

FPGA型デジタル計測制御装置の米国原子力発電所適用に向けて

Toshiba's Efforts toward Applying FPGA-Based Digital Instrumentation and Control Equipment to U.S. Nuclear Power Plants

後藤 泰志 林 俊文 穂坂 泰臣

■ GOTO Yasushi ■ HAYASHI Toshifumi ■ HOSAKA Yasuomi

東芝は、FPGA (Field Programmable Gate Array) を使用した原子力発電所向けデジタル計測制御装置を開発した。従来のCPU型デジタル計測制御装置は、CPUの製品サイクルが短いことから装置の長期供給が困難であり、また、ソフトウェアの機能検証に多くの時間と労力を費やしてきたが、FPGAは、必要な機能を実行させるための論理回路をプログラム可能なLSIであり、ソフトウェアを使用しない。更に、FPGA素子が変わっても、同じ設計の論理回路を使用できるため、装置の長期供給が可能である。また、当社はFPGA型計測制御装置に対して、内部の信号処理を透明化しわかりやすくする設計と、その検証方法を開発した。

FPGA型の監視装置は国内の原子力発電所に適用を開始しており、米国で建設を計画中の改良型沸騰水型原子炉 (ABWR) プラントへも適用する計画である。米国の原子力発電所では、安全上重要な計測制御装置として使用するために、米国原子力規制委員会 (NRC) の認可が必要であり、現在、認可取得に向けた活動を行っている。

Two major problems are encountered with conventional central processing unit (CPU)-based digital instrumentation and control (I&C) equipment in nuclear power plants: the difficulty of securing long-term operation due to the short product life cycle of CPUs, and the long period required for the functional verification of software.

To overcome these problems, Toshiba has developed digital I&C equipment for nuclear power plants using field programmable gate arrays (FPGAs). An FPGA is a large-scale integration (LSI) containing logic circuits that can be programmed to perform necessary functions without the use of software. FPGA-based digital I&C equipment makes long-term operation possible by securing the logic circuit design even when FPGA devices are changed. We have also developed comprehensive design and verification methods that make internal signal processing more transparent, to improve verifiability.

This FPGA-based monitoring equipment has already been installed in Japanese nuclear power plants, and we are aiming to apply it to advanced boiling water reactor (ABWR) plants being planned in the United States. We are now working toward obtaining Nuclear Regulatory Commission (NRC) approval for the use of FPGA-based systems as safety-related equipment in U.S. nuclear power plants.

1 まえがき

わが国の原子力発電所では、1980年代からアナログ式の計測制御装置に替わってCPUを使用したデジタル式が採用され始め、現在主流となっている。デジタル式は、アナログ式に比べ素子の経年変化が少なく、精度を維持するための頻繁な校正の必要がない。また、アナログ式では実現の難しい自己診断機能を備えており、計測制御装置の性能向上に寄与してきた。

しかし、CPUやその周辺部品は進歩が早く製品サイクルが短い。原子力発電所の安全上重要な計測制御装置では、部品を変更する場合であっても、システムの信頼性が損なわれないよう設計評価を行い、安全上の問題がないことを確認する必要がある。このように、一般社会では歓迎される技術の進歩は、20年程度の製品寿命が望まれる原子力発電所向けの計測制御装置を維持するうえで大きな負担となってきた。

また、原子力発電所の安全上重要な計測制御装置では、万一の故障に備え、多重化した構成が採用されているが、共通して用いられるソフトウェアに不具合があると、多重故障の原

因となりうる。このため、安全上重要な計測制御装置のソフトウェアには、安全保護機能が正しく確実に実現されていることを保証する活動が求められており、ソフトウェアが正しく働くことを示すための検証活動に多くの時間と労力を費やしてきた。

このような状況を踏まえ、東芝はFPGAを採用したデジタル式の計測制御装置を世界に先駆けて開発した^{(1), (2)}。FPGAとは、プログラム可能なLSIであり、内部には、論理回路を構成可能な論理要素が数万個以上並んでいる。計測制御装置の回路設計者は、実現したい機能に合わせ、FPGA素子上の論理要素を接続し、論理回路を構築することができる。FPGAは用途別に多品種生産する必要がないため、素子の長期供給が期待できる。また、あるFPGAが製造中止になっても、代替のFPGAに論理回路を書き込むことができる。このため、FPGAを計測制御装置の主要部品として使用することにより、CPU型計測制御装置と比較して、長期間の供給ができる。

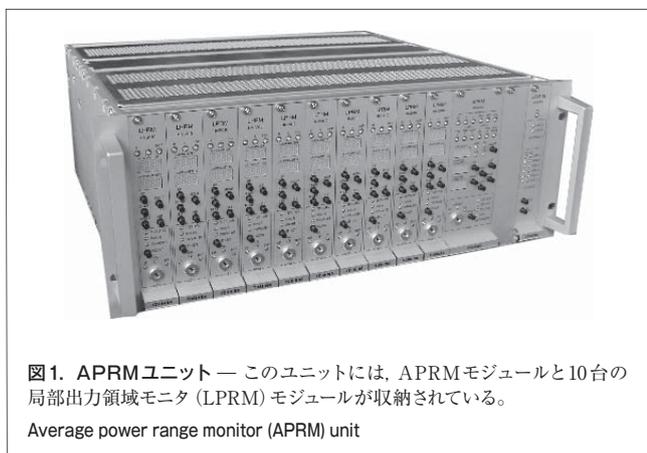
また、FPGA型計測制御装置の設計と検証のために、当社はFPGAの特質を生かして独自に開発した手法を取り入れ、検証の透明性を向上させた。このように、FPGAを計測制御

装置の主要機能に適用することによって、従来からのデジタル式の利点を生かしながら、製品の長期安定供給及び検証の透明性向上を実現した。

当社は、FPGAを使用した中性子計測装置及び放射線計測装置を国内の原子力発電所へ適用している。一例として、原子炉の平均中性子束を測定する平均出力領域モニタ (APRM) ユニットの図1に示す。

更に当社は、米国テキサス州に建設予定のABWRプラントであるサウステキサスプロジェクト3号機及び4号機に、FPGA型デジタル計測制御装置を適用する計画である。米国の原子力発電所では、安全上重要な計測制御装置として使用するためにはNRCの認可が必要であり、現在、認可取得に向けた活動を行っている。

ここでは、FPGAを使用した計測制御装置の技術概要とNRCの認可取得に向けた活動について述べる。

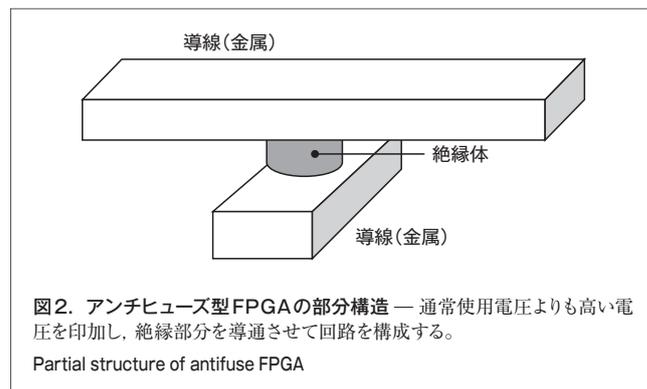


2 FPGA型計測制御装置の概要

2.1 FPGAの概要と実装

FPGAは、内部に論理回路を構成可能な論理要素を基盤の目のように配置した半導体素子であり、論理要素の数は数万個に上る。また、論理要素間を接続し論理回路を構成するために、基盤の目に沿って未接続の導線が配置されている。これらの導線を論理要素と接続していくことで、目的に応じた論理回路を構成できる。

FPGAには、未接続の導線を接続する方式によっていくつかのタイプがあるが、今回、計測制御装置向けに当社が採用したFPGAは、適切な高電圧を導線間に加え、絶縁破壊によって接続するアンチヒューズ型と呼ばれるFPGAである。アンチヒューズ型のFPGAは、素子内に縦横に配置され、導線に挟まれる形でアモルファスシリコンの絶縁体が置かれている(図2)。初期状態では導線間に電流は流れないが、高電圧を印加するとアモルファスシリコンが溶け、結晶化して導体とな



り導線を接続する。

アンチヒューズ型のFPGAは、一度論理回路を書き込めば、回路が変わるおそれがない点が特徴であり、航空宇宙分野で実績があるとともに、高信頼性が要求される原子力発電所の安全上重要な設備向けにも適している。

FPGAの論理回路の設計は、ハードウェア記述言語と呼ばれる一種のプログラミング言語を用いて行われる。当社はハードウェア記述言語としてVHDL (Very High Speed IC Hardware Description Language) を採用した。VHDLは論理回路のロジックを記述するための言語であり、ロジックをFPGAに実装するためには、3段階のステップが必要である(図3)。

最初のステップは論理合成と呼ばれ、VHDLによって記述されたロジックを、電子回路で使われるNANDやNORを使った表現であるネットリストに変換する。論理合成は論理合成ツールと呼ばれるソフトウェアによって実行される。

2番目のステップはネットリストのNANDやNORを、FPGA内の論理要素に対応させて配置し論理回路の配線を決める処理であり、配置配線と呼ばれる。配置配線ツールがこの処理を行い、前述のアンチヒューズによって導線を接続する箇所を記したヒューズマップと呼ばれるデータを生成する。

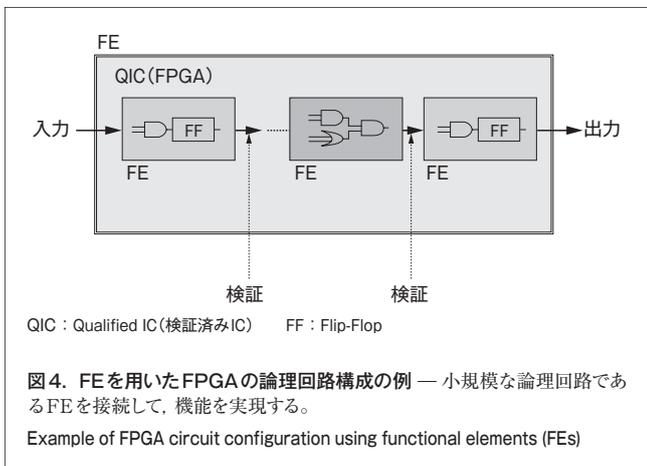
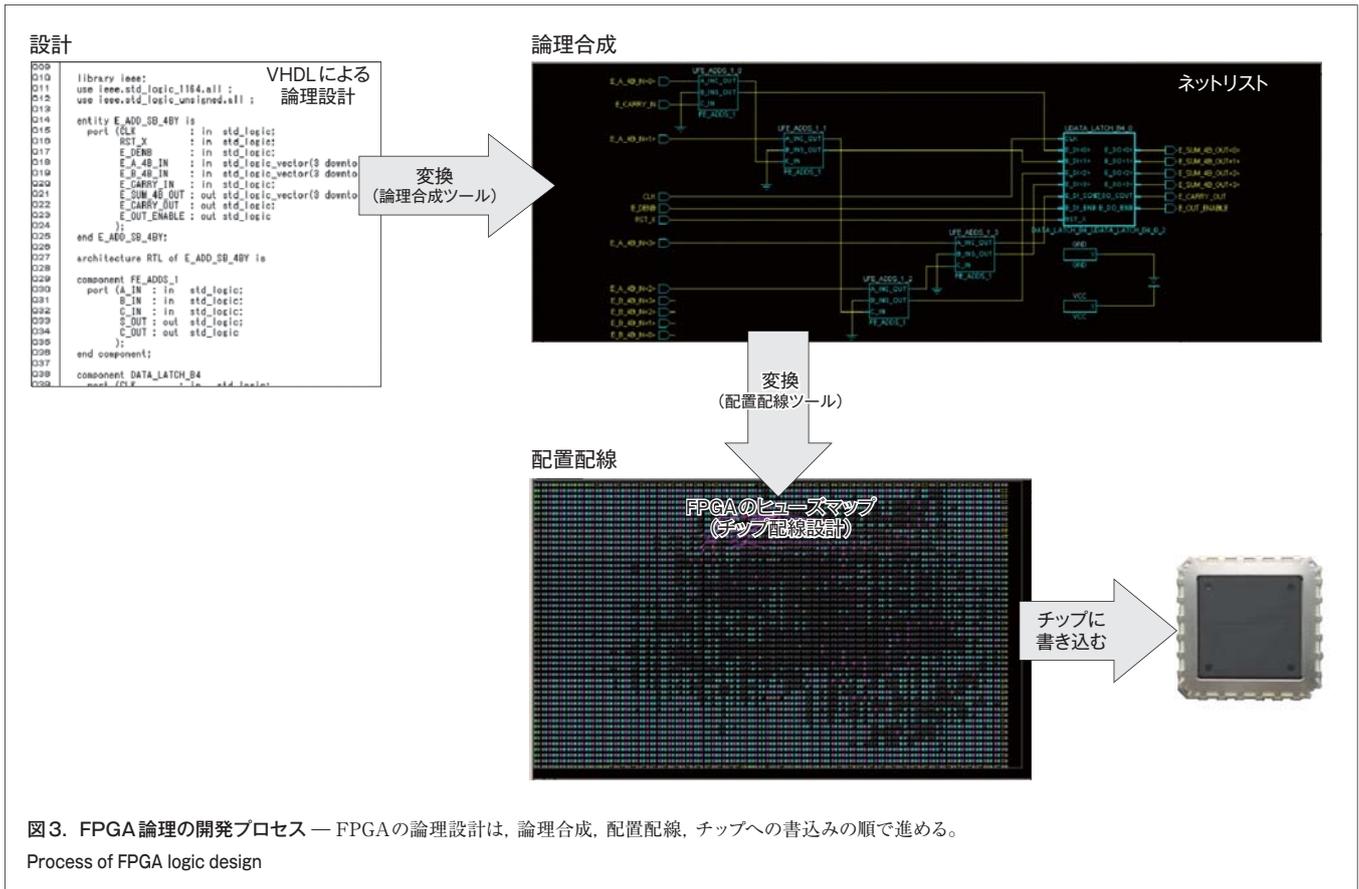
最後のステップは、FPGAのプログラミングと呼ばれ、プログラミングツールがヒューズマップに基づいて、FPGA内の指定された導線間に電圧を掛けて接続し、論理回路を構成する。

これらのステップで論理回路がFPGAに書き込まれる。

2.2 検証方法

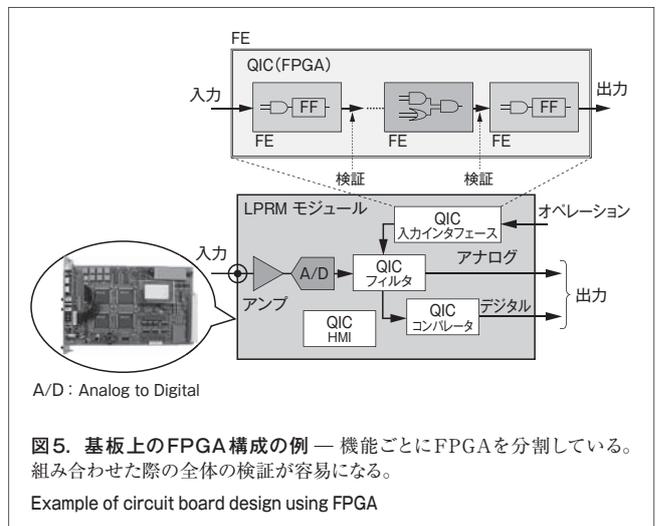
計測制御装置で使用されるFPGAの入力信号は数十ビット以上あるため、各ビットのON/OFFを考えると、その組合せは膨大な数(例えば、30ビットならば、 $2^{30} \approx 10$ 億パターン)になり、すべての組合せを試験によって検証することは現実的ではない。そこで、FE (Functional Element) と呼ぶ、検証可能な小規模の論理回路を組み合わせることで回路を構成する方式を開発した。FEは規模を小さくすることで、入力信号のすべての組合せに対する動作を試験によって検証する。

FEを用いてFPGAを構成する例を図4に示す。FPGAの回路はこの検証されたFEだけを組み合わせることで実現す



る。次に、FE間の接続をすべて動作させる試験を実施し、FPGA回路全体が正しく機能することを検証する。

FPGA型計測制御装置は、このようなFPGAを用いて構成される。例として、原子炉の中性子束を測定する局部出力領域モニタ (LPRM)モジュールの回路構成を図5に示す。LPRMモジュールの機能は、フィルタ用FPGA、信号比較用FPGA、ヒューマンマシンインタフェース (HMI) 用FPGA、HMI用FPGAとのインタフェースFPGAに分割されて実装されている。



3 米国原子力発電所への適用

米国の原子力発電所への適用に関しては、米国の規制要求を満足している必要がある。FPGA型の計測制御装置を安全上重要な装置として原子力発電所に適用するには、規制要求として装置の検証及び妥当性の確認や、万一の原子力発電所の事故時にも確実に期待される機能を発揮することの証明が求められる。

3.1 検証及び妥当性の確認

FPGA型のデジタル計測制御装置では、信号処理部分がハードウェア論理回路で構成されるため、CPU型デジタル計測制御装置のようにアプリケーションソフトウェアは使用しない。しかし、FPGAのロジックの開発過程はハードウェア記述言語を使用することから、CPU型計測制御装置のアプリケーションソフトウェアの開発過程と同様であるとみなされる。

米国規制では、アプリケーションソフトウェアの開発に対して、最終製品だけを試験によって確認するだけでなく、開発過程を通じて設計を確認する検証と妥当性確認(V&V: Verification and Validation)が求められている。このため、この部分についてV&Vの活動を実施することとした。

当社は、米国規制に対応したV&V活動方法を構築済みであり、原子炉の中性子束を測定する装置である出力領域モニタ(PRM)に適用し、実施した実績を持つ。サウステキサスプロジェクト3号機及び4号機に適用するFPGA型計測制御装置も、この方法に基づいてV&Vを実施する計画である。原子炉の燃料装荷前に、納入システムがプラント認可の内容と規制に適合していることをNRCが最終確認する許認可プロセスがあり、この中で審査を受ける。

3.2 耐環境性能の検証

原子力発電所の安全上重要なシステムでは、温度や湿度などの周囲環境に対する環境試験、地震に対する耐性を確認する耐震試験、電磁的な特性を確認するEMC (Electromagnetic Compatibility) 試験などによる検証が必要である。当社は、PRMについて米国の規制要求に適合する条件で試験を実施した。

PRMの試験の例として、EMC試験の実施状況を図6に示す。環境試験、耐震試験、EMC試験などのすべての試験において、米国の規制で要求される性能を満足することが確認できた。

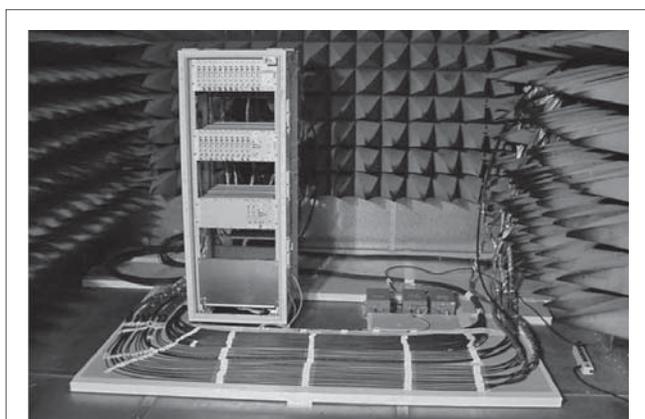


図6. PRMのEMC試験 — 専用の試験室内にPRMを設置してEMC試験を実施した。

Electromagnetic compatibility test of power range monitor

米国の原子力発電所に適用する、FPGA型計測制御装置について同様な設計を行うことにより、要求される性能の確保と米国の規制要求への適合ができる。

今後、ABWR用の安全系FPGA型計測制御装置について供試体を製作し、検証試験を実施していく。

4 あとがき

FPGAを用いた新型のデジタル計測制御装置を開発し、国内の原子力発電所への適用を開始している。また、米国で建設されるABWRにも適用する計画である。採用されるシステムには、PRM、起動領域モニタ(SRNM)、出力領域振動モニタ(OPRM)やRTIS(Reactor Trip & Isolation System)といった安全上重要なシステムが含まれており、米国の電力会社にもその優秀性が認められた結果である。

FPGAを使用したデジタル計測制御装置は、CPUを用いた装置と比較して、製品の長期供給性に優れ、検証性が向上するなどのメリットがある。建設プラントだけでなく、運転プラントの既存設備からの更新もでき、今後当社は、原子力発電所向けの標準技術として、国内及び海外の原子力発電所の計測制御設備へ、広く適用を推進していく計画である。

今後も、ユーザーのニーズに対応した、高品質で高信頼性の計測制御装置を安定的に供給していく。

文献

- (1) Miyazaki, T., et al. "Qualification of FPGA-Based Safety-Related PRM System". 6th American Nuclear Society International Topical Meeting on NPIC & HMIT 2009. Knoxville Convention Center, Knoxville, TN, 2009-04. Nuclear Plant Instrumentation. Knoxville, USA. American Nuclear Society, 2009. (CD-ROM).
- (2) 小田直敬, ほか. FPGAを採用した検証性の高い放射線計測装置の開発. 電気評論. 93. 3. 2008, p.13-14.



後藤 泰志 GOTO Yasushi

電力システム社 原子力事業部 礫子エンジニアリングセンターグループ長。原子力プラント向け監視システムの設計・開発に従事。日本原子力学会会員。

Nuclear Energy Systems & Services Div.



林 俊文 HAYASHI Toshifumi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 計測・検査技術開発部主査。原子力プラント向け監視・制御システムの開発に従事。日本原子力学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



穂坂 泰臣 HOSAKA Yasuomi

電力システム社 府中事業所 原子力計装制御システム部主務。原子力プラント向け監視システムの設計・開発に従事。

Fuchu Complex