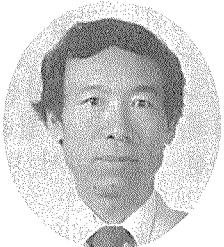


放射線 利用技術의 世界的 發展趨勢와 展望



李 昌 健
韓國原子力學會 會長

머릿말

宇宙안의 모든 물질은 同位元素이다. 그중에는 安定동위원소도 있고 방사선을 방출하는 방사성동위원소도 있다. 이것을 슬기롭게 이용하는 국민은 부가가치를 높여 생활향상과 경제성장을 기할 수 있을 것이며, 그렇지 못하면 방사선으로 말미암아 피해를 입게 된다. 방사성동위원소와 방사선으로 말미암아 이익을 볼 것이냐 아니면 손해를 보느냐는 오로지 그것을 다룰줄 아는 기술을 지니고 있느냐 없느냐의 여부로 판가름난다.

이 글에서는 우리가 부가가치를 올릴 수 있는 RI/방사선이용기술에는 어떤 것이 있으며, 또 그것들이 어디에 쓰이는 가를 적어보았다. 아울러 앞으로 우리가 개발해야 할 기술을 선진외국의 발전추세에 비추어 보면서 전망해 보기로 하였다.

특히 그중에서 굴뚝에서 나오는 매연처리와 사용후 핵연료에서 strontium와 cesium 같은 유용한 방사성동위원소와 값비싼 白金族금속을 분리해 낼 수 있다는 사실은 우리

의 약점을 長點化한다는 점에서 고무적인 분야라 할 것이다. 즉 酸性비와 大氣污染의 주범인 매연으로 비료를 만들고, 高準位 방사선방출로 하여 귀찮고 위험스러운 것으로만 여겨지고 있는 사용후핵연료에서 쓸모있고 값비싼 물건을 빼낸다는 것은 핵미사일을 녹여서 識者의 心琴을 울리는 조각품을 만들어 내고 칼을 쳐서 밭가는 쟁기로 개조하려는 인류의 意願과 일맥상통하는 것이라 자부하고 싶다.

筆者は、 과학기술은 곧 善하게 쓰여지며 또한 그것을 깊이 파고 들고 있노라면 막대한 부가가치가 創出된다는 等式이 입증되는 것을 보고 싶다는 간절한 마음으로 이글을 쓴다.

1. RI 生產現況

IAEA의 1990년말 자료에 의하면 현재 전 세계적으로 320기의 연구용원자로가 가동중이며(표 1), 이것은 材料物性연구, 핵연료시험, 核데이터 생산, 방사성동위원소생산, 중

표 1. 稼動中인 세계의 연구용 원자로(1990. 12)

나라	기수	나라	기수	나라	기수
Algeria	1	Hungary	3	Philippines, The	1
Argentina	5	India	5	Poland	3
Australia	2	Indonesia	3	Portugal	1
Austria	3	Iran, Islamic Rep. of	1	Romania	2
Bangladesh	1	Iraq	2	South Africal	
Belgium	5	Israel	2	Sweden	2
Brazil	4	Italy	6	Switzerland	4
Bulgaria	1	Jamaica	1	Thailand	1
Canada	14	Japan	18	Turkey	2
Chile	2	Korea, Dem. People's		United Kingdom	13
China	10	Rep. of	1	USA	93
Colombia	1	Korea, Republic of	3	USSR	24
Czechoslovakia	3	Libyan Arab Jamahiriya	1	Venezuela	1
Denmark	2	Malaysia	1	Viet Nam	1
Egypt	1	Mexico	3	Yugoslavia	3
Finland	1	Netherlands, The	2	Zaire	1
France	20	Norway	2		
Germany	25	Pakistan	2	World total : 320	
Greece	2	Peru	2		

Note : The total includes one research reactor in operation under the Commission of European Communities(CEC) and five research reactors in operation in Taiwan, China.

Source : IAEA RRDB.

성자回折연구, 실리콘도핑(doping), 放射化分析 등에 이용되고 있다. 대부분의研究爐는 거의가 商用 RI도 생산하고 있으며, 특히短半減期 RI는 自國需要를 충당하기 위해 생산되고 있다. RI는 醫療, 산업, 기초과학 등 다양한 분야에서 이용되므로 그 제품 또한 대단위 放射線源으로부터 放射免疫測定킷트에 이르기까지 다양하다(표 2).

최근의 RI 생산동향은 다음과 같다.

- 1) 선진국에서 商用 RI를 민간업체에서 생산하나 개발도상국에서는 短半減期 醫療用 RI를 국가연구기관에서 생산한다.
- 2) 몇몇 선진국에서는 각기 독특한 RI품목들을 개발하여 世界市場確保에 노력하고 있다(표 3).

표 2. 주요 RI 製品分類 및 開發生產 難易度

醫療用	RIA 커트*
	^{99m}TC 發生器*
	^{99m}TC 標識用 바이알
	기타 일반 放射性醫藥品
產業用	Radiography 線源
	滅菌/食品照射用 線源*
	製造業用*
研究用	標識反應用
	生·醫學研究用
	分析機器 セン서
RI內裝機器類*	各種 게이지 類

* 高 中性子束 밀도의 研究用 原子爐만으로는 생산이 불가능하며, 특별한 施設과 研究開發投資가 수반되어야 생산이 가능한 品目

표 3. 각국의 동위원소 생산이용 현황

국 가	RI 생 산 이 용 현 황
미 국	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국립 원자력 연구기관에서 기본 RI 생산 및 이용기초연구 ○ 다수요 RI 생산이용 관련 산업발전을 이루하여 민간기업등에서도 RI 생산 및 관련 RI 제품제조 공급 ○ 생산이용기술 고도화, 고도기술은 비공개
영 국	<ul style="list-style-type: none"> ○ Radiochemical Centre에서 RI 생산 산업화 ○ RI 제품 수출전략화 ○ 관련 기초 및 응용연구수행 활발
스 웨 덴	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국립 원자력연구기관에서 20여종의 RI 생산 ○ RI/방사선 이용연구 및 실용화
소 련	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국립 원자력연구기관에서 2,500개 RI 품목 생산중 ○ 고도의 생산, 이용기술 확보 ○ RI 이용 진단기관 600개소, NDT 대수 : 1,000대 이상 ○ 원자로, 사이클로트론 이용생산 : 40%, 핵분열생성물로 부터 회수 : 60%
유 고	<ul style="list-style-type: none"> ○ Co-60등 20여종 생산, 산업, 의료 등에 이용
브 라 질	<ul style="list-style-type: none"> ○ 4기의 연구로에서 생산 ○ 국립연구소 IPEN이 3개의 생산 line 가동중 ○ RI/방사선의 공업이용 센타 설립 운영
아 르 헨 티 나	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국내수요 80% 이상 지급, 연간수요증가 : 50% ○ 대형 hot cell 수개 보유, Tc-99m 발생기 제조구체화 ○ 국내수요 90% 이상 생산계획 수립 및 방사선 이용 연구조합 추진
일 본	<ul style="list-style-type: none"> ○ JAERI Tokai : Ir-192, Au-198, Co-60, Ni-63 등 밀봉선원(소형)과 연구용 RI/표지화합물 생산 /공급, 의료용 및 고준위 RI에 한해 수입 ○ RI 관련 기술 발달로 민간업체에서 RI 재가공하여 자국 수요 충당 및 수출 ○ JAERI Takasaki의 RI 방사선이용

국 가	RI 생 산 이 용 현 황
일 본	<ul style="list-style-type: none"> ○ 연구소 설치운영, Co-60 조사장치 및 이온빔 조사장치 등 막대한 장비 설치, RI/방사선이용 전담 연구원 : 200여명(Tokai, Oarai, Takasaki 등)
중 국	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국가 과학기술위원회, 중국 과학원, 기계공업성 등이 집중적으로 RI/방사선 R & D 수행 관장, RI 및 RI 기기 모두 국산화 ○ 원자력 공업성 감독하에 20개 RI 생산단체 700종의 RI 제품생산 ○ RI 생산/이용연구자 : 2,000여명, 실용화 앞장
인 도	<ul style="list-style-type: none"> ○ BARC(인도 원자력연구소)가 Ap-sara 원자로 이용 다품목의 RI 생산해 자국 수요 충당 ○ 각종 RI 이용관련 기초 및 응용연구 활발 ○ RI생산/이용의 실용화
파 카 스 탄	<ul style="list-style-type: none"> ○ PAEC(파키스탄 원자력위)산하에 3개 연구소 ○ PINSTECH : 16종의 RI 개발이용 ○ RI기기, NDT 장비 등 개발 실용중
카 나 다	<ul style="list-style-type: none"> ○ RI 양상 체제 구축, 대단위선원 (Co-60 등) 생산기술의 고도화 이룩 ○ 대단위 선원, Fission Moly, Tc-99m 발생기 등 수출 ○ CANDU 카나다 원자로 이용 특수 RI(Co-60)생산 기술확보 ○ AECL 산하 Radiochemical Company를 Nordion으로 개편하여 RI 상용 생산 체제 진입
호 주	<ul style="list-style-type: none"> ○ AAEC를 호주 원자력 과학기구 (ANSTO)로 개편 원자력발전/핵연료연구에서 RI생산/이용으로 방향전환 ○ RI 자급 및 수출 ○ 트레이서 등 RI 산업이용기술 고도화 이룩
인 도네 시 아	<ul style="list-style-type: none"> ○ 30 MW 연구로 최근 완공하여 RI 양산체제 구축 ○ Fission Moly 및 Tc-99m 발생기 생산시설 도입설치 ○ RI/방사선 이용 연구소 별도 설치 운영

3) 원자로이용생산과 함께 加速器를 이용한 RI생산이 급격히 증가하고 있다(표 4).

표 4. 원자로이용과 사이클로트론이용 동위 원소생산 특성비교

구 분	원자로 이용 생산	사이클로트론 이용 생산
생산방법	용이함	어려움
생산경비	낮음	높은
표적조사	수개 동시조사 가능	수개 동시조사 불가능
핵자비율	중성자파다(양자과소)	양자파다(중성자과소)
주 붕괴형식	$n \rightarrow p + e^-$ (n, γ) 낮다	$P \rightarrow n + e^+$ (n, f) 높다
비방사능		향상높다

4) 多需要 RI中에는 核分裂生成物로 부터 분리한 것들이 많으며 몇 선진국이 이 분야의 기술을 보유하고 있다. 多需要品目인 Tc-99m은 이용에 편리한 Tc-99m 發生器形態로 많이 이용되는데, 그 제조를 위해서는 핵분열생성물로부터 분리한 母核種 Mo-99를 사용하지 않으면 안된다(표 5).

표 5. 핵분열 생성물로부터 회수되는 주요용동위원소와 용도

RI 핵 종	용 도
Mo-99	의료용 Tc-99m 발생기 제조, Tc-99m를 간편히 추출해 즉석에서 표지, 각종 질환 진단에 편리하게 이용
Pm-147	각종 전자기기 표시판의 숫자, 마크 등의 표시, 형광도료 제조이용, 특수도로 표시판 제조이용 등.
Cs-137	원자 전지 등 에너지 원
I-131	각종 질환 진단 치료
Xe-133	폐치료, 진단
Sr-90	단소병 치료, 안절환 치료
Y-99	활액 조사치료

- 5) 多需要 RI인 대단위 γ 線照射用 Co-60 線源은 상당량이 발전로에서 생산되고 있다.
- 6) 放射免疫測定컷트는 원자로이용 RI 生產기술만으로는 제조가 불가능하고 고도의 生物學的 製劑기술을 요하므로 대부분이 선진국에서만 생산되고 있다.
- 7) RI안전관리 등 이용상 난점이 있음에도 불구하고 그 이용량증가추세가 계속하여 생산량도 꾸준히 증가一路에 있다(표 6).

표 6. 日本과 미국에서의 RI 이용 현황

국가	구 分	연도별 이용량		증가배수	인용문헌
일본	방사성의약품 체내용	1982	1987	(5년간)	
	체외용	115870건/월	121443건/월	1.04	Radioisotope 38, 219-22
	합 계	2444639건/월	4475380건/월	1.83	(1989)
	방사성의약품 체외용	2560509건/월	45996823건/월	1.79	
미국	방사성의약품 체외용	1986	1987E	(1년간)	Chinica No. 2 Aug(1987) p. 13
	US\$ 213.5M (성장을 7%)	US\$ 220.5M (성장을 3%)		1.03	
미국	방사성의약품	1987	1991(예측)	(5년간)	Clinica No. 3 May(1988) p. 22
	US\$ 123M	US\$ 126M		1.02	

앞으로 각국의 RI생산품목 특정화 傾向은 더욱 뚜렷해 질 것이다.

核分裂生成物로부터의 응용 RI분리는 경우에 따라 극소수의 나라에서만 수행이 가능하도록 구체적으로 제안되고 규제받게 될 것으로 본다.

국제연구기관에서 생산하는 RI품목 중 商用化가능 품목은 민간기업측에 이양하여 생산케될 것이며, 醫療用 사이클로트론 이용생산 RI가 증산될 것이다.

대형 RI 생산專用原子爐를 갖고 있거나, 특히 RI생산을 겸할 수 있는 발전로를 소유하거나, 核分裂生成물로 부터의 RI분리 고도 기술을 발전시켰거나 아니면 생물학적 製劑 기술이 개발된 나라에서의 RI세계시장占有率은 더욱 높아질 것이 예상되며 이것이 세계경제의 흐름으로 보아도 어느정도의妥當性을 가질것으로 전망된다.

적어도 2000년대초까지 Co-60, Fission Moly(Mo-99)등은 카나다가, RIA 컷트類는 영, 미, 日 등이, 또한 RI 생산용 濃縮標的 및 加速器이용생산 RI 등은 소련이 각각 그 생산을 주도할 것으로 본다. 이에 따라 小/中型연구로만 소유한 群小국가들에서는 短半減期 RI, 中比放射能 RI線源(Co-60, Ir-192 등)과 그 標識化合物類 위주로 생산하게 될 것이며 그럴경우 군소국들의 放射能基準 自給率은 최고 30% 안팎이 될 것이다.

2000년대에는 대부분의 RI생산작업이 技能員들의 손을 떠나 Robot에 의해 수행되어 RI생산상의 방사선安全 확보가 한층 더 제고될 것으로 전망된다.

2. RI 放射線 利用

2. 1 非 密封 RI

非 密封 RI는 RI의 가장 本態的인 것이며 그 이용의 기본형태는 醫療, 산업, 環境保全, 과학연구 등에서의 追跡子의 이용이다. 追跡子의 이용의 기본이론은 放射性追跡子(특히 無擔體이거나 高 比放射能 RI인 경우)의 化학적 含量이 무시될 수 있을 정도로 적으면

서도 그 放射能은 통상의 計測裝備로 충분히 계측할만큼 강하다는데에 있다($1\mu\text{Ci}$ 의 CF RI의 무게 ω_c gram) = $8.854 \times 10^{-20}\text{T.M.}$).

그래서 微量系에 투입될 수 있고, 극미량이 투입되어야 그 系 본래의 특성을 그대로 유지시키면서 특정물질성분(대개 RI追跡子와 같은 성분)을 추적 조사할 수가 있다. 이런 의미에서 非 RI이용은 방사선이용이라기보다 오히려 RI이용이라고 보는것이 타당하다고 생각한다.

追跡子는 追跡者가 아니다. 追跡者가 늙고 음흉한 총잡이라면 追跡子는 5~6개 어린나이의 少女이며 숨바꼭질의 名手다. 몸이 작아 찾기 어려우나 술레가 멀리 있을 때 自意에 의해 튀어나오며 “나 여기 있다”고 외치면서 홈베이스로 달려갈 때의 목소리는 振動數가 높고 예쁘고 뚜렷하기 때문이다.

즉 追跡子는 몸집이 작고(화학적 함유량이 무시되고) 목소리는 크다(放射能計測值가 충분히 커서 방사선 alarm monitor는 충분히 크게 울린다).

한편 放射性追跡子는 추적하려는 물질과 물리, 화학적으로 같아야 한다. 물론 類似물질을 쓰는 편법도 생각할 수는 있으나 그것은 진짜追跡子(genuine tracer)가 아니다. 染料나 螢光물질도 시도되었으나 방사성추적자와는 필적할 수 없다. 이것들은 銳敏度면에서 현저히 떨어져 제구실을 할 수 없기 때문이다.

이와같은 이유로 방사성추적자의 의료, 산업, 학술에의 이용은 계속 발전될 수 밖에 없다. 代替候補기술도 속속 도전해 올 것이지만 RI追跡子를 필적하지 못하는 것이다. NMR CT가 나왔어도 RI의 의료적이용은 終焉을 고하지 않고相互補完하며 共存, 相乘作用에 따라 꾀차 더욱 빨리 발전하였다. 체내의 微量물질을 追跡하는 動的研究(dynamic studies)에는 RI追跡子(방사성의료품)가 가장 유리하기 때문이다.

선진국에서는 微量의 短半減期 RI화합물을 이용하여 pilot시설이나 생산공정에서 원

표 7. 한국과 日本의 RI 이용 비교

나라	RI의 평균* 이용량, k Ci (A)	인구수, 백만명 (B)	1인당 GNP, 미국 \$ (C)	1인당 GNP, 미국 \$** (C')	A / B	A / C
한국	173	40	5,000	5,600 (90년)	41	35
일본	2,169	120	20,000	23,000 (89년)	180	108
비교 일본/한국	13	3	4	4	4	3

* 평균치는 1984~88년 평균치

자료 : 동아년감 1989년판

** 1991. 8. 9 일간지

豆混合速度나 滯在時間分布測定, 유량과 유속측정, 磨耗, 腐蝕측정, 配管누설, 막힘探査 등을 수행하여 공정개량, 에너지節減, 原料節減 등 생산성향상과 산업기술발전에 큰 성과를 거두고 있다. 主로 제철, 화학, 유리, 비료, 정유, 시멘트, 요업, 채광, 정광 등 분야에서 이용된다(표 7)

開封된 RI를 사용하므로 안전이용이 전제되어야 하며 단반감기 RI핵종이나 그 화합물의 극소량을 사용하게 된다. 가능한 한 적은 양을 투입하는 대신 좋은 計測기술과 data processing software가 우수해야 한다.

서구의 선진국에서는 이미 이 분야의 기술용역회사들이 설립되어 활동하고 있으며, 특히 영국의 ICI 회사는 유명하다. 아세아·태평양지역 국가로는 호주, 말레이지아, 印度 등이 용역회사를 갖고 있다. 日本은 이 분야 이용기술을 전반적으로 확보하고 있으며 최근에는 이 분야에서 이용하는 기기들을 개발하여 상용화하고 있다.

Boron tracer 기술, activable tracer 기술 등 이 분야의 난점을 해결하려는 발전된 기술이 속속 개발되고 있다.

최근에는 環境保全을 위한 트레이서기술이 급진전되고 있으며 汚染源追跡, 污染物質擴散 經路 등의 究明에 긴요하게 이용되고 있다.

醫療 :

RI의 의료적이용의 90%는 診斷的이용이며 의료용 RI追跡子가 진단에 쓰인다. 追跡對象物質인 경우가 많다. RI標識단일 clone 抗體 등을 쓰는 RI免疫診斷이나 RI免疫治療法도 질병퇴치율향상에 크게 기여할 것이다.

장비의 고도발전에 힘입어 방사성물질의 인체내 투여량은 극소화되고, 양질의 影像을 얻어 診斷效果의 극대화가 실현될 것이다. 사이클로트론 이용생산 RI의 이용비율이 높아질 것이며 RIA(Radioimmuno Assay)는 EIA(Enzyme Immuno Assay)와 共存하며 발전하게 될 것이다. I-131 등 β , γ 放出 RI核種으로부터 순수 γ 방출 RI핵종으로, 또한 장반감기 RI핵종에서부터 短半減期 RI 핵종으로의 이용추세가 바뀌고 있으며 가능한 한 최소량을 사용하려는 노력이 뚜렷하다.

원자로이용생산 RI 핵종으로는 Tc-99m이 압도적으로 많이 쓰이는데 그 이유는 Tc-99m의 반감기(6시간)와 γ 에너지가 적절하며(140keV) 순수한 γ 방사핵종이면서 소형연구로로도 생산되기 때문이다. 또 생산지에서 먼 장소에서 이용하기에도 편리한 Tc-99m 발생기가 개발되어 있기 때문이다.

醫療用 RI를 생산이용하기 위해 사이클로트론 설치 의료기관이 증가추세에 있으며

短半減期의 陽子過多 RI핵종을 생산하여 이용하고 있다. 그러나 이것은 선진국에서만 활발한 편이며 개발도상국에서는 陽電子방출RI핵종을 수입, 사용하기도 하나 값이 너무 비싸 이용에 어려움을 겪고 있다. 가속기 이용생산 RI핵종 중 주요한 것은 Ga-67, Ti-201, I-123, C-11, O-15, F-18 등이다.

일반적으로 현 核醫學界에서 가장 보편화된 장비인 γ 카메라는 SPECT(single photon emission tomograph)로 점차 대체되어 가고 있으며, 또 PET(positron emission tomograph)로 옮겨갈 것이 예상된다. 현재 PET는 세계적으로 100여개 醫療기관(미국 60개소, 일본 20개소, 유럽 30개소 등)에서 이용되고 있다.

근래 미국, 일본, 호주 등에서 화제가 되고 있는 것은 BNCT(boron neutron capture therapy)이다. 이 방법은 뇌종양의 종양부위에 boron화합물을 주입한 다음 원자로의 증성자비임을 조사하여 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 반응을 일으켜 발생되는 α 종자에너지로 종양세포를 파괴하는 것이다. 지금까지의 결과에 의하면 치료율이 높다고 한다.

한편, RI를 標識한 單一 clone抗體 등을 이용하는 immunodiagnosis나 immunotherapy도 점차 진전을 보이기 시작하였다.

기초 및 應用科學：

생명과학, 遺傳工學, 植物生態學, 反應機構研究 등에 필수도구로 이용될 것이다.

그런데 한편으로 非 密封 RI의 이와 같은 뚜렷한 長點을 깎아내리는 요인이 있는데 그것이 바로 이것을 이용할 때 발생하는 방사성폐기물이다. 여기서 발생되는 폐기물은 방사능이 極低準位인 반면 부피가 크다. 물론 密封 RI선원이용에서도 방사성폐기물이 발생되나 그 경우는 放射能準位가 상대적으로 높으면서 부피는 극히 적다. 그래서 일시保管이나 처리를 위해서는 후자가 유리할 수 있다.

그런데 放射性追跡子의 특성을 알고 그妙味를 애용하는 과학자가 안전관리법을 향상시킬 지혜를 짜내지 못할 이유가 없다고

본다. 약간의 비용으로 시설을 補強하고 안전守則을 지키는 지혜를 발휘함으로써 안전 이용의 正道를 걷는다면 非 密封 RI이용기술발전은 자명한 사실로 될 것이다.

앞으로 국민의 意識水準向上, 環境保護캠페인에 발맞추어 추적자를 標準量이하로 이용하게 될 것이고, 데이터의 자동判讀시스템도 점차 좋아질 것이다.

2.2 密封 RI

密封 RI이용의 기본이론은 放射線照射효과이용에 있으며, 여기에는 물리적조사효과와 화학적, 생물학적 조사 효과가 있다.

- 物理的照射效果利用；密度計, 두께計, 重量計, 準位計, 水分計, 硫黃計, 等 RI 계이지類
- 化學的, 生物學的照射效果利用；放射線滅菌, 食品照射, 고무架橋, 表面塗裝, 放射線重合, 惡性疾患治療 등
- 物理·化學的照射效果利用；NDT.

물리적조사효과는 투과효과라고 하는것이 더 타당할 수도 있는데 투과매에 방사선에너지의 일부 또는 전부를 잃으면서 나타내는 것이며, 화학적·생물학적조사효과는 방사선이 물질을 투과할 때 에너지를 잃는 과정에서 일어나는 화학적 생물학적변화로 인한 효과이다.

방사선이 투과하는 물질에 따라서 방사선에너지의 흡수율이 달라지며 물질변화의 정도도 다르다.

방사선조사이용기술도 재래식 타기술과 다른 독특한 장점을 갖고있어 빠른 속도로 보급될 것이다. RI계이지類는 접촉하지 않고도 연속적으로 두께, 무게, 밀도, 수분, 유황含量 등을 쟀 수 있으며, 방사선원의 放射性崩壞速度는 핵종고유의 定數에 따르며 외부조건(고온, 고압 등)에 영향받지 않는다. 生成 放射線信號는 쉽게 증폭되어 서보시스템과 연결, 자동조절할 수 있어서 공장자동화를 위해 효과적이다.

放射線滅菌：

1회용 플라스틱제 의료용품과 脱脂綿, 綿

棒, 꺼즈 등 가스浸透는 수년내에 거의 모든 나라에서 100% 가까이 방사선으로 滅菌하게 될 것이다.

그와같은 의료용품은 加熱滅菌되지 않으며, EO(Ethylene Oxide) 滅菌하면 잔류가스 때문에 엄격해지는 검사기준을 만족시킬 수 없다. 반면 방사선멸균은 無加熱滅菌이며 방사선은 고루 침투되므로 완전포장상태로 멸균되어 세균에 의한 2차污染잔화가 원칙적으로 봉쇄되는 등 타방법에서는 생각할 수 없는 특이한 장점을 갖기 때문에 더욱 편리하고 환영받는다.

食品照射 :

국민의식수준향상으로 위생포장식품, 무공해식품 등을 추구하면서 照射식품에 대한 인식도 점차 개선될 것으로 전망된다. 無菌動物(SP, specific pathogen-free)사료, 환자식품, 우주식품, 조미료, 乾魚物 같은 照射食品이 먼저 유통판매될 것이고 이의 국제교역도 이루어질 것이다.

그러나 그 시기를 앞당기기 위해서는 각국에서 조사식품연구결과를 사실 그대로 정직하게 홍보해야 한다.

放射線治療 :

Co-60이나 Ir-192 등의 γ 선을 체외에서 痘巢部位에다 조사하거나 인체 특정病巢부위에 삽입, 조사하는 Brachy therapy, I-131經口投與에 의한 甲状腺疾患치료 등은 그 치료효과가 인정되었기 때문에 지속적으로 이용될 것이다. 照射線量 dosimetry 및 그 표준화, 안전연구결과가 최대한 활용될 것이다.

2. 3. 放射線 非破壊検査(NDT)

NDT기술은 圓周放射에 의한 검사에 특히有利하여 파이프의 熔接部位검사에 가장 좋다. 최근엔 연속작업장비를 이용한 반자동화의 길이 열리고 있다. 露出放射線을 줄이고 현장에서 직접影像을 판독하는 기술도 개발되고 있다. NDT장비가 대폭 개량되고 NDT용 Robot가 등장할 것이다.

Co-60, Ir-192 등 RI를 이용하는 NDT기술의 장점은 휴대성이 좋다는 사실이외에도 圓周放射로 인해 복잡한 塊型構造物(航空機엔진 등)의 검사나 파이프 熔接部位검사에 유리하다는 점이다. 亞·太지역국가들 중에는 日本, 호주, 말레이지아, 싱가포르 등이 앞서있는 편이다.

UT, ET 등 非 RI이용 NDT도 계속 확장되고 있으나 RI NDT는 나름대로의 장점이 있어 그 기술발전의 여지가 많다. 최근 선진국에서는 필름을 사용하지 않고 γ 카메라를 써서 직접 판독하는 기술이 개발되었다. 컴퓨터를 사용해 각 검사지점을 積分한 影像을 연결해 나타내는 이 기법은 노출 즉시 현장에서 영상을 볼 수 있고 약품, 필름, 화학처리 등 복잡한 과정을 거치지 않아 장래가 매우 유망하다.

2. 4. 放射線照射技術

방사선조사기술에서 이용하는 방사선에는 RI(Co-60, Cs-137 등 강한 γ 선) 방사선과 非 RI 방사선(X선, 자외선, 가속전자선)이 있다. 또 이용형태도 醫療用品滅菌, 食品照射, 架橋電線製造, 表面塗裝, 架橋고무, 熱收縮性 튜브제조 등 실용화된 것과 실용화초기단계기술(排煙處理, 下水슬럿지處理 등)이 있다(그림 1).

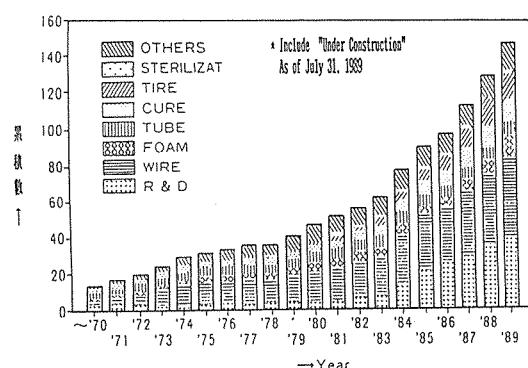


그림 1. Total Number of Electron Accelerators(Nissin H.V.)

醫療用品滅菌 및 食品照射 :

일찍 실용화된 기술이지만 확산속도가 빠르지 못했다. 醫療用品滅菌은 식품照射분야 보다 빠른 속도로 확산될 전망이며 현재도 비교적 많이 이용되고 있다(그림 2). 방사선 멸균의 주대상은 1회용 의료용 플라스틱用具이어서 의료용품 전체를 放射線滅菌하기를 기대할 수는 없다. 현재 北美洲 등 선진국에서는 약 30%의 의료용품을 방사선멸균하고 있어서 실제로 플라스틱製, 1회용품은 90%이상을 이 방법으로 멸균하는 셈이다. 최근에는 人工臟器 등의 개발보급, 惡性傳染性菌(HIV 등)의 막연 등을 고려할 때 방사선멸균은 급속도로 확산될 전망이다. 유럽각국에서도 EO(ethylene oxide) 가스滅菌때의 殘留 EO規制가 강화되기 시작하였음을 고려할 때 더욱 그러하다. 다만 플라스틱재질의 방사선에 의한 着色이나 脆弱化(brITTLE化)를 방지하도록 하는 耐放射線性플라스틱재료가 다양하게 개발될 필요가 있다(그림 3).

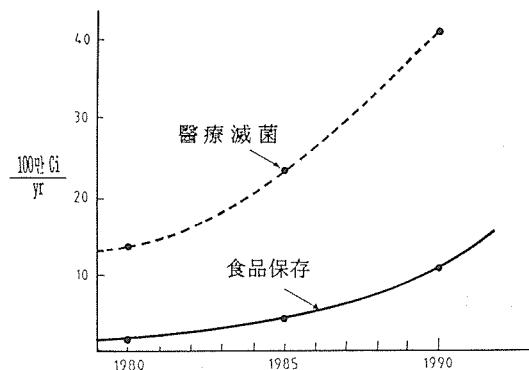


그림 3. Trends of Cobalt-60 Demand in Medical Sterilization and Food Irradiation (Source : Nordion)

식품 照射는 그가 양파, 감자 등을 위시해서 대상품목이 확대되었다. FAO/WHO/IAEA共同技術委員會에서는 10k Gy 이하로 조사된 어떠한 식품도 그 건전성이 인정된다고 발표함으로써 이 기술확산의 계기를 마련하였다. 현재 24개국에서 상용조사시설 30여개가 가동중이며 연간 약 500,000 M/T의 식품이 처리되고 있다. 이 기술의 확대보급을 위해서는 건전성에 대한 홍보가 필요하다(그림 4).

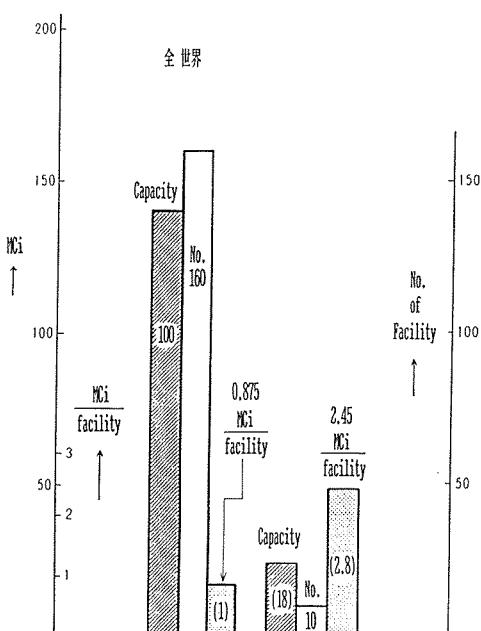


그림 2. ^{60}Co Irradiation Facilities (1989)

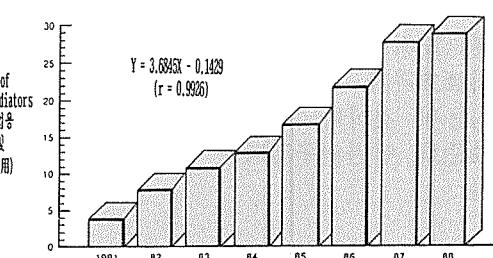


그림 4. Trends in the Use of Irradiators for Food Processing on Commercial Scale (Source : IAEA)

架橋電線, 热收縮性导体, 表面塗裝, 고무架橋 기술 :

主로 加速電子線을 이용하는 산업기술이

다. 架橋電線은 전선被覆材 分子間에 새로운結合(架橋)을 생기도록하여 耐熱性, 耐放射線性이 현저히 향상된 우수한 전선이며, 热收縮性튜브는 가열하면 수축되어 튜브내 물체에 밀착되므로 전선연결부위 보호용으로 유효하게 쓰인다.

한편 철판, 목재, 플라스틱 등의 표면을塗裝한 다음 電子線을 照射하면 견고하고 광택있는 塗裝膜이 형성된다.

이와같은 방사선照射기술에서는 방사성폐기물이 발생되지 않으며 신속하고 간편하게 처리되므로 빠른 속도로 이용이 확산되고 있다. 전세계적으로 이와같은 목적에 이용되는 전자가속기가 600여대에 이르며 그 중 200여대가 日本에서 가동되고 있다. JAERI 高崎研究所는 이분야연구의 중심기관이다.

架橋고무제조기술은 비교적 최근에 개발되었으며 加速電子線이나 Co-60 γ 선을 모두 이용한다. 架橋고무에는 加黃하지 않기 때문에 廢고무제품 燒却처리때에 SO_x 발생이 없을 뿐만 아니라 제조과정에서 고무원료의 節減效果가 뚜렷하다고 한다.

2. 5. RI계이지類

두계計, 重量計, 密度計, 準位計, 水分計, 硫黃計 등 여러가지 RI계이지類가 산업계에서 이용되면서 원료/에너지제품질향상에 큰 기여를 하고 있다.

최근 개발, 실용화된 계이지類는 Cf-252를 중성자원으로 사용하는 水分計이며 이를 Cs-137 등 γ 線源과 組合하여 土壤密度/水分計로 사용한다. 이 계기는 도로, 滑走路 등의 포장상태검사에 유효하게 이용된다.

Boron 추적자와 中性子水分計를 조합한 地下流量, 流向計나 現場試料分析器 등도 석유, 가스산업, 금속광업등에서 크게 주목받고 있다.

檢出器, 銳敏度 향상에 따라 이와같은 RI 계이지類는 폭발적으로 보급되고 있으며 앞으로 robot 산업에 이용될 것이다. 이 분야에서 日本의 계이지개발은 괄목할만 하다.

2. 6. 農業利用

방사선에 의한 식품照射이외에 주요 이용 형태는 放射線育種, 植物生理, 施肥法연구, 害蟲驅除 등이다. 최근 日本에서는 medfly를, 또한 南아프리카 공화국에서는 screw worm을 각각 雄性不妊術(sterile insect technique, SIT)로 減種시키는 project가 활발히 진행되고 있다.

3. 非 RI放射線 分야(電子線 이용)

현단계의 非 RI방사선 이용형태는 X선 NDT, 加速電子線照射에 의한 架橋전선생산, 열수축성튜브생산, 표면도장, 排煙처리, 멸균, 식품조사 등과 自我선조사에 의한 표면도장 등인데 여기서는 전자선照射에 한해 의존키로 한다.

전자선조사에서는 RI이용법과는 달리 하등의 방사성 폐기물이 발생되지 않는 큰 장점이 있다. 그밖에도 이 기술은 아래와 같은 장점을 갖는다(Co-60 γ 線처리의 경우도 같음).

- 電源스위치開閉 조작으로 즉각적으로 照射處理가 가동된다.
- 非 加熱 단순처리여서 조작이 용이하다.
- 복잡한 부대설비가 불필요한 에너지節約型이다.

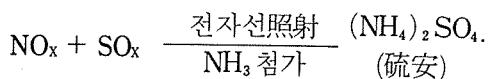
이 기술의 기본개념은 非 RI 방사선인 가속전자선에 의한 화학적, 생물학적효과를 이용하는데 있다. 전세계적으로는 600여대의 전자가속기가 산업계에서 운영되고 있으며, 안전상 난점이 별로 없으면서도 기술집약적高附加價値 創出산업이어서 급속도의 이용 확산이 예상된다. 架橋電線은 耐熱性, 耐放射線性이어서 原電의 방사선구역에서 효과적으로 쓰인다. 热收縮性튜브, 표면도장 등 모두가 우리생활을 윤택하게 하는데 필요한 것들이다.

환경보전 또는 공해추방을 위해 오염源탐사, 오염경로추적, 오염물질 확산경로 규명

등과 나아가 배기가스처리에도 이용될 것이다. 추적자기술은 중성자 방사화분석기술과 결합되어 activable tracer 硼素 tracer로서도 동시에 이용될 것이다.

排煙處理 :

주로 加速電子照射로 排煙을 처리, SO_x 와 NO_x 를 80~90% 까지 제거해 硫安肥料로 만드는 획기적인 방법이다.



이 기술은 日本 JAEAR와 미국의 Ebara사가 집중적으로 연구하여 pilot plant가 운영되고 있어서 실용화를 눈앞에 두고 있다(그림 5, 6).

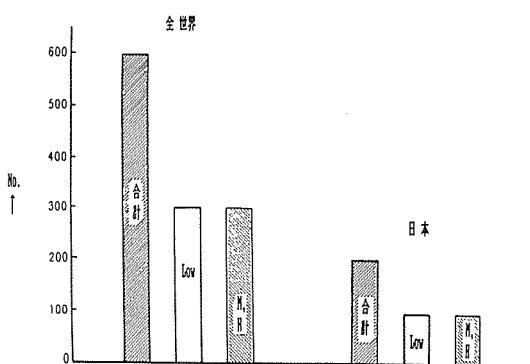


그림 5. Number of Electron Accelerators for Processing (1989)

SO_x , NO_x 는 酸性비를 내리게 하는 대기오염의 주범이며 제철, 시멘트 등, 제조업체나 화력발전소의 매연에서 많이 발생된다. 이 기술의 특징은 아래와 같다.

- SO_x 와 NO_x 의 高效率(80~90%) 동시 제거
- 건조공정이며 폐수발생이 전혀 없다.
- 排煙再加熱이 필요없는 단순과정이고 처리비용이 싸다.

현재 독일, 폴란드, 미국, 일본 등에서 과이럿 규모의 시설을 운영중인데 그 결과가 매우 고무적이라고 한다. 電子加速器가 아직 高價이나 酸性비에 의한 자연파괴예방을 위해 불원간 실용화될 전망이다. 화력발전을 원자력으로 대체해가며 공해를 줄이고, 방사선이용연구개발성과로 화력발전소나 일반공장에서 발생하는 공해마저도 줄이는 등 環境保全을 위한 원자력기술의 기여는 더욱 커질 것이다.

下水슬럿지 處理 :

電子線이나 γ 선을 照射하여 下水슬럿지를 滅菌한 다음 발효시켜 堆肥化하는 기술이며 이렇게 하여 얻은 퇴비는 酸性土壤의 中和에 적합하다. 환경오염을 줄이면서 자원화하는 二重효과로 인해 유망시된다.

세계적으로 대형이온가속기나 放射光加速器(浦項工大에서 설치中)가 설치되고 있으며, 앞으로 이와같은 거대시설을 이용하여

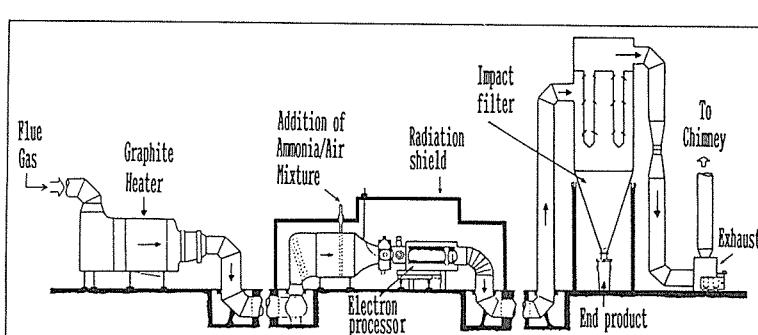


그림 6. Electron Beam Processing for the Flue Gas Purification.

宇宙科學, 核融合爐用 신소재개발, 생명과학, 이온照射工學 등의 연구개발이 활발히 이루어져 그 성과가 기대된다.

4. 최근의 방사성동위원소 응용기술

4. 1. 醫療用 안정동위원소

가. Ytterbium의 활용

- $\text{Yb-168+n} < \text{Tm-167} (\text{t}_\text{H}=9.6\text{ 日})$
- $\text{Yb-169} (\text{t}_\text{H}=31.8\text{ 日})$
- Tm-167, Yb-169는 뇌종양, 간암, 폐암진단용.

나. Yb-168, Hg-196 안정동위원소의 값

Yb-168		Hg-196	
농축도(%)	\$/gram	농축도(%)	\$/gram
14.85	241,400	13.94	98,950
18.25	364,600	19.28	189,250
24.13	637,350	20.99	224,300
24.47	655,450	25.18	322,750
33.51	1,229,150	28.45	412,050
		31.81	516,050
		47.83	1,164,500
		48.18	1,181,600
		50.00	1,272,600
		73.16	2,724,500

(ORNL : April 1991)

4. 2. 원자력시설 素材用 안정동위원소의 레이저분리

가. 中性子 低吸收소재

(Zr-91-depleted zirconium/Zr-90-enriched zirconium)

- 용도 : 핵연료피복재, grid, calandria, 구조재
- 기대효과 : 중성자경제성향상을 통한 핵연료주기 연장
: 원자로심 설계상의 최대 margin 확보

Natural Abundance of Zirconium Isotopes and Thermal Neutron Capture Cross-Section

Isotope	Natural Abundance, %	Neutron Capture Cross-Section, barn
Zr-90	51.46	0.014
Zr-91	11.23	1.58
Zr-92	17.11	0.26
Zr-94	17.40	0.08
Zr-96	2.80	0.3

한때 stainless steel을 핵연료피복재로 사용하던 것을 Zircaloy(Zirconium alloy)로 대체하게 된 것은 zirconium의 중성자흡수가 적기 때문이며, 또한 핵연료 grid를 Inconel에서 Zircaloy로 바꾼것도 마찬가지 이유에서이다. 그러나 zirconium 동위원소중 반이상을 차지하는 Zr-90의 중성자흡수단면적은 0.014barn으로 아주 이상적이지만 존재비가 11.23%인 Zr-91의 중성자흡수율은 Zr-90의 100배가 넘는다.

따라서 중성자흡수단면적이 큰 Zr-91을 레이저분리방법으로 제거하거나 아니면 중성자를 아주 적게 흡수하는 Zr-90을 골라내서 원자력시설소재로 쓴다면 대단히 효과적이다.

나. 中性子吸收用 硼素

(B-10-enriched Boric Acid, H_3BO_3)

Boric acid는 발전용원자로에서 중성자흡수용으로 냉각재안에 풀어서 사용된다. 그러나 이것은 酸性이기 때문에 물안에 너무 많이 용해시키면 원자로의 구조재나 기기의 부식을 유발할 수 있다. 따라서 중성자흡수단면적이 극히 큰 B-10만을 분리해 쓰면 이런 애로를 크게 완화할 수 있다. 특히 B-10의 존재비는 20%미만이므로 그 효과는 대단히 크다. 이렇게 할 경우 원자로제어의 안전성향상은 물론 방사선방출과 작업자에의 被曝量도 줄일 수 있게 된다.

Natural Abundance Boron Isotopes and Thermal Neutron Absorption Cross-Section

Isotope	Natural Abundance, %	Neutron Capture Cross-Section, barn
B-10	19.78	3,8370
B-11	80.22	0.005

다. 핵융합로용 구조재, Titanium

Titanium-50은 고속중성자흡수단면적이 적어서(n, p) reaction이나(n, α) reaction이 적다. 따라서 존재비가 크고 중성자를 많이 흡수하는 Ti-48을 제거하거나 중성자 흡수가 적은 Titanium-50만을 분리해 쓰면 방사선방출을 줄이는데 크게 기여하게 된다.

Natural Abundance of Titanium Isotopes and Thermal Neutron Capture Cross-Section

Isotope	Natural Abundance, %	Neutron Capture Cross-Section, barn
Ti-46	7.93	0.6
Ti-47	7.28	1.7
Ti-48	73.94	8.3
Ti-49	5.51	1.9
Ti-50	5.34	0.14

라. 可燃性毒劇物(Burnable Poison), Gadolinium

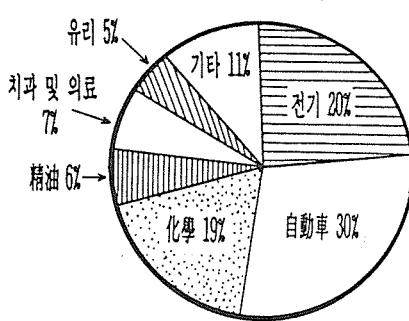
경수로에서는 농축우라늄을 쓰기 때문에 초기노심의 경우 反應度價(reactivity worth)가 너무 높아 이를 억제하기 위하여 핵연료안에 중성자를 많이 흡수하는 가연성독극물을 넣으면 그중의 하나가 gadolinium이다. 그러나 그 동위원소중 특히 존재비가 16% 정도인 Gd-157의 중성자흡수단면적이 유난히 크기 때문에 이것만을 분리하여 쓰면 아주 효과적이다.

Natural Abundance of Gadolinium Isotopes and Thermal Neutron Capture Cross-Section

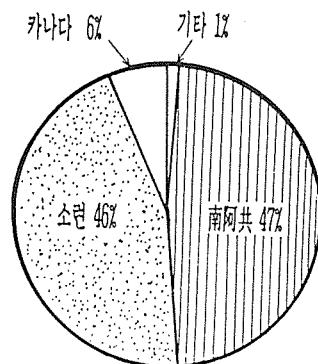
Isotope	Natural Abundance, %	Neutron Capture Cross-Section, barn
Gd-152	0.2	700
Gd-154	2.15	102
Gd-155	14.73	61,000
Gd-156	20.47	
Gd-157	15.68	254,000
Gd-158	24.87	3.5
Gd-160	21.90	0.77

4. 3. 사용후핵연료에서의 유용금속 추출

- 한국에서 현재 연 200t 정도의 사용후 핵연료 배출
- 사용후핵연료 ton당 약 5kg의 희귀금속들이 포함되어 있으며 그 값은 5,000만 원이나 됨으로 사용핵연료를 재처리 후



백금족 원소의 산업활용 분야

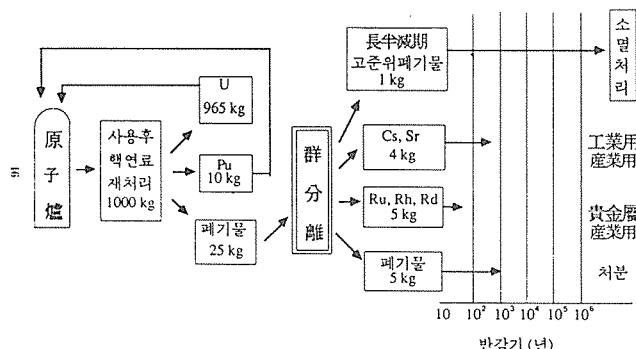


백금족 원소 생산국

이것을 群(核種) 分離하면 연간 100억 원의 부가가치를創出할 수 있을 것이다.

- Ru(Ruthenium), Rh(Rhodium), Pd (Palladium)의 용도 :
 - 자동차 배기정화 및 화공공정 총매제, 유리공업과 精油產業用
 - 齒科 및 의료용과 전기재료용
 - 귀금속 장식용.

群分離(核種分離)에서 얻을 수 있는 核種中에 공업용과 의료용으로 널리 쓰이는 cesium과 strontium이 있다. 지금까지는 이것을 만들기 위해 試料를 원자로안에서 照射시키고 있으나 사용 후핵연료를 재처리하게 되면 이런 핵 종제조에서 당면하는 그런 번거로운 절차와 장기간의 조사기간이 생략될 것이다.



使用後核燃料의 資源化

白金族(Ru, Rh, Pd)와 U의 半減期

핵 종	반 감 기
Ru-99	안정
Ru-100	〃
Ru-101	〃
Ru-102	〃
Ru-104	〃
Ru-106	368일
Rh-102	2.9년
Rh-103	안정
Pd-104	안정
Pd-105	〃
Pd-106	〃
Pd-107	7×10^6 년
Pd-108	안정
Pd-110	〃
U-235	7억년
U-238	45억년

結論

방사성동위원소와 방사선은 醫療, 산업,

농학, 기초과학연구 등에 널리 이용되면서 국민의 복지향상, 산업발전 및 각 분야에서의 부가가치 창출과 便益向上에 크게 이바지할 것이다. 특히 이것들이 지닌 고유한 장점때문에 앞으로의 기술개발속도도 매우 빨라질 것이며 첨단과학기술로 각광을 받을 것이다.

2000년대에는 전자공학의 발달로 컴퓨터와 RI/放射線技術의 組合됨으로써 방사선照射量, 방사선被曝量을 減縮시키며, 이용과정, 廢棄物貯藏, 處理過程 등도 대폭 標準化되어 방사선안전이 확보됨에 따라 RI/방사선이용 기술이 한층 고도화될 것이다.

이를 가능케 하기 위해 이용자는 안전수칙엄수에 더욱 유의해야 할 것이며, 일반대중은 불필요한 오해나 공포심을 갖지 않도록 올바른 이해를 가져야 한다. 한편 앞으로 연구에 종사하는 창조적 엘리트집단은 새로운 기술개발로 과학기술이 국가의 경제개발과 국민의 생활향상에 기여하고 있음을 실증적으로 보여주어야 할 것이다.