

Study of Classification and Disposal Method for Disused Sealed Radioactive Source in Korea

국내 폐밀봉선원 분류체계 및 처분방식 연구

Sukhoon Kim, Juyoul Kim*, and Seunghee Lee

FNC Technology Co., Ltd., 13, Heungdeok 1-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

김석훈, 김주열*, 이승희

(주)미래와도전, 경기도 용인시 기흥구 흥덕1로 13, 32층

(Received April 19, 2016 / Revised May 10, 2016 / Approved June 9, 2016)

In accordance with the classification system of radioactive waste in Korea, all the disused sealed radioactive sources (DSRSs) fall under the category of EW, VLLW or LILW, and should be managed in compliance with the restrictions for the disposal method. In this study, the management and disposal method are drawn in consideration of half-life of radionuclides contained in the source and A/D value (i.e. the activity A of the source dividing by the D value for the relevant radionuclide, which is used to provide an initial ranking of relative risk for sources) in addition to the domestic classification scheme and disposal method, based on the characteristic analysis and review results of the management practices in IAEA and foreign countries. For all the DSRSs that are being stored (as of March 2015) in the centralized temporary disposal facility for radioisotope wastes, applicability of the derivation result is confirmed through performing the characteristic analysis and case studies for assessing quantity and volume of DSRSs to be managed by each method. However, the methodology derived from this study is not applicable to the following sources; i) DSRSs without information on the radioactivity, ii) DSRSs that are not possible to calculate the specific activity and/or the source-specific A/D value. Accordingly, it is essential to identify the inherent characteristics for each of DSRSs prior to implementation of this management and disposal method.

Keywords: DSRS disposal, Radioisotope (RI) wastes, Classification system, Disposal method

*Corresponding Author.

Juyoul Kim, FNC Technology Co., Ltd., E-mail: gracemi@fnctech.com, Tel: +82-10-3101-2272

ORCID

Sukhoon Kim <http://orcid.org/0000-0002-3042-7764>

Juyoul Kim <http://orcid.org/0000-0003-4076-0760>

Seunghee Lee <http://orcid.org/0000-0002-1552-139X>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

현행 규제요건에 따르면 국내에서 발생된 모든 폐밀봉선원은 자체처분 대상, 극저준위 또는 중·저준위 방사성폐기물에 해당하며, 기본적으로 방사능 농도를 기준으로 한 처분방식 제한규정을 준수해야 한다. 본 연구에서는 이러한 분류체계 이외에 IAEA 및 국외 폐밀봉선원 사용국의 방사성폐기물 분류체계, 폐밀봉선원 고유 특성 등에 대한 검토 및 분석결과를 토대로 반감기 및 A/D 값(각 선원의 방사능(A)을 작업자 및 일반 대중에 대한 잠재적 위험도를 의미하는 방사성핵종 고유의 'D 값'을 활용하여 정규화한 수치로 선원의 상대적 위험을 평가하는 기초적인 기준으로 사용)에 대한 기준을 추가적으로 적용하여 국내 폐밀봉선원 분류체계에 대한 방안을 제시한 후, 각 범주에 대한 처분방식을 도출하였다. 다양한 처분시점을 상정한 국내 폐밀봉선원 특성 분석 및 처분방안별 대상 수량·체적 평가결과를 통해 본 연구에서 도출된 처분방안을 처분 예상 시기와 무관하게 2015년 3월말 기준으로 임시저장 중인 모든 폐밀봉선원에 대해 적용할 수 있음을 확인하였다. 단, 방사능량을 확인할 수 없거나 비방사능 또는 A/D 값을 산출할 수 없는 선원에 대해서는 본 연구결과를 적용할 수 없으므로 처분방안 이행을 위해서는 사전에 비방사능, 체적 등의 선원 고유 특성이 반드시 확인되어야 한다.

중심단어: 폐밀봉선원 처분, 방사성동위원소(RI) 폐기물, 분류체계, 처분방식

1. 서론

현재 국내에서 발생된 대부분의 폐밀봉선원은 발생기관 또는 업무대행기관을 통해 한국원자력환경공단에 인도된 후 한국원자력연구원 내에 위치한 방사성동위원소(RI) 폐기물 폐기시설에 임시 보관되고 있다. 한국원자력환경공단에서는 방사성폐기물 처분사업을 중·저준위(1단계 동굴처분방식, 2단계 표층처분방식) 및 극저준위(3단계)로 구분하여 순차적으로 추진할 예정이다. 경북 경주시 양북면 봉길리 일원에 건설된 처분시설 1단계 사업은 2014년 12월 원자력안전위원회로부터 사용 승인을 득한 후 2015년 7월에 최초 처분이 시작되었으며 2단계 사업은 방폐장 부지 내에 2019년 12월 준공을 목표로 추진되고 있다.

2015년 7월 16일 7개의 폐밀봉선원(^{63}Ni , 4상자)에 대한 인수업무가 처분시설에서 최초로 수행되었으며 인수절차 완료 이후 현재는 동 부지의 인수저장건물에 저장되어 있다[1]. 처분시설에서는 향후 한국원자력환경공단의 RI관리팀 및 방사선관리팀 주관하에 주1회 계속적으로 RI 밀봉선원 폐기물을 인수(연 평균 33드럼)할 예정이다. 현행 'RI 폐기물 폐기시설 사용협약'에 따르면 중·저준위 방사성폐기물 처분시설 준공 후 1년 이내에 폐기시설을 한국원자력연구원 측에 반환하여야 하나 현재까지 폐밀봉선원에 대한 처분방법 등이 구체적으로 마련되어 있지 않다. 따라서, 방사성폐기물관리사업자의 처분시설 건설·운영 추진계획과 연계하여

폐밀봉선원에 대한 향후 처분방안을 조속히 수립할 필요가 있다. 한수원(주) 원자력환경기술원에서 밀봉선원폐기물 처분대책 수립 및 최적 처분방안 도출을 위한 연구[2]가 수행된 바 있으며, 해당 연구에서는 전체 밀봉선원폐기물을 방사능 준위 및 반감기를 적절히 고려하여 3개의 그룹으로 분류한 후 각 그룹별 처분방안을 제시하고 있다. 그러나, 이러한 방안에는 폐밀봉선원 발생현황 및 특성, 방사성폐기물 처분 관련 국내·외 최신 규제요건 등이 반영되어 있지 않아 현 시점에서 적용이 제한되므로 이를 종합적으로 고려하기 위한 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

폐밀봉선원은 물리적 형태, 방사선학적 특성 등이 매우 다양하므로 안전하고 효율적인 처분방안을 수립하기 위해서는 국내 처분환경 및 선원 고유 특성 등을 다각적으로 고려해야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 국내 RI 관련 현행 규제요건에 대한 검토결과를 기초로 국내 폐밀봉선원 분류체계에 대한 개선안을 제시한 후 각 범주에 대한 처분방식 구성 방안을 도출하였다.

2. 폐밀봉선원 분류체계(안)

2.1 국내 방사성폐기물 분류체계 및 처분방식

국내에서 발생된 방사성폐기물의 경우 '방사성폐기물

Table 1. Summary of notice [3] on the disposal method for classification of radioactive wastes in Korea

Classification	Self disposal	Near-surface disposal			Deep geological disposal
		Trench type disposal	Engineered vault type disposal	Rock-cavern type disposal	
EW	O	-	-	-	-
VLLW	X	O	O	O	O
LLW	X	X	O	O	O
ILW	X	X	X	O	O
HLW	X	X	X	X	O

Notes) EW: Exempt Waste, VLLW: Very Low-Level Waste, LLW: Low-Level Waste, ILW: Intermediate-Level Waste, HLW: High-Level Waste

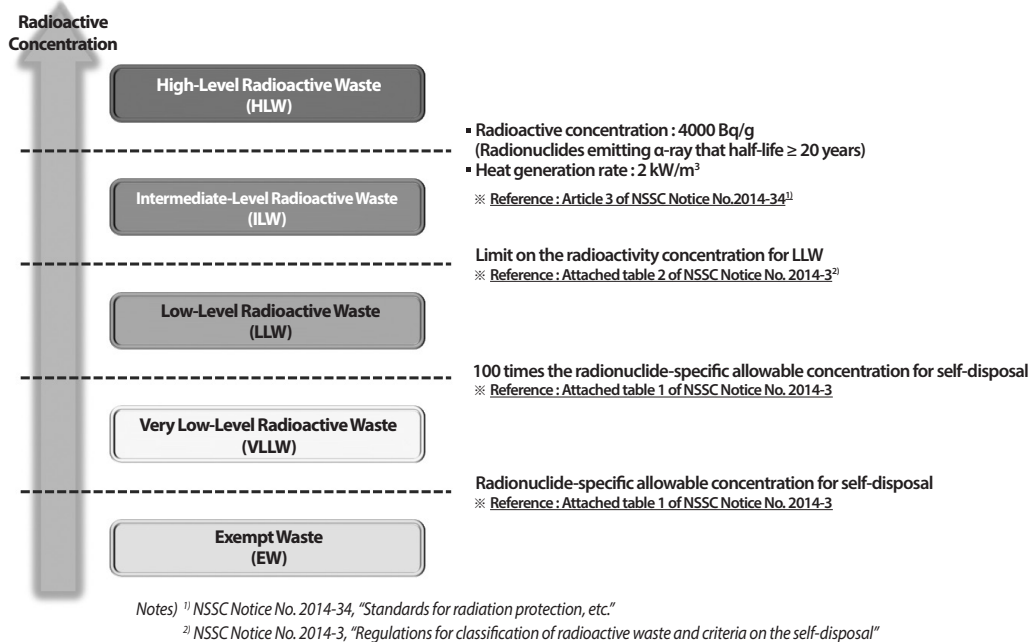


Fig. 1. Classification system [3] of radioactive waste in Korea.

분류 및 자체처분 기준에 관한 규정 [3] 제3조 및 별표 1~2에 의거 방사능 농도에 따라 Fig. 1과 같이 5가지 범주(자체 처분(EW), 극저준위방사성폐기물(VLLW), 저준위방사성폐기물(LLW), 중준위방사성폐기물(ILW), 고준위방사성폐기물(HLW))로 분류된다. 또한, 동 규정 제4~5조에서는 처분 방식을 크게 심층처분과 천층처분으로 구분한 후 방사능 농도에 따른 분류별로 다음과 같이 제한하고 있으며 이를 요약하면 Table 1과 같다.

- 극저준위방사성폐기물 : 천층처분 또는 심층처분 방식으로 처분 가능
- 저준위방사성폐기물 : 매립형처분 방식으로 처분 불가
- 중준위방사성폐기물 : 표층처분 또는 매립형처분 방식 처분 불가
- 고준위방사성폐기물 : 천층처분 방식으로 처분 불가

이러한 현행 규제요건에 따르면 국내에서 발생된 모든

Table 2. Classification system for radioactive waste and principal criteria by countries

Country	Classification scheme	Principal criteria
Sweden	<ul style="list-style-type: none"> • Very Low-level Waste (SL) • Low-level Waste (SL) • Intermediate-level Waste (SL) • Low- and Intermediate-level Waste (LL) • High-level Waste 	<ul style="list-style-type: none"> • Radioactivity • <u>Half-life (on the basis of 31 years)</u> • Dose rate on waste package
Finland	<ul style="list-style-type: none"> • Low-level Waste • Intermediate-level Waste • High-level Waste 	<ul style="list-style-type: none"> • Radioactivity concentration (after 500 years) • <u>Half-life (Activity concentration of which after 500 years)</u>
France	<ul style="list-style-type: none"> • Very Low-level Waste • Low- and Intermediate-level Waste (SL) • Low-level Waste (LL) • Intermediate-level Waste (LL) • High-level Waste 	<ul style="list-style-type: none"> • Activity level • <u>Half-life (on the basis of 100 days and 31 years)</u> • Acceptance criteria : Activity of ^{60}Co and ^{137}Cs, Thermal power
United States	<ul style="list-style-type: none"> • Low-level Waste • High-level Waste • Transuranic Waste 	<ul style="list-style-type: none"> • Radioactivity concentration • <u>Half-life (on the basis of 5 years and 100 years)</u>
United Kingdom	<ul style="list-style-type: none"> • Very Low-level Waste (LV) • Very Low-level Waste (HV) • Low-level Waste • Intermediate-level Waste • High-level Waste 	<ul style="list-style-type: none"> • Radioactivity concentration • Total activity of single items • Volume (in case of VLLW)
Spain	<ul style="list-style-type: none"> • Very Low-level Waste (SL) • Very Low-level Waste (LL) • Low- and Intermediate-level Waste (SL) • Low- and Intermediate-level Waste (LL) • High-level Waste 	<ul style="list-style-type: none"> • Initial radioactivity level • <u>Half-life (on the basis of 30 years)</u>
Japan	<ul style="list-style-type: none"> • Very Low-level Waste • Low-level Waste • Transuranic Waste • High-level Waste 	<ul style="list-style-type: none"> • Radioactivity level
Russian Federation	<ul style="list-style-type: none"> • Very Low-level Waste • Low-level Waste (SL) • Low-level Waste (LL) • Intermediate-level Waste (SL) • Intermediate-level Waste (LL) • High-level Waste 	<ul style="list-style-type: none"> • Specific activity • <u>Half-life (on the basis of 30 years)</u> • Phase of waste (Solid/Liquid)
Hungary	<ul style="list-style-type: none"> • Low-level Waste • Intermediate-level Waste • High-level Waste 	<ul style="list-style-type: none"> • Radioactivity concentration • <u>Half-life (on the basis of 5 years and 30 years)</u>
Republic of South Africa	<ul style="list-style-type: none"> • Very Low-level Waste • Low- and Intermediate-level Waste (SL) • Low- and Intermediate-level Waste (LL) • High-level Waste 	<ul style="list-style-type: none"> • Radioactivity concentration • <u>Half-life (on the basis of 31 years)</u> • Thermal power, Intrusion dose

Notes) SL : Short-lived, LL : Long-lived, LV : Low Volume, HV : High Volume

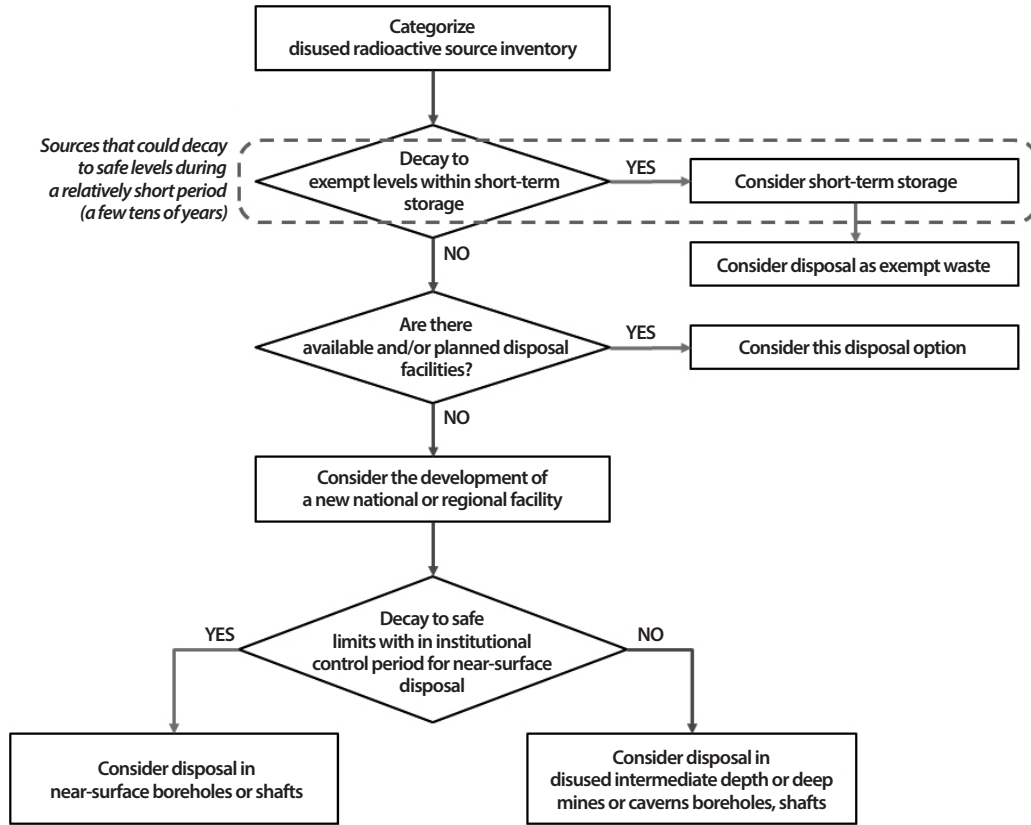


Fig. 2. Identification and screening process [5] of disposal options for disused radioactive sources.

폐밀봉선원은 자체처분 대상, 극저준위 또는 중·저준위 방사성폐기물에 해당하며, 기본적으로 Table 1에 제시된 처분 방식 제한규정을 준수해야 한다. 그러나, 해당 규정은 방사능 농도를 기준으로 한 방사성폐기물 분류체계에 따라서만 처분방식을 제한하고 있으므로, 물리적 형태, 방사선학적 특성 등이 매우 다양한 폐밀봉선원에 대한 안전하고 효율적인 처분방안을 수립하기 위해서는 다음과 같은 선원 고유 특성을 추가적으로 고려할 필요가 있다.

2.2 방사성핵종 반감기

현행 규제요건에서는 방사성폐기물 분류과정에서 반감기는 고려하지 않고 있다. 그러나 IAEA General Safety Guide No. GSG-1[4]에 제시된 신분류체계에서는 제한된 기간(수년 내) 동안 붕괴저장을 통해 규제 면제기준을 충족할 수 있는 폐기물을 ‘극단반감기 폐기물(Very Short-Lived

Waste, ‘VSLW’)로 별도 구분하고 있으며, Table 2에 기술한 바와 같이 폐밀봉선원을 사용하는 대부분의 국가에서 방사성핵종 반감기를 방사성폐기물 분류를 위한 추가적인 기준으로 적용하고 있다. 또한, IAEA Technical Reports Series No. 436[5]에서는 불용 방사선원에 대한 처분옵션을 방사선원 반감기에 따라 Table 3과 같이 구분하고 있으며, Fig. 2에 제시된 흐름도에 따라 처분옵션을 식별·선정할 것을 권고하고 있다.

이와 같이, 극단반감기 핵종을 포함하는 폐밀봉선원의 경우 붕괴저장을 통해 관리하는 것이 효과적이며 제도적 관리기간 내 안전 제한치까지 붕괴될 것으로 예상되는 핵종 반감기를 추가적으로 고려할 필요가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 IAEA 권고사항과의 일관성을 유지하기 위해 반감기를 3개(100일 미만, 100일 이상 30년 미만, 30년 이상)의 그룹으로 분류하였으며, 이러한 기준을 적용하여 국내 발생 폐밀봉선원을 분류하면 Table 4와 같다. Table에 제시한 바와 같이 ^{90}Sr 및 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 핵종의 경우 실제 반감기는 30년 미만

Table 3. Possible disposal options [5] for radioactive sources based on half-life of radionuclide

Half-life ($T_{1/2}$) {Principal radionuclides}	Decay in storage	Near-surface disposal		Geological disposal
		Without special requirements	With greater depth and/or barriers	
$T_{1/2} \leq 100$ days { ^{125}I , ^{192}Ir }	O			
$100 \text{ days} < T_{1/2} < 30$ years		O	O	
$T_{1/2} \geq 30$ years { ^{90}Sr *, ^{137}Cs , ^{238}Pu , ^{63}Ni , ^{241}Am , ^{226}Ra , ^{239}Pu }			O	O

* Although the half-life of ^{90}Sr (i.e. 28.79 years) is less than 30 years, it is categorized into this group because of its high activity.

Table 4. Grouping of disused sealed radioactive sources (proposed in this study) based on half-life of radionuclides in Korea

Half-life ($T_{1/2}$)	Number of radionuclides	Radionuclide contained in DSRS
$T_{1/2} < 100$ days { Very short-lived }	4	^{210}Bi , ^{125}I , Sb-Be, ^{192}Ir
$100 \text{ days} \leq T_{1/2} < 30$ years { Short-lived }	17	^{75}Se , ^{210}Po , ^{153}Gd , ^{68}Ge , ^{57}Co , ^{109}Cd , ^{134}Cs , ^{22}Na , ^{147}Pm , ^{252}Cf , ^{55}Fe , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{85}Kr , ^3H , ^{152}Eu , ^{244}Cm
$T_{1/2} \geq 30$ years { Long-lived }	13	^{90}Sr *, $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ *, ^{137}Cs , ^{63}Ni , ^{241}Am , $^{241}\text{Am}/\text{Be}$, ^{226}Ra , $^{226}\text{Ra}/\text{Be}$, ^{14}C , ^{235}U , ^{238}U , Mixed sources (such as three (3) nuclides including ^{60}Co , and three (3) nuclides including ^{90}Sr)

* Although the half-life of ^{90}Sr and $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (i.e. 28.79 years) is less than 30 years, it is categorized into this group in compliance with IAEA recommendation [5].

Table 5. IAEA categorization system [6] for radioactive waste based on 'A/D' value

Category	The activity ratio of A/D	Relative radiation hazards
1	$A/D \geq 1,000$	Personally extremely dangerous
2	$10 \leq A/D < 1,000$	Personally very dangerous
3	$1 \leq A/D < 10$	Personally dangerous
4	$0.01 \leq A/D < 1$	Unlikely to be dangerous
5	(Exempt quantities)/ $D \leq A/D < 0.01$	Not dangerous

(단반감기 그룹)이지만, IAEA 권고를 반영하여 '30년 이상'의 장반감기 그룹으로 분류하였다. 또한, 방사성핵종 반감기를 분류체계에 실제적으로 적용하는 경우 그룹간 경계값 부근의 반감기를 갖는 특정 핵종(^{75}Se (119.79일), ^{210}Po (138.38일), ^{90}Sr (28.79년), ^{137}Cs (30.07년) 등)은 처분환경 및 시설 특성 등에 따라 현재와 다른 그룹으로 분류하는 것을 고려할 수 있다.

2.3 A/D 값

폐밀봉선원에 사용되는 각 방사성핵종의 방사선준위는 매우 다양하므로 일반적 기준에서 선원 및 행위의 상대적 순위를 수치적으로 결정하기 위해 표준화 인자(Normalizing Factor)를 도입할 필요가 있다. IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.9[6]에서는 각 선원의 방사능(A)을 방사성핵종 고유의 D 값으로 나눈 A/D 값에 따라 방사선원을 Table 5와 같이 5개의 범주로 분류한 후 해당 범주 체계의 규제 활용방안에 대한 지침을 제시하고 있다. 'D 값'은 선원이 통제되지 않는 경우 내부 및 외부피폭을 통해 심각한 결정론적 영향을 야기할 가능성이 매우 높은 '위험 선원(Dangerous Source)'의 방사능을 나타내며 보수적인 가상의 피폭 시나리오에 따라 핵종별로 결정된다(기. 즉, 선원의 방사능은 매우 다양하므로 D 값을 활용하여 정규화하며 A/D 값이 선원의 위험도를 평가하는 기초적인 기준이 된다.

방사선원 범주화는 일반적으로 해당 선원으로 인해 결정론적 건강영향이 발생할 가능성을 근거로 하여 수행되므로 선원 및 행위의 상대적 우선순위를 결정하기 위해 작업자 및 일반 대중에 대한 잠재적 위험도를 의미하는 'D 값'을 표준화 인자로 적용하는 것은 합리적인 것으로 간주할 수 있다. 폐밀봉선원 분류체계를 개발하기 위한 목적으로 각 방사성핵종에 대해 다음과 같은 가상 시나리오를 상정하여 도출된 값 중 보다 제한적인 수치를 표준화 인자(D)로 적용하였다.

- D_1 (외부피폭) : 미차폐 선원을 손으로 1시간 동안 운반 또는 주머니에 10시간 동안 소지하거나, 실내에 수일에서 수 주 동안 방치한 경우
- D_2 (내부피폭) : 화재, 폭발 또는 인위적 행위에 의해 선원이 확산되어 호흡, 섭취 및 피부오염을 통해 피폭되는 경우

본 연구에서는 IAEA 권고사항[6]과의 일관성을 유지하기

위해 A/D 항목에 대한 경계값을 1000, 10, 1, 0.01로 설정하였으나, 실제 적용과정에서는 관리 측면에서의 편의성을 고려하여 일부 범주를 통합하여 적용할 수 있다.

3. 국내 폐밀봉선원 처분방식(안)

앞서 기술한 바와 같이, 현행 규제요건은 방사능 농도를 기준으로 한 방사성폐기물 분류체계에 따라서만 처분방식을 규정하고 있다. 본 연구에서는 폐밀봉선원의 다양한 특성을 고려한 안전하고 효율적인 처분방안을 수립하기 위해 이러한 분류체계 이외에 반감기(100일, 30년) 및 A/D 값(1000, 10, 1, 0.01)에 대한 기준을 추가적으로 적용하여 범주를 세분화 후 각 범주에 대한 처분방식 구성방안을 도출하였다. 이러한 처분방식(안)을 Fig. 3 및 Table 6에 제시하였으며, 폐밀봉선원 분류체계(안)에 따른 해당 처분방안의 적용방법 및 특정 시점에서의 적용 가능성 검토결과를 이하 절에 세부적으로 기술하였다.

3.1 적용방법

재활용이 가능한 선원의 경우 처분 대상에서 제외하여 별도 관리하는 것이 바람직하며, 재활용되지 않는 선원은 우선적으로 방사성핵종의 반감기(극단반감기, 단반감기 및 장반감기)를 기준으로 각각 다음과 같이 상이한 절차가 적용된다.

3.1.1 극단반감기 핵종

반감기가 100일 미만인 극단반감기 핵종을 포함하는 폐밀봉선원의 경우 밀집저장용기 또는 별도 용기에 포장한 후 방사능 농도가 해당 핵종에 대한 자체처분 허용농도의 100배 미만이 될 때까지 붕괴저장을 통해 관리한다. 일정 시간이 경과한 처분시점에서 평가된 A/D 값이 0.01 이상(IAEA 선원 범주 1~4)인 경우 계속 붕괴저장을 거치게 되고, 0.01 미만(IAEA 선원 범주 5)인 경우 규제요건에 제시된 '자체처분 허용농도'를 기준으로 자체처분 또는 매립처분을 수행하는 방안을 제안한다. 원칙적으로 법적 요건을 충족하는 경우 규제 해제를 통해 매립이 가능하지만, 실제로 폐밀봉선원을 일반 매립지에 처분하게 되는 경우에는 주민 수용성 등을 종합적으로 고려하여 매우 신중한 접근이 필요할 것으로 판단된다.

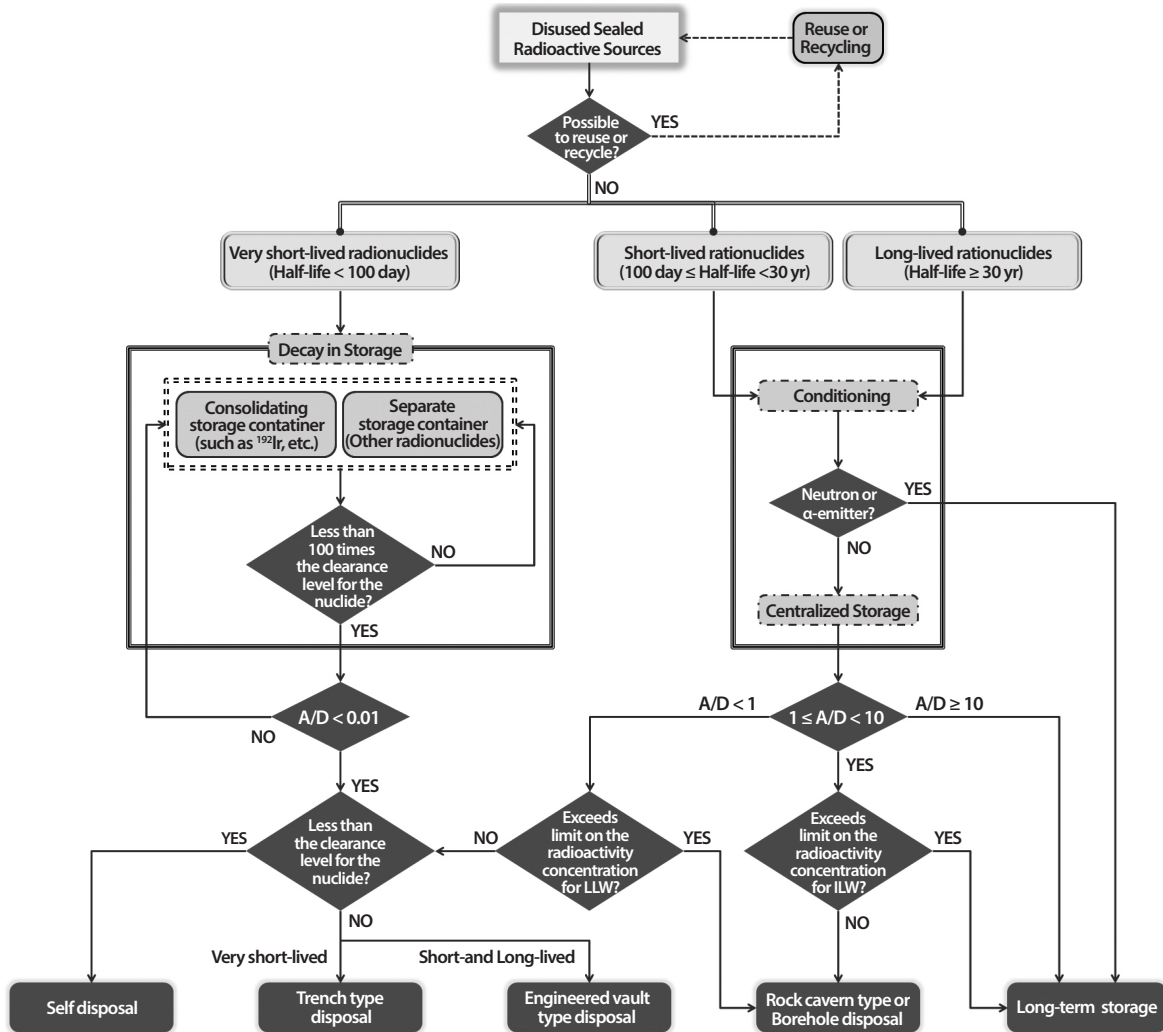


Fig. 3. Optimum method (proposed in this study) for management and disposal of disused sealed radioactive sources in Korea.

3.1.2 단반감기 및 장반감기 핵종

단반감기(100일 이상 30년 미만) 및 장반감기(30년 이상) 핵종의 경우 향후 관리목적을 고려하여 기본적인 처리 작업을 수행한 후 중앙저장된다. 이러한 과정에서 생태계에 유출될 경우 심각한 영향을 야기할 가능성이 높은 알파 방출핵종 및 현 시점에서 처분방안을 확정하기 어려운 중성자 선원은 처분 대상에서 제외하여 별도로 장기저장을 수행하는 것이 바람직하다. 중앙저장 이후 일정 시간이 경과한 처분시점에서 평가된 A/D 값에 의거 규제요건에 제시된 ‘저준위 또는 중준위방사성폐기물의 방사능 농도 제한치’ 등을 기준으로 다음과 같은 방법으로 관리하는 방안을 제안한다.

- $A/D \geq 10$ (IAEA 선원 범주 1~2) : 장기저장 관리
- $1 \leq A/D < 10$ (IAEA 선원 범주 3) : ‘중준위방사성폐기물의 방사능 농도 제한치’를 기준으로 처분방안 결정
 - 제한치 이내 : 동굴처분(또는 시추공처분) 수행
 - 제한치 초과 : 장기저장 관리
- $A/D < 1$ (IAEA 선원 범주 4~5) : ‘저준위방사성폐기물의 방사능 농도 제한치’를 기준으로 처분방안 결정
 - 제한치 이내 : ‘자체처분 허용농도’ 미만인 경우 자체 처분, 해당 농도 이상인 경우 표층처분 수행
 - 제한치 초과 : 동굴처분(또는 시추공처분) 수행

Table 6. Management matrix (proposed in this study) in accordance with the classification system for disused sealed radioactive source

Half-life and A/D value		Classification system of radioactive wastes in Korea			
		EW	VLLW	LLW	ILW
Very short-lived	$A/D \geq 1000$	Not Applicable		Decay in storage	
	$10 \leq A/D < 1000$				
	$1 \leq A/D < 10$				
	$0.01 \leq A/D < 1$				
	$A/D < 0.01$				
Half-life Short-lived	$A/D \geq 1000$	Not Applicable		Long-term storage	
	$10 \leq A/D < 1000$				
	$1 \leq A/D < 10$			Rock-cavern type (or borehole) disposal	
	$0.01 \leq A/D < 1$			Engineered vault type disposal	
	$A/D < 0.01$			Self disposal	
Long-lived	$A/D \geq 1000$	Not Applicable		Long-term storage	
	$10 \leq A/D < 1000$				
	$1 \leq A/D < 10$			Rock-cavern type (or borehole) disposal	
	$0.01 \leq A/D < 1$			Engineered vault type disposal	
	$A/D < 0.01$				
Alpha emitter	$A/D \geq 1000$			Long-term storage	
	$10 \leq A/D < 1000$				
	$1 \leq A/D < 10$				
	$0.01 \leq A/D < 1$				
	$A/D < 0.01$				
Neutron sources	$A/D \geq 1000$			Long-term storage	
	$10 \leq A/D < 1000$				
	$1 \leq A/D < 10$				
	$0.01 \leq A/D < 1$				
	$A/D < 0.01$				

Table 7. Change of quantity (in unit of EA) by each management method for disused sealed radioactive source

Year	Decay in storage	Self disposal	Trench type disposal	Engineered vault type disposal	Rock-cavern type (or borehole) disposal	Long-term storage			Total [EA]
						$\beta&\gamma$	α	Neutron	
2020	0 (0.00%)	37,560 (89.53%)	13 (0.03%)	1,759 (4.19%)	1,908 (4.55%)	49 (0.12%)	464 (1.11%)	201 (0.48%)	41,954
2035	0 (0.00%)	37,756 (89.46%)	0 (0.00%)	2,010 (4.76%)	1,759 (4.17%)	15 (0.04%)	464 (1.10%)	201 (0.48%)	42,205
2050	0 (0.00%)	37,940 (89.67%)	0 (0.00%)	2,035 (4.81%)	1,666 (3.94%)	6 (0.01%)	464 (1.10%)	201 (0.48%)	42,312
2065	0 (0.00%)	38,129 (90.11%)	0 (0.00%)	1,906 (4.50%)	1,608 (3.80%)	4 (0.01%)	464 (1.10%)	201 (0.48%)	42,312
2080	0 (0.00%)	38,198 (90.28%)	0 (0.00%)	1,890 (4.47%)	1,555 (3.68%)	4 (0.01%)	464 (1.10%)	201 (0.48%)	42,312
2180	0 (0.00%)	39,222 (92.64%)	0 (0.00%)	1,431 (3.38%)	1,019 (2.41%)	0 (0.00%)	464 (1.10%)	201 (0.47%)	42,337

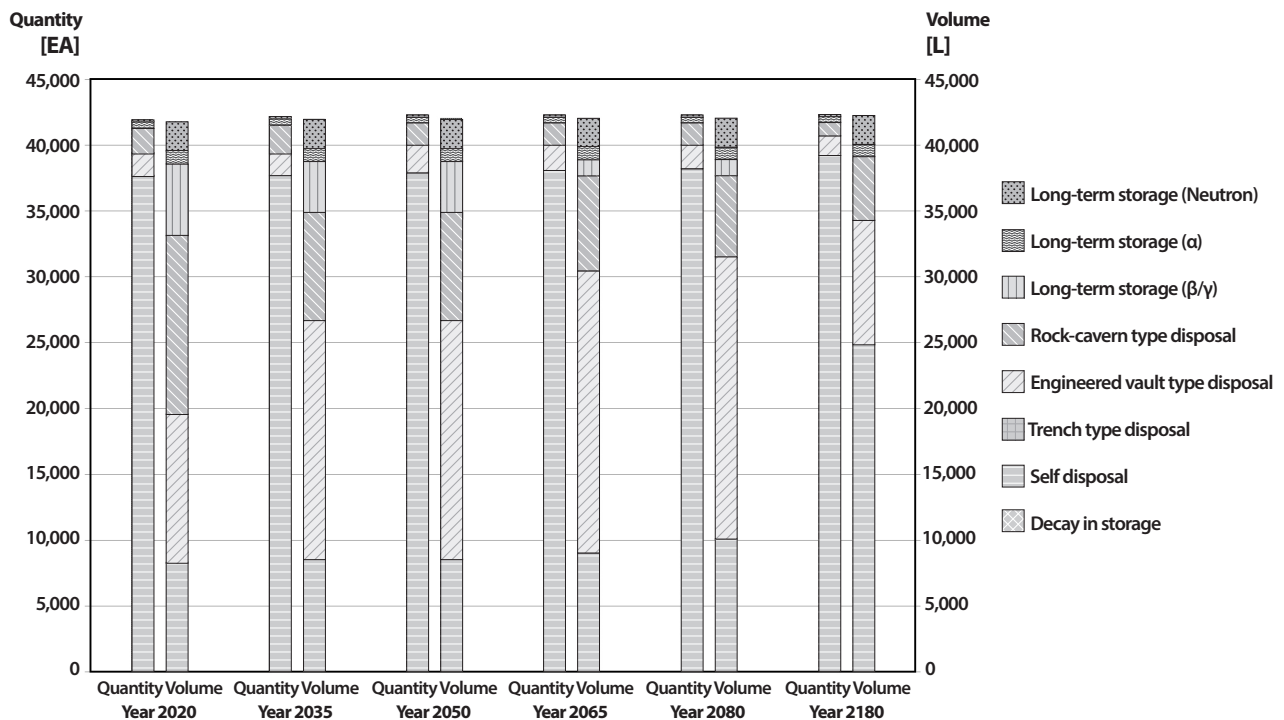


Fig. 4. Change of quantity (in unit of EA) and volume (in unit of L) by each management method for disused sealed radioactive sources.

Table 8. Change of volume (in unit of L) by each management method for disused sealed radioactive source

Year	Decay in storage	Self disposal	Trench type disposal	Engineered vault type disposal	Rock-cavern type (or borehole) disposal	Long-term storage			Total [L]
						β&γ	α	Neutron	
2020	0.0	8,296.6	0.0	11,265.1	13,575.7	5,498.2	926.1	2,253.5	41,815.2
	(0.00%)	(19.84%)	(0.00%)	(26.94%)	(32.47%)	(13.15%)	(2.21%)	(5.39%)	
2035	0.0	8,593.5	0.0	18,097.7	8,218.2	3,883.9	926.1	2,253.5	41,972.9
	(0.00%)	(20.47%)	(0.00%)	(43.12%)	(19.58%)	(9.25%)	(2.21%)	(5.37%)	
2050	0.0	8,759.4	0.0	19,542.3	8,386.0	2,178.4	926.1	2,253.5	42,045.7
	(0.00%)	(20.83%)	(0.00%)	(46.48%)	(19.94%)	(5.18%)	(2.20%)	(5.36%)	
2065	0.0	8,986.7	0.0	21,415.0	7,241.7	1,222.7	926.1	2,253.5	42,045.7
	(0.00%)	(21.37%)	(0.00%)	(50.93%)	(17.22%)	(2.91%)	(2.20%)	(5.36%)	
2080	0.0	10,047.5	0.0	21,434.4	6,161.6	1,222.7	926.1	2,253.5	42,045.8
	(0.00%)	(23.90%)	(0.00%)	(50.98%)	(14.65%)	(2.91%)	(2.20%)	(5.36%)	
2180	0.0	24,801.9	0.0	9,430.6	4,859.2	0.0	926.1	2,253.5	42,271.3
	(0.00%)	(58.67%)	(0.00%)	(22.31%)	(11.50%)	(0.00%)	(2.19%)	(5.33%)	

3.2 적용 가능성 검토(Case Study)

2015년 3월말 기준으로 RI 폐기물 폐기시설에 임시저장 중인 폐밀봉선원을 대상으로 본 연구를 통해 도출한 처분방식 구성방안 도출결과(Fig. 3 및 Table 6)의 적용 가능성을 검토 하였다. 폐밀봉선원의 경우 관리기간에 따라 방사능량 등이 변화하므로 처분시기에 따라 상이한 범주에 포함될 수 있다. 현 시점에서 폐밀봉선원의 정확한 처분시기를 예상할 수 없지만, 중·저준위방사성폐기물 처분시설의 운영기간(60년) 및 제도적 관리기간(100년)을 고려하여 다양한 시점(2020년, 2035년, 2050년, 2065년, 2080년, 2180년)에서 폐밀봉선원 특성 분석을 수행한 후 각 범주에 대한 처분방안별 대상 수량 및 체적을 평가하였다. 처분 예상시기에 따른 대상 수량 및 체적 변화 추이는 Table 7~8 및 Fig. 4와 같으며, 이에 대한 주요 분석결과는 다음과 같다.

- 자체처분 대상선원은 수량 기준으로 90% 내외를 차지 하지만, 낮은 방사능으로 인해 체적 기준으로는 20% 전후로 점차 증가하는 경향 : 단, 2180년 시점에서는 자체

- 처분 대상 체적이 거의 60%에 육박하는 수준으로 증가
- 표층처분 또는 동굴처분 대상선원은 수량 기준으로 대략 8~9% 수준이지만, 고방사능으로 인해 체적 기준으로는 약 60~65%를 차지 : 단, 2180년 시점에서는 자체 처분 대상 체적 증가로 인해 약 34% 수준까지 감소
- 선원 체적 기준으로 2020년에는 동굴처분 대상선원이 가장 많지만, 이후 시점(2035~2080년)에서는 표층처분 대상선원이 전체의 절반 정도(43.12%~50.98%)를 차지
- 장기저장 대상선원의 수량 및 체적은 기준시점 경과에 따라 지속적으로 감소(수량 기준 1.71% → 1.57%, 체적 기준 20.75% → 7.52%)하는 경향 : 즉, 방사능 감쇄에 따라 특정 방식으로 처분 가능
- 임시저장 중(2015년 3월말 기준)인 폐밀봉선원을 대상으로 하는 경우 예상시기와 무관하게 붕괴저장 또는 매립형처분 불필요 : 단, 향후 발생될 폐밀봉선원의 불확실성에 따라 처분방안으로 고려 필요

각 기준시점에서의 평가결과를 통해 본 연구에서 도출된 처분방안을 2180년까지 처분 예상시기와 무관하게 현재

Table 9. Quantity (in unit of EA) by each management method for disused sealed radioactive source as of 2020

Half-life and A/D value		Classification system in Korea				Subtotal [EA]	Total [EA]
		EW	VLLW	LLW	ILW		
Very short-lived	A/D ≥ 1000	0	0	0	0	0	35,551
	10 ≤ A/D < 1000	0	0	0	0	0	
	1 ≤ A/D < 10	0	0	0	0	0	
	0.01 ≤ A/D < 1	0	0	0	0	0	
	A/D < 0.01	35,538	13	0	0	35,551	
Half-life Short-lived	A/D ≥ 1000	0	0	0	0	0	3,491
	10 ≤ A/D < 1000	0	0	4	8	12	
	1 ≤ A/D < 10	0	0	3	4	7	
	0.01 ≤ A/D < 1	0	0	42	165	207	
	A/D < 0.01	2,022	188	945	110	3,265	
Long-lived	A/D ≥ 1000	0	0	0	0	0	2,247
	10 ≤ A/D < 1000	0	0	0	37	37	
	1 ≤ A/D < 10	0	0	0	28	28	
	0.01 ≤ A/D < 1	0	0	40	402	442	
	A/D < 0.01	0	0	544	1,196	1,740	
Alpha emitter	A/D ≥ 1000	0	0	0	0	0	464
	10 ≤ A/D < 1000	0	0	0	0	0	
	1 ≤ A/D < 10	0	0	0	36	36	
	0.01 ≤ A/D < 1	0	0	0	300	300	
	A/D < 0.01	6	4	13	105	128	
Neutron sources	A/D ≥ 1000			(0)		(0)	(201)
	10 ≤ A/D < 1000			(0)		(0)	
	1 ≤ A/D < 10			(0)		(0)	
	0.01 ≤ A/D < 1			(194)		(194)	
	A/D < 0.01			(7)		(7)	
Total [EA]		37,566	205	1,591	2,391	41,753	41,753
Fraction (%)*		89.97	0.49	3.81	5.73	100.0	100.0

Legend)



Note) * Ratio to total quantity (i.e. 41,753) of sources that can be categorized in accordance with classification system in Korea and A/D value at the time of management and disposal; Since neutron sources cannot be classified into specific category in accordance with the Korean regulation, these are excluded from calculating the total quantity to be managed.

Table 10. Volume (in unit of L) by each management method for disused sealed radioactive source as of 2020

Half-life and A/D value		Classification system in Korea				Subtotal [L]	Total [L]
		EW	VLLW	LLW	ILW		
Very short-lived	A/D ≥ 1000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4,961.8
	10 ≤ A/D < 1000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	1 ≤ A/D < 10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	0.01 ≤ A/D < 1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	A/D < 0.01	4,961.8	0.0	0.0	0.0	4,961.8	
Half-life Short-lived	A/D ≥ 1000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25,160.2
	10 ≤ A/D < 1000	0.0	0.0	1,018.6	2,437.8	3,456.4	
	1 ≤ A/D < 10	0.0	0.0	4,961.1	147.8	5,108.9	
	0.01 ≤ A/D < 1	0.0	0.0	1,291.9	3,392.1	4,684.0	
	A/D < 0.01	3,334.8	349.3	7,452.2	774.5	11,910.8	
Long-lived	A/D ≥ 1000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8,513.6
	10 ≤ A/D < 1000	0.0	0.0	0.0	2,041.8	2,041.8	
	1 ≤ A/D < 10	0.0	0.0	0.0	396.9	396.9	
	0.01 ≤ A/D < 1	0.0	0.0	640.4	2,355.5	2,995.9	
	A/D < 0.01	0.0	0.0	1,531.2	1,547.8	3,079.0	
Alpha emitter	A/D ≥ 1000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	926.1
	10 ≤ A/D < 1000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	1 ≤ A/D < 10	0.0	0.0	0.0	149.6	149.6	
	0.01 ≤ A/D < 1	0.0	0.0	0.0	463.3	463.3	
	A/D < 0.01	24.3	3.0	63.6	222.4	313.2	
Neutron sources	A/D ≥ 1000			(0.0)		(0.0)	(2,253.6)
	10 ≤ A/D < 1000			(0.0)		(0.0)	
	1 ≤ A/D < 10			(0.0)		(0.0)	
	0.01 ≤ A/D < 1			(2,238.9)		(2,238.9)	
	A/D < 0.01			(14.6)		(14.6)	
Total [L]		8,320.8	352.3	16,959.0	13,929.5	39,561.7	39,561.7
Fraction (%)*		21.03	0.89	42.87	35.21	100.0	100.0

Legend)



Note) * Ratio to total volume (i.e. 39,561.7 L) of sources that can be categorized in accordance with classification system in Korea and A/D value at the time of management and disposal. Since neutron sources cannot be classified into specific category in accordance with the Korean regulation, these are excluded from calculating the total volume to be managed.

임시저장 중인 모든 폐밀봉선원에 대해 적용할 수 있음을 확인하였으며, 본 논문에는 중·저준위 방사성폐기물 처분 시설 2단계 건설사업 준공 예정시점(2019년 12월)을 고려하여 2020년에 대한 결과를 Table 9~10에 제시하였다.

지금까지 발생된 폐밀봉선원 중 현행 규제요건[3]에 자체 처분 허용농도(별표 1) 또는 저준위 방사성폐기물의 방사능 농도 제한치(별표 2)가 제시되지 않은 방사성핵종의 경우 국내 방사성폐기물 분류체계에 따라 특정 범주로 지정될 수 없으므로 본 연구를 통해 도출된 처분방안의 적용이 제한된다. 단, 두 가지 농도 중 자체처분 허용농도만 제시되어 있는 방사성핵종의 경우 방사능 감쇄에 따라 특정 시점 이후에는 극저준위 또는 저준위 방사성폐기물로 분류될 수 있으며, 이후 본 연구결과에 따라 처분방식이 결정될 수도 있다.

4. 결론

현행 규제요건은 방사능 농도를 기준으로 한 방사성폐기물 분류체계에 따라 처분방식을 규정하고 있다. 본 연구에서는 이러한 분류체계 이외에 IAEA 및 국외 폐밀봉선원 사용국의 방사성폐기물 분류체계, 폐밀봉선원 고유 특성에 대한 검토 및 분석결과를 토대로 반감기와 A/D 값에 대한 기준을 추가적으로 적용하여 국내 폐밀봉선원 분류체계에 대한 방안을 제시한 후 각 범주에 대해 안전하고 효율적인 처분방식을 도출하였다.

본 연구결과에는 IAEA에서 권고한 방사성폐기물 신분류 체계 및 폐밀봉선원의 고유 특성(방사능준위, 반감기, 방사성핵종별 위험도, 방사선 유형 등)을 기초로 다양한 관리 및 처분방안이 제시되어 있다. 다양한 처분시점을 상정한 국내 폐밀봉선원 특성 분석 및 처분방안별 대상 수량·체적 평가 결과를 통해 본 연구에서 도출된 처분방안을 2180년까지 처분 예상시기와 무관하게 현재 임시저장 중인 모든 폐밀봉선원에 대해 적용할 수 있음을 확인하였다.

추가적으로, 현재까지 발생된 또는 향후 발생될 폐밀봉선원 중 방사능량을 확인할 수 없거나 비방사능 및/또는 고유 A/D 값을 산출할 수 없는 선원 등을 대상으로 본 연구에서 도출된 처분방식(안)을 적용하기 위해서는 사전에 비방사능, 체적 등의 선원 고유 특성이 반드시 확인되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(20141720100560).

REFERENCES

- [1] Korea Radioactive Waste Agency (KORAD). April 20 2016. "The Operating Status of Wolsong Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Center (as of July 2015)." Official Homepage of KORAD. Accessed Aug. 30 2016. Available from: https://www.korad.or.kr/krmc2011/user/2016_new/02_10_30_10/board_main.jsp?mode=read&page=1&idx=6&rnumValue=6&selectName=&searchName=&code=
- [2] C. L. Kim, C. G. Lee, E. Y. Lee, J. W. Park, S. M. Park, J. H. Lee, J. B. Park, J. S. Bae, and K. S. Choi. A Study on the Disposal of Spent Sealed Sources, Nuclear Environment Technology Institute (Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd.) Report, 19-44, TM.C02NS01.S2005.11 (2005).
- [3] Notice of Nuclear Safety and Security Commission, "Regulations for Criteria on the Classification and Clearance of Radioactive Waste", Notice No. 2014-3 (2014).
- [4] International Atomic Energy Agency, "Classification of Radioactive Waste", IAEA Safety Standards Series No. GSG-1, IAEA, Vienna (2009).
- [5] International Atomic Energy Agency, "Disposal Options for Disused Radioactive Sources", Technical Reports Series No. 436, IAEA, Vienna (2005).
- [6] International Atomic Energy Agency, "Categorization of Radioactive Sources", IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.9, IAEA, Vienna (2005).
- [7] International Atomic Energy Agency, "Method for Developing Arrangements for Response to a Nuclear or Radiological Emergency: Updating IAEA-TEC-DOC-953", EPR-Method 2003, IAEA, Vienna (2003).