

原子力監視計装制御システムの最新技術

Latest Technologies for Monitoring, Instrumentation and Control Systems of Nuclear Power Plants

前川 立行

戸塚 紳一

中久木 功

■ MAEKAWA Tatsuyuki

■ TOTSUKA Shinichi

■ NAKAKUKI Isao

原子力発電プラントの中央制御盤は、運転員の体型や視野角、認知特性などを考慮したヒューマンファクターエンジニアリング (HFE) に基づいて設計する必要があり、特に米国向けの中央制御盤では、原子力規制委員会が発行するガイドに従い、HFE を取り入れた設計を行う必要がある。そこで東芝は、実際の中央制御盤と同等な環境で、画面表示色やシンボル、運転操作に対する応答時間などを変更することでヒューマンファクターを評価できるHFE評価設備を開発し、日本及び米国に設置した。

また、監視計装制御システムでは、高信頼性の確保に加えて、保守部品の長期供給体制や保守費用の低減など、運転経済性向上のための設備維持コストの低減が求められている。当社は、これらのユーザーニーズに応えるために、FPGA (Field Programmable Gate Array) を適用した原子炉監視計装制御システムを開発し、製品のラインアップを完了した。

The main control panel of a nuclear power plant is designed based on human factors engineering (HFE), considering the physical size, field of view, and cognitive characteristics of plant operators. In particular, main control panels for nuclear power plants in the United States must conform with the regulatory requirements of the Nuclear Regulatory Commission (NRC) in addition to their HFE design. Toshiba has developed an HFE evaluation facility that makes it possible to evaluate human factors by changing display colors and symbols, control response times, and so on under the same conditions as in an actual main control panel, and installed it in Japan and the U.S.

Furthermore, the instrumentation and control systems of nuclear power plants are required to offer not only high reliability, but also improved economic efficiency of operation including long-term supply of maintenance parts, reduction of maintenance costs, and so on. To meet these requirements, we have developed a nuclear reactor instrumentation and control system using field-programmable gate arrays (FPGAs) and completed the product lineup.

1 まえがき

原子力発電プラント向けの監視計装制御システムは、大きく分けて運転員の操作や監視のためのヒューマンマシンインタフェース (HMI) と、プラントの情報を収集し制御するための計測制御装置で構成される。HMIについてはHFEに基づいた設計が必要であり、計測制御装置については信頼性、経済性、保守性の向上に加えて、長期安定供給性や検証の容易性が重要な要素となってきている。また、米国の安全保護系に適用する計測制御装置の製作にあたっては、トレーサビリティ (追跡可能性) の確保も重要な課題となっている。

ここでは、最近の技術課題に対する東芝の取組みの一例として、HFEに基づく中央制御盤の設計、集積論理素子であるFPGAを用いた最新の計装制御システムの開発状況、及びトレーサビリティ確保のためのトラベラーシステムについて述べる。

2 シミュレータを用いたHFE評価設備

原子力発電プラントの中央制御盤には、操作や監視に必要な操作スイッチ、ハード表示器、画面表示器、警報表示器などが多数配置されており、適切なプラント運転のためには、運

転員の体型や視野角、認知特性などを考慮したHFEを活用して設計を行うことが重要になってきている。特に米国では、原子力規制委員会 (NRC) が発行するガイド NUREG-700 や 711 に従い、HFEの手法に基づいて制御盤の設計を行うことが要求されている。

当社の改良型沸騰水型原子炉 (ABWR) プラントの中央制御盤 A-PODIA™ は、国内で良好な運転実績があり、その基本仕様は米国においても ABWR プラントの標準設計認証図書 (DCD) に反映済みで、既にNRCのHFEを含めたレビューと審査が完了し、承認され発効されている。当社が現在建設を進めている米国のABWRプラントの中央制御盤は、過去に国内のプラントで詳細設計を担当した当社と米国での設計経験が豊富なウェスチングハウス社が協力して、DCDに基づき詳細設計を進めている。

このような状況において、今後拡大する海外市場も含めた多様なニーズに応えるために、実際の中央制御盤と同等な環境で画面表示色やシンボル、運転操作に対する応答時間などを評価できる設備の必要性が増してきている。そこで当社は、プラントを模擬するシミュレータと組み合わせて実機環境での運転操作性の評価が可能なHFE評価設備を開発し、国内及び米国に設置した。国内に設置した評価設備 (図1) は A-PODIA™



図1. HFE評価設備(日本設置) — 実際の中央制御盤と同等な環境で画面表示色やシンボルなどを変更し、ヒューマンファクターを評価できる。
HFE evaluation facility in Japan

をベースとしており、実環境に極めて近い条件でHFEを評価できる。また、米国に設置した評価設備は、操作スイッチ部分もソフトウェアによる模擬スイッチで実現し、海外顧客の多様なニーズの収集と、それに基づく設計変更に対応できるようにしている。

今後、国内外で建設予定の原子力発電プラントや既設の中央制御盤の更新に向けて、これらのHFE評価設備を活用し、より運転操作のしやすい中央制御盤の設計に取り組んでいく予定である。

3 FPGA型 原子炉監視計装制御システム

当社は、原子力発電プラントにおける監視計装制御システムの中核となる核計装系及び安全保護系のシステムにおいて、マイクロプロセッサを用いた専用デジタル装置TOSDIA_{TM}及びTOSMAP_{TM}の供給と保守をこれまで約20年間にわたって継続してきた。しかし、マイクロプロセッサや周辺の回路部品などが急速に進歩し改廃が進むなかで、従来と同等の経済性を維持しながら、信頼性の高い製品を長期にわたり安定供給することが困難になりつつある。

当社は、このような課題を解決し、製品の高信頼性と長期安定供給のニーズに応えるために、以下の特長があるFPGAを用いた専用デジタル装置(FPGA型TOSDIA_{TM}) (図2)を開発し、ラインアップを整備してきた。

- (1) 長期安定供給の確保 FPGAは、継続供給性が約束されたものが多く、たとえ同じ型式品が廃型となっても代替素子と同じ論理記述言語で記述した回路設計を継承して実装することで継続的な供給が可能となる。
- (2) 検証性の向上 FPGAでの信号処理は、ハードワイヤードなロジックとして構成され、基本ソフトウェア(OS)やアプリケーションソフトウェアは不要となる。設計検証は、実際の素子上での信号処理が設計した論理ブロック



図2. FPGAを使用したSRNMユニット — 高信頼性と長期安定供給に応えるために開発したFPGA型TOSDIA_{TM}の代表例である。
Startup range neutron monitoring unit applying FPGAs

と1対1に対応しているため、容易に行える。

- (3) ドリフトレスの回路構成 デジタル信号処理を行うFPGAは、本質的にアナログ回路特有の経時変化によるドリフトがないため、ドリフトレスの回路構成が実現できる。

このFPGA型TOSDIA_{TM}は、既存のマイクロプロセッサ型デジタル装置と外形寸法や外部インタフェースの互換性を持たせることで、設備更新範囲を最小化し、短期間の定期検査でも更新できる仕様になっている。また、基板実装部品の集積度向上や部品点数削減とともに、FPGA化による消費電力の低減により基板内部の温度上昇が抑えられ、故障率が減少して信頼性が向上する。当社は、従来のTOSDIA_{TM}及びTOSMAP_{TM}に替えて、FPGA型TOSDIA_{TM}として以下の製品のラインアップを完了した。

- (1) 原子炉核計装系システム 原子炉の停止状態から定格出力状態までの炉内の出力レベルの監視
 - (a) 起動領域モニタ(SRNM)監視ユニット
 - (b) 出力領域モニタ(PRNM)監視ユニット 局所出力領域モニタ(LPRM)、平均出力領域モニタ(APRM)、出力振動モニタ(OPRM)、制御棒引抜阻止モニタ(MRBM)、及び移動式炉内校正システム(TIP)の各監視ユニット
- (2) エリア・プロセス放射線監視計装系システム 原子力発電所内外の放射線レベルの監視
 - (a) 1チャンネル用放射線監視ユニット
 - (b) 多チャンネル用放射線監視ユニット(電気伝送タイプ及び光伝送タイプ)
- (3) 原子炉安全保護系制御システム 従来のTOSMAP_{TM}に加えて、FPGA型TOSDIA_{TM}による以下の安全保護系制御システムを実現
 - (a) 原子炉緊急停止系(RPS)用ユニット
 - (b) 主蒸気隔離弁隔離系(MSIV)用ユニット

これらのシステムは、国内の原子力発電プラントへの適用が既に開始されており、放射線モニタで400台以上及び核計装モニタで70台以上の出荷が完了している。更に、順次既設システムへの更新を図っていく予定である。

また、FPGA型TOSDIA_{TM}を新たな米国向け原子炉監視

計装制御システムへ適用するための活動を開始し、現在、米国のNRCの要求仕様に準拠した認証を取得するため、環境試験の準備や図書の整備を行っている。

4 グローバル市場に対応した製造トレーサビリティの保証

米国の原子力施設に設置される安全保護系システムの場合、米国連邦規則のタイトル10 パート50 付属書B (10 CFR Part 50 Appendix B) に適合した品質保証プログラムの下で製造しなければならず、製造者には安全にかかわる重大な欠陥の報告義務が10 CFR Part 21で課せられている。この要求に対しては、材料・機械系で使用されているショップトラベラー（移動票）で製造トレーサビリティを保証することが規制に準拠するうえで合理的な方法である。

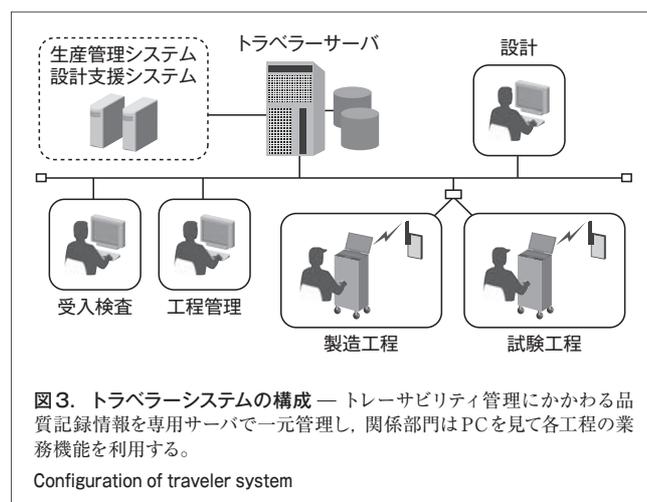
安全保護システムの装置を製造する場合には、適用される設計図書が多種にわたり、多数の部品を調達して製品に組み立てている。このため、安全保護システムのためのトラベラーシステム^(注1)として、設計・生産管理システムとよりきめ細かく情報連携ができる電子トラベラーを開発した。

電子トラベラーの開発方針を以下に示す。

- (1) 受入れから出荷までトレースできる識別管理 装置を構成するすべての部品、材料は、物理的に識別表示できないものや、組み立てていく過程で識別表示が判読できなくなる場合があるため、トラベラーシステムですべての部品、材料の受入情報を取り込み識別管理する。
- (2) 全作業履歴管理 製品出荷までの製造、試験、検査のすべての作業履歴を、チェックリスト又は報告書として記録する。また、作業環境も記録し、適切な環境下で作業が行われたことを追跡できるようにする。
- (3) 工程管理 必要な作業が漏れなく実施され、あらかじめ指定された順序どおりに作業が実施されたことを記録する。工程内検査や指定されたチェックポイントの結果を入力できるように、適切に細分化された工程表を登録して工程管理する。
- (4) 設計・生産管理システムとの情報連携 設計用のCADシステムや、生産管理システムとの情報連携を行い、設計及び手配でのトレーサビリティを構築する。
- (5) データベース機能 万一、10 CFR Part 21に規定された報告義務に該当する欠陥が発生した場合、その影響を迅速に判定するため、適切な識別子で検索可能なデータベースを構成する。

この方針に基づき開発された電子トラベラーは、プロジェクト情報管理機能、製造・試験作業の指図機能、トレーサビ

(注1) トレーサビリティを管理するためのシステム。



ティ情報登録機能、及び記録情報のトレース機能などの業務機能をWeb上で提供している。機能設計、生産管理、製造・試験、品質管理の担当者は、各々の作業ステージで必要となる業務機能をパソコン（PC）を見て利用する（図3）。

現在、電子トラベラーをデモンストレーションプロジェクトの中で運用しながら最終的な機能検証を実施中である。今後、海外向けプラント案件への対応を行うなかで、システム機能や関連システムとの情報連携を更に拡充していく計画である。

5 あとがき

当社は、安定した信頼性と経済性を備える原子力監視計装制御システムを製造し提供していくとともに、米国向けをはじめとするグローバルな展開に向けて、海外の規格や規制に適合した製品の開発と品質保証システムの構築を進めている。

今後も、最新の技術を取り入れ、グローバル市場で競争力のある製品やシステムを提供していく。



前川 立行 MAEKAWA Tatsuyuki, D.Eng.

電力システム社 原子力事業部 原子力計装設計部長、工博。原子力計装に関するエンジニアリング、企画、開発、統括業務に従事。日本原子力学会、電気学会、応用物理学会会員。Nuclear Energy Systems & Services Div.



戸塚 紳一 TOTSUKA Shinichi

電力システム社 府中事業所 原子力計装制御システム部長。原子力プラント向け計装・制御システムの開発、設計、製造、品質保証業務に従事。Fuchu Complex



中久木 功 NAKAKUKI Isao

電力システム社 府中事業所 原子力プロセス監視制御システム部長。原子力プラント向け監視システムの設計に従事。Fuchu Complex