

밀봉선원 폐기물 처분을 위한 특성 평가

Characteristics of the Spent Sealed Radioactive Source for Disposal

이지훈, 이태범, 박진백, 최광섭, 김창락
한국수력원자력(주) 원자력환경기술원
대전광역시 유성우체국 사서함 149호

요 약

방사성 밀봉선원은 농업, 산업, 의학 및 여러 가지 연구 분야에서 광범위하게 사용되고 있으며 이러한 밀봉선원 폐기물의 안전관리 및 처분을 위해서 국내 현실에 맞는 방사능량 설정 제한치를 정해야만 한다. 이에 따라 국내 밀봉선원 폐기물 처분을 위한 발생현황 및 특성을 분석한 결과 Am-241이 42%로써 최대 수량을 보였으며 주요 조사선원인 Co-60의 누적 방사능량과 개별 선원의 최대 방사능이 각각 8,868Ci과 1,045Ci로 큰 방사능량을 보유함을 알 수 있었다. 이에 비하여 Ra-226선원은 방사능 범위가 890 μ Ci에서 225mCi로 비교적 적은 범위를 가지나 Ra-226선원은 높은 방사독성으로 인하여 향후 적절한 처분대책 수립이 필요하다.

Abstract

Sealed Radioactive Source(SRS) are made use of various fields such as agriculture, industry, medicine and research. In order to do safe management and disposal of SRS, the suitable limiting values for important SRS in Korea should be determined. Accordingly, the generation status and characteristics of the domestic SRS were analyzed for disposal. As a result, Am-241, the maximum amount in SRS, was shown 42%. The total activity and maximum activity of Co-60, the major irradiation source, were analyzed as 8,868Ci and 1,045Ci, respectively. On the other hand, the activity of Ra-226 has relatively narrow range from 890 μ Ci to 225mCi but appropriate disposal measure for Ra-226 will be required due to the high radiotoxicity in near future.

1. 서론

방사성 밀봉선원(SRS; Sealed Radioactive Source)은 농업, 산업, 의학 및 여러 가지 연구 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 밀봉선원의 정의는 국내 원자력법령집에 “기계적인 강도가 충분하여 파손될 우려가 없고, 부식되기 어려운 재료로 된 용기에 넣은 방사성 동위원소로서 사용할 때에 방사선은 용기외부로 방출하지만 방사성동위원소는 누출하지 못하도록 되어 있는 것을 말한다.”라고 기술되어 있다.¹⁾

선원이 더 이상 필요치 않거나 의도한 적용조건에 맞지 않을 때 예를 들어 방사능이 너무 약하거나, 장비가 기능 저하 또는 쓸모없이 되었거나, 선원이 손상 또는 누설되는 경우는 밀봉선원 폐기물로 고려되는데 이 때에도 여전히 높은 방사능(기가 벡크렐(GBq) 또는 테라 벡크렐(TBq)수준)을 가지며, 오래된 방사성 밀봉선원은 밀봉(encapsulation) 기술이 최근 것에 비해 떨어져 누설과 용해에 약하게, 낮은 품질로 제작된 것이 많다.

폐선원 즉, 사용 후 밀봉선원(Disused Sealed Radioactive Source)은 모두 폐기물이 아니다. 제일 먼저 고려되어야 하는 것이 이러한 선원이 다른 응용분야에서 또 다르게 사용될 수 있다는 점이다.

만일 어떤 기술적, 경제적 이유로 인해 더 이상 이용하지 않을 경우 사용 후 밀봉선원은 방사성 폐기물이 된다. 밀봉선원 폐기물(SSRS; Spent Sealed Radioactive Source)과 관련된 많은 사고가 전 세계적으로 발생하여 왔으며 위험도를 줄이기 위하여 사용 장소뿐 아니라 전 국토에 걸쳐 안전관리를 위한 적절한 기반구조를 갖는 것이 중요하다. 사용 중인 선원은 엄격한 규제를 받으며 운영 중에는 잘 개발된 방사선방호시스템을 적용한다. 이와는 반대로 밀봉선원 폐기물은 규제를 벗어날 수도 있으며, 방사선 방호와 폐기물관리 시스템 밖에 있게 될 수 있으므로 폐기 선원의 특성에 따라 분류하여 안전하게 관리하여야만 한다. 국제원자력기구(IAEA)에서는 1990년대 초부터 가입국 특히 개도국에 대한 기술 지원의 목적으로 밀봉선원 폐기물의 안전관리에 관한 기술보고서를 발표하고 있으며, 법적 규제측면, 기술 및 관리측면 그리고 국제협력 측면에서의 밀봉선원 폐기물 관리 분야의 프로그램을 시행하고 있다.²⁾

국내의 경우 2008년부터 중·저준위 방사성폐기물의 처분시설 운영이 예상되므로 본 연구에서는 합리적인 핵종농도 및 최대 방사능량 제한치 설정 등에 따른 밀봉선원의 분류 및 처분방법을 도출하기 위하여 밀봉선원 폐기물의 국내외 발생현황 및 특성을 규명하였다.

2. 밀봉선원 폐기물 특성

밀봉선원은 국제 표준인 ISO 2919:1999에서 시험 성능을 기초로 분류하여 일반 요건,

성능 시험, 생산 실험, 표기 및 확인서 등을 규정하고 있으며, 선종(線種)에는 주로 α 선원, β 선원, 저에너지의 $\gamma(X)$ 선원, 고에너지의 $\gamma(X)$ 선원 등 여러 가지 종류의 선원이 있고, 선원의 특성 및 에너지에 따라 캡슐(capsule)의 재료 및 두께가 결정되어 진다. 밀봉선원은 사용목적에 따라 이용하고자 하는 방사선이 잘 방출되어야 하며, 방사성핵종의 밀봉 및 고정화 방법은 내구성 측면에서 다음과 같은 두 가지 사항이 만족되어야 한다.

- 사용조건에 대한 내구성 : 캡슐(capsule)은 사용 중에 기계적인 힘, 온도, 화학적 현상에 대해서 내구성을 갖추고 있어야 한다.
- 내용물의 변화에 대한 내구성 : 캡슐에 봉입된 물질에 의한 화학적 부식, 봉입물질의 방사선에 의한 손상, 압력증가(수분이나 유기물 등은 방사선분해로 가스를 발생시키고, α 선은 헬륨가스로 된다.)등에 대해서 내구성이 있어야 한다.

이상과 같은 이유 때문에 캡슐의 재료는 스테인레스 강이나 귀금속 종류가 많이 사용되고, 경우에 따라서는 알루미늄이나 티타늄, 황동 등도 사용된다. 용접부분은 밀봉된 방사성 동위원소가 누출되지 않을 정도로 양호하여야 한다. 밀봉선원의 주요 핵종별 특성을 선종에 따라 다음과 같이 구분하여 설명할수 있다.³⁾

가. 베타/감마 방출 방사성 핵종

1) 코발트

베타입자와 두 개의 감마 광자(1.17 그리고 1.33MeV)의 방출에 의해 붕괴하여 밀봉선원에서 금속성 코발트는 선원에 가장 높은 비방사능을 주므로 많이 사용되었다. 보통 얇은 디스크나 스테인레스 스틸 캡슐에 용접된 작은 실린더형 펠렛 형태(pellet type)이다. 금속은 공기 중에서 안정하나 표면이 얇은 산화층(oxide layer)을 형성하고 만약 방호되지 않은 코발트를 사용한다면 오염의 원인이 된다. 이러한 이유로 방사성 선원에서 사용된 코발트는 활성화하기 전에 니켈 도금된다. 금속 코발트는 물에 녹지 않는다. 만약 물에 녹는 형태의 코발트가 인체에 흡수된다면 고르게 분포되며 간에서의 농도는 다른 곳의 4배정도 높을 것이다.

2) 세슘

가장 널리 사용되는 세슘 방사성 동위원소는 일반적으로 중간 에너지의 감마-방출체로 간주된다. 비록 662 keV 의 감마-광자가 생성되기는 하나 β^- 붕괴로 생성된 Cs-137에 의해 Ba-137m이 된다. 세슘 염화물 파우더는 종종 스테인레스 스틸 캡슐에 용접에 의해 밀봉되어진다. 그러나 세슘 염화물은 부식성이고 내부에서 캡슐이 부식하여 분산이 야기될 수 있다. 인체에 흡수될 때 근육에 높은 농도로 도달된다.

3) 이리듐

73.8일의 짧은 반감기를 가지고 있고 심지어 높은 방사능의 이리듐 선원도 5년 이내에 면제한도(exemption limit) 이하로 붕괴될 것이다. 붕괴 시에는 약 0.5MeV까지의 많은 감마 양자의 방출이 포함된다. Ir-192 선원은 물질의 비파괴 검사 분야에서 대단히 중요하다.

나. 알파 방출 방사성핵종

1) 라듐

Ra-226은 U-238 붕괴사슬의 일부분이다. 라듐은 알파 방출에 의해 반감기 3.6일인 희귀 가스인 Rn-222로 붕괴한다. 붕괴사슬의 마지막인 안정동위원소 Pb-206로 되기 전에 4개의 알파 방출을 포함한 8개 방사성핵종을 생성하게 된다. 따라서 붕괴하는 Ra-226 원자 각각은 5개의 알파 입자를 발생시킨다. 또한 붕괴하는 동안 낮은 에너지의 감마 광자와 베타 입자가 방사된다. 과거에 널리 보급된 라듐의 특별한 특성은 밀봉선원 가운데서도 두드러진 문제를 일으킨다. 라듐은 알칼리(Alkali) 토금속이다. 이것은 매우 반응성이 좋고 심지어 질소와도 반응한다. 방사성선원에서 라듐은 항상 브롬화합물, 염화물, 탄산염 등 염의 형태로 사용된다. 모두 수용성으로서 방사선적 문제를 일으킬 정도이다. 이러한 염은 만약 캡슐이 손상되면 파우더처럼 쉽게 분산된다. 상기 특성으로 인하여 최근에는 라듐이 밀봉선원으로 사용하기 위한 적절한 물질로 간주되지 않는다.

2) 아메리슘

낮은 에너지 감마선원으로 사용할 때 스테인레스 금속 캡슐은 감마 광자가 과도한 감쇠 없이 방출되도록 하기 위해 한 방향에 얇은 창을 가지고 있다. 인체에서 아메리슘은 뼈와 간에 축적되고 적은 양을 흡입하여도 높은 위험 선량을 가져온다.

밀봉선원 폐기물 발생시 사용용도에 따른 방사능 범위를 그림 1에 제시하였다.⁴⁾

3. 국내외 밀봉선원폐기물 발생현황 및 특성평가

가. 국외 밀봉선원폐기물 발생현황

IAEA와 회원국을 중심으로 밀봉선원 폐기물과 관련된 사고의 발생가능성과 위험도를 낮추는 조치를 취해왔으며, 밀봉선원 폐기물의 안전관리를 위한 다양한 활동이 있었다. 그 일환으로 1991년도에 발간된 기술보고서가 처음으로 발간되었는데 이에 따르면 밀봉선원 폐기물로 인한 위험성은 선진국이나 개발도상국 모두에 존재하며 대부분 같은 문제를 갖고 있으나 다음과 같은 점에서 주요한 차이를 보이고 있는 것으로 지적되었다.

- 선진국의 경우, 주요 문제점은 사용되었거나 사용 중인 선원이 대량이라는 점이다. 즉, 이 중 일부가 손실되거나 계량되지 않았더라도 그 양은 엄청날 수 있다.
- 개도국의 경우는 관련법규 도입 이전에 많은 선원이 수입되어 손실되거나 적절하게 관리되지 않은 부분이 많을 것으로 보인다. 또한 밀봉선원 폐기물 관리 기술과 경험이 부족한 점이다.
- 선진국은 규제 조직의 기반구조와 밀봉선원 폐기물 관리 프로그램을 적용할 기술능력을 갖추고 있다는 것이 개도국의 상황과는 큰 대조를 이루고 있다. 이러한 점에서 IAEA는 개도국을 지원하기 위한 프로그램을 진행하고 있다.

유럽 공동체중 주요국가의 2000년 말 핵종별 밀봉선원폐기물 발생수량을 그림 2에 도시하였다.⁵⁾

나. 국내 밀봉선원폐기물 발생현황 및 특성평가

2003년 12월 31일 현재 국내의 밀봉 방사선 사용기관은 산업체, 비파괴업체, 공공기관, 의료기관 및 연구기관 등 총 3,496개가 인허가 되어 있으며, 매년 이용기관의 증가추세를 보이고 있다. 용도별로는 산업체에서는 현재 방사성 동위원소와 방사선 발생장치를 포함하여 성분분석을 목적으로 가장 많이 사용하고 있으며, 다음으로 비파괴를 목적으로 사용하고 있다. 용도별로 가장 많이 사용되고 있는 장반감기 핵종으로는 Am-241, Cs-137 및 Ni-63을 들 수 있으며 비파괴검사와 성분 분석등의 산업체 및 공공기관에서 이용하고 있다. 의료기관에서는 주로 단반감기 핵종인 Fe-55, H-3, C-14을 진단의 목적으로 사용하고 이들 핵종의 사용기관의 수는 평균 50개 정도이며 또한, 교육기관에서는 교육 및 연구, 실험을 목적으로 주로 Ni-63 핵종이 사용되고 있다. 밀봉선원의 국내 사용허가량은 2003년 말 현재 약 160만 Ci에 이르고 있으며, 핵종별 허가량은 표 1.과 같다.⁶⁾

국내 밀봉선원 폐기물은 현재 한국수력원자력(주) 원자력환경기술원의 RI 폐기물폐기 시설에 보관 및 저장하고 있으며 자체처분핵종을 제외한 주요핵종의 2003년 12월 현재 연도별 발생량 및 누적방사능량과 각 핵종 당 최대 최소의 방사능량 비교한 값을 그림 3, 4, 5, 6 에 도시하다. 밀봉선원폐기물 중 Am-241핵종이 가장 많은 수량인 1664개를 보유하고 있으며 자체처분핵종을 제외한 핵종의 42 %를 차지함을 그림 3에서 알 수 있다. 또한 그림 4의 연간 핵종 발생량에서 알 수 있듯이 99년도에 수거한 Am-241핵

종의 수거량이 대부분을 차지함을 알 수 있으나 그림 5의 누적 방사능량을 보면 핵종 중 Am-241은 수량에 비해 누적된 방사능량이 Co-60선원보다 작다. 그 이유는 주로 산업체에서 조사용으로 사용하는 선원인 Co-60의 핵종의 방사능크기가 다른 핵종들의 크기에 비해 압도적으로 크기 때문이며 Co-60 선원 중 가장 큰 방사능 세기는 1045.0 Ci이다. 그림 6에서 보듯이 Ra-226의 분포는 0.89 μ Ci에서 225 mCi의 다른 핵종에 비해 비교적 낮은 방사능 분포를 갖는 것을 알 수 있으나 Ra-226선원의 고유 특성상 취급에 주의를 요하게 되며 이와 같은 알파방출핵종인 Am-241 과 중성자 선원인 Am(Be)-241 등의 장반감기 핵종들은 보어홀 처분(borehole disposal) 또는 심지층 처분(In-depth disposal)등 별도의 처분방안을 설정하여야 할 것이다.

4. 결론

밀봉선원 폐기물은 방사성폐기물중 비교적 크기는 작으나 특별한 주의를 요하는 물질이다. 특히 현재의 품질 기준이하로 제작된 라듐선원의 경우 통제나 관리는 문제가 될 수 있으며, 음식물 보존이나 살균에 사용된 밀봉선원 폐기물의 경우도 처분상 특별한 고려가 필요하다. 이러한 밀봉선원의 특징은 작은 크기와 고건전성물질로 되어 있음에도 높은 비방사능을 갖는다는 것이며 이러한 특성들이 미래의 피폭시나리오에서 보통의 방사성폐기물과는 다른 피폭결과를 가져올 수 있다. 예를 들면 이중밀봉구조를 사용하므로 다른 폐기물에 비해 열화에 저항하므로 반감기가 충분히 긴 선원의 비방사능이 생태계로 나갈 때까지도 높은 상태를 유지할 수 있으며, 어떠한 상황 하에서는 자연방벽의 희석, 분산 효과를 기대할 수 없게 되고 예상한 것보다 높은 피폭선량을 야기할 수 있다. 대부분의 단반감기 밀봉 선원의 경우 적절한 처리와 설계를 통한 천층 처분이 가능하지만 Ra-226과 Am-241과 같은 장반감기 선원이나 조사시설에서 사용된 대형 선원들은 미래에 잠재적인 방사선적 위협을 주게 되므로 별도의 처분시설의 설계가 필요할 것이다.

밀봉선원 폐기물의 발생량을 조사한 결과 장반감기 핵종인 Am-241, Ra-226이 각각 42%, 13%를 차지하였으며 산업체에서 수위 측정용도 및 조사시설에서 사용하는 대형 선원인 Co-60의 누적 방사능량과 개별 선원의 최고 방사능량이 각각 8868Ci, 1045Ci로 큰 수치를 보임을 알 수 있었으며 누적된 방사능량 중 한개의 대형선원이 대부분을 차지함을 또한 알 수 있다. Co-60에 비해 방사능의 크기가 차이가 나지 않는 Ra-226의 방사능 범위는 0.89 μ Ci에서 225 mCi의 비교적 낮은 방사능 범위를 갖는 것을 알 수 있으나 Ra-226선원의 특성상 취급에 주의를 요하게 된다. 또한 대표적인 중성자 선원인 초우라늄원소인 Am-241과 Be분말을 균일하게 혼합한 Am(Be)-241선원의 수량은 다른 선원에 비해서 적은 수이지만 Am-241처럼 처분인수 시 주의를 요함을 간과해서는 안 될 것이다. 국내에서도 본 논문에서 조사, 평가된 국내 밀봉선원의 발생현황 및 특성을 고려하여 향후 각 밀봉선원에 적절한 처분방안의 도출이 필요할 것이다.

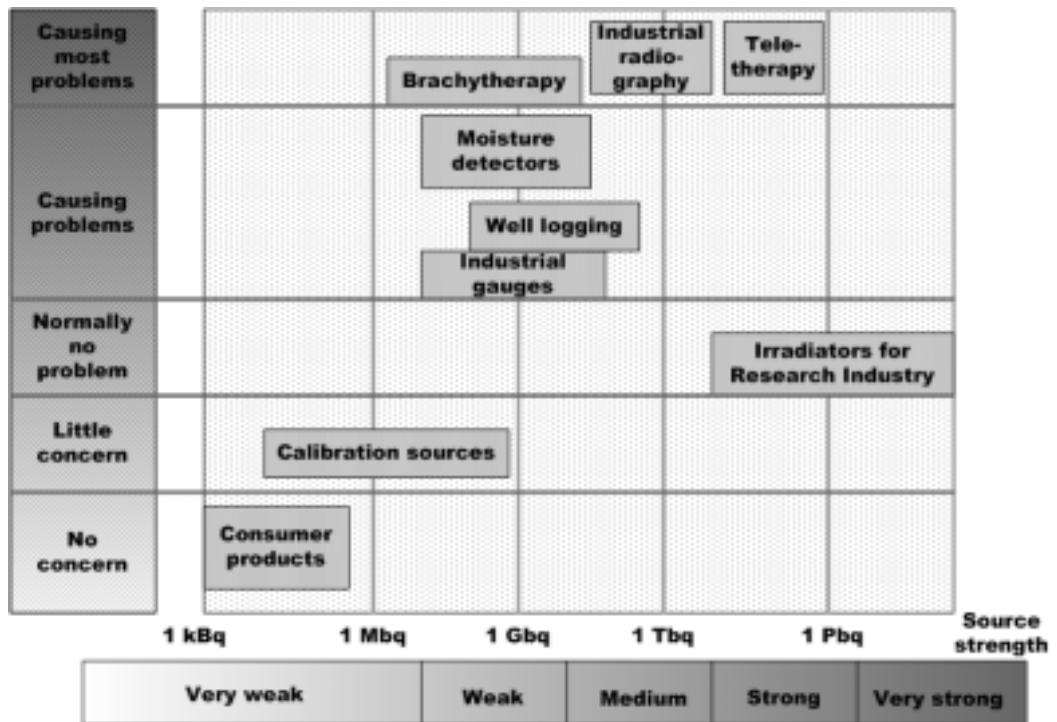


그림 1. 밀봉선원 폐기물 사용용도에 따른 방사능 범위

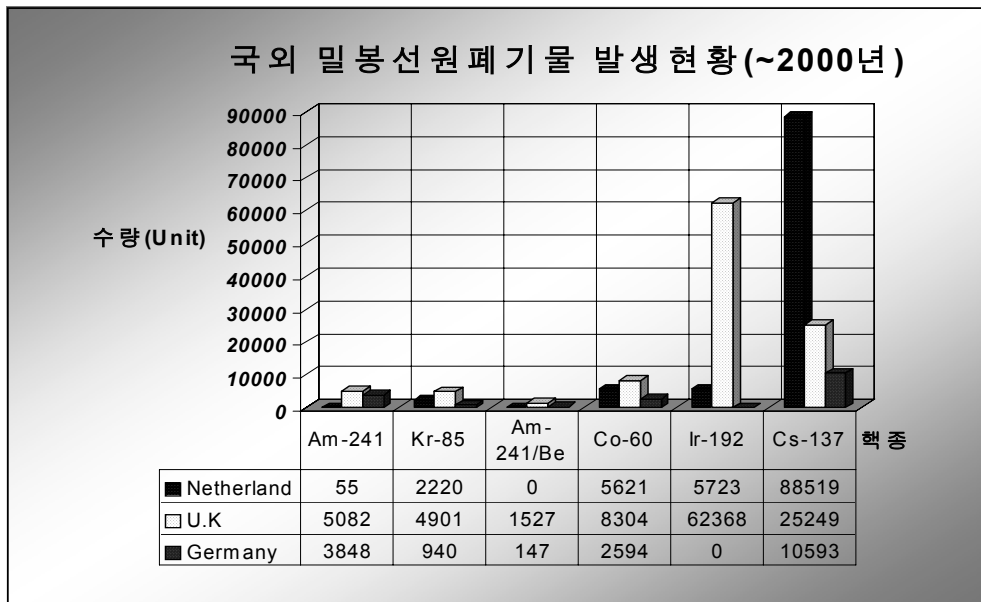


그림 2. 국외 밀봉선원 폐기물 발생 현황 (2000. 12)

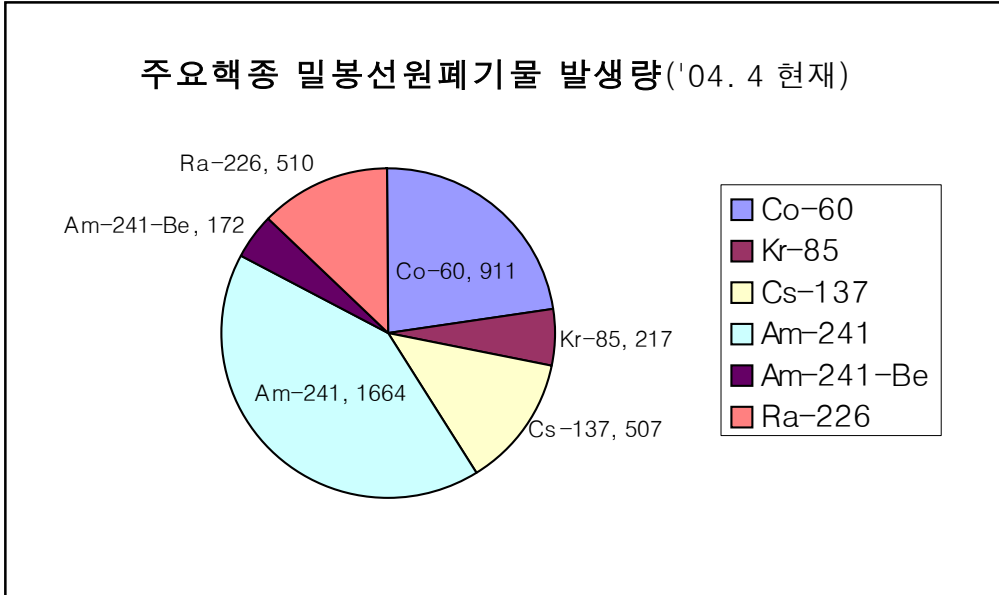


그림 3. 주요핵종별 밀봉선원 폐기물 발생량

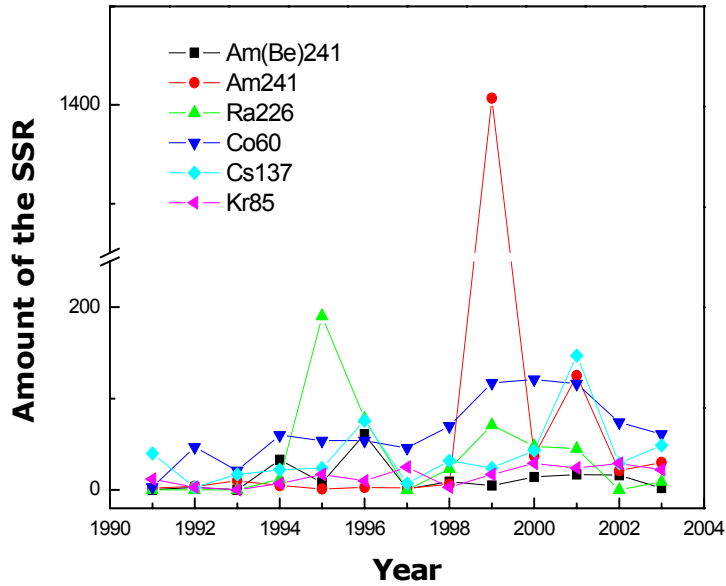


그림 4. 연도별 주요 밀봉선원 폐기물 핵종 발생량

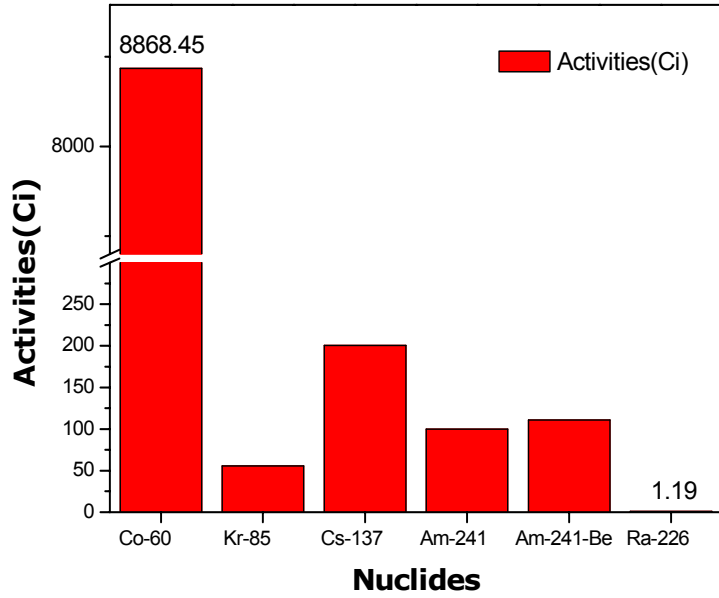


그림 5. 국내 밀봉선원 폐기물 누적방사능량

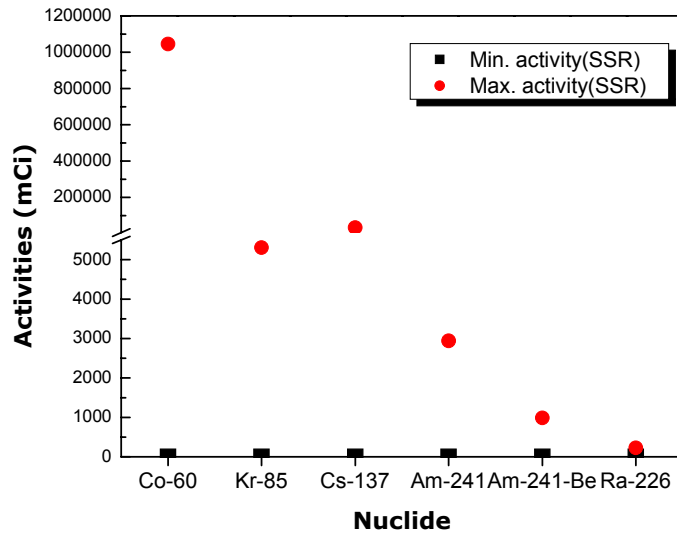


그림 6. 국내 밀봉선원 폐기물의 주요핵종의 최대 최소 방사능량 비교

표 1. 국내 밀봉 방사성동위원소의 허가량

핵종	방사능량	핵종	방사능량
Am-241	281,775.5840	I-125	26,210.0000
Am(Be)-241	58,660.0000	Ir-192	154,107,710.0000
Au-198	20,010.0000	Kr-85	335,005.1000
C-14	21.4122	Ni-63	40,424.5252
Cd-109	630.9420	Pd-103	2,000.0000
Cf-252	5,044.7846	Pm-147	35,997.3000
Cm-244	9,085.0120	Po-210	255.4020
Co-57	2,342.7820	Ra-226	469.9225
Co-60	1,309727,061.5480	Se-75	20.1000
Cs-137	132,410,492.7746	Sr-90	11,801.0170
Fe-55	5,428.1060	Tl-204	50.0000
Gd-153	12,639.0000	W-188	10.0000
Ge-68	310.1500	Yb-175	100,010.0000
H-3	371.2689	기타	89,904.0570
계(Total)		1,597,283,740.7881	

참고문헌

- 1) 한국원자력안전기술원, “원자력관계법령집”, 2001
- 2) International Atomic Energy Agency, “Code of Conduct on the Safety and Security of Radioactive Sources”, IAEA/CODEOC/2004, Jan. 2004.
- 3) International Atomic Energy Agency, “Handling, Conditioning and Storage of Spent Sealed of Spent Sealed Radioactive Sources”, IAEA-TECDOC-1145, Sep. 2002.
- 4) International Atomic Energy Agency, “Safety Considerations in the Disposal of Disused Sealed Radioactive Sources in Borehole Facilities”, IAEA-TECDOC-1368, Aug, 2003.
- 5) C Crumpton, “Management of Spent Radiation Sources in the European Union : Quantities, Storage, Recycling and disposal”, EUR 16960 EN, 1996
- 6) 과학기술부, 한국방사성동위원소협회, “방사선이용통계”, 2003