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]I804:24011-200000279026

2020年 2月

碩士學位 論文

RESRAD를 이용한 폐활성탄 자체처분에 대한 연구

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

原子力工學科

李 憼 豪

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

RESRAD를 이용한 폐활성탄 자체처분에 대한 연구

A Study on the Clearance of Activated Carbon by Using RESRAD

2020년 2월 25일

조 선 대 학 교 대 학 원

원자력공학과

이 민 호

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

RESRAD를 이용한 폐활성탄 자체처분에 대한 연구

지도교수 정 운 관

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2019년 10월

조 선 대 학 교 대 학 원

원자력공학과

이 민 호

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이민호의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 이 경 진 (印)

위 원 조선대학교 교 수 송 종 순 (印)

위 원 조선대학교 교 수 정 운 관 (印)

2019년 11월

조선대학교 대학원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

표 목차 i

그림 목차 iii

ABSTRACT iv

제 1 장 서 론 1

제 1 절 연구 배경 1

제 2 절 연구 목적 3

제 2 장 국내/외 방사성폐기물 분류 및 자체처분 4

제 1 절 국내/외 방사성폐기물 분류체계 4

1. 국내 방사성폐기물 분류 4

2. 국외 방사성폐기물 분류 9

제 2 절 국내/외 자체처분 폐기물 규제 및 현황 15

1. 국내 자체처분 폐기물 규제 및 현황 15

2. 국외 자체처분 폐기물 규제 및 현황 25

제 3 장 (폐)활성탄의 특성 및 현황조사 28

제 1 절 활성탄 및 첨착활성탄의 특성 28

1. 활성탄의 특성 28

2. 첨착활성탄의 특성 29

제 2 절 국내 원전 폐활성탄 30

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1. 폐활성탄의 발생량 ····· 30
2. 폐활성탄의 표면선량률 ····· 30
3. 국내원전 폐활성탄 방사능 분석 결과 ····· 31
4. 폐활성탄 처리 ····· 32
제 4 장 연구 방법 ····· 33
제 1 절 RESRAD 코드 ····· 33
제 2 절 시나리오 선정 ····· 36
제 3 절 RESRAD 평가 코드 입력인자 ····· 37
1. 선원항 ····· 37
2. 처리기술 별 제거율 적용 ····· 38
3. 선량환산인자 ····· 39
4. 시나리오 선정 및 Calculation Time ····· 40
5. 부지 ····· 41
6. 거주자에 대한 특성정보 ····· 43
7. 음식물 섭취경로 및 가축에 대한 섭취 ····· 44
제 5 장 연구 결과 ····· 45
제 1 절 처리기술 별 선량평가 결과 ····· 45
1. 열처리 ····· 45
2. 진공&열처리 ····· 47
3. 습식처리 ····· 49

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 ^{14}C농도에 따른 선량평가 51
1. 14C 농도에 따른 개인 및 집단선량 평가결과 51
2. 시간에 따른 선량평가 52
제 6 장 결론 53
참고문헌 54

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 목 차

표 1. 중·저준위방사성폐기물 처분시설 운영현황 ····· 2
표 2. 국내 방사성폐기물 분류기준 및 처분방식 ····· 6
표 3. 저준위방사성폐기물의 방사능농도 제한치 ····· 6
표 4. 방사성 핵종별 자체처분 허용농도 ····· 7
표 5. 모핵종 허용농도 ····· 8
표 6. IAEA 방사성폐기물 분류기준 ····· 11
표 7. 미국의 방사성폐기물 분류기준 ····· 13
표 8. 일본의 방사성폐기물 분류기준 ····· 14
표 9. 국내 방사성폐기물 자체처분 관계법령 ····· 15
표 10. 자체처분 절차 ····· 16
표 11. 원전본부별 자체처분대상 폐기물 저장현황 ····· 19
표 12. IAEA 규제 정의 ····· 25
표 13. 국내 원전별 폐활성탄 저장현황 ····· 30
표 14. 무작위로 추출된 폐활성탄 시료 5개에 대한 표면선량률 측정 ····· 30
표 15. 국내 각 원자력발전소별 폐활성탄 내 ^{14}C 및 ^{3}H 방사능 비교 ····· 31
표 16. 폐활성탄 내 $^{14}C/^{3}H$ 제거 후보 기술 장단점 비교 ····· 32
표 17. RESRAD 코드별 내용 ····· 34
표 18. RESRAD-onsite 시나리오 ····· 36
표 19. 폐활성탄 선원항 ····· 37
표 20. 처리기술 별 제거율 ····· 38

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 21. 부지 설정인자 값1 ····· 41

표 22. 부지 설정인자 값2 ····· 42

표 23. 거주자 특성정보 값 ····· 43

표 24. 음식물 섭취경로 및 가축에 대한 섭취 값 ····· 44

표 25. 열처리 시 핵종의 농도 ····· 45

표 26. 열처리 시 개인 및 집단선량결과 ····· 46

표 27. 열처리 시 평가결과 ····· 46

표 28. 진공&열처리 시 핵종의 농도 ····· 47

표 29. 진공&열처리 시 개인 및 집단선량결과 ····· 47

표 30. 진공&열처리 시 평가결과 ····· 48

표 31. 습식처리 시 핵종의 농도 ····· 49

표 32. 습식처리 시 개인 및 집단선량결과 ····· 49

표 33. 습식처리 평가결과 ····· 50

표 34. ^{14}C 농도에 따른 개인 및 집단선량평가 ····· 51

표 35. ^{14}C 농도에 따른 시간 별 선량평가 ····· 52

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그 림 목 차

그림 1. 개정 전 방사성폐기물 분류. ····· 4

그림 2. IAEA 방사성폐기물 신 분류기준에 따른 처분방안. ····· 5

그림 3. 방사성폐기물 분류기준별 IAEA의 권고 처분방식. ····· 9

그림 4. 미국의 방사성폐기물 분류 체계도. ····· 12

그림 5. 국내 원자력발전소 자체처분대상 폐기물 저장현황. ····· 20

그림 6. 연도별 자체처분 현황. ····· 21

그림 7. 폐기물 종류별 자체처분 승인 현황. ····· 22

그림 8. 폐활성탄 시료채취 및 분석 절차 1. ····· 23

그림 9. 폐활성탄 시료채취 및 분석 절차 2. ····· 23

그림 10. 폐활성탄 소내 매립 과정3. ····· 24

그림 11. 흑연과 활성탄 구조 비교. ····· 28

그림 12. RESRAD 코드군 ····· 33

그림 13. RESRAD 이동경로 ····· 35

그림 14. RESRAD 이동경로 ····· 35

그림 15. 평가시간 설정 ····· 40

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

A Study on the Clearance of Activated Carbon by Using RESRAD

Min Ho Lee
Advisor : Prof. Chung, Woon-kwan
Department of Nuclear Engineering
Graduate School of Chosun University

According to the previous studies, the results of the radioactivity analysis of activated carbon wastes generated from the HVAC system of the nuclear power plant in Korea show that the gamma radionuclides are self-disposable below the minimum detection activity (MDA). The nuclide concentrations of ^{14}C and ^{3}H exceeds the limit concentration of clearance(^{14}C: 1 Bq/g, ^{3}H: 100 Bq/g, respectively), so that self-disposal cannot be carried out without treatment. In case of vacuum heat treatment using microwave for ^{3}H, the removal rate of ^{3}H is over 99% and the activated carbon wastes from nuclear power plants satisfies the self-disposable allowable concentration. However, in the case of ^{14}C, the removal rate of ^{14}C is 60 ~ 70% , which makes it difficult to dispose of the whole amount in excess of the allowable concentration criteria for clearance(1 Bq/g). In addition, dozens of drums of activated carbon wastes are generated every year. If the total amount of waste is disposed as radioactive waste, it is expected to increase the cost of radioactive waste management and the permanent disposal of radioactive waste. In this study, we reviewed the relevant laws and regulations for the clearance of activated carbon wastes from nuclear power plants and evaluated the risks for individuals and groups using RESRAD computer codes based on the results of previous studies. As a result, it was found that the activated carbon wastes satisfying the self-disposable limit concentration meets the clearance allowable dose.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

국내 원자력발전소는 1978년 고리 1호기를 시작으로 현재 총 25기로 한빛 6기, 한울 6기, 새울 2기, 고리 5기(신고리 2기), 월성 6기(신월성 2기)가 운영 중에 있고 가압경수로 원전인 고리 1호기가 영구 정지상태에 있어 곧 해체에 들어갈 전망이다.

원자력은 우리 사회 전반적으로 엄청난 이득을 가져왔지만 다수의 호기 운영 및 오랜 기간 운영으로 인하여 다량의 방사성폐기물이 발생하였고 이에 따라 원전 소내 임시저장 공간은 포화가 되어 가고 있는 실정이다. 더욱이 2017년 고리 1호기 정지되고 해체를 결정한 시점에서 운영 중 폐기물량의 문제는 더욱 가중될 것이고 이 부분은 단순하게 폐기물량에 의한 소내 임시저장공간 포화 문제뿐만 아니라 궁극적으로 처분비용 증가에 따른 경제적 측면에서도 큰 부담으로 작용할 것으로 보여진다. 이로 인한 문제가 더욱 가중이 되어가고 있는 실정이어서 국내에서는 방사성폐기물을 안전하게 관리 및 처리 · 처분하는 것이 주된 관심사항이다.

원자력발전소에서 발생하는 방사성폐기물과 원자력유관기관에서 발생된 방사성폐기물은 원안위고시 제2017-60(중 · 저준위방사성폐기물 인도규정)[1]과 산업통상자원부고시 제2016-230호(방사성폐기물인수방법 등에 관한 규정)[2] 및 중 · 저준위방사성폐기물처분시설 안전성분석보고서 8.3(폐기물인수기준)[3]에 따라 적합하게 처리 및 포장 되어 각 발전소 임시저장시설 또는 원자력연구원 등 발생지에 보관하고 있으면서 순차적으로 경주 중 · 저준처분시설로 이송되어 처분되고 있다. 중 · 저준위 방사성폐기물 처분시설 운영현황에 관련하여 표 1과 같다[4].

현행 원자력안전위원회고시 “방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준”[제2017-65호][5]에 관한 규정에 따르면 자체처분이란 원자력안전법의 적용대상에서 제외하여 방사성폐기물이 아닌 폐기물로 소각 · 매립 · 재활용 등의 방법으로 관리하는 것이라고 정의하고 있다. 국내의 경우 1994년 NaF 폐기물에 대한 자체처분이 처음 시행된 이후 2000년부터 관련 법령의 정비를 통하여 자체처분 대상 폐기물의 종류 및 수량이 증가되고 있다[6].

원자력발전소 공기정화계통에서 사용되는 첨착활성탄은 사용연수가 증가함에 따라 성능이 저하되어 매년 수십 드럼씩 발생하고 있으며 발생된 폐활성탄은 원전 내 임시저장고에서 관리 중에 있다. 따라서 폐활성탄을 적절한 방법에 의한 처리 및 규제해제 절차

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

에 따라 처분대상에서 제외하게 되면 관리비용 및 처분비용 절감에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

폐활성탄을 자체처분하기 위한 연구가 수행되고 있으며 현재 ^{3}H의 경우 자체처분 제한농도를 만족하는 기술을 확보하였으나 일부 폐활성탄의 경우 ^{14}C 농도가 자체처분 제한농도를 상회하여 실제 개발 기술을 현장 적용하기에는 한계가 있다.

표 1. 중·저준위방사성폐기물 처분시설 운영현황 2019.10.31. 기준 (단위 : 200L)

인수현황

구분	~2015년	2016년	2017년	2018년	2019년	누계
수량	8,843.94	4,954.79	5,825.6	3,682.72	11.37	23,318.43

저장현황

구분	인수저장건물	방사성폐기물건물	합계
수량	4,063.22	1,757.61	5,820.83

처분현황

구분	silo1	silo2	silo3	silo4	silo5	silo6	합계
수량	2,144	4,528	1,011.2	2,320	6,832	662.4	17,497.6

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 연구 목적

국내 원자력발전소에서는 여러 계통에서 발생되는 기체방사성물질에 대하여 수시로 감시를 하고 있으며 이를 공기정화계통(HVAC)에 설치된 원자력급 첨착활성탄 필터를 이용하여 정화하고 있다. 원자력발전소 기체폐기물 처리계통에 설치된 원자력급 첨착활성탄 필터는 정상운전 시뿐만 아니라 중대사고 시에도 대응할 수 있도록 설계되어 있으며, 원자력발전소 해체단계에서도 기체폐기물 처리계통 및 이동형 공기정화설비와 연계하여 작업자 안전성 확보에 기여를 할 것으로 판단된다[7].

선행연구에서 폐활성탄은 매년 수십 드럼 분량이 발생되고 있고 대부분의 준위가 극저준위방사성폐기물이라는 것을 알 수 있었다. 이에 따라 본 연구에서는 국내 자체처분 절차에 따라 미국 DOE 산하 ANL(Argonne National Laboratory)에서 개발한 RESRAD-onsite 평가코드를 활용하여 폐활성탄의 자체처분 만족여부를 평가해보고자 한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 국내/외 방사성폐기물 분류 및 자체처분

제 1 절 국내/외 방사성폐기물 분류체계

1. 국내 방사성폐기물 분류

방사성폐기물은 원자력 및 방사성물질을 이용하는 과정에서 불가피하게 발생하는 폐기물로써 물리적, 화학적 특성이나 형태가 다양하다. 이러한 방사성폐기물을 효율적이며 안전하게 관리하기 위해서는 다양한 관리 방안이 필요하며 방사성폐기물을 적절하게 분류하는 것은 방사성폐기물 관리를 위해 중요한 요소이다. 방사성폐기물 분류체계는 원자력산업과 안전규제의 상당한 영향을 미치는 중요한 사항으로, IAEA는 지속적으로 해당 사항에 대한 기술기준을 권고해오고 있다.

국내는 1998년 8년 IAEA Safety Series No. 111-G-1.1(1994)[8]의 분류체계를 준용하여 아래 그림 1과 같이 2단계(중·저준위방사성폐기물, 고준위방사성폐기물) 방사성폐기물의 처분안전성을 강조한 분류 기준으로 개정하여 사용되었다.

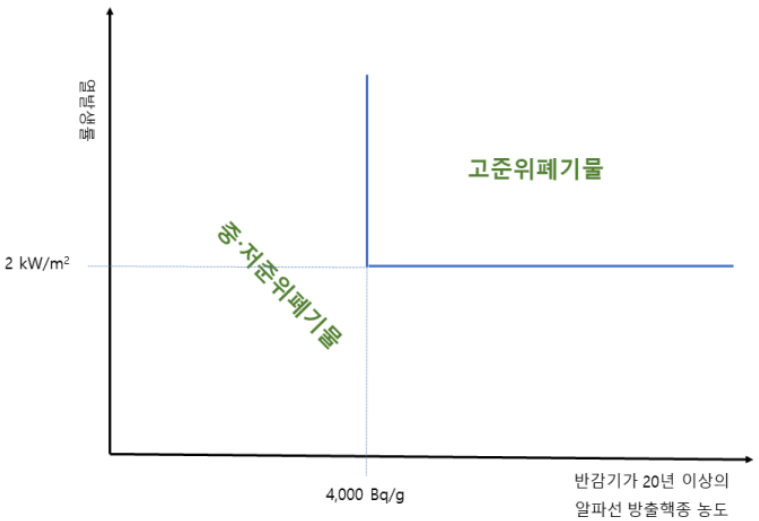


그림 1. 개정 전 방사성폐기물 분류.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2013년 2월 13일 IAEA가 방사성폐기물 관리 정책을 일관성 있게 확립하고 최적의 안전성을 확보하도록 잠재 위험도와 처분 방식에 따른 GSG-1 'Classification of Radioactive Waste(2009권고)[9]에 따라 원자력안전위원회에서 국내 방사성폐기물 분류를 그림 2와 같이 5단계(고준위방사성폐기물, 중준위방사성폐기물, 저준위방사성폐기물, 극저준위방사성폐기물, 규제해제대상폐기물)로 세분화 하였다[10].

또한 국내에서는 IAEA RS-G-1.7(핵종별 농도 또는 선량)도입을 통하여 자체처분폐기물을 규제대상에서 제외된 규제해제폐기물로 규정하고 자체처분폐기물(자체처분이 입증된 폐기물)에 한에서는 사업자가 자체적으로 처분할 수 있도록 고시하고 있다.

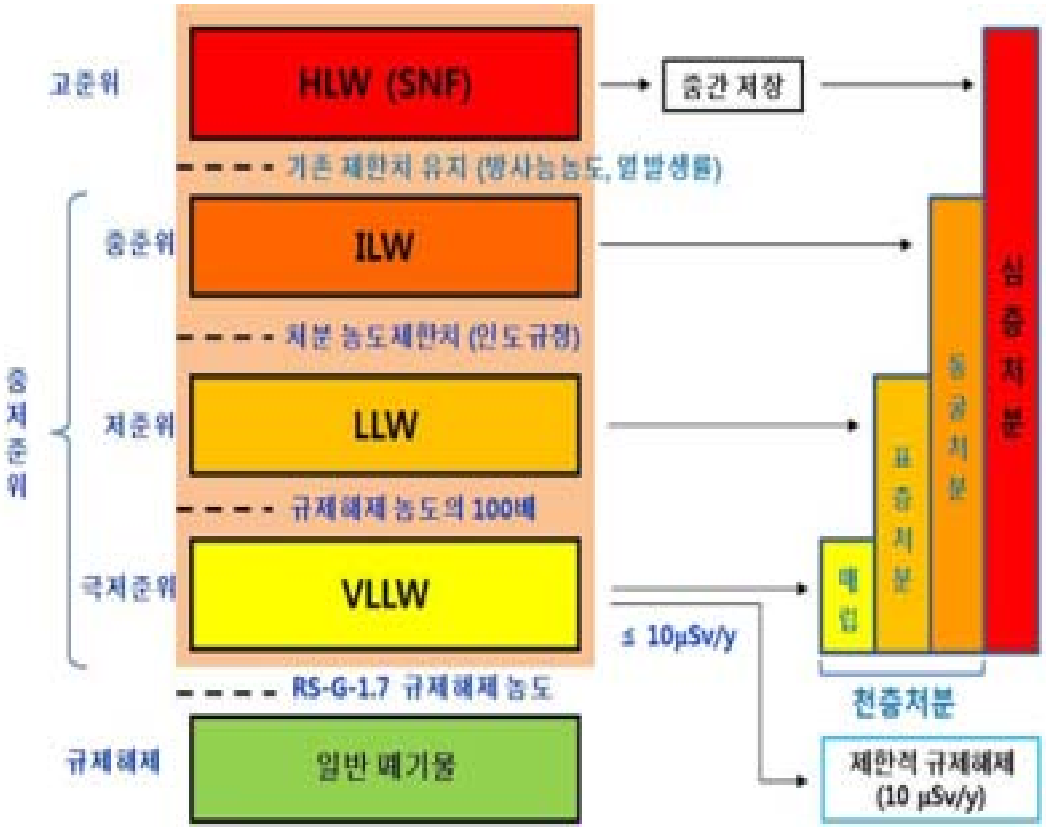


그림 2. IAEA 방사성폐기물 신 분류기준에 따른 처분방안.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 2. 국내 방사성폐기물 분류기준 및 처분방식

폐기물 범주	분류기준	처분방식
고준위 방사성폐기물	- 반감기 : 20 y 이상 - 핵종 : 알파핵종 - 농도 : 4,000 Bq/g - 열발생률 : 2 kW/m^3	- 심지층처분 - 천층처분 불가
중준위 방사성폐기물	- 방사능농도가 표 3의 핵종별 농도 이상	- 심층처분 or 동굴처분 - 표층처분 or 매립형 처분 불가
저준위 방사성폐기물	- 표 4의 100배 이상이고 표 3의 핵종별 농도 미만인 것 - 표 3에 규정되지 않은 핵종은 처분시설 운영자의 인수기준에 따른 처분제한 농도 적용	- 심층처분 - 매립형 처분 불가
극저준위 방사성폐기물	- 중/저준위 방사성폐기물 중에서 방사능 농도가 자체처분 허용농도 이상이고 자체처분 허용농도의 100배 미만	- 천층처분 or 심층처분

표 3. 저준위방사성폐기물의 방사능 농도 제한치

방사성핵종	방사능농도(Bq/g)
^{3}H	1.1×10^{6}
^{14}C	2.22×10^{5}
^{60}Co	3.7×10^{7}
^{59}Ni	7.4×10^{4}
^{63}Ni	1.11×10^{7}
^{90}Sr	7.4×10^{4}
^{94}Nb	1.11×10^{2}
^{99}Tc	1.11×10^{3}
^{129}I	3.7×10^{1}
^{137}Cs	1.11×10^{6}
전알파	3.7×10^{3}

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 4. 방사성 핵종별 자체처분 허용농도

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

주[1] 다수의 방사성핵종이 혼합되어 있는 경우에는 다음과 같이 한다.

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

c_i : 방사성핵종 i의 방사능농도(Bq/g)

$c_{L,i}$: 표 4에 주어진 방사성핵종 i의 자체처분 허용농도 (Bq/g)

주[2] 표4에 수록되지 않은 알파선을 방출하지 아니하는 방사성핵종의 경우 자체처분 허용농도로서 0.1(Bq/g)을 적용할 수 있다.

주[3] 다음 목록에 제시된 모핵종과 그 모핵종의 붕괴로 생성되는 자핵종이 함께 존재하는 경우, 모핵종에 대해서만 허용농도를 적용한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 5. 모핵종 허용농도

모핵종	자핵종
^{52}Fe	^{52m}Mn
^{69m}Zn	^{69}Zn
^{90}Sr	^{90}Y
^{91}Sr	^{91m}Y
^{95}Zr	^{95}Nb
^{97}Zr	^{97m}Nb, ^{97}Nb
^{97}Nb	^{97m}Nb
^{99}Mo	^{99m}Tc
^{101}Mo	^{101}Tc
^{103}Ru	^{103m}Rh
^{105}Ru	^{105m}Rh
^{106}Ru	^{106}Rh
^{103}Pd	^{103m}Rh
^{109}Pd	^{109m}Ag
^{110m}Ag	^{110}Ag
^{109}Cd	^{109m}Ag
^{115}Cd	^{115m}In
^{115m}Cd	^{115m}In
^{114m}In	^{114}In
^{113}Sn	^{113m}In
^{125}Sb	^{125m}Te
^{127m}Te	^{127}Te
^{129m}Te	^{129}Te
^{131m}Te	^{131}Te
^{132}Te	^{132}I
^{137}Cs	^{137m}Ba
^{144}Ce	^{144}Pr, ^{144m}Pr
^{232}U	^{228}Th, ^{224}Ra, ^{220}Rn, ^{216}Po, ^{212}Pb, ^{212}Bi, ^{208}Tl
^{240}U	^{240m}Np, ^{240}Np
^{237}Np	^{233}Pa
^{244}Pu	^{240}U, ^{240m}Np, ^{240}Np
^{242m}Am	^{238}Np
^{243}Am	^{239}Np
^{247}Cm	^{243}Pu
^{254}Es	^{250}Bk
^{254m}Es	^{254}Fm

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 국외 방사성폐기물 분류

가. IAEA

방사성폐기물의 분류체계 설정은 방사성폐기물관리의 안전에 대한 국제기준에서 기본적인 사항 중 하나이며 이를 위하여 IAEA에서는 방사성폐기물에 대한 관리정책 및 전략을 확립하고 최적의 안전성을 확보하는데 도움을 주기 위하여 그림 3 과같은 방사성폐기물 분류체계를 권고하고 있다[10].

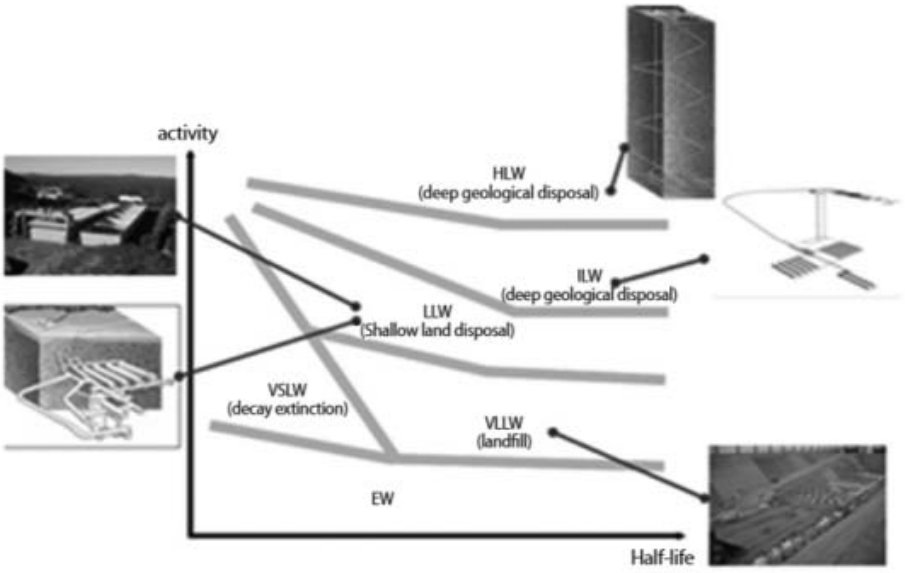


그림 3. 방사성폐기물 분류기준별 IAEA의 권고 처분방식.

고준위방사성폐기물은 심지층 처분방식을 기본적으로 권고하고 있으며, 지하 500 m ~ 1,000 m의 암반에 처분시설을 만들어 처분해야 한다. 현재 고준위방사성폐기물 처분을 위해 미국, 프랑스 등을 중심으로 지하시험시설을 만들어 기술을 개발 중에 있다.

중준위방사성폐기물은 지하 100 m ~ 300 m의 적절한 지층에 처분장을 설치하여 폐기물을 처분하는 것을 권고하고 있으며 고준위방사성폐기물과 중준위방사성폐기물의 처분에는 지질학적으로 안정적인 암염층, 현무암층, 화강암층 등이 검토 중에 있다.

저준위방사성폐기물은 지하 약 30 m 이내의 천연방벽 또는 인공방벽 처분방식이 검

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

토 중에 있으나, 안전성을 위해 인공방벽을 설치하는 처분방법이 널리 이용되고 있다.

극단반감기방사성폐기물은 자연 붕괴 후 방사능이 소멸될 때까지 저장한 후 처분하고, 단순매립을 통한 처분할 수 있다. 규제면제폐기물은 재활용 가능한 부분만 재활용하고 나머지는 일반 사업장폐기물과 동일한 처리 방법을 권고 하고 있다.

IAEA 방사성폐기물의 분류체계 설정은 1970년에 처음 발간하였으며 초기 기준에는 3가지 등급(고준위방사성폐기물, 중준위방사성폐기물, 저준위방사성폐기물)으로 나누어 제시하였다. 추후 이러한 분류는 모든 형태의 방사성폐기물을 다루고 있지 못하였고 특히 처분과 직접적인 연계성이 부족하여 실질적인 적용에 제한사항이 있었다고 IAEA는 밝히고 있다. 이와 같은 문제를 해결하고자 IAEA에서는 2009년 IAEA GSG-1 'Classification of Radioactive Waste'를 발간하여 방사성폐기물의 위험도에 기반을 둔 차등접근법에 따라 방사성 폐기물을 6개(고준위방사성폐기물, 중준위방사성폐기물, 저준위방사성폐기물, 극저준위방사성폐기물, 극단반감기폐기물, 면제폐기물)로 구분하였고 이는 표 6과 같다[10, 11].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 6. IAEA 방사성폐기물 분류기준

폐기물 범주	분류기준
고준위폐기물 (High Level Waste, HLW)	- 다량의 단반감기, 장반감기 핵종을 포함 - 장기간의 안전성 보장을 위해 높은 수준의 격리기능 필요
중준위폐기물 (Intermediate Level Waste, ILW)	- 천층처분보다 높은 수준의 격납과 격리를 요구하며, 열발생량이 낮고 차폐 필요
저준위폐기물 (Low Level Waste, LLW)	- 정상 취급(Handling) 및 운반 시 차폐를 요구하지 않으며, 일발적으로 천층처분에 적합 - 방사능농도 관점에서 LLW와 ILW 사이의 정확한 기준값을 제시하는 것은 어려우나, LLW에 대한 정량적 기준값은 각 규제기관이 결정할 수 있음
극저준위폐기물 (Very Low Level Waste, VLLW)	- 일반적으로 면제준위와 같거나 이를 조금 상회하는 폐기물 - 공학적방법을 가진 천층매립처분시설에 처분
극단밤감기폐기물 (Very Short Lived Waste, VSLW)	- 저장 및 자연붕괴를 통해 방사선 준위가 해제준위 이하가 되는 폐기물 - 일반적으로 반감기 100일 이하 방사성동위원소를 포함
면제폐기물 (Exempt Waste, EW)	- 규제관리의 관점에서 고려되지 않는 폐기물

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. 미국

미국의 방사성폐기물 분류체계는 크게 핵주기와 비핵주기폐기물로 구분할 수 있으며, 핵주기폐기물은 다시 사용후핵연료, 고준위폐기물, 초우라늄폐기물, 저준위폐기물, 우라늄/토륨 정련폐기물 등으로 구분한다. 상업용 원자로에서 발생하는 저준위폐기물의 경우 방사능량에 따라 분류하고 있으며 비핵주기폐기물은 가속기에서 생산된 방사성폐기물과 NORM(Naturally Occurred Radioactive Material)로 구별하고 있다.

이와 같은 미국의 방사성폐기물 분류체계도를 그림 4에 나타내었다.

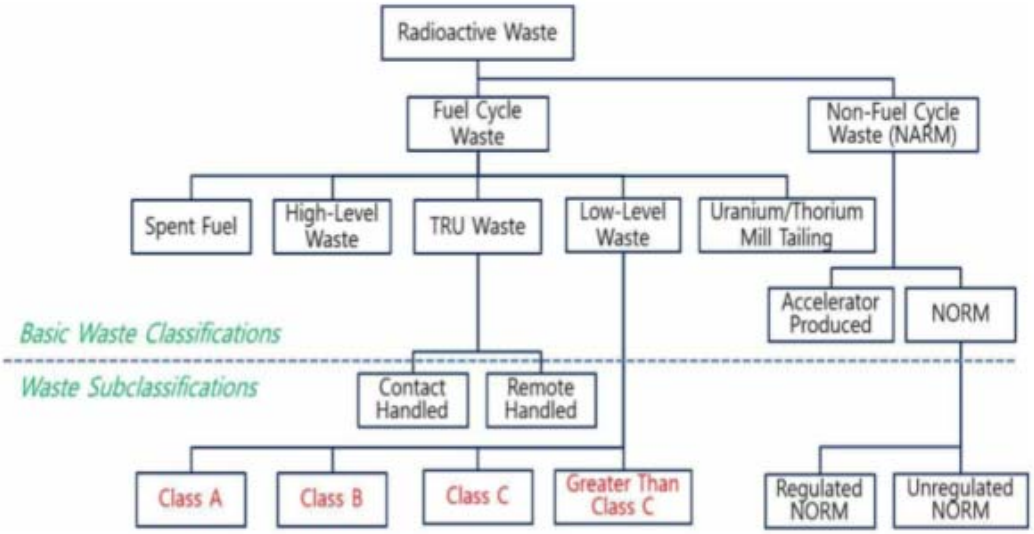


그림 4. 미국의 방사성폐기물 분류체계도.

사용후핵연료의 경우 재처리 되지 않은 것을 말하며, IAEA 방사성분류체계와 같이 사용후핵연료는 최종적으로는 심지층에 처분되는 최종 처분 방식을 따라가고 있다. 고준위방사성폐기물은 사용후핵연료의 재처리 과정에서 발생한 주요 폐기물에 해당되며, 사용후핵연료와 같이 심지층 처분하는 방법을 채택하고 있다. 초우라늄 폐기물의 경우 우라늄보다 원자번호가 크고 반감기 20 y이상의 알파선을 내는 방사성 핵종으로 4 kBq/g 이상의 농도가지고 있는 것을 뜻한다.

미국은 방사성폐기물에 관하여 미국 DOE에 의해 관리 감독을 받고 있으며 처분도 DOE 산하의 별도의 처분시설에 처분되고 있다[10, 11].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

미국의 저준위방사성폐기물의 경우 주로 상업용 발전원자로에서 발생하는 폐기물로서 미국 NRC가 규제를 하고 있고, 미국 연방 기준 0 CFR part61에 이와 관련된 내용이 수록되어 있다. 저준위방사성폐기물은 방사능 농도에 따라서 Class A, B, C, GTCC의 4가지로 분류하고 있으며, 각 핵종별 반감기 및 농도에 대한 기준은 10CFR Part 61.55에 제시되어 있다.

미국의 방사성폐기물 분류 기준은 아래 표7과 같으며 크게 고준위방사성폐기물, 저준위방사성폐기물로 분류를 하고 저준위방사성폐기물의 경우 대부분이 상업용 원자로에서 발생하는 폐기물로 방사능 방출 정도와 반감기에 따라 3등급으로 구분하여 분류하고 있고 GTCC 방사성폐기물의 경우에 대한 처분방법은 아직 미확정상태이다[10, 11].

표 7. 미국의 방사성폐기물 분류기준

폐기물 범주		분류기준
고준위폐기물 (HLW)		사용후핵연료 재처리에서 발생한 고 방사성물질, NRC에서 정한 규정 이상의 고 방사성물질
저준위폐기물	Class A LLW	10CFR55(a)(2)(i)에 기술된 특성과 10CFR61.56(a)에서 요구하는 물리적 형태로 결정(Class A 폐기물의 하한치를 정하고 있지 않다.)
	Class B LLW	Class A보다 폐기물형태가 더 엄격한 규정을 만족시켜야 하는 폐기물 (안전성을 높임)
	Class C LLW	Class A보다 폐기물 형태가 더 엄격한 규정을 만족시켜야 할 뿐만 아니라 부주위에 의한 침입을 방지하기 위하여 처분시설에서 추가적인 조치가 요구되는 폐기물
	GTCC LLW	천층처분이 허용되지 않는 LLW로 처분하기 위한 방안을 모색중이며 현재 임시 저장시설에 저장
AEA Section 11e.(2) Byproduct Material		광물 처리과정에서 발생한 우라늄 또는 토륨의 추출 또는 농축에 의해서 발생된 Tailing 또는 폐기물, 여기에는 우라늄 용액 추출 공정에서 생긴 분리된 표면 폐기물을 포함함

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 일본

일본은 방사성폐기물 분류를 방사성폐기물의 발생원에 따라 크게 고준위방사성폐기물과 저준위방사성폐기물 및 방사성폐기물로 취급할 필요가 없는 물질로 구분하고 있다. 일본의 사용후연료 안전 및 방사성폐기물 관리의 안전에 관한 공동협약 4차 국가보고서에 따르면, 방사성폐기물에 따라 처분 방식을 연계하여 방사성폐기물을 관리·처분할 계획을 표 8과 같이 제시하고 있다[11].

표 8. 일본의 방사성폐기물 분류기준

폐기물 범주			예	발생원
고준위방사성폐기물			유리 고화체	사용후핵연료 재처리 시설
저준위방사성폐기물	발전용 원자로 폐기물	노심 구조물 등 폐기물	제어봉, 노심내부 구조물	발전용 원자로 폐기물
		저준위 폐기물	액체폐기물, 필터, 사용된 도구, 소모품	
		극저준위 폐기물	콘크리트, 금속	
	장반감기 저열발생폐기물 (TRU)		연료봉의 부품, 폐액 필터	재처리시설과 MOX연료제조시설의 운영/해체에서 발생한 저준위폐기물
	우라늄폐기물		소모품, 슬러지, 작업자용 장비	농축시설 및 연료제조시설
	연구시설 등의 폐기물		금속, 액체폐기물, 콘크리트, 폐주사기, 플라스틱, 필터	연구시설, 의료시설 등
방사성폐기물로 취급할 필요가 없는 물질 (클리어런스 준위 미만의 폐기물)			콘크리트, 금속 등 해체폐기물의 대부분	위에 나열된 모든 발생원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 국내/외 자체처분 폐기물 규제 및 현황

1. 국내 자체처분 폐기물 규제 및 현황

자체처분이란 방사성폐기물 중에서 핵종별 농도가 자체처분 허용농도 미만임이 확인된 것을 원자력안전법의 적용대상에서 제외하여 방사성폐기물이 아닌 폐기물로 소각, 매립 또는 재활용 등의 방법으로 관리하는 것이라고 정의하고 있으며 원자력안전법 제70조[12], 원자력안전법 시행령 제107조[13], 원자력안전법 시행규칙 제94조[14] 및 제95조[15], 방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정 원자력안전위원회 고시 제2017-65호 제2조(정의)[5]에 고시하고 있다.

자체처분에 관한 정의 중 자체처분 허용농도란 앞서 표 4에서 방사성폐기물의 자체처분을 허용할 수 있는 방사성핵종 별 방사능농도로 제시를 하였고, 자체처분 허용선량이 만족함이 입증되는 농도라고 국내 법령에서는 고시를 하고 있으며 자체처분 허용선량은 아래와 같다.

가. 자체처분 허용선량

- 개인에 대한 연간 예상 피폭방사선량이 10 μSv 미만
- 집단에 대한 연간 예상 총피폭방사선량이 1 man · Sv 미만

국내에서는 원자력시설에서 발생되는 폐기물에 대하여 자체처분을 시행해왔으며 국내 원자력안전법 속 자체처분에 관한 법령은 표 9와 같다[16].

표 9. 국내 방사성폐기물 자체처분 관계법령

원자력안전법 제70조	방사성폐기물의 처분제한
원자력안전법 시행령 제107조	방사성폐기물 자체처분의 절차 및 방법
원자력안전법 시행규칙 제94조	방사성폐기물의 처분제한
원자력안전법 시행규칙 제95조	자체처분 신고
원자력안전위원회 고시 제2017-65호	방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. 자체처분 방법 및 절차

자체처분사업자는 방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정 원자력안전위원회 고시 제2017-65호 제11조에(자체처분절차서)에 따라 각 호의 사항을 포함한 방사성폐기물 자체처분절차서를 마련하여, 그 절차서에 따라 자체처분에 관한 제반업무를 수행하여야 한다라고 고시되어 있으며 상기의 내용은 아래와 같다[5].

표 10. 자체처분 절차

방사성폐기물
⇓
자체처분 허용농도 측정
⇓
자체처분계획서 제출
⇓
사업자 자체적으로 처분 (매립, 소각, 재활용)

자체처분계획서에는 원자력안전법 시행규칙 제95조제2항에 따라 방사성폐기물 자체처분계획서에 첨부서류를 첨부해야 한다라고 고시하며 이는 아래와 같다.

1. 자체처분 대상 폐기물의 종류 및 수량
2. 자체처분 대상 폐기물의 발생원, 발생일시 또는 발생기간
3. 자체처분 대상 폐기물의 측정 대상별 표면 방사선량률, 핵종별 농도 및 그 산출근거
4. 자체처분 방법 및 예정 목적지
5. 자체처분으로 인하여 부수적으로 발생되는 폐기물의 수량 및 관리방법
6. 자체처분에 따른 예상 피폭방사선량이 자체처분 허용선량을 만족함을 입증하는 자료
7. 자체처분절차서 (원안위고시 제2017-65)호

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

앞서 말한 자체처분 절차서에는 다음과 같은 제반업무를 수행하여야한다.

○ 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(평가의 타당성에 대한 논거)
- 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 폐기물의 관리방법

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

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 국내 자체처분 현황

국내 자체처분 주요 신청기관은 발전사업자인 한국수력원자력(주)을 비롯하여 한전원자력연료(주)와 한국원자력연구원 등이 있으며, 자체처분 대상 폐기물을 전용 저장고에 저장하여 관리하고 있다. 원자력시설 운영 또는 보수과정에서 토양, 폐콘크리트, 철재류, 폐활성탄, 폐수지, 폐유 등과 같은 다양한 종류의 폐기물이 매년 발생하며 그 수량이 증가하고 있어 저장공간과 처분비용의 증가하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 국내에서는 자체처분을 수용하고 점진적으로 자체처분 수량을 늘려가고 있다.

방사성폐기물에 대한 자체처분은 한전원자력연료(주)에서 발생한 NaF 폐기물에 대한 자체처분이 1994 년에 처음 시행되었고 그 다음해인 1995 년 원전에서 발생한 방사성폐기물의 자체처분이 시행되었다. 그 후 관련 법령의 정비를 통하여 2000 년부터 본격적으로 자체처분이 시행되었으며, 최근에는 자체처분 대상 폐기물 종류 및 수량이 증가하고 있는 추세이다.

자체처분 방법을 살펴보면, 철재류는 대부분 재활용되고 있으며 토양, 폐수지, 폐활성탄, 콘크리트 등은 매립장에 매립을 시행하고 있다. 폐유, 폐수지, 종이 등은 허가받은 폐기물 처리시설에서 소각하였지만 폐기물의 불완전연소, 배기 기체처리 계통의 과도한 부식, 필터 및 기타 배기가스 장치에 타르 및 매연의 오염, 배기가스 처리효율 저하, 방사선 환경에서의 소각기 조작에 따른 기계적 문제 등과 같은 많은 문제점이 있어 이를 해결하기 위한 연구/개발이 진행중이다.

원전운영 사업자인 한국수력원자력(주)은 철재류, 폐수지, 활성탄, 콘크리트 등 다양한 종류의 폐기물에 대하여 자체처분을 시행하고 있다. 각 원전본부별 자체처분 폐기물 저장현황은 아래 표 11 및 그림 5와 같다. 한전원자력연료(주)는 연 평균 3~4회 정도 금속폐기물과 콘크리트 폐기물에 대하여 자체처분을 꾸준히 시행하고 있으며, 2009 년도부터 신청건수가 증가하고 있다. 한국원자력연구원은 연구로 1, 2호기 해체과정에서 발생한 방사성폐기물에 대하여 자체처분을 시행한 경험이 있다[6, 16].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 11. 원전본부별 자체처분대상 폐기물 저장현황

본부 / 종류	고리	새울	월성	한빛	한울
철재류 (kg)	223,289	-	66,911.6	187,960	55,602
콘크리트 (kg)	60,988	-	23,194	38,600	8,638
폐수지 (kg)	114,822	5,960	11,374	35,015	37,020
폐유 (kg)	43,727	32,734	69,272	10,917	58,140
폐활성탄 (kg)	85,675	-	42,535	41,110	79,004
기타 (kg)	37,834	-	50,199	3,859	65,432

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

새울 본부 자체처분 대상 폐기물 보관창고 전경

월성 1, 2발 폐유 보관창고 전경

고리 3발 소내 자체처분 폐기물 저장현황

한울 본부 자체처분 창고 저장현황

월성 1, 2발 폐유저장창고 저장현황

한빛 본부 폐유저장창고 저장현황

그림 5. 국내 원자력발전소 자체처분대상 폐기물 저장현황.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2013년 법령 개정 이후로 자체처분 승인 현황은 그림 6과 같이 총 78건으로 2013년 (20), 2014년 (12), 2015년 (11), 2016년 (15), 2017년 (12), 2018년 (8) 건이며, 총 중량(kg)기준으로 2013년 (202.8 t), 2014년 (264.4 t), 2015년 (564.1 t), 2016년 (128.8 t), 2017(139.2 t), 2018(131.7 t)으로 자체처분 한 사례가 있다.

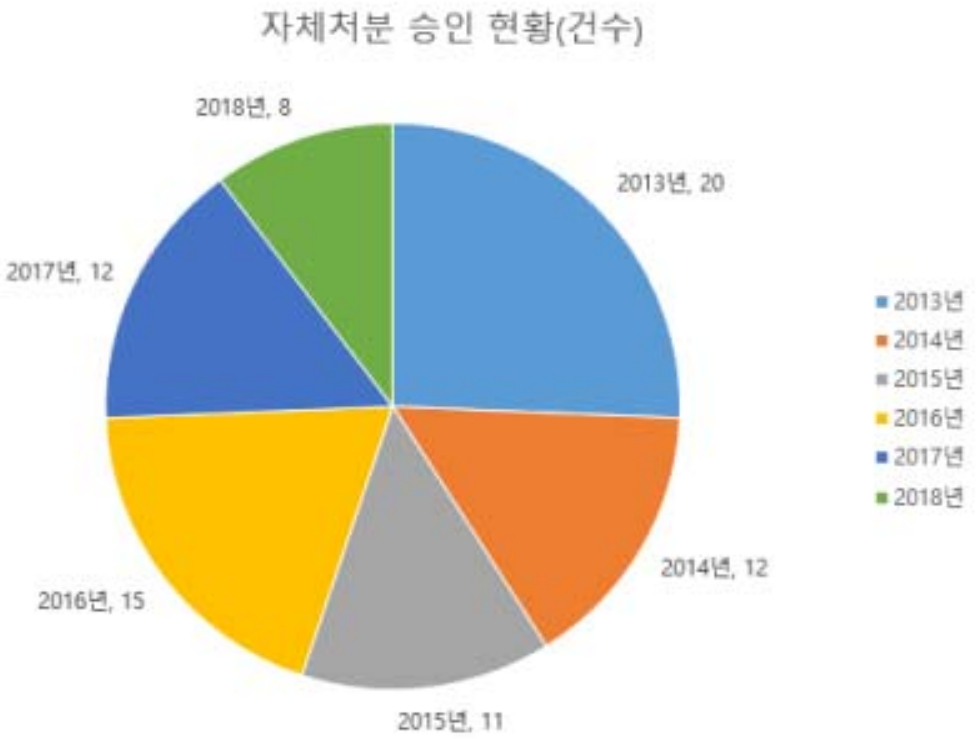


그림 6. 연도별 자체처분 현황.

2014~2018년 폐기물 종류별 자체처분 승인 현황을 보면 불산, 철재류, 콘크리트, 폐수지 등이 있으며 대부분 불산과 철재류가 차지하고 있는 걸 그림 7과 같이 알 수 있다.

앞서 말한 것과 같이 폐수지, 콘크리트, 폐활성탄 등은 통상 매립을 실시하며, 철재류는 대부분 재활용하고 있다. 원자력시설에서 발생되는 고체방사성폐기물의 상당부분은 가연성 물질로 구성되어 있어 허가 받은 폐기물 처리시설에서 이를 소각하고 있다[16, 17].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

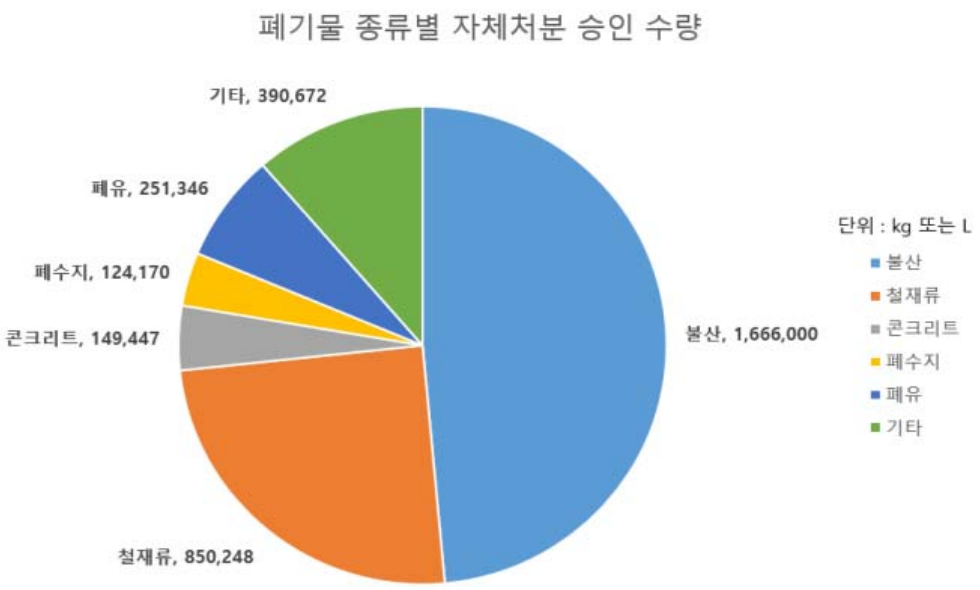


그림 7. 폐기물 종류별 자체처분 승인 현황

라. 폐활성탄 자체처분 사례

한수원에서는 1998년 이후 연료건물 비상배기계통, 보조건물 정상배기계통, 격납건물 저체적 배기계통 등 방사선관리구역에서 발생한 폐활성탄 58,478 kg 중 연료건물 및 보조건물에서 발생한 극저준위 이하 폐활성탄 47,858 kg (연료건물 비상배기계통: 14,160 kg, 보조건물 정상배기계통: 33,698 kg)을 2017년 11월 자체처분신고하여 2019년 1월 승인을 받고 2019년 3월중에 자체처분을 시행하였다.

폐활성탄 자체처분은 표면선량율 측정 → 대표시료채취 → 선량평가 → 적합성검토 → 자체처분 순으로 진행하며, 국내에서 시행한 폐활성탄 자체처분은 그림 8 및 그림 9와 같이 시행되어 최종적으로 소내 매립장에 매립하였다 그림 11[16].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

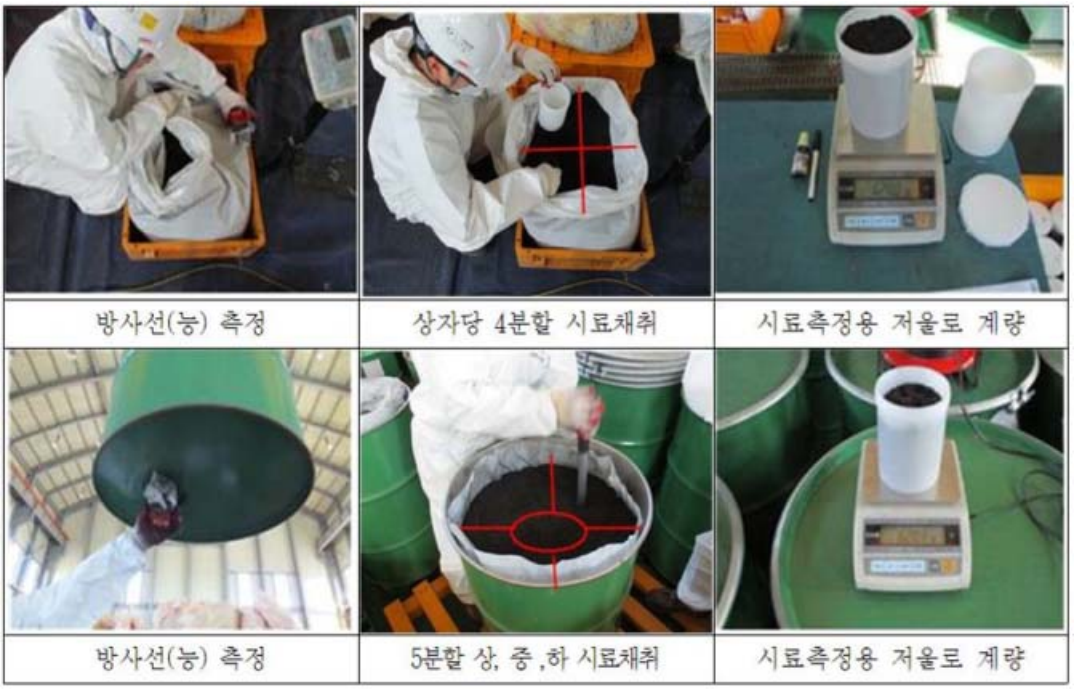


그림 8. 폐활성탄 시료채취 및 분석 절차 1.

그림 9. 폐활성탄 시료채취 및 분석 절차 2.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 10. 폐활성탄 소내 매립 과정.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 국외 자체처분 폐기물 규제 및 현황

가. IAEA

IAEA의 경우 RS-G-1.71에 따른 방사능농도가 극히 미량인 폐기물에 대한 규제배제, 규제면제, 규제해제에 대하여 권고하고 있으며 세부내용은 표 12와 같다.

표 12. IAEA 규제 정의

구분	내용
규제배제(Exclusion)	- 천연 방사성물질 등 어떤 특정한 종류의 피폭을 규제기관이 규제기준에 맞추어 관리할 수 없다고 생각되기 때문에 그 관리체계의 적용범위에서 의도적으로 제외하는 것
규제면제(Exemption)	- 어떤 방사선원 또는 행위에 기인하는 피폭(잠재피폭을 포함)으로 사람의 건강에 미치는 위험(risk)가 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 방사성물질로서 취급할 필요가 없어 규제기관이 면제하는 것
규제해제(Clearance)	- 반감기 등으로 방사성물질의 농도가 낮아져서 피폭과 그 위험이 무시할 수 있을 정도로 작아졌기 때문에 규제 및 관리하던 것을 그 대상에서 제외하여 일반폐기물로 처리할 수 있도록 하는 것

나. 미국

1994년까지는 원자로 시설에서 일부 고체폐기물에 대해 사안별 평가를 통하여 규제해제를 허가하였다. US NRC는 1999년에 NUREG-1640 (Radiological Assessments for Clearance of Materials from Nuclear Facilities)를 발간하여 방사선영향이 10 μSv/y에 해당하는 방사능농도를 규제해제 기준으로 제시하였다.

현재 US NRC는 관련 지침 및 규정에 따라 규제해제를 극히 제한적으로 고체상 물질에 허용하고 있다. 원자로시설에서 발생된 표면이 오염된 고체폐기물은 Reg. Guide 1.86에

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

따른 오염도 조사결과 자연방사선 준위를 초과하는 방사능이 검출되지 않는 경우에 한하여 규제해제가 가능하다. 또한 원자로에서 발생된 체적오염 고체폐기물은 Reg. Guide 1.86에 제시된 수치보다 보수적인 검출하한치 조건 하에 수행된 방사능 계측결과에 따라 자연방사능 준위를 초과하는 폐기물은 규제해제가 허용되지 않는다. 이와 관련하여 US NRC는 Information Notice 88-22(Disposal of Sludge from Onsite Sewage Treatment Facilities at Nuclear Power Stations)에서 체적오염 폐기물에는 환경시료의 측정에 적용되는 감마선핵종의 검출하한을 적용하여 천연방사성물질과 허가대상 방사성 물질의 오염도를 구분하여야 한다는 규제입장을 표명한 바 있다. 아직까지 사안별로 선량 평가에 적용되는 단일 기준치가 확정되지는 않았지만, 일반인 선량한도 수준인 총 유효선량당량(TEDE: Total Effective Dose Equivalent) 1 mSv/y의 매우 낮은 농도임을 입증 하여야 한다. 참고로 1992년 US NRC는 핵연료주기시설인 Allied Signal사(이후 Honey Well로 변경)에서 발생된 미량의 핵연료물질로 오염된 CaF_2를 철강산업에 사용되는 용제로 재활용되는 것을 승인한 바 있으며, 당시 적용된 선량기준은 TEDE 0.25 mSv/y 수준이었다.

예외적으로 일반인에 대한 잠재적인 선량이 연간선량한도 수준의 낮은 농도인 경우에는 원자로 및 비원자로시설에서 발생된 고체폐기물에 대하여 매립을 통한 허가배출이 허용 가능하나, 아직까지 이러한 허가사례는 확인되지 않았다. US NRC는 BRC 정책성명을 철회한 후 1994년부터 규제해제 기준을 도출하기 위한 연구를 재개해 1999년 NUREG-1640의 발간하여 규제해제 농도기준(안)을 제시하였다. 그러나 일반인과 산업계에서 다양한 이견을 보여 현재 국립과학원(National Academy of Science)의 주도로 검토를 재수행하고 있다. 또한 미국 보건물리학회에서는 규제해제를 위한 사전 선별기준에 관한 산업기술기준 ANSI/HPS-N13.12(1999)를 발간하였으나, 아직까지 규제 기관이 동 기준을 채택하지 않아 실제 적용되지는 못하고 있다. 한편 2000년 1월에 US DOE는 체적오염된 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 금속폐기물의 규제해제를 계속 연기할 것이며, 정책의 우선순위를 산하 시설 내에서 납을 재이용하는데 둔다고 발표한 바 있다[11].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 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 섣불리 혼입하여 처리하지 않고 원자력 관련 기구 내에서 우선적으로 재이용을 실시하고 있다. 이를 통해 실적을 쌓고 모니터링을 통해 안전성을 확보하여 수용성을 높이고 있다[11].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

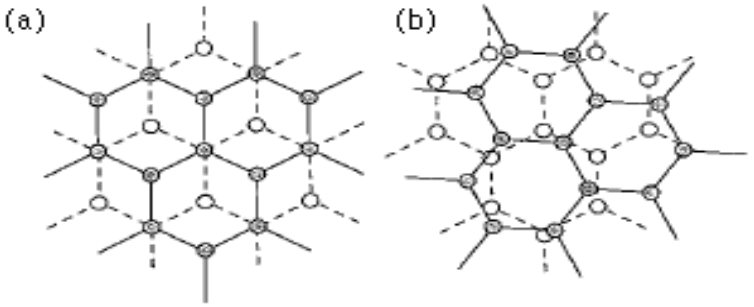
제 3 장 (폐)활성탄의 특성 및 현황조사

제 1 절 활성탄 및 첨착활성탄의 특성

1. 활성탄의 특성

활성탄(activated carbon)은 숯(char or charcoal)을 가스 또는 약품으로 활성화시킨 다공성 탄소라고 정의하며 원료물질이나 활성화 조건에 따라 활성탄의 특성이 달라진다. 통상 야자껍질, 톱밥, 석탄 또는 합성수지와 같은 유기물질등과 같은 가연성 물질들을 약 500 ℃에서 탄화, 약 900 ℃에서 활성화 및 다공성을 증가시키기 위한 가스 또는 화학약품의 첨가 과정을 거쳐 약 20 Å ($10^{-10}m$) 크기의 미세공이 생성시킨다. 활성탄은 물리적 형상에 의해 분말상과 입상으로 구분할 수 있으며 제조단계인 활성화 과정에 따라서 가스활성탄과 약품활성탄으로 분류가 가능하다. 추가적으로 각종 화학약품을 첨가하여 피흡착질을 화학흡착 또는 화학반응을 일으키는 첨착카본이 있다.

활성탄의 결정 구조는 그림 11 왼쪽 흑연과 달리 불규칙적으로 쌓여 있는 난층 구조 또는 무정형 구조이며, 기본 결정구조가 불규칙적으로 배열되는 것에 의하여 생긴 세공과 비정질 부분이 흡착에 관여한다고 알려져 있다[7].



(a)흑연:정형구조 (b) 활성탄: 무정형 구조

그림 11. 흑연과 활성탄의 구조 비교.

활성탄은 1,000 ㎡/g 이상의 표면적을 가지고 있으며, 반데르발스 인력에 의해서 기상이나 액상의 저농도 유체로부터 분자들을 결합해서 고농도로 농축하는 물리적 흡착을 한다고 알려져 있다. 또한 화학적 흡착이 일어나는 활성점은 강력한 원자결합력에

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

의한 화학적 흡착이 일어나기에 흡착시 중요한 부분이다.

활성탄은 각종 흡착제 중에서 최대의 비표면적을 가지며 대부분 미세공으로 구성되 있고 분자량이 작은 흡착질을 흡착했다가도 더 큰 분자량의 흡착질을 흡착하는 흡착선택성을 띄고 있다. 또한 활성탄의 흡착은 온도에 따라 달라지는 특성을 보이고 있다. 흡착은 발열 현상으로 고온에서는 분자의 확산속도와 충돌 횟수가 감소하기 때문에 온도가 상승할수록 흡착성능이 감소하게 되어 온도가 낮은 편이 흡착에 좋은 조건이다.

2. 첨착활성탄의 특성

원자력발전소 공기 정화계통에서 사용중인 활성탄은 주로 기체폐기물 내 방사성요오드를 제거하기 위하여 사용하고 있다. 일반 활성탄에 의해서 유기요오드를 흡착할 경우 흡착용량이 크나 습도가 높거나 온도가 높아지면 쉽게 탈착되는 현상이 발생하게 된다. 이러한 문제점을 해소시키고 일반활성탄으로 제거가 어려운 특정 유해물질의 흡착효율을 향상시키거나 흡착탑의 사용시간을 연장시키기 위하여 활성탄에 KI(Potassium Iodine) 및 TEDA(TriEthylene-DiAmine) 등의 화학약품을 첨착시킨 활성탄을 사용하도록 규정하고 있다[7].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 국내 원전 폐활성탄

1. 폐활성탄의 발생량

국내 원전별 폐활성탄 저장량을 정리한 것으로, 200L드럼 기준 총 폐활성탄 양은 무게로 약 249 톤이며 표 13과 같다.

표 13. 국내 원전별 폐활성탄 저장현황 2018.12 (단위 : 200L 드럼 기준)

원전	고리		영광			월성		울진			합계
	1발	2발	1발	2발	3발	1발	2발	1발	2발	3발	
현재고량	357	535	128	214	86	354	89	494	205	124	2,586

2. 폐활성탄의 표면선량률

국내 원자력발전소 공기 정화계통에서 발생하여 저장중인 ^{14}C / ^{3}H 방사능농도를 측정하기 전에 폐활성탄의 표면선량율 측정결과 표 14와 같다.

표 14. 무작위로 추출된 폐활성탄 시료 5개에 대한 표면선량률 측정

품목명 \ 시료번호		표면선량률	Background
폐활성탄	1	0.249 ± 0.00888 Bq/㎠ · s	0.230 ± 0.019 Bq/㎠ · s
	2	0.238 ± 0.00460 Bq/㎠ · s	
	3	0.233 ± 0.00314 Bq/㎠ · s	
	4	0.248 ± 0.00303 Bq/㎠ · s	
	5	0.231 ± 0.0115 Bq/㎠ · s	

표 14에 제시한 표면 선량률 결과 background 준위와 크게 다르지 않아 폐활성탄만에 의한 알짜 선량률은 실제적으로 없음을 확인할 수 있다[7].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 국내원전 폐활성탄 방사능 분석 결과

고리, 울진, 영광 원자력발전소에서 발생된 폐활성탄 내 방사능 분포 측정 자료를 정리한 결과는 표 15와 같다. 특히 울진 원자력발전소 발생 폐활성탄내 ^{14}C 방사능이 다른 원자력 발전소에 비하여 높게 나타났으며, 영광, 고리 원자력발전소의 경우 폐활성탄내 ^{14}C 방사능이 자체처분제한치를 초과할 것으로 판단된다[7].

표 15. 국내 각 원자력발전소별 폐활성탄 내 ^{14}C 및 ^{3}H 방사능 비교

발전소	시료명	방사능	
		^{3}H (Bq/g)	^{14}C (Bq/g)
신품 활성탄	KI 활성탄	0.128 ± 0.0851	0.307 ± 0.0993
	TEDA 활성탄	0.157 ± 0.0847	0.379 ± 0.1021
고리1발	2호기 폐활성탄 441	1.8 ± 0.4	< 0.5
	2호기 폐활성탄	14.94 ± 1.69	209.21 ± 23.44
영광3발	폐활성탄I	< 0.19	< 0.17
	폐활성탄II	< 0.19	314.58 ± 35.33
영광2발	3-H-27S	5.537 ± 0.668	5.897 ± 0.645
	3-H-29S	< 0.204	9.408 ± 1.023
	4-H-28S	< 0.193	0.277 ± 0.054
	4-3H0S	< 0.194	0.286 ± 0.056
	RWB H-06S	< 0.204	0.352 ± 0.062
	3호기 A계열 및 RWB	0.450 ± 0.0863	4.965 ± 0.5634
	3호기 B계열	0.843 ± 0.1243	5.139 ± 0.5830
	4호기 A계열	0.275 ± 0.0755	0.330 ± 0.0592
	4호기 27S	0.295 ± 0.0767	26.790 ± 3.0070
	4호기 B계열	0.291 ± 0.0741	0.429 ± 0.0682
울진	AV1-0	226 ± 24.5	45.5 ± 4.97
	AV3-0	-	130 ± 14.1
	AV4-0	-	145 ± 16.1

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 폐활성탄 처리

가. 폐활성탄 처리기술

폐활성탄으로부터 ^{14}C 및 ^{3}H 핵종을 제거할 수 있는 후보 공정 기술은 크게 두 가지로 나눌 수 있으며, 각 공정의 장단점을 표 16에 간략하게 정리하였다.

표 16. 폐활성탄 내 $^{14}C/^{3}H$ 제거 후보 기술 장단점 비교

후보기술	장점	단점
건식 (단순 열처리)	•공정이 단순 •운전이 용이 •2차폐기물 발생 최소화 •현장적용 용이	•국내외 연구사례 전무 •운전비가 큼 •전력소모량 많음
습식 (산성 약품처리)	•전력소모량 적음 •탈착효율 좋음 •처리시간 단축	•국내외 연구사례 전무 •탈착용이 물질 선정 어려움 •공정이 복잡 •2차폐기물 다량 발생

두 가지 후보 기술은 표 16에서 보는 바와 같이 각각의 장, 단점을 가지고 있으며, 폐활성탄으로부터 ^{14}C 및 ^{3}H 제거 연구 결과가 거의 전무한 현실에서 구체적인 입증 자료를 제시하기는 어렵지만 상대적인 비교를 통하여 적용 가능한 후보 기술을 선정할 수 있을 것이다. 즉 후보 기술 중 원전 현장 적용을 목적으로 할 경우 공정의 단순성, 신뢰도, 안정성을 우선적으로 고려하여야 할 필요가 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 연구 방법

제 1 절 RESRAD 코드

RESRAD(RESidual RADiactivity) 전산코드는 미국 DOE(U.S. Department of Energy)와 NRC(U.S. Nuclear Regulatory Commission)의 지원 하에 ANL(Argonne National Laboratory)에서 개발된 코드로서 아래 그림 12에서 보는 것과 같이 RESRAD(ONSITE, OFFSITE, BUILE, RDD, BIOTA, RECYCLE, BASELINE, CHEM, ECORISK)로 총 9가지 전산코드가 있으며 이들은 서로 다른 환경영향 평가를 수행할 수 있고 각각의 목적에 맞게 코드를 사용하여야한다.

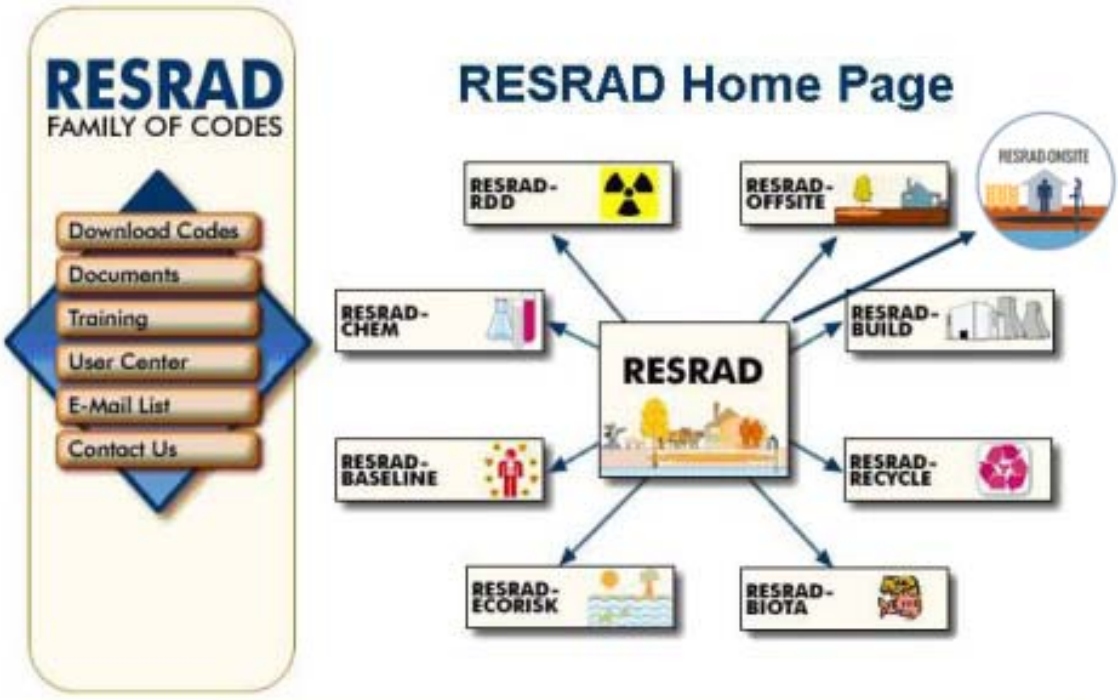


그림 12. RESRAD 코드군.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

본 연구에서 오염토양(부지) 상부 거주자의 방사선학적 영향을 평가하기 위해서 RESRAD-ONSITE 코드를 사용하였으며, 이 코드는 자체처분시 매립 시나리오가 가능하고 일반 거주자에 대해서는 잔류 방사성 물질에 의한 피폭선량 및 위해도 평가를 위해 개발되었다. 본 프로그램은 EPA가 부지 복구 관련 법안 작성시 사용하였으며 DOE의 Order 5400.5에 따라 개발된 것으로 NRC의 사용 승인을 받아 현재 해체 시 유용하게 활용하고 있다[18, 19].

표 17. RESRAD 코드별 내용

코드명	코드내용
ONSITE	부지 내 잔류 방사성 물질에 의한 거주자 방사선량 평가
OFFSITE	RESRAD ONSITE에 확장 코드로 부지 내, 부지 외 거주자의 피폭선량 평가
BUILD	오염된 건물 거주자에 대한 피폭선량 및 위험도 평가
RDD	고의적으로 방사성물질을 확산시키는 장치에 대한 사전 점검을 위한 프로그램화 한 것
BIOTA	오염된 물 및 토양의 부지개방, 기준농도 유도 및 부지 내 피폭선량/위험도 평가
RECYCLE	오염물질, 장비 재활용, 재사용에 따른 위험도 평가
BASELINE	EPA의 보건위험평가지침에 따른 기본위험도 평가
CHEM	RESRAD에 추가하여 화학적 위험도를 평가
ECORISK	오염물질 피폭에 의한 생태학적 위험도 평가

본 프로그램의 피폭시나리오는 토양 내 함유된 물질로부터 직접적인 외부피폭, 공기 중 핵종의 호흡, 오염된 토양으로부터의 식물, 고기, 우유, 물고기등의 섭취에 의한 내부피폭 등으로 구성되어있고 각 피폭경로는 그림 13 및 14와 같이 나타낼 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

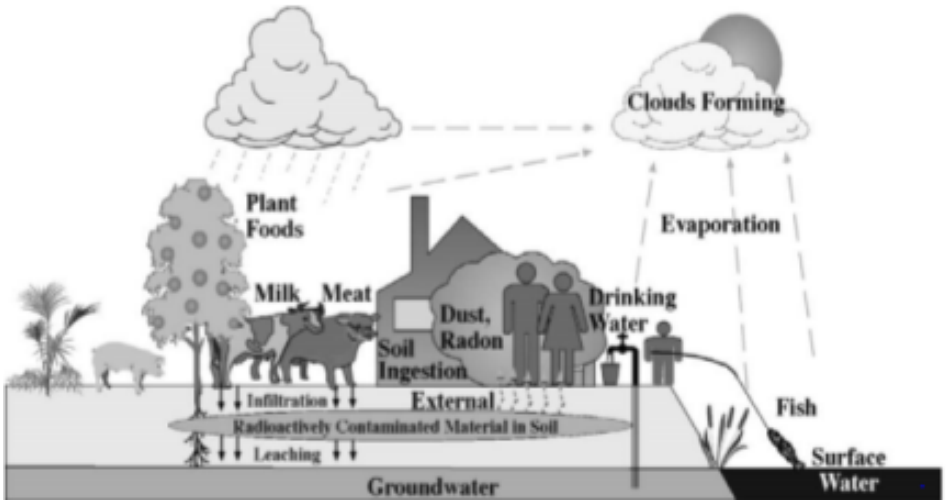


그림 13. RESRAD 이동경로.

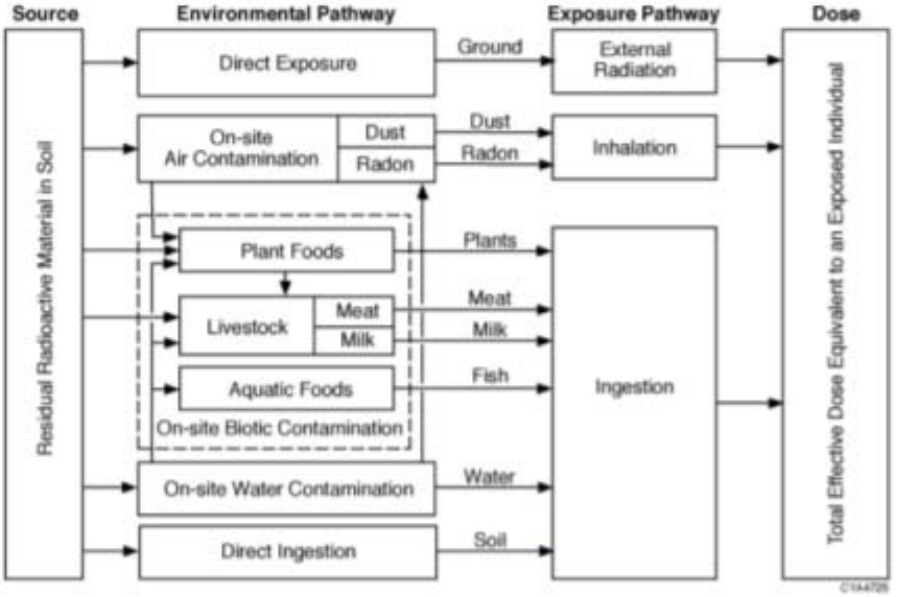


그림 14. RESRAD 이동경로.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 시나리오 선정

본 연구에서는 산업 작업자 시나리오를 선정하였고 작업자에 대한 피폭은 토양에 존재하는 방사성 핵종으로부터의 직접 피폭, 부유된 먼지의 호흡, 라돈 및 라돈의 붕괴생성물의 호흡, 오염된 토양의 섭취 등을 고려하여 평가한다.

작업자 시나리오는 방사성 핵종으로부터의 직접피폭, 부유된 먼지의 호흡. 라돈 및 라돈의 붕괴 생성물의 호흡, 오염된 토양의 섭취에 대한 피폭경로를 고려해야지만 라돈 및 라돈의 붕괴 생성물의 호흡의 경우 선행연구에서 자체처분허용농도를 초과한 핵종(^{14}C, ^{3}H)을 선정하였고 본 연구에서도 이를 바탕으로 실시하였으므로 평가시 고려하지 않았다.

표 18. RESRAD-onsite 시나리오

시나리오 / 피폭경로	거주 농부	교외 거주자	산업 작업자	행랑객
External exposure	O	O	O	O
Inhalation of dust	O	O	O	O
Radon inhalation	O	O	O	O
Ingestion of plant foods	O	O	X	X
Ingestion of meat	O	X	X	O
Ingestion of milk	O	X	X	X
Ingestion of fish	O	X	X	O
Ingestion of soil	O	O	O	O
Ingestion of water	O	X	X	X

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 RESRAD 평가 코드 입력인자

1. 선원항

폐활성탄의 선원항의 경우, ^{131}I, ^{14}C, ^{3}H 및 그 밖의 γ 핵종이 포함되어 있을 것으로 보여지지만 선행연구 결과 ^{131}I의 경우 반감기가 8 d로 짧기 때문에 평가 대상에서 제외하였으며 γ핵종의 경우 선행연구 결과 MDA값 미만인 결과가 나와 제외를 하였다.본 연구에서는 최종적으로 폐활성탄의 선원항은 ^{14}C, ^{3}H를 선정하였다.

표 19. 폐활성탄 선원항

Nuclide	Half - Life	Activity (Bq/g)
^{14}C	5,730 y	45.5
^{3}H	12.3 y	226

*울진 발전소 폐활성탄 측정값

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 처리기술 별 제거율 적용

선행연구에서 연구 및 개발을 하였던 3가지인 열처리, 진공&열처리, 습식처리(6M 염산, 질산)인 방법을 적용하여 선량평가를 실시하였으며 처리기술 별 제거율은 표20과 같다.

표 20. 처리기술 별 제거율

처리기술	방법	제거율	
		^{14}C	^{3}H
단순 열처리	500 ℃, 10 시간 처리	61.5 %	96.7 %
	850 ℃, 10 시간 처리	64.3 %	97.3 %
진공&열처리	500 torr, 270 ℃	64.4 %	99.4 %
	600 torr, 270 ℃	72.7 %	99.8 %
습식처리	6M 질산	66.4 %	99.7 %
	6M 염산	45.3 %	99.7 %

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 선량환산인자

폐활성탄 매립시 선량평가를 하기에 앞서 선량환산인자 값들을 수정해주어야 한다. RESRAD 코드 같은 경우 미국 ANL(Argonne National Laboratory)에서 개발된 코드로서 선량환산인자를 ICRP 26 선량개념(선량당량)으로 이루어져 있다. 이에 따라 RESRAD 코드에서는 외부피폭 선량환산인자를 1993년 미국 EPA에서 제시된 FGR NO. 12에 맞춰 설정이 되어 있으며 호흡 및 섭취에 해당하는 내부피폭 선량환산인자의 경우 1998 년에 출간한 FGR NO. 11을 기본값으로 채택하고 있다. 그러나 우리나라의 경우 ICRP 60에서 권고한 유효선량개념을 채택하고 있으므로 이를 적용하고 ICRP 72에 호흡과 섭취의 내부피폭 선량환산인자 값을 수정하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 시나리오 선정 및 Calculation Time

RESRAD는 평가기간 동안 최대 선량이 발현되는 시점을 자동적으로 계산하는 기능을 가지고 있으며 그림 15와 같이 설정이 가능하다. 매립지는 5년이 경과된 시점부터 일반인에게 개방을 한다는 가정을 하고 부지 재활용의 적합성을 평가하는 과정에서 1,000년을 기본 평가 기간으로 적용하는 것이 미국의 규제관행으로 알려져 있기에 최대 평가기간을 1,000년까지 평가 기간을 설정하여 작업자 시나리오에 적용하였다[20].

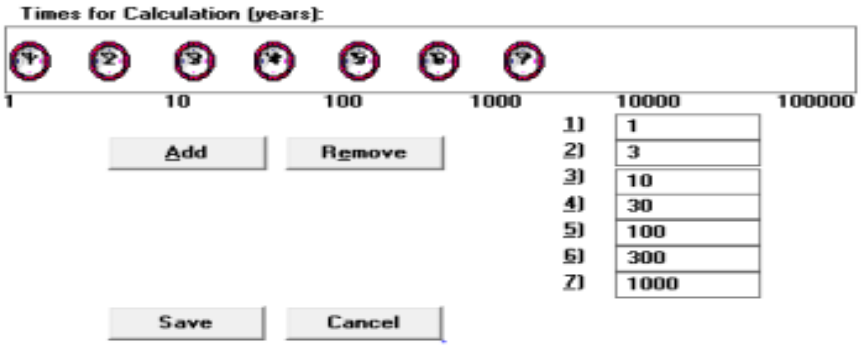


그림 15. 평가시간 설정.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5. 부지

RESRAD코드를 이용하여 선량평가를 위해서는 매립지역에 해당하는 부지 선정 및 부지 특성에 대하여 알아야한다. 국내에서는 중·저준위 폐기물 처분장만 있을 뿐 아직 폐기물 매립처분장이 선정되지 않았기에 본 연구에서는 KINS/GR-297과 같이 반경 150 m, 깊이 1 m 체적 70,685 m^3로 가정하여 표 21과 같이 적용하였다[18].

표 21. 부지 설정인자 값1

부지 특성 인자	적용값	비고
Area of Contaminated Zone	70,685 m^2	KINS/GR-297
Thickness of Contaminated zone	1 m	KINS/GR-297

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Cover and Contaminatedz Zone Hydrological Data는 오염지역 및 복토층에 대한 수문학적 특성정보에 대한 입력값으로 보수적인 평가를 위해 복토층은 고려하지 않고 나머지 입력값은 표 22와 같이 적용하였다.

표 22. 부지 설정인자 값2

부지 특성 인자	적용값	비고
오염구역 밀도 (Density of contaminated zone)	1.52 g/cm^3	KINS/GR-297
오염구역 침식속도 (Contaminated zone erosion rate)	0.001 m/y	KINS/GR-297
오염구역 총 공극률 (Contaminated zone total porosity)	0.45	KINS/GR-297
오염구역 포장용수량(수분보유량) (Contaminated zone field capacity)	0.2 m/y	RESRAD Default
오염구역 수리전도도 (Contaminated zone hydraulic conductivity)	10 m/y	RESRAD Default
오염구역 b 매개변수 (Saturated zone b Parameter)	5.3	KINS/GR-297
대기 중 습기 (Humidity in air)	8	KINS/GR-297
증발산계수 (Evapotranspiration Coefficient)	0.365	KINS/GR-297
풍속 (wind)	3.7 m/s	기상청
강수량 (Precipitation)	1.52 m/y	기상청
관개량 (Irrigation)	0.4 m/y	KINS/GR-297
지표유출계수 (Runoff Coefficient)	0.045	KINS/GR-297

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6. 거주자에 대한 특성정보

Occupancy, Inhalation, and External Gamma Data는 거주자에 대한 특성정보에 대한 값으로 표 23과 같이 적용하였으며 호흡률의 경우 국내 법령이 준용하고 있는 ICRP 60에서 작업자의 호흡률을 1.2 ㎥/h 에 연간 작업 시간 2,000 h 을 적용하였다.

표 23. 거주자 특성정보 값

거주자 특성정보	적용값	비고
(Inhalation rate)	2,400 m^3/y	-
(Mass loading for inhalation)	0.0005 g/m^3	KINS/RR-144
(Exposure duration)	30 y	-최대개인선량평가에 무관
(Indoor dust filtration factor)	0.4	RESRAD Default
(Exernal gamma shielding factor)	0.7	RESRAD Default
(Indoor time fraction)	0.7	KINS/GR-297
(Outdoor time fraction)	0.25	RESRAD Default
(Shape of the contaminated zone)	Circular	RESRAD Default

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

7. 음식물 섭취경로 및 가축에 대한 섭취

Ingestion Pathway, Dieraty Date 및 Ingestion Pathway, Nondietaty Data는 음식물 섭취경로 및 섭생, 가축에 대한 섭취에 대한 입력인자 값으로 토양 섭취율은 RESRAD Default 값을 이용하였고 토양 혼합층의 깊이의 경우 KINS/RR-144의 값을 기반으로 하여 표 24와 같이 적용하였다.

표 24. 음식물 섭취경로 및 가축에 대한 섭취 값

섭생자료	적용값	비고
토양 섭취율	36.5 g/y	RESRAD Default
토양 혼합층의 깊이	0.15 m	KINS/RR-144

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 연구 결과

국내 원전에서 발생하는 폐활성탄의 자체처분 방안을 검토하기 위하여 RESRAD 코드를 이용해 선량평가를 실시하였다.

울진 발전소 폐활성탄 실측값을 토대로 선행연구된 ^{14}C 와 ^{3}H 의 제염기술을 적용하였으며, 자체처분(매립) 시 1,000 년의 기간 동안 작업자의 피폭선량을 평가하였다.

제 1 절 처리기술 별 선량평가 결과

1. 열처리

가. 열처리 시 핵종의 농도

열처리 방법은 500 ℃, 850 ℃ 온도에서 10시간 열처리하는 방법을 적용하였으며 그 결과는 표 25와 같으며 ^{3}H 의 경우 0.6% 제거율이 높아 졌고 ^{14}C의 경우 2.8% 제거율이 높아 졌지만 자체처분 허용농도는 만족하지 못하였다(표 25).

표 25. 열처리 시 핵종의 농도

핵종	처리전	처리후		자체처분 허용농도
		500 ℃	850 ℃	
^{14}C	45.5	17.52	16.24	불만족
^{3}H	226	7.46	6.10	만족

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. 개인 및 집단선량 평가결과

500 ℃ 열처리 시 개인에 대한 연간 예상 피폭방사선량은 2.245 μSv/y, 850 ℃ 개인에 대한 연간 예상 피폭방사선량은 1.857 μSv/y로 500 ℃ 열처리 방법보다 더 낮은 값을 보였다. 집단에 대한 연간 예상 총피폭방사선량은 매립으로 인한 선량값이 거의 없는 것으로 보여졌다(표 26).

표 26. 열처리 시 개인 및 집단선량결과

	개인 (μSv/y)	집단 (man · Sv/y)	자체처분 허용선량
처리전	62.75	0.004	불만족
(500℃)	2.245	-	만족
(850℃)	1.857	-	만족

NOTE : 선량 평가결과 0.001man · Sv/y 미만의 값은 'hyphen' 처리함

다. 시간에 따른 선량의 변화

시간에 따른 선량의 변화를 보았을 경우 폐활성탄의 선원항으로 선정하였던 ^{14}C, ^{3}H 모두 자체처분 허용선량을 만족하였고 5년이 지난 후에는 그 선량의 값이 미미한 정도를 보여 열처리 시 폐활성탄 자체처분(매립)으로 인한 피폭은 거의 없는 것으로 판단된다(표 27).

표 27. 열처리 시 평가결과 (μSv/y)

처리 방법	핵종	즉시	5년	10년	30년
500 ℃ 10시간	^{14}C	0.1897	-	-	-
	^{3}H	2.055	-	-	-
850 ℃ 10시간	^{14}C	0.1758	-	-	-
	^{3}H	1.681	-	-	-

NOTE : 선량 평가결과 0.001 μ · Sv/y 미만의 값은 'hyphen' 처리함

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 진공 & 열처리

가. 진공&열처리 시 핵종의 농도

226 Bq/g 이었던 ^{3}H 의 농도는 500 torr, 270 ℃ 처리 시 1.46 Bq/g 으로 99.4 % 제거율을 보였고 600 torr, 270 ℃ 처리 시 0.38 Bq/g 으로 99.8 % 제거가 가능하였다. ^{14}C 의 경우 500 torr, 270 ℃ 처리 시 16.2 Bq/g, 600 torr, 270 ℃ 처리 시 12.4 Bq/g 으로 제거율이 높아졌으나 ^{14}C의 자체처분 허용농도를 만족하지 못하였다(표 28).

표 28. 진공&열처리 시 핵종의 농도

핵종	처리전	처리후		자체처분 허용농도
		500 torr	600torr	
^{14}C	45.5	16.2	12.4	불만족
^{3}H	226	1.46	0.38	만족

나. 개인 및 집단선량 평가결과

진공&열처리 시 연간 개인 선량은 500 torr의 경우 0.580 μSv/y, 600 torr의 경우 0.240 μSv/y로 개인에 대한 연간 예상 피폭방사선량인 10 μSv/y 가 만족하는 것을 알 수 있었고, 집단선량 평가의 경우 선량값이 집단에 대한 연간 예상 총피폭방사선량인 1 man · Sv을 만족한 결과가 보였다. 따라 진공&열처리 후 매립 시 자체처분 허용선량을 만족함을 알 수 있었다(표 29).

표 29. 진공&열처리 시 개인 및 집단선량결과

	개인 (μSv/y)	집단 (man · Sv/y)	자체처분 허용선량
처리전	62.75	0.00433	불만족
500 torr	0.580	-	만족
600 torr	0.240	-	만족

NOTE : 선량 평가결과 0.001 man · Sv/y 미만의 값은 'hyphen' 처리함

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 시간에 따른 선량의 변화

시간에 따른 선량의 변화를 보았을 경우 폐활성탄의 선원항으로 선정하였던 ^{14}C, ^{3}H 모두 자체처분 허용선량을 만족하였고 5년이 지난 후에는 그 선량의 값이 미미한 정도를 보여 진공&열처리 시 폐활성탄 자체처분(매립)으로 인한 피폭은 거의 없는 것으로 판단된다(표 30).

표 30. 진공&열처리 시 평가결과 (μSv/y)

처리 방법	핵종	즉시	5년	10년	30년
500 torr. 270 ℃	^{14}C	0.1754	-	-	-
	^{3}H	0.4022	-	-	-
600 torr. 270 ℃	^{14}C	0.134	-	-	-
	^{3}H	0.1047	-	-	-

NOTE : 선량 평가결과 0.001 μ·Sv/y 미만의 값은 'hyphen' 처리함

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 습식처리

가. 습식처리 시 핵종의 농도

226 Bq/g 이었던 ^{3}H 의 농도는 6 M 질산을 이용하여 처리 시 0.57 Bq/g 으로 99.7 % 제거율을 보였고 6 M 염산 처리 시 0.63 Bq/g 으로 거의 비슷한 제거율을 보여 자체처분 허용농도를 만족하였다. 허나 ^{14}C 의 경우 6 M 질산 처리 시 15.3 Bq/g, 동일한 농도의 염산 처리 시 24.9 Bq/g 로 자체처분 허용농도를 만족하지 못하였다(표 31).

표 31. 습식처리 시 핵종의 농도

핵종	처리전	처리 후		자체처분 허용농도
		6 M 질산	6 M 염산	
^{14}C	45.5	15.3	24.9	불만족
^{3}H	226	0.57	0.63	만족

나. 개인 및 집단선량 평가결과

개인 및 집단선량 평가결과 6M 질산 및 염산 처리 시 연간 개인 선량은 0.32 μSv/y, 0.44 μSv/y 로 개인에 대한 연간 예상 피폭방사선량인 10 μSv/y를 만족하였고, 집단에 대한 연간 예상 총피폭방사선량인 1 man · Sv을 만족하여 자체처분 허용선량을 만족하는 결과가 나왔다(표 32).

표 32. 습식처리 시 개인 및 집단선량결과

	개인 (μSv/y)	집단 (man · Sv/y)	자체처분 허용선량
처리전	62.75	0.00433	불만족
6 M 질산	0.32	-	만족
6 M 염산	0.44	-	만족

NOTE : 선량 평가결과 0.001 man · Sv/y 미만의 값은 'hyphen' 처리함

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 시간에 따른 선량의 변화

시간에 따른 선량의 변화를 보았을 경우 폐활성탄의 선원항으로 선정하였던 ^{14}C, ^{3}H 모두 자체처분 허용선량을 만족하였고 5년이 지난 후에는 그 선량의 값이 미미한 정도를 보여 습식 처리 시 폐활성탄 자체처분(매립)으로 인한 피폭은 거의 없는 것으로 판단된다(표 33).

표 33. 습식처리 평가결과 (μSv/y)

처리 방법	핵종	즉시	5년	10년	30년
6M 질산	^{14}C	0.166	-	-	-
	^{3}H	0.157	-	-	-
6M 염산	^{14}C	0.270	-	-	-
	^{3}H	0.174	-	-	-

NOTE : 선량 평가결과 0.001 μ·Sv/y 미만의 값은 'hyphen' 처리함

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 ^{14}C 농도에 따른 선량평가

앞선 처리기술 별 선량평가 결과 개인 및 집단선량은 자체처분 허용선량값을 만족하였지만, ^{14}C의 농도가 자체처분 허용농도를 초과하였다. 이에 ^{14}C 농도를 자체처분 허용농도에 만족하는 수준의 값을 추가하여 선량평가를 수행하였다.

1. ^{14}C 농도에 따른 개인 및 집단선량 평가결과

선행연구에서 진공&열처리 시 ^{3}H의 제거율이 가장 높아 이를 적용하였으며 국내 법령에서 다수의 방사성핵종이 혼합되어 있는 경우 각 방사성핵종의 분율의 합이 1을 넘지 않는 정도 이내에서 ^{14}C의 농도를 결정하였다. 추가적으로 ^{14}C의 농도를 임의적으로 조절하여 선량평가를 실시한 결과 표 34와 같이 자체처분 허용선량을 평가하였고 표 35와 같이 시간 별 선량평가를 실시하였다.

탄소의 농도가 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.996 일 때 모두 자체처분 허용선량을 만족하는 것을 알 수 있었다.

실험결과 ^{14}C의 제거율이 97.8%정도에서 자체처분 허용농도 및 자체처분 허용선량이 만족되므로 자체처분이 가능하다는 것을 알 수 있다.

표 34. ^{14}C 농도에 따른 개인 및 집단선량평가

^{14}C 농도 (Bq/g)	개인선량 (μSv/y)	집단선량 (man · Sv/y)	자체처분 허용선량
0.996	0.115	-	만족
0.8	0.113	-	만족
0.6	0.111	-	만족
0.4	0.109	-	만족
0.2	0.107	-	만족

NOTE : 선량 평가결과 0.001man · Sv/y 미만의 값은 ‘hyphen’ 처리함

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 시간에 따른 선량평가

시간에 따른 선량의 변화를 보았을 경우 폐활성탄의 선원항으로 선정하였던 ^{14}C, ^{3}H 모두 자체처분 허용선량을 만족하였고 5년이 지난 후에는 그 선량의 값이 미미한 정도를 보여 습식 처리 시 폐활성탄 자체처분(매립)으로 인한 피폭은 거의 없는 것으로 판단된다(표 35).

표 35. ^{14}C 농도에 따른 시간 별 선량평가 (μSv/y)

	Activity (Bq/g)	즉시	5년	10년	30년
^{14}C	0.996	0.011	-	-	-
^{14}C	0.8	0.009	-	-	-
^{14}C	0.6	0.006	-	-	-
^{14}C	0.4	0.004	-	-	-
^{14}C	0.2	0.002	-	-	-
^{3}H	0.38	0.105	-	-	-

NOTE : 선량 평가결과 0.001 μ·Sv/y 미만의 값은 'hyphen' 처리함

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 6 장 결론

본 실험은 선행연구에서 실시하였던 처리 기술 별 폐활성탄의 농도를 가지고 자체처분 허용선량을 평가하였고 이에 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 방사성폐기물 자체처분 평가를 위해 한울 발전소에서 저장 중인 첨착활성탄을 가지고 제염기술 별 선량평가를 수행하였다. 그 결과 개인 및 집단선량은 모두 만족하였으나 탄소의 농도는 현 제염기술로는 만족하지 않는 수준으로 나타났다. 이에 향후 탄소의 농도의 제거율이 97.8% 될 수 있는 제염기술이 추가적으로 개발되어야 할 필요가 있다고 보여진다.

2. 선량평가 결과 평가 기간을 매립 시부터 1,000년까지 설정하였지만 5년이 지난 후에는 매립으로 인한 선량이 거의 없는 결과를 알 수 있었다. 하지만 ^{14}C의 경우 5,730년의 긴 반감기를 가지고 있어 해당 결과의 모순이 발생하지만 이는 RESRAD 코드 내에서는 입자상의 탄소와 수소는 땅속 깊이 스며들어 지하수를 타고 기존의 오염지역에서 벗어나는 거동특성을 적용하였기 때문이다. 향후 ^{14}C, ^{3}H의 환경에서의 거동특성을 좀 더 연구한 후 시간에 따른 선량평가가 이루어져야 할 것이다.

3. 방사성폐기물 소내 저장고의 포화에 대한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 자체처분을 해결 방안으로 선정하고 이를 평가하였지만 폐기물 처리 및 자체처분에 대한 연구는 지속적으로 이루어져야 하며 본 연구가 기초자료로 활용될 것으로 기대한다.

자체처분 시 국내 법규에서는 자체처분허용선량(개인에 대한 연간 예상피폭방사선량이 10 μSv/y 미만, 집단에 대한 연간 예상총피폭방사선량이 1 man · Sv/y 미만)을 입증하여야 하므로 본 연구에서는 처리기술 별 선량평가를 실시하였고 그 결과 자체처분허용농도가 만족하는 폐기물은 자체처분허용선량이 만족됨을 알 수 있었다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고문헌

[1]. 원자력안전위원회고시 제2017-60호 . 중·저준위 방사성폐기물 인도규정.

[2]. 산업통상자원부고시 제2016-230호 . 방사성폐기물인수방법 등에 관한 규정.

[3]. 한국원자력환경공단. 중·저준위방사성폐기물처분시설 안전성분석보고서 . 8.3(폐기물인수기준).

[4]. 한국원자력환경공단. 2019. 중·저준위방사성폐기물 처분시설 운영현황.

[5]. 원자력안전위원회고시 제2017-65호. 방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정.

[6]. 김동민. 2017. 원전 해체 방사성 금속폐기물 처분량 감소를 위한 자체처분 평가 연구. 조선대학교 석사학위논문.

[7]. 한수원중앙연구원. 2008. 공기정화계통 폐활성탄 중 ^{14}C 및 ^{3}H 저감화기술 및 장치개발.

[8]. IAEA. 1994. 'Safety Series No. 111-G-1.1'.

[9]. IAEA. 2009. 'GSG-1. Classification of Radioactive Waste'.

[10]. 한국원자력환경공단. 2013. 해체폐기물관리 시나리오 분석.

[11]. 한국환경정책 평가연구원. 2017. 원자력발전소 해체 폐기물의 안전·안심관리 정책방안.

[12]. 원자력안전법 제70조. 방사성폐기물의 처분제한.

[13]. 원자력안전법 시행령 제107조. 방사성폐기물 자체처분의 절차 및 방법.

[14]. 원자력안전법 시행규칙 제94조. 방사성폐기물의 처분제한.

[15]. 원자력안전법 시행규칙 제95조. 자체처분 신고.

[16]. 염준기. 2019. 원자력안전규제 정보회의 원전 방사성폐기물 안전관리 현황 및 개선방안. 2019 원자력안전규제 정보회의. 대전.

[17]. 방사성폐기물 안전관리 통합정보시스템. http://wacid.kins.re.kr/.

[18]. 한국원자력안전기술원. 2005. KINS/GR-297 방사선 안전규제 기술개발.

[19]. RESRAD USER MANUAL.

[20]. 김희경. 2017. 규제해제된 소각재 폐기물의 처분에 대한 안정성평가 연구. 숭실대학교 석사학위논문.

[21]. 변지향. 2017. RESRAD 확률론적 분석을 통한 고리 1호기 지표 토양 및 건물에 대한 DCGL 유도방법 연구. 부산대학교 석사학위논문.