

原子力計装制御システムのグローバル展開に向けた製品開発

永井貞光* 上田 威*
谷口 学*
北村信吾*

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

Tadaaki Nagai, Manabu Taniguchi, Shingo Kitamura, Takeshi Ueda

要 旨

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

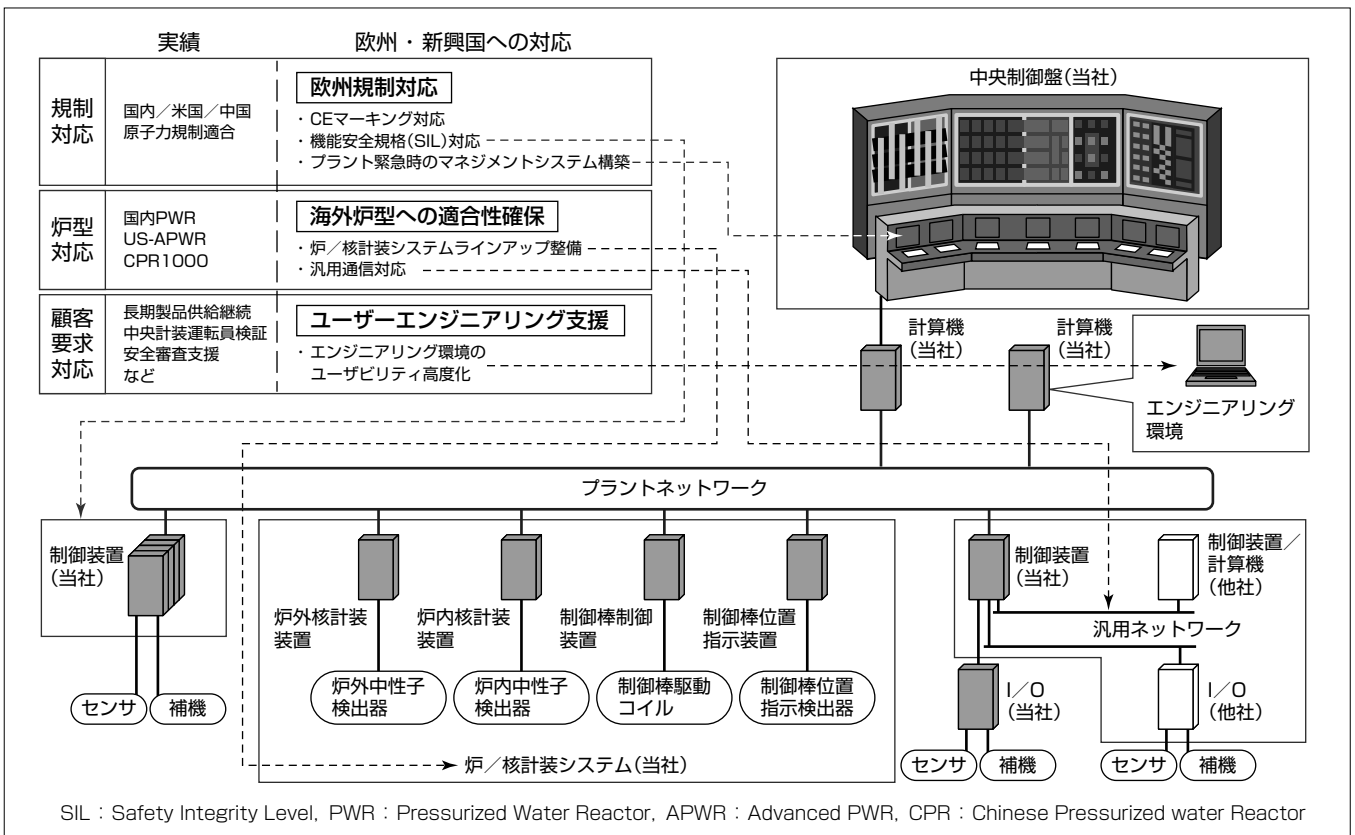
三菱電機は、高い安全性・信頼性が求められる原子力計装制御システムを国内を中心に50年以上にわたり供給してきた。国内で培ってきた技術を活用し、新興国の原子力発電所の安全性・信頼性を高めるため、当社の原子力計装制御システムのグローバル展開に取り組んでいる。

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

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

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

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



グローバル市場進出に向けた標準的な原子力計装制御システム構成

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

1. ま え が き

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

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

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

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

2. 実績とグローバル化拡大に向けた取り組み

2.1 国内外での実績

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

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

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

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

2.2 更なるグローバル化拡大に向けた取り組み

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

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

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

(1) 規制対応…要件(1)

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

(2) 炉型対応…要件(2)

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

(3) 顧客要求対応…要件(3)

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

3. 欧州規制対応

3.1 CEマーキング対応

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

具体的には、低電圧指令や機械指令において人災事故防

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

図1. グローバル化拡大に向けた活動

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

3.2 機能安全規格(SIL)対応

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

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

3.3 プラント緊急時のマネジメントシステム構築

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

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

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

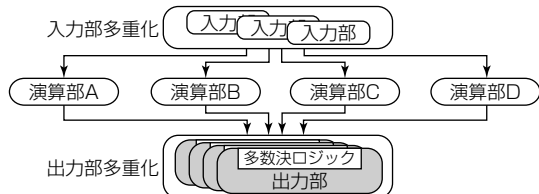


図2. SIL3対応システムの構成

4. 海外炉型への適合性確保

4.1 炉/核計装システムのラインアップ整備

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

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

4.1.1 炉内核計測装置(ICIS)

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

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

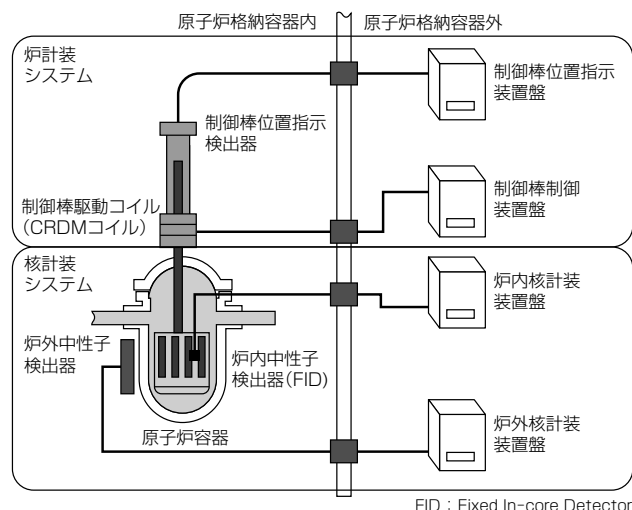


図3. 炉/核計装システム

4.1.2 制御棒駆動(CRDM)コイル

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

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

4.2 汎用通信対応

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

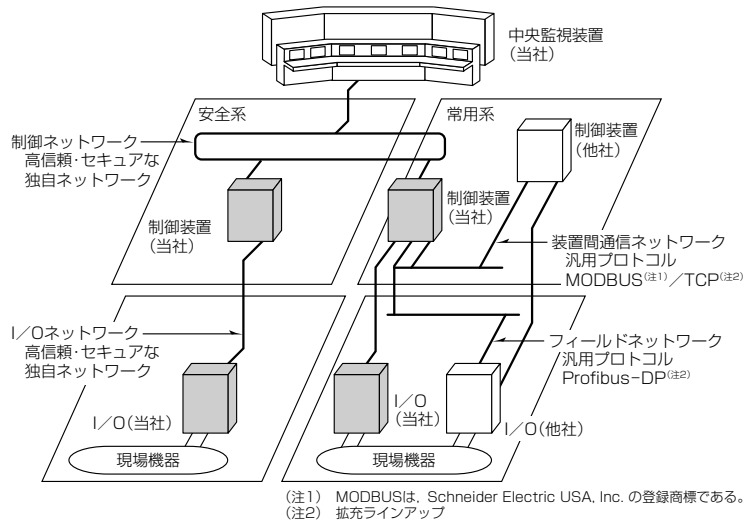


図4. ネットワーク構成図

5. ユーザーエンジニアリング支援

5.1 エンジニアリング環境のユーザビリティ高度化

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

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

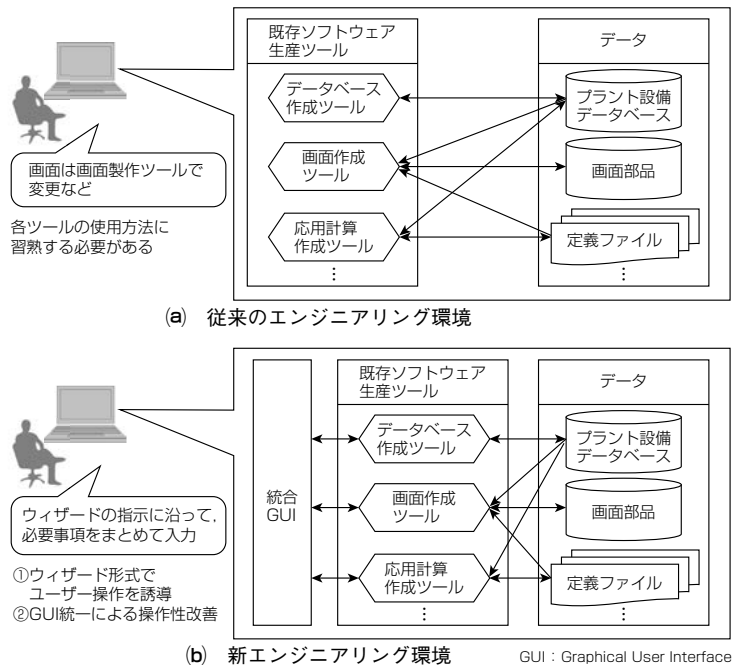


図5. エンジニアリング環境の新旧比較

6. むすび

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

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

参考文献

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