

既設プラント向け原子炉制御・保護システムのデジタル化更新

Digital Upgrades of Reactor Control and Protection Systems for Operating Plants



内海 正文*1
Masafumi Utsumi

丸田 祐史*2
Yuji Maruta

佐竹 秀和*3
Hidekazu Satake

小西 真介*3
Shinsuke Konishi

磯部 友司*4
Yuji Isobe

普門 宏和*6
Hirokazu Fumon

長期にわたり原子力プラントを安全・安定に運転していくにあたっては、設備の健全性維持、安全性・信頼性の向上や運用の高度化に向けた取組みが重要であり、計測制御システムのデジタル化はこれに寄与するものである。既に最近の PWR プラントの計測制御システムでは、中央制御盤を含めて、デジタル技術を採用した制御装置を全面適用し、安全性・信頼性の向上、保守性の向上を実現している。一方、1970 年代から 90 年代に建設されたプラントの原子炉制御・保護システムにはアナログ制御設備が適用されており、40 年超運転も見据えて、これをデジタル制御設備に更新する工事を進め、既に 20 プラントで工事を実施してきた。デジタル化更新工事にあたっては、各プラントに共通して適用可能な標準化されたシステム構成を開発、電力事業者及び三菱電機(株)と共同で適用性の確証を行い、設備全体の一括更新のみでなく、既設のアナログ制御設備を活かした形での工事や複数回の定期検査に分割した工事など、電力事業者のニーズに合わせたさまざまな工事形態に展開して柔軟に対応し、高い信頼性、保守性を実現している。

1. はじめに

原子力プラントを運転していくには、安全性・信頼性の継続的向上に対する取組みが重要である。

近年、従来型のアナログ制御設備では、回路を構成する部品の生産中止等により、長期的な予備部材の確保や大幅な設備改造が困難になりつつあり、今後、安全性の継続的向上や新たな機能を導入する上で課題となる可能性がある。また、アナログ制御設備では定期検査時の試験や調整項目が煩雑となるのに加え、多くの種類の回路を扱うことから、それぞれの専門知識を有する人材を維持し続けていく必要もある。デジタル制御設備の導入により、これらの課題の解決が可能である。

PWR(加圧水型軽水炉:Pressurized Water Reactor)プラントの計測制御システムには、通常運転時のプラント制御を行う原子炉制御系と、緊急時にプラントの非常停止等を行う安全保護系があり、1980 年代から逐次デジタル制御設備を導入してきた。原子炉制御系等での実績を積み重ね、2009 年には安全保護系を含めてデジタル化した計測制御システムを導入した。これらの経験を踏まえ、その後も各プラントにおいて、原子炉制御・保護システムのデジタル化更新を推進し、信頼性、保守性の向上を図っている(図1)。

*1 ICT ソリューション本部電気計装技術部 技術士(原子力・放射線)

*2 ICT ソリューション本部電気計装技術部 グループ長

*3 ICT ソリューション本部電気計装技術部 課長

*4 ICT ソリューション本部電気計装技術部 課長 工学博士

*5 ICT ソリューション本部電気計装技術部

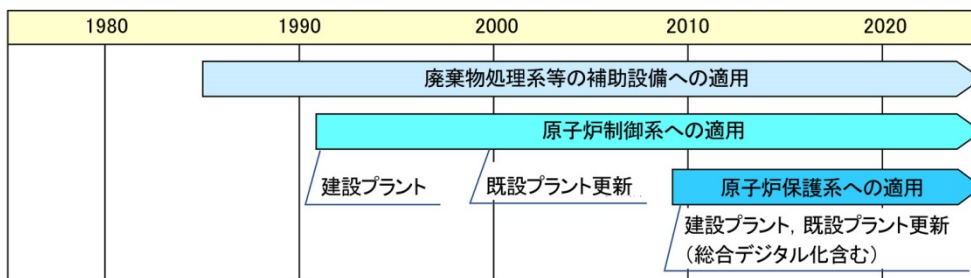


図1 PWRプラント計測制御システムのデジタル化実績

既設プラントの原子炉制御・保護システムの更新では、既設設備の機能及びシステム構成、設置スペース、更新対象とする設備の範囲・更新順序等がプラントごとに異なるといった、既設プラント工事に特有の制約条件がある。これらに対応するため、各プラントに共通して適用可能な標準化されたシステム構成を開発し、電力事業者及び三菱電機(株)と共同でその適用性の確認を行い、既設のアナログ制御設備を活かした形での工事や複数回の定期検査に分割した工事など、電力事業者のニーズに合わせたさまざまな工事形態に柔軟に対応し、これまでに 20 プラントで約 800 面を更新した。

本報では、デジタル計測制御システム導入のメリット、及び既設プラント向けの標準設計の概要を述べる。

2. デジタル計測制御システム導入のメリット

計測制御システムをデジタル化するメリットとして、以下が挙げられる。

(1) 自己診断機能の導入等による設備信頼性の向上

デジタル制御設備の導入により、自己診断機能による健全性確認が常時可能となり、故障の早期発見や故障箇所の特定制約が容易となる。故障時にもプラントが安全な状態を維持するように、冗長化された機器(CPU、入出力カード等)が自動的に切り替わるようにするとともに、故障の種類に応じて、制御設備の出力がフェイル・セーフ動作となるように設計している。

(2) 試験・保守性の向上

従来のアナログ制御設備を適用した原子炉制御・保護システムでは、それぞれの設備で使用している回路の種類に応じて保守作業や部材管理を行う必要があったが、デジタル制御設備を導入し、共通のプラットフォームを適用することで、保守作業や予備部材を共通化している。

また、従来はアナログ回路で実現していた機能をソフトウェアで実現することで、設定値等の経年変化がなくなり、設備の健全性は、管理された最新版ソフトウェアとの照合や自己診断機能を用いて確認可能としている。模擬信号を用いたロジックの動作確認や設定値の個別確認といった作業が不要となり、検査を省力化している。

(3) 将来の設備拡張に柔軟に対応可能

アナログ制御設備では機能追加等に伴い制御ロジックの変更を行うには、新しいアナログ回路の追加や配線の追加・変更等のハードウェア改造が必要であり、回路を追加するスペースの確保や設備を長時間停止しての作業など、改造に当たって考慮すべき制約は多い。

一方、デジタル制御設備では制御ロジックをソフトウェアで実現するため、機能追加・変更に際して、大幅なハードウェア改造が不要であり、アナログ制御設備よりも機能拡張の自由度を高く保つ設計としている。

(4) 保守部品の安定供給

従来のアナログ制御設備では、回路を構成する部品の生産中止等により、長期的な予備部材の確保や大幅な設備改造が困難になりつつあり、デジタル制御設備への更新により、保守部品の安定供給を可能としている。

デジタル制御設備の導入により、信頼性の向上、試験・保守性の向上、設備拡張への柔軟な対応、保守部品の安定供給が可能になり、従来のアナログ制御設備が抱えていた、設備改造や保守・運用面での課題の解決を図った。

3. 既設プラント向けデジタル化更新 標準設計の概要

国内 PWR プラントの原子炉制御・保護システムは、プラントが建設された年代や、その後の最新知見を反映した改造工事によって、プラントごとに設計、設備構成・仕様等が異なっている。プラントによって制御対象の機器数、配置設計等も異なるため、制御設備に搭載する機能や設備を設置する場所・スペースの制約もプラントごとに異なっている。

既設 PWR プラントの原子炉制御・保護システム更新においては、上記のようなプラントごとに異なる制約条件に対応していく必要があるが、個別プラントに合わせた設計は、設計の複雑化やコスト増加に繋がる可能性もある。これを回避するため、あらかじめ各プラントに共通して適用可能なシステム構成を標準設計として定め、それを各プラントの要求に合わせて変更していく方式を採っており、合理的かつ柔軟に工事を進めている。

以下に、既設プラント向け更新工事で採用している標準設計の概要を述べる。

(1) コンパクトなシステム構成

既設の制御設備更新における制約事項の一つとして、設置スペースが挙げられる。新設プラントと異なり、既設プラントでは、既設設備の設置場所にそのまま更新設備を設置するケースが多い。既設設備の盤面数、盤配置、盤サイズはプラントごとに異なるが、標準設計は、どのプラントにも適用できるように、必要な機能及び信頼性(多重化や安全機能を適切に分散させる等)を確保しつつ、コンパクトなシステム構成とする必要がある。

従来、アナログ信号処理と論理演算処理(ON-OFF 制御)で、適用される技術の違いに応じて、計器ラック、リレーラック等の異なる設備を設置していた。デジタル化更新においては、設備に搭載する制御ロジックをソフトウェア処理とし、また、デジタル制御設備間の信号インターフェイスを通信で実現することで、システム構成を既設構成から変更する際の自由度が高い設計とした。この特長を活かし、従来は異なる設備で実現していた複数の機能(アナログ信号処理、原子炉トリップ等の論理演算処理)を統合させることで、設備物量及び設備間インターフェイスの合理化を図り、標準設計としてコンパクトなシステム構成を実現した。機能の統合の例を図2に示す。

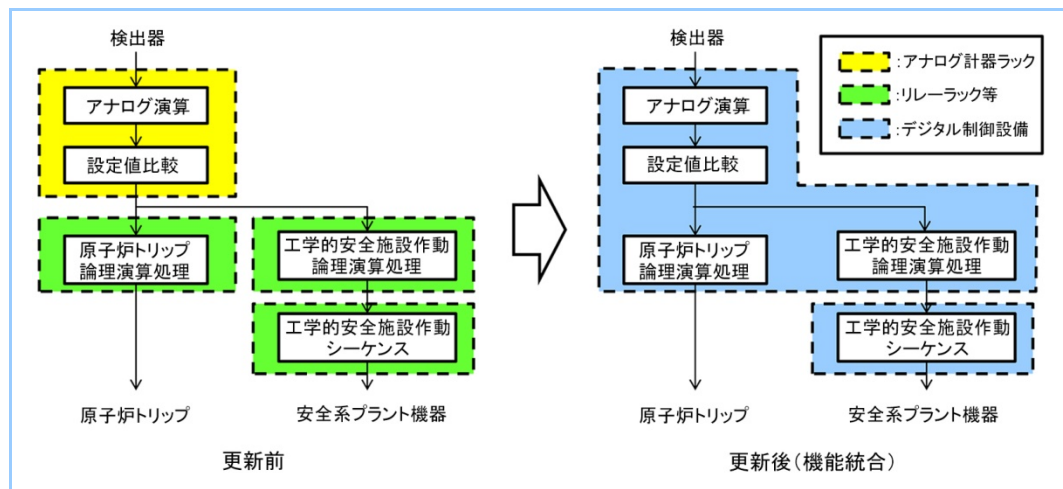


図2 安全保護設備の機能統合の例

(2) 多様な更新形態に対応

原子力プラントの計測制御システムは、制御盤面数約 200 面(代表例)から構成されており、規模が大きなものである。このため、定期検査日数の制約等から一括での更新が困難となり、

複数回の定期検査にわたって分割して更新を進める必要がある場合がある。このような場合にも対応できるよう、標準設計では、システム全体を適切な制御設備単位に分割した構成としており、いくつかのステップに分けて、順次部分的に更新を進めた場合でも、各ステップで必要な信頼性、機能を確保しつつ、更新が進められるようにした。分割して更新する場合や、一部の設備のみを更新する場合には、既存設備を極力活用し、大規模なケーブルの引き直しやそれに伴う回路設置などの電気・計装工事が、最小限となるよう考慮した設計を行っている。

複数のプラントで制御システムを数ステップに分割したデジタル化更新を実施中であり、あらかじめ各ステップでのシステム構成・設備構成を策定し、成立性を確認しつつ計画を進めている。

(3) 最新の規制動向への対応

原子力プラントの再稼働や改造工事に当たっては、福島第一原子力発電所の事故の教訓を踏まえて策定された新規制基準の要求を満足することを前提として、世界最高水準の安全性を追求し、設計している。原子炉制御・保護システムについても、安全保護系の改造工事において、同基準に適合していることの審査が必要になるが、標準的なシステム構成を適用した複数プラントが、既にこの審査に合格した。

また、海外でも、アナログ制御設備の生産中止に伴いデジタル化更新のニーズが高まっており、その規制についても活発な議論がなされている。特に米国では運転開始から 60 年を超えたプラントの運転継続に向けて、デジタル化更新の議論が進んでおり、このような新しい動向も取り入れることで、より安全性が高い設計を実現している。

その一例として、多重化されたデジタル安全保護系の、ソフトウェアに起因する同時故障の規制要求上の想定(ソフトウェア共通要因故障)への対策がある。PWR プラントでは、この故障の想定に対して、深層防護の観点から、デジタル安全保護系を採用した全てのプラントに、緊急時の対応に必要となる、“止める”、“冷やす”、“閉じ込める”の機能を合理的にバックアップする設備を導入した。バックアップ設備の構成例を図3に示す。なお、バックアップ設備の設置に際しては、本設の安全保護系への悪影響防止のため、絶縁回路により安全保護系との分離を図るとともに、内部回路を2重化し誤動作による影響を防止する設計とした。

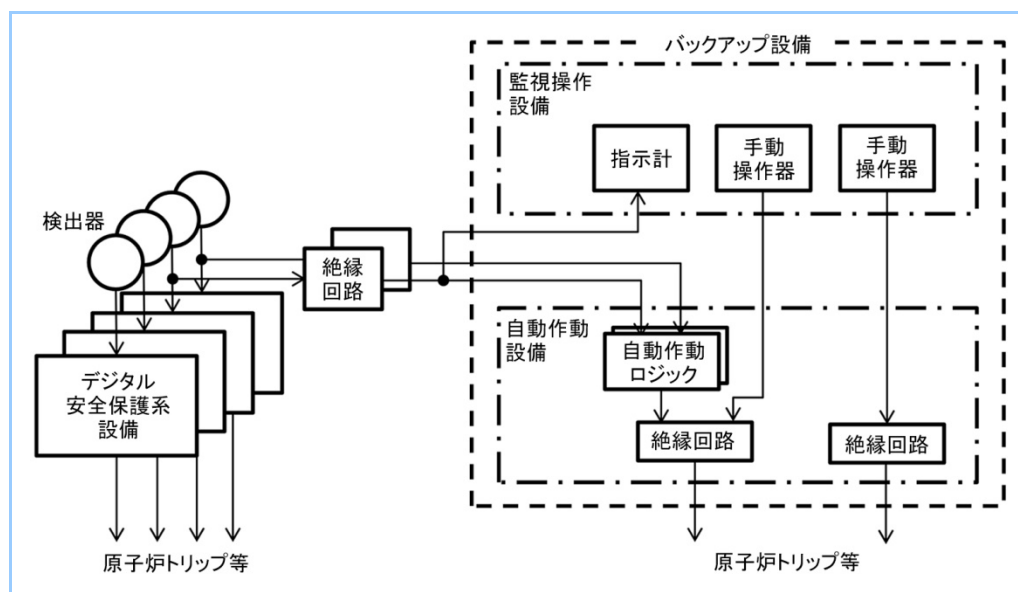


図3 バックアップ設備の構成例

(4) 更新に合わせた機能拡張

更新に合わせて機能拡張することにより、信頼性、保守性を向上させている。例えば、信頼性向上のため、安全保護系の検出器を従来の3チャンネル構成(2 out of 3)から最新プラント

並みに4チャンネル構成(2 out of 4)に拡張している。また、4チャンネル化により、多重度が増すことから、保守時に1チャンネルをバイパスした状態で運用することが可能であり、保守性を向上させている。

上記のとおり、原子炉制御・保護システムのデジタル化更新では、標準化されたシステム構成を適用し、プラントに応じた多様な更新形態に適応しつつ、最新の規制動向への対応や更新に合わせた機能拡張を行った。また、標準化されたシステム構成を適用することにより、全プラントで基本仕様が共通化されるため、プラント間で知識や経験の共有を図りつつ、安全性・信頼性の向上や運用の高度化に取り組むことも可能とした。

4. まとめ

原子力プラントでは、原子炉制御・保護システムのデジタル化更新を推進しており、これまでに20プラントで約800面の設備更新を実施してきた。

既設プラントの原子炉制御・保護システムの更新では、従来のアナログ制御設備が有していた設備改造や保守・運用面での課題を解決するとともに、各プラントに共通して適用可能な標準化されたシステム構成を開発し、電力事業者のニーズに合わせた更新形態に柔軟に対応することにより、最新の安全性・信頼性や保守性などを実現した。

現在、国内既設プラントにおいて、複数の設備更新を推進しており、新たな設備更新も計画中である。今後もこれらの取組みを通して、プラントの安全性・信頼性の向上や運用の高度化に寄与していく。