

## 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 QST-NIRS

北條 悟<sup>#, A)</sup>, 涌井 崇志<sup>A)</sup>, 片桐 健<sup>A)</sup>, 杉浦 彰則<sup>A)</sup>, 宮原 信幸<sup>A)</sup>, 野田 章<sup>A)</sup>,  
岡田 高典<sup>B)</sup>, 立川 裕士<sup>B)</sup>, 青山 功武<sup>B)</sup>, 白井 敏之<sup>A)</sup>

Satoru Hojo<sup>#, A)</sup>, Takashi Wakui<sup>A)</sup>, Ken Katagiri<sup>A)</sup>, Akinori Sugiura<sup>A)</sup>, Nobuyuki Miyahara<sup>A)</sup>, Akira Noda<sup>A)</sup>,  
Takanori Okada<sup>B)</sup>, Yuji Tachikawa<sup>B)</sup>, Isamu Aoyama<sup>B)</sup>, Toshiyuki Shirai<sup>A)</sup>

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

<sup>B)</sup> 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<sub>b</sub>=110 MeV and K<sub>f</sub>=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 1634 hours. 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 1547 hours.

#### 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(放医研)のサイクロトロン施設は、NIRS-930(K=110 THOMSON CSF 製)と HM-18(K=20 住友重機械工業製)の 2 台のサイクロトロンと、9 つのビーム照射ポートによって構成される。放医研のサイクロトロンは、放射性薬剤の研究開発を主目的としており、9 ポートある照射ポートのうち 5 ポートが放射性薬剤の研究開発用のポートとなっている。運転時間は、平日昼間のみの運転を行っており、月に 2 回程度、NIRS-930 のみ土曜日の運転を行っている。NIRS-930 は、1974 年に速中性子治療と RI 製造を主目的として運転を開始した。その後、陽子線治療が主目的に加わったが、重粒子がん治療装置 HIMAC の稼働にともない、現在では NIRS-930 による治療照射は行われていない。治療照射に代わり、主目的となったのが、医学用 RI 製造である。RI 製造では、これまで多くが診断に用いるものであったが、近年では、標的アイソトープ治療 (TRT) に向けた放射性同位元素の製造が主目的となっている。この主目的以外でも、物理実験や、検出器の開発、耐放射線試験など、様々な目的に用いられている。それぞれのサイクロトロンの利用状況、故障等に伴う供給遅延事例や、各機器の改良開発、老朽化対策などについて報告を行う。

#### 2. HM-18 運転状況

HM-18 は、PET 用核種の製造専用を導入されたもので、負イオン加速の荷電変換取り出し方式で、18 MeV プロトン、9 MeV デュートロン の固定エネルギータイプである。取り出しポートは 2 ポートあり、大型サイクロトロンと共用の 2 つのビームコースに乗せるポート 1 と、4 つの直結ターゲットを持つポート 2 があり、製造核種やターゲットにより使い分けている。プロトンの照射は、両ポートで広

く用いられており、<sup>11</sup>C, <sup>18</sup>F の製造に用いられている。一方、デュートロンの照射は、ポート 2 での <sup>15</sup>O の製造に用いられる。2017 年度の運転時間について、Table 1 に示す。総運転時間の 95%にあたる 1473 時間がプロトンでの運転時間で、<sup>11</sup>C や <sup>18</sup>F の製造が多く行われている、デュートロンの運転時間は、総運転時間の 4%にあたる 56 時間であった。

また、併せて予期せぬ運転停止時間としては、3 時間の停止時間があった。これは、後述する受電設備の更新工事における対応不備が原因であった。HM-18 の装置故障としての停止は発生しておらず、総運転時間に対しての停止時間の割合は 0.3%で、非常に安定した供給運転を行うことができている。

Table 1: Annual Operation Time of the HM-18

Operation time	Total	1547 h
1. RI productions (Proton)		1473 h
2. RI productions (Deuteron)		56 h
3. Beam tuning / machine studies		18 h
Unscheduled downtime		3 h
Unscheduled downtime / Operation time		0.2%

#### 3. NIRS-930 運転状況

##### 3.1 運転時間について

NIRS-930 は、現在標的アイソトープ治療 (TRT) に向けた放射性同位元素の製造を主目的として運転を行っている。NIRS-930 の 2017 年度の運転時間とその内訳を Table 2 に示す。総運転時間は、1634 時間で、そのなかで実験に利用された時間は、1331 時間であった。実験

<sup>#</sup> hojo.satoru@qst.go.jp

Table 2: Annual Operation Time of the NIRS-930

Operation time	Total	1634 h
1. Experiment		1331 h
2. Tuning operation and machine studies		303 h
1. Experiment summary		
RI productions		861 h
Nuclear and atomic physics experiments		252 h
Radiation damage tests (Proprietary research)		192 h
Studies on radiation dosimeters		26 h

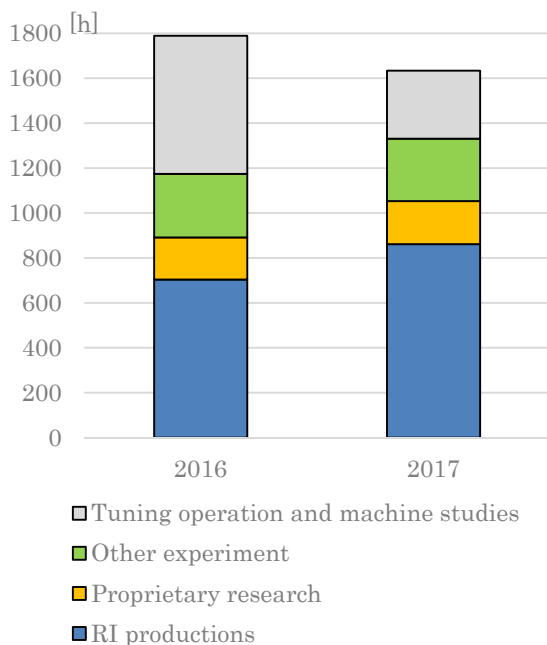


Figure 1: Annual operation time of the NIRS-930 at 2016.

に利用された時間の内訳では、RI 製造が 861 時間で、約 65%を占めている。RI 製造では、 $^{28}\text{Mg}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{68}\text{Ge}$ ,  $^{74}\text{As}$ ,  $^{124}\text{I}$ ,  $^{211}\text{At}$  等の製造が行われ、さらに、 $\beta$ 線放出核の  $^{186}\text{Re}$ , オージェ電子放出  $^{191}\text{Pt}$  などの製造法の開発や評価が行われた。そのほかの実験に利用された時間では、核物理実験が 252 時間、有料利用の耐放射線試験が 192 時間、放射線検出器の開発が 26 時間であった。また、利用時間以外の調整運転に用いられた時間は 303 時間で、新しいエネルギーでの調整運転や、取り出し効率改善、ビーム強度の増強、定期点検後のビーム確認、放射線漏えい測定等が行われた。

2017 年度と昨年 2016 年度の運転時間との比較を Fig. 1 に示す。2017 年度の総運転時間は、2016 年度に比べ、少なくなっているが、調整運転の時間を差し引いた利用時間が長くなっている。マシンタイムの日数としては、2017 年度が 198 日であったのに対し、2016 年度は、192 日で、2017 年度の方が 6 日分多くマシンタイムが配分されている。総運転時間には、メンテナンス期間のビーム調整や、利用提供終了後の調整運転時間も含まれている。2016 年では、 $^{211}\text{At}$  製造のためのビーム調整が多く行われており、結果として調整運転の時間が長くなってい

た。2017 年度に  $^{211}\text{At}$  の製造が安定した製造が行えるようになったことにより、調整運転の時間が減り、RI 生産に利用された時間が 100 時間以上増えている。

### 3.2 故障事例について

2017 年度の NIRS-930 の故障停止時間の合計は、15 時間であった。集計を Table 3 に示す。

デフレクタの放電による供給停止時間が 5 時間あった。NIRS-930 は、平日のみの運転のため、週末は、真空排気装置のみを運転している。その週末の停止期間中に加速箱内部を排気しているターボポンプが故障により停止し、加速箱内部の真空が 30 時間以上の間、 $9 \times 10^{-2}$  Pa まで真空が悪化してしまっていた。これにより、週明けの高電圧運転の際に放電が多発してしまいビーム利用に支障が生じてしまった。

電源系のトラブルによる故障停止時間は、合計で 5 時間あった。輸送系の Q マグネットの電源に故障が発生するトラブルが 2 回。また、後述する受変電設備の更新による漏電発覚と対応不備による停止があった。新受電設備では、各系統に漏電検出が設置された。これにより、制御用電源の一部に変圧器の midpoint から漏電している電源があったことが発覚し、対応を行った。また、三相 4 線式の midpoint を用いて単相電源として使用していた電源が、漏電として誤認検出されてしまった。これらの対応による時間が含まれている。

その他、冷却水系では流量計の誤動作が 1 件で 1 時間、電磁石の冷却水の温度異常による停止等が 2 件で 1 時間の計 2 時間の停止時間となっている。流量計の誤動作の対応としては軽微なものであったが、HM-18 と同様に設置されているため、HM-18 の照射スケジュールと重なってしまい、入室しての対応ができずに時間が掛かり、1 時間の停止時間となってしまった。また、冷却水の温度異常については、1 次冷却水を 2 週間停止して冷却系の工事を行った際に、メンテナンス漏れとなっていたストレーナーが目詰まりを起こし 1 次冷却水の流量低下が発生し 2 次冷却水の温度上昇が発生してしまった。制御系では、制御用 PC の故障が 2 件で 1 時間の停止時間と、ガス流量制御のマスフローコントローラーの故障が発生し、1 時間の計 2 時間となっている。

このように、数時間程度の停止時間のトラブルは発生したが、数日にわたる故障停止に至るような大きなトラブルはなく運転することができている。

Table 3: Unscheduled Downtime of the NIRS-930

Unscheduled downtime by failure	Total	15 h
Deflector system		5 h
Power supplies systems		5 h
Cooling water systems		2 h
Control system		2 h
Vacuum systems		1 h
Unscheduled downtime / Operation time		0.9%

## 4. 機器の改良

### 4.1 イオン源引き出し電極駆動系の改良

NIRS-930 のイオン源は、永久磁石型 ECR イオン源の Kei-source が 1 台のみで、すべてのマシンタイムを担っている。この Kei-source は、2006 年に NIRS-930 の入射用イオン源としての稼働以来 10 年を超えて安定な運転を続けてきた。最近、NIRS-930 では、TRT に向けた核種製造に向けて He ビームの強度増強の要求や、核物理実験ユーザーから C や Ne といった He より重い核種の要求が増えてきている。これまで、イオン源からの引き出し電極は、駆動機構に不具合が生じていたため、引き出し電極の位置を固定で運転を行ってきた。しかしながら、各引き出しエネルギーでの強度増強や、各イオンでの最適化するためには、引き出し電極の位置の調整が必要不可欠となる。そのため、引き出し電極の駆動機構の改良を行なった。駆動機構の不具合は、駆動ガイドの劣化によるもので、位置を駆動すると引き出し電極に傾きが生じてしまう状態になっていた。そのため、駆動ガイドの強化とサポートの強化を行い、電極の製作を行った。今後、さらにビームを見ながら引き出し電極の位置の調整を可能とするように、遠隔駆動化を進める予定である。

### 4.2 高調波ビームバンチャー用インピーダンス変換トランスの改良

NIRS-930 では、正弦波を用いたビームバンチャーから、高調波を用いたビームバンチャーへの改良を進めている。これまで、高調波ビームバンチャーに向けて製作したインピーダンス変換トランスで不具合が生じたため、改良を行った。これまでのインピーダンス変換トランスは、入力インピーダンス  $50 \Omega$  で出力終端は水冷式で  $500 \text{ W}$  の  $200 \Omega$  の抵抗器を備えた 1:4 のトランスであった。この  $200 \Omega$  の両端には電極に加わる電圧と同じ  $200 \text{ V}$  程度の電圧が掛かる設計となっていたが、出力端で絶縁破壊が生じてしまった。そこで、出力端の構造及び内部回路の見直しを行い、同じ入力電力で高い電圧を得るためにトランス終端で  $450 \Omega$  とする 1:9 のトランスの製作を行った。トランス内部の抵抗器は  $800 \text{ W}$  の  $50 \Omega$  を用いており、バンチャー電極への出力端から降圧トランスを設け、設置されている。これにより、抵抗両端に印加される電圧は、低くなる設計となっている。周波数帯域は、NIRS-930 の加速周波数の 3 倍波をカバーする  $10 \text{ MHz} - 66 \text{ MHz}$  となっている。今後、取り付け後のパワーテストと、ビームテストを行っていく予定である。

## 5. 老朽化対策

冷却系システムにおいて老朽化対策を行った。輸送系の電源やマグネットを含めたサイクロトロン設備全体の純水系冷却水用循環ポンプにおいて、メンテナンスを行った。この冷却水ポンプは、2 台並列に設置されており、半年ごとに交互の運転を行っている。シャフトを含め、ベアリングとメカニカルシールの交換を行った。また、冷却水の温度上昇の要因となっていたストレーナーの交換や、不具合が生じていた大口径のバルブの交換をおこなった。

また、放医研の特高変電施設の更新に伴い、受電設



Figure 2: Old NFB and power board.



Figure 3: New transformer system for collective housings.



Figure 4: New power board and old transformer.

備の更新が行われた。これまで、サイクロトロン設備には、特高変電施設からは  $3300 \text{ V}$  での送電されていた。放医研の特高変電施設が老朽化により更新する際に、全体を  $6600 \text{ V}$  での送電に統一したことにより受電設備も更新が必要となった。旧受電設備では、大型の NFB が並び (Fig. 2)、 $415 \text{ V}$  系と  $200 \text{ V}$  系の 2 台の大型トランスが用いられていた。新たな受電設備としては、屋外型のキュービクルを導入した (Fig. 3)。屋外型を新設することにより、系統ごとに切り分けて据付や配線工事を行い、段階的に切換および撤去工事を行った。しかしながら、 $415 \text{ V}$  系と  $200 \text{ V}$  系として用いられていた 2 台の大型トランスは、撤去が困難なため、そのまま据え置かれている (Fig. 4)。段階的に切換工事を行うことにより、メンテナンス期間と連休期間での停電対応が可能となり、マシンタイムを大きく停止することなく、全体の切り替え工事を実施することができた。