



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](#)

2023년 2월

석사학위 논문

플라즈마를 이용한 방사성폐기물  
처리시 휘발성 물질 관리 기술 연구

조선대학교 대학원

원자력발전학과

노 완 복

플라즈마를 이용한 방사성폐기물  
처리시 휘발성 물질 관리 기술 연구

A Study on the Volatile Material Management Technology  
in the Treatment of Radioactive Wastes Using Plasma

2023년 2월 24일

조선대학교 대학원

원자력발전학과

노 완 복

# 플라즈마를 이용한 방사성폐기물 처리시 휘발성 물질 관리 기술 연구

지도교수 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위 신청 논문으로 제출함

2022년 10월

조선대학교 대학원

원자력발전학과

노 완 복

## 노완복의 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	이 경 진	(인)
위 원	조선대학교	교수	송 종 순	(인)
위 원	조선대학교	교수	공 태 영	(인)

2022년 12월

조선대학교 대학원

## 목 차

ABSTRACT . . . . .	1
제1장 서론 . . . . .	3
제2장 국내·외 플라즈마를 이용한 방사성 폐기물처리 현황 . . . . .	5
제1절 국내 방사성폐기물 현황 . . . . .	5
제2절 플라즈마 기술 현황 . . . . .	10
제3절 국외 방사성 폐기물처리 현황 . . . . .	18
제3장 휘발성 및 방사성 휘발성 물질 종류와 특성 . . . . .	30
제1절 휘발성 물질의 종류 . . . . .	30
제2절 배기체의 특성 . . . . .	30
제3절 핵분열에 의한 휘발성 물질 . . . . .	34
제4절 온도에 따른 휘발성 물질 중 세슘의 휘발 특성 . . . . .	38
1. 폐기물 용융방법에 따른 세슘의 특성 . . . . .	38
2. 온도 및 시간 변화에 따른 세슘의 특성 . . . . .	40
제5절 온도에 따른 NO <sub>x</sub> 특성 . . . . .	41
제6절 혼합 방사성폐기물 용융 특성 . . . . .	41
제7절 방사성 폐액처리 시 휘발성 물질 분석 . . . . .	44
제8절 요오드(I-131)의 휘발성 특성 . . . . .	46
제4장 배출기준 . . . . .	48
제1절 국내 기준 . . . . .	48
1. 중저준위 방사성폐기물 소각 기준 . . . . .	49
2. 자체처분 기준 . . . . .	50

3. 배출관리 기준 . . . . .	53
제2절 국외 기준 . . . . .	56
1. 미국 . . . . .	57
2. EU(유럽연합) . . . . .	59
3. 독일 . . . . .	63
4. 일본 . . . . .	65
제3절 배출규제 기준의 국내외 비교 . . . . .	67
제5장 방사성 휘발성 물질 관리 기술 . . . . .	69
제1절 해체원전 방사성폐기물 처리(플라즈마토치 시스템)시 휘발성 물질 관리 . . . . .	69
제2절 C-14 포집 및 유해가스 관리 기술 . . . . .	70
제3절 배기체 처리 및 관리 기술 . . . . .	71
제4절 이동형 불활성 기체 제거장치 . . . . .	72
제5절 방사성 휘발성 물질 관리를 위한 Detector 종류 . . . . .	73
제6절 플라즈마를 이용한 방사성 폐기물처리 시 휘발성 물질 관리 기술	80
제6장 결론 및 제언 . . . . .	84
참고문헌 . . . . .	87

## 표 목차

표 1. PWR 원전 1 기 해체 시 폐기물 발생량 예측 . . . . .	8
표 2. 고리 1 호기 해체 시 예상 폐기물 발생량 . . . . .	8
표 3. 플라즈마 설비 장치 사양 . . . . .	16
표 4. Incinerator Facilities in Operation in some Member States .	19
표 5. The comparative characteristics of the Sia Radon Plasma Plants for treatent of the radioactive waste. . . . .	27
표 6. 가연성 잡고체 방사성 폐기물과 농축 패액 내의 방사성 핵종 .	31
표 7. 미립자제거기술 . . . . .	32
표 8. 산성 가스제거기술(SO <sub>x</sub> ,NO <sub>x</sub> ) . . . . .	33
표 9. NO <sub>x</sub> 제거기술 . . . . .	33
표 10. Maxium values for fractional release of xenon and krypto during reactor operation of UO <sub>2</sub> fuel in LWRs at serveral burnup and temperature . . . . .	34
표 11. Physical properties of krypton and xenon . . . . .	35
표 12. The Krypton's isotopes . . . . .	36
표 13. The xenon's isotopes . . . . .	37
표 14. 토치출력 변화시험에 따른 슬랙 내 Cs 잔존율 . . . . .	38
표 15. 토치출력 변화시험에 따른 먼지 내 Cs 농도 . . . . .	39
표 16. TCLP 측정시험 결과 . . . . .	39
표 17. Recovery of cesium depending on ashing temperature . . . .	40
표 18. Recover of cesium depending on time elapsed at 450°C ashing . . . . .	40
표 19. 배출가스 성분 분석 값 . . . . .	45
표 20. 폐기물 소각실험시 방사능 안전성 분석계산 결과 . . . . .	46
표 21. 방사성핵종별 자체처분 허용농도 . . . . .	51
표 22. 종류 미상인 방사성물질의 연간섭취한도, 유도공기중농도 및 배출	



관리 기준 . . . . .	54
표 23. 방사성폐기물 각 분류 별 기준 . . . . .	56
표 24. 미국 배출규제 기준 비교 . . . . .	57
표 25. 미국 California SCAQMD BACT 기준 . . . . .	58
표 26. EC 대기오염 관련 지침 구분 . . . . .	60
표 27. NECs for SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , VOC and NH <sub>3</sub> , to be attained by 2010 . . . . .	61
표 28. EC 제정 소각시설 배출허용기준 . . . . .	62
표 29. 독일 대기환경 관련 법령 기본구조 . . . . .	63
표 30. TA-Luft 배출한계치 . . . . .	64
표 31. 일본 오염물질 종류별 배출규제 기준 적용방법 . . . . .	66
표 32. 일본 배출기준 종류별 차등규제 . . . . .	66
표 33. 선진국 배출규제 기준 비교 . . . . .	68
표 34. 각 공정별 배가스 정화 효율 평가 . . . . .	71
표 35. 배기가스 분석 결과 . . . . .	71
표 36. The 1st Performance Examination . . . . .	73
표 37. 페로브스카이트 비교 . . . . .	75
표 38. GM 계수관 비교 . . . . .	76
표 39. Plastic Scintillator 신틸레이터 비교 . . . . .	77
표 40. NaI 신틸레이터 비교 . . . . .	79

## 그림 목차

그림 1. 방사성폐기물 저장시설별 누적저장량 및 저장용량 . . . . .	6
그림 2. 경주 중저준위 방사성폐기물 처분시설 개요 . . . . .	7
그림 3. 플라즈마 토치 종류 . . . . .	10
그림 4. 플라즈마 시스템 구성 . . . . .	11
그림 5. 플라즈마 운전방식 . . . . .	12
그림 6. 비이송식 플라즈마토치 종류 . . . . .	13
그림 7. 플라즈마 용융 개념도 . . . . .	13
그림 8. 플라즈마 설비 . . . . .	14
그림 9. 플라즈마 설비의 용융로 디자인 . . . . .	15
그림 10. 플라즈마 설비 시운전 결과물 . . . . .	15
그림 11. Plasma Melter System . . . . .	18
그림 12. CILVA low level waste incinerator facility, Beluim. . . . .	21
그림 13. CENTRACO incineration plant . . . . .	23
그림 14. includes a process diagram for the off-gas treatment system in the ZWILAG plasma melting plant. . . . .	24
그림 15. 스와질랜드 설비 . . . . .	25
그림 16. The technological flow sheet of the plant PLUTON, SIA RADON. . . . .	26
그림 17. 불가리아 Kozloduy 발전소 건설 현장 . . . . .	28
그림 18. Process flow diagram for PAM system . . . . .	43
그림 19. Offgas sampling locations . . . . .	44
그림 20. 이동형 불활성기체 제거장치 . . . . .	72
그림 21. 페로브스카이트 . . . . .	75
그림 22. 휴대용 GM 계수기를 이용한 선량률측정기 . . . . .	77
그림 23. 플라스틱신틸레이터를 이용한 차량오염감시시스템 . . . . .	78
그림 24. NaI Scintillaor 를 이용한 고정형 환경 방사선 감시시스템 . . . . .	80

## ABSTRACT

# A Study on the Volatile Material Management Technology in the Treatment of Radioactive Wastes Using Plasma

Oanbok Noh

Advisor : Prof. Jongsoon Song,  
Ph.D.

Department of Nuclear Engineering  
Graduate School of Chosun  
University

Radioactive waste must be stored for at least 300 years and must bear astronomical costs. In addition, unexpected potential risk factors are also a considerable burden. In the case of low-level radioactive waste, combustible and liquid low-contamination radioactive waste can be treated relatively easily through high-temperature plasma which the volume can be reduced by 1/250 and the weight by 1/30.

It is possible to permanently dispose of the ash leached after plasma treatment in a more stable manner compared to the conventional methods. Types of low-level combustible radioactive waste, including paper, vinyl, clothing, filters, and resins, account for more than 30% of the total waste volume. Furthermore, high-temperature plasma treatment of low-level radioactive waste from petrochemical plants and medical institutions have many advantages, namely astronomical cost savings, securing free space in existing storage facilities, and improving the image of nuclear energy.

In the future, radioactive waste treatment technology and research

will inevitably continue as a large amount of low-level combustible radioactive waste is expected to be generated due to the dismantling of nuclear power plants. Along with the development of incineration technology, there are many low-level radioactivewaste treatment methods, but it is natural that the use of plasma incineration technology with reduction rates, efficiency and advanced control systems are increased. Since the application of Plasma technology is becoming more universal and promising, additional research on volatile material monitoring technology by plasma equipment is needed, and Plasma technology will be useless unless radioactive volatile gases generated during incineration are managed.

Since the radioactive volatile gas monitoring technology is one of the core technologies for waste reduction, it is natural to research and develop it. During the radioactive waste treatment process, if the radioactive concentration of the exhaust gas exceeds the standard value, an alarm should be sounded by the real-time continuous monitoring system, and the operator must be able to fundamentally prevent leakage to the external natural environment by recirculating or stopping operation through the waste channel.

Through the monitoring technology of volatile radioactive gas generated during radioactive waste treatment using plasma, external leakage of radioactivity is prevented and systematic research is conducted to activate and generalize low-level radioactive waste incineration and to reduce permanent radioactive waste disposal costs to improve the image of nuclearpower. It aims to reduce the burden of radioactive waste disposal that will be handed down to future generations.

## 제1장 서론

방사성폐기물은 최소 300년 이상을 저장할 수 있어야 하고 천문학적인 비용을 감당해야 하며 또한 천재지변 등 예상치 못한 잠재적인 위험요소가 상존해 있다. 저준위 방사성폐기물의 경우 고온의 플라즈마를 이용해 가연성 및 액체 저오염 방사성폐기물들을 다른 처리 방법에 비해 상대적으로 높은 효율로 처리가 가능하며 부피를 1/250 무게를 1/30로(대상물에 따라 차이 있음) 줄일 수 있다. 플라즈마 처리 후 침출되는 재(Ashes)는 고화처리를 통하여 기존의 폐기물 처리방법 보다 안정적으로 영구처분이 가능하다.

저준위 가연성 방사성폐기물의 종류에는 종이류, 비닐류, 의복류, 필터류, 수지류 등 총 폐기물량의 30%(실제 50%~60% 예상 됨) 이상을 차지한다. 또한 석유 화학 공장에서 발생하는 저준위 방사성폐기물 및 의료 기관의 저준위 방사성폐기물들을 고온 플라즈마로 소각처리할 경우 천문학적인 비용 절감, 기존 저장시설의 여유 공간 확보 및 방사선에 대한 이미지 제고 등 많은 장점을 가지고 있다.

고리1호기 원자력발전소 해체 작업 등이 계획되어 있으므로 다량의 저준위 가연성 방사성폐기물들이 발생될 것이며 폐기물처리 관련 연구 또한 활발해질 전망이다.

소각처리 기술의 발전과 더불어 저준위 방사성폐기물 처리 방법에는 여러 가지가 있으나 감용률, 효율 및 첨단 제어 시스템을 보유한 플라즈마 소각처리 기술의 사용량 증가는 자명한 일이다. 플라즈마 기술 적용이 보편화 및 유망 시 되므로 플라즈마 설비에 의한 휘발성 물질 관리 기술의 추가적인 연구 또한 필요하다. 영국의 경우 1970년부터 소각처리를 시작했다는 자료를 보면 한국의 소각처리 방법에 대한 인식과 문화가 얼마나 차이가 나는지 짐작할 수 있다. 소각 처리 시 발생하는 방사성 휘발성 물질을 관리하지 않으면 플라즈마 기술은 무용지물이 될 수밖에 없다. 방사성 휘발성 기체 관리기술은 폐기물 저장 설비 중에 중요한 부분이므로 범국가적인 지원과 투자를 아끼지 말아야 한다. 방사성폐기물 처리 과정 중 배기체의 방사능 농도가 허용 기준치를 넘으면 실시간 연속 모니터링 시스템에 의해 경보가 울리고 운전원은 폐유로를 이용해 재순환 또는 운전 정지 등의 방법으로 외부유출을 원천적으로 막을 수 있어야 하기 때문이다.

이번 “플라즈마를 이용한 방사성폐기물 처리시 휘발성 물질 관리 기술 연구”  
는 저준위 및 극저준위 방사성폐기물 소각처리의 활성화, 보편화를 통해 영구  
방사성폐기물 처리 비용을 절감하고 원자력 이미지 개선과 후세에 물려줄 방사성  
폐기물의 경제적 부담 및 잠재적 위험 부담을 줄이고자 한다.

## 제2장 국내·외 플라즈마를 이용한 방사성 폐기물 처리 현황

국내 고리 1호기 원자력 발전소 폐로를 준비하면서 중소기업 및 관련 기관들이 방사성폐기물 소각처리를 위한 연구 및 준비를 다양하게 하고 있다. 외국의 경우 영국은 1970년대 소각처리 기술을 적용했고, 미국 플로리다에 본사를 둔 Plasma Energy Group, LLC는 플라즈마 챔버와 플라즈마 아크를 결합하여 재료의 분자 구조를 물리적으로 변경하여 1992년에 특허 출원을 득했다. 독일은 2002년에 운영 승인 받았고 스위스는 2004년에 플라즈마 기술을 기반한 설비의 시운전을 마쳤다. 대만은 정부 지원으로 플라즈마 가스화 설비가 2004년 시운전되었으며, 2005년에 운영 허가를 받았다. 러시아는 2007년에 플라즈마 처리를 시작했고 불가리아는 2009년에 Kozloduy는 플라즈마 기술을 이용하여 고체 방사성 폐기물의 처리·컨디셔닝·부피 감소 등을 위한 공급 계약을 Iberdrola Ingeniería y Construcción(스페인)과 Belgoprocess(벨기에)의 합작투자로 시작되었다. Kozloduy 플라즈마 용융 설비(PMF)는 500kW 토치를 열원으로 하는 틸팅 플라즈마 퍼니스로 40주 이상 운전하며 연간 250t의 저준위 및 중준위 방사성 폐기물을 처리한다. 이 과정에서 유기 폐기물은 기화되고 무기 폐기물은 녹아 폐기물의 양은 감량되며 재는 슬래그로 처리되며 시설의 운영 수명은 40년이다.

### 제1절 국내 방사성폐기물 현황

현재 국내는 상대적으로 방사능 오염이 적은(자연방사선 수준) 원자력발전소의 2차측(방사성 핵종이 Zero인 구역) 증기발생기 화학세정 폐액(약 300t~700t)을 플라즈마 기술로 처리하는 성과들을 10회 가지고 있으나 드럼 처리 대상 또는 영구처분 대상 중의 저준위 가연성 방사성폐기물 소각처리에 대한 국민적 공감대가 부족한 실정이다.

방사성폐기물의 처리 및 영구처분은 전 국민의 큰 관심거리이며 원자력안전

위원회에서 조사한 국내 발전소의 저장 시설별 누적 저장량 및 저장 가능 용량은 아래 그림 1과 같다. 국내 저장용량을 한눈에 볼 수 있으며, 특히 영광, 고리, 대전 등은 저장 가능 용량이 얼마 남지 않아 온 국민의 주목을 받고있다[1].

[2020년 4분기 기준, 단위: 드럼]

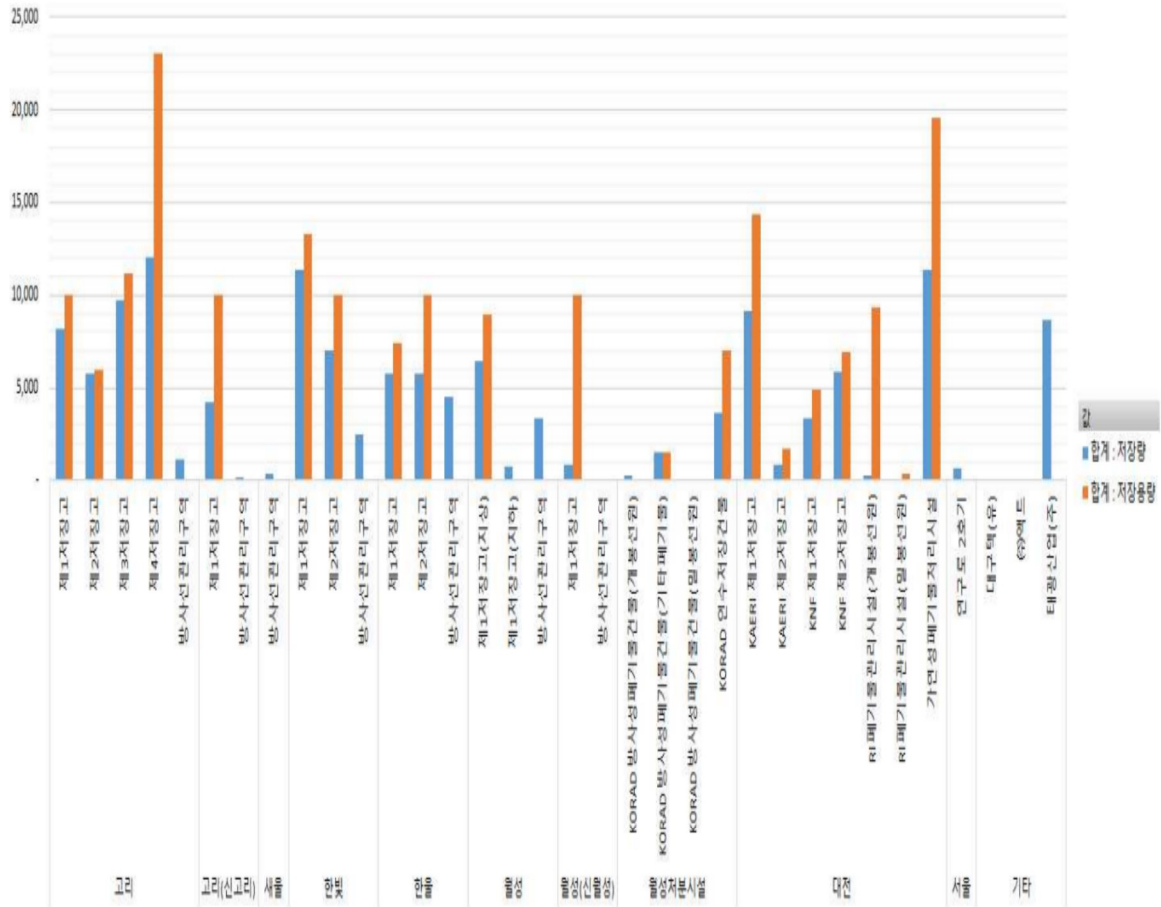


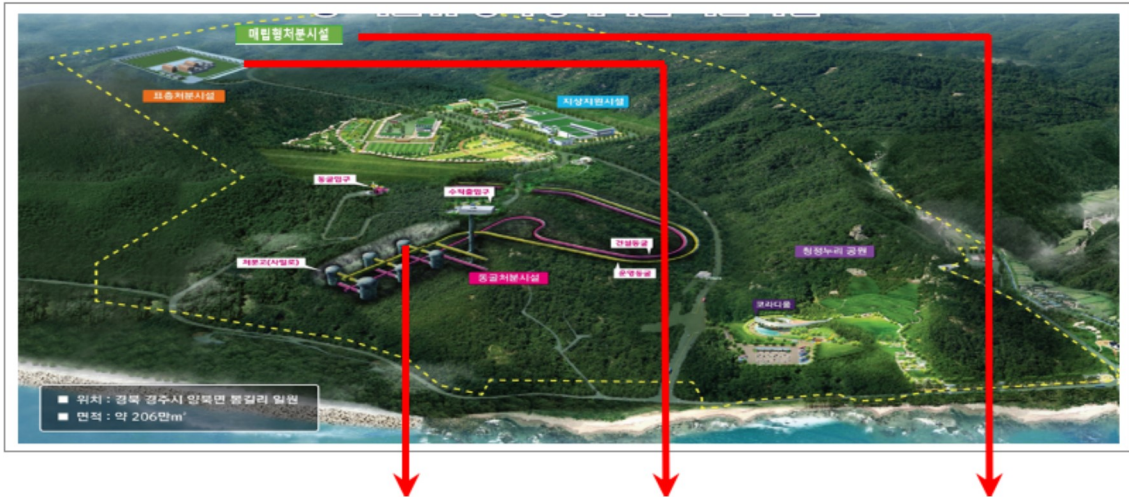
그림 1. 방사성폐기물 저장시설별 누적저장량 및 저장용량

산업통상자원부의 아래 그림 2 자료를 보면 저준위 이하 및 극저준위 방사성 폐기물 드럼은 약 70만 드럼에 해당한다. 총 사업비는 표층처분시설 및 매립처분시설에 대한 2단계 및 3단계의 건설예산이며, 한 드럼당 영구 처분비용은 고려하지 않은 금액이다. 저준위 이하 및 극저준위 방사성폐기물들은 모두 플라즈마 기술을 적용하여 소각처리를 할 수 있는 방사성폐기물 들이다[2]. 그림 2는 경주



중저준위 처분시설 및 향후 생성 예정인 드럼을 보여주고 있다.

□ (위치) 경북 경주시 문무대왕면 봉길리 ※ 여의도 면적(2.9km<sup>2</sup>)의 약2/3



구 분	동굴처분시설(1단계)	표층처분시설(2단계)	매립형처분시설(3단계)
처분방식	동굴형	표층형	매립형
준위	중준위 이하	저준위 이하	극저준위
처분 규모 (총 80만 드럼)	10만 드럼	12.5만 드럼 (향후 27.5만 드럼 추가)	16만 드럼 (향후 14만 드럼 추가)
사업현황	완료('14.12월)	건설 진행* (*'22.7.7 건설 안·허가 획득)	기본설계 진행 (*'21.1월 ~ )
총사업비	1조 5,436억원	2,621억원	1,573억원

\* 사업기간: '23.12월 → '24.12월 변경 예정

그림 2. 경주 중저준위 방사성폐기물 처분시설 개요

표층 처분시설과 매립형 처분시설에 보관되어질 저준위 와 극저준위 방사성 폐기물 중 30% 이상이 가연성 방사성폐기물로써 플라즈마 기술을 적용하면 부피를 1/250, 무게를 1/30로 감축할 수 있다. 폐기물을 소각 처리 시 약 1,500만 원/1드럼 \* 21만 드럼 (총 70만 드럼의 30%) = 3.15조 원 이상의 절약이 가능하다.

국내 24기 원전 중 고리 1호기와 월성 1호기가 영구정지 상태이며, 해체를 앞두고 있다. 또한 2030년까지 10기가 추가로 해체가 진행될 예정이며 원전 해체관련 한 보고서에 따르면 2090년 까지 약 616,000드럼을 예상했다. 방사성폐기

물 중 약 67%(약 41만 드럼)이 극저준위 방사성폐기물로 예상하며, 중준위 폐기물은 0.1%(약 139 드럼)을 예상했다. 표 1은 PWR 원전 1기 해체 시 폐기물 발생량 예측과 아래 표 2는 고리 1 호기 해체 시 예상 폐기물 발생량을 보여준다.

표 1. PWR 원전 1기 해체 시 폐기물 발생량 예측

종 류	발 생 량		
	중량 (ton)	부피 (m <sup>3</sup> )	드럼
방사화 금속	650	92.86	546
방사화 콘크리트	300	150	882
오염 금속	3,500	500	2,941
오염 콘크리트	600	300	1,765
오염된 마감재 (금속판)	150	21.43	126
해체 잡고체	1,000	1,250	7,353
계	6,200	2,314.29	13,613

표 2. 고리 1 호기 해체 시 예상 폐기물 발생량

폐기물 등급	폐기물 유형	폐기물부피(m <sup>3</sup> )	200L 드럼용기(EA)
저준위 폐기물 (LLW)	케이블류	22	119
	콘크리트 조각	229	1,488
	스캐블링 콘크리트	34	189
	잡고체	409	2,456
	유해성 폐기물	11	65
	석면	12	65
	대형기기	832	5,408
	원자로압력용기	199	1,293
	소형 금속류	3,416	22,207
	사용후저장조랙	490	3,188
	폐수지/필터	19	103
소 계	5,673	36,581	
극저준위 폐기물 (VLLW)	케이블류	83	457
	콘크리트 조각	187	1,218
	스캐블링콘크리트	100	551
	유해성 폐기물	22	132
	석면	129	712
	소형 금속류	6,308	41,004
	사용후저장조랙	0	0
	폐수지/필터	0	0
소계	6,829	44,074	
총 방사성폐기물	12,502	80,655	

IAEA PRIS는 2020 년전 세계적으로 총 442기의 원전이 운영 중이며, 미국 39기, 영국 30기, 독일 30기, 일본 27기 등 191기의 원전이 해체를 준비 중이라고 밝혔다. 2020년까지 미국 16기, 독일 3기, 일본 1기, 스위스 1기 총 21기의 원전이 해체 완료하였고, 2011년 후쿠시마 원전의 사고 이후 해체가 증가할 것으로 예상하고 있다[3].

자체처분은 원자력관계사업자가 소각, 매립 또는 재활용 등의 방법으로 처분하는 개념으로써, 기체 방사성폐기물 처리는 다음과 같은 방법이 있다. 방사성 먼지의 처리법에는 일반적으로 필터를 사용하고 필터 교환주기는 1년에 1회 교체한다. 고성능 필터는 0.3 $\mu\text{m}$ 에 대해 99.75%의 제거효율을 가지고 있으며 압력손실이 최초 사용의 2~3배가 되면 교체한다.

방사성 불활성 기체의 처리법에는 불활성 기체를 압축하여 일정 기간(30일) 감쇠탱크에 보관 후 방출하며 활성탄(흡착제) 및 층(Bed)에 기체를 유입해 처리하며 활성탄흡착(활성탄지연)법, 저온흡착법, 저온증류법, 흡수법, 격막법 등이 있다. 기체 방사성폐기물의 대부분을 Kr이 차지하며 반감기가 긴 휘발성 기체는 기체 폐기물 처리계통에서 처리하기 어렵다.

방사성 요오드는 활성탄 필터를 사용 및 요오드와 은의 교환반응을 이용한 질산은법이 이용되고 있으며, 삼중 수소의 경우 공기 중에 존재하는 HTO 증기를 실리카겔(Silica gel)과 분자 여과기(Molecular sieve) 및 활성알루미나(Alumina) 등의 흡착제를 사용한다.

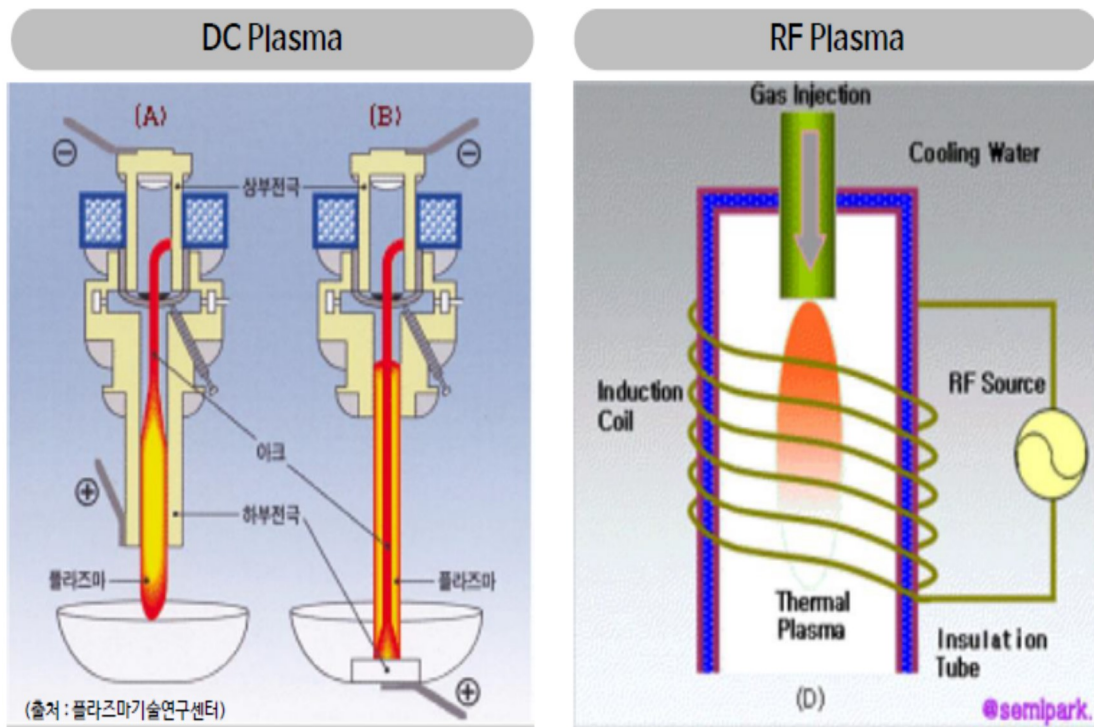
플라즈마 소각처리법은 방사성폐기물을 소각하여 부피 감용 및 반응성이 적은 형태로 변환하여 수송 및 저장에 용이하게 할 수 있는 큰 장점이 있다. 방사성폐기물 소각 중 방사능 누출 방지를 위해 폐기물 완전연소가 중요하며, 소각 시 체류 시간, 연소 온도, 산소 공급 등이 중요한 요소이다.

고화처리법으로는 고화 매체에 따라 시멘트 고화, 아스팔트 고화, 유리고화 등이 있으며 최근 이온교환처리의 폐이온교환수지를 건조하여 고건전성용기(High Integrity Container)에 담아 처리한다.

## 제2절 플라즈마 기술 현황

플라즈마란 고체, 액체, 기체에 이어 이온화된 제4의 상태로 우주의 95% 이상을 차지하며 중성 기체, 이온 및 전자의 집합체로 비평형 상태로 존재하며 전체적으로 중성 상태를 말한다.

DC 플라즈마는 (+)/(-) 전극 간의 직류 또는 교류 아크방전에 의해 기체의 플라즈마화를 통해 밀도가 높고 운전이 용이하여 대용량 설계가 가능한 장점이 있어 현재 고리 1호기 방사성폐기물 처리에 대한 소각처리 설비 등에 사용될 예정이다. RF 플라즈마는 부도체 전극의 (+)/(-) 극성 상태 변화를 통한 중성원자 충돌 증가(Radio Frequency)로 운전 압력이 높으며 30~100kW 이내로 대용량(상용급) 적용에는 한계가 있다. 그림 3은 플라즈마 토치 종류인 DC Plasma 와 RF Plasma 를 보여주고 있다.



Copyright 2022. Vitzronextech all rights reserved

그림 3. 플라즈마 토치 종류

플라즈마 시스템 구성은 아래 그림 4. 와 같이 AC Distribution, High Voltage Network, Gas network or tank or compressor 및 Water network and external cooling으로 구성되어 있는 것을 볼 수 있다[4].

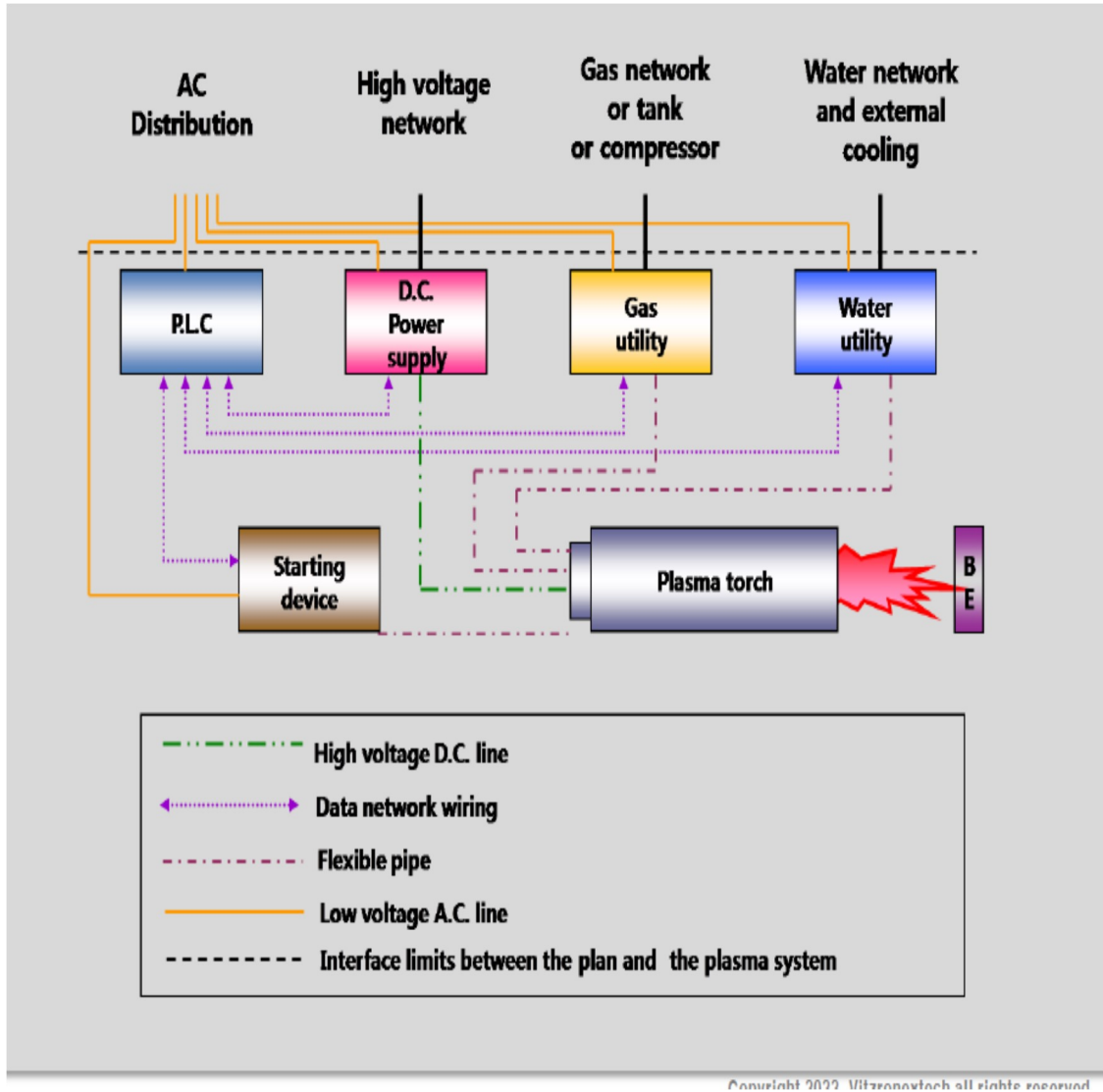


그림 4. 플라즈마 시스템 구성

플라즈마 운전방식으로는 Non-trans mode(비이송식), Trans mode(이송식), Dualmode(혼합식)등이 있다. 비이송식은 오염가스, 액생/기상, 가스화를 주용도로 하고, 이송식은 Metal/Slag 용융 및 고체상폐기물 등을 주용도로 하며 혼합식은

Metal/Slag 용융 및 고체상폐기물 등을 주용도 및 용융 효율이 좋은 특징을 가지고 있다. 토치의 온도가 높기 때문에 냉각수로 열을 적절히 식혀줘야하는데로 내부 온도를 높이기(3,000℃ ~4,000℃ 가능)위해 냉각수 유량을 적게 하면 전극이 녹아 내릴 수 있으므로 운전에 주의해야 한다. 온도와 냉각수의 밸런스를 유지하는 것이 중요한 Technic 중의 하나이다. 그림 5는 플라즈마 운전방식을 그림으로 보여주고 있다.

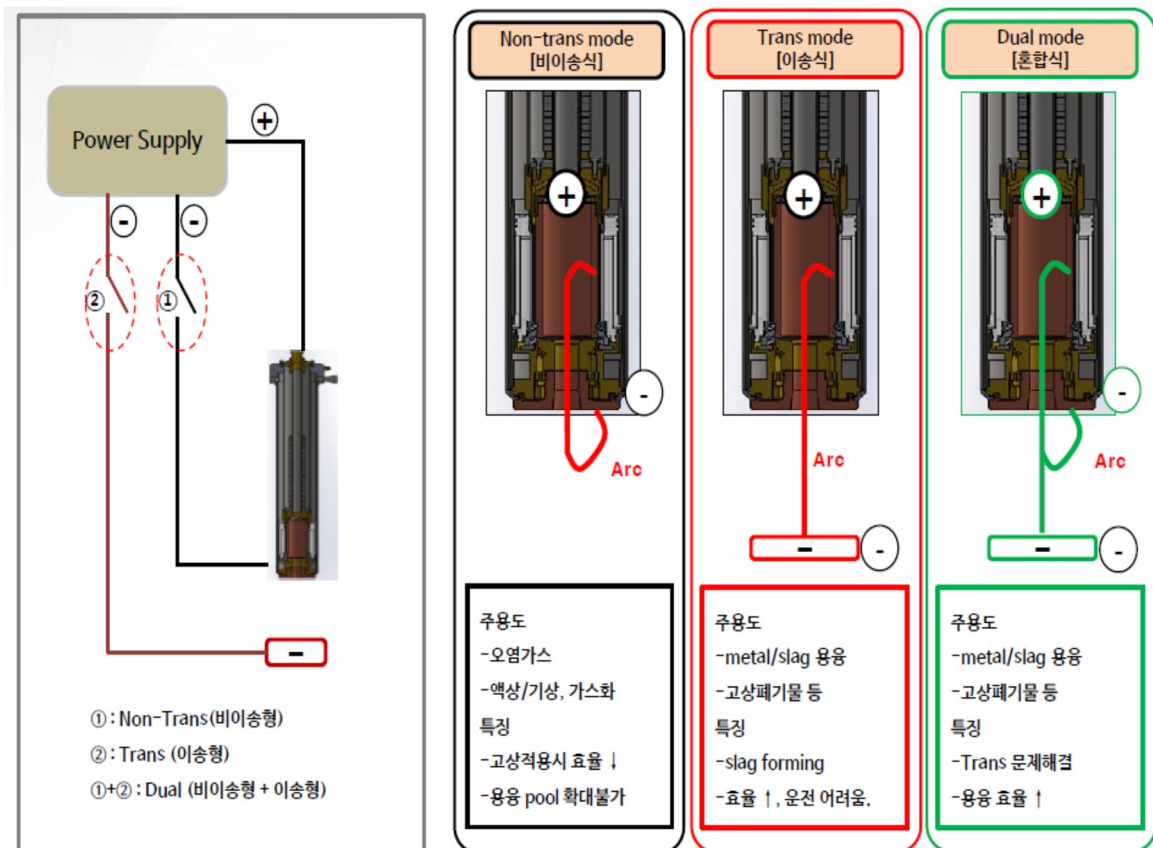


그림 5. 플라즈마 운전방식

플라즈마 토치의 기본 사양을 보면, 비이송식 공동형 Type의 내부 온도 10,000~15,000℃ 와 토치 출구 온도 5,000~10,000℃이며 용량은 30kW~2.4MW까지 가능하다. 플라즈마 기체는 목적에 따라 선택이 가능하며 종류는 Al, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, Ar 등이 있고 냉각 방식은 용량에 따라 유량 및 압력 변동이 가능한 수냉식이

있다. 그림 6은 비이송식 플라즈마토치 종류인 30kW, 100A(소형 탄화 시스템), 200kW, 320A(액체폐기물 열분해 시스템), 300kW, 420A(고체폐기물 열분해 시스템)의 토치를 보여주고 있다.



그림 6. 비이송식 플라즈마토치 종류

플라즈마 용융 개념은 폐기물 처리 대상 특성에 따라 최적의 용융로를 구성해야 하며 Plasma Heating 을 통해 대상물을 용융시키고 용융된 부산물은 배출 슬래그 공냉 후 덩어리 형태로 배출 가능하며 배출 슬래그를 수냉 후 알갱이 형태로도 배출이 가능하다[3]. 그림 7은 플라즈마 용융 개념도를 보여준다.



그림 7. 플라즈마 용융 개념도

고온을 견뎌야하는 로의 벽은 내화벽돌로써 2,000℃ 이상의 고온을 유지해야 하므로 사용운전(예상) 최고온도를 고려하여 특수 주문제작을 하고 주변 설비도 준비 해야 한다. 그림 8은 국내 플라즈마 설비의 한 예로써 플라즈마 용융로, 2차 연소로, CBA(S, DUST, 온도 등), ID FAN/Stack 등을 실제 사진과 함께 보여 주고 있다.

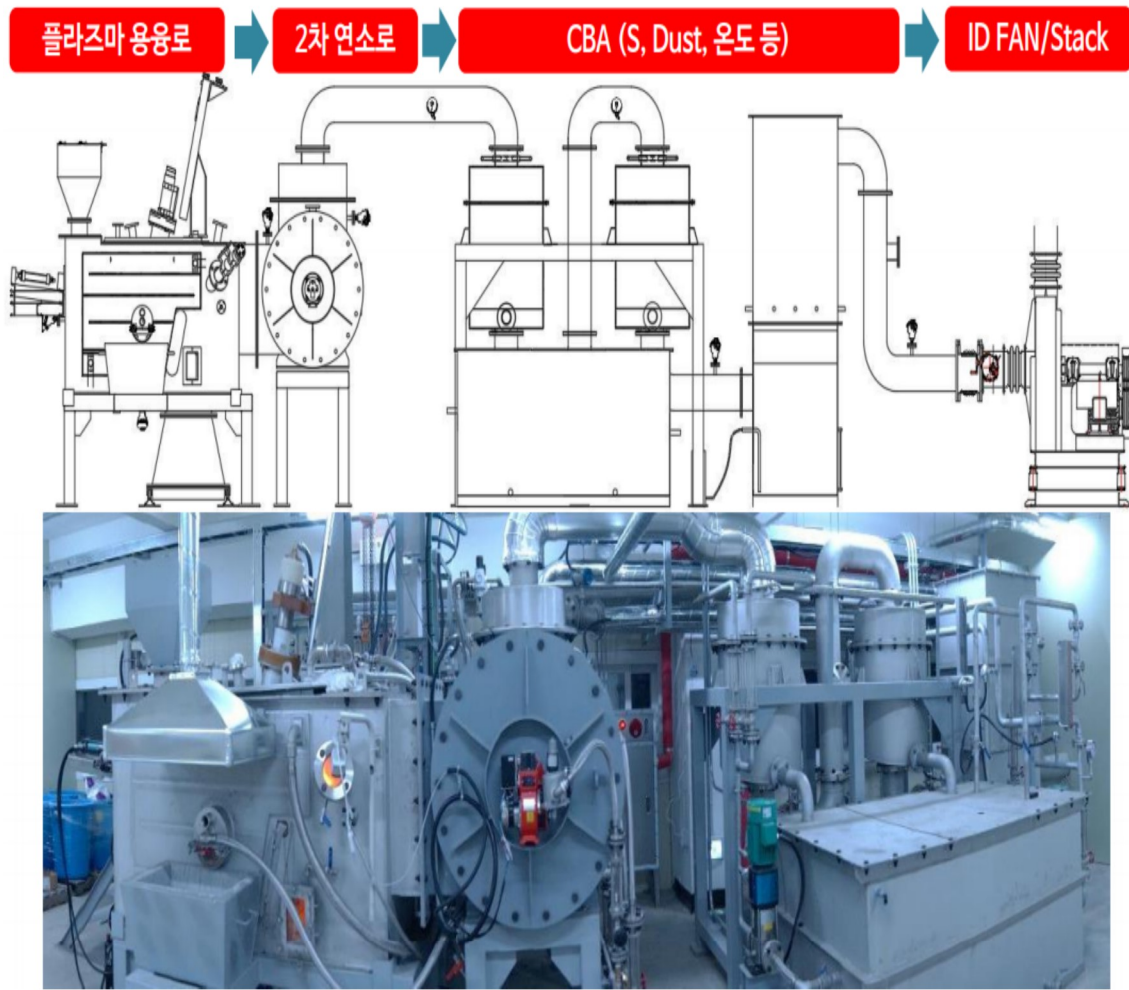


그림 8. 플라즈마 설비

원료 투입구, 플라즈마 토치, Metal 배출구, Slag 배출구 등을 도식한 플라즈마 설비의 용융로 디자인은 아래 그림 9과 같다



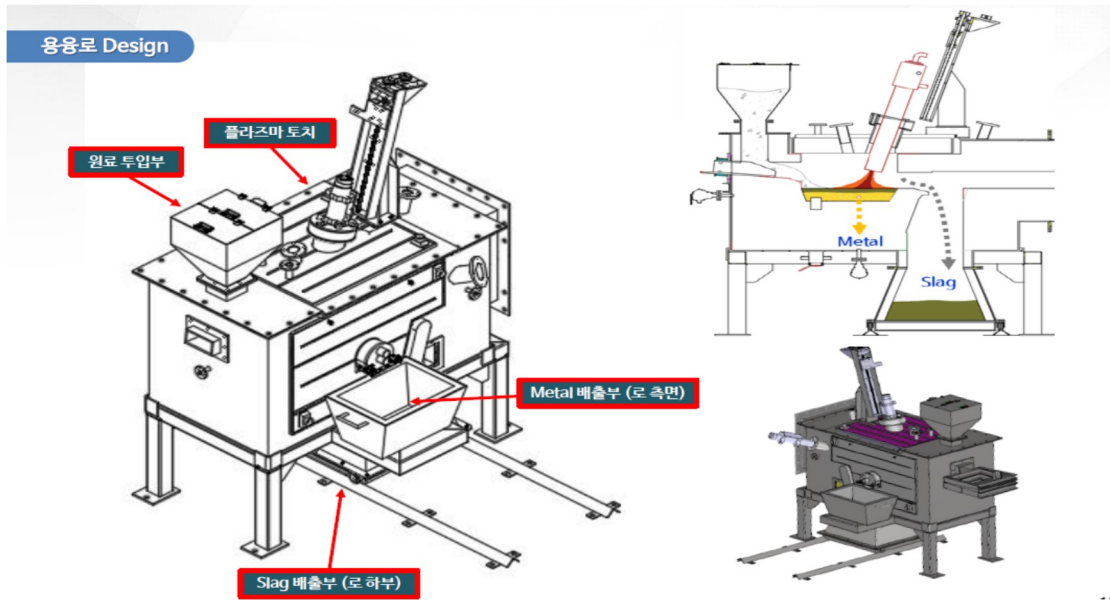


그림 9. 플라즈마 설비의 용융로 디자인

이송식 플라즈마 토치를 이용한 시운전 결과로 로내부 용탕 형성, 측면 Slag 줄탕, 측면 Metal 배출 및 하부 Slag 배출 등을 아래 그림 10의 플라즈마 설비 시운전 결과물을 통해 볼 수 있다.

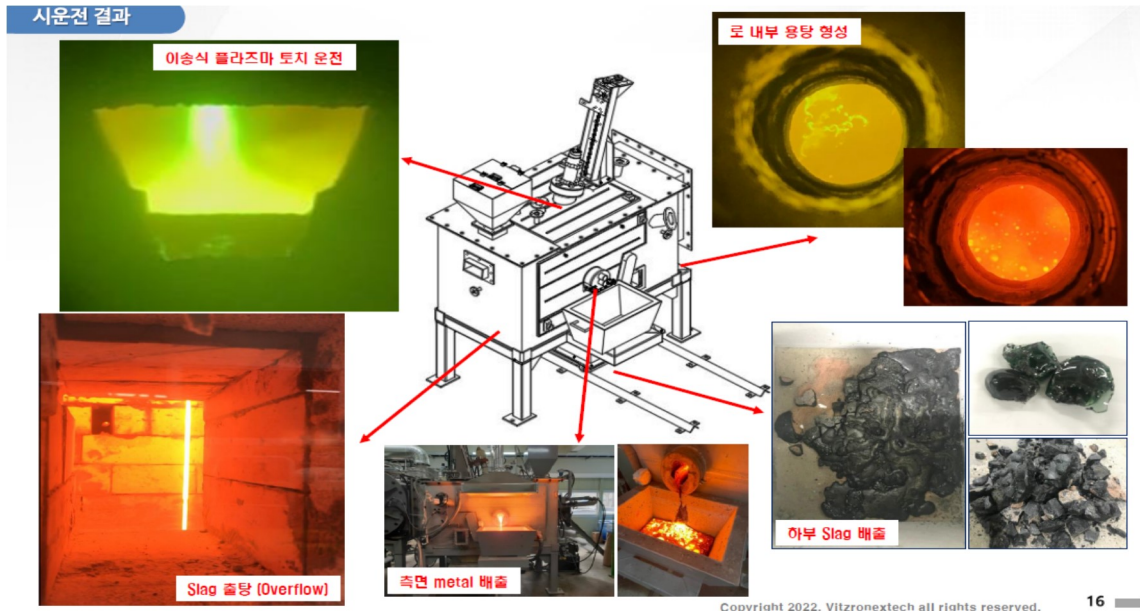


그림 10. 플라즈마 설비 시운전 결과물

처리용량 10ton/day 의 플라즈마 토치, 가스화 반응로, Cyclone, Steam Boiler, Quencher 등 아래 표 3의 플라즈마 설비 장치사양을 보여준다.

표 3. 플라즈마 설비 장치사양

NO	설비명	형식	사양	수량	부대설비
1	플라즈마 토치	비아송식 타입	75kW	2	정류기
2	가스화 반응로	유동형 가스화 반응기	10ton/day	1	원료 이송/공급 장치
3	Cyclone	Cone Type	20Am <sup>3</sup> /min	2	호퍼 / 재투입 배관
4	Steam Boiler	가스 냉각형	0.5ton/hr	1	-
5	Quencher / SDR	반건식	15Am <sup>3</sup> /min	1	Spray Nozzle / 냉각수 공급설비
6	Bag Filter	Pulse Type	15.1Am <sup>3</sup> /min	1	분말소석회 공급설비
7	Spray Tower	Spray Type	15Am <sup>3</sup> /min	1	SprayWater 공급설비
8	Scrubber	Packing Type	12Am <sup>3</sup> /min	1	약품공급설비 / Spray Water 공급설비
9	충돌식 응축기	Eliminator	2Am <sup>3</sup> /min	1	온수Tank / 온수배출 Pump
10	공정수 Tank	원통자립형	10m <sup>3</sup>	1	Level Gauge 및 전장장치
11	질소 발생기	PSO Type	1m <sup>3</sup> /min	1	Filter / Air Compressor
12	I.D FAN	Turbo Type	30Am <sup>3</sup> /min	1	650mmAq / Inverter / Damper
13	발전 System	신가스 발전 1	300 Kwh	1	발전기, Electronic hardware
14	SCR	고온 촉매	55Am <sup>3</sup> /min	1	-
15	배기송풍기	Turbo Type	80Am <sup>3</sup> /min	1	-
16	연돌 원통 자립형	-	-	-	-

플라즈마 설비의 배기 처리 시스템 중 배기체를 완전히 연소하기 위한 2차 연소기(2nd Combustion chamber)가 있으며, 기능은 내부 온도를 800~1,000℃ 이상 유지하며 원하지 않은 원소의 재결합을 방지한다. 운전 중 발생하는 질소산화물 처리에는 무촉매환원법(SNCR: Selective Non-Catalytic Reduction)이 있다. 배기 기체 냉각기(Off gas cooling system)을 통해 2차 연소실 및 SNCR 을 통해 배출된 1,000℃의 고온 기체가 여과집진장치(Bag filter)로 유입되면 200℃ 이하로 냉각된다. 여과집진장치(Bag filter)로 배기가스에 함유된 입자성 물질을 포집하며 입자(0.3~0.5nm)는 Bag filter(Nomex filter)를 이용해 90% 이상 제거된다. 배기팬(Extraction fan)은 배기체를 대기로 배출하는 기능과 계통의 부압을 유지하는 기능을 동시에 수행한다[4].

플라즈마 기술을 이용하여 가연성 폐기물 즉 유기성 폐기물, 목재 및 섬유 폐기물, 생활 폐기물, 플라스틱 폐기물 등의 일반 산업 폐기물 소각처리는 국내에서도 보편화되어 있다. 또한 방사능량이 Background 에 가까운 국내 원자력발전소 증기발생기 2차측 화학세정 폐액(약 300~700톤)의 경우 총 10건을 플라즈마 기술로 처리한 경험이 있다[3]. 증기발생기 2차측 화학세정 폐액은 방사성물질이 상대적으로 적어 임시 플리즈마 소각장을 이용한 폐액처리 및 운영에 어려움이 없었다. 그러나 가연성 방사성폐기물 소각처리의 경우 준휘발성 방사성물질 등이 존재하므로 휘발성 물질 관리와 처리에 철저히 준비를 해야 한다.

1.5MW의 플라즈마토치 용융로 시스템을 예로 들면, 토치에서 발생하는 고온 플라즈마를 사용하여 원자력발전소에서 발생하는 가연성 및 비가연성 방사성폐기물을 사전 전처리가 없이 200L 드럼을 용융로에 투척하여 처리하는 용융 기술이다. 아래 그림 11에 Plasm Melter System 을 보여주고 있다.

플라즈마 용융로 측면에 유리(슬래그) 용융물이 배출되는 배출구가 있고, 바닥에는 금속 용융물을 배출하는 배출구가 있어 각각의 배출구를 통해 배출된 용융물은 몰드 이송장치의 몰드 내부로 저장되도록 설계되었다[5].

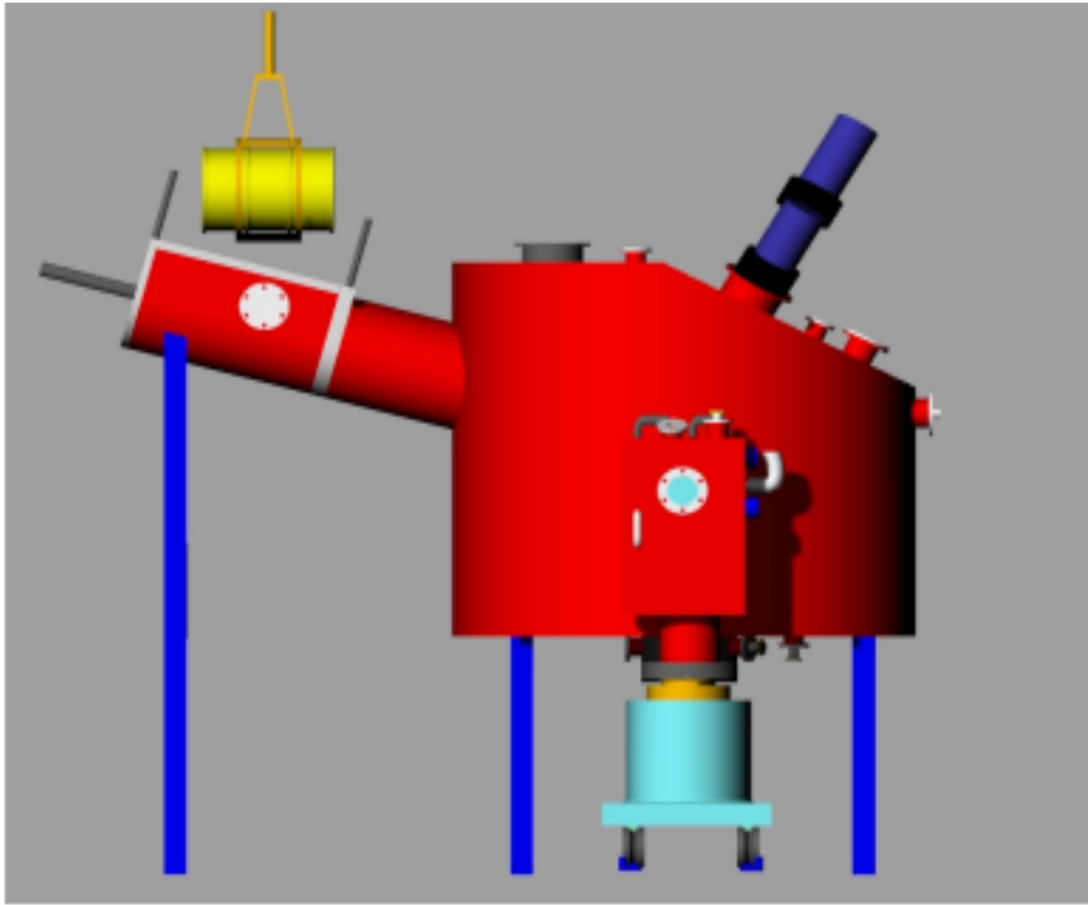


그림 11. Plasma Melter System

### 제3절 국외 방사성 폐기물처리 현황

세계적으로 소각로의 운전 경험은 성공적으로 입증된 기술이며 그 축적된 기술은 믿을 만한 수준이라고 IAEA(2006년 발표 자료)는 말한다. 특히 영국(Hinkley Point B)과 스웨덴(Studsvijk)은 1970년대에 소각처리 기술을 사용했으며, 미국(Duratek, Oak Ridge), 독일(Karlsruhe), 오스트리아(Seibersdorf Research Center), 러시아(RADON)등의 나라는 1980년대 소각처리 기술을 사용했다. 최근 후쿠시마 사고로 다량의 방사성 폐기물을 처리하기 위해 소각처리 설비가 사용되고 있다.

아래 표 4는 각 나라별로 운영되고 있는 회원국의 종류별 소각로 발전소를 간단히 소개하고 있다[6].

표 4. Incinerator Facilities in Operation in some Member States

Country	Facility/ Site	In-service date	Capacity	Notes
Austria	Seibersdorf Research Center	1983	40 kg/h solid	-
Belgium	CILVA, Belgoprocess	1995	80 kg/h solid 50 kg/h liquid	Solids, liquids and Ion exchange resins
Canada	Ontario Power Generation, Western Waste Management Facility	2002	2 t/d solid 45 l/h liquid (license limit)	Continuous feed, starved air system
India	BARC Kalpakkam	1990's	50 kg/h solid	Organic solids without Cl and S
France	Socodei Centraco	1999	2000 t/yr solid 1100 t/yr liquid	Commercial LLW treatment facility
Germany	Karlsruhe	Since 1980's	40 kg/h liquids 50 kg/h solids	Solids and liquids
Japan	PNC, TokaiMura	1991	50 kg/h solid	-
Netherlands	COVRA, Missingen-Oost	1994	60 kg/h solid 40 l/h liquid	Two incinerators, one for liquids, one for animal carcasses and other solids
Russian Federation	RADON	1982	100 kg/h solid 20 l/h liquid	-
Slovakia	Jaslovske Bohunice BSC	2001	50 kg/h solid 10 kg/h liquid	Used in campaigns for LLW
Spain	ENRESA El Cabril	1992	50 kg/h total solid and liquid	Located at LLW disposal facility

Country	Facility/ Site	In-ser vice date	Capacity	Notes
Sweden	Studsvijk	1977	150 kg/h total solid	-
UK	Hinkley Point B	Since 1970's	-	Located at a nuclear power plant
Ukraine	Zaporizhzhе NPP	1993	40 kg/h solid 20 kg/h liquid	-
USA	Consolidated Incineration Facility, Savannah River	1997	400 kg/h solids 450 kg/h liquids	Designed for PUREX reprocessing solvents, LLW and mixed waste.
USA	Duratek, Oak Ridge	1989	2 incinerators, approx 400kg/h each	Commercial LLW treatment facility

첫 번째 나라 벨기에는 1995년에 운전을 시작한 통제식 공기 다단 소각로인 CILVA 소각로가 있다. 고체 폐기물 즉 옷, 장갑, 걸레, 면직물, 고무 그리고 플라스틱 등을 100시간/1주 운전으로 고체 폐기물은 8 톤/주를 처리하며 액체 폐기물의 경우 1톤~5톤/주를 처리한다. 배기가스 필터 시스템과 방사성 정화 필터 등 백필터 및 HEPA 필터가 설치되며 액화 배기가스 정화 처리 시스템에는 쿼치 타워 와 역전류 정화처리 시스템이 설치되어 HCl 와 SO<sup>2</sup> 를 제거한다[6].

아래 그림 12는 방사성폐기물을 처리하기 위한 소각로 시스템의 개략도이다.

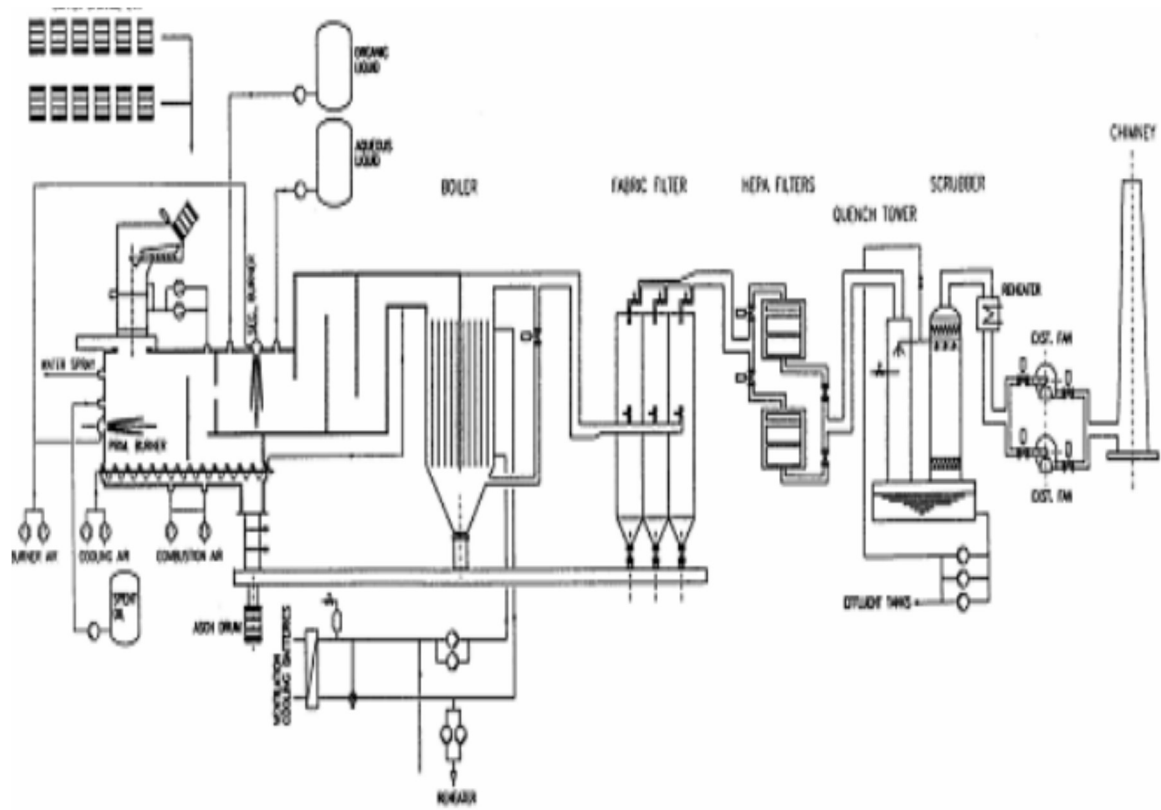
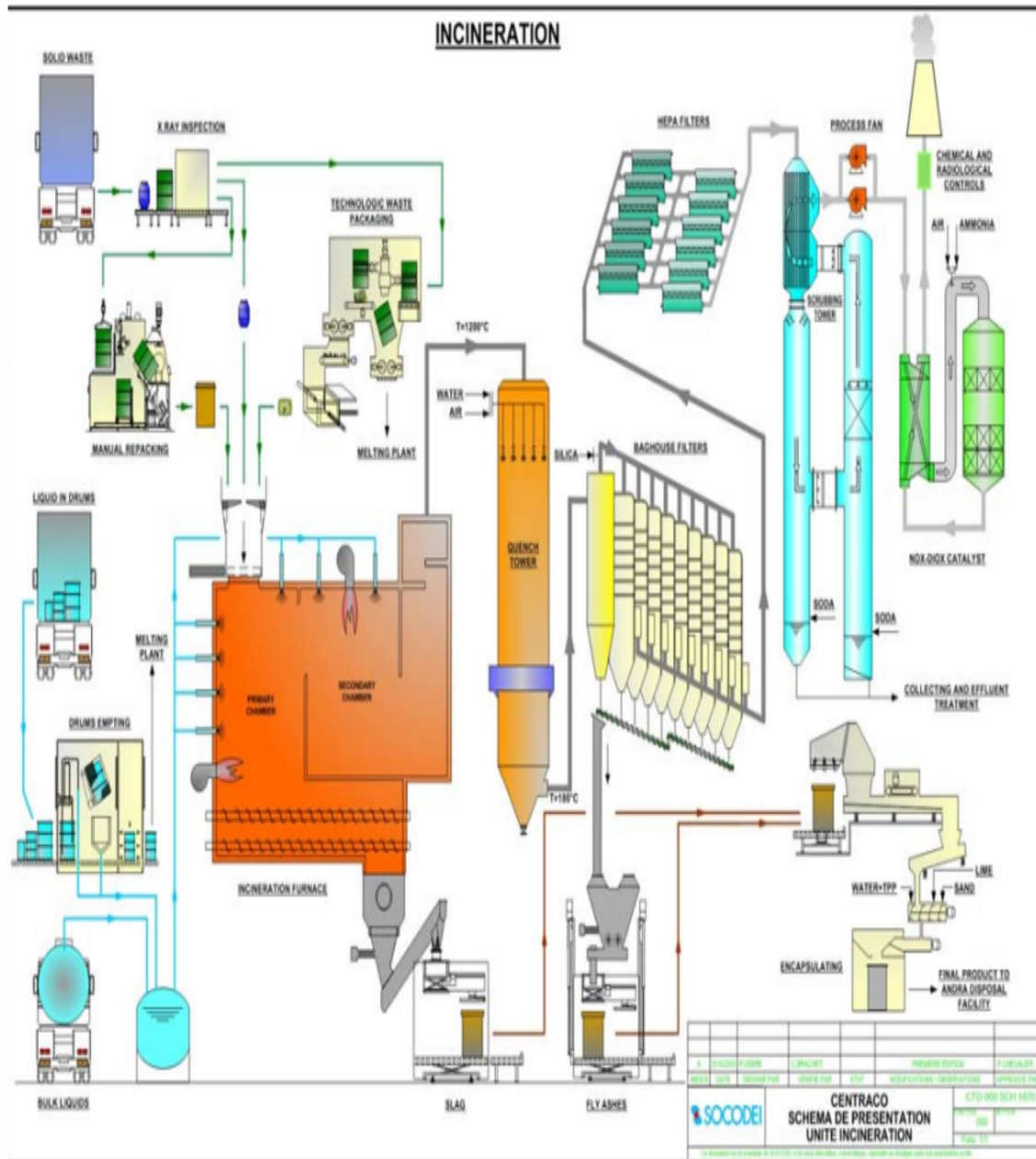


그림 12. CILVA low level waste incinerator facility, Beluim.

두 번째 나라 프랑스는 통제식 공기 다단 소각로 SOCODEI의 CENTRACO 소각로 발전소이며 1999년에 운전을 시작했다. 아래 그림 13과같이 방사성 고체 폐기물 즉 옷, 장갑, 걸레, 면직물, 고무 그리고 플라스틱 등은 100시간/1주 운전으로 고체 폐기물은 60톤/주를 처리하며 액체 폐기물의 경우 40톤~80톤/주를 처리 가능하며 방사능 제한치는 베타-감마 20 GBq/t, 알파 37 MBq/t이며 최대 표면 선량률은 각 패키지마다 2mSv/h로 제한한다. 1차 연소실의 열분해 온도는 850°C to 1050°C이며 2차 연소실의 운전 온도는 1100°C이다. 배기가스 필터 시스템과 방사성 정화 필터 등 백필터 및 HEPA 필터가 설치되며 액화 배기가스 정화 처리 시스템에는 쿼치 타워 와 역전류 정화처리 시스템이 설치되어 HCl 와 SO<sup>2</sup> 를 제거하고

촉매 반응기로 질소산화물, 다이옥신 그리고 퓨란을 제거한다[6].  
아래 그림 13은 CENTRACO incineration plant 를 보여주고 있다.





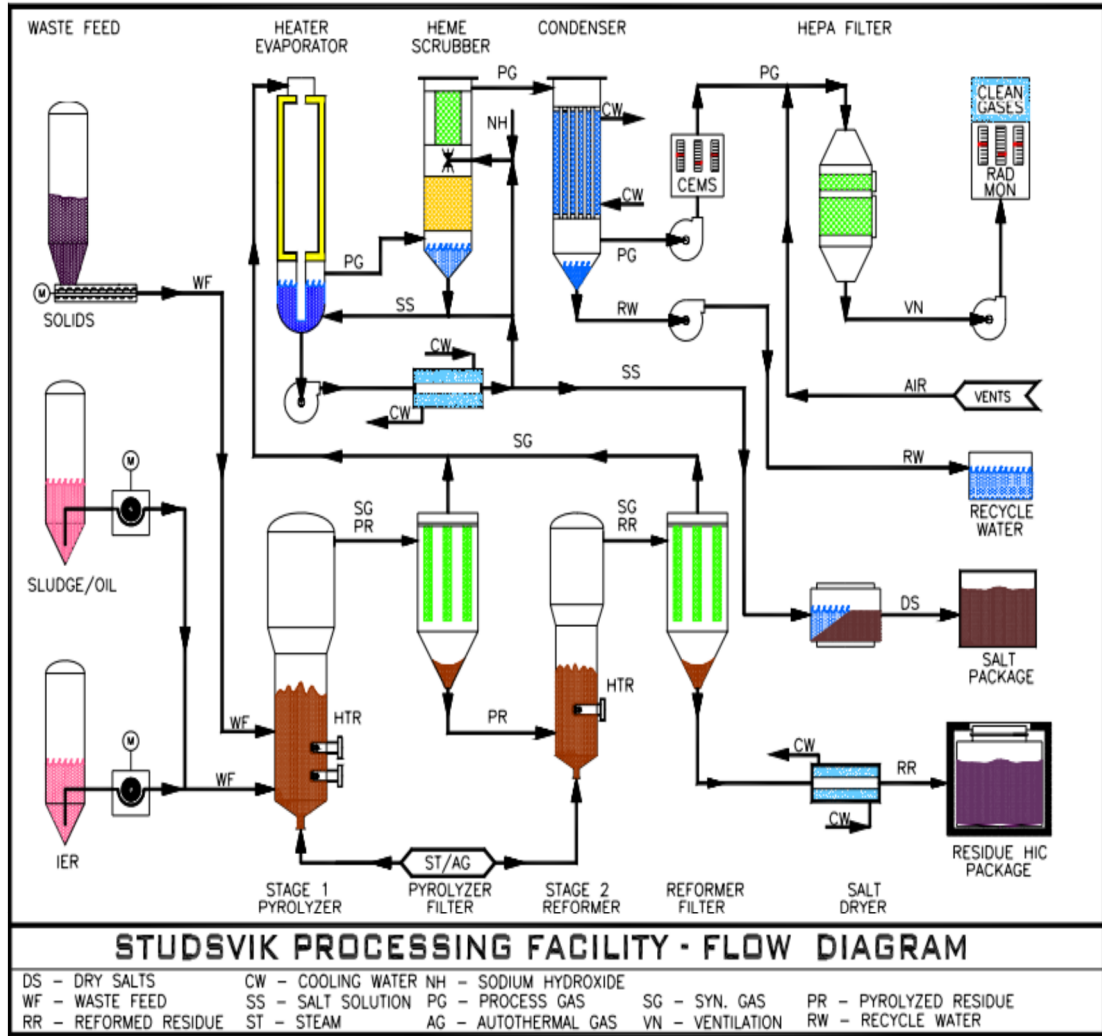


그림 13. CENTRACO incineration plant

세 번째 나라 스와질랜드의 ZWILAG 설비는 스와질랜드 최초 정규 플라즈마 시스템으로 중저준위 방사성 폐기물처리를 위해 2000년에 폐기물 처리 인허가를 취득 후 2004년에 상용 운영을 시작했다. 이는 세계 최초의 방사성폐기물 처리 플라즈마 상용 설비로 기록되었다. 가연성 물질과 액체 폐기물 및 기타 폐기물 (콘크리트 자갈 등)를 처리한다. 최대 용량은 가연성 폐기물 200kg/h 가용성 폐기물 300kg/h를 처리한다. 발전소는 일 년에 두 번 운전 중이며 한 번에 6주를

운전한다.(운전 기간은 기술적인 제한이 때문이 아니며 폐기물 생성량의 제한 때문이다)

폐기물 처리 원리는 아래 그림 14 ZWILAG 플라즈마 시스템에서 보여주고 있으며 전처리 이전의 200L 드럼을 이용하며 모든 시스템은 자동 및 원거리 운전으로 운전된다. 수평 주입 공급기로부터 폐기물은 용융슬래그로 떨어지고 무기물을 녹아내리고 용융된다. 유기물은 증발되고 남겨진 휘발성 가스는 후단 재연소 장치 실로 이송된다[6].

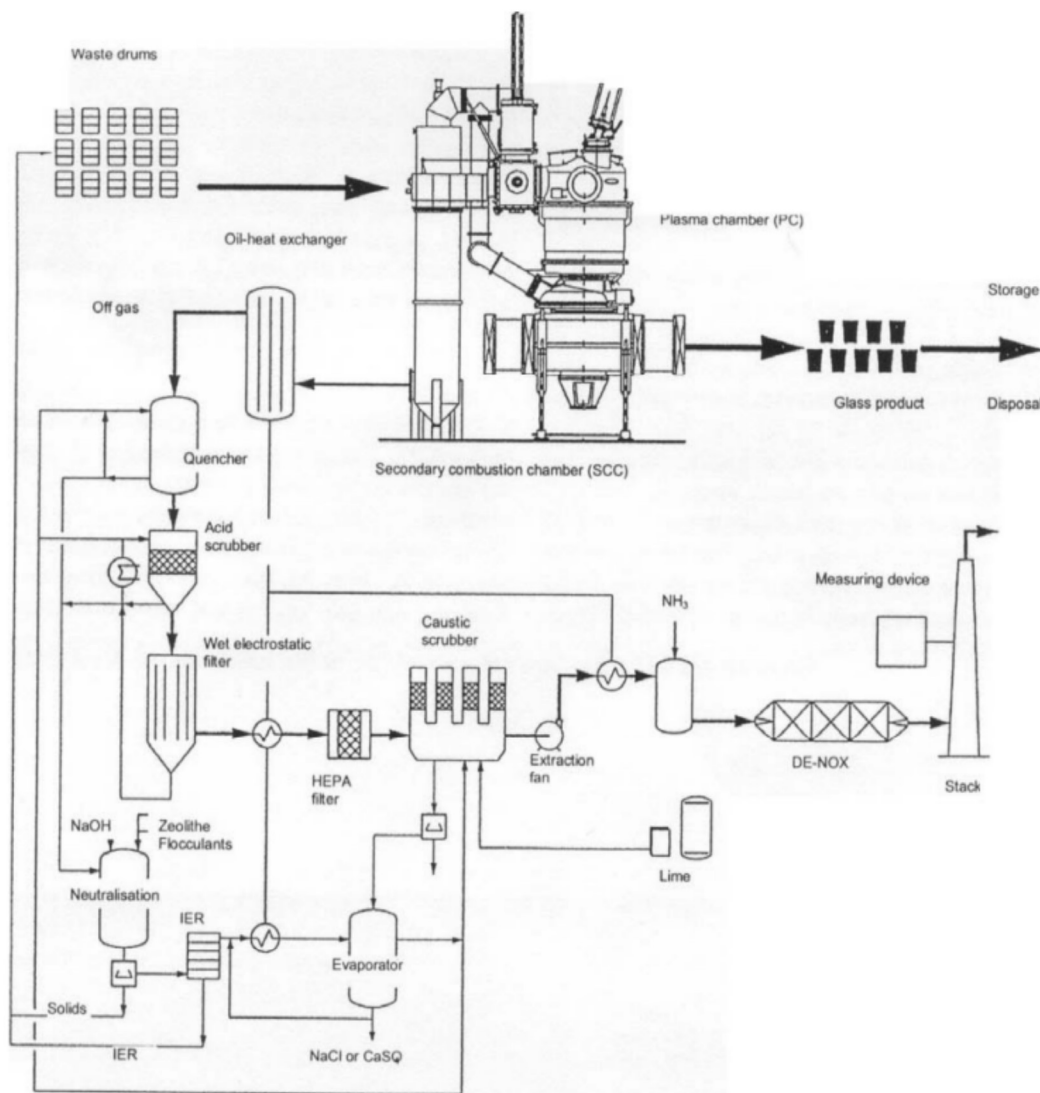


그림 14. includes a process diagram for the off-gas treatment system in the Z WILAG plasma melting plant.

이설비를 이용해 방사성폐기물 80kg/yr와 비방성 폐기물 70kg/yr을 처리했으며 현재 처리량은 50kg/yr~60kg/yr이다.

배기체 시스템으로부터 방출되는 가스 중 Cs, Co는 제거 대상이나 Co 7.3%와 Cs 10.5%가 회수되지 않았다. 그러나 Co와 Cs는 시스템 내 파이프 라인안에 잔류한 것으로 파악되었고 Co 89.8%와 Cs 96.7%는 슬래그 안에 잔류하는 것으로 파악되었다. 모든 유기물은 극고온의 전기 아크에 의해 완전히 분화되고 후단 버너에 신속에 이송되므로 다이옥신이나 퓨란 등의 형성이 안된다. 그림 15는 스와질랜드 설비를 보여준다[7].



그림 15. 스와질랜드 설비

네 번째 나라 러시아 연방정부는 “Pluton” 이라는 플르즈마 방식으로 혼합 방사성폐기물 처리 실험(40 kg/hr)을 1998년부터 2001년까지 실험을 한 후 용량 200~250 kg/h의 설비를 건설하였다.

두 개의 플르즈마 토치를 구비하고 타원형 로안에서 100~150 kW 급으로 1,500~1800℃의 용융 온도를 공급하며 효과적인 배기 기체 처리 시스템은 원자력과 일반 환경의 두 규제 기준을 맞추었다[6]. 그림 16은 Pluton 발전소의 기술적 흐름도를 보여준다.

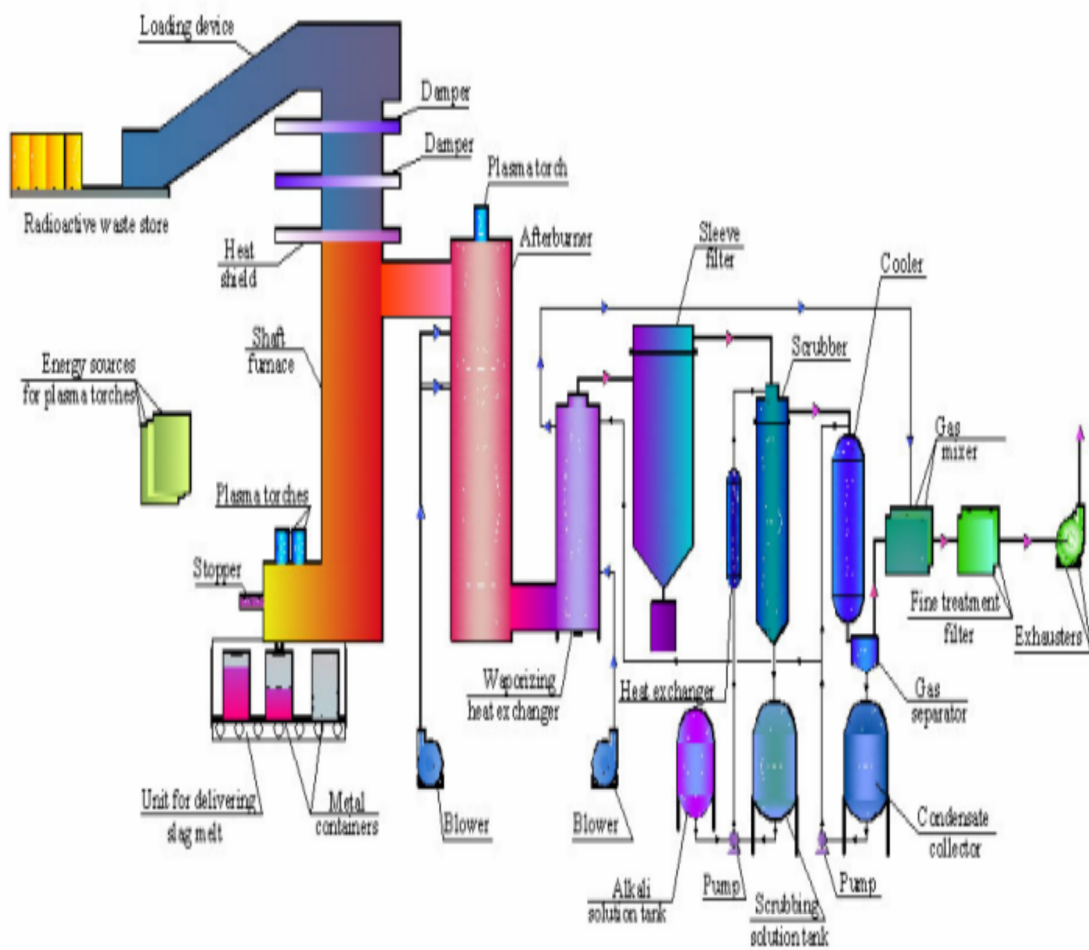


그림 16. The technological flow sheet of the plant PLUTON, SIA RADON.

아래 표 5은 Sia Radon 플라즈마 발전소의 방사성폐기물 처리의 특성을 Pluton 과 Pyrolysis를 비교해서 보여준다.

표 5. The comparative characteristics of the Sia Radon Plasma Plants for treatment of the radioactive waste.

Parameter name	Pyrolysis	Pluton
Capacity of solid radioactive waste, kg/h	40-50	200-250
Dimensions of the plant, m	8x8x10	12x18x12
Number of Plasma torches	1	2
Electrical capacity of the plasma torch, kW	70-120	100-150
Start up time (till beginning of loading), hours	3-4	6-10
Electric energy usage of plasma torches, kWh/kg waste	1-2	0.5-1.5
Degree of radionuclides escape from the furnace ( <sup>137</sup> Cs), %	5-12	7-10

다섯 번째 나라 불가리아는 새로운 플르즈마 용융 발전소를 Kozloduy 원자력 발전소에 설치했으며 이는 방사성폐기물의 처리와 처분을 위해서이며 아래 그림 17은 불가리아의 Kozloduy 발전소 건설 현장을 보여주고 있다.



그림 17. 불가리아 Kozloduy 발전소 건설 현장

31 억 유로의 플라즈마 용융 발전소는 상당한 감용 기술을 적용해 저준위 및 중저준위 방사성 폐기물을 처리하며 2002년과 2006년에 운전 정지를 한 Kozloduy VVER-440 원자로 1~4호기와 현재 운영 중에 있는 5,6호기의 방사성폐기물을 처리한다. 250톤/년의 처리 용량을 가지고 있고 방사성오염의 위험성을 줄이며 최종 부산물은 엄격한 규제 기준인 장기 저장 및 처분 규정 이내로 관리되고 있다. 불가리아는 새로운 방사성폐기물 저장소를 2021년부터 건설 예정에 있다[8].

여섯 번째 나라 대만 소각발전소는 100kg/hr 를 처리할 수 있도록 Nuclear Energy Research (INER)으로부터 원자력발전소의 저준위 가연성 폐기물을 처리하기 위해 디자인, 건설 및 테스트 되었다. 건설은 1988년에 시작되었고 1990년 1월에 상온 수압시험을 수행했고 이후 몇 차례의 점검 후 고온 기능시험을 1990년 8월에 완료했다[9].

일곱 번째 나라 일본은 후쿠시마 다이치 원자력발전소 사고로 다양한 고체 저준위 폐기물의 소각설비가 운영되고 있다. 이 소각로는 방호복과 건설 폐기물들을 처리한다. 2대의 고체폐기물 소각 시설이 나란히 설치되어 있고 각각의 회전식 소각 시스템과 배기 필터를 가지고 있으며 공통의 배기 굴뚝으로 만들어졌다. 타고 남은 재는 소각로의 밀폐된 드럼에 최종 처리를 위해 저장되고 각 소각라인은 300kg/hr의 처리 능력을 가지고 있으며 24시간 운전이 가능하다. 이 설비는 2013년 5월에 건설되었으며 같은 해 11월에 완공되었다. 건설은 일본 Tokyo Electric Power Company(Tepco)와 계약을 한 Kobe Steel Group의 계열사인 Kobelco에 의해 건설되었고 설비의 상온 수압시험과 비오염 폐기물 소각 시험을 차례로 진행했으며 고온 가압 시험은 실제 방사성폐기물로 수행을 했다. 이설비는 고체 폐기물(개인 방호복, 제염지, 나무, 종이, 폐오일, 사용 후 레진 등)을 처리하도록 설계되었으며 폐기물들은 부지 내에서 밖으로 누설될 수 없도록 설계되었다. 기체 방사성 폐기물이 대기 중으로 배출되는 것을 방지하기 위해 각종 필터들이 장착되어 있고 하루 8톤의 폐기물을 처리한다[10].

## 제3장 휘발성 및 방사성 휘발성 물질 종류와 특성

### 제1절 휘발성 물질의 종류

기체 방사성폐기물은 Ar · Kr · Xe 등의 불활성 가스, 방사성요오드, 부유입자 등이 있고 불활성가스는 물리 화학적으로 안정되어 더 이상 분리하기 힘든 물질로써 활성지연탄, 저온증류법, 저온흡착법, 흡수법, 격막법 등으로 처리를 한다. 방사성요오드는 활성탄 여과법, 질산은법, 알칼리 세정법 등으로 처리를 하며, 삼중수소는 재결합 공정을 통해 제거를 하고, 부유입자는 여과 장치를 통해 처리한다.

플라즈마 기술을 이용해 방사성폐기물을 처리하는 방법은 열분해(Pyrolysis), 유리화(Vitrification), 재활용(Recycling) 등으로 크게 구분할 수 있으며 열분해는 유기 화합물질이 안전한 원소로 화학적으로 분해되는 것을 말한다.

사용후 핵연료(경수로) 파이로 공정 전처리 연구 중 사용후 핵연료 집합체를 인출, 해체, 절단, 탈피복, 분말화, 전해환원 원료물질을 제조하는 과정에서 Cs-137, Tc-99, I-129의 상온 고체 준휘발성 핵종과 Kr-85, Xe, C-14(CO<sup>2</sup>), H-3 등 휘발성 핵종이 생성된다[11].

### 제2절 배기체의 특성

원자력발전소(PWR)의 폐기물은 가연성 잡고체, 붕산 폐액, 폐 이온교환수지, 비가연성 잡고체, 유리 조각 등이다. 폐이온 교환수지는 Cs-137을 다량 함유하고 있으며 녹는점이 670°C로 휘발성이 높고 포집에도 어려운 점이 있다. 소각처리 시 발생하는 배기체는 방사성 핵종, 독성 금속, 탄화수소, 미립자, 그리고 산성 가스로 분류할 수 있다[12].



방사성핵종은 대부분 금속 동위 원소로 이루어져 있으며 세슘 등의 방사성 핵종은 용융로 주위에서 가스화돼 기체 상태로 배기체 처리 시스템을 통해 처리된다. 아래 표 6은 가연성 잡고체 방사성 폐기물과 농축 폐액 내의 방사성 핵종을 분석한 결과를 나열하였다.

표 6. 가연성 잡고체 방사성 폐기물과 농축 폐액 내의 방사성 핵종

핵종	가연성 잡고체		농축폐액	
	LMAV	최대	LMAV	최대
H-3	1.9E-03	2.3E-01	1.4E-02	2.4E-01
C-14	1.1E-03	3.8E-01	6.0E-05	4.1E-02
Fe-56	1.5E-01	2.7E+03	7.1E-03	8.3E-02
Co-68	-	5.7E+02	2.3E-01*	-
Cn-60	4.1E-02	1.4E+02	2.2E-03	4.1E-02
Ni-63	3.5E-02	2.4E-01	1.7E-03	5.6E-02
Sr-90	1.8E-04	8.2E-03	5.2E-06	7.0E-05
Tc-99	4.8E-05	2.0E+00	5.5E-06	4.7E-05
I-129	1.0E-04	-	3.9E-07	1.3E-5
Cs-134	-	7.5E-01	7.9E-01*	-
Cs-137	1.6E-02	1.1E+01	4.3E-03	8.0E-02
Ce-144	4.0E-03	1.4E+01	3.0E-05	5.0E-04
Pu-238	9.6E-06	1.4E-02	5.6E-08	1.5E-06
Pu-239	9.5E-06	3.7E-02	7.1E-09	2.4E-06
Pu-241	1.6E-03	3.3E+00	1.1E-05	2.0E-04
Am-241	6.4E-06	2.1E-02	4.7E-08	1.4E-06
Cm-242	4.6E-06	6.5E-03	1.6E-07	1.3E-06
Cm-244	6.0E-06	6.0E+00	5.6E-08	7.2E-07
계	2.5E-01	3.4E+0.3	1.2E+00	9.4E+0.3

- 주: 1. LMAV: Log Maen Average
- 2. 참고 문헌: EPRI 보고서(Np-5077, Mar. 1987)
- 3. \* 국내 원전 데이터

방사성 기체 중 일부는 응축·흡수 또는 흡착에 의해 포집되며, 일부는 흡착과 탈착의 반복을 통해 천천히 배기체 시스템을 통해 처리된다.

열처리 공정의 플라즈마 토치, 저온 용융로에서 발생하는 독성 금속 중 일부는 입자 상태로 배기체 속으로 유입되어 배출된다. 탄화수소는 불완전 연소 생성물(PICs) 및 연소 반응을 거치지 않은 폐기물에서 탄화수소(HC)가 생성되며 다이옥신과 퓨란은 온도의 영향을 많이 받는다. 배기체의 온도가 249°C~291°C 정도에서 다이옥신과 퓨란의 생성이 10배로 증가한다.

미립자는 방사성 핵종, 독성 금속 및 탄화수소 등을 함유하며 노(爐)에서 통풍 장치에 의해 운반된 불연성 재의 내에도 존재하므로 배기체 처리 시 미립자의 크기등을 고려하여 필터 관리를 해야 한다. 아래 표 7은 미립자제거 기술을 나열하였다.

표 7. 미립자제거기술

건 식 법	습 식 법
백하우스	벤츄리 스크러버
전기 집진기	Other High-energy Scrubbers
Ceramic Candle	Self-Induced Scrubber
HEPa 필터	Rotary Atomizing Wet Scrubber
금속필터	Free Jet Scrubber
Nested-filters	Ionizing Wet Scrubber
Gravity Settling Chamber	Flux Force/Condensation/Collision Scrubber
사이클론 분리기	Froth Scrubber
Mechanical Centrifugal Separator	
Impigement Separator	
Barrierless Ultrasonic Air Cleaner	

산성가스는 염산(HCl), 황산화물(SO<sub>x</sub>), 질산화물(NO<sub>x</sub>) 등이 산성가스이며 HCl은 염소화 물질을 처리할 때 생성되며 NO<sub>x</sub>는 질소화된 물질을 처리할 때 생성된다.

아래 표 8과 표 9는 산성가스 제거 기술과 NOx 제거 기술을 나열하였다[12].

표 8. 산성가스 제거기술(SOx,NOx)

습 식 법	건 식 법	반 건 식 법
충전탑식 스크러버 저수식 스크러버 가압수식 스크러버 스프레이식 스크러버 습윤 유동층식 스크러버	건조 흡수제 주입 건조 유동층식 스크러버	스프레이식 건조기 흡수제 (spray dryer absorber)

표 9. NOx 제거기술

건 식 법	습 식 법
선택적 촉매 환원법 선택적 비촉매 환원법 비선택적 촉매 환원법 직접분해법 전자빔 공정	산화와 흡착법 세척제와 킬레이트제

### 제3절 핵분열에 의한 휘발성 물질

저준위 방사성폐기물 처리 중 어떠한 연유로 방사성폐기물에 저장되어 있던 불활성 기체가 외부로 나올 수 있다. 불활성기체는 U(우라늄) 원소가 중성자

조사를 받으면 핵분열을 하고 Kr, Xe 과 같은 불활성기체를 만들어 내는데 전체 생성되는 기체의 약 10% 정도이며, 그 중 Xe이 90%를 차지한다. 아래 표 10은 경수로의 연소도와 온도에 따른 예상 최대 발생량을 보여주고 있다.

표 10. Maxium values for fractional release of xenon and krypto during reactor operation of UO2 fuel in LWRs at serveral burnup and temperature

Volume average temperature(°C)	Burnup(MWd/MTU) (megawatt day per Metric ton of urainuim)	Fractional release
1000(12kW/ft)	20,000	0.12
	25,000	0.15
	30,000	0.20
	35,000	0.30
	40,000	0.42
	45,000	0.55
1400(16kW/ft)	20,000	0.35
	25,000	0.40
	30,000	0.50
	35,000	0.55
	40,000	0.65
	45,000	0.75
<1000 and with centerline less than 1250	20,000	0.0025
	25,000	0.005
	30,000	0.010
	35,000	0.015
	40,000	0.030
	45,000	0.060

Kr 과 Xe의 동위원소는 안정한 핵종으로 붕괴되며 가장 장수명 핵종은 Kr-85의 경우 반감기가 10.7년이고, Xe-133의 반감기는 5.3일이다.

Xe-133은 배출 후 몇 수개월 냉각기간 동안에 대부분 붕괴되지만, Kr-85는 반감기가 길며 배기체의 대부분을 차지한다. 조사된 U-235 연료의 불활성기체인 Kr 과 Xe의 물리적 특성은 아래 표 11, 표 12, 표 13과 같다[13].

표 11. Physical properties of krypton and xenon

Property	Unit	Kr	Xe
Critical temperature at 760 torr	°C	-63.75	16.59
Critical pressure	atm	56.0	60.2
Boiling point	°C	-153.40	-108.12
melting point	°C	-156	-112
Density at boiling point	kg/L	1.5465	1.9959
Density at STP	kg/m <sup>3</sup>	3.744	5.896
Heat of vaporization	kcal/kg	25.8	23.7
	kcal/m <sup>3</sup>	96.59	139.74
Heat conductivity	W/cm K	95.1	55.5
Amounts in air	vpm	1	0.08
Ratio in air	-	12.5	1
Ration in fission product gas	-	1	10

표 12. The Krypton's isotopes

Element of Isotope	Natural Abundance(%)	Atomic Mass or Weight	Half-life	Decay mode/ Energy (/MeV)
Kr -36	-	83.80	-	-
Kr-71	-	70.9505	0.10 s	$\beta^+$ , EC/10.5
Kr-72	-	71.9419	17.0 s	$\beta^+$ /5.0 EC
Kr-73	-	72.9389	27.0 s	$\beta^+$ , 6.7 EC/
Kr-74	-	73.9333	11.5 m	$\beta^+$ , 3.1 EC/
Kr-75	-	74.93104	4.3 m	$\beta^+$ , 4.90 EC/
Kr-76	-	75.92595	14.8 h	$\beta^+$ , 1.31
Kr-77	-	76.92467	1.24 h	$\beta^+$ /80/3.06 EC/20/
Kr-78	0.35(2)	77.92039	-	-
Kr-79m	-	-	53.0 s	I.T./0.1299
Kr-79	-	78.920083	1.455d	$\beta^+$ , 7/1.626 EC/93/
Kr-80	2.25(2)	79.916379	-	-
Kr-81m	-	-	13.1 s	I.T./0.1904
Kr-81	-	80.916593	$2.1 \times 10^5$ y	EC/0.2807
Kr-82	11.6(1)	81.913485	-	-
Kr-83m	-	-	1.86 h	I.T./0.0419
Kr-83	11.5(1)	82.914137	-	-
Kr-84	57.0(3)	83.911508	-	-
Kr-85m	-	-	4.48 h	$\beta^-$ /79/I.T./21/0.305
Kr-85	-	84.912530	10.73 y	$\beta^-$ /0.687
Kr-86	17.3(2)	85.910615	-	-
Kr-87	-	86.913359	1.27 h	$\beta^-$ /3.887
Kr-88	-	87.91445	2.84 h	$\beta^-$ /2.91
Kr-89	-	88.91764	3.15 m	$\beta^-$ /4.99
Kr-90	-	89.91953	32.3 s	$\beta^-$ /4.39
Kr-91	-	90.9234	8.6 s	$\beta^-$ /6.4
Kr-92	-	91.92611	1.84 s	$\beta^-$ /5.99 n/
Kr-93	-	92.9312	1.29 s	$\beta^-$ /8.6 n/
Kr-94	-	93.9343	0.21 s	$\beta^-$ /7.3
Kr-95	-	94.9397	0.78 s	$\beta^-$ /9.7
Kr-97	-	-	< 0.1 s	$\beta^-$

1. isotope or element : for elements, the atomic number and chemical symbol are listed. For nuclides, the mass number and chemical symbol are listed. Isomers are indicated by the addition of m, m1, or m2.

2. Isotopic abundance : in atom percent

3. Atomic mass or weight : Atomic mass relative to  $^{12}\text{C}=12$ . Atomic weight is given on the same scale. 4. Half-life : Half-life in decimal notation. s=microseconds; ms=mili-seconds; s=seconds, m=minutes; h=hours; d=days; and y=years.

5. Decay Mode/Energy : Decay modes are  $\alpha$ =alpha particle emission ;  $\beta^-$ =negative beta emission ;  $\beta^+$ =positron emission ; EC=orbital electron capture ; IT=isomeric transition from upper to lower isomeric state ; n=neutron emission ; SF=spontaneous fission. Total disintegration energy in MeV units.

표 13. The xenon's isotopes

Element of Isotope	Natural Abundance(%)	Atomic Mass or Weight	Half-life	Decay mode/ Energy (/MeV)
$_{54}\text{Xe}$	-	131.29	-	-
Xe-110	-	109.9445	0.2 s	$\beta^+$ / 9.2
Xe-111m	-	-	0.9 s	EC, $\beta^+$
Xe-111	-	110.9416	0.7 s +	EC, $\beta^+$ /10.6 / $\pi$
Xe-112	-	111.9357	3.0 s	EC, $\beta^+$ /7.2 /0.8/
Xe-113	-	112.9334	2.8 s	EC, $\beta^+$ /9.1
Xe-114	-	113.9281	10.0 s	$\beta^+$ , EC/5.9
Xe-115	-	114.9270	18.0 s	$\beta^+$ , EC/7.6
Xe-116	-	115.9214	56.0	$\beta^+$ , EC/4.3
Xe-117	-	116.9206	1.02 m	$\beta^+$ , EC/6.5
Xe-118	-	117.917	4.0 m	$\beta^+$ , EC/3.0
Xe-119	-	118.9156	5.8 m	$\beta^+$ , EC/5.0
Xe-120	-	119.91216	40.0 m	$\beta^+$ ,EC/97/1.96 /3/
Xe-121	-	120.91138	39.0 m	$\beta^+$ ,44/3.73 EC/56/
Xe-122	-	121.9086	20.1 h	EC/0.9
Xe-123 1	-	22.90848	2.00 h	$\beta^+$ ,23/2.68 EC/77/
Xe-124	0.10	123.905895	-	-
Xe-125m	-	-	57.0 s	I.T./0.252
Xe-125	-	124.906398	17.1 h E	C/1.653
Xe-126	0.09	125.90427	-	-
Xe-127m	-	-	1.15 m	I.T./0.297
Xe-127	-	126.905179	36.4 d	EC/0.662
Xe-128	1.91	127.903531	-	-
Xe-129m	-	-	8.89 d	I.T./0.236
Xe-129	26.4	128.904780	-	-
Xe-130	4.1	129.903509	-	-
Xe-131m	-	-	11.9 d	I.T./0.164
Xe-131	21.2	130.905083	-	-
Xe-132	26.9	131.904155	-	-
Xe-133m	-	-	2.19 d	I.T./0.233
Xe-133	-	132.905906	5.243 d	$\beta^-$ /0.427
Xe-134	10.4	133.905395	-	-
Xe-135m	-	-	15.3 m	I.T.
Xe-135	-	134.90721	9.10 h	$\beta^-$ /1.15
Xe-136	8.9	135.90722	-	-
Xe-137	-	136.91156	3.82 m	$\beta^-$ /4.17
Xe-138	-	137.91399	14.1 m	$\beta^-$ /2.77
Xe-139	-	138.91879	39.7 s	$\beta^-$ /5.06
Xe-140	-	139.9216	13.6 s	$\beta^-$ /4.1
Xe-141	-	140.9267	1.72 s	$\beta^-$ /6.2
Xe-142	-	141.9297	1.22 s	$\beta^-$ /5.0
Xe-143m	-	-	0.96 s	-
Xe-143	-	142.9352	0.30 s	$\beta^-$ /7.3
Xe-144	-	143.9385	1.2 s	$\beta^-$ /6.1
Xe-145	-	-	0.9 s	$\beta^-$ , (n)

## 제4절 온도에 따른 휘발성 물질 중 세슘의 휘발 특성

### 1. 폐기물 용융방법에 따른 세슘의 특성

“가열 및 유리화 중 염화물 토양으로부터 세슘-137의 휘발” 실험 결과, 용융 온도까지 온도 증가율이 높을수록 Cs-137의 휘발률이 낮으며 용융 온도 도달 후의 숙성시간은 세슘의 휘발에 영향을 거의 미치지 않는다고 평가하고 있다. 열분해는 고체 또는 액체 폐기물들을 높은 온도로 기화시키고 고온에서 잔류시간이 길어야 하며 원활한 화학반응을 위해서 다양한 기체를 플라즈마 기체로 사용해야 한다.

유기폐기물은 탄소, 일산화탄소 또는 수소, 미임계 탄화수소 등 열분해과정을 통해 안전한 원소로 분해된다. 용융 실험 결과를 보면 배기가스 중 NO는 플라즈마 토치 유입구 실링을 통해 통제가 가능하며 미국 EPA가 정한 슬랙고화체의 TCLP40CFR268의 침출 시험 결과 전체 원소들이 허용 기준을 만족하나 열 플라즈마를 이용시 방사성폐기물을 처리할 때는 세슘 등 휘발성 물질이 유리 구조 내에 포획되지 않으며 기화가 된다. 폐기물 내에 Cs은 고체 상태에서 액체 상태로 변환되는 과정에서 최대 휘발률을 가지고 있는 것으로 파악되었다 .

Cs-137은 시료가 용융될 때 공기와 접촉 표면적이 줄어들어 용융 상태의 Cs-137이 기체로 휘발하는 데 제약을 받고 대부분 시료가 용융 직전에 발생한다. Cs-137의 최대 휘발률 용융 온도는 1,150~1,250℃일 때로 조사되었다. 아래 표 14는 토치 출력 변화 시험에 따른 슬랙 내 Cs 잔존율을 보여준다.

표 14. 토치출력 변화시험에 따른 슬랙 내 Cs 잔존율

시험번호	전류	총 용융시간	투입률	슬랙 내 Cs 잔존율
1	300 A	26분	500 ppm	450 ppm
2	270 A	26분	500 ppm	440 ppm
3	240 A	27분	500 ppm	430 ppm



한편 토양 용융 시 휘발되는 먼지 중 Cs 농도는 470ppm~1,000ppm 이었으며 용융 출력 및 용융 속도 등 일정한 경향을 찾지 못했다. 아래 표 15는 토치 출력 변화 시험에 따른 먼지 내 Cs 농도를 보여준다.

표 15. 토치출력 변화시험에 따른 먼지 내 Cs 농도

시험번호	전 류	총 용융시간	Cs 투입률	먼지 내 Cs 잔존율
1	300 A	26분	500 ppm	920 ppm
2	270 A	26분	500 ppm	1,000 ppm
3	240 A	27분	500 ppm	470 ppm

아래 표 16은 TCLP(Toxicity Characteristic Leaching Procedure) 측정시험 결과이다.

표 16. TCLP 측정시험 결과

원 소	기 준	결 과	원 소	기 준	결 과
Cs	-	0.204	Pb	0.75	<DL
Co	-	0.475	Sb	1.15	<DL
Ba	21	0.73	Zn	4.3	0.34
Ni	11.0	<DL	Cr	0.6	<DL

Cs의 휘발 특성은 온도가 높을수록, 출력이 높을수록 폐기물이 더 빨리 용융 되어서 Cs의 휘발률이 낮아지는 결과가 나타났다[14].

## 2. 온도 및 시간 변화에 따른 세슘의 특성

온도 및 가열 시간에 따라 방사성물질은 각각 다른 휘발특성을 가지고 있다. 한국원자력연구원 내에 중저준위 방사성폐기물을 약 7,000 드럼(2008년 12월 기준)을 보관 중에 있고 이번 실험은 회화 시 그을음 또는 불꽃 발생을 방지하기 위해 회화 온도를 200℃부터 50℃도 씩 650℃까지 증가하며 각 온도별로 일정 시간 유지를 해서 각각의 변화를 Test 했다. 세슘 표준용액으로 450℃~650℃에서 회화한 후 ICP-MS로 측정한 회수율은 아래 표 17과 같다.

표 17. Recovery of cesium depending on ashing temperature

Temp. (°C)	Recovery (%)	SD
450	78.3	3.2
500	79.8	6.2
550	68.6	4.6
600	52.4	5.3
650	33.5	3.6

450℃와 500℃에서 각각 78.3 % 및 79.8%로 큰 차이는 없으나 550℃에서 68.6%로 감소했고 온도가 올라갈수록 더 감소하여 650℃에서 33.5%로 나타났다. 세슘 표준용액으로 450℃에서 4시간 회화 후 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry-유도 결합 플라즈마 질량 분석)로 측정한 회수율은 아래 표 18과 같이 81.7%가 나타났고 8시간 및 12시간 회화한 후는 74.3% 및 77.0%의 휘발률이 나타났다.

표 18. Recover of cesium depending on time elapsed at 450℃ ashing

Time elapsed (hr)	Recovery (%)	SD
4	81.7	3.8
8	74.3	3.1
12	77.0	1.4

제염지에 Cs-137과 세슘 표준용액을 각각 첨가한 후 450도에서 4시간 회화한 후 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry-유도 결합 플라즈마 질량 분석)로 측정된 회수율은 각각 46% 및 59%로 약 53.7% 와 40.9% 가 휘발이 되었다.(회수율의 오차는 약 10%이다)

방사성폐기물 중 잡고체의 전처리 기술의 하나인 회화 방법은 시료 농축 효과가 높은 장점과 휘발성 원소의 손실 또한 높아 세슘의 회수율을 체계적으로 모니터링하고 필터링해야 한다[15].

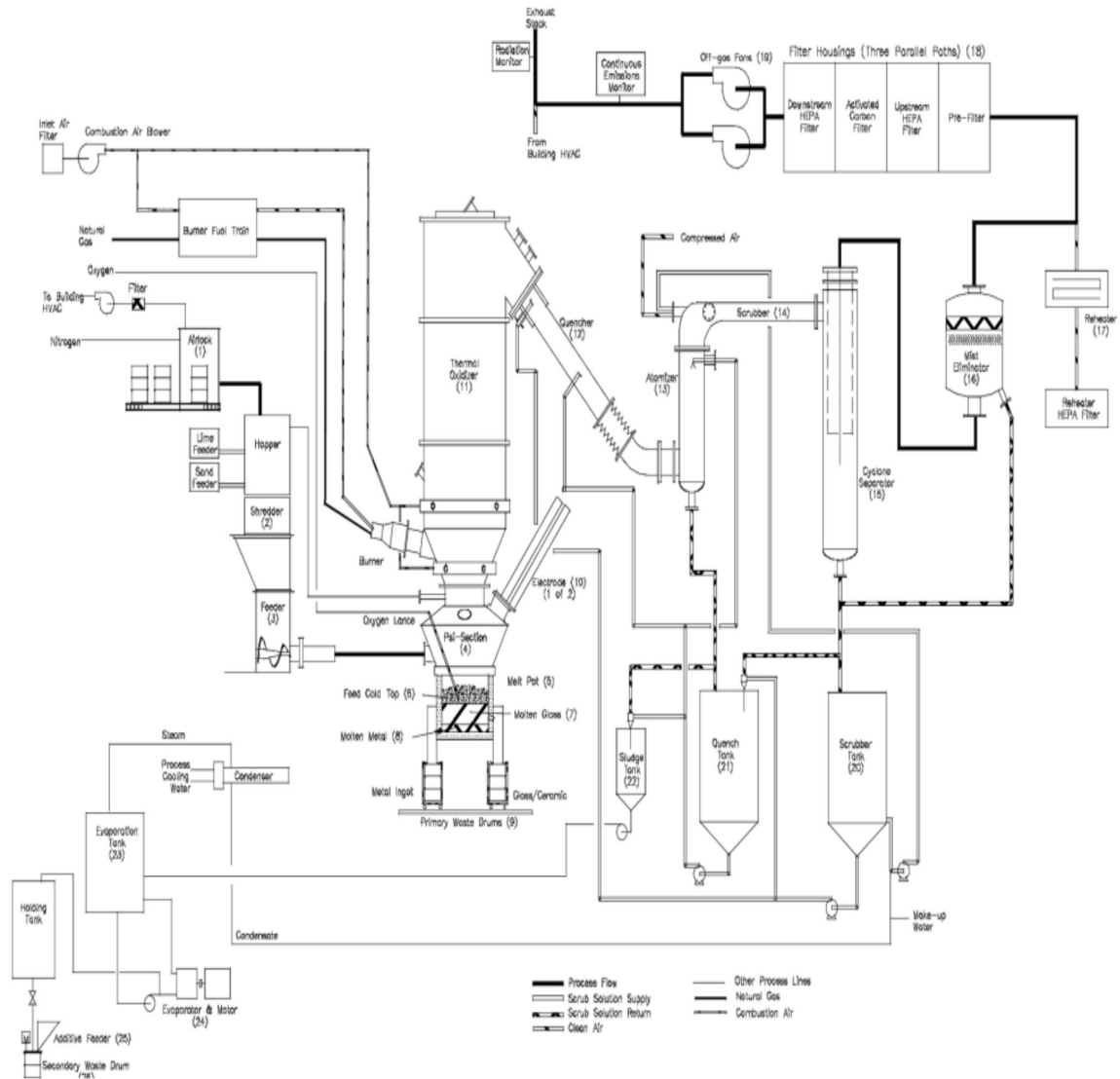
## 제5절 온도에 따른 NOx 특성

방사성폐기물 처리시 방사성물질 만큼 관리를 해야하는 것이 유독성 기체이다. SG 화학세정 폐액처리 시 온도별 NOx의 생성을 관찰한결과 NO의 생성 속도는 연소온도가 850℃ 이상이 되면 SO<sub>2</sub> 와 NO 의 배출농도가 증가했다. 반면 800℃ 이하 일때는 연소효율 감소와 함께 연소로의 성능을 저하시킨다. 그러므로 적절한 운전온도는 800~850℃의 범위를 추천한다. NOx 생성을 최소화하기 위해 연소온도의 설정이 매우 중요한 요인임을 알 수 있었으며 전기로의 내부 온도를 245~900℃로 설정해 EDTA 분해 시 NOx의 생성을 최소화하였다. 산화 과정에 존재하는 NOx와 같은 유해 가스를 SCR(Selective Catalytic Reduction-선택적 촉매 환원) 촉매반응로에서 제거했다[16].

## 제6절 혼합 방사성폐기물 용융 특성

실제 방사성폐기물 소각처리에는 몇가지 이상의 다른 종류의 폐기물이 소각될 수 있다. 아래 그림 18은 설비 공정도와 같이 2개의 전극봉이 용융 온도 1,800℃ 까지 가열 가능하고, 노내 용융물의 온도 특성을 모니터링할 수 있도록 44개의 열전쌍과 레이저 검출기를 설치했다. 비중차를 이용해 용융로 측면에 금속 용융물과 슬래그가 인출 가능하도록 설계했으며 용융로는 알루미나 성분이 90% 이상 함유한 내화재를 이용했다.

고온에서 중금속 휘발을 억제하기 위한 방법으로 Cold Cap 운전기능이 있다. 후단 연소로(Thermal Oxidizer)는 용융로에서 발생한 불완전 연소가스의 완전 산화를 위해 1,000℃~1,200℃에서 2초 이상 유지했다. 열적 산하기를 거친 배기가스는 급냉장치(Spray Quencher)에서 급냉되며 다이옥신 및 퓨린류와 같은 독성 유기물의 생성을 억제하며, 자동화 분무장치(Atomizer)를 거쳐 고압 세정기에서 분사되는 물과 배기체의 난류 혼합 기능으로 미세입자 유도를 통해 제거된다. 원심력 집진기 및 미스트 제거기를 통과하면서 배기가스에 함유한 불순물이 분리되고, 산가스는 알칼리성 세정액을 통해 중화된다. 응축현상을 막기위해 배기가스는 재가열기를 거쳐 가열된 후 4단계의 필터 बैं크를 지나면서 여과 과정을 거친다. 방사성 핵종 농도 관리는 방사선 감시기(RMS)를 이용하여 연속 모니터링 되도록 설계되며 2차측 폐기물인 폐세정 용액 등은 시설 내부에서 직접 증발농축 및 고화처리가 가능하도록 증발농축 고화 설비를 갖추고 있다.



그리 18. Process flow diagram for PAM system

시료채취 위치는 그림 19와 같으며, 배기가스 채취 장치 및 채취방법은 국내 대기오염공정시험법에 따랐고, 다이옥신 측정장소는 S3(배기팬 후단) 지점에 두고 다시 총 세 지점에서 샘플을 채취한다, 첫 번째 샘플링 포트는 배기가스 연속 방출 모니터링 시스템(CEMS)을 위해 사용되고, 두 번째 포트는 금속, 미립자, 휘발성 유기물질, 및 다이옥신 모니터링을 위해 샘플 채취를 위해 사용되며 세 번째 포트는 방사선 모니터링 목적으로 샘플 취재를 위해 사용 된다. 다이옥신과 퓨란의 측정은 EPA Method 23의 절차에 따라 연돌에서 시행했으며 공인기관인

환경관리공단에서 측정했다. 다이옥신의 경우 총 3차를 통해 측정했고 1차 측정 시 25℃, 762mmHg, 2차 측정 시 18℃, 762mmHg, 3차 18℃, 762mmHg의 조건하에 시행했다[17].

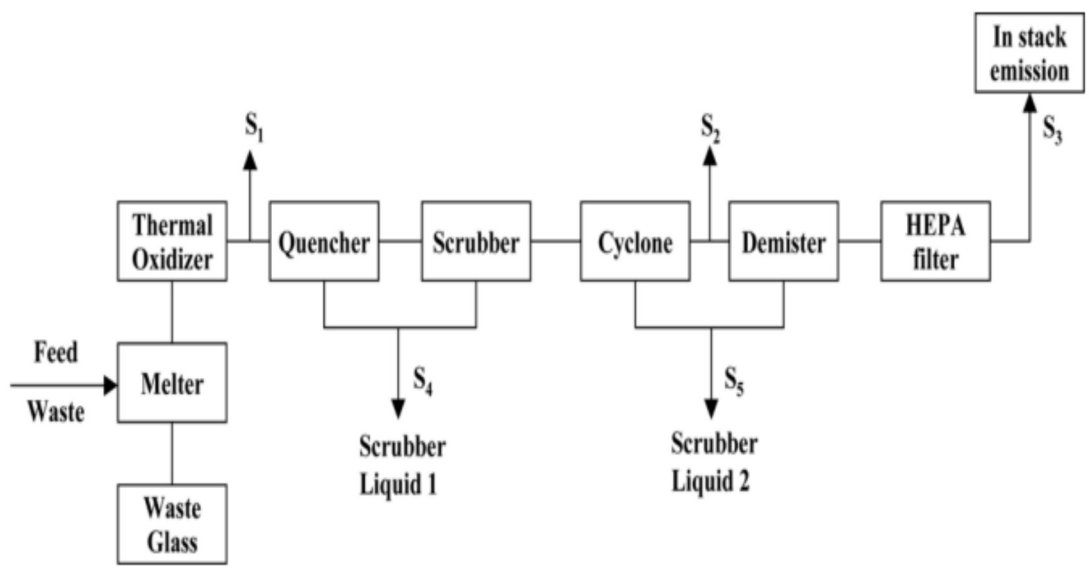


그림 19. Offgas sampling locations

### 제7절 방사성 폐액처리 시 휘발성 물질 분석

저준위 방사성 폐액은 약 1,200℃의 플라즈마 조건하에서 열분해를 거친 후 약 800℃의 산화 반응로 내에서 전체 산화시키는 것을 권장하며, 이때 약 800℃의 고온 가스를 1차 열교환기를 통해 60℃ 이하로 냉각시킨 후 다이옥신과 퓨란 등의 독물질 생성을 막아야 한다.

또한 습식 세정장치, 촉매 산화반응기 및 촉매 환원반응기 등을 이용해 냉각 및 배출되는 가스내에 포함된 미처리 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx), 휘발성 유기화합물(VOCs; volatile organic compounds)과 일산화탄소(CO)를 제거해야 한다.

아래 표 19는 발전소 증기발생기 2차측 화학세정 폐액을 플라즈마 열분해·산화처리 후 생성된 배출가스를 1개월간 분석하여 평균값을 낸 것이다. 전반적으로 환경기준 값보다 현저히 낮은 수치가 나왔으며 일체형 플라즈마 열분해·산화 반응로를 이용할 경우 암모니아(NH<sub>3</sub>(g)) 투입 없이도 배출가스 중 NO<sub>x</sub> 물질의 농도를 환경기준치(150 ppm 이하)이내로 유지할 수 있는 것을 알 수 있다.

표 19. 배출가스 성분 분석 값 / 주 ( ) : 산소농도(%) 보정

항목	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>x</sub> (ppm)	CO (ppm)	방사능 (Bq/m <sup>3</sup> )	NH <sub>3</sub> (g)투입량 (L/min)
환경기준	150(12)이하	100(12)이하	300(12)이하	BKGD	-
평 균	52.2(12)	0.0(12)	0.2(12)	N/D	0

일체형 플라즈마 열분해·산화 반응로를 거쳐 배출된 800℃의 가스는 싸이클론 집진기를 통과해 1차 비산재(Fly ash)로 제거하고, 이 비산재는 비산재 포집 호퍼에서 처리된다.

비산재가 1차로 제거된 후 배출가스는 1차 열교환기를 통과하면서 60℃ 이하로 냉각된다. 그 과정에서 다이옥신의 발생 가능한 200~300℃의 온도를 원천적으로 차단되는 것을 알 수 있다. 제1 열교환기는 분무 노즐을 갖추고 있어 스프레이 노즐을 이용해 분무액을 분사시키므로 냉각 효과가 크며, 싸이클론 집진기에서 미처리된 비산재가 2차로 제거되므로 폐기물소각처리에 효율적인 설비로 판단된다[18].

## 제8절 요오드(I-131)의 휘발성 특성

한국원자력연구소에 보관 중인 방사성폐기물 중 생성이 2년 지난 방사성폐기물을 대상으로 한 소각실험결과 부피는 약 1/250 무게를 약 1/30로 줄일 수 있을 것으로 판단했다. 방사성폐기물 소각 중 배출기체 농도관리는 환경관련법상의 배출허용기준치 이하 및 배출 방사선량은 검출기의 측정한계 이하로 유지 되었다. 이때 사용된 계측기는 요오드 감지장치(Bai 9103 Iodine Monitor, Bai Berthold 제조)를 사용했으며 시설 외부로 배출되는 방사능 농도는 굴뚝에 연결된 시료 채취용관을 이용해 연속적으로 분석 및 측정하고 소각재 및 포대 여과기 하단의 재에서 샘플을 채취하여 비방사능을 Multi-logger LB-5310(Berthold) 방사선 측정기(Berthold 제조, LB761 GD)로 측정했다. 실험을 위해 예열 온도는 450℃로 하고 제염지 투입에는 소각 온도인 900℃로 유지했다. RI(방사성동위원소) 추적자는 I-131 (Na-131 형태, 총 2mCi)을 사용해 모의 폐기물을 소각 후 시험 결과 대부분의 방사능은 휘발되었고 배기체와 같이 거동하며 포대여과기의 여과층에 포집 되었다. 아래 표 20은 폐기물 소각실험 시 방사능 안전성 분석계산 결과를 보여 주고 있다[19].

표 20. 폐기물 소각실험시 방사능 안전성 분석계산 결과

Radioisotope	Waste form	Maximum activity in off-gas(uCi/cm <sup>3</sup> )	MPC in air (uCi/cm <sup>3</sup> )
I-125	Syringe, Tube	6.8 × 10 <sup>11</sup>	8 × 10 <sup>11</sup>
H-3	Tube, Tray	1.42 × 10 <sup>-17</sup>	4 × 10 <sup>7</sup>
P-32, C-14, H-3	Tube, Pipet tip	8.4 × 10 <sup>9</sup>	1 × 10 <sup>7</sup>
Tc-99m	Tube, Vial	Negligible	1 × 10 <sup>5</sup>



방사성 요오드의 고준위 폐기물 처분 시 현재 유리를 매질로 사용하지만, 낮은 끓는 점을 가지고 있는 요오드는 쉽게 휘발되어 대기로 방출된다. 그러나 요오드-129 (반감기가 1500만 년 이상)는 방사성 동위원소이므로 관리구역 내에서 모니터링 및 관리가 되어야 하며 외부 유출을 방지해야 한다.

방사성 휘발성 핵종 고정화에 탁월한 소달라이트 세라믹 소재는 소결 공정을 이용해 만든 새로운 세라믹 신 매질이며, 저온 소결 및 높은 경도·강도·화학적 안정성을 가지고 있어 앞으로 방사성 요오드 폐기물처리에 주목을 받을 전망이다 [20].

## 제4장 배출 기준

### 제1절 국내 기준

원전 폐기물의 경우 1995년(금속, 콘크리트 등)에서 2000년(자체처분 관련 법 등 제도 정비) 이후 다양한 품목들이 자체처분 되고 있다. 국내 규제해제 선량 기준 및 자체처분 허용농도는 IAEA RS-G-1.7의 권고를 준용하고 있다. IAEA의 규제해제는 방사선 방호 목적으로 규정한 모든 규제에서 방사성물질은 제외하는 것으로 정의되며 IAEA Safety Guide RS-G-1.7에서 규제배제(Exclusion), 규제면제(Exemption), 규제해제(Clearance)로 정의했다. 고시에 따르면 자체처분은 방사성폐기물 중 핵종 별 농도가 자체처분 허용농도 미만임이 확인된 것을 법의 적용 대상에서 제외하여 방사성폐기물이 아닌 폐기물로 매립, 소각 또는 재활용의 방법으로 처분하는 것으로 정의하고 있다.

규제면제는 규제로부터 규제해제, 면제 또는 배제 요건을 만족하는 폐기물로서 IAEA RS-G.1.7의 허용농도 기준을 만족하는 폐기물을 말한다. 예로 Co-60 핵종의 허용농도 기준은 0.1 Bq/g 이하이다. 극단수명 폐기물은 반감기 100일 이하의 개봉선원폐기물을 말한다. 극저준위 폐기물은 규제해제 폐기물의 규제요건은 불만족하나 격납 및 격리가 요구되지 않아 천층처분이 적합한 폐기물이다. 저준위 폐기물은 규제해제준위 이상이나 제한적인 장반감기 핵종을 가지는 폐기물로 수백 년의 견고한 격납 및 격리가 필요하여 공학적 천층 처분시설에 처분이 적합한 폐기물이다.

국내 최초의 자체처분 고시는 1994년 제정되었고, 원자력법 제84조(방사성폐기물의 처분제한)를 근거로 방사성폐기물을 임의로 처분할 수 없도록 규정하였다. 원자력법 제85조 (방사성폐기물을 발생하게 하는 자의 비용 부담)를 통하여 방사성폐기물을 발생하게 하는 자는 방사성폐기물을 안전하게 관리하도록 조치하였다. 국내 자체처분법 제정 이래 95년 3건, 96년 1건이 처리된 것 처럼 활발하지 못한 이유는 해당 방사성폐기물이 처분제한치 미만임을 입증하기 어렵음 뿐만 아니라 처분 절차가 복잡하기 때문이다. 처분제한치 미만의 방사성폐기물 자체처분 등에 관한 규정은 1994년 11월 최초 규정되었고, 이후 7차례의 개정이 되었다.

2008년 전면개정에 허용기준은 핵종별 농도와 개인 및 집단의 피폭선량을 동시에 만족하는 조건을 그대로 유지하였고, 자체처분사업자 입장에서는 허용기준이 직관적 단위인 핵종별 허용농도와 유도 단위인 피폭선량을 동시에 만족해야 하는 어려운 점은 개선되지 않았다. 2014년 "방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정"으로 자체처분 폐기물 관점에서 규정이 새롭게 개정되었는데 핵종별 허용농도 만족 또는 선량 제한 만족이라는 두 조건 중 하나만 만족해도 자체처분이 가능하도록 개정되었다. 이 개정은 자체처분사업자 입장에서 자체처분 활성화에 큰 도움이 되는 방향으로 개선된것이다. 현 규정은 2017년 일부 개정에서 자체처분 방사성폐기물의 총량이 연간 1톤(또는 이에 상당하는 부피)을 초과하지 않도록 규정하고 있으며 의료및 산업체에서 발생하는 방사성동위원소 등을 다루는데 초점이 맞추어져 있어 원자력발전소의 방사성폐기물 처리에는 역부족하다[21].

## 1. 중저준위 방사성폐기물 소각 기준

제7조 배기가스 처리설비의 기준을 보면 아래와 같다.

- ① 배기가스 처리설비의 기준은 다음 각 호와 같다.
  1. 소각로에서 발생하는 배기가스를 적절히 처리하여 대기로 방출되는 기체의 방사능 농도는 제한구역 경계 밖에서 1주당 평균할 때 원자력안전위원회고시 「방사선방호등에 관한 기준」을 만족하여야 한다.
  2. 소각로에서 발생하는 배기가스를 적절히 처리하여 대기로 방출되는 기체로 인한 시설주변의 주민피폭선량은 1년간에 걸쳐 평균할 때 원자력안전위원회고시 「방사선방호등에 관한 기준」을 만족하여야 한다.
  3. 소각로에서 발생하는 배기가스를 적절히 처리하여 대기로 방출되는 기체는 「대기환경보전법 시행규칙」 제15조, 「악취방지법 시행규칙」 제8조 제1항 및 「잔류성오염물질 관리법 시행규칙」 제7조에 따른 배출허용기준을 만족하여야 한다.
  4. 배기가스 처리설비는 기밀구조를 갖추으로써 배기팬 전단까지 부압을 유지하여야 한다. ② 제1항제3호에도 불구하고 소각시설의 처리능력이 제1항제3호에 따른 배출허용기준을 그대로 적용하기 어려운 경우에는 제1항

제3호에 따른 배출허용기준 중 해당 시설의 처리능력에 근접한 처리능력의 배출허용기준을 적용한다.

제10조 공정 및 배기가스 감시설비의 기준은 아래와 같다.

공정 및 배기가스 감시설비의 기술기준은 다음 각 호와 같다.

1. 소각공정 안전에 영향을 미치는 주요 운전인자는 적절한 방법으로 감시, 경보기록 및 이에 따른 안전조치 방법이 확립되어야 한다.
2. 연돌을 통하여 대기로 방출되는 배기가스 중 유해가스나 방사성물질은 연속적으로 감시되어야 하며 경보 및 기록기능을 갖추어야 한다.

제13조(소각처리기준) 방사성폐기물을 소각로에서 소각 처리할 경우에는 다음 각 호의 기술기준을 만족하여야 한다.

1. 소각방법은 과잉공기 소각, 제어공기 소각, 열분해, 고온용융 소각, 유동층 소각 등의 방법으로 한다.
2. 발생한 소각재의 강열감량 기준치는 고체폐기물의 경우 5퍼센트 이하, 폐액의 경우에는 10퍼센트 이하로 한다.[22]

## 2. 자체처분기준

방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정

제10조 방사선 및 방사능의 측정·평가 기준은 아래와 같다.

- ③ 방사성핵종별 방사능 농도를 측정하기 전에 표 21에 규정된 방사성핵종별로 자체처분 허용농도 보다 충분히 낮은 수준으로 검출목표치를 수립하여야 하며, 실제 최소검출가능농도는 검출목표치 이하여야 한다[23].

표 21. 방사성핵종별 자체처분 허용농도(제2조 제2호 및 제3조 제1항 관련)

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, 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

주1) 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)

주2) 별표 1에 수록되지 않은 알파선을 방출하지 아니하는 방사성핵종의 경우 자체처분 허용농도로서 0.1Bq/g을 적용할 수 있다.

주3) 다음 목록에 제시된 모핵종과 그 모핵종의 붕괴로 생성되는 자핵종이 함께 존재하는 경우, 모핵종에 대해서만 허용농도를 적용한다.

모 핵 종	자 핵 종
Fe-52	Mn-52m
Zn-69m	Zn-69
Sr-90	Y-90
Sr-91	Y-91m
Zr-95	Nb-95
Zr-97	Nb-97m, Nb-97
Nb-97	Nb-97m
Mo-99	Tc-99m
Mo-101	Tc-101
Ru-103	Rh-103m
Ru-105	Rh-105m
Ru-106	Rh-106
Pd-103	Rh-103m
Pd-109	Ag-109m
Ag-110m	Ag-110
Cd-109	Ag-109m
Cd-115	In-115m

모 핵 종	자 핵 종
Cd-115m	In-115m
In-114m	In-114
Sn-113	In-113m
Sb-125	Te-125m
Te-127m	Te-127
Te-129m	Te-129
Te-131m	Te-131
Te132	I-132
Cs-137	Ba-137m
Ce-144	Pr-144, Pr-144m
U-232	Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208
U-240	Np-240m, Np-240
Np237	Pa-233
Pu-244	U-240, Np-240m, Np-240
Am-242m	Np-238
Am-243	Np-239
Cm-247	Pu-243
Es-254	Bk-250
Es-254m	Fm-254

### 3. 배출관리 기준

방사선방호 등에 관한 기준은 아래와 같다.

#### 제6조 배출관리기준

- 방사성물질의 종류는 알 수 없으나 혼합물내에 존재하지 않는 방사성핵종이 알려진 경우에는 혼합물내에 존재할 수 있는 방사성핵종의 배출관리기준 중 가장 낮은 값 또는 별표 4의 제1란의 핵종별 각 경우에 대한 제4란과 제6란의 농도[24].

아래 표 22는 종류 미상인 방사성물질의 연간섭취한도, 유도공기중농도 및

배출관리 기준을 보여주고 있다.

표 22. 종류 미상인 방사성물질의 연간섭취한도, 유도공기중농도 및 배출관리 기준

1 란	2 란	3 란	4 란	5 란	6 란
핵 종	흡 입			섭 취	
	연간 섭취 한도	유도 공기중 농도	배기중의 배출관리 기준	연간 섭취 한도	배수중의 배출관리 기준
	Bq	Bq/m <sup>3</sup>	Bq/m <sup>3</sup>	Bq	Bq/m <sup>3</sup>
Ac-227-F, Cm-250-M이 혼합물내에 없는 경우	5E+01	2E-02	-	-	-
상기의 경우에 추가하여, Ac-227-M-S, Th-229-M-S, Pa-231-M, Cm-248-M, Bk-247-M, Cf-249-M, Cf-251-M이 혼합물내에 없는 경우	5E+02	2E-01	-	-	-
상기의 경우에 추가하여, Sm-146-M, Sm-147-M, Gd-148-F-M, Gd-152-F-M, Ra-223-M, Ra-225-M, Ac-225-M-S, Th-227-M-S, Th-228-M-S, Th-230-M-S, Th-232-M-S, Pa-231-S, U-230-M-S, U-232-F-M-S, U-233-S, U-234-S, U-235-S, U-236-S, U-238-S, Np-237-M, Pu-236-M-S, Pu-238-M-S, Pu-239-M-S, Pu-240-M-S, Pu-242-M-S, Pu-244-M-S, Am-241-M, Am-242m-M, Am-243-M, Cm-243-M, Cm-244-M, Cm-245-M, Cm-246-M, Cm-247-M, Cf-248-M, Cf-250-M, Cf-252-M, Cf-254-M, Es-254-M, Fm-257-M이 혼합물내에 없 는 경우	5E+03	2E+00	-	-	-
상기의 경우에 추가하여, In-115-F, Pb-210-F, Bi-210m-M, Po-210-F-M, Ra-224-M, Ra-226-M, Ra-228-M, Ac-225-F, Ac-226-M-S, Pa-230-M-S, U-233-F-M, U-234-F-M, U-235-F-M, U-238-F-M, Np-236-M, Pu-241-M, Cm-240-M, Cm-242-M, Cf-253-M, Es-253-M, Md-258-M이 혼합물내에 없는 경우	5E+04	2E+01	-	-	-
상기의 경우에 추가하여, Si-32-S, Ti-44-F-S, Fe-60-F-M, Sr-90-S, Cd-113-F-M, Cd-113m-F, In-115-M, I-129-F-원소형 -메틸화합물, La-138-F, Mo-166m-M, Lu-176-M, Hf-178m-F-M, Hf-182-F-M, Bi-210-M, Bi-210m-F, At-211-M, Ac-224-M-S, Ac-226-F, Th-226-M-S, Pa-227-M-S, Pa-228-M-S, U-230-F, Pu-241-S, Bk-249-M, Cf-246-M, Es-254m-M, Fm-252-M, Fm-253-M, Fm-254-M, Fm-255-M이 혼합물내에 없는 경우	5E+05	2E+02	-	-	-



1 란	2 란	3 란	4 란	5 란	6 란
핵 종	흡 입			섭 취	
	연간 섭취 한도	유도 공기중 농도	배기중의 배출관리 기준	연간 섭취 한도	배수중의 배출관리 기준
	Bq	Bq/m <sup>3</sup>	Bq/m <sup>3</sup>	Bq	Bq/m <sup>3</sup>
Ac-227-F-M, Cm-250-M이 없는 경우	-	-	5E-04	-	-
상기의 경우에 추가하여, Gd-148-F, Gd-152-F, Ac-227-S, Th-228-M-S, Th-229-M-S, Th-230-M, Th-232-M-S, Pa-231-M-S, U-232-S, Np-237-M, Pu-236-M, Pu-238-M, Pu-239-M, Pu-240-M, Pu-242-M, Pu-244-M, Am-241-M, Am-242m-M, Am-243-M, Cm-243-M, Cm-244-M, Cm-245-M, Cm-246-M, Cm-247-M, Cm-248-M, Bk-247-M, Cf-249-M, Cf-250-M, Cf-251-M, Cf-252-M, Cf-254-M이 없는 경우	-	-	5E-03	-	-
상기의 경우에 추가하여, Sm-146-M, Sm-147-M, Gd-148-M, Gd-152-M, Bi-210m-M, Po-210-M, Ra-223-M, Ra-224-M, Ra-225-M, Ra-226-M, Ra-228-M, Ac-225-M-S, Th-227-M-S, Th-230-S, U-230-M-S, U-232-F-M, U-233-M-S, U-234-M-S, U-235-M-S, U-236-M-S, U-238-M-S, Np-236-M, Pu-236-S, Pu-238-S, Pu-239-S, Pu-240-S, Pu-242-S, Pu-244-S, Cm-240-M, Cm-242-M, Cf-248-M, Es-253-M, Es-254-M, Fm-257-M, Md-258-M이 없는 경우	-	-	5E-02	-	-
상기의 경우에 추가하여, Fe-60, Sr-90, Cd-113, Cd-113m, In-115, I-126, I-129, I-131, Cs-134, Hg-194, Pb-210이 없는 경우	-	-	-	-	5E+04

## 제2절 국외 기준

전서계적으로 IAEA가 정한 기준을 따르고 있으며, 2009년 발간된 IAEA Safety Standards Series No. GSG-1에 따르면 반감기와 방사능 농도에 따라 Exempt Waste (EW) 등 총 6 단계로 분류했고 각 분류 별 기준은 아래 표 23과 같이 규제 해제를 정하였다[3]. 아래 표 23과 같이 IAEA는 방사성폐기물을 핵종의 반감기와 방사능 준위에 따라 등급을 분류했다.

표 23. 방사성폐기물 각 분류 별 기준

분 류	특 성	처분방안
Exempt Waste (EW)	규제관리 기준치에 만족하는 폐기물 자체처분, 규제면제, 규제해제 준위	제한없음
Very Short Lived Waste (VSLW)	연구 및 의료 목적으로 사용된 극단반감기 방사성핵종을 대상으로 수년정도 저장하면 무제한적 처분이 가능함(반감기 100일 이하 단반감기 핵종)	-
Very Low Level Waste (VLLW)	EW 기준에 부합할 필요는 없지만, 고준위 폐기물 및 격리 할 필요가 없는폐기물	천층처분
Low Level Waste (LLW)	자체처분 기준 초과 폐기물, 장반감기 핵종의 양 제한.LLW는 범위가 매우 넓어, 높은 방사능 준위 단반감기 핵종, 장반감기 핵종 그러나 방사능준위가 상대적으로 저준위 임	천층처분 심지층처분
Intermediate Level Waste (ILW)	부분적으로 장반감기 핵종 포함, 방사능 준위가 상대적으로 높아 천층처분을 통한 격리가 요구된다. 저장 및 처분 기간동안 열 제거가 필요하지 않다. ILW는 장반감기핵종을 포함한다.	천층처분 심지층처분
High Level Waste (HLW)	방사능 준위가 높고, 핵종의 붕괴 과정에서 열발생하며, 많은 양의 장반감기 핵종을 포함한다. 일반적으로 수백미터 이상의안정된 지질층에 처분 -열출력 2-20KW/m <sup>3</sup> , 일반적인 방사능 준위는 10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup> TBq/m <sup>3</sup>	심지층처분

## 1. 미국

### 가. 법령 체계

미국의 법령 체계는 1955년도에 대기환경관련 법률 “대기오염제어법(Air Pollution Control Act)” 을 시작으로 1990년 최종 개정된 “개정 대기청정법(Clean Air Act Amendment of 1990)의 큰틀을 유지하면서 운영되고 있다.

CAAA(Clean Air Act Amendment of 1990) 가 지정하는 대기환경기준물질은 납(Pb), 황산화물(SO<sub>x</sub>), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 일산화탄소(CO), 먼지(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>), 오존(O<sub>3</sub>) 등 6종을 지정했으며 유해대기오염물질(HAPs)은 189종을 지정했으며 9개 항목에 대해서 배출허용기준을 정했다.

CAAA의 구체적인 기준 등은 연방법령(CFR, Code of Federal Regulations)에서 정하며 환경분야는 Title 40 CFR 에 해당한다[25].

### 나. 배출규제 기준

배출 허가 시에 오염물질의 종류, 배출원, 지역의 대기질 상태에 따라 배출 규제 기술수준에 차등 적용하고 있다. 아래 표 24는 미국 배출규제 기준 비교를 보여준다.

표 24. 미국 배출규제 기준 비교

구 분	배출규제 기준 수준	기준설정	엄격성
NSPS	미국 전역에 적용되는 최소한 기준 (New Source Performance Standard)	EPA 공표 (40CFR part 60)	-
BACT	최상의 적용 가능한 기준 (Best Available Control Tech)	SIP 설정 (CAA§169)	최소 NSPS 이상 엄격
LAER	실제 달성한 가장 엄격한 기준 (Lowest Achievable Emission Rate)	SIP 설정 (CAA §171)	가장 엄격
MACT	최고수준 SIP이행 상위 12% 평균 (Maximum Available Control Tech)	EPA 공표 (40CFR part 63)	-
RACT	합리적 적용가능 기준 (Reasonable Available Control Tech)	포괄적 개념	가장 완화

BACT(최상의 적용 가능한 기준) 결정에는 에너지 효율, 토지이용 및 경제성 등에 대해 고려를 하지만 LAER(설제 달성한 가장 엄격한 기준) 결정에는 에너지 효율, 경제성 및 기타 요인 등을 고려하지 않는다. 아래 표 25는 미국 California SC AQMD BACT 기준이다[25].

표 25. 미국 California SCAQMD BACT 기준(사례)

구 분	PART	SOx	NOx
BACT Technologically Feasible	-	-	1. 9ppm, Dry Corrected to 3%O <sub>2</sub> 2. >9ppm but <30ppm Dry, Corrected to 3% O <sub>2</sub>
BACT Achived in Practice or Contained in EPA Approved SIP 2	Natural gas or Treated Refinery gas	Natural Gas or Treated Refinery Gas with < 10ppm Sulfur Bearing Compounds as Hydrogen Sulfide	30ppm, Dry, Corrected to 3%O <sub>2</sub>
BACT For Small Business 3	Natural gas or Treated Refinery gas	Natural Gas or Treated Refinery Gas with < 100ppm Sulfur Bearing Compounds as Hydrogen Sulfide	1. 9ppm, Dry Corrected to 3% O <sub>2</sub> 2. >9ppm but <30ppm Dry, Corrected to 3% O <sub>2</sub> 3. 30ppm Dry, Corrected to 3% O <sub>2</sub> 4. 40ppm Dry, Corrected to 3% O <sub>2</sub>
Alternae Basic Equipment or Process 1	-	-	-
BACT-SCAQMD Board's Clean Fuel Policy 2	Nat. Gas or other Equipment Clean Fuels as Standby Fuel or Equivalent Control Technology	Nat. Gas or other Equipment Clean Fuels as Standby Fuel or Equivalent Control Technology	Nat. Gas or other Equipment Clean Fuels as Standby Fuel or Equivalent Control Technology

- \* 1. Requires Economic Analysis
- 2. No Economic Analysis
- 3. Control technology are in descending order of efficiency. The most control technology must be considered first when conducting an economic analysis

## 다. 미국 규제해제

US NRC 는 1999 년 NUREG-1640 (Radiological Assessments for Clearance of Materials from Nuclear Facilities) 의 발간을 통해 규제해제 시 방사선 영향이 10  $\mu\text{Sv}/\text{y}$  에 해당하는 방사능농도를 제시했다. 원자로에서 발생된 체적오염 고체폐기물은 Reg. Guide 1.86 에 제시된 수치보다 더욱 보수적인 검출하한치 조건에서 수행된 방사능 계측 결과에 따라 자연방사능 준위를 초과하는 폐기물은 규제해제가 허용되지 않는다[3].

## 2. EU(유럽연합)

### 가. 법령 체계

유럽은 유럽의회를 중심으로 관리가 되고 있다. 유럽의회(EC; The European Parliament and of the Council)에서 규제 가이드라인을 설정하며 관련 국가에 적용하도록 하고 있으며 대기오염 규제는 아래 표와 같이 국가별 오염물질 상한치 규정, 오염물질 통합오염 저감 규정, 고정오염원 배출저감 규제로 나누고 있다. 아래 표 26은 EC 대기오염 관련 지침 구분을 보여주고 있다.

표 26. EC 대기오염 관련 지침 구분

구 분		지 침(Directive)
국가별 배출 한도(Ceiling)		Directive 2001/81/EC, 2002/3/EC
IPPC 통합오염 저감		Directive 96/61/EC → 2008/1/EC
고정오염원 배출 저감	대용량 연소시설(발전)	Directive 2001/80/EC
	폐기물 소각시설	Directive 2000/76/EC
	VOCs(Stage I)	Directive 94/63/EC, 99/13/EC
	액체연료 황산화물	Directive 99/32/EC

EU는 대기오염물질은 물론 다른 매체 오염 등도 통합 저감하는 IPPC(Integrated Pollution Prevention & Control)를 기본 개념으로 하고 있다.

### 나. 배출 규제

배출기준, 대기질 기준 및 관리를 목적으로 대기환경 정책을 펼치고 있으며 ‘Clean Air For Europe(Café)’ 에 명시하고 있다. 여러 나라와 인접하고 있으므로 오염물질이 월경하는 것을 규제하기 위해 산성화, 지표면 오존(Ground-Level Ozone), 부영양화 등 4가지 오염물질인 VOCs, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, 암모니아에 대해 아래 표 27 NECs for SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, VOC and NH<sub>3</sub>, to be attained by 2010 과 같이 국가별 배출 상한(National emissions ceilings)을 설정했다[25].

표 27. NECs for SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, VOC and NH<sub>3</sub>, to be attained by 2010

Country	SO <sub>2</sub> Kilotonnes	NO <sub>x</sub> Kilotonnes	VOC Kilotonnes	NH <sub>3</sub> Kilotonnes
Austria	39	103	159	66
Belgium	99	176	139	74
Denmark	55	127	85	69
Finland	110	170	130	31
France	375	810	1050	780
Germany	520	1051	995	550
Greece	523	344	261	73
Ireland	42	65	55	116
Italy	475	990	1159	419
Luxembourg	4	11	9	7
Netherlands	50	260	185	128
Portugal	160	250	180	90
Spain	746	847	662	353
Sweden	67	148	241	57
UK	585	1167	1200	297
EC 15	3850	6519	6510	3110

\* DIRECTIVE 2001/81/EC Annex1

### 다. 배출규제 기준

배출규제 기준의 기본 원칙으로는 대기오염 저감을 위해 예방책을 수립하며 BAT(Best Available Technology)를 적용하고 있다.

IPPC(Integrated Pollution Prevention Control) 지침에서 시설별 배출허용 기준의 주요 항목은 회원국별 배출허용 기준을 정한다. 아래 표 28은 영국 및 독일 소각시설 배출허용기준 이다[25].

표 28. EC 제정 소각시설 배출허용기준(사례)

구분	시설	국가	Particulate (mg/m <sup>3</sup> )	CO (mg/m <sup>3</sup> )	NOx (mg/m <sup>3</sup> )	SOx(mg/m <sup>3</sup> 그 리고 황제거울)
기존 시설	10톤/일 이상의 유해폐기물 소각시설	독일	10 (DAV) 30 (HHAV)	50 (DAV) 100 (HHAV) 150	200 (DAV) 400 (HHAV)	50 (DAV) 200 (HHAV)
		영국 (11% O <sub>2</sub> dry)	20 (30분 시료 채취)	100 (30분 시료채취)	350	50 (시간당 채취)
	3톤/시간 이상의 유해폐기물 소각시설	독일	10 (DAV) 30 (HHAV)	50(DAV) 100 (HHAV) 150	200(DAV) 400 (HHAV)	50 (DAV) 200 (HHAV)
		영국 (11% O <sub>2</sub> dry)	30	100	400	150
신규 또는 병형 시설	10톤/일 이상의 유해폐기물 소각시설	독일	10 (DAV) 30 (HHAV)	50(DAV) 100 (HHAV) 150	200 (DAV) 400 (HHAV)	50 (DAV) 200 (HHAV)
		독일	10 (DAV) 30 (HHAV)	50(DAV) 100 (HHAV) 150	200(DAV) 400(HHAV)	50 (DAV) 200 (HHAV)
	영국	10	100	200	50	

\* DAV(Daily Average), HHAV(Half-hour Average)



### 3. 독일

#### 가. 법령 체계

독일 대기 환경 법령은 EU의 기본지침을 반영하고 기본 법률, 법규명령(시행령) 및 행정규칙의 구조를 취하고 있으며 아래 표 29와 같이 독일 대기환경 관련 법령 기본구조를 제정했다.

표 29. 독일 대기환경 관련 법령 기본구조

구 분	법 령	주 용 내 용
EU지침	96/61/EC(08/1/EC)	회원국 통합오염 저감 지침(Directive)
법 른	연방이미시온 방지법(BImSchG)	대기오염 등 환경위해(Immission) 방지 기본법률 * Immissionsschutzrechtsverordnungen
법규명령	동법 시행령 (BImSchV)	EC지침 국내법 시행 및 각종 법규명령
행정규칙	행정규칙(Ta Luft)	기술지시, 허가요건 등 지침 (허가기관 부관 의무화)

#### 나. 배출규제 기준

독일은 EU의 BAT를 토대로 배출 규제를 하며 배출시설의 배출 한계치는 BImSchV (Bundesimmissionsschutzgesetz; Gesetz zum Schutz vor schaedlichen Umwelt- einwirkungen durch Luftverunreinigungen, Gerausche, Erschuetterungen und aehnliche Vorgaenge) 및 TA-Luft(: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) 에서 규정하며 BAT를 총체적 환경 영향을 고려해 배출 한계치를 설정한다. 그리고 허가 과정에서 경제성을 근거로 한 BImSchV 및 TA-Luft의 배출한계치를 초과할 수 없다[25].

아래 표 30은 BImSchV 및 TA-Luft에 정해져 있는 배출한계치의 사례이다.

표 30. TA-Luft 배출한계치(사례)

사용연료 및 정격용량	50MW이하의탄, 코크스, 연탄, 이탄, 나무 표면처리된 자연목 잔재물 연소시설	50MW이하의11차 정제된 난방유, 원유, 연소 시설	100MW이하의 가스연소 시설
표준 산소량	- 석탄: 7% - 기타:11%	3%	3%
먼지	- 5MW이상 : 50mg/m <sup>3</sup> - 5MW미만 : 150mg/m <sup>3</sup>	- 5MW이상: 80mg/m <sup>3</sup> (단, 황분 1%이상인 난방유 사용시는 50 mg/m <sup>3</sup> ) - DIN 51603의 1부에 의한연료유 사용시: 매연도 1	- 고로가스: 10mg/m <sup>3</sup> - 제강가스: 50mg/m <sup>3</sup> - 기타가스: 5mg/m <sup>3</sup>
CO	250mg/m <sup>3</sup> (단 2.5MW미만인 개별연소시설의 경우는정격 부하운영시만 적용	170mg/m <sup>3</sup>	100mg/m <sup>3</sup>
유기물질	총탄소로서 50 mg/m <sup>3</sup>	무연급	무연급
질소화물 (NO <sup>2</sup> 로서)	- 20MW이상인 정치식 유동상연소시설 또는 와류층 순환식 유동상연소시설: 300mg/m <sup>3</sup> - 기타시설: 400 mg/m <sup>3</sup> 또는 500mg/m <sup>3</sup>	- DIN 51603의 1부에 의한 연료유 사용시 250mg/m <sup>3</sup> - 기타 연료유 사용시: 300mg/m <sup>3</sup> 또는 450mg/m <sup>3</sup>	- 200 mg/m <sup>3</sup> (질소산화물 함유 공정가스 사용시는 정상의 기술에 상응한 조치로 배출 억제)
황산화물 (SO <sup>2</sup> 로서)	- 유동상연소시설: 400(단, 비용이과다한 경우는 황배출율 25%) -기타시설에서 석탄 사용시 . 10MW이하: 2,000mg/m <sup>3</sup> . 10MW이상: 1,000mg/m <sup>3</sup>	- 10MW이상시:850mg/m <sup>3</sup> - 10MW미만시:1,700mg/m <sup>3</sup> - 5MW이하시:DIN51603의 1부에 따른 황함유 난방유만 사용 (단, 탈황시설은 예외)	- 코크스가스 또는 정유가스:100mg/m <sup>3</sup> - 액체가스:5mg/m <sup>3</sup> - 제철소와 코우크스 공장이 연계 사용하는 연료가스:도표(생략) 상 지시값 - 기타가스: 35mg/m <sup>3</sup>
할로겐화합물	3.1.6번의 증기상.가스상무기 물질기준은 적용 안됨	무연급	무연급
TA Luft	3.3.1.2.1	3.3.1.2.2	3.3.1.2.3

주) 국립환경과학원(대기공학과), 연방이미시온(Immissionsschutzrechtsverordnungen)방지법 조사 자료

## 다. 규제해제

Atomic Energy Act와 Radiation Protection Ordinance(RPO)에 규제해제 준위 등을 명시했고, RPO는 유럽연합의 Basic Safety Standards를 반영하였다, 입법자 문기구인 SSK가 10  $\mu\text{Sv}/\text{y}$ 의 개인선량 및 1man-Sv/y 의 집단선량 기준에 근거하여 권고한 핵종 별 규제해제농도기준을 적용하고 있다. 규제해제 준위는 오염이나 방사화에 노출되는 모든 물질에 적용될 수 있다. 독일은 특정 물질을 조건부로 규제에서 제외될 수 있으며, 핵종의 일반적인 규제해제 준위가 0.1 Bq/g 이라면 매립 또는 소각의 규제해제 준위는 4 Bq/g, 재활용(금속의 용융)은 0.6 Bq/g 등 시나리오별로 각각다른 기준치를 적용한다[3].

## 4. 일본

### 가. 법령 체계

일본의 배출 규제의 기본 구조는 농도규제, 총량규제, 차등 농도규제 및 양적 규제를 같이 병행하며 매연 중에서 황산화물, 질소산화물은 총량규제를 적용한다. 매연 및 유해 물질의 경우 농도규제를, 황산화물은 착지 지점에서의 농도규제를 동시 적용하며 매연 및 질소산화물은 시설 규모에 따라 차등 농도규제를 병행한다. 표 31은 각 오염물질별 배출 규제기준 적용방법을 요약한 것이다.

표 31. 일본 오염물질 종류별 배출규제 기준 적용방법(요약)

오염물질 종류		총량규제	농도규제	착지지점 농도규제(K치)	부지경계선 농도기준	시설설치 관리기준
매연	황산화물	○	-	○	-	-
	질소산화물 (유해물질)	○	-	-	-	-
	매진(검댕)	-	○	-	-	-
	유해물질 (Cd, Pb 등 5종)	-	○	-	-	-
분진 및 특정분진	일반분진	-	-	-	-	○
	특정분진 (석면)	-	-	-	○	○
특정물질	암모니아 등 (28종)	-	-	-	-	-
유해대기 오염물질	지정물질 (벤젠 등 4종)	-	-	-	-	-
특정악취물질(22종)		-	-	-	○	-

일본의 배출기준은 지역별, 오염물질별로 구별하여 적용하며 ①일반 배출허용기준(국가가 정한 기준), ②특별배출허용기준(대기오염 심한 지역), ③엄격한 배출허용기준(지자체의 조례), ④총량규제기준(배출허용기준의 관리 불가시 적용), ⑤특별 총량 규제 기준(총량규제 기준 중 신규시설) 5종으로 구분했다[25].

아래 표 32는 일본 배출기준 종류별 차등규제를 보여주고 있다.

표 32. 일본 배출기준 종류별 차등규제(요약)

구 분	주 요 내 용
일반배출허용기준	전국적 일괄적용 배출허용기준 (매연)
특별배출허용기준	오염 심각지역 신규시설 적용(매연 중 SOx, 매진)
추가배출허용기준	일반, 특별 불충분지역 지자체 조례 지정(매진, 유해물질)
총량규제기준	대규모 오염심화지역 지자체 조례 지정(SOx, NOx)
특별 총량규제기준	총량규제지역 신규시설 대상 특별 기준

### 제3절 배출규제 기준의 국내외 비교

국내 배출 규제기준은 농도 중심의 배출허용기준을 적용하지만, 선진국들은 배출 허용농도 기준 외에 총량규제, BAT, 주변 환경영향 심사 등 다양한 배출 규제 기준을 동시에 병행하는 것이 특징이다. 미국의 경우 국가적인 규제 기준, 환경 기준(NAAQS)의 달성 여부에 따라 주 정부별 신규·기존 시설별 기준, 유해 물질 기준 등 지역 환경기준 달성을 위해 복잡하고 다양한 배출 규제기준을 토대로 관리하고 있다.

유럽연합은 국가들의 배출 규제를 위해 유럽의회(EC)의 지침(Directives)을 전달하여 국가별 배출 규제 기준에 반영토록 하며 유럽 전체의 배출총량 제어를 위해 국가별 배출한도(Ceiling)를 할당했다.

독일은 EU가 권고해 준 BAT 배출 규제 기준을 따르고 있으며 주변 환경영향을 고려해 배출한계치 보다 낮은 수준의 기준을 적용한다. 아래 표 33은 선진국 배출 규제 기준의 주요 내용에 대한 요약이다[25].

표 33. 선진국 배출규제 기준 비교(요약)

구분	배출규제 기준		주요 내용
미국	배출규제 및 시설기준	NSPS	신규시설 미국 전역 적용 최소기준(EPA)
		BACT	NAAQS 달성지역 신규시설 최상기준(SIP)
		LAER	NAAQS 미달성지역 엄격 기준(SIP)
		MACT	유해물질 주요오염원 상위 12%기준(EPA)
		GACT	유해물질 면오염원 적용 합리적 기술기준
		RACT	기존시설 미국 전역 적용 합리적 기술기준
	총량규제	Acid Rain	발전시설 황산화물 Cap & Trade
		NOx Budget	동북부 대형시설 질소산화물 Cap & Trade
		RECLAIM 등	지역 AQMD 등 사업장 Cap & Trade
EU	배출규제 EC지침	국가 Ceiling	역내 국가별 배출한도 설정 지침
		IPPC	배출원 통합오염 저감, BAT 적용 및 Reference Document 제시
	고정오염원 지침	대형시설(4) 배출기준	①대형연소시설 ②폐기물 소각시설 ③VOCs ④연료 황함량 지침
독일	EC지침 이행	배출한계치	BAT 근거 허가신청시 최소 배출기준 (BlmSchV, Ta-Luft에 설정)
	허가심사	환경영향심사	대기 모델링 후 지역환경영향 심사, 이행 가능시 배출허용기준으로 지정
일본	배출허용 기준	일반 기준	전국 일괄적용 배출허용기준(매연)
		특별 기준	오염 심각지역 신규시설 적용(SOx, 매진)
		추가 기준	일반, 특별 불충분 지역 지자체(매진, 유해)
	배출영향 기준	K치 적용	황산화물 착지지점 농도에 가산(일반, 특별)
	총량규제	일반, 특별	대규모 오염심화지역 지자체(SOx, NOx)
	자발적 저감수단	오염방지협정	지자체 주도 산업계 오염저감 협정 체결
자주행동계획		경제단체 중심 자발적 오염저감 공표	

## 제5장 방사성 휘발성 물질 관리 기술

방사성폐기물의 종류는 다양하지만 기체 폐기물 중 대부분의 핵종은 반감기가 짧거나 농도가 낮다. 방사성 기체 폐기물처리 관점의 중요한 방사성 핵종은 불활성기체, 방사성요오드 및 방사성 부유입자 등이 있다. 발전소의 경우 불활성기체가 총 방사능량의 90% 이상을 차지하며 주요 핵종으로는 Xe 및 Kr의 동위원소들이다. 방사성요오드의 경우 중요한 방사성동위원소는 I-131이며, 그 외 기체 폐기물 중 방사성 핵종에 오염된 입자는 약 99.999%가 3 $\mu$ m(직경) 이하의 미세입자들이다. 이런 기체 폐기물들은 기체 폐기물처리계통의 서지탱크(Surge tank) 및 각 단계의 필터를 거치고 압축기에서 압축이된다. 그 후 감쇠 탱크에서 저장 또는 활성탄 흡착기에서 30~60 일간 단 반감기 핵종을 자연 붕괴시키며 HEPA 필터를 거쳐 방출을 한다. 방출 시 방사능 농도는 연속 모니터링 설비를 이용해 감시 및 관리 하고 있으며 기체 폐기물처리계통 내에는 폭발 위험을 방지하기 위해 산소 농도를 관리하고 있다[26].

### 제1절 해체원전 방사성폐기물 처리(플라즈마토치 시스템) 시 휘발성 물질 관리

고리 1호기를 시작으로 원자력발전소는 해체계획에 따라 설계수명이 다한 발전소는 해체가 진행된다. 기존의 방사성폐기물 처리 한계를 벗어나 플라즈마토치 용융 기술의 장점은 고감용비, 광범위한 폐기물처리, 방사능 피폭 최소, 휘발성 핵종 배출 차단 등이 있다. 플라즈마 토치는 콘크리트 및 토양까지 용융할 수 있으며 200L 방사성폐기물 드럼을 용융로에 장입하여 처리한다. 플라즈마 토치 용융 시 휘발성 방사성폐기물은 Cs-137, Sr-90, Ru-106, Pm-147, Ce-144 등이며 용융 후 가스화되며 기체 처리계통에서 처리된다. 비방사성물질로는 먼지, 염화수소(HCl), 질산화물(NO<sub>x</sub>), 황산화물(SO<sub>x</sub>) 등이 있으며 다이옥신과 퓨란 등도 생성된다. 방사성 휘발성 기체와 유해가스를 처리하기 위해 Pipe Cooler - Combustion

- Offgas Cooler - HighTEMP.Filtet - HighTEMP.HEPA Filter - Scrubber - #1. Heter - A/C& HEPA Filter - Extractor Fan - #2. Heater - Stak 등으로 구성되어 있다[27].

## 제2절 C-14 포집 및 유해가스 관리 기술

C-14의 관리를 위하여 사용후 핵연료 파이로 전처리 공정(산화공정)에서 발생하는 C-14이 CO<sup>2</sup> 형태로 방출된다고 가정하여 3가지 CaO 포집제로 실험을 수행했다. 그 결과 CaO 분말, CaO 그레놀, CaO fragment 순서대로 포집 효과가 좋게 나왔다. 또한 포집 적정 온도를 알아내기 위한 실험에서는 500℃에서 포집량이 최고조에 달한 것을 알아냈다. 보통의 CO<sup>2</sup> 흡착공정은 배기체를 흡착층에 여러번 통과시켜 CO<sup>2</sup> 흡착율을 높이고 나머지 CO<sup>2</sup> 는 환경으로 방출하지만 <sup>14</sup>CO<sup>2</sup> 은 규정에 의해 외부로의 방출이 허용되지 않는다. C-14의 방출기준은 10<sup>4</sup> Bq/m<sup>3</sup> 로 Kr-85의 105 Bq/m<sup>3</sup> 보다 더 엄격하다. 그러므로 CO<sup>2</sup> 가 필터를 지나는 동안 빠르게 포집되어야 한다[27].

증기발생기 2차측 화학세정 시 발생하는 방사성액체폐기물에는 일반 폐수처리 기법으로 처리가 불가능한 EDTA(Ethylene Diamine Tetra Acetic acid)가 다량 포함되어 특별한 처리 방법이 요구되며 이를 150kWh 급 아크 플르즈마 기술로 처리했다. 처리결과 유기물은 97% 질소는 52%의 제거 효율을 가졌고, 최종 증발기 시스템을 통해 만족하는 방류수 수질을 얻을 수 있었다. 방사성폐액 처리시 발생하는 배기체의 처리 효율은 아래 표 34와 같으며 처리결과를 분석한 결과 NO<sub>x</sub>, CO 및 HCN 가스를 저감할 수 있는 배기가스 정화장치 및 기술이 추가로 필요하다[28].



표 34. 각 공정별 배가스 정화 효율 평가

구분 항목	기준치 (ppm)	측정 부위별 결과(ppm)				비 고
		반응챔버 내부	열교환기 후단	스크러버 후단	스크러버 효율	
NOx	150(12)	17,520	13,825	1,914	86%	•배출가스량 : 120m <sup>3</sup> /hr •배출가스유속: 0.74m/s
SOx	100(12)	1,217	446	43	90%	
CO	300(12)	25,500	30,500	22,000	28%	
HCN	10	249	286	43	85%	

### 제3절 배기체 처리 및 관리 기술

증기발생기 2차측 화학세정을 플라즈마 기술인 진공 증발 및 농축 장치, 플라즈마 열분해 산화장치 및 배기체 처리장치로 영구 처분 조건에 맞도록 감용 처리했으며, 배기체 NOx, COx, CO 및 방사성 물질 등은 1단계 증발 및 농축 단계, 2단계 플라즈마 열분해 및 산화처리 공정을 통해 발생된 배기체는 3단계 정화처리 단계(배출 환경기준)를 거친 후 발전소 연료건물의 HVAC 계통과 방사능 감시 계통을 통해 실시간 검사를 하면서 환경기준치 이하로 만족 시 배출을 하였다. 아래 표 35 “배기가스 분석 결과” 와 같이 배기가스는 환경기준에 크게 못 미치는 결과를 볼 수 있다[29].

표 35. 배기가스 분석 결과

항목	NOx (ppm)	SOx (ppm)	CO (ppm)	O <sub>2</sub> (%)	방사능 (Bq/m <sup>3</sup> )	비고
환경 기준	150(12)이하	100(12)이하	300(12)이하	-	BKGD	
평 균	52.2(12)	0.0(12)	0.2(12)	7.9	N/D	

## 제4절 이동형 불활성 기체 제거장치

원자력발전소는 10 CFR 50의 설계 개념에 따라 격납건물의 공기를 자체적 배출팬의 HEPA Filter와 Charcoal Filter를 이용해 Particle 및 Iodine 등 방사성 물질을 제거하나 Xe과 Kr등 불활성기체는 제거가 어렵다. 기체 폐기 처리계통 GRS 계통의 Charcoal Delay Bed로 흡착 및 탈착을 통해 자연 붕괴시켜 기체 폐기물을 처리하며 정상 처리량은 평균 2.5 cfm 정도 되지만 비상시의 약 100배(국내·외 통계) 이상의 불활성기체가 생성되면 처리가 어려워진다. 불활성기체는 초저온 상태에서 활성탄에 흡착률이 크게 증가하는 것을 이용해 전처리 필터(수분,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  및 입자를 제거)를 거치고 저온(냉동기 사용)의 활성탄에서 불활성기체를 1차로 흡착한 후 초저온(액체질소) 냉각을 통해 불활성기체를 2차로 흡착한다. 아래 그림 20은 “이동형 불활성기체 제거장치” 개략도에 초저온 조건을 만들기 위해 설치된 액체 질소를 볼 수 있다.

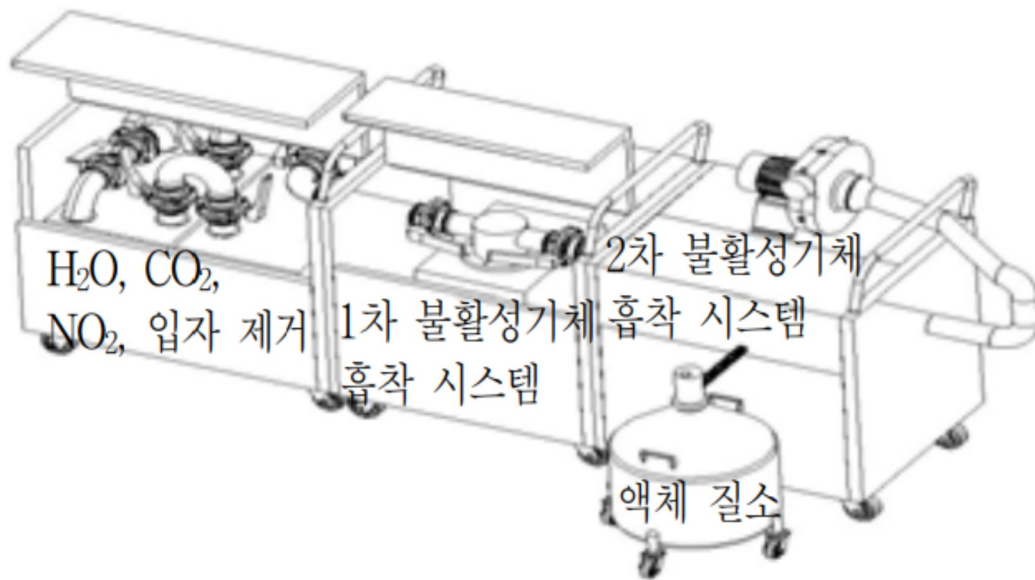


그림 20. 이동형 불활성기체 제거장치

RCS 기체 시료로 성능시험을 수행했으며 시료 분석은 시간차를 두고 3회에 걸쳐 수행한 결과 Kr의 제거효율은 100%, Xe의 제거효율은 약 99.8 %로 나타났다. 아래 표 36은 첫 번째 실험 결과를 보여주고 있다[30].

표 36. The 1st Performance Examination

구 분	전 단 (Bq/cc)	후 단(Bq/cc)		
		0.5 시간	1 시간	1.5 시간
<sup>85</sup> mKr	$1.74 \times 10^0$	N/D	N/D	N/D
<sup>87</sup> Kr	$2.00 \times 10^0$	N/D	N/D	N/D
<sup>88</sup> Kr	$3.50 \times 10^0$	N/D	N/D	N/D
<sup>89</sup> Kr	$4.97 \times 10^{-1}$	N/D	N/D	N/D
<sup>88</sup> Xe	$1.71 \times 10^{-1}$	N/D	N/D	$9.86 \times 10^{-2}$
<sup>133M</sup> Xe	$3.75 \times 10^{-1}$	N/D	N/D	N/D
<sup>135</sup> Xe	$8.57 \times 10^0$	$1.06 \times 10^{-2}$	$3.26 \times 10^{-2}$	$2.98 \times 10^{-2}$
<sup>135m</sup> Xe	$7.03 \times 10^{-1}$	N/D	N/D	N/D
<sup>137</sup> Xe	$1.24 \times 10^0$	N/D	N/D	N/D
<sup>138</sup> Xe	$2.11 \times 10^0$	N/D	N/D	N/D

## 제5절 방사성 휘발성 물질 관리를 위한 Detector 종류

현재 플라즈마를 이용한 증기발생기 2차측(방사성 핵종 Zero 구역) 폐액 처리 시 임시로 설치 한 플라즈마 설비 건물에는 방사성 핵종이 포함된 폐액이 아니므로 별도의 실시간 방사선 관리 설비를 설치할 필요가 없었다. 그리고 보수적으로 발전소 폐기물처리건물의 HVAC(공기 정화 계통) 시스템을 이용해 배기체의 휘발

성 방사성물질 등을 한번더 각종 Filter들을 통해 처리해 왔다. 그러나 앞으로 저준위 방사성폐기물을 처리할 경우 임시 폐기물 처리건물(임시 방사선 관리구역) 과 발전소 폐기물처리 건물을 연결하는 배관에서 누설이 발생할 경우 운전원 및 관계자의 감시가 늦어져 방사능 누출에 대한 대응이 늦어질 수 있다. 이를 방지하기 위한 방법으로 아래와 같은 Detector를 이용하여 실시간 관리하는 것을 추천한다.

방사선 및 방사능 모니터링 방법에는 연속적 및 간헐적 방법이 있으며 현장에서는 두 가지 방법을 병행해서 방사선 및 방사능을 관리해야 한다. 배기체 배관의 적절한곳에 “페로브스카이트를 이용한 실시간 연속 모니터링, GM 튜브를 이용한 실시간 연속 모니터링, 신틸레이터를 이용한 실시간 연속모니터링 등”의 방법 중 하나를 선택 및 설치해 운전원이 방사선을 상시 모니터링 하는 것을 추천한다. 또한 작업자의 안전을 위해 작업장 내부 건물에 이동식 연속공기오염도 감시기를 이용해 GAS, PARTICLE을 실시간 모니터링 할 수 있는 측정장비를 구비하여 안전한 작업공간을 확보하고 휴대용 서베이미터 및 스미어 측정법을 통해 작업장 주변의 기기 및 작업장의 방사선·방사능을 주기적으로 검사·기록 관리하기를 추천한다[30][34][35].

현재 국내 연구진들의 의해 활발히 연구되고 있는 새로운 Detector 재료가 있다. 페로브스카이트(Perovskite:  $\text{CaTiO}_3$ 와 같은 결정 구조를 갖는 물질을 총칭하는 용어)는 상대적으로 높은 태양 전지 전력변환효율(21%)로 현재 각광을 받고 있으며, 빠른 전하이동 및 안정성으로 태양전지, 엑스선 검출기, 감마선 검출기, 가시광선 검출기 등으로 사용될 것 이다[31][32].

플라즈마를 이용한 임시 소각장 내의 배관에 페로브스카이트를 밴드 형식으로 부착하여 배관에 흐르는 방사성 휘발성 물질을 검출하고 연속적으로 모니터링 할 수 있으며 노이즈 등을 제거하고 정확한 측정과 백그라운드를 줄이기 위해 검출기는 납으로 차폐를 해야한다. 현재 검출기로 사용하기에는 검증과 테스트 단계가 남아 있지만 재료를 보강하고 추가적인 연구를 한다면 탄력있는 페로브스카이트의 활용도가 많을 것으로 예상을 한다. 아래 표 37은 페로브스카이트의 특징을 보여주고 있다.

표 37. 페로브스카이트 비교

분 류	내 용
장 점	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 플렉시블한 물질로 배관 등 원하는 부위에 부착 가능</li> <li>○ 방사선을 실시간 연속적으로 모니터링 가능(개발 중)</li> </ul>
특 징	원하는 사이즈로 제작가능
비 용	가격이 저렴함
측정 방사선	감마선
방 법	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 원하는 지점에 “페로브스카이트” Detector 를 배개체 배관에 밴드 형식으로 부착하고, Detector 는 외부 방사선의 영향을 받지 않도록 납차폐를 설치하여 측정</li> <li>○ 계측된 선량값은 제어실에서 관리가 가능하도록 원격모니터링 시스템을 구성하여 실시간 관리</li> <li>○ Detector는 교정기관에서 발급한 인증서 필요</li> </ul>

※ Am으로 검출기 사용 가능성을 테스트 했으나 재료 등의 여러 사유로 현재는 검출기로서 부적합으로 판단했다. 그러나 비화학양론 조성의 페로브스카이트 단결정으로부터 발전 가능성을 확인 하였고, 만약 결정의 품질이 개선되면 실리콘 검출기로 재현 할 수 있을 것으로 사료된다.

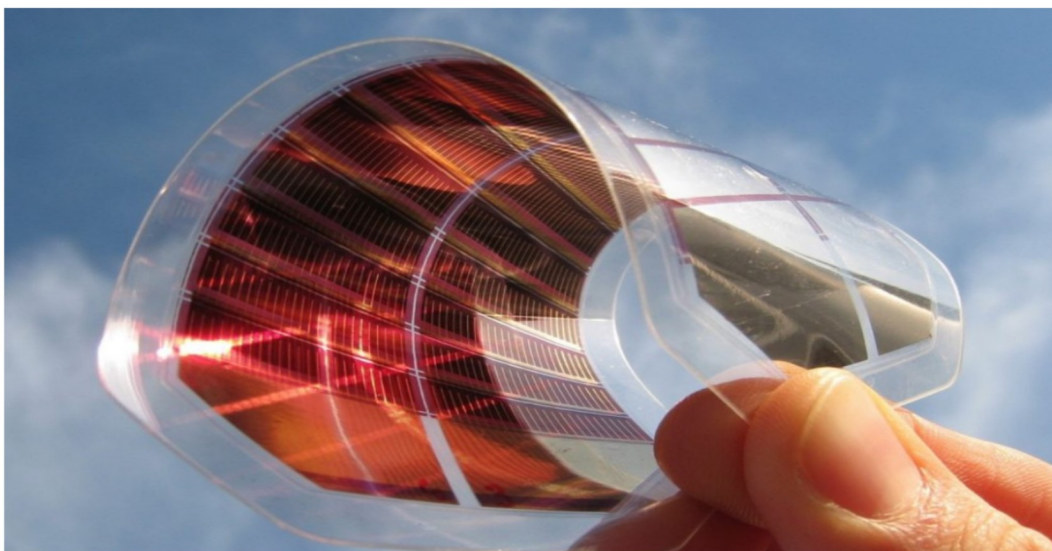


그림 21. 페로브스카이트

방사선 검출기에 가장 보편적으로 사용되고 있는 Detector는 GM Detector이다. GM 관의 한쪽 면은 알파 또는 베타 입자가 투과할 수 있도록 얇은 막으로 되어있고 단창형 GM 계수관은 알파와 베타 방사능 측정이 가능하나 알파입자에 대한 검출 효율은 낮다. 100KeV 이상의 베타입자의 방사능 측정 또는 오염 감시에 사용한다. GM Detector는 다루기가 편하고 비용도 저렴하여 플라즈마를 이용한 임시 소각장 내의 공기중 방사선량과 배관에 흐르는 방사성 휘발성 물질을 검출하고 연속적으로 모니터링할 수 있다. 정확한 측정과 백그라운드를 줄이기 위해서는 검출기를 납으로 적절히 차폐하여 백그라운드를 줄여야 한다. 아래 표 38은 GM 계수관의 비교를 기술했다.

표 38. GM 계수관 비교

분 류	내 용
장 점	저렴한 비용, 간편한 설치, 원하는 위치에 설치 가능
단 점	불감시간이 길다(검출기의 기능이 발휘되지 않는 시간)
특 징	○ 가스증폭 최대( $10^9$ 배), 출력펄스 일정 ○ 충전기체: Q가스(He 99.5% + C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (isobutane) 0.5%)
비 용	가격이 저렴함
측정 방사선	Alpha, Beta, Gamma, X-ray
검 출 기	Pancake type GM-Tube
측정범위	0~4,000cps 또는 동등한 값의 Bq/cm <sup>2</sup>
방 법	○ 원하는 지점에 GM-Tube Detector를 배기체 배관 3곳 정도에 부착하고 Detector는 외부 방사선의 영향을 받지 않도록 납차폐를 설치하여 측정 ○ 계측된 선량값은 제어실에서 관리가 가능하도록 원격모니터링 시스템을 구성하여 실시간 관리 ○ Detector 는 교정기관에서 발급한 인증서 필요



그림 22. 휴대용 GM 계수기를 이용한 선량률측정기

신틸레이터 Detector는 유기 신틸레이터는와 무기 신틸레이터로 구별되며 여러 종류가 있다. 유기 신틸레이터 중 플라스틱 신틸레이터는 가공성이 좋아 원하는 부위에 쉽게 설치가 가능하며 NaI 신틸레이터보다 저렴하여 외부 차량용 오염감시기 등에 광범위하게 사용중이다. 플라즈마를 이용한 임시 소각장 내의 배관에 흐르는 방사성 휘발성 물질을 검출하고 연속적으로 모니터링 할 수 있으며 정확한 측정과 백그라운드를 줄이기 위해 검출기는 납차폐로 감싸야 한다. 아래 표 39는 플라스틱 신틸레이터의 특징을 설명한것이며, 그림 23은 플라스틱신틸레이터를 이용한 차량오염감시시스템 개략도를 보여 준다.

표 39. Plastic Scintillator 신틸레이터 비교

분 류	내 용
장 점	가공성이 좋아 대형 제작 용이 함
특 징	쉬운 교정 시스템
비 용	NaI신틸레이터 보다 저렴
측정 방사선	베타선, 속중성자, 우주선, 감마선
방 법	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 원하는 지점에 신틸레이터 Detector를 배기체 배관 주위에 설치하고 Detector는 외부 방사선의 영향을 받지 않도록 납 차폐를 설치하여 측정</li> <li>○ 계측된 선량값은 제어실에서 관리가 가능하도록 원격모니터링시스템을 구성하여 실시간 관리</li> <li>○ Detector 는 교정기관에서 발급한 인증서 필요</li> </ul>



그림 23. 플라스틱신틸레이터를 이용한 차량오염감시시스템

무기 결정 신틸레이터는 NaI(Tl), CsI(Tl) 등이 있고, 검출 원리는 방사선이 입사되면 발광하는 섬광체(Scintillator: 흡수된 방사선에너지의 일부를 가시광선으로 변환하여 방출하는 성질을 가진 물질) 및 이 발광을 전기신호로 변환시킴과 동시에 증배하는 광전자 증배관을 이용해서 측정하는 방식이다.

\* 섬광체 내에서  $\gamma$ 선은 전자를 전리 또는 여기 시킨다[33].

가격이 고가이지만 계수효율이 좋아 많은 분야에서 사용을 하고 있으며 정확한 측정 및 백그라운드를 줄이기 위해 납차폐가 필요하다. 플라즈마를 이용한 임시



소각장의 배관에 흐르는 방사성 휘발성 물질을 검출하고 연속적으로 모니터링 하기에 가장 적합하다. 계측기 Detector에서 제어실 모니터까지의 시스템 및 제어 프로그램의 국산화가 필요하다. 아래 표 40은 NaI 신틸레이터 특징을 보여주고 있고, 그림 24는 현장에 설치된 계측기를 보여준다.

표 40. NaI 신틸레이터 비교

분 류	내 용
장 점	발광효율과 실효 원자번호가 높고, 형광 감쇠시간이 짧음
단 점	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 조해성이 있어 밀봉하여 사용</li> <li>○ 결정 약함, 기계적·열적 충격에 약함</li> </ul>
특 징	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 가스증폭 최대(<math>10^9</math> 배), 출력펄스 일정</li> <li>○ 충전기체: Q가스(He 99.5% + C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>(isobutane) 0.5%)</li> </ul>
비 용	가격이 고가임
측정 방사선	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 중·고에너지 X선</li> <li>○ 원자번호가 높아 감마선 계수효율 좋음</li> </ul>
검 출 기	NaI(Tl): $\gamma$ 선, CsI(Tl): $\gamma$ 선, LiI(Eu), ZnS(Ag): $\alpha$ 선
측정범위	0.01 $\mu$ Sv/h~50.0 $\mu$ Sv/h
방 법	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 원하는 지점에 NaI(Tl) Detector를 배기체 배관에 부착하고 Detector는 외부 방사선의 영향을 받지 않도록 납차폐를 설치하여 측정</li> <li>○ 계측된 선량값은 제어실에서 관리가 가능하도록 원격모니터링시스템을 구성하여 실시간 관리</li> <li>○ Detector 는 교정기관에서 발급한 인증서 필요</li> </ul>



그림 24. NaI Scintillaor 를 이용한 고정형 환경 방사선 감시시스템

## 제6절 플라즈마를 이용한 방사성폐기물 처리 시 휘발성 물질 관리 기술

플라즈마를 이용한 방사성폐기물 처리 시 휘발성 물질 등의 관리는 체계적 그리고 보수적으로 철저히 관리를 해야하며 아래와 같은 사항들을 고려하여 방사성 휘발성 물질의 배출 관리 및 작업자의 안전에 만전을 기하여야 한다.

하나, 임시 폐기물 처리건물내에 방사선 연속모니터링 감시기 설치

플라즈마 소각처리 임시 건물과 발전소 폐기물처리 건물을 연결하는 배기체의 배관 전후의 방사선 연속 모니터링을 위한 계측기를 설치하여 운전원이 실시간 모니터링 및 데이터를 감시해야 한다. 또한 운전원이 설정해 놓은 기준치에 도달하면 알람이 울리도록 하고, 알람 및 모니터링된 데이터를 이용하여 기체 폐기물 처리가 용이하도록 폐기물 투입량을 조절해야 한다. 계측기의 Detector는 주기적

으로 교정기관으로부터 교정을 받아야 하고 모든 데이터는 기록 및 관리를 해야 한다.

둘. 방사성 휘발성 기체 처리 시 GRS 계통 연계

임시 폐기물처리 건물(임시 방사선관리구역)에서 전처리된 방사성 휘발성 배기체는 폐기물처리 건물의 GRS(기체 폐기물처리 계통)계통에 Charcoal Delay Bed 등을 통해 휘발성 방사성 물질을 50~60일 정도 물리적으로 흡수 및 탈착 방법·방사능의 자연붕괴를 이용하며 휘발성 방사성 배기체를 처리해야 한다[30].

셋. 플라즈마 토치를 이용해 휘발성 유독기체 분해

저준위 방사성폐기물 소각처리 시 발암물질인 다이옥신, 질소산화물(NOx) 및 황산화물(SOx) 등을 제거하기 위해 배관 내부에 플라즈마를 추가로 설치해야 한다. 유독 기체가 1,000℃ 이상 및 2초 이상의 플라즈마 불꽃을 지나면서 분해되고 안정 원소가 되도록 추가 플라즈마 토치를 설치 운영하여 후단으로 지나가는 유독 기체를 사전 분해하고 흡착 포집 방법에 따라 처리해야 한다. 처리가능 이상의 유독가스가 발생될 때에는 알람 기능을 통해 투입량을 조절할 수 있도록 운전원이 상시 모니터링하고 모든 데이터는 기록 및 관리되어야 한다.

넷. 폐기물 처리 냉각수 라인에 방사선 연속감시기 설치

플라즈마를 이용한 폐기물 처리 시 고온의 배기체를 냉각하기 위해 열교환기를 사용한다. 열교환기 Leak 시 방사성 휘발성 기체 및 유독 물질이 환경으로 누출될 수 있으므로 열교환기에 사용되는 냉각수 등은 방사능 연속감시기(NaI 신틸레이터 등)으로 실시간 감시를 해야 한다.

다섯. 배기체 전후단에 압력 게이지 설치

플라즈마 소각처리 임시 건물과 발전소 폐기물처리 건물의 기체 폐기물처리 계통(GRS 계통)에 연결되는 배관은 방사능 누설의 잠재적 가능성을 가지고 있다. 예상치 못한 사고로부터 휘발성 기체의 누설을 방지하기 위해 실시간 압력 게이지 값을 운전원이 Control Room에서 모니터링할 수 있도록 설비 배관 전후단에 압력

게이지를 설치하여야 하고 미리 설정해 놓은 일정 압력이 되면 알람이 울려 방사성 휘발성 물질을 관리할 수 있어야 한다. 또한 모든 데이터는 기록 및 관리되어야 한다.

여섯. 폐기물처리 건물 내 이동식 연속공기오염 감시기 설치

임시 폐기물처리 건물 작업장 내부 설비 중 배기체 누설이 예상되는 지점 또는 상대적 취약 배관 주변에 이동식 연속공기오염도 감시기를 설치해 방사성 GAS, PARTICLE을 실시간 모니터링할 수 있도록 연속공기오염도 감시기를 설치하여 안전한 작업 공간을 확보해야 한다. 계측기는 주기적으로 교정기관으로부터 교정을 받아 사용해야 하며 측정된 모든 데이터는 기록·관리하여 작업장 내 방사선 안전 관리를 해야 한다[34][35].

일곱. 임시 폐기물처리 건물에 지역방사선 감시기 설치

저준위 방사성 폐기물 처리시 예상치 못한 설비 내 누설 및 배관의 누설로 인해 방사성 가스가 외부로 누출될 수 있으므로 임시 폐기물처리 건물(임시 방사선관리구역)에 지역 방사선 감시기(GM Detector)를 설치하고 주기적으로 작업장 및 설비를 방사선 및 방사능 측정기로 점검해야 한다. 계측기는 교정기관으로부터 교정을 받아 사용하며 모든 데이터는 기록·관리해야 한다[34].

여덟. 임시 폐기물처리 건물내 휴대용 방사선 측정기 비치

임시 폐기물처리 건물 작업장 내에 휴대용 서베이미터 및 스미어 측정기를 비치하여 응급 시 즉시 방사선 및 방사능을 측정해야 한다. 또한 주기적으로 작업장 및 기기의 방사선 및 방사능을 점검해야 하고 모든 계측기는 교정기관으로부터 교정을 받아 사용하며 모든 데이터는 기록·관리해야 한다.

아홉. 장반감기 준휘발성기체 처리 방안

고온의 플라즈마를 이용한 저준위 방사성 폐기물 처리 시 휘발성 방사성 물질 중 장반감기 휘발성 물질 또는 준휘발성 기체가 소각처리 과정에서 발생할 수 있으므로 “배기체 저온처리방법” 등을 통해 모든 방사성 휘발성 기체에 대한 처리방안이

선행 연구 및 개발되어야 한다.

#### 열. 2차 폐기물처리 시 휘발성 기체 처리 방안

플라즈마 소각 설비 운전 시 HEPA Filter를 사용하여 준휘발성 방사성입자 등을 처리하므로 다량의 오염된 HEPA Filter들이 발생된다. 오염된 필터를 안정적으로 영구처리할 수 있는 대안 또는 재처리하는 방법을 연구하여 폐기물 저감화에 기여해야 한다. 플라즈마 처리 후 2차 폐기물 처리에 플라즈마 기술을 다시 이용할 경우 휘발성 기체 및 경제성 등에 대한 처리 등 연구가 선행되어야 한다. 또한 고압을 이용한 압축방법을 이용할 경우 휘발성 물질의 비산 등에 대한 연구가 선행되어야 한다.

#### 열하나. 방사성폐기물 예상 휘발성 물질에 따라 분류

방사성 핵종별로 휘발성 입자를 포집하는 방법이 각기 다르므로 모든 방사성 폐기물은 종류별 및 예상 방출 핵종별로 구별하여 선별작업을 해 놓아야 한다. 플라즈마를 이용하여 소각처리를 할 경우 같은 종류의 폐기물 별로 소각작업을 수행하고, 예상 휘발성 물질에 대한 최적의 포집 방법을 선택하여 휘발성 물질의 누출을 막아야 한다.

#### 열둘. 수중플라즈마를 이용한 삼중수소 처리

중수로의 경우 삼중수소 처리는 중요한 사항 중의 하나이다. 수중플라즈마를 이용한 기술을 통해 액체 방사성폐기물내의 삼중수소, 킬레이트 등의 원하지 않는 방사성 핵종 및 원소를 제거하여 작업장 및 환경으로 방출을 방지 해야 한다.

## 제6장 결론 및 제안

방사성폐기물 처리의 문제는 현시대를 살고 있는 사람들의 문제만은 아니며 후세에까지 짐을 안겨주는 사회적 쟁점이다. 현재 각 발전소별로 방사성폐기물 처리 및 저장 공간에 대한 우려가 커지고 있다.

각국의 선진화된 기술과 선진국에서 처리하고 있는 소각기술들을 응용해 방사성폐기물 즉 “극저준위 및 저준위 방사성 폐기물” 소각처리를 시행하여 영구 처분에 예상되는 막대한 비용을 줄이고 후세에 짐을 떠넘기는 일은 없어야겠다.

이를 위한 방법 중의 한 가지인 플라즈마를 이용한 방사성폐기물 처리는 고온을 이용해 방사성 폐기물의 부피는 약 1/250로 무게는 약 1/30 이상(대상 물질에 따라 차이 있음) 줄이는 효과를 볼 수 있어 최적의 방법으로 꼽히고 있다. 이런 선진 기술을 이용하기 위해서는 규제기관에서 정한 각종 배출기준을 만족해야 하며 또한 각 단계별로 방사선 및 방사능의 존재 유무를 확인하고 관리하여 환경으로의 배출을 ZERO로 만드는 것이 중요하다. 그러므로 이를 위한 장치와 방사성 휘발성 물질 관리에 대한 연구는 필수적이다.

플라즈마를 이용한 방사성폐기물 처리장 주변의 시설 및 모든 주변 환경은 연속적·정기적으로 모니터링을 하여 기록·관리하며 각 측정 대상에 따라 방사선 및 방사능 계측기를 구별하여 비치하고 측정을 실시해야 한다. 모니터링 결과에 따라 방사성물질의 누출 또는 유출의 역추적을 통해 원인 분석 및 조치를 취하며 각 이벤트의 정도에 따라 자체 해결 또는 운전 정지 등의 방법으로 절차에 따라 조치를 취해야 한다.

또한 방사성 휘발성 물질 관리 방법 중 연속 모니터링 방식의 측정은 필수적이며, 방사성폐기물 소각 중 실시간으로 각 단계의 기체를 각각의 유로를 따라 연결된 방사능 연속 모니터링 계측기(Detector)를 통해 방사성 휘발성 물질의 유무를 실시간으로 관리되어야 한다. 규제기관 및 관련 법규에 규정된 방사능 허용 기준치를 넘어가면 알람과 함께 배기장치를 Close, 운전 정지 또는 방사성 휘발성 배기 기체를 시스템 내에서 재순환(Filtering) 할 수 있도록 설비를 갖추어야 하며 모든 방사성물질들은 관리되어야 한다.

현재 연구 및 실험 분야에서 방사성폐기물의 플라즈마를 이용한 제염기술 및

소각 처리를 위한 실험들이 진행되고 있으나 방사성 휘발성 물질의 관리를 위한 연속방사능모니터링시스템 설치 비용의 고가로 인해 관련 기술이 현장에 적용되고 시행되기에는 어려움이 있다. 국내 고리 1호기 폐로를 기점으로 플라즈마 처리에 대한 관심도가 높아지고 있는 반면 방사성 휘발성 기체의 체계적인 관리 및 연구는 부족한 것으로 판단이 되어 아래와 같이 제안을 한다.

하나, 플라즈마 처리설비의 방사능 연속모니터링 계측시스템에 대한 정부 및 관련 기관의 연구·투자로 저비용·고성능의 방사능 연속모니터링 설비 제작 및 보급으로 방사성 휘발성 기체 모니터링 기술의 신뢰도를 높여야 한다.

둘, 모든 방사성폐기물 소각 처리는 발전소의 폐기물처리 건물 내 기체 폐기물처리 계통의 GRS 계통에 연결하는 것을 추천하며, 방사능연속모니터링감시기를 통해 작업이 모니터링되고 수행될 수 있도록 절차를 체계화해야 한다. 단 플라즈마 임시 소각장에 GRS 계통에 준하는 시스템이 정상 운영되고 관련기관의 인증이 된 경우는 자체 시스템만 사용해도 무방하다(GRS 계통은 방사성 휘발성 기체를 감쇠 탱크 등에 가두어 방사능을 자연적으로 Decay 처리함)[30].

셋, 플라즈마 소각 처리 시 온도와 시간에 따라 발생하는 유독가스 및 방사성 휘발성 물질이 각각 다르므로 소각전에 예상 방사성물질별 및 폐기물 종류별로 사전 분류작업을 통해 소각작업 시 같은 물질이 소각될 수 있도록 사전 작업을 해야 한다. 또한 각 방사성 휘발성 물질 포집 및 처리에 최적인 필터 등의 설비를 연계하여 소각 대상물질에 맞추어 시스템을 운영하며 방사성 및 유해 배기체를 처리해야 한다.

넷, 플라즈마 소각 처리 시 방사성 휘발성 물질의 각기 다른 방사화학적 특성들을 고려하여 소각 대상 물질에 따른 운전 온도 및 시간을 표준화·정량화할 수 있도록 연구 및 지원을 해야 한다. 표준화 및 절차화된 플라즈마 운전 변수 적용으로 방사성 휘발성 물질 및 유독물질의 생성을 원천적으로 제거해야 한다.

다섯, 플라즈마 처리 시 발생하는 오염된 HEPA 필터의 처리방법 및 재처리 방법(2차 플라즈마 처리)등 2차 폐기물처리에 대한 학문적 연구 및 지원을 범국가적으로 장려해야 한다. 또한 화학처리 후 생성되는 2차 화학폐기물(염소 등) 처리에 대한 연구도 병행되어야 한다.

여섯, 선진국의 사례를 참고하여 정부 및 관련 기관은 플라즈마 기술 등을 이용한 저준위 및 극저준위 방사성폐기물의 소각처리를 적극 장려하고 법적 및 행정적 절차 간소화를 통해 저준위 방사성폐기물 사업자의 적극적인 참여를 유도해야 한다. 상기와 같은 저준위 방사성폐기물 처리기술 노하우는 중준위 폐기물 처리의 기초가 되므로 연구 및 투자를 적극 장려해야 한다.

일곱, 준휘발성 물질·장반감기 휘발성 기체는 소각처리 과정에서 발생될 수 있으므로 방사성폐기물을 소각 처리 시 초저온흡착법 등을 이용해 방사성 휘발성 물질을 관리 및 처리 할 수 있도록 선행 연구 및 관련 기술이 개발되어야 한다[30].

여덟, 방사성 폐액 중 삼중수소, EDTA, 등을 함유한 방사성 액체 폐기물은 “수중플라즈마” 기술을 이용해 방사성 폐액내의 삼중수소, EDTA 등 원하지 않는 방사성 핵종 및 원소를 제거하여 작업장 및 환경으로 방출을 방지 해야 한다.

아홉, 방사성폐기물 중 금속성(철재류 등)폐기물은 플라즈마트론을 이용해 제염작업을 수행할 수 있다. 플라즈마트론을 이용한 제염 작업 시 비산되는 준휘발성 방사성 물질에 대한 처리기술의 연구를 통해 휘발성 물질을 관리 해야 한다[36].



## 참고문헌

- [1] 원자력안전위원회, 방사성폐기물 저장시설 누적저장량 및 저장요량, 2021년
- [2] 산업통상자원부, “산업부 장관, 국내 최초의 저준위 방사성폐기물 처분을 위한 표층 처분시설 착공식 참석”, 2022년
- [3] 한양대, 원전 해체 방사성폐기물 발생 최소화를 위한 최적 자체처분 모델, 2021년
- [4] (주)비츠로테크, <http://www.vitzrotech.com/group/tech.php>, 2022년
- [5] 한국수력원자력(주), 플라즈마 용융로 배출장치 개념설계, 2015.
- [6] IAEA, Application of Thermal Technologies for Processing of Radioactive Waste(IAEA-TECDOC-1527), December 2006
- [7] [https://www.zwilag.ch/en/plasma-plant-\\_content---1--1047.html](https://www.zwilag.ch/en/plasma-plant-_content---1--1047.html)  
 ZWILAG (Zwilag Zwischenlager Würenlingen AG) Industriestrasse Beznau 1
- [8] <https://www.nsenergybusiness.com/news/bulgaria-opens-plasma-melting-plant/>  
 news By NS Energy Staff Writer 2018년
- [9] Design commissioning of a low level radwaste incineration plant’  
<https://www.osti.gov/biblio/5982412>, 1992년
- [10] <https://www.world-nuclear-news.org/WR-Fukushima-Dai-ichi-waste-incinerator-starts-up-2203164.html>,  
 (Fukushima Dai-ichi waste incinerator starts up world nuclear news), 2016년
- [11] 송중순, RESRAD-RECYCLE을 활용한 원전 해체 시 발생하는 금속폐기물의 자체처분 기준 적용 연구, 방사성폐기물학회지, 2016.
- [12] 한국 전력연구원, 방사성폐기물 유리화 시설의 배기체 처리공정, 1997년
- [13] 한국원자력 연구소, 크립톤 및 크세논 처리기술, 2003년
- [14] 원자력환경기술원, 플라즈마토치 용융로의 폐기물용융방법에 따른 세슘 휘발특성, 2001년
- [15] 한국원자력 연구원, 회화온도 및 회화시간 변화에 따른 세슘의 휘발성 연구, 2012년
- [16] 한국방사성폐기물학회, 증기발생기 화학세정 폐액처리시스템의 온도별 NOx 생성에 대한 고찰, 2012년
- [17] 충남대 화학공학과, 한국원자력연구소, 플라즈마 아크 용융로를 이용한 훈

- 합 방사성폐기물 용융 특성, 2006년
- [18] 비츠로테크, 고온 플라즈마 기술을 이용한 방사성 물질을 함유한 폐액의 처리방법 및 처리장치 Application KR1020080009482A, 출원일자 2008.
  - [19] 한국원자력연구소, 방사성 동위원소 (RI) 폐기물의 소각 한국원자력학회-춘계학술발표회논문집, 1996년
  - [20] 헬로디디(<http://www.hellodd.com>), 수명 길고 휘발성 높은 '방사성' 원소 붙잡는 신소재, 2019.
  - [21] 한양대, 원전해체의 경제성 재고를 위한 해체폐기물의 자체처분 최적화 방안 고찰, 2019년
  - [22] [원자력안전위원회고시 제2021-23호, 2021. 7. 13., 일부개정]
  - [23] [원자력안전위원회고시 제2020-6호, 2020. 5. 26., 일부개정]
  - [24] [원자력안전위원회고시 제2019-10호, 2019. 5. 10., 일부개정]
  - [25] (사)한국환경컨설팅협회, 대기배출원 관리 선진화 방안 마련 연구, 2010년
  - [26] 한국IR협의회, 방사성폐기물 처리, 2121년
  - [27] 한국원자력연구원, 칼슘산화물을 이용한 파이로 전처리공정 1400<sup>2</sup> 포집, 2015년
  - [28] (주) 비츠로테크, “원전 증기발생기 화학세정폐액 처리용 150kW급 아크 플라즈마 장치개발, 2006년
  - [29] (주) 비츠로테크, 한전전력연구원, 고온플라즈마를 이용한 원전 증기발생기 화학세정폐액 처리용 경험, 2008년
  - [30] 대한방사선방어학회, 이동형 불활성기체 제거장치의 성능 및 경제성 평가, 2011년
  - [31] 세종대학교, 유-무기 하이브리드 페로브스카이트 단결정 기반 전리방사선 검출소자 개발 연구, 2019년
  - [32] 엠브라운 코리아, 유기금속 할라이드 페로브스카이트 열역학 특성 규명
  - [33] SFT 테크놀로지, <https://www.sftechnology.co.kr/default/m02/p01.php?tit=02&sub=01>
  - [34] 한국원자력 환경공단, <https://blog.naver.com/yeskrmc/221631479318>
  - [35] 생각하는 사람, <https://blog.naver.com/palmar ius/222657846825>
  - [36] 제주대학교, 플라즈마트론을 이용한 금속 방사성 폐기물 제염처리연구