

デジタル信号処理を適用した NIS／ICIS後継機種のパフォーマンス評価

Performance Evaluation of Newly Developed NIS/ICIS Utilizing
Digital Signal Processing

田中隆己*
Ryuki Tanaka
小西 遼*
Ryo Konishi
東 哲史†
Tetsushi Azuma

笹野 理†
Makoto Sasano
卞 哲浩§
Cheol Ho Pyeon

*三菱電機㈱ 電力システム製作所
†同社 先端技術総合研究所
‡同研究所(博士(理学))
§京都大学

要 旨

カーボンニュートラル社会の実現に向けて原子力発電が注目される中、三菱電機では今後の原子力事業の持続的な発展を目指して、新たな取組みとしてデジタル信号処理技術を積極的に導入した加圧水型原子炉(Pressurized Water Reactor：PWR)向け核計装設備の後継機種を開発している。

炉外核計装設備(Neutron Instrumentation System：NIS)では、中性子検出器からの信号に対して特有の処理方法を適用するため、アナログ回路での信号処理が主流である中、世界的にも例の少ないデジタル化を実現した。

炉内核計装設備(InCore Instrumentation System：ICIS)では、国内既設PWRで適用実績のない自己出力型中性子検出器(Self Powered Neutron Detector：SPND)に対応した信号処理部を開発し、所定の性能が得られることを確認した。

1. ま え が き

近年、脱炭素電源としての需要増加によって、原子力発電の中でも小型炉を代表とする新型炉の新設に対する世界的な期待が高まっている。三菱電機では米国Holtec International社が進める小型炉“SMR-300”の開発に参画し、原子炉の制御や運転操作の自動化を担う計装制御(Instrumentation and Control：I&C)システムの設備設計を担当している⁽¹⁾。小型炉市場では、従来の大型炉との差別化要素として建設時の経済的メリットを創出することが重要である。そのため、初期コストと保守コストの低減を目指して、デジタル技術を積極的に導入したI&Cシステムの開発を推進している。

I&Cシステムの中でも、炉心の状態監視機能を持つNIS及びICISは主要な計装設備の一つである(図1)。NISは、原子炉の外周に設置した中性子検出器を用いて炉外に漏洩(ろうえい)する中性子を計測することで、原子炉の保護・監視・制御に寄与する。ICISは炉心の内部に設置した中性子検出器を用いて炉内の中性子を計測することで、炉心の詳細な状態の監視を可能にする。

海外の小型炉では、三菱電機が設備を供給してきた国内既設PWRと異なる中性子検出器や検出方式を適用する可能性がある。それに加えて、国内既設PWRや新型炉を含めて建設・保守コスト低減のニーズがあり、これらに対応するため、デジタル技術を活用したNIS／ICIS後継機種の開発を進めている⁽²⁾。

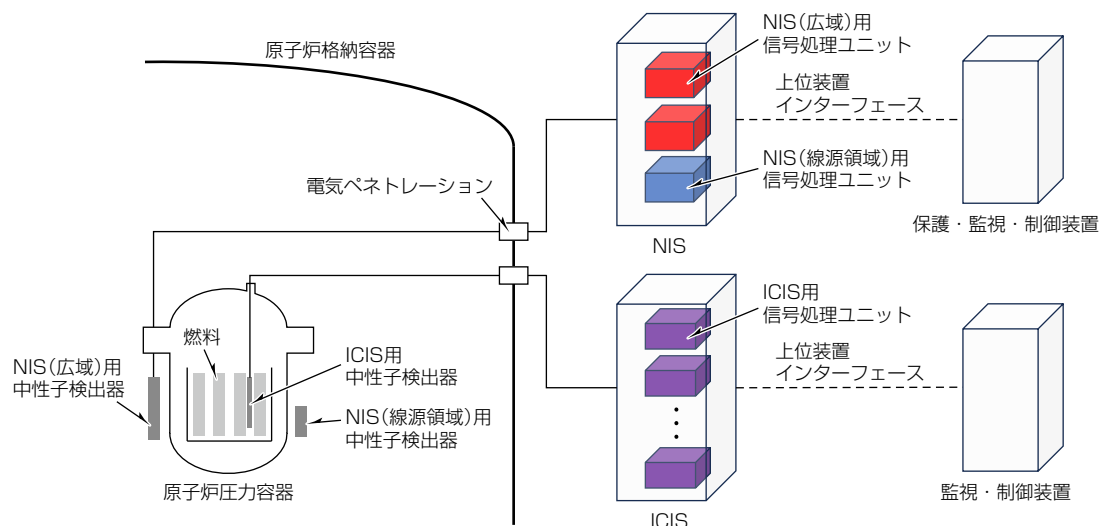


図1 - NIS及びICISのシステム構成

2. 核計装での信号処理とデジタル化

原子炉の出力や状態を監視する核計装では、原子炉内又は原子炉外に設置した中性子検出器に入射する中性子量を測定するため、中性子検出器から出力される信号に対する信号処理が必要になる。

2.1 信号処理手法のデジタル化と課題

核計装向けに開発した信号処理手法と課題の概念図を図2及び図3にそれぞれ示す。

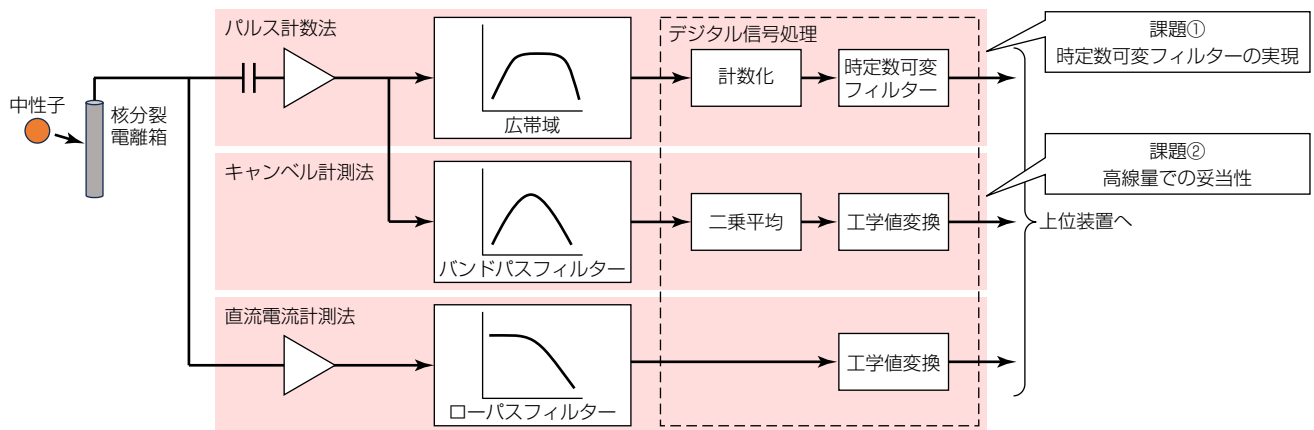


図2-NISの信号処理手法と課題の概念図

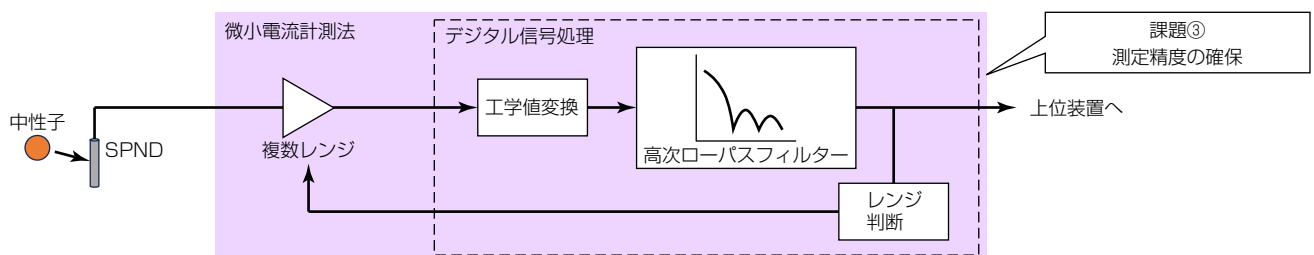


図3-ICISの信号処理手法と課題の概念図

NIS向けの中性子検出器にはBF3比例計数管、核分裂電離箱、非補償型電離箱などがある。中性子量や検出器の特性に応じて、パルス計数法、キャンベル計測法、直流電流計測法の三つの異なる計測手法が適用される。これらのうち、NIS後継機種向けに核分裂電離箱に対応したパルス計数法及びキャンベル計測法のデジタル信号処理技術を新たに開発した。両者の計測手法に適したデジタル信号処理技術の実現に当たっては、それぞれ次の課題がある。

課題①(パルス計数法) : 計数率にかかわらず要求精度を満たすデジタルフィルタ(時定数可変フィルタ)の実現

課題②(キャンベル計測法) : 中性子検出器による出力信号、かつ高線量での妥当性確認

ICIS向けの中性子検出器としては、安全性向上のために原子炉上部からSPNDを挿入する固定式ICIS方式が近年新設PWRでは主流になっている。SPNDの出力信号の範囲は1 nA～1 μA程度と小さくかつ広いダイナミックレンジで精度の確保が必要であることが特徴である。このことから、SPNDに対応するICISでは次の課題がある。

課題③(微小電流計測法) : 微小電流、かつ要求されるダイナミックレンジに応じた測定精度の確保

これらの課題とその対応方法について、2.2節、2.3節及び2.4節で詳しく述べる。

2.2 課題①(パルス計数法)へのアプローチ：アナログ回路のモデル化と漸化式表現

パルス計数法では、中性子が検出器に入射した際に発生するパルス信号の数を求めることで、炉出力に比例する計数率が得られる。しかし、信号が確率的に発生するため、信号の発生頻度が低い場合、短時間の測定では計数率の変動が大き

くなり、原子炉の保護・監視には適さない。そこで、NISでの典型的なパルス計数法では計数率の大小にかかわらず標準偏差が要求精度を満たすように、時定数を変化させて処理している。三菱電機では、以前からトランジスタの指数特性を利用した専用のアナログ回路(ログアンプ)によってこの処理を実現しており、低計数率から高計数率に変化した際の応答が早いという特長も持っている。

パルス計数法をデジタル化する場合、先に述べたログアンプのような特性をデジタル信号処理で再現することが課題であった。そこで、理想トランジスタを使ったログアンプのアナログ回路をモデル化し、入力と出力の関係を微小ステップに対する漸化式で表現することでデジタル化を実現した(図4)⁽³⁾。

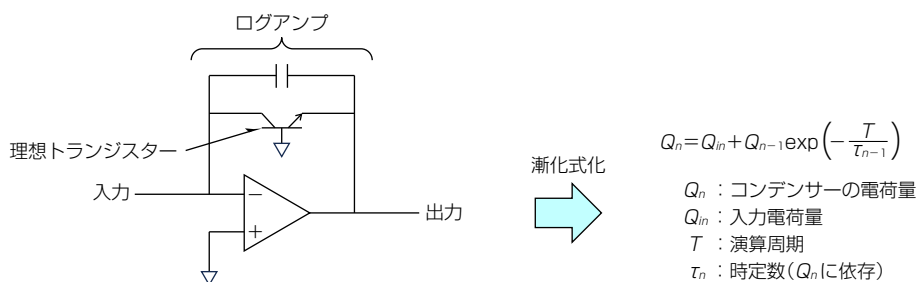


図4-ログアンプのアナログ回路のモデル化

2.3 課題②(キャンベル計測法)へのアプローチ：システム検証まで可能なモデルベースデザイン

NIS及びICISの開発では、高い中性子照射場での測定が容易に実施できないことから、実信号を用いた評価が難しい。また、中性子検出器が出力する信号も複雑なため、特にNISのデジタル化設計の妥当性は従来の手法では通常の試験環境や模擬信号による静的な確認しかできず、信号処理手法の開発検証のハードルになっていた。

そこで、中性子検出器やアナログ回路、デジタル信号処理、上位の制御・監視装置までをデジタル空間上(MATLAB/Simulink^(注1))で再現するモデルベースデザインを適用した(図5)。これによって、デジタル信号処理手法の実装設計や開発プロセスの効率化だけでなく、システムレベルでの妥当性評価も可能になった。実機段階まで確認できなかったダイナミックかつ高線量を模擬した信号の確認まで設計段階で実施し、これまで課題であったNISのキャンベル計測法を含む信号処理ロジックの妥当性を確認した。

(注1) MATLAB, Simulinkは、The MathWorks, Inc.の登録商標である。

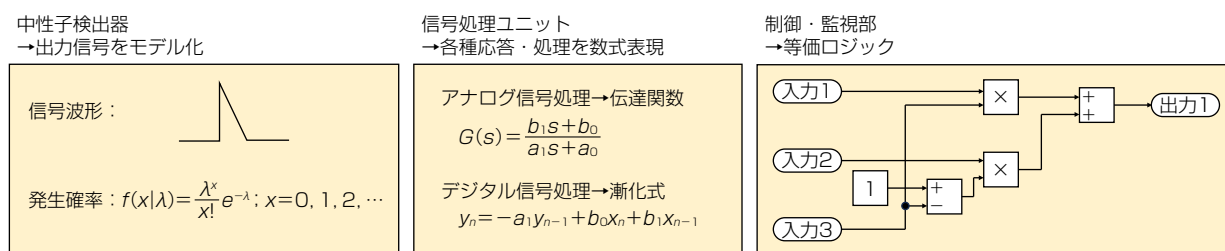


図5-モデルベースデザインの適用

2.4 課題③(微小電流計測法)へのアプローチ：自動レンジ切替え手法の適用

微小電流を測定対象としながら、要求されるダイナミックレンジに応じた測定精度を確保するため、初段の増幅回路の増幅率を適切に切り替えながら連続的に計測する自動レンジ切替え手法を開発した。

一般的に高精度を確保する微小電流計測用の回路では、初段の増幅回路の増幅率を切り替えると、出力電圧が静定するまでに計測上無視できないほど長い時間を要する。開発した手法では、アナログ回路の工夫によってこの静定時間を大幅に短縮し、デジタル信号処理によって切替え直後の短時間のデータに対してフィルターすることで連続的な計測を実現した⁽⁴⁾。

3. デジタル化による核計装装置の小型化の実現

2. 3節に述べたデジタル信号処理ロジックを適用したNIS用及びICIS用の信号処理ユニットをそれぞれ試作した(図6, 図7)。信号処理ロジックを一つの演算素子(Field Programmable Gate Array : FPGA)に実装することで、信号処理回路に必要な基板面積が大幅に縮小された。これによって、核計装装置の主要な要素である信号処理回路が1台のユニットへ集約可能になり、核計装装置の小型化を実現した。



図6-NIS用信号処理ユニット試作機



図7-ICIS用信号処理ユニット試作機

4. 性能評価と妥当性確認

模擬信号を試作機に入力し、信号処理ユニットの性能評価を実施した。その結果、4. 2節に述べるとおり、実測値と設計値がよく一致する結果が得られた。これによって、デジタル信号処理ロジックの妥当性及び製品としての実現性が確認できた。

4. 1 NIS用信号処理ユニットの評価結果

パルス計数法とキャンベル計測法の入出力特性を図8に、パルス計数法での時定数の評価結果を図9に示す。入力信号の発生確率は計数率が1 cps(count per second), 10cps, ..., 10⁶cpsになるポアソン分布とした。その結果、入出力特性は期待する範囲で線形性が得られて、応答時間は設計どおり計数率の逆数に比例する応答が確認できた。

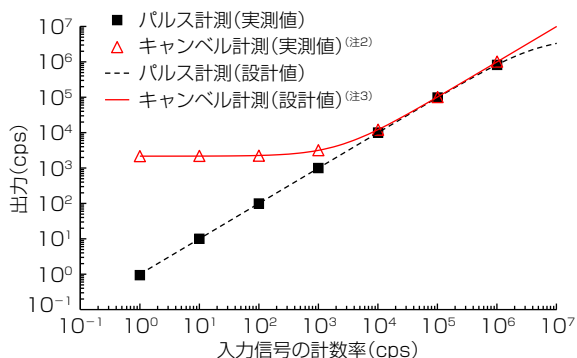


図8-入出力特性の評価結果

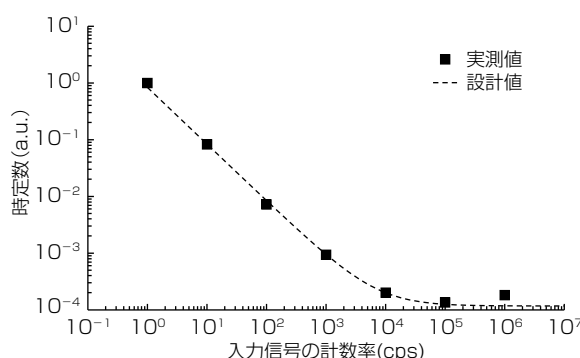


図9-パルス計数法の応答時間の評価結果

(注2) 入力信号が1×10⁶cpsの場合を基準に補正
(注3) オフセットとして実測値(1 cps入力時)を加算

4.2 ICIS用信号処理ユニットの評価結果

デジタル信号処理で実装した自動レンジ切替え機能の評価のため、模擬電流を入力し、レンジ切替えによってアナログ回路の増幅率が高いレンジから低いレンジに切り替わる際のユニット内部の演算結果を記録した(図10)。レンジ切替え前後の出力はシームレスになっており、自動レンジ切替え機能の有効性を確認した。

また、高次ローパスフィルターのノイズ除去性能の評価として、5～25Hzの交流信号に対するフィルター効果を表す減衰量を評価した(図11)。測定した周波数で減衰量はアナログ回路のローパスフィルターの特性を含めた設計値とよく一致しており、ノイズ除去性能の高いフィルターが設計想定どおりに機能していることを確認した。

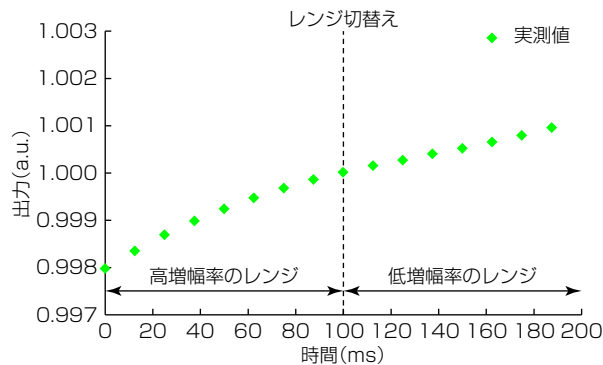


図10-自動レンジ切替え機能の評価結果

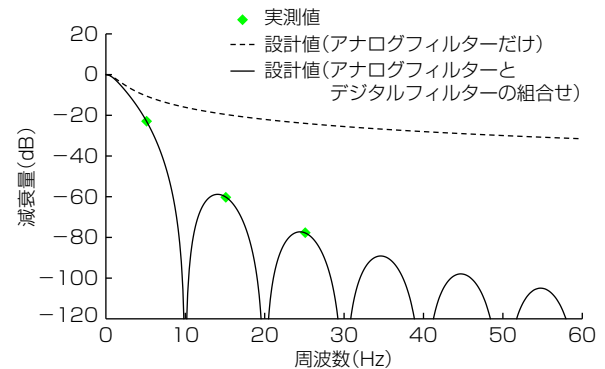


図11-高次ローパスフィルターの評価結果

5. む す び

核計装設備の後継機種に向けた性能評価として、開発した信号処理技術とその評価結果を述べた。新たに開発したデジタル信号処理技術の適用によって、新型炉に適した装置を実現可能になる。基本性能について妥当性が確認できたため、今後は環境試験や米国認証取得対応を進めていき、製品化に向けた開発を進めていく。

また、ICISに使用する中性子検出器の特性評価を目的として、京都大学との共同研究の下、京都大学研究用原子炉を利用した中性子照射試験⁽⁵⁾を実施しており、本稿で述べた信号処理ユニットを使用して評価を行っている。同様に、NISでの計測手法の評価を目的として、同原子炉を利用した実験も予定している。これらの結果は別途論文で述べる予定である。

本稿で述べたICISに関する成果の一部は、経済産業省“原子力産業基盤強化事業”の結果得られたものである。

参 考 文 献

- (1) 濱谷陽一郎, ほか: 小型モジュール炉“SMR-160”向け計装制御システム, 三菱電機技報, **95**, No.11, 686～689 (2021)
- (2) 小型炉への適用に向けた現場型デジタル炉外核計装システム, 三菱電機技報, **99**, No.1, 1-1-03 (2025)
- (3) 国際出願番号: PCT/JP2024/040975 (出願日: 2024年11月19日)
- (4) 国際公開番号: WO2024/150353 (公開日: 2024年7月18日)
- (5) Pyeon, C. H., et al.: Development of Compensation Method for Faster Measurement with SPND, KURNS Prog. Reports 2022, CO12-8, 242 (2023)
<https://www.rr.kyoto-u.ac.jp/PUB/report/PR/ProgRep2022/CO12.pdf>