

[F16p05]

## STATUS OF THE HIMAC LINAC

W.Takasugi, T.Fujimoto, T.Miyata, M.Yamamoto, T.Yokoyama, Y.Honda, H.Sakamoto, T.Okada,  
Y.Kageyama, H.Fujiwara, C.Kobayashi, T.Fukushima, T.Kato, \*T.Takayasu, \*M.Muramatsu,  
\*A.Kitagawa, \*T.Murakami, \*Y.Sato, \*S.Yamada

Accelerator Engineering Corporation (AEC)  
2-13-1 Konakadai, Inage, Chiba  
\*National Institute of Radiological Sciences (NIRS)  
4-9-1 Anagawa, Inage, Chiba

### Abstract

HIMAC is operated for 24 hours per day from Monday evening to Saturday evening for cancer treatments and basic researches. More than 400 patients have been treated by the end of July, 1998. HIMAC linac delivers the heavy-ion beams to two synchrotron rings and a medium energy experimental room. Time-Sharing-Acceleration(TSA) has been realized in the injector. This paper mainly describes the RF systems.

### 放射線医学総合研究所 HIMAC 線形加速器の現状

#### 1.はじめに

現在 HIMAC は 24 時間運転が行われている。火曜日～金曜日の昼間に  $^{12}\text{C}$  ビームで患者の治療を行い、夜間及び土曜日は共同利用研究のために  $^1\text{H}$ ～ $^{134}\text{Xe}$  ビームを供給している。放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置 HIMAC 入射器は、上下 2 台のシンクロトロンへのビーム供給及び、入射器による加速のみで実験を行う中エネルギーコースへの供給に使用されている。

ここでは主として入射器 linac の高周波系における現状を報告する。

#### 2.入射器 linac の構成

HIMAC の入射器は 2 種の linac とディバンチャー、及びそれぞれの RF 源により構成されている。以下にその最大出力、duty、及び e/m (加速可能な粒子の電荷質量比) を示す。

##### 2.1 RFQ linac

イオン源より入射される  $8\text{keV/u}$  のイオンビームを  $800\text{keV/u}$  まで加速する。

最大出力 : 300kW  
duty(max) : 0.3%  
e/m : 1/2～1/7

##### 2.2 Alvarez linac (DTL)

RFQ より入射される  $800\text{keV/u}$  のイオンビームを  $6\text{MeV/u}$  まで加速する。DTL1～3 の 3 タンクに分割されており、それぞれに RF 源を持っている。

最大出力 : 1.4MW  
duty(max) : 0.3%  
e/m : 1/2～1/7

##### 2.3 Debuncher (DBC)

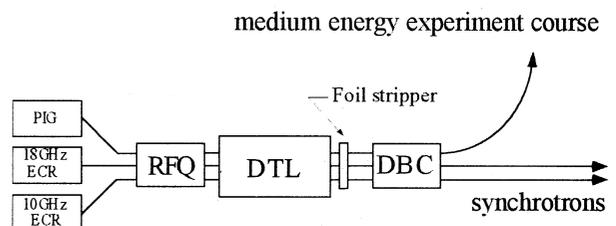
DTL より入射される  $6\text{MeV/u}$  のイオンビームの運動量分散を  $\pm 0.25\%$  以下にする。

最大出力 : 30kW  
duty(max) : 0.3%  
e/m : 1/2～1/4

#### 3.linac の現状

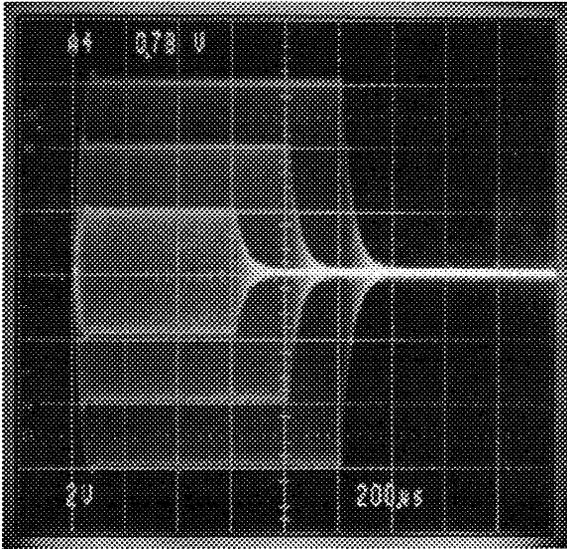
##### 3.1 時分割加速\*<sup>1</sup>(タイムシェアリング)

現在タイムシェアリング対応の機器据え付けがほぼ完了し、3 台のイオン源から異なるイオン種を同時にそれぞれのコースに供給することが可能となっている。この改造により、あたかも 3 本の独立した linac があるかのように効率よく利用できる。(Fig.1.2)



(Fig.1) System layout

最近、共同利用研究に於いて多種多様のビームを求められるようになっており、より重い即ち e/m の小さな核種の需要が増加している。このため高周波系にとって高出力運転の機会が増え、後述するトラブル等への対応策が重要となる。



(Fig.2)  
( $e/m=1/2, 1/4, 1/6$  TSA 運転時の RFQ tank pickup 時間幅が異なるのは単に見やすくするため。)

このタイムシェアリング導入に際して RF 関係では以下のような改造等をおこなった。

### 3.1.1 自動チューナトリガ選択装置

加速電圧( $m/e$ )の違いにより、タンクの自動周波数制御システム用チューナの最適値が違ってくる。このとき既存のチューナ制御ではパルスごとに位相差を検出し、次のパルスにフィードバックをかけてしまう。これでは常に最適値から外れた制御をしていることになる。またチューナ駆動部の消耗を著しく早めてしまう。拠って 3 種類の加速電圧のうち最も高い電力のパルスだけに自動チューナのフィードバックを掛けるようにしてこの問題を解決した。

### 3.1.2 高周波制御装置の改造

3 種類あるイオン源に対してそれぞれ独立の運転トリガを割り当て、トリガごとに線形加速器に導入する高周波電力レベルの設定値を与えることができるように改造した。

### 3.2 可変エネルギーでの加速

通常運転では linac 出射時のビームエネルギーは常に  $6\text{MeV/u}$  であるが、DTL3、2、1 を順次 off する事で  $4.4\text{MeV/u}$ 、 $2.6\text{MeV/u}$ 、及び  $800\text{keV/u}$  まで加速したビームをそれぞれ中エネルギーコース末端までほぼ 100%の効率で輸送することに成功した。これにより中エネルギーコースに 4 種類のエネルギーのビーム供給が可能となった。

### 3.3 Velocity monitor<sup>\*2</sup>によるエネルギー測定

ビームエネルギーについては、以前から中エネルギーコースに分岐後の BendingMagnet の NMR

を測定して評価してきた。最近になって Velocity monitor による測定法が完成しつつある。これは一定の距離をおいた 2 台の非破壊型静電モニタを使用して、その位相を比較することによりビーム速度を測定するものである。まだいくつかの問題点を含んでいるが、まもなく実用に供されるであろう。これが完成すれば中エネルギーコース利用時や、シンクロトロンに供給中でもエネルギーの連続的なモニタが可能となる。

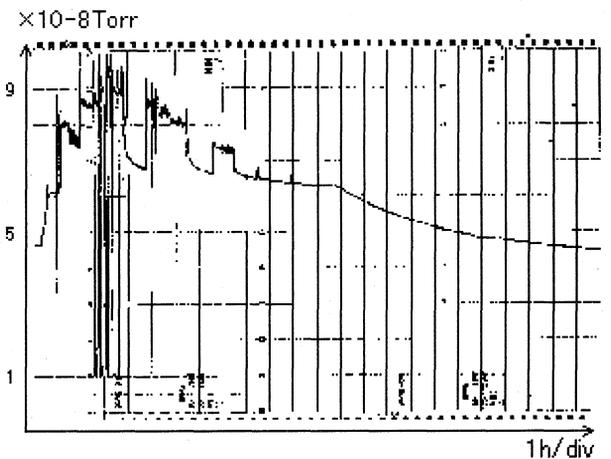
## 4 トラブルとその対応

### 4.1 高出力運転時の問題

RFQ, DTL ともに  $e/m=1/7$  の加速に必要な電力をタンクに導入できる仕様になっているが、様々な障害により高出力運転が安定に行えなかった。そこで下記のような対策を施し高出力運転が問題なく行えるようになった。

RFQ においては  $m/e=5$  を越える電力(約  $130\text{kW}$ )を導入するとタンク内の放電が頻発していた。RFQ の最大表面電場は  $1.8\text{ Kilpatrick}$  であるため、高出力運転時にはタンク内で放電を起しやす。

(DTL は  $1.3\text{ Kilpatrick}$ ) この対策として放電を開始する level でのエージングを行った。高周波電源の仕様が  $\text{duty}(\text{max})=0.3\%$  であるため、放電が起らなくなるまでにかかりの時間を要した。Fig.3 にタンクエージング時の真空度の推移を示す。時間とともに放電(真空度の乱れ)が起りにくくなっていることが分かる。

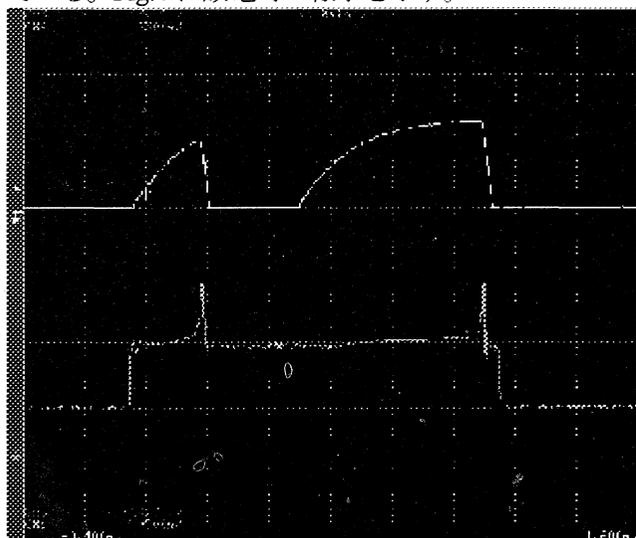


(Fig.3) RFQ tank aging  $m/e: 5.1 \sim 5.3 (130 \sim 140\text{kW})$   
 $\text{duty}: 0.3\%$

DTL においては RFamp の調整不足や高調波共振により高出力運転時に動作が不安定になっていた。この対策として amp の調整と出力回路内部にエレマ抵抗を設置することにより寄生振動の低減を図った。

また amp 出力回路内で放電を起すことがある。

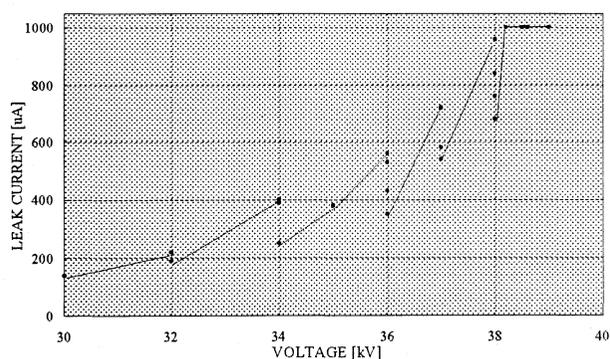
これはタンク内放電時に全反射した RF が入射 RF と同位相になっていることが原因と思われる。これについては出力回路の調整によりかなり改善されたが、同軸導波管長を変更すること等も検討している。Fig.4 に放電時の様子を示す。



(Fig.4) ↑放電 ↑放電  
 (上) DTL tank pickup  
 (下) DTL HPA plate current 200 μs/div.

#### 4.2 真空管のトラブル(DTL)

97 年度までの数年間は真空管のトラブルに悩まされた。不具合の内容は filament 切れ、filament-G1 短絡、G2-plate 耐圧不足等があった。メーカーの保証時間に満たない事例も数回ある。最もトラブル頻度の高い真空管は重量が 72kg もあるうえに、取り付け位置が地上 2m 以上の高さになっている。このため真空管交換時には最低 2 名の人員で約 2 時間かかる。しかし真空管の初期不良が減少したことや、対策として真空管の耐電圧を回復するための高圧エージングを行ったことにより、真空管によるトラブルは激減した。高圧エージングは真空管の plate-screengrid 間に最大 40kV の高電圧を印加して真空管内に小さな放電を起こし徐々に耐圧を上げていく方法である。Fig.5 に plate-screengrid 間の印加電圧と leak current の推移を示す。



(Fig.5) high voltage tube aging

#### 4.3 真空管のトラブル(RFQ)

真空管の filament socket が焼損した。この amp は真空管を取り付け後、ナットを締め付けて接触を良くする形式であり、この締め付けが不十分であったために起きた。以後締め付けトルクの管理及びスペーサーへの当たり具合の確認をすることでこの問題は起こっていない。

#### 4.4 マルチパクタリング放電(DBC)

DBC に於いて、2~3pulse/100pulse の頻度で不規則に tank から amp に RF が全反射する現象が起こった。調査の結果、タイムシェアリング導入にあたり RF 運転パルスと同時に設定値を与えるように高周波制御装置を改造したため tank への入射波の立ち上がりが遅くなり、低電力部分でマルチパクタリング放電を起こしているためと判明した。高周波出力設定値を運転パルスより 100 μs 早く与えることで設定遅れ時間を意識的に作り出し解決した。

#### 5.今後の予定

DTL は真空管を使用した 3 段の RFamp で構成されているが、このうちの初段 amp(LPA;出力 5kW)を半導体化する予定である。現在は試験的に DTL3 のみ置き換えている。この改造が完了すれば回路構成上最も調整が困難な LPA の調整が平易になる。又、真空管を毎年交換していることを考えるとランニングコストの軽減も図ることができる。

最も真空管トラブルの多い DTL 終段増幅器 (HPA)を 4 本程度の小型真空管並列運転による分散型増幅器に改造することも検討している。これは仮に真空管 1 本に問題が起きても残りの 3 本で治療ビーム供給に必要な程度の出力が可能となるためである。

いくつかの真空管トラブルの中で最も頻度の高かったものはプレート耐電圧不足であった。これに対して 4.2 で述べたとおり直流高圧電源 (100kV,1mA)を使用して耐圧の回復をはかっていたが、電源の容量が小さい為かなり長い時間を必要としていた。また filament を点灯できず、真空管内に封入されたゲッターの作用も期待できなかった。このため高電圧、高 duty で運転可能な真空管高圧エージング装置を開発中である。

#### 6 参考文献

- [\*1]C.Kobayashi,et al. "Status of time-sharing acceleration at HIMAC" at this meeting.
- [\*2]T.Kato,et al. "Non-Destructive Velocity Monitor for the HIMAC Injector" Proc. 11th Symp. Accel. Sci. & Tech.(1997)