

放医研のサイクロトロン NIRS-930 と HM-18 現状報告

THE CURRENT STATUS OF NIRS-930 AND HM-18 IN NIRS

北條 悟^{#, A)}, 片桐 健^{A)}, 中尾政夫^{A)}, 杉浦彰則^{A)}, 野田 章^{A)},
岡田高典^{B)}, 高橋勇一^{B)}, 井 博志^{B)}, 野田耕司^{A)}
Satoru Hojo^{#, A)}, Ken Katagiri^{A)}, Masao Nakao^{A)}, Akinori Sugiura^{A)}, Akira Noda^{A)},
Takanori Okada^{B)}, Yuichi Takahashi^{B)}, Hiroshi Ii^{B)}, Koji Noda^{A)}

^{A)} National Institute of Radiological Sciences

^{B)} Accelerator Engineering Corporation

Abstract

The cyclotron facility at National Institute of Radiological Science (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 radio-isotope (RI) for molecular imaging. 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 1791 hours. The High intensity beam operation such as 75 MeV 10 μ A helium and 30 MeV 20 μ A protons for production of RI. Therefore, beam viewer is being developed for high intensity beam. 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 PET. The annual total operation time of HM-18 in last year was 1766 hours. In the two cyclotrons, the beam stop time by failure in last year was extremely short.

1. はじめに

放射線医学総合研究所 (NIRS) には、2 台のサイクロトロンが設置されており、RI の製造を主目的として稼動している。1 台は、NIRS-930 (Thomson-CSF AVF-930, $K_b=110$ MeV and $K_f=90$ MeV) で、1974 年に速中性子線を主目的として運転を開始し、その後陽子線治療を経て、現在の RI 製造が主目的となっている。もう 1 台は、RI 製造専用の HM-18 (Sumitomo Heavy Industry 製 $K=20$) である。HM-18 は、1994 年に HIMAC (Heavy ion Medical accelerator in chiba) による重粒子線治療が始まるのにあわせて、PET 診断薬の製造専用として、NIRS-930 と同じ部屋に設置された。

2 台のサイクロトロンは、平日昼間のみ運転を行っている。マシンタイムとしては、4 月から 8 月を第 1 期、9 月から 3 月を第 2 期として、8 月と 3 月にそれぞれ二週間程度のメンテナンスのための停止期間を設けている。これに加え、NIRS-930 ではマシンタイム要望を充たすために月に 1 回程度、土曜日の運転を行っている。

2. 運転状況

2.1 NIRS-930 の運転状況

NIRS-930 の 2013 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。その

2013 年度の年間合計は、1634 時間であった。これに対し、実際の年間運転時間は、1790.8 時間であった。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。まず、主目的である RI 製造用のマシンタイムにおいては、薬剤提供時刻と照射時間の関係からの早朝運転開始や、金属ターゲットの長時間照射のために 19 時程度までの照射が行われた。また、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、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 7 割以上を占める 1350.0 時間がマシンタイムとして利用され、残りの 459.1 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に用いられた。マシンタイム利用の中では、およそ 6 割の 791.3 時間が RI 製造に利用された。そのほかには、原子核物理の研究に 269.6 時間、有償の耐放射線試験が 136.1 時間、耐放射線研究が 32.3 時間、生物研究が 45.3 時間、放射線計測に関する研究が 32.3 時間となっている。また、装置の故障によるマシンタイムの中止や、30 分以上の供給遅延等は無く、機器故障としては、トリムコイル電源の故障が生じたが、予備電源に切替対応を行ったため停止時間は非常に短く 0.2 時間の停止のみであった。

年間運転時間における各粒子における割合を、Figure 1 に示す。多くの時間が陽子に用いられており、全体の 74%を占めている。そのほかには、水素分子 2%、重陽子 4%、ヘリウム 15%、炭素 1%、酸素 3%、ネオン 1%となっている。

陽子の利用内容では、RI 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

[#] s_hojo@nirs.go.jp

ギー範囲も広がっている。陽子のエネルギー範囲ごとの運転時間を Figure 2 に示す。ここで、各エネルギーでの運転時間において、使用目的として、ビーム調整、RI 製造、その他物理実験などに分けて示す。陽子の低エネルギーでは、RI 製造での利用が多く、また、要求されるビーム強度が高いため、取出し効率改善などのために調整運転も比較的多く行われている。一方、高いエネルギーでは、物理実験や耐放射線試験などの RI 製造以外の利用が行われているのがわかる。

Table 1: Annual Operation Time of the NIRS-930 (2013)

Planned time of operation	1634.0 h
Operation time Total	1790.8 h
1. Experiment	1350.0 h
2. Tuning operation and machine studies	459.1 h
3. Unscheduled beam stop by failure	0.2 h
1. Experiment summary	
RI productions	791.3 h
Nuclear and atomic physics experiments	269.6 h
Radiation damage tests (with charge beam time fee)	136.1 h
Studies on radiation damaged	32.3 h
Biological experiments	45.3 h
Studies on radiation dosimeters	32.3 h
3. Unscheduled beam stop by failure	
Power supply for trim coils	0.2 h
Beam stop time / Operation time	0.01%

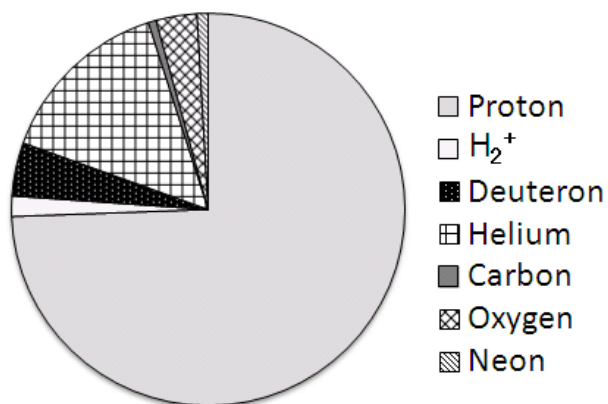


Figure 1: The operation time ratio of beam particles.

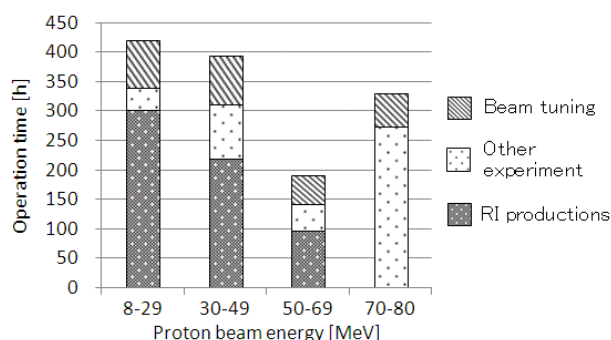


Figure 2: The operation time of proton beams.

2.2 HM-18 の運転状況

HM-18 の 2013 年度の年間運転時間を Table.2 に示す。95%以上が陽子による RI 生産が行われており、3%で重陽子による RI 生産が行われている。故障による停止は、フォイルストリッパーの駆動機構の故障による 4.5 時間と、ヒューマンエラーによる 1 時間の停止時間となっている。フォイルストリッパーの駆動機構の故障において故障内容としては軽微なものであったが、同室に設置されている NIRS-930 において RI 製造用の高強度での長時間照射中であったため、復旧対応作業ができずに 4.5 時間の停止となってしまった。

Table 2: Annual Operation Time of the HM-18 (2013)

Planned operation time for RI production	1566.0 h
Operation time Total	1766.1 h
1. Protons used RI productions	1699.5 h
2. Deuterons used RI productions	53.9 h
3. Tuning operation and machine studies	12.7 h
4. Unscheduled beam stop by failure	5.5 h
4. Unscheduled beam stop by failure	
Stripping foil movement system	4.5 h
Human error	1.0 h
Beam stop time / Operation time	0.3%

3. 改良・開発

3.1 高強度対応ビームビューアーの開発

NIRS-930 では、高強度での長時間照射が多くなってきている。このような照射のターゲットは、主に金属が用いられている。金属をターゲットとした場合、発熱密度が高くなってしまうと、ターゲットが熔融する可能性があるため、ビーム強度のみではなく、ビームのサイズや分布も重要となってくる。そこで、蛍光板をもちいて、二次元的にビーム形状と分布を確認することとした。一般的なアルミナ蛍光板には $1\mu\text{A}$ 以下の低いビーム強度のビームしか

当てることができない。高いビーム強度を当ててしまうと、アルミナに焦げ付きや溶融、割れが生じたりして使用不能となってしまいます。そのため、ビームの形状や分布を確認する際には、入射するビーム強度を下げて、ビーム形状や分布の確認を行う必要があった。しかしながら、金属ターゲットを照射する場合の入射エネルギーは 10 keV 以下で、強度は 200 μA 程度の強度を入射しており、空間電荷効果の影響が大きい。そのため、強度を下げることにより、ビームのサイズや分布に変化が生じる恐れがある。そのため、高強度のビームに対応できるビームビューアーの開発を行っている。これまで、厚さが 3-5mm 程度のアルミナ板を用いていたが、水冷が可能な銅板にアルミナ 0.1 mm の薄い層を作ることにより、アルミナ中での発熱量を少なくし、溶融や割れを防ぐ構造とした。

製作した冷却式アルミナモニターを 18 MeV 陽子ビームを照射して蛍光テストを行った。まず、これまでの厚さのアルミナモニターでの使用範囲である 300 nA のビーム電流での確認をおこなった (Figure 3)。この強度ではこれまでの厚さでは、蛍光が強すぎて、確認が困難な状態であったが、冷却式では、ビーム形状と分布を確認することができた。照射後のアルミナ表面を Figure 4 に示す。表面の色の変化はあるが、蛍光には問題なかった。更にビーム電流を 10 倍の 3 μA での蛍光を確認した。結果を Figure 5 に示す。ビーム分布確認するための蛍光量として十分な蛍光が確認できており、熱による損傷も無いことが確認できた。しかしながら、目標とする 20 μA では、発光量が多すぎることを懸念されるため、今後更にエネルギーや強度を上げてのテストを実施するとともに、30 MeV 陽子で、20 μA 時にビームサイズや、分布などが確認できること目標とし、更なる改良を行う予定である。また、画像をモニターする際にも、CCD を用いると放射線による損傷が激しいためファイバースコープを用いるなどの対策を講じる必要がある。



Figure 3: Photo of beam viewer test at 300nA proton 18MeV.

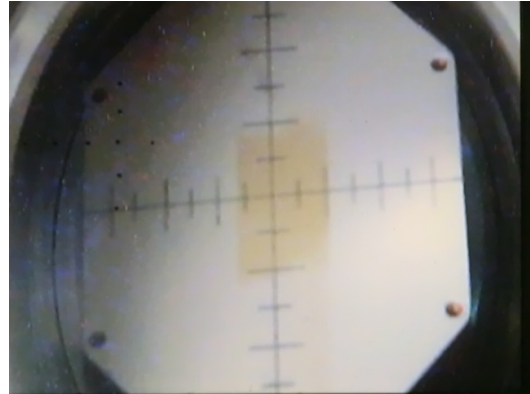


Figure 4: Photo of beam viewer after the test at 300nA proton 18MeV.

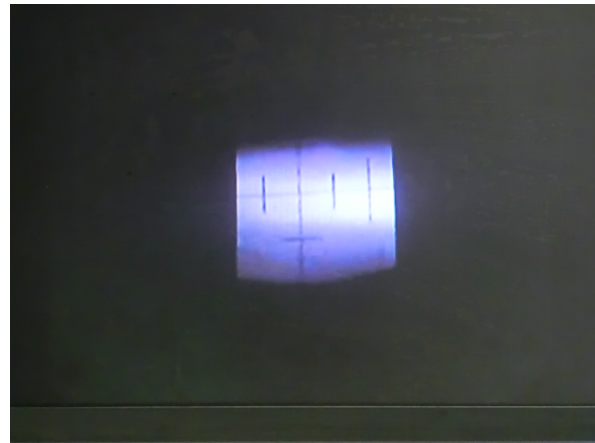


Figure 5: Photo of beam viewer test at 3 μA proton 18MeV.

3.2 ビーム位相の測定および調整[1]

これまでのビーム位相の測定は、等時性磁場を形成するために、サイクロトロン半径の内側から外側までの相対的な位相の測定を行い、等時性磁場の形成を行ってきた。しかし、相対的な位相の測定のみでは、理想てきな加速位相への調整は不可能である。そこで、加速高周波 (Dee 電圧) のピックアップ波形との比較を行い、理想的な加速位相への調整を行った。その結果をもとに、さらに、入射の調整を加えることにより、ユーザーからの要求強度を充たしていなかった 34 MeV ヘリウムの強度を、要求を充たす強度まで高めることができた。

3.3 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。例えば、18 MeV 陽子での取出し効率や、ビーム位相とビーム損失場所の確認などを行い、ビーム調整へ活用している。また、強度の大幅な増強の検討を行うために大強度化のシミュレーションも行われている。

3.4 RI 生成用新ビームラインの設計[3]

医療放射性核種の製造に加え、 $^{10/11}\text{C}$ ビーム生成を背景とした $^{10/11}\text{C}$ を含むメタン分子 ($^{10/11}\text{CH}_4$) の生成実験のため、速中性子治療が行われていたビームラインを改良し、新たなビームラインの設置が計画されている。 $^{10/11}\text{C}$ ビーム生成用の $^{10/11}\text{CH}_4$ のターゲットは熱により溶解しやすいため、適切な電流密度での照射野を形成する必要がある。そのため、NIRS-930 からのビームエミッタンスを測定し、適切な照射野を形成するためのビームラインの設計を行った。

4. まとめと今後

運転開始より 40 年以上がたつ NIRS-930 と、20 年がたつ HM-18 は、トラブルなどによる大きな停止もなく、それぞれ 1790.8 時間と 1766.1 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、計画時間より多く運転時間となっている。

改良開発においては、高強度でのビームプロファイルモニターの開発を行っており、現在、数 μA でビームプロファイルがモニターできている。さらに高い強度への対応を進めていく予定である。また、ビーム位相の測定やシミュレーションによる検討を基にしたビーム調整によりビームの質の改善を行うことができた。

今後、新たなビームラインの設置や、さらにシミュレーションをベースとしたサイクロトロンの高強度化をめざし、高調波バンチャーや、新たな取り出し系などの検討を行いつつ、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, Proceedings of this conference. MOOM03
- [2] M. Nakao, Proceedings of this conference. SUP012
- [3] K. Katagiri, Proceedings of this conference. SUP118