

はじめに

KEK 電子リニアックは、1978年より7年かけて建設された。初めの4年間の一期目で、公称エネルギー2.5GeV(ビーム電流50mA)全長400mの放射光実験施設入射器(PFリニアック)を完成させ、続く3年間で、トリスタン入射のための陽電子発生装置(200MeV電子リニアック+250MeV陽電子リニアック)を作り上げた。二期にわたって建設されたこれ等二つのリニアックは、一体のシステムとして運転できるように設計されているが、陽電子発生装置制御システムについては、PFリニアック制御システムより4年遅れて建設に取り掛かったため、その間の急激なマイクロエレクトロニクスの進歩を背景にPFリニアック制御システムを再検討し、システムの改善をはかることができた。これにより、両者は、大すじでは同一の構造を保ちながらも、システム制御プロセッサについては、ミニコンから複合マイクロプロセッサへの転換が行われた。又、サブシステム毎の制御盤も、全金物スタイルからパソコン利用方式へと変わった。

加速器制御システムの組み方は、予算、期間、人員、時代背景によって様々に変化するものであるが、このKEK電子リニアック制御システムも、その置かれた環境によって、以下に述べるような形をとることになったのである。

1. 概要

PF2.5GeV電子リニアックは、電子銃及びバンチャーを含む入射システム、40台の加速ユニット、及びビーム輸送システムからなり、それ等は全長400mにわたって配置されている。制御対象装置は、大電力クライストロンパルス電源(公称尖頭出力84MW)41台、ビーム輸送システム電磁石電源244台、イオンポンプ88台等々で、計算機による制御システムの入出力点数は、アナログ信号が約2000点、デジタル信号が約8000点である。

リニアックの制御システムは以下の原則のもとに設計された。

- (1) リニアックの個々の装置は、遠隔操作が可能であるとともに、それ自身独立して運転可能なこと。(クライストロン電源を例にとると、パルス電源1台ごとに遠隔操作及び独立運転が可能であるのはもちろんのこと、その中に組み込まれている各種回路ユニットも又、それぞれ遠隔操作及び独立運転可能な構造になっている。)
- (2) 制御卓で、各装置の制御及び状態表示がリア

ルタイムで実行可能なこと。そのための適当な通信手段を用意する。

- (3) 各装置自身を保護するためのインターロック回路は、リレーを用いた完全なハードワイヤー論理回路とする。
- (4) 各種装置は極力モジュール化し、製造・保守の簡易化をはかる。

このPFリニアックの制御システムは、長さ方向に6分割され、それぞれの区域ごとに副制御システムを持っている。その6区域とは、電子銃、バンチャーよりなる入射システム、その後の40台の加速ユニットを5分割した第1～第5セクタである。最後尾のビームスイッチヤードは第5セクタ副制御システムに含まれる。このように装置種別にならず、区域ごとに制御システムを分割したのは、リニアックの運転立上げを操作員の目のとどく範囲の小区域ごとに行う予定になっていたからである。したがって、副制御システムは、それぞれの副制御室内に専用の操作盤を持ち、そこから受持区域内の機器を遠隔操作できるように設計した。

リニアックの制御機器は、電子銃・クライストロンパルス電源等の端末装置、操作員が運転に介入するための制御卓(盤)或は操作員に替って運転に関与する制御装置(運転管理装置)、及びそれ等を相互に接続する通信システムに分類できる。言い換えれば、リニアックの制御システムは、端末装置群と運転管理装置群が通信システムにぶら下がっているものとして描き出せる。そこでシステム設計上まず第一に必要なことは、通信規約とデータ交換形式とを定めることである。これができれば、後は端末装置、運転管理装置ごとに独立に設計・製造を行えばよい。

リニアック制御に使用されているプロセッサは、8台のミニコンピュータ(MELCOM70/30)と多数の6800系8ビットマイクロプロセッサである。これ等のプロセッサは統合された通信ネットワークを形成している。8台のミニコンの中2台は主制御卓用として、他の6台はそれぞれ入射システム、第1～第5セクタ副制御システムの主プロセッサとして使用されている。これ等ミニコンの外部装置との主要なインターフェースはブランチハイウェイに接続されたCAMACである。

2. 通信システム

PFリニアック制御のための通信システムはビットシリアル方式で、図2-1に示すような二階層のループ構造を持っており、いずれもバイナリー形式のデータ伝送ができる。上位階層の主ループは

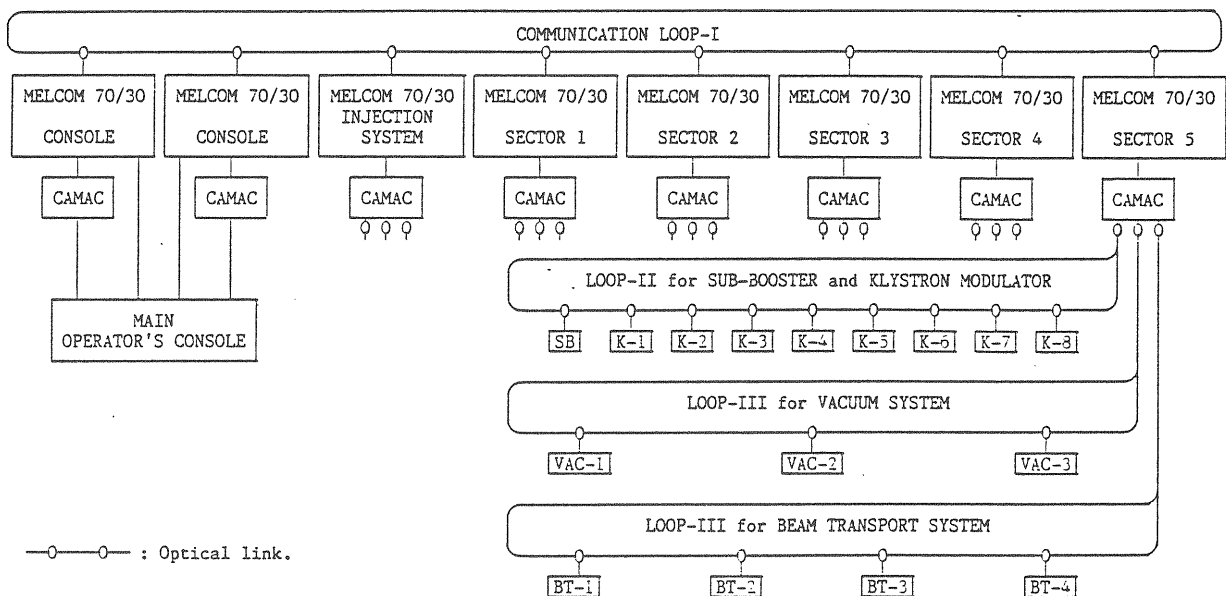


図 2-1 PF リニアック通信ネットワーク。

上位階層主ループのノードはミニコンピュータ MELCOM70/30, 下位階層ループの制御局はミニコンに接続された CAMAC モジュールである。通信速度は 5 Mbps (Loop-I), 500 kbps (Loop-II), 48 kbps (Loop-III) である。端末装置は K (クライストロンパルス電源), BT (ビーム輸送系制御ユニット), VAC (真空系制御ユニット) 等で表示されている。他の装置は省略した。

LOOP-I と呼ばれ、8 台のミニコン (MELCOM70/30) を相互に接続する N:N のいわゆるトークンリングで、5 Mbps の通信速度である。この通信制御装置は送受信データバッファメモリを持たず、直接ミニコンの主記憶装置に読み書きする。タスクレベルからは、全二重動作をしているように見える。副制御システムの主プロセッサとして使われているミニコンは、又、下位階層ループとの間の交換機としても機能している。

下位階層ループは 1:N 通信方式で、通信速度と同期方式の違いにより二種類に分けられる。一つは通信速度 500 kbps の独立同期式通信ループで、LOOP-II と名付けられている。もう一つは通信速度 48 kbps 調歩同期式の LOOP-III である。下位階層ループは、LOOP-II だけで統一した方がスッキリするが、ビーム輸送システムの電磁石電源のように、端末装置 1 台当りのデータ量は少ないが、装置数が多いという場合、通信速度をある程度下げても単価を下げる時に調歩同期式が有利になるので、LOOP-III をつくった。下位階層ループの通信速度は、容易に入手できる通信 LSI でも実現可能な最大値に近い値に定めた。LOOP-I 通信制御装置はミニコン固有のもので、CPU バス直結であるが LOOP-II / -III の一次局 / 制御局は二幅の CAMAC モジュールである。II, III ともデータウェイ側に対しては同一の動作をする。LOOP-II 通信制御 CAMAC モジュールのブロック図を図 2-2 に示

す。LOOP-III 通信制御 CAMAC モジュールは II のモジュールの HDLC, DMAC (直接メモリアクセス制御 LSI) 及び PLL 回路を取り除いて、代わりに非同期通信 LSI (ACIA) を組込んだものである。

LOOP-I 及び II のループ上のメッセージ形式は、ハイレベルデータリンク制御手順 (HDLC) のフレーム構成 (JIS C6363-1978) と基本的には同一である。LOOP-III は、バイナリーデータ伝送のため、DLE 符号を用いる透過モード方式とした (基本形データ伝送制御手順, JIS C6362-1975)。即ち、メッセージは DLE·STX 符号で始まり、DLE·ETX で終わる。テキスト中 DLE 符号と同一のデータが現れた場合は、DLE·DLE として送信し、受信側では二重の DLE を 1 けたの DLE と認識する。

KEK リニアックは、パルス運転により強力なノイズ源になっている。このノイズによる制御回路の誤動作を防ぐため、小規模な回路毎にフォトカップラー或は光ファイバーを使って他の回路と電気的に絶縁した。ある程度以上の長さの通信回線には光ファイバーを用いた。LOOP-I で使用している光ファイバーは、コア径 $60\mu\text{m}$, クラッド径 $150\mu\text{m}$ の石英ガラス製で、LOOP-II, III 用は、コア径 $100\mu\text{m}$, クラッド径 $150\mu\text{m}$ の多成分ガラス製である。光の中心波長はいずれも 850nm である。光送受信モジュールは、それに接続されている通信制御回路が異常のとき、バイパスモードなる。

光ファイバー中を伝搬する光信号は外来ノイズか

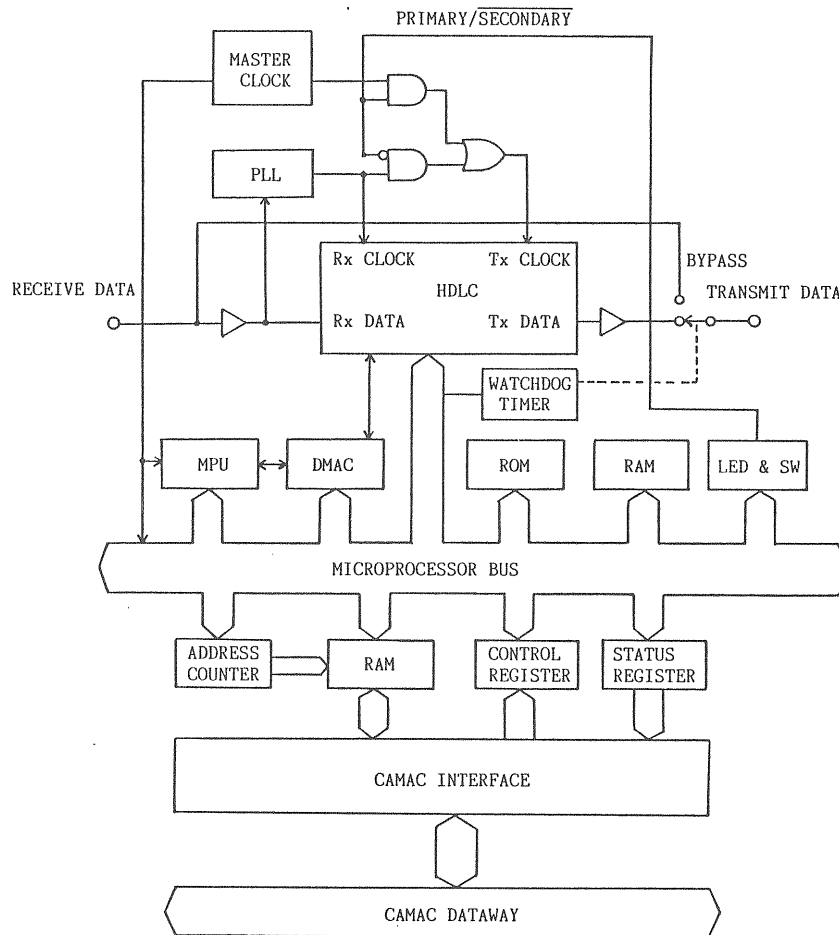


図 2-2 LOOP-II 通信制御 CAMAC モジュールのブロック図。

HDLC：ハイレベルデータリンク制御 LSI, MPU：マイクロプロセッサ(6800), DMAC：直接メモリアクセス制御 LSI。

ら影響を受けないが、設計に際して注意すべきは受光回路である。光信号を電気信号に変換する時に使用する増幅器が外来ノイズを拾わぬように、特に大電力クライストロンパルス電源筐体に組込む時の事も考え、嚴重な電磁シールドをほどこした。

3. 端末装置の制御回路

リニアックの各種端末装置は、通信ネットワークによる遠隔制御が可能であるばかりでなく、試験、保守が容易であるように、独立運転も可能なように設計されている。そのため、各装置はローカルモードとリモートモードの切換スイッチと、LOOP-II 或は LOOP-III の二次局（従属局）としての通信機能を持っている。通信に LOOP-II を使うか、或は LOOP-III を使うかは性能／価格費を考慮して決める。以下に、主な装置の制御回路について説明する。

3.1 電子銃及びクライストロンパルス電源の制御回路

電子銃パルス電源もクライストロンパルス電源も

同一の制御回路を持っているが、高周波装置固有の回路を除いて唯一異なるのは、電子銃パルス電源の高電圧投入／切断スイッチが通信ネットワークを介さずに、直接、制御卓のスイッチに接続されている点である。これは放射線安全管理上、電子ビームの入射／停止を制御室の操作員が確実にできることを保証するためである。

制御回路は、図3-1に示すように、ローカル運転のための「制御回路 I」と遠隔制御のための「制御回路 II」からなっている。ローカル運転の場合は制御回路 I のみ使用する。遠隔制御の場合は、制御回路 II から I の押しボタン回路へ信号を送り込み、又、制御回路 I のステータス情報、各部の電圧・電流を制御回路 II へ取込む。

制御回路 II を収納するクレートは、バックプレーンを除いて CAMAC と同一規格である。バックプレーンは 8 ビットマイクロプロセッサ 6800 のバスラインになっている。各モジュールも、カードエッジ端子部分を除いて、CAMAC 規格と同一の寸法になっている。制御回路 II は、高電圧、大電流スイッ

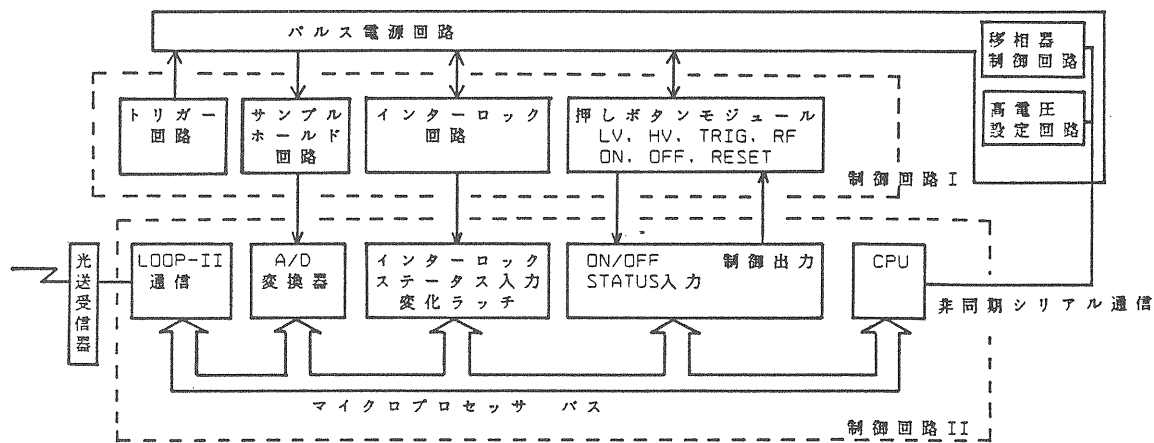


図3-1 クライストロンパルス電源の制御回路。

ローカル運転には「制御回路 I」だけを使い、遠隔制御には「制御回路 II」も合せて使う。「CPU」はマイクロプロセッサ 6802を使用したモジュール、LOOP-II通信制御は内部の独自のマイクロプロセッサによる。

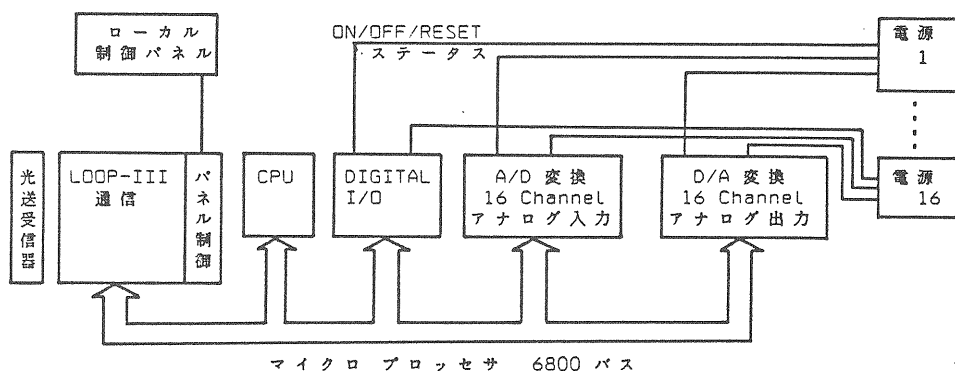


図3-2 PFリニアックのビーム輸送系電磁石電源制御ユニットのブロック図。
1ユニット当たり16台の電源を制御できる。

チ回路を含む筐体に収納されるため、特にノイズによる誤動作防止に努めた。

クライストロンパルス電源筒体に収納されている移相器制御回路(クライストロン入力高周波の位相を調整する)や高電圧設定回路は、制御回路IIのCPUより LOOP-IIIと同等の規格の調歩同期式シリアル通信で制御される。これ等はそれ自体でローカル運転も可能である。

3.2 ビーム輸送システムの制御回路

ビーム輸送系の電磁石電源の制御ユニットは図3-2に示す通りの構成で、1ユニット当たり16台の電源制御が可能である。ここで外部とのシリアル通信に低速の調歩同期式 (LOOP-III) を使用しているが、これはシステム設計の初期の段階では、電源一台毎に小型のコントローラを組込む計画であったので、回路を簡単にして1台当りの価格を低くおさえる必要があったのと、伝送データ長が短く、48 kbpsの通信速度で間に合うと考えたからである。結局、電源本体製造との関係上、時間的に無理と判断

して、上記システムを採用した。個々の電磁石電源に小型コントローラを組込む方式は、陽電子発生装置で採用するに至った。

上記の集合方式制御ユニットでは、クライストロンパルス電源制御回路などと同様に、外部回路とのデジタル信号の接続には全てフォトカップラーを使用した。又アナログ回路部分は独立電源を持たせた。前面パネル上には、16台の電源を選択するスイッチ、電流の増・減押しボタン、デジタルパネルメータ等が付いており、電源のローカル運転が可能になっている。D/A 変換器の出力電圧と電磁石電流値をパネル上に表示するためにデジタルパネルメータを使用しているが、これは制御ユニット内蔵のファームウェアをなるべく簡略化するためであった。

現在このユニットで合計244台の電磁石電源を制御している。制御ユニットに内蔵されているファームウェアは4 kBで、以下の機能を持っている。

- (1) 電源の投入、切断、インターロックリセット。
- (2) 出力電流値の設定。(絶対値、相対値)。
- (3) 出力電流値モニタ用AD変換器入力増幅器

の利得の設定。

- (4) 出力電流の上限値, 下限値の設定, 電流値変動の監視。
- (5) LOOP-III通信. 制御コマンドの受信, ステータスの送信。

4. 運転管理装置

主制御卓用に2台のミニコンが割り当てられており, 操作員によるコマンド入力には9吋と20吋のタッチパネルが使われている。グラフ表示にはパーソナルコンピュータ等が用いられている。

5. 陽電子発生装置

この装置は, 200MeV 電子リニアック, 陽電子発生ターゲット, 及び下流の陽電子加速用250MeV リニアックからなっており, 規模から言って, PF2.5 GeV リニアックの入射システムと第1セクタを合わせたものに相当する。陽電子発生装置制御のための通信システムはPF2.5GeV リニアックと同一で, 図5-1に示す配列になっている。

陽電子リニアックは, KEK リニアック全体から見ると一つのサブシステムを形成しており, 制御システムも, 基本的にはPFリニアックの副制御システムと同一構造のものとするればよい。しかし, PFリニアック制御システムの運用経験によると, 副制御プロセッサにつき, 以下のような問題がある。

- (1) 通信システムの幹線を形成しているミニコン

が汎用オペレーティングシステムを使用しているため, リアルタイムシステムとして運用する場合には, オーバーヘッドが過大となり, 実行速度が十分に上がらない。

- (2) オペレーティングシステムは利用者から見てブラックボックスとなっており, 不具合が生じても虫とりが困難である。たとえ内容が公開されてもオペレーティングシステムが大きすぎて, 利用者自身が虫とりすることは事実上できない。
- (3) ミニコンの主記憶装置が64kW ほどのセグメントに分割されているため, タスク間でのデータ交換に時間がかかる。

上記(1), (2)の問題は, いかにしてソフトウェアを(メーカーの供給するソフトウェアを含めて)単純化するかである。(3)の問題は単一の広いアドレス空間を持つプロセッサを使用すれば解決できる。

これまで使用してきたミニコンは単一CPUでマルチタスクを実行する形式のものであった。もちろん, 虫なしのリアルタイム専用オペレーティングシステムがあれば, 現在よりも相当の改善が見込める。しかし, 高性能のマイクロプロセッサが安価に入手できるようになった現在, リニアックの副制御システムに必要なミニコンの機能を複数のマイクロプロセッサの組合せで容易に得ることができる。ここで重要なのは, それぞれのマイクロプロセッサには, ごく小規模の単一タスクのみ実行させることである。マイクロプロセッサは必要なタスクの数だけ使用する

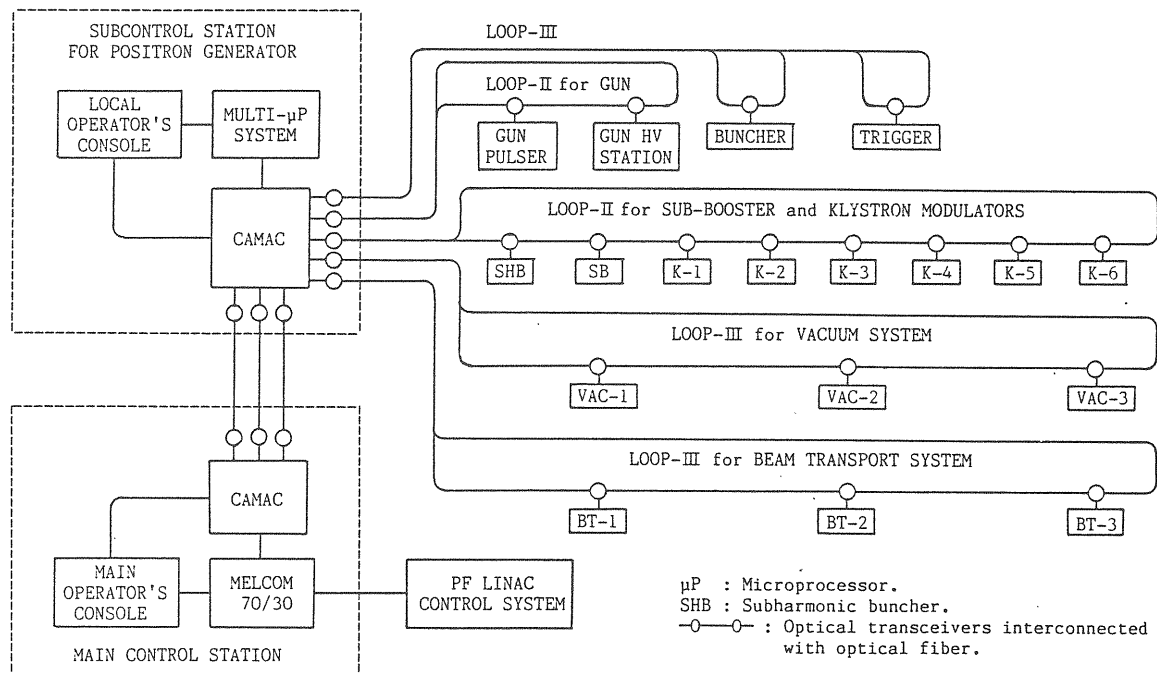


図5-1 陽電子発生装置制御システムのブロック図。

K, BT, VAC は図2-1の説明参照のこと。

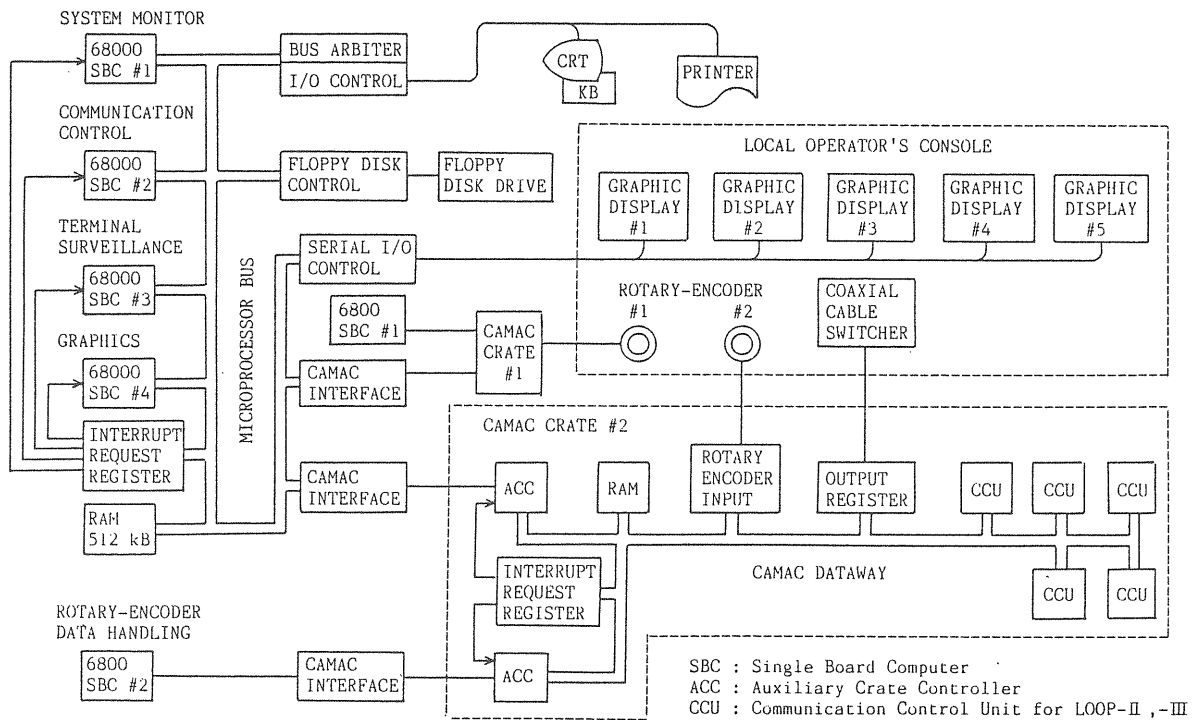


図5-2 陽電子発生装置制御用多重マイクロプロセッサシステム。

ればよい。こうすることによって副制御システムから厄介者のオペレーティングシステムを放逐できる。このようにして問題(1), (2)は解決できる。多少ハードウェアに余分の投資をしても、このような極めて単純化されたソフトウェアで制御システムを組上げることができることによる利益は非常に大きい。(実際のところ、必要経費もミニコンに比べて、かなり安くできる。)

ところでマイクロプロセッサの多重化の方法であるが、いくつかの方法が考えられる。

- (1) マイクロプロセッサのバスを共有する密結合方式
- (2) 多重コントローラ CAMAC (EUR6500e-1978) による方式で、マイクロプロセッサ間のデータ交換は CAMAC クレート内の記憶モジュールによる方式。
- (3) シリアル通信回線によるマイクロプロセッサの疎結合方式。

以上の方式のうち、(3)はマルチタスクシステムとしてのミニコンの置き換えとしては実行速度の点で問題がある。(1)案は先にあげた問題点(3)のアドレス空間の広さという点で案(2)に優っている。多重プロセッサシステム全体を案(1)で組み、CAMAC を全く使わない方式も可能であるが、陽電子発生装置の副制御システムは、PF リニアック用に既に通信制御回路等を CAMAC で開発済みであることもあり、案(1)と(2)の折衷案を採用した。この陽電子発生装置制

御室に置かれている多重マイクロプロセッサのブロック図を図5-2に示す。

陽電子発生装置は単独運転が可能のように独自の制御室を持っている。これは、PF リニアックのセクタごとの副制御室に相当する。この在来の副制御システムでは、電圧計、電流計、表示灯、スイッチ類が並んだパネルをラックに組込んだ「副制御盤」を製造した。しかし、このような制御盤はかなりの金を食うし、システム全体を複雑にしてしまうので、陽電子発生装置制御盤は、ごく一部を除いて安価なパーソナルコンピュータで組上げた。そこでは、各種のスイッチ操作はライトペンを使って実行する。端末装置別に4台のパーソナルコンピュータをラックに組込んで使っている。他に作業台上にも1台置き、その都度必要なプログラムをディスクよりロードするか或は新に作成して実行する。パソコン上のプログラムは全て BASIC インタープリタのもとで実行される。パーソナルコンピュータは、グラフィック画面の作りやすさの点では優れているが、リニアック各部状態のリアルタイム表示の点では難がある。しかし、それもプログラムの組み方の工夫で、我慢のできる程度のもにすることができる。陽電子発生装置の運転手順はこのパーソナルコンピュータで組むので、多重マイクロプロセッサのプログラムをファームウェア化することによって生じるシステム変更の面倒臭さが気になるような事はあまりない。制御システム中で変更の柔軟性を求めら

れる部分をこのような形でパーソナルコンピュータに背負わせることで、陽電子発生装置制御システムの立上りを早めることができた。

6. 将来の制御システム

以上述べたように、KEK リニアックは現在のところ PF リニアックと陽電子発生装置とで異なった副制御プロセッサを用いている。陽電子発生装置は、リニアック全体から見れば、その一サブシステムと位置づけられているので、本来ならば全て同一の副制御システムとすべきところである。そうすることによって、サブシステム間通信も単一ループでこと足りるわけである。現状では、陽電子発生装置制御システムを直接 PF リニアックの LOOP-I に接続できないので、通信形態は変則的である。それにもかかわらず陽電子発生システムをこのように設計したのは、電子リニアック全システムを更に進化させる際の基本構成につき、現実のリニアックで実際に試験する目的があったからである。今後、陽電子発生装置の制御システムを更に練り上げ、それを電子リニアック全系に展開させる予定である。

前節で既に述べたパーソナルコンピュータは、制御システム中、最もソフトであるべき部分を背負ったワークステーションとしての役割を果たしている。将来は、現用ミニコンを通信システムの交換機としての役割から解放し、ワークステーションとしての機能だけにしたい。

このように、KEK 電子リニアックの制御システムは、多重マイクロプロセッサを中心とする通信システム、運転管理装置としてのワークステーション、それに端末制御装置とから構成されたものになるであろう。

むすび

制御システムの設計に当っては、必要とする予算・人員を極力おさえる努力をしなければならないが、陽電子発生装置で採用した徹底的な「単一プロセッサ単一タスク」方式は一つの行き方であると思う。単純な単一タスクを実行するプロセッサのいくつかを単純な方法で結合して副制御システムを作り、更にいくつかの副制御システムを単純に結合して全体のシステムを組み上げる。システムのどのレベルを見ても全て単純な構造を持っている。このようなシステムを組み上げるときに注意すべきは、単一のプロセッサで走るプログラムは、全体を唯一人だけで書くことである。その場合、タスクの大きさは当然ながら、それなりに小さなものにしなければならない

い。これは、そのプログラムのすみずみまで完全に頭の中に入っていれば、虫出しも極めて容易だからである。プログラムが予期しなかつた動作をしたときでも、どこがおかしいか、すぐに見当がつくものである。ハードウェアの機能にゆとりがあるからと言って、プログラムの能力以上のプログラムを詰め込むことは極力避けるべきである。システムの中で、ハードウェアで組みやすいところは、できるだけハードウェア化し、ソフトウェア製造の負担を低下させることが望ましい。

なお、本稿では触れなかったが、ソフトウェア設計上最も重要なものは通信規約とデータベースである。この点については、本書の他の解説を参照されたい。