

PRESENT STATUS OF CYCLOTRONS (NIRS-930, HM-18) AT NIRS

Satoru Hojo ^{#,A)}, Akinori Sugiura ^{A)}, Ken Katagiri ^{A)}, Katsuto Tashiro ^{A)}, Akira Goto ^{A)},
Takanori Okada ^{B)}, Yuichi Takahashi ^{B)}, Ryuji Nakayama ^{B)}, Takashi Kamiya ^{B)}, Toshihiro Honma ^{B)}
Victor Smirnov ^{C)}, Sergey Vorozhtsov ^{C)}

^{A)} National Institute of Radiological Sciences

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

^{B)} Accelerator Engineering Corporation

3-8-5 Konakadai, Inage, Chiba, 263-0043

^{C)} Joint Institute for Nuclear Research

Dubna, RU-141980, Russia

Abstract

The cyclotron facility at National Institute of Radiological Science (NIRS) consists of a large cyclotron (Thomson-CSF NIRS-930, $K_b=110$ MeV and $K_f=90$ MeV), a small cyclotron (Sumitomo- Heavy- Industry HM-18), and nine experimental beam lines. The NIRS-930 has been used for production of short-lived radio-pharmaceuticals for PET, research of physics, developments of particle detectors in space, and so on. In this report, operational status of the cyclotron facility and some improvements and developments are presented.

放医研サイクロトロン (NIRS-930、HM-18) の現状報告

1. はじめに

放射線医学総合研究所の NIRS-930 サイクロトロン(NIRS-930)は、1974 年に速中性子線を利用したがん治療を主な目的として導入された。その後、速中性子線から陽子線での治療へ、さらに HIMAC(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)による炭素線での治療へ移行しており、NIRS-930 を用いた治療は行われていない。現在の目的は、分子イメージング研究のための放射性薬剤の製造や開発が主で、その他に放射線検出器の開発、基礎物理研究、耐放射線性試験などとなっている。また、HM-18 サイクロトロン(HM-18)は、HIMAC での治療のための PET 診断に用いる放射性薬剤の製造専用のサイクロトロンとして 1994 年に導入された。

NIRS-930 と HM-18 の 2 台のサイクロトロンは、建設以来、改良や改修を重ねながら利用され続けている。2011 年度は、NIRS-930 では位相プローブを導入し、さらに鋸歯状波バンチャーへの改良をすすめられた。また、老朽化により温度上昇が問題となっていたマグネティックチャンネルの更新を行った。HM-18 では、ビーム位相を計測できるように位相プローブを導入した。

これら 2 台のサイクロトロンの利用状況と改良開発についての報告を行う。

2. 利用状況

NIRS-930 は分子イメージング研究のための放射性薬剤の製造研究を主な目的とし、その他多くの目的に利用されている。また、ユーザーからの利用要求が増加しており、これに対応するため 2011 年度より土曜日の運用を実施している。これにより、

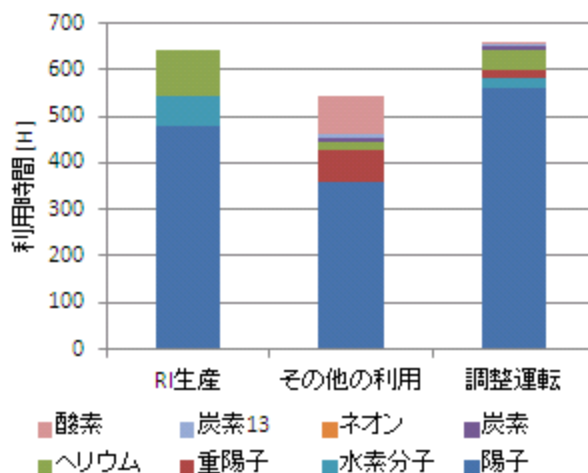


図 1 : NIRS-930 の利用時間集計 (2011 年度)

2010 年度 1674 時間であった総運転時間は 1841 時間と大幅に増加した。2011 年度の運転時間を利用目的別に集計した結果を図 1 に示す。利用目的を主となる放射性薬剤の製造研究とその他の利用時間と調整運転の 3 つに分け、それぞれについて核種ごとに色分けをして示した。

放射性薬剤の製造では、総運転時間のおよそ 3 分の 1 に当たる 640 時間が当てられた。NIRS-930 における放射性薬剤の製造では固体をターゲットとした照射が多く行われており、生成核種としては ^{28}Mg , ^{62}Cu , ^{64}Cu , ^{62}Zn , ^{76}Br , ^{89}Zr , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{124}I である。ビーム種としては、30 MeV 以下の陽子と水素分子による照射が 85% を占めている。それ以外では、最近 ^{28}Mg の生成を実施し始めたことにより、ヘリウ

ムによる照射時間が増えてきている。このように、陽子のみでなくヘリウムを用いた照射も行うことにより、生成核種の種類を増やしている。

その他の利用では、粒子線検出器の開発、生物影響研究、粒子線による損傷試験、物理研究などが行われ、545 時間が当てられた。有料のビーム提供も行われ、そのための主に 70 MeV 以上の陽子利用がこの利用時間の半分を占めている。それ以外にも、重陽子、ヘリウム、炭素、酸素、炭素の同位体である炭素 13 など数多くのビームが利用されている。

調整運転では、入射・取出し・輸送効率が悪く要求強度に満たないビームに対する効率改善のための調整や、機器開発のための運転などが行われ、656 時間が当てられた。また、法令による漏えい測定などに当てられた時間もこの中に含まれている。

HM-18 は放射性薬剤の製造専用として運転されており、2011 年度の総運転時間は 1614 時間であった。HM-18 では 18 MeV 陽子と 9 MeV 重陽子の提供が可能で、それぞれの運転時間の割合を図 2 に示す。95% が 18 MeV 陽子の利用で、9 MeV 重陽子の利用は 4% であった。調整運転は、長期メンテナンス期間後のビーム確認等のために行われ、18 MeV 陽子と 9 MeV 重陽子とを合わせて 1% であった。

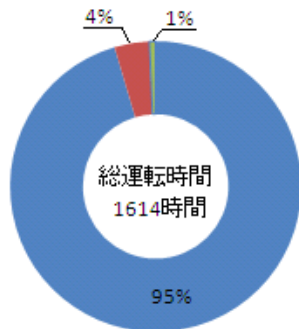


図 2 : HM-18 の運転時間集計割合 (2011 年度)

3. 改良開発

3.1 位相プローブの導入

2010 年度に設計製作が行われた位相プローブ[1]の NIRS-930 への据付け作業を 2011 年 7 月の定期点検時に行った。ピックアップ電極は上下 10 対あり、各ピックアップ電極の設置された半径と各トリムコイルにより発生する磁場の関係を図 3 に示す。

各ピックアップ電極からの電気長をそろえるため、極力同一のラインを用いるようにした。そのため、ピックアップ電極間近の本体室に選択回路を設置した。選択回路は 1 桁デジスイッチと複数の同軸切換えスイッチを用いて信号増幅器の入力の切換えを行っている。さらに、ピックアップ電極からの電気長と Dee 電極からの電気長の較正も行い、Dee 電圧の位相とビーム位相の関係がみられるようにした。位相測定はオシロスコープを用いて行った。

30 MeV 陽子と 12 MeV 陽子でのビーム位相の測

定結果と、それをもとにトリムコイルを用いて等時性磁場の調整を実施した後のビーム位相をそれぞれ図 4, 5 に示す。最も内側の電極を 0 度として各半径での位相差を示す。

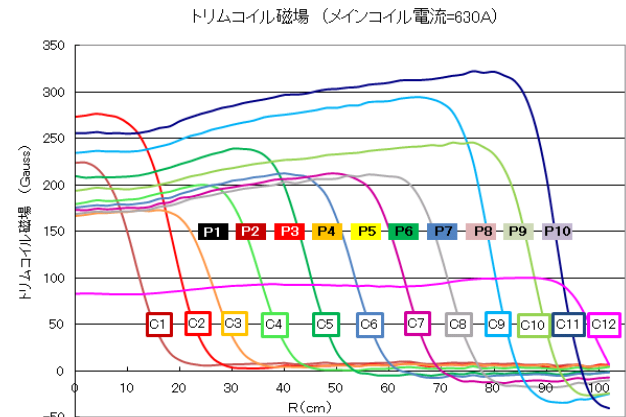


図 3 : 位相プローブの位置とトリムコイル磁場

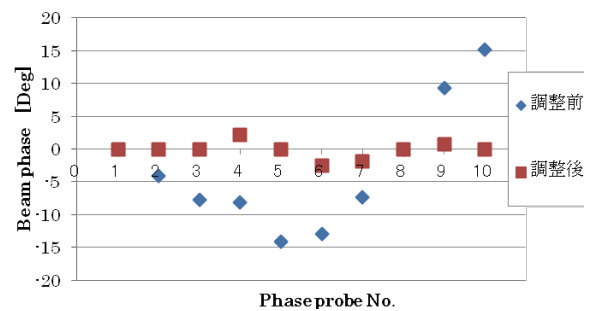


図 4 : 30 MeV 陽子に対するビーム位相測定結果

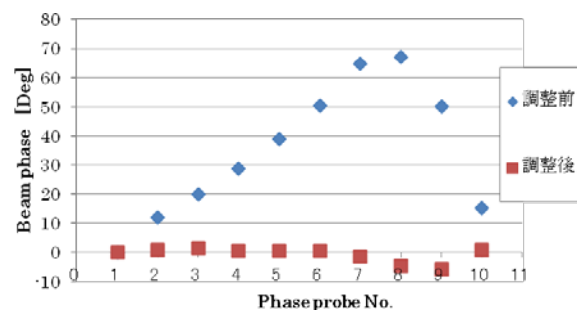


図 5 : 12MeV 陽子に対するビーム位相測定結果

30 MeV 陽子のビーム位相の変動幅は、±15 度であったのに対して、位相プローブを用いてトリムコイルを調整することにより±5 度以下とすることができた。また、12 MeV 陽子では、70 度と大きくずれていたが、これもトリムコイルの調整後は±5 度以下にすることができた。位相プローブを導入することによって、これまで加速されていたビームに対する等時性磁場をより良いものにし、また新たな核種やエネルギーのビームに対してはサイクロトロン内部の加速調整に要する時間を大幅に短縮することができるようになった。

また、HM-18 にも簡易的な設計による位相プローブの導入を行った[2]。

3.2 シングルギャップバンチャーの導入

NIRS-930 では鋸歯状波を用いたビームバンチャーの開発に向けて、シングルギャップバンチャー (S-Gap) のテストを実施した。既存のダブルギャップバンチャー (W-Gap) の設置位置 (インフレクターまでの距離 $L=1.53$ m) に対して、シングルギャップバンチャーをテスト用として $L=2.33$ m の位置に設置した場合、ビーム強度が高くなるとバンチング効率が低下することが分かった[3]。この低下は空間電荷効果によるものと考えられる。そこで、シングルギャップバンチャーを $L=1.53$ m の位置に設置してビームテストを行った。その結果、バンチング効率はビーム強度が高い場合でもあまり低下することなくダブルギャップバンチャーと同程度の値が得られることを確認することができた[4]。サイクロトロン入口である入射ラインのファラデーカップ FC4 の強度に対する、取出し後の BS0 におけるバンチング効率を図 6 に示す。現在、シングルギャップバンチャーは、 $L=1.53$ m の位置で通常のオペレーションに用いられている。

今後、このシングルギャップバンチャーに鋸歯状波の電圧をかけて運転できるようにする予定である。

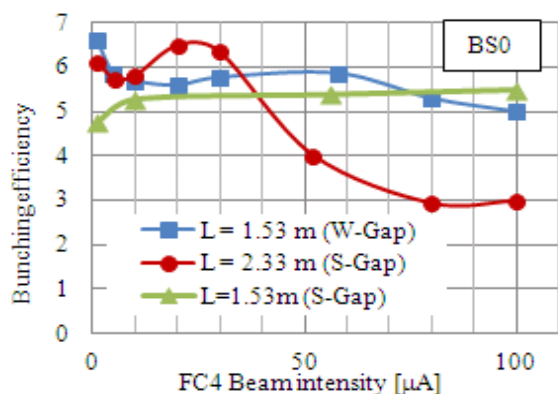


図 6 : シングルギャップバンチャーを用いたビームテスト結果

3.3 軌道計算

エネルギーフロンティアの新しいビームを加速したり既存のビームの強度を上げたりしたいときには軌道計算が有用となる。それに対応できるように完全 3 次元電磁場分布のもとでビームのシミュレーションを行う軌道計算プログラムを構築した。

サイクロトロンを構成する各機器の電磁場 (メインコイル、トリムコイル、ハーモニックコイルによる磁場、マグネティックチャンネル、グラディエントコレクターの磁場、ヨーク内のグレーザレンズの磁場、Dee 電極ギャップの電場、インフレクターの電場) はすべて OPERA-3d [5] を用いて計算し、それらの分布のもとで入射・加速・取出しの軌道計算を行った。

典型的なビーム (30 MeV 陽子) に対して先ず行った計算ではビームパターンやビーム通過効率等が実際の運転をよく再現することが確認された。一例としてビーム位相に関する計算と運転との比較を図 7 に示す。今後このビームや他のビームについて

その通過効率を上げることを目指して、さらに計算を行う予定である。

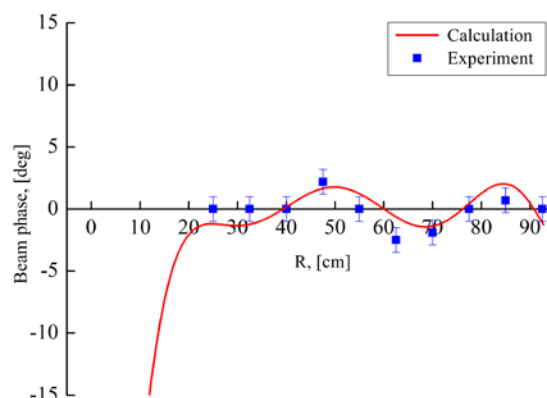


図 7 : ビーム位相の計測と計算結果の比較

3.4 その他

NIRS-930、HM-18 とともに経年劣化が進んでいるため、系統ごとに更新を進めながら稼働を続けている。取出しビームラインの Q マグネットのコイルからの漏水、冷却水ラインのホースの劣化、電源供給ラインのケーブルの硬化や端子台等の絶縁物の劣化など、細かい対応も必要となってきた。なかでも、電流密度が高く厳しい条件で使用されているマグネティックチャンネルは、10 年の使用経過で、冷却水の流量不足による使用可能な電流の低下のため、高エネルギービームの取出しが問題となっていた。そのため、マグネティックチャンネルの更新を実施した。更新前では、陽子 70MeV のサイクロトロンからの取出し効率が 1% 程度であったのに対し、更新後では 30% まで上げることができ、ユーザーに提供できるようになった。また、陽子 80 MeV も供給できるようになった。

4. おわりに

NIRS-930 ではユーザーの利用要求が増加している。そして、それにともなって新しいビーム核種およびエネルギーが求められたり、既存のビームの強度の増強が求められたりするようになってきた。それらに応えるべく、今後鋸歯状波ビームバンチャーの導入、ビーム診断系の充実、軌道計算による通過効率の向上等を図っていく予定である。

参考文献

- [1] A.Sugiura, et al., "Status report of NIRS cyclotron facility", Proceedings of the PASJ2011, MOPS031, (2011)
- [2] S.Hojo, et al., "Development of phase probe in the NIRS small cyclotron HM-18", Proceedings of the PASJ2012, WEPS029, (2012)
- [3] S.Hojo, et al., "Development of multi-harmonic beam buncher for AVF-930 cyclotron(II)", Proceedings of the PASJ2011, TUPS113, (2011)
- [4] S.Hojo, et al., "Observation of longitudinal space charge effects in the injection beam of NIRS-930 cyclotron", Proceedings of the IPAC12, MOPPD028, (2012)
- [5] OPERA/TOSCA Reference Manual. Vector Fields Limited. Oxford, OX5 1JE, England.