の審査指針を定めたものであり、NUREG-0711は中央制御室に設置される計装制御システム全体の設計、開発、評価、実装の全ライフサイクルにわたる開発プロセスの要求事項を定めている。

計装・安全保護装置関連では、原子力発電所の計装制御システム全体の標準審査指針を定めたNUREG-0800⁽⁷⁾の7章がある。そこでは、原子炉停止システム、工学的安全システム等、安全上重要な個別システムが満たすべき要件を定めるとともに計装制御システムの製品ライフサイクル全般にわたる要求も規定している。

具体的な認証取得活動としては、審査で要求される種々の申請資料を整備し提出、規制当局の承認を受ける。特に

ヒューマンマシンインタフェース設計では、米国内に検証設備を構築し、米国電力の運転クルー協力のもと、プラントシミュレータと組み合わせ動的な検証評価を行い、評価結果を申請資料として提出している⁽⁸⁾。

米国向け計装制御システムの最新の状況は、この特集号の“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”(p.23)で述べている。また、計装制御システムの中国向け仕様策定、規制・規格準拠活動は“中国CPR1000型原子力発電所向け計装制御設備の実現”(p.27)で述べている。

3. む す び

発電プラントを支える計装制御システム技術の動向を概観し、当社における取組みの概要について述べた。具体的な取組みの詳細については、この特集号の各論文を参照いただきたい。

発電プラント向け計装制御システムには堅牢で、効率的かつ人に優しいシステムを実現することが求められる。今後もシステム技術とヒューマンファクタの観点から、より優れた計装制御システムを構築するための研究開発を進める。

参 考 文 献

- (1) (独)情報処理推進機構(IPA)セキュリティセンター：2010年度 制御システムの情報セキュリティ動向に関する調査報告書、IPA報告書(2011)
- (2) 井登純一、ほか：産業用計算機のマルチコアCPU適用、三菱電機技報、**84**，No.10，562～565(2010)
- (3) 増濱和生：発電プラントにおける監視制御用ネットワーク、三菱電機技報、**81**，No.10，708～711(2007)
- (4) Kagimoto, M., et al.: Development of a shift supervisor support system for power plants, Proceedings of first international symposium on socially and technically symbiotic systems, 36_1～36_6(2012)
- (5) US-NRC: Human-system interface design review guidelines, NUREG-0700 Rev. 2(2002)
- (6) US-NRC: Human factors engineering program review model, NUREG-0711 (Rev. 2)(2004)
- (7) US-NRC: Standard review plan for the review of safety analysis report for nuclear power plants: LWR edition, NUREG-0800, Chapter 7, Rev.5(2007)
- (8) 北村雅司、ほか：米国向け中央計装運転検証設備及び型式認証活動、三菱電機技報、**84**，No.10，542～545(2010)

火力発電プラント向け計装制御システム “MELSEP5”

西嶋宏樹*
三木政幸*
佐内孝太郎*

Instrumentation and Control System “MELSEP5” for Thermal Power Plants

Hiroki Nishijima, Masayuki Miki, Kotaro Sanai

要 旨

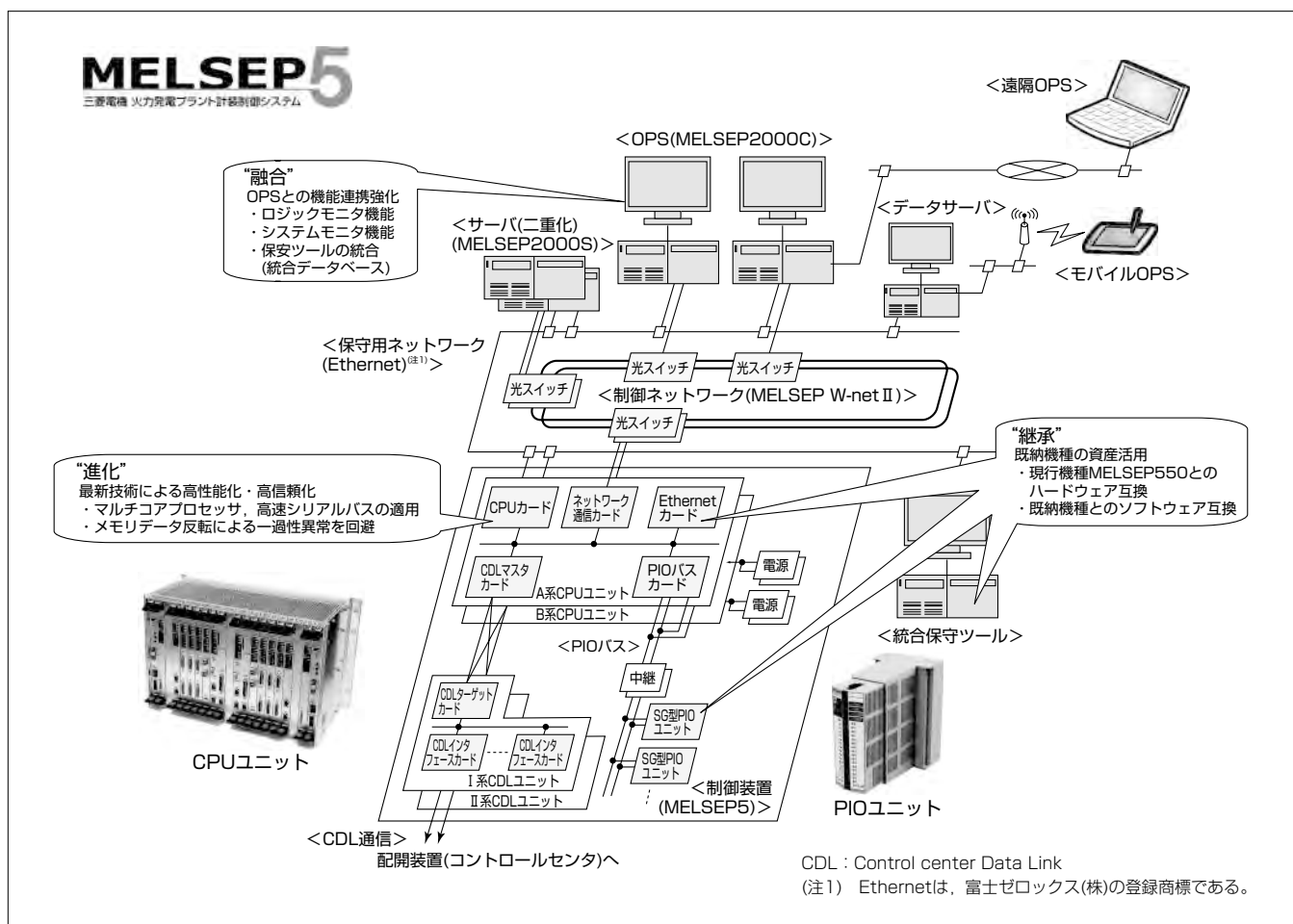
火力発電プラント向け計装制御システム“MELSEPシリーズ”は1980年代から開発・生産を開始し、これまで国内全電力会社へ600システム以上を納入してきた。現行機種“MELSEP550”は2000年の市場投入から10年以上が経過して新機種投入時期を迎えており、機能面・コスト面で更に製品競争力を高めた新機種“MELSEP5”を開発した。

開発にあたっては、ユーザーへのニーズヒアリング、他社製品とのベンチマーク、現行機種からの改善検討などを行い、次の3つのキーワードを開発コンセプトに掲げた。

- (1) 進化：最新技術による高性能化・高信頼化
- (2) 融合：OPS(OPerator Station)との機能連携強化
- (3) 継承：既納機種の資産活用

最新技術としてマルチコアプロセッサや高速シリアルバスを適用し、機能連携としてOPS上でのロジックモニタ・システムモニタ等を実現した。さらに、既納機種の資産活用として、MELSEP550とのハードウェア互換を実現し、カード単位・PIO(Process Input Output)ユニット単位での部分更新を可能とした。また、既納機種で製作したプラント制御ソフトウェアをMELSEP5対応に自動変換し、長年のプラント運転で確立された既設ソフトウェアの品質維持も併せて可能とした。

本稿では、MELSEP5の開発コンセプト、製品の特長、実工事への適用例等、これまでの取組みについて述べる。



“MELSEP5”の開発コンセプト

火力発電プラント向け計装制御システム“MELSEPシリーズ”の最新機種としてMELSEP5を開発した。開発にあたっては、“進化”“融合”“継承”という3つのコンセプトを掲げて取り組んだ。

1. ま え が き

火力発電プラント向け計装制御システム“MELSEPシリーズ”は1980年代から開発・生産を開始し、これまで国内全電力会社へ600システム以上を納入してきた。

現行機種MELSEP550は2000年の市場投入から10年以上が経過し新機種投入時期を迎えており、2010年から開発コンセプトの検討を開始し、2014年3月の初品出荷に向けて新機種MELSEP5の開発を行ってきた。

図1に、MELSEPシリーズ各機種の主仕様と変遷を示す。

2. 開発コンセプト

MELSEP5の開発にあたって、ユーザーへのニーズヒアリング、他社製品とのベンチマーク、現行機種からの改善検討等を行い、その結果“進化”“融合”“継承”という3つの開発コンセプトを掲げた。

2.1 進化：最新技術による高性能化・高信頼化

(1) 高性能化

現在、国内での新設火力発電プラントはガスタービンコンバインドサイクル方式が多く、MELSEP550では1軸あたり3装置（タービン制御装置、HRSG（排熱回収ボイラ）制御装置、補機制御装置）を設けているが、MELSEP5では1装置だけでプラント制御を行えるよう高性能化を目指し、次の最新技術を適用した。

①CPUカードに高性能マルチコアプロセッサを適用

②CPUシステムバスに高信頼の高速シリアルバスを適用

(2) 高信頼化

近年、半導体の微細化・低電圧化によって、宇宙線メモリ上のデータが反転するというSEU（Single Event Upset）現象が顕在化してくる可能性がある。MELSEP5では従来機種からの更なる高信頼化を実現するため、メモリデータ反転による一過性異常の回避に取り組み、メモリ全般に対して徹底的なSEU対策を施した。

①主メモリにECC（Error Check and Correct：エラー検出・修正）機能付きメモリを採用。

②ECC機能が付いていないキャッシュメモリには、三菱電機独自のデータ反転検出機能とデータリカバリー機能を搭載。

2.2 融合：OPSとの機能連携強化

これまでの機種では、制御装置とOPSはそれぞれで機能完結し、必要なデータだけを制御ネットワークで送受信していたが、制御装置とOPSを統合化したDCS（Distributed Control System：分散制御システム）構成を実現するため、MELSEP5では制御装置とOPSの機能連携強化を目指し、新たに次の機能を設けた。

(1) ロジックモニタ機能

OPS上で制御装置内プラント制御ソフトウェアの動作状況を表示。

(2) システムモニタ機能

OPS上で計装制御システム全体、及び各装置の状態や故障発生部位を表示。

(3) 保守ツールの統合

制御装置用・OPS用保守ツールを統合し、制御装置～OPS間の信号データを統合データベースとして一括管理。

2.3 継承：既納機種の資産活用

これまでMELSEPシリーズは国内全電力会社へ600システム以上納入しており、今後の既設装置更新工事では既納機種のハードウェア資産・ソフトウェア資産を活用して、既設装置で確立した品質の継承、部分更新の実現、工事期間の短縮を目指した。これを実現するため、新たに次の機能を開発した。

(1) 現行機種MELSEP550とのハードウェア互換

CPUカード・通信カードはカード単位でMELSEP5のカードへ取り替え可能とした。PIOは既設端子台に接続された外部ケーブルを解線せずに、PIOユニットだけをMELSEP5シリーズへ取り替え可能とした。これらによって、プラント停止期間に応じた部分更新・一括更新等、最適な更新方法を実現可能とした。

(2) 既納機種とのソフトウェア互換

既納機種で製作したプラント制御ソフトウェアを、保守ツールで自動変換してMELSEP5で使用可能とした。ロジック演算要素、パラメータ、コンパイル時のデータ構造まで一致させ、長年のプラント運転で確立された既設ソフトウェアの品質を確保しながら、装置更新を可能とした。

3. 製品の特長

3.1 制御装置の特長

先に述べた開発コンセプトの実現とともに次の取り組みを行い、製品競争力を向上させた。

(1) CPUカードへの機能取り込みと拡張性向上

MELSEP550ではCPUカードと別にCPU拡張カード、Ethernet通信カードが必要であったが、MELSEP5ではこ

機種名	主仕様	1980年代	1990年代	2000年代	2010年以降
MELSEP 500/700	・CPU Intel 80386(16MHz) ・主メモリ 1MB		生産中止 1995年 生産期間	保守期限 2010年 保守期間	
MELSEP 500PLUS	・CPU Intel 80486(25MHz) ・主メモリ 3MB		生産中止 2006年 生産期間	保守期限 2016年 保守期間	
MELSEP 550	・CPU Intel Pentium®(133MHz) Intel Pentium III(400MHz) ・主メモリ 64MB		初品出荷 2000年 生産期間		
MELSEP 5	・CPU Freescale® P2020(1GHz) (デュアルコア) ・主メモリ 1GB			開発着手 2010年 初品出荷 2014年3月 生産期間	

(注2) Pentiumは、Intel Corp.の登録商標である。

(注3) Freescaleは、Freescale Semiconductor, Inc.の登録商標である。

図1. MELSEPシリーズの変遷

これらの機能をFPGA(Field Programmable Gate Array)化、ファームウェア化してCPUカードに取り込み、カード枚数を削減した。また、CPUユニットへのカード収納枚数を増やして拡張性を向上させた(MELSEP550：最大21枚→MELSEP5：最大34枚)。

(2) 電源カードの削減

MELSEP550ではA系・B系それぞれのCPUユニットに電源カード(出力150W)を実装していたが、MELSEP5ではCPUユニット外部に大容量電源カード(出力400W)を設置してA系・B系双方のCPUユニットへ供給し、電源カード枚数を削減した。電源カードは電解コンデンサの経年劣化のため定期交換が必要だが、その枚数を削減することによって定期交換費用の低減に寄与する。

(3) 盤面数削減

MELSEP550ではPIOユニットを2列×6段配置していたが、MELSEP5ではPIOユニットをコンパクト化して3列×8段まで配置可能とし、PIO盤1面あたりの収納台数を増やした(MELSEP550：24台/面→MELSEP5：48台/面)。また、CPU盤に収納する各種ユニットの奥行き寸法を縮小し、CPU盤裏面にもI/Oモジュールを収納可能とした。

これらによって盤面数の削減を実現し、図2に示すように、PIOユニット48台(すべてデジタル入力なら約1,600点)の場合、MELSEP550では3面必要であったが、MELSEP5では2面(実質1.5面)に削減した。

(4) リベット筐体(きょうたい)の適用

MELSEP550までの機種では溶接筐体を採用しており、1面あたり約110か所の溶接が必要であった。MELSEP5では溶接技能に依存せずに筐体を製作できるようにリベッ

ト筐体を採用した。これによって筐体製作品質の均一化を実現した。このリベット筐体採用では、火力発電所向け機器に求められる耐震規格“JEAC 3605”に基づき振動試験を行い、入力振動0.75G^(注4)でも動作異常・破損が起こらないことを確認した。

(注4) 重要度クラスI，設計レベル2，機器設置3階の場合に求められる機器据付け面での入力振動。

3.2 OPSの特長

OPSは現行機種を適用するが、追加機能として制御装置との機能連携強化に取り組んだ。

(1) ロジックモニタ機能

MELSEP550までの機種では、制御装置とOPSはそれぞれで機能完結しており、制御装置内プラント制御ソフトウェアの動作状況は保守ツールでしかモニタできなかった。そのため、OPS画面にプラント制御に関する警報が表示された場合、まず制御装置からOPSへの該当伝送信号を図面上で調べ、プラント運転員が保守ツールまで移動して該当の制御装置内ソフトウェアを確認していた。

今回、OPS画面に制御装置内プラント制御ソフトウェアを直接表示して動作状況を確認する“ロジックモニタ機能”を開発し、さらに、表示するだけではなく次の機能も追加して操作性・視認性の向上を実現した(図3)。

- ①OPSでの表示情報(警報一覧、データー一覧等)からワンクリックで関連する制御装置内プラント制御ソフトウェアの該当箇所を自動表示。
- ②OPSで制御装置内プラント制御ソフトウェアのパラメータを調整可能。過去2,000件の調整履歴を保存。
- ③OPSで制御装置内プラント制御ソフトウェアの各演算要素について出力固定・データ設定が可能。

(2) システムモニタ機能

MELSEP550までの機種では、OPSには各装置の集約状態(正常/重故障/軽故障のどれか)しか表示しておらず、各装置内部の具体的な故障部位については、制御装置盤内の故障表示グラフィックパネル又は保守ツールで確認していた。

今回、具体的な故障部位や故障要因の情報をOPS画面に表示する“システムモニタ機能”を開発した。これによって、プラント運転員が制御装置盤や保守ツールまで移動する

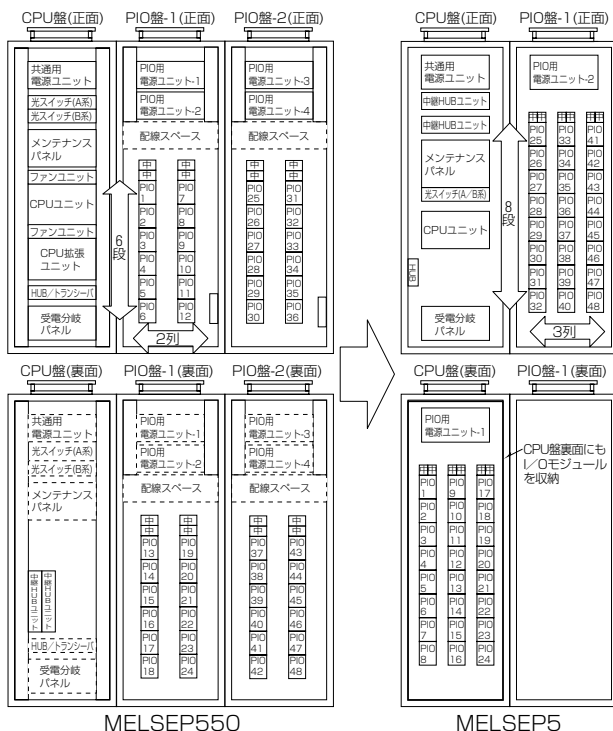


図2. 盤面数の削減



図3. ロジックモニタ画面

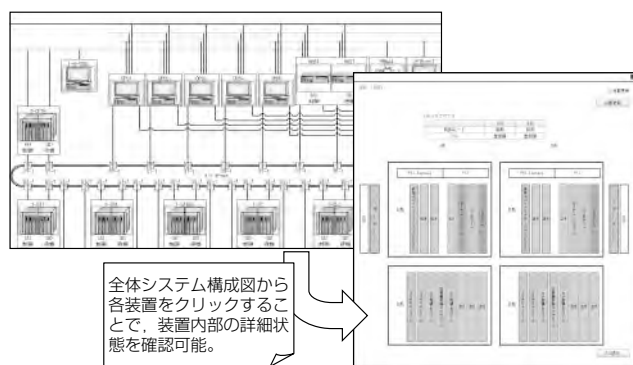


図 4. システムモニタ画面

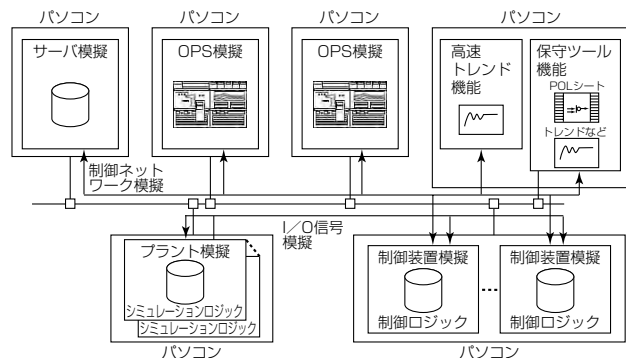


図 5. 複数パソコンを使用したデスクサイドシミュレーション構成

ことなく、OPS画面上で故障部位、故障要因を詳細に把握することができ、故障復旧時間を短縮することができる(図4)。

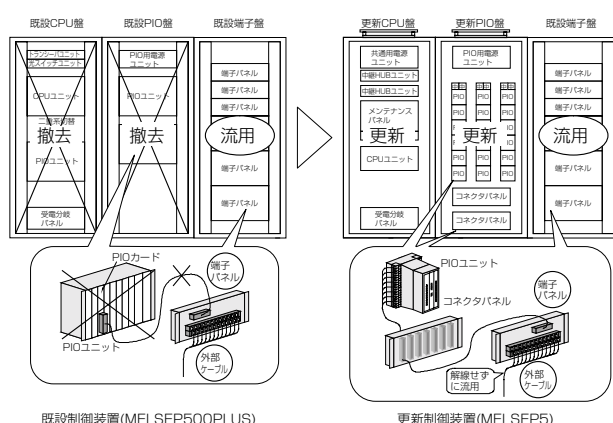
3.3 MELSEP5用保守ツールの特長

(1) 自動変換による既納機種ソフトウェアの活用

MELSEPシリーズではプラント制御ソフトウェアをPOL言語(Problem Oriented Language:問題向き言語)で製作しており、MELSEP5用保守ツールでは既納機種で製作した既設POLを自動変換する機能を開発した。この自動変換機能は、既設POLの各演算要素の処理・パラメータ・演算要素間の接続等をすべて互換性を保って変換し、コンパイル後のデータ構造も同一構造として、演算結果が一致するように設計した。これによって、長年のプラント運転で確立された既設POLのソフトウェア品質を確保しながら、MELSEP5への更新工事を可能とした。

(2) ソフトウェア試験環境・ツールの改善

これまではプラント制御ソフトウェアを製作した後、納入機器(制御装置・OPS)を用いて、試験設備であるプラント模擬シミュレータと接続し、ソフトウェアのシミュレーション試験を実施してきた。MELSEP5では、パソコン内に制御装置・OPSの模擬環境を構築し、納入機器がなくてもシミュレーション試験が行える“デスクサイドシミュレーション機能”を開発した(図5)。制御対象である火力発電プラントの挙動もパソコン内にシミュレーションロジックとして構築することができる。これによって、納入機器が製作途中の段階でも、パソコン上でシミュレーション試験を行うことができ、工場試験期間の短縮を可能とした。



既設制御装置(MELSEP500PLUS)

更新制御装置(MELSEP5)

図 6. 既設端子盤流用による装置更新

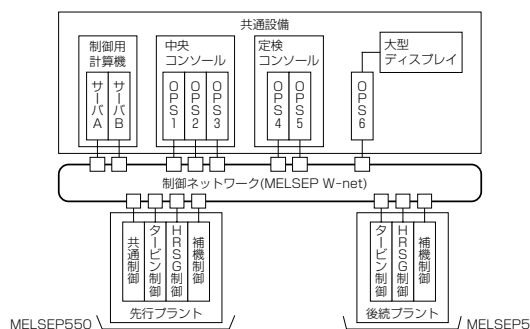


図 7. 先行プラントと後続プラントの同一ネットワーク接続

4. 工事適用例

4.1 既設プラント更新工事

MELSEP5の初号機適用工事は、二世代前のMELSEP500 PLUSからの更新工事である。現場発信器・アクチュエータ等からの外部ケーブルが接続されている端子盤はそのまま流用し、CPU盤とPIO盤をMELSEP5へ更新する。また、既設装置でのプラント制御ソフトウェアは自動変換して流用する(図6)。これらによって、既設装置で確立されたケーブル接続品質やソフトウェア品質を保ちながら、MELSEP5への更新を実現する。

4.2 新設プラント工事

新設プラントでのMELSEP5初適用は、1軸型ガスタービンコンバインドプラントを予定している。MELSEP5は同一ネットワーク上での既納機種混在を可能としているので、先行プラントで納入したMELSEP550と後続プラント向けMELSEP5を同一ネットワークで接続し、サーバ・OPSを共用することが可能である(図7)。

5. む す び

MELSEP5は2014年3月の初号機出荷に向けて製作中である。今後は、タブレット端末によるモバイルOPS機能や他社装置とのMODBUS^(注5)通信接続、保守ツールの機能向上等、ユーザーメリットにつながる機能拡充を行い、更に顧客満足を得られる製品とすることに努めていく。

(注5) MODBUSは、Schneider Automation Inc. の登録商標である。

発電プラント向け 新計装制御システムのコンセプト

川上益史*
野村明裕*
古賀靖信*

Concept of New Instrumentation and Control System for Power Plants

Masufumi Kawakami, Akihiro Nomura, Yasunobu Koga

要 旨

電力の安定供給は昨今の重要課題であり、電力安定供給に向けて発電プラントの安定稼働、加えて更新工事の工期短縮などが求められている。三菱電機はこれらの課題に対応し、電力の安定供給に貢献するための、機能・性能等を一新した発電プラント向け新計装制御システムの提供を開始した。新計装制御システムは、機能・性能面の向上に加え、従来のシステムとの継承性も考慮した製品としている。次を製品コンセプトに掲げて開発を行った。

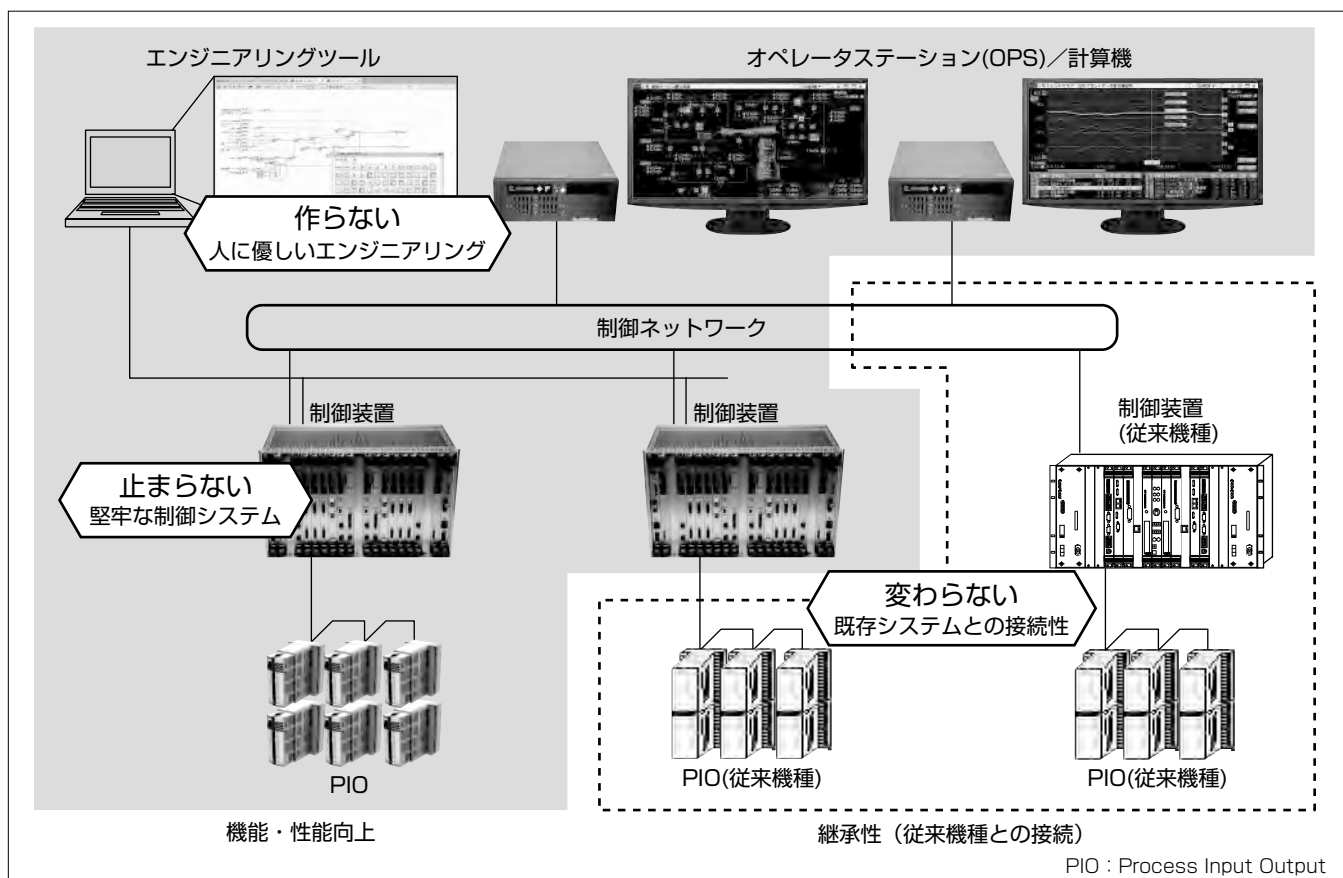
- (1) 止まらない：堅牢(けんろう)な制御システム
- (2) 作らない：人に優しいエンジニアリング
- (3) 変わらない：既存システムとの接続性

電力の安定供給に貢献するため、一過性の異常時にも自己修復を行うことで継続運転を可能とする“止まらない

堅牢な制御システム”を提供する。例えば、半導体の微細化に伴い今後顕在化する可能性のある宇宙線によるSEU (Single Event Upset) 発生への対策も徹底的に行った。

発電プラントの建設・更新で、品質確保と工期短縮を両立させるため、機能を高度化した“作らない 人に優しいエンジニアリング”を提供する。また、特に更新工事向けに、様々な組合せで既存システムとの接続を可能とする“変わらない 既存システムとの接続性”を実現した。

新計装制御システムは、共通プラットフォーム“MELHOPE-GRID”をベースに、火力発電、水力発電など、分野ごとに必要な機能をアドオンした上で、各分野に提供していく。



“MELHOPE-GRID”：発電プラント向け新計装制御システムのプラットフォーム

MELHOPE-GRIDは、発電プラントを制御する制御装置、監視・操作のためのOPS/計算機、制御装置や計算機で実行するアプリケーションプログラムを作成するエンジニアリングツールで構成している。MELHOPE-GRIDでは、制御装置、OPS/計算機、エンジニアリングツールの機能・性能を向上させるとともに、従来機種との継承性を確保することで、既設システムの部分更新、既設システムへの増設を容易に実現可能としている。

1. ま え が き

電力の安定供給は昨今の重要課題であり、電力安定供給に向け発電プラントの安定稼働、加えて更新工事の工期短縮などが求められている。当社はこれらの課題に対応し、電力の安定供給に貢献するため、機能・性能等を一新した発電プラント向け新計装制御システムを開発した。

新計装制御システムは、次を製品コンセプトとして開発した。

- (1) 止まらない：堅牢な制御システム
- (2) 作らない：人に優しいエンジニアリング
- (3) 変わらない：既存システムとの接続性

電力の安定供給に貢献するため、一過性の異常時にも自己修復を行うことで継続運転を可能とする“止まらない 堅牢な制御システム”を提供する。例えば、半導体の微細化に伴い今後顕在化する可能性のある宇宙線によるSEU発生への対策をすべてのメモリ素子に対して行った。発電プラントの建設・更新で、品質確保と工期短縮を両立させるため、機能を高度化した“作らない 人に優しいエンジニアリング”を提供する。また、特に発電プラントの更新工事向けに、様々な組合せで既存システムとの接続を可能とする“変わらない 既存システムとの接続性”を実現した。

本稿では、新計装制御システムの特長について述べた上で、これらのコンセプトについて詳しく述べる。

2. 新計装制御システムのコンセプト

2.1 機能・性能の向上

2.1.1 制御装置とネットワーク

発電プラントの制御性能に大きく関わる制御装置(図1)とネットワークでは、高性能化・高信頼化を中心に強化を図っている。主な特長を次に示す。

(1) マルチコアプロセッサによる高性能化

制御装置で、プラントの制御プログラムを実行するマイクロプロセッサに最新のマルチコアプロセッサを当社制御装置として初めて採用した。

マルチコアプロセッサの採用によって、制御プログラムの高速な実行が可能となり、今後、複雑・大規模化する発



図1. 制御装置

電プラントにも十分に対応可能な性能を確保した。

(2) 一過性異常への耐性強化、高信頼化

ノイズ、静電気、宇宙線等を原因とする一過性異常への耐性を強化した。制御装置内のすべてのメモリ、及び、システムバスに関して、リトライ・リカバリー機能を装備することによって、従来はシステム停止していた一過性の異常時にも正常に動作継続する制御装置を実現した。プラントの安定稼働、電力の安定供給に寄与するものと考えている。

(3) 制御ネットワークの大容量化

制御ネットワークにおけるサイクリック通信の通信容量を従来の2倍に拡張し、ネットワークの大容量化を実現した。これによって、今後、複雑・大規模化する発電プラントにも十分に対応可能とした。

(4) 省スペース化

制御装置内のカード構成の見直し、PIOモジュールのスリム化、周辺機器の小型化・形状見直し、電源系統の見直し等、種々の施策によって制御盤内の実装効率を向上させた。代表的なCPU盤の例では3面から2面への削減を実現した。

結果、必要とする制御盤の面数が大幅に削減され、システムとしての省スペース化を実現した。

これらの特長のうち、“止まらない 堅牢な制御システム”を実現するための制御装置の高信頼化について、次に詳しく述べる。

2.1.2 止まらない 堅牢な制御システム

電力の安定供給のためには、電力プラントで使用する計装制御システムに関しても停止することなく安定稼働することが必須条件である。電力プラントの安定稼働に向け、新計装制御システムでは、制御装置における一過性異常への耐性を徹底的に強化した。

制御装置のハードウェア構成を図2に示す。

制御装置は、CPUカード、インタフェースカード

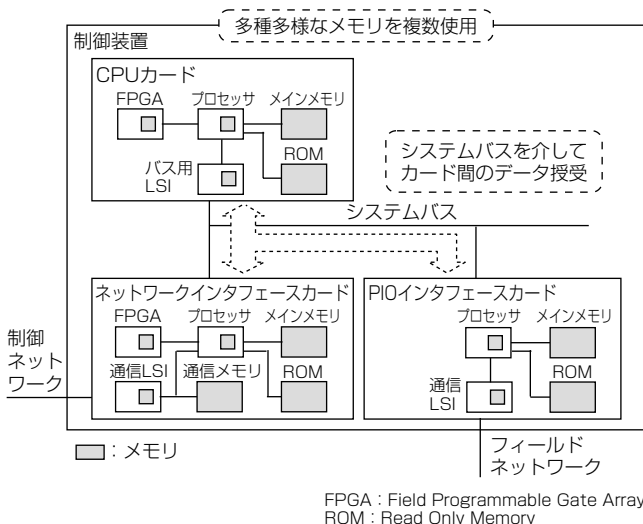


図2. 制御装置のハードウェア構成

(ネットワークインタフェースカード、PIOインタフェースカードなど)、及び、カード間のデータ授受のためのシステムバスで構成している。新計装制御システムでは、一般的に一過性異常が想定されるカード内のメモリ素子、及び、システムバスを対象に、一過性異常への耐性を強化した。

メモリ、システムバスそれぞれについての強化内容を次に述べる。

(1) メモリ

図2では、制御装置のハードウェア構成と併せて、制御装置内でのメモリの使用箇所を示している。例えば、制御装置の各カードにはプログラムとワークデータを格納するためのメインメモリが存在する。また、プロセッサ内にはプログラムを高速に実行するためのキャッシュメモリが存在し、ほかにハードウェア回路をプログラムできるFPGA内などにもメモリが存在する。このように、制御装置では多種多様なメモリが複数使用され、必要とされており、一過性異常に対する対策は、すべてのメモリに対して行う必要がある。また、近年の半導体の微細化によって、宇宙線によるメモリ上のデータが反転する現象(SEU)も今後顕在化する可能性があり、メモリに対する耐性強化は重要な課題である。

新計装制御システムでは、制御装置内の様々な部位にある多種多様なすべてのメモリを対象に、一過性異常に対するリカバリー機能を実装し、一過性異常への耐性を向上させた。

使用しているメモリ素子の種類、用途に応じて最適な方法でデータのリカバリーを実現している。一般的な技術であるECC(Error Checking and Correction)による自動修復、CRC(Cyclic Redundancy Check)値/サム値等によるデータ健全性のチェックとエラー検出時の再送などに加え、マイクロプロセッサ内のキャッシュメモリなどの特殊なメモリに関しては、当社独自技術によるデータの修復機能を実装した。メモリの種類・用途に応じて様々な手法を使い分けることによって、すべてのメモリに対してリカバリーを実現している。各メモリの高信頼化の方法を表1に示す。

(2) システムバス

制御装置内のカード間のデータ授受を行うためのシステ

表1. メモリの高信頼化方法

部位	リカバリー方法	ECC	パリティ+再送	CRC・サム値+再送	その他
メインメモリ		○			
プロセッサ	一次キャッシュ				(注1)
	二次キャッシュ	○			
FPGA内メモリ		○	○		
バス用LSI・通信LSI内メモリ		○		○	
その他(通信用メモリなど)		○	○	○	

(注1) ECCなどを付加できないメモリは、当社独自技術によってリカバリー

ムバスについて信頼性を大きく向上させた。システムバスをシリアル化し、ネットワーク技術を導入したことでパケット通信を可能とし、データリンク層でのデータの完全性を保証している(図3)。

具体的には、ノイズなどによる一過性の異常発生時でも、異常の検出、リトライを自動的に行うことで、データのリカバリーを実現した。異常のパターンとしては、データそのものが破壊されるデータエラー、パケットそのものが抜けるパケット抜けの2パターンが想定されるが、どちらの異常に対しても、異常の検出とリトライによるリカバリーを可能としている。システムバスの高信頼化方法を表2に示す。

2.1.3 OPS/計算機、エンジニアリングツール

OPS/計算機、エンジニアリングツールでは、更なる機能性、操作性、エンジニアリング性の向上を図っている。主な特長を次に示す。

(1) エンジニアリング環境の統合

制御装置POL(Problem Oriented Language)と計算機POLのエンジニアリング環境を統合し、統合データベースによってシステム全体の情報を一元管理することで、ツール間の相互連携を強化している。また、ブロック図に制御装置POL部品や計算機POL部品を混在して記述可能としており、装置間の取り合い情報などを統合データベースで共有しながら、ブロック図からPOL図を自動展開できるなど、エンジニアリング性の向上を図っている。

(2) マルチプラットフォーム化

エンジニアリングツールはOS(Operating System)に依存することなく種々のOSで動作可能なマルチプラットフォーム化を実現している。これによって、OPSの警報画面から関連するPOLロジック図を直接表示できるなど、OPSとエンジニアリングツール間の連携強化が可能となり、プラント監視機能の向上を図ることができる。

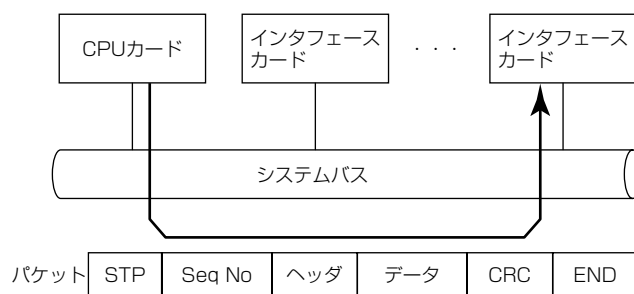


図3. パケット通信を使用したシステムバス

表2. システムバスの高信頼化方法

異常パターン	検出方法	リカバリー方法
データエラー	リンクCRC	受信側からの再送要求による送信側からの再送
パケット抜け	パケットのシーケンス番号監視	受信側からの再送要求による送信側からの再送

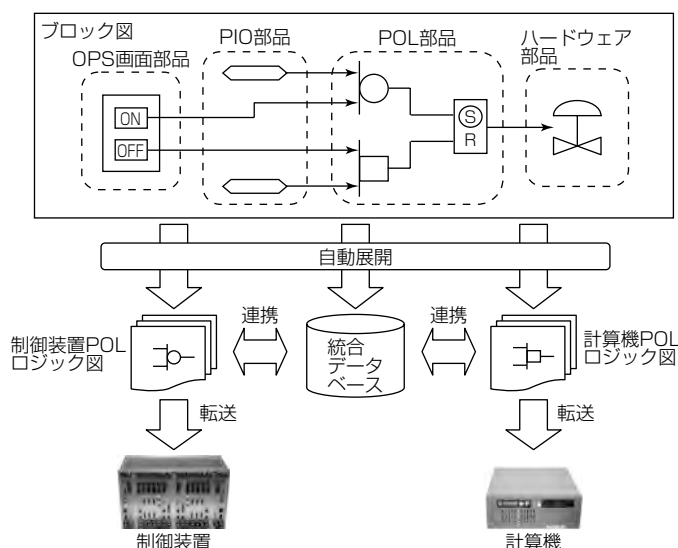


図 4. ブロック図からの自動展開

(3) ユニバーサルデザインの全面適用

OPS画面デザインにユニバーサルデザインを全面適用し、視線移動を最短にしたレイアウトや識別しやすいフォント・色使いの採用等によって、操作性・視認性の向上及びヒューマンエラーの防止を図っている。

(4) 充実したエンジニアリング支援機能

パソコン上で制御装置POLの検証を可能とするシミュレーション機能や、従来機種のPOLデータを変換して新計装制御システムのエンジニアリングツールで流用可能とするデータ変換機能など、様々な要求に柔軟に対応する各種のエンジニアリング支援機能をサポートしている。

これらの特長のうち、“作らない 人に優しいエンジニアリング”を実現するためのブロック図からの自動展開機能について、次に詳しく述べる。

2.1.4 作らない 人に優しいエンジニアリング

図 4 に示すように、ブロック図にOPSの画面部品、PIO部品、制御装置POL部品、計算機POL部品、ハードウェア部品を混在して記述可能としている。今後、各部品に割り付けられた信号のアドレス情報や名称などの定義情報を統合データベースに自動展開する機能、及び、統合データベース内の情報を共有しながら、ブロック図から各POLロジック図へ自動展開する機能のサポートを計画している。

2.2 従来機種からの継承性

2.2.1 変わらない 既存システムとの接続性

既存プラントシステムの更新工事では、プラント停止期間を極力短くすることが求められる。そのため、既設システムの設備を最大限に活用しながら、部分的なリプレイスや増設を段階的に行い、最終的にシステム全体を更新する。

システムを部分的に更新していく場合、既設のシステムと新設のシステムが混在するため、既設システムとの接続

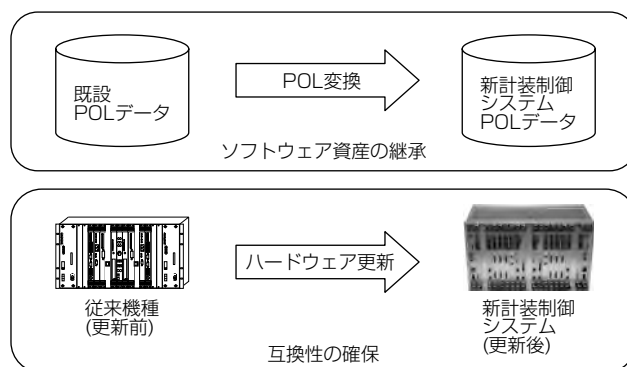


図 5. 既設ソフトウェア資産の継承

が必須となる。新計装制御システムでは、ハードウェア・ソフトウェア両面で従来機種からの継承性を確保することによって、多様な更新形態を可能としている。

(1) ハードウェアの継承性

既設システムにおけるシステム構成・ハードウェア構成に応じた更新工事に対応するため、次に示す様々な組合せで従来機種との接続をサポートしている。

① 既設PIOを残した更新

- ・従来型PIOとの接続
- ・従来型PIOと新型PIOの混在

② 既設ネットワークを残した更新

- ・従来型ネットワークとの接続
- ・従来型ネットワークと新型ネットワークの混在

③ カード単位の更新

- ・既設制御装置内で新旧カードの混在

(2) ソフトウェアの継承性

既設システムのソフトウェア資産をそのまま継承する。

新計装制御システムの制御装置では、POL命令体系や演算実行アルゴリズムなど、従来機種と互換性のあるアーキテクチャを踏襲している。そのため、既設システムの更新工事で、ユーザーは実績のある従来機種の既設POLデータを新計装制御システムのPOLデータへ変換するだけでそのまま流用することができ、従来機種で構築された高い品質を継承して、更新工事の工期短縮を図ることができる(図 5)。

3. む す び

発電プラント向け新計装制御システムのコンセプトについて述べた。一過性の異常への耐性強化・高信頼化、人に優しいOPS/計算機、エンジニアリングツール、既存システムとの継承性の確保等によって、発電プラントの安定稼働、更新工事の工期短縮等を実現し、電力の安定供給に貢献できるものと考えている。

当社は、今後も電力の安定供給に向け、計装制御システムの技術開発に取り組んでいく。

発電プラント向け新計装制御システムの要素技術

高橋浩一* 織田修司*
武村英夫*
諸岡史久*

Key Technologies Applicable to New Instrumentation and Control System for Power Plants

Koichi Takahashi, Hideo Takemura, Fumihisa Morooka, Shuji Orita

要 旨

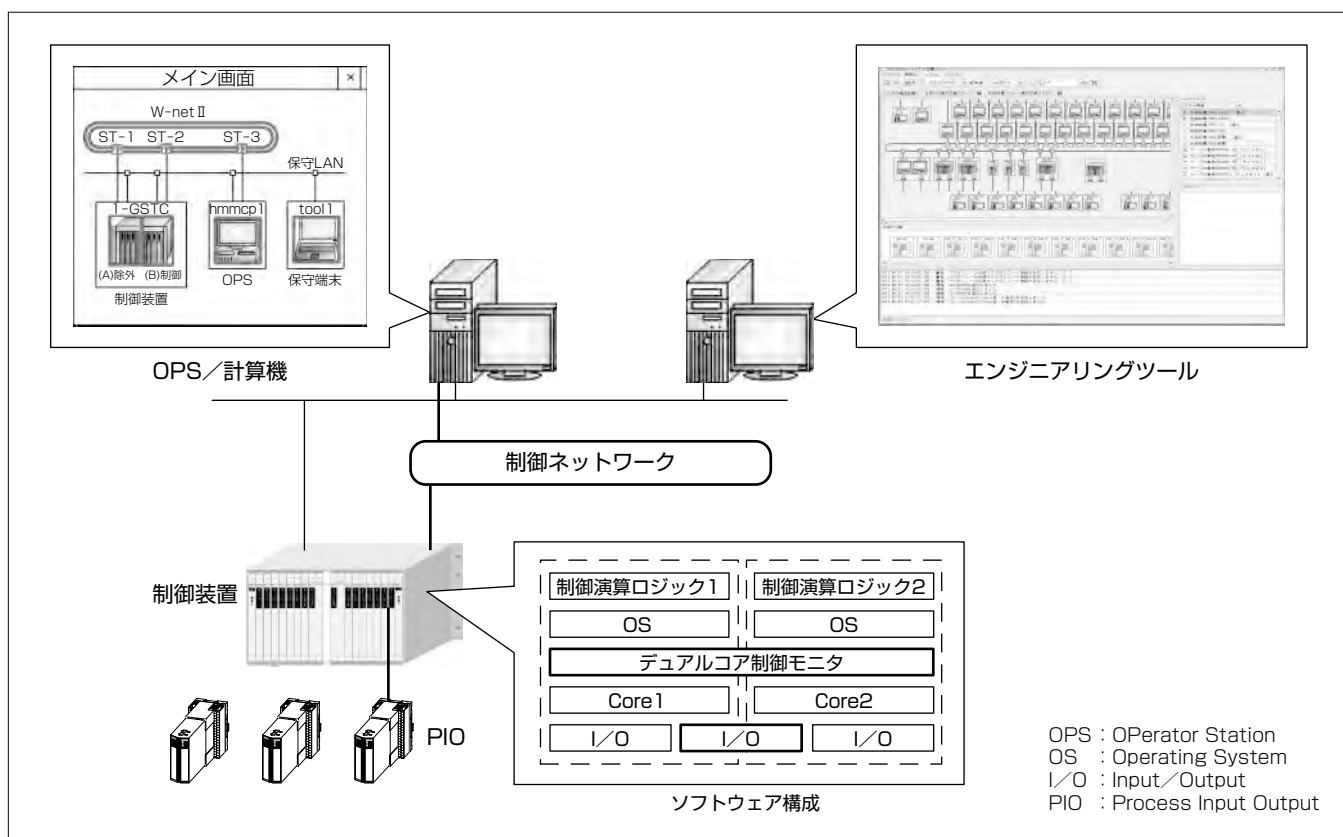
新計装制御システムの開発コンセプトの内、“止まらない 堅牢(けんろう)な制御システム”“作らない 人に優しい エンジニアリング環境”に対応して、従来よりも高信頼・高性能な制御装置の実現や、誰にでも分かりやすく操作ミスの少ない高度なエンジニアリング環境を提供するため、より高度なプロセッサの技術やユニバーサルデザインを適用している。

近年のプロセッサ(CPU: Central Processing Unit)の技術動向は、半導体プロセス技術の向上によって集積度が上がった反面、クロック周波数を上げることによる性能向上が難しくなったことと、消費電力、熱対策の問題があり、クロック周波数、消費電力を抑制できるマルチコア化の方向に進んでいる⁽¹⁾。社会インフラを支える発電プラントの

計装制御システムに適用される制御装置は、高性能かつ、高い信頼性を要求されるため、三菱電機では新計装制御システムの制御装置のプロセッサとして、低消費電力かつ熱対策が容易で高性能なデュアルコアプロセッサを採用している。

また、ヒューマンエラーを防止するため、ハードウェアの表示類にもユニバーサルデザインを適用し、視認性・識別性の向上を図っている。さらに、信頼性・故障解析性の機能として、メモリ化け対策によって一過性の故障に対して運転継続可能とし、故障情報格納領域、通信経路を多様化することによって、故障情報を確実に収集可能としている。

本稿では、発電プラント向け新計装制御システムの共通プラットフォーム“MELHOPE-GRID”の高信頼化、高性能化、故障解析性能の向上に関係する要素技術について述べる。



“MELHOPE-GRID”に適用される要素技術

新制御装置では、マルチコアプロセッサを有効活用するためのハイパーバイザ技術を使ったデュアルコア制御モニタ及び制御装置本体の表示類のユニバーサルデザインを適用している。エンジニアリングツール、OPSは画面のユニバーサルデザイン化とエンジニアリング作業、保守作業を支援する各種機能を提供している。

1. ま え が き

当社では、昨今の技術動向を踏まえて、制御装置の高性能・高信頼化を目的として、マルチコアプロセッサの採用など、最新の要素技術を適用した新計装制御システムの共通プラットフォーム“MELHOPE-GRID”を開発した。MELHOPE-GRIDのエンジニアリングツールやOPSでは、ユーザーの誤操作などを防止、保守性の向上を目的に“人に優しい”をコンセプトに誰にでも分かりやすく使いやすいユニバーサルデザインを採用している。

本稿では、MELHOPE-GRIDで適用している主要な要素技術及びその応用について述べる。

2. 制御装置で適用している主要技術

2.1 性能向上

2.1.1 デュアルコアの有効活用

近年、プロセッサ技術では、クロック周波数による性能向上が難しくなったことと、消費電力及び熱対策の問題があったことでマルチコア化が主流となっている。MELHOPE-GRIDの制御装置でも消費電力の抑制及び熱対策を考慮した高性能化のため、デュアルコアプロセッサを採用している。

デュアルコアプロセッサを有効に活用するため、1台の制御装置の中で仮想的に複数の制御装置が動作できるように、ハイパーバイザ技術を使ったデュアルコア制御モニタを開発した(図1)。デュアルコア制御モニタ上では、OS、アプリケーションがリソースを意識することなく、複数台分動作させることが可能で、次の特長がある。

- ・OSが使用するリソース(CPU、割り込み)の排他制御をリアルタイムに実施
- ・各OS間のメモリ破壊を防止
- ・OS間の同期や通信が可能

2.1.2 高速シリアルバス採用によるシステムバスの性能向上

システムバスは技術の進歩に伴い、パラレルバスから高速シリアルバスにトレンドシフトしている。これに合わせ、制御装置内のシステムバスについても、性能向上を目的として、従来のパラレルバスから、高速シリアルバスへの変

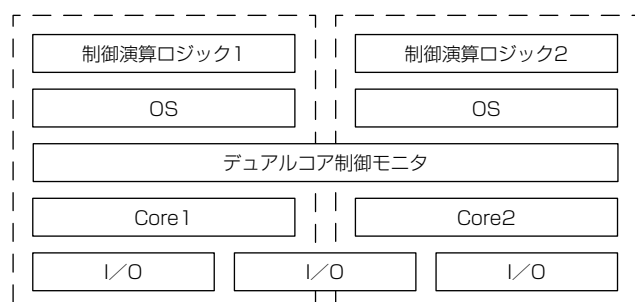


図1. ソフトウェア構成

更を行った。しかしながら、パラレルバスと高速シリアルバスには1回のアクセス要求に対する転送データ量によって優劣があり、これを考慮した設計が必要であった。32バイト、64バイト付近を境として、1回のアクセス要求に対する転送データ量が少ない場合はパラレルバス、多い場合は、高速シリアルバスが高速となる。制御装置では、主に大容量のデータ転送を行っているが、従来の制御装置ではデータ量が少ない転送も多く実施されていた。そのため、MELHOPE-GRIDでは、複数のデータをまとめて転送する設計に見直すことでパフォーマンスを向上させた。

2.2 故障解析性の向上

2.2.1 RAS情報収集と解析方法

制御装置は、制御装置内外の故障状態などの情報(以下“RAS(Reliability, Availability, Serviceability)情報”という。)を収集し、後述のシステムモニタで表示することで、故障解析などを行う。なお、制御装置はCPUカードとインタフェースカードに分かれており、CPUカードが各インタフェースカードから収集したRAS情報とCPUカード内で検出したRAS情報が制御装置で検出可能なRAS情報となる。RAS情報はCPUカード内のIOプロセッサ(通信用のプロセッサ)を経由し、システムモニタに通知される。この一連の動作に関し、次に述べる2点を行うことで故障解析性を向上させた。

2.2.2 システムバス異常時のインタフェースカード情報取得冗長化

制御装置のシステムバスはシリアルバスを採用しているが、メインシリアルバスが異常となった場合に、各インタフェースカードの状態を監視できなくなるという問題が発生する。その問題を解決するため、メインのシリアルバスとは別方式のシリアルバスを採用したサブシリアルバスを配置することで、異常時にインタフェースカードの状態を監視することを可能とした(図2①)。

2.2.3 RAS情報格納領域の二重化

RAS情報はCPUカード内のBackup SRAMに格納される。通常は、保守用Ethernet^(注1)経由でシステムモニタによってRAS情報の確認を行う。RAS処理を行うメインプロセッサがなんらかの異常で停止した場合には、通信を行うためのIOプロセッサ経由でアクセスを行うことによって、異常時にもRAS情報を確認可能とした。さらに、この経路に異常が発生した場合を考慮して、同一の情報をSD^(注2)カード内に格納することで、装置異常が発生した場合でもSDカードを抜き取り、オフラインで内容を確認することを可能とした(図2②)。

(注1) Ethernetは、富士ゼロックス(株)の登録商標である。

(注2) SDは、SD-3C, LLCの登録商標である。

2.3 ユニバーサルデザイン

MELHOPE-GRIDでは、ユニバーサルデザインを採用

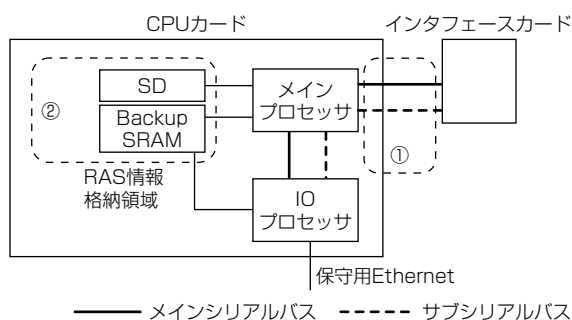


図 2. RAS情報格納場所

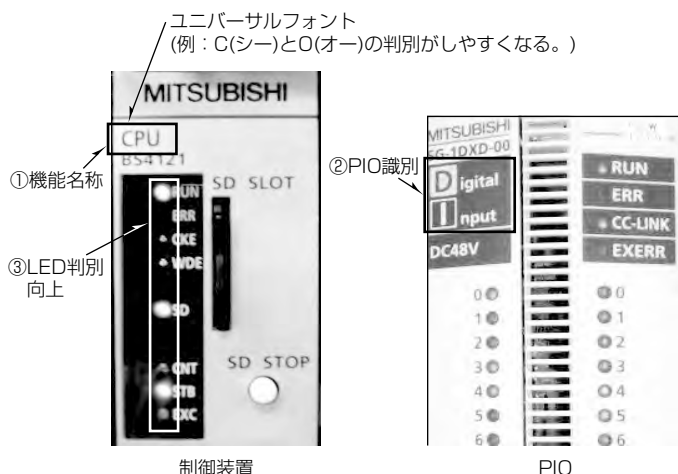


図 3. ユニバーサルデザイン

することによって、視認性を向上させた(図 3)。具体的には、次の改善を行った。

- ・カード機能を判別しやすくなるように各カード、モジュールの機能名称を記載した(図 3 ①)。
- ・PIOの識別を容易にするために、PIO種別の頭文字を大きな文字で表記した。さらに、種別によって色を変えることで種別を判別しやすくした(図 3 ②)。
- ・LED(Light Emitting Diode)の点灯位置を明確化し、LED点灯位置を判別しやすくした(図 3 ③)。
- ・ユニバーサルフォントを適用し、読み間違いを減少させた。

3. エンジニアリングツールとシステムモニタ

3.1 エンジニアリングツール

3.1.1 エンジニアリングツールの特長

エンジニアリングツールの主要ツールは次の 3 つである。

(1) システム定義ツール

制御装置、ネットワーク、計算機等の監視制御システムを構成する機器をグラフィカルに配置してシステム構成を作図し、システム設定を行う。また、このツールで作成したシステム構成をそのままシステムモニタの画面として表示することを可能とした。

(2) ロジックエディタ

制御装置と計算機の制御演算ロジックの作成(POL

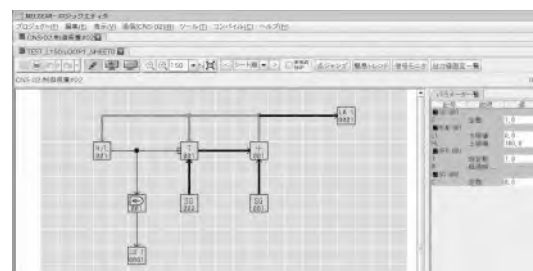


図 4. ロジックエディタ機能

(Problem Oriented Language)で記述)、ロジックデータのコンパイル、ロジックデータのダウンロード、制御装置内のロジックデータとの照合機能、制御装置内の演算状態をモニタリングする機能を持つ(図 4)。編集画面は、タブ形式で複数の制御装置、計算機、シートを同時に編集可能となっている。従来は、制御装置と計算機の制御演算ロジックの作成などは 2 つのツールで行っていたが、ツールを統合して効率的に作業を行えるようにした。

(3) ユーティリティ

エンジニアリングデータを統合的に管理する統合データベース、セキュリティ機能、客先提出用ドキュメント作成等を可能とした。また、マルチプラットフォーム(Windows^(注3)とLinux^(注4))に対応し、通常のパソコン端末だけでなく計算機アプリケーションの生産・管理・保守環境とも共存して使用できるようにした。

(注 3) Windowsは、Microsoft Corp. の登録商標である。

(注 4) Linuxは、Linus Torvalds氏の登録商標である。

3.1.2 デュアルコアへの対応

MELHOPE-GRID制御装置の制御演算ロジックをループごとにコアに割り付けて実行できるようにした。

エンジニアリングツールで、ループを各コアに割り付ける機能を持っており、次の機能を提供する。

(1) 手動割り付け：ループ定義機能で実行するコアを指定可能。

(2) 自動割り付け：実行するコアを自動的に割り付け可能。

入出力があるループを別のコアで動作した場合、各コアで非同期にループが実行されるので、入出力が不整合になる場合があり、自動割り付け機能では、コア間で入出力が発生しないように割り付けられる。

手動割り付け機能は、もともと複数の制御装置で処理していたループを 1 台に集約する場合に、各CPU単位で各々のコアにループを割り付けるケースを想定しているが、自動割り付け後に、設計変更などを手動で行うケースを想定して、コア間で不正な入出力が発生する可能性があるコアが指定される場合には、ユーザーに通知する。

3.2 システムモニタ

システムモニタとは、エンジニアリングツールとOPS上で、監視制御システムの構成機器の状態を監視する機能であり、次の特長を持っている。

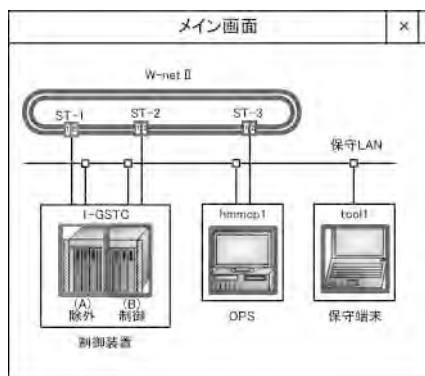


図 5. 第一階層の表示画面例(イメージ)

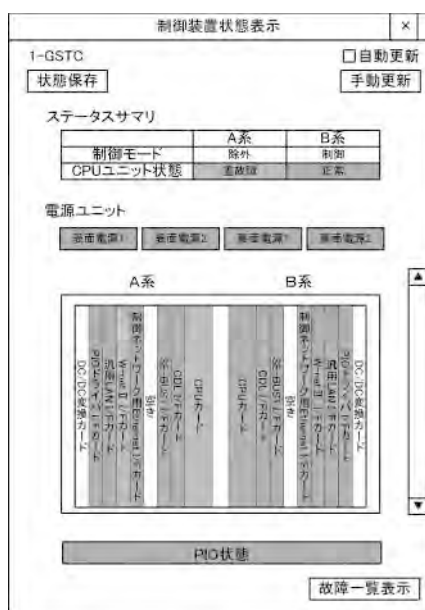


図 6. 第二階層の表示画面例(イメージ)

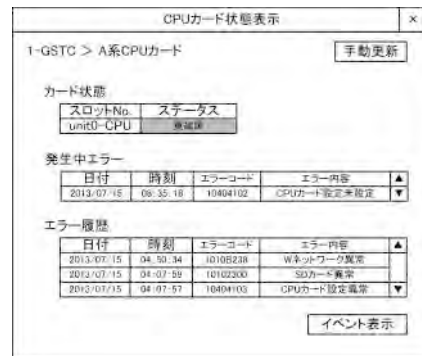


図 7. 第三階層の表示画面例(イメージ)



ボタン表現



ボタン表現



ランプ表現

(a) 現行版



ランプ表現

(b) ユニバーサルデザイン対応版

図 8. 表現の比較

ド類の故障状態を監視可能である。

図 7 は、第二階層の CPU カードをクリックした場合に表示される第三階層の表示画面例(イメージ)である。カード状態と選択したカードで発生中の故障及びこれまでに発生した故障履歴を表示可能としている。

従来、詳細な状態監視を行うために専用のグラフィックパネルを制御盤に設置して対応していたが、このシステムでは、エンジニアリングツールで詳細監視を実現している。

4. OPSのユニバーサルデザイン化

MELHOPE-GRIDでは、ユニバーサルデザインに対応したOPSの監視画面アプリケーションを構築するためのフレームワークを提供している。スイッチ、ボタン、ランプ等が誰でも自然に識別可能なように、グラデーション表現、影表示に対応した画面ビルダと、表示部品を提供している(図 8)。

5. む す び

発電プラント向け新計装制御システムでは、制御装置、エンジニアリングツール、OPSについて、基本機能の開発を完了しており、実プラントへの適用に向けて、システムの検証・評価中である。今後はI/Oのバリエーション追加、タブレット端末を応用した保守・監視端末といった拡充開発を実施し、システムの適用拡大を図る計画である。

参 考 文 献

- (1) 井登純一，ほか：産業用計算機のマルチコアCPU適用，三菱電機技報，84，No.10，562～565（2010）

- (1) システム構成イメージでの各機器の状態監視が可能である。
- (2) カードスロット位置、PIOの盤面配置等が実物と同じ配置で監視できるため、異常のある箇所が分かりやすい。
- (3) エンジニアリングツール“MELGEAR”のシステム定義ツールでは、同一画面イメージ設定可能で、システム構成、機器の構成変更になっても管理が容易である。

図 5 は、システムモニタの第一階層の表示画面例(イメージ)であり、ネットワーク構成、システム構成要素の状態を監視する画面である。故障が発生している構成要素をクリックすることで、より詳細な故障情報の参照を可能としており、故障情報のドリルダウンができる。

図 6 は、第一階層で表示されている構成要素をクリックしたときに表示される第二階層の表示画面(イメージ)で、制御装置をクリックした際に表示される例である。制御装置では、制御モード、CPUユニット状態、制御装置が格納されている制御盤の電源の故障状態、構成するIOカー

原子力プラントの安全対策に向けた技術

内山隆弘*
小泉義夫*
清水 遼*

Technologies of Safety and Security Measures for Nuclear Plants

Takahiro Uchiyama, Yoshio Koizumi, Ryo Shimizu

要 旨

平成23年3月11日に発生した東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故を契機に、原子力規制委員会(NRA)が設置された。

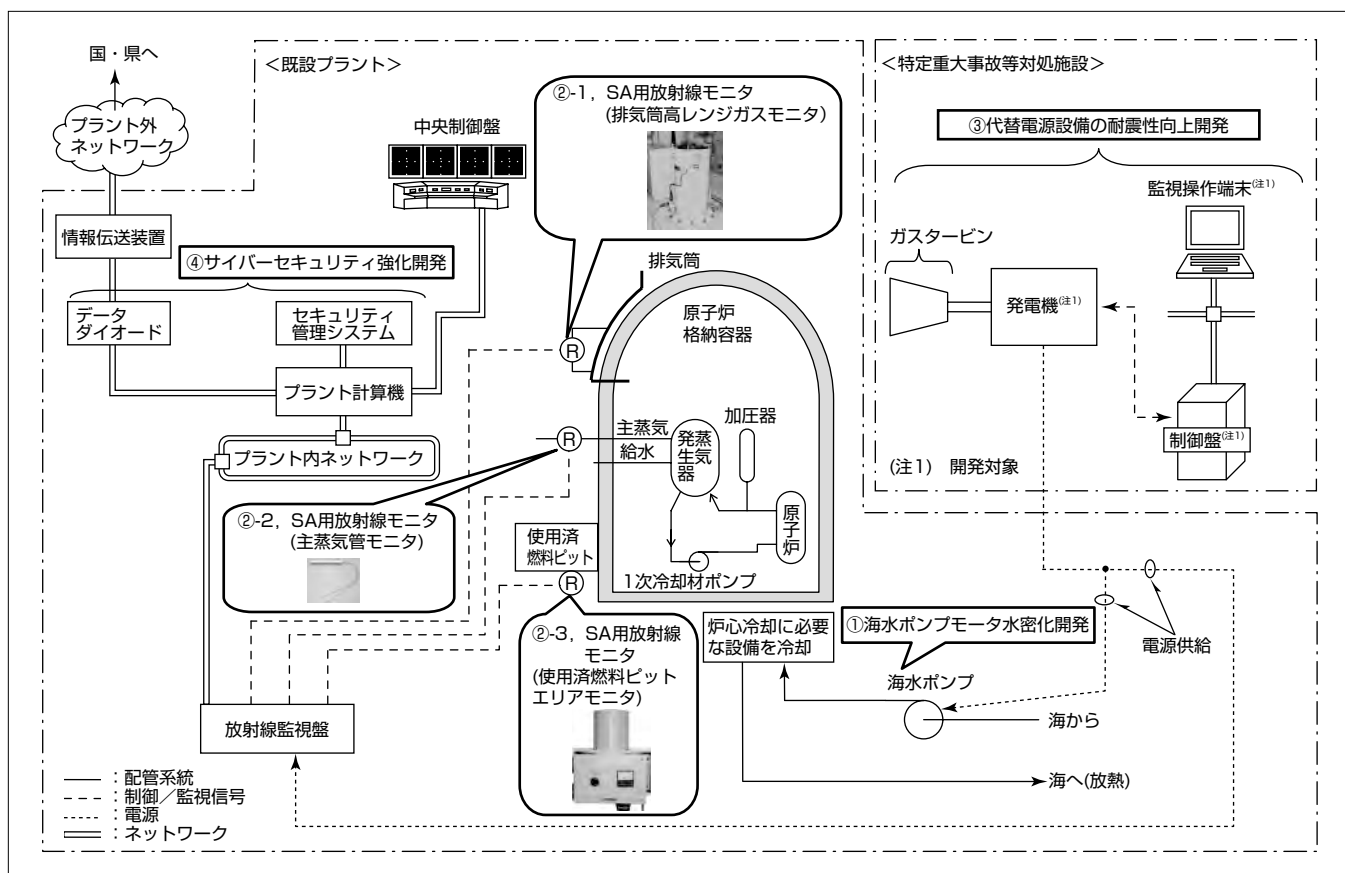
従来、原子力発電所のシビアアクシデント(SA)の発生を防止することを目的とした設計規準が制定されていたが、福島第一原子力発電所の事故を受けてNRAは、SA発生防止の強化に加え、更なる安全性向上のために従来は電力事業者の自主努力に委ねられていたSA発生時の対策やテロ対策を追加し、新規規準(以下“新基準”という。)⁽¹⁾⁽²⁾としてまとめた。

三菱電機は、新基準への適合に加え、更なる安全性向上

の実現に向け、電気計装分野で次の開発に取り組んでいる。

- (1) 津波による浸水時に海水ポンプを駆動可能とするための大型水密化モータ開発
- (2) 原子炉容器や格納容器損傷時に放出される高線量の放射線を計測可能な放射線モニタの開発
- (3) 発電所内電源確保の信頼性向上を目的とした代替電源設備の耐震性向上開発
- (4) サイバーテロ対策に向けたデジタル計装システムへのサイバーセキュリティ強化開発

当社はこれらの開発成果に基づき、原子力プラントの世界最高水準の安全性向上に寄与していく計画である。



原子力プラントの世界最高水準の安全性向上に寄与する技術

- (1) 耐震性を持った代替電源設備(図の③)／水中駆動を可能にした海水ポンプモータ(図の①)によって、原子力プラントの冷却機能を維持する。
- (2) 耐環境性を持った放射線モニタ(図の②)によって、SA発生時に放出される高線量の放射線を監視する。
- (3) プラント外ネットワークとの物理的分離、ウイルス対策を一括管理するセキュリティ管理システム(図の④)によって、サイバーテロ対策を行う。

1. ま え が き

平成23年3月11日に発生した東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故を契機に、NRAが設置された。福島第一原子力発電所の事故以前は、SA発生を防止するための設計基準が制定されていたが、更なる対策は電力事業者の自主努力に委ねられていた。しかし、福島第一原子力発電所の事故で、想定基準を超える津波によって安全機能が喪失し、その後のSA事象の進展を食い止めることができなかったことを受けて、NRAはSA発生防止の強化(表1の(1))に加え、SA発生時の対策やテロ対策(表1の(2))を追加し、新基準としてまとめた。

2. 安全対策に必要な技術開発

本稿では、電気計装分野での新基準への適合(表1の①～⑥)と、更なる安全性向上の実現に向けた次の技術開発について述べる。

(1) 海水ポンプモータの水密化(表1の③・⑥に対応)

福島第一原子力発電所の事故では津波による浸水のため海水ポンプが駆動せず、炉心冷却に必要な補機への冷却水供給が滞った。そのため、大規模な津波による浸水時も機能が維持できる大型水密化モータを開発している。

(2) SA用放射線モニタ(表1の③・④・⑤・⑥に対応)

現在の放射線モニタは冷却材喪失事象などによる事故時環境下での放射線量を計測できるが、新基準では原子炉容器や格納容器損傷時の過酷な環境における放射線計測を要求している。このため、高線量の放射線を計測可能なモニタを開発している。

(3) 代替電源設備の耐震性向上(表1の①・③に対応)

従来の発電所でも複数の非常用電源を設けているが、更なる電源の信頼性向上を目的とし、耐震性を向上させた代替電源設備を開発した。開発設備の特長は次のとおりである。

表1. 従来の規制基準と新基準との比較

	従来の規制基準 ^(注2)	新基準	本稿に関係する内容	従来の規制基準と新基準との比較
(1)	自然現象に対する考慮	自然現象に対する考慮(火山・竜巻・森林火災を新設)		強化・新設
	火災に対する考慮	火災に対する考慮		
	電源の信頼性	電源の信頼性	①	強化
	その他の設備の性能	その他の設備の性能 ^(注3)	②	
	—	内部溢水(いっすい)に対する考慮(新設)		新設
(2)	耐震・耐津波性媒	耐震・耐津波性能	③	強化
	—	意図的な航空機衝突への対応		新設(テロ対策)
	—	放射性物質の拡散抑制対策	④	
	—	格納容器破損防止対策	⑤	新設
	—	炉心損傷防止対策(複数の機器の故障を想定)	⑥	(SA発生時対策)

(注2) SA発生を防止するための基準

(注3) サイバーテロ対策を含む

(a) 低周波数領域の振動に対して共振しないように機器の固有振動数30Hz以上(剛構造)を持つ。

(b) Ss地震動^(注4)に対して2倍の耐震裕度を持つ。

(4) サイバーセキュリティ強化開発(表1の②に対応)

安全性向上を目的に、米国サイバーセキュリティ規制指針(Regulatory Guide 5.71: RG 5.71)⁽³⁾に適合したデジタル計装システムのサイバーセキュリティ強化開発を行っている。

次章に、これらの(1)～(4)の開発内容について詳述する。

(注4) 地質構造的見地から、原子力施設周辺で発生する可能性がある最大の地震の揺れの強さのこと。

3. 技術課題と開発内容

3.1 海水ポンプモータの水密化

海水ポンプモータは、原子炉の運転に必要な補機冷却水を冷却するための海水を供給するモータである。津波によって海水ポンプモータが浸水した場合、現在のモータは防水モータではないため機能を喪失し、原子炉補機で発生した熱を最終的なヒートシンクである海に放出不可能となる。

このため、大規模地震で発生した津波によってモータが浸水した場合でも、機能を維持することを目的として、次の水密化仕様の海水ポンプを開発している。

(1) 許容水深15m

(2) 許容水中稼働時間12hr^(注5)

また、海水ポンプモータは原子力プラントの安全系設備であり、浸水時も余震に対して機能維持を要求されるため、水中でも耐震性を持つ必要がある。したがって、通常は気中、浸水時は水中での耐震性を満足する必要がある。従来にはない新規性の高いモータとなる。主要な新規開発項目について次に示す。

(1) 水密化仕様の検討

①軸シールの適用

完全密閉の観点から、軸部のシールに潤滑油を満たして外部に潤滑油が漏れ出る機構(メカニカルシール)を選定し、モータ内部への浸水防止を図った(図1)。

潤滑油の漏れ量を最小限にして保守性を向上させるために、気中及び水中でも外圧に対して常に一定圧力が加わるように潤滑油の圧力を制御する機構を設けた。

この状態で、気中、水中でのメカニカルシール単体検証を実施し、潤滑油の漏れ量、摺動(しゅうどう)面の磨耗量、発熱量等について所定の性能を持っていることを確認した。

②外被形式の検討

外被形式を全閉型の防水構造とした。全閉型としたことによって、気中、水中の両方での冷却を可能とするために、自ポンプで汲(く)み上げた海水の一部を使用して冷却する方式とした。これに

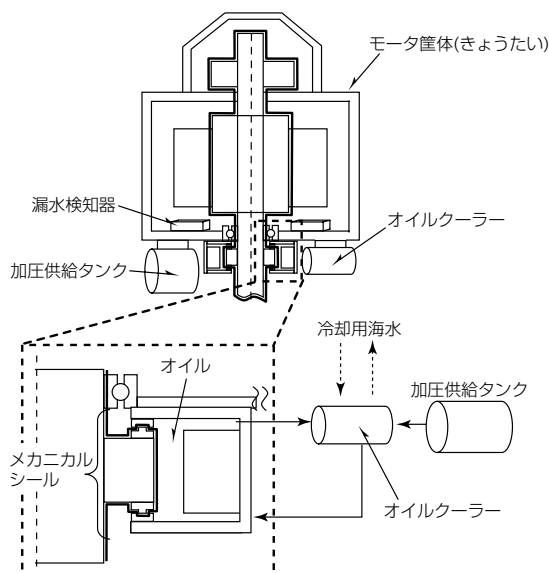


図 1. メカニカルシール

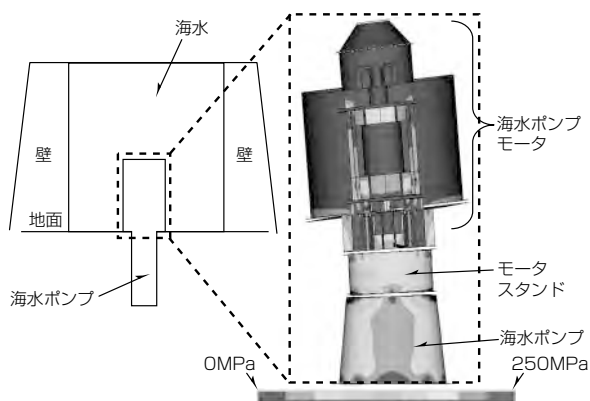


図 2. 耐震・強度解析結果の一例

よって、新たな冷却水は必要なく、従来の空冷式海水ポンプモータから更新する際の工事物量削減を可能とした。

(2) 水中での耐震評価

水中での耐震・強度解析では、地震波に加えて水質量効果、水没による静水圧、振動による動水圧を考慮する必要がある。この課題に対して、構造検討→耐震解析評価→強度解析評価のルーチンを回すことで、任意の水位で基準地震動に耐え得る最適なモータ構造を開発した。水中時のポンプモータ各部にかかる水圧について、解析結果の一例を図 2 に示す。

(注 5) 東日本大震災を受け、引き津波までの浸水時間を想定した。

3.2 SA用放射線モニタ

新基準では、原子炉容器や格納容器損傷時の過酷な環境で放出される高線量域の計測要求がある(表 2)。その要求を満足するため、使用済燃料ピットエリアモニタ、排気筒高レンジガスモニタ、主蒸気管モニタの 3 つのモニタ(要旨の図)を開発中である。

このうち、排気筒高レンジガスモニタの計測レンジ拡大について述べる。

新基準で要求される幅広いレンジの放射線量を測定可能

表 2. SA用放射線モニタの計測レンジ

モニタ名称	従来計測レンジ	新基準要求レンジ
使用済燃料ピットエリアモニタ	1.0～ $1.0 \times 10^6 \mu\text{Sv/h}$	1.0～ $1.0 \times 10^{11} \mu\text{Sv/h}$
排気筒高レンジガスモニタ	$1.9 \times 10^1 \sim$ $3.7 \times 10^6 \text{Bq/cm}^3$	$1.9 \times 10^1 \sim$ $3.7 \times 10^{11} \text{Bq/cm}^3$
主蒸気管モニタ	$5.0 \times 10^1 \sim$ $1.0 \times 10^7 \mu\text{Sv/h}$	$5.0 \times 10^1 \sim$ $1.0 \times 10^{11} \mu\text{Sv/h}$

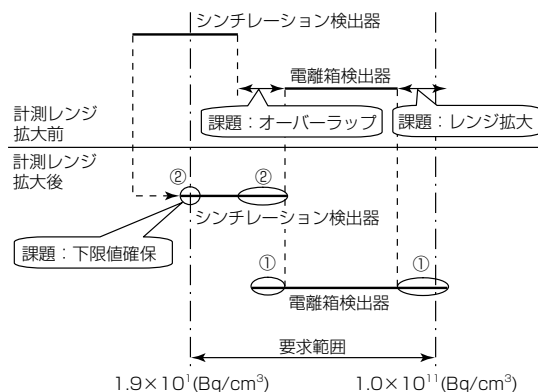


図 3. 排気筒高レンジガスモニタ計測レンジ

とするため、低線量域を計測するシンチレーション検出器と、高線量域を計測する電離箱検出器を組み合わせる方法を採用した。この方法の課題は、電離箱検出器の上下限計測レンジを拡大させること、及び両検出器のレンジがラップしないため、シンチレーション検出器と電離箱検出器の計測レンジ間をオーバーラップさせることが必要となる。よって、次の開発を実施した。

- (1) 電離箱検出器の計測レンジについて、電離箱検出器の検出感度が最も高くなるサンプリング容器の構造と検出器の配置を決定し、測定レンジの上限と下限の拡大を図った。サンプリング容器構造と検出器配置をモデル解析で評価した結果、電離箱検出器を中央に配置することで計測レンジを上限と下限側に 1 桁ずつ拡大することを確認した(図 3 の①)。
- (2) シンチレーション検出器の電離箱検出器と計測レンジをオーバーラップさせ、かつ要求下限値も測定可能とするためには、計測レンジを全体的に上限側へシフトさせる必要がある。レンジをシフトさせるために、検出器有感部に入射する放射線量を評価し、有感部面積を 1/10 に決定することで、レンジ 2 桁分を上限側へシフトすることを可能とした(図 3 の②)。

この(1)、(2)の開発を実施し、2 つの検出器を組み合わせることで、低線領域から高線領域までの幅広い放射線量の監視を実現した。

3.3 代替電源設備の耐震性向上

(1) 発電機の耐震性向上

負荷投入時の電圧降下を要求値内にするためには、固定子及び回転子内の鉄心を大きくする(短絡比を上げる)こと

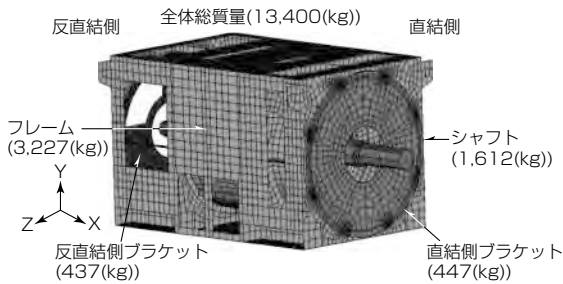


図 4. 発電機の3Dモデル

表 3. 評価結果

設備	耐震要求	結果
発電機	<ul style="list-style-type: none"> 固有振動数30Hz以上 水平：1.64G (Ss×2) 鉛直：1.08G (Ss×2) 	<ul style="list-style-type: none"> 固有振動数：30Hz以上 JEAC4601-2008の評価手法を準用し、静的解析を行い、耐震要求を満足することが確認できた。
ガスタービン制御盤	<ul style="list-style-type: none"> 固有振動数30Hz以上 水平：6.23G (Ss×2) 鉛直：1.88G (Ss×2) 	<ul style="list-style-type: none"> 固有振動数：30Hz以上 機器の機能維持加速度は、“水平：10G”“鉛直：2G”であり、耐震要求を満足している。
発電機制御盤	<ul style="list-style-type: none"> 固有振動数30Hz以上 水平：3.71G (Ss×2) 鉛直：1.58G (Ss×2) 	<ul style="list-style-type: none"> 固有振動数：30Hz以上 機器の機能維持加速度は、“水平：5.2G”“鉛直：2G”であり、耐震要求を満足している。
監視操作端末	<ul style="list-style-type: none"> 固有振動数30Hz以上 水平：8.26G (Ss×2) 鉛直：1.88G (Ss×2) 	<ul style="list-style-type: none"> 固有振動数：30Hz以上 盤内に収納するパネルコンピュータの加振試験を実施し、機能維持加速度は、“水平：10G”“鉛直：2G”であった。耐震要求を満足している。

が有効である一方、発電機の共振を防止し耐震性を向上させるためには、回転子を極力小さくすることが求められる。

この条件を同時に満たすために、電圧降下の要求値から求められる鉄心物量を算出し、回転子の固有振動数が、共振を防止する値(発電機の回転周波数より十分大きい値)となるように回転子の自重バランスと軸受スパンを考慮し、最適構造を決定した。これらの検討によって、性能要求と耐震要求を同時に満足する発電機を開発した。

なお、耐震評価は、原子力発電所耐震設計技術指針(JEAC 4601-2008)⁽⁴⁾に準じて、固有値解析(解析モデルを図4に示す)、及び対象部位の耐震評価を実施して耐震要求を満足することを確認した(結果を表3に示す)。

(2) 制御盤の耐震性向上

制御盤の耐震性を向上させるためには、補強部材の追加や鋼材板厚の増加等が有効であるが、過度な対策による保守作業性の悪化や、制御盤内の温度上昇を防止する必要がある。このため、従来の耐震盤の固有値解析を実施することで、補強すべき必要最低限の部位を明確にし、次の対策と評価を実施した。

(a) 補強対策

左右方向の揺れに対して、盤中央部にアクセス性を考慮した仕切り板を設置することで、耐震補強を実施した。また据付けを強固にするため、盤低部外側の溶接に加え、盤底部内側の溶接が可能な盤構造とした(図5)。

(例) 【ガスタービン制御盤】

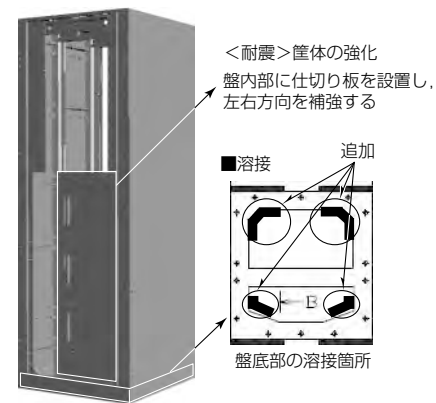


図 5. ガスタービン制御盤の強化方法

(b) 保守作業性／熱解析評価

三次元CADによって、盤内構造を立体的に表現することで、盤フレームと盤内機器の干渉がないこと、保守手順のシミュレーションを実施し、メンテナンス性に問題のない補強対策であることを評価した。また盤内の熱解析によって、盤全体の過度な温度上昇や、部分的な高温箇所がないことを評価した。

これらの対策によって、固有振動数30Hz以上、Ss地震動に対して2倍の耐震裕度を持つ制御盤を実現した(結果を表3に示す)。

3.4 サイバーセキュリティ強化

当社は米国原子力プラント向けに、RG 5.71に適合した物理的な一方向通信を実現するデータダイオード、及び監視対象装置のセキュリティを統合管理するセキュリティ管理システムを開発している(この特集号の“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”(p.23)を参照)。

国内でも新基準にサイバーテロ対策が追加されているため、この開発成果を国内システムに展開し、プラントの更なる安全性向上に寄与する。

4. む す び

新基準に適合し、原子力プラントの安全性向上に寄与する4つの技術について述べた。今後は、これらの技術を国内原子力プラントに導入し、原子力の安全性向上に貢献していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 原子力規制委員会：新規制基準(設計基準)骨子
- (2) 原子力規制委員会：新規制基準(重大事故対策)骨子
- (3) Regulatory Guide 5.71：Cyber Security Programs for Nuclear Facilities (2010)
- (4) 原子力規格委員会：原子力発電所耐震設計技術指針(JEAC4601-2008)

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

平島将士*
 稲葉隆太*
 那須ひとみ*

Activities for Complying with Regulations for US-APWR Digital Instrumentation and Control Systems

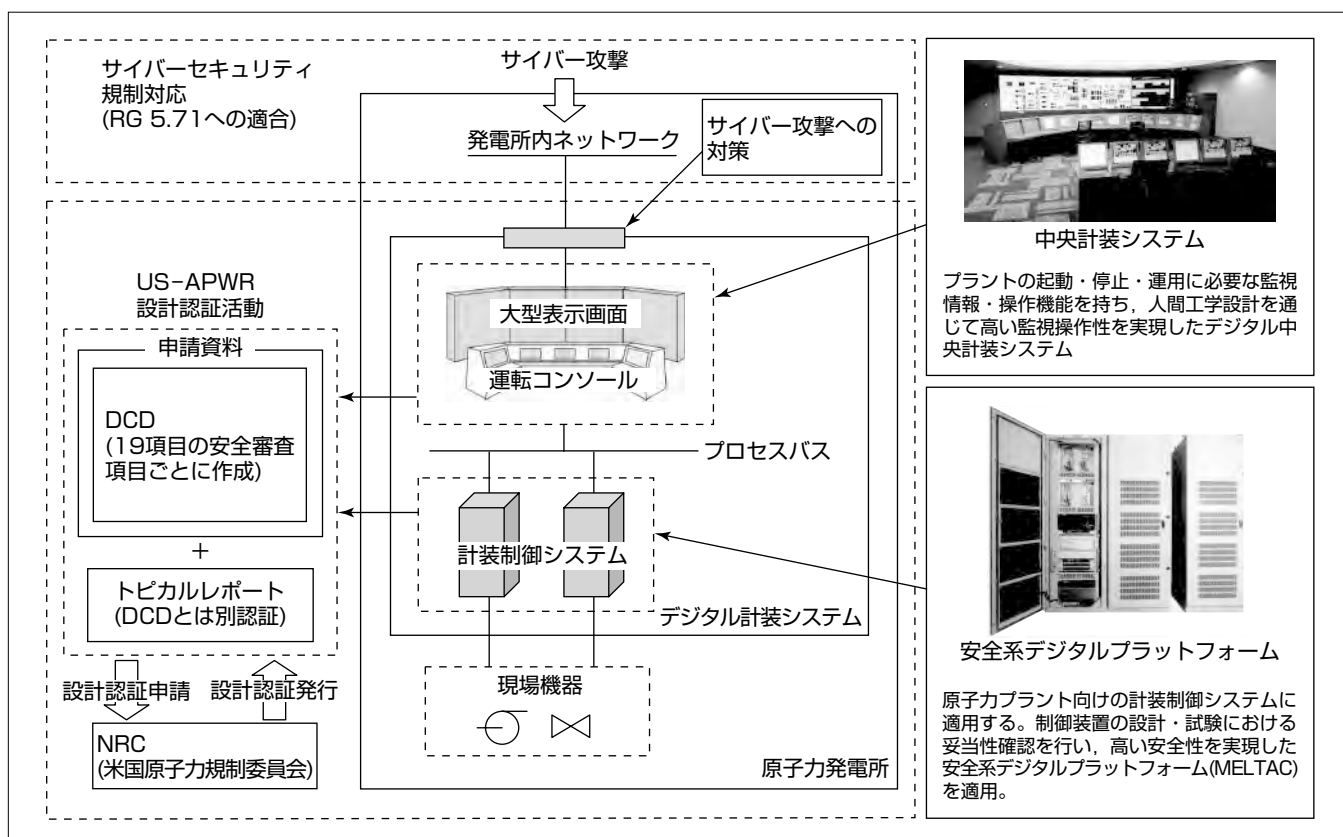
Masashi Hirahatake, Ryuta Inaba, Hitomi Nasu

要 旨

三菱電機は、三菱重工業(株)とともに、米国市場向け最新型加圧水型軽水炉としてUS-APWRの設計認証活動を推進しており、三菱重工業(株)は、米国標準審査指針で定められる19項の安全審査項目ごとに設計認証の申請資料を米国原子力規制委員会(NRC)へ提出している⁽¹⁾。当社は、19項の安全審査項目のうち、人間工学設計と計装制御システムの設計認証が必要となる活動に取り組んでいる。三菱重工業(株)と当社は、この活動を通じて、これら2つの安全審査項目に関する米国規制指針への適合性を示し、これらの審査項目に関する申請資料に対してドラフト版安全評価書(Safety Evaluation Report：SER)がNRCから発行された。

今後、原子力安全諮問委員会(Advisory Committee on Reactor Safeguards：ACRS)の審査を経て、最終版SERが発行される。

また、サイバーテロの脅威が増加し、サイバーセキュリティ対策の必要性が高まる中、米国では、2010年に原子力発電所のサイバーセキュリティに関する規制指針(RG 5.71)が制定された。このため、三菱重工業(株)と当社は、この規制指針への適合に向けたサイバーセキュリティ対策の開発を進めており、当社では、データダイオードとセキュリティ管理システムの開発を進めている。



当社が関係するUS-APWR 設計認証活動

三菱重工業(株)は、プラント全体(炉型)の設計認証の申請資料として、DCD (Design Control Document)、及びトピカルレポート、テクニカルレポートをNRCに提出している。当社では、19項の安全審査項目のうち、人間工学設計、計装制御システムの設計認証活動に協力しており、申請資料の評価レポートであるSERを受け、当社設備をUS-APWRに適用する計画である。

1. ま え が き

当社は、三菱重工業(株)とともに、米国市場向け最新型加圧水型軽水炉(US-APWR)に関して、米国原子力規制委員会(NRC)による設計認証の取得活動を推進している。当社は、この設計認証活動のうち、人間工学設計と計装制御システムに関する設計認証活動に取り組んでいる。

また、米国では、2010年に原子力発電所のサイバーセキュリティに関する規制指針“Regulatory Guide 5.71(RG 5.71)”が制定された。三菱重工業(株)と当社(以下“三菱”という。)は、この規制指針への適合を進めている。

本稿では、人間工学設計、及び計装制御システムについてドラフトSER発行に至るまでの活動と、サイバーセキュリティ規制指針への適合に向けた当社活動について述べる。

2. 設計認証活動とサイバーセキュリティ規制対応

2.1 US-APWRの設計認証活動

米国での原子力プラント建設・運転に向け、三菱重工業(株)は、米国標準審査指針で定められる19項の安全審査項目ごとに設計認証の申請資料をNRCに提出しており⁽¹⁾、当社は、これらの安全審査項目のうち、人間工学設計と計装制御システムの設計認証に必要な活動に取り組んでいる(図1)。

当社は、この活動を通じて、人間工学設計及び計装制御システムの米国規制指針への適合性をNRCへ示し、これら2つの安全審査項目の申請資料に対して、NRCからドラフトSERが発行された。

2.1.1 人間工学設計の設計認証活動

三菱では、人間工学設計の規制ガイドラインである人間工学プログラムのレビュー基準(NUREG-0711)、及び中央計装システムの設計ガイドライン(NUREG-0700)への適合性を示すために、三菱の設計プロセス及び米国標準仕様を申請資料に定めている。また、これらの規制ガイドラ

インへの適合性を示すために、当社の米国拠点(MEPP: Mitsubishi Electric Power Products, Inc.)に構築した検証設備(図2)を用いて、米国運転員による運転検証を実施した⁽²⁾。運転検証結果は、米国標準仕様として申請資料に反映しており、NRCによる技術監査の中で、規制ガイドラインへの適合性が確認され、人間工学設計の申請資料に対するドラフトSER発行に至った。

3章で、運転検証以降に実施した米国標準仕様の確立に向けた活動と、NRCによる技術監査の結果を述べる。

2.1.2 計装制御システムの設計認証活動

計装制御システムの設計認証取得のためには、計装制御システムの中でも原子炉の保護機能をつかさどる安全系に適用するプラットフォーム“MELTAC”に関して、米国規制指針への適合性を示す必要がある。当社は、米国原子力安全系向け品質保証プログラム(10CFR50 Appendix B)に準拠した品質保証プログラムを新たに策定し、MELTACの技術要素とともに申請資料としてまとめた⁽²⁾。2010年以降は、策定した品質保証プログラムに基づき、MELTACの再評価活動を実施し、NRCによるQA(Quality Assurance)審査、技術監査を経て、米国原子力安全系向け品質保証プログラムへの適合性が確認された。この結果を受け、MELTACを含む計装制御システムの申請資料に対するドラフトSER発行に至った。



図2. 中央計装システムの運転検証設備

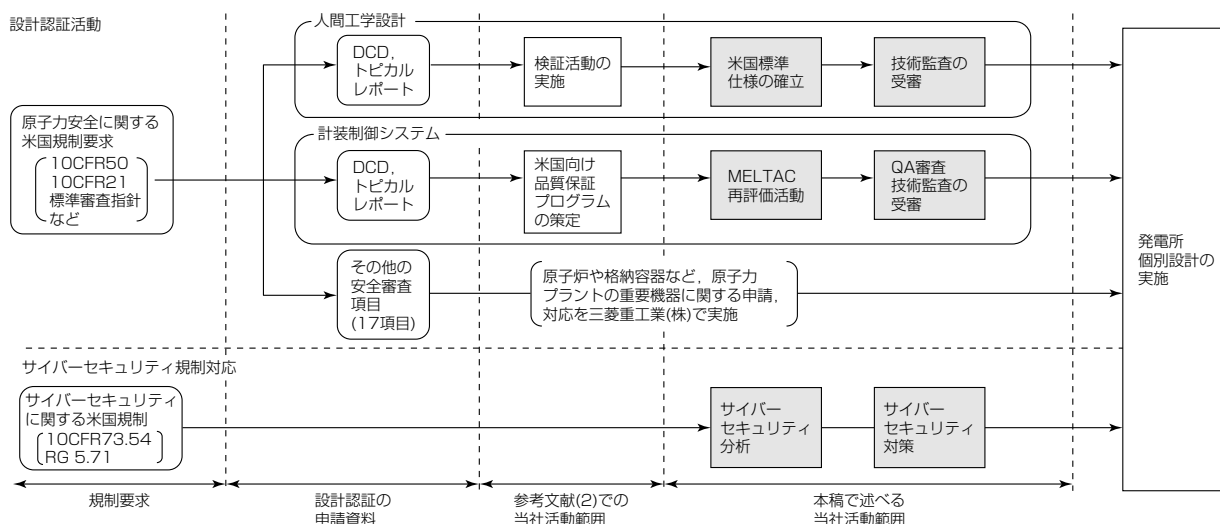


図1. 米国規制対応に向けた三菱活動

4章で、策定した品質保証プログラムに基づき実施した米国規制指針に適合するためのMELTAC再評価活動、及びNRCによるQA審査、技術監査の内容を述べる。

2.2 サイバーセキュリティ規制対応

近年、マルウェアや不正アクセス等によるソフトウェア改ざん、データ傍受、現場設備の不正制御等、監視制御システムに対するサイバーテロの脅威が増加しており、社会や米国電力会社を含む事業者被害を与えている。サイバーセキュリティ対策の必要性が高まる中、米国では2010年に原子力発電所のサイバーセキュリティに関する規制指針(RG 5.71)が制定された。当社では、RG 5.71への適合に向けたサイバーセキュリティ対策の開発を進めており(図1)、5章でその取組みを述べる。

3. 人間工学設計の設計認証活動

3.1 米国標準仕様の確立

設計認証活動で必要となる米国標準仕様を確立するため、人間工学プログラムのレビュー基準(NUREG-0711)に基づいた設計プロセスを定め、運転検証を実施した。運転検証結果については、この設計プロセスに従い、米国標準仕様に反映した。三菱では、米国運転員を含めた評価チームを編成し、運転検証結果の反映仕様をレビューすることで、米国標準仕様が規制ガイドラインに適合していることを確認した。次に、運転検証結果の反映仕様例について述べる。

【運転検証結果の反映仕様例】

運転員は、運転手順書に従った監視操作を行っており、この監視操作をサポートする機能として、電子化手順書システムに次の機能を設けた。

(1) 電子化手順書上でのステータス管理機能(図3)

複数の運転員による手順書の進捗を管理するため、手順書の操作手順ごとで“開始”“完了”“対応不要”等、複数のステータス管理を可能とした。

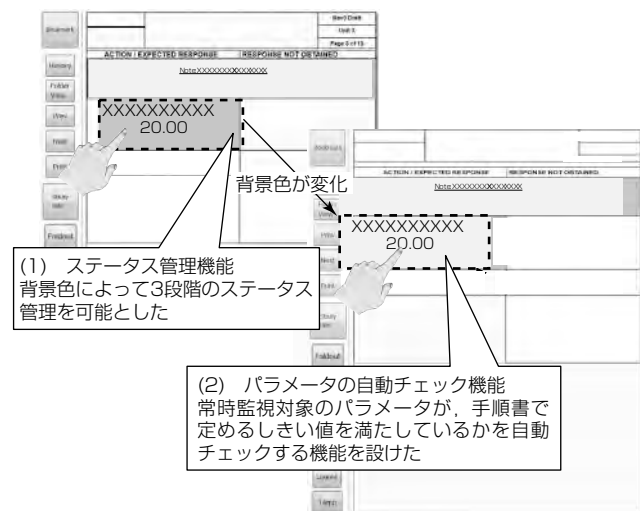


図3. ステータス管理機能及び自動チェック機能

(2) パラメータの自動チェック機能(図3)

運転手順書の中で常時監視が要求されるパラメータについて、常時監視する負担を軽減するために、対象パラメータの状態を計算機が常時チェックし、状態変化時には運転員に告知する機能を設けた。

3.2 NRCによる技術監査

人間工学設計の設計認証活動では、2007年に申請図書の提出以降、NRCによる審査を受審してきた。この審査では、申請資料で定めた三菱の設計プロセスと米国標準仕様が、規制ガイドラインに適合していることをNRCが確認した。次に、NRC評価の観点と評価結果を示す。

(1) 設計プロセスの適合性

三菱の設計プロセスが、人間工学プログラムのレビュー基準(NUREG-0711)に定める要求を満足している。

(2) 画面設計方針の適合性

監視操作画面などの仕様が、中央計装システムの設計ガイドライン(NUREG-0700)に定める要求を満足している。

(3) 運転員のワークロード評価

デジタル中央計装システムの適用によって、ハードウェアの操作器、指示計等を主体に構成した中央計装システムに比べ、運転員のワークロードを軽減しており、人間工学プログラムのレビュー基準(NUREG-0711)の要求を満足している。

これらの評価結果を踏まえ、トピカルレポートで定めた設計プロセスと策定した米国標準仕様が米国規制ガイドラインの要求を満足していることをNRCが確認し、2012年3月にドラフトSER発行に至った。

4. 計装制御システムの設計認証活動

4.1 米国規制適合に向けたMELTACの再評価活動

安全系計装制御システムに適用するMELTACは、米国原子力安全系向け品質保証プログラム(10CFR50 Appendix B)の要求への準拠が必要である。そのため、この要求事項を満足した当社の品質保証プログラムの下、日本国内原子力発電所に納入してきた開発済みMELTACに対して、再評価活動を実施した。

開発済みMELTACは、日本国内原子力安全系向け品質保証プログラム(ISO9001, JEAG等)に準拠して開発している。一方で、米国原子力安全系向け品質保証プログラムの下では、日本国内規格で開発済みMELTACは、商用グレード製品(Commercial Grade Item)として扱われるため、EPRI NP-5652(Guideline for the Utilization of Commercial Grade Item in Nuclear Safety Related Applications)の評価手法であるCGD(Commercial Grade Dedication)を用いて、MELTACの再評価活動を実施し、開発済みMELTACが米国原子力向け品質保証プログラムの要求事項を満足し、商用グレード製品を安全系計装制御システムに適用できることを示した。

再評価活動は、開発時点で設計及びV&V (Verification and Validation：検証と妥当性確認)に関わっていない独立した組織に所属する第三者によって実施した。

4.2 NRCによるQA審査と技術監査

2011年12月にNRCによるQA審査と技術監査を受審した。QA審査では、MELTACの開発設計活動や4.1節で述べた再評価活動の結果をエビデンスとして、当社の米国原子力安全系向け品質保証プログラムが、規制指針に適合しているか審査を受けた。技術監査では、日本国内でも要求がある安全系計装制御システムの多重性、独立性等の主要技術要素を中心に、米国規制指針への適合性が評価された。この結果を踏まえ、2013年3月に計装制御システムの申請資料に対して、ドラフトSERが発行されており、この中で、MELTACが規制指針へ適合しているとの評価を得た。

5. サイバーセキュリティ規制対応

5.1 RG 5.71のサイバーセキュリティ要求

RG 5.71には、詳細なサイバーセキュリティ対策の要求があり、セキュリティの低いネットワークから高いネットワークへのデータ送信の禁止、ネットワークのセキュリティレベルに応じた分離等の外部脅威^(注1)への対策、及びデジタルシステムへの不正アクセス防止のためのアクセス管理、データ改ざん防止のための暗号化等の内部脅威^(注2)への対策に分類できる。

また、RG 5.71では、デジタル計装システムのサイバーセキュリティ分析を実施し、セキュリティ対策を行うことを要求している。そこで当社は、この要求に適合するために、RG 5.71で推奨されているセキュリティ分析手法である、National Institute of Standards and Technology (NIST)の“SP800-30：Guide for Conducting Risk Assessments-IT Security”に基づき分析(図4)を実施し、内部脅威及び外部脅威への対策を検討した。

(注1) 原子力プラント外からのサイバー攻撃などによる脅威
(注2) 原子力プラント内における不正アクセスなどによる脅威

5.2 サイバーセキュリティ対策

脅威への対策を検討した結果、当社は、外部脅威対策として、物理的な一方通信を実現するデータダイオード、内部脅威対策として、監視対象装置のセキュリティを統合管理するセキュリティ管理システムの開発を進めている。

外部脅威対策としては、RG 5.71では、セキュリティレベルの異なるネットワーク間にデータダイオード又はファイアウォールを設置し、デジタル計装システムに対するデータアクセスを遮断することを要求している。しかし、ファイアウォール適用時は、21項目の運用面での管理が必要であり、事業者負担が大幅に増加する。そのため、当社ではデータダイオードを採用する方針とし、デバイス開発を進めている。

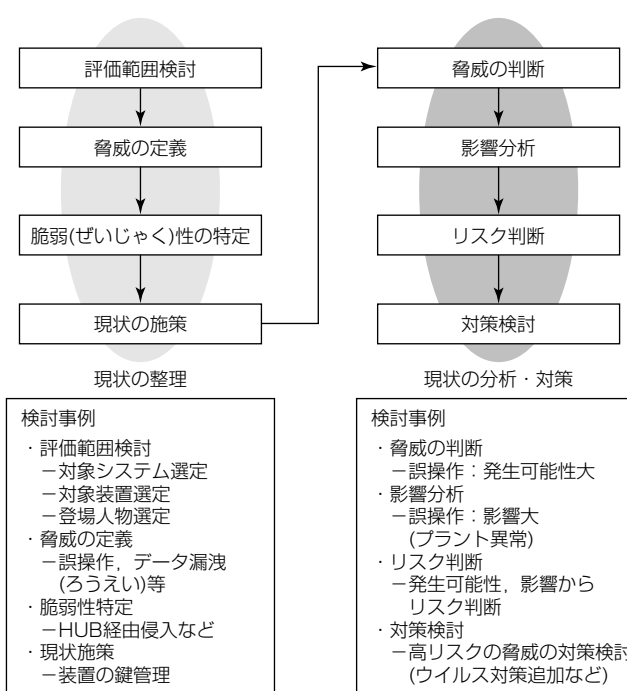


図4. 米国規制が推奨するサイバーセキュリティの分析フロー

内部脅威対策としては、ネットワーク上の各装置に対して、各種セキュリティ機能(アクセス管理、暗号化、ウイルス対策等)を実装する必要がある。個別にセキュリティ機能を実装する場合、装置ごとにセキュリティ状態の確認や、ウイルスパターンファイルの更新等を行う必要があり、運用負荷の増大につながる。そのため、当社では、RG 5.71に適合するとともに、セキュリティの統合管理による運用効率化とセキュリティ強化を実現するセキュリティ管理システムを開発した。

6. む す び

3章、4章で述べた活動を通じて、人間工学設計、計装制御システムの申請資料に対するドラフトSER発行に至った。2016年までに、三菱重工(株)は全ての安全審査項目に関する設計認証活動を完了する予定である。認証取得後は、この活動で定めた標準設計を基にUS-APWR適用プラントでの仕様詳細化検討を進める。

また、5章で述べたサイバーセキュリティ対策については、日本国内外でも議論されている課題であり、日本国内外の規制動向を踏まえた開発に取り組む計画である。

参 考 文 献

- (1) 緒方善樹，ほか：US-APWRにおける電気計装設備の新技术(新型中央制御盤及び非常用ガスタービン発電機の検証)，三菱重工技報，46，No.4，15～18 (2009)
- (2) 北村雅司，ほか：米国向け中央計装運転検証設備及び型式認証活動，三菱電機技報，84，No.10，542～545 (2010)

中国CPR1000型原子力発電所向け計装制御設備の実現

松本 等* 金丸剛之*
 杉谷 滋*
 津村嘉彦*

Application of Mitsubishi Digital Instrumentation and Control System for China CPR1000 Nuclear Power Plant

Hitoshi Matsumoto, Shigeru Sugitani, Yoshihiko Tsumura, Yoshiyuki Kanamaru

要 旨

中国では、国内産業の拡大や鉄道交通・通信等の社会インフラ整備等に伴う電力需要がますます増加傾向にあり、安定した電力の供給及び内陸部の電力不足解消を図るため原子力発電所の建設計画が堅持されている。

三菱電機は、CPR1000型原子力発電所(中国自主開発設計の1,000MW加圧水型軽水炉)向け計装制御設備14基を中国原子力デジタル装置メーカーである北京広利核系統工程有限公司(以下“CTEC社”という。)と共同受注した。

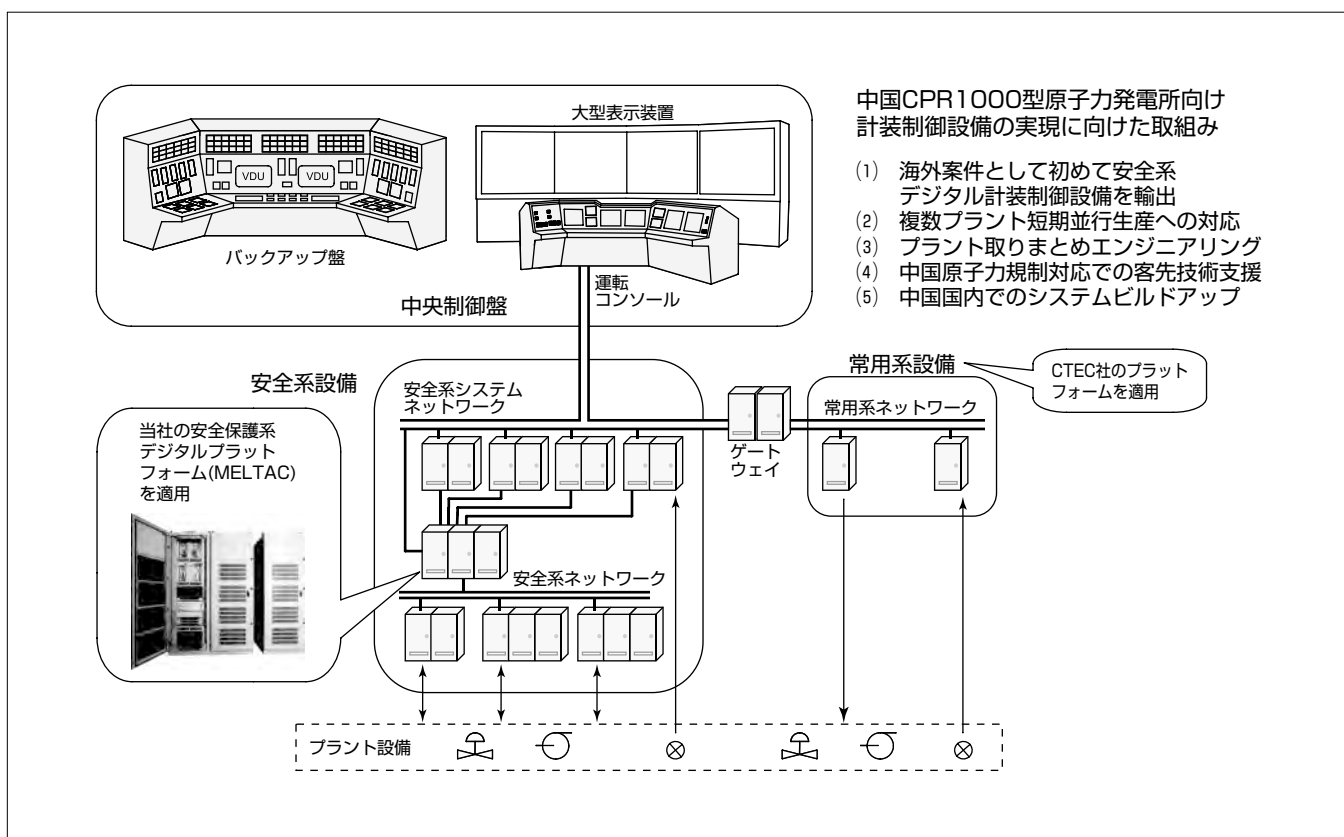
CPR1000型原子力発電所向け計装制御設備は、ソフトウェアを採用した中央制御盤と安全系／常用系デジタル設備で構成され、運転性・信頼性・保守性・経済性の

向上を実現している。

当社は、海外原子力案件として初めて安全系デジタル計装制御設備を出荷し、2013年4月にCPR1000初号機1基、6月には更に1基が相次いで商業運転を開始した。

日本と同様に、中国でも原子力発電所は、耐震・火災防護を始めとする原子力特有の規制(規格・基準)を満たす必要があり、東日本大震災後の規制強化が図られる中、中国原子力規制当局による安全系設備の審査に対して客先支援を行った。

本稿では、CPR1000型原子力発電所向け計装制御設備の実現に向けた取組みについて述べる。



中国CPR1000型原子力発電所向け計装制御設備の標準的なシステム構成と実現に向けた取組み

計装制御設備は、中央制御盤と安全系／常用系デジタル設備をネットワーク接続している⁽¹⁾。多数の監視パラメータを伝送し、監視制御の応答性が要求されるネットワークには高速・大容量の当社製品を適用し、CPR1000型原子力発電所に対応したデジタル計装制御設備を実現した。当社デジタル装置をベースとした安全系設備とCTEC社の常用系設備を組み合わせた合理的な計装制御システムを構築した。また、その実現のために様々な取組みを行った。

*電力システム製作所

1. ま え が き

中国では、原子力発電所の設備容量を現状の13GW(ギガワット)から2020年までに58GWへ増強する予定であり、さらに2030年までに200GWへと増強が計画されている。これらの新設される原子力発電所は、明らかになっているだけでも60基以上にのぼる。当社の顧客となる中国広核集団有限公司(CGNPC)は、中国国内で商業運転中の原子力発電所16基・建設着工済み29基のうち、商業運転中8基・建設着工済み14基を持っている大手電力会社であり、今後5年間に更に10基程度の建設着工を行う計画である。

本稿では、海外原子力案件として初めてとなるCPR1000型原子力発電所(中国自主開発設計の1,000MW加圧水型軽水炉)に適用するデジタル計装制御設備の実現に向けた取り組みについて述べる。

2. CPR1000向け計装制御設備

2.1 デジタル計装制御設備の構成

CPR1000向け計装制御設備は、中央制御設備とデジタル計装制御設備をネットワーク接続したものであり、次の特長を持つ(図1、図2)。

- (1) 安全系設備には、当社の安全保護系デジタルプラットフォーム“MELTAC”を適用した。
- (2) 計装制御設備の安全性を高めるため、重要ロジックをハイブリッド化(ソフトウェアロジックとハードウェアロジックの組合せ)した。
- (3) 常用系設備にはCTEC社プラットフォームを適用した。

2.2 中央制御設備の構成

中央制御設備(図3)は、原子力発電所の全システムを監視操作するシステムであり、次の特長を持つ⁽²⁾。

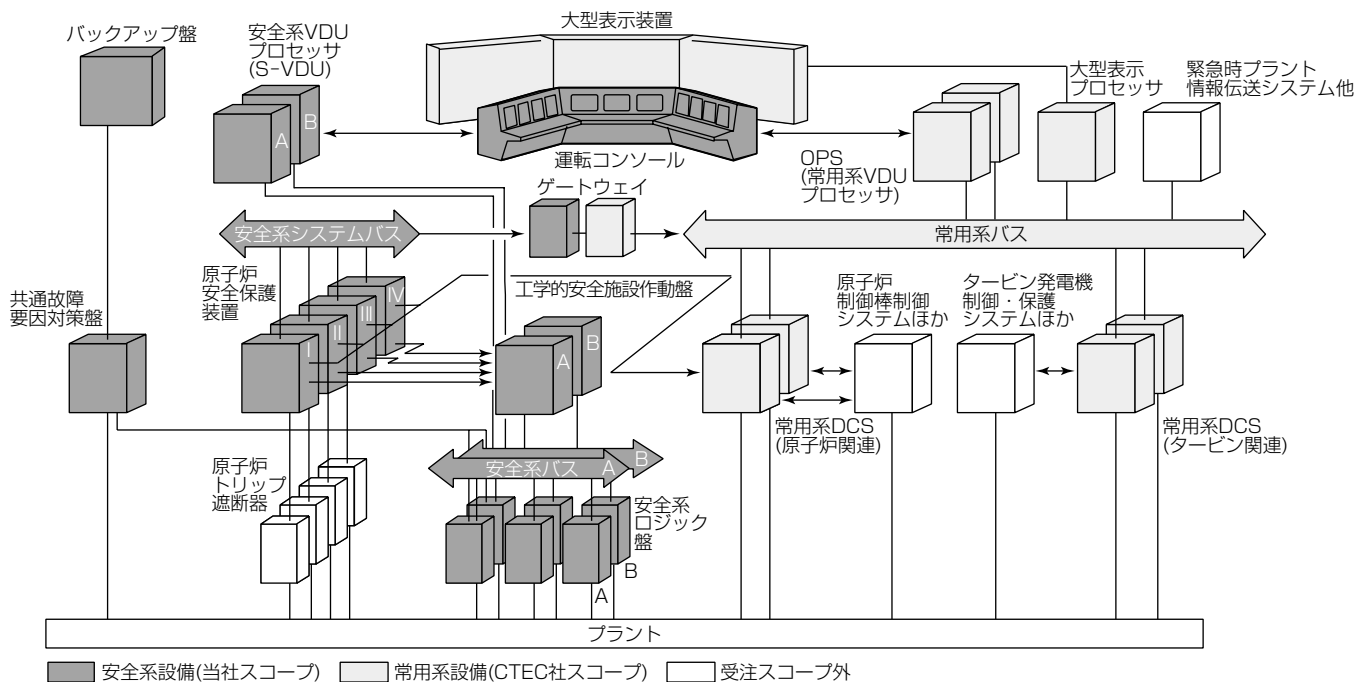
- (1) ソフトオペレーションを主体としたコンパクトなコンソールタイプの中央制御盤
- (2) 大型表示装置による運転クルー間の情報共有と重要情報の常時監視



図2. デジタル計装制御設備



図3. CPR1000向け中央制御設備(モックアップ検証設備)



S-VDU : Safety-Visual Display Unit, OPS : Operator Station, DCS : Distributed Control System

図1. 計装制御設備のシステム構成

- (3) プラント運転操作設備の故障時に備え、監視操作ディスプレイをバックアップ盤に切り替えて代替監視操作することで設備の安全性を向上

3. CPR1000向け計装制御設備の実現

3.1 設備の実現に向けた取組み

海外原子力案件として初めてとなる安全系デジタル計装制御設備の実現に向け、次の取組みを展開した(図4)。

- (1) 複数プラント短期並行生産への対応
- (2) プラント取りまとめエンジニアリング
- (3) 中国原子力規制対応での客先技術支援
- (4) 中国国内でのシステムビルドアップ

3.2 複数プラント短期並行生産への対応

3.2.1 設計標準化と合理化の推進

CPR1000型原子力発電所は、日本国内原子力発電プラントの建設工程と比較すると短納期であり、かつ複数プラント(14基)を並行して製品出荷する必要があった。

また、CPR1000初号機を2007年に受注して以降、CPR1000仕様や客先要求仕様の分析を行ったが、レファレンスプラントの試運転経験反映などの理由から上流設計の仕様変更が発生し、複数プラントへ確実に水平展開する仕組み作りが必要となった。このような状況下で、客先要求仕様を満足しつつ設計品質を確保させるため、徹底した設計標準化と合理化を推進した。

3.2.2 フローティング型スタンダード設計の適用

CPR1000設計の標準化を推進する取組みの一つとして、フローティング型スタンダード設計

を立案し運用した。フローティング型スタンダード設計とは、初号機をスタンダードプラントに設定して、後続プラントで発生した仕様変更や設計懸案事項を一旦スタンダードプラントのマスターに反映し、スタンダードプラントの図面との差分を順次後続プラントに反映する方式である。プラント個別に設計変更する方式に比べて、設計変更管理がシンプルとなり輻輳(ふくそう)する設計作業が合理化された(図5)。

3.2.3 水平展開管理ツールの適用

3.2.2項で述べたスタンダードプラント及び後続プラントに水平展開すべき項目を迅速かつ確実にリストアップするため、各プラントで発生した上流設計の仕様変更や設計懸案事項をデータベース化した水平展開管理ツールを製作し運用した。このツールに登録するデータには、水平展開項目が発生したプラント名、対象設備名、他プラントへの反映要否、実施状況などの情報を付加させ、プラントごとの水平展開リストを容易に作成することを可能とした(図6)。

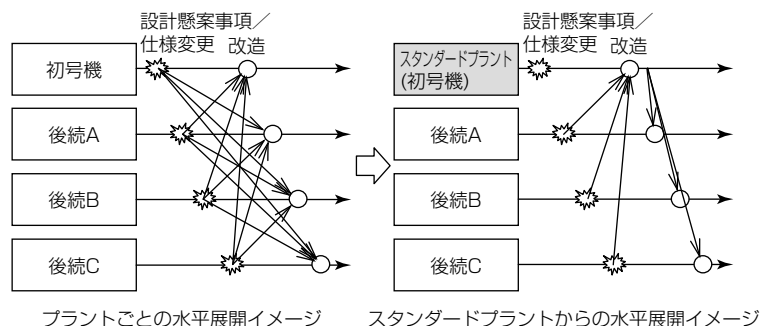
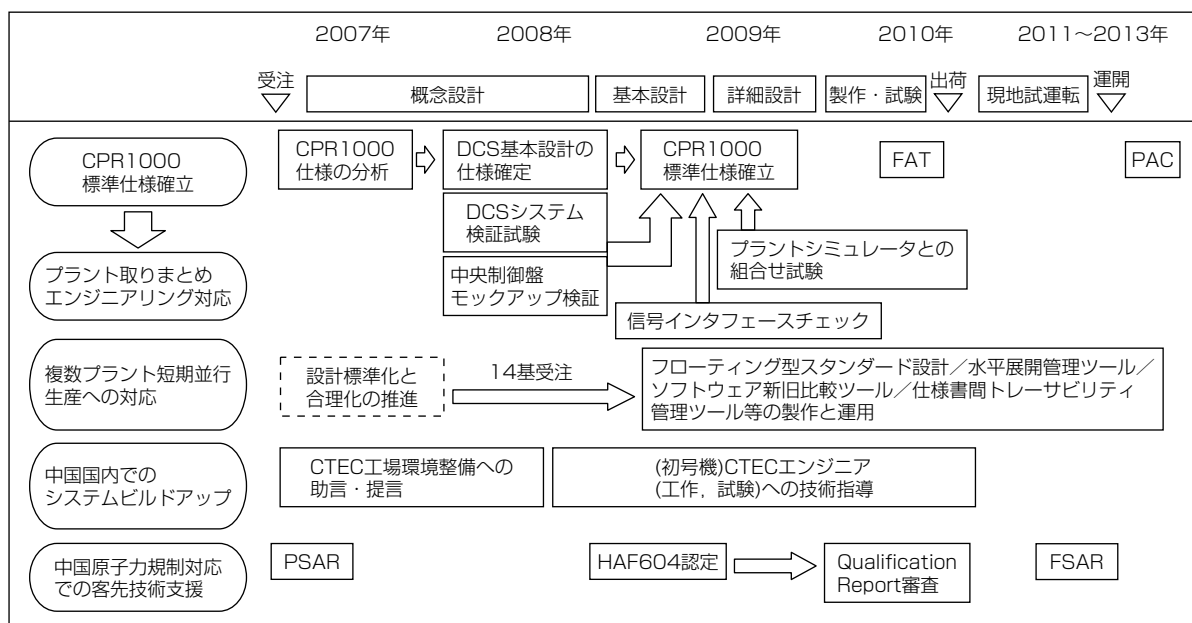


図5. フローティング型スタンダード設計のイメージ



FAT : Factory Acceptance Test(工場客先立会い試験), PAC : Provisional Acceptance Certificate(性能評価検査), HAF604 : 中国の原子力安全設備の輸入管理監督規定, PSAR : Preliminary Safety Analysis Report(建設許可段階審査), FSAR : Final Safety Analysis Report(建設燃料装荷許可段階審査)

図4. CPR1000向け計装制御設備実現に向けた取組み

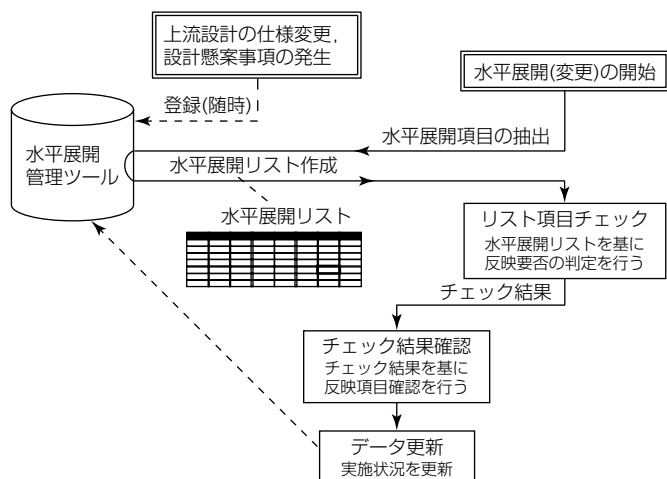


図 6. 水平展開管理ツール運用のイメージ

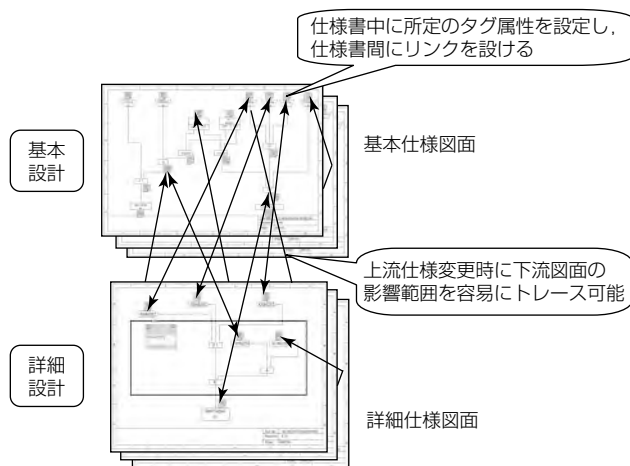


図 8. 仕様書間のトレーサビリティの例⁽³⁾

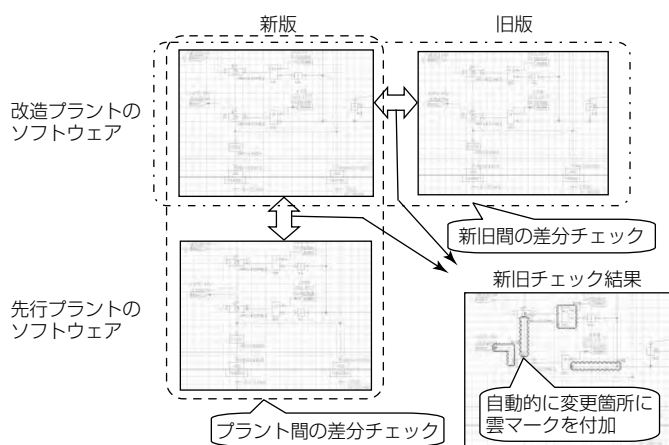


図 7. ソフトウェア新旧比較チェックツールの適用例

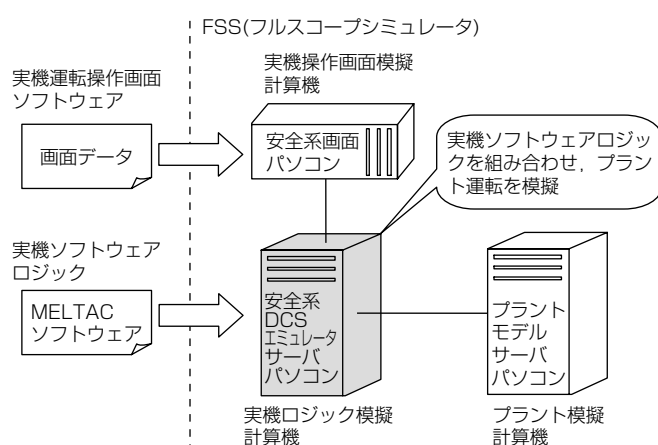


図 9. FSSのシステム構成(概略)

3. 2. 4 ソフトウェア新旧比較チェックツールの適用

上流設計変更に対して迅速かつ確実に対応するため、設計評価(変更点管理)や変更作業を合理的に行える仕組みが必要となった。その取組みの一つとして、計装制御設備に対応したソフトウェアロジックの新旧比較ツールについて述べる。

ソフトウェア製作段階で、ソフトウェアロジックの新旧比較チェックツールを適用することで、ソフトウェア変更時のチェック作業効率と品質の向上を図った。

このツールはソフトウェアバージョンの新旧データを比較し、変更箇所を自動的に抽出するツールであり、変更すべき箇所が正しく変更されていることを容易にチェックすることが可能となった(図 7)。

3. 2. 5 仕様書間トレーサビリティ管理ツールの適用

設計業務の効率化(特に変更時の影響範囲評価)、及び設計品質向上を図る取組みとして、設計段階で仕様書間のトレーサビリティを管理するPD(Portable Document)トレーサー(仕様書間に共通する文字情報をキーとしてリンクを設け、仕様書間のつながりを検索できるようにしたツール)を適用した。このPDトレーサーを使用することで、PDF(Portable Document Format)形式の仕様書を対象に

変更する仕様書間の影響範囲を容易にトレースすることが可能となった(図 8)。

3. 3 プラント取りまとめエンジニアリング

3. 3. 1 プラントシミュレータによるプラント動作確認

デジタル計装制御設備が起因となるトラブルをサイトに流出させないため、工場出荷までにサイトトラブルの未然防止を図る必要がある。この取組みとして、運転員訓練を行うプラントシミュレータ(Full Scope Simulator : FSS)を活用し、計装制御設備のソフトウェアロジックと組み合わせて、運転員マニュアルに従ったプラント模擬運転(起動/停止)におけるロジックの妥当性を確認した。

なお、FSSはプラント動作を模擬するプラント模擬計算機、実機運転操作を模擬する実機操作画面模擬計算機、実機計装制御設備のソフトウェアロジックを模擬する実機ロジック模擬計算機から構成される。実機操作画面模擬計算機、及び実機ロジック模擬計算機には、それぞれ実機用のソフトウェアをインストールすることで、プラントの起動や停止といった動きに応じた運転操作の訓練が可能となっている(図 9)。

3. 3. 2 信号インタフェースチェック

計装制御設備と信号インタフェースする現場のセンサや

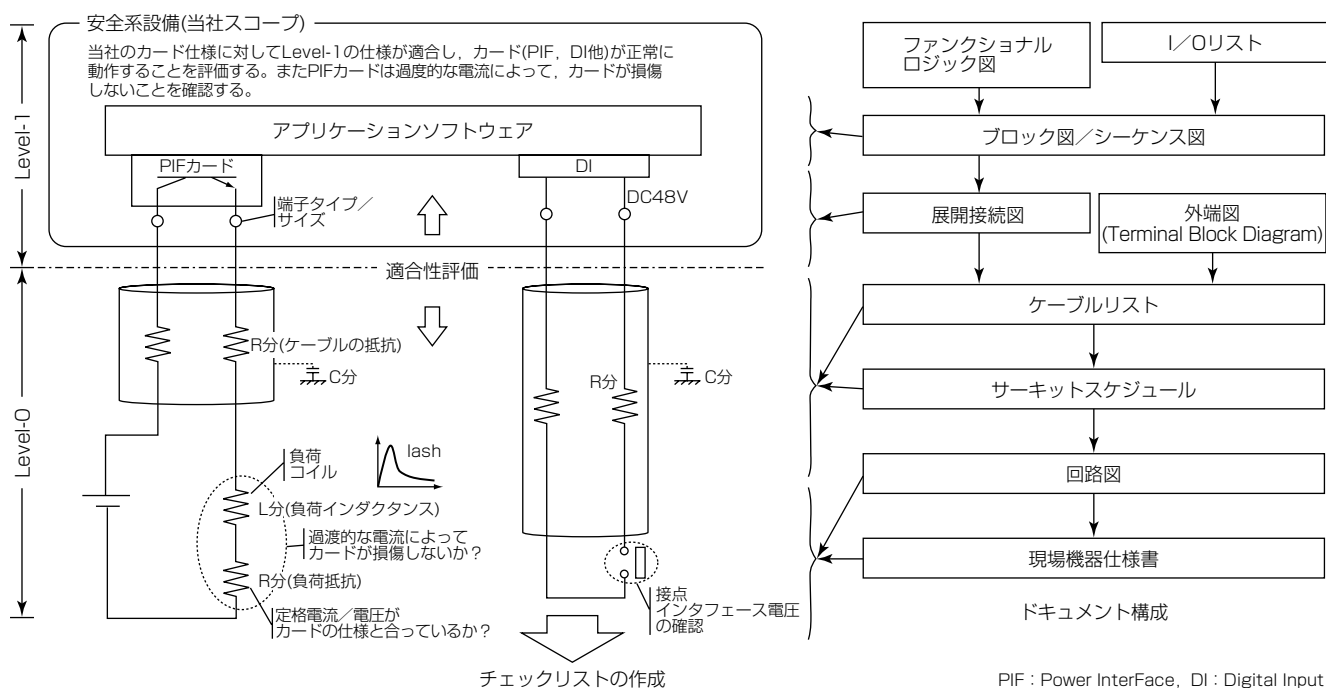


図10. 信号インタフェースチェックリストの作成

ポンプ、モータなどの機器は、数多くの海外ベンダーの製品が発電所に設置されている。これらの現場機器と電氣的（電気仕様）、及び機械的（端子サイズなど）インタフェースの整合性を確認するため信号インタフェースチェックリストを作成し、客先確認を行った（図10）。

3.4 中国原子力規制対応での客先技術支援

中国原子力規制当局（National Nuclear Safety Administration：NNSA）の安全審査には、原子力発電所の建設着工段階のPSAR審査と運転開始前の核燃料装荷段階のFSAR審査がある。

また、実地検査として安全系設備の品質評価となるFATの開始許可、工場出荷許可、サイトでの開梱（かいこん）許可等の審査があり、中国の規制対応は実機製作と並行して段階的に実施される。これら各段階で、当社は客先の規制対応を支援した。

これらに加えて東日本大震災以降は、工場出荷から現地試運転フェーズに対しても燃料装荷の条件として安全系設備の検証（Qualification）に対する厳格な審査が実施された（図11）。

3.5 中国国内でのシステムビルドアップ

CTEC社工場で、当社スコープである安全系設備の組立て・試験を行うとともに、安全系設備（当社プラットフォーム）と常用系設備（CTEC社プラットフォーム）との組合せを実現した。

また、当社はCTECエンジニア（工作・試験）への技術指導を行った。工作では制御盤・配電盤の組立てや結線に関

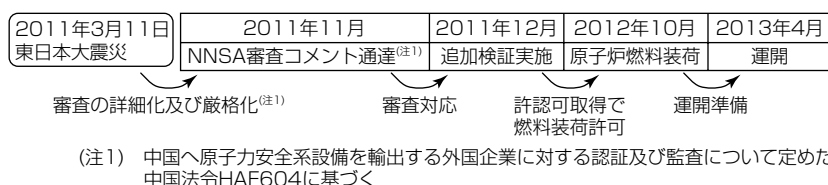


図11. 東日本大震災後の追加審査

する技能教育、試験では工場試験技術及びQA/QC（品質保証・品質管理）活動に関する指導を行った。

4. む す び

中国CPR1000型原子力発電所に適合した計装制御設備の標準仕様を確立し、プラントへの適用を実現した。

中国を始めとする諸外国の安定的な電力供給に対して、その一役が担えるよう技術力と国際競争力の更なる向上を図り、今後も当社原子力事業の海外展開の一環として中国原子力ビジネスへの展開を推進する所存である。

参考文献

- (1) 今瀬正博，ほか：原子力プラント向け新型中央計装システム開発の取り組み，三菱電機技報，**72**，No.6，554～559（1998）
- (2) 佐久間智英，ほか：高速・大容量ネットワーク適用による原子力発電プラント向け総合デジタル設備の実現，三菱電機技報，**81**，No.10，686～689（2007）
- (3) 宗像浩一，ほか：仕様書間のトレーサビリティ管理技術，三菱電機技報，**87**，No.4，224～227（2013）

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

佐古 浩*
岡田真一**

On-line Partial Discharge Measurement with Microstrip Antenna for Turbine Generators

Hiroshi Sako, Shinichi Okada

要 旨

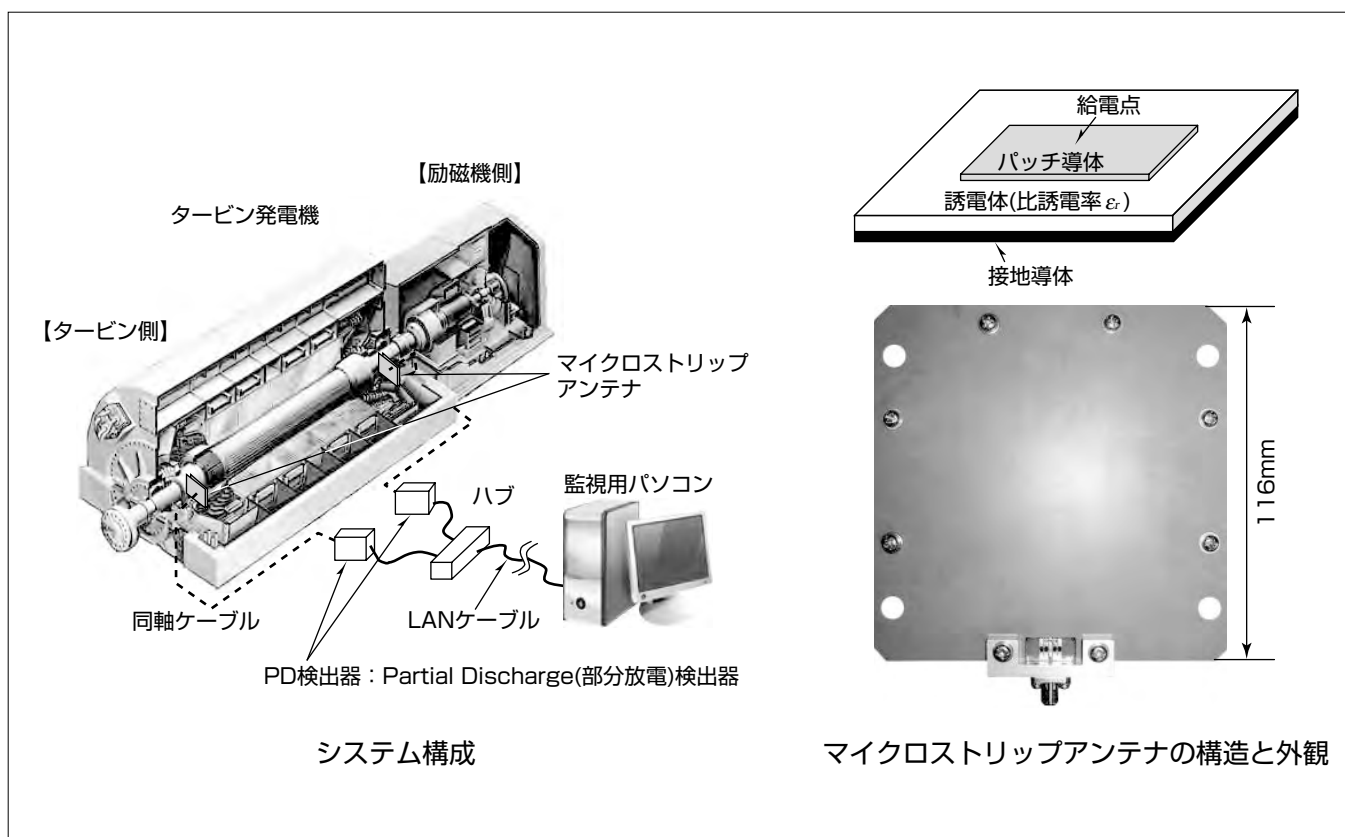
タービン発電機は、蒸気タービン又はガスタービンで駆動する同期発電機であり、電気事業用には電機子を固定子とし、2極又は4極の界磁極を回転子とした回転界磁形が主に使用される。

電力の安定供給の観点からもタービン発電機の予期せぬ不具合による長時間停止は回避すべきであり、昨今では、タービン発電機の運転状態を連続的に監視する装置の需要が高まっている。このような状況のなか、三菱電機は、定格電圧が10～30kV程度の電機子巻線から発生する部分放電をマイクロストリップアンテナによって連続的に監視し、異常の予兆を初期の段階で検出するシステムを開発した。

小型・軽量のマイクロストリップアンテナは、タービン

発電機の回転子を引き抜くことなく短時間で容易に取り付けることができ、高電位部である電機子巻線から離れた場所に設置するため、電機子巻線の主絶縁に悪影響を与えることはない。さらに、信頼性の高い機器でシンプルなシステム構成を実現しており、機器の保守・点検を容易に実施できるように配慮した。

このシステムでは、部分放電が発生した際に生じる電磁波のうち、1.8GHz帯の信号を選択的に受信する。この部分放電信号をもとに生成した“部分放電の位相特性”と“部分放電強度のトレンド”の2つのデータから、タービン発電機を運転したままの状態、電機子巻線の主絶縁の状態を長期間にわたって監視することができる。



オンライン部分放電計測システムの構成とマイクロストリップアンテナ

タービン発電機の励磁機側及びタービン側に設置したマイクロストリップアンテナによって、電機子巻線(固定子巻線)から発生する部分放電信号を広範囲にわたって連続的に計測し、異常の予兆を初期の段階で検出する。小型・軽量のマイクロストリップアンテナは、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、高電位の電機子巻線から離れた場所に設置するので電機子巻線の主絶縁に悪影響を与えることはない。

1. ま え が き

タービン発電機は、蒸気タービン又はガスタービンで駆動する同期発電機であり、電気事業用には電機子を固定子とし、2極又は4極の界磁極を回転子とした回転界磁形が主に使用される。電力の安定供給の観点からもタービン発電機の予期せぬ不具合による長時間停止は回避すべきであり、昨今では、タービン発電機の運転状態を連続的に監視する装置の需要が高まっている。このような状況のなか、当社は、電機子巻線から発生する部分放電をマイクロストリップアンテナによって連続的に監視し、異常の予兆を初期の段階で検出するシステムを開発した。

本稿では、このシステムの構成及びデータの評価を中心に述べる。

2. 部分放電の種類と計測方法

2.1 タービン発電機で発生する部分放電

部分放電とは、誘電体をはさんだ2つの電極間に高電圧を印加したとき、電極間に存在する空隙などで部分的に発生する放電のことをいう。

10～30kV程度の高電圧が発生するタービン発電機の電機子巻線は、一般に複数の重ねたマイカ層と熱硬化性樹脂を主材料とする主絶縁を導体の被覆として用いる。部分放電はこの主絶縁の内部及び外部表面で発生し、新しい電機子巻線であってもある程度は発生する。この主絶縁が、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、劣化の進行に対応して部分放電が大きくなる傾向があるため、部分放電を連続的に計測することによって主絶縁の劣化状況を把握することが可能となる。

タービン発電機で発生する部分放電の種類は、表1のように分類できる⁽¹⁾。

2.2 部分放電計測の分類

タービン発電機の部分放電計測は、次のように幾つかの視点で分類することができる。

2.2.1 オンライン計測とオフライン計測

タービン発電機の通常運転状態での部分放電計測をオンライン計測と呼ぶ。オンライン計測では、タービン発電機の運転中に部分放電を連続的に計測でき、異常の予兆を初期の段階で検出できることが最大の利点であるが、ノイズの影響を受けやすい⁽¹⁾。一方、タービン発電機を電力系統

から切り離して、停止した状態で行う部分放電計測をオフライン計測と呼ぶ。オフライン計測では、任意の相に比較的自由に印加電圧を選定して試験できるという特長があるが、発電機運転中の連続的な計測は行わない。

2.2.2 部分放電信号の検出方法

部分放電の検出は、部分放電発生によって生じる電機子導体内を伝播(でんぱ)するパルス状の信号を、電機子導体にコンデンサを接続して検出する方法と、部分放電発生の際に生じる電磁波をアンテナを用いて検出する方法とに大別できる。

2.2.3 部分放電信号の検出周波数

部分放電発生の際に生じる信号(電機子導体内を伝播する信号や電磁波)は、幅広い周波数成分を持つ⁽²⁾⁽³⁾。部分放電信号を検出する周波数帯は次のように大別できる。

- (1) 長波-短波(約100kHz～30MHz)
- (2) 超短波-極超短波(30MHz～3GHz)

波長が短いと部分放電信号が減衰しやすいが、ノイズの影響を受けにくくなる⁽¹⁾。

3. マイクロストリップアンテナの設計

3.1 部分放電信号の周波数スペクトル

図1は、2002年に製造された3.0MW、6.6kVの電動機に広帯域のホーンアンテナを設置して、電動機の運転時と停止時の周波数スペクトルを比較したものである。電動機停止中の周波数スペクトル(図1(b))に部分放電の信号が重畳したものが、電動機運転中の周波数スペクトル(図1(a))と考えられ、部分放電信号は幅広い周波数成分を持つことが分かる。電動機停止中にも特定の周波数で高い信号強度が確認できるが、これは通信や放送等の電波によるノイズと思われる⁽²⁾。

3.2 マイクロストリップアンテナの設計

図1(b)から、1.8GHz周辺はノイズが比較的少ないことが分かり、図1(a)から、部分放電信号の周波数成分は1.8GHz周辺を含んでいることが分かる。また、受信する周波数が高くなるほどアンテナの形状を小さくすることが

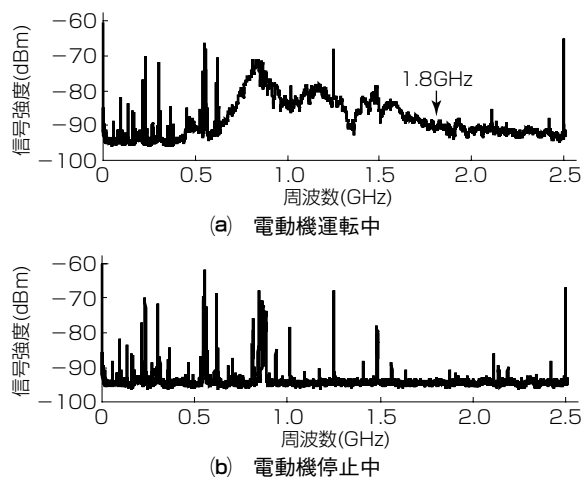


図1. ホーンアンテナによる周波数スペクトル

表1. タービン発電機で発生する部分放電

部分放電の種類	放電の説明
内部の放電	主絶縁の樹脂内部及びマイカ層の剥離によって生じた空隙で発生する部分放電
スロット放電	電機子巻線と固定子鉄心間の空隙で発生する部分放電
巻線端部の放電	巻線端部での沿面放電や異相巻線間又は接地物との空間距離不足による部分放電
導電性異物	巻線内の導電性異物によって局所的に発生する部分放電

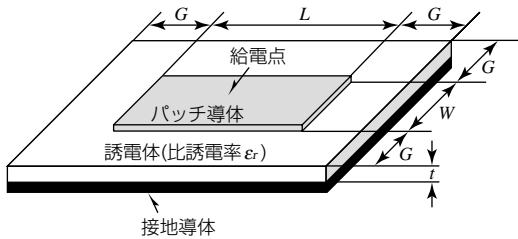


図2. マイクロストリップアンテナの構造

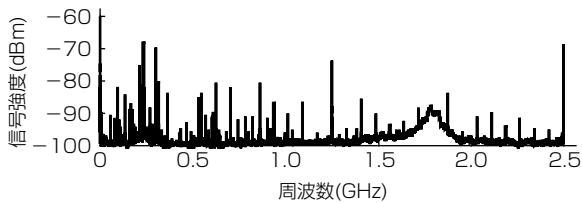


図3. 設計したマイクロストリップアンテナで得た部分放電信号の周波数スペクトル

可能なので、マイクロストリップアンテナの設計では1.8GHzの部分放電信号を選択的に受信するようにした⁽²⁾。

マイクロストリップアンテナは図2に示すように、接地導体の上に厚さ t (m)、比誘電率 ϵ_r の誘電体を重ね、さらに、その上に長さ L (m)、幅 W (m)のパッチ導体を重ねて構成している。アンテナの共振周波数 f_r (Hz)は、式(1)で表すことができる。また、アンテナ帯域幅の共振周波数 f_r に対する比 B_w は式(2)となる。図2で G の長さはアンテナのピーク利得に関する⁽⁴⁾。このようにして、共振周波数 f_r が1.8GHzでノイズ除去の観点から狭い受信帯域幅を持たせたマイクロストリップアンテナを設計した。アンテナの寸法は、一辺の長さが116mmの正方形であり、コンパクトな形状となっている。

$$f_r = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

c : 真空中での光速(3.0×10^8 m/s)

$$B_w = 3.77 \times \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r^2} \times \frac{W}{L} \times \frac{t \cdot f_r}{c} \quad \dots\dots\dots(2)$$

3.3 周波数スペクトルの確認

3.2節で設計したマイクロストリップアンテナを1980年に製造された1.3MW、6.6kVの電動機内に設置したところ、電動機運転中に図3の周波数スペクトルが得られた。ノイズを除いたときの信号強度のピークは1.8GHzにあり、設計どおりの特性が得られていることを確認した⁽²⁾。

4. 部分放電計測システムの構成

4.1 システム構成

マイクロストリップアンテナによるオンライン部分放電計測システムの構成を図4に示す。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、同軸ケーブルによって機外に導かれ、PD検出器で信号処理を行った後に監視用パソコンに伝送される。

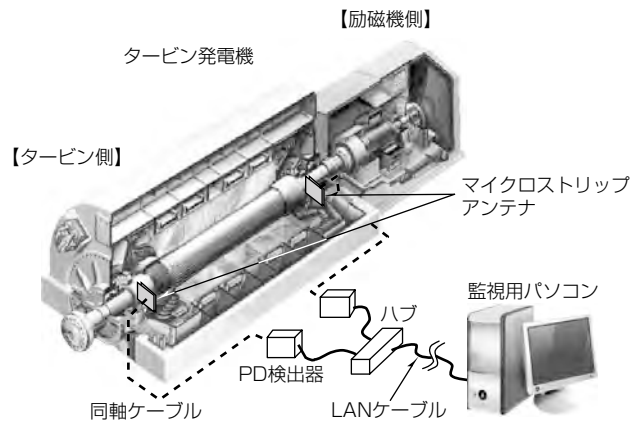


図4. 部分放電計測システムの構成

4.2 構成機器

4.2.1 マイクロストリップアンテナ

マイクロストリップアンテナはタービン発電機内の電機子巻線端部の近傍に2枚(タービン側1枚、励磁機側1枚)設置することを標準とし、それぞれが電機子巻線から発生する部分放電信号を広範囲にわたって受信する。高電位部である電機子巻線から離れた場所に設置するため、電機子巻線の絶縁に悪影響を与えることはなく、取付けの際に回転子を引き抜く必要もない。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、同軸ケーブルを介して機外に設置したPD検出器に導かれる。信号の減衰を防ぐために、同軸ケーブルの長さは最短化することが好ましい。

4.2.2 PD検出器(部分放電検出器)

部分放電信号のノイズ処理やアナログ→デジタル変換(A/D変換)等を行う。

4.2.3 監視用パソコン

PD検出器から伝送された部分放電信号の加工・表示・保存等を行う。発電所内での長期使用を考慮して、耐久性に優れた産業用パソコンを使用する。

5. 部分放電データの取得と評価

この部分放電計測システムは、 10^{-9} mWから 10^{-3} mWまでの幅広い部分放電信号を取り扱う。これらを1 mWを基準としたデシベル表示を行うと、-90 dBmから-30 dBmとなる。このシステムでは、これを0 Vから10 Vにおおよそ直線的に置き換えたものを部分放電強度として標準的に使用し、部分放電データの評価には“部分放電の位相特性”と“部分放電強度のトレンド”の2つを使用する。

5.1 部分放電の位相特性

図5は部分放電の位相特性であり、横軸が任意の相の電圧位相、縦軸が部分放電強度である。アンテナで受信した部分放電信号は強度と位相の情報を持っているので、一定時間(例えば5秒間)の全ての受信信号をプロットすることで、位相特性が得られる。

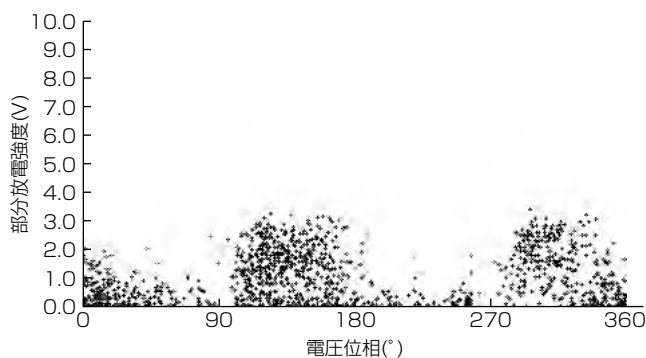


図5. 部分放電の位相特性

参考文献(1), (5)等には, 電機子導体内を伝播する部分放電信号をコンデンサによって検出する方法で, 表1に記載したそれぞれの部分放電が特徴的な位相特性パターンを示すことが述べられている。マイクロストリップアンテナによって部分放電を検出するこのシステムでも, 位相特性から部分放電の種類や発生相を特定することが可能と考えられるため, 意図的に各種の欠陥を与えた模擬巻線で部分放電を発生させ, 位相特性パターンの取得を行っている⁽⁶⁾。将来は, 異常予兆の判定基準に位相特性パターンの評価も含める予定である。

5.2 部分放電強度のトレンド

部分放電のデータ評価では, 一般的に電圧1サイクルのうちに1個の頻度で発生する部分放電強度を評価の対象とするので, 50Hz機の場合は50個/s(50pps: pulses per second), 60Hz機の場合は60ppsとなる部分放電強度が対象となる。図5のデータを繰り返し取得するたびに, 50pps又は60ppsとなる部分放電強度のデータが得られ, これを時系列に並べると部分放電強度のトレンド図となる。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情報が得られる。

電機子巻線に異常がない場合の部分放電強度は, タービン発電機の運転開始直後などに一時的に平常時より高くなる場合があるが, これを除くとある一定のレベルに落ち着く。このときの部分放電強度を“初期値”とし, トレンド図で部分放電強度が初期値よりも2V(約10倍, 10dB)増加, 又は6か月間で1.2V(約5倍, 7dB)増加した場合を異常の予兆ありと判断する。

図6は, 水素冷却タービン発電機(定格電圧19kV)で, 電機子巻線の巻替前後で部分放電強度のトレンド図を比較したものである。このタービン発電機は, 長期間の使用によって電機子巻線の劣化が認められたため, 全ての電機子巻線の巻替を実施しており, 巻替後は部分放電強度が小さくなっていることが確認できる。

5.3 異常の予兆を確認したときの処置

異常の予兆が確認された場合は, タービン発電機の停止

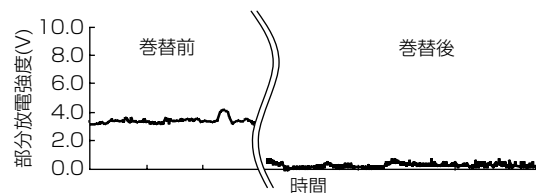


図6.トレンド図による巻替前後の部分放電強度の比較

時に, 電機子巻線端部の目視点検, エアギャップ部のロボット点検及び電気試験による絶縁診断の実施を推奨する。

6. む す び

マイクロストリップアンテナによるオンライン部分放電計測システムは, タービン発電機の運転中に発生する部分放電を広範囲かつ連続的に監視し, 異常の兆候を初期の段階で検出することを実現する。

小型・軽量のアンテナは, 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, 高電位部である電機子巻線から離れた場所に設置するため, 電機子巻線の主絶縁に悪影響を与えることはない。さらに, 信頼性の高い機器でシンプルなシステム構成を実現しており, 機器の保守・点検を容易に実施できるように配慮した。新設及び既設タービン発電機へのこのシステムの組み込みを推進し, タービン発電機の長期間にわたる安定運転を実現していく。

参 考 文 献

- (1) IEC TS 60034-27-2:2012 :Rotating electrical machines On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines (2012)
- (2) Muto, H., et al.: On-line PD monitoring system for rotating machines using narrow band detection of EM wave in GHz range, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (2008)
- (3) 岡田真一, ほか: 発電機コイルの絶縁模擬欠陥のPD電磁波特性, 電気学会全国大会講演論文集, No. 2, 83~84 (2012)
- (4) 兼田吉治, ほか: 回転電機の部分放電計測装置及び回転電機の絶縁診断方法, 特開2006-250772 (2006)
- (5) Hudon, C., et al.: Partial Discharge Signal Interpretation for Generator Diagnostics, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 12, No. 2, 297~319 (2005)
- (6) Sako, H., et al.: On-line PD Monitoring System with Microstrip Antenna for Synchronous Generators, CIGRE SC A1 Rotating Electrical Machines, A1-110 (2012)

可変速揚水発電システムによる電力安定供給と最新海外水力発電プロジェクト

西都一浩* 竹重 晋**
高見健太郎* 岸田和之**
難波輝晃**

Adjustable-speed Pumped Hydro Power Generation System for Electric Power Stable Supply, and Latest Overseas Projects of Water-power Generation
Kazuhiro Saito, Kentaro Takami, Teruaki Namba, Susumu Takeshige, Kazuyuki Kishida

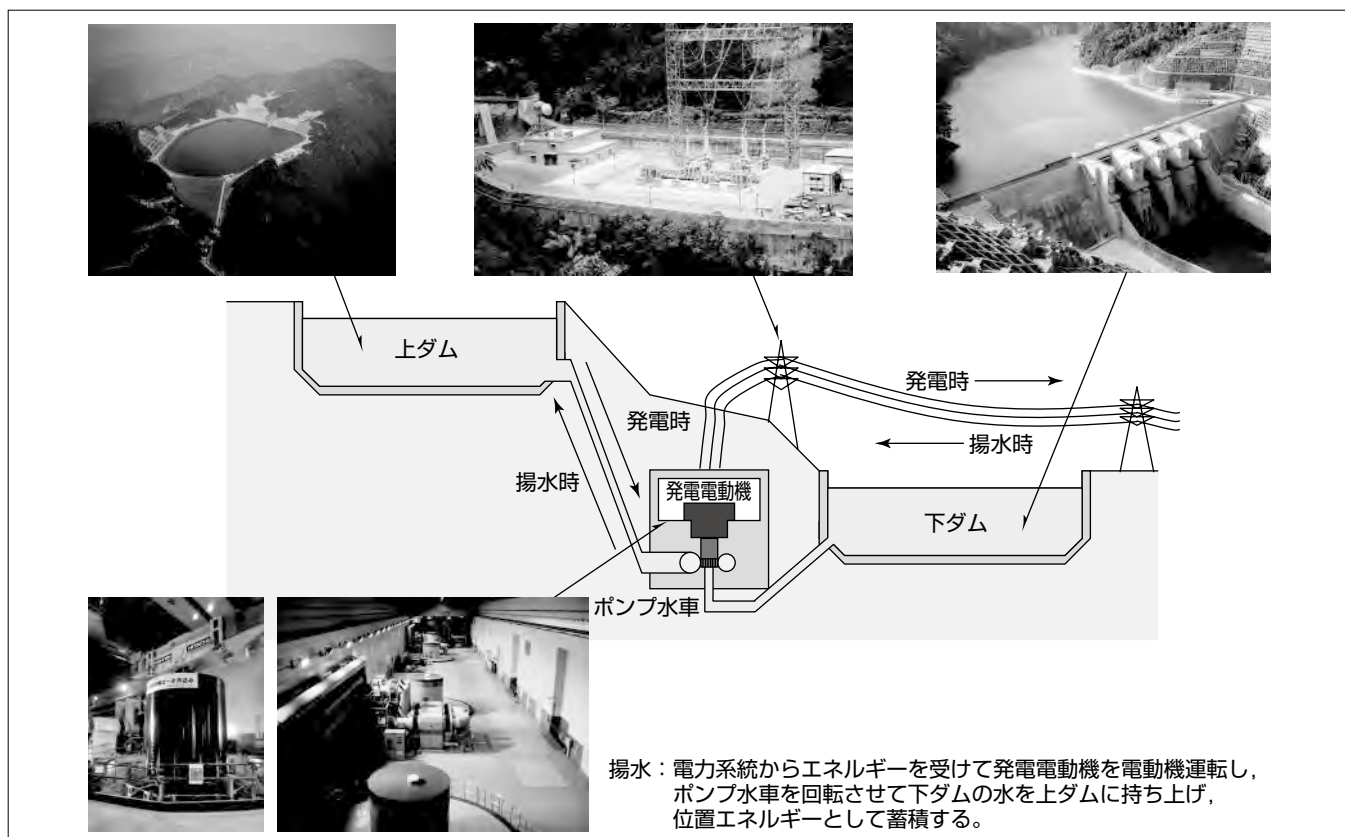
要 旨

近年の地球温暖化などの環境問題に対して、再生可能エネルギーの活用が見直されている。水力発電は水という再生可能エネルギーを効率良く電気に変換することができ、さらに、揚水発電システムでは、電力貯蔵システムとしてもこれまで一定の役割を果たしてきた。その中でも特に可変速揚水発電は、近年の風力発電や太陽光発電等の増加に対し、系統電圧維持及び系統周波数の変動抑制等、電力系統の安定化のために寄与できる発電システムとして注目されている。このため、国内外で可変速揚水発電所の新設や既設揚水発電所の可変速化が進められている。

三菱電機はこれまで1993年に北海道電力㈱高見発電所向けに1台、2010年、2011年に九州電力㈱小丸川発電所向け

に2台、2010年にスロベニアアウチェ発電所向けを1台、合計3発電所4台の可変速揚水発電システムを納入してきた。本稿では、高速大容量機である小丸川機及びアウチェ機の特長と運用状況について述べる。

また、一般水力としては数少ない最高有効落差約500m級の高落差、高回転速度機であるスリランカアップーコトマレ発電所が2012年に営業運転を開始し、スリランカの電力安定供給に大きく貢献している。同発電所の概要と制御システムとして特長的な系統周波数変動調整制御及び水位偏差監視に基づく水位調整制御等、多様な自動運転機能についても併せて述べる。



九州電力㈱小丸川発電所の可変速揚水発電システム

高速大容量可変速機として、運転実績2年以上を経過した小丸川発電所の主要構成を示す。励磁装置によって系統周波数の変動を瞬時に抑制するよう入出力を調整しており、系統電圧維持及び系統周波数の変動抑制等、電力系統の安定化のために貢献している。

1. ま え が き

2011年10月、三菱電機、三菱重工業㈱、日立製作所の水力事業分野の三社合併によって、日立三菱水力㈱が発足し、それぞれが培ってきた水力発電システムの技術を共有することで、シナジー効果を発揮することが期待されている。

本稿では、三菱電機が納入し、日立三菱水力㈱が継承した水力発電事業で、系統電圧維持及び系統周波数の変動抑制等の電力系統の安定に貢献している可変速揚水発電システムとして九州電力㈱小丸川発電所、及びスロベニアアウチェ発電所の特長と運用状況について述べる。また、2012年に営業運転を開始し、スリランカの電力安定供給に大きく貢献しているアップパーコトマレ発電所について、そのプラント概要などについて述べる。

2. 可変速揚水発電システムによる電力安定供給

2.1 可変速揚水発電システムの納入実績

2013年現在運用中の可変速揚水発電システムは、全世界で9発電所／14台あり、三菱電機と日立製作所を合わせると、過半数の納入実績を持つ。表1に納入実績を示す。特に2010年にはスロベニアアウチェ発電所の運転を開始し、国内メーカーとして初の海外納入実績を持つ。

2.2 小丸川機とアウチェ機の特長と運転実績

従来の可変速揚水発電システムに比べ、小丸川機とアウチェ機では回転速度を高速化し、発電電動機の体格を縮小して経済性を向上させるとともに、大容量GCT (Gate Commutated Turn-Off) サイリスタを使用した小型・低損失な励磁装置を適用した。

2.2.1 特 長

可変速発電電動機の回転子には、一般揚水機の回転子と異なり、固定子と同様の三相巻線を適用するが、回転速度の二乗に比例して遠心力が働くため、高速になるほどコイルエンド部の強度確保が困難となる。従来、最高回転速度は 429min^{-1} であったが、小丸川機とアウチェ機は回転速度 600min^{-1} の世界最高速級の可変速発電電動機であり、バインド線による回転子コイルエンド支持構造を更に高速機向けに改良し、高速機向けのコイルエンド支持の技術を確立した(図1、図2)。

表1. 可変速揚水発電システム納入実績

発電所 実績	北海道電力 高見#2	関西電力 大河内#3, 4	九州電力 小丸川#1, 4	九州電力 小丸川#2, 3	スロベニア アウチェ
運開年	1993	1995/1993	2010/2007	2011/2009	2010
発電容量(MVA)	105	395	319	345	195
モータ容量(MW)	140	388	330	330	180
回転速度(min^{-1})	231 ± 23	360 ± 30	600 ± 24	600 ± 24	$576 \sim 626$
発電機メーカー	三菱電機	日立製作所	日立製作所	三菱電機	三菱電機
水車メーカー	三菱重工	日立製作所	日立製作所	三菱重工	三菱重工

2.2.2 運 転 実 績

小丸川機とアウチェ機は運転実績2年以上を経過し、高速大容量可変速機として安定した運転を継続している(表2)。

2.3 可変速揚水発電システムによる電力安定供給

これまでの揚水発電所は、揚水運転時の電動機出力は負荷であるポンプ特性から揚程に応じた一定出力(速度一定のため調整不可)となるが、可変速機では、任意の回転速度で運転可能であることから、揚水入力調整による電動機の出力変化に伴い、回転速度も安定して変化し、運転を継続する。図3は小丸川機の揚水運転トレンドデータを示しており、揚水入力の変化に追従して、回転速度が変化している。加えて、可変速機では揚水運転時の入力調整が可能となったことから、従来の揚水機では不可であった揚水時のガバナフリー機能を励磁制御による高速ガバナフリー運転として実現しており系統周波数変動の抑制に大きく貢献している。

図4に小丸川発電所の揚水運転時における中給指令値、実揚水入力及び系統周波数をプロットしたグラフを示す。系統周波数変動が $60\text{Hz} \pm 0.1\text{Hz}$ 以内に抑制されていることが分かる。

なお、欧州では、日本国内に比べ再生可能エネルギー(風力発電、太陽光発電等)の導入が進んでおり、アウチェ機については特に欧州域内の系統の安定化に対し大きく貢献していると客先から高い評価を得ている。

3. スリランカアップパーコトマレ発電所

3.1 プロジェクトの概要

アップパーコトマレ発電所は標高700mに位置しており、最高有効落差約500mを利用して発電を行っている。このプロジェクトは、三菱電機を主契約者としてターンキーで

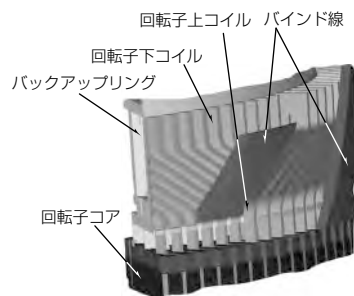


図1. 回転子コイルエンド支持構造
(バインド線方式)



図2. 回転子

表2. 小丸川機、アウチェ機の運転実績
(2013年3月末時点)

発電所 実績	小丸川#2	小丸川#3	アウチェ
発電運転時間(hr)	約640	約1,000	約4,000
揚水運転時間(hr)	約520	約830	約4,500
発電運転回数(回)	約270	約460	約1,000
揚水運転回数(回)	約230	約430	約1,000

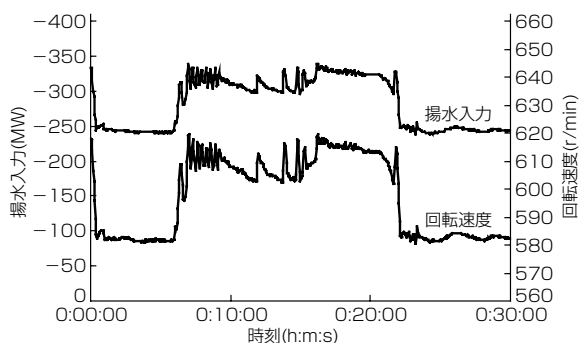


図3. 揚水入力調整と回転速度の変化

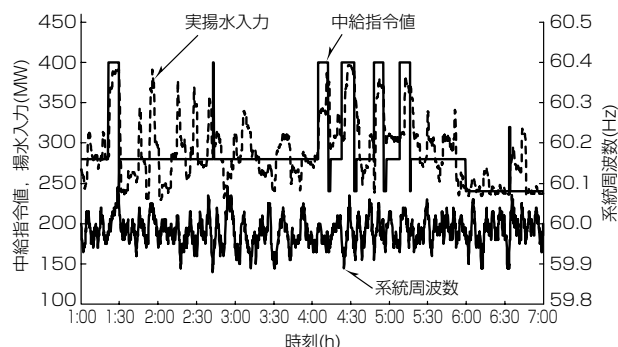


図4. 揚水入力調整による系統周波数の変動抑制

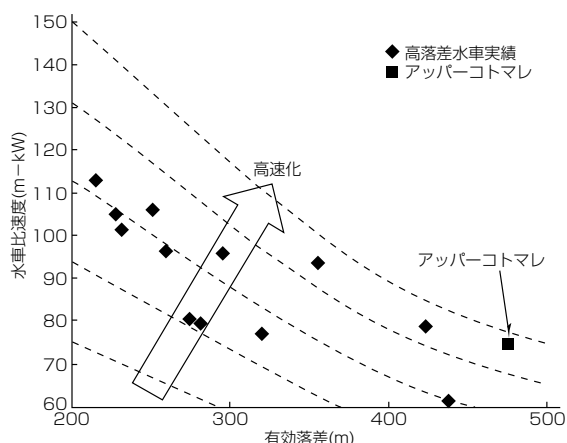


図7. 高落差フランシス水車の納入実績



図8. 2号機ランナ吊(つ)り込み



図5. 配電盤室

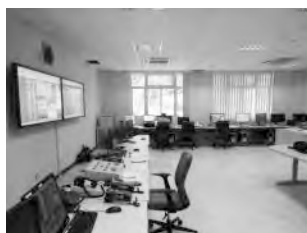


図6. 中央制御室

- (1) 水車型式 : 立軸フランシス水車
- (2) 有効落差 : 487.31m (最高)
- (3) 水車出力 : 77,000kW
- (4) 回転速度 : 600min^{-1}
- (5) 入口弁型式 : 球型弁(ロータリー弁)

600min^{-1} という高回転速度機であり、流量も比較的小さいことから、機器サイズは非常にコンパクトである。高落差に耐え得る機器の強度を確保しつつ、機器の設計では各部品の干渉チェックを行い、限られたスペースの中で必要なメンテナンススペースを最大限確保できるよう配慮した。また、発電所自体のスペースもコンパクトであり、限られたスペースに給水ポンプ、圧油装置、圧縮空気装置、潤滑油装置等の必要な機器を配置するため、機器の最適配置、及び配管の取り回しを決定した。

水車関連の現地据付け工事は2010年1月のドラフトチューブ据付けから始まり、現地での厳しい環境のもと約3年に及ぶ現地据付け(図8)、試験を経て2012年7月に1台目、2012年9月に2台目の引渡し完了した。

3.3 監視制御システム

アッパーコトマレ発電所では、中央給電指令所との通信、距離の離れた発電所と変電所双方での監視制御、ダム水位一定運転等、高度なプラント制御を実現するため、国内及び海外で実績のある三菱電機監視制御システム“MEL HOPE530シリーズ”を適用している。次に監視制御システムの主要諸元と特長、及び、図9にシステム構成を示す。

受注している。三菱電機の供給した主要設備を次に示す。

- (1) 主機2台：水車77MW、発電機88MVA
- (2) 主変圧器2基
- (3) 発電所監視制御システム一式
- (4) GIS(Gas Insulated Switchgear)他変電所、開閉所設備
- (5) ダム電源設備
- (6) 各種通信設備

アッパーコトマレ発電所の出力150MWは、スリランカ国内のピーク時全発電電力2,000MWの約7%に相当し、年間409GWhの電力の提供を行う。また、系統周波数変動調整制御及び水位偏差監視に基づく水位調整制御等、多様な自動運転機能を持っている。これらの監視制御場所は、図5の配電盤室、図6の中央制御室及び主幹電力系統との接続点であるコトマレ変電所に分散配置されている。

3.2 水車

アッパーコトマレ発電所の水車は、一般水力としては数少ない500m級の高落差、高回転速度機であり、図7に示すとおり三菱電機的全納入実績でも一般水力向けフランシス水車として最高落差機となる。水車の主要諸元を次に示す。

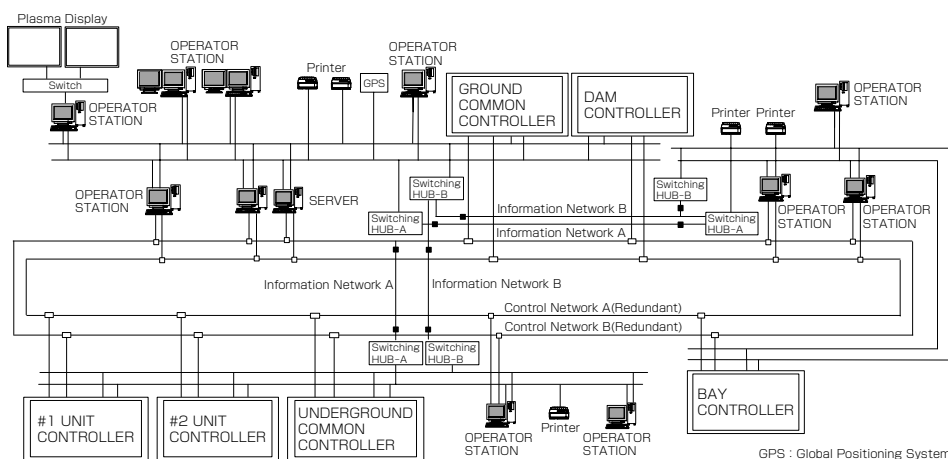


図9. 監視制御システムの構成

- (1) 制御装置台数 : CPU二重化×6セット
- (2) OPS台数 : 8台、内2台はDual monitor
- (3) サーバ台数 : 2台
- (4) グラフィックパネル : 6台
- (5) 制御ネットワーク : 1 Gbps, 光二重リング(RPR: Resilient Packet Ring)方式
- (6) 情報LAN : 1 Gbps, 二重化Ethernet^(注1)
LAN

次にこの監視制御システムの特長を述べる。

(1) 高速な制御ネットワークと長距離伝送

従来は100Mbpsであった制御ネットワークに対し、伝送速度1 Gbpsの二重化光リング方式を採用し、最大の伝送速度と高い信頼性を確保している。このシステムは約17km離れた発電所と変電所間を光ケーブルで接続することで、双方のOPS(OPERATOR Station)による遠隔監視を可能としている。

(2) 機器ごとの制御権選択機能

従来は操作場所単位での選択であった制御権をOPS単位で機器ごとに選択可能としている。例えば、ポンプAの操作権を取得中のOPSは操作可能だが、他のOPSからは監視だけ可能で操作不可となるインターロック機能を備えている。

(3) イベント検出機能

最小20ms幅でのデジタル入力検出機能を備え、リレーの瞬時動作も確実にイベントとして記録可能。また、オペレーションのシーケンスオブイベント機能では、1ms分解能でのイベント記録を可能としている。

(4) 長期トレンド、イベント記録機能

従来は1秒周期で48時間までであったトレンドデータ保存期間を1秒周期で365日分を可能とした。同じく、従来は1万件までであったイベント記録機能を最大100万件に拡張している。どちらのデータもCSV(Comma Separated Value)形式での自動保存と再読み出し機能を実現している。

(5) 多彩な監視機能

標準的な警報、系統図監視機能に加え、通常は揚水機だ

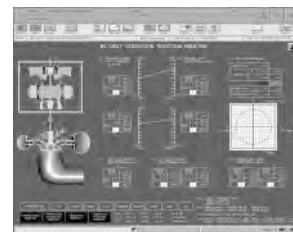


図10. 軸振動監視の画面例

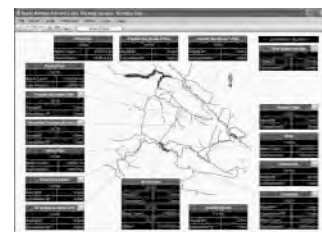


図11. 流入量予測機能の画面例

けに備えられる主給水温度に比例した温度監視、プラント運転状態に応じた可変制限値による温度監視と振動監視、モダル円による軸振動監視機能を監視制御システムの一部として備えている(図10)。

(6) 各制御装置盤にタッチパネルモニタ装備

各制御装置盤にはタッチパネルモニタを装備することでOPSと同等の監視・制御を可能としている。

(7) 国際標準言語、通信プロトコルのサポート

制御装置のプログラミング言語には国際標準であるIEC 61131-3を完全サポートし、通信規格としてはOPC(Object Linking and embedding for Process Control)とIEC 60870-5をサポートしている。

(注1) Ethernetは、富士ゼロックス㈱の登録商標である。

3.4 付帯設備：流入量予測機能

アッパーコトマレ発電所では、4mの水位幅で発電を行う必要があり、また、限られた水量を有効に使うため、ダムへの流入量に応じたきめ細かな発電が要求される。このシステムでは流域内5箇所の雨量局、2箇所の河川水位局から70MHz帯域のテレメータを用いて雨量、水位を定期的に収集し、過去の雨量、水位の実績からダムへの流入量を予測する流入量予測システムを構築している。

図11に流入量予測機能の画面例を示す。

4. む す び

可変速揚水発電システムは、国内外での導入が加速され、市場拡大が見込まれている。今後は定期的な点検などを通じて回転子の信頼性を確保するとともに、高速大容量可変速揚水発電システムの保守技術を蓄積していく。また、安定した電力供給のために、水力発電監視制御システムの重要性も高まっている。三菱電機は、日立三菱水力㈱と協力し、これまでのプロジェクトで得られた経験を活かし、今後とも水力発電分野における電力安定供給に貢献していく所存である。

重要施設の外周セキュリティ強化に向けた侵入監視システム“MELSIGHT”

水谷晴之*
藤原 潤*

Perimeter Intrusion Detection System "MELSIGHT" for Critical Infrastructures

Haruyuki Mizutani, Jun Fujiwara

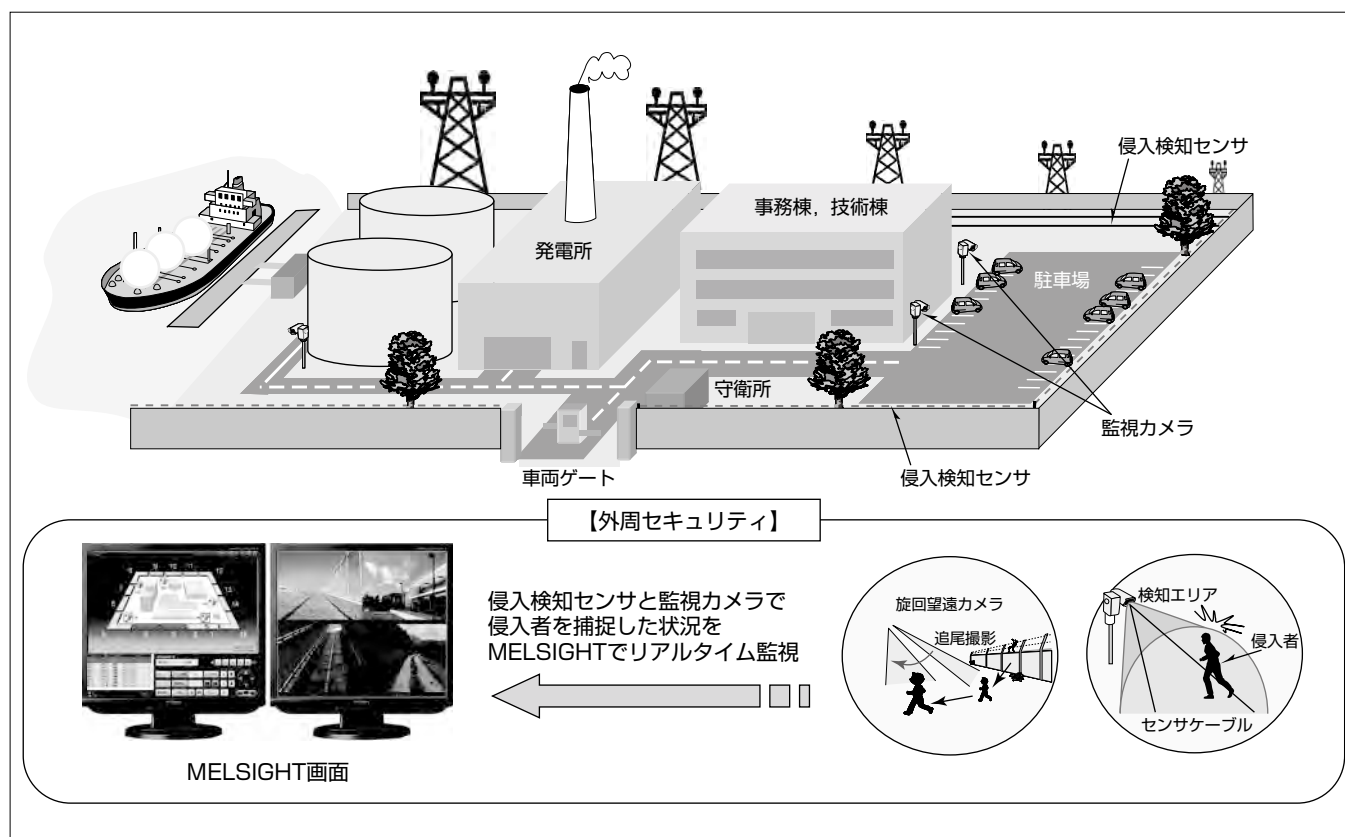
要 旨

電力需給が逼迫(ひっばく)する中、電力安定供給の要となる発電所、変電所などの重要施設で、外周からの侵入に対するセキュリティ(以下“外周セキュリティ”という。)の強化が推進されている。

外周セキュリティに欠かせない侵入監視システムは、様々な外周環境に対応して、各種の機器(侵入検知センサ、監視カメラ)でシステムを構築することとなり、システム構成・ユーザーインターフェースが複雑となる。

三菱電機は発電設備、上下水道設備などの社会インフラ設備向けの侵入監視システムで培った侵入検知技術、監視業務ノウハウに基づく監視業務の確実性・円滑化を図り、ユーザービリティを高めたシステムとして侵入監視システム“MELSIGHT”を開発した。

“MELSIGHT”は、外周セキュリティとシステム要件(当社の狙い)、柔軟なシステム構築、及び実システム適用時のコスト低減も視野に入れて開発した。



侵入監視システム“MELSIGHT”

侵入監視システムMELSIGHTは、各種カメラの映像、検知センサの信号を入力し、検知マップとライブ映像の2画面に侵入検知状態を表示する監視システムである。また、威嚇装置などを接続することによって侵入抑止を促すための警告を発することもできる。

1. ま え が き

東日本大震災などの震災での原子力発電所への被害を契機に原子力発電所の安全対策強化に向けた法改正で不審者による不正侵入に備えた外周セキュリティ強化が推進されている。

また、各地の原子力発電所の停止によって火力発電への電力需要上昇に伴い、燃料費の高騰による電力会社の採算が悪化する中、電力の安定供給に重要な拠点である変電所（特に、500kVの一次変電所）で、遠隔監視による無人化での合理化が推進され、それに伴う外周セキュリティ強化も計画されている。

本稿では、電力会社などの重要施設向け外周セキュリティで、当社がこれまで培ってきたノウハウを基に開発した侵入監視システム“MELSIGHT”について述べる。

2. 外周セキュリティとシステム要件

2.1 外周セキュリティ

原子力発電所などの重要施設は、不審者による妨害・混乱を目的とした破壊攻撃のため侵入を受けた場合、その施設だけでなく広範囲な地域にまで甚大な被害を及ぼすおそれがある。このような危険から守るため、常に外部からの侵入を監視する外周セキュリティが必要である。

外周セキュリティは、侵入監視システム（“侵入検知センサ”“監視カメラ”“ユーザーインターフェース”で構成）を用い、“侵入センサ”で侵入者を検知し、“監視カメラ”によって侵入者の捕捉・監視・記録を行い、“ユーザーインターフェース”で施設管理者に通報することによって、侵入者の早期把握と対策を可能とするものである（図1）。

2.2 顧客ニーズに基づくシステム要件(当社の狙い)

侵入監視システムでは“ユーザーインターフェース”の仕様が監視業務の確実性と円滑化に大きく影響する。“ユーザーインターフェース”を侵入監視システムの開発ターゲットとし、侵入監視に対する顧客ニーズである“使い勝手”を考慮したシステム要件を抽出した。次にシステム要件ごとの対応策を述べる。

(1) 侵入箇所の迅速かつ確実な視認

画面に侵入検知状態を色替えて表示し、迅速かつ確実に侵入箇所を視認できるようにする。

また、確認行為まで色替え状態を保持して視認漏れを防止する。

(2) 侵入者の多角的な映像記録

侵入検知センサの検知に複数の監視カメラを連動させて侵入者を多方面から詳細に監視し、記録する。

(3) 施設の重要度、環境に応じた警戒

複数ベンダーの侵入検知センサに対応するとともに、重要度の高い場所は複数の侵入検知センサを設置して警戒する。

(4) 簡単な監視カメラ操作

アイコン表示などで視認性の向上を図り、直観的で簡単なマウス操作による監視カメラ操作を実現する。

(5) 履歴データの迅速な検索

時刻、検知エリアなどの検索キーを基に履歴データを素早く抽出する。

(6) 運用に応じた警戒の自動設定

曜日、時間帯などをスケジュール登録することで、人の出入りがあるゲートなどでの警戒を自動ON/OFFさせる。

3. 侵入監視システムMELSIGHT

これまで施設外周の侵入監視を目的とした製品は少なく、システムごとに個別に設計・製作を行っていた。

近年の重要施設への外周セキュリティの強化の流れを受け、2.2節で抽出したシステム要件に基づくシステム仕様の共通化・汎用化を実現した侵入監視システムMELSIGHTを開発した。

3.1 MELSIGHTの特長

3.1.1 画面の色替えと状態遷移(システム要件(1)対応)

施設を示すマップに侵入検知センサで検知するエリア（検知ブロック）と監視カメラのアイコンを配置した画面を表示する。検知ブロックごとに“侵入なし”“侵入あり（検知中）”“侵入あり（通過後）”の色替え表示を行うことで、瞬時に侵入箇所とその状態の把握を可能とした。

また、警報鳴動による注意喚起、確認ボタンの押下まで色替え状態を保持することで視認漏れ（＝人間系のミス）の防止を図っている（図2）。

3.1.2 複数の監視カメラ連動(システム要件(2)対応)

検知ブロックごとに最大10台までの監視カメラを割り当

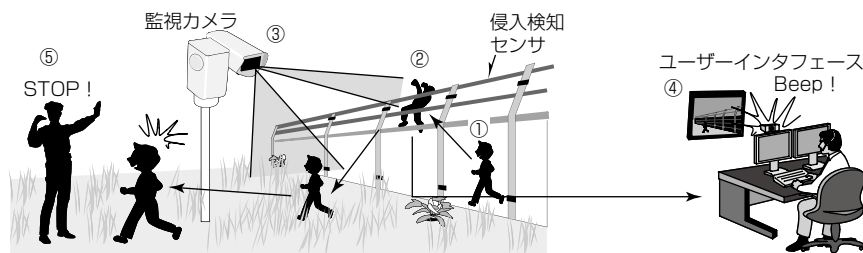


図1. 侵入監視システムの侵入検知動作

<侵入監視の運用フロー>

- ①不審者が敷地内に侵入
- ↓
- ②不審者の侵入を侵入検知センサで検知
- ↓
- ③監視カメラで侵入検知エリアを撮影
- ↓
- ④不審者の侵入を通知
- ↓
- ⑤警備員が侵入者の確認・威嚇

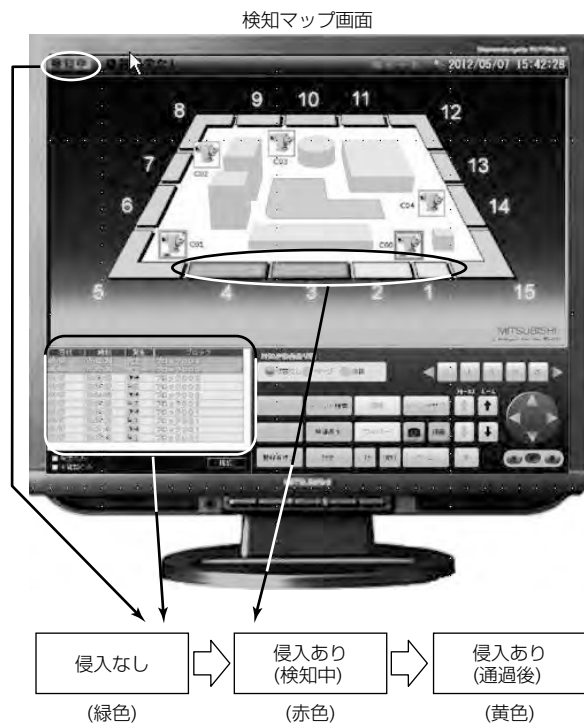


図2. 検知ブロックの色替えと状態遷移

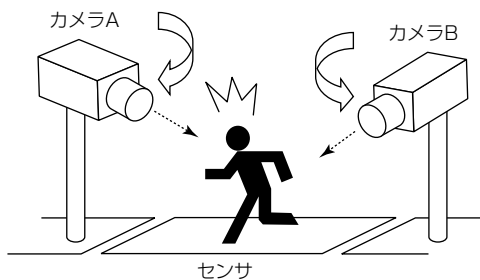


図3. 複数の監視カメラでの映像

て、侵入検知時に該当の旋回式監視カメラをあらかじめ登録した視野制御(左右(パン)・上下(チルト)・拡大(ズーム))で、複数の監視カメラによる侵入者の正確な視認・把握を可能とした(図3)。

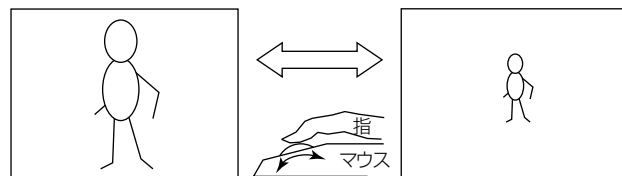
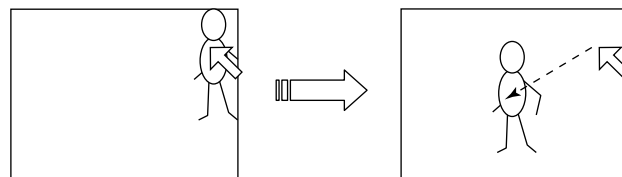
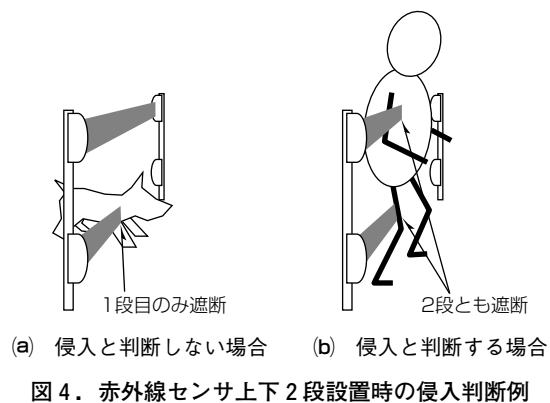
3.1.3 複数の侵入検知センサ対応(システム要件(3)対応)

当社の広域侵入検知センサ“MELWATCH”や他社装置との接続ができ、柔軟な警戒ラインの構築を可能とした。

また、複数の侵入検知センサを組み合わせ各センサの侵入検知状態をAND/OR条件で判断させ、運用に合わせた警戒パターンの設定も可能とした。例えば、敷地周辺に野生動物が多く生息するような環境に赤外線センサを上下2段設置した場合、1段目だけの赤外線ビーム遮断は野生動物などの行動によるものとして侵入と判断せず、上下2段同時に赤外線ビームが遮断された場合だけ背丈のある動物(人間)の侵入と判断する(図4)。

3.1.4 監視カメラのクイック制御(システム要件(4)対応)

監視カメラ画像を表示した画面上のマウスでクリックした場所が画面の中央となるように監視カメラを視野制御し



たり(図5)、マウスホイールの前後操作でズーム制御したりする(図6)ことで監視カメラの迅速かつ直観的な操作を可能とした。

3.1.5 インデックス検索(システム要件(5)対応)

期間、時刻、種別(侵入発生、復帰、リセット)等のインデックスをキーにした履歴データの迅速な検索を可能とした。

3.1.6 警戒スケジュールの設定(システム要件(6)対応)

期間、曜日、特定日、時間帯等でのスケジュール条件を検知ブロックごとに指定でき、業務形態に応じた警戒スケジュールの設定を可能とした。

3.2 MELSIGHTのシステム構成と機能

MELSIGHTは映像サーバ、監視端末、大画面表示装置の3種類のハードウェアをパソコンで構成し、監視業務に必要な機能をソフトウェアで実現した(図7)。

次にMELSIGHTの機能要素ごとの機能を述べる。

3.2.1 映像サーバの機能

(1) 映像蓄積・配信

監視カメラ映像を常時録画・蓄積し、監視端末、大画面表示装置へ映像を配信する。

(2) カメラ監視

ネットワーク障害、監視カメラ故障などによって監視カメラからの映像データ受信が停止した場合、監視カメラ異常と判断し監視端末へ通知する。

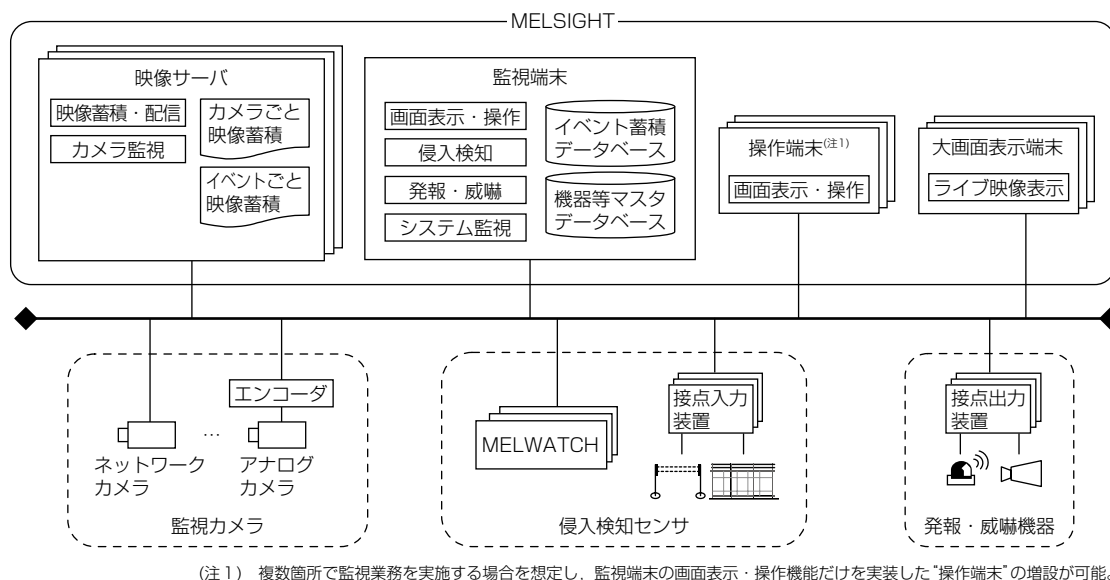


図 7. MELSIGHTのシステム構成と機能配置

3. 2. 2 監視端末の機能

(1) 画面表示・操作

“検知マップ”と“ライブ映像”の2画面を表示し、侵入検知状態を通知する。

また、監視カメラの操作、監視カメラ映像などの過去データの検索、警戒スケジュール設定などの監視業務に必要な操作・設定機能を持つ。

(2) 侵入検知

当社広域侵入検知センサMELWATCH、他社侵入検知センサの侵入検知状態を取得し、画面表示内容を更新する。

(3) 発報・威嚇

仕様に応じて、接点出力装置を介して警告灯点灯、音声出力によって、侵入者を威嚇する。

(4) システム監視

- ①映像サーバ(接続先の監視カメラの状態含む)、大画面表示装置、侵入検知センサ、発報・威嚇機器の状態(正常・異常)を監視し、システムに生じた障害を自動通知して迅速な障害復旧を支援する。
- ②プログラムが異常終了した際に自動で再起動させ、監視業務の継続性を維持する。

3. 2. 3 大画面表示端末の機能

監視端末で表示する“ライブ映像”画面だけをモニタ表示するものであり、対象のモニタを大画面で表示し複数人でライブ映像を共有する。

なお、表示内容は監視端末の“ライブ映像”画面の内容との連動も可能である。

4. む す び

重要施設における外周セキュリティ強化に伴い、侵入監視業務の負荷軽減、侵入者の確実な検知と迅速な対応等、侵入監視システムの必要性が高まっている。

今後は警備会社、セキュリティ関係のシステム・インテグレータなどへの展開も検討していく。

また、侵入検知状態に加え、設備・機器の状態を取り込み、外周セキュリティだけでなく設備監視を含めた複合的な監視システムとしてMELSIGHTを適用することで広範囲な市場への展開、良質なソリューションを提供していく所存である。

最新の粒子線治療装置

大谷利宏*
 鳥羽 順*

Latest Particle Beam Treatment Systems

Toshihiro Otani, Jun Toba

要 旨

近年の急激ながん患者の増加に伴い、患者への身体的負担が少なく、社会復帰が容易でQOL (Quality of Life) に優れている粒子線治療への期待が高まっている。粒子線治療は、従来のX線を用いた放射線治療に比べて線量の集中性に優れ、患部形状に合わせた照射が可能ことから、国内、国外での導入が進んでいる。三菱電機は次世代粒子線治療に対応した最新照射技術として次の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照射
- ③患部に最適な照射法を提供するユニバーサルノズル

これら最新照射技術を実用化するため、社内に自社検証設備を設置した。

当社が提供する粒子線治療装置は炭素線タイプと陽子線タイプがある。炭素線タイプの最新機は2013年治療を開始した九州国際重粒子線がん治療センター向け重粒子線治療装置である。この装置は“普及小型重粒子線治療装置”の初の民間向け普及機であり、既設装置の経験を生かして加速器システムの高性能化、運転の省人化、デザインの改善などを図っている。

陽子線タイプは、都市部の狭い敷地への導入要望に対応するため敷地面積の小型化を図った。小型化にもかかわらず、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、自在なノンコプラナ照射が可能である。



粒子線治療装置

粒子線治療装置は、粒子線の線量集中性を生かしてがん患部に放射線投与を行う。

(上段) 九州国際重粒子線がん治療センター重粒子線治療装置 (左) 炭素線シンクロトロン (右) 治療室
 (下段) 陽子線治療装置自社検証設備 (左) 陽子線シンクロトロン (右) 治療室を模擬したショールームが併設されている。

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⁽¹⁾。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に優れていることから今後の更なる普及が期待されている。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て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、国内外での導入が進んでいる。国内の粒子線治療施設だけでも11施設を数える⁽²⁾。当社は11施設のうち、8施設の建設に参画し装置を納入している。

粒子線治療装置は普及が進んでいるものの、今後も研究開発による更なる進化が求められている。本稿では、粒子線治療装置における当社の技術開発動向について述べる。

2. 粒子線治療装置の最新技術

粒子線治療装置は、炭素線を用いるタイプと陽子線を用いるタイプの2種類が普及している。炭素線(重イオン線とも呼ばれる。)は炭素イオン、陽子線は水素イオンを加速し、患部に照射する。炭素線、陽子線とも、物理的に体内で吸収される線量の分布特性に特徴を持ち、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、ガンマ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、炭素線、陽子線は体表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できる。

当社では粒子線のこの特性を踏まえ、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照射
- ③患部に最適な照射法を提供するユニバーサルノズル

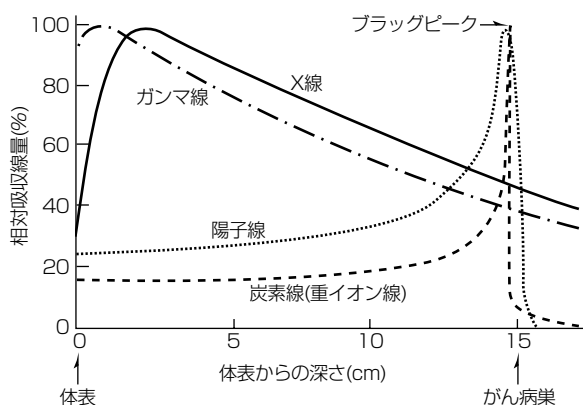


図1. 各種放射線の線量分布特性

2.1 高線量率照射

先に述べたように粒子線はその良好な線量集中性を利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数ミリ単位で位置決めされる。そのため、患者は治療台と呼ばれるベッドの上に固定具を使用して拘束され、数分の間、身動きができない状態となる。このことは患者、特に高齢者や小児にとっては苦痛となる。そこで、できるだけ粒子線の線量率を向上させて、一度の照射での照射時間を短縮し、患者の身体的及び精神的負担を軽減することが求められている。

当社はこの課題を解決するために照射方法の改善を図った。最新型の装置ではユニフォームスキャンングと呼ばれる照射方法を採用した。ユニフォームスキャンングでは、比較的細く絞ったビームを走査し、照射野を均一に塗りつぶす方法である。この方法は従来の単円ワブラー法や二重散乱体法と呼ばれる方法に比べて、中性子となって損失する粒子線量が少ない。そのため線量率が向上する。

当社の従来タイプ装置は単円ワブラー法と呼ばれる照射法を用いていた。図2に示すように、単円ワブラー法に比べてユニフォームスキャンングは所定の照射野に線量を集中できる特長がある。線量率は従来の3倍以上の15~20Gy/分を得ることができる。これによって照射時間は最大で従来の4分の1に短縮することができる。また中性子の発生を少なくすることができる。

2.2 高精度スキャンング照射

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ペンシルビームスキャンング法(以下“スキャンング法”という。)である。従来照射法(単円ワブラー法、ユニフォームスキャンングを含む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、その拡大ビームによって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、スキャンング法は、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に分割され、分割ごとに患部を塗りつぶしていく(図3)。

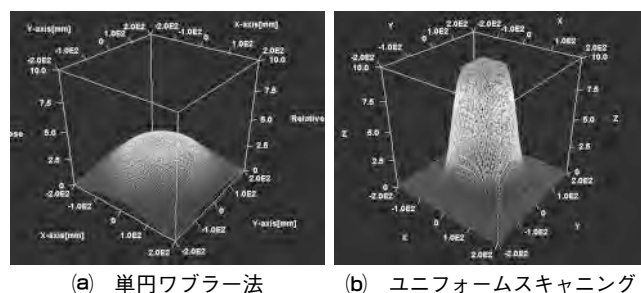


図2. 線量集中性の比較

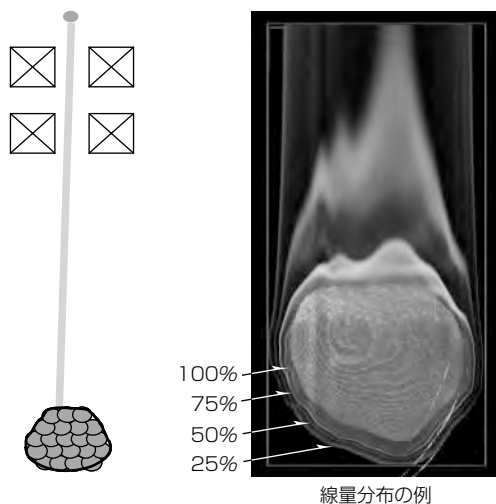


図 3. スキャニング照射

スキャニング法を適用することによって、ブロードビーム法に比べて患部に合わせて線量分布を最適化できるので粒子線の特長である良好な線量集中性をより高めることができる。

このように、患部を分割領域単位で塗りつぶすことができるのがスキャニング法の特長である。そして、この分割領域のサイズをなるべく小さくした方が、より精密に患部形状を塗りつぶすことができ、患部周囲の重要臓器など正常細胞への被ばくが抑えられることは自明である。

当社はビームサイズ拡大を抑えるために加速器及び照射系の物理設計、装置の工夫を行った。ビームのスポットサイズは、後述するユニバーサルノズルの場合で従来の2分の1の約5mmとした。また、スキャニング専用装置の場合、約3mmまで高精細にすることが可能である。

また、ビームの走査速度を従来機の約5倍である100mm/msとした。これによって患者の呼吸位相に同期してビームを照射する方法である呼吸同期照射の際の線量集中性を従来機に比べて飛躍的に高めることができる。

2.3 ユニバーサルノズル

当社の粒子線治療装置は、2.1節で述べた高線量率照射（ブロードビーム照射及び積層原体照射）と2.2節で述べた高精度スキャニング照射のレパートリーを持つ。この複数の照射方法を一つの照射ノズルで実現可能とするのがユニバーサルノズルである（図4）。当社のユニバーサルノズルは単一のノズルの内部で自動で装置構成が切り替わることによって、ブロードビームとスキャニングをシームレスに切り替えることができる。医療スタッフが重量物を脱着するなどの手間は不要であり、症例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スキャニングを適用し、高線量率を活用して短時間で照射したい部位や呼吸同期照射が必要な部位にはブロードビームを用いることによって、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。

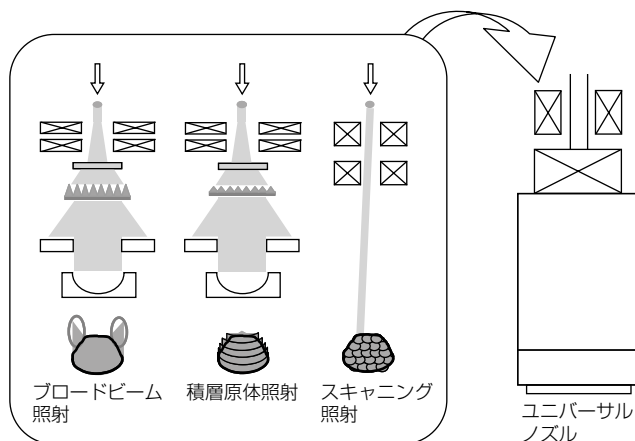


図 4. ユニバーサルノズル



図 5. 新型シンクロトン加速器



図 6. 検証用ビームライン

2.4 自社検証設備

最新技術を実用化するにあたり、新機能の品質の評価・検証を実施する目的で、社内に自社検証設備を建設した。装置は陽子線タイプである。専用建屋に陽子線を発生する加速器と検証用ビームラインを設置した（図5、図6）。この装置を用いてビーム試験を実施し、新機能の検証を行う。粒子線治療装置は装置規模が大きいため、一般的には実用化前に装置性能に関する事前検証ができない例が多い。また、その場合の薬事承認申請は、納入機の完成後に必要なデータを取得することになる。そのため、ユーザーの治療開始が大幅に遅延することになり、ユーザーに機会損失を強いる問題がある。当社はこの検証設備を用いて薬事承認に必要なデータ取得を実施し、ユーザーに引き渡す前に薬事承認を取得することでユーザーの早期治療開始と費用回収に貢献する。

3. 粒子線治療装置のタイプ

現在普及している粒子線治療装置は、炭素イオンを用いる炭素線タイプと水素イオンを用いる陽子線タイプ、両方のイオンが可能なデュアルタイプに大別できる。ここでは、炭素線タイプと陽子線タイプについて、当社の最新の取組みについて述べる。

3.1 炭素線タイプ

当社が受注した炭素線タイプの最新装置である九州国際



(a) 九州国際重粒子線がん治療センター



(b) シンクロトロン



(c) 治療室

公益財団法人 佐賀国際重粒子線がん治療財団提供

図7. 九州国際重粒子線がん治療センター

重粒子線がん治療センター(SAGA HIMAT)は、2013年に治療を開始した。炭素線治療が可能な施設としては国内で4か所目であるが、民間施設としては最初となる(図7)。

(独)放射線医学総合研究所主導で開発した普及小型重粒子線治療装置は、重粒子線治療を一般に広く普及させるために従来装置をよりコンパクトにしたものである。当社はその普及小型の実証機として群馬大学に重粒子線治療装置を納入した。九州国際重粒子線がん治療センターの重粒子線治療装置は、実証機で得た知見を反映して改善した初号機である。

装置は3治療室(うち、1室は将来設置予定)で構成し、どの治療室も2方向の照射ポートを持つ(水平と垂直ポートの治療室が2室、水平と45度ポートが1室)。装置の特長は次の3点である。

(1) 加速器システムの高性能化

将来実装予定のスキニング照射に対応するため、加速器システムの高性能化を図った。

(2) 治療装置としての改善(省人化)

従来加速器と照射装置にはそれぞれ運転員が必要であったが、制御システムの改善によって統合を図り、少ない人数での運転が可能となった。

(3) 人に優しいデザインの実現

治療室の照明・画像情報を工夫し、患者が少しでもリラッ



図8. 立体モデルのレイアウト

クスして治療を受けられるように、デザインを刷新した。また、医療スタッフが効率よく操作・運用できるように、ユニバーサルデザインを取り入れた表示画面・操作機を開発した。

3.2 陽子線タイプ

これまでは、複数の治療室を持つ大規模装置が導入されてきた。しかし最近では、都市部などの狭い敷地に設置するために、治療室が1室の装置にニーズが高まっている。当社では敷地の様々な制約に対応できるように、平面モデルと立体モデルの2種類を検討している。平面モデルは機器配置の最適化、遮蔽計算の高精度化による壁厚の見直しなどによって敷地スペースを削減した。立体モデル(図8)は、地下の掘削が容易な敷地であれば、加速器を地下に、治療室をその上階に配置することによって、当社従来モデルの70%に削減することができる。

機能的には、両モデルとも先に述べた高線量率照射、高精度スキニング照射、ユニバーサルノズルをサポートしており、最新の技術を備えている。また、装置自体を小さくしたにもかかわらず、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、自在なノンコプラナ照射が可能である。

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における技術開発動向について述べた。当社は粒子線治療の高度化要請に応えるために、照射法の技術開発に努める一方、粒子線装置の普及に向けて、装置の小型化・使いやすさの改善を進めている。加えて、医療機器の使命を鑑み、装置の信頼性・安全性が重要なことは言うまでもなく、継続的に改善を行う必要がある。今後とも、社会の要請に対応した粒子線治療装置を提供していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 厚生労働省：がん対策推進基本計画(2012)
http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/dl/gan_keikaku_02.pdf
- (2) 公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団：切らずに治す粒子線治療
http://www.antm.or.jp/05_treatment/04.html

核融合用大型超電導コイルの製作

野元一宏* 堀井弘幸*
 湊 恒明**
 長谷川 満***

Manufacturing of Large Superconducting Coils for Fusion Projects

Kazuhiro Nomoto, Tsuneaki Minato, Mitsuru Hasegawa, Hiroyuki Horii

要 旨

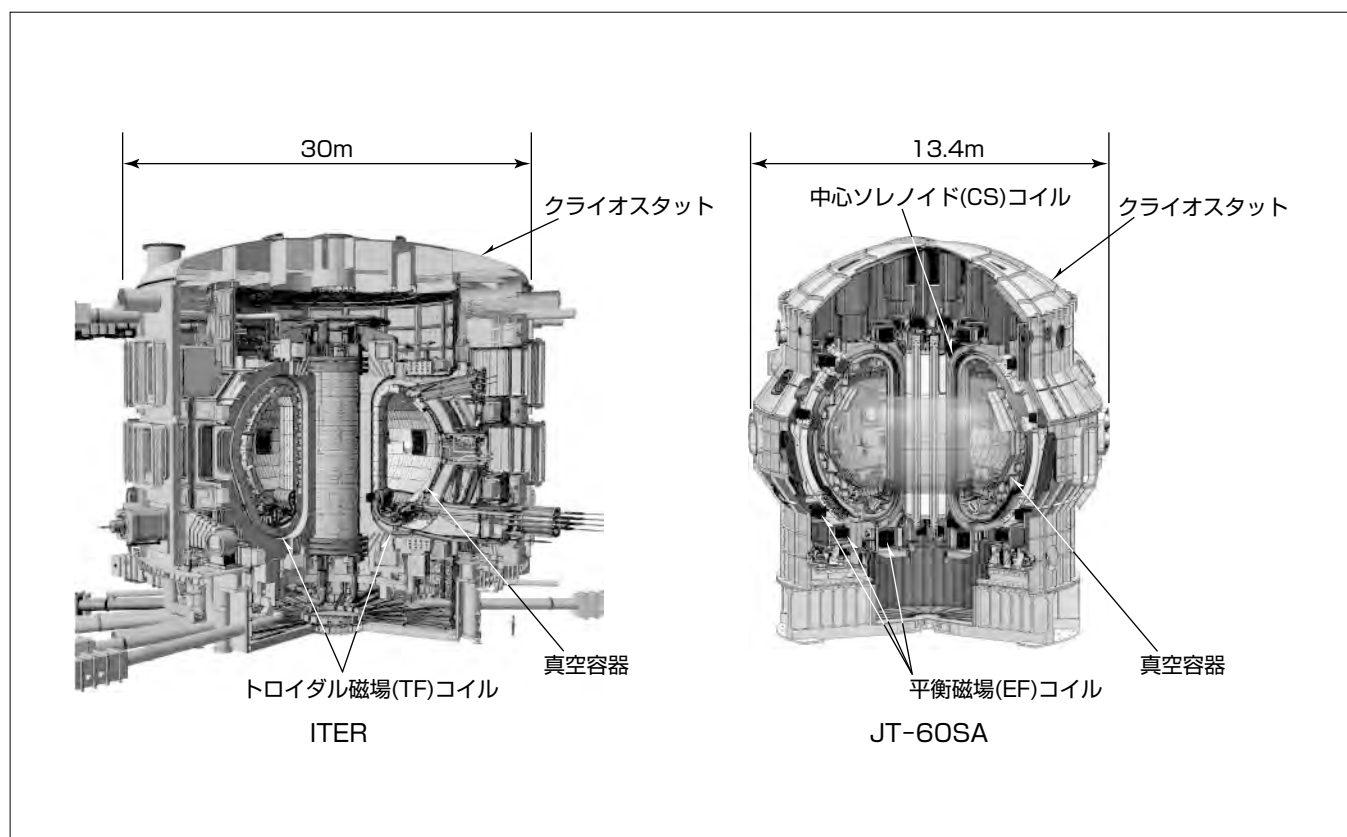
三菱電機は、核融合の科学技術的実証を目的とした国際熱核融合実験炉ITER(イーター)並びにITERの支援及び発電を実証する原型炉への補完研究を目的としたJT-60SA(JT-60 Super Advanced)の超電導コイルの製作に参画している。ITERは、日本・欧州連合(EU)・ロシア・米国・韓国・中国・インドの7極の国際協力で製作を進めており、フランスのカダラッシュに建設される。

JT-60SAは、日本・EUの国際協力で(独)日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所(以下“那珂研究所”という。)

のJT-60の真空容器やコイルなどの主要機器を入れ替えて建設される。

ITER及びJT-60SAの構成機器は各極で分担して製作され、当社は日本分担分であるITERのトロイダル磁場コイル(以下、“TFコイル”という。)及びJT-60SAの中心ソレノイドコイル(以下、“CSコイル”という。)・平衡磁場コイル(以下、“EFコイル”という。)の製作を行っている。

本稿では、各超電導コイルの製作概要、技術的課題と当社の取組みを述べる。



ITERとJT-60SAの鳥瞰(ちょうかん)図(提供：日本原子力研究開発機構)

主な装置構成は、プラズマ生成維持に必要な高真空を保つ真空容器、プラズマの生成維持に必要な磁場を発生する超電導コイル、真空容器を保護する真空容器内機器、プラズマを加熱する加熱系、超電導コイルを冷却維持するためのクライオスタットである。

1. ま え が き

当社が製作するITERのTFコイル及びJT-60SAのCSコイル・EFコイルの製作概要、技術的課題と当社の取組みについて述べる。

2. ITERへの取組み

2.1 TFコイル

TFコイルは、真空容器内に生成したプラズマを磁場で閉じ込める役割を持つ。ITERのTFコイルは18個あり、日本とEUで分担して製作する。

TFコイルの構造を図1に示す。高さ14m、幅9m、質量300tのD型の超電導コイルである。

TFコイルのコイルケース内には超電導導体を2層のD型に巻線したダブルパンケーキ(以下“DP”という。)を7個積層した巻線パックが収まる。図2にDPの断面構造を示す。当社は巻線パックの製作を行っている。

2.2 TFコイルの製作手順

外径43.7mmの円形ステンレス鋼のジャケットにニオブ3スズ超電導熱線(よりせん)が入った導体を用いて次の(1)～(8)の工程によってDPを製作する。製作したDP7個を(9)の工程で積層し、絶縁した後、(10)の工程の真空含浸によって加熱硬化することで巻線パックが完成する。

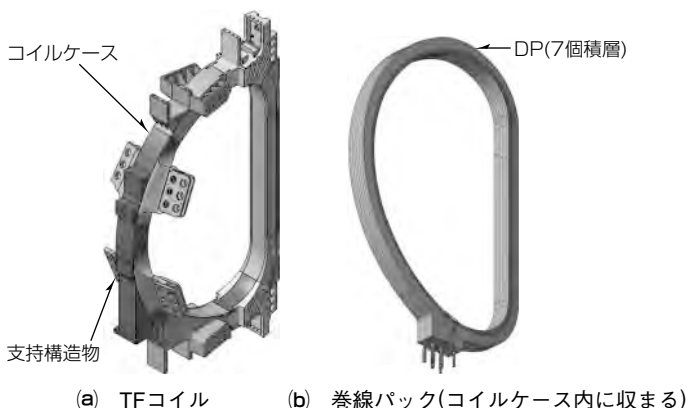


図1. ITERのTFコイル(提供：日本原子力研究開発機構)

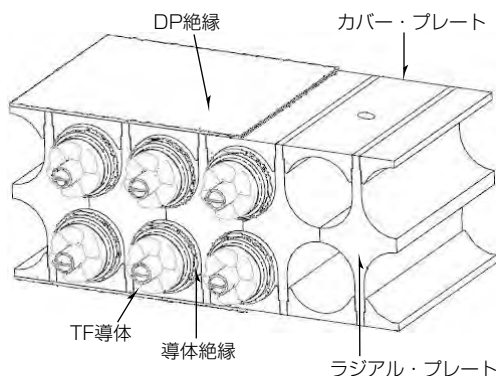


図2. DPの断面構造(提供：日本原子力研究開発機構)

(1) 巻線

3本ロール曲げによる巻線装置を用いて導体をD型2層に曲げ成形する。

(2) 冷媒入口部、ジョイント組立

導体内に液体ヘリウムを流すための冷媒入口部の加工及びDP間を電気接続するジョイント及びターミナルの組立てを行う。

(3) 熱処理

不活性雰囲気又は真空中で650℃×200時間の熱処理を行い、ニオブとスズを反応させ、ニオブ3スズの超電導線にする。

(4) トランスファー

通電時に導体を支持するステンレス鋼の溝型構造物であるラジアル・プレートを層間に挿入する。

(5) 導体絶縁

導体をラジアル・プレートから引き出して絶縁施工した後、溝に戻すことを全長にわたって実施する。

(6) カバー・プレート溶接

ラジアル・プレートの溝にカバー・プレートと呼ぶ蓋をはめ込みレーザ溶接で固定する。

(7) DP絶縁

導体がラジアル・プレートに収まりカバー・プレートが溶接されたDPに対して絶縁を行う。

(8) DP真空含浸

絶縁層にエポキシ樹脂を浸透させ、加熱硬化する。

(9) DP積層、絶縁

7個のDPを積層し、絶縁を行う。

(10) 巻線パック真空含浸

絶縁層にエポキシ樹脂を浸透させ、加熱硬化することで、巻線パックが完成する。

(11) 一体化

ステンレス鋼の大型構造物であるコイルケースに巻線パックを組み込み、封止溶接する。溶接後に真空含浸を行いコイルケースと巻線パック間の隙間を充填材で埋めて硬化させる。

TFコイルは14×9(m)の大型コイルであり、広い製作エリアが必要となる。また、すべての工程で高い品質が要求されており、高度な大型構造物加工及び溶接技術を持つ三菱重工業㈱と連携し、TFコイルの製作を行っている。

2.3 TFコイル巻線パック製作の技術課題

当社は、三菱重工業㈱の二見工場内に当社事業所を設置して巻線パックの製作を行っている。図3に製作した巻線装置を示す。

トランスファー工程でラジアル・プレートに熱処理後の導体を挿入するために、巻線時の導体長の管理及び熱処理による導体伸びの測定が重要となる。熱処理による導体伸びは0.07%程度であり、巻線時は0.01%(1m当たり0.1mm)の精度で導体長を管理する必要がある。巻線時の導体長を



図 3. ITER TFコイルの巻線装置(提供：日本原子力研究開発機構)

精度良く管理するために、巻線装置に導体送り量を測定するシステムを追加した。また、巻線及び導体長測定を温度管理エリアとすることで測定への影響を小さくしている。

曲率半径が変化するD型巻線を精度良く実施するために巻線シミュレーションコードを開発し、巻線装置による成形パターンの検討も行っている。

冷媒入口部やジョイントの組立はサンプル試験で構造や組立要領の確認を実施している。

絶縁材や含浸に使用するレジンの対放射線性や機械的強度についても、サンプル試験によって性能を確認している。

3. JT-60SAへの取組み

3.1 JT-60SAの超電導コイル

図 4 にJT-60SAの超電導コイル構成を示す。プラズマを生成するCSコイル及びプラズマを制御するEFコイルが日本製作分であり、プラズマを閉じ込めるTFコイルはEU製作分である。

(1) CSコイル

CSコイルは、外径 2 m×高さ1.6mのCSモジュールを 4 個積層し、タイ・プレートと呼ばれるステンレス鋼の構造物で予備圧縮を与えた構造である。CSモジュールは、27.9mm角のステンレス鋼のジャケットにニオブ 3 スズ超電導熱線が入った導体を52層に巻線したコイルである。モジュール分の全導体長を 1 本の導体で賄うことはできないため、1 モジュールあたり 6 か所の導体接続部がある。

CSモジュールは、ITERのTFコイルの製作手順と同じように①巻線、②端部加工、③熱処理、④導体絶縁・層間

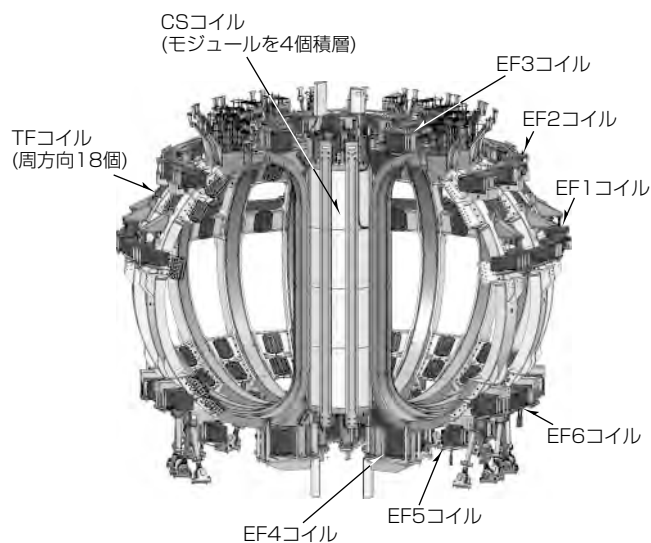


図 4. JT-60SAの超電導コイル (提供：日本原子力研究開発機構)

接続、⑤対地絶縁、⑥真空含浸の手順で製作する。CSモジュールは当社工場で製作し、那珂研究所に輸送する。

(2) EFコイル

EFコイルは、ターン数及びコイル径の異なるEF1～EF6の 6 種類のコイルがある。コイル外径が4.4m (EF3, EF4)～12m (EF1)と大きいため、EF4以外のコイルは那珂研究所に製作設備を設置して製作を行っている。

EFコイルは、コイルの受ける磁場が低いためニオブチタンの超電導線を使用する。そのため超電導生成熱処理が不要となる。また、コイルの含浸は、ITERのTFコイルとJT-60SAのCSコイルと同様に真空含浸するとコイルを取

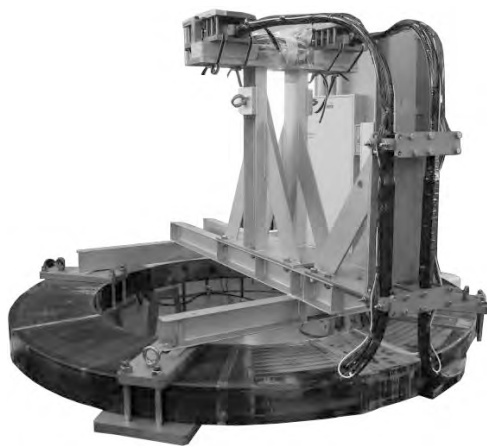


図 5. JT-60SAのCSモデルコイル
(提供：日本原子力研究開発機構)

める真空容器の製作コストが高くなるため、レジンをもって浸み込ませた絶縁物を導体に巻き付けて加熱硬化させるプリ・プレグ方式とした。

3.2 CS・EFコイルの技術課題

(1) CSコイル

CSコイルの技術課題としては、TFコイル組立後の装置中心部に挿入するため、クリアランスが小さくコイルの寸法精度が求められる。そこで巻線の精度を高めるために導体の剛性に応じて巻線装置のパラメータを変更する方式とした。

また、導体絶縁を行いながら52層積層する治具は、ガイドによってコイル寸法を確保する構造としている。

導体接続も開発を行い、試験サンプルの励磁試験で接続抵抗の要求値を達成した。

CSコイルは実機モジュール製作前の試験サンプルの製作及び試験が完了し、実機モジュールの一部のコイル巻線を開始した。図 5 に試験サンプルの一つであるCSモデルコイルを示す。

(2) EFコイル

EFコイルの技術課題としては、プラズマ制御が目的のコイルであるためコイルの電流中心の真円度・平面度が重要となる。電流中心の要求値を達成するために、巻線及び



図 6. JT-60SAのEF4コイル(提供：日本原子力研究開発機構)

加熱硬化に使用する治具をステンレス鋼の型で製作し、巻線した導体を収めていき、プレスした状態で加熱硬化した。その結果、コイル寸法及び電流中心の真円度・平面度の要求値を満足することができた。

EF4コイルの製作、EF5及びEF6コイルの巻線・加熱硬化が完了し、現在EF5及びEF6の積層の作業に取り掛かっている。図 6 に完成したEF4コイルを示す。

4. む す び

ITERのTFコイルは、実機製作前のサンプル試験を行っている。JT-60SAは、EF4コイルの製作を完了し、CSコイル及びEF5・EF6コイルを製作中である。超電導コイルは核融合装置の重要機器であり、当社はITER及びJT-60SAの両プロジェクトに参画することで核融合炉の実現に貢献していく。また、基盤となる超電導技術に関しても、経済産業省「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」に参画し技術確立を図っていく所存である。

参 考 文 献

- (1) Hasegawa, M., et al.: Manufacturing of JT-60SA equilibrium field coils, Proceedings of ICEC 24-ICMC 2012, 571~574 (2012)
- (2) Yoshida, K., et al.: The Manufacturing of the Super-conducting Magnet System for the JT-60SA, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, **22**, No.3, JUNE (2012)

450MVA GCT-STATCOMによる 定態安定度向上技術及び系統過電圧抑制技術

正城健次* 松田泰蔵***
天満耕司** 森島直樹†
原田英広***

Enhancement of Steady-State Stability and Suppression of Over-Voltage using 450MVA GCT-STATCOM

Kenji Masaki, Koji Temma, Hidehiro Harada, Taizou Matsuda, Naoki Morishima

要 旨

パワーエレクトロニクス技術を応用したFACTS(Flexible AC Transmission System)機器の中で、STATCOM(STATIC synchronous COMPensator: 静止形自励式無効電力補償装置)は、顕在化する電力系統問題の対策として適用が進みつつある。

STATCOMは電力系統の要求に応じて進相から遅相まで無効電力を高速に連続的に補償することができる。そのため、長距離大容量送電系統などに懸念される定態安定度や電圧問題に対して、その制御性や応答性から複数の系統問題を同時に解決することが可能となる。さらに、系統安定化システムや他の安定化対策と組み合わせることで、大規模な送電線増強を行わずに送電可能容量を高めることが

期待できる。

本稿では、定態安定度向上及び系統過電圧抑制を目的として中部電力(株)東信変電所に納入した世界最大級容量450MVA GCT-STATCOMについて、システム仕様、適用する主回路技術や系統問題を解決するSTATCOM制御技術について述べる。さらに、STATCOM設置系統である長野方面系統を詳細に模擬した電力系統シミュレータによる制御装置の検証試験及び長野方面系統安定化(Integrated Stability Control: ISC)システムとの協調試験、実系統での系統連系試験を実施し、STATCOMによる効果確認を行った内容について述べる。



インバータ盤



連系用・変換用多重変圧器
(特別三相形、防音壁一体構造)



屋上冷却ファン

450MVA GCT-STATCOM

中部電力(株)東信変電所

中部電力(株)東信変電所の450MVA GCT-STATCOM

GCT (Gate Commutated Turn-off) サイリスタを適用した世界最大級の450MVA STATCOMである。進相から遅相まで無効電力を高速に連続的に補償することができるため、定態安定度向上と系統過電圧抑制を一つの機器で実現できる。コンパクト性にも優れ、図中の枠内に囲まれた建屋と変圧器を合わせた敷地面積は2,982.5m²である。2012年11月から運用を開始しており、大容量送電系統の安定化に寄与している。

1. ま え が き

大規模電源の新設に伴い送電線の増強が必要となる場合、STATCOMはその機能の柔軟性から系統安定度や電圧変動といった複数の系統課題を解決することが可能であり、送電設備として有効な手段である。

本稿では、定態安定度向上及び系統過電圧抑制を目的として中部電力(株)東信変電所に納入した世界最大級容量450MVA GCT-STATCOMについて、その構成や適用した制御技術について述べる。またSTATCOMの動作検証として、電力系統シミュレータを用いたSTATCOM制御装置の検証試験やSTATCOMと長野方面系統安定化(ISC)システムとの協調試験、実系統での系統連系試験を行ったので、その内容について述べる。

2. システム概要

2.1 送電対策とSTATCOM仕様

長野方面系統は、図1のように500kV基幹系統から約300km離れた地点に大容量2,380MWの上越火力発電所が新設され長距離大容量送電系統となるため、重潮流時の一般的な問題である定態安定度が懸念される。その定態安定度対策として、STATCOMによって発電機の内部相差角の変動に伴う系統電圧低下を検出し無効電力を補償することで、発電機の同期化力を保ち定態安定度を向上させる方法が採用されることになった。

また、ルート断故障によって長野方面系統が分離系統となった場合に過電圧の問題が懸念される。長野方面系統では500kV基幹系統への送電が重潮流となる断面で、長距離送電による無効電力損失を補償するため、大量の電力用コンデンサが投入されている。このような系統でルート断故障が発生すると、並列していた電力用コンデンサによって分離系統に過電圧を引き起こすフェランチ現象が発生する。その過電圧対策にもSTATCOMは有効であり、STATCOMによって高速に遅相無効電力を出力し過電圧抑制に貢献することが可能である。

これら定態安定度向上及び過電圧抑制に対して系統解析を行い冗長性なども考慮しSTATCOMシステムを容量

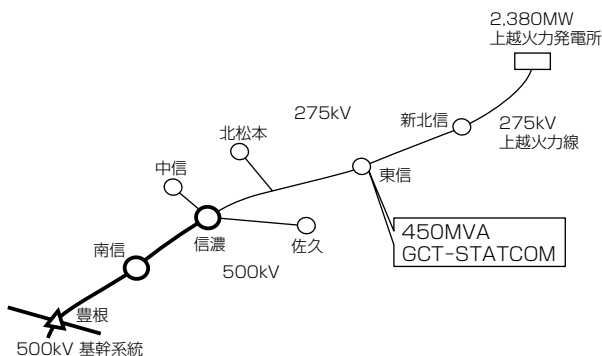


図1. 長野方面系統

450MVA(単器150MVA×3台)と決定した。STATCOM設置点は、定態安定度向上に最も効果的な上越火力発電所と基幹系統との電気的中間地点に位置する東信変電所とした⁽¹⁾。

2.2 主回路構成

450MVA GCT-STATCOMの主回路構成、3レベルGCT変換器ユニットの外観と6kV-6kA GCTサイリスタ素子の外観を図2に示す。450MVA GCT-STATCOMは、150MVA STATCOM 3台で構成している。150MVA STATCOMは連系用変圧器と変換用7段多重変圧器によって275kV系統と接続している。変換用7段多重変圧器によって3レベル変換器の7段直列多重接続を実現している。多重変圧器を使った3レベルGCT変換器の多重化や、スナバレスの大容量6kV-6kA GCTサイリスタを用いた変換器を適用することで、高効率・高性能・高信頼度・コンパクト・高調波フィルタレスを実現することができる。

表1にこのSTATCOMの主な仕様を示す。インバータ盤・制御盤等を配置した建屋と変圧器とを合わせた敷地面積は2,982.5m²であり、コンパクト性にも優れている。

2.3 STATCOM制御

このSTATCOMの基本制御方式を図3に示す。定態安定度向上のためのAVR(Automatic Voltage Regulator)制御及び過電圧抑制のための無効電流フィードフォワード型スケジューリング制御を採用した。有効・無効電流は一般的な電圧形自励式変換器で採用されている回転座標系を適用して制御する。また、各段キャリア位相シフトPWM(Pulse

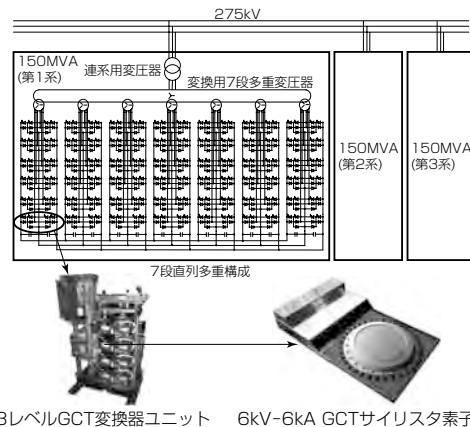


図2. 主回路構成及び6kV-6kA GCTサイリスタ素子

表1. 東信STATCOMの主な仕様

装置構成	7段多重×3系	変圧器構成		連系用変圧器+変換用変圧器
定格容量	150MVA×3系	連系用 変圧器	結線	Y/Y/Δ
定格交流電圧 (系統接続側)	275kV		定格電圧	275kV/77kV/33kV
過電圧運転範囲	1.85pu		定格容量	150MVA
適用素子	6kV-6kA GCT	変換用 変圧器	結線	Y/7段ブロークンY
インバータ方式	単相3レベル×3相		定格電圧	77kV/3.326×√3kV
定格直流電圧	±3,000V		定格容量	150MVA
PWMパルス数	3パルス	変圧器インピーダンス	35%	

Width Modulation)を適用することで、低パルスでありながら系統故障時の過電流防止に対して十分な高速応答性を持つ。

2.3.1 定態安定度向上制御

定態安定度向上のためのAVR制御としてSTATCOMに不感帯付Vref形AVR制御を採用している。AVR制御ブロック及びAVR特性を図4に示す。送電線1回線開放時や系統故障時等、系統電圧に大きな変動が生じたときにはAVRのスロー特性に従って高速に無効電力を出力する。また、平常時の系統電圧範囲に不感帯を設けることで常時の無効電力出力を零に抑え、系統安定化システムの平常時電圧・無効電力制御との協調を図り、かつ常時損失も低減している。不感帯上下限を設定変更することで必要に応じて平常時の無効電力出力量を制御できる⁽²⁾。さらに、通常運用時や系統状況、分離系統時や上越火力発電機運転状況に応じて複数のAVR特性パターンを設定しておき、系統状態に応じてAVR設定を切り替える。それによって、高速応答が必要となる重潮流時の定態安定度に寄与するとともに、低短絡容量状況でもSTATCOMの安定運転が可能となる。また過酷な条件下では発電機の軸ねじれ振動が励振されるSSTI (Sub-Synchronous Torsional Interaction) 発生可能性があるが、AVR特性切替えによってSSTIの回避も可能となる⁽³⁾。

2.3.2 系統過電圧抑制制御

無効電流は基本的にAVR制御の出力指令を受け制御されるが、さらに、高速な応答性を確保し系統過電圧抑制するために、AVR制御に加えフィードフォワード型スケジューリング制御を導入している。系統過電圧を検出する

と無効電流指令値を遅相側に制限し過電圧抑制指令値の無効電流に切り替えるものであり、この制御方式によって極めて高速な遅相無効電力出力が可能となり、系統過電圧を抑制することができる。

3. 性能検証試験

3.1 シミュレータ試験

実機のSTATCOM制御装置とSTATCOM主回路ミニモデルを、長野方面系統を詳細に模擬した電力系統シミュレータに接続し、STATCOM制御機能の検証を行った⁽⁴⁾。

3.1.1 定態安定度向上確認試験

定態安定度向上効果を確認するため、上越火力線(上越火力発電所-新北信変電所)1回線開放試験を実施した。1台停止時でも定態安定度を維持できることを確認するため、この試験ではSTATCOM1台停止状態を模擬した。シミュレータ試験結果を図5に示す。

重潮流断面では送電線が1回線開放されると同期化力の低下に伴い上越火力発電機の内部相差角が系統に対して増加し、系統の電気的中間地点付近の変電所では電圧低下が生じ定態不安定によって脱調する。STATCOMを適用すると、1回線開放による電圧低下に応じてAVR制御が進相無効電力を出力し同期化力を向上させ、上越火力発電機の脱調を防止していることが分かる。この実機の制御装置を用いた試験結果によって長野方面系統でのSTATCOMの定態安定度向上効果が確認できた。

3.1.2 過電圧抑制確認試験

系統過電圧抑制効果を確認するため、重潮流断面で、過電圧が最も厳しくなる豊根開閉所(長野方面系統と500kV基幹系統との接続点に位置する)でのルート断故障ケースを実施した。シミュレータ試験結果を図6に示す。

豊根開閉所での3LG(3-Line-to-Ground)故障発生後、STATCOM接続母線電圧は0.6pu程度まで低下するものの、STATCOMは運転継続し、AVR制御によって進相無効電流を1.0pu出力している。故障除去によって長野方面系統は500kV基幹系統と切り離され分離系統となり、フェランチ現象による系統過電圧が発生している。STATCOMは故障除去後も運転継続し、過電圧検出によって無効電流フィードフォワード型スケジューリング制御が動作し、無効電流出力を高速に遅相側に制御している。さらに、遅相側の所定値(この場合1.0pu)に無効電流指令値を変更し故障除去後1サイクル以内に遅相無効電流1.0puを達成しており、STATCOMの高速な過電圧抑制効果が確認できた。

3.1.3 ISCシステムとの検証試験

長野方面系統には新たな統合型系統安定化システムである長野方面系統安定化(ISC)システムも導入されている。そのため、STATCOMとISCシステムが有機的に機能し、互いに適正に系統安定化を図れることを確認するため、検

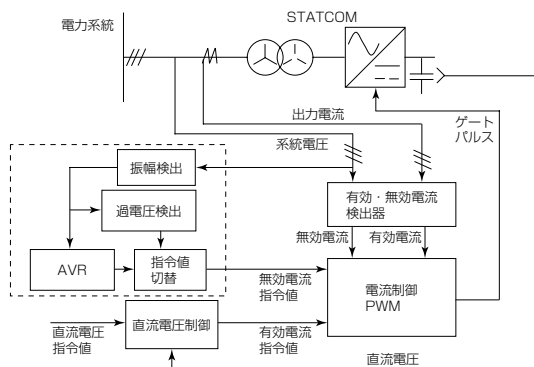


図3. STATCOM制御ブロック

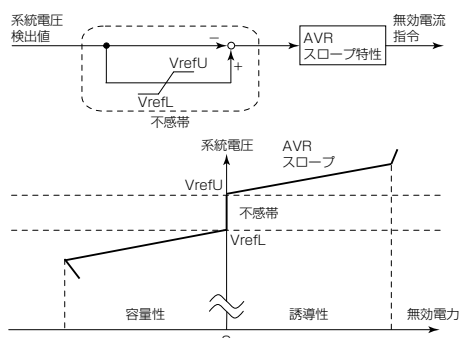


図4. AVR制御ブロック及びAVR特性

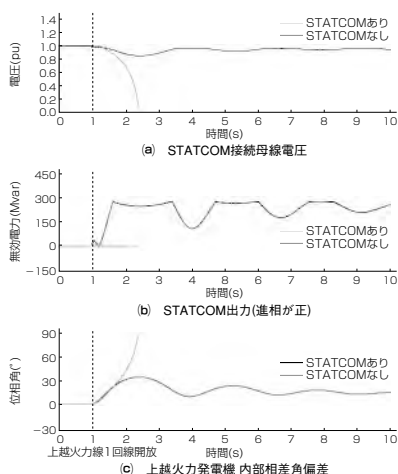


図 5. 定態安定度確認試験の結果

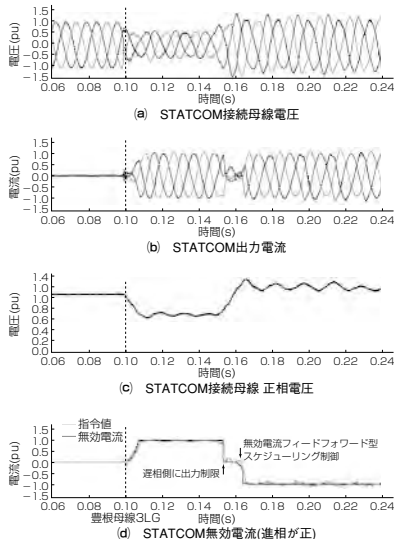


図 6. 過電圧抑制確認試験の結果

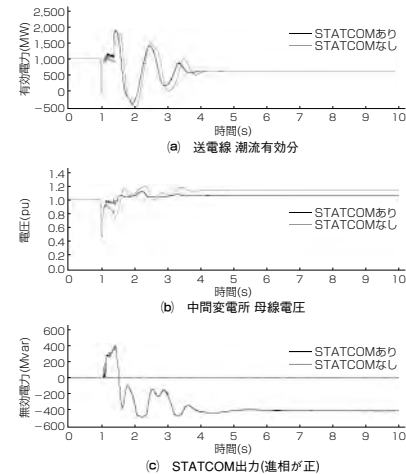


図 7. ISCシステムとの検証試験結果

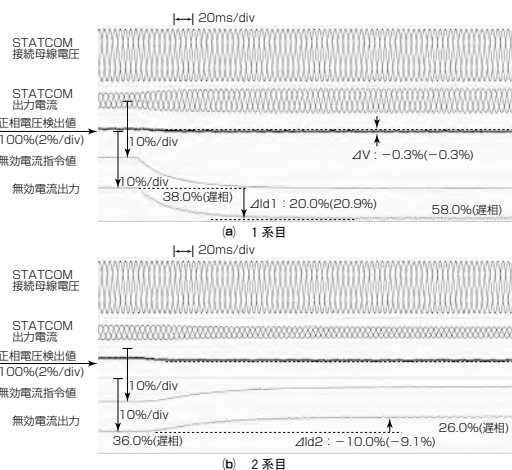


図 8. AVR特性切替え試験の結果

証用ISCシステムを電力系統シミュレータに組み込み、検証試験を実施した⁽⁵⁾。

図 7 に非ルート断故障(送電線 3 相 4 線地絡故障)試験結果を示す。ISCシステムが故障後の発電機加速・減速エネルギーを的確に把握して過渡安定度維持を図るとともに、STATCOMによって電圧変動も抑制され、互いに適正に動作していることが確認できた。

3.2 系統連系試験

系統連系試験では、STATCOMのAVR制御特性を確認するため、実系統に連系した150MVA STATCOM 2 系列を用いてAVR特性切替え試験を行った⁽⁶⁾。

150MVA STATCOM 2 台をそれぞれ同じAVR制御定数に設定し、不感帯上限VrefUをSTATCOM接続母線電圧より低く設定しSTATCOMをリアクトル動作させた状態で、2 台中 1 台だけAVR特性を切り替えた(1 台のVrefUを1.0%低下)ときの母線電圧変動量 ΔV 、2 台のSTATCOMの無効電流出力変動量 $\Delta Id1$ 、 $\Delta Id2$ を図 8 に示す。図中の()内の数値はシミュレーションによる事前検討値である。

AVR特性切替えによって、並列する 2 台のSTATCOM

のAVR特性が異なっても、2 台のSTATCOMはそれぞれに備わるAVR制御に応じて動作し、出力変動量もほぼ事前検討値と同じであり、ハンチングを発生させることもなく安定動作することが確認できた。

4. む す び

定態安定度向上及び過電圧抑制を図る世界最大級容量 450MVA GCT-STATCOMに適用した技術及びその性能検証について述べた。今後ますます重要となるSTATCOMなどのFACTS機器について、この開発で培った技術を基に更なる有用性の追求に尽力していく所存である。

参 考 文 献

- (1) Aakedani, T., et al.: 450MVA STATCOM installation plan for stability improvement, Proceeding of 2010 CIGRE, B4-207 (2010)
- (2) 下之園隆明, ほか: 450MVA GCT-STATCOM制御方式の検討, 平成22年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, 108 (2010)
- (3) 下之園隆明, ほか: 大容量STATCOMにおけるSSTI抑制検討, 平成24年電気学会全国大会講演論文集, 6-125 (2012)
- (4) 金澤 剛, ほか: 詳細模擬システムによる450MVA GCT-STATCOM制御装置検証, 電気学会電力技術研究会資料, PE-11-186 (2011)
- (5) 原田英広, ほか: STATCOMと長野方面系統安定化(ISC)システムのアナログシミュレータによる検証試験, 平成23年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, 129 (2011)
- (6) 守口聡一, ほか: 450MVA GCT-STATCOMの系統連系試験, 平成25年電気学会全国大会講演論文集, 6-258 (2013)