核融合装置制御のためのマルチプロセッサ・システムにおける CAMAC システムの開発

正員 木村 豊秋 (原研)・正員 村井 勝治 (日立)
 正員 近藤 育朗 (原研)・正員 射場 大造 (日立)
 非会員 熊原 忠士 (原研)・正員 中山 尚英 (日立)
 非会員 栗原 研一 (原研)・非会員 後藤 徹也 (J E X)
 非会員 米川 出 (原研)・非会員 村上 達志 (国際電気)

1. 緒言

臨界プラズマ試験装置 JT-60 は、核融合実用化にあたって、最も有望視されているトカマク型装置のひとつであり、核融合炉の前提となる臨界プラズマ条件の達成を目指して、欧米の大形装置としてのぎをけずっている。

JT-60 は、図 1 に示すように本体、ガス注入、トロイダル・ポロイダル磁界コイル電源、加熱装置など 14 のブロック設置からなる。その制御系は、各ブロック設備の制御装置とこれらを統括する全系制御設備との階層構成をとっている。

全系制御設備は、プラント全体の設備機器監視のための運転制御計算機、プラズマ放電制御のための放電制御計算機および実時間プラズマ制御のためのプラズマ制御用計算機の 7 台の制御用計算機を中心としたシステムである。また、ブロック設備制御装置は、マイクロプロセッサあるいは制御用計算機を中心とした計

算機システムであり、それぞれ多数の特性の異なる計算機を内蔵している。更に JT-60 プラント監視のためには、約 2 万点の計測点からのデータ収集やプラズマ放電によって発生する多量の実験結果データの収集が必要である。従って、全系制御設備の各計算機とブロック設備の異種計算機間の大量データ伝送のために、汎用性のある標準化された高速通信手段の適用が不可欠となる。

また、JT-60 は図 2 に示すように、プラズマを発生させ閉じ込める本体を中心に、トロイダル・ポロイダルの閉じ込め磁界コイル電源、各加熱装置などを相互に緊密に連繫運転させて、高温、高密度のプラズマを安定に生成、維持する必要がある。そのためには、多数のプラズマ状態や設備状態を高速で効率よく取得するための伝送手段が不可欠であり、各設備の厳密な同期をとりながら、運転するための高精度タイミングシステムが必要となる。

そのため、CAMAC 規格に基づく汎用性のあるデータ伝送用ソフトウェア、CAMAC 規格を拡張した可変語長大容量データ伝送方式、コマンドバッファを搭載した高速ハイウエイドライバおよびインターロック機能を持った高精度タイミングシステムを開発した⁽¹⁾。

本論文では、大容量、高速データ伝送および高精度タイミング伝送を行う CAMAC システムの構成と機能および主要開発技術について述べる。

2. 大規模核融合装置制御設備におけるデータ伝送に必要な機能とその開発方針

大規模核融合装置 JT-60 の制御システムは、上述のように全系制御設備と各サブシステムからなる階層

Development of the CAMAC System in the Multiprocessor Control System for the Large Fusion Experimental Device. By Toyoaki Kimura, Member, Ikuo Kondo, Member, Tadashi Kumahara, Non-member, Ken-ichi Kurihara, Non-member, Izuru Yonekawa, Non-member (Japan Atomic Energy Research Institute), Katsuji Murai, Member, Daizo Iba, Member, Takahide Nakayama, Member (Hitachi, Ltd.) Tetsuya Goto, Non-member (Japan Expert Crone Corp.) & Tatsushi Murakami, Non-member (Kokusai Electric Corp.).

木村豊秋：正員，日本原子力研究所那珂研究所
 近藤育朗：正員，日本原子力研究所那珂研究所
 熊原忠士：非会員，日本原子力研究所東海研究所
 栗原研一：非会員，日本原子力研究所那珂研究所
 米川 出：非会員，日本原子力研究所那珂研究所
 村井勝治：正員，(株)日立製作所大みか工場
 射場大造：正員，(株)日立製作所大みか工場
 中山尚英：正員，(株)日立製作所大みか工場
 後藤徹也：非会員，日本エクスクロン株式会社
 村上達志：非会員，国際電気株式会社

図 1 JT-60 システム構成図
Fig. 1. JT-60 system configuration.

図 2 JT-60 の運転シナリオ
Fig. 2. JT-60 operation scenario.

構成をとるマルチプロセッサシステムである。本システムは、図2に示すように10分ごとの運転周期において、3,000項目のプラズマ放電条件および1放電あたり1.5 M 語 (3 M バイト) の設備データを効率よく伝送するとともに、再現性のよいプラズマ実験を行うため、プラズマ放電中に制御周期 1ms の高速データ伝送を行い、かつ各設備を厳密に同期をとって運転する必要がある。これらの要請に答える通信方式として、

全系統制御設備を中心とした1対N方式で汎用性、高速性が期待できる CAMAC 規格を採用することにした。

図3は CAMAC を用いた高速データ伝送システムの開発課題を示す。汎用性のある高速、高効率データ伝送システムの課題に対しては、計算機の機種に左右されない汎用 CAMAC ハンドラと CAMAC 通信ソフトウェアならびに変換語長データ伝送とコマンドバッファ方式による高効率で高速のデータ伝送を可能とするハイウェイドライバを開発することとした。これらによって、1放電 1.5 M 語のデータ伝送と制御周期 1ms の高速制御を可能とすることを目指した。設備間の厳密な同期と安全性を確保するタイミングシステムの課題に対しては、制御インターロック機能を有し、制御周期 1ms に対応した基本クロック (精度 1 μ s) およびタイミング信号伝送時間 30 μ s の CAMAC 化タイミングシステムを開発し、安全な高速制御を可能にした。

3. CAMAC 規格に基づく大容量、高速データ伝送システム

図4は CAMAC 規格に基づく大容量、高速データ伝送システムを示しており、図1の1ブロック設備 CAMAC システムの詳細を示すものである。JT-60 の制御システムは、全システムを統括制御する全系統制御設備と下位ブロック設備 CAMAC システムに機能を分担している。

図 3 CAMAC を用いた高速データ伝送システムの開発課題

Fig. 3. Development Items of High-speed data transfer for the CAMAC system.

図 4 CAMAC システムによる高速データ伝送方式

Fig. 4. High-speed data transfer in the CAMAC system.

ブロック設備 CAMAC システムは、全系制御設備との通信および自設備内の情報交換を行うためのコミュニケーションクレート、キーボード入力や CRT 表示などのデータ交換を行うマンマシンクレートおよび機器の制御や設備データ収集を行う運転(または放電)管理クレートからなる。これらのクレートは一般モジュールおよびモジュール化された計算機を有し、各々独立した機能を実現する分散処理システムを構成している。これら分散処理システム内の計算機には CAMAC システム制御用基本ソフトウェアを搭載している。

図 4 の CAMS (CAMAC Handler) および CCOS (CAMAC Communication System) は、CAMAC シ

ステム内のハードウェア機種に左右されることなく、CAMAC システムをアプリケーションプログラムにより制御するために開発した標準ソフトウェアである。以上の各ソフトウェアは、オペレーティングシステム PMS (Process Monitor System) により管理される。

CAMS は、CAMAC データウェイ、ハイウェイおよび AC (Auxiliary Crate Controller) バスを使用して行う CAMAC システム入出力処理管理用ハンドラであり、CCOS、CAMAC システム間の通信制御ソフトウェアである。CAMS および CCOS を標準的に使用することによって、オペレーティングシステム以外に基本ソフトウェアの大半を占める通信ソフトウェ

けるタスク管理に適用される。後者に対応した処理は BUFF モジュール交信ブロックで実行され、放電条件の伝送や放電によって得られた大量の結果データの伝送などに適用される。

BUFF モジュールによるデータ伝送を例にとりて CCOS の処理内容を以下に述べる。データ伝送における下位クレートから上位クレートへのデータ送信は、BUFF モジュールによって発行される LAM に基づくデマンドを発行して送信要求を出すことにより開始される。このとき、下位クレート内計算機が、BUFF モジュールのメモリーに放電結果データなどを書込んでおけば、上位クレートはシリアルハイウェイのリモート読出し動作によりデータ読出しを行ってデータ伝送が完了する。

逆に、上位クレートからのデータ伝送は、シリアルドライバーを介したリモート書き込み動作により、上位クレート内計算機が放電条件などのデータを下位クレート内の BUFF モジュールのメモリーに書き込み、下位クレート内計算機にコマンド割込みを発行して、下位クレート内計算機がその内容を読出すことによって完了する。

〈3.2〉 可変語長データ伝送方式による大量データ伝送 CAMAC 規格によるデータ伝送は、通常は図 6 (1) 1 語長伝送フォーマットに示すように、データ書き込み時には 1 語の書き込みデータに制御データを付加して伝送する。制御データは、クレートアドレス C 、サブアドレス A 、ファンクション F およびステ

ーションナンバー N からなる。これらはそれぞれハイウェイ上のクレート位置、モジュール内レジスタアドレス、モジュールへの動作指令およびクレート内モジュール位置を定義する。

図の例は、バイトシリアルハイウェイ上のフォーマットであるが、運転および放電制御系に使われるビットシリアルハイウェイ上では、各バイトに対してスタート、ストップビットが前後に付加されて順次シリアルに伝送される。

JT-60 では、1 放電あたり、1.5 M 語の大量の結果データを伝送する必要がある。そこで同一設備に対するデータ伝送においてはデータ伝送用モジュールが同一であることから、制御データの変更が不要であることに着目し、図 6 (2) 可変語長伝送フォーマットに示すように、1 個の CAMAC 命令に n 語 ($1 < n \leq 2048$) の書き込みまたは読出しデータを付加できる可変語長データ伝送方式と、このためのコミュニケーションクレート内の通信モジュール ACD (Auxiliary Controller with D-port) を開発した。これにより、全系制御設備計算機は、ブロック設備 CAMAC システム内のデータ伝送モジュール ACD の内部メモリーを介して、1 命令で最大 2 K 語のデータを書込みまたは読出すことができる。

CAMAC ハイウェイを用いたデータ伝送効率 E を全伝送情報量に対する有効情報量と定義し、パリティビットや制御データを考慮すると、 N 語のデータを伝送速度 V ビット/s で伝送するときのデータ伝送時間 T は、

$$T(s) = \frac{24N(\text{語})}{V(\text{ビット/s})} \times \frac{1}{E} + T_{DMA}(s)$$

ただし、

$$E = \frac{Nd(\text{語})}{1.25\{Nc(\text{語}) + 1.33Nd(\text{語})\}}$$

となる。ここで Nd は有効情報量、 Nc は制御データ量にスペースバイトなどを加えたもの、 T_{DMA} は制御用計算機の DMA 転送時間 (4.7 s/1 M 語) である。ビットシリアルハイウェイにおいて図 6 (1) 1 語長伝送フォーマットを使用した場合、 $Nd=3$ 、 $Nc=10 \sim 15$ であり、データ伝送効率 E は、 $E \leq 0.17$ となる。一方、同図 (2) 可変語長データ伝送フォーマットでは、データ伝送効率は、 $E \approx 0.6$ に向上する。これは 1 語ごとのデータ伝送効率の約 3.5 倍であり、実際の運転では 1.5 M 語のデータ伝送時間を 1 語長データ伝送の場合の 49 s に対して 19 s と約 1/2.5 に短縮できた。

〈3.3〉 実時間制御システムにおける高速データ伝

図 6 CAMAC シリアルハイウェイにおける可変語長データ伝送方式

Fig. 6. Variable word-length block transfer in the CAMAC serial highway.

送 JT-60 のプラズマ位置形状制御システムなどに対しては、制御周期 1 ms といった高速フィードバック制御が要求される。プラズマ位置形状制御のためには、JT-60 本体に取付けられた磁気プローブやロブスキークoilによって検出される信号および制御用磁界を発生させるポロイダル磁界コイル電源設備からコイル電流・電圧など、種々のデータを異なる場所から収集する必要がある。バイトシリアルハイウェイのデータ伝送では、1回のハイウェイ動作ごとに計算機による応答確認の手順が必要であり、伝送速度に制約が生じ、プラズマ制御のための高速データ授受には不十分である。

以上の問題を解決して CAMAC 命令発行および応答の取込みの高速化を図るため、「コマンドバッファ方式」および「複数コマンド連続転送方式」が可能なハイウェイドライバを開発して適用した。これらの方式では、データ伝送の応答確認を一連の伝送の最終段で一度行えば良いことになる。

図 7 に CAMAC ハイウェイドライバの構成を示す。このドライバは CAMAC 命令を 2K 語分記憶可能なコマンドバッファを運転ケースに応じて複数個備える。また、制御用計算機からの起動信号により、コマンドバッファの内容をハイウェイ上に送出するトランスミッタおよびハイウェイからのデータを制御用計算機主メモリ上に DMA 転送するレシーバを有する。このハイウェイドライバによる高速データ伝送手順を次に述べる。

(1) 準備処理 実時間制御におけるデータ伝送を開始する以前に、プラズマ位置形状制御計算機は

図 7 CAMAC ハイウェイドライバの構成

Fig. 7. Configuration of the CAMAC highway driver.

CAMAC システム内の各モジュールに対して発行すべき実時間処理用 CAMAC 命令群を編集し、コマンドバッファに設定する。同時に各 CAMAC 命令に付随する書き込みデータや読み出しデータに対する計算機主メモリアドレスの設定を行う。

(2) 実時間制御時のデータ伝送処理 実時間制御開始後は、位置形状制御計算機は制御周期ごとにハイウェイドライバに対する起動をかける。ハイウェイドライバは、事前に設定された CAMAC 命令群を、自動的にコマンドバッファにより 1 個ずつ順次取出しハイウェイ上に送出する。このとき、命令が書き込み命令の場合は計算機主メモリ内のデータを付加し、読み出し命令の場合はスペースバイトを付加する。位置形状制御系 CAMAC システムは、連続して入力される CAMAC 命令に基づく処理を実行し、読み出し命令に対してはスペースバイトをデータで置換えてドライバにリブライとして返送する。返送されるリブライおよびデータは、ドライバのレシーバにより検出された後、計算機主メモリの所定のアドレスに順次返送される。

上述のコマンドバッファ方式および複数コマンド連続転送方式の組合せにより、データ伝送速度 4.7 μs/語の高速データ伝送を実現でき、それらを使用しない場合のデータ伝送速度約 30 μs/語に比べて約 6 倍に高速化することができた。

4. 高速デジタル制御用タイミングシステム

〈4.1〉 タイミングシステムの機能と構成 JT-60 制御システムにおいて、プラズマ位置形状制御を中心とするプラズマ制御システムは、最も重要な役割を果たしている。プラズマ制御を実行するにあたっては、再現性の良いプラズマ実験結果を得るため、全系制御設備の各計算機とプラズマ制御用磁界コイル電源、ガス注入、加熱設備などの動作タイミングに厳密な時間精度が要求される。タイミング信号は、プラズマ特性時間約 10 ms を考慮して 1 ms 単位で設定可能とする。

図 8 はタイミングシステム構成図を示す。タイミングシステムの時間管理は、クロックシステムによって生成する 1 ms 制御クロックを用いる。このクロックは、プラズマ制御のための 1 ms 周期制御クロックのベースであり、かつタイミングシステムのデジタル遅延要素 (タイミングジェネレータ) のためのクロックにも適用することにより、位置形状演算結果などの制御出力と各設備の動作タイミングの同期管理を可能

図 8 タイミングシステム構成図

Fig. 8. Configuration of the timing system.

にしている。タイミングシステムは、プラズマ制御に先立ち、放電制御計算機により与えられた放電条件に従って各ブロック設備制御装置に対するタイミング信号発生条件の設定を行う。プラズマ放電 60 秒前に放電制御計算機によりタイミングシステムのタイミングジェネレータが起動され、タイミング信号を順次各設備に出力して各設備間の機器を起動する。タイミングジェネレータは、プリセットカウンタを中心としたものであり、プラズマ制御におけるタイミングシステムの動作時間間隔最大 60 秒を満足するため 16 ビットカウンタ (1 ms クロック使用時約 65 秒遅延可能) としている。この遅延要素およびタイミング信号生成を制御するための論理判定回路に対する設定パラメータは、あらかじめ放電条件として与えられる。一方、論理判定回路設定パラメータは、ハードまたはソフト信号入力を行うことにより、実時間でタイミング信号の生成を制御するようにしている。

〈4・2〉 タイミング信号の高速伝送 プラズマ放電制御実行時は、〈4・1〉節に述べたタイミング信号とクロック信号を、全系制御設備から各ブロック設備へ送出する必要がある。タイミング信号は、信号伝送路を減らすため、TGT (Timing Transmitter) および TGR (Timing Receiver) の組合せによって、複数のタイミング信号のコード化伝送を行うようにした。

図 9 にタイミング信号のコード化伝送方式を示す。TGT は、最大 16 個のタイミング信号の入力が可能である。TGT 側から見るとタイミング信号は非同期で入力されるため、2 個以上のタイミング信号入力が競合しないように、同時入力の場合には、優先度判定回路によって優先度の高い信号から先にコード化して

図 9 タイミング信号のコード化伝送方式

Fig. 9. Transfer of coded timing signals.

送信するようにした。信号伝送路上のコード化タイミング信号は、チャンネルアドレス、制御データおよびパリティビットなどの 10 ビット信号により構成する。このうち制御データは、主として TGR 出力回路の制御に使用する。動作モードが試験の場合は、TGR は受信したコード化タイミング信号をデコードし、正常受信した場合にも外部にタイミング信号を出力することなく、システム内部で閉じた伝送試験を行うことができる。通常運転状態においては、TGR は受信したコード化タイミング信号をデコードし、正常受信した場合は、動作モードが通常となり、チャンネルアドレスに対応したタイミング信号を制御対象機器に出力するとともに、タイミング信号に対する対象機器の応答を監視する。応答が正常に行われた場合、TGR は TGT に対して ACK 信号を送信してタイミング信号伝送が完了する。応答信号が規定時間 (10 μ s) を超えた場合、またはパリティエラーが発生して異常検出された場合は、TGT の ACK 信号検出回路でタイムアウト検出し、タイミング信号の再送信が行われる。再送信にも失敗した場合は TGT により異常処理が行われ、計算機に対する割込み信号を発生する。

5. 試験結果

本 CAMA システムを JT-60 に適用した結果について以下に示す。

データ伝送の性能に関しては、可変語長データ伝送は、1 回に最大 2 K 語の伝送が可能であり、制御用計算機～ドライバ間のデータ伝送時間は 9.7 ms/2 K 語、ドライバ～CAMAC システム間のデータ伝送時間は 16.4 ms/2 K 語とすることができた。JT-60 の 1 回の放電で発生する 1.5 M 語のデータを 5 M ビット/s のシリアルハイウェイで収集した場合、19 s となり、1 語ごとと伝送した場合に要する時間 49 s に比べて 1/2.5 に短縮され目標を達成することができた。

図 10 JT-60 プラズマ制御試験結果例

Fig. 10. Control result of the JT-60 plasma.

また、コマンドバッファ方式による高速データ伝送は、 $4.7 \mu\text{s}/\text{語}$ の速度を達成することができ、制御周期 1 ms のうちデータ伝送に必要な時間を $200 \mu\text{s}$ 以下にすることができた。

タイミングシステムの試験結果は、タイミング信号伝送時間 $20 \mu\text{s}/\text{チャンネル}$ であり、目標 $30 \mu\text{s}$ を達成し、インターロック機能も十分果していることが確認できた。

以上により図 10 に示すように、運転周期 10 分 、制御周期 1 ms で 10 秒間 の高速、高精度で再現性のよいプラズマ制御を実現できた。

7. 結 言

臨界プラズマ試験装置 JT-60 を対象とするデジタル制御用データ伝送システムとして、可変語長データ伝送方式とコマンドバッファを搭載した高速ハイウエイドライバを軸とする、CAMAC 規格に基づく汎用性のある高速 ($4.7 \mu\text{s}/\text{語}$) 高効率 (通常 CAMAC の 2.5 倍) データ処理システムを開発した。また、高速デジタル制御実行時の各設備の動作タイミングに厳密な時間精度を有する高精度タイミングシステムを開発し、制御周期 1 ms の高速実時間制御を実現した。

これらのシステムは、高速デジタル制御に広く適用できるものであり、今後の大型核融合、加速器システムなどへの適用を計れるものと考えられる。

終わりに、このシステムの開発にあたり、御指導および御協力いただいた関係各位に心から謝意を表す次第である。

(昭和 62 年 8 月 28 日受付)