

플라즈마 일괄건식제염공정 상용화 기술 개발

(주)수산인더스트리 / 한양대학교
2021년 10월 27일

목 차

I. 제염 개요 및 제염 기술

1. 제염(Decontamination)
2. 부식산화물 생성 메커니즘
3. 제염 기술

II. 플라즈마 제염

1. 플라즈마란?
2. 플라즈마 최적 발생 조건
3. 비정상 글로우 방전

III. 플라즈마 일괄건식제염공정 상용화 기술 개발

1. 연구 배경
2. 플라즈마 제염 원리
- 3-1. 기술 개요
- 3-2. 전처리(pre-treatment) 공정
- 3-3. 플라즈마 제염
- 3-4. 플라즈마 제염 성능 평가
4. 향후 연구계획

1. 제염 (Decontamination)

Definition

방사성 물질로 오염된 특정 지역, 시설/장비의 표면으로부터 세척, 가열, 화학적, 전기화학적, 기계적 세정 및 기타(용융 등) 방법으로 방사성 오염을 제거하는 일련의 활동

Object

- 원자력시설의 방사능 준위 저감을 위한 설비 오염 제거
- 유지보수 및 해체 시 오염 확산 최소화
- 오염지역 진입 시 요구되는 개인 방호 장비 수준 경감
- 오염 설비의 방사능 저감에 의한 저준위화 또는 재활용

Application

- 일반적으로 원자력 시설 해체 활동 시 규모에 무관하게 제염 작업이 필수
- 일부 제염 기술들은 ex-situ로 적용하는 것이 유용

2. 부식산화물 생성 메커니즘 (1차 계통 내 기기 내부 표면)

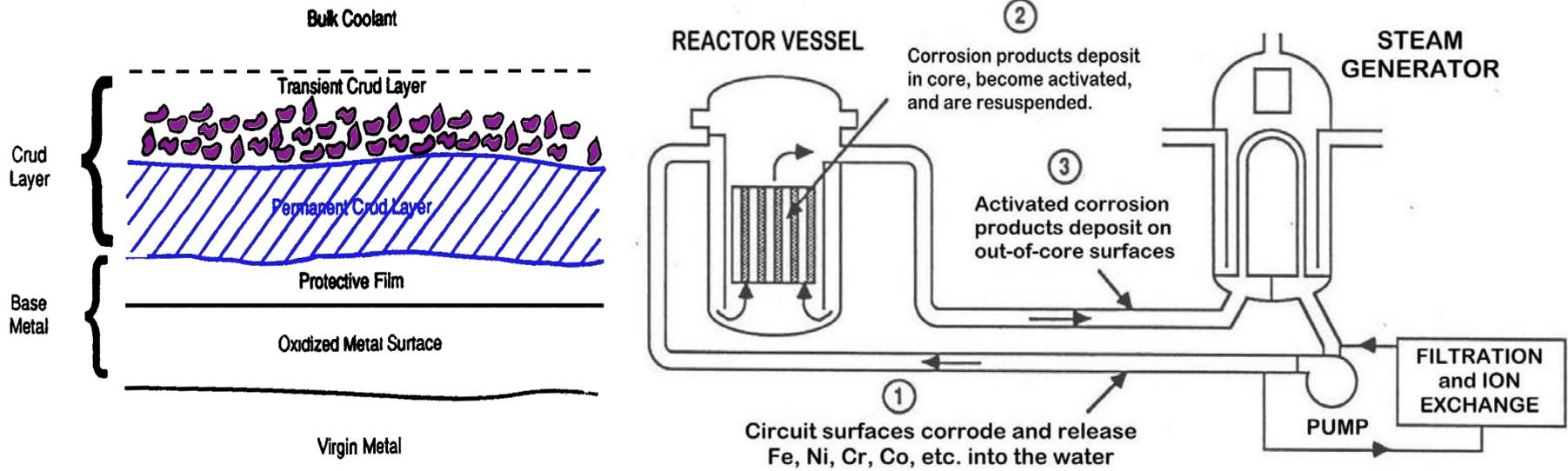


Fig 1. Schematic Representation of Formation of Radioactive Deposits in PWRs (EPRI)

3. 제염 기술

Table 1. Nuclear Facility Decontamination

In Operation	가동 중 제염 (유지보수 제염)	<ul style="list-style-type: none"> - 유지보수 작업자 피폭 저감 - 파이프, 탱크, 설비 등 - 재료 손상 문제 고려 필요 - 저농도 화학제 등 적용으로 제염 성능 향상에 제한적
After Shutdown	해체 전 제염 (계통제염)	<ul style="list-style-type: none"> - 해체 작업자 피폭 저감 및 후속 철거 공정 위한 계통 제염 - 재질 손상 고려 필요 없음 - 제염 성능 향상을 위해 마모성, 용해성이 높은 방법 적용
	해체 중 제염 (기기 제염)	<ul style="list-style-type: none"> - 방사성 폐기물 준위 저감 및 규제 해제 목적의 고농도 (중→저준위, 저→극저준위, 극저준위→규제해제) - 분사연마제염, 화학침수제염, 초음파제염, 전해연마제염 - 플라즈마제염 - 유용 물질 회수/재활용 및 자원화

1. 플라즈마란?

분자의 이온화가 일어나 양이온과 전자들이 떠돌아다니는 이온화된 상태의 기체

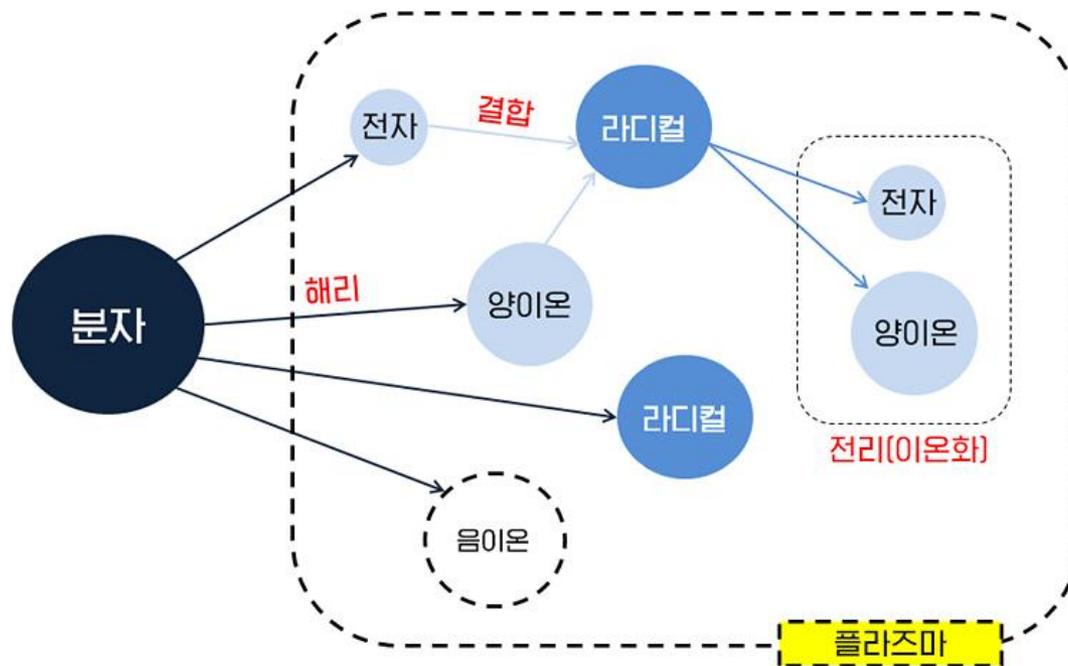
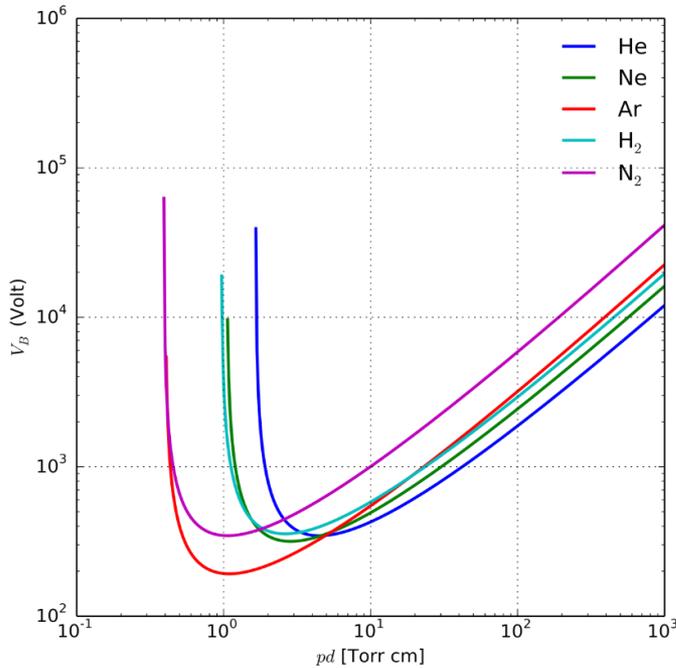


Fig 2. 플라즈마 생성

2. 플라즈마 최적 발생 조건

○ 파센곡선 : 방전을 일으키는데 필요한 전기장, 압력, 전극의 거리간의 관계를 나타낸 그래프

- 1) 높은 압력 → 일정 공간에 많은 기체 분자 → 충돌 확률 높지만 행정거리가 짧음 → 속도가 느려서 이온화 어려움
- 2) 낮은 압력 → 일정 공간에 적은 기체 분자 → 충돌 확률 낮지만 행정거리는 김 → 충돌 숫자가 적어서 이온화 어려움



$$V = f(P \cdot d)$$

V = 방전개시전압

P = 기체 압력

d = 전극 사이의 거리

Fig 3. Paschen's law

3. 비정상 글로우 방전

이온의 생성량과 소멸량이 같은 정상 글로우 방전 영역에서 에너지를 증가시켜 전류와 전압이 급격히 증가하는 비정상 글로우 방전 영역의 플라즈마를 이용하여 제어

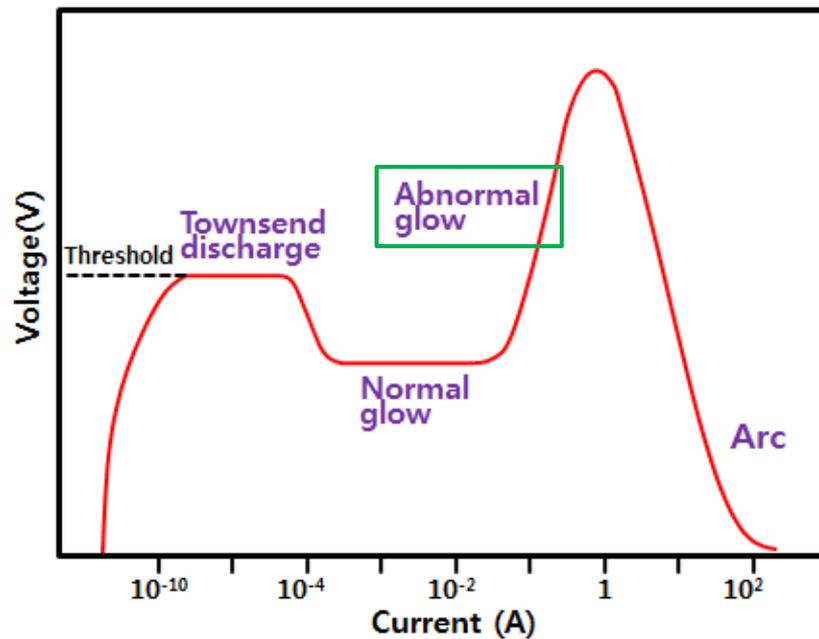


Fig 4. Abnormal Glow Discharge

1. 연구 배경

- 원전해체 시 해체 기간과 해체 비용에 가장 영향을 미치는 것은 해체 방사성폐기물 관리
- 콘크리트를 제외하고 가장 많이 발생하는 폐기물은 금속 방사성폐기물
- 1000MW급 PWR 원전 1기 해체 시 금속 방사성폐기물량은 약 614.29m³으로 전체의 약 26.54%를 차지
- 고리 1호기의 경우 200L 드럼 기준 방사성폐기물량은 약 8만 개 발생 예상되며, 국내 방사성폐기물 처분장 현황을 고려했을 때 14,500개로 줄이는 것이 시급함
- 방사성폐기물량을 저감시키기 위해서는 금속 방사성폐기물량의 저감이 무엇보다도 중요

1. 연구 배경

Table 2. Typical Radioactive Generated from Decommissioning(IAEA)

Radioactive material generation	900~1300MWe PWR	
	m ³	ton
Activated steel	92.86	650
Activated concrete	150	300
Contaminated ferritic steel	500	3500
Contaminated concrete	300	600
Contaminated lagging	21.43	150
Contaminated technological wastes	1250	1000
Total	2314.29	6200
Proportion(Steel)	26.54%	69.35%

2. 플라즈마 제염 원리

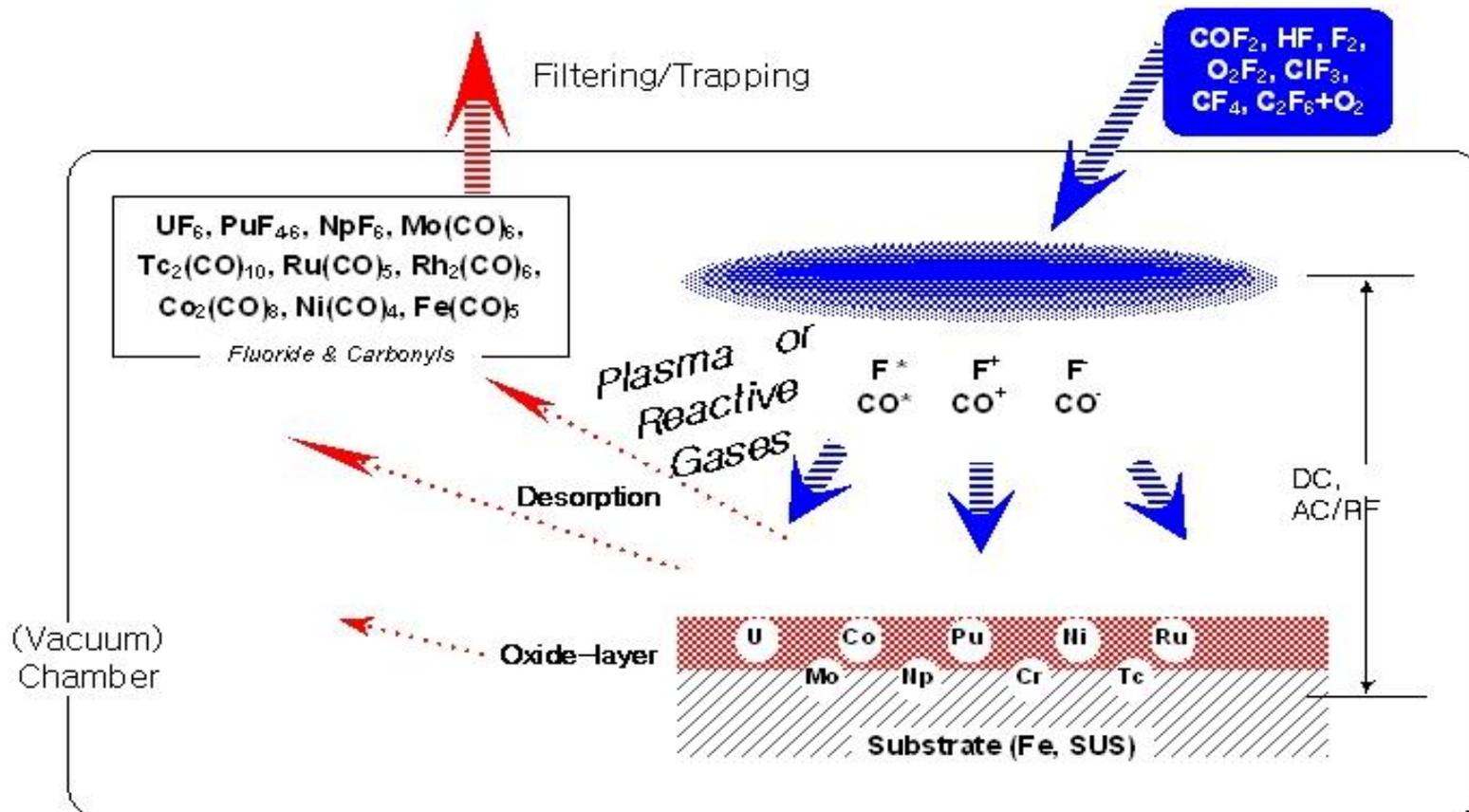
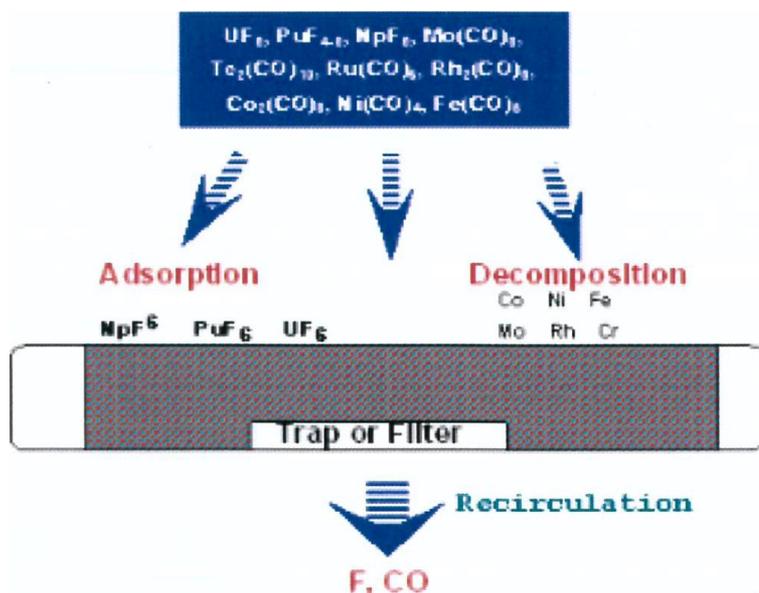


Fig 5. 반응성 플라즈마를 이용한 제염 공정 개념도

2. 플라즈마 제염 원리



F_2/CF_4 , $C_2F_6/CF_4 + O_2$, NF_3 등 불소함유기체
 → plasma
 → radical, ion-F, $[F^*, F^-, F^+]$

Radical, ion-F
 + Co, Ru, U (CP, FP, TRUs) – metal or oxide
 + COF_{2-3} , RUF_{5-6} , UF_6 [volatile]

Fig 6. 모재로부터 탈착된 방사성핵종의 흡착-분해 제거 개념도

2. 플라즈마 제염 원리

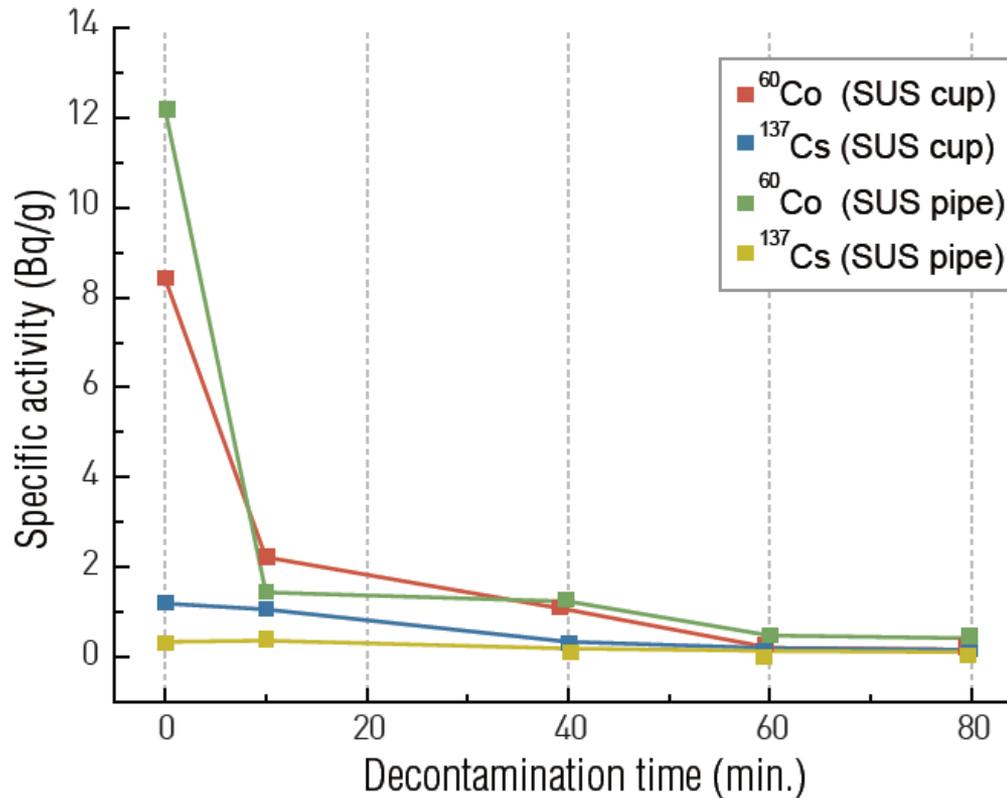


Fig 7. Radioisotope concentration changes on the metallic waste from a test reactor site by plasma treatment

3-1. 기술 개요

- 금속폐기물의 재사용 및 재활용을 위해 표면 산화막까지 제염 가능한 효율 높은 제염 기술
- 해체 현장에서 발생하는 다양한 형태의 금속 기기류를 반입, 해체/분해, 제염, 오염판정과 방출, 처분용 금속 용융 공정까지 이루어질 수 있는 일괄된 원격 자동화 및 모듈화된 2차 폐기물 발생이 거의 없는 신기술

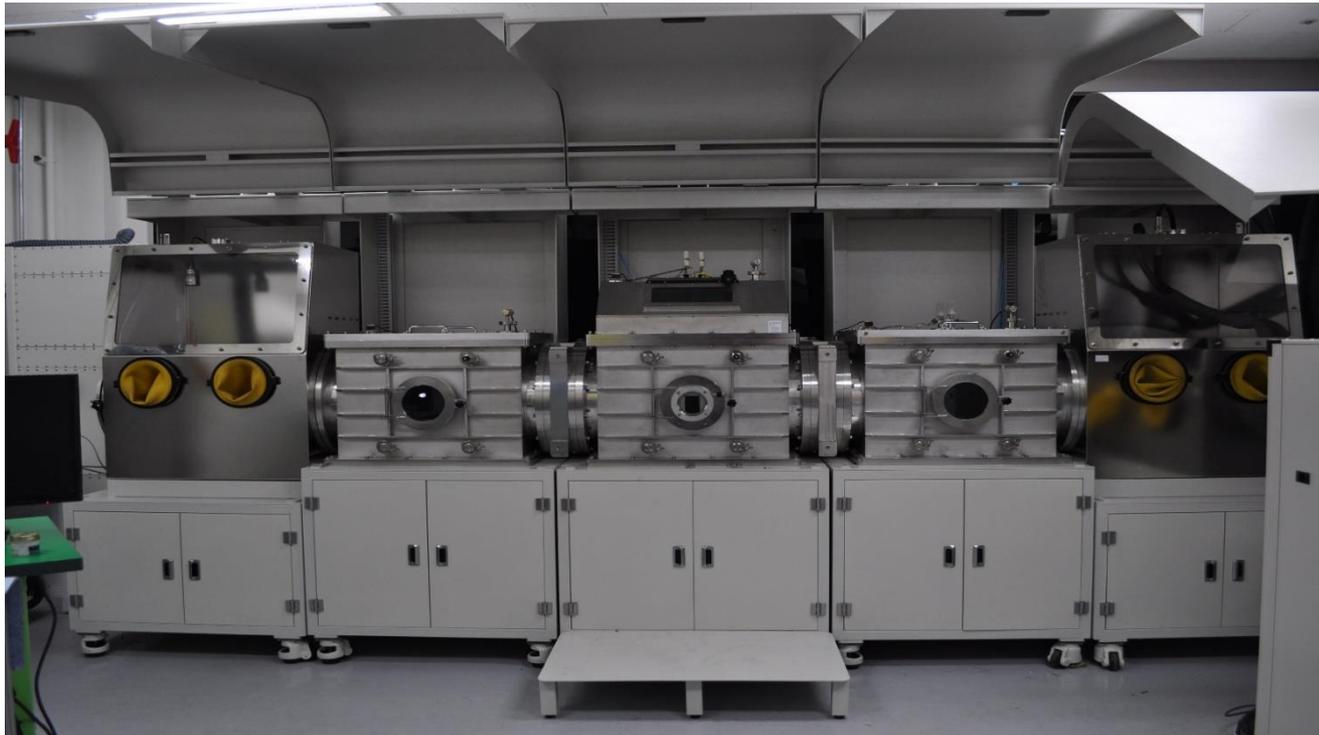


Fig 8. 플라즈마 일괄건식 제염설비

III. 플라즈마 일괄건식제염공정 상용화 기술 개발

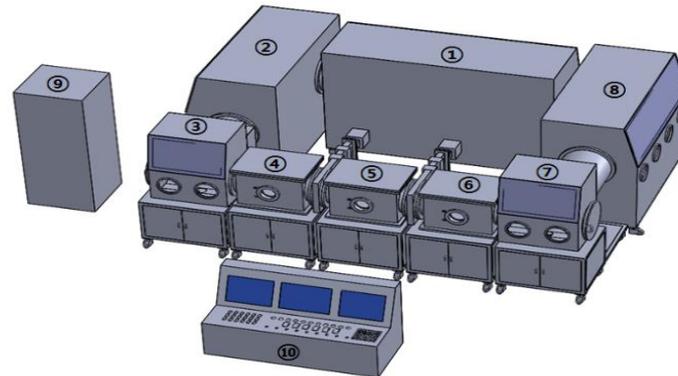
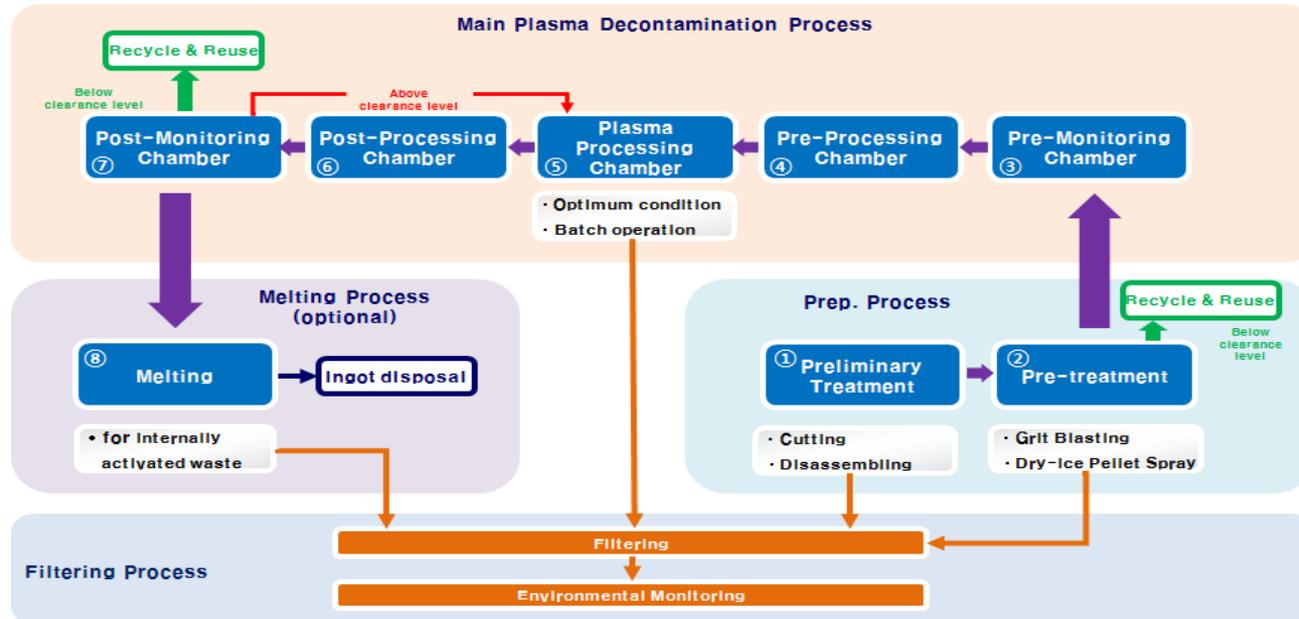


Fig 9. 일괄건식 제염공정 개념 블록 다이어그램 및 설계도

III. 플라즈마 일괄건식제염공정 상용화 기술 개발

* 동영상 시청



3-2. 전처리(pre-treatment) 공정

○ CO₂ blasting

- 드라이아이스 펠릿을 사용한 표면 오염물질 제거 기술
- -78.7°C의 펠릿 온도로 인한 cracking 및 열 충격 현상 발생
- 드라이아이스가 오염물질 층 밑으로 침투, 승화하면서 부피가 팽창하여 오염물질 제거

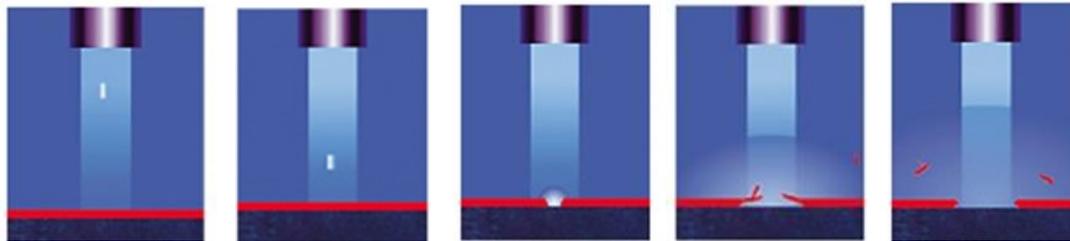


Fig 10. CO₂ blasting 공정

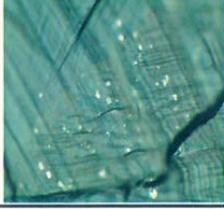
3-2. 전처리(pre-treatment) 공정



Fig 11. CO₂ blasting 설비 구축

3-2. 전처리(pre-treatment) 공정

Table 3. CO₂ blasting 실험 결과

재질	제염 전	제염 전 (현미경)	제염 후	제염 후 (현미경)
인코넬				
스테인리스				
시편 종류	제염 전 (g)	제염 후 (g)	제염계수	제거율(%)
인코넬	2.53889	2.51196	0.897666667	89.6%
인코넬	2.56705	2.54016	0.896333333	
SUS	2.4388	2.42583	0.864666667	87%
SUS	2.43321	2.42001	0.88	

3-3. 플라즈마 제염

-공정 조건 : 기체 종류, 기체 유량, 온도, 압력, 전압

Table 4. 플라즈마 제염 공정 조건 변수

조건	종류
기체	SF ₆ , NF ₃ , CF ₄ , Ar, O ₂
유량	최적화 필요
온도	고온일 수록 효과적
압력	최적화 필요
전압	최적화 필요(DC, RF)

3-3. 플라즈마 제염

Table 5. 플라즈마 제염 공정 조건

기체	유량	전압	전류	압력	제염시간	온도
NF ₃ , Ar	NF ₃ : 20sccm Ar : 60sccm	600eV (DC)	4A	6.2*10 ⁻² Torr	30min	350℃



제염 전



CO₂ blasting 후



플라즈마 제염 후

Fig 12. 일괄건식제염 실험결과(우라늄)

3-4. 플라즈마 제염 성능 평가

○ 플라즈마 금속 산화막 제거 성능

$$\Delta Thickness(cm) = \frac{\Delta m(g)}{S(cm^2) * \rho(\frac{g}{cm^2})}$$

$\Delta Thickness(cm)$ = 산화막 전/후 두께 차이

$\Delta m(g)$ = 산화막 전/후 무게 차이

$S(cm^2)$ = 시편 넓이

$\rho(\frac{g}{cm^2})$ = 산화막 밀도

4. 향후 연구계획

세부 목표	주요 내용
상용화 장비 상세 설계	본 과제를 통해 개선한 장비의 성능 평가를 통해 상용화 장비 상세 설계
타당성 검증을 위한 종합성능 평가	일괄제염장치 각각의 요소기술 연계성 평가 및 최적화 조건 도출
플라즈마 제염 중심 일괄건식제염 장치 상용화	원전해체연구소 또는 실증 가능한 장소를 활용한 개발 기술 실증 및 상용화

감사합니다

수산인더스트리 기술연구소

서울시 강남구 밤고개로1길 10 현대벤처빌 1520호

Tel : 02-2017-8178

한양대학교 원전해체연구센터

서울시 성동구 왕십리로 222 한양대학교 HIT 513-2호

Tel : 02-2220-4615