



研究技術ノート

ITER 準拠制御システムによる ジャイロトロンローカル制御システムの開発

Development of ITER CODAC Compatible Gyrotron Local Control System and its Operation

小田靖久¹⁾, 大島克己¹⁾, 中本崇志²⁾, 橋本慰登³⁾, 山本剛史¹⁾, 林 一生⁴⁾,
池田幸治¹⁾, 池田亮介¹⁾, 梶原 健¹⁾, 高橋幸司¹⁾, 坂本慶司¹⁾

ODA Yasuhisa¹⁾, OHSHIMA Katsumi¹⁾, NAKAMOTO Takashi²⁾, HASHIMOTO Yasunori³⁾,
YAMAMOTO Tsuyoshi¹⁾, HAYASHI Kazuo⁴⁾, IKEDA Yukiharu¹⁾, IKEDA Ryosuke¹⁾, KAJIWARA Ken¹⁾,
TAKAHASHI Koji¹⁾ and SAKAMOTO Keishi¹⁾

¹⁾日本原子力研究開発機構, ²⁾Cosylab, ³⁾日本エクス・クロン, ⁴⁾日本アドバンステクノロジー

(論文受付: 2014年1月24日 / 論文受理: 2014年6月12日)

日本原子力研究開発機構(原子力機構)では, ITERのECシステムの開発に向け, ITERのPlant Control Design Handbookに準拠したジャイロトロン運転システムのローカル制御システムのプロトタイプ開発を行った。本システムは, ITER CODAC Core Systemを使用し開発し, ジャイロトロン運転システムの状態遷移管理と監視をはじめ, ジャイロトロンの発振のための電源システムのタイミング制御と運転波形収集の機能を実装した。本システムを用いて, ITERのジャイロトロン運転システムに準拠した電源構成にて, ITER用170 GHzジャイロトロンの大電力発振シーケンスをITER準拠機材で制御する実証試験を行い, 大電力RF発振を確認した。

Keywords:

ITER, EC H&CD, Gyrotron, CODAC Core System, EPICS

1. はじめに

ITERにおける電子サイクロトロン加熱電流駆動(EC H&CD)システムは, 170 GHz高周波(RF)を20 MW入射する計画となっている。このためのRF発振源として, 1 MW出力ジャイロトロンを24本使用し, トカマク真空容器の水平ポートならびに上側ポートに設置される入射装置(ランチャー)によってプラズマに入射する計画である[1]。日本は24本のうち8本のジャイロトロン[2, 3], ならびに水平ポートランチャー[4]の調達を担当する。EC H&CDシステムとしては, RF源とランチャーに加え, ジャイロトロンの高電圧電源, ならびにRF源よりランチャーまでRFを伝送する伝送系により構成され, 各々の機器が異なる極により調達されることになる。このように複数の極で独立に開発された機器を, ITERにおいてシステムとして統括して運転するための制御システムを設計することが重要な要素となる。ITERのEC H&CDシステムにおいては, 各々のRF源となるジャイロトロンやランチャーなどのサブシステムごとのローカル制御系をもたせ, それをEC H&CDシステム全体を統括する主制御装置により制御することをめざしている[5]。

ITERにおいてECH&CDシステムに限らず, 複数の極より調達された機器による統合を前提とした制御システムの

構築が重要な要素となる。そのために, ITERでは, ITER制御計測セクション(CODAC section)において, ITERにおける制御システムの検討が行われ, ITER制御システムの標準化に取り組んできた[6]。標準化の対象としては, 制御システムの基本ソフトウェア群, 通信システム, 標準ハードウェア, ならびに制御ソフトの開発環境などがあげられ, その内容は, ITERのPlant Control Design Handbook(PCDH)[7]という文章において制御機器の標準化を規定するとともに, ITER CODAC Core System[8]というオペレーティングシステムを含むソフトウェア環境の開発が行われている。ITERの各機器の制御システムは, PCDHに記載される制御機器, ソフトウェア, ならびに開発手法に準拠することが推奨されている。これにより, 異なる極で開発される制御機器同士の統括運転に向けた制御互換性の確保をめざしている。これまでに原子力機構においてはITERのバルススケジュール管理システムのプロトタイプ開発においてPCDHならびにITER CODAC Core Systemが使用された[9, 10]ほか, FTUのトロイダル電源制御においてPCDHで規定されSlow Controllerが使用される[11]など, ITERの複数の国内機関においてITER CODACを視野に入れた研究開発が進められている。

一方で, これまでの原子力機構などにおけるITER用

ジャイロトロンの開発では、ITER のシステムとは異なるシステムでの運用がなされてきた。したがって ITER 準拠の制御システムをはじめとした機器によって、ITER 用ジャイロトロンを実際に運用できるかについて、あらためての実証が必要である。そこで、原子力機構のジャイロトロン試験装置を、ITER の ECH&CD システムの構成に改造を加えたうえで、PCDH に準拠したジャイロトロンローカル制御装置のプロトタイプを開発した。本報告では、ITER の ECH&CD システムを模擬した試験設備の開発とともに、実際の ITER 用ジャイロトロンを用いた RF 発振制御の実証試験について報告を行う。なお、本記事で使用される略語のうち、ITER CODAC ならびに EPICS に特有な用語について、略語と元になった用語、簡単な説明を文末の表にまとめて示す。

2. ITER CODAC 準拠制御システムの概要

ITER における個別機器の制御は、各機器の調達担当極において開発される制御装置によるが、ITER サイトにおいて統合する段階で、制御機器同士の統合を円滑に進めるため、ITER においては ITER Plant Control Design Handbook (PCDH) [7] という標準化文書を規定している。PCDH においては、各機器の計装制御システム (ITER においては Plant System Instrumentation and Control (I&C) と称する) と ITER 全体の制御システムとの間の制御アーキテクチャを規定し、制御システムの開発手続き、開発ツール、ならびに Plant System I&C において使用するべきハードウェアのカタログなどによって構成されている。PCDH では Plant System I&C で使用するコントローラとして、以下の 2 種が定義されている。

・ Slow Controller

装置の状態監視や比較的低速のデータ収集を目的とし、SIEMENS 社 S7 シリーズ PLC 機器を対象とする。PCDH においては、おおむね 100 Hz 未満の制御ならびに信号収集周期のデータを取り扱うことが想定されている [7, 12, 13]。

・ Fast Controller

比較的高速での制御や収集周期の早い波形データ収集を目的とし、PCI ファミリのフォームファクターを用いて構成される。PCDH においては、Slow Controller で扱うことができない高速制御を担う機材や、実験用データの大規模収集システムなど、幅広い機能を持つ制御システムを構築するために、PCI ファミリの派生製品である PXI をはじめとし、National Instruments 社の FPGA 機材である FlexRIO/CompactRIO 機器、あるいは ATCA/MTCA 機器などが採用されている [7, 14, 15]。

PCDH においては、Plant で採用すべきハードウェアを、Slow Controller ならびに Fast Controller の双方において、詳細に規定している。これは、各制御ハードウェアの ITER 運用期間の調達を円滑にするとともに、限られた制御機器について制御ドライバを ITER が責任をもって開発することにより、ITER CODAC team によるサポートを可能とするためである。

PCDH においては、ITER CODAC Core System (ITER

CCS) [8] というソフトウェアパッケージを標準開発ツールならびに制御システムのプラットフォームとして採用した。ITER CCS は、Red Hat Enterprise Linux (RHEL) を OS として採用している。また、主に大型加速器分野で開発された制御通信ソフトウェア群である Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) を採用しており、Channel Access が制御情報をネットワーク上でやり取りを行うための標準プロトコルとなる。EPICS は Argonne National Laboratory など世界各地の研究機関により共同で開発されている [16]。これを採用することにより、ヒューマンインターフェース (HMI) などは、EPICS 向けにさまざまな研究機関などから提供されたツールを利用することが可能となった。これらのツールのいくつかは、ITER CCS にパッケージ化されている。EPICS は、世界各地の大型加速器の制御システムで使用されていることに加え、核融合装置としては、米国の NSTX [17] や韓国の KSTAR [18] において使用実績がある。また、オープンソースソフトウェアとして開発されてきた経緯に加え、日本を含む世界各国にユーザーがいるため、たとえば日本においても EPICS ユーザーコミュニティ・メーリングリストのような形で日本語によるユーザー同士の情報共有が盛んであり、開発を行う上での大きなメリットとなっている。

EPICS は、サーバーとクライアントをもつネットワーク通信による機器の遠隔制御を実現しており、ネットワーク上の通信プロトコルは Channel Access (CA) と呼ばれている。Input Output Controller (IOC) は、制御システムの制御対象機器と CA 通信のネットワークを接続する EPICS の中核とも言えるべきソフトウェアであり、制御点に関する情報とそれらを用いた制御ロジックが定義された Database、ハードウェアとのやりとりを行う Device Support, State Notation Language (SNL) という言語で実装された制御シーケンス動作を実行するための Sequencer、および CA クライアントや他の IOC との通信を行う CA Server から構成される。プロセスデータ、警報およびトレンドグラフ等を表示する HMI やデータアーカイブシステムといった機能は CA クライアントとして動作し、IOC と通信し、I/O カードのデータ取得、ならびに I/O カードからの出力データを設定する。ITER においては、Slow Controller は Plant System Host (PSH) というホスト計算機上にて IOC を、Fast Controller はその上で IOC を動作させる形態をとっている。HMI としては、特に Control System Studio (CSS) [19] という EPICS ツールの使用を推奨している。CSS は、Eclipse と呼ばれる広く使われている Java 等の統合開発環境 (IDE) 上に構築された、制御用 HMI 開発および実行環境である。Eclipse のプラグインとして実装されたことで、近年主に利用されている IDE と統一された見た目と操作感 (ルックアンドフィール) を実現することに成功している。

3. ITER 準拠ジャイロトロン運転システム

日本が調達する ITER 用ジャイロトロンのための電源システムの構成を図 1 に示す。三極管型電子銃を有する日本

のITER用ジャイロトロン[2,3]は、各電極に対して独立した電源で給電する方式を採用している。そのため、カソード電極に対してビーム電流を供給する主電源（MHVPS）に加え、電子銃のアノード電極に給電するアノード電源（APS）、ならびにCPD運転時の逆バイアス電位を供給するボディー電源（BPS）という複数の高電圧電源を使用する。三極管型電子銃をもつジャイロトロンでは、アノードとカソードの電位を短絡させることにより、主電源の電源を印加したままビーム電流を遮断することが可能である。そこで、ITERの電源構成では、アノード・カソード間にダブルスイッチ型アノードスイッチを取り付けている。これによりNTMに同期させたジャイロトロン出力RFパワーの高速変調運転を、主回路のスイッチングを用いずに実現することができる。特に、アノードスイッチはビーム電流にくらべて小さな電流しか流れないため、早い変調周波数であっても電源機器への負荷が小さく、ITERで要求される5kHzという変調周波数を実現することが可能となる[20]。

原子力機構では、ジャイロトロン試験装置をITERにおける電源構成に変更し、ITERに近い環境でのジャイロトロン動作環境での試験を進めている。ITER用ジャイロトロンの制御システムにおいては、特に各々の電源の立ち上がり時間を考慮した統括制御シーケンスが必要である。

4. ジャイロトロンローカル制御システムの概要

ジャイロトロンローカル制御システムは、ジャイロトロン駆動の高電圧電源機器ならびに、超伝導コイルシステムを通じたジャイロトロン運転のパラメータ制御と運転波形の収集に加え、冷却システム、補機電源類の運転状態監視といった複数の機能が必要となる。これらの機能を実装するために、図2に示すようにSlow Controllerならびに、Fast Controllerの両者を使用したアーキテクチャを採用している。

本プロトタイプの開発にあたって、主要な部分においてPCDHに指定されるハードウェアとソフトウェアを選定するとともに、ITER CCSにおける標準的な開発手順に則っ

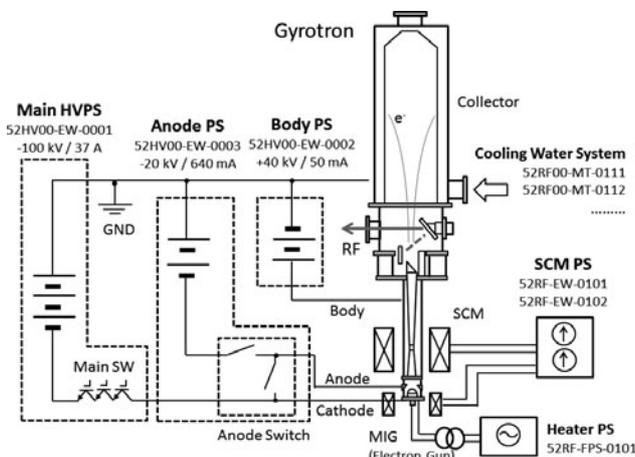


図1 ITER用ジャイロトロンの運転システムの概略と主要な補機類。制御対象機器はComponent Identifierが定義されている。

てFast Controller, Slow Controllerにおける制御システムのソフトウェアの作成を行った。これにより、本プロトタイプはITER CODACネットワークへの直接接続が可能なシステムとして開発を行った。

4.1 ITER CCSを用いた制御システムの開発手順

ITER CCSを用いて制御システムを構築するにあたり、ITERの全システムの制御情報を統括管理することをめざして構成されているSelf-Description Data (SDD) [21]を用いることが求められており、そのためにSDD Editorというツールを用いて制御対象機器の信号線ならびに制御システム上の変数をITER CCS上に登録しながらシステムの設計を行うことになる。SDD Editorは情報の登録を進めることにより、Slow ControllerならびにFast Controllerのための制御ソフトウェアを構築するためのコーディング環境を自動生成する機能を有しており、これを用いて開発作業を進めることが想定されている。

本プロトタイプの開発にあたり、まず制御対象機器から制御装置への信号ラインならびにシステム内の変数を定義し、これらをSDD Editorを用いてITER CCS上に登録した。登録にあたって、すべての信号と変数がITER CODAC全体で重複なく識別できるように、Signal and plant system I&C Variable Naming Convention [22]に基づいたSignal NameとVariable Nameの定義を行う必要がある。

Signal Nameは、プラント内の物理的な信号線に対応する名称であり、制御システム中ではより下位の名称定義となる。以下のようなコロンで区切られた形式である。

PPPPPP-TTT-NNNN:AAA[RRRR]-SSS
 コロンより前半は、Component Identifierであり、PPPPPPはITERにおけるプラント装置にITER全体で一意に決定

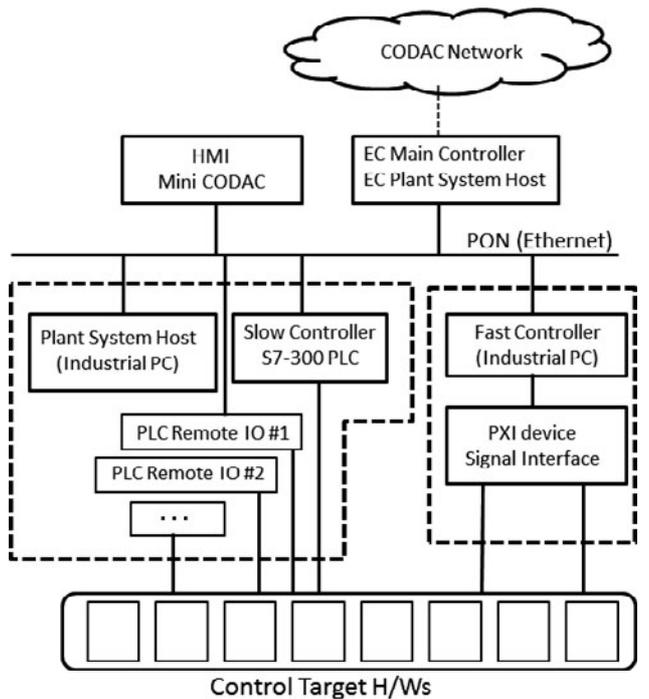


図2 ITER用ジャイロトロンローカル制御システムのアーキテクチャ。

されている Plant Breakdown Structure に対応しており、以下、TTT はプラント装置の構成機器の種別、NNNN は識別番号となる。一方で、後半は Signal Identifier であり、機器が有する信号について、AAA がアクチュエータやセンサのクラスを示し、RRRR が識別番号（なくてもよい）、SSS は信号の種類を示している。表 1 に、本システムにおける Signal Name の一例を示す。

Variable Name は物理的な信号をデジタル化したデータ、制御システム内の状態遷移に対応するタグや、計測信号値の演算結果といった制御システム上の変数に対応する名称定義であり、以下のような形式である。

FFFF -FFFF: VV...VV

前半は、Control Function Identifier であり、制御上の機能グループ単位につけられる ITER 全体で一意に決定された記号である。上位より、プラント装置に対応した符号が割り当てられている。後半は、Variable Identifier であり、制御機能上の変数についてその名称を自由に決められている。表 2 に、本システムにおける Variable Name の一例を示す。

ITER CODAC ネットワークにおいて、Variable Name は EPICS の Process Variable (PV) 名として利用されるため、ネットワーク上にて制御情報のアクセスに必要な識別子に相当する。

SDD Editor では、各信号について、名前の定義後、デジタル信号・アナログ信号の識別をはじめ、デジタル信号であれば各状態に対応する名称の定義、アナログ信号では信号レベルや物理単位の定義といった、各信号の属性情報を付与する。このような、属性情報は、EPICS の PV の属性情報に対応するものとなっている。さらに、Fast Controller の信号インターフェースとなる NIPXI-6259 をはじめとする I/O カードでは、各信号に対応する機器のアドレス情報 (CH 番号) を登録することにより、ハードウェアの情報にアクセスできる状態となっている IOC をビルドすることが可能なソースコード群を自動生成する。

なお、開発手続きの詳細については、PCDH ならびに ITER CCS のマニュアルを参照されたい [7, 8]。

4.2 Slow Controller の開発の概要

ジャイロトロンローカル制御システムの Slow Controller は、PCDH に従い SIEMENS 社 S7-300 シリーズの PLC と、ITER CCS が動作する 1U ラックサイズの PC サーバー (1U サーバー) 上に構築した Plant System Host により実装を行った [7]。図 3 に Slow Controller のシステム構成を示すが、PLC で収集したステータスやデータ、および PLC へのコマンドは、Plant System Host 上で動作する IOC をゲートウェイとしてユーザーインターフェースとなる HMI が動

作する制御端末などが接続される Plant Operation Network (PON) 上の CA 通信を提供する構成となっている。

Slow Controller の機能は以下のとおりである。

1) ジャイロトロンシステムの状態遷移の管理

ジャイロトロン運転システムの動作にあたって、高電圧電源、補機電源類、冷却水システムなどの動作をシステムの運転状態とリンクさせている。Slow Controller では、システムの状態遷移コマンドに合わせ、各機器に対して運転・停止指令を発し、機器のステータスの監視の開始を行う。

2) 機器の保護動作・アラーム機能

Slow Controller は各種電源機器や冷却水システムのステータスを監視しており、異常が生じた場合には、ジャイロトロンの運転を停止させるなど、運転状態を自動的に遷移させる機能をもつ。Slow Controller の保護機能にあたっては、HMI において機器の異常を把握できるようにアラーム情報をネットワーク上に送信する。

表 2 ジャイロトロンローカル制御システムで使用される Variable Name の一例。

信号名称	Variable name
主電源出力電圧指令値	EC-GN-P0C:EW1-VOset
主電源回路スイッチ ON 指令	EC-GN-P0C:EW1-IGBTON
ビーム電流値	EC-GN-P0C:EW1-Ic
電子銃ヒーター設定電圧	EC-GN-P0C:FPS101-VOset
主磁場マグネット電源電流	EC-GN-P0C:EW101-MC-IOset
システム開始(AUX ON) 指令	EC-GN-P0C:PLC1-SYSSTRT
高電圧機器準備(HVPS start) 指令	EC-GN-P0C:PLC1-HVPSSTRT

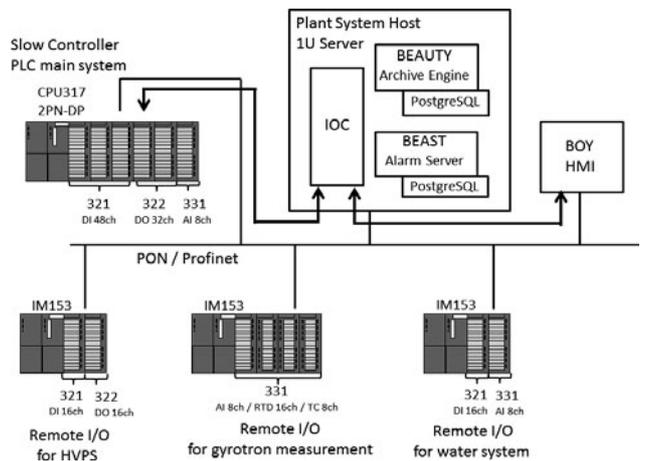


図 3 ジャイロトロンローカル制御システムにおける Slow Controller のシステム構成ならびに Plant System Host の機能構成。

表 1 ジャイロトロンローカル制御システムで使用される Signal Name の一例。

信号名称	信号種	Signal name
主電源出力電圧指令値	アナログ出力	52HV00-EW-0001:ECZ-CRC
主電源回路スイッチ ON 指令	デジタル出力	52HV00-EW-0001:CZ[2]-CRC
ビーム電流値	アナログ入力	52HV00-EW-0001:IT-CRC
イオンポンプ電源正常	デジタル入力	52RF00-VPS-0101:CT[1]-CRC

3) 計測信号の収集

Slow Controller は、収集サイクル時間が比較的長いため比較的低速の信号の収集に適用される。本システムでは、ジャイロトロンの冷却水流量、冷却水温度、ジャイロトン本体の表面温度、管内真空度といった信号の取得を行っている。本システムの Slow Controller の PLC では、データの収集に合わせ、ジャイロトロンの各部の損失パワーを冷却水の流量と温度上昇から自動的に計算する機能を実装させている。

ジャイロトロンの制御においては、実験室内の各所に配置された機器の情報管理を行うため、SIEMENS 社の S7-300 PLC システムは CPU をもつメインシステムと複数のリモート I/O により構成されている。リモート I/O は Profinet 通信を介してメインシステムに接続される。Slow Controller は、電源設備やジャイロトン本体の温度計測などを行うリモート I/O を有しており、こういった機器は光通信でメインシステムと接続することで、電気的絶縁を確保している。

Slow Controller では、PLC 内に状態管理や監視に必要なプログラムを実装させている。S7-300 シリーズの PLC システムは、SIEMENS 社の STEP7 という開発環境によりプログラミングを行う。STEP7 を用いた開発では、PLC のプロ

グラムは、個別の機能を有するファンクション類により構成されており、各機能を担うファンクション (FC)、ファンクションブロック (FB)、およびデータブロック (DB) が、メインサイクルならびに周期サイクルを担うオーガニゼーションブロック (OB) より呼び出される形となる。各ブロックは、LAD 言語や STL 言語などにより記述されている。

ITER CCS では、Plant System Host と通信するための FC、FB、DB、OB 類が自動的に生成される。STEP7 環境において、ITER CCS の出力ファイル群をインポートすることにより、Plant System Host との通信機能を備えた PLC プログラムのブランクプロジェクトが生成される。こうしてできた PLC プログラムに対して、PLC に実装する各機器固有の機能を実装する FC 類を追加した上で、PLC にプログラムをダウンロードするという手続きを踏むことにより、Plant System Host と直接通信できる PLC システムを構築することが Slow Controller 開発の標準的な手順となる。図 4 に、本システムの Slow Controller における PLC プログラムの構造を示す。一方で、Plant System Host 側では Ethernet を介した PLC と通信するドライバ機能が組み込まれ IOC が ITER CCS により生成される。

PLC では、SDD Editor 上で登録されるいわばユーザー定義変数のうち、PLC から Plant System Host に送信される情

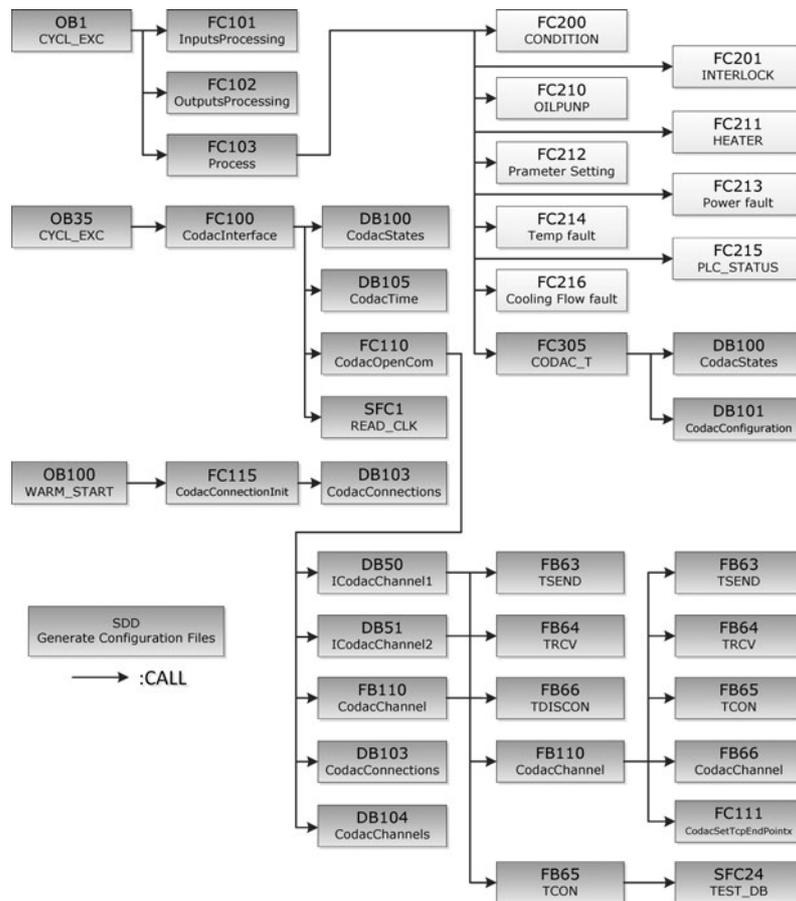


図 4 Slow Controller S7-300 PLC 内部プログラムの主要な FC・FB 類の相互呼び出し関係図。白色ブロックで示す FC200 番台に、ジャイロトン運転システムの制御ロジックが定義されている。灰色ブロックは SDD Editor による自動生成ブロックであり、Plant System Host との通信に使用される。

報はデータブロック CodacStates (DB100), 逆に Plant System Host から PLC に送信される情報はデータブロック CodacConfiguration (DB101) に登録されている. PLC と Plant System Host との TCP/IP による通信は, デフォルトで 100 ミリ秒周期と設定されており, Plant System Host ならびに上位のユーザーインターフェース等での Slow Controller 信号情報の更新周期はこの通信サイクルに依存する [12].

4.3 Fast Controller の開発の概要

ジャイロトロンローカル制御システムにおける Fast Controller は, 図 5 に示すように ITER CCS が動作する 1U サーバと PXIe シャーシにより構成され, とくに信号の入出力には, PCDH カタログ [14] に掲載される National Instruments 社製 NI PXI-6259 アナログ入出力ボードを採用している. 本プロトタイプの Fast Controller では, PXIe シャーシは信号のインターフェースとしてのみ動作させ, 1U サーバ上の IOC に制御ロジックを実装する形態としている.

Fast Controller の機能は以下のとおりである.

1) ジャイロトロン運転パラメータの設定

ジャイロトロン運転には, 各高電圧電源, ならびに超電導コイルに設定値を指令する必要があるが, Fast Controller が一元的に運転パラメータ指令のインターフェースとなっている. ジャイロトロンの運転にあたっては, ショット中にパラメータを変更する必要があるため, パラメータ制御を Fast Controller が一元して行うことが可能なシステムとしている. 高電圧電源への設定値指令はアナログ電圧値でなされるため, NI PXI-6259 のアナログ出力を使用している.

2) 電源の運転タイミングの制御

ジャイロトロン運転にあたって, 電源の運転タイミングをミリ秒単位にて制御する必要があるが, Fast Controller より高電圧印加指令を各高電圧電源に送っている.

3) 波形データの収集

ジャイロトロンの電圧・電流値などの運転パラメータについて, ジャイロトロンのショット中の波形を収集する機能を実装している. 波形データの収集については, アナログ入出力ボードにおいて 40 ksps にて 16 ch 同時取得システムとして構成しており, 1 時間の連続データ収集に成功している.

パラメータ出力並びにタイミングの制御について, 本システムにおいては, Fast Controller における IOC 内で動作する EPICS Sequencer を使用して実装している. EPICS Sequencer の挙動は, SNL で記述されている. 本システムは, 特にタイミング制御についてはサイクル時間が短くなる制御ルーチンを構築することにより, 専用のハードウェアを用いずにミリ秒単位のタイミング制御を実装している. なお, EPICS Sequencer そのものは, 通常の OS 上で動作するプログラムとして実装されているため, リアルタイム性を保証するものではない. タイミングの発生がシビア

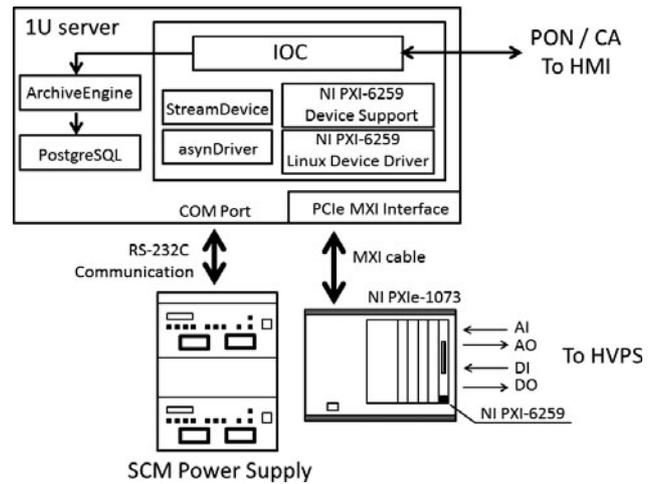


図 5 ジャイロトロンローカル制御システムにおける Fast Controller のシステム構成. (なお本システムで使用する PXIe シャーシ (NI PXIe-1073) は, PCDH カタログに収集されていない機材である).

なケースでは専用ハードウェアによる実装, または RHEL リアルタイムカーネルである MRG-Realtime の使用が必要と考えられる.

なお, 超電導マグネットの制御については, マグネット電源がシリアル通信ポートを有しているため, NI PXI-6259 を介さず, 1U サーバに直接接続し, EPICS のコマンド通信ツールである StreamDevice [23] を用いた実装を行った. なお, 現段階では, StreamDevice は ITER CCS には含まれておらず, この機能は ITER CODAC のサポートはされない.

Fast Controller は PON 上の CA 通信に加え, High Performance Network (HPN) という高速ネットワークに対応している. HPN は, 高精度の時刻同期のための Time Communication Network (TCN), プラズマ制御に必要な高速のデータ同期を実現する Synchronous Databus Network (SDN), 映像音声を転送する Audio-Video Network (AVN), 大容量高速データ転送を実現する Data Archiving Network (DAN) など用途に応じた専用ネットワークが PCDH において定義されている [7]. 現段階では, 本システムでは HPN は実装されていないが, プラント機器とプラズマ制御システムとの間の同期など, ITER の実験では必須の機能である.

4.4 ユーザーインターフェース

ジャイロトロンローカル制御システムのユーザーインターフェースは, Plant System Host ならびに Fast Controller が接続されたネットワーク上に設置した ITER CCS が動作する計算機上に配置している. ITER CCS に含まれる CSS は, IOC からの情報を CA 経由で取得しており, ネットワークが接続されていれば遠隔での制御も可能である. 本システムは, ジャイロトロン試験装置のある実験室の制御室に加え, 同じ建屋の異なる階にある遠隔制御室を設け, 遠隔での運転を可能としている.

CSS の機能のうち, 制御システムのグラフィカルユーザーインターフェース (GUI) を開発する BOY を用いて,

ジャイロトロン運転システムの制御指令の入力ならびに、各機器のステータス情報を表示させている。図6に示す通り、ユーザーが直感的に把握できるように画像を多用した制御画面を実装することができる。

一方で、システムのアラームハンドリングはBEASTを用いて、アラーム発生の状況や履歴などを参照できるようにしている。BEASTに登録される情報は、SDD Editorにおいて登録している。また、主にSlow Controllerで取得した信号波形は、CSS DataBrowserによりアクセスできるようにしている。CSSによる計測データの保存にあたっては、ITER CCSのArchive Engineによりホスト計算機内、または遠隔アーカイブ計算機に格納する方式となっている。

5. ジャイロトロン運転の結果

ITER用ジャイロトロンの発振シーケンスでは、主電源(カソード電源)、ボディー電源、アノード電源をスタートさせ、同じ時刻に設定電圧に到達するようにスタートタイミングを制御する。続いて、主電源からの供給を行うIGBT主回路スイッチを動作させ、カソードに電圧を印加する。この時、ダブルスイッチ型アノードスイッチによりジャイロトロンのアノード・カソード間電位を短絡させることにより、ジャイロトロンにおけるビーム電流を停止させる。その後、所定のタイミングでアノードスイッチを動作させてアノード・カソード間電圧を印加することにより、ビーム加速電圧の変化に伴う過渡的状态を経ずにジャイロトロンのビーム電流を発生させることが可能となる。

ジャイロトロン試験装置の主電源は、ビームオン指令後、設定電圧値まで到達するまで2秒程度かかり、ほかの高電圧電源機器に比べてタイムスケールが長いので、ビームオン指令後に設定電圧値に到達した後に発報される主電源準備完了(MHVPS Ready)信号をもとにジャイロトロンの発振開始シーケンス動作をスタートさせている。発振

開始シーケンスの開始すぐに、APSならびにBPSの電源印加(GATE-ON)指令を送る。APS, BPSは市販の定常高電圧電源であるため、指令より50 ms後に電圧が立ち上がりはじめる。設定電圧値に到達するまでに200 ms程度の時間を要する。ここまでの間、主回路とアノードスイッチによりジャイロトロン電子銃への電圧は印加されていない。各電源の電圧が設定値に到達した段階で、まず主回路スイッチオン(MHVPS Main-SW Turn ON)指令によりカソードに対して電圧が印加される。この段階では、アノードスイッチを短絡側に設定してあるため、アノード・カソードは同電位であり、ビーム電流は発生していない。主回路スイッチオン指令より1 ms後にアノードスイッチを短絡側より給電側に切り替え、アノード・カソード間電圧が発生し、ジャイロトロン管内にビーム電流を発生させる。ジャイロトロン試験装置での実証試験では、図7に波形を示すように各電源の立ち上がり後、主回路スイッチとアノードスイッチをFast Controllerより時間差をもたせて動作させ、ジャイロトロンのビーム電流発生を制御すると

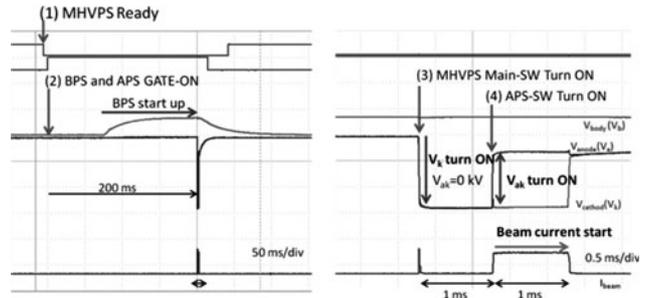


図7 ジャイロトロンローカル制御システムを使用して運転した発振開始シーケンスとITER用170 GHzジャイロトロンによる1 msパルス運転のジャイロトロンの電圧・電流波形。左図：運転シーケンス全波形、右図：発振タイミングでの時間拡大波形。

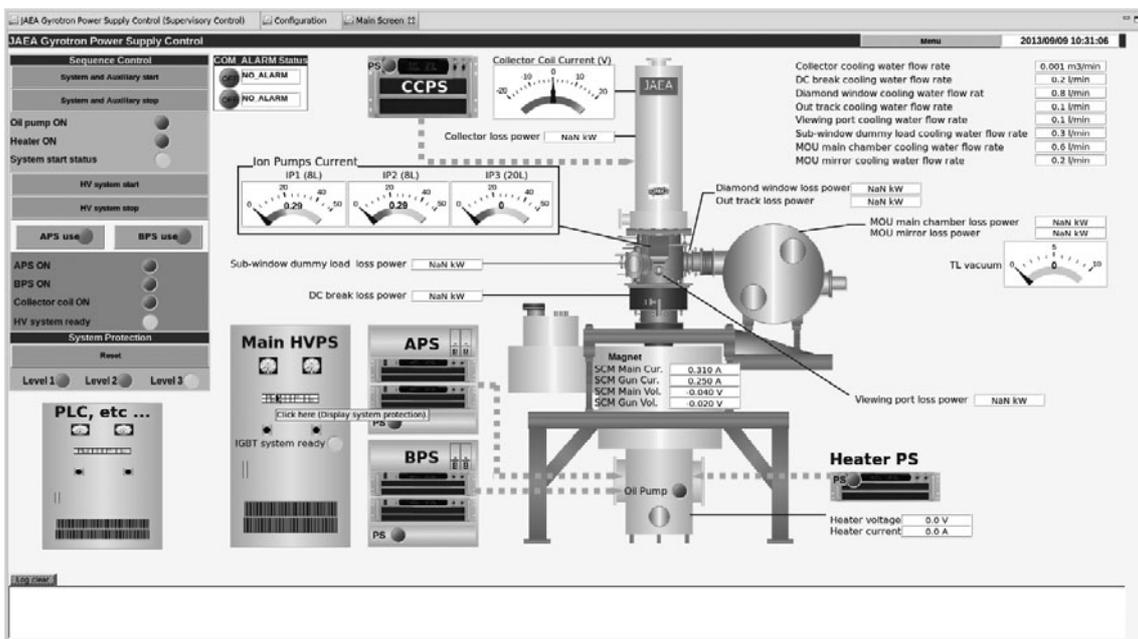


図6 ジャイロトロンローカル制御システムの状態遷移指令と機器監視を行うためのBOYを用いたHMI画面。

ともに、所定のタイミングにて 170 GHz 帯 RF ビームを共振させることに成功した。

ITER での運転に準拠した電源構成ならびに制御機器を用いたジャイロトロン運転シーケンスは、長パルス運転ならびに、高速変調動作でも用いられる予定であり、現在は、長パルス動作に向けた試験の準備を進めている。

現在、原子力機構では ITER EC システム全体の制御アーキテクチャの実証試験をめざしている。ITER の EC システムは、RF 発振源となるジャイロトロンのほか、電源設備、伝送系、ランチャーといったサブシステムが異なる極から調達されるため、サブシステムごとに制御システムをもたせ、これを EC システムの Plant System Host となる EC Main Controller が、EC システム全体を統括制御することが求められている。なお、EC Main Controller はトカマク本体やプラズマ制御システムなどからの制御情報のゲートウェイとしての機能を有している。原子力機構では、ITER 用長パルスジャイロトロンの試験装置に、ITER 準拠の導波管を用いた長距離伝送系の試験設備、ならびに ITER 用水平ポートランチャーの実物大モックアップを有しており、実機システムに近い条件でのシステム統合試験を実施することが可能である。現在は、EC システム全体の制御アーキテクチャ案をベースとし、原子力機構の試験設備に適用できるアーキテクチャの設計を進めており、来年度中の実装と統括動作の実証試験を実施する予定である。

6. まとめ

原子力機構では、ITER の EC H&CD システムのためのジャイロトロン運転システムの開発として、ITER の PCDH に準拠したジャイロトロン運転システムであるジャイロトロンローカル制御システムのプロトタイプ開発を行った。

ジャイロトロンローカル制御システムは、PCDH に従い、ITER CCS を使用した開発を行っている。本システムは、Slow Controller ならびに Fast Controller によって構成されている。Slow Controller は、SIEMENS 社 S7-300 PLC システムと ITER CCS が動作する Plant System Host により

構成され、ジャイロトロン運転システムの状態遷移管理、機器の保護動作とアラーム管理、ならびに計測信号の収集の機能を実装している。一方、Fast Controller は、ITER CCS が動作するサーバーと NI PXI-6259 ボードをインターフェースとする構成としており、ジャイロトロンの発振のための電源パラメータの設定、電源システムのタイミング制御、ジャイロトロンの運転波形収集といった機能を実装している。両者とも ITER CCS において IOC を構築しており、ネットワーク上の CA を経由し、CSS で開発された HMI 等による制御・監視システムの運用を可能としている。

原子力機構では、このジャイロトロンローカル制御システムのプロトタイプによるジャイロトロン試験システムの運用を行っている。特に、ITER のジャイロトロン運転システムに準拠した電源構成によるジャイロトロン運転試験においては、各電源の電圧発生タイミングと高電圧スイッチの動作タイミングを制御することにより、170 GHz ジャイロトロンの ITER における発振シーケンスの実証に成功した。

謝 辞

この記事に記載した ITER EC 機器に関する制御システムのプロトタイプ開発において、ITER 機構 EC section D. Purohit 氏、CODAC section 米川出氏をはじめ、ITER EC section team ならびに ITER CODAC team より数多くの助言をいただいたことにこの場を借りて謝意を表明いたします。

付 録

本記事で使用された略語のうち ITER CODAC ならびに EPICS に特有な用語について、略語と元になった用語、簡単な説明を表 3 に示す。

表 3 記事中の主要な略語の一覧と説明。

略語	本来の用語	説明
PCDH	Plant Control Design Handbook	ITER におけるプラント制御システムの標準化文書
ITER CCS	ITER CODAC Core System	ITER における標準制御システム開発のためのソフトウェアパッケージ
EPICS	Experimental Physics Industrial Control System	大規模実験装置向けの制御通信ソフトウェア群
CA	Channel Access	EPICS における制御通信プロトコル
IOC	Input Output Controller	EPICS における制御対象機器の制御ソフトウェア
SNL	State Notation Language	EPICS の IOC で使用されるシーケンス動作の記述言語
CSS	Control System Studio	ITER CCS で採用される EPICS 用の制御用 HMI 開発及び実行環境を提供するソフトウェア
SDD	Self-Description Data	ITER CCS における信号・変数の定義手続き
PON	Plant Operation Network	ITER CODAC における制御ネットワーク
HPN	High Performance Network	ITER CODAC における高速ネットワークの総称
TCN	Time Control Network	ITER CODAC における高精度時刻同期ネットワーク
SDN	Synchronous Data Network	ITER CODAC における高速同期データ通信ネットワーク
AVN	Audio Visual Network	ITER CODAC における音声・映像用ネットワーク
DAN	Data Acquisition Network	ITER CODAC におけるデータ収集ネットワーク

参考文献

- [1] J. How *et al.* (ed) Plasma stability and control ITER 2009 Baseline: Plant Description (PD) (France:ITEROrganization) chapter 4.6 www.iter.org (2009).
- [2] K. Sakamoto *et al.*, *Nature Phys.* **3**, 411 (2007).
- [3] K. Kajiwara *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **86**, 955 (2011).
- [4] K. Takahashi *et al.*, *Rev. Sci. Inst.* **82**, 063506 (2011).
- [5] D. Purohit *et al.*, "An overview of Instrumentation and control for ITER ECH&CD system," 26th Symposium on Fusion Technology (2010).
- [6] A. Wallander *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **85**, 529 (2010).
- [7] Plant Control Design Handbook (27LH2V) ver. 7.0, ITER Organization (2013).
- [8] CODAC Core System Overview (34SDZ5) ver. 4.0, ITER Organization (2013).
- [9] Y. Kawano *et al.*, "Progress on Design and R&D for ITER Diagnostic Systems in Japan Domestic Agency", 24th IAEA Fusion Energy Conference, P5-35 (2012).
- [10] T. Yamamoto *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **87**, 2016 (2012).
- [11] V. Vitale *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **87**, 2012 (2012).
- [12] PLC Software Engineering Handbook (3QPL4H) ver. 1.4, ITER Organization (2013).
- [13] ITER catalogue for I&C products - Slow controllers PLC (333J63) ver. 3.1, ITER Organization (2012).
- [14] Guideline for Fast Controllers, I/O Bus Systems and Communication Methods between Interconnected Systems (333K4C) ver. 2.0, ITER Organization (2013).
- [15] ITER Catalog of I&C products - Fast Controllers (345X28) ver. 2.1, ITER Organization (2013).
- [16] Experimental Physics and Industrial Control System, <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [17] P. Sichta *et al.*, "Overview of the NSTX Control System," 8th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control System (PSN TUBT004), (2001).
- [18] M. Kim *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **85**, 515 (2010).
- [19] Control System Studio, <http://controlsystemstudio.github.io/>
- [20] K. Kajiwara *et al.*, *Nucl. Fusion* **53**, 043013 (2013).
- [21] Self-description Data Documentation and Guidelines (34 QXCP) ver. 2.1, ITER Organization (2011).
- [22] Signal and plant system I&C Variable NamingConvention (2UT8SH) ver. 8.1, ITER Organization (2013).
- [23] StreamDevice, <http://epics.web.psi.ch/software/stream-device/>