

## 放医研サイクロトロン(NIRS-930, HM-18)の現状報告

### STATUS REPORT OF NIRS-930 AND HM-18 CYCLOTRON AT NIRS

杉浦彰則<sup>#, A)</sup>, 北條 悟<sup>A)</sup>, 片桐 健<sup>A)</sup>, 中尾政夫<sup>A\*)</sup>, 野田 章<sup>A)</sup>, 涌井崇志<sup>A)</sup>,  
岡田高典<sup>B)</sup>, 高橋勇一<sup>B)</sup>, 青山功武<sup>B)</sup>, 井 博志<sup>B)</sup>, 野田耕司<sup>A)</sup>,

Akinori Sugiura<sup>#, A)</sup>, Satoru Hojo<sup>A)</sup>, Ken Katagiri<sup>A)</sup>, Nakao Masao<sup>A)</sup>, Akira Noda<sup>A)</sup>, Takashi Wakui<sup>A)</sup>,  
Takanori Okada<sup>B)</sup>, Yuichi Takahashi<sup>B)</sup>, Isamu Aoyama<sup>B)</sup>, Hiroshi Ii<sup>B)</sup>, Koji Noda<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> National Institute of Radiological Sciences, National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology

<sup>\*)</sup> Present Address: Research Center for Nuclear Physics, Osaka University.

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

#### Abstract

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

#### 1. はじめに

量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所のサイクロトロン施設には、NIRS-930(Thomson-CSF, Kb=110 MeV, Kf=90 MeV) とHM-18(住友重機械工業製 K=20 MeV)のサイクロトロンが設置されている。

NIRS-930 は 1974 年に運転を開始し速中性子治療、陽子線治療を行ってきた。現在では放射性薬剤の研究開発を中心に、荷電粒子の核破碎反応測定、陽子線治療の高度化のための基盤研究、放射線生物学の基礎実験、放射線検出器の開発、耐放射線性評価試験等に対して使われている。2015 年度は NIRS-930 の老朽化対策としてデフレクタの更新やマグネティックチャンネル用電源の交換等を行った。1994 年に運転を開始した HM-18 は短寿命放射性薬剤の製造および開発専用に使われ、大きな故障も無く運転している。

#### 2. NIRS-930 の運転実績と利用状況

2015 年度の総運転時間は 1706.9 時間であった。NIRS-930 には、外部イオン源として永久磁石型 ECR イオン源(Kei-source) [1]が設置されており、陽子をはじめとして水素分子(H<sub>2</sub>)、重陽子(D)、ヘリウム(He)、炭素(C)、ネオン(Ne)といった様々な粒子を加速することが可能となっている。加速可能なエネルギーは、陽子で 8~90 MeV である。

NIRS-930 の利用目的別運転時間を Figure 1 に示す。主目的である放射性薬剤の製造・研究では 46.4%の運転時間が当てられた。そのほかでは、物理研究に 16.2%、粒子線検出器の開発に 4.3%、生物研究に 4.0%、有料ビーム提供に 8.7%が利用された。ビーム開発では、20.4%の運転時間が当てられ、輸送および透過効率の改善や、新規供給ビームの調整等に使われた。

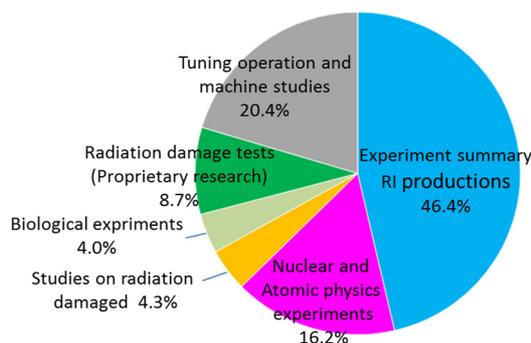


Figure 1: Annual operation time ratio of categories at the NIRS-930 (2015).

粒子別運転時間を Figure 2 に示す。すべての分野で主に利用されている陽子は総運転時間の 43.7%を占めている。ヘリウムは総運転時間の 36.8%を占めるようになった。主目的である放射性薬剤の製造・研究において標的アイソトープ治療 (TRT: Targeted Radionuclide Therapy) に用いられる <sup>211</sup>At の製造のためにヘリウムの利用が増えている。水素分子は解離後に陽子として、放射性薬剤の製造・研究に利用されている。重陽子は主に放射性薬剤の製造・研究で利用され、炭素およびネオンは物理研究にて利用されている。

<sup>#</sup> sugiura.akinori@qst.go.jp

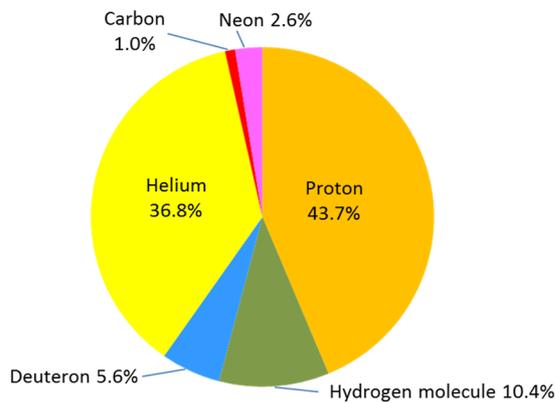


Figure 2: The operation time of beam particles at the NIRS-930 (2015).

### 3. HM-18 の利用状況

HM-18 は、負イオン加速型のサイクロトロンであり、陽子と重陽子のみが供給可能である。加速エネルギーは固定で、陽子で18 MeV、重陽子で9 MeVとなっている。2015年度の小型サイクロトロンの運転時間を Figure 3 に示す。総運転時間は1541.9時間で、そのうち95.3%が陽子による $^{11}\text{C}$ や $^{13}\text{N}$ 、 $^{18}\text{F}$ などの放射性薬剤の製造に利用された。3.7%が重陽子による $^{15}\text{O}$ の放射性薬剤の製造に利用された。定期点検に伴うビーム確認等に利用された調整運転は1.0%であった。

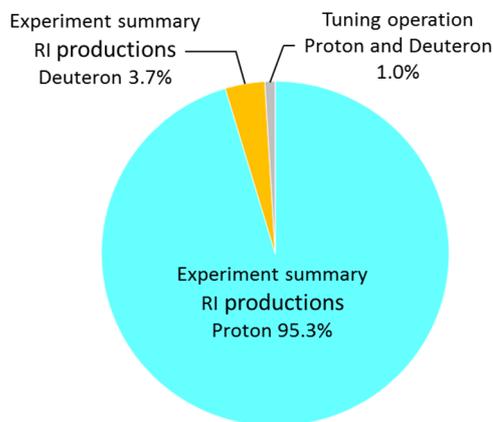


Figure 3: Annual operation time ratio of categories at the HM-18 (2015).

### 4. 取り出しエネルギーの調整[2]

NIRS-930 では、標的アイソトープ治療の研究開発を行っている。その標的アイソトープ治療用の放射性核種の生産においては、 $^{211}\text{At}$ などの原子番号の高い核種を効率良く生産されることが求められている。 $^{211}\text{At}$ ではビームのエネルギーが少し外れると生産効率が下がることや、毒性の強い放射性核種が副産物として生成されるという問題がある。そのため、ビームのエネルギーが重要なパラメータの一つとなっている。

そこで NIRS-930 から取り出されたビームのエネル

ギーを TOF 法により測定を行い、取り出されるビームのエネルギーの調整を行った。

### 5. 静電デフレクタの更新

装置の老朽化対策として、静電デフレクタシステムの更新を行った。これまで使用していた静電デフレクタは、Thomson 製のデフレクタを用いていたが、老朽化による駆動機構の位置の再現性に問題があることに加えて、Thomson 社が加速器事業から撤退して長年経過しているため、故障時の交換部品の入手も困難になっていた。そのため、駆動制御や制御システムを含めて住友重機械工業 (SHI) 製のデフレクタシステム (Figure 4, 5) への更新を行った。

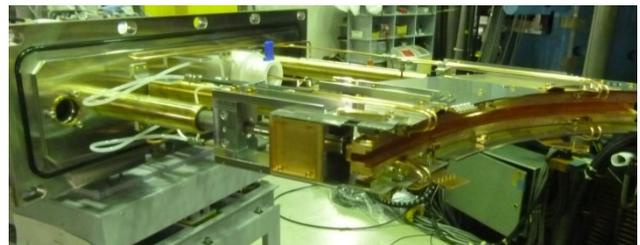


Figure 4: Picture of Deflector made by SHI.



Figure 5: Picture of moving system for Deflector.

また、静電デフレクタ用の高電圧電源においても、電流モニターに不具合があり、高電圧印加時の暗電流が計測できなくなっていたため、併せて更新をおこなった。

駆動制御装置も併せて更新した。Thomson 製では、ダイヤル式ポテンショメータ (Figure 6) およびデジタルポルトメータによる駆動位置制御を行っていたが、SHI 製では、PC からの PLC 制御となっている。メインの駆動画面の一例を Figure 7 に示す。

高電圧電源においては、高さ 2 m の 19 インチラック 1 本分のコッククロフトを用いた高電圧電源から、9 インチラック 1U タイプのインバーター形高周波電源になり、小型化されている。さらに遠隔制御システムもダイヤル式ポテンショメータとアナログメーターで行っていたものから、PLC 制御となっている。



Figure 6: Control panel of deflector positions by Thomson.

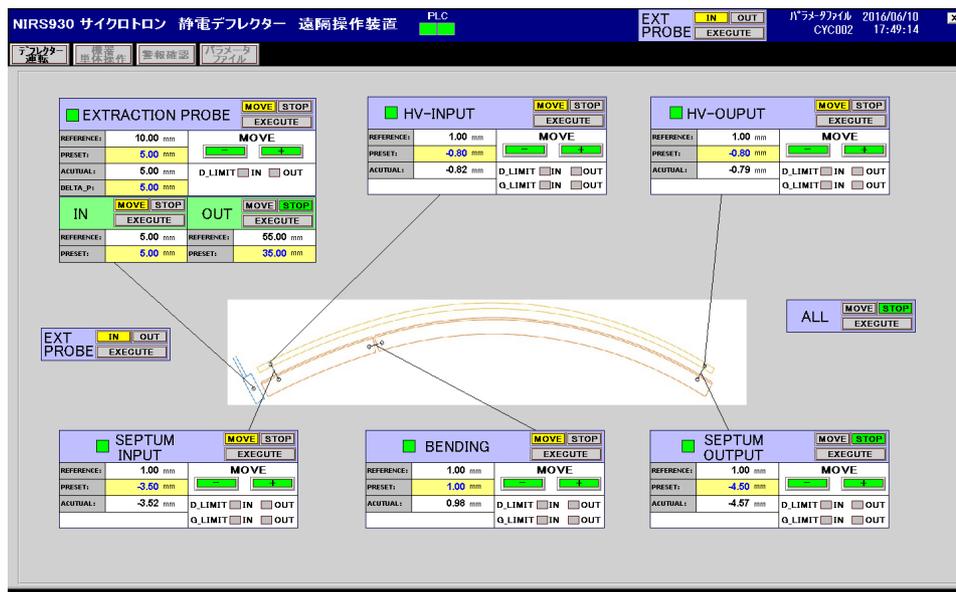


Figure 7: Control panel of deflector positions by SHI (Each deflector positions and running status was associated).

## 6. 汎用 RI 照射コースの整備

速中性子治療を行っていた照射ポートを新たな医療用放射性核種の製造に備えて、また重粒子線がん治療における不安定核イオンの加速を目指した基礎的実験を行うために、照射システムの設計[3]に基づき、整備を行った。整備を行った照射ポートの写真を Figure 8 に示す。ワブラー電磁石を導入したことによりビームを拡大して照射することが可能になった。大電流のビームを当てた場合でもターゲットおよびその周辺の損壊を防止することが可能になる。

2016年1月より照射コースにおけるビーム調整を開始し、6月から放射性核種の製造を行っている。今後、大電流ビームによる放射性核種の製造や不安定核イオンを用いた試験を行う予定である。



Figure 8: Picture of new Irradiation port for RI production.

## 7. 3次元シミュレーション[4]

NIRS-930 において、今後の放射性薬剤の製造・研究で必要とされるビームの大強度化、高品質化に向けて、最適な運転パラメータを調査するために3次元磁場計算プログラム(SNOP)を用いてビームのシミュレーションを行っている。

AVF サイクロトロンにおいて、鉛直方向のチューン  $\nu_z=0.5$  の共鳴条件近傍で粒子の鉛直方向の振動が増大してビームロスが起きる可能性がある。シミュレーションによって、ビームバンチ中の加速位相がずれている粒子は、加速位相の合っている粒子に比べて共鳴が起りやすく、デフレクタのセプタム電極の上下に衝突してビームロスすることが明らかになった。ビーム強度を上げる際にバンチの位相幅も増加すると、共鳴が原因のビームロスも増える。これを避けるための磁場の作成などの方法が分かった。これを基にビーム調整を行う予定である。

## 8. ビーム供給停止事例

2015年度にビーム供給が停止した時間は、NIRS-930で27時間、HM-18で20分だった。NIRS-930の主な停止時間は、真空管ソケットへの異物侵入によるRFの停止で8.5時間、デフレクタの放電により5.7時間、コンペンサターからの水漏れによる真空度悪化で3時間となった。HM-18の停止時間は冷却水タンクの水位が低下したことによる目視点検となった。

## 参考文献

- [1] Masayuki Muramatsu, Atsushi Kitagawa, Yukio Sakamoto, Shinji Sato, Yukio Sato, Hirotsugu Ogawa, Satoru Yamada, Yoshikazu Yoshida, Arne Drentje : Development of a compact electron-cyclotron-resonance ion source for high-energy carbon-ion therapy, Rev. Sci. Instrum.76 113304 (2005).

**PASJ2016 FSP003**

- [2] S. Hojo *et al.*, “NIRS-930 サイクロトロンを取り出しエネルギーについて”, 第13回日本加速器学会年会, Chiba, Aug. 8-10, 2016, TUP005.
- [3] K. Katagiri *et al.*, “NIRS サイクロトン施設 RI 生成用照射ポートのための Wobbling beam 照射システム的设计”, 第12回日本加速器学会年会, 敦賀, Aug. 5-7, 2015, pp. 1380-1383.
- [4] M. Nakao *et al.*, “サイクロトン NIRS-930 における共鳴によるビームロスを避けるためのシミュレーション研究”, 第13回日本加速器学会年会, Chiba, Aug. 8-10, 2016, TUP007.