

2026 고준위방사성폐기물 처분 Safety Case 워크숍

대안/고효율 처분시스템 개념 개발 현황



Disposal safety Evaluation Research Division

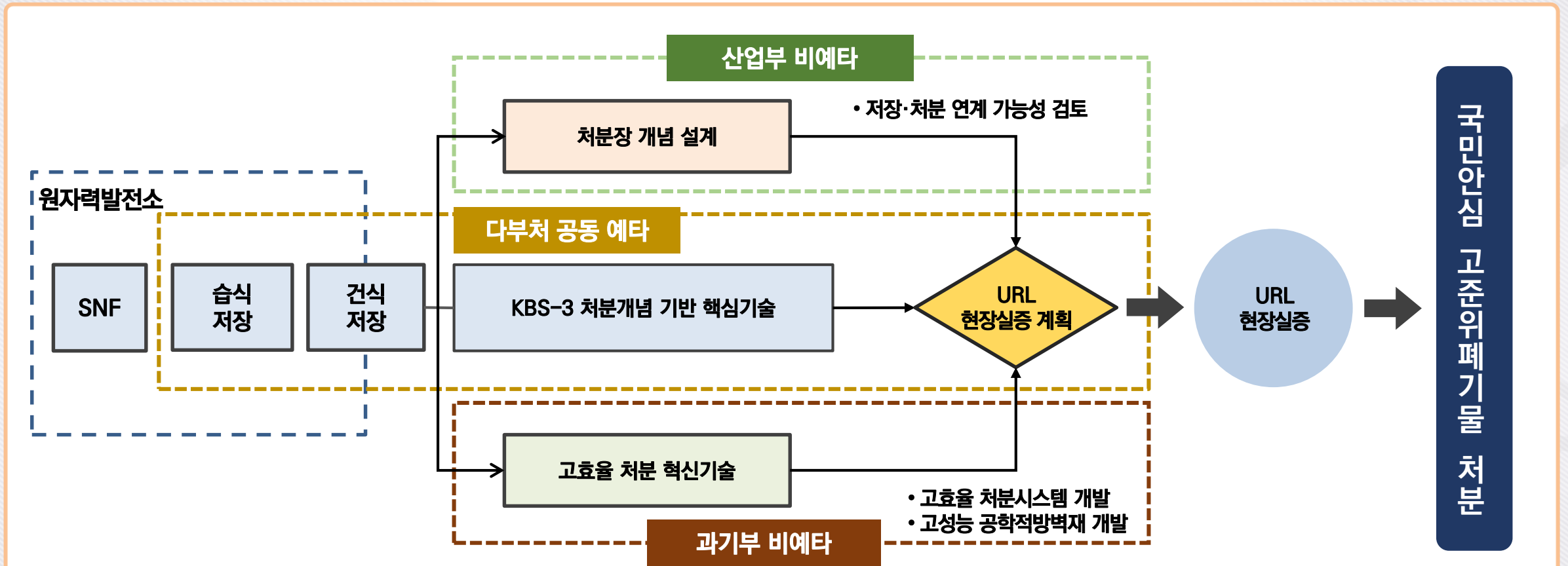
*Changsoo Lee

e-mail* : leecs@kaeri.re.kr

6 May 2026

01 대안/고효율 처분시스템 개발 현황

저장·처분 R&D 현황

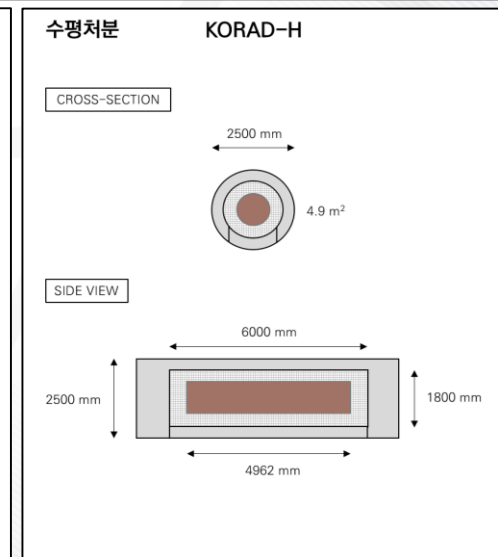
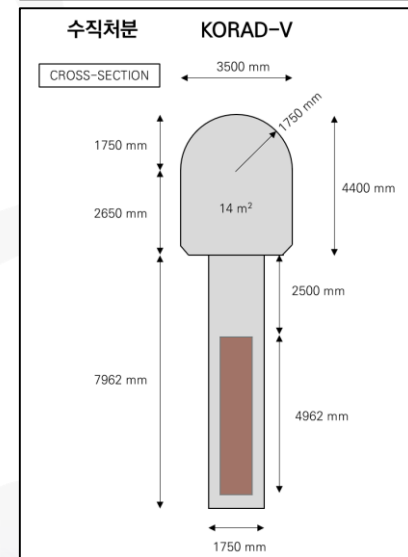
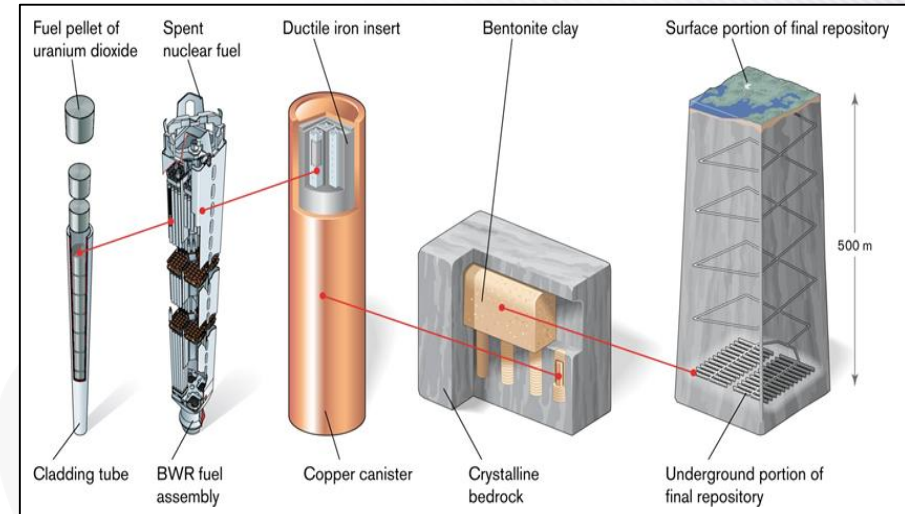


- 다부처 예타: 심층 처분개념 기반의 처분시스템을 URL에서 실증하기 위해 필요한 핵심기술개발
- 산업부 비예타: 한국현실에 적합한 처분시스템 개념 설계(안) 도출
- 과기부 비예타: 안전성, 경제성 및 국민수용성 향상을 위한 대안 및 고효율 처분개념을 개발하여 국내적용 타당성을 평가하는 혁신적 핵심기술 개발

제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획(안)

관리정책 로드맵

- ◇ 부지선정 절차 착수 이후 37년내에 영구처분시설 확보
- ◇ 유치지역을 "안전하고 살기 좋은 도시"로 조성



03 대안/고효율 처분시스템 개발 현황

연구개발과제의 목표

고준위폐기물 안전강화 혁신기술개발 사업

- 기술진보를 고려하여 국내 환경에 적합하고, 처분면적 저감과 처분안전성 강화가 가능한 혁신적이고 차세대 고준위폐기물 관리 기술개발

✓ 고효율 처분시스템 설계안 제시

안전성 강화 고효율 처분시스템 개발
고효율 처분시스템 제시·성능평가와 처분부지 저감효과 분석을 통한 최적 개념설계안 확보

고기능성 공학적방벽 개발 및 처분적합성 평가
국내 환경에 적합하고 처분안전성 강화가 가능한 혁신적인 공학적방벽재 개발

✓ 효율향상 대비 안전성이 강화된 고성능 공학적방벽재 제공

- ✓ 처분면적 저감 한국형 고효율 처분 설계개념 + 평가도구 개발
- ✓ 혁신적인 공학적방벽재 설계기준

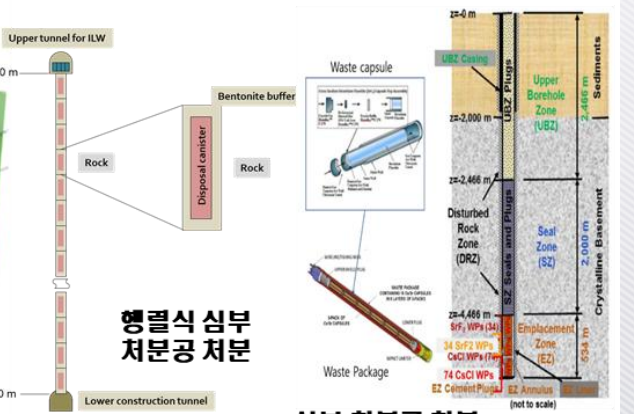
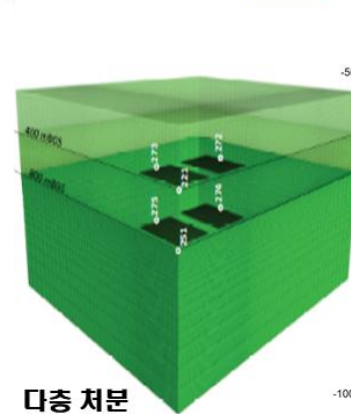
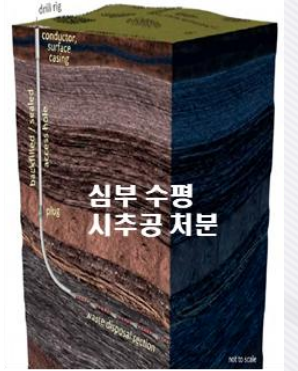
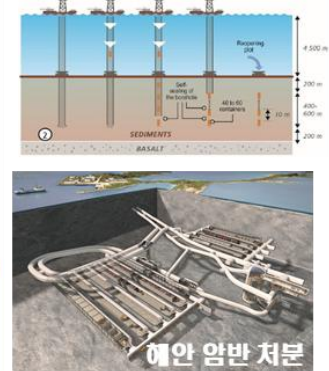
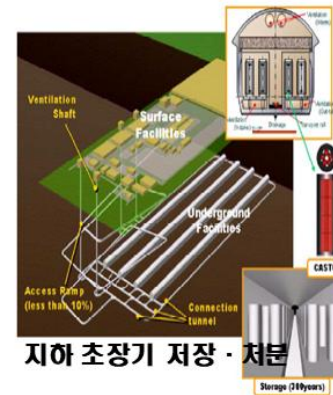
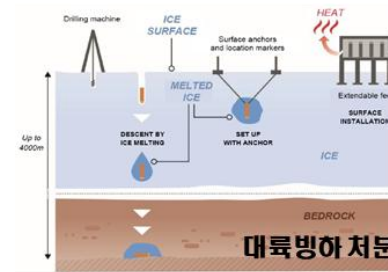
- ✓ 고기능성 공학적방벽 대안재료
- ✓ 공학적방벽 처분 적합성 종합성능평가 자료

처분 효율성 및 안전성 강화방안 제시

04 대안/고효율 처분시스템 개발 현황

대안 처분개념(안) 도출

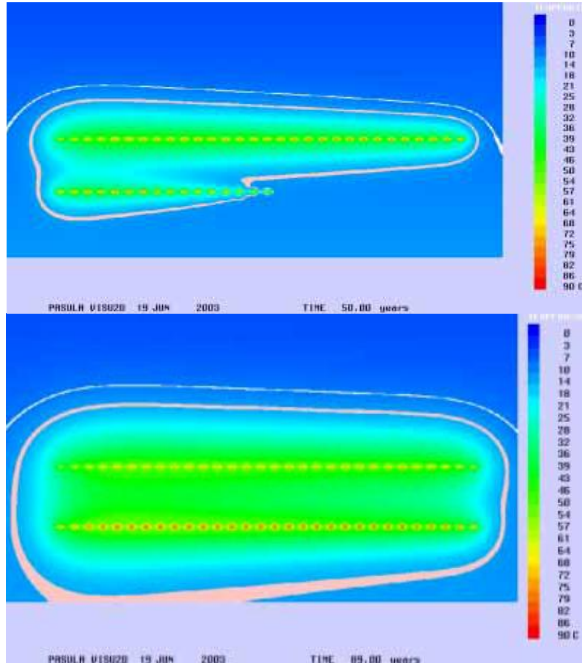
- 기준 처분개념 : KBS-3 심층 처분
- 해외 대안처분관련 문헌 분석
 - 후보 선정 기준 : 기술완성도, 안전성, 경제성, 환경보존, 주민수용성
 - 9개의 대안처분 개념 도출
 - ✓ 다층처분, 해안 암반 처분, 지하 초장기 저장·처분, 심부 시추공 처분, 행렬식 심부 처분공 처분, 심부 수평 시추공 처분, 우주처분, 해양투기, 대륙빙하 처분
- 내부 전문1차 평가 → 4개의 대안처분 개념 도출
 - 다층처분, 해안암반 처분, 심부 시추공 처분, 행렬식 심부 처분공 처분
- 2차 전문가 평가 (내·외부 전문가 평가) → 다층 처분 개념 도출
 - 처분능력 평가, 처분 효율 평가, 안전성 및 안정성 평가 수행



05 대안/고효율 처분시스템 개발 현황

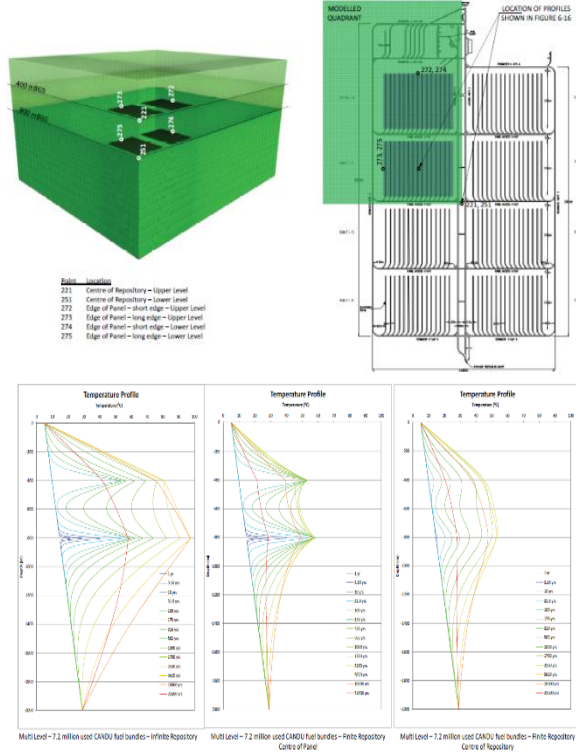
국내·외 다층처분 개념 연구

핀란드



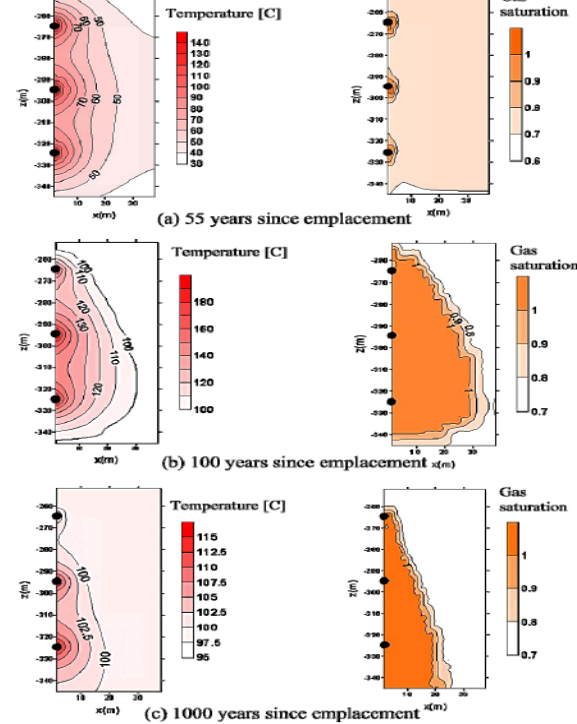
- 400 m와 500 m 처분패널의 상호작용 분석
- 기존개념 (400 m) 최고온도 : 90.1°C
- 500m 패널 최고온도 : 94.7°C
- 하단 처분용기 간격 : 2 m 증가
- 상단 패널과 동일한 위치에서 처분 시작하는 것이 중요

캐나다



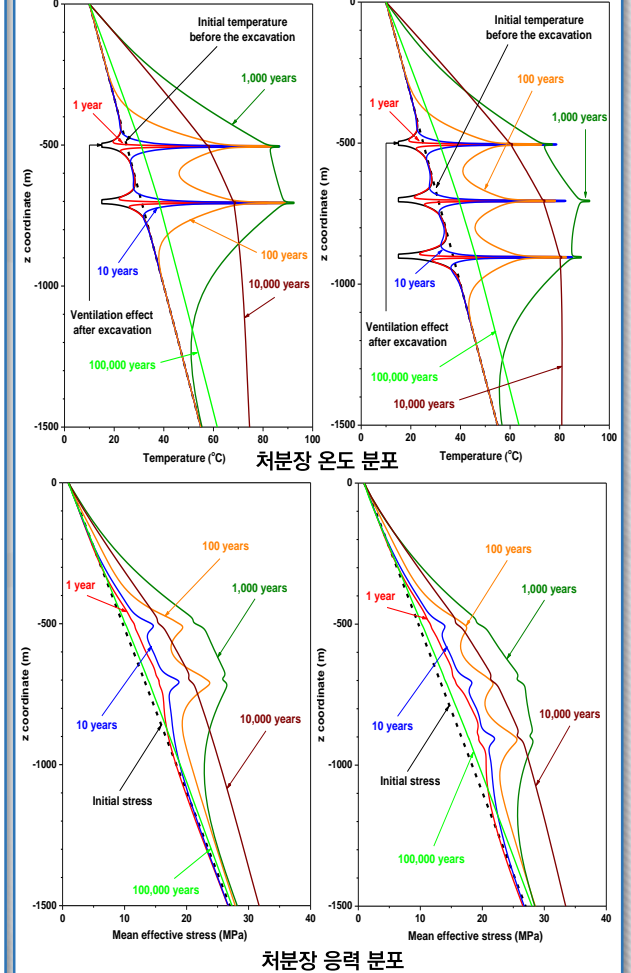
- 400 m와 800 m 복층 처분장의 열, 역학적 거동, 처분장 온도제한치 충족 여부 등 분석
- 간격분석 : 최적 처분간격 제안
 - DT 36 m x DC 4.2 m

미국



- 응회암 기반의 유카산 처분장(YMP)의 처분용량 극대화
- 다층(3층) 처분시스템 열-수리-역학 및 안전성/경제성 분석
- 기술적 타당성 평가

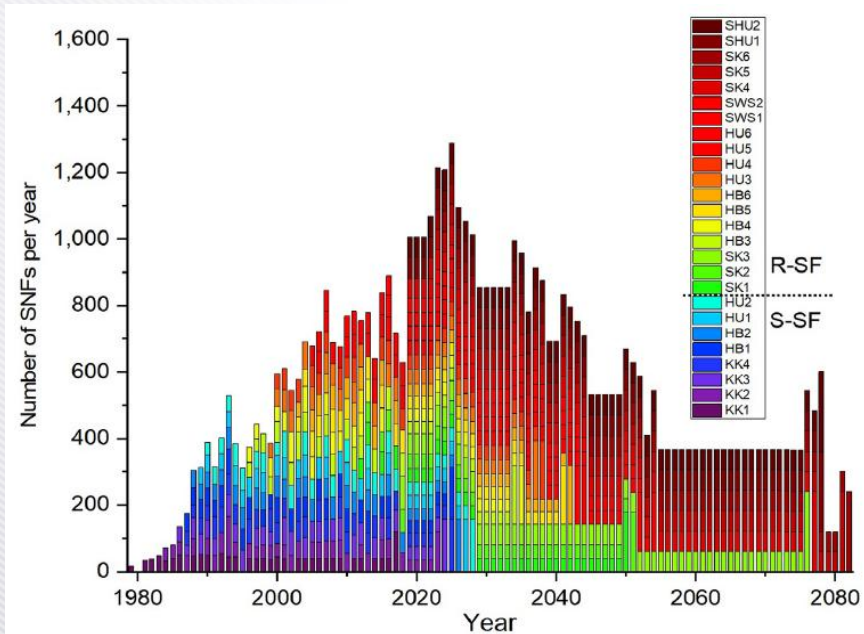
한국



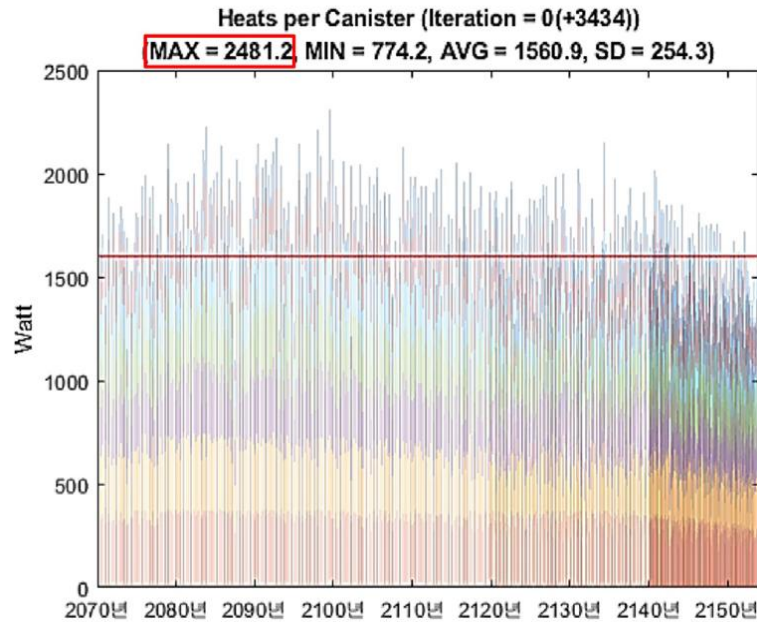
06 대안/고효율 처분시스템 개발 현황 처분용기내 방사선원항 최적화

» 붕괴열 최적화 프로그램

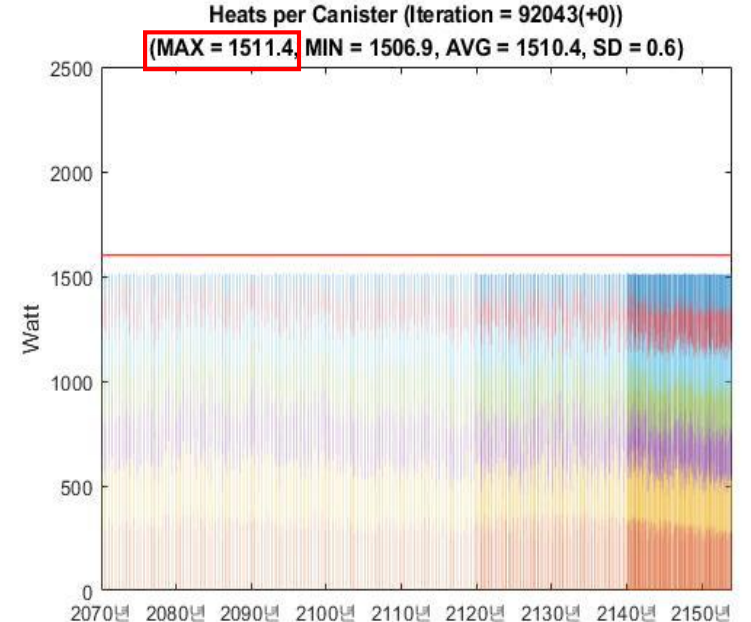
- 방출연소도/냉각기간을 조합
 - 처분용기에 장전되는 붕괴열 낮출 수 있음
 - 용기당 붕괴열 최대값 기준으로 약 40% 정도 낮출 수 있음



PWR 사용후핵연료



최적화 전 (KRS⁺)

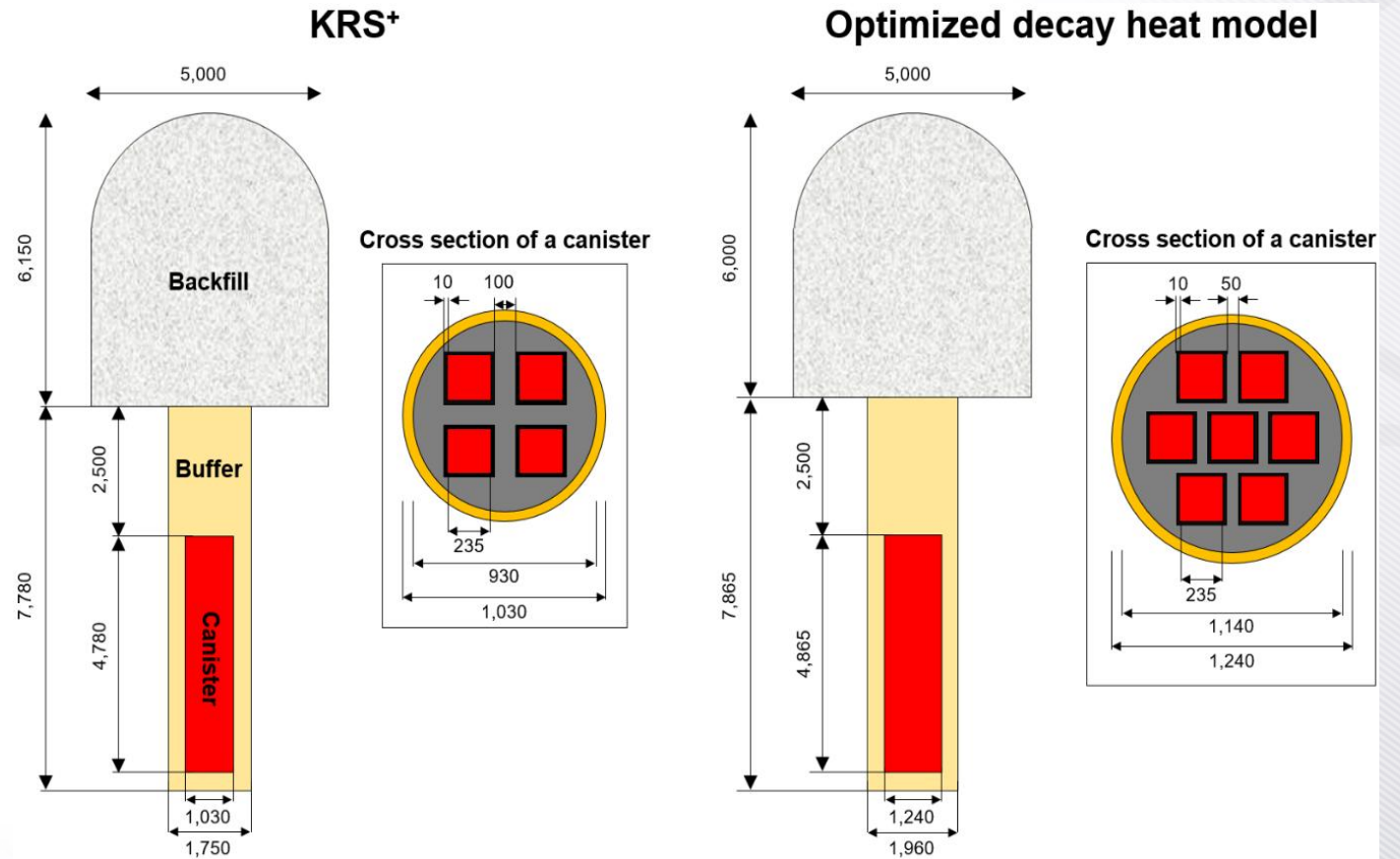
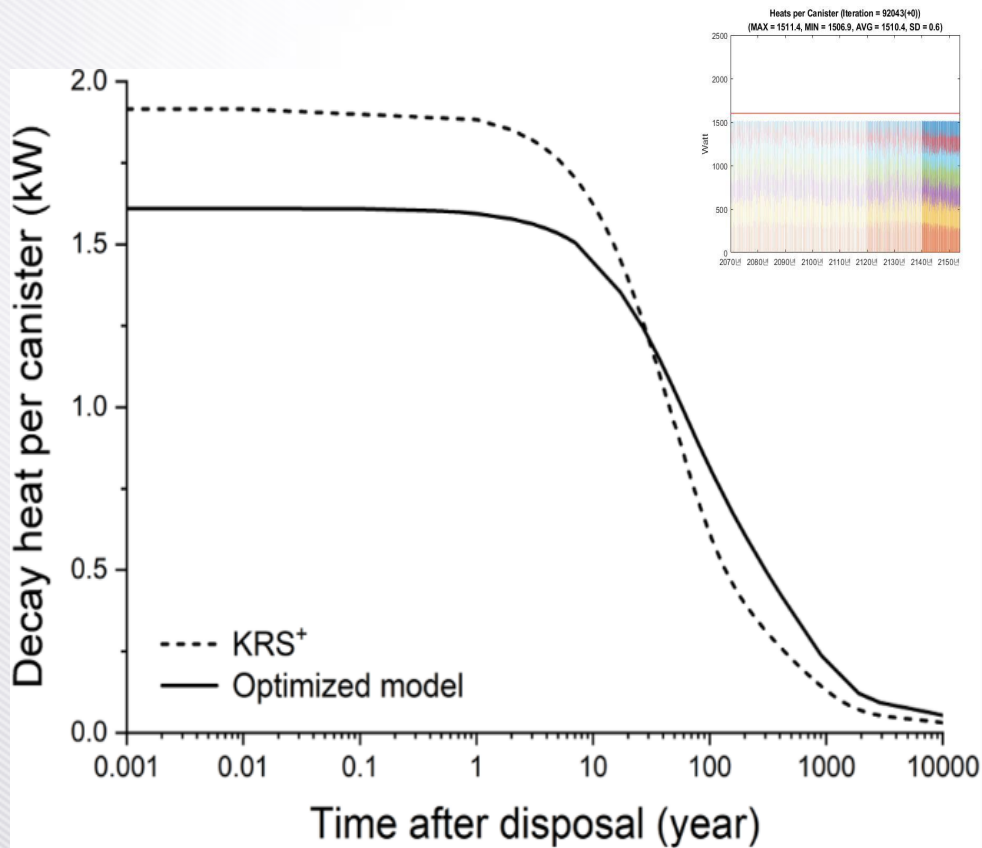


최적화 후 (Optimized decay heat model)

06 대안/고효율 처분시스템 개발 현황 처분용기내 방사선원항 최적화

» PWR 처분시스템

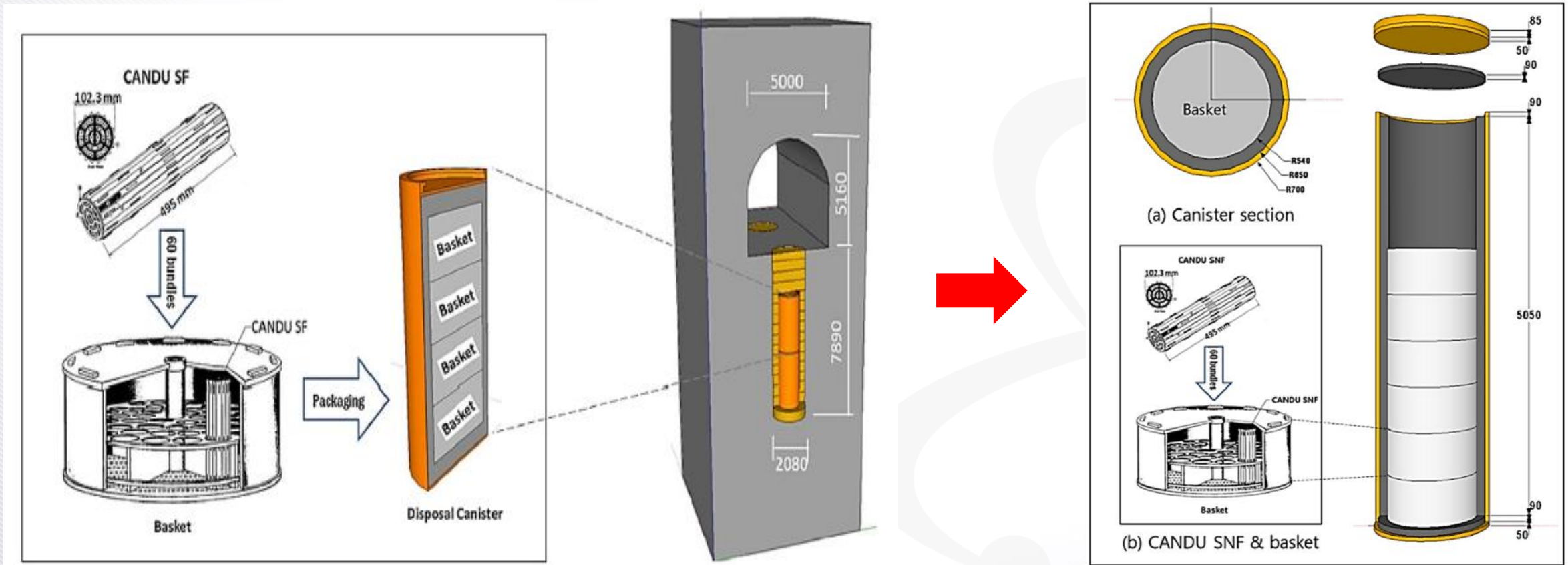
- 용기당 SNFs: PWR 4 → 7



06 대안/고효율 처분시스템 개발 현황 처분용기내 방사선원향 최적화

» CANDU 처분시스템

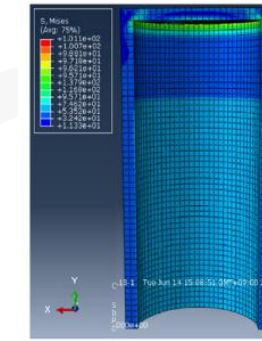
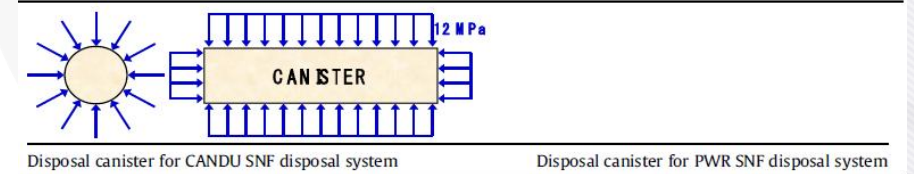
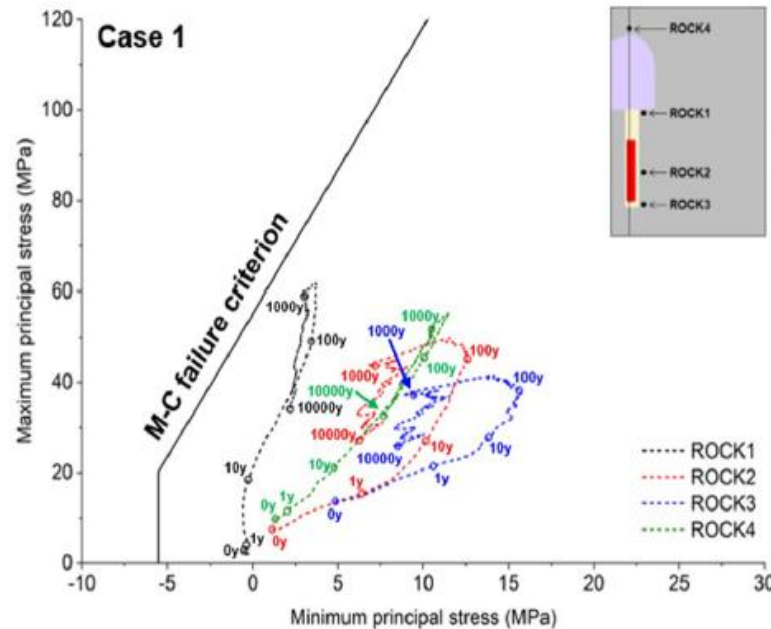
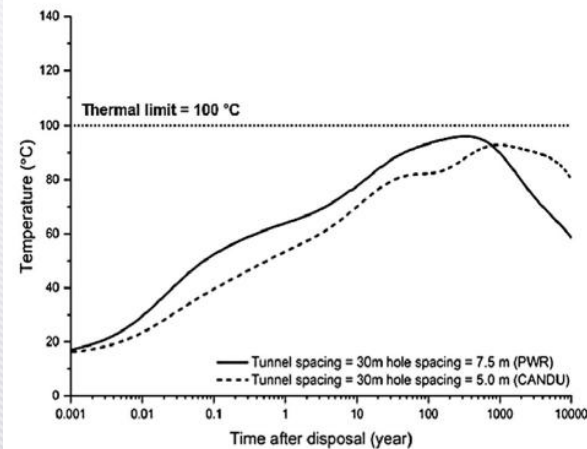
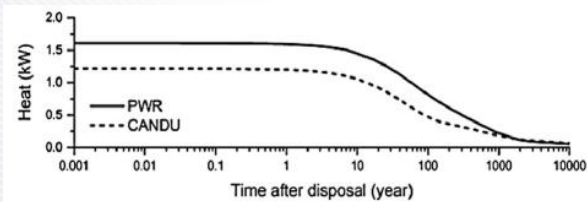
- 용기당 SNFs: CANDU 480 → 540 bundles



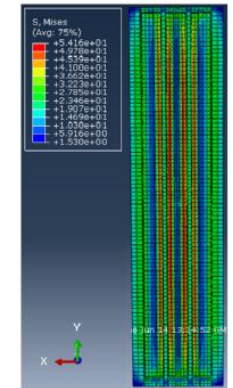
06 대안/고효율 처분시스템 개발 현황 처분용기내 방사선원향 최적화

» 성능평가 및 안전성 평가

- Thermal stability
- Mechanical stability of rock mass
- Structural stability of disposal canister
- Radiological safety assessment



101 MPa
2.3 (230 MPa/101 MPa)

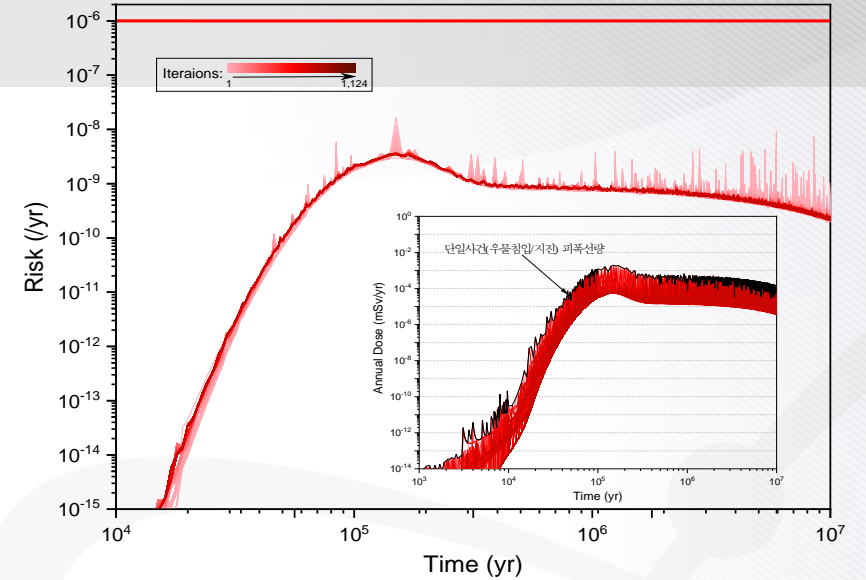
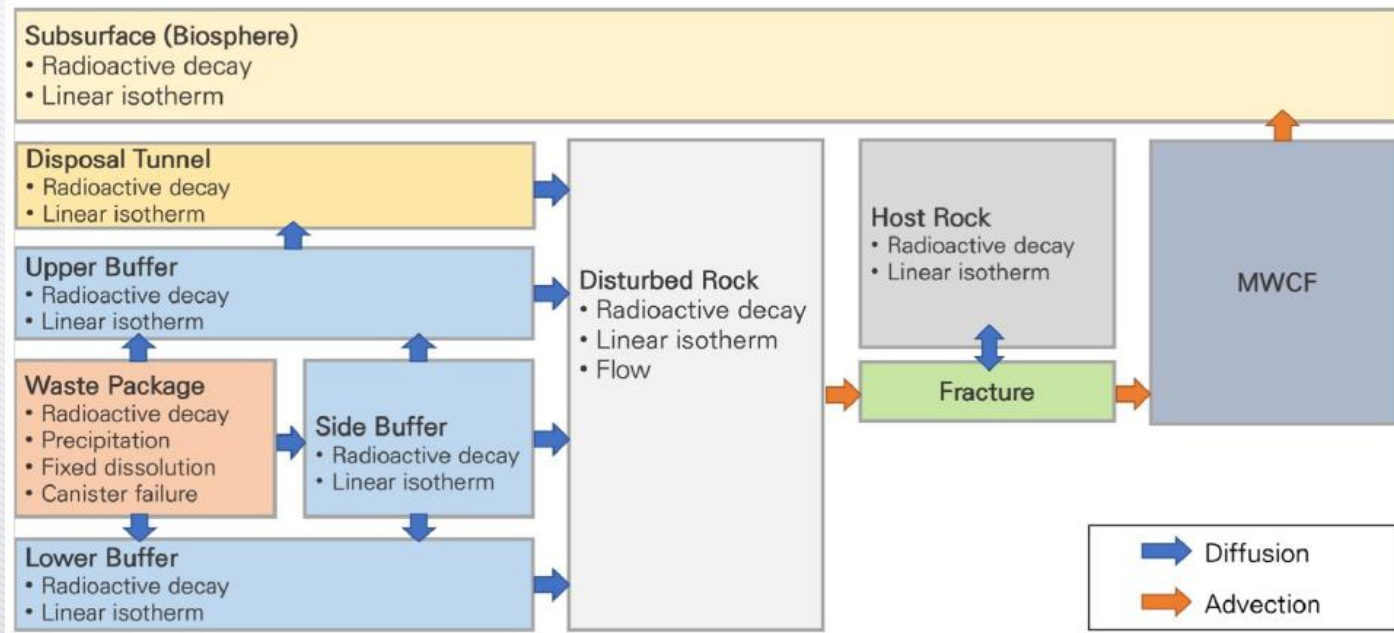


54.2 MPa
4.2 (230 MPa/54.2 MPa)

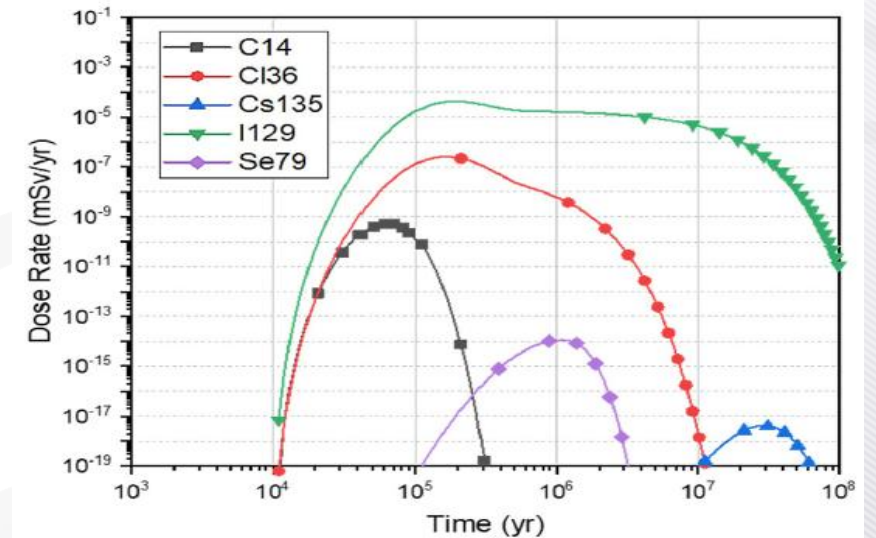
06 대안/고효율 처분시스템 개발 현황 처분용기내 방사선원향 최적화

» 성능평가 및 안전성 평가

- Thermal stability
- Mechanical stability of rock mass
- Structural stability of disposal canister
- Radiological safety assessment



<정상시나리오 안전성평가 결과>

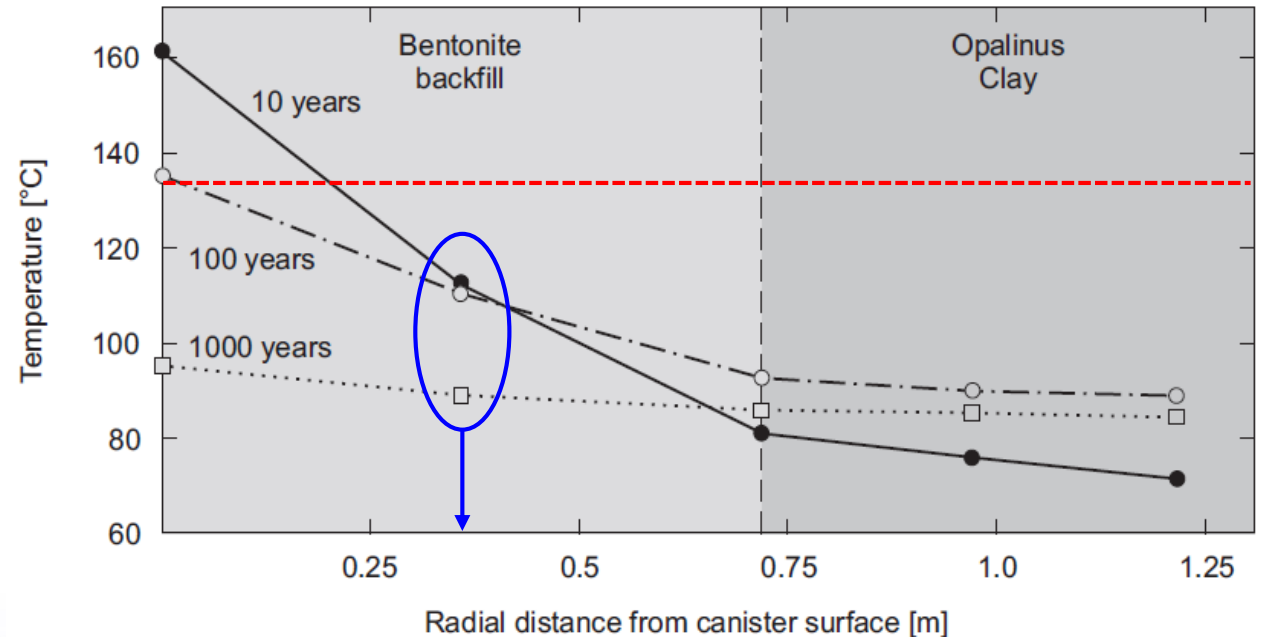
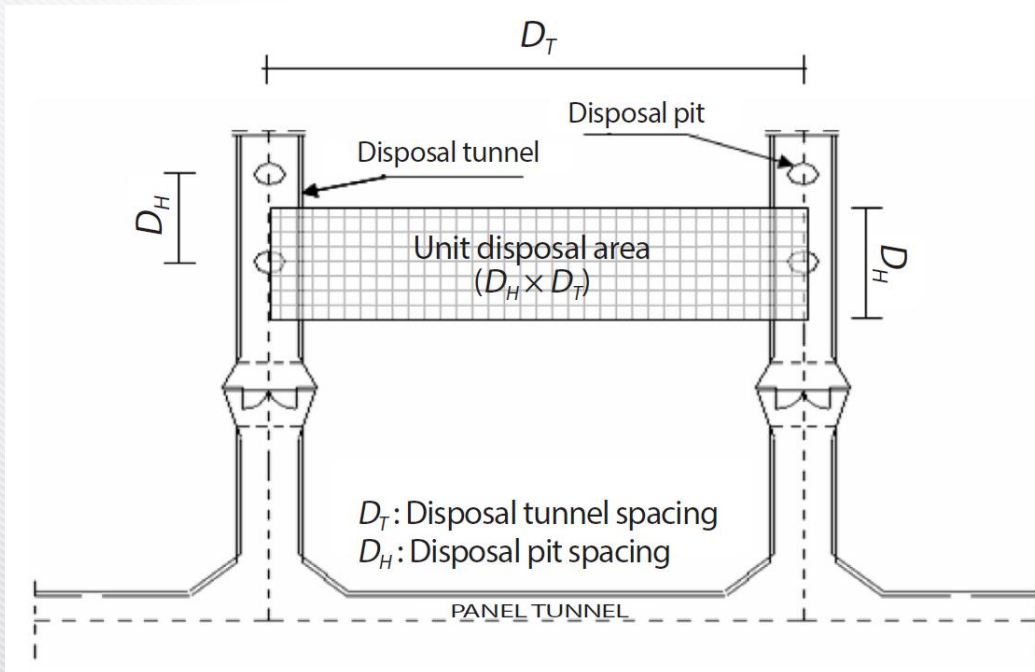


<리스크 및 단일사건 안전성평가 결과>

07 대안/고효율 처분시스템 개발 현황 설계기준 온도 상황

» 국내·외 설계기준 온도

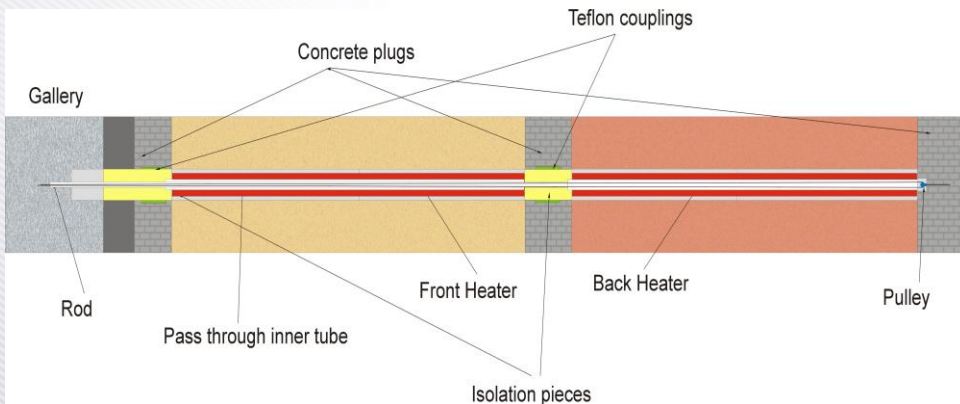
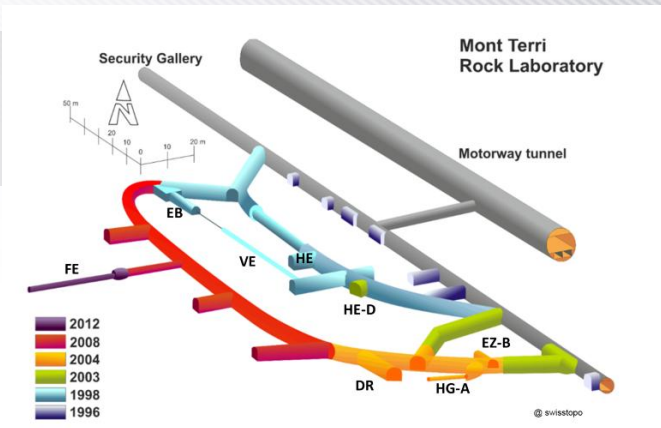
- 스웨덴, 핀란드, 한국: 처분용기와 완충재의 경계면에서의 온도 (100°C 이하)
- 스위스: 완충재의 중간 지점에서의 온도 (125°C 이하) [NAGRA, TR-02-05]
- 처분장 면적 : 설계 온도를 만족하는 처분공 및 터널 간격과 SNF 처분에 필요한 처분공과 터널의 수를 기반으로 계산된 면적



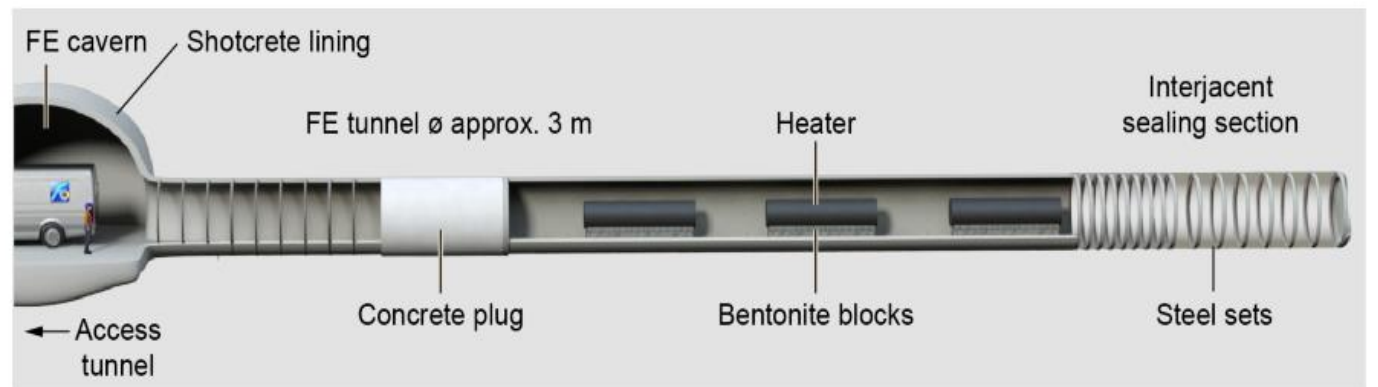
07 대안/고효율 처분시스템 개발 현황 설계기준 온도 상황

» 국외 실증연구

- Heater Experiment – E (HE-E)
 - 1/2 규모 현장시험으로 140°C의 고온에서의 처분시스템에서의 THM 복합거동 규명 및 수치모델/해석시뮬레이터 검증
- Full-scale emplacement Experiment (FE)
 - 실규모 현장시험으로 150°C의 고온에서 처분시스템에서의 THMC 복합거동 규명 및 수치모델/해석시뮬레이터 검증
- 국제공동연구 DECOVALEX-2015, DECOVALEX-2023: 수치해석 모델 및 시뮬레이터 검증 (KAERI 참여)



HE-E 현장시험 개념도

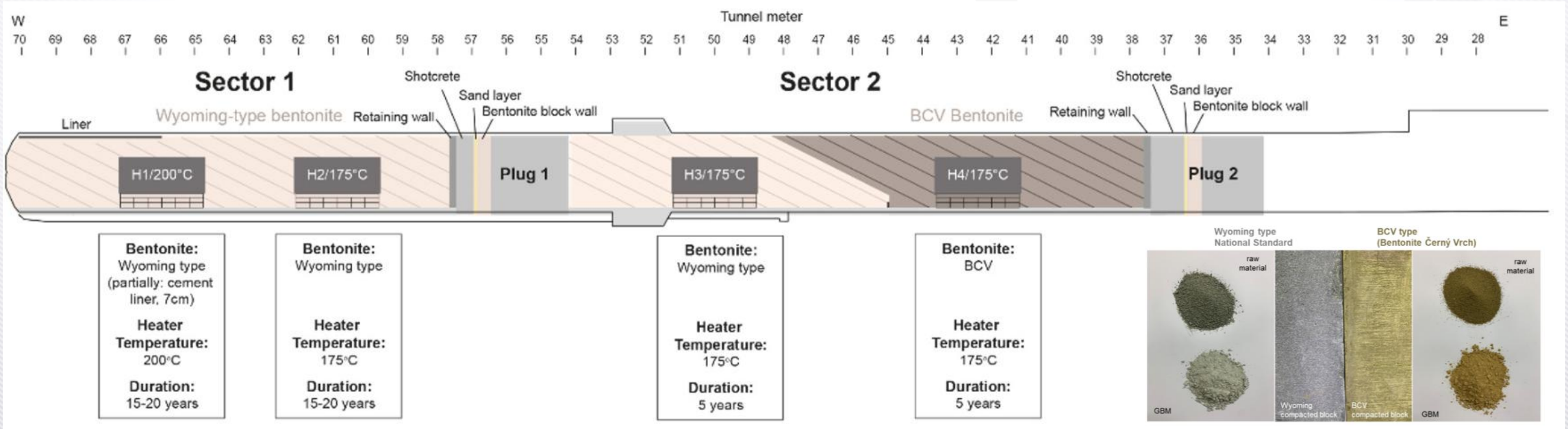


FE 현장시험 개념도

07 대안/고효율 처분시스템 개발 현황 설계기준 온도 상황

» 국외 실증연구

- HotBENT 프로젝트 : **고온(175°C & 200°C)**에서의 벤토나이트 완충재의 성능 평가 & THMC 모델 및 해석 시뮬레이터 검증
 - ▶ 참여기관: 스위스 Nagra, 영국 RWM, 일본 NUMO, 캐나다 NWMO, 체코 SURAO, 미국 DOE, 독일 BGE, 독일 BGR, 스페인 ENRESA, 일본 Obayashi, **한국 KORAD** (9개국 11개 기관)
 - ▶ 2026년 Sector 2 해체 예정 & 2041년 시험 종료 예정



설계기준 온도 상황

» SKB 처분시스템 완충재 안전 기능 및 설계 기준

• 완충재의 안전기능

- 이류 질량 이송제한, 미생물 활동 제한, 콜로이드의 이송 제한
- 구조적 하중으로부터 처분용기 보호, 변형에 저항
- 처분용기 위치 보호, 충분한 질량 유지, 변질에 대한 저항

항목	설계 기준	비고
열전도도	< 100 °C	변질에 대한 저항
포화수리전도도	< 10 ⁻¹² m/s	이류 질량 이송 제한
평균압	> 2MPa	이류 질량 이송 및 미생물 활동 제한 처분용기 위치 유지
일축압축강도	> 4MPa	암반 전단 영향 완화
불순물 함량	< 유기탄소 1% < sulphide 0.5% < Sulphur 1% (sulphide 포함)	생산시 적합성 및 신뢰성 확보

- 완충재의 안전기능 : 이류 질량 이송(advective mass transfer) 제한
 - 요건 : 완충재는 처분공에서 지하수의 흐름(이류이송)을 막아야 한다.
 - 성능목표 : 수리전도도 < 10⁻¹² m/s, 평균압 > 1 MPa
- 완충재의 안전기능 : 미생물활동 제한
 - 요건 : 완충재는 미생물활동을 제한할 능력을 가져야 한다.
 - 성능목표 : 평균압 > 2 MPa [완충재 포화밀도 1.8 일때]
- 완충재의 안전기능 : 콜로이드 여과
 - 요건 : 완충재는 방사성 콜로이드의 이송을 제한해야 한다.
 - 성능목표 : 건조밀도 > 1000 kg/m³
- 완충재의 안전기능 : 유해한 구조하중으로부터 처분용기 보호
 - 요건 : 불리한 구조적하중(암반전단)으로부터 처분용기를 보호하여야 한다.
 - 성능목표 : 전단하중 1 m/s, 변위 5 cm 하중의 영향 완화
 - shear strength가 용기가 버틸 수 있는 하중보다 커서는 안됨
 - 최대 전단강도는 최대 평균압에서의 건조밀도 값에서 발현됨 (건조밀도와 전단강도와의 관계 규명이 필요)
- 완충재의 안전기능 : 유해한 구조하중으로부터 처분용기 보호
 - 요건 : 불리한 구조적하중(암력하중)으로부터 처분용기를 보호하여야 한다.
 - 성능목표 : 평균압 < 10 MPa, 완충재 온도 > -2.5 °C (Tc -2.5 ~ -11 °C)
 - Tc : critical temperature - 동결이 시작되는 온도
- 완충재의 안전기능 : 변질에 대한 저항
 - 요건 : 완충재는 처분환경에서 방벽기능 유지 및 장기적 내성을 가져야 한다.
 - 성능목표 : 온도 유지 < 100 °C
 - 열전도도가 고려되어야 할 characteristic
 - 온도가 올라가지 않는 이상 벤토나이트가 변질이 될 가능성은 낮음
- 완충재의 안전기능 : 처분용기 위치 유지
 - 요건 : 완충재는 정확한 위치에 처분용기를 위치시켜야 한다(침하/경사방지).
 - 성능목표 : 평균압 > 0.2 MPa
 - 건조밀도와 평균압 관계 규명 필요
 - 완충재 평균압이 0.1 MPa 일때 용기가 2cm 미만 sinking 됨
- 완충재의 안전기능 : 충분한 질량 유지
 - 요건 : 완충재는 충분한 질량(화학적 침식 방지)을 유지하여야 한다.
 - 성능목표 : 지하수 양이온 전하 농도 > 8 mM/l
 - 질량감소의 주 원인은 chemical erosion 이며 erosion은 지하수의 이온강도가 충분하면 발생되지 않음

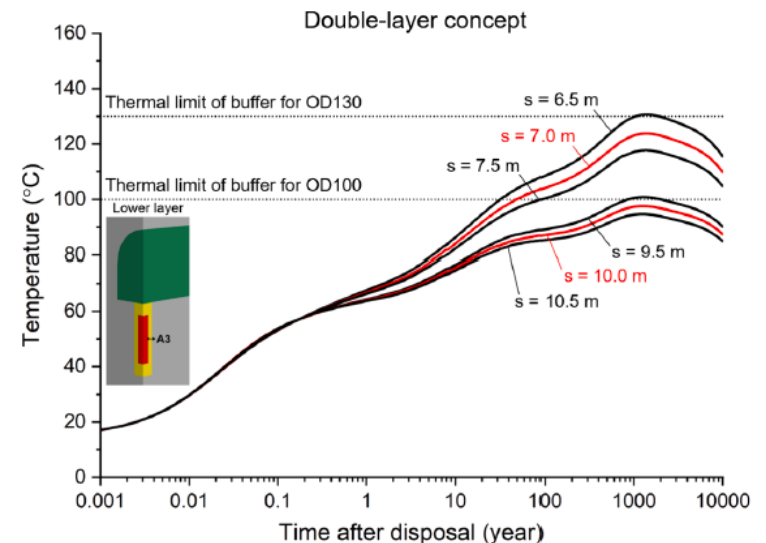
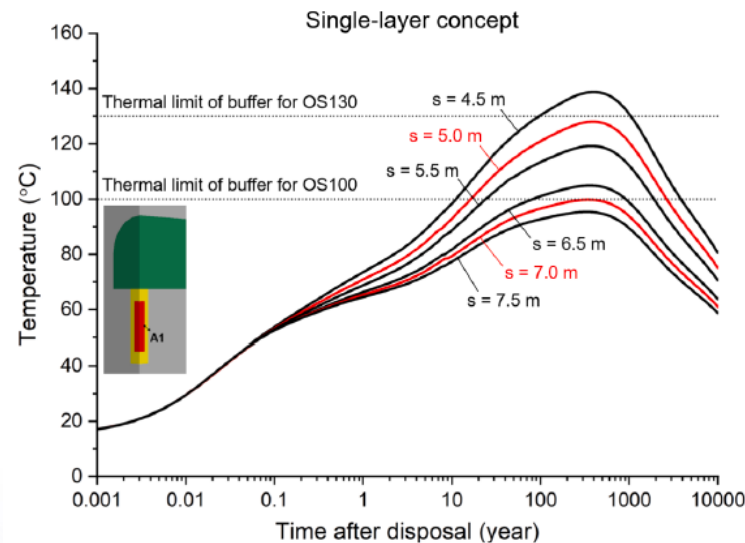
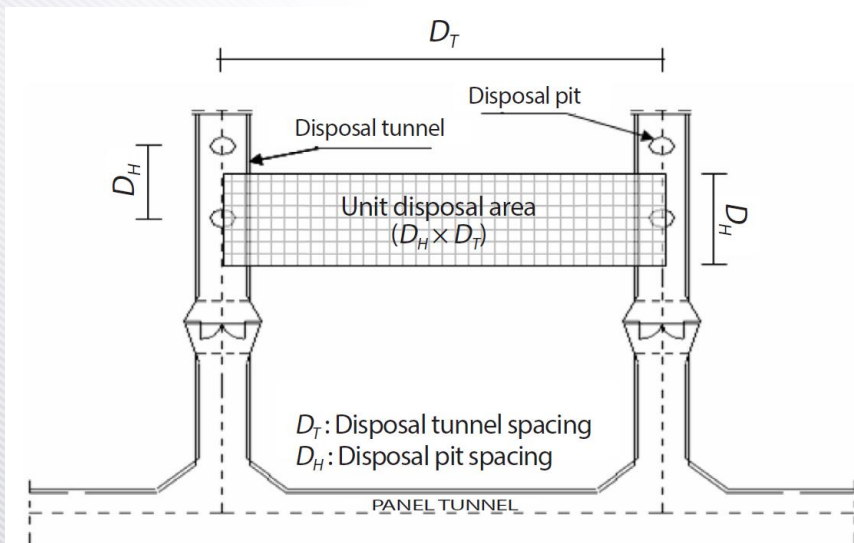
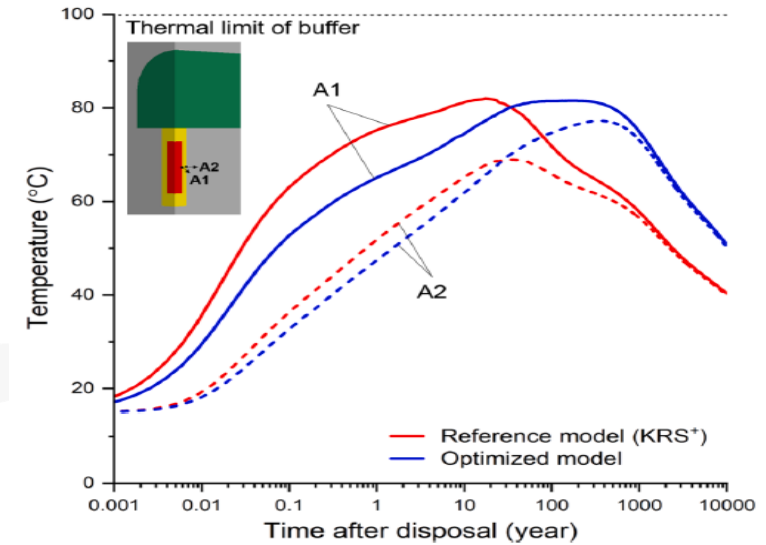
» 완충재 성능평가

- 설계 온도 변화에 따른 완충재의 **광물학적 장기 변화 특성 규명**
 - 온도 조건 : 100(기준치), 125, 150, 175, 200°C
 - 변질 반응액 : 0.01, 1 M KCl
 - 시험 기간 : 20년 (연 1~2회 샘플링)
- 광물학적/완충재 층간 이온변화에 따른 **열-수리-역학적 물성 변화 평가**
 - 완충재의 열전도도, 수리전도도, 흡입력, 팽윤압, 강도 및 탄성계수
 - 처분시스템 성능평가에 입력자료로 활용 예정
- 광물학적 변화에 따른 완충재의 **핵종 흡착능 평가**
 - Kinetic/Isotherm 선수행 후 최적 흡착능 조건 도출
 - KURT 지하수 환경에서의 Cs 대표 핵종에 대한 흡착능 평가 진행 중

대안/고효율 처분시스템 성능 평가 및 처분 효율

» 열-수리-역학적 복합거동 특성 평가

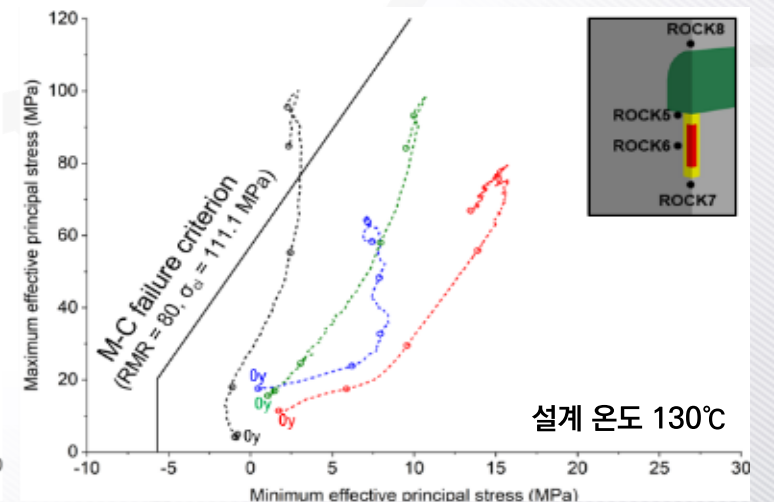
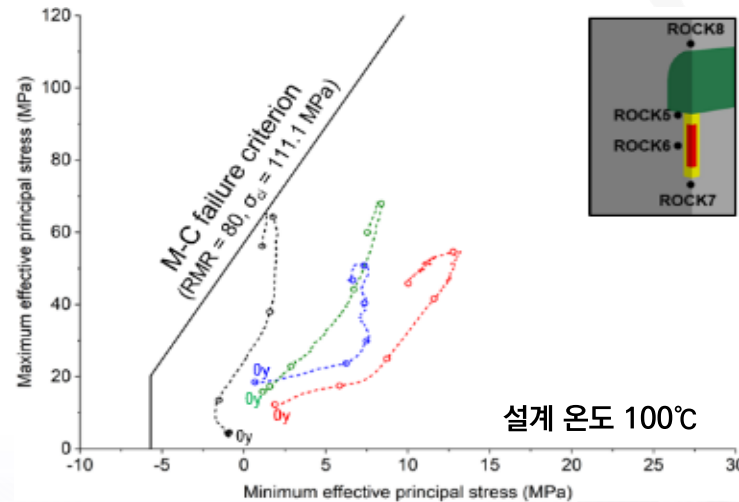
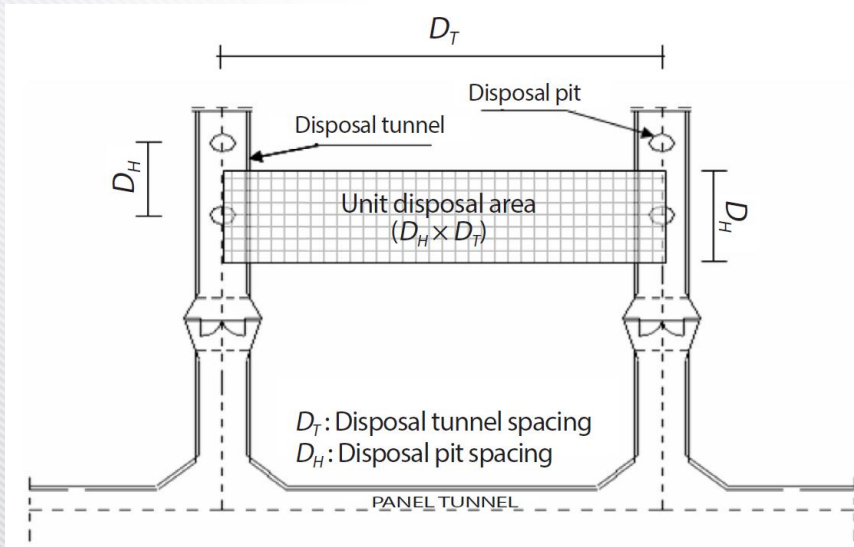
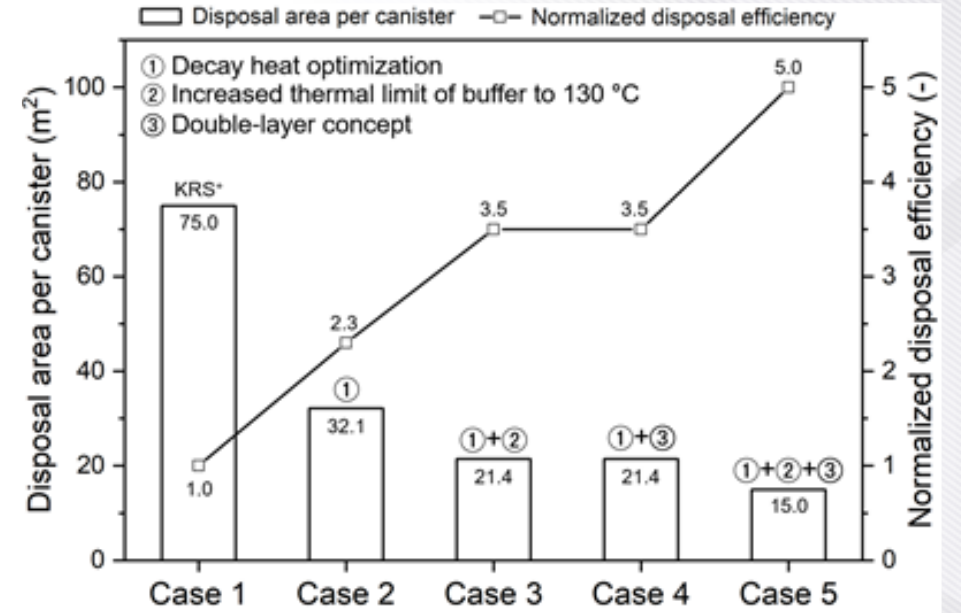
- 처분 효율(면적) 계산
 - 방사성붕괴열 최적화 모델 / 완충재 설계온도 130°C / 복층 처분
 - 설계인자 모두 반영 시 단위 처분면적은 KRS+ 대비 약 20% 수준으로 감소
 - 설계온도 130°C로 상향 시 처분공-터널 교차점에서의 응력이 파괴 기준을 초과하나 나머지 지점에서는 암반이 역학적으로 안정함



대안/고효율 처분시스템 성능 평가 및 처분 효율

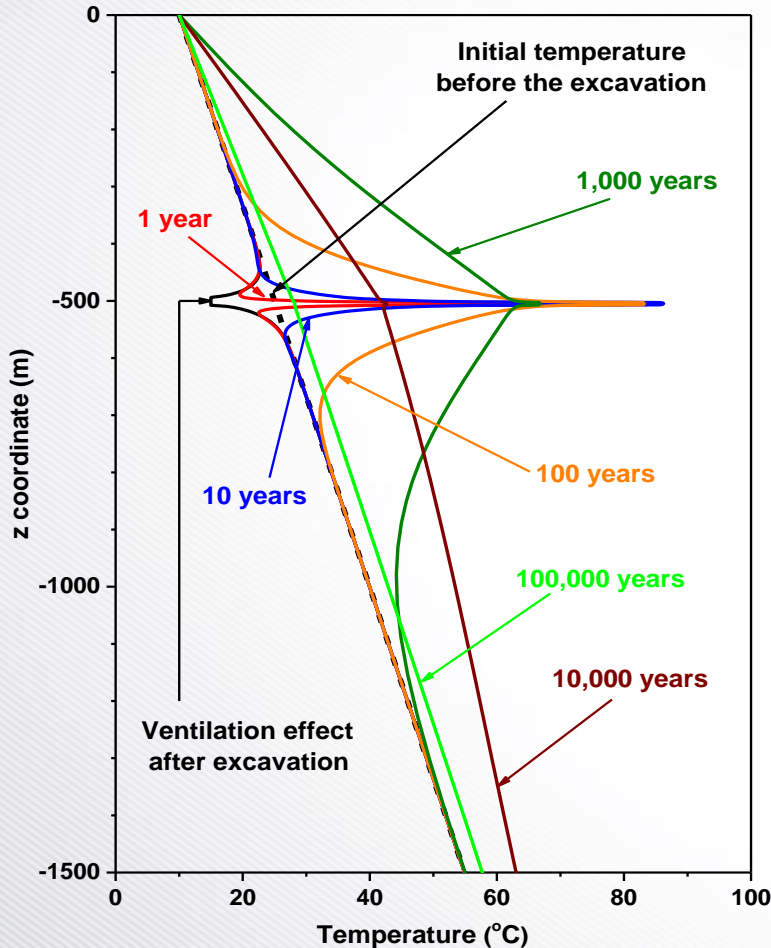
열-수리-역학적 복합거동 특성 평가

- 처분 효율(면적) 계산
 - 방사성붕괴열 최적화 모델 / 완충재 설계온도 130°C / 복층 처분
 - 설계인자 모두 반영 시 단위 처분면적은 KRS+ 대비 약 20% 수준으로 감소
 - 설계온도 130°C로 상향 시 처분공-터널 교차점에서의 응력이 파괴 기준을 초과하나 나머지 지점에서는 암반이 역학적으로 안정함

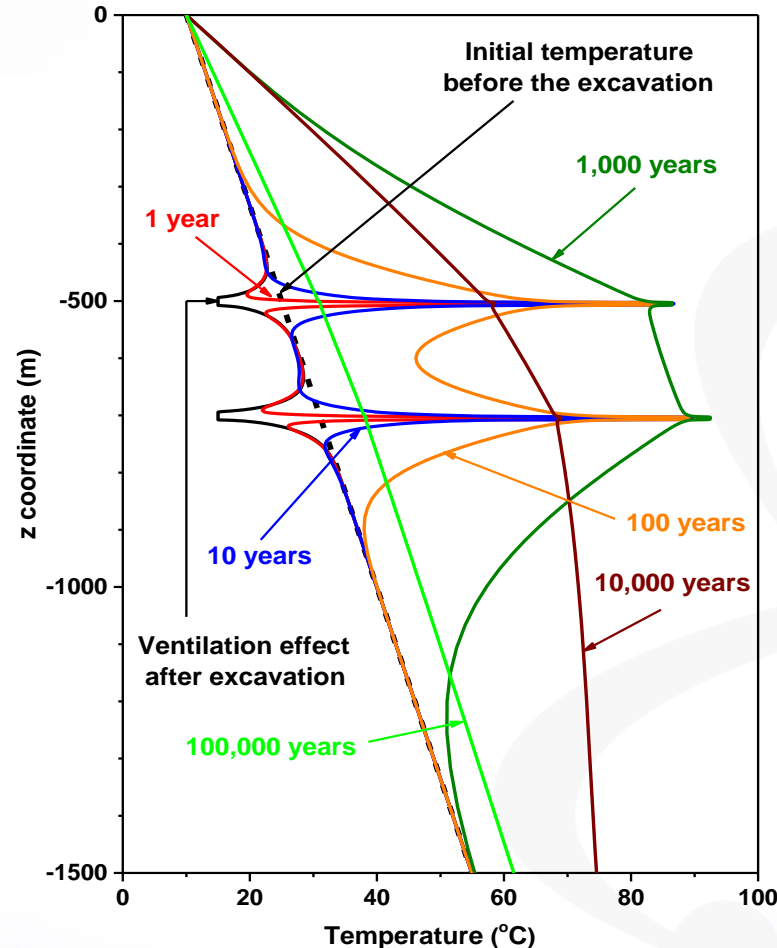


다층 처분시스템 THM 복합거동 해석

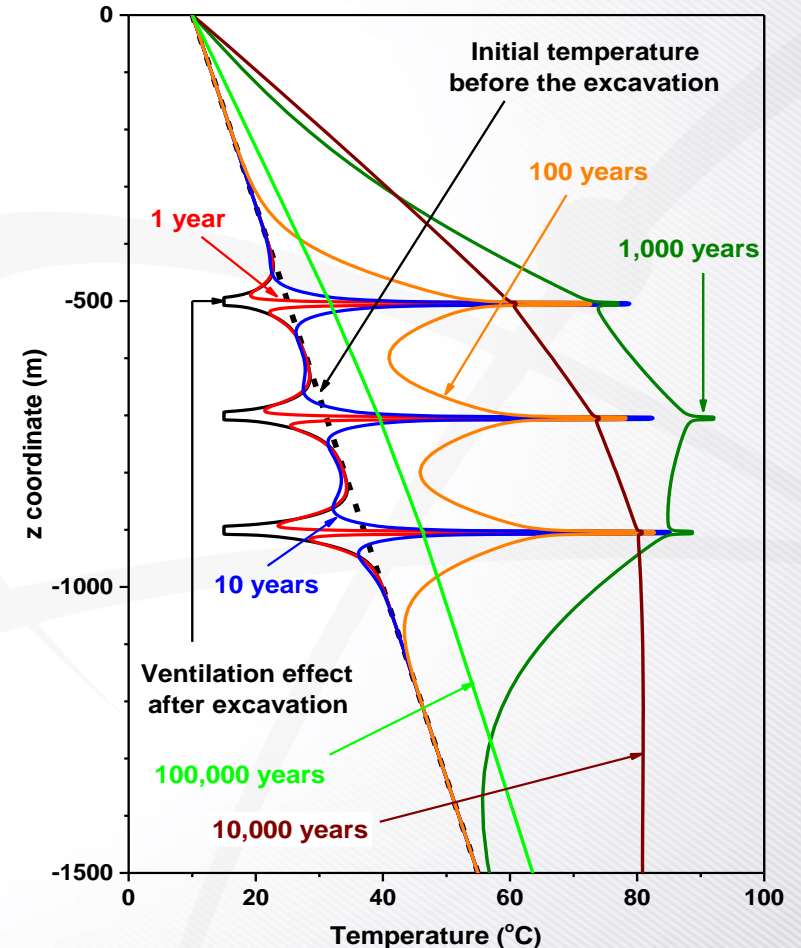
» 기준 처분시스템(KRS+) 및 다층 처분시스템 온도 분포



기준 처분시스템에서의 온도 분포



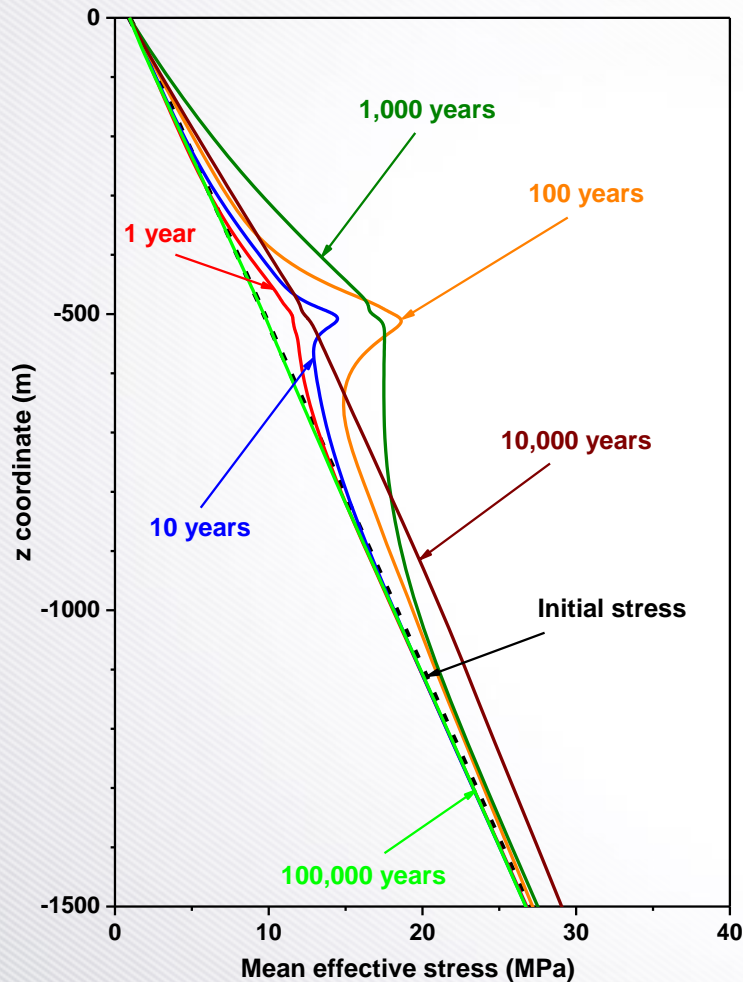
복층 처분시스템에서의 온도 분포



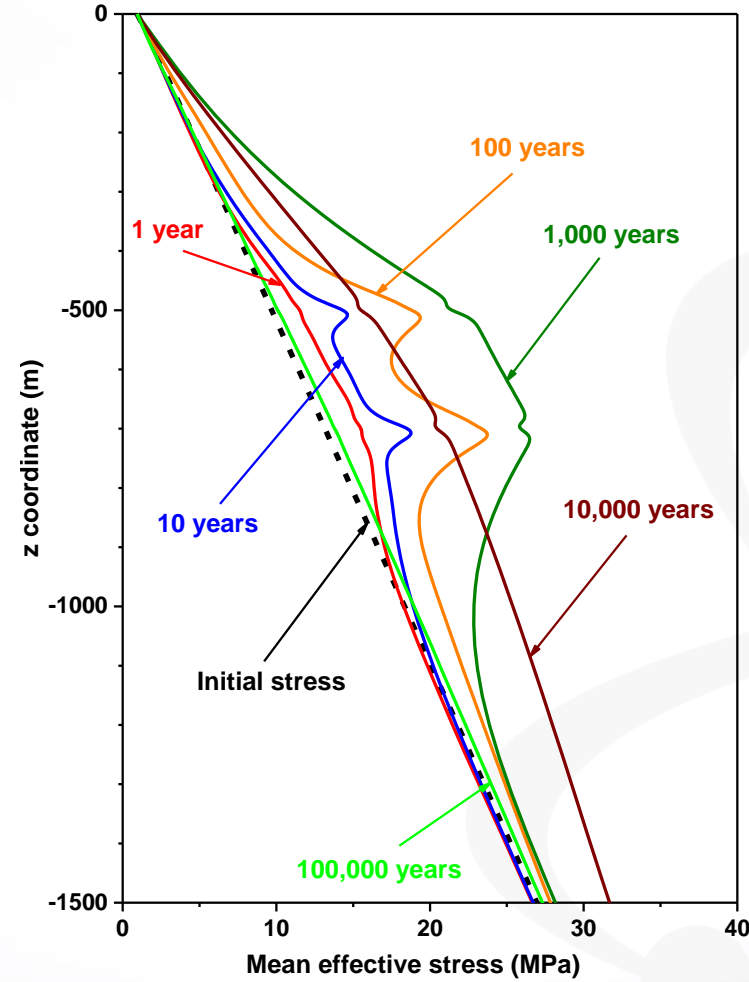
삼층 처분시스템에서의 온도 분포

다층 처분시스템 THM 복합거동 해석

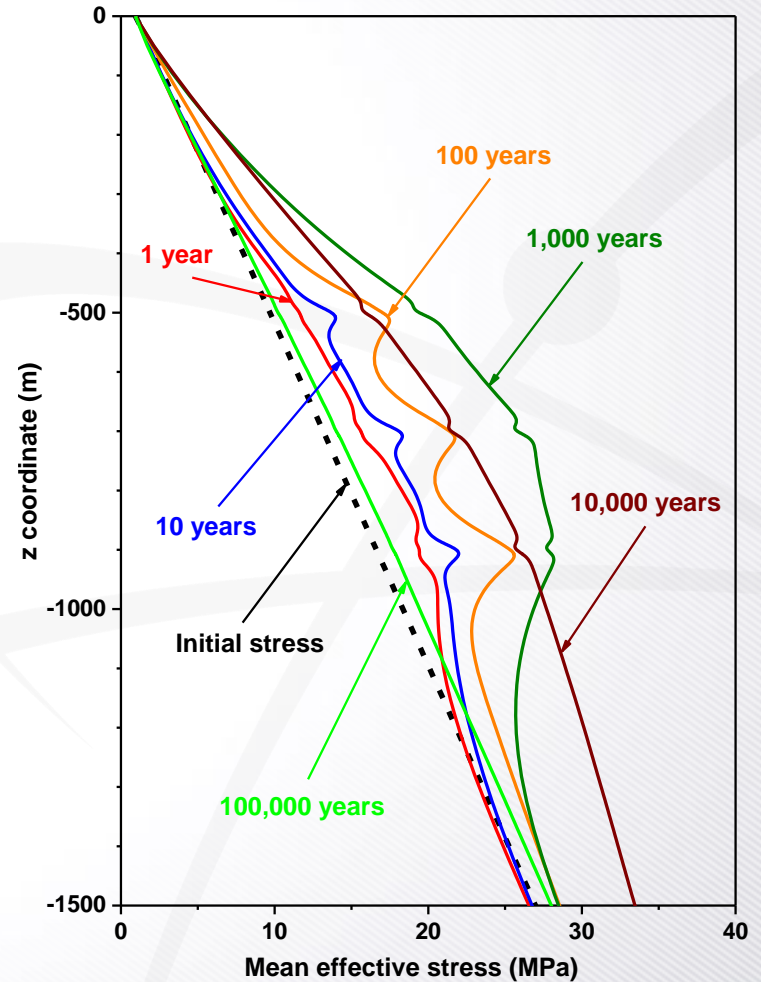
» 기준 처분시스템(KRS+) 및 다층 처분시스템 응력 분포



기준 처분시스템에서의 응력 분포



복층 처분시스템에서의 응력 분포

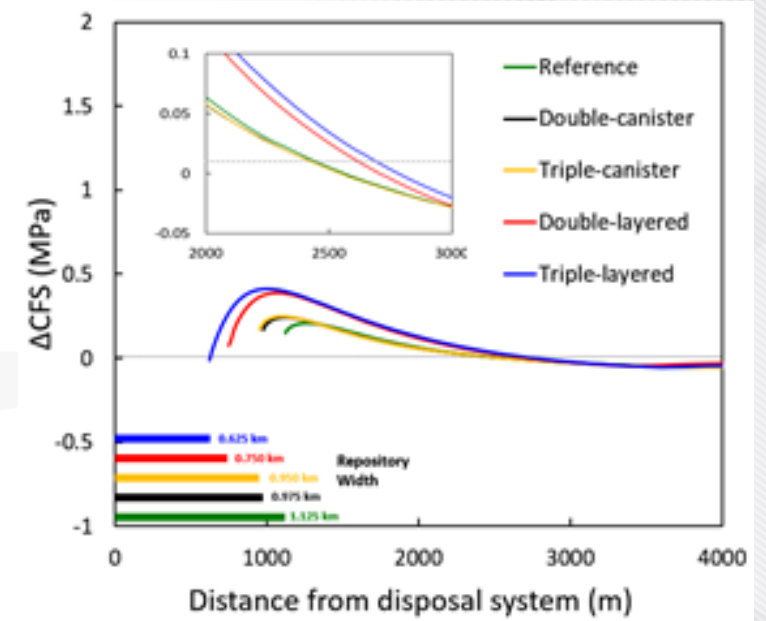


삼층 처분시스템에서의 응력 분포

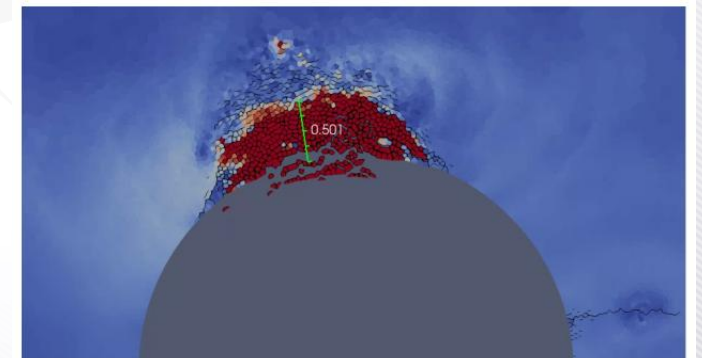
10 대안/고효율 처분시스템 개발 현황 암반 안정성 평가

» 단층 재활성 위험도 및 처분공 안정성 평가

- 단층 재활성 위험도 평가
 - 기준처분시스템 단층 재활성 위험도 분석모델 구축 및 예비 평가
 - 대안 처분개념(다층, 다적층, 고온 처분, 심부시추공 처분) 열응력 유발 단층 안정성평가 해석모델 개발 및 단층 재활성 위험도 평가
 - 단층 안전거리 ($\Delta CFS < 0.01 \text{MPa}$): 다층(2,700 m) > 기준 처분(2,450m) > 다적층 처분(2,400 m)
- 다층, 다적층, 고온시스템의 설계 조건에 따른 처분공 안정성 평가
 - 개선된 개별요소법을 적용하여 처분공 안정성 예비 해석을 수행
 - Mine-By 터널의 시추공을 모사하고 암석의 스폰링 현상과 낙석을 구현
 - 고효율처분시스템에서의 처분공 안정성 평가 수행 예정

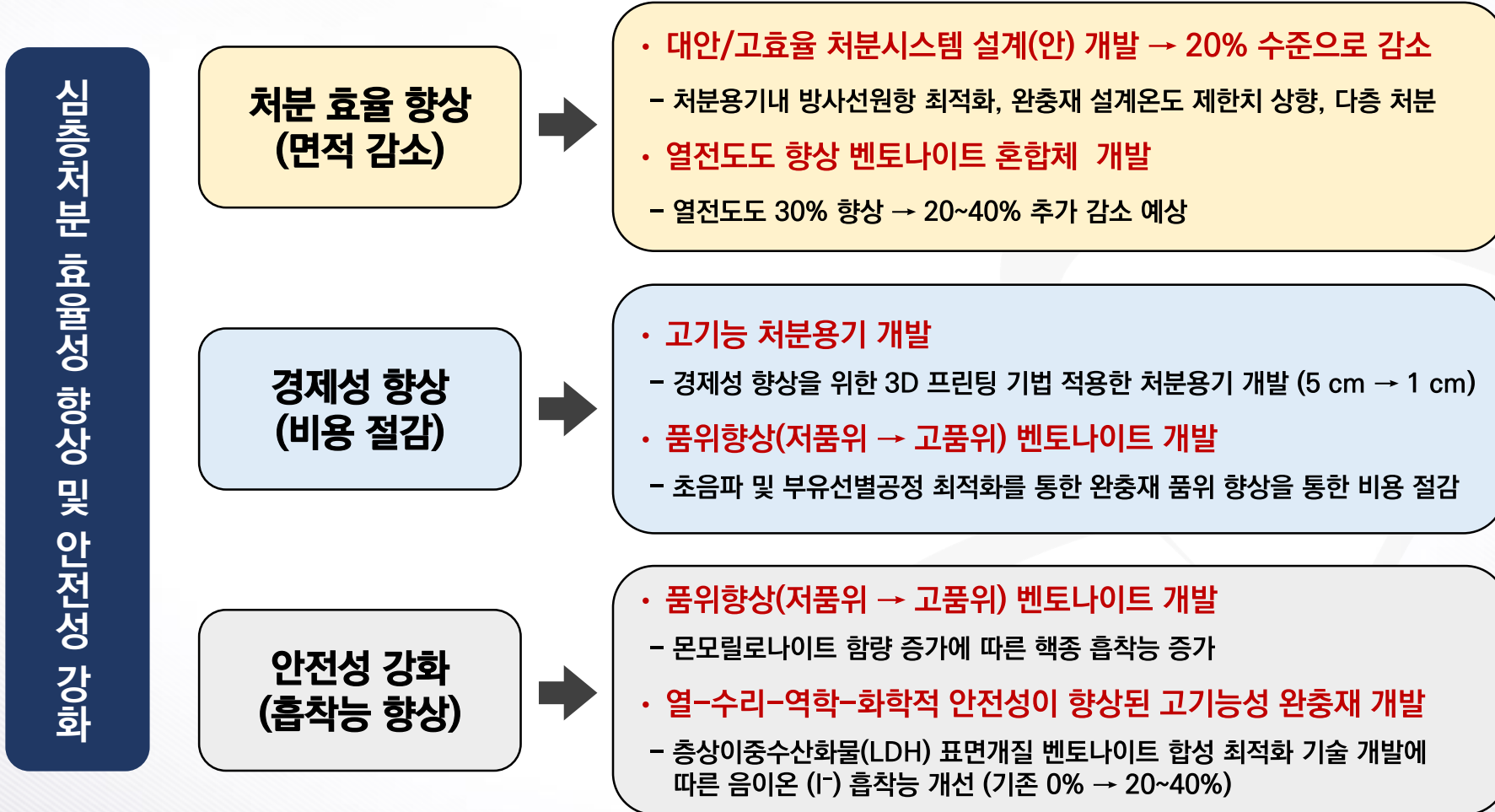


<1만 년 시점의 기준 및 대안 처분시스템의 거리에 따른 CFS 변화량>



<개선된 개별요소법으로 모사한 시추공>

» 고준위폐기물 안전강화 혁신기술 개발 (고효율 처분시스템 개발 / 고기능 공학적방벽재 개발)

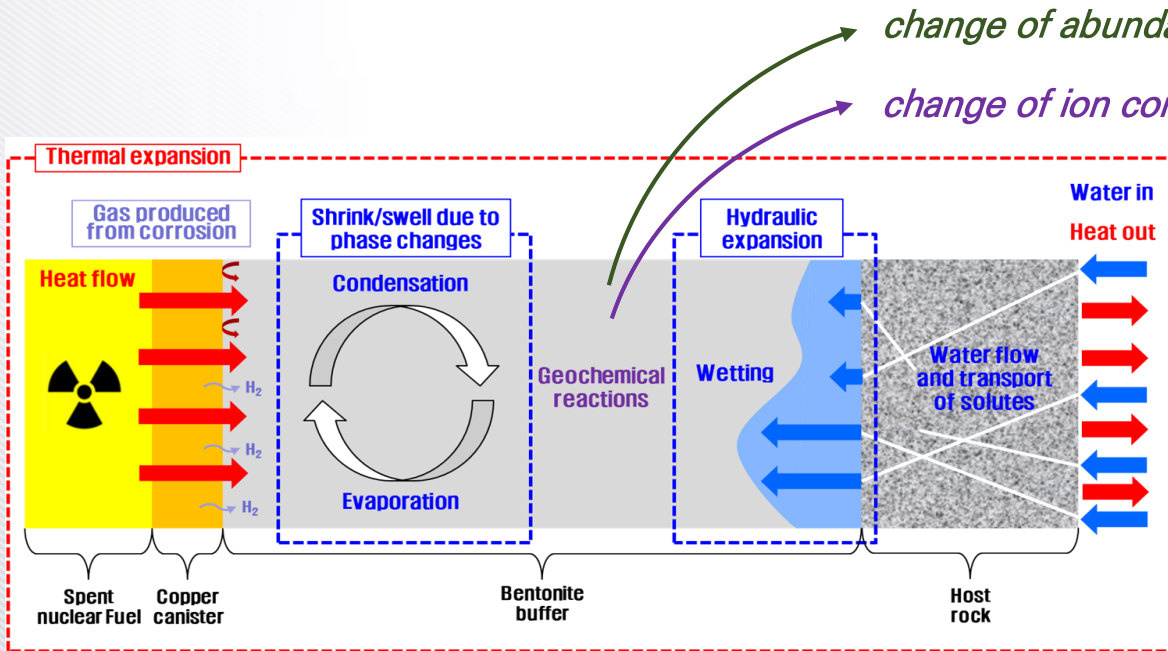
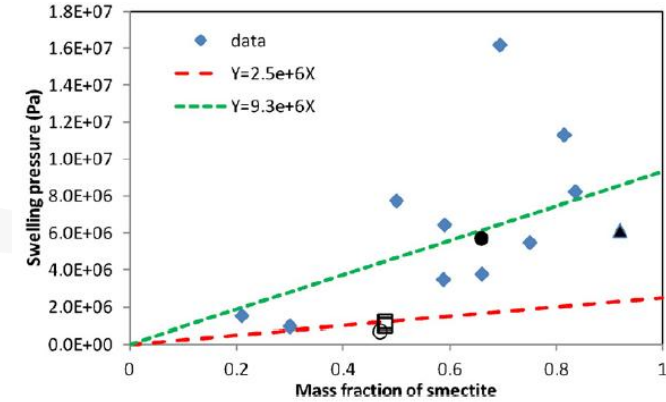


THMC 복합거동 특성 규명 및 예측을 위한 해석모델 및 시뮬레이터 개발

- Kinetic model (kinetic rate, constants)

$$r = kA \left| 1 - \left(\frac{K}{Q}\right)\theta \right|^\eta, k = k_{23}^{nu} \exp \left[\frac{-E_a^{nu}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15} \right) \right] + k_{23}^H \exp \left[\frac{-E_a^H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15} \right) \right] \alpha_H^{n_H} + k_{23}^{OH} \exp \left[\frac{-E_a^{OH}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15} \right) \right] \alpha_H^{n_{OH}}$$

- Smectite-illite 함량에 따른 완충재의 THM 물성 평가 (열전도도, 투수계수, 흡입력, 팽윤압 등)



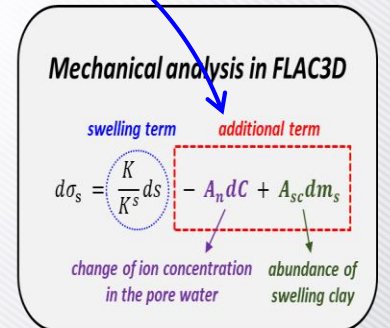
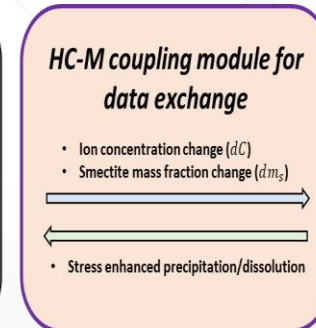
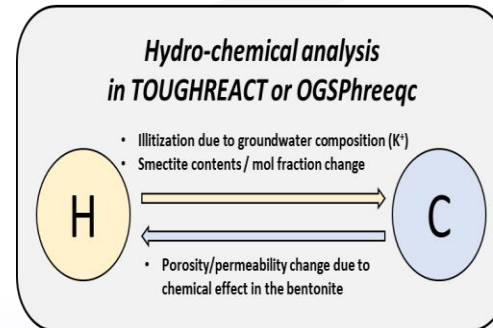
change of abundance of swelling clay

change of ion concentration in the pore water

loss in the swelling capacity

↪ : Anaerobic corrosion H₂

↪ : Corrosion due to sulfide transport arising from remote microbial activity or by residual groundwater oxidants

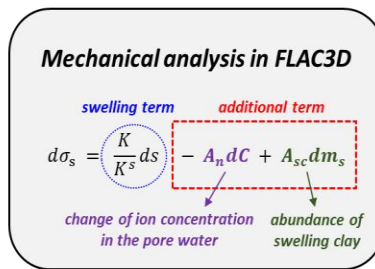
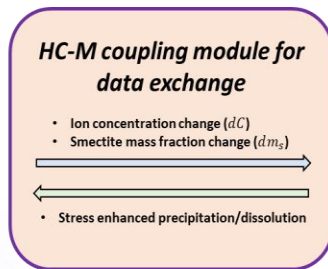
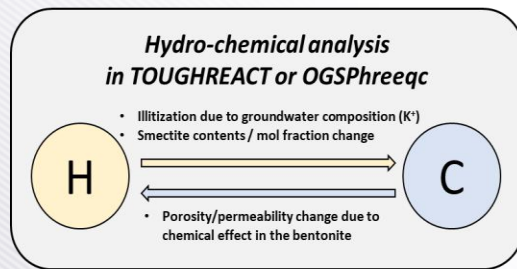
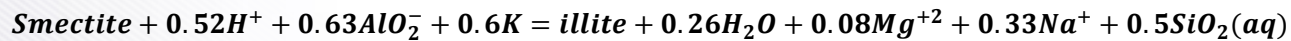


13 HotBENT project

대안/고효율 처분시스템 개발 현황

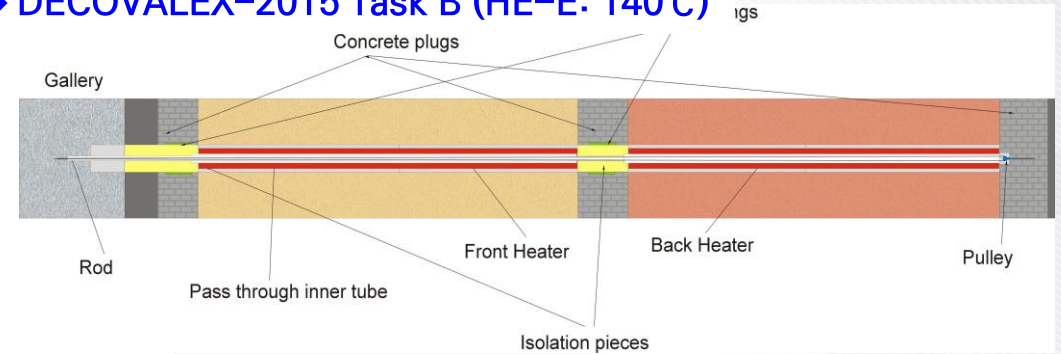
» 완충재 THMC 복합거동 연구현황 (KAERI)

- 고온 완충재 실험데이터
 - 고온에서의 완충재 THMC 복합물성 데이터 및 광물학적 변질 데이터 확보
- 수치 해석모델 및 시뮬레이터
 - 고온에서의 THM 복합거동 해석 모델 및 시뮬레이터 검증 완료 (DECOVALEX)
 - 장기 지화학 반응 및 광물학적 변질을 고려한 THMC 복합거동 해석 모델 및 시뮬레이터 개발 중

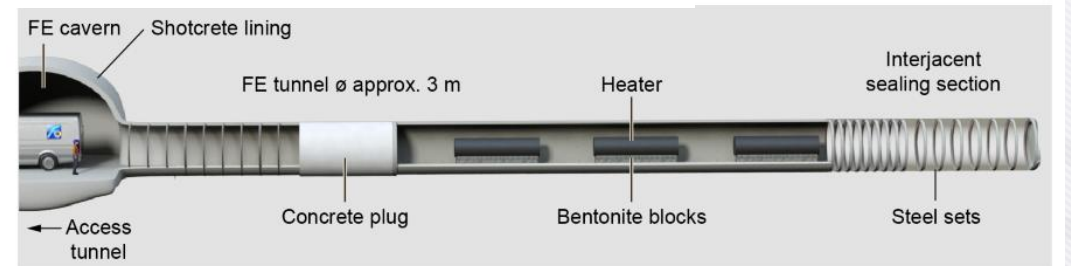


- HotBENT project 현장 데이터를 이용한 검증 필요

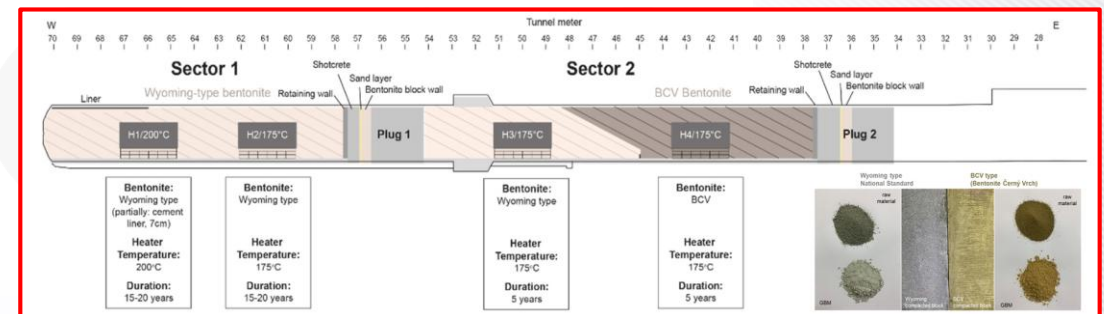
◆ DECOVALEX-2015 Task B (HE-E: 140°C)



◆ DECOVALEX-2023 Task C (FE: 150°C)



◆ HotBENT project (175 ~ 200°C)



**THANK YOU
FOR YOUR ATTENTION**