

SECTOR MAGNETS FOR A SMALL DOUBLE-SIDED MICROTRON

T. TANAKA, K. TSUKADA, K. SATO, K. HAYAKAWA AND O. TAKEDA*

Atomic Energy Research Institute, Nihon University

*Dept. of Physics, College of Science and Technology, Nihon University

Abstract

A model magnet of the sector magnet for a small double-sided microtron has been designed. This magnet is equipped with an active field clamp in order to fasten the field edges and compensate the horizontal displacement of beam orbits from ideal ones in sharp cut off approximation. The beam orbits inside the magnet have been calculated from the field distribution obtained by using TRIM. Also the phase motion of the electron bunch during acceleration has been simulated. From this result the equilibrium electron energy and bunch phase at each turn orbit have been determined.

1. 序

昨年から 1 GeV ダブルサイデッドマイクロトロンのプロトタイプとして、35 MeV の小型ダブルサイデッドマイクロトロンの設計を行ってきた。今年度は主電磁石である扇形電磁石のモデルを製作することになった。今回は、このモデル電磁石の設計、磁場計算の結果、さらにマイクロトロン中で加速される電子の RF 位相に対する相対運動について報告する。また、前回の報告以後マイクロトロンの設計を変更したので、この点について報告する。

2. ダブルサイデッドマイクロトロンの仕様

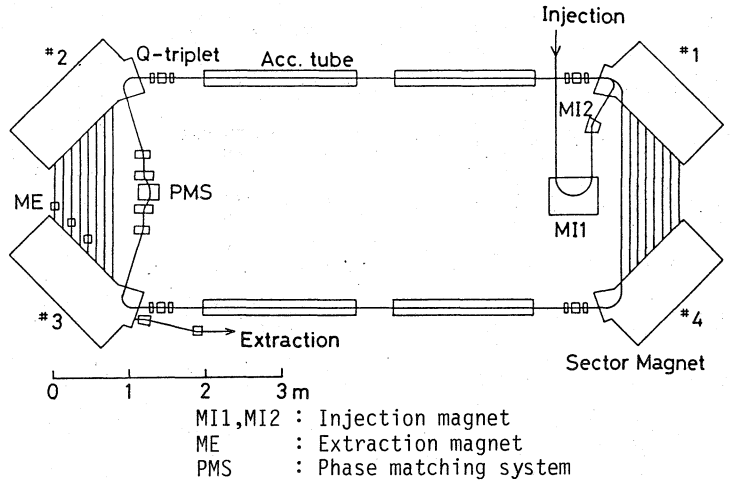
当初、プロトタイプを現在のリニアック本体室に建設することを想定して設計を行なったが、スペースが狭すぎるために電磁石・加速管等の設置が極めて困難であることから、十分なスペースを取れる現在のモジュレーター室に建設することとし設計をやり直している。二つの加速部間の距離を長くした (3 m) 結果、扇形電磁石間に設置する Q 電磁石の配置に無理がなくなり扇形電磁石を大きくすることでビームの周回数を多くできるため、テストマシンとしてより好ましいものとなった。

現在の設計仕様を第 1 表に示す。また、マイクロトロン本体の概略図を第 1 図に示す。ビームの周回数に最大 8.5 で 61 MeV まで加速する。ビームの取り出し方法は 1 GeV マシンで考えている方法を

TABLE I. Design parameters for the small double-sided microtron.

Injection energy	5 MeV
Extraction energy (max.)	61 MeV
Beam current (max.)	300 μ A
Magnetic field	2053.9 G
Accelerating gradient	0.895 MV/m
Nominal synchronous phase	19.7 deg.
Energy gain per turn	6.6 MeV
Number of turns (max.)	8.5
Operating rf frequency	2450 MHz
Accelerating tubes	2 m x 4
Rf power dissipation	100 kW
Number of klystrons	2

採用し、4.5周及び6.5周においても、それぞれ35 MeV 及び48 MeV で取り出せるよう取り出し用電磁石を合計3台設置する。マイクロ波源としては THOMSON-CSF 社製 2450 MHz, 50 kW のクライストロンを2本用いる予定である。実効シャントインピーダンス $70 \text{ M}\Omega/\text{m}$ の DAW 型 2 m 長加速管を4本用いるとすると、1周6.6 MeV のエネルギー利得で、35 MeV 取り出し時には $300 \mu\text{A}$ までの電流が加速できる。61 MeV では $150 \mu\text{A}$ である。入射器として5 MeV リニアックを用いる。マイクロロン中の加速位相のずれを小さくするため可能な限り入射エネルギーを高くする必要があるが、5 MeV 程度あれば十分である。5 MeV リニアックは現在のリニアック本体室に置くこととし、電子銃、RF チョッパー、バンチャーの設計を検討中である。

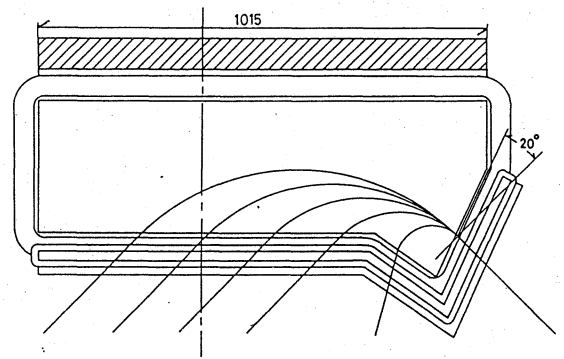


第1図 小型ダブルサイデッドマイクロロンの概略図。
扇形電磁石内のQ電磁石は省略してある。

3. 扇形電磁石の設計

ダブルサイデッドマイクロロンの扇形電磁石のポールピースの端部は、扇形電磁石間側ではビームに対して -45° の傾きをもっている。また、電磁石中でのビームの曲率半径が加速とともに大きく変化する。そのため扇形電磁石の設計に当っては垂直方向のビームの発散を抑制するためなるべく磁場端を硬くすること、また磁場端部分を除いては全ての曲率半径において水平方向の軌道が *sharp cut off* 近似で計算された軌道からずれないようにし、正確にビームを 90° 偏向させられる形状を求めることを条件とした。設計には磁場計算プログラム

TRIM を用いた。第2図にポールピースの対称面での断面図(平面図)を示す。また第3図に、第2図の一点鎖線の位置での断面図を示す。モデル電磁石は4.5周まで加速できる大きさとし、5 MeV のビームが正規のドリフト軌道に対して 30° の角度で扇形電磁石に入射されるように設計した。第3図において、ポールピースとヨークの間に 2.5 mm の間隙を設けて(バセルフィルタ)磁場の一様性を向上させている。磁場端を硬くするためフィールドクランプを取り付けて

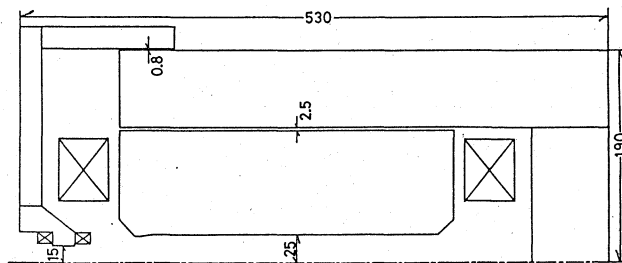


第2図 扇形電磁石のポールピース、フィールドクランプの形状。

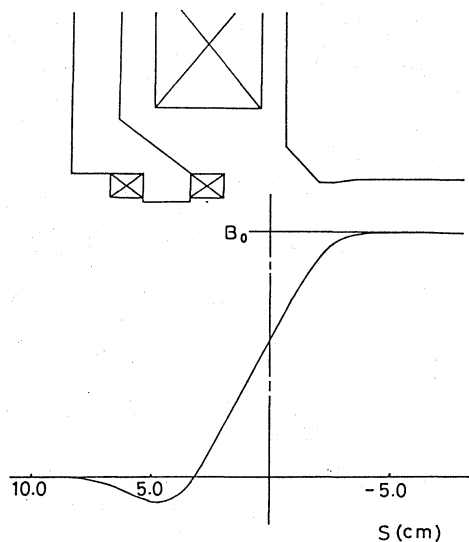
いるが、さらにフィールドクランプにもコイルを巻き、磁場端に送電磁場を生じさせてさらに磁場端を硬くしている。このコイルの機能としては、さらに励磁電流の調整によって、水平方向の sharp cut off 近似による軌道からのずれをなくすことができる。

また、フィールドクランプの外側への漏れ磁場を地磁気程度に抑制するためにフィールドクランプとヨークの結合部分には 0.8mm の間隙を設けてある。中心面上での磁場分布を第4図に示す。ポールピースの端部とフィールドクランプの形状は、1GeVマシンにおいて1Tの磁場を必要とするため局所的に極端に強い磁場が生じない形状を考え、さらに一様磁場の範囲をできるだけ広くするためにシムをつけてある。 $B_0 = 2053.9 \text{ gauss}$ のとき、主コイルとフィールドクランプコイルの励磁電流はそれぞれ 4647 AT 及び 327 AT である。

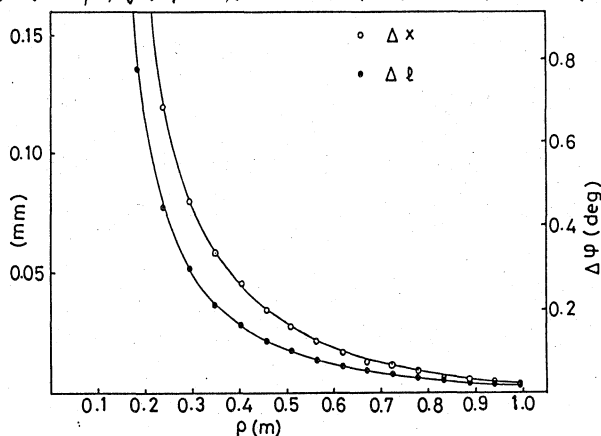
TRIMで計算した磁場分布を扇形電磁石の入口側と出口側の端部に用いて、Runge-Kutta法で水平方向と垂直方向のビームの収束・発散の様子を調べ、また、sharp cut off 近似からのずれを調べた。水平方向の収束に関しては sharp cut off 近似との違いはほとんどなく問題ないが、垂直方向においては曲率半径が小さい軌道で特に違いが大きく、ビーム偏向角を設計するためには、この計算結果を用いることが不可欠であることがわかった。水平方向の軌道のずれは厳密になくすとはできず、第5図の白丸で示されているように曲率半径(ρ)が大きくなるに従って小さくなる。しかし、ビーム偏向角の90°からのずれは $\rho = 18 \text{ cm}$ でも 0.2mr 以下であるため大きな問題はない。扇形電磁石を通過したときの軌道長のずれ(Δl)は加速位相のずれの原因となるため、sharp cut off 近似と比較し、第5図に黒丸で示した。このずれによって、180°偏向したときに生ずる加速位相のずれは同図右の縦軸



第3図 扇形電磁石の断面図。



第4図 TRIMで計算した磁場端部の中心面上での磁場分布。

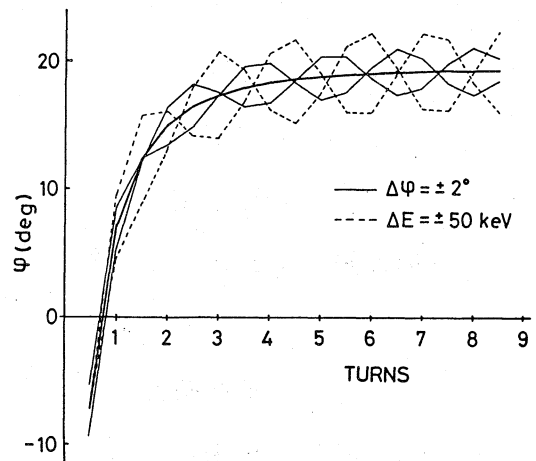


第5図 sharp cut off 近似からの軌道及び軌道長のずれ。また軌道長のずれによる加速位相のずれ。

で表わしてある。この程度の位相のずれはビームの位相運動のシミュレーションから大きな問題がないことがわかった。しかし、次節で述べるシミュレーションにはこのずれも取り入れて計算した。

4. 位相運動

5 MeV でマイクロロンに入射されたビームは、わずかにずれてはあるが加速中にその速度を変え光速に近づいて行く。このためバンチの加速位相は絶えず変化することになり、その変化は加速とともに小さくなる。その結果、 $\beta = 1$ の加速管を用いたとすると、加速部の入口でのバンチ位相が漸近的な振舞をするような位相とエネルギーの組み合わせが存在する。実際のバンチは有限のエネルギー幅と位相幅をもっているため、漸近的な振舞をするバンチの中心の周りでシンクロトロン振動が起こる。漸近的な振舞をするようにマイクロロンに入射された電子のエネルギーとそのときの位相が変わると、その後の加速中でのビームの中心エネルギーとバンチの中心位相が変わるが、これらは計算機シミュレーションで求めることができる。シミュレーションではマイクロロンに入射後半周後に位相調整系を通過するため、半周後を入射点として、入射エネルギーと位相を変えて漸近的な振舞をする値を探した。その結果得られた位相の変化の様子を第6図に示す。太い実線が中心位相の変化を表わしている。加速をくり返すに従って位相は設計上の同期位相である 19.7° に近づく。このシミュレーションから扇形電磁石におけるビームの中心軌道が決定される。細い実線は中心位相から $\pm 2^\circ$ 離れた位相から同じエネルギーで入射された場合、破線は中心エネルギーから ± 50 keV ずれて中心位相で入射された場合を示す。これらはいずれもマイクロロン加速における位相安定性を示している。



第6図 加速中のバンチ位相のずれのシミュレーションによる結果。