

# 1 はじめに

加速器は、加速する荷電粒子（電子・陽電子・重イオンなど）や利用目的（放射光源・高エネルギー実験・医療用など）などによって千差万別であり、その応用分野は多岐に渡っている。また、その規模も大電力高周波源（クライストロン）1本・加速管1台からなる小規模なものから、KEKB 加速器のような巨大なものまで様々である。しかしながら、これら加速器の種類や用途にかかわらず、加速器制御システムから見れば、どれも大きな違いはないと思われる。加速器制御システムは、多種多様な加速器構成要素を効率的かつ安定に運用することが目的であり、細部の実装方法は数多く存在するが、その根底にある設計思想には共通する部分も多い。

本テキストでは、KEKB 加速器（リングとその入射器である線形加速器）の制御システムを实例に挙げ、加速器制御システムを構築する上での基礎的な知識について解説する。

## 2 加速器制御システム

### 2.1 概論

一般的な加速器制御システムは、下記の要素から構成される：

- ・ 加速器制御用計算機システム（及びネットワーク）
- ・ タイミング信号配信システム
- ・ 安全制御システム（マシンプロテクション及びヒューマンプロテクション）

上記はいずれも重要であるが、本テキストでは(1)の計算機制御システムを中心に解説する。

図 2-1 に、KEKB 加速器の航空写真を示す。

KEKB は、二つのリング（8-GeV 電子、3.5-GeV 陽電子蓄積リング）及び入射器である線形加速器から構成される。リングは周長約 3km にもおよぶ地下トンネル内に、二つの蓄積リングが並べて設置されている。制御用機器類は、12箇所に点在した地上部のローカル制御室内に設置される。入射器は、二本の直線部分が 180° アーク部によってつながれた J 字型をしており、全長は約 600m におよぶ地下トンネルと地上部のクライストロンギャラリーからなる。

KEKB の制御システムでは、このような広範囲に分散設置された、多種多様な機器群を、統一的・高効率に制御・監視する必要がある。また、KEKB 加速器は、約 2 ヶ月間の夏期メンテナンス・定期メンテナンス（二週間に一度 8 時間）及びトラブル時を除けば、24 時間運転が続けられている。このように、長期間連続運転を行うことを可能としたのは、個々の機器の信頼性に加えて、計算機制御システムの高い安定性に因るところが大きい。

加速器の制御システムといえども、なにも特殊な技術を用いている訳ではない。特殊な用途のために研究所毎に独自開発した装置を除けば、国際標準・産業界標準規格の機器やネットワーク技術を基盤として構築されることが一般的である。加速器制御に計算機が用いられ始めた当初、ネットワークによる機器の単純な遠隔制御も困難であった。近年、計算機・ネットワーク技術の急速な進歩によって、システム構築は容易になってきているに見える。一方で、加速器の性能が飛躍的に進歩し、制御システムに要求される水準も高まってきた。加速器のビームが目標の性能を達成するために、制御システム構築上の方法論がますます



図 2-1 : KEKB 加速器

重要視されてきている。

加速器は、クライストロン・電磁石や真空などの様々なサブシステムから構成され、個々のサブシステムの制御には、多数の異なる機器が使用されることが多い。これは、加速器の運転寿命が制御機器の技術開発サイクルに比べて長いことに起因する。また、新たな加速器プロジェクトの多くは、コスト削減のために、過去の加速器で用いられた装置の再利用の必要性に迫られる。このため、歴史のある加速器施設では、古い規格と新しい規格の機器が混在した制御システムが多く見られる。

図 2-2 に、典型的な加速器制御システムの「標準モデル」を示す。本図中では、下部は加速器側、上部はオペレータ側を意味している。広範囲に分散設置された加速器構成機器は、ローカルコントローラによって制御する。ローカルコントローラには、VME, CAMAC などの標準規格のフィールドバスが用いられる。各ローカルコントローラは、ネットワークを経由して上位計算機からアクセス可能である。上位計算機には、加速器オペレータ用端末や、種々のパラメータを蓄積するデータベースサーバやサーバ計算機などから構成される。

図 2-3 に、標準的な制御システムのレイヤー構成を示した。多くの大規模加速器施設では、加速器構成要素毎のサブグループから構成される（RF、

真空、電磁石、加速管グループなど）。個々の加速器構成要素を、どのようなフロントエンドを用いて制御するかは、機器の性質によってことなる。バンチ毎フィードバックのような、高速制御が求められるものから、制御室内の温度を 1 分毎に計測する低速な物まで多岐にわたる。このため、加速器制御では、多種多様なローカルコントローラを効率的に制御する必要がある。この違いは、上位の中間サーバ層で吸収する。これは、ホスト計算機と呼ばれる物で、UNIX あるいは Linux 計算機が利用されることが多い。

オペレータ側に最も近いのは、制御アプリケーション層であり、一般的には可視性の良い GUI<sup>1</sup>を備えたソフトウェアが利用される。また、各レイヤーのソフトウェアは、歴史的経緯などから、さらに幾層ものプログラム階層から構成される場合もある。小規模な加速器では、これらの階層を 1 台の PC で実現することも可能である。しかしながら、KEKB のような大型加速器では、構成要素が多種多様であるため、ハードウェア・ソフトウェアを階層的に実装することが重要である。このような階層化は、将来的に必要となるシステム拡張及び改修に柔軟に対応するためにも有効である。

また、制御システムを長期にわたって安定に運用を行い、

- ・ホスト計算機など重要な装置を複数用いた運用

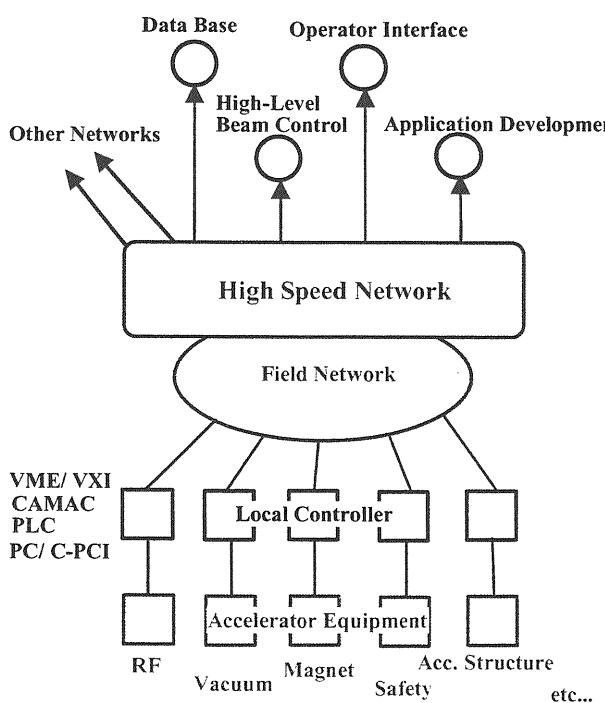


図 2-2：加速器制御システムの標準モデル

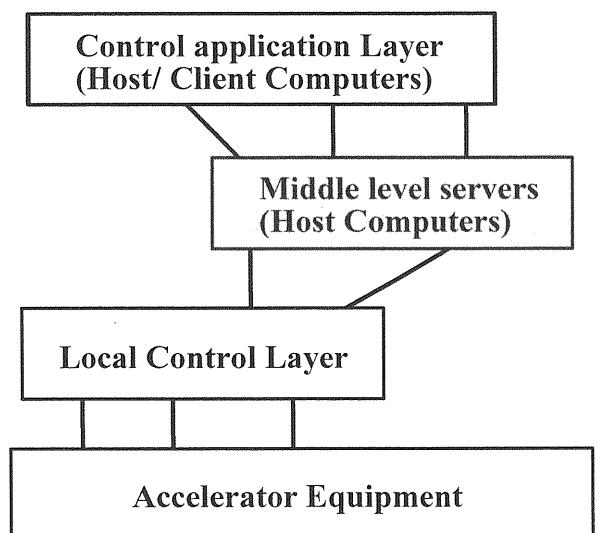


図 2-3：制御システムの標準的なレイヤー構成

<sup>1</sup> Graphical User Interface。グラフィックスを多用したユーザー画面。

を行い、冗長性を持たせる

- ・重要なネットワーク部を二重化し堅牢化
- ・データストレージに信頼性の高い装置を利用することが重要である。どのような規格・製品を選択するかは、業界全体の動向を踏まえた上で、目的に有効な技術を取捨選択することが必要である。

## 2.2 フィールドバス

フィールドバスは、加速器制御システムのローカルコントローラとして用いられる。バスとは、計算機内部で各回路がデータをやり取りするための伝送路を意味している。データを伝送するためのデータ線、データの所在を示すためのアドレス線、これらのデータ・アドレスを設定するための制御線から構成される。バス幅が大きい程一度に取り扱うことのできるデータ量が多く高性能である。

バスの規格には、様々な電気的・物理的種類があり、広く一般に利用されている汎用バス規格から、特殊な用途に用いられるバスまで様々である。KEKB のような大型加速器の制御には、多数のローカルコントローラが必要となってくる。どのようなバス（及びモジュール）をローカルコントローラに用いるかは、制御システム全体の信頼性・パフォーマンスを左右する。下記の点に留意して、選択することが必要である。

- ・ 標準規格品で、広く利用されている
- ・ 目的のモジュールが利用可能
- ・ 将来性

下記では、KEKB で用いられている主なバスや信号規格について簡単に解説する。

### 2.2.1 GPIB<sup>2</sup>

GPIB は、もっとも基本的なバス規格の一つである。Hewlett Packard 社（現在の Agilent Technologies 社）が、社内で使用していた HPIB を IEEE で標準規格化したものである。また、GPIB は比較的安価な制御バスであるが、

- ・ 1 台のインターフェースの接続台数は最大 15 台・総ケーブル長 20m までに制限される
  - ・ 比較的ノイズに弱く、通信速度が遅い
- などの理由から、最近の機器では Ethernet がその地位を奪いつつある。

<sup>2</sup> General Purpose Interface Bus; IEEE488

KEKB では、電磁石励磁電流値の読み返し（リング）、BPM 用オシロスコープと上位 VME 計算機との通信や周波数カウンタの読み返し（入射器）などに利用されている。一部の GPIB 機器は、LAN-GPIB と呼ばれる変換器を通じて、ネットワーク経由で直接ホスト計算機からアクセス可能である。

### 2.2.2 NIM 規格<sup>3</sup>

米国原子力委員会(AEC)において 1966 年に制定された”放射線測定モジュール標準規格 TID-20893”に準拠した標準規格である。この規格は、信号レベル・信号線・コネクタ形状・電源およびモジュールケースなどについて規定している。この規格に準拠して製作された回路は、NIM モジュールと呼ばれ、KEKB の制御システムにおいても数多く利用されている。

NIM 規格では、同軸ケーブルの特性インピーダンスは  $50\Omega$  を使用し、論理 “1” は  $-0.7V$  ( $50\Omega$  に対して  $14mA$  の電流)、論理 “0” は  $0V$  と定められていて、この論理レベルは NIM レベルと呼ばれる。

NIM モジュールは、NIM ビンと呼ばれる電源クレートに装着して使用する。NIM 電源は、通常  $\pm 24V$ ,  $\pm 12V$ ,  $\pm 6V$  を供給する。古いものは  $\pm 6V$  がない場合もあるが、近年主流の ECL<sup>4</sup>回路を使った高速論理回路は、通常  $\pm 6V$  を使うので注意する必要がある(ECL 自体が必要とするのは約  $-5V$  と  $-2V$ )。また、電源クレートに電力消費の大きい ECL を使用したモジュールを多数差す場合には、電源容量をオーバーしないか注意が必要である。

一方、多くの高速論理回路では、TTL<sup>5</sup>がよく使われている。TTL の論理レベルは、論理 “1” が約  $+5V$  ( $2.5V$  以上)、論理 “0” が  $0V$  ( $0.8V$  以下) である。NIM モジュールであっても、NIM レベルでなく TTL レベルの論理信号を受け付けるものがある(特に、slow 回路のゲート信号)。その場合は、NIM レベルから TTL レベルへ変換する場合には、”レベルアダプタ” を用いる必要がある(但し、やむを得ない場合以外は勧められない)。

NIM モジュールとしてよく利用されるのは、

- ・ FAN IN/OUT 回路 (OR 回路)
- ・ COINCIDENCE (AND 回路)
- ・ DISCREMENATOR (閾値以上の入力でパルス

<sup>3</sup> Nuclear Instrument Modules

<sup>4</sup> Emitter Coupled Logic: TTL より高速に動作するが、消費電力が大きい。

<sup>5</sup> Transistor-Transistor Logic: バイポーラトランジスタのみから構成されるロジック IC。

を出力)

- Clock Generator (基準クロック信号発信)
- Gate Generator (入力パルスの幅・タイミングの調節)

これらのモジュール端子には、LEMO<sup>6</sup>コネクタがよく利用されている。抜き差しが容易で、ケーブル経路を頻繁に変更する実験回路での利用に適している。しかしながら、加速器のタイミング制御システムに用いる場合には注意が必要である。KEKB 入射器でも、LEMO 端子老朽化による接触不良や、メンテナンス作業後にきちんと装着されなかったといったトラブルを幾度か経験した。このため、特に重要な部分については、SMA 端子などを用いて、確実に固定する方が安全である。

### 2.2.3 CAMAC<sup>7</sup>

1969 年の規格化以来、高エネルギー・原子核実験などを中心に広く利用されてきた。以前の TRISTAN 加速器でも、多数の CAMAC モジュールが RF・真空を始めとした機器制御に用いられていた。コスト軽減のため、これら CAMAC クレートの冷却ファンを全数交換の後、二千台以上の CAMAC モジュールを KEKB リングの制御に再利用している。入射器に於いては、タイミング信号分配システムの一部に 11 台の CAMAC クレートを利用している。CAMAC モジュールを、上位の計算機と結ぶには、

- CAMAC クレートコントローラ+Ethernet
- ブランチ・ハイウェイ方式(伝送距離数十 m)<sup>8</sup>
- シリアル・ハイウェイ方式(伝送距離数 Km)

などの方式がある。入射器の CAMAC は、(1)の方式を用いて、制御ネットワーク上のホスト計算機から直接制御される。一方、リングの制御システムでは、(3)のシリアル・ハイウェイを用いて VME 計算機と接続されている。VME 計算機は、制御ネットワークに接続されており、上位ホスト計算機からの制御を可能にしている。また、NIM-CAMAC アダプタなどを用いれば、NIM 標準モジュールを、CAMAC クレートに装着して使用することができる。図 2-4 に、入射器中央タイミングステーションで使用している CAMAC クレートの写真を示す。

<sup>6</sup> LEMO 社(スイス)のセルフラッチングタイプのコネクタ。

<sup>7</sup> Computer Automated Measurement And Control; IEEE583/ 595/ 596

<sup>8</sup> この他に、多数の非標準パラレルバス方式が存在する。

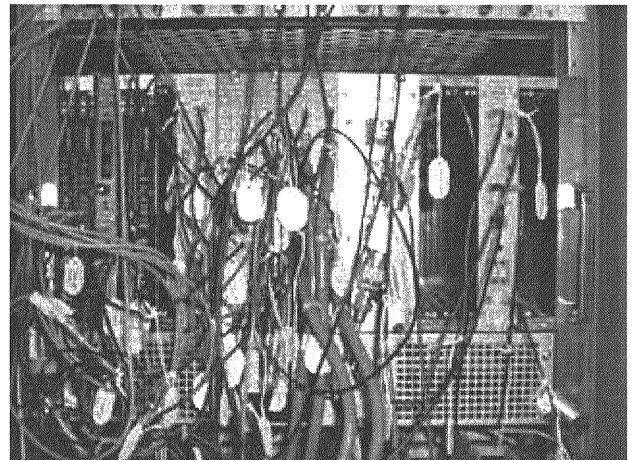


図 2-4 : CAMAC クレート及びモジュール群

### 2.2.4 VME<sup>9</sup>

現在、工業用標準バスとして、最も広く普及しているバスである。VMEbus、1987 年に IEEE で標準規格化された。モトローラ社の VERSA バスを電気的仕様として採用し、機械的仕様として、ヨーロッパで広く普及していたユーロカードを採用した。ユーロカードは、DIN<sup>10</sup>型コネクタを採用し、カードエッジ型コネクタに比べ振動・接触不良および腐食に強く機構的に堅牢であるため、高信頼性が必要とされる工業用・加速器制御用として適している。VME では、5V(メイン電源)、12V(RS232C ドライバ電力など)の電源が利用可能である。VME が普及した要因としては、

- 特定の CPU に依存しないアーキテクチャ
- 堅牢な機械的機構
- ローカルバスシステムを使用した高い拡張性
- ライセンスフリー
- 豊富なリアルタイム OS (RTOS)
- VITA<sup>11</sup>, VSO<sup>12</sup>など業界団体の存在

などが挙げられる。

VME-bus のバックプレーンは、96 ピン(32 ピン

<sup>9</sup> Versa Module Europe; IEEE1014: 航空機、ロケットシミュレータ、潜水艦の制御システムなど、軍事技術や半導体製造装置などに広く用いられている。これは、VMEbus の堅牢性を物語っている。

<sup>10</sup> Deutsche Institute Norm; ドイツ工業規格

<sup>11</sup> VMEbus International Trade Association

<sup>12</sup> VITA Standards Organization

x3 列)からなる J1/J2 コネクタを有する<sup>13</sup>。J2 バックプレーンの 2 列分 (A 列、C 列) のピンアサインは、ユーザー定義となっている。データ転送のバスタイミングは、ハンドシェイクによって行われるマスターがストローブ信号をドライブすることによってはじまり、スレーブ側のデータ・アクノリッジ信号でサイクル終了する。

モジュールの大きさは、シングルハイト、ダブルハイトがあり、ダブルハイトの物が主流である。バックプレーン (クレート) は、3~20 スロットの物がカタログ品として調達可能である。クレートを選ぶときには、将来的なシステム拡張を視野に入れて選ぶ必要がある。

KEKB のタイミングシステムでは、TD4V と呼ばれる 16-bit ECL カウンタによるディレイモジュールが数多く用いられている。TD4V は、CAMAC(TD4)、RS232C(TD4R)用のモジュールも開発され、一部で利用されている。加速器におけるタイミング制御は、このようなディレイモジュールと NIM モジュールを組み合わせてトリガのロジックを構築するのが一般的である。

VME をアナログ信号計測に特化したバスに VXIbus がある。VXI のモジュールは、電源が強化され、RF シールドケースで覆われるなどして、アナログ信号の収集に優れている。このため KEKB リングでは、アナログ信号 (波形デジタル) の取り扱いを VXI、デジタル信号を VME で取り扱うことしている。VXI モジュールは、MXIbus と呼ばれる VMEbus エクステンダモジュールを用いて、VME 経由で制御される。入射器では、VXIbus を用いた RF 波形の常時監視を行っているが、VXIbus は直接ネットワークに接続され、ホスト計算機からデータの収集を行っている。

最近では、PC 計算機に広く利用されている PCIbus<sup>14</sup>を産業用に特化した Compact-PCIbus が普及しつつある。PICMG3.0<sup>15</sup>規格として、Advanced TCA<sup>16</sup>を提倡するなど、移動体通信の中継基地局などに普及している。加速器制御の世界でも、今後 Compact-PCI が徐々に普及していくであろう。

## 2.2.5 PLC<sup>17</sup>

PLC は、シーケンサーとも呼ばれ、古くは電話交換機技術に利用されていた電磁リレーから発展してきた。産業用 FA<sup>18</sup>をターゲットにして開発されているため、工場内の高温・多湿・塵埃・高ノイズな悪環境下でも高い信頼性で動作する。ソフトウェア開発には、ラダー方式、フローチャート方式などが用いられる。図 2-5 に、入射器のクライストロン制御用 PLC モジュールの写真を示す。

PLC は、KEKB リングの安全系やクライストロン及び電磁石電源のインタロックシステムに使用されている。入射器では、安全システムに加えてクライストロン・電磁石電源・真空機器の制御及び安全系システムのインタロックに使用している。各 PLC は、Ethernet モジュールを介して、上位のホスト計算機と結ばれている<sup>19</sup>。

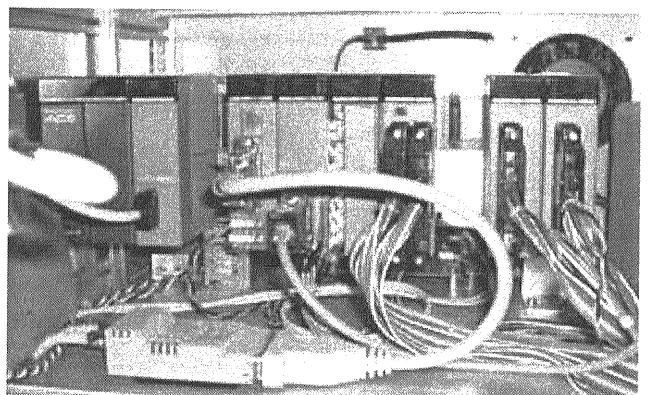


図 2-5 : PLC モジュール  
(入射器クライストロン制御用)

## 2.2.6 ARCNET<sup>20</sup>

改良型トーケンパッシング方式<sup>21</sup>の LAN プロトコルであり、FA をはじめ、産業分野で広く利用されている。KEKB リングの制御では、電磁石電源の制御用に利用されている。KEKB 建設期には、

<sup>17</sup> Programmable Logic Controller

<sup>18</sup> Factory Automation: 計算機制御技術を導入し、工場内シーケンス作業を自動化すること及びそれに使用される機器のこと。

<sup>19</sup> 安全系の PLC は読み出しだけが可能になっている。直接ホスト計算機と結ばれているわけではない。

<sup>20</sup> Attached Resource Computer Network:

<sup>21</sup> 各ノードが唯一のトーケンと呼ばれる送信権データがネットワーク中を常に周回する。トーケンを保有するノードのみ発信可能とすることによって衝突を回避する方式。ネットワーク上にパケットが溢れることがなく、信頼性が高いのが特徴であるが、通信速度を上げにくいのが難点。

<sup>13</sup> 64-bit 拡張バスである VME64 では、160 ピンコネクタを使用。

<sup>14</sup> Peripheral Component Interconnect-bus

<sup>15</sup> PCI Industrial Computer Manufacture Group: PCI の業界団体。

<sup>16</sup> Advanced Tele-Communication Architecture

Ethernet 機器がまだ高価であったため、大量に必要とされる電磁石電源制御に導入された。

ARCNET のコントローラは、各ノードのネットワーク情報を自動更新する機能を持つ。すなわち、ノードの新規追加・撤去の情報が、自動的に他のノードへ伝えられることによって、ネットワーク情報の再構築が行われる。ノード数は、最大 255 まで拡張可能である。

## 2.3 計算機システム

### 2.3.1 ハードウェア

ローカルコントローラの上位層には、ホスト計算機（サーバマシン）やオペレータ端末などがある。ホスト計算機は、加速器制御の中心的役割を果たしている。システム全体の制御点数・ビーム制御に用いられる各種フィードバック演算に加えて、ビームオプティクスのオンラインシミュレーションに必要な処理能力に見合った計算機能力が必要とされる。

大型加速器の場合、膨大な制御点数を有するが、高効率な運転を実現するためには、これらの I/O 制御を許容応答時間内に完了する必要がある。この

ため、高性能な UNIX 計算機を複数台用いてホスト計算機システムが構成されることが多い。また、近年では、汎用的な PC 計算機の高性能化や Linux の普及により、Linux-PC を用いた制御システムも普及しつつある。オペレータ端末には、古くは X 端末などが利用されてきたが、近頃では、Linux-PC や Windows PC 上の X-Window<sup>22</sup>を利用することも多い。これにより、運転用プログラムをホスト計算機上で動作させ、オペレータ端末にはその GUI 画面のみ表示させることができる。

ホスト計算機には、高い信頼性を持つハードウェア/OS を選ぶ必要がある。さらに、万一の障害に備えて、システムに冗長性を持たせることが望ましい。特に、共有ファイルサービスを提供するマシンは、運転用ソフトウェアやログデータへアクセスするために重要である。このような冗長化には、クラスタ技術がしばしば用いられる。クラスタは、複数台の計算機群を一つのシステムとして運用する技術である。クラスタのタイプは、

- ・ HA (High Availability, 高可用性) クラスタ
  - ・ HPC (High Performance Computing) クラスタ
- に大別される。HPC は、分散処理による並列計算を行うためのクラスタであり、大規模な数値計算に向いている。加速器制御システムにおいては、HA クラスタの導入が有効である。HA クラスタは、フェイルオーバー(Fail over)型と負荷分散(Load balancing)型に分類される。

フェイルオーバー型クラスタには、データミラー型、共有ディスク型及び遠隔クラスタ型がある。共有ディスク型は、各サーバ間のディスクをミラー（全体を複製）することにより、比較的低成本で実装可能なクラスタシステムである。しかしながら、サーバ間のデータミラーは、大量のデータを取り扱う大規模システムには向いていない。大規模加速器の制御システムでは、共有ディスク型のクラスタが広く利用されている。これは、複数のホスト計算機が同一のディスクを共有する形態であり、共有ディスクには RAID<sup>23</sup> (Redundant Arrays of Independent Disks) とよばれる耐障害性の高いディスクシステムが用いられる。図 2-6 において、Host-A がアクティブなホスト計算機として動作中に障害が発生すると、Host-A 上のサービスがス

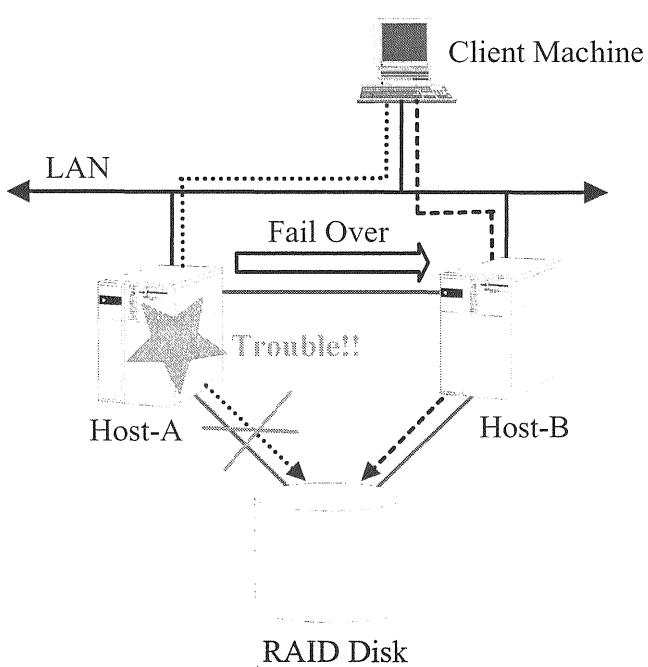


図 2-6：共有 DISK を用いた HA クラスタ

<sup>22</sup> MIT で開発された、遠隔計算機上の画面をローカルに表示させる仕組み。

<sup>23</sup> RAID0～5（ミラーリングは RAID1）及びソフトウェア RAID・ハードウェア RAID に大別される。

ンパイ装置の Host-B へと自動的に切り替わる。サービスによっては、数十秒で切り替わる物から 10 分のオーダーまで様々である。

一方、負荷分散型のクラスタは、複数台のホスト計算機間の負荷が均一になるようジョブを振り分ける技術である。急激なアクセス数の増加に対してもシステムがダウンしにくい。以上のように、HA クラスタ技術を中枢計算機群に適用することによって、システムの構成要素を冗長化し、“Single Point of Failure”<sup>24</sup>を撲滅することが重要である。

加速器制御システムでは、運転パラメータの設定値やビームの測定値など、大量のデータを常時保存し続けることが必要となる。このためには、先に述べた RAID システムが広く利用されているほか、最近では NAS<sup>25</sup>、SAN<sup>26</sup>と呼ばれるネットワーク直結型ストレージも広まってきている。

### 2.3.2 ソフトウェア

加速器制御システムにおけるソフトウェア環境は、その目的に応じて OS やアプリケーション開発言語が選択される。ホスト計算機には、信頼性が高くサポート体制が充実した商用 UNIX、Windows server やオープン OS である Linux、FreeBSD などが用いられる。

ローカルコントローラは、制御対象である加速器サブシステム毎に、入射ビームのバンチ選択やバンチ毎フィードバックのように高速な制御を必要とするものから、制御室の温度計測などの遅い監視システムまで様々である。制御の 1 サイクル（読み出し、演算処理、設定など）の処理を、一定時間以下に保証するためには、VxWorks<sup>27</sup>などのリアルタイム OS(RTOS)が用いられる。RTOS では、あるイベントが発生したときに、決められた時間内（数十μs から数十 ms 程度）に確実にイベントハンドラを起動することを保証する。そのため、必要な処理時間の予測や、複数の処理要求が同時発生した場合でも目的の時間内に完了させるための仕組みを備え持っており、必要な処理時間の予測

<sup>24</sup> 単一機器の障害が、システム全体の障害を引き起こす脆弱性。

<sup>25</sup> Network Attached Storage: 大規模データの転送効率が SAN よりやや低いものの、安価である。GbE との併用で、アプリケーションによっては、SAN に匹敵する効率も期待できる。

<sup>26</sup> Storage Area Network: FC(Fibre Channel)を利用した、ストレージ専用ネットワーク。NAS より高速だが、数百万円の初期投資が必要。

<sup>27</sup> WindRiver 社による代表的な商用 RTOS。

<URL: <http://www.windriver.com/>>

を立てることが可能になっている。

ここで、加速器制御システムのソフトウェアは、どのように実装されるかについて考える。典型例として、ソフトウェア層が下記の 3 層から構成される場合を考える。

- (1) ローカル制御層（ローカルコントローラ）
- (2) サーバーソフトウェア層（ホスト計算機）
- (3) アプリケーションソフトウェア層（オペレータ X 端末/ ホスト計算機）

上記のように階層化されたシステムを用いて、ビーム軌道補正を行う場合を考えてみる。まず、オペレータが操作するソフトウェアは、(3)のアプリケーション層で動作する。この層では、軌道補正の演算アルゴリズムや GUI の実装などが行われる。ステアリング電磁石名と、発生させるべき磁場の命令群は、(2)のホスト計算機上のサーバソフトウェアへ伝えられる。この層では、ステアリング電磁石の名前とその電源のためのローカルコントローラ名の対応を解釈したり、電磁石毎の励磁曲線データを保持する。これらの機構を実装することにより、(1)層からの命令は(2)層を経由して、目的のローカルコントローラへ正確に振り分けられる。ローカル制御層のソフトウェアは、受け取った設定励磁電流値を、電源コントローラに送るビットパターンとして解釈し、デジタル I/O ボードを制御する。一般的に、(3)ではオペレータ側（人間）が直感的に理解しやすい命令群、(1)では制御機器が持ち合わせる低水準命令群の実装を行う。(2)のサーバー層では、(1)及び(3)の仲介を行う。このようなソフトウェアの多層化は、初めに仕様を確定すれば、(1)～(3)の部分を他のグループが並列に開発することができるため効率的である。また、将来的な機器の拡張や更新による変更を、低水準な層で吸収することにより、上位のアプリケーションプログラムは変更なく利用し続けることができるなどメリットが大きい。場合によっては、各層において、さらにソフトウェアの多層化実装が行われる。

速い処理速度が求められるローカル制御層やサーバ層には、C/ C++などのコンパイラ言語が用いられることが多い。一方、アプリケーション層では、日々のビーム運動形態の進歩やマシンスタイルの要望などから、短期間でのプログラム開発を必要とする場合が多い。この目的のためには、コンパイラ言語よりもスクリプト言語の方が適していると思われる。また、オペレーションの効率化のためには、豊富な GUI ライブラリが利用可能

な物が好ましい。KEKB では、SAD<sup>28</sup>スクリプトや Python<sup>29</sup>、Tcl/Tk<sup>30</sup>などのスクリプト言語を用いたアプリケーションプログラムが多数開発され、成功を納めている。

また、ソフトウェア開発では、單一アプリケーションを複数のスタッフが平行してコーディングすることが少なくない。このためには、RCS<sup>31</sup>、CVS<sup>32</sup>、Subversion<sup>33</sup>といったオープンソースのバージョン管理ソフトウェアが利用できる。複数人が同時に同じファイルを編集した場合、編集した内容が競合していなければ両方の変更を自動的に統合できる。また、1つのバージョンに対して別々の変更を加えるためにバージョンを分岐させることも可能など、多様な開発ニーズに対応できる機能を備える。その他、有用なフリーツールは数多く存在するので、目的に応じて積極的に取り入れることにより、システム全体の開発効率を向上させることができる。

## 2.4 ネットワークシステム

ネットワークは、機器の遠隔制御の基盤を担う極めて重要な基盤要素である。個々のローカルコントローラは、ネットワークを通じて上位のホスト計算機と通信可能となり、これにより高速な遠隔制御が可能となる。

KEKB 制御システムでは、Ethernet<sup>34</sup>や FDDI<sup>35</sup>などの、国際標準規格に従ったネットワーク機器が利用されている。また、通信規約(Protocol)として

<sup>28</sup> Strategic Accelerator Design: 1986 年以来、KEK で開発が進められている、加速器設計のための汎用計算コード。

<URL: <http://acc-physics.kek.jp/SAD/sad.html>>

<sup>29</sup> Guido van Rossum 氏による、フリーのオブジェクト指向スクリプト言語。RedHat Linux では、環境設定ツールに利用されている。Java 上で動作する、Jython なども利用できる。

<URL: <http://www.python.org/>>

<sup>30</sup> Tool Command Language/Tool Kit: インタプリタ型言語 Tcl と X Window System 上で GUI を構築するためのライブラリ Tk を組み合わせたもの。SAD や Python からも、Tk ライブラリを利用できる。<URL: <http://www.tcl.tk/>>

<sup>31</sup> Revision Control System

<sup>32</sup> Concurrent Versions System: RCS をベースにして開発された。

<sup>33</sup> CVS をベースに開発された。

<sup>34</sup> 1973 年ゼロックス社パロアルト研究所の Robert Metcalfe によって発明。CSMA/CD(Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection)方式のデータ通信を行う。

<sup>35</sup> Fiber Distributed Data Interface: トーケンリングのような(論理的に)リング状のネットワーク(実際的な配置はスター状になることが多い)。主に、基幹 LAN に利用される。

は、TCP/IP<sup>36</sup> (TCP 及び UDP<sup>37</sup>)を使用している。加速器の制御システムにおいて、ネットワーク障害はビーム制御を不完全にする可能性や、最悪の場合には運転停止に陥る場合もある。このため、制御用ネットワークを運転期間中安定に運用することは極めて重要である。

ネットワークには、メタルケーブルであるツイストペアケーブルあるいは光ファイバケーブルが用いられる。ツイストペアケーブルは、UTP<sup>38</sup>と STP<sup>39</sup>に分別されるが、100Mbps 以下では、通常 UTP ケーブルが多く使用されている。また、ノイズに対する性能上、カテゴリーと呼ばれるクラス分けがなされている。最近は、GbE<sup>40</sup>に対応したエンハンストカテゴリー5 の UTP ケーブルが広く使用される。また、伝送距離が長く、ノイズが高い環境 (KEKB 入射器のクライストロンギャラリー内など) では光ファイバが使用される。

ネットワークのトポロジ(接続形態)には、いくつかの種類がある(図 2-7)。バス型トポロジは、10Base-2/5 などで利用されるもので、一本のネットワークバスライン上に、複数の計算機が接続される形態を指す。この様なトポロジでは、1カ所の障害が、ネットワークシステム全体の不通の原因となるので、高信頼性が要求されるシステムには不向きである。

スター型トポロジは、現在最も多く利用されている物で、HUB と呼ばれる機器を介して、放射状に機器が接続される。このようなトポロジは、障害がシステム全体に与える影響を軽減出来る。さらに、障害箇所の特定が比較的容易である。加速器制御ネットワークでは、スター型トポロジに冗長性を持たせて(二重化して)運用することが望ましい。

リング型トポロジの FDDI は、高速かつ高信頼性

<sup>36</sup> Transmission Control Protocol/Internet Protocol: 米国防総省 DARPA NET プロジェクトで開発され、'80 年代初頭に、4.2BSD で実装され急速に普及した。

<sup>37</sup> User Datagram Protocol: レイヤ 4(トランスポート層)に使用されるプロトコル。TCP に比べ高速だが、信頼性が低い。

<sup>38</sup> Un-Shielded Twist Pair: より対線の外側がすぐ被覆で覆われた物。ノイズに弱い。

<sup>39</sup> Shielded Twist Pair: より対線と被覆の間にメッシュ状に編み込まれたシールドが施されており、ノイズに強い。

<sup>40</sup> Giga-bit-Ethernet: 通信速度を 1Gbps に高めた高速な Ethernet 規格。Gigabit Ethernet 規格では、光ファイバーを利用した 1000BASE-SX 規格と 1000BASE-LX 規格が IEEE 802.3z として標準化されている。広く普及している、カテゴリー5 のより対線を用いた規格も策定されている(1000BASE-T)。

を有するが、インターフェイスが高価なため、一般的な WS やパーソナルコンピュータレベルで使用されることはない。主に、バックボーンなどのネットワーク基幹部分に利用される。このほかにも、メッシュ型やツリー型（CATV の分配網に使用）などのトポロジがある。一般的には、複数のトポロジの組み合わせが利用される。

KEKB リングでは、ローカルコントローラの設置される 12 箇所のローカル制御室と中央制御室間は FDDI ネットワークで接続される。基本的には、マルチモード光ファイバー<sup>41</sup>が用いられるが、2km を超える長距離についてはシングルモードファイバーケーブル<sup>42</sup>が用いられる。入射器においても、制御ネットワークの基幹部分に FDDI が利用されている。近年の大規模ネットワークは、GbE の利用が一般的になってきている。これは、FDDI レベル

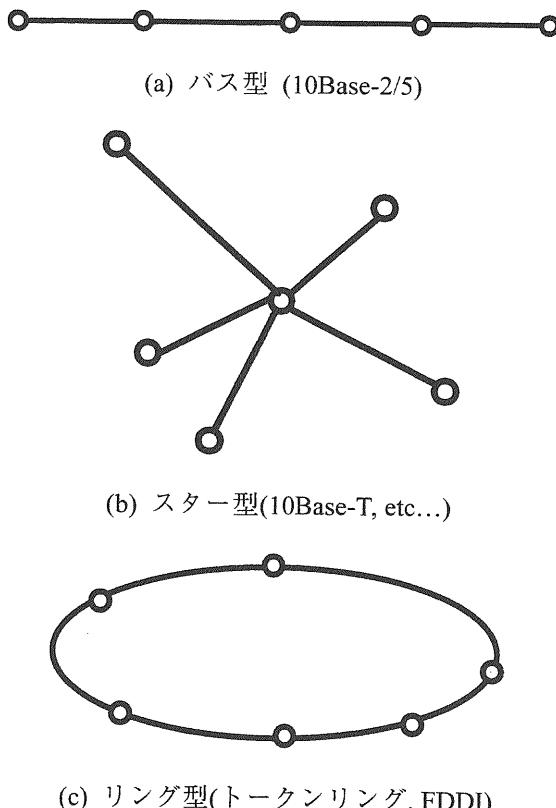


図 2-7：ネットワークトポロジ(接続形態)の種類

の信頼性は期待できないが、FDDI では原理的に不可能な大容量高速通信が実現できる。KEKB でも、維持コストの問題や、ネットワーク高速化の要求が高まってきたため、FDDI から GbE への更新が進んでいる。

これらの有線ネットワークに加えて、近年では無線 LAN の利用も増えてきた。将来、転送レート向上や、高信頼性の確立により、一部の加速器制御システムには取り入れられる可能性もある。

### 3 KEKB 加速器制御システム

#### 3.1 入射器

入射器の制御システムは、1993 年に旧システムからの更新が行われ、その後毎年小規模な変更・改善が行われてきた。1982 年から使用されていたシステムは、8 台のミニコンピュータ(三菱 MELCOM70/30)と約 300 台のマイクロプロセッサを用いたローカルコントローラから構成され、ミニコンピュータ間及びミニコンピュータとローカルコントローラ間は、専用光ファイバーネットワークで接続されていた。その後、ミニコンピューターを UNIX ホスト計算機と VME 制御計算機に置き換え、専用ネットワークを汎用 Ethernet に更新した二代目の制御システムに移行した。その後、KEKB に向けた能力増強に合わせ、ローカルコントローラを VME/ PLC などに置き換え、現在の三代目制御システムが誕生した。

図 3-1 に、現在の入射器制御システム概略図を示す。ホスト計算機には、3 台の Tru64 UNIX マシンを使用しシステムの基盤としている。また、基幹ネットワークには信頼性の高い FDDI を使用し、ホスト計算機及びローカルコントローラ間が相互接続されている。ローカルコントローラは、各サブシステム毎に異なるフィールドバスが用いられているが、その多くに PLC が利用されている(表 3-1)。入射器制御システムでは、Unix 計算機をサーバとして最下層の機器コントローラを統括して制御するシステムになっており、それらの間の通信には TCP, UDP を基にした独自開発の RPC<sup>43</sup>(Remote Procedure Call)を使用している。

制御ソフトウェア上では、各機器の値設定(set)、

<sup>41</sup> ファイバーケーブルでの光伝搬モードが複数存在し、信号がなまる（時間軸方向に広がりをもつ）。このため、長距離伝送には不向きである。

<sup>42</sup> 光伝搬モードが単一のため、長距離伝送に向いている。

<sup>43</sup> Remote Procedure Call: ネットワーク上の異なる計算機で処理を実行するそのプロトコル。ネットワーク分散型計算機環境の基盤技術。同様な技術に、Microsoft 社の DCOM(Distributed Component Object Model)や、業界団体 OMG が定めた CORBA(Common Object Request Broker Architecture)などがある。

読み出し(get)には、(command, name, value)を1組とした制御メッセージをホスト計算機上のプログラムへ配信する。ソフトウェア上での機器の名前が、実際にはどの機器に対応するかは、管理 table を使用した静的データベースで対応付けを行っている。管理テーブルはサーバの起動時に Memory 上の Hash Database として展開され、高速な Database として動作する。また、管理 table は ASCII ファイルであり、エディタによる追加・修正が行われる。これらの管理テーブルは、ホスト計算機によって提供される共有ファイルサービス(NFS)により、異なる計算機からも同一ファイルが参照される。共

機器 (台数)	ローカルコントローラ (台数)
Klystron (69台)	PLC (69台)
Magnet (499台)	PLC (45台)
Vacuum (284台)	PLC (17台)
Timing (141台)	CAMAC(11台) VME(5台)
BPM (89台)	VME (19台)

表 3-1：制御機器とローカルコントローラ  
(入射器)

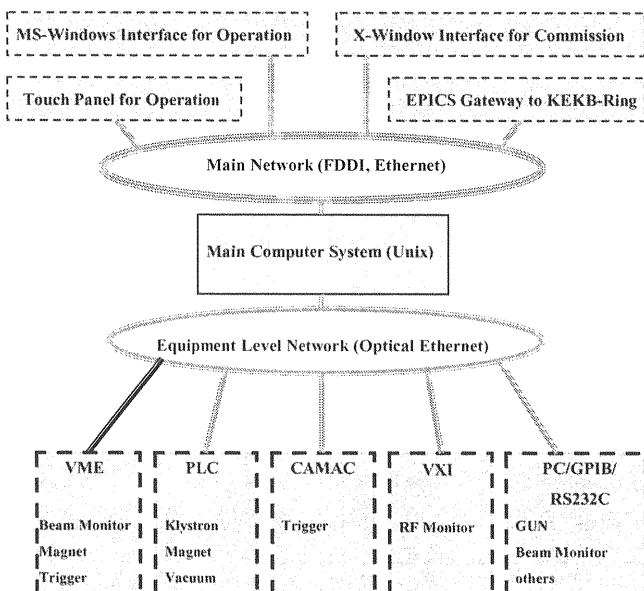


図 3-1：入射器制御システムの概要

有ファイルサービスを行うホスト計算機は、クラスタ化により堅牢化され、共有ディスクには RAID システムが用いられている。また、管理 table によって、ローカルコントローラの制御を実行可能である端末を厳しく制限し、システムの安全性を高めている。

一方、リングの制御システムは、EPICS（4章で解説）と呼ばれる制御システム構築ツールキットを用いて開発されているため、今後、入射器の制御システムも EPICS へのゲートウェイを増強する必要がある。一部のアラーム（クライストロンダウン情報など）は、ゲートウェイサーバを活用してリング側のアラームシステムへ提供されている。

### 3.2 リング

KEKB リングの制御システムの全体デザインは 1993 年に開始され、まず、EPICS, Vsystem<sup>44</sup>, NODAL<sup>45</sup>といった既存の制御システム構築環境に関する評価を行った。そして、実現可能性及びコスト的な評価から、EPICS を採用することが決定された。KEKB リングは、TRISTAN MR のトンネルを再利用して建設されたため、TRISTAN 時代に数多く用いられていた CAMAC モジュールを極力再利用することによりコスト削減を行った。

図 3-1 に、リング制御システムの概略図を示す。KEKB リングは、約四千台に上る電磁石とそれらをドライブするための電磁石電源、ビームパイプ内を超高真空に保つための真空ポンプ群、クライストロンやビーム位置モニタなどから構成される。これらの機器は、全週 3km に渡って分散設置されている。機器を制御するためのローカルコントローラは、トンネル上部の地上に設置された 12 箇所のローカル制御室に設置されている。中央制御室のホスト計算機から、ローカルコントローラを遠隔制御するために、FDDI を基幹としたネットワークが用いられている。FDDI ネットワークは、各ローカル制御室と 1 対 1 の対向接続となっている。

KEKB リングの制御は、EPICS システムを採用し、IOC として VME バス(VxWorks)を使用している。VME は、デジタル信号による制御を行い、アナログ信号による機器制御は、さらに下位層の各種フィールドバスを用いて行う。フィールドバス

<sup>44</sup> <URL: <http://www.vista-control.com/>

<sup>45</sup> CERN-SPS, TRISTAN で使用された、インタプリタ言語

としては、CAMAC, GPIB, VXIbus, ARCNET, RS-232 が使用されている。一部の GPIB 機器は、LAN-GPIB 変換器を用いて、ネットワークから直接読み出し可能になっている。また、各 VME 計算機はターミナルサーバ及びネットワークを経由して、コンソール画面を中央制御室の計算機に表示している。これにより、障害時の迅速な状況把握・原因追求が可能である。

各加速器ハードウェアグループは、すべての機器を制御・運用することを望んでいる。例えば、電磁石グループは、全電磁石電源の励磁電流値を常にモニタし、設定値からのずれが許容範囲外である場合には、アラーム情報などを通じて迅速に異常を察知することを望むであろう。また、運転グループは、加速器パラメータの変更履歴を逐次記録し、多種多様な測定値及びパラメータ間の相関解析を行う必要がある。加速器のビーム性能を最大限に引き出すためには、ビーム計測、オンラ

インシミュレーション及びビーム制御を高効率に結びつけることが重要である。このような要求を満たすために、リング制御システムは、下記の項目を大原則として構築された。

- ・ 取得可能なデータはすべて取得し保存
  - ・ 運転中に変更したパラメータはすべて保存
  - ・ パラメータの保存にはデータベースを使用
  - ・ オペレータフレンドリーな制御システム
  - ・ 使い勝手の良いプログラム開発環境
  - ・ オペレーションアクションは数秒以下で完了
- これらの項目は、EPICS をシステムの基盤として採用し、アプリケーション開発にスクリプト言語である SAD 及び Python を使用することにより満足な結果が得られている。

SAD 計算機上で実行される運転ソフトウェアの GUI は、X-Window によりオペレータ PC(主に Macintosh)上に表示される。また、中央計算機室壁には複数の大画面の液晶パネルが設置され、ビー

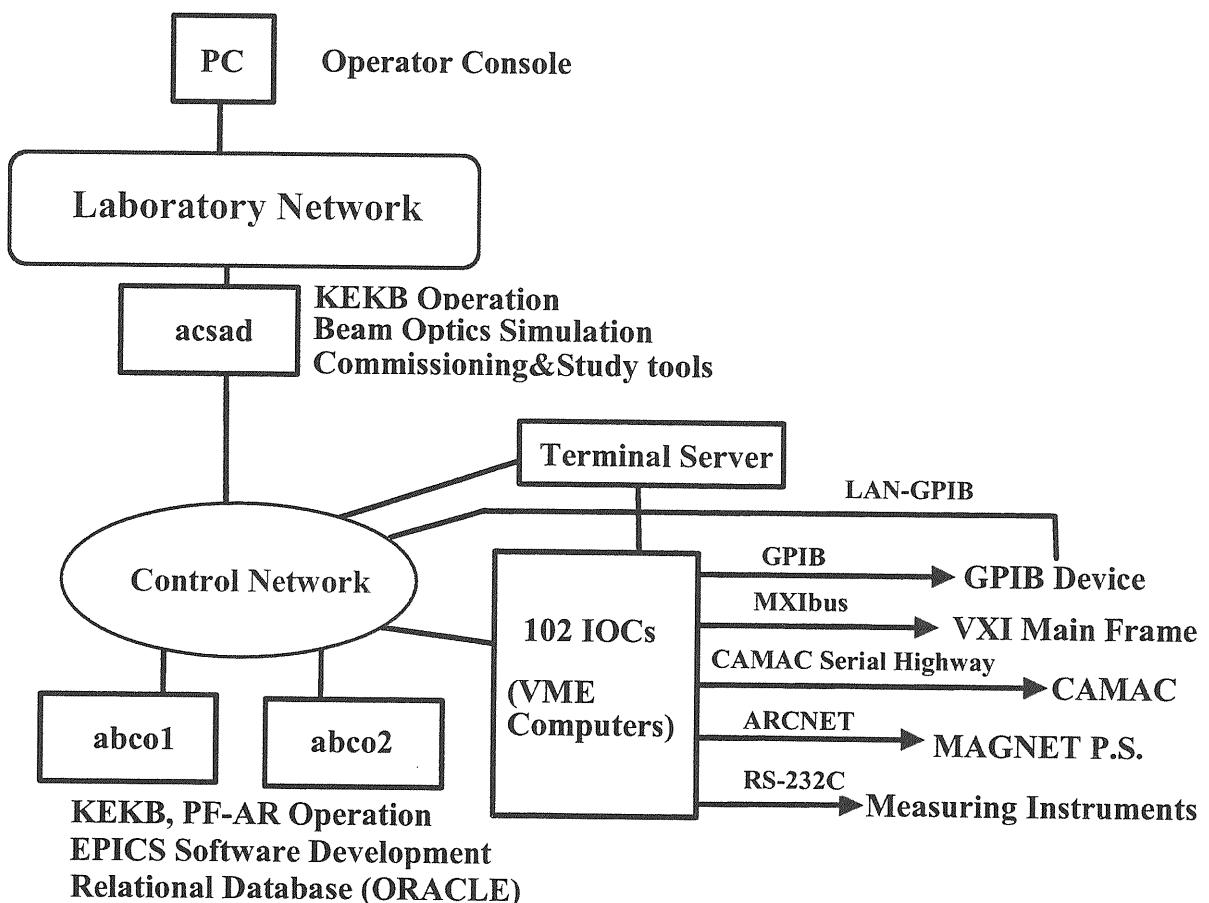


図 3-2：リング制御システムの概要

ムの運転状況やアラーム情報を表示している。さらに、主要なビームパラメータ（チューンなど）の更新やアラーム及びインタロック情報などは、音声による通知も行われ、高機能な運転環境を実現している。

また、制御システム開発期当初は、各ハードウェアグループに”link person”と呼ばれるローカルコントローラの担当者制度を設けた。これにより、制御グループ・各サブグループ間の綿密な協力体制、迅速な意志決定が行われ、効率的な制御システムの構築が実現した。加速器制御のみならず、すべての大規模プロジェクトにおいては、高水準な基盤技術に加えて、このようなスタッフ間の効率的な連携体制が最も重要であることは言うまでもない。

## 4 EPICS

### 4.1 概要

本章では、KEKB リング制御システムの中核を担う EPICS について解説する。EPICS(Experimental Physics and Industrial Control)は、米国 Los Alamos 国立研究所(LANL)及び Argonne 国立研究所(ANL)によって開発が開始された、ネットワーク分散型の制御システムを構築するためのソフトウェアツールキットである。EPICS はまた、国際的な共同開発研究プロジェクトもある。研究の成果は年に複数回開催される EPICS 共同研究の会合で発表される。また今後の開発方針なども議論・検討される。開発されたソフトウェアは ANL が運営する CVS サーバによって参加研究機関で共有される。

研究に関する議論は年複数回の EPICS 共同研究の会合以外にも、電子メールによって常時活発に行われている。

EPICS は、ハードウェアを操作するためのドライバからシステム全体の制御に必要な汎用アプリケーションまでの広範囲のソフトウェアをカバーしている。全世界で 60 以上の研究プロジェクトで制御システム構築ツールセットとして採用され、高く評価されている。KEKB リング（及び PF-Ar）の制御システムは EPICS を基盤システムに採用し、短期間で高機能な要求に応える制御システムの開発が実現された。表 4-1 に、EPICS を使用している主な研究プロジェクトの一覧を示す。KEKB 制御システムは EPICS を使用した加速器制御システムの中でも最大規模のもの一つとなっている(VME 計算機約 100 台/ 制御レコード総数約 30 万点)。KEKB 入射器では 1993 年から使用されている独自開発の RPC が現在でも主力となっている。

EPICS の最大の特徴は、

- 1) 規模における拡張可能性(Scalability)
- 2) 機能の拡張可能性(Extendibility)
- 3) ツールによる制御システムの構築などである。ネットワーク分散型の基本設計を採用することで、ごく小規模の制御システムから数十万点の制御点数を含む大規模な制御システムにまで拡張可能である。

プロジェクト名	制御点数 (レコード数)	IOC/ホスト数	運転状況
APS	300,000	170 / 20 WS	安定運用
HERA Cryo	6,000	4 / 1 WS	安定運用
TTF Injector	600	4 / 2 WS	安定運用
KeckII 望遠鏡	1,500	2 / 2 WS	安定運用
PSR	2,500	4 / 6 WS	安定運用
Duke FEL	2,500	6 / 3 WS	安定運用
PEPII RF	8,400	8 / 2 WS	安定運用
BESSY	15,000	15 / 4 WS	安定運用
APS beam line	15,000	22 / 10 WS	安定運用
KEKB Ring	300,000	約 100 / 5 WS, Many XT, PC	安定運用
KEKB Injector Linac	70,000	---	Archiver (準備中)

表 4-1 : EPICS 使用の主なプロジェクト

## 4.2 基本構成 (Base software)

図 4-1 に、EPICS の基本構成図を示す。ネットワーク分散型アーキテクチャを採用し、

- (1) ローカルコントローラ層
- (2) Network 層
- (3) オペレーターアプリケーション層 (Operator Interface; OPI)

から構成される。これは、一般的な加速器制御の標準モデルそのものである。KEKB では、ローカルコントローラとして、VME 計算機 (RTOS vxWorks) を標準的に使用している。ローカルコントローラ上では、IOC core と呼ばれるソフトウェアを実行させ、ハードウェア制御の中心的な役割を果たす。機器の制御は、IOC から直接或いはフィールドバス (CAMAC, GPIB, PLC) を経由して行われる。IOC 上には、EPICS runtime Database と呼ばれるソフトウェアが導入され、ハードウェアへのアクセスは runtime database 経由で行われる。

EPICS 上でのデータ通信は、Channel Access(CA) プロトコルが使用される。これは、TCP/IP 及び UDP/IP 上に定義された非同期通信プロトコルであり、EPICS 制御システム内のデータへの一元的なアクセス方法をサービスする。各データの読み出し(get)/書き込み(put)や callback (処理終了通知) が実装されている。さらに、ローカルコントローラ層からオペレーターアプリケーション層へのイベ

ント通知を行うための、モニタ機能を持つ。

EPICS 上での制御対象機器群は、EPICS runtime database 上の複数のレコード集合体として表される。レコードは、複数のフィールドから構成される。EPICS 上のレコード名は、データベース内で一意なものである。つまり、EPICS レコードはそのタイプによらず、そのレコード名がユニークキーとなる。EPICS は分散データベースであるため、レコードの実態は複数の IOC 上に点在している。EPICS クライアント (オペレーターアプリケーション)

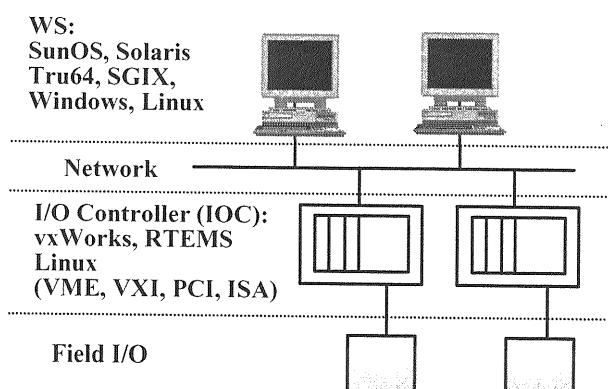


図 4-1 : EPICS の基本構成図

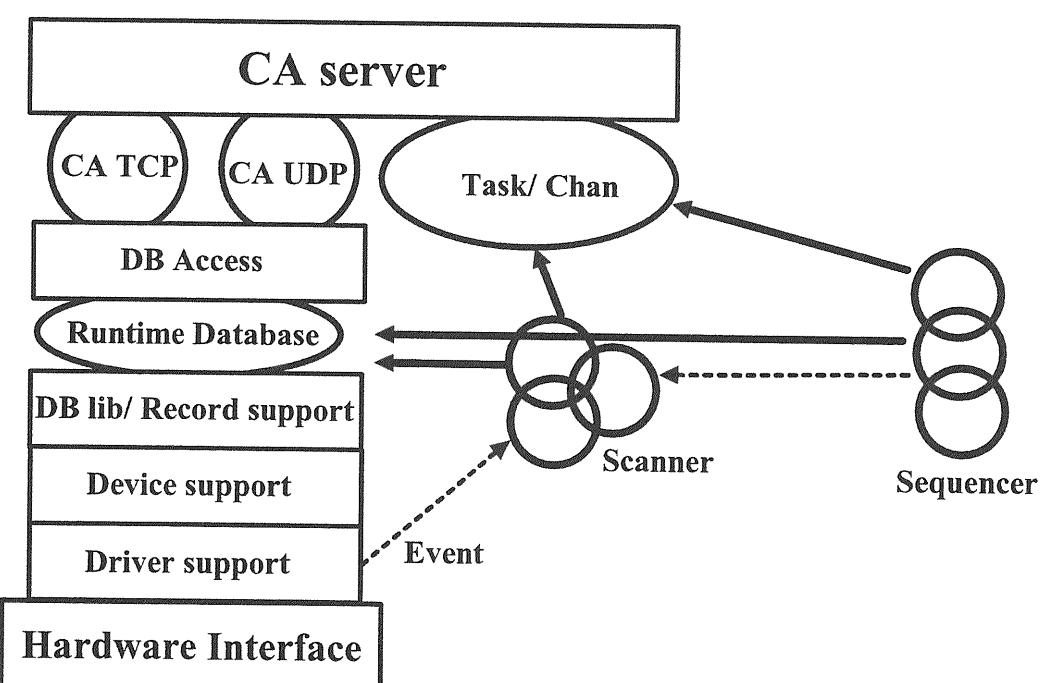


図 4-2 : IOC 上でのプロセス概念図

ン) は、レコードの実体がどの IOC 上にあるかを意識する必要はない。システムの拡張や機能・制御対象の追加のため、データベースを複数の IOC 上に分散させる場合にも、オペレータアプリケーション側の変更は必要ない。これは、EPICS の高い拡張可能性の一例を示している。

表 4-2 に、EPICS の代表的なレコード型一覧を示す。EPICS データベースのレコード型は、各々事前に定義された処理ルーチンが付随しており、特定のフィールドのデータの書き込みなどをトリガ

レコード型名称	意味
aai	アナログデータ配列デバイスからの入力
aao	アナログデータ配列デバイスへの出力
ai	アナログデータのデバイスからの入力
ao	アナログデータのデバイスへの出力
bi	バイナリデータのデバイスからの入力
bo	バイナリデータのデバイスへの出力
calc	計算式評価
calcout	計算式評価及び値出力
camac	汎用 CAMAC レコード
compress	データの圧縮
dfanout	データファンアウト
eg	イベントジェネレータレコード
egevent	イベントジェネレータのイベント生成
er	イベントレシーバレコード
erevent	イベントレシーバのイベントビットパターン
event	ソフトウェアイベントの生成
fanout	プロセスリンクのファンアウト
gpib	汎用 GPIB レコード
gsub	多入力サブルーチンレコード
histgram	ヒストグラム
longin	長整数データのデバイスからの入力
longout	長整数データのデバイスへの出力
mbbiDirect	複数バイナリデータのデバイスからの入力
mbbi	複数桁バイナリデータのデバイスからの入力
mbboDirect	複数バイナリデータのデバイスへの出力
mbbo	複数桁バイナリデータのデバイスへの出力
pal	Programable Array Logic レコード
permissive	Host = Client 同期
pid	フィードバック制御レコード
pulseCounter	パルスカウンタ
pulseDelay	パルスディレイ
pulseTrain	パルストレイン生成
scan	データのスキャン
sel	プロセスリンクの選択
seq	プロセスリンクの順序制御
state	状態文字列を保持
steppermotor	Steppermotor 専用レコード
stringin	ストリング型データのデバイスからの入力
stringout	ストリング型データのデバイスへの出力
subArray	配列データの 1 部分を抜き出す
sub	C サブルーチンの呼び出し
timer	obsolete
wait	ソフトウェアイベントの発生待ち。条件によりプロセスリンクの分岐
waveform	波形データのデバイスからの入力

表 4-2 : EPICS の標準レコード型

として、その処理ルーチンが起動される。これを、EPICS ではレコードのプロセスと呼んでいる。EPICS による制御システムにおいては、ハードウェアとのデータの入出力はこのレコード・プロセスを経由することが基本となる。

図 4-2 は、IOC 上でのプロセス概念図を表している。EPICS database 上のレコードは、デバイスサポートからハードウェアにアクセスすることが出来る。あるいは、デバイスサポートがさらに下位層のドライバサポート (デバイスドライバ) を経由して機器にアクセスする。EPICS では、標準的なモジュール群については、あらかじめデバイスサポートが準備されている。

IOC 上の runtime データベースには、定期的あるいは外部からのイベントによってこれらのレコードプロセスを起動するための仕組み (Database scanning) が組み込まれており、データベースレコードを定期的にスキャンする設定にすれば、そのレコードは指定された周期でプロセスされ、機器の状態を示すデータが定期的に更新される。

EPICS database のもう一つの特徴は、リンク機能である。通常の Relational Data Base(RDB)では、レコードは静的な物として定義される。EPICS のレコードは、プロセスという動的な機能を持ち、プロセスを他のプロセスへ関連づけることが可能となっている。これがレコードのリンクと呼ばれる機能であり、レコードの LINK 型フィールドとして実装される。リンク機能を使うことにより、フィードバックループの表現などを簡単にを行うことが出来る。

### 4.3 Extensions

EPICS では、先に述べた IOC core/CA からなる基本ソフトウェアに加えて、extensions ソフトウェアが提供されている。これにより、CA を用いて IOC 上のデータを利用するための、様々な汎用アプリケーションが利用可能である。これらのソフトウェアは、CA クライアントソフトウェアと呼ばれ、制御システムを構築するために必要となる GUI、アラーム、データ記録などの機能を提供するための汎用アプリケーションが用意されている。例えば、dm2k や edm などの Display マネージャは、IOC runtime database の値を運転員に提示し、設定変更の要求を受け付ける操作画面をグラフィカルな操作で作成し、実行するための環境を提供する。また、Channel Archiver は機器の状態データをファイルに記録し、また記録された値を後で閲覧するための機能を提供している。

必要な機能を備えたアプリケーションが見あたらない場合には、CA ライブラリを利用することにより、独自の CA クライアントソフトウェアの開

発も可能である。また、CA ライブラリは C 言語のみならず、Tcl/Tk, Java, Python, SAD などのインターフェース言語でもサポートされている。これらの言語を利用することで、柔軟なアプリケーション開発が可能である。

以上のように、EPICS ソフトウェアはモジュラーな設計とよく定義されたインターフェースを用意しており、ソフトウェアの各層で機能拡張を用意している。また EPICS 共同開発の中で開発された汎用アプリケーション(EPICS tools)を利用して制御システムを構築することで、制御システムの多くの定型的な機能についてはプログラム開発の必要を大きく省くことができる。今後、EPICS を採用する研究プロジェクトが増加し、発展し続けていくであろう。

## 5 運転ツール群

KEKB リングの日常運転では、”Adiabatic tuning”と呼ばれる衝突点近傍のビームオプティクス微調整やチューンの微調整を行い、ルミノシティを常に高い状態に保つ調整が行われている。通常、これらのビーム調整は、加速器オペレータ及び KCG(KEKB Commissioning Group)シフト当番が 24 時間体制(8 時間交代)で当たっている。本章では、KEKB 加速器の日常運転において使用されるソフトウェアについて、代表的な物をいくつか紹介する。

### 5.1 入射器

#### 5.1.1 タッチパネルシステム

入射器の制御システムは、既に 3 章で解説したとおり、機器制御部（フロントエンド）・ホスト計算機部（中間層）及び OPI(オペレータインターフェイス)部から構成され、ネットワークによって相互接続されている。このうち、オペレーターが直接操作する OPI 部には、Windows PC (Visual Basic)、PC-Linux (X 端末として使用) 及びタッチパネルシステム（図 5-1）の 3 種類が利用されている。

現在のタッチパネルシステムは、1991 年に導入され、NEC-PC98 及び 10.4 インチの TFT-Color-LCD が用いられている。本タッチパネルシステムは、制御ネットワークに Ethernet で接続され、RPC によって機器操作を行う。例えば、クライストロン電圧・位相調整・電磁石励磁電流値調整・クライストロン加速及び非加速モード切り替えなど、個々の機器の操作に頻繁に使用される。その他にも、スクリーンモニタ制御、全クライストロン立ち上げ、立ち下げなどの機能も備えている。ノブを用いた直感的な操作はオペレータに好まれており、頻繁に利用されている。

しかしながら、十年以上前に導入されたため、システム維持が困難になってきている。ディスプレイは常時表示を行っているため特に消耗が激しいが、同等品は販売しておらず、繰り返し修理を行っている。NEC-PC98 も 6 台中 2 台が故障し使用不可となっているが、現在では入手困難であり更新ができない。このため、仮想タッチパネルシステムソフトウェア(VTP)が開発されて、日常運転で安定に利用され始めた（図 5-2）。これは、入射器運転ソフトウェアに広く使用されている Tcl/Tk で開発された。VTP は、タッチパネルシステムの全機能を実装し、過去の操作状態へ段階的

に戻ることを可能とするなど、いくつかの追加機能を実装した。

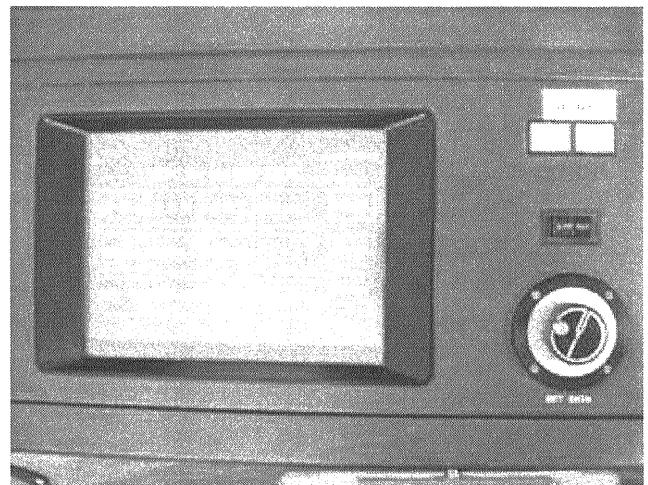


図 5-1：タッチパネルの外観

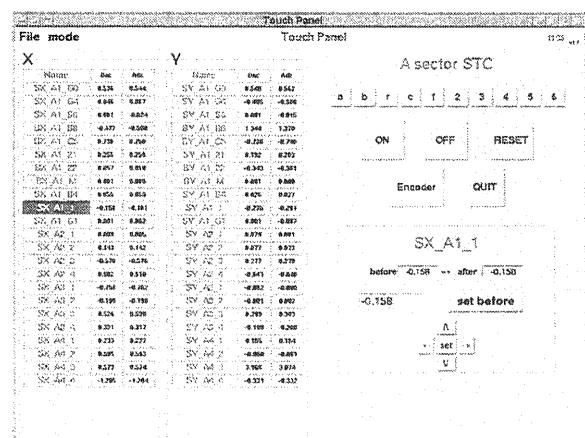


図 5-2：仮想タッチパネル画面

#### 5.1.2 ビームモードスイッチ

入射器は、KEKB 電子・陽電子リングの他に、PF、PF-AR を含む 4 つの異なるビーム入射を行っている。これらのビームモードを、素早く切り替えるためのソフトウェアが準備されている。パラメータ切り替えは、下記項目について行われる。

- 電磁石初期化
- 電磁石励磁電流値設定
- RF 位相設定（クライストロン、サブブースタクライストロン
- 電子銃パラメタ設定
- 陽電子ターゲット及びシケイン電磁石設定
- ビームモニタ（オシロスコープ）の測定

## モード設定

- ・ ビーム輸送ラインの設定
  - ・ ビーム繰り返しの設定
  - ・ 下流加速器への運転モード変更通知
  - ・ オペレータへの音声通知
  - ・ 前回ビームモードとの差分情報表示及び記録
  - ・ 各ビームモードでのフィードバックループ起動

図 5-3 に、ビームモードスイッチパネルの写真を示す。上部に設置されているボタンを、オペレータが選択することにより、目的のビームモードのためのパラメータが呼び出される。さらに、オペレータの判断により、呼び出されるパラメータ項目の選択・非選択の変更が可能である。

通常、運転パラメータは、直前の同一ビームモードで使用されたパラメータが利用される。オペレータの判断により、他のパラメータも瞬時に呼び出すことが可能である。入射器ビームは、各種のビームフィードバックや、オペレータによる手動調整によって毎回異なるが、変更記録はすべて保存され、再利用可能となっている。

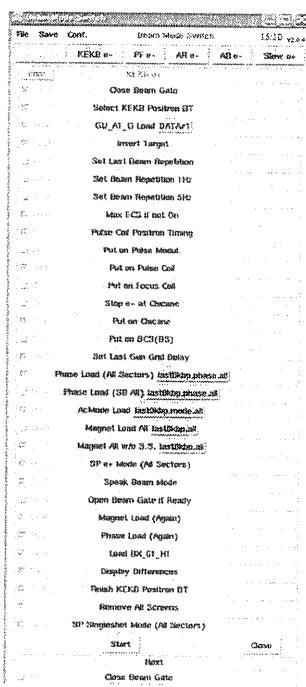


図 5-3：ビームモードスイッチ

### 5.1.3 フィードバックループ

入射器では、ビームの安定化のために、多数のフィードバックソフトウェアが実装されている。

これらは、ローカルな機器に対する物やビームエネルギー及び軌道に関して行われる。フィードバックの基盤となる部分は、共通のソフトウェアが利用されており、単純 PID 制御を行っている。個々のフィードバックは、下記のような部分から構成される。

- ・ ビームモード及び電荷量の認識
  - ・ フィードバック制御量の取得
  - ・ フィードバック操作量の算出
  - ・ 操作量を機器へ設定する
  - ・ 履歴グラフの更新及び記録

現在、エネルギー・フィードバック 6 カ所、軌道・フィードバック 30 カ所及び機器のフィードバック 6 個が常時利用されている。また、制御室オペレータ端末上には、図 5-4 に示すフィードバックループ状態表示パネルにより、多数のフィードバック動作状態を監視している。

図 5-4：入射器フィードバックループ

#### 5.1.4 フェージングツール

入射器では、60台を超える大電力クライストロンをビーム加速に使用しているが、安定したビーム運転には、RF位相の安定化が重要な課題となる。主に、室温・水温の変化や、クライストロン電源の印可高電圧値の変更などにより、RF位相の変動が生じる。このため、RFクロрест位相を測定・掌握することが求められる。

KEKB コミッショニング当初は、加速管からの

ビーム誘起波の位相を測定し、クライストロン RF の位相と比較して直接フェージングする方法を予定していた。この方法では、加速管の中心周波数のずれが、位相のずれとして見えてしまうので、絶対位相の測定に使う事はできないと判断された。現在はビームエネルギー測定法により、RF フェージングを行っている。

KEKB に供給している電子ビームを使用して、測定対象であるクライストロンの位相を変更し、最大エネルギーが得られる位相を測定することで RF クレースト位相を測定している(図 5-5)。フェージングを行うクライストロンの位置によりディスペーページョン関数の大きな 2箇所の BPM を使い分けで測定しており、A, B セクターはアーク部 BPM (SP\_R0\_31)、C~5 セクターは入射器終端の BPM (SP\_61\_H1) を用いている。

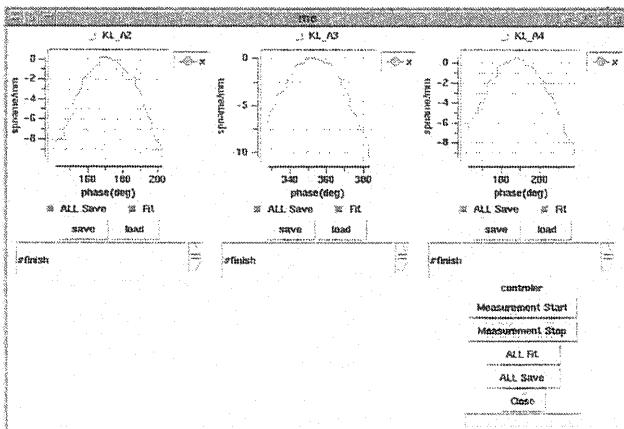


図 5-5：フェージングツール

### 5.1.5 自動軌道補正

長期メンテナンス後(夏期メンテナンス後)の立ち上げ運転時には、様々な運転パラメータが変更になっているため、個々のステアリング電磁石を個別に設定するビーム調整は時間の浪費となる。また、定常運転時であっても、ビーム軌道悪化によるビーム透過量の減少がしばしば生じる。このような事態に対処するために、自動軌道補正ソフトウェアが開発された。

本ソフトウェアでは、セクター毎の個々の BPM 位置におけるビーム軌道を、ステアリング電磁石によってビーム軌道を微少にキックし、その下流位置での BPM の応答を計測することによって、全体のビーム軌道を補正していく。しかしながら、

このような補正方式は、ビーム入射中には用いることが出来ない。現在、入射器ビーム軌道をグローバルに補正するためのツールを開発中である。

### 5.1.6 エネルギー広がりフィードバック

2004年初頭より、KEKB リングでは連続入射運転を通常の運転モードとして確立し、積分ルミノシティの向上に大きく貢献している。しかしながら、連続入射中においては、スクリーンモニタのようなビーム破壊型モニタの利用は入射を妨げるため使用不可能である。さらに、エネルギー広がりフィードバックを行うためには、フィードバックの制御量であるエネルギー広がりを、定量的に測定することが求められる。この目的のためには、KEK で開発された非破壊型エネルギー広がりモニタ(ESM)が有効である。通常、4 電極ストリップライン型ビーム位置モニタ(BPM)を、水平方向ディスペーページョンが大きなビームラインに設置した場合、電極配置を 45 度傾けて設置する。このような設置方法は、ビームや放射光が BPM 電極を直撃し、大振幅信号がオシロスコープの電気回路を損傷する事態を避けるためである。しかしながら、直線部に置かれている水平・垂直方電極をもった BPM ではその方向の 2 次モーメントを測定することができるが、アーク部に設置された 45 度 BPM では、ビームの水平・垂直方向の 2 次モーメント計測は原理的に不可能である。

ESM は、このような事態を避けるために、8つのストリップライン型電極から構成される。これにより、ビームの 2 次モーメントが消失する電極配置(45 度、135 度、225 度、315 度)を避けつつ、同時に、放射光やエネルギーのずれたビームが電極へ直撃する事を回避する。KEK 入射器では、この ESM をアーク部中央( $E=1.7\text{-GeV}$ )及び第三スイッチャード電子ビーム輸送ライン( $E=8\text{-GeV}$ )の二箇所に設置し、常時ビーム監視を行っている。図 5-6 にエネルギー広がり履歴表示パネルを示す。

図 5-7 は、ビーム電荷量とエネルギー広がりとの相関を示している。この図から、ビームのエネルギー広がりが増大すると、入射器ビームの電荷量が減少することが見て取れる(ライン A)。このような事態をさけ、さらに、連続入射中でも自動的にエネルギー広がりを最適化するためのフィードバックの運用が開始された。ESM の測定値をフィードバックの制御量とし、サブブースタクライストロン RF 位相の設定値を操作量とした PI 制御を行った。図 5-8 にフィードバック ON/OFF 時の

エネルギー広がりをプロットした。これにより、フィードバックは、ESM の計測のばらつき範囲内で、有効に動作していることを確認した。現在、さらに効率的なフィードバックアルゴリズムの開発や、試験データの詳しい解析が行われている。

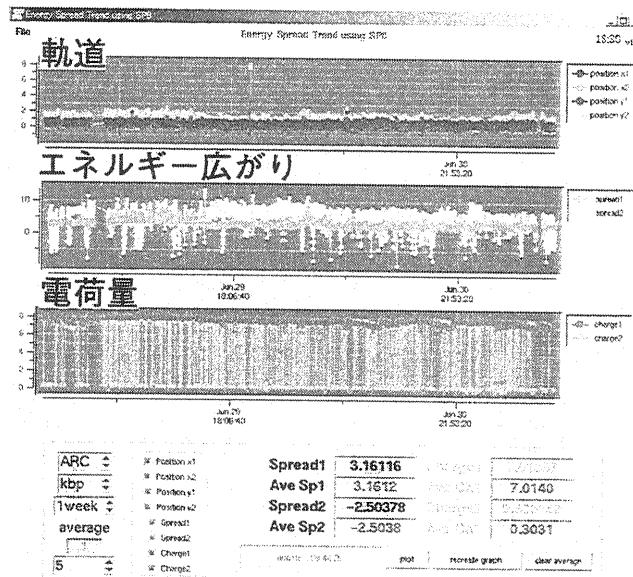


図 5-6：エネルギー広がり履歴表示画面

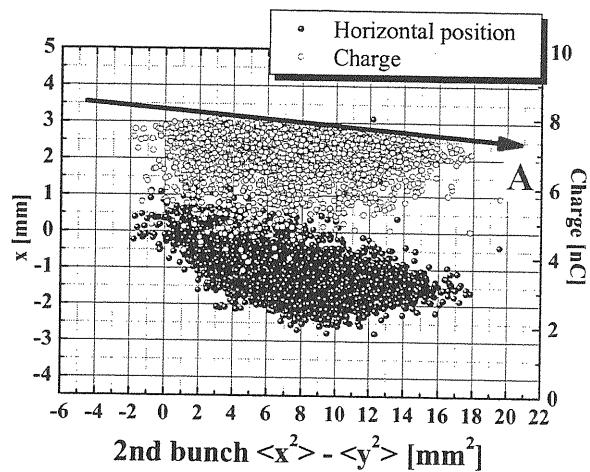


図 5-7：アーケ部 ESM による水平方向ビーム位置・電荷量とエネルギー広がりの相関プロット(10nC モード)

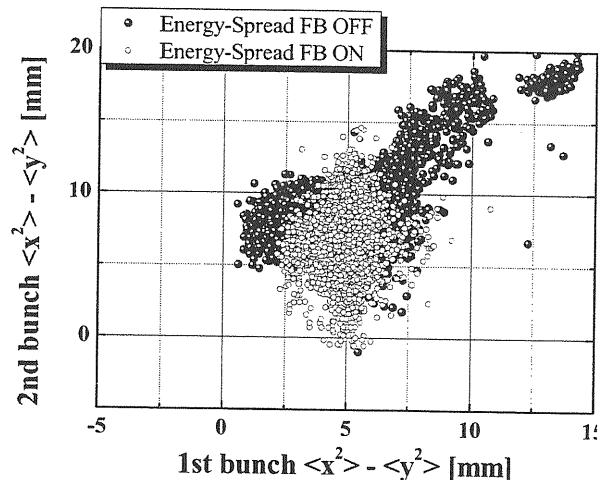


図 5-8：アーケ部 ESM によるエネルギー広がりフィードバックの結果(10nC モード、1 バンチ目のフィードバック目標値を 5 に設定した場合)

## 5.2 リング

### 5.2.1 チューン計測及びフィードバック

蓄積リングにおいて、ビームのベータトロンチューンは最も基本的なパラメータの一つであり、リングのビームオプティクスが設計値にどの程度近づけているかを判断する上で非常に重要である。チューンは、パイロットバンチと呼ばれる非衝突バケットのビームを、キッカーで励振させて、スペクトラムアナライザで検出する。これにより、ビームのベータトロン振動数の常時観測が行われている。

チューンは、その蓄積電流値によって最適な値が存在する。ビームチューンを常時監視し、常に最適な設定値に保つために、チューンプロットパネル及びチューンフィードバックソフトウェアが実装されている（図 5-9）。

### 5.2.2 CCC (Continuous Closed-orbit Correction)

KEKB リングでは、CCC とよばれるアプリケーションソフトウェアを使用し、軌道補正が常時行われている。これは、ビームの閉軌道が目標値附近で安定化するように、20-30 秒間隔でフィードバックをおこなっている。

軌道補正に用いられる水平（垂直）方向ステアリング電磁石は、水平（垂直）方向に収束力をを持つ四極電磁石近傍に設置されている。補正のアルゴリズムには、SVD(Singular Value Decomposition)が用いられる。SVD の方法において、適当な数の固有値を用いた補正を行えば、BPM 読み値誤差に対する軌道補正精度の悪化を減少させることができる。また、蓄積ビームのエネルギーの長期に渡る

変動を押さえるために、水平方向ステアリング蹴り角度の総和が一定値になるような束縛条件を付加している。

### 5.2.3 LogBrowser

KEKB リングでは、EPICS システムをその制御システムの基盤として運用していることは先に述べたとおりである。EPICS ツール群には、運転おパラメタログ用の Archiver ツール及び複数の閲覧ツールが存在する。KEKB 制御システムデザイン当時は、EPICS の Archiver ツールでは目標とするパフォーマンスの実現が困難であるとの判断から、KEKBLog(通称 kblog)と呼ばれる独自システムを開発・運用している。Kblog によって蓄積されるデータは、LogBrowser と呼ばれる専用閲覧ツールにて、過去ログの閲覧及びリアルタイムトレンド表示が実現できる（図 5-10）。

本ツールは、数種類の数値演算機能を有しており、異なるパラメータ間の相関プロットや、数値演算操作後の相関プロットなどを簡単に行うことが可能である。これにより、今まで発見しにくかったビームパラメータ同士の相関やルミノシティに対する影響を理解しやすくなり、ビーム調整効率の向上に大きく貢献してきた。

独自のシステムを採用してきた入射器のビームパラメータ管理に関しても、EPICS Archiver の利用とともに、LogBrowser を利用したリングビームのパラメタと種々の相関を調べるのに便利であると理由から、Kblog システムへのデータ蓄積が検討されている。

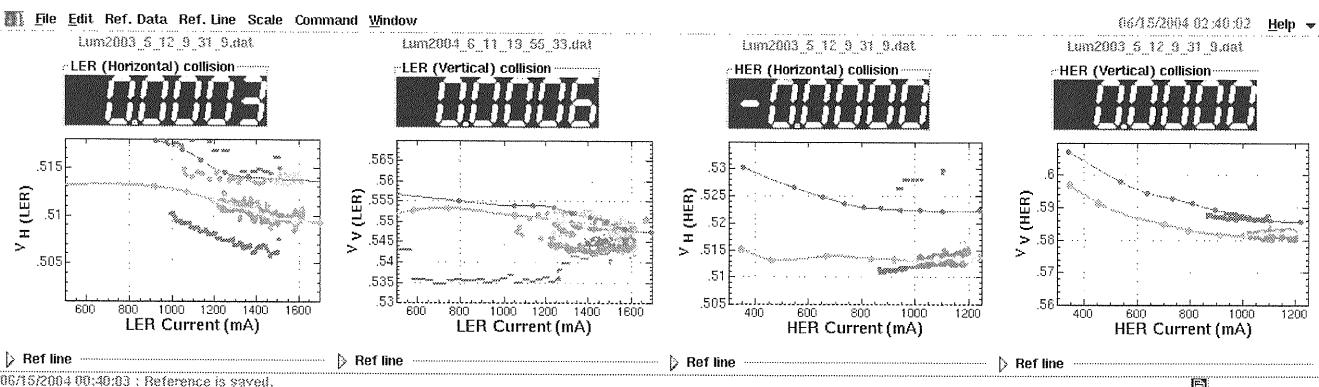


図 5-9：パイロットバンチ・チューンパターン及びフィードバックパネル

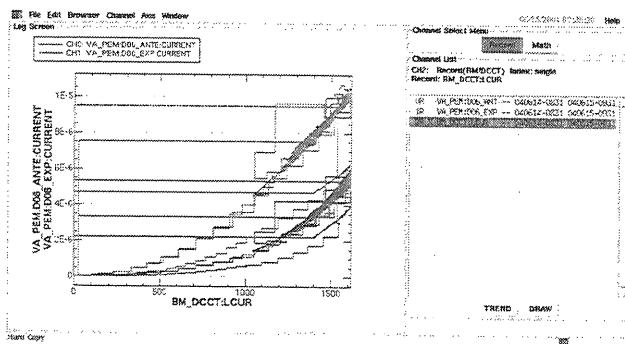


図 5-10 : Log browser

#### 5.2.4 ローカルオプティクス補正

衝突点(IP)近傍でのローカル補正は、衝突実験中は常に行われる。これは、ルミノシティー、ビームサイズを見ながら行われる。これは、KCG シフト当番及び加速器オペレータが共同して行う。このビーム調整は、下記のパラメータについて行われる。

- (a) ウエスト（垂直ベータ関数の極小点）
  - (b) 衝突点ティルト（ローカルカップリング補正）
  - (c) 衝突点ディスペーション及び傾き

本ローカル補正でオプティクスが変更する領域は衝突点領域及び近傍のアーケ部に限られており、リングの他部分に影響することはない。

各パラメータにおけるビーム調整は、ルミノシティが最大になり、なおかつビーム寿命が極端に減少しない領域を、スキャン履歴パネルを参考にして行う（図 5-11）。スキャンは、2種類のパラメータの和・差を制御量として行うことも可能である。これは、単独のスキャンではルミノシティに対して鈍感なパラメータ同士を組み合わせることにより、多次元スキャンをおこなって効果を上げるためである。本パネルは、チューンスキャン

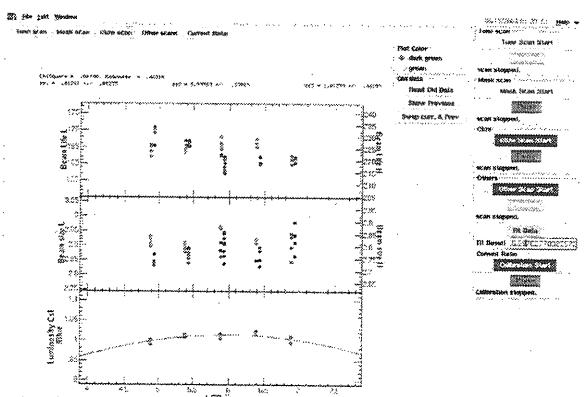


図 5-11・スキャン履歴パネル

などにも用いられる。

## 5.2.5 アラーム

加速器のビーム運転中は、膨大な数の計測値が常に監視されている。場合によっては、これらの監視値が通常考えられる許容範囲を超える場合もある。例えば、局所的な真空値の悪化やチェンバーの温度上昇などの場合である。蓄積ビームは、深刻なパラメータ異常の場合には、ビームアボートシステムによって、即座にビームダンプへと捨て去られる。これ以外の場合には、アラーム情報としてオペレータに通知される。アラームは、中央制御室の大画面パネルに文字情報として通知されるほか、音声による通知も行われる。通知方法を二重化することにより、加速器オペレータは確実にアラーム情報を認識することができる。また、アラーム状態パネルを用いて、通知されたアラーム履歴を調べることもできる(図5-12)。

オペレータは、アラーム情報の内容を確認し、深刻な内容であれば各サブグループの担当者に連絡して対処する。このようなアラームシステムを実装することにより、深刻な機器の故障を未然に回避することが可能である。

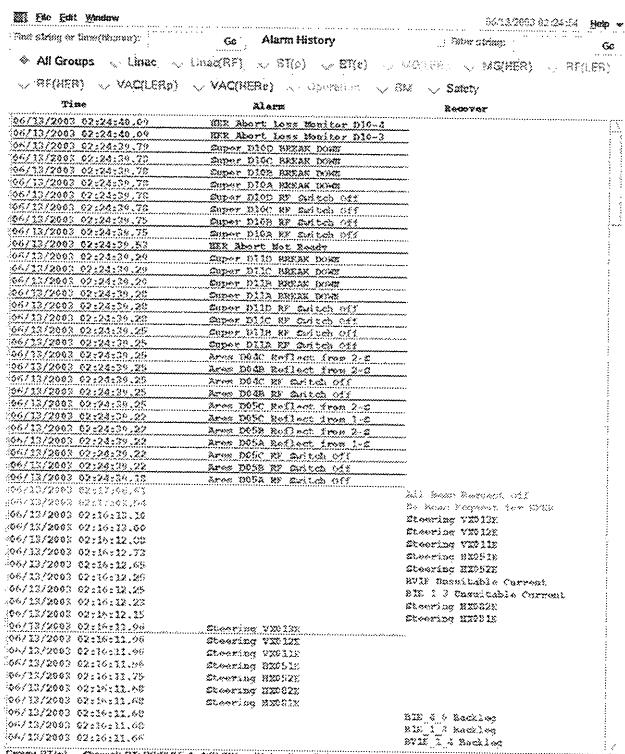


図 5-12：アラームステータスパネル

### 5.2.6 運転ログブックシステム

加速器運転中は、トラブル情報は言うまでもなく、ビーム調整の詳細な情報を共有することは有

益である。この目的のために、電子ログブックシステムが開発された。KEKB 運転開始より、詳細な運転記録は、オペレータによる手書きの記録が行われていた。しかしながら、過去のデータの再利用や検索が困難であったため、Windows PC 及び RDB(Relational Data Base) である MS-SQL/MS-ACCESS を用いて加速器運転記録のデータベースを構築し、安定な運用を行っている。本システムでは、入射器ビーム繰り返しやモード変更やビームゲート ON/OFF などの、頻繁に変化する状態については、ログシステムが自動的にデータベースへ配信する。これにより、オペレータの手間を格段に省くことが可能となり、他のビーム調整に専念することができる。

リング側（及び PF-AR）では、本期運転より独立したログシステムに移行した。これは、Zope と呼ばれる Python インタプリタ言語による Web アプリケーション開発ツールを用いて構築された。利用者の声を迅速に反映するため、利用者要望掲示板を設置し、日々細かな改良が行われ続けている。これら、オペレーションログは、通常の Web ブラウザで閲覧可能であり、運転情報をリアルタイムに共有することにより、運転効率の向上をもたらしている（図 5-13）。

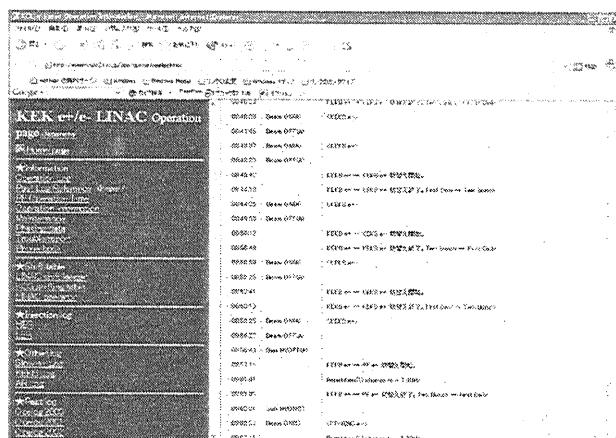


図 5-13：入射器ログブック画面

## 6 まとめと今後の課題

KEKB 加速器が世界最強のルミノシティマシンとして成功を収めた要因は、先進的かつ柔軟なオプティクス設計や、大電流を安定に蓄積するための高水準な加速器技術（超高真空技術・ARES 常伝導及び超伝導 RF 加速空洞技術・ソレノイド電磁石による光電子雲ビーム不安定性の抑制・高精度なバンチーバンチフィードバックによるビーム不安定性の抑制・入射器による連続入射運転及び陽電

子 2 バンチ入射の実現。毎朝行われる KCG ミーティングによる、加速器サブグループ、物理実験グループ間の迅速な意志決定及び情報共有) であることは疑う余地もない。これらに加えて、

- ・ EPICS システム
  - ・ 独自開発の RPC システム
  - ・ 堅牢な計算機制御システム
  - ・ 信頼性の高いネットワークシステム
  - ・ 柔軟なアプリケーション開発環境

を基盤とした、加速器制御システムの功績が大きい。

将来予定されている、KEKB アップグレード、SuperKEKB 計画においては、入射器でのビームモードをパルス間で高速にスイッチするなど、さらに高度かつ複雑なビーム制御機構の実装が必要とされる。このような要求に備えて、具体的な制御システム増強案の検討が始まっている。

7 謝辭

OHO 高エネルギー加速器セミナーの講師という貴重な機会を与えて下さいました、鎌田進教授、神谷幸秀加速器施設長、榎本收志主幹、生出勝宣主幹に深く感謝致します。また、原稿に目を通して頂き、筆者に加速器制御の基礎をご教授して頂きました、古川和朗氏に感謝致します。貴重なコメントを頂きました上窪田紀彦氏、諏訪田剛氏に感謝の意を表します。また、日々の加速器運転に関する様々な提案及び情報提供をして頂きました、小川雄二郎氏、LCG・KCG メンバー各位、オペレーターの皆様に感謝致します。

## 8 参考文献

本テキストの執筆には、下記の文献を参考した。

- [1] 古川和朗、上窪田紀彦，“KEK 入射器の制御システム”, OHO’02 (2002).
  - [2] 山本昇, “EPICS アプリケーション開発の手引き” (2002).
  - [3] Edited by E. Kikutani, “KEKB Accelerator Papers”, Compiled for publication in Nuclear Instruments and Methods Series A, KEK Preprint 2001-157 (2001).