講座

加速器施設における放射線管理

II. 理研 RI ビームファクトリーの放射線管理[†]

上 義 朋

独立行政法人 理化学研究所 仁科加速器研究センター 安全業務グループ
351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

Key Words : RIKEN Nishina Center, RIBF, accelerator health physics, heavy ion, ring cyclotron, superconducting cyclotron, radiation shielding, induced radioactivity, uranium acceleration

1. RI ビームファクトリーの概要

現在、理化学研究所仁科加速器研究センター・RI ビームファクトリー (RIBF) では、図 1 に示すように重イオン線形加速器 (RILAC) と 5 台のサイクロトロン [AVF サイクロトロン (AVF), 理研リングサイクロトロン (RRC), 固定周波数リングサイクロトロン (fRC), 中間段リングサイクロトロン (IRC), 超伝導リングサイクロトロン (SRC)] が稼動し、すべてが有機的に接続された加速器コンプレックスとなっている¹⁾。それぞれの加速器の諸元を表 1 に示す。従来からあるリニアック棟、仁科記念棟に加え、RIBF 加速器棟、RIBF 実験棟が最近新たに建設された。

リングサイクロトロンとは分離セクター型のサイクロトロンをいう。fRC は加速周波数が固定であるが、RILAC, AVF, RRC, IRC, SRC はすべて可変周波数である。SRC は写真 1 に示すように世界最大のサイクロトロンであり、超伝導の 6 セクター電磁石から構成されている。

磁場と放射線の遮へいを兼ねた厚さ 80 cm の鉄板を電磁石間に張っているため、全体は円筒形の鉄の塊に見える。鉄板はメンテナンスのために観音開きとなっている。

RIBF では H から U までのあらゆる元素を加速可能で、最大エネルギーは Fe までの比較的軽い元素で 400 MeV/u (/u は核子あたりのエネルギーであることを示す)、それより重い元素で 350 MeV/u である。U を加速する際は、RILAC, RRC, fRC, IRC, SRC の順にカスケードで加速する。軽い核では fRC を迂回する。重陽子では更に IRC も迂回し、AVF, RRC, SRC の 3 台だけを用いる。

重イオンビームをターゲットに照射すると、核破砕反応と核分裂反応によって元のイオンより軽いあらゆる核種が生成される。この核種はビームとほぼ同じ速度と方向を持って生成されるため、これを磁場とエネルギー減衰板を組み合わせで特定の原子番号と質量数の核種 (通常は放射性) を 2 次ビームとして取り出して実験に用いる。この RI ビーム²⁾生成装置は仁科記念棟と RIBF 加速器棟にあり、それぞれ RIPS (RIken Projectile-fragment Separator), BigRIPS とよんでいる。2 次ビームとして引き出される粒子はわずかであるため、加速したビームのほぼ 100% がここで止まる。BigRIPS はターゲットによって広がってしまう 2 次ビーム

[†]Radiation Control for Accelerator Facility.

II. Radiation Safety and Management at RIKEN RI Beam Factory (RIBF).

Yoshitomo UWAMINO: RIKEN, Nishina Center for Accelerator-Based Science, 2-1, Hirosawa, Wako-shi, Saitama Pref. 351-0198, Japan.

図1 RIBF 鳥瞰図

表1 加速器の諸元

加速器	加速粒子	最大エネルギー (MeV/u)	最大強度 (pμA*)
RILAC	He から U	6 から 1.5	10
AVF	H から Zr	15 から 6	30 から 15
RRC	H から U	210 から 15	1
fRC	Kr から U	51 (固定)	0.1
IRC	C から U	127 から 115	0.3 から 0.1
SRC	C から U	400 から 350	0.3 から 0.1

* 重イオンビームの強度を表す単位。「粒子 (particle) micro ampere」とよぶ。加速イオンが1価と仮定したときの電流に相当し、1 pμA=6.2×10¹² 粒子/秒である。

なおこの強度は文部科学省から得ている許可の数値であり、現実にはどのイオンでもこれに近い値が出るわけではない。

写真1 SRC 全景。電磁石の総重量は8100トン

表2 遮へい設計の線量基準値

項目	設計線量基準
管理区域内常時立入場所	1 mSv/週(25 μ Sv/h)
管理区域境界	1.3 mSv/3 月(2.6 μ Sv/h)
事業所境界	50 μ Sv/y
地中外壁の表面	1.3 mSv/h

を効率よく受け入れるため、超伝導 Q 電磁石を用いて大きなアクセプタンスを持っている。

RIBF 建設の第一の目的は、鉄より重い元素の起源の解明や新たな原子核モデルの構築である。これには高い強度の RI ビーム生成が不可欠であり、そのためには大強度の重イオンビームが求められ、RIBF はそれに応えるものである。RILAC は RRC への入射器として用いられるとともに、世界で初めて原子番号 113 の元素合成³⁾に成功するなど、超重元素合成の研究などにも単独で用いられている。AVF は単独で RI 生産や軽い核での不安定核ビームの生成などにも用いられる。2007 年度からは生産した RI の販売を開始した。RRC では偏極ビームや比較的軽い不安定核ビームを用いた原子核実験のほか、放射線育種、マルチトレーサの生成、宇宙船搭載機器試験などの学際的研究にも利用されている。

2. 放射線遮へい

遮へい設計⁴⁾の目標値となる線量基準値を表 2 に示す。事業所境界の値は和光市への約束[†]である。地下の建物外壁の値は、土が放射化によって放射性同位元素としての定義値を超えないことと、地下水を事業所境界で飲用した場合でも預託線量が年間 10 μ Sv を超えないための値である。他は法令のままである。

リニアック棟では 2001 年に加速エネルギーを上げた際、局所遮へいを置いて対応した。そのため実験によっては、ビーム輸送の調整が悪

いと想定外の場所でのビームロスの増加により管理区域境界への漏洩線量率が 2.6 μ Sv/h よりも若干高くなる場合があり、実験中の放射線測定は重要である。線量率が高い場合はビーム輸送の再調整や強度を下げる指示をする。ただし許可の上限に近いビームを用いる実験はまれであるため、積算線量では表 2 の限度をはるかに下回る。

仁科記念棟の遮へい外壁はコンクリートで 3 m 以上あるため、管理区域外への放射線漏洩はほとんど認められない。RIPS 実験ではまれに管理区域内の通路で 25 μ Sv/h を超えることがある。特に¹⁸O ビームのように中性子過剰核の場合に顕著である。その際は一部にロープを張り、立入禁止とする^{††}。

RIBF 棟では BigRIPS 周辺の遮へいが厚く、ビームダンプ上方では管理区域境界に対し全部で 7 m のコンクリート遮へいがある。写真 2 は BigRIPS 本体室物品搬入口の厚さ 2 m の遮へい扉である。

3. 残留放射能

運転開始から 20 年近く経過している AVF、RRC では残留放射能による線量が高い。それぞれのデフレクター表面における線量率の推移を図 2 に示す。原因となる核種は⁶⁵Zn などである。初期はビーム強度が小さいため値は小さいが、数年で急速に高くなった。その後もビーム強度は上がっているが、運転調整の上達からビームロスは抑えられ、線量率はほぼ一定になっている。

ビームエネルギーが高い RRC の方が線量率が高いが、AVF のデフレクターは表面の比放射能が大きく、メンテナンス時に汚染を生じやすい。そのためデフレクターをフィルムで覆うなどの措置をした上、写真 3 に示す防護服を着

[†] 50 μ Sv/y は明文化されたものではなく、従来から大規模な加速器施設建設に先立って行われてきた和光市への説明時に言及してきたものである。

^{††} 法令に基づく申請では通路の滞在は週 40 時間未満で評価している。実際の滞在時間も短時間であるため、25 μ Sv/h を超えても実質的な問題はない。立入禁止措置は注意喚起である。

写真2 BigRIPS 本体室遮へい扉。厚さ2m, 最小開口幅4mのコンクリート充填片持扉である

図2 AVFとRRCのデフレクターにおける表面線量率の推移

用し、室内汚染を防ぐために空調を停止して空気の流れを止めて作業している。

RIPSでの経験から、新しく建設したBigRIPSではメンテナンス時の被ばくを低減するため、比較的頻繁に行われるターゲット交換は遠隔操作で行えるシステムを設けている(写真4)。また電磁石は万一の交換時の被ばくを減らすため、真空槽の接続にはピローシールを使用するなど、比較的容易に脱着が可能な設計となっている。

写真3 デフレクター作業時の内部被ばく防止対策

4. インタロック、放射線モニタ

建設年代を反映し、リニアック棟のインタロックシステムはリレーを用いた完全なハードワ

写真4 BigRIPS ターゲット自動交換装置。左の真空チェンバーからターゲット一式を取り出し、レールを進んで一時保管箱に納める

写真5 入室安全キーに取り付けたタグ（左下）と管理区域入口に設けた、安全キー持ち出し防止のための警報ゲート

イヤで作られているが、仁科記念棟と RIBF 棟は PLC (Programmable Logic Controller) で制御している。三つの棟のシステムは完全に独

立している。

放射線モニタは中性子用、 γ 線用を一組として、事業所境界に 4 組、リニアック棟に 3 組、仁科記念棟に 20 組、RIBF 棟に 8 組設置している。仁科記念棟では照射室内にも設置しているため台数が多いが、他は照射室周辺や管理区域境界だけに設置している。RIBF 棟の加速器室周辺にはビームロスをモニタするため、比較的安全な中性子レムカウンタを 20 台設置し、出力をインタロック用 PLC に取り込んでいる。

RIBF 棟では各照射室に入退管理システムがないため、入室安全キーを設置した。不用意にキーが持ち帰られて運転不能になることを防ぐため、写真5に示すようにすべてのキーに持ち出し防止用のタグをつけ、管理区域の入り口に警報ゲートを設置している。これは商店で万引防止に広く用いられているシステムである。設置後いく度も警報が鳴っており、有効と思われる。

5. ウラン加速

加速に用いる U の量はわずかであるが、理研は過去の研究の経緯から「核原料物質、核燃

料物質及び原子炉の規制に関する法律（炉規法）」の許可施設となっている。したがってUの加速には炉規法と「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（障防法）」の両方の規制を受ける。U自体の危険性は炉規法の、Uを加速することによって生じる2次放射線の生成や放射化にともなう危険性は障防法の範疇と切り分けて申請等を行っている。

Uの取り扱いには放射能毒性よりも化学毒性に配慮する必要がある。 ^{238}U を吸入摂取した場合、年被ばく限度（20 mSv とする）に相当するのは3.5 kBq（0.28 g）であるが、化学毒性による体重60 kgの人の致死量は0.06 gから0.12 gとされている。

当初 ECR（Electron Cyclotron Resonance）イオン源には UF_6 ガスを供給して $^{238}\text{U}^{14+}$ を引き出していたが、現在では金属や酸化物などの固体Uを挿入して $^{238}\text{U}^{35+}$ を引き出している。 UF_6 を用いた場合は、高温の金属との反応でイオン源部品の表面に緑色の UF_4 が析出し、剥離しやすく汚染を生じやすいという難点があった。しかし固体Uを用いた場合はUが強固に固着するため取り扱いは比較的容易である。

ECR イオン源は定期的な分解清掃が必要である。その際には床の養生を行うなど、汚染の拡大防止策をとるとともに、内部被ばくを防ぐために作業者は写真3に示す保護具を装着する。

従来イオン源内に付着した不純物はサンドブラスタ等により物理的に削り取ることで除去していたが、U使用開始後は酸洗浄によって

化学的に湿式で除去している。

6. おわりに

仁科加速器研究センターではHからUまであらゆる元素を加速している。核子あたりのエネルギーが同じ場合、重イオンの方がビームパワーは各段に大きいため発熱の問題は厳しくなるが、飛程が小さくなるため2次中性子の生成や放射化の範囲は小さい場合がある。重い核での2次中性子生成は前方性が極めて強くなるなど、加速粒子とエネルギーによって状況は大きく異なる。今後 RIBF 棟でのビーム強度が上がってくるため、残留放射能対策が極めて重要になる。また放射線安全以外でも、超伝導電磁石ではHeの漏洩による窒息の危険性がある。安全には一時も気を抜くことができない。

文 献

- 1) Yano, Y., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **B261**, 1009-1013 (2007)
- 2) 谷畑勇夫, 宇宙核物理学入門, pp. 92-241, 講談社（ブルーバックス）, 東京（2002）
- 3) Morita, K., Morimoto, K., Kaji, D., Akiyama, T., Goto, S., Haba, H., Ideguchi, E., Kanungo, R., Katori, K., Koura, H., Kudo, H., Ohnishi, T., Ozawa, A., Suda, T., Sueki, K., Xu, H., Yamaguchi, T., Yoneda, A., Yoshida, A. and Zhao, Y.-L., *J. Phys. Soc. Jpn.*, **73**, 2593-2596 (2004)
- 4) Uwamino, Y., Fukunishi, N., Sakamoto, H. and Fujita, S., Safety Design of the Radioactive Isotope Beam Factory (RIBF) at RIKEN, SATIF-8, Pohang (May 2006)