

원전 주 발생 방사성 금속폐기물의 자체처분 안전성평가

Safety assessment for Clearance of Radioactive metal wastes from nuclear facility

임용규, 이지훈, 양호연, 신상운, 송명재
한국수력원자력(주) 원자력환경기술원
대전광역시 유성우체국 사서함 149

요약

제염후 금속폐기물 자체처분시 원자력 관계법령에서 정한 처분제한치(최대개인선량 : 10 $\mu\text{Sv}/\text{y}$, 집단선량 : 1 $\text{man} \cdot \text{Sv}/\text{y}$)를 만족하기 위한 제염인자 도출을 목적으로 고리원자력 발전소의 주 발생 금속폐기물 중 H-beam과 밸브류에 대한 자체처분 안전성 평가를 실시하였다. 주 발생 방사성 금속폐기물의 제염전 피폭선량 평가 자료를 토대로 ICRP Pub. 60 유효선량 개념에 근거한 내부선량환산인자를 적용하여 예상되는 최대개인선량 및 집단선량을 평가하였다.

선량평가 결과 최대개인선량 및 집단선량은 H-beam의 경우 139 $\mu\text{Sv}/\text{y}$, 0.166 $\text{man} \cdot \text{Sv}/\text{y}$ 의 유효선량과 밸브류의 경우 158 $\mu\text{Sv}/\text{y}$, 0.468 $\text{man} \cdot \text{Sv}/\text{y}$ 의 유효선량으로 처분제한치를 만족하기 위해서는 각각 13.9와 15.8 이상의 제염인자가 요구됨을 알 수 있었다.

Abstract

Safety assessments for clearance of H-beam and valves, main radioactive metal wastes in gori nuclear power plants, were carried out to derivate a decontamination factor for satisfying the dose limits of clearance level(Maximum individual dose : 10 $\mu\text{Sv}/\text{y}$, collective dose : 1 $\text{man} \cdot \text{Sv}/\text{y}$) in korea. maximum individual dose and collective dose were evaluated by internal dose conversion factor which based on the concep of effective dose in ICRP publication 60.

The results of maximum individual dose and collective dose is 139 μSv per year and 0.166 $\text{man} \cdot \text{Sv}$ per year about H-beam, and 158 μSv per year and 0.468 $\text{man} \cdot \text{Sv}$

per year about valves respectively. Demand decontamination factor satisfied with, which is respectively more than 13.9 and 15.8 for satisfying clearance level.

1. 서 론

원자력시설의 운영기간이 긴 선진국의 경우 노후 된 시설이나 가동 중지한 시설을 해체하는 과정에서 상당량의 금속폐기물이 발생하고 있고 국내 또한, 현재 운영중인 원전이 18기에 달하고 2기의 원전이 건설 중에 있으며 가동 중인 원전의 운전 년 수가 증가하면서 설비의 개선 및 보수와 관련하여 다량의 금속폐기물이 발생하고 있으나 특별한 처리 방안 없이 절단하여 드럼처리하고 있는 실정이다. 그러나 이들 금속폐기물은 모두 폐기물로 처분할 대상이 아니므로 이를 재사용하거나 재활용하여 경제적인 이득을 얻는 것이 중요하다.

이를 위해서는 금속폐기물 재활용에 따른 자체처분 안전성평가를 통한 작업자 및 일반 주민이 받을 수 있는 예상 피폭 방사선량을 평가하여 관련 규제해제 기준을 만족함을 입증할 필요가 있다.

본 연구에서는 방사성물질로 오염된 고리2발의 H-빔과 밸브류 등의 제염전 실패기물을 재활용하는 과정에서 예상되는 방사선적 영향을 ANL의 EDA(Enviromental Assessment Division Argonne National Laboratory)가 개발한 RESRAD-RECYCLE Code를 사용하여 평가하였다. 그러나 RESRAD-RECYCLE은 ICRP Pub. 26[1]에 근거한 TEDE를 기준으로 금속폐기물의 규제해제에 따른 피폭방사선량을 평가하도록 개발되었으므로 흡입과 섭취에 의한 내부피폭 선량환산인자는 EPA FGR No. 11(1988)[2]에서 제시한 값을 채택하고 외부피폭 선량환산인자는 EPA FGR No. 12 (1993)[3]에 제시된 값을 사용하고 있다. 그러나, 과학기술부고시 2001-30호의 자체처분 제한치[4][5]인 개인에 대한 $10 \mu\text{Sv/y}$ 와 집단에 대한 $1 \text{ man} \cdot \text{Sv/y}$ 는 내부피폭과 외부피폭을 합한 총 유효선량[6]값이므로 본 연구에서는 금속폐기물 자체처분 안전성 평가시 ICRP Pub. 72[7]의 내부피폭 선량환산인자와 EPA FGR No. 11 선량환산인자의 방사성핵종별 농도비를 이용한 보정 값과 RESRAD-RECYCLE Code의 내부화일을 수정한 선량환산인자 값을 적용함으로써 유효선량 개념에 근거한 평가를 수행하였으며 구해진 선량에 대해서 제염후 금속폐기물 자체 처분시 원자력 관련법령에서 정한 처분제한치를 만족시키기 위해 요구되는 제염인자를 도출하였다.

2. 평가 방법론 및 기본가정

2.1 적용 코드(RESRAD-RECYCLE Ver.3.02)

RESRAD-RECYCLE 코드는 방사성 금속스크랩의 재활용 및 표면오염 물질과 장비의 재사용으로 야기되는 잠재 피폭 선량 및 위해도를 계산하기 위해 적용하였다.

2.2 기본 입력 자료

고리 2발 주 발생 금속 폐기물 중 1996년부터 2001년까지 발생한 H-beam 11.7 톤과 밸브류 28.8 톤에 대하여 검출된 ^{60}Co 과 ^{54}Mn 을 대상핵종으로 자체처분 안전성 평가를 수행하였다.

Table 1. Inventory of Radioactive metal wastes in kori-2 nuclear power plants

금속폐기물	H-beam	Valves
폐기물 질량	11.7 Ton	28.8 Ton
함유 핵종 및 농도(Bq/cm ²)	^{60}Co : 2.47 ^{54}Mn : 0.13	^{60}Co : 2.82 ^{54}Mn : 0.18
재원	1차 (S.F.P)	1차 (CV/AB)
재질	탄소강	스테인레스강
선량율	0.02 mSv/h	0.06 mSv/h

운영 중 대량으로 발생하는 금속폐기물에 대하여 표면오염특성 조사를 실시하였다. 동일 종류 폐기물의 경우는 발생원에 따라 시료를 선정하였고 표면오염도 측정에는 고순도 게르마늄 검출기를 사용하여 20분간 측정하는 간접 측정법과 Pancake 타입(G-M)의 Frisk-Tech를 사용하여 3분간 측정하는 직접 측정법 두 가지 방법을 사용하여 측정하였다. H-beam과 밸브류에 대한 측정자료는 Table 1에 나타내었다.

2.3 시나리오

방사성금속폐기물의 재활용과정에서 예상되는 방사선적 영향을 평가하기 위하여 재활용 단계별 흐름을 Fig. 1과 같이 나타내었고 금속폐기물 재활용 단계별 시나리오는 Table 2와 같이 재활용 단계별로 금속폐기물의 수집·운반·처리 작업에 참여하는 작업자 시나리오와 소비재 및 공공재를 이용하는 일반인에 대하여 총 34종의 피폭경로를 고려하였다. 고리 2발전소 운영중 발생된 금속폐기물을 대상으로 하였으므로 장비나 도구의 원형 그대로의 재사용 및 건물의 재사용과 방사성폐기물저장용기로 재활용하는 제한적 재활용 시나리오는 고려하지 않았다.

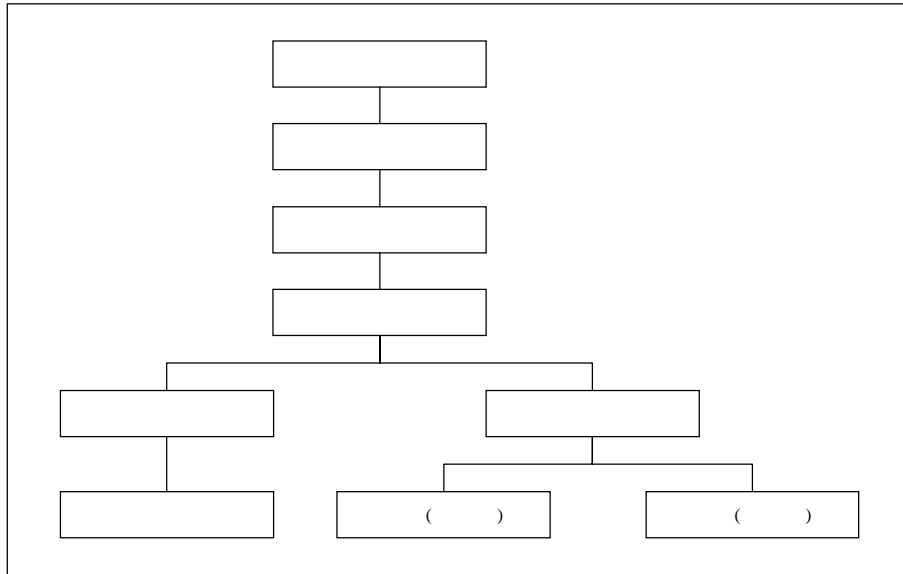


Fig. 1. A Conceptual Flow Chart of the Metal Recycling Process

Table 2. The Exposure Pathway for the Metal Recycling

재활용단계	시나리오	재활용단계	시나리오	재활용단계	시나리오
스크랩 운반	절단 작업자	강괴 운반	적하 작업자	소비재	주차장
	적하 작업자		트럭 운전자		방/사무실
	트럭 운전자		야적장 작업자		가정 용품
강괴 용융	스크랩 취급자	초기 가공	판재 제조자		자동차
	야적장 작업자		코일 제조자		사무용가구
	용융로 적하 작업자	최종 가공	판재 취급자		가정용 가구
	용융로 운전자		코일 취급자		프라이팬
	분진 여과기 취급자	생산품 분배	생산품 적하 작업자		도로포장
	정련 작업자		생산품 트럭 운전자		건물
	강괴 주조 작업자		판재조립 작업자		교량
	소품 주조 작업자		작업장 작업자	스크랩 운반	
	슬래그 작업자	제한적 재활용	차폐체 폐기물 용기	재이용	장비 건물

2.4 평가모델

작업자 및 일반인에 대한 호흡, 섭취 및 외부피폭을 고려하였으며, 세부 피폭경로별 기본 평가모델은 다음과 같다.

2.4.1 호흡 피폭경로

미량의 방사능으로 오염된 폐기물을 규제해제 하는 경우 작업장 및 일반 환경에서 폐기물로부터 유래된 공기중 부유분진을 흡입하는 과정에서 발생하는 피폭으로 호흡에 의한 선량평가 모델은 다음의 수식으로 나타낼 수 있다.

$$CEDE_{inh,i} = C_{i,v} \times IR \times AD \times ED \times DCF_{inh,i} \times F_{decay,i} \times W_v \times RPF_i \times PF \times RF / MPF$$

여기서

$CEDE_{inh,i}$: 핵종 i의 흡입에 의한 유효 선량당량(Sv or rem)

$C_{i,v}$: 체적선원에서 방사성핵종 i의 농도(Bq/g 또는 pCi/g)

IR : 호흡률(m³/h)

AD : airborne-dust-loading factor(g/m³)

ED : 피폭 기간(h)

$DCF_{inh,i}$: 방사성핵종 i에 대한 흡입 선량전환인자(Sv/Bq or rem/pCi)

$F_{decay,i}$: 1년에 걸친 핵종 i의 평균 붕괴 인자(무차원)

W_v : 선원내 일부 오염된 물질의 dilution을 설명하기 위한 dilution factor(무차원)

PF : 호흡 보호인자(무차원)

RF : 호흡율(무차원)

2.4.2 섭취 피폭경로

금속폐기물에 함유된 방사성물질을 취급작업자의 손이나 피부로 전이되거나 전이된 방사성물질의 2차섭취에 의해 발생되며 섭취에 의한 피폭방사선량을 평가하기 위하여 다음과 같은 평가모델을 사용하였다.

$$CEDE_{ing,i} = C_{i,v} \times IR \times AD \times ED \times DCF_{ing,i} \times F_{decay,i} \\ \times W_v \times RPF_i \times PF \times (1 - RF) / MPF + C_{i,v} \times IG_v \times ED \\ \times DCF_{ing,i} \times F_{decay,i} \times W_v \times RPF_i / MPF$$

여기서,

$DCF_{ing,i}$: 방사성 핵종 i에 대한 섭취 선량전환인자(Sv/Bq 또는 rem/pCi)

IG_v : 체적오염에 대한 우발적 섭취율(g/h)

2.4.3 외부 피폭경로

예상되는 선원으로부터의 직접 외부피폭에 따른 피폭방사선량은 다음과 같은 수식을 이용하여 평가할 수 있다.

$$EDE_{ext, i} = C_{i, v} \times ED \times \left(\sum_{nside} DCF_{ext, i, nside} \right) \\ \times F_{decay, i} \times W_v \times RPF_j / MPF$$

여기서,

$EDE_{ext, i}$: 핵종 i의 외부피폭으로부터의 유효 선량당량(Sv or rem)

$DCF_{ext, i, nside}$: n번째 면으로부터의 외부선량전환인자

$nside$: 선원의 n번째 면

2.5 선량환산인자

2.5.1 내부선량환산인자

RESRAD-RECYCLE은 ICRP Pub. 26에 근거한 TEDE(Total Effective Dose Equivalent)를 기준으로 금속폐기물의 규제해제에 따른 피폭방사선량을 평가하도록 개발되었으며 흡입과 섭취에 의한 내부피폭 선량환산인자는 EPA FGR No. 11(1988)에서 제시한 값을 채택하고 있으므로 ICRP Pub. 60의 유효선량 개념에 근거한 평가를 위해서는 ICRP Pub. 72의 호흡과 섭취에 의한 내부피폭 선량환산인자 값으로의 적용을 필요로 한다. 그러므로 작업자 및 일반인에 대한 내부피폭(호흡, 섭취)으로 구분하여 작업자 시나리오에 대해서는 ICRP Pub. 72의 작업자에 대한 내부피폭 선량환산인자를 선정하여 적용하였으며 일반인에 대해서는 연령군별 선량환산인자의 차이를 보정하기 위해 ICRP Pub. 72의 일반인에 대한 내부피폭 선량환산인자 값의 2배를 호흡과 섭취에 대한 내부피폭 선량환산인자로 채택하였다. 또한 호흡에 의한 선량환산인자는 ICRP Pub. 66[8]에 근거하여 작업자에 대해서 5 μm 의 AMAD(Activity Median Aerodynamic Diameter) 입자크기를, 일반인에 대해서는 1 μm 의 AMAD 입자크기를 적용하였으며 흡수율 파라미터(F(fast), M(moderator), S(slow))는 핵종의 반감기에 따라 F, M, S 값을 각각 적용하였다.(Table 3)(Table 4)

Table. 3 Dose Conversion Factor of Radionuclide by Worker

핵 종	반감기	선량환산인자(ICRP-26)		선량환산인자(ICRP-72)	
		섭취	흡입	섭취	흡입
^{60}Co	5.27×10^0	7.28×10^{-9}	5.91×10^{-8}	2.5×10^{-9}	1.7×10^{-8}
^{54}Mn	8.56×10^{-1}	7.48×10^{-10}	1.81×10^{-9}	7.1×10^{-10}	1.2×10^{-9}

Table. 4 Dose Conversion Factor of Radionuclide by Public

핵 종	반감기	선량환산인자(ICRP-26)		선량환산인자(ICRP-72)	
		섭취	흡입	섭취	흡입
^{60}Co	5.27×10^0	7.28×10^{-9}	5.91×10^{-8}	6.8×10^{-9}	6.2×10^{-8}
^{54}Mn	8.56×10^{-1}	7.48×10^{-10}	1.81×10^{-9}	1.42×10^{-9}	3.0×10^{-9}

2.5.2 외부선량환산인자

ICRP Pub. 60의 권고에 근거한 유효선량을 평가하기 위해서는 ICRP Pub. 74에 제시된 외부피폭에 대한 선량환산인자를 적용하여 평가하는 것이 원칙이다. 그러나 Zankl 등 (1992년)은 연구논문에서 대부분의 경우 유효선량 및 유효선량당량에 근거한 외부피폭선량 평가결과의 차이는 수 퍼센트 내외인 것으로 보고한 바 있으며 기타 국내외 연구결과에도 저에너지 감마핵종의 경우에는 외부피폭에 의한 유효선량이 유효선량당량과 큰 차이가 없는 것으로 밝혀진 바 있으므로 외부피폭에 대해서는 유효선량당량에 근거한 US EPA의 Federal Guidance Report(FGR) No. 12를 적용하였다.

2.6 평가 방법

RESRAD-RECYCLE 전산코드를 이용하여 금속폐기물 재활용 시나리오에 대한 자체처분 안전성 평가를 실시하였다. 유효선량 개념에 근거한 평가를 위해 두 가지 방법으로 ICRP Pub. 72의 내부피폭 선량환산인자를 적용하여 고리 2발전소 H-beam과 벨브류에 대한 최대개인선량 및 집단선량을 계산하였다. 첫 번째 방법으로 EPA FGR No. 11(1988)에서 제시한 값과 ICRP Pub. 72에서 제시한 핵종별 내부선량환산인자 비를 이용하여 출력문의 선량 값을 보정해 주는 방법 즉, 작업자 시나리오에 대해서는 섭취와 흡입에 대한 선량 값에 ^{60}Co 핵종에 대해서는 0.3434, 0.2877을 곱한 값을 ^{54}Mn 핵종에 대해서는 0.9492, 0.663을 곱한 값을 적용하여 선량을 평가하였고 일반인 시나리오에 대해서는 섭취와 흡입에 대한 선량 값에 ^{60}Co 핵종에 대해서는 0.3677과 0.2742를 곱한 값을 ^{54}Mn

핵종에 대해서는 0.493과 0.4를 곱한 값을 적용하여 내부피폭선량을 계산하였다. 두 번째 방법으로는 RESRAD-RECYCLE 전산코드 내부 파일의 내부피폭 선량환산인자 값을 수정하여 선량을 평가하는 방법을 사용하였다. 위에 설명한 방법에 의한 유효선량과 EPA FGR No. 11(1988)에서 제시한 값을 사용하여 평가한 피폭경로별 최대개인선량 및 집단선량을 비교, 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

1996 년부터 2001년 사이에 발생한 고리 2발전소의 H-beam과 벨브류 11.7 톤과 28.8 톤을 대상폐기물로 하여 내부선량환산인자를 제외한 나머지 변수들은 RESRAD-RECYCLE 전산코드의 기본값을 그대로 적용하였다. 또한, Table. 2에 제시한 총 34개의 작업자 및 일반인 피폭시나리오를 고려하여 자체처분 안전성평가를 실시하였으며 평가결과는 Table 5와 같다.

Table 5. Comparison of Overall Impact from Recycling Scenario

피폭 경로	ICRP Pub. 26 (EPA FGR No. 11)		ICRP Pub. 60			
			보정 값 (내부선량환산인자 비)		수정 값 (내부파일)	
	H-beam	V/V	H-beam	V/V	H-beam	V/V
작업자	1.51×10^{-5}	4.26×10^{-5}	1.51×10^{-5}	4.25×10^{-5}	1.51×10^{-5}	4.25×10^{-5}
소비재 생산품	1.64×10^{-1}	4.61×10^{-1}	1.64×10^{-1}	4.61×10^{-1}	1.64×10^{-1}	4.61×10^{-1}
공공재	2.21×10^{-3}	6.48×10^{-3}	2.21×10^{-3}	6.47×10^{-3}	2.21×10^{-3}	6.48×10^{-3}
공중 피폭	1.25×10^{-8}	3.51×10^{-8}	1.25×10^{-8}	3.51×10^{-8}	1.25×10^{-8}	3.51×10^{-8}
집단선량 (man · Sv/y)	1.66×10^{-1}	4.68×10^{-1}	1.66×10^{-1}	4.68×10^{-1}	1.66×10^{-1}	4.68×10^{-1}
최대개인선량 (μ Sv/y)	139	158	139	158	139	158
요구제염인자	13.9 이상	15.8 이상	13.9 이상	15.8 이상	13.9 이상	15.8 이상

자체처분 안전성평가 결과 H-beam과 벨브류에 대해 ICRP Pub. 60의 유효선량 개념으로 평가한 최대 개인선량 및 집단선량은 각각 139 μ Sv/y와 158 μ Sv/y, 0.166 man · Sv/y와 0.468 man · Sv/y로 서로 같은 값을 나타내었으며, ICRP Pub. 26의 계산 값과도 거의 일치함을 보였다. 그러나 피폭경로별 내부피폭선량을 살펴보면 Table 6에 제시한 바와 같이 피폭시나리오별로 약간의 차이가 있음을 알 수 있었다. 위 결과는 핵종 분석 결과

감마선을 방출하는 두 가지 핵종(^{60}Co , ^{54}Mn)에 대하여만 피폭선량을 평가하였고 개인선량과 집단선량에서 최대치를 나타내는 방/사무실 시나리오와 가정용 가구 시나리오에 있어 내부피폭경로의 기여도가 외부피폭경로보다 상대적으로 적기 때문에 최종적인 선량평가 결과에 큰 영향을 미치지 못하기 때문이라 판단되며, 또한 ^{60}Co , ^{54}Mn 핵종의 피폭경로별 기여도를 살펴보면 섭취와 호흡에 의한 내부피폭보다 외부피폭에 대한 선량기여도가 높기 때문이라 판단된다.(Fig. 2)(Fig. 3)

고리 2발전소에서 발생된 제염전 금속폐기물의 자체처분 안전성 평가 결과 H-beam 과 밸브류에 대한 최대개인피폭선량은 각각 $13.9 \mu\text{Sv/y}$ 와 $15.8 \mu\text{Sv/y}$ 로써 H-beam 과 밸브류에 대한 금속폐기물 제염시 13.9와 15.8 이상의 제염인자(DF) 값을 얻을 경우 자체처분 제한치를 만족하는 최대개인선량 및 집단선량을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

Table 6. Comparison of Internal Exposure Dose by Nuclides

H-beam								
Nuclides	^{60}Co				^{54}Mn			
	ICRP-26		ICRP-60		ICRP-26		ICRP-60	
Internal Pathway	섭취	호흡	섭취	호흡	섭취	호흡	섭취	호흡
작업자	2.44×10^{-3}	1.74×10^{-4}	8.39×10^{-4}	4.99×10^{-5}	1.51×10^{-5}	4.21×10^{-7}	1.43×10^{-5}	2.79×10^{-7}
소비재	1.38×10^{-2}	0.00×10^0	5.07×10^{-3}	0.00×10^0	2.69×10^{-5}	0.00×10^0	1.33×10^{-5}	0.00×10^0
밸브류								
Nuclide	^{60}Co				^{54}Mn			
	ICRP-26		ICRP-60		ICRP-26		ICRP-60	
Internal Pathway	섭취	호흡	섭취	호흡	섭취	호흡	섭취	호흡
작업자	6.87×10^{-3}	4.87×10^{-4}	2.36×10^{-3}	1.40×10^{-4}	5.15×10^{-5}	1.43×10^{-6}	4.89×10^{-5}	9.51×10^{-7}
소비재	1.57×10^{-2}	0.00×10^0	5.77×10^{-3}	0.00×10^0	3.73×10^{-5}	0.00×10^0	1.84×10^{-5}	0.00×10^0

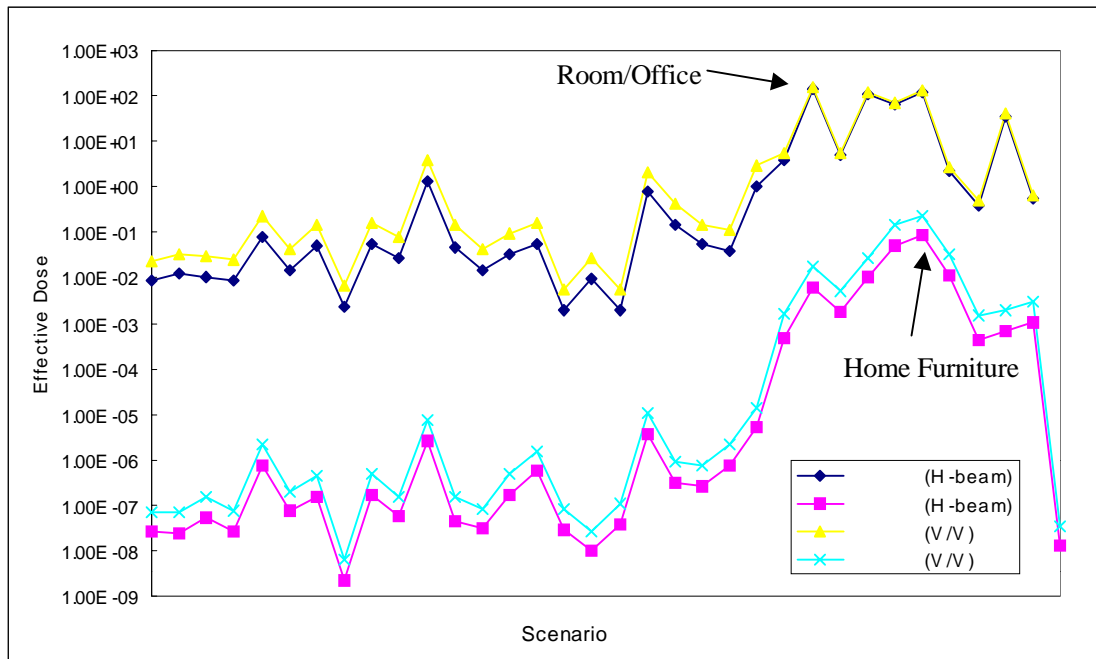
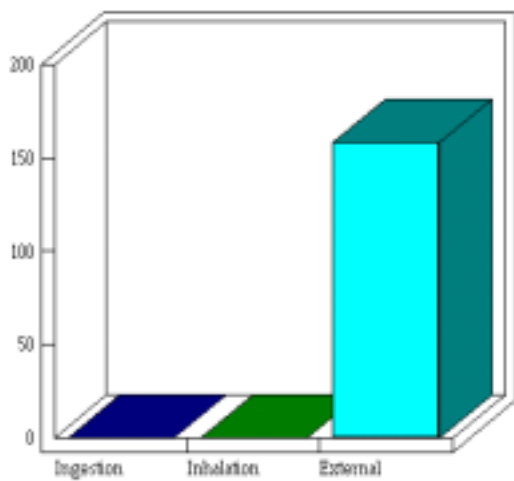
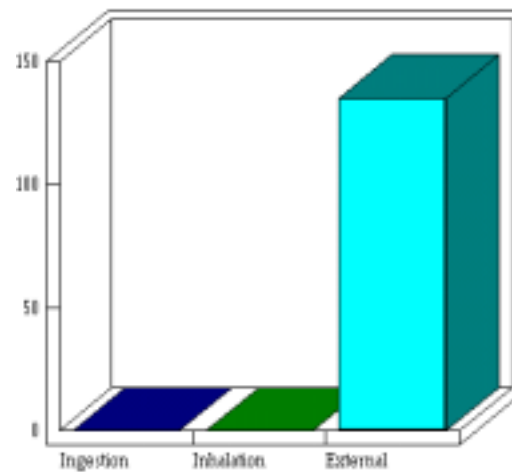


Fig. 2. Scenario Ranking for Individual and Collective Dose



Room/Office Scenario(H-beam)



Home Furniture Scenario(Valves)

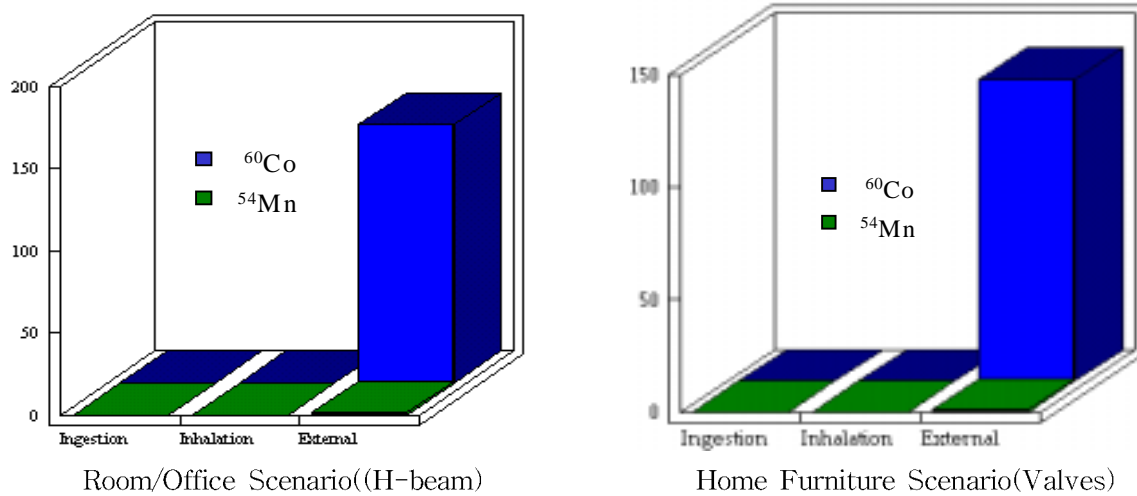


Fig. 3. Plot of the estimated radiation doses and dose fractions attributed to various Pathway, Radionuclides and Scenarios

4. 참고문헌

- [1] International Commission on Radiological Protection, "Recommendation of ICRP," ICRP Publication 26, Annals of the ICRP(1977).
- [2] USEPA, Federal Guidance Report No. 11, "Limiting Values of Radionuclide Intake and Air Concentration and Dose Conversion Factor for Inhalation, Submersion and Ingestion", (1988).
- [3] USEPA, Federal Guidance Report No. 12, "External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil", (1993).
- [4] 과학기술부 고시 제 2001-30호, "방사성폐기물 자체처분에 관한 규정", (2001).
- [5] 원자력법 시행규칙 제86조(2001.7.25. 과학기술부령 제29호).
- [6] International Commission on Radiological Protection, "Recommendation of ICRP", ICRP Publication 60, Annals of the ICRP(1990).
- [7] International Commission on Radiological Protection,, "Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides", ICRP Publication 72, Annals of the ICRP(1995).
- [8] ICRP Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. Publication 66 (Oxford, Pergamon Press)(1994).