creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000266103

2017년 2월
석사학위 논문

원전 해체 방사성 금속폐기물 처분량 감소를 위한 자체처분 평가 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 동 민

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

원전 해체 방사성 금속폐기물 처분량 감소를 위한 자체처분 평가 연구

A Study on the clearance assessment for reduction of disposal amount of radioactive metal wastes from decommissioning NPPs

2017년 2월 24일

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 동 민

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

원전 해체 방사성 금속폐기물 처분량 감소를 위한 자체처분 평가 연구

지도교수 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 동 민

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

김동민의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 이 경 진 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 진 원 (인)

위 원 조선대학교 교수 송 종 순 (인)

2016년 11월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

ABSTRACT ····· V

제 1 장 서론 ····· 1
제 1 절 연구 배경 ····· 1
제 2 절 연구 목적 ····· 1

제 2 장 국내/외 자체처분 현황 ····· 3
제 1 절 국내 자체처분 현황 ····· 3
1. 국내 자체처분 규제 ····· 3
2. 국내 자체처분 사례 ····· 8
제 2 절 국외 자체처분 현황 ····· 10
1. 미국 ····· 10
2. 영국 ····· 10
3. 일본 ····· 11
4. 독일 ····· 11
5. 프랑스 ····· 12
6. 스웨덴 ····· 12
7. 캐나다 ····· 13

제 3 장 방사성 금속폐기물의 오염 및 제염 ····· 14
제 1 절 방사성 금속폐기물의 오염 ····· 14
1. 방사화부식생성물 개요 ····· 14
2. CRUD의 특성 ····· 14
3. 방사성 금속폐기물의 오염 형태 ····· 15
제 2 절 방사성 금속폐기물의 제염 ····· 16
1. 방사성 금속폐기물 제염기술 소개 ····· 16
2. 해외 제염 사례 ····· 21

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 평가코드 소개 및 입력인자 분석 ····· 23
제 1 절 RESRAD-RECYCLE 코드 소개 ····· 23
제 2 절 RESRAD-RECYCLE 코드 기본 입력인자 분석 ····· 24
제 3 절 국내 여건에 맞는 입력인자 조사 ····· 25
1. 민감도 분석 ····· 25
2. 국내 자체처분 사례에 따른 입력인자 조사 ····· 28

제 5 장 선량평가 ····· 30
제 1 절 평가대상 선정 ····· 30
1. BRT(Boron Recovery Tank) 배관 ····· 30
2. 가압기(Pressurizer) ····· 31
제 2 절 선량평가 조건 ····· 31
1. 입력인자 수정 ····· 32
2. 평가 시나리오 선정 ····· 32
3. 시나리오별 작업시간 도출 ····· 32
제 3 절 선량평가 결과 ····· 35
1. BRT(Boron Recovery Tank) 배관 ····· 35
2. 가압기(Pressurizer) ····· 37

제 6 장 결론 ····· 41

참고문헌 ····· 42

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 목차

표 1. 방사성폐기물 자체처분 관계법령 ····· 3
표 2. 방사성핵종의 자체처분 허용농도 ····· 7
표 3. 기관별 자체처분 계획서 신청건수 ····· 9
표 4. RESRAD-RECYCLE 전산코드의 시나리오 ····· 24
표 5. RESRAD-RECYCLE 전산코드 내 입력인자 ····· 25
표 6. 작업시간 변화에 따른 작업자 시나리오의 민감도분석 결과 ····· 26
표 7. 흡입률 변화에 따른 작업자 시나리오의 민감도분석 결과 ····· 27
표 8. 섭취율 변화에 따른 작업자 시나리오의 민감도분석 결과 ····· 27
표 9. 고철처리 작업자의 작업시간 비교 ····· 29
표 10. BRT 배관의 방사성핵종 특성 및 농도 ····· 30
표 11. 제염시간에 따른 거리별 제염계수 ····· 32
표 12. BRT 배관의 코드 기본 작업시간과 도출한 작업시간 ····· 34
표 13. 가압기의 코드 기본 작업시간과 도출한 작업시간 ····· 35
표 14. BRT 배관의 코드 입력인자를 이용한 선량평가결과 ····· 36
표 15. BRT 배관의 도출한 입력인자를 이용한 선량평가결과 ····· 37
표 16. 가압기의 코드 입력인자를 이용한 선량평가결과(DF=1,000) ····· 38
표 17. 가압기의 코드 입력인자를 이용한 선량평가결과(DF=10,000) ····· 39
표 18. 가압기의 도출한 입력인자를 이용한 선량평가결과(DF=1,000) ····· 40
표 19. 가압기의 도출한 입력인자를 이용한 선량평가결과(DF=10,000) ····· 40

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 목차

그림 1. 원전 연료 금속폐기물 자체처분 ····· 8
그림 2. 연구로 2호기 콘크리트 자체처분 ····· 8
그림 3. 2005~2009년간 폐기물 종류별 자체처분 수량 ····· 9
그림 4. 금속의 오염 형태 ····· 15
그림 5. 제염 시 요구되는 제염계수 ····· 16
그림 6. RESRAD-RECYCLE 코드의 재활용 절차 개념도 ····· 23
그림 7. 원자력연구소에서 수행한 페드럼 자체처분 공정도 ····· 28

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

A Study on the clearance assessment for reduction of disposal amount of radioactive metal wastes from decommissioning NPPs

Kim Dongmin
Advisor : Song Jong-Soon, Ph.D.
Departmant of Nuclear Engineering
Graduate School of Chosun University

A lot of radioactive wastes are generated while nuclear power plants (NPPs) are operated or demolished. In particular, most of the radioactive wastes generated in disintegrated are metallic wastes. Therefore, it is considered that disposal of metallic waste can be handled and reduced at nuclear power plant through efficient management. In this respect, the present study on clearance evaluation of scrap metal are carried out in an effort to reduce the amount of metallic waste to dispose of at the demolition of a nuclear power plant. RESRAD-RECYCLE, which is a computer code to be used in making decisions about the disposition of radioactively contaminated materials, was employed and BRT (Boron Recovery Tank) pipes and pressurizers, which were actually used in a nuclear power plant, was selected as analysis target. BRT pipes are equipment that conveys the contents of reactor drain tank (RDT) in chemical and volume control system and those of equipment drain tank (EDT) outside a container. They do not have high level of radioactivity. Therefore, they can meet clearance permissible radiation dosage without decontamination. On the other hand, a pressurizer is directly exposed to coolant during the operation of a nuclear power plant and contains a high level

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

of radiation due to the sedimentation of radioactive corrosion products that exist in the coolant. Therefore, when a nuclear power plant dismantles, a proper method of decontamination should be taken for clearance of a pressurizer. The decontamination factors of 1,000 and 10,000 for evaluation were applied in this study.

In addition, RESRAD-RECYCLE codes have several input parameters to evaluate the risk of workers and general people. However, because most of those input parameters are not suitable for domestic conditions, it is necessary to modify them properly. However, there are a lot of limitations to modifying all the input parameters to fit domestic situations. Therefore, Some key parameters from the code input parameters from domestic cases were chose and derived in this study, which are applied them to evaluation.

The results of the evaluation demonstrated that BRT pipes meet clearance permissible radiation dosage. According to the results of evaluation with code input parameters and derived input parameters, it takes 23 years for a pressurizer to meet clearance permissible radiation dosage when two cases are applied with decontamination factor 1,000, and 5 years when decontamination factor 10,000 is applied.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

현재 국내 원자력발전소는 한빛, 한울, 월성, 신월성, 고리, 신고리에서 총 24기가 운영 중에 있으며, 신한울 2기, 신고리 4기가 추가로 건설 중에 있다. 현재 운영 중이거나 건설 중인 원자력발전소가 모두 운영된다면 많은 방사성폐기물이 발생되고 영구정지에 따른 해체 시에는 더 많은 방대한 양의 방사성폐기물이 발생하게 될 것이다. 발생된 방사성폐기물은 임시저장소에 저장되며 저준위와 극저준위 방사성폐기물은 관리절차에 따라 영구 처분장에 처분된다. 이러한 일련의 절차를 통해 발생되는 모든 방사성폐기물을 처리/처분하기 위해서는 많은 인력과 높은 처분장 수용력을 필요로 하며 이는 결과적으로 경제적 문제를 야기시킬 수 있다. 영구정지가 결정된 고리 1호기의 경우 해체를 위한 기간은 15년에서 최대 30년 비용은 6,033억 원으로 예상하고 있다.

향후 국내 운영중인 원자력발전소는 계속운전에 의해 설계수명에 도달하게 되고 필연적으로 해체단계를 맞이하게 될 것이다. 발전소 해체 시 발생하는 방사성 폐기물 중 금속폐기물이 많은 부분을 차지하고, 이를 고려하면 자체처분을 통한 방사성 금속 폐기물의 재사용 및 재활용으로 해체 기간단축 및 처분부피 감소 등과 이에 따른 비용 절감을 예상할 수 있다.

제 2 절 연구 목적

현재 국내는 고준위, 중준위, 저준위, 극저준위로 분류되는 방사성폐기물 분류기준을 따르고 있으며 원전해체 시 발생하는 폐기물은 이와 같은 기준으로 분류된다. 실제 원전해체 시 발생하는 폐기물 중 대부분이 저준위 및 극저준위 폐기물로 분류될 것으로 예상되며 해체 시 발생하는 방사성 금속폐기물은 1차계통 구조물을 제외한 대부분이 오염정도가 낮아 재활용 가능할 것으로 판단된다. 실제 원자력발전소 해체 시 금속폐기물은 수 천 톤 이상 발생할 것으로 예상되고 적절한 제염을 수행한다면 대부분이 재활용 가능할 것으로 판단된다.

이에 따라 본 연구에서는 향후 실제 원전해체 시 방사성 금속폐기물의 효과적인 자체처

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

분에 기여함을 목적으로 RESRAD-RECYCLE 전산코드를 이용하여 원전 해체 시 발생 가능한 방사성 금속폐기물을 대상으로 자체처분 시나리오에 따른 위해도 평가를 수행하였다. 또한 국내 자체처분 작업 조건에 맞는 입력 값을 적용하여 비교평가 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 국내/외 자체처분 현황

제 1 절 국내 자체처분 현황

1. 국내 자체처분 규제

국내에서는 방사성폐기물의 신 분류체계 적용 과정에서 “처분 제한치 미만의 방사성폐기물”을 규제해제 대상 폐기물로 규정하고 규제해제 절차를 개정하였다. 규제해제 기준(핵종별 농도 또는 선량)은 IAEA RS-G-1.7을 도입하였으며 규제해제 폐기물은 원자력 안전법의 적용범위에서 제외하도록 규정한 바 있다. 원자력위원회 고시 제 2014-3호에 의하면 자체처분 허용농도 미만인 방사성폐기물과 자체처분 허용선량을 만족하는 것이 입증된 방사성폐기물은 소각, 매립 또는 재활용등의 방법으로 자체처분 할 수 있다.

- 자체처분 허용선량
  - 개인에 대한 연간 예상 피폭방사선량이 10μ Sv 미만
  - 집단에 대한 연간 예상 총피폭방사선량이 1mam · Sv 미만

원자력 안전법 시행령 제 107조 1항에 따른 방사성핵종별 자체처분 허용농도는 표 2에 나타내었고 방사성폐기물 자체처분을 위한 국내 관계법령을 표 1에 나타내었다.

표 1 방사성폐기물 자체처분 관계법령

방사성폐기물 자체처분 관계법령	
원자력안전법 제 70조	방사성폐기물의 처분제한
원자력안전법 시행령 제 107조	방사성폐기물 자체처분의 절차 및 방법
원자력안전법 시행규칙 제 94조	방사성폐기물의 처분제한
원자력안전법 시행규칙 제 95조	자체처분 신고
원자력안전위원회 고시 제2014-34호	방사선방호 등에 관한 기준
원자력안전위원회 고시 제2014-3호	방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정
폐기물관리법 제17조	사업장폐기물배출자의 의무 등
폐기물관리법 제18조	사업장폐기물의 처리
폐기물관리법 시행령 제7조	폐기물의 처리기준

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

또한 원자력 안전법 시행령 제 107조 제 3항 제2호에서 "위원회가 정하여 고시하는 자체처분 허용기준”이라 함은 다음과 같다.

■ 방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정 제 9조(자체처분 대상 폐기물의 관리)에 따른 기준을 만족시켜야 한다.

- ㅇ 자체처분사업자는 자체처분 하고자 하는 방사성폐기물(이하 “자체처분 대상 폐기물”이라 한다)을 별도로 구분하여 분리·저장하여야 하며, 다른 폐기물이 혼입되지 아니하도록 하여야 한다.
- ㅇ 자체처분사업자가 자체처분 허용농도 또는 자체처분 허용선량을 만족 함을 자체적으로 확인한 방사성폐기물 중에서 「방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙」 제3조 제2항 제4호에 따른 방사선관리구역 반출기준을 만족하는 폐기물은 강우 또는 바람 등에 의한 오염의 확산가능성이 없는 사업소 내의 방사선 관리구역 외부의 저장장소에 임시로 저장할 수 있다.
- ㅇ 자체처분 대상 폐기물은 취급·저장 또는 운반 과정에서 방사성물질 등이 주변으로 전이되거나 확산되지 않도록 관리하여야 한다.
- ㅇ 매립 또는 소각할 예정인 자체처분 대상 폐기물은 가능한 한 부주의하게 재활용되지 않도록 관리하여야 한다.
- ㅇ 자체처분 대상 폐기물이 용기에 들어 있거나 포장한 경우에는 그 용기 또는 포장재 중에서 자체처분 후 회수되지 않을 용기 또는 포장재는 자체처분 대상 폐기물에 준하여 관리하여야 한다.
- ㅇ 자체처분으로 인하여 부수적으로 폐기물이 발생될 경우, 이 부수적인 폐기물의 관리방안을 사전에 마련하여야 한다.

■ 방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정 제 10조(방사선 및 방사능의 측정·평가 기준)에 따른 기준을 만족시켜야 한다.

- ㅇ 자체처분 대상 폐기물의 방사선 및 방사능은 교정을 통하여 신뢰성이 확보된 측정기를 이용하여 측정하여야 한다.
- ㅇ 자체처분 대상 폐기물의 표면방사선량률은 부득이한 경우를 제외하고 자연방사선 준위를 확인할 수 있는 지역에서 폐기물의 표면으로부터 10 ㎝의 거리에서 측정하여야 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

◦ 방사성핵종별 방사능 농도를 측정하기 전에 별표1에 규정된 방사성핵종별로 자체처분 허용농도 보다 충분히 낮은 수준으로 검출목표치를 수립하여야 하며, 실제 최소검출가능농도는 검출목표치 이하여야 한다.

◦ 자체처분 대상 폐기물에 존재하는 모든 방사성핵종의 종류를 알고 있을 때에는 이론적 방법을 적용하여 핵종별 방사능 농도를 평가할 수 있다. 이 경우 핵종별 방사능 농도가 과소평가 되지 않도록 하여야 한다.

■ 방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정 제 11조(자체처분절차서)에 따른 절차가 수립되어 있어야 한다. 자체처분사업자는 다음 각 호의 사항을 포함한 방사성폐기물 자체처분 절차서를 마련하여, 그 절차서에 따라 자체처분에 관한 제반업무를 수행하여야 한다.

◦ 자체처분 정책 및 전략
- 자체처분 원칙
- 자체처분이 정당화되는 근거
- 자체처분 폐기물의 수량 및 방사능 최소화 전략
- 자체처분 업무를 수행하는 조직, 책임 및 권한

◦ 자체처분하고자 하는 폐기물의 특성과 관리방안
- 폐기물의 발생장소, 발생과정 및 예상 발생량
- 폐기물의 종류 및 형태
- 폐기물에 함유될 수 있는 방사성핵종의 종류
- 폐기물의 선별, 수거, 분리 및 저장방법
- 핵종별 및 폐기물별 자체보관기간 및 자체보관기간의 평가방법(적용 가능한 경우에 한함)
- 폐기물의 표면오염 관리방안

◦ 자체처분 관련 기준을 만족함을 입증하는 방법
- 방사능 측정방법(대표시료 채취방법을 포함한다) 또는 방사능 평가방법(평가의타당성에 대한 논거)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

- 방사선 측정방법
- 기타 이 규정의 제반 규정을 만족함을 입증하는 방법

◦ 자체처분 방법 및 사전 조치
- 자체처분 방법
- 자체처분 전 조치사항
- 자체처분으로 인하여 부수적으로 폐기물이 발생될 경우, 이 부수적인 폐기물의관리방법

◦ 기록 및 관리
- 기록의 종류 및 작성양식
- 기록의 보존방법 및 보존기간

■ 자체처분 방법 및 절차 등이 위원회로부터 적합한 것으로 판정된 검토결과를 통지받은 자체처분계획서의 내용과 변경이 없어야 한다.
■ 자체처분 되는 방사성폐기물의 총량이 연간 1톤(또는 이에 상당하는 부피)을 초과하지 않아야 한다.[1]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 2 방사성핵종의 자체처분 허용농도

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, u-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, Pm-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

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 국내 자체처분 사례

국내의 경우, 1994년 한전원자력연료(주)에서 발생한 NaF 폐기물에 대한 자체처분이 처음 시행된 이후, 1995년부터 원전에서 발생한 방사성폐기물의 자체처분이 시행되었다. 그 후 관련 법령의 정비를 통하여 2000년부터 본격적으로 자체처분이 시행되었으며, 최근에는 자체처분 대상 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 목재 및 종이류 등도 일부 자체처분 되고 있다. 자체처분 방법을 살펴보면, 철재류는 대부분 재활용되고 있으며, 토양, 폐수지, 활성탄, 콘크리트 등은 매립장에 매립하고 있다. 폐유, 폐수지, 종이 등은 허가 받은 폐기물 처리시설에서 소각하고 있다.

그림 1 원전 연료 금속폐기물 자체처분

그림 2 연구로 2호기 콘크리트 자체처분

발전용 원자로 사업자인 한국수력원자력(주)은 철재류, 폐수지, 활성탄, 콘크리트 등 다양한 종류의 폐기물에 대하여 자체처분을 시행하고 있다. 한전원자력연료(주)는 연평균 3~4회 정도 금속폐기물과 콘크리트 폐기물에 대한 자체처분을 꾸준히 시행하고 있으며, 2009년도부터 신청건수가 증가하고 있다. 한국원자력연구원은 연구로 1,2호기 해체과정에서 발생한 방사성폐기물에 대하여 자체처분을 시행한 바 있다. 기관별 자체처분 계획서 신청건수는 표 3과 같고, 2005년~2009년간 폐기물 종류별 자체처분 수량은 그림 3과 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 3 기관별 자체처분 계획서 신청건수

기관	자체처분 계획서 신청건수								
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	합계
KHNP	11	13	11	12	17	16	14	18	112
KEPCO NF	3	5	4	3	10	26	14	16	81
KAERI	-	1	2	1	1	2	2	-	9
KORAD	-	-	-	-	1	1	1	-	3
기타	-	-	-	-	-	1	-	-	1
합계	14	19	17	16	29	46	31	34	206

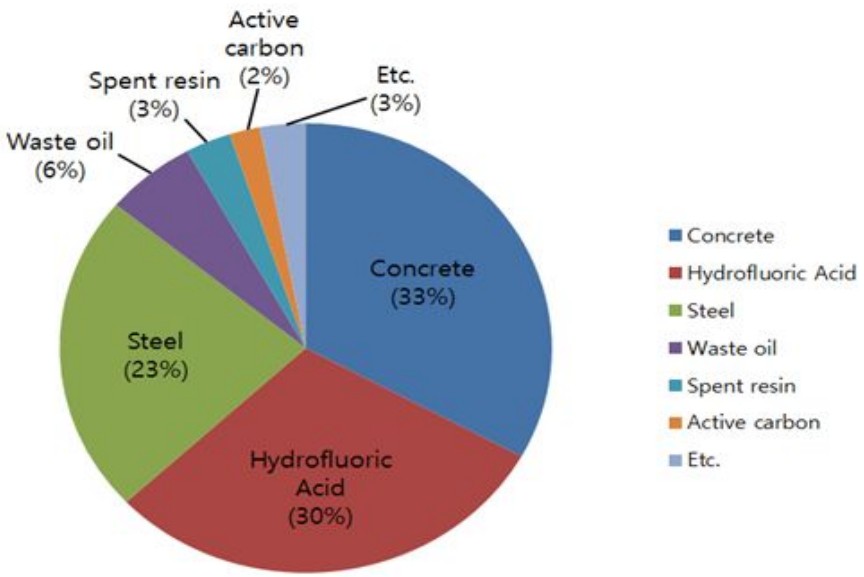

그림 3 2005~2009년간 폐기물 종류별 자체처분 수량

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 국외 자체처분 현황

1. 미국

1980년대까지 방사성폐기물 규제해제에 대한 미원자력규제위원회(U.S. Nuclear Regulatory Commission; USNRC)의 공식적인 입장은 방사선 검출기로는 적정 방사능이 검출되지 않는 폐기물에 대해서는 방사성폐기물 이외의 폐기물로 분류하여 처분하는 것이었다. 1992년 USNRC는 BRC (Below Regulatory Concern) 정책성명을 발표함으로써 규제해제 개념의 본격적인 시행을 계획하였으나, 환경단체와 일반 대중의 반대로 인하여 이듬해 정책성명을 철회한 바 있다. 이후 1994년까지는 사안별 평가를 통하여 원자로 시설에서 발생된 일부 고체폐기물을 규제에서 제외하는 방안이 허가된 사례가 있다. 이에 따라 USNRC는 관련 지침과 규정에 따라 고체상 물질의 규제해제를 극히 제한적으로 허용하였지만, 2005년에는 법령화 중단을 선언함으로써 방사성폐기물의 규제해제를 허용하지 않는 것으로 알려져 있다.

미국의 자체처분 사례를 살펴보면, 원자력발전소에서 발생된 고체폐기물의 처분방법은 크게 2가지로 구분된다. 즉, 방사성폐기물 처분 관련 미연방법인 10CFR61에 따라 허가된 처분시설로 처분하는 방안과 10CFR20.2002에 따른 승인을 취득하여 처분하는 방안 등으로 구분한다. USNRC는 원자력 발전과정에서 발생된 오염도가 낮은 방사성물질에 대해 전체 대상폐기물의 10 %로부터 14C, 55Fe, 63Ni, 129I 및 감마핵종 방사능을 측정하여 규제해제 요건을 검증함으로써 자체처분을 실시한 바 있다(EPRI NP-5677, 1989[18]). 한편 비원자로시설에서 발생된 표면오염 고체폐기물의 경우에, 미원자력위원회 관련 규제지침(USAEC Regulatory Guide 1.86)에 제시된 수준 미만인 경우는 규제해제에서 제외될 수 있으나[19], USNRC는 사업자로 하여금 잔류방사능을 제거하기 위한 합리적인 노력을 기울이도록 요구하고 있는 것으로 알려져 있다.

2. 영국

1986년에 고시된 『방사성물질 자체처분 기준』(The Radioactive Substance Exemption Order)에 의해 연간 개인 및 집단선량 등에 대한 기준을 각각 10 μSv 및 1 person·Sv로 결정한 바 있으며, 원자력 산업계를 포함한 모든 산업계에서 고체상 물질의 규제

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

해제 준위는 인공 방사성핵종에 대하여 0.4 Bq/g으로 정한 바 있다. 천연 방사성핵종을 함유한 고체상 물질의 규제해제 준위는 우라늄에 대하여 11.1 Bq/g, 토륨에 대하여 2.59 Bq/g, 납에 대하여 0.74 Bq/g, 그리고 Ra, Pa, Ac, Po 등 기타 천연방사성핵종에 대하여 0.37 Bq/g으로 정하고 있다.

또한 의료용 개봉선원으로부터 발생되는 고체 방사성폐기물의 경우에 대해서는 『의료용 방사성물질 자체처분 기준』(Medicines' Radioactive Substance Order, 1978)을 적용하여 단시간동안 자체 보관하는 방법으로 방사능을 감쇄시킨 다음 일반 의료용 폐기물로 간주하여 처리할 수 있도록 규정하고 있으며, 표면오염도 기준치를 사안별로 결정하고 있는 것으로 알려져 있다.

3. 일본

일본은 1986년 “방사성폐기물의 천층처분에 대한 규제제외 선량기준”을 통해서 개인선량 0.01 mSv/y를 결정하였고, 구체적인 실행방법은 ICRP 및 IAEA의 지침을 따르도록 잠정 결정하고 있지만, 명확한 기준을 마련하지는 못한 상태이다. 이후 일본원자력안전위원회 산하 전문분과회에서는 1999년과 2001년 경수로, 중수로, 가스냉각로 및 고속증식로 등에서 발생된 폐기물에 대한 규제해제기준(안) 보고서를 발간하여 현재 세부 적용기준에 대해 검토 중에 있다.

현재 규제면제 및 규제해제의 법령화에 대해 산업폐기물 규제를 담당하는 보건복지부(Ministry of Health and Welfare; MHA)가 강한 우려를 표명한 바 있지만, 원자로 및 방사성동위원소 발생기관으로부터 발생된 방사성물질은 『방사성동위원소 등에 의한 방사선 장해방지에 관한 법률』에 근거하여 규제면제 및 규제해제의 자체처분을 검토하고 있다.

4. 독일

독일에서는 입법자문기구인 독일 방사선방호위원회(Radiation Protection Commission; SSK)를 통해 고철 등의 극저준위 방사성물질에 대해서는 재활용하는 것을 원칙으로 정하고, 10 μSv/y 개인선량 기준에 근거하여 권고한 핵종별 규제해제 농도기준을 적용하고 있다. SSK의 규제해제 권고값은 기본 안전기준에 명시된 약 300개의 방사성핵

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

종을 대상으로 하지만, 현재 규제기준을 상당히 완화한 것으로 알려져 있다. 이를 위해 독일에서는 몇 가지 시나리오에 따라서 특정한 물자가 조건부로 규제에서 제외될 수 있으며, 이는 조건부 규제해제 또는 허가배출에 해당하는 것이다. 예를 들면 특정한 핵종의 일반적인 규제해제 준위가 0.1 Bq/g이더라도 매립 또는 소각에 대한 규제해제 준위는 4 Bq/g, 재활용을 위한 금속의 용융에 대해서는 0.6 Bq/g 등으로 시나리오별로 상이한 기준치를 적용하고 있다.

5. 프랑스

1994년부터 DSIN (French Nuclear Safety Authority)은 극저준위 폐기물의 합리적인 관리방안을 도출하기 위한 노력을 기울여 1999년 12월 신규 법안을 제정하였다. 이 법령에서는 폐기물 발생자가 계획서에 따라 각 시설별로 "일반폐기물"이 발생되는 구역과 "방사성폐기물"이 발생되는 구역으로 지역구분 (Zoning)을 이행하도록 요건화하고 있다. 또한 이러한 지역구분을 수행할 때에는 시설의 설계 및 운전이력을 고려하여야 하며, 폐기물의 생성, 특성분석, 수량, 모든 부류의 폐기물에 대한 감시방법, 관리관행, 절차 그리고 임시 저장시설에 대한 사항을 계획서에 기술하도록 요구하고 있다. 적용 예로서 극저준위 방사성물질에 오염된 슬러지 물질을 산업폐기물 매립지에 처분하도록 허가하였으며, 해체폐기물 중 고철의 재활용 사안에 대해 총 방사능 제한을 두어 허가한 바 있다.

6. 스웨덴

1980년대 초부터 스웨덴방사선방호연구소(Swedish Radiation Protection Institute)는 극저준위 방사성물질에 대해 규제면제 원칙을 적용하기로 결정하였고, 1998년에는 구체적인 수행계획이 검토되었다. 현재 규제가 면제된 비방사성폐기물의 경우 개인피폭선량 0.01 mSv/y 및 집단선량 0.1 person·Sv/y를 기준으로 사안별로 적용하고 있다. 대부분의 규제 면제된 비방사성폐기물의 처분방안은 위생매립이나 소각공정을 적용하고 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

7. 캐나다

1989년 극저준위 방사성폐기물의 규제면제에 관한 정책을 발표하였고, 개인선량기준 0.05 mSv/y를 적용하고 있지만, 자체처분에 대한 발생자의 허가신고는 이전에는 AECB (Atomic Energy Control Board)로 알려진 캐나다 규제위원회 (Canadian Nuclear Safety Commission; CNSC)에서의 안전성 검토를 통해 사안별로 처리하고 있다. 즉, 일반 또는 특정 방사성폐기물은 방사성 핵종이나 폐기물의 물리화학적 특성에 따라 규제면제·해제 방안이 결정되며, 필요한 경우 사후 확인도 가능하도록 되어 있다.[2]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 방사성 금속폐기물의 오염 및 제염

제 1 절 방사성 금속폐기물의 오염

1. 방사화부식생성물 개요

방사화부식생성물은 원자로냉각재와 접하는 기기나 배관의 부식으로 생성된 부식생성물이 원자로냉각재를 통해 원자로심에 유입되어 핵연료 피복재 표면에 침적된 후 중성자에 조사되어 방사성물질이 된 상태를 말한다. 이들이 중성자에 조사되어 방사화될 경우 강한 방사능을 띄는 물질로 변환되며 이들은 원자로냉각재내 방사화부식생성물과 계속적으로 연속치환작용이 진행되어 원자로냉각재중에 존재하는 방사화부식생성물은 대부분 높은 방사능을 가지게 된다. 이러한 방사화부식생성물은 일차냉각재계통 배관이나 증기발생기 등의 내부표면에 재침적되어 일차냉각계통을 오염시키거나 기타 연계계통으로 이송, 확산되어 전 계통을 오염시킨다. 방사화부식생성물이 외부로 누출될 경우 핵분열생성물과 마찬가지로 원자로주변 환경을 오염시키는 결과를 초래할 수 있다. 또한 방사성폐기물의 발생을 증가시키는 요인이 되기도 한다.

2. CRUD의 특성

일반적으로 정상운전 중 CRUD의 농도는 10 ~ 20 ppb 정도되며 그 입자의 크기는 1~10 μm 정도라고 보고되고 있다. CRUD 입자들은 색깔이 검고 자성을 띄고 있다. CRUD의 주성분은 $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$(Hematite) 도는 Fe_3O_4(Magnetite)형의 철산화물과 $Ni_xFe_{3-x}O_4$(Nickel Ferrite)가 주종을 이루나 최근의 연구결과 개선된 핵연료의 침적물은 니켈-철 산화붕산인 Ni_2FeBO_5(보나코다이트)도 발견되고 있다.

또한 CRUD를 구성하는 중요한 원소로 코발트가 있다. 스테인레스강과 인코넬에서는 코발트가 0.1% 내외로 함유되어 있으나 CRUD 성분을 분석하면 1% 이상이 코발트로 되어 있는 것이 보통이다. 이들은 대부분 마모생성물(Wear Products)에서 발생된 CRUD에서 볼 수 있으며 증기발생기 인코넬 합금과 원자로내장품인 스테인리스스틸에서 주로 발생하고 그 외에 고 코발트 합금강인 스텔라이트(Stellite)와 같은 합금강에서 나온

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

것으로 추정된다.[3]

3. 방사성 금속폐기물의 오염 형태

방사성 금속폐기물의 오염 특성은 부착·집적 오염, 내부성장 부식산화막 중의 오염 및 모재 침투성 오염의 3가지 형태로 분류할 수 있다. 부식산화막의 형태는 성장 산화막과 집적 산화막의 조성이 다소 차이는 있으나 크게 분류하면 철산화물(Fe_2O_3, Fe_3O_4), 철-크롬/철-니켈/니켈-크롬 산화물($FeCr_2O_4$, $Ni-Fe_2O_4$, $NiCr_2O_4$) 등으로 분류할 수 있다. 부착·집적 오염은 원자력시설의 계통수 중에 있던 크러드가 재질에 부착된 것으로 아주 느슨한 형태로 오염되어 있다. 내부성장 부식산화막 중의 오염은 모재의 부식산화막 속으로 방사성핵종이 침투하여 형성된 것으로 고착성 오염을 이루고 있다. 침투성 오염은 모재의 미세공을 통하여 핵종이 침투해서 형성된 것이다. 주로 표면제염은 금속표면의 부식산화막내 오염과 모재에 침투되어 있는 오염물질을 제거하는 것으로 경우에 따라 화학적, 전기화학적 및 물리적 방법이 이용되고 있다.[4]

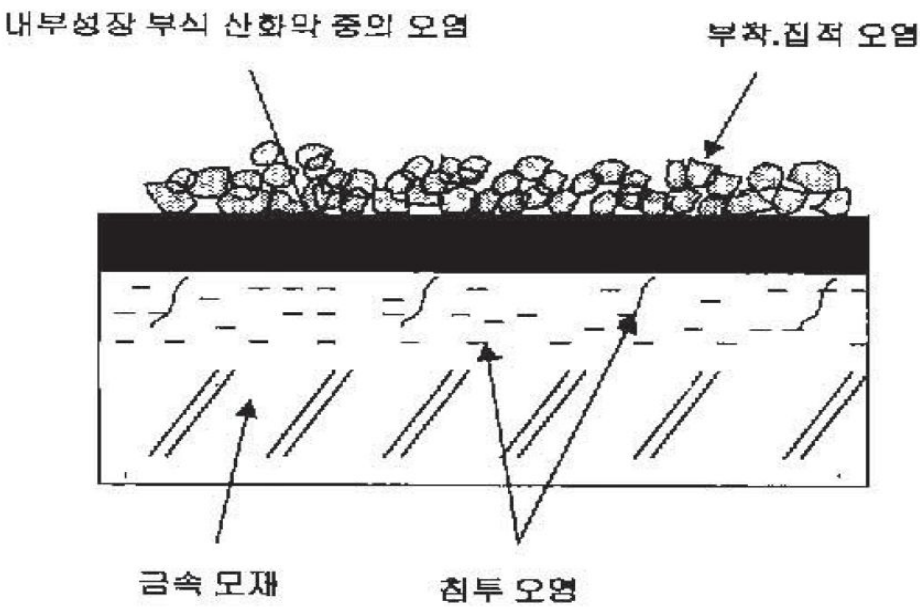

그림 4 금속의 오염 형태

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 방사성 금속폐기물의 제염

1. 방사성 금속폐기물 제염기술 소개

제염은 세척, 가열, 화학처리, 물리적 처리, 또는 다른 기타 방법을 사용하여 시설이나 장비의 표면에 묻어있는 오염을 제거하는 과정을 지칭한다. 해체에 적용되는 제염의 경우, 가능한 많은 방사능을 제거하여 해체된 설비를 재활용 할 수 있는 단계까지 방사능 준위를 낮추는데 그 주된 목적이 있다. 일반적으로 방사성핵종은 금속배관의 마디마디 틈 사이에 쌓이면서 다른 이물질과 함께 농축되어 진다. 따라서 대부분의 경우 방사능오염물질이 묻어 있는 모든 산화물을 제거하여야하며 배관의 얇은 층막도 벗겨내는 것이 필요하다. 두께가 1~5㎛인 외부 부식산화막 층이 제거되면 제염계수는 약 5정도까지를 얻을 수 있으며, 2~10㎛ 두께의 내부 부식산화막 층을 제거하면 약 50 정도까지의 제염계수를 얻을 수 있고, 5~30㎛ 정도의 모재를 식각해 내면 10,000까지의 제염계수를 얻을 수 있음을 알 수 있고 이는 그림 5에 나타내었다.

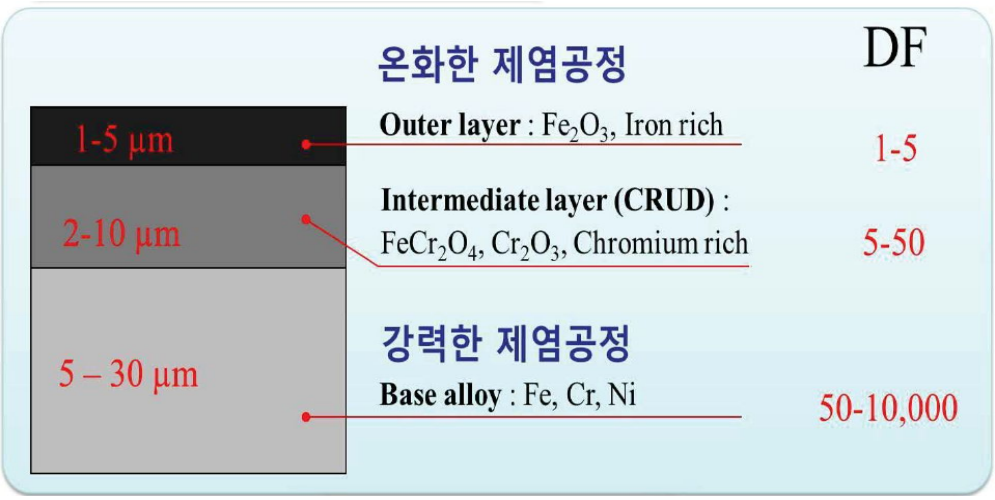

그림 5 제염 시 요구되는 제염계수

가. 킬레이트 및 유기산(Chelation and organic acids)

킬레이트화 반응은 유기화학제를 금속 이온에 결합시키는 것으로 화학제와 결합된 금

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

속 이온은 비용해(Insoluble) 상태의 금속으로부터 분리되어 용액으로 이동되고 결국 제거된다. 킬레이트제는 금속 이온의 양전하와 결합하려는 음전하를 많이 가지고 있다. 따라서 킬레이트제는 금속을 움켜잡고 있으려는 특성으로 인해 물질 표면에 부착되어 있는 금속 오염물질들을 갈고리처럼 끌어내어 제거할 수 있다.

원전 제염에서 킬레이트 제염방법을 사용할 경우 오염물질인 금속 이온이 킬레이트제와 강하게 결합하고 이러한 결합물이 다시 침적되거나 다른 물질과 재결합될 확률이 매우 낮기 때문에 다른 화학제염 방법에 비해 장점을 지니고 있다. 그러나 킬레이트 결합물은 액체로 유동성을 지니기 때문에 사용된 제염용액이 환경으로 유출되지 않도록 반드시 폐기물 관리를 철저히 해야 한다. 킬레이트제로 다양한 물질이 사용되고 있으며 제염 목적으로 주로 사용되는 킬레이트제는 다음과 같다.

- 옥살산 (Oxalic acid)
- 구연산 (Citric acid)
- 글루콘산 (Gluconic acid)
- EDTA (Ethylenediaminetetraacetic acid: 에틸렌디아민 사초산)
- HEDTA (Hydroxyethylenediaminetriacetic acid)
- EDDS (Ethylenediaminedisuccinic acid)
- OEDPA (Oxyethylidenediphosphonic acid)
- DTPA (Diethylenetriaminepentaacetic acid)

또한 금속, 콘크리트, 나무 등의 표면 제염을 실시할 경우 킬레이트가 사용되며 복도, 벽, 천장, 파이프, 배관의 제염에 효과적이다.

나. 강 무기산 및 관련 화학작용제 (Strong mineral acids and related materials)

화학적 제염에 사용되는 강 무기산의 종류로는 염산(HCl), 질산(HNO_3), 황산(H_2SO_4), 인산(H_3PO_4)이 있다. 산을 이용한 제염반응은 다음과 같다. 산으로 인해 수소이온이 생성되고 이러한 이온들은 오염물질의 산화물을 공격하고 산화물 격자를 와해시킨다.

$$8H^+ + Fe_3O_4 \rightarrow 2Fe^{3+} + Fe^{2+} + 4H_2O$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

또는 이러한 수소이온들이 금속 표면을 직접적으로 공격하여 결합된 오염물질을 떨어뜨리기도 한다.

$$3H^{+} + Fe \rightarrow Fe^{3+} + 1.5H_2$$

이러한 강 무기산의 주된 화학반응 목적은 오염물질이 묻어 있는 금속 표면 산화막을 용해하는 것이지만, 높은 온도와 높은 농도로 접촉시간을 늘려주면 금속 기저에 깊숙이 존재하는 오염물질 막도 제거할 수 있다. 적절한 주의만 한다면 아연과 같은 높은 활성금속(Reactive metal)을 제외한 모든 금속의 표면에 강 무기산을 적용할 수 있다.
강 무기산을 이용한 제염의 장점은 비용이 비교적 저렴하며, 화학공정이 빠르고 효과적이며, 일반산업에서 주로 사용되는 산들로 제염 시 이와 관련된 화학기술자를 구하기 쉬운 점이다. 반면 안전 및 취급과 관련하여서 몇몇 단점을 지니고 있다. 우선 폐기물을 중성화시킬 필요가 있으며 공격적인 화학반응으로 인해 위험도가 높고 이러한 반응을 조절하기 어렵다는 단점이 있다. 또한 제염과정에서 수소나 질소산화가스(NOx)와 같은 폭발성의 가스가 생성될 수도 있다.

- 염산은 화학처리 산업에서 세척제로 널리 사용되고 있다. 방사성물질의 제염측면에서는 염산은 금속표면의 90㎛ 깊이까지 방사성오염물질과 산화막을 제거하는데 주로 사용된다. 효과적인 제염이 이루어지는 금속의 두께는 적용되는 산의 농도와 오염물질과 접촉시간, 그리고 제염 대상금속의 고유특성에 따라 달라진다. 염산은 주로 금속 산화물과 같은 무기(Inorganic) 침적물 제염에 사용되고 있으며 유기(Organic) 침적물에 대해서는 효과가 낮은 것으로 밝혀져 있다.

- 질산은 스테인리스강과 인코넬 시스템의 금속 산화막을 용해하는데 널리 사용되고 있으며 몰리브덴강(Molybdenum steel)과 EP-630 합금의 제염에도 적용되고 있다. 일반적으로 섭씨 75도에서 10% 농도로 용액을 만들어 사용한다. 질산을 이용한 제염은 원거리 오염지역에 적용가능하며 수조에서 사용할 경우 수소의 생산을 억제하는 장점이 있다. 그러나 탄소강의 제염에는 질산을 사용할 수 없으며 불화합 물질과 혼합하여 사용할 경우 화재나 폭발의 위험성이 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

- 황산은 희석하여 침적물 제거에 사용하거나 농축시켜 유기물 제거에 사용한다. 그러나 황산칼슘의 비용해성으로 인해 칼슘이 포함된 물질의 제염에는 사용하지 않는다. 특히, 황산과 질산을 50:50의 비율로 혼합한 Sulfonitric 산이 원전의 제염에 사용되고 있다. 그러나 제염계수가 높지 않고 부식성이 매우 높아 다른 강 무기산들처럼 널리 사용되지는 않는다.

- 인산은 섭씨 60 ~ 70도 사이에서 탄소강의 표면에 산화막을 제거하는데 주로 사용되고 있다. 10% 농도의 인산용액은 약 20분 정도의 오염물질과의 접촉시간으로 오염물질을 99%까지 제거할 수 있다.

다. 화학 포말 및 화학 젤 (Chemical foams and gels)

포말(거품)과 젤은 다른 화학제염제를(주로 킬레이트) 운송하는 매개물로 사용되며 포말과 젤 자체도 약간의 제염능력을 지니고 있다.

포말 제염방법은 오버헤드를 포함하여 어떤 표면에도 사용할 수 있으며 파이프 또는 폐쇄된 공간에도 적용할 수 있다. 포말은 물, 세정제, 제염제를 혼합하여 만들 수 있다. 그리고 매우 적은 양의 2차 폐기물을 발생하고 물 분무기와 같이 사용할 경우 분진의 발생도 피할 수 있다. 포말 제염의 효과는 오염물질과의 접촉시간을 늘려줌으로써 증가시킬 수 있다. 그러나 포말에 포함된 화학제염제가 오염물질과 직접 접촉하는 면적이 포말을 사용하지 않고 화학제염제를 직접 사용하는 경우보다 작기 때문에 목적한 제염효과를 달성하기 위해서는 반복적인 제염이 필요하다.

젤은 오버헤드와 특이한 형태의 표면에 대해 분무하여 솔질한 후 닦아내거나 또는 얇게 벗겨낸다. 젤은 포말을 이용하여 화학제염제를 혼합할 수 없는 경우에 대체 방법으로 사용된다. 포말과 같이 젤도 킬레이트, 세정제, 다른 산들을 혼합하여 사용할 수 있다. 젤 제염방법의 효과는 오염물질과의 접촉시간을 늘려줌으로써 증가 시킬 수 있다. 젤 제염방법도 목적한 제염효과를 달성하기 위해서는 반복적인 제염을 실시해야 하며, 물 분무기와 같이 사용할 경우 분진의 발생을 피할 수 있다.

라. 산화제 및 환원제 (Oxidizing and reducing (REDOX) agents)

산화 및 환원제 제염방법은 화학반응에서 환원제가 전자 하나를 받고 산화제가 전자

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

하나를 주는 반응을 가리킨다. 금속은 특정한 산화상태에서는 다른 상태에 있을 때 보다 더욱 용해성이 높기 때문에 원소의 산화상태를 조절하는 능력은 매우 중요하다. 일반적으로 산화상태가 올라갈수록 용해도는 증가하게 된다. 따라서 제염에서는 환원보다는 산화가 보다 중요한 반응이다. 그러나 낮은 산화상태의 금속이 킬레이트와 강한 결합능력을 가지고 있다면 금속의 산화상태를 환원하는 것이 유용하다. 또한 주로 오염물질이 금속 산화물 형태로 존재하기 때문에 원소의 산화상태를 조절하는 능력은 제염에 있어 중요하다. 금속 산화물 격자에서 일부 원자들은 산화상태가 변화됨으로 인해 그들의 격자 상태가 붕괴되기도 한다. 이로 인해 표면에 붙어 있는 오염물질을 쉽게 제거할 수 있다. 산화 및 환원제 제염방법은 주로 금속에 묻어 있는 부식 크러드, 철, 크롬 산화물을 제거하는데 사용된다. 방사성오염물질은 이러한 산화물에 포함되어 있으며 용해나 산화물 격자 파괴를 통해 산화물을 오염지역 표면에서 제거 함으로써 제염목적을 달성한다.

마. TechXtract

TechXtract 기술은 상품으로 등록된 화학작용제를 사용하여 콘크리트, 벽돌, 나무, 금속 등에 고착화 되어 있는 방사성물질, PCB, 기타 유해한 유기물 및 무기물을 제거하는 화학제염 기술이다. 이 기술에 사용되는 화학작용제는 제염대상에 따라 달라질 수 있다. 모든 제염공정은 이동이 가능한 트레일러 안에서 이루어지며 이러한 트레일러는 기중기와 레일(Rail) 장치를 이용하여 제염하고자 하는 조그마한 물체들을 순차적으로 이동시킨다. 따라서 제염 대상물체는 여러 종류의 화학작용제에 순차적으로 담가지게 된다. 이때 오염물질은 초음파에 의해 오염물질 저장조로 모이게 된다. 한편, 위에 기술한 바와 같이 화학작용제에 오염물질을 담금질하기 어려운 경우, TechXtract 화학작용제를 제염하고자 하는 표면에 얇은 안개처럼 분무할 수 있다. 그리고 이러한 화학작용제가 오염지역 표면과 화학반응을 하도록 일정 시간을 기다린 후에 연마패드(Abrasive pad)를 사용하여 표면을 문질러 제염을 실시한다. 마지막으로 물 청소용 진공청소기를 사용하여 오염지역을 세척하게 된다.

TechXtract 화학작용제는 비 다공성(Non-porous) 표면을 가진 오염물질뿐만 아니라 표면에 구멍이 많거나 미세기공이 있는 오염물질의 제염에 사용된다. 물리화학적 힘에 의해 화학작용제는 오염물질의 기저까지 침투하게 되고 화학적 또는 정전기적으로 결합하게 된다.[5]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

바. 건식 분사연마 제염

건식연마 분사제염기술은 실리콘 카바이드와 같은 연마재를 사용하여 분사노즐을 통해 오염표면에 분사하여 표면으로부터 오염물질을 제거하는 기술이다. 벨기에, 스웨덴, 미국 등 해외 여러 나라에서는 1990년도부터 건식연마 분사제염기술을 금속, 유리 및 콘크리트의 표면에 오염된 오염물질을 제거하기 위해 개발해왔고, 현재 실용화 단계수준의 기술을 갖고 있다. 건식 분사연마제염은 일반적으로 짧은 시간에 매우 높은 제염계수를 나타낸다. 장비는 잘 발달되어 있고, 상업적으로 이용 가능하며, 원격 조작이 가능하다. 제염 대상 표면에 형성되어 있는 부식산화막 층을 포함하여 점착성 소재를 제거할 수 있으며, 탱크 및 배관의 내측을 처리하기 위한 특수 도구 또한 이용 가능한 장점이 있다.

2. 해외 제염 사례

가. 일본

일본에서는 가압경수로의 증기발생기를 고압 습식 연마제염법으로 제염한 사례가 있다. 이때 연마재로는 제염제가 잔류해도 계통에 악 영향을 주지 않는 무수붕산(B_2O_3)을 사용하였다. 이 제염법은 기존의 분사연마 제염 작업 시 제염장치 설치 및 적용 등이 SG 내부에서 수동조작으로 이루어진 것에 비해 핸드홀에 자동 제염 장치를 부착시켜 수실 내부를 원격 조작으로 제염하는 방법으로 작업자 피폭 저감면에서 매우 우수한 효과를 나타내었다. 이 제염 시스템은 원자로 격납용기(CV)내에 설치한 무수붕산을 공급하는 Grid Pot, 고압수를 공급하는 급수 펌프·고압 펌프, 수실부와 1차 냉각수 배관을 격리하는 노즐 댐 및 배수 설비로 구성되어 있다. 제염 시간은 약 20시간이며, 300kgf/cm^3 정도의 고압수를 분사하여 그 흡입압력으로 무수붕산을 분사함으로써 수행되었다.

나. 벨기에

벨기에는 BR3 증기발생기(중량 30톤, 길이 8m)를 SCK·CEN에서 개발한 MEDOC(Metal decontamination by oxidation with cerium)으로 명명되는 화학제염법을 사용하여 제

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

염하였다. 황산 용액 내에서 오존과 함께 강산화제인 Ce를 지속적으로 재순환하여 사용하는 방법으로 증기발생기 수실과 세관에 대하여 MEDOC 제염공정을 적용하였다. 제염작업은 3주간에 걸쳐 총 30 싸이클의 제염작업을 수행하였다. 제염 후 금속폐기물의 80%는 Co-60 핵종에 대하여 비방사능이 0.1Bq/g 이하가 되어 직접 방출하여 고철업자에게 판매하였다.

다. 스웨덴

스웨덴의 Studsvik에서는 증기발생기 폐기물 처리개념을 확립하였으며, Ringhals 원전에서 교체한 증기발생기를 전용 절단 cell 내에서 원격으로 절단한 후 건식 연마 제염을 수행하여 310톤의 금속폐기물 중 288톤(전체의 88%)을 무제한 방출하였다. 2005년에 Ringhals 원전에서 교체된 중량이 300톤인 웨스팅하우스모델 증기발생기 (20m 길이의 인코넬 전열관 3,400개로 이루어진 길이 19m, 직경 4.5m 크기)의 총 방사능 재고량은 650GBq 이었으며, 그 중 약 95%가 전열관 다발에 분포하였으며, 5%가 수실에 존재하였다. 4,700개의 인코넬-600 재질의 전열관 다발에 오염된 방사성 핵종의 85%(510GBq)를 건식 분사연마제염으로 제염하였다. 총괄적으로 증기발생기의 Steam dome과 outer shell을 제염 처리하여 중량기준으로 80% 이상 (288 t)을 자체처분 할 수 있었다.

라. 독일

독일 Gundremmingen에서는 KRB-A 원자로에서 발생한 증기발생기의 감용 및 자체처분을 위하여 전기화학적 제염을 실시하였다. 3기의 증기발생기 수실을 세절한 조각 금속의 무제한 방출을 위하여 인산 전해질을 사용한 전해제염을 수행하였으며, 잔류방사능 측정 결과 초기 표면 오염도가 20,000Bq/cm^2에서 무제한 방출 수준으로 감소되었고, 이를 통해 초기의 1.5%만이 최종 방사성폐기물로 발생하였다.[6]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 평가코드 소개 및 입력인자 분석

제 1 절 RESRAD-RECYCLE 코드 소개

RESRAD-RECYCLE 전산코드는 규제해제된 철재와 알루미늄의 재활용 및 재이용 과정에서 유발되는 방사선학적 영향을 평가하기 위한 목적으로 US DOE(Department of Energy)의 지원 하에서 ANL(Argonne National Laboratory)의 EAD(Environmental Assessment Division)에서 2003년 개발하였다. 그림 8은 RESRAD-RECYCLE의 재활용 절차 개념도를 나타낸다. RESRAD-RECYCLE 전산코드는 금속성 방사성폐기물의 수집 · 운반 · 처리작업자(Worker)와 소비재 및 공공재를 이용하는 일반인(Public)에 대해서 총 41개의 시나리오와 54개의 핵종에 대해서 잠재 피폭선량 및 위해도를 평가할 수 있다.

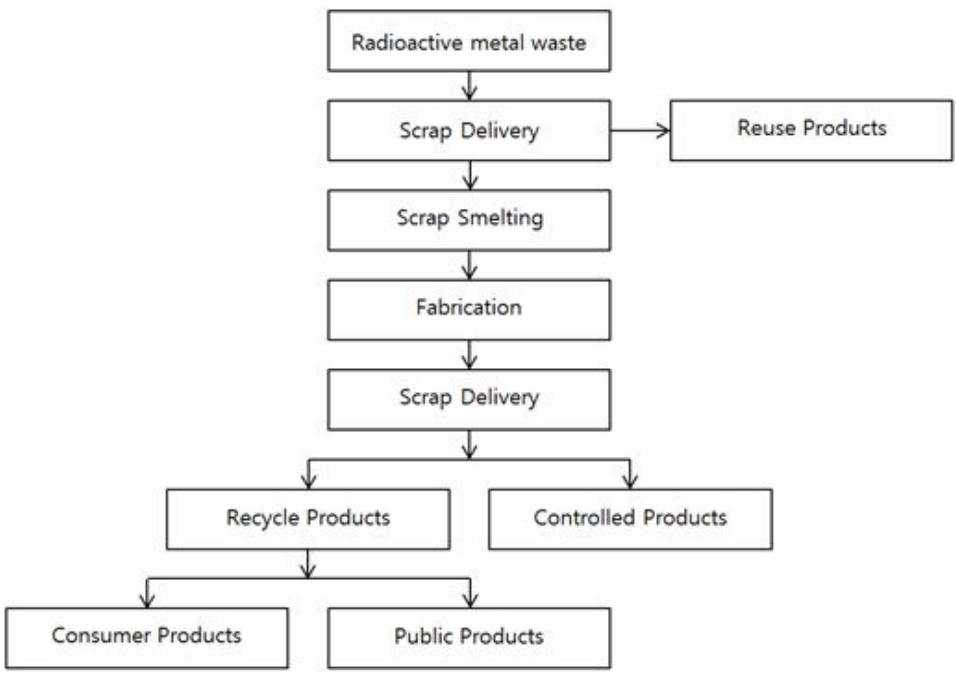

그림 6 RESRAD-RECYCLE 코드의 재활용 절차 개념도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 RESRAD-RECYCLE 코드 기본 입력인자 분석

RESRAD-RECYCLE 전산코드는 방사성폐기물을 자체처분 하는 공정에서 발생하는 작업자의 피폭선량과 소비재와 공공재의 유통에서 발생하는 일반인의 피폭선량을 평가하는 코드이다. 평가를 위해 코드 내에는 자체처분 작업공정과 일반인이 사용하는 최종 생산품 별로 시나리오가 구성되어있다. RESRAD-RECYCLE 전산코드의 세부 시나리오는 표 4에 제시하였다.

표 4 RESRAD-RECYCLE 전산코드의 시나리오

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

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

또한 코드의 각 시나리오에는 평가를 위한 입력인자들이 있고 이 입력인자는 표 5에 제시하였다.

표 5 RESRAD-RECYCLE 전산코드 내 입력인자

내부피폭 계산을 위한 입력값	
섭취 DCF(Dose Conversion Factor)	Respiratory Protection Fraction
흡입 DCF(Dose Conversion Factor)	Dust fraction from slag
Exposure Duration (hr/yr)	Emission Rate (1/hr)
Inhalation Rate (m^3/hr)	Surface Transfer Fraction
Ingestion Rate (g/hr)	Ventilation Rate (1/hr)
Contaminant Dust Loading (g/m^3)	Room Volume (m^3)
Respirable Fraction	Source Density (g/cm^3)
Dilution Fraction	Source Thickness (cm)
Initial Decay Time (yr)	Source Radius (cm)
Number Of Individuals	Number of Sides
Population Exposure Duration (hr/yr)	Distance (cm)

제 3 절 국내 여건에 맞는 입력인자 조사

코드 내에는 작업자와 일반인의 위해도 평가를 위한 여러 입력인자들이 존재한다. 이 입력인자는 대부분이 국내 여건에 맞지 않기 때문에 적절한 수정이 필요하다. 그러나 모든 입력인자를 국내 여건에 맞게 수정하기에는 많은 제약이 있다. 따라서 코드의 입력인자 중 주요 입력인자를 선정하고 이 주요 입력인자를 국내 자체처분 사례를 바탕으로 도출하여 평가에 적용하였다.

1. 민감도 분석

본 연구에서는 주요 입력인자 선정을 위해 코드 입력인자 중 작업시간, 흡입률, 섭취

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

율에 대해 민감도 분석을 수행하였다. 분석은 금속을 용융하기 전단계인 고철운반, 철강용융 작업자 시나리오를 이용하였고, 각 시나리오별 작업시간, 흡입률, 섭취율에 코드 기본 입력인자의 50%, 100%, 150% 비율로 값을 입력하여 분석하였다. 민감도 분석 결과 흡입률과 섭취율의 분석 값은 큰 변화가 없었으나 작업시간의 분석 값은 적용한 비율에 따라 변화가 확인되었다. 이에 따라 작업시간의 변화에 가장 민감한 것을 알 수 있었고, 주요 입력인자를 작업시간으로 선정하였다. 민감도 분석 결과는 표 6~8에 제시하였다.[7]

표 6 작업시간 변화에 따른 작업자 시나리오의 민감도분석 결과

작업시간			
시나리오	50%	100%	150%
절단작업자	1.74×10^{-2}	3.48×10^{-2}	5.22×10^{-2}
적하작업자	2.48×10^{-2}	4.97×10^{-2}	7.45×10^{-2}
트럭운전자	2.18×10^{-2}	4.36×10^{-2}	6.54×10^{-2}
철재류취급자	1.78×10^{-2}	3.55×10^{-2}	5.33×10^{-2}
야적장취급자	1.61×10^{-1}	3.21×10^{-1}	4.82×10^{-1}
용융로적하작업자	2.98×10^{-2}	5.96×10^{-2}	8.94×10^{-2}
용융로운전자	1.07×10^{-1}	2.13×10^{-1}	3.20×10^{-1}
분진여과기취급자	4.74×10^{-3}	9.48×10^{-3}	1.42×10^{-2}
정련작업자	1.17×10^{-1}	2.35×10^{-1}	3.52×10^{-1}
강괴주조작업자	5.85×10^{-2}	1.17×10^{-1}	1.76×10^{-1}
소모품주조작업자	2.70×10^{0}	5.40×10^{0}	8.09×10^{0}
슬래그작업자	1.13×10^{-8}	2.26×10^{-8}	3.39×10^{-8}

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 7 흡입률 변화에 따른 작업자 시나리오의 민감도분석 결과

흡입률			
시나리오	50%	100%	150%
절단작업자	3.47×10^{-2}	3.48×10^{-2}	3.48×10^{-2}
적하작업자	4.97×10^{-2}	4.97×10^{-2}	4.97×10^{-2}
트럭운전자	4.36×10^{-2}	4.36×10^{-2}	4.36×10^{-2}
철재류취급자	3.55×10^{-2}	3.55×10^{-2}	3.55×10^{-2}
야적장취급자	3.21×10^{-1}	3.21×10^{-1}	3.21×10^{-1}
용융로적하작업자	5.96×10^{-2}	5.96×10^{-2}	5.96×10^{-2}
용융로운전자	2.13×10^{-1}	2.13×10^{-1}	2.13×10^{-1}
분진여과기취급자	9.48×10^{-3}	9.48×10^{-3}	9.48×10^{-3}
정련작업자	2.35×10^{-1}	2.35×10^{-1}	2.35×10^{-1}
강괴주조작업자	1.17×10^{-1}	1.17×10^{-1}	1.17×10^{-1}
소모품주조작업자	5.40×10^{0}	5.40×10^{0}	5.40×10^{0}
슬래그작업자	2.09×10^{-8}	2.26×10^{-8}	2.44×10^{-8}

표 8 섭취율 변화에 따른 작업자 시나리오의 민감도분석 결과

섭취율			
시나리오	50%	100%	150%
절단작업자	3.45×10^{-2}	3.48×10^{-2}	3.51×10^{-2}
적하작업자	4.96×10^{-2}	4.97×10^{-2}	4.98×10^{-2}
트럭운전자	4.36×10^{-2}	4.36×10^{-2}	4.36×10^{-2}
철재류취급자	3.52×10^{-2}	3.55×10^{-2}	3.58×10^{-2}
야적장취급자	3.20×10^{-1}	3.21×10^{-1}	3.23×10^{-1}
용융로적하작업자	5.95×10^{-2}	5.96×10^{-2}	5.97×10^{-2}
용융로운전자	2.13×10^{-1}	2.13×10^{-1}	2.13×10^{-1}
분진여과기취급자	9.46×10^{-3}	9.48×10^{-3}	9.50×10^{-3}
정련작업자	2.35×10^{-1}	2.35×10^{-1}	2.35×10^{-1}
강괴주조작업자	1.17×10^{-1}	1.17×10^{-1}	1.17×10^{-1}
소모품주조작업자	5.39×10^{0}	5.40×10^{0}	5.40×10^{0}
슬래그작업자	1.31×10^{-8}	2.26×10^{-8}	3.22×10^{-8}

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 국내 자체처분 사례에 따른 입력인자 조사

한국원자력연구원은 토양 및 콘크리트의 자체처분 시 발생한 폐드럼을 2011년도에 자체처분한 경험이 있다. 자체처분 수행 공정은 먼저 한국원자력안전기술원의 인·허가를 받고 폐드럼을 전량 수거업체로 보낸다. 수거업체에서 일반 고철과 폐드럼을 혼합·압축·절단 방식으로 처리한 후 제강소로 보내고 제강소에서 재활용품으로 가공한 뒤 유통하여 최종적으로 일반 소비자가 사용할 수 있도록 하였다.

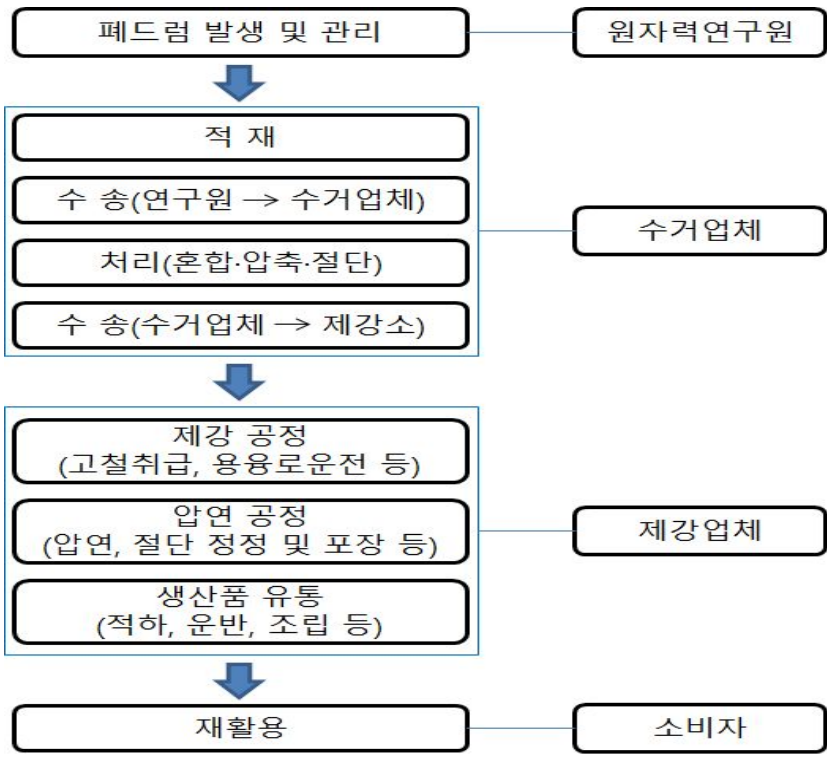

그림 7 원자력연구소에서 수행한 폐드럼 자체처분 공정도

한국원자력연구원은 위와 같이 자체처분을 수행하면서 국내 고철처리 작업자의 실제 작업시간을 표 9와 같이 도출하였다. 실제 작업시간을 보면 코드의 기본 입력값과 상이하다는 것을 알 수 있다. Scrap cutter는 10배, Scrap loader는 9배, Scrap truck driver는 2배 증가하였다.[8]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 9 고철처리 작업자의 작업시간 비교

작업명	시나리오명	작업시간 (hr/yr)		비고
		평가코드 (Default)	실제작업 (KAERI)	
야적장작업	Scrap cutter	12	126	
	Scrap loader	4	36	
고철 운반	Scrap truck driver	4	4	2회

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 선량평가

제 1 절 평가대상 선정

원자력발전소는 1차측과 2차측으로 나누어져 있고 2차측 기기와 구조물은 대부분 극저준위이므로 원전해체 시 제염 수행 여부와 관계없이 대부분 자체처분이 가능할 것으로 예상된다. 이에 따라 본 연구에서는 1차계통에 속해있는 기기 및 구조물을 대상으로 평가를 수행하기 위해 BRT(Boron Recovery Tank) 배관을 평가대상으로 선정하였다. 또한 제염 수행에 따른 자체처분 평가를 위해 가압기를 대상으로 추가 평가를 수행하였다.

1. BRT(Boron Recovery Tank) 배관

BRT(Boron Recovery Tank) 배관은 1차측 화학 및 체적제어계통에 속해있는 BRS(Boron Recovery System) 계통의 구조물이다. BRS(Boron Recovery System)는 냉각재 계통의 가동, 정지, 붕산희석운전 동안에 체적제어탱크로부터 나오는 유출유량과 격납용기 내부기기의 냉각재 누설, 밸브스템 누설수, 배수 및 방출밸브의 배출수로 구성되는 원자로배수탱크(RDT) 및 격납용기 외부의 기기배수탱크(EDT) 내용물을 처리하는 설비이다. BRT 배관의 핵종분석은 ISOCS 검출기를 이용하였고 검출된 핵종의 방사능 농도는 핵종 특성과 함께 표 10에 제시하였다. 평가에 이용된 BRT 배관의 처리량은 0.024t 이다.

표 10 BRT 배관의 방사성핵종 특성 및 농도

Concentration of Nuclides (Unit : Bq/g)		
Nuclide	Half-Life	Activity Concentration
Co-60	5.27y	1.66×10^{1}

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 가압기(Pressurizer)

가압기는 원자로 냉각재 계통 고온관에 수직으로 설치된 원통 압력용기로 원자로 냉각재 계통 운전압력을 유지하게 하고, 과도상태 중 원자로 냉각재 계통의 체적변화를 보상해주는 기기이다. 본 연구에서 평가한 가압기의 처리량은 350t이다.

제 2 절 선량평가 조건

본 연구에서는 원전해체 시 방사성 금속폐기물의 자체처분을 위해 BRT 배관과 가압기를 대상으로 평가를 수행하였다. 평가에서는 입력인자와 제염계수(DF)를 변수로 이용하였으며, 입력인자는 코드 기본입력인자와 도출한 입력인자를 이용하였다. 제염계수는 가압기의 높은 방사능 준위를 고려하여 평가에 적용하였다. 가압기는 원자력발전소 1차계통에 속해있는 기기로 냉각수에 의해 오염되어 높은 방사능을 띄기 때문에 적절한 제염을 수행하여야 자체처분이 가능할 것으로 판단된다. 이에 따라 본 연구에서는 화학적 제염법과 물리적 제염법으로 가압기 제염 수행을 가정하였고 각각 제염계수는 화학적 제염법 DF=1,000, 물리적 제염법 DF=10,000으로 평가를 수행하였다. 화학적 제염법 제염계수는 유동연마제염법을 참고하였으며, 해외사례에 따르면 일본 JPDR(Japan Power Demonstration Reactor)에서 유동연마제염법을 이용하여 원자로수 정화계통을 계통제염한 결과 제염계수가 200~1600까지 가능한 것으로 조사되었다.[9] 물리적 제염법 제염계수는 분사연마제염법을 참고하였고 타기관 보고서에 의하면 제염계수가 최고 16,000까지 가능한 것으로 확인되었다. 보고서에 제시된 실험내용에 따르면 울진원전 인출 증기발생기 방사능오염 세관 시편에 6분, 9분, 12분 분사연마 제염을 수행하여 거리별 방사능 농도를 확인하였다. 실험 결과는 표 11에 나타내었다.[6]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 11 제염시간에 따른 거리별 제염계수

구분	6분	9분	12분
1m	2,399	15,907	7,271
4m	265	4,794	12,107
7m	184	2,145	8,705
10m	127	691	3,592
13m	216	1,110	1,921
16m	287	1,372	8,187
19m	8,235	>16,000	>16,000

1. 입력인자 수정

선량평가를 수행하기 위해서는 먼저 위에서 설명한 입력인자들을 수정해야 한다. 본 연구에서는 코드내 입력인자 중 흡입률, 섭취율을 국내 평가체계에 맞게 ICRP 60으로 수정하였다. 작업자 시나리오는 ICRP 72에 명시되어있는 호흡과 섭취의 선량환산인자를 적용하여 내부피폭선량을 평가하였고 호흡에 대한 AMAD(Active Median Aerodynamic Diameter)는 ICRP 68에 근거하여 5μm의 AMAD 입자크기를 적용하였다.[10]

2. 평가 시나리오 선정

RESRAD-RECYCLE 전산코드를 이용하여 평가를 수행하기 위해서는 평가를 수행할 시나리오를 선정해야 한다. 코드 내에는 작업자 시나리오와 일반인 시나리오 총 41개 시나리오가 있다. 국내의 경우 무제한 재활용에 대한 규정이 명확하지 않아서 본 연구에서는 무제한 재활용(소비재, 공공재, 재이용) 시나리오 16개를 제외하고 국내에 적용 가능한 작업자 시나리오와 제한적 재활용 시나리오 25개를 대상으로 평가를 수행하였다.

3. 시나리오별 작업시간 도출

RESRAD-RECYCLE 전산코드는 시나리오 별로 여러 입력인자들이 있고 이 입력인자들에 따라 평가결과 값이 출력된다. 따라서 상황에 맞는 정확한 입력인자를 이용하여 평가를 수행하여야 한다. 그러나 국내의 경우 자체처분 공정에 따른 작업자 데이터가 미비

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 민감도 분석을 수행하여 작업시간을 주요 입력 인자로 선정하였고 고철처리 작업자(절단작업자, 적하작업자, 트럭운전자)의 작업시간을 도출하여 평가를 수행하였다.

가. BRT(Boron Recovery Tank) 배관

코드에서 작업시간은 폐기물의 처리량에 비례한다. 본 논문의 평가에 사용된 BRT 배관의 처리량이 0.024t으로 극 미량이므로 코드 내 작업시간이 매우 짧다. 따라서 보수적인 결과를 위해 최소 시간단위인 1시간으로 작업시간을 수정하였다. 그러나 운전자 시나리오 노출시간은 방사성금속폐기물의 처리량과 무관하고 이동시간과 같으므로 원자력연구원에서 폐드럼 자체처분 시 도출한 작업시간을 사용하였다. 평가코드의 작업시간과 도출한 작업시간은 표 11에 제시하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 12 BRT 배관의 코드 기본 작업시간과 도출한 작업시간

작업시간			
재활용단계	시나리오	코드값	도출값
고철처리	절단작업자	0.00288 hr	1 hr
	적하작업자	0.00096 hr	1 hr
	트럭운전자	0.00096 hr	4 hr
철강용융	철재류취급자	0.00288 hr	1 hr
	야적장취급자	0.0192 hr	1 hr
	용융로적하작업자	0.00096 hr	1 hr
	용융로운전자	0.0012 hr	1 hr
	분진여과기취급자	0.00024 hr	1 hr
	정련작업자	0.0012 hr	1 hr
	강괴주조작업자	0.0006 hr	1 hr
	소모품주조작업자	0.012 hr	1 hr
	슬래그작업자	0.006 hr	1 hr
강괴운반	적하작업자	0.00048 hr	1 hr
	트럭운전자	0.0012 hr	4 hr
초기가공	야적장작업자	0.0096 hr	1 hr
	판재제조자	0.00024 hr	1 hr
	코일제조자	0.00024 hr	1 hr
최종가공	판재취급자	0.00024 hr	1 hr
	코일취급자	0.0192 hr	1 hr
생산품유통	적하작업자	0.0048 hr	1 hr
	트럭운전자	0.00192 hr	4 hr
	판재조립작업자	0.0048 hr	1 hr
	작업장작업자	0.48 hr	1 hr
제한적재활용	차폐체	1 hr	1 hr
	폐기물용기	1 hr	1 hr

나. 가압기(Pressurizer)

가압기의 처리량(350t)에 따른 평가코드 작업시간은 표 12와 같고 원자력연구원 자체 처분 사례를 바탕으로 고철처리 작업자(절단작업자, 적하작업자, 트럭운전자)의 작업시간을 도출하였다. 평가코드의 작업시간과 도출한 작업시간은 표 12에 제시하였다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

표 13 가압기의 코드 기본 작업시간과 도출한 작업시간

작업시간			
재활용단계	시나리오	코드값	도출값
고철처리	절단작업자	42 hr	420 hr
	적하작업자	14 hr	126 hr
	트럭운전자	14 hr	28 hr
철강용융	철재류취급자	42 hr	42 hr
	야적장취급자	280 hr	280 hr
	용융로적하작업자	14 hr	14 hr
	용융로운전자	17.5 hr	17.5 hr
	분진여과기취급자	3.5 hr	3.5 hr
	정련작업자	17.5 hr	17.5 hr
	강괴주조작업자	8.75 hr	8.75 hr
	소모품주조작업자	175 hr	175 hr
	슬래그작업자	87.5 hr	87.5 hr
강괴운반	적하작업자	7 hr	7 hr
	트럭운전자	17.5 hr	17.5 hr
초기가공	야적장작업자	140 hr	140 hr
	판재제조자	3.5 hr	3.5 hr
	코일제조자	3.5 hr	3.5 hr
최종가공	판재취급자	3.5 hr	3.5 hr
	코일취급자	280 hr	280 hr
생산품유통	적하작업자	70 hr	70 hr
	트럭운전자	28 hr	28 hr
	판재조립작업자	70 hr	70 hr
	작업장작업자	2000 hr	2000 hr
제한적재활용	차폐체	1 hr	1 hr
	폐기물용기	1 hr	1 hr

제 3 절 선량평가 결과

1. BRT(Boron Recovery Tank) 배관

가. 코드 입력인자를 이용한 선량평가 결과

BRT 배관 처리량(0.024t)에 따른 RESRAD-RECYCLE 전산코드의 기본 입력값으로 평가를 수행한 결과 작업자와 제한적재활용 시나리오는 “방사성폐기물 자체처분에 관한 규

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

정” 개인에 대한 연간 피폭방사선량 10μSv/y 미만, 집단에 대한 총 피폭방사선량이 1man · Sv/y 미만을 만족하는 것을 알 수 있었다. 평가 결과는 표 14에 제시하였다.

표 14 BRT 배관의 코드 입력인자를 이용한 선량평가결과

평가결과			
재활용단계	시나리오	개인선량	집단선량
고철처리	절단작업자	3.97×10^{-2}	1.19×10^{-7}
	적하작업자	1.71×10^{-1}	3.43×10^{-7}
	트럭운전자	7.54×10^{-1}	3.77×10^{-6}
철강용융	철재류취급자	4.06×10^{-2}	1.22×10^{-7}
	야적장취급자	5.52×10^{-2}	5.52×10^{-7}
	용융로적하작업자	2.06×10^{-1}	1.03×10^{-6}
	용융로운전자	5.90×10^{-1}	1.77×10^{-6}
	분진여과기취급자	1.31×10^{-1}	1.31×10^{-7}
	정련작업자	6.49×10^{-1}	1.95×10^{-6}
	강괴주조작업자	6.47×10^{-1}	1.29×10^{-6}
	소모품주조작업자	1.49×10^{0}	2.98×10^{-6}
	슬래그작업자	0.00×10^{0}	0.00×10^{0}
강괴운반	적하작업자	4.36×10^{-1}	8.73×10^{-7}
	트럭운전자	1.93×10^{0}	9.67×10^{-6}
초기가공	야적장작업자	7.94×10^{-2}	7.94×10^{-7}
	판재제조자	1.10×10^{-1}	1.66×10^{-6}
	코일제조자	5.43×10^{-1}	5.43×10^{-7}
최종가공	판재취급자	1.10×10^{-1}	2.20×10^{-6}
	코일취급자	5.42×10^{-1}	2.71×10^{-6}
생산품유통	적하작업자	4.36×10^{-1}	8.73×10^{-7}
	트럭운전자	1.93×10^{0}	9.67×10^{-6}
	판재조립작업자	1.10×10^{-1}	2.20×10^{-6}
	작업장작업자	2.91×10^{-2}	1.45×10^{-7}
제한적재활용	차폐체	1.27×10^{0}	1.27×10^{-6}
	폐기물용기	9.41×10^{-2}	9.41×10^{-8}

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. 도출한 입력인자를 이용한 선량평가

한국원자력연구원 폐드럼 자체처분 사례를 바탕으로 데이터를 도출하여 평가를 수행한 결과 고철처리 작업자 시나리오는 “방사성폐기물 자체처분에 관한 규정” 개인에 대한 연간 피폭방사선량 10μSv/y 미만, 집단에 대한 총 피폭방사선량이 1man · Sv/y 미만을 만족하는 것을 알 수 있었다. 평가 결과는 표 15에 제시하였다.

표 15 BRT 배관의 도출한 입력인자를 이용한 선량평가결과

평가결과			
재활용단계	시나리오	개인선량	집단선량
고철처리	절단작업자	3.97×10^{-1}	1.19×10^{-6}
	적하작업자	1.54×10^{0}	3.09×10^{-6}
	트럭운전자	1.51×10^{0}	7.54×10^{-6}

다. 평가결과 비교분석

BRT 배관 평가는 고철처리 작업자 시나리오의 입력인자(작업시간)을 변수로 코드 입력인자와 도출한 입력인자 두 조건을 이용하여 평가하였다. 두 조건의 작업시간 중 도출한 입력인자의 작업시간이 절단작업자 10배, 적하작업자 9배, 트럭운전자 2배 더 많았다. 평가결과 두 조건 모두 자체처분 허용선량을 만족하였고 도출한 입력인자를 이용한 평가결과 값은 작업시간에 비례해서 증가하였다.

2. 가압기(Pressurizer)

가. 코드 입력인자를 이용한 선량평가

평가결과 제염계수 1,000을 적용하였을 경우 제염 후 23년, 제염계수 10,000을 적용하였을 경우 제염 후 5년이 경과하면 “방사성폐기물 자체처분에 관한 규정” 개인에 대한 연간 피폭방사선량 10μSv/y 미만, 집단에 대한 총 피폭방사선량이 1man · Sv/y 미만을 만족하는 것을 알 수 있었다. 평가 결과는 표 16~17에 제시하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 16 가압기의 코드 입력인자를 이용한 선량평가결과(DF=1,000)

평가결과			
재활용단계	시나리오	개인선량	집단선량
고철처리	절단작업자	5.93×10^{-2}	1.78×10^{-7}
	적하작업자	8.53×10^{-2}	1.71×10^{-7}
	트럭운전자	7.50×10^{-2}	3.75×10^{-7}
철강용융	철재류취급자	6.06×10^{-2}	1.82×10^{-7}
	야적장취급자	5.50×10^{-1}	5.50×10^{-6}
	용융로적하작업자	1.02×10^{-1}	5.12×10^{-7}
	용융로운전자	3.67×10^{-1}	1.10×10^{-6}
	분진여과기취급자	1.63×10^{-2}	1.63×10^{-8}
	정련작업자	4.04×10^{-1}	1.21×10^{-6}
	강괴주조작업자	2.01×10^{-1}	4.03×10^{-7}
	소모품주조작업자	9.28×10^{0}	1.86×10^{-5}
	슬래그작업자	1.54×10^{-6}	1.54×10^{-12}
강괴운반	적하작업자	1.09×10^{-1}	2.17×10^{-7}
	트럭운전자	2.41×10^{-1}	1.20×10^{-6}
초기가공	야적장작업자	3.95×10^{-1}	3.95×10^{-6}
	판재제조자	1.37×10^{-2}	2.06×10^{-7}
	코일제조자	6.75×10^{-2}	6.75×10^{-8}
최종가공	판재취급자	1.37×10^{-2}	2.74×10^{-7}
	코일취급자	5.40×10^{0}	2.70×10^{-5}
생산품유통	적하작업자	1.09×10^{0}	2.17×10^{-6}
	트럭운전자	3.85×10^{-1}	1.92×10^{-6}
	판재조립작업자	2.74×10^{-1}	5.47×10^{-6}
	작업장작업자	2.07×10^{0}	3.62×10^{-5}
제한적재활용	차폐체	4.51×10^{-2}	4.51×10^{-8}
	폐기물용기	3.34×10^{-3}	3.34×10^{-9}

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 17 가압기의 코드 입력인자를 이용한 선량평가결과(DF=10,000)

평가결과			
재활용단계	시나리오	개인선량	집단선량
고철처리	절단작업자	6.34×10^{-2}	1.90×10^{-7}
	적하작업자	9.11×10^{-2}	1.82×10^{-7}
	트럭운전자	8.01×10^{-2}	4.01×10^{-7}
철강용융	철재류취급자	6.48×10^{-2}	1.94×10^{-7}
	야적장취급자	5.87×10^{-1}	5.87×10^{-6}
	용융로적하작업자	1.09×10^{-1}	5.47×10^{-7}
	용융로운전자	3.92×10^{-1}	1.18×10^{-6}
	분진여과기취급자	1.74×10^{-2}	1.74×10^{-8}
	정련작업자	4.31×10^{-1}	1.29×10^{-6}
	강괴주조작업자	2.15×10^{-1}	4.30×10^{-7}
	소모품주조작업자	9.91×10^{0}	1.98×10^{-5}
	슬래그작업자	7.55×10^{-3}	7.55×10^{-9}
강괴운반	적하작업자	1.16×10^{-1}	2.32×10^{-7}
	트럭운전자	2.57×10^{-1}	1.28×10^{-6}
초기가공	야적장작업자	4.22×10^{-1}	4.22×10^{-6}
	판재제조자	1.47×10^{-2}	2.20×10^{-7}
	코일제조자	7.21×10^{-2}	7.21×10^{-8}
최종가공	판재취급자	1.46×10^{-2}	2.92×10^{-7}
	코일취급자	5.76×10^{0}	2.88×10^{-5}
생산품유통	적하작업자	1.16×10^{0}	2.32×10^{-6}
	트럭운전자	4.11×10^{-1}	2.05×10^{-6}
	판재조립작업자	2.92×10^{-1}	5.85×10^{-6}
	작업장작업자	2.21×10^{0}	3.86×10^{-5}
제한적재활용	차폐체	4.81×10^{-2}	4.81×10^{-8}
	폐기물용기	3.57×10^{-3}	3.57×10^{-9}

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. 도출한 입력인자를 이용한 선량평가

한국원자력연구원 폐드럼 자체처분 사례를 바탕으로 데이터를 도출하여 평가를 수행한 결과 제염계수 1,000을 적용하였을 경우 제염 후 23년, 제염계수 10,000을 적용하였을 경우 제염 후 5년이 경과하면 “방사성폐기물 자체처분에 관한 규정” 개인에 대한 연간 피폭방사선량 10μSv/y 미만, 집단에 대한 총 피폭방사선량이 1man · Sv/y 미만을 만족하는 것을 알 수 있었다. 평가 결과는 표 18~19에 제시하였다.

표 18 가압기의 도출한 입력인자를 이용한 선량평가결과(DF=1,000)

평가결과			
재활용단계	시나리오	개인선량	집단선량
고철처리	절단작업자	5.93×10^{-1}	1.78×10^{-6}
	적하작업자	7.68×10^{-1}	1.54×10^{-6}
	트럭운전자	1.50×10^{-1}	7.50×10^{-7}

표 19 가압기의 도출한 입력인자를 이용한 선량평가결과(DF=10,000)

평가결과			
재활용단계	시나리오	개인선량	집단선량
고철처리	절단작업자	6.34×10^{-1}	1.90×10^{-6}
	적하작업자	8.20×10^{-1}	1.64×10^{-6}
	트럭운전자	1.60×10^{-1}	8.01×10^{-7}

다. 평가결과 비교분석

가압기를 대상으로 자체처분 평가를 수행하였다. 가압기는 제염계수와 입력인자를 변수로 평가를 수행하였다. 제염계수는 1,000과 10,000을 적용하였고 입력인자는 코드 기본 입력인자(작업시간)와 도출한 입력인자(작업시간)를 이용하였다. 평가결과 가압기를 원전 즉시해체 후 자체처분 하기 위해서는 제염계수 10,000 이상을 달성해야 가능할 것으로 확인되었다. 또한 코드 입력인자와 도출한 입력인자의 평가결과 두 조건의 작업시간에 비례해서 피폭선량이 증가하는 것을 알 수 있었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 6 장 결론

본 연구에서는 원전해체 시 발생 가능한 방사성 금속폐기물의 자체처분을 위한 사전 연구로서, 원자력발전소 기기 중 1차계통에 속해있는 BRT(Boron Recovery Tank) 배관과 가압기를 대상으로 자체처분에 따른 선량평가를 수행하였다. 원전해체 시 2차계통에서 발생하는 방사성폐기물은 대부분이 저준위와 극저준위 폐기물로 자체처분이 가능할 것으로 판단되므로 1차계통 내 구조물인 BRT 배관과 가압기를 평가 대상으로 선정하였다. 평가를 위한 코드는 ANL(Argonne National Laboratory)의 EAD(Environmental Assessment Division)에서 개발한 RESRAD-RECYCLE 전산코드를 선정하였다.

RESRAD-RECYCLE 코드를 이용하여 평가를 수행하기 위해 코드 입력인자를 국내 여건에 맞게 수정하여야 한다. 이에 따라 민감도 분석을 수행하여 작업시간을 주요 입력인자로 선정하였고 원자력연구원에서 폐드럼을 자체처분한 사례를 바탕으로 도출한 실제 작업시간과 비율을 적용하여 평가에 사용할 작업시간을 도출하였다. 따라서 두 조건인 코드 입력인자와 도출한 입력인자로 각각 평가를 수행하였다. 또한, 평가에 이용한 가압기는 방사능 준위가 높아 제염 수행을 가정하여 제염계수를 고려하였으며, 제염계수는 각각 1,000과 10,000으로 적용하였다. 평가결과 BRT 배관은 두 조건 모두 자체처분 허용선량을 만족하였으며, 가압기는 두 조건 모두 제염계수 1,000을 적용하였을 경우 제염 후 23년, 10,000을 적용하였을 경우 5년이 경과해야 자체처분 허용선량을 만족하는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 제염계수를 최대치로 적용하였지만 실제 제염 시에는 어려움이 있을 것으로 예상되므로 제염대상에 따라 효율적인 제염방법을 선정하는 것이 중요하다. 또한, 국내 여건에 맞는 코드 입력인자를 구축한다면 향후 원전해체 시 방사성 금속폐기물의 자체처분 평가에 기여할 것으로 사료된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고문헌

[1] 원자력안전위원회 고시 2014-003호, “방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정”

[2] 한국원자력연구원, "중준위 이하 방사성폐기물 처분을 위한 기술현황 분석", KAERI/RR-RR3894 (2014).

[3] 송명제, 박성철, 서장수, “알기쉬운 원전 방사성 폐기물 관리”,한국원전수출산업협회 (2015).

[4] 문제권, 박상윤, 정종헌, 이정원, 오원진, “방사성오염 금속폐기물의 재활용 연구”, 한국자원리싸이클링학회지, 6(3), 22-27 (1997)

[5] US EPA. Technology Reference Guide for Radiologically Contaminated Surfaces, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-402-R-06-003 (2006).

[6] 한국원자력연구원, “S/G 등 원전 발생 대형 금속성 폐기물의 감용 및 자체처분 기술 개발”, (2011).

[7] 김아름, “자체처분 방사성 금속폐기물 오염도 평가 방안 및 재활용 기준 제시”, 경희대학교 석사학위논문 (2009).

[8] 홍대석, 강일식, 지영용, 손종식, 주근식, 곽경길, 류우석. “폐드럼 자체처분시의 실제 작업환경을 고려한 고철처리 작업자 선량평가”, 대한방사선방어학회, 3(1), 62-63 (2011).

[9] 이시카와 미치오, 안전한 퇴역을 위한 원자로 해체, 1st ed., 100-101, 한국원자력문화재단, Seoul(1997).

[10] 홍상범, 이봉재, 정운수, “연구로 1, 2호기 해체 철재폐기물의 규제해제농도기준(안) 도출을 위한 연구”, 방사성폐기물학회지, 2(1), 61-67 (2004).

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

감사의 글

졸업논문을 마무리하며, 2년이라는 짧지 않은 대학원 생활 동안 지도와 응원을 해주신 많은 분들께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저, 2년 전 학업의 뜻을 가지고 실험실 문을 두드렸을 때 부족한 저를 믿고 받아주시고 세심한 지도와 많은 격려로 이끌어주신 송종순 교수님께 진심으로 감사드리며, 논문심사 과정에서 아낌없는 지도로 많은 가르침을 주신 이경진 교수님과 김진원 교수님께 감사드립니다. 또한, 열정적인 강의로 대학원 수업에서 많은 가르침을 주신 정운관 교수님, 나만균 교수님, 김종현 교수님께 감사드립니다.

그리고 대학원 생활 동안 한솥밥을 먹으며 많은 힘이 되었던 우리 핵주기공학 실험실 상헌이형, 민영이, 선일이, 승수, 훈조, 학윤이에게 감사드리며, 각 실험실에서 응원해주신 선후배님들에게 감사드립니다.

마지막으로, 언제나 제 편이 되어 힘을 주시고 사랑으로 키워주신 부모님과 많은 격려와 응원으로 힘을 주었던 우리 누나와 매형에게 진심으로 감사드립니다. 또한 바쁘다는 핑계로 많이 챙겨주지 못했지만 항상 저를 믿고 곁에서 힘이 되어준 여자친구 신수진양에게 감사의 마음을 전합니다.

그 외, 언급하지는 못했지만 주변에서 도움을 주신 모든 분들께 감사의 마음을 전하며 받은 사랑에 보답할 수 있도록 매사 성실하고 최선을 다하겠습니다.

Collection @ chosun