

DOUBLE-SIDED MICROTRON AT NIHON UNIVERSITY

K. Hayakawa

Atomic Energy Research Institute, Nihon University

Narashinodai 7-24-1 Funabashi 274

ABSTRACT

Construction of the 35 MeV cw double-sided microtron (DSM) at Nihon University¹ was started at 1984 and completed in the spring of 1989. This microtron was constructed as a prototype of a 1 GeV machine for a medical pion facility² and the test accelerator for the FEL and other applications.

The 4.55 MeV electron beam from an injector linac is injected to the DSM. The energy gain is 6 MeV per turn. After recirculated 5 times, the electron beam with 34.5 MeV is extracted at the final short straight section. The DAW³ structure is used for all the accelerating tubes including the injector linac. Total rf power of 200 kW is provided by four 50 kW klystrons of 2450 MHz.

日大ダブルサイデッドマイクロトロン

1. はじめに

自由電子レーザー発振用及び大型(1 GeV)電子加速器のプロトタイプとして1984年~1989年に35 MeVダブルサイデッドマイクロトロン(DSM)を建設した。

自由電子レーザーの発振ためには、低エミッタンス、大電流かつ長いパルス幅あるいはcwの電子ビームが必要とされる。また、1 GeVの大電力加速器のプロトタイプとしては、あまり問題なくスケールアップできるようなものでなければならない。これらの要求に対して我々はその優れたビーム特性と、高エネルギー加速器への可能性からダブルサイデッドマイクロトロン(DSM)を選択した。全体の構成は図1に示すように、入射器となる4.5 MeVのリニアック及び入射ビームラインと、DSM本体とからなる。運転は、放射線遮蔽の問題から新しい建屋ができるまでの間暫定的に、rfを50%デュウティーのパルスモードにし、電子ビームもパルス幅100 μ s 繰り返し50 ppsのパルスモードで行っている。実験を通していくつかの問題点が明らかになったのでこれらの改良を進めている。

表1 DSMの基礎的パラメーター

入射エネルギー	4.55 MeV
最大加速エネルギー	34.5 MeV
ビーム電流	300 μ A
主偏向電磁石磁場	0.1867 T
加速勾配	0.773 MeV/m
エネルギー利得/周	6 MeV
周回数	5 回
加速rf周波数	2449.77 MHz
加速管	4.283m \times 2
rf電力	100 kW

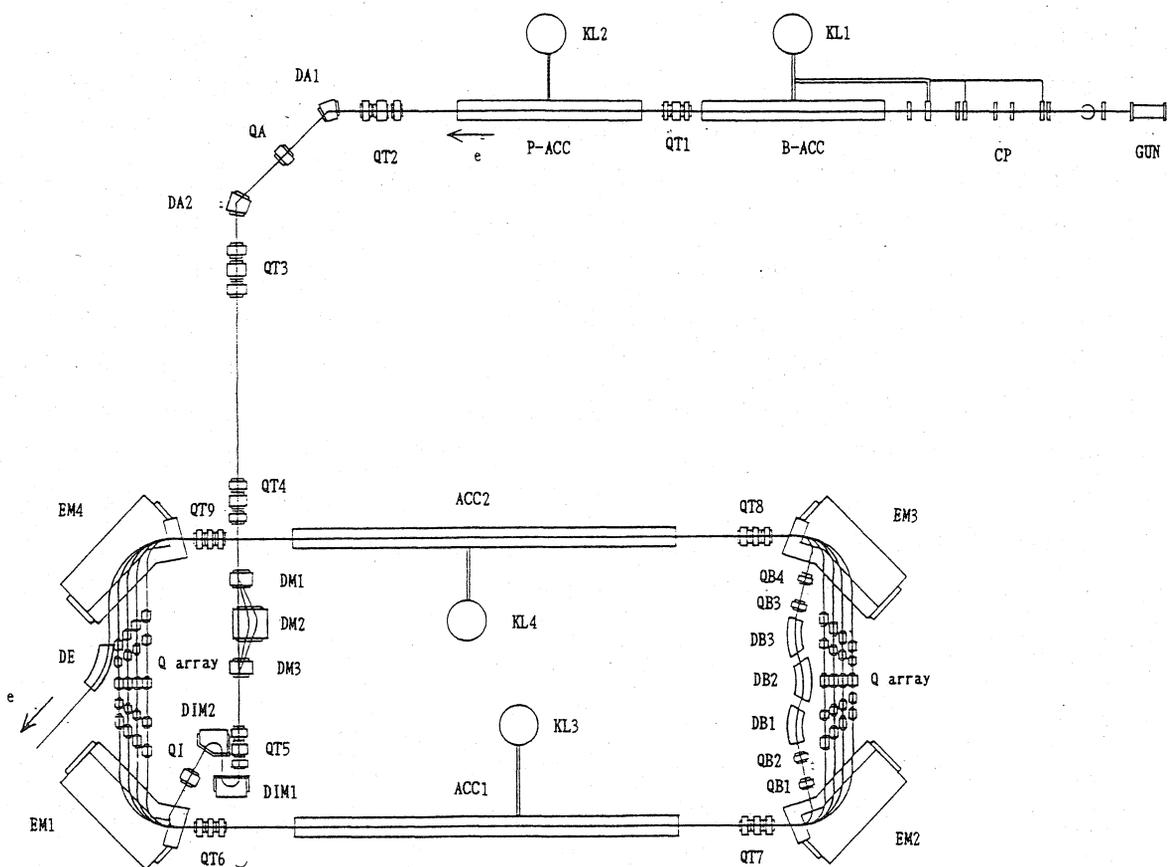


図1 入射器及びマイクロロン本体の構成図。ここで、KL：クライストロン、ML：マグネティックレンズ、CP：チョッパー、PB：プレバンチャー、B-ACC：バンチャー加速管、P-ACC：プレアクセレレータ、DA, QA：分析電磁石、DM：位相補正電磁石 DI, QI：入射電磁石、EM：主偏向電磁石、ACC：4m加速管、DB, DQ：位相調整電磁石、DE：取出し電磁石、QT：Qトリプレット。

2. 入射器

入射器は、100 kV 高圧ターミナル、rf チョッパー、プレバンチャー、バンチャー、プレアクセレレータからなる。高圧ターミナルは DC-100 kV に昇圧したターミナルに、電子銃、および同電源類を搭載したものである。ターミナル上で必要となる電力は絶縁トランスを介して供給され、制御信号は光ファイバーケーブルにより伝達される。rf チョッパーは、NIST レイストラックマイクロロン⁴ の入射器で採用されたものと同じで、2 台の矩形マイクロ波空洞及びその中間に置かれた扇型のスリットとマグネティックレンズからなり、第 1 の空洞でビームを円錐形に振り、スリットでその一部分だけが通過するようにする。スリットの前後に置かれたマグネティックレンズによりビームを収束させ、第 2 の空洞により、再びビームラインに戻す。プレバンチャーは TM_{010} モードの単一矩形空洞である。バンチャーは後述するように $\beta = 0.7 \sim 0.974$ の空洞を組み合わせた 2 m 長の定在波型加速管である。プレアクセレレータは、 $\beta = 0.994$ の空洞 32 個からなる 2 m 長の定在波型加速管である。電子ビームは、上記の 2 本の加速管で各々およそ 2 MeV 加速され、DSM 入射に必要なエネルギーに達する（全エネルギーで、4.55 MeV）。

3. マイクロ波系

マイクロ波は、24.5MHzのシンセサイザによってフェイズロックされた2450MHzの発振器からの信号を増幅後4分割して各加速管に供給している。クライストロンは入射器及びDSM本体部で各々2本合わせて4本使用し、増幅率50dB最大出力cw55kWの性能をもつ。位相器と減衰器を一体としたΦAを各クライストロンの入力側に入れ、加速管相互の位相の調整ができるようにし、同時に入力電力の最適化ができるようにした。クライストロンの出力は導波管によって加速管まで運ばれるが、この間に加速管あるいは導波管中に生じた放電等によるマイクロ波の反射によってクライストロンが破損されないようにアイソレータを伝送路注に挿入した。バンチャーにマイクロ波を供給する系統では、プレバンチャー及びチョッパーにマイクロ波を供給するためマイクロ波を分岐している。このほかの系統ではすべて1本のクライストロンから1本の加速管にマイクロ波を供給している。クライストロンの保護のため、導波管にアークセンサーを取付け、放電を検知したら直ちに、マイクロ波の入力を遮断するようにしている。また、クライストロンのボディー電流と反射波を常時監視しており、異常時には同様に、直ちに入力を遮断するようにしている。

4. 加速管

加速管にはディスクアンドワッシャー(DAW)型加速構造を採用した。入射器では、バンチャー加速管及びプレアクセレレータ加速管の2本の2m管、DSM本体部では2本の4m加速管を使用する。バンチャー加速管には、電子ビームのエネルギーが低いため、加速中に速度が変化する。これに合わせて空洞の位相速度を変化させなければならない、位相速度の異なる加速空洞を組み合わせた場合の電場分布は、SUPERFISHによる計算とこれに基づいて製作したテスト空洞による実験から推測して設計・製作した。ところが、実際に製作した加速管では図2に示すように、期待とは異なる電場分布を示している。これは、DAW型加速構造では、空洞相互間の結合が強い(他の定在波型構造と比較して一桁大きい)ため、加速管の一部での変化が全体に影響を及ぼしていると考えられる。即ち、図にのような階段状の電場分布を期待したが、実際には、各空洞での電場の強さが加速管全体に渡る平均の電場からのずれを小さくするような分布を示している。このためバンチャー加速管中でバンチングが不完全なものとなっている。他の加速管はすべて同じ位相速度の空洞からなるためこのような問題は生じなかった。

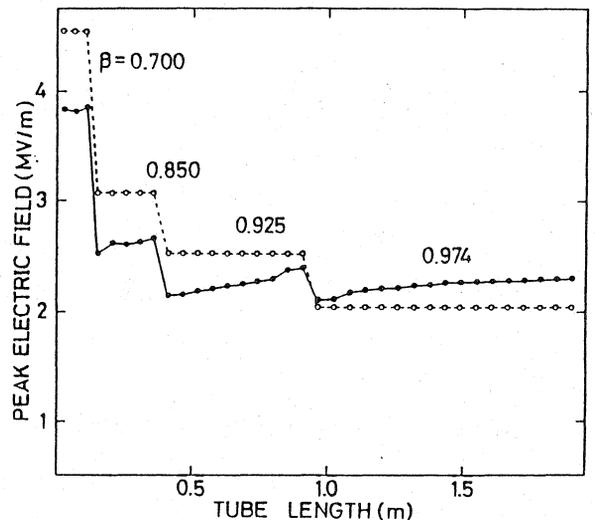


図2 バンチャーの各空洞に生ずる電場のピーク値の分布、黒丸は測定値、白丸は設計値で電場の積分値を等しくしてある。

5. 電磁石系

マイクロトロンは多数の電磁石(偏向電磁石、四極電磁石等)を必要とする。特に4台の主偏

向電磁石には厳しい磁場の一樣性が要求される。主偏向電磁石の形状は、二次元の磁場計算プログラム (TRIM) を用いた計算と、モデル電磁石を製作した経験に基づいて設計製作した。この電磁石の特徴は、(1) 磁場の一樣性を向上させるために、ポールピースとヨークの間に間隙 (パーセルギャップ) を設けた。(2) 磁場の平坦部を広げるために、ポールギャップにシムを取付け、更に、これを補うために、パーセルギャップにもシムを取付けた。(3) 磁場端を急峻にするために、アクティブフィールドクランプを取付けたことである。完成した主偏向電磁石の磁場測定を行ったところ、平坦部での均一度 $\Delta B/B_0$ は $\pm 0.07\%$ であった。これは設計の目標値の3~4倍である。主偏向電磁石の磁場分布の一例を図3に示す。磁場の均一度を更に向上させる方法として、ポールピースの表面に補正コイルを巻く方法をテストした。コイルの形状として、ギャップの中心面上で測定した磁場分布の平坦部分の0.01%ごとの当磁場曲線を用いた。この表面コイルに電流を流すと磁場分布の一樣性は著しく改善され、 $\pm 0.01\%$ まで向上した。この値は測定器の精度と同程度であり、目標値を上回っている。この結果から、ポールピースの表面に補正コイルを巻く方法によって十分均一な磁場が得られることが確認された。但し現状では、まだこの補正コイルは取付けられていない。

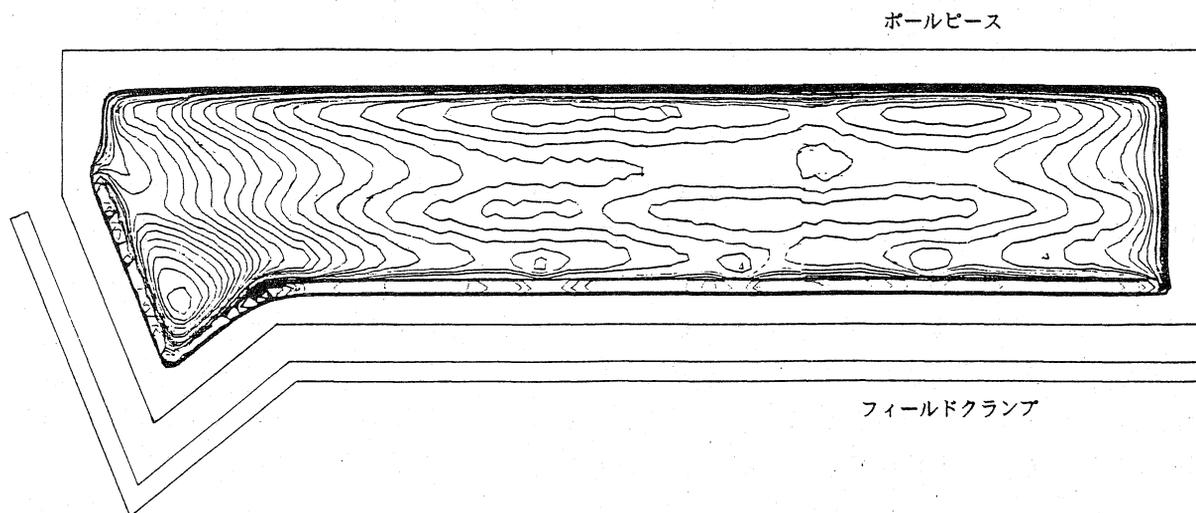


図3 主偏向電磁石のポールピースの形状と平坦部の磁場分布。
(等高線は0.01%間隔)

6. ビーム軌道計算

ビーム軌道の計算は一次及び二次のビーム変換行列を使って行った。図4にDSMの最初の加速管の入口から、5周後の第2の加速管の出口までの、一次の計算におけるビーム包絡線の一例を示す。図でX-axisは水平方向、Y-axisは垂直方向をあらわす。二次の計算では、最後の加速管の出口で、一次の計算に比べて30%ビーム径が大きくなる。

図5に縦方向の位相空間に置けるビーム楕円の様子を示す。図で1、2、3とあるのは周回数を示し、in, center, outはそれぞれ加速管の入口、中央、出口を示す。入射直後には細長い楕円であったものが次第に、一定の形の楕円に落ち着いて行く様子がわかる。この例では、最終的なビームは、位相幅 $\pm 1^\circ$ 、エネルギー幅 $\pm 20\text{keV}$ となっている。

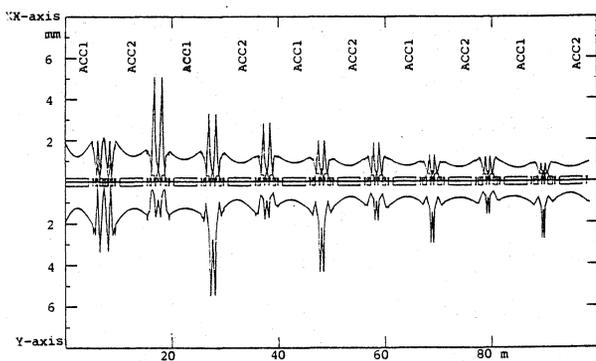


図4 一次の計算によるビームの包絡線。

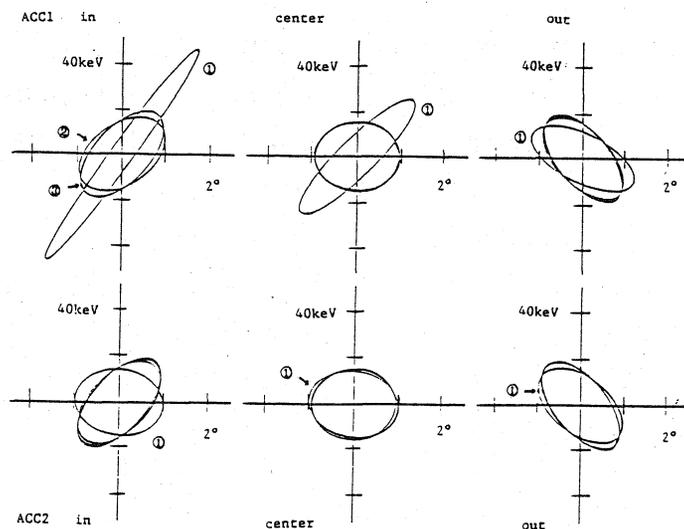


図5 縦方向の位相区間におけるビームの形状の変化。

7. ビーム加速実験

ビーム加速実験は、rfをパルス幅10msec、ビームをパルス幅100μsec、繰り返し50ppsのパルスモードで行っている。

入射器では4.55MeV以上の加速エネルギーが得られ、DSMへの入射エネルギーの設計値を満足している。しかし、加速管の項で述べたように、バンチャー加速管の電場分布が設計と異なっていたため、集群特性が悪く、電子銃を出たビームの1割程度しか加速されていない。

DSM本体部での加速実験は、1周当たり4台置かれた蛍光板ビームプロファイルモニタでビームの形状を観測しながらステアリングコイル、四極電磁石を調整して行っている。最大加速エネルギーは設計値の34.5MeVに達しているが、入射器の性能が設計どおりにならず、入射ビームのエミッタンスが悪く（主として電子銃の性能に由来するものと思われる）、縦方向の位相空間でのビームの形状がDSMのアクセプタンスと整合していない（主としてバンチャーの性能に由来する）ため、加速中に多くのビームが失われている。

8. まとめ

日大DSマイクロトロンは、ビーム加速に成功したものの主として入射器の性能不足のため十分な性能を発揮していない。現在は入射器の改良を進めているところである。また本文では触れなかったrfの不安定性等の問題があったが、これはほぼ解決している。

参考文献

- 1 T.Tanaka, K.Hayakawa, K.Tsukada, K.Sato, O.Takeda and M.Nishinaka, Proc. of the 1984 Linear Accelerator Conf., Seeheim, FRG, 449.
- 2 K.Hayakawa, K.Tsukada, K.Sato and T.Tanaka, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-30, No.4 3224(1983)
- 3 S.O.Schriber, Proc. of Conference on Future Possibilities for Electron Accelerators, Virginia, USA, V-1.
- 4 M.A.Wilsin, R.I.Cutler, D.L.Mohr and S.Penner, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-32, No.5, 3089(1985)