

13. RI ビームラインと生成ターゲット

理化学研究所

吉 田 光 一

目 次

RIビームラインと生成ターゲット

1	はじめに	13-1
2	RIビームの生成、分離、収集	13-1
2.1	RIビームの生成	13-1
2.2	RIビームの分離、収集	13-1
2.3	エネルギー減衰板	13-2
2.4	RIビームの同定と輸送	13-2
3	RIビーム用生成ターゲット	13-2
3.1	RIビーム生成ターゲットの特徴	13-2
3.2	RIBFのRIビーム生成ターゲット	13-4
3.3	除熱性能とその評価	13-6
3.4	運用実績	13-8
4	まとめ	13-8
5	謝辞	13-8
	参考文献	13-8

RI ビームラインと 生成ターゲット

1. はじめに

物質を作っている原子の中心にある原子核は陽子と中性子とが核力で結びついたものである。原子核中の陽子数と中性子数により原子核の性質は決まり、約 7000 個の原子核が存在すると言われている。このうち寿命が無限大で、崩壊しない安定な原子核が 251 個、寿命が地球の年齢よりも長くほぼ崩壊しないといってよい原子核が 35 個ある。それ以外の原子核は有限の寿命で放射線を出してほかの原子核へと変わっていく不安定な原子核、Radio Isotope (RI) で、これまでに約 3300 個の RI が見つかった。RI ビームは、このような RI をビームとしたもので、その生成方法は、加速器で RI を加速して RI ビームとするものと、加速器で加速した安定核ビームから核反応によって RI を生成し、これを集めてビームとするものの 2 つに大別される。この講義では、後者の安定核ビームから RI ビームを生成する形の RI ビームラインについて、理化学研究所の RI ビームファクトリー (RIBF) の超伝導 RI ビーム生成装置 BigRIPS [1-4] を例に詳しく述べることにする。

2. RI ビームの生成、分離、収集

2.1. RI ビームの生成

核子当たり 100MeV を超える重イオンビーム (安定核ビーム) をターゲットに照射すると、ビーム原子核のいくつかはターゲット原子核に衝突し、核反応がおこり RI が生成する。RI ビームの生成に多く使われている反応は入射核破碎反応とよばれるもので、入射 (ビーム) 原子核が衝突したターゲット原子核によって削り取られるものである。その結果として、入射原子核よりも小さい RI がその核種によらず、広い範囲に生成する。このため一種類の入射ビームから多種類の RI を生成することができる。また生成した RI がほぼ入射ビームと同じ速度を持っていることも、こ

の反応の大きな特徴で、生成した RI ビームの収集と分離を容易にしている。

入射ビームとしてウランを使用する場合、ウランの飛行核分裂反応も RI ビーム生成によく使われる反応である。これはビームとして入射したウラン原子核が、ターゲット原子核と衝突した際にエネルギーをもらい核分裂をおこすもので、その結果生じる核分裂片を分離、収集して RI ビームとする。

2.2. RI ビームの分離、収集

生成した RI は、RI ビームラインによって、収集され、RI の核種の選別を行って、RI ビームとなる。Fig. 1 は、RIBF の RI ビームラインである超伝導 RI ビーム生成装置 BigRIPS の配置を示したものである。BigRIPS は、F1 から F7 までの 7 つの焦点をもつビームラインで、標準的な使用方法では F1、F4,5,6 が運動量分散を持つ (Dispersive な) 焦点で、F2,3 および最終焦点の F7 が運動量分散を持たない (Achromatic な) 焦点となっている。3 台の超伝導四極電磁石が 1 つの低温容器に入った超伝導三連四極電磁石 STQ と常伝導の双極電磁石で構成されるこのビームラインは、標準モードで、角度アクセプタンス x 方向 ± 40 mrad、 y 方向 ± 50 mrad、運動量アクセプタンス $\pm 3\%$ という大きなアクセプタンスを持っている。この大立体角を実現するため、STQ の常温ボア半径は 120 mm (ターゲット直後の

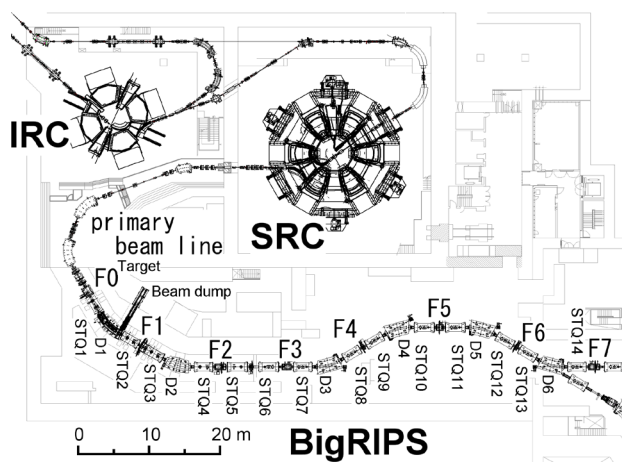


Fig. 1 BigRIPS の配置図

STQ1 中の最初の四重極電磁石のみ 90 mm)と大口径であり、双極電磁石の磁極間距離は 140 mm となっている。

ターゲットで生成された RI および未反応の一次ビームは、STQ1 を通って D1 へ運ばれる。D1 では、ターゲットで反応しなかった一次ビームを磁気剛性、すなわちビーム粒子の運動量/荷電数の違いを使って RI ビームから分離し、一次ビームを D1 の側面および出口部に設置したビームダンプを使って停止させる。

D1 を通過した RI は、STQ2 で収束されて、dispersive な焦点 F1 に運ばれる。ここにスリットを置いて RI の磁気剛性を選ぶようになっている。RI の磁気剛性は RI の質量数 A、陽子数 Z、および速度 V とすると、 $A \cdot V/Z$ に比例する。またターゲットで生成された RI はほぼ同じ速度を持っていることから、磁気剛性を選択することで、RI の質量数/陽子数 A/Z (RI に電子がついている場合は質量数/荷電数 A/Q) の違う RI を選び出すことができる。

このように F1 での磁気剛性の分析の結果として、RI ビームの A/Z を選ぶことができる訳だが、RI の核種を選び出すためには、もう一段 A もしくは Z による分離が必要である。そこで、F1 で A/Z を選択した後に RI をエネルギー減衰板と呼ばれる薄板を通過させる。物質中での荷電粒子は同じ速度の場合、 Z^2 に比例するエネルギーを失うため、 A/Z が同じ RI であっても物質通過後は、Z が異なる RI は異なるエネルギー、速度を持つことになり、磁気剛性に違いが生じる。この違いを STQ3-D2-STQ4 の電磁石を使って再度分析することにより、Z の違いを分離することができる。このように間にエネルギー減衰板を入れ 2 段階で磁気剛性の分析を行うことで、RI の A と Z を選択することが可能となる。

2.3. エネルギー減衰板

RI 分離のために F1 に挿入するエネルギー減衰板だが、ビーム粒子の物質中でのエネルギー損失は、速度の大きい粒子の方がエネルギー損失は小さく、速度の遅い粒子の方が大きいという性質が

あるため、一様の厚さのエネルギー減衰板を挿入するとビームの運動量幅は、通過後広がることになる。F1 のような運動量分散のある焦点では、焦点上の位置とビーム粒子の運動量は相関をもっている。そこで、焦点上の位置によって減衰板の厚さを変えて低運動量粒子で薄く、高運動量粒子で厚くしてやると、減衰板の前後で中心粒子に対する運動量の幅を同じにすることができる。このようなクサビ形をした減衰板を用いると、運動量幅が変わらないため、減衰板から下流のビームラインを中心粒子の運動量にスケールするだけで、うまく F2 に運動量によらない Achromatic な焦点を結ぶことができる。RI ビーム生成時のビームラインの調整が容易になるため、クサビ形のエネルギー減衰板がもっぱら使われている。

2.4. RI ビームの同定と輸送

F1 焦点における A/Z の選択に加えて、F1 エネルギー減衰板での Z によるエネルギー損失の違いを用いて F1-F2 間で磁気剛性分析を行うことで、F2 焦点では、A (Z) による分離が得られる。ここにスリットを置いて粒子を選択することで、RI の核種の選択が完成する。

BigRIPS でこの下流に連なる F3-F7 のセクションは RI の同定を行うセクションで、F3-F7 の飛行時間、F5 焦点のビーム位置から求まる RI の磁気剛性、および F7 にあるエネルギー損失検出器 (イオンチェンバー) の情報からビーム粒子の核種をビーム粒子ごとに同定することが可能となっている。

3. RI ビーム用生成ターゲット

3.1. RI ビーム生成ターゲットの特徴

これまで、RI ビームの生成、分離、同定の過程を見てきたが、その生成ターゲットに見られる特徴をあげてみる。

まずターゲットに照射される安定核ビームだが、RIBF の場合 RI ビーム生成用の一次ビームとして、 ^{12}C 、 ^{18}O 、 ^{48}Ca 、 ^{70}Zn 、 ^{78}Kr 、 ^{124}Xe 、 ^{238}U が使われている。ビームエネルギーは核子当たり 345 MeV、スポットサイズは直径 1 mm 程度であ

る。最大ビーム電流は ^{238}U で $0.3 \text{ particle } \mu\text{A}$ (μpA)、他のビーム核種で $1 \mu\text{pA}$ を目標としている。(particle μA はビーム電流 μA をそのビーム粒子の電荷数で割ったもので、重イオンビームのビームの粒子数を表す単位である。)

3.1.1. ターゲットの材質

ターゲットの材質としては入射核破砕反応には、ベリリウム Be やカーボン C といった軽い元素からなる物質が使われる。核破砕反応の反応断面積は、ターゲットの原子核の種類にはあまり依存しないが、ビームがターゲット中を進む際に受けるクーロン多重散乱による角度やエネルギーの広がりが、軽い元素のターゲットの方が少ないからである。

ウランビームの飛行核分裂反応を RI ビーム生成に使う場合には、ウランビーム原子核に励起エネルギーを与える反応機構によって、ターゲットに使われる物質が変わってくる。ビームであるウラン原子核がターゲットの原子核に衝突し、その一部がはぎ取られる際に、ウラン原子核の残りの部分が励起エネルギーをもらって核分裂を起こす核破砕—核分裂 (abrasion-fission) では、先と同じく、軽い元素でできたターゲットが用いられる。

一方、重い元素でできたターゲットを用いると、ターゲット原子核の周りの強いクーロン力のため、直接原子核同士が衝突することなく、そばを通過するだけでターゲット原子核のクーロン場からビーム原子核はエネルギーをもらうことができる。これはクーロン励起といわれる反応で、これによりエネルギーをもらったウランビーム原子核が核分裂を起こすのが、クーロン励起—核分裂 (Coulomb fission) である。この反応のためには陽子数 Z の大きいターゲット、金 Au ($Z=79$) や鉛 Pb ($Z=82$) が多く用いられるが、RI ビーム生成用のターゲットとしては後述するターゲットの耐熱性の観点から、融点の高いタングステン W ($Z=74$) が利用されている。

3.1.2. ターゲットの厚さ

RI ビーム生成に使うターゲットの厚さは、生成する RI ビームにより、様々な厚さのものが使われる。厚いターゲットの方が RI の生成効率は高いが、ターゲット通過後の RI ビームの角度やエネルギーの広がりとの兼ね合いで、厚さは決まってくる。RI ビームは、RI 生成反応そのものによってエネルギー、角度に広がりを持っている。これにターゲット中での多重散乱による広がりが加わる。さらに厚いターゲットでは、ターゲット中でのエネルギー損失が反応前の一次ビームと反応後の RI ビームで違うため、ターゲット中での反応点の違いによって、ターゲット通過後の RI ビームのエネルギーに広がりをあたえる。これらの RI ビームのエネルギーや角度の広がりは、RI ビームの収集効率を低下させ、時に RI ビームの核種分離を難しくする。このため、生成元となる安定核ビーム (一次ビーム) の核種と生成する RI ビームの核種に応じて適切に選択する必要がある。

ターゲット中でのエネルギー損失が一次ビームと RI ビームで違うことを利用して、ターゲットの厚さを変えることで、ターゲット通過後の目的とする RI の磁気剛性と一次ビームの磁気剛性の違いを調整することができる。D1 のビームダンプに一次ビームが止まるようにターゲットの厚さを選ぶことも RI ビーム生成上重要である。

ターゲットの厚さとしては、経験的に一次ビームの飛程の 30 - 50% のものを用いることが多い。実際 ^{238}U 345MeV/核子ビームの場合、ベリリウム中での飛程は 13 mm であり、4—6mm の厚さのベリリウムターゲットがよく用いられている。 ^{48}Ca 345 MeV/核子ビームでは、飛程は 52 mm で、15—30 mm の厚さのターゲットがよく使われている。

3.1.3. ターゲット中での発熱

ビームがターゲットに入射すると、ビームはターゲット中でエネルギー損失をしながら通過していく。その際のエネルギー損失はターゲット中での発熱となる。RI ビーム生成に大強度の重イオ

ンビームを使うため、ターゲット中での発熱密度が高いのも特徴である。RIBF の ^{238}U 345 MeV/核子のビームが Be 4 mm 厚さのターゲットに入射した場合を考えるとビーム強度が 1 μA の場合、18 kW の発熱となる。ビームスポットの大きさは直径 1 mm 程度であるので、体積密度にすると 5.7 kW/mm³ となる。ベリリウムの比熱 1.82 J/g °C と密度 1.85 g/cm³ を使ってこれを温度上昇に換算してみると、断熱状態（周囲に熱が逃げない）では、1 ms の間に 1700 °C の温度上昇をもたらすこととなり、すさまじい熱量であることがわかる。

この熱密度ではターゲットが熔融しないよう除熱することは不可能である。そこで、熱密度を下げることを考える。ターゲットを円盤状にして回転させ、その外周付近にビームを当てるようにすると発熱を円周上に分散できる。直径 30 cm 程度の円盤の縁にビームを当てることを考えると、熱密度を 1/1000 程度に下げることが可能である。このようにして熱密度を 6 W/mm³ 程度に減少させる。それでも、1 秒間に 1700°C の温度上昇をもたらす熱を取り除く必要がある。

真空中で回転する円盤ターゲットからの除熱方法としては 2 つの方法が考えられる。1 つは高温となる回転ターゲットからの熱放射をターゲット円盤と対向するように置かれた固定された冷却板で受けて冷却する方法である。この方式では、回転するターゲットには冷却のための水路は不要で、水路を組み込む冷却板は固定したものである。回転部分の構造が簡単で済むという特徴がある。ただターゲットの材質としては放射で冷却されるため、高温に耐える材質であることと放射効率の良いものである必要がある。炭素（グラファイト）は、融点（昇華点）が 3642°C と高く、放射率も 0.8-0.9 と高いため、この方式のターゲットを作るのに適した材質である。

もう一つの方式は、回転ターゲットの回転軸から冷却水を導入し、そこへの熱伝導で冷却する方式である。回転軸への冷却水の導入機構が必要になるなど、回転ターゲットの構造が複雑になる欠点があるがターゲットを比較的低い温度で運用

できる利点がある。ベリリウムは融点が 1287°C で熱伝導率が 200 W/m K と高いため、この伝導冷却タイプのターゲットに適した材料である。

3.2. RIBF の RI ビーム生成ターゲット

3.2.1. 生成ターゲットの全体構造

RI ビーム生成ターゲットの例として、RIBF の超伝導 RI ビーム生成装置 BigRIPS の生成ターゲット [5-8] について、その構造を詳しく見てみよう。

この生成ターゲットは、RIBF の超伝導サイクロトロン SRC から得られる 345 MeV/核子の ^{12}C ~ ^{238}U ビームの最大ビーム電流 1 μA を受けて RI ビームを生成するターゲットとして、設計・製作されたもので、伝導冷却式の回転ターゲットである。RI 生成ターゲットとして直径 30 cm のベリリウム円盤を採用し、この中心部分を水冷された冷却円盤に接触させ、回転軸を通じて導入した冷却水を通じて除熱するという、水冷式回転円盤ターゲットとなっている。高効率の RI ビーム生成をめざし、RI ビーム生成効率の高いベリリウムをターゲット材として使用している。

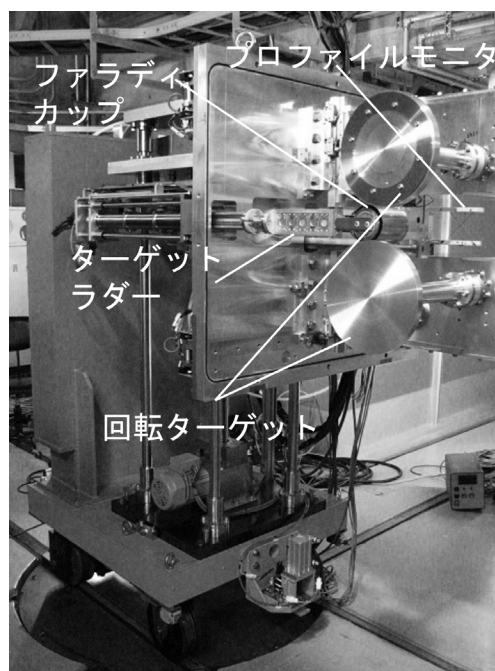


Fig. 2 BigRIPS ターゲットシステムの主要機構。

ターゲットシステムは、1.4 m x 1.0 m x 0.8 m の真空チェンバーに格納され、前後のビームダクトとつながっている。チェンバーの横側面は一枚の大きなフランジとなっていて、このフランジにターゲットシステムの主要な機構である、回転ターゲット 2 台、固定式ターゲットとして使用するターゲットラダー 1 台、ビーム形状を測定するプロファイルモニタ 1 台、及びビーム電流を計測するファラディカップ 1 台が取り付けられている。Fig. 2 にその写真を示す。

この側面フランジは専用台車を用いて、遠隔でターゲットチェンバーから取りはずし、生成ターゲット周りの放射線遮蔽壁の外に搬出できるようになっている。このため、ターゲット機構のメンテナンスは、搬出した先の放射線量の低い場所で行うことが可能である。

3.2.2. 回転ターゲットの構造

回転ターゲットの詳細構造を Fig. 3 に模式的に示す。図の右側からターゲット本体、冷却円盤、回転シャフトとつながる構造になっている。ターゲット本体は直径 30 cm のベリリウム製の円盤であり、その淵の部分の厚さが 3 段階に変えられている。こうすることで、一枚のターゲット円盤で 3 種類のターゲット厚さに対応できるようになっている。ターゲット本体は冷却円盤にネジで取り付けられており、ターゲット円盤単独で交換可能な構造になっている。回転シャフトの他端に

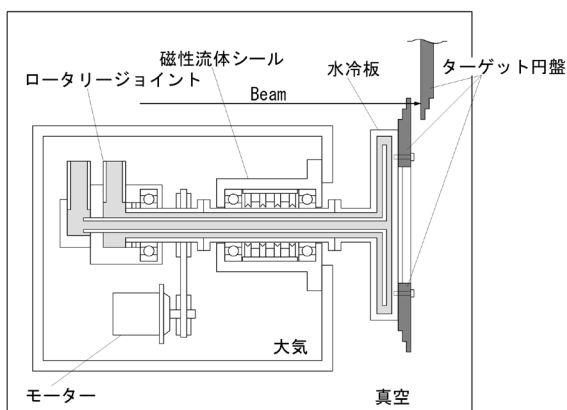


Fig. 3 回転ターゲット構造模式図

は、回転シャフトに冷却水を導入するロータリージョイントが設けられ、これを通じて二重管となっている回転シャフトに冷却水が出入りする構造になっている。回転シャフトには歯車を取り付けられていて、ベルトを通じてモータの回転を伝えるようになっている。モータには回転トルクが高く、特別なセンサーなしに回転数制御が可能な IPM モータを使用している。専用の電源モジュールによって、100-1000rpm の範囲で回転数の制御が可能である。ロータリージョイントの水封能力が高真空には対応できないため、ロータリージョイント、モータはターゲットチェンバーの中に大気の小部屋を作り対応している。このため、回転シャフトの途中で磁性流体シールをいれて大気と真空を仕切っている。

この回転ターゲットが 2 台、上下に可動な移動台を介して側面フランジに取り付けられている。モータ、ロータリージョイントを含め回転ターゲットが全体として上下の位置を変えることによって、ターゲット円盤周辺部の厚みの違う部分を選択してビームに照射することが可能となっている。

3.2.3. 温度などの監視

ターゲットチェンバーおよび側面フランジにはビューポートが設けられ、そこを通じてビーム

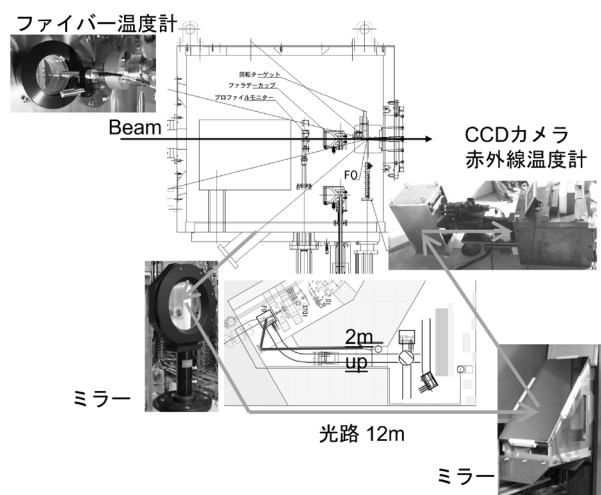


Fig.4 ターゲット温度計測システムの構成

スポット周辺の様子を観察することが可能である。Fig. 4 にその構成を示す。ビューポートの窓材にはサファイアガラスを使用しており、赤外線カメラでビームスポットの温度を測定することが可能である。ビーム照射中に発生する強力な放射線の影響を避けるため、ビューポートからの光は、ミラーで3回反射され、ターゲット周辺を取り囲む放射線遮蔽の外側まで12mほど運ばれて、超望遠レンズをつけた CCD カメラや赤外線カメラで観測される。またターゲットチェンバーのビューポートには、光ファイバーを使った赤外線スポット温度計が設置されており、ビームスポットの温度を常時監視することができるようになっている。

赤外線カメラによる温度測定には、ターゲットの輻射率や、ターゲットから赤外線カメラまでの光路途中の吸収などの補正が必要である。これを実施するため、ターゲットラダーの一部に、ヒーター、熱電対、ベリリウム板からなる温度校正用標的が取り付けられている。ヒーターでベリリウム板を加熱し、熱電対で測定した温度と赤外線カメラで見た温度を比較することで校正を行っている。

3.3. 除熱性能とその評価

3.3.1. ANSYS による伝熱計算

この回転ターゲットシステムの除熱能力を評価するために、有限要素法を用いた熱構造解析コードである ANSYS[9]を用いた伝熱計算を行った。計算モデルとして、Fig. 5(a)に示すようにビームスポット（熱源）が円周上を時間とともに移動するという形で、ターゲットの回転運動を計算に取り込み、時間依存の伝熱計算を行った。

その結果として、 ^{238}U 345MeV/核子、1 μA のビームが 2-3-4 mm 厚さの 300 rpm で回転するベリリウムターゲットの 4 mm 部分に 1 mm 四方のスポットサイズで当たった場合の温度分布を Fig. 5(b)に示す。計算では、ベリリウムの熱伝導率の温度依存性を取り込んでいる。またターゲット本体と冷却円盤の間の接触熱抵抗（接触熱伝達率）として、橘の式[10]として知られる経験式を

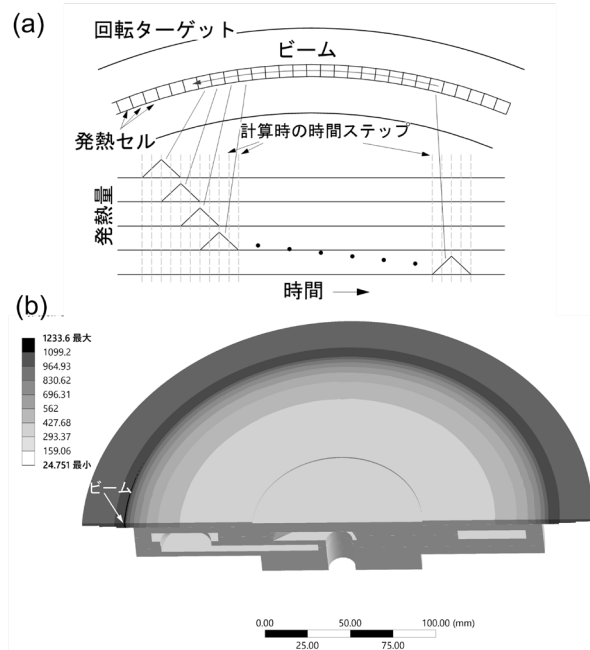


Fig. 5 回転ターゲットの熱計算の(a)モデルと (b) 結果

使って求めた 3000 W/m^2 という値を、冷却盤と冷却水のための熱伝達率としてスムーズ管の熱伝達率 6000 W/m^2 を用いている。

計算結果をみると、ビームスポットの部分が最高温度となり、そこからビームの通った軌跡に沿って温度が徐々に下がっていく高温部のテールが続いていることがわかる。最高温度は 1230°C であり、ビームスポットの直前の温度は 1030°C であることから、ターゲットが一周する間に 200°C 温度が下がることになる。この時ベリリウムターゲットと冷却板の接するところの温度を見るとそれぞれ 700°C 、 160°C であった。接触熱抵抗により、この部分に 540°C の温度差ができていくことになる。

3.3.2. ビームスポット温度の測定と比較

赤外線カメラを使ったベリリウムの回転ターゲットの温度の測定は、これまでのところビーム強度が限られていることもあり、精度の良いものは得られていない。Fig. 6 上段に ^{78}Kr 345MeV/核子 280 pnA のビームを 300 rpm で回転する 5-7-10 mm のベリリウムターゲットに照射した際の赤外線カメラによる観測画像を示す。図中で

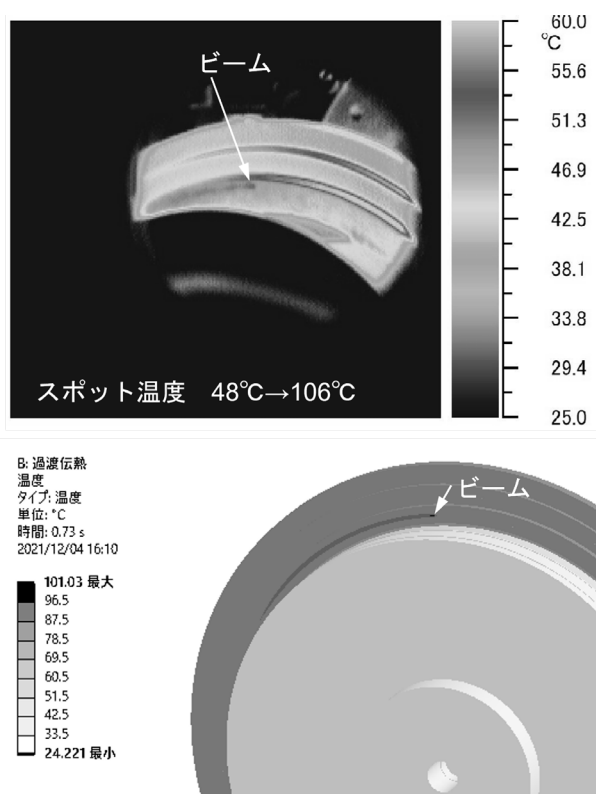


Fig. 6 ^{78}Kr 345 MeV/核子、280 p nA ビームを 10 mm 厚さの Be ターゲットに照射した際の温度の計測値（上段）と ANSYS 計算値（下段）

矢印で示しているのが、ビームのあたっている位置で、そこから左側にテールを引くように温度の高い部分がビームの軌跡に沿って続いているのがわかる。外部からの赤外線反射によって、回転ターゲットの淵にある段差の部分が高い温度、60 °C となっていて見えているが、ビームスポットの部分の最高温度は 48 °C である。この観測温度にあらかじめ測定しておいたターゲットの輻射率の補正を加えると図中の矢印で示したように 106 °C となる。

Fig. 6 下段は、この観測条件で行った ANSYS 計算によるターゲットの温度分布を示している。最高温度とあるビームスポットの温度は 101 °C と計算されていて、観測データを再現している。このことは、ANSYS 計算に用いた熱伝達率などのパラメータがおおむね妥当なものであることを示唆している。

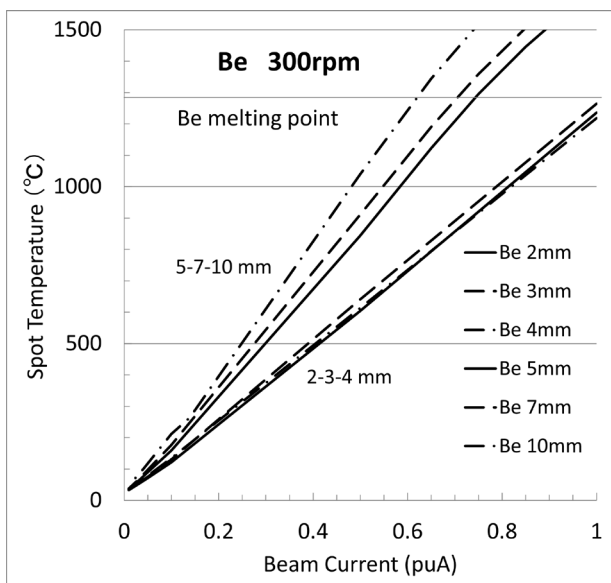


Fig. 7 ^{238}U 345 MeV/核子ビームに対する各種厚さの Be 回転ターゲットのビームスポット温度

3.3.3. 除熱性能の評価

そこで、これらのパラメータを用いて ^{238}U 1 μA のビームを照射した際の、各種厚さのベリリウム回転ターゲットの温度分布を ANSYS で予測した。Fig. 7 は 300 rpm の回転数で計算した 2-3-4、5-7-10 mm 厚さのベリリウムターゲットのビームスポットの温度（最高温度）である。2-3-4 mm 厚さのターゲットでは、ターゲットの厚さの増加に伴う入熱量の増加と、冷却板への伝熱距離の減少が互いにキャンセルしあって、ビームスポットの温度はターゲットの厚さにあまりよらなくなっている。ベリリウムの融点は 1280 °C であるから、このターゲットはかろうじて溶融せずに ^{238}U 1 μA のビームに耐えることがわかる。一方、厚い 5-7-10 mm のターゲットでは、入熱量の増加がまさりターゲットの厚さの増加とともに、ビームスポットの温度も上がり、600 p nA 程度で融点に達してしまう。

このターゲットシステムには 2 つの回転ターゲット機構があり、2 つの回転円盤を重ねて使用することが可能である。2-3-4 mm の回転ターゲットをそれぞれの冷却円盤につけて重ねて使用す

れば、2～8 mm 厚さのターゲットとなり ^{238}U 1 μA のビーム強度に耐えることが可能である。

また、回転ターゲットの回転数を上げることでビームスポットの温度を下げることも可能である。先に述べたように ANSYS 計算では 4 mm の Be ターゲットに ^{238}U 1 μA のビームを照射した場合、ビームスポットの前後で温度が 200 °C 変化する。回転数を 1000 rpm まで上げるとこの変化は 1/3 となり、ビームスポットの温度を 120 °C 程度下げることができる。このように回転数を上げ 1000 rpm でターゲットを運用すれば、ビームスポットの温度は 1100 °C 程度になり、熔融に対して余裕を持った運用が可能になる。

ターゲット本体と冷却盤との間の熱接触を高める工夫もビームスポットの温度を下げるのに有用である。現状では、ターゲット本体の冷却盤への取り付けは間に何も挟まずにネジで締結するだけであるが、間に銀箔のような柔らかく、熱伝導率の高い物質を挟み込んで締結するようにして、熱接触を改善することを検討している。この部分の温度差は 540 °C と大きいので接触熱抵抗を半分程度に下げることができれば、ビームスポットの温度は 250 °C 程度下がることになり、大きな効果が期待できる。

3.4. 運用実績

この回転ターゲットシステムは 2006 年に超伝導 RI ビーム分離生成装置 BigRIPS とともに完成し、2007 年のコミッショニング以来、運用が続いている。当初は SRC から得られるビーム強度が限られていたため、もっぱらターゲットラダーにマウントした固定式のターゲットを使用していたが、2015 年以降、SRC のビーム強度増加に合わせて回転式ターゲットを使うことが主流になっている。これまでに回転ターゲットに照射したビームの最大強度は、 ^{48}Ca 500 pnA、 ^{70}Zn 800 pnA、 ^{78}Kr 600 pnA、 ^{124}Xe 160 pnA、 ^{238}U 100 pnA である。

回転ターゲット本体は、当初整備した 2-3-4 mm、5-7-10 mm、10-15-20 mm という厚さの回転ターゲットに加えて、2018 年に 1-2-3 mm 厚さ

と 4-6-8 mm 厚さの Be ターゲットを追加整備した。この 2 つのターゲットを重ねて用いることで、1mm～11mm に間で 1 mm ステップでターゲットの厚さが選択可能となり、 ^{238}U ビームのみならず、 ^{70}Zn 、 ^{78}Kr や ^{124}Xe ビームによる RI ビーム生成にもこの組み合わせの回転ターゲットで運用している。

回転ターゲットの本格的運用を始めてから 8 年になるが、これまでのところ大きなトラブルなしに運用を行っている。

4. まとめ

RIBF の RI ビームライン BigRIPS を例に RI ビームの生成ターゲットに見られる特徴についてみてきた。BigRIPS の生成ターゲットは、RI ビーム生成効率の高いベリリウムをターゲット材とした水冷式回転ターゲット 2 台を用いたもので、ターゲット厚さの選択に柔軟に対応している。その除熱能力は、ターゲット厚さ 4mm を超えると設計目標の ^{238}U の 1 μA には単体では不足すると予測されるものの、2 台の組み合わせで対応可能である。ターゲット本体と冷却円盤との熱接触の改善により除熱能力を高め、より安定した生成ターゲットの運用につなげていきたいと考えている。

5. 謝辞

BigRIPS の生成ターゲットの設計、製作にあたられた理化学研究所 RIBF の久保敏行氏、吉田敦氏に深く感謝します。また日々の生成ターゲットの運用・メンテナンスに従事されている、柳澤善行氏をはじめとする BigRIPS チームの皆さんにも感謝します。

参考文献

- [1] T. Kubo, Nucl. Instrum. Meth. B 204 (2003) 97.
- [2] T. Kubo, K. Kusaka, K. Yoshida, A. Yoshida, T. Ohnishi, M. Ohtake, Y. Yanagisawa, N. Fukuda, T. Haseyama, Y. Yano, N. Kakutani, T. Tsuchihashi, K. Sato, IEEE Trans. Appl. Supercond. 17 (2007) 1069.
- [3] T. Kubo, D. Kameda, H. Suzuki, N. Fukuda, H. Takeda, Y. Yanagisawa, M. Ohtake, K. Kusaka, K. Yoshida, N. Inabe, T. Ohnishi, A. Yoshida, K.

Tanaka, and Y. Mizoi, Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, 03C003.

- [4] K. Yoshida, et al., 「加速器」 Vol. 10 (2013) 93.
- [5] A. Yoshida, K. Morita, K. Morimoto, D. Kaji, T. Kubo, Y. Takahashi, A. Ozawa, I. Tanihata, Nucl. Instrum. and Meth. A 521 (2004) 65.
- [6] A. Yoshida, T. Suda, T. Otsuki, H. Yuki, and T. Kubo, Nucl. Instrum. and Meth. A 590 (2008) 204
- [7] A. Yoshida, Y. Yanagisawa, T. Kubo, Nucl. Instrum. and Meth. A 655 (2011) 10
- [8] K. Yoshida, et al., 「加速器」 Vol. 18(2022) 241.
- [9] Ansys Inc., <https://www.ansys.com/ja-jp>
- [10] 橘 藤雄, 「接触面の熱抵抗に関する研究」, 日本機械学会誌 55-397(1952) 102.