



세계의 RI생산·공급의 현황

RI는 여러 가지 분야에서 연구개발, 의학진료, 공업계측, 비파괴검사, 방사선 가공 등의 산업에 이르기까지 넓게 사용되고 있다. 이들의 이용에 공급되어 다양한 제품생산에 이용되는 RI 및 안정 SI의 생산·공급에 관하여 세계의 현황을 개관한다.

1. RI 생산과 공급

1·1 개관

RI는 일반적으로 원자로 또는 가속기에 의해 제조되고 있으나, 어떤 종류의 RI는 핵연료 사이클에서 부산물로서 얻어진다.

현재 세계에서는 318기의 연구용원자로가 가동되고 있으나 10MW이상의 출력로는 45기뿐이다. 그중 33기는 이미 30년 이상 경과하고 있다. 노후화된 선진국의 연구용원자로는 폐기되고 있다.

새로운 연구용원자로의 건설은 원자력 선진국보다는 오히려 개발도상국 특히 아시아 지역에서 많이 진행되고 있다. 표 1에 세계에서 RI제조에 사용되고있는 주요한 연구용원자로를 표시한다.

멸균 등 방사선가공 처리용선원으로 사용하는 ^{60}Co 은 발전용원자로(CANDU로) 또는 그와 비슷한 대규모의 원자로에서 원료코발트 스퀘그를 조사하여 제조한다. 최대의 공급처는 캐나다의 노르데온(MDS Nordion)이다. 다음으로 MAYAK(러시

표1.RI제조에 사용되고 있는 세계 주요 연구용원자로

국 명	원자로명	열출력 (MW)
벨기에 프랑스 헝가리 네델란드 스웨덴 폴란드 러시아	BR 2	100
	OSIRIS	70
	BRR	10
	HFR	45
	R-2	50
	MARIA	30
	SM-3	100
	MIR/M1	100
	IR-8	8
	(Mayak)	30
캐나다	(Mayak)	30
	NRU	135
미 국	MNR	5
	ATR	250
	HFBR	30
	HFIR	100
	ACRR	2
	MURR	10
	HWRR- I	15
중 국	HFETR	125
	HWRR- II	15
	DHRUVA	100
인 도	GAS-MPR	30
	JRR-3M	20
인도네시아	JRR-4	3.5
	JMTR	50
	HANARO	30
일본	RA-3	2.8
	HIFAR	10
한국	SAFARI-1	20

(): 사이트명

아), 소규모로는 CANDU로가 있는 아르헨티나 등에서 제조되고 있다. 이 선원으로 사용하는 ^{60}Co 의 비방사능은 낮으나(50-100Ci/g, 방사능은 크다(선원 1개당 1만Ci) CANDU형 발전로는, 현재 캐나다에서 22기, 기타에 12기가 가동하고 있다.

의료용 ^{60}Co 선원의 원료는, 고비방사능(200~400Ci/g)인 것이 필요하므로 고중성자속으로 조사하지 않으면 안된다. 현재 제조하는 것이 적어서, 공급부족 상황으로 되고 있다.

의료용 및 공업용선원으로 이용되고 있는 ^{192}Ir 는 각처에서 많이 제조되고 있으나 이와같은 경우, 원자로는 제조의 당사자가 아니고 제조자에게 조사 서비스를 제공하는 것이다.

^{192}Ir 의 반감기가 74일이기 때문에 선원의 제조에 있어서는 적시의 서비스를 확보하는 것이 중요하다. 조사한 이리듬데스크를 모아서 외국으로부터 입수하는데는, B형 수송물로 항공수송이 필요하다.

비밀봉으로 사용되는 RI에서 가장 중요한 것은 ^{99}Mo 이다. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 제너레이터 또는 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 제약의 원료로서 수요가 있다. ^{99}Mo 는 반감기가 66시간이기 때문에, 매주 정기적인 생산·공급이 요구된다. 고농축우라늄을 조사하여 핵분열 생성물에서 분리하는 것으로, 대량제조할 수 있는 곳은 제한되어 있다. 현재 일본은 전량 캐나다(MDS Nordion)에 의존하고 있다. 캐나다 다음에 ^{99}Mo 의 제조 공급원은 벨기에의 IRE와 남아프리카의 원자력공사이며, 이 두회사는 콘소시움을 이루고 있다. 네덜란드 소재의 마린 룩트도 같은정도의 규모로 제조하고 있으나 자사용 제품이 주이다.

^{99}Mo 부산품으로서 ^{131}I 와 ^{133}Xe 를 얻는다. 그 외에 원자로서 생산하는 주요한 RI는 ^{14}C , ^{32}P , ^{33}P , ^{35}S , ^{89}Sr , ^{125}I , ^{131}I , ^{153}Sm , ^{169}Yb , ^{198}Au 등이다.

사용후 핵연료의 재처리등, 핵연료 사이클에서 부산품으로 얻어지는 주된 RI는 ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{147}Pm ,

^{237}Np , ^{238}Pu , ^{241}Am 기타의 초우라늄 원소이다.

트리튬(T, ^3H)는 CANDU 등 중수를 사용하고 있는 원자로의 중수 정제프로세스로부터 회수하거나, 농축 리튬-6를 원자로에 조사하여 생산된다. 후자는 군사용생산이 주로된다. ^{252}Cf 는 큐리움등의 중원소를 고중성자속의 원자로에서 조사하여 제조한다. 원자로 뿐만아니라 조사표적 처리시설의 제약으로 미국과 러시아만이 제조하고 있다.

가속기에 의한 RI생산은 연구용가속기에 의한 경우와 전용가속기에 의한 경우가 있다. 전자는 주로 고에너지 양자가속기에서 통상의 RI외에 안정핵에서 떨어진 것, ^{82}Sr 등이 제조된다.

표 2에 RI제조를 하고 있는 주요한 연구용가속기를 나타낸다.

표2. RI제조를 하고있는 세계의 주요한 연구용가속기

국 명	연구시설	가속기 (명칭/형식)
벨기에	UCL	CYCLONE
	Gent University	CGR-520
핀란드	Jyvaskla University	K-130
	ABO, AKAD	MGC-20
헝가리	ATOMKI	MGC-20E
이태리	JRC-AMI	MC-40
노르웨이	Oslo University	MC-35
스위스	PSI	SIN
러시아	CYCLOTRON	U-150-1
카자흐스탄	INP	KVEIC
캐나다	TRIUMF	TRIUMF
미국	LANL	LAMPF
	BNL	BLIP
인도	VECC	SSC
남아프리카	NAC-FRD	SSC
총 수		15기

RI생산 전용가속기는 대체로 사이클로트론(양자 30MeV 정도)으로, 방사성의약품의 원료에 사용되
는 ⁶⁷Ga, ⁸¹Rb, ¹¹¹In, ¹²³I, ²⁰¹Tl 등을 정상 생산하고
있다. 세계에서 가동하고 있는 의료용 RI 제조전용
사이클로트론을 표 3에 표시한다.

PET용 RI는 10분정도의 단수명이기 때문에 현
장에 소형의 전용사이클로트론(양자 15~18MeV
정도)을 설치하고 있으나 ¹⁸F만은 반감기 110분이
기 때문에 얼마간 떨어진 곳에서 제조공급되는 경우
도 있다. 표 4에서 세계의 PET 전용 사이클로트론
설치수를 표시한다.

표3. 의료용 RI제조전용에 사용되고 있는 사이클로트론

국 명	설치자	대 수
벨기에	Nordion	2
	NRI	1
프랑스	CIO BIO	2
독일	FZK	1
네덜란드	Vrije Amsterdam Univ.	1
	Mallinckrodt Amersham	2
영국	Radium Institute	2
러시아	Nordion	1
캐나다	Nordion	2
미국	Amersham	5
	Du Pont	6
중국	Mallinckrodt Theragenics	4
	IAE	1
대만	INR	1
	IMP	1
인도네시아	INER	1
이란	BATAN	1
일본	NRC	1
	DRL	2
한국	NMP	4
	KAERI	1
사우디아라비아	King Fasaal	1
오스트레일리아	ANSTO	1
총수		48

다음에 세계의 주요한 지역별로 RI 생산·공급의
현황을 기술한다.

1·2 북미지역에 있어서의 RI생산과 공급

북미에서는 캐나다의 MDS Nordion이 원료 RI
및 선원의 주요한 제조공급원이다. 특히 멸균 등 방
사선 가공처리용 ⁶⁰Co 대선원과 방사선 의약품의 원
료인 ⁹⁹Mo에 대해서는, 현재 세계 시장의 8할을 점
유하고 있다.

⁶⁰Co는 캐나다 원자력공사(AECL)가 개발실용화
한 발전용원자로 「CANDU」의 반응도 제어용로트드
에 코발트 금속스래그를 충전하고 있고 조사코발트
는 원자력발전을 하고 있는 전력공사 「온테리오하
이드로」에서 Nordion이 인수하는 계약을 체결하고
있다. 이것에 의하여 온테리오하이드로의 22기의
CANDU에서 생산될 수 있는 선원용 ⁶⁰Co를 전유하
여 선원을 제조판매 할 수 있다. 생산여력은 아직 충
분하다는 것이다. 공급한 선원은 사용후 인수키로
한다는 조건도 표시되고 있다.

의료용 선원등의 원료인 고비방사능 ⁶⁰Co나 ⁹⁹Mo
의 대량제조는 AECL의 연구용원자로 「NRU」에
의하고 있다. 동로는 건설후 40년 이상 경과되고 있
고 근간 운전 정지할 예정이다.

이것을 대신하여 MAPLE형의 전용원자로 2기의
건설이 진행되고 있다.

초크리버의 AECL 연구소 사이트에 Nordion의
출자로 AECL이 건설하고 운전을 수탁한다. 1호로
는 1999년말 완성, 2000년 6월 운전개시예정이고 2
호로는 1년후에 완성예정이다. 또 새로운 조사표적
처리시설도 원자로에 부속시켜 건설한다. 완성하면
2기의 원자로는 상호 보완하여 원자로 고장 등으로
인하여 RI 생산이 중단되는 일은 없다.

표 4. 세계에서 가동하고 있는 PET 전용 사이클로트론

국 명	대 수
벨기에	5
덴마크	2
핀란드	1
독일	12
이태리	5
네덜란드	2
스페인	2
스웨덴	2
스위스	2
영국	6
러시아	2
캐나다	5
미국	47
중국	3
대만	1
이스라엘	1
일본	30 ^{*2}
한국	1
아르헨티나	1
오스트레일리아	132

* 1999년 12월 기준, 기타는 1997년

Nordion은 밴쿠버의 TRIUMF에 40MeV의 사이클로트론 2기를 보유하고, 의료용 RI를 제조하여 미국, 일본에 수출하고 있다. 또 PET용 소형사이클로트론도 있으며, ¹⁸F조제를 인접한 브리티시컬럼비아대학(UBC)병원의 핵의학 병동으로 2.4km의 뉴메디트루를 통해서 공급하고 있다.

미국에서는 에너지성이 오크릿치 국립연구소(ORNL)에 연구용 HFIR(85MW)를 연간 43주 가동시켜 ²⁵²Cf, ¹⁹²Ir 등을 제조하고 있다. 아이다호 국

립연구소(INEEL)에서는 ATR(250MW)이 연간 42주 운전하여 ¹⁹²Ir, ⁶⁰Co, ⁶³Ni 등을 제조하고 있다.

이 사이클로트론에는 LLC라하는 민간회사가 생겨 이들의 RI제조 판매와 조사서비스의 업무를 하고 있다. 브룩크헤븐국립연구소(BNL)에서는 중성자빔 실험용의 원자로 HFBR(30MW)에서 실험과 병행하여 노운전 중에는 수시로 RI제조를 위한 조사를 할 수 있다. 또 33GeV 양자 리니아에 부속된 BLIP(Brookhaven Linear Isotope Producer)가 연간 16주 운전하여 ⁸²Sr, ⁶⁸Ge, ⁶⁷Cu 기타 핵의학 진단용 RI를 제조 공급하고 있다. 샌디아국립연구소의 연구로 ACRR(2MW)에서도 진료용 RI를 제조하고 있다.

특히 로스아라모스국립연구소(LANL)의 핫셀시설과 연결하여 ⁹⁹Mo를 국산화할 수 있도록 정비하고 있다. 그 외에 DOE의 핵폐기물처리 프로세스에서 부생하는 ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs 등의 재고를 보유하고 있는 외에 ⁹⁰Sr에서 ⁹⁰Y를 추출하여 의료용에 공급하고 있다. 로스아라모스국립연구소(LANL)에는 고에너지 양자가속기에 부속시킨 RI제조용시설이 있으며 ⁶⁸Ge, ⁸²Sr, ²²Na 등의 특수한 RI를 제조하고 있다. 또 LANSC(Los Alamos Neutron Science Center)에서는 가속기에 의한 중성자원에서 RI제조도 가능하다.

미즈리 대학의 연구로 MURR(10MW)에서도 RI 제조의 조사를 하고 있으나 이것은 민간 등의 위탁으로 조사를 하고 있는 것 같다. 민간에서는 III(International Isotope Inc.)가 슈퍼고라이더의 계획중지로 불필요하게된 70MeV 양자 리니아를 받아 의료용 RI의 제조 판매를 하는 외에 amersham, DuPont, Mallinckrodt, NEN, Theragenics 등이 전용 사이클로트론을 설치하여, 또 미국내외의 원자로에 대해 위탁조사하여 각종 RI를 제조하고 있다.

1·3 러시아 및 구 소련에서의 RI생산과 공급

러시아에서는 MAYAK에서 원래 플로토늄 생산로였던 대형의 원자로 2기가 운전되어 있어 ^{60}Co 대선원 및 고비방사능 ^{60}Co , ^{192}Ir 등의 선원 및 핵폐기물에서 분리한 ^{80}Sr , ^{137}Cs 및 초우라늄 원소를 제조하고 있다. 특히 ^{60}Co 대선원에 대하여는 영국 아머삼사와 합병회사「Reviss Services Ltd」를 설립하여 아머삼사의 품질관리를 도입, 캐나다제와 동등규격의 조사용 선원을 생산하고 있다. 그 외에 데미도로그라드 100MW 2기, 60MW, 10MW 및 6MW 각 1기, 오브닝스크에 10MW 2기와 12MW 1기 또한 가치나에 18MW 1기, 모스크바 8MW 1기의 원자로가 있으나 데미도로그라드에서는 고중성자속도로서 ^{89}Sr , ^{113}Sn , ^{117m}Sn , ^{153}Gd 등을 제조하고 있다. 또 라듐연구소의 의료용 사이클로트론과 사이클론사의 가속기에 의한 RI 제조가 이루어지고 있다.

^{123}I 제조에는 농축 ^{123}Te 를 사용하고 있는 것 같다.

모스크바 소재의 TECHSNABEXPORT Co. Ltd.가 이들 러시아제 아이소토프 제품의 수주, 수출의 창구로 되어 있다.

기타의 동구 및 구소련지역에서는 폴란드의 연구로「MARIA(30MW)와 카자흐스탄 INP의 사이클로트론에 의한 RI 제조가 주된 것이다.

1·4 서구지역에 있어서의 RI 생산과 공급

서구에서 RI 제조에 이용되고 있는 주요한 원자로는 벨기에의 BR 2(100MW), 프랑스의 OSIRIS(70MW), 네덜란드의 HFR(45MW), 스웨덴 R-2(50MW) 및 헝가리의 BRR(10MW)이다. 이 가운데 BR 2와 OSIRIS, HFR은 상호간 운전정지기간을 보충하게끔 협력하고 있어 이것으로 특히 벨기에 소재의 IRE에 의한 ^{99}Mo 의 매주 계속되는 제조공급을 보충하게 하고 있다. 또 Mallinckrodt는 네덜란드에 RI 제조시설을 만들어 주로 자사 수요의 ^{99}Mo 를 생산하고 있다. IRE 및

Mallinckrodt는 남아프리카와 ^{99}Mo 의 공급 협정을 체결하고 있다. BR 2는 통상 출력 50~70MW, 1사이클 3주간, 연간 5사이클 운전하고 있으며, RI 생산의 조사수탁은 ^{99}Mo 연간 43만Ci, ^{192}Ir 연간 60만Ci, 기타 ^{89}Sr , ^{186}Re , ^{60}Co 등이 있다.

RI 제품공급의 큰 회사인 영국 Amersham(현재 Nycomed Amersham 및 AEA Technology 선원 부문으로 되어 있다)에서는, 자사 및 영국내에 가동하고 있는 원자로는 없고 상기와 같은 외국의 원자로에 위탁하여 조사하거나, 외부로부터 원료 RI를 구입하거나 또는 생산거점을 외국으로 이전하는데 등에 의하여 대응하고 있다.

서구 지역 내의 의료용 RI 제조 전용 사이클로트론은 벨기에 2기, 체코 1기, 프랑스 2기, 독일 1기, 네덜란드 3기, 영국 2기이다. 또 RI 제조에도 기여하고 있는 연구용 가속기는 벨기에 2기, 핀란드 2기, 기타 헝가리, 이태리, 노르웨이와 스위스에 각 1기이다.

1·5 아시아 및 중동지역에 있어서의 RI의 생산과 공급

RI 생산이 이루어지고 있는 주된 연구용 원자로는 중국의 2기, 즉 중국원자력과학연구원(북경)의 HWRR-II(15MW), 중국핵동력연구설계원(성도)의 HFETR(125MW), 또한 인도네시아의 RSG-GAS(30MW), 한국의 HANARO(30MW) 그것과 일본원자력연구소의 JRR-3M(20MW) JRR-4(3.5MW) 및 JMTR(50MW)이다.

중국의 원자로에서는 각각 상당하게 RI가 제조되고, 국내공급되고 있다. 북경에서는 핵분열에 의한 ^{99}Mo 외에 사이클로트론에 의한 의료용 RI 제조도 이루어지고 있다. 성도쪽에서는 모리브텐을 중성자 조사한 ^{99}Mo 제조 외에 ^{60}Co , ^{192}Ir 선원의 제조가 주로 이루어지고 있다.

또 인도에서는 몬바이(구 봄베이)의 바바 원자력

연구센터에 최대출력 100MW의 연구용원자로(DHRUVA)가 가동되어 RI를 제조하고 있으나 중국과 마찬가지로 국내공급이 주다. 또 하나의 원자로(CIRUS) 40MW는 현재휴지, 개축중에 있다. 동력을 이용한 ^{60}Co 제조도 하고 있다.

이 지역의 RI생산전용 사이크로트론은 중국 3기, 대만 1기, 인도네시아 1기, 이란 1기, 한국 1기, 사우디아라비아 1기이다. 일본에서는 민간에서 총6기를 가동하고 있다.

1·6 세계 기타의 지역에 있어서의 RI생산과 공급
남아프리카에서는 원자력연구소에서 원자력공사(Atomic Energy Corporation of Africa Limited)로 된 원자로에 의한 RI제조판매를 사업화하였다. 최근 ^{99}Mo 를 주로하여 생산 규모를 늘리고 있으며, IRE 등과도 협정하여 세계에의 공급에 나서고 있다.

^{99}Mo 는 주 3000Ci 생산가능, 기타 ^{131}I 는 1999년말까지 계속하여 ^{32}P , ^{35}S 도 출하할 예정이다. 또 연구용 가속기도 1기 있다. 오스트레일리아에서는 ANSTO(Australian Nuclear Science and Technology Organization) 중에 RI제조판매 부문 「ARI(Australian Radioisotopes)」이 있어 동연구소의 원자로 「HIFAR(10MW)」에 의해 ^{99}Mo 기타 각종 RI를 제조하고 있다. 주로 국내공급이지만 인도네시아 등에도 공급하고 있다. 제조한 당일에 시드니공항에서 일본의 나리타로 직행편으로 발송할 수 있으므로, 일본에서 단수명 RI를 수입하는 것도 가능하다. 반감기 2.7일의 ^{186}Au 를 일본이 수입한 실적이 있다. ANSTO는 시내의 병원에 인접한 의료용 RI제조전용 사이크로트론의 운전도 담당하고 있다.

2. 안정 아이소토프(SI)의 생산과 공급

미국의 ORNL에는 안정아이소토프 분리시설 「칼

루트론(Calutron)이 있으나, 1998년 1월 운전중지되었다. 그후 시설은 민간위탁되어 대기상태에 있다.

수탁한 Trace Sciences International은, 외국의 EKP(Electrokhimprebor), URENCO, Kurchatov Institute(KI) 및 SGCE(Siberian Group of Chemical Enterprises, Tomsk)와 협력체제를 형성하여 대응하고 있다.

에너지성은 연구용의 수요에는 현재 어느 정도 재고가 있으나, 장래의 연구용 수요를 위하여, 전자분리, 원심분리 및 레이더법중에서 가장 효과적이며 적용성이 좋은 기술을 선정하여 시설을 건설하는 것으로 하고 있다.

러시아에서는 KI가 전자분리법, SGCE가 원심분리에 의한 안정아이소토프를 많이 생산하고 있다. SGCE에서는 주석(Sn), 세렌(Sn), 텅스텐(W), 유황(S), 크롬(Cr), 텔루륨(Te), 크세논(Xe), 크립톤(Kr)의 농축 아이소토프를 생산할 수 있다. 최근 미국의 칼루트론 운전중지에 따라 러시아가 안정아이소토프의 중요한 공급원으로 되고 있다.

네덜란드의 URENCO는 원심분리, EKP는 전자분리 시설을 보유하고 있고 많은 원소에 대하여 안정아이소토프의 생산과 공급을 하고 있다.

가벼운 원소의 안정아이소토프에는 ^{13}C , ^{18}O 등 수요가 있는 것도 많지만, 저온증류법, 열확산법 등에 의한 분리가 일반적이며, 모든 민간회사(예를 들면 CIL, CHEMGAS, ICON 등)에서 제조공급되고 있다. 중중(中重)원소의 동위체 분리에는 원심분리가 유효하지만 시설코스트가 크고 또 안정한 기체로 되지 않으면 안되므로 원소에 따라서는 적용이 제한된다.

레이저법은 분리효율은 우수하나 원자 또는 분자의 특성에 의한 제약이 있다. 가장 일반적으로 적용될 수 있는 전자분리법은, 코스트가 가장 큰 것이 문제이다. **KRIA**