

DRL サイクロトロン の 現 状

山本朝樹、佐藤泰治、御前法生、白木正志、野口真一、山田一之、正源司尚

株式会社 第一ラジオアイソトープ研究所

〒289-1592 千葉県山武郡松尾町下大蔵 453-1

概要

(株) 第一ラジオアイソトープ研究所では、放射性医薬品の製造のために、二台のサイクロトロンを所有している。一台 (K=40) は、本体タンク内にターゲットを設置した正イオン加速器であり、もう一台 (K=30) は負水素イオン専用加速器である。前者については、内部照射のために問題となる放射性損傷や被曝等について述べる。後者においては、出力電流増強を目的とした負イオン入射系の改良等について主に述べる。

1 INTRODUCTION

株式会社第一ラジオアイソトープ研究所 (DRL) では、放射性医薬品の製造・販売を行っている。様々な核種を取り扱っているが、そのうち、 ^{201}Tl 、 ^{67}Ga 、 ^{123}I については、自社内で二台のサイクロトロンを用いて製造している。

放射性同位体を製造する場合、照射時間に対しては放射線量の飽和値が存在するため、製造量を増加させるには、単位時間当たりの生成量を増加させる必要がある。そのため、入射粒子を多くするかターゲットを厚くするしかないが、ターゲットの厚みは入射粒子の飛程によって決まってしまう。よって、安定して大電流を出力できるサイクロトロンが必要である。

二台のサイクロトロンの中の一台は、1984年に設置された Scanditronix 社製の MC-40 で、K 値は 40 であり、陽子を $180\mu\text{A}$ まで加速できる。このサイクロトロンは、当初は引き出し電極とビームラインを備えていたが、現在では撤去し、本体タンクチャンバー内に設置したターゲットに加速ビームを直接照射する。これは、照射電流を少しでも多くしたためである。しかし、本体内ですべてのビームを受け止めているため、サイクロトロン本体が放射化し多くのトラブルを引き起こしている。また、メンテナンスを行う場合の被曝量が多い。

もう一台は、1991年に設置された IBA 社製の Cyclone30 である。このサイクロトロンは、30MeV の負水素イオン専用加速器で、設計出力電流は $350\mu\text{A}$ である。Cyclone30 は、外部に、負イオン入射のためのマルチカスプ型負イオン源と入射系が、また 180° 離れて二組の荷電変換機構 (炭素フォイル) とビーム引き出し口がある。これらは2方向同時に照射が可能である。各引き出し口はそれぞれ2本のビームラインを持ち、どちらかのビームラインを選択して使用する。つまり、合計4本のビームラインがあるが、そのうちの2本を同時に使用できる (デュアル照射)。照射は、サイクロトロン室とは別の照射室にて行う。各ビームラインの照射電流は、ターゲット装置の受けられる最大電流と照射室の遮蔽壁によって制限され、 $200\mu\text{A}$ である。しかし、DRL の Cyclone30 は、デュアル照射で合計およそ

$320\mu\text{A}$ までしか安定して照射ができない。従って、ここにサイクロトロン本体の改良の余地がある。

Cyclone30 の場合、本体室内でのビームロスが少ないために、本体の放射化レベルは低い。また、加速粒子と加速エネルギーが固定のため、補正コイルが無く、共振系も構造が簡単である。そのため、トラブルが少なく、非常に稼働率の高いマシンである。

2 MC-40

図1に MC-40 の本体表面線量の一例を示す。これは、照射終了から一週間後に測定したものである。図から、ターゲット前方付近の放射化が特に激しく、内部照射による影響が大きいことが分かる。

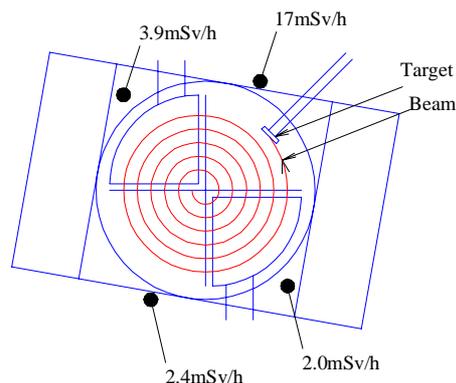


図1 : MC-40 本体の表面線量

MC-40 は、設置から 20 年近く経過していることと、内部照射による放射線損傷のために、多くのトラブルを経験している。まず、加速器にとって一番問題となり復旧まで時間が必要なトラブルに、真空リークがある。真空リークは、リーク箇所の特定制やメンテナンスのために、多くの被曝を伴う。これまで、ライナー周辺のリークのために3度のライナー交換を、また、RF Feed Through のリークのために年1回程度のメンテナンスを行っている。特に RF Feed Through のリーク頻度が高いが、これは Feed Through の構造が複雑で部品点数やシール箇所が多いことに原因がある。その中でも絶縁端子に接する O-ring は、真空シールと高周波に対する高圧絶縁耐性を求められ、さらに加速軌道に近く放射線レベルも高いために、かなり厳しい条件下にある。一旦リークが発生すると、真空が悪化し放電が起こり、O-ring が損傷してさらにリークが起こりやすくなるという悪循環に陥る。現在までに様々な材質を試しているが、特に有効なものは見つかっていない。また、放電は真空槽の外側でも起きており、少しでも湿度を下げて放電を防止する目的で、放電箇所を乾燥空気を吹きつけるといった対策も行っている。RF Feed Through の交換作業は、あら

かじめ外部で冷却していたものを Dee と共に組み立てておき、使用していたものと入れ換えるという手順で行うが、外部での組立・調整でも 1mSv 程度の被曝を要する。一連の作業全体での被曝は延べおよそ 30mSv である。

ただし、MC-40 全体に関わる被曝量は、年々低下傾向にある。これは、装置の簡素化や放射線損傷に強い材質の採用によるトラブル頻度の減少、作業の効率化によるメンテナンス時間の短縮等の結果である。

また、被曝を伴わないが多いトラブルに、制御系や各種電源のトラブルがある。MC-40 の制御は基板上の回路で行っているため、これらのトラブルは経年変化による基板の動作不良が原因である。また、電源も老朽化による故障が増加してきている。そこで、現在、順次電源の入れ換えを行っており、さらに将来的には制御系を更新したいと考えている。

3 CYCLONE30

Cyclone30 で過去に経験しているトラブルは、荷電変換機構周辺の真空リーク、終段アンプの冷却水漏れ、イオン源高圧部の絶縁破壊等である。また、定期的に本体内部の清掃とインフレクターの交換を行っている。ただし、長期間停止しなければならないようなトラブルは起こっていない。Cyclone30 は安定して稼働しており、予定照射時間に対する実際の照射時間の割合は 90% 以上である。また、照射室で照射を行うために、本体室の線量は低く、本体をメンテナンスする際の被曝は MC-40 ほど大きな問題とはならない。よって、Cyclone30 本体に関しては、積極的に改良を行うことができる。

Cyclone30 の仕様は 350 μ A にも関わらず、安定して加速できる出力電流は 320 μ A である。従って Cyclone30 に対する我々の興味は、350 μ A までの本体出力電流の増強である。今、サイクロトロンビーム出力限界を考えた場合、大きく分けて 2 つの要因が考えられる。すなわち、サイクロトロンに入射する粒子数が少ないか、または (かつ) サイクロトロン本体の加速能力が限界かである。

まず、サイクロトロン本体の改良には、RF 系の出力増強、本体真空度の改善等が考えられる。このうち RF 系については、250W 前段アンプ、3kW ドライバーアンプ、25kW 終段アンプという構成になっているが、ドライバーアンプの置き換え等、ある程度対策を施している。一方、真空系については、本体タンクの真空引きを 4 台の真空ポンプで行っているが、本体には大口径の引き口は 4 箇所しかなく、これ以上真空ポンプを増設することができない。真空ポンプの種類を変えるという方法はあるが、口径が決まっているので、大きな効果は望めない。

他方で、負イオン入射電流の増強には、バンチャーの改良や入射系の真空度の改善等が挙げられる。現在のバンチャーは、2ギャップ構造で正弦波を使用している。当然、バンチャーの RF 波形の変更は大きな効果が期待できるが、バンチャーの構造変更が必要である。これについては、現在検討中である。そこで、ここでは入射系の真空度の改善を行うこととした。イオン源チャンバー付近には、まだ若干のスペースがあり、大幅な変更をしなくても、真空ポンプを取り付けることができる。負水素イオンは不安定であり、特に真空度の悪いイオン源直後の真空度の改善は、出力電流の増加に十分効果があるのではないかと考えた。

Cyclone30 の入射ラインを図 2 に示す。入射ラインには、イオン源電流を測定するためのファラデーカップ、ステアリング、単極の静電レンズ、バンチャー、ステアリング、ソレノイドレンズ、インフレクターがある。従来の真空システムは、イオン源チャンバーに排気速度 3000l/s の Oil Diffusion Pump (ODP) が一台あるのみで、入射ラインに真空ポンプはなかった。そこで、イオン源の下にもう一台真空ポンプを取り付けることとした。真空ポンプは、取り付け場所の制限、周辺での放電やメインコイルのもれ磁場等から排気速度 500l/s の ODP とした。

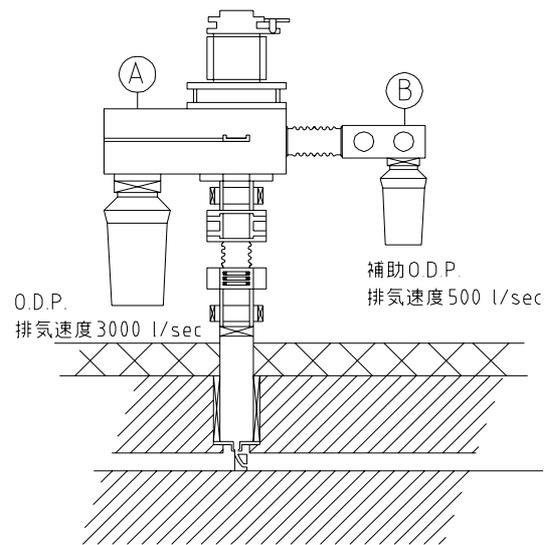


図 2 : Cyclone30 の入射ライン

真空ポンプを設置後、実際に動作させて、真空度を測定した。測定は図の A と B で行った。その結果、補助 ODP を使用することによって、A の真空度はほとんど変化がなかったが、B の真空度は補助ポンプを使用しないときのおよそ 1/2 程度まで改善がみられた。

次に、実際にビーム電流を測定した結果、補助 ODP を使用することによって、およそ 6% 程度、ビーム出力を向上させることができた。Cyclone30 では、加速槽での中性粒子数 (負水素イオンの電子が 1 個剥がれたもの) を測定しているが、この値は、補助 ODP を使用した場合と使用しなかった場合で、ほとんど変化がなかった。よって、ビーム出力の増加は入射ラインの真空度の良化によるものと考えられる。

以上のように、入射ラインに真空ポンプを増設することによって、本体出力を向上させることができた。さらに、長時間照射を継続する場合、サイクロトロンの負荷が低減し、出力ビームの安定性が増した。しかし、目標とする 350 μ A にはまだ達していない。今後は、バンチャーや本体真空システム等の改良を検討したいと考えている。

4 ACKNOWLEDGEMENT

本発表を行うにあたり、株式会社アトックス DRL 系の皆様には、サイクロトロンのメンテナンスやオペレーション、実際の真空ポンプの設置や配線等多大な御協力をいただきました。ここに感謝いたします。