

大電流CW電子線形加速器  
コントロールシステムの子備検討

1992年8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ください。

〒311-13 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-cho, 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)

大電流CW電子線形加速器コントロールシステムの予備検討

遠山伸一\*

要 旨

〔目的〕 大強度CW電子線形加速器では、既存の加速器より数桁大きい電流の電子ビームを加速する必要があり、このために加速器の要素開発を進めているが、これら同様に大電流ビームを安定に加速するための計測制御システムの最適化設計も重要な課題である。そこで、その最適化設計のための予備調査と検討を行う。

〔方法〕 既存加速器の計測制御手法を、線形加速器に留まらずサイクロトロン、シンクロトロンも含めて主に文献に基づいて調査し、その結果から大強度CW電子線形加速器の計測制御系の基本構成の予備検討を行った。

〔結果〕 計測制御系では、オペレータを補助すると共にオペレータへ判断材料を提供できるように、加速されるビームの状態を高速で検知しを内部処理する機能を有するものとした。さらにシステムの拡張、運転・保守の容易化のため、計測制御系を設備毎に4段階に階層化した。

〔結論〕 大強度CW電子線形加速器の計測制御系に、必要なモニタ類や詳細な設計のためのビームローディング変化に対応できる計測制御系の階層化分類を得た。

---

\*大洗工学センター、技術開発部、フロンティア技術開発室

PRELIMINARY DESIGN OF CONTROL SYSTEM FOR HIGH CURRENT CW ELECTRON LINAC

S.TŌYAMA\*

ABSTRACT

[Object]

A high current CW electron linac that has a few orders magnitude of higher beam acceleration compared with the other electron linacs is being developed. In the development, it is also important for the stable beam acceleration to get an optimum control system. Therefore, the objective of the present study is to carry out preliminary optimum design of system.

[Method]

A survey on the control system of existing accelerators is summarized. This survey covers the control system for not only linac but also cycrotron and synchrotron.

[Result]

A basic configuration of the control system of the linac was obtained based on the study. An inner processing system was convoluted in order to assist the operator by the data processed in linac orarating system. And the total control system was divied into 4 layer structure to ease the operation and maintenance.

[Conclusion]

The guide line for detailed design and test of the control system of this linac facility was obtained.

---

\* Frontier Tecnology Development Section, Technology Development  
Division  
Oarai Engineering Center(OEC)

## 目 次

1. はじめに	1
2. 加速器のコントロール	1
3. 加速器のモニタと制御	2
3.1 モニタと制御パラメータ	2
3.2 ビームモニタ	3
3.3 還流型加速管のRF	4
3.4 まとめ	4
4. コントロール系におけるデータの流れ	5
4.1 コントロール系の階層化	5
4.2 データの階層内処理	6
5. まとめ	7
参考文献	8
付録 マイクロ波ビームモニタ	9

表リスト

付表 1	円筒形共振器 $u_{nm}$ の値	-----	9
------	--------------------	-------	---

図リスト

付図 1	空洞共振器	-----	9
図 1	コントロール系の構成	-----	10
図 2	加速管の RF モニタと制御	-----	11
図 3	加速管ビームモニタ系ブロックダイヤグラム	-----	11
図 4	ビームモニタ概念図	-----	12
図 5	マイクロ波ビームモニタの電場励起	-----	13
図 6	多芯電極を用いたエミッタンスの測定概念図	-----	14
図 7	3スタブチューナによる RF 反射の調整	-----	14
図 8	加速器ビームコントロール系の信号の種類と回線数	-----	15
図 9	加速器コントロール系概念図	-----	16

## 1. はじめに

大洗工学センターでは核変換技術開発の一環として大電流CW電子線形加速器の要素開発<sup>1)</sup>を行っている。

この開発では加速器を運転する際に重要な役割を果たす、ビームの形状や強度のみならず、電源・RF系や熱交換器・空調等ユーティリティー系、放射線モニタ系の制御系の開発も必要である。特にビームに関する計測制御、は開発中の大電流CW電子線形加速器ではビーム強度が平均で20mAに達し、これを安定に加速するためには加速管や電子銃の状態を最適に維持する必要がある、この維持が不適切であれば、ビームの発散(BBU)や場合によっては加速器や付帯設備の損傷を導くことになるために、その重要性は高い。また、ビーム利用では、安定なビーム供給のための自己診断による運転が必要である。

本報では、加速器や付帯設備の個々の状態を監視しつつ全体的に安全かつ効率的に運転するために、他の加速器や文献の調査を基に、本加速器に反映されるべきコントロールシステムを構成し纏めた。

## 2. 加速器のコントロール

加速器は放射線が発生するためしゃへい壁を介して遠隔で運転操作される。このため加速器の運転制御系は、付帯設備(熱交換器、放射線管理モニタ)を含めてその運転状態を監視しするモニタ系と、モニタ系からの情報を判断し、運転状態を適切に維持する制御系からなる。ここでは、これらを総称して加速器のコントロール系と呼ぶ。

加速器開発施設の設備を機能別に分類し、それら設備の運転制御の特徴を挙げると次のようになる。

### ① 加速器

加速器本体は、電子銃からの電子ビームを集群化して予備加速する入射部、それを加速する加速管、及びビームダンプ等からなる。本加速器は進行波還流型加速管を採用しているため、運転制御ではクライストロンや立体回路のRF状態をモニタしながら、その同調状態を適切に保持するために、移相器やスタブチューナをコントロールする必要がある。この他に、電子ビームの電流や形状、漏れビーム及び加速管の温度等を検知しつつ加速器を最適な状態に保つために、これらを制御することも必要であり、関連する制御は施設で最も複雑な部分である。

### ② 加速器系熱交換器

加速器を運転すると本加速器施設のような効率の良いものでも約50%の電力が熱になる。これにより発生する熱変形を防止するため、冷却系が必要である。熱交換系は0.2℃の精度で対象とする機器の温度を制御する精密温調系と、さして精度のいらぬ粗温調系に分かれる。精密温調系は加速管・導波管に用いられ、粗温調系はビームダンプ、ダミーロードや集束コイル等の冷却に用いられる。

### ③排ガス処理装置

電子ビームと空気の相互作用により、オゾンやNOXが発生するため、そのため処理装置が設置され、運転時には加速器本体室の排ガス処理の状態をオゾン計、NOX計でモニタする必要がある。

### ④放射線管理モニタ系

本加速器は加速器運転に伴い多量の放射線（X線）を発生する。環境への漏れや、入室可能であることを確認するために常時施設の放射線を電離箱や中性子カウンタでモニタする必要がある。

### ⑤実験装置

加速器の完成後には様々なビーム利用実験がなされる。試験体によっては供給ビームに制限がある等、加速器を適正にコントロールする必要がある。

本加速器開発施設では、このような諸設備が相互に関連しつつ運転されるため、データ通信ネットワークを介し各機器の状態がモニタされる必要がある。加速器のコントロール系の全体構成の概念は図1のようになる。これらの機器からの情報はコントロール室で統括的に監視され運転される。

## 3. 加速器のモニタと制御

ここでは加速管の運転に必要なモニタ系、制御系及び制御方法について、既存の加速器施設をもとに基本的な考え方を纏めた。

### 3. 1 モニタと制御パラメータ

基本的なRFモニタリングと制御ブロックダイアグラムは、加速器とコントロール室が遠隔であるので、図2のようなものになる。ここで、加速管のマイクロ波特性はRFセンサでモニタされ信号変換器でA/D変換された後コントロール室の信号処理系を経由した後に総合監視装置に表示される。RF特性の変更は制御装置により信号処理系を経由してRF調節器により行う。RFの制御はコントロール室（リモート）でも現場（ローカル）でも可能である。これは、保守やビームを用いない試験を効率的に行うためであり、ビーム試験時は現場制御は行わないようインターロックする。

図2中の信号処理器は、監視データの圧縮を行い加速管の特性を判断すると共に自己判断機能を持たせ、その構成は4章で述べるように分散システムとする。RF調節器は位相や反射調整のため多数のモータ駆動系を持つが、一つの加速管で同時に2台以上のモータ駆動は制御上行わない。駆動系の信号はマルチプレクサで選択された後に、RFノイズを避ける為に光ケーブルで通信する。図2の総合監視装置のインターロックにはビーム利用実験からのものも含む。

図3に1本の加速管のビームモニタ系のブロックダイヤグラムを示す。大電流加速時の蓄積型ビームBBUを防止するために、各加速管に集束コイル、四重極磁石、電流モニタ、ビーム位置モニタを設置する。ここで集束コイルと四重極電磁石は蓄積型BBUを抑制するため軌道のビームの修正に用いる。RFは加速効率やビームの性質を改善させるために電力やビームとのタイミングを調節する必要がある。そのため、加速管RF調整用にそれぞれ3つのスタブ（導波管に挿入する円筒形導



体)を持った移相器とスタブチューナを取り付けて使用する。

よってこれらを考慮すると、加速管1本当たりのモニタまたは制御の対象とそれらの数は次のようになる。

モニタ対象	数	制御対象	数
RF検出モニタ	2	位相器	3
電流モニタ	1	スタブチューナ	3
位置モニタ	1	集束コイル	1
温度センサ	3	四重極磁石	2

ここでは加速管出入口カプラ部、加速管中央部に温度センサをおいている。また四重極磁石はビーム輸送の自由度を確保するため3連型を2電源で励磁するとした。よって本加速器の場合、加速管1本当たりのモニタ対象は7個、制御対象は8個のデータがあるが、マルチプレクサ等を用いれば制御系のケーブル本数は半数程度に低減できる。これにRF入力状態のモニタ及び真空モニタの2個を加えると、加速管1本当たりの対象数は17となる。

### 3. 2 ビームモニタ

本加速器のような大電流では、通常の加速器で使用されている蛍光式或いはワイヤ式の接触型の検出器は放射化や寿命が短いの問題で用いることが出来ない。非接触型電子ビーム検出器は大別して電子ビームの電磁誘導による電界と磁界を検出するものと、空洞の誘導マイクロ波を検出するものとに大別される<sup>2)</sup>。両者とも本加速器に使用可能でその概念図を図4に示す。前者に属するものとしてDCCT (DC current transformer)、後者に属するものとしてマイクロ波ビームモニタがある。両者は数10nsの時定数を持っており $\mu$ sオーダーで起こるBBU成長の観測が十分に可能である。これらを考慮に置いて、以下に本加速器に用いるビームモニタについて纏める。

パルスライナックで良く用いられるカレントトランスフォーマ (CT) をCWでも使用可能にしたDCCT<sup>3)</sup>は図4に見られるように環状鉄芯 (鉄芯にはフェライトやパーマロイが用いられる) にトロイダルコイルを巻いた簡便な構造を有している。DCCCTは透磁率の高いドーナツ上のコアの中をビームが通過する際の電磁誘導を利用するため電流検知精度は高く、感度 (最小10 $\mu$ A)、ダイナミックレンジ (10Aオーダー)とも安定なビーム電流モニタとしてすでに開発されているため、これを用いる。しかしその構造上ビーム形状を計測することは出来ない。

位置を検出するためには金属電極によるピックアップ (ボタン電極) や上に述べた空洞によるマイクロ波検出法<sup>4)</sup>があるが、位置分解能や時間分解能の点で後者を用いる。そのマイクロ波検出のための空洞の形状は測定目的によって異なるが、簡便なものとしてはTM110モードを利用した円筒状のもの、TM210、TM120モードを用いた区形状のものがある。これらを図5に示す。後者は製作が難しくなるが、そのモード特性によりx, y方向のビーム位置が同時に分かる利点があり、ビームモニタの場所を取らないので、区形空洞共振器が良くこれを採用する。空洞によるマイクロ波ビーム検出器はQを大きくすることにより時定数と感度が向上

するが、ノイズに弱い欠点があり、本加速器のような大電力用のものはないので今後試作を行い性能を確認する必要がある。また、空洞と信号取り出しアンテナの結合度により出力が変動するのでビーム電流の絶対測定には適していないことも今後の課題である。付録にマイクロ波ビームモニタの共振周波数の求め方をまとめた。本加速器では区形モニタでビーム断面方向でおよそ1辺27cmとなり、加速管径より4cm程大きくなる。

また、線形加速器内のビーム輸送を効率的に行うため、ビームの進行方向への広がり（エミッタンス）をモニタする必要がある。このモニタをエミッタンスモニタと呼び、エミッタンスは本加速器のようにビームが強い場合はビームが電極を通過するとき生ずる二次電子を測定することにより検出できる。実際には、多芯化電極の位置検出を二段で行うことによりビームの広がりを検知できる。その概略図を図6に示す。それぞれの多芯電極からのビームスポットからビーム広がりが分かりエミッタンスを計算できる。エミッタンスモニタは電子銃の出口、入射部出口、レギュラ部A出口、レギュラ部B出口に設置し、通常は加速軸中心から離しビームを避ける構造とする。

これらのビームモニタは、BBU対策のためエミッタンスモニタを除き1.2m加速管1本につきDCCT、マイクロ波モニタそれぞれ1個を装着する。これは単位長さ当たりのモニタ数が通常の線形加速器の数倍になる事を意味し、それにともない処理対象が増加する。

### 3.3 還流型加速管のRF

本加速器に用いられる加速管は還流型であるから共鳴状態を実現するために位相を調節し、電子ビームのローディング変化によるRF源（クライストロン）への反射を防ぐ必要がある。反射を打ち消すにはスタブチューナが持つ1/3波長間隔で並んだ三つのスタブで調節する。ここでは、簡単のために位相調整用の移相器とのマイクロ波干渉が無いとする。スタブチューナによる調整原理を図7に示す。ここで、スタブチューナの3つのスタブの働きは極座標図で任意の反射に対応する120度で交差する3つのベクトルの大きさを変えることに相当するため、よってスタブの調節により図7の加速管の反射状態を示すベクトルAを打ち消すベクトルを作るで反射が打ち消される。

加速管の反射調整は加速器の運転で重要な部分であり、ビームローディングの変化にともなって瞬時に調節しなければならない。特にビーム強度の変更はビームローディングの変化を意味するため加速管のマイクロ波の安定状態を速やかに達成する必要がある。このビームと加速管のマッチングは加速管やスタブチューナの個性により動作特性がほぼ決定されることから、AI化が可能と考えられる。これは通常のパルスライナックには無い運転形態であるが、最近では学習機能を有する制御系（ニューラルネットワーク）<sup>5)</sup>を用いてクライストロンモジュレータ等一部のAI制御が試みられているのでこれを採用する。

### 3.4 まとめ

これらにより、1本の加速管のモニタ、制御ポート数やビームモニタの種類を定めて、図8に示す。ここでは、マルチプレクサ、A/D変換器によるハード的なデータの圧縮により、154対象数以上のデータを80回線程度に圧縮することが可能

である。この回線の圧縮化はワイヤリング構造の単純化につながり、遮蔽など施設の保守上重要である。

#### 4. コントロール系におけるデータの流れ

モニタや制御の流れは、大きな自由度（制御パラメータ）を保ち、柔軟性に富み、マンマシンインターフェースが容易であることが重要である。更に、処理装置に負担をかけないこと、将来の制御方法の改良に伴う拡張性が容易であることも重要である。このため、操作機器、モニタ機器及びそれらの集中制御に計算機単独に割り当てネットワークで繋ぐと同時に、その上位にオペレータコンソールを配置する独立分散型<sup>6)</sup>が一般的にとられてきた。近年、単独の計算機と同等な処理系を有する安価な制御機器が登場し、制御機器間でデータの通信が可能になっている。将来の自動化運転のためには、機器間の内部処理を可能にする構造が、完全独立分散よりも発展性に富む。このためにはコントロール系の設計では、設備相互のデータ処理の流れを明確化した階層構造が必要である。この考え方は近年の大型加速器で実際に取り入れられつつある。例えば、高エネルギー物理学研究所の2.5GeV電子ライナックでは多層ループ<sup>7)</sup>を用いてデータ管理を行っている。

##### 4. 1 コントロール系の階層化

コントロール系の設計の見通しを良くし、ソフトウェア及びハードウェアの保守労力低減のために、データフローを機能別に分類するとともにそれらの、に階層化を検討した。まず分類については、階層をデータ処理負担分散・軽減化の観点から次のように4つにした。

- 階層A 測定器（センサ）あるいは制御機器に直接信号の入出力が行われる。この領域はデータ処理の観点からフロントエンドと呼ばれ、この段階で信号はデジタル化される。
- 階層B フロントエンドとコントロール用計算機の媒介をする。この階層でデータの圧縮（中間処理）を行い、コントロール系のデータ管理の負担を軽減する。ビームローディング変動にともなう自動運転の主処理はこの階層で行う。
- 階層C 各機器単位（加速器、熱交換器等）の統括的データ処理を行い、コントロール命令を発行する。運転のパラメータはこの階層で管理保存される。また、コントロール用プログラム開発はこの階層で行う。
- 階層D 施設全体を統合管理する。各機器からのデータを判断し他の機器へコントロール命令を発行する。また、オフラインデータ解析のためこの階層は計算センタへのゲートウェイを通じて接続される。

ここで、モニタデータは階層Aから階層Dへ流れ、コントロールデータは逆に階層Dから階層Aへ流れる。この階層化データフローで、階層Bの中間処理方

法や能力は故障箇所の推定やビーム輸送の自動運転化のため極めて重要であり、機器の運転の容易化に決定的な影響を与える。そのため階層Bには汎用性のあるマイクロプロセッサを持たせ、また命令タイミング用のトリガー装置（タイミングコントローラ）を設置することとした。加速器施設のコントロール装置類は保守の観点から、原則として加速器開発施設コントロール室に設置されるがその概念図を図9に示す。この図で分かるように、加速器のコントロールシステムは機器相互のデータ通信等の主ループ（これは図1に見られるデータ通信ネットワークである）と、要素器機内のデータ通信の副ループの2階層になっている。副ループは階層Bの各処理系（例えば電源コントローラとビームモニタコントローラ）を孤立化させず自動運転のための情報を交換するためである。

#### 4. 2 データの階層内処理

4. 1で述べたように階層Bではデータ圧縮や自動制御のための中間処理を行う。加速器からのデータの中には、エミッタンスモニタ等ハード的な処理をしても電極の本数分のなお大きなデータサイズを持つものがあり、この場合は階層Bでエミッタンスという物理量に変換する。このように階層Bではモニタからの信号は出来るだけ物理量に変換する。これは、自動化運転を行う際、図9の副データ通信ネットワークを介する階層B間の情報交換の定義が容易であるからである。

階層Bではマイクロプロセッサ付きの制御機器としたが、そのハードウェア及びソフトウェアのプロトコルを統一する必要がある。ハードウェアのプロトコルとしてはシーケンサ、CAMAC、VME等があり、基礎研究から工学的応用まで広く用いられている。ここでシーケンサはコスト的に安価であるが、データのやりとりに標準性がなく拡張性に乏しい。CAMAC、VMEはデータ操作の規格に柔軟性に富みとりわけVMEはデータバスの容量や1インストラクション処理時間がCAMACより優れており将来性がある。VMEは以下のようなハード的能力を持っている。

##### (1) 高速性

これには70MB/sのVMEbus、80MB/sのPbusによりデータ転送の高速化が可能である。ボード内ではi860リアルタイムMC/OS、DMAを用いてリアルタイム性を実現できる。これは、10Kワードのデータ転送を1ms以下で転送できることに相当し本加速器施設では十分な速度を持つ。i860MPUマルチプロセッサ構成（80MFLOPS×n）では1024ポイントのFFT演算を740μsで実行する能力を有しマイクロ波情報の内部処理に適している。

##### (2) 使いやすさ

直接のキー入力だけでなくマウス、ライトペン等を利用する。また、計測と、改正が同時に出来るマルチウィンドウを用いることが出来る。

##### (4) オープンシステム

1つの機器から複数のリアルタイムステーションに接続でき、多数のWSや端末と交信できる。このためには、UNIX関連では、X-window、TCP-IP、Ether-net、VMEbus等をサポートされている。

よって、現在開発されている資源の活用の観点と規格の統一性から階層BではVMEをハードウェアとして採用する。

なお、ソフトウェアはUNIXオペレーティングシステムを用いた加速器の制御

8) が一般化しつつある。UNIXはリアルタイム制御に課題が残されているが現在のVMEを含めたデバイスドライバの開発状況から根本的問題はないのでこれを採用する。

## 5. まとめ

加速器施設のコントロール系の構造を検討し機器におけるAIを取り入れた内部処理機能を持つ階層化の検討を行った。ビーム検出器は非接触型のモニタの組み合わせで大強度ビームコントロールができる見通しがあることが分かった。これらによってより詳細な階層設計の方針が得られた。今後は、加速器本体以外のユーティリティ、放管設備などを階層化分類を行い設計を進めると同時に、ハードウェアを用いたパフォーマンステストを試験や、実際の運転シミュレーションを行う必要がある。特に、ビーム制御についてはモニタを試作し計測試験を実施する必要がある。

参考文献

- 1) 遠山, 等, 「大強度CW電子線形加速器の要素開発」,  
PNC TN8410 91-048 (1992).  
Y.L. Wang, *et al.*, "DESIGN OF A CW HIBEAM POWER ELENCRON LINAC,"  
PNC TN9410 92-039 (1992).
- 2) "The Stanford Two-Mile Accelerator," edited by R.B.Neal,  
W.A.Benjamin, Inc. 1969.
- 3) K. Unser, "A Toroidal D.C.Beam Current Transformer with High  
Resolution," IEEE Particle Accelerator Coference,  
Washington D.C., 1989.
- 4) 榎本, 等, 「空洞共振器型ビーム位置モニター」,  
「核理研研究報告」, 東北大学, Vol.13 (1980). p.289.
- 5) M. Mutoh, *et al.*, "The Diagnostic System of Klystron Modulator Using  
neural network," Proc. 16th Linear Accelerator Meeting  
in Japan (1991) p.37.
- 6) 黒川, 等, 「トリスタン用大規模分散計算機制御システム」,  
「日立評論」, 日立製作所, Vol.66 (1984). p.19.
- 7) K. Furukawa, *et al.*, "Resent Progress in the Control System of the  
KEK 2.5GeV e-/e+ LINAC," Nucl. Instr. and Meth. A293  
(1990). P.16.
- 8) J. Urakawa, *et al.*, "The Status and Prospects of the Control System  
of an Accelerator Test Facility for Linear Collider,"  
Nucl. Instr. and Meth., A293 (1990). P.23.

付録 マイクロ波ビームモニタ

マイクロ波ビームモニタは空洞共振器であり、その共振周波数は $TM_{nml}$ 、 $TE_{nml}$ モードの時、ビーム軸上のモニタ幅を $d$ としてその両端の電氣的短絡（TEモード）、マ磁氣的短絡（TMモード）という境界条件で電磁場のマックスウェル方程式を解くことにより求められる。その結果は、

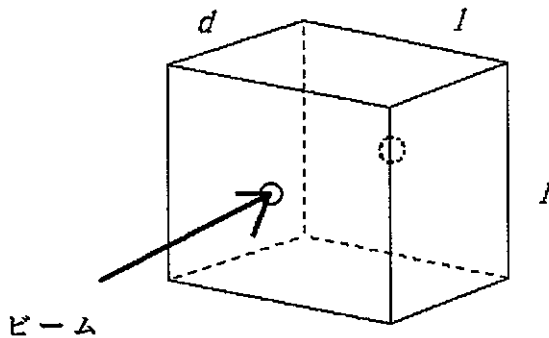
$$f_c = \frac{c}{2} \left\{ \left( \frac{n}{a} \right)^2 + \left( \frac{m}{b} \right)^2 + \left( \frac{l}{c} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad \text{(方形共振器)} \quad (A1)$$

$$f_c = \frac{c}{2\pi} \left\{ \left( \frac{u_{nm}}{r} \right)^2 + \left( \frac{l}{d} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad \text{(円筒共振器)} \quad (A2)$$

である。ここで $c$ は光速、 $u_{nm}$ は $n$ 次ベッセル関数及びその微分の $m$ 番目の零点であり、その値を表付1に示す。TM210、TM120モードを用いる方形共振器の場合、空洞の共振周波数は（A1）の式より

$$f_c = \frac{\sqrt{5}}{2} \frac{c}{l} \quad (A3)$$

となり、Lバンドでは（A1）～（A3）及び付表1から、およそ27cm方形空洞になる。



付図1. 空洞共振器

この図は各辺の長さ $l$ 、ビーム長手長 $d$ の方形空洞共振器の例であり円筒形の場合はビームに正対する面が半径 $r$ の円形になる。

付表1. 円筒形共振器 $u_{nm}$ の値

モード	$u_{nm}$	モード	$u_{nm}$
TE11	1.841	TE41	5.317
TM01	2.405	TE12	5.331
TE21	3.054	TM02	5.520
TM11	3.832	TE31	6.380
TE01	3.832	TE22	6.706
TE31	4.201	TM12	7.016
TM21	5.136	TE02	7.016

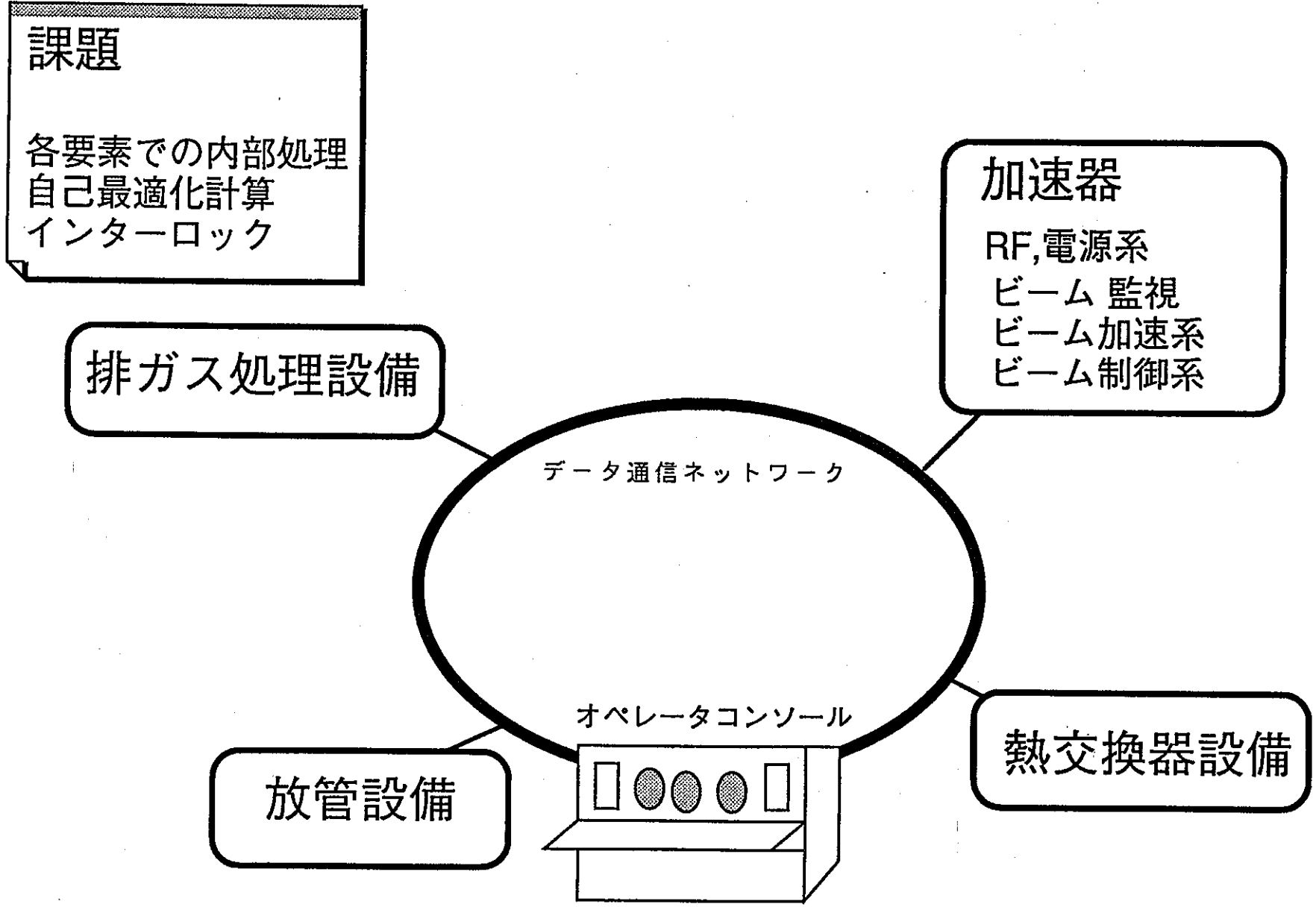


図1. コントロール系の構成



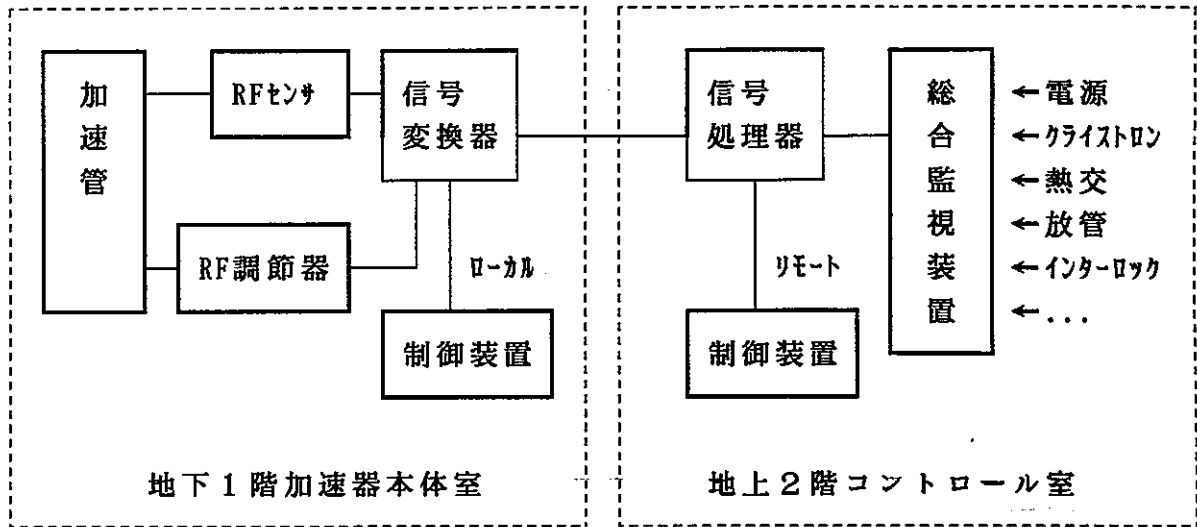
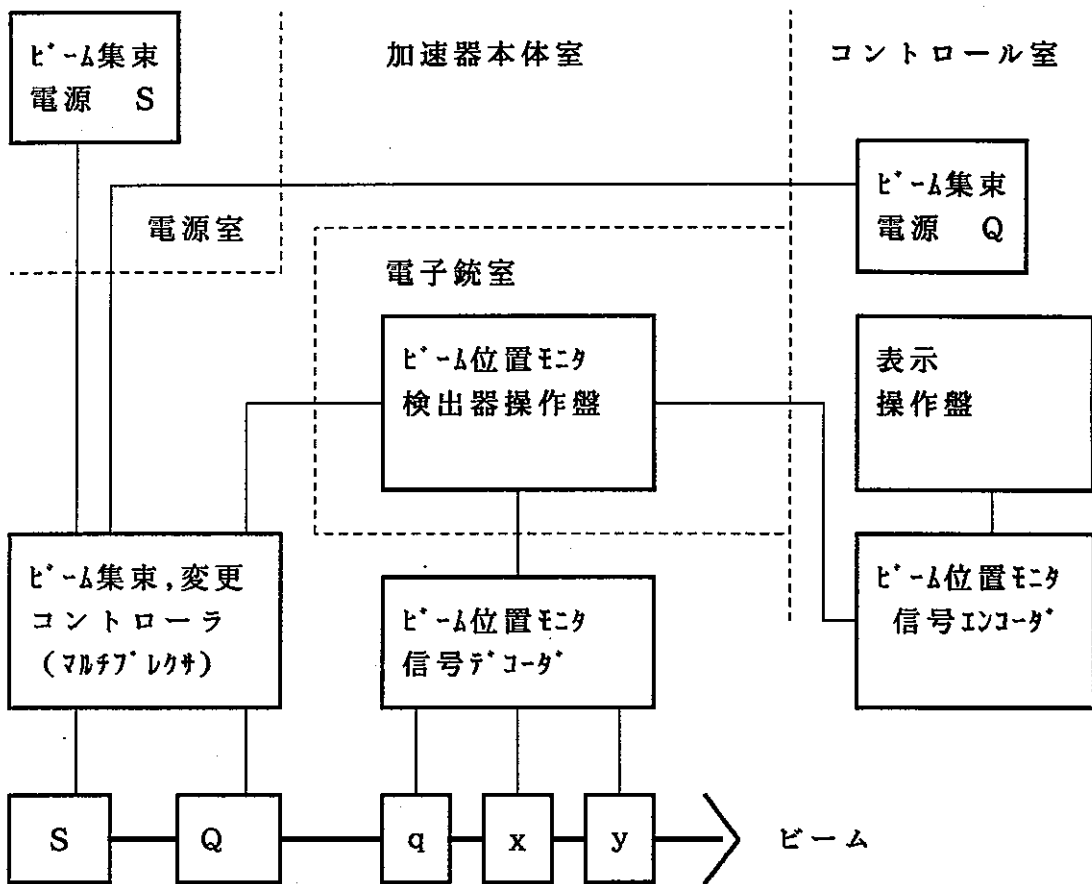
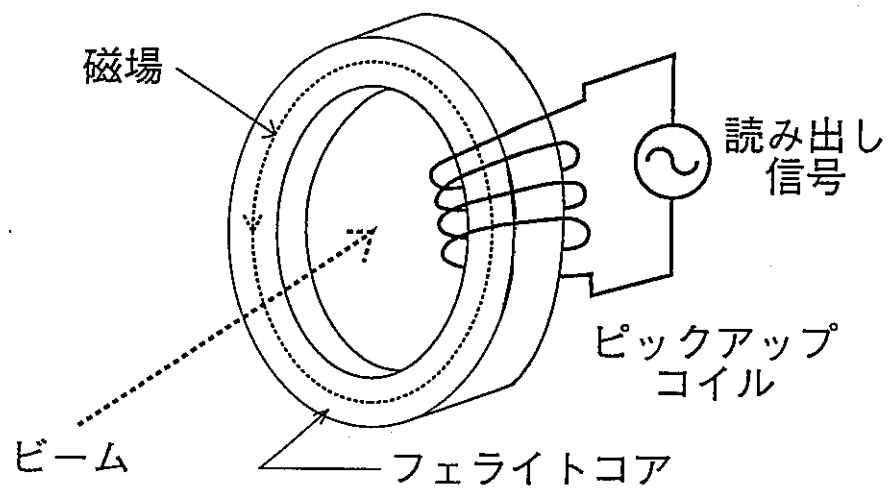


図2. 加速管のRFモニタと制御

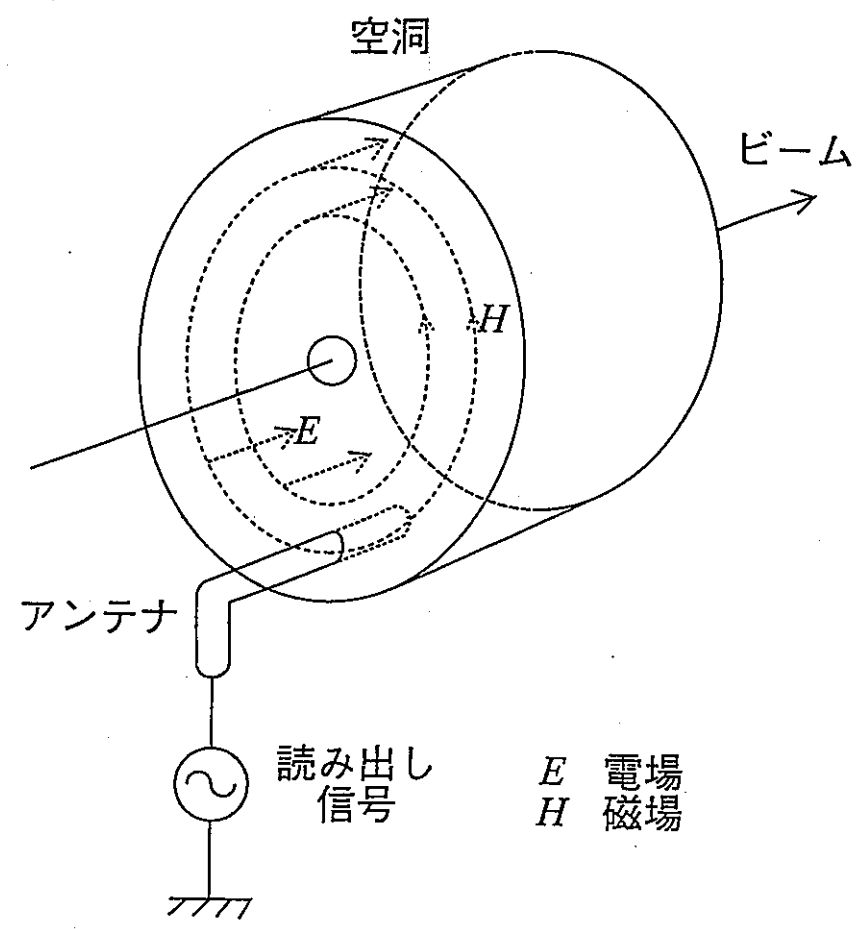


S : 集束コイル Q : 四重極磁石 q : 電流モニタ x, y : 位置モニタ

図3. 加速管ビームモニタ系ブロックダイアグラム

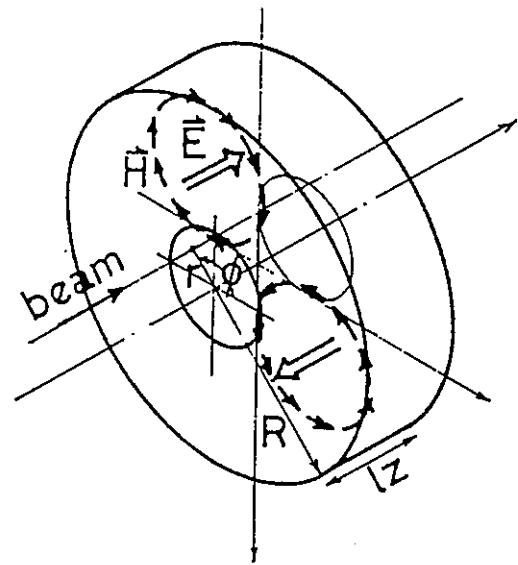


### 電磁誘導を用いたビーム検出

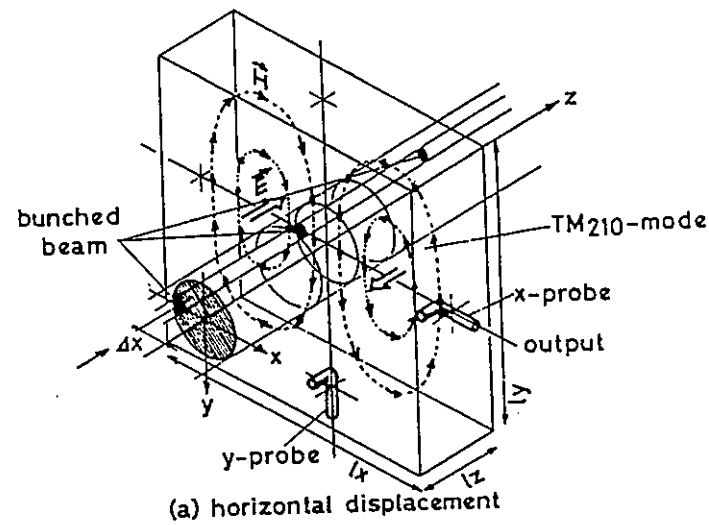


### マイクロ波を用いたビーム検出

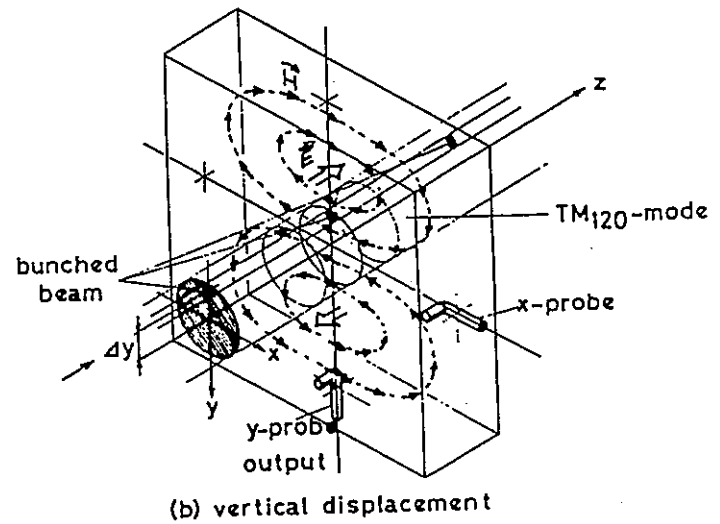
図4 ビームモニタ概念図



TM110モード



(a) horizontal displacement



(b) vertical displacement

TM210、TM120モード

図5 マイクロ波ビームモニタの電場励起

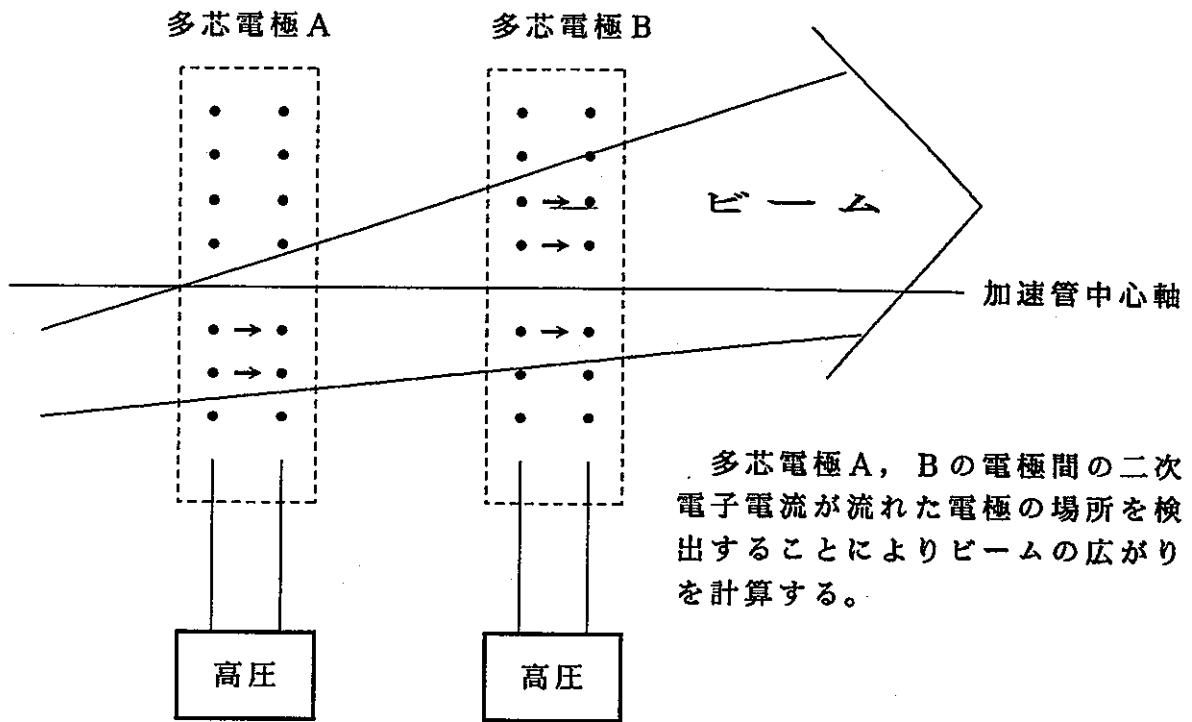
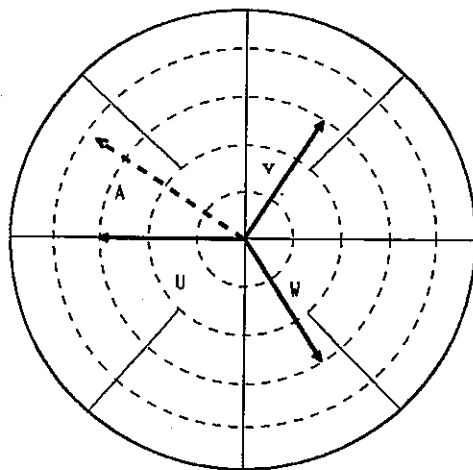


図 6. 多芯電極を用いたエミッタンスの測定観念図



点線の円は等VSWR面（体系からの反射が等しい面）を示す。円周はマイクロ波の位相を示す。

U, V, W  
スタブ調節  
基本ベクトル

A,  
任意ベクトル

図 7. 3スタブチューナによるRF反射の調整

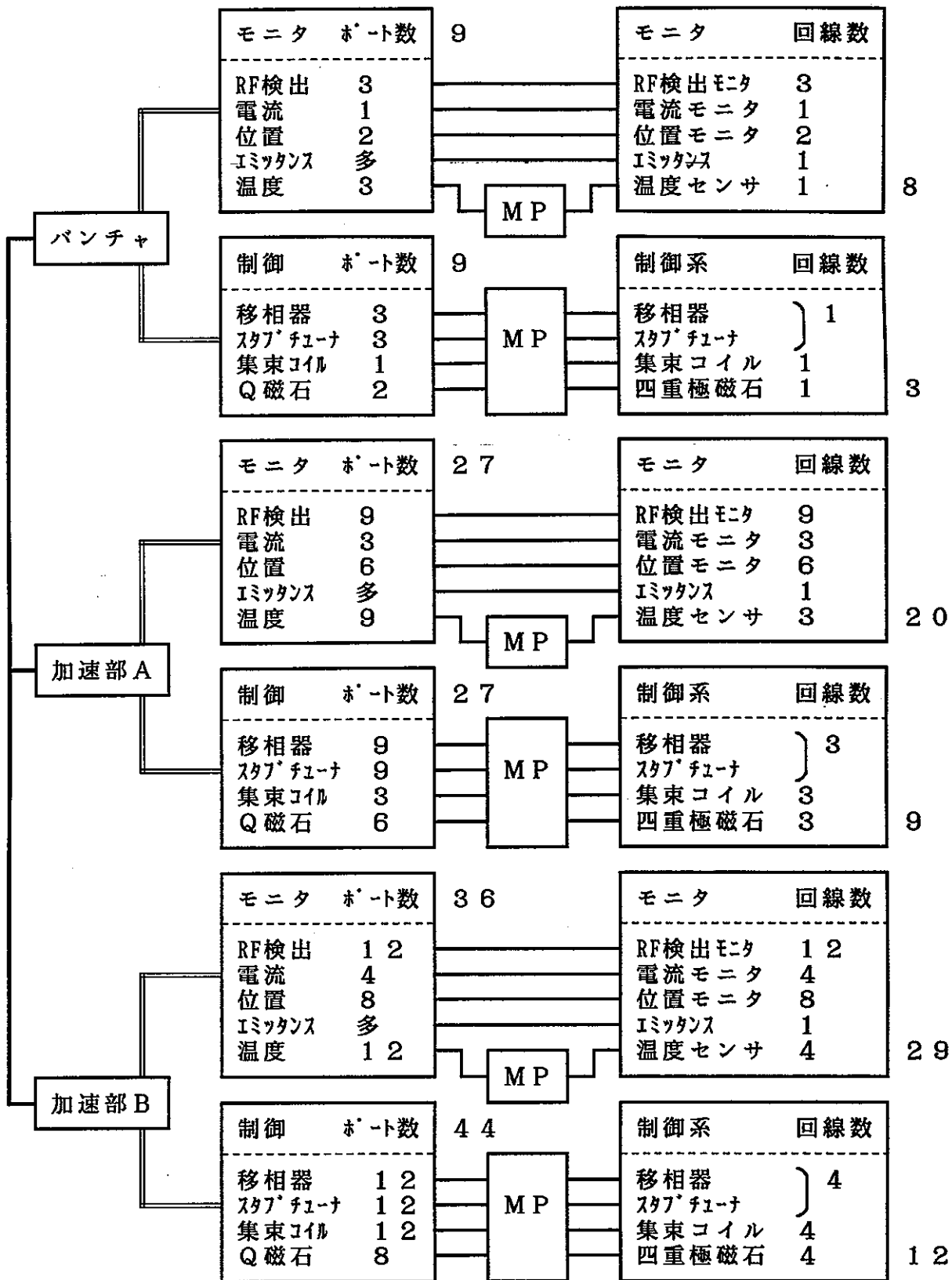


図8. 加速器ビームコントロール系の信号の種類と回線数

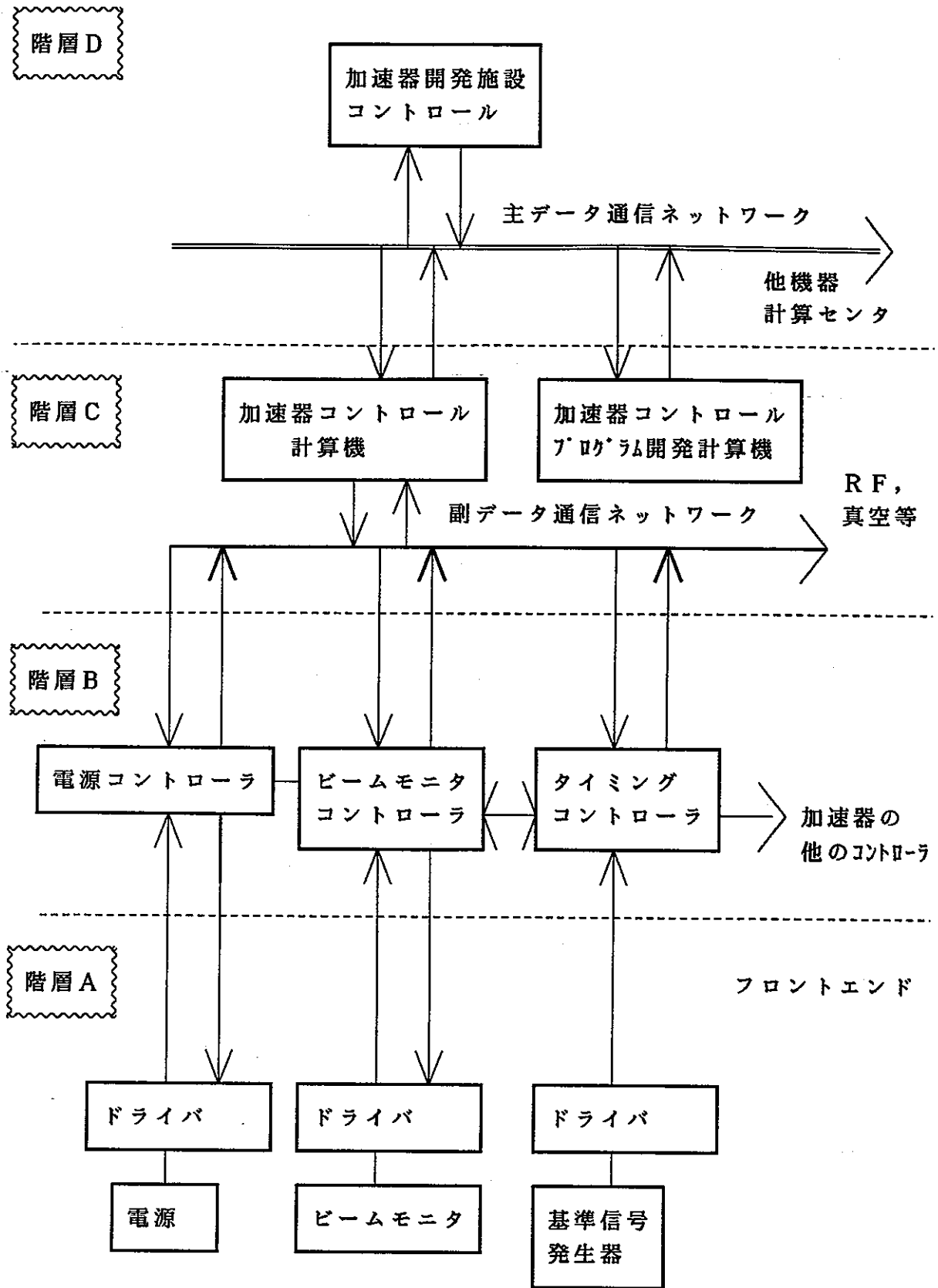


図9. 加速器コントロール系概念図