

新型サイクロトロン MP-30

SUMITOMO MULTI-PURPOSE CYCLOTRON MP-30

谷口 愛実^{#, A)}, 筒井 裕士^{A)}, 宇野 浩一^{A)}, 衛藤 晴彦^{A)}, 密本 俊典^{A)}, 日朝 俊一^{A)}

Manami Taniguchi^{#, A)}, Hiroshi Tsutsui^{A)}, Koichi Uno^{A)}, Haruhiko Etoh^{A)}, Toshinori Mitsumoto^{A)}, Toshikazu Hiasa^{A)}

^{A)} Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

Abstract

The medical cyclotron has become indispensable not only for diagnosis but also for treatment. We, Sumitomo Heavy Industries, Ltd., have developed and introduced compact cyclotrons and their peripheral devices in medical market such as radioisotopes production for pharmaceuticals and cancer treatment. In recent years, needs for metal based radioisotopes have been increasing, as the research progresses of new medical radioisotopes for labeling antibodies and radioisotope therapy for internal medicine. It means need for the cyclotron which can produce many kinds of metal based radioisotopes has been occurred. In such market requirement, we have developed a new cyclotron "MP-30" that can accelerate multiple particle for multiple radioisotopes production. "MP-30" is a unique cyclotron which has two kinds of ion sources and two kinds of extraction system in order to accelerate and extract both positive and negative ions. Proton(15-30 MeV: variable), Deuteron(8-15 MeV: variable), α (32 MeV: fixed) are available. Also vertical irradiation system and automatic target transport system is adoptable, which can increase flexibility of the target, for example, powder or low melting point materials and easy and safely handling of the target. We had delivered first "MP-30" to Fukushima Medical University in May 2016 and succeeded producing ^{211}At which is a novel and expected radioisotope as new cancer therapy " α -emitting radionuclide therapy" in October 2016. The development outline and performance evaluation about "MP-30" are reported herein.

1. MP-30 誕生の背景

核医学診断の有用性が認識された 1950 年代より、様々な放射性同位元素 (Radioisotopes: 以下 RI) を利用した核医学の研究や応用がなされてきた。そのめざましい発展の中、検査用 RI だけではなく内用療法用 RI の需要が生まれ、中でも高い LET (linear energy transfer) と短飛程の特徴をもつ α 線の放出核種による α 線内用療法が近年注目を集めている[1]。

我々は、1980 年代から FDG をはじめとする PET 核種を製造するための 20 MeV 以下の小型サイクロトロン、BNCT (Boron Neutron Capture Therapy: 中性子捕捉療法) の中性子線源を目的とした 30MeV クラスの大電流中型サイクロトロンなど核医学の進歩に対応できる医療用サイクロトロンの開発を手掛けてきた。これらの技術を生かし、PET、SPECT、内用療法のための新しい RI 製造もできる多目的用途のサイクロトロン MP-30 を開発した。

2016 年 5 月に MP-30/1 号機を福島県立医大に納入し、Table 1 に示すような RI の製造を実証した。これらの RI を製造するための最適な核反応、照射イオン、エネルギーを選択することが可能となり、2016 年 10 月には院内サイクロトロン初の α 内用療法のひとつとして期待されている ^{211}At の製造にも成功した。サイクロトロンを垂直照射システムやターゲット自動搬送装置との接続することにより、ターゲット材料選定の上で自由度が増し、効率よく、簡便、安全に、目的とする RI を製造することが可能となった。

Table 1: Radioisotopes Production by MP-30 (Example)

Radio isotopes	^{62}Zn	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	^{68}Ge	^{177}Lu	^{211}At
Projectile	Proton	Proton	Proton	Deuteron	Alpha
Nuclear Reaction	$^{63}\text{Cu}(p,2n)^{62}\text{Zn}$	$^{100}\text{Mo}(p,2n)^{99\text{m}}\text{Tc}$	$^{69}\text{Ga}(p,2n)^{68}\text{Ge}$	$^{176}\text{Yb}(d,x)^{177}\text{Lu}$	$^{209}\text{Bi}(\alpha,2n)^{211}\text{At}$
Irrad. Energy	25 MeV	19 MeV	26 MeV	15 MeV	30 MeV
Target	^{nat}Cu Foil	$^{100}\text{MoO}_3$ Powder	$^{nat}\text{Ga}_2\text{O}_3$ Powder	$^{176}\text{Yb}_2\text{O}_3$ Powder	^{209}Bi Grain

2. MP-30 と RI 製造システムの構造

MP-30 は、外部イオン源を含む入射系とサイクロトロン本体からなる。地下室には 2 種類のイオン源が設置されておりイオン種に応じて使い分けられる。イオン源で生成されたイオンは LEBT (Low Energy Beam Transport) で加速&輸送され、インフレクタによってサイクロトロン本体へ入射される。サイクロトロン内では目的のエネルギーまで加速され、イオン種に応じた引出機器で引出され、すべて同一ポートに導かれる設計としている (Figure 1)。サイクロトロンから引出されたビームは BT (Beam Transport) でターゲット照射装置まで輸送され、RI 製造のためのターゲットに照射することができる。Figure 2 に福島県立医大に納入された MP-30 を用いた RI 製造システム全体のレイアウト図を示す。ターゲットは照射材料の自由度を考慮して垂直照射システムが採用され、ターゲット自動搬送システムも導入されている。

[#] manami.taniguchi@shi-g.com

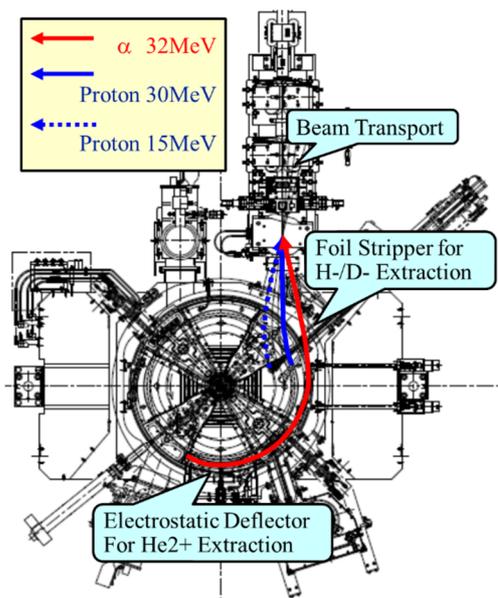


Figure 1: Plane view of MP-30.

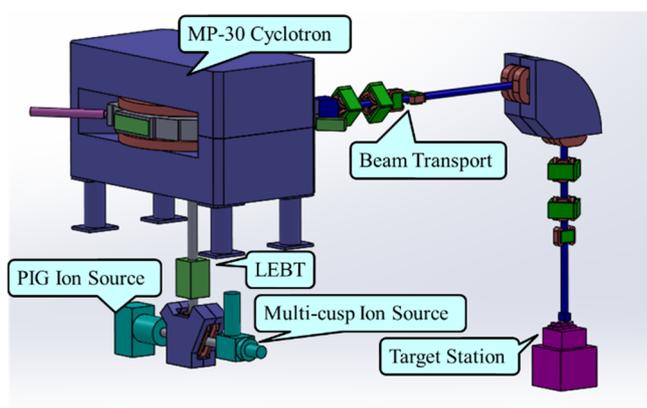


Figure 2: Schematic of MP-30 radioisotopes production system.

3. MP-30 の設計仕様

MP-30 の主な設計仕様を Table 2 に示す。本サイクロトロンでは、H⁺, D⁺, ⁴He²⁺ (以下、 α) の 3 種類のイオンを加速する必要があるため、それぞれのイオンで加速等時性を満たすために、トリムコイル 3 本とメインコイルの合成磁場により、加速領域における最適な平均磁場を形成した (Figure 3)。磁場計算には 3 次元磁場解析ソフト OPERA を用いた。負イオンである H⁻, D⁻ と正イオン α を同一ポートに引出すため、主磁場を反転できるよう各コイル電源は極性切り替えができるようにしている。

入射系では、H⁻, D⁻ を生成するためのマルチカスプイオン源と α を生成するための PIG イオン源 (コールドカソード型) の 2 つのイオン源を用いている。マルチカスプイオン源は BNCT 用の大電流サイクロトロン (当社開発の) HM-30 でも使用しているポリウムタイプの大電流イオン源で、イオン源出口で最大 10 mA もの H⁻ を引き出すことができる。また、PIG イオン源は、イオン源出口で最大 1 mA の α を引き出すことが可能である。このような

大強度の α を得るためには、⁴He²⁺/⁴He⁺ 比率が高く、質のいいビームを得ること、さらに空間電荷効果や絶縁破壊による電流制限に対して最適な引出電場を構築することが必要となる [2]。我々は、プラズマからのビームの引出、空間電荷効果などが扱える三次元のシミュレーションコード IBSimu [3] を用いた計算により、最適なイオン源引出のジオメトリを決定し、引出イオンのビーム分布 (エミッタンス)、および、LEBT の軌道計算を行った。さらに、各イオンにおいてインフレクタの位置に必要なエミッタンスとツイスパラメータ及びエネルギーを満たすよう LEBT の計算を行い、各入射系輸送機器のパラメータを決定した。各イオンはサイクロトロン内の 2 つのディー電極で加速されるが、イオン種によって加速周波数が異なるため、共振周波数は 73.3 MHz (H⁻) と 37.7 MHz (D⁻, α) の切り替えができるようになっている。また、加速領域は残留ガスとの衝突によるビームロスが減らすため、2 台のクライオポンプ (N₂ で 3,000 L/sec) を使い、運転中においても 1.0×10^{-4} Pa 以下の真空度が得られるようにした。

加速されて目的のエネルギーに到達したイオンは、全て、サイクロトロン出口に設置された偏向電磁石によって同一ビームライン、同一ターゲットへ導けるような引出し軌道とした。また、フォイルストリッパーによる H⁻, D⁻ の引出の際に静電デフレクタの退避量を小さくするため、 α は H⁻, D⁻ の引出軌道半径よりも外側で引出すような設計とした。さらに、 α の場合、外周磁場による水平方向発散力を緩和させるために、フォーカシングチャネルを用いている。

総合的な設計検証として、イオン源からサイクロトロン出口までの全体通したビームの生き残り率をシミュレーション (モンテカルロ法) で評価した。クライテリアを、入射効率で約 10%、インフレクタからサイクロトロン引出半径位置までの加速効率で約 90%、引出半径位置からサイクロトロン出口までの引出効率で 98% (ただし α は 50%) として、シミュレーションを行った結果、各イオンにおいて全ての効率をクリアできることを確認した。

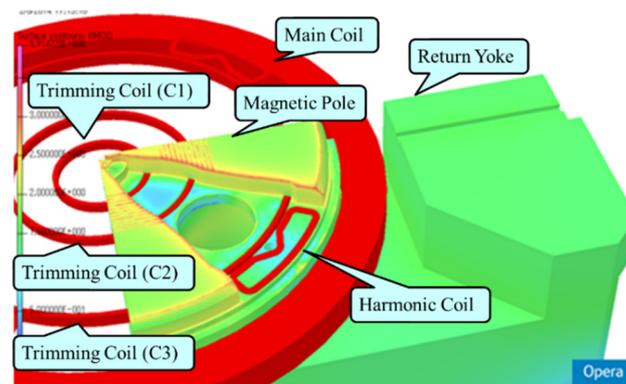


Figure 3: Calculation model of magnetic field (OPERA).

Table 2: Main Specification of MP-30

Extracted particle	Proton	Deuteron	Alpha
Accelerated particle	H ⁺	D ⁺	⁴ He ²⁺
Extracted energy [MeV]	15-30	8-15	32
Extracted beam current [μ A]	>400	>100	>30
Extracted radius [mm]	639	636	656
Harmonics	4	4	4
Magnet system			
Magnetic field [T]	1.17	1.20	1.20
Current of main coil [A/2coils]	92,000		
Current of trimming coils [A/2coils]	C1: 2,000, C2: 3,000, C3: 5,000		
Harmonic coil [sets]	4		
RF system			
Frequency [MHz]	73.7	37.7	37.7
Dee voltage [kV]	50	27.5	27.5
Max. power [kW]	60		
Inflector			
Type	Spiral		
Voltage [\pm kV]	9.11	4.81	4.81
Injection system			
Ions	H ⁺	D ⁺	⁴ He ²⁺
Ion sources	Multi-Cusp		PIG
Accelerated energy [keV]	30	16	32
Extraction system			
Type	Foil Stripper		Electrostatic Deflector
Voltage [kV]	--	--	27
Vacuum system			
Pumps	Cryogenic pump 2sets Dry pump 1set		
Ultimate pressure in Cyclotron [Pa]	$\leq 5.0 \times 10^{-5}$		
Ultimate pressure in LEBT [Pa]	$\leq 5.0 \times 10^{-5}$		

4. MP-30 の性能確認試験結果

4.1 MP-30 磁場測定結果

磁場計算結果に基づいて電磁石を設計・製作した後、工場内にて組み立て、実機の磁場測定、各コイルの励磁電流調整、シム調整などを行い、各粒子において等時性磁場を形成した。Figure 4 に各粒子における等時性を形成した時の平均磁束密度の計算値と磁場測定によって得られた実測値を示す。実測磁場の等時性磁場からのずれは粒子加速時の粒子回転周期と RF 加速電圧の周期との間の位相差になるが、その積算値 (ϕ) が $\pm 30^\circ$ 以内に十分おさまり、効率よく加速できると確認できた (Figure 5)。

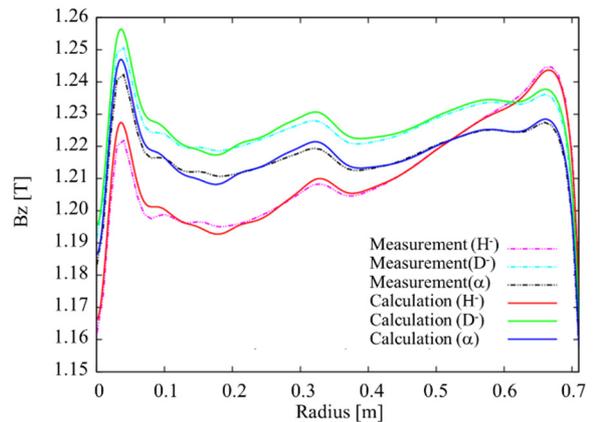


Figure 4: Isochronous Field (Mean Field).

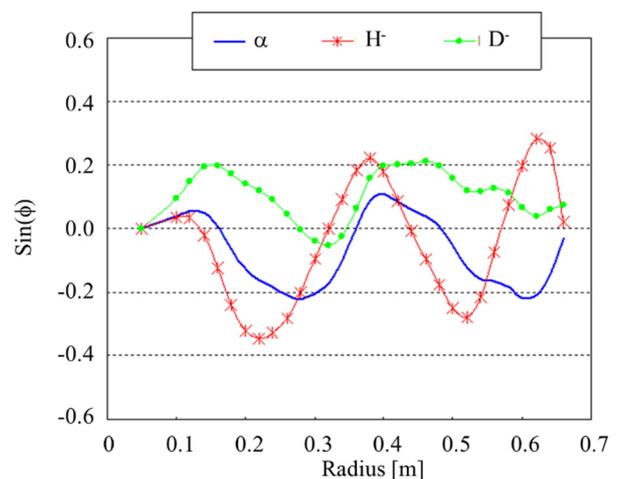


Figure 5: Integrated Phase Shift due to Deviation of Isochronous Magnetic Field.

また、設計時と同様に、実測磁場を用いて軌道シミュレーションを行い、各粒子の入射効率、加速効率、引出効率がそれぞれの設計値をクリアできることを確認した。

4.2 MP-30 ビーム試験結果

MP-30 のビーム性能試験では、入射、加速、引出効率において設計どおりの値が得られること、各粒子において仕様最大エネルギー及び最大電流値をターゲット位置で確認することを目的とした。

Table 3 に福島県立医大に納めた MP-30 の最大仕様値 (Proton: 100 μ A, Deuteron: 50 μ A, α : 30 μ A) でのビーム試験結果を示す。入射、加速、引出の全ての効率において設計値以上の結果を得ることができた。これにより、余分なビーム損失による機器の発熱や放射化を極力抑えた安全なシステムであることも確認できた。

MP-30 では、多くの種類の RI を製造するため、核反応、ターゲット材質・形状に対して最適な照射粒子・エネルギーおよびビームサイズを選定できる必要がある。フォイルストリッパーの位置と角度によって Proton で 15-30 MeV、Deuteron で 8-15 MeV が連続可変で、 α は静電デフレクタとフォーカシングチャネルを用いて 32 MeV 固定

で、引出しできることを確認し、引出エネルギーに応じてビームトランスポート各電磁石のパラメータを最適化し、ターゲット位置で様々な RI 製造に必要なビーム電流、ビームサイズを得ることができた。また、調整後、連続 8 時間運転を行ってシステム全体の信頼性を確認した。

Table 3: Results of MP-30 Beam Test on Site

	Proton	Deuteron	Alpha
Extracted energy [MeV]	30	15	32
Extracted beam current [μ A]	100	50	30
Efficiency of injection [%]	16.2	17.8	18.6
Efficiency of acceleration [%]	93.2	91.2	94.5
Efficiency of extraction [%]	99.5	100	56.7
Beam size on target [mm]	ϕ 6-10	ϕ 6-10	ϕ 6-10

5. まとめ

MP-30 は様々な医療用 RI を製造できる多目的サイクロトロンとして開発された。正負両イオンの生成、加速、引出ができ、引出エネルギーも可変、といった非常にユニークなサイクロトロンとなっている。垂直照射システムやターゲット自動搬送装置といった照射系技術と組み合わせることで、自由度が高く、効率のよい安全な RI 製造設備が構築できることを実証できた。

参考文献

- [1] “ α 線内用療法の実状と展望” 細野 眞、Isotope News 2013 年 7 月号 No711 [PDF].
- [2] イオン源工学 石川順三著 アイオニクス株式会社.
- [3] <http://ibsimu.sourceforge.net/>