



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2020年 2月

碩士學位 論文

원전 해체 시 발생하는  
대형 금속폐기물 자체처분 방안 연구

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

孫 振 豪

# 원전 해체 시 발생하는 대형 금속폐기물 자체처분 방안 연구

A Study on the Clearance of Large Metal Wastes Generated from  
Decommissioning of Nuclear Power Plant

2020년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

손진호

# 원전 해체 시 발생하는 대형 금속폐기물 자체처분 방안 연구

지도교수      정   운   관

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2019년 10월

조 선 대 학 교   대 학 원

원자력공학과

손   진   호

# 손진호의 석사학위 논문을 인준함

위원장    조선대학교 교 수    이경진 (印)

위 원    조선대학교 교 수    송종순 (印)

위 원    조선대학교 교 수    정운관 (印)

2019년 11월

조선대학교 대학원

## 목 차

표 목차 .....	3
그림 목차 .....	5
ABSTRACT .....	6
제 1 장 서 론 .....	8
제 1 절 연구 배경 .....	8
제 2 절 연구 목적 .....	9
제 2 장 자체처분 규정 및 자체처분 사례 .....	10
제 1 절 방사성폐기물 분류체계 및 자체처분 절차 .....	10
제 2 절 해외 규제체계 .....	15
제 3 절 국내 자체처분 현황 .....	19
제 3 장 금속폐기물 제염 기술 및 잔류방사능 계측 21	
제 1 절 물리적 제염기술 .....	21
제 2 절 화학적 제염기술 .....	24
제 3 절 전해 제염기술 .....	29
제 4 절 잔류방사능 계측 .....	30
제 4 장 연구방법 .....	40

제 1 절 평가 코드 및 입력인자 분석 .....	40
제 2 절 선량평가 대상 선정 .....	50
제 5 장 선량평가 결과 .....	54
제 6 장 결론 및 고찰 .....	65
참고문헌 .....	67

## 표 목 차

표 1. PWR 원전 1기 해체시 발생하는 해체폐기물 발생 예상량 .....	8
표 2. 저준위 방사성폐기물의 방사능 농도 제한치 .....	11
표 3. 방사성 핵종별 자체처분 허용농도 .....	14
표 4. 화학 제염공정별 특성 비교 .....	28
표 5. 전해 제염액의 종류 및 공정별 특성 분석 .....	30
표 6. 분석 대상 핵종 및 특성 .....	33
표 7. 분석 대상 감마 핵종 .....	37
표 8. 분석 대상 알파 핵종 .....	38
표 9. 분석 대상 베타 핵종 및 측정방법 .....	39
표 10. IAEA-SS-111-P-1.1과 RESRAD-RECYCLE 코드의 평가 방사성핵종 및 선량 환산인자 비교 .....	42
표 11. IAEA-SS-111-P-1.1과 RESRAD-RECYCLE 코드의 내부선량환산인자 비교 .....	42
표 12. RESRAD-RECYCLE 전산코드의 시나리오 .....	44
표 13. Westinghouse F Series SG 설계인자 .....	52
표 14. 제염 전 비방사능 .....	53
표 15. 제염계수별 비방사능 .....	53
표 16. DF 100 선량평가 .....	55
표 17. DF 200 선량평가 .....	56
표 18. DF 300 선량평가 .....	57
표 19. DF 400 선량평가 .....	58



표 20. DF 500 선량평가 .....	59
표 21. DF 600 선량평가 .....	60
표 22. DF 700 선량평가 .....	61
표 23. DF 800 선량평가 .....	62
표 24. DF 900 선량평가 .....	63
표 25. DF 1000 선량평가 .....	64

## 그림 목 차

그림 1. 방사성폐기물 분류 및 처분방식 .....	10
그림 2. 방사성폐기물 자체처분 절차 .....	13
그림 3. 2014 ~ 2018년 자체처분 신청건수 .....	20
그림 4. 2014 ~ 2018년 폐기물 종류별 자체처분 승인 수량 .....	20
그림 5. 기기를 이용한 고압수 제염 .....	22
그림 6. 고압수 제염 .....	22
그림 7. 드라이아이스 블라스팅 .....	23
그림 8. 초음파 제염 수조 .....	24
그림 9. Kalinin NPP 연료다발 제염 수조 .....	24
그림 10. RESRAD-RECYCLE 전산코드의 재활용 절차 개념도 .....	40
그림 11. 철강의 최종사용제품 기본 모델링 매개변수 .....	45
그림 12. Westinghouse 증기발생기 단면도 .....	51
그림 13. Greifswald 원전 Decay Storage .....	66

## ABSTRACT

### A Study on the Clearance of Large Metal Wastes Generated from Decommissioning of Nuclear Power Plant

Jin Ho Son

Advisor : Prof. Chung, Woon-kwan

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

Currently, 25 nuclear power plants are operating in Korea. Among them, Kori Unit 1 was permanently suspended in 2017, and full-scale decommissioning will begin in 2022. And 11 nuclear power plants will be permanently stopped by 2030 if the lifetime extension of each nuclear power plant is not extended. The IAEA expects a total of 6,200 tons of radioactive waste to be generated when dismantling one(1) PWR nuclear power plant of 900 ~ 1300 MWe. The amount of metal radioactive waste is 4,150 tons, accounting for 70% of the total waste. Therefore, if the metal radioactive wastes are properly decontaminated for self-disposal and recycling, the economic feasibility of dismantling nuclear power plants can be improved.

In this study, the RESRAD-RECYCLE 3.10 computer code was used to evaluate individual and collective doses due to the recycling of radioactive metal waste from decommissioning stages.

The radionuclide concentrations of the metal wastes used for the dose assessment were cited from the Kori 1 replacement steam generator dose rate analysis report conducted by the Korea Electric Power Research Institute in 1998. The total radioactivity of the steam generator is 3.3 TBq, which is 5% in the water chamber and 95% in the heat pipe. The decontamination coefficient was 1,000 and the specific radioactivity of the heat pipe after decontamination was 0.18753 Bq/g and was excluded from the evaluation. Accordingly, it is assumed that half of the total weight of Kori Unit 1 steam generator is recycled.

Individual and collective dose assessments were performed with increasing decontamination factors from 100 to 1000 to 100 units for recycling steam generator metal waste in this study. At the decontamination factor of 100, the individual and the collective doses in shielding block scenario were  $15.300 \mu\text{Sv}/\text{yr}$  and  $1.53 \times 10^{-4} \text{man}\cdot\text{Sv}/\text{yr}$ , respectively. The individual dose in the automobile scenario at the decontamination factor of 100 is exceeded the legally allowed dose. In the bridge scenario, the individual dose is  $0.023 \mu\text{Sv}/\text{yr}$  and collective dose is  $4.99 \text{man}\cdot\text{Sv}/\text{yr}$ , and the result shows that the collective dose in this scenario is exceeded the legally acceptable dose. However, when the decontamination factor was above 500, it was found that individual and collective doses satisfy legal limits in all scenarios.

In conclusion, the recycling of metal wastes generated in nuclear facilities is negative in terms of inhabitability, so it is appropriate to use recyclable metal wastes as materials for shields, devices and disposal drums of radioactive wastes in nuclear facilities.

# 제 1장 서론

## 제 1 절 연구배경

현재 국내 운영 중인 원자력발전소는 고리, 새울, 한빛, 한울, 월성 총 5개소에서 25기의 원자력발전소가 운영중이고 신한울 1, 2호기 및 신고리 5, 6호기는 건설하고 있으며 고리 1호기는 2017년 6월 19일로 영구정지되어 본격적인 해체작업을 준비하고 있다. 또한, 국내의 원자력발전소는 2030년까지 총 12기의 설계수명이 만료되며 에너지 전환 정책에 따라 계속운전하지 않는다면 앞으로 해체해야 할 원전에서 발생하게 될 방사성폐기물의 양이 단기간에 집중적으로 발생하게 된다.

원자력발전소 해체폐기물은 원전 운영 정지 후 오염된 시설의 제염, 구조물의 해체 및 철거 등을 통해 발생하는 폐기물이다. IAEA에서는 900 ~ 1,300 MWe 규모의 PWR 원전 1기 해체 시 발생하는 해체폐기물 발생량을 표 1에 제시하였다[1].

표 1. PWR 원전 1기 해체시 발생하는 해체폐기물 발생 예상량

종류	발생량(ton)	비고(%)
방사화 금속	650	10.48
방사화 콘크리트	300	4.84
오염 금속	3,500	56.45
오염 콘크리트	600	9.68
오염된 마감재 (금속판)	150	2.42
해체 잡고체	1,000	16.13
합계	6,200	100

해체폐기물의 발생량은 총 6,200 톤으로 예상되며 그 중 방사성 금속폐기물인 방사화 금속, 오염 금속, 오염된 금속 마감재의 총합은 4,300 톤으로 전체 방사성폐기물의 69.35%에 달한다.

2017년 12월 27일 산업자원부 방사성폐기물 관리 및 원전해체 비용 인상 고시에서 중·저준위 방사성폐기물 처분비용이 1,219 만원에서 1,373 만원으로 12.6% 증가

하여 해체 비용에서 폐기물 처분비용이 크게 증가하였고, 그에 따라 중·저준위 방사성폐기물의 감용이 원전 해체의 경제성에 크게 기여할 수 있다[2].

## 제 2 절 연구 목적

현재 국내의 방사성폐기물은 고준위, 중준위, 저준위, 극저준위로 분류되며 원자력발전소 해체에서 발생하는 폐기물도 위의 기준과 동일하다. 실제 해체시에 발생하는 폐기물의 대부분이 저준위, 극저준위폐기물로 분류될 것으로 예상되며 방사화된 금속폐기물을 제외한 오염된 금속폐기물은 적절한 제염작업 거쳐 재활용이 가능할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 향후 원자력발전소의 해체 시 발생하는 방사성 금속폐기물의 제염과정과 잔류방사능 평가를 거쳐 자체처분 허용농도를 만족하는 금속폐기물에 대해 RESRAD-RECYCLE 평가코드를 사용하여 개인 피폭선량 및 집단선량을 계산하고, 자체처분 가능 여부를 평가하고자 한다.

## 제 2 장 자체처분 규정 및 자체처분 사례

### 제 1 절 방사성폐기물 분류체계 및 자체처분 절차

#### 1. 국내 방사성폐기물 분류체계

원자력안전법 제 2조에 의해 방사성폐기물이란 방사성물질 또는 그에 따라 오염된 물질로서 폐기의 대상이 되는 물질을 말한다. 방사성폐기물의 분류체계는 그림 1에 제시한다. 방사성폐기물의 분류 및 처분방식 체계는 그림 1과 같다.

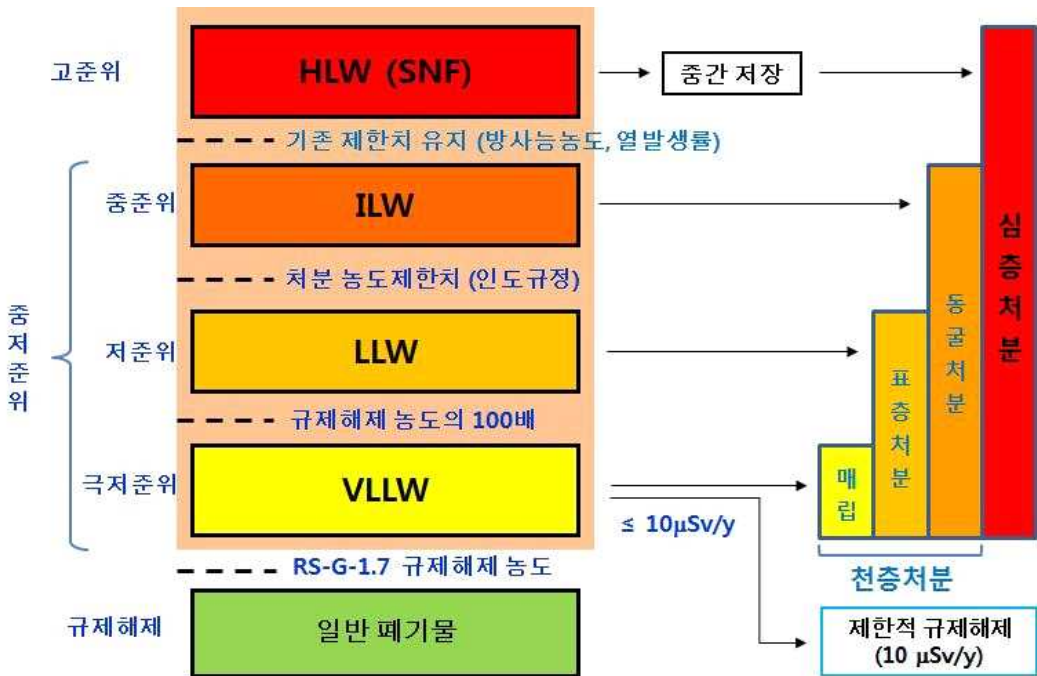


그림 1. 방사성폐기물 분류 및 처분방식

고준위 방사성폐기물은 원안위 고시 제2017-36호(방사선방호 등에 관한 기준)에 따라 반감기 20년 이상의 알파선을 방출하는 핵종으로 4,000 Bq/g 이상의 방사능농도를 가지며 열 발생률은 2 kW/m<sup>3</sup> 이상으로 구분된다. 표 2는 저준위 방사성폐기물의 방사능농도 제한치를 나열한 표로 해당 값을 초과할 시 중준위 방사성폐기물로 분류된다. 표 3에서 제시한 규제해제 방사능 농도 값을 초과하고 그 값의 100배 미만의 경우 저준위 방사성폐기물로 분류하며 차체처분 농도를 초과하고 저준위 방사성폐기물의 농도 제한치 미만이면 극저준위 방사성폐기물로 분류한다[3].

표 2. 저준위 방사성폐기물의 방사능농도 제한치

방사성핵종	방사능 농도(Bq/g)
H-3	1.11E+6
C-14	2.22E+5
Co-60	3.70E+7
Ni-59	7.40E+4
Ni-63	1.11E+7
Sr-90	7.40E+4
Nb-94	1.11E+2
Tc-99	1.11E+3
I-129	3.70E+1
Cs-137	1.11E+6
전알파	3.70E+3



## 2. 자체처분 절차

자체처분이란 방사선학적 영향이 미미하여 방사성폐기물을 규제대상에서 해제하는 것을 말한다. 국내외적으로 원자력시설에서 발생하는 규제해제대상의 각종 선원 및 행위는 사회 각 계층의 다양한 요구를 충분히 수용할 수 있을 정도의 후속처리방안이 아직 미비한 관계로 상당한 어려움에 봉착되어 있다. 특히, 원자력발전소에서 발생하는 대형 금속폐기물의 자체처분은 방사선학적 특성, 처리방법 및 다양한 피폭대상 측면에서 섬세한 기술적 판단이 요구되며 충분한 근거를 통해 방사선학적으로 국민이 납득할 만한 수준의 안전함을 보장하는 것이 필수적이다.

자체처분은 원자력안전법 시행령 제107조(방사성폐기물 자체처분의 절차 및 방법)에 따라 자체처분계획서 및 첨부서류를 원자력안전위원회에 제출함으로써 시작된다. 심사는 서류제출요건 확인 → 표면선량률 측정결과를 통한 방사선학적 특이사항 확인 → 관리구역 반출기준 준수확인 → 시료 대표성 확인 → 방사능 측정적절성 → 예상 주민피폭선량 적절성 및 관련요건 부합성 → 자체처분 절차서에 따른 대표시료채취 및 방사능측정 → 피폭선량평가 적절성 → 최종 충족여부 결정으로 이루어지는데 그 주요 흐름도는 그림 2와 같다.

자체처분을 위한 방사선학적 요건을 만족하기 위해서는 다음과 같은 조건을 충족해야 한다. 자체처분 대상 폐기물내 Hot Spot가 존재하는지 여부를 확인하기 위해 표면선량률 결과가 자연 표면선량률( $5.0E-05 \sim 3.0E-05$  mSv/hr)을 초과하고 있는지 확인하고, 자체처분 폐기물 또는 포장용기의 표면오염도가 알파선을 방출하는 경우  $0.04$  kBq/m<sup>2</sup>, 알파선을 방출하지 않는 경우  $0.4$  kBq/m<sup>2</sup> 값을 만족하였는지 확인한다.

시료채취는 시료의 균질성 및 평균성을 확보하기 위해 표면오염폐기물과 체적오염폐기물로 구분하여 시료의 대표성을 확보한다. 표면오염폐기물은 오염이 표면에 국한된 폐기물로 표면이 평탄하고 재질이 매끈한 경우 MDC(Minimum Detective Concentration)의 10%이하를 유지할 수 있는 표면오염측정기를 이용하여 1m<sup>2</sup>당 1개의 문지름 시료를 채취하며, 시료 채취가 부적합한 경우는 200 kg 또는 1m<sup>2</sup> 당 대표시료 1kg을 채취한다. 체적오염폐기물은 200 kg마다 대표성 있는 1kg의 시료를 직접 채취하여 방사능 분석을 실시한다.

감마 방사능 측정은 보정된 상태에서 감마핵종분석 MDC가 자체처분 제한농도의

10%이하가 되게 하여 측정하며, 알파 및 베타방사능측정은 특이사항 시료군으로부터 최소 3개의 시료를 채취하여 IAEA RS-G-1.7에 제시된 핵종별 농도의 1/10을 확인할 수 있는 측정기로 측정한다. 또한 대상폐기물 발생공정상 H-3, C-14 함유가능성이 있을 경우 해당핵종에 대한 방사능측정을 수행한다.

선원항 평가에서 감마핵종 분석으로 측정되지 않는 저에너지 난검출 핵종은 해당핵종들을 핵종분석을 통해 선원항에 포함시키거나 인허가 문서에 제시된 해당핵종 생성비나 척도인자를 이용한 핵종비율을 적용하여 포함시켜야한다.

금속폐기물 자체처분은 재활용을 염두에 두어야 하므로 예상 가능한 시나리오 분석을 수행하고 국내 상황에 적합한 검증된 데이터를 입력변수로 사용하여 보수적으로 평가하여 자체처분으로 인한 개인 및 집단에 대한 방사선학적인 영향이 관련 기준을 충분히 만족하는지 보여야 한다.

이를 위해서는 흡입 및 섭취경로 DCF로 ICRP-67, 69, 71 및 74, 외부 피폭경로 DCF로 ICRP-74를 활용할 수 있으며, 이와 동등한 자료를 이용할 경우에도 인정될 수 있다. 피폭선량평가에 필요한 각종 변수 값들은 대상 부지 또는 대표집단에 고유한 것들로서 이 값들이 합리적이라는 것을 입증할 수 있어야 한다.

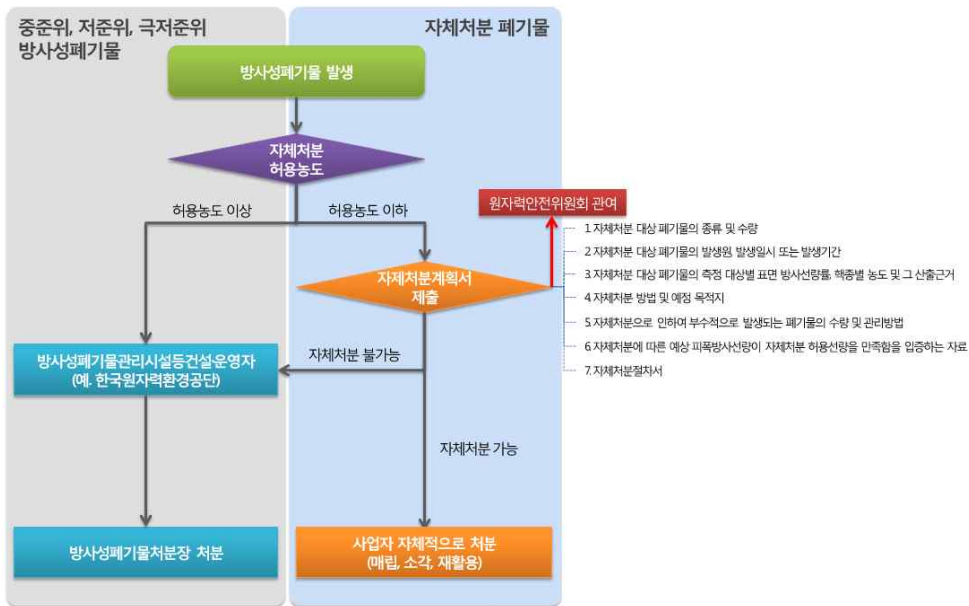


그림 2. 방사성폐기물 자체처분 절차.

표 3. 방사성핵종별 자체처분 허용 농도

방사성핵종	허용농도 (Bq/g)
I-129	0.01
Na-22, Sc-46, Mn-54, Co-56, Co-60, Zn-65, Nb-94, Ru-106, Ag-110m, Sb-125, Cs-134, Cs-137, Eu-152, Eu-154, Ta-182, Bi-207, Th-229, U-232, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-242, Pu-244, Am-241, Am-242m, Am-243, Cm-245, Cm-246, Cm-247, Cm-248, Cf-249, Cf-251, Es-254	0.1
C-14, Na-24, Cl-36, Sc-48, V-48, Mn-52, Fe-59, Co-57, Co-58, Se-75, Br-82, Sr-85, Sr-90, Zr-95, Nb-95, Tc-96, Tc-99, Ru-103, Ag-105, Cd-109, Sn-113, Sb-124, Te-123m, Te-132, Cs-136, Ba-140, La-140, Ce-139, Eu-155, Tb-160, Hf-181, Os-185, Ir-190, Ir-192, Tl-204, Bi-206, U-233, Np-237, Pu-236, Cm-243, Cm-244, Cf-248, Cf-250, Cf-252, Cf-254	1
Be-7, F-18, Cl-38, K-43, Ca-47, Mn-51, Mn-52m, Mn-56, Fe-52, Co-55, Co-62m, Ni-65, Zn-69m, Ga-72, As-74, As-76, Sr-91, Sr-92, Zr-93, Zr-97, Nb-93m, Nb-97, Nb-98, Mo-90, Mo-93, Mo-99, Mo-101, Tc-97, Ru-97, Ru-105, Cd-115, In-111, In-114m, Sn-125, Sb-122, Te-127m, Te-129m, Te-131m, Te-133, Te-133m, Te-134, I-126, I-130, I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, Cs-129, Cs-132, Cs-138, Ba-131, Ce-143, Ce-144, Gd-153, W-181, W-187, Pt-191, Au-198, Hg-203, Tl-200, Tl-202, Pb-203, Po-203, Po-205, Po-207, Ra-225, Pa-230, Pa-233, U-230b, U-236, Np-240, Pu-241, Cm-242, Es-254m	10
H-3, S-35, K-42, Ca-45, Sc-47, Cr-51, Mn-53, Co-61, Ni-59, Ni-63, Cu-64, Rb-86, Sr-85m, Sr-87m, Y-91, Y-91m, Y-92, Y-93, Tc-97m, Tc-99m, Rh-105, Pd-109, Ag-111, Cd-115m, In-113m, In-115m, Te-129, Te-131, I-123, I-125, Cs-135, Ce-141, Pr-142, Nd-147, Nd-149, Sm-153, Eu-152m, Gd-159, Dy-166, Ho-166, Er-171, Tm-170, Yb-175, Lu-177, Re-188, Os-191, Os-193, Ir-194, Pt-197m, Au-199, Hg-197, Hg-197m, Tl-201, Ra-227, U-231, U-237, U-239, U-240, Np-239, Pu-234, Pu-235, Pu-237, Bk-249, Cf-253, Es-253, Fm-255	100
Si-31, P-32, P-33, Fe-55, Co-60m, Zn-69, As-73, As-77, Sr-89, Y-90, Tc-96m, Pd-103, Te-125m, Te-127, Cs-131, Cs-134m, Pr-143, Pm-147, Sm-149, Sm-151, Dy-165, Er-169, Tm-171, W-185, Re-186, Os-191m, Pt-193m, Pt-197, At-211, Th-226, Pu-243, Am-242, Cf-246	1,000
Co-58m, Ge-71, Rh-103m, Fm-254	10,000

주<sup>1)</sup> 다수의 방사성핵종이 혼합되어 있는 경우에는 다음과 같이 한다.

$$\sum_i \frac{c_i}{c_{L,i}} < 1$$

$c_i$  : 방사성핵종  $i$ 의 방사능농도 (Bq/g)

$c_{L,i}$  : 별표1에 주어진 방사성핵종  $i$ 의 자체처분 허용농도 (Bq/g)

주<sup>2)</sup> 별표1에 수록되지 않은 알파선을 방출하지 아니하는 방사성핵종의 경우 자체처분 허용농도로서 0.1 (Bq/g)을 적용할 수 있다.

주<sup>3)</sup> 다음 목록에 제시된 모핵종과 그 모핵종의 붕괴로 생성되는 자핵종이 함께 존재하는 경우, 모핵종에 대해서만 허용농도를 적용한다.

## 제 2 절 해외 규제해제 체계

### 1. IAEA

IAEA는 액체 및 기체방사성폐기물의 방사능과 고체방사성폐기물의 표면 방사선량을 기준으로 분류한 Technical Report Series No. 101(1970)을 준용하였고, 1998년 8월 IAEA Safety Series No.111-G-1.1(1994)의 분류체계를 준용하여 방사성폐기물의 처분안전성을 강조한 분류기준으로 개정하였다. 현재는 IAEA Safety Series No. 115(1996)을 통해 자체처분에 대한 선량기준은 규제해제에 관한 선량기준(개인에 대해 0.01 mSv/yr 미만이고 집단에 대한 총 선량 1 man · Sv/yr 미만)으로 적용하고 있다[4,7].

### 2. 벨기에

벨기에는 2001년 7월 20일의 GRPIR(General Regulations for the Protection of the population, workers and the environment against the dangers of Ionising Radiation)이라는 Royal Decree에 따라 방사성폐기물을 관리하고 있다. GRPIR은 96/29/Euratom과 같은 EU Directive 등을 반영하고 있다. 또한 GIPBR은 European Commission의 RP-122 Part I에서 제안한 규제해제 준위를 반영하여 고체 폐기물의 규제해제 기준에 대해 규정하고 있다. 벨기에는 과거에 EuroChem 재처리공장 해체 폐기물에 대한 제한적 규제해제를 사안별로 허용한 바 있으며, 당시 적용된 기준치는 표면오염도는 방출 방사선과 관계없이 0.04 Bq/cm<sup>2</sup> 을 초과해서는 안되며 방사능 농도는 1 Bq/q (임의의 1,000 kg당 평균치, 최대 10 Bq/g)이다. 벨기에는 α 핵종에 대한 표면오염도는 국내 방사선관리구역 반출기준과 동일하며 β, γ 핵종의 표면오염도는 국내 반출 기준의 1/10이다[4,7].

### 3. 프랑스

프랑스는 EU Directive(96/29/Euratom)의 기본안전기준을 법령에 반영하지 않고 있다. 규제해제에 대한 일반인과 환경단체에 의해 규제체계가 명확해지기 전까지 규제해제를 시행하지 않고 있으나 사안별 인허가를 통한 규제해제는 가능한 것으

로 보인다. 프랑스의 신규 법령에서는 폐기물 발생자는 폐기물관리계획서를 작성해 ASN의 승인을 받도록 되어있으며, 계획서에 따라 각 시설별로 일반폐기물과 방사성폐기물이 발생하는 구역으로 지역구분을 하도록 되어있다. ASN은 극저준위 폐기물 관리체계로 비원자력시설에 대해서 규제해제 준위를 적용할 필요가 있다고 판단했으며, 이에 따라 폐기물 발생자에 대한 규제관리, 품질보증, 시설의 출입구에 설치된 검출기 등과 관련해 추가적인 방호조치를 고려하였다. 또한 폐기물 관리와 관련해 책임의 소재를 명확하게 하기 위해 발생자, 매립시설, 소각시설 및 용융시설 간에 계약이 체결되어야 한다.

향후 프랑스는 대규모 원자력시설에 대해 일반규제해제기준을 도입하지 않을 가능성이 크며 이에 대한 대안으로 지역 구분 등의 방법으로 규제대상 폐기물과 규제에서 제외되는 폐기물을 구분하는 방식을 고려하고 있는 것으로 보인다[4,7].

#### 4. 독일

독일의 규제해제는 Atomic Energy Act와 RPO(Radiation Protection Ordinance, 방사선 방호령)에 규정되어 있으며, 규제해제 준위를 포함한 구체적인 사항들은 RPO에 명시되어있다. RPO는 유럽연합의 Basic Safety Standards를 반영하고 있으며, 입법자문기구인 SSK가  $10 \mu\text{Sv/yr}$  개인선량 및  $1 \text{man} \cdot \text{Sv/yr}$  집단선량 기준에 근거하여 권고한 핵종별 규제해제농도기준을 적용하고 있다. 규제해제 준위는 오염이나 방사화에 노출되는 모든 물질에 적용될 수 있다.

독일에서는 특정한 몇 가지 시나리오에 따라서 특정 물질이 조건부로 규제에서 제외될 수 있으며, 이는 조건부 규제해제 또는 허가 배출에 해당하는 것이다. 예를 들어 폐기물 발생자가 특정 폐기물의 형태와 특성이 매립 또는 소각에만 적절함을 입증할 수 있다면, 일반적인 규제해제준위가 아닌 제한된 각 시나리오에서 설정된 규제해제준위를 적용할 수 있다. 예를 들어 특정 핵종의 일반적인 규제해제준위가  $0.1 \text{Bq/g}$ 이더라도 매립 또는 소각에 대한 규제해제 준위는  $4 \text{Bq/g}$ , 재활용을 위한 금속의 용융에 대해서는  $0.6 \text{Bq/g}$  등으로 시나리오별로 상이한 기준치가 적용될 수 있다. RPO에서는 이러한 제한적 규제해제의 적용 대상을 "매립장 또는 소각장에서 고체폐기물 처분" 및 "철거만을 고려하는 건물" 등으로 정의하고 있다.

2001년 하반기부터 시행되고 있는 RPO에서 일반 규제해제의 대상으로 언급하고

있는 대상들은 다음과 같다[4,7].

- ① 연간 1,000 톤 미만의 고체상 물질의 재활용, 재이용 또는 매립
- ② 연간 1,000 톤을 초과하는 건물의 파쇄물과 토양
- ③ 재이용 또는 철거되는 건물
- ④ 원자력시설 부지 (철거 후)

## 5. 영국

영국은 "전리방사선규정 1999"를 통하여 EU Directive (96/26/Euratom)를 이행하고 있으며, 규제해제 및 규제면제와 방사성폐기물 처분 등에 관한 주요 사항은 Radioactive Substances Act 1993(RSA 93)에 규정되어 있다. 또한 Radioactive Substances Exemption Order에서도 특정 조건 아래에 있는 다양한 물품 및 물질에 대한 규제해제 사항들을 다루고 있다. 원자력산업계를 포함한 모든 산업계에서 방사능의 고체상 물질에 대한 일반적인 규제해제준위는 인공방사성핵종에 대하여 0.4 Bq/g이다. RSA 93에 따르면, 천연방사성핵종을 함유한 고체상 물질의 규제해제준위는 11.1 Bq/g(우라늄), 2.59 Bq/g(토륨), 0.74 Bq/g(납), 0.37 Bq/g(Ra, Pa, Ac, Po 등 기타 천연방사성핵종) 등이다.

영국은 2007년 고체 LLW의 장기관리에 관한 정책성명 (Department for Environment, Food and Rural Affairs, Policy for the Long Term Management of Solid Low Level Radioactive Waste in the United Kingdom)을 공표하면서, 기존의 LLW 중 상당량이 극저준위의 방사성물질만을 함유하고 있다는 점과, 이들 폐기물에 의한 인간의 건강과 환경에 대한 리스크를 무시할 만한 수준으로 제한하면서도 다양한 방법으로 처분할 수 있다는 점에 주목하였다.

이를 통해 LLW의 하위 범주로서 VLLW에 대한 정의를 개정하고 대량의 VLLW도 폐기물 매립장에 처분할 수 있도록 정책을 수정하였다. 즉, EC의 RP 122 보고서에 제시된 핵종별 규제해제기준 농도를 적용하고 있으며, 또한 이와 별도로 극저준위 폐기물에 대해서는 수량에 따라 처분방법을 차등화하고 있다.

이는 소량의 극저준위폐기물(LV-VLLW, low volume, very low level radioactive waste)에 대해서는 0.1 m<sup>3</sup> 당 총방사능이 400 kBq 미만이거나 또는 총방사능이 40

kBq 미만(H-3와 C-14는 이 제한치의 10배 까지 허용)인 단일 품목의 경우 생활쓰레기나 산업폐기물과 함께 불특정 장소에 매립할 수 있도록 허용하고 있다. 해당 폐기물이 발생된 원자력시설 부지 외부로 폐기물이 반출된 이후에는 처분에 대한 별도의 제한조건이 부과되지 않는다.

한편, 대량의 극저준위폐기물(HV-VLLW, high volume, very low level radioactive waste)은 특정 매립장에 한정하여 매립될 수 있는 폐기물로서 총방사능 농도가 4 MBq/ton (4Bq/g) 이하인 폐기물로 정의된다(H-3는 이 제한치의 10배 까지 허용). 해당 폐기물이 발생된 원자력시설 부지 외부로 폐기물이 반출된 이후에도 법적인 제한조건이 부과된다는 점에서 LV-VLLW와 차이가 있다[4,7].

## 6. 일본

일본은 미량의 방사능으로 오염된 폐기물을 매립하거나 재활용하기 위한 일반적인 기준이 부재했으나, 2005년도에 법령이 개정되어 “규제해제 제도”가 도입되었다. 현재 규제해제 대상물을 금속과 콘크리트로 한정하고 있지만, 사업자의 건의에 따라 보온재, 플라스틱류, 고무류 등과 같은 종류에 대해서도 확대적용을 검토 중이다. 안전하다고 판단된 규제해제 물질도 일반폐기물에 선불리 혼합하여 처리하지 않고 원자력 관련 기구 내에서 우선적으로 재이용을 실시하고 있다. 이를 통해 실적을 쌓고 모니터링을 통해 안전성을 확보하여 수용성을 높이고 있다[4,7].

## 7. 미국

NRC는 저방사능의 고체상 물질에 대해 일반적으로 적용할 수 있는 규제해제 기준이 없으나, 관련 지침과 다른 case-specific 기준을 근거로 각 고체상 물질의 조건에 따라 규제해제를 극히 제한적으로 허용하고 있다. 원자로시설에서 발생된 표면오염 고체폐기물은 Reg. Guide 1.86(Termination of Operating Licenses for Nuclear Reactors)에 따른 오염도 조사결과 자연방사선 준위를 초과하는 방사능이 검출되지 않는 경우에 한하여 규제에서 제외될 수 있다. 비원자로시설에서 발생된 표면오염 고체폐기물은 Reg. Guide 1.86 Table I에 제시된 수준 미만인 경우 규제에서 제외될 수 있으나, US NRC는 사업자로 하여금 잔류방사능을 제거하기 위한

합리적인 노력을 기울이도록 요구하고 있는 것으로 알려져 있다.

비원자시설에서 발생한 체적오염 고체폐기물의 경우에는 사안별로 예상 피폭방사선량을 평가한 후 US NRC의 승인을 득하는 경우에 한하여 규제에서 제외될 수 있다. 아직까지 사안별 선량평가에 적용되는 단일 기준치가 확정되지는 않았지만, 일반인 선량한도인 총유효선량당량(Total Effective Dose Equivalent; TEDE) 1 mSv/y의 매우 작은 비율(a Small Fraction)임을 입증하여야 한다.

US NRC는 BRC 정책성명을 철회한 후 1994년부터 규제해제기준을 도출하기 위한 연구를 재개하였으며, 1999년 NUREG-1640의 발간을 통하여 도출된 농도기준(안)을 제시하였다. 미국 보건물리학회는 규제해제를 위한 사전 선별기준에 관한 산업기술기준 ANSI/HPS-N13.12(1999)를 발간하였다. 그러나 아직까지 규제기관이 동 기준을 채택하지 않음에 따라 실제 적용되지는 못하고 있다.

2000년 1월에 US DOE는 체적오염 된 금속폐기물에 대한 규제해제를 US NRC에서 연방법 수립 여부를 결정하기 전까지 무기한 유예한다고 선언하였으며, 현재 방사성폐기물의 규제해제를 허용하지 않고 있다. 또한 2001년 1월에 US DOE의 장관은 폐금속의 규제해제를 계속 연기할 것이며, 정책의 우선순위를 산하 시설 내에서 납을 재이용하는데 둔다고 발표한 바 있다[4,7].

### 제 3 절 국내 자체처분 현황

국내의 자체처분은 1994년 한전 원자력연료(주)에서 NaF의 자체처분은 시행한 이후로 1995년부터 원전에서 발생한 방사성폐기물의 자체처분을 시행하고 있다. 그 후 관련 법령의 정비를 통하여 2000년부터 본격적으로 자체처분이 시행되었으며, 최근에는 자체처분대상 폐기물 종류 및 수량이 증가하고 있는 추세이다. 주요 신청기관은 한국수력원자력(주), 한전원자력연료(주), 한국원자력연구원 등이며 주요 자체처분대상 폐기물에는 토양, 폐 콘크리트, 철재류, 활성탄, 폐수지, 폐유 등이 있으며 폐기물은 종류별로 철재류, 불산은 재활용하였고 토양, 활성탄, 콘크리트는 매립했으며 폐유, 목재, 폐수지, 종이류는 소각하였다. 2014~2018년 사이 자체처분 신청 건수는 그림 3과 같고 자체처분 승인된 폐기물의 양은 그림 4와 같다[5].



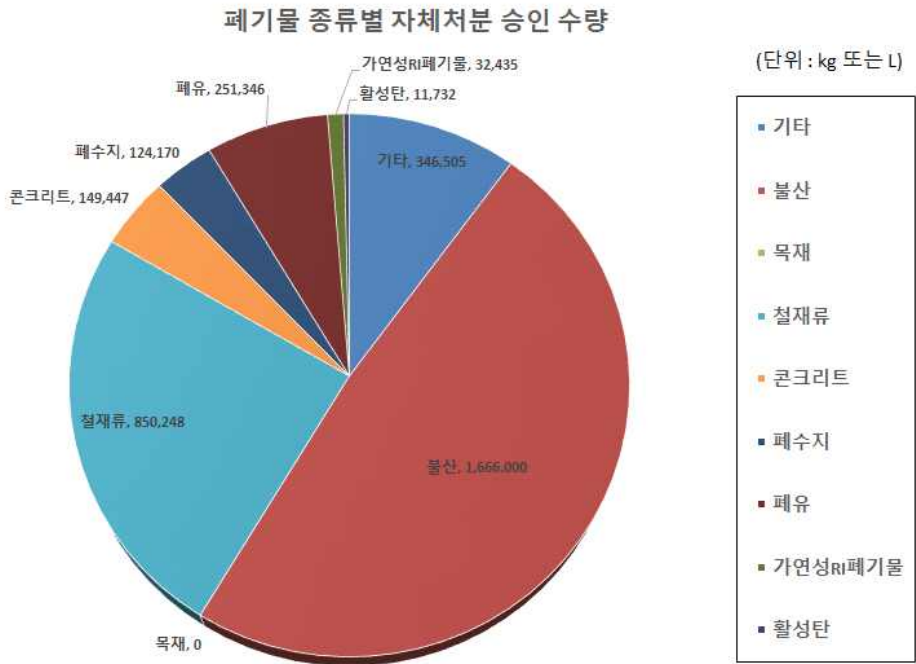


그림 3. 2014 ~ 2018년 폐기물 종류별 자체처분 승인 수량

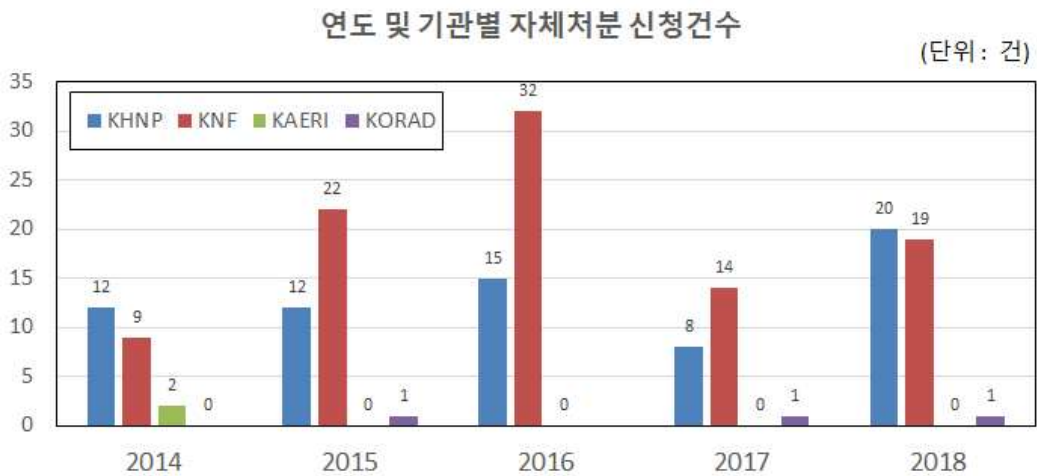


그림 4. 2014 ~ 2018년 자체처분 신청건수

## 제 3 장 금속폐기물 제염기술 및 잔류방사능 계측

### 제 1 절 물리적제염기술

제염 기술 중 가장 오랫동안 활용된 기술로 원리가 간단하고 다양한 활용이 가능하지만 제염계수가 낮다. 낮은 오염준위와 유리성 오염의 경우 물리적 제염이 가장 간편하게 사용가능하다. 이러한 기술적 특성 때문에 다른 제염방법과 함께 활용되고 있다.

#### 1. 연마세척 제염

작업자가 솔이나 주걱 등과 같은 도구를 이용하여 직접 닦아내는 방법이다. 제염시간, 도구의 형태, 제염 용액, 표면 상태에 따라 다양한 제염계수를 가진다. 대상의 손상이 없이 제염이 가능하나 작업자가 직접 접근하는 방식으로 방사선에 의한 피폭 위험이 가장 큰 것이 단점이고 연마도구의 주기적인 교체나 세척에 의해 오염의 분산을 방지해야 한다[6].

#### 2. 고압수 제염

고압수 제염방법은 고압의 물이나 수증기(~3,000 MPa)를 사용하여 분사되는 물리적인 힘으로 작은 균열, 좁은 통로등의 틈의 유리성 오염에 대한 제염이 가능하며 50 ~ 1,000의 제염계수를 얻을 수 있는 방법으로 일반산업뿐만 아니라 원자력 산업에서도 널리 사용되고 있다. 제염제 등의 화학약품을 첨가해 제염효과를 증진할 수 있고 분사 노즐을 여러 방향으로 회전시켜 접근이 쉽지 않은 곳도 제염이 가능하다. 비용이 저렴하고 원격으로 조작이 가능하며 오목한 표면의 제염이 가능하다. 2차 폐기물의 발생이 많으며 에어로졸로 인한 공기 중 오염이 일어날 수 있는 단점이 있다. 아래 그림 5와 6은 고압수 제염작업을 보여주고 있다[6].



그림 5. 기기를 이용한 고압수 제염



그림 6. 고압수 제염

### 3. 블라스팅 제염

본 제염방법은 대형 기기들을 제염하여 금속성 폐기물을 재활용하기 위해 사용하는 제염기술로 CO<sub>2</sub> 블라스팅, 얼음 블라스팅 습식 블라스팅 등이 있다. 고압 분사 유체의 흐름에 미립자 상태의 연마제(알루미나, 카보랜덤 및 마그네타이트 등)를 불어넣어 입자의 충돌로 제염효과를 향상시키는 방법이다. 오염의 성질에 따라 효과적인 기술이 될 수 있으나, 많은 양의 2차폐기물을 발생시킨다. 제염 폐액으로부터 제염에 사용된 연마제들은 선별 분리하여 회수한 뒤 재사용 가능하고 제염 방법에 따라 건식과 습식으로 나뉘며 200~300정도의 제염계수를 가진다.

효율이 좋고 표면 연마가 빠르며 여러 재료에 적용이 가능하고, 제염 대상에 부식이 발생하지 않는 장점이 있지만 오염물의 고착 가능성과 오염된 연마제에 의한 표면의 재오염, 다량의 2차폐기물 발생 가능성이 있다. 그림 7은 드라이아이스 블라스팅제염작업을 보여주고 있다[6].



그림 7. 드라이아이스 블라스팅

#### 4. 초음파 제염

초음파 에너지가 수용액 속에 전달되면 용액내에 강력한 교반효과가 생기며, 고액계면에서 국부적으로 강한 물리적 힘이 작용한다. 사용되는 초음파 영역은 20 ~ 100 kHz이다. 진동소자는 Piezoelectric crystal이나 Magnetostrictive resonator가 사용되며, 제염 온도를 90 °C 까지 올릴 수 있다. 제염계수는 100이상을 얻을 수 있으며 화학제를 첨가해 제염효과를 높일 수 있다. 초음파 제염은 소형 탱크 내에서 사용하는 방법과 이동성 플러그를 이용해야 한다. 전열관과 같은 얇은 물체나 작은 틈이 있는 물체가 주요 대상이다. 폐기물의 발생량이 적으며, 원격조작이 용이하고 오염확산을 방지할 수 있는 장점이 있지만 변수의 선정에 의해 제염 효과가 크게 달라지기 때문에 변수의 최적 조건을 찾아 제염하는 것이 중요하다. 아래 그림8은 초음파 제염을 위한 수조이고 그림 9는 러시아 Kalinin NPP 연료다발 제염용으로 제작 된 2.2 m<sup>3</sup> 그림 7은 초음파 제염작업을 위한 수조이다[6].



그림 8. 초음파 제염 구조



그림 9. Kalinin NPP 연료다발 제염 구조

## 제 2 절 화학적제염기술

화학제염은 크게 강산을 사용한 제염법과 유기산을 사용하는 제염법이 사용된다. 질산, 황산, 염산 등의 강산은 활성금속을 제외하면 거의 모든 금속에 적용이 가능하며, 표면에 산화물 층이 형성되고 방사성 물질이 오염된 경우에 주로 사용한다. 비교적 저렴한 방법이지만 중화작업이 필요하며 작업 과정중 유독가스의 발생 가능성이 있다.

옥살산, 시트릭산 등의 유기산은 부식성이 적고 안전하며 취급이 용이하여 많이 사용되고 있으나 고온에서 분해되기 쉽고 폐기물처리가 어려운 단점이 있다.  $KMnO_4$ ,  $K_2Cr_2O_7$ ,  $H_2O_2$  등의 산화제는 산화막으로 오염된 금속표면 제염시 전처리를 위한 용도로 사용한다.

### 1. CAN-DECON

본 공정은 1970년대 초반에 캐나다 AECL에서 개발된 희석화학 제염공정이다. 주로 사용하는 화학제는 LND-101A 용액을 사용하며 표면에 부착된 방사성 산화물을 용해시키는 환원 유기산인 옥살산과 재침적을 막는 chelating agent의 혼합물로 구성되어 있다. 약품의 농도가 높고 냉각재에 직접 첨가하여 사용하며 제염 계통에서 배출하거나 물세정이 필요하지 않다. 입자상의 크러드는 필터로 여과시키고 용해된 크러드는 양이온 교환수지로 제거하여 제염제의 재활용이 가능하다는 특성이 있다[6].

## 2. LOMI

Low Oxidation-state Metal Ion(LOMI) 공정은 영국에서 개발된 공정으로서  $V^{2+}$  이온을  $V^{3+}$  이온으로 산화시키면서 부식생성물내의  $Fe^{3+}$  이온을 용해성이 강한  $Fe^{2+}$  이온으로 환원시키며, vanadium picolinate 형태의  $V^{+2}$ 를 이용하는 공정이다. 1990년 프랑스의 Dampierre NPP에서 수행된 증기발생기의 교체에서 사용하여 증기발생기 채널 헤드의 제염을 수행하였고 70 이상의 제염계수를 얻었다. 유기산을 사용하기 때문에 가압중수로의 계통에서 형성된 Cr 산화물은 제거하기 어려워 LOMI를 사용하기 전에 강산을 이용한 공정이 필요하다[6].

## 3. Alkaline Permanganate

제염제는  $KMnO_4$  (1,000 ppm)와  $NaOH$  (100 ppm)의 묽은 용액으로 구성되며, pH 10 ~ 11, 온도 95 °C에서 6 ~ 12시간 동안 반응시킨다. 크롬의 산화과정에서 생성되는  $MnO_2$ 의 침전물은 방사능 물질과 공침하는 성질이 있으며, 침전물이 계통에 침적되어 잔류하므로 산화단계에서는 상대적으로 낮은 제염계수, 환원단계에서는 높은 제염계수를 보이는 특성이 있는데 가장 큰 이유는  $MnO_2$ 의 재침적 현상 때문으로 밝혀졌다[6].

## 4. Nitric Permanganate

본 공정의 제염제는  $KMnO_4$ (1,000 ppm)와  $HNO_3$ (200 ppm)의 묽은 용액으로 구성되어 있으며, pH 3~4 온도 95 °C(200 °F)에서 4~6 시간동안 반응시킨다. 크롬산화물(chromium oxide)은  $MnO_4^-$ 에 의해 산화되어 AP의  $CrO_4^{2-}$ 이온이 아닌  $HCrO_4^-$  이온으로 용출된다. 산용액에서  $MnO_4^-$ 는 pH 10~11에서 보다 pH 2~3에서 더 강한 산화제로 작용하기 때문에 NP의 낮은 pH는 더 효율적인 산화를 가능하게 한다. 그러나 pH가 낮고 질산의  $NO_3^-$ 가 존재하므로 AP보다 부식정도가 더 심하다. 낮은 pH는  $MnO_4^-$ 의 자체분해를 촉진한다. 따라서, AP 공정을 사용하는 경우보다 NP를 사용할 경우 더 많은  $MnO_4^-$ 가 생성된다.

발생되는 산소는  $Cr_2O_3$ 의 산화를 촉진하기보다는 고온에서 기체의 용해도가 낮기

때문에 대기로 방출된다. 위와 같은 이유들로 인해 산화처리 단계에서 NP 산화처리보다는 AP 산화처리법을 선호하고 있다[6].

## 5. CORD-UV

프랑스 AREVA(독일 Siemens사 합병)에서 개발한 CORD는 Chemical Oxidation Reduction Decontamination을 의미하며, 유럽지역에서 많은 제염실적을 갖고 있는 원전 제염공정이다. 이 공정은 오존을 산화제로 사용한 OZOX 공정(OZone/OXalic acid)으로부터 출발했는데, 오존을 생산하여 필요한 농도를 조절하는 기술적인 어려움으로 인해 실 적용시는 Alkaline Permanganate가 산화제로 사용되었다. 1980년대 중반에 산화제를 permanganic acid로 대체하였고 이름을 CORD로 바꾸었다. 재생 가능한 공정이며 주요 4단계의 혼합공정으로 구성되는 제염 공정이다.

이 공정은 산화단계, 환원단계가 혼합되어 있으며, 산화단계에서는  $\text{KMnO}_4$  중의  $\text{K}^+$  이온을 양이온수지로 제거하여  $\text{HMnO}_4$ 를 조제함으로써 산화 제염 후 제염폐액중의  $\text{K}^+$  이온을 제거하는 과정에서 생성되는 폐수지 발생량을 줄일 수 있다. 마지막으로 옥살산을 광분해( $\text{UV-H}_2\text{O}_2$ ) 시킴으로써 방사성폐기물중 음이온수지의 발생량을 줄일 수 있다 [6].

## 6. Sulfuric Acid - Cerium

제염효과가 크고 한 단계로 금속표면제염을 완료할 수 있을 뿐만 아니라 제염제를 재사용함으로써 제염에 의한 2차 폐기물을 획기적으로 줄일 수 있는 SC 제염법을 일본에서 개발하였다.  $\text{Ce}^{4+}$  이온의 농도가 2~5 mM의 저농도 SC 용액은 해체 전 계통제염에 주로 사용되며, 50~100 mM의 고농도 SC 용액은 해체 후 부품 및 기기 제염에 사용되는데, 얻을 수 있는 제염계수는 1,000 정도로서 매우 효과적이다. 이 SC 제염법은 JPDR 해체 프로젝트 수행 중 해체 전 계통제염 및 해체 후 부품제염에 사용된 방법으로서 제염효과가 크고 제염에 의한 2차 폐기물이 적어 연구개발의 가치가 큰 것으로 확인되었다. 이 기술은 금속이온쌍의 산화환원력을 이용하는 방법으로  $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$  이온쌍의 산화력과 황산의 산용해능을 이용하는 공정이기 때문에  $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$  이온쌍의 산화환원특성은 제염효율이나  $\text{Ce}^{3+}$  이온을  $\text{Ce}^{4+}$  이온으로



재생시키는 데 큰 영향을 준다.

산화가가 높은 금속이온으로서  $Ce^{4+}$  이온이 선택되었고, 질산용액보다 황산에서  $Ce^{4+}$  이온의 안정성이 크다는 것이 입증되어 황산이 많이 사용된다. 제염중에 환원된  $Ce^{3+}$  이온은 재생조에서 산화되어  $Ce^{4+}$  이온으로 되는데, 이와 같이 제염제가 계속 재생되어 반복 사용됨으로써 제염효과의 향상은 물론 제염폐기물을 최소화시킬 수 있다[6].

## 7. DfD

Decontamination for Decommissioning의 의미인 DfD 제염공정은 1996년 EPRI에서 원전 해체를 위해 개발한 제염공정이며 1997년 미국 PNS사에서 상업용 허가를 획득하였다. EPRI DfD(해체 제염공정)라 불리는 이 공정은 모재 손상의 제한 없이 스테인레스강과 Alloy 600 즉 원전 금속구조물을 재사용하거나 비방사성 폐기물로 처분시키기 위한 제염공정이며, 다른 금속에도 적용될 수 있다. 1,000이상의 제염 계수로 오염 수준을 주위수준으로 저감할 수 있다. 이 공정은 폐기물의 처리를 위해 일반적인 처리장치와 기존의 이온교환기술을 사용한다.

EPRI DfD 공정은 이미 미국의 재가동 전에 있는 여러 소형 펌프의 제염에 성공적으로 이용되었으며, 향후 원자로 냉각재펌프의 제염 시 활용할 계획이다. 이 공정은 불소화 붕산을 산화제로 사용하고 있으며, 초기에 계통은 탈염수로 채워지고 선택한 경로를 통해서 순환이 이루어진다.

가장 최근에 제염을 수행한 실적이 있는 Alaron Co. 는 EPRI DfD를 이용하여 총 12개의 스테인레스강 열교환기를 제염하였다. 이 열교환기의 무게는 약 3,500 kg이며 초기 방사선 수준은 5~10 mSv/hr로 4대 열교환기의 방사선 수준을 규제를 받지 않고 반출할 수 있는 정도의 준위까지 낮추기 위해 충분한 횟수의 EPRI DfD공정이 적용되었다. 제염 완료후 표면분사 및 문지름 제염 등의 국부제염을 실시하여 열교환기 총무게의 90%까지는 제약을 받지 않고 반출할 수 있게 하였다[6].

이상에서 설명한 화학제염 공정별 특성비교는 아래 표 4에 제시하였다.



표 4. 화학제염 공정별 특성 비교

제 염 방 법		CAN-DECON 법	LOMI 법	CORD 법	SC 제염공정
개 요		캐나다 AECL 개발	영국 CEGB의 백레이 원자력 연구소 개발	프랑스 AREVA 개발	일본 원자력연구소 개발
제 염 조 건	농도(%)	0.1	0.2 ~ 0.3	0.2	2.5
	pH	2.5	4.8	0.7 ~ 2.5	< 1.0
	온도(℃)	95 ~ 120	70 ~ 90	95	80
	시간(hr)	15 ~ 74	3 ~ 10	3 ~ 5/Cycle	48 ~ 72
제염제의 조성		EDTA, 구연산, 옥살산	바나든티콜리네이트, 포름산	옥살산, 과망간산 (산화처리)	황산(0.25M), 세륨(Ce <sup>4</sup> 2mM)
제염계수		7	10 이상	10 이상 (20 ~ 40이상치)	100 ~ 1000
폐 기 물 처 리	폐기물 처리방법	이온교환수지에 의한 정화처리	좌동	자외선과 산화제에 의한 분해, 정화	농축폐액, 농축고화
	폐기물 발생량	제염대상 용적의 1/3정도의 폐수지량, 기타(필터)	제염대상 용적의 약 1/10 정도의 폐수지량 기타 (필터)	감용비 약 1/30 (폐수지로)	JPDR실적 드럼통 4.5개(제염 대상 용적 2.3m <sup>3</sup> )
제염대상		재순환계통, 원자로 정화계통, 열교환기, 재순환펌프 전 계통 제염, S/G 수실	재순환 및 원자로 냉각재, 재순환계통, S/G 수실	원자로 용기 배수관 재순환 계통, 재순화 펌프, RCP 및 일차계통 배관	연구용 원자로 해체 전 강제 순환계통, 해체 금속 스크랩
문제점과 과제		옥살산의 부식성이 문제됨	제염제의 취급 및 제염중의 유지 관리(용액산소)가 어려움	옥살산 분해시 CO <sub>2</sub> 및 MnO <sub>2</sub> 의 처리기술 필요	폐액처리의 부가 설비가 많고, 넓은 장소가 필요하며 공정도 복잡함

### 제 3 절 전해제염기술

방사성물질에 의해 표면이 오염된 금속폐기물의 효과적인 제염공정으로는 물리적 제염, 화학적 제염 및 전해제염기술이 있는데, 이중 전해제염 기술은 전기적인 특성과 화학적인 특성을 복합적으로 이용하여 제염하는 것으로 부식 산화물 내에 고착된 오염물의 제거 효과가 뛰어나고 일반 화학제염에 비해 제염 적용시간이 짧으며, 제염능력이 우수하여 실용화 가능성이 큰 기술이다. 또한 전해제염공정은 화학제염에 비해 발생하는 2차 폐액의 양이 상대적으로 적고 또한 폐액 처리공정을 잘 적용한다면 재순환도 가능하여 2차 폐기물의 발생을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

전해제염의 전해액 종류는 무기산 전해액, 유기산 전해액, 중성염 전해액으로 구분되며 무기산 전해액으로는 인산, 황산, 질산이 있고, 유기산 전해액으로 아세트산, 구연산, 옥살산, 또는 이들 혼합물 등이 있으며 중성염 용액으로는 황산나트륨과 질산나트륨 등이 사용된다. 저농도의 황산전해액은 인산전해액보다 제염효과는 좋으나 제염 후 표면이 거칠다. 고농도 인산전해액은 제염효과는 크고 재오염이 최소화되나 2차 폐기물 발생량이 크다. 따라서 2차 폐기물의 재생이나 처리가 더욱 용이한 전해액으로서 황산이나 인산염에 대체할 새로운 전해질 개발이 필요하다. 황산나트륨이나 질산나트륨 등과 같은 기타 전해질이 인산이나 황산을 대체할 수 있는 전해질로서 연구되고 있다. 유기산 혼합액은 Co-60의 불용성 침전물을 형성시켜 2차 폐액의 감용효과가 크나 침전에 의해 소모되는 Acetylacetone을 제염 중 연속하여 공급하여야만 한다. 전해 제염액의 종류와 공정별 특성은 표 5와 같다[6].

표 5. 전해 제염액의 종류 및 공정별 특성 분석

제염공정 항목	조업조건	특 징	폐기물발생량	비 고
인산전해액	-전해액 농도: 40-80% -온도: 40-80℃ -전압: 8-12V DC -전류: 60-270 mA/cm <sup>2</sup>	-인산이 착화능을 가져 전해액내 방사능 농도 누적시 재오염 최소화	-산농도가 높아 폐액감용효과 없음 -2차폐기물 발생량이 많음	-미국 PNL 수행
질산전해액	-전해액농도: 6-12M -온도: 10-35℃ -전압: 5-8VDC -전류: 400-2000 mA/cm <sup>2</sup>	-Mist 등과 같은 aerosol 문제 해결 -두 종류의 조업방식 사용: 고전류밀도/저전류밀도 조업	-기존 재처리시설의 질산폐액 처리시설 활용으로 감용효과 얻음	-영국 Harwell에서 수행
황산전해액	-전해액농도: 5-10% -온도: 60℃ -전압: 10 VDC -전극간거리: 20 mm	-저농도의 전해액 사용	-인산 전해액에 비해 큰 감용효과 -증발농축으로 2차폐액 양이 적음	-일본 JAERI
중성염용액/ 교번 전류전해법	-Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 전해액 -온도: 20-60℃ -전압: 8-10 VDC -전극간거리: 50 mm	-공정적용이 용이 -사각파형교류전류 -최적주기: 90 초(음극 60초/양극 30초)	-방사성 오염물이 수산화물형태로 침전되어 슬러지 제거 -큰 감용효과 (기존인산전해액의 1/30)	-일본 Hitachi사
유기산혼합 용액	-Ac(5%)+KBr(0.5 M) -온도 : 20-40℃ -전압: 15-24 VDC -전류: 200 mA/cm <sup>2</sup>	-침전에 의해 소모되는 Acetylacetone은 제염중 연속공급	-불용성 침전물형성으로 2차폐액 처리 용이 -폐기물양 : 약1.1 l /m <sup>2</sup> (표면제염)	-서독의 Kraftanlagen 수행

## 제 4 절 잔류방사능 계측

원자력시설에서 발생하는 금속폐기물은 그 시설의 사용처에 따라 다양한 방사성 핵종들이 포함되어 있다. 그러나 대부분의 핵종 들은 반감기가 짧아 검출이 거의 불가능하거나 자체처분에 따른 방사선 위험도가 매우 낮기 때문에 폐기물에 포함되어 있을 것으로 추정되는 모든 방사성핵종을 측정하는 것은 바람직하지 않으며, 방사선 안전측면에서 필요한 방사성핵종을 선정하는 것이 중요하다.

한편 규제기관에서는 방사성폐기물 자체처분과 관련한 핵종 분석에 대해 다음과 같이 요구하고 있다.

- 자체처분 대상 폐기물의 대표 시료에 대하여 감마핵종분석이 수행되어야 한다.
- 전베타 및 전알파 방사능에 대한 분석이 수행되어야 한다. 단, 가장 높은 감마핵종 농도를 나타낸 시료에 대한 전베타 및 전 알파 방사능 분석결과를 동일한 계통에서 발생된 동일한 종류의 폐기물에 대하여 준용할 수 있다.
- 감마핵종 분석결과 검출된 핵종의 모핵종 또는 자핵종이 베타 또는 알파 방출 핵종으로 판명되는 경우, 모핵종 또는 자핵종에 대한 핵종분석이 수행되어야 한다.
- 폐유 및 공정폐기물의 경우, C-14 및 H-3에 대한 핵종분석이 추가로 수행되어야 한다. 그러나 2차 계통에서 발생된 공정폐기물의 경우 가장 높은 감마 핵종 농도를 나타낸 시료에 대한 C-14 및 H-3 분석결과를 동일한 계통에서 발생된 동일한 종류의 폐기물에 대하여 준용할 수 있다.
- 특히, 자체처분 대상 폐기물이 발생된 기간 중 시설 운전이력에 대한 검토를 통하여 핵연료 손상, 2차 계통 오염 및 기타 특이사항이 발생하는 경우, 알파 및 베타 방출 핵종에 대한 분석을 강화하여야 한다.

따라서 상기 요건과 콘크리트나, 금속 폐기물 등 재활용 대상이 되는 폐기물의 오염 특성을 고려하여 재활용을 위해 분석하여야 할 대상 방사성 핵종들의 기준을 다음과 같다.

- 핵분열 생성물질로서 핵연료 손상 시 냉각재로 빠져나와 1차 계통 금속 표면에 침착이 가능한 핵종 : Cs, Ce, Nb, Sb, Se, Sr, Tc, Ru, Pm
- 방사화 부식 생성물 : Co, Fe, Ni, Zn, Mn
- 콘크리트나 기기, 구조물 등의 중성자 방사화 생성물 : Ca, Cl, Na, Eu
- 반감기가 1년 이상이거나 1년 이하라도 source term 측면에서 중요한 핵종
- 비휘발성일 것
- 핵연료의 중성자 포획에 의해 생성된 Actinide 및 그 붕괴 생성물

위의 기준에 의해 분석 대상 핵종을 구해보면 반감기가 1년 미만인 일부 핵종들의 당위성에 대해서는 논란의 여지가 있지만 재활용에 따른 피폭선량 평가에 사용되는 전산 코드인 RESRAD-RECYCLE에 제시되어 있는 핵종 즉, 53개의 방사성동위원소와 일치된다. 이들 53개 핵종들의 반감기 및 붕괴 특성 등은 표 6과 같다.

표 6에 따르면 분석 대상이 되는 핵종을 크게 알파 및 베타 붕괴 후 감마선을 방출하는 핵종과 순수 베타 및 알파 붕괴만을 하는 핵종으로 분류할 수 있다.

## 1. 감마핵종 분석

총 53개 핵종 중에 알파 붕괴 후 감마선을 방출하는 핵종은 11개 핵종이며 베타 붕괴 후에 감마선을 방출하는 핵종은 14개 핵종으로 모두 25개의 핵종이 감마 스펙트로미터를 이용하여 손쉽게 각 핵종에 대한 방사능을 정량할 수 있다. 감마 스펙트로미터로 측정할 수 있는 감마 분석 대상 핵종에 대한 각 에너지 및 붕괴 당 강도를 표 6으로부터 다시 정리해 보면 표 7과 같다[7].

## 2. 알파핵종 분석

총 53개 핵종중에 알파 붕괴를 하는 핵종은 모두 25개로 이중 붕괴 후 감마선을 방출하지 않는 핵종은 16개이며 9개의 핵종은 감마선 스펙트로미터로 측정이 가능하다. 16개의 순수 알파 핵종은 감마 핵종 분석과 마찬가지로 알파 붕괴를 하는 핵종의 방사능도 알파 스펙트로미터를 이용하여 구할 수 있다. 또한, 다음 항에 나타낸 유도 결합 플라즈마 질량분석법(ICP-MS)에 의해 구할 수도 있다. 알파 핵종 분석 대상 핵종과 각 에너지와 붕괴당 강도는 표 8과 같다[7].

## 3. 베타핵종 분석

핵종 분석에서 가장 어려운 분석이 감마선이나 특성 X선을 방출하지 않고 베타 붕괴만을 하는 핵종이다. 특히, 감마선을 방출하지 않고 전자 포획에 의한 특성 X선을 방출하지 않는 베타 핵종은 감마선을 내는 핵종과 달리 계측기를 이용한 직접적인 분석이 곤란하여 화학적으로 분리하여 정량분석을 하여야 한다. 특성 X선을 방출하는 핵종은 비교적 낮은 에너지의 X선을 방출하지만, 저에너지 측정용 감마 스펙트로미터나 X선 스펙트로미터를 사용하여 정량할 수 있다.

분석 대상으로 제시한 베타 핵종은 모두 12개 핵종(표 9 참조)으로 기본적으로 이들 핵종은 모두 화학적인 분리 공정을 수행하여 원하는 핵종을 분리한 후 방사선 계측기를 이용하여 분석하여야 한다. 다만, 이들 핵종 중에 전자 포획에 의한 특성 X선을 방출하기 때문에 X선이나 저에너지 감마선 스펙트로미터로 Ca-41, Fe-55 및 Ni-59 3개의 핵종이 측정 가능할 것으로 보이나, 그 이외 8가지 핵종(Ru-106 제외, 이 핵종은 방사평형을 이용하여 측정 가능함)은 화학적인 분리 후 액체신틸레이션으로 측정하여야만 대상 핵종의 방사능을 구할 수 있다[7].

표 6. 분석 대상 핵종 및 특성

동위원소	반감기 (년)	붕괴특성	비 고(keV, %)
Ac-227	2.2E+01	$\alpha$ , $\beta^-$	알파붕괴 : 4940.7(39.6), 4953.26(47.7)
Ag-110m	6.8E-01	EC	감마선방출 : 665.54(86)
Am-241	4.3E+02	$\alpha$ , SF	감마선방출 : 26.3448(2.40), 59.5412(35.9) 알파붕괴 : 5485.56(84.5), 5442.8(13.0)
Am-243	7.4E+03	$\alpha$ , SF	감마선방출 : 43.533(5.93), 74.664(68) 알파붕괴 : 5233.3(11.0), 5275.3(87.4)
Ca-41	1.0E+05	EC	특성X선 방출 : 3.311(3.9), 3.314(7.8)
Ce-144	284 d	$\beta^-$	감마선방출 : 133.515(11.09)
Cl-36	3.0E+05	EC, $\beta^-$	순수 베타 붕괴
Cm-243	2.9E+01	$\alpha$ , SF	알파붕괴 : 5785.2(72.9), 5742.1(11.5), 5991.8(5.7), 6058(4.7) 감마선방출 : 277.599(14.0), 228.183(10.6), 209.753(3.29)
Cm-244	1.8E+01	$\alpha$ , SF	알파붕괴 : 5804.8(76.4), 5762.7(23.6)
Cm-245	8.5E+03	$\alpha$ , SF	알파붕괴 : 5362.0(93.2), 5303.8(5.0) 감마선방출 : 174.94(10), 132.99(2.77)
Cm-246	4.7E+03	$\alpha$ , SF	알파 붕괴 : 5386.5(82.2), 5343.5(17.8)
Cm-247	1.6E+07	$\alpha$	알파붕괴 : 4870(71.0), 5267(13.8), 5212(5.7), 4820(4.7) 감마선방출 : 402.6(72), 278.0(3.4), 287.4 (2.0), 344.5(1.3)

표 6. 분석 대상 핵종 및 특성(계속)

동위원소	반감기 (년)	붕괴 특성	비 고(keV, %)
Co-57	272 d	EC	감마선방출 : 122.0614(85.60), 136.4743(10.687)
Co-60	5.3E+00	$\beta^-$	감마선방출 : 1173.237(99.9736), 1332.501(99.9856)
Cs-134	2.1E+00	$\beta^-$ , EC	감마선방출 : 604.721(97.62), 795.864(85.53)
Cs-135	2.3E+06	$\beta^-$	순수 베타 붕괴
Cs-137	3.0E+01	$\beta^-$	감마선방출 : 661.657(85.1)
Eu-152	1.3E+01	EC, $\beta^-$	감마선 방출 : 121.78(28.58), 344.28(26.5), 1408.00(21.0), 964.08(14.61), 1112.07(13.6), 778.9(12.9), 1085.87(10.2)
Eu-154	8.6E+00	EC, $\beta^-$	감마선방출 : 123.07(40.79), 1274.44(35.19), 723.30(20.22), 1004.73(18.01), 873.190(12.27), 996.26(10.6)
Fe-55	2.7E+00	EC	특성X선방출 : 5.888(8.5), 5.899(16.9)
Mn-54	8.6E-01	EC, $\beta^-$	감마선방출 : 834.848(99.976)
Na-22	2.6E+00	EC	감마선방출 : 1274.53(99.944)
Nb-94	2.0E+04	$\beta^-$	감마선방출 : 702.622(97.9), 871.091(100)
Ni-59	7.5E+04	EC	특성X선방출 : 6.930(20.4), 6.915(10.4), 7.649 (2.45)
Ni-63	1.0E+02	$\beta^-$	순수 베타 붕괴
Np-237	2.1E+06	$\alpha$ , SF	감마선방출 : 29.37(15.0), 86.477(12.4)

표 6. 분석 대상 핵종 및 특성 (계속)

동위원소	반감기 (년)	붕괴 특성	비 고(keV, %)
Pa-231	3.3E+04	$\alpha$ , SF	알파붕괴 : 5013.8(25.4), 4591.3(22.8), 5028.4(20.0), 5058.6(11.0), 4736.0(8.4) 감마선방출 : 27.36(10.3)
Pb-210	2.2E+01	$\alpha$ , $\beta^-$	알파붕괴 : 3720(100) 감마선방출 : 46.539(4.25)
Pm-147	2.6E+00	$\beta^-$	순수 베타 붕괴
Pu-238	8.8E+01	$\alpha$ , SF	알파붕괴 : 5499.0(70.91), 5456.3(28.98)
Pu-239	2.4E+04	$\alpha$ , SF	알파붕괴 : 5156.59(73.3), 5144.3(15.1), 5105.5(11.5)
Pu-240	6.6E+03	$\alpha$ , SF	알파붕괴 : 5168.2(72.8), 5123.7(27.1)
Pu-241	1.4E+01	$\alpha$ , SF, $\beta^-$	알파붕괴 : 4853.0(12.2), 4896.3(83.2)
Pu-242	3.7E+05	$\alpha$ , SF	알파붕괴 : 4900.1(77.5), 4856.2(22.4 %)
Ra-226	1.6E+03	$\alpha$	감마선방출 : 186.211(3.59)
Ru-106	1.0E+00	$\beta^-$	순수 베타 붕괴
Sb-125	2.8E+00	$\beta^-$	감마선방출 : 427.88(30), 600.6(17.86), 635.95(11.31), 463.37(10.49)
Se-79	6.5E+05	$\beta^-$	순수 베타 붕괴
Sm-151	9.0E+1	$\beta^-$	순수 베타 붕괴
Sr-90	2.9E+01	$\beta^-$	순수 베타 붕괴
Tc-99	2.1E+05	$\beta^-$	순수 베타 붕괴
Th-228	1.9E+00	$\alpha$	알파붕괴 : 5340.4(72.2), 5423.2(27.2)



표 6. 분석 대상 핵종 및 특성 (계속)

동위원소	반감기 (년)	붕괴특성	비 고(keV, %)
Th-229	7.3E+03	$\alpha$	감마선방출 : 193.509(4.4), 210.853(2.8), 136.990(1.18) 알파붕괴 : 4845.3(56.2), 4901.0(10.20), 4814.6(9.30), 5053(6.6), 4967.5(5.97)
Th-230	7.5E+04	$\alpha$ , SF	알파붕괴 : 4687.0(76.3), 4620.5(23.4)
Th-232	1.4E+10	$\alpha$ , SF	알파붕괴 : 4.012.3(78.2), 3947.2(21.7)
U-232	6.9E+01	$\alpha$	알파붕괴 : 5320.1(68.15), 5263.4(31.55)
U-233	1.6E+05	$\alpha$ , SF	알파붕괴 : 4824.2(84.4), 4783.5(13.2)
U-234	2.5E+05	$\alpha$ , SF	알파붕괴 : 4774.6(71.38), 4722.4(28.42)
U-235	7.0E+08	$\alpha$ , SF	감마선방출 : 185.71(57.2), 143.76(10.96), 163.36(5.08), 205.309(5.01) 알파붕괴 : 4397.8(55), 4366.1(17), 4596.4(5.0)
U-236	2.3E+07	$\alpha$ , SF	알파붕괴 : 4494(73.8), 4445(25.9)
U-238	4.5E+09	$\alpha$ , SF	알파붕괴 : 4198(79.0), 4151(20.9)
Zn-65	244 d	EC	감마선방출 : 1115.55(50.60)
Zr-93	1.5E+06	$\beta^-$	감마선방출 : 30.77(100)

표 7. 분석 대상 감마 핵종

번호	동위원소	에너지(KeV)	Intensity(%)
1	Ag-110m	665.5	86
2	Am-241*	59.54, 26.3448	35.9, 2.40
3	Am-243*	43.533, 76.664	5.93, 68
4	Ce-144	133.5	11.1
5	Cm-243	277.599, 228.183, 209.753	14.0, 10.6, 3.29
6	Cm-245	174.94, 132.99	10.0, 2.77
7	Cm-247	402.6, 278.0, 287.4, 344.5	72, 3.4, 2.0, 1.3
8	Co-57	122.06, 136.47	85.4, 10.8
9	Co-60	1173.2, 1332.5	99.89, 99.98
10	Cs-134	604.6, 795.0	97.50, 85.08
11	Cs-137	661.6	85.2
12	Eu-152	121.78, 344.30, 1408.08, 964.08, 1112.07, 778.9, 1085.87	28.58, 26.5, 21.0, 14.61, 13.6, 12.9, 10.2
13	Eu-154	123.1, 1274.4, 723.30, 1004.73, 873.19	40.1, 35.2, 20.22, 18.01, 12.27, 10.6
14	Mn-54	834.8	99.98
15	Na-22	1274.5	99.94
16	Nb-94	702.6, 871.1	97.9, 100
17	Np-237*	29.37, 86.48	15.0, 12.4
18	Pa-231*	27.36	10.3
19	Pb-210*	46.539	4.25
20	Ra-226	186.2	3.59
21	Sb-125	427.9, 600.6, 635.95, 463.4	30, 17.86, 11.31, 10.49
22	Th-229	193.509, 210.853, 136.990	4.4, 2.8, 1.18
23	U-235	185.7, 143.76, 163.36, 205.31	57.2, 10.96, 5.08, 5.01
24	Zn-65	1115.5	50.60
25	Zr-93*	30.77	100

표 8. 분석 대상 알파 핵종

번호	동위 원소	에너지 (KeV)	Intensity(%)
1	Ac-227	4940.7, 4953.26	39.6, 47.7
2	Am-241*	5485.56, 5442.8	84.5, 13.0
3	Am-243*	5275.3, 5233.3	87.4, 11
4	Cm-243*	5785.2, 5742.1, 5991.8, 6058	72.9, 11.5, 5.7, 4.7
5	Cm-244	5804.8, 5762.7	76.4, 23.6
6	Cm-245*	5362.0, 5303.8	93.2, 5.0
7	Cm-246	5386.5, 5343.5	82.2, 17.8
8	Cm-247*	4870, 5267, 5212, 4820	71.0, 13.8, 5.7, 4.7
9	Pa-231*	5013.8, 4591.3, 5028.4, 5058.6, 4736.0	25.4, 22.8, 20.0, 11.0, 8.4
10	Pb-210*	3720	100
11	Pu-238	5499.0, 5456.3	70.9, 29.0
12	Pu-239	5156.59, 5144.3, 5105.5	73.3, 15.1, 11.5
13	Pu-240	5168.2, 5123.7	72.8, 27.1
14	Pu-241	4896.3, 4853.0	83.2, 12.2
15	Pu-242	4900.1, 4856.2	77.5, 22.4
16	Th-228	5340.4, 5423.2	72.2, 27.2
17	Th-229*	4845.3, 4901.0, 4814.6, 5053, 4967.5	56.2, 10.2, 9.3, 6.6, 5.97
18	Th-230	4687.0, 4620.5	76.3, 23.4
19	Th-232	4.012.3, 3947.2	78.2, 21.7
20	U-232	5320.1, 5263.4	68.2, 31.6
21	U-233	4824.2, 4783.5	84.4, 13.2
22	U-234	4774.6, 4722.4	71.4, 28.4
23	U-235*	4397.8, 4366.1, 4596.4	55, 17, 5.0
24	U-236	4494, 4445	73.8, 25.9
25	U-238	4198, 4151	79.0, 20.9

\* : 감마스펙트로미터로 측정 가능

표 9. 분석 대상 베타핵종 및 측정 방법

번호	동위원소	붕괴 특성	측 정 방 법(keV, %)
1	Ca-41	EC	화학적 분리 후 액체 신틸레이션 또는 X선 스펙트로미터[3.311(3.9), 3.314(7.8)]
2	Cl-36	EC, $\beta^-$	화학적 분리 후 액체 신틸레이션
3	Cs-135	$\beta^-$	화학적 분리 후 액체 신틸레이션
4	Fe-55	EC	화학적 분리 후 액체 신틸레이션 또는 X선 스펙트로미터[5.888(8.5), 5.899(16.9)]
5	Ni-59	EC	화학적 분리 후 액체 신틸레이션 또는 X선 스펙트로미터[6.930(20.4), 6.915(10.4), 7.649(2.45)]
6	Ni-63	$\beta^-$	화학적 분리 후 액체 신틸레이션
7	Pm-147	$\beta^-$	화학적 분리 후 액체 신틸레이션
8	Ru-106	$\beta^-$	Rh-106(방사평형)으로 측정 가능
9	Se-79	$\beta^-$	화학적 분리 후 액체 신틸레이션
10	Sm-151	$\beta^-$	화학적 분리 후 액체 신틸레이션
11	Sr-90	$\beta^-$	화학적 분리 후 액체 신틸레이션
12	Tc-99	$\beta^-$	화학적 분리 후 액체 신틸레이션

## 제 4 장 연구방법

### 제 1 절 평가 코드 및 입력인자 분석

#### 1. 개요

RESRAD-RECYCLE 전산코드는 규제해제된 철재와 알루미늄의 재활용 및 재이용 과정에서 유발되는 방사선학적 영향을 평가하기 위한 목적으로 US DOE (Department of Energy)의 지원으로 ANL (Argonne National Laboratory)의 EAD (Environmental Assessment Division)에서 2003년 개발하였다. 그림 10은 RESRAD-RECYCLE의 재활용 절차 개념도를 나타낸다. RESRAD-RECYCLE 전산코드는 금속성 방사성폐기물의 수집·운반·처리작업자(Worker)와 소비자 및 공공재를 이용하는 일반인(Public)에 대해서 총 41개의 시나리오와 54개의 핵종에 대해서 잠재 피폭선량 및 위험도를 평가할 수 있다.

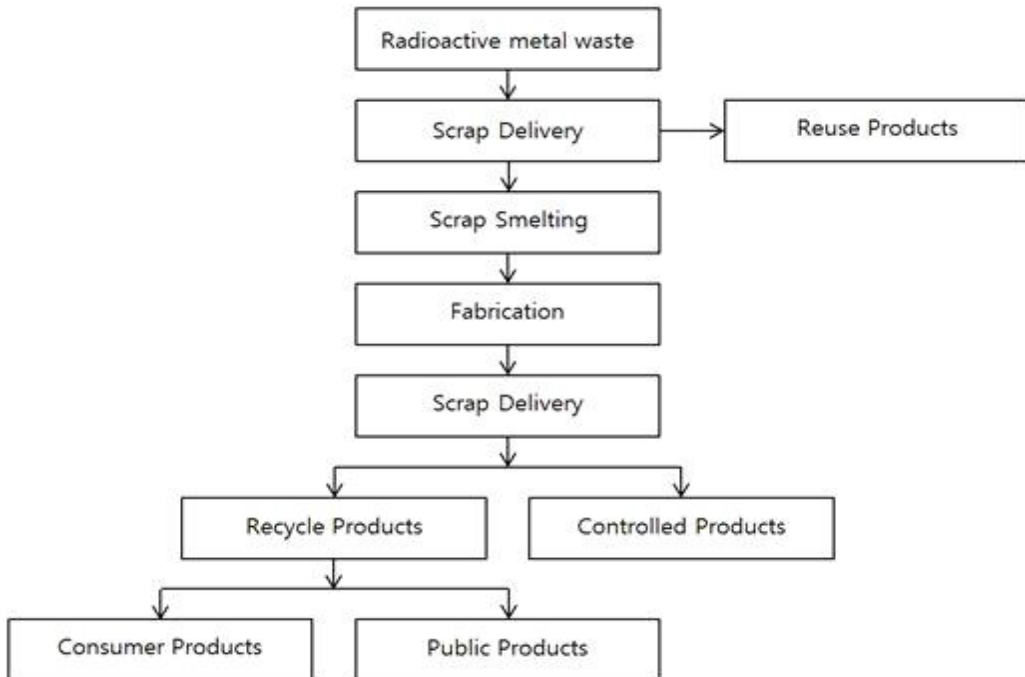


그림 10. RESRAD-RECYCLE 전산코드의 재활용 절차 개념도

## 2. 기본 입력인자 분석

### 1) 금속폐기물 재활용시나리오 선정 및 평가

자체처분 별도 승인을 받기 위해서는 방사성 금속 스크랩의 재활용 및 재사용으로 인해 발생하는 잠재적 피폭선량 및 위해도를 IAEA-SS-111-P-1.1 피폭 시나리오를 고려하여 계산하여야 한다. 이러한 목적으로 개발된 전산도구가 바로 RESRAD-RECYCLE 코드로서 본 연구에서는 RESRAD-RECYCLE 시나리오를 분석하여 작업자나 주민이 받을 수 있는 방사선적 영향평가의 적합성을 검토, 평가하고 IAEA-SS-111-P-1.1과 RESRAD-RECYCLE에서 제시한 피폭 시나리오 및 선량평가에 사용된 입력변수들을 비교, 검토하였다.

국내의 경우 방사성물질로 오염된 금속물을 철강산업에 재활용한 전례가 없으므로 재활용으로 인한 방사능 영향을 평가하고 이의 안전성을 입증하기 위해서는 방사성 피폭을 유발할 것으로 예상되는 모든 피폭경로를 조사하고, 이를 적절히 분류하여 평가하는 작업이 요구된다. 따라서 본 절에서는, 금속폐기물 재활용에 따른 피폭방사선량 평가시 IAEA-SS-111-P-1.1에 기술된 피폭경로 및 시나리오를 고려하기 위하여 규제기관에서 검증 계산 시 적용 예정인 RESRAD-RECYCLE 코드에서 제시한 시나리오 및 선량평가를 위한 기본 입력자료를 비교, 분석하였다.

시나리오 비교 결과 RESRAD-RECYCLE 코드의 경우 스크랩 용융 단계에서 백하우스 프로세서 과정과 제련 작업자 과정을 고려한 반면 IAEA-SS-111-P-1.1는 주괴 제작에 있어 용광로를 100 톤의 대형 용광로와 10 톤의 소형 용광로로 나누기 때문에 선적자 2와 운영자 2를 추가로 고려하였다. 또한, RESRAD-RECYCLE 코드는 생산품 운반 과정에서 주민이 받을 수 있는 피폭을 고려한 반면 IAEA-SS-111-P-1.1은 규제 해제되는 금속의 용융 등의 재활용 과정에서 유발될 수 있는 배기체의 풍하 방향에서의 선량평가를 고려하였다. 이 외에 고려사항은 두 시나리오가 대체로 일치하는 경향을 보여주었다.

IAEA-SS-111-P-1.1과 RESRAD-RECYCLE 코드에서 고려된 방사성핵종과 선량환산인자는 표 10과 같다.

IAEA-SS-111-P-1.1과 RESRAD-RECYCLE 코드에서 공통으로 고려한 방사성핵종과 선량환산인자는 표 11과 같다[7].

표 10. IAEA-SS-111-P-1.1과 RESRAD-RECYCLE 코드의 평가 방사성 핵종 및 선량 환산인자 비교

	RESRAD-RECYCLE	IAEA-SS-111-P-1.1
방사성 핵종	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 53개 핵종</li> <li>· Th-232 이상의 반감기(1.41E+10 년 이상)를 갖는 방사성핵종들은 본 분석에서 제외</li> <li>· 방사성 스크랩 금속 내에서 영향이 큰 Zn-65와 Mn-54를 제외한 1년 미만의 방사성핵종은 제외.</li> <li>· 선량계산시 핵종 붕괴 사슬을 통하여 딸핵종까지 포함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 16개 참고 핵종</li> <li>· 4개의 방사성 핵종 그룹으로 구분</li> </ul>
선량 환산 인자	Federal Guidance Report 11 (EPA 1988)	다양한 에너지 그룹에 대한 선량환산인자제공 (ICRP-30)

표 11. IAEA-SS-111-P-1.1과 RESRAD-RECYCLE 코드의 내부선량환산인자 비교

Radionuclide	섭취 당 예탁유효선량당량 (RESRAD-RECYCLE)		섭취 당 예탁유효선량당량 (IAEA-SS-111-P-1.1)	
	흡 입 (Sv/Bq)	섭 취 (Sv/Bq)	흡 입 (Sv/Bq)	섭 취 (Sv/Bq)
Cl-36	$5.93 \times 10^{-9}$	$8.18 \times 10^{-10}$	$5.5 \times 10^{-9}$	$8.2 \times 10^{-10}$
Ca-41	$3.64 \times 10^{-10}$	$3.44 \times 10^{-10}$	$3.5 \times 10^{-10}$	$3.3 \times 10^{-10}$
Mn-54	$1.81 \times 10^{-9}$	$7.48 \times 10^{-10}$	$1.7 \times 10^{-9}$	$7.3 \times 10^{-10}$
Fe-55	$7.26 \times 10^{-10}$	$1.64 \times 10^{-10}$	$6.9 \times 10^{-10}$	$1.6 \times 10^{-10}$
Co-60	$5.91 \times 10^{-8}$	$7.28 \times 10^{-9}$	$4.1 \times 10^{-8}$	$7.0 \times 10^{-9}$
Ni-63	$1.70 \times 10^{-9}$	$1.56 \times 10^{-10}$	$8.4 \times 10^{-10}$	$1.0 \times 10^{-10}$
Zn-65	$5.51 \times 10^{-9}$	$3.90 \times 10^{-9}$	$5.0 \times 10^{-9}$	$3.9 \times 10^{-9}$
Sr-90	$3.54 \times 10^{-7}$	$4.13 \times 10^{-8}$	$3.4 \times 10^{-7}$	$4.0 \times 10^{-8}$
Nb-94	$1.12 \times 10^{-7}$	$1.93 \times 10^{-9}$	$9.0 \times 10^{-8}$	$1.4 \times 10^{-9}$
Tc-99	$2.25 \times 10^{-9}$	$3.95 \times 10^{-10}$	$2.4 \times 10^{-9}$	$3.0 \times 10^{-10}$
Cs-137	$8.63 \times 10^{-9}$	$1.35 \times 10^{-8}$	$8.7 \times 10^{-9}$	$1.4 \times 10^{-8}$
Eu-152	$5.97 \times 10^{-8}$	$1.75 \times 10^{-9}$	$5.9 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-9}$
U-238	$3.20 \times 10^{-5}$	$7.27 \times 10^{-8}$	$3.2 \times 10^{-5}$	$6.9 \times 10^{-8}$
Pu-239	$1.16 \times 10^{-4}$	$9.56 \times 10^{-7}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$9.6 \times 10^{-7}$
Pu-241	$2.23 \times 10^{-6}$	$1.85 \times 10^{-8}$	$2.2 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-8}$
Am-241	$1.20 \times 10^{-4}$	$9.84 \times 10^{-7}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$9.8 \times 10^{-7}$

위의 표 11에서 보듯이 Federal Guidance Report 11(EPA 1988)로부터 인용된 RESRAD-RECYCLE 코드의 내부 선량환산인자와 ICRP-30으로부터 인용된 IAEA-SS-111-P-1.1의 내부 선량환산인자는 대체로 일치하는 값을 나타냈다. 또한 IAEA-SS-111-P-1.1에서 고려한 16개의 방사성 핵종과 고려하지 않은 나머지 37개 핵종에 대해서도 RESRAD-RECYCLE 코드에서 모두 고려하고 있으므로 작업자 및 주민이 받을 수 있는 예상 피폭방사선량 평가에 RESRAD-RECYCLE 코드의 적용이 적합하다고 판단된다.

## 2) RESRAD-RECYCLE 전산코드 시나리오

RESRAD-RECYCLE 전산코드는 방사성 폐기물을 자체처분 하는 공정에서 발생하는 작업자의 피폭선량과 소비재와 공공재의 유통에서 발생하는 일반인의 피폭 선량을 평가하는 코드이다. 평가를 위해 코드 내에 자체처분 작업공정과 일반인이 사용하는 최종 생산품 별로 시나리오가 구성되어있다. RESRAD-RECYCLE 전산코드의 세부 시나리오는 표 12에 제시하였다[8].



표 12. RESRAD-RECYCLE 전산코드의 시나리오

재활용 단계	시나리오	재활용 단계	시나리오
철재류운반	절단작업자	생산품유통	적하작업자
	적하작업자		트럭운전자
	트럭운전자		판재조립작업자
철재류취급자	작업장작업자		
철강용융	야적장취급자	소비재	주차장
	용융로적하작업자		방/사무실
	용융로운전자		가정용품
	분진여과기취급자		자동차
	정련작업자		선박
	강괴주조작업자		사무용가구
	소모품주조작업자		가정용가구
	슬래그작업자		프라이팬
강괴운반	적하작업자	공공재	음료수캔
	트럭운전자		도로포장
	야적장작업자		건물(철근)
초기가공	판재제조자		제한적재활용
	코일제조자	교량	
	판재취급자	차폐체	
최종가공	판재취급자	재이용	폐기물용기
	코일취급자		장비
			건물

### 3. 재활용 시나리오

본 연구에서는 총 41개 중 일반 소비재 7개, 공공재 3개 및 제한적 재활용 시나리오 2개를 사용하여 선량평가를 하였으며 RESRAD-RECYCLE 전산코드가 적용한 시나리오에 대해 설명하고자 한다. 최종 제품 시나리오에 입력된 철강 재활용의 기본 모델링 매개변수 요약은 그림 11과 같다[9].

Recycle Step	Scenario	Source Geometry	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Thickness (cm)	Radius (cm)	Distance from Source (cm)	Time (h)	Radiation Source for the External Pathway <sup>a</sup>	Radiation Source for the Internal Pathway <sup>b</sup>	Default Internal Pathway <sup>c</sup>	Number of Individuals <sup>d</sup>
Consumer products	Parking lot	1 full cylinder	2.70	10	3,400	100	62	Slag	None	None	1,000
	Room/office	4 half cylinders	7.86	0.2	300	100, 250, 250, 400	2,000	Ingot	None	None	380
	Appliance	1 half cylinder	7.86	0.1	92	100	730	Ingot	None	None	4,300
	Automobile	4 full cylinders	7.86	0.1	150	50	730	Ingot	None	None	800
	Office furniture	1 half cylinder	7.86	0.1	103	15	2,000	Ingot	None	None	7,000
	Home furniture	1 half cylinder	7.86	0.1	110	15	3,650	Ingot	None	None	6,000
Public products	Frying pan	1 full cylinder	7.86	0.4	15	30	180	Ingot	None	ing	41,000
	Pavement	1 full cylinder	2.70	10	3,400	100	0.0074 <sup>e</sup>	Slag	None	None	8,200,000
	Public building <sup>f</sup> (with rebars) Bridge	4 half cylinders 2 half cylinders	7.86 7.86	0.5 1.2	300 1,800	100, 250, 250, 400 100, 400	2,000 0.002 <sup>e</sup>	Ingot Ingot	None None	None None	164 8,200,000
Controlled products	Shielding block	1 half cylinder	7.86	132	105	100	1	Ingot	None	None	— <sup>g</sup>
	Radwaste container	1 half cylinder	7.86	0.27	100	100	1	Ingot	None	None	—
Reuse products	Tool reuse	1 full disk	—	—	56	60	2,000	Reuse product	Reuse product	ing, ing	1
	Building reuse	4 half disks	—	—	300	100, 250, 250, 400	2,000	Reuse product	Reuse product	ing, ing	4

<sup>a</sup> Radionuclide concentrations in slag or ingot are calculated by using the corresponding mass and radionuclide partitioning factors. For the reuse product scenarios, concentrations in the products are used directly in dose calculations.

<sup>b</sup> The source material is the material from which the product is made. It is assumed to be the source from which the airborne dust particles originate. When no internal pathway is considered, "none" is listed. For the reuse product scenarios, concentrations in the products are used directly in dose calculations.

<sup>c</sup> If by default no internal pathway is considered, "none" is listed. However, the user can elect to consider the internal pathways. In that case, radionuclide concentrations are calculated by using the source material listed in the column immediately to the left. Here, "inh" denotes inhalation and "ing" denotes ingestion.

<sup>d</sup> Based on the assumption that 100% of the ingot or slag from recycling 100 t of scrap metal would be used.

<sup>e</sup> Shielded by 15 cm of concrete.

<sup>f</sup> For MEI dose calculations, exposure durations of 6 and 1 hour(s) are applied for the pavement and bridge scenarios, respectively.

<sup>g</sup> A hyphen indicates not applicable or various.

그림 11. 철강의 최종사용제품 기본 모델링 매개변수

### 1) 주차장 시나리오

아스팔트 주차장의 제련 공정에서 생성된 슬래그 사용을 모델링한다. 슬래그는 콘크리트로 100배 희석됐으며 슬래그와 콘크리트의 혼합물은 밀도가  $2.7 \text{ g/cm}^3$  으로 가정한다. 슬래그 질량분배계수가 10%로 가정되고 발생하는 모든 슬래그가 주차장을 구성하는데 사용되는 경우 슬래그와 콘크리트의 혼합물 총 질량은 1,000 톤이 된다. 고철이 강철일 때 주차장은 반경 3,400 cm, 두께 10 cm의 균일한 전체 실린더로 모델링된다. 보통 개인은 주차장에서 하루 10 분을 소비하고 연간 노출시간은 62 시간으로 가정한다. 집단 선량 계산은 노출된 개인의 수를 1,000 명으로 추산한다. 이 추정치는 주차장의 표면적, 평균 자동차의 표면적 및 자동차 당 두 사람의 평균 점유율을 기반으로 한다. 외부 노출은 선원과 수용체 사이의 거리가 100 cm라고 가정하여 계산한다.

### 2) 방/사무실 및 주택 사이딩 시나리오

사무실 또는 방 4개의 벽을 구성하기 위해 재활용 강판을 사용하고 집의 외부 사이딩을 위해 재활용 알루미늄 시트를 사용하는 것을 모델링하였다. 강재의 경우 방의 크기는  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  로 가정한다, 선량계산에서 각 벽은 두께 0.2 cm, 반경 300 cm, 밀도  $7.86 \text{ g/cm}^3$  의 반 원통으로 모델링된다, 평균적으로 개인은 한 벽에서 100 cm, 반대쪽 벽에서 400 cm, 두 개의 인접한 벽에서 250 cm에 있다고 가정한다. 개인은 하루에 8 시간 1년에 총 2,000 시간 (50주) 동안 보낸다고 가정한다.

하나의 방을 건설하기 위해 940 kg의 강철이 필요한 경우, 완성된 강철의 100%가 벽을 만드는데 사용된다고 가정한다. 100 톤을 재활용하여 약 96 개의 방을 지을 수 있고 그에 따라 방당 평균 4 명을 수용하면 집단 선량평가에 노출된 개인의 수는 380 명이다.

### 3) 가전제품 시나리오

가전제품 제조에서 재활용 철강을 사용할 경우를 모델링하였다. 냉장고, 스토브 및 식기세척기를 모델링 하였고 크기가 커 냉장고는 가장 보수적인 경우를 나타낸다. 냉장고는 두께 0.1 cm, 반경 92 cm, 밀도  $7.86 \text{ g/cm}^3$  의 반실린더로 모델링 된다. 외부노출은 소스로부터 100 cm 거리로 가정한다. 개인은 냉장고 부근에서 하루 2 시간을 소비하며 연간 총 730 시간을 노출한다. 집단선량 계산은 기기당 한 사람이 노출되는 것으로 가정하고 냉장고에 사용되는 평균 강철 질량은 21 kg으로 추정된다. 사용 가능한 재활용 철강의 100%가 사용되면 4,300 개의 냉장고가 100 t의 방사성 고철 재활용으로 제조될 수 있다. 따라서 집단선량에 사용된 인원의 수는

4,300 명이다.

#### 4) 자동차 시나리오

자동차 시나리오는 자동차 바디 제조에 재활용 철강 사용을 모델링 하였다. 두께 0.1 cm 반경 150 cm, 밀도  $7.86 \text{ g/cm}^3$  이며 4 개의 풀실린더로 모델링 되었다. 사용자는 선원에서 50 cm 떨어졌다고 가정하며 평균 개인의 노출시간은 하루 2시간으로 연간 총 노출시간은 730 시간으로 설정하였다. 100 톤의 고철을 재활용하여 각각 평균 222 kg의 철강이 사용되면 400대의 자동차가 제조될 수 있다. 자동차당 평균 2인의 사용을 기준으로 집단 선량평가에 사용된 개인의 수는 800 명이다.

#### 5) 사무용 가구 시나리오

책상, 책장 및 파일 캐비닛 세가지 유형의 사무용 가구가 고려되었고 평균적으로 개인이 노출될 수 있는 최근 거리 및 장기간으로 인해 책상이 가장 보수적인 경우로 나타났다. 책상은 0.1 cm두께, 103 cm반경 및  $7.86 \text{ g/cm}^3$ 의 밀도를 가진 반실린더로 모델링되었다. 외부노출은 선원에서 15 cm인 것으로 가정한다. 평균 개인은 하루 책상에서 8 시간, 연간 2,000 시간을 소비한다고 가정한다. 책상은 13 kg의 철강을 소비하며 100 t의 방사성 고철을 재활용 하면 7,000 개의 책상을 생산할 수 있다고 추정된다. 집단선량 계산에 사용되는 개인의 수는 7,000 명으로 가정한다.

#### 6) 가정용 가구 시나리오

가정용 가구 제조에 재활용금속을 사용하는 것을 모델링하였다. 가정용 가구는 두께 0.1 cm, 반경 110 cm이며 밀도가  $7.86 \text{ g/cm}^3$  인 반실린더로 모델링된다. 외부 노출은 선원 위 15 cm에서 계산한다. 평균 개인이 하루 10 시간 노출되며 연간 3,650 시간이라고 가정한다. 각 가정용 가구는 15 kg의 철강을 사용하며 6,000 개를 생산할 수 있으며 가구 하나당 한 명이 노출되었다고 가정하면 집단 선량을 계산하는데 사용된 개인의 수는 6,000 명이다.

#### 7) 프라이팬 시나리오

가정용 프라이팬 제조에 재활용 금속을 사용하는 것을 모델링하였다. 두께 0.4 cm 반경 15 cm 스틸팬은  $7.86 \text{ g/cm}^3$ 의 밀도를 가진 풀실린더로 모델링된다. 외부 노출은 선원에서 30 cm 이상인 것으로 가정한다. 평균 개인은 하루 0.5 시간, 연간 180 시간 노출되는 것으로 가정한다. 프라이팬은 개당 2.2 kg의 철강을 사용하며

100 톤을 재활용하면 41,000 개가 생산된다.

프라이팬 시나리오의 경우 부식된 금속의 섭취로 인한 내부피폭까지 고려하기 때문에 추정 부식 질량을 사용해 섭취 노출을 계산한다. 프라이팬의 기본 부식 속도는 0.13 mm/yr 으로 가정한다.

## 8) 철근을 이용한 건물 시나리오

공공 건물 건설에 재활용 철강으로 제조된 철근의 사용을 고려한다. 500 cm × 500 cm × 300 cm 공간의 4 개의 벽은 콘크리트 내부에 15 cm 깊이의 철근으로 구성된 것으로 가정한다. 각 벽은 30 cm 반경, 0.5 cm 두께 및 7.86 g/cm<sup>3</sup>의 강철 밀도를 가진 반 실린더로 모델링한다. 평균 개인은 한 벽에서 100 cm, 반대쪽 벽에서 400 cm, 두 개 인접한 벽에서 250 cm에 있다고 가정한다. 개인은 하루에 총 8시간을 일년에 총 2000 시간을 보낸다고 가정한다. 1개의 방을 건설하기 위해 2.2 톤의 강철이 필요한 경우 100 톤의 방사성 고철을 재활용하여 약 41개의 방을 만들 수 있다. 따라서 방당 평균 4 인의 경우 집단 선량평가에 사용된 개인의 수는 164명으로 가정한다.

## 9) 교량 시나리오

교량 지지용 빔을 구성하기 위해 재활용 금속을 사용하는 것을 모델링 한다. 교량의 폭 500 cm, 높이 500 cm 인 것으로 가정한다. 측면의 두께는 1.2 cm, 반경 1,800 cm 강철 7.86 g/cm<sup>3</sup>의 하프 실린더로 모델링된다. 외부 노출은 한쪽에서 100 cm, 반대쪽에서 400 cm로 계산된다. 집단 선량의 경우 농촌 교통빈도는 매 시간 470 대의 차량이 다리를 건너며 각 차량에는 2명의 승객이 있으며 연간 총 노출시간은 0.002 시간으로 50 km/h로 이동하는 것으로 가정한다. 100 톤의 방사성 고철을 재활용하여 하나의 교량을 건설할 수 있기 때문에 노출된 개인의 수는 매년 약 8,200,000 명으로 가정한다.

## 10) 포장 시나리오

포장 구조에서 방사성 고철의 제련으로 인한 슬래그 사용을 모델링한다. 슬래그는 콘크리트로 100배 희석한 것으로 가정한다. 슬래그와 콘크리트의 혼합물은 밀도가 2.7 g/cm<sup>3</sup>인 것으로 가정한다.

강재의 경우와 같이 슬래그 질량분배계수가 총 스크랩의 10 %인 것으로 가정하고 슬래그 콘크리트의 혼합물 추정 질량은 1,000 톤이 된다. 모든 슬래그가 포장을 구성되는데 사용한다고 가정하면 길이 370 m, 폭 10 m이다. 선량계산은 강철 슬래

그로 제작된 포장은 반경 3,400 cm 두께 10 cm의 균일한 실린더로 모델링된다. 외부 노출은 포장 위 100 cm에서 계산된다. 집단 선량 계산의 경우 시간당 470 대의 자동차가 농촌 지역에서 일반적으로 나타나는 빈도로 포장도로를 통과하며, 각 차량에는 2명의 승객이 탑승하고 연간 0.0074 시간의 총 노출기간동안 50 km/h를 이동하는 것으로 가정한다. 노출된 개인의 수는 매년 8,200,000 명이다.

#### 4. 입력인자 수정

RESRAD-RECYCLE 코드의 기본 입력인자는 미국의 사례를 토대로 입력된 인자값이다. 따라서 본 연구에서는 자동차, 사무실, 프라이팬의 시나리오는 국내의 근로여건 및 사례를 바탕으로 평가하기 위하여 2017년 OECD 회원국 연평균 근로시간 조사에 따라 2,024 시간을 적용하였다. 또한, 서울통계 2016년 한강다리 교통량 자료를 바탕으로 평가하기 위하여 21개 다리의 평균 통행량인 100,070 대의 차량이 통행하는 것을 기준으로 365일 적용하여 36,525,550 대의 차량이 통행하며 총 길이 919 m, 속도 60 km/hr로 교량을 통과하며 계산된 시간은 1분으로 적용하였다.

각각의 인자를 적용하여 선행연구에서 제시한 Sulfuric-Cerium 공정의 제염계수를 100 ~ 1,000까지 100단위로 적용하였다.

## 제 2 절 선량평가대상 선정

### 1. 선량평가대상 선정

현재 가동 중인 25기 원전 및 건설 중인 신한울 1,2호기를 대상으로 증기발생기 교체 및 해체 시 발생하는 증기발생기는 2020년까지 30기의 증기발생기가 교체 및 해체될 것으로 추산되며, 2040년까지 82기의 증기발생기가 교체되거나 원전 영구 정지 등으로 발생할 것으로 예상된다. 증기발생기 교체는 설계수명 및 계속운전 10년을 고려하여 운전 후 25년째 교체하는 것으로 가정하였고, 해체 시점은 40년(고리1 및 월성 1, 2, 3, 4) 및 50년(기타 원전)으로 가정하였다. 이미 12기의 증기발생기가 국내 원자력발전소에서 교체되었다(1998년 고리 1호기 2기, 2011년 한울 2호기 3기, 그리고 2012년 한울 1호기 3기, 2013년 한울 4호기 2기, 2018년 한빛 4호기 2기). 국내에서 교체된 증기발생기의 평균 가동수명은 22.25년이였다.

영구정지 상태인 고리1호기 또한 해체가 본격적으로 시작되면 증기발생기가 발생하므로 대형 금속폐기물인 증기발생기의 저장공간 확보와 관리비용 절감을 위하여 적절한 처리기술을 적용 및 자체처분 평가가 필요할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구는 고리 1호기 해체 시 발생하는 증기발생기를 대상으로 제염을 통해 방사능농도를 자체처분 기준까지 낮춰 재활용할 시 소비자가 받는 피폭 선량을 도출하고 법적 여건에 대하여 만족 여부를 평가하였다.

### 2. 선량평가대상 및 선원항

#### 1) 증기발생기 제원

고리 1호기의 증기발생기는 WH F series 51B를 사용하였고 1988년 Δ60 모델로 교체하였다. F series 증기 발생기는 세관과 일부만 변경되고 크기는 변하지 않았다. Westinghouse F Series SG의 설계인자는 표 13과 같고 단면도는 그림 12와 같다[10].

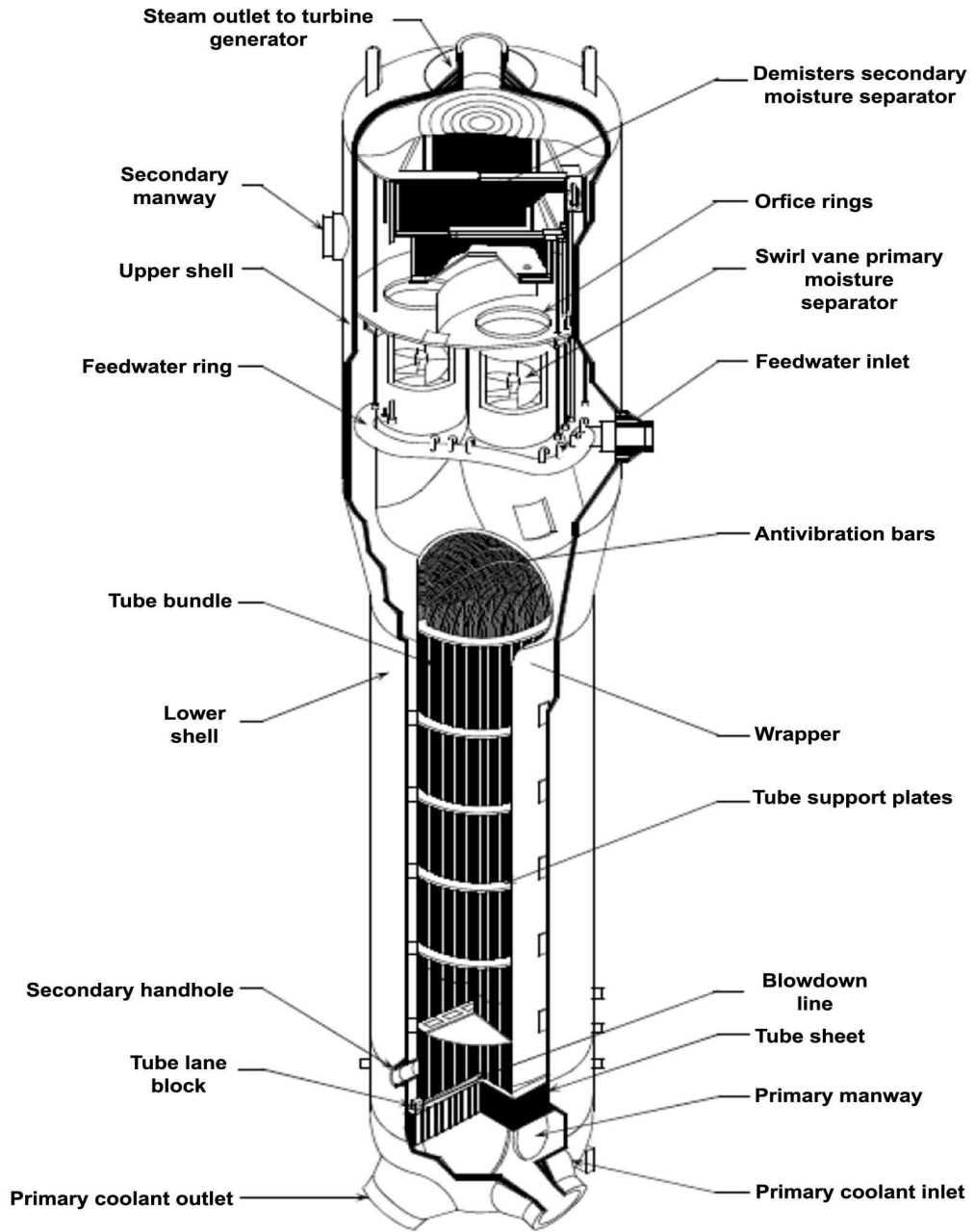


그림 12. Westinghouse 증기발생기 단면도



표 13. Westinghouse F Series SG 설계인자

항목	데이터
Height(m)	21
Upper/Lower Diameter(m)	4.5/3.5
Weight(ton)	300
Heat Transfer Area(ft <sup>2</sup> )	50,000
No. of Tube	5626
Tube Spacing(in)	0.98
Tube Dimensions(in)	0.688 × 0.040
Tubing Material	Alloy 600/690
Heat Treatment	Treated(TT)
Tube Sheet Expansion Method	Hydraulic
Tube Sheet Crevice Depth(in)	20.7

## 2) 증기발생기 선원항

RESRAD-RECYCLE 전산코드를 이용하여 선량평가를 하기 위해서는 방사성 핵종별 선원항이 필요하다. 증기발생기는 주로 수실과 전열관에 방사성 오염이 집중되어 있다.

본 연구에서는 선량평가를 위한 자료로 1998년 전력연구원에서 진행한 고리 1호기 교체 증기발생기 선량을 분석 자료에 있는 방사성 핵종 농도 데이터를 이용하였다. 증기발생기 총 선량은 3.3TBq으로 수실에 5%, 전열관에 95%가 존재한다 [11]. 고리 1호기 증기발생기의 전열관은 제염계수가 1000인 Sulfuric Acid - Cerium 공정을 사용해도 Co-60의 방사능 농도가 6.36Bq/g으로 자체처분 허용농도를 초과했기 때문에 전열관의 자체처분은 불가능할 것으로 판단하여 제외하고 총 중량의 절반만 재활용하며 고리 1호기가 본격적으로 해체되는 2022년을 기준으로 5년의 붕괴시간을 가졌다고 가정하고 평가를 진행하였다. 표 14는 제염 전 비방사능 값이고, 표 15는 제염계수별 비방사능이다.

표 14. 제염 전 비방사능

핵종	반감기(Day)	Chamber (Bq/g)
Mn-54	312.7	-
Co-57	270.9	-
Co-60	1923.92	9.87
Zn-65	244.4	-
Ru-106	368.2	-
Ce-144	284.3	-
Total		9.87

표 15. 제염계수별 비방사능(Bq/g)

제염계수 핵종	DF 100	DF 200	DF 300	DF 400	DF 500
Co-60	0.099	0.049	0.032	0.033	0.025
	DF 600	DF 700	DF 800	DF 900	DF 1,000
	0.016	0.014	0.012	0.011	0.010

## 제 5 장 선량평가 결과

본 연구에서는 향후 원자력발전소의 해체 시 발생하는 방사성 금속 폐기물의 제염과 잔류방사능 평가를 거쳐 자체처분 허용농도를 만족한 금속폐기물에 대해 RESRAD-RECYCLE 전산코드를 사용하여 개인선량 및 집단선량을 평가하였다.

소비재와 공공재 그리고 제한적 사용 시 시나리오를 채택하였고 RESRAD-RECYCLE 코드 입력인자에 국내 여건을 조사하여 적용하였으며, 제염계수는 100 ~ 1,000까지 적용하여 평가하였다.

평가 결과 자체처분 요건 만족 여부를 확인하였으며, 개인 및 집단선량 어느 한 쪽의 값이 법적 요건에 만족하지 않았을 시 불만족 처리를 하였다.

## 1. 제염계수(DF) 100 적용 시 선량평가 결과

제염계수를 100으로 적용하여 선량평가를 한 결과 개인선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 가장 높은 값은 15.3  $\mu$  Sv/yr인 차폐블록 시나리오로 나타났다. 집단선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 교량의 경우 4.990 man · Sv/yr로 가장 높은 선량값을 보였다. 소비재인 자동차 시나리오, 공공재인 교량 시나리오 및 차폐체 사용 시나리오 선량평가 결과는 법적 요건을 만족하지 못하였으며, 그 외 시나리오는 모두 법적 요건을 만족하였다(표 16).

표 16. DF 100 선량평가

재활용단계	시나리오	개인선량 ( $\mu$ Sv/yr)	집단선량 (man · Sv/yr)	법적 요건 만족 여부
소비재	주차장	0.000	0.000	만족
	방 / 사무실	5.390	0.002	만족
	가정용품	0.144	$6.2 \times 10^{-4}$	만족
	자동차	12.000	$9.57 \times 10^{-3}$	불만족
	사무용 가구	2.510	0.017	만족
	가정용 가구	4.680	0.028	만족
	프라이팬	1.040	0.043	만족
공공재	도로 포장	0.000	0.000	만족
	철근을 이용한 건물	1.410	$2.31 \times 10^{-4}$	만족
	교량	0.023	4.990	불만족
제한적	차폐체	15.300	$1.53 \times 10^{-4}$	불만족
	폐기물 용기	1.136	$1.36 \times 10^{-5}$	만족

## 2. 제염계수(DF) 200 적용 시 선량평가 결과

제염계수를 200으로 적용하여 선량평가를 한 결과 개인선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 가장 높은 값은 7.630  $\mu$  Sv/yr인 차폐블록 시나리오로 나타났다. 집단선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 교량의 경우 2.490 man · Sv/yr로 가장 높은 선량값을 보였다. 공공재인 교량 시나리오 선량평가 결과는 법적 요건을 만족하지 못하였으며, 그 외 시나리오는 모두 법적 요건을 만족하였다(표 17).

표 17. DF 200 선량평가

재활용단계	시나리오	개인선량 ( $\mu$ Sv/yr)	집단선량 (man · Sv/yr)	법적 요건 만족 여부
소비재	주차장	0.000	0.000	만족
	방 / 사무실	2.700	0.001	만족
	가정용품	0.072	$3.1 \times 10^{-4}$	만족
	자동차	5.980	$4.79 \times 10^{-3}$	만족
	사무용 가구	1.260	$8.79 \times 10^{-3}$	만족
	가정용 가구	2.340	0.014	만족
	프라이팬	0.522	0.021	만족
공공재	도로 포장	0.000	0.000	만족
	철근을 이용한 건물	0.703	$1.15 \times 10^{-4}$	만족
	교량	0.011	2.490	불만족
제한적	차폐체	7.630	$7.63 \times 10^{-5}$	만족
	폐기물 용기	0.568	$5.68 \times 10^{-6}$	만족

### 3. 제염계수(DF) 300 적용 시 선량평가 결과

제염계수를 300으로 적용하여 선량평가를 한 결과 개인선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 가장 높은 값은 5.090  $\mu$  Sv/yr인 차폐블록 시나리오로 나타났다. 집단선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 교량의 경우 1.660 man · Sv/yr로 가장 높은 선량값을 보였다. 공공재인 교량 시나리오 선량평가 결과는 법적 요건을 만족하지 못하였으며, 그 외 시나리오는 모두 법적 요건을 만족하였다(표 18).

표 18. DF 300 선량평가

재활용단계	시나리오	개인선량 ( $\mu$ Sv/yr)	집단선량 (man · Sv/yr)	법적 요건 만족 여부
소비재	주차장	0.000	0.000	만족
	방 / 사무실	1.800	$6.83 \times 10^{-4}$	만족
	가정용품	0.048	$2.07 \times 10^{-4}$	만족
	자동차	3.990	$3.19 \times 10^{-3}$	만족
	사무용 가구	0.837	$5.86 \times 10^{-3}$	만족
	가정용 가구	1.560	$9.36 \times 10^{-3}$	만족
	프라이팬	0.348	0.014	만족
공공재	도로 포장	0.000	0.000	만족
	철근을 이용한 건물	0.469	$7.69 \times 10^{-5}$	만족
	교량	$7.49 \times 10^{-3}$	1.660	불만족
제한적	차폐체	5.090	$5.09 \times 10^{-5}$	만족
	폐기물 용기	0.378	$3.78 \times 10^{-6}$	만족

#### 4. 제염계수(DF) 400 적용 시 선량평가 결과

제염계수를 400으로 적용하여 선량평가를 한 결과 개인선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 가장 높은 값은 3.870  $\mu$  Sv/yr인 차폐블록 시나리오로 나타났다. 집단선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 교량의 경우 1.250 man · Sv/yr로 가장 높은 선량값을 보였다. 공공재인 교량 시나리오 선량평가 결과는 법적 요건을 만족하지 못하였으며, 그 외 시나리오는 모두 법적 요건을 만족하였다(표 19).

표 19. DF 400 선량평가

재활용단계	시나리오	개인선량 ( $\mu$ Sv/yr)	집단선량 (man · Sv/yr)	법적 요건 만족 여부
소비재	주차장	0.000	0.000	만족
	방 / 사무실	1.350	$5.12 \times 10^{-4}$	만족
	가정용품	0.036	$1.55 \times 10^{-4}$	만족
	자동차	2.990	$2.39 \times 10^{-3}$	만족
	사무용 가구	0.628	$4.40 \times 10^{-3}$	만족
	가정용 가구	1.170	$7.02 \times 10^{-3}$	만족
	프라이팬	0.261	0.011	만족
공공재	도로 포장	0.000	0.000	만족
	철근을 이용한 건물	0.352	$5.76 \times 10^{-5}$	만족
	교량	$5.62 \times 10^{-3}$	1.250	불만족
제한적	차폐체	3.870	$3.87 \times 10^{-5}$	만족
	폐기물 용기	0.288	$2.88 \times 10^{-6}$	만족

## 5. 제염계수(DF) 500 적용 시 선량평가 결과

제염계수를 500으로 적용하여 선량평가를 한 결과 개인선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 가장 높은 값은 3.650  $\mu$  Sv/yr인 차폐블록 시나리오로 나타났다. 집단선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 교량의 경우 0.998 man · Sv/yr로 가장 높은 선량값을 보였다. 제염계수 500에서 모든 시나리오가 법적 요건을 만족하였다(표 20).

표 20. DF 500 선량평가

재활용단계	시나리오	개인선량 ( $\mu$ Sv/yr)	집단선량 (man · Sv/yr)	법적 요건 만족 여부
소비재	주차장	0.000	0.000	만족
	방 / 사무실	1.080	$4.10 \times 10^{-4}$	만족
	가정용품	0.029	$1.24 \times 10^{-4}$	만족
	자동차	2.390	$1.91 \times 10^{-3}$	만족
	사무용 가구	0.502	$3.52 \times 10^{-3}$	만족
	가정용 가구	0.936	$5.61 \times 10^{-3}$	만족
	프라이팬	0.209	$8.56 \times 10^{-3}$	만족
공공재	도로 포장	0.000	0.000	만족
	철근을 이용한 건물	0.281	$4.61 \times 10^{-5}$	만족
	교량	$4.5 \times 10^{-3}$	0.998	만족
제한적	차폐체	3.650	$3.65 \times 10^{-5}$	만족
	폐기물 용기	0.228	$2.28 \times 10^{-6}$	만족



## 6. 제염계수(DF) 600 적용 시 선량평가 결과

제염계수를 600으로 적용하여 선량평가를 한 결과 개인선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 가장 높은 값은 2.540  $\mu$  Sv/yr인 차폐블록 시나리오로 나타났다. 집단선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 교량의 경우 0.834 man · Sv/yr로 가장 높은 선량값을 보였다(표 21).

표 21. DF 600 선량평가

재활용단계	시나리오	개인선량 ( $\mu$ Sv/yr)	집단선량 (man · Sv/yr)	법적 요건 만족 여부
소비재	주차장	0.000	0.000	만족
	방 / 사무실	0.902	$3.43 \times 10^{-4}$	만족
	가정용품	0.024	$1.04 \times 10^{-4}$	만족
	자동차	2.000	$1.60 \times 10^{-3}$	만족
	사무용 가구	0.420	$2.94 \times 10^{-3}$	만족
	가정용 가구	0.782	$4.69 \times 10^{-3}$	만족
	프라이팬	0.175	$7.16 \times 10^{-3}$	만족
공공재	도로 포장	0.000	0.000	만족
	철근을 이용한 건물	0.235	$3.86 \times 10^{-5}$	만족
	교량	$3.76 \times 10^{-3}$	0.834	만족
제한적	차폐체	2.540	$2.54 \times 10^{-5}$	만족
	폐기물 용기	0.189	$1.89 \times 10^{-6}$	만족

## 7. 제염계수(DF) 700 적용 시 선량평가 결과

제염계수를 700으로 적용하여 선량평가를 한 결과 개인선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 가장 높은 값은 2.180  $\mu$  Sv/yr인 차폐블록 시나리오로 나타났다. 집단선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 교량의 경우 0.713 man · Sv/yr로 가장 높은 선량값을 보였다(표 22).

표 22. DF 700 선량평가

재활용단계	시나리오	개인선량 ( $\mu$ Sv/yr)	집단선량 (man · Sv/yr)	법적 요건 만족 여부
소비재	주차장	0.000	0.000	만족
	방 / 사무실	0.771	$2.93 \times 10^{-4}$	만족
	가정용품	0.021	$8.85 \times 10^{-5}$	만족
	자동차	1.710	$1.37 \times 10^{-3}$	만족
	사무용 가구	0.359	$2.51 \times 10^{-3}$	만족
	가정용 가구	0.668	$4.01 \times 10^{-3}$	만족
	프라이팬	0.149	$6.11 \times 10^{-3}$	만족
공공재	도로 포장	0.000	0.000	만족
	철근을 이용한 건물	0.201	$3.29 \times 10^{-5}$	만족
	교량	$3.76 \times 10^{-3}$	0.713	만족
제한적	차폐체	2.180	$2.18 \times 10^{-5}$	만족
	폐기물 용기	0.162	$1.62 \times 10^{-6}$	만족

## 8. 제염계수(DF) 800 적용 시 선량평가 결과

제염계수를 800으로 적용하여 선량평가를 한 결과 개인선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 가장 높은 값은 1.900  $\mu$  Sv/yr인 차폐블록 시나리오로 나타났다. 집단선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 교량의 경우 0.622 man · Sv/yr로 가장 높은 선량값을 보였다(표 23).

표 23. DF 800 선량평가

재활용단계	시나리오	개인선량 ( $\mu$ Sv/yr)	집단선량 (man · Sv/yr)	법적 요건 만족 여부
소비재	주차장	0.000	0.000	만족
	방 / 사무실	0.672	$2.55 \times 10^{-4}$	만족
	가정용품	0.018	$7.72 \times 10^{-5}$	만족
	자동차	1.490	$1.19 \times 10^{-3}$	만족
	사무용 가구	0.313	$2.19 \times 10^{-3}$	만족
	가정용 가구	0.583	$3.50 \times 10^{-3}$	만족
	프라이팬	0.130	$5.33 \times 10^{-3}$	만족
공공재	도로 포장	0.000	0.000	만족
	철근을 이용한 건물	0.175	$2.87 \times 10^{-5}$	만족
	교량	$2.80 \times 10^{-3}$	0.622	만족
제한적	차폐체	1.900	$1.9 \times 10^{-5}$	만족
	폐기물 용기	0.142	$1.42 \times 10^{-6}$	만족

## 9. 제염계수(DF) 900 적용 시 선량평가 결과

제염계수를 900으로 적용하여 선량평가를 한 결과 개인선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 가장 높은 값은 1.700  $\mu$  Sv/yr인 차폐블록 시나리오로 나타났다. 집단선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 교량의 경우 0.556 man · Sv/yr로 가장 높은 선량값을 보였다(표 24).

표 24. DF 900 선량평가

재활용단계	시나리오	개인선량 ( $\mu$ Sv/yr)	집단선량 (man · Sv/yr)	법적 요건 만족 여부
소비재	주차장	0.000	0.000	만족
	방 / 사무실	0.601	$2.28 \times 10^{-4}$	만족
	가정용품	0.016	$6.90 \times 10^{-5}$	만족
	자동차	1.330	$1.07 \times 10^{-3}$	만족
	사무용 가구	0.280	$1.96 \times 10^{-3}$	만족
	가정용 가구	0.521	$3.13 \times 10^{-3}$	만족
	프라이팬	0.116	$4.77 \times 10^{-3}$	만족
공공재	도로 포장	0.000	0.000	만족
	철근을 이용한 건물	0.157	$2.57 \times 10^{-5}$	만족
	교량	$2.51 \times 10^{-3}$	0.556	만족
제한적	차폐체	1.700	$1.7 \times 10^{-5}$	만족
	폐기물 용기	0.126	$1.26 \times 10^{-6}$	만족

## 10. 제염계수(DF) 1,000 적용 시 선량평가 결과

제염계수를 1,000으로 적용하여 선량평가를 한 결과 개인선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 가장 높은 값은 1.530  $\mu$  Sv/yr인 차폐블록 시나리오로 나타났다. 집단선량의 경우 주차장 및 도로포장 재활용 시나리오에서 가장 낮은 값을 보였으며, 교량의 경우 0.499 man · Sv/yr로 가장 높은 선량값을 보였다(표 25).

표 25. DF 1,000 선량평가

재활용단계	시나리오	개인선량 ( $\mu$ Sv/yr)	집단선량 (man · Sv/yr)	법적 요건 만족 여부
소비재	주차장	0.000	0.000	만족
	방 / 사무실	0.539	$2.05 \times 10^{-4}$	만족
	가정용품	0.014	$6.2 \times 10^{-5}$	만족
	자동차	1.200	$9.57 \times 10^{-4}$	만족
	사무용 가구	0.251	$1.76 \times 10^{-3}$	만족
	가정용 가구	0.486	$2.81 \times 10^{-3}$	만족
	프라이팬	0.104	$4.28 \times 10^{-3}$	만족
공공재	도로 포장	0.000	0.000	만족
	철근을 이용한 건물	0.141	$2.31 \times 10^{-5}$	만족
	교량	$2.25 \times 10^{-3}$	0.499	만족
제한적	차폐체	1.530	$1.53 \times 10^{-5}$	만족
	폐기물 용기	0.114	$1.14 \times 10^{-6}$	만족

## 제 6 장 결론

### 1. 결론

RESRAD-RECYCLE 코드를 이용하여 증기발생기 수실의 자체처분 및 재활용을 위한 일반 소비재 및 공공재의 선량 평가 결과는 제염계수가 100인 경우 차폐블록 시나리오를 적용하였을 때, 개인선량  $15.300 \mu\text{Sv}/\text{yr}$ , 교량시나리오 집단선량  $4.99 \text{ man} \cdot \text{Sv} / \text{yr}$ 로 국내 법규에서 제시된 자체처분에 따른 개인의 연간 피폭선량인  $10 \mu\text{Sv}/\text{yr}$ 와 집단선량인  $1 \text{ man} \cdot \text{Sv}/\text{yr}$ 를 초과하여 자체처분이 불가능한 것으로 판단되었지만 제염계수 500 이상을 적용하면 모든 시나리오에서 자체처분이 가능한 것으로 판단된다.

따라서 증기발생기 수실은 500 이상의 제염계수를 가진 제염공정을 사용하면 무제한적 재활용을 해도 방사선학적 영향이 거의 없을 것으로 보인다. 하지만 중·저준위 방사성폐기물 처분장 부지 유치에 따른 주민 반대 혹은 노원구 폐아스콘에서 미량의 방사선이 검출되었다는 이유로 330 톤의 아스콘을 걸어내 폐기처분을 하는 등의 사례 [12] 및 최근 이슈였던 라돈침대 임시 저장소의 반대와 같은 사례로 보아 주민들의 방사선에 대한 막연한 두려움이 크고 수용성이 좋지 못하다. 무제한적 재활용을 하기 위한 용융 및 철강주조 산업체가 들어선다고 하더라도 지역 주민의 반대로 인해 어려움이 있다고 판단된다. 따라서 법적인 제도개선 및 홍보 등을 통한 주민의 수용성을 증진 시키지 않는 이상 무제한적 재활용은 불가능에 가까우며 원자력시설의 기기 생산에 재활용하거나 차폐체의 역할 또는 방사성폐기물 처분용 드럼으로 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

증기발생기 전열관의 경우 5년의 붕괴와 1000의 제염계수를 적용하여도  $0.18753 \text{ Bq}/\text{g}$ 으로 Co-60의 방사성폐기물 자체처분 제한치인  $0.1 \text{ Bq}/\text{g}$ 의 조건을 만족하지 못하고 제염 후 최소 5.3년이 지나야  $0.094 \text{ Bq}/\text{g}$ 으로 자체처분이 가능할 것으로 보인다. 본 연구의 가정과 같이 150 톤의 증기발생기 1개의 전열관을 200 L 드럼의 중량 500 kg의 제한에 따라 발생한 폐기물을 처분한다고 하면 300 드럼의 처분비용은 41억 2,000 만원이며 원전 1기당 2개의 증기발생기를 처분해야 한다. 따라서 고리 1호기 해체 시 독일의 Greifswald 원전 부지 내의 Decay Storage와 같이 중간저장시설을 만들어 대형 금속폐기물의 저장을 통해 비교적 반감기가 짧은 방사성 금속의 붕괴를 시켜 자체처분 준위까지 낮춰 처분이 가능할 수 있도록 하는 방식으로 방사성폐기

물을 감용 할 수 있다. Greifswald 원전 Decay Storage의 사진은 그림 13과 같다[13].



그림 13. Greifswald 원전 Decay Storage

## 2. 고찰

RESRAD-RECYCLE코드는 2005년 6월 이후 업데이트가 없어 코드에서 사용하는 선량환산인자는 ICRP 30을 기반으로 적용되어있다. 현재 ICRP 72에서 연령 별 섭취 및 흡입에 대한 선량환산인자가 개정되었기 때문에 이를 적용할 시 본 연구에서 평가한 선량과의 차이가 발생할 수 있다. 또한, 증기발생기의 수실과 전열관의 정확한 제원에 대해 파악을 할 수 없어 수실의 중량을 150 톤으로 가정하였는데 이에 따라 향후 연구에서 이를 수정·보완하여야 할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] 김창락. 원전 해체 폐기물 관리 동향, Konetic Report 2016-138호, 2016.
- [2] 산업통상자원부 장관, 산업통상자원부 고시 제2017-195호, 2017.
- [3] 원자력안전위원회, 원자력안전위원회고시 제2017-65호, 2017.
- [4] 원자력안전기술원, 방사성폐기물 안전관리 통합정보시스템, 2019.
- [5] 전제근, 방사성폐기물 처분 전 관리 현안 및 규제 방향, 원자력안전기술원, 2019.
- [6] 원자력환경기술원, 방사성폐기물 감용을 위한 표면오염 제거기술 개발, 2003.
- [7] 송명재 외, 방사성 금속폐기물 자체처분 방안 도출을 위한 연구용역 보고서, 한국 방사성폐기물학회, 2011.
- [8] 김동민, 원전 해체 방사성 금속폐기물 처분량 감소를 위한 자체처분 평가 연구, 조선대, 2017.
- [9] ANL, RESRAD-RECYCLE Manual, 2005.
- [10] 손영직, 고리1호기 대형 금속방사성폐기물 제염해체 시 작업자 피폭선량 평가 및 저감화 방안, 부산대, 2018.
- [11] 신상운 외, 고리1호기 교체 증기발생기의 선량을 분석, 전력연구원, 1998.
- [12] 이희선 외, 원자력발전소 해체 폐기물의 안전·안심관리 정책 방안, 한국환경정책평가연구원, 2017.
- [13] 김창락, 해외 해체사례 분석과 방사성 폐기물 관리, KINGS, 2019.



## 감사의 글

대학원 생활을 하며 졸업논문을 끝까지 마칠 수 있도록 도움을 주셨던 모든 분들께 감사한 마음을 전하고 싶습니다.

처음 대학원에 들어가고자 하였을 때, 많이 부족했던 저를 받아주신 지도교수 정운관 교수님께 진심으로 감사드리며, 논문 심사 과정에서 부족한 저의 논문에 많은 가르침을 주신 이경진 교수님과 송종순 교수님께 감사드립니다. 또한, 저의 논문을 작성하며 바쁜 와중에도 세심하게 논문에 대한 잘못된 점을 지적 및 보완해주셨던 양호연 박사님과 남희누나, 코드에 대한 자문을 해주신 상현이형께 깊은 감사의 말씀 드립니다.

2년의 대학원 생활을 하며 항상 도움을 주고 응원해주셨던 한이형, 인석이형, 상채형, 원선이형, 성준이형, 민호, 세희 다들 감사드립니다.

끝으로, 언제나 저를 응원해주시고 부족한 저를 위해 항상 애써주신 부모님께 이렇게나마 감사의 마음을 전달하고 싶습니다.