

# 大電流電子線形加速器の開発

## —計測・制御系（概要・ハードウェア）—

1998年6月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-chō, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken, 311-13, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

(A)

大電流電子線形加速器の開発  
— 計測・制御系(概要・ハードウェア) —

江本 隆\*、加藤 裕子\*\*、平野 耕一郎\*、  
石川 雄大\*\*\*、武井 早憲\*、野村 昌弘\*、谷 賢\*

要旨

動燃事業団では、核種分離・消滅処理研究の一環として、大電流電子加速器を用いて高レベル放射性廃棄物中に含まれる長寿命核分裂生成物を消滅する可能性を研究している。将来の消滅処理システムで必要となる加速器の大電流化技術を開発することを目的として、当面の目標をエネルギー10MeV、最大電流100mA、パルス幅4ms、繰り返し50Hzに設定し大電流電子線形加速器の開発を推進している。

本計測・制御装置は加速器全体の制御および大電流化により生じる問題に対して試験・運転を支援するものである。本装置の特徴は加速器の状態を分散配置した計算機で同時に把握できるように、通常用いられているEthernetの他に、専用の高速ネットワーク (SCRAM Net: ~15MB/s)とデータ処理専用の計算機(DSP)を用いて高速のデータ集録系としたこと、データの集録・制御の変更に対して柔軟にハードウェア・ソフトウェアの変更・保守が行えるようにデータの入出力を扱うハードウェアは他の加速器施設で採用されている標準規格モジュールを採用し、制御・測定のMMI(Man Machine Interface)部分は他の加速器施設に先駆け全面的にソフトウェアによるものとしたことである。

制御画面等はGUI(Graphical User Interface)を採用し、その開発環境はオブジェクト指向プログラミングを用いて開発時間の短縮、保守性の向上を計り、視覚プログラミングを用いて容易な開発環境を整備した。

---

\* 大洗工学センター 基盤技術開発部 先進技術開発室

\*\* 原子力システム株式会社 (NESI)

\*\*\* 株式会社ペスコ (PESCO)

A computer control system for  
the PNC high power cw electron linac  
-Concept and hardware-

T.Emoto\*, Y.Kato\*\*, K.Hirano\*, Y. Ishikawa\*\*\*,  
H. Takei\*, M. Nomura\*, S. Tani\*

Abstract

Design and construction of a high power cw (Continuous Wave) electron linac for studying feasibility of nuclear waste transmutation was started in 1989 at PNC. The PNC accelerator (10MeV, 20mA average current, 4 ms pulse width, 50 Hz repetition) is dedicated machine for development of the high current acceleration technology in future need.

The computer control system is responsible for accelerator control and supporting the experiment for high power operation. The feature of the system is the measurements of accelerator status simultaneously and modularity of software and hardware for easily implemented for modification or expansion. The high speed network (SCRAMNet ~15MB/s), Ethernet, and front end processors (Digital Signal Processor) were employed for the high speed data taking and control. The system was designed to be standard modules and software implemented man machine interface. Due to graphical-user-interface and object-oriented-programming, the software development environment is effortless programming and maintenance.

---

\* Frontier Technology Section, Oarai Engineering Center

\*\* Nuclear Energy System Inc. (NESI)

\*\*\* PESCO Inc.

## 目次

1. はじめに	1
2. 背景	2
2.1 状態把握と実時間制御	2
2.2 システムの拡張性	4
2.3 データベースの必要性	6
3. 全体構成	8
4. ハードウェア	11
4.1 EWS(ワークステーション)	11
4.2 VME計算機	12
4.3 DSP計算機	14
4.4 シーケンサ	15
5. アプリケーション	17
6. 考察	19
7. あとがき	21
参考文献	22

## 表目次

Table 2.1 バスの比較	23
Table 4.1 VME計算機とシーケンサの入出力データ項目	24

## 図目次

Fig. 2.1	ビームパルス波形	25
Fig. 2.2	種々の計測システムから入力されるデータの5段階処理	26
Fig. 3.1	データ処理装置の概要	27
Fig. 3.2	データ処理装置の構成	28
Fig. 3.3	VME計算機とシーケンサ構成の詳細	29
Fig. 3.4	オブジェクト指向プログラミングの概念	30
Fig. 4.1	VME計算機のバス/ネットワーク接続	31
Fig. 4.2ab	VMEモジュールの構成	32
Fig. 4.3	VME/DSPシステムの概要	34
Fig. 4.4	DSP計算機ボードと高速ポートの接続	35
Fig. 4.5	DSPの応用	36
Fig. 5.1	DSPソフトウェアの概念	37
Fig. 5.2	GUIウインドの例	38

## 1. はじめに

事業団では、核種分離・消滅処理研究の一環として、大電流電子加速器を用いて高レベル放射性廃棄物中に含まれる長寿命核分裂生成物を消滅する可能性を探る研究を行っている。将来の消滅処理システムで必要となる加速器の大電流化技術を開発することを目的として、エネルギー10MeV、最大電流100mA、パルス幅4ms、繰り返し50Hzである大電流電子線形加速器の開発を推進している。

本計測・制御装置は大電流加速器の試験を支援し、運転を制御するものである。本装置の特徴は加速器全体の状態を分散配置した計算機で同時に把握できるように、通常用いられているEthernetの他に専用の高速ネットワーク(SCRAM Net: ~15MB/s)とデータ処理専用の計算機(DSP)を用いて高速のデータ集録系とした。データの集録、制御の変更に対して柔軟にハードウェア・ソフトウェアの変更・保守が行えるようにデータの入出力を扱うハードウェアは加速器施設等で用いられている標準規格モジュールを採用した。制御・測定のMMI(Man Machine Interface)部分は他の加速器施設に先駆け全面的にソフトウェアによるものとした。制御画面等は優れたGUI(Graphical User Interface)を採用して、その開発環境はオブジェクト指向プログラミングを用いて開発時間の短縮、保守性の向上を計り、視覚プログラミングにより容易な開発環境を整備した。

## 2. 背景

事業団では加速器の大電流化技術の開発を目的として、要素技術開発用の大電流CW電子線形加速器の開発を行っている[1]。本加速器は既存の加速器よりも平均電流で2桁程度高い電子線を加速するため、加速器を構成する全ての要素に対して既存の加速器にはない、大電流化技術を開発する必要がある。大電流化にあたっての基本的な技術課題は従来の加速器とは異なり、電子銃の構成、ビーム発散対策、ビームローディング(加速管に供給する高周波に対するビーム電流の負荷)による加速管温度の制御などが挙げられる。さらにこれらの課題は相互に関連しているので、ビームの安定性、加速管の熱除去および制御が重要な開発課題となる。

本加速器に対する計測・制御系はこれら課題解決を支援するために次の点を考慮して設計した。(1)未知の要素を持っている大電流加速器の状態を観測するために、実時間(リアルタイム)で加速器全体の状態を集録できる装置とし、加速器の状態を把握した上で相互に関連した要素に対して実時間で制御できる構成とした。(2)加速器の状態把握する計測器・手段および加速器の運転制御の手法等は運転・試験にともない考案・改良を続けるため、将来ハードウェアの変更ができるだけ減らすためにソフトウェアによる変更を中心としてシステムの柔軟性、拡張性を持たせた。

### 2.1. 状態把握と実時間制御

電子回路技術、特に初期のパルス技術は原子核・素粒子物理とともに発達したと言っても過言ではない。微弱な信号処理から膨大なカウントデータの処理までアナログ、デジタルを問わず、技術的性能の限界を常に利用してきた。デジタル技術、特に計算機および関連技術の急速な発達により、以前では不可能であった計測や制御が可能となった。たとえば、シンクロトロン等のリング加速器では、ビームの移動する時間があり、また周回しているビームの状態

を把握し、実時間で計算処理[2]を行い、反対側で制御する手法(stochastic cooling[3])が試みられている。このようなことが可能になつた背景には、物理的に大きな加速器の要素間を結ぶネットワーク技術の発達と計測した情報をナノ秒程度で処理できる並列計算機の発達がある。本加速器はこれら高エネルギー物理学実験用の加速器に比べればエネルギーは低く、小さな規模の装置である。しかし冒頭にも述べたように大電流CW電子ビームを加速する課題を解決するために、瞬時に計測・演算処理できる計測装置を製作した。

通常、線形加速器ではビームは一度しか加速されず、前段部で状態を検出して、後段部で制御することはほとんど不可能である。とくに電子線の場合はビームの速度はほとんど光速であり、またビームパルスの幅はピコ秒、ナノ秒のオーダーであるので、観測したパルスそのものへの制御は不可能である。本加速器のビーム波形はFig. 2.1に示すように、20ms毎に、4ms幅のマクロパルスに対して各々のミクロパルスがある。マクロパルスはCWもしくは準CWであるのでマクロパルス内のビームの挙動を観測することが可能である。特にBBU(Beam BreakUp: ビームパルス後方からビームが発散しビームが欠けていく現象)の解明、マクロパルス内のビームエミッタンスの解明等、今まで困難であった計測を可能とする計測・制御装置を目標として開発された。

加速器全体の状態把握は相互に関連した事象の解明、制御に必要である。本加速器は通常の加速器に比べてビームローディングが高く、ビーム電力が大きいことから、ビーム電流、加速管の電力レベル、加速管温度、還流部の同調、冷却水温度等が密接に関連している。通常の加速器ではこれらパラメータは比較的独立しており、単独に制御してマニュアルで運転することが可能である。本加速器ではビームのデュティが低い条件では通常の加速器と同じように扱えるが、デュティが高い(200kWのビーム電力)条件では、未知の部分が多く、加速器を安定に持続して運転するには、特別な工夫が必要である。また、進行波還流型加速管を8本持つ本加速器は各加速管の加速電力、位相角について同調する必要があり、操作はマニュアルで行えるものではなく、計算機による制御が必須のものとなる。

状態把握と実時間制御は数多くの検出器により加速器の状態を計測し、実時間で処理し、同時に制御を行い、加速ビームを安定化するものである。

## 2.2. システムの拡張性

本加速器は要素開発を目的としているため、装置のハードウェアおよびソフトウェアは試験の過程により変更される。ハードウェアの変更はソフトウェアに比べて困難な場合が多いので、本装置ではソフトウェアを中心とした(例えば、調整用のツマミ等をGUIによって画面操作とし、端末からの操作のみとして、可能な限りハードウェアをソフトウェアに置き換えた)構成としてある。使用するハードウェアは標準規格を用い、カスタムメイドにする装置を削減している。

本加速器の制御は機器の操作、機器のモニタ・表示が主である。試験の進捗にともない操作・表示方法の変更および今後の試験の結果または計算機シミュレーション等により自動制御の手法を段階的に製作していくので、その変更はできるだけ容易なものにする必要がある。

ハードウェアの拡張性について、原子核、高エネルギー物理学実験等の分野で標準規格である、機械的寸法、電源電圧、アナログ信号を定めたNIM規格[4]、さらにデジタル信号の規格を加えたCAMAC規格[5]、CAMAC規格をインテリジェンス化し、高速化し、大規模な高エネルギー物理実験で使われているFastBus[6] 規格等がある。一方、計算機の内部バス、周辺機器バスから発達した、ISA、VME、MCA、EISA、PCI等がある。これらの計算機内部バスは計算機以外の周辺機器を利用できるものが少ない。その中でVME-BUSは特定のプロセッサ(中央演算処理装置)に対して作られたバスではなく、計算機以外の周辺機器やVME規格のモジュールが数多く製作されており、工業用計算機の標準バスとなっている。Table 2.1にこれらバスの主な仕様を示す。

計測・制御装置を構成する上で常に問題になるのが、各機器からの信号をバスに接続するインターフェイスの部分である。計算機内部バスに接続できる周辺機器は主に計算機関連であり、また計算機の発達とともにその盛衰が激しい。汎用の計測制御用として使用できるバスはCAMAC規格とVME規格のみである。本装置にはCAMAC規格が目的に最も適したものであるが、規格が1970年代初めに定まり、現在の計算機能力を十分に生かせない事情がある(例えば、バスの速度が遅いためプロセッサ、ローカルメモリー等の構成が制限を受け

る)。しかし、内外の大型加速器施設で開発された各種周辺機器(モジュール)は加速器の計測・制御に最適なものが数多くある。VME規格は工業用規格として発達した経緯から、CAMAC規格に比べるとモジュールの選択は限定される。しかしバスの速度はCAMAC規格より一桁以上速く、使用できる計算機の種類および構成が豊富である。本装置では、バスの速度を優先し、VME規格を採用した。

バス規格とモジュールの関係は、単に性能だけの問題でなく、業界標準になれば、より多くのモジュールが利用できる。大規模な加速器施設や特殊な機能を要求される場合は、独自にバス規格を決めて製作し使用している施設もある。小規模な施設や開発時間・予算が限られているときは業界標準のバス、モジュールを使用することにより、ハードウェアだけでなくソフトウェアに使われる労力を大幅に削減することができる。

その他バス標準として採用した計算機外部バス規格に、EthernetとGPIB規格がある。Ethernetは計算機間ネットワークを構成する標準的手段であり、GPIB規格はIEEE488規格とも呼ばれ、計測機器を結ぶ小規模のバス規格で、対応している計測機器が数多くあり、VME計算機にインターフェイスを設け入出力バスとして採用した。

ソフトウェアの拡張性についてはオペレーティングシステムおよびアプリケーションソフトウェアの項目で概要を述べ、詳細については後報の計測・制御系-ソフトウェア-編で報告する。

### 2.3 データベースの必要性

データの整理・保管としてデータベースを導入することは、計算機の記憶容量増大とコストの低減にともない、一般的になり、そのためのアプリケーションも数多く開発され、フォーマットも標準化されつつある。加速器を用いた物理学実験等では限られたマシンタイムの内にできるだけ多くの情報を集録するために、ハードウェアは以前からいろいろな手法が開発されている。たとえば、波高分析器では実時間で検出したパルスのヒストグラムを表示するハードウェアが使用されている。しかし、計算機ハードウェアの発達により、近年では汎用の計算機を用いてソフトウェアで構成する手法が取られている。ソフトウェアによってデータベースも含んだアプリケーションを開発することにより、データの一貫性の向上、試験・解析のオンライン化、試験中の解析が可能となり、データ処理した結果を、直ちに試験に反映することが可能となる。

Fig. 2.2 に一般的な計測・制御における一連の操作とデータベースの関係を示す。

ステップ1:データを集録するアプリケーションおよび機器を制御するアプリケーションに対してデータを設定する。必要に応じてデータベースからもデータが供給される。

ステップ2: 計測機器からの集録信号および機器制御信号を選択し、条件設定をする。

ステップ3: 集録データの処理およびフォーマット。

ステップ4: データファイルの整理および統合。

ステップ5: データのセーブ。必要に応じてデータベースにも書き込む。

この一連のステップはその用途により自動あるいは、マニュアル操作によって行われる。ステップ4のデータは初期的な解析により、オペレーターがステップ1の条件設定にフィードバックをかけることができる。

これらの操作を解析処理を含みオンラインで一つの端末(ターミナル)から行うと、試験の進捗を大幅に改善することができる。オンラインのデータベース

をステップ1、ステップ4に組み込むことにより、さらに自動化が可能となる。特に、一つの事象に対して大量のデータを集録するような試験では、個々の事象に対してマニュアルでデータを集録していくは時間がかかり、試験によっては実施不可能な場合もある。本加速器の試験においては、加速器全体の状態把握を行うために、ハードウェアおよびソフトウェアの構成に上記のようなデータベース、オンライン化を考慮した。データベースの詳細については、後報の計測・制御系-ソフトウェア-編で報告する。

### 3. 全体構成

全体構成は前章で検討した高速のデータ集録システムの拡張性を考慮して、利用できるオペレーティングシステムから、ハードウェアの階層(layer)を決定した。Fig. 3.1に示すように、レベル1はオペレーターに情報を表示し、入力操作を行うワークステーション群で構成された階層で、Ethernetで計算機間を結んでいる。また付帯設備を制御するシーケンサ、装置全体のファイルの管理、データベースを管理する計算機(サーバー)もこの階層(Ethernet)に接続されている。レベル2は本装置の制御の中心となる階層で、VMEバス規格のVME計算機群より構成される。計算機間はEthernetおよび高速なSCRAMNetで結ばれている。この階層の計算機には入出力インターフェイスが接続され、データの入出力および機器の制御が行われる。レベル3はVME計算機の下に専用バスで接続されたデータ処理専用のフロントエンド計算機群である。フロントエンド計算機にはDigital Signal Processor (DSP)を採用し、DSPプロセッサに直接接続されたHigh Speed Communication PortによりTransputer接続が可能である。このポート間を並列に計算機で接続することにより、DSP計算機群が一体となって高速の演算処理装置を構成することが可能である。

DSP計算機には入出力インターフェイスがあり、単独もしくは複数のDSP計算機にVME計算機から専用バスを通してデータの入出力を行う。

Fig.3.2に各レベルとネットワークの関係を示す。レベル1のEthernetはネットワークのハードウェア仕様として、現在標準的なものである。通信の手順(protocol)により、UNIXではTCP/IP、UDP/IP、TELNET、FTP等があり、特徴により使い分けられている。通信速度は10Mbit/sあるが、現実にはprotocolのオーバーヘッド等により100kByte/s程度になる。Ethernetよりも10倍速いFDDI規格(所内LANで使用されている)があるが、本装置を計画した当時では、小規模の装置においては一般的でなかった。Ethernetはネットワークを構成する周辺機器が豊富なこと、計算機の多くでEthernetインターフェイスが利用できることにより、EWS(Engineering Work Station)を中心としたMMI(Man Machine Interface)部分に採用した。レベル2のVME計算機間はEthernetとSCRAMNetの二種類のネットワークにより接続されている。EthernetはVME計

算機とEWSとの間でソフトウェアの関与した交信に用い、SCRAMNetはVME計算機間でハードウェアによる高速の交信(~15MB/s)を行う。SCRAMNetの動作は各VME計算機内の主記憶装置内の指定した領域を全てのVME計算機で共有するもので、あるVME計算機である領域に書き込めば、全てのVME計算機で読み取ることができるものである。VME計算機間で交信しながら複数の計算機で同時に計測、処理、制御を行うことができる。

一台のVME計算機は電源とVMEバスバックプレーン(Fig. 4.1)で構成され、VMEモジュールが20台入るスロットを持ち、計算機モジュール、各種入出力モジュールなどが入る。レベル3のDSP計算機群は、とくにバス構造、ネットワーク構造ではなく、DSPに直接接続された6チャンネルのHigh Speed Communication Portである。このポートを相互にHypercube形状などに並列接続したDSP計算機群で、入出力を含んだ並列フロントエンドプロセッサを構成する。Fig.3.2の構成は16台のDSPを4次元で構成した場合である。本装置のDSP計算機は、VMEのモジュールとして、VMEバスで接続されている。シーケンサを含んだ全体の詳細接続構成をFig. 3.3に示す。

ソフトウェア構成の詳細は後報で述べるが、Fig. 3.1に示すように、レベル1はマルチタスク、マルチジョブに対して信頼性の高いUNIXをベースとしたオペレーティングシステムとし、MMIを良くするためにGraphical User Interface (GUI) に優れたオペレーティングシステムを採用した。レベル2の計測、制御部分は実時間制御が要求され、UNIXに実時間制御の機能がつけ加えられたUNIXを採用した。レベル3のDSP計算機は標準的オペレーティングシステムがなく、またオペレーティングシステムを用いるとそのオーバーヘッドのために動作速度が遅くなるため、当初のアプリケーションではオペレーティングシステムを用いずVME計算機から見てUNIXのドライバーになる構成とした。

アプリケーションの開発言語は開発した資産の有効利用と保守の点からオブジェクト指向の言語で記述し、またインハウスで容易に変更、拡張ができるようGUIの部分には言語で記述しなくてもプログラミングができる視覚的プログラミング(Visual Programming)を採用した。オブジェクト指向とは、従来のプログラミングの方法とは異なり、実世界にある種々のものをオブジェクト(対象)とみなし、オブジェクト間でメッセージをやりとりさせて情報の処理

を行う、という考え方を基にプログラムを書く方法である。Fig. 3.4 にオブジェクト指向言語の概念を示す。通常のプログラミングはプログラマーと開発言語との関係が重要であるが、オブジェクト指向のプログラミングではソフトウェア集積回路として供給されるオブジェクトをユーザー(Fig. 3.4における consumer)が目的に合せて組み立てることが重要となる。

## 4. ハードウェア

### 4.1 EWS(ワークステーション)

ワークステーションはオペレーターが操作する本加速器施設の全体統括装置となる。Fig. 3.2に示すように、4台のEWS内1台がサーバー計算機としてハードディスク、カートリッジテープ等補助記憶装置が接続されている以外、同じものである。特定のEWSが特定のアプリケーションを動作させるものではなく、どのEWSからでも同じように操作でき、Ethernetの接続口があるところであれば、ラップトップのEWSを現場に持ち込んで操作することができる(但し機器を操作するアプリケーションは同時には1台のEWSでしか操作できないよう制限してある。)。

EWSの選定はMMIを良くするために、使い易いGUIを持ち、その開発環境が整っており容易に開発できることが必要である。3章で述べたようにGUI、オブジェクト指向言語を使用する要請からNEXTSTEP(NeXT社)のオペレーティングシステムと開発環境を採用した。NEXTSTEPでの開発環境はユーザ・インターフェイスがしっかりとしており、Visual ProgrammingによるInterface Builderを利用すると、他のEWSでアプリケーションを作成する場合と比べ、1/10の手間で開発することができるといわれている[7]。加速器の前段部を試験した入射部試験においてインハウスで計測・制御用に製作したアプリケーションは大変良好で、その製作時間は他のXウインドウ等のアプリケーションに比べ短期間で製作することができた(通常、Xウインドウのアプリケーションをエンドユーザが製作することは困難である)。

ハードウェアの選択は開発環境をNEXTSTEPとしたのでインテル社(プロセッサについてのみ)、ヒューレット・パッカード社(PA-RISC 7200)、サン・マイクロシステムズ社(SPARC)の3社となった。本装置の計画段階では、インテル社のCISC (Complex Instruction Set Computer)プロセッサ:486は他2社のRISC (Reduced Instruction Set Computer)のプロセッサに比べ、計算処理能力(MIPS値等)において劣り、また計算機を構成するハードウェアは豊富に存在していたが、もともとパーソナル計算機から発展した計算機という理由から信頼

性を考慮して選択しなかった(報告書執筆時点では、インテル社のプロセッサは市場の寡占とともに計算能力は急速に向上し、計算機もサーバーに用いられる高い信頼度・処理能力を持つものが数多く生産されている。)。ヒューレット・パッカード社のRISC プロセッサ PA-RISC 7200はその計算能力の高さとともに、HP-UNIXカーネル(kernel)の深くまでNEXTSTEPが移植されているので、動作の安定性は非常に高く、評価用に導入した機種でのNEXTSTEPの動作は非常に安定したものであった。サン・マイクロシステムス社のSPARCもRISC プロセッサを用いており、評価もヒューレット・パッカード社と同等であった。最終的にサン・マイクロシステムス社のSPARCを採用した理由はNEXTSTEP3.3のバーションアップとして予定されているOPENSTEP4.0がヒューレット・パッカード社のPA7200をサポートしないことが明らかになつたためである。

操作用のEWSには、36インチのHigh Definition TeleVision (HDTV) がEWS の画面と同じ内容を表示できるようにスキャンコンバーターを介して取り付けられている。大型画面による表示は、オペレーターが操作している画面を他のオペレーターからも見ることができ、運転に必要な加速器の運転状況等をモニターするためのものである。また監視カメラによる加速室等の遠隔モニター、デジタルオシロスコープの画面などのビデオ画像も選択して表示することができる。

#### 4. 2 VME計算機

通常、一台のVME計算機はFig. 4.1 に示すようにクレート(crate)と呼ばれるVMEバスを持ったケースと電源から構成されている。マスターとなるボード計算機にはネットワーク等基本的入出力ポート、ローカルメモリ(RAM:Random Access Memory)等が組み込まれ、必要に応じVMEバスを通じてリモートメモリ(RAM)、入出力インターフェイス等をスロットに組み込むことができる。

本装置ではEthernetインターフェイスとRAMを内蔵したボード計算機と

SCRAMNetインターフェイスの各1スロットを1クレートの基本構成としている。12台のボード計算機はEthernetとSCRAMNetにより接続され、分散して配置された3グループにまとめられている。各グループ間を結ぶEthernetおよびSCRAMNetは光ケーブルにより配線され、電気的ノイズ、接地による電位誘導の問題を避けている。3つのグループはFig. 3.3に示されているように、(1)コントロール室内のVMEサーバ(1台)、(2)クライストロンギャラリーのステッピングモーター用(2台)、低レベルコントロール用(3台)、(3)加速器室脇のVMEモニター用(2台)、VME-DSP用(3台)、VMEコントロール用(1台)である。Fig. 4.2abに各グループのVMEモジュール配置を示す。将来拡張できるように余裕を取り、クレートのスロットは全てモジュールが配置されていない。各モジュール動作の詳細は後報のソフトウェア編に譲るが、モジュール類はステッピングモーター用コントローラー、電圧測定用ADC、デジタル入出力インターフェイス、GPIBインターフェイス、シリアルインターフェイスおよびADC/DACの付属したDSP等である。

VMEボード計算機モジュールはインテル社486系、モトローラ社68000系、RISC系のプロセッサ等が利用できるが、EWSと同様にオペレーティングシステムの選択と信頼性の理由から、ヒューレット・パッカード社のRISC プロセッサPA7100を用いたVME計算機モジュールHP9000シリーズ743rtを採用した。VME計算機のオペレーティングシステムはレベル1のEWSの計算機との接続およびprotocolの互換性を考慮しUNIXを基本とするものを選択した。当初、UNIXは実時間制御のオペレーティングシステムとして開発されておらず、実時間制御を行うには最適なものではなかった。その後、ワーカステーションのオペレーティングシステムとして急速にUNIXが使用されるようになり、実時間制御機能を付加したUNIXが利用できるようになった。VxWorks、LINX、HP-RT等が入手可能である。ヒューレット・パッカード社のHP-RTはLINXを同社が手を加え、VME計算機HP900シリーズ700系の標準オペレーティングシステムとなっている。高エネルギー物理学研究所(現高エネルギー加速器研究機構)、Spring-8等の使用実績を考慮した上で、オペレーティングシステムHP-RTとVME計算機743rtをレベル2の計算機として採用した。

#### 4. 3 DSP計算機

本装置のDSP計算機および接続されるインターフェイスモジュールは、物理的にはVMEモジュールと同じ寸法で、バス構成はVMEバスにDSP専用バスを拡張したものである。Fig. 4.3にDSP計算機の構成および接続を示す。一台のクレートはマスター計算機としてVME計算機モジュール(743rt)とSCRAMNetモジュール、DSP計算機モジュールが2台ないし4台で構成されている。各DSP専用バスには各DSPに対応した入出力インターフェイスが接続されている。DSP計算機モジュールはFig. 4.4に示すように、DSPプロセッサ、RAM、ROM、VMEおよびDSP専用バスのコントローラー等が一台のVMEモジュールの搭載されている。

DSP計算機のフロントパネルには6入力のHigh Speed Communication Portがあり、並列接続を行うことができる。DSP計算機の並列化は加速器の特性、制御方式が明らかになった段階で、レベル3のDSP計算機による自動化を行うことを最終目的としている。最初の段階ではFig.4.2bに示すVME-DSPクレート#1~#3の各DSP計算機に各加速管の計測および計算処理を行わせている。加速管一台あたりADCは電子ビームの位置検出用に4入力、加速管還流部の高周波電力測定用に3入力、ビーム電流用に1入力を使用し、最小 $10\mu s$ 程度のサンプリングで一つのマクロパルス(4ms)をすべてサンプリングできる速度と容量を持たせてある。

Fig. 4.2aのLow Level Control#2および#3のDSP計算機はFig. 4.5に示すようにアナログ制御回路網をDSP計算機を用いたデジタル方式で行うものである。DSPプロセッサを用いることにより制御回路網をソフトウェアのみで構成することができ、またハードウェアでは困難な回路網を実現することができる。これらのDSP計算機は加速器に高周波を供給するクライストロンの制御に使用する予定である。現在、クライストロンのフィードバック制御回路は高エネルギー物理学研究所(現高エネルギー加速器開発機構)でのクライストロン単体試験での実績からアナログ回路により特性(伝達関数)を制御している。今後

の試験によりクライストロンおよび加速器の特性がより明らかになった段階で、クライストロン制御回路の高安定化(高周波電力の安定度は加速ビームのエネルギー安定度に直接影響する)をADC、DAC、DSP計算機の組み合わせで実現することを計画している。

DSPプロセッサの選択はtransputer接続が可能という条件と開発環境の整備の点から、テキサス・インスツルメンツ社のプロセッサTMS320C40を採用した。DSP計算機モジュールはMTT社が開発したFig. 4.4に示すようなVME規格でDSP専用バスを持った計算機モジュールおよび専用クレートを採用した。

#### 4.4 シーケンサ

シーケンサは空気処理、冷却水の付帯設備系、クライストロン電源、電子銃低圧電源、加速器本体(真空度、温度、流量等)の系統に使用され、それぞれの系統の運転・制御に独立したシーケンサが使用されている。各シーケンサには同じ機種を用い、外部とのインターフェイスはEthernetを使用した。これらシーケンサはEWSのEthernetに接続されている。外部との交信はシーケンサ内のEthernetインターフェイスのバッファ領域に書き込んだデータをEthernetから計算機が読みに行く方式で行っている。計算機から制御データを必要とする電子銃とクライストロン電源系は計算機からシーケンサ内のEthernetインターフェイスバッファに書き込みシーケンサが読みに行くことによりデータを受け取る。

シーケンサはプラント制御で広く使用されている三菱電機(株)社のMELSEC-Aシリーズを用い、EthernetインターフェイスはAJ71E71を使用している。Ethernetの通信protocolはネットワークの負荷を考慮してコネクションを行うTCP/IPではなくUDP/IPを使用し、エラー処理等通信の管理が必要な場合はアプリケーション側で行っている。付帯設備系のデータは機器の状態をモニター表示するもので機器の動作には関係していない。付帯設備の運転操作は計算機を経由せず、それぞれの遠隔制御盤から行われる。クライストロン電

源、電子銃低圧電源の操作は遠隔操作盤から行えるが、Ethernetを経由して計算機から操作できるようにしてある。

Fig. 3.4と対応してTable 4.1にVME計算機、DSP計算機、シーケンサによる計測および操作の項目を示す。このうち放射線管理システム(Table 4.1のRadiation safty system)は、本装置と完全に独立したネットワークで構成され、放射線管理システム内のハードディスクをEthernetを経由してNFSマウントしてデータの受け渡しを行う。NFSマウントされたハードディスク上のデータは一定の周期で更新される。

## 5. アプリケーション

アプリケーションは基本的にはGUI、本体、ドライバーに別れる。GUIはオペレーターが操作するMMIの担う部分でNEXTSTEPのオペレーティングシステムのもとにあり、開発環境であるInterfaceBuilderによりVisual Programmingの環境により開発された。

本体はNEXTSTEPとHP-RTのオペレーティングシステムのもとにあり、GUIとのやり取りをする部分はNEXTSTEPによりオブジェクトC言語で書かれ、オブジェクト指向のプログラミング構成となっている。VME計算機と入出力・処理を行うアプリケーションはHP-RTのもとC言語で書かれ、NEXTSTEPのアプリケーションとEthernetを通じてTCP/IPのprotocolで交信を行う。

ドライバーはVME計算機のオペレーティングシステムHP-RTの入出力機器に対する部分を製作した。標準的なドライバーはオペレーティングシステムまたはVMEインターフェイスカードに付属しているが、使用するVME計算機による。VME計算機のオペレーティングシステムHP-RTに対し、いくつかのVMEインターフェイスカードについてドライバーの製作を行った。モジュールに対して、ドライバーはその後の変更に対して、アプリケーションの本体、GUIの部分を書き換えることにより、アプリケーションを作り替えることができる。

DSP計算機はオペレーティングシステムで管理されず、アプリケーションだけで構成されている。Fig. 5.1に示すように、DSP計算機および入出力のアプリケーションはVME計算機から見てドライバーのように扱い、ドライバーがDSPのアプリケーションとなっている。電子ビーム位置検出の例では、4入力のデータを計算処理して二次元の位置データとしてVMEドライバーに送る。VME計算機側では、VME入出力インターフェイスボードのドライバーと同じようにデータを取り込む。

GUIの例として、電子ビーム操作画面をFig. 5.2に示す。この画面はビームの位置表示と集束系(ソレノイドコイル、Qマグネット)および偏向系(ステアリングコイル)を制御するものである。左下にある操作画面は全体画面の必要なマ

グネットまたはコイルをクリックすると表示される。アプリケーションの詳細、オブジェクト指向プログラミング、GUIについては後報"ソフトウェア編"で述べる。

## 6. 考察

計算機を用いた汎用の計測・制御装置で問題となるのが、製作メーカーの違う雑多な計測器、制御装置を計算機でインターフェイスすることである。この事情は計算機のバスに対して周辺機器がインターフェイスされてきた理由による。入出力インターフェイスも含め、一つのメーカーで閉じている装置であれば、ハードウェアおよびソフトウェアの構成が比較的容易に実現できる。しかし、異なるメーカーの計算機、周辺機器を集めて計測・制御装置を構成する場合はハードウェア、ソフトウェアともに困難な場合が多い。さらに、2.2章で述べた拡張性については、一つのメーカーで閉じている装置であっても、アプリケーションはカスタムメイドでありソフトウェアの変更はインハウスで行うこととは難しい。

CAMAC、VME等の汎用バスはハードウェアの規格が定まっているので、利用できるモジュールは多様であるが、ソフトウェアの環境は接続される計算機に左右される。CAMACでは、計算機バスとCAMACバスのインターフェイス(コントローラー)に対して計算機のドライバーがあれば、CAMACの制御コマンドは単純なのでアプリケーションを作ることは困難ではない。VMEでは使用する計算機のオペレーティングシステムに対するドライバーが必要となる。

アプリケーションを本体のプログラミングのみで製作すると、MMIの部分は非常に貧弱となって、昨今のGUI環境とは掛け離れたものとなる。GUIの部分をインハウスで改造・製作を試みると、UNIXの環境で広く使われているX-windowでユーザーが実現することは非常に困難である。

本装置ではVMEバスのハードウェアを中心として、インハウスでGUIを含めたアプリケーションが開発できる環境を、UNIXをベースとするオペレーティングシステムNEXTSTEPによって実現した。インハウスでのNEXTSTEPにより開発したアプリケーションは大変良好で、平成8年に行った入射部試験[8]において使用された。

本装置の開発で困難であったことは、ハードウェア、ソフトウェアの将来性を見極めることであった。ハードウェア、特に、プロセッサは急速な発展のた

め3年も経つと様子が違ってしまう、場合によっては製造中止になることさえある。本装置を計画した、平成4年当時に現在のハードウェアの状況を想像することは難しかった。さらに選択したオペレーティングシステムが主流になれば、市販のアプリケーションや他の研究所等が開発した資産が利用できる。UNIXの選択は科学技術の分野では一般的なものであるが、NEXTSTEPの選択は特殊なものである。しかしオブジェクト指向のプログラミングとGUIの利点からNEXTSTEPを選択した。計測・制御装置としてのアプリケーションはNEXTSTEP内で閉じており、インハウスでの開発には外部の状況はさほど問題とならない。

本装置の仕様を検討する時点で、まだ普及していなかったが、その後発展したものにVXIバス[9]がある。2.3章では述べていないが、VXIバスはVMEバスを拡張し計測・制御用に開発したものである。平成4年度の時点では、ヒューレット・パッカード社など数社がモジュールを製作していたが、その種類は非常に少なかった。現時点では、とくにヒューレット・パッカード社の装置は制御用計算機として本装置に採用したVME計算機と同等のものが利用でき、モジュールも豊富になっている。もし仕様を検討する時点でVME計算機に、現時点でのヒューレット・パッカード社のVXIモジュールおよび計算機を使用できたならば、VMEレベル計算機のソフトウェアおよびハードウェアが一社にまとまり、容易に装置を構成できたものと思われる。

## 7. あとがき

本報告書では、大電流電子線形加速器開発に用いる計測・制御装置の概要とハードウェアについて報告した。

本装置の特徴は加速器全体の状態を同時に把握できる高速のデータ集録系と試験・実験の過程に合せて装置のハードウェア、ソフトウェアの変更・拡張が容易に行える装置である。本装置はその実現に対してハードウェア・ソフトウェアの標準化および開発環境を整備した。

現在、加速器のフルビーム試験に向け調整・準備に対して本装置が使用され、Graphical User Interfaceを重視した制御画面の操作性は良好である。現時点でのアプリケーションは今後インハウスでアプリケーションを試験に合せて改良するための例となる位置付けである。今後、試験の進捗とともにアプリケーションを開発する段階で本装置の真価が問われるであろう。

## 参考文献

- [1]若林 利男、山岡 光明、小無 健司、高下 浩文、"高速炉および加速器による核変換研究の現状、" 動燃技報 № 82、p96 (1992)
- [2]G. Lambertson, Beam Bunch Feedback, Frontiers of the Accelerator Technology, World Scientific, New Jersey, p489~505(1995)
- [3]J. Marriner, D. McGinnis, An Introduction to Stochastic Cooling, AIP Conference Proceedings 240, American Institute of Physics, New York, p694~761(1992)
- [4]NIM standard [formerly TID 20893 (Rev) and NIM/GPIB]. DOE/ER-0457T, U.S. NIM committeee, May 1990, Standard NIM Instrumentation System, NTIS, U.S. Department of Commerce, Springfield, Verginia 22161
- [5]Computer Automated Mesurement and Controls, IEEE Standard 583-1982, 595-1976, 683-1976, IEEE Standard Modular Instrumentation and Digital Interface System (CAMAC), Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 345 East 47 Street, New York, NY 10017
- [6]ANSI, "IEEE Standard FASTBUS Modular High-Speed Data Acquisition and Control Standard," ANSI/IEEE Standard 960-1986
- [7]前田 英明、"代表的な機種、"別冊日経サイエンス スーパーパソコン、vol.104、p39 (1992)
- [8]江本 隆、王 元林、遠山 伸一、野村 昌弘、武井 早憲、平野 耕一郎、山崎 良雄、大村 明子、谷本 育律、谷 賢、"大電流電子線形加速器の開発 -設計概要・入射部試験-、"動燃報告書 TN9410 98-010 (1998)
- [9]VXI-bus, IEEE Standard 1155-1991, IEEE Standard VMEBus Extensions for Instrumentation, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 345 East 47 Street, New York, NY 10017

Table 2.1. バスの比較 (Comparison of bus characteristics.)

Bus	Data path (bit)	Clock (MHz)	Maximum data rate (Mbytes/s)	Interrupts
CAMAC	24	1	3	from each module
VME	32	10	40	priority bus
ISA	16	8.33	8	-
EISA	32	8.33	33	-
MCA	32	10	160	-
PCI	32	33	132	-

Table 4.1 VME計算機とシーケンサの入出力データ項目  
(Input and output data items of VME computers and sequencers.)

Computer / Sequencer		Monitor	Operation
VME server	VME	beam position beam current RF level slit current collimator current DCCT current electron gun current (CT) Faraday cap current (BD)	hard disk data readout SCRAMNet assign
Low level cont. #1	VME	up / down module readout low level controller status RF switch module status interlock module status klystron monitor RF level monitor klystron amplifier status signal generator status frequency counter monitor	timing up / down module low level controller signal generator
Low level cont. #2~#3	VME /DSP	—	—
Stepping motor Drive #1	VME	tuner / stub position alarm monitor tuner / stub operation	stepping motor alarm set
Stepping motor Drive #2	VME	oscilloscope data	oscilloscope, multiplexer
VME control	VME	vacuum gauge vacuum gauge (ion pump) interlock status oscilloscope data	magnet set (accelerator) magnet set (electron gun) multiplexer oscilloscope
VME monitor	VME	temperature monitor radiation loss monitor	radiation loss monitor
VME DSP #1~#3	VME/DSP	beam position beam current RF level slit current collimator current DCCT current electron gun current (CT) Faraday cap current (BD)	function set
Radiation safty system	EWS	dose alarm status	
Electron gun control	Sequencer	status (output, interlock)	output set, on / off
Radiolysis process	Sequencer	status (interlock)	
Cooling equipment	Sequencer	status temperature, flow rate	
Klystron remote control	Sequencer	status (output, interlock)	output set, on / off
Accelerator monitor	Sequencer	vacuum, temperature, flow rate, interlock beam line magnet output	

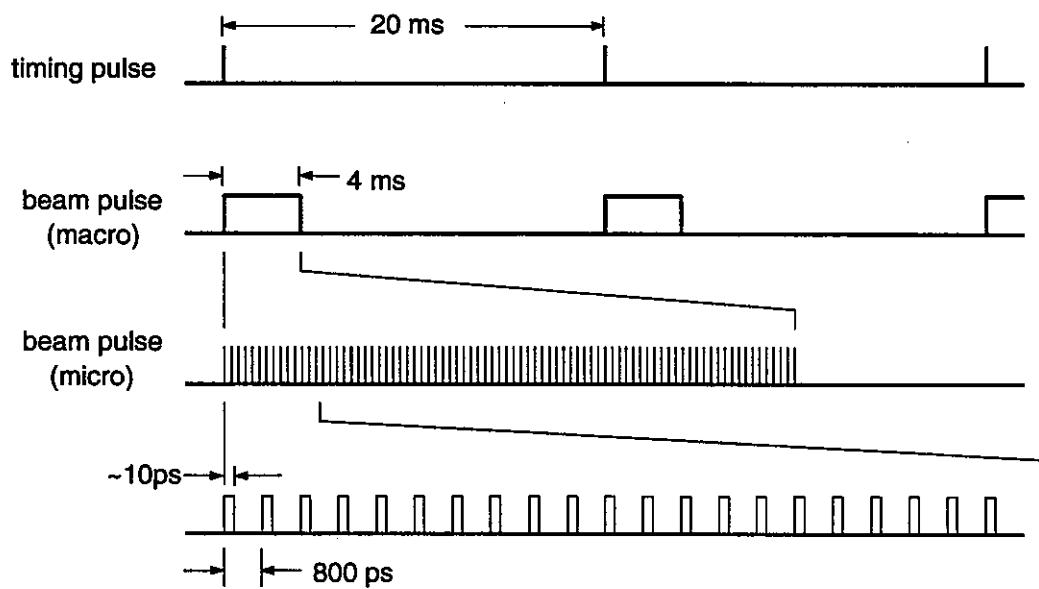


Fig. 2.1 ビームパルス波形 (Beam pulse shape.)

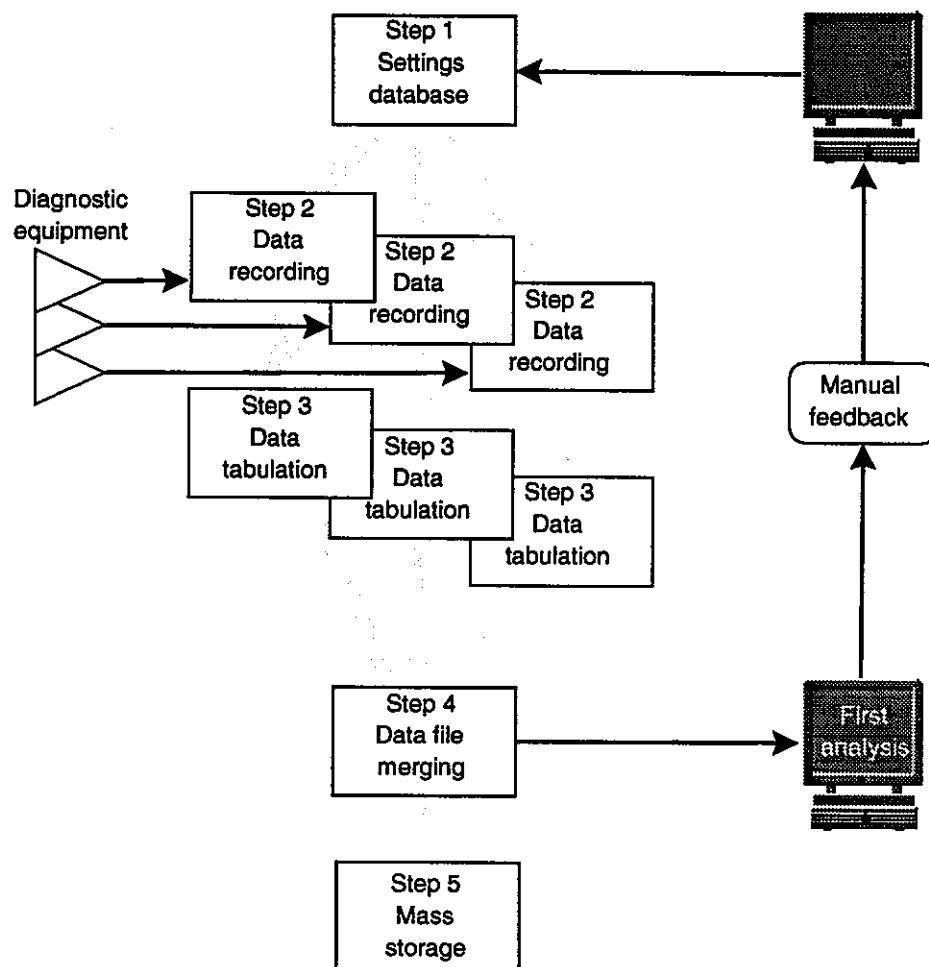


Fig. 2.2 種々の計測システムから入力されるデータの5段階処理  
(The acquisition of data inputted from various diagnostic systems proceeds in five stages with human interactions.)

Hardware / Software

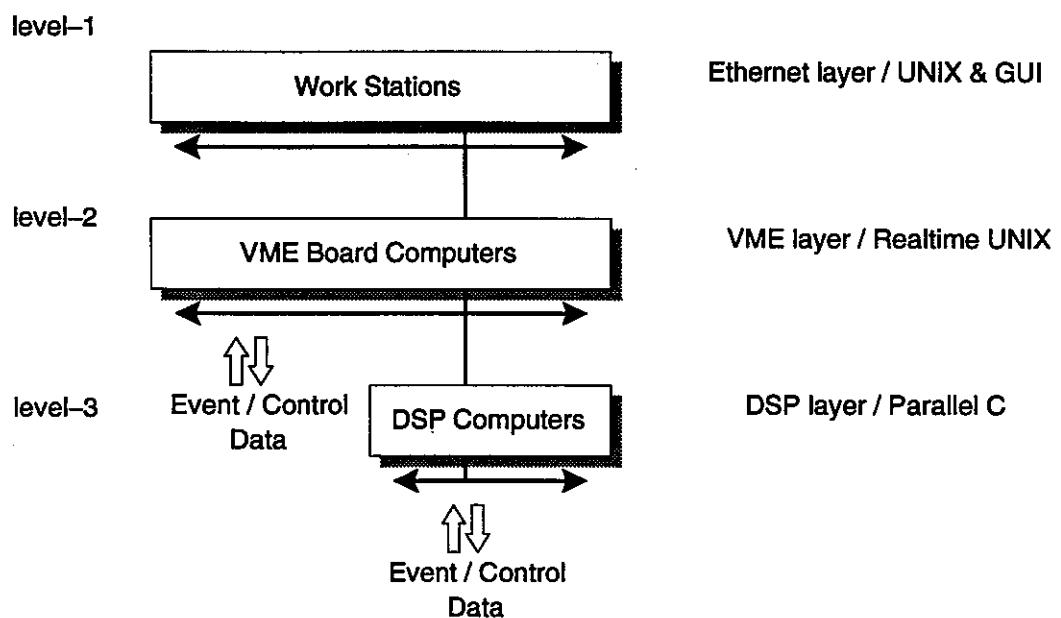


Fig. 3.1 データ処理装置の概要  
(Overview of the data acquisition system.)

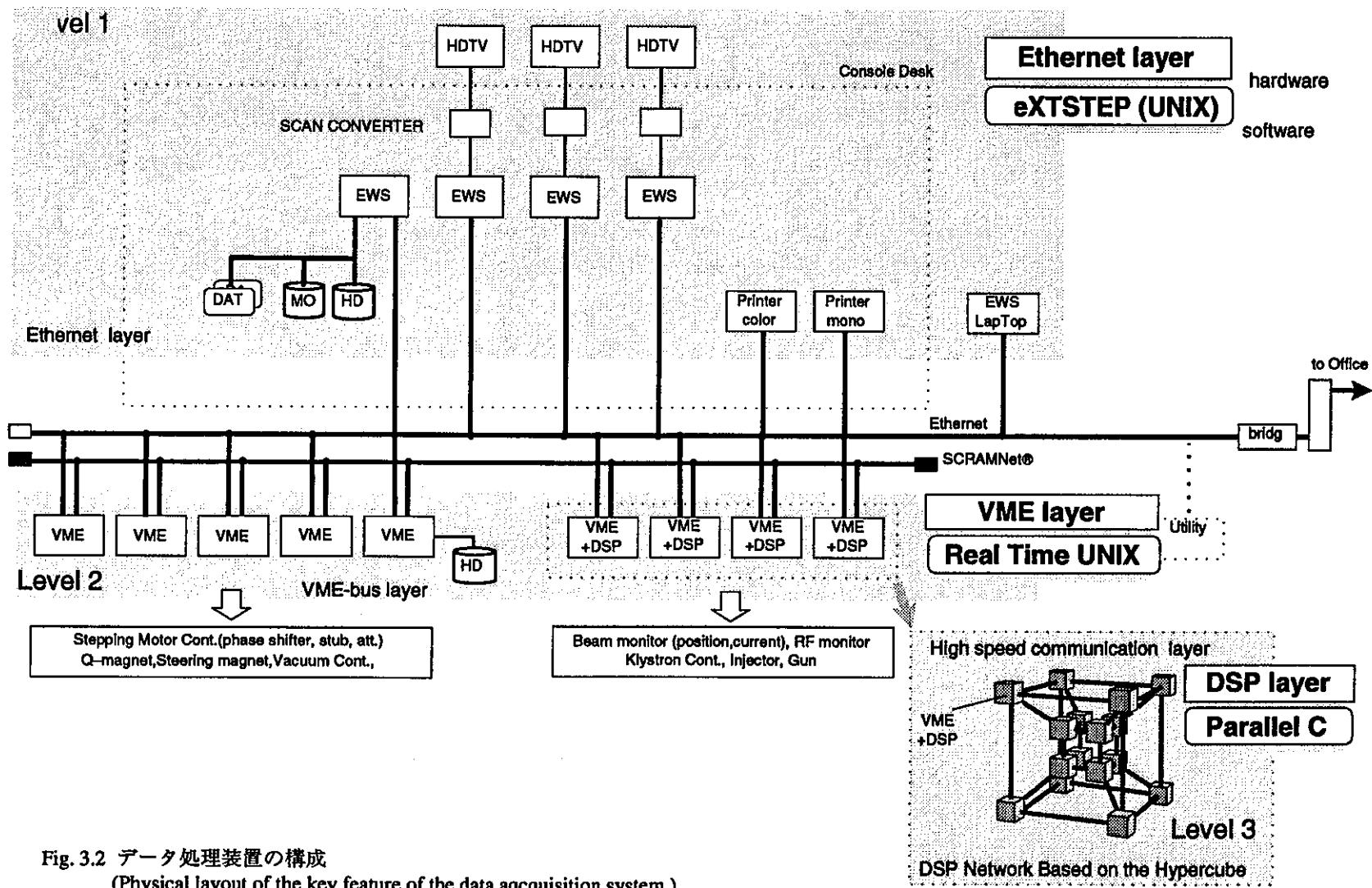


Fig. 3.2 データ処理装置の構成  
 (Physical layout of the key feature of the data acquisition system.)

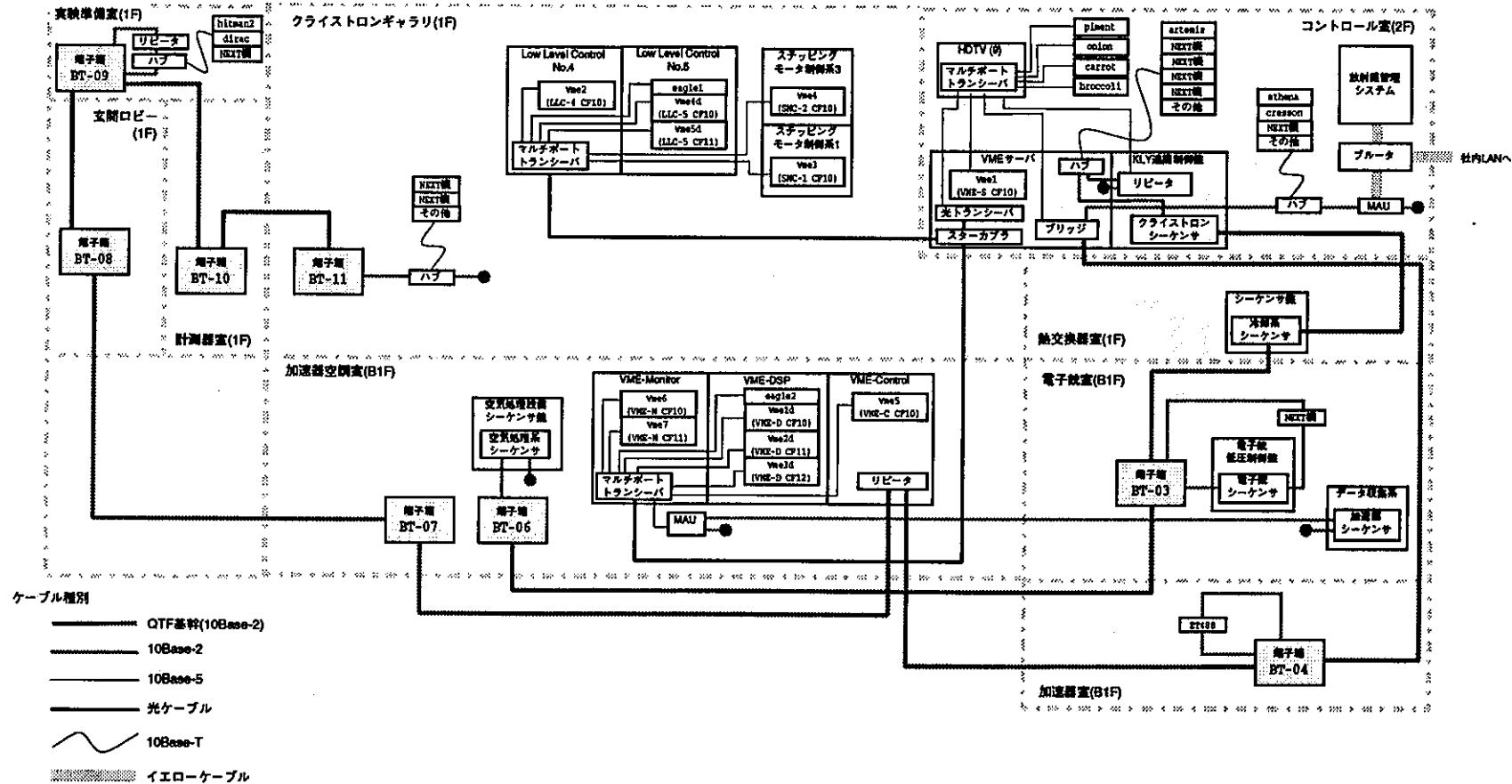


Fig. 3.3 VME計算機とシーケンサ構成の詳細  
(Physical composition of the VME computer and sequencer part of the data acquisition system.)

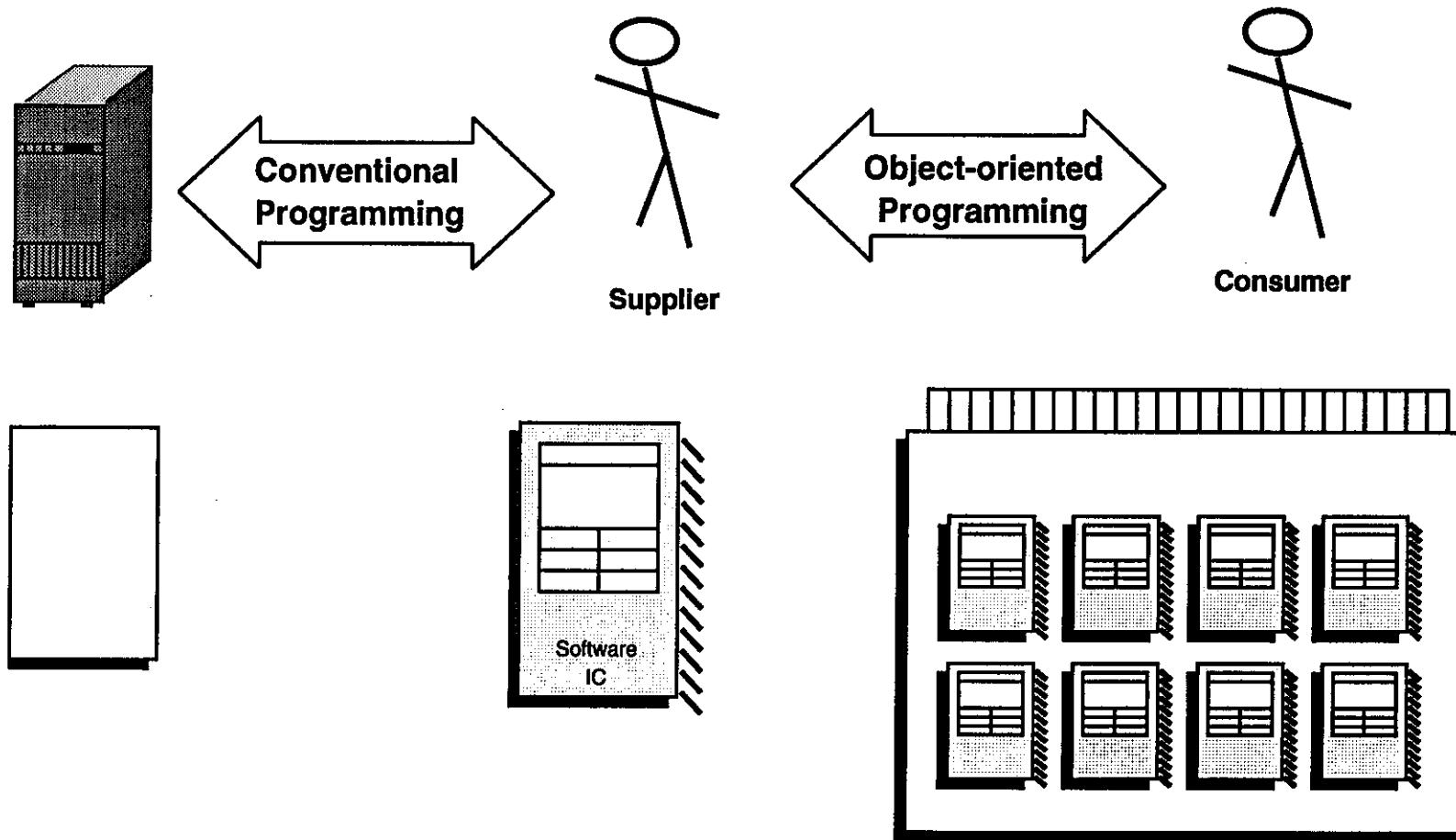


Fig. 3.4 オブジェクト指向プログラミングの概念  
(Object-oriented programming concept.)

Program-building versus system-building. Conventional programming tools emphasize the relationship between a programmer and his code, while object-oriented programming emphasizes the relationship between suppliers and consumers of code.

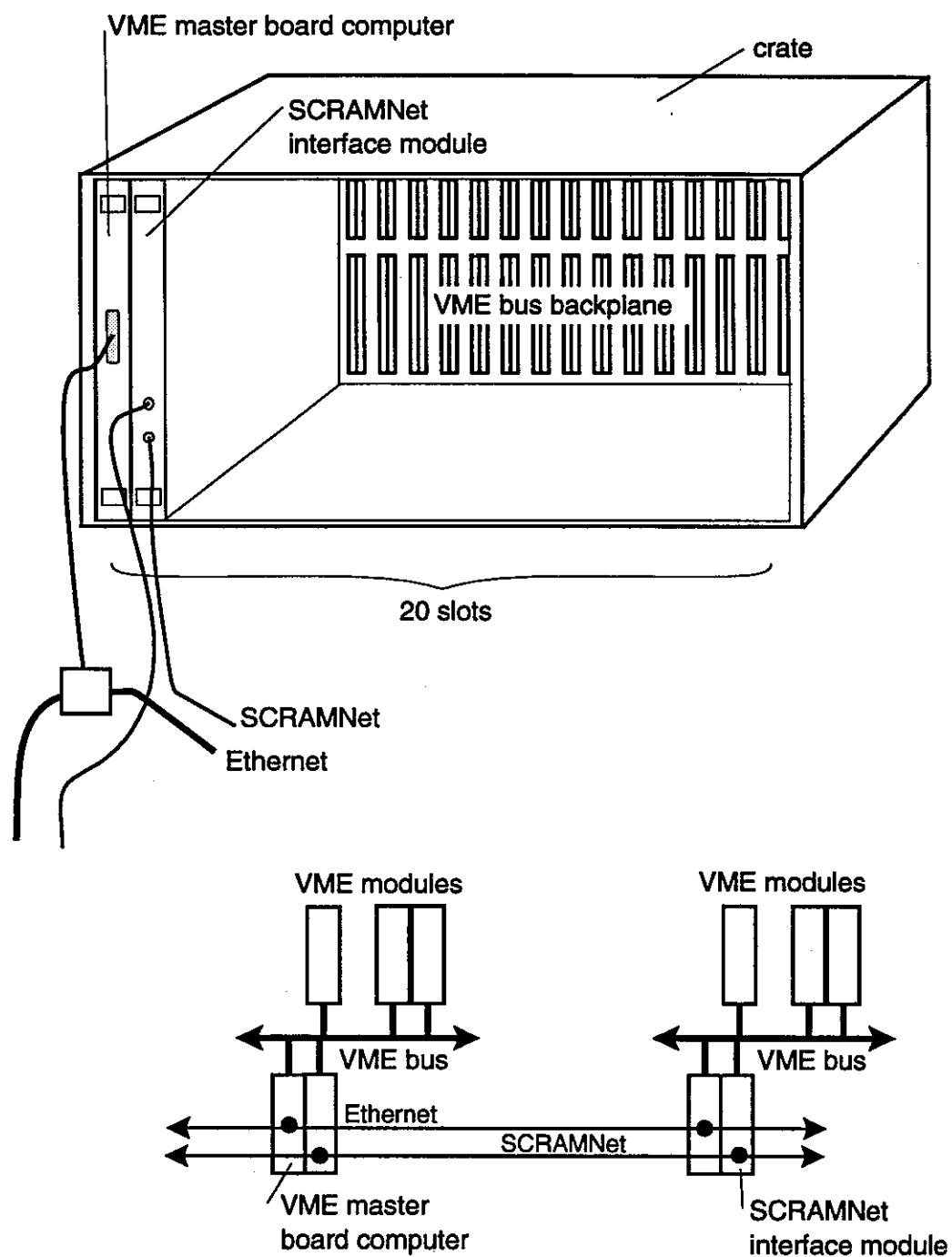


Fig. 4.1 VME計算機のバス/ネットワーク接続  
(VME computer unit and bus /network connection.)

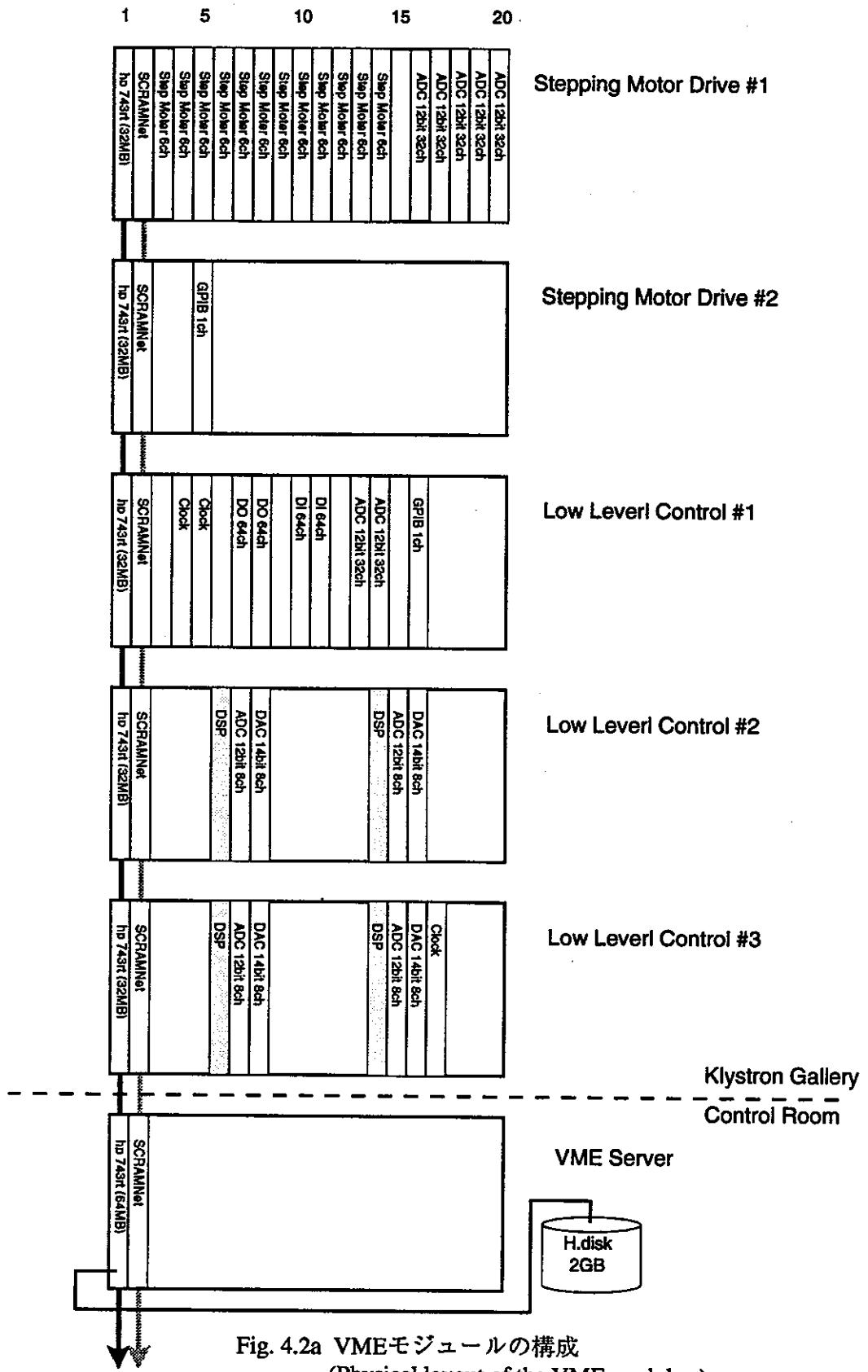


Fig. 4.2a VMEモジュールの構成  
(Physical layout of the VME modules.)

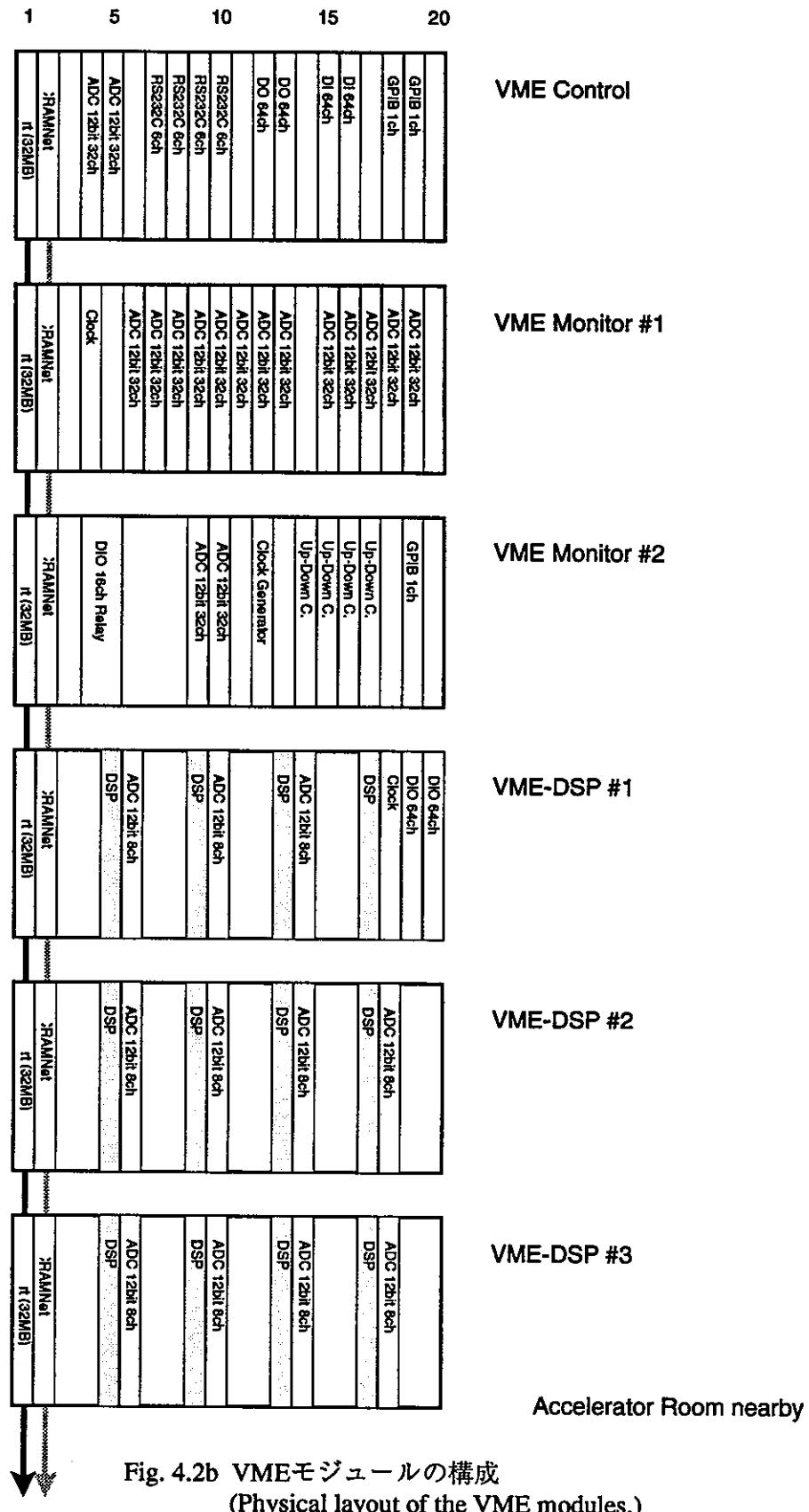


Fig. 4.2b VMEモジュールの構成  
(Physical layout of the VME modules.)

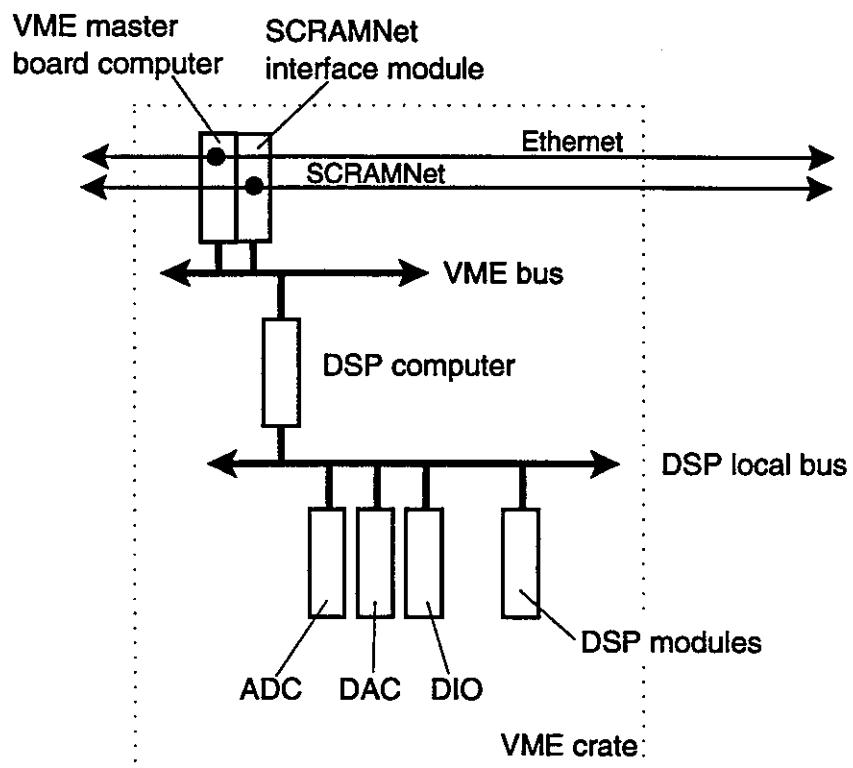


Fig. 4.3 VME/DSPシステムの概要  
(Overview of the VME/DSP system.)

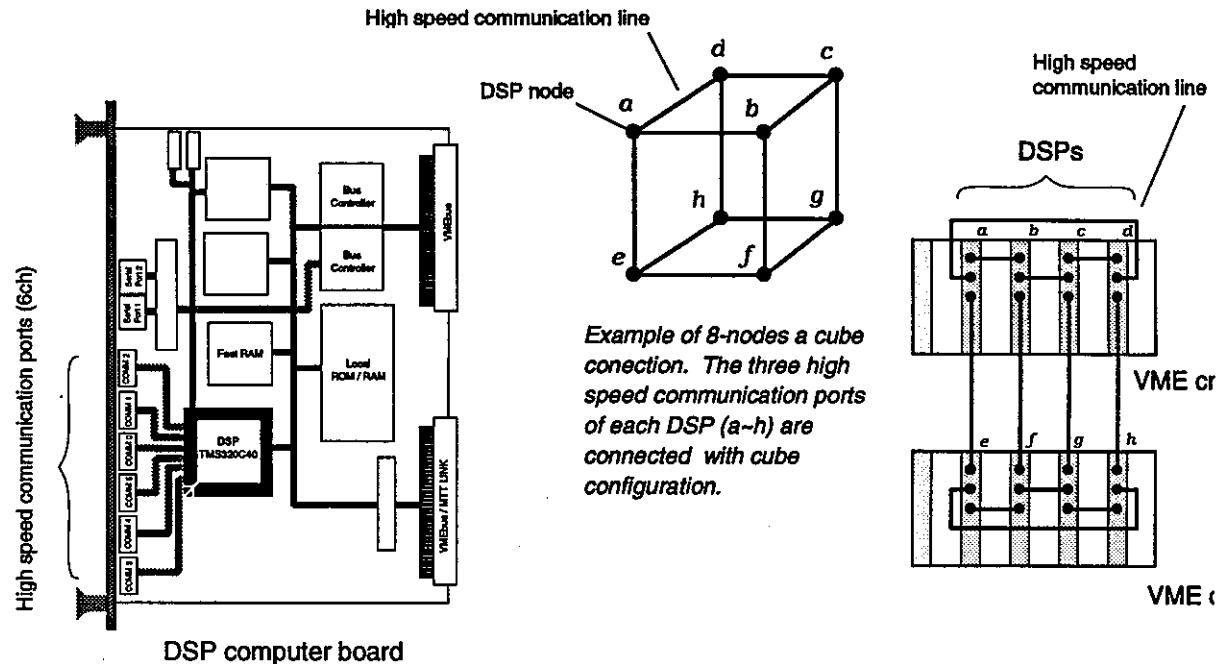


Fig. 4.4 DSP計算機ボードと高速ポートの接続  
(DSP computer board and high speed communication port connection.)

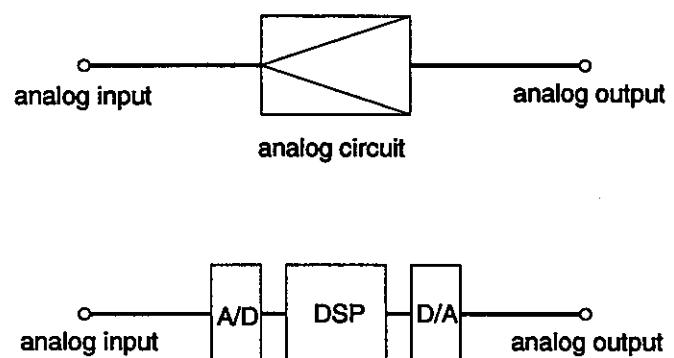


Fig. 4.5 DSPの応用  
(DSP application.)

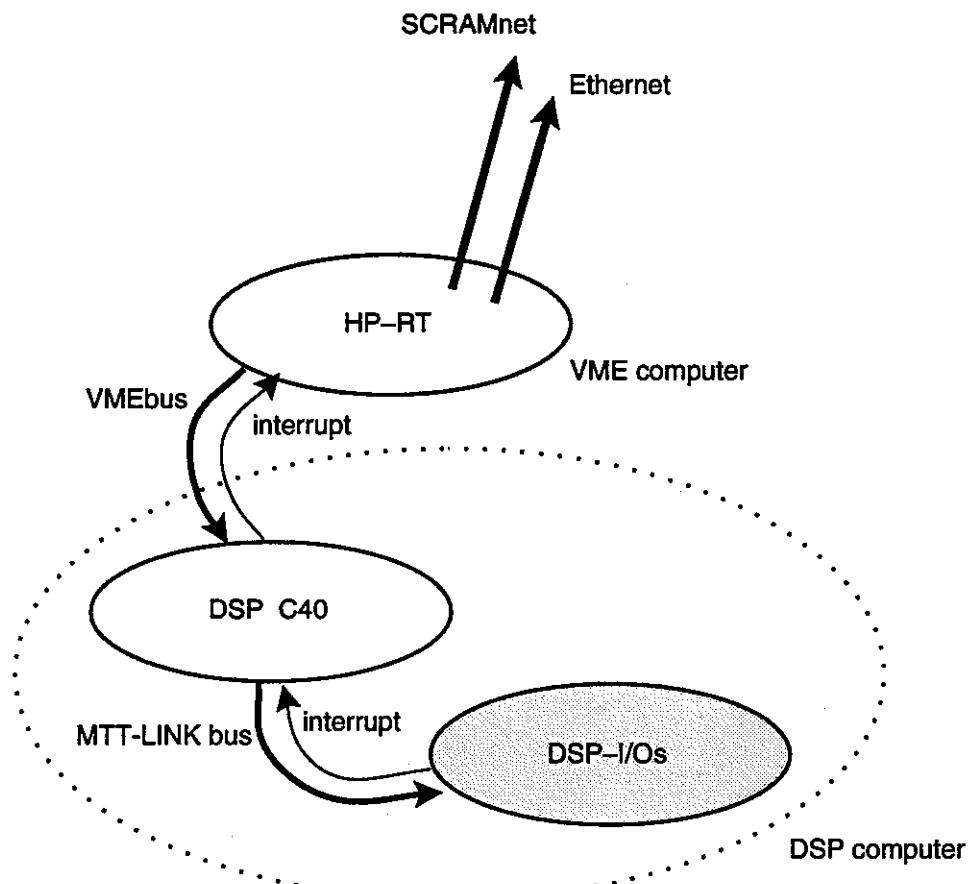


Fig. 5.1 DSPソフトウェアの概念  
(DSP software concept.)

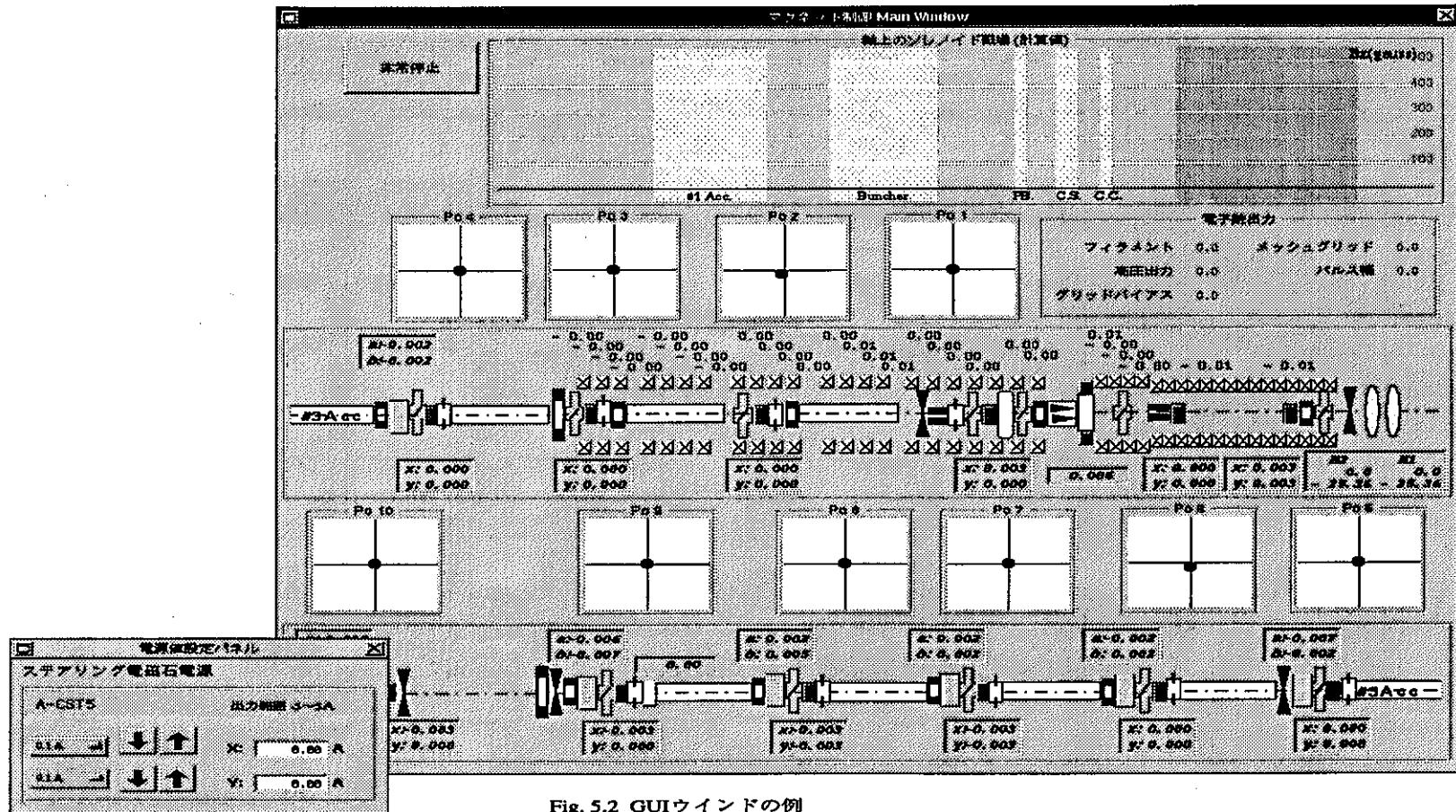


Fig. 5.2 GUI ウィンドウの例  
(Example of GUI windows for magnet control.)