

高周波制御系の開発  
—インターロックシステム—  
(研究報告書)

1999年5月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
1999

高周波制御系の開発  
—インターロックシステムの開発—  
(研究報告書)

平野耕一郎\*、石川雄大\*\*、小又智輝\*\*、桧山徹\*\*、  
加藤裕子\*\*\*、山崎良雄\*、野村昌弘\*

要旨

サイクル機構では、核種分離・消滅処理研究の一環として、大電力CW電子線形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。大電力CW電子線形加速器の要素技術開発として、ビームエネルギー10MeV、ビーム電流100mA、パルス幅4msec、繰返50Hzの条件で、大電流加速技術の開発を進めている。この中で、大電力高周波を制御し、大電流ビームを安定に加速するためのシステムを開発する必要がある。そこで、大電流ビーム及び大電力高周波の異状から加速管を保護するためのインターロックシステムを開発した。また、運転条件に対応したインターロックを選択できるシステムを開発した。

低デューティのビームを加速させた状態で異常条件を再現し、加速器の各要素機器を組み合わせた総合的な試験を実施したので報告する。試験の結果、ビーム及びRFが確実に停止されることを確認した。また、インターロック動作後、RF及びビームが3.5 μsecで遮断されることが分かった。

---

\* 大洗工学センターシステム技術開発部ビーム利用技術開発Gr

\*\* 株式会社ペスコ

\*\*\* 原子力システム株式会社

## The Development of RF Control System — Development of the Interlock System —

K.hirano\*, T.Ishikawa\*\*, T.Komata\*\*, T.Hiyama\*\*,  
Y.Kato\*\*\*, Y.Yamazaki\*, M.Nomura\*

### Abstract

The development of a high power CW electron linear accelerator was started in 1989 to study the feasibility of nuclear waste transmutation. The accelerator (10MeV, 100mA peak current, 4 ms pulse width, 50 Hz repetition) is dedicated machine for development of the high current acceleration technology in future need.

It is necessary to develop the system which controls high power RF in order to stably accelerate the high current beam. Then, We have developed the interlock system for protecting accelerating tube from high current beam in time of trouble of high current beam and high power RF. We have succeeded in the development of the system so as to be able to choose interlock elements corresponding to the operating condition.

Using the beam of the low electric power, the synthetic interlock system was tested. The beam was cut off at  $3.5 \mu\text{sec}$ , after the interlock operated.

---

\* Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC), System Engineering Technology Division, Beam Technology Development Group.

\*\* PESCO.

\*\*\* NESI.

## 目次

1	はじめに	1
2	高周波制御システム	2
2.	1 励振系	2
2.	2 RF電力制御系	3
2.	3 RF位相制御系	3
2.	4 インターロック系	3
3	機器インターロック	5
3.	1 RFインターロック	5
3.	1. 1 RFインターロックの構成	5
3.	1. 2 RFインターロック項目	6
3.	2 ビームインターロック	7
3.	2. 1 ビームインターロックの構成	7
3.	2. 2 ビームインターロックの特徴	8
3.	2. 3 ビームインターロック項目	12
3.	3 ソフトインターロック	15
4	インターロック試験	17
4.	1 インターロック部分試験	17
4.	2 総合試験	18
5	まとめ	20
6	謝辞	21
7	参考文献	22

## 図リスト

図2.1 高周波制御システム	23
図2.2 加速器概略構成図	24
図2.3 機器インターロックの概略構成図	25
図3.1 インターロック操作ソフト表示画面	26
図3.2 RFインターロック専用NIM電源内のモジュール実装図	27
図3.3 RFインターロック項目配置図	28
図3.4 RFディスクリの外観図	29
図3.5 デューティモジュールの外観図	29
図3.6 ビームインターロック専用NIM電源内のモジュール実装図	30
図3.7 ビームインターロックの信号系統図	31
図3.8 チョッパシステムの概略図	32
図3.9 検波波形、パルスゲート信号及びインターロック制限値の関係	33
図3.10 安全対策用インターロック操作パネル	34
図3.11 ビームラインの構成図	35
図3.12 ビーム位置モニタ表示画面	36
図3.13 加速管等温度表示画面	37
図3.14 ビーム電流モニタ表示画面	38
図4.1 遮断前の還流部進行電力の検波電圧及びビーム波形	39
図4.2 遮断後の還流部進行電力の検波電圧及びビーム波形	40
図4.3 遮断前後のブリバンチャキャビティの検波電圧波形	41

## 表リスト

表4.1 RFインターロックのインターロック設定条件	42
表4.2 ビームインターロックの設定条件(ビームファースト)	43
表4.3 ビームインターロックの設定条件(ビームノーマル)	44

## 付録リスト

付録A ビーム条件の設定根拠	45
----------------	----

## 1. はじめに

サイクル機構では、大電力CW電子線形加速器の要素技術開発<sup>(1)(2)</sup>を実施している。加速器の各要素機器にはインターロックが個別に用意され、各機器を保護している。これら各要素機器を組み合わせて加速器を運転する場合には加速器全体のインターロックシステムが必要である。また、加速器運転のデューティが低い場合には問題にならない事象でも、デューティが高くなると機器に重大な損傷を与える可能性がある。このため、大電流の電子ビームまたは大電力高周波から、加速管やクライストロン等を保護し、大電流ビームを安定に加速できるシステムを開発する必要がある。そこで、励振系、RF電力制御系、RF位相制御系及びインターロック系で構成される高周波制御システム<sup>(3)</sup>を開発している。

クライストロン<sup>(4)</sup>から出力された高周波(以下、RFという。)は高周波制御システムで制御され、加速管へ供給されるが、ここでは、この中の加速器要素機器を組み合わせて運転する場合のインターロック系(以下、機器インターロックという)の開発について報告する。本報告では、機器インターロックの総合的な性能を調べることを目的にした。

## 2 高周波制御システム

高周波制御システムは励振系、RF電力制御系、RF位相制御系及びインターロック系で構成され、これらの概要を以下に示す。図2.1に高周波制御システムを示す。

### 2. 1 励振系

励振系は、基本波を発生させるシグナルジェネレータからクライストロン入力までの系統であり、主な構成要素は8/16倍速倍器、バンドパスフィルター、パワーディバイダ、フェーズシフタ、RFモジュレータ、1Wアンプ、50Wアンプ及びこれらの機器を接合するRFケーブルである。

シグナルジェネレータでは周波数156.141875MHz、出力10mWのRF信号を発生させている。この信号を8/16倍速倍器に入力し、8倍速して1.249135GHzの基本波(以下、f波という。)を作り出し、2台のクライストロンへ供給している。また、16倍速して2.49827GHzの2倍波(以下、2f波という。)を作り出し、1台のクライストロン(以下、2fクライストロンという。)へ供給している。さらに、156.141875MHz、1mWのRF信号をタイミングモジュールへ供給している。タイミングモジュールでは基本信号を分周してビームを加速するために必要なパルス信号を作りだしている。また、これらのパルス信号の繰返、幅及び遅延時間はコンピュータで設定されている。繰返の可変範囲は0.1Hz~50Hz、パルス幅及び遅延時間は410nsec~27msecである。ビームを出力する際に用いるゲート信号もこのタイミングモジュールから電子錶拡張インターフェースへ出力される。

高調波成分を取り除くためバンドパスフィルターでは、f波または2f波の±10MHzの範囲内の信号だけを透過させている。この数mWのf波をパワーディバイダで分配し、一方をRF位相制御系のモジュールに入力し、位相制御の基準信号として使用している。他方はフェーズシフタ、RFモジュレータを経由し、アンプで数Wに増幅して、クライストロンへ入力されている。また、数mWの2f波も同様にフェーズシフタ等を経て、1Wアンプで数百mWに増幅させ、2fクライストロンへ入力されている。

RFを遮断させるためのTTLレベルのインターロック信号が8/16倍速倍器に内蔵されているRFスイッチに入力されると、3系統のクライストロンへの入力信号が全て遮断され、全てのクライストロンからRFが出力されなくなる。

## 2. 2 RF電力制御系

チョッパキャビティ、プリバンチャキャビティ及びレゾナントリング内におけるRF電力の変化はビーム電流、エネルギー分布、トランスポート等を変化させる。加速器の概略構成図を2.2に示す。これらのRF電力を一定に保持することが加速器の安定運転につながる。そこで、RF供給源であるクライストロンの出力電力を制御し、各系統への入力電力が±0.6%以下になるようにする。2fに関しては、チョッパキャビティ内電力の変動がビーム電流に影響を与えるので、チョッパキャビティのピックアップからのフィードバック信号を用いてRFの電力の安定制御を行う。

## 2. 3 RF位相制御系

ローカルオシレータで発生させた基準信号より20MHz信号低い信号を、フリークエンシーコンバータに入力し、基準信号と制御対象信号を20MHz信号に変換している。20MHzに変換されたそれぞれの信号はフェーズディテクタに入力され、これらの信号の位相差に比例した電圧信号(20mV / 1deg)が出力される。その電圧信号がフィードバックコントローラに入力され、位相差が一定になるようにRF信号の位相がフェーズシフタによって制御される。

チョッパキャビティのf波及び2f波の位相が変動すると、チョッパからの出力電流やプリバンチャのディチューニング条件が変化するため、ビームのエネルギー分布やトランスポートが変化する。そこで、チョッパキャビティのf波及び2f波の位相を±1°以下で制御し安定化を図る。No.2クライストロン系に關しては、第4加速管レゾナントリング入力電力の位相を制御する。

## 2. 4 インターロック系

加速器の各要素機器は個別にインターロックを用意しており、シーケンサを用いて各機器の保護を行っている。シーケンサとは、従来ハードリレー接点で行っていた動作シーケンスをシーケンサの入出力ユニットと専用ソフトを使用することで動作シーケンスとしたものである。また、これにはCUPを搭載しており、A/D変換、D/A変換、LANとの接続等が可能である。この他に、各要素機器を組み合わせた加速器全体のインターロックとして、放射線障害を防止するためのインターロック(以下、安全対策用インターロックという)と、RFの異常事象からクライストロンを保護し、また、ビームの異常事象から加速管等を保護するためのインターロック(以下、機器インターロックという)を設けている。

安全対策用インターロックは加速器室および電子銃室への人の閉じ込めを防止し、鍵管理による加速器室への人の立入制限を行うために設けられている。放射線管理設備のシーケンサからの異常信号、遮蔽扉の開閉信号等の信号を安全対策用インターロックのシーケンサに集約させ、放射線障害を防止している。この他、RFやビームの異常事象を示す信号を機器インターロックに集約させ、異常事象が発生するとビームおよびRFを遮断させるインターロックシステムを構築している。

機器インターロックは、RF遮断に必要なRFインターロック、ビーム遮断に必

要なビームインターロック、ソフトでインターロックを動作させるソフトインターロックの3系統で構成している。機器インターロックの概略構成を図2.3に示す。以下に、機器インターロックについて述べる。

### 3 機器インターロック

RFインターロックは励振系の8/16倍速倍器内のRFスイッチへトリガ信号を入力し、クライストロンへのRF入力信号を高速遮断させ、大電力RFからクライストロン及び立体回路を保護するシステムである。

タイミングモジュールから出力されたトリガ信号が電子銃拡張インターフェースへ入力し、電子銃のグリット電圧のパルス幅が電子銃操作パネルから設定されると、ビームが出力される。そこで、ビームインターロックでは、電子銃拡張インターフェースに入力されたトリガ信号を外部信号で高速遮断させることにより、大電流ビームを遮断させて加速管等を保護している。

ビーム加速時にRFだけが遮断すると、ビームが加速管等に損傷を与える可能性があるため、RFと同時にビームも遮断させる。

ソフトインターロックでは、人的操作ミスを防止し、長時間の状態変化を観測する必要がある場合等に関して、ソフトを介してインターロックを動作させる。

#### 3. 1 RFインターロック

##### 3. 1. 1 RFインターロックの構成

RFインターロックは、反射波による異常事象など  $\mu\text{sec}$  オーダの早い応答速度の信号が入力されるファーストモジュールと、 $\text{msec}$  オーダの接点信号が入力されるノーマルモジュールとで構成される。RFインターロックの概略構成を図2.3の点線内に示す。

ファーストモジュール5台及びノーマルモジュール2台をRFインターロック専用NIM電源内に組み込み、ローレベルコントローラと接続している。RFインターロック専用NIM電源内のモジュール実装図を図3.2に示す。ローレベルコントローラはRFを遮断または再度投入させるためのモジュールであり、コンピュータで遠隔操作することができる。RFが遮断されるとローレベルコントローラのONランプが消灯し、OFFランプが点灯する。図3.1にローレベルコントローラの操作ソフトの表示画面を示す。これらRFインターロックは量子工学試験施設(以下、QTFという)の1階のRF信号が集中するクライストロンギャラリに設置されている。

ファーストモジュールに入力されたTTL信号がHレベル、または、ノーマルモジュールに入力された接点信号が開になると、ローレベルコントローラを介してRFスイッチが動作し、RFが遮断される。また、同時にビームを遮断する信号がローレベルコントローラから電子銃拡張インターフェースへ出力される。

ファーストモジュール及びノーマルモジュールの入力チャンネル数はそれぞれ1台当たり8チャンネルある。全てのチャンネルのインターロック動作状態をVME<sup>(5)</sup>に取り込んでいるため、図3.1に示すインターロック操作ソフトでRFインターロックの発生状況を把握することができる。

### 3. 1. 2 RFインターロック項目

RFインターロックに入力されている主な項目を以下に示す。RFインターロック項目の配置図を図3.3に示す。

#### (1) ファーストモジュール

##### ① 反射電力

クライストロン、チョッパ、ブリバンチャ及び加速管の反射電力をRFディスクリで検波している。RFディスクリの入力チャンネル数は4チャンネルあり、各チャンネルごとに反射電力の検波電圧の制限値がVSWR=1.2に相当するように設定している。検波電圧が制限値以上になると、TTL信号がRFディスクリの背面パネルのDsubコネクタケーブルを通してファーストモジュールへ出力される。RFディスクリの外観図を図3.4に示す。

##### ② レゾナントリングダミーロード入力電力

レゾナントリング内での放電または共鳴条件のずれが発生すると、レゾナントリングに入らないRFはダミーロードに入力される。このため、レゾナントリングダミーロード入力電力もRFディスクリでインターロックを動作させる。

##### ③ 放電

クライストロン出力窓を覗く導波管内にアークセンサを取り付け、出力窓付近で発生した放電を検知する。異常時に発生するアークセンサからの光信号をローレベルラック内でTTL信号に変換してファーストモジュールに入力している。

##### ④ 安全対策用インターロック

遮蔽扉の開閉、加速器室空調、放射線管理設備などの信号が安全対策用インターロックシーケンサに集約されている。設備異常時にはTTL信号が安全対策用インターロックシーケンサからファーストモジュールへ出力される。

##### ⑤ ビームインターロック異常

ビームインターロックが動作した場合、ビームインターロックのローレベルコントローラからTTL信号がRFインターロックのファーストモジュールへ出力される。

## (2)ノーマルモジュール

### ①出力窓及び出力導波管

出力窓及び出力導波管の損傷がクライストロンの致命傷につながるため、インターロックとして特に重要である。そこで、これらの冷却水の流れ及び冷却水の温度上昇にインターロックを動作させる。

冷却水の流れが止まると接点信号がフロースイッチからノーマルモジュールへ出力される。また、冷却水出口温度は横河電機製データ収集装置で測定している。測定温度が設定制限値を越えると、接点信号がデータ収集装置の接点出力モジュールからノーマルモジュールへ出力される。

### ②カソード電圧

クライストロン電源単体のインターロックが発生して、アノード電圧が印加されなくなると、RFが出力されなくなる。このため、カソード-アノード間電圧のモニタ電圧にインターロックをかけ、クライストロン電源停止時にビームを遮断する。カソード-アノード間電圧のモニタ電圧はデータ収集装置で測定している。測定電圧が設定制限値を越えると、前項と同様に接点信号がノーマルモジュールへ出力される。

### ③クライストロン単体試験

クライストロン単体のRF出力試験の際に、クライストロン出力窓上部の導波管を組み換えて、加速器試験体系からクライストロン単体試験体系にする。このとき、クライストロン単体試験用ダミーロード及び導波管を大電力RFから保護するため、ダミーロードの冷却水流量計、試験用導波管冷却水量及び冷却水上昇温度をデータ収集装置で測定している、測定電圧が設定制限値を越えると、前項と同様に接点信号がノーマルモジュールへ出力される。

## 3. 2 ビームインターロック

### 3. 2. 1 ビームインターロックの構成

ビームに関するインターロック信号はビームファーストモジュール及びビームノーマルモジュールの2種類のモジュールに入力される。ビームインターロックの概略構成を図2.2の点線内に示す。

ビームファーストモジュールを用いて、加速管を守るために必要なRF電力を検波し、 $\mu\text{sec}$ オーダの早い応答速度を要するインターロックを動作させる。また、チョップスリット電流等のモニタ電圧に対して、制限値を設けてインターロックを動作させる。接点信号が入力されるビームノーマルモジュールを用い、ビームラインの真空度の悪化等に対してインターロックを動作させる。

ビームファーストモジュール4台及びビームノーマルモジュール5台をビームインターロック専用NIM電源内に組み込み、ビームインターロック用のローレベルコントローラと接続している。ビームインターロック専用NIM電源内のモ

ジュール実装図を図3.6に示す。これらビームインターロックはQTFの地下階のビームラインの信号が集中する加速器空調室に設置している。その他に、RF電力の検波電圧をモジュールに入力する必要があるため、2台のビームファーストモジュールをRFインターロック専用NIM電源内に組み込んでいる。

ビームファーストモジュールでは、入力される10V以下の電圧に対して上限制限値及び下限制限値を設定することができる。この入力電圧が上下限の設定範囲を越えた場合、ビームインターロック用のローレベルコントローラを介して電子銃拡張インターフェースで電子銃トリガ信号が遮断される。また、ビームノーマルモジュールに入力された接点信号が開になってしまっても、電子銃トリガ信号が遮断される。これらのビーム遮断と同時に、RFを遮断する信号がビームインターロック用のローレベルコントローラからRFインターロックのファーストモジュールへ出力される。

ビームインターロック用のローレベルコントローラはRFインターロック用のローレベルコントローラと同様である。ビームファーストモジュール及びビームノーマルモジュールの入力チャンネル数はそれぞれ1台当たり8チャンネルある。全てのチャンネルのインターロック動作状態をVMEに取り込んでいるため、図3.1に示すインターロック操作ソフトでビームインターロックの発生状況を把握することができる。

### 3. 2. 2 ビームインターロックの特徴

ビームパワーが低い状態から高い状態まで、複雑な運転条件に応じて加速器を運転しなければならない。このため、インターロックシステムに用いている全てのインターロックの中から必要なものだけを選択して使用する必要がある。そこで、ビームの平均値、ビームが出力されている領域または運転モードに応じて、必要なインターロックだけが動作するように、以下に示す3種類の信号を用意してシステムを構築した。ビームインターロックの信号系統図を図3.7に示す。

#### (1) 初期ビーム調整信号

ビームが加速管壁に当たっても損傷しない低いデューティの条件下で、ビームを電子銃からビームダンプまで順次輸送調整していく。まず、電子銃から出力された300mAのビームはチョッパキャビティ<sup>(6)</sup>内のRF磁場でビーム全体が振られ、DCバイアスで曲げられる。図3.8にチョッパシステムの概略図を示す。300mAのビームが3分割されたスリット(以下、チョッパスリットという)を通過することにより、加速に必要な100mAのビームが切り出される。ここで、チョッパキャビティ内のRFが遮断されると、チョッパスリットでビームが止められるため、加速管側へビームが出力されなくなる。次に、プロファイルモニタと呼ばれるセラミック蛍光板をビームライン上に降下させ、蛍光板表面に現れるビームによる発光を見ながら、電磁石の電流を変化させて、ビームの形状及び位置を調整する。さらに、このようなビームの調整をビームダンプまで全て終了させた後に、プロファイルモニタを全て上昇させ、ビームのデューティを高めていく。

ここで、高デューティビームからプロファイルモニタを保護するためには、プロファイルモニタが降下した時に働くインターロック信号が必要である。ただし、ビーム初期調整時にはインターロック信号を無効にしなければならない。

そこで、デューティモジュールでは、波高値、幅及び繰返を測定し、これらの値の平均値に制限値を設け、制限値以上で初期ビーム調整信号を出力させる。制限値は測定電圧1V、幅4msec、繰返50Hzの平均値0.2 ( $1V \times 4msec \times 50Hz$ )に対して、0.01%~1%の範囲内で設定できる。デューティモジュールの外観図を図3.5に示す。ビームが加速管に当っても損傷を与えることなく、ビーム輸送を調整できるビーム条件は、ビームエネルギー10MeV、ビーム電流100mA、パルス幅 $100\mu sec$ 、1パルスである。ビーム条件の設定根拠を付録Aに示す。この場合、300mAの電子銃出口ビーム電流に対して、ビーム電流モニタ(以下、CTモニタという。)からは600mVの電圧が出力される。この平均値は0.00006となるので、最大平均値0.2に対して、初期ビーム調整信号が出力される制限値は0.03%となる。

初期ビーム調整信号はビームインターロック専用NIM電源の背面の入力コネクタから、ビームファーストモジュール及びビームノーマルモジュールの各チャンネルに入力される。また、RFインターロック専用NIM電源内の2台のビームファーストモジュールには、モジュール前面パネルから入力される。初期ビーム調整信号の入力箇所を図3.2及び図3.6に示す。

ビーム調整時には、初期ビーム調整信号がTTL信号のLレベルになる。この時、モジュールに入力されたインターロック信号は無効となるので、RF及びビームは遮断されない。また、ビーム条件が制限値0.03%以上になると、初期ビーム調整信号がTTL信号のHレベルになる。この状態でインターロック信号が入力されるとRF及びビームが遮断される。このように、初期ビーム調整信号を使用することによって、ビーム条件でインターロックを無効にしたり有効にしたりすることができる。ただし、モジュールの各チャンネルに設けられているディップスイッチをONさせて、初期ビーム調整信号を無効にすると、ビーム条件に関係なくインターロックの動作が可能になる。

初期ビーム調整信号を使用するインターロック項目は、プロファイルモニタ、チョッパスリット電流及び還流部進行波電力等であり、図3.7の(1)及び(3)に示す項目である。

## (2)パルスゲート信号

ビームが還流部進行波電力で加速されると、ビームにエネルギーが与えられるため、ビームが加速されている領域の電力(以下、ビームローディング電力という。)が低下する。このビームローディング電力はビームが減ると増大し、ビームが増えると減少する。このようにRF及びビームの状態が同時に表されるため、ビームローディング電力に対してインターロックを動作させることは大変重要である。そこで、デューティモジュールから出力されるビームのパルス幅に対応するTTLレベルのゲート信号(以下、パルスゲート信号とい

う。)を出力させ、このゲート信号内でのみインターロックが働くようにする。パルスゲート信号、電子銃出口ビーム電流のモニタ電圧及び還流部進行波電力波形との関係を図3.9に示す。

パルス幅 $10 \mu\text{sec}$ 以上の電子銃出口ビーム電流のモニタ電圧がデューティモジュールに入力されると、デューティモジュールからパルスゲート信号とモニタ電圧が出力される。パルスゲート信号は図3.2に示す系統でビームファーストモジュールに入力される。

還流部進行波電力はRFディスクリで検波され、RFディスクリから検波電圧信号とピークホールド電圧信号が出力される。ピークホールド電圧信号はビームファーストモジュールに入力される。ビームファーストモジュールでは、ピークホールド電圧信号に対して上下限制限値が設定される。

図3.9に示すピークホールド電圧がパルスゲート信号内で上下限制限値を越えると、RFが遮断される。ただし、モジュールの各チャンネルに設けられているディップスイッチをONさせて、パルスゲート信号を無効にすると、パルスゲート信号に関係なくインターロックの動作が可能になる。その他にも、パルスゲート信号は図3.6に示すビームインターロック専用NIM電源の背面からビームファーストモジュールの各チャンネルに入力できるようになっている。

ピークホールド電圧信号は検波電圧の最大値を $15 \mu\text{sec}$ 程度保持させた電圧信号である。ビームローディングの電力が確立するまでの時間は $6 \mu\text{sec}$ 程度であるが、ピークホールド電圧の保持時間を考慮し、パルスゲート信号の立ち上がりを電子銃出口ビームの立ち上がりから $20 \mu\text{sec}$ 遅らせた。また、パルスゲート信号は電子銃出口ビームの立ち下がりから $1.6 \mu\text{sec}$ 遅れて立ち下がる。このため、検波電圧をビームファーストモジュールの入力信号に利用すると、パルスゲート信号の立ち下がりとビームローディングの立ち上がりが重なり合うため、インターロックが誤動作する。そこで、パルスゲート信号より遅れてビームローディングが立ち上がるピークホールド電圧信号を利用して、パルスゲート信号がビームローディングの領域に確実に入るようとした。

パルスゲート信号を使用するインターロック項目を図3.7の(1)に示す。

### (3)エージングモード信号

ビームをRFで加速させる加速器運転には、全てのインターロックシステムが使用される。この他の機器の運転として、加速管にRFだけを入力する加速管RFエージングとビームを出力させずに電子銃に高電圧だけを印加させる電子銃DCエージングとを含むエージング運転がある。このエージング運転にはインターロックシステムの一部が使用される。このため、エージング運転中に、関係の無いインターロック信号によって、RFが遮断されないようにする必要がある。

図3.10に示す安全対策用インターロック操作パネルで加速器運転とエージング運転を選択できる。エージング運転を設定すると、安全対策用インターロックシーケンサからエージングモード信号の接点閉信号が出力される。エージングモード信号は図3.6に示すビームインターロック専用NIM電源の背面から、ビームファーストモジュール及びビームノーマルモジュールの各チャンネルに入力される。エージングモード信号が接点閉になると、モジュールに入力されたインターロック信号は無効となり、RFが遮断されなくなる。また、加速器運転の場合には、エージングモード信号が接点開となり全てのインターロックの動作が可能になる。ただし、モジュールの各チャンネルに設けられているディップスイッチをONさせてエージングモード信号を無効にすると、機器の運転条件に関係なくインターロックの動作が可能になる。

エージングモード信号を使用するインターロック項目は、電子銃シーケンサ、プロファイルモニタ及び還流部進行波電力等であり、図3.7の(1)、(2)及び(3)に示す項目である。

### 3. 2. 3 ビームインターロック項目

ビームファーストモジュール及びビームノーマルモジュールに初期ビーム調整信号、エージング信号またはパルスゲート信号を入力し、状況に応じて必要なインターロックが動作するように信号を選択している。以下に示す(1)、(2)、(3)の場合について、ビームファーストモジュール及びビームノーマルモジュールに入力されている項目を示す。ビームインターロックが組み込まれているビームラインの構成図を図3.11に示す。

#### (1)初期ビーム調整信号、エージングモード信号及びパルスゲート信号を使用する項目

以下に示す図3.7の(1)の4項目に対応するビームファーストモジュールのチャネルについて、初期ビーム調整信号、パルスゲート信号及びエージングモード信号のディップスイッチをOFFして、各信号を使用できる状態にする。

これによって、ビーム調整時には、初期ビーム調整信号がTTL信号のLレベルになり、インターロック信号は無効となる。また、エージング運転時には、エージングモード信号は接点閉になり、インターロック信号は無効となる。

さらに、ビーム調整終了後、高デューティの加速器運転を行う場合には、ビームが加速されているパルスゲート信号の領域だけインターロックの動作が可能になる。

##### ①還流部進行波電力

検波波形、パルスゲート信号及びインターロック制限値の関係を図3.9に示す。

##### ②チョッパキャビティ電力

加速位相に乗せるビーム電流を決定する重要な電力であるため、チョッパキャビティ電力の検波電圧に対して上下限値を設定する。

##### ③プリバンチャキャビティ電力

ビームのバンチングに大きく影響する電力であるため、プリバンチャキャビティ電力の検波電圧に対して上下限値を設定する。

##### ④ビームダンプモニタ電圧

ビームダンプ<sup>(7)</sup>は22枚の銅製の中空状円板で構成され、中空状円板の内径がビームを受け止めるためにビーム進行方向に段々と小さくなっている。22枚の中空状円板を4組に分け、それぞれの電流を50Ω抵抗で測定している。その測定電圧に対してビームファーストモジュールで上限値を設定する。

パルスにオーバーシュートがあるため、パルスゲート信号を使用してパルスの立ち上がりを避けてインターロックの誤動作を防いでいる。

## (2)初期ビーム調整信号、エージング信号を使用する項目

以下に示す図3.7の(3)の7項目に対応するビームファーストモジュールまたはビームファーストモジュールのチャンネルについて、初期ビーム調整信号及びエージングモード信号のディップスイッチをOFFして、各信号を使用できる状態にする。

これにより、ビーム調整時、または、エージング運転時には、以下に示す7項目のインターロック信号は(1)と同様に無効となる。

### ①プロファイルモニタ

高デューティビームからプロファイルモニタを保護するために、プロファイルモニタの降下時に、接点開信号がビームノーマルモジュールに出力される。

### ②CTモニタ電圧

電子銃は最大400mAの電流を出力できる。そこで、300mAの電流に相当する600mVに対して、ビームファーストモジュールで上限値を設定する。

### ③コリメータモニタ電圧

電子銃とチョッパキャビティの間にコリメータを挿入し、コリメータに当たる発散ビームの電流を測定している。コリメータ電流は $50\Omega$ で測定した電圧に対してビームファーストモジュールで上限値を設定する。

### ④チョッパDCバイアス

DCバイアスの変化はビーム電流に影響する。また、DCバイアスが印加されている間はチョッパキャビティ電力が失われてもビームはチョッパスリットに当たるので、加速管の方へ直接射出されない。そこで、DCバイアスに対してビームファーストモジュールで上下限値を設定する。

### ⑤チョッパスリットモニタ電圧

3分割されたチョッパスリットに当たるビーム電流を $50\Omega$ 抵抗で測定し、その測定電圧に対してビームファーストモジュールで上限値を設定する。

### ⑥ビームダンプQマグネット

ビームをQマグネットで発散させてビームダンプに入力させている。高デューティビーム加速時にQマグネットの電流が消失すると、ビームがビームダンプの中心部に集中し、ビームダンプを破損させる。このため、Qマグネット電流のモニタ出力電圧に対してビームファーストモジュールで下限値を設定する。

### (3)エージング信号を使用する項目

以下に示す図3.7の(2)の2項目に対応するビームファーストモジュールのチャンネルについて、エージングモード信号のディップスイッチをOFFして、エージングモード信号を使用できるようとする。

これにより、エージング運転時には、以下に示す2項目のインターロック信号は(1)と同様に無効となる。

#### ①ゲートバルブ

プリバンチャとバンチャ加速管の間、第3加速管と第4加速管の間及びビームダンプ側の第7加速管出口の3箇所にゲートバルブが設置されている。ビームラインの真空部品を交換する場合やRFエージングを行う場合に、ゲートバルブを閉じる。ゲートバルブが閉まると接点開信号が出力される。プリバンチャとバンチャ加速管の間のゲートバルブの接点信号は安全対策用インターロックのシーケンサに入力されている。また、その他の2箇所のゲートバルブの接点信号をビームノーマルインターロックに入力し、ゲートバルブが閉じられている状態で加速器が運転されないよう、インターロックをかけている。

#### ②電子銃シーケンサ出力信号

電子銃電源のインターロック信号は電子銃のシーケンサに集約されている、異常が発生した場合には、シーケンサからビームノーマルインターロックへ接点開信号が出力される。

### (4)運転条件に無関係な項目

以下に示す図3.7の(4)の5項目に関しては、インターロックの動作は常に可能である。

#### ①ビームライン真空系

ビームラインに8箇所の真空ゲージを設置し、コントローラで真圧度を測定している。その真圧度が $10^{-6}$ torr以下になるとコントローラから接点開信号が出力される。

#### ②レゾナントリング真空系

8台のレゾナントリングにそれぞれイオンポンプを設置し、コントローラで真圧度を測定している。その真圧度が $10^{-6}$ torr以下になると接点開信号が出力される。

#### ③緊急遮断弁

緊急遮断弁をビームダンプと第7加速管の間に設置し、ビームダンプ内の

真空悪化から加速管を保護している。遮断弁が閉じられると、接点開信号が出力される。

④冷却設備シーケンサ出力信号

粗温度系設備、恒温度系設備、蒸気冷却設備等の冷却設備のインターロック信号は冷却設備シーケンサに集約されている。各設備で異常が発生した場合には、シーケンサから接点開信号が出力される。

⑤ビームラインシーケンサ出力信号

ビームダンプ冷却設備異常、磁場レンズ電源出力電流値、冷却水出口温度等の信号はビームラインシーケンサに集約されている。誤入力による異常事象を防ぐため、磁場レンズ電源の出力電流は専用のシーケンサ操作盤から出力電流の下限値を設定している。シーケンサで設定した制限値を越える信号が入力された場合には、シーケンサから接点開信号が出力される。

### 3. 3 ソフトインターロック

人的操作ミスを防止する項目、長時間の状態変化を観測する必要がある項目、温度のように遅い応答速度を有する測定項目等、以下に示す5項目に関しては、ソフトを用いてインターロックを動作させる。(5)~(8)は整備中であるため、整備でき次第、ソフトインターロックに組み込む予定である。ソフトインターロック表示画面を図3.1に示す。

ソフトインターロックの測定値が制限範囲を越えた場合には、ビームインターロックのローレベルコントローラがOFFされ、ビームが遮断される。同時に、ソフトインターロックの画面上の異常項目に赤印が表示される。

(1)ビーム位置モニタ

ビーム位置モニタから出力された電圧はVMEで計算処理され、1パルスで積分されたビームの重心位置がコンピュータ画面上に図3.12のように表示される。ビーム位置表示の応答速度は2sec程度である。各加速管の前後に配置された10個のビーム位置モニタに対して、画面上の任意の点を中心とした半径r(cm)の制限範囲を設けた。

(2)加速管等の温度

図3.13に示す専用ソフト(AccTempMonitor.app)で、チョッパ、プリバンチャ、加速管及びコリメータ等の表面温度を観測することができ、インターロックの上限温度も設定できる。また、上限温度を越えた項目の右側に赤印が表示される。

(3)ビーム電流モニタ

ビームパルス内におけるビーム電流の急激な変動に対してビームインター

ロックでインターロックを動作させる。これと同時に、ゆっくりとしたビーム変動を観測することにより、異常の発生を予測することも可能となる。そこで、図3.14に示す画面上の平均ビーム電流値の時間的な変化量に対してインターロックを動作させる。

#### (4)還流部内スタブ設定値

還流部内スタブ位置はコンピュータで専用のソフト画面から設定できる。誤入力による異常事象を防ぐ為、流部内スタブ位置は専用のソフト画面からスタブ位置の移動範囲を制限させる。

#### (5)RF安定制御された位相

チョッパキャビティのf波及び2f波の位相並びに第4加速管レゾナントリング入力電力の位相は安定制御されている。このため、キャビティ内及びレゾナントリング内で放電の発生、安定制御パラメータの変更や機器の故障が発生しない限り、位相が大きく変動することはない。安定制御された各位相の電圧信号はフェーズディテクタからVMEに取り込み、コンピュータの画面に表示されている。これらの表示値に対して、上下限値を設定し、インターロックを動作させる。

#### (6)ビームエネルギー分析器

エネルギー分析用電磁石が最後の加速管の出口に設置されている。この電磁石によって、繰り返し0.1Hz、パルス幅30  $\mu$ sec程度のビームが曲げられ、ビームのエネルギーが測定される。高デューティのビームからエネルギー分析器を保護するため、繰り返し0.1Hz、パルス幅100  $\mu$ sec以上のビームに対して、誤ってエネルギー分析用電磁石の電源が入らないようにする。

#### (7)ビームロスモニタ

ビームロスモニタで加速管から漏れるビーム量を測定する。ビームロスモニタで測定される単位時間あたりのチャージ量に制限値を設ける。ビームトランスポートの最適化を実施した後、ビームと制限値の関係を調査する。

#### (8)ビームダンプ温度

ビームダンプは22枚の銅製の中空状円板で構成され、中空状円板の内径がビームを受け止めるためにビーム進行方向に段々と小さくなっている。中空状円板の円周上に熱電対が4箇所接続されており、中空状円板全体で88箇所の温度分布を測定することができる。これらの温度情報をVMEに取り込み、ビームダンプ全体の温度分布でインターロックを動作させる。

## 4 インターロック試験

### 4. 1 インターロック部分試験

総合試験を行う前にRF及びビームを遮断する部分やインターロック信号を出力させる機器について、部分的な動作試験を実施した。部分的な動作試験終了後、インターロック制限値の設定を行った。

#### (1)RF及びビーム遮断確認

8/16倍遙倍器のRF出力ポートにパワメータを接続し、8/16倍遙倍器内のRFスイッチから出力されるRFを測定した。また、電子銃拡張インターフェースにTTL信号のHレベルを入力し、電子銃のグリットへ出力される光信号出力ポートの光を観測した。

RFインターロック用のローレベルコントローラをOFFさせると、パワメータでRFが測定されなくなり、光信号出力の光が観測されなくなった。また、ビームインターロック用のローレベルコントローラをOFFさせると、パワメータでRFが測定されなくなり、光信号出力の光が観測されなくなった。

以上により、RFおよび電子銃のグリットへ出力されるトリガ信号が外部信号で遮断できることを確認した。

#### (2)インターロック項目の動作確認

ファーストモジュール、ノーマルモジュール、ビームファーストモジュール及びビームノーマルモジュールの表面パネルに、各チャンネルに対応した8個のランプがある。インターロック信号が各モジュールに入力してローレベルコントローラがOFFになると、各モジュールの表面パネルのランプが緑色の点灯から赤色の点滅に変化する。

全てのインターロック項目に対して、機器側からインターロック信号を出力させ、ランプが赤色の点滅に変化することを確認した。同時に、RFインターロック用及びビームインターロック用のローレベルコントローラのOFFランプが点灯することを確認した。

以上により、各機器のインターロック機能が正常に動作することを確認した。

#### (3)インターロック制限値の設定

全てのインターロック項目の動作を確認した後に、インターロック信号が出力される制限値を設定した。RFインターロックのインターロック設定条件を表4.1に示す。ビームインターロックのインターロック設定条件を表4.2及び表4.3に示す。

#### 4. 2 総合試験

インターロックシステムを組み合わせた総合的な動作試験を実施した。各試験の方法と結果を以下に示す。

##### (1) 初期ビーム調整信号動作試験

ビーム条件がビーム電流100mA、ビーム幅100  $\mu$ sec、繰返1Hzの平均値よりも大きい場合、初期ビーム調整信号がTTL信号のHレベルになるように制限値(0.03%)が設定されている。

ビーム電流102mA、ビーム幅20  $\mu$ sec、繰返1Hzの条件で、プロファイルモニタを降下させても、ビームは遮断されなかった。

次に、ビーム電流102mA、ビーム幅150  $\mu$ sec、繰返1Hzの条件にすると、初期ビーム調整信号がTTL信号のHレベルになった。この状態で、デマルケストが付いていないプロファイルモニタを降下させると、RF及びビームが遮断された。

以上より、初期ビーム調整信号がHレベルになる制限値以上のビーム条件で、インターロック信号が発生するとRF及びビームは遮断されるが、制限値以下のビーム条件では、インターロック信号が発生してもRF及びビームは遮断されないことが確認された。

図3.7の(1)及び(3)に示す項目についても同様に確認した。

##### (2) エージングモード信号動作試験

エージング運転を設定すると、エージングモード信号は接点閉になった。この状態で、プロファイルモニタを降下させても、RF及びビームは遮断されなかった。

次に、加速器運転を設定すると、エージングモード信号は接点開になった。この状態で、プロファイルモニタを降下させると、RF及びビームは遮断された。

以上より、エージングモード信号が接点開になり、インターロック信号が発生するとRF及びビームは遮断されるが、接点閉になるとインターロック信号が発生してもRF及びビームは遮断されないことが確認された。

図3.7の(1)、(2)及び(3)に示す項目についても同様に確認した。

##### (3) パルスゲート信号動作試験

###### ① バンチャ加速管の還流部進行波電力に関するインターロック動作試験

インターロック動作前のバンチャ加速管の還流部進行波電力の検波電圧波形及びビーム電流のモニタ電圧波形を図4.1に示す。電子銃のグリット電圧を変化させて、ビーム電流を10%減少させた。このとき、10%減少させたときの還流部進行波電力(1050kW)が上限制限値の設定電力(914kW)よりも大きくなるように上限制限値を設定する。この時のビーム条件はビーム電流102mA、ビーム幅60  $\mu$ sec、繰返1Hzであり、制限値(0.03%)より低いため、パルスゲート信号内でインターロック信号が制限値を越えても、インター

ロックは動作しないことが確認された。

次に、制限値(0.03%)を越えるビーム条件(ビーム電流102mA、ビーム幅150  $\mu$ sec、繰返1Hz)に設定した。

この状態でビーム電流を10%減少させたところ、図4.2に示すようにRF及びビームが23.5  $\mu$ secで遮断された。ビーム電流モニタ波形の立ち上がりからパルスゲート信号までの時間は20  $\mu$ secであった。したがって、パルスゲート信号が入力されてからインターロックが動作し、RF及びビームが遮断されるまで、3.5  $\mu$ secかかることが分かった。

ピークホールド電圧は十数  $\mu$ secごとにピークホールドを繰り返し、低下していることが分かる。

## ②プリバンチャ電力に関するインターロック動作試験

プリバンチャキャビティ電力の検波電圧波形を図4.3に示す。ビーム電流を10%減少させたときのプリバンチャキャビティ電力が下限制限電力(347W)になるように下限制限値を設定している。制限値(0.03%)を越えるビーム条件(ビーム電流102mA、ビーム幅150  $\mu$ sec、繰返1Hz)で、ビーム電流を10%減少させたところ、図4.2に示すようにRFが遮断された。

以上のように、ビーム電流の変動に相当する検波電圧に対して上下限制限値を設定し、パルスゲート信号内の検波電圧がこれらの制限値を越えた場合に、RF及びビームが遮断されることを確認した。

今後、ビーム輸送の最適化を図るため、インターロックレベルの設定値の最適化を行う必要がある。

## (4)ソフトインターロック動作試験

総合試験と同じビーム条件で、ソフトインターロック動作試験を実施した。

ビーム位置及びビーム位置制限範囲は図3.12のようにビーム位置モニタ表示画面に表示される。ビーム位置がインターロックの制限範囲から外れるようには、ビーム範囲設定パネルで制限範囲を設定することで、ビームインターロック用のローレベルコントローラがOFFになり、ビームが遮断された。また、ソフトインターロック画面上の異常項目に赤印の表示となった。

以上により、ビーム位置モニタのソフトインターロックが正常に動作することを確認した。その他のソフトインターロック項目に関しては、ソフトの整備が終了次第、順次確認していく予定である。

## 5. まとめ

ビームパワーが低い状態から高い状態まで、複雑な運転条件に応じて加速器を運転しなければならない。このため、初期ビーム調整信号、パルスゲート信号及びエージングモード信号を用い、全てのインターロック項目の中から必要なインターロック項目だけを選択して使用するシステムを構築した。

ビーム条件を、ビーム電流102mA、ビーム幅 $150\mu\text{sec}$ 、繰返1Hzとし、加速器要素を組み合わせたインターロックシステムの総合的な動作試験を実施した。ビーム電流を10%減少させ、バンチャ還流部進行波電力のインターロックを動作させたところ、RF及びビームが $23.5\mu\text{sec}$ で遮断された。また、パルスゲート信号が入力されてからインターロックが動作し、RF及びビームが $3.5\mu\text{sec}$ で遮断されることが分かった。

現在組み込まれている全インターロック項目の試験を行った結果、RF及びビームが確実に遮断されることを確認した。

今後、大電力ビームを加速するために加速器運転条件の最適化を図っていくため、これに応じたインターロックレベルの最適な設定を行うとともに、高デューティの加速器試験に向けたインターロックシステムの整備を進めていく予定である。

6. 謝辞

高エネルギー加速器研究機構の小野正明先生、吉本伸一先生にはインターロック  
システムおよびモジュールに関するご助言をして頂き、深く感謝します。

## 7. 参考文献

- 1) 江本隆他、”大電流電子線形加速器の開発 -設計概要・入射部試験-”、PNC TN9410 98-010.
- 2) Y.L.Wang,"INJECTOR TEST(2) OF PNC High Power Electron LINAC", PNC TN9410,98-017, February 1998.
- 3) M.Ono, et al., "TRISTAN RF SYSTEM WITH NORMAL CONDUCTING CAVITY", KEK Internal 87-6, December 1987.
- 4) 平野耕一郎他、”大電力クライストロンの開発—パルスモードの開発—”、PNC TN9410 98-068.
- 5) 江本隆他、”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)—”、PNC TN9410 98-060.
- 6) Y.L.Wang,"THE NEW CHOPPER CAVITY DESIGN AND TEST SUMMARY", PNC TN9410,95-201, August 1995.
- 7) H.Takei, et al., "CONCEPTUAL DESIGN OF BEAM DUMP FOR HIGH POWER ELECTRON BEAM", Proceeding of XVIII International Linear Accelerator Conference, Volume1, P387, August 1996.

P.S. パワーデバイダ  
BPF バンドパスフィルタ

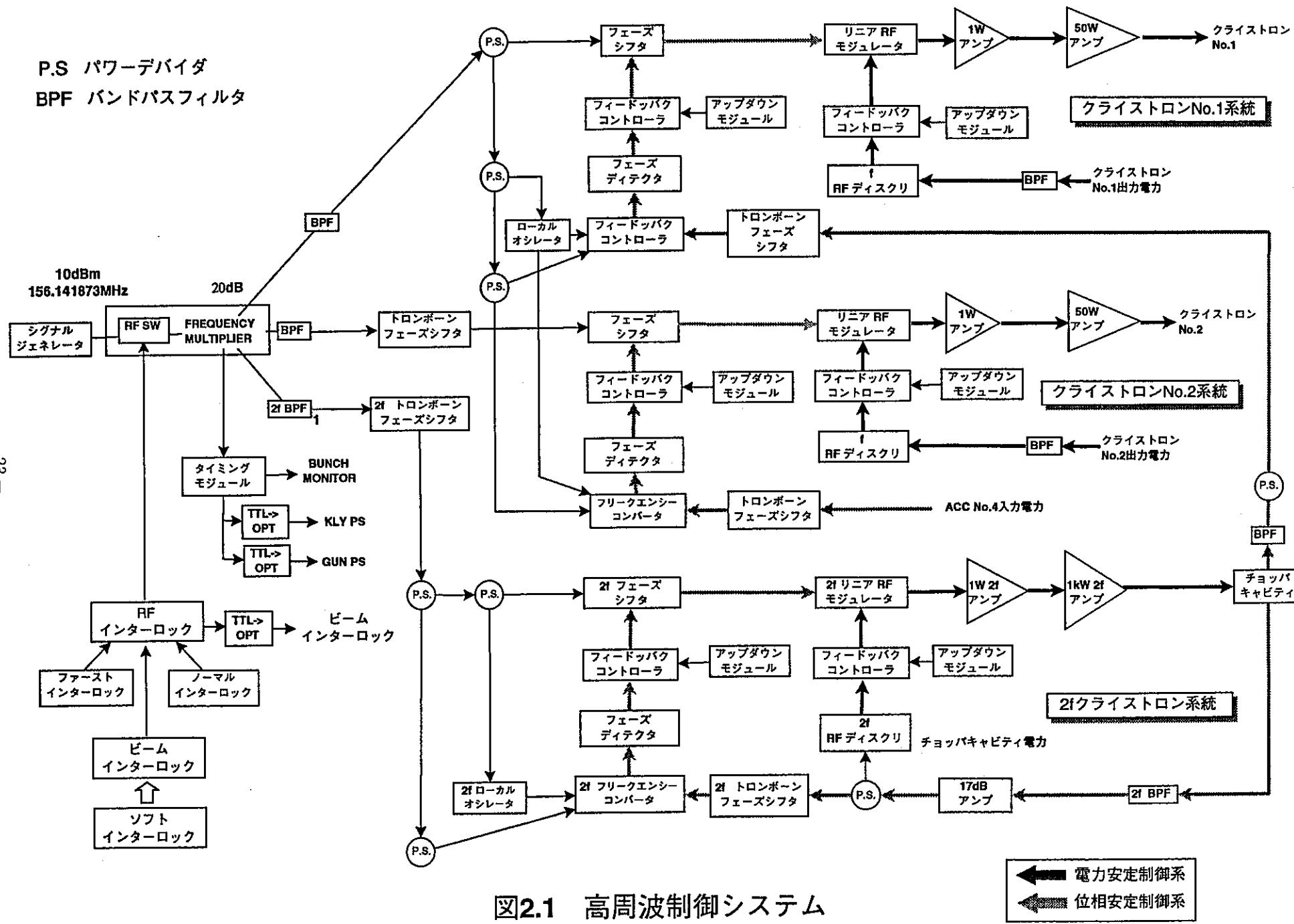


図2.1 高周波制御システム

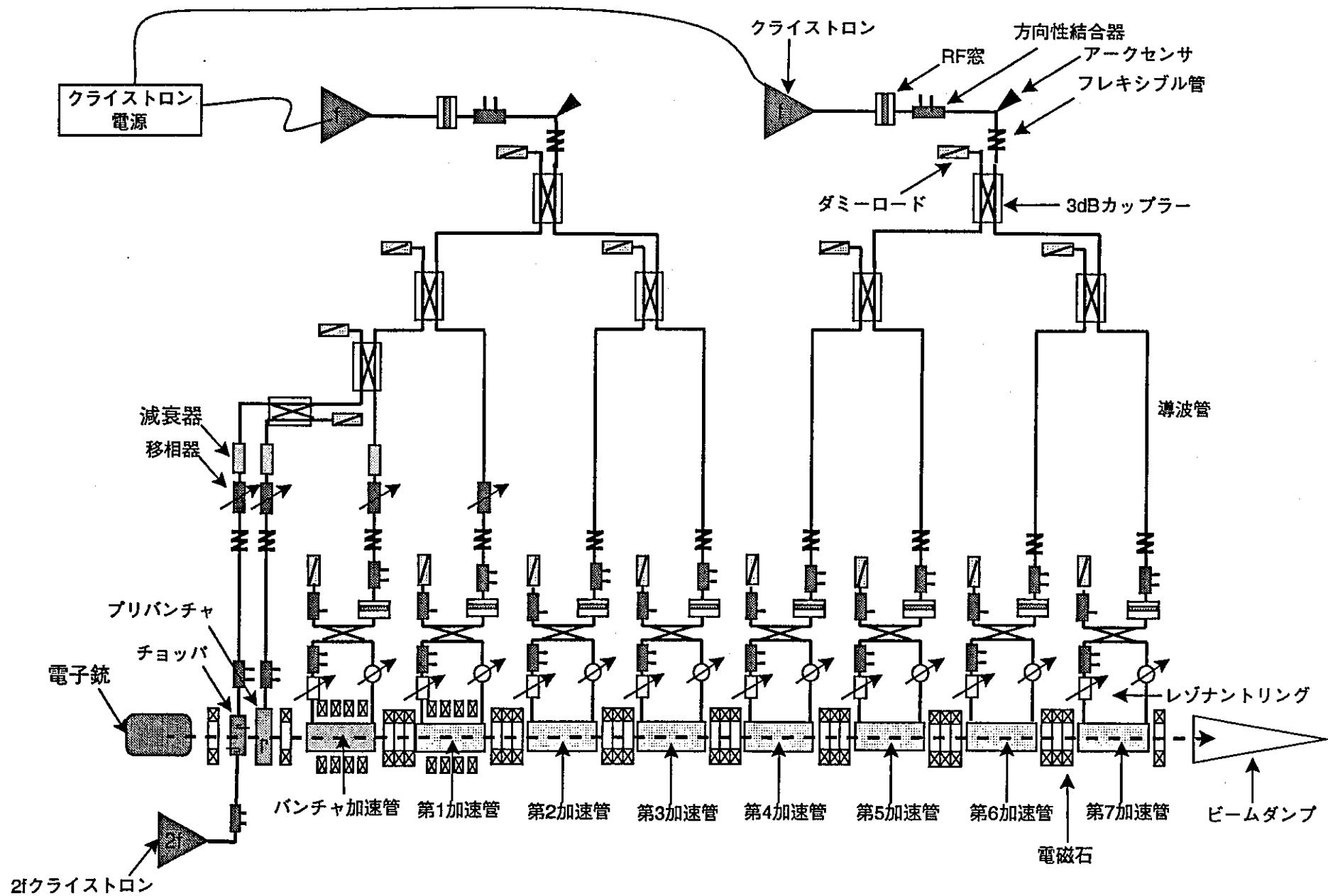


図2.2 加速器概略構成図

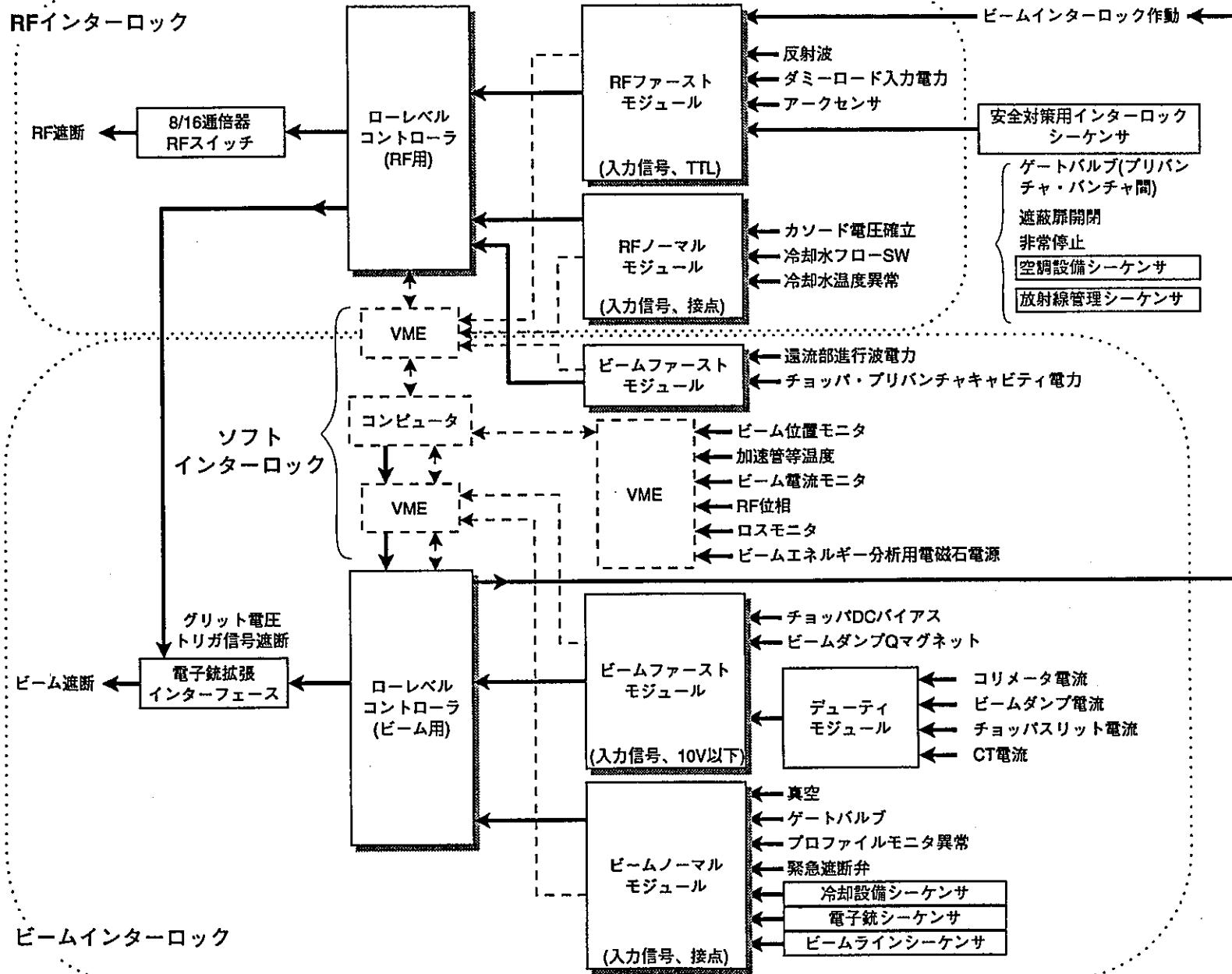


図2.3 機器インターロック系の概略構成

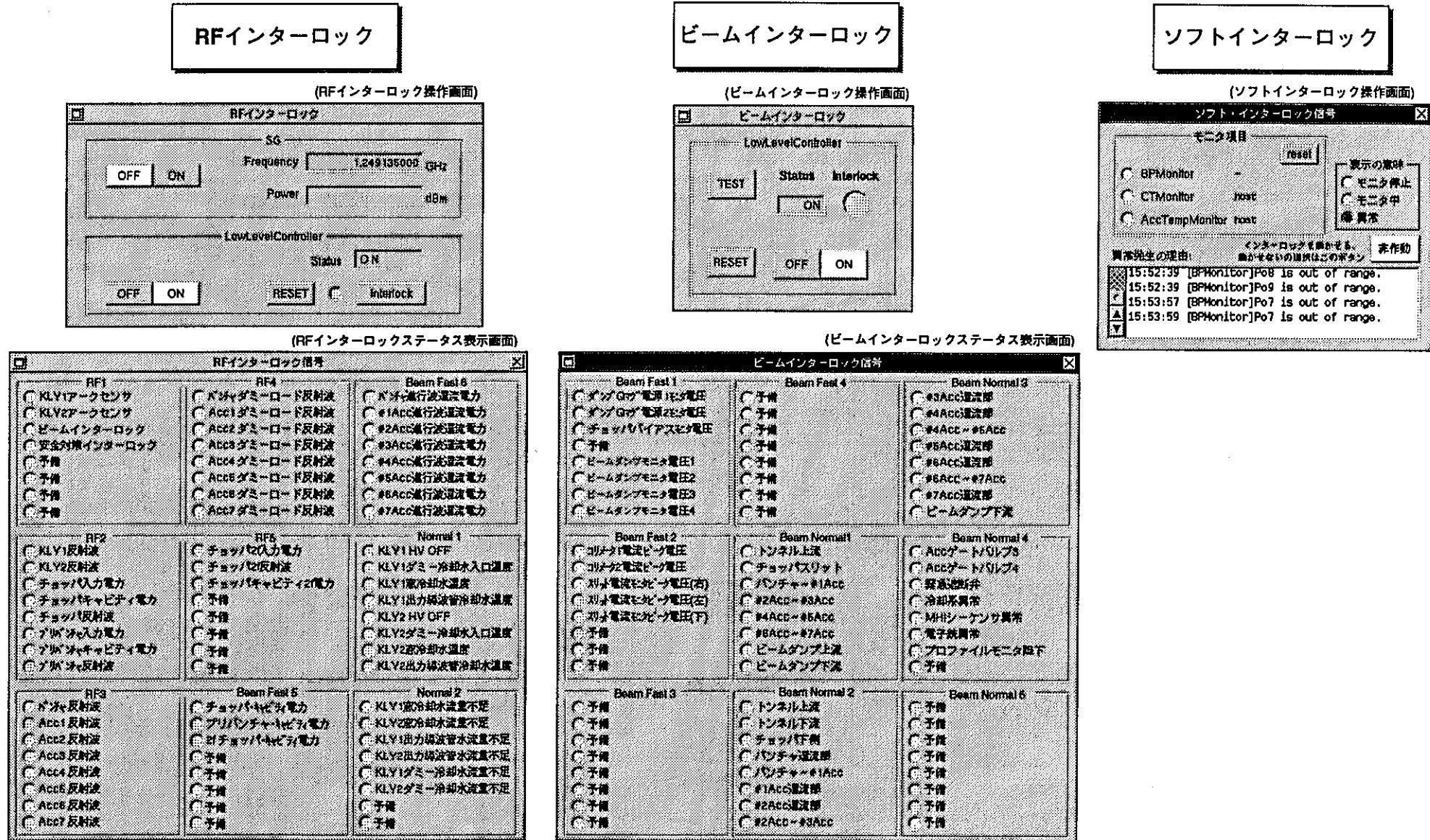


図3.1 インターロック操作ソフト表示画面

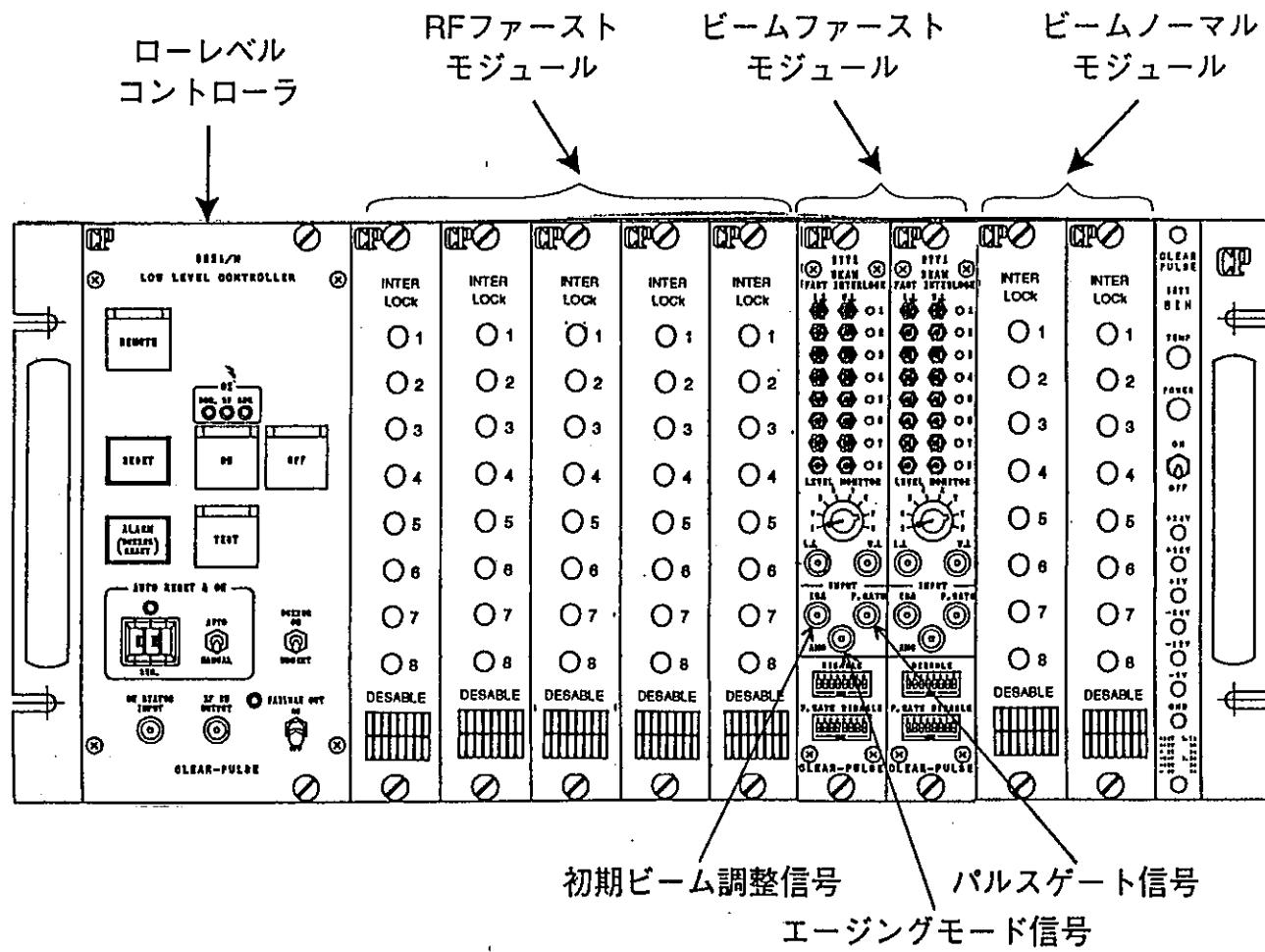


図3.2 RFインターロック専用NIM電源内のモジュール実装図

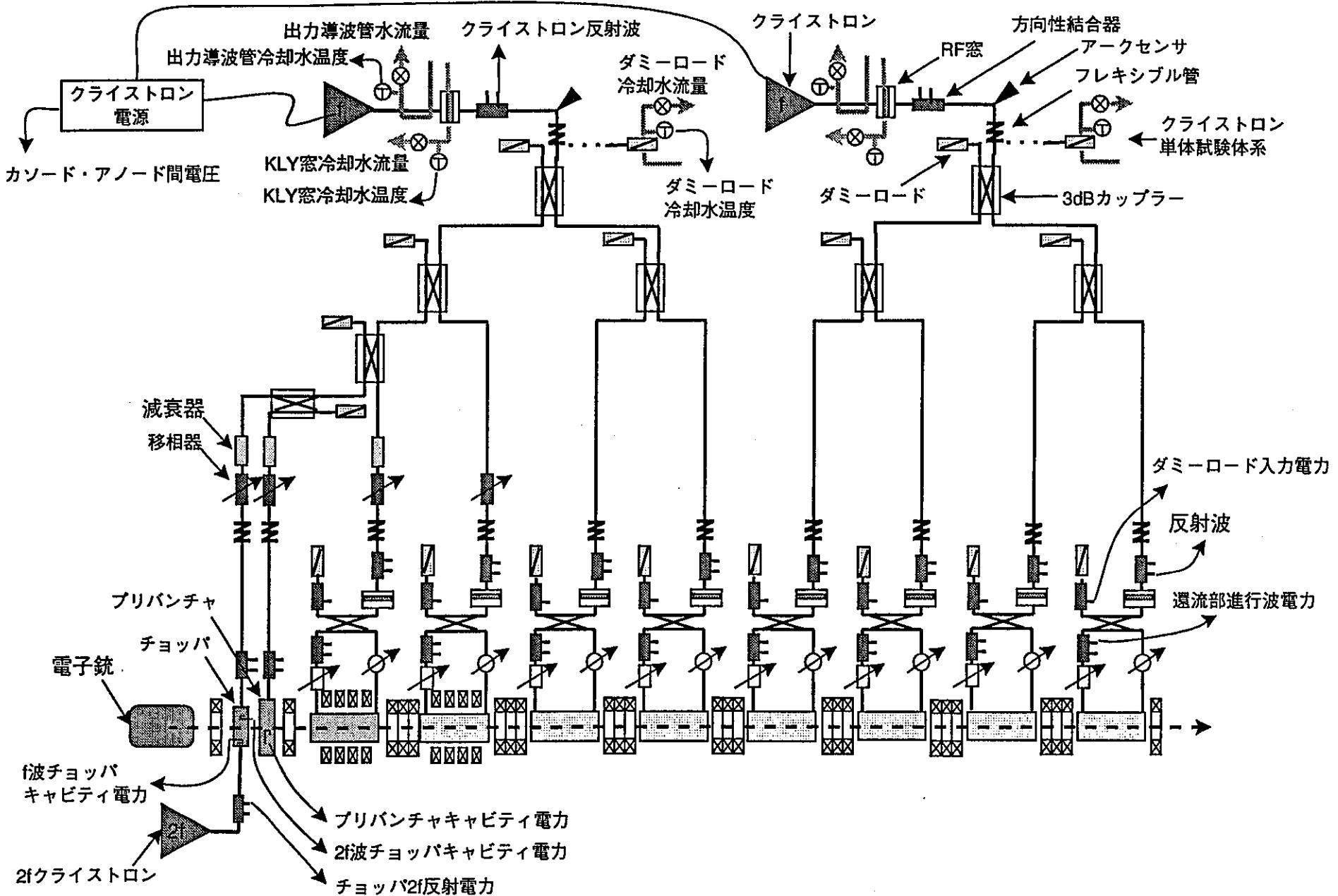


図3.3 RFインターロック項目配置図

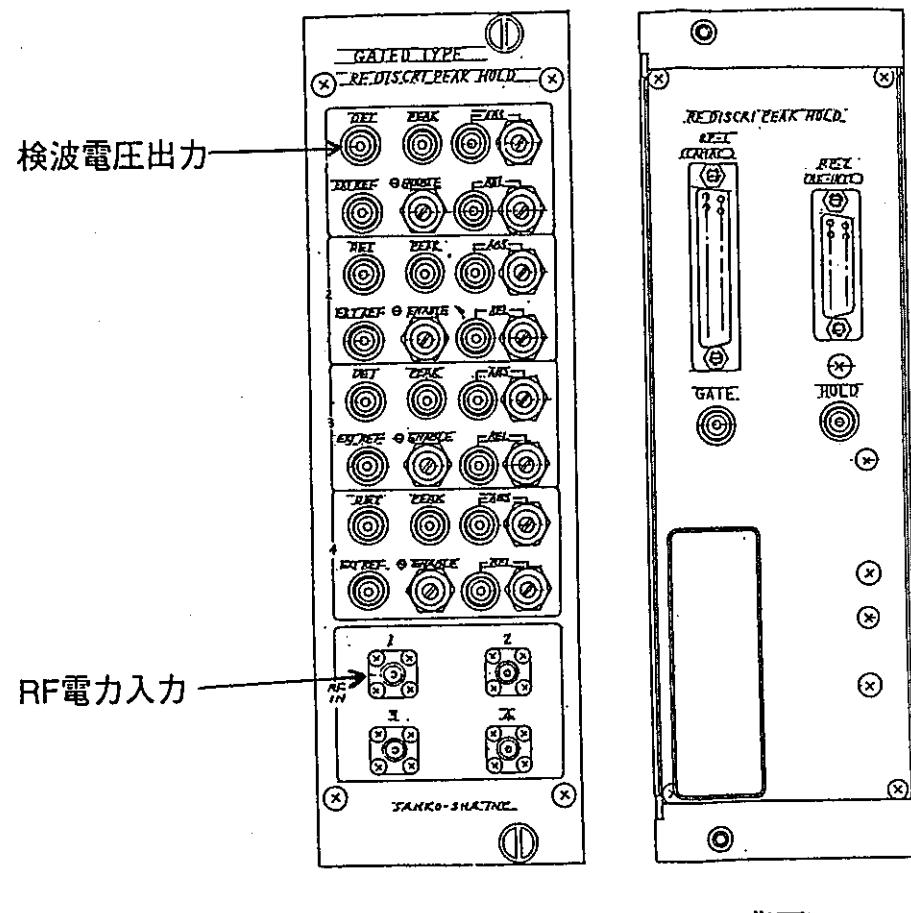


図3.4 RFディスクリの外観図

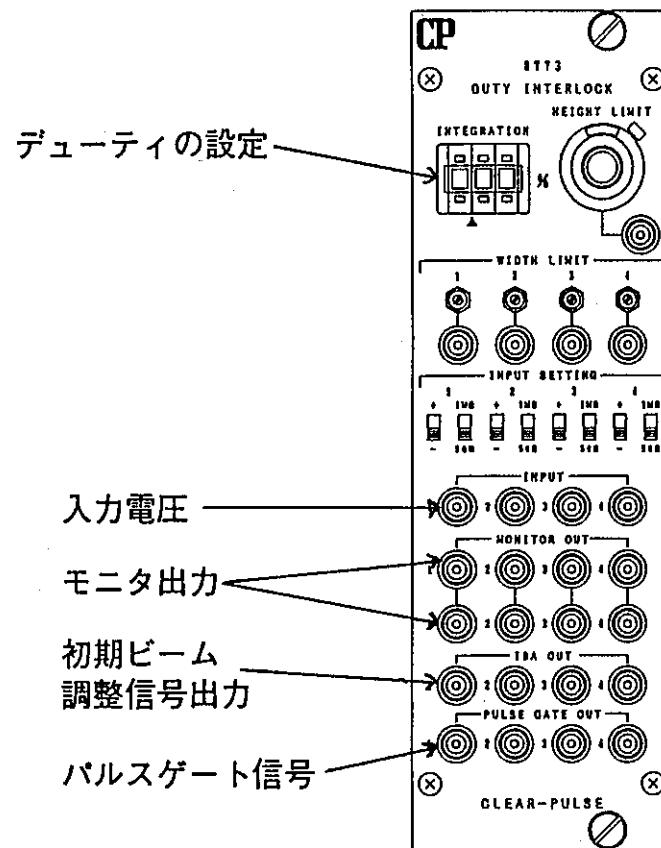
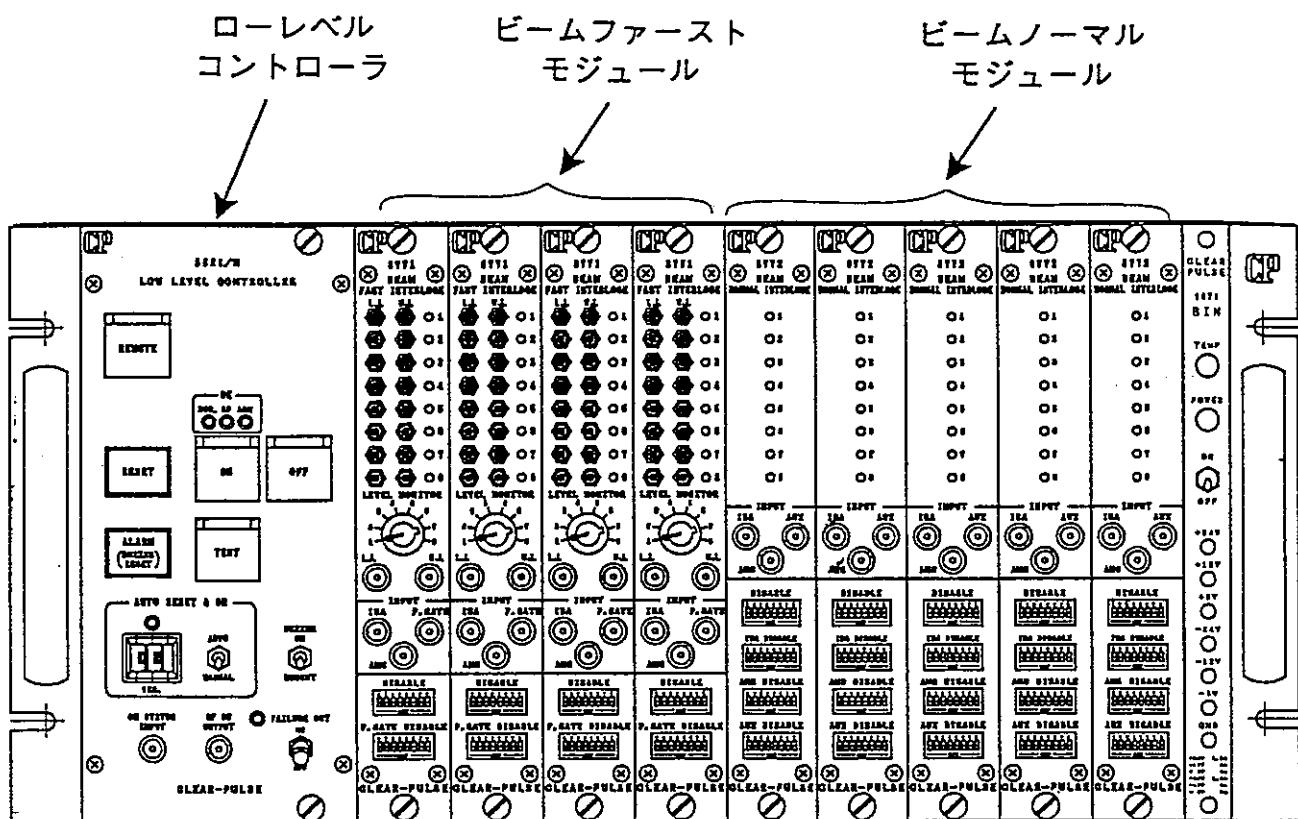


図3.5 デューティモジュールの外観図

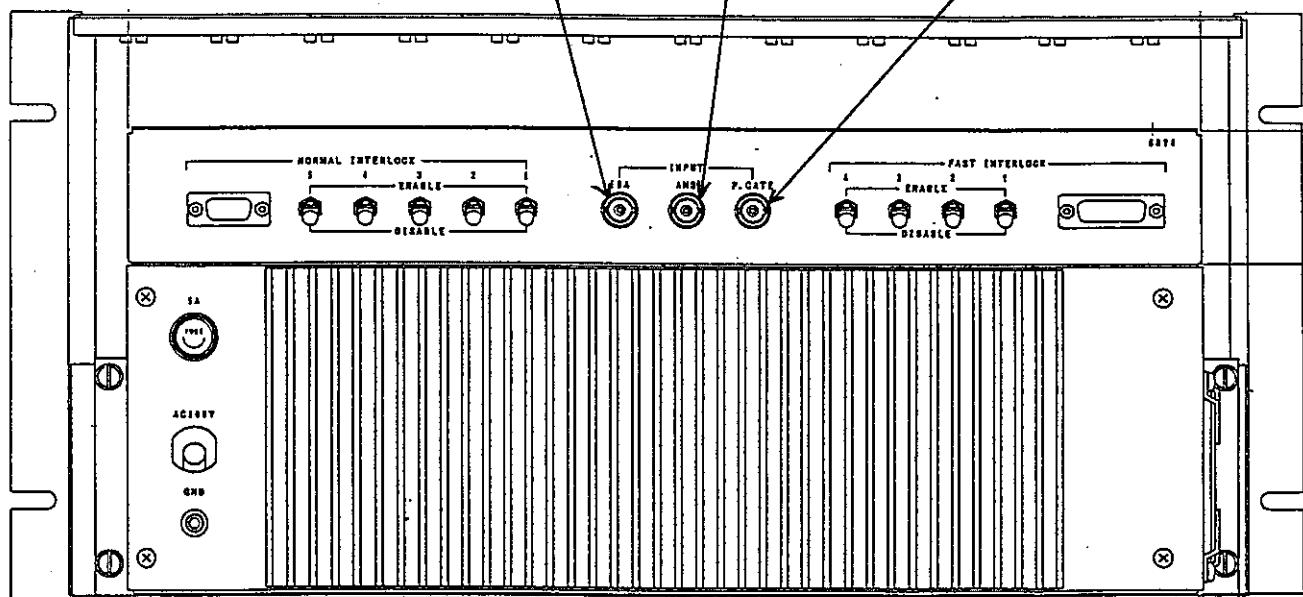


ビームインターロック専用NIM電源(前面)

初期ビーム調整信号

パルスゲート信号

エージングモード信号



ビームインターロック専用NIM電源(裏面)

図3.6 ビームインターロック専用NIM電源内のモジュール実装図

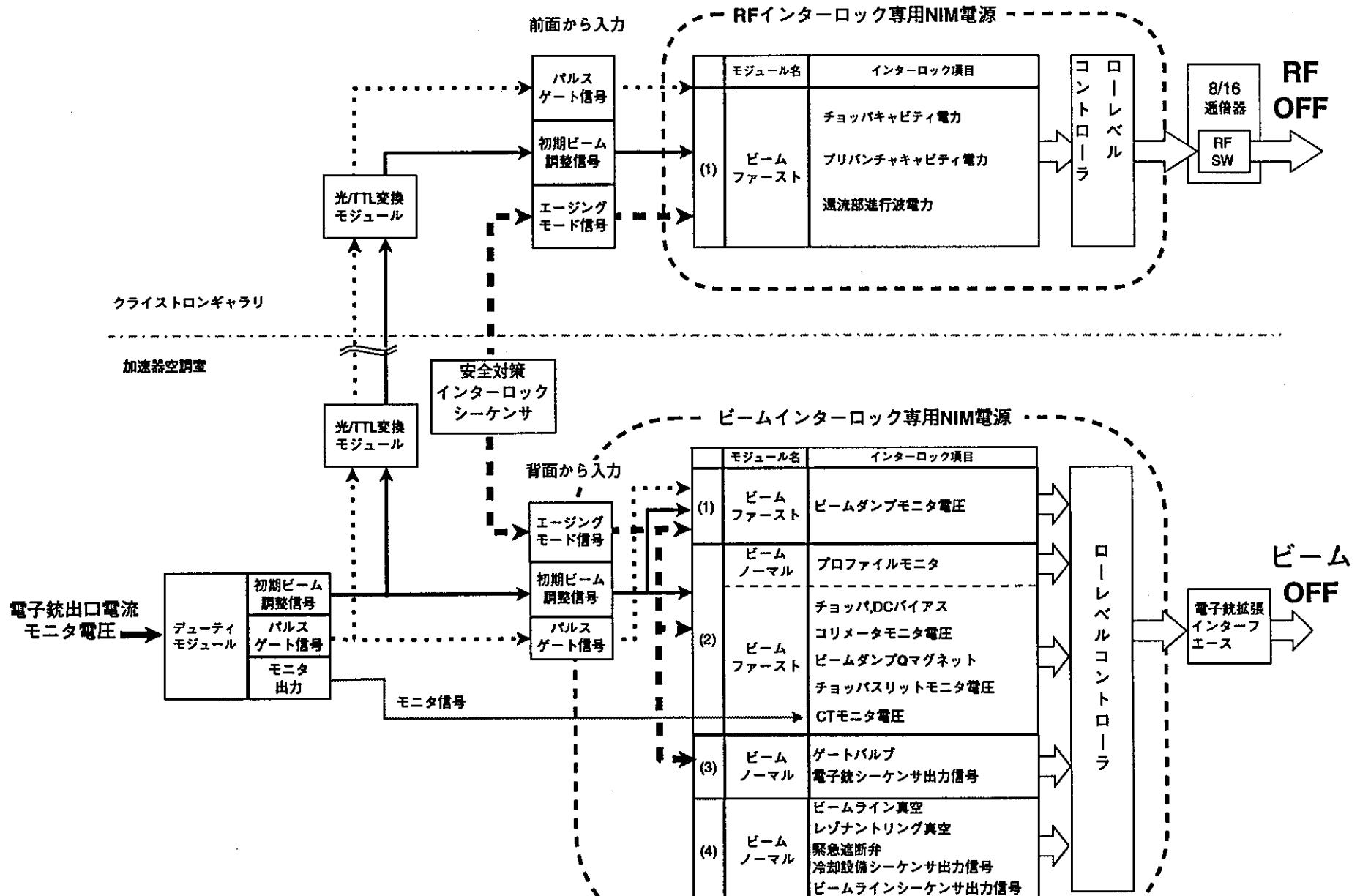
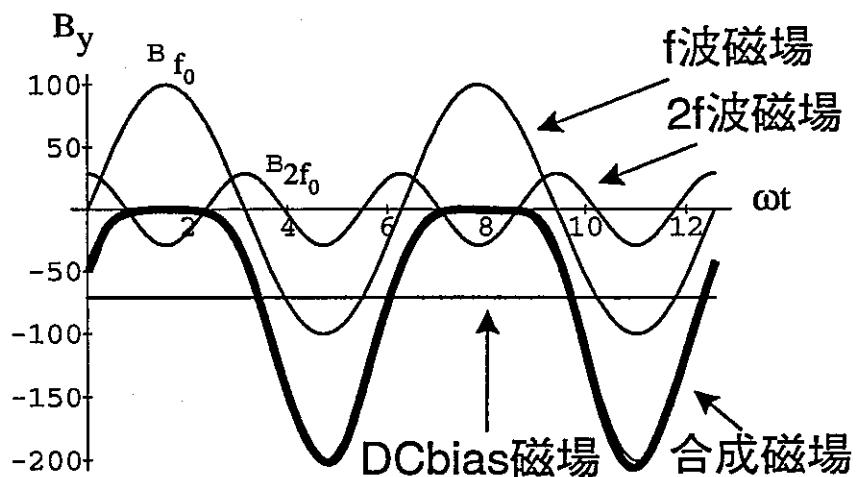
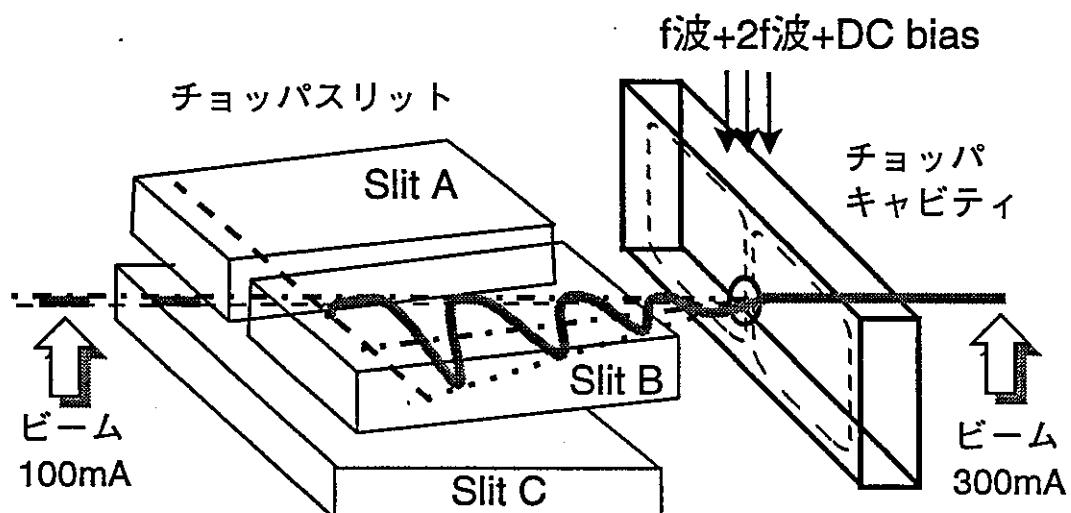


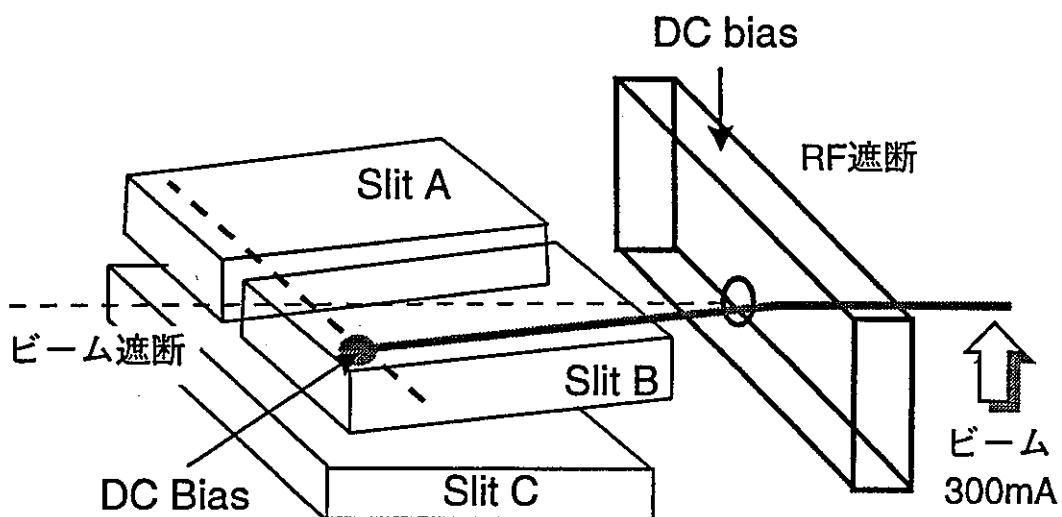
図3.7 ビームインターロックの信号系統図



(a) チョッパキャビティ内磁場分布



(b) RFによってビームがチョッパスリットで切り出される様子



(c) RFが遮断され、ビームがチョッパスリットで遮断される様子

図3.8 チョッパシステムの概略図

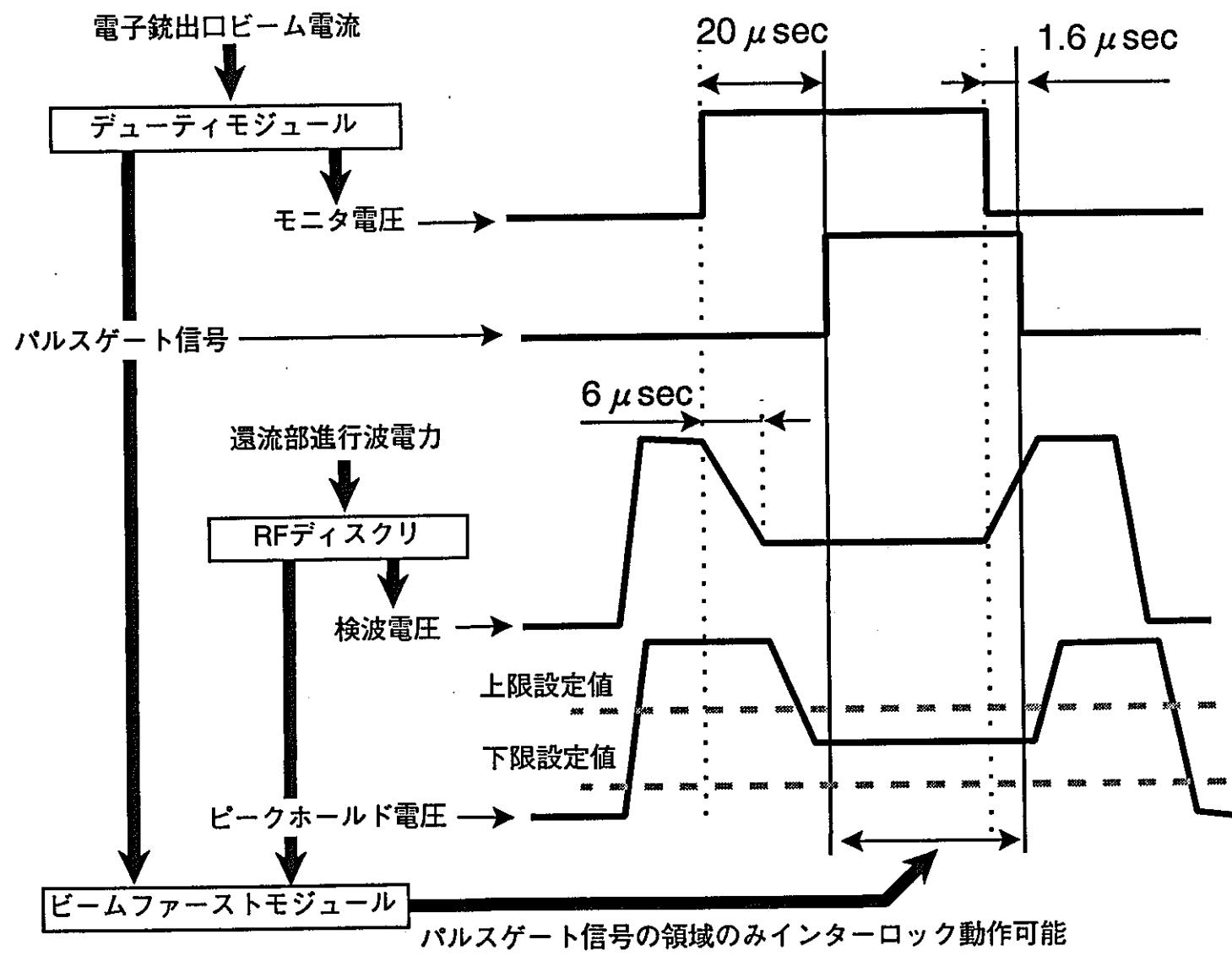


図3.9 検波波形、パルスゲート信号及びインターロック制限値の関係

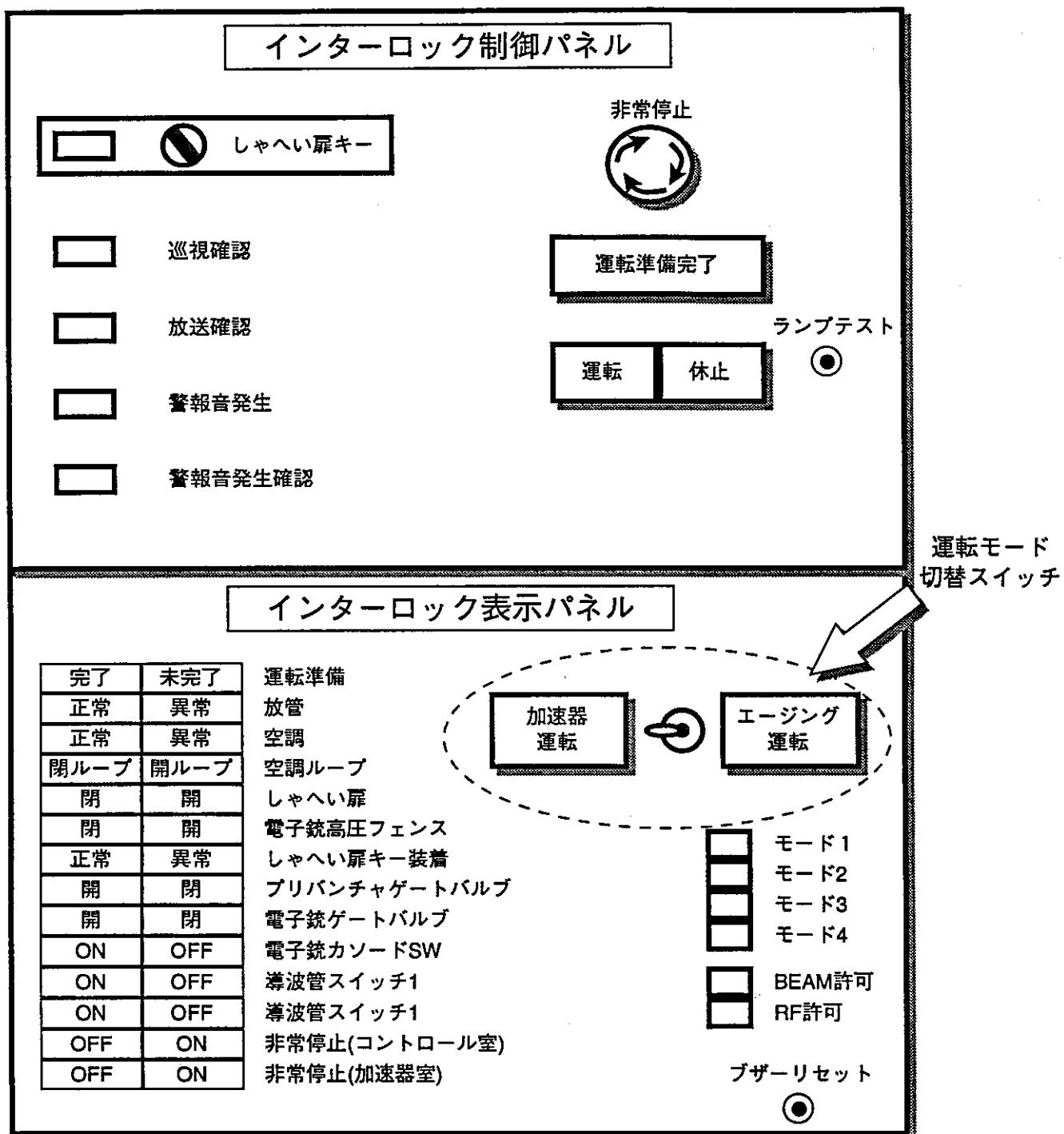
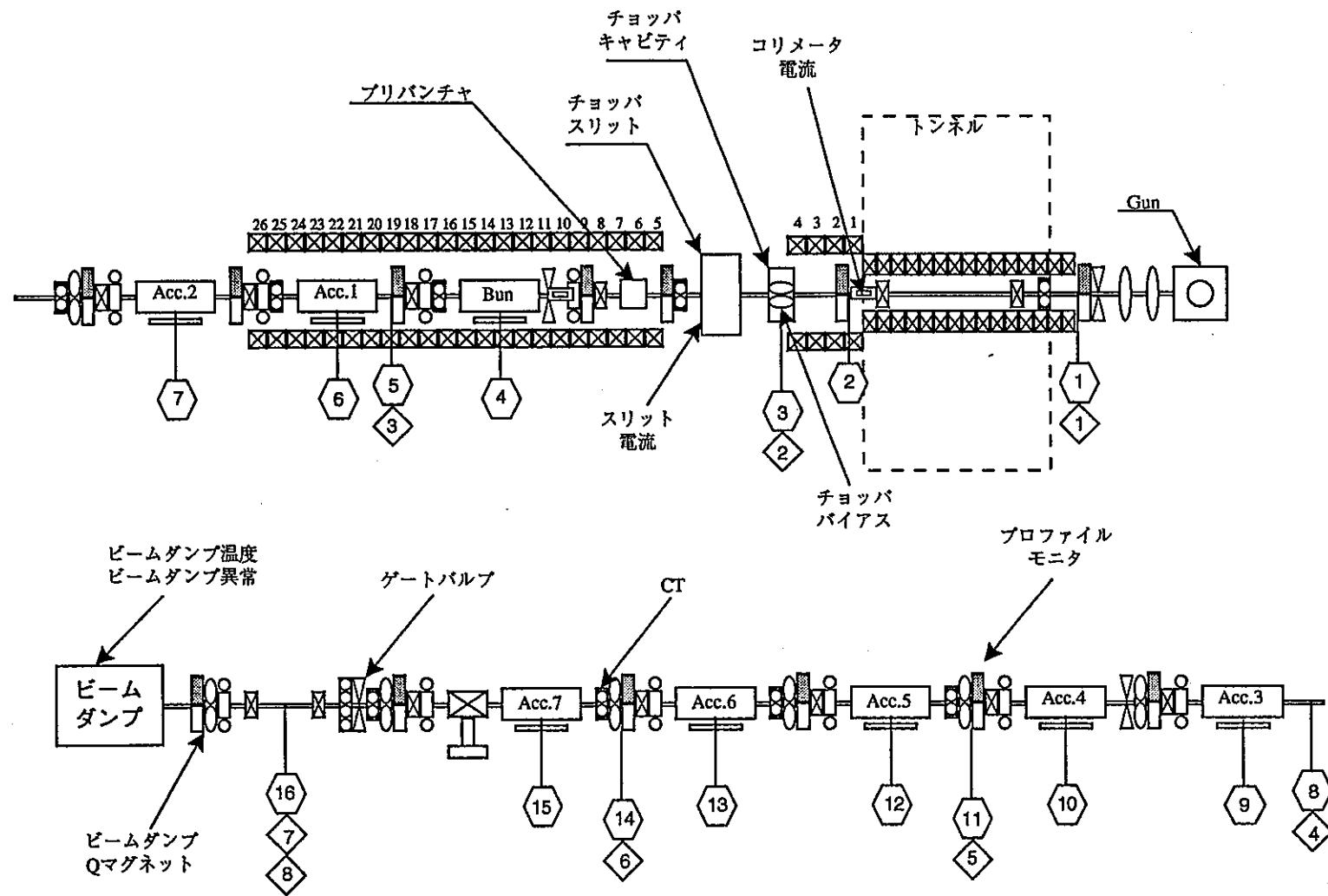


図3.10 安全対策用インターロック操作パネル



記号	名称
	ゲートバルブ
	バンチャ 加速管
	Q マグネット
	チョッパ ・バイアス ・マグネット
	プロファイ尔 ・モニタ
	イオングージ
	イオンポンプ
	コリメータ
	CT (No.2~No.10)

図3.11 ビームラインの構成図

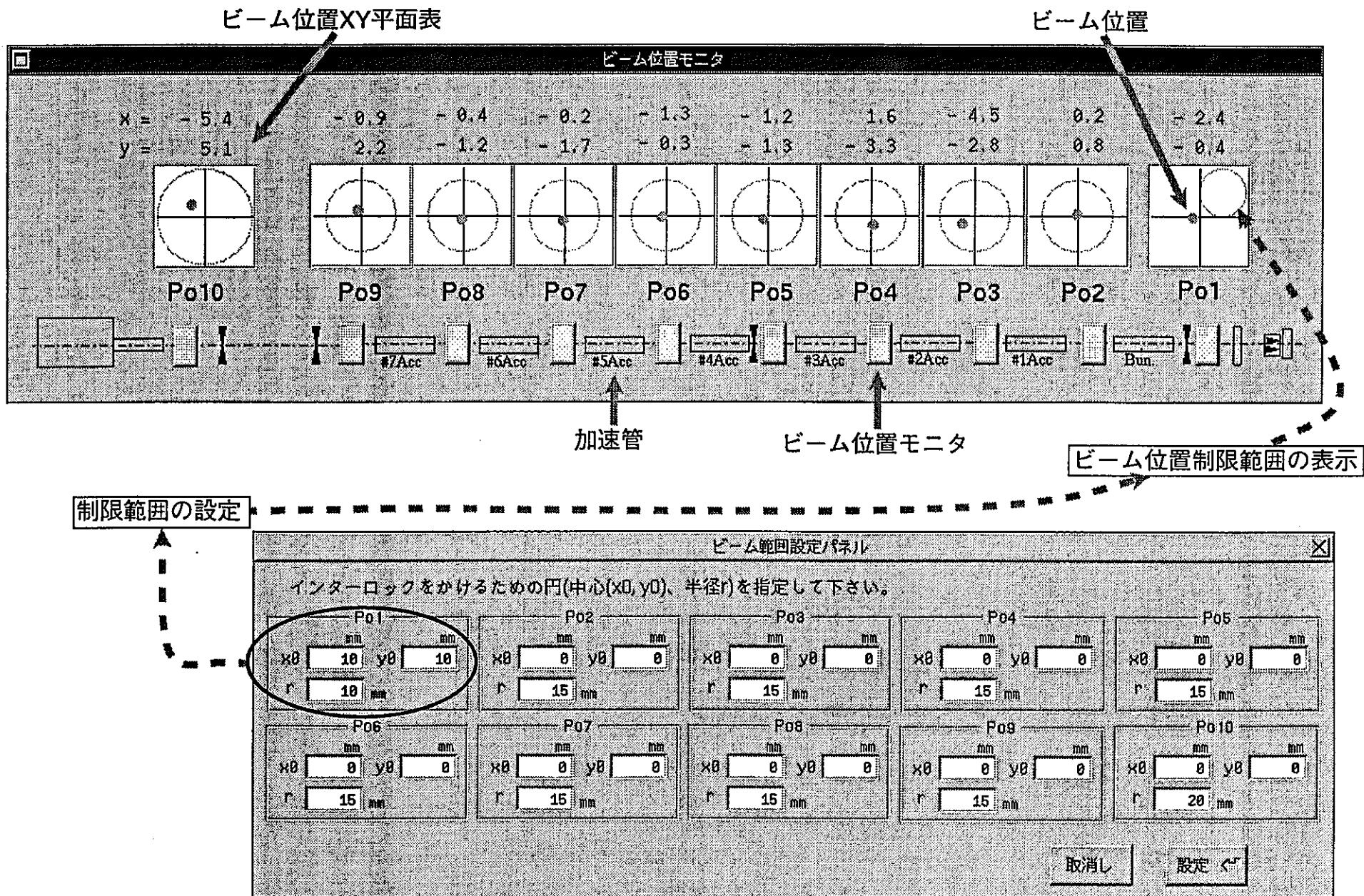


図3.12 ビーム位置モニタ表示画面

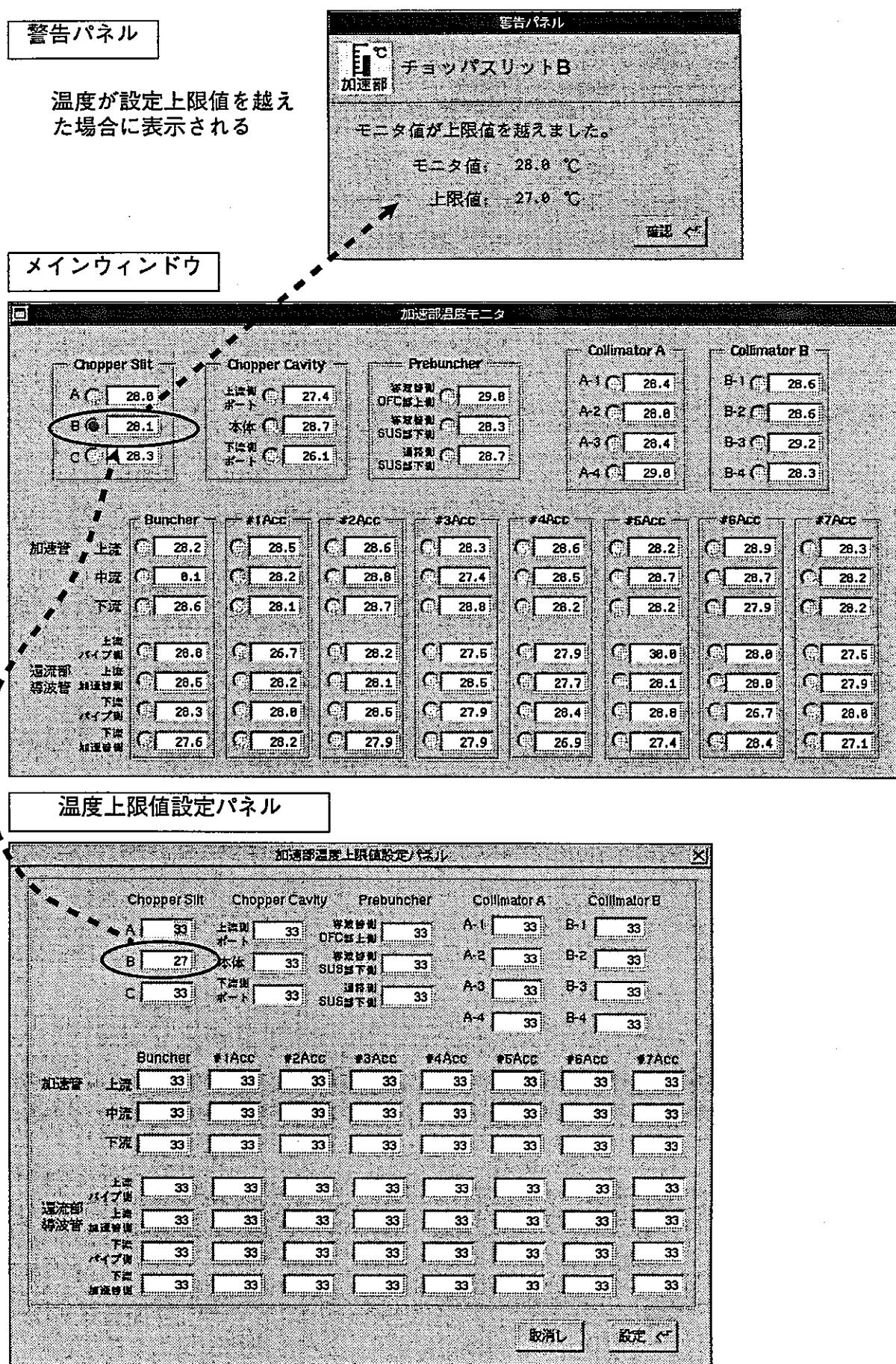


図3.13 加速管等温度表示画面

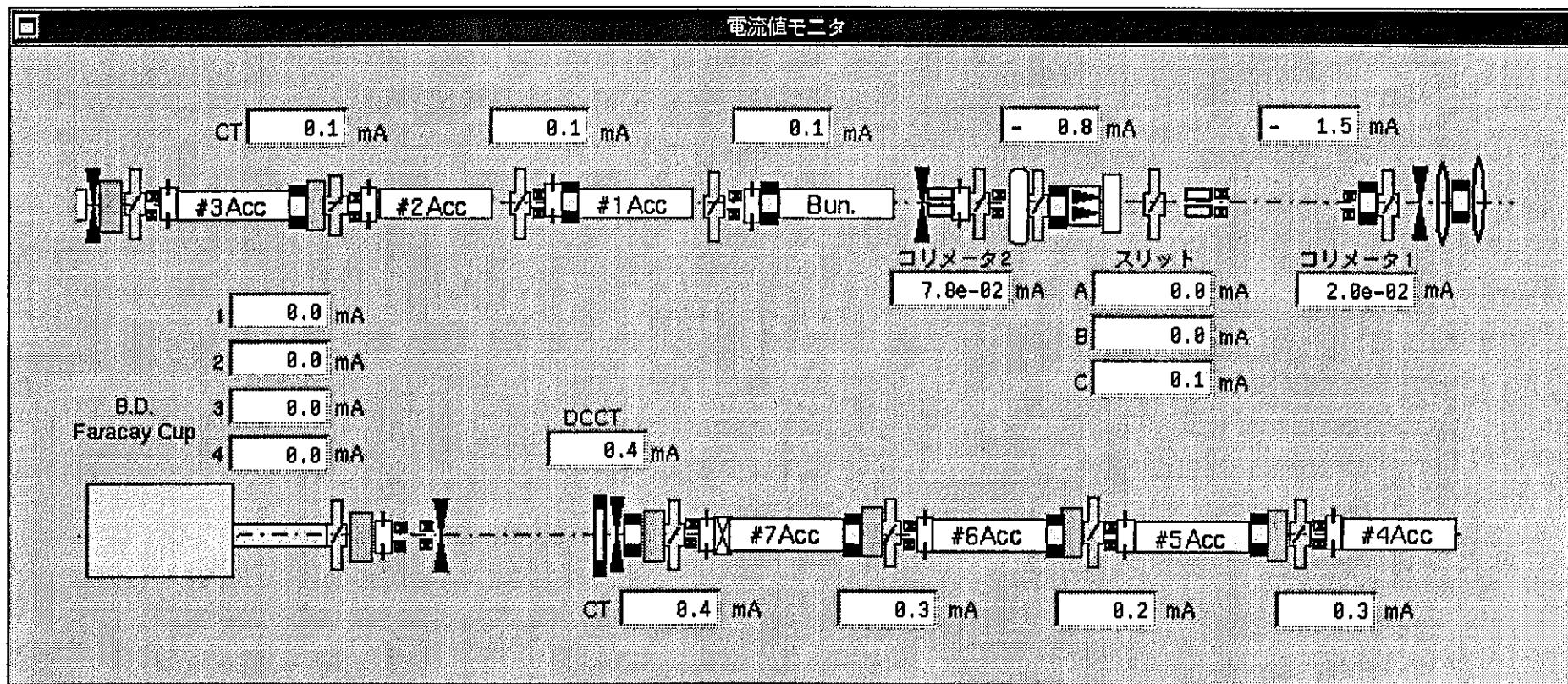


図3.14 ビーム電流モニタ表示画面

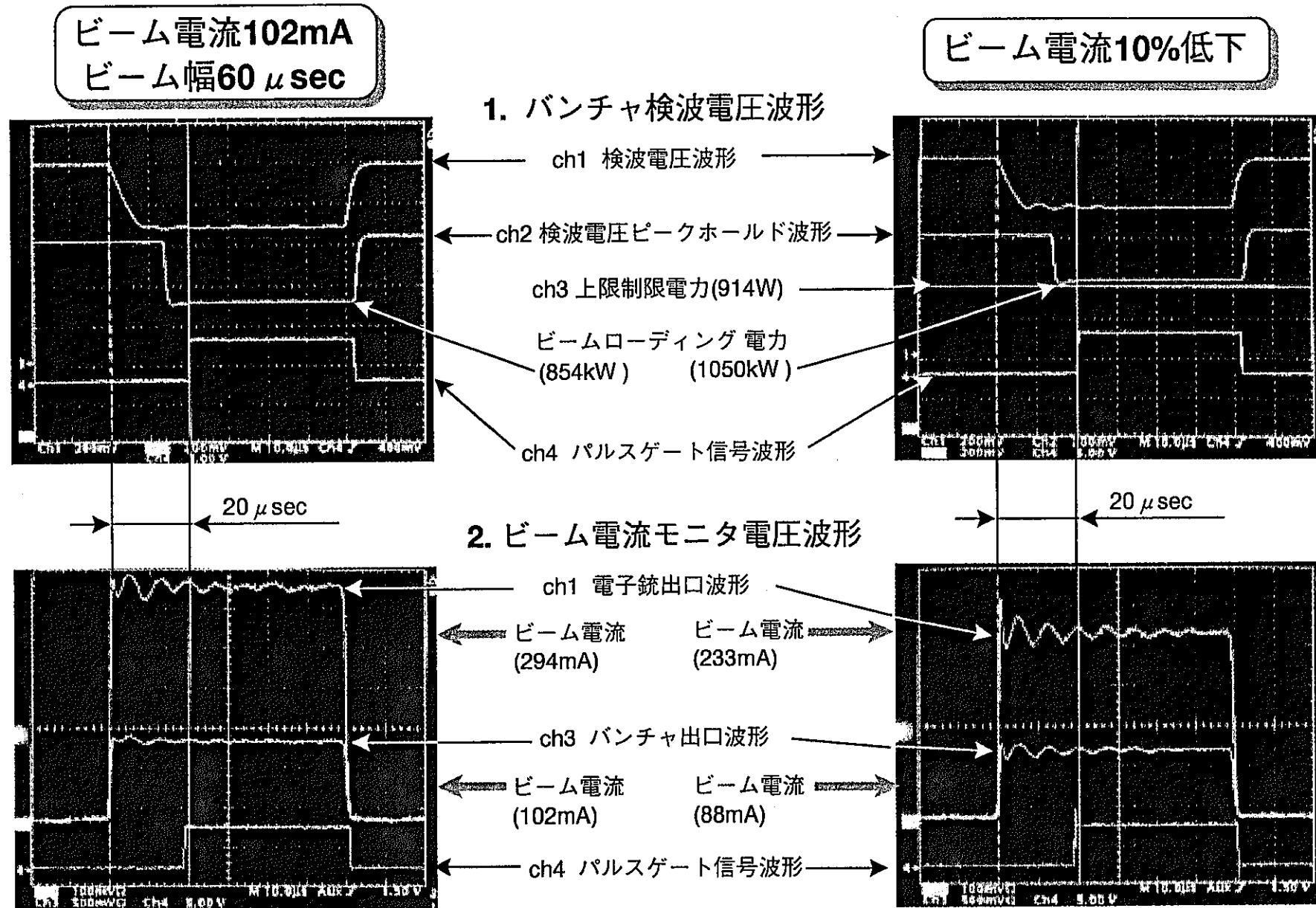


図4.1 遮断前の還流部進行波電力の検波電圧及びビーム波形

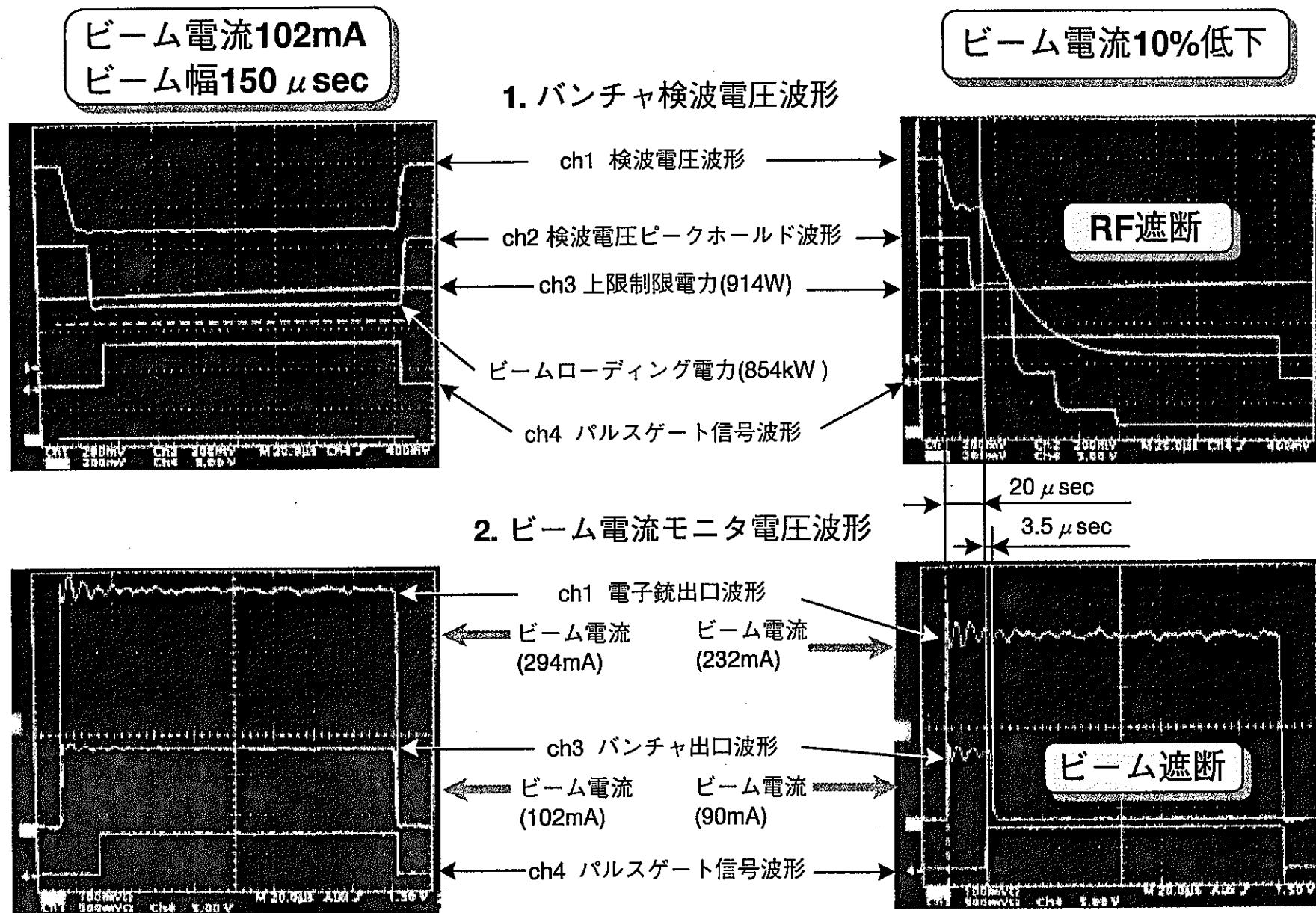


図4.2 遮断後の還流部進行波電力の検波電圧及びビーム波形

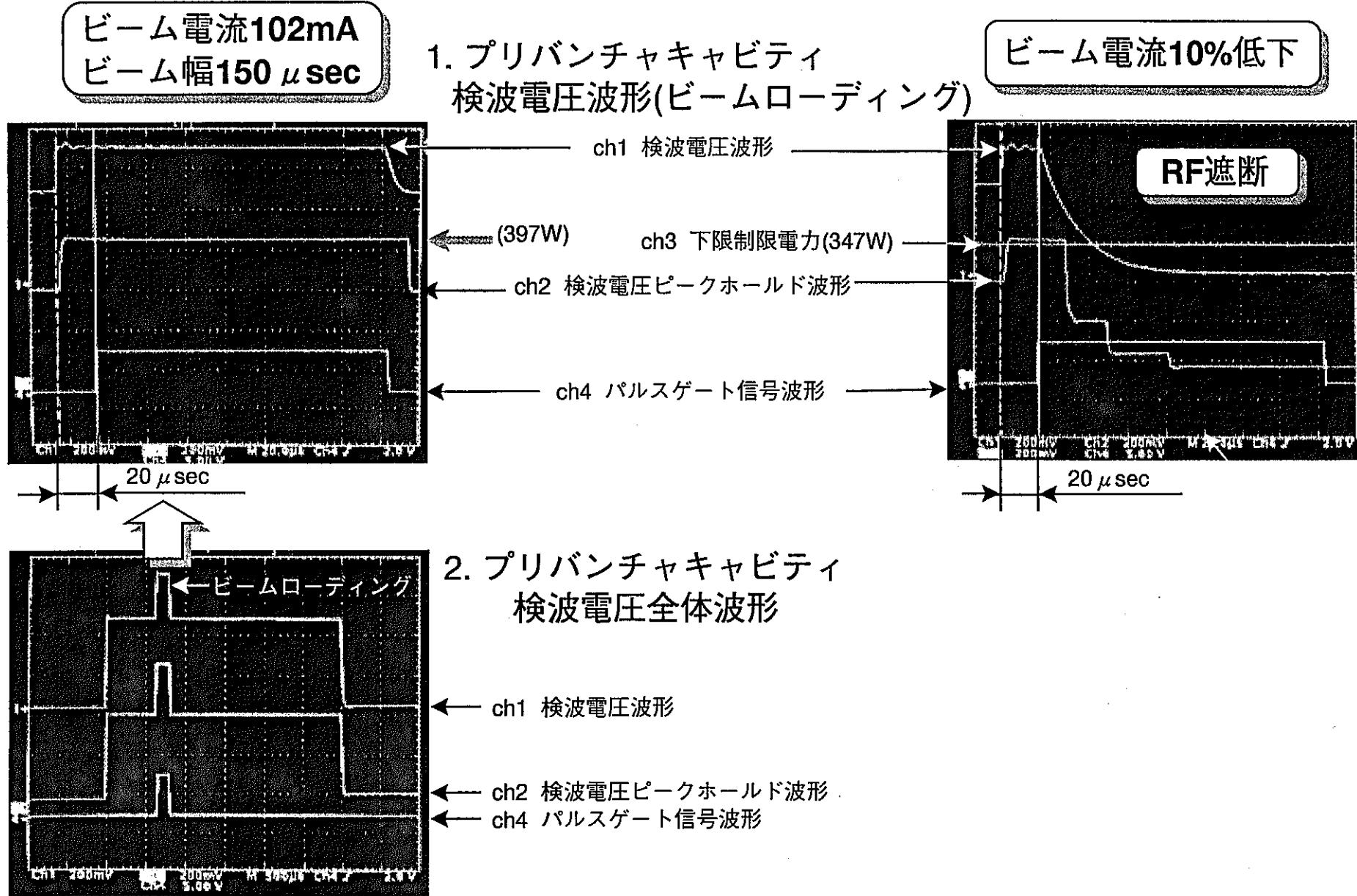


図4.3 遮断前後のプリバンチャキャビティの検波電圧波形

表4.1 RFインターロックの設定設定条件

	ch	インターロック項目	インターロック 設定条件	
フ ア ー ス ト 1	1	KlystronNo.1、窓部放電発光	発光でTTL、H	
	2	KlystronNo.2、窓部放電発光	発光でTTL、H	
	3	ビームインターロック	TTL、H	
	4	安全対策インターロック	TTL、H	
	5	予備		
	6	予備		
	7	予備		
	8	予備		
フ ア ー ス ト 2	1	KlystronNo.1、反射電力大	VSWR 1.2	1.598V
	2	KlystronNo.2、反射電力大	VSWR 1.2	0.8V
	3	チョッパ入力電力	1300W	0.549V
	4	パンチャ入力電力		
	5	チョッパ反射電力	VSWR 3	1.288V
	6	ブリバンチャ入力電力	680W	1.106V
	7	ブリバンチャ空洞電力		
	8	ブリバンチャ反射電力	VSWR 3	0.941V
フ ア ー ス ト 3	1	パンチャ反射電力	VSWR 3	1.847V
	2	第1加速管反射電力	VSWR 3	2.011V
	3	第2加速管反射電力	VSWR 3	1.958V
	4	第3加速管反射電力	VSWR 3	1.920V
	5	第4加速管反射電力	VSWR 3	0.88V
	6	第5加速管反射電力	VSWR 3	0.922V
	7	第6加速管反射電力	VSWR 3	0.888V
	8	第7加速管反射電力	VSWR 3	0.88V
フ ア ー ス ト 4	1	パンチャダミーロード入力電力	100kW	0.872V
	2	第1加速管ダミーロード入力電力	100kW	0.78V
	3	第2加速管ダミーロード入力電力	100kW	0.612V
	4	第3加速管ダミーロード入力電力	100kW	0.739V
	5	第4加速管ダミーロード入力電力	100kW	0.318V
	6	第5加速管ダミーロード入力電力	100kW	0.322V
	7	第6加速管ダミーロード入力電力	100kW	0.32V
	8	第7加速管ダミーロード入力電力	100kW	0.3V
フ ア ー ス ト 5	1	2fチョッパ入力電力	310W	1.712V
	2	2fチョッパ反射電力	VSWR 1.2	0.166V
	3	2fチョッパキャビティ電力	100W	0.65V
	4	予備		
	5	予備		
	6	予備		
	7	予備		
	8	予備		
ノ ー マ ル 1	1	KlystronNo.1カソード電圧	4V	LL=40kV
	2	KlystronNo.1ダミーロード冷却水出口温度	60°C	
	3	KlystronNo.1出力窓冷却水出口温度	33°C	
	4	KlystronNo.1出力導波管冷却水出口温度	50°C	
	5	KlystronNo.2カソード電圧	4V	LL=40kV
	6	KlystronNo.2ダミーロード冷却水出口温度	60°C	
	7	KlystronNo.2出力窓冷却水出口温度	33°C	
	8	KlystronNo.2出力導波管冷却水出口温度	50°C	
ノ ー マ ル 2	1	KlystronNo.1窓冷却水流量不足	LL=5(l/min)	
	2	KlystronNo.2窓冷却水流量不足	LL=5(l/min)	
	3	KlystronNo.1出力導波管水流量不足	LL=5(l/min)	
	4	KlystronNo.2出力導波管水流量不足	LL=5(l/min)	
	5	KlystronNo.1ダミーロード冷却水流量不足	LL=100(l/min)	
	6	KlystronNo.2ダミーロード冷却水流量不足	LL=100(l/min)	
	7	予備		
	8	予備		

表4.2 ビームインターロックの設定条件(ビームファースト)

	ch	インターロック項目	インターロック設定値	
ビームファースト1	1	ダンプQマグネット電源1 出力電流のモニタ電圧	3.14A以上 0.3A以下	5.1 V 0.48 V
	2	ダンプQマグネット電源2 出力電流のモニタ電圧	3.14A以上 0.3A以下	5.1 V 0.48 V
	3	チヨッパのDCバイアス電源 出力電流のモニタ電圧	3.5A以上 1.5A以下	7.0 V 3.0 V
	4	予備		
	5	ビームダンプモニタ電圧異常1	2V以上	2.0 V
	6	ビームダンプモニタ電圧異常2	2V以上	2.0 V
	7	ビームダンプモニタ電圧異常3	2V以上	2.0 V
	8	ビームダンプモニタ電圧異常4	2V以上	2.0 V
ビームファースト2	1	コリメータ1電流のピーク電圧	2mA以上	2.0 V
	2	コリメータ2電流のピーク電圧	2mA以上	2.0 V
	3	チヨッパ右電流のモニタピーク電圧	100mA以上	5 V
	4	チヨッパ左電流のモニタピーク電圧	126mA以上	6.32 V
	5	チヨッパ下電流のモニタピーク電圧	66mA以上	3.32 V
	6	予備		
	7	予備		
	8	予備		
ビームファースト3	1	予備		
	2	予備		
	3	予備		
	4	予備		
	5	予備		
	6	予備		
	7	予備		
	8	予備		

	ch	インターロック項目	インターロック設定値	
ビームファースト4	1	予備		
	2	予備		
	3	予備		
	4	予備		
	5	予備		
	6	予備		
	7	予備		
	8	予備		
ビームファースト5	1	チヨッパキャビティ電力	450W以上 350W以下	0.32V 0.28V
	2	ブリバンチャキャビティ電力	250W以上 150W以下	0.49V 0.38V
	3	2fチヨッパキャビティ電力	55W以上 45W以下	0.45V 0.44V
	4	予備		
	5	予備		
	6	予備		
	7	予備		
	8	予備		
ビームファースト6	1	パンチャ進行波還流電力	1200W以上 1080W以下	0.787V 0.719V
	2	第1加速管進行波還流電力	2300W以上 2100W以下	1.083V 0.989V
	3	第2加速管進行波還流電力	2080W以上 1900W以下	0.999V 0.913V
	4	第3加速管進行波還流電力	1960W以上 1800W以下	1.087V 0.993V
	5	第4加速管進行波還流電力	350W以上 320W以下	0.416V 0.380V
	6	第5加速管進行波還流電力	410W以上 370W以下	0.447V 0.409V
	7	第6加速管進行波還流電力	330W以上 300W以下	0.399V 0.365V
	8	第7加速管進行波還流電力	310W以上 280W以下	0.408V 0.372V

表4.3 ビームインターロックの設定条件(ビームノーマル)

	ch	インターロック項目	インターロック設定条件
ビームノーマル1	1	ビームライン真空系(トンネル部上流)	・現在の設定10~6torr以上 ・MHIシーケンサ異常同時点灯(赤点灯)
	2	ビームライン真空系(チョッパスリット)	
	3	ビームライン真空系(BUN-ACC#1)	
	4	ビームライン真空系(ACC#2-ACC#3)	
	5	ビームライン真空系(ACC#4-ACC#5)	
	6	ビームライン真空系(ACC#6-ACC#7)	
	7	ビームライン真空系(ビームダンプ上流側)	
	8	ビームライン真空系(ビームダンプ下流側)	
ビームノーマル2	1	R.R.真空系(トンネル部上流)	・現在の設定10~6torr以上 ・MHIシーケンサ異常同時点灯(赤点灯)
	2	R.R.真空系トンネル部下流)	
	3	R.R.真空系(チョッパスリット)	
	4	R.R.真空系(BUNレゾナントリング)	
	5	R.R.真空系(BUN-ACC#1)	
	6	R.R.真空系(ACC#1レゾナントリング)	
	7	R.R.真空系(ACC#2レゾナントリング)	
	8	R.R.真空系(ACC#2-ACC#3)	
ビームノーマル3	1	R.R.真空系(ACC#3レゾナントリング)	・現在の設定10~6torr以上 ・MHIシーケンサ異常同時点灯(赤点灯)
	2	R.R.真空系(ACC#4レゾナントリング)	
	3	R.R.真空系(ACC#4-ACC#5)	
	4	R.R.真空系(ACC#5レゾナントリング)	
	5	R.R.真空系(ACC#6レゾナントリング)	
	6	R.R.真空系(ACC#6-ACC#7)	
	7	R.R.真空系(ACC#7レゾナントリング)	
	8	R.R.真空系(ビームダンプ)	
ビームノーマル4	1	ACCゲートバルブ3	バルブ閉、接点開
	2	ACCゲートバルブ4	バルブ閉、接点開
	3	緊急遮断弁作動	遮断弁閉、接点開
	4	冷却設備シーケンサ出力信号	異常、接点開
	5	ビームラインシーケンサ出力信号	異常、接点開
	6	電子銃シーケンサ出力信号	異常、接点開
	7	プロファイル	下降、接点開
	8	予備	
ビームノーマル5	1	予備	
	2	予備	
	3	予備	
	4	予備	
	5	予備	
	6	予備	
	7	予備	
	8	予備	

## 付録A ビーム条件の設定根拠

## 1パルスビームの照射による金属材料の温度変化計算

ビーム条件

JNCライナックの基本仕様をビーム条件とする。しかし、ビーム径については経験値を用い、パルス幅は $10\mu\text{s}$ から1msまでとする。

## ビーム条件

エネルギー	10 Mev
ピーク電流	100mA
ビーム径	$\phi 5\text{ mm}$
パルス幅	$10\mu\text{s} \sim 1\text{ms}$

照射金属

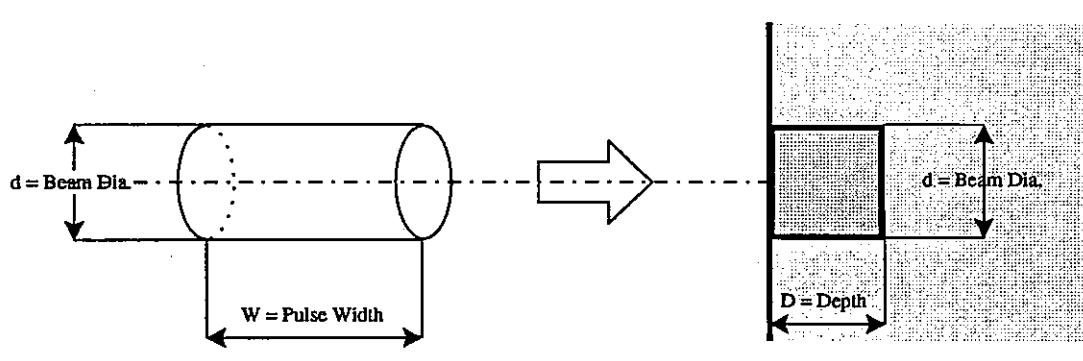
JNCライナックの主要な金属材料であるOFCとSUS304を照射金属とする。各物性値は300Kでの値を使用する。

## 照射金属および各物性値

金属	OFC	SUS304
密度 [ kg/m <sup>3</sup> ]	8880	7920
比熱 [ J/(kg · K) ]	386	499
熱伝導率 [ W/(m · K) ]	398	16
融点 [ °C ]	約1000	約1400

照射モデル

電子ビームは、下図に示すような円柱状で、垂直に金属に照射するとし、ビーム直径( $d$ )とビームもぐり込み量( $D$ )による体積部分が、ビーム照射により発熱部分と仮定する。ビーム直径( $d$ )は $\phi 5\text{ mm}$ とし、また、ビームもぐり込み量( $D$ )は、上記ビーム条件を用いたEGS4の計算結果から、エネルギー損失が約80%となる深さ $D=5\text{mm}$ とした。なお、熱の分布等は今回考慮しないこととする。



照射モデル

計算式

照射モデルにおいて、1パルスビームにより金属へ流入する熱量( $Q_1$ )は、

$$Q_1 = E \times I \times W$$

E : エネルギ  
I : ピーク電流

であり、 $Q_1$ による金属発熱部分の温度変化( $\Delta T$ )は、

$$Q_1 = c \times m \times \Delta T \\ = c \times \rho \times \pi \times (d/2)^2 \times D \times \Delta T$$

より、

m : 質量  
c : 比熱  
 $\rho$  : 密度

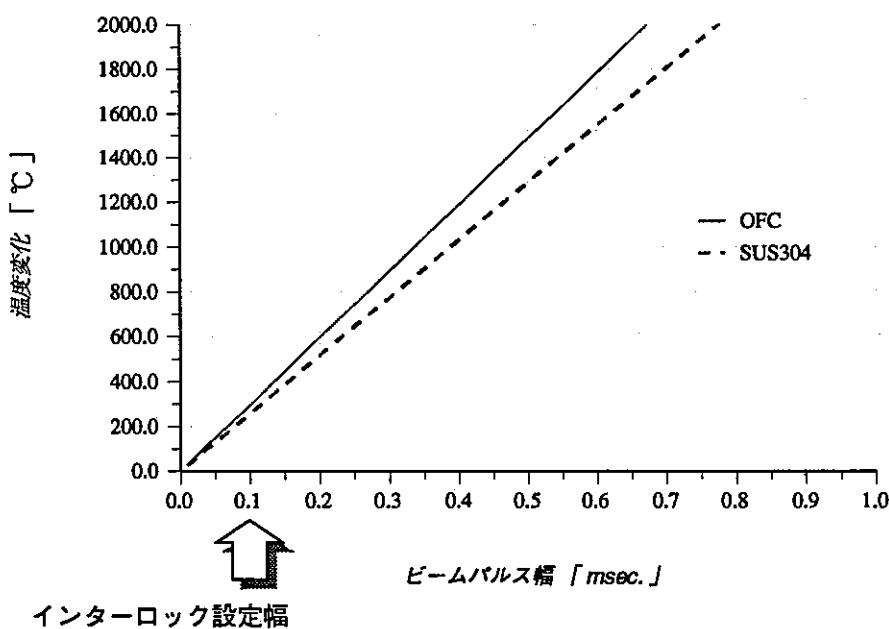
$$\Delta T = \frac{E \times I \times W}{c \times \rho \times \pi \times (d/2)^2 \times D}$$

となる。

計算結果

下図に示す様に、各金属の初期温度が30°Cの場合には、

- ・OFCは、パルス幅約  $350\mu s$  で融点に達する。
- ・SUS304は、パルス幅約  $550\mu s$  で融点に達する。



1パルスビームの照射による各金属材料の温度変化