Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 4, pp. 275-287, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.4.275

Original article

중저준위 폐기물 처분용기의 차폐 성능 분석 및 설계 최적화

강지훈[1] · 임동석[1,*] · 정우영[1] · 이현철[1] · 도호석[2] · 손유화[2]

[1]㈜미래와도전, [2]한국원자력환경공단

Analysis of Shielding Performance and Design Optimization of Low and Intermediate Level Waste Disposal Containers

Ji-Hoon Kang[1], Dong-Seok Lim[1,*], Hyun Chul Lee[1], Woo Young Jung[1], Ho-Seog Dho[2], and Yu-Hwa Son[2]

[1]FNC Technology Co., 32F, 13 Heungdeok 1-ro, Giheung-gu, Yongin-si 16954, Republic of Korea
[2]Korea Radioactive Waste Agency, 174, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Republic of Korea

ABSTRACT The increasing number of disused sealed radioactive sources (DSRSs) in Korea necessitates the development of effective disposal methods. This study aims to enhance the safety and efficiency of DSRS disposal through improved design of disposal containers. This study focuses on enhancing the safety and efficiency of DSRS disposal by analyzing the impact of external coating materials, inner container thickness variations, and inner container size changes on radiation shielding performance and loading capacity. Using 200 L and 320 L steel drums, radiation shielding was assessed through MicroShield with various coatings, including tungsten carbide (WC) and boron carbide (BC). The analysis explored inner container thicknesses (0 to 4 mm). Results indicate that WC coating provides superior shielding due to its high density and larger atomic number. Also, an inner container thickness of 3 mm offers the best balance between cost and shielding performance. The study shows that increasing the inner container size in both drum types decreases the volume-based loading capacity. This reduction occurs because larger containers result in thinner shielding material and increased self-shielding effects. However, when considering the weight of the shielding material, larger inner containers may reduce total shielding weight, which can positively affect loading capacity if the weight reduction outweighs the decrease in shielding efficiency. Thus, both the size and total weight of the shielding material must be considered when determining inner container dimensions. In conclusion, when designing disposal containers and determining inner container sizes, it is essential to balance shielding efficiency with loading capacity. The study emphasizes optimal design based on radiation exposure and shielding weight, providing a conceptual design that meets current standards and enhances the management of DSRSs during long-term storage.

Key words: Disposal container, Shielding design, Radioactive waste disposal, Disused sealed radioactive source

1. 서 론

국내의 다양한 산업 분야, 병원, 학교 및 학계에서 방사성동위원소의 사용이 활발해짐에 따라 폐밀봉선원 발생이 지속적으로 증가하고 있다. 폐밀봉선원은 밀봉 상태에서 방사능을 방출하는 방사성동위원소로, 사용 기간이 종료되거나 방사능이 감쇄되어 더 이상 사용이 불가능한 상태에 도달한 방사성 물질을 의미한다. 현재까지 국내에서 발생한 폐밀봉선원은 약 5만 개 이상으로, 물리적 형태와 방사선 종류에 있어 매우 다양한 특성을 보인다[1].

방사성동위원소(Radioactive isotope; RI) 폐기물은 방사성동위원소로 인해 오염된 물질을 포괄적으로 의미하며, 산업통상자원부 고시[2]에 따라 개봉선원 폐기물과 밀봉선원 폐기물로 분류된다. 개봉선원 폐기물은 고체 또는 액체 상태의 방사성동위원소가 포함된 폐기물로, 동위원소가 밀봉되지 않은 상태에서 발생된 물질을 말한다. 반면, 밀봉선원 폐기물은 방사성 물질이 밀봉된 상태에서 사용되다가 방사능 감쇄로 인해 사용 가치가 없어진 것

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

Copyright© 2024 by Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author: Dong-Seok Lim
Tel: +82-31-8005-5614, Fax: +82-31-8005-6014, E-mail: lds777@fnctech.com

Received 26 September 2024 Revised 18 October 2024 Accepted 12 November 2024

이나, 사업 중단 등의 이유로 더 이상 사용되지 않아 폐기 대상으로 분류된 방사성 물질을 의미한다.

RI 폐기물은 다양한 형태와 방사능 준위를 가지며, 발생원이 고정적이지 않아 기존 원전 운영 방사성폐기물 처리·처분 기술의 적용이 어렵다. 기존의 RI 폐기물 관리 기술은 부피 감용을 위한 처리 기술에 초점을 맞추어 개발되었으며, 감용 처리된 RI 폐기물의 최종 처분이 고려된 처분 기술의 개발은 미흡하였다. 그 결과, 현재 RI 폐기물은 중·저준위 방폐물 처분시설의 인수저장건물에 장기 보관되고 있다. 장기보관된 RI 폐기물은 처분장의 인수·저장량 포화를 유발하여 신규 RI 폐기물의 인수 제한을 초래할 수 있다. 이는 RI 산업의 활성화를 방해하고 폐액 누설, 방사선 피폭, 화재 위험, 악취 발생 등의 안전성 문제를 초래한다. 이러한 상황에서는 방사성 폐기물 관리사업자의 처분시설 건설 및 운영 계획과 긴밀히 연계하여, 폐밀봉선원의 처분 방안을 신속히 마련하는 것이 필수적이다[3].

현재, 방사성폐기물의 포장은 중·저준위방폐물 동굴처분시설 인수기준[4]에 따라 200 L 및 320 L 강재 드럼을 표준으로 사용하고 있으며, 신규 용기 개발 시에는 중·저준위 방폐물 인도규정[5]을 준수하여 처분사업자의 사전 승인이 필요하다. 그러나 200 L와 320 L 강재 드럼을 이용한 RI 폐기물의 처분과 처분 적합성에 대한 검토가 이루어진 사례가 미흡하므로, 국내 처분시설 적용성 및 처분 적합성을 가지는 전용 처분용기 개발이 필요하다. 이때, 처분용기의 개발을 위해서는 방사선학적 차폐 성능뿐만 아니라 구조적 안정성을 동시에 고려한 설계가 필요하다.

본 연구에서는 장기보관 중인 RI 폐기물의 신속한 처분을 위해 방사선학적 차폐 성능을 최우선으로 평가하였으며, 차폐 해석 결과를 바탕으로 처분용기의 안전성과 설계를 최적화 하는 데 중점을 두었다. 방사선학적 차폐 해석을 통한 처분용기의 내부용기 두께를 결정하였으며, 코팅 적용을 통해 방사성 물질의 외부 유출 방지와 내구성을 향상시킬 수 있다. 또한, 추가적인 차폐 성능 향상도 기대할 수 있기 때문에 코팅 적용 유무에 따른 방사선 차폐 효율을 체계적으로 분석하였다. 200 L 및 320 L 드럼의 내부용기의 크기를 변화시키며 차폐 효율의 변화를 살펴보고, 이를 통해 적재 공간의 단위체적당 적재가능 방사능 및 차폐체 단위 중량당 적재 가능한 방사능을 도출하였다. 분석 결과를 바탕으로, 국내 처분시설에 처분 적합성을 확보할 수 있는 처분용기의 설계를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

폐밀봉선원의 안전한 처분을 위해서는 방사 선량과 선원의 특성을 고려한 처분용기의 설계가 필수적이다. 폐밀봉선원 중 일부 핵종은 특수한 형태의 처분용기가 필요하며, 그 외의 핵종에 대해서는 일반적인 처분용기를 사용한다[1]. 본 연구에서는 두 가지의 처분용기와 처분용기에 적용할 코팅재료를 선정하고, 폐밀봉선원 보관 수량 및 방사선량을 고려하여 차폐해석을 수행하였다.

2.1. 코팅재료

IAEA에서는 중·저준위 방사성 폐기물 처분용기에 차폐 성능 향상을 위한 방안으로 코팅 기술 적용을 고려하고 있다[6]. 본 연구에서는 처분용기 설계 시 장기적 안정성 확보를 위해 처분용기 외부에 코팅을 고려하였으며, 이러한 기준을 충족하는 재료로 탄화텅스텐(Tungsten carbide; WC)과 탄화붕소(Boron carbide; B_4C)를 선정하였다. 이와 함께, 차폐성능이 우수한 납 코팅도 고려할 수 있으나, 납은 기계적 강도 화학적 안정성이 낮아 장기간 처분장에 보관될 경우 보관 중에 부식되거나 변형될 가능성이 있다. 이러한 특성으로 인해 방사성 물질의 누출 및 노출 위험을 초래할 수 있으므로 처분용기의 코팅 재료 선정 후보에서 제외 되었다.

탄화텅스텐은 높은 밀도와 경도를 지녀 외부 충격에 대한 저항성이 뛰어나며, 우수한 열 안전성을 바탕으로 고온 환경에서도 처분용기의 안정성을 유지할 수 있다. 또한, 탄화텅스텐은 화학적 부식에 대한 저항성이 높아 장기적으로 용기의 내구성을 향상시킨다.

반면, 탄화붕소는 중성자 차폐 성능이 우수하고, 탄화텅스텐과 마찬가지로 높은 화학적 부식 저항성과 기계적 강도를 갖추고 있다. 특히, 탄화붕소는 중성자 흡수율이 높아 중성자 차폐에 매우 효과적이다. 이러한 특성들은 방사성 폐기물 처분용기의 장기적 안정성을 향상시키는 데 중요한 역할을 한다. 탄화텅스텐과 탄화붕소는 각각의 특성이 방사성 폐기물 처분용기의 물리적, 화학적 안정성을 제공할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 두 가지 코팅재료를 선정하고 외부 코팅 두께로 0.35 mm를 가정하여 분석하였다.

2.2. 처분용기

국내에서는 중·저준위 방사성폐기물 인수기준[4]에 따라 200 L 및 320 L 용기에 폐기물을 포장하여 동굴처분시설에 처분하고 있다. 국내 운반 및 처분절차에 따르면 중저준위 방사성 폐기물은 200 L 및 320 L 드럼에 포장하여 인도해야 한다. 인도된 드럼은 인수 검사 시 중량 및 표면 선량률 등의 전수검사와 드럼핵종분석기, 표면 오염도 등의 표본검사를 수행 후 처분용기에 포장되어 동굴처분을 수행한다. 따라서 본 연구에서는 RI 폐기물의 처분 환경, 국내 처분환경 및 운반 부대 설비/설계를 고려해서 원주형 철제 드럼 대상으로 차폐해석을 수행하였다. 일반 처분용기는 국내 원자력발전소에서 사용 중인 200 L 콘크리트 차폐 드럼을 사용하며, 차폐 드럼은 외부 1.2 mm 두께의 냉간압연강판 원통 및 콘크리트 차폐체로 구성된다. 본 연구에서 사용한 200 L 및 320 L 용기의 제원 및 재질은 Table 1과 같으며, 일반 처분용기 중 200 L 및 320 L의 콘크리트 차폐 드럼에 스테인리스 강 소재의 원통형 내부 용기를 추가로 적용하였다. 내부용기의 두께는

Table 1. Dimensions and Materials of the 200 L and 320 L Shielded Drums

	Specification	200L Drum	320L Drum
Outer Container	Size (Outer)	570 mm (D) × 884 mm (H) × 1.2 mm (T)	713 mm (D) × 955 mm (H) × 1.2 mm (T)
	Size (Inner)	204 mm (D) × 440 mm (H)	500 mm (D) × 600 mm (H)
	Material	Carbon steel	Carbon steel
	Shielding Material	Concrete	Concrete
Inner Container	Size	204 mm (D) × 440 mm (H) × Optimal thickness	500 mm (D) × 600 mm (H) × Optimal thickness
	Material	304 Stainless Steel	304 Stainless Steel

D: Diameter, H: Height, T: Thickness

차폐 해석을 통해 기술 기준 및 차폐 성능을 고려하여 최적화된 값을 적용하였다.

2.3. 차폐 해석

본 연구에서는 산업적, 의료적으로 널리 사용되어 재고량이 많고, 감마 key 핵종인 ^{60}Co과 ^{137}Cs을 선정하고 차폐 해석을 수행하였다[7]. 차폐 해석은 포인트 커널(Point Kernel) 방법론을 기반으로 한 전산코드 MicroShield v9.05 (Grove Software)를 사용하여 수행되었으며, 차폐해석 시 핵종 붕괴 과정에서 생성되는 딸핵종의 감마선 방출 영향도 차폐 해석에 반영하여 평가를 진행하였다.

2.3.1. 선량 평가

각 핵종별 단위 방사능 수치 1 Ci (3.7×10^{10} Bq) 방사능량을 가정한 후, 용기 표면(1 cm) 및 2 m 이격 지점에서의 선량을 평가하였다.

2.3.2. 적재가능 최대 방사능량 도출

처분용기 별로 선량률 제한치, 표면 2 mSv·h^{-1} 이하, 2 m 이격 지점 0.1 mSv·h^{-1} 이하[8]를 충족하는 최대 방사능량을 도출하였다.

2.3.3. 최적 치수 결정

도출된 값을 바탕으로 최적 치수를 결정하였으며, 적재공간 단위체적당 선원 방사능(Bq·cm^{-3}) 및 차폐체 단위중량당 적재 가능 방사능(Bq·kg^{-1})을 도출하였다.

이를 통해 폐밀봉선원의 처분용기 설계의 효율성을 높이고, 차폐 성능을 최적화하여 방사선 안전성을 강화하고자 하였다. Fig. 1은 내부용기 두께가 3 mm인 일반 처분용기의 입력화면 예시이며, 본 연구에서는 폐밀봉선원의 적재 공간과 처분용기의 구조를 고려하여 측면 선량 평가 모델(Cylinder Volume - Side Shields)과 상부 선량 평가 모델(Cylinder Volume - End Shields)을 적용하여 분석하였다.

Table 2에 제시한 바와 같이 200 L 및 320 L 용기의 내부용기 두께와 크기를 변화시키며 차폐 해석을 수행하였다. 200 L 용기의 경우 내부용기의 두께를 0~4 mm까지 1 mm 간격으로 변화시켰으며, 200 L 용기는 직경 204~404 mm, 높이 440~840 mm까지 6단계로 크기를 변화시켰다. 마찬가지로 320 L 용기도 내부용기의 직경을 500~700 mm, 높이를 600~800 mm까지 변화시키며 차폐 해석을 진행하였다. 이를 통해 내부용기의 두께와 크기가 방사선 차폐에 미치는 영향을 분석하였다.

용기 표면으로부터 1 cm 및 2 m 떨어진 지점에서 적재가능한 최대 방사능량을 평가하였다. 각 처분용기의 재질 및 밀도는

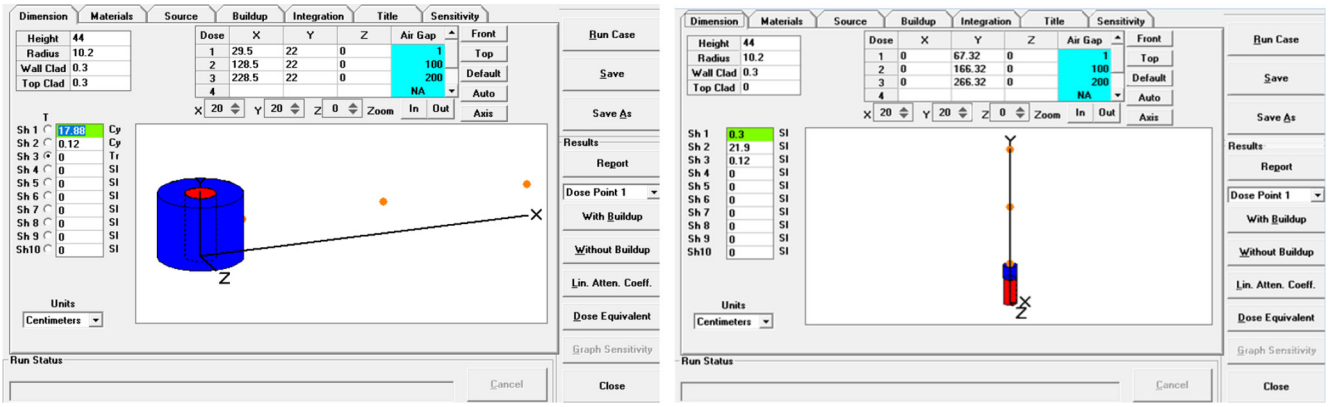


Fig. 1. General disposal container dimension with 3 mm inner container

Table 2. Variable of general container for shielding analysis

General container	Variable	
Thickness of inner container (mm)	0, 1, 2, 3, 4	
Inner container size	200L Diameter × Height, mm	204 × 440 244 × 520 284 × 600 324 × 680 364 × 760 404 × 840
	320L Diameter × Height, mm	500 × 600 540 × 640 580 × 680 620 × 720 660 × 760 700 × 800

Table 3. Material properties of general disposal container

Modeling	Material		Density (g · cm^{-3})
Source	Air		0.001205
Inner container	Stainless steel		8.0
Shielding material	Concrete		2.3
Outer container	Carbon steel		7.85
Transition	Air		0.001205
Air gap	Air		0.00122
Coating material, WC	Tungsten carbide (WC)		15.6
	Element	Weight percent	
	W	93.9	
	C	6.1	
Coating material, B_4C	Boron carbide (B_4C)		2.52
	Element	Weight percent	
	B	78.3	
	C	21.7	

Table 3에 제시된 값을 사용하였다. 차폐해석의 재질의 일부는 내장 라이브러리에 제시된 값을 활용하였으며, 스테인리스강 재질의 경우 해당 라이브러리에 포함되지 않아, 방사선 수송 모델링을 위한 물질 조성자료[9]에 기재된 값을 참조하여 Custom Material로 정의하여 입력하였다. 코팅재료로 사용되는 탄화텅스텐과 탄화붕소의 밀도는 질량 분율을 고려하여 적용하였다. 또한, 적재공간 및 Transition 영역의 공기 밀도는 상기 문헌의 값을 그대로 준용하였다.

핵종 선택 시 방사능 재고량을 입력한 후, 표준 에너지 구간(Standard Indices)으로 다수의 그룹으로 분류하여(Grouping) 차폐 계산에 적용하였다. 핵종 선택 과정에서는 붕괴 라이브러리를 지정할 수 있으며, 본 연구에서는 최신 자료인 ICRP-107 [10]을 적용하였으며, 차폐 계산은 0.015 MeV 미만의 감마선을 포함하여 수행되었다.

축적계수(Buildup factor)는 Buildup 탭에서 각 영역에 대한 값을 순차적으로 적용하여 별도의 계산을 수행한 후, Anterior/Posterior Geometry에서 선량이 최대값을 나타내는 영역을 최종적으로 선택하였다.

격자(Integration)는 각 방향에 대한 미소체적 분할 개수를 의미하며, 원기둥 구조(Cylindrical Geometry)의 경우 반경(Radial), 원주(Circumferential), 축(Axial) 방향으로 각각 다른 값을 입력할 수 있다. 코드의 초기 설정을 고려하여 각 방향에 대해 계산을 수행한 후, 최종적으로 선량이 최대화되는 조합을 선택하여 적용하였다.

출력 파일에는 선량 조합 결과가 각각 표시되며, 선량률 제한치와의 비교 및 보수성 확보를 위해 ICRP-74 [11], Anterior-Posterior, With Buildup에 해당하는 수치를 최종 결과값으로 채택하였다. 선속–선량률 환산인자는 ICRP-51 [12]의 유효선량당량 또는

ICRP-74 [11] 유효선량을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 내부용기 두께

일반 처분용기의 내부용기 두께를 0~4 mm 범위 (1 mm 간격)로 변화시키면서 ^{60}Co 및 ^{137}Cs 방사선원에 대한 차폐 성능을 평가했다. 각 두께 변화에 따른 차폐 성능은 처분용기 측면(Side) 및 상부(End) 부분에서 각각 1 cm와 2 m 거리에서 측정되었으며, 선량률 제한치를 충족하는 최대 방사능량 결과를 우선적으로 도출하였다. 이후 해당 수치를 적용하여 적재공간 단위체적당 선원 방사능 및 전체 차폐체 단위중량당 적재 가능 방사능을 평가하였으며, 그 결과를 내부용기의 두께에 따라 Table 4~7에 제시하였다.

3 mm 두께에서는 ^{60}Co과 ^{137}Cs 방사선원에 대해 각각 최대 7.14% 및 9.78%의 차폐 성능 향상이 나타난다. 반면, 4 mm 두께로 증가시킬 경우 차폐 성능이 추가적으로 향상되기는 하나, 성능 증가율이 점진적으로 감소하여 방사선 차폐 성능과 경제성 간의 최적 균형을 고려할 때 3 mm로 결정하였다.

3.2. 코팅재료

본 연구에서는 200 L 및 320 L 처분용기를 대상으로 코팅 재료 적용에 따른 방사선 차폐 효과를 평가하고, 최대 적재 가능 방사능량을 분석하였다. 분석 대상은 탄화텅스텐(WC)과 탄화붕소(B_4C)를 각각 0.35 mm 두께로 적용한 모델과 코팅을 적용하지 않고 내부용기 두께 3 mm 표준모델(Standard)이며, 표준모델 대비 차폐성능 상승률을 Table 8 및 Table 9에 제시하였다. 차폐해석 결과로는 용기 표면으로부터 1 cm 거리에서의 등가선량을 나타냈다. Table 8에 200 L 처분용기를 대상으로 차폐 위치와 코팅재에 따른 차폐해석 결과를 나타냈으며, Table 9에는 320 L 처분용기 대상으로 차폐해석 결과를 나타냈다.

3.3.1. ^{60}Co 선원

200 L 용기의 경우, 측면차폐 탄화텅스텐 코팅 모델이 두께 3 mm 모델과 비교하여 2.26%의 방사능 적재량 증가를 보였으며, 탄화붕소 코팅 모델은 0.50%의 적재량이 증가했다. 상부차폐에서도 탄화텅스텐 코팅이 2.22%의 적재량 증가를 기록하였고, 탄화붕소 코팅은 0.52%의 증가율을 보였다. 320 L 용기에서도 유사한 경향이 관찰되었으며, 측면차폐에서 탄화텅스텐 코팅이 2.16%, 탄화붕소 코팅이 두께 3 mm 모델과 비교 시 0.48%의 증가율을 보였고, 상부 차폐에서는 각각 2.23%와 0.50%의 증가율이 나타났다.

3.3.2. ^{137}Cs 선원

200 L 용기의 경우, 측면차폐에서는 탄화텅스텐 코팅을 적용한 모델이 3.97%의 방사능 적재량 증가를 보였으며, 탄화붕소 코팅은 0.65%의 증가를 나타냈다. 상부차폐에서는 탄화텅스텐 코팅이 3.80%의 적재량 증가를 기록하였고, 탄화붕소 코팅은 0.62%의 증가율을 보였다. 320 L 용기에서도 탄화텅스텐 코팅이 측면차폐에서 3.48%, 상부 차폐에서 3.95%의 적재량 증가율을 나타내었으며, 탄화붕소 코팅은 각각 0.57%의 증가율을 보였다.

코팅 재료의 적용은 차폐 성능을 향상시키는 것으로 나타났으며, 탄화텅스텐 코팅은 탄화붕소 대비 더 많은 방사능 적재가 가능하다. 이는 탄화텅스텐 의 높은 밀도와 원자번호가 방사선 차폐에 유리하게 작용한 결과로 판단된다. 이러한 결과는 처분용기 설계 시 탄화텅스텐 코팅을 적용하여 차폐 성능을 강화할 수 있다.

3.3. 내부용기 크기

200 L 및 320 L 용기를 대상으로 ^{60}Co과 ^{137}Cs 방사선원의 차폐 성능을 평가하였으며, 각 방사선원에 대해 두 가지 지점(Point #1 (1 cm)과 Point #3 (2 m))에서 내부용기 크기와 방사선원과의 거리 차이에 따른 적재 가능 방사능량을 분석하였다. Table 10~13에 내부용기 크기에 따른 200 L 처분용기의 측면 및 상부차폐, 320 L 처분용기의 측면 및 상부차폐 해석 결과 차례로 나타냈다.

3.3.1. 적재가능 방사능량 비교

200 L 용기의 Point #1, 내부용기 지름 204 mm일 때 적재가능 ^{60}Co의 적재가능 방사능량은 0.0665 Ci에서 지름 404 mm에서는 0.0532 Ci로 감소하였다. 마찬가지로 ^{137}Cs의 적재가능 방사능량은 0.3929 Ci에서 0.2521 Ci로 감소하였다. 200 L 및 320 L 모두 ^{60}Co 및 ^{137}Cs 선원 모두 Point #1에서 적재가능 방사능량이 Point #3보다 작으므로 보수적 평가 측면에서 Point #1에서의 적재 가능 방사능량을 기준으로 평가하는 것이 적합하다.

3.3.2. 부피 당 적재가능 방사능량 비교

200 L 및 320 L 용기에서 ^{60}Co 및 ^{137}Cs 모두 적재 가능한 방사능량과 부피 당 적재 가능한 방사능량이 모두 감소하는 경향을 보인다. 이때, 용기 크기에 따른 ^{60}Co의 부피 당 적재 가능 방사능량은 Fig. 2 및 Fig. 3에 제시하였다. 내부용기 크기가 증가할수록 측면 및 상단의 차폐체 두께가 감소하여 차폐 효과가 감소하며, 자기 차폐 효과의 증가로 인해 적재가능 방사능량이 감소하게 된다.

3.3.3. 차폐체 무게 당 적재가능 방사능량 비교

차폐체 무게당 적재 가능 방사능량은 용기 크기와 차폐체 두께에 따라 상반되는 경향을 보인다. 일부 데이터에서는 내부 용기가 커짐에 따라 차폐체 무게당 적재 가능 방사능량이 감소하는 경향이 관찰되었다(200 L, End, P1 및 200 L, End, P3). 이는

Table 4. Comparison of shielding performance in 200 L disposal container - Side shields with varying coating thickness

Conditions	Thickness (mm)	Maximum activity (Ci)	Difference (%)	Increment rate (%)	Loadable activity	
					Per loading volume ($Ci \cdot cm^{-3}$)	Per shielding weight ($Ci \cdot kg^{-1}$)
200 L Drums ^{60}Co Side shielding Point #1, 1 cm	0	0.0618	-	-	4.296E-06	1.237E-04
	1	0.0633	2.44%	2.44%	4.404E-06	1.263E-04
	2	0.0649	4.82%	2.44%	4.514E-06	1.289E-04
	3	0.0665	7.14%	2.43%	4.626E-06	1.316E-04
	4	0.0682	9.36%	2.40%	4.740E-06	1.342E-04
200 L Drums ^{60}Co Side shielding Point #3, 2 m	0	0.1472	-	-	1.024E-05	2.947E-04
	1	0.1506	2.22%	2.22%	1.047E-05	3.002E-04
	2	0.1540	4.39%	2.21%	1.071E-05	3.057E-04
	3	0.1574	6.48%	2.19%	1.095E-05	3.113E-04
	4	0.1610	8.52%	2.19%	1.119E-05	3.170E-04
200 L Drums ^{137}Cs Side shielding Point #1, 1 cm	0	0.3544	-	-	2.464E-05	7.094E-04
	1	0.3669	3.40%	3.40%	2.551E-05	7.314E-04
	2	0.3797	6.66%	3.38%	2.640E-05	7.539E-04
	3	0.3929	9.78%	3.34%	2.732E-05	7.768E-04
	4	0.4064	12.79%	3.34%	2.826E-05	8.004E-04
200 L Drums ^{137}Cs Side shielding Point #3, 2 m	0	0.8084	-	-	5.621E-05	1.618E-03
	1	0.8340	3.07%	3.07%	5.799E-05	1.663E-03
	2	0.8606	6.06%	3.09%	5.984E-05	1.709E-03
	3	0.8881	8.97%	3.10%	6.175E-05	1.756E-03
	4	0.9158	11.72%	3.02%	6.368E-05	1.803E-03

Table 5. Comparison of shielding performance in 200 L disposal container - End shields with varying coating thickness

Conditions	Thickness (mm)	Maximum activity (Ci)	Difference (%)	Increment rate (%)	Loadable activity	
					Per loading volume ($Ci \cdot cm^{-3}$)	Per shielding weight ($Ci \cdot kg^{-1}$)
200 L Drums ^{60}Co End shielding Point #1, 1 cm	0	0.1232	-	-	8.563E-06	2.465E-04
	1	0.1256	1.97%	1.97%	8.735E-06	2.504E-04
	2	0.1281	3.88%	1.95%	8.909E-06	2.544E-04
	3	0.1307	5.79%	1.99%	9.089E-06	2.585E-04
	4	0.1334	7.70%	2.03%	9.277E-06	2.627E-04
200 L Drums ^{60}Co End shielding Point #3, 2 m	0	0.2115	-	-	1.471E-05	4.233E-04
	1	0.2157	1.92%	1.92%	1.500E-05	4.299E-04
	2	0.2199	3.81%	1.92%	1.529E-05	4.366E-04
	3	0.2242	5.67%	1.93%	1.559E-05	4.434E-04
	4	0.2286	7.49%	1.93%	1.590E-05	4.502E-04
200 L Drums ^{137}Cs End shielding Point #1, 1 cm	0	0.7599	-	-	5.284E-05	1.521E-03
	1	0.7816	2.77%	2.77%	5.434E-05	1.558E-03
	2	0.8039	5.47%	2.77%	5.590E-05	1.596E-03
	3	0.8271	8.13%	2.81%	5.751E-05	1.636E-03
	4	0.8507	10.68%	2.77%	5.915E-05	1.675E-03
200 L Drums ^{137}Cs End shielding Point #3, 2 m	0	1.2887	-	-	8.961E-05	2.579E-03
	1	1.3245	2.71%	2.71%	9.210E-05	2.640E-03
	2	1.3615	5.35%	2.72%	9.467E-05	2.703E-03
	3	1.3996	7.93%	2.72%	9.732E-05	2.768E-03
	4	1.4388	10.44%	2.73%	1.000E-04	2.833E-03

Table 6. Comparison of shielding performance in 320 L disposal container - Side shields with varying coating thickness

Conditions	Thickness (mm)	Maximum activity (Ci)	Difference (%)	Increment rate (%)	Loadable activity	
					Per loading volume ($Ci \cdot cm^{-3}$)	Per shielding weight ($Ci \cdot kg^{-1}$)
320 L Drums ^{60}Co Side shielding Point #1, 1 cm	0	0.0498	-	-	4.225E-07	7.957E-05
	1	0.0509	2.22%	2.22%	4.321E-07	8.039E-05
	2	0.0521	4.38%	2.21%	4.419E-07	8.123E-05
	3	0.0532	6.50%	2.21%	4.519E-07	8.207E-05
	4	0.0545	8.59%	2.24%	4.622E-07	8.295E-05
320 L Drums ^{60}Co Side shielding Point #3, 2 m	0	0.0903	-	-	7.668E-07	1.444E-04
	1	0.0921	1.90%	1.90%	7.816E-07	1.454E-04
	2	0.0938	3.70%	1.84%	7.963E-07	1.464E-04
	3	0.0956	5.51%	1.88%	8.115E-07	1.474E-04
	4	0.0974	7.23%	1.82%	8.265E-07	1.483E-04
320 L Drums ^{137}Cs Side shielding Point #1, 1 cm	0	0.2307	-	-	1.958E-06	3.688E-04
	1	0.2376	2.92%	2.92%	2.017E-06	3.753E-04
	2	0.2448	5.76%	2.92%	2.078E-06	3.819E-04
	3	0.2521	8.51%	2.92%	2.140E-06	3.887E-04
	4	0.2598	11.20%	2.94%	2.205E-06	3.957E-04
320 L Drums ^{137}Cs Side shielding Point #3, 2 m	0	0.4045	-		3.434E-06	6.467E-04
	1	0.4146	2.43%	2.43%	3.519E-06	6.548E-04
	2	0.4250	4.81%	2.45%	3.607E-06	6.631E-04
	3	0.4357	7.16%	2.46%	3.699E-06	6.718E-04
	4	0.4468	9.47%	2.48%	3.793E-06	6.807E-04

Table 7. Comparison of shielding performance in 320 L disposal container - End shields with varying coating thickness

Conditions	Thickness (mm)	Maximum activity (Ci)	Difference (%)	Increment rate (%)	Loadable activity	
					Per loading volume ($Ci \cdot cm^{-3}$)	Per shielding weight ($Ci \cdot kg^{-1}$)
320 L Drums ^{60}Co End shielding Point #1, 1 cm	0	0.1166	-	-	9.899E-07	1.864E-04
	1	0.1190	2.04%	2.04%	1.011E-06	1.880E-04
	2	0.1216	4.08%	2.08%	1.032E-06	1.897E-04
	3	0.1241	6.06%	2.07%	1.054E-06	1.914E-04
	4	0.1268	8.05%	2.11%	1.077E-06	1.932E-04
320 L Drums ^{60}Co End shielding Point #3, 2 m	0	0.1538	-	-	1.306E-06	2.459E-04
	1	0.1566	1.78%	1.78%	1.329E-06	2.473E-04
	2	0.1595	3.54%	1.79%	1.354E-06	2.488E-04
	3	0.1624	5.28%	1.80%	1.378E-06	2.504E-04
	4	0.1654	6.98%	1.80%	1.404E-06	2.519E-04
320 L Drums ^{137}Cs End shielding Point #1, 1 cm	0	0.6519	-	-	5.533E-06	1.042E-03
	1	0.6714	2.90%	2.90%	5.699E-06	1.060E-03
	2	0.6913	5.70%	2.89%	5.868E-06	1.079E-03
	3	0.7120	8.44%	2.90%	6.044E-06	1.098E-03
	4	0.7334	11.11%	2.92%	6.225E-06	1.117E-03
320 L Drums ^{137}Cs End shielding Point #3, 2 m	0	0.8078	-	-	6.856E-06	1.291E-03
	1	0.8285	2.50%	2.50%	7.033E-06	1.308E-03
	2	0.8503	5.01%	2.57%	7.218E-06	1.327E-03
	3	0.8726	7.43%	2.55%	7.407E-06	1.345E-03
	4	0.8953	9.77%	2.53%	7.599E-06	1.364E-03

Table 8. Comparison of coating materials for 200 L

Conditions	Shielding	Coatings	Loadable activity (Ci)	Difference (%)
200 L Drums ^{60}Co Point #1, 1 cm	Side	Standard	0.0665	-
		WC	0.0681	2.26%
		B_4C	0.0669	0.50%
	End	Standard	0.1307	-
		WC	0.1337	2.22%
		B_4C	0.1314	0.52%
200 L Drums ^{137}Cs Point #1, 1 cm	Side	Standard	0.3929	-
		WC	0.4091	3.97%
		B_4C	0.3954	0.65%
	End	Standard	0.8271	-
		WC	0.8598	3.80%
		B_4C	0.8323	0.62%

Table 9. Comparison of coating materials for 320 L

Conditions	Shielding	Coatings	Loadable activity (Ci)	Difference (%)
320 L Drums ^{60}Co Point #1, 1 cm	Side	Standard	0.0532	-
		WC	0.0544	2.16%
		B_4C	0.0535	0.48%
	End	Standard	0.1241	-
		WC	0.1270	2.23%
		B_4C	0.1248	0.50%
320 L Drums ^{137}Cs Point #1, 1 cm	Side	Standard	0.2521	-
		WC	0.2615	3.48%
		B_4C	0.2536	0.57%
	End	Standard	0.7120	-
		WC	0.7413	3.95%
		B_4C	0.7161	0.57%

내부 용기의 크기가 증가하면서 차폐체의 두께가 감소하고, 그로 인해 방사선 차단 효과가 저하되어 전체적으로 적재 가능한 방사능량이 줄어드는 현상으로 설명될 수 있다. 반면, 다른 데이터에서는 내부 용기가 커질수록 차폐체 무게당 적재 가능 방사능량이 증가하는 경향이 나타났다. 내부 용기 크기 증가로 인해 차폐체의 무게가 더 크게 감소하면서 나타나는 현상으로, 차폐 효율 감소보다 차폐체 무게 총량 감소가 적재 가능 방사능량 증가에 더 큰 영향을 미친다고 해석할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 200 L 및 320 L 차폐 드럼을 대상으로 외부 코팅 재료의 적용, 내부용기 두께 변화 및 내부용기 크기 변화가 방사선 차폐 성능 및 적재 가능 방사능량에 미치는 영향을 분석하였다. 내부용기 두께 분석에서는 차폐체 두께를 0~4 mm 범위에서 변화시키며, 두께가 증가할수록 차폐 성능이 향상됨을 확인 하였다. 그러나 두께가 증가할 경우 성능 상승 폭이 점진적으로 감소하므로, 경제성과 성능을 고려할 때 3 mm 두께가 최적의 선택으로 판단된다.

외부 차폐드럼의 코팅 재료로 탄화텅스텐과 탄화붕소를 선정하여 코팅 적용 후 차폐 해석을 수행하였으며, 탄화텅스텐 코팅 사용 시 방사능 적재량을 더 많이 허용하는 것으로 나타났다. 이는 탄화텅스텐의 높은 밀도와 원자번호가 방사선 차폐에 유리하게 작용하기 때문이다. 따라서, 처분용기 설계 시 탄화텅스텐 코팅을 적용하여 차폐 성능을 향상을 기대할 수 있다.

차폐해석 시 200 L 드럼에서는 내부용기 크기가 작을 때 측면 차폐 기준에서 적재 가능 방사능량이 상대적으로 낮게 나타났다. 반면, 내부용기가 클 때는 상부차폐 기준에서 적재 가능 방사능량

Table 10. Comparisons of loadable activity by inner container size in 200 L drum with side shielding

Conditions	Size of inner container (D × H, mm)	Loadable activity (Ci)	Loadable activity	
			Per loading volume ($Ci \cdot cm^{-3}$)	Per shielding weight ($Ci \cdot kg^{-1}$)
200 L Drums	204 × 440	0.0665	4.626E-06	1.316E-04
^{60}Co	244 × 520	0.0606	2.491E-06	1.248E-04
Side	284 × 600	0.0549	1.446E-06	1.203E-04
Point #1, 1 cm	324 × 680	0.0496	8.839E-07	1.184E-04
	364 × 760	0.0444	5.616E-07	1.202E-04
	404 × 840	0.0396	3.675E-07	1.285E-04
200 L Drums	204 × 440	0.1574	1.095E-05	3.113E-04
^{60}Co	244 × 520	0.1351	5.555E-06	2.783E-04
Side	284 × 600	0.1163	3.059E-06	2.545E-04
Point #3, 2 m	324 × 680	0.1004	1.792E-06	2.399E-04
	364 × 760	0.0873	1.103E-06	2.362E-04
	404 × 840	0.0763	7.089E-07	2.479E-04
200 L Drums	204 × 440	0.3929	2.732E-05	7.768E-04
^{137}Cs	244 × 520	0.3381	1.391E-05	6.966E-04
Side	284 × 600	0.2898	7.624E-06	6.343E-04
Point #1, 1 cm	324 × 680	0.2474	4.413E-06	5.910E-04
	364 × 760	0.2106	2.663E-06	5.700E-04
	404 × 840	0.1791	1.663E-06	5.815E-04
200 L Drums	204 × 440	0.8881	6.175E-05	1.756E-03
^{137}Cs	244 × 520	0.7153	2.942E-05	1.474E-03
Side	284 × 600	0.5800	1.526E-05	1.270E-03
Point #3, 2 m	324 × 680	0.4748	8.469E-06	1.134E-03
	364 × 760	0.3935	4.976E-06	1.065E-03
	404 × 840	0.3306	3.070E-06	1.074E-03

Table 11. Comparisons of loadable activity by inner container size in 200 L drum with end shielding

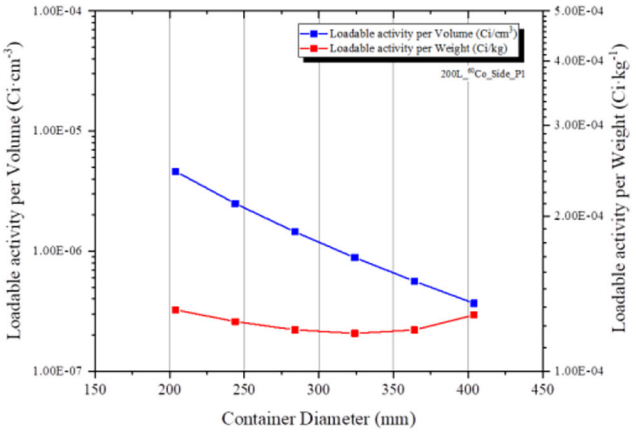
Conditions	Size of inner container (D × H, mm)	Loadable activity (Ci)	Loadable activity	
			Per loading volume ($Ci \cdot cm^{-3}$)	Per shielding weight ($Ci \cdot kg^{-1}$)
200 L Drums	204 × 440	0.1307	9.089E-06	2.585E-04
^{60}Co	244 × 520	0.0858	3.527E-06	1.767E-04
End	284 × 600	0.0577	1.517E-06	1.262E-04
Point #1, 1 cm	324 × 680	0.0392	6.985E-07	9.355E-05
	364 × 760	0.0267	3.376E-07	7.226E-05
	404 × 840	0.0182	1.695E-07	5.926E-05
200 L Drums	204 × 440	0.2242	1.471E-05	4.233E-04
^{60}Co	244 × 520	0.1624	1.500E-05	4.299E-04
End	284 × 600	0.1191	1.529E-05	4.366E-04
Point #3, 2 m	324 × 680	0.0894	1.559E-05	4.434E-04
	364 × 760	0.0698	1.590E-05	4.502E-04
	404 × 840	0.0579	5.377E-07	1.880E-04
200 L Drums	204 × 440	0.8271	5.751E-05	1.636E-03
^{137}Cs	244 × 520	0.4768	1.961E-05	9.823E-04
End	284 × 600	0.2851	7.502E-06	6.242E-04
Point #1, 1 cm	324 × 680	0.1767	3.151E-06	4.220E-04
	364 × 760	0.1127	1.425E-06	3.050E-04
	404 × 840	0.0752	6.983E-07	2.442E-04
200 L Drums	204 × 440	1.3996	9.732E-05	2.768E-03
^{137}Cs	244 × 520	0.8850	3.640E-05	1.823E-03
End	284 × 600	0.5741	1.510E-05	1.257E-03
Point #3, 2 m	324 × 680	0.3926	7.003E-06	9.379E-04
	364 × 760	0.2881	3.643E-06	7.798E-04
	404 × 840	0.2382	2.212E-06	7.734E-04

Table 12. Comparisons of loadable activity by inner container size in 320 L drum with side shielding

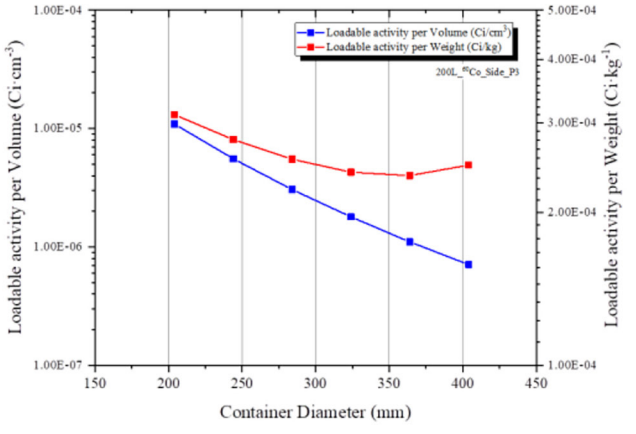
Conditions	Size of inner container (D × H, mm)	Loadable activity (Ci)	Loadable activity	
			Per loading volume ($Ci \cdot cm^{-3}$)	Per shielding weight ($Ci \cdot kg^{-1}$)
	500 × 600	0.0532	4.519E-07	8.207E-05
320 L Drums	540 × 640	0.0458	3.122E-07	7.809E-05
^{60}Co	580 × 680	0.0396	2.202E-07	7.699E-05
Side	620 × 720	0.0342	1.574E-07	7.937E-05
Point #1, 1 cm	660 × 760	0.0295	1.135E-07	8.745E-05
	700 × 800	0.0252	8.191E-08	1.087E-04
	500 × 600	0.0956	8.115E-07	1.474E-04
320 L Drums	540 × 640	0.0831	5.667E-07	1.417E-04
^{60}Co	580 × 680	0.0729	4.060E-07	1.420E-04
Side	620 × 720	0.0649	2.983E-07	1.504E-04
Point #3, 2 m	660 × 760	0.0583	2.244E-07	1.729E-04
	700 × 800	0.0534	1.733E-07	2.300E-04
	500 × 600	0.2521	2.140E-06	3.887E-04
320 L Drums	540 × 640	0.2068	1.411E-06	3.528E-04
^{137}Cs	580 × 680	0.1715	9.547E-07	3.338E-04
Side	620 × 720	0.1437	6.610E-07	3.332E-04
Point #1, 1 cm	660 × 760	0.1220	4.693E-07	3.616E-04
	700 × 800	0.1046	3.398E-07	4.509E-04
	500 × 600	0.4357	3.699E-06	6.718E-04
320 L Drums	540 × 640	0.3627	2.475E-06	6.189E-04
^{137}Cs	580 × 680	0.3074	1.711E-06	5.983E-04
Side	620 × 720	0.2670	1.228E-06	6.191E-04
Point #3, 2 m	660 × 760	0.2394	9.208E-07	7.094E-04
	700 × 800	0.2219	7.208E-07	9.566E-04

Table 13. Comparisons of loadable activity by inner container size in 320 L drum with end shielding

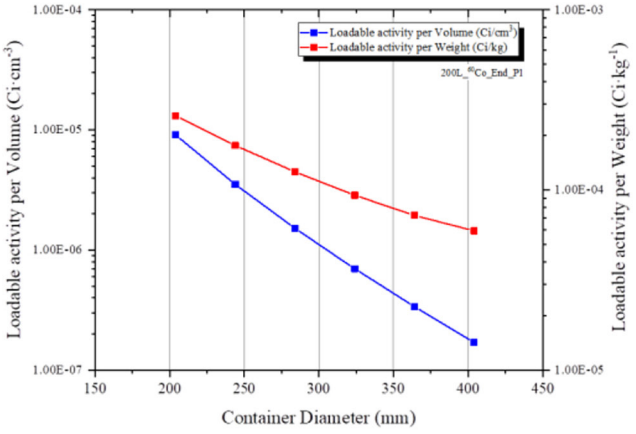
Conditions	Size of inner container (D × H, mm)	Loadable activity (Ci)	Loadable activity	
			Per loading volume ($Ci \cdot cm^{-3}$)	Per shielding weight ($Ci \cdot kg^{-1}$)
	500 × 600	0.1241	1.054E-06	1.914E-04
320 L Drums	540 × 640	0.1059	7.223E-07	1.807E-04
^{60}Co	580 × 680	0.0905	5.037E-07	1.761E-04
End	620 × 720	0.0776	3.569E-07	1.799E-04
Point #1, 1 cm	660 × 760	0.0667	2.565E-07	1.976E-04
	700 × 800	0.0575	1.868E-07	2.479E-04
	500 × 600	0.1624	1.378E-06	2.504E-04
320 L Drums	540 × 640	0.1385	9.452E-07	2.364E-04
^{60}Co	580 × 680	0.1188	6.612E-07	2.312E-04
End	620 × 720	0.1025	4.716E-07	2.378E-04
Point #3, 2 m	660 × 760	0.0900	3.462E-07	2.667E-04
	700 × 800	0.0785	2.549E-07	3.383E-04
	500 × 600	0.7120	6.044E-06	1.098E-03
320 L Drums	540 × 640	0.5718	3.901E-06	9.756E-04
^{137}Cs	580 × 680	0.4618	2.570E-06	8.988E-04
End	620 × 720	0.3757	1.728E-06	8.714E-04
Point #1, 1 cm	660 × 760	0.3083	1.186E-06	9.135E-04
	700 × 800	0.2550	8.283E-07	1.099E-03
	500 × 600	0.8726	7.407E-06	1.345E-03
320 L Drums	540 × 640	0.6988	4.768E-06	1.192E-03
^{137}Cs	580 × 680	0.5663	3.152E-06	1.102E-03
End	620 × 720	0.4655	2.142E-06	1.080E-03
Point #3, 2 m	660 × 760	0.3922	1.508E-06	1.162E-03
	700 × 800	0.3305	1.073E-06	1.424E-03



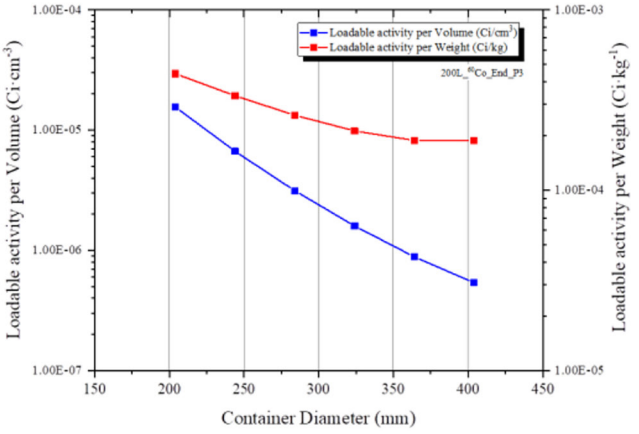
(a) 200L ^{60}Co Side Point #1



(b) 200L ^{60}Co Side Point #3



(c) 200L ^{60}Co End Point #1



(d) 200L ^{60}Co End Point #3

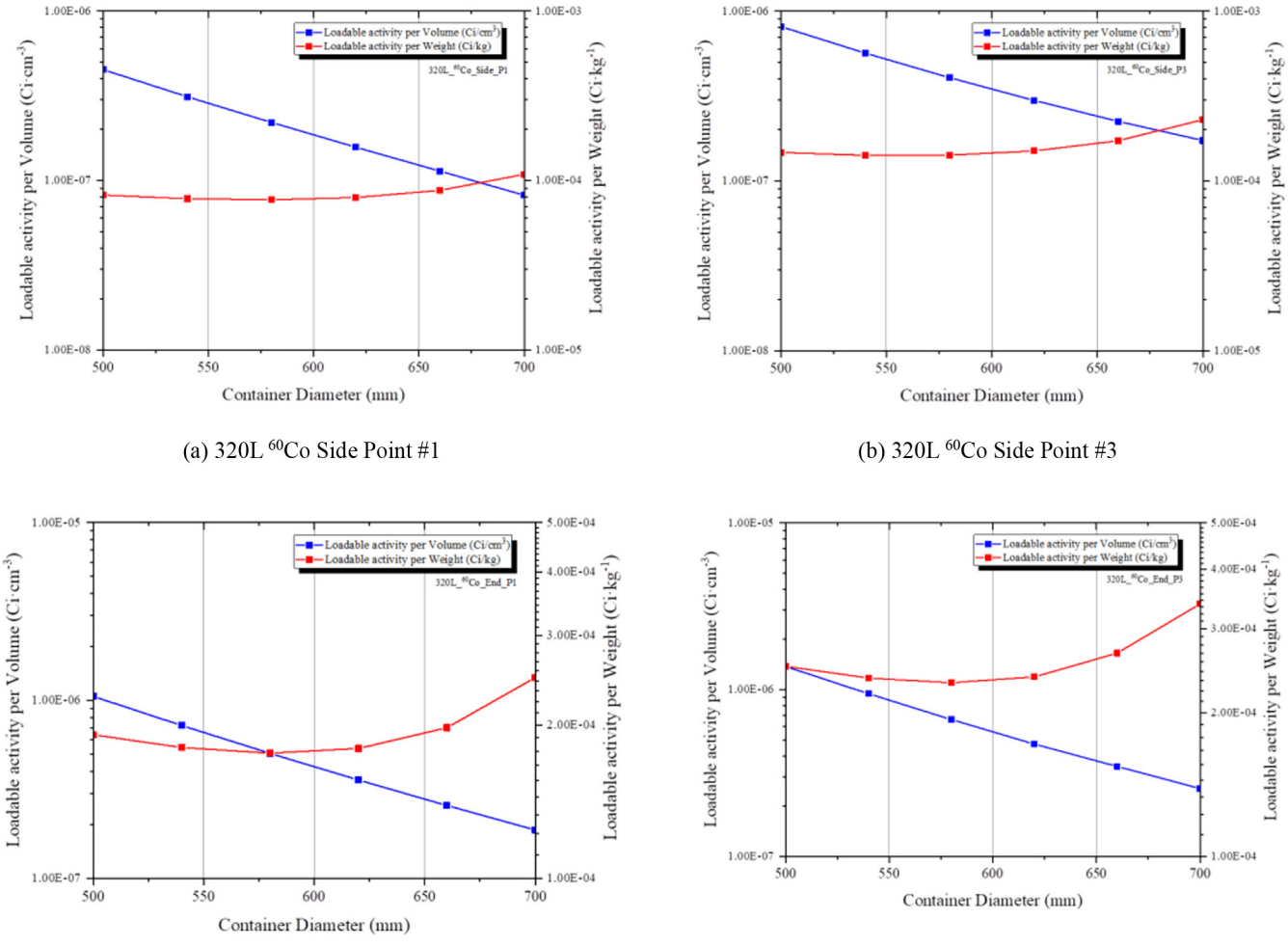
Fig. 2. Loadable activity per volume of ^{60}Co in 200L container

이 낮으므로, 보수적 기준에 맞춰 내부용기의 크기를 결정하는 것이 바람직하다. 320 L 드럼에서는 측면차폐 시 적재가능 방사능량이 낮으므로 보수적 측면에서 측면차폐 기준으로 내부용기 크기를 결정하는 것이 적합하다.

내부용기 크기 분석 결과로 200 L 및 320 L 차폐 드럼 모두 내부용기 크기가 증가할수록 부피 당 적재 가능 방사능량은 지수적으로 감소하는 경향을 보인다. 이는 내부용기 크기 증가로 인해 차폐체 두께가 감소하면서 차폐 효과가 저하되고, 자기 차폐 효과도 증가하기 때문이다. 반면, 차폐체의 무게를 기준으로 살펴볼 때 내부용기의 크기가 커지면 상대적으로 차폐체 무게가 줄어들게 된다. 이때, 차폐체 무게의 감소로 인한 차폐 효율의 감소보다 차폐체 무게 총량의 감소가 더 커질 때 Fig. 2 및 Fig .3과 같이 적재 가능 방사능량 경향에 전환점이 생길 수 있다. 따라서 차폐 드럼의 내부용기 크기 결정 시에는 크기와 차폐체의 총 무게를 종합적으로 고려해야 한다.

차폐해석 시 Point-kernel method 기반 선량 평가를 수행하여 본 연구에서는 실제 밀봉선원의 형상은 고려하지 않았다. 다양한 형상을 포함한 평가를 수행하면 선량 분포 및 선량 평가 결과가 달라질 수 있으므로, 향후 연구에서는 실제 선원 형상을 반영한 평가를 수행할 계획이다. 또한, 처분용기 설계 최적화를 위한 구조 해석을 병행하여 처분용기의 구조적 안전성 성능을 포함하여 종합적으로 평가할 계획이다. 그리고, 향후 연구에서는 이러한 설계 변경이 가져올 수 있는 비용 절감 및 효율성 증가와 관련된 경제적 효과도 평가할 필요가 있다.

결론적으로 처분용기의 설계 및 내부용기 크기 결정 시, 차폐효율과 적재 가능 방사능량의 균형을 고려하여 측면차폐 기준으로 내부용기의 크기와 두께를 결정하는 것이 중요하다. 내부용기 크기 증가로 인한 부피 당 적재 가능 방사능량이 감소하는 것과 차폐체 무게 당 적재 가능 방사능량의 결과를 종합적으로 고려하여 폐밀봉선원의 재고량 및 선량을 고려한 최적의 차폐 설계를 수



(a) 320L ^{60}Co Side Point #1

(b) 320L ^{60}Co Side Point #3

(c) 320L ^{60}Co End Point #1

(d) 320L ^{60}Co End Point #3

Fig. 3. Loadable activity per volume of ^{60}Co in 320 L container

행해야 한다. 본 연구는 장기 보관 중인 RI 폐기물의 안전하고 효율적인 처분을 위한 처분용기의 개념설계안을 제안하였으며, 현행 기술 기준 및 인수 기준을 충족하고 있으므로 임시 저장 중인 폐밀봉선원의 효율적인 처분 관리가 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2023년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (RS-2023-00234593).

참고문헌

1. Sukhoon Kim and Juyoul Kim. 2017. Shielding 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.
2. Ministry of Trade, Industry and Energy. 2016. Regulations on the Acceptance of Radioactive Waste. Notice No. 2016-230.
3. IAEA. 2000. Handling, Conditioning and Storage of Spent Sealed Radioactive Sources. IAEA-TECDOC-1145.
4. Korea Radioactive Waste Agency. 2024. Radioactive Waste Acceptance Criteria, WAC-SIL-2024-1.
5. Notice of the Nuclear Safety and Security Commission. 2023. Regulations on the Acceptance of Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste. Notice No. 2023-8.
6. IAEA. 1993. Containers for Packaging of Solid and Intermediate Level Radioactive Wastes. IAEA Technical reports series No.355.
7. Kang Il Jung, Noh Gyeom Jeong, Young Pyo Moon, Mi Seon Jeong, and Jin Beak Park. 2015. Prediction of Radionuclide Inventory for the Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste Disposal Facility by the Radioactive Waste Classification. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*. **14**(1):63-78. https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2016.14.1.63.

8. Notice of the Nuclear Safety and Security Commission. 2021. Regulations on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials. Notice No. 2021-2.
9. McConn RJ, Gesh CJ, Pagh RT, Rucker RA and Williams III RG. 2011. Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling. Pacific Northwest National Laboratory, PIET-43741-TM-963.
10. ICRP 107. 2008. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication.
11. ICRP 74. 1996. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication.
12. ICRP 51. 1987. Data for Use in Protection against External Radiation. ICRP Publication.