

最新の原子力監視計装制御システムと今後の計画

Latest Nuclear Monitoring Instrumentation and Control System and Its Planned Application

川上 誠志郎 佐藤 俊文 池田 旬

KAWAKAMI Seishiro

SATO Toshifumi

IKEDA Jun

当社は、昨今の半導体素子などのデジタル監視制御装置を構成するデバイスの急速な進展と変化の中にあって、原子力発電プラント向けに、高信頼度で長期の供給性と保守性を満足する原子炉計測専用の監視装置やヒューマンマシンインタフェース(HMI)装置を開発・製品化し、実際のプラントに適用していく計画である。また、原子力特有の製品であるインコアセンサについても、従来から進めていた設計改良を集大成した新型局部出力領域モニタ(LPRM)の開発を進めるとともに、次世代核計装のなめであるガンマサーモ(GT)検出器についても国産初の製品化のめどをつけた。

With the recent rapid progress made in electronic devices used in digital monitoring and control systems, Toshiba has developed special-purpose digital monitoring equipment and human-machine interface equipment that meet the special requirements of high reliability and long-term supply and maintainability for nuclear power plants, and is scheduled to apply these new products to actual nuclear power plants. Moreover, for the in-core sensor, which is a special-purpose product for nuclear power plants, Toshiba has been developing a new local power range monitor (LPRM) detector as the comprehensive result of improvements made up to now, and has developed the first domestic gamma-thermo (GT) detector as a pivot of the next-generation neutron monitoring system.

1 まえがき

原子力向けの監視計装制御システムは、大きく分けるとセンサ、監視制御装置、HMIで構成される。当社は、センサの製造技術を含む開発、最新デジタル技術の適用による監視制御装置の信頼性、経済性、保守性の向上や、HMIの高機能・高性能化及び製品化を行い、実プラントへの適用と展開を進めてきている。

ここでは、最近の技術動向と課題、及びそれに対する当社の取組みの一例として、原子炉核計装を中心とした最新の技術成果と今後の計画について述べる。

2 監視計装制御の技術動向と課題

近年、原子力向けの監視計装制御システムには、高信頼性の確保に加え、短期定期点検への対応やシステムの長期供用可能化による経済性、保守性の向上が求められている。

一方で、IT(情報技術)分野を中心として、一般のデジタル技術は大幅かつ急激に変化してきている。

当社は原子力プラントメーカーとして、こうしたニーズ、シーズ両面の変化に対応し、原子力向けの専用技術と一般向けの汎用技術を適切に使い分け、原子力向けの監視計装制御システムを構築している。

一般的に、汎用製品は技術の進展、改廃が著しく、性能向

上や高機能化が容易である反面、長期供給を維持することは困難であり、一般市場で最新性やもっとも普及されているというだけで適用すると実績と安定性の面でも問題が残る。

一方、専用化した製品では、技術的には確証された部品や技術を使用するため、長期供給性と実績を含めた高い信頼性や安定性を確保できる反面、専用技術維持のためのコストがかかること、特に情報処理にかかわる高機能化が困難であるという課題がある。

したがって、信頼性要求が高く、機能・性能の変更が少ない部分は専用技術を適用し、信頼性要求が高くなく、機能・性能向上の要求が高い部分は汎用技術を採用することを基本方針としている。

プラントを運転する人間に近いHMIの部分では、直接安全性に影響が及ぶことは少ない反面、運用方法の変更や監視操作性の向上の要望に応える必要がある。このため、もっともユーザーに近いレベルのインタフェースとなる表示デバイスや表示制御用ソフトウェアについては、汎用技術の適用が必要であり、また可能でもある。常用系のHMIについては、ほぼ全面的に汎用技術の適用が可能であるが、長期供給性の観点からキーコンポーネントのみは専用化している。安全系HMIについては、安全性にかかわるスイッチはハードウェアとして残し、補助的な監視操作にかかわる表示デバイスなどに汎用技術を適用している。これら補助的なHMIであっても、ハードウェアとしては安全系に要求される耐震

性や耐環境性を満足するものを採用し、なおかつ故障時の影響が下位の監視制御装置ロジックに及ばないように、ハードウェアスイッチによる許可ロジックを設けている。

監視制御装置については、安全系向けのものは、制御ロジックや信号処理方法はプラント寿命中にほとんど変更されることはなく、高い信頼性と長期供給性を要求されるため専用化を基本方針とし、基本ソフトウェア(OS)も含めた高い信頼性と安定性を持つ専用製品を開発・製品化して供給の維持を行う。常用系の監視制御装置は、汎用技術を部品レベルで採用するが、信頼性と長期供給性を確保するために入念に選定した部品と専用OSにより、発電プラント専用システムとして構築する。原子炉本体の監視制御以外の周辺システムは、基本的に一般産業と共通のコントローラを適用する。

センサについては、汎用計器であっても産業用であるため、HMIや監視制御のような汎用/専用の使い分けにかかわる問題は少ないが、原子力専用計測器であるインコアセンサについては、当社が国内で唯一の沸騰水型原子炉(BWR : Boiling Water Reactor)用インコアセンサの製造を行うことによって、特有のセンサ設計製造技術と長期供給性を維持している。この結果、プラントでの稼働実績と顧客ニーズを反映した製品開発・改良が継続され、高品位の製品供給を実現してきている。

以下に、最新の監視制御システムと代表的な原子力専用製品として、原子炉計測用監視装置とインコアセンサについて述べる。

3 最新の監視制御システム

当社は、最新のデジタル技術、HMI技術を駆使して開発・製品化した監視制御システム A・PODIA_{TM}を、第3世代の中央制御盤として ABWR 初号機に適用した。この A・PODIA_{TM}は、前章の方針に従い、高い信頼性と長期供給性を要求される中核部には原子力専用のハードウェア/ソフトウェアを、ユーザーインタフェース部の表示デバイスやソフトウェアには汎用技術を適用し、信頼性とマンマシン性を両立させた総合システムである。

現在建設中の最新の改良型 BWR(ABWR : Advanced BWR)向けの A・PODIA_{TM}(図1)においても、この基本的なシステム構成と設計上の配慮は堅持されている。

すなわち、安全系は、実績があり解析性の高い独自 OS を採用しかつ耐震性などの要求を満足する安全系専用の制御コントローラ(TOSMAP_{TM} - C75)と、専用 HMI 処理装置(TOSMAP_{TM} - FD1000)で構成している。また、常用系監視制御システムは、発電専用の制御コントローラ(TOSMAP_{TM} - C1000)と HMI 処理装置(TOSMAP_{TM} - S2000)で構成している。この常用系用のコンポーネントでは、

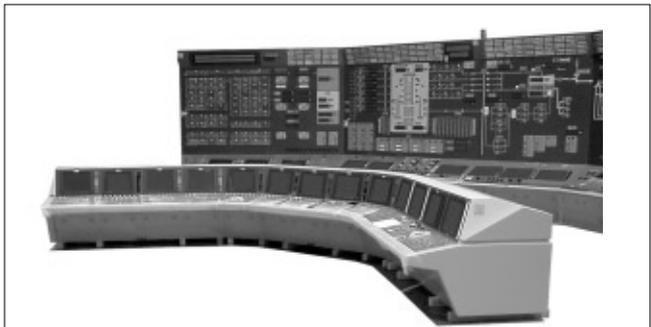


図1 . 最新建設中 ABWR 向け中央制御盤 A・PODIA_{TM} - 先行 ABWR 設備の構成と基本設計を踏襲しながら改善を図っている。
A - PODIA_{TM} system for latest advanced boiling water reactor (ABWR) plant under construction

ハードウェア設計や OS・アプリケーション言語などを先行機で実績ある製品と同様のものを踏襲しながら、最新の汎用技術の適用により、制御コントローラの保守性の向上、HMIでの18インチフラットディスプレイの採用、及びウィンドウ表示機能の追加といった高機能化を図っている。

4 原子炉計測専用監視装置

監視装置の代表としては、原子力監視計装の中核となる核計装や安全上重要な放射線計装のシステムにおいて、当社は原子炉計測専用デジタル装置(TOSDIA_{TM})を ABWR や既存の運転プラント向けの設備更新に適用してきた。このデジタル監視装置においても、マイクロプロセッサをはじめとする汎用の半導体素子を使用しながら、原子力計測特有の信号処理に適合した専用製品として、15年以上供給と保守を継続してきている。しかし、前章で述べたように、昨今の急速なデジタル部品・素子の進歩、改廃のなかでは、従来と同等の高信頼度と長期製品性を維持していくことが困難となってきた。このような課題を解決しユーザーニーズに応えるべく、当社は集積論理素子を適用した新型 TOSDIA_{TM} (A・TOSDIA) を新たに開発した。この新型のデジタル監視装置は次のような方針で開発した製品である。

- (1) リプレース性 既存設備の監視装置と外形寸法、外部インタフェースについて互換性を持たせ、短期定検での更新を可能化とする。
- (2) 信頼性 基板実装部品の集積度向上や部品点数削減による信頼性向上を図るとともに、センサ・監視装置間の伝送は実績のある従来 TOSDIA_{TM} の方式を踏襲する。
- (3) 長期供給・保守性 デジタル部品改廃の激しい現況下で10年以上の長期製品供給と保守を可能とするため、演算処理やトリップ判定の機能を、OSレスの高集積論理素子である PLD(Programmable Logic Device)で

実現する。

- (4) 安全系に対する配慮と検証 安全系として要求される応答性、耐震性、耐環境性などを満足するよう設計するとともに、十分な試験・検証を行う。

PLDの適用により、旧来のアナログ装置と同等に設計及び検証が行えるため、設計の透明性と試験・検証の効率化を図ることができる。A・TOSDIA(図2)は従来のTOSDIA_{TM}の後継機種として互換性があり、アナログ放射線モニタモジュールと互換のシングルチャンネル型監視ユニット、従来の多チャンネルTOSDIA_{TM}と同等のマルチチャンネル型監視ユニット、起動領域モニタ(SRNM)適用シングルチャンネル型監視ユニット、出力領域モニタ(PRNM)適用マルチチャンネル型監視ユニットといった製品ラインアップで構成される。この新型機種は、2003年以降の既設設備更新から、実機向けの適用、展開を図っていく計画である。



図2 . A・TOSDIA(シングルチャンネルタイプ)の外観と基板 - 従来盤実装のアナログモジュールと互換性を維持しつつ、高信頼性と長期供給・保守性を実現した。
A・TOSDIA unit module

また、監視装置への高集積論理回路の適用にあたっては、高速信号処理能力を活用し、従来技術のDSP(デジタルシグナルプロセッサ)と同程度のフィルタリング機能を付加した耐ノイズ性向上型SRNM(D・SRNM)を開発・製品化した。この製品では、SRNM信号帯域(100k ~ 10MHz)に混入する高周波ノイズのうち、過去に経験したインバータノイズ、電磁コンタクトノイズ、スイッチング電源ノイズなどが除去できる。

利便性、経済性の観点から、今後のプラントでは、高周波ノイズ発生を伴うインテリジェント機器がますます増大することが予想される。このような電磁環境に影響を受けないD・SRNMは、プラントの安定運転へ大きく貢献しうる。

5 インコアセンサ

原子炉計測システムには、原子力の監視の中核として高い

信頼性と安定性が要求される。このため、当社はBWR用インコアセンサの国内唯一の製造を行い、自社製の監視装置やHMIと組み合わせたトータルシステムとして、原子炉計測システムを構築し供給してきている。

このインコアセンサは、炉心出力及び出力分布の監視のために高い信頼度を要求されるが、過酷な炉内照射環境下で長期間使用されるため、高信頼度の実現には高い開発技術力と製造能力が必要である。

5.1 超高信頼度・長寿命型LPRM(TND2000シリーズ)

当社はこれまで、炉内環境下で約6年の長期使用を実現するLPRMの各種設計改良を行ってきたが、近年の長・短・短・長サイクルの定検期間に合わせ、更に8サイクルまでの使用期間延長が期待されている。当社は、長期使用においても性能を維持できる新型LPRM(TND2000)を開発し、核的寿命延長のめどを得た(表1)。また、材料的寿命に対しては、後述のTND2000Nにより、バウダリ部の劣化リスクも低減可能になる。

表1 . TND200A(従来)とTND2000シリーズ(新型)の仕様比較
Comparison of TND200A and TND2000 series

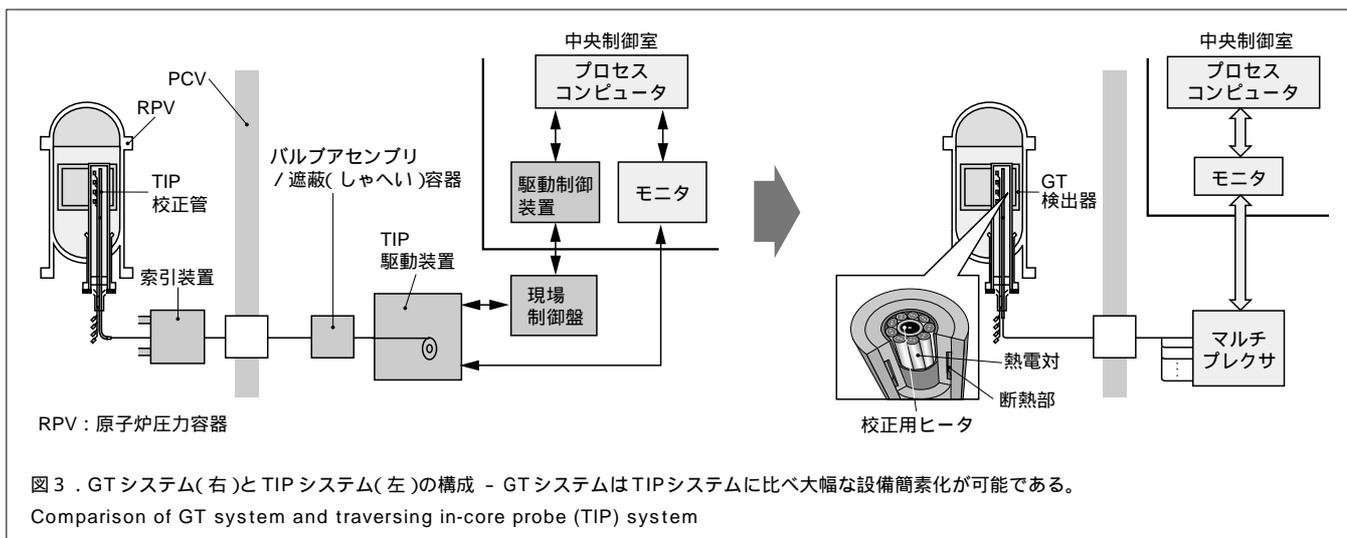
No.	比較仕様	TND2000シリーズ	TND200A
1	中性子感度 (A/nv)	1.2×10^{-17}	8×10^{-18}
2	検出器印加電圧 (V)	100	100
3	陰極材料	インコネル	チタン
4	気密シール部品	窒化けい素気密シール	アルミナ気密シール
5	MIケーブル	2段ケーブル	1段ケーブル
6	コネクタ	ワンタッチ式	ワンタッチ式

5.1.1 寿命性能の拡大 近年のプラント運転実績の104か月(約8.7年)に対応した核的寿命を得るため、現在のチタン電極に替えてインコネル電極を採用し、より安定したウラン塗布層と感度余裕を実現した。インコネルの採用により電極材料の高純度化が実現でき、電極材料の吸収した不純物の放出に伴うスパイク現象(指示上昇・変動)の除去、ウラン塗布強度の増加による長期使用での電極表面の安定化維持などの付帯効果が得られる。

5.1.2 高信頼度性能の拡大 長い炉内滞在により、LPRM材料は高速中性子照射劣化を受ける。この劣化に対し、信頼性を損なう要因を排除する以下の改良を行っている。

- (1) 窒化けい素気密シール適用によるMIケーブルの中間シール部削除、及び細径配管の自動溶接による溶接入熱エリア局所化と劣化低減
- (2) 溶接部の高照射域からの排除
- (3) クレビスレス構造の採用による腐食劣化の低減

また、(1)の気密シールの採用で、従来LPRMでは必ず発生する感度変化(ドリフト)をなくすこともできる。

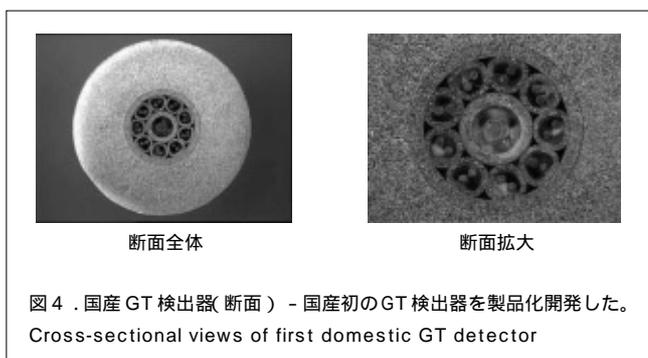


5.1.3 検出器内不純物の一掃 長期使用に伴い,検出器内包材料の含有不純物の悪影響(電極間の短絡,指示変動,接続部のオープン)の発生確率の増加が懸念される。これまでの,不純物排除構造設計(フォイルレス,一段気密シール化)のほかに,溶接自動化による不純物排除,加熱・排気などの製造治具の新製による純度向上などを行った。

5.2 国産LPRM / GT検出器(TND2000N)

1回/月の頻度で使用される移動型校正用中性子検出器(TIP)は,一次格納容器(PCV)内外の駆動装置と原子炉圧力容器下部のTIP配管などで構成されるが,定検時の煩雑な保守とそれに伴う被曝(ひばく),及び駆動部の故障が改善すべき課題である。このため当社は,駆動装置が不要な計測装置の実現を目指し,線が金属に吸収されて発生する熱を炉内に装荷された熱電対で計測するGTシステムの開発を,1980年代末から進めてきた。

図3に示すGTシステムは製品提供可能な時期に来ているが,現在の海外製のGT検出器は非常に高価であるため,経済性のあるGT検出器の製品化が望まれている。当社は,今回,従来のLPRMのMIケーブルの製造で培ったスエーディングやロールに関する製造技術をベースに,GT検出器の国産化開発のめどを得た(図4)。更に,国産化にあたっては,



品質向上に向けたコネクタ及びGT検出器内の配線方法の改善,量産に適した構造設計と製造技術の開発を行った。

また,LPRM/GTシステムの採用によって,原子炉冷却材のバウンダリの一部を構成している従来のLPRM内のTIP案内管を削除でき,炉内バウンダリレス化が可能となって,8サイクル使用でのバウンダリ部分の材料劣化と機械強度低下のリスクの回避も可能となる。

6 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ため,今後も原子力向けの専用製品化技術を確実に維持・向上させていくとともに,いっそうの機能と経済性の向上を目指し,原子力以外の分野の技術を適切に適用していく。



川上 誠志郎 KAWAKAMI Seishiro

電力システム社 原子力事業部 原子力電気計装設計部長。
原子力プラント向け監視制御システムの開発設計に従事。
日本原子力学会会員。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



佐藤 俊文 SATO Toshifumi

電力システム社 府中電力システム工場 原子力計装制御システム部グループ長。原子力計装システムの開発設計に従事。日本原子力学会会員。
Fuchu Operations - Power Systems



池田 旬 IKEDA Jun

電力システム社 原子力事業部 原子力電気計装設計部グループ長。原子力プラント向け監視計装システムの開発設計に従事。日本原子力学会会員。
Nuclear Energy Systems & Services Div.