



大電流CW電子線形加速器入射部の開発について

江本 隆 野村 昌弘

大洗工学センター基盤技術開発部

資料番号: 97-3

Design of the High Power CW Electron Linac Injector

Takashi Emoto Masahiro Nomura

(Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center)

オメガ計画の一環として、動燃事業団では長寿命核分裂生成物を加速器により消滅処理する可能性の研究を進めている。消滅処理研究に必要となる加速器の大電流技術を開発することを目的として、加速エネルギー10MeVおよび最大/平均ビーム電流100mA/20mAの大電流電子線形加速器を設計し、その構成要素であるクライストロン、加速管等の試作・評価を実施した。本稿では、加速器要素の入射部を構成する電子銃、RFチョッパー、パンチャー、ビーム輸送系、モニター等の機器について設計方針および電子ビーム輸送のシミュレーションによる結果を述べる。

1. はじめに

長期的・基礎的研究として推進されているオメガ計画の一環として、動燃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、加速器等により消滅する可能性を探る研究を推進している。動燃事業団では、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いる。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のが困難であることから、加速器等による消滅処理の可能性を検討している¹⁾。

加速器等による消滅処理としては、加速器を単体で用いる方法、加速器と未臨界炉を組み合わせる方法等が提案されている。これらのうち電子加速器による消滅処理は、加速器から得られる高エネルギー電子線を対象核種に直接、あるいは重い元素のターゲットに衝突させ、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ものである。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や、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。

開発中の電子線形加速器の概要については他の報告書²⁾に譲るが、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ので、動燃事業団では当面、加速器の大電流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に選んだのは、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

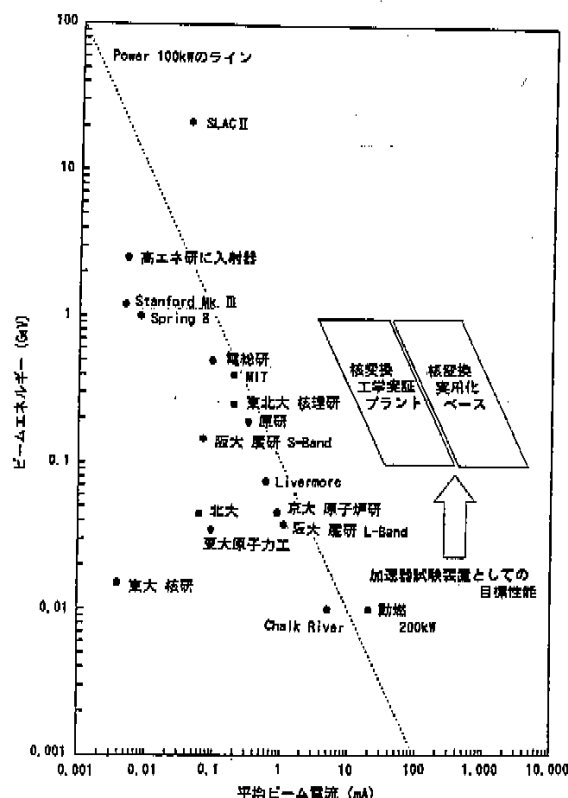


図1 代表的電子線形加速器の性能比較

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ふ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力・大平均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関連）による加速管温度の制御等が挙げられる。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、制御が重要な開発課題となる。上述のように本加速器は新たな技術課題があるため、設計研究を行うのは勿論のこと、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。表1に動燃事業団で開発を進めている加速器の基本仕様を示す。

表1 加速器基本仕様

エネルギー	10 MeV
最大ビーム電流	100 mA
平均ビーム電流	20 mA
エネルギー分散	0.5%
パルス幅	4 msec
繰り返し数	50 Hz
デューティファクター	20 %
平均ビーム出力	200 kW
加速周波数	1249.135Hz
加速モード	$2\pi/3$
加速管の本数（含むバンチャー）	8 本
クライストロン数	2 台
クライストロン出力	1.2MW
加速器全長	16 m

本加速器の基本構成と入射部の構成を図2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し200keVまで加速する電子銃、直流電子ビームを加速管の高周波位相にビームを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位相に乗ったビームを位相方向にまとめるプリバンチャーおよびバンチャー、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バ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の速度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。電子がこの領域まで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わ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一定なので加速管のエネルギーによらず、ほぼ同じ構造となる。それゆえ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で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してしまう重要な部分である。

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。この量は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ので、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、バ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

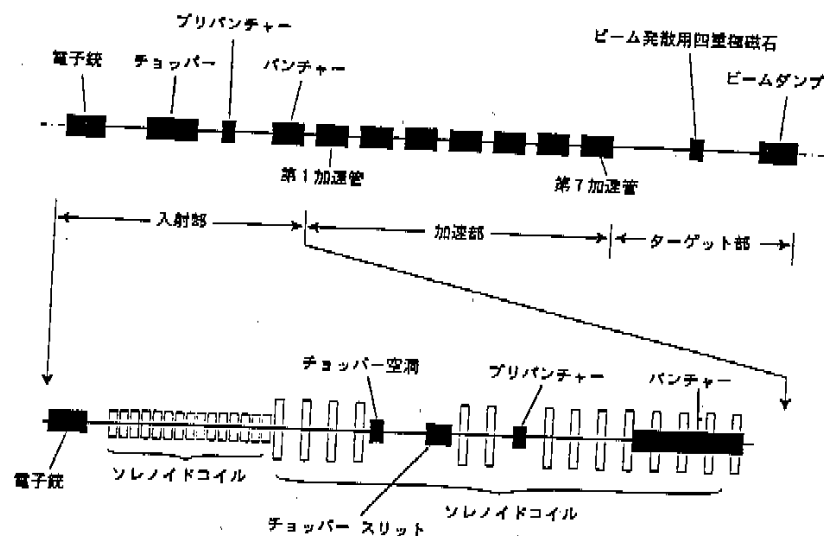


図2 加速器本体と入射部の基本構成

ある。

本報では加速器の入射部を構成する電子銃、RFチョッパー、バンチャー、ビーム輸送系、ビームモニタ、高周波供給部について設計の概要およびこれらを設計したビームシミュレーションについて報告する。

2. 設計の概要

入射部を構成する要素の概要と設計については以下の項目で述べるが、それ以外に付帯設備としてバンチャー等を恒温に保つ精密温度調節装置、高周波を供給するクライストロンおよびそのパルス電源の設計は割愛した。

3. 電子銃

3.1 電子銃の概要

本電子銃はアパーチャグリッドを用いた熱陰極型である。電子銃の仕様を表2に、概略構造を図3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してしまい採用できない。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は、加速器全体のエミッタンスを決定してしまうので、大電流の加速を後段で安定に行うためには、電子銃から出ていくビームのエミッタンスを極力小さくしなくてはならない。

本電子銃では図3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パーチャグリッドを設け、その影響による電位面の変位は第2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、含浸型カソードを用

表2 電子銃ビーム仕様

エネルギー	0.2MeV
電流値（ピーク）	100 μ ～400mA
パルス幅	100 μ ～4 msec
繰り返し数	50Hz
ビーム径	1cm以下
規格化エミッタンス	10 π mm・mrad以下

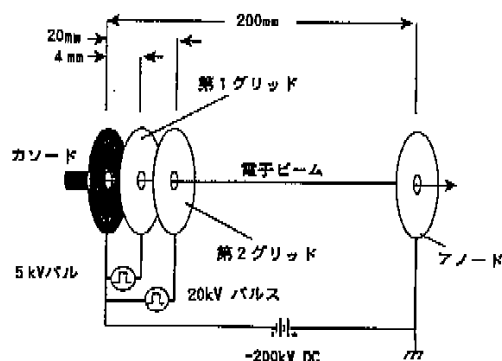


図3 電子銃概念図

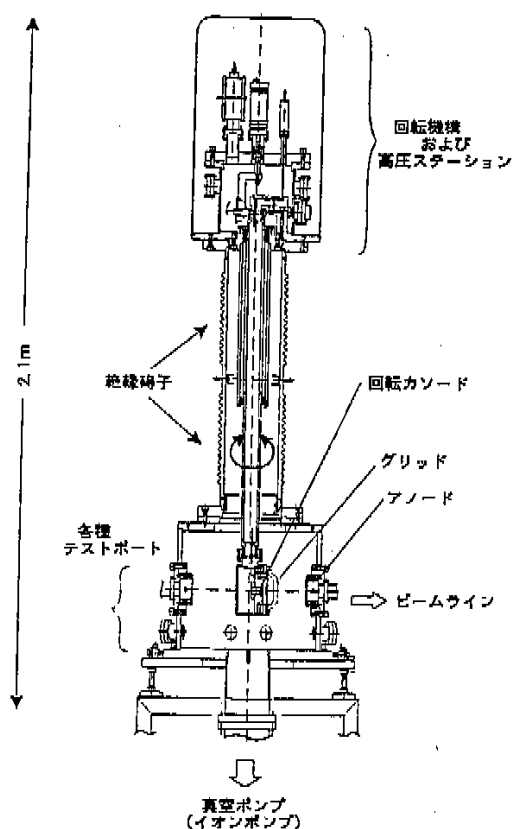


図4 電子銃側面図

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ので、本電子銃のようにデューティ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状態で試験できるように、図4に示すように通常のものと異なり縦型で、カソードの部分が回転できる構造になっている。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等を測定するのに非常に有益である。

3.2 電子銃の設計

電子銃の構造としてダブルアパーチャグリッド方式を採用し、その電子銃電極の幾何学的形状を電子軌道解析コードEGUN³⁾によって解析、最適化した。EGUNは空間電荷効果を含んだ2次元の有限差分法でポアソン方程式の解を求めるものである。

最適化はカソード、グリッド、アノードの間

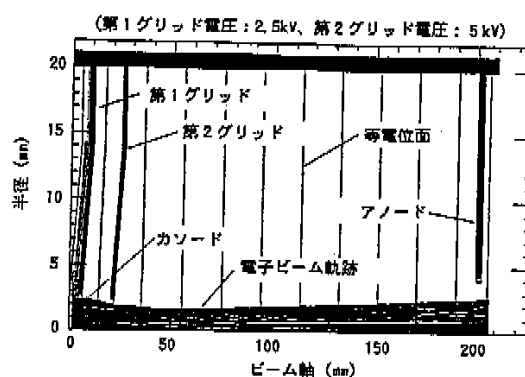


図5 EGUNによるビーム軌道の計算例

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の範囲でエミッタンスを $10\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 以下に押さえる電極形状を決めることができた。図5にEGUNによるビーム軌道と電極形状を示す。

3.3 電子銃制御用電源

ダブルアパーチャグリッド方式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った。メッシュグリッド方式では、100V以下であることに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。グリッドパルス幅が数 μsec 以下であれば種々の波形整形回路やパルス変圧器等が採用できるが、パルス幅4msec、5kVの電圧波形に対しては多数の電界効果素子(FET)を重ねてスイッチング素子として使用した。

グリッドパルスの立ち上がり、立ち下がりはそのまま電子ビームのそれとなるので、各種のビーム利用を考慮し $1\mu\text{sec}$ となるように設計された。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。

4. 高周波チョッパー

4.1 高周波チョッパーの概要

電子銃から引き出されたビームは概略図6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ブリバンチャーに送られる。チョッパーでのビームと垂直方向の運動量の増加はエミッタンスを劣化させる。しかしスリッ

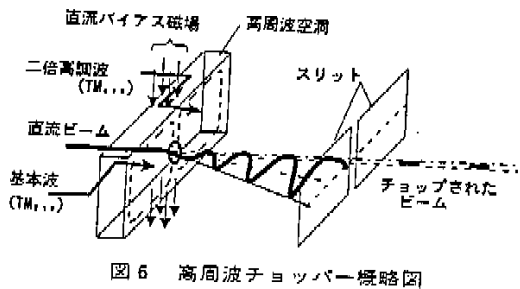


図6 高周波チョッパー概略図

トの幅を狭くしてエミッタンスを良くしようとする
と取り出される位相角が減少し電子銃からの
ビームが効率良く利用できない上、スリットで大量の
ビームを受け止めなくてはならず熱除去の問題が生
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ビームに加えることによ
り、エミッタンスの増加を極力抑え、位相角120度
(直流ビーム1/3の電流)を取り出すことを可能とし
た。

本方式の概要は高周波空洞を通過するビームに
対して加える磁場を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7の太線に示す磁場を加える。
これにより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ができる。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。図8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。

4.2 チョッパーの設計

前述の考案を具体化するために、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

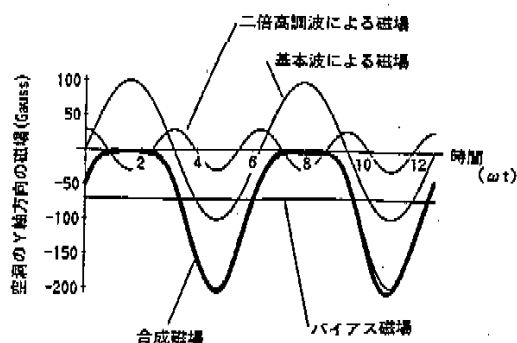


図7 高周波空洞でのY軸方向の磁場

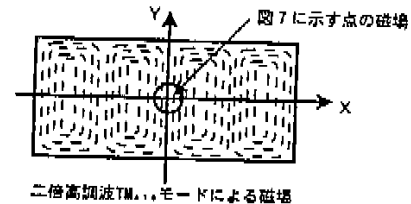
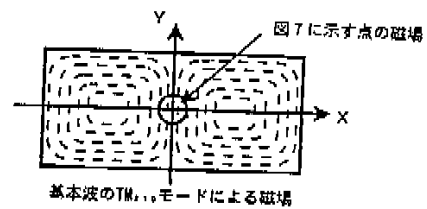


図8 高周波空洞内に励起される磁場分布

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MAFIA⁴⁾によって行った。MAFIAは三
次元の有限差分法でMaxwell方程式の解を求め
るものである。

空洞の形状は二つのモードが励起できる値を決
め、アルミニウム製の試作空洞を作り、測定によ
り最終形状を定めた。空洞には高周波を供給する
カプラ、空洞での共鳴を微調整するスタブチュー
ナが取り付けられる。

スリットは空洞から約50cmのところに置かれ、
スリット幅はビーム径と同じである5mmとし、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加える。スリット
は10kW程度の電力が捨てられるため、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
れるような形状とした。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EGS4⁵⁾によって解析され、ス
リットの形状を設計した。

設計されたチョッパー空洞とスリットにより切
り取られるビームのシミュレーションを図9に示
す。計算はMAFIAコードにより行った。

5. プリバンチャーおよびバンチャー

5.1 プリバンチャーおよびバンチャーの概要

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
により位相方向にまとめ、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にす
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

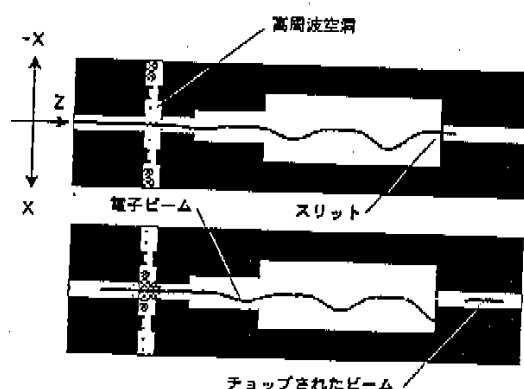
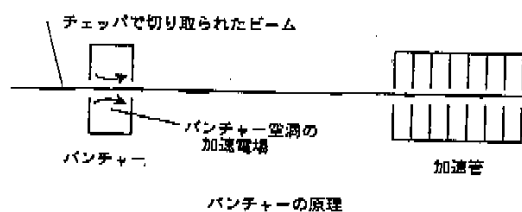


図9 チョッパーのビーム軌道シミュレーション
(1/4周期前後を示す)

出るときにはその高周波位相に応じて異なる速度をもつ（速度変調）、バンチャーから適当な距離



バンチャーの原理

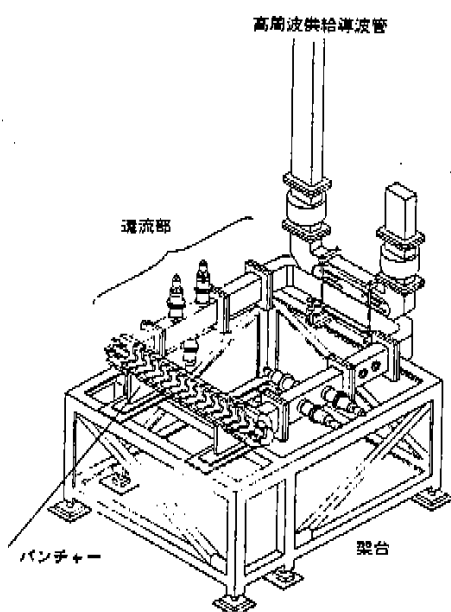


図10 進行波漂流型バンチャーの外観図とバンチャーの原理

の点では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群する（バンチする）。これがビーム圧縮の原理である。図10にビーム圧縮の原理および概要を示す。

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および図10に示すような加速管とほぼ同じ構造からなる進行波漂流型バンチャーから構成されている。バンチャーは進行波漂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16空洞よりできている。進行波漂流型のバンチャーおよび加速管の設計については他の報告書⁷⁾に譲る。

バンチャーにおいて、集群できる度合いは、空間電荷効果により制限されるので、比較的短いドリフト区間で強い電場により集群する必要がある。そこでプリバンチャーではビームは位相角を120度から30度まで絞り、さらにバンチャーでは30度から15度まで絞り込む。プリバンチャーおよびバンチャーの位置、位相角、空洞内の電場については8章に述べるビーム輸送のシミュレーションにより、エミッタンスの増加等を考慮しながら決定された。

5.2 プリバンチャーの高周波設計

プリバンチャーでの問題点に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) 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の電場を高めるには、回路のQ値を高くしなくてはならない。しかしQ値が高いことにより、チョッパーで切り取られたビーム（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）により電圧を誘起する。この電圧は空洞に供給する高周波電圧より大きくなることがあり、さらにビームに対して集群させる位相角をずらしてしまう。

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。そこで図11に示すように、胴の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。空洞の高周波損失等電気的特性は二次元（軸対称）電磁場解析コードSUPERFISH⁶⁾により計算した。

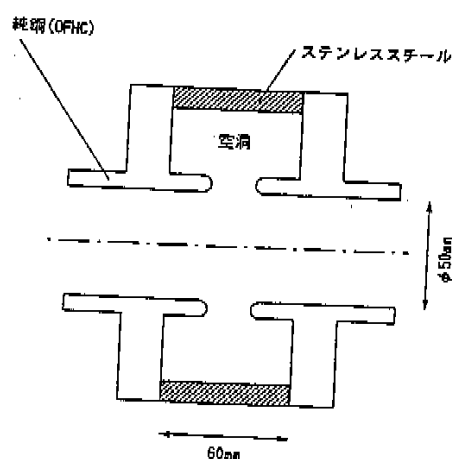


図11 プリバンチャーの断面図

6. ビーム輸送系およびビームモニタ

6.1 概要

ビーム輸送系はビームが半径方向に発散するの制御する要素から成り立っている。図12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て、12台のソレノイドコイルからなるドリフト区間に入る。ソレノイドコイルは一樣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。ドリフト区間は電子銃室と加速管室を分ける2.3mの遮蔽壁の区間で、エミッタンスを劣化させることなくビームをチョッパーに送る必要がある。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、ビームが万一本コリメータに当たった場合、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。バ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台ほぼ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。これらビーム輸送に対するコイルの位置、磁場の強さ等の設計、最適化は8章で述べる。

ビームモニタはビームのプロファイル（形状、位置）および電流を測るものに分けられる。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、等が図12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ない加速器においては、これらモニタは加速器の振る舞い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られている。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等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、繰返しを減らすことでビーム電流を下げ、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。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あるが適当なものがなく、現在開発中である。そのため、スクリーンモニタを挿入する部分は4方向に汎用ポートとし、将来の使用を考慮してある。

6.2 プロファイルモニタ

(1) スクリーンモニタ

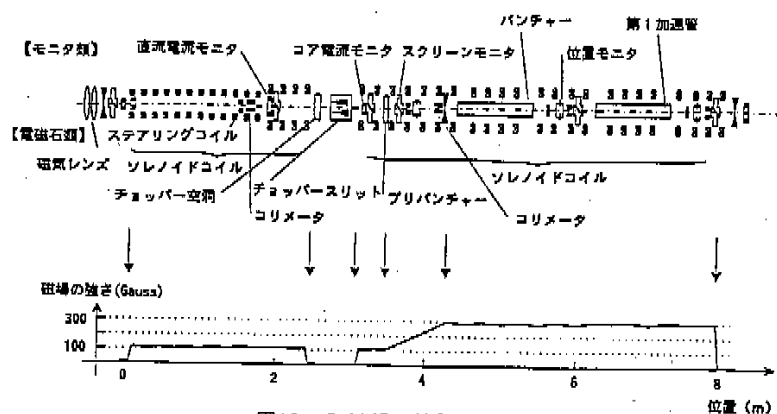


図12 入射部の機器配置

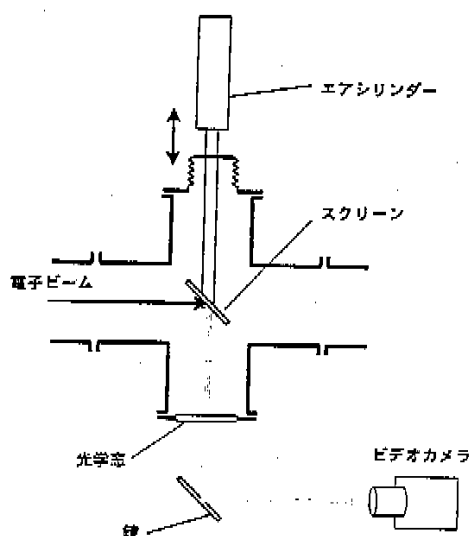


図13 スクリーンモニタ概念図

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いる。図13に示すように、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。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（ $\sim 320\text{nm}$ ）で短い時間の発光、赤い可視光領域（ $\sim 680\text{nm}$ ）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程高速なので、この光をストリークカメラで観測し位相角を測定する。また長い発光ではプロファイルを測定する。

蛍光板からの光は光学素子で作られたのぞき窓から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。ストリークカメラとは空間と時間を変数として光の強度を記録できるもので、時間分解能は 2psec である。

(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として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。図14に示すように、X軸、Y軸に並べられた電極にビームが通過する際、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。実際には感度をあげ、S/N比を上げるため、ビームがチョッパーにより

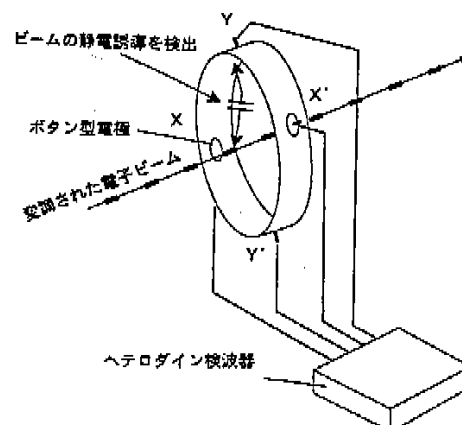


図14 位置モニタ

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をしている。

6.3 電流モニタ

(1) 直流電流モニタ

本加速器のビームパルスは非常に長く（ $\sim 4\text{msec}$ ）検出器の低域周波数特性を確保するために、また電子銃から出た直流ビームを測定するため、直流から感度のある磁気変調型電流トランス方式の既成品を採用した。表3に本モニタの仕様を示す。

(2) コアモニタ

コアモニタは図15に示すように、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の長いため、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 4msec のパルスをほぼ測定でき、立ち上がり時間が 1msec 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を与えてくれるので、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。

表3 直流電流モニタ仕様

測定電流	$10\mu\text{A} \sim 500\text{mA}$
測定精度	$\sim 10\text{mA}$ $\sim 500\text{mA}$
周波数特性	$\pm 10\mu\text{A}$ 以下 $\pm 200\mu\text{A}$ 以下 $\text{DC} \sim 500\text{Hz} (-3\text{dB})$

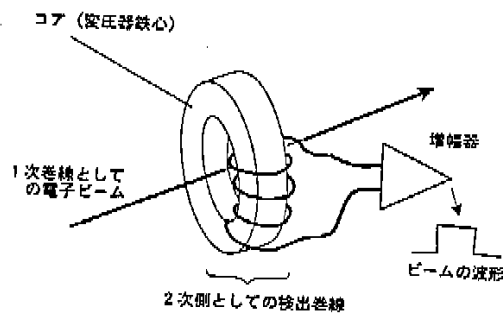


図15 コアモニタ（電子ビームを1ターンコイルとする変圧器を構成する）

7. 高周波給電部

前述の高周波チョッパー、プリバンチャー、バンチャーに高周波電力を供給する部分である。図16に入射部機器の高周波回路を示す。基準信号の1249.135MHzは3系統に分岐され、2系統はLバンド1.2MWのクライストロンを駆動しバンチャー、加速管に供給され、1系統は2倍に通倍されSバンド2kW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系統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、基準信号に対して1度以内の位相変動に安定化している。ビームに対するチョッパー空洞での基本波、高調波の位相および加速位相の安定度はビームを設計どおりバンチし加速し、

ビームエネルギーの安定度に寄与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ップラにより分岐され各入射部機器に供給される。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より接続されている。移相器、減衰器、導波管等大電力を制御する大型の要素であり、かつ除熱し恒温に保つ必要がある。

8. ビーム輸送シミュレーション

8.1 計算の概要

入射部の主なビーム輸送のシミュレーションは電子軌道解析コードPARMELA⁸⁾ (Phase And Radial Motion in Electron Linear Accelerator) により行った。PARMELAは多粒子（多くの電子を一つの粒子で代表したもの）シミュレーションコードで、線形加速器、ビーム輸送系の軸方向を独立変数とし扱い、トレースしている粒子の情報を渡して行くチェーン行列法(chain-matrix method)を用いている。コードは6次元で作られているが、空間電荷効果を扱う部分は軸方向と半径方向に切られたドーナツ状のメッシュで電荷を扱っている。

コード自体は変更したり、いろいろな目的に利用できるよう柔軟な構造に作られている。本計算においても、磁気レンズ、チョッパースリット要素の付加、本加速器の体系で精度を上げるためメッ

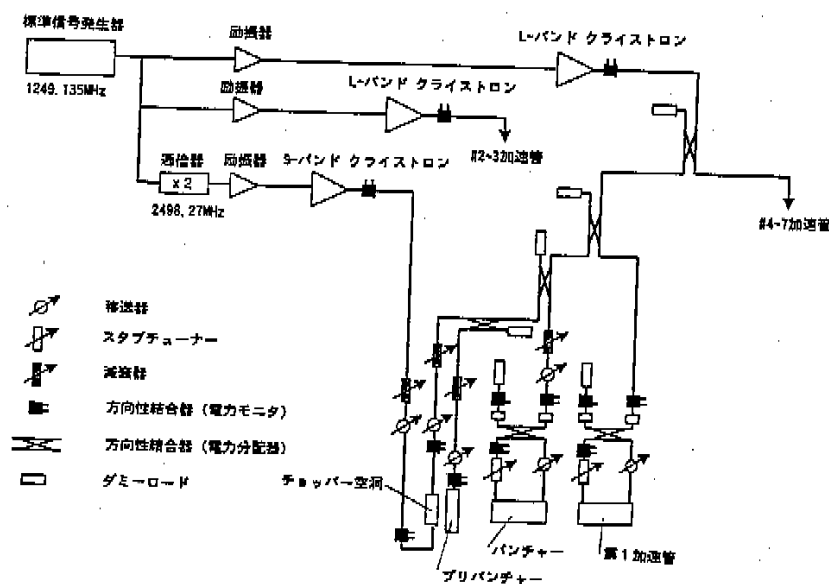


図16 入射器高周波回路

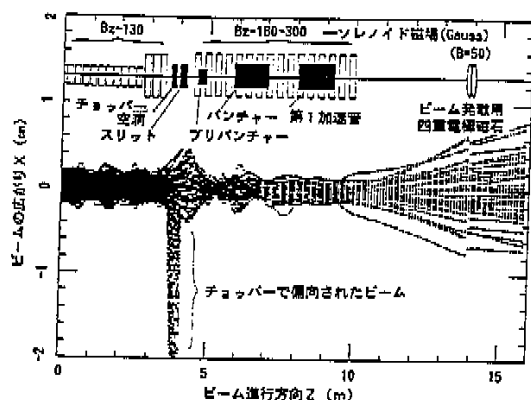


図17 電子銃からビームダンプまでの電子ビーム軌道

シュ数の拡大等の機能をコードにつけ加えた⁹⁾。

入射部の各要素の配位、ソレノイドコイルの磁場強度、エミッタンスの最適化等、PARMELAによって行われた。

8.2 計算結果

代表的な計算結果として図17に電子銃出口からチョッパー、プリバンチャー、バンチャー、加速管、ビームダンプの熱負荷を軽減するために電子ビームを発散させる四重極電磁石を通過するまでのX軸方向の電子ビームの広がりを示す。電子銃出口からチョッパー空洞までの約3 mの自由空間には先に述べたようにコイルを設置し、ビームラインに平行な磁場を作っている。磁場強度は、電子ビームの空間電荷効果による反発力と磁場による収束力が等しく成るように設定し、電子ビームの流れが層流になるようにし、電子ビームの品質の劣化を防いでいる。

チョッパーでは電子ビームを水平方向に振り電子ビームを位相角にして約120度だけ切り出す。このためチョッパー空洞からチョッパースリットの間には磁場のない領域を設けている。チョッパーによる電子ビームの切り出しの様子を図18に示す。この図から、チョッパー空洞により偏向された部分がチョッパースリットにより削り取られ位相角にして約120度だけがチョッパースリットを通過しているのが理解できる。この磁場のない領域のために切り出された電子ビームは広がってしまう。この広がった電子ビームは再びソレノイド磁場により集束させられて、プリバンチャーに入射される。

プリバンチャーおよびバンチャーでは効率良く加速するために電子ビームをRFで速度変調しそ

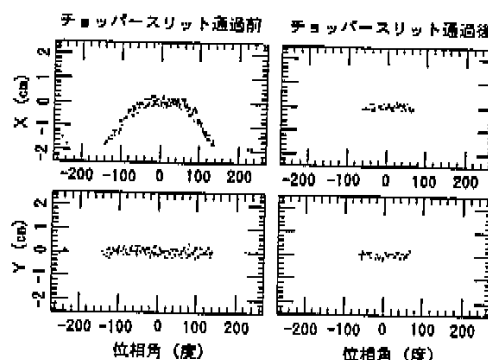


図18 チョッパースリット前後での電子軌道の広がり

れぞれ、位相角にして約30度、約15度に圧縮し、加速管に入射する。この様子を図19に示す。

圧縮する位相角の大きさや、プリバンチャー、バンチャー、第一加速管の位置は、電子ビームのエミッタンスとエネルギーの広がりを最小になるように決定した。

9. おわりに

大電流CW電子線形加速器の入射部について、構成する各要素の設計概要およびビーム輸送のシミュレーションについて述べた。他に例のない大電流加速器の入射部をいくつかの新しい考案を含めて設計した。シミュレーションの結果はエミッタンスを劣化させずにビームを通過できる入射部を設計できることを示した。

入射部は電子線形加速器の性能を決定する重要な部分である。それゆえ加速器全体を一度に製作、据え付けるのではなく、入射部および第1加

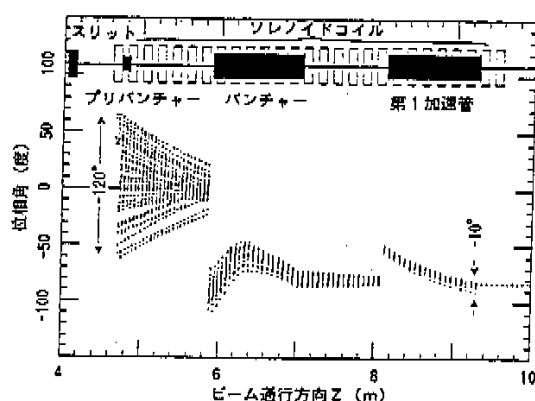


図19 スリットから加速管までの電子ビーム軌道

速管の部分を製作し試験する入射部試験を計画している。現在は入射部試験に向けて据え付けられた機器の試験および調整を行っている。その結果を加速部の製作に反映し平成8年末に加速器全体の据え付けおよび調整を完了する。その後はビーム電流を徐々に上げて目標性能であるエネルギー10MeV、電流20mAを目指す試験および制御を行う予定である。

参考文献

- 1) 若林, 山岡, 他: "加速器および加速器による核変換研究の現状", 動燃技報, 82, P19 (1992).
- 2) 遠山, 谷, "大電流電子線形加速器の開発", 動燃技報, 88, P19 (1993).
- 3) William B Herrmannsfeld, "EGUN an electron optics and gun

design program", SLAC-Report-331, (October 1986).

- 4) CST (Computer-Simulationstechnik), Lauteschlagstrabe 38, D-64289 Darmstadt Germany.
- 5) W.R.Nelson, H.Hirayama, et. al., "The EGS4 Code System", SLAC-Report-265, (1985).
- 6) M.T. Menzel : H.K. Stokes, "User's Guide for POISSON/SUPERFISH Group of Codes", LA-UR-87-115, (January 1987).
- 7) Y.L.Wang, Isamu Sato et. al.: "Design of High Power Electron Linac at PNC", Journal of Nuclear Science and Technology, 30, 12, P1261, (December 1993).
- 8) R.A.Jameson, computer code PARMELA (Accelerator Technology Division, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, USA).
- 9) S.Toyama, M.Nomura, et. al., in Proceedings of the 1994 International Linac Conference, edited by K. Takata, Y. Yamazaki, and K. Nakahara (National Laboratory for High Energy Physics, Japan, 1994) /, p199.