

## R&D at NIRS Cyclotron Facility

Akinori sugiura<sup>1,A)</sup>, Satoru Hojo<sup>A)</sup>, Yukio Sakamoto<sup>A)</sup>, Toshihiro Honma<sup>A)</sup>, Takuya Endou<sup>A)</sup>, Koji Kono<sup>A)</sup>,  
Tatsuaki Kanai<sup>A)</sup>, Takanori Okada<sup>B)</sup>, Katsuyoshi Komatsu<sup>B)</sup>, Takashi Kamiya<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> National Institute of Radiological Sciences

4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba 263-8555, JAPAN

<sup>B)</sup> Accelerator Engineering Corporation

2-13-1 Konakadai, Inage-ku, Chiba 263-0043, JAPAN

### Abstract

In NIRS cyclotron(NIRS-930 and HM18), we carried out three improvements. First for update of RF-system: we had been renewed to a new one. Second for high current beam extraction: we carried out negative ion acceleration, and constructed new beam-line for RI production. Third, we optimize beam optics for 12C6+ under low level background radiation for biological research. In this report, we present these improvement and some of the results.

## 放医研サイクロトロンの改良開発

### 1. はじめに

大型サイクロトロン (NIRS-930) と小型サイクロトロン (HM-18) の利用は、短寿命 RI の製造及び製造法の研究を中心に、宇宙空間放射線の粒子検出器の開発、陽子線の吸収線量の測定、及び重粒子線治療に関わる生物物理の基礎研究等が行われている。

約 4 年前から開始した外部ユーザーへの「有料ビーム」提供も、月に一度のペースで提供を行っている。このビーム利用は主に陽子線 10~70 MeV のエネルギー範囲で安定なビームを提供している。上記のように大型サイクロトロン利用者は所内スタッフに限らず、外部ユーザーも徐々に広がってきている。

大型サイクロトロン(AVF-930)は、主に短寿命 RI の製造に利用され、研究及び上記の有料ビームに利用されている。表 1 には平成 18 年度の大型サイクロトロンの分野別の利用状況を示す。小型サイクロトロン(HM-18)は1034 hの運転中、ビーム提供時間は陽子(18 MeV)が937 h、重陽子(9 MeV)が 72 hで、ビーム調整時間はそれぞれ 14 hと11 hであった。大

型サイクロトロンのトラブルについてはセクション 6 にて記述する。小型サイクロトロンはトラブルは特になかった。

今回のサイクロトロンの改良開発は大きく分けて、老朽化対策、RI製造用の改修、生物研究用の改修の3つを行った。

サイクロトロン施設の老朽化対策は以前からの問題であり、1973年に速中性子線を用いたがん治療、RI製造用の装置として建設されて以来、稼働を続けている。その中でも加速高周波系は建設以来32年に亘り稼働していて、老朽化対策が必要とされていた。昨年、その高周波加速系の老朽化対策を行った<sup>[1]</sup>。今回はその後のビーム調整について報告する。

RI製造用改修として、昨年、RI生産を効率よく行う為に、高強度ビーム生成を目的とした、負イオン加速のシミュレーションと装置の設置を行った。今

表 1:大型サイクロトロン利用状況 分野別

分野	運転時間(h)	運転時間(%)
短寿命RI生産と生産方法の研究	248.75	22.5
宇宙放射線防護プロジェクト	120.83	10.9
生物・物理の基礎研究	64.17	5.8
有料ビーム提供	36.50	3.3
放射線安全管理測定	3.50	0.3
ビーム開発と輸送テスト	205.25	18.6
調整運転	427.00	38.6
計	1106.0	100.0

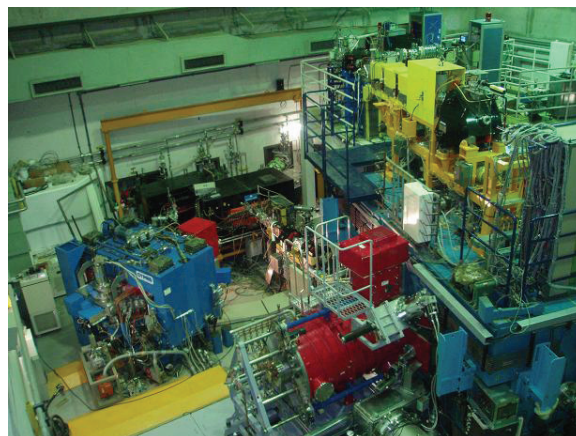


図 1:高周波加速系改修後の大型サイクロトロン

<sup>1</sup> E-mail: sugiura@nirs.go.jp

年はその加速・取り出しを行った。また、サイクロトロンによる陽子線治療はHIMACへすべて移行している。その治療コースをRI製造コースへ改修した。生物研究用のビームコースを改修して低バックグラウンド状態を達成するため、ビーム光学系最適化を行った。

## 2. 高周波系の更新

昨年、Dee電極を含む共振器、最終段増幅器及び制御系を更新した。この更新により、以前より高いDee電圧や、安定かつ21 MHzを超える共振周波数による運転が可能となった。

今回はビーム調整を行い、陽子18MeVで23 $\mu$ Aと、更新前から使用している粒子でも、更新前と変わらない強度により安定なビーム提供ができることを確認した。さらに、更新した共振器は励振立ち上げも自動的に行われ、ビーム提供前の操作も短時間で終わっている。

また、今までは70 MeVが限界であった陽子ビームの最高加速エネルギーが、本サイクロトロンの集束限界の90 MeVまで可能となり、平成18年9月15日にサイクロ出口で11nA取り出された。

表2: 加速高周波系更新前後の比較

	更新前	更新後
周波数可変機構	ムービング パネル	ムービング ショート
周波数範囲	10.6~ 20.0 MHz	11.5~ 21.1 MHz
Dee電圧	36kV	45kV
Q値	12MHz	7400
	20MHz	2900
		4400

## 3. 負イオン加速と荷電変換ビーム取り出し

RI製造用の陽子及び重陽子ビームによる高強度照射を目的として、負イオンの加速取り出し試験を行った。ビーム取り出しのためには炭素薄膜の100  $\mu$ g/cm<sup>2</sup>及び500 $\mu$ g/cm<sup>2</sup>を使用している。取り出し試験も同時に行った。

<sup>62</sup>Zn-<sup>62</sup>Cu等の中短寿命RI製造を目的としているため、エネルギーが45及び65 MeVの陽子ビーム取り出しを想定して装置の設計を行った。

負イオン生成には、以前作製した負イオン源を使用した。

一般にサイクロトロンで負イオンを加速する場合、加速中における電磁力によってイオンの解離が懸念される。例えばNIRS-930の場合の計算では、軌道半径が90 cm近辺で70 MeVの負陽子(H<sup>-</sup>)ビームについては、約3%程度が解離しビーム損失が生ずる。しかしながら、今回のテスト結果ではそれに近い65 MeVの陽子ビームを加速したが、軌道半径が20~90

cmの範囲でのビーム損失は観測されなかった。

このとき、荷電変換したビームの取り出し効率は100%であった。

荷電変換装置は4枚の荷電変換膜がカセット方式で装着でき、そのカセットを回転させることによって交換が可能である。荷電変換位置は軌道半径にして78~88 cm、軌道方向に沿っては3 deg.の駆動範囲をもっている。これによる取り出すビームのエネルギー可変範囲は、例えばサイクロトロンの加速パラメータを通常加速・取り出し(R=92.5 cm)に於ける40 MeV設定にした場合の30~35 MeV、80 MeV設定での55~70 MeVのそれぞれが取り出しエネルギーの範囲として得られる。この場合の加速テストでは、陽子を50MeV設定にして45MeVで取り出した。

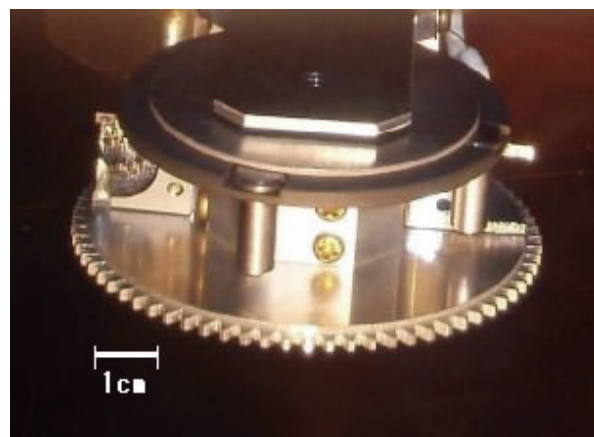


図2: 負イオンを取り出した後の荷電変換装置

## 4. RI製造専用新コース設置

既存の陽子線治療コース(C-9垂直ビーム照射コース)を、新規にRI製造の専用コースとする改修が行われた。

この作業では先ずワブラーマグネットを含んだ旧装置の撤去や照射室及び監視室等の改装が行われ、そのあと四重極電磁石及びビームモニター等の設置が行われた。新規のビーム輸送系は四重極電磁石が2台、ステアリング電磁石1台、及びビームモニター系としてファラデーカップとコリメータ等で構成され全長は約3.1 mである。

ビーム光学系の設計では、水平ビームラインの中心軸から垂直距離で3.3 m 下流の点をターゲットの位置とし、そこでのビームサイズは $\Phi$ 10 mm として設定した。このとき偏向電磁石(偏向角: 90-deg. 極率半径: 0.96 m)によるターゲット上の光学的分散関数を0.5 m 以内にすするため、その下流に四重極電磁石を設置した。

今後、このビームコースはビーム調整を行い、その後、放射薬剤の製造研究のために利用される。

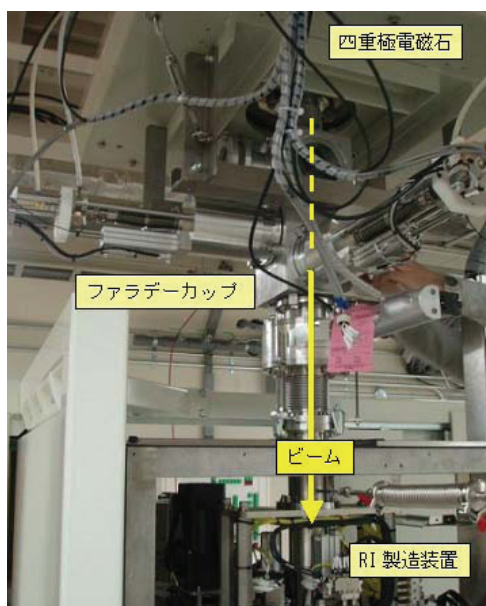


図 3: RI 専用コースの一部  
及び RI 製造装置

## 5. 低バックグラウンドのためのビーム光学系最適化

重粒子線治療に関わる生物・物理の基礎研究において、低バックグラウンドの条件下での実験<sup>[1]</sup>が必要とされ、ビームコースのビーム光学系の最適化を行った。

この実験では低バックグラウンドの条件下での測定が必要とされ、特に輸送中のビームの一部がビームダクトに当たって発生するX線及びγ線による影響が問題になっていた。また本実験では4価の炭素ビームをサイクロトロンで加速し、ビームラインの初段で荷電変換して6価の炭素ビームにするため、ビーム光学的な整合性（ビームサイズ及び分散関数）をより最適化する必要があった。最適化された光学系の計算結果をビームの進行方向に対するビームサイズ及び運動量分散係数の変化と共に図3に示す。主な改造点は輸送系の途中に四重極電磁石（1

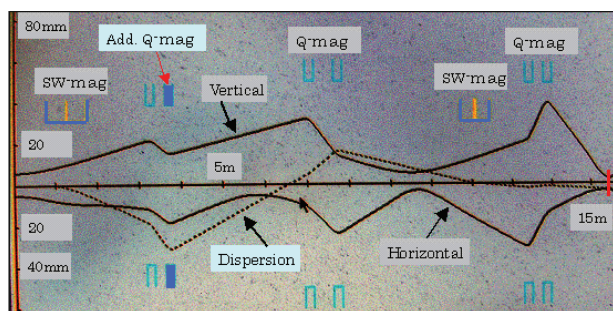


図 4: C10 コース ビーム光学系の計算結果

台)を追加することによって分散係数を小さくし、且つ実験装置に近い場所でのビームダクトの径をΦ62 mm をΦ80 mm に変更したことである。

結果的に非常に満足できる低バックグラウンドの条件下での実験が可能となっている。

## 6. その他・機器の保守と更新

### 6.1 ジェネレータの製造・配送・利用

R I 製造用直線コース (SPECT : C 4 コース) では、今年度から陽子線ビーム30MeVを強度20 μAで10時間連続照射による中寿命R I (<sup>62</sup>Zn-<sup>62</sup>Cu) ジェネレータの製造・配送・利用という課題が4施設共同研究として開始された。1回/月の頻度で実施されている。

### 6.2 大型サイクロトロン漏水対策

大型サイクロトロン電磁石ヨーク側面部には、デフレクターやコイルの電流ライン等の重要機器が取り付けられている。このため、ヨーク上部の冷却配管から水漏れが発生すると、マシンタイムへの影響だけでなく、サイクロトロン本体の致命的な故障に繋がるため、鉄ヨーク上部に漏水検知器の設置等の対策を講じた。

### 6.3 H1インフレクター故障修理

交換時にトラブルが発生し電極及び碍子等を破損した。修理に約3ヶ月要したが、その間H2インフレクターで代用しビームの提供を行った。陽子ビーム40 MeVのビーム強度が30%程低下したが、幸い高強度を求める提供はなく、影響はなかった。

## 7. 今後の予定

多種・多様なビームをより安定で且つ高強度で提供のためには、加速高周波系の更新に加え更なる老朽化対策を進めていく必要がある。

今後、負イオン加速では、荷電変換によるビーム取り出し場所及び方向が、通常の正イオン加速による場合と共有出来ないため、新規に取り出しポート及びビームラインを計画している。

## 参考文献

- [1] T Honma, et al., Proc., The 3<sup>rd</sup> Annual Meeting of Particle Acc. Society of Japan, (August 2-4, 2006 sendai) WP08.
- [2] D.Ohsawa et al., 平成18年度サイクロトロン利用報告書