

資 料

世界のアイソトープ生産・供給の現状†

梅澤弘一

日本アイソトープ協会
113-8941 東京都文京区本駒込 2-28-45

1999年10月29日 受理

Key Words: isotope, radioisotope (RI), stable isotope (SI), production, supply, nuclear reactor, accelerator, isotope separation

アイソトープは、さまざまな分野での研究開発から医学診療、工業計測、非破壊検査、放射線加工等の産業にもわたり広く使用されている。これらの利用に供される多様な製品の原料となるラジオアイソトープ (RI) および安定アイソトープ (SI) の生産・供給について、世界の現状を概観する。

1. ラジオアイソトープ (RI) の生産と供給

1-1 概要

RI は、一般に原子炉または加速器によって製造されるが、ある種の RI は核燃料サイクルからの副産物として得られる。現在、世界では 318 基の研究用原子炉が稼働しているが、10 MW 以上の出力の炉は 45 基のみであり、そのうち 33 基はすでに 30 年以上経過している。先進諸国の研究用原子炉は、多く老朽化して廃止されている。新しい研究用原子炉の建設は、原子力先進国よりはむしろ開発途上国、特にアジア地域で多く進められている。表 1 に、世界で RI 製造に使用されている主要な研究用原子炉を示す。

滅菌等放射線加工処理用線源にする ^{60}Co は、

表 1 RI 製造に使用されている世界の主要な研究用原子炉

国 名	原子炉名	熱出力 (MW)
ベルギー	BR2	100
フランス	OSIRIS	70
ハンガリー	BRR	10
オランダ	HFR	45
スウェーデン	R-2	50
ポーランド	MARIA	30
ロシア	SM-3	100
	MIR/M1	100
	IR-8	8
	(Mayak)	30
	(Mayak)	30
カナダ	NRU	135
	MNR	5
米 国	ATR	250
	HFBR	30
	HFIR	100
	ACRR	2
	MURR	10
中 国	HFETR	125
	HWRR-II	15
インド	DHRUVA	100
インドネシア	GAS-MPR	30
日 本	JRR-3M	20
	JRR-4	3.5
	JMTR	50
韓 国	HANARO	30
アルゼンチン	RA-3	2.8
オーストラリア	HIFAR	10
南アフリカ	SAFARI-1	20

() : サイト名

† Production and Supply of Isotopes in the World. Hirokazu UMEZAWA: Japan Radioisotope Association, 2-28-45, Honkomagome, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8941, Japan.

発電用原子炉 (CANDU 炉) またはそれに類した大規模の原子炉で原料コバルトスラグを照射して製造する。最大の供給元は、カナダのノルデオン (MDS Nordion) である。次いで MAYAK (ロシア)、小規模には CANDU 炉のあるアルゼンチン等で製造されている。この線源に使う ^{60}Co の比放射能は低い (50–100 Ci/g) が、放射能は大 (線源 1 本当たり 1 万 Ci) である。CANDU 型発電炉は、現在カナダで 22 基、その他に 12 基稼働している。

医療用 ^{60}Co 線源の原料は、高比放射能 (200–400 Ci/g) であることが必要なので、高中性子束で照射しなくてはならない。現在製造できるところが少なく、供給不足気味になっている。

医療用および工業用線源として利用される ^{192}Ir は、各所でかなり製造されているが、このような場合、原子炉は製造の当事者でなく製造者へ照射サービスを提供するものである。 ^{192}Ir の半減期が 74 日であるため、線源の製造に当たっては適時の照射サービスを確保することが重要である。照射したイリジウムディスクをまとめて外国から入手するには、B 型輸送物としての航空輸送が必要になる。

非密封で使用される RI で最も重要なものは、 ^{99}Mo である。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ジェネレータまたは $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 製薬の原料として需要がある。 ^{99}Mo は半減期 66 時間であるため、毎週定期的な生産・供給が要求される。高濃縮ウランを照射して核分裂生成物から分離するもので、大量製造できる所は限られている。現在、日本は、全量カナダ (MDS Nordion) に依存している。カナダに次ぐ ^{99}Mo の製造供給元は、ベルギーの IRE と南アフリカ原子力公社であり、この 2 者はコンソーシアムをつくっている。オランダ所在のマリンクロットも同程度の規模で製造しているが、自社用製品が主である。

^{99}Mo の副生として ^{131}I と ^{133}Xe を得る。そのほか原子炉で生産する主要な RI は、 ^{14}C , ^{32}P , ^{33}P , ^{35}S , ^{89}Sr , ^{125}I , ^{131}I , ^{153}Sm , ^{169}Yb , ^{198}Au 等であ

る。

使用済み核燃料の再処理等、核燃料サイクルからの副生として得られる主な RI は、 ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{147}Pm , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{241}Am その他の超ウラン元素である。

トリチウム (T , ^3H) は、CANDU など重水を使用している原子炉の重水の精製プロセスから回収するか、濃縮リチウム-6 を原子炉照射して生産される。後者は軍事用生産が主である。

^{252}Cf は、キュリウム等の重元素を高中性子束の原子炉で照射して製造する。原子炉のみならず照射ターゲット処理施設の制約から、米国とロシアでしか製造されない。

加速器による RI 生産は、研究用加速器による場合と専用加速器による場合がある。前者は、主に高エネルギー陽子加速器で、通常の RI の外に安定核から離れたもの、 ^{82}Sr 等が製造される。表 2 に RI 製造を行っている主要な研究用加速器を示す。RI 生産専用加速器は、たいがいサイクロトロン (陽子 30 MeV 程度) で、放射性医薬品の原料に使用される ^{67}Ga , ^{81}Rb , ^{111}In , ^{125}I , ^{203}Tl 等を定常生産している。世界で

表 2 RI 製造を行っている世界の主要な研究用加速器

国 名	研究施設	加速器 (名称/型式)
ベルギー	UCL	CYCLONE
	Gent University	CGR-520
フィンランド	Jyvaskia University	K-130
	ABO. AKAD	MGC-20
ハンガリー	ATOMKI	MGC-20E
イタリア	JRC-AMI	MC-40
ノルウェー	Oslo University	MC-35
スイス	PSI	SIN
ロシア	CYCLOTRON	U-150-1
カザフスタン	INP	KVEIC
カナダ	TRIUMF	TRIUMF
米 国	LANL	LAMPF
	BNL	BLIP
インド	VECC	SSC
南アフリカ	NAC-FRD	SSC
総 数		15基

稼動している医療用 RI 製造専用のサイクロトロンを表 3 に示す。

PET 用 RI は、10 分程度の短寿命であるため、現場に小型の専用サイクロトロン（陽子 15 - 18 MeV 程度）を設置しているが、 ^{18}F のみは半減期 110 分であるから、いくぶん離れた所で製造供給される場合もある。表 4 に、世界の PET 専用サイクロトロン設置数を示す。

次に、世界の主要な地域ごとに、RI 生産供給の現状を述べる。

1.2 北米地域における RI の生産と供給

北米では、カナダの MDS Nordion が原料 RI および線源の主要な製造供給元である。特に滅菌等放射線加工処理用 ^{60}Co 大線源と放射

線医薬品の原料の ^{99}Mo については、現在、世界市場の 8 割を占めている。

^{60}Co は、カナダ原子力公社 (AECL) が開発実用化した発電用原子炉「CANDU」の反応度制御用ロッドにコバルト金属スラグを充填しており、照射コバルトは原子力発電を行っている電力会社「オンタリオハイドロ」から Nordion が引き取る契約を結んでいる。これによりオンタリオハイドロの 22 基の CANDU で生産できる線源用 ^{60}Co を専有して線源を製造販売できる。現在も 22 基全部で照射してはいないので、生産余力は未だ十分あるとのこと。供給した線源は、使用後引き取ることとしており条件も示されている。

医療用線源等の原料の高比放射能 ^{60}Co や ^{99}Mo の大量製造は、AECL の研究用原子炉「NRU」によっている。同炉は建設後 40 年以上経過しており、近く運転停止の予定である。こ

表 3 医療用 RI 製造専用に使われているサイクロトロン

国 名	設 置 者	台数
ベルギー	Nordion	2
チェコ	NR1	1
フランス	CIS BIO	2
ドイツ	FZK	1
オランダ	Vrije Amsterdam Univ.	1
	Mallinckrodt	2
英 国	Amersham	2
ロシア	Radium Institute	1
カナダ	Nordion	2
米 国	Amersham	5
	Du Pont	6
	Mallinckrodt	4
	Theragenics	4
中 国	IAE	1
	INR	1
	IMP	1
台 湾	INER	1
インドネシア	BATAN	1
イラン	NRC	1
日 本	DRL	2
	NMP	4
韓 国	KAERI	1
サウジアラビア	King Faisal	1
オーストラリア	ANSTO	1
総数		48

表 4 世界で稼動している PET 専用サイクロトロン

国 名	数
ベルギー	5
デンマーク	2
フィンランド	1
ドイツ	12
イタリア	5
オランダ	2
スペイン	2
スウェーデン	2
スイス	2
英 国	6
ロシア	2
カナダ	5
米 国	47
中 国	3
台 湾	1
イスラエル	1
日 本	30*
韓 国	2
アルゼンチン	1
オーストラリア	1
総 数	132

* 1999年12月、その他は1997年調

れに代えて MAPLE 型の専用原子炉 2 基の建設が進められている。これはチョークリバーの AECL 研究所サイトに Nordion の出資で AECL が建設し、運転を受託する。1 号炉は 1999 年末完成、2000 年 6 月供用開始の見込み。2 号炉は、1 年後に完成の予定。また、新しい照射ターゲット処理施設も原子炉に付属して建設する。完成すれば 2 基の原子炉は相互補完して、原子炉故障等により RI 生産を中断することはない。

Nordion は、バンクーバーの TRIUMF に 40 MeV のサイクロトロン 2 基を保有し、医療用 RI を製造、米国、日本へも輸出している。また、PET 用小型サイクロトロンもあり、 ^{18}F 製剤を隣接するブリティッシュコロンビア大学 (UBC) 病院の核医学病棟へ 2.4 km のニューマテックチューブを通して供給している。

米国では、エネルギー省がオークリッジ国立研究所 (ORNL) に研究用原子炉 HFIR (85 MW) を年間 43 週稼働させて ^{232}Th 、 ^{192}Ir 等を製造している。アイダホ国立研究所 (INEEL) では、ATR (250 MW) が年間 42 週運転して ^{132}I 、 ^{60}Co 、 ^{63}Ni 等を製造している。このサイトには 1996 年後半から MAC Isotopes, LLC という民間会社ができてこれらの RI 製造販売と照射サービスの業務を行っている。ブルックヘブン国立研究所 (BNL) では、中性子ビーム実験用の原子炉 HFBR (30 MW) で実験に並行して炉運転中は随時に RI 製造のための照射ができる。また 33 GeV の陽子リニアックに付属した BLIP (Brookhaven Linear Isotope Producer) が年間 16 週運転して、 ^{82}Sr 、 ^{68}Ge 、 ^{67}Cu 、その他核医学診断用 RI を製造供給している。サンディア国立研究所の研究炉 ACRR (2 MW) でも医療用 RI を製造している。特にロスアラモス国立研究所 (LANL) のホットセル施設と組み合わせて ^{99}Mo を国産できるよう整備している。そのほか DOE の核廃棄物処理プロセスから副生する ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 等のストックを保有するほか、 ^{90}Sr から ^{90}Y を抽出して治療用に供給

している。ロスアラモス国立研究所 (LANL) には高エネルギー陽子加速器に付属した RI 製造施設があり、 ^{68}Ge 、 ^{82}Sr 、 ^{22}Na 等の特殊な RI を製造している。また LANSCE (Los Alamos Neutron Science Center) では加速器による中性子源での RI 製造も可能である。

ミズリー大学の研究炉 MURR (10 MW) でも RI 製造の照射をしているが、これは民間等の委託で照射を行っているようである。民間では、III (International Isotope Inc.) がスーパーコライダーの計画中止で不要になった 70 MeV 陽子リニアックの払い下げを受けて医療用 RI の製造販売を行うほか、Amersham, DuPont, Mallinckrodt, NEN, Theragenics 等が専用サイクロトロンを設置し、また米国内外の原子炉への委託照射によって各種 RI を製造している。

1.3 ロシアおよび旧ソ連邦における RI の生産と供給

ロシアでは、MAYAK で元プルトニウム生産炉であった大型の原子炉 2 基が運転されていて、 ^{60}Co 大線源および高比放射能の ^{60}Co 、 ^{192}Ir 等の線源ならびに核廃棄物から分離した ^{90}Sr 、 ^{137}Cs および超ウラン元素を製造している。特に ^{60}Co 大線源については、英国アマシャム社と合併会社「Reviss Services Ltd.」を設立し、アマシャム社の品質管理を導入して、カナダ製と同等規格の照射用線源を生産している。そのほか、デミトログラードには 100 MW 2 基、60 MW、10 MW および 6 MW 各 1 基、オブニンスクに 10 MW 2 基と 12 MW 1 基、さらにガッチナに 18 MW 1 基、モスクワに 8 MW 1 基の原子炉があるが、デミトログラードでは、高中性子束炉によって ^{90}Sr 、 ^{113}Sn 、 $^{117\text{m}}\text{Sn}$ 、 ^{153}Gd 等を製造している。また、ラジウム研究所の医療用 RI 専用サイクロトロンとサイクロトロン社の加速器による RI 製造が行われている。 ^{125}I 製造には、濃縮 ^{123}Te を使用しているようである。モスクワ所在の TECHSNABEXPORT

Co. Ltd. が、これらロシア製アイソトープ製品の受注、輸出の窓口となっている。

その他の東欧および旧ソ連地域では、ポーランドの研究炉「MARIA (30 MW)」とカザフスタンINPのサイクロトロンによる RI 製造が主なものである。

1-4 西欧地域における RI の生産と供給

西欧では、RI 製造に利用されている主要な原子炉は、ベルギーの BR2 (100 MW)、フランスの OSIRIS (70 MW)、オランダの HFR (45 MW)、スウェーデンの R-2 (50 MW) およびハンガリーの BRR (10 MW) である。このうち BR2 と OSIRIS、HFR は、相互に運転停止期間を補完するように協力していて、これにより特にベルギー所在の IRE による ^{99}Mo の毎週継続した製造供給を保証するようにしている。また、Mallinckrodt はオランダに RI 製造施設を設け、主に自社需要の ^{99}Mo を生産している。IRE および Mallinckrodt は南アフリカと ^{99}Mo の供給協定を結んでいる。BR2 は、通常出力 50 - 70 MW、1 サイクル 3 週間、年間 5 サイクル運転しており、RI 生産の照射受託は、 ^{99}Mo 年間 43 万 Ci、 ^{132}Ir 年間 60 万 Ci、その他 ^{85}Sr 、 ^{106}Re 、 ^{60}Co 等である。

RI 製品供給の大手である英国 Amersham (現 Nycomed Amersham および AEA Technology 線源部門となっている) では、自社および英国内に稼働している原子炉はなく、上記のような外国の原子炉へ委託して照射するか、外から原料 RI を購入するか、あるいは生産拠点を外国へ移転するか等によって対応している。

西欧地域内の医療用 RI 製造専用サイクロトロンは、ベルギー 2 基、チェコ 1 基、フランス 2 基、ドイツ 1 基、オランダ 3 基、英国 2 基である。また、RI 製造にも寄与している研究用加速器は、ベルギー 2 基、フィンランド 2 基、その他ハンガリー、イタリア、ノルウェーとスイスに各 1 基である。

1-5 アジアおよび中東地域における RI の生産と供給

RI 生産の行われている主な研究用原子炉は、中国の 2 基、すなわち中国原子能科学研究院 (北京) の HWRR-II (15 MW)、中国核動力研究設計院 (成都) の HFETR (125 MW)、ならびにインドネシアの RSG-GAS (30 MW)、韓国の HANARO (30 MW)、それと日本原子力研究所の JRR-3M (20 MW)、JRR-4 (3.5 MW) および JMTR (50 MW) である。このうち日本は別にして、HANARO は未だ最大出力になっておらず、RI 製造は本格化していない。RSG-GAS も 20 - 25 MW 程度の出力であり、現在は政情不安もあって輸出するほどではない模様。

中国の原子炉では、それぞれかなり RI が製造され、国内供給されている。北京では核分裂による ^{99}Mo のほか、サイクロトロンによる医療用 RI 製造も行われている。成都の方では、モリブデンを中性子照射した ^{99}Mo 製造のほか、 ^{60}Co 、 ^{132}Ir 線源の製造が主に行われている。

またインドでは、ムンバイ (旧ボンベイ) のバーバー原子力研究センターに最大熱出力 100 MW の研究用原子炉 (DHURVA) が稼働して RI を製造しているが、中国と同様に国内供給が主である。もう 1 基の原子炉 (CIRUS) 40 MW は、現在休止、改装中である。動力炉を利用した ^{60}Co 製造も行っている。

この地域の RI 生産専用サイクロトロンは、中国 3 基、台湾 1 基、インドネシア 1 基、イラン 1 基、韓国 1 基、サウジアラビア 1 基である。日本では、民間で計 6 基稼働している。

1-6 世界のその他の地域における RI の生産と供給

南アフリカでは原子力研究所から原子力公社 (Atomic Energy Corporation of South Africa Limited) となって原子炉による RI 製造販売を事業化した。最近 ^{99}Mo を主に生産規模を充実させており、IREなどと協定して世界への供給に乗り出している。 ^{99}Mo は週 3000 Ci

生産可能。その他 ^{131}I は1999年末までに、続いて ^{32}P , ^{35}S も出荷する予定である。また、研究用加速器も1基ある。

オーストラリアでは、ANSTO (Australian Nuclear Science and Technology Organisation) の中に RI 製造販売部門「ARI (Australian Radioisotopes)」があって、同研究所の原子炉「HIFAR (10MW)」により ^{99}Mo その他各種 RI を製造している。主に国内供給であるが、インドネシア等へも供給する。製造した当日にシドニー空港から成田へ直行便で発送できるので、わが国へ短寿命 RI を輸入することも可能である。半減期 2.7 日の ^{198}Au を輸入した実績がある。ANSTO は、シドニー市内の病院に隣接した医療用 RI 製造専用サイクロトロンも1基ある。

そのほかアルゼンチンでは、動力炉(CANDU型)により ^{60}Co 線源の製造を行っている。また、医療用 RI 製造のサイクロトロンも1基ある。

2. 安定アイソトープ (SI) の生産と供給

米国の ORNL には、安定アイソトープ分離の施設「カルトロン (Calutron)」があるが、1998年1月運転停止された。以来施設は民間委託でスタンバイの状況にある。受託側の Trace Sciences International は、外国の EKP (Elektrokhimprebor), URENCO, Kurchatov Institute (KI), および SGCE (Siberian Group of Chemical Enterprises, Tomsk) と協力体制を形成して対応している。エネルギー省は、研

究用の需要には現在ある程度在庫があるが、将来の研究用需要のために、電磁分離、遠心分離およびレーザー法のうち最も効果的で適用性のよい技術を選定して、施設を建設することとしている。

ロシアでは、KI が電磁分離法、SGCE が遠心分離による安定アイソトープを多く生産している。SGCE ではスズ (Sn), セレン (Se), タングステン (W), 硫黄 (S), クロム (Cr), テルル (Te), キセノン (Xe), クリプトン (Kr) の濃縮アイソトープを生産できる。最近の米国のカルトロン運転停止に伴い、ロシアが安定アイソトープの重要な供給源になってきた。

オランダの URENCO は遠心分離、EKP は電磁分離の施設を有して、多くの元素について安定アイソトープの生産と供給を行っている。

軽元素の安定アイソトープでは、 ^{13}C , ^{18}O など需要のあるものも多いが、低温蒸留法、熱拡散法等による分離が一般的で、すべて民間 (たとえば CIL, CHEMGAS, ICON 等) で製造供給されている。

中重元素の同位体分離には、遠心分離が有効であるが、施設コストが大であり、また安定な気体になるものでなければならないので元素によっては適用が制限される。レーザー法は、分離効率に優れているが、原子または分子の特性による制約がある。最も一般的に適用できる電磁分離法は、コストが最も大きいことが問題である。