

사용후핵연료 저장·처분 기술개발 현황

박정용

한국원자력연구원 사용후핵연료저장처분연구단

창원시-한국원자력학회 공동워크숍

2022 한국원자력학회 추계학술대회

2022.10.19, 창원

사용후핵연료 지속 발생 전망

원자력 발전

현재

23GWe (24기)

계속운전(10기) + 신한울 3, 4 준공 +

원자력 지속 이용

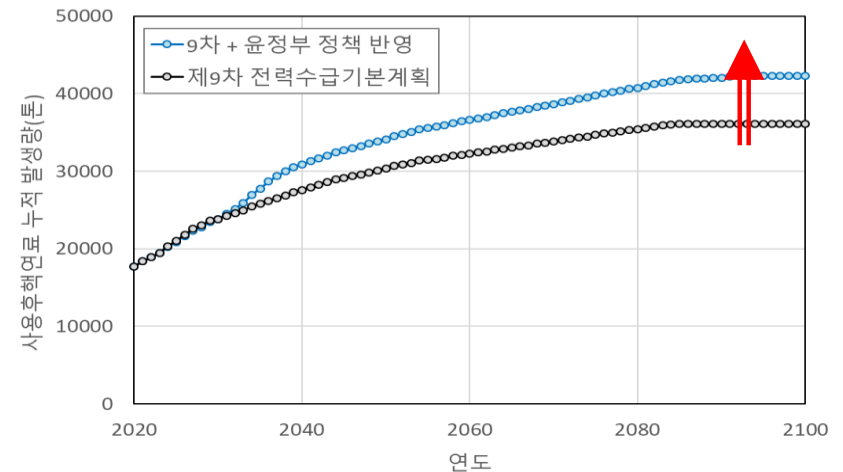
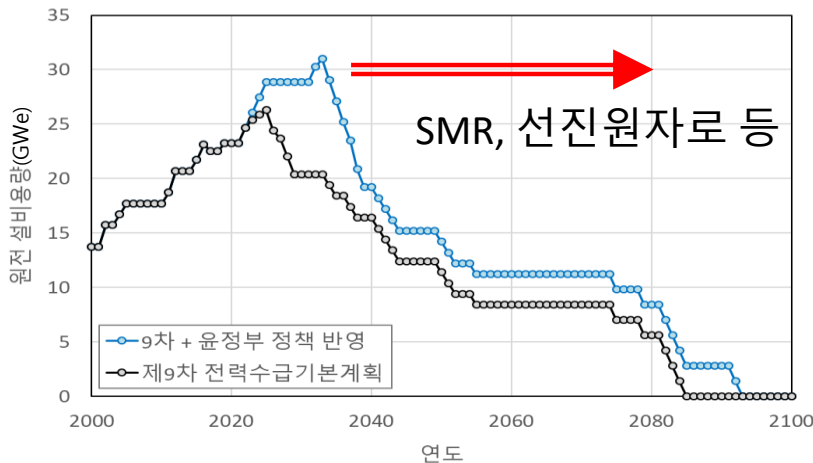
사용후핵연료 발생

지금('22년 2분기)까지,

18,500톤

누적은

~43,000톤 + α ??



사용후핵연료 발생 및 포화

➤ 발생 현황(22.2분기): 18,500톤(경수로 약 9,100톤, 중수로 약 9,400톤)

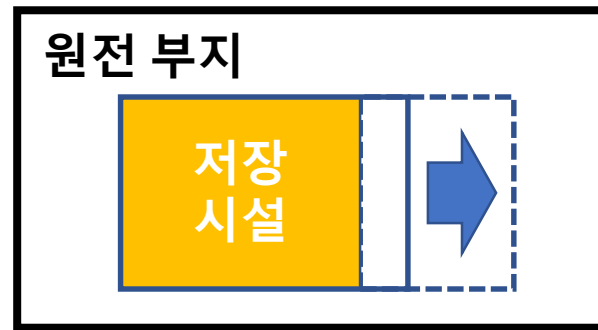
(단위: 다발)

본부		저장용량	저장량	포화율	포화시점 추정*
경수로	고리	8,038	6,901	85.9%	2031
	새울	1,560	396	25.4%	2066
	한빛	9,017	6,755	74.9%	2031
	한울	7,847	6,475	82.5%	2032
	신월성	1,046	658	62.9%	2044
	소계	27,508	21,185	77.0%	-
중수로	월성	657,952	491,276	74.7%	-

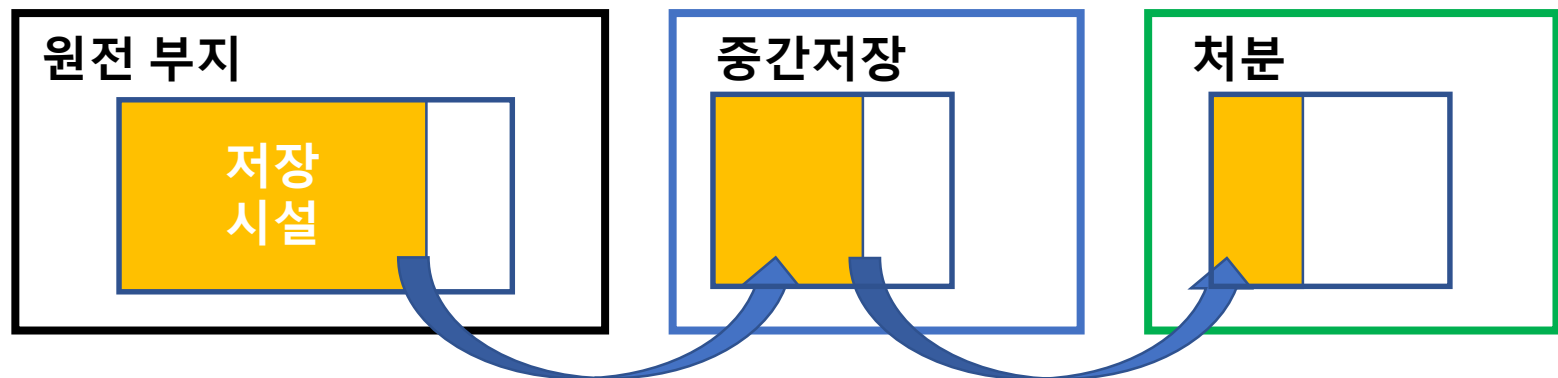
계속운전
추진에 따른
조기 포화에
대비 필요

원전 지속 이용 위한 포화 해결 방안

➤ (단기) 부지 내 건식저장 시설 확충

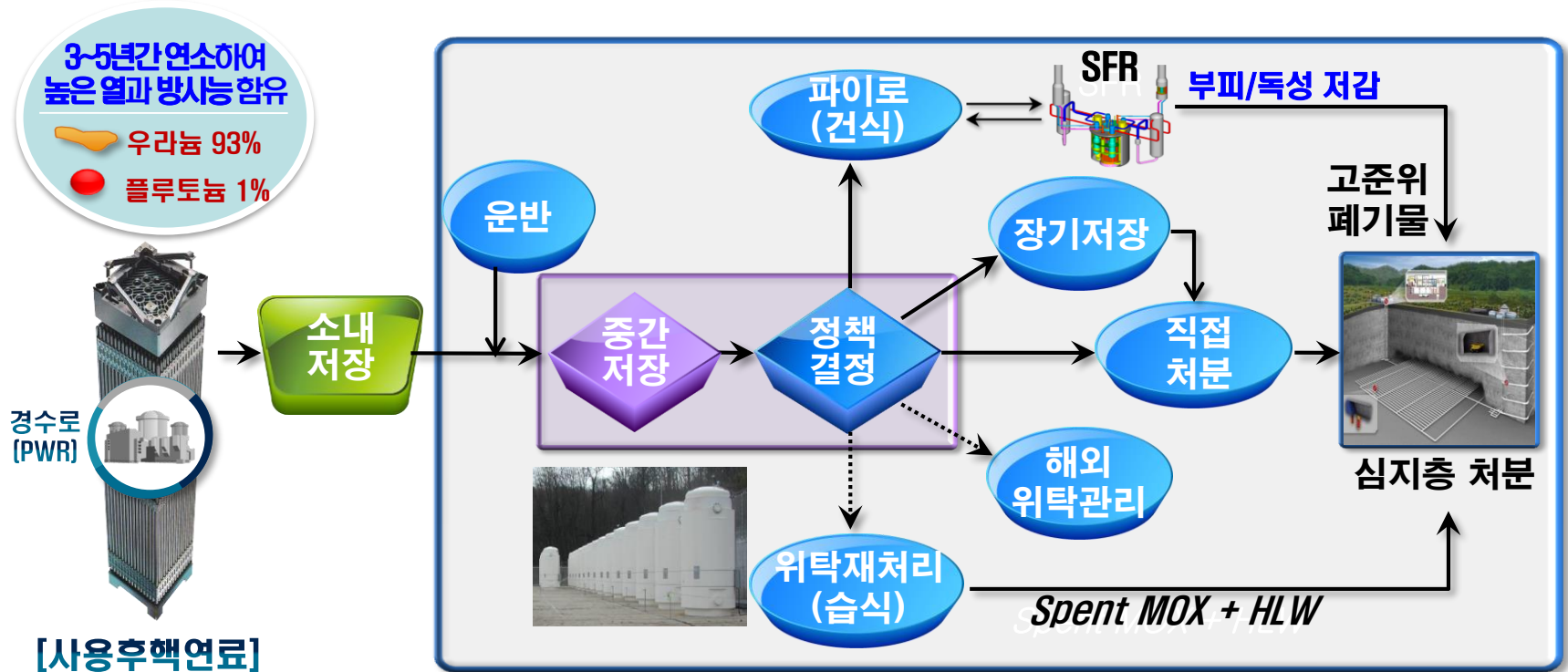


➤ (중장기) 중간저장 및 처분시설 건설/운영



사용후핵연료 관리

- 사용후핵연료를 어떻게 관리할 것인가?
 - 각국의 환경과 에너지(원자력) 정책을 고려한 관리 방안 필요



사용후핵연료 관리 정책

➤ 세계 각국의 사용후핵연료 관리 정책

직접처분 (10개국)	<ul style="list-style-type: none"> 미국, 핀란드, 스웨덴, 스위스, 스페인, 캐나다, 독일, 루마니아, 슬로바키아, 대만
재처리 후 처분 (6개국)	<ul style="list-style-type: none"> 프랑스, 일본, 러시아, 인도, 중국, 영국 [일본을 제외한 5개국은 핵무기보유국]
정책결정 유보 (18개국)	<ul style="list-style-type: none"> 한국, 벨기에, 체코, 남아공, 아르헨티나, 아르메니아, 브라질, 불가리아, 헝가리, 이란, 이탈리아, 카자흐스탄, 리투아니아, 멕시코, 네덜란드, 파키스탄, 슬로베니아, 우크라이나

※ 출처: 사용후핵연료 관리정책 의견수렴 숙의자료집

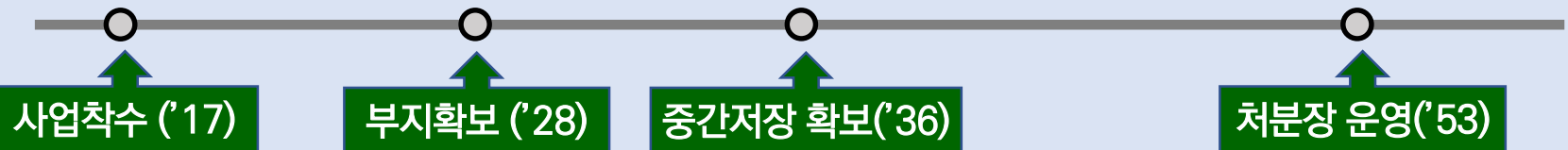
➤ 우리나라 SF 관리정책은 **정책결정을 유보한 관망('Wait & See')정책**

- ▶ 국민선택권 보장을 위해 사용후핵연료 관리 분야의 **균형있는 기술 확보 추진**

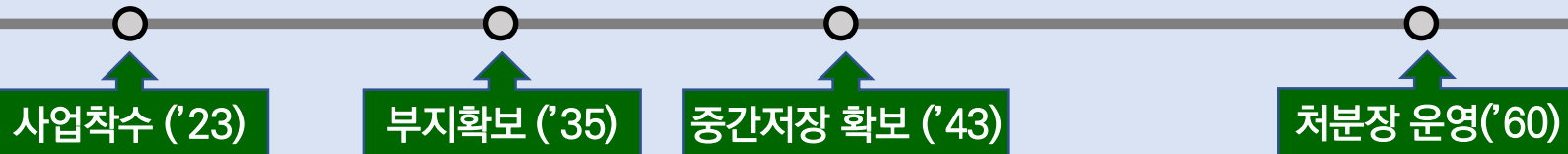
사용후핵연료 관리 사업

➤ 고준위방사성폐기물 관리 기본계획

제1차 기본계획('16.7)



제2차 기본계획('21.12)



SF 관리를 위한
특별법 제정



- ▶ 추진 동력 확보로 저장/처분 사업 지연 방지
- ▶ 관리 기술 적기 확보
- ▶ 미래에 확보가능한 최적화된 관리 옵션 준비

사용후핵연료 건식저장 방식

			
<p>금속저장용기+옥외</p>	<p>금속용기+ 터널저장</p>	<p>옥외 콘크리트저장용기</p>	<p>옥외 수평모듈방식</p>
			
<p>금속용기+STEAG건물</p>	<p>금속용기+WTI 건물</p>	<p>옥외 매립형 저장시설</p>	<p>볼트방식 저장시설</p>

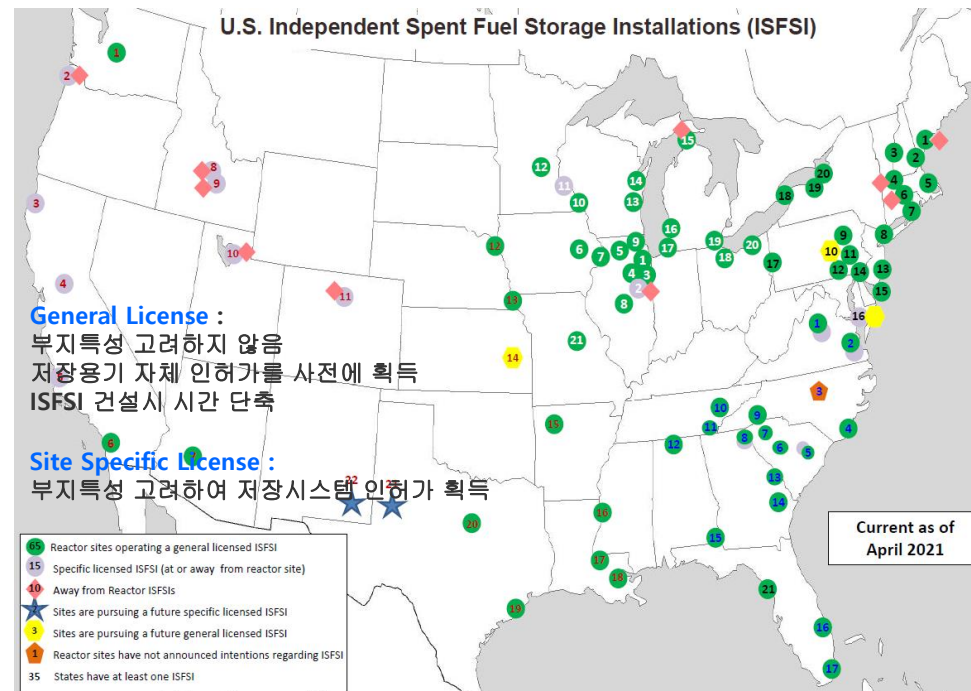
U.S. Independent Spent Fuel Storage Installations

➤ 독립저장시설 운영 중

- 65개 원자로 부지 General License ISFSI
- 15개 Site Specific License ISFSI
- 10개 Away from reactor ISFSI

➤ 중앙집중형 중간저장시설(추진중)

- 뉴멕시코주 : Holtec사와 ELEA(Eddy Lea Energy Alliance)
- 텍사스주: Orano USA와 WCS(Waste Control Specialists)가 공동 설립한 ISP(Interim Storage Partners)



US List of Approved Spent Fuel Dry Storage Cask

➤ US 저장용기 General license 15개, 저장방식 종류 : 4 종류

2021.1

Type	SAR Submitted by	Certificate Expiration Date	Model Number
Horizontal Module	Transnuclear, Inc.	23-Jan-55	NUHOMS®-24P, -24PHB, -24PTH, -32PT, -32PTH1, -37PTH, -52B, -61BT, -61BTH, and -69BTH
Horizontal Module	Transnuclear, Inc.	05-Feb-23	Standardized Advanced NUHOMS®-24PT1, -24PT4, and -32PTH2
Horizontal Module	Transnuclear, Inc.	10-Jan-27	NUHOMS® HD-32PTH
Concrete Cask	Holtec International, Inc.	31-May-20	HI-STORM 100
Concrete Cask	NAC International, Inc.	20-Nov-20	NAC-UMS
Concrete Cask	NAC International, Inc.	10-Apr-20	NAC-MPC
Concrete Cask	BNG Fuel Solutions	15-Feb-21	WSNF-220/221/223 systems; W-150 storage cask; W-100 transfer cask; and the W-21/74 canisters.
Concrete Cask	NAC International, Inc.	04-Feb-29	MAGNASTOR®
Concrete Cask	Holtec International, Inc.	12-Jun-31	HI-STORM FW MPC-37, MPC-89
Metal Cask	Holtec International	04-Oct-19	HI-STAR 100(MPC-24, MPC-32, MPC-68, MPC-68F)
Metal Cask	Transnuclear, Inc.	19-Apr-20	TN-32, TN-32A, TN-32B
Metal Cask	Transnuclear, Inc.	28-May-20	TN-68
Underground	Holtec International, Inc.	06-Apr-35	MPC-37, MPC-89

국내 건식저장 용기 및 시설 개발 현황

➤ 국내 중간저장시설 고시: '16년 1월 최초 제정

- 원안위고시 제2015-19호, 사용후핵연료 중간저장시설의 구조 및 설비에 관한 세부기술기준, 2016.1.6



➤ 국내 저장용기 고시: '21년 6월 최초 제정

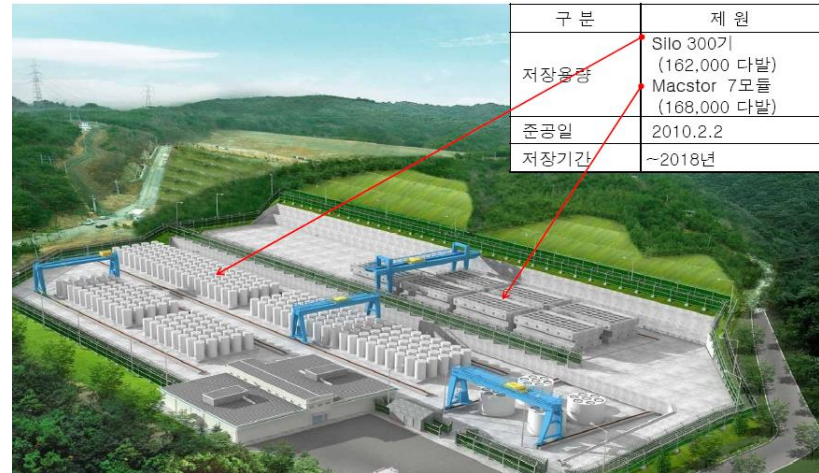
- 원안위고시 제2021-13호, 사용후핵연료 저장용기등의 안전성분석보고서 작성지침 등에 관한 규정, 2021.6.23

구분	KORAD21	KORAD21C	Magnestor MSO-37(금속저장)	Doosan-DSS24 (금속 운반저장 겸용)	건식저장모듈
개발기관	환경공단	환경공단	두산	두산	한수원
운반용량	21다발	21다발	37다발	21다발	10 Canister
용기형상					 
비고	설계승인 획득 ('22.9.13)		'22년 9월 NRC 인허 가 취득 예정(심사완 료)		'26년 인허가 신청 예정

국내 사용후핵연료 건식저장 현황

➤ 월성발전소 중수로 사용후핵연료 건식저장시설 운영

명 칭	사일로(캐니스터)	맥스터
설치수량	300기	7기
유 형	콘크리트 원통형 내부에 탄소강 저장실린더 1개 	콘크리트 직육면체 내부에 탄소강 저장실린더 40개 
설치이력	<ul style="list-style-type: none"> 1차 : '91.05.~'92.04. (60기) 2차 : '97.05.~'98.06. (80기) 3차 : '00.08.~'02.12. (60기) 4차 : '05.08.~'06.11. (100기) 	<ul style="list-style-type: none"> '07.09.~'09.12. (7모듈)
저장용량	162,000 다발	168,000 다발



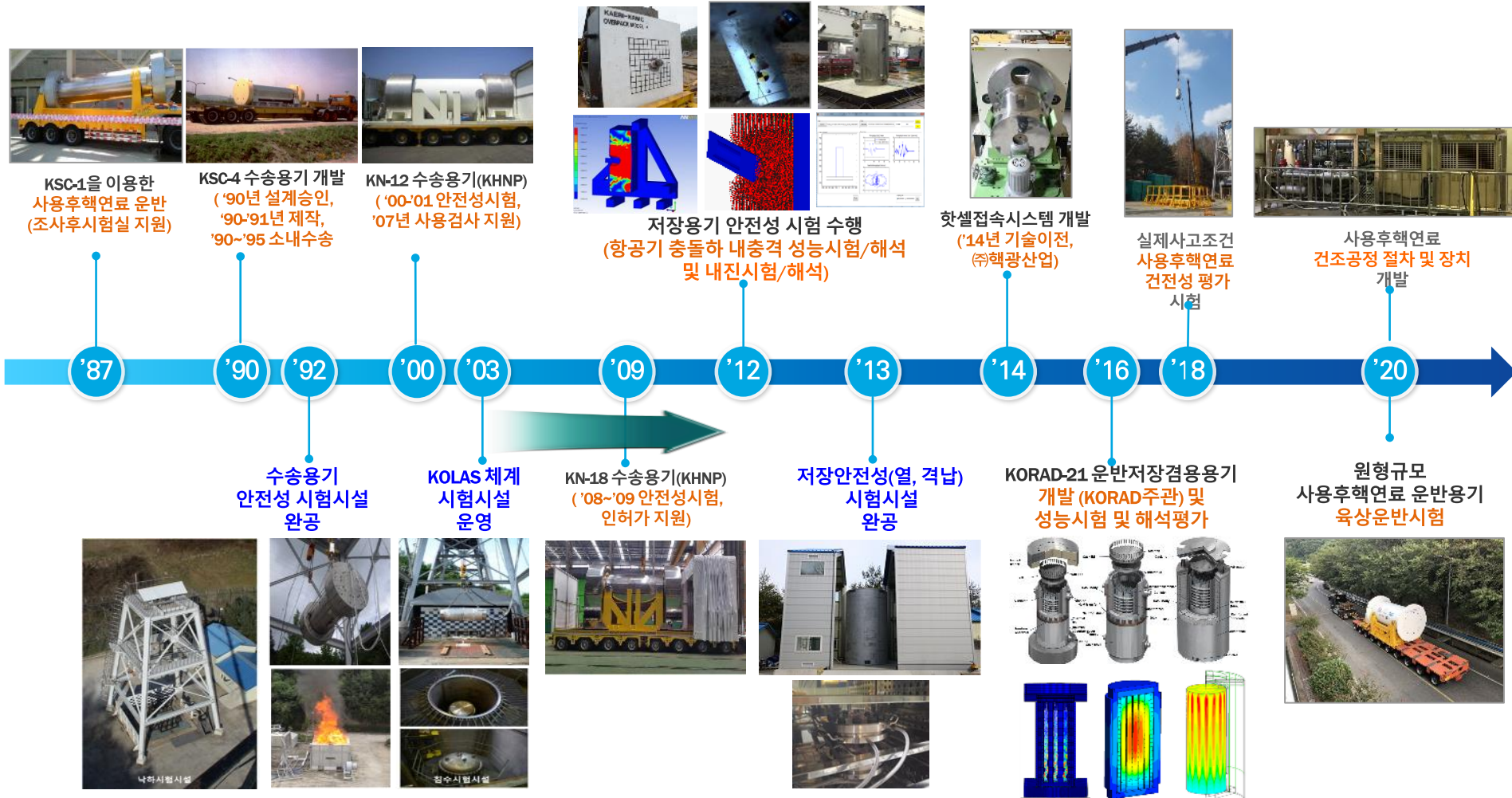
구 분	제 원
저장용량	Silo 300기 (162,000 다발) Macstor 7모듈 (168,000 다발)
준공일	2010.2.2
저장기간	~2018년

'22년 3월 총 7모듈의 맥스터 추가 증설

➤ 경수로 사용후핵연료 부지내 건식저장 방식(예정)

구분	예상 추진 일정														
	'22	'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	'36	'43	'60
한수원 1단계 (고리)	준비	설계		인허가			제작/시공		운영 1단계						
	기본계획/계약	시설설계 용기설계		저장시설운영변경허가 운반저장용기 설계승인			저장시설 건설 운반저장용기 제작		용기방식						
한수원 2단계 (고리/한빛/ 한울)	기본설계	상세설계				인허가			건설/제작			운영2단계			
		저장모듈 상세설계				저장시설 운영변경허가			저장모듈 건설 캐니스터 제작			모듈방식			

운반·저장 기술개발 실적

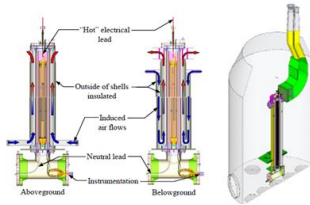


사용후핵연료 저장안전성 기술 개발

➤ 사용후핵연료 건식저장 안전성 실증 및 시험기술 개발

SF열특성 시험평가 기술

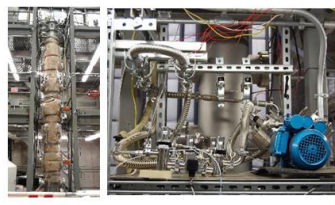
- 사용후핵연료 열평가 시험장비 확보 및 DB 구축



결과물: 사용후핵연료 상세 열시험 DB

진공건조 안전성 평가기술

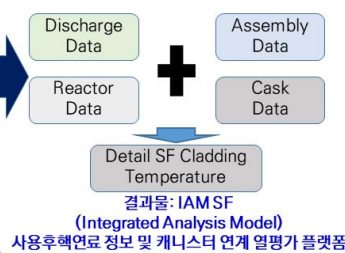
- 진공건조 저장안전성 평가기술 확보



결과물: 진공건조 온도, 압력, 잔류 수분량 DB

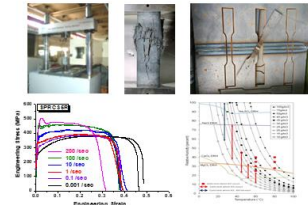
SF 건전성 평가 열적 예측모델 개발

- 사용후핵연료 건전성 평가에 필요한 열적 SF 안전정보 예측모델 개발



격납 및 차폐 구조재 물성 DB 구축

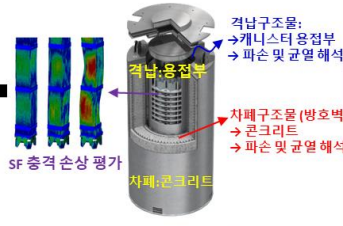
- 콘크리트 열화/정적/동적 물성 DB 구축
- 용접부 열화/정적/동적/파괴 물성 DB 구축



결과물: 콘크리트 및 용접부 열화-정적-동적물성 DB

격납 및 차폐 구조물 정적 및 충격 해석 기술

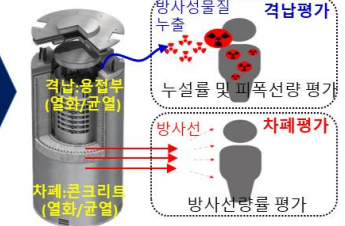
- 열화된 콘크리트 및 용접부 충격 손상 구조해석 방법론 구축



결과물: 격납 및 차폐 구조물 파손/균열 평가 방법론

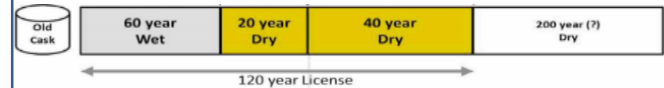
구조손상-방사선영향 연계 평가 기술

- 격납 및 차폐 성능과 구조해석 연계 평가 방법론 구축(균열 및 열화 고려)

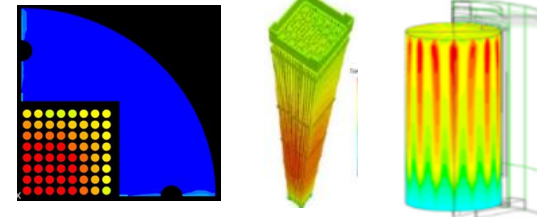


결과물: 구조손상-방사선영향 연계평가 방법론

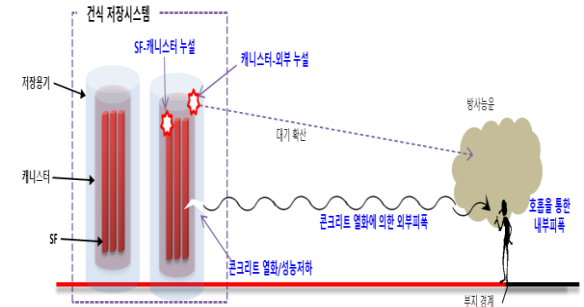
저장기간



사용후핵연료 온도 및 열화 평가

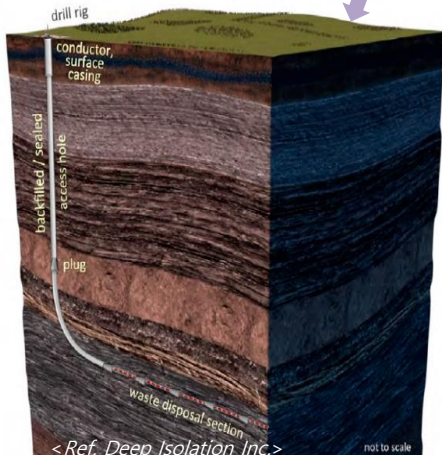
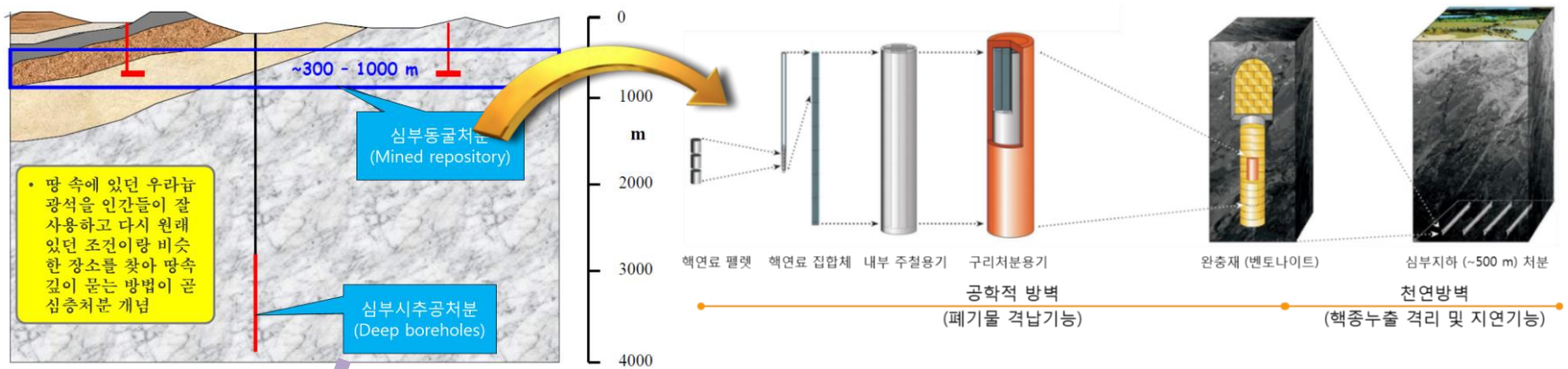


저장시설 열화 및 격납/차폐 성능 평가



심층처분 개념

➤ 지하 깊은 암반에 처분하여 방사성 물질이 인간생활권에 도달하지 못하도록 격리

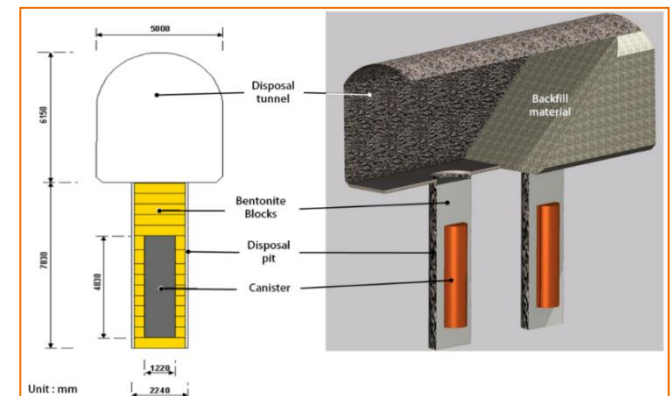


공학적으로 제작한 방벽과 암반 자체의 천연방벽 등 다중방벽시스템 적용

- ① 핵연료 펠렛
- ② 핵연료봉 피복관
- ③ 처분용기 (내부: 주철, 외부: 구리)
- ④ 완충재
- ⑤ 지하암반

공학적방벽

천연방벽



심층처분시스템 주요 기능

➤ (다중방벽) 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

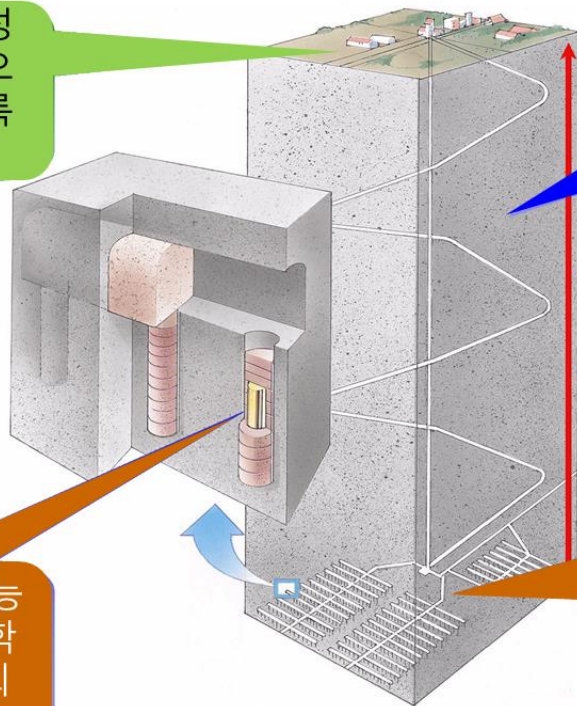
- 지하수 선형속도 : 수리전도도 10^{-9} m/s일 때 ~160m/10만년
- 적합 암종 : 화강암, 점토암, 암염 등

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

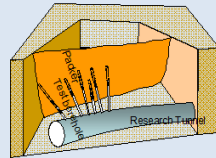
Image: SKB, Sweden



심층처분 핵심기술

➤ 심층처분 설계/안전성평가 기술과 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

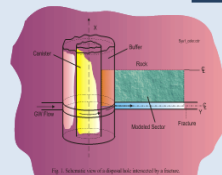
- 안전성 ↑
- 불확실성 ↓
- 실현성 ↑

공학적방벽 성능



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

안전성평가



- FEPs 및 시나리오
- 안전성평가 모델 개발
- QA

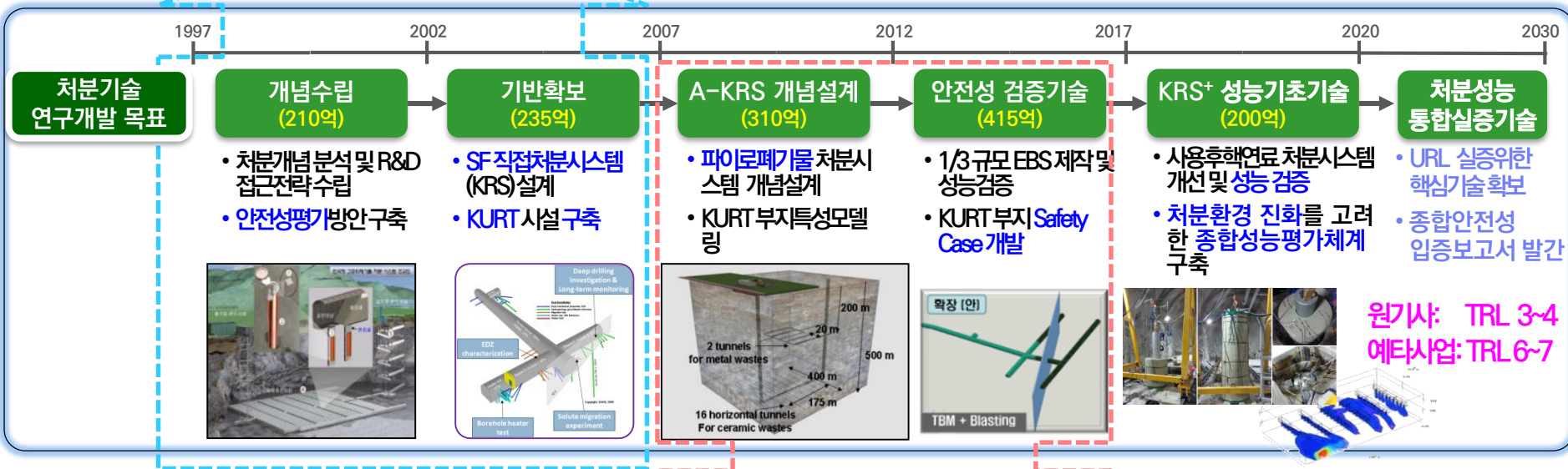


심층처분 연구 실적

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

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

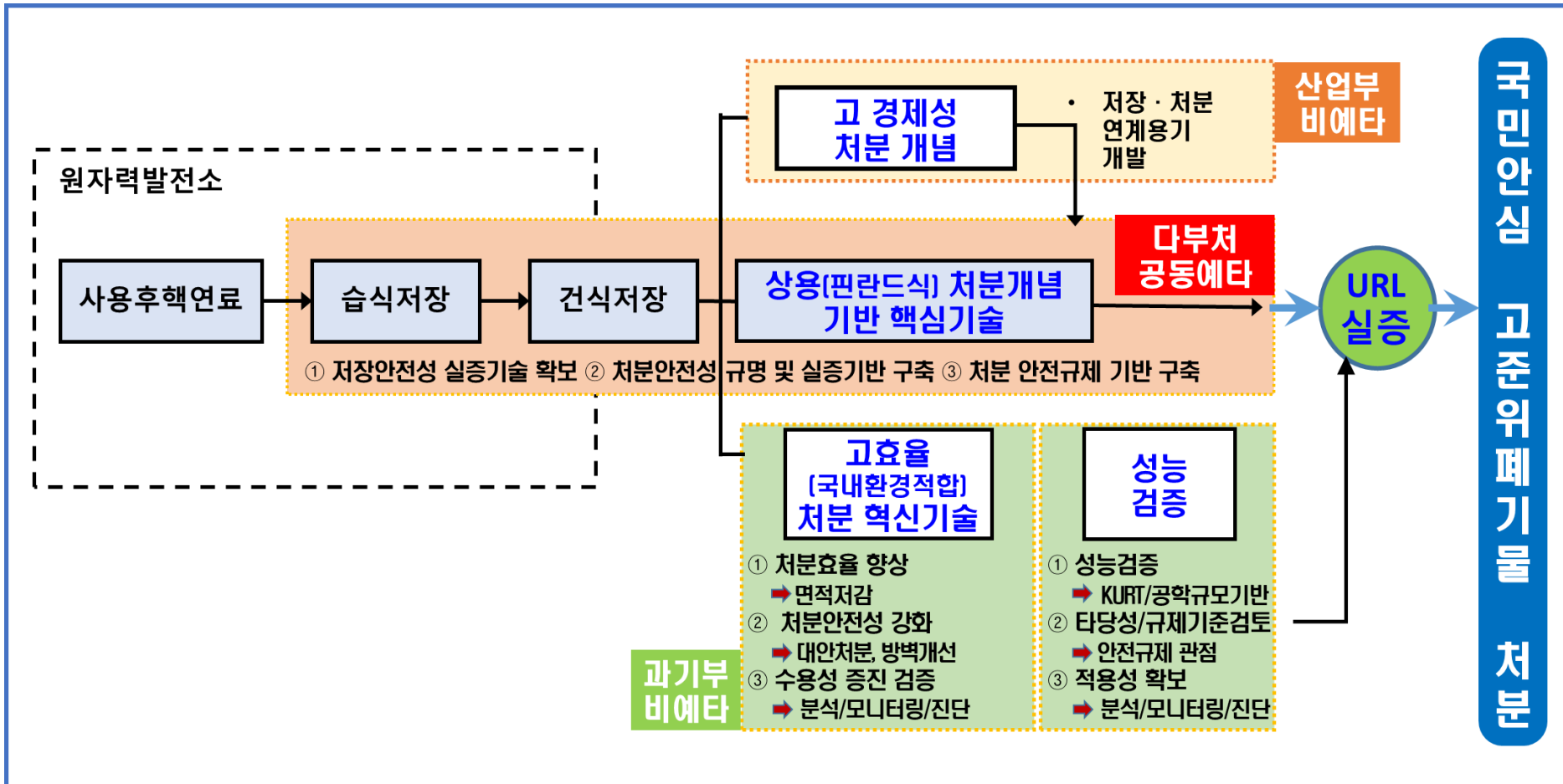
KURT (지하처분연구시설)



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

심층처분 연구 현황

➤ 다부처 예타사업 / 과기부 비예타 사업/ 산업부 비예타 사업 진행중

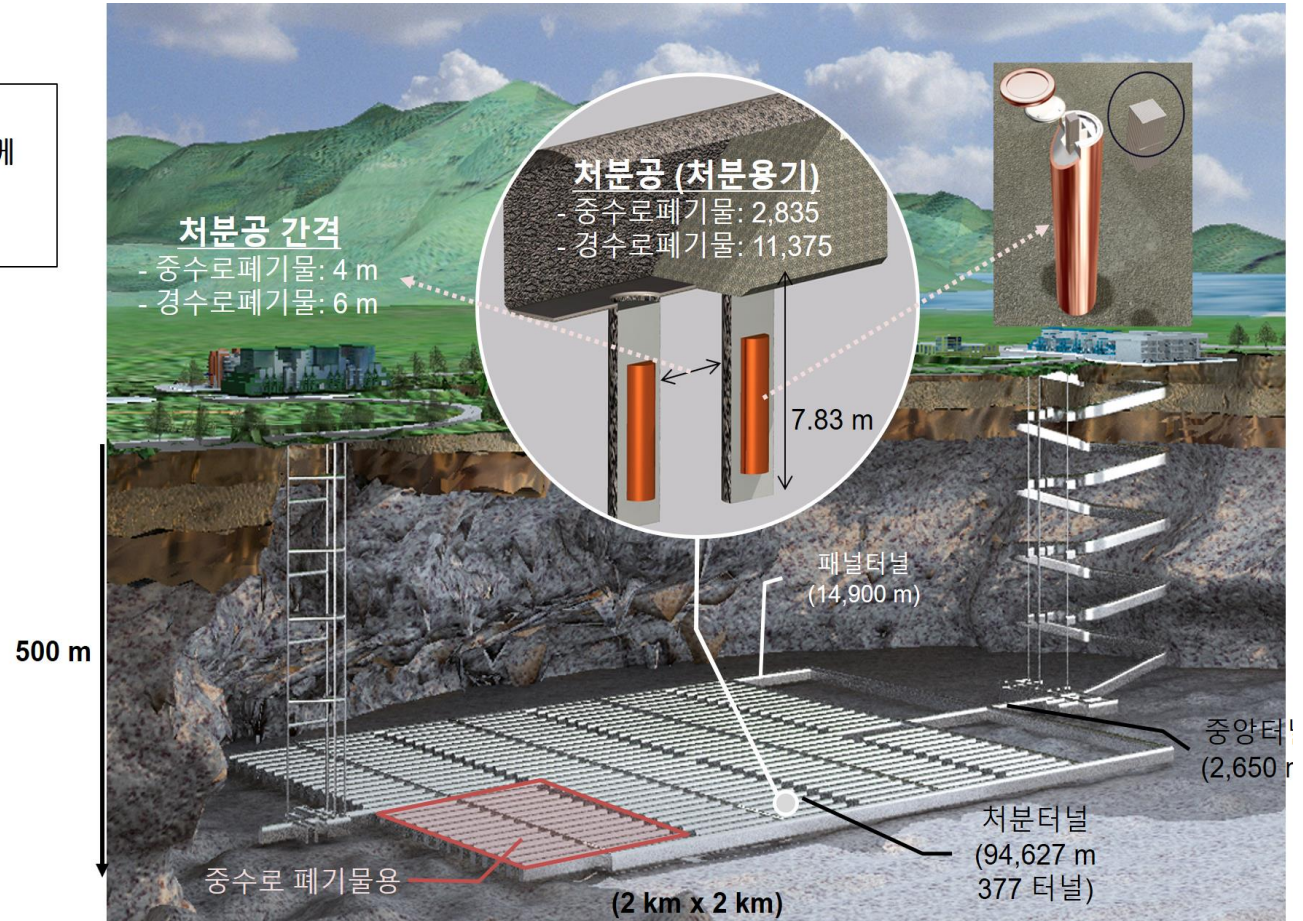
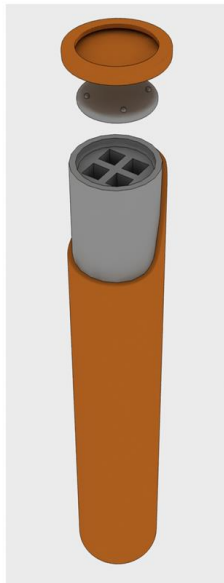
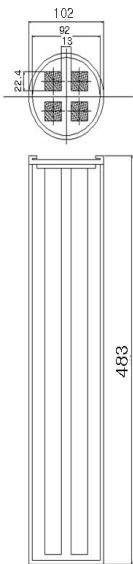


처분시설 설계기술

➤ **사용후핵연료를 국내 암반에 처분하기 위한 개념설계안을 제시 → 기금산정에 반영**

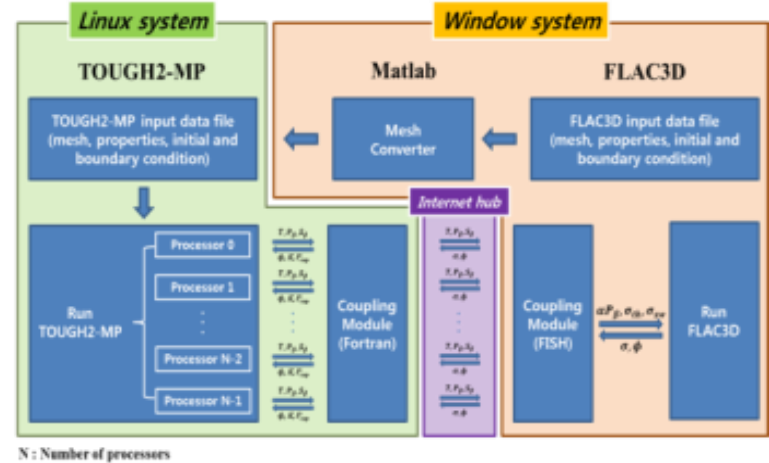
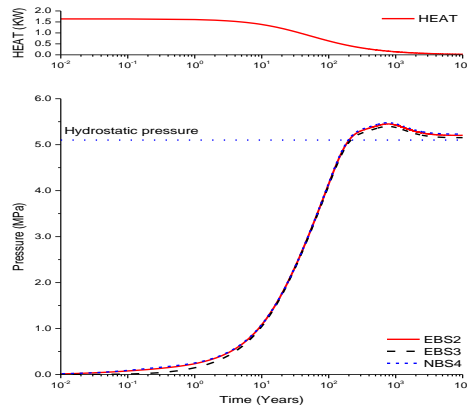
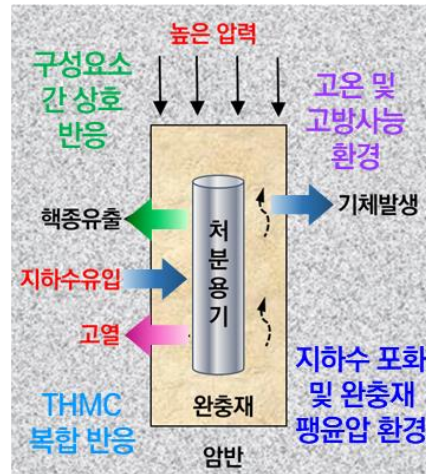
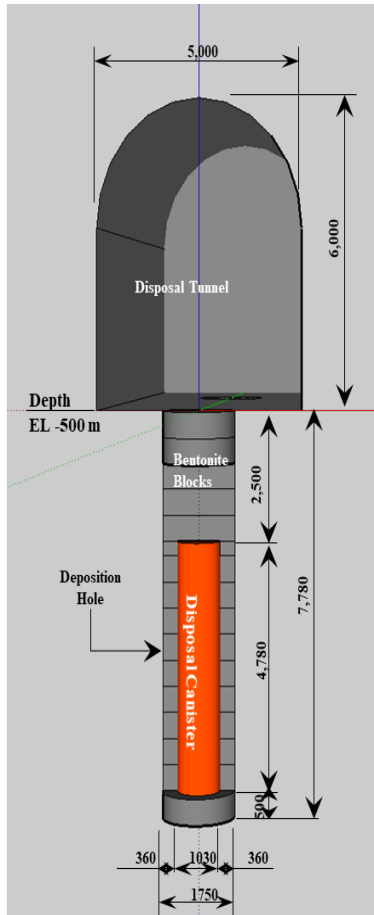
○ 처분용기

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



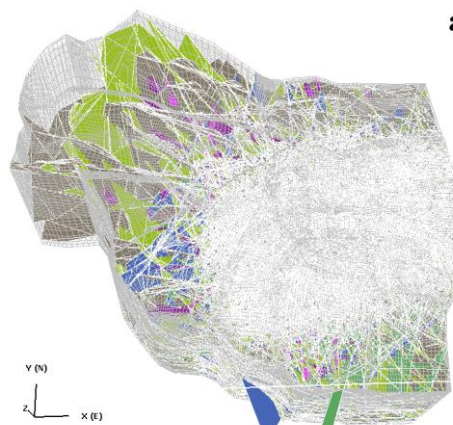
공학적방벽 성능평가 기술

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

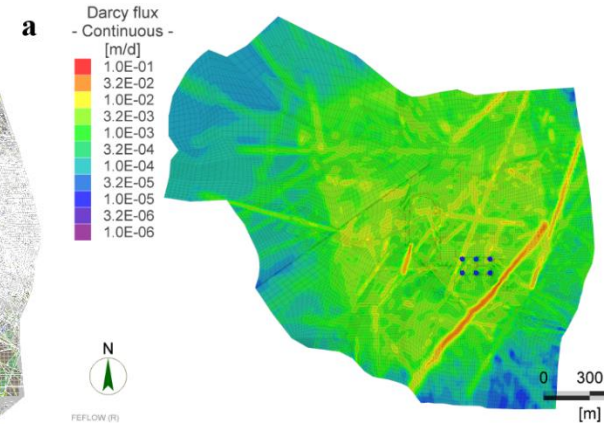


수리지질 모델링 기술

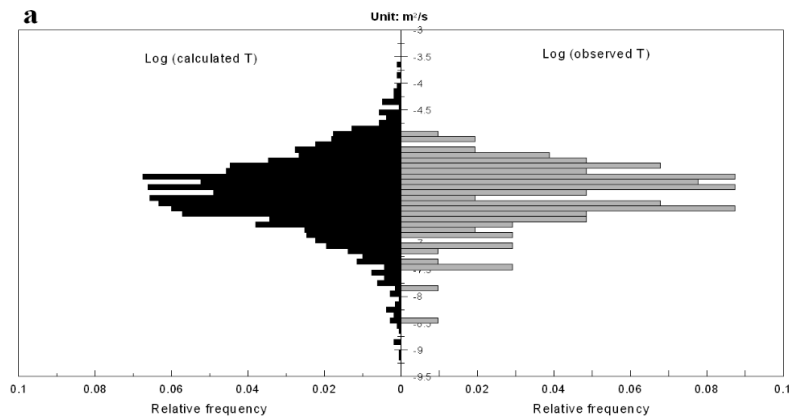
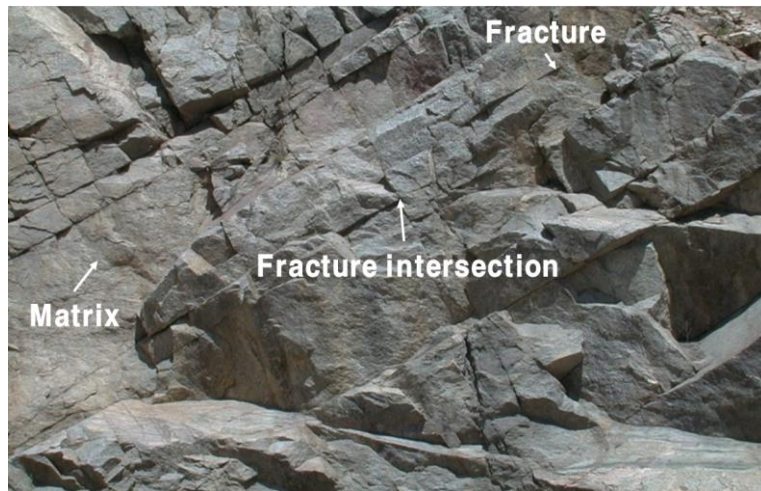
➤ 심부암반의 단열/수리 특성을 모델링 할 수 있는 기술 개발



<단열망 모델>



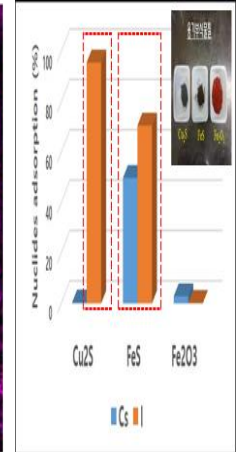
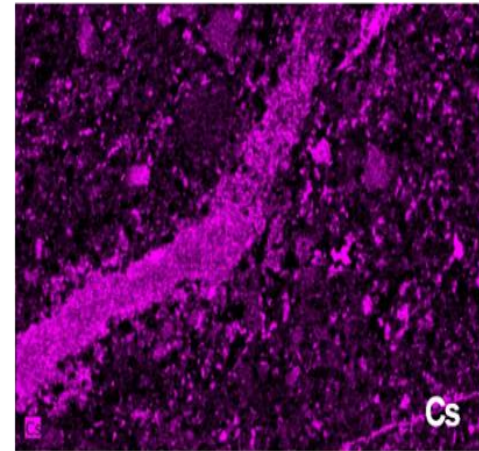
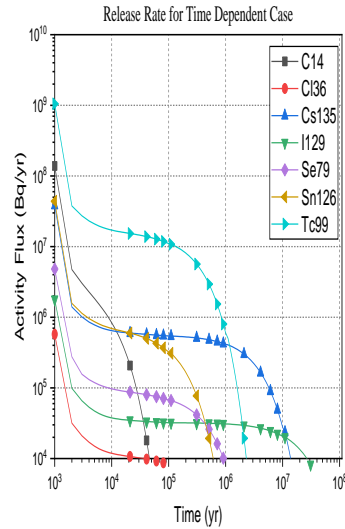
<수리지질 모델>



<예측치와 실측치의 비교>

핵종거동 평가 기술

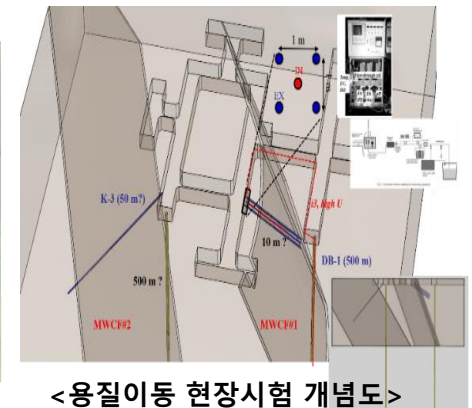
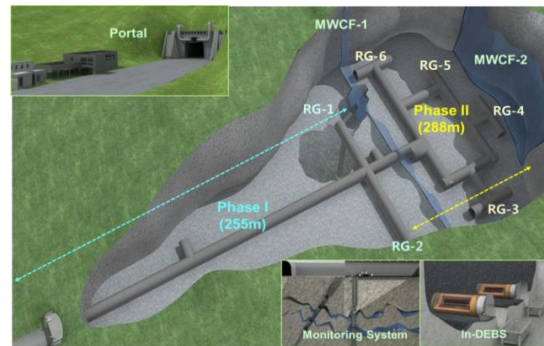
➤ 공학적방벽/천연방벽의 핵종이동 관련 특성 및 이동모델 개발



<핵종수착 표면분석 사진 및 핵종수착 자료>



<핵종 장기 용출 모델>



<용질이동 현장시험 개념도>

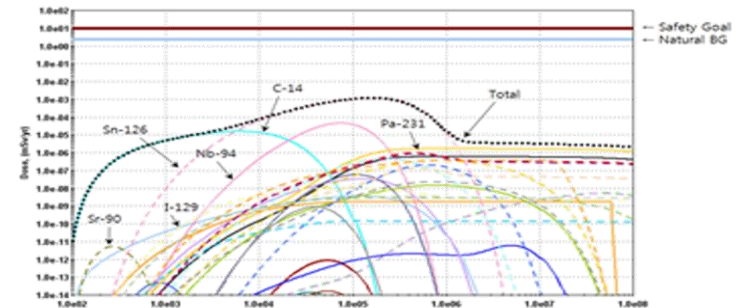
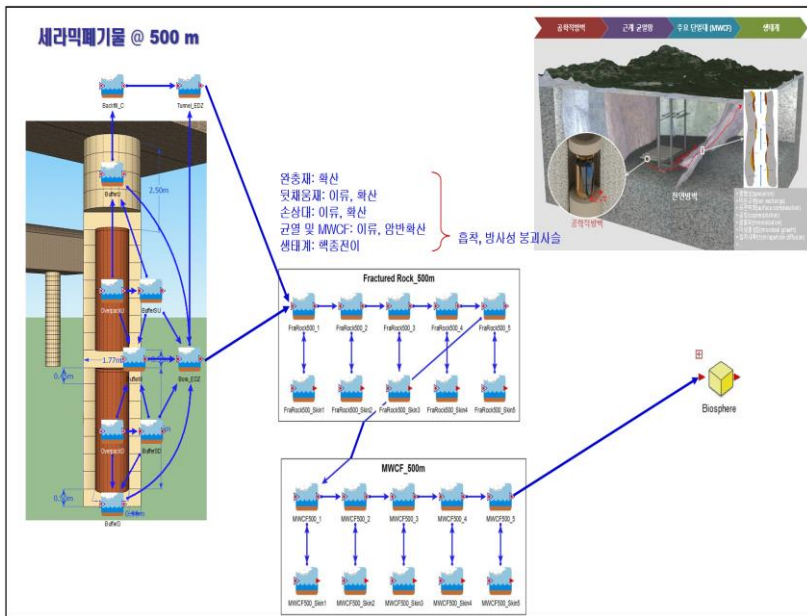
폐쇄 후 안전성평가 기술

➤ 위험도 및 피폭선량을 예측할 수 있는 안전성평가체계 개발

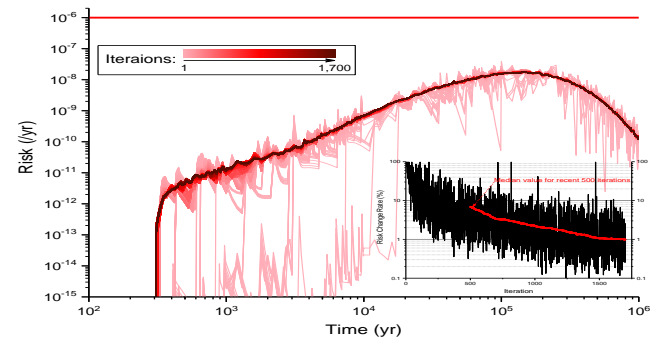
제5조(안전목표치) 심층처분시설은 폐쇄 후 방사선영향이 다음 각 호의 안전목표치를 만족하도록 설계되어야 한다.

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〉

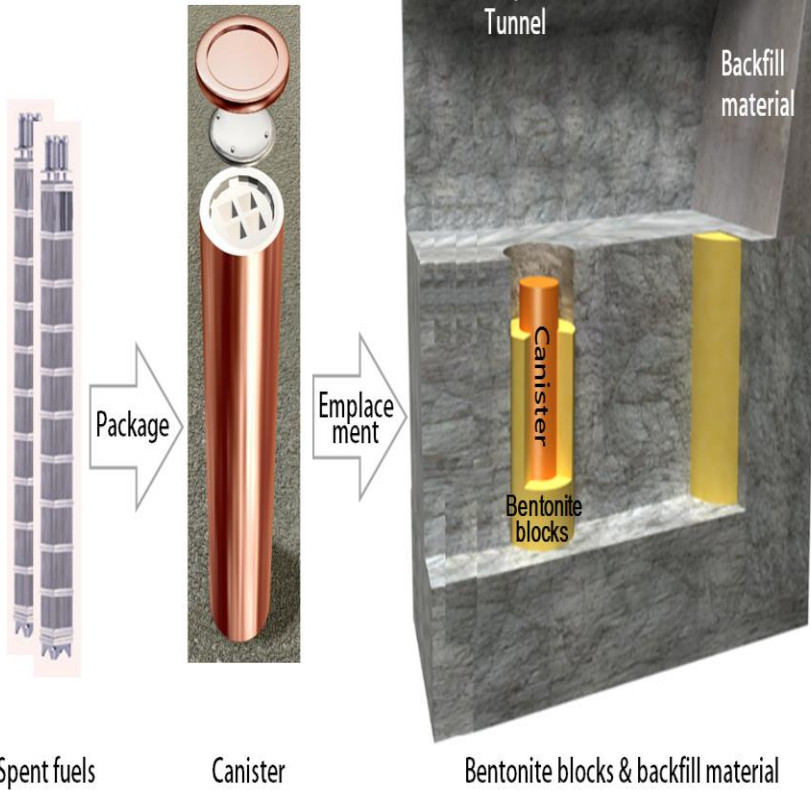


25

고준위폐기물 심층처분 개념

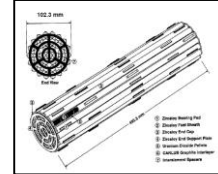
(경수로) 기준사용후핵연료

농축도 4.5%, 55 GWd/tU,
40년냉각



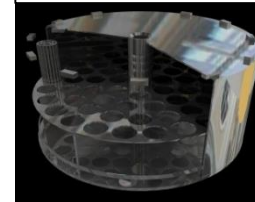
PWR처분용기 / 처분공 / 처분터널

CANDU 번들

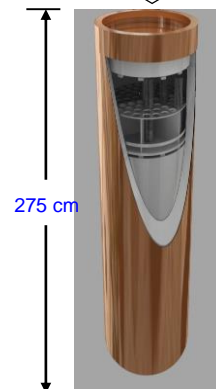


60 번들

CANDU 바스켓



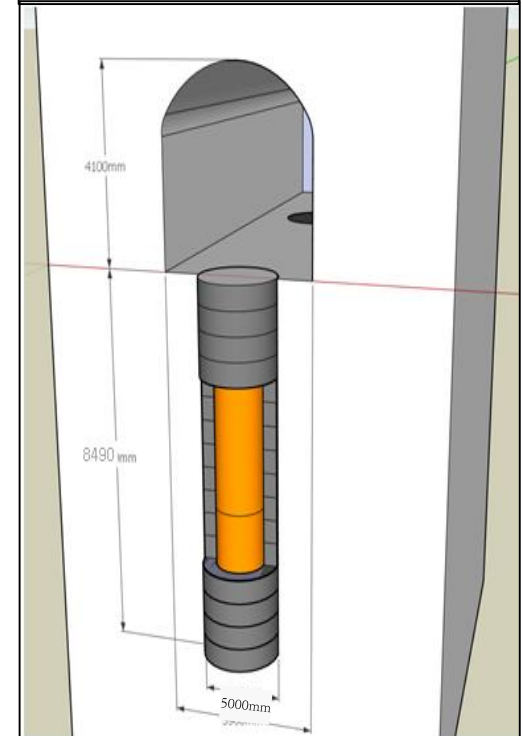
4 바스켓



(중수로) 기준사용후핵연료

농축도 0.71%, 8.1 GWd/tU,
30년냉각

- 처분터널 간격 : 40m
- 처분공 간격 : 5m

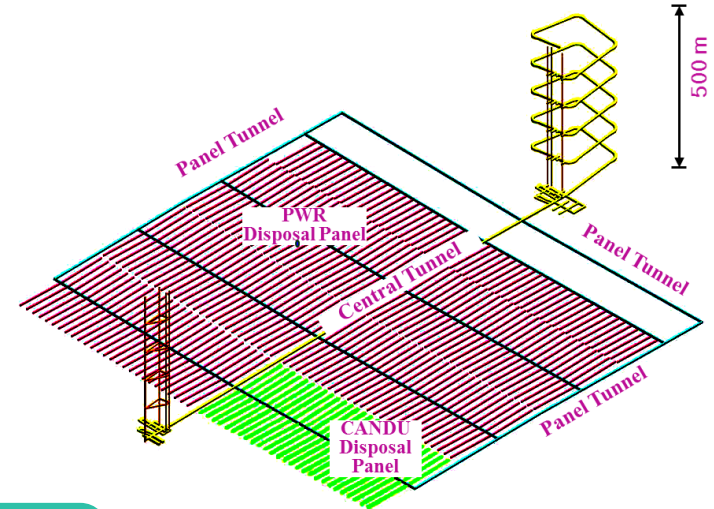


중수로 처분용기

심층처분 소요 면적

➤ 사용후핵연료 순수 처분면적은 약 6 km²로 추산

	경수로 사용후핵연료	중수로 사용후핵연료	합계
처분면적 (km ²)	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.

고효율 처분개념 개발

➤ 고효율 처분개념 적용시 처분면적 감소 가능

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)

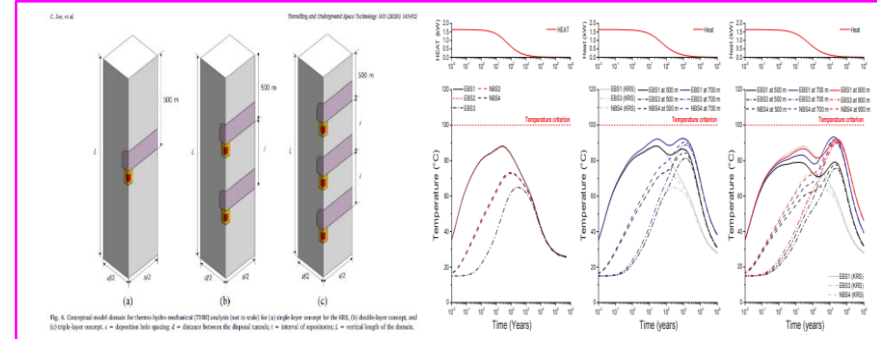
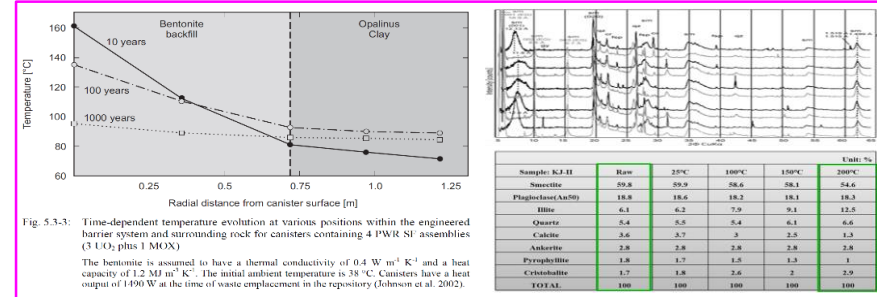
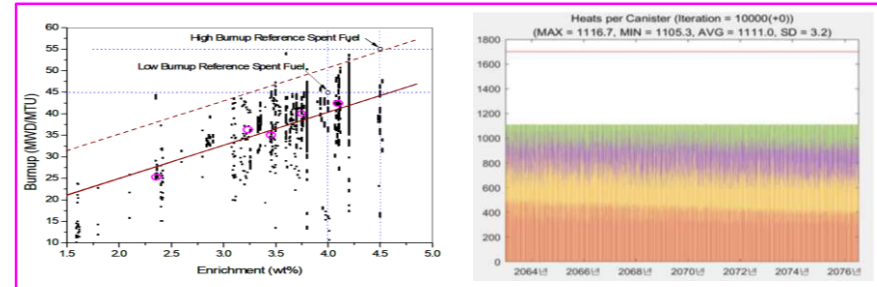
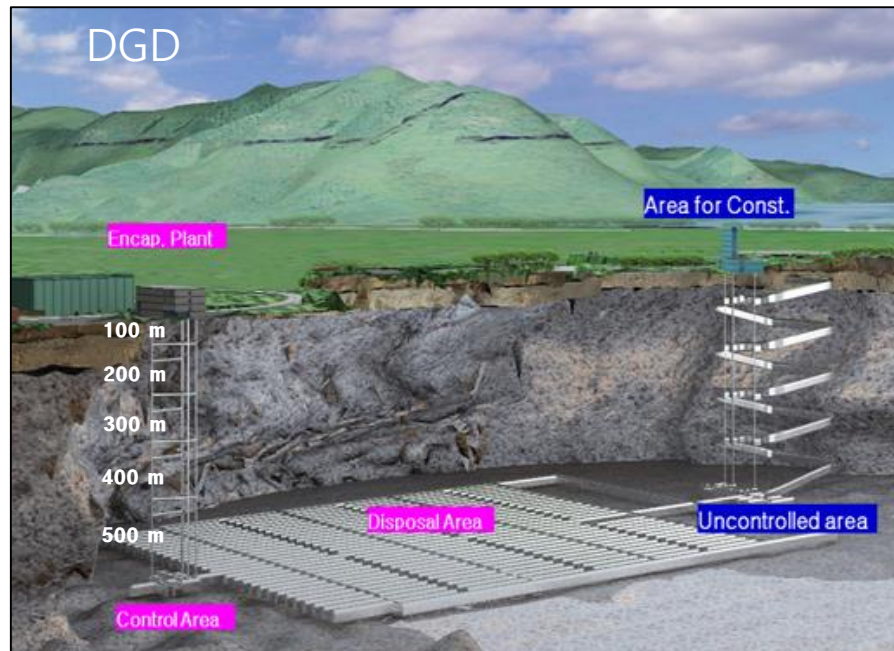


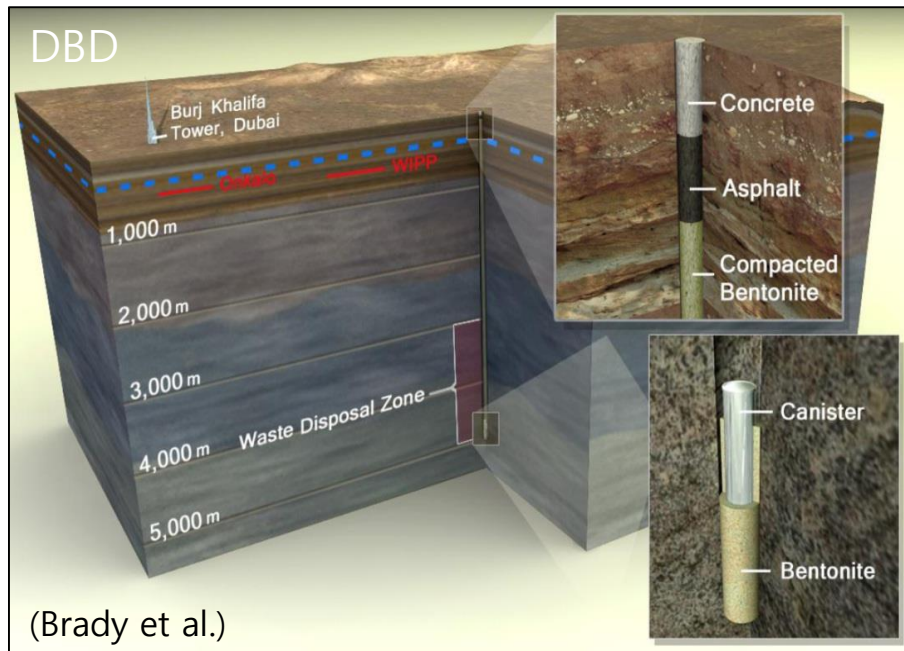
Fig. 6. Conceptual model domain for thermohydro-mechanical (THM) analysis (not to scale) for (a) single-layer concept, and (b) double-layer concept, and (c) triple-layer concept. L = distance between the disposal canisters, L' = lateral length of the repository, L'' = vertical length of the domain.

심부시추공 처분

➤ Deep Geological Disposal (DGD) vs. Deep Borehole Disposal(DBD)



- Concept : Disposal of HLW in the disposal tunnel at **the depth of 500 m**
- **Reference Concept for HLW Disposal**



(Brady et al.)

- Concept : Drilling a deep borehole to the **depth of 5 km** and disposal HLW at the lower part of the borehole(**3~5 km**)

심층처분 가능 암반

- 심층처분 후보 암반은 35% 정도로 예상되며, 원전 진흥정책으로 처분물량이 증가해도 처분가능 암반은 충분할 것으로 예상

■ 화강암

S. Korea

- 고생대 및 중생대 25.6%

■ 변성암

- 화강암질 편마암 9.7%

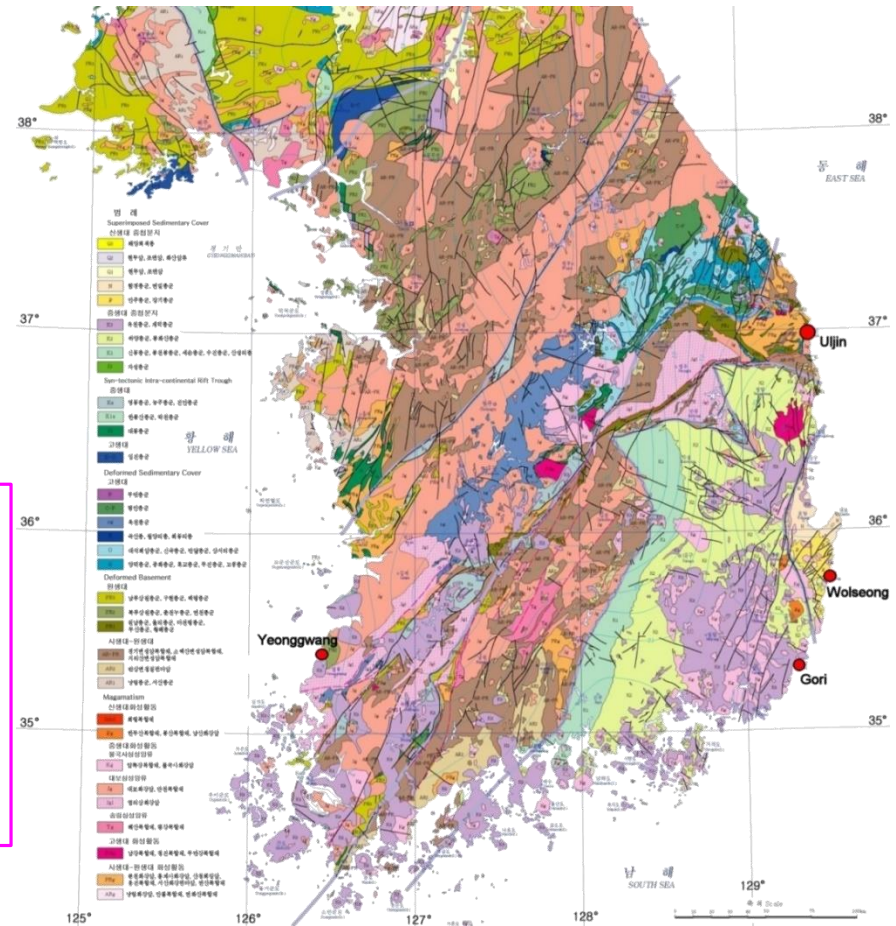
- 퇴적암질 편마암 19.8%

고준위방사성폐기물 심층처분시설에 관한 일반기준

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



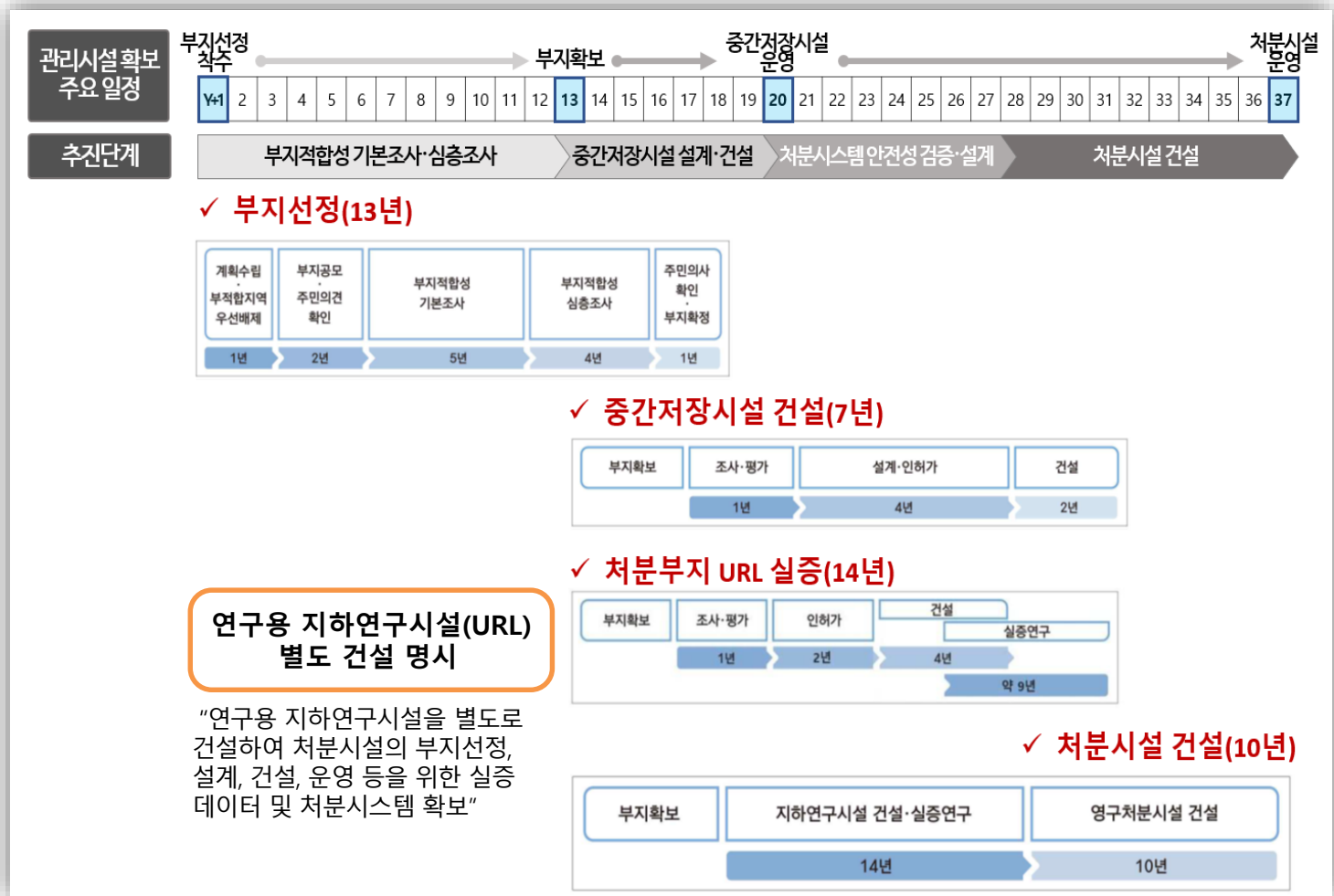
- 제12조(천연방벽) ① 심층처분시설의 모든 처분고는 석회암이나 이방성이 큰 불안정한 암종이 분포하지 않은 균질한 암반으로서 강도가 큰 단일의 기반암 내에 위치하여야 한다.
- ② 심층처분시설의 처분고는 미래에 해당 지역에서 예상되는 지표면의 변화와 기후변화에 의해 심각한 영향을 받지 않도록 하고, 미래 인간침입의 가능성과 그 영향이 제한될 수 있도록 충분한 깊이에 위치하여야 한다.
- ③ 심층처분시설의 천연방벽은 역학적 · 수리지질학적 · 지화학적으로 안정된 매질로서 해당 방사성폐기물에 함유된 장반감기 방사성핵종의 이동을 지연시키고 방사성물질이 생태계로 유출하는 것을 제한하는 성질을 가져야 한다.



고준위방폐물 관리 기본계획

➤ 제2차 고준위방폐물 관리 기본계획 ('21.12)

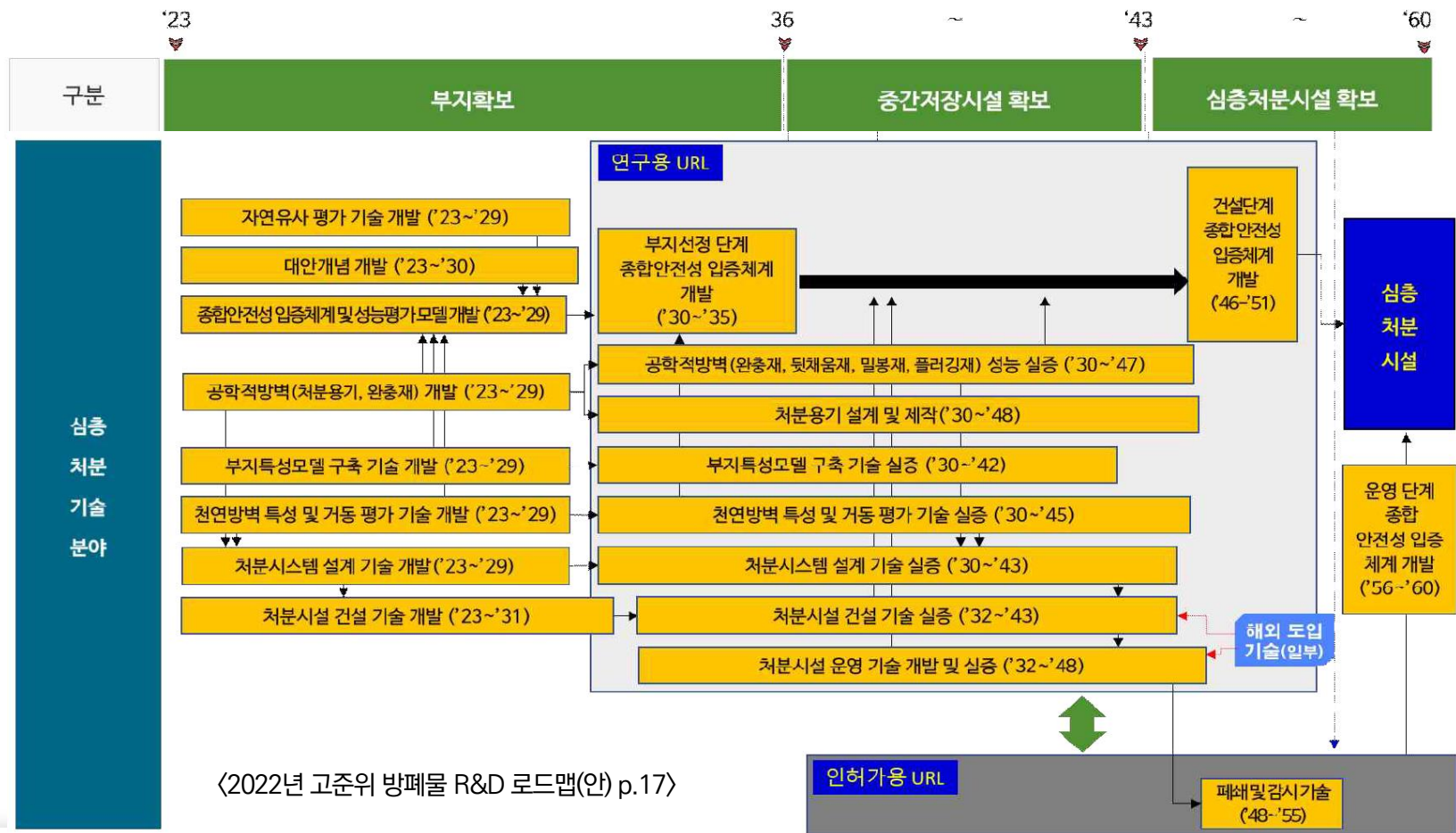
- 부지내 저장 이후 관리시설 부지가 확보되는 즉시 중간저장시설을 거쳐 Y+37(2060년 예상)에 처분 시작



고준위방폐물 처분 연구 로드맵

➤ 산업부 고준위 방사성폐기물 관리 기술 로드맵(안) ('22)

- 제2차 고준위폐기물 관리 기본계획에 근거(Y+37)하여 R&D 로드맵(안) 수립('60년 처분시설 운영)
- 다부처 공동예타사업의 성과와 연계하여 연구용 URL에서의 R&D 수행('30~) 포함 로드맵 수립: 운반/저장, 부지평가, 심층처분 분야



요약

- **사용후핵연료 건식저장 안전성 실증 및 시험기술 개발**
 - 사용후핵연료 온도에 따른 열화 평가 및 저장시설 열화로 인한 격납/차폐 성능 평가 기술을 개발 중임.
- **심층처분시스템의 안전성을 지하연구시설(URL)에서 실증하기 위한 핵심기술(평가모델, 시험·분석기술, 제작·취급기술) 개발**
 - '29년까지 국내 고유 심층처분시스템 실증에 필요한 기술을 확보하고, '30년부터 연구용 URL에서 처분성능을 실증하여 건설허가에 필요한 자료를 획득할 예정임.
 - 개발된 기술이 차질없이 URL 성능 실증에 활용될 수 있도록 조속한 연구용 URL 부지확보가 요구됨.
- **심층처분 안전성 및 효율성 향상을 위한 대안처분기술 개발**
 - 심부시추공 처분 등 대안처분기술 및 고효율 공학적방벽 기술을 한국형 처분시스템에 적용할 수 있도록 개발 중임.

감사합니다.