

大電流電子線形加速器の開発

— 設計概要・入射部試験 —

1997年12月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

大電流電子線形加速器の開発 — 設計概要・入射部試験 —

江本 隆*、王 元林**、遠山 伸一*、
野村 昌弘*、武井 早憲*、平野 耕一郎*、
山崎 良雄*、大村 明子*、谷本 育律***、
谷 賢*

要旨

動燃事業団では、核種分離・消滅処理研究の一環として、大電流電子加速器を用いて高レベル放射性廃棄物中に含まれる長寿命核分裂生成物を消滅する可能性を研究している。電子加速器を用いて発生させたガンマ線による消滅処理は、廃棄物の二次的な放射化が少ないこと、広範な加速器技術を利用できることという利点がある。以上のこととを念頭に置いて、将来の消滅処理システムで必要となる加速器の大電流化技術を開発することを目的として、当面の目標をエネルギー10MeV、最大電流100mA、パルス幅4ms、繰り返し50Hzに設定し大電流電子線形加速器の開発を推進している。

大電流電子線形加速器の前段部分となる、入射部の試験では、進行波加速管にビーム電流100mAのビーム負荷を加えることができた。またパルス幅が3msという長い電子ビームを安定に加速することに成功した。平成9年3月に、残りの設備を設置し、各設備の調整を経て平成9年度末から全加速器の運転試験を実施する予定である。

* 大洗工学センター 基盤技術開発部 先進技術開発室

** 大洗工学センター 基盤技術開発部 先進技術開発室客員研究員
(中国 南京大学物理系 副教授)

*** 現 高エネルギー加速器研究機構

Dec.1997

Progress, status, and injector commissioning of
the high power cw electron linac at PNC

T.Emoto*, Y.L.Wang**, S.Toyama*,
M.Nomura*, H.Takei*, K.Hirano*,
Y.Yamazaki*, A. Ohmura*, I. Tanimoto***,
S. Tani*

Abstract

Design and construction of a high power CW (Continuous Wave) electron linac for studying feasibility of nuclear waste transmutation was started in 1989 at PNC. The transmutation by photonuclear reaction using a electron accelerator has advantages of the small production for secondary radioactive waste and broad base of accelerator technology. The PNC accelerator (10MeV, 20mA average current, 20% duty) has been pre-commissioned. We have been very successful to produce 3 ms pulse width electron beam with 100 mA peak and energy about 2.9 MeV at present. The rest of the accelerating section was installed by March 1997. Studies are continued towards the designed goal of 100 mA beam with 4 msec pulse width and 50 Hz pulse repetition.

* Frontier Technology Section, Oarai Engineering Center

** Frontier Technology Section, Oarai Engineering Center

Guest Researcher from Nanjing University

*** present address: High Energy Accelerator Research Organization

目次

1.はじめに	1
2.背景と加速器概要	2
2.1 背景	2
2.2 開発スケジュール	4
2.3 加速器構成	4
3.入射部	7
3.1 電子銃	7
3.2 高周波チョッパー	8
3.3 バンチャ―	10
4.進行波還流型加速管	14
5.ビームダンプ	18
6.高周波源	19
6.1 クライストロン	20
6.2 高周波電源	21
7.計測・制御系	23
7.1 ビーム輸送・計測系	23
7.1.1 スクリーンモニタ	24
7.1.2 位置モニタ	25
7.1.3 電流モニタ	25
7.2 制御・処理系	26
7.2.1 ハードウェアの構成	26
7.2.2 ソフトウェアの構成	27
8.入射部試験	30
8.1 コンディショニング	31
8.2 ビーム加速試験	33
8.2.1 初期試験	33
8.2.2 チョッパーの調整	35
8.2.3 プリバンチャ―の調整	37
8.2.4 還流部加速管の調整	38
8.2.5 ビーム加速	39
8.2.6 エネルギー測定	40
終わりに	42
謝辞	43
参考文献	44

表目次

表2.1 加速器の基本仕様	6
表6.1 クライストロンの基本仕様	20
表6.2 クライストロン電源の基本仕様	21

図目次

図2.1 代表的電子線系加速器の性能比較	3
図2.2 開発スケジュール	4
図2.3 加速器本体と入射部の基本構成	5
図3.1 電子銃の概念構造	7
図3.2 電子銃の構造	8
図3.3 高周波チョッパーの概略図	9
図3.4 高周波空洞内の磁場	9
図3.5 高周波空洞内に励起される磁場分布	10
図3.6 ビームバンチと電場との位相関係	12
図3.7 離調前後のベクトル表示	13
図4.1 加速管断面図	14
図4.2 進行波還流型加速管	15
図4.3 加速管の励起モード	16
図4.4 加速管の冷却構造	17
図5.1 ビームダンプおよび真空系	18
図6.1 高周波回路	19
図6.2 高周波電源部	22
図7.1 モニタおよび磁石等の配置	23
図7.2 ハードウェア・ソフトウェアの構成	29
図8.1 入射部試験の経緯	30
図8.2 高周波コンディショニング	32
図8.3 ビームローディング(1)	34
図8.4 チョッパーの動作	36
図8.5 プリバンチャーにおけるビームローディングと離調	37
図8.6 ビームローディング(2)	39
図8.7 入射部試験結果の例	40
図8.8 エネルギー分析器	41
図8.9 エネルギー分布	41

1. はじめに

長期的・基礎的研究として推進されている核種分離・消滅処理研究(通称「オメガ計画」と言う。)の一環として、事業団では高レベル放射性廃棄物中に含まれるマイナアクチニド(ネプツニウム、アメリシウム、キュリウム等)および長寿命核分裂生成物(ストロンチウム、セシウム、テクネチウム、ヨウ素等)を分離し、これらを原子炉、加速器により消滅する可能性を探る研究を推進している。事業団では、マイナアクチニドの消滅には、高速炉を利用することが適切と考えて研究開発を推進している他、長寿命核分裂生成物については通常の原子炉で消滅することが困難であるため、電子加速器による消滅処理の可能性を検討している¹⁾。

加速器による消滅処理方法としては、加速器を単独で用いる方法、加速器と未臨界炉を組み合わせる方法などが提案されているが、電子加速器による消滅処理については、加速器から得られる高エネルギー電子線をガンマ線に変換して、発生したガンマ線による光核反応((γ, n) 反応)を利用して短寿命核種または安定核種に変換する方法が考えられている。

電子加速器による消滅処理の特徴は、光核反応を用いるので副次的な放射性核種の生成が少ないこと、加速器技術としての基盤が高エネルギー物理学での利用、産業用として他の粒子加速器(陽子、重イオン加速器)に比べて整備され充実されており、大電流化(平均電力の観点から)が容易である点にある。しかしながら、実際に原子炉から生成する大量の長寿命核分裂生成物を消滅させるには、従来にない大電流の電子加速器が必要になる。特に大電流に対しては、CW(連続)ビームの加速が必要である。本加速器開発としてはCWビームの生成を目指して開発を進めた。

本報告書では、このような目的のために開発された大電流CW加速器の設計概要および加速器前段部分を用いて行った入射部試験について報告する。

2. 背景と加速器概要

2.1 背景

大量の核分裂生成物を消滅する実用段階では、加速器としてアンペア級の大電流が要求されると考えられる。必要なエネルギーおよび電流を一挙に達成することは技術的にも予算的にも困難であるため、事業団では、当初は加速器の大電流化技術の開発に重点を置いて開発を進めており、エネルギー10MeV、最大/平均ビーム電流100mA/20mAを開発目標に据えた。このエネルギーを超えると、機器要素、空気の放射化等により加速器の試験、保守等が困難となること、10MeVまで大電流が加速できる技術が確立されればエネルギーを高めるることは比較的容易に達成できると考えられることによる。最大ビーム電流を100mAに設定したのは、現在の加速器要素・付帯設備の技術レベルから見て到達できる可能性が高く、アンペア級の加速器に移行できるかどうかを判断するのに適切な値であることによる。図2.1に世界の代表的電子線形加速器をビームエネルギーと電流について示す。本加速器はビームのエネルギーを高めるというこれまでの加速器開発の方向とは異なり、世界にも例のない大電流を目標とするものである。

大電流化にあたっての基本的な技術課題は従来の加速器とは異なり電子銃の構成、ビーム発散対策、ビームローディング(加速管に供給する高周波とビーム電流の負荷)による加速管温度の制御などが挙げられる。さらにこれらの課題は相互に関連しているので、これまでの高エネルギー化の加速器開発とは異なり、ビームの安定性、加速管の熱除去および制御が重要な開発課題となる。このように本加速器は新たな技術課題があるため、設計研究を行うとともに、加速管、クライストロン等の主な構成要素については試作を行い、その性能試験を高エネルギー物理学研究所と共同で実施した²⁾。これらの試験結果を踏まえて本加速器の設計を行った。

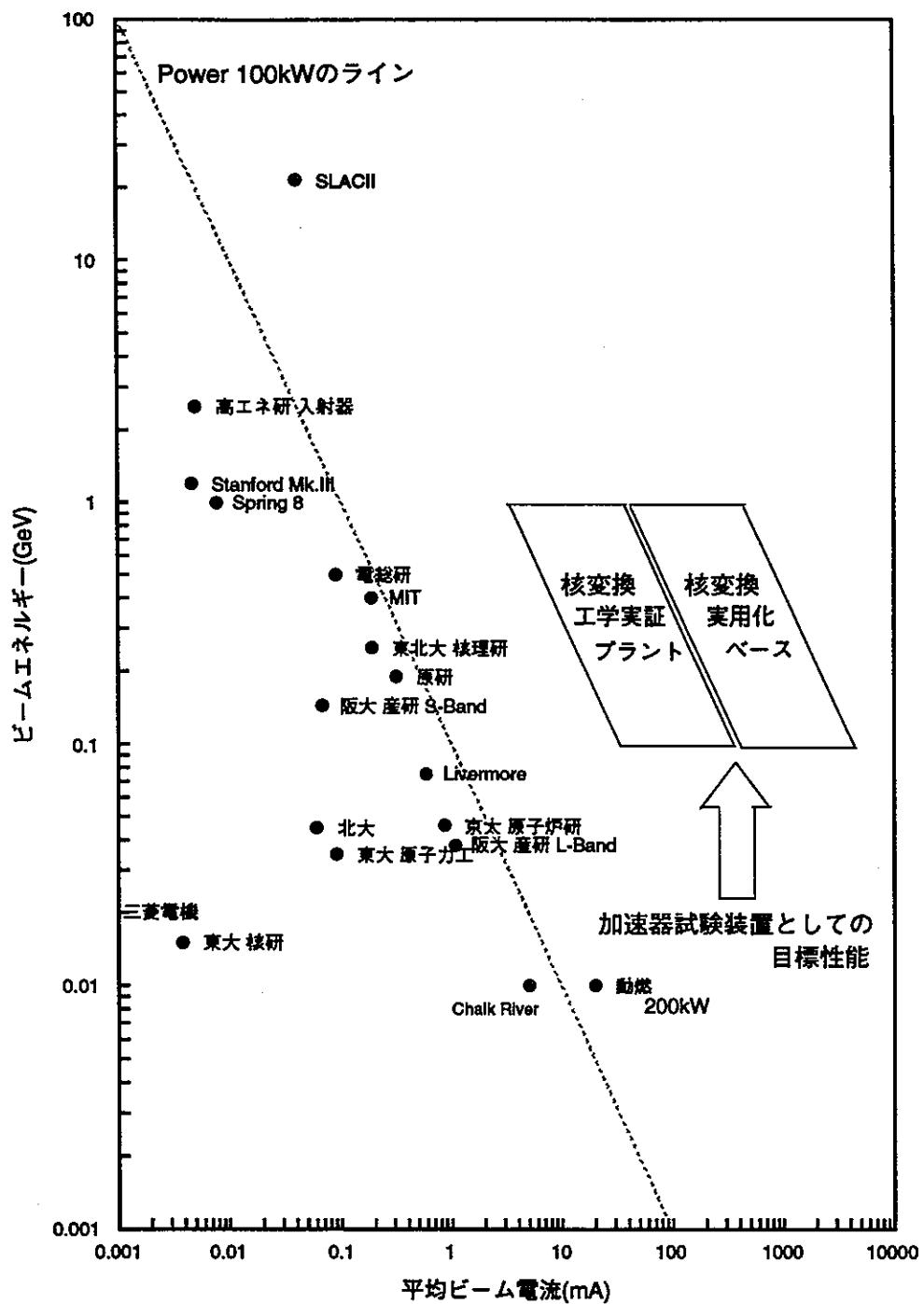


図 2.1 代表的電子線形加速器の性能比較

2.2 開発スケジュール

加速器施設の開発スケジュールは図2.2に示す。要素開発、建屋建設、加速器要素の設計・製作・据付について平成2年度から開発・設計が開始された。要素開発については、本加速器の開発要素である大電流加速管と大電力CWクライストロンについて設計・試作し、これらの組み合わせによる加速管およびクライストロン窓の大電力試験を実施した。これらの試験結果を踏まえて加速器要素の設計を行った。加速器要素は入射部のビーム加速試験を平成8年度に行うために本体および付帯設備を平成7年度までに製作・据付を行った。入射部試験後、加速部を平成8年度末までに据付け、各設備の調整を経て平成9年度から全加速器の運転試験を実施する予定である。

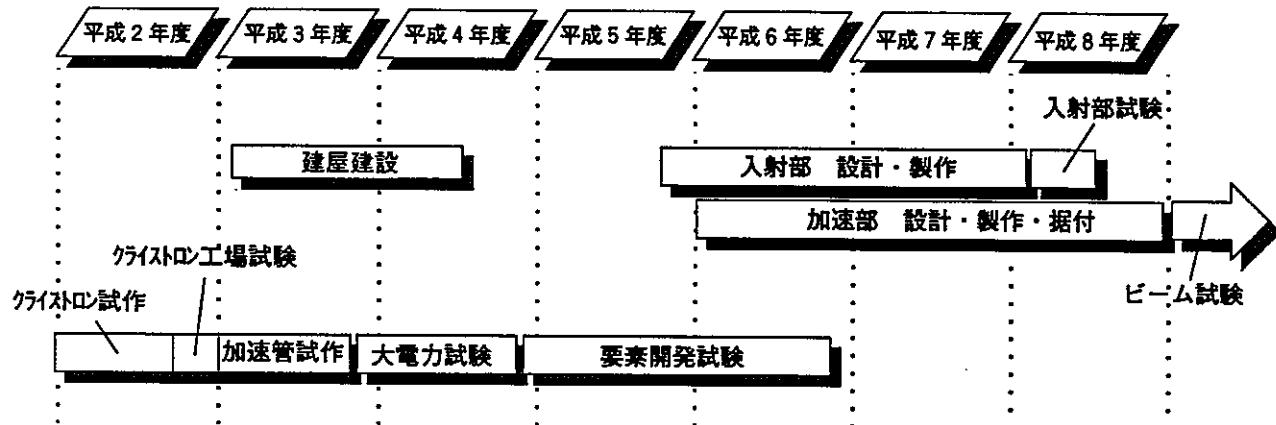


図 2.2 開発スケジュール

2.3 加速器構成

本加速器の基本構成と基本仕様を図2.3および表2.1に示す。入射部の構成は電子ビームをカソードから引き出す電子銃、直流電子ビームを加速管の高周波位相に乗せるためにビームを変調する高周波チョッパー、チョッパーで高周波

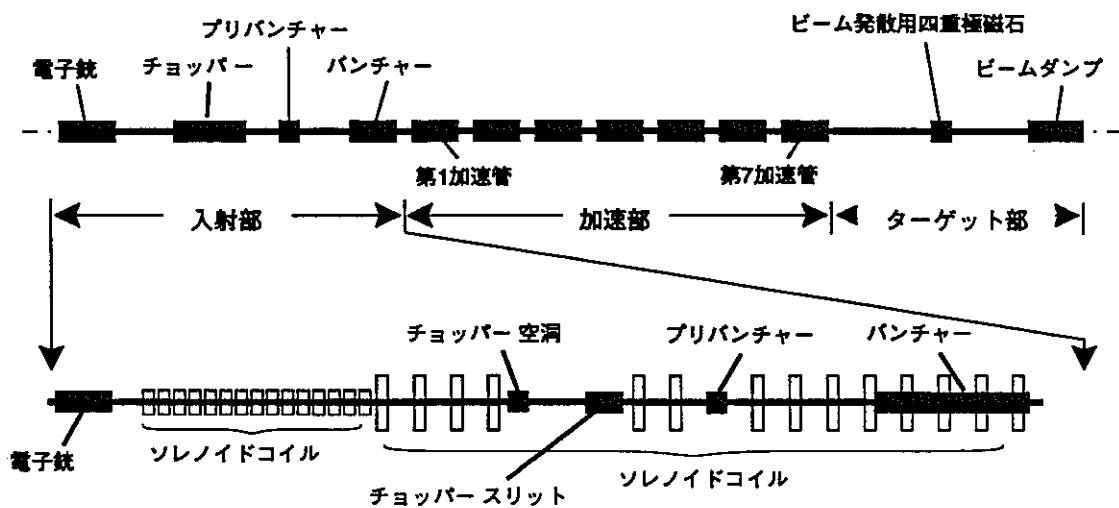


図 2.3 加速器本体と入射部の基本構成

位相に乗ったビームを位相方向に圧縮するプリバンチャーおよびパンチャー、これらのビームを半径方向に集束したり、位置を制御するビーム輸送系、ビームの位置および形状を測定するビームモニタ、高周波をプリバンチャーおよびパンチャーに供給する高周波電源からなる。

入射部とは電子銃から打ち込まれた電子がほぼ光速に達するまで加速される部分で加速器の初段を構成している。電子がこの領域に加速されるまでは空間電荷の影響を受け易く、また加速電場を電子の速度に合せて加えるため構造も複雑となる。それに対して加速部は電子の速度がほぼ光速に達しているため加速管はエネルギーによらず、ほぼ同じ構造となる。このため電子線形加速器においては同じ構造の加速管を並べることにより加速エネルギーを増加することができ、ビームの特性においても初期の特性を維持しながら加速することができる。一方、入射部はその特性が加速器全体の特性を決定する重要な部分である。ビームの質を記述するパラメータの一つとして半径方向にビームの広がりを示す量(エミッタンス)があるが、自由空間や加速を伴わない集束コイル等では保存されるため、電子を発生させる電子銃が最初のエミッタンスを決定し、以下チョッパー、パンチャーとエミッタンスを劣化させる要因が連なっている。入射部の設計はいかにエミッタンスを劣化させずに加速部が受け入れられるエネルギーまで加速するかが主な設計目標である。

表2.1 加速器基本仕様

エネルギー	10MeV
最大ビーム電流	100mA
平均ビーム電流	20mA
エネルギー分散	0.5%
パルス幅	~4ms
繰り返し	~50Hz
デュティファクター	~20%
平均ビーム出力	200kW
加速周波数	1249.135MHz
加速モード	$2\pi/3$
加速管の本数	8本
クライストロンの本数	2本
クライストロン出力	1.2MW

加速部では入射部から送られた電子を加速し、電子のエネルギーを高める部分である。加速部における大電流CW電子線形加速器固有の問題点はビームの発散に関するもの(BBU: Beam Break Up)、大電流加速管、高周波エネルギーの変換効率等である。

3 入射部

3.1 電子銃

電子銃はダブルアーチャーグリッドを用いた熱陰極型で、その概略構造を図3.1に示す。本加速器の平均ビーム電流は、多くの電子線形加速器がマイクロアンペア級であるのに比べ2~3桁高く、通常電流制御に用いるメッシュグリッド方式(被制御電子ビームが制御用グリッドを通過する方式)ではグリッドに流れる電流が大きく熱的な限界に達するため採用できない。さらに冒頭で述べたように電子ビームを最初に発生させる電子銃では、加速器全体のエミッタンスを左右するため、電子銃から出していくビームのエミッタンスを極力小さくし、大電流の加速を後段で安定に保つ必要がある。

本電子銃では図3.1に示すように、カソードから出たビームがグリッドに直接当たらないアーチャーグリッドを設け、電位面の変位の影響は第二グリッドにより補償し、エミッタンスの増加を抑えている。電子を取り出すカソードは現段階で安定で寿命の長い、含浸型カソード(EIMAC社Y646E)を用いている。カソードの寿命は取り出す電流と時間で決まるため、本電子銃のようにデュティーファクターの高い電子銃においては根本的な問題である。寿命、エミッタンスの問題について加速器に装着した状態で試験できるよう、図3.2に示すように通常の電子銃と異なり縦型で、カソードの部分が回転できる構造としてある。これにより、電子銃を他の出口に向け電子ビームを引き出し、種々の測定が真空を破らずに可能な構造となっている。これはカソードの物性などを測定するのに非常に有益である。

電子銃に採用したダブルアーチャーグリッドは、電子銃電極の幾何学的形状を電子軌道解析コードEGUN³⁾で解析、最適化した。最適化はカソード、グリッド、アノードの間隔、径をパラメータとしてエミッタンス、電流制御特性について行った。その結果、電子銃の仕様にそったビーム電流値10mA~400mA

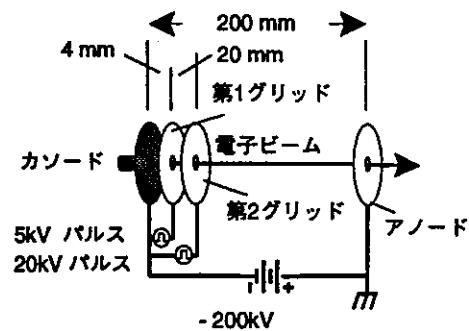


図3.1 電子銃の概念構造

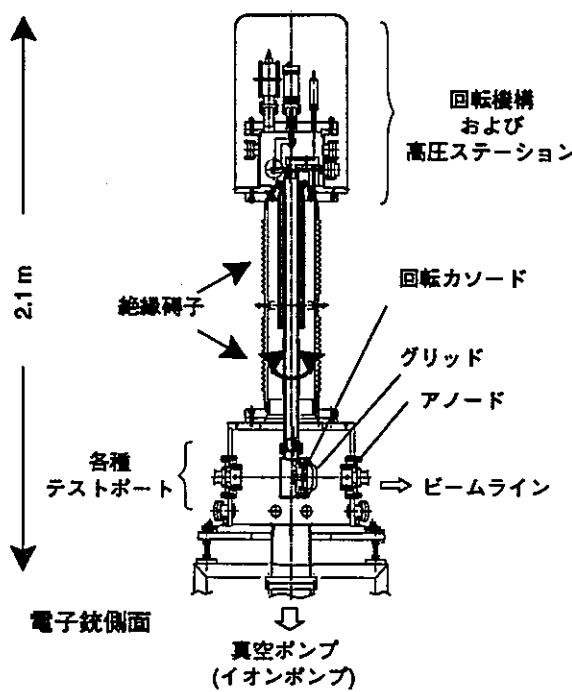


図 3.2 電子銃の構造

の範囲でエミッタン
ス $10\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 以下
に押さえる電極形状
を決めることができ
た⁴⁾。

ダブルアバー
チャーグリッドを採
用したことにより、
第一、第二グリッド
各々に 5kV、 20kV の
カットオフ電圧が必
要となり、 100V 以下
を使用するメッシュ
グリッドと比べると
その制御用電源は複

雑なものを採用せざるを得ない。波形整形方式として、グリッドパルス幅が数 μs 以下であれば種々の波形整形回路やパルス変圧器などが採用できるが、パルス幅 4ms、 5kV の電圧波形に対しては多数の電界効果素子 (FET) を重ねた回路とした。以上の検討結果により第二グリッドは安全のために、第一グリッドのパルスを覆うように立ち上がりの遅いパルスで 20kV を FET のスイッチにより発生させ電子銃を二重にカットオフにさせることとした。さらに第一グリッドパルスの立ち上がり、立ち下がり時間はそのまま電子ビームに影響するため、将来的な各種ビーム利用を考慮し ~1 μs とした。

3.2 高周波チョッパー

電子銃から引き出されたビームは概略図 3.3 に示されるよう高周波空洞内の磁場により左右に振られ、その先に設けたスリットで切り取られ、加速位相に

乗る部分だけがプリバンチャーに送られる。チョッパーで増加するビームと垂直方向の運動量はエミッタансを劣化させる傾向にあるが、スリット幅を狭くしてビームを取り出す

ことでエミッタансを良くすることができる。しかし切り取られる位相角が減少することで電子銃からのビームを効率良く利用できない上、スリットで受け止める大量のビームによる熱除去の問題が生じる。本チョッパーでは、この問題を解決するために高周波空洞に加える高周波を基本波、二倍の高調波および直流バイアス磁場を加えることにより、エミッタансの劣化を極力抑え、位相角 120° （直流ビーム $1/3$ の電流）を取り出すことを可能とした。通常の高周波チョッパーでは基本波のみであるところに二倍高調波およびバイアス磁場を調整し図3.4の太線に示す磁場を加えることで、Y軸方向の磁場がゼロとなり狭いスリットにビームを通過できる平坦部を作る。この磁場は空洞に基本波に対し

ては TM_{210} モード、二倍高調波には TM_{410} モードが励起されるよう空洞の形状を決める必要がある。図3.5にこれら二つのモードが作る磁場を示す。ビームに作用する磁場はこれらの重ね合せとなる。

前述の考案を具体

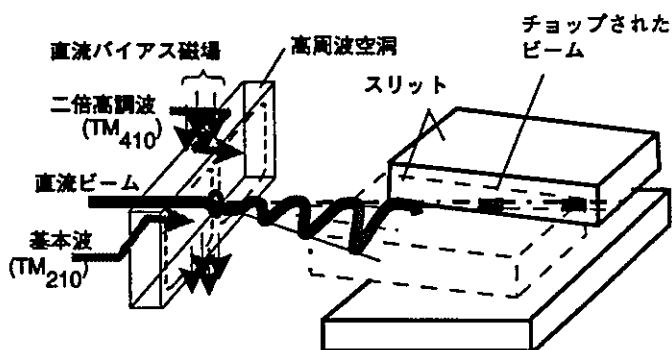


図3.3 高周波チョッパー概略図

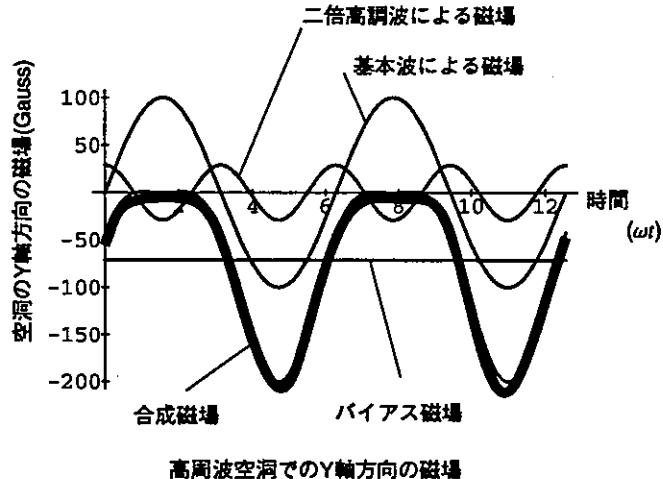


図3.4 高周波空洞内の磁場

化するために、チョッパー空洞の形状の決定、空洞に生じる他の高調波モードの検索、電子ビームの軌道解析を三次元電磁場解析コードMAFIA⁵⁾によって行った。空洞の形状は二つのモードが励起できる値を決め、試作空洞を製作し、その性能を確認した上で最終形状を定めた。空洞には高周波を供給するカプラ、空洞での共振を微調整するスタブチューナが取り付けられている。スリットは空洞から

約50cmのところに位置し、スリット幅はビーム径と同一である5mm、スリット上でビームを40mm偏向できるように、基本波、二倍高調波の高周波電力を決定した。スリットでは10kW程度の通過しない電子が熱として捨てられるため、スリットの形状を楔型とし、ビームに対して傾け、広い面積にビームが照射されるような構造とした。スリットに入射される電子ビームのエネルギー損失はモンテカルロ電子・光子輸送コードEGS4⁶⁾によって解析し、スリットの形状を決定した。

3.3 バンチャー

チョッパーから切り取られたビームは加速管に入射される前にプリバンチャーおよびバンチャーにより位相方向に圧縮し、できるだけ多くの電子が加速管の安定な加速位相の領域に入るようとする。高周波電場によって、入射ビームのあるものは加速され、あるものは減速され、バンチャーを出るときはその高周波位相に応じて異なる速度を持つため(速度変調)、バンチャーから適当な距離の点で速度の違う電子は走行時間の違いからある位相のところに電子が時間的に集簇する(バンチする)。

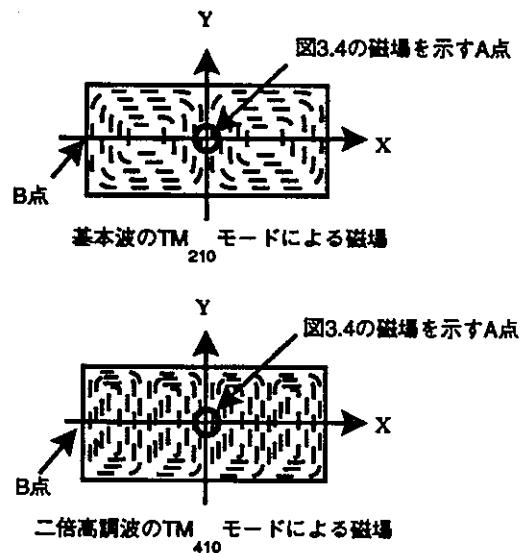


図3.5 高周波空洞内に励起される磁場分布

本加速器のビーム圧縮部分は定在波リエントラント型空洞からなるプリバンチャーハンチーおよび加速管とほぼ同じ構造からなる進行波還流型バンチャーハンチーから構成されている。バンチャーハンチーは進行波還流型の加速管とほぼ同じ構造で空洞が加速管より1つ多い17空洞より構成されている。進行波還流型のバンチャーハンチーおよび加速管については次章で述べる。バンチャーハンチー部において、バンチできる度合いは、空間電荷効果により制限されるため、比較的短いドリフト区間で強い電場によりバンチする必要がある。そこでプリバンチャーハンチーではビームは位相角を120度から30度まで絞り、さらにバンチャーハンチーでは30度から15度まで絞り込む。プリバンチャーハンチーではビームが空洞内を通過することによる誘導電場 (beam-induced rf field) という問題点がある。空洞をLCR並列共振回路と置き換えて考えると、少ない電力でバンチャーハンチーの電場を高めるためには、回路のQ値を高くする必要がある。しかしQ値が高いことにより、チョッパーで変調されたビームは(チョッパーは基本周波数で動作しているので、ビームは基本周波数成分が主な高周波と見なせる)プリバンチャーハンチー空洞内に電圧を誘起する。この電圧は空洞に供給する高周波電圧に対して影響し、ビームに対してはバンチさせる位相角を変化させる。また、位相の安定性から見ると、高いQ値の空洞は周波数や温度に影響され易い傾向にある。これらの問題に対して、供給電圧の許される範囲でQ値を下げ、空洞に取り付けたスタブチューナーにより位相角を補正することにより解決した。Q値を下げるには高周波に対して抵抗の高い金属で空洞を製作すればよいが、一般的に電気抵抗の高い金属は熱抵抗も高く空洞の除熱が難しくなる。そこでプリバンチャーハンチーの空洞の胴部分はステンレススチールで、熱の逃げにくい電極部分は銅で製作した。空洞の高周波損失など電気的特性は二次元(軸対称)電磁場解析コードSUPERFISH⁷⁾により計算し、最適化した。プリバンチャーハンチー全体を無酸素銅で構成するとQ値は11550(TM₀₁₀モード、空洞本体)、胴の部分をステンレススチールとした場合はQ値は4336となる。ビームローディングによる誘導電場に関しては、図3.6(a)に示すように加速管空洞内の加速電場の場合はビームの位相に最大電場を合せる、プリバンチャーハンチーではビームをバンチするため図3.6(b)のようにビームに対して-90度に v_g の最大電場が位置するように選んだ。ビーム電流 I_b に対する誘導電場 v_b はビーム

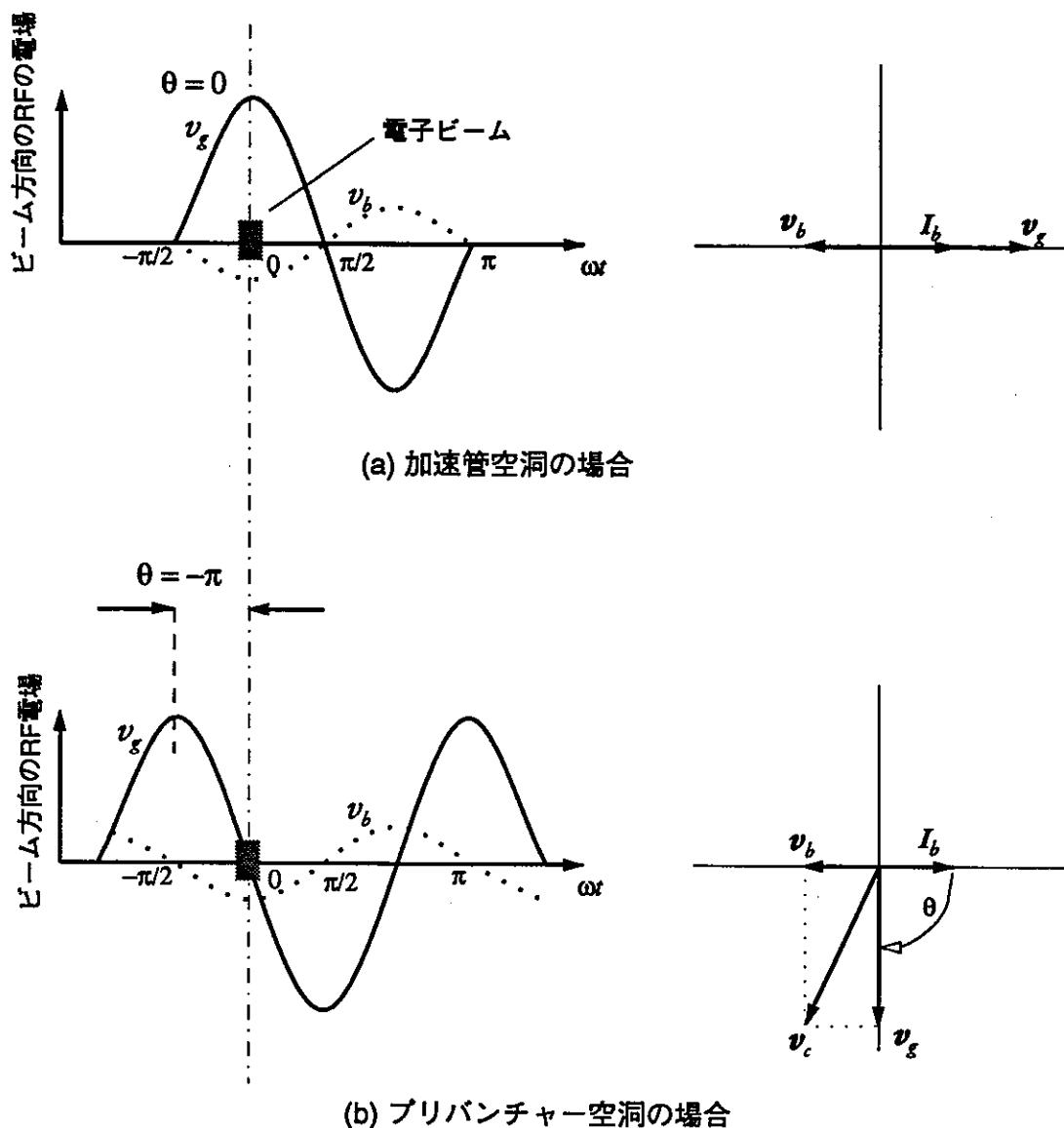
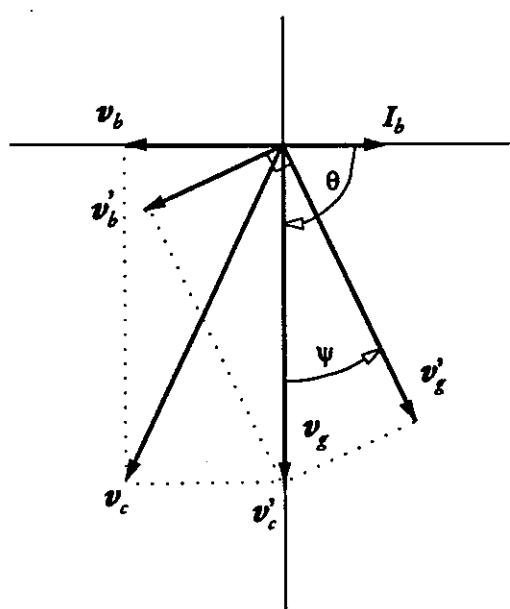


図3.6 ビームバンチと電場との位相関係

ムの位相に対して反対方向となる。ビーム電流が流れている時にプリバンチャ空洞に現れる電場 v_c は v_b と電流が流れていらないとき空洞に励起される電場 v_g との合成になる。このとき v_c はビームの位相に対して-90度から外れるので図3.7に示すように、外部から調整できる v_g の位相と振幅を移相器、減衰器および空洞のスタブチューナーで変化させて、変更後にプリバンチャ空洞に励起される電場 v'_c を-90度の位相に合せる。すなわち、ビームローディングの無い



時の v_g の位相を ψ だけ進め、振幅を v_g から v'_g にしてプリバンチャーの電場 v_c を v'_c にして、ビームローディングの有るビームに対して-90度に合せる。この操作を離調と呼ぶ。

図3.7 離調前後のベクトル表示

4 進行波還流型加速管

CW電子線形加速器において理想的には加速する高周波の損失が少ない超電導加速管を採用した方が良い。しかし、現状の技術においてビーム電力MW級の加速器に超電導空洞を加速管を採用すると、電流を加速する上でクエンチング(超電導状態の一部が崩れ、全体の温度が上昇してしまう現象)等の問題点があること、機器の運転を単純化することなどを考慮して常伝導の加速管とした。

加速管は、図4.1のように一様な円筒導波管に孔のあいた円盤を一定間隔に並べた周期構造体の前後に結合器を接続したものであり、無酸素銅 (OFHC: Oxygen Free High-purity Copper)で製作した。また加速管の構成はL-バンド (1249.135MHz)で励起される定電界進行波還流型とした。還流型とは図4.2に示すように、加速管に供給する高周波を還流することにより、電気的共振回路に高周波のエネルギーを蓄積し、ビームに供給された分だけの高周波電力を還流部に供給し、高周波電力の利用効率を高めるものである。加速管はバンチャーワン本を含めて合計8本で、各加速管は長さ1.2m、 $2\pi/3$ モードの空洞を15個、カップリング空洞を2個持つ構造である。各加速管は100mAのビームローディングに対して定電界型となるように設計されている⁸⁾。

電子線形加速器における問題点はBBU(Beam Break Up)と呼ばれるビームの発散現象である。BBUは μ sオーダのビームを加速する場合、ビーム電流がある閾値を超えるとビーム波形後部から欠けはじめ、ビーム電流の増加と共にビームがなくなる現象であり、1960年頃スタンフォード大学(SLAC)等ではじめて確認された。CWビームを加速する加速器においては次の2点を考慮して設計された。一つ目は、BBU現象が起こりはじめる閾値は進行波型加速管では高周波周波数 w^{-3} に比例するので、周波数を下げてL-バンド(1.3GHz)を選択した。二

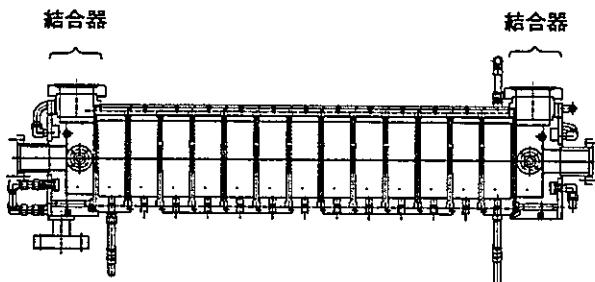


図4.1 加速管断面図

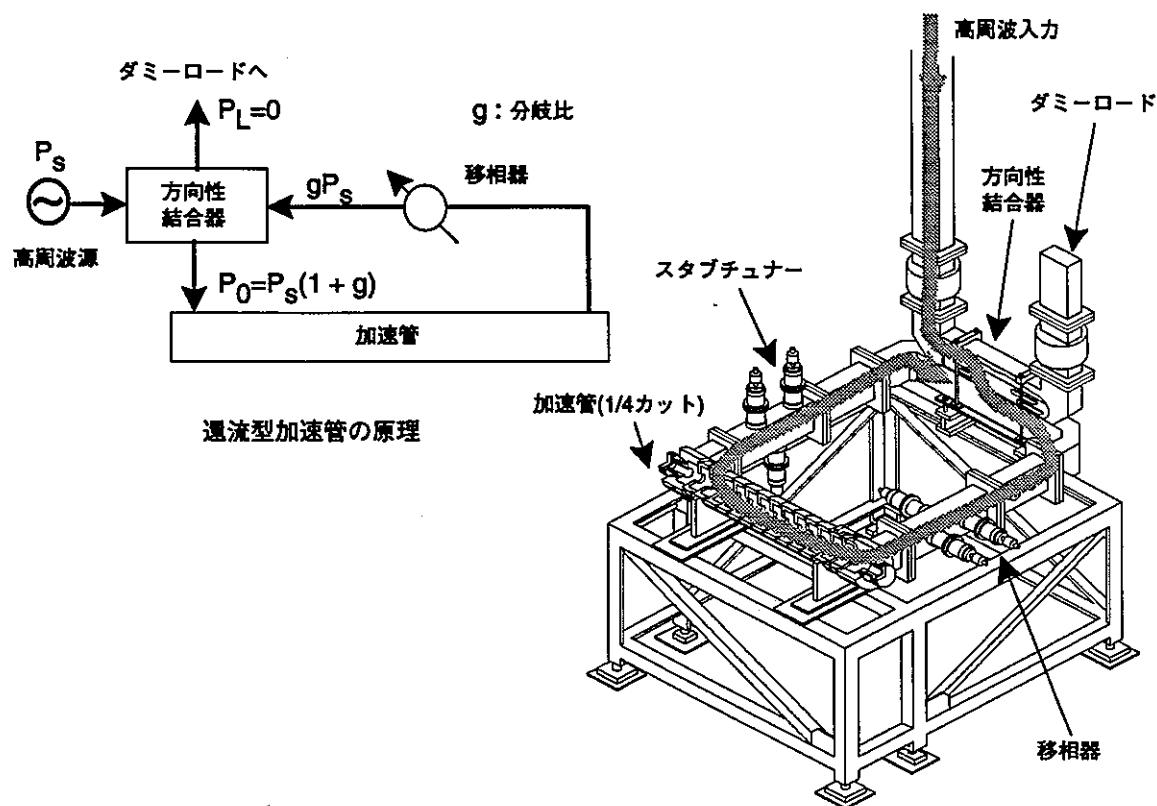


図 4.2 進行波還流型加速管

つ目は加速管における各空洞の TM_{01} モードに対しては同じ周波数で共振し、 TM_{11} -like モードに対しては異なる周波数で共振するように設計したことがある。このことは TM_{01} モードの共振周波数を同じに保ち、各空洞の形状を徐々に変えることにより実現した⁹⁾。蓄積型のBBUはこの対策により部分的に抑えることができる。図4.3にBrillouinダイアグラムを示す。図4.3に示す TM_{11} -like モードの特性は MAFIAコードによって計算した。図4.3に示されるようにすべての加速管における各空洞の TM_{01} モード特性曲線は、周波数 1249.135MHz と各空洞の位相変化量 $2\pi/3$ の点Aで一点に交わり、位相速度 V_p が光速である点でも交わっている。図4.3の加速管内の電場が示すように、このモードはビームを加速する。しかし TM_{11} -like モードはビームに対して直角、すなわち発散するように働く。 TM_{11} -like モードの特性曲線はそれぞれがほぼ並行する異なった位置にあるので、ビームを発散させるモードが各空洞、加速

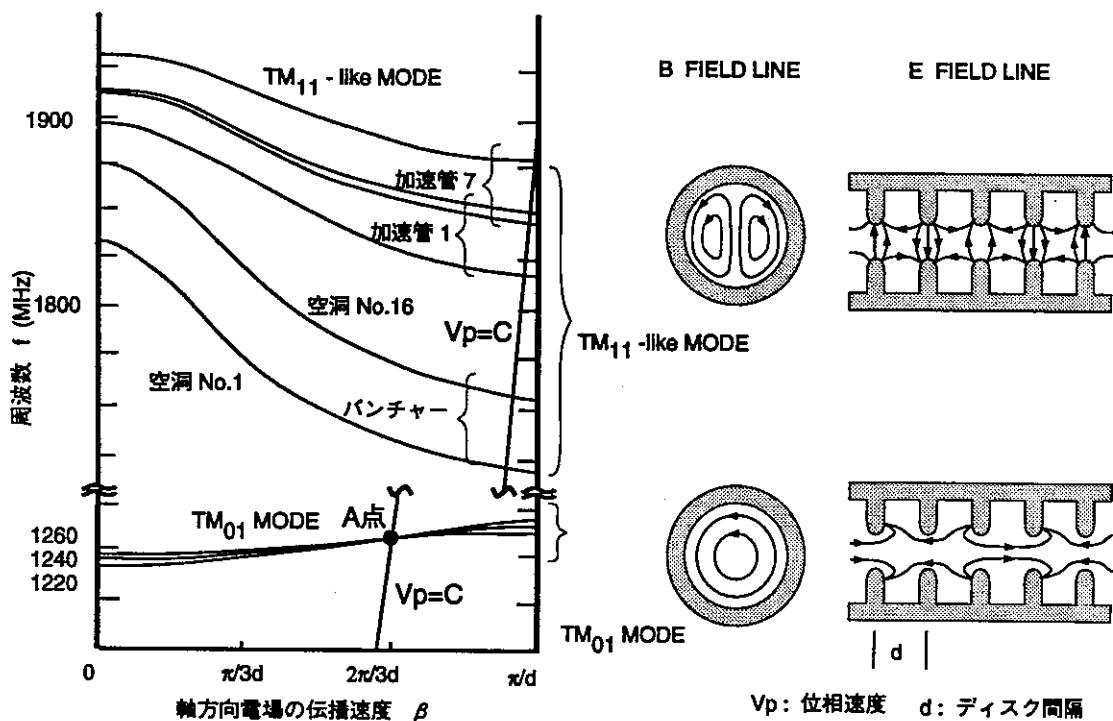


図 4.3 加速管の励起モード

管で励起され伝達されることを抑制している。

また、大電流加速管では除熱や温度制御に以下のような問題がある。本加速管1本あたり約50kWの高周波電力が供給され、そのうち25kWが電子ビームとなり残りは加速管の発熱になる。そこで加速管の除熱においては25kWの電力を除去でき、さらに冷却水路の最適化を行なって加速管内に温度分布が一様になるようにする必要がある。図4.4に加速管内部の冷却構造を示す。三次元有限要素法による伝熱応力シミュレーションコードNASTRAN¹⁰⁾により加速管内の高周波損失による熱分布を求め、冷却水路等加速管構造の最適化を行った。加速管の機械的寸法は電気的共振周波数(本加速管の場合~24kHz/°C)に影響するため、共振を維持し高周波を加速管に供給するには加速管温度を0.1°C程度に安定させる必要がある。多くの電子線形加速器ではビームのデュティが少なく、大きな除熱は必要としないため、温度の安定化はそれほど問題と成らないが、本加速管においては25kWにもなる熱を除去しながら温度変動を±0.1°C程

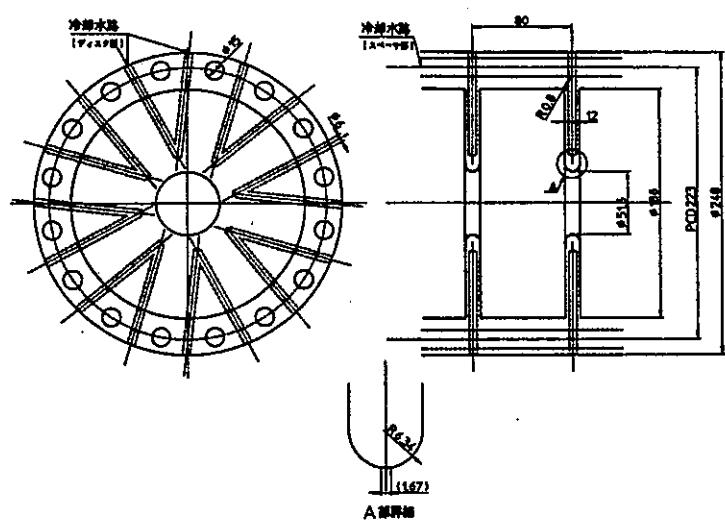


図 4.4 加速管の冷却構造

度に抑えること
が必要である。
加速管の温度を
冷却系で制御せ
ず、安定した温
度の冷却水を加
速管に供給し、
加速管の温度上
昇で共振周波数
のずれた分を加
速管還流部にあ
る移相器によっ

て補正し同調を取っている。移相器は機械的高周波要素であるため、調整にはステッピングモータ等の駆動が必要であるが、それでも冷却系を制御するよりもはるかに速い時間で操作を行うことが可能である。本加速器においては、全ての加速管の調整を計算機制御によって行う予定としており、加速管の特性が明らかになった段階で自動化を行う予定である。

5 ビームダンプ

本加速器ではフルパワーでエネルギー10MeV、200kWの電子ビームをビームダンプで受け止めなければならない。SLACの2マイル電子線形加速器では、同程度のビーム出力を有しているが、エネルギーが数十GeVあるため数mの水中における飛程(熱の集中がない)を利用して除熱を行っている。しかし、エネルギーが10MeVでは、飛程は数cmほどで水に直接打ち込むことは難しいだけでなく水と真空を仕切る窓での発熱も大きく、このような方法でビームダンプを構成することは難しい。従って図5.1に示すように、徐々に半径を小さくした銅のドーナツを重ねて、各ドーナツに設けた水路に冷却水を流して冷却する方式を考案した。ビームは上流部に設けられた四重極マグネットにより発散させ、これらのドーナツの内側に徐々に吸収させることとした¹¹⁾。ビームダンプ本体は真空容器の中に置き、加速器ビームポートの間には仕切り窓は設けない。ビームダンプ内の真空(10^{-5} torr)と加速管内の真空(10^{-7} torr)をコンダクタンスの低いビームポートを通して、差動排気によってそれぞれの真空を維持し、容器内の真空が急激に悪化した際には、緊急遮断弁により、ビームポートを閉じることとした。動作する時間を衝撃波がビームポートを伝播してくる時間程度(10数ms)に設定した。

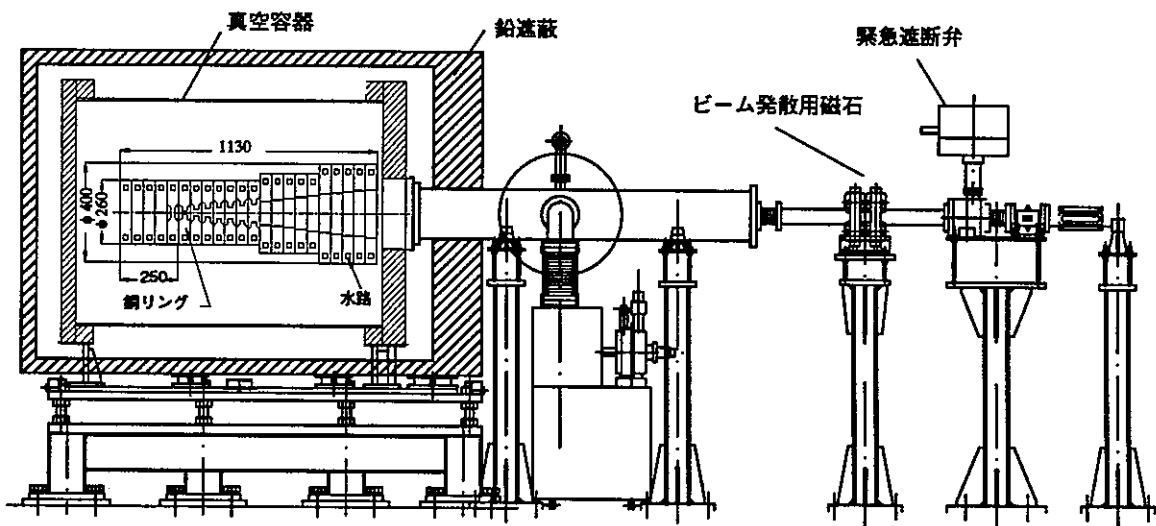


図 5.1 ビームダンプおよび真空系

6 高周波源

高周波源は、前述の高周波チョッパー、プリバンチャー、バンチャー、加速管に高周波電力を供給する装置である。図6.1に高周波回路を示す。基準信号の 156.141875 MHz を 8 倍に倍増し、L-バンド 1.2MW のクライストロンを 2 台駆動に供給している。1 系統はさらに 2 倍に倍増し、S-バンド 1kW クライストロンを駆動し高周波チョッパーに供給される。これら 3 種類の増幅器の出力から基準信号に対して振幅および位相の帰還をかけ、振幅安定度 ±0.8% 以内、基準信号に対して ±0.1 度以内の位相変動に安定化するようにしている。チョッパー空洞での基本波、高調波の位相およびビームに対する加速位相の安定度はビームをバンチ、加速を左右するだけでなく、ビームエネルギーの安定度にも影響する重要な要因である。

安定化された高周波電力はハイブリッドカプラにより分岐され各機器に供給

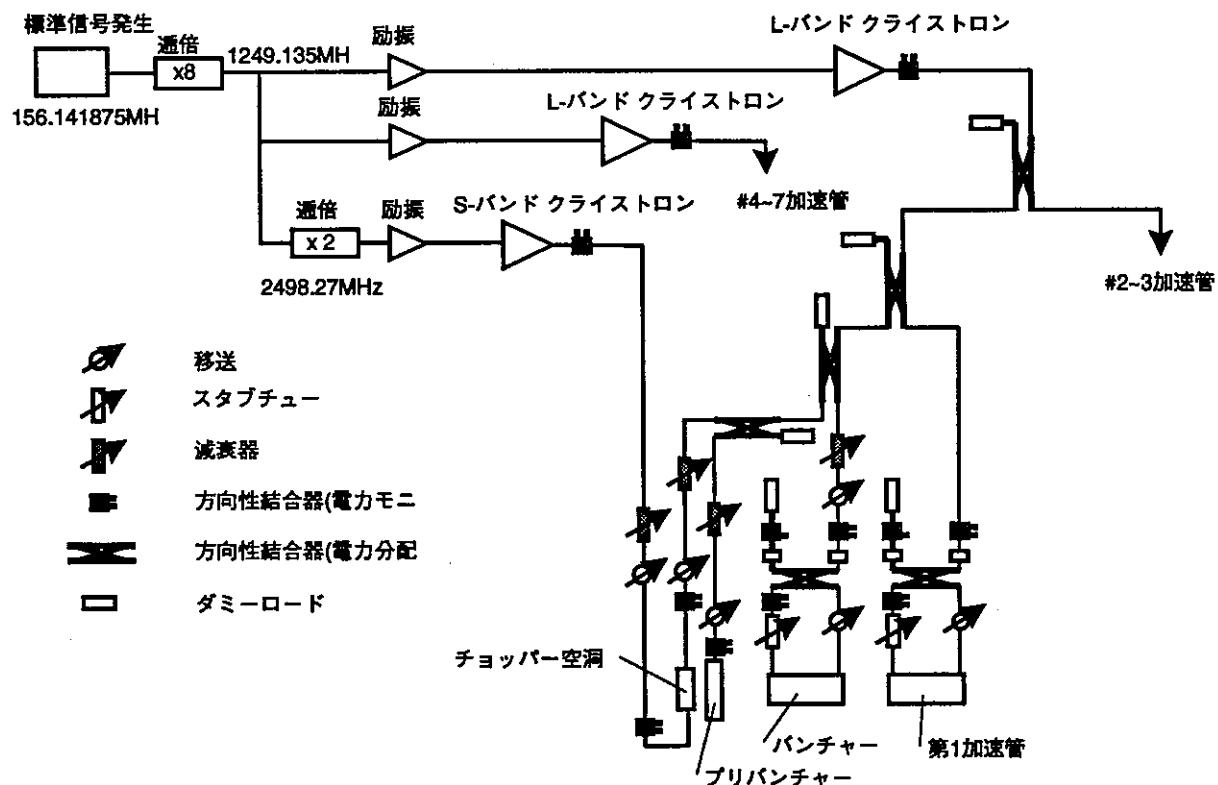


図 6.1 高周波回路

される。各要素側には位相を調整する移相器、電力を調整する減衰器、各要素に供給される電力をモニタする方向性結合器が導波管に接続されている。移相器、減衰器、導波管など大電力を制御する大型の要素であり、かつ除熱し温度を一定に保つ必要がある。

6.1 クライストロン

本高周波源に使用したクライストロンは、L-バンド、連続出力(CW)1.2MWを目標としたが、この帯域には市販品がないこと、高周波への変換効率の向上を目標としたため、新たに開発する必要があった。本クライストロンの仕様を表6.1に示す。表に示すように本クライストロンはCWモードとパルスマードで動作し、パルスマードでは4.1MWの出力を取り出せる。設計では両方のモードで安定に動作し、クライストロン空洞の最適化を行い、変換効率65%以上を目指した。

初期の電子集団の解析には1次元のDMSコード(Disk Model Simulation Code)¹²⁾を使用し、最大効率が得られる高周波相互作用部の条件を2次元のFCIコード(Field Charge Interaction Code)¹³⁾を用いて行った。これらの設計結果に基づいてクライストロンを試作し、加速管1本を含む還流部とともに、高エネルギー物理学研究所において高周波実負荷試験を実施した。高周波を取り出す出力窓に関しても、大電力化を可能にするため、窓の材質および形状、ピルボックスの形状等についてFCIおよびMAFIAコードで最適化した上で試作し、上記の還流部に組み込んで評価した。その結果、窓単体で連続1.7MWの高周波電力が通過できることを確認した。これら試験結果を基として、実機用クライストロンを製作した。製作されたクライストロンは幅15μsのパルス試験においてピーク電力1.2MW、変換効率63%を達成した¹⁴⁾。

表6.1 クライストロン基本仕様

	CWモード	パルスマード
ビーム電圧	最大90kV	最大147kV
ビーム電流	最大25A	最大56.5A
動作周波数	1.25GHz	1.25GHz
励振電力	12W	—
目標飽和出力	1.2MW	—
目標効率	65%	—
パルス幅 繰り返し	— —	最長0.8ms 最大250pps

6.2 高周波電源

加速器の基本運転を満たす条件の他に、クライストロン単体試験、加速エネルギー増強等の目的に表6.2に示すような3モードがある。

65kVのCWモード以

外はパルス変調が必要である。本加速器の仕様であるパルス幅4ms、繰り返し50Hzは、既存の電子線形加速器に較べると非常に長く、パルスの整形に関して、通常用いられているPFN(Pulse Forming Network)等の手法は困難であるため、本装置ではパルス幅4msの整形に対しては、クライストロンのアノードに変調をかけ、100μsの整形に対してはパルストラnsを用いてGTOでスイッチングしビーム電圧を変調を行うことで、妥当なサイズ、コストで実現することができた。特に、147kVではアノード変調するための素子(真空管)の選択が困難であり、信頼性の高いものを構成することは難しいと判断し、結果的にパルストラns、アノード変調用の素子等をクライストロンソケットと合せて油入りタンク内に入れた。このため、外部に147kVの導入端子を設ける必要が無くなった。

電源の安定化は電源の位相制御により高圧電源を安定化させるため、電源の周期以内の制御はできない。クライストロン2本で90kV、4msパルス幅で約5%のサグがあるが、これは平滑用コンデンサーの容量とクライストロンの負荷で決定され、位相制御でも制御ができない。これに対しては以下に述べる低レベル系において制御を行うこととした。図6.2に電源のブロックダイアグラムを示す。

低レベル系はクライストロンの出力に対して出力、位相を安定化するために、フィードバックをかける回路である。高周波の電圧、位相は加速される電

表6.2 クライストロン電源の基本仕様

	モード I	モード II	モード III
出力電圧	90kV	65kV	147kV
ビーム出力電流	50A	13.8A	113A
出力電流パルス幅	1~4ms	CW	0.1ms
電圧サグ	<5%	—	<1%
パルス繰り返し(最大)	50pps	CW	50pps
デューティ	20%	CW	4%
パルス出力	4.5MW	0.9MW	16.6MW

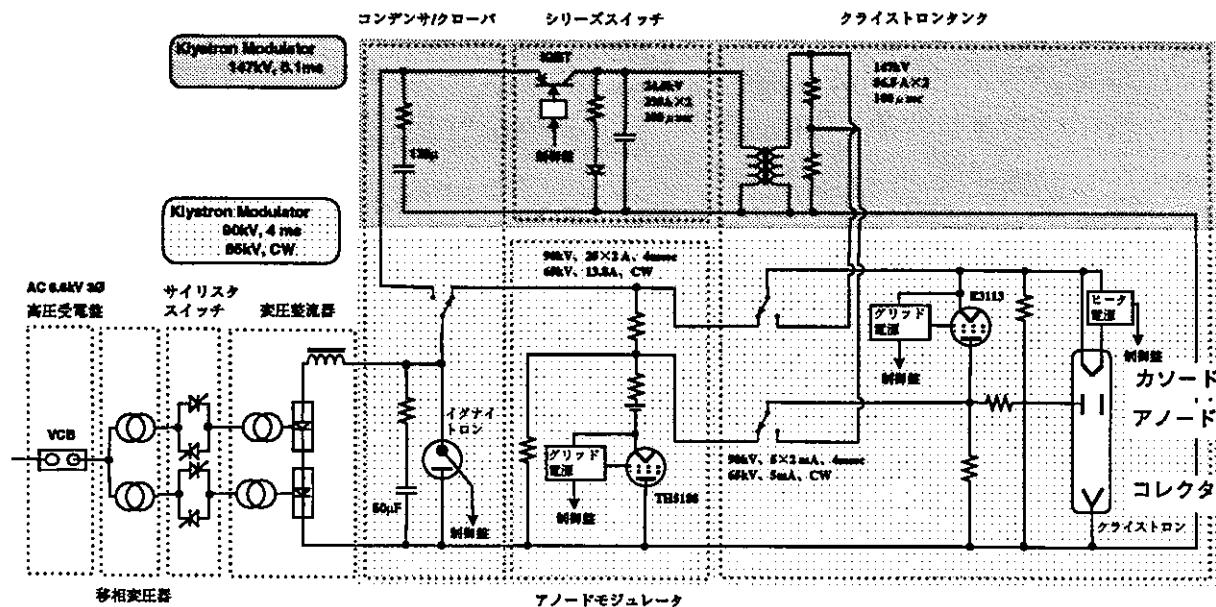


図 6.2 高周波電源部

子ビームのエネルギー分布に影響するため、高周波電圧は±0.5%以下、位相は±1度以内にその変動を抑える必要がある。本構成では高周波を検波して100kHz以下の帯域に対してフィードバックがかけられる回路とし、フィードバックループ内の時定数は変動が少なくなるように選択した。高圧電源に伴うサグの問題は、フィードフォワードを用いることにより補正を行なうこととした。高周波の負荷に対して電源のサグは一律に決まるので、フィードバックの参照電圧に対してサグを補正するような電圧をクライストロンに加え、その出力においてフラットなパルスを取り出すものである。

現在これらの制御はアナログ回路によって構成されているが、加速器の運転経験を積み、その特性が把握できた段階で、高速のA/D、D/A、DSP(Digital Signal Processor)によるデジタル制御を用いて精度が高く、柔軟性の高い制御システムに変更する予定である。

7 計測・制御系

計測・制御系は計測・制御の周辺機器のビーム輸送・計測部分とマンマシンインターフェイスを行い制御・処理する計算機から構成されている。

7.1 ビーム輸送・計測系

ビーム輸送系はビームが半径方向に発散することを制御する機器から構成されている。図7.1に入射部の機器配置を示す。電子銃から出た電子は2台の磁気レンズにより絞られ、12台のソレノイドコイルからなるドリフト区間を通過する。ソレノイドコイルは一様な軸方向の磁場により、ビームを半径方向に集束するものである。チョッパーの手前には直径2cmのコリメータがある。コリメータはビームを絞る目的ではなく、ビームがずれ、万ーコリメータに当った場合、直ちにビームを止めるための電流検出器として使用するものである。パンチャーの手前にもう1台のコリメータが置かれている。加速管室内では

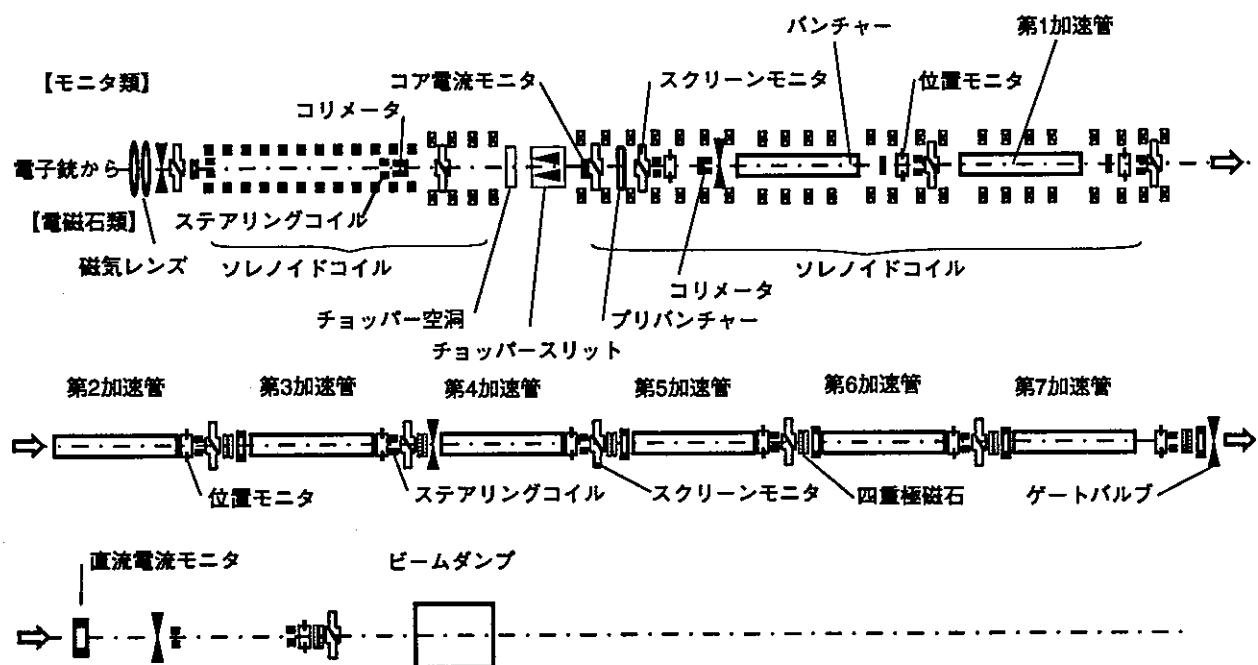


図 7.1 モニタおよび磁石等の配置

チョッパーの部分を除きソレノイドコイルが第一加速管の先まで、ビームの位置を上下、左右に調整するステアリングコイルが5台ほど等間隔で設置されている。ステアリングコイルによりビームを中心に向けるように制御し、ビームを後段の加速管へ導くようになっている。

ビーム計測を行うビームモニタはビームのプロファイル(形状、位置)および電流を測る機器に分けられる。プロファイルモニタとしてスクリーンモニタ、位置モニタとして静電誘導型ボタンモニタ、電流モニタとして直流電流モニタ、コア電流モニタなどが図7.1に示すように配置されている。

大電流CW電子線形加速器というかつて先例の無い加速器においては、これらモニタは加速器の挙動を観測するのに重要な道具である。それゆえ、モニタ類は配置が許す限り取り付けてある。本加速器のビーム測定で問題なのはビーム電流が大きくスクリーンモニタなど接触型のプロファイルモニタが使用できない点である。現状では、ビームのパルス幅を短くし、繰り返しを減らすことによってビーム電流を下げ、スクリーンモニタを使用して測定し、パルス幅を広げてもビーム光学は変わらないとする仮定を取っている。しかしながらそれが正しい保証はないため、今後の課題である。非接触型のプロファイルモニタとしては残留ガスの発光を用いたもの等いくつか提案されているが適当なものがなく、現在開発中である。そのため、将来、非接触型モニタを設置できるように、スクリーンモニタを挿入する部分は4方向にポートを持つ汎用ポートとし、将来の使用を考慮してある。

7.1.1 スクリーンモニタ

スクリーンをビームラインに直接出し入れしてビームの形状や位置を測る方法で、加速器では良く用いられており、スクリーンをエアシリンダーによって出し入れするものである。蛍光板には適当な発光量があり、放射線の影響のないものが好ましいため、一般的には各種セラミックスが用いられる。本モニタには、紫外線領域 (~320nm)で短い時間の発光、赤い可視光領域 (~680nm)で長い発光をする酸化クロムを含んだアルミナのセラミックス (Desmarquet社

AF995R)を使用している。短い時間の発光は加速位相に乗って集群された電子ビームの様子が観測できるほど高速なため、この光をストリークカメラで観測しバンチ角を測定することができる。また長い発光ではプロファイルを測定できる。蛍光板からの光はのぞき窓から放射線損傷を避けるために、何段かの鏡を経てビデオカメラまたはストリークカメラに入る。また蛍光板の代りにアルミニウム等の金属板もしくは蒸着してスクリーンとし、入射する電子ビームからのOTR (Optical Transition Radiation)による光を観測する方法も併用している。この光は十分高速であり、集群された電子ビームを観測できるので、ストリークカメラを用いて電子ビームのバンチ長を測定できる。ストリークカメラはカメラに入射した光の強度を時間で掃引して記録するものであり、時間分解能は最小2psである。蛍光板およびアルミニウムのスクリーンは2段動作のエアシリンダーによって駆動できる構造となっている。

7.1.2 位置モニタ (静電誘導型ボタンモニタ)

非接触型の位置モニタで本加速器において唯一、フルビームで使用できるモニタである。X軸、Y軸に並べられた電極にビームが通過するさい、静電誘導により誘起された電位を測定し、X、X'、Y、Y'の電位の重心から位置を求めるものである。実際には感度、S/N比を上げるために、ビームがチョッパーにより変調(チョッパーまたは加速高周波)されているので、電極からの検出信号に70MHz低い高周波を加えヘテロダイン検波としている。

7.1.3 電流モニタ(コアモニタ)

コアモニタはビーム電流を1ターンの巻線とした変圧器を構成している。ビームパルス幅が従来の加速器のものに比べて長いため、通常用いられる電流変圧器に電流帰還をかけ、時定数を大きくしている。これにより4msのパルスをほぼ測定でき、立ち上がり時間が1μs位まで観測できるように設計した。コアモニタは時間に関する情報が得られるため、ビームの発散やビームローディ

ングの観測に不可欠のモニタとなる。また、コアモニタとは別に直流電流モニタを最終加速管の後に設置し、長パルス(パルス幅~4ms)を用いて、コアモニタの較正用として使用している。

7.2 制御・処理系

計測・制御系の特徴は加速器の状態(status)を同時に(実際には一つのマクロパルス内)集録し、必要な制御を目指すものである。そのため計算機部分は図7.2に示すように、ハードウェア、ソフトウェア共に3層で構成される。本加速器開発の性格上、ハードウェア/ソフトウェアはできるだけ柔軟性、拡張性を持たせており、ハードウェアにおいては、Ethernet、VME、GPIB規格を採用し、ソフトウェアはUNIXを基本ソフトウェアとして、必要に応じてリアルタイムUNIXを採用し実時間制御機能を持たせている。アプリケーションソフトウェアはオブジェクト指向プログラミング言語であるオブジェクトCを用い、生産性、保守性、信頼性の向上を配慮している。リアルタイムUNIXの部分はハードウェアに対応したドライバーソフトウェアが主であるので、オブジェクト指向化はされていない。

7.2.1 ハードウェアの構成

計測・制御の中心となる計算機の部分は図7.2に示すように、3層に別れており、各々の計算機はネットワークにより各層毎に結ばれている。

オペレーターが制御するEWSはマンマシンインターフェイスを受け持ち、一般に使われるEthernetでネットワークを構成している。このネットワーク内の計算機には大量記憶装置および外部のネットワークと接続するルータやブリッジ等も含まれる。また付帯設備等のコントロールに使用されているシーケンサーとも接続されている。計測・制御の中心となるのは、VME規格のボード計算機でRISC CPUを持つ12台の計算機をEthernetとSCRAMNet(Systran社)によりネットワークを構成している。SCRAMNetは高速のネットワーク(~15MB/

秒)で入出力をメモリマップにより行うもので、ソフトウェアが関与せず、ある計算機メモリ上に書き込むと、すべての計算機のメモリ上に書き込まれるものである。VME規格の計算機は周辺機器、特に入出力インターフェイスを容易に行うことができる。本制御系ではほとんどの機器がVMEバスに接続されている。さらにGPIBインターフェイスをVMEバスに接続することにより、GPIBインターフェイスを持った測定器にも接続されている。最下層にはDSP(Digital Signal Processor)がVMEボード計算機のもとに接続されている。ハードウェアはVMEバスを拡張したバスに接続され、物理的にはVME規格とモジュールである。またこれらDSPにはそれぞれ6チャンネルの高速ポート(Communication Port)を持ち、計算機の並列接続(transputer接続)ができるようになっている¹⁵⁾。並列接続は加速器の運転特性が明らかになり、自動制御運転をさせる段階で加速器の状態を同時に把握し、瞬時に制御したり、クライストロンの高周波制御の高度化等に使用することができる。

7.2.2 ソフトウェアの構成

EWS、VMEボード計算機等分散している計算機を統括する基本ソフトウェアとしてUNIXを基本として、その上に必要とされるフロントエンド(ウインドウ)を選択する。UNIXはマルチタスク、マルチジョブ、ファイル管理、ネットワーク管理等が汎用的に行える唯一の基本ソフトウェアである。

ソフトウェアの構成はハードウェアの構成に対応して3層を構成する。統括管理を行うEWSにはUNIX上に優れたGUI(Graphical User Interface)を持つNEXTSTEP(現アップル社)を採用し、マンマシンインターフェイスを容易にし、オブジェクト指向プログラミングにより開発環境、保守性を優れたものとしている。VMEのボード計算機部分は制御・計測の中心となり実時間制御が必要であることから、リアルタイムUNIXであるHP-RT(ヒューレット・パッカード社)を採用している。ネットワーク管理、ファイル管理、機器間の交信等全てがUNIXの統一した環境で行える。DSP計算機は現段階ではVME計算機の一部としてHP-RTの管理下でアプリケーションソフトウェアのサブルーチンの扱い

としている。

-29-

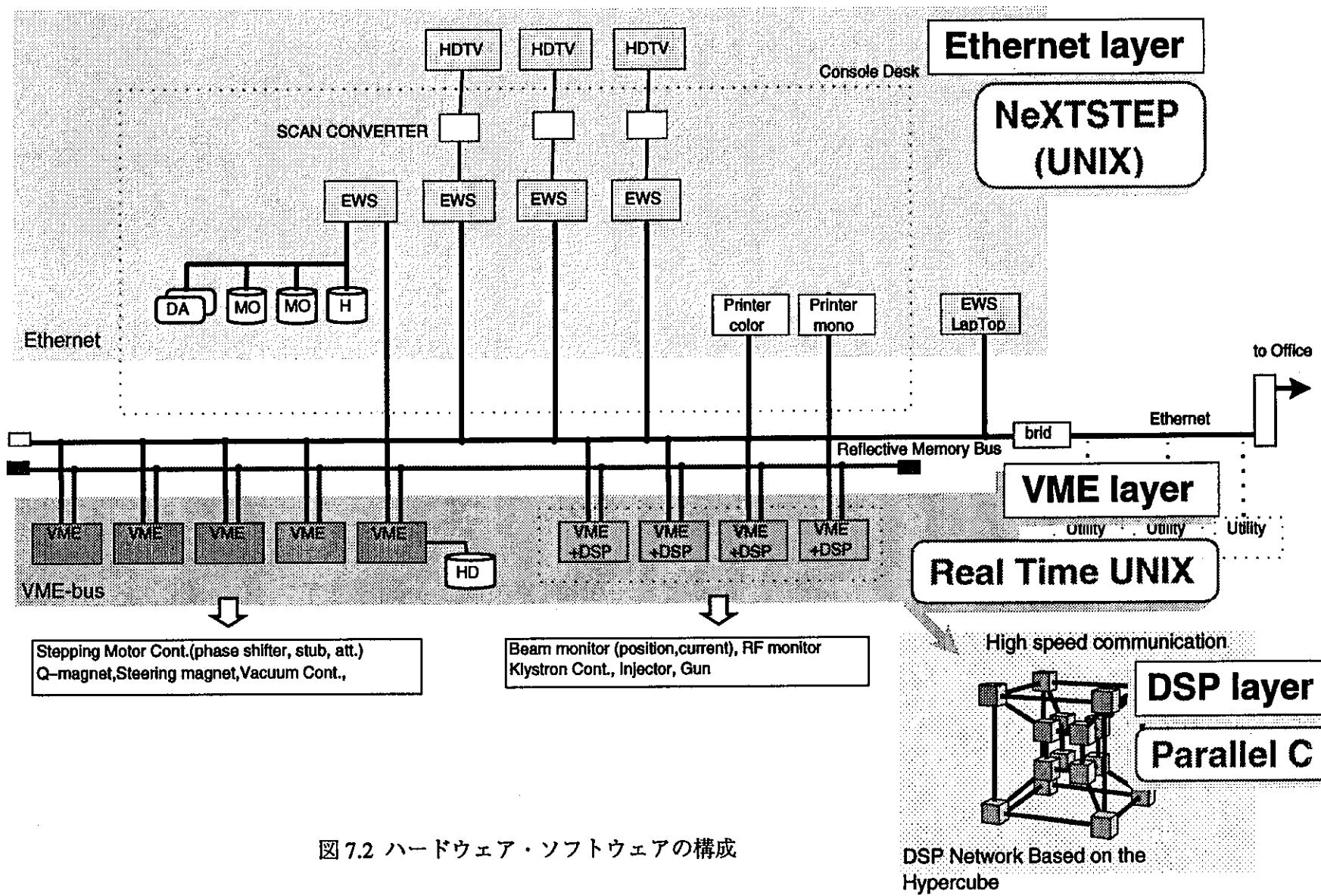


図 7.2 ハードウェア・ソフトウェアの構成

8 入射部試験

加速器本体の建設は平成5年から開始し、平成7年末までに入射部と加速管1本およびビームダンプ、さらにビーム加速を行うために必要な付帯設備を製作し入射部試験を実施した。本加速器は新しい方式の電子銃、高周波チョッパーおよび大電流の進行波還流型加速管等を採用しているため、全体を一度に試験せずに、重要な要素である入射部のみをまず対象とした。

入射部の試験は加速器運転の施設検査準備を経て、施設検査合格後の得た平成8年3月から平成8年9月まで行われた。図8.1に入射部試験の経緯を示す。施設検査以前の平成7年10月から高周波源の調整を開始し、発生した高周波の供給を受けて加速管のコンディショニングを行った。電子銃をはじめとするビーム加速に必要な要素の調整も並行して行い、施設検査の受験に向けて準備を行った。施設検査合格後は加速管とバンチャーのみ構成で初期試験を行い、ビーム電流47mA、パルス幅1msのビームを加速した。その後、データ集録装置等の計測系の整備、チョッパー空洞およびスリット、プリバンチャーの調整を行い、さらにコンディショニングを続けて、7月中旬からビーム加速試験を行

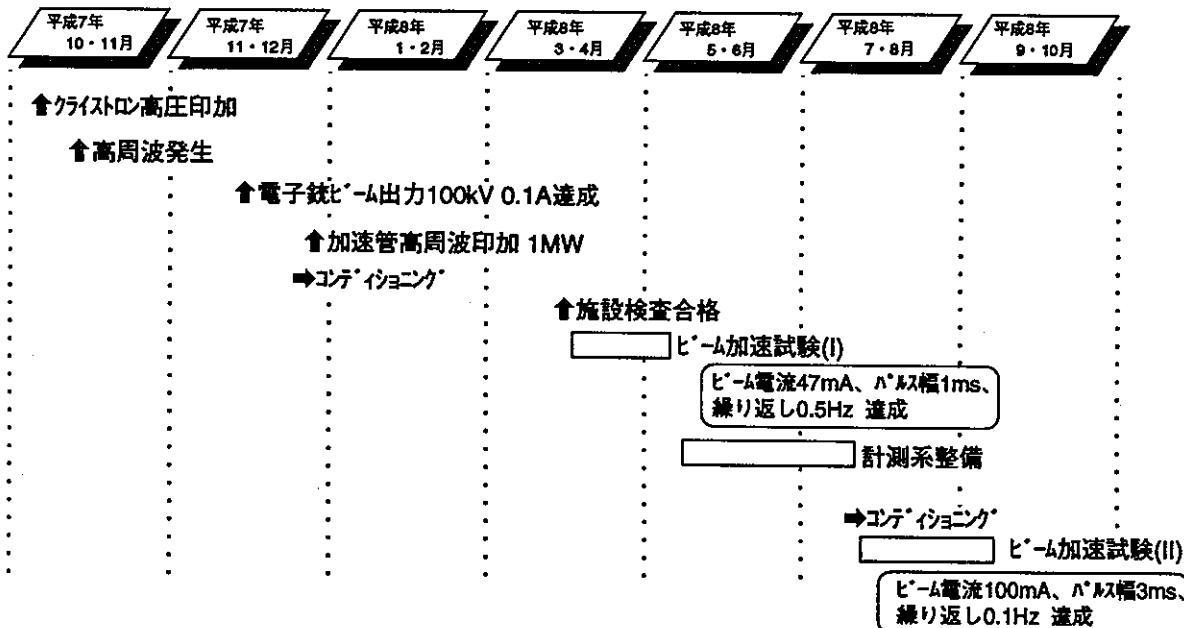
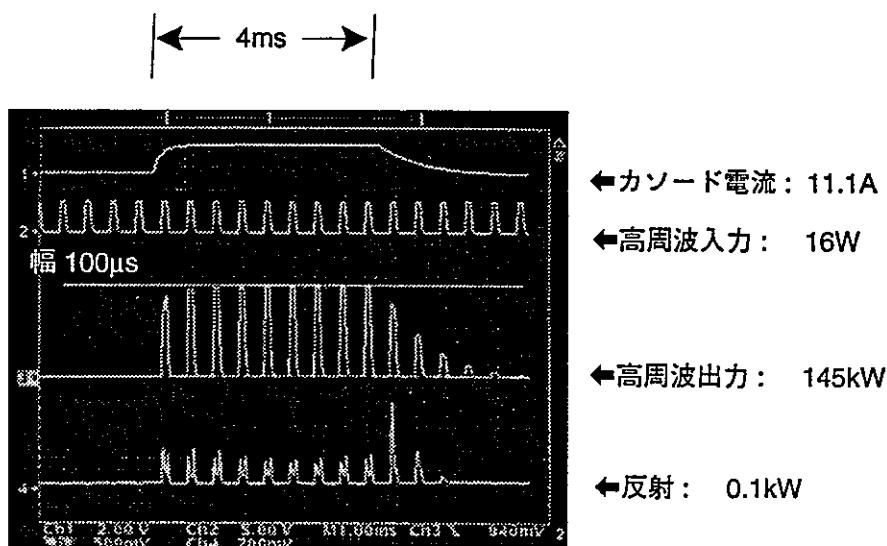


図 8.1 入射部試験の経緯

い、ビーム電流100mA、パルス幅3ms、繰り返し0.1Hzまで加速することが観測された。

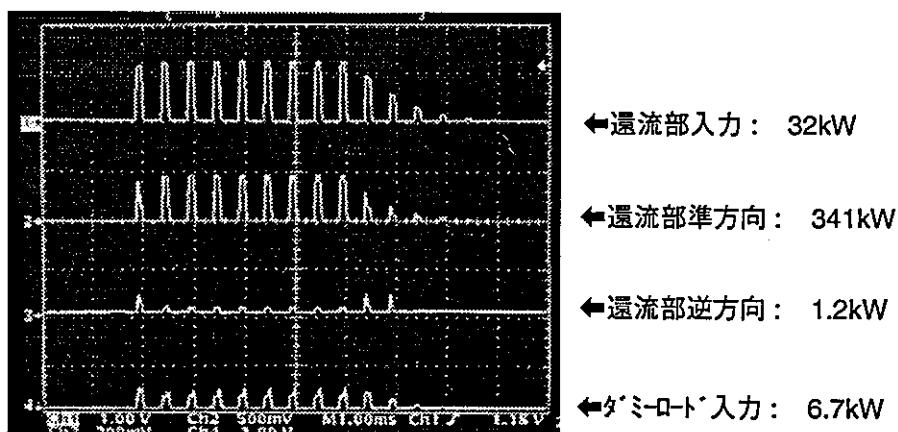
8.1 コンディショニング

ビームを加速管に通す前に加速管のコンディショニング(加速管に高周波を徐々に供給し、加速管内の電場を上げて放電を起こさせ、必要とされる電場において放電がなく安定に電場がかけられるようにする。)を行なった。初日は還流部加速管に100ms幅のパルスを0.1Hzで還流部電力が70kW程度まで加えることができ、パルス幅を広げることにより数日間のコンディショニングにより、還流型加速管に約1MWの電力が蓄えられるようになった。コンディショニングにより還流部内で放電が飛び、それにより内部がクリーンになっていくのであるが、大きな放電が起った場合はその影響が反射となって導波管を通じてクライストロンに損傷を加えることがある。反射を検出してクライストロン電源にインターロック掛け、クライストロンを保護するようになっているが、コンディショニングにおいては、その解除等の操作は煩雑なものとなる。本コンディショニングでは、放電でインターロックが働く以前に高周波を止め、放電が止まる程度待って、高周波の供給を再開するようにする方法を考案した。これはバーストパルス状の高周波で個々のパルス幅と繰り返しを調整し、図8.2に示すようなバーストパルス状の高周波でコンディショニングを行い、短い期間で終えることができた。特に加速管にソレノイドコイルにより磁場を加えると、さらにコンディショニングが必要になるので、この方法は有効であった。コンディショニングで用いられた高周波電力は、6章に述べられたもので、図6.1に示す回路で、L-バンドクライストロンを1本使用し、4台の還流部に供給する内の2台分を使い、残り2台分はダミーロードに吸収される。



高周波の波形 クライストロンの動作条件

パルス幅 4ms
 繰り返し 10Hz
 ビーム電圧 60kV
 アノード電圧 46kV



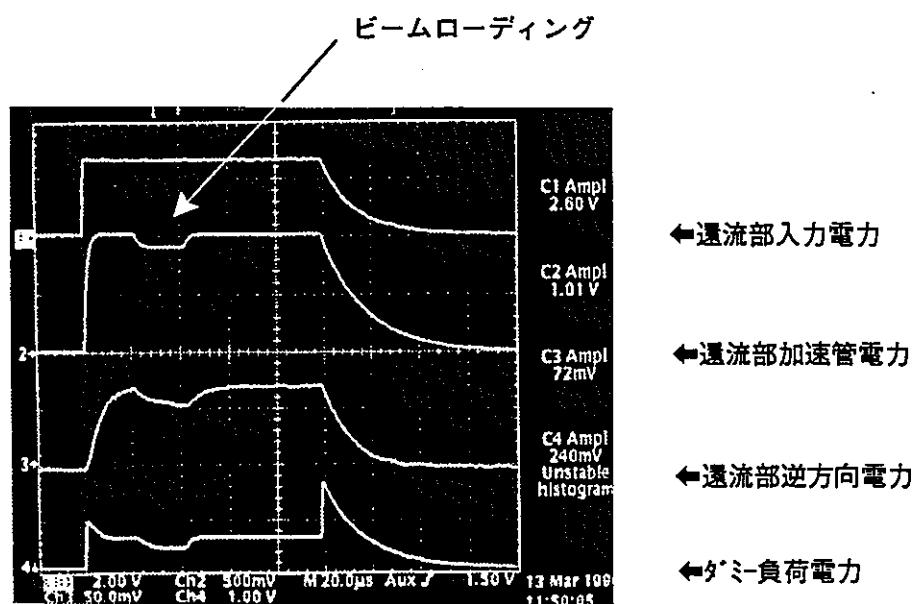
加速管還流部の波形 還流部の条件 電力増幅率： 3.3

図 8.2 高周波コンディショニング

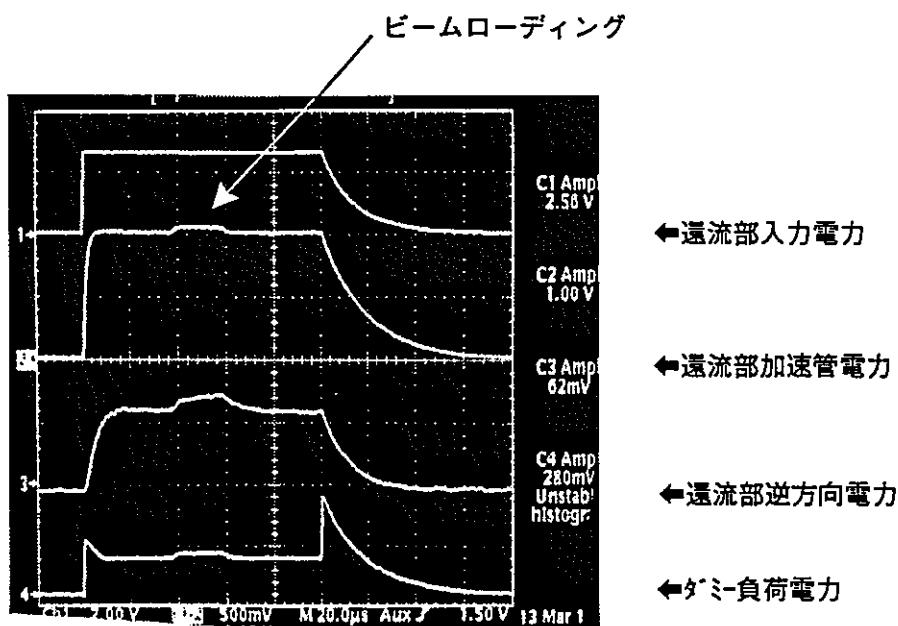
8.2 ビーム加速試験

8.2.1 初期試験

最初のビーム加速は高周波チョッパー、ブリバンチャーを動作させずに、非常に低いデュティファクター(パルス幅20μs、繰り返し1Hz)で行われた。供給する高周波の位相はバンチャーレと加速管との相対的位相のみを変化させて調整した。この状態は設計通りの条件ではないが、最初にビーム加速するには調整するパラメータが少なく、様子を観測するには良い条件である。このようにデュティの低いビーム条件では、多くの電子線形加速器と同じように挿入型のプロファイルモニタが使用できるので、ビームの調整を容易に行うことができる。図8.3に示すように、バンチャーレと加速管の位相を変化させることにより、ビームローディングの状態が変わる。図8.3の加速時の還流部加速管電力波形のビームローディング部分はビーム加速に電力を使うため低い値(凹んでいる)となっているが、減速時の波形はビームから電力を受け取り高い値となっている。



ビーム加速時の高周波電力波形



ビーム減速時の高周波電力波形

図 8.3 ビームローディング(1)

8.2.2 チョッパーの調整

チョッパーは3章に述べたように、高周波空洞とスリットから構成されている。チョッパーの調整は高周波空洞に基本波と2倍高調波を共振させ、基本波および高調波の振幅と位相を調整して図3.4に示す磁場にすることである。

空洞には2種類のスタブチューナーがあり、基本波に対しては TM_{210} モードで同調を取り、2倍高調波に対しては TM_{410} モードで同調が取れるように、事前に低レベル(高周波電源からではなく、測定器からの高周波源)で測定したチューナーの変化量に対する共振周波数の関係から設定した。チョッパースリットを完全に開き(40mm)、パルス幅10μs、1Hz程度の低デュティファクターの10mA程度のビームを電子銃から入射し、チョッパースリット直後のプロファイルモニタ(蛍光板)の画像を得た(図8.4)。各写真の下に描かれている図はビーム軸上に加わる磁場を示す波形である。その磁場により掃引された電子ビームの画像が図8.4である。図8.4(1)は空洞に高周波電力がないときで、ビームスポットが見えている。基本波の高周波電力を加えると図8.4(2)のようにx軸方向に振られる。このとき40mm振るのに400W程度必要であった。次に基本波が作る磁場と同じ方向に直流磁場バイアスを加えると図8.4(3)のようにx軸方向に振幅がシフトする。2倍高調波を50W程度とし、位相を変化させて図3.4のような磁場波形とすると図8.4(4)のような画像となる。中心部で明るくなっているのが、磁場波形上げフラットトップで偏向磁場ゼロの部分である。この状態でスリットをビーム径(直径8mm)に狭めると、フラットトップ部分で、基本波に対して120°の部分が切り取られる(図8.4(5))。

磁場波形を調整するにあっては、チョッパー空洞に取り付けられたピックアップループによってビーム軸上の磁場を測定した(図3.5におけるB点)。図3.5の磁場分布において、原点のビーム軸上の磁場と同じA点はx軸と空洞の境界が交わるB点で、 TM_{210} モードと TM_{410} モードの磁場が重ね合わされる点で原点と同じになる筈である。この点に磁場を検出できるピックアップループを取り付けてサンプリングスコープにより観測した。

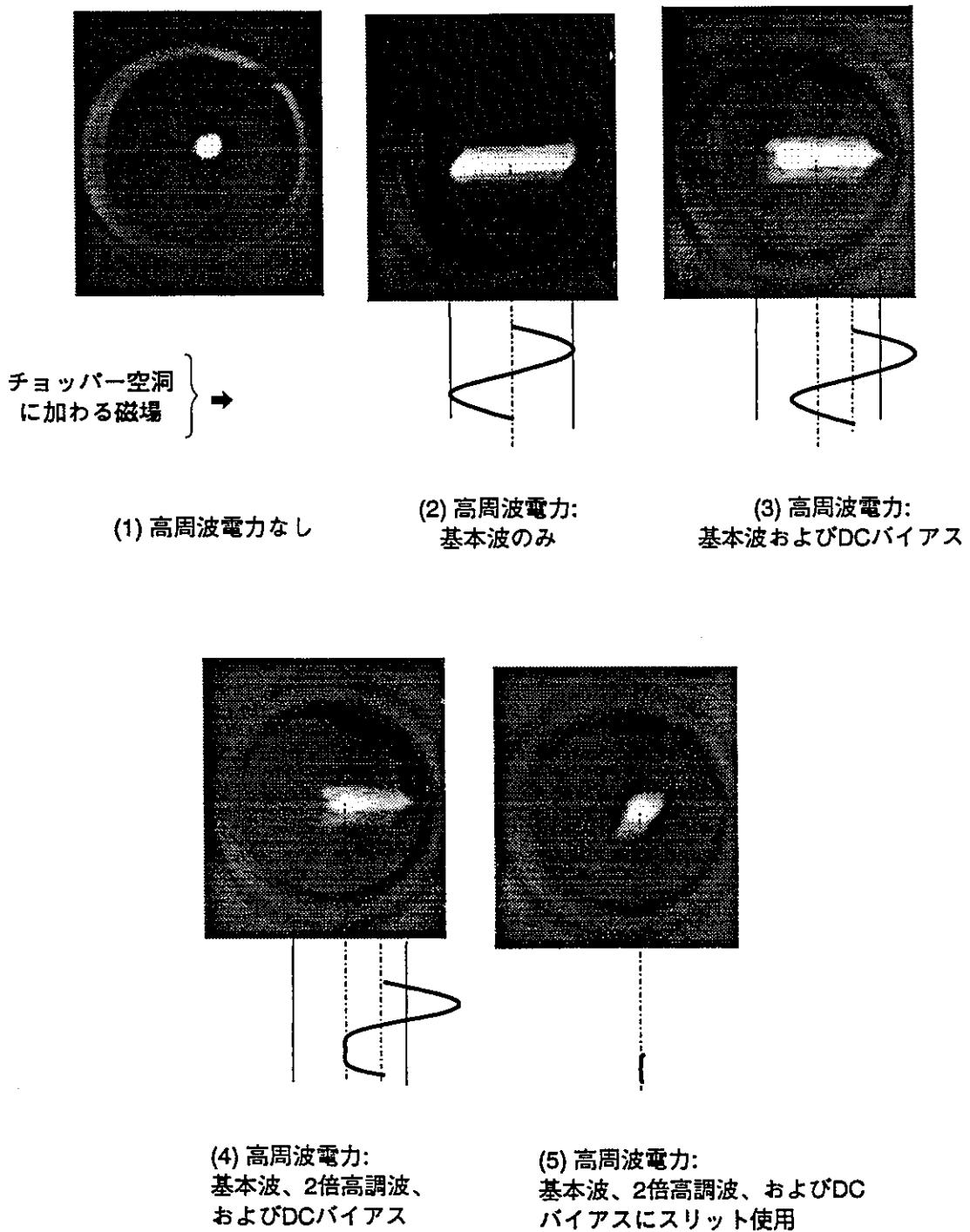


図 8.4 チョッパーの動作

8.2.3 プリバンチャーの調整

チョッパーを調整した後、3章で述べた方法により、プリバンチャーの離調を行った。まずビーム無しの状態でプリバンチャー空洞に高周波250Wを供給し、1249.135MHzで同調するようにプリバンチャーのスタブチューナーで調整する。次にチョッパーから1mAのビームをプリバンチャーに通し、プリバンチャー空洞に高周波を供給している移相器を変化させてビームローディングを観測し、ディバンチングおよびバンチングの位相角度を見つけ、バンチングの位相に固定する。現状ではバンチモニターが利用できないので、バンチヤーおよび第一加速管を通し、その後に接続されたエネルギー分析器を用いエネルギー分布が小さくなるバンチングの位相角を選んだ。

この時点での振幅および位相の参照点を図8.5.aに示す。ビーム電流を

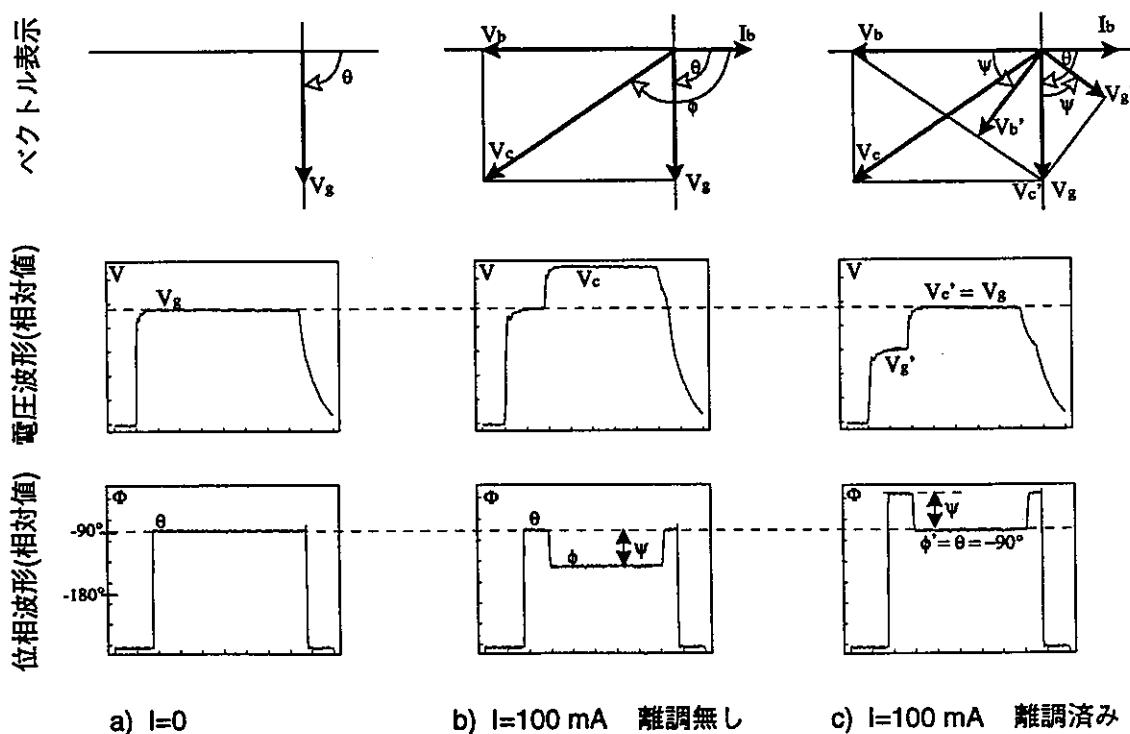


図8.5 プリバンチャーにおけるビームローディングと離調

100mAまで増加させるとビームによる誘導電場により図8.5.bのようにプリバンチャーランプにかかる電場が変化する。そこでプリバンチャーランプのスタブチューナーを調整し図8.5.cに示す参照点に合せる。

空洞へ供給する高周波および離調角は設計では544Wおよび48.6°、実機では200Wおよび55°であった。空洞に供給する高周波が設計値より少ないので離調の量も若干大きくなっている。

8.2.4 還流部加速管の調整

入射部試験時では、プリバンチャーランプを通過後ランプ長がいくらになっているか、わからぬのでバンチャーランプ、第一加速管に供給する高周波の位相を変化させて、ビームのエネルギー分解能が良くなるよう調整した。

位相を合わせる前に、バンチャーランプおよび第一加速管還流部のチューニングおよびマッチングを行なわなくてはならない。還流部内の移相器により共振を取り(チューニング)、スタブチューナーにより還流部内の反射を最小に保つように調整する(マッチング)。ビーム幅が1ms以下では、低レベルでの測定時、ビームローディング時でも設定値は変わらず、反射も少ない。しかしパルス幅が1msを越えると、反射が大きくなり($\Gamma > 0.2$)スタブチューナーを調整して反射を小さくし、移相器により共振を取る必要がある。

図8.6に高周波パルス幅4ms、ビームパルス幅3msのビーム加速時の還流部の高周波波形を示す。上から、還流部に供給される電力、還流部内の順方向電力、還流部内の逆方向電力、ダミーロードに吸収される電力を表わす。加速管に加わる電力(還流部順方向)は100mAのビームローディングのために電力が減少している。ビームローディングの無いパルスの初めの部分では反射電力(還流部逆方向)が大きいが、ビームローディングの部分では反射が少なくなるように調整されている。ダミーロードに対しても、この間のミスマッチ分の電力が入っている。還流部での反射率 $\Gamma = 0.025$ (ビームローディングのある時)、 $\Gamma = 0.03$ (ビームローディングの無い時)となっている。ダミーロードに入る電力はビームローディングがある時は、非常に小さくなっている。これはビーム電流

100mAに対して、還流部のカップリングが最適になるように設計されているからである。

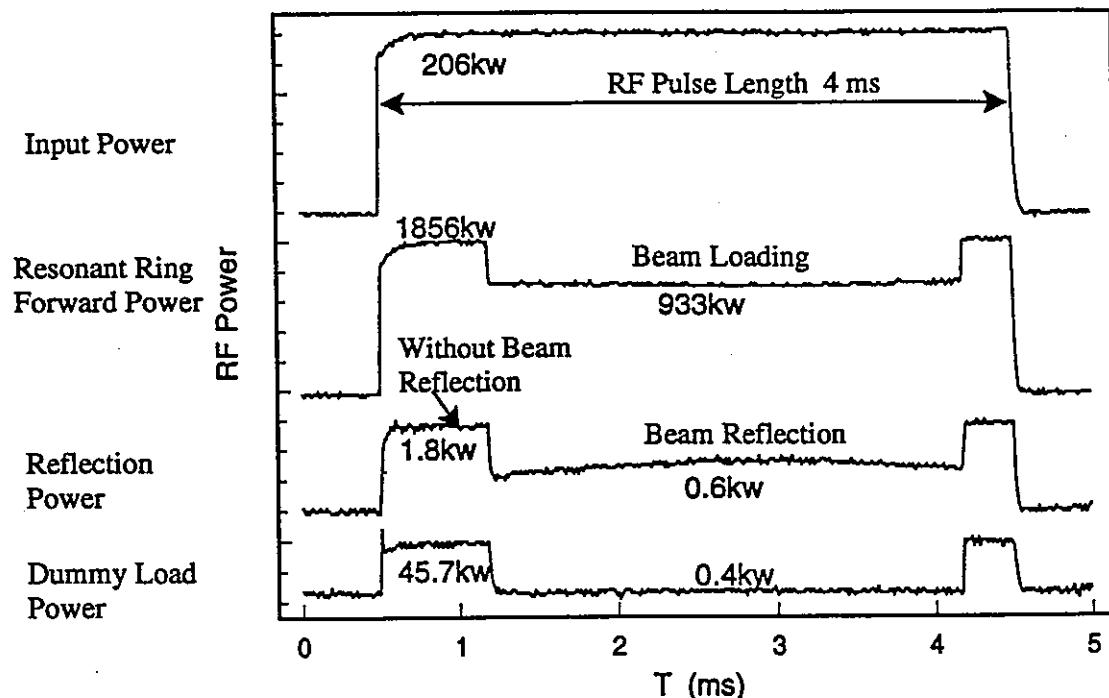


図 8.6 ビームローディング(2)

8.2.5 ビーム加速

以上のように各要素機器の調整を行った後、ビーム加速試験を実施した。電子銃から出た300mAの電子ビームをチョッパーにより120°切り出し、100mAとなったビームをプリバンチャーによりバンチを行う。現段階ではバンチ長を測定するバンチモニタが準備できなかったため、バンチャーと第一加速管のビームに対する位相の調整は、調整試験と同様に相互の位相を変化させビームエネルギーが最大になる点を選んだ(beam energy maximization法)。この方法はSLACで用いられて beam induction techniqueが開発される以前に行われた方法で、クライストロンもしくは加速管の数が多くなると感度が下る、少ない場合には有効な方法である¹⁶⁾。

現実には、ビームの幅を数

$10\mu s$ 、繰り返し 0.1Hz 程度、ピーケ電流数 10mA のパルスを、まずプロファイルモニタ、位置モニタ、電流モニタで観測しながら、バンチャーチャー、加速管の位相、集束コイル、ステアリングコイル等を調整して、ビームを順々に通過させて行った。その後、ビーム幅を増加しながら最終的にピーケ電流 100mA 、パルス幅 3ms 、繰り返し 0.1Hz まで加速することができた。パルス幅が数 $10\mu s$ 以上ではプロファイルモニタを使用できないため、電流モニタ、位置モニタによりビームを観測した。図8.7に電流モニタで測定したビーム電流 100mA 、パルス幅 3ms の電流波形を示す。上段は電子銃直後のモニタ波形(チョッパーを通過していないので最大電流は 300mA)、中段はチョッパー通過後、下段は第一加速管通過後で共に 100mA のビーム電流となっている。

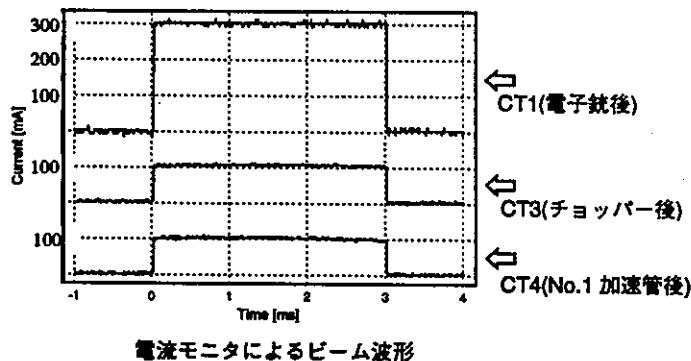


図8.7 入射部試験結果の例

8.2.6 エネルギー測定

加速されたビームのエネルギー分布は分析用電磁石とスリットと組み合わされたファラディカップにより測定した。最終加速管の下流部にある 30cm 程度のビームパイプ部分を図8.8に示すような分析装置に置き換え、磁場により曲げられてスリットを通過したビームをファラディカップにて測定することによりエネルギー分布を測定した。磁場を変化させることにより、それに対応するビームのエネルギーの分布を求めた。エネルギー分布を精度良く測定するにはビームスポットのサイズ、分布等未知の部分があるが、図8.9にその計測結果を示す。

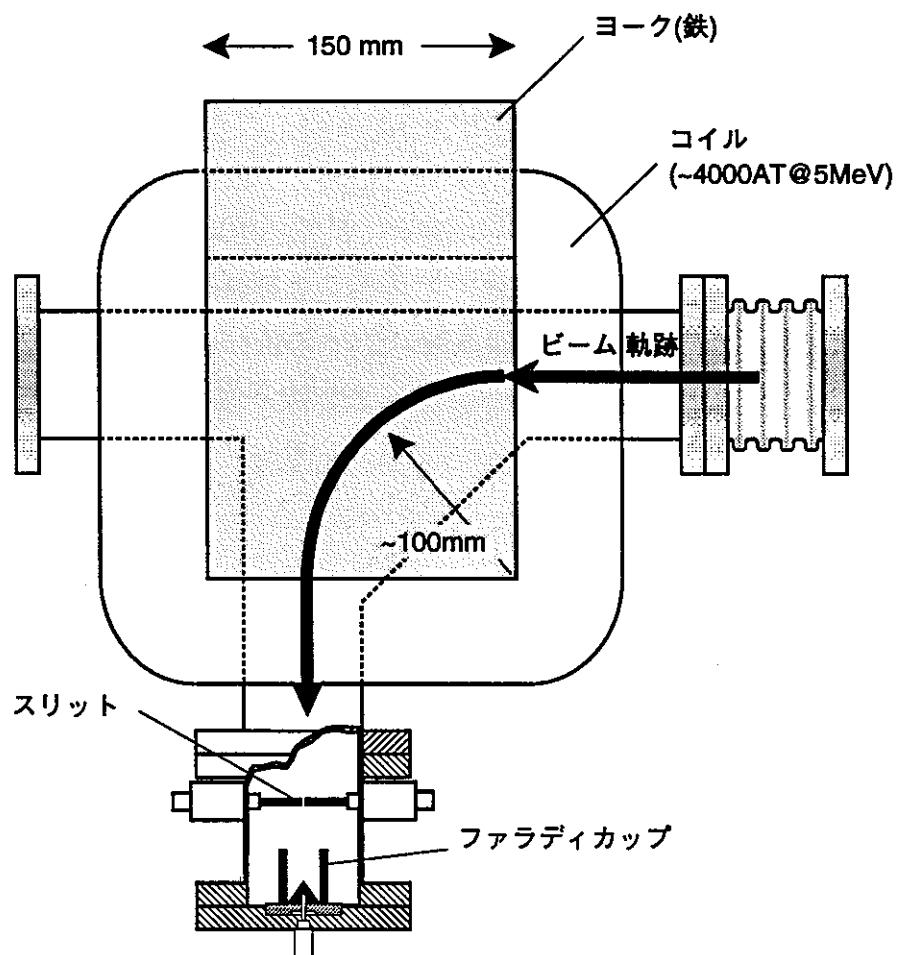


図8.8 エネルギー分析器

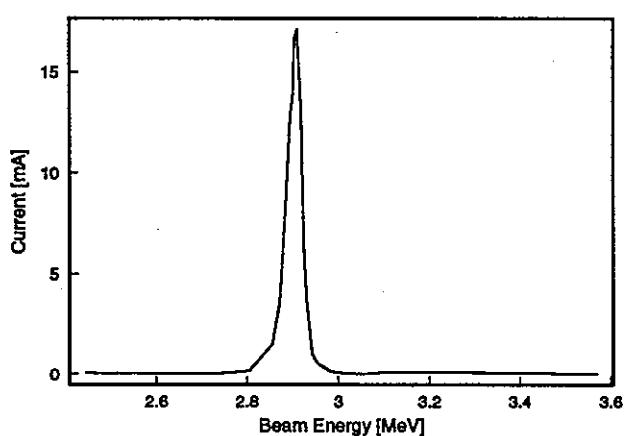


図8.9 エネルギー分布

9 終わりに

本報告書では、大電流電子線形加速器の設計概要および、平成8年に行われた入射部試験について報告した。

入射部試験において、ピーク電流100mA、パルス幅3ms、繰り返し0.1Hzまで加速したことを観測し、ほぼ設計通りであることを確認した。

入射部試験の終了後、残り6本の加速管および付帯する設備の設置を平成9年3月に完了し、全ての加速器要素、付帯設備の設置を完了した。現在はエネルギー10MeV、200kWのフルビーム試験に向けての調整・準備中である。

謝辞

本研究を行うにあたり計画当初から御指導また施設を使用させて頂いた文部省高エネルギー物理学研究所(現:高エネルギー加速器研究機構)の佐藤 勇主幹教授(現:日本大学 教授)、有益な助言・議論をして頂いた科学技術庁放射線医学研究所 平尾 泰男 所長をはじめとする御協力頂いた方々、また本加速器の設計・製作を担当して各製作会社の方々に深謝の意を表する。

参考文献

- [1]若林 利男、山岡 光明、小無 健司、高下 浩文、"高速炉および加速器による核変換研究の現状、" 動燃技報 № 82、96 (1992).
- [2]遠山 伸一、谷 賢、"大電流電子線形加速器の開発、"動燃技報 № 88、19 (1993)
- [3]William B. Herrmannsfeld, "EGUN an electron optics and gun design program," SLAC - Report - 331, (October 1988).
- [4]Y.Yamazaki,M.Nomura, "The Electron Gun for the PNC High Power CW linac," Proc. of 1994 Linac Accelerator Conf., vol.1, p219~p222 (1994).
- [5]計算コードFMAFIA, CST(Computer-Simulationstechnik), Lauteschlägerstrabe 38, D-64289 Darmstadt Germany.
- [6]W.R.Nelson, H.Hirayama et al., "The EGS4 Code System," SLAC-Report-265, (1985).
- [7]M.T.Menzel, H.K.Stokes, "User's Guide for POISSON/SUPERFISH Group of Codes," LA - UR - 87 - 115, (January 1987).
- [8]Y.L.Wang, et al, *J. Nucl. Sci, Technol.*, 30 [12], 1261 (1993).
- [9]R. Klatt, et al, Proc. of 1986 Linac Accelerator Conf., SLAC - 303, p276~p278 (1986).
- [10]計算コードNASTRAN, Monty Kennedy Engineering, 3881 E. Marble Peak Place,Tucson, Arizona 85718, U.S.A.
- [11]武井 早憲、武田 靖、大電力電子線用ビームダンプの開発(1) -概念設計-:PNC TN9410 96-072(1996).
- [12] H.Yonezawa, Y.Okazaki, "A ONE DIMENSIONAL DISK MODEL SIMULATION FOR KLYSTRON DESIGN", SLAC-TN-84-5 (1984).
- [13] T.Shintake, "HIGH POWER KLYSTRON SIMULATIONS USING FCI - FIELD CHARGE INTERACTION CODE", KEK Report(1990).
- [14]平野 耕一郎、江本 隆、王 元林、榎本 収志、佐藤 勇、大電力クライストロンの開発 (1) -試作クライストロンの改造-:PNC TN9410 96-071(1996).
- [15]F. Rinaldo,S. Wolbers, "Loosely coupled parallel processing at fermilab," Computer in physics Vol. 7, No. 2, 184, (1993).
- [16]K.L.Brown, et al, Proc. of the 1961 Int. Conf. on High Energy Accelerators (1961).