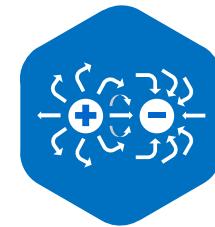
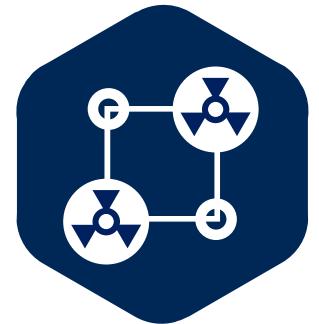


# C-14 함유 방사성폐기물 처리 설비 개발 현황



Hee Reyoung Kim  
Department of Nuclear Engineering, UNIST

2021.10.28



# CONTENTS

1. 활성탄 재활용 그래핀 합성 (2차년도 연구 추진 현황)
2. 폐수지흔합물 처리설비의 사고 관련 방사선학적 안전성 평가  
(3차년도 연구 추진 현황)
3. 연구 추진 계획

# 1. 활성탄 재활용 그래핀 합성

## ● 그래핀 자원화 시장과 응용 분야 조사

- 그래핀은 디스플레이, 차세대 반도체, 에너지용 전극 소재, 초경량/고강도 복합소재, 방열 소재, 배리어/코팅 소재, 나노 잉크용 소재, 전력 전송용 케이블 소재, 센서 소재 및 부품, 연료전지의 전해질막 재료 등 다양한 신소재 응용 분야에서 사용
- 그래핀 소재를 기반으로 한 세계 그래핀 시장 규모는 산업통상자원부와 전자부품연구원에 따르면 2015년에 300억 달러로 성장해 2030년에 6천억 달러로 성장할 것으로 예측

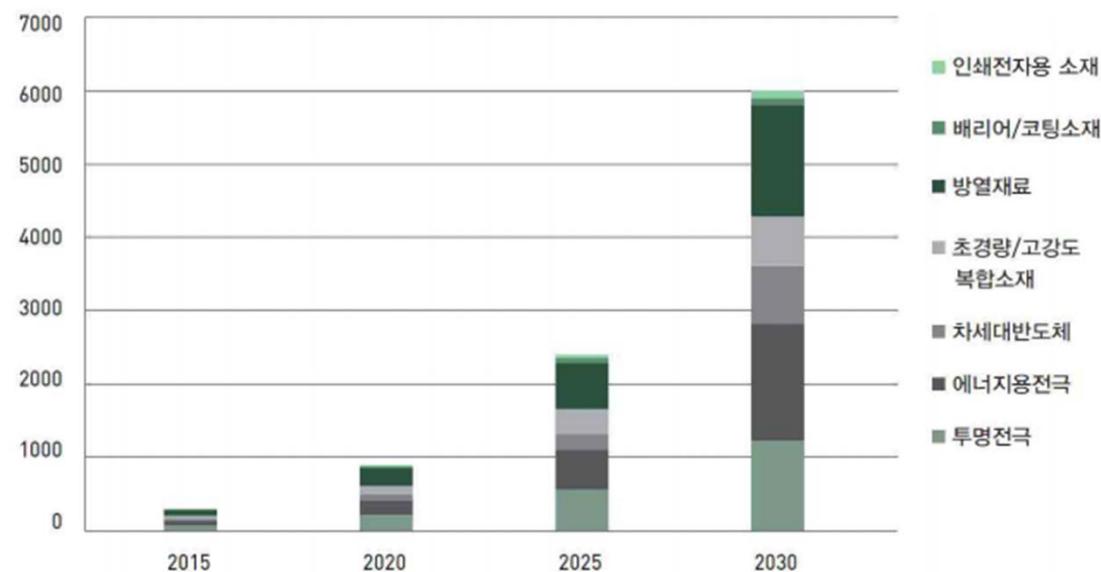


Fig. Market size growth trend of graphene application

# 1. 활성탄 재활용 그래핀 합성

## ● 그래핀의 합성법 중 적합한 방법 분석 및 파악

Table. Comparison of graphene synthesis methods

공정 방법	박리법		성장법	
	물리적	화학적	CVD	에피택셜
특성	매우 우수	나쁨	우수	우수
전도도	매우 우수	낮음	우수	우수
크기	~100 μm	~100 μm	~30 inch	SiC wafer
공정 난이도	쉬움	쉬움	복잡	보통
대량 생산	어려움	가능	가능	어려움

- CVD 방법으로 그래핀을 합성을 할 때, 메탄 가스를 Carbon source로 사용하여, 탄화된 이온교환수지를 이용한 그래핀 합성에 적합한 공정이 아님.
- Top-down 방식의 화학적 박리법을 통하여 파우더 형태의 그래핀 유래 물질인 산화그래핀과 그래핀 양자점 두 가지 물질로의 합성 가능성을 예측
- 산화그래핀 합성을 위해 Hummer's method 방법을 통해 실험을 수행하였으나, 이온교환수지의 내산성으로 인해 충분히 분해되지 않음.

# 1. 활성탄 재활용 그래핀 합성

## ● 그래핀 양자점 합성 실험 수행

### ▪ 그래핀 양자점 합성

- ✓ 탄화된 이온교환수지를 황산과 질산이 3:1의 비율로 혼합된 용액에 투입한 후, 115 °C에서 48시간동안 이온교환수지를 분해하고, 그래핀 양자점을 합성

### ▪ 정제 과정

- ✓ 그래핀 양자점을 수득한 후, 투석법을 활용하여 잔존하고 있는 산 혼합 용액을 제거

### ▪ 필터링 과정

- ✓ 필터를 통해 그래핀 양자점을 수득 (통상적으로 100 nm pore size 필터를 사용하나, 수득률을 올리기 위하여 20 nm pore size 필터 사용)

### ▪ 증발 및 건조 과정

- ✓ 회전증발기를 이용하여 여과된 수득물의 용액을 증발시키고, 동결 건조를 수행



Fig. Synthesis of graphene quantum dots (GQDs)

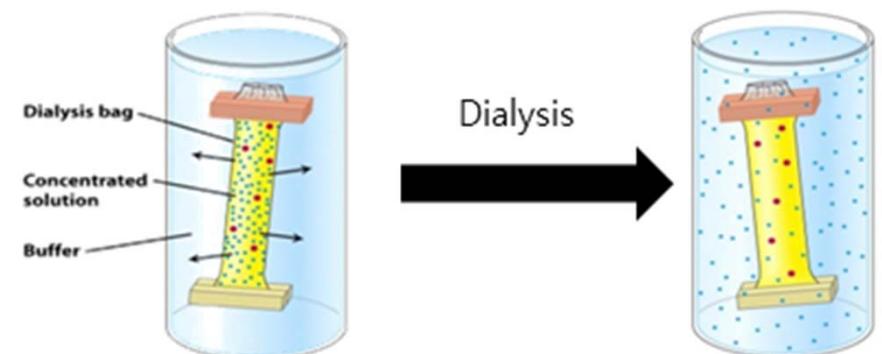


Fig. Purification: Acid removal (Dialysis)

# 1. 활성탄 재활용 그래핀 합성

## ● 그래핀 양자점 합성 결과 및 분석

### ■ 원자력 현미경 (Atomic force microscope) 관측

- ✓ 두께는  $0.4 \sim 3 \text{ nm}$ 로 관측되었으며, 해당 두께는 1 ~ 4 층의 그래핀 층에 해당됨.
- ✓ AFM 이미지의 검은 선의 단차를 측정하였을 때, 단차 두께가  $2 \sim 2.5 \text{ nm}$ 로 관측

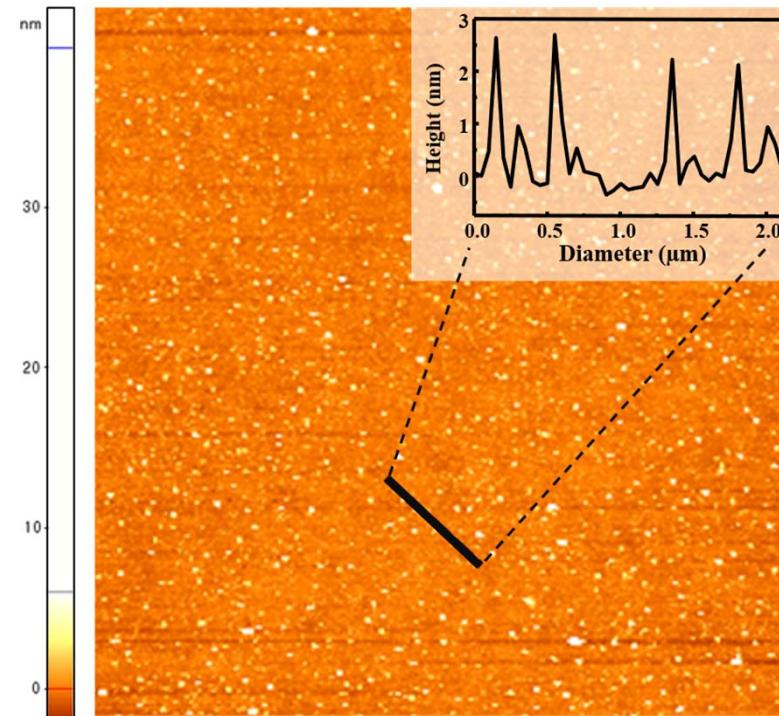


Fig. AFM image of obtained GQDs

# 1. 활성탄 재활용 그래핀 합성

## ● 그래핀 양자점 합성 결과 및 분석

- 푸리에 변환 적외선 분광 (Fourier transform infrared spectrum) 측정 수행

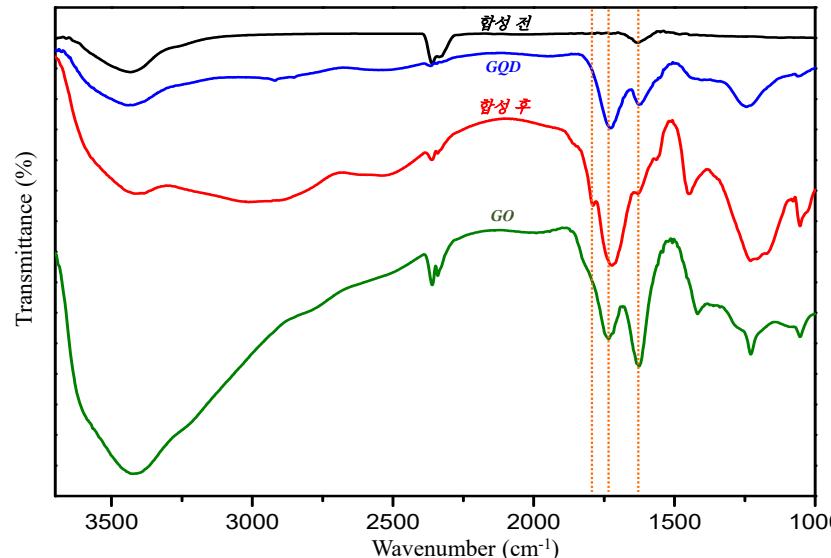


Fig. FT-IR spectrum of obtained GQDs

Table. Changes in functional group before and after synthesis of GQDs

$\Lambda$ (cm <sup>-1</sup> )	합성 전	합성 후
3420	-OH	-OH
1790		C=O (acid halide)
1751		C=O (Carboxylic acid)
1621	C=C (aromatic)	C=C (aromatic)
1445		C-OH
1217		C-O
1054		C-O

- 기존의 그래핀 기반 물질과 비교하였을 때, C=O 카복실기와 C=C 카보닐 작용기가 공통적으로 나타남을 확인
- 방향족 고리에 생성된 이러한 작용기들은 물질의 용매에 분산을 가능하게 하여, 안정한 분산을 유지하는 역할을 함.

# 1. 활성탄 재활용 그래핀 합성

## ● 그래핀 양자점 합성 결과 및 분석

- 라만 스펙트럼 (Raman spectrum) 측정 수행
- 탄소로 이루어져 있는 그래핀 기반 물질들은 라만 분광법에서 고유의 D 피크와 G 피크를 가짐.
- 따라서 그래핀 양자점이 합성되었는지 확인하기 위하여 라만 스펙트럼을 측정하여 고유의 D 피크와 G 피크를 확인할 필요가 있음.
- 고유의 D 피크와 G 피크가 존재함을 확인하였고, 그래핀 양자점이 성공적으로 합성되었음을 알 수 있음.

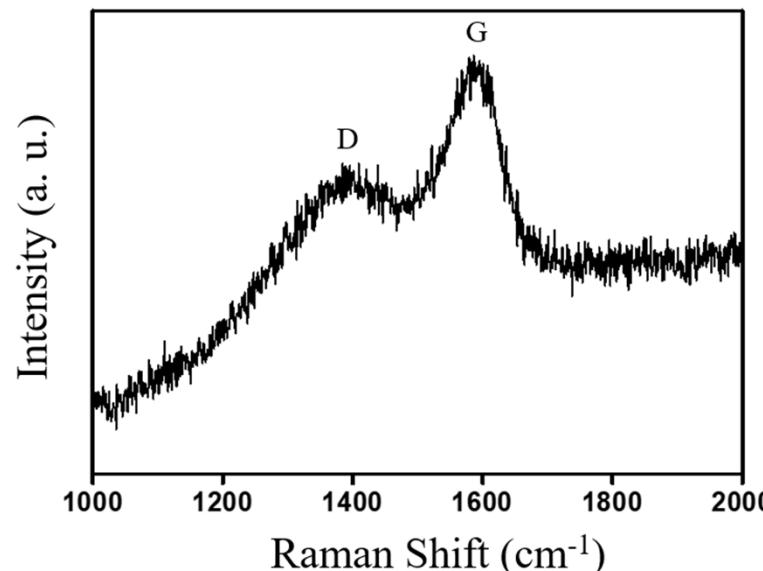


Fig. Raman spectrum of obtained GQDs

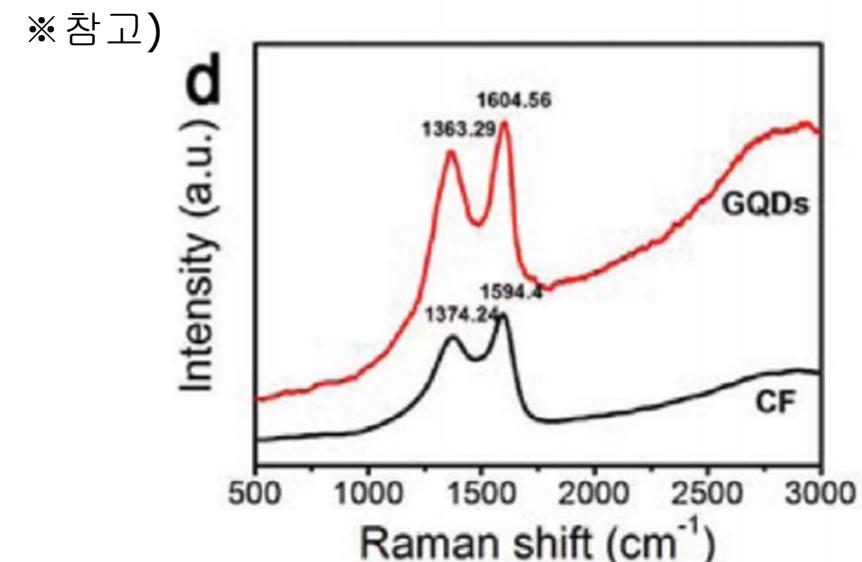


Fig. Raman spectrum in  
J. Peng et. al. NanoLett. 12, 844–849 (2012)

## 2. 폐수지흔합물 처리설비의 사고 관련 방사선학적 안전성 평가

### ● 작업자의 외부 피폭 선량 평가를 위한 선원항 도출

- 1단계 연구 자료 및 시간당 폐수지흔합물 처리용량을 기반으로 도출된 선원항을 외부 피폭 선량 평가 코드인 VISIPLAN 3D ALARA Planning Tool에 활용
- 보수성을 고려한 설비 내 최대 잔류량인 600 kg의 폐수지흔합물과 실제 설비 내에 존재하는 양인 125 kg의 폐수지흔합물을 고려하여 비교 평가 수행

Table. Source term of spent resin mixture (Bq/g)

Nuclide	Zeolite	Activated carbon	Spent resin
<sup>57</sup> Co	0	0	2.05E+01
<sup>60</sup> Co	4.98E+01	1.52E+02	3.82E+02
<sup>51</sup> Cr	0	0	2.05E+02
<sup>134</sup> Cs	2.39E+01	1.80E+00	1.33E+01
<sup>137</sup> Cs	3.22E+04	1.63E+03	1.16E+04
<sup>54</sup> Mn	0	0	1.60E+01
<sup>95</sup> Nb	2.89E-01	5.92E+00	3.67E+01
<sup>125</sup> Sb	0	9.90E+00	2.80E+02
<sup>95</sup> Zr	0	0	2.68E+01
<sup>152</sup> Eu	0	0	4.44E+02
<sup>154</sup> Eu	0	0	3.48E+01
<sup>3</sup> H	8.55E+03	1.56E+04	3.30E+04
<sup>14</sup> C	1.98E+02	2.22E+03	1.54E+05

## 2. 폐수지흔합물 처리설비의 사고 관련 방사선학적 안전성 평가

### ● 작업자의 외부 피폭 선량 평가를 위한 폐수지흔합물 처리설비 모델링

- VISIPLAN 코드를 활용하여 처리설비 모델링
- 도출한 선원항과 기하학적 정보를 기반으로 처리설비의 유출 사고 시 작업자의 방사선학적 안전성 평가 수행

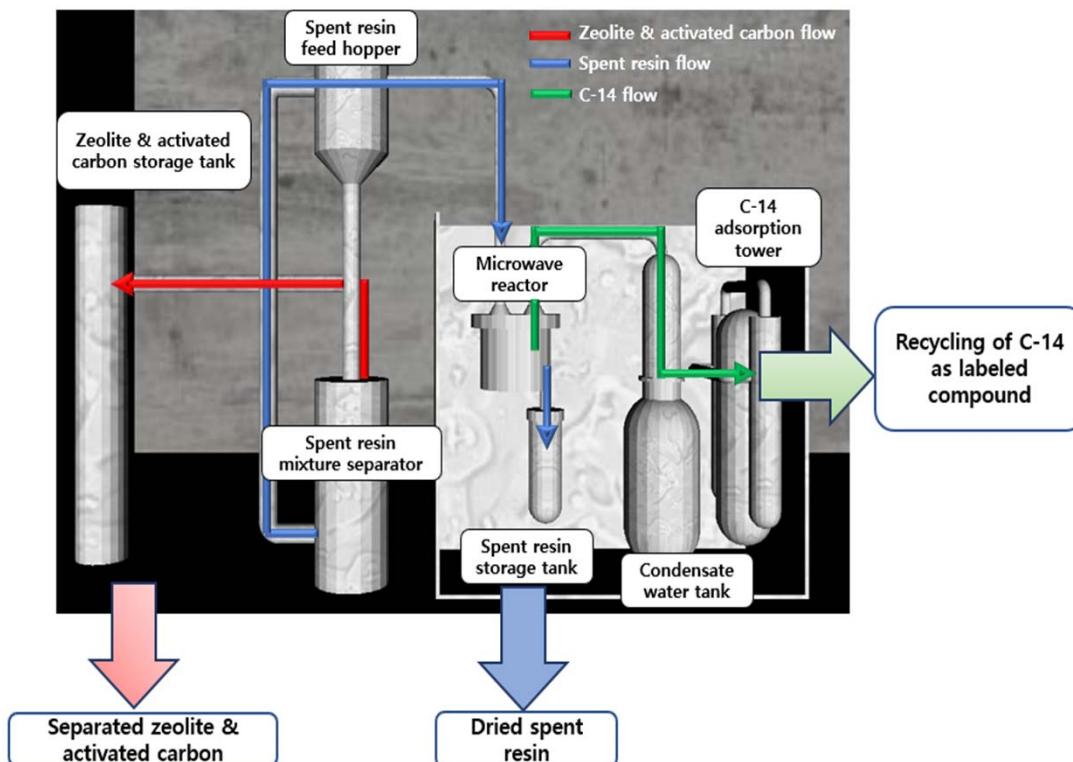


Fig. Model of spent resin treatment facility and flow of spent resin mixture

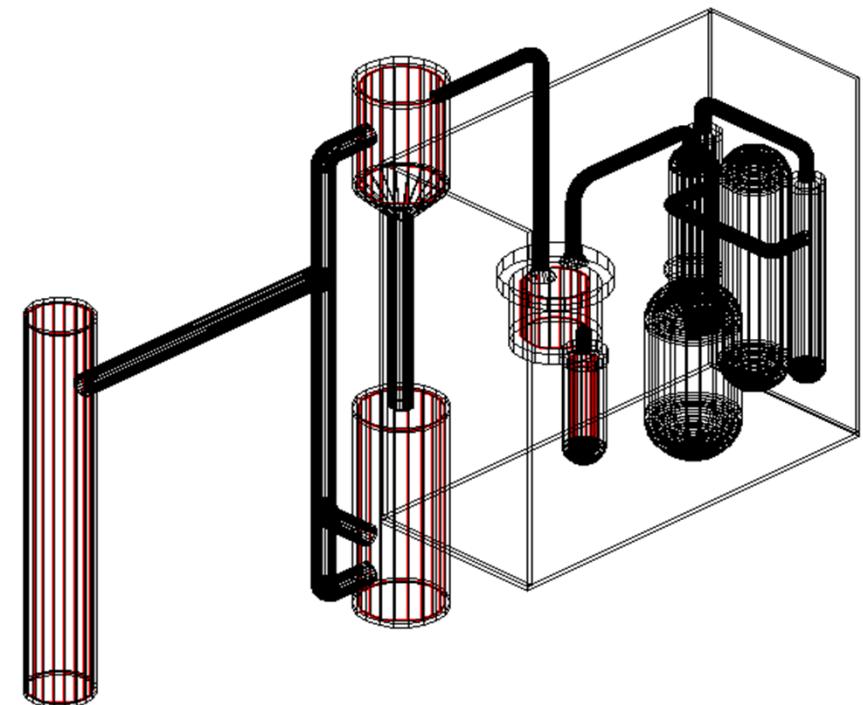


Fig. Location of spent resin mixture in treatment facility in normal operation

## 2. 폐수지흔합물 처리설비의 사고 관련 방사선학적 안전성 평가

### ● 폐수지흔합물 처리설비 사고 시나리오 가정 및 내부 피폭 선량 평가

- 폐수지흔합물 처리설비의 파트 1개에서 폐수지흔합물이 외부로 유출되는 사고 시나리오 도출
- 유출 비율은 각 장치마다 10 %의 비율로 (10 ~ 100 %) 늘려가며 평가 수행
- 내부 피폭 선량 평가는  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^{14}\text{C}$  및 휘발성 핵종인  ${}^{137}\text{Cs}$ 을 제외한 나머지 입자에 대하여

**Resuspension rate (25  $\mu\text{m}$  이상의 입자: 9.49E-09  $\text{s}^{-1}$ )를 고려**

- ✓ 마이크로웨이브 반응기에서  ${}^{137}\text{Cs}$ 의 휘발온도 이상으로 되어 외부로 기체 형태로 유출이 되었을 경우를 가정
- ✓ 반응 후 폐수지 저장탱크에선 마이크로웨이브 반응기에서  ${}^{14}\text{C}$ 의 95 % 탈착이 발생한 것을 가정하여 5 %의  ${}^{14}\text{CO}$  기체 형태로 외부로 유출되었다고 가정 (나머지 핵종은 입자형태로 Resuspension rate를 고려)
- 유출된 폐수지흔합물을 작업자가 1시간동안 제거하는 작업을 수행하는 것으로 가정

$$H = \sum_i \{A_i \times C_i\} \times \eta \times T \times APF$$

H: Committed effective dose [mSv]

$A_i$ : Concentration of radionuclide  $i$  in air ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )

$C_i$ : Dose conversion factor of radionuclide  $i$  [ $\text{mSv}/\text{Bq}$ ]

$\eta$ : Breathing rate [ $1.20 \text{ m}^3/\text{h}$ ]

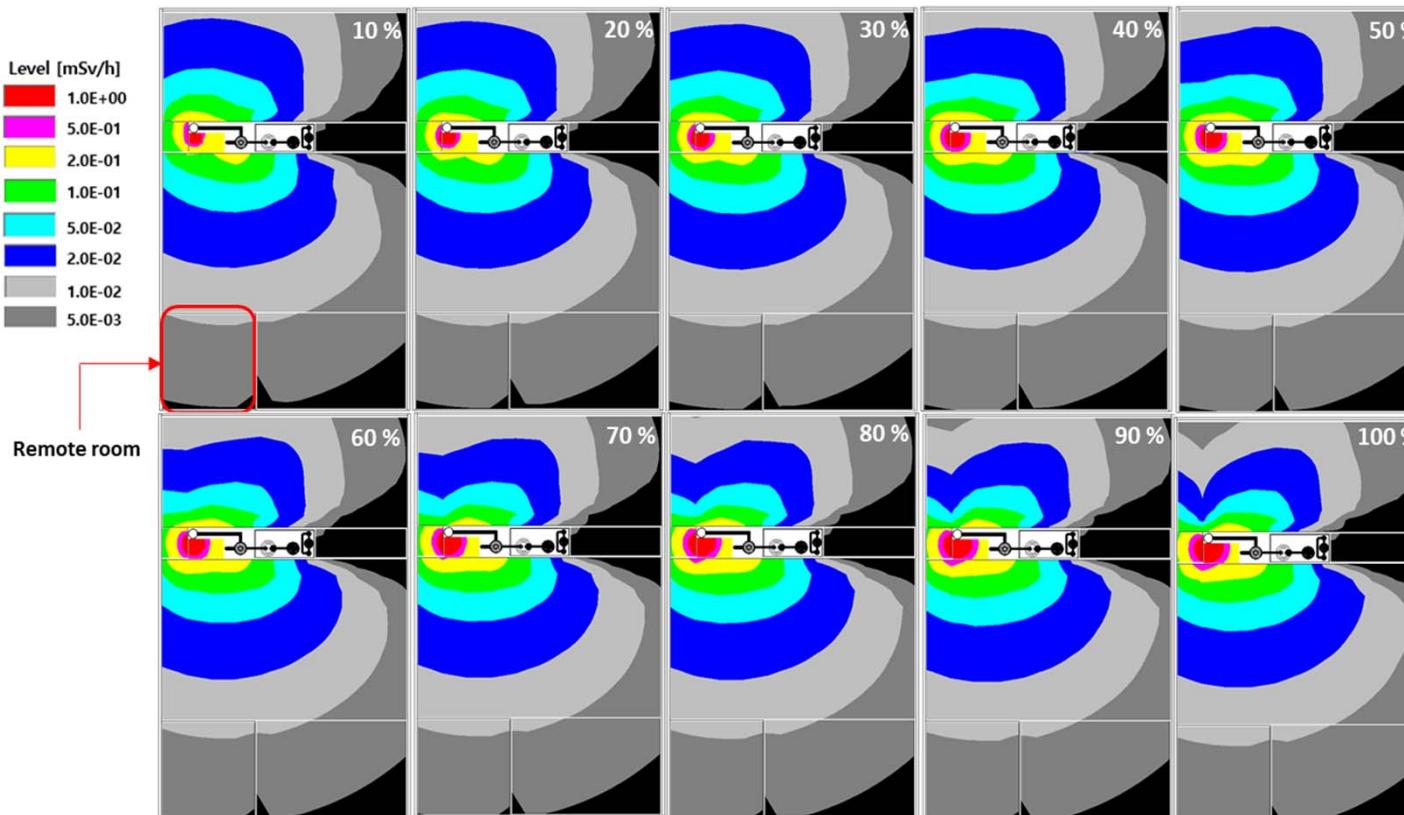
T: Working time [h]

APF: Assigned protection factor [1/50]

## 2. 폐수지혼합물 처리설비의 사고 관련 방사선학적 안전성 평가

- 폐수지혼합물 처리설비 유출율에 따른 공간 선량 평가

- 폐수지혼합물 처리설비 유출율에 따른 공간 선량 평가 수행
  - ✓ 분리 제올라이트 및 활성탄 저장탱크 (Zeolite and activated carbon storage tank, ZAST)



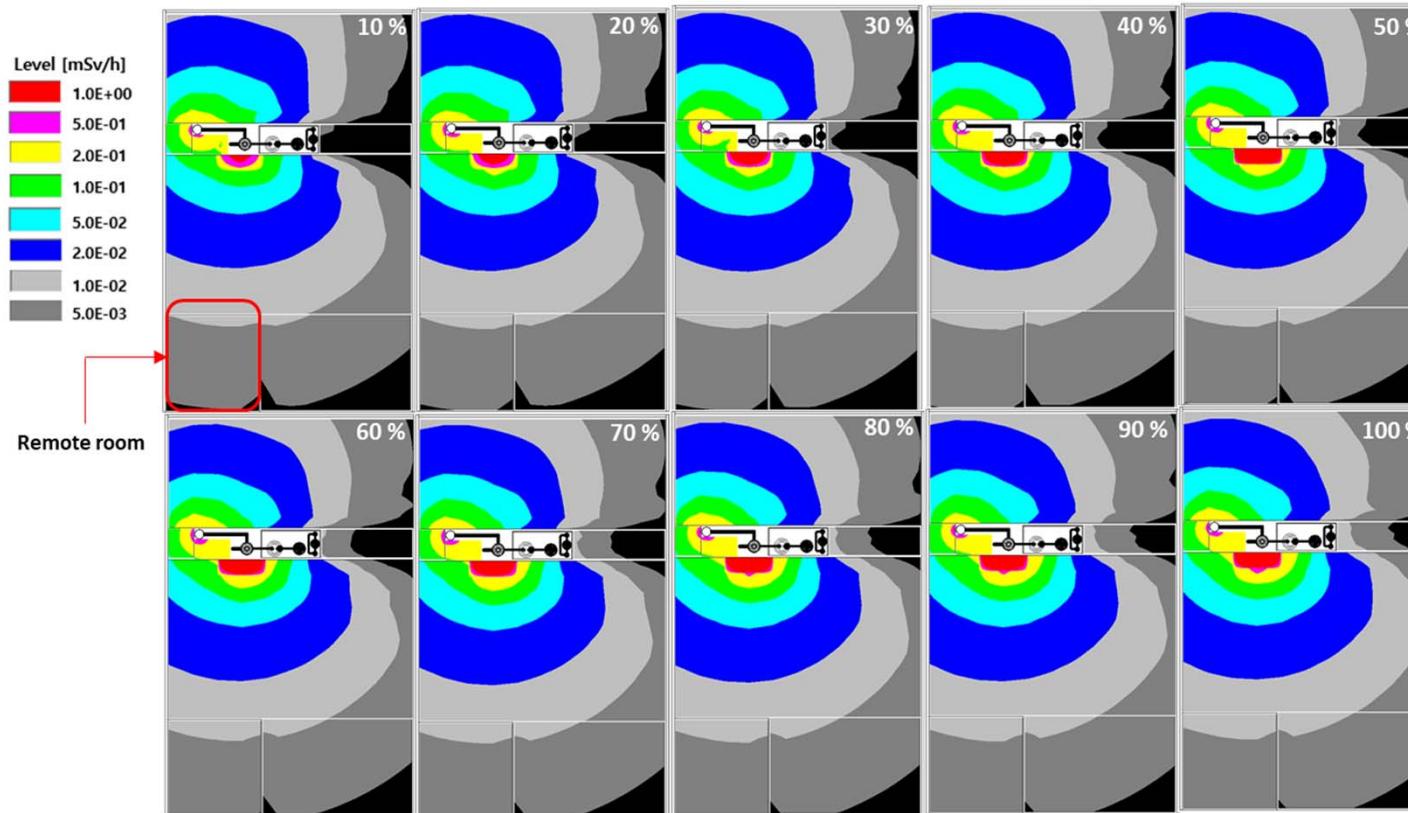
- 유출 지점에서의 최대 선량 범위
- ❖ Conservative evaluation (600 kg):  $3.30E+00 \sim 2.30E+01$  mSv/h
- ❖ Realistic evaluation (125 kg):  $7.00E-01 \sim 4.79E+00$  mSv/h

Fig. Spatial dose according to outflow rate from zeolite and activated carbon storage tank

## 2. 폐수지혼합물 처리설비의 사고 관련 방사선학적 안전성 평가

- 폐수지혼합물 처리설비 유출율에 따른 공간 선량 평가

- 폐수지혼합물 처리설비 유출율에 따른 공간 선량 평가 수행
  - ✓ 폐수지혼합물 분리탱크 (Spent resin mixture separator, SRMS)



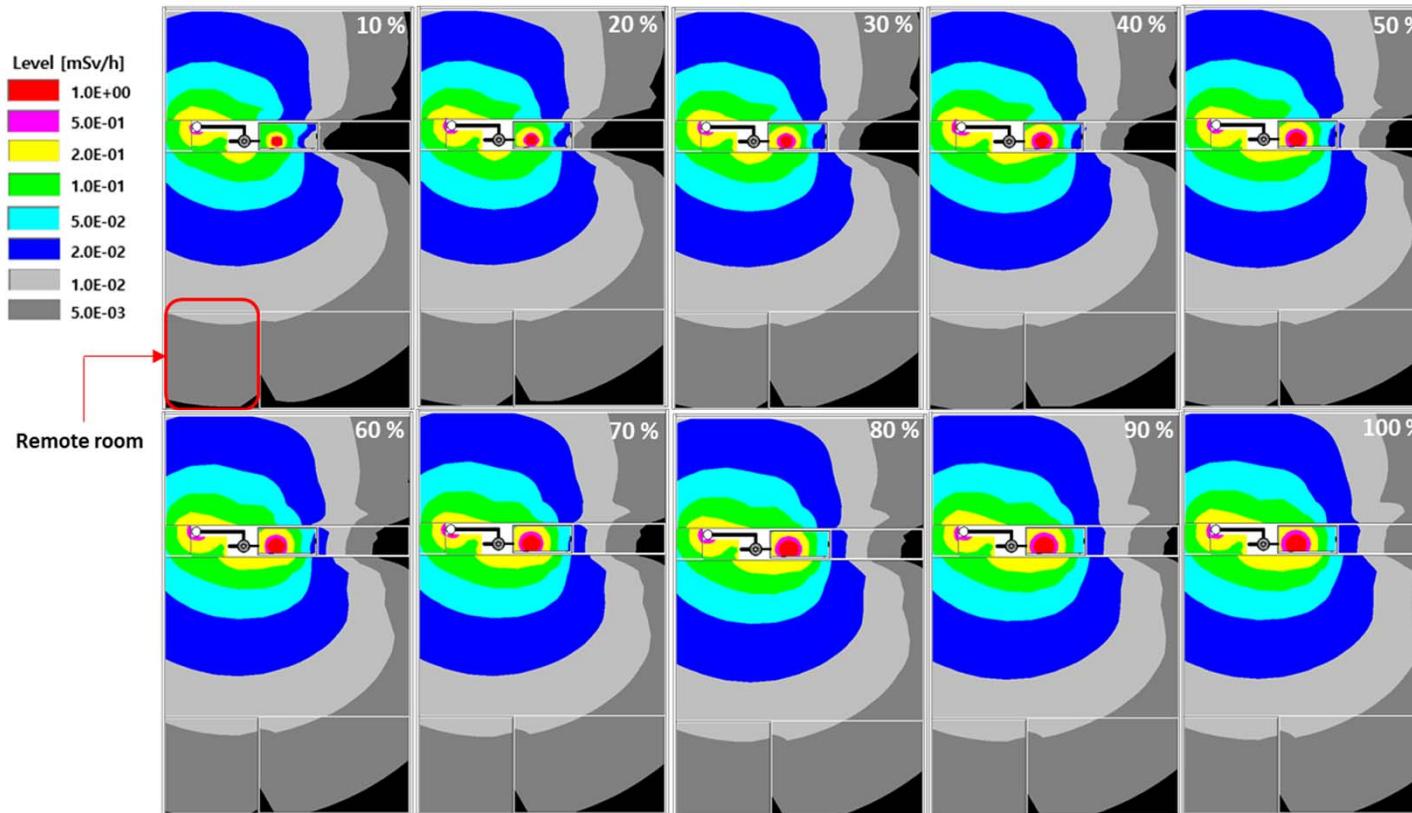
- 유출 지점에서의 최대 선량 범위
- ❖ Conservative evaluation (600 kg):  $1.80E+00 \sim 1.40E+01$  mSv/h
- ❖ Realistic evaluation (125 kg):  $4.00E-01 \sim 2.90E+00$  mSv/h

Fig. Spatial dose according to outflow rate from spent resin mixture separator

## 2. 폐수지혼합물 처리설비의 사고 관련 방사선학적 안전성 평가

- 폐수지혼합물 처리설비 유출율에 따른 공간 선량 평가

- 폐수지혼합물 처리설비 유출율에 따른 공간 선량 평가 수행
  - ✓ 반응 후 폐수지 저장탱크 (Spent resin storage tank, SRST)



- 유출 지점에서의 최대 선량 범위
- ❖ Conservative evaluation (600 kg):  $7.40E+00 \sim 3.30E+01$  mSv/h
- ❖ Realistic evaluation (125 kg):  $1.50E+00 \sim 6.90E+00$  mSv/h

Fig. Spatial dose according to outflow rate from spent resin storage tank

## 2. 폐수지흔합물 처리설비의 사고 관련 방사선학적 안전성 평가

- 폐수지흔합물 처리설비 유출율에 따른 공간 선량 평가

- 폐수지흔합물 처리설비 유출율에 따른 공간 선량 평가 수행
  - ✓ 마이크로웨이브 반응기 (Microwave reactor, MWR)

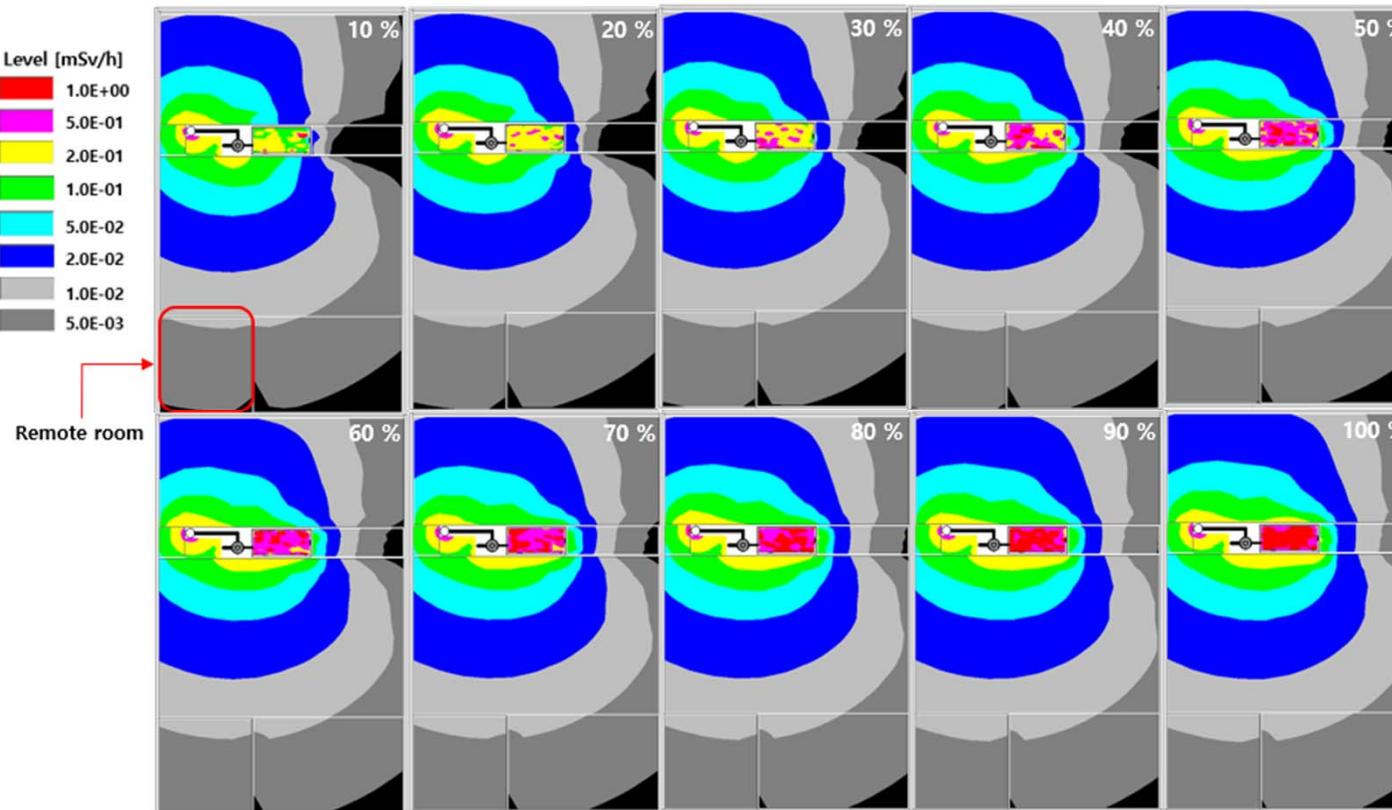


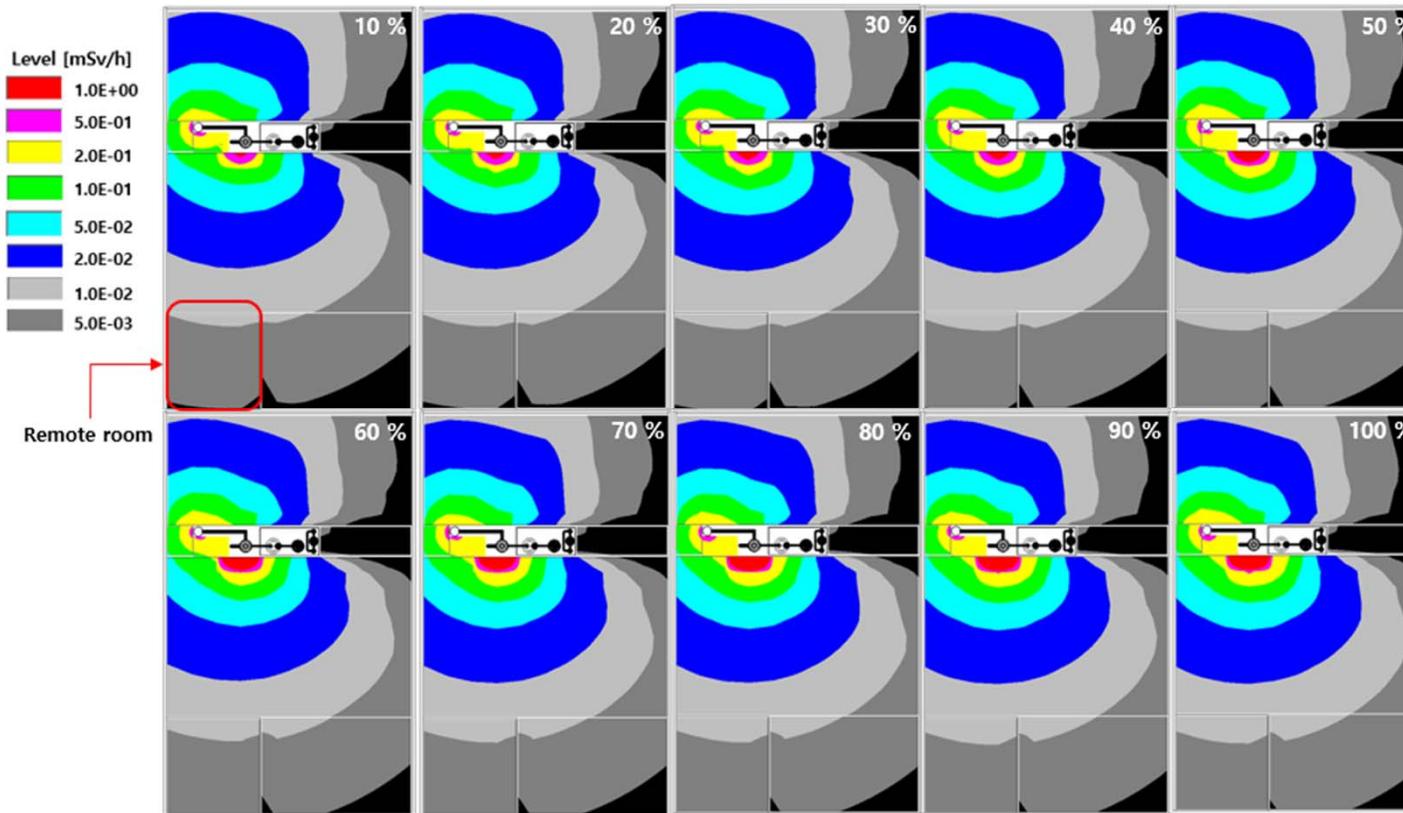
Fig. Spatial dose according to outflow rate from microwave reactor

- 유출 지점에서의 최대 선량 범위
- ❖ Conservative evaluation (600 kg):  $4.50E+00 \sim 2.00E+01$  mSv/h
- ❖ Realistic evaluation (125 kg):  $9.00E-01 \sim 4.20E+00$  mSv/h

## 2. 폐수지혼합물 처리설비의 사고 관련 방사선학적 안전성 평가

- 폐수지혼합물 처리설비 유출율에 따른 공간 선량 평가

- 폐수지혼합물 처리설비 유출율에 따른 공간 선량 평가 수행
  - ✓ 폐수지 Feed hopper (Spent resin feed hopper, SRFH)



- 유출 지점에서의 최대 선량 범위
- ❖ Conservative evaluation (600 kg):  $1.30E+00 \sim 7.80E+00 \text{ mSv/h}$
- ❖ Realistic evaluation (125 kg):  $3.00E-01 \sim 1.60E+00 \text{ mSv/h}$

Fig. Spatial dose according to outflow rate from spent resin feed hopper

## 2. 폐수지흔합물 처리설비의 사고 관련 방사선학적 안전성 평가

### ● 폐수지흔합물 처리설비 유출율에 따른 작업자의 외부 피폭 선량 평가 결과

- 폐수지흔합물 처리설비 유출율 및 유출 파트에 따른 작업자의 외부 피폭 선량 평가 수행
- 1시간 동안의 작업자의 보수적인 외부 피폭 선량 범위는 **2.00E-01 ~ 3.50E-01 mSv**로 도출

Table. Dose rate of workers while removing radioactive materials according to outflow rate due to leakage in treatment facility (mSv/h)

Outflow rate	Evaluation type	SRMS	ZAST	SRST	MWR	SRFH
10 %	Conservative	2.20E-01	2.50E-01	2.70E-01	2.70E-01	2.00E-01
	Realistic	4.58E-02	5.21E-02	5.63E-02	5.63E-02	4.17E-02
20 %	Conservative	2.30E-01	2.60E-01	2.80E-01	2.80E-01	2.10E-01
	Realistic	4.79E-02	5.42E-02	5.83E-02	5.83E-02	4.38E-02
30 %	Conservative	2.40E-01	2.70E-01	2.80E-01	2.90E-01	2.20E-01
	Realistic	5.00E-02	5.63E-02	5.83E-02	6.04E-02	4.58E-02
40 %	Conservative	2.50E-01	2.80E-01	2.90E-01	3.00E-01	2.30E-01
	Realistic	5.21E-02	5.83E-02	6.04E-02	6.25E-02	4.79E-02
50 %	Conservative	2.60E-01	2.90E-01	2.90E-01	3.00E-01	2.40E-01
	Realistic	5.42E-02	6.04E-02	6.04E-02	6.25E-02	5.00E-02
60 %	Conservative	2.70E-01	2.90E-01	3.00E-01	3.10E-01	2.50E-01
	Realistic	5.63E-02	6.04E-02	6.25E-02	6.46E-02	5.21E-02
70 %	Conservative	2.80E-01	3.00E-01	3.10E-01	3.20E-01	2.60E-01
	Realistic	5.83E-02	6.25E-02	6.46E-02	6.67E-02	5.42E-02
80 %	Conservative	2.90E-01	3.10E-01	3.20E-01	3.30E-01	2.70E-01
	Realistic	6.04E-02	6.46E-02	6.67E-02	6.88E-02	5.63E-02
90 %	Conservative	3.00E-01	3.20E-01	3.20E-01	3.40E-01	2.80E-01
	Realistic	6.25E-02	6.67E-02	6.67E-02	7.08E-02	5.83E-02
100 %	Conservative	3.10E-01	3.30E-01	3.30E-01	3.50E-01	3.00E-01
	Realistic	6.46E-02	6.88E-02	6.88E-02	7.29E-02	6.25E-02

SRMS, spent resin mixture separator; ZAST, zeolite and activated carbon storage tank; SRST, spent resin storage tank; MWR, microwave reactor; SRFH, spent resin feed hopper.

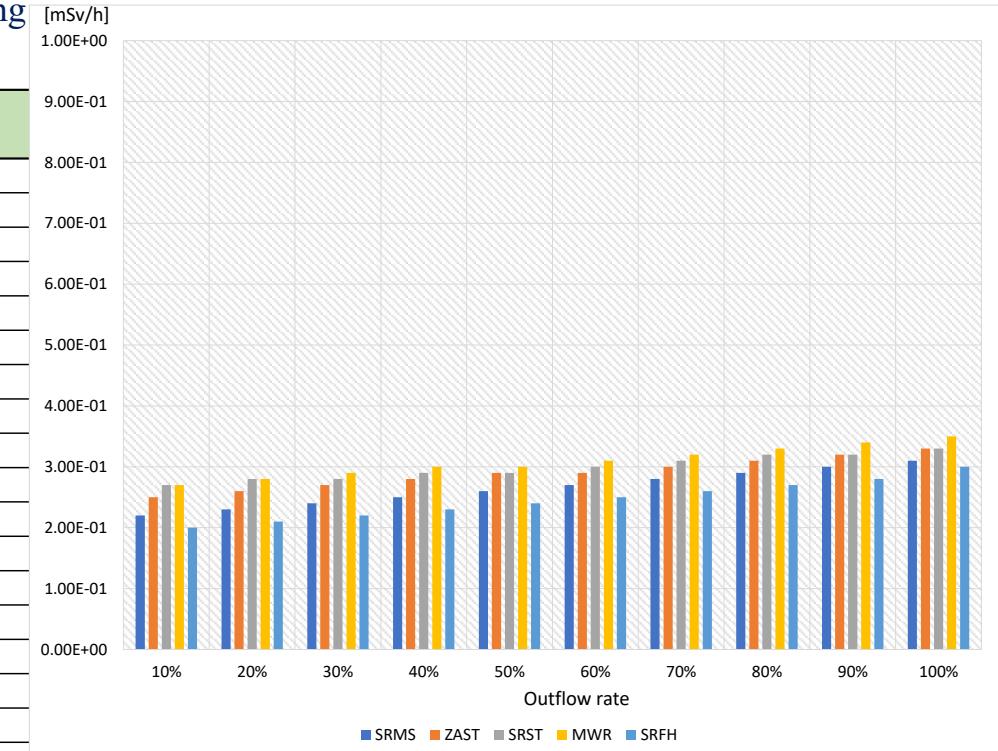


Fig. Dose rate of workers while removing radioactive materials according to outflow rate due to leakage in treatment facility

## 2. 폐수지흔합물 처리설비의 사고 관련 방사선학적 안전성 평가

### ● 폐수지흔합물 처리설비 유출율에 따른 작업자의 내부 피폭 선량 평가 결과 (APF 고려 X)

- 1시간 동안 APF 50에 해당하는 방호구를 착용하지 않은 작업자의 보수적인 내부 피폭 선량 범위는 **2.08E-02 ~ 1.88E+01 mSv**로 도출

Table. Committed effective dose of workers without air-purifying respirator according to outflow rate due to leakage in treatment facility (mSv)

Outflow rate	Evaluation type	SRMS	ZAST	SRST	MWR	SRFH
10 %	Conservative	5.82E-02	2.08E-02	3.30E-02	1.88E+00	5.53E-02
	Realistic	1.21E-02	4.33E-03	6.87E-03	3.92E-01	1.15E-02
20 %	Conservative	1.16E-01	4.16E-02	6.59E-02	3.77E+00	1.11E-01
	Realistic	2.43E-02	8.66E-03	1.37E-02	7.85E-01	2.30E-02
30 %	Conservative	1.75E-01	6.24E-02	9.89E-02	5.65E+00	1.66E-01
	Realistic	3.64E-02	1.30E-02	2.06E-02	1.18E+00	3.45E-02
40 %	Conservative	2.33E-01	8.32E-02	1.32E-01	7.53E+00	2.21E-01
	Realistic	4.85E-02	1.73E-02	2.75E-02	1.57E+00	4.60E-02
50 %	Conservative	2.91E-01	1.04E-01	1.65E-01	9.42E+00	2.76E-01
	Realistic	6.07E-02	2.17E-02	3.43E-02	1.96E+00	5.76E-02
60 %	Conservative	3.49E-01	1.25E-01	1.98E-01	1.13E+01	3.32E-01
	Realistic	7.28E-02	2.60E-02	4.12E-02	2.35E+00	6.91E-02
70 %	Conservative	4.08E-01	1.46E-01	2.31E-01	1.32E+01	3.87E-01
	Realistic	8.49E-02	3.03E-02	4.81E-02	2.75E+00	8.06E-02
80 %	Conservative	4.66E-01	1.66E-01	2.64E-01	1.51E+01	4.42E-01
	Realistic	9.70E-02	3.46E-02	5.49E-02	3.14E+00	9.21E-02
90 %	Conservative	5.24E-01	1.87E-01	2.97E-01	1.70E+01	4.97E-01
	Realistic	1.09E-01	3.90E-02	6.18E-02	3.53E+00	1.04E-01
100 %	Conservative	5.82E-01	2.08E-01	3.30E-01	1.88E+01	5.53E-01
	Realistic	1.21E-01	4.33E-02	6.87E-02	3.92E+00	1.15E-01

SRMS, spent resin mixture separator; ZAST, zeolite and activated carbon storage tank; SRST, spent resin storage tank; MWR, microwave reactor; SRFH, spent resin feed hopper.

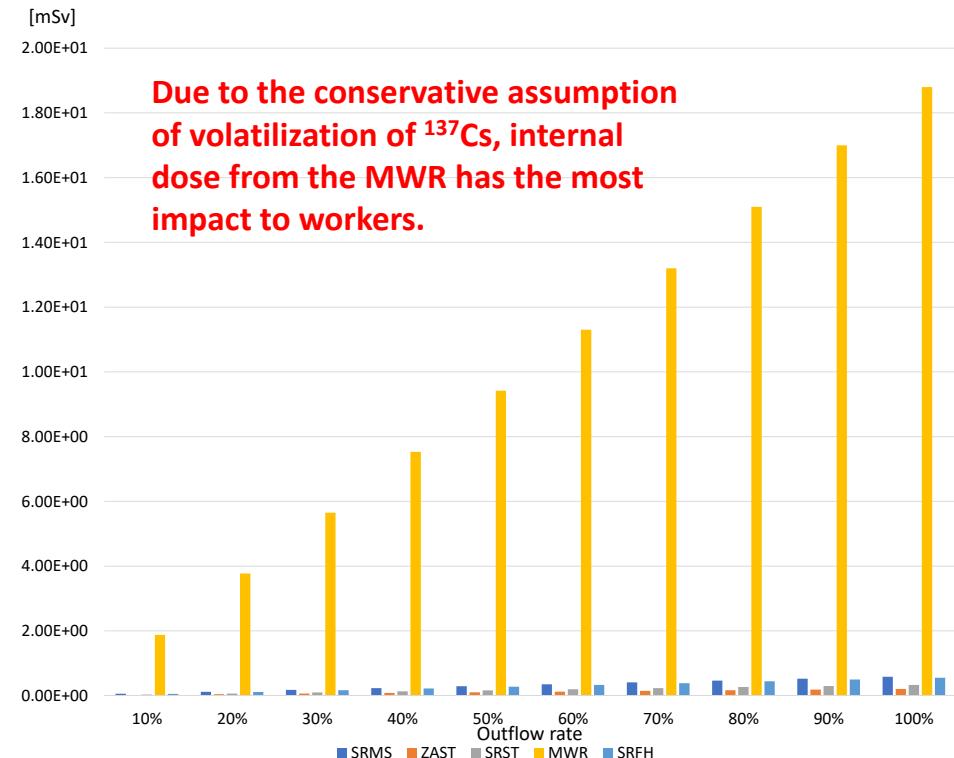


Fig. Committed effective dose of workers without air-purifying respirator according to outflow rate due to leakage in treatment facility (mSv)

## 2. 폐수지흔합물 처리설비의 사고 관련 방사선학적 안전성 평가

### ● 폐수지흔합물 처리설비 유출율에 따른 작업자의 내부 피폭 선량 평가 결과 (APF 고려)

- 1시간 동안 APF 50에 해당하는 방호구를 착용한 작업자의 보수적인 내부 피폭 선량 범위는 **4.16E-04 ~ 3.77E-01 mSv**로 도출

Table. Committed effective dose of workers with air-purifying respirator according to outflow rate due to leakage in treatment facility (mSv)

Outflow rate	Evaluation type	SRMS	ZAST	SRST	MWR	SRFH
10 %	Conservative	1.16E-03	4.16E-04	6.59E-04	3.77E-02	1.11E-03
	Realistic	<b>2.43E-04</b>	<b>8.66E-05</b>	<b>1.37E-04</b>	<b>7.85E-03</b>	<b>2.30E-04</b>
20 %	Conservative	2.33E-03	8.32E-04	1.32E-03	7.53E-02	2.21E-03
	Realistic	<b>4.85E-04</b>	<b>1.73E-04</b>	<b>2.75E-04</b>	<b>1.57E-02</b>	<b>4.60E-04</b>
30 %	Conservative	3.49E-03	1.25E-03	1.98E-03	1.13E-01	3.32E-03
	Realistic	<b>7.28E-04</b>	<b>2.60E-04</b>	<b>4.12E-04</b>	<b>2.35E-02</b>	<b>6.91E-04</b>
40 %	Conservative	4.66E-03	1.66E-03	2.64E-03	1.51E-01	4.42E-03
	Realistic	<b>9.70E-04</b>	<b>3.46E-04</b>	<b>5.49E-04</b>	<b>3.14E-02</b>	<b>9.21E-04</b>
50 %	Conservative	5.82E-03	2.08E-03	3.30E-03	1.88E-01	5.53E-03
	Realistic	<b>1.21E-03</b>	<b>4.33E-04</b>	<b>6.87E-04</b>	<b>3.92E-02</b>	<b>1.15E-03</b>
60 %	Conservative	6.99E-03	2.49E-03	3.96E-03	2.26E-01	6.63E-03
	Realistic	<b>1.46E-03</b>	<b>5.20E-04</b>	<b>8.24E-04</b>	<b>4.71E-02</b>	<b>1.38E-03</b>
70 %	Conservative	8.15E-03	2.91E-03	4.62E-03	2.64E-01	7.74E-03
	Realistic	<b>1.70E-03</b>	<b>6.06E-04</b>	<b>9.62E-04</b>	<b>5.49E-02</b>	<b>1.61E-03</b>
80 %	Conservative	9.32E-03	3.33E-03	5.27E-03	3.01E-01	8.84E-03
	Realistic	<b>1.94E-03</b>	<b>6.93E-04</b>	<b>1.10E-03</b>	<b>6.28E-02</b>	<b>1.84E-03</b>
90 %	Conservative	1.05E-02	3.74E-03	5.93E-03	3.39E-01	9.95E-03
	Realistic	<b>2.18E-03</b>	<b>7.80E-04</b>	<b>1.24E-03</b>	<b>7.06E-02</b>	<b>2.07E-03</b>
100 %	Conservative	1.16E-02	4.16E-03	6.59E-03	3.77E-01	1.11E-02
	Realistic	<b>2.43E-03</b>	<b>8.66E-04</b>	<b>1.37E-03</b>	<b>7.85E-02</b>	<b>2.30E-03</b>

SRMS, spent resin mixture separator; ZAST, zeolite and activated carbon storage tank; SRST, spent resin storage tank; MWR, microwave reactor; SRFH, spent resin feed hopper.

- 선량 영향: MWR > SRMS > SRFH > SRST > ZAST
- 방호구를 착용하여 작업하는 것이 보수적으로 작업자의 연간 선량한도를 만족할 수 있을 것으로 예상됨.

## 2. 폐수지혼합물 처리설비의 사고 관련 방사선학적 안전성 평가

### ● 폐수지혼합물 처리설비 유출율에 따른 작업자의 방사선학적 안전성 평가 (APF 고려 X)

- 1시간 동안 작업한 작업자의 총 선량 (외부+내부) 도출

Table. Radiological safety evaluation for worker removing leaked spent resin mixture (without APF)

Outflow rate	Evaluation type	SRMS	ZAST	SRST	MWR	SRFH
10 %	Conservative	2.78E-01	2.71E-01	3.03E-01	2.15E+00	2.55E-01
	Realistic	5.80E-02	5.64E-02	6.31E-02	4.49E-01	5.32E-02
20 %	Conservative	3.46E-01	3.02E-01	3.46E-01	4.05E+00	3.21E-01
	Realistic	7.22E-02	6.28E-02	7.21E-02	8.43E-01	6.68E-02
30 %	Conservative	4.15E-01	3.32E-01	3.79E-01	5.94E+00	3.86E-01
	Realistic	8.64E-02	6.92E-02	7.89E-02	1.24E+00	8.04E-02
40 %	Conservative	4.83E-01	3.63E-01	4.22E-01	7.83E+00	4.51E-01
	Realistic	1.01E-01	7.57E-02	8.79E-02	1.63E+00	9.40E-02
50 %	Conservative	5.51E-01	3.94E-01	4.55E-01	9.72E+00	5.16E-01
	Realistic	1.15E-01	8.21E-02	9.48E-02	2.02E+00	1.08E-01
60 %	Conservative	6.19E-01	4.15E-01	4.98E-01	1.16E+01	5.82E-01
	Realistic	1.29E-01	8.64E-02	1.04E-01	2.42E+00	1.21E-01
70 %	Conservative	6.88E-01	4.46E-01	5.41E-01	1.35E+01	6.47E-01
	Realistic	1.43E-01	9.28E-02	1.13E-01	2.81E+00	1.35E-01
80 %	Conservative	7.56E-01	4.76E-01	5.84E-01	1.54E+01	7.12E-01
	Realistic	1.57E-01	9.92E-02	1.22E-01	3.21E+00	1.48E-01
90 %	Conservative	8.24E-01	5.07E-01	6.17E-01	1.73E+01	7.77E-01
	Realistic	1.72E-01	1.06E-01	1.28E-01	3.60E+00	1.62E-01
100 %	Conservative	8.92E-01	5.38E-01	6.60E-01	1.92E+01	8.53E-01
	Realistic	1.86E-01	1.12E-01	1.37E-01	4.00E+00	1.78E-01

SRMS, spent resin mixture separator; ZAST, zeolite and activated carbon storage tank; SRST, spent resin storage tank; MWR, microwave reactor; SRFH, spent resin feed hopper.

- **Conservative evaluation: 2.55E-01 ~ 1.92E+01 mSv**
- **Realistic evaluation: 5.32E-02 ~ 4.00E+00 mSv**
- APF를 고려하지 않았음에도 불구하고 작업자 평균 연간 선량한도인 20 mSv 미만임을 확인
- 처리설비의 유출 파트 및 유출율에 관계없이 선량 한도 만족

## 2. 폐수지혼합물 처리설비의 사고 관련 방사선학적 안전성 평가

### ● 폐수지혼합물 처리설비 유출율에 따른 작업자의 방사선학적 안전성 평가 (APF 고려)

- 1시간 동안 작업한 작업자의 총 선량 (외부+내부) 도출
  - ✓ Conservative evaluation: **2.01E-01 ~ 7.27E-01 mSv**
  - ✓ Realistic evaluation: **4.19E-02 ~ 1.51E-01 mSv**

Table. Radiological safety evaluation for worker removing leaked spent resin mixture (with APF)

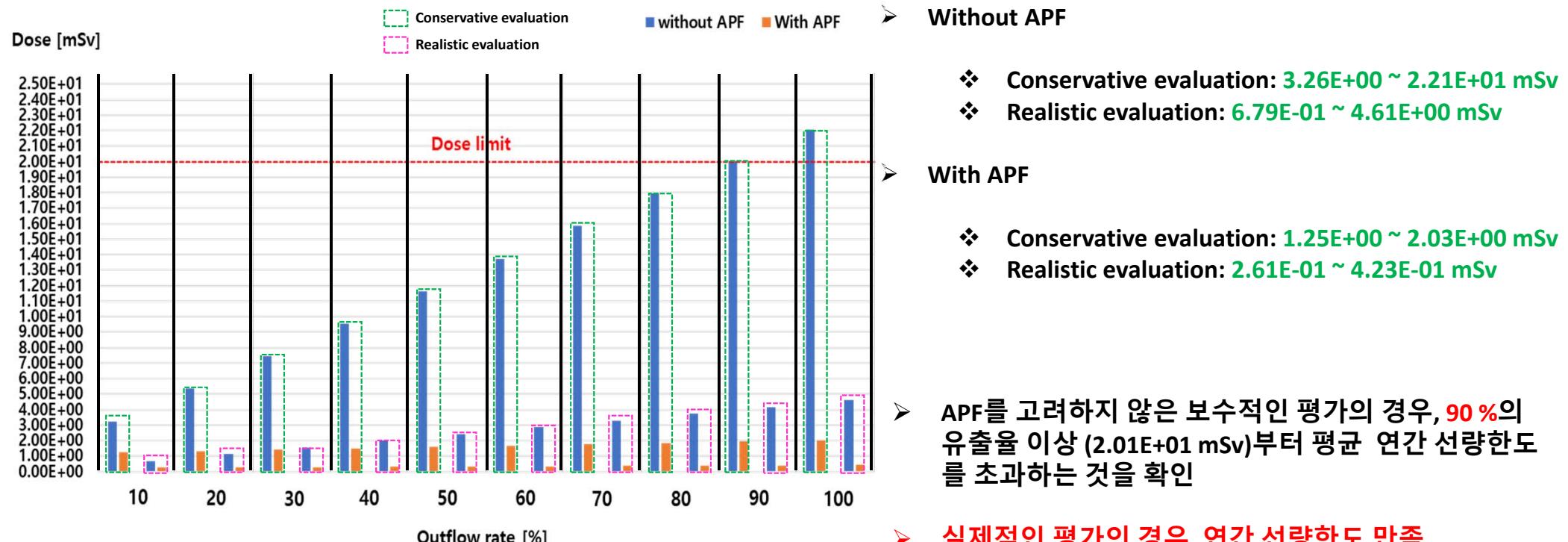
Outflow rate	Evaluation type	SRMS	ZAST	SRST	MWR	SRFH
10 %	Conservative	2.21E-01	2.50E-01	2.71E-01	3.08E-01	2.01E-01
	Realistic	<b>4.61E-02</b>	<b>5.22E-02</b>	<b>5.64E-02</b>	<b>6.41E-02</b>	<b>4.19E-02</b>
20 %	Conservative	2.32E-01	2.61E-01	2.81E-01	3.55E-01	2.12E-01
	Realistic	<b>4.84E-02</b>	<b>5.43E-02</b>	<b>5.86E-02</b>	<b>7.40E-02</b>	<b>4.42E-02</b>
30 %	Conservative	2.43E-01	2.71E-01	2.82E-01	4.03E-01	2.23E-01
	Realistic	<b>5.07E-02</b>	<b>5.65E-02</b>	<b>5.87E-02</b>	<b>8.40E-02</b>	<b>4.65E-02</b>
40 %	Conservative	2.55E-01	2.82E-01	2.93E-01	4.51E-01	2.34E-01
	Realistic	<b>5.31E-02</b>	<b>5.87E-02</b>	<b>6.10E-02</b>	<b>9.39E-02</b>	<b>4.88E-02</b>
50 %	Conservative	2.66E-01	2.92E-01	2.93E-01	4.88E-01	2.46E-01
	Realistic	<b>5.54E-02</b>	<b>6.08E-02</b>	<b>6.11E-02</b>	<b>1.02E-01</b>	<b>5.12E-02</b>
60 %	Conservative	2.77E-01	2.92E-01	3.04E-01	5.36E-01	2.57E-01
	Realistic	<b>5.77E-02</b>	<b>6.09E-02</b>	<b>6.33E-02</b>	<b>1.12E-01</b>	<b>5.35E-02</b>
70 %	Conservative	2.88E-01	3.03E-01	3.15E-01	5.84E-01	2.68E-01
	Realistic	<b>6.00E-02</b>	<b>6.31E-02</b>	<b>6.55E-02</b>	<b>1.22E-01</b>	<b>5.58E-02</b>
80 %	Conservative	2.99E-01	3.13E-01	3.25E-01	6.31E-01	2.79E-01
	Realistic	<b>6.24E-02</b>	<b>6.53E-02</b>	<b>6.78E-02</b>	<b>1.32E-01</b>	<b>5.81E-02</b>
90 %	Conservative	3.10E-01	3.24E-01	3.26E-01	6.79E-01	2.90E-01
	Realistic	<b>6.47E-02</b>	<b>6.74E-02</b>	<b>6.79E-02</b>	<b>1.41E-01</b>	<b>6.04E-02</b>
100 %	Conservative	3.22E-01	3.34E-01	3.37E-01	7.27E-01	3.11E-01
	Realistic	<b>6.70E-02</b>	<b>6.96E-02</b>	<b>7.01E-02</b>	<b>1.51E-01</b>	<b>6.48E-02</b>

SRMS, spent resin mixture separator; ZAST, zeolite and activated carbon storage tank; SRST, spent resin storage tank; MWR, microwave reactor; SRFH, spent resin feed hopper.

## 2. 폐수지혼합물 처리설비의 사고 관련 방사선학적 안전성 평가

### ● 폐수지혼합물 처리설비 유출율에 따른 작업자의 방사선학적 안전성 평가

- 처리설비의 모든 파트에서 유출이 발생한 것을 가정하여 작업자의 방사선학적 안전성 평가 수행



➤ APF를 고려하지 않은 보수적인 평가의 경우, 90 %의 유출율 이상 ( $2.01E+01$  mSv)부터 평균 연간 선량한도를 초과하는 것을 확인

➤ 실제적인 평가의 경우, 연간 선량한도 만족

➤ 모든 파트에서 100 % 유출이 발생하여도 작업자의 방사선학적 안전성을 확보할 수 있을 것으로 예상됨.

Fig. Radiological safety evaluation of workers who remove the spent resin mixture leaked from all parts of the treatment facility

### 3. 연구 추진 계획

#### ● RESRAD Onsite 및 RESRAD Offsite를 활용한 폐수지훈합물 처분 안전성 평가 수행

- 마이크로웨이브를 통하여  $^{14}\text{C}$ 의 처리가 완료된 폐수지훈합물 (저준위 혹은 극저준위)의 표층 처분 시 작업자 및 인근 주민에 대한 안전성 평가 수행 예정
  - ✓ RESRAD 코드 Input parameter (부지 특성자료, 주민 섭생자료 등) 도출
  - ✓ 처분 시나리오 수립
  - ✓ 대표 핵종 ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  및  $^3\text{H}$ )을 선정하여 평가 예정

#### ● 폐수지 처리설비의 다중성을 고려한 재 모델링 수행

- 처리설비의 설계 변화 및 장치의 다중성을 반영하여 재 모델링 수행 후 선량 평가 예정



THANK YOU