

MODIFICATION OF NIRS-930 CYCLOTRON

Toshihiro Honma^{1,A)}, Satoru Hojo^{A)}, Yukio Sakamoto^{A)}, Nobuyuki Miyahara^{A)}, Takuya Endo^{A)}
 Takanori Okada^{B)}, Katsuyoshi Komatsu^{B)}, Takashi Kamiya^{B)},
 Jun Kanakura^{C)}, Masami Sano^{C)}, Yasushi Fukumoto^{C)}

^{A)} National Institute of Radiological Science
 4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8555

^{B)} Accelerator Engineering Corporation
 4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8555

^{C)} Sumitomo Heavy Industries, Ltd.
 5-2, Soubiraki-cho, Niihama, Ehime, 792-8588

Abstract

Some of big modifications in the NIRS-930 cyclotron have been done in past fiscal year later on 2005 to early on 2006. One of the most important in them is replacement the RF-system including Dee-electrodes, and other is that newly installation of charge-exchange equipment accompanied a remodeling a phase defining slit.

In the present, the new RF-system can be provided the maximum frequency up to 21.4 MHz, which covers an acceleration of proton energy of 90 MeV, and the system is successfully used in the daily operation of the cyclotron. The charge exchanging has an advantage of a relatively high current beam extraction, and would be provided the beam in the research field for development of newly radio pharmaceuticals.

NIRS -930サイクロトロンの改造

1. はじめに

放医研の大型サイクロトロン（NIRS-930と呼ぶ）は1973年にフランスのトムソンCSF社によって設置され、依頼約32年間稼働して来た。その間、速中性子線によるがん治療及び陽子線70MeVによる眼の疾患（メラノーマ）の臨床試行、短寿命RIの生産方法の研究、及び粒子線治療における生物・物理の両面での基礎研究等を中心に利用されて来た。しかしサイクロトロンの老朽化も同時進行して来た。サイクロトロンの老朽化は、それぞれの施設で個々特有の症状として現れているが、NIRS-930に関しては特に加速高周波系のDee電極の経年変化や駆動系の機械的摩耗、及び制御用電子部品の破損・劣化が問題となっていた。

この様な状況の中で、サイクロトロンの新たな活用を目的とし、平成17年度の後半から加速高周波系の更新作業を開始すると同時に、平成18年度当初からは、高強度ビーム取り出しを可能とする荷電変換装置、及び位相スリット設置作業を行った。

同時に、新旧共振器の入れ替えのために、サイクロトロン本体室の壁（幅3.5m, 高さ3.5m, 厚さ3m）は解体し、搬出・搬入を行った後現状復帰する作業が行われた。

2. 加速高周波系の更新

Dee電極及び共振系をセットとして新機に更新した。Dee電極の形状は旧来の寸法をほぼそのまま採用し、周波数可変機構を従来のムービングパネルをムービングショート型に変更した。共振周波数の微調補正のためはコンペンセータを付設し、約400kHzの範囲で自動調整が可能である。その中でも大きな改良点は、21MHzを超える最高共振周波数が安定に動作し、また、可変周波数領域でのQ値が20MHzでは従来に比べ約2倍の5000近くまで上がり、比較的高いDee電圧による運転が可能となったことである。これにより今までは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90MeVまでの加速が期待できることになる。本加速高周波系の更新計画では、共振周波数範囲：12～22MHzを目標に設計されたが、現状ではその運転可能周波数は11.5～21.14MHzとなっている。これは、Dee電極に対向する上下のアース板の経年変化による“盛り上がり”が原因で、Dee電極と上下アース板との静電容量が増大している影響と判断された。従って共振周波数全体が低い方向にシフトした結果になった。図1には設置された新高周波系器のうちCH1側の共振器を示す。

¹ E-mail: honma_t@nirs.go.jp



図1 . NIRS-930サイクロトロンと更新された高周波共振器

3 . 高強度ビーム取り出し

前述の加速高周波系を更新すると同時にNIRS-930では以下の2点について改良を行った。

3.1 荷電変換装置の設置

陽子及び重陽子ビームによる高強度照射を目的として、その負イオン加速による荷電変換取り出しを行うため荷電装置を新に設置した。

この方法によるビーム取り出しはデフレクターを必要とせず高効率のビーム取り出しが可能である。従って、R I 製造のような高強度ビーム照射では特に有用とされている。本計画では主に中寿命のR I 製造を目的とし、取り出しエネルギーが45 及び65 MeVの陽子ビームの場合を設計の基本とした。

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。しかしながら例えばNIRS-930の場合の計算では、軌道半径が90cm近辺で70MeVの陽子ビームについては、たかだか約3%程度が解離するだけである。

荷電変換によるビーム取り出し場所及び方向は、

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。図2にはシミュレーションで得られた荷電変換後のイオン軌道を示す。

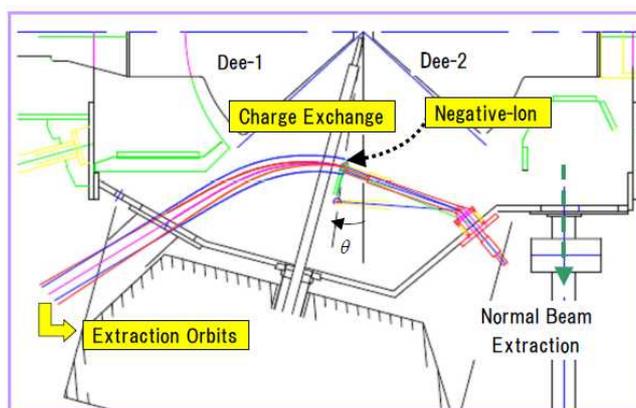


図2 . NIRS-930における荷電変換位置と取り出しビーム軌道。

軌道計算では、前述した取り出しエネルギーが45及び65 MeVの陽子ビームの場合を例にして最適な荷電変換位置を決めた。この場合サイクロトロン加速パラメータはそれぞれ、前者に於いては陽子加速の50 MeV及び、後者では80 MeVの設定である。このとき荷電変換位置は、ビームの軌道半径方向で $R=83.4 \sim 84.6\text{cm}$ 、 $\theta=7.5 \sim 9\text{deg}$.の範囲で、いずれの場合に於いても所定の取り出しが可能である。

以上のシミュレーションを基にして、荷電変換装置の位置可変範囲は軌道半径 $R = 83\text{cm}$ を基準とし可動範囲を $\pm 5\text{ cm}$ 、 θ 方向は $6 \sim 9\text{ deg}$.と設定した。

荷電変換装置に装着出来るフォイルは4枚装着可能で、遠隔操作にて回転させ交換出来、それぞれにフォイル破れ検出機構を備えている。フォイルは厚さ $100\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の炭素薄膜を使用する予定であるが、 $500\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 厚も検討している。これはフォイルの強度を上げるためであるが、目的としているビームのエネルギーが40MeV以上であることから熱的、及び多重散乱の影響は無視できるからである。

3.2 位相スリットの設置

陽子ビームの取り出しエネルギーの向上に伴い、加速途中及び取り出し近辺でのビーム損失を軽減するため、中心領域に位相スリットを設置した。設置位置は中心部軌道計算の結果を参照し最適化した。

位相スリットは2本の $\phi 4\text{mm}$ のタンタル棒を、それぞれ独立に駆動してスリットを構成する。

図3には陽子ビームエネルギー80 MeV、Dee電圧50kV、中心位相100deg.の加速条件で、位相差が $\pm 10\text{deg}$.のビームの軌道計算結果を示す。シミュレーションの結果では、位相差による半径方向のビームの拡がりを実際にカット出来ることを示している。

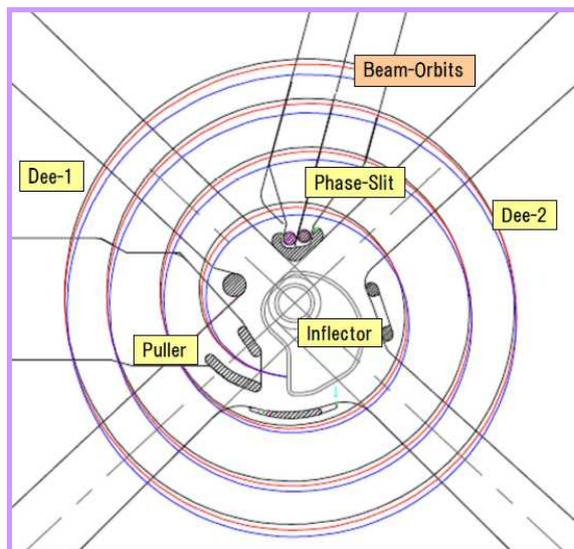


図3 . NIRS 930中心領域の位相の違いによるビーム軌道のシミュレーション結果と位相スリットの位置関係。

4 . 更新作業

加速高周波系の更新作業では以下に述べるような旧装置の解体・搬出、新装置の搬入、及びそれらの装置の入れ替えに拘わるサイクロトロン室の壁の解体・復旧等の作業を行った。これらの作業では特に放射化物の処理が考慮の対象になった。

4.1 サイクロトロン室側壁の解体

解体に際しサイクロトロン室内壁コンクリートの放射化レベルの測定を行った。図4には表面から深さ25cmでの放射化核種のスペクトルを示す。 ^{46}Sc 、 ^{60}Co 、及び ^{152}Eu のピークが検出されている。結果的に、内壁の深さ50 cmまでのコンクリートは修復時に内壁として再利用された。

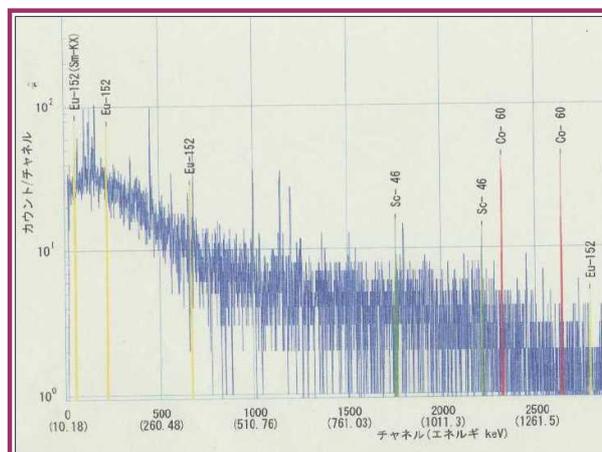


図4 . 放射化コンクリートのスペクトル。

4.2 旧装置の解体

加速Dee電極は高い放射化レベルにあり、その一部は 2mSv に達するレベルにあり、負圧に管理されたビニールハウス内で細分化シドラム管に格納して施設内の管理区域に保管した。Dee電極以外の部分は比較的レベルが低いので管理区域内に別途保管庫を設営し保管した。

5 . おわりに

放医研の大型サイクロトロンは、加速高周波系を更新すると同時に、中心領域の改造及び負イオン加速による荷電変換装置を付設した。この作業により陽子線エネルギーが本サイクロトロンの集束限界の90 MeVまで加速可能となり、また65 MeV近辺までの大強度陽子ビームが荷電変換取り出しによって可能となる。このサイクロトロンの利用としては今後、分子イメージング研究の中心をなす新しい放射薬剤の製造研究のため多種多様で安定したビームが期待される。最後に上記の改造に伴い内部イオン源は撤去し、ビームは全て外部入射に変更した。改造計画は順調に進み、現在ビーム加速テストを開始した。