

放医研のサイクロトロン(NIRS-930, HM-18)の現状報告 STATUS REPORT OF NIRS-930 AND HM-18 CYCLOTRON AT NIRS

北條悟^{#,A)}, 杉浦彰則^{A)}, 片桐健^{A)}, 中尾政夫^{A)} 野田章^{A)}, 涌井崇志^{A)},
岡田高典^{B)}, 高橋勇一^{B)}, 井博志^{B)}, 青山功武^{B)}, 野田耕司^{A)}
Satoru Hojo^{#,A)}, Akinori Sugiura^{A)}, Ken Katagiri^{A)}, Masao Nakao^{A)}, Akira Noda^{A)}, Takashi Wakui^{A)},
Takanori Okada^{B)}, Yuichi Takahashi^{B)}, Hiroshi Ii^{B)}, Isamu Aoyama^{B)}, Koji Noda^{A)}

^{A)} National Institute of Radiological Sciences

^{B)} Accelerator Engineering Corporation

Abstract

The cyclotron facility at National Institute of Radiological Sciences (NIRS) consists of a NIRS-930 cyclotron (Thomson-CSF AVF-930, K_b=110 MeV and K_f=90 MeV) and a small cyclotron HM-18 (Sumitomo- Heavy- Industry HM-18, K=20 MeV). The NIRS-930 has been used for production of radionuclide. The other purposes of NIRS-930 were research of physics, developments of particle detectors in space, research of biology, and so on. The annual total operation time of NIRS-930 in last year was 1760 hours. The high intensity beams such as 34 MeV helium 15 μA and 24 MeV H₂ 10 μA have been used for the radionuclide production for Targeted Radionuclide Therapy (TRT). The HM-18, that is a fixed energy negative-ion accelerator, has been providing 18 MeV protons and 9 MeV deuterons in order to produce short-lived radio-pharmaceuticals for Positron Emission Tomography (PET). The annual total operation time of HM-18 in last year was 1576 hours.

1. はじめに

放射線医学総合研究所(NIRS)のサイクロトロン施設には、NIRS-930 (Thomson-CSF AVF-930, K_b=110 MeV and K_f=90 MeV) と HM-18 (Sumitomo Heavy Industry 製 K=20 MeV) の2台のサイクロトロンが設置されている。NIRS-930 は、標的アイソトープ治療(TRT)用核種の製造を始めとする放射性薬剤の製造方法の研究開発を中心に、放射線検出器の開発、荷電粒子の核破砕反応測定、耐放射線性評価試験、放射線生物学の基礎実験等に使われている。一方、HM-18 は PET 薬剤製造専用として、運転を続けている。

年間のマシンタイムスケジュールは、前期と後期に分けた2期制をとっている。前期マシンタイムと後期マシンタイムの間の二週間と、年度末の二週間程度を停止期間としてメンテナンスを行っている。1週間のスケジュールとしては、平日の昼間のみの運転となっており、一週間の内2.5-3日間は放射性薬剤の製造にあてられている。さらにこれに加えて、マシンタイムの要望を満たすために、月に1回程度土曜日のビーム供給運転をおこなっている。

2. 運転状況

2.1 NIRS-930 の運転状況

NIRS-930 の2014年度の年間運転時間を Table 1 に示す。運転計画時間は、配分されたマシンタイム日数から1日の予定運転時間を9時から17時までの8時間運転として算出した時間である。2014年

度は、土曜提供を11日間行っており、これを含めた予定運転時間は、1616時間であった。これに対し、実際の年間運転時間は、1760時間であった。これは、それぞれのマシンタイムにおいて、予定時間からの延長が多く見られたためである。まず、主目的である放射性核種の製造用のマシンタイムにおいては、TRT用核種の製造方法の研究開発のため²¹¹At や⁶⁴Cu を製造する回数が多くなった。また、薬剤提供時刻と照射時間の関係からの早朝運転開始による、金属ターゲットの長時間照射も行われた。これらの放射性核種の製造にはより高いビーム強度が求められていることから、その製造に使われる34 MeV He15 μA や24 MeV H₂ 10 μA の提供を行っており、これらのビームに対する調整運転の時間も増加した。

R&D や、その他物理実験等でも、ユーザーからの要求により、17時での終了ではなく、1、2時間の延長を実施しているため、実運転時間が多くなっている。全体の運転時間の8割を占める1396時間がマシンタイムとして利用され、残りの364時間がR&D や、要求強度に向けての取出し効率の改善などの調整運転、法令による放射線漏えい測定などに用いられた。マシンタイム利用の中では、およそ6割の862時間が放射性核種の製造に利用された。そのほかには、原子核物理の研究に178時間、有償の耐放射線試験が205時間、耐放射線研究が77時間、生物研究が65時間、放射線計測に関する研究が9時間となっている。また、装置の故障によるマシンの停止時間としては、30分以上の供給遅延を停止時間として積算している。2014年度の機器故障による停止時間は、28時間であった。その内訳は、ビーム輸送の四極電磁石のコントロールシステムに

[#]s_hojo@nirs.go.jp

不具合が生じ 9 時間の停止、インフレクタの絶縁低下により 9 時間の停止、ビームプローブの真空シール部に破損が生じ真空悪化により 8 時間の停止、さらにビーム輸送ラインの真空排気装置の故障により 2 時間の停止が発生している。

年間運転時間における各粒子の割合を Figure 1 に示す。多くの時間が陽子に用いられており、全体の 57% を占めている。陽子の利用内容では、放射性核種の生産や、宇宙環境を模した耐放射線試験等と様々で、利用されるエネルギー範囲も広がっている。そのほかには、低エネルギーの陽子を補う形で用いられる水素分子が 8%、高エネルギーが検出器の開発に用いられ、低エネルギーが放射性核種製造に用いられている重陽子が 7%、TRT 用核種の製造方法の研究開発のためのヘリウムが 23%、物理実験に用いられた炭素が 1%、生物物理実験に用いられたネオンが 4% となっている。

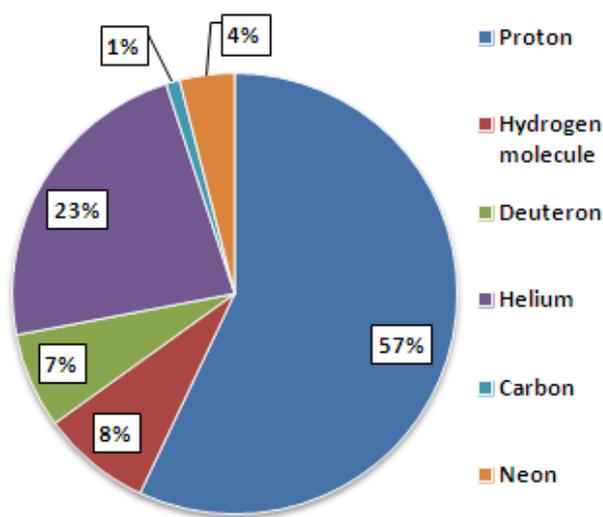


Figure 1: The operation time ratio of beam particles.

Table 1: Annual Operation Time of the NIRS-930 (2014)

Planned time of operation	1616 h
Total operation time	1760 h
1. Experiment	1396 h
2. Tuning operation and machine studies	364 h
3. Unscheduled beam stop by failure	28 h
1. Experiment summary	
RI productions	862 h
Nuclear and atomic physics experiments	178 h
Radiation damage tests (Proprietary research)	205 h
Studies on radiation damaged	77 h
Biological experiments	65 h
Studies on radiation dosimeters	9 h
3. Unscheduled beam stop by failure	
Beam transport control system	9 h
Inflector	9 h
Beam probe (vacuum seal)	8 h
Vacuum system	2 h
Beam stop time / Operation time	1.6%

2.2 HM-18 の運転状況

HM-18 の 2014 年度の年間運転時間を Table 2 に示す。運転計画時間は、NIRS-930 と同様に配分されたマシンタイム日数から 1 日の予定運転時間を 9 時から 17 時までの 8 時間運転として算出した時間で 1596 時間であった。ここで、HM-18 と NIRS-930 の運転計画時間の違いは、マシンタイム日数の違いにある。長期メンテナンス直前の一週間は、NIRS-930 が停止し HM-18 のみのマシンタイムとなっている。一方、NIRS-930 のみが土曜日にマシンタイムを入れており、この土曜マシンタイムの日数がメンテナンス前停止日数に比べて多かったため、HM-18 の運転計画時間は NIRS-930 より短くなっている。

実際の運転時間は、総運転時間の 9 割以上となる 1482 時間が陽子による PET 用放射性核種の製造に充てられており、56 時間が重陽子による PET 用放射性核種の製造に充てられている。

故障による停止は、39 時間であった。故障箇所としては、メインコイル電源とイオン源システムで故障が発生した。メインコイル電源の故障による停止が計 20 時間、イオン源の故障による停止が計 19 時間となっている。メインコイル電源の故障では、電源内部の故障が生じた事例と、電源配電盤内のノーヒューズブレーカーに不具合が発生した事例があった。電源内部の故障においては、メーカーにより、代替電源の手配を受け、停止時間 16 時間で通常運転を行うことができた。イオン源の故障においては、イオン源内部でのカソードショートによる事例と、ガス供給システムにおける真空リークが原因による事例があった。また、これら HM-18 における故障停止の際、NIRS-930 からの 18 MeV 陽子の提供により 16 時間程度、PET 用放射性核種の製造を実施している。

Table 2: Annual Operation Time of the HM-18 (2014)

Planned operation time for RI production		1596 h
Operation time	Total	1576 h
1. Protons used RI productions		1482 h
2. Deuterons used RI productions		56 h
3. Tuning operation and machine studies		38 h
4. Unscheduled beam stop by failure		39 h
4. Unscheduled beam stop by failure		
Main coil power supply		20 h
Ion source		19 h
Beam stop time / Operation time		2.4%

3. 垂直入射系制御装置の改修

NIRS-930 の垂直入射ラインは 1991 年に導入された。導入当初は、サイクロトロン中心への振り下げ偏向電磁石の直上流に PIG イオン源が設置されたものであった。その後、垂直入射による本格運用が実施される際に、入射ラインが延長され永久磁石型の ECR イオン源が導入された。しかしながら、これまで、サイクロトロン中心への振り下げ偏向電磁石下流は、1991 年導入時に製作されたポテンシオメータと、照光式押しボタンスイッチによるコントローラを使用していた。長年の使用により老朽化が進むにも関わらず、コントローラ内部に用いられている電子部品が製造中止となっているため、改修を行った。導入当初のシステムでは、現場テスト用コントローラとして、現場操作盤がサイクロトロン本体のヨーク上に設置されていた。この現場操作盤は既に使用しておらず、本体室から RF などの大きなノイズを拾ってしまうなど、各電源制御に悪影響を与えていた。そのため、改修に併せて、現場操作盤の撤去も行った。

新しいコントローラは PC を経由した PLC 制御とした。PLC を設置する場所は、放射線によるダメージとノイズ混入を懸念して、サイクロトロン本体から離し、サイクロトロンが運転中でも立ち入れる区域である遮蔽壁の外とした。新しいコントローラの操作画面の写真を Figure 2、3 に示す。Figure 2 は制御する機器を選択するデバイス画面で、Figure 3 はデバイス画面で選択することにより開く個々の機器の詳細設定画面である。これにより、各機器のセッティングはスムーズになり、電源へのノイズの影響も少なくなり、さらなる安定したビーム供給が可能となっている。

今後、ロータリーエンコーダーでの数値変更を可能とするなど、ビーム調整時などにおける操作性の向上や、各パラメータのログデータ化などを目標

していく予定である。



Figure 2: Photo of device select screen at new controller.



Figure 3: Photo of device control screen at the new controller.

4. 改良開発

4.1 高調波ビームバンチャーの開発^[1]

これまでのビームバンチャーは、サイクロトロンの加速周波数と同じ基本波の正弦波形でのビームバンチを行ってきた。さらにビーム強度を増強するために、理論的に正弦波でのビームバンチより効率の高い、高調波を加えた鋸歯状波形によるビームバンチをめざして機器の改良を進めている。基本波に加えて、第 2、第 3 高調波を加えることにより、サイクロトロンからの取出し効率を低下させずに、正弦波よりも高いバンチング効果を確認することができた。今後、ローレベルシステムを確立していく必要がある。

4.2 3次元シミュレーション^[2]

3次元シミュレーションにより、ビーム挙動を理解し、最適なパラメータを調整することにより、ビームの質の向上や強度増強を目指しシミュレーションを行っている。18 MeV 陽子での入射時の位相における取出し効率の解析を行った。これを基に、取り出し機構の改良案の検討等を進めていく予定である。

4.3 RI 生成用新ビームラインの設計^[3]

TRT に向けた放射性核種の製造と関連した基礎的

実験に向けた、新たなビーム照射ポートの設置を進めている。放射性核種の製造量の向上を狙ってビーム電流の増強をする場合には、溶解等によるターゲット系の損壊を防ぐためにビーム電流密度の低減が必要となる。そのため、照射システムにワブラー電磁石を採用し、拡大ビームを放射性同位元素の製造時に供給するビームトランスポートの設計を行った。また、照射システムに用いるワブラー電磁石の設計製作を行った。本照射ポートは 2015 年度内のビーム照射を目標として計画を進めている。

4. まとめ

放医研の 2 台のサイクロトロン NIRS-930 と HM-18 は、それぞれ 1760 時間と 1576 時間の運転を行った。運転スケジュールが昼間のみのため、多くの場合に延長運転が行われており、計画時間より多い運転時間となっている。

1991 年に導入された垂直入射の制御系の改修を実施した。また、さらなる高強度をめざし、高調波ビームバンチャーの導入や、取り出しビームの解析をおこなった。今後、新たなビームラインの設置を行いつつ、老朽化に対する対策も随時実施していく必要がある。

参考文献

- [1] S. Hojo, et al., “Development of multi-harmonic beam buncher for AVF-930 cyclotron (III)”, Proceedings of the PASJ2015, THOL03.
- [2] M. Nakao, et al., “Beam Simulation for Cyclotron NIRS-930”, Proceedings of the PASJ2015, THOL04.
- [3] K. Katagiri, et al., “Wobbled beam irradiation system for radioisotope production in NIRS cyclotron facility”, Proceedings of the PASJ2015, THP130.