

# < 사용후핵연료 처분기술 개발 현황 및 추진방향 >



- 1 심층처분 개요
- 2 심층처분 주요 연구성과
- 3 심층처분 연구 진행현황 및 계획
- 4 심층처분 이슈 점검
- 5 맺음말

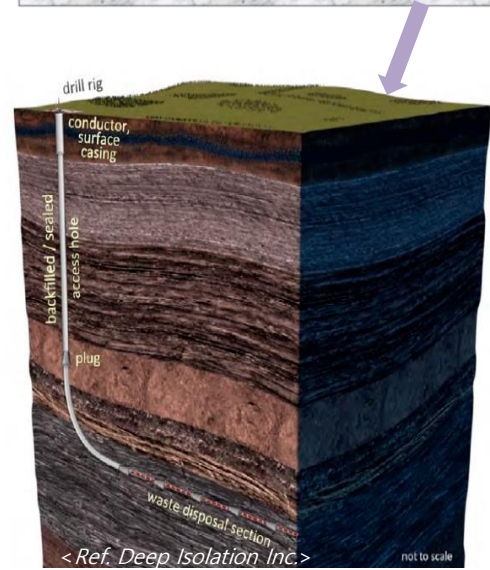
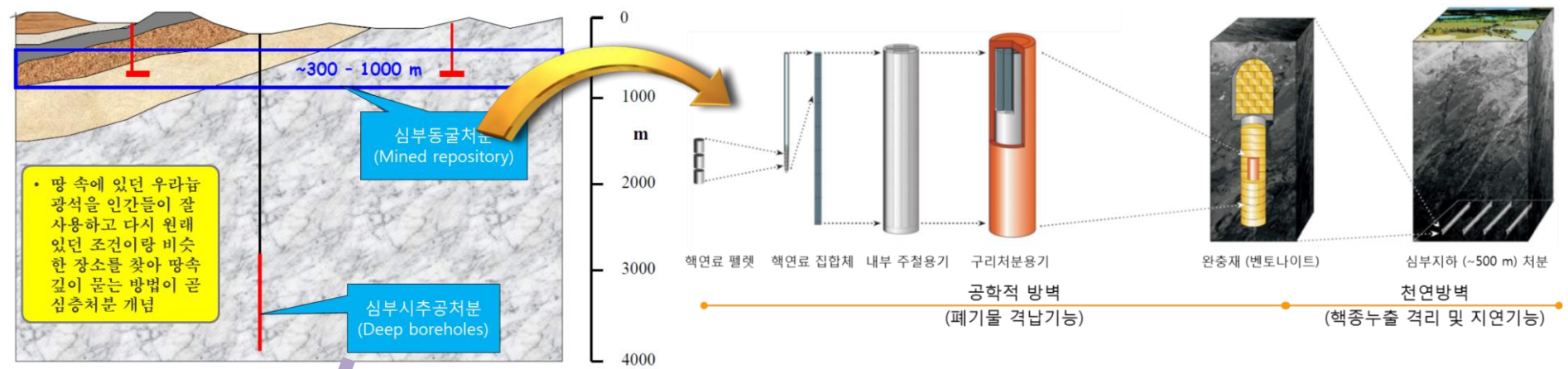
조 동 건

한국원자력연구원 사용후핵연료저장처분연구단

# 01 심층처분 개요

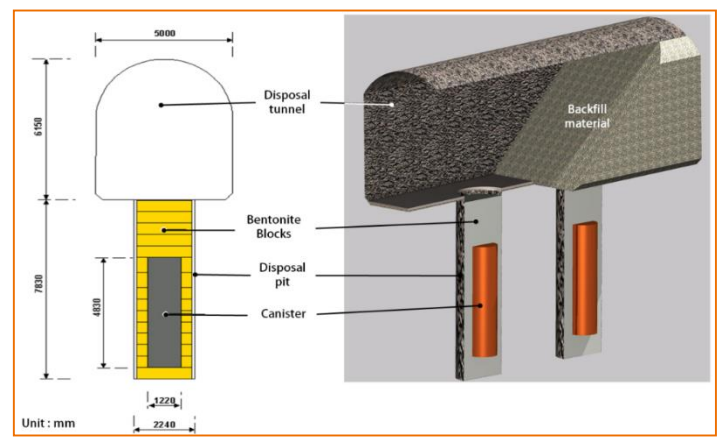
# 1\_1. 고준위폐기물 심층처분 개념 (1/2)

지하 깊은 암반에 처분하여 다중방벽으로 인해 방사성 물질이 인간생활권에 도달하지 못하도록 격리



공학적으로 제작한 방벽과 암반 자체의 천연방벽 등 다중방벽시스템 적용

- ① 핵연료 펠렛
  - ② 핵연료봉 피복관
  - ③ 처분용기(내부:주철, 외부구리)
  - ④ 완충재
  - ⑤ 지하암반
- 공학적방벽
- 천연방벽



# 1\_1. 고준위폐기물 심층처분 개념 (2/2)

(다중방벽) 적어도 수 십만 년 이상 인간생활권으로부터 격리함으로써 안전성 확보 가능

인간 생활권에 방사성  
물질이 유해한 수준으  
로 도달하지 못하도록  
**방호기능**

지하 암반의 방사능  
**격리 및 지연기능**

- 지하수 선형속도 : 수리전도도  $10^{-9}$  m/s일 때 ~160m/10만년
- 적합 암종 : 화강암, 점토암, 암염 등

수 천 년 간 방사능  
을 가둬 두는 공학  
적 방벽 시스템의  
**격납기능**

수 십만 년 동안 공학적  
방벽 시스템을 안정적  
으로 보호할 수 있는  
**방벽보호기능**

- 처분용기 수명 : 1 ~ 10만년
- 완충재 : 처분용기 보호, 물질이동 억제,  
수리전도도  $10^{-12}$  m/s

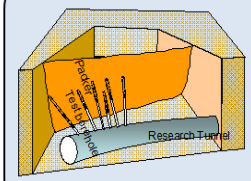
Image: SKB, Sweden



# 1\_2. 심층처분 핵심기술 (1/1)

## | 심층처분 설계/안전성평가기술과 장기 안전성에 대한 실증기술 확보가 중요!!

### 지질특성 조사



- 암반 열-역학 특성
- 지질구조 모델
- 수리지질 모델
- 지화학 모델

### 핵종이동



- 용해도, 수착
- 공학적방벽에서 핵종이동
- 천연방벽에서 핵종이동
- 미생물, 콜로이드 영향

### 시스템 개발



- 방사선원향 평가
- 처분장 설계
- 국가정책 반영

### 심층처분시스템

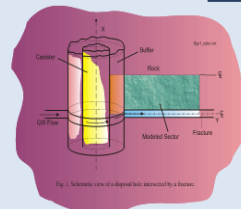
- 안전성 ↑
- 불확실성 ↓
- 실현성 ↑

### 공학적방벽 성능



- 공학적방벽 재질 특성
- 공학적방벽 성능목표
- 공학적방벽 THM 실험 및 모델링

### 안전성평가



- FEPs 및 시나리오
- 안전성평가 모델 개발
- QA

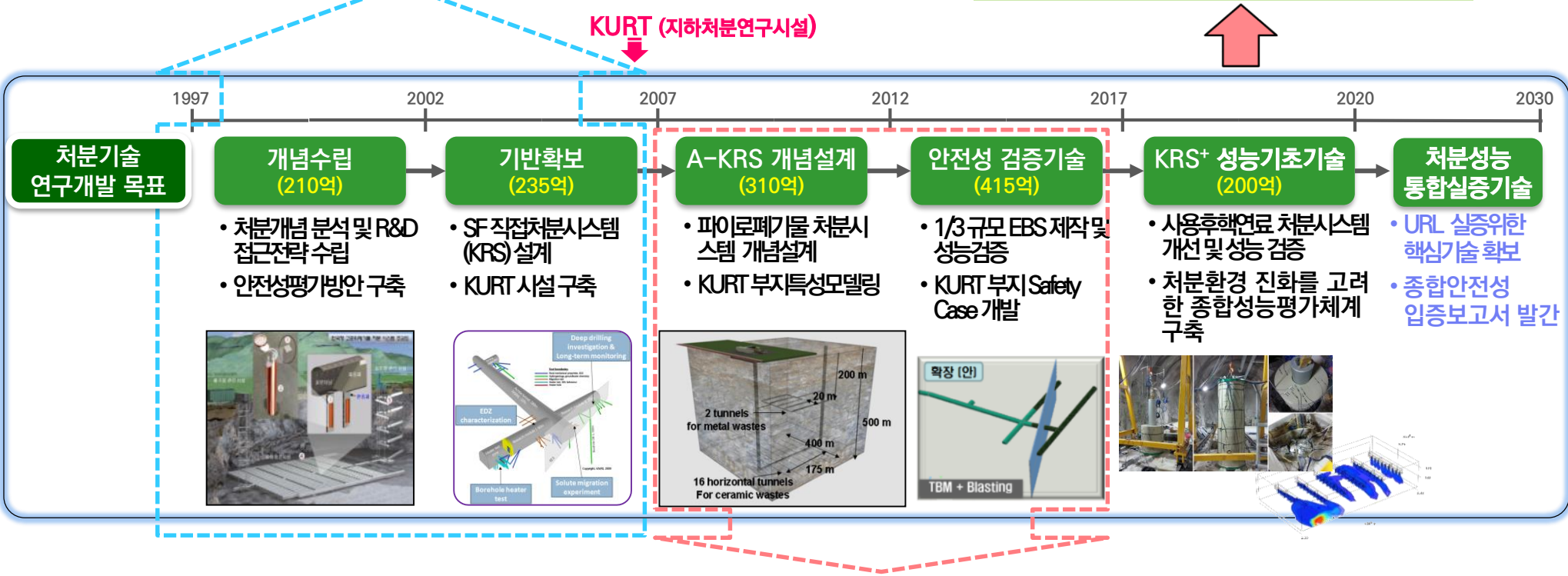


# 02 심층처분 주요 연구성과

# 2\_1. 심층처분 연구 총괄 (원기사 1~ 5차)

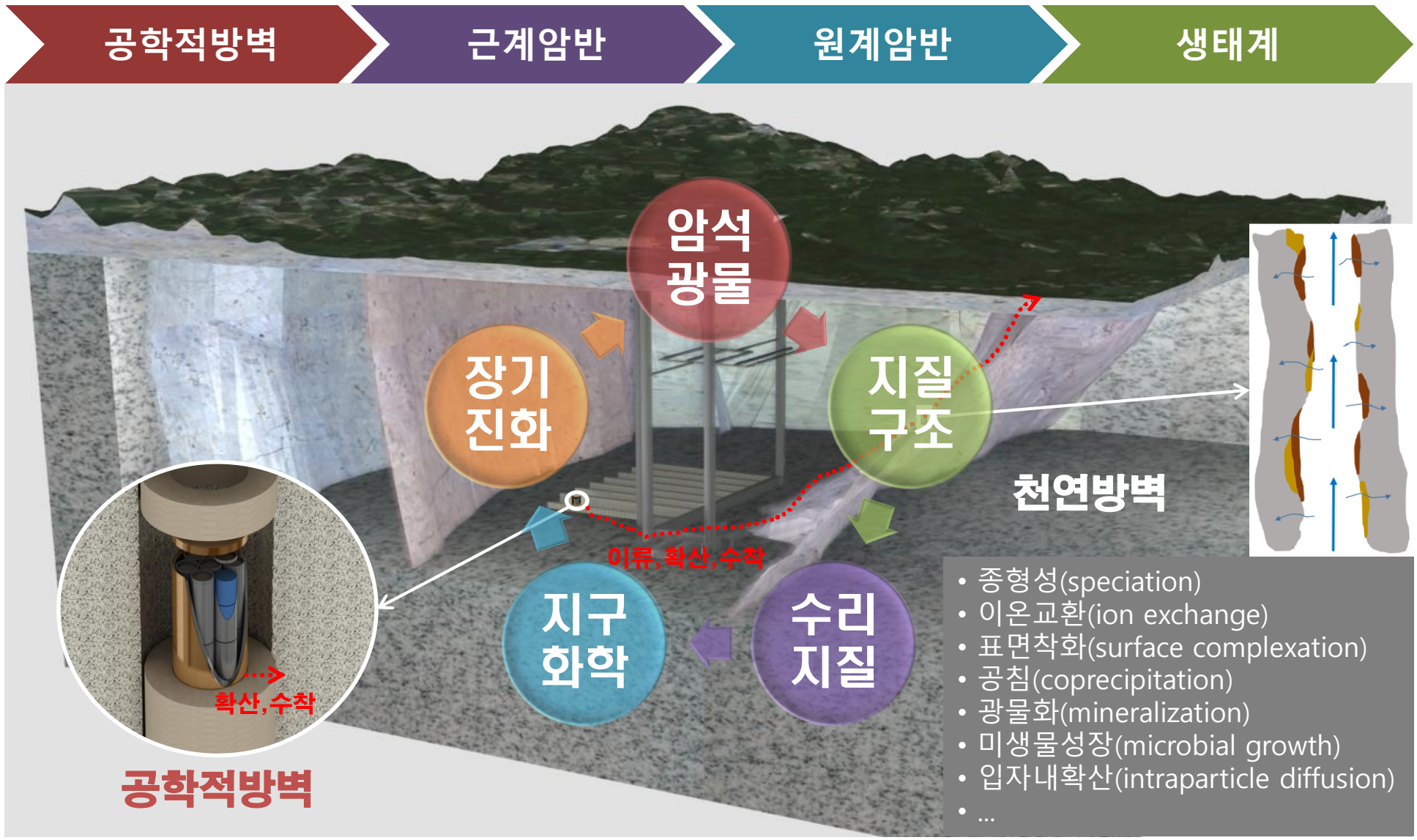
- 사용후핵연료 처분시스템 설계 및 안전성평가 기초기술 확보
- 사용후핵연료 직접처분시스템 개념설계안(KRS) 제시
- 지하처분연구시설(KURT) 건설

- KRS 성능개선 → **KRS+**
- **In-DEBS** 현장실험과 **실측데이터**를 활용한 **처분기술(THM)** 검증



- ❖ 파이로폐기물 처분시스템 개념설계안(A-KRS) 제시
- ❖ 지하연구시설(KURT) 내에 공학적방벽 성능 검증장치(In-DEBS) 설치

# 2\_2. 심층처분 연구 핵심 결과물



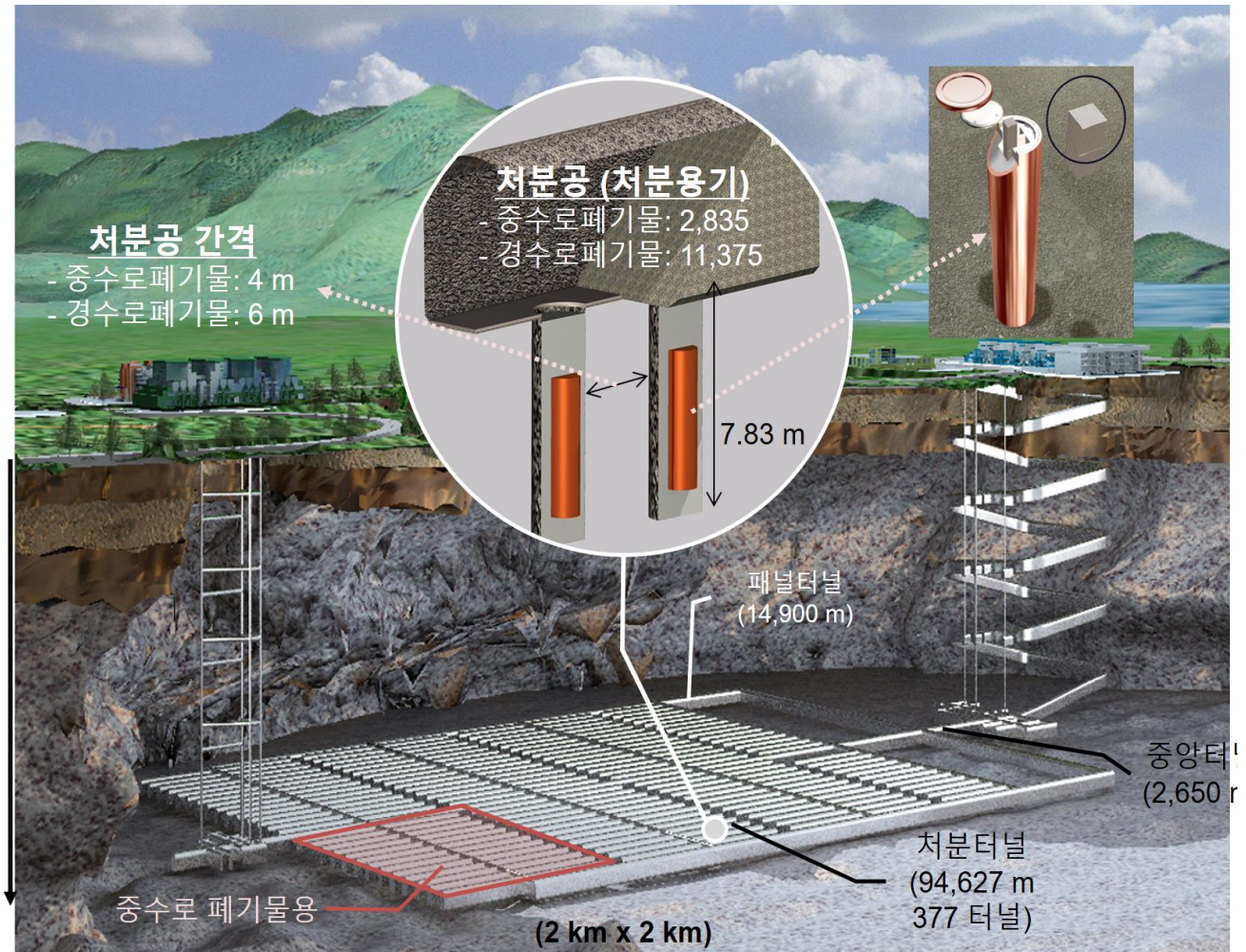
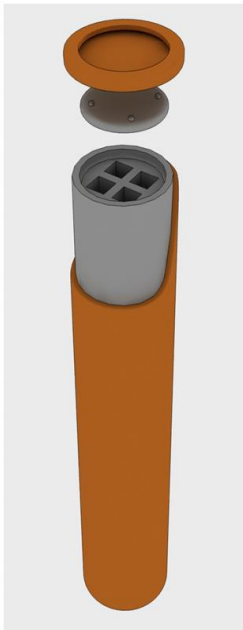
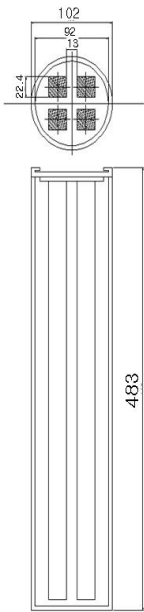


## 2\_2. 심층처분연구 핵심 결과물\_ 처분시설 설계 기술

사용후핵연료를 국내 암반에 처분하기 위한 개념설계안을 제시 → 기금산정에 반영

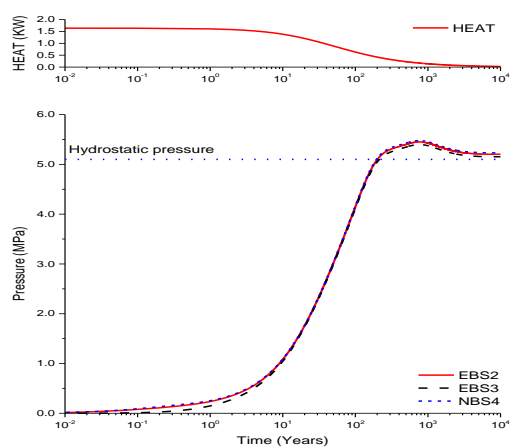
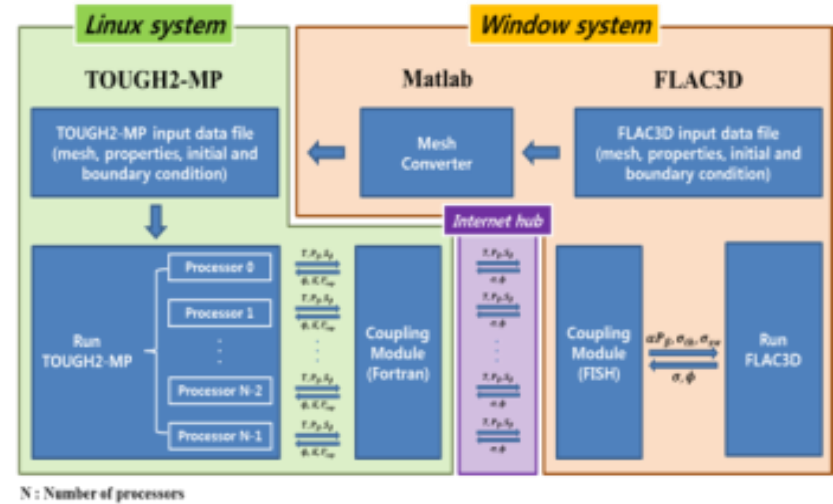
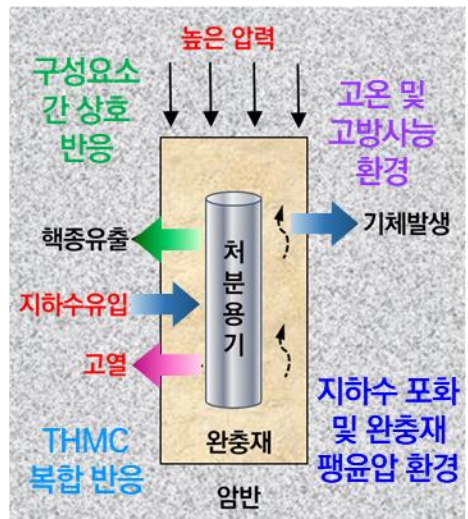
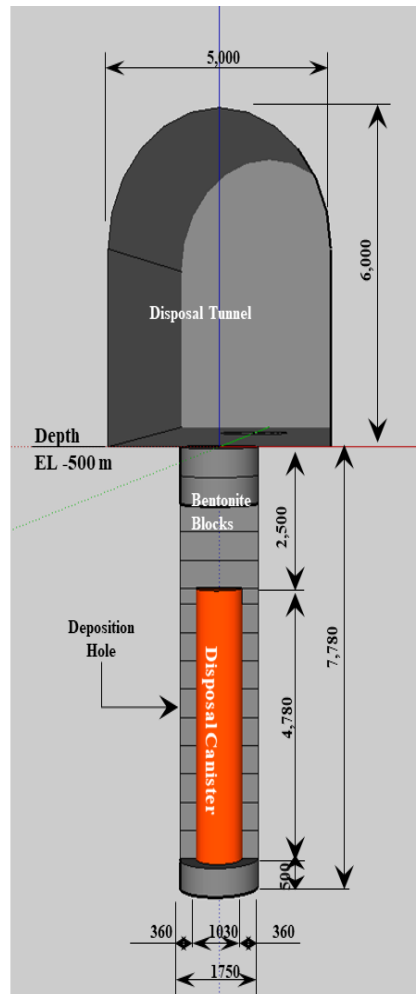
### ○ 처분용기

- 이중 구조 : 구리 + 주철
  - 구리 : 내부식성, 5 cm 두께
  - 주철 : 구조적 건전성 유지
- 용량 : PWR SNF 4집합체



# 2\_2. 심층처분연구 핵심 결과물\_공학적방벽 성능평가 기술

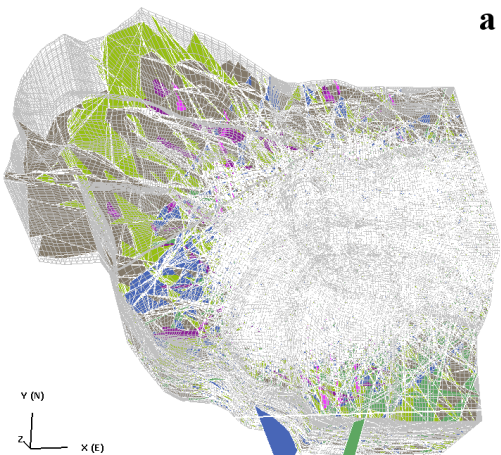
## 완충재 장기 성능평가 모델 및 시뮬레이터 개발 - 완충재는 핵종이동 지연기능을 유지할까?



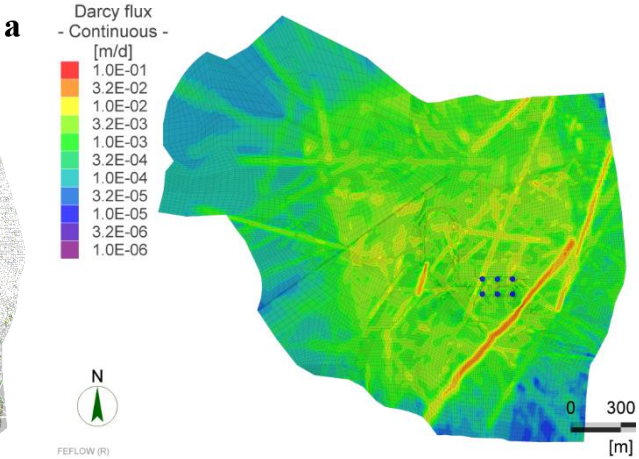


# 2\_2. 심층처분연구 핵심 결과물\_수리지질 모델링 기술

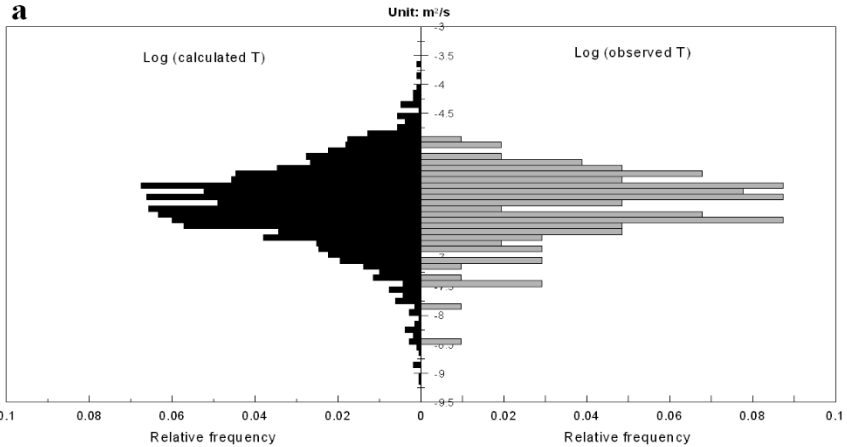
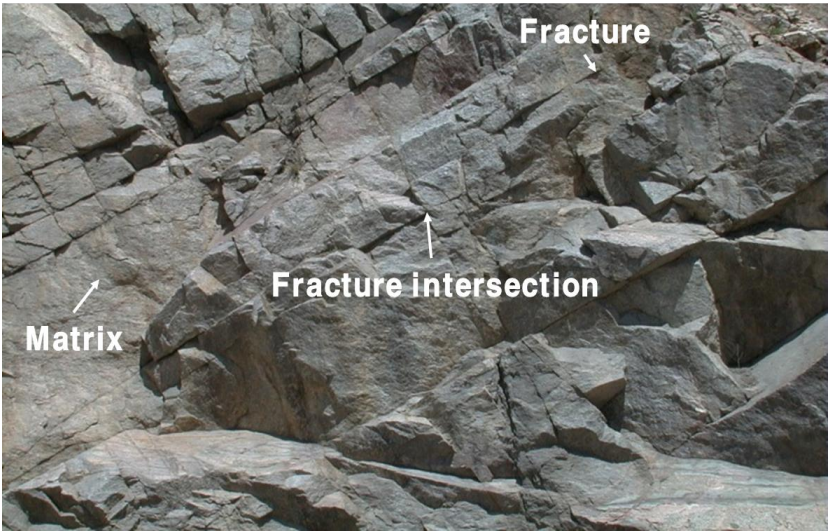
심부암반의 단열/수리 특성을 모델링 할 수 있는 기술을 개발



<단열망 모델>



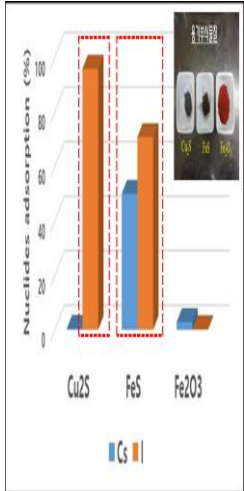
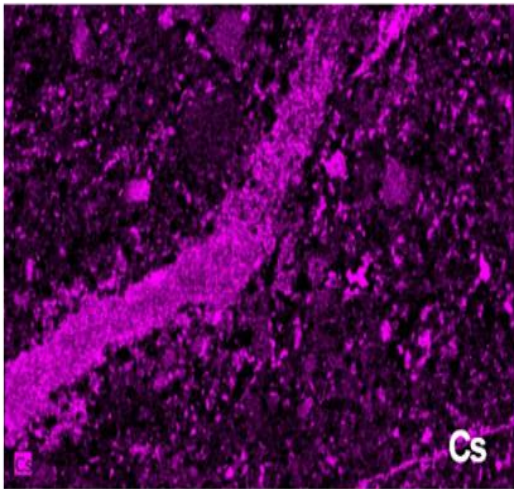
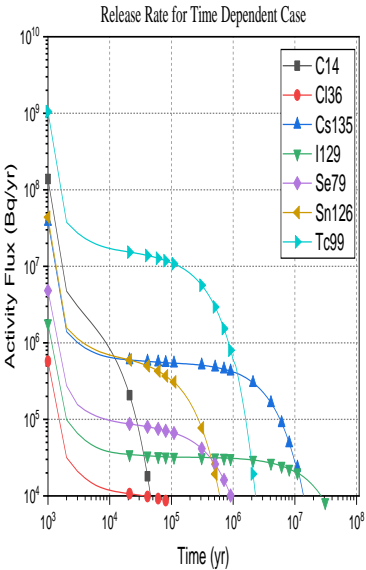
<수리지질 모델>



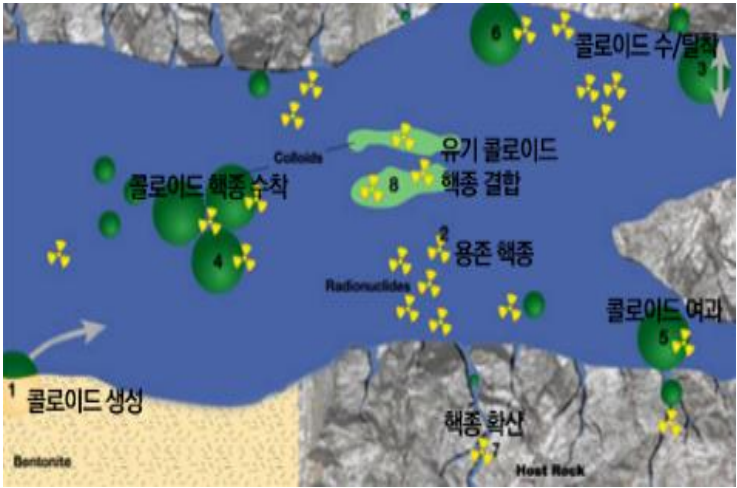
<예측치와 실측치의 비교>

# 2\_2. 심층처분연구 핵심 결과물\_핵종거동자료 생산 기술

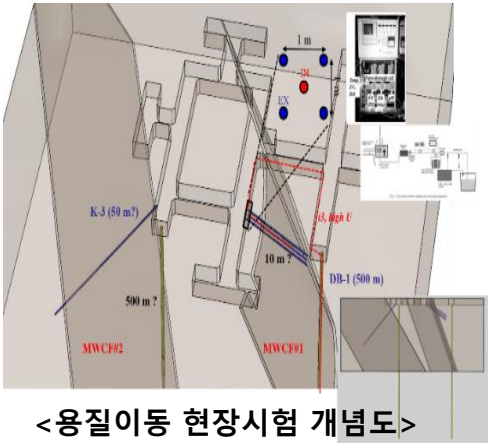
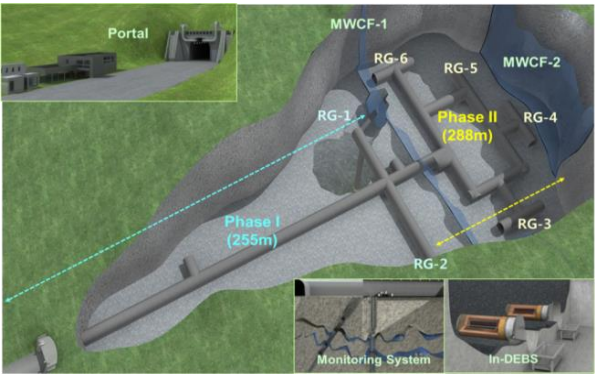
## 공학적방벽/천연방벽에서의 핵종이동 관련 특성 및 이동모델을 개발



<핵종수착 표면분석 사진 및 핵종수착 자료>



<핵종 장기 용출 모델>



<용질이동 현장시험 개념도>



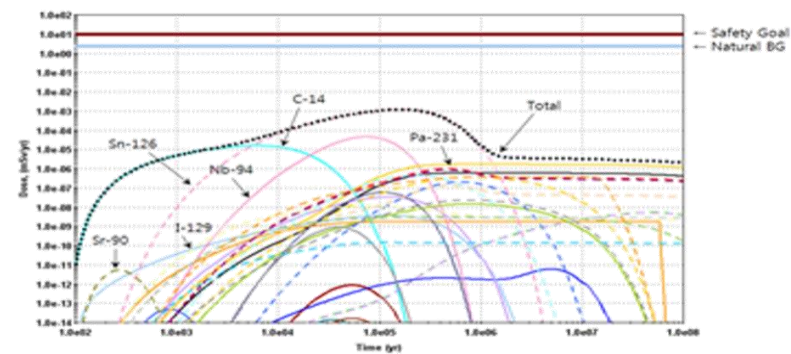
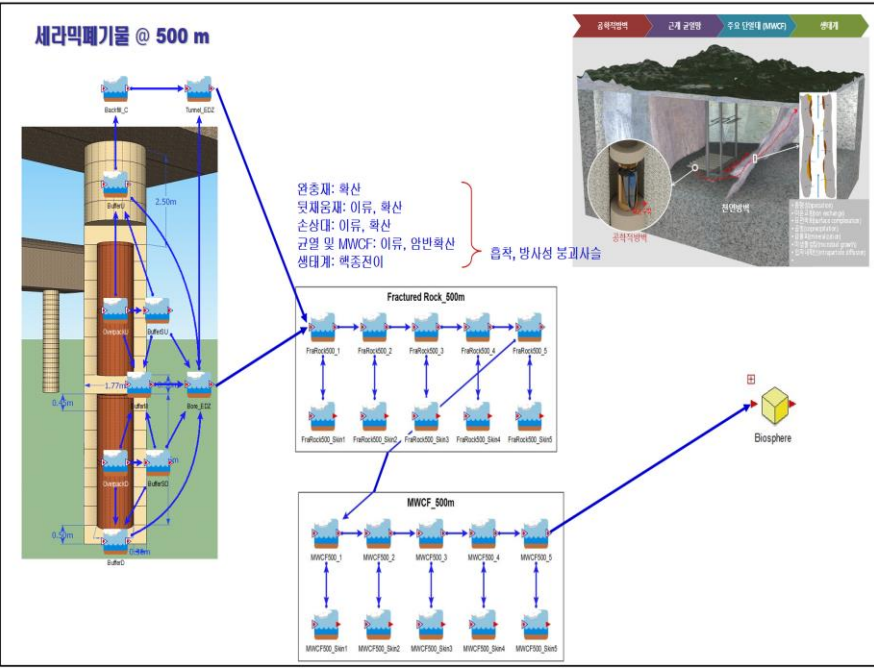
# 2\_2. 심층처분연구 핵심 결과물\_ 폐쇄후 안전성평가 기술

## 위험도 및 피폭선량을 예측할 수 있는 안전성평가체계를 개발

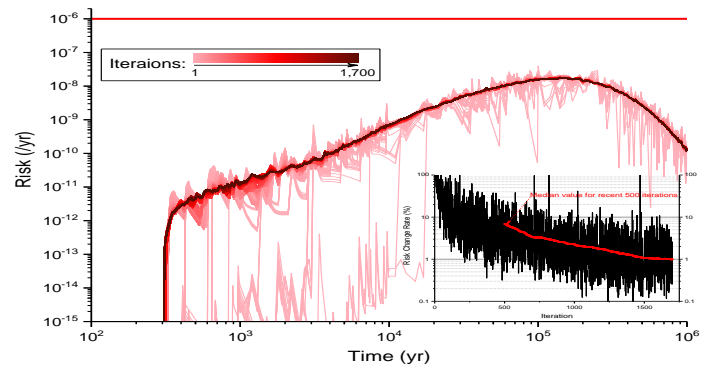
제5조(안전목표치) 심층처분시설은 폐쇄 후 방사선영향이 다음 각 호의 안전목표치를 만족하도록 설계되어야 한다.

- 1. 자연현상과 인간침입을 망라한 주요 시나리오에 따른 방사선피폭으로 인한 연간 총 위험도가 대표인에 대해  $10^{-6}$ 을 초과하지 않을 것
- 2. 발생가능성이 낮은 확률자연현상과 인간침입 등 단일 시나리오에 따른 예상피폭선량이 대표인에 대해 연간 10밀리시버트를 초과하지 않을 것

### 주요 안전지표: 연간선량, 위험도



〈계산 예 : 연간선량〉

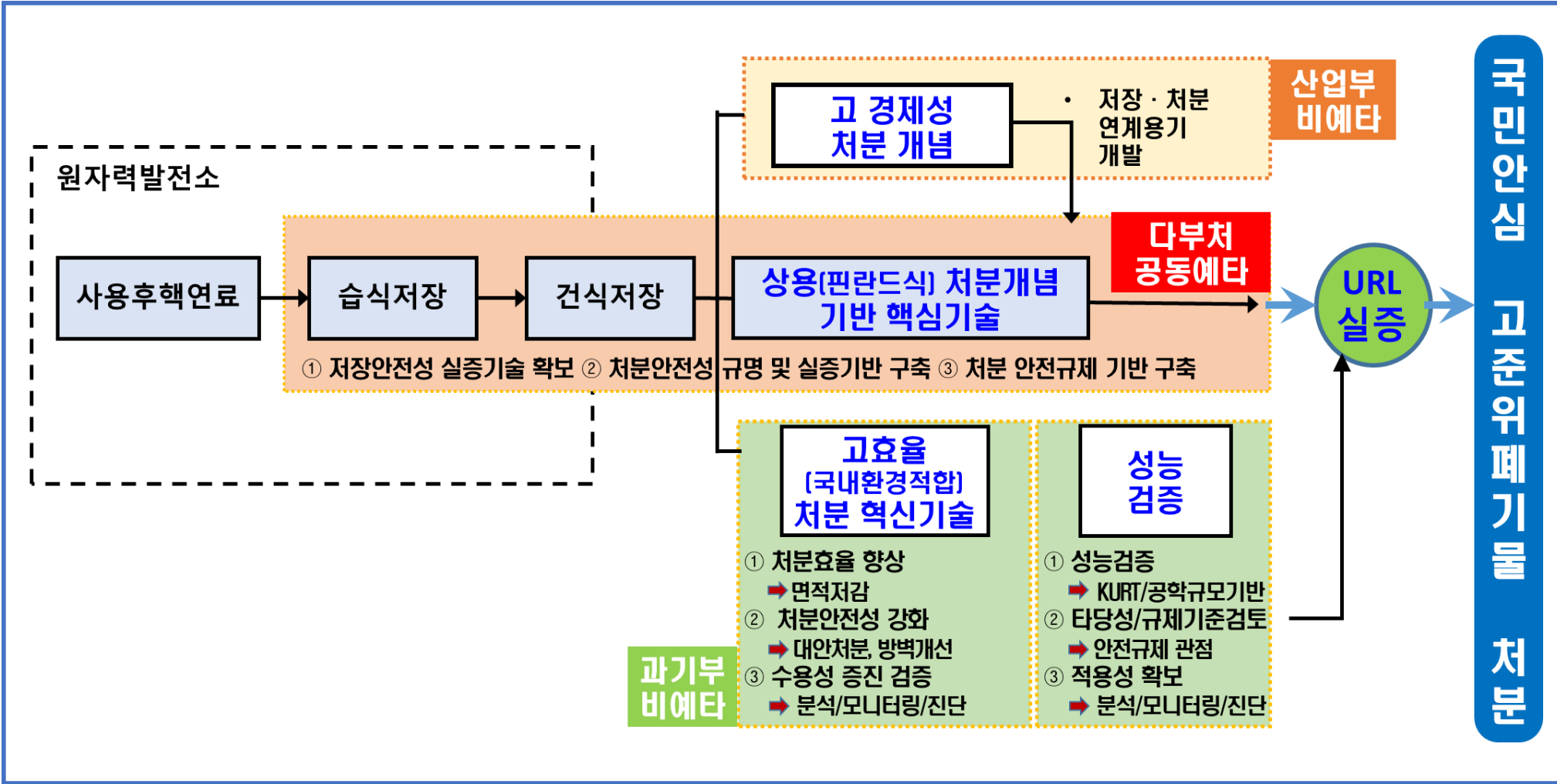


# 03

## 국내 심층처분 기술개발 현황

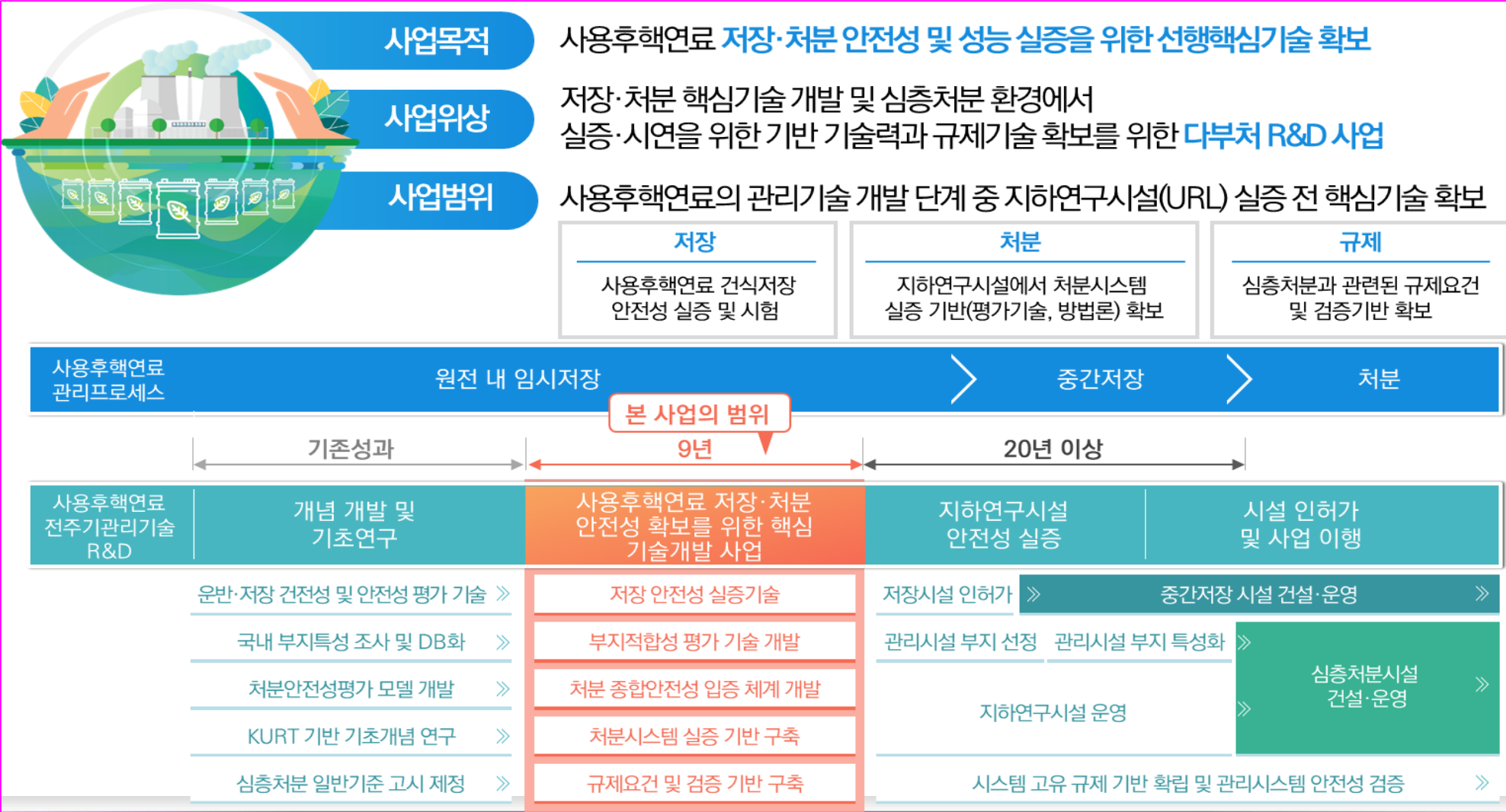
# 3\_1. 국내 심층처분연구 진행 현황 (1/1)

다부처 예타사업 / 과기부 비예타 사업/ 산업부 비예타 사업 진행중



# 3\_2. 다부처 예타사업 진행 현황 (1/3)

## 과기부 / 산업부/ 원안위가 공동으로 연구 수행중





# 3\_2. 다부처 예타사업 진행 현황 (2/3)

## 과제간 연계도



- 세부1 공학적방벽 장기 건전성 평가기술 개발
- 세부2 천연방벽 성능 장기진화 평가기술 개발
- 세부3 처분환경 핵종거동 실증 기반기술 개발

[목표]  
사용후핵연료 심층처분시스템  
실증 핵심기술 확보

## 세부과제1

개요	처분용기-완충재-뒷채움재-근계압반의 복합 상호작용 특성규명 및 성능실증을 위한 핵심 요소기술 개발
연구내용	공학적방벽재 특성규명 및 주요 성능기준(안) 제시 공학적방벽 구성요소 간 상호작용 특성규명 공학적방벽 열-수리-역학-화학적 복합거동 규명 처분시스템 복합거동 및 상호작용 실증 요소기술 개발
주요 성과물	공학적방벽재의 주요 성능기준(안) 국내 고유 처분용기 부식모델 THMC 복합거동 수치해석 예측모델 실증시험장비 제작 및 품질관리 기술

## 세부과제2

개요	천연방벽 성능의 장기 진화를 평가할 수 있는 통합모델 개발 및 URL 실증 방법론 개발
연구내용	천연방벽 지구조 장기진화에 대한 역학적-수리적 연동 모델 개발 지표환경 장기변화 이력특성을 반영한 지표수-지하수 연계모델 개발 연구지역 수리-지화학 장기진화모델 개발 천연방벽 성능 장기진화평가 통합모델 개발 및 URL 실증 방법론 개발
주요 성과물	암반역학-수리지질 연동모델 지표수-지하수 연계모델 천연방벽 성능 장기진화 평가 통합모델 천연방벽 성능 장기진화 URL 실증 방법론

## 세부과제3

개요	다중방벽 핵종거동 입력자료 생산, 생지구화학 반응특성 규명 및 실증 핵심기술 개발
연구내용	핵종 용해도 및 화학종 형성 열역학 특성 평가기술 개발 핵종 수착/확산 평가기술 개발 핵종 이동 가속화 및 지연 평가 기술 개발 핵종거동 현장실증 기반기술 개발
주요 성과물	처분환경 핵종 반응 및 열역학 입력 상수 핵종 지화학거동 자료 관리 프로그램 핵종거동 예측모델 및 고이동성 핵종 이동저지제 핵종거동 시험시설 구축 및 실증 기반기술

## 3\_2. 다부처 예타사업 진행 현황 (3/3)

### 과제간 연계도



### 세부과제1

**개요** 심층처분시스템 장기진화를 고려한 프로세스 기반 종합성능평가체계(APro) 개발 및 검증

#### 연구내용

- 심층처분시스템 장기진화를 고려한 APro 전산모듈 개발 및 검증
- 고성능컴퓨팅을 이용한 APro 통합시스템 개발 및 검증
- 심층처분시스템 장기진화 시나리오 종합성능평가
- APro를 이용한 심층처분시스템 불확도평가

#### 주요 성과물

- 코드인증 대비 APro 배포버전
- APro GUI, 사용자메뉴얼, QA
- 심층처분시스템 장기진화시나리오 종합성능평가 결과
- 심층처분시스템 불확도 관리방안

### 세부과제2

**개요** 처분시스템 구성요소별 안전성입증을 위한 자연유사 장기진화 평가 체계 개발

#### 연구내용


- 처분시스템 구성요소별 자연유사부지 특성조사
- 환경변화 및 연대분석 연계 자연유사 장기진화 특성 규명
- 처분안전성 연계 자연유사 장기진화 개념모델 및 평가 체계 개발
- 자연유사자료 특성 분석 및 활용방법 개발

#### 주요 성과물

- 자연유사부지 고유특성 및 현장특성 자료
- 처분시스템 장기 안전성 입증 자연유사 자료
- 처분시스템 구성요소 성능 입증 자연유사 자료
- 처분신뢰도 향상을 위한 자연유사자료 활용방안

# 3\_2. 다부처 예타사업 진행 현황 (3/3)

종합안전성입증보고서는 총 9권으로 구성되는 전집의 형태로 발간될 것이며, 각 보고서를 위한 보조 보고서들이 계획에 따라 연도별로 발간 예정

종합안전성입증보고서		202120222023202420252026202720282029									세부과제	
1. 통합해석 보고서	2. 처분시스템과 설계	2	1	1	1	1	1	2	1	3	프로세스 기반 종합성능평가체계 개발	심층처분 시스템 종합성능 평가체계 개발
	3. 처분부지의 지표환경 및 생물권	1				1		1				
	4. 처분부지의 심부환경	2	6	4	2	7	5	4	5	3	처분 자연유사 평가기술 개발	
	5. 공학적방벽 시스템	7	10+1	7+3	8+3	8+2	8+2	9+1	9	7+1		
	6. FEP과 시나리오	1+8	1+3	2+5	3+7	1+4	8	1+7	1+6	8	공학적방벽 장기 건전성 평가기술 개발	심층처분 시스템 성능실증 기반기술 개발
	7. 모델과 자료	2+2	1+1+4	2+2+2	3+1+3+2	1+1+4	2+1+5	1+1+1	1+3	5+1+3		
	8. 안전성 평가	1		1	1	1	1	4	5	1	천연방벽 성능 장기진화 평가기술 개발	
	9. 보조적인 고려사항	5	5	5	5	8	7	6	2	1+2		
	종합안전성입증보고서 발간 추진 일정		<31>	<33>	<34>	<39>	<39>	<40>	<39>	<33>	<35>	
						전문가 위원회 검토			전문가 위원회 검토	IAEA Peer Review	최종 발간	 처분시스템 인허가에 활용

# 3\_3. 과기부 단독 기술개발사업 진행 현황 (1/2)

## KBS-3 방식대비 처분면적을 저감할 수 있는 고효율 처분시스템을 개발중

### 이슈

### 고준위폐기물 처분밀도 향상

#### 공학적 방벽재 특성 규명

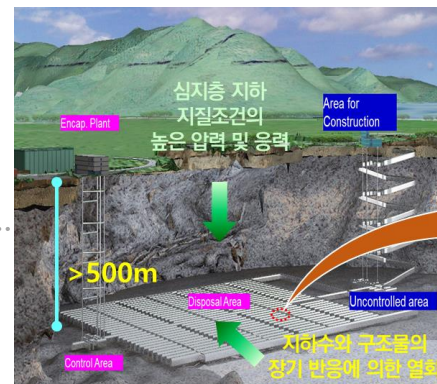
- 처분면적 저감을 위한 완충재 장기 건전성 특성 규명
  - 설계제한치를 25°C 상향(100→125)할 경우  
처분면적 50% 감소

#### 공학적방벽재 제작 기술

- 경제성 향상 위한 처분용기 제작기법 개발
  - 저온분사코팅/3D프린팅은 재료비를 절감 (구리층 5cm → 1cm)

#### 신개념 처분방식 적용기술 개발

- 처분면적 저감을 위한 다층처분/심추시추공처분 기술 개발
  - 다층처분 (핀란드: 단층처분)을 위해 고응력해석 기술 및 다중처분장 안전성평가 기술 개발
  - 심부시추공처분을 위해 초심도 시추, 초심부환경 특성 조사, 처분용기 정치·회수 등의 기술 개발



<KBS-3 심층처분개념>



- ▶ 처분효율성 향상을 위한 완충재 장기 성능 규명 및 공학적방벽 제작 혁신기술을 개발 중
- ▶ 신개념 처분방식 적용을 위한 혁신기술을 개발 중



## 3\_3. 과기부 단독 기술개발사업 진행 현황 (2/2)

### ■ KBS-3 방식대비 안전성을 높일 수 있는 공학적방벽을 개발중

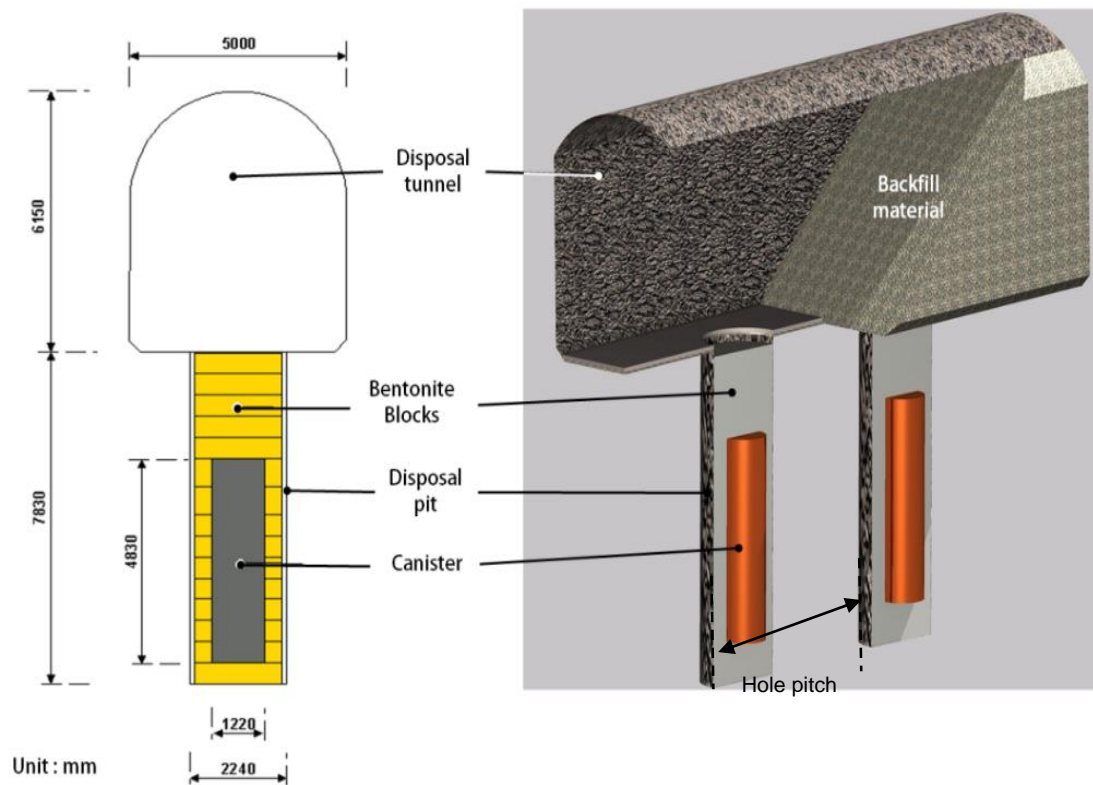


# 04 심층처분 이슈 점검

## 4\_1. KAERI 고준위폐기물 심층처분 개념 (1/2)

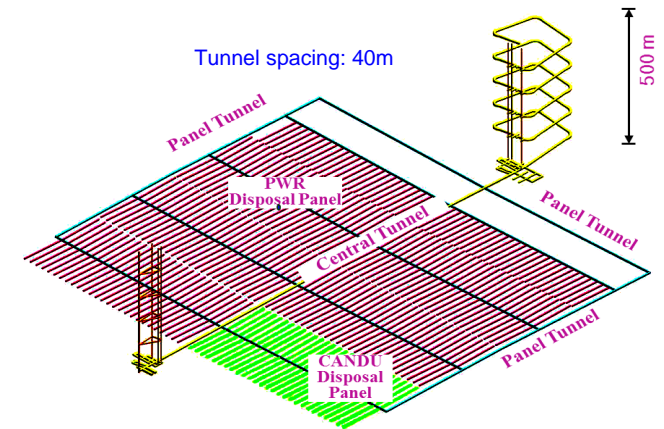
## ❖ 경수로 고연소도 사용후핵연료 처분시스템

✓ 화강암반 기반, 심부 500m

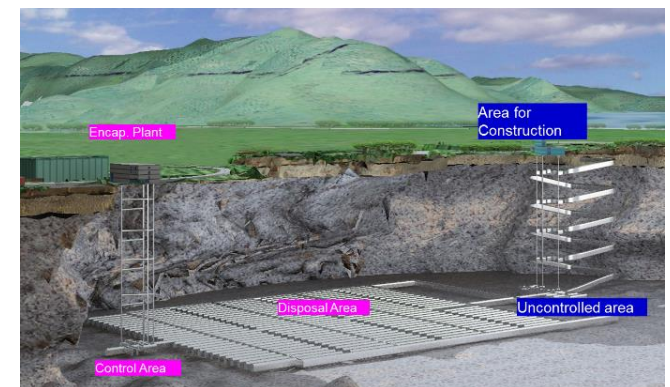


## 처분용기 / 처분터널

- 처분공 간격 : 9m
- 터널 간격: 40m



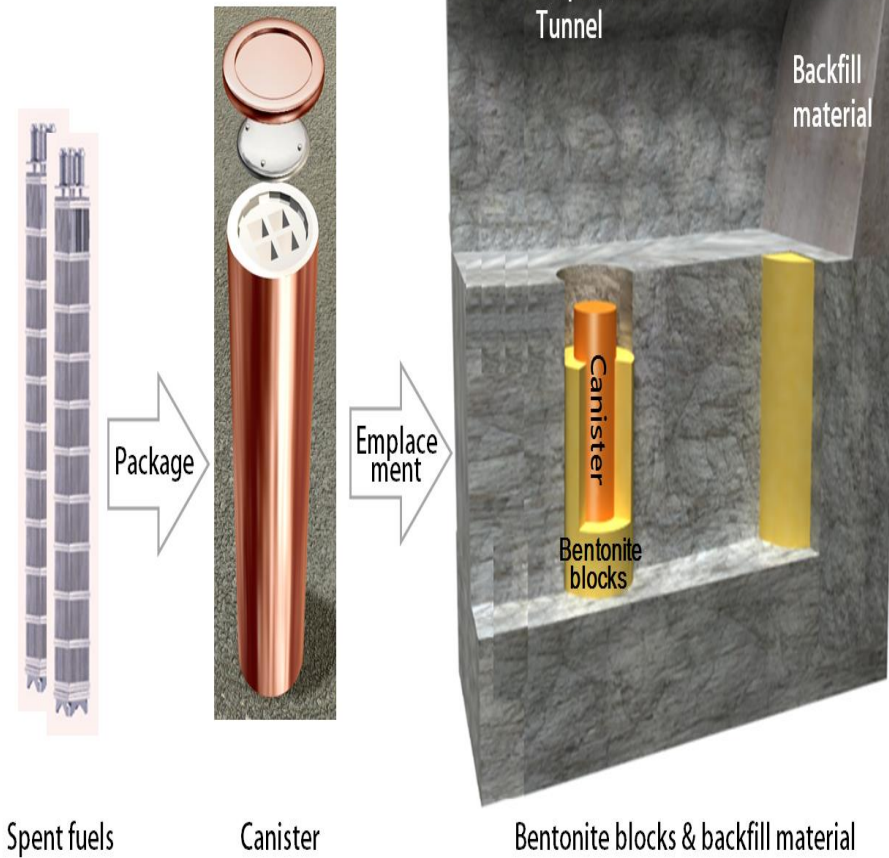
## 처분장 배치 개념도



# 4\_1. KAERI 고준위폐기물 심층처분 개념 (2/2)

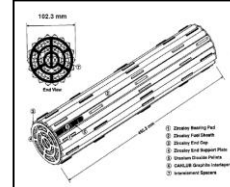
## (경수로) 기준사용후핵연료

농축도 4.5%, 55 GWd/tU,  
40년냉각



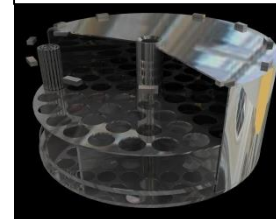
PWR처분용기 / 처분공 / 처분터널

## CANDU 번들

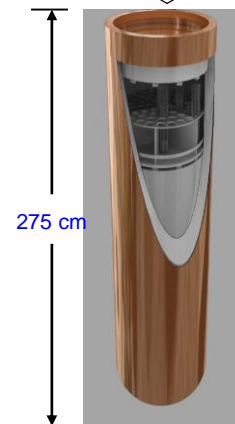


60  
번들

## CANDU 바스켓



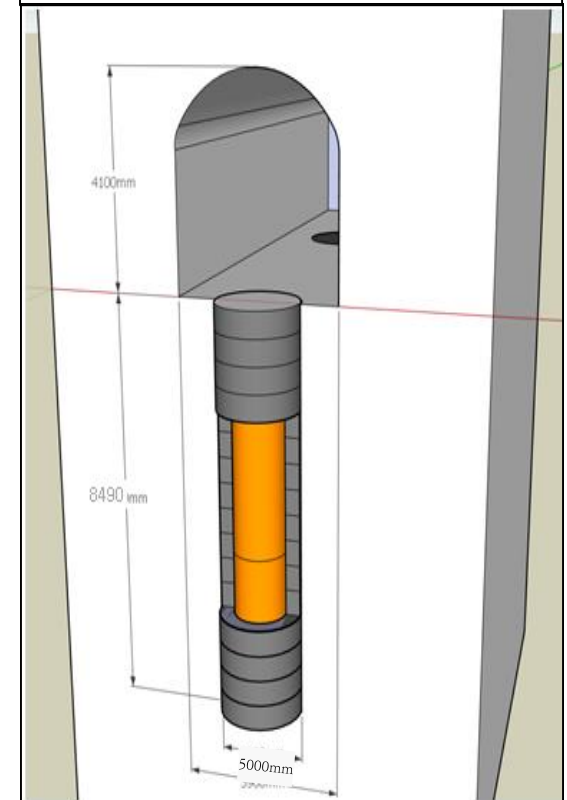
4  
바스켓



## (중수로) 기준사용후핵연료

농축도 0.71%, 8.1 GWd/tU,  
30년냉각

- 처분터널 간격 : 40m
- 처분공 간격 : 5m



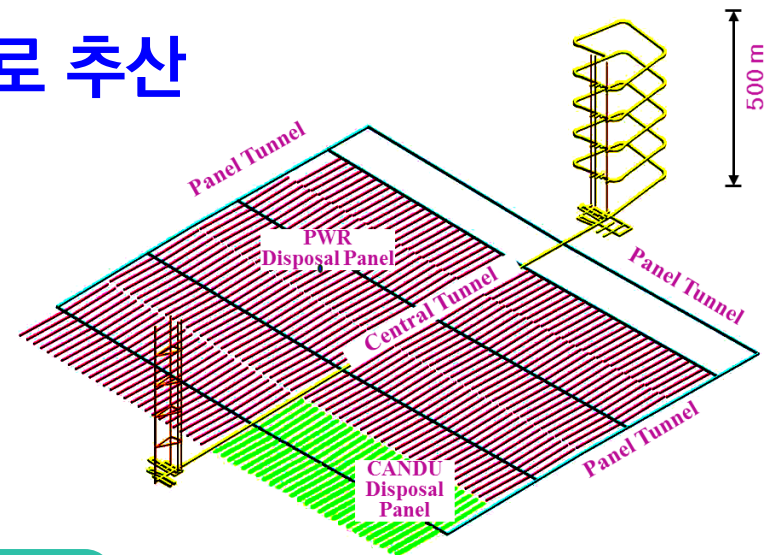
중수로 처분용기



## 4\_2. 고준위폐기물 심층처분 소요면적 (1/2)

사용후핵연료 순수 처분면적은 약 6 km<sup>2</sup>로 추산

	경수로 사용후핵연료	중수로 사용후핵연료	합계
처분면적 (km <sup>2</sup> )	5.69	0.27	5.96



### 가정사항

- 처분물량 : 제2차 고준위방사성폐기물 관리 기본계획 제시 물량
  - 경수로 사용후핵연료 58,479 다발, 중수로 사용후핵연료 576,851 다발
- 모든 경수로 사용후핵연료는 연소도 55GWd/tU, 냉각기간 40년이며, 동시에 처분됨
- 처분장 (온도 제한치 100 °C) 은 단층으로 건설되며, 열은 오직 상부지표로만 빠져나감.



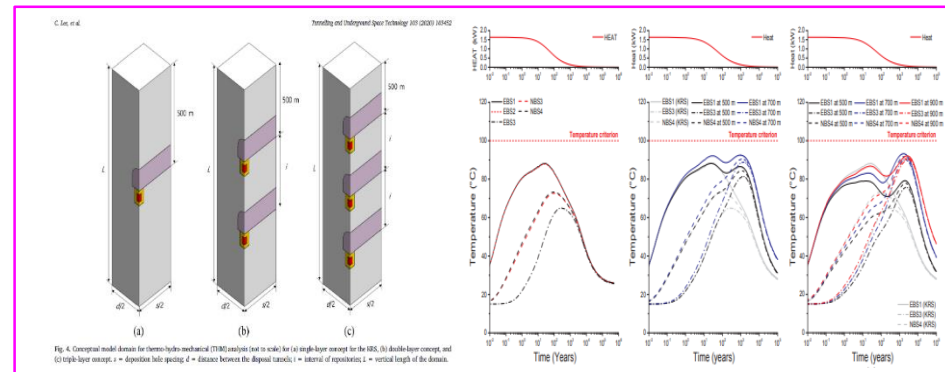
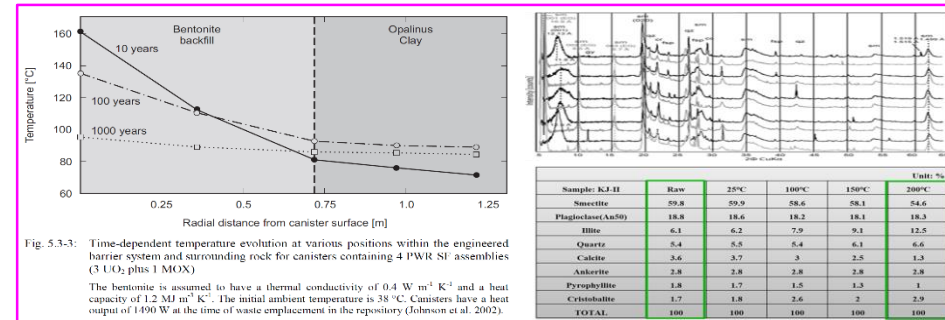
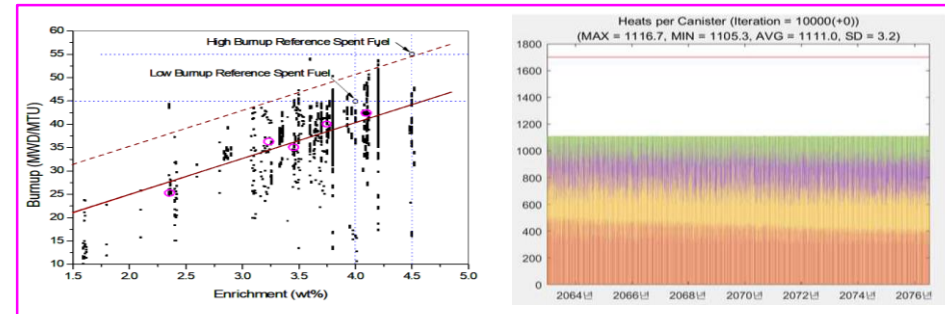
▶ 과도한 보수성 제거 필요 !!

## 4\_2. 고준위폐기물 심층처분 소요면적 (2/2)

**고효율 처분개념 적용시 처분면적은 1/4 ~ 1/8로 감소 예상되며, 현재 심층처분 개념설계안 개선 중!!**

### 설계 개선 사항

- 사용후핵연료의 연소도/냉각기간이 다음을 고려하여 방사선원항 최적화 (약 50% ↓)
- 벤토나이트 설계온도 제한치를 현재 100°C에서 125°C로 상향 (약 50% ↓)
- 단층이 아닌 복층으로 설계를 변경 (약 50% ↓)
- 열은 측면으로도 소산하며, 처분장 운영기간 80년 동안에도 지속적으로 소산함 (미반영)
- 완충재 열전도도 향상을 통한 처분면적 감소 (미반영)
- 적재량(용기/처분공) 증가를 통한 처분면적 감소 (미반영)



## 4\_3. 심층처분 가능 암반 (1/2)

사용후핵연료를 안전하게 처분할 수 있는 후보 압반은 35% 정도로 예상되며, 원전 진흥정책으로 처분물량이 증가해도 처분가능 압반은 충분할 것으로 예상

## ■ 화강암

## S. Korea

**-고생대 및 중생대 25.6%**

## ■ 변성암

- 화강암질 편마암 9.7%

- 퇴직암질 편마암 19.8%

고준위방사성폐기물 심층처분시설에 관한 일반기준

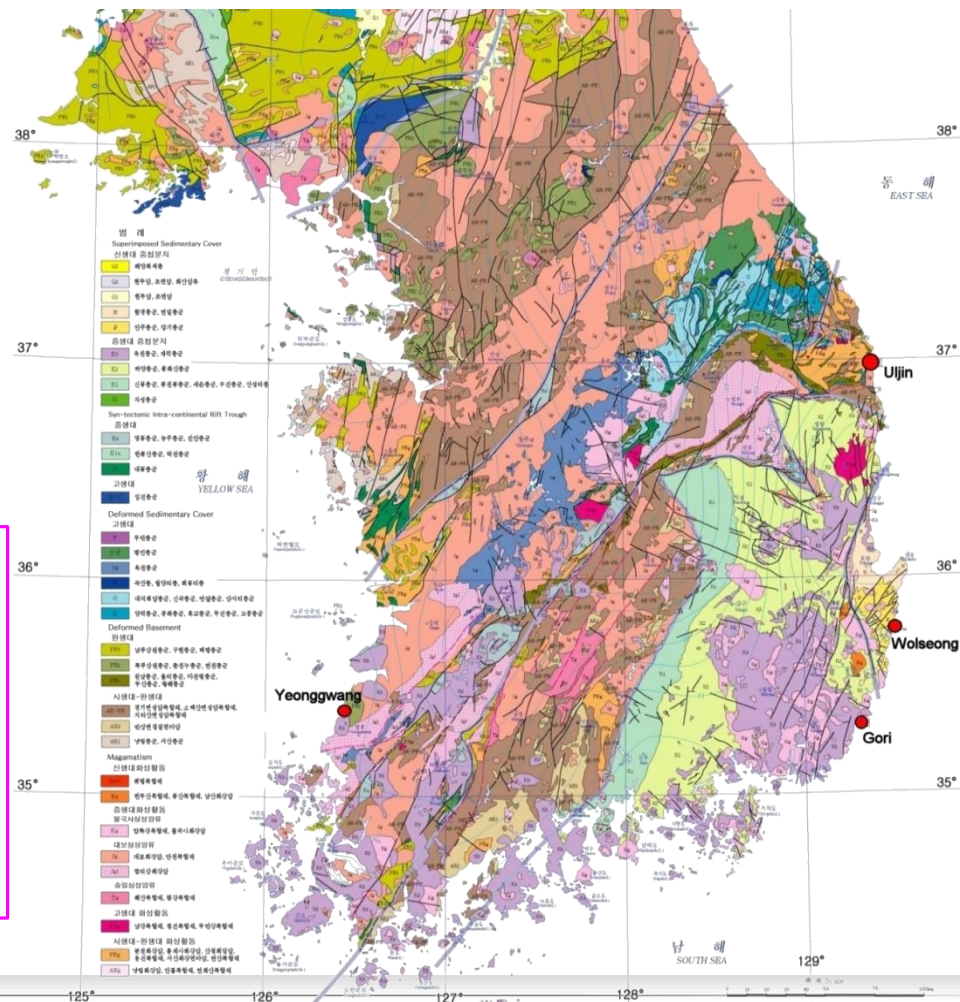
[시행 2021. 7. 13.] [원자력안전위원회고시 제2021-21호, 2021. 7. 13., 일부개정]



제12조(천연방역) ④ 심층처리시설의 모든 처분고는 석회암이나 이방성이 큰 불안정한 암종이 분포하지 않은 균질한 암반으로서 강도가 큰 단위의 기반암 내에 위치하여야 한다.

② 심층처분시설의 처분고는 미래에 해당 지역에서 예상되는 지표면의 변화와 기후변화에 의해 심각한 영향을 받지 않도록 하고, 미래 인간침입의 가능성과 그 영향이 제한될 수 있도록 충분한 깊이에 위치하여야 한다.

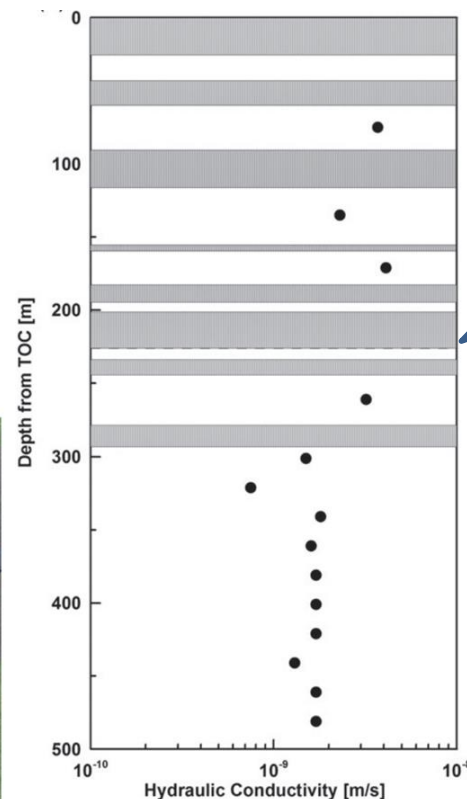
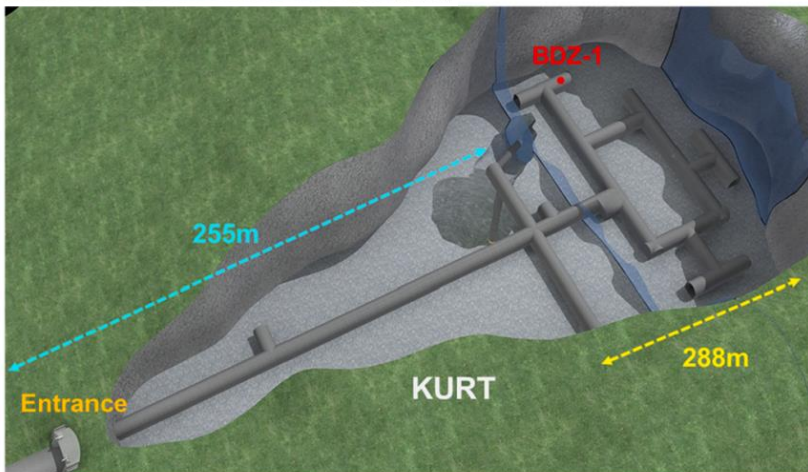
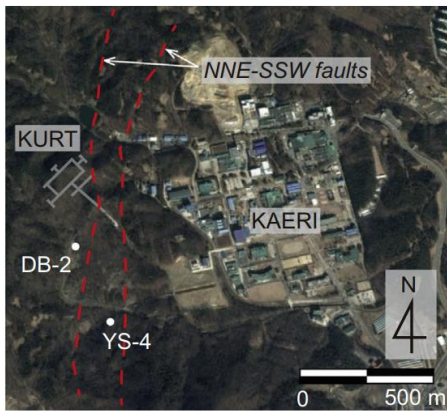
③ 심층처분시설의 천연방벽은 역학적·수리지질학적·지화학적으로 안정된 매질로서 해당 방사성폐기물에 함유된 장반감기 방사성핵종의 이동을 지연시키고 방사성물질이 생태계로 유출하는 것을 제한하는 성질을 가져야 한다.





## 4\_3. 심층처분 가능 암반 (2/2)

사용후핵연료를 안전하게 처분할 수 있는 후보 암반은 35% 정도로 예상되며, 원전 진흥정책으로 처분물량이 증가해도 처분가능 암반은 충분할 것으로 예상



KURT부지의 깊이별  
투수도 분포 (Ji et al., 2017)

수리전도도가  
지하300m 이하 깊이  
에서  $10^{-9}$  m/s 수준

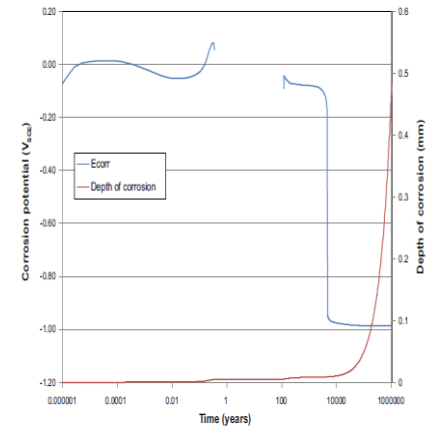
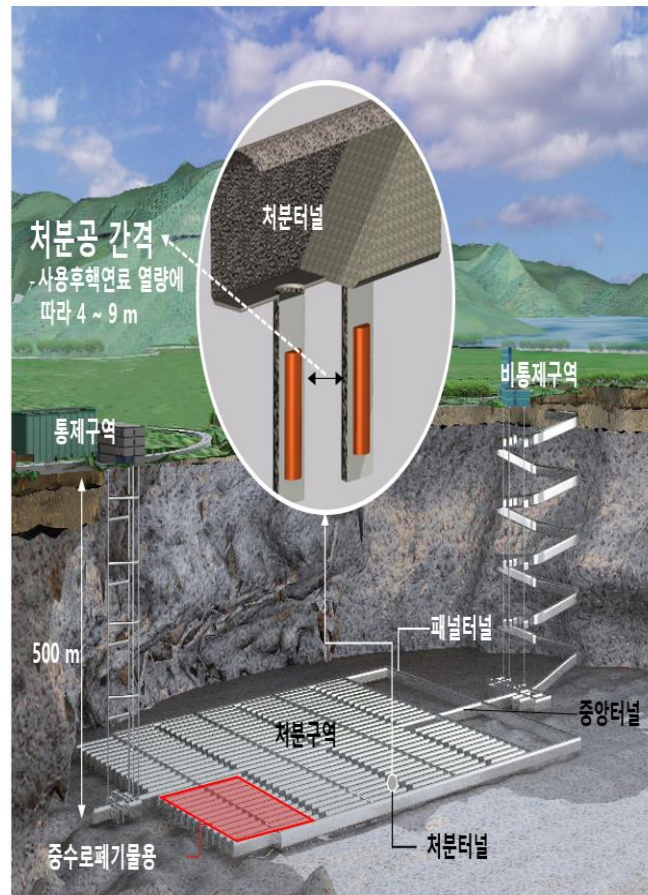
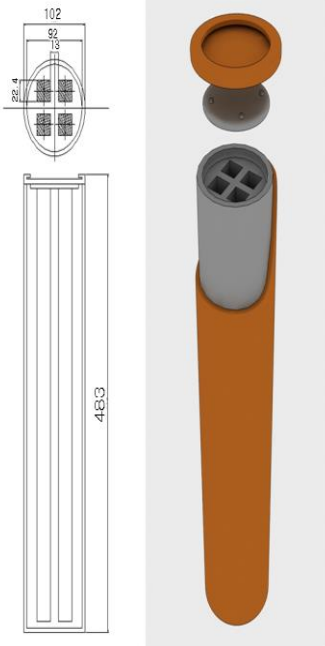
• 지하수 선형속도 :  
수리전도도  $10^{-9}$  m/s일 때  
이동거리는 ~160m/10만년

# 4\_4. 심층처분 안전성 (1/1)

**고려중인 공학적방벽은 대부분 장기간(100만년 이상)동안 건전성을 유지하도록 설계**

## ○ 처분용기

- 이중 구조 : 구리 + 주철
  - 구리 : 내부식성, 5 cm 두께
  - 주철 : 구조적 건전성 유지
- 용량 : PWR SNF 4집합체



스웨덴 구리부식 예측결과 (10<sup>6</sup>년 동안 < 0.5mm)



캐나다 처분용기(3mm 구리코팅)



## 4\_5. 심층처분시설에 대한 안전성 기준 (1/1)

원안위 고시(제2021-21호) 안전목표치를 만족하도록 고효율 처분시스템 도출 예정 (현재 설계중)

제5조(안전목표치) 심층처분시설은 폐쇄 후 방사선영향이 다음 각 호의 안전목표치를 만족하도록 설계되어야 한다.

1. 자연현상과 인간침입을 망라한 주요 시나리오에 따른 방사선피폭으로 인한 연간 총 위험도가 대표인

에 대해  $10^{-6}$ 을 초과하지 않을 것

2. 발생가능성이 낮은 확률자연현상과 인간침입 등 단일 시나리오에 따른 예상피폭선량이 대표인에 대해 연간 10밀리시버트를 초과하지 않을 것

제6조(안전성평가) 제5조에 따른 안전목표치에 대한 부합성의 평가는 다음 각 호에 기초하여야 한다.

1. 총 위험도는 위험도계수( $\gamma$ ), 피폭시나리오( $i$ ), 피폭시나리오가 발생할 확률( $P_i$ ), 대표인에 대한 연간피폭선량( $D_i$ )을 고려하여 다음 계산식에 따라 산출한다.

$$\text{총 위험도} = \gamma \sum P_i D_i$$

2. 평가대상 피폭시나리오는 처분시스템의 특성을 대표하며, 총 위험도에 기여가 클 것으로 예상되는 주요 현상, 과정 및 사건을 체계적으로 분석하여 구성할 것

3. 대표인에 대한 선량은 유효선량값으로 평가하며, 선량값을 위험도로 환산하기 위해 시버트 당 0.05의 위험도 계수를 적용할 것

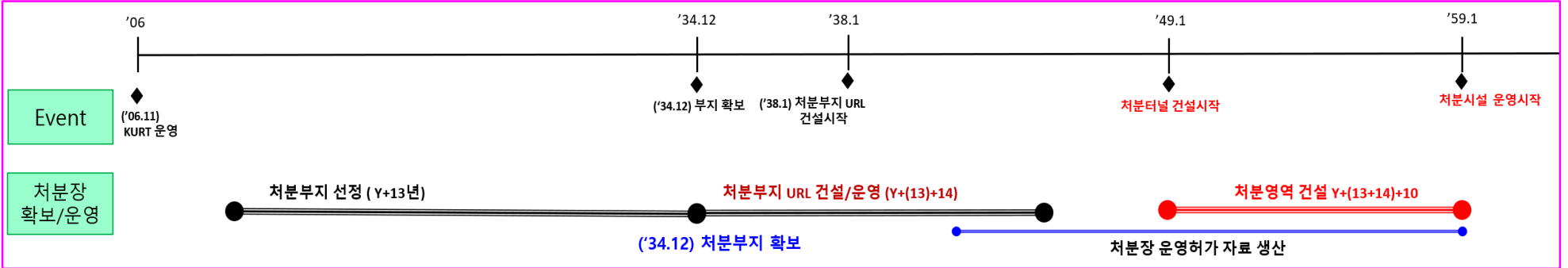
4. 위험도는 피폭시나리오 및 시간에 따른 위험도 분포로부터 평가할 것

5. 위험도평가에 적용하는 피폭시나리오의 발생확률은 상대적 발생빈도로부터 유도하거나 정량적인 분석기술을 사용한 최적평가기법 또는 공학적 판단으로부터 산출할 것

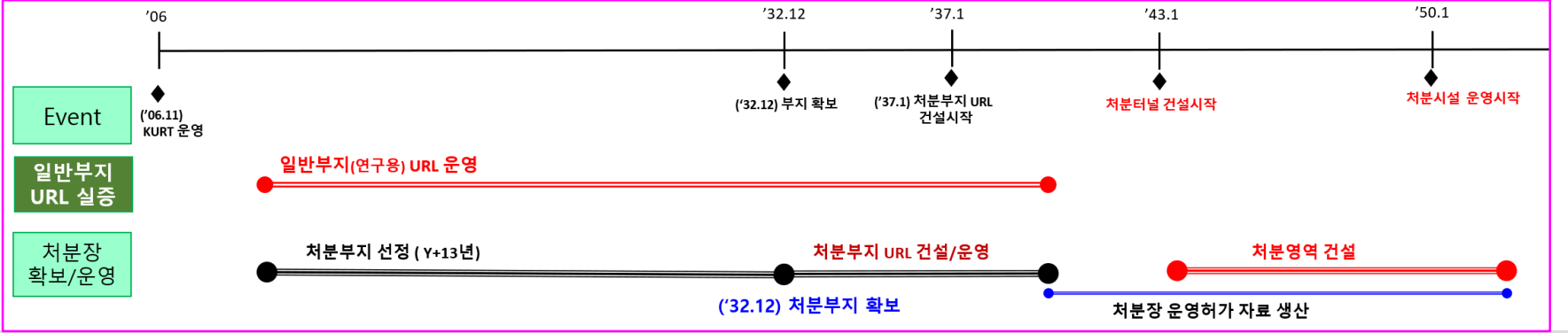
# 2\_6. 처분사업을 위한 R&D 일정 (1/1)

2060년 이전에 고준위폐기물 처분장 운영 가능하며, 일반부지(연구용) URL에서의 실증 연구 조기착수와 집중투자가 이루어진다면 최대 2050년에 운영 가능할 것으로 판단

## 처분부지 URL에서 실증연구를 주로 수행할 경우



## 일반부지(연구용) URL에서 실증연구를 주로 수행할 경우



# 05 맺음말

## 5. 맺음말

- 현재 3개의 처분사업(다부처 예타사업/과기부 비예타/ 산업부 비예타)이 상호 유기적으로 효율적으로 진행 중이며, 연구결과를 바탕으로 2030년에 처분안전성 실증이 시작될 것임.
  - 한국형 심층처분시스템, 처분면적 저감/안전성 향상기술 기술, URL 실증전 핵심기술 개발 중
- 국내 제시된 사용후핵연료 직접처분 개념은 안전성을 충분히 확보하고 있으며, 현실성 있는 고효율 처분개념을 적용할 경우, 「제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획」에 제시된 처분물량은 경주처분장(2.1km<sup>2</sup>) 크기 안에 충분히 처분할 수 있을 것으로 예상됨.
- K-텍소노미에 원자력이 포함되기 위해서는 원활한 고준위폐기물 처분사업이 중요하며, 이를 위해서는 500m 처분환경 심도를 갖는 연구용 지하연구시설 확보가 필수적임.





**경청해 주셔서 감사합니다.**