

QST 量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-IQMS

北條 悟^{#, A)}, 涌井 崇志^{A)}, 杉浦 彰則^{A)}, 村松 正幸^{A)}, 片桐 健^{A)},
岡田 高典^{B)}, 神谷 隆^{B)}, 岩田 佳之^{A)}, 白井 敏之^{A)}

Satoru Hojo^{#, A)}, Takashi Wakui^{A)}, Akinori Sugiura^{A)}, Masayuki Muramatsu^{A)}, Ken Katagiri^{A)},
Takanori Okada^{B)}, Takashi Kamiya^{B)}, Yoshiyuki Iwata^{A)}, Toshiyuki Shirai^{A)}

^{A)} Institute for Quantum Medical Sciences, QST

^{B)} Accelerator Engineering Corporation

Abstract

The cyclotron facility of Institute for Quantum Medical Sciences (i-QMS), at National Institutes for Quantum Science and Technology (QST) includes the NIRS-930 cyclotron (Thomson-CSF AVF-930, K_b=110 MeV and K_f=90 MeV) and HM-18 cyclotron (Sumitomo- Heavy- Industry HM-18, K=20 MeV). The NIRS-930 has been used for production of radionuclide. Other purposes of NIRS-930 are research of physics, developments of detectors for proton therapy, research of biology, and so on. The HM-18 is a fixed-energy-negative-ion accelerator, has been providing 18 MeV protons and 9 MeV deuterons to produce short-lived radiopharmaceuticals for Positron Emission Tomography (PET). A fire broke out in the power supply of the cyclotron facility in November 2021. There were no casualties, but both the NIRS-930 and the HM-18 were stopped because power supplies have been damaged by the soot and water used to extinguish the fire. The HM-18 was back in operation for RI production in September 2022. The total operation time of the HM-18 at FY2023 was 1194 hours.

1. はじめに

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構の量子医科学研究所のサイクロトロン棟には、2 台のサイクロトロンが設置されている。1 台は、1974 年に運転を開始した NIRS-930 サイクロトロン(NIRS-930)[1]で、もう 1 台は 1990 年に運転を開始した HM-18 サイクロトロン(HM-18)である。2 台のサイクロトロンは、2021 年 11 月の火災により停止[2]した。2022 年の 9 月から運転を再開した HM-18 は、2023 年度も RI 生産のための運転を続けることができた。未だ、火災により停止している NIRS-930 では各電源、真空排気装置、冷却水配管及び流量計等の復旧に向けて、計画が進められている。それ以外では、復旧にむけて、電源室の床の排水溝や排水ピットの更新、電源室の柱、壁、天井、床等の塗装を行った。

2. HM-18 運転状況について

2.1 製造核種と運転スケジュール

2023 年度は、PET 核種の製造に加えて、NIRS-930 で行っていた金属核種の製造を、HM-18 からの陽子 18 MeV で行う金属核種製造の代替製造の実証が行われた。その結果、Cu-64, Zr-89, Ga-68 の製造が可能となった。また、Pt-191 の代替製造試験も行われている。そのほかには、Ac-225 も製造を可能とするために、管理区域の整備や変更申請が必要となり、準備が進められている。このように、これまで NIRS-930 で行っていた金属核種の製造も、HM-18 で行う必要があるため、マシンタイムの需要が増えてきている。

HM-18 のマシンタイムスケジュールでは、月に 1 度月曜日に終日停止してのメンテナンス日を設けている。そ

れ以外の月曜日は午前中をメンテナンス時間として停止していた。そのため、HM-18 の 1 週間の運転スケジュールは月曜日の午後とそれ以外の平日の午前 9 時から 17 時までの運転を行っていた。2023 年度は、マシンタイム需要の増加へ対応するため、月曜の午前中を 10 時から照射開始として運用を行っている。

年間のスケジュールとしては、火災復旧作業や、ターゲットシステム改修等のため、2023 年 3 月の点検期間を延長し、4 月の 2 週間を点検期間とした。9 月と 2024 年 3 月には例年通り 3 週間の点検期間を設けた。

2.2 運転時間

2023 年度における HM-18 の運転時間を Table 1 に示す。総運転時間は、1194 時間であった。そのほとんどが、陽子による RI 生産のための運転時間で、1111 時間であった。2023 年度から、O-15 の生産が再開され、重陽子による RI 生産のための運転時間が 11 時間となった。そのほかビーム調整のための運転時間が 71 時間となっている。ビーム調整時間の内訳は、HM-18 内部での陽子ビームの確認が 13 時間、重陽子ビームの調整が 3 時間、C-2 コースでの陽子ビームの調整が 50 時間で、漏

Table 1: Annual Operation Time of the HM-18

Operation time	Total	1194 H
1. Protons used RI productions		1111 H
2. Deuterons used RI productions		11 H
3. Tuning operation and machine studies		71 h
Protons beam tuning at HM-18		13 h
Protons beam tuning at C-2 beam line		50 h
Deuterons beam tuning at HM-18		3 h
Measurement required by law		5 h

[#] hojo.satoru@qst.go.jp

Table 2: Unscheduled Beam Stop by Failure of the HM-18

Unscheduled beam stop by failure	Total	5.0 h
Human error (cryopump stopped)	2.5 h	
Control system (Wire Connection Problems)	2.5 h	
Beam stop time / planning time		0.4 %

洩測定が 5 時間であった。C-2 コースでは、金属核種製造のために陽子ビームの輸送効率の改善や、ターゲット位置でのビーム形状の確認などの調整運転が多く行われた。Table 2 に、トラブルによる停止時間を示す。合計で 5 時間のトラブルによる停止があった。内訳は、操作ミスによるクライオポンプの停止で、2.5 時間、配線不良による制御システムの誤動作による停止が 2.5 時間であった。操作ミスは、毎朝立ち上げ作業で操作を行う NFB 盤で生じた。火災後の HM-18 復旧作業において、使用する配電盤の集約を行い、NFB を変更しており、通常 ON-OFF する NFB とクライオポンプの NFB が同盤内で隣り合わせとなっていて、誤って NFB を OFF してしまったのである。クライオポンプの NFB に誤操作防止のカバーを取り付け、対策を行った。また、制御システムの誤動作による停止では、配線不良により、ビーム輸送ラインの制御リレーが動作しない状態となっていた。ビーム輸送ラインの制御系においても、HM-18 復旧作業の際に回路変更を行ったが、その際に配線ミスがあり、誤動作したリレーコイルの(-)側が使用していない旧電源のマイナス出力側へ接続された状態となっていた。配線作業を行ってから数ヶ月は、誤配線の状態で動作していたため、原因究明に至るまでに時間がかかり、復旧までに2時間半を要してしまった。これ以外にも、運転時間に影響は出していないが、煤が入り込んだ制御盤内のユニット電源の故障や、エアー駆動系のスピードコントローラーが腐食により動作しなくなったりするなど、火災の後遺症とも考えられる故障事例がある中で運転を続けている。

2012 年度以降の運転時間と稼働率を Fig. 1 に示す。2023 年度の運転時間は 1194 時間で COVID-19 緊急事態宣言にて 3 か月停止した 2020 年度と同程度となっている。この運転時間の減少には、NIRS-930 の停止と節電対策が要因となっている。運転時間には、照射を行っていない待機時間を含んだ時間となっている。NIRS-930 と HM-18 は同室に隣り合わせて設置されているため、ビーム輸送ラインを含めて、磁場による影響を相互的に与

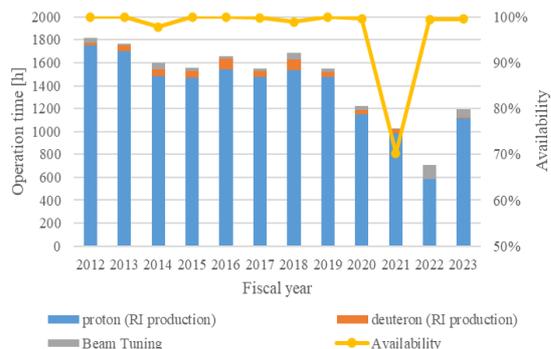


Figure 1: Operation time and availability of HM-18.

えている。そのため、NIRS-930 がビーム供給中の場合、HM-18 を停止すると、NIRS-930 のビームに影響をあたえることになってしまう。さらに、17 時までは HM-18 への追加の照射依頼が入る可能性もあるため、RI 生産の照射スケジュールが終了しても 17 時まで待機運転をしていることが多かった。しかしながら、本年度は、NIRS-930 が未だ停止中で、さらに節電対策にもなるため、照射スケジュールが終了次第、HM-18 を停止している。概ね 15 時くらいで運転終了となる日が多い。そのため、年間の運転日数は例年より 4 月に停止していた 2 週間少ない程度であるが、年間運転時間は、3 か月停止した 2020 年度と同程度となっている。早めに HM-18 を停止した後の時間では、可能な範囲で NIRS-930 の復旧作業を進めている。

2.3 調整運転について

これまで NIRS-930 で行っていた金属核種を HM-18 の C-2 コースで製造するためのビーム調整が行われた。通常的气体を用いたターゲットのサイズは概ね $\phi 20$ 程度でビーム電流は最大 $20 \mu\text{A}$ での照射を行っている。金属核種 (Cu-64) の生産をするには、 $\phi 12$ のターゲットサイズにて $25 \mu\text{A}$ のビーム電流が必要となり調整運転を行った。

HM-18 から C-2 コースのターゲットまでのレイアウトを Fig. 2 に示す。まず、HM-18 の内部のビームモニターとして、加速半径 150 mm の位置に中心部シャッターがある。次に加速され荷電変換取出されたビーム電流を計測するのが BSR-1 である。その後、三連の四重極電磁石 (Q-mag) を通った後に、ファラデーカップ (FC) の BSR があり、スイッチングマグネット (SWR) にて 54.5° 偏向された後に二連の Q-mag を通り最下流の FC である BS-C2 がある。その先は、ターゲット直前の $\phi 12$ コリメータを通して、ターゲットとなる。

C-2 コースの各点におけるビーム電流を Fig. 3 に示す。黄色 (X) のプロットにて $\phi 20$ のターゲットへの調整運転時、青 (●) のプロットにて、 $\phi 12$ のターゲットで Cu-64 生産時の各点のビーム電流を示す。 $\phi 20$ ターゲットでの調整運転では BSR-1 からのビームを損失なくターゲットまで輸送出来ている。一方、 $\phi 12$ のターゲットにビームを照射するためには、ビームを形成するために BSR から BS-C2 までで $10 \mu\text{A}$ 以上の損失が生じている。照射後の残留放射線による確認の結果、SWR を通ったあとのビームダクトでの損失であることが分かっている。BS-C2

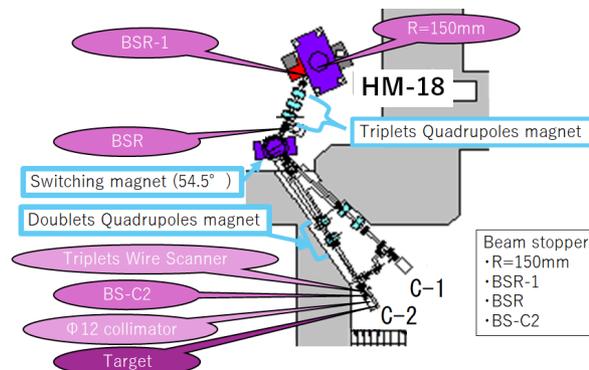


Figure 2: Layout of HM-18 and C-2 beam line.

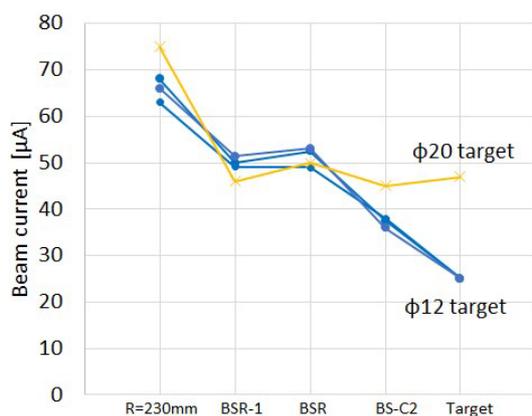


Figure 3: Beam current at C-2 beam line.

とターゲット間の損失は、コリメーターによるもので $15 \mu\text{A}$ がコリメータ電流として読み出され確認できている。コリメータでの損失が大きい状態ではあるが、要求されたビーム電流を安定して供給できるようになった。

Figure 4 にそれぞれ $\phi 20$ ターゲットの際と、 $\phi 12$ ターゲットの時の 3 線式ワイヤスキャンによるプロファイルの観測結果を示す。3 線式ワイヤスキャナーは、ターゲットの約 70 cm 上流に設置されている。それぞれ、ビームスキャン結果縦方向 (青)、横方向 (黄色)、斜め (紫)、駆動ポジションインジケータの値 (緑) である。 $\phi 20$ と $\phi 12$ で比較すると横方向の幅が $\phi 12$ では、横方向が狭まっているのがわかる。さらに、輸送効率の改善等を行うには、輸送ラインのレイアウトの変更が必要であるが、NIRS-930 と共用のビームラインであり、さらに建屋遮へい壁との干渉等もあり、C-2 コースのレイアウトの変更は今後検討すべき難題となっている。

3. NIRS-930 復旧に向けて

3.1 ユーティリティの改修

NIRS-930 復旧に向けて、火災現場となった電源室の改修を行った。アルカリ洗浄を行ったが、未だ臭気や煤

がとり切れないため、壁面、天井、床の塗装を行った。また、廃水ピットや排水桝、排水ポンプ等が腐食していたため、更新を行った。これにより、電源室の臭気は劇的に改善した。他方、火災後に絶縁確認をし、復旧させている幹線ケーブル等のケーブルラックや、配線を撤去して、残置されている配電盤等は、今後の改修対象となっている。また、冷却水配管や流量計群についても、撤去を行い、新たに設計を行っている。また、電源室に設置されている冷却水の各系統のゲートバルブや、ボールバルブ等も、腐食が進んでいるため併せて交換を実施する予定である。

3.2 NIRS-930 復旧及び電源更新計画

NIRS-930 においては、本体室搬入口が量子メス建設工事により使用できないため、火災により故障したクレーンの修理が実施できず、外観からの判断により可能な範囲で分解清掃を行い、腐食が進まないように手当を続けている。計画としては、本体室搬入口が使用可能となる 2025 年 9 月頃からクレーンの修理を実施して、順次進めていく予定である。

また、NIRS-930 の各電源についても、設計を進めている。基本的な各電源の出力仕様等は、踏襲するが、これまでメインコイル電源は、過飽和リアクトルを用いたり、その他の直流電源でもトランジスタ整流による電源であったりしたが、ほとんどがスイッチング電源となり、筐体サイズも、縮小する可能性が高く、空間的な余裕が生じる可能性がある。一方、小型で空冷の電源が増えるため、空調による熱源回収がより必要になる可能性がある。そのため、電源室のレイアウトの検討と、これに合わせた冷房設備の配置について検討を行う必要がある。

3.3 NIRS-930 の腐食に対する手当

NIRS-930 において、腐食に対する手当を進めている。前述したように、クレーンが使用不可の状態、ヨーク上昇機構も修理できず、ヨークを上げての点検が出来ない状態である。外観から確認できる範囲でのヨーク面をアルカリ洗浄、研磨、油を塗布し、腐食防止をすすめている。また、電流供給用のブスバーや、配管接続部、真空フランジ、など、細かく分解できる部分については、分解清掃を行っている。

なかでも、真空フランジでは、メタルガスケットを用いたコンフラットフランジに腐食が進んでおり、被害が大きくなっていった。O リングなどのゴムシールを用いている場合は、ゴムシールは腐食せずに密着しており、内側に腐食が進むことはなかったが、コンフラットフランジの場合は、ステンレスのフランジと銅ガスケットの両方で腐食が進んでしまっていた。そのため、チェンバーのシール用のエッジにも腐食が進み、コンフラットフランジのチェンバーは更新せざるを得なくなっている。

参考文献

- [1] H. Ogawa *et al.*, "STATUS REPORT ON THE NIRS-CHIBA ISOCHRONOUS CYCLOTRON FACILITY", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 26, No. 2, April 1979, DOI: 10.1109/TNS.1979.4329792.
- [2] 令和 3 年度量医研サイクロロン利用報告書, QST-M-38. <https://repo.qst.go.jp/records/86611>

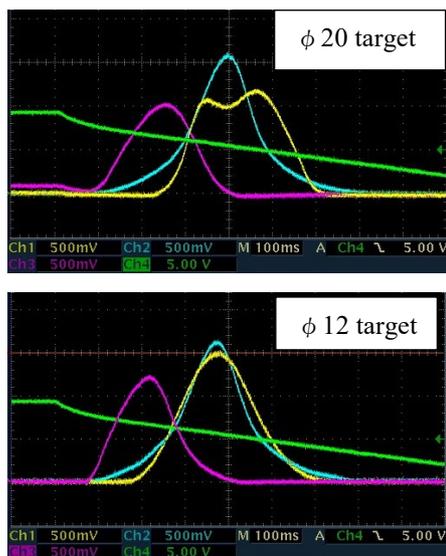


Figure 4: Beam scan at C-2 triplets wire scanner.