

# MITSUBISHI

## 三菱電機技報

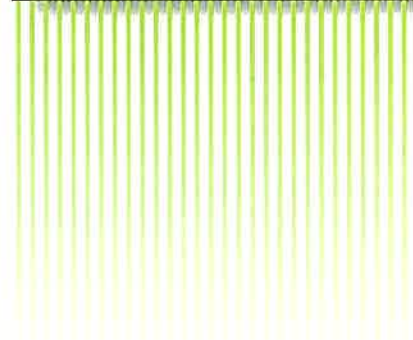
Vol.84 No.10

2010

# 10

特集Ⅰ「発電プラントの最新技術と応用展開」

特集Ⅱ「環境との調和を目指す社会インフラシステム」



## 目 次

### 特集Ⅰ「発電プラントの最新技術と応用展開」

- 低炭素社会実現に向けた発電機器の高効率化 ..... 1  
山本俊二
- 米国向け中央計装運転検証設備及び型式認証活動 ..... 2  
北村雅司・高橋浩一・松下英俊
- 新型放射線監視設備 ..... 6  
坂本高一・田室 勝・中西正一
- モジュール型AVR・ガバナ ..... 10  
野口紳也・森田和宏・岡嶋靖樹
- 低炭素社会における水力プラントの有効活用技術 ..... 14  
平沢京太郎・西都一浩・佐藤裕二
- 新通風方式を採用した大容量空気冷却タービン発電機 ..... 18  
古賀清訓
- 産業用計算機のマルチコアCPU適用 ..... 22  
井登純一・畔 英之・増田大樹

### 特集Ⅱ「環境との調和を目指す社会インフラシステム」

- 基礎技術の蓄積が未来を創造する ..... 26  
漆畑廣明
- 環境との調和を目指す社会インフラシステム ..... 27  
古藤 悟
- 空冷式ヒートポンプ氷蓄熱ユニット“コンパクトキューブICE” ..... 31  
大越 靖・伊藤拓也・石田和之・落合康敬・福井孝史
- オーロラビジョン用高画質表示コントローラ“XDC-6000” ..... 34  
大塚尚司・花村敏明・南 浩次・山中 聡
- デジタルサイネージ市場対応屋外型高精細“オーロラビジョン” ..... 38  
世良田博幸・道盛厚司・吉田 浩・金光輝長
- E6系新幹線電車(量産先行車)用  
空調装置における小型軽量化・機能向上 ..... 42  
白石仁史・原 正明・郡嶋宗久・林田友紀・梅崎達昭
- 非常用単相発電装置のコンパクト化 ..... 45  
大井手政人・宇都波多留・馬場圭介
- 可動式ホーム柵における環境負荷低減とユニバーサルデザイン適用 ..... 48  
上杉知弘・諸熊宏典・住吉広昭・谷田川智弘

### 一般論文

- 群馬大学向け粒子線治療装置(小型炭素線機) ..... 52  
津上浩伸
- 粒子線(陽子線)治療装置用入射器 ..... 56  
川崎定博・山本和男

### 特許と新案

- 「水車発電機のターニング方法及びターニング装置」 ..... 60
- 「可変速揚水発電システムの制御装置」 ..... 61
- 「可変速揚水発電システムの制御装置」 ..... 61
- 「水路系模擬装置」 ..... 62

### Advanced Technology for Power Plants and its Applications

- Higher Efficiency Power Electric Machineries towards Low Carbon Society  
Shunji Yamamoto
- Human System Interface Verification and Validation Facility and Type Acceptance Activities for U.S.  
Masashi Kitamura, Kouichi Takahashi, Hidetoshi Matsushita

### Advanced Radiation Monitoring System

Shoichi Sakamoto, Masaru Tamuro, Masakazu Nakanishi

### Module type Automatic Voltage Regulator and Governor Controller

Shinya Noguchi, Kazuhiro Morita, Yasuki Okajima

### Effective Utilization Technology of Hydropower Plant in Low Carbon Society

Kyotaro Hirasawa, Kazuhiro Saito, Yuji Sato

### Large Capacity Air-cooled Turbine Generator with New Ventilation System

Kiyonori Koga

### Application of Multi-Core CPU for Industrial Computer System

Junichi Ito, Hideyuki Kuro, Hiroki Masuda

### Social Infrastructure System Aiming at Harmony with Environment

### Accumulation of Fundamental Technology Creates the Future

Hiroaki Urushibata

### Social Infrastructure System Aiming at Harmony with Environment

Satoru Koto

### Air-Cooled Heat Pump Ice Thermal Storage Unit "Compact Cube Ice"

Yasushi Ohkoshi, Takuya Ito, Kazuyuki Ishida, Yasutaka Ochiai, Koji Fukui

### High-resolution Display Controller "XDC-6000" of Diamond Vision

Shoji Otsuka, Toshiaki Hanamura, Koji Minami, Satoshi Yamanaka

### Outdoor High Resolution "Diamond Vision" for Digital Signage Market

Hirofumi Serada, Atsushi Michimori, Hiroshi Yoshida, Terunaga Kanemitsu

### Down Sizing and Improvement of Passenger Comfort in Air Conditioning System for E6 Series Shinkansen

Hitoshi Shiraiishi, Masaaki Hara, Munehisa Gunjima, Tomoki Hayashida, Tatsuaki Umesaki

### Down Sizing of Single Phase Emergency Power Generating Facility

Masato Oide, Wataru Uto, Keisuke Baba

### Environmental Impacts Reduction and Universal Design in Moving Platform Safety Gate System

Tomohiro Uesugi, Hironori Morokuma, Hiroaki Sumiyoshi, Tomohiro Yataigawa

### Features of the Gunma University Heavy Ion Medical Center

Hironobu Tsugami

### Proton Injector System

Sadahiro Kawasaki, Kazuo Yamamoto

### スポットライト

三菱デジタルサイネージソリューションMEDIWAY  
(メディアウェイ)

### 表紙：特集Ⅰ 発電プラントの最新技術と応用展開

低炭素社会の実現に向け、原子力発電・水力発電の見直し及び火力発電の高効率発電など、発電プラントの最新技術と応用展開を報告する。写真①は、製作中の500MVA級のタービン発電機。

### 表紙：特集Ⅱ 環境との調和を目指す社会インフラシステム

省エネルギー、高効率、軽量化など、環境との調和を図りながら、安心・安全・快適で社会システムに貢献する製品システムを提供している。

表紙の写真はこれらを具現化した当社製品と関連製品の例である。

③可動式ホーム柵、④E6系新幹線空調装置、⑤三菱デジタルサイネージソリューション MEDIWAY用ネットワークメディア端末。

### 表紙：粒子線治療装置

粒子線治療は放射線治療の1つで、粒子線を患部に集中的に照射できるため、副作用や身体機能の損失を最小限に抑えられる利点がある。写真②は、粒子線治療装置のシンクロトン加速器の外観。



# 低炭素社会実現に向けた発電機器の高効率化

Higher Efficiency Power Electric Machineries towards  
Low Carbon Society

山本俊二  
Shunji Yamamoto



人類が排出し続けている二酸化炭素によって、地球の温暖化が進行している。地球の温暖化で、氷河が溶けだし、海水面が上昇し、ポリネシアにある独立国ツバルが水没の危機に瀕(ひん)している。さらに、熱波と寒波の到来、集中豪雨などの異常気象による天災が世界中で発生している。

地球の温暖化への危機感に影響されて、市場が変化している。多くの市場は、二酸化炭素の排出量を低減する(低炭素)製品を選ぶ傾向が強くなっている。また、各国独自のみならず各国間で連携して、地球規模での二酸化炭素排出量の規制や削減の政策協議が進行している。

IEA (International Energy Agency) の統計によれば、世界のCO<sub>2</sub>排出量は、2007年で290億トン。1位が中国(21%)、2位が米国(20%)、ロシア、インドに続き日本は5位(4.3%、12億5,000万トン)である。日本は、すべての主要国による公平な国際枠組みの構築を前提に、温室効果ガスを2020年に1990年比25%削減、2050年に80%削減の目標を掲げている。非常に厳しい目標であり、この目標を達成するには、単純に排出量で比較すると、1960年代の生活水準に戻ることだといわれている。しかしながら、我々は、現在の生活スタイルをそのまま維持しながら、科学技術の拡大適用と新たな技術導入によって、過去の生活様式に後退することなく脱炭素エネルギー社会にシフトすることを目指している。

今後の世界のエネルギーの動向としては、再生可能エネルギーが増大するものの、化石燃料エネルギー源別では石炭の伸びが最大となり、二酸化炭素排出量は増大傾向にある。エネルギー供給側としては、化石燃料から原子力・再生可能エネルギーへのシフト、発電機器の高効率化による二酸化炭素の排出量の削減などが大きな課題であり、需要

側では再生可能エネルギーの活用と、省エネルギーの徹底が課題となる。

低炭素社会を実現するに当たり、二酸化炭素を排出しない原子力発電の重要性が更に増し、各国で新たに原子力発電所が計画・設置されつつある。また、火力発電における高効率発電の必要性、緊急性はますます重要となり、熱効率の向上を目指して、ガスタービンコンバインドサイクル(GTCC)の高温化が推進され、石炭ガス化複合発電(IGCC)も実証期を経て商用に向かおうとしている。発電機そのものの高効率化も、強力に推進されており、最新の三次元電磁界解析、流体解析技術を駆使して独自の損失低減構造を開発、エネルギー変換効率を著しく向上させている。さらに、監視・制御機器のデジタル化など、省電力化や機器信頼性の向上に効果がある様々な技術開発が推進されている。

低炭素社会に向けた課題を具体的にどのように解決するかという命題は、三菱電機が持つ様々な技術を活用できる絶好の機会でもある。常日ごろから様々な開発技術や生産技術を、当社は蓄積してきている。計装技術、システム技術、電磁界解析技術、熱設計技術、高電圧機器設計技術、モデリング技術、生産技術など。これらの技術を縦横に組み合わせながら、例えば発電機の効率向上など製品の改良の継続、発電所制御システムの高度化・安全化・省エネルギー化の推進、可変速揚水発電など、発電システム全体に関わる技術を広く横展開させての製品群の拡大・システムの提案に挑戦し続けている。

当社創業以来の歴史が技術蓄積の歴史でもあり、これらの技術が、地球環境を守り抜く切り札になる。

低炭素社会実現に向けた取組みは、当社の特徴ある総合力を引き出す取組みでもあるといえる。

# 米国向け中央計装運転検証設備及び 型式認証活動

北村雅司\*  
高橋浩一\*\*  
松下英俊\*\*

Human System Interface Verification and Validation Facility and Type Acceptance Activities for U.S.

Masashi Kitamura, Kouichi Takahashi, Hidetoshi Matsushita

## 要 旨

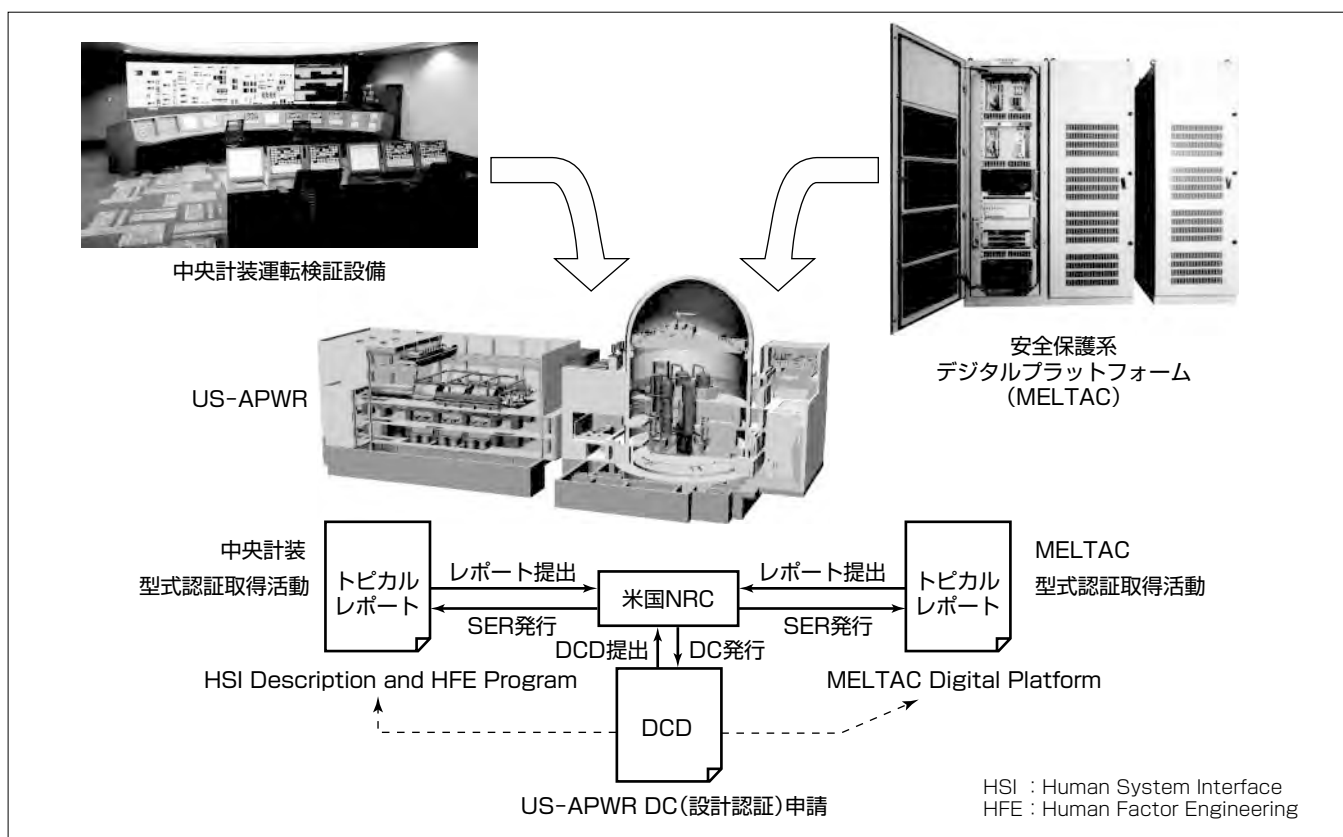
米国の原子力発電の市場は、TMI(Three Mile Island) 2号機の事故以来、新設プラントの建設計画が減少していたが、昨今、地球温暖化対策として、CO<sub>2</sub>排出量の少ない原子力発電は世界中で見直され、特に米国では政府の後押しもあり、多数の新設プラントの計画が持ち上がっている。また、既設の米国内の原子力発電所の計装設備についても老朽化が進み、更新の時期がきている。

三菱グループは、米国市場向け最新型加圧水型軽水炉(US-APWR)を市場に投入するため、米国原子力規制委員会(Nuclear Regulatory Commission : NRC)の型式認証活動を推進している。型式認証活動で三菱電機は三菱重工業(株)とともに、タッチスクリーンを使用したソフトウェ

ア・オペレーションの中央計装設備及びデジタル安全保護設備に適用する安全保護系デジタルプラットフォーム“MELTAC”に関するトピカルレポート(特定の安全審査項目についてまとめた技術文書)を作成提出した。

さらに、中央計装設備では、トピカルレポートの記載内容である設計検証プロセスの実証と当社製品の機能・性能に関して、NRC及び米国顧客への理解を深めるため、中央計装運転検証設備を当社米国拠点に構築し、米国人運転員による運転検証を実施した。

本稿では、米国向け中央計装の設計検証プロセスと検証設備を用いた運転検証の結果及び中央計装設備とMELTACにおける型式認証活動について述べる。



## 当社が関係するUS-APWR認証取得活動

US-APWRの設計認証活動で、プラント全体(炉型)のDC(Design Certification)申請として、DCD(Design Control Document)を米国NRCに提出している。更新工事等への適用も考慮し、DCDとは別レポートとしてプラットフォームのトピカルレポートをNRCに提出し、DC申請に先行して型式認証を受けた結果のレポートであるSER(Safety Evaluation Report)を受けることにより、その後の認証活動をスムーズに行うようにしている。



## 1. ま え が き

地球温暖化防止、原油価格の変動などエネルギーの安定供給という観点で、原子力発電が世界的に見直されている。特に、米国では政府の後押しもあり、30基以上の新設プラントの計画がある。三菱グループでは、米国市場向けの最新型加圧水型軽水炉としてUS-APWRのNRCの型式認証取得活動を推進している。

当社のデジタル計装設備は、国内の加圧水型軽水炉(Pressurized Water Reactor:PWR)プラントでの納入・稼働実績を持っており、US-APWRでも適用される計画である。

本稿では、型式認証活動における、US-APWRのデジタル計装設備を構成する中央計装及び安全保護系デジタルプラットフォーム“MELTAC”に関する活動内容について述べる。

## 2. 米国向けデジタル計装設備と型式認証活動範囲

### 2.1 US-APWR のデジタル計装設備の構成

US-APWR のデジタル計装設備は、PSMS(安全保護系)、PCMS(常用系)、DAS(共通要因故障対策)で構成されてお

り(図1)、国内プラントで実績のある構成をベースに最新の米国規制に適合するように設計している。

中央計装設備(HSIS)は、すべてのシステムの監視操作系システムとして位置づけられ、次の特徴がある。

- ・タッチスクリーンを使用した直感的なソフトウェア・オペレーション
- ・大型表示装置による運転員間の情報共有

### 2.2 型式認証活動における当社の活動範囲

当社のデジタル計装設備を米国で適用するためには、NRCの規制指針に適合していることを証明し、NRCの型式認証を取得する必要がある。

中央計装に関する型式認証活動として、三菱重工業㈱と当社は、HSI(Human System Interface)設計プロセスの米国規制指針NUREG-0711(Human Factors Engineering Program Review Model)に対する適合性及びHSI基本設計の内容を示すため、HFE(Human Factors Engineering) Program/標準HSI仕様に関するトピカルレポートを提出した。当社はこのレポートの作成に協力し、トピカルレポートに記載されている内容を実証するための運転検証設備を当社米国拠点に構築し、運転検証を実施した。

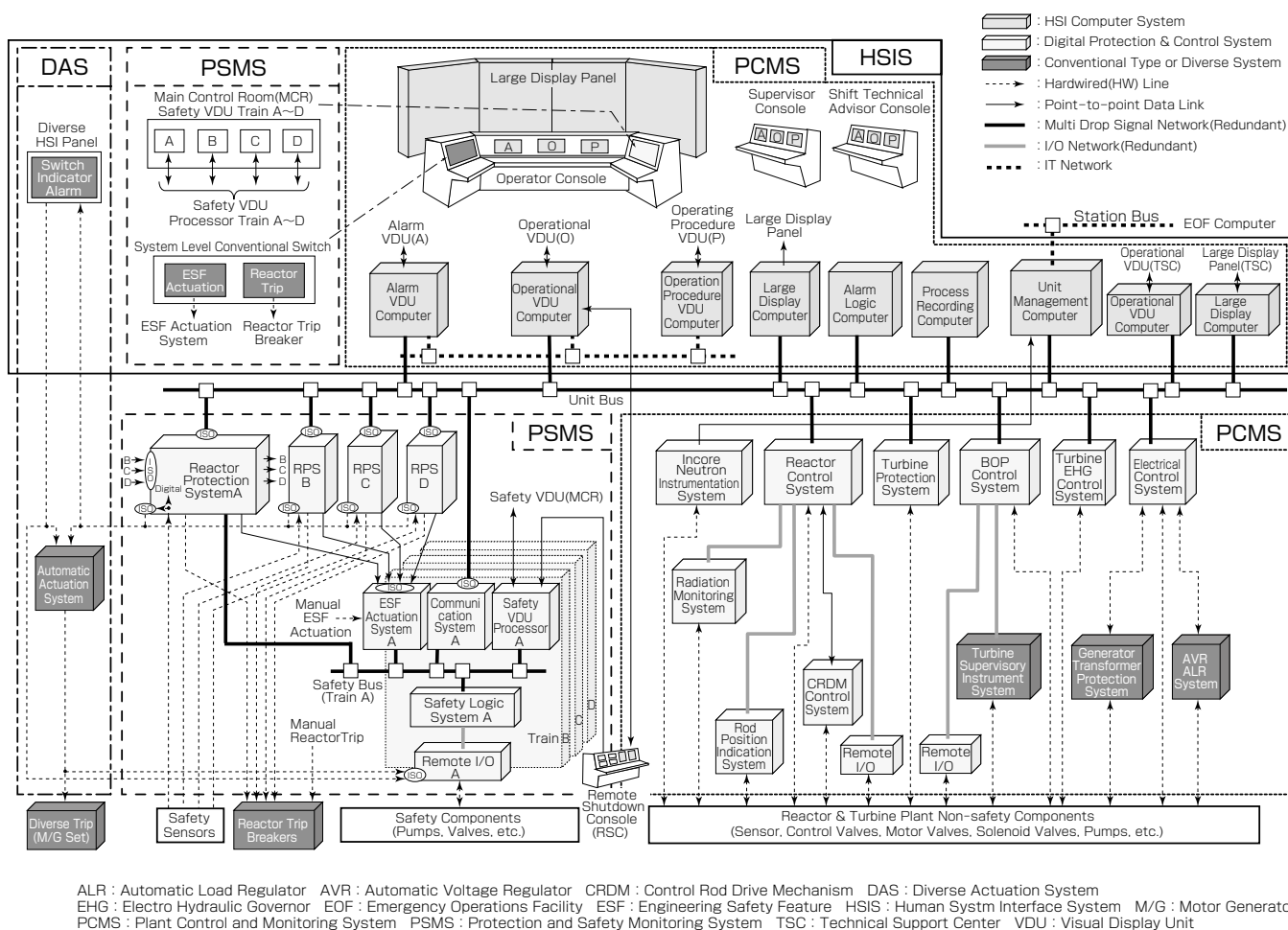
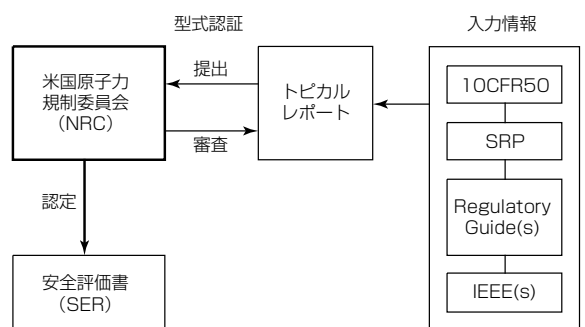


図1. 米国向け(US-APWR)デジタル計装設備の構成



10CFR50 : 合衆国連邦規制基準10-50(品質保証関連規制)  
SRP : Standard Review Plan(NRCの審査の観点・判定基準)  
Regulatory Guide : 被規制者(電力・ベンダ)に10CFRを遵守させるために定めたNRCの規制指針(以下“RG”という。)  
IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers  
米国に本部を持つ電気・電子技術の学会。電気・電子技術に関わる多数の指針・手順を規格化している。それらの中からRGの具体的なガイドとなりうるIEEE規格を認知し、その規格の遵守を要求している。

図2. 米国における型式認証

MELTACについては、主としてソフトウェア設計プロセスの第三者検証と、EMC(Electro-Magnetic Compatibility)に対する要求があり、当社ではこれに対応するMELTACのトピカルレポートを作成した。

トピカルレポートは、三菱重工業(株)によるDC申請と連動しNRCに提出した。その後NRCとの公開会議や監査を通じて、認証の証明となるSERの発行に向け活動を推進している。図2に型式認証取得活動の流れを示す。

### 3. 米国向け中央計装運転検証

#### 3.1 中央計装運転検証設備

トピカルレポートに記載したHSI仕様は、国内で実績のある仕様を英語化し、単位系などを米国の慣習に合わせた米国HSI基本設計であり、米国の運転員への適合性を確認するための運転検証が必要であった。また、米国NRCの規制により“検証及び妥当性確認(Verification and Validation: V&V)”の実施が要求されている。このため、動的な運転検証が可能な設備を当社の米国拠点MEPPI(Mitsubishi Electric Power Products, Inc.)に構築した(図3)。

#### 3.2 中央計装設備の設計・検証プロセス

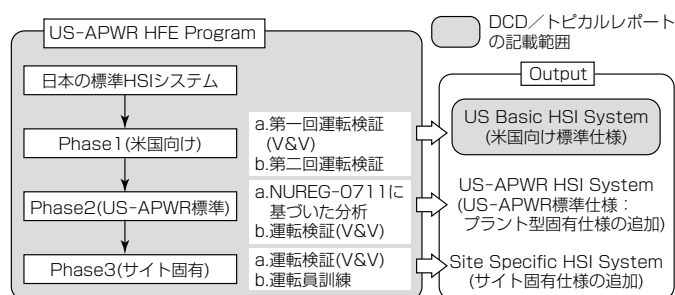
中央計装設備の設計・検証プロセス(US-APWR HFE Program)は、図4に示すように3つのフェーズに分けて、日本のHSI標準仕様から、US-APWR向け標準HSI仕様を確立する計画としている。3つの設計フェーズの目的と内容は次のとおりである。

##### (1) Phase 1

プラント設計が確定する前に、プラント型に依存しない米国運転員向けの監視・操作に必要な基本的な表示・入力操作用の標準的な要素を規定した仕様(US Basic HSI System)を確立するための活動で、中央計装検証設備を使用



図3. 米国向け中央計装運転検証設備


図4. 米国向け中央計装運転検証プロセス  
(US-APWR Human Factors Engineering Program)

し、米国運転員による運転検証を実施することによって、監視・操作における日米間の要件の違いを抽出し、設計仕様に反映する。

##### (2) Phase 2

US-APWRのプラント設計に基づいた、具体的な警報、系統監視画面、操作など、US-APWRプラント型固有の詳細仕様を決定する活動であり、プラント設計結果とNUREG-0711に規定されている設計分析に基づいた設計及び運転検証を実施する。

##### (3) Phase 3

サイト固有の仕様を反映して、個別プラント仕様を決定する活動である。必要であれば運転検証を実施し、その後、運転員訓練に入る。

#### 3.3 Phase 1 運転検証の実施結果

##### 3.3.1 Phase 1 運転検証の実施概要

Phase 1 運転検証は、日本の標準HSI仕様を英語化及び単位系などを米国の慣習に合わせた仕様でMEPPIに構築した運転検証設備を使用し、米国の運転員による第一回検証(Phase 1 a)を2008年に実施した。

その後、第一回検証の検証結果を分析し、解決策を設計に反映した設備を用いて第二回運転検証(Phase 1 b)を2009年に実施した(表1)。

表 1. 検証実施状況

	第一回 (Phase 1a)	第二回 (Phase 1b)
時期	2008年 7～8 月	2009年 4～5 月
期間	8 週間	5 週間

### 3.3.2 主要な検証コメントと対応状況

検証によって得られた検証コメントについては、2009年上期に対応策の検討を実施した。コメントの大半は、表現面に対するものであり、設備構成、機能仕様は、日本国内標準仕様と米国標準仕様とで、おおむね共通化することができた。しかしながら、運転スタイルや慣習上の違いのような米国固有事情によるコメントについては対応を検討する必要がある。

次に米国運転員の慣習を考慮した検討事例を示す。

#### (1) シンボル表示

弁・補機類のシンボルについては、国内の運転員にとって一般的な表現（例：塗りつぶし表示、中抜き表示）であるものに対し、米国運転員から表示を見直ししてほしいとの要望があった。このため、これらの各表示の示す状態の検討を行った。

#### (2) 用語・略語

用語・略語については、米国運転員の慣習の影響が比較的強く、国内で使用する一般的な用語・略語とは異なる場面が見られた。このため、米国運転員にとって誤解のないよう、米国で従来使われている用語・略語を使用する。

## 4. MELTACにおける型式認証取得活動

MELTACにおける型式認証取得活動は、開発設計プロセス、品質保証プログラムを米国規制要件に適合させるため、主に次の活動を実施した。

#### (1) 独立組織によるV&V実施

IEEE 1012-1998(Software Verification and Validation)の要求に従い、設計部門と独立のV&Vチームを組織し、以下のV&Vを実施した。

- ①設計／製作／試験フェーズ間のトレーサビリティ確認
- ②ソースコードの試験網羅性確認(全分岐実施)
- ③安全保護系への適用を想定したソフトウェア安全分析

#### (2) 米国原子力安全系対応の品質保証プログラム構築

米国原子力安全の品質規制要件である10CFR50 Appendix B及びそこから参照されているASME NQA-1(米国機械学会 原子力施設の品質保証要件)に基づき、国内向け品質保証プログラムとは別に、米国原子力安全系向け品質保証プログラムを構築した。

#### (3) EMC耐性強化と検証試験

安全保護設備に対しては、耐環境性、耐振動性、EMC耐性がNRCの規制要求を満足している必要がある。特にEMC耐性に関しては、国内に比べ規制要求が厳しく、RG1.180(Guidelines for Evaluating Electromagnetic and Radio-Frequency Interference)への準拠が要求される。そのため、筐体(きょうたい)や実装モジュールに対してEMC耐性の強化を施した後、EMC試験を実施することで規制要求への適合性を確認した。

## 5. む す び

米国(MEPP)に運転検証設備を構築し、日本のHSI標準仕様から米国US-APWR向け標準仕様を確立する検証及び設計を実施中である。またMELTAC及びUS-APWR HFE Programに関し、NRCの型式認証取得活動を推進している。

今後は、NRCの型式認証を取得し、US-APWRに標準的に適用可能な設備として、米国の原子力ビジネスへの展開を進めていく所存である。

## 参 考 文 献

- (1) 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）
- (2) 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）

# 新型放射線監視設備

Advanced Radiation Monitoring System

Shoichi Sakamoto, Masaru Tamuro, Masakazu Nakanishi

坂本尚一\*  
田室 勝\*  
中西正一\*

## 要 旨

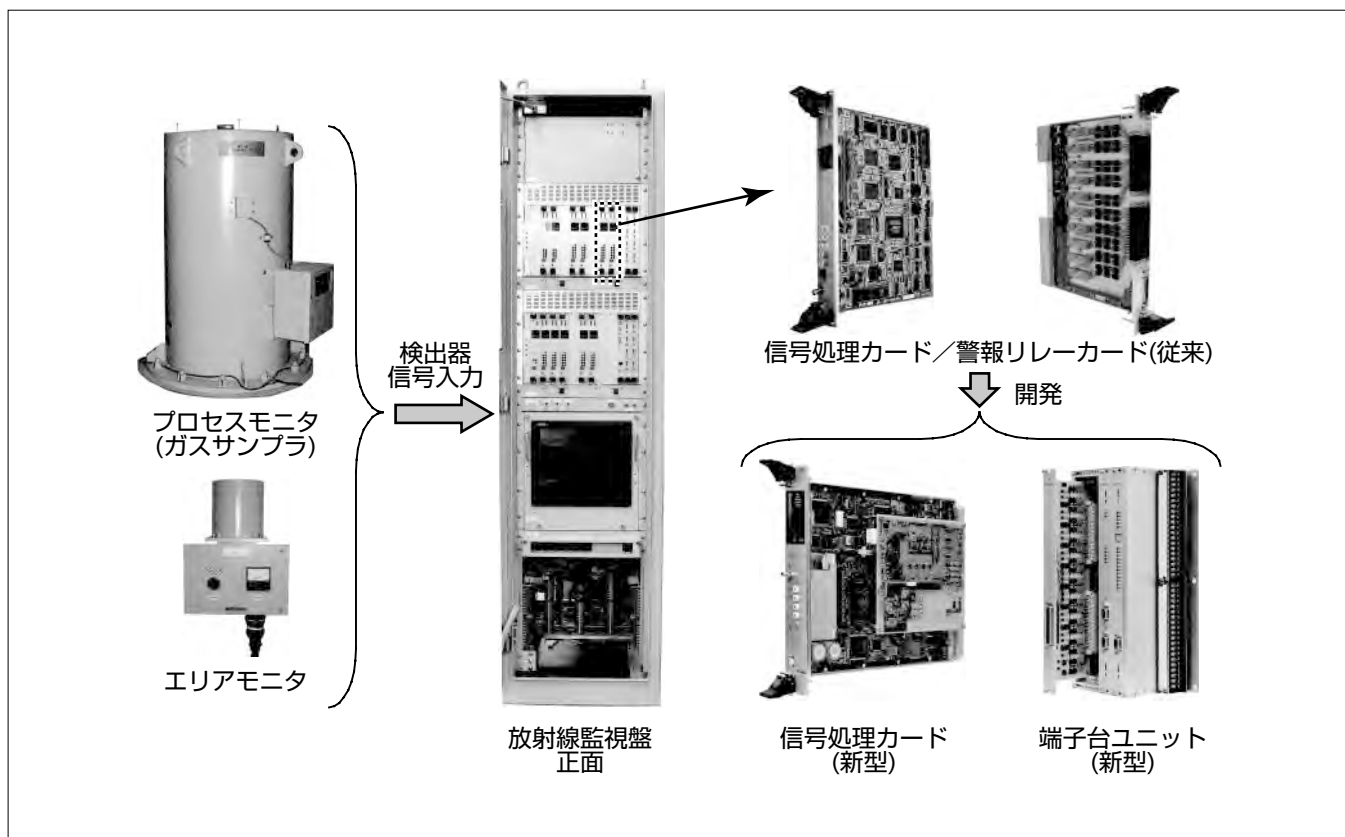
放射線監視設備は、人体に対する放射線障害防止、プラントからの放射性物質放出管理及びプラント異常の早期検知のため、原子力発電プラントにとって不可欠な設備であり、三菱電機では1969年以来国内すべての加圧水型軽水炉（Pressurized Water Reactor：PWR）発電プラントに納入している。

既設発電プラントに納入している放射線監視設備については、すでに稼働後20年以上経過しており、使用部品の生産中止に伴う保守在庫の確保、代替品への置き換え処理などによって保守費用が増大している状況から設備更新が急

務な状況にある。一方、米国では、多数の新設プラントの計画があり、三菱グループは、米国市場向けの改良型加圧水型軽水炉（US-APWR）を投入するため、NRC（Nuclear Regulatory Commission：原子力規制委員会）の型式認定活動を推進しており、放射線監視設備の安全系についても型式認定を取得するための活動している。

このような状況を踏まえ、現存設備の運用、保守の経験を反映し、耐ノイズ性強化、保守性及び長期供給性向上、さらに安全系の設備を開発している。

本稿では、新型放射線監視盤の開発状況について述べる。



## 放射線監視設備

放射線監視設備の主要な構成製品は、測定系の入力機器である放射線検出器を内蔵したプロセスモニタ、エアモニタ、この開発対象の放射線監視盤及び放射線監視盤に収納する従来のカードと新型のカード／ユニットからなる。端子台ユニットはインタフェースの信号種別によって、適合したカードを選定して構成する。



## 1. ま え が き

放射線監視設備は、人体に対する放射線障害防止、プラントからの放射性物質放出管理及びプラントの異常の早期検知のため、原子力発電プラントにとって不可欠な設備であり、三菱電機では1969年以来国内すべてのPWR発電プラントに納入している。

既設発電プラントに納入している放射線監視設備については、すでに稼働後20年以上が経過しており、使用部品の生産中止に伴う保守在庫の確保、代替品への置き換え処理などによって保守費用が増大している状況から設備更新が急務な状況にある。

また、三菱グループとして米国市場向けに改良型加圧水型軽水炉(US-APWR)の安全系放射線監視設備が必要である。

本稿では、国内向け放射線監視盤及びUS-APWR向けの安全系放射線監視盤の開発状況について述べる。

## 2. 新型放射線監視設備

新型放射線監視設備のシステム構成を図1に示す。

放射線監視設備は、測定対象の近傍に設置する検出装置と被測定流体を源流点から検出装置に移送するサンプリング盤、及び放射線監視盤(以下“測定系”という。)から構成されている。

検出装置からの検出器出力信号は、測定系で演算処理、放射線工学値データに変換し、警報状態及び機器の状態監

視情報とともにPWR発電プラント計装設備上位システムに伝送される。

放射線の検出装置は、主に人の立入り頻度の高い場所や放射性廃棄物の放出に係る排気・排水系統や発電所の運転状態の監視に必要な系統などに設置している。

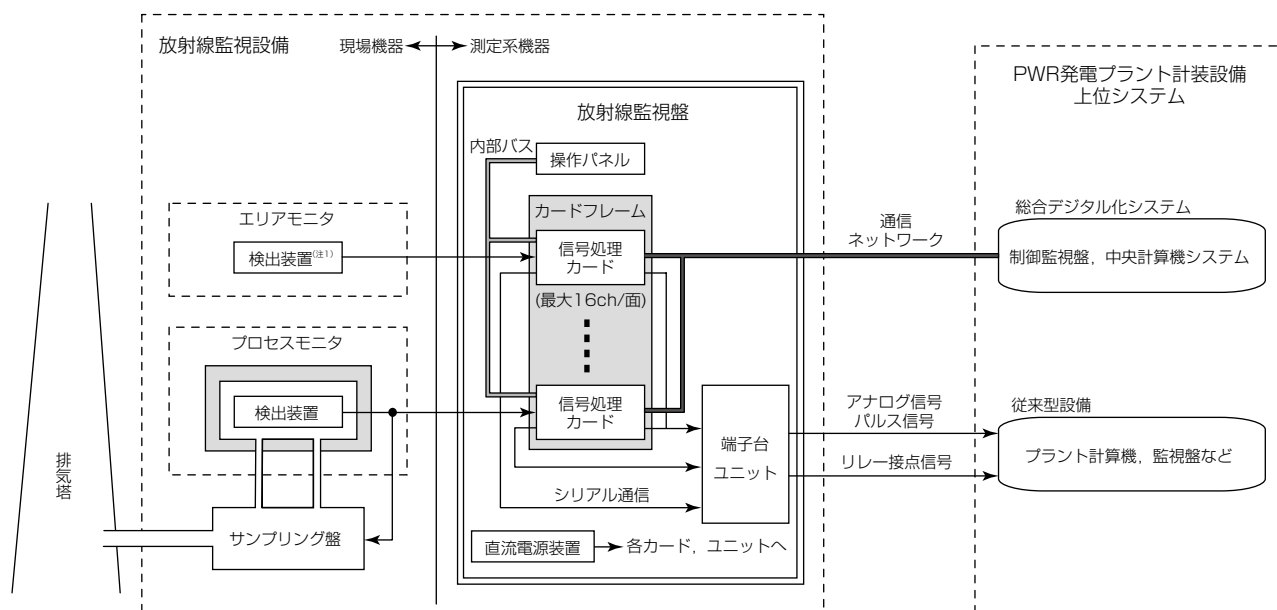
測定系は、検出装置から伝送されたパルス等の信号を受け、パルス整形(パルス出力型検出器の場合)、レート演算、警報比較演算、通信処理などを行う。

パルス出力型検出器を使用した測定系は、微小電圧のパルス信号を扱っており、フィールドから侵入するノイズの除去機能を備え、外部ノイズの影響を排除する。更に、安全系放射線監視設備は、単一故障基準、火災防護、分離(電氣的、物理的)及び耐環境性(耐震、EMC(Electro Magnetic Compatibility:電磁両立性)など)への適合を要求され、これは型式認定試験で確認する。

測定系の出力は、上位システムに合わせてフレキシブルに対応できる必要があり、最新の総合デジタル化システムの対応は通信出力、既設設備の対応は、上位システムに必要なアナログ信号、パルス信号、リレー接点信号等を出力する。

今回の開発は、従来設備をベースに次の観点で見直し、国内の既設設備の更新及びUS-APWR向けの安全系設備に対応できる新型放射線監視設備とした。

- (1) 耐ノイズ性強化
- (2) 保守性向上
- (3) 長期供給性向上
- (4) US-APWR向け安全系への適合化



(注1) 検出装置は、放射線検出器とプリアンプで構成している。

図1. 新型放射線監視設備のシステム構成

### 3. 測定系開発のポイント

測定系の主要機能を持つ信号処理カードの外観を図2、回路構成を図3に示す。

また、測定系の主要仕様を表1に示す。

測定系は、従来と同様に信号処理カード、管理カードとこれらのカードを収納するカードフレーム、端子台ユニット、直流電源装置、操作パネル及び盤筐体(きょうたい)で構成している。

この測定系の開発のポイントを次に述べる。

#### 3.1 耐ノイズ性強化

図4に従来構成と開発構成及び入出力信号経路を示す。外部からのノイズ侵入(誘導ノイズの重畳)、カードフレーム内でのノイズ発生(リレー開閉ノイズ)を抑制するため、次の改善を実施した。

##### (1) 端子台ユニットの設置

従来は検出器出力信号を盤外(フィールド)からカードフレームに直接入力し、リレー接点信号もカードフレームから直接盤外へ出力する構成で、ノイズに敏感な信号処理カードがノイズの影響を受けやすい構成であった。今回の開発では、カードフレーム内に外来ノイズが直接侵入しない

ようにノイズ経路を遮断する端子台ユニットを設けた。端子台ユニットは、アナログ信号、パルス信号のフィルタ回路、リレー接点信号用のリレーなどを収納する。

表1. 測定系の主要仕様

項目	仕様
対応検出器	半導体式検出器, NaI(Tl)シンチレーション検出器, PLシンチレーション検出器, 電離箱
演算処理機能	レート変換, 警報比較演算, サンプルング盤の監視, 制御
指示表示	計数率又は線量率, 機器情報, 系統図, スペクトル
表示方法	デジタル表示(LED仮数部3桁, 指数部1桁), 操作パネル表示(LCD表示)
外部出力 (モニタ1ch.当たり)	アナログ9点, パルス3点, リレー接点16点
通信出力 (モニタ1ch.当たり)	RS-422通信2点, RS-485通信4点, USB通信1点
接続モニタch.数	最大16ch./面
収納ユニット(盤1面当たり)	カードフレーム2段, 直流電源装置2台, 操作パネル1台
搭載カード (カードフレーム1段当たり)	信号処理カード <sup>(注2)</sup> 8枚, 管理カード <sup>(注2)</sup> 2枚
電源条件	電圧AC100V/AC115V±5%, 周波数50/60Hz±2%, 電源容量最大1kVA/面
環境条件	温度0~50℃, 湿度10~95%RH
外形寸法	600W×900D×2,300H(mm)

(注2) カードサイズ: 233.35×260(mm)

LED: Light Emitting Diode

LCD: Liquid Crystal Display



図2. 信号処理カード

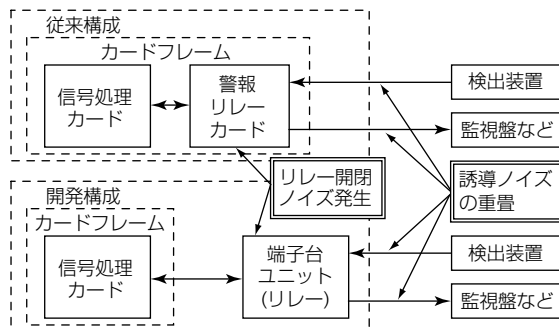


図4. 入出力信号経路図

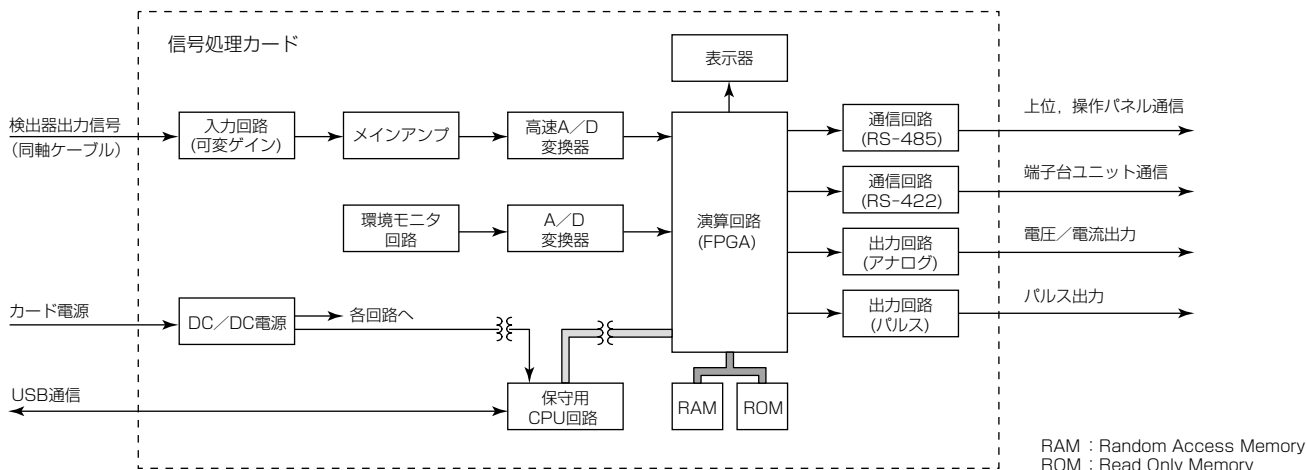


図3. 信号処理カードの回路構成

## (2) カードフレーム構造の見直し

放熱用給排気開口部の縮小化，構成部材の電氣的接続強化によって磁気シールドの性能を向上させる。

## (3) 入力信号の差動2線化

入力回路を差動入力回路に変更することでコモンモードノイズに対する影響を抑制する。

## (4) デジタル処理化

従来，検出器出力(パルス)信号の正極信号に対応したアナログ回路で構成し，設定電圧以上のパルス信号に対し立上り時間，パルス幅が規定値を外れた場合にノイズ除去を行っていた。そのため，ノイズが重畳した場合にはパルス信号をノイズ，又はノイズをパルス信号として判定する可能性があった(図5のパルス信号波形の例を参照)。

今回，検出器信号の正負両極信号に対応した高速A/D(Analogue/Digital)変換器(40Msps)でデジタル化してパルス信号の正負極性判定，立上り，立下り，パルスの重畳(ダブルパルス)を識別し，パルス信号に重畳したノイズ除去性能を向上させた。

## (5) シリアル通信の採用

信号処理カードと端子台ユニットはシリアル通信で行い，ノイズによるデータ変化を複数回読み込み多数決機能によってノイズの影響を排除する。

## 3.2 保守性向上

顧客(電力会社)が定めた保安規定に従い，放射線レベルが警報点を越えて警報を発信した場合は，誤警報でない限り，発信から一定時間内に原子力発電所の運転を手動で停止する必要がある。

誤警報は測定系の故障，外部ノイズの影響などによって発生するため，誤警報による原子力発電所の停止を回避するために短時間で要因が特定可能なように次の処理を追加した。

### (1) パルス信号の波形保存

パルス信号を高速A/D変換器でデジタル化した波形データを逐次保存(約1,000波形)し，そのデータを解析することで誤警報の有無を判定する。

### (2) カード内の環境状態信号の採取

信号処理カード内の電源電圧，温度，振動データ及び設定電圧，警報設定値，警報状態等の設定データを一定周期(2ms)で保存(約4,000個)し，保存データを解析することで誤警報の有無を判断する。

これらの保存データは，保守用パソコンで容易に解析が可能なように，カード前面に設けたUSB(Universal Serial Bus)端子から取り出せるようにし，また，カード交換後

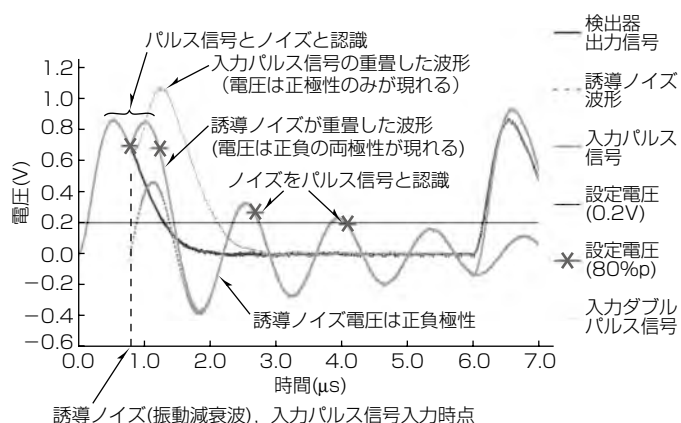


図5. パルス信号波形の例

のカード単体からも取り出せるようにUSB端子からの電力供給で保守用CPU(Central Processing Unit)回路を駆動可能とした。

## 3.3 長期供給性向上

従来は演算回路にCPUを使用しており，CPU変更はソフトウェアを含めた再開発が必要であったため，ソフトウェア変更が不要なFPGA(Field Programmable Gate Array)を使用することで長期供給性の向上を図った。

## 3.4 US-APWR向け安全系への適合化

安全系は，NRCの型式認定を取得するため，NRCの審査基準に従い適用法令，規格，基準を満足する仕様とし，早期に認定が得られるようにソフトウェアを排除し，すべてハードウェアでの回路構成とした。すべてハードウェア回路構成とすることでV&V(Verification and Validation)作業の必要がなく，要求されるノイズ試験項目も簡素となり短時間で開発が可能となる。

## 4. む す び

国内の既設プラント更新及び米国向けUS-APWRプラントへの適用を計画している新型放射線監視設備の測定系の概要と特長について述べた。この測定系の採用によってPWR発電プラントの信頼性向上，保守作業の効率化に寄与することが期待される。また，米国向けはNRCの型式認定を取得し，US-APWRの標準タイプとして展開を進めていく所存である。

## 参考文献

- (1) 高岡 章，ほか：放射線計装設備の更新技術，三菱電機技報，77，No12，758～761 (2003)

# モジュール型AVR・ガバナ

野口紳也\*  
森田和宏\*  
岡嶋靖樹\*

Module type Automatic Voltage Regulator and Governor Controller

Shinya Noguchi, Kazuhiro Morita, Yasuki Okajima

## 要 旨

発電機の自動電圧調整装置(Automatic Voltage Regulator: AVR)及び水力プラント向け調速機(Governor: 以下“ガバナ”という。)は、1990年ごろにデジタル化され、一部の機種変遷を経ながら高信頼性化、高機能化などのニーズにこたえてきた。既存機種は開発から10~20年が経過したので、生産中止部品への対応や、生産性向上と機能改善を目的として新機種を開発した。新機種開発の課題は次のとおりであった。

### (1) 生産性向上

世界的な電力需要の伸びに加え、老朽化した設備の更新需要もあり、増加する需要と要求納期に対応できる生産性の高い製品とする。

### (2) 機能向上

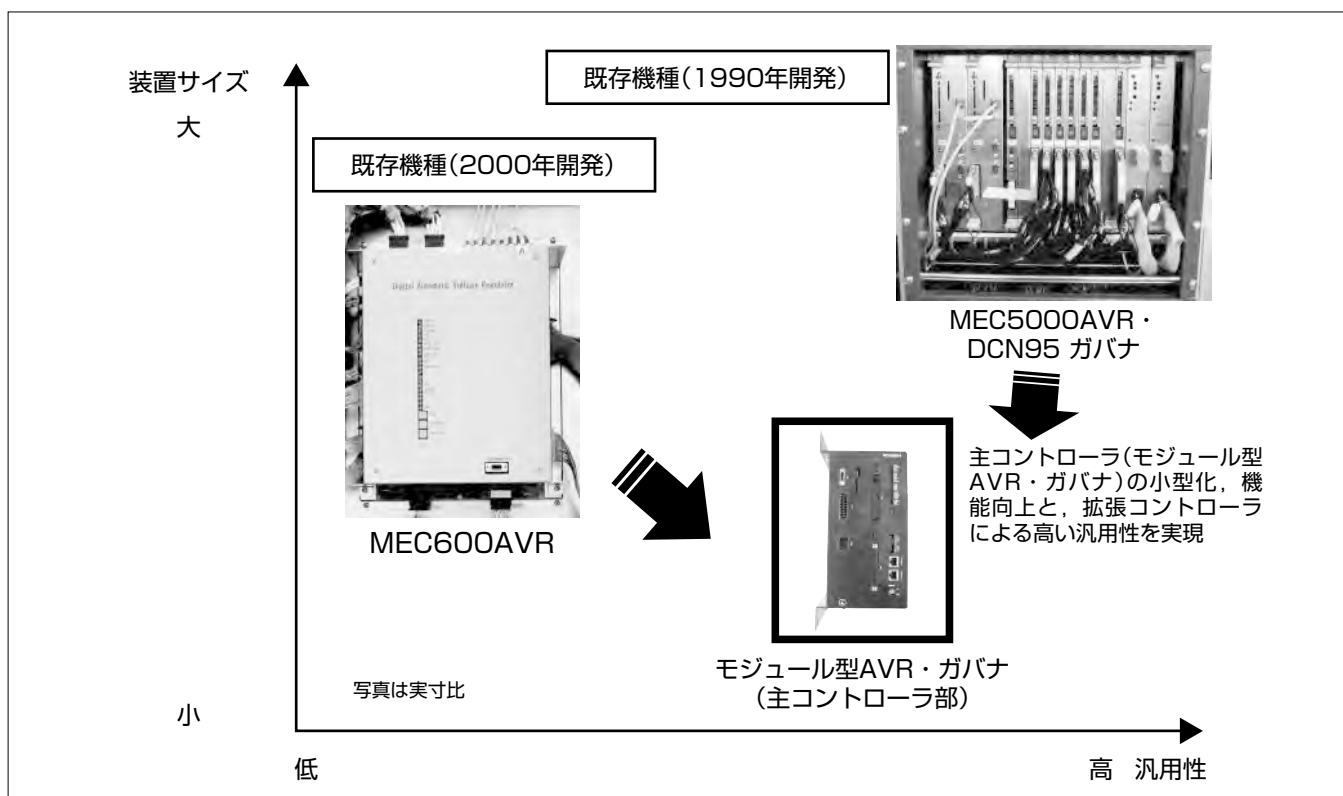
火力／水力全般及び揚水発電所などでの要求に対応できる多機能、高性能に対応する製品とする。

### (3) 生産継続性

発電プラントでの長期間の稼働・保守を考慮した部品選定・共用化を図った製品とする。

これらの課題解決のため、以下を開発コンセプトとした。

- (1) ロジック固定のモジュール部(主コントローラ部)と、顧客要求でカスタマイズできる拡張コントローラ部に分割することで多機能に対応し、設計要素の明確化を計る。
- (2) モジュール型AVR・ガバナには通常の発電プラントで要求されている機能・性能を搭載し、70%以上の市場にはモジュール部のみで対応可能とする。これによって工事ごとの新規ロジック設計をなくし高生産性、高品質を図る。
- (3) AVRと水力ガバナでハードウェア(プリントカード)を共用化し、生産性、保守性の向上を図る。



## AVR・水力ガバナの機種変遷

デジタルAVR・水力ガバナは、従来のアナログ式の型名を踏襲し、AVRを“MEC5000”、ガバナを“DCN95”とし1990年に開発・市場投入した。2000年には主に海外・自家発電の市場をターゲットに機能限定した“MEC600”AVRを開発・市場投入した。今回述べるモジュール型はハードウェアの小型化とロジック固定化を実現しつつ、拡張コントローラとの組み合わせによって高い汎用(はんよう)性を実現した。

# 1. ま え が き

AVR及び水力ガバナは、1990年ごろにデジタル化され、一部の機種変遷を経ながら高信頼性化、高機能化などのニーズにこたえてきた。今般、世界的な電力需要の伸びに対応する増産、納期改善(生産性向上)、火力／水力及び揚水プラントなどに要求される機能・性能、発電プラントでの長期間の稼働(生産継続性向上)に対応することを目的にモジュール型AVR・ガバナを開発した。

この開発では、ハードウェア構成をロジック固定部と可変部に明確に分離して、“中モジュラ・外インテグラル”の考え方を導入することで、生産性・設計品質向上のためのロジック固定化を実現しつつ、高い汎用性を実現した。

## 2. モジュール型AVR・ガバナの基本仕様

### 2.1 ハードウェア仕様

新たに開発したモジュール型AVR・ガバナと既存機種のハードウェア仕様の比較を表1に示す。

モジュール型AVR・ガバナの特徴を次に示す。

#### (1) モジュール型(一体箱型)構造

制御盤内での設置及び保守の容易性向上を目的として、既存機種で採用していたカードフレーム型ではなく、小型のモジュール型構造とした。また、各種I/O(Input/Output)はすべてコネクタ接続とし、外部接続を簡素化すると同時に、すべてのコネクタの種別、ピン数を変えることで誤配線を防いだ。

また、モジュール型AVR・ガバナはCPU(Central Processing Unit)等デジタル回路を搭載した制御装置であるため、外来ノイズの影響を受けないように実装する必要がある。配電盤は、図1のように左側をクリーン側(低圧回路、アナログ信号などのノイズを出さず、ノイズの影響を避ける機器を配置)とするように設計しているため、標準的な盤内配置を考慮し、配電盤左側面の壁に取付けでき、かつ放熱を考慮し、取付け面との間に放熱スペースを設け

た図2のような独特な構造とした。

#### (2) 処理能力・精度の向上

性能・機能向上のため、従来機種より処理能力の高いCPU(32ビット RISC/240MHz)を採用した(表1の主CPUの欄を参照)。

また、アナログ入出力のA/D(Analogue/Digital)、D/A変換を、従来機種の12ビットから16ビット対応に変更することで分解能を高め、更なる精度向上を図った。

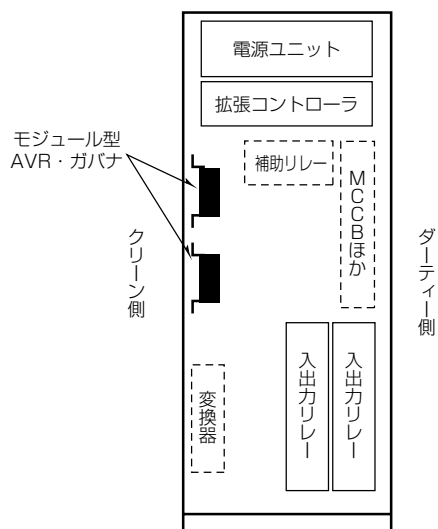
#### (3) 小型・軽量化

配電盤内のスペースファクタの向上、保守性向上を目的として、回路構成の最適化による部品及びプリントカードの小型化、枚数の低減を図り、モジュールを小型・軽量化した。

(体積比で、従来型MEC5000/DCN95の、約80%減、従来型MEC600の約50%減)

#### (4) 低消費電力

消費電力抑制を目的として、入出力回路の回路電源電圧の最適化見直し、省電力部品への置き換え、部品点数の削減を行った。



MCCB : Molded Case Circuit Breaker

図1. 盤内取付けイメージ

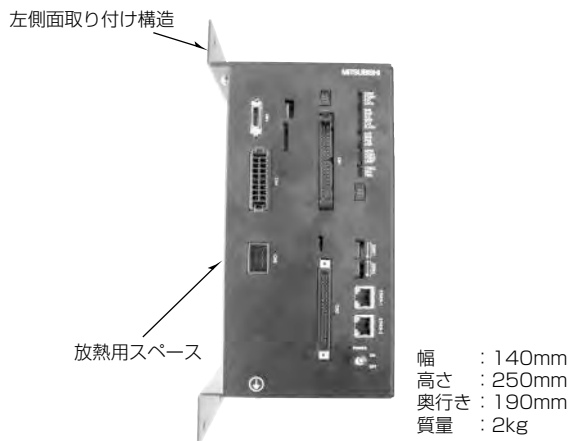


図2. モジュール型AVR・ガバナの外観

表1. ハードウェア仕様の比較

	従来機種 MEC5000 /DCN95	従来機種 MEC600	新機種 モジュール型 AVR・ガバナ
構成 (基本構成)	カードフレーム型 (カード5枚)	ユニット型 (カード2枚)	モジュール型 (カード4枚)
主CPU	32bit CISC 133MHz	32Bit RISC 20MHz	32bit RISC 240MHz
大きさ (mm)	W : 480 H : 400 D : 400 (2重化) (体積 : 76.8L)	W : 320 H : 390 D : 110 × 2台(2重化) (体積 : 27.5L)	W : 140 H : 250 D : 190 × 2台(2重化) (体積 : 13.3L)
質量	10kg	5 kg	2 kg
消費電力	160W	90W	70W

CISC : Complex Instruction Set Computer  
RISC : Reduced Instruction Set Computer

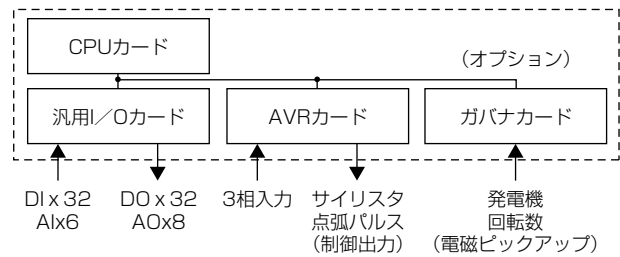


表 2. AVRモジュール搭載機能と拡張コントローラ部の機能

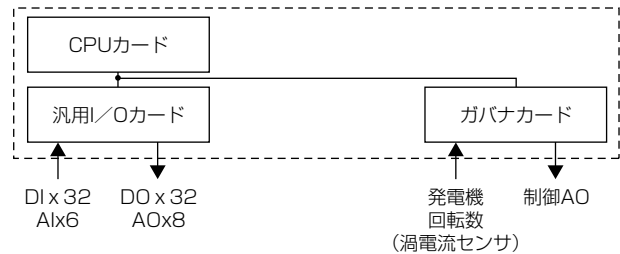
AVR モジュール 搭載機能	標準制御 機能	・AVR自動／手動 ・OEL(過励磁制限) ・MEL(低励磁制限)
	付加機能	・CCC(横流補償) ・LDC(無効分による電圧補償) ・RDC(有効分による電圧補償) ・PSS(電力安定化装置) ・VFL(V/Hz制限) ・SCL(固定子電流制限) ・AQR(無効電力一定制御) ・APFR(力率一定制御) ・SFC(サイリスタ始動対応制御) ・電気ブレーキ励磁
拡張コントローラ部 機能		・揚水プラントの特殊制御 ・二軸同期起動発電機の起動制御 ・発電所特化の特殊な制御(無効電力制御など)

表 3. AVR・ガバナの特殊入出力

AVR	発電機の電圧・電流値信号(3相交流入力) サイリスタ点弧用同期信号入力 サイリスタ点弧パルス出力 発電機回転数入力(電磁ピックアップ入力)
ガバナ	発電機回転数入力(渦電流センサ入力)



(a) AVRモジュール



(b) ガバナモジュール

図 3. モジュール内カード構成

(従来型MEC5000/DCN95の約50%減, 従来型MEC600の約20%減)

## 2.2 ソフトウェア仕様

モジュール型AVR・ガバナの制御ロジックは、生産性、品質向上を目的に、標準的な発電プラントで要求され、5msの高速演算を求められる機能を固定ロジックとして搭載した。発電プラントごとに異なる付加機能の使用／不使用選択、制御設定値変更などは、保守ツール(メンテナンス用ノート型パソコン)からのパラメータ設定によって行う構成とした。

特にAVRに関しては、標準的な発電プラントで要求される機能を網羅するように、表2に示す標準制御機能及び付加機能をAVRモジュールに搭載した。これによって、70%以上の発電プラントについては、AVRモジュールのみで顧客要求仕様を満足することが可能である。揚水プラント、二軸同期など、一部の発電プラントで要求される特殊制御は拡張コントローラ部で実現する。

## 3. システム構成の特徴

### 3.1 プリントカード共用化による生産性向上

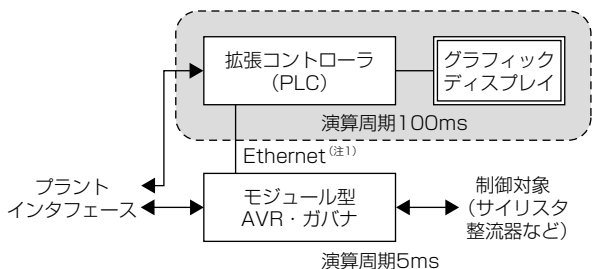
制御演算に必要な主演算部(CPU部)及び汎用的なデジタル入出力とアナログ入出力についてはAVRとガバナで共用化が可能である。したがって、共用可能な部分については同一ハードウェア(プリントカード)で実現し、基本ハードウェアの共用化を図った。

AVRと水力ガバナは表3のとおりそれぞれが特殊な入出力回路を必要としており、専用のカードが必要である。このうち、AVRで客先要求によって追加される $\Delta\omega$ 型PSS(Power System Stabilizer)で必要となる電磁ピックアップによる発電機回転数入力と、ガバナで必要となる渦電流センサによる発電機回転数入力は、原理的に類似してい

基本構成(モジュール単体)



特殊要求対応(拡張コントローラを付加)



(注1) Ethernetは、富士ゼロックス(株)の登録商標である。

図 4. 拡張コントローラ接続イメージ

るので、入力回路のみ個別に設け、計測部は共用化した統一カードとした(図3 ガバナカード部参照)。

プリントカードの共用化によって、従来の機種ごとに個別ハードウェアを製作する場合に比べ、ロット生産などの活用による生産性の向上が可能となる。また、将来的に発生することが予想される搭載部品の生産中止対応も、代替品を共通的に検討・対策することができる。

### 3.2 拡張コントローラによる顧客要求仕様の実現

モジュール型AVR・ガバナは、多くの発電プラントでの標準的な顧客要求機能・性能を満足する設計としているが、発電プラントによっては特殊な制御が必要となる。

顧客からのカスタマイズ要求に対して柔軟に対応するために、可変ロジック専用のハードウェアである拡張コントローラ(Programmable Logic Controller: PLC)を付加することができるシステム構成とした(図4, 表4参照)。

表 4. システム仕様比較

	従来機種 MEC5000 ／DCN95	従来機種 MEC600	新機種 モジュール型 AVR・ガバナ	新機種 モジュール型 AVR・ガバナ+ 拡張コントローラ
演算周期	5 ms (低速部50ms)	10ms	5 ms	5 ms (拡張部100ms)
波形記録機能	5 ms周期 1 回	20ms周期 1 回	5ms周期 5回	5ms周期 5回
グラフィックパネル	○	×	×	○
試験用シミュレータ	○	×	○	○
拡張性	○	×	×	○
AVR	CT	3相／単相	単相	3相／単相
	$\Delta f$ 型PSS	オプション	$\Delta$ (リアクタンス補正なし)	○
	$\Delta\omega$ 型PSS	オプション	×	オプション
	揚水制御	○	×	○
	特殊Q制御	○	×	○
ガバナ	分解能	12Bit (X級対応可)	—	16Bit (X級対応可)
	RV制御	○	—	○
	水調制御	○	—	○

CT：Current Transformer  
RV：Runner Vane

拡張コントローラの役割は次の2つである。

- (1) モジュール型AVR・ガバナに対し、条件によって自動で設定値変更や、制御コマンドを出力する。

例：無効電力一定制御で、その設定値を特殊な条件で設定する(複数の発電機間のバランス制御など)。

- (2) モジュール型AVR・ガバナの制御と連動し、個別のシーケンス制御をする。

例：揚水プラントで、起動・停止時にAVR制御と連動して励磁電源切替開閉器のON／OFF指令を出力する。

これらの役割にはAVR・ガバナの主制御のような5msの高速演算は不要であるため、PLCを適用した。

また、この拡張コントローラが故障した場合でも、モジュール型AVR・ガバナによって主制御が継続されるため、発電プラントの運転継続が可能である。

## 4. む す び

モジュール型AVR・ガバナは、2010年度に水力発電所向けシステムに適用し、順次適用を拡大していく計画である。

AVR・ガバナは、発電機及び水車という主機を制御しており、発電プラントには不可欠で、重要な装置である。今回開発したモジュール型AVR・ガバナによって、小型・省電力化された高機能なシステムを実現した。今後ともユーザーニーズを反映させながら、よりユーザーに満足してもらえるシステム提供を目指して努力する所存である。

# 低炭素社会における水力プラントの有効活用技術

平沢京太郎\*  
西都一浩\*  
佐藤裕二\*

Effective Utilization Technology of Hydropower Plant in Low Carbon Society

Kyotaro Hirasawa, Kazuhiro Saito, Yuji Sato

## 要 旨

低炭素社会の実現に向けて、水力発電の価値が見直されている。水力発電の有効活用技術として、環境負荷を低減させる監視制御装置と揚水発電所の価値を向上させる可変速揚水化の経済性評価ツールについて述べる。

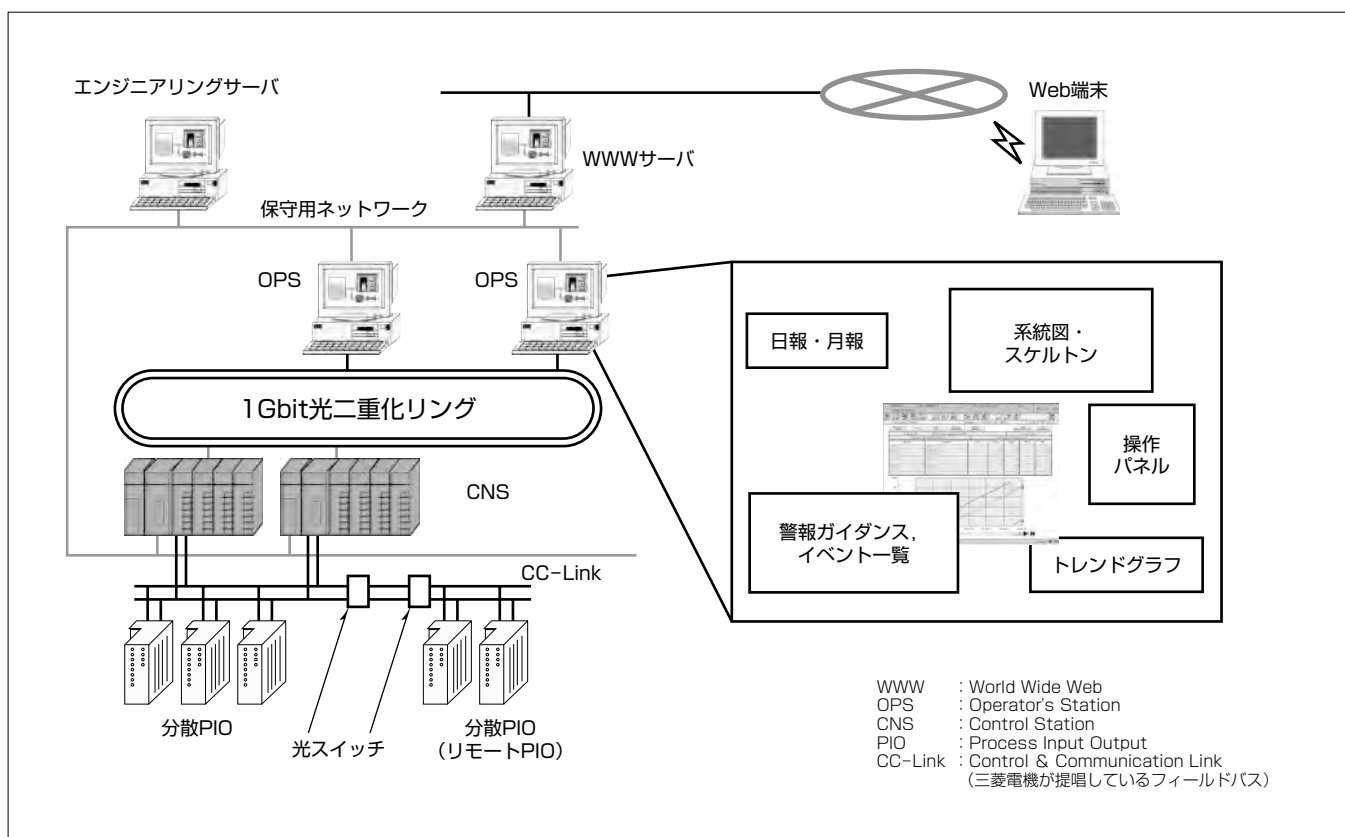
### (1) 新型監視制御システム

現在稼働中の監視制御装置の多くは、稼働から15年以上経過し、更新需要が高まっている。三菱電機は、新型監視制御システム“MELHOPE530”を開発・適用している。このシステムの特長は次のとおりである。

- ①省スペースと省電力化
- ②高信頼性と高機能化(保守性向上)
- ③リプレースの容易性

### (2) 可変速導入経済性評価ツール

CO<sub>2</sub>削減の一環として、化石燃料電源からゼロ・エミッション電源である原子力・新エネルギーへの転換が加速している。ゼロ・エミッション電源であり唯一の純国産エネルギーである水力発電所の価値向上のため、新エネルギーによる需給バランスの変化に対応可能な、既設揚水発電所の可変速化を提案している。この可変速化の推進をサポートする経済性評価ツールを開発した。ツールは、最適な需給計画を計算し、発電コストを算出する機能を持つ。つまり、既設揚水発電所を可変速化する前後の発電コストをそれぞれ計算することで定量的な可変速導入の経済性を評価するツールである。



## 新型監視制御システム“MELHOPE530”

水力発電所の新型監視制御システムは、OPSとCNSから構成され、既設発電所のリプレースに柔軟に対応できることを特長とする。

## 1. ま え が き

水力発電プラントの有効活用技術として、2章で省エネルギー、省スペースと高機能化を実現した新型監視制御システム、3章でCO<sub>2</sub>削減に貢献する揚水発電所の変速化の経済性評価ツールについて述べる。

## 2. 新型監視制御システム“MELHOPE530”

### 2.1 既設監視制御システムの更新

現在稼働中の水力発電所向けプラント監視制御システムの多くは、稼働から15年以上経過しており、更新需要が高まっている。このため、既設設備の更新で、様々なメリットを持つ新型監視制御システムを開発・適用している。

### 2.2 新型監視制御システムのメリット

新型監視制御システムは、環境性、操作性、保守性の向上を実現するシステムとなっており、次に示すメリットを持つ。

#### (1) 省スペースと省電力化

盤の最適設計と技術の進歩によって、制御装置を構成する部品の削減、小型化及び高密度化を図り、盤面数低減、消費電力低減によるCO<sub>2</sub>排出量の削減に寄与する。

#### (2) 高信頼性と高機能化

二重化構成による制御システムの信頼性確保、及び大量の制御／監視データ管理とロジックモニタ機能などによる故障解析機能の高度化を実現している。

#### (3) 将来のリプレースの容易性

汎用性の高い機器とフィールドバス“CC-Link”を採用し、部分更新が容易なシステムとすることで、機器の寿命に見合う更新を可能とし、保守費用を低減させる。

### 2.3 MELHOPE530システムの特長

2.2節に記載したメリットを実現する監視制御システムがMELHOPE530である。図1にMELHOPE530システムのシステム構成を示す。次に、このシステムの特長を述べる。

#### 2.3.1 省スペース、省電力化

ラックアップ構造の最適化によって盤のファンレス化、

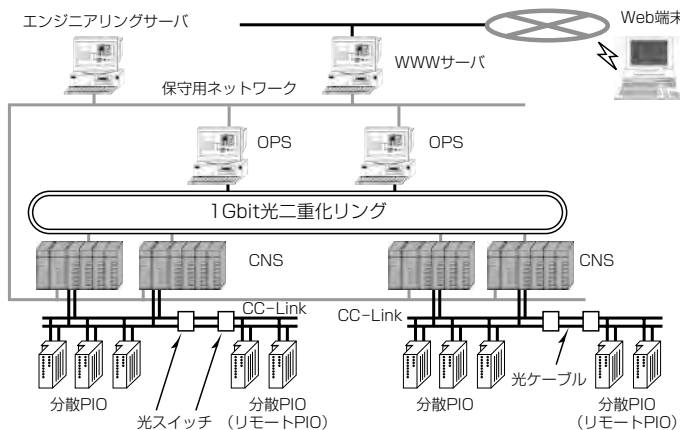


図1. MELHOPE530のシステム構成

CPU(Central Processing Unit)のファンレス化を実現した。また、CPUの小型化に伴い消費電力の低減を実現しCO<sub>2</sub>排出量削減に貢献している(例：CPUカードの消費電力は従来比80%低減)。

従来はCPU、電源、PIO(Process Input Output)ともシャーシ実装のカード型(図2)であったが、このシステムではDIN(Deutsches Institut fuer Normung)レールラックマウントタイプのベースユニットに各CPU／電源／PIOを取り付けるモジュール型となっている(図3)。このため、ラックアップの自由度が向上した。また、リモートPIO化することで、必要な箇所に壁掛け盤等による分散配置を可能とした。この結果、PIO用自立盤を削減し、省スペースとケーブル量削減を実現した。これによって、既設発電所の盤配置の制約を最小限にする。

また、PIOは外部ケーブルを直接接続できる端子台タイプとコネクタタイプ(図4)の2タイプを用意している。端子台タイプを採用することで、既設中継端子盤を削減することが可能となった。また、既設中継端子盤を流用する場合は、コネクタタイプを採用することで、既設盤までのケーブルを流用した盤更新も可能である。また、端子台タイプとコネクタタイプは混在可能であるため、フレキシブルなシステム構成が可能である。

#### 2.3.2 高信頼性、高機能化

##### (1) 二重化構成

従来システムと同様に高い信頼性とするため、制御装置のCPU、CPU電源及び、盤電源はそれぞれ二重化構成と

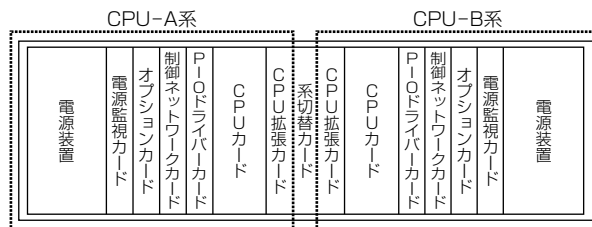


図2. 従来のCPUユニット

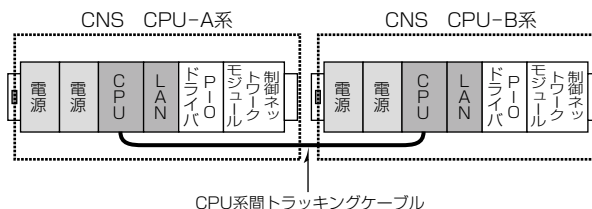


図3. 最新システムのCPUユニット

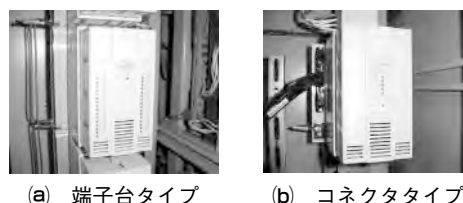


図4. 端子台タイプとコネクタタイプのPIO

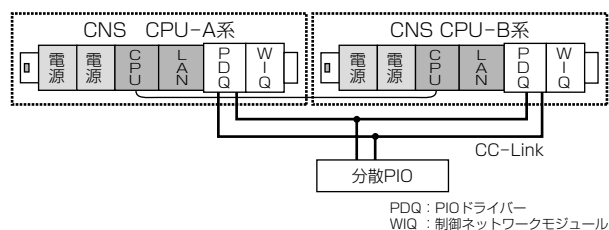


図5. PIOネットワークの二重化構造

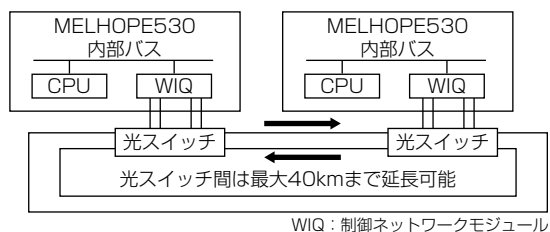


図6. 制御ネットワーク

表1. マンマシン機能

大分類	小分類
イベント監視	警報記録機能
	補機動作記録機能
	高速故障記録(1ms分解能)
プラント監視/制御	系統図表示
	CRTオペレーション
	起動/停止シーケンスモニタ
	トレンドグラフ
	4画面マルチ画面表示
	Dualモニタ対応
記録機能	日報/月報/年報(最長10年)
	イベント履歴機能(5万件)

CRT: Cathode Ray Tube

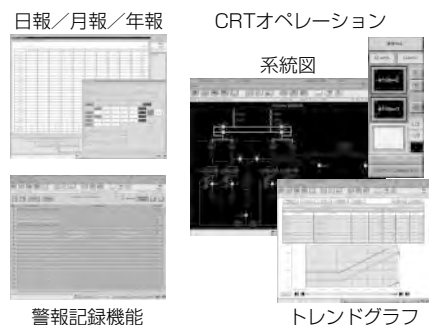


図7. マンマシン機能の画面例

している。また、PIOとCNSのCPU間のPIOネットワークも二重化構成(図5)としており、ネットワークの一方が故障した場合でもシステムに影響を与えることなく監視制御を継続することが可能である。

制御ネットワークは、大容量化と高出力光モジュールの採用によって、光スイッチ間距離の長距離化を実現し、発電所だけでなく開閉所、ダム設備などを含めた監視制御を可能としている(図6)。

## (2) マンマシン機能

多彩なマンマシン機能をサポートしている(表1, 図7)。

## (3) 保守支援機能

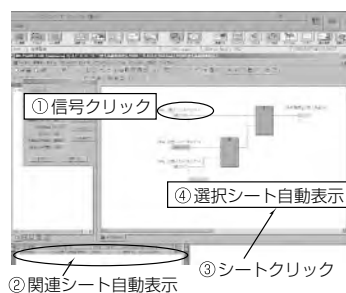


図8. ロジックモニタの画面例

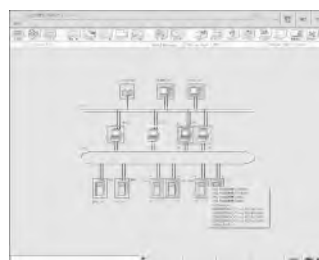


図9. システム稼働状態表示の画面例

保守支援機能として、系統図表示画面上のアナログデータをクリックすると関連するトレンドグラフを表示できる。また、警報メッセージから当該警報を検出した制御ロジックへの自動展開機能(ロジックモニタ機能)を持っており、警報発生時に要因判別を支援する。

制御ロジック内で使用している信号(線番)をクリックすると、この信号を書き込んでいるロジック又は、読み出しているロジックにワンアクションでジャンプすることができるクロスリファレンス表示をサポートしている(図8)。

また、監視制御システム全体の状態監視、詳細故障情報、エラーメッセージの確認とリセットが可能である。制御装置のCPU、PIOモジュール単位で状態監視が可能であり、OPSにてシステム稼働状態と故障情報を確認できるため、OPSを事務所や遠隔地に設置することで、現場に行く前にもどの装置のどのモジュールが故障したのか、を判断できるため、復旧を迅速に行うことが可能となる(図9)。

なお、制御装置のプログラム言語は国際標準言語IEC-61131.3に準拠しており、ST(Structured Text)、IL(Instruction List)、FBD(Function Block Diagram)、LD(Ladder Diagram)、SFC(Sequential Function Chart)をサポートしている。

## 2.3.3 将来のリプレースの容易性

盤構成として、CPU収納盤、PIO収納盤、端子パネル収納盤など、盤収納機器を分類し、機器間を汎用(はんよう)のフィールドバス“CC-Link”で接続することで、盤単位、機器単位でリプレースすることを容易にしている。

## 3. 可変速揚水発電システムの経済性評価ツール

### 3.1 可変速揚水発電システムを取り巻く状況

CO<sub>2</sub>削減の一環として、化石燃料電源から原子力・新エ



表 2. 可変速揚水発電システムの特長

特長	メリット
揚水運転での入力電力調整	夜間の周波数調整を火力機の替わりに行う。 原子力(固定電力)増加時の周波数調整を可能とする。
発電運転の効率向上	水(自然エネルギー)の有効活用 発電単価の低減
有効(無効)電力の高速制御	新エネルギーのような天候に左右されやすい電源に対応した電力の吸放出による過渡安定度の向上
系統事故時の擾乱減少	可変速機は電力動揺が発生しない。 隣接号機の動揺の抑制が可能

エネルギーへの転換が加速している。このような電源構成の変化で、新エネルギーは、出力が天候に左右され不安定になる。そのため、需給バランスの変化への対応策が必要となり、様々な特長を持つ可変速揚水発電システム(表2)が、有効な解決手段の一つとなる。当社は、これまで納入した3プラントの可変速揚水発電所で確立した技術を生かし、今後見込まれる可変速揚水発電システムの需要の増大に対応する方針である。需要増大に対応するには、新規に発電所を建設するだけでなく、既設揚水発電所の可変速化に向けた取り組みが最重要課題であり、この取り組みをサポートする目的で、可変速揚水発電システムの経済性評価ツールを開発した。

### 3.2 既設揚水発電所の可変速化のメリット

国内における、急速な新エネルギーの増加に対応するため、最短期間で可変速システムを得るには、次の2点から既設揚水発電所の可変速化がコスト及び期間を最小に抑えられる手段である。

- (1) 揚水発電所の立地条件にあう地点の確保が不要である(土木費の抑制)。
- (2) ダムを含めた既存の設備を流用でき、最小限の設備(機器)の更新で済む。

### 3.3 ツールの概要

既設揚水発電所の可変速化を促進するには、投資による経済効果を把握できる必要があり、定量評価を可能にしたツールを開発した。

#### 3.3.1 定量評価の考え方

電力会社ごとに最適需給計画が立てられ、計画に沿った火力及び水力発電所の運用が行われている。需給計画における揚水発電所は、夜間の安価な電力で揚水し、昼間、発電することで高コスト火力機の運用を抑制する役割を持っている。可変速揚水発電システムの導入時と未導入時の需給計画を計算し、発電コストの変化額を導入効果として定量評価する。

#### 3.3.2 ツールの内容

需給計画は、電力会社ごとに、運用のノウハウがあるが、一般的に次のような条件を考慮した上で最適化処理を行っている。

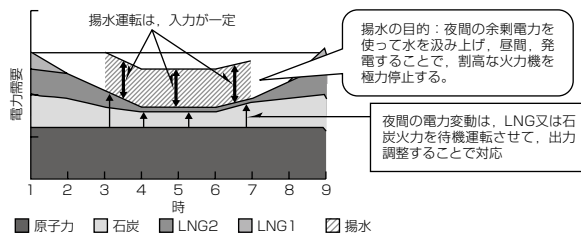


図10. 可変速機導入前の夜間の電力調整

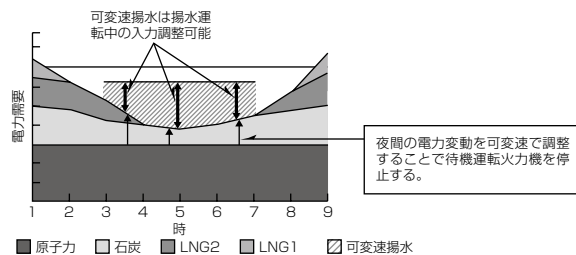


図11. 可変速機導入後の夜間の電力調整

#### (1) 発電機特性と機器制約

実運用に即し、発電機特性(火力機燃料費特性、出力変化速度など)と機器制約(最小運転/停止時間)、水位制約(ダムの水量、水位運用)などの条件を考慮している。

#### (2) 需給計画

一週間分の最適需給計画を計算するためのツールであるため、経済効果についても一週間のコスト評価を行っている。一週間とすることで、平日と土日の需給運用の違いを評価できるメリットがある。

### 3.4 効果の確認

ツールによる計算結果例から次のような可変速導入効果を確認できている(図10, 図11)。

- (1) 夜間の電力変動を可変速揚水で調整して、変動に対応するため低出力(低効率)で運転していた火力機を、夜間電力供給向けの高出力(高効率)運転機と、夜間停止機に分け、火力機の運用効率が改善することによるコスト削減及びCO<sub>2</sub>削減
- (2) 可変速揚水は夜間の揚水量を増大できるので昼間の水力機による発電量を増やすことができ、発電コストの高い火力機発電量を減少させることによるコスト削減及びCO<sub>2</sub>削減

## 4. む す び

監視制御システムについては、プラント事故解析、故障予測、保守支援機能といった保守性の改善と省電力実現に向けて、継続して機能向上に取り組んでいく。

新エネルギーの増加に伴い、昼間の可変速揚水発電システムによる余剰電力の吸収、また、天候に左右されやすく急激な出力変動がある新エネルギーに対し、即応性を備えた可変速揚水発電システムの重要性が増すことから、その経済的評価を可能としたツールは有効である。

# 新通風方式を採用した 大容量空気冷却タービン発電機

古賀清訓\*

Large Capacity Air-cooled Turbine Generator with New Ventilation System

Kiyonori Koga

## 要 旨

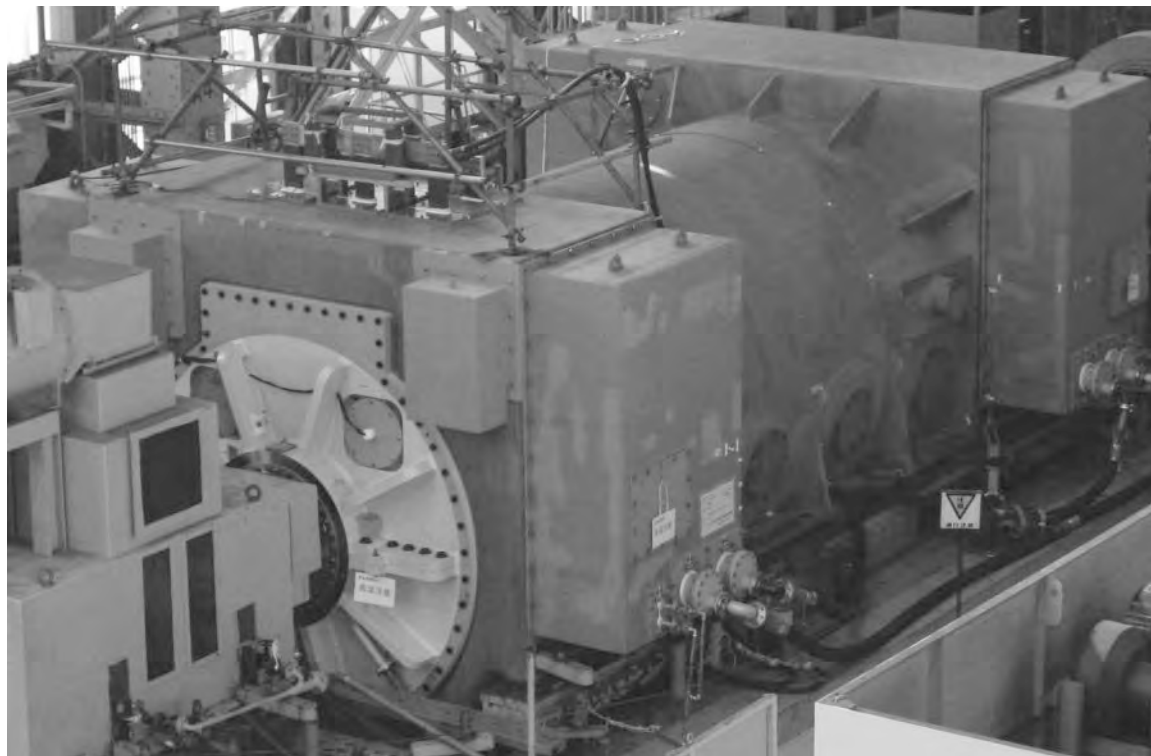
近年、火力発電プラントにおいては、ガスタービンを利用した熱効率の高い複合型発電方式(GTCC)の利用が世界的に拡大している。このGTCCは年々高性能化されており、このGTCCに対応する空気冷却タービン発電機についても高出力・大容量化することが要求されている。これに対応し三菱電機では新通風方式を採用することで高出力・大容量化した新型の空気冷却タービン発電機を市場投入した。

一般に空気冷却タービン発電機の大容量化には、冷却性能の向上が課題となる。新通風方式では冷却空気の流れを従来の“ファン→本体→空気冷却器(クーラー)”から“ファン→空気冷却器(クーラー)→本体”に変更することで、空気冷却器で冷却された空気を直接本体に送り込めるために、同一体格の条件で比較した場合、新通風方式を適用した発電機は従来機と比べ高出力化・大容量化が可能となった。

また、機内冷却空気を循環させるファンまわりを中心に冷却空気の流れについて流体解析や縮小モデルによる風洞試験を重ね、結果を設計に反映することで冷却性能の向上を図り、空気冷却タービン発電機の高出力化・大容量化を実現できた。

400MVA級の空気冷却タービン発電機にも適用する新技術の総合試験実施のため、220MVAのプロトタイプ機を試作し、工場で実機検証試験を実施した。試験結果は固定子コイル温度の約10Kの低減、約0.1%の効率向上などいずれも良好な結果を確認した。

これらの技術試験結果を基に、今後も引き続き技術開発を進めることで、空気冷却タービン発電機の大容量化と高効率化に取り組んでいく。



## 220MVAプロトタイプ空気冷却タービン発電機

新通風方式を適用した220MVAの空気冷却タービン発電機を試作し、工場試験によって設計の妥当性と信頼性を確認した。これらの技術成果を基に、空気冷却タービン発電機の容量を400MVA級まで拡大することが可能である。

## 1. ま え が き

近年、メンテナンスの簡略化及び補機装置の簡素化などの理由によって、大容量空気冷却タービン発電機の需要が高まっている。また、温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>の排出削減のため、水素冷却タービン発電機と同等の効率が求められている。

火力発電では、ガスタービンを利用した熱効率の高いGTCCの利用が世界的に拡大している。このGTCCは、年々高性能化されており、発電機も高出力化・高効率化が要求されている。通風方式を変えた新しいタイプの空気冷却タービン発電機について、部分縮小モデル試験の実施、プロトタイプ機を試作しての実機検証試験を実施した。これらの検証試験結果について述べる。

## 2. タービン発電機の出力範囲

### 2.1 空気冷却タービン機の大容量化

当社では、1970年代後半から空気冷却タービン発電機の大容量化に対し、積極的な取組みを進めてきた。図1に当社製の空気冷却タービン発電機の大容量化の変遷を示す。1996年以降、空気冷却タービン発電機の出力は250MVAを超えるようになり、出力範囲が200～300MVAの空気冷却タービン発電機を、すでに30台以上製造してきた。その豊富な実績・経験に基づいて、空気冷却タービン発電機の更なる大容量化に向けた技術開発を進めている。

### 2.2 発電機のラインアップ

図2に、冷却方式で分類した発電機のラインアップを示す。当社では、“空気冷却”“間接水素冷却”“水素内部冷却”“水冷却”の4種類のラインアップを持っており、発電機容

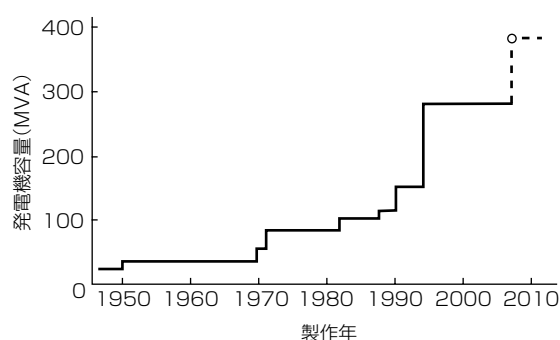


図1. 空気冷却タービン発電機の大容量化の変遷

冷却方式	発電機容量(MVA)									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	
空気冷却方式										
間接水素冷却方式										
水素内部冷却方式										
水冷却方式										

図2. 冷却方式によるタービン発電機出力範囲

量に応じて、それぞれ最適な冷却方式を選定している。このうち、空気冷却タービン発電機については、新しい通風方式を適用することによって、400MVA級(50Hz)までラインアップ化が可能であることを今回確認した。さらに、この新通風方式を従来の出力範囲にも適用することで、単機の高出力化・高効率化を実現するための、ラインアップの拡充を図っている。

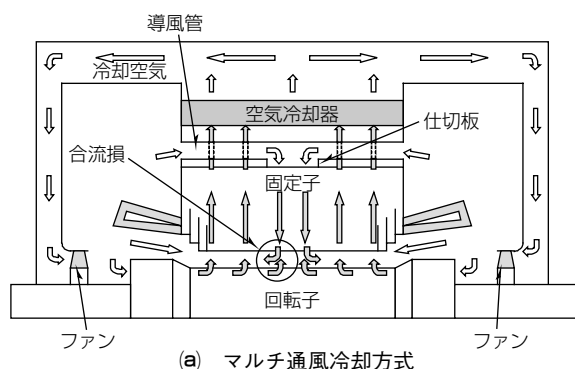
## 3. 新しい通風方式のコンセプト

### 3.1 通風方式の変遷

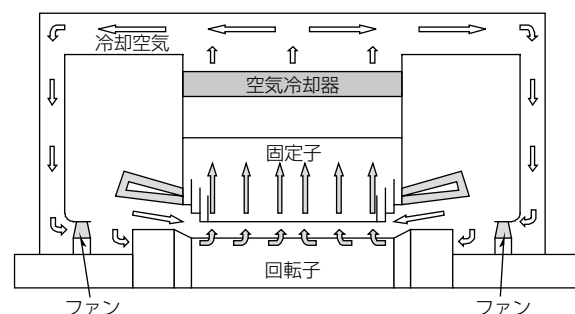
図3に空気冷却タービン発電機に適用してきた通風方式を示す。旧来は“マルチ通風方式”を適用していたが、マルチ通風の場合、冷却風を分配するための仕切り板・導風管が必要で複雑な構造となり、また回転子、固定子間のエアギャップで冷却風の過大な合流損が生じるなどの問題点があった。そこで、これらの問題点を改善する目的で“シンプル通風方式”適用するにいたった。なお、シンプル通風方式の採用に際しては、通風回路網と熱回路網の解析技術を用いることで、通風冷却性能の信頼性を高めた設計としている。

### 3.2 新通風方式とその特徴

図4に、今回採用する新しい通風方式を示す。新通風方式では、図5に示すとおり冷却空気の流れを従来の“ファン→本体→空気冷却器(クーラー)”から“ファン→空気冷却器(クーラー)→本体”に変更する。なお、この冷却空気の流れから新通風方式をFTC(Fan To Cooler)通風方式と呼ぶ。



(a) マルチ通風冷却方式



(b) シンプル通風冷却方式

図3. 従来の通風冷却方式

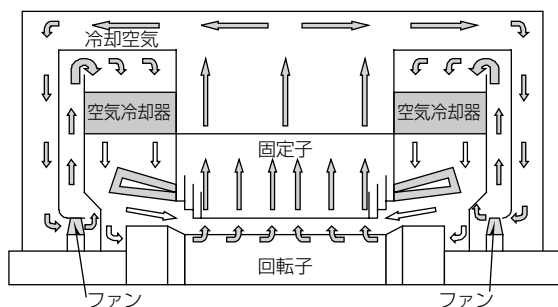
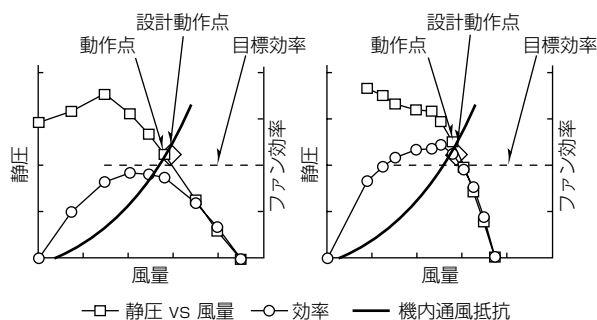


図4. 新通風冷却方式(FTC通風冷却方式)



—○— 静圧 vs 風量 —○— 効率 — 機内通風抵抗

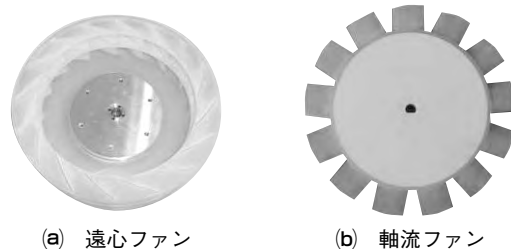


図7. ファン縮小モデルの風洞試験結果

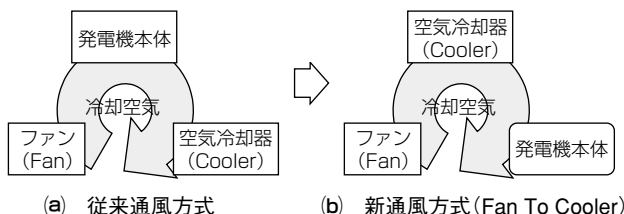


図5. 通風方式概念図

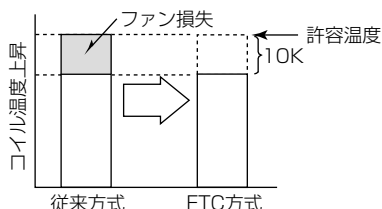


図6. コイル温度上昇

従来の通風冷却方式では、ファンで発生する損失によって、冷却空気温度が上昇して、本体に流れ込むが、この通風の順序を変更することによって、空気冷却器で冷却された空気を直接本体に送り込めるために同一出力条件下での発電機本体の温度は低下するので、発電機コイルの温度一定、同一体格の条件で比較した場合、新通風方式を適用した発電機は、従来機と比べて、より高出力が可能となる(図6)。

#### 4. 部分縮小モデル検証

##### 4.1 ファン形式の選定

新通風方式発電機におけるファン動作点の比速度の条件で効率の良いファン形式を選定すると軸流ファンとなるが、新通風方式ではファン前後で180°風向きが変わる狭い風路内でファンを動作させるため、風路の構成上では遠心ファンの方が有利ではないかと考えた。そこで、遠心ファンと軸流ファンの縮小モデルを作成し、風洞を用いた比較試験によってファン形式を選定することとした。

試験結果を図7に示す。通風抵抗曲線とファン特性曲線が交差する点が、実際に発電機で動作する点となる。発電機に必要なファン差圧、風量特性が達成可能なファンは、軸流ファンであることが分かったとともに、目標としていたファン効率も達成できることを確認できた。この軸流ファ

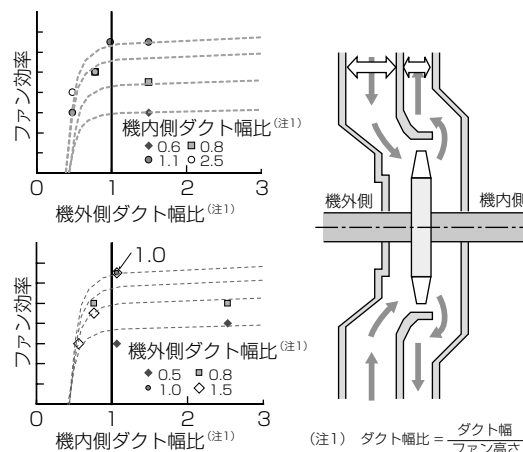


図8. ファン周辺風路幅の風洞試験結果

ンの縮小モデルの結果を基に、実機のファンを設計、製作した。

##### 4.2 ファン周辺風路形状検証

ファン前後の通風ダクト幅のファン効率への影響を確認するために縮小モデルを用いた通風試験を行った。通風ダクト幅とファン高さの比がファン効率に及ぼす影響について整理したものを図8に示す。機外側(吸気側)、機内側(排気側)どちらの通風ダクトについても通風ダクト幅とファン高さの比が1.0となる、すなわちダクト幅がファン高さと同じになる付近でファン効率が飽和しており、ダクト幅をファン高さ程度とすることで、ファン効率を高く維持し、かつ通風ダクト寸法をコンパクト化できるデータを得た。

回転子と固定子間のエアギャップへの冷却空気の流入形態を図9に示す。従来通風方式ではファンを出た冷却空気はそのまま真っ直ぐエアギャップへ流入していたのに対し、新通風方式では固定子コイルエンド外周側から曲がりなが

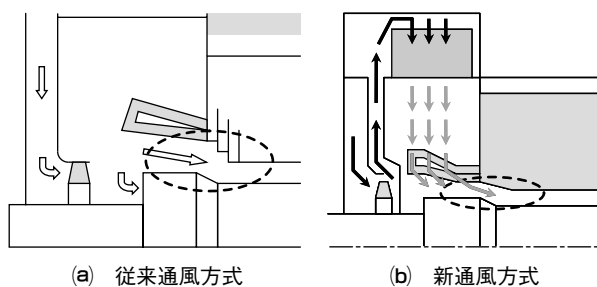


図9. エアギャップへの流入形態

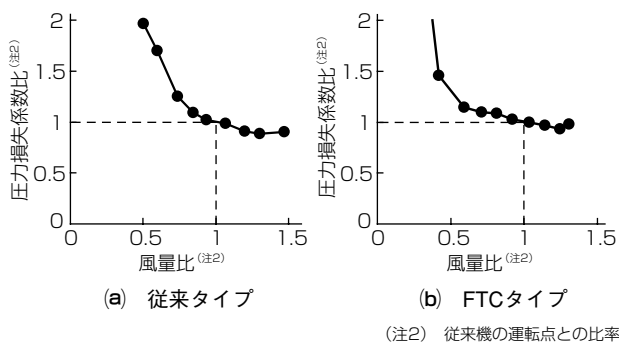


図10. 縮小モデルの通風試験結果



図11. 縮小モデルの風洞試験装置

ら流入する。この流入形態の違いによるエアギャップ入口での圧力損失への影響について三次元数値流体解析及び縮小モデルを用いた通風試験によって検討した。図10はその通風試験の結果を、図11はその風洞試験装置の外観を示しているが、実機動作点でのエアギャップ風量での圧力損失係数については、通風方式間での違いはほとんどなく、新通風方式採用による圧力損失増加に伴う通風量の減少、冷却性能の低下がないことを確認した。

## 5. プロトタイプ発電機の検証試験

### 5.1 プロトタイプ発電機の回転電気試験

新通風方式の空気冷却タービン発電機の開発の最終段階では、新技術の信頼性及びその他の発電機各部の健全性を確かめるために220MVAのプロトタイプ機を試作し工場で行った。発電機各部には284点の計測素

表1. 試験結果：コイル温度上昇

	従来タイプ	FTCタイプ
	F種ライズ	B種ライズ
固定子コイル(ETD)	129℃	119℃
回転子コイル	111℃	105℃

(220MVA, 冷却温度32℃)

表2. 試験結果：騒音

計測結果	目標値
84dB(A)	85dB(A)以下

50Hz定格電圧発生時、機側1mフローレベル

表3. 空気冷却タービン発電機の大容量化

	従来機最大容量	FTC	FTC
容量(MVA)	286	350	400
力率(-)	0.9	0.85	0.85
電圧(kV)	16	19	21
周波数(Hz)	60	50	50
温度上昇種別	F Rise	B Rise	B Rise
効率(%)	~98.60	~98.81	~98.70

子を取り付け温度・振動などのデータを採取し各部の健全性、設計の妥当性を確認した。代表的な試験結果を表1、表2に示す。この開発の目的である固定子コイルの温度<sup>(注3)</sup>については、従来機と同一出力で比較した場合約10Kの低減ができた。また、騒音についても、目標85dB(A)以下であることを確認した。

(注3) 固定子コイルの温度は埋込温度計(Embedded Temperature Detector: ETD)で測定

### 5.2 新ラインアップ空気冷却タービン発電機

これらのプロトタイプ発電機の検証試験結果を反映させることで、空気冷却タービン発電機の容量を400MVA級まで拡大することが可能である(表3)。また、従来の空気冷却タービン発電機に比べて効率が約0.1%向上できることを確認した。

## 6. む す び

新通風方式を適用した空気冷却タービン発電機のプロトタイプ機の回転電気試験によって400MVA級の空気冷却タービン発電機に適用する新技術の信頼性を確認した。今後も引き続き技術開発を進めることで、空気冷却タービン発電機の大容量化と高効率化に取り組んでいく予定である。

## 参 考 文 献

- (1) Koga, K., et al.: INTRODUCTION OF NEW VENTILATION SYSTEM LARGE CAPACITY AIR-COOLED TURBINE GENERATOR, CIGRE SC A1 MEETING 2009 (2009)



# 産業用計算機のマルチコアCPU適用

井登純一\*  
畔 英之\*  
増田大樹\*\*

Application of Multi-Core CPU for Industrial Computer System

Junichi Ito, Hideyuki Kuro, Hiroki Masuda

## 要 旨

三菱電機㈱電力システム製作所では、従来監視制御システムにシングルコアCPU(Central Processing Unit)を搭載した産業用計算機(Single Core Industrial Computer System: SC-ICS)を適用し、リアルタイム性に加えて、高品質・高信頼・故障解析容易性を実現してきた。産業用プラントでは、設備の新設工事や既存設備の更新工事が行われており、過去にエンジニアリングツールで作成した画面や、実績のあるソフトウェア資産の継承が求められるため、既存機種からの継承性を確保した機種開発を実施している。

近年のCPU市場動向では、シングルコアCPUの性能向上が限界に近づいていることから、CPUコア数を増やすことで性能を向上させたマルチコアCPUが主流となってきた。そのため産業用計算機でも、マルチコアCPUを搭載した産業用計算機(Multi-Core Industrial Computer System: MC-ICS)の開発が必要となった。

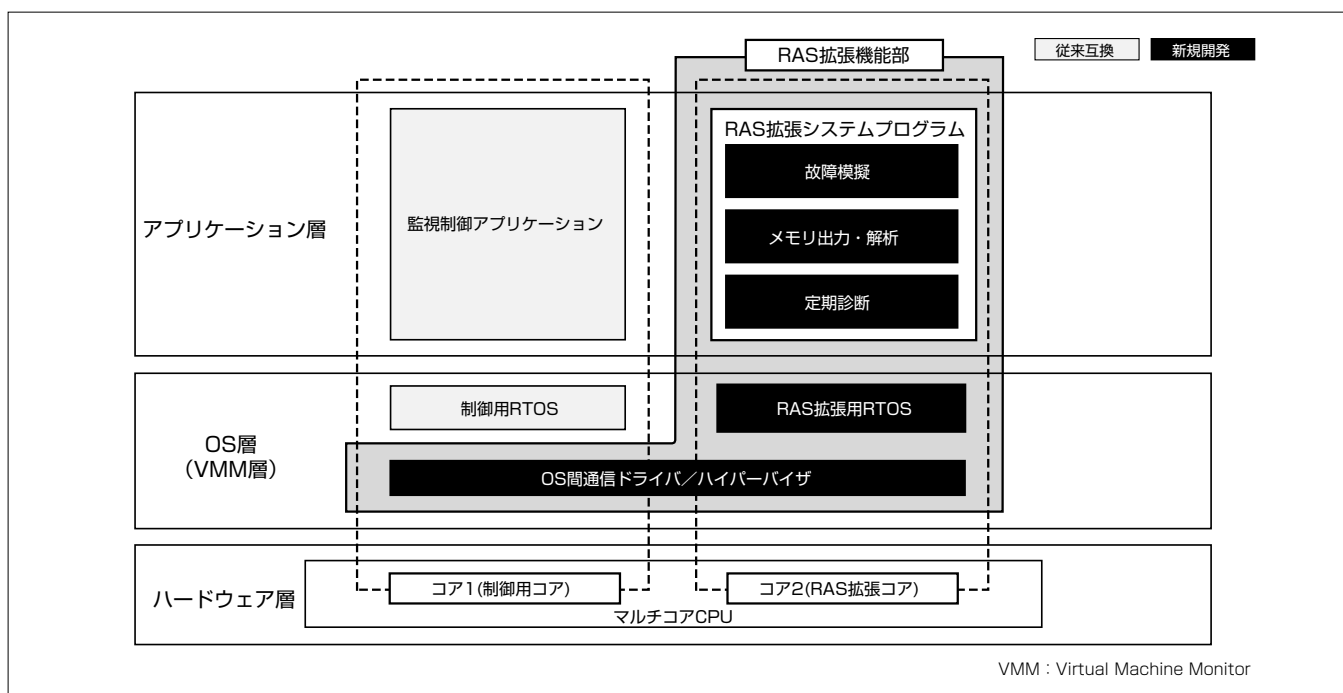
マルチコアCPUの並列処理方式には、各CPUコアに均一に処理を割り当てる対称型と、各CPUコアに別々の処

理を割り当てる非対称型があり、いずれの方式を採用するか決める必要がある。非対称型では、各CPUコアへのアプリケーションの割当て方法も決定しなければならない。

MC-ICSでは、非対称型を採用し、一方のCPUコアに従来の制御用RTOS(Real Time Operating System)を割り当てることで、監視制御アプリケーションなどのSC-ICSの資産を継承可能にした。

また、マルチコアCPUは各コアが独立して動作できるという利点を生かし、もう一方のCPUコアには制御用RTOSのRAS(Reliability Availability Serviceability)機能を拡張するソフトウェア(RAS拡張システムプログラム)を搭載することとした。これによって、一方のコアで動作している監視制御アプリケーションの処理に影響を与えることなく、かつ監視制御処理と独立して動作するRAS機能を追加することができた。

本稿では、産業用計算機におけるマルチコアCPUの適用手法と、拡張したRAS機能について述べる。



## 産業用計算機のマルチコアCPU適用例

図のマルチコアCPU適用例では、SC-ICSに搭載していた制御用RTOSと監視制御アプリケーションをCPUコア1(制御用コア)にそのまま移設し、RAS拡張機能部としてRAS拡張用RTOSとRAS拡張システムプログラムをCPUコア2(RAS拡張コア)に搭載している。このうちRAS拡張システムプログラムでは、故障模擬、メモリ出力・解析、定期診断の3機能を実現した。また、CPUコア1(制御用コア)とCPUコア2(RAS拡張コア)間は、ハイパーバイザとOS間通信ドライバによって双方向に通信する。

## 1. ま え が き

監視制御システムに適用してきたSC-ICSは、リアルタイム性に加えて、高品質・高信頼・故障解析容易性を実現してきた。また、既存設備の更新工事では、過去にエンジニアリングツールで作成した画面や、実績のあるソフトウェア資産の継承も求められるため、既存機種からの継承性を確保した機種開発を実施している。

近年のCPU市場動向では、シングルコアCPUの性能向上が限界に近づいていることから、CPUコア数を増やすことで性能向上したマルチコアCPUが主流となってきている。そのため産業用計算機でも、マルチコアCPUを搭載したMC-ICSの開発が必要になってきた。

マルチコアCPUの並列処理方式には、各CPUコアに均一に処理を割り当てる対称型と、各CPUコアに別々の処理を割り当てる非対称型があり、非対称型は、各CPUコアへのアプリケーションの割当て方法も決める必要がある。

本稿では、産業用計算機におけるマルチコアCPUの適用手法と、マルチコアCPUの特徴を生かして拡張したRAS機能について述べる。

## 2. MC-ICS開発における課題

### 2.1 マルチコアCPUの並列処理方式

マルチコアCPUとは、複数のCPUコアを1素子にパッケージングし、複数の演算処理を同時に実行できるようにしたものである。マルチコアCPUの並列処理方式は、次の2種類に大別できる(図1)。

- (1) 対称型マルチプロセッシング(Symmetric Multi-Processor : SMP)

各CPUコアに均一に処理を割り当てる方法

- (2) 非対称型マルチプロセッシング(Asymmetric Multi-Processing : AMP)

各CPUコアに別々の処理を割り当てる方法

SMPは複数CPUコアを均等(対称的)に有効活用でき、AMPは既存ソフトウェア資産を有効活用できる。双方のメリットとデメリットはトレードオフの関係にある。

### 2.2 SMPの製品適用時の問題点

MC-ICSに搭載するようなホモジニアスマルチコア

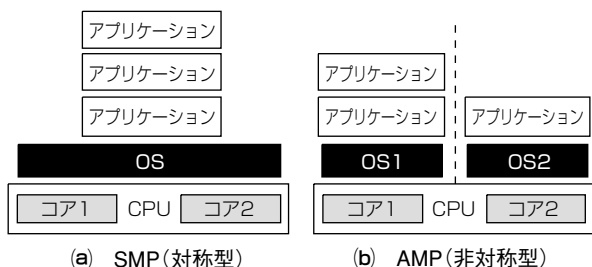


図1. SMPとAMPの比較

CPU(同種のコアを複数実装したCPU)を利用する場合、複数のCPUコアを効率良く利用できるSMP方式を適用するケースが多い。しかし、SC-ICS用に製作したソフトウェアをマルチコアCPUに搭載する場合、SMP方式で利用すると表1に示す問題がある。

### 2.3 AMPの製品適用時の利点

マルチコアCPUは、外見上は1つのLSIだが、複数のCPUとして機能する。さらに、CPUコア間は高速な内部バスで接続されており、AMP方式で利用すると2台の計算機が接続されているものと同等の環境が実現される。この特徴を利用し、シングルコアCPUではCPU負荷の問題で実現が難しかった機能の実現が可能となる。その機能の例を表2に示す。

SC-ICSでは、1つのCPUコアで制御用RTOSを稼働させており、リアルタイム性を確保するため、重要な処理以外のタスクは低優先度で動作させる又は通常は停止させるなどの処置を講じていた。

## 3. MC-ICSで実現した仕組み

2.2節に示す問題から、MC-ICSでは、既存ソフトウェア資産を有効活用するためにAMP方式を採用した。これは、CPUコアの一方を従来の制御用RTOSの動作に割り当てることで、実績のあるアプリケーション資産を継承可能とするためである。

また、2.3節に示す利点から、マルチコアを有効活用するため、もう一方のCPUコアには、制御用RTOSのRAS機能を拡張するソフトウェア(以下“RAS拡張機能”という。)を搭載(マルチOS化)し、継承性を確保しつつ、高信頼化を実現した。

### 3.1 MC-ICSのソフトウェア構成

図2にSC-ICSとMC-ICSのソフトウェア構成を示す。従来機種では、CPU(ハードウェア層)–制御用RTOS(OS層)–監視制御アプリケーション(アプリケーション層)という構成であった。これに対し、MC-ICSでは、CPU

表1. SMP適用時の問題点

項目	問題点
リアルタイム性	タスクがCPUコアに動的に割り当てられるため、実行順序が常に変化し、リアルタイム性の保証が難しい。
スケジューリング	CPUコア数だけタスクが同時に実行されるため、優先度により排他制御している箇所、排他される側のタスクが動作する。
影響範囲	全アプリケーションの再生成および再評価が必要になる。

表2. AMP適用によって実現容易となった機能

機能	適用例
故障模擬	・検証試験 ・異常検出機構の(稼働中)健全性確認
メモリ出力・解析	OS動作不能な異常発生時の解析データ収集
定期診断	ハードウェア(接続機器)・ソフトウェア(機能モジュール)ごとの健全性確認

コア1(ハードウェア層)にハイパーバイザ(VMM層) - OS間通信ドライバと制御用RTOS(OS層) - 監視制御アプリケーション(アプリケーション層), CPUコア2(ハードウェア層)にハイパーバイザ(VMM層) - OS間通信ドライバとRAS拡張用RTOS(OS層) - RAS拡張システムプログラム(アプリケーション層)という構成とした。

ハイパーバイザは, システム起動時に制御用RTOSに先立って起動し, CPUからの割り込みや, 制御用RTOSの動作を管理する役割を担う。ハイパーバイザ設計に際しては, CPUの仮想化支援機能を利用し, ハイパーバイザが介在することによる制御用RTOSへの影響が最小限となるよう配慮した。

CPUコア2のRAS拡張用RTOSには, 軽量・高い安定性などの特長があり, 使用実績が多く信頼性が高いOSを採用した。設計上の留意点としては, 不要な機能を徹底的に排除するようカスタマイズを施し, 安定性を維持しつつ品質を確保した。

RAS拡張システムプログラムでは, 次に述べる故障模擬, メモリ出力・解析, 定期診断の3機能を実現した。

これによって, 既設システムで利用していた制御用

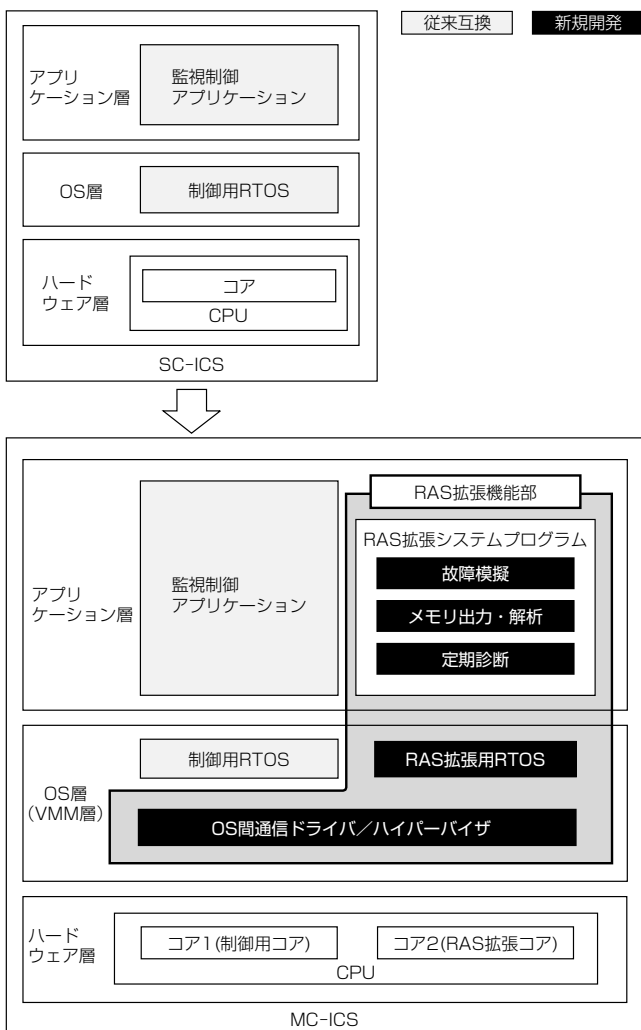


図2. SC-ICSとMC-ICSのソフトウェア構成

RTOSやアプリケーション資産を継承しながら, 従来のシングルコアCPUでは実現が難しかったRAS拡張機能をCPUコア2の利用によって実現した。

### 3.2 故障模擬機能

故障模擬機能とは, ハードウェア故障が原因の障害(マシントラップ, ECC(Error Check and Correct)エラーなど)を, ハイパーバイザによって擬似的に発生させる機能である。

従来は, OSやアプリケーションのハードウェア故障検出機能の試験の際に, ハードウェア故障を実機上で発生させるために, ハードウェア又はソフトウェアを改造して試験していた。

ハードウェア改造による故障模擬では, 試験対象カードからリード線を引き出し, 回路を強制的に短絡させるためのスイッチを取り付けて実現していた。人手で操作するため, 故障発生タイミングのコントロールが困難であった。

また, CPUやチップセット内に組み込まれた機能などのハードウェア改造が困難な試験については, 制御用RTOSを改造した試験用OSを作成して, ソフトウェアで擬似的に故障を発生させていた。OS試験では, 試験対象のOS自体を改造することになるため, 使用可能な範囲が限られていた。さらに故障発生タイミングをコントロールするには, OSの故障検出箇所を改造する必要があるが, OS試験では任意のタイミングで故障を発生させられなかった。

これに対しMC-ICSでは, 故障模擬機能によってソフトウェアで擬似的に故障を発生させることができる。故障模擬機能では, 故障発生のための特別な改造が不要な分, 実際の動作により近い状態で故障を模擬することができる。また, ハイパーバイザで故障発生をコントロール可能のため, 任意のタイミングで故障を発生させて試験を行うことができる。これによって, ハードウェア故障検出試験の密度を高めることができ, また障害の再現試験などでも活用できるようになった。

図3にSC-ICSのハードウェア故障模擬と, MC-ICSでの故障模擬機能の差異を示す。図中, SC-ICSの割り込み

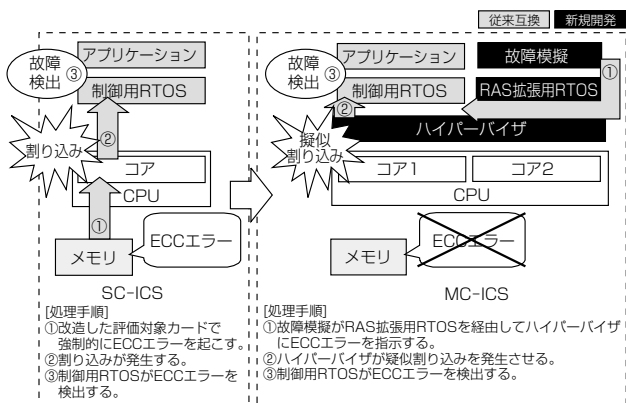


図3. 故障模擬機能(例: ECCエラー)

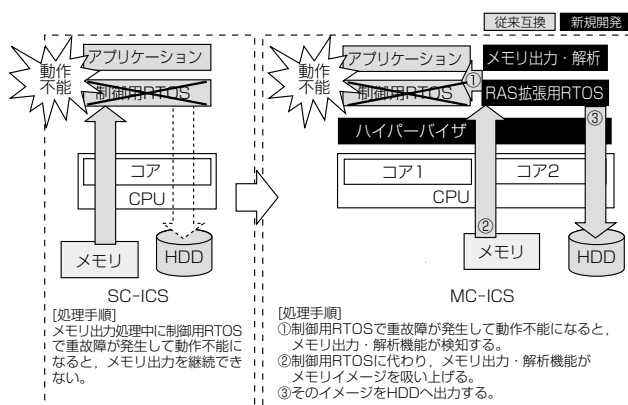


図4. メモリ出力・解析機能

とMC-ICSの擬似割り込みは、制御用RTOSからはどちらも同じものに見え、その違いを識別することはできない。

### 3.3 メモリ出力・解析機能

メモリ出力・解析機能とは、故障が発生した瞬間のメモリイメージをHDDに保存することで、保存したメモリイメージを後から解析して障害を調査するために利用する機能である(図4)。

SC-ICSでは、常に制御用RTOSがメモリ出力を行うが、MC-ICSでは、制御用RTOSが動作できない異常が発生した場合に、CPUコア2側のメモリ出力・解析機能からメモリ出力する機能を追加した。これによって、CPUコア1に搭載された制御用RTOSやアプリケーションが動作できない障害発生時にも、メモリイメージを取得・解析することが可能となる(ただし、CPUカードなどのハードウェア異常は除く)。CPUコア2側には必要な機能だけをカスタマイズしたRAS拡張用RTOSを採用することによって安定出力を可能とし、故障解析容易性を向上させた。

### 3.4 定期診断機能

定期診断機能とは、制御用RTOS、RAS拡張用RTOS、ハードウェアなどの健全性を定期的に診断する機能である(図5)。従来のSC-ICSでは、監視制御アプリケーションへの影響を考慮し、故障情報の収集は、ほとんどが異常を検知したときであった。また、その情報も故障時の対応に必要な情報に限定していた。MC-ICSでは、定期診断を監視制御アプリケーションとは別のコアで動作させ、異常を検知したときだけでなく、定常状態の診断情報を収集・解析可能とした。例えばHDD/SSD(Solid State Drive)の

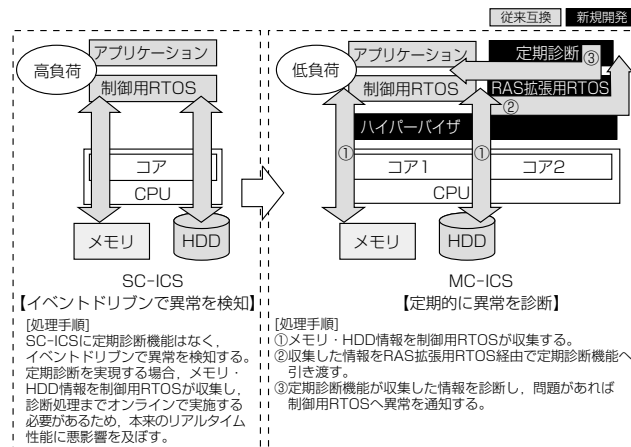


図5. 定期診断機能

リードエラーレートなどを収集・解析し、制御用RTOSが動作できなくなる前に異常を検出できるようにした。これによって信頼性を向上させることができた。

診断は、次の項目について実施する。

- (1) 各CPUコアの健全性・負荷状況
- (2) HDD、SSDの故障・寿命予測(S.M.A.R.T.(Self-Monitoring, Analysis and Reporting Technology) 解析)

## 4. む す び

マルチコアCPUを適用した産業用計算機MC-ICSで、次の機能を実現した。

- (1) AMP型マルチOS(制御用RTOS+RAS拡張用RTOS)を適用し、実績のあるアプリケーション資産を継承可能とした。
- (2) RAS拡張機能を搭載し、制御用RTOSの動作は変更せずに(リアルタイム性を確保し)、次の項目を実現した。
  - ①品質向上(故障模擬機能)
  - ②解析性向上(OS異常時のメモリ出力・解析機能)
  - ③信頼性向上(定期診断機能)

今後は、RAS拡張システムプログラムの機能拡充として、次の項目への対応を実施予定である。

- (1) 拡張カードなどを含めたシステム全体の故障模擬
- (2) 障害の自動解析機能
- (3) 診断情報を用いた(HDD・SSD以外のデバイスの)故障予測・寿命予測

## 基礎技術の蓄積が未来を創造する

Accumulation of Fundamental Technology Creates the Future

漆畑廣明

Hiroaki Urushibata



環境とエネルギーの時代と言われる21世紀において、国民の資産としての社会インフラ整備は、環境と調和し、社会秩序の維持に貢献するものでなければならない。また、国の豊かさはGDP等の経済指標だけでなく、社会インフラの質も豊かさの大切な尺度である。高度経済成長期に構築された社会インフラが更新時期を迎える中、環境や安心、安全といった視点から電力、交通などの様々な都市インフラが質的転換を求められている。

特に環境エネルギー関連では、スマートグリッドなどの電力インフラ、電気自動車などの交通インフラが注目されるが、これらに共通するキー技術の一つに電池技術がある。筆者は高度経済成長が終わった1980年ごろ、博士課程の学生であった。博士論文のテーマと関連して燃料電池やナトリウム硫黄(NaS)電池の研究に出会い、それ以来、電池の研究に携わってきた。当時、分散電源、コジェネレーションといった技術用語を論文の中で初めて学んだことを思い出す。約30年経過した現在、テレビのニュースやコマーシャルでも燃料電池、NaS電池やリチウムイオン電池が登場し、コジェネレーションという言葉も出てくる。さらに高校の授業でも燃料電池の話が出ると聞く。当時は、これほど電池が注目される時代になるとは想像もできなかった。このように燃料電池やリチウムイオン電池などの言葉が先行する一方で、これらデバイスの基本となる電気化学という学問については、一般にはあまり知られていない。電気化学エネルギー変換の本質は、熱力学的に最も高い変換効率で化学エネルギーを電気エネルギーへ直接的に変換できる点にある。また、工学的意味だけでなく身近な所では、植物の光合成や生物の体内で起きるエネルギー代謝はまさにこの電気化学エネルギー変換である。このように、電池

の動作原理は自然界で起きる様々な物質間のエネルギー伝達と同じであり、火力発電のように燃焼熱を電気エネルギーへ変換する自然界に存在しないサイクルではない。この観点から、電気化学デバイスは、最も環境に調和したエネルギー変換デバイスであると考えられる。

しかし、電池がこのように注目されるまでには苦難の道を歩んできた。例えばNaS電池は現在でこそ大容量二次電池として市場が拡大しているが、1970年代日米欧で研究がスタートしてから約30年間におよぶ基礎技術の蓄積を経て製品化を実現した。メガWh級二次電池としては唯一のシステムであり日本のメーカーが圧倒的優位性を維持している。一方、リチウムイオン電池は携帯機器用に1990年代初頭にやはり日本メーカーが開発製品化し、電気自動車用としては1992年のNEDO((独)新エネルギー・産業技術総合開発機構)プロジェクトから約20年の研究を経て現在のHEV(Hybrid Electric Vehicle)、EV(Electric Vehicle)用二次電池としての地位を確立した。このような電池開発は主に企業が中心になって進めてきたが、20年以上にわたり事業としての貢献は少なく、その環境下で基礎研究を継続してきた開発者の努力と企業の忍耐には頭が下がる思いである。太陽光発電も同じような経緯で現在に至っているが、特に社会のインフラに関わる技術は製品として世に出るためには10年以上の地道な基礎技術の蓄積が必要な場合が多く、そこに日本の技術者の信念を感じる。このような日本の技術を支えるため、基礎技術の大切さを学生に教えることが大学の使命であり、今は論文にしか書かれていない技術が、30年後テレビのコマーシャルに出るかもしれないという夢を持ち、諦(あきら)めず粘り強く研究することの大切さを教えたいと思っている。



# 巻頭論文



古藤 悟\*

## 環境との調和を目指す社会インフラシステム

*Social Infrastructure System Aiming at Harmony with Environment*

Satoru Koto

### 要 旨

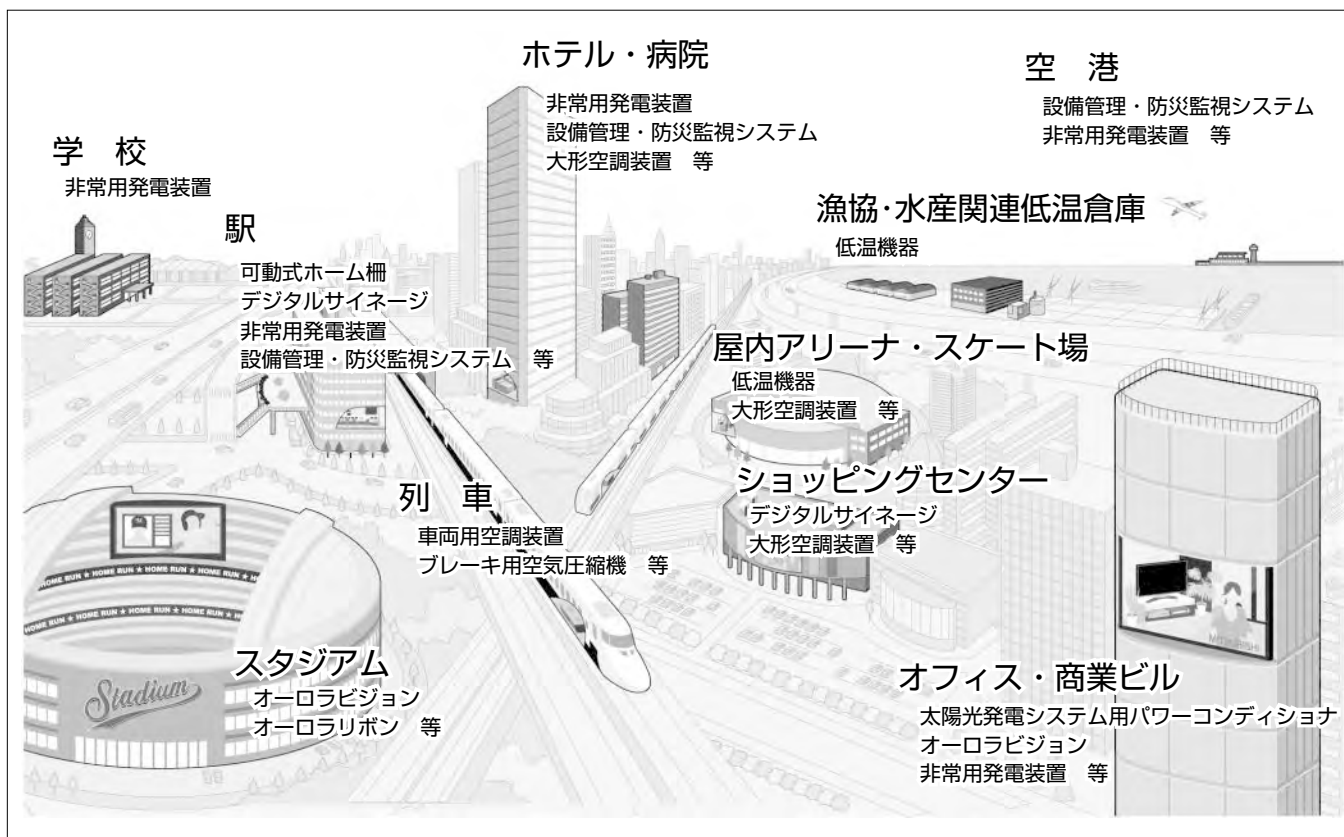
近年の環境意識の高揚に伴い、社会インフラシステムを形成する多種多様の製品、設備、統合システムでも環境との調和をコンセプトに織り込んだ取組みが盛んである。

三菱電機では、“持続可能な社会づくりへの貢献”を経営の最重要課題に掲げ、事業活動及び製品・サービスにおける低炭素社会に対する貢献に向けて各々の製品を継続的に改善し、“小型・軽量”“高性能”で“省資源”“省エネルギー”に配慮した製品・サービスを提供することによって、社会に貢献する地道な取組みを続けている。街の中を見渡すと、

公共施設、産業施設、交通システムなどの社会インフラシステムがあるが、様々な当社製品が活躍しており、各製品がおかれた設置状況の下で、環境との調和を目指した取組みを展開している。

本稿では、これらの製品の中から各々の環境との調和を目指した取組みに加え、安心・安全・快適面で社会システムに貢献する“より良い製品”の提供に向けた制御面・システム面・材料面での取組み例を述べる。

特集  
Ⅱ



### 環境との調和を目指す社会インフラシステム

街の中を見渡すと、ホテル・病院、駅、空港、学校、オフィス・商業ビル、ショッピングセンター、スタジアム、屋内アリーナ・スケート場などの公共施設、工場、漁協・水産関連低温倉庫などの産業施設、列車などの交通システムといった様々な社会インフラシステムがあり、その中で環境との調和を図った様々な当社製品が活躍している。

\*長崎製作所 副所長(工博)

## 1. ま え が き

近年の環境意識の高揚に伴って、社会インフラシステムを形成する製品、設備、統合システムに対しても環境との調和をコンセプトに織り込んだ取組みが求められている。当社は、幅広く、社会インフラシステムを形成する製品を製造している。ここでは、これらの中から、空冷式ヒートポンプチラー、太陽光発電用大容量パワーコンディショナ、大型映像表示装置、車両用空調装置、非常用発電装置、可動式ホーム柵(さく)を例として取り上げ、各製品の環境負荷低減への取組み、安心・安全・快適面での社会システムへの貢献について述べる。

## 2. 環境負荷低減に貢献する社会インフラシステム

### 2.1 空冷式ヒートポンプチラー“コンパクトキューブ”

世界的な景気低迷を受け設備投資が減少する一方、地球温暖化対策投資のニーズが高まるといった追い風もあり、冷温水発生機(チラー)では、燃料式に対して電気式ヒートポンプの優位性が高まっている。

当社のヒートポンプチラーは、低コスト化と短納期への対応を図るため、標準化とモジュール化を進め、“コンパクトキューブ”の名称で製品化しており、吸収冷温水機のリニューアル需要をねらい、効率・設置スペース面での優位性を目指すものである。

具体的には、インバータ駆動スクロール圧縮機、Vフローユニット(斜め上方風吹き出し構造)、代替冷媒R410aの採用などによって高性能・高効率化を図り環境負荷低減に貢献しており、当社従来機(F形60馬力)比で、冷房COP(Coefficient Of Performance)を8~20%向上、消費電力を8~17%削減、質量を33%低減した(図1)。

この製品は、エネルギー消費量、CO<sub>2</sub>排出量を大幅に削減するため、電力会社の高効率電気式熱源機の普及活動とも連動させて、トップクラスの冷却COP4.8(高効率シリ-

ズ(散水式)40馬力 50/60Hz)を達成しており、インバータ圧縮機を複数台搭載することで部分負荷性能を大幅に向上させた。さらに、COPが最大となる圧縮機の運転台数と運転周波数制御によってフルタイムでの高効率化を実現した。

今後、コンパクトキューブをベースとしたシステム化(水冷機)、運転範囲拡大、機能拡大(氷蓄熱)によるシリーズ化を展開する予定で、展開に当たっては、電力会社との共同開発を積極的に推し進める。

### 2.2 太陽光発電用大容量パワーコンディショナ

世界的な環境意識の高まりから、再生可能エネルギーである太陽光発電システムは、急激な市場の伸びを呈しており、市場全体では年率20~30%の成長が期待できる。

その中で北米市場では、公共・産業分野、電力分野向けが市場の70%以上を占め、太陽電池で発電した直流電力を、交流電力に変換する大容量パワーコンディショナに対するニーズが高い。

当社の大容量パワーコンディショナは、独自の階調制御型インバータ技術を用いたトランスレス方式によって、高効率・軽量化を図るものである。具体的には、階調制御型インバータの採用によって、従来のPWM(Pulse Width Modulation)インバータ+トランス方式に比べ、損失率を抑え効率アップを図るほか、新方式チョッパ採用によって昇圧トランスが不要なため製品重量の低減が可能となり、損失低減と省資源化によって環境負荷の低減を図るものである。

今回開発したパワーコンディショナ100kW機は、高効率、軽量という特長を持ち、優れたCEC(California Energy Commission)効率と製品重量の軽量化を実現した(図2)。

今後、100kW機の市場投入に続き250kW機を含む大容量機種シリーズ化を図る予定である。また、モニタリングシステムを活用した保守情報・故障検知サービスを展開し、総合的な品質向上を目指す。



図1. コンパクトキューブ



図2. 大容量パワーコンディショナ

### 3. 安心・安全・快適面に貢献する社会インフラシステム

#### 3.1 大型映像表示装置“オーロラビジョン”

大型映像表示装置は、従来市場としていた公営競技場、スポーツスタジアムでは、リブレース商談はあるが縮小傾向にあり、民需分野では需要はあるが低価格化への対応が必要である。今後は、従来市場だけでなく、交通・道路分野などの新規市場で、デジタルサイネージと組み合わせた大型映像表示装置の需要が見込まれる。

従来市場であるスポーツスタジアム向けの超大型映像表示装置は、高輝度単色(R, G, B)砲弾型LED(Light Emitting Diode)を用いるとともに、映像信号処理、スクリーン構造の双方に対して高画質化技術を適用し、高画質表示装置として製品化している(図3)。また、最近の新しい市場として、デジタルサイネージ、屋内レンタル向けに3in1タイプのLEDを用いた軽量・薄型スクリーンを開発し、市場拡大を図っている。

環境面では、LED表示素子として従来比で30%高い発光効率の最新高輝度タイプを用い、低電力損失の駆動方式を採用するなど、高効率化によって省エネルギー化を図るとともに、表示スクリーンの軽量・薄型化によって、輸送エネルギーの低減、梱包(こんぼう)部材量低減による廃棄物量削減など環境負荷低減への対策を継続的に実施している。

オーロラビジョンは、長寿命、高信頼性を保持し、故障が少なく長期に安定して使用できるとの市場の高い信頼を得ており、特に、公営競技場では、表示の安定性を得るためのシステムの二重化などの技術を提供している。また、製品の定期メンテナンスや、故障時の緊急対応を担うサービス体制を完備している。

今後、映像の高解像度化に向けてスクリーンの更なる高性能化を図るとともに、環境への配慮としてスクリーンの効率向上と薄型・軽量化を進め、省エネルギーに加えて製品の価格低減を実現する。

#### 3.2 車両用空調装置

車両用空調装置の需要は、国内市場では鉄道車両の新

造・更新需要を含めて横這(よこば)いであるが、海外、特にアジア市場で伸びており、また、地球温暖化対策等によって鉄道輸送は拡大傾向にあることから、引き続き市場の拡大が予測される。

車両用空調装置では、客先ごと、車種ごとに仕様の異なる製品を要求されるが、当社は空調負荷容量に応じた自社製圧縮機のラインアップを持っており、車体の艤装(ぎそう)に対応したサイズの空調装置を実現するために冷凍サイクル及び各構成機器を最適に配置することで、幅広い客先ニーズに応じた機種を開発し提供している(図4)。

また、環境意識の高まりから、当社の車両用空調装置では、HCFC(Hydro Chloro Fluoro Carbon)冷媒(R22)からオゾン破壊係数ゼロの代替冷媒(R407C)へ置き換えを促進するとともに、熱交換器の高性能化によって冷媒充填(じゅうてん)量の低減を可能にし、地球温暖化防止に貢献している。さらに、新幹線用空調装置では、全熱交換器“ロスナイ”を内蔵することで換気に伴う排熱ロスを回収し、消費電力10%削減を実現した。

なお、当社の車両用空調装置は、国内の多くの鉄道会社で使用されており、特に快適さを提供するために、

- ・容量制御機能付きスクロール圧縮機の採用による、多段階のきめ細かな空調制御
- ・乗客乗降に伴う急激な温度変化に追従する、ファジー制御による快適な車内温度制御
- ・車内外温度とカレンダー機能を連動した、年間全自動制御による冷暖房の自動切替え

などを実現しており、社会インフラ製品としての貢献度は高い。

今後、更なる省エネルギー化、省保守化、軽量化、コンパクト化、低騒音化、快適性の向上を目指すとともに、空調装置の標準化を進め、開発期間の短縮を図り、客先ニーズへの対応の更なる迅速化を図る。

#### 3.3 非常用発電装置

国内景気は、いまだ回復途上にあり、電源インフラ関係の投資は鈍い状態が続いているが、金融・通信関係の投資は一定規模で継続されると見込まれている。その中で、単



図3. オーロラビジョン



図4. 車両用空調装置



図 5. 非常用単相発電装置

相発電機の市場である金融機関での中小容量域の需要は、合併や支店統廃合が進む一方、既納品の更新時期にあり、また事業継続計画BCP(Business Continuity Plan)策定の後押しもあり、継続的な需要増が見込まれている。

この市場環境の下、単相発電装置(MCG)の市場競争力強化のための戦略として、最新の市場要求機能を満たした端末機(ATM)用電源に従来の高機能製品の仕様を適用し、低価格で供給するとともに、大容量燃料タンクを設けて高速電源切替装置を搭載できるようにした。

また、100%全負荷時の騒音を75dBに抑え、設置環境に配慮した。さらにこの非常用単相発電装置は、設置スペース、製品質量を従来当社比で各々20%、30%低減して環境負荷の低減に貢献している(図5)。

非常用発電装置は、消防法によって設置が義務付けられており、単相発電装置はこれまでATM用として販売され、銀行系が主要顧客であったが、今回の発電装置は、消防法規定に適合しており、単相電源を必要とする防災設備にも適用できるほか、銀行系では国際決済銀行規制に伴う事業継続計画対策としての設置も必要であるため、今後、信用金庫等の金融機関での採用が見込まれる。

また、この発電装置は、単相専用で10~30kVAまでの機種であるが、今後、タンデム機(単相、三相両用機)、30kVA以上の大型機種までのシリーズ化に加え、ATM以外の単相需要を目指した一般仕様の単相装置のシリーズ化も展開する。

### 3.4 可動式ホーム柵

可動式ホーム柵は、乗降客の安全確保のために公営地下鉄を中心に普及しているが、平成18年に国土交通省によってバリアフリー新法が施行され、その中には車両の乗降口位置が一定しているなどの要件に該当するプラットホームでは、ホームドア又は可動式ホーム柵を設ける努力義務が



図 6. 可動式ホーム柵

記載されている。近年、JR・私鉄でも導入の検討が開始され、施工の容易性から、今後可動式ホーム柵の飛躍的な普及が見込まれる。

当社可動式ホーム柵は、ホーム柵の軽量化によって、本体・工事コストの低減とホームへの機械的負荷の軽減を図るとともに、ホーム柵と車両間のすき間への居残りを検知する高性能なセンサを組み合わせ、機能させることによって、乗降客の一層の安全・安心の向上を目指すものである。

具体的には、安全・安心・快適性の面では、乗降客のホームからの転落防止、駆け込み乗車の抑止によって、列車の定時運行に役立っているほか、ホーム柵の開閉時の安全にも考慮し、戸あたり・巻き込みの検知、ホーム柵と車両間への居残り検知を実現している。さらに、扉のこじ開けに対する防止機能も設けているほか、万一の緊急時には、手動で扉を開閉して脱出できるよう設計されている(図6)。

また、軽量化については、本体質量を開口当たり500kgから400kgに低減することによって、製品輸送時のCO<sub>2</sub>排出量を削減し、環境負荷低減に取り組んでいるが、今後は、更に開口当たり300kg以下を目標に軽量化を図る予定である。

ホーム柵は、一般の乗降客の目に触れる製品であり、今後、映像表示装置などとの組み合わせによって、乗降客へ情報を提供できる製品を開発する。また、子供、お年寄り、障がい者への配慮、安全・安心を意識した外観・構造、分かりやすい表示などユニバーサルデザインを目指す。

## 4. む す び

環境との調和を目指した社会インフラシステムを形成する一部の製品を例として取り上げ、各製品の環境への取り組み、更に安心・安全・快適面での社会システムへの貢献について述べた。当社は、ほかにも数多くの社会インフラシステムを形成する製品群を持っており、今後もこれらを世に送り出すことで環境負荷低減に積極的に取り組んでいく。

# 空冷式ヒートポンプ氷蓄熱ユニット “コンパクトキューブICE”

大越 靖\* 落合康敬\*\*  
伊藤拓也\* 福井孝史\*\*  
石田和之\*

*Air-Cooled Heat Pump Ice Thermal Storage Unit "Compact Cube Ice"*

*Yasushi Ohkoshi, Takuya Ito, Kazuyuki Ishida, Yasutaka Ochiai, Koji Fukui*

## 要 旨

氷蓄熱ユニットは、深夜電力で蓄えた熱を昼間に利用するため電力負荷平準化の効果が大きく、今後の普及拡大に向けて省エネルギー性能が求められるとともに、システム構築の容易性に対する要望が高まっている。

このような市場ニーズの下、氷蓄熱ユニットの性能向上及びシステム構築の容易化を図った新形高効率氷蓄熱ユニット“コンパクトキューブICE”を開発した。

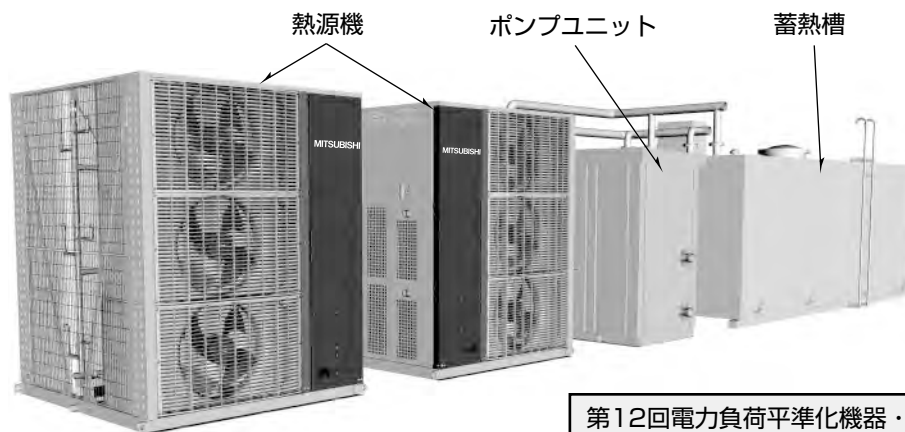
今回開発した高効率氷蓄熱ユニットは、圧縮機や空気側熱交換器、冷凍サイクルなどへ新技術を導入したコンパクトキューブをベースとし、三菱電機の従来氷蓄熱ユニットから冷房蓄熱COP (Coefficient Of Performance) で51%、

冷房追い掛けCOPで34%の性能向上を達成した。

また、ヒートポンプチラー“コンパクトキューブ”と高効率氷蓄熱ユニットの混在制御が可能なシステムコントローラを開発し、大規模負荷への適用が可能となる複数台システム構築の容易化を図った。

なお、設備更新を想定した場合、既設吸収冷温水機からの入替えて55%、既設氷蓄熱ユニットからの入替えて31%のCO<sub>2</sub>排出量の削減効果を見込んでいる。

本稿では、今回開発した高効率氷蓄熱ユニットについて述べる。



第12回電力負荷平準化機器・システム表彰  
経済産業省資源エネルギー庁長官賞 受賞

### コンパクトキューブ関連技術

- ・Vフローユニット構造(斜め上方風吹き出し)
- ・デュアルインバータ搭載(圧縮機、ファン)
- ・最適容量制御
- ・2蒸発温度冷凍サイクル
- ・散水運転の最適化

### 氷蓄熱関連技術

- ・内融式の採用
- ・エア攪拌
- ・高効率蓄熱制御
- ・最適解氷制御

## 高効率氷蓄熱ユニット“コンパクトキューブICE”シリーズ

電力負荷平準化、ランニングコスト低減、CO<sub>2</sub>排出量削減を同時に実現(氷蓄熱ユニットとしては、40馬力の製氷COP3.77を達成)した。また、圧縮機と送風機のデュアルインバータ制御によって、夜間蓄熱運転時の高効率化と低騒音化の両方を実現した。

氷蓄熱ユニットとして3機種(40、60、120馬力)を揃え、“コンパクトキューブ”との組合せシステムをコントローラで容易に構築できる。



## 1. ま え が き

近年、ヒートポンプチラー(非蓄熱ユニット)でCO<sub>2</sub>排出量削減を目的とした機器の性能向上が進められており、氷蓄熱ユニットについても今後の普及拡大に向けて省エネルギー性能の向上が求められている。

氷蓄熱ユニットは電力負荷平準化への効果が大きく、国土交通省“建築設備技術基準”に氷蓄熱ユニットに関する記述が追加されるなど今後の普及促進が期待される状況にあり、普及加速の観点からシステム構築の容易性に対する要望がますます高まると考えられる。

このような背景の下で、氷蓄熱ユニットの性能向上及びシステム構築の容易化を図った新形高効率氷蓄熱ユニットを開発した。

## 2. 製 品 仕 様

図1にコンパクトキューブICEの配管系統図を示す。

熱源機は当社空冷式ヒートポンプチラー“コンパクトキューブ”をベースに氷蓄熱専用熱源機を開発し、部品共通化によってコスト上昇抑制を図るとともに当社従来氷蓄熱ユニットからの大幅なCOP向上を図った。蓄熱槽はエア攪拌(かくはん)方式の内融式蓄熱槽を採用し、解氷運転のみでピーク負荷への対応(ピークカット運転)を可能とした。

表1に製品仕様を示す。今回開発したコンパクトキューブICEは、40、60、120馬力の3機種をラインアップした。

また高効率化を図ることで、当社従来氷蓄熱ユニットと比較して冷房蓄熱COPを51%、冷房追い掛けCOPを34%向上させた。

## 3. システム構築の容易化

機器の開発にあわせて、大規模負荷への対応を容易にするために、システムコントローラの開発を行った。

このコントローラは高効率氷蓄熱ユニットのみのシステ

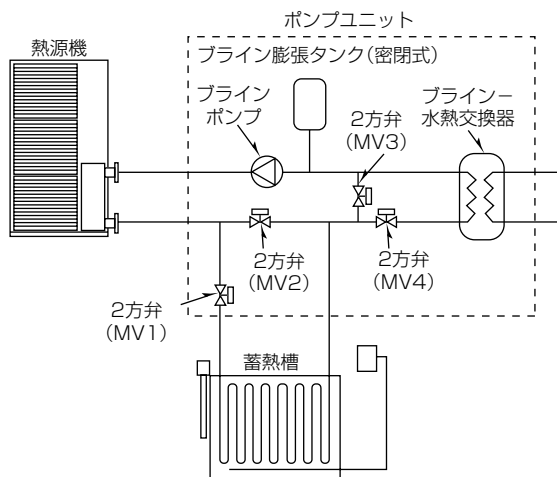


図1. コンパクトキューブICEの配管系統図

ムだけでなく、非蓄熱ユニットと高効率氷蓄熱ユニットの両方が混在するシステムにも使用可能な全自動システムコントローラとし、非蓄熱ユニットと組み合わせたシステムを容易に構築できるようにした。

高効率氷蓄熱ユニットと非蓄熱ユニットの混在システムの配管系統イメージを図2に示す。このシステムは非蓄熱ユニットと高効率氷蓄熱ユニットの組合せから構成され、夜間の冷房蓄熱運転、ピークカット運転時の氷蓄熱用熱源機の停止及び追い掛け運転時の非蓄熱ユニットを含めた熱源機の台数制御を全自動で行う。

図3に高効率氷蓄熱ユニットと非蓄熱ユニットの混在システムの負荷対応を示す。開発したシステムコントローラは混在システムにも容易に対応が可能であり、ピークカット中はシステムコントローラによって高効率氷蓄熱ユニットの熱源機を停止させ、停止した熱源機に相当する負荷を解氷で対応し、ピーク時間帯の電力量を削減する。

表1. コンパクトキューブICEの製品仕様

項目	形名	MKHV-P1180AE-ST	MKHV-P1800AE-ST	MKHV-P3550AE-ST
相当馬力		40	60	120
電源		三相200V 50/60Hz		
日量冷却能力(MJ/D)		3,600	5,148	12,420
日量冷却COP(ポンプ入力なし)		4.32	4.09	3.83
冷房	能力(kW)	100.0	143.0	345.0
追い掛け	COP	4.61	4.29	3.93
冷房蓄熱	能力(kW)	39.2	44.5	110.2
	COP	3.77	3.68	3.61
暖房	能力(kW)	117.7	154.6	309.2
	COP	3.50	3.43	3.43
製品質量	熱源機(kg)	1,630	1,650	1,650×2
	蓄熱槽(kg)	4,470	4,470	9,090
	ポンプユニット(kg)	1,550	1,550	1,650

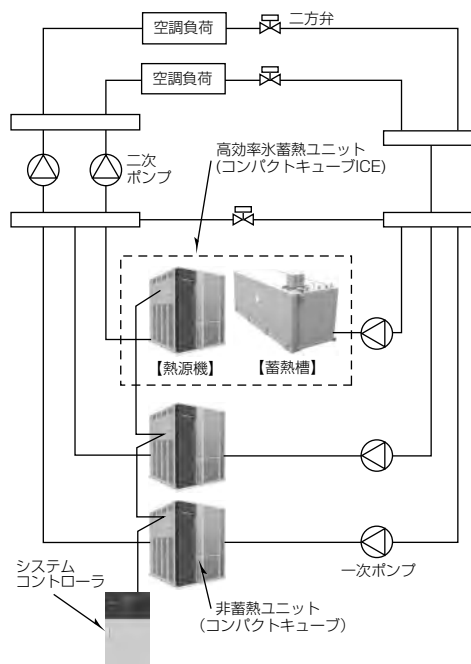


図2. 高効率氷蓄熱+非蓄熱ユニットの混在システム

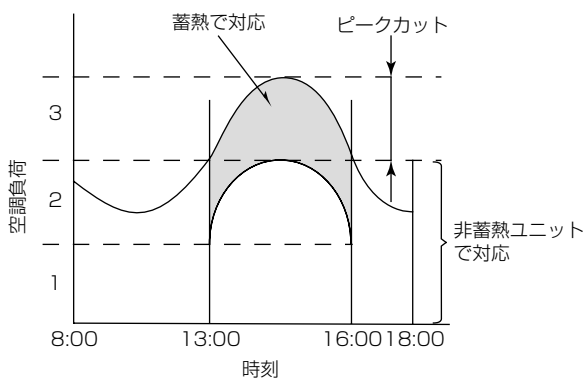


図3. ピーク負荷への対応(高効率氷蓄熱+非蓄熱 混在システム)

表2. 検討条件

項目		検討条件
負荷条件	①建物規模	12,000m <sup>2</sup>
	②用途	事務所
	③運転期間	冷房（5～10月のうち平日） 暖房（11～4月のうち平日）
	④気象条件	東京地区 月別平均外気温、外気湿度
対象機種	①氷蓄熱ユニット（開発機）	120馬力×3台システム 冷温水送水ポンプ用電動機18.5kW
	②氷蓄熱ユニット（既設機）	120馬力×3台システム 冷温水送水ポンプ用電動機18.5kW
	③吸収冷温水機（冷却能力1.080kW相当）	ガス吸収冷温水機+冷却塔（新設機/既設機） 新設：冷房定格COP1.32、暖房定格COP0.88 既設：冷房定格COP1.03、暖房定格COP0.86 冷温水送水ポンプ用電動機18.5kW 冷却水ポンプ用電動機37kW 冷却塔ファン用電動機11kW
	④料金メニュー	①電気 東京電力業務用電力 ②水道 東京都水道局23区内 水道：一般100mm 下水：一般汚水 ③ガス 東京ガス 東京地区等産業用A契約
CO <sub>2</sub> 排出原単位	①電力	0.339kg-CO <sub>2</sub> /kWh
	②都市ガス	2.08kg-CO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>

#### 4. CO<sub>2</sub>排出量・経済性比較

今回開発した高効率氷蓄熱ユニットに関し、CO<sub>2</sub>排出量と経済性（ランニングコスト）の削減効果を検討した。

比較の対象は、既設氷蓄熱ユニット、新設吸収冷温水機及び既設吸収冷温水機とし、同一空調負荷（1.080kW相当）で検討した。表2に検討条件を示す。

##### 4.1 CO<sub>2</sub>排出量

図4に年間CO<sub>2</sub>排出量の比較を示す。設備更新を想定した場合、既設吸収冷温水機から高効率氷蓄熱ユニットへ入れ替える場合で55%、既設氷蓄熱ユニットから入れ替える場合で21%のCO<sub>2</sub>排出量の削減効果を見込むことができる。新設吸収冷温水機との比較でも43%の削減効果があり、高効率氷蓄熱ユニットの採用によって大幅なCO<sub>2</sub>排出量の削減効果が見込める。

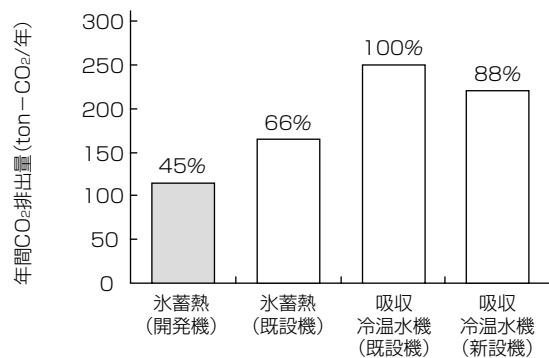


図4. 年間CO<sub>2</sub>排出量の比較

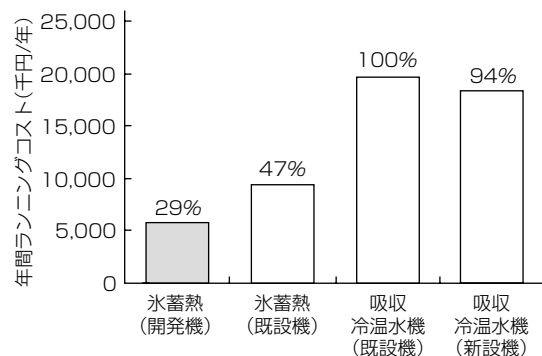


図5. 年間ランニングコストの比較

#### 4.2 経済性

図5に年間でのランニングコスト試算結果を示す。高効率氷蓄熱ユニットの年間ランニングコストは既設吸収冷温水機の29%となり、設備更新によって71%のランニングコスト低減を図ることができる。既設氷蓄熱ユニットからの入替える場合は18%のランニングコスト低減を見込むことができる。新設の吸収冷温水機との比較でも65%の削減効果があり、高効率氷蓄熱ユニットの採用によって大幅なランニングコスト低減が見込まれる。

#### 5. む す び

氷蓄熱ユニットは電力負荷平準化効果が大きく、今後の普及拡大に向けて省エネルギー化が求められるとともにシステム構築の容易性に対する要望が更に高まると考えられる。

今回開発した高効率氷蓄熱ユニットは、圧縮機や空気側熱交換器、冷凍サイクルなどへ新技術を導入したコンパクトキューブをベースとし、当社従来氷蓄熱ユニットに対して冷房蓄熱COPで51%、冷房追い掛けCOPで34%の省エネルギー性の向上を達成した。また、非蓄熱ユニットと氷蓄熱ユニットの両方が含まれる混在システムの制御が可能なシステムコントローラを開発し、大規模負荷への適用が可能となる複数台システムの構築の容易化を図った。

今回開発・製品化した高効率氷蓄熱ユニットによって、電力負荷平準化及び省エネルギーに効果の大きい氷蓄熱システムの普及拡大を進めていく。

# オーロラビジョン用高画質表示コントローラ“XDC-6000”

大塚尚司\* 山中 聡\*\*  
花村敏明\*  
南 浩次\*\*

High-resolution Display Controller "XDC-6000" of Diamond Vision

Shoji Otsuka, Toshiaki Hanamura, Koji Minami, Satoshi Yamanaka

## 要 旨

三菱電機の大型映像表示装置“オーロラビジョン”は、1980年の初号機納入以来、国内外のスタジアムや公営競技場などを中心に納入実績を重ねてきた。

近年LED (Light Emitting Diode) 方式の表示素子が普及し、軽量・長寿命とあわせて低コスト化が進み、商業施設のビル壁面やオープンスペースなどに設置する表示装置など、新しい市場にもその用途を拡大している。

当社は、市場のニーズをくみ取り、オーロラビジョンの高画質化に注力してきた。オーロラビジョンの高画質化では、LED素子ごとの輝度調整、多階調表示制御、独自の色度変換技術などの開発を行っている。

オーロラビジョンのさらなる高画質化を進める上で、オーロラビジョンの画像処理をつかさどるコントローラが最

も重要な要素となっている。従来のコントローラにはこれまで、三次元IP (Interlace/Progressive) 変換、三次元ノイズリダクション等の高画質化技術を搭載してきた。

このたびオーロラビジョン用高画質表示コントローラ“XDC-6000”の開発を行った。このコントローラは1Uラックマウントサイズ<sup>(注1)</sup>の小型筐体(きょうたい)でフルHD (High Definition) のスクリーンがコントロール可能で、最新の高画質化技術(超解像処理、ダイナミックガンマ補正、超階調処理など)を多く搭載している。

また環境対応技術として、スクリーン輝度の最適化調整処理及び消費電力低減技術を搭載している。

本稿では、今回開発したXDC-6000について述べる。

(注1) 1UラックマウントサイズはEIA (Electronic Industries Alliance) によって規定化された19インチラックのサイズで、(W)約483mm×(D)540mm×(H)約45mm以下を示す。



## オーロラビジョン用高画質表示コントローラ“XDC-6000”

1台でフルハイビジョンを制御可能なオーロラビジョン専用小型コントローラである。超解像処理やダイナミックガンマ補正等の最新高画質化技術を搭載している。

## 1. ま え が き

当社のフルカラー大型映像表示装置は、1980年の初号機納入以来、スタジアムや公営競技場をはじめ、1,300箇所以上に納入している。

当社は納入当初より表示部の高画質化、高精細化及び高機能化を進め、かつスタジアム・公営競技場などの各市場に適したシステムを構築し、表示部と合わせたトータルシステムとして提案しながら大型映像業界をリードして来た。

しかし、1993年に高輝度の青色LEDが登場して以来、大型映像業界に多くのメーカーが新規参入し、競争が激化している。そのような状況の中、当社も映像技術のさらなる改良や付加価値の高い新システムの開発を行い、市場を拡大している<sup>(1)</sup>。

本稿では、今回開発したオーロラビジョン用高画質表示コントローラXDC-6000の概要について述べる。

## 2. 高画質表示コントローラXDC-6000

スタジアムとアリーナ向けLEDオーロラビジョンは、高精細化、大画面化しており、スクリーンの表示解像度の向上に伴い、ハイビジョン映像の表示が可能となってきた。

一方、ハイビジョン放送の拡大によって、民生用ハイビジョン機器やハイビジョンコンテンツが普及しており、容易にハイビジョン映像の放映が可能な環境となってきた。

当社では2006年、ハイビジョン対応の表示コントローラを業界に先駆けて発売し、2008年には3Uラックマウントサイズ(435(W)×348(D)×130(H)(mm))にコンパクト化した製品を発売し好評を博してきたが、このたび超解像処理、ダイナミックガンマ補正等の最新高画質化技術を加え更なるコンパクト化及び大型映像表示装置の低消費電力化を実現した普及タイプとしてXDC-6000を開発した。

## 2.1 XDC-6000の仕様と機能

XDC-6000の製品仕様を表1に示す。またXDC-6000は、次の機能を搭載している。

(1) DVI(Digital Visual Interface)／SDI(Serial Digital Interface)入力対応

最大解像度WUXGA (1920×1200ピクセル), 1080p  
(1920×1080ピクセル)まで入力可能

(2) 色変換アルゴリズム (ナチュラルカラーマトリックス)

大型表示装置では、企業ロゴ広告などのコンテンツ表示が想定され、表示の色再現性が重視される。パソコンの操作画面(図1)で、ユーザーが色空間上のR(赤), G(緑), B(青), Y(黄), Mg(マゼンタ), Cy(シアン), W(白)を任意の色に設定することが可能

### (3) 拡大・縮小スケーラ

入力画像の任意の位置を1ピクセル単位で切り取り，拡大・縮小が可能

(4) ダイナミックピクセルコントロール制御

少ない画素数で高解像表示を実現でき、高解像でシャープなコンテンツ表示が可能

XDC-6000では、前面操作パネル機能の充実によって各種設定操作を容易にできるようにした。また前面の文字表示部には、民生電子機器に多く採用されている蛍光表示管を採用することで広視認角度のはっきりとした文字表示が可能となった。図2に前面操作パネルの文字表示部及び操作ボタンを示す。

表 1. XDC-6000の仕様

入力信号 (SDIビデオ)	SD-SDI (480i@59.94Hz, 576i@50Hz) HD-SDI (1080i@59.94Hz, 1080i@50Hz, 720p@59.94Hz, 720p@50Hz)
入力信号 (DVI-D)	VGA, SVGA, XGA, SXGA, UXGA, WUXGA, 480p, 720p, 1080i, 1080p (HDCP対応)
入力信号 (外部同期信号)	NTSC標準ブラックバースト信号 PAL標準ブラックバースト信号
LED表示装置用 出力信号	HD-SDI (SD-SDI) 規格をもとにした 三菱オリジナルフォーマット最大 6 出力
出力信号(モニタ)	DVI-I 1 系統: XGA, SXGA, 720p
制御スクリーンサイズ (1 台あたり)	1920 (W) × 1088 (H) ピクセル 1920 (W) × 1088 (H) ドット
制御入出力	温度センサ／照度センサからのデータ収集 スクリーンON／OFF制御
外部コントロールI/F	RS-422／RS-485Dサブ 9 ピン × 3 10BASE-T／100BASE-TX
カスケード接続台数	8 台(最大)
電源	AC100～240V (3 ピン IECプラグ), 1.2A 50/60Hz
外形寸法	440 (W) × 417 (D) × 44 (H) (mm) ※ゴム足, 正面ボタン, ラックマウントブラケットを除く
質量	6.2kg
使用環境	動作温度0～40℃, 湿度10～90%RH (結露なきこと)
その他の機能	ビデオフリーズ ビデオクリア

SD	: Standard Definition
HD	: High Definition
VGA	: Video Graphics Array
SVGA	: Super VGA
XGA	: eXtended Graphics Array
SXGA	: Super XGA
UXGA	: Ultra XGA
WUXGA	: Wide UXGA
HDCP	: High-bandwidth Digital Contents Protection
NTSC	: National Television System Committee
PAL	: Phase Alternating Line
IEC	: International Electrotechnical Commission
RH	: Relative Humidity

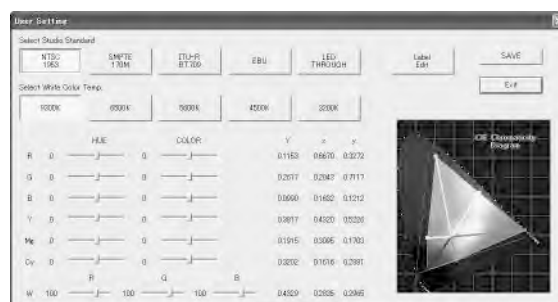


図1. ナチュラルカラーマトリックスの操作画面

## 2.2 高画質化技術

XDC-6000は、次の最新高画質化技術を搭載している。

- (1) 超解像処理
- (2) ダイナミックガンマ補正
- (3) 超階調処理

また、これら新しい高画質化技術に加え、従来機種に搭載していた、

- (1) 動画のフレーム間ノイズを低減する三次元ノイズリダクション
- (2) インターレース信号をプログレッシブ信号に変換する動き検出適応型ハイビジョン三次元IP変換
- (3) 縮小映像にあらわれる折り返しノイズを抑える縮小エリアシング(Aliasing)低減処理

などの高画質化技術を更に改良して搭載している。

### 2.2.1 超解像処理

オーロラビジョン等の大型映像表示装置の高解像度化は、ハイビジョンを超える領域に広がっている。こうした高解像度の表示装置で低い解像度の映像を表示する場合、映像を拡大するだけでは細かい部分を再現することができず、表示装置の解像度を生かした映像表現ができなかった。

そこで、拡大時に映像の細かい部分(高周波成分)を推定して鮮明な映像を作り出す超解像処理技術を搭載した。この技術は、フルハイビジョンの4倍以上の解像度をもつスクリーンにも対応でき、表示装置の解像度にあわせた処理が可能となっている。

図3に超解像処理の概念図で、入力画像を縦横2倍に拡大する例を示す。まず、入力画像①を拡大する(②)。次に、入力画像①を縮小する(③)。入力画像①及び縮小画像③の高周波成分を抽出する(④、⑤)。④、⑤で得られた画像をもとに拡大画像の高周波成分を推定する(⑥)。最後に拡大画像②と推定高周波成分⑥を合成し、最終的な超解像の出力画像⑧を作り出す。

このようにして、鮮明な拡大画像を作り出すことができるので、ハイビジョンでない低解像度の画像を解像度の高いスクリーンに拡大して表示する際に生じるぼやけを改善する効果がある。

### 2.2.2 ダイナミックガンマ補正

オーロラビジョンにとって高コントラスト化は高画質化への重要な要素の一つとなっている。デジタル映像信号処理での高コントラスト化は、デジタルデータの限られたダイナミックレンジの中で、いかにレンジを有効活用するかが重要なポイントである。

ダイナミックガンマ補正は、入力画像のヒストグラムを検出し、リアルタイムにガンマ補正を行うことで、高コントラスト化を実現する方式である。

図4に映像ヒストグラムとそのときのダイナミックガンマ補正の一例を示す。映像ヒストグラムで16分割された区間の中で、出現頻度の高い階調区間のゲインをより高く、出現頻度の低い階調区間のゲインをより低くするようにして16点折れ線でガンマ補正を行う。

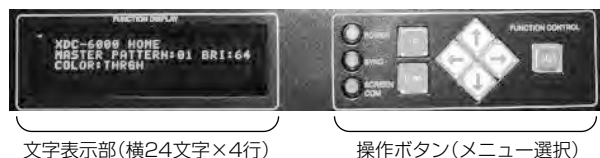


図2. 前面操作パネルの表示部

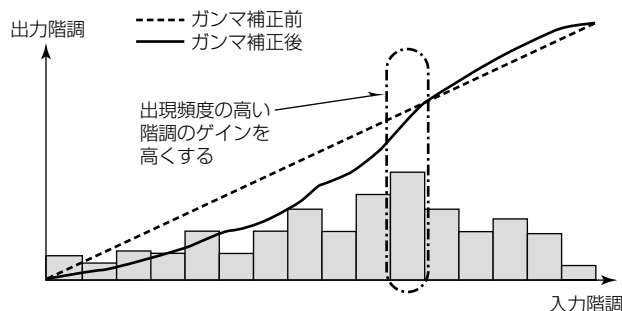


図4. ヒストグラムとダイナミックガンマ補正

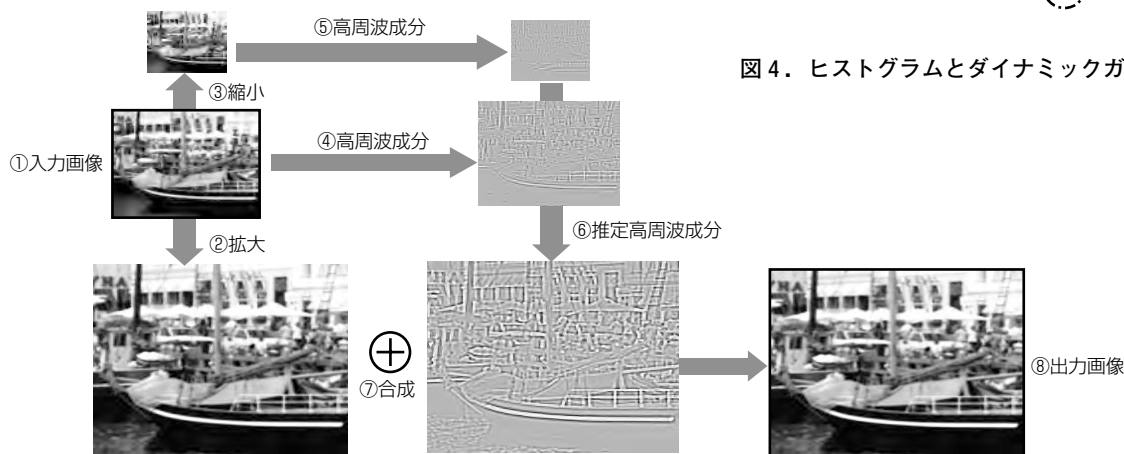
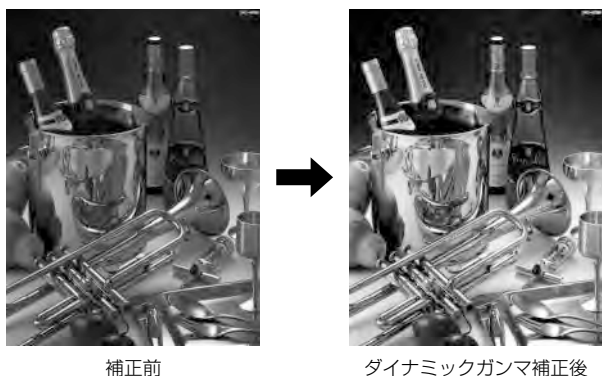


図3. 超解像処理の概念図

出典：JIS X 9204 XYZ/SCID(ISO-sRGB)





出典：JIS X 9204 XYZ/SCID(ISO-sRGB)

図 5. ダイナミックガンマ補正

これによって、映像の平均階調が高い場合に暗い部分の黒が強調されるように補正を行う。このように映像ヒストグラムに応じてガンマ補正を行うことで、シーンごとに最適なコントラストに補正が行われ、黒が強調された、高コントラストで艶(つや)やかな映像となる。

図 5 にダイナミックガンマ補正処理前後の画像を示す。

ダイナミックガンマ補正を用いると、オーロラビジョンの全体的な輝度を下げても、高コントラストで明るく見ることができ消費電力削減によって省エネルギーとなる。

### 2.2.3 超階調処理

階調の少ない平坦(へいたん)部の階調数(ビット数)を拡張する技術である。階調変化が平坦な区間(グラデーション領域)を検出して、なだらかになるように平滑化処理を行う。

超階調処理によって、映像をぼかすことなく、自然な階調変化を実現することができ、ビット数不足の平坦部に発生する擬似輪郭やノイズを低減することができる。

### 2.3 コンパクト化

今回1台あたり1920×1088ピクセルの制御が可能な表示コントローラを、1Uラックマウントサイズで実現しており、さらにXDC-6000をカスケード接続することで1920×1088ピクセルを超える超大型のスクリーンも制御可能となる。

また、最新の高性能・大容量FPGA(Field Programmable Gate Array)や高画質化技術を搭載した専用ASIC(Application Specific Integrated Circuit)<sup>(2)</sup>の使用によって制御LSIを高集積化するとともに、大容量のメモリLSIや小型部品を積極的に採用することによって高集積化を実現した。

基板内IC間の映像信号伝送として、低消費電力の高速差動インタフェースであるLVDS<sup>(注2)</sup>(Low Voltage Differential Signaling)を採用することで、基板上の信号線数を減らし高速に映像信号を伝送することができた。

これらの高密度実装技術によって、従来に比べコンパクトな外形で、フルハイビジョン解像度のスクリーンの映像信号コントロールが可能となった。

(注2) LVDSは小振幅・低消費電力で高速の差動インタフェースであり、ANSI/TIA/EIA-644で規定されている標準規格である。

### 2.4 低消費電力化

XDC-6000では、画面全体の輝度に応じて電力ピーク制御を行う適応型電力制御機能を搭載しており、映像内容に応じてスクリーンの表示輝度を最適に制御することで大型映像表示装置の低消費電力化を実現している。

また、スクリーンに照度センサを組み合わせることで、外光に応じて自動的に表示輝度を制御することが可能で、大型映像表示装置の低消費電力化を実現しており、表示輝度を80%固定で運用した場合に比べ、消費電力を約30%低減することができる。

## 3. む す び

当社オーロラビジョンで使われている表示コントローラの最新高画質化技術について述べた。

これら技術を活用し、既存分野での顧客サービス向上と、新市場の開拓ができるものと期待している。

## 参 考 文 献

- (1) 前嶋一也：オーロラビジョンLEDの高画質化技術と新シリーズADの概要，月刊ディスプレイ，**9**，No.1，39～44（2003）
- (2) 野村 崇，ほか：液晶テレビの高画質化，三菱電機技報，**83**，No.2，119～123（2009）

# デジタルサイネージ市場対応 屋外型高精細“オーロラビジョン”

世良田博幸\* 金光輝長†  
道盛厚司\*\*  
吉田 浩\*\*\*

Outdoor High Resolution "Diamond Vision" for Digital Signage Market

Hiroyuki Serada, Atsushi Michimori, Hiroshi Yoshida, Terunaga Kanemitsu

## 要 旨

近年、ディスプレイ(液晶ディスプレイ、プラズマディスプレイなど)の大型化・薄型化・低価格化やIP(Internet Protocol)ネットワークの整備に加え高速化が進み、広告用途での“デジタルサイネージシステム”が注目されている。

このデジタルサイネージ市場は拡大傾向にあり、市場規模は2012年に830億円弱に、2015年には1,250億円以上の規模に拡大すると予測されている<sup>(1)</sup>。

三菱電機では、大型映像表示装置“オーロラビジョン”として1980年にCRT(Cathode Ray Tube)方式の初号機を納入して以来、国内外のスタジアム、公営競技場を中心に納入してきた。

近年はLED(Light Emitting Diode)方式の表示素子採用によって、軽量・長寿命化・低価格化を進め、商業施設のビル壁面やオープンスペース用として適用してきた。

一方、2009年にはハイビジョン映像に対応したデジタル

サイネージシステムである“三菱デジタルサイネージソリューションMEDIAWAY(メディアウェイ)”を製品化しており、今回、MEDIAWAYと組み合わせる大型映像表示装置として、

- (1) 新防水方式の適用による屋外型とし、近距離での視認性を確保
- (2) モジュールの薄型化・軽量化による設置性の改善
- (3) ファンレス冷却方式と密閉構造による信頼性の確保をコンセプトとし、さらに周囲環境に合わせた自動輝度調整機能を装備し、省電力を図ることでの環境面への寄与も考慮した上で、デジタルサイネージ市場対応の屋外型高精細オーロラビジョンを製品化した。

本稿では今回製品化したデジタルサイネージ市場対応の屋外型高精細オーロラビジョンと、三菱デジタルサイネージソリューション MEDIAWAYの特長について述べる。



## デジタルサイネージ市場対応の屋外型高精細“オーロラビジョン”

当社デジタルサイネージシステムであるMEDIAWAYと組み合わせる屋外型高精細オーロラビジョンとして、薄型化・軽量化をコンセプトに製品化した屋外用175型(横3.84m×縦2.24m×奥行き0.03m)のディスプレイである。

## 1. ま え が き

近年、ディスプレイ（液晶ディスプレイ、プラズマディスプレイなど）の大型化・薄型化・低価格化やIPネットワークの整備・高速化が進み、広告用途での“デジタルサイネージシステム”が注目されている。

当社では、ハイビジョン映像に対応したデジタルサイネージシステムとして“三菱デジタルサイネージソリューションMEDIWAY（メディアウェイ）”を製品化しており、今回はこのデジタルサイネージシステムと組み合わせた大型映像表示装置として、近距離での視認が可能なデジタルサイネージ市場対応の屋外型高精細オーロラビジョンを製品化した。

製品化に当たっては、

- (1) 新防水方式の適用による屋外型とし、近距離での視認性を確保
- (2) モジュールの薄型化・軽量化による設置性の改善
- (3) ファンレス冷却方式と密閉構造による信頼性の確保をコンセプトとした。

また、周囲環境に合わせ、スクリーンの明るさを自動的に変化させる自動輝度調整機能を装備し、省電力を図ることでの環境面への寄与についても考慮した。

本稿ではデジタルサイネージ市場対応の屋外型高精細オーロラビジョンと、三菱デジタルサイネージソリューションMEDIWAYの特長について述べる。

## 2. デジタルサイネージ市場対応屋外型高精細オーロラビジョン

### 2.1 近距離視認性確保に向けたLED素子の仕様

オーロラビジョンの表示用LED素子は、1パッケージに1素子を封入した1in1タイプ（図1）と3素子を封入した3in1タイプ（図2）があり、要求される視認距離に応じ、素子タイプと素子ピッチ（素子の配置間隔）を選択している。

3in1タイプは3素子を1パッケージに封入しており、1in1タイプに比べて混色距離が短いという特長があり、近距離用の表示に適している。

しかし、3in1タイプのLED素子は通常防水性がなく、屋外用としては前面に防水カバーが必要で、構造上、素子ピッチを小さくできなかった。



図1. 1 in 1 タイプ素子

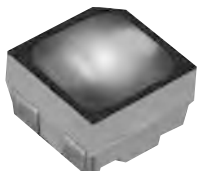


図2. 3 in 1 タイプ素子

今回、新防水方式の採用によって、デジタルサイネージ市場へ適用する屋外近距離広告ディスプレイとして、3in1タイプのLED素子で素子ピッチ6.7mmを実現し、5m程度の近距離での視認性と高精細性を確保できた。

また、今回の製品化によって、屋外型オーロラビジョンは用途に応じて、5m程度の近距離用から100m超の長距離用まで製品を品ぞろえすることができた。

### 2.2 製品への適用技術とその効果

#### 2.2.1 新防水方式の適用

図3に3in1タイプLED素子の防水方式を示す。

従来方式はLED素子に防水性がなく、LED素子の前面に防水カバーを実装することで防水性を維持していたが、今回、LED素子自体に防水性を持たせるとともに、LED素子を実装するLED基板にも防水処理を施すことによって、従来に比べ更に確実に耐候性のある防水方式を確立した。

新防水方式の確立によって、従来必要であったLED素子の防水用カバーが不要になり、素子ピッチを小さくでき、視認性・高精細性確保と軽量化にもつながった。

#### 2.2.2 表示モジュールの薄型・軽量化

デジタルサイネージで一般的に使用される表示用のディスプレイ（液晶ディスプレイ、プラズマディスプレイなど）は簡単に設置することが可能であり、デジタルサイネージ用途である今回のオーロラビジョンも組立ての容易性・軽量化が求められていた。

従来の当社オーロラビジョン表示部は輸送・組立て作業性を考慮しモジュール化しているものの、奥行き300mm、1モジュールあたりの質量約100kg前後と設置の際は重機などが不可欠であった。

今回の表示モジュールは新防水方式の適用やファンレス冷却方式と密閉構造の実現などによって、図4に示すように奥行き30mm（最薄部）、1モジュールあたりの質量20kgと薄型・軽量化を実現した。

さらに軽量化に伴い引掛け金具による引掛け構造が可能となり、設置の際も重機などは不要で、人力で短時間での設置が可能となった。

また、薄型・軽量化に伴い、輸送容積及び質量はそれぞれ、当社従来製品比で1/5、1/2以下となり、輸送エネルギーと輸送コストの削減も見込まれる。

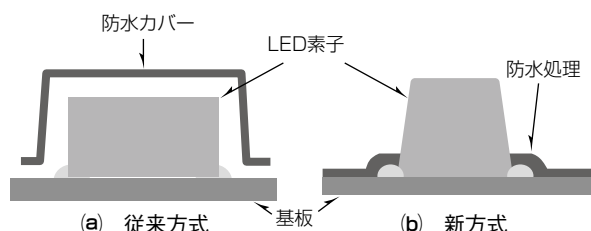


図3. LED素子の防水方式

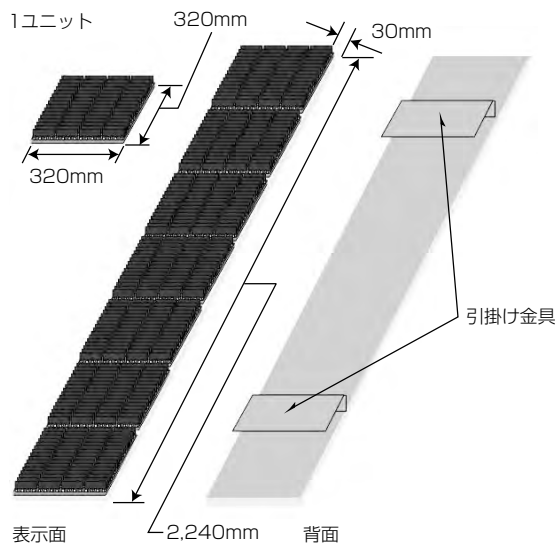


図4. 薄型・軽量タイプ表示モジュール

### 2.2.3 ファンレス冷却方式と密閉構造の実現

従来の屋外型オーロラビジョンの冷却はファンによる冷却やエアコンによる冷却を採用していた。

これらの冷却方式で、ファン冷却方式は一定期間使用した際はフィルタ交換やファン交換が必要となる一方、エアコン冷却方式は初期費用とランニング費用が発生するという、それぞれの課題があった。

今回のオーロラビジョンではこれらの課題を解決するために、冷却ファン・エアコンのいずれも使用しないファンレス冷却方式とし、併せて外気取り込みの際も粉塵（ふんじん）などの設置環境による影響を受けにくい密閉構造とした。

ファンレス冷却方式では主熱源である表示面とモジュール背面の距離を狭くし、モジュール背面に効率よく伝熱し自然空冷によって放熱させる構造とした。その結果、温度上昇を抑えることが可能となり、冷却のための外気取り込みが不要な密閉構造とすることができた。

ファンレス冷却方式の採用によって、薄型・軽量化が実現できたほか、ランニングコストの低減、ファン故障やフィルタ目詰まりなどによる表示装置不具合の発生もなくなり、信頼性の向上にもつながった。

### 2.2.4 省電力化への対応

今回のオーロラビジョンは、従来同様に照度センサを搭載し、外光の明るさに合わせ、スクリーンの明るさを自動的に変化させる自動輝度調整機能を装備した。

また、表示する映像信号（R, G, B）と輝度から消費電力を算出し、あらかじめ設定した電力を超える場合には輝度を落とす自動電力制御機能を標準的に装備し、これら機能を有効に作用させることで省電力を図る構成とし、環境面にも寄与できるものとした。

今回製品化した屋外デジタルサイネージ市場対応屋外型高精細オーロラビジョンの仕様を表1に示す。

表1. デジタルサイネージ市場対応屋外型高精細オーロラビジョンの仕様(175型の場合)

項目		目標性能
基本仕様	方式	高輝度LED (R, G, B)
	絵素構成	
	絵素密度 (ピクセル/m <sup>2</sup> )	22,500
	輝度 (cd/m <sup>2</sup> )	3,000
	表示階調	各色4,096階調
ディスプレイ仕様	輝度調整	64段階
	画面寸法 (m)	3.84 (W) × 2.24 (H)
	絵素数 (ピクセル)	193,536 (横576 × 縦336)
	アスペクト比	9 : 15.4
	外形寸法 (m)	3.84 (W) × 2.24 (H) × 0.03 (D)
質量 (kg)		約240

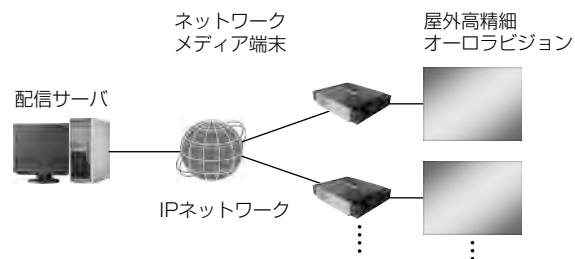


図5. MEDIAWAYシステムの構成

## 3. デジタルサイネージシステム

従来のオーロラビジョンではデジタルサイネージ市場に対しては、個々にシステムをカスタマイズしていた。

当社は2009年に三菱デジタルサイネージソリューション MEDIAWAYを発売し、デジタルサイネージ市場に対し標準システムを提供している。今回のオーロラビジョンでは、このMEDIAWAYと組み合わせることでシステム構築が容易となった。

図5に示すように、MEDIAWAYシステムは配信サーバ、ネットワークメディア端末、オーロラビジョンによって構成しており、システム構築が容易であり、拡張時はネットワークメディア端末とオーロラビジョンの追加によって容易に対応できる。

次に、三菱デジタルサイネージソリューション MEDIAWAYの特長について述べる。

#### (1) IP映像配信と高機能描画エンジンによる高画質表示

MEDIAWAYは、ハイビジョン動画や高精細な静止画などのコンテンツ、表示スケジュールや制御指令などのデータをIPネットワークで配信でき、公衆網や施設内のネットワークを利用したシステム構築や拡張が容易となる。

また、高機能な描画エンジンとIP映像配信クライアント

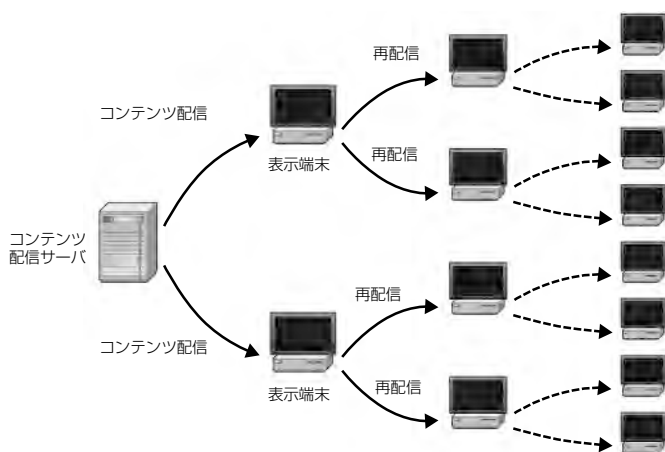


図6. 分散配信のイメージ

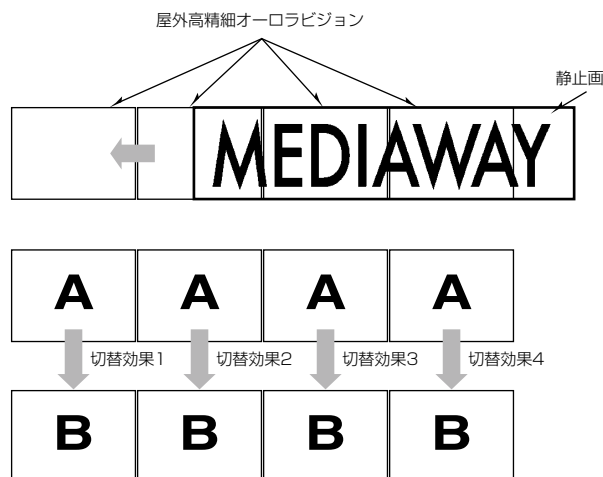


図7. マルチ画面の同期表示

機能の組み合わせによって、伝送されたコンテンツを画面分割や合成など様々な効果を付加し高画質で表示できる。

## (2) ハイブリッド配信による安定配信の確保

IPネットワーク、特にインターネットなどの広域ネットワークを利用する場合、回線の実効通信速度が保証されていないが、デジタルサイネージではこれらネットワークの性能に依存せず、配信できることが要求される。

MEDIAWAYでは、広告や店舗紹介などのコンテンツを事前に配信し表示端末にファイルとして蓄積させておく蓄積映像配信を利用することで、ネットワーク性能に依存せずに配信が可能となる。

また、事前配信が困難なライブ映像は、リアルタイムでエンコードしストリーム配信・表示することも可能で、イベント実況や緊急放送など、リアルタイム配信表示が必要なコンテンツがある用途にも対応できる。

このように蓄積映像配信とライブ映像配信の両方に対応するハイブリッド配信によって適用用途及び運用の幅が広がり、安定した運用を行うことができる。

## (3) 分散配信によるネットワーク負荷抑制と配信時間の短縮

ハイビジョン映像の一般化、表示装置のフルハイビジョン化などによってハイビジョン対応が不可欠であるが、そのデータ量は大きく、10分程度のコンテンツでも、ギガバイト単位の容量が必要となる。

MEDIAWAYでは、このような大容量コンテンツを大規模なデジタルサイネージシステムへ配信するため、図6に示すように配信サーバからコンテンツを受信した表示端末が更に別の表示端末へ中継し再配信を行う分散配信方式を実現し、ネットワーク負荷の集中を抑え、かつ配信時間を短縮している。

## (4) アイキャッチ機能の実現

デジタルサイネージシステムでは視聴者へのアイキャッチ機能が不可欠となる。

MEDIAWAYでは、先に述べた高機能描画エンジンによって、図7に示すように1つの静止画を複数の屋外高精細オーロラビジョン間をまたがって自由に動かすことや、コンテンツAからコンテンツBに切り替える際に切替え効果を付けることによって、アイキャッチ効果を高める機能を実現している。

また、静止画を自由に動かすことによって、動画と同様の多彩な表現が可能となり、コンテンツ制作費も抑制できる。

## 4. む す び

デジタルサイネージ市場対応の屋外型高精細オーロラビジョンとデジタルサイネージシステムMEDIAWAYの特長を述べた。

今回製品化したデジタルサイネージ市場対応の屋外型高精細オーロラビジョンを拡大傾向にあるデジタルサイネージ市場分野へ投入するほか、確立した要素技術をオーロラビジョンラインアップの他機種へも展開する。

## 参 考 文 献

- (1) デジタルサイネージ市場総調査2010, (株)富士キメラ総研 (2009)
- (2) 斎藤雄作, ほか: オーロラビジョン新技術, 三菱電機技報, **83**, No.2, 159~163 (2009)
- (3) 吉田 浩: サーバレス分散型コンテンツ配信方式の検討, 電子情報通信学会総合大会B-7-43 (2006)
- (4) 吉田 浩: 情報集配信方式の検討, 電子情報通信学会総合大会B-19-5 (2010)



# E 6 系新幹線電車(量産先行車)用 空調装置における小型軽量化・機能向上

白石仁史\* 林田友紀\*\*  
原 正明\* 梅崎達昭\*\*\*  
郡嶋宗久\*\*

*Down Sizing and Improvement of Passenger Comfort in Air Conditioning System for E6 Series Shinkansen*

*Hitoshi Shiraishi, Masaaki Hara, Munehisa Gunjima, Tomoki Hayashida, Tatsuaki Umesaki*

## 要 旨

環境性能，走行性能，快適性の向上をコンセプトに，東京－八戸間を国内最高時速320km/hの営業運転が可能で，かつ盛岡－秋田間の在来線区間も直通できるE 6 系新幹線電車(量産先行車，以下“E 6 系新幹線”という。)を，東日本旅客鉄道(株)は2012年度末に導入予定である。三菱電機では，客室の快適性を担うE 6 系新幹線用空調装置を開発した。E 6 系新幹線用空調装置の開発にあたり，冷房能力を確保したうえで小型軽量化と消費電力の低減を図ること，また機器故障時でも車内快適性を維持する冗長性システムを構築することを目標とした。

次に今回開発したE 6 系新幹線用空調装置の特長を示す。

- (1) 各車両の天井に室内機，床下に室外機を 2 台ずつ分割して搭載していた従来空調装置に対して，空調装置 1 台を床下に集中して配置する。また，従来別置きとしていた換気装置を空調装置に内蔵し，かつ換気装置ダクトの形状を最適化することによって，従来空調装置に比べ小型軽量化を実現し，消費電力を低減した。
- (2) 空調装置に内蔵している圧縮機用インバータが故障した場合でも，冷房運転を継続し，車内快適性を維持可能な冗長システムを実現した。



## E6系新幹線用空調装置

E6系新幹線用空調装置は，1両あたり 1 台で構成されている。空調装置には，従来空調装置では別置きにしていた換気装置を内蔵している。



## 1. ま え が き

E6系新幹線は、現在営業運転中のE3系新幹線の次形式として投入される予定であり、E3系新幹線の空調装置をターゲットとして開発目標値を設定した。表1にE6系新幹線用空調装置の開発目標を示す。

本稿では、開発したE6系新幹線用空調装置の構成と、小型軽量化及び冗長性の確保における取組みについて述べる。

## 2. E6系新幹線用空調装システム

図1に、E3系新幹線とE6系新幹線の空調システムを示す。E3系新幹線では、給気用換気装置及び空調室内機が車体の天井に搭載され、空調室外機と排気用換気装置が床下に搭載される。ここで、空調室内機と空調室外機は車体に付設の冷媒配管によって接続される。給気用換気装置で取り入れた新鮮気は、新鮮気ダクトを用いて2台の室内機へ振り分けられ、車内からのリターン空気と混合し、冷却／加熱される構成となっている。

表1. E6系新幹線用空調装置の開発目標

車種	E3系(他社製)	E6系(開発目標)
冷房能力	44.2kW	54.6kW
消費電力 <sup>(注1)</sup>	約48kW	43kW
暖房能力	32kW	32kW
容積 <sup>(注1)</sup>	—	E3系以下
質量 <sup>(注1)</sup>	約1,820kg	1,400kg

(注1) 換気装置を含む。

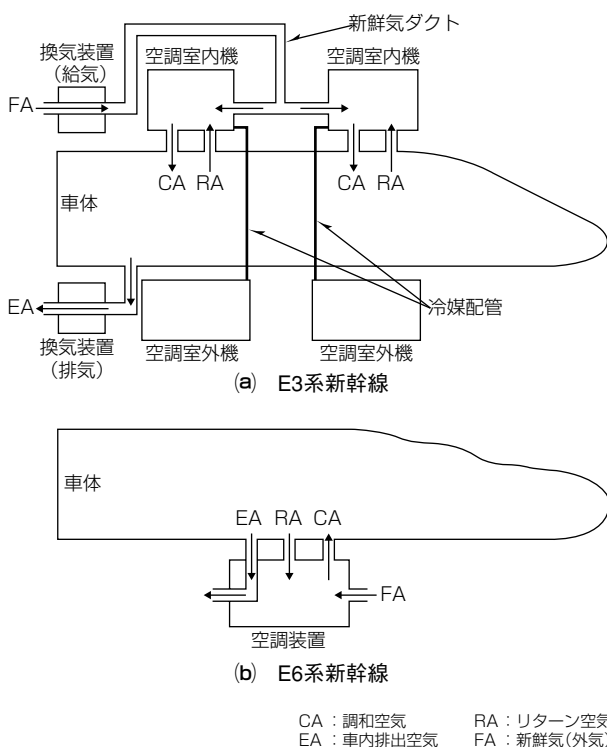


図1. E3系及びE6系新幹線の空調システム

これに対しE6系新幹線用空調装置は車体の床下に集約して搭載され、新鮮気と車内からのリターン空気が混合され冷却／加熱する構成である。

## 3. 小型軽量化と消費電力低減

E6系新幹線用空調装置の小型軽量化を図るため、次の取組みを実施した。

### 3.1 空調装置の床下集約化

E3系新幹線空調装置は、屋根上と床下に分割搭載されているため、冷媒配管を車体に付設する必要があったが、E6系空調装置では床下に集約することで冷媒配管の付設を不要とした。また、空調装置に換気装置を内蔵したため、換気装置から空調装置へ送風する車体側の新鮮気ダクトも不要となった。集約にあたり、目標冷房能力を満足しつつ消費電力を低減するためには、電動機の搭載台数を低減する必要があった。

表2に電動機を備える内蔵機器の台数を示す。E6系の室外送風機の台数は、E3系に比べて増加するものの、大容量スクロール圧縮機の採用と室内送風機の集約によって、電動機の合計台数を削減することで約10%の消費電力低減を実現した。

### 3.2 給排気一体型換気装置の開発

E3系では換気装置を給気用と排気用で別置きにしていたが、E6系では換気装置を給気用と排気用で一体化し、さらに空調装置に内蔵した。これによって換気装置の筐体(きょうたい)と電動機を省略でき、大幅な小型軽量化を実現した。

### 3.3 新鮮気ダクトの最適化

換気装置を空調装置に内蔵することに伴い新鮮気ダクトも内蔵することとなり、空調装置の限られた搭載スペースで風量を確保するため、ダクト形状の最適化を実施した。

図2にE6系新幹線用空調装置の新鮮気ダクト形状を、図3に風速分布の解析結果を示す。従来の新幹線用新鮮気ダクトは一定の大きな開口面積で長くとり、風量を調整する板をダクトの入口部に付設して所望の風量に調整していたが、E6系では入口部の風量調整板を廃止し、ダクト内部で流路面積を絞って換気送風機給気部の要求風量(風速)に調整した。特に、従来の約1/5以下という薄さ(30mm)によって小型化を実現した。

表2. 電動機を備える内蔵機器の台数

車種	E3系(他社製)	E6系
圧縮機	4台	3台
室内送風機	2台	1台
室外送風機	2台	3台
換気送風機	2台	1台
合計	10台	8台

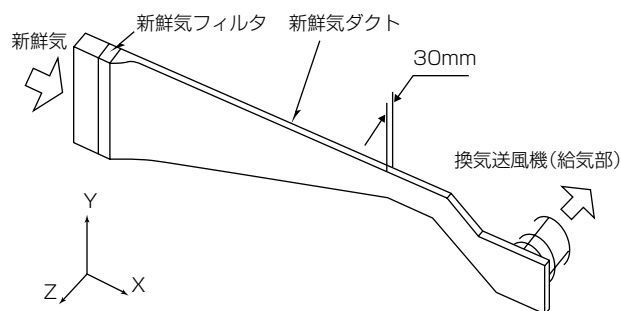


図2. E6系新幹線用空調装置内蔵の新鮮気ダクト形状

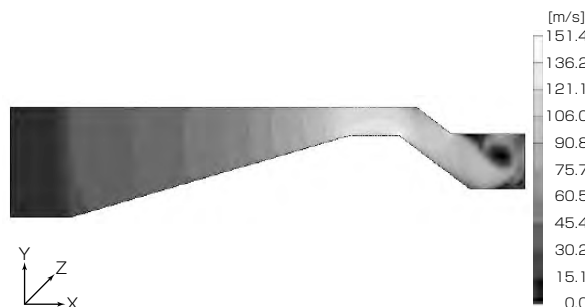


図3. E6系新幹線用空調装置内蔵の新鮮気ダクト風速分布

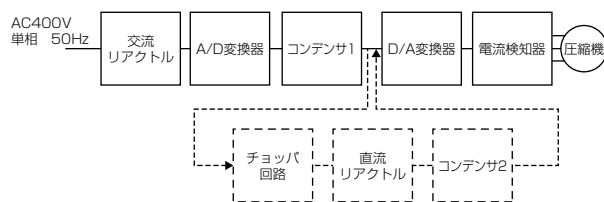


図4. E6系新幹線用空調装置のインバータ回路図

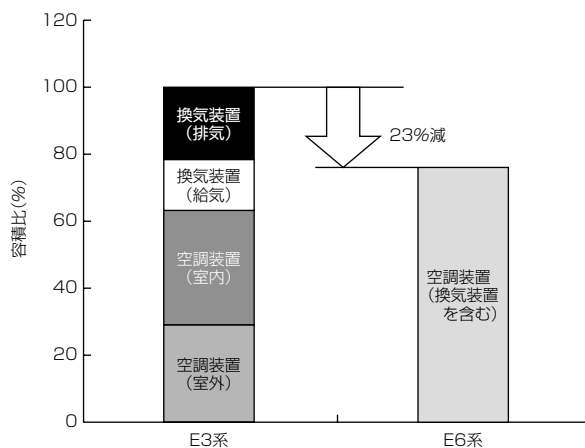


図5. 空調装置の小型化

### 3.4 空調内蔵インバータの小型化

E6系新幹線用空調装置の圧縮機はインバータ駆動であり、図4にE6系新幹線用空調装置のインバータ回路図を示す。AC400V電源から順に、交流リアクトル、A/D変換器、コンデンサ1、D/A変換器、電流検知器で構成され、従来の新幹線用空調装置のインバータ回路にあるチョップ回路、直流リアクトル、コンデンサ2を廃止して、小型軽量化を図った。

### 3.5 小型化の効果

図5に、E6系新幹線用空調装置における小型化の効果を示す。E6系新幹線用空調装置は、E3系に比べ容積比で約23%低減、質量比で約23%低減を達成した。

## 4. 冗長性の確保

E6系新幹線用空調装置では床下に集約したため、万一の故障時に冗長性の確保(バックアップ運転時の車内快適性維持)が必要である。図6に、空調制御ツナギを示す。圧縮機用インバータが故障した場合でも、換気装置用インバータで圧縮機を1台運転し、車内を冷房することができる。

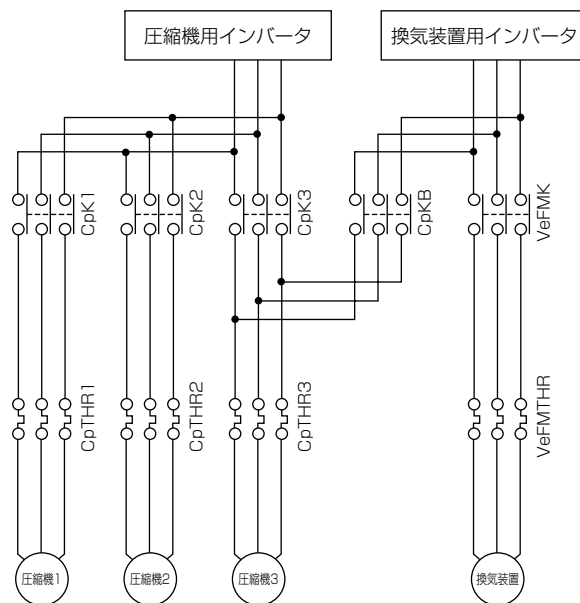


図6. 空調制御ツナギ

## 5. むすび

E6系新幹線用空調装置の概要について述べるとともに、小型軽量化、冗長性の確保に向けた取り組みについて述べた。今後、この開発で培った技術を生かし他装置への展開を図るとともに、環境への配慮に貢献していきたいと考える。

# 非常用单相発電装置のコンパクト化

大井手政人\*  
宇都波多留\*  
馬場圭介\*\*

*Down Sizing of Single Phase Emergency Power Generating Facility*

*Masato Oide, Wataru Uto, Keisuke Baba*

## 要 旨

金融機関等のコンピュータやATM(Automatic Teller Machine)を対象にした三菱端末機用発電装置(Mitsubishi Computer Generator:MCG)は、一般仕様の非常用発電装置に比べ高精度な電圧・周波数特性などを備えていたが、負荷側性能の向上に伴い要求電源特性が緩和されたため、それに対応した非常用单相発電装置(以下“MCG-S”という。)を製品化した。

製品化に際して当社の環境ビジョン2021に向けた活動も考慮し、据付け面積と質量の低減を図って製品のコンパクト化も実現した。

パッケージのコンパクト化に伴いパッケージ内の温度上昇と騒音の問題が発生するため、熱流体解析による評価や同容量現行機種での騒音測定結果に基づき、騒音・圧力損失による影響評価を実施し、実機測定結果との比較・検証を行うことで、パッケージ構造の最適化を図った。

その結果、MCG-Sは市場要求性能を満足した。またMCGと比較して設置スペースを20%、製品質量を30%低減することができた。さらに、市場要求に基づき高速電源切換盤や燃料タンク増量などの特殊仕様もオプションとして搭載可能としている。

特集  
Ⅱ



## 非常用单相発電装置(MCG-S)

制御盤、発電機、原動機、燃料タンク、排気消音器や蓄電池からなる発電装置を防音パッケージ内にコンパクトに収納している。最新の市場要求性能を満たし各構成部品とパッケージを見直すことによって、従来の当社非常用発電装置に比べ寸法・質量面をコンパクト化した。

## 1. ま え が き

当社は金融機関などのコンピュータやATMのMCGを生産している。MCGは一般仕様の非常用発電装置に比べ高精度な電圧・周波数特性を持っているが、これはコンピュータの誤動作防止のため、高精度電源特性が要求されてきたためである。

しかし最近、コンピュータの要求電源特性が緩和され、コンピュータ以外の単相負荷設備（防災行政無線設備や病院医療設備など）の要求特性と同レベルとなってきた。この市場要求特性の変化に合わせた仕様で寸法・質量面でコンパクトなMCG-Sを製品化した。

## 2. 開 発 概 要

### 2.1 製品の構成及び仕様

製品化したMCG-Sの外観と構成を図1に示す。MCG-Sは制御盤、発電機、原動機、排気消音器や蓄電池、燃料タンクからなる発電装置を防音パッケージ内にコンパクトに収納した構成となっている。

なお、今回製品化した装置は市場分析によって需要が多いと予測される発電容量20kVAに対応している。

MCG-Sの仕様を表1に示す。ATMの要求特性はMCGに比べ電圧特性、周波数特性、波形ひずみ率がいずれも緩

とされており、MCG-Sの電気的特性は最近のコンピュータやATMの要求仕様を満足するものとした。表2に最近のATM要求特性とMCG-Sの特性を示す。

### 2.2 製品化に向けた検討項目

MCG-Sの製品化に際し、仕様は市場要求電源特性を満たすものとし、寸法・質量面のコンパクト化を図るため、次の3点に取り組んだ。

#### (1) パッケージ

冷却・防音効果を考慮した機器配置及びパッケージ構造の最適化と質量低減

#### (2) 単相発電機

要求特性への機器最適設計によるコンパクト化及び三相発電機シリーズとの部品共用化

#### (3) 制御盤

三相発電機シリーズ制御盤の設計流用によるコンパクト化と部品共用化

そのうち、寸法・質量面のコンパクト化に大きく寄与したパッケージ構造の最適化について次に述べる。

### 2.3 冷却空気の流れ・温度分布解析によるパッケージ構造の最適化

100%負荷連続運転時の機器発生熱量を考慮し、パッケージの最適化を図るため、次の事項について検討した。

#### (1) 圧力損失変動に伴う冷却空気量の確保と防音効果を高めるダクト内の吸音材配置

#### (2) 性能確保のための機器周囲の熱滞留の抑制

#### (3) 雨水吸い込み防止を考慮した吸気ダクトなど

さらに、熱流体解析によってパッケージ内の冷却空気の流れと温度分布につき解析を行い、解析結果と実機での測定結果との比較・検証によって、パッケージ構造の最適化を図った。

#### 2.3.1 パッケージ内温度分布の解析

各機器を図2のように配置し、モデリングを行い、100%負荷連続運転時のパッケージ内各機器の発生熱量を解析した。さらに、パッケージ内冷却空気の通風経路、冷却空気の出口温度、パッケージ内部の構成機器（原動機、発電機など）周囲温度を予測するため、冷却空気流速分布解析、温度分布解析によって評価した。

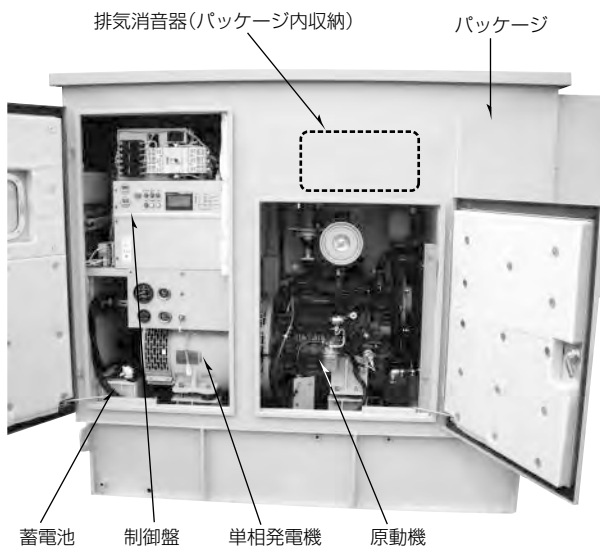


図1. MCG-Sの外観と構成

表1. MCG-Sの仕様

発電機定格	単相三線20kVA、電圧100V/200V
使用環境	屋外定置式
騒音	75dB(A)以下
外形寸法	1,950(W)×750(D)×1,800(H)(mm)(フード部含まず)
設置寸法	1,950(W)×750(D)(mm)(従来比20%低減)
機器質量	乾燥質量1,250kg以下(従来比30%低減)

表2. ATM要求に合わせたMCG-S特性

特性	MCG	最新のATM 要求特性	MCG-S
電圧特性	整定	±2%	±2.5%
	瞬時	±5%	±10%
周波数特性	整定	±0.2%	50Hz時 2.0%
	瞬時	±0.5%	60Hz時 1.7%
波形ひずみ率	5%以内	10%以内	10%以内

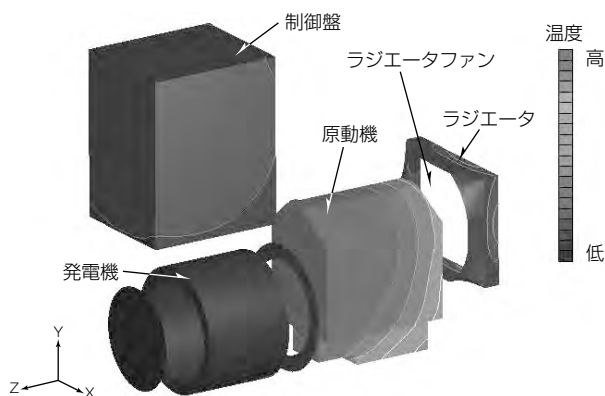


図 2. 各機器発生熱量と配置モデリング

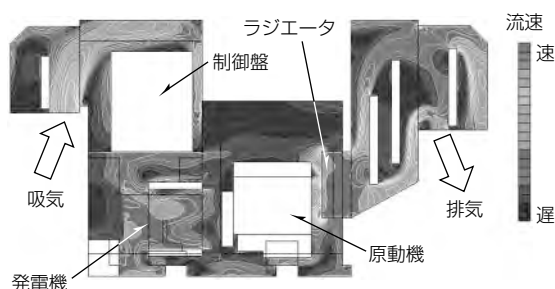


図 3. パッケージ内流速分布

その結果、パッケージ内部構成機器周囲の冷却空気の通風経路が構成され(図 3)、最大の熱源である原動機からの熱が効率的に冷却されていること(図 4、図 5)を確認した。

### 2.3.2 パッケージ内温度分布の測定

実機によって温度測定を実施した。各測定箇所の解析値と実機測定値及び周囲温度40℃換算値のうちラジエータ出口温度、吸気温度を表 3 に示しているが、解析値と同等の実機測定値が得られた。このことからパッケージ内湿度分布の解析がパッケージ最適設計に有効であることが検証された。

### 2.4 騒音推定と実機測定結果

MCG-Sは、コンパクト化のためにMCGパッケージから板厚を薄くしたことで透過損失の効果が小さくなり、騒音が大きくなることが予想された。そこでMCGから得られた騒音データから吸音材の配置位置などを見直し、MCG-Sの騒音値を推定した。そして、その結果をもとにMCG-Sパッケージ内の吸音材配置位置を決定した。

実機による騒音測定を評価基準である機器側面から1m、地上からの高さ1.2mの位置で実施した。

その結果、騒音に対する一般的な市場要求仕様である75dB(A)を満足し、MCGと同等の騒音値となった。これは、パッケージ内及び吸排気カバー内の吸音材を効果的に配置したことによって防音効果が得られたものである。

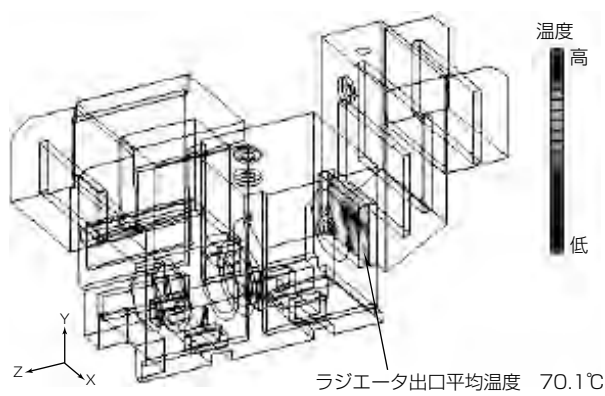


図 4. ラジエータ出口温度分布

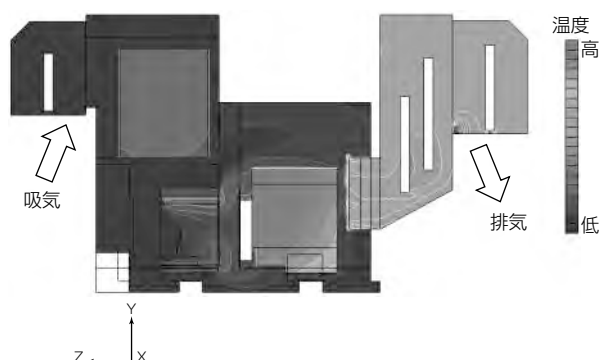


図 5. パッケージ内温度分布

表 3. 解析値と実機測定値の比較

測定箇所	解析値 (周囲温度40℃)	実機測定値	
		周囲温度18.2℃時	周囲温度40℃換算
ラジエータ出口	70.1℃	47.8℃	69.6℃
吸気入口	41℃	24.3℃	46.1℃

これらの結果、MCG-Sは市場要求の電気的特性及び温度、騒音の仕様を満たしつつ、MCGよりも設置スペースで20%、製品質量で30%の低減を実現した。

また、高速電源切換盤搭載や燃料タンク増量などの特殊仕様にも対応できるため、他社製品との差別化を図ることも可能である。今後この機種をもとに容量を拡大し、製品シリーズとして拡充する。

## 3. む す び

今回、市場要求仕様の緩和にあわせてMCG-Sを製品化した。従来、MCGは主に災害などにおける事業継続計画BCP(Business Continuity Plan)策定に対応する非常電源として金融機関等への設置が進められてきている。また災害時の緊急予備電源の確保は情報通信市場、医療機関などでも同様であり、MCGを含めた非常用発電装置シリーズの担う役割は今後ますます重要になってくるものと考え。

# 可動式ホーム柵における環境負荷低減とユニバーサルデザイン適用

上杉知弘\* 谷田川智弘\*\*  
諸熊宏典\*  
住吉広昭\*

*Environmental Impacts Reduction and Universal Design in Moving Platform Safety Gate System*

*Tomohiro Uesugi, Hironori Morokuma, Hiroaki Sumiyoshi, Tomohiro Yatagawa*

## 要 旨

可動式ホーム柵(さく)は設置が始まって10年以上が経過し、安全意識の高まりから、ここ数年設置する交通事業者が増加している。さらに、国土交通省のバリアフリー新法の施行などによって、普及促進が予想される。

これまでの可動式ホーム柵は、乗降客の安全性確保に向け、特に乗降客で混雑する際にも誤動作・倒壊しないように耐荷重性に主眼を置いてきた。そのため、扉・戸袋とも質量増加の傾向にあり、質量は開口単位で約500kgが基本仕様となっている。しかし、今後は環境負荷低減に向けた省エネルギー・軽量化などが重要となると考えられる。

三菱電機の可動式ホーム柵は、使用している鋼材の板厚・サイズを適正化することで、400kgまでの軽量化をす

でに実現している。軽量化及び待機電力量の削減を行うことで、扉駆動時のモータ電流消費量や、鋼材の減量化などの効果で、1000開口あたり160t-CO<sub>2</sub>/年のCO<sub>2</sub>排出量削減を達成している。

また、可動式ホーム柵は、一般の乗降客の目に触れる又は手で触ることができる製品であり、今後は映像表示装置などとの組合せによって乗降客へ運行状況や列車情報などの各種情報を提供するとともに、子供、お年寄り、障がい者への配慮、安全を意識したユニバーサルデザインを目指している。

本稿では、当社の可動式ホーム柵における環境負荷低減とユニバーサルデザイン適用への取組みについて述べる。



## 可動式ホーム柵(仙台市交通局)

乗降客のホーム下への転落防止など、乗降客の安全・安心を目的に駅プラットフォーム上に設置され、車両のドアと連動して、可動式ホーム柵の扉も開閉を行う。また、運用時の乗客の安全を確保するために、戸あたり・巻き込み検知や居残り検知などの機能を備えている。

なお、環境面では製品の軽量化及び待機電力量の削減によって、CO<sub>2</sub>排出量の削減を図っている。



## 1. ま え が き

可動式ホーム柵は、駅のプラットフォームに設置され、乗降客のホーム下への転落防止、駆け込み乗車の抑止など、乗降客の安全確保に役立っている。

現在、公営地下鉄を中心に導入されているが、国土交通省のバリアフリー新法の施行などによって、地下鉄以外の鉄道でも普及促進が予想される。

これまで可動式ホーム柵は、乗降客の安全性確保に向け、特に乗降客で混雑する際にも誤動作・倒壊しないように耐荷重性に主眼を置いてきた。そのため、扉・戸袋とも質量増加の傾向にあり、開口単位で500kgが基本仕様となっている。

しかし、近年の環境問題への取組みから、今後は省エネルギー・軽量化などによる環境負荷低減は不可欠となる。

本稿では、駅プラットフォーム上で安心・安全・快適性を提供する可動式ホーム柵の環境負荷低減とユニバーサルデザイン適用への取組みについて述べる。

## 2. 可動式ホーム柵

### 2.1 システム構成

図1に可動式ホーム柵の全体システム構成を示す。可動式ホーム柵は、扉と扉の駆動・制御部を内蔵した戸袋で機械本体を構成し、可動式ホーム柵を制御する総合制御盤と、乗務員及び駅務員が操作・確認を行う駅務員操作盤・個別操作盤・乗務員操作盤・表示器・駅務室表示盤で基本的なシステムを構成する。

車両がホームに到着し、車両ドアの開動作に連動して、可動式ホーム柵の扉も開く。可動式ホーム柵の扉が閉まる場合も、車両ドアと連動することで、乗降客が安全に車両へ乗降することが可能となっている。

表1に当社製の一般的な可動式ホーム柵の主要諸元を示す。質量は1開口あたり400kgを実現し、軽量化によって後述する環境負荷低減に寄与している。

また、耐荷重は、一般的に要求されている条件であり、これらを満足しつつ軽量化を実現している。

表1. 可動式ホーム柵の主要諸元

項目			標準形
主要寸法	開口幅		2,000mm(片側1,000mm)
	戸袋部	高さ	1,300mm
		厚さ	150mm
		幅	1,470mm
	扉部	高さ	1,200mm
		厚さ	32mm
幅		1,000mm	
電源			単相200V，3相200V
配線方式	通信		RS-485
	開閉信号		ハードワイヤ
安全機能	戸あたり・巻き込み検知		モータ電流検知
	居残り検知		光軸タイプ，3平面タイプ(オプション)
	自動開閉機能		障害検知によって扉反転
扉閉保持力		通電時	300N以上 省エネルギー(待機電力削減)運転実施
		停電時	駆動力フリー
開閉時間			3.0±1s(調整可能)
材質	扉・戸袋		メッキ鋼板＋塗装
質量			400kg/開口
耐荷重	水平荷重	長期	980N/mで変形なし
		短期	瞬時最大：2,450N/mにて， 倒壊しないこと
環境条件	温度条件		－10～50℃
耐久寿命			100万回開閉，または10年の短い方

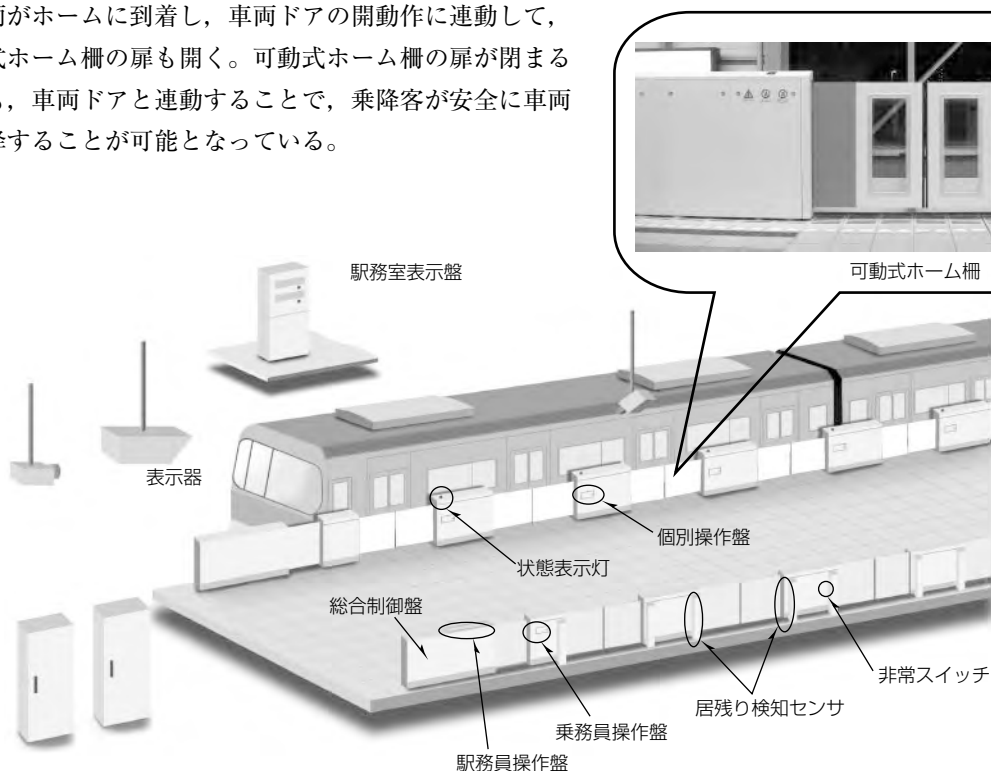


図1. 可動式ホーム柵の全体システム構成

## 2.2 可動式ホーム柵の安全機能

### (1) 戸あたり・巻き込み検知

扉の開閉時、人や物が扉に接触したり、戸袋へ手を巻き込んだ場合、即座に検知し、反転動作を行うことで乗降客に怪我(けが)を負わせない機能を持つ。

なお、戸あたり、巻き込み検知はモータの負荷によって検知しているため、専用のセンサ類が不要であり、メンテナンス部品の低減に寄与している。

### (2) 居残り検知

車両と可動式ホーム柵間に支障物を検知するセンサ(光軸タイプ、3平面タイプ)を持っており、万一車両と可動式ホーム柵間に乗降客が居残った場合に戸閉を抑止することが可能である。

3平面タイプの居残りセンサを図2に示す。3つの平面状に投射される赤外線(センシングエリア1～3)の反射によって、支障物を検知する。

センシングエリア1～3で、車両と可動式ホーム柵の空間を平面状に走査することで、光軸タイプに比べて、死角の少ない検出が可能となる。また、各センシングエリアは、検出範囲を設定することができ、現地での実際のホーム形状(直線/湾曲)に即した調整が可能である。

### (3) こじ開け防止

故意に扉をこじ開けた場合、ブザー及びランプで警告を行う。また、こじ開けた場合は、扉を即座に閉方向へ動かすことによって、扉が開かないよう制御している。

### (4) 手動での開閉

非常時・緊急時は可動式ホーム柵の電源をOFFにすることで、手動で扉を開閉することができる。また、非常スイッチを備えており、このスイッチを押下することでも、手動で扉を開閉できるため、万一の緊急時には、手動で脱出することが可能である。

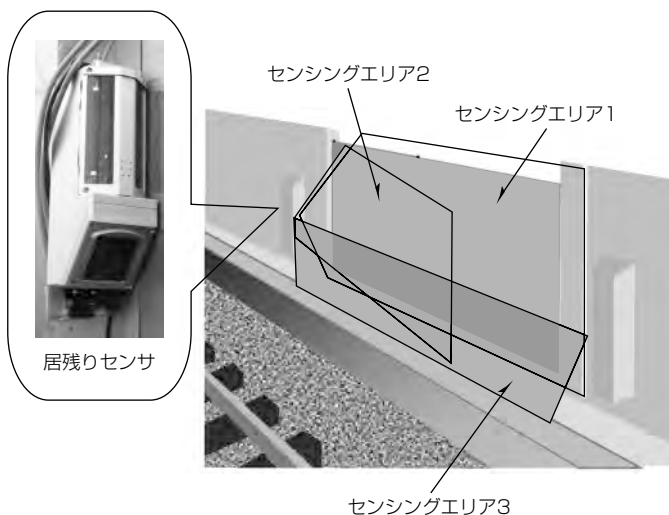


図2. 居残りセンサ(3平面タイプ)

## 3. 環境負荷低減への取組み

### 3.1 可動式ホーム柵の軽量化

可動式ホーム柵の構造を図3に示す。耐荷重性にかかわる強度は、支柱・梁(はり)・扉骨材で保っており、鋼材(鉄)で構成される。また、戸袋及び扉の外装フレームも鋼材(鉄又はステンレス)で構成されており、これらの使用量によって可動式ホーム柵の質量が、ほぼ決定される。

当社の可動式ホーム柵では、必要な耐荷重性を確保しつつ、鋼材の板厚・サイズの適正化を行うことによって、本体質量を1開口あたり500kgから400kgへ軽減した。

この軽量化によって、設置するプラットフォームへの負担軽減、製作性・施工性の向上だけでなく、次に述べる環境負荷低減にも寄与している。

#### (1) 省エネルギーの効果

扉質量を削減することによって、扉を駆動する際のモータ電流が削減され、省エネルギーを実現した(1000開口の場合)。

消費電力削減：8,400kWh/年

CO<sub>2</sub>換算：3.4t-CO<sub>2</sub>/年

#### (2) 省資源による効果

可動式ホーム柵部材における板厚・サイズの見直しによって、使用している鋼材を減量し、材料製作時に排出されるCO<sub>2</sub>を削減した(1000開口の場合)。

鋼材削減：100t

CO<sub>2</sub>削減：118t-CO<sub>2</sub>/年

#### (3) 輸送負荷軽減による効果

可動式ホーム柵の軽量化によって、輸送時におけるトラックの排出CO<sub>2</sub>が削減される(1000開口の場合)。

質量削減：100t

走行距離：1,000km(長崎～関東)

CO<sub>2</sub>削減：17.8t-CO<sub>2</sub>/年

### 3.2 待機電力の省エネルギー

可動式ホーム柵の閉状態時の制御方法を工夫することで、省エネルギーを実現している。

車両の扉が開いているときのみ、可動式ホーム柵の扉も開く。したがって、1日の大半は扉が閉じている状態であ

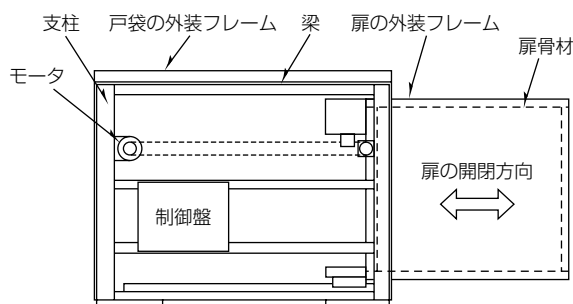


図3. 可動式ホーム柵の構造

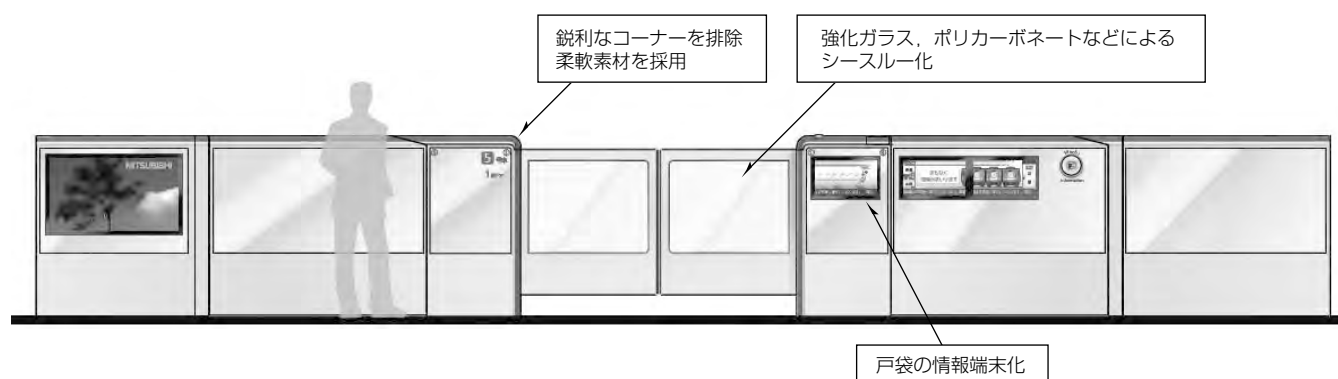


図 4. ユニバーサルデザインに基づく可動式ホーム柵デザイン

り、扉が閉じている間は、モータへの供給電流を遮断することで、使用する電力を削減している。

なお、こじ開け防止のため、扉が全閉状態から若干でも開いた際には、モータに扉を閉めるための電流を供給するよう制御している(1000開口の場合)。

消費電力削減：52,000kWh/年

CO換算：20.8t-CO<sub>2</sub>/年

#### 4. ユニバーサルデザインへの取り組み

図 4 に可動式ホーム柵のユニバーサルデザインの一例を示す。

可動式ホーム柵は、ホーム下への転落や車両との接触を防止する製品である。

しかし、プラットホームのホーム端に設置されるため、車両とホームとの隙間(すきま)が見えにくくなり、乗降客の隙間への認知が遅れる可能性がある。

扉に強化ガラスやポリカーボネートなどを使用し、ホーム端を見えやすくし、乗降客の安全性を確保する。また、シースルー化によって、可動式ホーム柵による圧迫感を緩和し、開放的な空間を創出することができる。

戸袋部分は、映像表示など情報端末を設置することも可能である。情報端末に列車運行情報や注意喚起を配信することで、乗降客に利便性・安全性向上を提供する。

表 2. CO<sub>2</sub>削減効果

項目	削減したCO <sub>2</sub> 排出量(t-CO <sub>2</sub> /年)	
	製造時	運用時
可動式ホーム柵の軽量化		
①省エネルギーの効果	—	3.4
②省資源による効果	118.0	—
③輸送負荷軽減による効果	17.8	—
待機電力の省エネルギー	—	20.8
小計	135.8	24.2
合計	160.0	

※年間1000開口の場合

可動式ホーム柵は乗降客が直接触ることができる製品なので、鋭利なコーナーを排除して樹脂系などの柔軟素材を採用することで、安全に配慮する。

#### 5. む す び

現在、可動式ホーム柵の質量を、1 開口あたり500kgから400kgに削減することで、CO<sub>2</sub>排出量は運用時24.2t-CO<sub>2</sub>/年の削減、製造時135.8t-CO<sub>2</sub>/年の削減(1000開口の場合)を達成している(表 2)。

今後は、構造部材に樹脂系素材などを使用することによって、300kg以下を目標に、更なる軽量化を目指す。

また、だれもが安全に安心して使用できるようなユニバーサルデザインも積極的に採用していく。

# 群馬大学向け粒子線治療装置 (小型炭素線機)

津上浩伸\*

*Features of the Gunma University Heavy Ion Medical Center*

*Hironobu Tsugami*

## 要 旨

三菱電機では1988～1993年にかけて世界初の医療研究専用重粒子加速器である(独)放射線医学総合研究所(放医研)の重粒子線がん治療装置全体システムをとりまとめるとともに、以後継続して医療用加速器の技術開発を進めてきた。

群馬大学向けの粒子線治療装置は放医研の“普及小型炭素線治療装置”の研究成果を基本設計として採用した。これに当社独自のビームシミュレーション技術と製作ノウハウを適用し、加速器機器及び電源類の小型化と最適設計を行い、基本設計に基づいた小型の粒子線治療装置を実現した。例えば主要構成機器であるシンクロトロンと呼ばれる高エネルギー炭素イオンビーム(ビーム)の加速器は直径約30mであったものが、約20mにまで小型化した(当社比)。

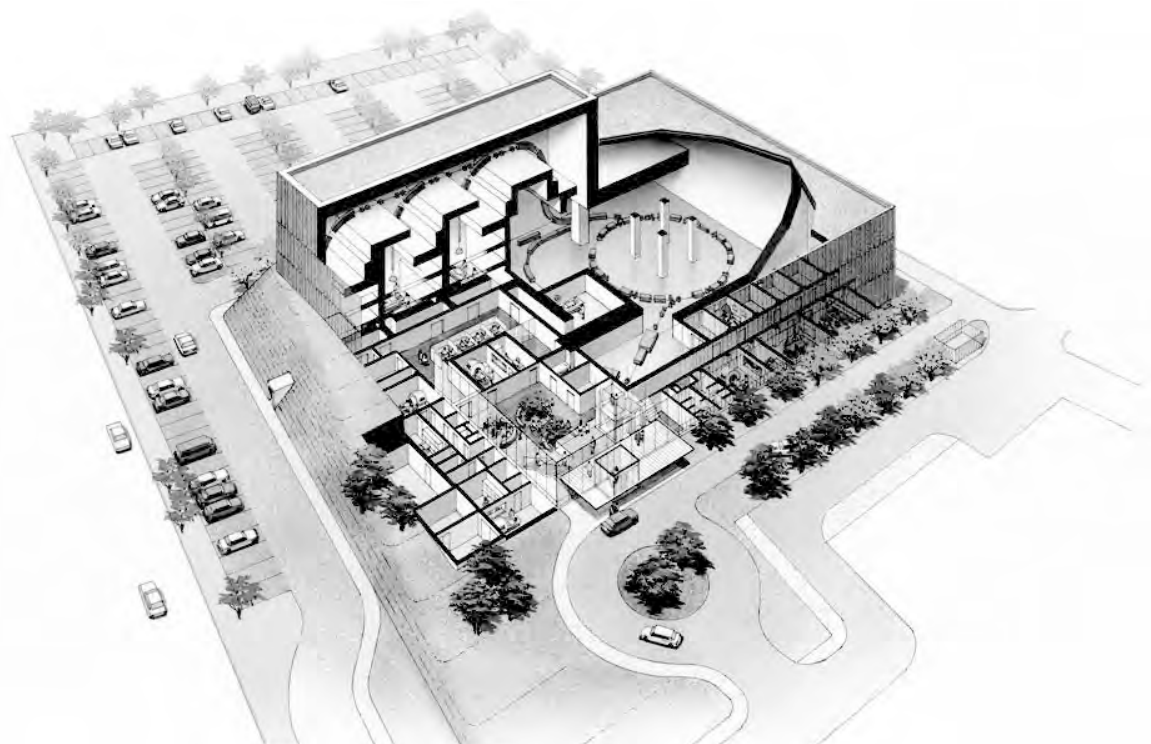
シンクロトロンのビームシミュレーションにおける加速

器モデルは実機を正確に再現しており、機器調整が容易になったので施設検査までのビーム調整期間を約半分に短縮した。

ビーム形成システムではビーム利用効率に優れるらせんワブラー法を採用した。ビームロスが小さくなるので、中性子発生に伴う建屋壁厚の削減に貢献した。

また、線量分布の改善を目的とした高度照射法である積層原体照射法も検討している。

施設の運営効率を高めるため、治療室とは別にビームを用いない準備作業に役立つ模擬ポートやモダリティを設置した。これらによって治療室での準備作業を削減して、有効にビーム照射時間を確保できるので、年間600人以上の患者を治療可能とする施設運用を目指している。



出典：群馬大学重粒子線医学研究センターホームページ  
<http://heavy-ion.showa.gunma-u.ac.jp/jp/facilities01.html>

## 群馬大学向け粒子線治療装置の外観

平成21年3月に治療を開始した群馬大学に建設された当施設は縦横約45m×65m、高さ約20mの建築物である。その中には直径約20mのシンクロトロン加速器と3つの治療室ならびに付帯設備を持つ。当施設は重粒子線照射施設を全国の諸地域に配置する場合の施設活用のモデルとなることを目指している。

## 1. ま え が き

群馬大学向け炭素線専用の重粒子線照射装置は厚生労働省の薬事承認を2010年3月9日に取得した。同年3月16日から治療を開始し、5月末で12名の治療を終え、現在、順調に稼働している。群馬大学では放医研の小型化研究開発に基づき、重粒子線医学利用による高度ながん治療の実現と全国普及を図るため重粒子線医学に関する国際的教育・研究・診療拠点の形成を目指している<sup>(1)</sup>。

## 2. 炭素線専用の重粒子線照射装置の特徴

### 2.1 全 体 構 成

この装置はイオン源装置、線形加速器、シンクロトロン加速器及び治療室で構成している(図1)。治療室は水平及び垂直の照射ポートを持つ3治療室4照射ポートの構成である。照射ポートは残余飛程250mmで150mm×150mmの照射野が形成可能である。また、治療準備室を治療室とは別に設けている。これによって、施設運用の効率化を図っている。

### 2.2 イオン源・入射器・MEBT

イオン源・入射器は放医研で基本設計がなされたプロトタイプで十分にビーム性能が評価<sup>(3)</sup>された同型機(住友重機械工業製)を採用した(表1)。

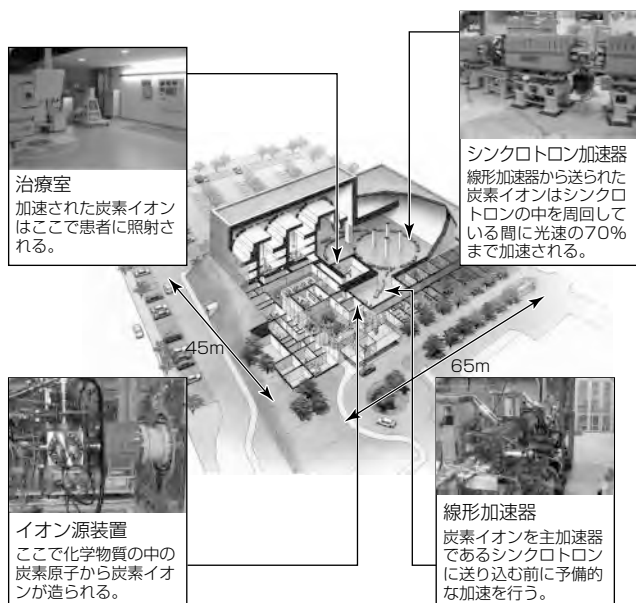


図1. 全体構成<sup>(2)</sup>

表1. イオン源・入射器の主要緒元

	イオン源	入射器
方式	全永久磁石型 ECRイオン源	RFQ線形加速器 IH線形加速器
エネルギー	10keV/u	600keV/u (RFQ) 4.03MeV/u (IH)

ECR : Electron Cyclotron Resonance  
 RFQ : Radio Frequency Quadrupole  
 IH : Interdigital H-mode

### 2.3 シンクロトロン

シンクロトロンの設計にあたっては放医研の研究成果である“線形ラティス”をもとに当社独自のビームシミュレーション技術とノウハウに基づいて、加速器機器及び電源類の小型化と最適設計を行った。主要緒元を表2に示す。

炭素イオン用シンクロトロンとしては当社比で直径約30mを約20mにまで小型化した(図2)。

特に留意した検討事項は次のとおりである。

#### (1) ラティス設計

- ・偏向電磁石の高次磁場の影響評価
- ・トランジションγの影響の評価
- ・機差を考慮した動作点の最適化

#### (2) 入射条件

- ・マルチターン入射の検討
- ・入射バンプの波形長の検討

これらによってビーム調整の自由度を損なわずにビームスクレーパー等の機器の削減ができた。

#### (3) 加速条件

- ・断熱高周波捕獲の検討
- ・非同調空洞の採用

#### (4) 出射条件

- ・出射用6極電磁石の配置の最適化
- ・必要アパチャーの最小化
- ・偏向電磁石及び4極電磁石の端部非線形磁場の影響評価と出射ビームのパラメータの検討
- ・トランジションγの影響を考慮した電源リプルのスピンル構造への影響評価

シミュレーション上の加速器モデルは実機のビーム挙動

表2. シンクロトロンの主要緒元

繰返周期	3 s
スピン幅	1 s
加速粒子数	$3 \times 10^9$ ppp
エネルギー	140~400MeV/u
周長	63m
ビーム入射	多重入射方式
ビーム取出し	三次共鳴による遅い取出し



図2. シンクロトロン

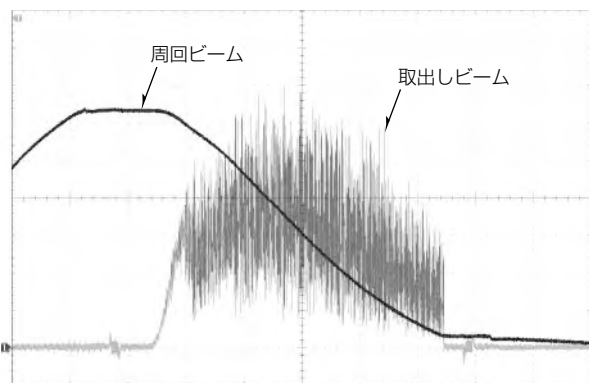


図3. 400MeV/uビーム調整の初期(フィードバック制御なし)で得られたスピル波形

表3. ビーム調整(2009年)

8月24日	ビーム調整開始
8月25日	最高エネルギー(400MeV/u)達成
8月30日	最初のビーム取り出し成功
9月5日	1室目治療室のビーム輸送成功
9月30日	全治療室のビーム輸送に成功
10月9日	放射線安全検査(自主リハーサル)
10月26日	放射線安全検査(文科省)

表4. 照射ポートの主要緒元

照射野サイズ	150×150(mm)
SOBP	30~140(mm)
最大飛程	250mm H <sub>2</sub> O
飛程調整	バイナリレンジシフタ 0.5~255.5mmH <sub>2</sub> O
線量率	2Gy/min以上 照射野φ150mm SOBP100mm
拡大照射野形成法	単円ワブラー法 らせんワブラー法

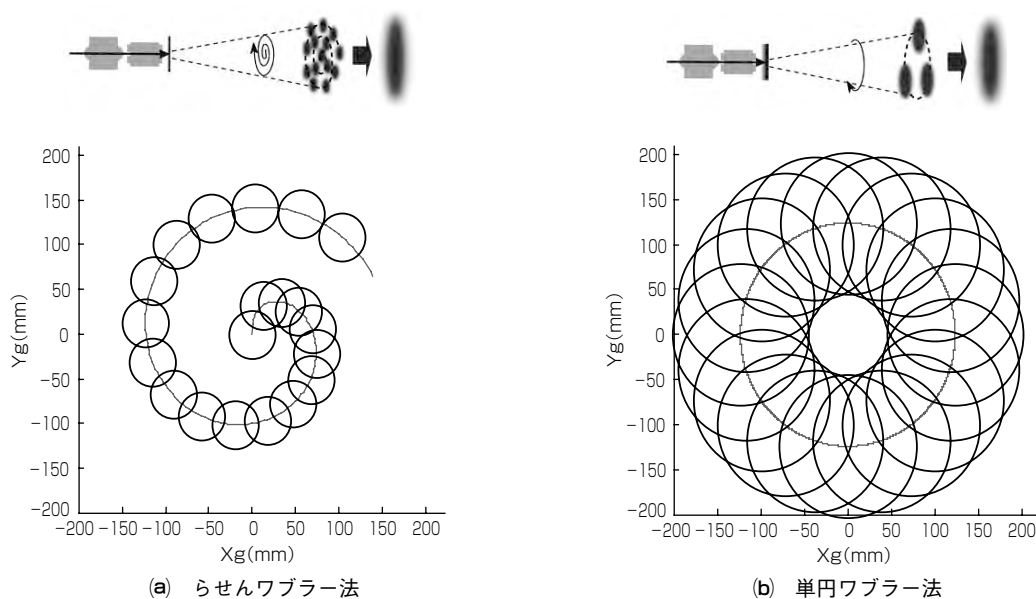


図4. ワブラー法による照射野形成

をよく再現している。高い取出し効率を実現する調整パラメータを実機で試行錯誤を重ねることなく得ることができた(図3)。

ビーム調整は順調に進み、放射線安全検査の受検条件のビーム強度は調整開始から47日目に達成できた(表3)。当社実績(兵庫県粒子線医療センター向け、78日)と比較して31日の短縮である。

## 2.4 照射ポート・治療室

照射ポートは単円ワブラー法とらせんワブラー法が併用できる構造とした。照射ポートの主要緒元を表4に示す。

照射ポートはワブラー電磁石、散乱体装置、リッジフィ

ルタ装置、レンジシフタ装置、多葉コリメータ装置、線量モニタ装置などで構成する。

らせんワブラー法によって高いビーム利用効率(～40%)で飛程ロスの小さい拡大照射野が得られることを期待している<sup>(4)</sup>。2010年度中に検証を完了する予定である。従来の単円ワブラー法に比べると、ビーム形成に必要なとする散乱の程度を小さくでき、ビームを掃引する軌道が照射野内を通過するので照射野形成に寄与するビームの割合が多くなる(図4)。測定条件を拡大照射野φ150mm、SOBP(Spread Out Bragg Peak)60mmとした場合の線量率は約2.5Gyから3.7Gyに改善している。



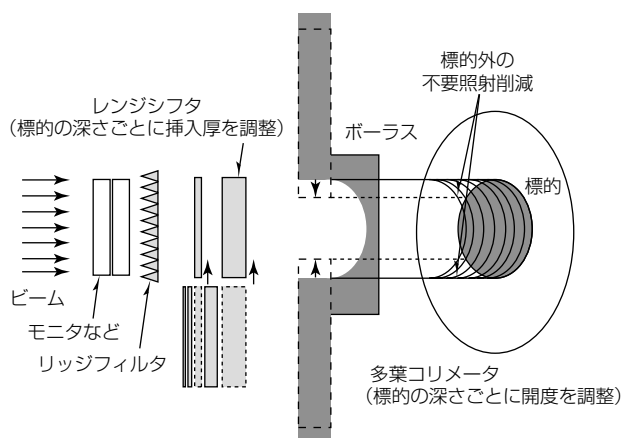


図5. 積層原体照射法



図6. 治療室（水平・垂直）

高度照射法として積層原体照射法（図5）の検証も予定している。ビーム照射中に標的深さに応じて多葉コリメータ開度とレンジシフタ挿入厚を調整する。体表面の過剰な線量投与を抑制し、標的以外の不要部分の照射を避けることが期待できる。

これらの照射ポートにデジタルX線撮像装置と寝台からなる患者位置決めシステムを組み合わせることで治療室を構成する。この装置は3つの治療室（水平、水平・垂直、垂直）を持つ。水平・垂直の照射ポートを持つ治療室のレイアウトを図6に示す。

## 2.5 治療準備・リハーサル

この装置では寝台、大口径CT(Computed Tomography)撮影装置、デジタルX線撮像装置で構成された治療準備室を備えている（図7）。治療室と同じ機器配置となるように寝台とX線撮像装置が配置されているので（治療室模擬ポート）、治療体位で次の作業が可能となる。

- ・治療計画用CT撮影
- ・固定具と患者との干渉回避リハーサル
- ・治療体位参照用X線撮像など

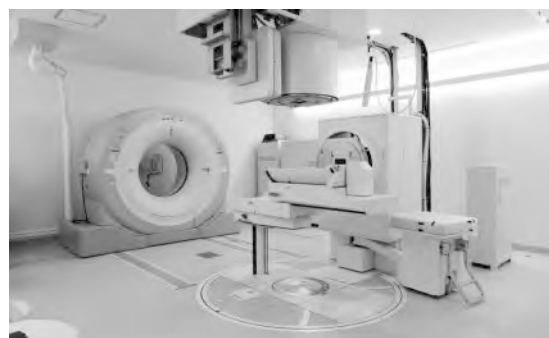


図7. 治療準備室

これによって治療準備の間の加速器待機時間を縮減し治療室ではビーム照射に多くの時間を割くことができるので、施設運営の効率化に貢献する。

## 3. む す び

炭素専用タイプ粒子線治療装置について述べた。この装置はシンクロトン加速器を大幅に小型化することで、必要とする建屋施設規模を縮減する。この装置を納めた群馬大学重粒子線医学研究センターの施設面積は、放医研HIMAC(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)のそれと比較して約1/3に小型化されている<sup>(5)</sup>。治療準備室や積層原体照射法等の治療システムによって施設運用効率を高めるとともに、より高度な照射法へ対応することができる。これらによって普及のネックであった初期投資の削減と投資回収の短縮化を実現し、重粒子線医学利用による高度ながん治療の実現と全国普及に貢献するものである。

## 参 考 文 献

- (1) 群馬大学重粒子線医学研究センターホームページ  
<http://heavy-ion.showa.gunma-u.ac.jp/jp/Information01.html>
- (2) 群馬大学重粒子線医学研究センターホームページ  
<http://heavy-ion.showa.gunma-u.ac.jp/jp/facilities02.html>
- (3) Iwata, Y., et al.: Performance of a compact injector for heavy-ion medical accelerators, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **572**, No.3, 1007~1021 (2007)
- (4) Komori, M., et al.: Optimization of Spiral-Wobbler System for Heavy-Ion Radiotherapy, Japanese Journal of Applied Physics, **43**, No.9A, 6463~6467 (2004)
- (5) Noda, K., et al.: New Accelerator Facility for Carbon-Ion Cancer-Therapy, J.Radiat Res., **48**: Suppl., A43~A54 (2007)

# 粒子線(陽子線)治療装置用入射器

川崎定博\*  
 山本和男\*\*

*Proton Injector System*

*Sadahiro Kawasaki, Kazuo Yamamoto*

## 要 旨

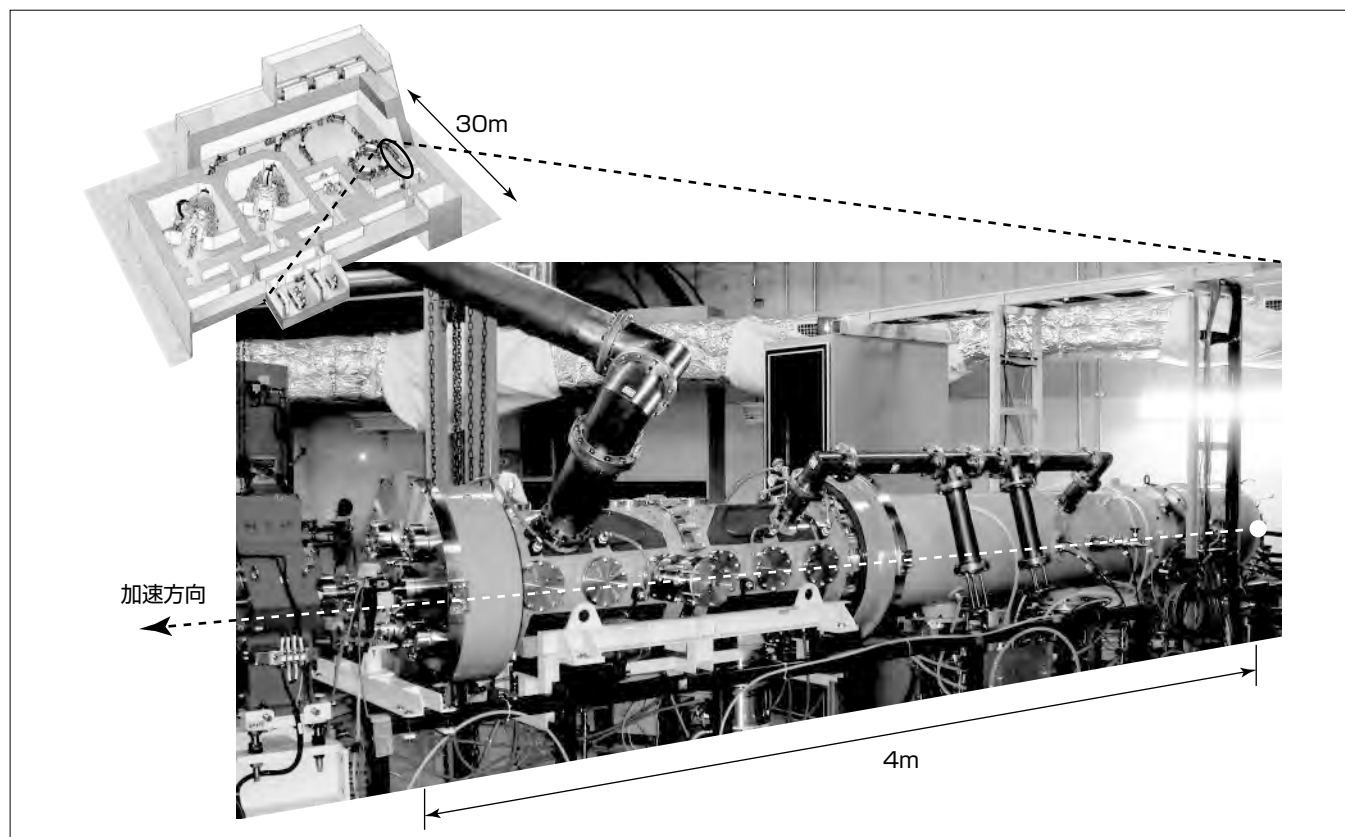
粒子線治療は放射線治療の一つで、従来のX線やガンマ線による治療に比べ患部に集中的に照射できるため、副作用や身体機能の損失を最小限に抑えられるという利点がある。国内では2001年7月に先進医療の認可を受け、現在、公的医療機関6施設、多目的研究機関1施設、民間医療機関1施設で治療や臨床研究が行われている。

この粒子線治療に用いる陽子や炭素イオンは、入射器と呼ばれる線形加速器からシンクロトロンに入射され、数百MeVという高いエネルギーに加速される。従来の入射器は電界で加速しながらビームを絞るために十数個から数十個の磁石が必要であり、構造が複雑となり調整が難しく、信頼性と保守性に限界があった。このため、磁石を使用しないAPF(Alternating Phase Focusing: 交替位相収束)

方式の入射器の開発が求められていた。

三菱電機は今回、“のこぎり波型位相変調技術”を適用することによって、APF方式の陽子線治療装置用入射器を世界で初めて開発した。さらに、磁気共鳴型電力分配(レゾナントカプラ)方式を適用し、陽子を加速する高周波電力の供給電源を、従来の2台から1台に集約した。これによって構成が簡素化され、複雑であった高周波電力の位相調整も不要となって保守性の向上を実現した。

当社はこれまで、入射器を社外から調達していたが、今回の開発によって自社製作が可能となり、粒子線治療装置システム全体の設計・製作を自社で完結できるようになった。



## 粒子線治療装置用入射器の外観写真

粒子線治療装置用入射器はシンクロトロンが加速できるエネルギーまで陽子を初期加速する装置である。イオン源、前段線形加速器、後段線形加速器で構成されており、2台の線形加速器は電力分配装置で接続されている。高周波電源の出力は後段線形加速器に接続されており、電力分配装置によって後段線形加速器と前段線形加速器に給電される。

## 1. ま え が き

がんは、日本で1981年から死因の第一位であり、年間30万人以上が亡くなっている。継続的に医療を受けているがん患者数は140万人以上で、1年間に新たにがんと診断される患者数は50万人以上とされている<sup>(1)</sup>。

現在行われている主ながんの治療法には、外科治療、放射線治療及び化学治療があり、それぞれの治療法の特徴を生かして併用するのが一般的になっている。放射線治療は、放射線をがん病巣に照射することによって、手術を行わずにがんを治療する方法である。その一つである粒子線治療は、身体への影響を最小限に抑えることができ、がん治療が効果的に行えるため、治療患者数が年々増加する傾向にある<sup>(2)</sup>。

粒子線治療装置は、入射器とシンクロトロン及び照射機器に大別される。入射器はシンクロトロンが受け付けられるエネルギーまで荷電粒子を予備加速するための装置である。一般的な入射器は、荷電粒子を生成するためのイオン源と、効率よく加速するための2台(前段/後段)の線形加速器、線形加速器へ加速電力を供給するための2台以上の高周波電源で構成される<sup>(3)</sup>。

医療機器として特に求められる信頼性と保守性の更なる向上のため、当社は次の2点を特徴とする陽子線用入射器を開発した。

- (1) 後段線形加速器内でのビーム収束方法としてAPF法を取り入れ、従来必要としていたビーム収束磁石を不要とした。
- (2) 加速電力供給方法として磁気共鳴型電力分配(レゾナントカプラ)法を取り入れ、従来2台以上必要としていた高周波電源を1台に集約した。

本稿では、内製化入射器の構成と特徴について述べ、ビーム試験による機能実証結果について述べる。

## 2. 内製化入射器の特徴

### 2.1 全体構成

入射器全体システムを図1に示す。イオン源と2台(前段/後段)の線形加速器及び1台の高周波電源と電力分配装置から構成された、全長4mのシステムである。

### 2.2 イオン源

イオン源として大電流陽子を生成できるECR(Electron Cyclotron Resonance：電子サイクロトロン共鳴)イオン源を開発した。電磁石によって磁界を発生させた真空容器内に2.45GHzのマイクロ波を入力すると、真空容器内に浮遊している電子にエネルギーが効率よく付与される。そこに水素ガスを注入すると水素原子の電子が浮遊電子と衝突して弾き出され、水素原子核(=陽子)を生成することができる。

### 2.3 前段線形加速器

イオン源から引き出された数10mAの低エネルギービームは、陽子同士の電荷による発散力(空間電荷効果)が特に大きい。そのため前段加速器としてビーム収束力が格段に強いRFQ(Radio Frequency Quadrupole：高周波四重極)型線形加速器を開発した。図2に示すようにビーム加速方向へ伸びた加速電極を共振器内に90度おきに配列し、200MHzの高周波電力を供給すると、電極間に電界が発生する。発生した電界によってビームの加速と収束を行い、ビームを取りこぼすことなく、かつ群集化して後段加速器が加速できるエネルギーまで加速する。

### 2.4 後段線形加速器

後段線形加速器には、IH(Interdigital-H)型DTL(Drift Tube Linear accelerator：ドリフトチューブ線形加速器)を開発した。共振器内に中空円筒(ちくわ)状のドリフトチューブ電極をビーム加速方向に数十個配列し、電極間に発生する電界でビームを加速する。電界を発生させるため、共振器内ビーム加速方向(共振器長手方向)に磁界を励起させ、誘起される誘導電流が共振器内壁面に流れ電極間に間接的に電界を発生させる。従来型のDTL(ビーム加速方向

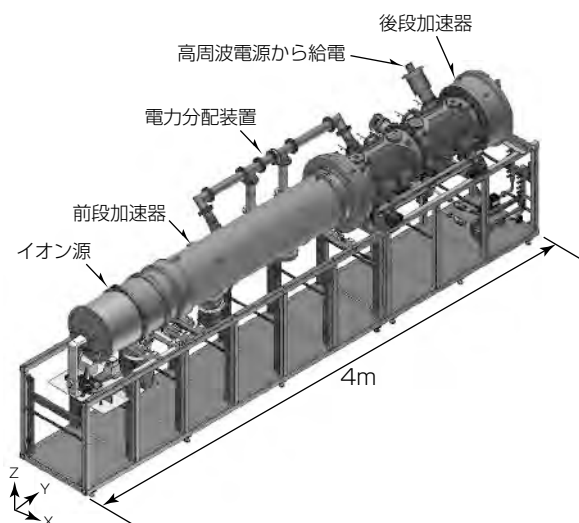


図1. 入射器全体システム構成



図2. RFQ型線形加速器内部



図 3. APF方式IH型DTL内部

に電界を励起させる)に比べ、共振器内に発生する電界を効率よくビーム加速に使用することができるため、加速効率(供給電力に対する加速エネルギー量)が格段に高いことが特長である。

ビーム自己収束方法の一つとして知られるAPF方式は1950年代に発明されたが、収束力が弱いために大電流物理研究用としては発展しなかった。その後、加速器の用途先が大電流物理研究用から医療用等に拡大され、空間電荷効果が小さい数100eμA (eμAは価数×電流を表す)の炭素イオン用入射器にAPF方式が適用された<sup>(4)</sup>。一方、陽子用入射器では医療用であっても数10mAの大電流を加速する必要があるためにAPF方式は採用されず、電極自身に四重極磁石を内蔵し磁界の力を用いてビーム収束する方式が採用されてきた。この方式は構造が複雑で調整が難しく、信頼性と保守性の向上に限界があることから、磁石を使用しないAPF方式を適用した大電流陽子加速用IH-DTLを世界で初めて開発した。加速器内部の写真を図3に示す。

大電流陽子を加速するために開発した主な項目は、次の3点である。

#### (1) ドリフトチューブ電極配列

APF方式として“のこぎり波型位相変調技術”を開発し、ドリフトチューブ電極配列を設計した。“のこぎり波型位相変調技術”は効率的にビームを加速できる当社独自の位相パターン技術である。従来型では電極間の位相パターンを正弦波的に変化させている<sup>(5)</sup>のに対して、この技術では同じ位相を数回繰り返すことが特徴であり、図4のようにパターンの形がのこぎり波に似ていることからこのように呼んでいる。電極間の位相は、低エネルギー領域では収束力を強くするため±60度近傍とし、高エネルギー領域になるにつれて加速を重視するよう、±30度近傍まで変化させている。この技術によって後段加速器で加速される陽子の到達エネルギーのばらつきを小さくすることができ、整ったビーム群をシンクロトロンに効率よく入射することが可能となった。

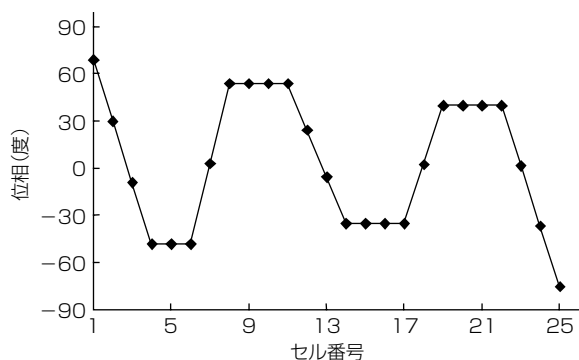


図 4. 電極間位相パターン

#### (2) ドリフトチューブ電極形状

空間電荷効果を考慮したビーム設計では、電極間に発生する電界分布はビーム軸に対して対称と仮定するが、IH-DTLは電極1本ずつ交互に共振器に設置されるため非対称電界分布を形成する。そのため、電界の非対称成分を低減させるボトルシェイプ型加速電極形状を開発した。さらに、放電の原因となる最大表面電界強度を低減させるために、卵形ドリフトチューブ電極形状を開発した。

#### (3) 共振器形状

IH-DTLは共振器端部でのドリフトチューブ電極間に発生する電界強度は低いため、電極間に発生する電界を用いてビームを収束するAPF法では、特に空間電荷効果が顕著である低エネルギー領域でビームを損失してしまい、大電流陽子ビームを加速することができない。そのため、共振器端部径を拡大した拡張空洞を設けた共振器形状を開発し、共振器端部での電界強度の立ち上がりを早くし、低エネルギー領域でのビーム損失を低減することを可能とした。

### 2.5 高周波電源

2台の線形加速器に高周波電力を供給するために、周波数200MHz、出力先頭値540kWの大電力高周波電源を開発した。高周波電源は低電力発生器、半導体増幅器、中段増幅器、終段増幅器から構成される。低電力発生器はパルス変調された約1Wの高周波信号を生成する装置であり、その出力は次段の半導体増幅器によって約500Wに増幅される。中段／終段増幅器は、真空管と空洞共振器を用いた増幅器であり、大電力を得るために真空管を複数個並列駆動する方式を採用している。これによって比較的安価で取り扱いの容易な真空管を選択することが可能となっている。空洞共振器の各部構造は増幅回路の回路素子として機能するとともに、高周波の分配・結合器としての役割も果たしている。各真空管は独立したバイアス回路で駆動しており、真空管の状態によらず同じカソード電流が得られるようにバイアス電圧が制御されている。

### 2.6 電力分配装置

荷電粒子を加速すると運動エネルギーが荷電粒子に与えられる、いわゆるビームローディングが生じるが、そのエ

表 1. 陽子線入射器ビームの性能

加速粒子	陽子
到達エネルギー	7 MeV
加速電流量	10mA
加速電流変動量	±10%以下
運転周波数	200MHz
運転モード	パルス
最大パルス幅	40μs
最大繰り返し	20Hz

エネルギーも高周波電源から供給する必要がある、荷電粒子を加速しないときより大きなパワーを必要とする。ビームローディングの位相と高周波電源の位相は異なるので、荷電粒子を加速する際には加速しない場合と異なる電源位相にする必要がある。従来技術では、空洞共振器ごとに電界を励起するために高周波電源を設置し、個々の高周波電源で電界の強度と、高周波電源間の位相を調整することによって、各々の加速位相と電界強度とを調整しているため、複雑な制御が必要であった。今回、前段加速器と後段加速器を、外導体と内導体で構成された高周波同軸伝送路で相互に結合し、その両端部に上記外導体と内導体を接続するループを形成した磁気共鳴型電力分配装置を開発した。その結果、陽子を加速する高周波電力の供給電源を、従来の2台から1台に集約することが可能となった。

### 3. ビーム実証試験

表 1 に陽子線入射器ビームの性能を示す。到達エネルギーを従来の 3 MeV から 7 MeV に増加させ、シンクロトロンへの入射効率を向上させた。パルス運転モードで、パルス内波高値が加速電流量の 10mA となる。

社内にビーム特性評価システムを新たに構築し、入射器ビーム性能を実証した。図 5 は入射器直後にある CT (Computed Tomography) で測定した加速電流波形である。最大加速電流量は 11.5mA であったが、実際の運用は 10mA を想定している。また、図 6 は加速された陽子のエネルギースペクトラムである。運動量分散 ±0.3% 以内に全電流の 70% 以上捕獲されていることを確認した。

### 4. む す び

当社が開発した粒子線治療装置用入射器は、世界で初めて収束磁石を使用しない APF 方式を大電流陽子ビーム加速に適用し、更に電力分配装置によって高周波電源を 2 台から 1 台に集約したことが特徴である。今回の開発によっ

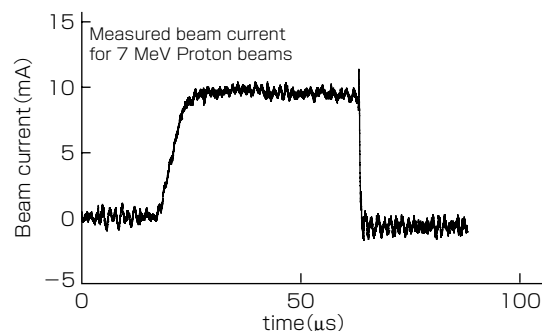


図 5. 加速電流波形

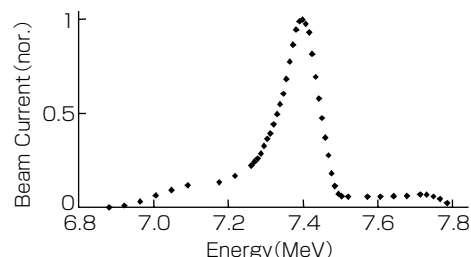


図 6. エネルギースペクトラム

て、これまで外部から調達していた入射器の自社製作が可能となり、当社の粒子線治療装置メーカーとしての実績を背景としてより一層の品質向上に努め、多くの患者を治療できる装置を提供していく所存である。

### 参 考 文 献

- (1) 厚生労働省健康局：がん対策推進基本計画（2007年6月発行）  
<http://www.mhlw.go.jp/shingi/2007/06/s0615-1.html>
- (2) 財医用原子力技術研究振興財団：医用原子力だより6号（2007年7月発行）  
[http://antm.or.jp/01\\_outline/13.html](http://antm.or.jp/01_outline/13.html)
- (3) Hirao, Y., et al.: Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba: NIRS-M-89 (1992)
- (4) Iwata, Y., et al.: Performance of a compact injector for heavy-ion medical accelerators: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 572, 1007~1021 (2007)
- (5) Iwata, Y., et al.: Alternating-phase-focused IH-DTL for an injector of heavy-ion medical accelerators: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 569, 685~696 (2006)