

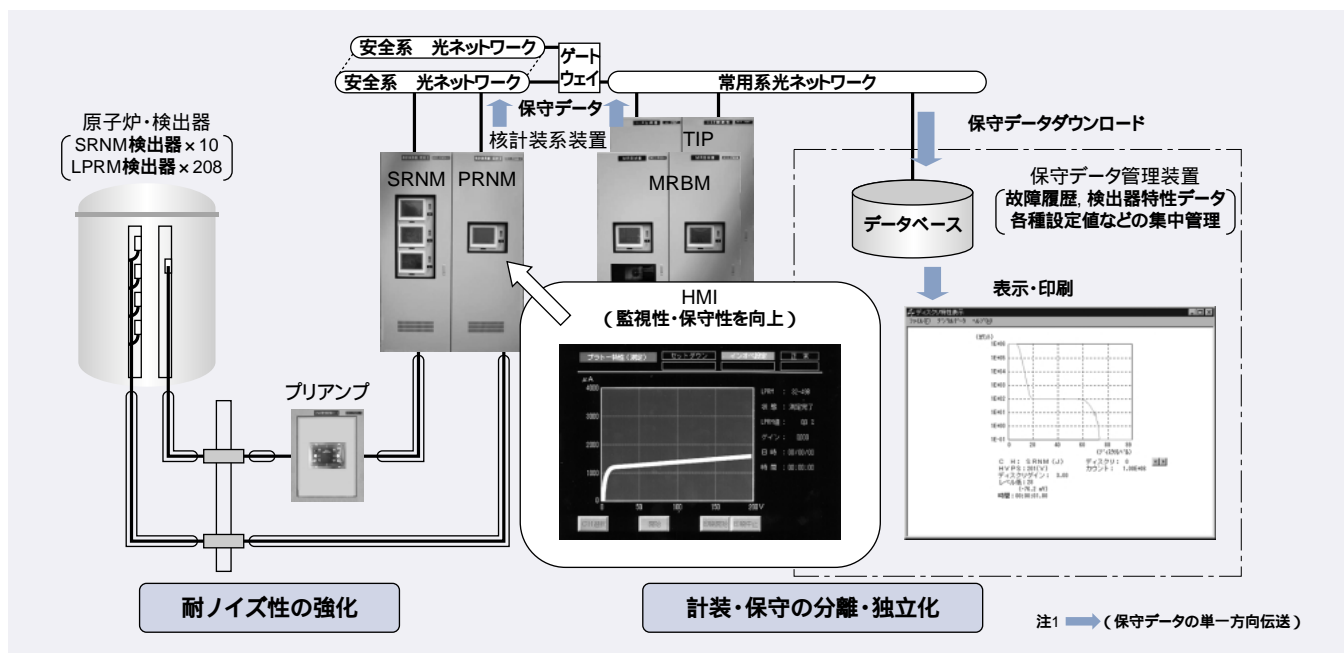
# 北陸電力株式会社志賀原子力発電所2号機向け 新型デジタル核計装系システムの開発

New Digital Neutron Monitor System for Unit No.2 of Shika  
Nuclear Power Station, The Hokuriku Electric Power Co., Inc.

平山 俊幸 Toshiyuki Hirayama  
野崎 健 Takeshi Nozaki

坂田 智貴 Tomoki Sakata  
伏見 篤 Atsushi Fushimi

伊藤 孝広 Takahiro Itô  
石井 一彦 Kazuhiko Ishii



注2:略語説明 SRNM( Startup Range Neutron Monitor ),LPRM( Local Power Range Monitor ),PRNM( Power Range Neutron Monitor ),MRBM( Multi-Rod Block Monitor )  
TIP( Traversing Incore Probe ),HM( Human-Machine Interface )

## ABWR(改良型沸騰水型原子炉)の新型デジタル核計装系システムの概要

デジタル核計装系システムは、検出器、プリアンプ、核計装系装置、およびこれらを接続する専用ケーブルから成り、計装・保守の分離・独立化とともに耐ノイズ性の強化を図ったシステムである。

北陸電力株式会社志賀原子力発電所2号機向けに開発した「新型デジタル核計装系システム」が完成し、2006年3月の運転開始に向けて、出力100%段階までのプラント起動試験を終えた。

原子炉での安全系の一部である「デジタル核計装系システム」は、高信頼度と長期安定供給、および操作性・監視性向上の実現を志向して開発したものである。このシステムのハードウェアはフラットディスプレイと最新

型の基幹コントローラをベースとし、ソフトウェアには構成管理手法による検証と健全性確認(V&V:Verification and Validation)を適用している。また、専用の保守データ管理装置を開発することによって保守性をいっそう向上させた。さらに、サブシステムの一つであるSRNMシステムは、信号ケーブルや施工技術を含めた最新の技術で構成し、耐ノイズ性の向上を実現している。

## 1 はじめに

原子力発電プラントには、安全かつ安定運転を確保する重要な系統の一つとして、原子炉出力監視を目的とした「核計装系システム」がある。日立製作所は、先行したABWR(Advanced Boiling Water Reactor:改良型沸騰水型原子炉)への核計装系システムを納入した後も、要素技術の進展とともに、既設のBWR(Boiling

Water Reactor:沸騰水型原子炉)プラント向けの核計装系システムを開発して7プラントへ納入し、運転実績を積んできた。

このような実績を踏まえ、顧客からの保守性についての機能向上というニーズに応えるため、先行技術を踏襲し、安全性・保守性の向上による運転信頼性の確保を第一として、第2世代製品として、高機能化を図ったABWRプラント向けデジタル核計装系システムを開発した。

ここでは、日立製作所のABWRプラント向けデジタル核計装系システムの特徴、および開発・改良の概要について述べる。

## 2 システムの開発方針

SRNM(Startup Range Neutron Monitor), PRNM(Power Range Neutron Monitor), MRBM(Multi-Rod Block Monitor), TIP(Traversing Incore Probe)の各サブシステムで構成する核計装系システムでは、計測信号に対する安定性と安全性にかかわる保護機能への高い信頼性が要求される。これらの要求を実現し、監視・保守性の向上、および計測信号レベルが微弱でノイズの影響を受けやすいSRNMの耐ノイズ性向上などのニーズに応えるために、以下の4点の開発方針を採用した。

- (1) 各サブシステムには、デジタル核計装系装置として同一コンセプトの下に、視認性に優れたカラー表示のフラットディスプレイを採用し、かつ最新型基幹コントローラの適用、およびソフトウェア資産の活用を図る。
- (2) 定期検査中や運転中の保守性を向上させるために、検出器の特性データやシステム監視情報などの保守データを容易に一元管理するシステム化を行い、定期検査中だけでなく、運転中での機器の状態監視・保全を可能とする。
- また、SRNM/PRNMは安全系に、MRBM/TIPは常用系にそれぞれ分類されるため、システムの保守データを一元管理する装置を適用するにあたって、安全系と常用系の相互の独立性を確保する。
- (3) 複数のベンダーの核計装機器との組み合わせを可能とすることにより、顧客運用の多様性を確保し、システム状態の確認と保守の容易化を実現する。
- (4) 特に、SRNMシステムは耐ノイズ性を強化し、周囲のノイズなどの影響を最小限に抑える。

## 3 新型デジタル核計装系システムの開発

開発方針に沿って完成したデジタル核計装系システムと、耐ノイズ性を向上させたSRNMサブシステムについて以下に述べる。

### 3.1 デジタル核計装系システム

デジタル核計装系システムの仕様を表1に示す。主な特徴は以下のとおりである。

- (1) 最新型基幹コントローラとI/O(入出力)装置を一体化したユニットをベースに、JEAG-4609-1999(安全保護系へのデジタル計算機の適用に関する指針)に基づく構成管理手法を適用したV&V(Verification and Vali-

表1 デジタル核計装系システムの仕様  
最新型基幹コントローラを基に、保守データを一元管理する機能を持っている。

項目	内容	特徴
適用	(1)ABWR (2)BWR(更新用)	
用途	原子炉核計装系	
トリップ 応答時間	(1)SRNM:150 ms以下 (2)PRNM:40 ms以下	応答時間に裕度を確保して高機能化を実現
コントローラ	H-04M/R600シリーズ (I/O一体型)	構成管理(V&V)によって安全保護機能を検証
ネットワーク	μ ネットワーク-100	高速大容量光伝送
フラットディスプレイ表示機能	カラー液晶TFT	視認性向上
SRNM プリアンプ	(1)電圧: -15 V (2)入力インピーダンス:75 (3)入力信号:パルス・正弦波	柔軟なインタフェースを確保
保守機能	保守データ管理装置 (オプション)	検出器特性データ・故障履歴・設定値などのデータ一元管理

注2:略語説明 ABWR(Advanced Boiling Water Reactor:改良型沸騰水型原子炉)  
BWR(Boiling Water Reactor:沸騰水型原子炉)  
SRNM(Startup Range Neutron Monitor)  
PRNM(Power Range Neutron Monitor), I/O(Input-Output)  
TFT(Thin Film Transistor), V&V(Verification and Validation)

dation)によってソフトウェアの安全保護機能を検証し、ネットワークには高速大容量光伝送を導入して性能の向上を図った。

- (2) 装置のHMI(Human-Machine Interface)部にはカラー液晶表示器を採用し、監視・保守性の改善を図るとともに、検出器特性データの監視と操作性の向上を図った。

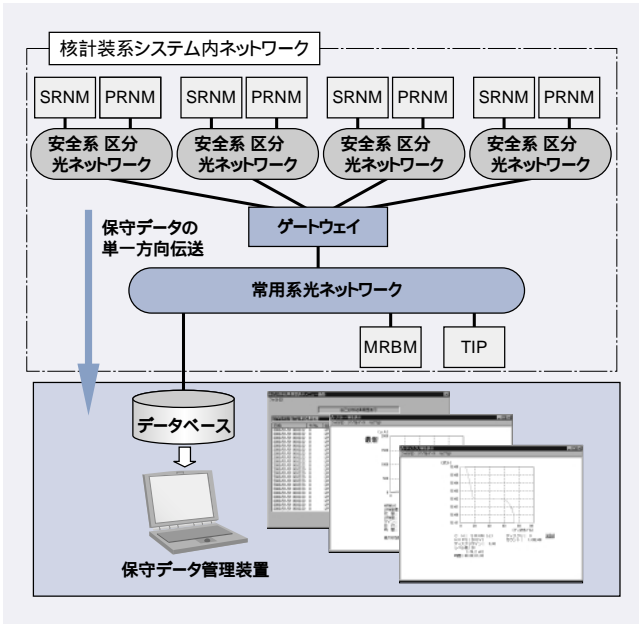
- (3) 核計装系システムの保守データを一元管理するため、以下の特徴を持つ「核計装系システム内光ネットワーク」を構築した。核計装系システム内光ネットワークの特徴は次のとおりである。

- (a) 光ネットワークを用いて、安全系と常用系を分離した。
- (b) 光ネットワークを独立・分散型にして、安全系相互区分間での故障発生時の影響を無くした。
- (c) 保守データ管理装置で管理する伝送データ量と伝送速度の最適化を図り、かつ核計装系装置から保守データ管理装置へのデータ伝送の方向を単一方向として、核計装系装置間の監視に影響を与えないようにした。

保守データ管理装置は、構築した核計装系システム内光ネットワークを介して、核計装系装置から検出器特性データ、故障履歴、各種設定値などを管理できるシステムとした。これにより、原子炉の停止中および運転中にかかわらず、核計装系装置を操作することなく、各種データを処理することができる(図1参照)。

### 3.2 SRNMサブシステムの耐ノイズ性向上

核計装系システムを構成するサブシステムのうち、特に微弱な信号を扱うSRNMの計測信号は、電磁ノイズの影響を受ける可能性がある。そのため、信号ケーブルや



注:略語説明 MRBM (Multi-Rod Block Monitor), TIP (Traversing Incore Probe)

図1 核計装系システム内光ネットワークと保守データ管理装置の構成  
核計装系システム内光ネットワークを構築することにより、光ネットワークを介して保守データを保守データ管理装置で管理する。

電路施工を改善し、耐ノイズ性能に優れたシステムを構築した。

### 3.2.1 SRNM信号ケーブルの改善

微弱信号を伝送するSRNM信号ケーブルは、原子炉格納容器内に布設されることから、耐環境性を確保し、かつ規定の電気特性を保持する特殊な同軸ケーブルである。

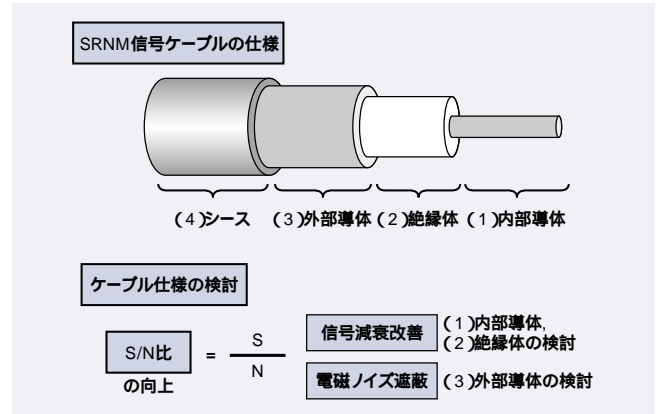
SRNM信号ケーブルとしての最適な仕様を決定するため、信号のS/N (Signal-to-Noise) 比の向上に着目し、以下の検討を行った。

- (1) 信号 (Signal) 減衰の抑制:ケーブル内部導体の導体抵抗の低減、および絶縁体の見直しによる信号漏えい量の両方を低減
- (2) 電磁ノイズ (Noise) 遮蔽性の向上:静電遮蔽を考慮した外部導体材質の検討、および電磁遮蔽を考慮した外部導体構造の改善

検討にあたっては、ケーブルの電気的等価回路モデルを構築して、外部の電磁ノイズが信号に与える影響を解析評価することにより、SRNM信号ケーブルとして最適な構造と電気特性を選定した (図2参照)。

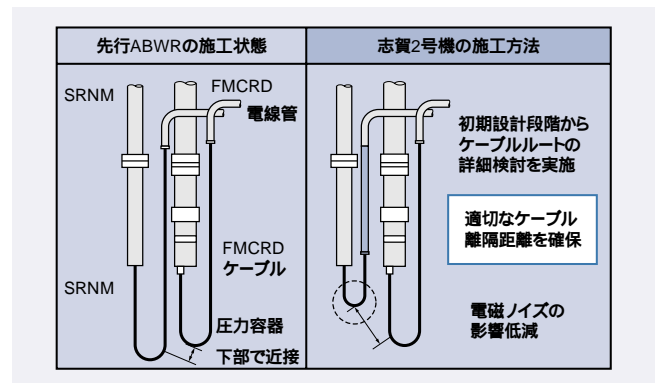
### 3.2.2 SRNM電路の施工改善

ABWRプラントでは、原子炉の構造上、インバータ制御機器であるFMCRD (Fine Motion Control Rod Drive) と、微弱信号回路であるSRNMのケーブルが圧力容器の下部で近接するケーブルルート (電路) がある。このため、近接するFMCRDケーブルからの電磁誘導によってSRNMケーブルにノイズ電流が誘起される事象が想定される。一方、SRNM検出器から微弱信号増幅



注:略語説明 S/N (Signal-to-Noise), S (Signal), N (Noise)

図2 SRNM信号ケーブルの改善検討の概要  
同軸ケーブルであるSRNM信号ケーブルについて、S/N比の向上を目標にケーブル仕様の最適化を図った。



注:略語説明 FMCRD (Fine Motion Control Rod Drive)

図3 圧力容器下部のFMCRD/SRNMケーブルの電路詳細検討の概要  
初期設計段階からノイズ対策を実施することにより、適切なケーブルルートの選定や機器配置の最適化を図った。

のためのプリアンプまでの電路で、SRNM信号ケーブルにノイズ電流が誘起されると、プリアンプで増幅され、計測に影響を与える可能性が高い。このため、初期設計の段階からケーブル離隔距離の確保や、最適電路の検討を実施してノイズ影響の低減を図った (図3参照)。

前述した電路の検討にあたっては、SRNM信号ケーブルとノイズ発生源となるFMCRDケーブルを電気的等価回路でモデル化し、ノイズ伝搬による影響を解析評価することで、必要なケーブル離隔距離を選定した。さらに、工場内で模擬試験を行い、評価の妥当性を確認した。

また、圧力容器の下部だけでなく、先行ABWRでの知見からプラント内のノイズ発生源となる各種インバータ機器を選び、その電路と近接、交差することのないSRNM信号ケーブルの最適な電路を決定した。

さらに、プラント内のプリアンプの配置を、検出器からプリアンプまでのケーブルの長さが最短となるように最適化を図り、耐ノイズ性能を向上させた。

### 3.2.3 ノイズ影響評価モデルの構築

SRNMケーブル、電路、および機器全体を模擬した等価回路モデルを構築し、ノイズによる影響を解析して設

計に反映した。3.2.1と3.2.2の評価を行う解析では、ケーブル、回路、プリアンプの詳細なモデルを組み合わせ、ノイズ源の周波数特性や共振特性を考慮した影響評価を実施した。

## 4 志賀原子力発電所2号機での成果

核計装系システムについては、志賀原子力発電所2号機の起動試験で、2005年4月に実施された中性子源照射試験から、燃料装荷、100%出力段階試験に至るまで、各機能試験を実施して良好な計測結果を得た。これら一連の試験で確認した開発システムの成果は以下のとおりである。

### (1) 計測信号の安定性

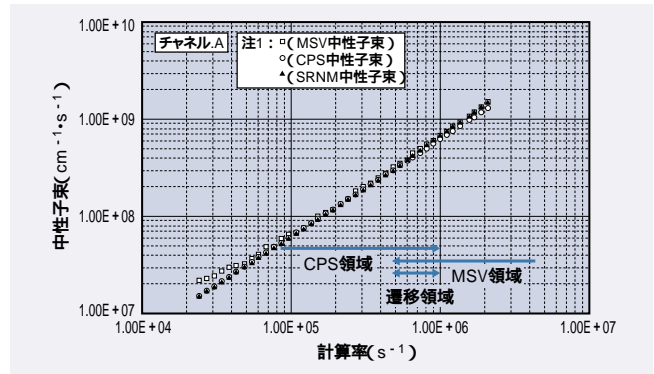
安定計測の難しいISRNMでは、中性子源照射の開始から現在に至るまで、ノイズによる計測信号の乱れは発生しておらず、安定運転に貢献できた。

### (2) 測定パラメータ確認の容易化

核計装では、測定パラメータの連続性の確認が重要である。特にCPS(Count per Second)領域とMSV(Mean Square Voltage)領域の間の遷移領域における連続性の確認は、これまでは記録員によるデータ採取に頼っていた。しかし、今回導入した保守データ管理装置により、遷移前後のデータが自動採取されるので、人手に頼ることなく、容易に遷移の確認が可能となった(図4参照)。

### (3) プラトー、波高弁別測定の自動化

これまで専用装置の接続、および記録員によるデータ採取によって確認していたプラトーや波高弁別測定を自動化し、測定後に保守データ管理装置へ自動転送する



注2: 略語説明 CPS(Count per Second), MSV(Mean Square Voltage)

図4 遷移領域における連続性の確認(代表チャンネル)別  
遷移領域において、CPS中性子束、MSV中性子束、およびSRNM中性子束を自動採取することができるので、遷移の確認が容易となった。

ことにより、検出器データの迅速な健全性の確認を可能とした。

## 5 おわりに

ここでは、北陸電力株式会社志賀原子力発電所2号機に納めた「新型デジタル核計装系システム」について述べた。

日立製作所は、今後も、この実績を既設のBWR更新にも展開し、プラントごとに最適なソリューションを提案しながら、顧客のニーズに応えることができるデジタル核計装系システムを提供していく考えである。

終わりに、システムを開発するにあたってご指導いただいた北陸電力株式会社志賀原子力発電所建設所をはじめとする関係各位に、深く感謝の意を表する次第である。

### 参考文献

- 1) デジタル出力領域中性子モニタ装置の完成, 日立評論, 82, 1, 74 (2000.1)

### 執筆者紹介



平山 俊幸

1979年日立製作所入社, 情報・通信グループ 情報制御システム事業部 原子力制御システム設計部 所属  
現在, 核計装系システムの設計に従事  
E-mail: toshiyuki.hirayama.hp@hitachi.com



野崎 健

1992年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所 原子力制御計画部 所属  
現在, 原子炉計装・制御の計画設計に従事  
E-mail: takeshi.nozaki.ew@hitachi.com



坂田 智貴

1996年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所 原子力制御計画部 所属  
現在, 原子炉プラントの電気工事設計に従事  
E-mail: tomoki.sakata.rx@hitachi.com



伏見 篤

1993年日立製作所入社, 電力グループ 電力・電機開発研究所 所属  
現在, 原子炉計装制御システムの研究開発に従事  
E-mail: atsushi.fushimi.re@hitachi.com



伊藤 孝広

2000年日立製作所入社, 情報・通信グループ 情報制御システム事業部 原子力制御システム設計部 所属  
現在, 核計装系システムの設計に従事  
E-mail: takahiro.ito.bu@hitachi.com



石井 一彦

1979年日立製作所入社, 情報・通信グループ 情報制御システム事業部 原子力制御システム設計部 所属  
現在, 原子炉の計装・制御取りまとめ、および海外ビジネスに従事  
日本原子力学会会員  
E-mail: kazuhiko.ishii.hu@hitachi.com