Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 4, pp. 465-474, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.4.465

Technical article

# 장기보관 폐밀봉선원의 안전한 관리를 위한 분류 방법 및 전용 처분용기 개념설계 연구

도호석[1,*] · 손유화[1] · 전다혜[1] · 강현구[1] · 강지훈[2] · 하재철[1]

[1]한국원자력환경공단, [2]미래와도전

# Study on the Classification methods for Safe management of Disused Sealed Radioactive Sources and Conceptual Design of Final Disposal Container

Ho-Seog Dho[1,*], Yuhwa Son[1], Dahye Jyon[1], Hyungoo Kang[1], Jihoon Kang[2], and Jae-Chul Ha[1]

[1]Korea Radioactive Waste Agency, Chunghyochun-gil-19, Gyeongju-si, Gyeongsangbuk-do 38062, Republic of Korea
[2]KoreaFNC Technology Co, Ltd, 13, Heungdeok 1-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 16954, Republic of Korea

**ABSTRACT** The study focuses on the safe management and disposal of disused sealed radioactive sources (DSRS) in South Korea. Due to the increasing volume and variety of DSRS from industries, hospitals, and research institutions, there is a pressing need for effective classification and disposal strategies. This research aims to develop classification methods for DSRS based on their physical and radiological characteristics, and to design a conceptual disposal container for their final disposal. The study considers the physical properties (size, shape, material) and radiological characteristics (activity level, half-life) of DSRS, along with the specific requirements of disposal facilities. The study identifies key radio nuclides such as $^{137}$Cs, $^{60}$Co and $^{63}$Ni as priority targets for disposal due to their high volume and activity levels. Conversely, isotopes like $^{192}$Ir, $^{55}$Fe and $^{57}$Co, with shorter half-lives, are suitable for self-disposal after natural decay. The study also involves the structural analysis of a proposed disposal container designed to safely contain DSRS. The container must withstand stacking pressures and potential drop impacts while preventing radio nuclide leakage. The study's findings highlight the need for robust design features to ensure structural integrity during handling and storage. Overall, this research provides a comprehensive framework for the classification and safe disposal of DSRS, contributing significantly to the enhancement of radioactive waste management practices in South Korea.

**Key words:** Disused Sealed Radioactive Source, Radioactive waste characterization, Conceptual Design Criteria, Disposal Container

## 1. 서 론

국내에서 발생되는 폐밀봉선원은 국내 산업체, 병원, 학교 및 연구기관 등에서 발생하며, 원자력 산업의 발전과 방사성동위원소의 이용의 증가로 인해 발생량이 점점 증가하고 있으며, 그 종류도 다양하게 발생하고 있다. 국내 원자력안전법에서는 밀봉선원을 '기계적 강도가 충분하여 파손될 우려가 없고 부식되기 어려운 재료로 된 용기에 넣은 방사성동위원소로서 사용할 때에 방사선은 용기 외부로 방출하지만 방사성동위원소는 누출하지 못하도록 되어 있는 것'으로 정의하고 있다[1]. 폐밀봉선원은 폐기 대상이되는 밀봉선원이며 현재 국내에서 발생된 대부분의 폐밀봉선원은 발생기관에서 보관중이거나 발생기관 또는 업무대행기관을 통해 한국원자력환경공단에 인도된 후 공단에서 운영 중인 중저준위방폐물 처분시설 내 방폐물 저장건물에 장기보관되고 있다. 기존의 폐밀봉선원 처분기술 연구를 위한 폐밀봉선원의 특성 분석은 인수 시 발생자로부터 제공되는 밀봉선원 특성정보를 바탕으로 처분시설 내 저장관리를 목적으로 물리적 특성(포장물 크기, 무게, 형태)과 방사선적 특성(핵종, 반감기, 방사능량, 비방사능)이 수행되어 왔으며, 처분시설의 부재로 인해 처분시설 운영 및 처분안전성평가가 고려된 최종처분 관점에

ISSN 1976-2402 http://www.ksri.kr/

Copyright© 2024 by Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author: Ho-Seog Dho
Tel: +82-54-750-4231, E-mail: ehghtjr@korad.or.kr

Received 4 November 2024 Revised 9 December 2024 Accepted 10 December 2024

서의 처분기술의 연구는 진행되지 않았다. 이로 인해 최종 처분 계획이 부재한 상황으로 폐밀봉선원의 관리는 발생자의 인도요청에 따라 한국원자력환경공단에서 인수하여 경주 중저준위 방폐물 처분시설의 인수검사 건물에 장기보관 중이다.

현재 한국원자력환경공단에서는 국내에서 발생하는 모든 방사성폐기물의 안전한 처분을 위한 중저준위방폐물 처분사업을 수행하고 있으며, 중저준위부터 극저준위 방폐물의 처분이 가능한 1단계 동굴처분시설을 2015년도부터 운영중이며, 저준위와 극저준위 방폐물 처분을 위한 2단계 표층처분시설을 건설중이다. 그리고 극저준위방폐물 처분을 위한 3단계 매립형 처분시설의 설계를 추진중에 있다[2]. 중저준위방폐물 처분사업의 원활한 수행을 위해 폐밀봉선원의 안전한 관리를 위한 분류 방안을 도출 하였으며, 처분시설의 제도적 관리기간 또는 제도적 관리기간 이후 안전성 확보를 위해서는 폐밀봉선원의 고정화를 통해 핵종이동저감 효과를 가지는 전용 처분용기의 개발이 필요하다.

이에 본 연구에서는 장기보관 폐밀봉선원의 안전한 관리를 위한 분류 방안의 도출을 위해 폐밀봉선원의 물리적 특성(선원의 크기와 성상, 밀봉재 특성(크기, 형태, 재료) 등)과 방사선적 특성(처분시점에서의 방사능량과 비방사능 등), 처분시설의 안전기준 특성(방사능준위, 처분농도제한치, 처분안전성평가 등)을 고려한 요인 분석(Factor analysis)을 수행하였다. 그리고 전용 처분용기의 개념설계를 위해 도출된 분류 방안 중 우선 처분 핵종의 밀봉선원 특성을 바탕으로 구조 안전성 해석평가를 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

본 연구를 위한 폐밀봉선원 특성분석 및 국내 처분환경을 고려한 장기보관 중 폐밀봉선원의 관리 분류 방안 도출, 폐밀봉선원 전용 처분용기 설계를 위한 구조 안전성 해석평가 방법에 대한 내용은 다음과 같다.

### 2.1. 장기보관 중 폐밀봉선원의 관리 분류 방안 도출

국내에서 발생되는 방사성폐기물의 경우 '방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정'에서 방사능 농도에 따라 5가지로 분류하고 있으며, 방사능 농도에 따른 처분 방식을 제시하고 있다[3]. 이러한 규정에 따르면 폐밀봉선원은 자체처분 대상, 중저준위방사성폐기물로 분류 할 수 있다. 그러나 해당 규정은 방폐물의 방사능 농도에 따른 처분방식을 규정한 것으로 폐밀봉선원의 핵종별 방사능량, 물리적형태, 처분시설 처분농도제한치, 핵종재고량에 대한 추가적인 검토를 통해 처분 가능성과 특성을 고려한 적절한 분류 방안을 도출할 필요가 있다. 이를 위해 현재 한국원자력환경공단에서 장기보관 중인 폐밀봉선원 약 6천여 건의 인수서류를 바탕으로 물리/방사선적 특성 분석을 수행하였

**Table 1.** Radioactivity Characteristics of Main Disused Sealed Radioactive Source as of 2024

| No. | Nuclide | Half-life | Average Activity (Bq) | Total Activity (Bq) | Clear level Specific activity (Bq/g) | Number of Source |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | $^{137}$Cs | 30 yrs | $1.87\times10^{12}$ | $6.97\times10^{15}$ | $1.0\times10^{-1}$ | 3,720 |
| 2 | $^{226}$Ra | 1,600 yrs | $5.47\times10^{11}$ | $5.34\times10^{14}$ | - | 975 |
| 3 | $^{241}$Am | 432.7 yrs | $3.29\times10^{11}$ | $3.27\times10^{15}$ | $1.0\times10^{-1}$ | 9,932 |
| 4 | $^{63}$Ni | 100.1 yrs | $3.28\times10^{11}$ | $1.69\times10^{15}$ | $1.0\times10^{2}$ | 5,150 |
| 5 | $^{192}$Ir | 73.8 day | $1.56\times10^{11}$ | $8.40\times10^{15}$ | 1.0 | 53,769 |
| 6 | $^{90}$Sr | 28.8 yrs | $1.13\times10^{11}$ | $7.55\times10^{13}$ | 1.0 | 664 |
| 7 | $^{3}$H | 12.3 yrs | $5.38\times10^{10}$ | $2.94\times10^{14}$ | $1.0\times10^{2}$ | 5,467 |
| 8 | $^{60}$Co | 5.3 yrs | $5.68\times10^{10}$ | $1.62\times10^{14}$ | $1.0\times10^{-1}$ | 2,853 |
| 9 | $^{152}$Eu | 13.6 yrs | $4.07\times10^{10}$ | $8.55\times10^{11}$ | $1.0\times10^{-1}$ | 21 |
| 10 | $^{241}$Am/Be | 432.7 yrs | $3.65\times10^{9}$ | $9.25\times10^{11}$ | - | 253 |
| 11 | $^{85}$Kr | 10.8 yrs | $2.77\times10^{9}$ | $4.95\times10^{11}$ | $1.0\times10^{-1}$ | 1,780 |
| 12 | $^{55}$Fe | 2.7 yrs | $8.27\times10^{8}$ | $3.33\times10^{11}$ | $1.0\times10^{3}$ | 403 |
| 13 | $^{57}$Co | 278.8 days | $7.81\times10^{8}$ | $1.47\times10^{11}$ | 1.0 | 188 |
| 14 | $^{244}$Cm | 18.1 yrs | $3.08\times10^{8}$ | $1.39\times10^{10}$ | 1.0 | 45 |
| 15 | $^{204}$Tl | 3.7 yrs | $8.66\times10^{6}$ | $8.66\times10^{6}$ | 1.0 | 1 |
| 16 | $^{147}$Pm | 2.6 yrs | $8.97\times10^{5}$ | $2.15\times10^{9}$ | $1.0\times10^{3}$ | 2,400 |
| 17 | $^{109}$Cd | 1.2 yrs | $8.22\times10^{-1}$ | $8.14\times10^{1}$ | 1.0 | 99 |
| 18 | $^{153}$Gd | 240.4 days | $3.74\times10^{-11}$ | $4.2\times10^{-9}$ | $1.0\times10^{1}$ | 112 |
| 19 | $^{125}$I | 59.4 days | $1.22\times10^{-49}$ | $8.58\times10^{-48}$ | $1.0\times10^{2}$ | 70 |

다. 2024년을 기준으로 87,902개 전체 밀봉선원에 대한 핵종별 반감기, 평균 방사능량, 총 방사능량, 자체처분허용농도, 선원 갯수를 산출하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다. 핵종별 총 방사능량은 인수시점의 총 방사능량에서 핵종의 반감기를 고려하여 아래의 식으로 현재의 방사능량을 산출하였다.

$$A = A_0(1 - e^{-\lambda t}) \quad (1)$$

위의 식에서, A=현재 방사능량
$A^0$=인수 시점의 방사능량
λ=붕괴상수($0.693 \cdot t^{-1}$)
t=핵종별 반감기

방사능량이 식별되지 않은 소량의 밀봉선원에 대하여는 평균 방사능량을 적용하여 총 방사능량을 산출하였다. 그리고 산출된 방사능량에 대해 핵종별 비율을 Fig. 1과 같이 나타내었다.

IAEA General Safety Guide No. GSG-1 [4]와 IAEA Technical Report Series No. 436 [5]에서는 폐밀봉선원의 반감기를 고려하여 처분시설 운영기간 중 적절한 기간내 자발적인 붕괴를 통해 방사능량을 자체처분허용 농도 미만 기준을 충족하는 시점에서 자체 처분할 수 있도록 장기보관 후 자체처분을 권고하고 있다. 이에 따라 폐밀봉선원의 경우에는 처분시설의 제도적 관리기간(300년)을 고려하여 적정 반감기를 기준으로 하여 자체처분 가능 폐밀봉선원으로 분류할 필요가 있다. 장기보관 폐밀봉선원은 핵종재고량 문제 외에도 인수되는 폐밀봉선원 대비 저장시설 공간 부족 문제로 빠른시일 내에 처리·처분이 필요한 상황이다. 이에 저장시설의 공간 확보를 위해 폐밀봉선원의 부피 정보를 분석하여 우선적으로 처분되어야할 폐밀봉선원을 도출하기 위해 핵종별 폐밀봉선원 부피 현황을 Fig. 2와 Table 3과 같이 정리하였다. 본 정리결과에서 핵종별 폐밀봉선원 중 총 부피가 보관중 폐밀봉선원 총 부피의 1% (24 L) 미만인 핵종은 정리대상에서 제외하였다.

**Table 2.** The Concentration and Inventory of 1st Phase silo disposal facility

| Nuclide | Concentration Limits (Bq/g) | Inventory (Bq) |
|---|---|---|
| $^{3}$H | $3.13\times10^{11}$ | 1.19E+16 |
| $^{14}$C | $4.94\times10^{5}$ | 1.89E+13 |
| $^{55}$Fe | - | 3.93E+14 |
| $^{58}$Co | - | 2.41E+14 |
| $^{60}$Co | - | 2.32E+14 |
| $^{59}$Ni | $9.98\times10^{7}$ | 5.03E+13 |
| $^{63}$Ni | $3.22\times10^{8}$ | 1.50E+15 |
| $^{90}$Sr | $6.56\times10^{7}$ | 9.40E+11 |
| $^{94}$Nb | $1.49\times10^{5}$ | 1.15E+11 |
| $^{99}$Tc | $3.24\times10^{4}$ | 4.79E+11 |
| $^{129}$I | $1.04\times10^{5}$ | 9.84E+08 |
| $^{137}$Cs | $2.35\times10^{8}$ | 4.26E+13 |
| $^{144}$Ce | - | 3.06E+11 |
| Gross alpha | $6.70\times10^{5}$ | 5.93E+11 |

처분시설 안전성평가는 중저준위 방폐물 처분시설의 폐쇄후 시설로부터 누출된 방사성핵종이 지하수 유동에 따라 처분시설의 공학적 방벽을 통과하여 투수성이 크고 지하수로 포화되어 있는 대수층을 거쳐 최종적으로 처분시설 관리구역 밖의 생태계로 이동함으로써 인간 및 환경에 미치는 방사선적 영향을 평가하는 것으로서 원자력안전위원회고시에 따른 정상조건의 결정집단 개인피폭선량 0.1 mSv/yr 이하, 인간침입으로 인한 개인피폭선량에 대해 1 mSv/yr 이하의 요건[6]을 만족하는 처분농도제

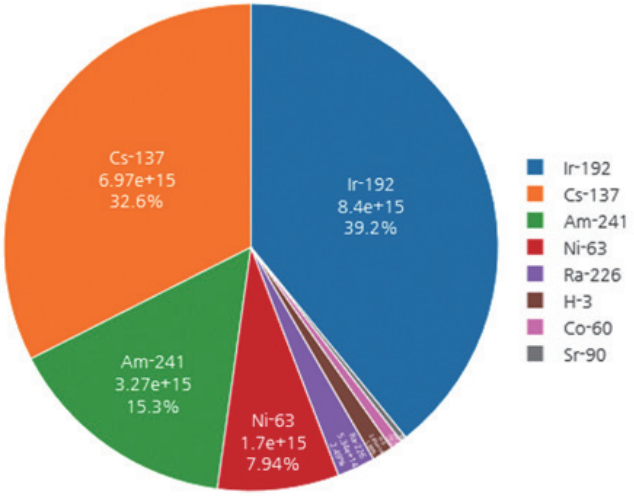



**Fig. 1.** The Activity Ratio of each Disused Sealed Radioactive Sources

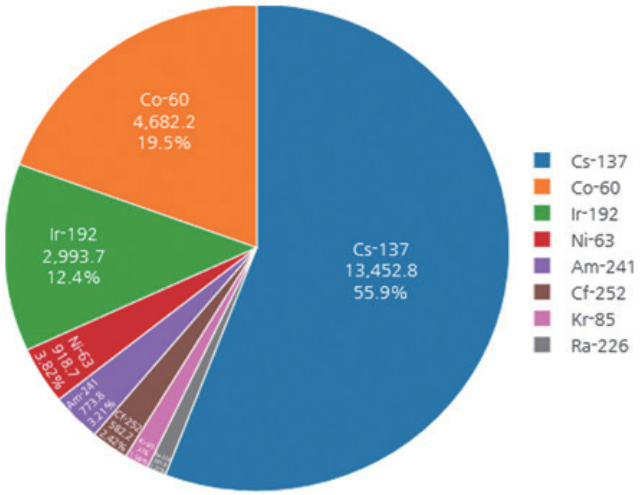



**Fig. 2.** The Volume Ratio of each Disused Sealed Radioactive Sources

**Table 3.** The Total Volume of each Disused Sealed Radioactive Sources

| Rank | Nuclide | The Number of Sources | Total Volume (L) |
|---|---|---|---|
| 1 | $^{137}$Cs | 839 | 13,452.80 |
| 2 | $^{60}$Co | 510 | 4,682.20 |
| 3 | $^{129}$I | 23,375 | 2,993.70 |
| 4 | $^{63}$Ni | 1,552 | 918.7 |
| 5 | $^{241}$Am | 1,732 | 773.8 |
| 6 | $^{252}$Cf | 52 | 582.2 |
| 7 | $^{85}$Kr | 294 | 376 |
| 8 | $^{226}$Ra | 48 | 291.9 |
| Total | | 28,402 | 24,071.30 |

한치와 처분시설 핵종재고량을 제시한다. Table 2는 현재 운영 중인 중저준위방폐물 처분시설인 1단계 동굴처분시설의 방사성 핵종별 처분농도제한치와 핵종재고량을 나타낸다. 이에 지금까지 인수된 폐밀봉선원 중 국내 중저준위처분시설 안전성분석보고서[7]에서 제시하는 핵종별 처분농도제한치와 처분시설 핵종재고량에 해당하는 핵종의 경우 처분 시점의 비방사능과 핵종재고량을 통해 처분 가능성을 확인할 수 있으나, 해당하지 않는 핵종의 경우 처분 안전성 평가가 요구된다.

### 2.2. 폐밀봉선원 전용 처분용기 구조해석 평가

본 용기는 폐밀봉선원의 처분을 위한 전용 처분용기 개념설계를 위하여 먼저 용기의 기본사양을 설정하였다. 처분대상 폐밀봉선원이 중저준위방폐물 처분시설에 처분된 후 폐밀봉선원의

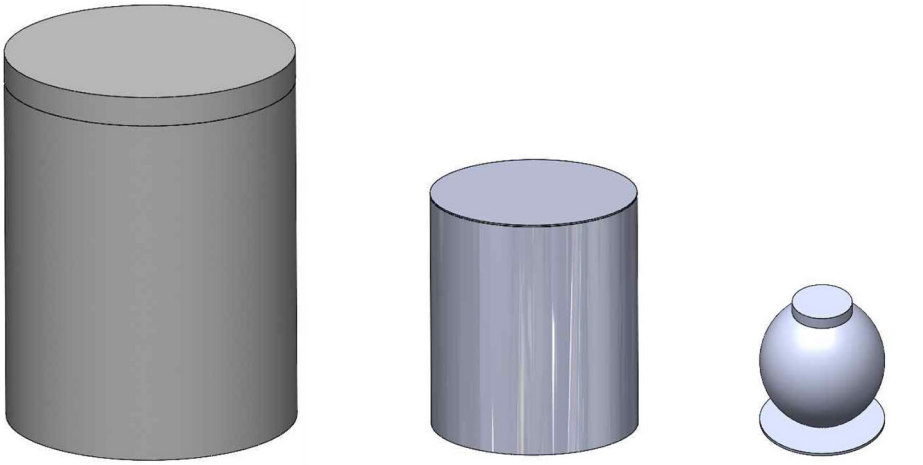



**Fig. 3.** Conceptual Disposal Container Composition

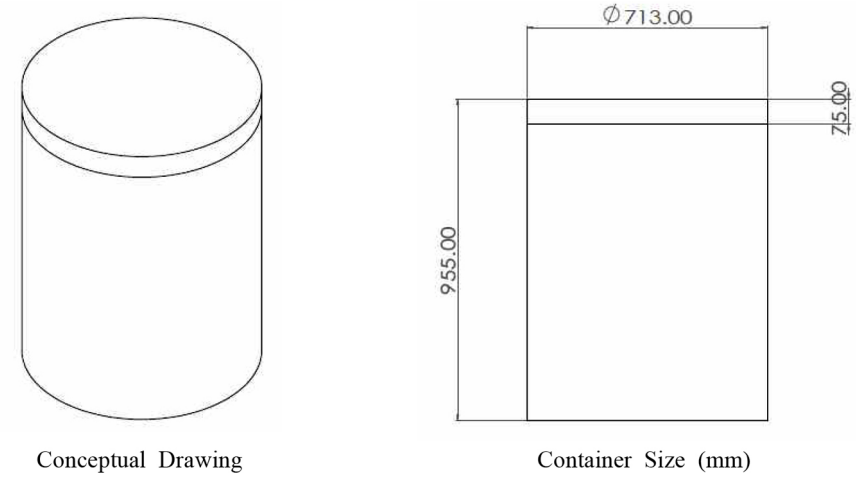
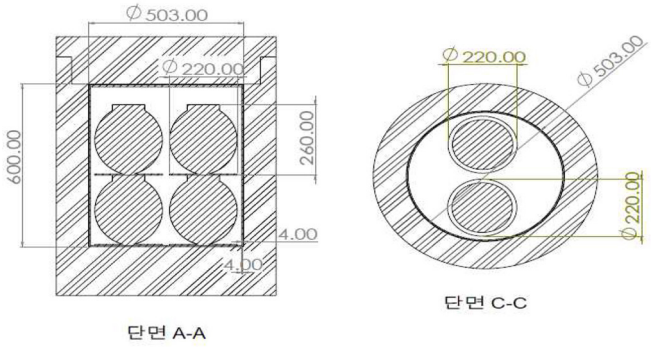



**Fig. 4.** Conceptual Disposal Container Composition




Elevation Plane

**Fig. 5.** Disposal Container Cross Section

**Table 4.** Weight of Each Disposal Container Component

| Component | Weight (Kg) |
|---|---|
| Body (Concrete Over pack) | 486.3 |
| Lid | 142,7 |
| A=Body+Lid | 629.0 |
| B=Inner Steel Container | 71.1 |
| C=Internal Waste (Disused Sealed Source+Grout) | 299.9 |
| Total: A+B+C | 1,000 (=9810 N) |

밀봉재가 그 기능을 상실하여 내부의 방사선원이 누설되는 조건을 고려하여, 지하수 침투와 핵종이동 지연을 위해 콘크리트 재질의 외부 용기(Over pack)와 외부용기 내부에 장입되는 금속용기를 구성하였다(Fig. 3). 내부에 장입되는 금속용기는 처분전 관리의 용이성과 외부용기의 열화 후 밀봉선원과 침투수의 접촉을 지연시키기 위한 기능을 가진다. 각각의 용기는 뚜껑(lid)이 별도로 존재한다. 용기의 중량은 중저준위방폐물 처분시설 중 1단계 동굴 처분시설에 적용 가능한 방폐물 포장물의 최대 중량인 1톤으로, 중저준위 방폐물 처분시설에서 사용되는 표준용기인 320 L 금속 드럼 용기와의 호환성을 고려하고자 320 L 드럼의 직경 713 mm, 높이 955 mm을 적용하였다(Fig. 4). 용기에 장입되는 대표 폐밀봉선원은 특성분석을 통해 장기보관 중인 폐밀봉선원 중 제일 많은 부피를 가지는 $^{137}$Cs 폐밀봉선원을 선정하였다. 전용 처분용기는 크게 뚜껑과 본체로 구성되어 있으며, 뚜껑은 처분용기와 동일한 직경을 가지며 뚜껑이 수, 용기가 암 형태로 뚜껑이 용기에 결합 되는 형식의 두께 175 mm 형태로 반영하였다. Fig. 5는 용기 단면도를 나타내어, 대표 폐밀봉선원과 내부 금속 용기가 어떤 방식으로 전용 처분용기에 장입되는지 그 상세를 나타내었다. 금속 용기 내부에는 폐밀봉선원 4개를 적재하며, 대표 폐밀봉선원의 형상은 가로와 세로가 220 mm×220 mm, 높이가 260 mm 수준의 규격을 가진다. 전용 처분용기 내부에 장입되는 금속용기는 두께 4 mm 금속으로, 외경을 500 mm로 설정하여 처분용기 내경 503 mm와의 운영 오차를 3 mm로 고려하였다. 내부 금속 용기 뚜껑의 체결 방식은 처분용기와 유사한 형태로 반영하였으며, 두께는 7 mm로 반영하였다. 더하여, 금속 용기 내부에 배치되는 폐밀봉선원의 내부 교란을 방지 및 폐밀봉선원 내부의 방사성핵종의 외부 누출 및 핵종이동 지연 효과를 위하여 금속 용기 내부는 몰타르와 같이 경화되는 물질로 채워짐이 필요하다. 내부 금속 용기 높이는 597 mm로, 처분용기 내부 공간의 높이 600 mm와의 운영 오차를 3 mm로 반영하였다. 전용 처분용기 재질인 콘크리트의 밀도를 2,400 kg·m$^{-3}$로 고려하고, 앞서 기술한 전용 처분용기 외경과 내부공간, 뚜껑과의 형태를 고려하여 그 중량을 계산하면 약 0.63톤으로 산출된다. 앞서 처분용기 최대 중량을 1톤으로 고려하였으므로, 처분용기 내부를 구성하는 금속용기와 금속용기 내부 뒷채움재, 4개의 폐밀봉선원 합계 중량은 0.37톤으로 산출된다(Table 4). 내부 금속 용기는 내부식성을 고려 밀도 8,000 kg·m$^{-3}$의 SUS 304스테인리스강의 재질을 반영하였다. 전산해석 수행을 위해 전용 처분용기 외부 재질인 콘크리트 물성치를 탄성계수 $3.0\times10^{10}$ N·m$^{-2}$, 포아송비 0.2, 강도 40 MPa로 적용하고, 파손에 대한 변형률은 별도로 고려하지 않았다. 내부 금속용기는 SUS 304를 반영하여 탄성계수 $1.9\times10^{11}$ N·m$^{-2}$, 포아송비 0.29, 인장강도 517,017,000 N·m$^{-2}$, 항복강도 206,807,000 N·m$^{-2}$를 적용하였다. 전산 해석은 Solidworks simulation 2022 버전을 사용하였다. 전용 처분용기의 구조해석 평가 중 적층해석 평가는 다수의 적층을 통해 가장 아래 용기의 변형정도를 확인하고자 현 중저준위 처분시설에서 운영 시 고려할 수 있는 적층조건 중 2단계 표층처분시설의 처분고 내 9단 적층 조건을 적용하였고, 낙하 사고조건은 국내 원안위 고시에서 제시하는 평가 조건을 적용하여 수행하였다[8]. 전용 처분용기 적층 조건과 낙하 사고 조건에 대한 성능기준은 개념설계 단계를 고려 별도의 성능 기준을 설정하지 않고, 기본 설계 시 구조적 안전성 강화 항목을 도출하기 위한 구조해석을 수행하였다.

공단으로 인수된 폐밀봉선원 중 차폐기능을 상실한 밀봉선원은 존재하지 않는다. 그리고 처분시설 운영 중 용기의 차폐 안전성 평가 시 고려되는 주요 감마핵종($^{60}$Co, $^{62}$Ni, $^{137}$Cs) 밀봉선원의 표면선량은 대부분 수 μSv·h$^{-1}$이며, 방사선량의 분포는 최소 $10^{6}$~$10^{10}$ Bq의 방사선량을 가진다. 기 발표된 밀봉선원 용기의 차폐설계에 대한 참조 논문에서는 주요 감마핵종 폐밀봉선원의 방사능량보다 큰 조건에 대해 내부 금속용기의 두께 4 mm로 차폐가 가능 한 것으로 제시한다[9]. 이에 운영 중 용기 내부 방폐물의 방사선원항을 고려 시 국내 고시에서 제시하는 용기의 표면 선량 2 mSv/h를 초과 할 조건이 아니라고 판단되어 개념설계를 위한 차폐평가는 고려하지 않았다.

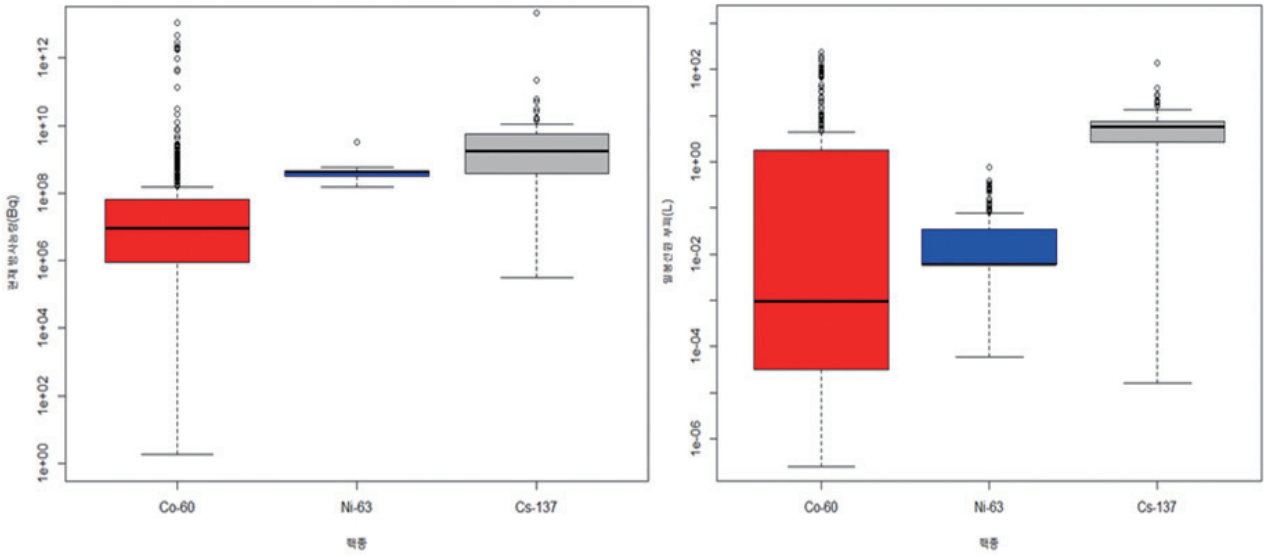



**Fig. 6 .** Radioactivity (Left) and Volume (Right) distribution of Disused Sealed Source for Priority Disposal

## 3. 평가 방법 및 결과

### 3.1. 장기보관 중 폐밀봉선원의 물리/방사선적 특성 분석 결과 및 처분 대상 분류

$^{192}$Ir은 전체 선원 수의 82.3%로 대부분을 차지하지만 부피기준으로는 2,994 L (200 L 약 15드럼)으로 상대적으로 적은 저장공간을 차지하고 있다. $^{192}$Ir는 막대모양의 긴 선원으로 막대의 머리부에만 선원이 분포하고 있어 선원부분만 절단하여 집중저장이 가능하므로 많은 선원수에도 저장 부피는 크지 않다. 그럼에도 저장중인 선원 수가 매우 많기 때문에 저장공간을 확보를 위한 처리·처분 우선 순위는 높다. 극단반감기 핵종인 $^{192}$Ir 폐밀봉선원은 가장 높은 총 방사능량을 보유한 폐밀봉선원 핵종으로 총 방사능량은 $8.40\times10^{15}$ Bq이다. 이는 1단계 동굴처분시설 총 처분제한치 $1.08\times10^{16}$ Bq에 준하는 수치로 매우 높은 수치이다. 이는 $^{192}$Ir 선원 수가 총 53,769로 매우 많아 총 방사능량이 높은 것으로 분석된다. $^{192}$Ir의 평균 방사능은 $1.56\times10^{11}$ Bq이며 반감기는 73.8일로 2년간 10 반감기가 지나 1/1024배로 감소하며, 8년 뒤에는 $9.09\times10^{-13}$배 감소하므로 중저준위방폐물 처분시설 운영 중 장기보관 하는 것만으로도 충분히 감쇠되어 자체처분이 가능할 것으로 판단된다. 이에 $^{192}$Ir와 같이 반감기가 짧고 현재 총 방사능이 작아 수년내 자체처분이 가능할 것으로 분석되는 $^{55}$Fe, $^{57}$Co, $^{153}$Gd, $^{125}$I에 대하여 자체처분 폐밀봉선원으로 분류하였다.

$^{137}$Cs은 선원 수로는 전체의 3.0%에 불과하지만 부피기준으로는 13,452 L (200 L 약 67드럼)으로 가장 많은 저장공간을 차지하고 있다. $^{137}$Cs 폐밀봉선원 대부분은 수위 측정용 소스홀더(Source Holder)를 포함하고 있어 상대적으로 부피가 큰 것으로 확인되며, $^{137}$Cs을 우선적으로 처리·처분할 경우 저장공간을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. $^{137}$Cs 폐밀봉선원은 두 번째로 높은 총 방사능량을 보유한 핵종으로 총 방사능량은 $6.97\times10^{15}$ Bq과 평균 방사능은 $1.87\times10^{12}$ Bq 이다. 도출된 방사능 값을 처분시설 핵종재고량 및 처분농도제한치의 방사선적 특성에 대하여 비교하였을 때 국내 처분시설에 처분이 어려운 것으로 판단된다. 대부분 $^{137}$Cs 폐밀봉선원의 방사능량이 타 핵종 폐밀봉선원에 비해 높은 편은 아니나 의료계에서 혈액조사용으로 사용되는 방사선 조사장치의 경우 약 $1.11\times10^{14}$ Bq 수준의 매우 높은 방사능을 가진다. 이로 인해 폐밀봉선원의 방사능 평균값이 높게 산출된 것으로 분석된다. 이에 $^{137}$Cs 폐밀봉선원의 방사능량에 대한 분포도에 대해 분석하였으며, 결과는 Fig. 6과 같다. 방사선조사장치를 제외한 대부분의 $^{137}$Cs 폐밀봉선원의 방사능은 $1.0\times10^{8}$~$1.0\times10^{10}$ Bq의 범위에 분포하므로 처분농도제한치와 처분시설 핵종재고량을 고려 시 충분히 처분 가능한 것으로 판단되어 우선처분대상 폐밀봉선원으로 분류 하였다.

$^{60}$Co은 선원 수로는 전체의 1.8%에 불과하지만 부피기준으로는 4,682 L (200 L 약 23드럼)으로 두번째로 많은 저장공간을 차지하고 있다. $^{137}$Cs 선원과 마찬가지로 폐밀봉선원 대부분이 소스홀더를 포함하고 있어 상대적으로 부피가 큰 것으로 파악되며, $^{60}$Co 또한, 우선적으로 처리·처분할 경우 상당한 저장공간을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. $^{60}$Co 폐밀봉선원은 일곱 번째로 높은 총 방사능량을 보유한 핵종으로 총 방사능량은 1.62×1014 Bq이다. $^{60}$Co의 반감기는 5.27년으로 길지 않아 장기보관 또는 처분시설 운영기간(60년)을 통해 감쇠효과를 기대할 수 있다. 대형기관 발생 중저준위 방폐물에 흔히 포함되는 핵종으로 안전성평가에 미치는 영향이 낮아 처분농도제한치가 없으며, 처

분시설 핵종재고량을 기준으로 관리되므로 $^{60}$Co 폐밀봉선원은 처분시설에 충분히 처분 가능할 것으로 판단되어 우선처분대상 폐밀봉선원으로 분류 하였다.

$^{63}$Ni 폐밀봉선원은 네 번째로 높은 총 방사능량을 보유한 핵종으로 총 방사능량은 1.69 E+15 Bq이다. 대부분의 $^{63}$Ni 폐밀봉선원은 가스크로마토그래피의 방사선 선원항으로 사용되고 있다. $^{63}$Ni의 반감기는 100.1년으로 상당히 길어 장기보관을 통한 감쇠효과를 기대하기 어려우며, 대형기관 발생 중저준위 방폐물에 포함된 핵종으로 처분농도제한치와 처분시설핵종재고량이 평가되어 있다. $^{63}$Ni 폐밀봉선원의 방사능량에 대한 분포도에 대해 분석하였으며, $^{137}$Cs 폐밀봉선원과 유사하게 일부 선원에서 높은 방사능을 가지며 대부분 선원의 방사능량은 $1.0\times10^{8}$~$1.0\times10^{10}$ Bq의 범위에 분포하여 처분농도제한치와 처분시설 핵종재고량을 고려 시 충분히 처분 가능한 것으로 판단되어 우선처분대상 폐밀봉선원으로 분류 하였다.

$^{241}$Am은 전체 선원 수의 6.0%를 차지하고 있으며 부피기준으로는 773.8 L (200 L 약 3.9드럼) 3.2%를 차지하고 있다. $^{241}$Am 선원의 상당수가 토양 함수량 측정 장치로부터 폐밀봉선원만 분리하여 인수하므로 상대적 부피도 작은 것으로 판단된다. $^{241}$Am 폐밀봉선원은 세 번째로 높은 총 방사능량을 보유한 핵종으로 총 방사능량은 $3.27\times10^{15}$ Bq이다. $^{241}$Am은 주로 토양 함수율 측정 장치에 사용되고 있으며, 개수도 9,932개로 $^{192}$Ir 폐밀봉선원 다음으로 많고 반감기는 432.7년으로 매우 길어 장기보관을 통한 감쇠 효과를 기대하기 어려운 폐밀봉선원이다. $^{241}$Am과 같은 알파 선원 및 $^{241}$Am/Be 중성자 선원 방출 폐밀봉선원은 처분농도제한치와 처분시설 핵종재고량 고려 시 많은 양의 처분이 어렵고 반감기도 처분시설의 제도적 관리기관 대비 상당히 길어 방사능량의 감소를 고려한 처분이 어렵다. 그리고 방사능 붕괴로 생성되는 딸핵종 $^{210}$Po은 처분 안전성에 심각한 영향을 발생시키므로 장기보관 및 재활용 대상 폐밀봉선원으로 분류하였다.

상기 기술된 분석내용을 바탕으로 장기보관 이후 처분시점에서 평가 되는 폐밀봉선원의 핵종 별 방사선원 종류, 반감기, 처분농도제한치 그리고 처분시설 핵종재고량을 바탕으로 Fig. 7과 같은 순서도에 따라 폐밀봉선원의 안전한 관리를 위한 분류 방안을 제시하였으며 그 내용은 Table 5와 같다.

### 3.2. 전용 처분용기 구조해석 평가 결과

전용 처분용기의 구조해석 평가는 2단계 표층처분시설의 처분고 내 적층 조건과 국내 원안위 고시에서 제시하는 낙하 사고 조건을 고려하여 수행하였다. 먼저 적층해석의 경우, 용기 최대 중량인 1톤(9,810N)을 최대 9단으로 적층하는 상황을 고려하여, 가장 아래 1층 전용 처분용기가 받는 최대 하중을 용기 8개의 중량으로 고려하였다. 전용 처분용기의 개념설계 단계임을 고려하여 전술한 바와 같이 콘크리트 파손 모사를 위한 파손 변형 조건은 고려하지 않았다. 콘크리트 재료 압축강도 수준과 발생 응력을 비교하였을때, 처분용기는 9단 적층 환경에서 최대 약 1.2 MPa 수준의 응력이 발생하였으며, 그때의 수직 변형량은 0.017 mm 수준으로, 구조적 건전성이 저해될 만큼의 위험성은 없는

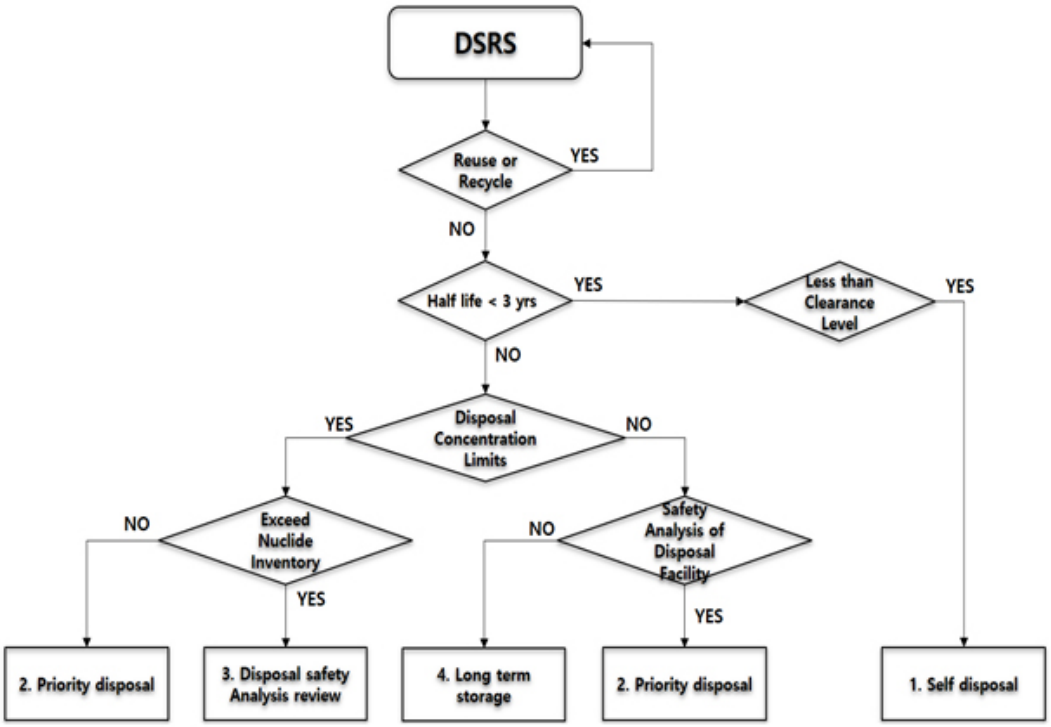



**Fig. 7.** Disused Sealed Source Management Group Algorithm

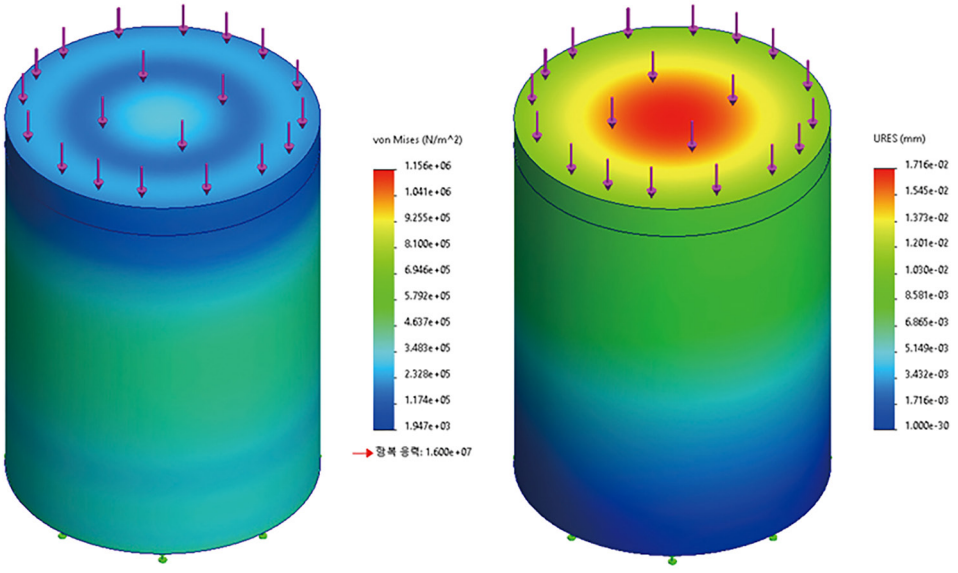
**Table 5.** Disused Sealed Source Management Group considering Characteristics

| Management Group | Nuclide | Characteristics | | | Note |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Half-life (Less than 3 years) | Limit on the radioactivity Concentration | Radioactive Inventory of disposal Facility | |
| Self disposal | Co-57, Ir-192, Pm-147, Fe-55 | O | O | - | |
| Priority disposal | H-3, Na-22, Co-60, Ni-63, Cs-137 | X | O | Acceptable | |
| Disposal Safety review | Kr-85, Sr-90, Cd-109, Cf-252 | X | - | - | Safety Analysis Required |
| Long-term storage (Reuse or Recycle) | Am-241, Ra-226, Am/Be, Po-210 | X | 0 | Excessive | Alpha, neutron emitter |

**Table 6.** Detail specification of Large Container Results of Maximum Stress and vertical Displacement by 9 Stacking of Container

| Stacking | Max. Stress [MPa] | Max. Veritical Displacement [mm] |
|---|---|---|
| 1 | 0.14 | 0.002 |
| 2 | 0.29 | 0.004 |
| 3 | 0.43 | 0.006 |
| 4 | 0.58 | 0.009 |
| 5 | 0.72 | 0.011 |
| 6 | 0.87 | 0.013 |
| 7 | 1.01 | 0.015 |
| 8 | 1.16 | 0.017 |

것으로 판단된다(Table 6). 다만, 용기의 상면과 하면의 완전 접촉이 발생될 경우, 용기 덮개에 가력되는 등분포 하중에 의해 의도하지 않은 하중이 용기 덮개 중앙부 변형을 유발할 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 용기 내부 매질을 매우 밀실하게 채워 해당 변형에 저항하는 방안의 고려가 필요하나, 이는 처분시설 운영의 효율성을 저해할 수 있다. 따라서 기본 및 상세설계 과정에서 용기 하단부에 별도의 하중전달 요소를 고려하여, 용기의 수직 구조부재(벽 또는 기둥의 개념이므로, 원통형 용기에서는 용기 외경 방향으로 구성된 벽체를 의미)를 통해서만 적층하중이 전달되면서 용기 뚜껑 중앙부로 전달되는 하중 경로를 단절시켜 적층 환경에 적합한 구조적 안정성을 확보할 수 있는 방안을 마련하는 과정이 필요할 것으로 판단된다(Fig. 8). 더하여




Max. Stress Distribution　　Max. Vertical Displacement Distribution

**Fig. 8.** Results of 9 Stacked Container Structure Analysis

**Table 7.** Drop Analysis Results of Maximum Stress and vertical displacement of Disposal Container

| Contanct time with Ground [μs] | Max. Stress [MPa] | Max. Veritical Displacement [mm] |
|---|---|---|
| 32.97 | 14.1 | 0.14 |
| 165.52 | 13.4 | 0.63 |
| 331.21 | 43.4 | 1.25 |
| 496.73 | 52.6 | 1.88 |
| 662.40 | 100.2 | 2.52 |
| 828.06 | 148.4 | 3.21 |

개념설계 단계에서의 낙하해석은 낙하높이 1.2 m에서 강체 바닥으로 낙하하는 상황을 모사하여 진행하였다. 이때 용기의 합산 자중은 전술한 바와 같이 1톤으로 설정하였으며, 금속용기를 포함한 내부는 약 0.37톤 중량을 갖는 모사체로 구현하였다. 전용 처분용기는 낙하사고 시 내부 폐밀봉선원의 외부 확산을 방지할 수 있는 충분한 내력을 보유해야 한다. 하지만 콘크리트의 취성과 균열의 진전을 예측하기 어려운 재료적 특성을 고려하였을 때, 낙하사고 발생 시 용기는 재사용되지 않고 교체됨이 필요하므로, 구조적 건전성 평가 대상에 콘크리트 내부의 용기를 고려할 필요가 있다. 다만, 본 연구에서 고려중인 처분용기는 폐밀봉선원이 용기 내부에서 교란되는 문제를 방지하기 위하여 경화성 물질로 빈 공간을 채우는 방식을 활용하므로, 콘크리트 용기와 내부 금속용기, 폐밀봉선원 폐기물 간의 상호 충돌 현상을 최소화할 수 있다. 이는 용기 내부 시공 간격 오차를 고려한 별도의 분석이 요구될 수 있음을 의미하므로, 용기의 기본 및 상세설계 과정을 통해 상세한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서 수행한 용기 개념설계 조건에서의 낙하해석 결과, 용기와 지면 접촉으로 인해 발생한 응력은 용기 몸체를 매체로 하여 용기 내부 폐기물이 인접한 공간으로 전달되는 양상을 보였으며, 오버팩에서 발생된 순간 최대응력이 약 150 MPa 수준으로 나타났다 (Table 7). 이때 발생된 수직 변위는 3.21 mm 수준으로, 용기에 상당한 손상을 초래할 수 있는 수준인 것으로 판단된다(Fig. 9).

## 4. 고찰 및 결론

본 연구는 폐밀봉선원의 장기 보관과 안전한 처분을 위해 분류 방안과 전용 처분용기의 개념설계를 위한 구조해석 평가 결과를 제시하였다. 먼저, 폐밀봉선원의 방사선적 및 물리적 특성 분석을 통해, 각 핵종의 반감기, 방사능량, 물리적 크기 및 형태를 고려한 분류 방안을 도출 하였다. 그 결과, 방사능 농도가 높고 부피가 큰 $^{137}$Cs와 $^{60}$Co, $^{63}$Ni는 처분시설의 공간 확보를 위해 우선적으로 처리해야 할 필요성이 있으며, 이들 핵종은 특히 부피가 커 처분이 완료될 경우 저장공간의 효율적인 활용에 기여할 수 있다. 반면, 반감기가 짧고 방사능이 빠르게 감소하는 $^{192}$Ir, $^{55}$Fe, $^{57}$Co, $^{125}$I 등은 수년 내 방사능이 자연 감소하여 자체처분이 가능할 것으로 분석되었다. $^{241}$Am의 경우, 알파선을 방출하는 특성과 긴 반감기 때문에 장기보관이 필요하거나 재활용 또는 재사용을 고려해야 할 핵종으로 분류되었다. 제시한 분류 방안에 대하여 우선 처분대상인 $^{137}$Cs의 경우 반감기는 30.07년으로 중저준위방폐물 처분시설의 제도적 관리기간 내(300년) 충분히 감쇠되기 어려우므로 관리기간 중 처분시설 핵종재고량을 실시간으로 관리되어야 할 핵종이며, $^{60}$Co와 함께 대표적인 감마선 방출 핵종이기 때문에 운영중 작업자 피폭영향에 대한 평가가 필요하다. 이러한 분석을 바탕으로 폐밀봉선원의 분류 방안

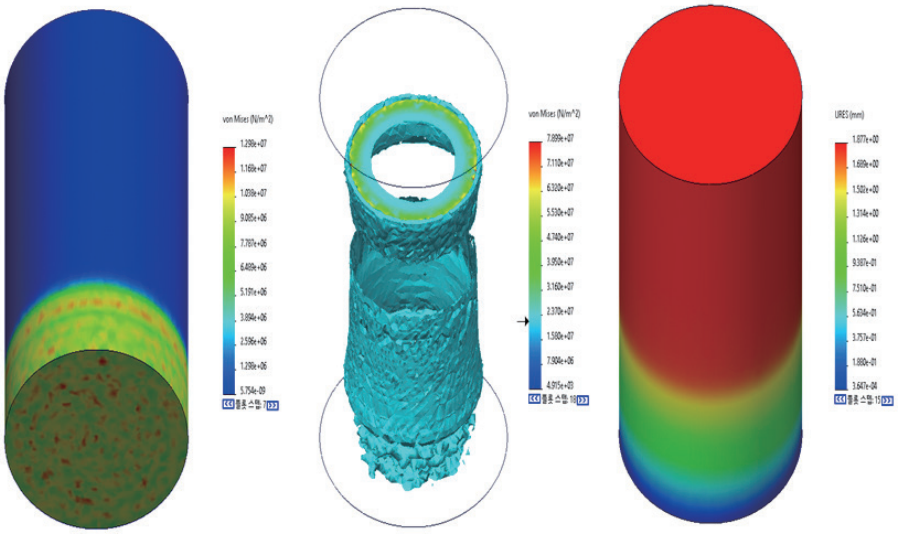


**Fig. 9.** Structure Analysis Results of 1.2 m Drop

은 방사선 안전성과 저장시설의 운영 효율성을 모두 고려한 체계적인 관리 방법을 제시하고 있는 것으로 판단된다.

폐밀봉선원 처분용기의 개념설계를 위한 구조적 안전성 평가 모델의 생성 및 해석은 9단의 처분용기 적층 조건에 대해 수행되었다. 최하단의 처분용기의 최대변형은 0.017 mm로 발생하여 처분 시설 내 정치 시에도 안전하게 운용이 가능하다. 그리고 낙하 해석 시 최대 응력은 용기내부의 금속용기에서 발생하였으며, 최대 변위는 3.21 mm로에서 발생하였다. 따라서 두 조건의 해석결과 적층조건에서는 안전한 운영이 가능하며 낙하 시에는 내부 금속용기와 콘크리트 외부용기와 구조적으로 안정적인 설계가 필요함을 확인 할 수 있었다. 이에 낙하에 의해 지면과 직접적인 접촉이 발생하는 외부용기 하단부에는 헌치(Haunch)와 같은 형상을 고려하여, 특정 모서리 부분에 응력이 집중되는 현상을 방지할 필요가 있으며, 용기 표면에 금속 부재 마감과 같은 설계 요소를 반영할 필요가 있다고 판단된다. 더하여 용기 내부는 폐기물 장입 공간과 금속 용기 간 유격을 최소화하여, 금속 용기 자중에서 유발되는 가속도에 의한 2차 충격 방지를 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 제시된 장기보관 중 폐밀봉선원의 분류 방안과 처분용기 개념(안)에 대한 구조해석평가 결과는 최종 처분을 위한 특수 처분용기의 상세설계, 저장/처분 시나리오 수립 그리고 국내 고시에서 제시하는 방폐물의 방사능 준위 분류의 핵종별 비방사능에 포함되지 않는 핵종들에 대한 처분시설 선정을 위한 안전성평가(안전기준: 정상 시나리오 1 $mSv \cdot y^{-1}$, 비정상 시나리오 0.1 $mSv \cdot y^{-1}$)에 활용되어 폐밀봉선원의 장기 보관과 최종 처분을 위한 기술적 기반을 마련함으로써, 방사성 폐기물 관리의 안전성을 크게 향상시키는 데 기여할 수 있다.

## 사 사

본 논문은 에너지기술평가원(KETEP)에서 주관하는 중저준위복합처분시설안전관리강화기술개발사업의 “장기보관 RI 폐기물의 안전한 관리를 위한 처리 방법 및 처분 기술개발” 과제(과제번호: RS-2023-00234593)의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Notice of Nuclear Safety and Security Commission. 2022. Enforcement Decree of the Nuclear Safety Act. Presidential Decree No. 33193.
2. Korea Radioactive Waste Agency. 2019. The 2nd Basic Plan of Radioactive waste Management in Korea.
3. Notice of Nuclear Safety and Security Commission. 2014. Regulations for Criteria on the Classification and Clearance of Radioactive Waste. Notice No. 2014-3.
4. International Atomic Energy Agency. 2009. Classification of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards Series No. GSG-1. IAEA. Vienna.
5. International Atomic Energy Agency. 2005. Disposal Options for Disused Radioactive Sources. Technical Reports Series No. 436, IAEA, Vienna.
6. Nuclear Safety and Security Commission. 2014. Criteria on Prevention of the Radiological hazard for Low and Intermediate Level radioactive Waste Disposal Facility. Notice No. 2014-56.
7. Korea Radioactive Waste Agency. 2024. Safety Analysis Report for Low and Intermediate Level Radioactive Waste Disposal Facility.
8. Nuclear Safety and Security Commission. 2021. Regulations on the Packaging and Transport, of Radioactive Material. Notice No. 2021-2.
9. Sukhoon Kim and Juyoul Kim. 2017. Sheielding Design of Disposal Container for Disused Sealed Radioactive Source. *Journal of Radiation Industry* **11**(2):107-121. https://doi.org/10.23042/radin.2017.11.2.107.