

話 題

理研 RI ビームファクトリーにおける応用研究用
ラジオアイソトープの製造

羽場 宏光*

Production of Radioisotopes for Application Studies at RIKEN RI Beam Factory

Hiromitsu HABA*

Abstract

We are developing production technologies of radioisotopes (RIs) for application studies at RIKEN RI Beam Factory (RIBF). About 70 RIs produced at the AVF cyclotron have been used in research fields of physics, chemistry, biology, engineering, medicine, pharmaceutical and environmental sciences. Purified RIs such as ^{65}Zn and ^{109}Cd are delivered to universities and institutes through Japan Radioisotope Association. A gas-jet transport system was installed in the RIKEN gas-filled recoil ion separator at the heavy-ion linear accelerator as a novel technique for chemical studies of the heaviest elements. Perspectives of RI productions for application studies at RIBF are briefly introduced.

1. はじめに

ラジオアイソトープ (RI) は、トレーサーや放射線源として物理学、化学や生物学の基礎研究から医療、農業、工業などの応用分野にわたり幅広く利用されている。我々の研究グループでは、理研 RI ビームファクトリー (RI Beam Factory: RIBF) の重イオン加速器を用いて、RI 製造技術の高度化と様々な研究分野における RI 応用研究を推進している。表 1 に我々がこれまで製造応用してきた主な RI とその原子番号、半減期、製造に利用した加速器と原子核反応を示す。RIBF の AVF サイクロトロン (AVF) と理研重イオンリニアック (RIKEN Linear ACcelerator: RILAC) を用いて、ベリリウム (^7Be) から 107 番元素ボーリウム (^{266}Bh) に至る様々な元素の RI を製造しユーザーに供給している。一方、理研リングサイクロトロン (RIKEN Ring Cyclotron: RRC) では、核子当たり 135 MeV に加速した高エネルギー ^{14}N ビームを ^{nat}Ti (nat : 天然同位体存在比), ^{nat}Ag や ^{197}Au 標的に照射し、標的核の核破砕反応によって多数の RI を同時に製造することができる (マルチトレーサー)。マルチトレーサーの

製造技術と応用については、文献 1, 2) を参照いただきたい。本稿では、最近我々が AVF と RILAC を用いて製造応用している RI について解説する。

2. AVF サイクロトロンを用いた RI 製造

2.1 RI 製造装置

図 1 に AVF のビームラインに設置された RI 製造装置の概略図を示す。AVF でそれぞれ 14, 24, 50 MeV まで加速された陽子 (p), 重陽子 (d), アルファ粒子 (α) は、タンタル (Ta) スリットで ϕ 9 mm に整形され、厚さ 10 μm の Be 真空窓を通過し、ガスジェット多重標的チェンバー内で 6 mm の間隔を空けて並べられた厚さ数 μm の金属標的箔を最大で 6 枚貫く。加熱した石英管中で塩化カリウム (KCl) を昇華させ、ヘリウム (He) をキャリアーガスとして標的チェンバーに導入する。核反応の結果標的から反跳脱出した RI は He 中で停止され、エアロゾルに吸着し、テフロン細管 (内径 2 mm \times 長さ 10 m) を通って数秒のうちに照射室から上階のホットラボへ輸送される (ガスジェット法)。RI を含んだエアロゾルは、ホットラボのフード内でガラスフィルター

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

表 1 理研 RIBF で製造される応用研究用 RI.

RI	Z	Half-life	Accelerator	Nuclear reaction
⁷ Be	4	53.29 d	AVF	^{nat} Li(p,xn)
²⁶ Mg	12	20.91 h	AVF	²⁷ Al(α,3p)
⁴⁸ V	23	15.9735 d	AVF	^{nat} Ti(p,xn); ^{nat} Ti(d,xn)
⁴⁸ Cr	24	21.56 h	AVF	^{nat} Ti(α,xn)
^{52,54} Mn	25	5.591 d, 312.3 d	AVF	^{nat} Cr(p,xn)
⁶⁷ Cu	29	61.83 h	AVF	⁷⁰ Zn(p,α); ⁷⁰ Zn(d,αn)
⁶⁵ Zn	30	244.26 d	AVF	^{nat} Cu(p,xn); ^{nat} Cu(d,xn)
⁷⁵ Se	34	119.779 d	AVF	⁷⁵ As(p,n); ⁷⁵ As(d,2n)
⁸⁵ Sr	38	64.84 d	AVF	^{nat} Rb(p,xn); ^{nat} Rb(d,xn)
⁸⁸ Y	39	106.65 d	AVF	^{nat} Sr(p,xn); ^{nat} Sr(d,xn)
⁸⁵ Zr	40	7.86 min	AVF/RILAC	^{nat} Ge(¹⁸ O,xn)
^{88,89} Zr	40	83.4 d, 78.41 h	AVF	⁸⁹ Y(p,xn); ⁸⁹ Y(d,xn)
^{89m} Zr	40	4.18 min	AVF	⁸⁹ Y(p,xn); ⁸⁹ Y(d,xn)
^{88m,89a} Nb	41	7.8 min, 14.5 min	AVF/RILAC	^{nat} Ge(¹⁹ F,xn)
^{90m} Nb	41	18.81 s	AVF	^{nat} Zr(p,xn)
^{92m,95} Nb	41	10.15 d, 34.975 d	AVF	^{nat} Zr(p,X); ^{nat} Zr(d,X)
⁹⁰ Mo	42	5.67 h	AVF/RILAC	^{nat} Ge(²² Ne,xn)
^{93m} Mo	42	6.85 h	AVF	⁹³ Nb(p,n); ⁹³ Nb(d,2n); ^{nat} Zr(α,xn)
⁹⁹ Mo	42	65.94 h	AVF	⁹⁶ Zr(α,n)
^{93,94} Tc	43	2.75 h, 293 min	AVF	⁹³ Nb(α,xn)
^{95m} Tc	43	61 d	AVF	⁹⁵ Mo(p,n)
^{109m} Pd	46	4.696 min	AVF	^{nat} Pd(d,X)
^{104m,9} Ag	47	33.5 min, 69.2 min	AVF	^{nat} Pd(d,X)
¹⁰⁹ Cd	48	462.6 d	AVF	^{nat} Ag(p,xn); ^{nat} Ag(d,xn)
¹²⁴ I	53	4.1760 d	AVF	¹²⁴ Te(d,2n)
¹³⁹ Ce	58	137.640 d	AVF	^{nat} La(p,xn)
^{141m} Nd	60	62.0 s	AVF	¹⁴¹ Pr(d,2n)
¹⁶⁹ Hf	72	3.24 min	AVF/RILAC	^{nat} Gd(¹⁸ O,xn)
¹⁷⁵ Hf	72	70 d	AVF	^{nat} Lu(p,xn); ^{nat} Lu(d,xn)
¹⁷⁰ Ta	73	6.76 min	AVF/RILAC	^{nat} Gd(¹⁹ F,xn)
¹⁷⁷ Ta	73	56.56 h	AVF	^{nat} Hf(p,xn)
^{178a} Ta	73	2.36 h	AVF	^{nat} Hf(d,xn)
¹⁷⁹ Ta	73	1.82 y	AVF	^{nat} Hf(d,xn)
¹⁸² Ta	73	114.43 d	AVF	^{nat} Hf(α,X)
¹⁷³ W	74	7.6 min	AVF/RILAC	^{nat} Gd(²² Ne,xn)
¹⁷⁷ W	74	135 min	AVF	^{nat} Hf(α,X)
^{179m} W	74	6.40 min	AVF	^{nat} Ta(d,xn)
¹⁸¹ W	74	121.2 d	AVF	^{nat} Ta(p,xn)
¹⁷⁴ Re	75	2.40 min	RILAC	^{nat} Gd(²³ Na,xn)
¹⁸⁰ Re	75	2.44 min	AVF	^{nat} Ta(α,xn)
¹⁸³ Re	75	70.0 d	AVF	^{nat} W(d,xn)
¹⁸⁵ Os	76	93.6 d	AVF	^{nat} Re(p,xn)
^{188,189,191} Pt	78	10.2 d, 10.87 h, 2,802 d	AVF	^{nat} Os(α,xn)
²⁰³ Pb	82	51.873 h	AVF	^{nat} Tl(p,xn)
²⁰⁶ Bi	83	6.243 d	AVF	^{nat} Pb(p,xn)
²¹¹ At	85	7.214 h	AVF	²⁰⁹ Bi(α,2n)
²⁰⁶ Fr	87	15.9 s	RILAC	¹⁶⁹ Tm(⁴⁰ Ar,3n)
²⁰⁹ Fr	87	50.0 s	RILAC	¹⁹⁷ Au(¹⁸ O,6n)
²¹⁴ Ac	89	8.2 s	RILAC	¹⁹⁷ Au(²² Ne,5n)
²⁴⁵ Fm	100	4.2 s	RILAC	²⁰⁸ Pb(⁴⁰ Ar,3n)
²⁵⁵ No	102	3.1 min	AVF/RILAC	²³⁸ U(²² Ne,5n); ²⁴⁸ Cm(¹² C,5n)
²⁵⁵ Lr	103	22 s	RILAC	²⁰⁹ Bi(⁴⁸ Ca,2n)
²⁵⁷ Lr	103	0.646 s	AVF	²⁴⁸ Cm(¹⁴ N,5n)
²⁵⁹ Lr	103	6.3 s	AVF	²⁴⁸ Cm(¹⁵ N,4n)
^{261a,b} Rf	104	68, 2.6 s	AVF/RILAC	²⁴⁸ Cm(¹⁸ O,5n)
²⁶² Db	105	34 s	AVF/RILAC	²⁴⁸ Cm(¹⁹ F,5n)
^{265a,b} Sg	106	8.5, 14.4 s	RILAC	²⁴⁸ Cm(²² Ne,5n)
²⁶⁶ Bh	107	10.7 s	RILAC	²⁴⁸ Cm(²³ Na,5n)
Multitracer	<22		RRC	^{nat} Ti(¹⁴ N,X)
Multitracer	<29		RRC	^{nat} Cu(¹⁴ N,X)
Multitracer	<47		RRC	^{nat} Ag(¹⁴ N,X)
Multitracer	<72		RRC	^{nat} Hf(¹⁴ N,X)
Multitracer	<73		RRC	^{nat} Ta(¹⁴ N,X)
Multitracer	<79		RRC	¹⁹⁷ Au(¹⁴ N,X)
Multitracer	<83		RRC	²⁰⁹ Bi(¹⁴ N,X)

* Radioisotopes produced with the gas-jet system

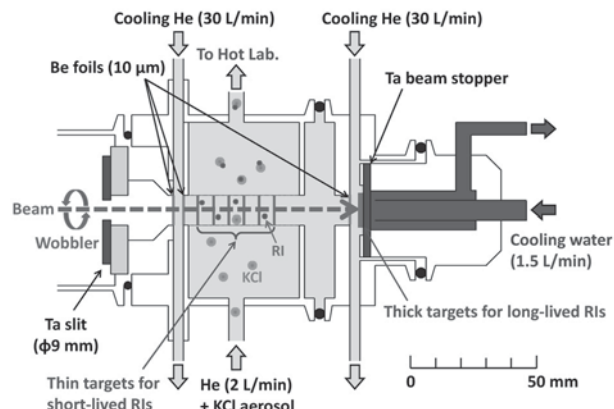


図 1 理研 AVF サイクロトロン のビームラインに設置された RI 製造装置の概略図.

に捕集され、これを任意の溶液に溶解することによって直ちに利用可能なトレーサー溶液となる。ガスジェット法の利点は、①標的物質から RI の化学分離が不要であり、②半減期が数秒程度の短寿命 RI まで研究に利用できること、③蒸着法や電着法によって周期表上の様々な元素の化合物を標的にできること、④異なる標的を組み合わせることにより多元素同時分析が可能なマルチトレーサーを製造できること、また、⑤標的中のビームのエネルギー損失が小さいため、下流で長寿命 RI を同時に製造できること、などが挙げられる。

ガスジェット多重標的を抜けたビームは Be 窓を通過し、Ta ビームストッパーに固定された標的を照射する。ここでは、標的が水 (1.5 L/min) と He (30 L/min) で効率的に冷却されるため、比較的厚い標的を用いた長寿命 RI の大量製造が行われる。通常は、*p*, *d*, *α* それぞれ 20, 10, 10 μA のビーム電流で RI 製造が行われている。AVF のビームエネルギーは、静電型ピックアップ³⁾を用いて、1%以下の精度で決定されている。融点の低い標的は、ビームライン上流に設置されたビームウォブラーでビーム軸を回転させることにより、局所的な発熱を抑えて照射することができる。

2.2 RI 製造技術の高度化研究

理研 RI の開発と応用研究の詳細は、RIKEN Accelerator Progress Report[†], Radiochemistry and Nuclear Chemistry の節を参照いただきたい。我々は、ユーザーの利用目的に合った壊変特

[†] <http://www.nishina.riken.jp/researcher/APR/>

性（放射線の種類とエネルギー，半減期）をもつ RI を RIBF の加速器で効率的に製造するため，まず核反応過程（イオンビーム種，ビームエネルギーや標的）を検討する。目的の RI を定量的に製造し，副反応生成物を低減する上で，核反応励起関数が必要である。我々は，マレーシアマラヤ大学，北海道大学，ハンガリー原子核研究所 (ATOMKI)，国際原子力機関 (IAEA) と協力し，AVF を用いて有用 RI 製造のための励起関数の精密測定や理論計算コードの検証を進めている⁴⁻⁹⁾。

100 W を超えるビーム出力で RI 製造を行う場合，標的の技術開発が非常に重要である。特に高価で少量の濃縮同位体や融点の低い物質を照射する場合は，冷却効率の高い照射チャンバーの開発，標的物質の化学形や形状を最適化する必要がある。照射後は，標的物質や副反応生成物から目的の RI を化学分離し，精製 RI としてユーザーに提供する。ここでは，RI の品質，化学収率，分離時間，作業者の被曝などを考慮して化学分離法の開発を進めている。精製 RI の放射能と放射性核種純度は，ゲルマニウム (Ge) 半導体検出器を用いた γ 線スペクトロメトリー，シリコン (Si) 半導体検出器を用いた α スペクトロメトリー，比放射能と化学的純度は誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS) を用いて評価している。

2.3 RI 応用研究

核化学の分野では，近年，新しく発見された元素（超重元素，原子番号 104 以上）の未知の化学的性質を調べる研究が精力的に進められている。^{85,88,89m,89g}Zr, ^{88m,88g,90m,92m,95}Nb, ^{90,93m}Mo, ^{93,94,95m}Tc, ^{109m}Pd, ^{104m,104g}Ag, ^{169,175}Hf, ^{170,177,178a,179,182}Ta, ^{173,177,179m,181}W, ^{174,180,183}Re, ¹⁸⁵Os は，104 番元素ラザホージウム (Rf)，105 番元素ドブニウム (Db)，106 番元素シーボーギウム (Sg)，107 番元素ボーリウム (Bh)，108 番元素ハッシウム (Hs)，110 番元素ダームスタチウム (Ds)，111 番元素レントゲニウム (Rg) の周期表上の軽い同族元素で，超重元素を模擬した基礎化学実験，迅速単一原子化学分析装置の開発などに用いられている。AVF では，102 番元素ノーベリウム ²⁵⁵No, ^{261a}Rf や ²⁶²Db などの重・超アクチノイド元素の RI がガスジェット法を用いて製造されている。ホットラボにおいて，日本原子力研究開発機構の自動迅速液体クロマ

トグラフ装置 (Automated Rapid Chemistry Apparatus: ARCA)¹⁰⁾ や大阪大学の自動沈殿線源作成装置 (CHINden: CHIN)¹¹⁾，自動バッチ式固液抽出装置 (AutoMated Batch-type solid-liquid Extraction apparatus for Repetitive experiments of transactinides: AMBER)¹²⁾ などの化学分析装置と理研の自動迅速 α /SF 計測装置¹³⁾ (SF: Spontaneous Fission ; 自発核分裂) を用いて，新元素の化学的性質の研究が行われている。

²⁸Mg, ⁴⁸V, ^{52,54}Mn, ⁶⁷Cu, ⁶⁵Zn, ⁷⁵Se, ⁸⁸Y, ^{89g}Zr, ⁹⁹Mo, ¹⁰⁹Cd, ¹²⁴I, ^{188,189,191}Pt, ²⁰³Pb, ²⁰⁶Bi, ²¹¹At は，生物学，薬学，医学分野において，生体微量元素の代謝研究，RI 分子イメージングや RI 内用療法のための基礎研究に利用されている。⁸⁸Zr, ^{95m}Tc, ⁹⁵Nb, ¹⁰⁹Cd, ¹⁷⁵Hf, ¹⁷⁹Ta は元素の環境動態研究，⁸⁵Sr は福島第一原子力発電所事故に関わる除染技術開発や放射線検出器開発などに利用されている。

2.4 RI 頒布事業

理研加速器技術の社会貢献を目的として，2007 年 10 月より AVF で製造される ⁶⁵Zn ならびに ¹⁰⁹Cd の精製 RI を日本アイソトープ協会の協力を経て有償で頒布している¹⁴⁾。2015 年 10 月末までの頒布実績として，⁶⁵Zn は 86 件で，合計放射能が 480.2 MBq, ¹⁰⁹Cd は 33 件で 192.15 MBq である。理研 RI の利用者は年々増加し，現在までに 30 機関を超える大学及び研究所に頒布され，国内の基礎研究を支えつつある。新規 RI の開発・頒布の要望も多数届いており，2010 年に ⁸⁸Y, 2015 年に ⁸⁵Sr の頒布を開始している。

近年，次世代の核医学診断・治療用 RI として，⁶⁷Cu の頒布が切望されている。我々は，AVF で 24 MeV に加速した重陽子を高濃縮 ⁷⁰Zn 同位体標的に照射し，⁷⁰Zn(*d,an*)⁶⁷Cu 反応による ⁶⁷Cu の製造技術開発を進めている¹⁵⁾。

3. RILAC を用いた RI 製造

3.1 GARIS ガスジェットシステム

RILAC からの世界最大強度の重イオンビームを用いれば，113 番元素 (²⁷⁸113)¹⁶⁾ をはじめとする様々な超重元素の RI を製造することができる。我々の研究グループでは，理研で次世代の超重元素化学研究を展開することを目標に，理研気体充填型反跳核分離装置 (GAs-filled Recoil Ion

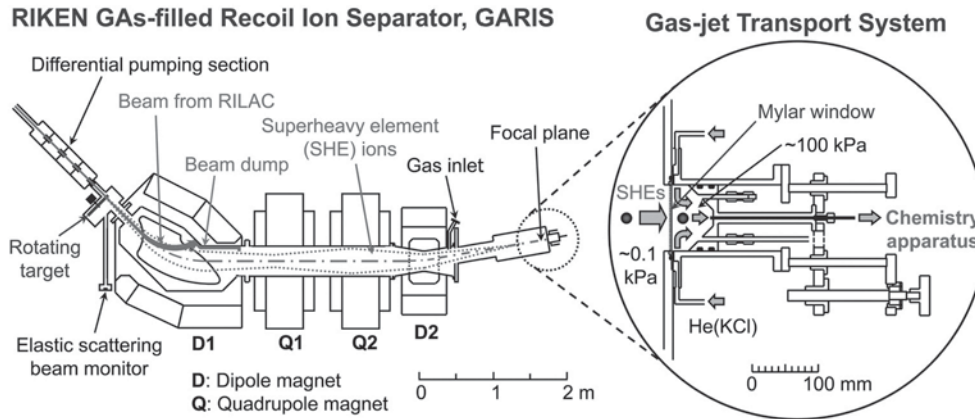


図2 理研気体充填型反跳核分離装置 (GARIS) に結合したガスジェット搬送装置。

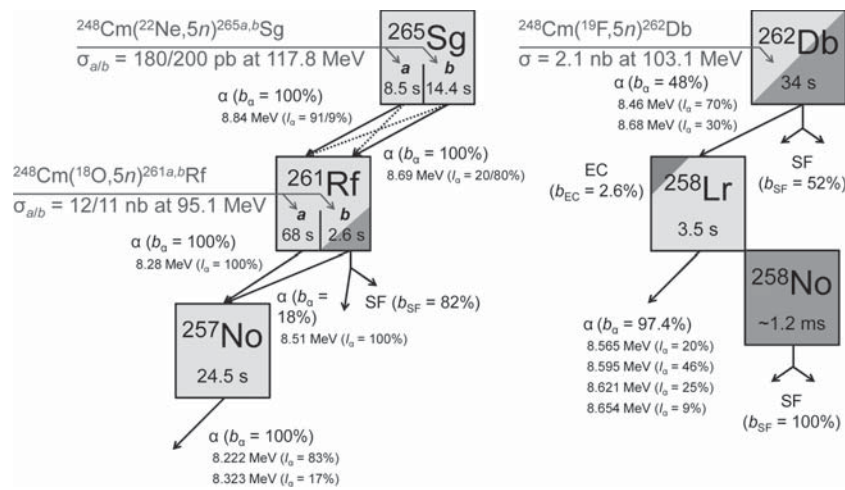


図3 GARIS ガスジェットシステムによって製造できる超重元素 RI の核反応断面積と壊変様式。

Separator: GARIS) で分離された超重元素の RI をホットラボに引き出すためのガスジェットシステムの開発を進めてきた¹⁷⁻¹⁹⁾。本システムの概念図を図2に示す。まず RILAC で加速された重イオンと標的核の核融合反応によって超重核が合成される。GARIS の中は、50 Pa 程度の希薄な He で満たされている。標的から反跳脱出した超重元素イオンは、He 原子と衝突を繰り返し、その電荷状態はある平衡電荷を中心として分布する。その後、GARIS の4つの電磁石 (D: 双極子電磁石; Q: 四重極電磁石) によってビームや副反応生成物から分離され、焦点面に収束される。超重元素イオンは、厚さ約 1 μm のマイラー (ポリエチレンテレフタレート) 真空隔壁を通過し、ガスジェットチャンバー内で He ガス中に停止され、KCl のエアロゾルとともにテフロン細管 (内径 2.0 mm × 長さ 10 m) を通って数秒でホット

ラボに搬送される。

我々は、GARIS ガスジェットシステムを用いて、化学実験に利用できる長寿命の ^{261a}Rf, ²⁶²Db, ^{265a,b}Sg をそれぞれ ²⁴⁸Cm (¹⁸O, 5n) ^{261a}Rf, ²⁴⁸Cm (¹⁹F, 5n) ²⁶²Db, ²⁴⁸Cm (²²Ne, 5n) ^{265a,b}Sg 反応によって合成し、ホットラボまで引き出し、回転式連続 α/SF 測定装置 (Measurement system for Alpha-particle and spontaneous fission events ON line: MANON) を用いて合成と壊変データの取得を行った²⁰⁻²²⁾。図3に我々が取得した ^{261a}Rf, ²⁶²Db, ^{265a,b}Sg の反応断面積と壊変様式を示す。^{261a}Rf, ²⁶²Db, ^{265a,b}Sg の生成率は、化学実験室においてそれぞれ僅か 0.5 原子/分, 5 原子/時間, 1 原子/時間であるが、これらは世界最高の生成率である。

3.2 GARIS が拓く新元素の化学

生成率が極めて小さくかつ短寿命の超重元素の

化学研究において、GARIS ガスジェットシステムは、①低放射線バックグラウンド下における化学実験、②大強度ビームの利用とガスジェット搬送効率の増大、③多様な化学反応の実現など、数々のブレイクスルーが期待されている²³⁾。

気相系の化学実験においては、重イオンビームがGARISで除去されるので、ガスジェットチャンバー内に直接化学試薬を導入して高効率かつ迅速に錯形成とガスクロマトグラフ分離を行うことができる。有機系の錯形成試薬を重イオンビームに破壊されることなく使用可能となり、研究対象とできる超重元素化合物の種類を飛躍的に増大できる。最近、我々はドイツマインツ大学、ドイツ重イオン科学研究所ほか12機関との国際共同実験によって、超重元素領域では初となる有機金属錯体 Sg (CO)₆ の化学合成を行い、その揮発性を低温ガスクロマトグラフ装置を用いて分析し、Sg が周期表第6族に特徴的な化学的性質をもつことを見出した²⁴⁾。

GARIS ガスジェット法では、超重元素の放射線計測においてバックグラウンドとなる副反応生成物を分離除去できるため、液体シンチレーション計数装置を用いた溶液化学実験が可能となる。液体シンチレーション計数装置の α 線やSF片に対する検出効率はほぼ100%で、これは従来Si検出器を用いた場合(約30%)の約3倍である。106番元素Sg以降の超重核の同定には、その娘核との α - α や α -SF時間相関事象を観測することが必須であるが、液体シンチレーション計数装置を用いることにより、相関事象の検出効率を従来の約9%から100%へ大きく向上させることが

できる。さらに α /SF線源調製のために溶液試料を蒸発乾固する必要がなく、化学分離後直ちに放射線計測を開始できる。我々は、半減期10秒程度の^{265a,b}Sgや²⁶⁶Bhを対象とした世界初の溶液化学研究を目指し、図4に示した新しい迅速単一原子溶媒抽出装置の開発に取り組んでいる²⁵⁾。本装置は、連続溶液化装置(Membrane DeGasser: MDG)、フロー溶媒抽出器(Flow Solvent Extractor: FSE)、液体シンチレーション検出器から成る。RIを吸着したエアロゾルは、MDGによって水溶液と連続的に混合、溶解され、Heはメンブレンフィルター(テフロン膜)を通して除去される。その後、水溶液はFSEにおいて有機溶媒と混合され、RIはテフロン管(内径0.5 mm×長さ5-100 cm)内で有機溶媒に抽出される。最終的に、混合溶媒はメンブレンフィルターを装着した相分離器を用いて水相と有機相に分離され、フロー式液体シンチレーション計数装置を用いて超重元素RIの α 線及びSF片が検出される。

3.3 大強度 α ビームを利用した²¹¹At製造

近年、内用療法で期待される α 放出体アスタチン-211(²¹¹At)のニーズが高まっている²⁶⁾。 α 線は生体組織内での飛程が β 線に比較して短く、高い線エネルギー付与であるために細胞毒性が高く、播種性のがんや血液由来のがんまたは微小転移がん、手術後の部位に残存する微小がんの治療に有効であると考えられている²⁶⁾。²¹¹Atは、通常サイクロトロンで加速された α 粒子を用いて、²⁰⁹Bi($\alpha, 2n$)²¹¹At反応によって製造される。製造に最適なビームエネルギーは、副反応生成物であ

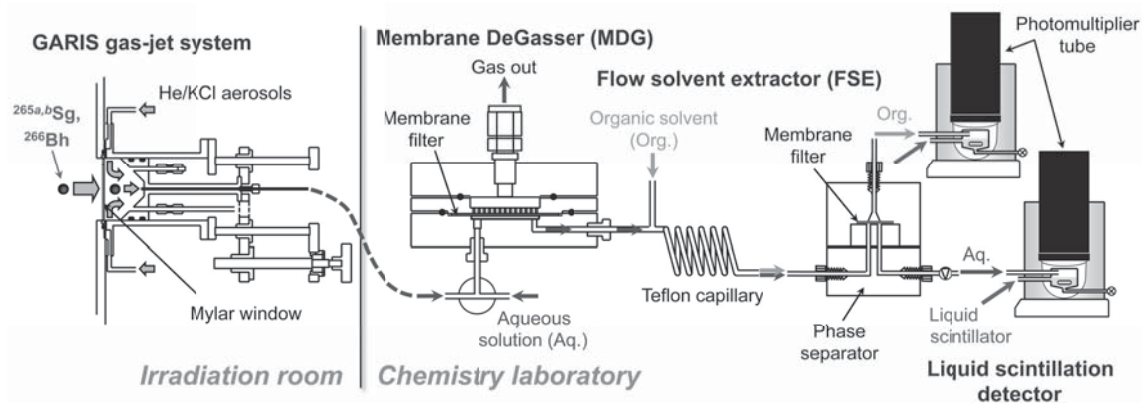


図4 GARIS ガスジェットシステムに結合した迅速単一原子溶媒抽出装置の概念図。

る ^{210}At (電子捕獲壊変により長寿命の ^{210}Po が生成) の生成量を低く抑えるため、約 28 MeV とされている²⁶⁾。RILAC は、 ^{211}At 製造に最適な 28 MeV の α ビームを世界最大強度 (0.5 mA) で加速できると期待されており、我々は、RILAC を利用した ^{211}At の国内安定供給体制の確立を目指し、現在 AVF を用いて ^{211}At の製造技術開発を進めている。

4. おわりに

1937 年、仁科芳雄博士は、理研に日本初のサイクロトロンを建設した。仁科博士は、翌年、早速このサイクロトロンで製造した RI をトレーサーとして利用し、化学や生物学の応用研究を開始した²⁷⁾。我々は、仁科博士時代からの RI 製造応用の伝統を受け継ぎ、今後も RIBF の特徴を生かした RI 製造技術開発を行い、我が国の RI 利用と普及に貢献していきたいと考えている。

現在我が国で利用されている RI の多くは輸入に頼り、①短寿命 RI の利用に限られる、②研究で新たな RI が必要なときに早急な対応が困難である、③海外の製造所あるいは輸送中のトラブルで入手に支障をきたす、④海外製造所における一方的な製造中止により研究に重大な支障をきたす、などの多くの問題を抱えている。このような状況の中、国内に安定した RI 供給体制を構築することが重要かつ緊急な課題となっている²⁸⁾。我が国には RI 製造に利用できる世界最先端の加速器がいくつもある。今後は、それぞれの加速器施設の特徴を生かしつつ、RI 利用者と密に意見交換を行いながら、有用 RI の国産化と効率的な RI 製造供給ネットワークを構築していくことが重要である。また、RI 製造業務に携わる研究者・技術者は非常に不足しており、核・放射化学分野における人材育成は今後ますます重要である。

謝 辞

本稿で解説した RI 製造応用研究は、理研仁科加速器研究センターと東京大学原子核科学研究センターによって共同運営される理研 RIBF において行われたものです。本研究は、理研仁科加速器研究センター、日本アイソトープ協会技術部、岡山大学薬学部、理研ライフサイエンス技術基盤研究センター、日本原子力研究開発機構先端基礎研

究センター、大阪大学大学院理学研究科、東北大学電子光学研究センター、首都大学東京理工学研究科、金沢大学理工学域、新潟大学理学部化学科、広島大学大学院理学研究科、筑波大学数理物質系、国際原子力機関理化学部、マレーシアマラヤ大学物理学科、ハンガリー原子核研究所、ドイツ重イオン科学研究所超重元素化学グループ、ドイツマインツ大学核化学研究所、ドイツヘルムホルツ研究所マインツ、中国科学院近代物理研究所核化学研究チーム、スイスポールシェラー研究所放射化学・環境化学研究室、スイスベルン大学化学・生物化学研究科、アメリカカリフォルニア大学バークレー校化学科、アメリカローレンスバークレー国立研究所との共同研究であり、共同研究者の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) H. Haba et al., "Development of a Gas-jet-coupled Multitarget System for Multitracer Production", *Radiochim. Acta* **93**, 539-542 (2005).
- 2) 榎本秀一, 羽場宏光, "マルチトレーサの開発と利用", *Isotope News* 8月号, 9-15 (2008).
- 3) 渡邊環ほか, "RI-BFにおける静電型ピックアップを用いたビームエネルギー測定システムの開発", *Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, pp. 1198-1201 (2015).
- 4) M. U. Khandaker et al., "Excitation Functions of (d,x) Nuclear Reactions on Natural Titanium up to 24 MeV", *Nucl. Instr. and Meth. B* **296**, 14-21 (2013).
- 5) M. U. Khandaker et al., "Activation Cross-sections of Deuteron-induced Nuclear Reactions on Natural Iron up to 24 MeV", *Nucl. Instr. and Meth. B* **316**, 33-41 (2013).
- 6) M. U. Khandaker et al., "Investigation of (d,x) Nuclear Reactions on Natural Ytterbium up to 24 MeV", *Nucl. Instr. and Meth. B* **335**, 8-18 (2014).
- 7) M. U. Khandaker et al., "Deuteron-induced Activation Cross-sections on Natural Copper up to 24 MeV", *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **302**, 759-764 (2014).
- 8) M. U. Khandaker et al., "Production Cross-sections of Long-lived Radionuclides in Deuteron-induced Reactions on Natural Zinc up to 23 MeV", *Nucl. Instr. and Meth. B* **346**, 8-16 (2015).
- 9) M. U. Khandaker et al., "Excitation Functions of Deuteron-induced Nuclear Reactions on Natural Platinum up to 24 MeV", *Nucl. Instr. and Meth. B* (in press).
- 10) Y. Nagame et al., "Chemical Studies on Rutherfordium (Rf) at JAERI", *Radiochim. Acta* **93**, 519-526 (2005).
- 11) Y. Kasamatsu et al., "Cocprecipitation Behaviors of

- Zr, Hf, and Th with Sm Hydroxide for Chemical Study of Element 104, Rf”, *J. Nucl. Radiochem. Sci.* **14**, 7-11 (2014).
- 12) Y. Kasamatsu et al., “Development of an Automated Batch-type Solid-liquid Extraction Apparatus and Extraction of Zr, Hf, and Th by Triisooctylamine from HCl Solutions for Chemistry of Element 104, Rf”, *Radiochim. Acta* **103**, 513-521 (2015).
 - 13) H. Haba et al., “Automated Rapid α /SF Detection System for Studying Aqueous Chemistry of Superheavy Elements at RIKEN”, *RIKEN Accel. Prog. Rep.* **45**, 204 (2012).
 - 14) 神原正, “理化学研究所 RI ビームファクトリーにおける RI 製造”, *Isotope News* 2月号, 17-20 (2008).
 - 15) 矢納慎也ほか, “ $^{70}\text{Zn}(d,\alpha n)^{67}\text{Cu}$ 反応による ^{67}Cu の製造”, 2015 日本放射化学会年会・第 59 回放射化学討論会, 2015 年 9 月 25 日, 仙台市.
 - 16) K. Morita et al., “New Result in the Production and Decay of an Isotope, $^{278}113$, of the 113th Element”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 103201 (2012).
 - 17) H. Haba et al., “Development of Gas-jet Transport System Coupled to the RIKEN Gas-filled Recoil Ion Separator GARIS for Superheavy Element Chemistry”, *J. Nucl. Radiochem. Sci.* **8**, 55-58 (2007).
 - 18) H. Haba et al., “Performance of the Gas-jet Transport System Coupled to the RIKEN Gas-filled Recoil Ion Separator GARIS for the $^{238}\text{U}(^{22}\text{Ne},5n)^{255}\text{No}$ Reaction”, *J. Nucl. Radiochem. Sci.* **9**, 27-31 (2008).
 - 19) H. Haba et al., “RIKEN Gas-filled Recoil Ion Separator GARIS as a Promising Interface for Superheavy Element Chemistry –Production of Element 104, ^{261}Rf , Using the GARIS/Gas-jet System—”, *Chem. Lett.* **38**, 426-427 (2009).
 - 20) H. Haba et al., “Production and Decay Properties of the 1.9-s Isomeric State in ^{261}Rf ”, *Phys. Rev. C* **83**, 034602 (2011).
 - 21) H. Haba et al., “Production of ^{262}Db in the $^{248}\text{Cm}(^{19}\text{F},5n)^{262}\text{Db}$ Reaction and Decay Properties of ^{262}Db and ^{258}Lr ”, *Phys. Rev. C* **89**, 024618 (2014).
 - 22) H. Haba et al., “Production of ^{265}Sg in the $^{248}\text{Cm}(^{22}\text{Ne},5n)^{265}\text{Sg}$ Reaction and Decay Properties of Two Isomeric States in ^{265}Sg ”, *Phys. Rev. C* **85**, 024611 (2012).
 - 23) 羽場宏光, “GARIS が拓く新元素の化学”, *放射化学* **30**, 7-18 (2014).
 - 24) J. Even et al., “Synthesis and Detection of a Seaborgium Carbonyl Complex”, *Science* **345**, 1491-1493 (2014).
 - 25) Y. Komori et al., “Development of a Rapid Solvent Extraction Apparatus for Aqueous Chemistry of the Heaviest Elements”, 5th International Conference on the Chemistry and Physics of the Transactinide Elements (TAN15), 29 May, 2015, Urabandai, Fukushima, Japan.
 - 26) 鷺山幸信, “アイソトープ治療のためのアルファ放射体の製造”, *放射化学* **32**, 11-33 (2015).
 - 27) 斎藤信房, “仁科芳雄博士とアイソトープ”, *放射化学ニュース* **3**, 6-9 (2000).
 - 28) 日本学術会議 基礎医学委員会・総合工学委員会合同放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会, “提言 我が国における放射性同位元素の安定供給体制について”, 2008 年 7 月 24 日.