

話 題

理研の超伝導 RI ビーム生成装置 BigRIPS について

吉田 光一*・久保 敏幸*・日下 健祐*・福田 直樹*・柳澤 善行*・竹田 浩之*
 稲辺 尚人*・大竹 政雄*・亀田 大輔*・田中 鐘信*・鈴木 宏*

Superconducting Radio-Isotope Beam Separator BigRIPS at RIKEN

Koichi YOSHIDA *, Toshiyuki KUBO *, Kensuke KUSAKA *, Naoki FUKUDA *, Yoshiyuki YANAGISAWA *, Hiroyuki TAKEDA *
 Naohito INABE *, Masao OHTAKE *, Daisuke KAMEDA *, Kanenobu TANAKA * and Hiroshi SUZUKI *

Abstract

BigRIPS fragment separator is the in-flight fragment separator with the large acceptance and the high momentum resolution that consists of 42 superconducting quadrupole magnets and 6 room-temperature dipole magnets. It is the core experimental equipment of RI beam factory (RIBF) at RIKEN and used to produce a wide variety of RI beams through the fragmentation of stable beams as well as the in-flight fission of the uranium beam. The BigRIPS fragment separator started in operation in 2007 and since then, 145 kinds of RI beams have been produced and used in physics experiments. 47 new isotopes were discovered by using the BigRIPS fragment separator.

1. はじめに

超伝導 RI ビーム生成装置 BigRIPS は理化学研究所仁科加速器センターの RI ビームファクトリー (RIBF) の中心的な実験装置で、超伝導サイクロトロン SRC から得られる安定核ビームから、不安定な原子核を作り出し、分離生成して RI ビームを作り出す装置である¹⁻³⁾。RIBF には、重イオンリニアック 2 台、AVF サイクロトロン 1 台、リングサイクロトロン 4 台 (うち 1 台は超伝導) があり、これらを組み合わせて使うことにより水素からウランにいたるまでの広範囲の安定核を 345 MeV/核子のエネルギーまで (軽い原子核では 400 MeV/核子) 加速可能である。加速により得られた安定核ビームをベリリウム、タングステンなどの標的原子核と衝突させ、入射核破碎反応や、ウランビームの飛行核分裂を起こさせることにより多種多様な不安定核が生成される。生成された不安定核は、ほぼ同じ速度で前方に飛行しているため、これを収集し特定の原子核を選び出すことにより RI ビームを生成するのが BigRIPS である。BigRIPS の特徴は、1) 超伝導四極電磁石をもちいた大立体角の分離生成装置で

あること、2) RI ビームの分離生成を行う第一ステージの分離分析器に引き続き、運動量分解能の高い第二ステージの分離分析器を持つ 2 段構成となっていること、の 2 点である。BigRIPS の角度アクセプタンスは水平方向 ± 40 mrad、垂直方向 ± 50 mrad、運動量アクセプタンスは $\pm 3\%$ となっている。これは、ウランの飛行核分裂による分裂片の分布にほぼ匹敵し、入射核破碎反応による破砕片にくわえて、核分裂片をも効率よく収集できるようになっている。また中性子過剰の RI ビームの生成を考慮して最大磁気剛性 ($B\rho$ 値) が 9 Tm と高いのも特徴である。

2. 全体レイアウト

図 1 に RIBF のビームラインのレイアウトを示す。BigRIPS は RIBF の 4 台のサイクロトロンのうちの 2 台、IRC と SRC と同一建屋に設置されている。最終段の加速器である超伝導サイクロトロン SRC から得られた安定核ビームは一次ビームラインを通して BigRIPS の生成ターゲット (F0) へと導かれる。ここでビームは生成標的と衝突し、入射核破碎反応や飛行核分裂などの核反応をおこし、不安定な原子核へと変わる。生成した不安定

* 理化学研究所仁科加速器研究センター RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science
 (E-mail: yoshida@ribf.riken.jp)

核は第一超伝導三連四極電磁石 (STQ1) によって集められ, 第一偏向電磁石 (D1) により曲げられると同時に運動量分析され, STQ2 によって, 第一焦点 (F1) に運動量分散を持って像を結ぶ。ここでスリットによって, 特定の運動量を持つビームを選び出し, 第一段の分離, すなわちビームの A/Z もしくは A/Q にもとづく分離が行なわれる。ここで, A, Z, Q は RI ビーム原子核の質量数, 陽子数, および荷電数である。スリットによって選ばれたビームはエネルギー減衰板を通過し, 近似的にビームの $A^{2.5}/Z^2$ に比例したエネルギーを失う。このビームを STQ3-D2-STQ4 からなる後段の分離セクションを用いてさらに分析することによって, F2 焦点において特定の Z と A を持つ RI ビームを選び出すことができる。

F2 で選び出された RI ビームは STQ5, STQ6 によって, F3 へ移送される。F3 から F7 までは, BigRIPS の第二ステージと呼ばれる部分で, 第一ステージより運動量分解能が高くなっている。F2 で単一の核種の RI ビームが選び出されるわけではないので, この第二ステージを用いて RI ビーム 1 個 1 個の A と Z を同定する。F3 から F5 に

かけて Dispersive となっていて, F5 焦点でのビーム位置から RI ビームの運動量を求めることが可能である。ビームは F7 焦点でふたたび Achromatic に戻る。F3 と F7 間で time-of-flight (TOF) を測定し, F7 もしくは F3 でビームのエネルギーロス ΔE を測定すると, ビームの A, Z を求めることができる。なお F2 での RI ビームの分離が十分でない場合には, F5 に 2 つめのエネルギー減衰板を置き分離能力を高めることも可能である。

F7 までで分離・同定された RI ビームはそれぞれの実験装置へと導かれる。F8 は ZeroDegree スペクトロメータのスタート点で, 実験者の反応ターゲットなどが置かれる。ZeroDegree スペクトロメータは, 偏向電磁石 2 台, STQ 6 台からなるスペクトロメータで, F8 に置かれたターゲットで核反応をおこし前方 (0 度近傍) に放出される粒子の分析に使われる。ZeroDegree スペクトロメータの最終焦点の F11 は, 電磁石の設定により Achromatic なモードと Dispersive なモードの 2 種類があり, 実験に応じて使い分けている。また F11 に置かれた実験装置に RI ビームを単に

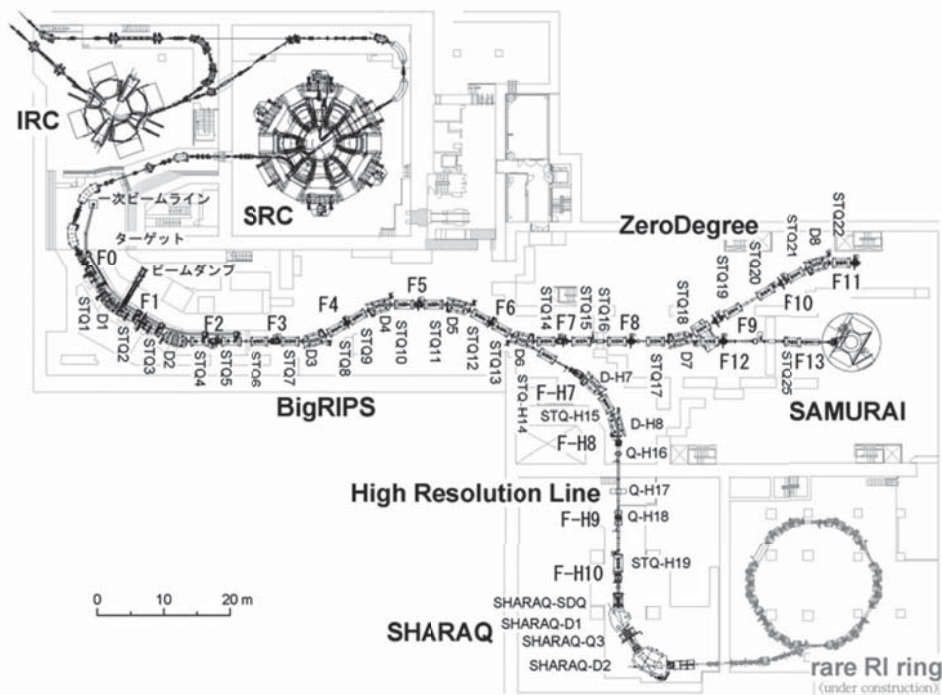


図 1 RIBF ビームラインレイアウト図。図上部中央にある超伝導サイクロトロン SRC で加速されたビームは一次ビームラインを通して図中央部を横にのびる BigRIPS へと導かれる。

輸送するためにも使われている。

ZeroDegree スペクトロメータの最初の偏向電磁石 D7 では、多粒子同時測定用の超伝導大型偏向電磁石 SAMURAI へのビームラインが分岐する。また、BigRIPS の最終焦点 F7 の手前、偏向電磁石 D6 では、高分解能スペクトロメータ SHARAQ へのビームラインが分岐する。SHARAQ に RI ビームを輸送する際には BigRIPS の第二ステージ、F3 から下流はモードを変え、F3 から SHARAQ スペクトロメータの入口点である F-H10 焦点までのビームラインを使って、SHARAQ スペクトロメータの分散と合わせる、分散整合が可能となっている。

次にこのような機能を実現するのに使われている電磁石、焦点面チェンバー等について述べる。

3. 超伝導三連四極電磁石 STQ

3.1 空芯型超伝導三連四極電磁石 STQ1

BigRIPS の大立体角を実現するのに欠かせないのが超伝導三連四極電磁石 STQ である。超伝導電磁石の作る強い磁場を用いて大口径の四極電磁石を実現している。RI ビームが生成されるターゲット直後の超伝導三連四極電磁石 STQ1 は、ターゲットからの放射線による熱負荷を避けるため、鉄芯を用いない空芯の超伝導四極電磁石となっている。P1, P2, P3 と呼ばれる 3 つの四極電磁石からなっていて、有効長はそれぞれ 500 mm, 800 mm, 500 mm, 室温ボア径は 90 mm, 120 mm, 120 mm である。それぞれの四極電磁石の最大磁場勾配は 24 T/m, 20 T/m, 20 T/m となっている。これらの 3 つの四極電磁石は 1 つの低温容器に入れられて、液体ヘリウムに浸かっている。STQ1 では低温容器の断熱に使うスーパーインシュレータに放射線耐性の高いポリイミドフィルムを用いたものを使用している。この STQ1 に使う液体ヘリウムは大型のヘリウム冷凍機を使って作られ、電磁石の脇をとおり液体ヘリウム輸送管を通じて供給されている (図 2)。

3.2 注液型超伝導三連四極電磁石 STQ2-5

BigRIPS の最初の偏向電磁石 D1 の後に続く 4 つの超伝導三連四極電磁石 STQ2-5 は、四極型の磁極面を持つ鉄芯をもちいた超伝導の四極電磁石である。鉄芯の磁極半径は 170 mm で、室温のボア半径は 120 mm である。1 つの低温容器

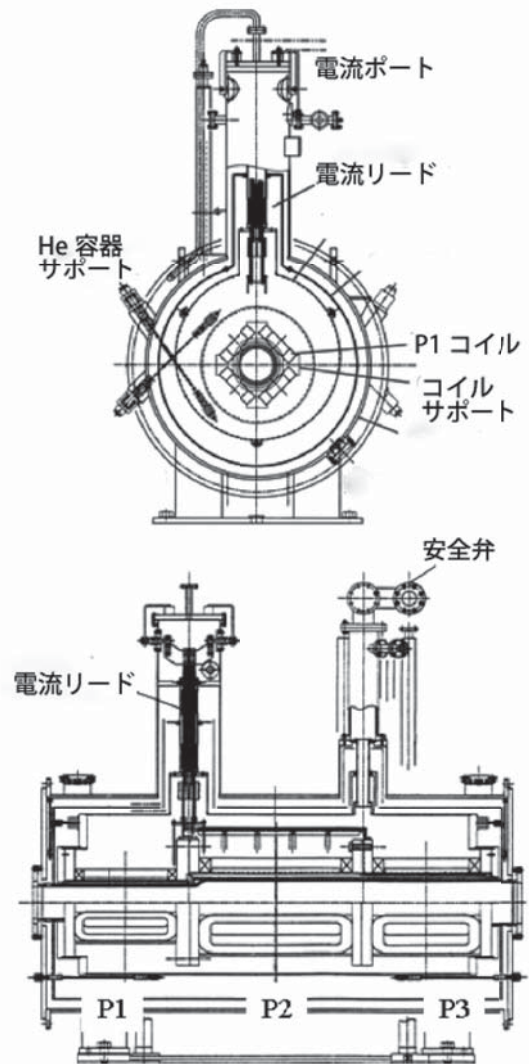


図 2 空芯型 STQ の構造

に磁極長 500 mm, 800 mm, 500 mm の 3 つの四極電磁石が入ったものと、500 mm, 1000 mm, 500 mm の磁極長を持つ電磁石が入ったものの 2 種類がある。いずれの電磁石も最大磁場勾配は 14.1 T/m で、磁極での最大磁場は 2.4 T となっている。これらの電磁石も STQ1 と同じく、大型ヘリウム冷凍機からヘリウム輸送管を経由して供給される液体ヘリウムで冷却されている。コイルとともに鉄芯もあわせて液体ヘリウムで冷却される構造となっている (図 3)。

3.3 冷凍機搭載型超伝導三連四極電磁石 (STQ6-)

BigRIPS の第二ステージ以降に使われている冷凍機搭載型超伝導三連四極電磁石は、電磁石の基本的構造、性能は注液型超伝導三連四極電磁石と

同じで、鉄芯を用いた超伝導電磁石である。違いは、大型冷凍機からの液体ヘリウムの供給を受けるのではなく、あらかじめ低温容器内にためられた液体ヘリウムによって、超伝導電磁石は冷却されている。低温容器内に侵入してくる熱によって蒸発したヘリウムは低温容器上部に設置された小型のGM-JTヘリウム冷凍機によって液化され再び電磁石の冷却に使われる。このようにヘリウムは低温容器内で気相-液相の状態を巡回しつづけ、小型冷凍機が運転している限りは、液体ヘリウムを補給することなく、超伝導電磁石を運転し続けることが可能となっている。

低温容器にはヘリウムガスを液化するための4 K冷凍機に加え、低温容器の熱シールドを冷却するための80 KのGM冷凍機が1台搭載されている。熱侵入を極力抑える為に、電磁石の電流リードには高温超伝導体を用いられている。高温超伝導体は80 Kの冷凍機で熱シールドとともに冷却されており、この温度で超伝導となり電流リードを通じて4 Kに冷えたコイルに伝わる熱の低減に役立っている (図4)。

3.4 大型ヘリウム冷凍機

STQ1-5の5台の超伝導三連四極電磁石は先に述べたように大型ヘリウム冷凍機によって液化さ

れたヘリウムで冷却されている。大型ヘリウム冷凍機としてリンデ社のTCF50Sが前川製の315 kWの圧縮機とともに使われている。冷凍機は一次ビームラインの上部にある冷凍機室に設置されていて、ここからSTQ1-5まで10 m (STQ1) ~ 50 m (STQ5)の液体ヘリウム輸送管を通じて、各STQに液体ヘリウムが送られている。冷凍機からは液体ヘリウムとともにSTQ、ヘリウム輸送管の熱シールドを冷却するための70 Kのヘリウムガスも送られる。このためヘリウム輸送管の内部は4 Kと70 Kのヘリウムの行き帰りのため4本の管が一つの真空断熱配管の中に納められている。4 Kの冷凍能力は約510 Wあり、このうち約200 Wが系の冷却に使われる。残りの約300 WはSTQの低温容器内に設けた熱負荷補償用ヒータで消費されていて、RIビーム生成時に発生する放射線による侵入熱を補償するために使われる。

この大型ヘリウム冷凍機を使ってSTQ1-5を室

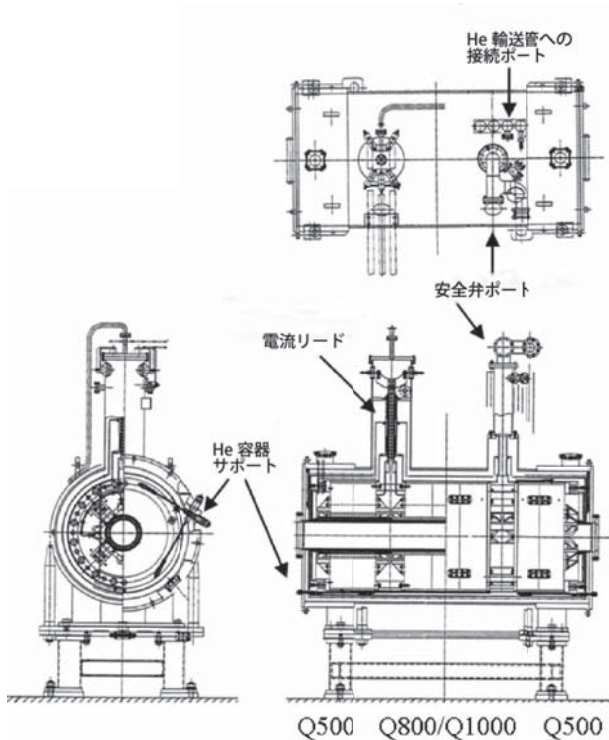


図3 注液型 STQ の構造

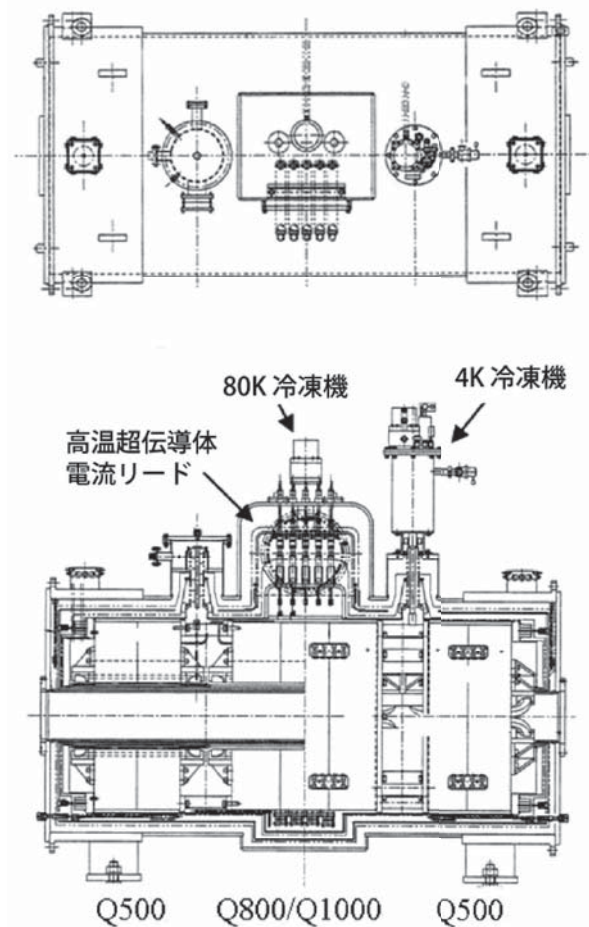


図4 冷凍機搭載型 STQ の構造

温から液体ヘリウム温度に冷却するのに約 16 日、電磁石の運転に必要な液体ヘリウムを溜めるのにさらに約 5 日かかる。冷却する部分の質量は STQ1-5 を合計して約 42 トンある。

4. 常伝導偏向電磁石

BigRIPS に使用されている偏向電磁石は常伝導の電磁石で、その仕様は、中心軌道半径 6 m, 偏向角 30° , 磁極間ギャップ 170 mm, 磁極幅 250 mm, 最大磁場は 1.5 T, 最大磁気剛性 9 Tm となっていて、すべての電磁石で共通である。RI ビームを分離生成する第一ステージに 2 台 (D1, D2), RI ビームの同定を行う第二ステージに 4 台 (D3-D6), ZeroDegree スペクトロメータに 2 台 (D7, D8), そして分散整合ラインに 2 台 (DH7, DH8) 使われている。このうち第一ステージの 2 台は耐放射線を考慮したものとなっている。第二ステージ以降で使われている D3-D8, DH7, 8 は同一形状のものである。

第一偏向電磁石 D1 の内部には、RI ビームに変換されなかった一次ビームを止めるためのビームダンプが設置されている。電磁石のコイルも無機絶縁のコイルを用いており、ビームダンプから発生する放射線に対する耐性を高めている。また第二偏向電磁石 D2 のコイルにも通常用いられているエポキシ系の樹脂ではなく、ポリイミド系の樹脂を用いていて、放射線損傷に対する考慮がなされている。

5. ターゲットシステム

BigRIPS の生成ターゲットは、水冷されたラダーにマウントする固定式ターゲットと、水冷式回転ターゲットとの 2 種類が用意されている⁴⁾。ターゲットでは、ビームパワーの 2-3 割が直径 1-2 mm のビームスポットで消費される。このため熱密度は、 ^{238}U 345 MeV/核子, 1 μA のビームに対して面積密度 23 MW/m², 厚さ方向も考慮して体積密度にすると 5.6 GW/m³ と著しく大きな値となる。このため水冷ラダーにマウントした固定式ターゲットでは除熱しきれずにターゲットが溶けてしまうため、回転ターゲットが開発された。

図 5 にターゲットチェンバーの写真を示す。回転ターゲットは回転シャフトの先端の水冷円盤に

取り付けられており、水冷円盤は回転シャフト内を通じて供給される冷却水で冷却されている。回転のためのモータ、回転シャフトに冷却水を導入する回転ジョイントは真空チェンバー内に設置された大気圧の小箱に収められている。回転シャフトは回転磁性流体シールを用いて大気と真空を仕切っている。回転ターゲットを用いることにより、固定式のターゲットに比べて、ビームスポットの温度を 1/10 に下げることが可能で、上記の ^{238}U ビームにも耐えることが可能となっている。

ターゲット周辺は高度に放射化すると予想されるため、ターゲットチェンバーに必要となる、ターゲット、プロファイルモニタ、ファラディカップなど機能部品は全てターゲットチェンバーの側面フランジにマウントされる構造となっていて、この側面フランジは小型搬送台車によって遠隔操作で着脱可能となるよう設計されている。

6. ビームダンプシステム

ビームダンプは生成ターゲットで二次ビームに変換されなかった一次ビームを受け止め停止させるもので、第一双極電磁石 D1 の磁極の両脇、及び出口部分を覆うように設置されている。 ^{238}U 1 μA のビームが安全に止められるよう設計されている。図 6 にその写真を示す。斜め入射により熱密度を下げ、また伝熱効率が高いスワール管、スクリュー管を冷却管に採用した水冷式の銅製のものである。用いる冷却水も 10 気圧, 10 m/s と圧力、流速ともに高いものを利用して除熱能力を

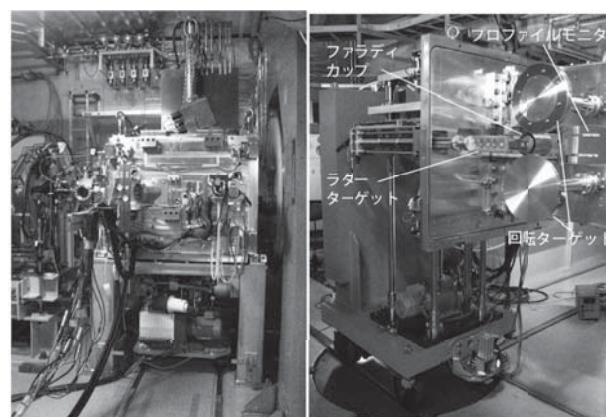


図 5 ターゲットチェンバーの写真 (左) と側面フランジを取り外したところ。(右) 側面フランジに回転ターゲット 2 台, ラダー型ターゲット, ファラディカップなど必要な機器が全てマウントされている。

上げている。メンテナンス性を考慮して、双極電磁石の出口部分を覆う出口ビームダンプは側面より引き出せるような構造となっている。

ビームダンプに使う冷却水は、その流速が 10 m/s と高いため、ビームダンプのエロージョン・コロージョンによる腐食が心配されている。このため、出口ビームダンプ用の冷却水システムにはイオン交換樹脂を使った純水化装置に加えて脱酸素装置を設置し、冷却水の質の管理にも配慮している。

7. 高放射線対策

BigRIPS のターゲット、ビームダンプからは運転中、非常に強い放射線が発生する。これに対応するため STQ1, D1, STQ2, ターゲット、ビームダンプなどの機器は放射線に弱い材料の使用を避けて製作されている。また放射化した際の交換などのメンテナンスを考慮し、機器から離れた場所からの操作で交換可能なように、位置決めピンを用いたはめあい構造で設置されている。ビーム

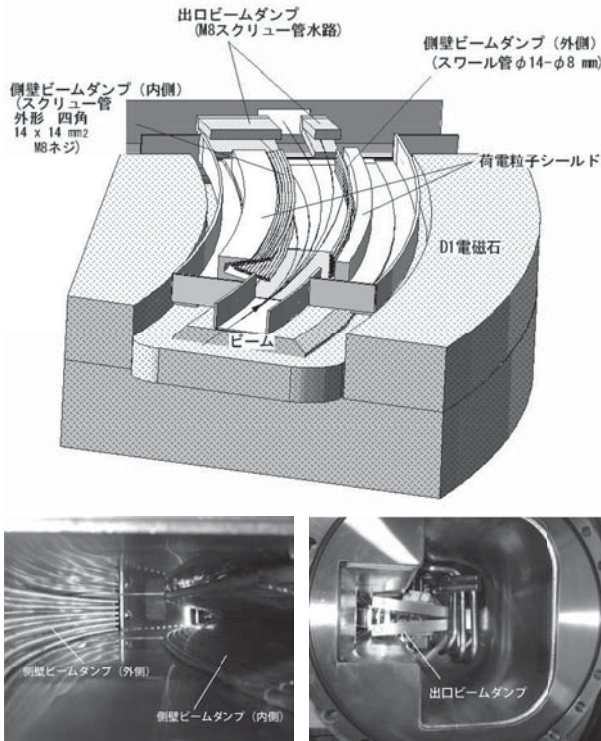


図6 ビームダンプの構造。ビームダンプはD1電磁石の磁極の両脇、出口部分を覆うように設置されている。下部左は側壁ダンプをビーム下流から見た写真。下部右は出口ビームダンプを側面から見た写真。

ダクトの接続についてもピロシールシステム⁵⁾を導入し、遠隔操作での着脱を可能としている。また、STQ内への放射線熱負荷を低減するために、ターゲット-STQ1間、ビームダンプ-STQ2間の空間には、SUSやタングステンを用いた局所遮蔽体が設置されている。

そのほか、ビーム強度の増加に先行するかたちで、さらなる高放射線対策が進行中である。

8. 焦点面チェンバーとビーム診断検出器

BigRIPS, ZeroDegree スペクトロメータなどの各焦点にはビーム診断用の検出器や、不要なRIビームを停止するためのスリット、粒子選択のためのエネルギー減衰板などを格納し、ビーム上に出し入れする駆動機構をもった真空チェンバーが置かれている。スリットなど挿入位置を設定するものはステッピングモータを使った駆動器で、また検出器等、ビームラインへの出し入れだけのものは、エアシリンダを用いた駆動器によって制御されている。図7に一例としてF7焦点面チェンバーの写真を示す。

ビーム診断検出器には、位置検出器としてParallel Plate Avalanche Counter (PPAC)、時間情報の検出にプラスチック検出器、そして荷電数Zを知るためのエネルギー損失検出器としてMulti Sample Ion Chamber (MUSIC) あるいは

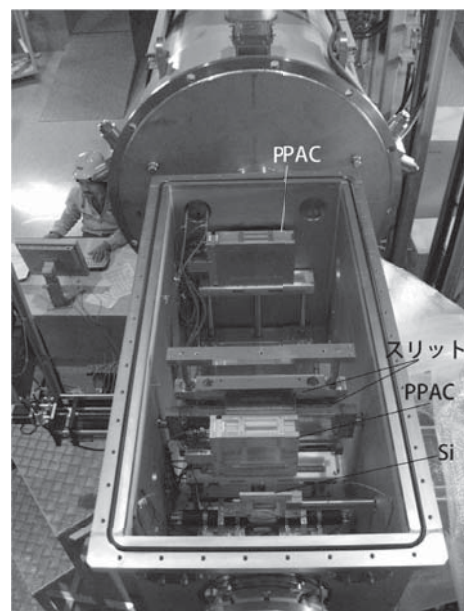


図7 F7焦点面チェンバーの上蓋を外した際の写真。位置検出用のPPAC検出器などが見えている。

Si 検出器が使われている。

各焦点面チェンバーはターボポンプとロータリーポンプの組み合わせからなる排気セットによって、真空中に保たれている。各焦点をむすぶ電磁石、ビームダクトにも原則 1 セクションに 1 台ずつの排気セットが配置されている。(ターゲット-F2 間は、ターゲット、F 1 チェンバーに真空排気セットがあるだけである。) 真空度は、ビームダクト内が約 1×10^{-5} Pa, 焦点面チェンバーが 1×10^{-4} Pa 程度である。

9. 粒子識別

先に述べたように BigRIPS において RI ビームの粒子識別は第二ステージでおこなわれる。BigRIPS の高次オーダーのイオン光学と F3, F5, F7 におかれた位置検出器によって、第二ステージ内の RI ビームの軌道再構築を行い、高精度で RI ビームの磁気剛性 ($B\rho$) を求めることが可能である。これに F3-F7 間の飛行時間 (TOF) およびに F7 に置かれた MUSIC 中のエネルギーロス (ΔE) をもとに、RI ビームの Z と A/Q が導出される。図 8 は、ウランビームの飛行核分裂で生成した RI ビームの A/Q と Z の 2 次元スペクトルである。図からビーム核子ごとに島状に分離しているのがわかる。下図は特定の Z ($Z=40$, Zn) を選んだ際の A/Q スペクトルである。高い A/Q 分解能のおかげで、非常に近い A/Q 値をもつ、裸の原子核と 1 個電子のついた水素状イオンとなっている原子核とがきれいに分離できていることがわかる。

10. RI ビームの生成実績

BigRIPS は 2007 年 3 月に完成し、345 MeV/核子の ^{86}Kr , ^{238}U ビームを用いてコミッションング実験が行われた。コミッションングに引き続き、同年 5~6 月には ^{238}U ビームを用いた新同位元素探索実験が行われた。この時のビーム強度は 0.007 pnA と非常に低いものだったが、 $^{125, 126}\text{Pd}$ の 2 つの同位元素を発見⁶⁾ することができた。2008 年には 2 度目の新同位元素探索実験をおこない、 ^{71}Mn から ^{152}Ba にわたる総計 45 個の新同位元素を発見⁷⁾ した。この時のビーム強度は 0.22 pnA で、現在得られている 10 pnA に比べれば、はるかに低い状況であった。それにもかかわらず、

多くの新同位元素が発見できたことは、BigRIPS の持つ高い RI ビーム生成能力・粒子識別能力によるところが大きい。図 9 に示す核図表において、これら発見された新同位元素は×印で示されている。

2008 年の実験では、新同位元素に加えて、新核異性体 (アイソマー) の探索も行った。全部で 54 種類の核異性体が観測され、そのうち 18 種類は新核異性体であった⁸⁾。

BigRIPS では、2007 年のコミッションング以

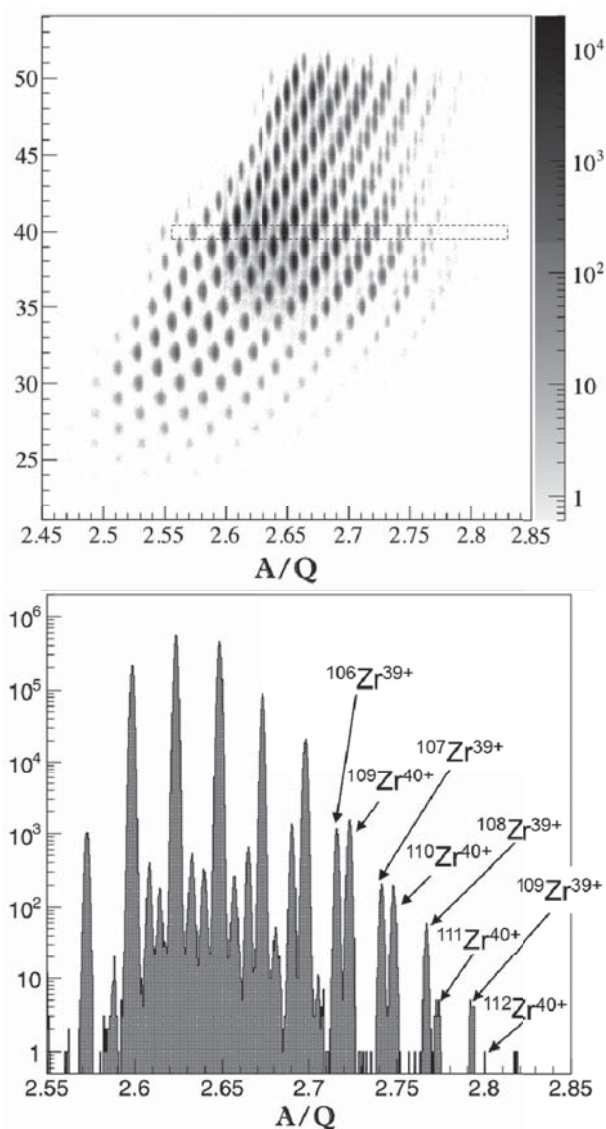


図 8 ウランビームの飛行核分裂反応によって得られた RI ビームの粒子識別のスペクトル。上図は Z と A/Q の 2 次元スペクトルで、下図は、上図の枠で囲った $Z=40$ (Zn) を選んだ際の A/Q のスペクトル。 ^{111}Zr と ^{112}Zr はこの実験で見つかった新同位元素である⁵⁾。

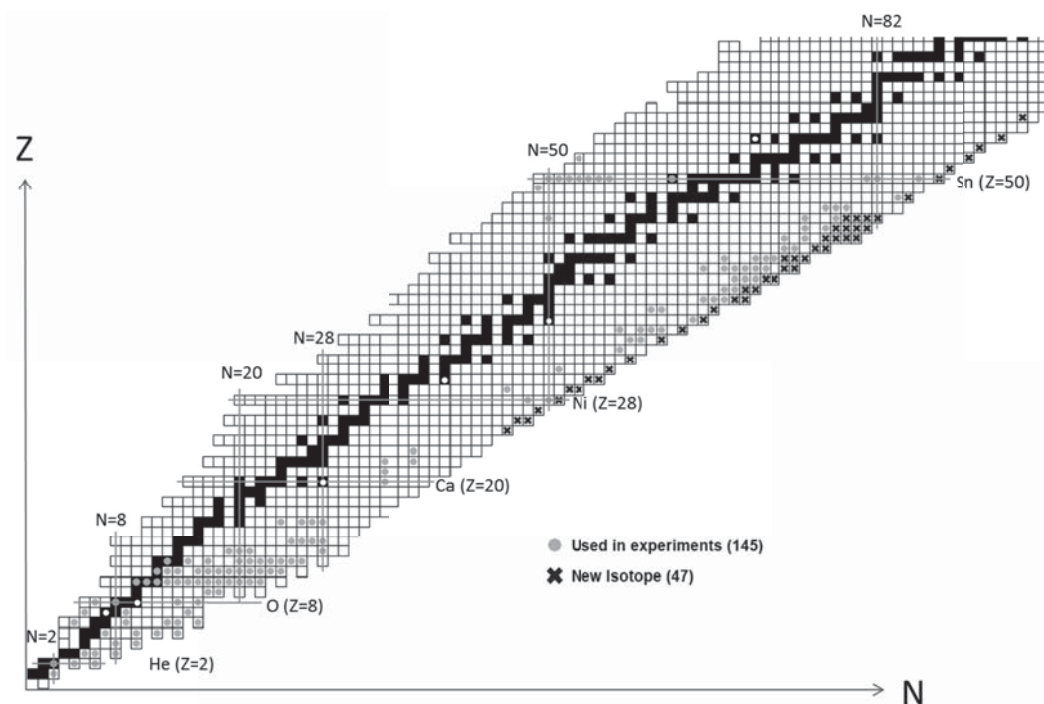


図9 BigRIPS で生成した RI ビームを核図表に示したもの。安定核は黒四角で表されている。これまでに 145 種の RI ビームが実験に使われている。また 47 種の新同位元素が発見^{6,7)}されている。

来 2012 年 12 月までの 6 年間で 62 回のビームタイムが行なわれた。この間に生成され実験に使われた RI ビームは 145 種類にのぼる。これらの核種は図 9 に示す核図表上で●印で示されている。これらの RI ビームの生成に使われた一次ビームの核種は ^4He , ^{14}N , ^{18}O , ^{48}Ca , ^{70}Zn , ^{86}Kr , ^{124}Xe , ^{238}U の 8 種類である。

11. ま と め

BigRIPS では、大口径の超伝導四極電磁石を使用することで大立体角を実現し、また分離分析器を 2 段重ねた構成は、第二ステージでビーム診断検出器を用いて RI ビームの磁気剛性を高精度で求めることを可能とした。このように BigRIPS は、高分解能かつ高い RI ビーム収集能力をもつ RI ビーム生成装置である。今後、加速器から得られるビーム強度の増加に伴って、BigRIPS はますますその優れた能力を発揮していくものと期待している。

参考文献

- 1) T. Kubo, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. 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) A. Yoshida, T. Suda, T. Ohtsuki, H. Yuki, and T. Kubo, Nucl. Instr. Meth. A590 (2008) 204.
- 5) Y. Yamanoi, K. Agari, H. Watanabe, et al., Proc. 4th Ann. Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (Wako, Japan, August 2007), p. 826.
- 6) T. Ohnishi et al., Journal of the Physical Society of Japan, 77 (2008) 083201.
- 7) T. Ohnishi et al., Journal of the Physical Society of Japan, 79 (2010) 073201.
- 8) D. Kameda et al., Phys. Rev. C 86 (2012) 054319.