

21世紀を目指した原子炉計測システム

Advanced Nuclear Instrumentation for 21st Century

伊藤 敏明
ITO Toshiaki

鈴木 茂
SUZUKI Shigeru

前川 立行
MAEKAWA Tatsuyuki

当社は、原子力発電所の運転を支える計測制御設備について、早くから経済性と信頼性に優れた機器の開発に努め、また、斬新(ざんしん)な技術と運転経験を融合したシステム改良に積極的に取り組んでいる。この計測制御分野で、特に重要な原子炉計測システムでは、デジタル型核計装(起動領域系、出力系)、高信頼度型中性子検出器(LPRM, SRNM)を実用化し、1996年に商業運転に入った改良型沸騰水型原子炉(ABWR)初号機(東京電力(株)柏崎刈羽6号機)の実現に貢献した。

更に、より簡素化し高機能化した原子炉計測の実現を目指し、炉内固定型校正システム(ガンマサーモメータ適用)、複合機能型炉内計装システムの実用化に取り組んでいる。

Toshiba has been developing reliable, economical, and user-friendly nuclear instrumentation systems for boiling water reactors (BWRs) since the early 1980s, using advanced and highly trustworthy digital-optical technologies. Our latest technologies are applied in the digital neutron monitoring system (startup range, power range) and the highest reliability in-core neutron detector (local power range and startup range neutron detector). These technologies have supported the operation of the first commercial advanced boiling water reactor (ABWR), the Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station Unit No. 6 of The Tokyo Electric Power Co., Inc.

Among the current activities for the development of next-generation systems for the 21st century, progress is being made on the fixed in-core calibration system for replacing an existing traverse in-core probe, the combined-function in-core detector, a highly sophisticated radiation monitor, and other systems. This paper outlines these examples of technologies and know-how for the 21st century.

1 まえがき

ABWRプラントでは、総合デジタル化により計測制御システム間の各種情報伝送の有機的結合、伝送効率化(適切な機能分散と階層構成化)及び情報の高信頼度化を達成した。更に、コンピューティングネットワーク技術を適用し、より経済性、保守性の向上した機能分散型の総合デジタル化を検討している。ここでは、特に重要な原子炉計測システムにおける世界初の全デジタル化技術の成果と、21世紀を視野に入れた新技術の特長について代表例により述べる。

2 開発課題と適用技術

近年、経済性向上(短期定期検査(以下、定検と略記)や長期運転サイクル、大出力化)や国民に安心感を与える技術、保守簡素化(保守技能レス)技術の導入が電力会社から望まれている。これに対し、光多重と高度マンマシンインタフェース技術採用の原子炉計測専用デジタル装置TOS-DIATMを、更に高機能でコンパクト化し、高信頼度センサ技術を併用してシステム改良し、使いやすさと経済性の実

現に努力している。放射線計装技術のトレンドを図1に示す。

3 原子炉核計装

近年、約11けたの原子炉出力を計測する原子炉核計装を、当社の開発した起動系モニタ(SRNM: Start up Range Neutron Monitor)と出力系モニタ(PRNM: Power Range Neutron Monitor)で構成する方式が、BWRのデファクトスタンダードとなっている。また、炉内中性子束分布計測用の移動式炉内中性子計装(TIP: Traversing Incore Probe)に替え、温度計測により炉内ガンマ線分布を測定するガンマサーモメータ(GT: Gamma Thermometer)方式をBWR標準とする検討が進められている。

3.1 デジタル式SRNM

80年代初頭に開発したアナログ型SRNMをデジタル化し、高機能型SRNMの製品化を行い、以下を実現した。

- (1) キャンベル^(注1)領域でフィルタードペリオドトリップ^(注2)機能を適用し、レンジ切替え操作の削減

(注1) 中性子検出器信号の高周波成分を2乗平均する信号処理方法。

(注2) 一次遅れフィルタ信号の時間変化率を用いて判定値に達した時に動作を要求される回路。

		1970	1980	1990	2000	2010
		BWR3, BWR4		BWR5		ABWR
		第一世代(国産化)		第二世代(長寿命型)	第二世代(信頼度向上)	第三世代
センサ技術開発	LPRM	第一世代(国産化)		第二世代	第三世代(信頼度向上)	
	SRM	イオンチェンバ/シンチレーション/GM検出器		イオンチェンバ/シンチレーション/半導体検出器		
	APRM	イオンチェンバ/シンチレーション/GM検出器		イオンチェンバ/シンチレーション/半導体検出器		
	PRRM	GM検出器		プラスチックシンチレーション検出器		
核計装・放射線モニタシステム開発	DRM	GM検出器		α線, β線同時測定検出器		
	出力系(アナログ)	(アナログ改良型)		(デジタル)		
	SRM/IRM(アナログ)			SRNM(デジタル)		
	TIP(アナログ)			(デジタル)	炉内固定型校正システム(デジタル)	
放射線モニタ(アナログ)	(アナログ改良型)		(デジタル)			

ARM : Area Radiation Monitor PRRM : Process Radiation Monitor DRM : Dust Radiation Monitor
SRM : Source Range Monitor IRM : Intermediate Range Monitor GM : Geiger Muller

図1. 放射線計装技術のトレンド 放射線計測技術はアナログ・シングルチャネルからデジタル・マルチチャネルへ発展している。
Past, present, and future trends in radiation monitoring technologies

(2) デジタルフィルタ技術を適用し、検出器異常や電磁波雑音への耐力向上

製品の信頼度確保のため、試験用原子炉でのシステム全体の性能検証、安全系ソフトウェアの検証(V & V: Verification & Validation)を実施した。(株)日本原子力発電 敦賀1号炉での国内初導入後、13基の運転・建設プラントに採用され、今後も設備更新を含め導入が計画されている。国外では、GE社により、米国を含む数か国のBWRプラントで導入された。

ABWRでは、更にSRNM技術の“原子炉出力と反応度変化を一括連続計測可能”という特長を生かし、制御棒操作の自動化を実現し、プラント起動時間の短縮に貢献している。

3.2 デジタルPRNM

デジタル出力系は、LPRM(Local Power Range Monitor)/APRM(Average Power Range Monitor)、炉心流量計測、MRBM(Multi Rod Block Monitor)/RBM、DCF(Data Communication Function: 他システムとのインタフェース)で構成される。

80年代後半に独自開発した光デジタル出力系のLPRM/APRM信号処理技術に、デジタルシグナルプロセッサと36ビットCPU処理技術を加え、ABWR初号機への適用を目的に製品化した⁽¹⁾。

また、製品の信頼度確保のため、実際の検出器信号内蔵のシミュレータ装置を用いて性能検証とV & Vを実施した。

この製品では、以下の技術を適用した。

(1) コンパクト化のため、核分裂型電離箱の検出器電源

を共有化し、信号を多重デジタル化する技術

(2) 安全系要求の40ms応答を実現する高速計算技術

(3) 安全系要求の高精度信号を実現する固有ノイズ除去技術、及び検出器異常や電磁波雑音除去技術

(4) ゲイン校正自動化、検出器特性自動測定、異常部位自動診断機能などの保守性向上技術

更に運転中のBWRへは、アナログシステムと同程度のコストと同一スペースでの高機能化更新実現のため、以下を適用した。

(1) TOSDIATM1台で24チャンネルの検出器信号処理によるコンパクト化

(2) DCFの機能充実などによるRBMとの共用化

この成果を図2に示すように、BWR5向けとして日本初となる99年春の福島第二原子力発電所1号機(2F1)の出力系設備更新に適用した。更新性に優れるこの製品は、検出器の少ない小型炉でも、設備更新の標準設計となる見込みである。

次に、デジタル制御棒引抜監視装置(MRBM/RBM)は、アナログが達成不可能な下記機能を省スペースで経済的に実現した。

(1) 完全二重化構成による制御棒引抜時のシステム応答の均一化

(2) TOSDIATM1台で208個のLPRM信号のシステム処理応答(運転プラントは100ms以内、ABWRは250ms以内)これによりのMRBMは、最大26本の制御棒ギャング操作^(注3)

時の反応度監視を行い、ABWRの起動時間の大幅短縮

(注3) 同時に、多数本の制御棒を駆動させる操作。

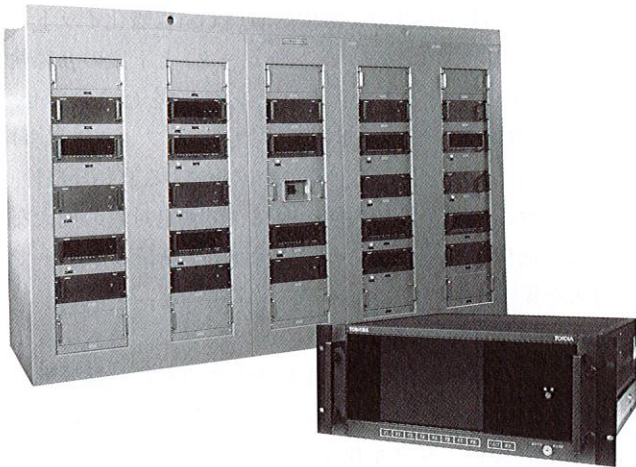


図2. デジタルPRNM盤とTOSDIA™-EX 日本初の運転プラント設備更新として2F1に納入した。新型TOSDIA™-EX(右下)はカラー液晶表示を採用している。
Digital PRNM (2F1) for first replacement in Japan and TOSDIA™-EX system

に貢献した。

3.3 GTシステム

1回/月で使用のTIPは、一次格納容器(PCV：Primary Containment Vessel)内外の機構装置と原子炉压力容器下部を占有するTIP配管などで構成される。

BWR導入当初より、装置の改良国産化による信頼度向上と駆動操作の自動化を進めたが、定検保守の煩雑さと被曝(ひばく)、PCV内機器故障時の出力低下措置などのプラント運転への影響の回避が残されている。このため、経済性に優れ、駆動装置の不要な計測装置の実現が期待され、加圧水型原子炉(PWR)で検証済のGT計測法をBWRに適用する炉内固定計測技術(GT内蔵LPRM)、信号処理と運転中

校正技術(DACS：Data Acquisition and Calibration System)及びガンマ線ベース炉心性能計算ソフトウェア(CMS：Core Monitoring System)の開発を80年代末から進めた⁽²⁾。

GT検出器の構造を図3に、GTシステムとTIPシステムの構成比較を図4に示す。

現在、経済性と品質に優れた次世代GT検出器の開発も進めており、プラント導入を前提に下記特長を持つGTシステムの実炉性能確認試験を国内で実施中である。

- (1) 初期コスト改善(駆動設備不要な簡素な機器構成)及び運転コスト改善(定検工事簡素化、被曝レス)
- (2) 機能向上(連続炉内中性子束分布による炉心性能計算機能向上、LPRM/APRMゲイン校正機能向上、静止化によるプラント運転への悪影響の潜在的リスク低減)
- (3) 保守性向上(校正源内蔵、及び劣化の少ない長寿命製品であることから容易な運転中保守や長期運転サイクル運転対応)

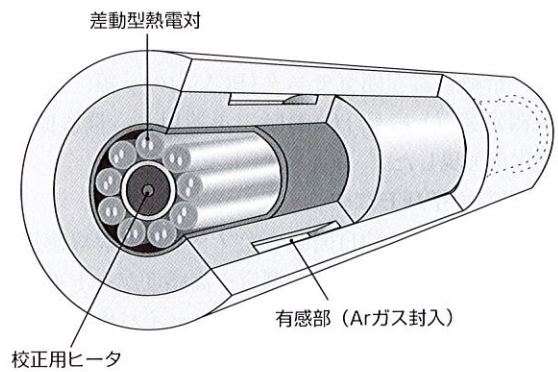


図3. GT検出器 γ 線が金属に吸収されて発生する熱を内蔵の熱電対で計測する検出器集合体で、特性確認の校正用ヒータを持つ。
Typical cross section of GT detector

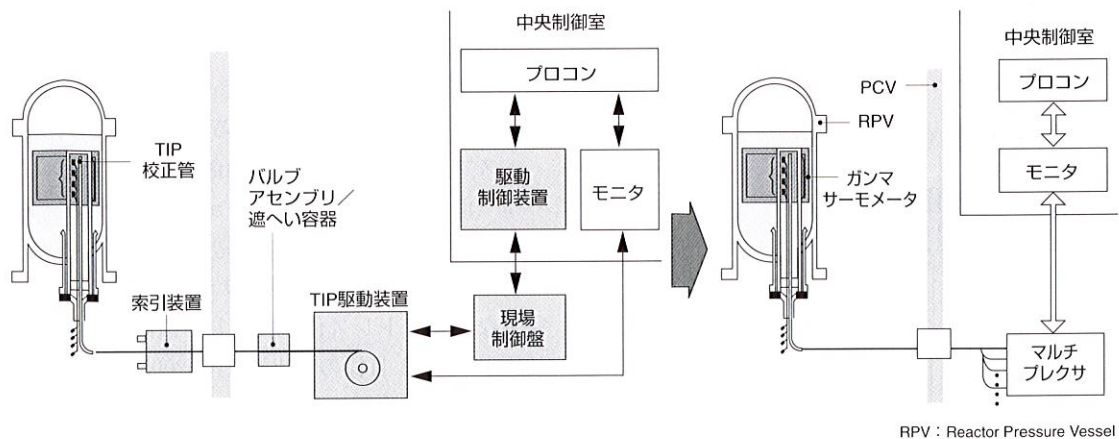


図4. GTシステムとTIPシステムの構成 GTはTIPに比べ大幅な設備簡素化が可能である。
Comparison of GT system and neutron TIP system

4 放射線計装

80年代から段階的にデジタル/光多重伝送技術を安全系も含む放射線計装に適用した。近年では、放射線計測信号のクオリティ向上を目指しデジタル核種分析(DMCA)技術や保守フリーのゲルマニウム(Ge)冷却技術を適用した放射線計測システムの構築、完全な光伝送を目指し光ファイバ放射線検出技術の適用を図っている。

4.1 デジタル型放射線モニタとデジタル型格納容器雰囲気モニタ

常用系デジタル放射線モニタ技術にV&Vと安全系要求仕様確認試験を実施し、すべての放射線モニタのデジタル化を完了した。安全系モニタのようにセンサ数の少ないシステムは、アナログ式との価格競争力制約などでデジタル化を実現しにくい。当社技術では、アナログ方式と大差のない経済性でシステムを構築し以下を達成した。

- (1) 予備品の共用化
- (2) 光デジタル技術採用によるプラントノイズ影響排除
- (3) 保守方法の簡素化、機器信頼度・性能向上(ドリフトレス、簡単なトリップ設定チェックなど)

また、格納容器雰囲気モニタ(PCV内の γ 線、水素・酸素濃度測定装置)にもTOSDIA™を適用し、機器標準化、高機能化を実現した。

4.2 光ファイバモニタ

90年代に入って、独自開発の光ファイバ放射線検出技術をPCV内放射線レベルの分布測定や高感度ゲートモニタへ適用し、原子力プラント環境での光ファイバ放射線連続計測技術を確立した。

4.3 α/β 分離型ダスト放射線モニタ

β (γ)線検出の現用ダスト放射線モニタは、空調設備の運転状況によってコンクリートなどからの自然放出核(α 、 β 線放出)も測定する場合があった。近年、 α 線と β (γ)線の同時計測可能な検出技術を製品化し、 α 線を出す妨害放射性物質の影響を削除可能とした⁽³⁾(図5)。

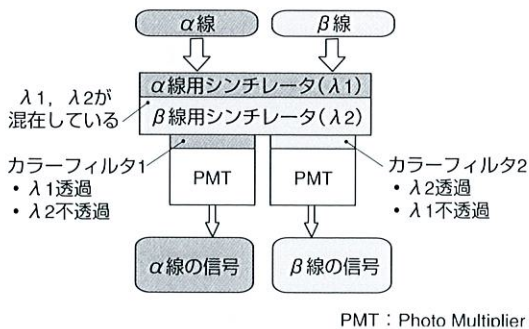


図5. α/β 分離型ダスト放射線モニタ計測原理 α 線感受層と β 線感受層からの光を独立に増幅して計測する。
Independent detection from α/β activated layers

この製品では、上段の α 線検出層(YOS(硫酸化イットリウム):Eu(ユウロピウム)シンチレータ)と下段の β 線検出層(NE-111Aプラスチックシンチレータ)をはり合わせ、背後の2種類のフォトマルチプライア(カラーフィルタ付き)で同時計測・弁別を行う。回路の簡素化による高い経済性、検出部の厚みと素子種類の組合せによる測定対象の拡大などの高機能化を実現しており、設備更新、新設プラントでの導入を提案している。

4.4 核種分析モニタ

古くより、豊富な分析ソフトに裏打ちされた核種分析モニタをNAIG™ブランドで、供給してきた。近年、Ge検出器信号を直接デジタル化するDMCA技術を世界に先駆けて開発し、高計数率測定レンジを拡大するとともに、Ge検出器の冷却フリー化を図り、プラント内での連続計測を可能とした。これらの技術を現状のグロス放射線計測^(注4)主体のプラント放射線モニタ(特に排ガスモニタ)に適用すべく、この製品の採用を提案中である。この技術導入の効果は次のとおりである。

- (1) 特定核種の早期オンライン検知によるモニタ検出能力向上(例:排ガスモニタでの破損燃料検知性能)
- (2) サンプリング装置の簡素化による使用性と経済性向上

5 センサ技術

LPRM検出器の国産化に成功した唯一のメーカーとして、60年代以後も、長寿命型改良のほか、信頼度と経済性向上に努め、累積で2,500本以上の製品を供給してきた。

更に、SRNM検出器の国産化を達成し、多機能センサ内蔵の複合炉内計装の開発を進めている。

5.1 超高信頼度LPRM検出器TND2000N

80年代後半、LPRM検出器は約10%の設計寿命外取替え率を経験していたが、以下の改良技術により0.1%以下に改善した。

- (1) 信号スパイク改善(メッキ前処理改善と付着強度の確保)
- (2) SCC(Stress Corrosion Cracking)改善(低カーボン材料の使用、自動溶接による溶接性と質の向上、クレビスフリー構造^(注5)による腐蝕環境の排除)
- (3) 信号フラクチュエーション改善(カソードとセンサケースのフォイルレス構造と溶接改善)

更に、開発中の窒化珪素セラミック気密シール⁽⁴⁾を用いて完全なドリフトレス化を実現し、設計寿命外取替え率6 σ (0.000002%)目標の検出器TND2000Nを開発した。21世紀のLPRM検出器に要求される品質、性能及びコストは、このTND2000Nにて達成される(図6)。

(注4) 検出器の感じるすべての放射線を計測する方法。

(注5) 狭いすき間部分のない構造。

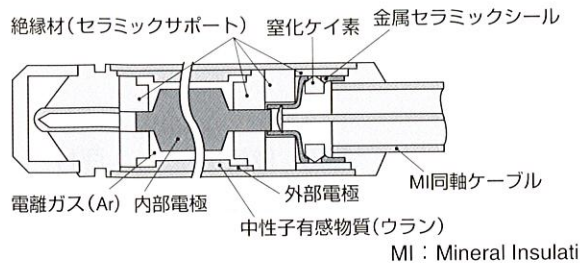


図6. 超高信頼度LPRM TND2000N 設計寿命外取替え率6σを目標とする21世紀のLPRM構造を示す。
Cross section of next-generation LPRM (TND2000N)

5.2 高信頼度SRNM検出器

LPRM製造技術に加え、ガンマ加熱高温環境下の使用を考慮し高純度な材料及び製造工程の採用、高圧ガス封入や大面積ウランメッキ技術を適用し、動作安定性、経済性に優れたSRNM検出器を国産化した。

5.3 複合炉内計装

LPRM/GTによる出力計測主体の炉内計装から、炉内の状態可視化も包括した複合炉内計装技術を確立した。これには、LPRMに苛酷事故時の炉心温度(炉内冷却状態可視)計測センサや通常時の腐蝕環境計測(電気化学電位)センサを内包したモニタ、LPRM信号の多機能化で炉心流量や実時間の炉内振動計測モニタがある。

6 あとがき

核計装/放射線モニタの検出器を含むすべての機器とシステムを一貫して開発、製造、供給できる唯一の国内メー

カとして、運用性と経済性の更なる改善を実現していくとともに、次世代炉A BWR-IIの原子炉核計装設備開発に今後も注力し世界をリードしていく。

文献

- (1) 阿部 弘, 他. 沸騰水型原子力発電所用デジタル出力モニタシステムの開発. 日本原子力学会誌, 37, 7, 1995 p.628-638.
- (2) Itoh, T, et al. "Application of the GT as BWR fixed incore calibration system" OECD, Incore Instrumentation & Reactor Core Assessment Proceedings of a Specialist Meeting. 1996, p.203-212.
- (3) 前川 立行, 他. 光学式波長弁別技術(波長弁別型 α/β 検出器). 日本原子力学会「1999春の年会」要旨集, 1999, D51.
- (4) 伊藤 敏明, 他. BWR中性子検出器新型気密シール部品の開発. 火力原子力発電, 50, Apr. 1999, p.68-74.



伊藤 敏明 ITOH Toshiaki

電力システム社 原子力事業部 原子力電気計装設計部参事。原子力発電所の核計装・放射線計装システムのエンジニアリング及びシステム開発業務とABWRのC&IEシステム開発業務に従事。

Isogo Nuclear Engineering Center



鈴木 茂 SUZUKI Shigeru

電力システム社 府中電力システム工場 原子力計装システム部課長。原子力計装システム、機器のエンジニアリング、開発、設計及び企画業務に従事。原子力学会会員。

Fuchu Operations-Power Systems



前川 立行 MAEKAWA Tatsuyuki

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 原子力技術研究所 計測・制御技術担当主査。プラントの放射線計測技術開発に従事。日本原子力学会, 応用物理学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center