

MARINA MSR Off-gas System 개발 현황

CENTURY / Nuclear HVAC Engineering Team

김 화 평

2026.05.06

2026년도 한국원자력학회 춘계학술발표회

Contents

- 1. Introduction to the Off-gas system**
- 2. Component of Off-gas system**
 - 1) Filter**
 - 2) Decay Tank**
 - 3) Delay Bed**
- 3. Conclusion**

Off-gas system

❖ Introduction

• Purpose of Off-gas system

- MSR 운전 중 발생하는 Off-gas에는 Noble gas(Xenon, Krypton), Active Halide(HCl, Cl₂, I₂/HI 등), volatile chloride (ZrCl₄, UCl₄ 등), aerosol/noble metal particle, 잔류 H₂O/O₂가 포함될 수 있음
- 이러한 불순물이 원자로 내 축적되면 압력 상승, 중성자 흡수 증가, 노심 반응도 저하 등과 같은 부정적인 영향을 끼칠 수 있음

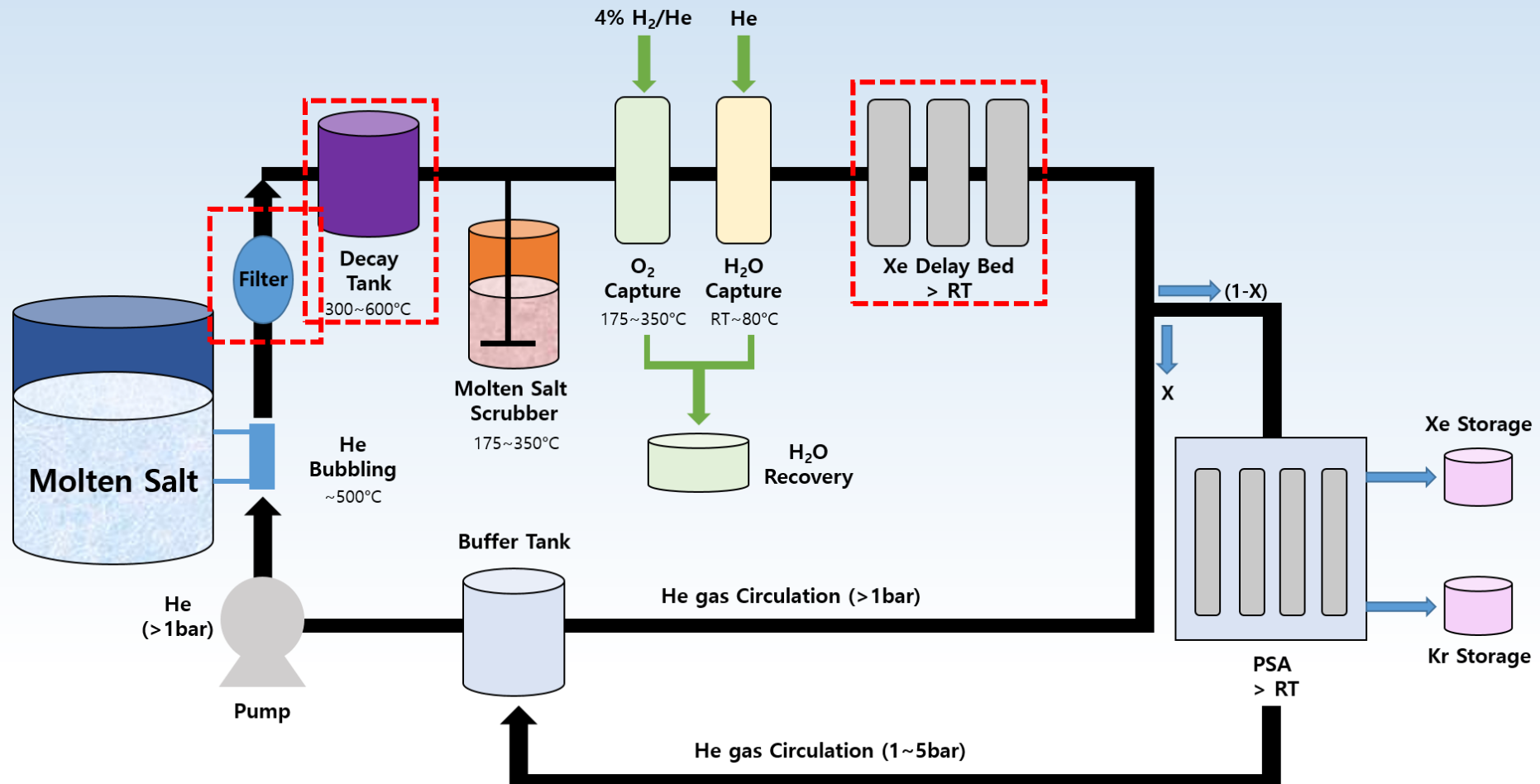


Off-gas System은 MSR 운전 및 핵분열 과정에서 발생하는 방사성 핵종 및 불순물 등을 효과적으로 분리·제거 함으로써 노심의 안정성을 확보하는 목적을 가지고 있는

MSR의 핵심 보조 계통

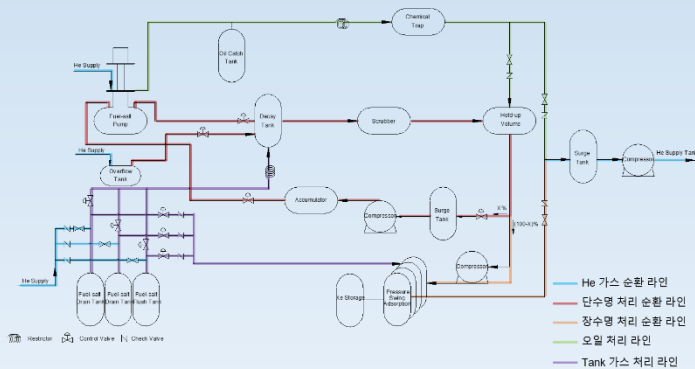
Off-gas system

❖ Concept of Off-gas system



Off-gas system

❖ Scope of work



KAERI
용융염연료
및 재료

- He Bubbling
- Caustic Scrubber
- O₂/H₂O Capture
- Xe/Kr PSA system

- Off-gas system 개념설계
- Off-gas system 배치 최적화
- 건식 Scrubber

Off-gas system

- Filter
- Decay tank
- Delay Bed (Hold-up tank)

KAERI
계통설계

센추리

2-1 Filter

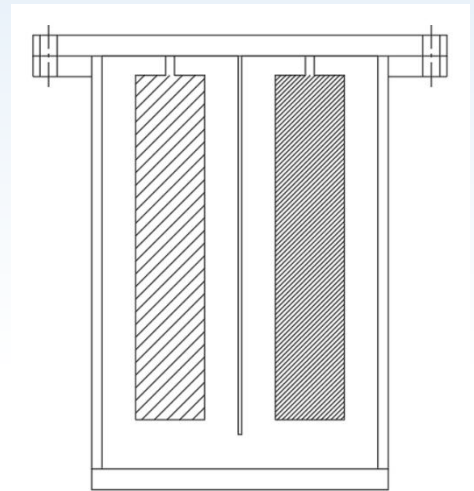
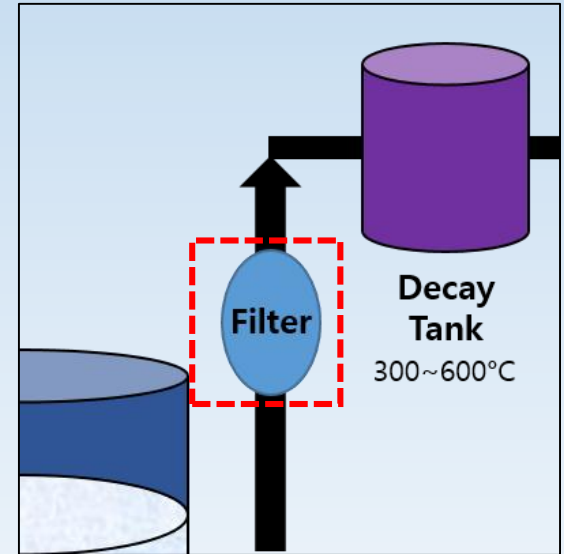
❖ Concept

• Purpose of Filter

- MSR 운전 중 고온에서의 증발 및 응축, 펌프 작동, 핵분열 반응 등에 의해 미세한 입자상 물질(Aerosol)이 생성됨
- Aerosol의 주성분($ZrCl_4$, CsI , UCl_4 등)은 응축 시 고체 입자 또는 결정을 형성하여 Valve Plugging, Erosion, Sticking, Corrosion 발생할 수 있음
- MSRE 실증연구에서도 Valve Plugging이 큰 문제로 인식됨



Filter를 통해 Aerosol 및 Particle을 제거하여 Valve Plugging 방지 및 Decay Tank 부하 저감을 위한 Off-gas system의 1차 정화장치



<Filter housing 내부 type>

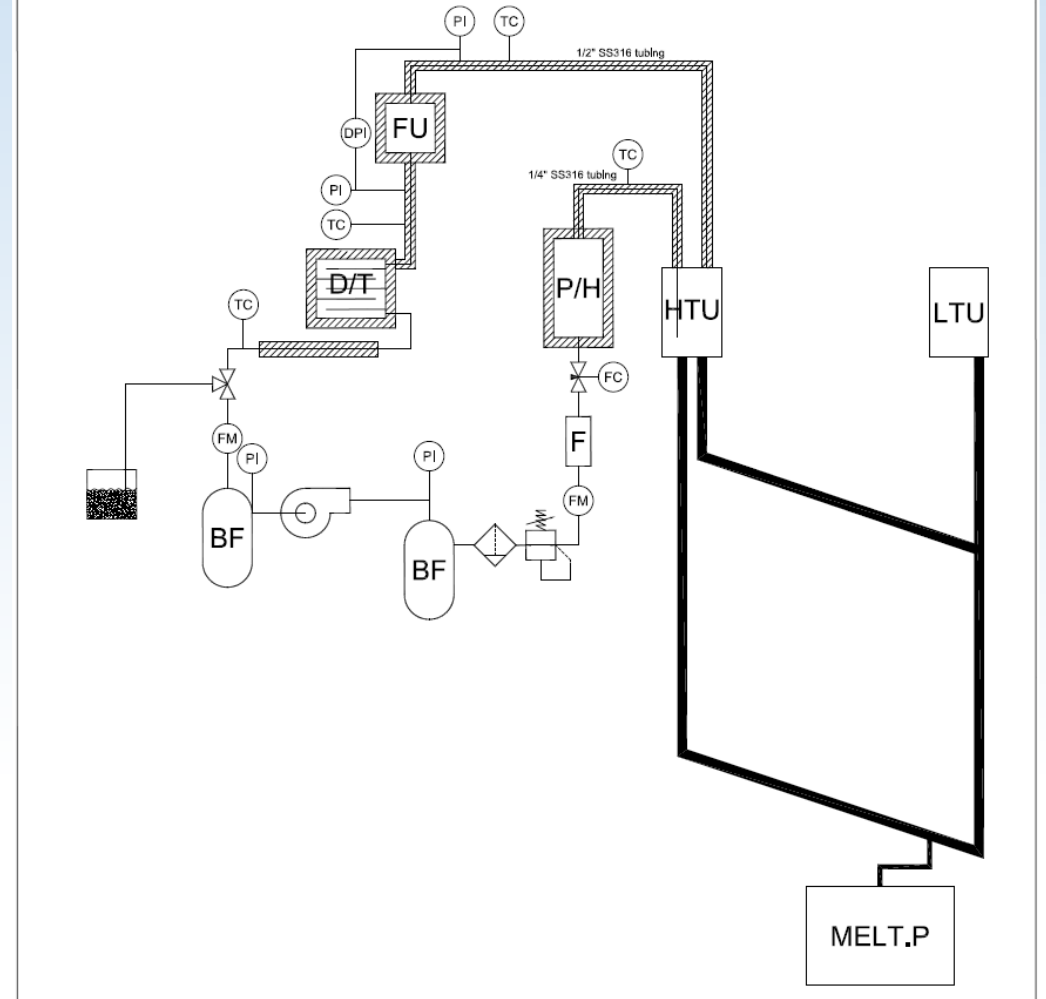
2-1 Filter

❖ Study of Filter

• Purpose of Test

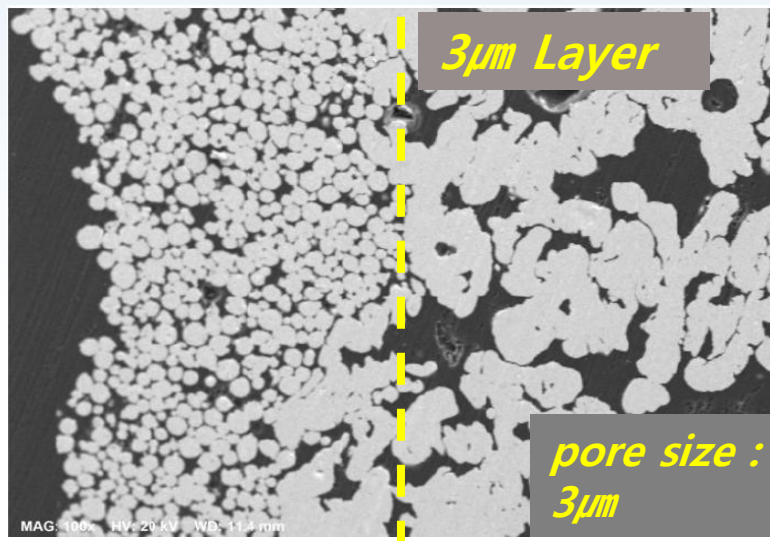
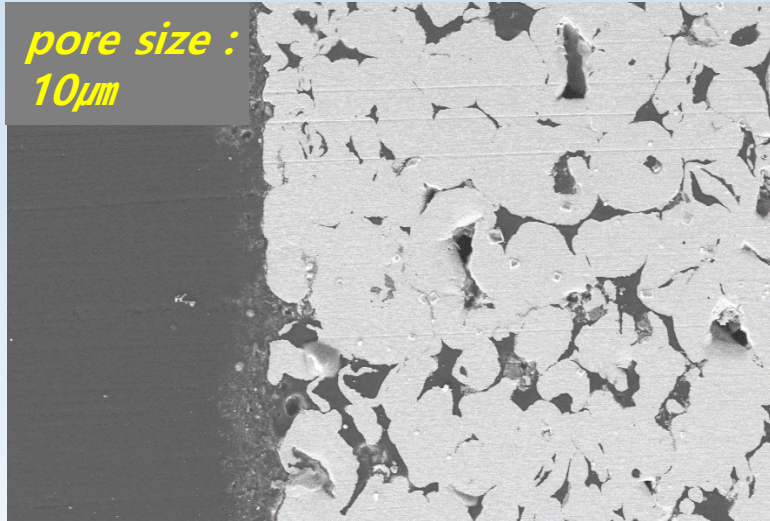
- Off-gas 내 포함된 여러 방사성물질 중 일정 크기의 불순물을 제거할 수 있는 필터의 크기와 공극률 분석
- 필터의 교체 주기
- 필터 구조재의 고온염 환경에서의 건전성 및 안정성
- 필터내 걸러진 불순물의 크기 및 양을 분석

MSR OFF-GAS FILTER TESTING FLOW DIAGRAM



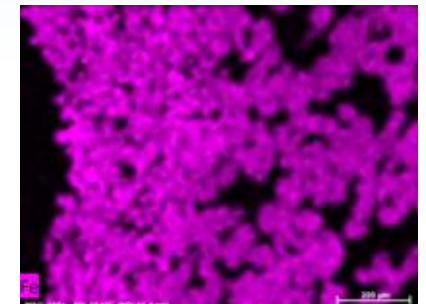
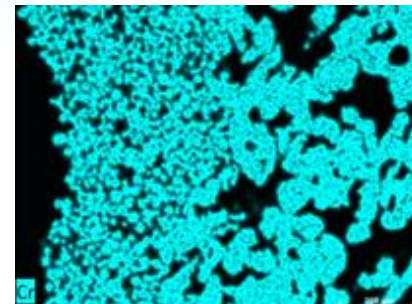
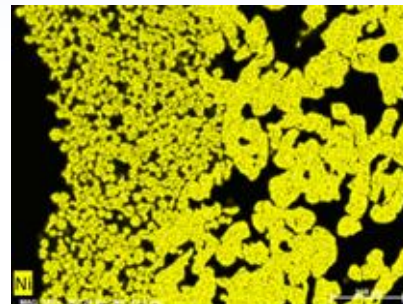
2-1 Filter

❖ Study of Filter



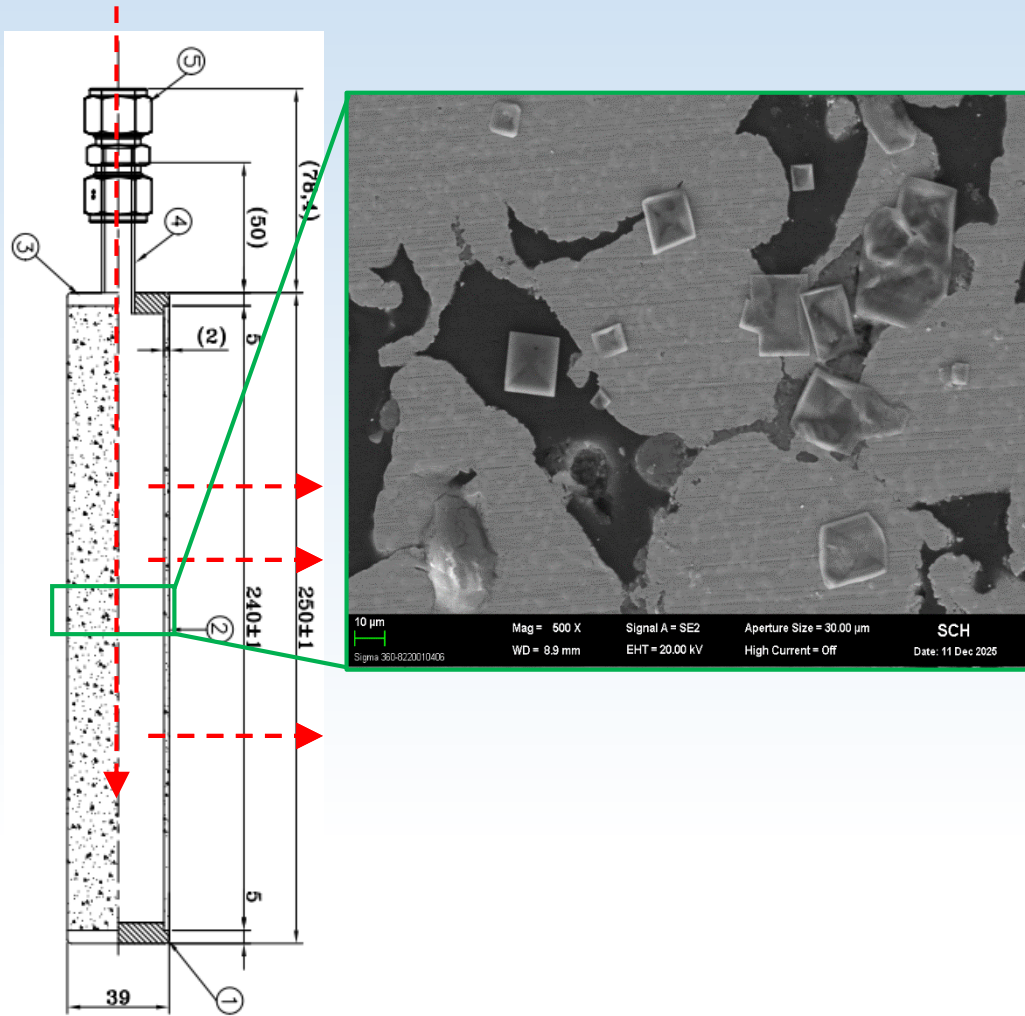
• Filter Specification(SEM-EDS)

- 금속 필터는 sintering 방식으로 제작된 다공성 금속 필터로, 불규칙한 공극 구조를 가지며 설계된 평균 pore size에 맞춰 제조됨
- 3 µm 필터는 외부 10 µm 소결층과 내부 미세 공극층으로 구성된 이중 레이어 구조
- 필터 공극 내부 또는 공극 입구에 침적될 것으로 예상됨
- 비교(SEM 이미지 관찰 결과)
 - SEM 관찰 결과, 에어로졸 침적은 주로 10 µm 필터에서만 확인됨
 - 3 µm 필터에서는 에어로졸 침적이 관찰되지 않음

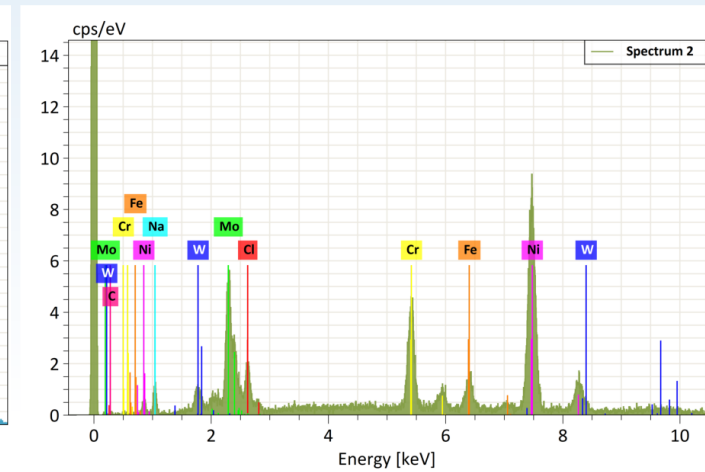
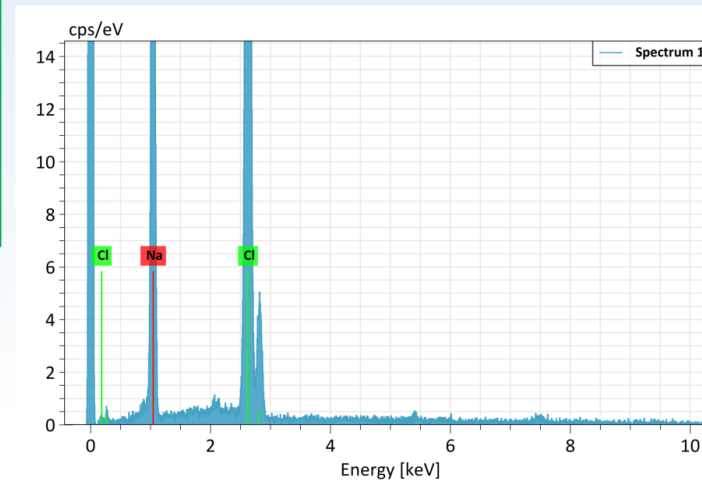
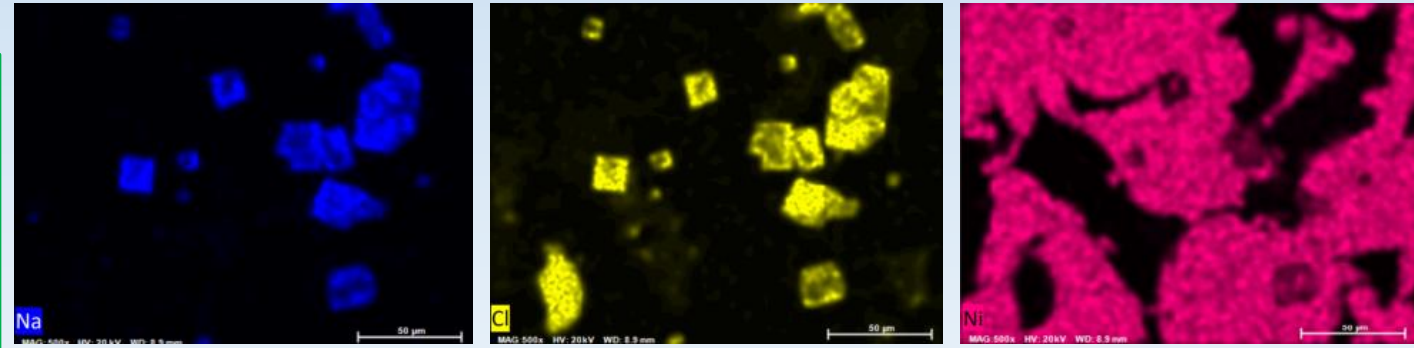


2-1 Filter

❖ Study result of Filter

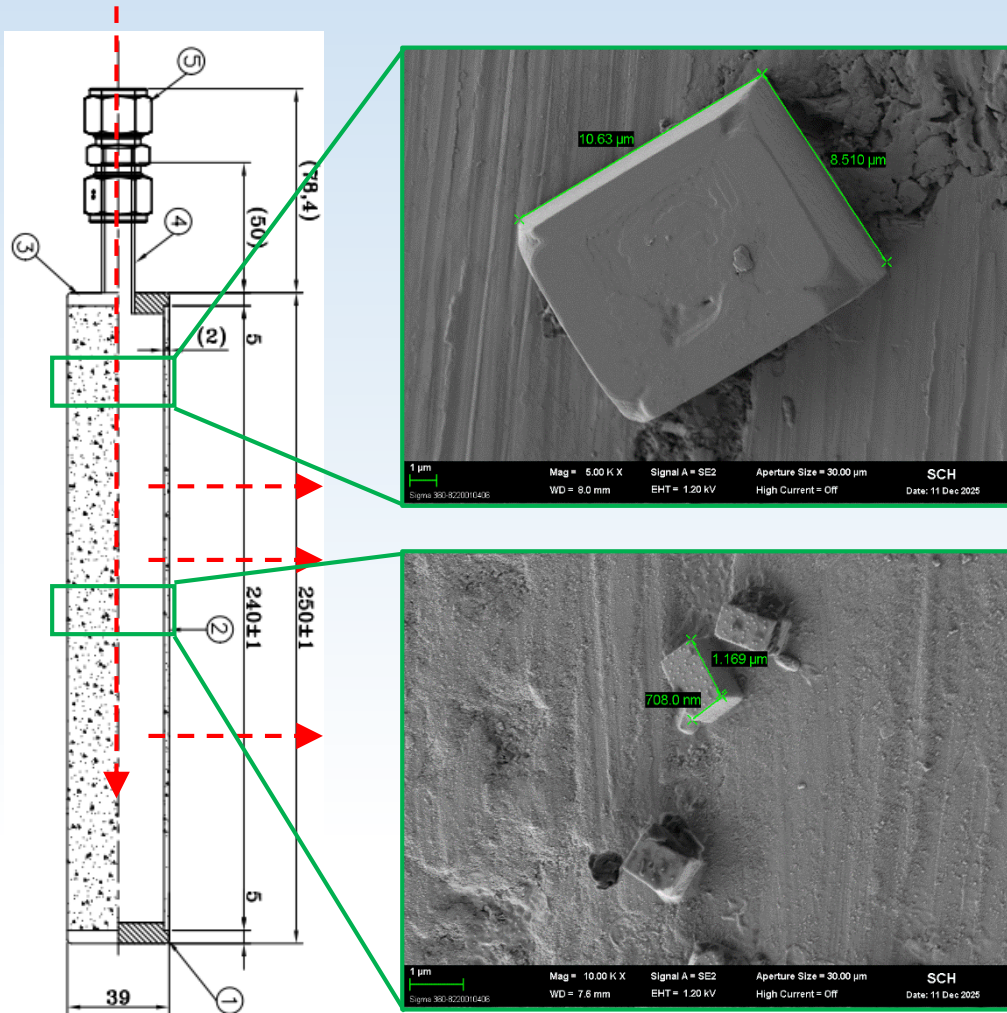


pore size : 10 μ m

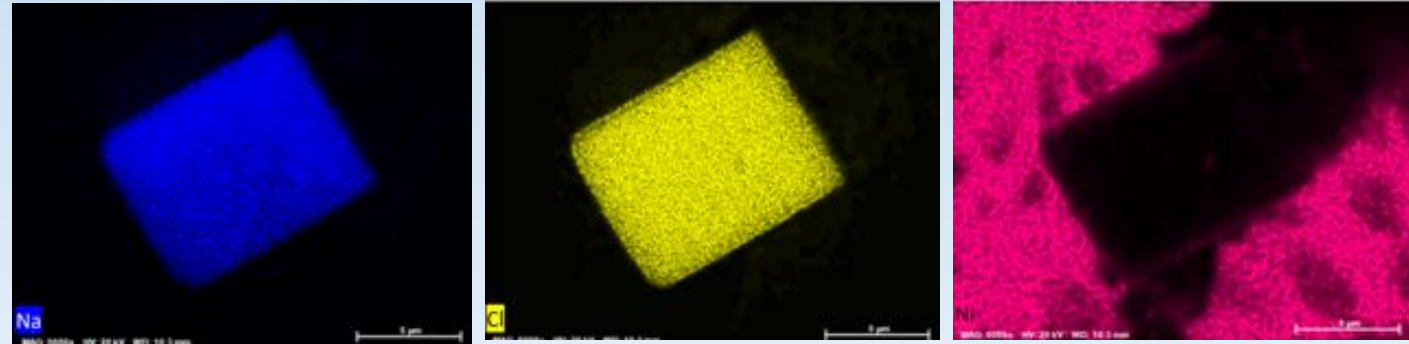


2-1 Filter

❖ Study result of Filter



pore size : 10μm



%	Na	Cl	Cr	Fe	Ni	Mo	W
Particle	48.57	51.43	-	-	-	-	-
Filter	5.26	1.58	17.90	6.18	54.21	13.77	1.10

- SEM-EDS 분석 결과, 10 μm 필터 공극 인근에서 정형의 입자가 관찰됨
- 관찰된 입자는 Na와 Cl 성분이 지배적으로 나타났으며, 입자 크기는 수백 nm에서 수십 μm 범위로 다양하게 분포함
- NaCl-MgCl₂ 기반 용융염 조건임에도 불구하고, 에어로졸 입자에서는 Mg 성분이 거의 검출되지 않음

2-2 Decay Tank

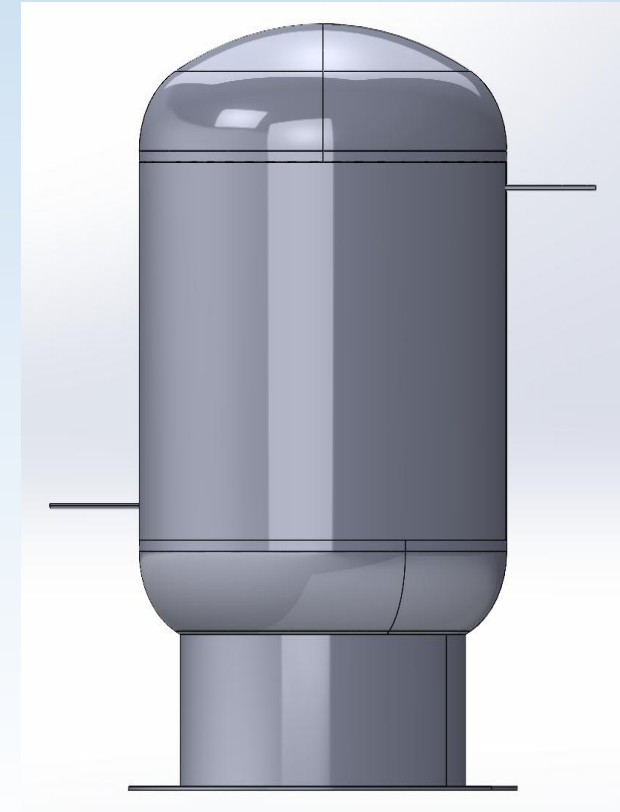
❖ Concept

• Purpose of Decay Tank

- Off-gas 내 포함된 여러 방사성물질 중 비교적 짧은 반감기(half-life)를 가지고 있는 기체 방사성 핵종, 핵분열 생성물을 Tank내에 체류 시켜 자연 붕괴를 유도 함
- Decay Tank 설계는 Off-gas System에서의 유량에 따른 체적, 기체 방사성핵종의 붕괴에 의한 부식 및 붕괴열(Decay Heat), 방사선 차폐 계산이 주요 핵심



Decay Tank는 단 수명의 기체 방사성핵종의 붕괴 및 붕괴열을 관리하는
Off-gas system의 핵심 안정화 장치



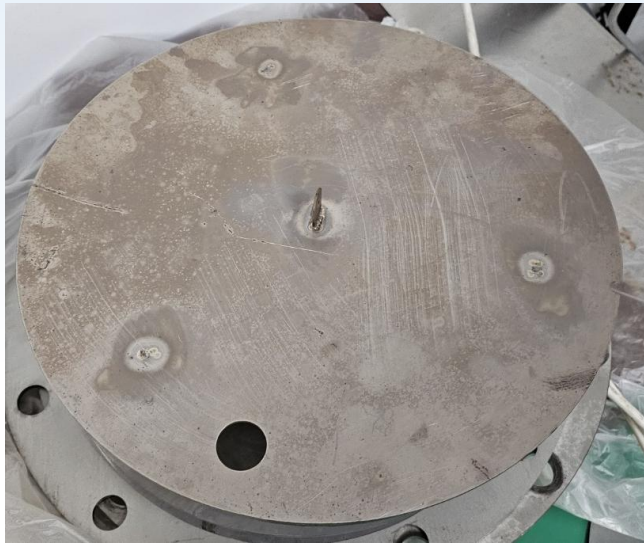
<Decay tank 예상 3D 모형>

2-2 Decay Tank

❖ Study of Decay Tank

• Purpose of Test

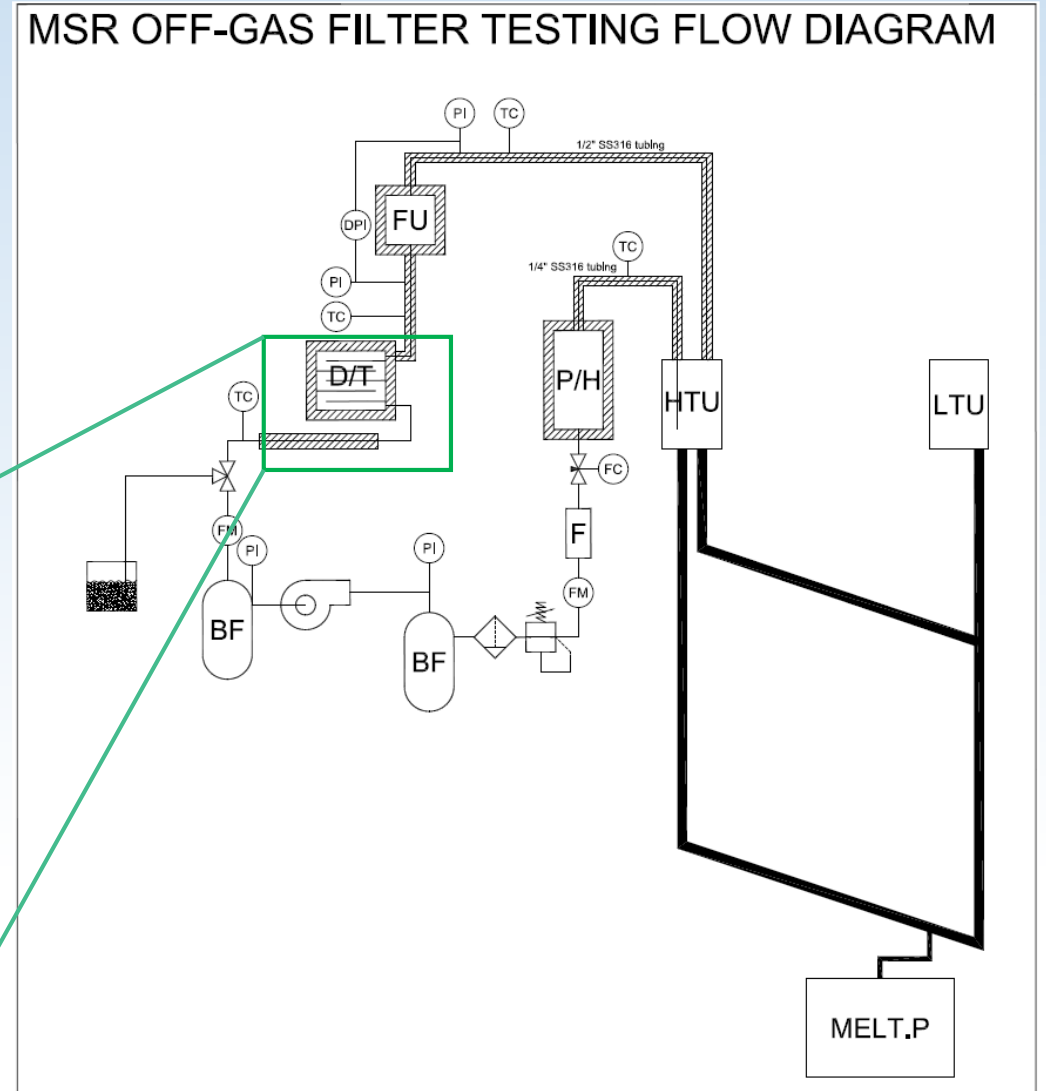
- Off-gas의 decay tank 내 목표 지연 시간 확보
- Decay tank 내 침적된 불순물 양 확인
- Ar bubbling에 의한 Aerosol 및 Particle 종류 분석
- Tank 내 침적된 Aerosol 및 Particle의 크기 및 양 분석
- Tank 내 baffle 형상 최적화



<Decay tank baffle>



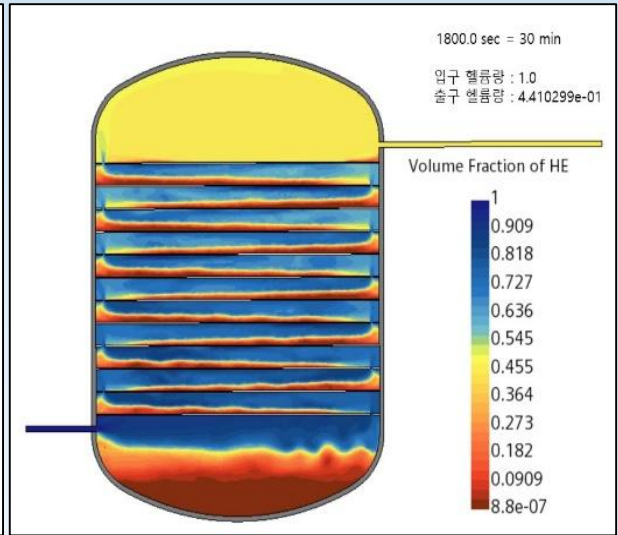
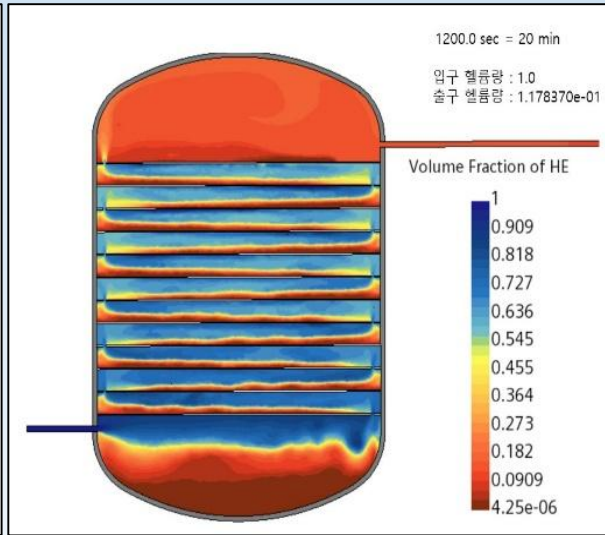
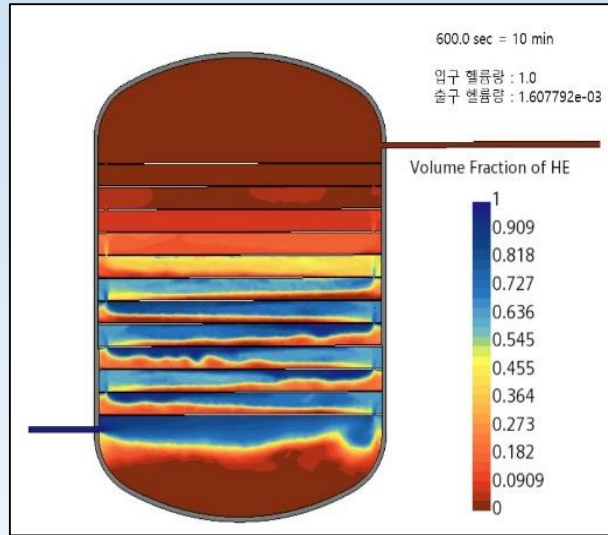
<Decay tank>



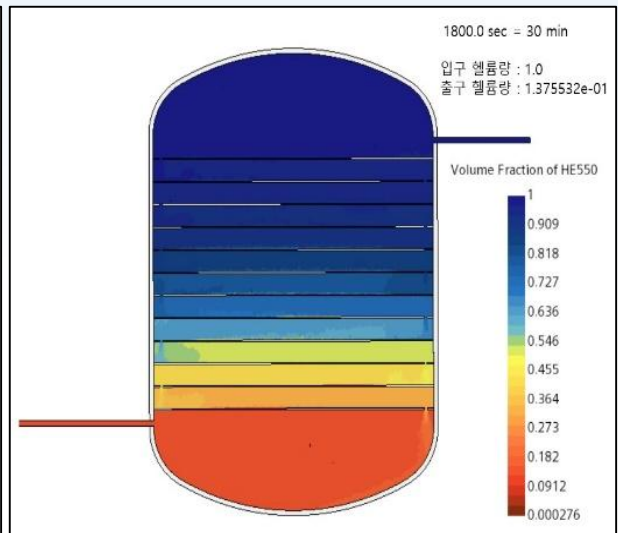
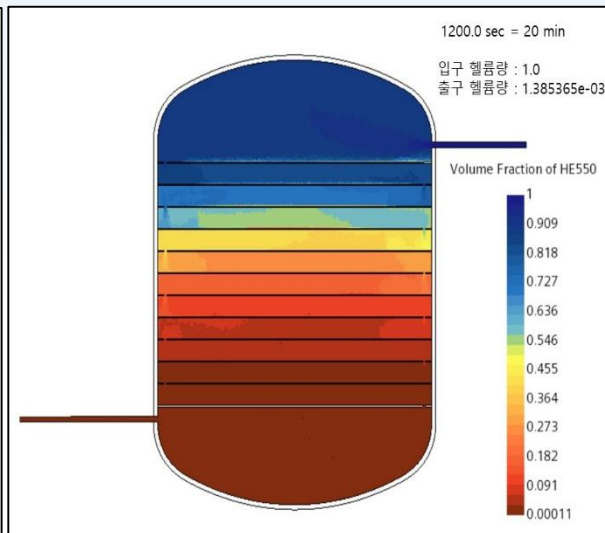
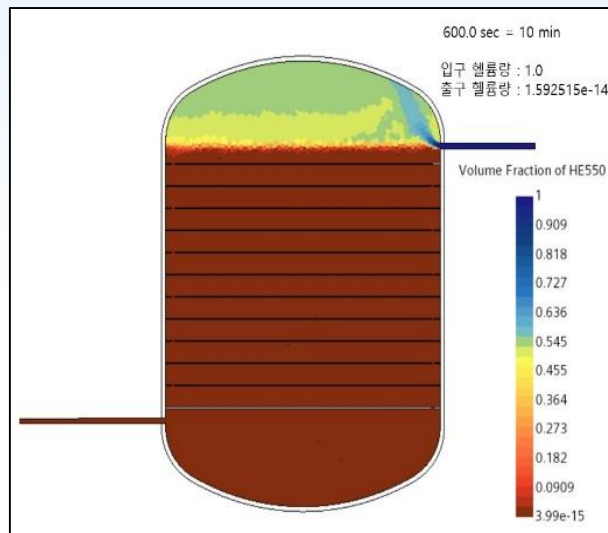
2-2 Decay Tank

❖ Study of Decay Tank

하부 → 상부



상부 → 하부



2-2 Decay Tank

❖ Study of Decay Heat

- Nuclide: Xe, Kr, Zr, Cs, I, Sb, Cd 및 Isotope by MSR Inventory from KAERI
- Total Decay Heat : **1.75kW**

Nuclide	Decay Heat
Xenon(Xe)	0.9675 kW
Krypton(Kr)	0.7702 kW
Cadmium(Cd)	2.655E-03 kW
Zirconium(Zr)	3.497E-08 kW
Cesium(Cs)	3.242E-10 kW
Iodine(I)	1.495E-13 kW

2-5 Delay Bed

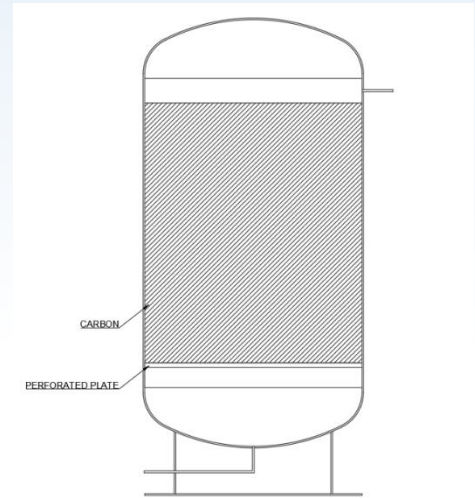
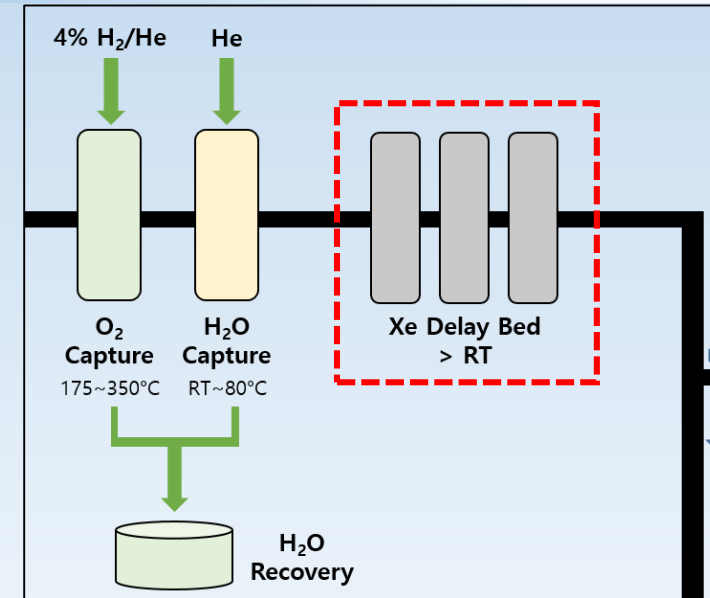
❖ Concept

• Purpose of Delay Bed

- Delay Bed는 Off-gas 내 포함된 Noble gas(ex. Xe-133, Xe-135, Kr-85 등)를 Activate Carbon을 통해 흡착. 지연시켜 자연 감쇠 시간을 확보함
- Xe-133의 경우 강한 감마선을 방출하는 핵종, Kr-85의 경우 베타선을 장시간 방출하는 핵종으로 알려져 있으며, 이는 Off-gas system의 방사선원 항을 결정하는 핵심 핵종
- Xe, Kr은 대기 중 배출 시 환경 영향이 높아 세계 원자력 규제기관에서 가장 엄격하게 관리하는 불활성 기체 핵종으로 MSR에서도 Off-gas 배출 규제 준수의 핵심



Delay Bed는 Off-gas의 방사선원 항을 저감하고 후단의 배출 규제 준수를 가능하게 하는 Off-gas system의 주요 장치



<Delay bed CAD drawing>

Consideration of Off-gas system

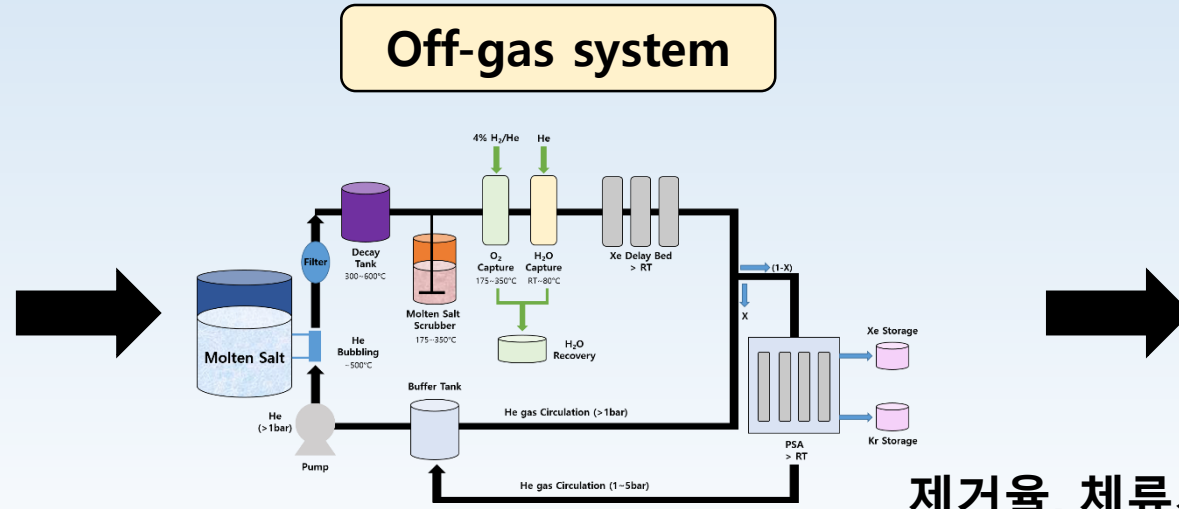
❖ Key of Off-gas system

Noble gas
Active Halide gas
Volatile chloride
Aerosol
H₂O/O₂

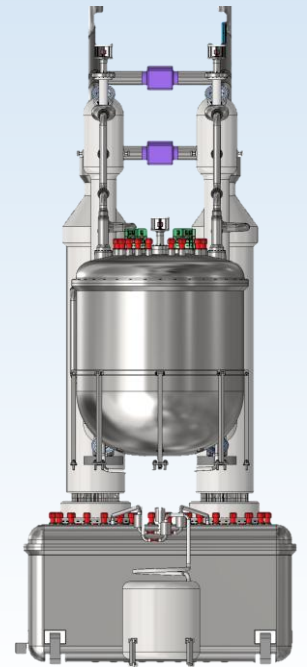
Off-gas

압력 상승
 반응도 및 출력 저하
 부식 증가

용융염 원자로
 (MSR)



제거율, 체류시간,
 선량률, He 순도 등
 운영지표의 최적화



Off-gas system을 통해 노심 압력 안정화, 반응도 건전성 유지, 구조재 부식 저감 등 MSR 운영 안정성 확보에 기여

감사합니다