

*Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting  
Gyeongju Korea, October 26-27, 2023*

# **A Study on the Application of Probability of Scenario for Risk Assessment of Deep Geological Repository for High-Level Radioactive Waste**

Kibeom SON, Karyoung CHOI, Gyunyoung HEO\*

\*Corresponding author: [gheo@khu.ac.kr](mailto:gheo@khu.ac.kr)

# INDEX

---

1. 서론
2. 시나리오 발생확률
3. 적용 예시
4. 결론

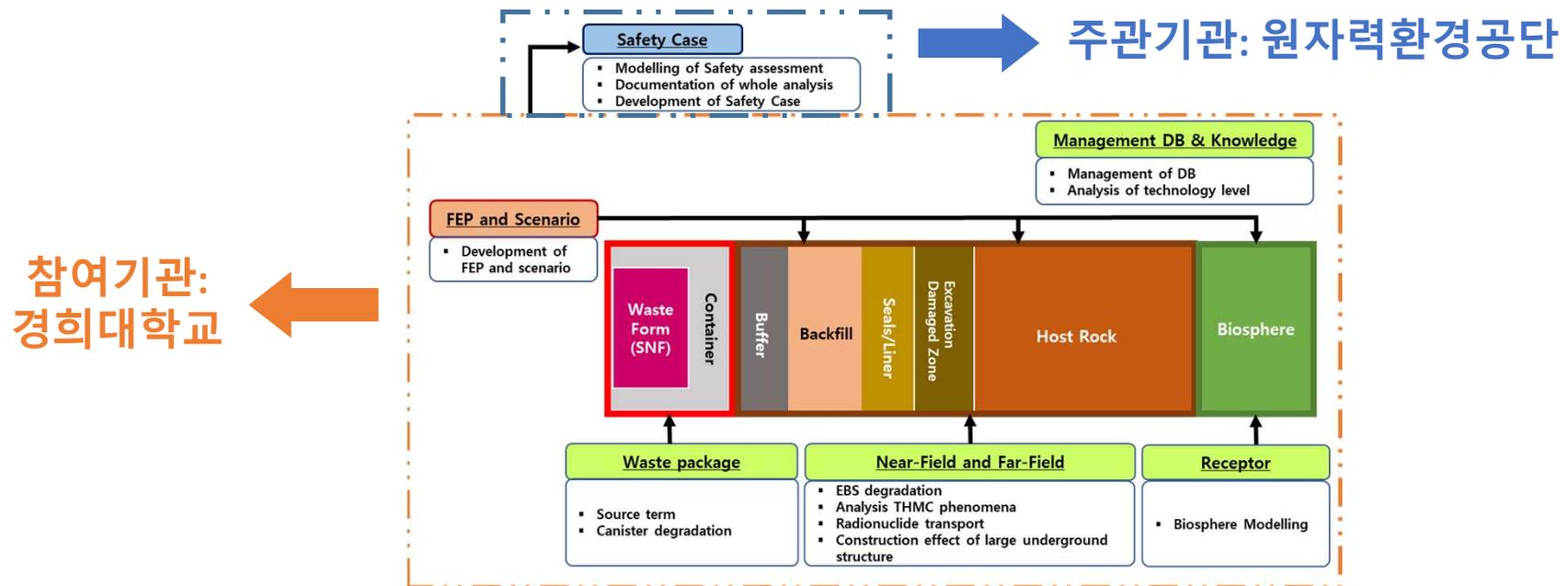
1

서론

# 서론

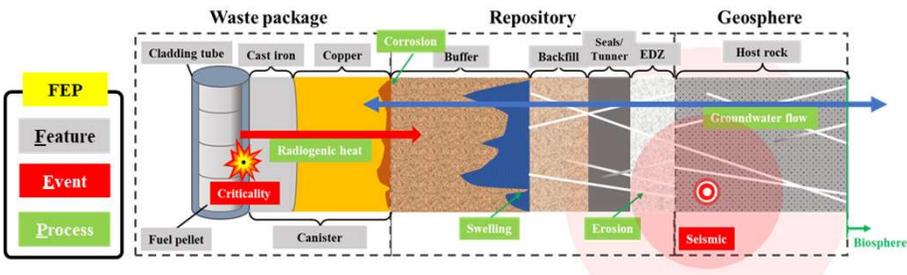
## ❖ 연구과제 소개

- 주관기관 과제명: 종합 안전성 입증 체계 구축 및 평가 체계 개발
- 참여기관 과제명: 사용후핵연료 처분 FEP 개발 및 시나리오 개발
  - ✓ 해당 과제의 사사를 받아 연구를 진행하였음

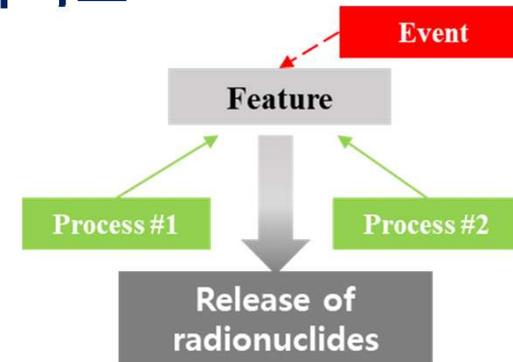


# 서론

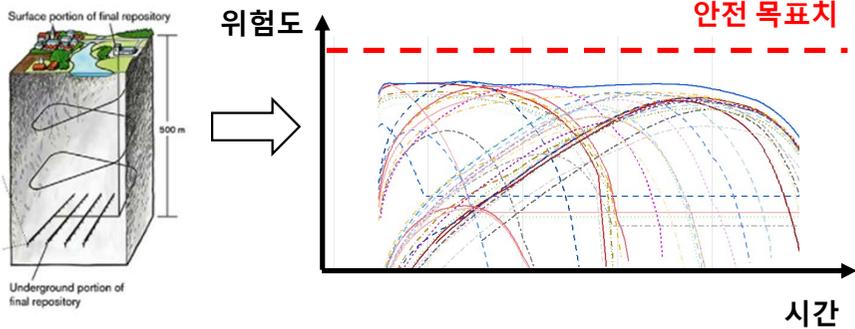
## FEP (Feature, Event and Process)



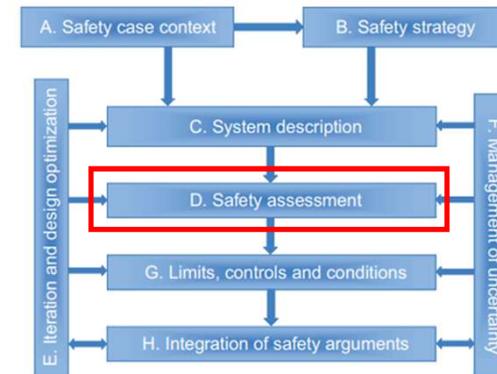
## 시나리오



## 위험도 평가



## Safety case



# 서론

## ❖ 국내외 처분시설의 안전 목표치

국가		한국(중저준위)	한국(고준위)	스웨덴	핀란드	미국
안전 목표치*	위험도 [yr]	확률자연현상 < 10 <sup>-6</sup>	모든 시나리오 < 10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup> for all scenarios	-	-
	선량 [mSv/yr]	정상자연현상 < 0.1 인간침입 < 1.0	단일 시나리오 < 10	-	0.1 for normal scenarios Management for keeping low consequence	0.15 for all scenarios 1.0 for all scenarios
국가		영국	캐나다	프랑스	일본	스위스
안전 목표치*	위험도 [yr]	10 <sup>-6</sup> for all scenarios	-	-	10 <sup>-5</sup> for abnormal scenarios	10 <sup>-5</sup> for all scenarios
	선량 [mSv/yr]	0.5 for all scenarios	1.0 for all scenarios	0.25 for normal scenarios	0.01 for normal scenarios 0.3 for variant scenarios 20~100 for first year of abnormal and human intrusion scenarios 1~20 for after the first year of abnormal and human intrusion scenarios	0.1 for all scenarios

\* 고준위폐기물 대상, 2022년 기준, 각 안전목표치의 세부 요건은 표기하지 않았음

# 서론

## ❖ 연구 필요성 및 목적

- 국내 고시에 기반하면 고준위폐기물 심층처분시설은 위험도가 주요 안전 목표치이며, 위험도 기반의 안전성 평가가 필요
- 하지만, 기존 위험도 평가 방법론 중 대부분은 시나리오의 발생확률 적용 방안의 구체적인 방법에 대해서는 제시하지 않고 있음
- 위험도의 정의 및 도출 과정을 고려하면 시나리오별 발생확률을 계산하고 적용하는 방법에 대한 논의가 필요



고준위폐기물 처분시설의 위험도 평가 절차에 활용될 수 있는  
시나리오 발생확률 계산 적용 방안 제시

2

## 시나리오 발생확률

# 시나리오 발생확률

## 위험도(국내 고시\*)

$$R = \gamma \sum P_i D_i$$

R: 총 위험도[yr]  
 γ: 위험도계수[0.05/Sv]  
 i: 피폭시나리오 번호  
 P: 피폭시나리오 발생확률  
 D: 대표인에 대한 연간피폭선량[Sv/yr]

**위험도 분포를 표현하기  
 적절한 형태로 세분화**

## 위험도 분포

$$\vec{R} \leq \gamma \sum P_i \vec{D}_i = \gamma \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} P_i^j \vec{D}_i^j$$

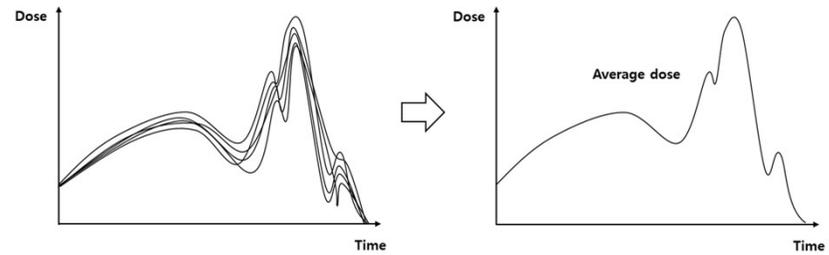
$$\vec{D}_i^j = [D_i^j(t), D_i^j(t + \Delta t), \dots, D_i^j(T)]$$

$\vec{R}$ : 위험도 분포  
 i: 피폭시나리오 번호  
 j: 시뮬레이션 조건 번호  
 N: 시나리오 개수  
 m<sub>i</sub>: 시나리오 i의 총 시뮬레이션 조건 개수  
 P<sub>i</sub><sup>j</sup>: 시나리오 i가 j 조건일 때의 시나리오 발생확률  
 $\vec{D}_i^j$ : 시나리오 i가 j 조건일 때의 피폭선량 분포  
 D<sub>i</sub><sup>j</sup>(t): 시나리오 i가 j 조건이며 시간 t에 해당할 때의 피폭선량 값  
 Δt: 시뮬레이션을 진행하는 시간 간격  
 T: 위험도 평가기간

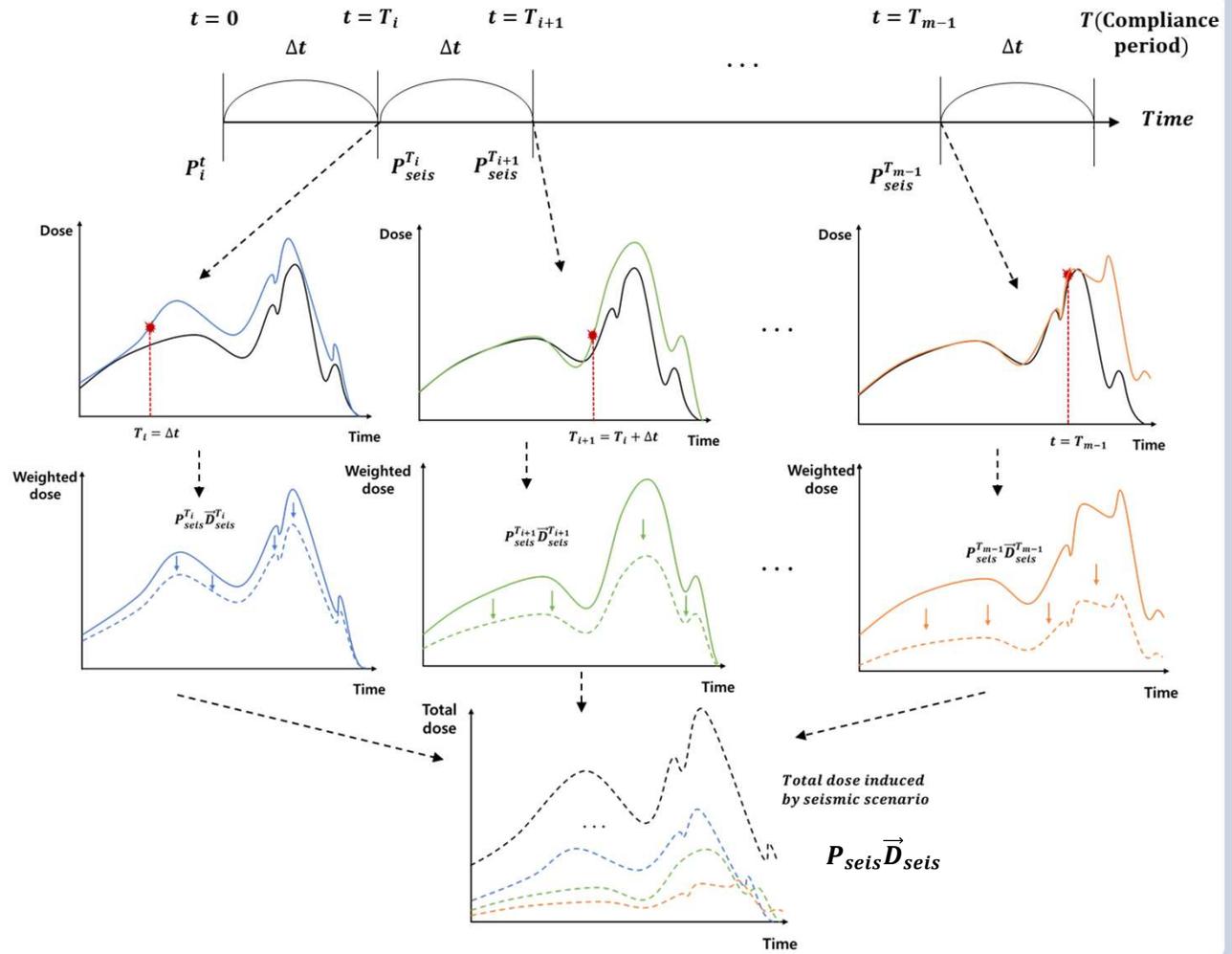
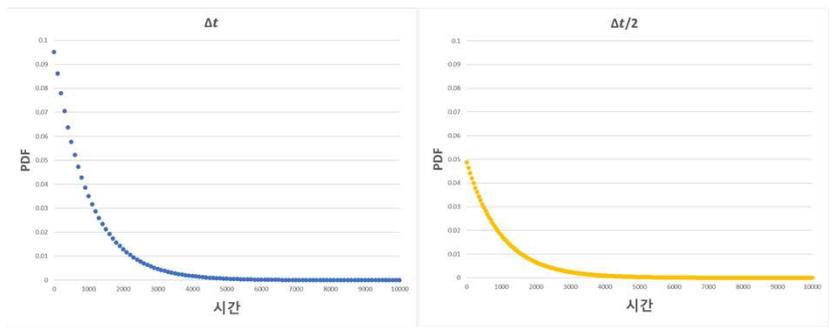
\*고준위방사성폐기물 심층처분시설에 관한 일반기준

# 시나리오 발생확률

- ❖ 선량 분포 도출 개념도
  - 비정상 사건(예시: 지진) 1회 발생



<정상 시나리오>



# 시나리오 발생확률

## ❖ 시나리오 발생확률의 분류

시나리오	확률분포	발생횟수	발생빈도
정상	이산	단일	일정
비정상	이산	단일	일정
		다중	일정
			변동
		연속	단일
	다중		일정

## ❖ 기간 내 2회 이상 발생하는 사건

- 비정상 시나리오(예시: 지진), 연속확률분포, 다중사건, 변동발생빈도
- 발생빈도가 일정한 경우
  - ✓ 감마분포를 활용하여 선량 분포에 가중
- 발생빈도가 변동되는 경우
  - ✓ 시뮬레이션 코드 내의 전처리를 통해 영향 반영

3

적용 예시

# 적용 예시

## ❖ 시나리오 발생확률 적용 절차



## ❖ 예시 계산(가정사항 적용)

### 1. 시나리오 종류, 확률분포, 평가기간

- 정상 시나리오( $i=1$ )
- 초기용기결함 시나리오( $i=2$ )
- 인간침입 시나리오( $i=3$ )
- 지진 시나리오( $i=4$ )
  
- 정상 시나리오: 이산확률분포
- 비정상 시나리오
  - ✓ 초기용기결함 시나리오: 이산확률분포
  - ✓ 인간침입 시나리오: 이산확률분포
  - ✓ 지진 시나리오: 연속확률분포
  
- 평가기간( $T$ )는 10,000년

# 적용 예시

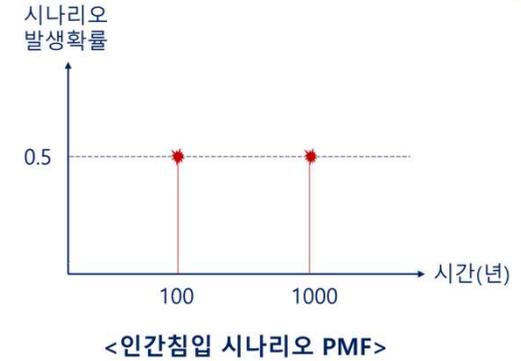
## ❖ 시나리오 발생확률 적용 절차



## ❖ 예시 계산(가정사항 적용)

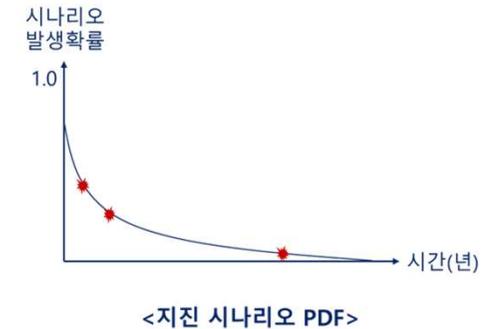
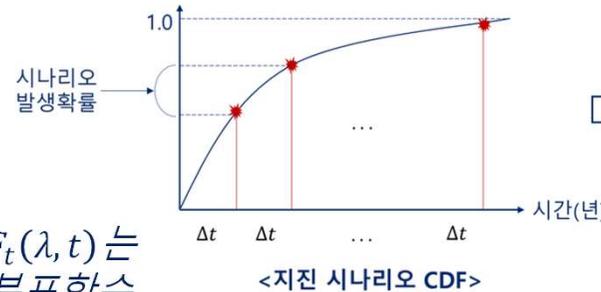
### 2. 시나리오의 시간별 사건발생확률

- 정상 시나리오: 폐쇄 즉시 발생하는 단일사건
- 초기용기결함 시나리오: 폐쇄 즉시 발생하는 단일사건
- 인간침입 시나리오: 폐쇄 후 100년 째에 발생할 확률이 50%, 1000년 째에 발생할 확률이 50%인 단일사건
- 지진 시나리오: 일정 진도, 거리의 단일 지진 발생 가정  
✓ 시간 간격: 1 yr, 임의의 발생빈도



$$P_{seismic}^{t,t+\Delta t} = F_t(\lambda, t + \Delta t) - F_t(\lambda, t)$$

$P_{seismic}^{t,t+\Delta t}$  는  $t$ 년에서  $t + \Delta t$  사이에 지진이 발생할 확률  $F_t(\lambda, t)$  는 지진발생빈도  $\lambda$ 를 따르는 지수분포의 시간  $t$ 에서의 누적분포함수



# 적용 예시

## ❖ 시나리오 발생확률 적용 절차



## ❖ 예시 계산(가정사항 적용)

### 3. 각 시나리오의 선량 분포

- 각 시나리오별 선량 분포 개수는 시뮬레이션 조건 개수( $m_i$ )와 동일
- 정상 시나리오:  $t=0$ 인 조건으로만 선량 분포 계산
- 초기용기결함 시나리오:  $t=0$ 인 조건으로만 선량 분포 계산
- 인간침입 시나리오:  $t=100, t=1000$  조건으로 선량 분포 각각 계산
- 지진 시나리오: 매년 시뮬레이션을 수행하는 것을 가정하여  $\frac{T}{\Delta t} = 10,000$ 개의 선량 분포 도출

# 적용 예시

❖ 시나리오 발생확률 적용 절차



## ❖ 예시 계산(가정사항 적용)

### 4. 최종 위험도 분포 도출 및 목표치 비교

구분	정상	초기용기결함	인간침입	지진
i	1	2	3	4
m <sub>i</sub>	1	1	2	10000/1=10000
P <sub>i</sub> <sup>j</sup>	P <sub>1</sub> <sup>1</sup>	P <sub>2</sub> <sup>1</sup>	[P <sub>3</sub> <sup>1</sup> , P <sub>3</sub> <sup>2</sup> ]	[P <sub>4</sub> <sup>1</sup> , ..., P <sub>4</sub> <sup>10000</sup> ]
D <sub>i</sub> <sup>j</sup>	D <sub>1</sub> <sup>1</sup>	D <sub>2</sub> <sup>1</sup>	[D <sub>3</sub> <sup>1</sup> , D <sub>3</sub> <sup>2</sup> ]	[D <sub>4</sub> <sup>1</sup> , ..., D <sub>4</sub> <sup>10000</sup> ]
Σ <sub>j=1</sub> <sup>m<sub>i</sub></sup> P <sub>i</sub> <sup>j</sup> D <sub>i</sub> <sup>j</sup>	P <sub>1</sub> <sup>1</sup> D <sub>1</sub> <sup>1</sup>	P <sub>2</sub> <sup>1</sup> D <sub>2</sub> <sup>1</sup>	P <sub>3</sub> <sup>1</sup> D <sub>3</sub> <sup>1</sup> + P <sub>3</sub> <sup>2</sup> D <sub>3</sub> <sup>2</sup>	P <sub>4</sub> <sup>1</sup> D <sub>4</sub> <sup>1</sup> + ... + P <sub>4</sub> <sup>10000</sup> D <sub>4</sub> <sup>10000</sup>
Σ <sub>i=1</sub> <sup>N</sup> Σ <sub>j=1</sub> <sup>m<sub>i</sub></sup> P <sub>i</sub> <sup>j</sup> D <sub>i</sub> <sup>j</sup>	P <sub>1</sub> <sup>1</sup> D <sub>1</sub> <sup>1</sup> + P <sub>2</sub> <sup>1</sup> D <sub>2</sub> <sup>1</sup> + (P <sub>3</sub> <sup>1</sup> D <sub>3</sub> <sup>1</sup> + P <sub>3</sub> <sup>2</sup> D <sub>3</sub> <sup>2</sup> ) + (P <sub>4</sub> <sup>1</sup> D <sub>4</sub> <sup>1</sup> + ... + P <sub>4</sub> <sup>10000</sup> D <sub>4</sub> <sup>10000</sup> )			
R <sub>vec</sub>	γ{P <sub>1</sub> <sup>1</sup> D <sub>1</sub> <sup>1</sup> + P <sub>2</sub> <sup>1</sup> D <sub>2</sub> <sup>1</sup> + (P <sub>3</sub> <sup>1</sup> D <sub>3</sub> <sup>1</sup> + P <sub>3</sub> <sup>2</sup> D <sub>3</sub> <sup>2</sup> ) + (P <sub>4</sub> <sup>1</sup> D <sub>4</sub> <sup>1</sup> + ... + P <sub>4</sub> <sup>10000</sup> D <sub>4</sub> <sup>10000</sup> )}			

$$\vec{R} \leq \gamma \sum P_i \vec{D}_i = \gamma \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} P_i^j \vec{D}_i^j$$

$$\vec{D}_i^j = [D_i^j(t), D_i^j(t + \Delta t), \dots, D_i^j(T)]$$

# 적용 예시

❖  $R \leq \gamma \sum_i P_i D_i$  ?

$$R = \gamma \sum_i P_i D_i = \gamma \left\{ \left( 1 - \sum_i P_i^{abnormal} \right) D_i^{normal} + \sum_i P_i^{abnormal} D_i^{abnormal} \right\}$$

- 정상 시나리오와 비정상 시나리오 간의 영향

- ✓ 보수적인 결과 도출을 위해 정상 시나리오 텀의  $(1 - \sum_i P_i^{abnormal})$ 을 1.0으로 가정
- ✓ 이러한 가정은 정상 시나리오는 비정상 시나리오로 인한 간섭을 받지 않는다는 것을 의미
- ✓ 이로 인해 더 보수적인 계산 결과가 도출될 것으로 예상되며 비정상 시나리오의 영향을 받은 정상 시나리오를 재평가할 필요성이 줄어들

4

결론

# 결론

## ❖ 요약 및 향후계획

- 국내 고시의 위험도 도출 과정 고려하면 시나리오별 발생확률을 계산하고 적용하는 방법에 대한 논의가 필요
- 이에 따라 본 논문에서는 시나리오 및 확률분포 구분에 따른 시나리오 발생확률 계산 적용 방안 제시
  - ✓ 비정상 사건에 대한 적절한 확률분포 선정이 가능하며, 비정상 사건의 영향이 선량 분포에 적절히 반영될 수 있음을 전제
- 위험도 평가가 가능한 시뮬레이션 코드를 활용하여 제안된 적용 방안에 대한 수치적인 결과 도출 계획

감사합니다