식품 및 의료용품에 대한 방사선 조사기술의 산업적 이용

권 중 호
한국원자력연구소
식 품 조 사 실 장

Worldwide, 38 countries have approved irradiation technology for treating one or more food items. Twenty-four countries are practically utilizing the technology to combat post-harvest food losses and to ensure hygienic quality of food products, thereby producing more than 500,000 metric tons of foodstuffs per annum by using 29 commercial irradiators. The volume of food processing by irradiation will increase significantly when international trade of the irradiated food is initiated. An estimated 400 million cubic feet of disposable medical products and related health-care items are currently being sterilized around the world, forecasting the average growth of 5% per year. Market share for each of terminal sterilization processes is 70% in ethylene oxide(EtO) fumigation, 27% in gamma irradiation and 3% in electron beam, respectively. However, considering the recent movement on safety of EtO, it is expected to be replaced by irradiation technology, even if that needs continuous R & D from the social and technical points of view to enlarge the application fields.

1. 서 론

食品照射와 의료용품의 방사선 멸균은 X-선(Röntgen, 1895)과 자연 방사능(Becquerel, 1896)의 발견과 더불어 그 연구개발의 역사를 같이 하고 있다. 방사선의 생물학적 작용에 대한 실제적인 연구는 1950년대부터 원자력의 평화적 이용(Atom for Peace)을 위한 조사선원의 개발로서 선진국과 국제기구의 주도에 의해 시작되었다.

인류의 역사는 안전한 식량확보와 질병예

방을 위한 끊임없는 노력에서 비롯되어 산업화 시대를 맞이하게 되었고, 이와 같은 과정에서 방사선 에너지는 식품의 살충, 살균 기술로서 뿐만 아니라 의료제품 등의 멸균 방법으로 연구개발 되면서 본격적인 실용화 추진단계에 이르게 되었다.(Fig. 1, 2)

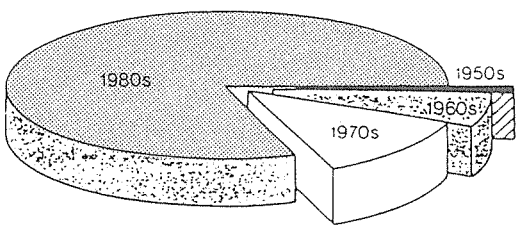

Fig. 1 Country approvals of irradiated foods (source : IAEA)

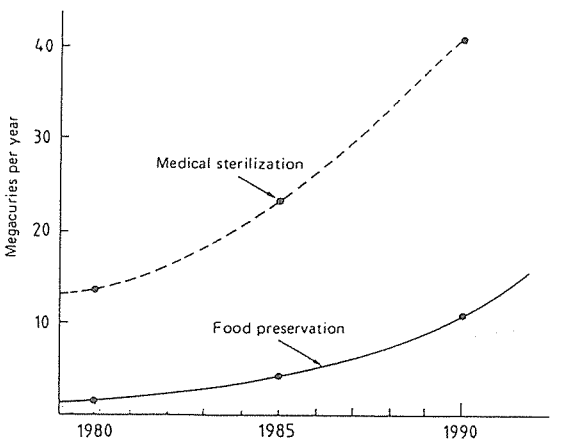

Fig. 2 Trends for cobalt-60 demand in medical sterilization and food irradiation(source : Nordion).

국내에서는 1960년대 초부터 방사선 이용에 관한 기초연구가 한국원자력연구소(KAERI)에서 수행되었으며, 특히 1975년 UNDP의 지원에 의해서 건설된 방사선 시범조사시설(100kCi Co-60)의 半産業的 이용연구는 의료용품 멸균 및 식품조사 기술의 산업화를 선도하였다. 1987년 이래 보건사회부에서는 이와 같은 국내의 연구결과와 FAO/IAEA/WHO, Codex Alimentarius Commission 등의 照射食品에 대한 건전성 평가내용을 바탕으로 12개 식품에 대하여 감마선 조사를 허가하였고(Table 1), 또한 상업용 조사시설(500kCi Co-60)이 민간기업에 의하여 건설됨으로써(1987. 6) 식품조사 및 의료용품 멸균분야에 산업화 시대가 열리게 되었다.

Table 1. Food items of clearance for irradiation and a commercial irradiator in Korea(As of 1990)

Products	Purpose of irradiation	Sort of clearance	Dose permitted (kGy)	Date of approval
Potatoes	Sprout inhibition	Unconditional	Up to 0.15	16 Oct. 1987
Onions	〃	〃	〃	〃
Gralic	〃	〃	〃	〃
Chestnuts	〃	〃	Up to 0.25	〃
Mushrooms (fresh and dry)	Growth inhibition/ Insect disinfestation	〃	Up to 1.0	〃
Dried spices (red pepper, black pepper, welsh onion, garlic, ginger)	Decontamination	〃	Up to 10	13 Sept. 1988

* A Co-60 commercial irradiator was installed in 1987 and is in operation(16.7 PBq : 450kCi) for treating medical products and foodstuffs.

본 고에서는 식품보존 및 의료용품 멸균에 이용되는 방사선조사 기술에 대하여 기술특성, 국내외 이용현황, 소비자 수용성, 이용개발 방향 등을 검토함으로써 이에 대한 사회적 이해증진과 건전한 활용에 기여하고자 한다.

2. 방사선 조사기술의 특성 비교

식품의 방사선 조사란 가열, 냉동, microwave 등과 같은 물리적인 처리 방법으로서 식품의 저장성 향상, 유해미생물 및 해충 제거, 물성개선 등을 목적으로 대상식품을 일정시간 동안 방사성동위원소(Co-60, Cs-137)에서 방출되는 γ선이나 기계적으로 발생되는 전자선(10 MeV 이하) 또는 X선(5 MeV 이하)에 노출시킴으로써 필요한 방사선 에너지를 식품에 통과 시켜 효과를 달성하는 방법이다.

특히 대부분 이용되고 있는 γ선은 투과력이 강하여 식품의 포장재나 포장방법에 상관없이 완포장된 상태로 처리할 수 있어 제품의 2차 오염을 방지할 수 있고, 식품의 품온 상승이 거의 없어(국제적으로 건전성이 인정된 10kGy 조사시 물과 동일한 열용량을 가진 식품에서 약 2.4℃ 상승) 열에 의한 영양분의 파괴나 외관의 변화를 막을 수 있으며 냉동식품에도 이용이 가능하다. 이와 같이 식품조사 기술은 기존의 타 가공·저장방법에 비해 에너지 소비가 월등히 적은 것이 특징이라 하겠다.(Table 2)

Table 2. Typical energy values required for food processing

Process	Energy value (KJ/kg)
Sprout inhibition(0.1kGy irradiation)	2
Insect disinfestation(0.25kGy irradaition)	7
Radurization(2.5kGy)	21
Radappertization(30kGy)	157
Heat sterilization	918
Cooking(93℃)	2,558
Chill storage(0℃/10days)	396
Frozen storage(-25℃/3.5weeks)	5,149
Blast freezing(4.4℃~-23.3℃)	7,552

(source : Brynjolfsson, 1981)

의료제품이나 식품에 오염된 미생물 제거 방법은 대상제품의 특성에 따라 크게 가열살균법과 저온살균법으로 나누며, 전자에는 autoclaving과 건열방법이, 후자에는 화학적 방법(가스나 약품)과 방사선 조사법이 각각 있다. 지금까지 ethylene oxide(EtO)에 의한 화학적 살균법은 식품 뿐만 아니라 의료제품의 멸균처리를 위해 광범위하게 사용되어 왔으나 약품의 잔류성, 환경공해, 2차오염 가능성, 공정의 복잡성 등의 문제점 때문에 사용이 금지되고 있는 추세이다(한국, 영국 : 식품 살균용 EtO 사용금지 발표). 또한 건열이나 습열, formaldehyde 등에 의한 살균방법은 제품의 내열성, 포장방법, 처리조건 등이 공정에 필수적인 영향을 미치게 되므로 이들 제품에 대한 산업적 이용은 거의 불가능하다. 그러나 방사선 에너지를 이용한 살균방법은 화학훈증제나 방부제와는 달리 잔류성분 및 환경공해가 없고 처리효과가 분명하며, 제품을 완포장한 채로 연속처리 할 수 있어 공정의 간소화와 시설의 가동률을 높임으로써 경제적 측면에서의 장점도 가져올 수 있다.(Table 3)

Table 3. Process parameters affecting the sterilization processes

Parameters	Dry heat	Moist heat	Ethylene oxide	Formal-dehyde	Irradia-tion
Time	+	+	+	+	+
Temperature	+	+	+	+	−
Pressure	−	+	+	+	−
Vacuum	−	+	+	+	−
Humidity	−	+	+	+	−
Post-treatment drying&degassing	−	+	+	+	−
Residue toxicity	Nil	Nil	Yes	Yes	Nil
Pollution	Nil	Nil	Yes	Yes	Nil
Process type	Batch	Batch	Batch	Batch	Continuous
Sterilization in final packaging for shipping	Not possible	Not possible	Not possible	Not possible	Possible
Packaging method	Narrow	Narrow	Narrow	Narrow	Wide

(+) : affects the process, (−) : not effect.

3. 이용현황

3-1. 食品照射

식품산업에 있어서 방사선의 이용분야는,

첫째 발아·발근억제, 해충/기생충 살충 및 숙도조정(저선량 조사 ≤ 1kGy), 둘째 부패 미생물 감소, 병원성 세균의 사멸 및 식품의 물성개선(중선량 조사 : 1~10kGy), 셋째 위생화 살균 및 완전살균(고선량 조사 : 3~50 kGy)으로 크게 구분된다. 식품의 방사선 조사는 의료제품의 방사선 멸균과는 달리 건전성(wholesomeness)의 측면에서 40여년의 연구가 수행되었으며, 1950~1970년대에는 18개 국가에서 방사선 조사식품을 조건부 또는 무조건적으로 허가하여 부분적인 실용화가 시도되었다.(Fig. 3) 그러나 1980년대에 접어

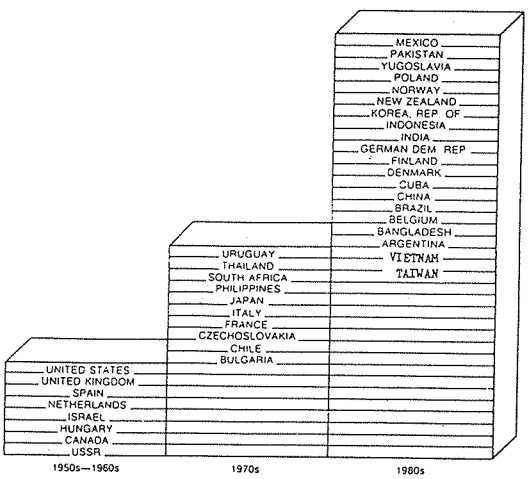

Fig. 3 Trends in national approvals of irradiated foods(source : IAEA).

들면서 국제기구(FAO/IAEA/WHO)와 보건기관(US FDA) 등이 방사선 조사식품의 건전성을 인정함에 따라 각국 정부는 자국에 알맞는 照射食品 허가규정을 마련하게 되었고, 현재까지 허가된 조사식품의 70% 이상이 '80년대에 허가되었다.(Fig. 1) 지금까지 방사선 조사식품의 세계적 허가현황을 38개국에서 한 품목 또는 여러 식품에 대하여 방사선 조사를 허가하였고(Fig. 3), 이들 국가들의 분포는 유럽 > 아메리카 > 아시아·태평양 > 아프리카·중동의 순으로 무조건적(unconditionally) 허가가 증가되고 있다. (Fig. 4)

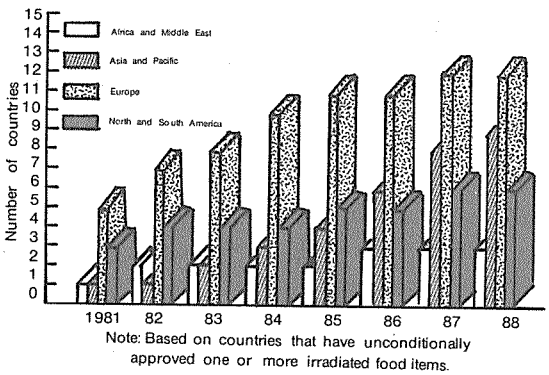

Fig. 4 Regional trends in approvals of irradiated food items(source : IAEA).

식품조사의 산업화 현황을 보면 현재 24개국에서 30여 상업용 조사시설이 가동중에 있으며(Fig. 5), 년간 500,000M/T 이상의 식품

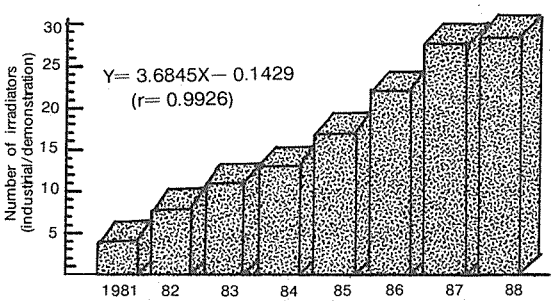

Fig. 5 Trends in the use of irradiators for food processing on a commercial scale(source : IAEA).

이 처리되고 있다. 주요대상식품은 건조향신료, 근채류, 건조채소류, 가금육, 신선 과채류 등이며, 소련(곡류 등, 40만톤/년), 남아프리타(과채류 등, 약 2만톤/년), 일본(감자, 1.5~2만톤/년), 벨기에(향신료 등, 1만톤/년), 네

덴란드(건조채소류 등, 1.8만톤/년), 프랑스(닭고기 등, 약 1만톤/년), 중국(양파 등, 약 1만톤/년) 등은 년간 1만톤 이상의 식품을 방사선 조사하여 시판하고 있다.(Table 4)

Table 4. Approvals and practical utilization of irradiated food in different countries

Food groups	No. of approved countries	No.of utilized countries	Food groups	No. of approved countries	No.of utilized countries
Tubers/bulbs	31	10	Meats	1	0
Grains	15	1	Poultry	13	5
Legumes	12	0	Eggs	2	0
Spices	25	15	Processed meats	4	3
Herbs	6	0	Fresh fish	10	2
F. vegetables	11	2	Fishery products	4	0
D. vegetables	13	5	Processed foods	5	2
F. fruits	16	4	Others	11	0
D. fruits	6	1			

· Irradiation technology is being practically utilized in 24 countries, processing more than 500,000 metric tons of foodstuffs per annum. Argentina, Belgium, Brazil, Canada, Chile, China, Cuba, Denmark, Finland, France, German, D. P., Hungary, Indonesia, Israel, Japan, Korea, Mexico, Netherlands, Norway, S. Africa, Thailand, U. S. A., USSR and Yugoslavia (source : IAEA).
Countries underlined produce more than 100,000 metric tons of irradiated food per annum and approximately 700 metric tons of foodstuffs(spices, etc.) are being irradiated per annum in Korea.

국내에서는 현재 12개 품목(감자, 양파, 마늘, 밤, 생버섯, 건조버섯, 건조향신료 6종)에 대하여 감마선 조사가 허가되어 있으나 소비자 수용성 등과 관련하여 처리식품의 양이 제한되어 있다. 그러나 건조향신료의 경우에는 '88년 559톤, '89년 714톤, '90년 765톤으로 매년 증가되고 있으며, 이용업체수도 51업체('88)에서 68업체('90)로 크게 늘어가는 추세이다.(Fig. 6, 기울기 21.5)

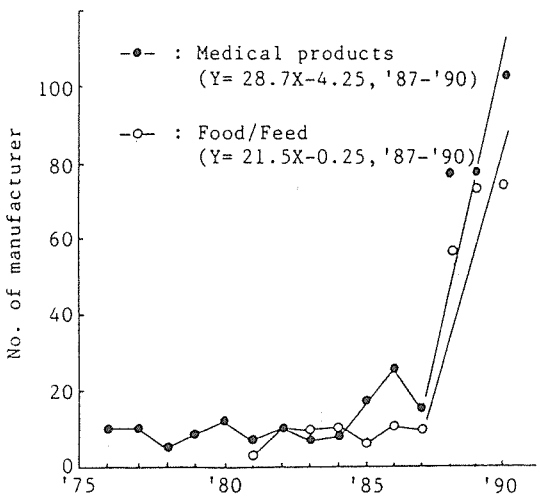

Fig. 6 Number of manufacturers utilizing irradiation processing for medical products and food/feed in Korea. (source : KAERI, Greenpia)

3-2. 의료용품 멸균

의료품의 멸균제로서 EtO에 대한 연구가 발표된 이래(Kaye 등, 1952) 호주, 영국, 프랑스 등은 1960년, 미국에서는 1964년에 처음 EtO의 사용을 시작하였다. 그러나 1970년대 부터는 EtO의 안전성 문제가 대두되었고, 나아가 반응생성물(EtCH 및 EtG)에 대한 잔류량 규제도 점차 엄격하게 되어 최근에는 식품 및 의료용품에 대한 EtO의 사용이 금지되거나 감소되는 추세에 있다.

현재 세계적으로 멸균처리되고 있는 의료제품의 전체량('88년 기준)은 361million cubic feet에 이르며, 이들 중 70%는 EtO, 27%는 감마선 조사법, 나머지 3%는 electron beam에 의해서 멸균 처리되고 있다.(Fig. 7, 10) 그리고 주요 국가별 방사선 멸균법의 이용률은 호주 약 70%, 일본 20% 이상,인도 10% 이상, 북미 약 80% 등으로 나타났으며(Table 5), 국내에서는 아직 10% 미만의 수준으로 약 30종의 품목에 이용되고 있다.

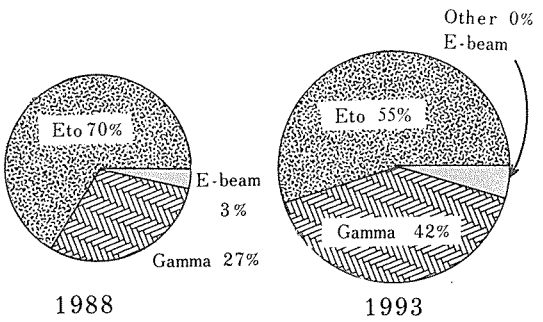

Fig. 7 Market share by sterilization methods in disposable medical products (source : Nordion).

UNDP의 지원에 의하여 방사선 멸균기술 商用시범시설이 건설된 인도(BARC)와 한국(KAERI)의 년도별 처리물량 추이를 비교해 보면, 1970년대 중반에는 처리량이 500m³ 이하였으나(이용업체수 : 약 10개사) 매년 높은 증가율을 나타내었고(인도 : 평균 1.33, 한국 : 평균 1.30, 인도네시아 : 1.37) (Fig. 8), 이

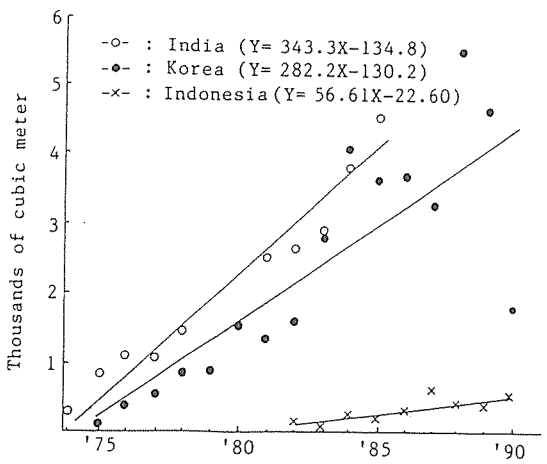

Fig. 8 Annual amount of medical products sterilized by irradiation in Asian countries(source : Isomed, KAERI, Greenpia, Razzak 1991).

용업체수는 한국의 경우 상업용 민간 조사시설이 가동된 1988년부터는 전년도에 비해 평균 2.74배의 증가를 나타내어(기울기 : 28.7) 100여개사에 이르고 있다.(Fig. 6)

Table 5. Commercial sterilization of medical products by irradiation in different countries

Countries	Quantity or portion(%)	Source (Co-60)	Manufacturers
Australia	approx. 70%	apporx. 2 MCi	–
India	> 10%	approx. 350kCi	> 250
Indonesia	approx. 600m³	approx. 600kCi	> 40
Japan	> 20%	> 10 MCi	–
Korea	< 10%	450kCi	> 100
North America	approx. 80%	> 100MCi	–
World total	3.1M m³(Gamma : 2.8, EB : 0.3)/27% of 10 M m³		

(source : UNDP/RCA/IAEA Report, Nordion)

4. 照射食品의 건전성 및 수용성

4-1. 건전성 평가

거의 반세기의 연구개발 역사를 지닌 식품조사 기술은 1980년대에 접어 들면서 그 안전성에 대한 과학적인 뒷받침과 본 기술의 필요성에 대한 새로운 인식으로 실용화를 위한 제2의 도약을 시작하였다. 다음은 방사선 조사식품의 건전성에 대한 국제적 평가와 실용화 추이를 요약한 것이다.

照射食品의 건전성에 대한 국제적 평가

- FAO/IAEA/WHO Joint Expert Committee on the Wholesomeness of Irradiated Food(JECFI, 1976) ; 식품의 방사선 조사를 물리적인 처리로 인정
- FAO/IAEA/WHO(JECFI, 1980) ; 총 평균 10kGy 이하로 조사된 식품의 독물학적, 영양학적, 미생물학적 건전성 인정
- 국제미생물학회(1982) ; 총 평균 10kGy 이하로 조사된 식품의 미생물학적 안전성 인정

○ FAO/WHO Codex Alimentarius Commission(1983) ; 총 평균 10kGy 이하로 조사된 식품의 안전성을 수용하고, "The Codex General Standard for Irradiated Food and the Recommended International Code of Practice for the Operation of Radiation Facilities for the Treatment of Food"을 채택하여 120여 회원국에 활용 권고
○ 38개국, 40여 식품군 ; 무조건적 또는 조건부 허가
○ 32개국, 40여 식품군 ; 무조건적 허가
○ 24개국 ; 상업적 실용화

4-2. 소비자 수용성

食品照射의 산업적 성공여부는 결국 소비자의 수용성에 달렸다고 볼 수 있다. 따라서 새로운 가공법과 그 제품은 소비자들에게 효과적인 매체에 의해 알려지고 충분한 이해와 인식이 있어야 한다. 지금까지는 각 국에서 나름대로의 방안을 준비하여 소비자에게 수용성을 넓혀가고 있으나 제도화 되지 못한 실정이며, 관련 국제기관에서는 소비자 수용성을 보다 효과적으로 높혀 나가기 위해 모든 국가에서 다같이 활용될 수 있는 국제적인 차원의 방안과 제도마련에 노력하고 있다. 다음은 照射食品에 대한 소비자의 수용성 확대에 있어서 반드시 주지되어야 할 사항들이다. "i) 식품이 어떤 목적을 위해 방사선 처리되었다는 사실, ii) 방사선 처리로서 어떤 형태로든 식품의 품질이 개선되었다는 사실, iii) 방사선 처리된 식품은 처리되지 않은 식품과 동일한 품질특성을 지니며, 정부 당국의 합법적인 절차에 의해 생산·공급될 뿐 아니라 대부분의 경우 방사선 조사가 아니면 타 방법에 의해서 처리되어야 하는 식품이 대상이 된다는 사실 등이다."

최근에 실시된 照射食品의 시험시판 결과에 따르면 食品照射에 대한 정보를 알고 있는 소비자는 방사선 조사식품이라는 것을 확인한 후에도 그 식품의 구입을 선호하였다. (Fig. 9) 이와 같은 시험시판은 과거 수년동

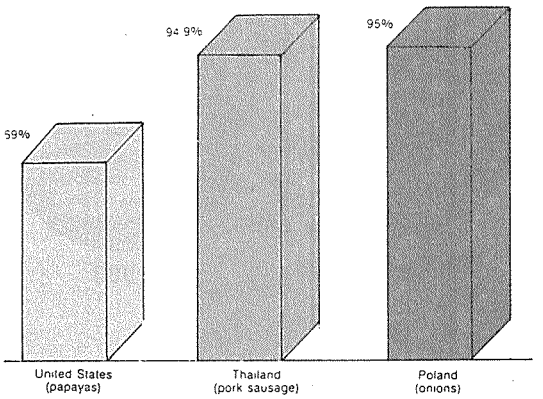

Fig. 9 Percentage of consumers who said they would purchase irradiated food again in marketing tests in many countries(source : IAEA).

안('84~'89) 아르헨티나, 방글라데시, 중국, 프랑스, 헝가리, 인도네시아, 이스라엘, 필리핀, 폴란드, 태국 및 미국 등에서 방사선을 조사한 향신료, 양파, 감자, 돼지고기, 소시지, 망고, 파파야 등에 대하여 수행되었다.(총 2

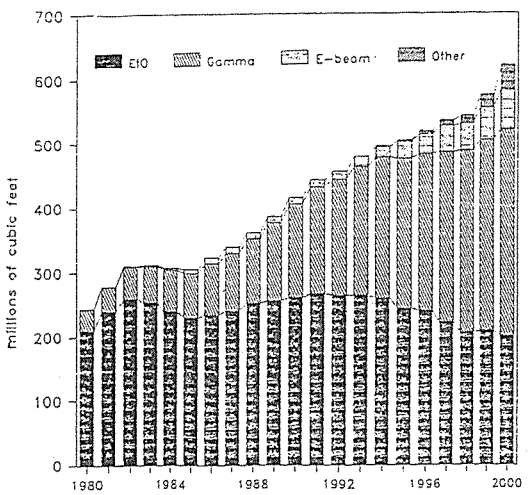

Fig. 10 Future growth of disposable medical products sterilized by different methods(source : Nordion).

만여톤) 대부분의 시험시판에서 방사선 조사 식품은 재래적 방법으로 처리된 식품보다 잘 팔렸으며, 이와 같은 경향은 최근에 실시된 국내의 설문조사 결과에서도 확인되었고, 특히 대부분의 소비자(71%)들은 실용화의 지연이유를 본 기술에 대해 이해와 정보부족이라고 응답하였다.

5. 이용개발 방향

식품 및 의료용품에 대한 방사선 이용기술은 기존방법의 문제점을 보완하거나 해결할 수 있는 실제적인 기술로 평가되면서 그 안전성과 경제적 타당성이 점차 인식되어 가고 있다. 세계적으로 방사선 조사기술은 자국의 실정에 알맞게 개발, 활용되고 있으나 Codex 규격과 같은 국제적으로 상호 신뢰할 수 있는 제도와 규정이 요구된다. 따라서 1988년 FAO/IAEA/WHO/UNCTAD/GATT-ITC는 공동으로 "방사선 조사식품의 수용, 통제 및 국제무역"에 관한 회의를 개최하여 식품조사 기술의 활용에 필요한 "International Document on Food Irradiation"를 채택하였고, 의료용품 멸균에 대한 국제적 시행규칙도 이미 공동 활용되고 있다.

이와 같이 식품조사, 의료용품 멸균 등을 위한 방사선 조사기술은 방사선의 특수성 때문에 지역간 국제협력 사업으로 연구 개발되고 있으며(UNDP/IAEA/RCA), 개발된 기술의 산업화에서는 법적허가 취득과 소비자 수용성 등이 전제되어야 하므로 관련 기업은 연구기관 및 정부당국과 긴밀한 협조체제를 유지하면서 국내외 기술여건에 부합된 이용기반을 확립해 나가야 할 것이다.

향후 식품산업분야의 이용개발 방향은 UNDP/IAEA/FAO 협력연구로 수행중인 "식품조사 가공통제 및 수용" 프로젝트 하에서 조사식품에 대한 소비자 수용성 연구, 품질관리, 산업적 시설을 이용한 저장시험, 시험시판 등을 기업과 공동으로 추진해 나가야 하며, 나아가 방사선의 고도이용을 위하여 감마선/전자선 등에 의한 효소, 미생물 등 생물활성 물질의 고정화, 기능성 위생식품 개발, 수출식품의 부가가치 향상 연구 등이 수행되어야 할 것이다.

한편 방사선 멸균분야에서는 일회용 의료용품 이외에도 고부가 가치의 의약품, 생체재료(혈액투석기 등), 의료기구 등에 대한 이용분야 개발과 내방사선 기능재료의 개발에 따른 합성수지 분야의 산업화 확충 및 하수침적물이나 상하수 정화처리 기술 등에 대한 기반연구도 추진되어야 할 것이다.

6. 결 론

식품 및 의료용품에 대한 방사선 조사기술의 역할은 식량의 이용률 증대, 위생적 식품 및 의료용품의 생산공급, 국제교역에서의 검역방법 개선 등을 들 수 있으며, 이와 같은 본 기술의 이용상 장점이나 특징은 기존 기술의 문제점 해결에 적합한 타당성을 제시해 주고 있다.

우리나라의 식량자급도는 매년 감소하여 최근에는 40%에도 미치지 못하는 실정이며, 식품조사 기술은 경제적 조건에서 식량의 대량저장을 가능케함으로써 물가안정과 수입대체 효과를 가져올 수 있다. 특히 식품에 기인된 질병예방에 효과적인 방법이므로 산업화된 국가에서는 본 기술의 활용을 적극 추진하고 있다. 특히 EtO와 같은 화학훈증제의 사용이 국내외적으로 금지되고 있는 추세이므로 식품 및 의료용품 산업에서는 방사선 조사법이 효과적인 대체기술로 적극 활용될 전망이며(Fig. 7, 10), 현재 세계적으로 46개국에서 160여기의 Co-60 조사시설(166 MCi)이 산업적 이용을 목적으로 가동되고 있다.

이미 언급된 바와 같이 본 기술은 방사선이란 특수성 때문에 정부와 산업체의 관심과 지원에 의해서 연구개발이 추진되어야 하며, 기술의 활용분야가 국민의 건강과 보건에 직접 관련되어 있기 때문에 산업화의 추진과 기술의 축적은 반드시 연구기관 및 관련당국과의 상호협력에 의해서 이루어져야 할 것이다.