

2024 KNS 추계학술발표회 워크숍D

핵연료 및 사용후핵연료 관련 쟁점과 해결방안: 핵연료전문위원회 활동을 중심으로

사용후핵연료 안전관리 분과위원회 활동 보고



참여자: 문주현, 조동건, 김기영, 이성기, 이상훈, 류재수, 정해룡, 지성훈

2024.10.23



사단
법인 **한국원자력학회**
KOREA NUCLEAR SOCIETY

CONTENTS



01 보고서의 목차

02 서문 내용

03 국내외 동향 내용

04 국내 현안 진단 및 대응 방안 내용

05 총괄적 제언

01 보고서의 목차 (1/1)

● 핵심 요약 (Executive Summary)

(24년 10월 현재 버전)

● 01 서문

- 원자력발전과 사용후핵연료 관리
- 사용후핵연료 관리 단계
- 사용후핵연료 관리 국내 수준 (자원 투자/기술/인력/제도 현황)

● 02 국내외 동향

- 국내외 동향
- 글로벌 이슈

● 03 국내 현안 진단 및 대응 방안

- 사용후핵연료 임시저장시설 포화 임박
- 선진원자로 핵연료주기 관리기술 부재

● 04 총괄적 제안

(붙임1) 미국의 CURIE 및 ONWARDS 프로그램 개요

(붙임2) 주요국의 사용후핵연료 관리 정책 현황

(붙임3) 고준위 방폐물 관리 특별법에 대한 요구

(붙임4) 연구용 URL 개요

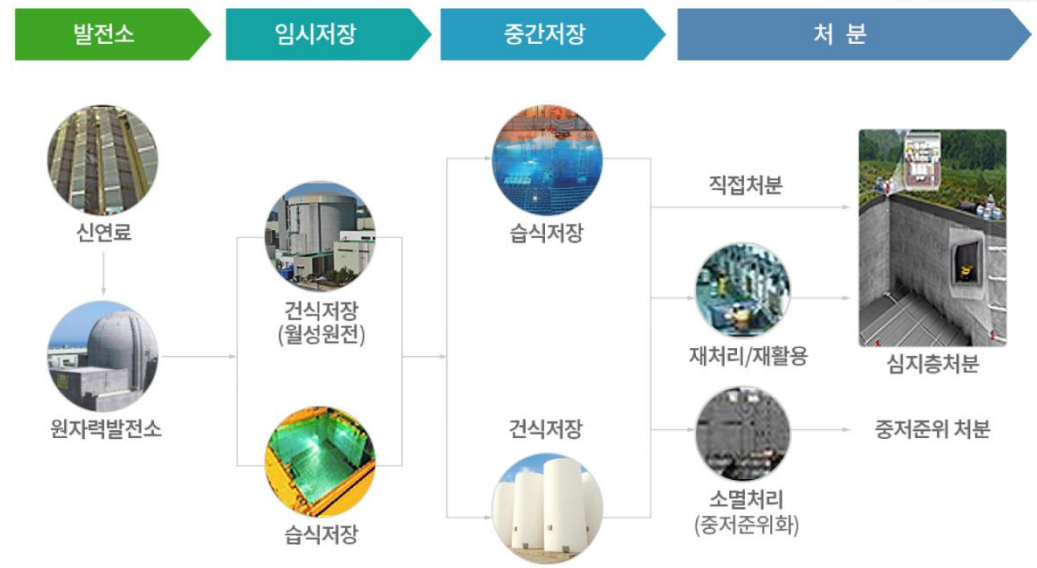
02 서문 내용 (1/3)

● 원자력발전과 사용후핵연료 관리

- 최근 2050 탄소중립과 에너지 안보를 위해 원자력발전이 주목받고 있음
 - 제28차 유엔기후변화협약 당사국 총회(COP28)에서 화석연료로부터 멀어지는 에너지 전환을 결의
 - 국제에너지기구(IEA)는 '2050 탄소중립'을 위해 원자력발전 유지와 확장을 로드맵에 포함
- 지속가능한 원자력발전은 사용후핵연료 관리가 전제되어야 함
 - 원전 사용후핵연료 저장수조 포화 시, 핵연료 교체가 불가능해 원전 가동 중단
 - 원전의 지속적 이용을 위해서는 부지내저장 이후 사용후핵연료 관리 단계가 정립되어 있어야 함
 - 녹색분류체계에 따라 원자력이 녹색에너지로 인정받기 위해서는 고준위 방폐물 관리가 전제되어야 함

● 사용후핵연료 관리 단계

- 사용후핵연료는 열과 방사선을 장시간 방출하기 때문에 특별한 관리 필요
 - 우리나라는 경수로와 중수로 타입의 두가지 사용후핵연료 발생
- 사용후핵연료는 임시저장→중간저장→(재처리)→영구처분의 관리과정을 거치며, 국가관리정책에 따라 결정됨



02 서문 내용(2/3)

● 사용후핵연료 관리 국내 수준('24.2 원진위 승인 고준위 방폐물 R&D 로드맵 인용)

● 재원 투자 현황

- 정부는 '97년부터 '22년까지 **고준위 방폐물 관리 기술개발에 1조 1,441억원**을 투자하였고, **산업부는 운반·저장 분야**와 **과기부는 부지저감·독성저감 분야**를 중심으로 투자
- 최근 5년간 **산업부는 고준위방폐물 관리 분야 기술개발에 515억원**을 투자하였고, 이는 **타 분야**(신재생 1.5조원, 전력 7,756억원, 자원 2,842억원, 원전 3,599억원) 대비 **매우 적은 수준**

[단위 : 억원]

	기투자비용(~'22)				합계	
	산업부		과기정통부			
		%		%		%
운반	572.0	38	-	-	572.0	5
저장	523.3	34	62.3	0.6	585.6	5
부지	282.9	19	100.0	1	382.9	4
처분	143.9	9	1,704.4	17	1,848.3	16
부피저감	-	-	4,148.7	42	4,148.7	36
독성저감	-	-	3,904.0	39.4	3,904.0	34
합계	1,522.1	100	9,919.4	100	11,441.5	100

- **다부처 예타사업**(사용후핵연료 저장·처분 안전성 확보를 위한 핵심기술개발사업)을 추진중이며, **'29년까지 4300억원 투자**

02 서문 내용(3/3)

● 사용후핵연료 관리 국내 수준('24.2 원진위 승인 고준위 방폐물 R&D 로드맵 인용)

● 기술 현황

- '97년부터 **고준위방폐물 관리기술을 개발**하여 **선도국의 60~80% 기술수준**에 도달
- **운반·저장** 분야는 **일부 상용화 단계**에 이르렀으나, **고준위방폐물 처분** 분야는 **핵심기술 개발 단계**, **부피저감·독성저감** 분야는 **세부기술 확보 단계**

구 분	운반	저장	부지	처분	부피저감	독성저감
선도국	미국	미국	스웨덴	핀란드	미국	러시아
선도국 대비 평균 기술수준(%)	82.3	79.1	63.2	56.6	71.0	58.0
기술격차(년)	3.0	4.0	7.1	8.6	4.0	9.0

* 전문가 집단심층면접(FGI) 및 델파이 조사(2회), 논문·특허 조사 등을 통해 도출

● 인력 현황

- 고준위방폐물 관리분야의 **기술개발 인력은 약 195명**('22년말 기준, KAERI, KORAD, KHNP, KIGAM, iKSNF)
- 2차 고준위방폐물 관리 기본계획 수행을 위해서는 **연간 평균 300여명(최대 410명)** 필요
- 현재 고준위방폐물 관리 융합대학원('22~'26 약 65명 석박사 양성 계획)과 관련 전공학과에서 **전문인력 양성 중**

● 제도 현황

- 사용후핵연료 **저장시설**에 대한 **규제기반은 수립**되어 있으나, **처리·처분은 규제기반 미비**
- 관리시설 부지 선정을 위한 **특별법 제정** 무산(21대 국회), 22대 국회에서 **재 추진중**

03 국내외 동향 및 이슈 (1/5)

● 국내외 동향

● 원자력 이용 확대는 세계적 추세

- 탄소중립 시대 무탄소 에너지원의 중요성과 러시아-우크라이나 전쟁 이후 **에너지 안보**가 중요해짐에 따라 **원자력 역할**이 커짐
- 프랑스(2035년까지 원전 6기), 영국(50년까지 최대 8기)은 **원전 건설을 확대를 추진 중임**
- 미국은 C2N 프로젝트 등 원전 **이용 확대 정책**과 더불어, 경수로 **사용후핵연료를 재활용**하여 **선진원자로 연료로 공급**(CURIE) 하고, 선진원자로 **사용후핵연료와 방폐물 안전관리**(ONWARDS)를 위한 **연구를 추진 중임**
- **국제적으로** 기존 대형 원전 이용 확대와 **SMR 개발 및 배치 노력** 가속화
 - 선진경수로(ALWR), 소듐냉각고속로(SFR), 초고온가스로(VHTR), 용융염원자로(MSR) **70여종**
 - '18년 **캐나다**는 탄소중립을 위한 **SMR 개발 로드맵** 수립
 - '20년 **미국 NuScale사**는 **SMR에 대해 NRC 표준 설계인가** 획득
 - '20년 **영국**은 **SMR 개발 및 투자계획**을 발표
- **우리나라**도 제11차 전력수급기본계획 실무안에 **원전 추가 도입 계획** 반영

03 국내외 동향 및 이슈 (2/5)

● 국내외 동향

● 원자력의 지속 이용을 위해 사용후핵연료 관리체계 구축 중

- 많은 국가들이 원전 부지와 독립 부지에서 저장시설 운영 중
- 주요국은 일정한 조건 만족을 전제로 원자력을 친환경 에너지로 분류하는 녹색분류체계 운영 중
 - 2025년까지 사고저항성핵연료(ATF; Accident Tolerant Fuel) 적용 등 최적가용기술(BAT; Best Available Technology) 적용
 - 2045년 이전 원전 건설허가, 2050년까지 고준위 방폐물 처분시설을 운영하기 위한 세부계획 제시 등
- 우리나라 환경부는 원전을 친환경 경제활동으로 규정한 한국형녹색분류체계(K-택소노미)를 2023년 1월 1일 시행
 - 인정 기준으로 고준위 방폐물 처분시설의 조속한 확보를 담보하는 법률제정, 2031년 ATF 도입 등 제시
- 선도국은 사용후핵연료 및 고준위 방폐물 처분시설 부지를 확보하였음
 - 핀란드는 2021년 처분시설 운영 인허가를 신청하였으며, 2025년 운영 착수를 목표로 시범운영 중
 - 스웨덴은 2009년 최종 후보부지로 포스마크(Forsmark) 부지를 선정하고, 2022년 처분시설 건설 허가를 획득
 - 프랑스는 2009년 심층처분시설 부지(ZIRA)를 선정한 후 2023년 처분시설 건설 허가를 신청
 - 스위스는 로르들리히 뢰게른(Nördlich Lägern) 부지를 최종 후보부지로 선정하고, 현재 연방의회 승인 준비
 - 캐나다는 2024년에 최종 부지를 선정할 예정

03 국내외 동향 및 이슈 (3/5)

● 국내외 동향

● 선진원자로 사용후핵연료 관리체계 구축 필요성 제기

- IAEA는 경수 및 비경수형 SMR 사용후핵연료 및 폐기물의 안전관리를 위한 기술개발을 강조
- OECD/NEA는 SMR 및 선진원자로 폐기물 통합관리(WISARD) 프로젝트를 준비 중

SMR을 위한 핵연료주기 개관

농축시설: 전 세계적으로 14개 상용시설 운영 중

핵연료주기의 모든 단계에서 운반



우라늄 자원



입증된 재료/기술 핵연료 제조

고온가스로 용량 증대

선진핵연료 연구개발

현재의 사용후핵연료 저장 최적화
새로운 사용후핵연료 저장 연구개발

재처리는 現 사용후핵연료에 대해 특화
HALEU 및 고연소도는 도전으로
다양한 재활용 기술 연구개발 필요

기술확보

기술확보확대필요

기술확보필요

처분장방폐물 인수기준은 現 사용후핵연료를 대상으로 설계
새로운 사용후핵연료에 대한 추가 연구

NEA Project on Waste Integration for Small and Advanced Reactor Designs (WISARD)

혁신적 원자력시스템은
혁신적 방폐물 관리 해결책이 필요

혁신적 핵연료
선진원자로 노형
소형모듈원전(SMR)



WISARD 사업은 참여국의 관심과 수요에 따라 일부 또는 모든 업무에 참여할 수 있는 유연한 구조를 제공함.
주제들 사이의 상호 의존성을 규명하고 선진원자력시스템 및 핵연료를 위한 통합폐기물관리전략의 종합적 평가를 제공함으로써, 최종 결과를 도출할 예정



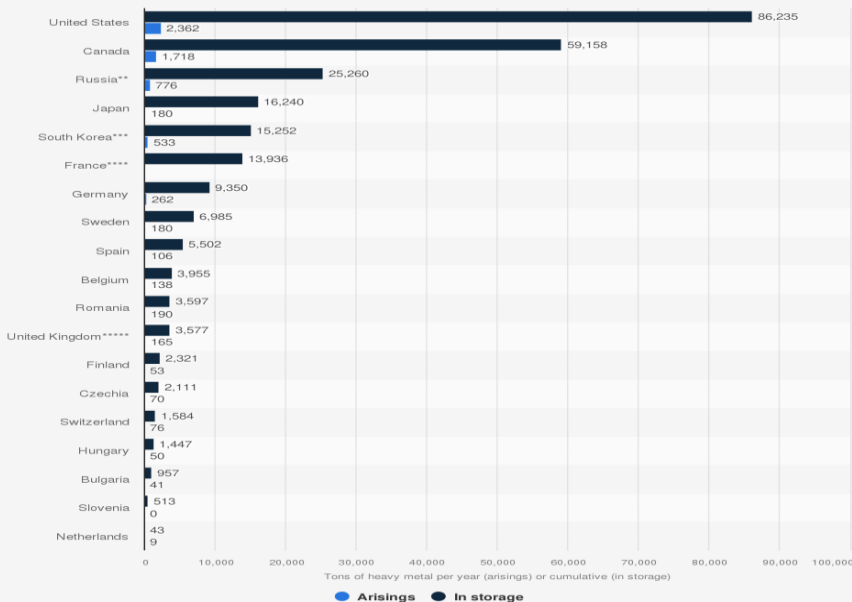
03 국내외 동향 및 이슈 (4/5)

● 글로벌 이슈

● 사용후핵연료 발생 증가

- 발생한 사용후핵연료에 비해 **저장공간 부족**으로 미국, 독일 등은 건식저장시설을 운영 중이며, 인허가 기간 만료가 도래한 시설에 대해 **연장을 추진 중**
 - 미국**은 중앙집중식 사용후핵연료 저장시설 추진 중이나 **지자체 및 시민단체 반대**로 어려움을 겪고 있음
- 우리나라도 **2030년부터 습식저장조 포화가 예상**되어 원전 **계속운전에 걸림돌**이 되고 있음

Spent nuclear fuel arisings and cumulative in storage in NEA/OECD countries* in 2020, by country (in tons of heavy metal)



Source: OECD-NEA © Statista 2024

Additional Information: OECD, 2020

(출처: statista 홈페이지)

사용후핵연료 포화율 및 포화시점 (단위: 다발, 괄호 안은 현 저장량 포화율 %, 2023년 말 기준)



● **국내도 저장 공간 부족 상황이 심화될 것으로 예상되며, 중간저장시설 및 처분시설 확보가 시급 (시사점)** (출처: 세계일보)

03 국내외 동향 및 이슈 (5/5)

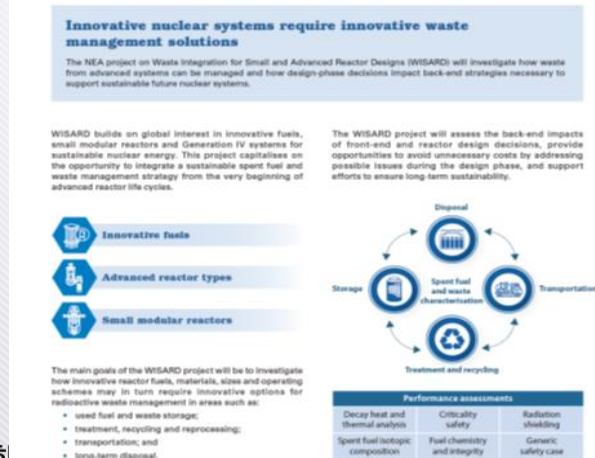
● 글로벌 이슈

● 사용후핵연료 종류 다양화

- 개발 중인 선진원자로의 지속가능성, 수용성, **수출경쟁력 제고 위해 방폐물 관리 방안 제시 필요**
- 선진원자로 기원 사용후핵연료 및 방폐물은 핵연료 구성성분, 핵연료 설계, 연소도, 원자로 구조재 등에 따라 기존 경수로의 것과 달라, IAEA, OECD/NEA 등은 **선진원자로 개발 시 방폐물 안전관리 기술개발의 필요성 강조**
- 미국은 **선진원자로 폐기물 안전관리 위한 프로젝트(ONWARDS)를 발족**하였으나 우리나라는 아직 고려치 않고 있음



The WISARD project will provide a flexible structure in which participants can join some or all of the tasks, depending on their interest and needs. The sixth and final task will be to integrate the results from the project, identifying inter-dependencies between topics and providing a holistic assessment of integrated waste management strategies for advanced systems and fuels.



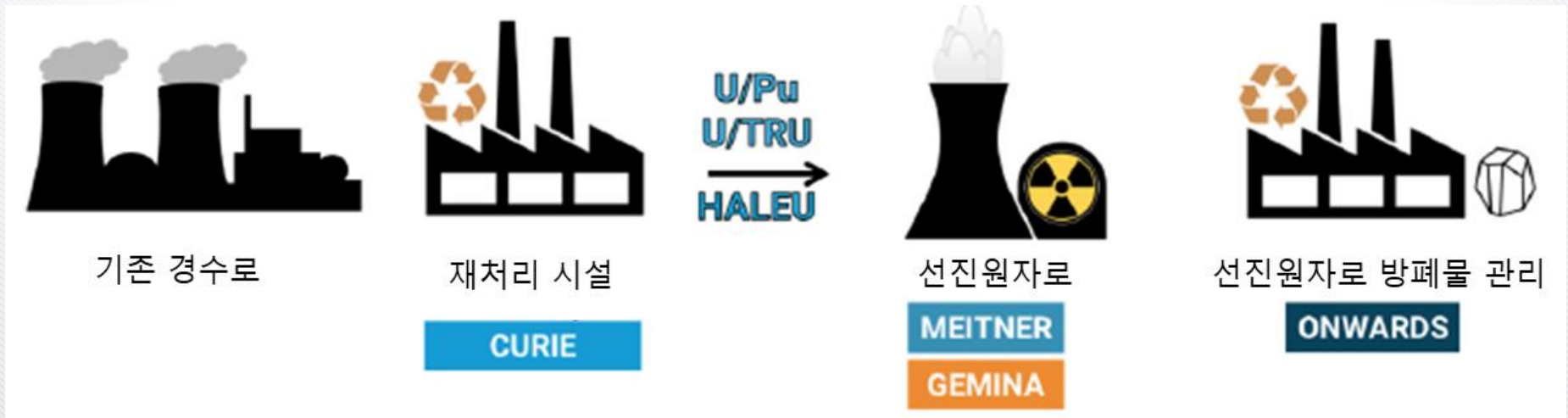
(시사점)

- 다양한 종류의 사용후핵연료 및 방폐물이 발생할 것으로 예상되면서 이들 관리 방안 마련 필요

(출처: OECD/NEA, 2024)

03 (참고) 미국 CURIE/ONWARDS 개요

- **미국 에너지부** 에너지고등연구계획국(ARPA-E)는 **CURIE와 ONWARDS 프로그램 착수**
- **CURIE**(Converting UNF Radioisotopes Into Energy): 2022년 9월에 착수하였으며, 기존 경수로 사용후핵연료를 재활용하여 **선진원자로의 핵연료를 공급하는 기술 개발**에 중점 (총 12개 기술, 3800만불 투입)
- **ONWARDS**(Optimizing Nuclear Waste and Advanced Reactor Disposal Systems): 2022년 5월에 착수하였으며, 선진원자로 사용후핵연료 및 **방폐물에 대한 관리방안 개발**에 중점 (총 11개 기술, 3600만불 투입)



04 국내 현안진단 및 대응방안 내용 (1/5)

● 사용후핵연료 임시저장시설 포화 임박

● 현안 진단

- 사용후핵연료 저장용량 포화문제 해결을 위해 부지내 건식저장시설 건설사업을 추진중이나 **영구시설화 우려등 수용성 문제로 사업지연**
- 정책적 차원에서, 임시저장 이후 **중간저장, 처분 등 정부의 계획은 있지만, 아직 관리 사업 미착수**
- 신규원전 도입국, EUR Rev.E(APR1000) 인증 시 국내 **사용후핵연료 관리 기술 수준** 문의와 확인 요청이 있었으나 대응할 만한 **전략 체계 미흡**
 - 사우디 체코 등 신규원전 도입국은 사용후핵연료 관리 기술 보유여부를 원전입찰 평가시 고려
 - 러시아는 원전 기술의 우수성보다 핵연료주기 서비스 제공 역량으로 수출시장 지배 노력 중
- 기술적 차원에서, 저장, 처리 및 처분에 필요한 제반 핵심 기술들이 개발되고 있으나, 국민 신뢰 확보를 위해 **실규모에서의 실증이 필요**
- **사용후핵연료 관리 부담 최소화**와 원자력 지속가능성 담보를 위해 안전성 확보와 함께 **경제적 효율성 고려**도 필요
 - 2012년 기준 사용후핵연료 관리비용은 53조원 예상, 원자재 가격 상승으로 안전은 물론 비용효율적 측면도 고려돼야 함

04 국내 현안진단 및 대응방안 내용 (2/5)

● 사용후핵연료 임시저장시설 포화 임박

● 현안 진단

- **고준위 방폐물 처분**이 원자력이 **녹색에너지원**으로 인정받기 위한 조건 중 하나로 제시되면서, 국내 처분 사업 일정에 **영향을 줄 수 있는 변수**(특별법 제정 무산, 2050 탄소중립, EU-Taxonomy, EU의 탄소국경조정세 도입 등)가 **많아짐**
 - 한국형녹색분류체계 **인정조건** 중 하나는 **고준위 방폐장 확보**를 담보하는 **법률 제정**
 - 2050 탄소중립, EU-Taxonomy, EU의 탄소국경조정세 도입 등 **사용후핵연료 관리 일정에 영향을 줄 수 있는 외부 요인**들이 존재
- 사용후핵연료 관리 사업에 필요한 안전성평가 및 인허가 획득을 위해 **사용후핵연료 특성평가 자료가 필요**하나 관련 사업이 착수되지 못함

04 국내 현안진단 및 대응방안 내용 (3/5)

● 사용후핵연료 습식저장시설 포화 임박

● 해결방안 제안

- (법적 측면) 사용후핵연료 관리에 관한 **특별법 제정 필요**
- (정책 측면) 원전부지내 **건식저장시설 건설이 지연될** 경우에 대비한 **해외 위탁재처리 정책 수립** 및 **처리 기술의 실증**을 위해 **미국의 장기동의 확보** 필요
- (기술 측면) '24년 2월 원진위 승인 고준위 방폐물 관리 **R&D 로드맵의 충실한 이행 및 주기적 갱신** 필요
 - ✓ 관리 단계별 사용후핵연료 인도/인수 요건 수립과 사용후핵연료 특성평가 체계 구축 추진 필요
 - ✓ DPC 활용 등 **운반·저장을 유기적으로 연계한** 관리 옵션 제시
 - ✓ 현재와 미래의 고준위 방폐물을 하나의 처분시설에 처분할 수 있도록 **부피, 열부하 저감을 위한 처리 기술개발** 추진
 - ✓ 처분 선도국 경험 활용, 실증 집중 기술/실증 병행 기술 등을 구분한 기술개발 추진 등 효율적인 기술개발을 추진하고 **연구용 URL을 적극 활용하여 처분 일정을 앞당기기 위한 노력** 필요
 - ✓ **고효율 처분시스템의 공학규모 및 현장시험 통한 검증** 추진
- (재정/인력 측면) **연구용 URL의 조속한 확보**를 위해 방폐기금 및 원기금 적극 활용, **전문인력 양성 및 안정적 수급 방안 마련** 필요

04 (참고) 고준위 방폐물 R&D 로드맵



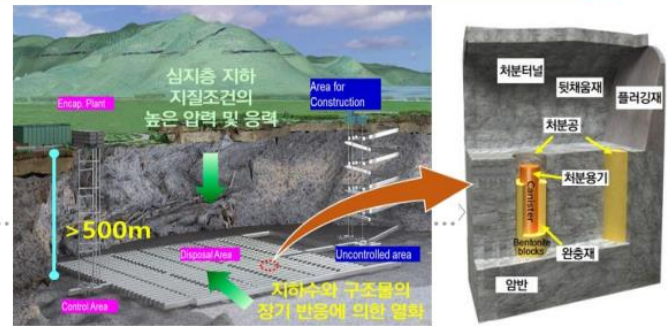
04 (참고) 고효율 처분기술 개발

이슈

공학적 방벽재 특성 규명

고준위폐기물 처분밀도 향상

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

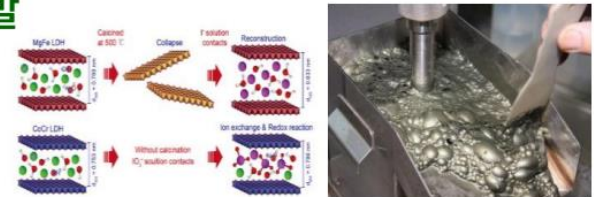


공학적방벽재
제작 기술

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

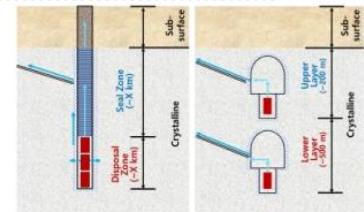
고기능성
완충재 개발

- 열-수리-역학-화학적 안전성이 향상된 고기능성 완충재 개발
 - 열전도가 증가된 완충재
 - 안전성 향상을 위한 **핵종 제거율 높은 완충재**



신개념 처분방식 적용기술 개발

- **처분면적 저감을 위한 다층처분/심부시추공처분 기술 개발**
 - 다층처분 (핀란드: 단층처분)을 위해 고응력해석 기술 및 다중처분장 안전성평가 기술개발
 - 심부시추공처분을 위해 초심부환경 특성조사, 처분용기 정치·회수 기술개발



04 (참고) 고준위방폐물관리특별법에 대한 요구

● 특별법은 다음 사항들을 고려하여야 함

- 해당 법은 원전 지속가능성 제고와 2050 탄소중립 현실화 등의 현안 해결에 도움을 주어야 함
- 해당 법의 주목적은 관리시설 부지의 원활한 선정이므로 부지 선정에 필요한 항목들이 포함되어야 함
- 해당 법은 고준위 방폐물 관리에 관한 2차레 공론화의 결과가 반영되어야 함

● 특별법에 대한 요구

- 관리시설 부지 선정 절차와 주체, 유치 지역 지원 방안 포함
- 관리정책 결정 및 시행을 위한 독립적 행정위원회 신설 방안 포함
- 원전 부지 내 임시저장시설의 용량 제한에 관한 항목 삭제
- 원전 부지 지역주민 및 국민의 신뢰성 확보를 위해 고준위 방폐물 관리 일정에 관한 마일스톤 포함
- 수용성 제고를 위해 고준위 방폐물 안전 관리를 위한 연구개발 지원 의지 포함

04 국내 현안 진단 및 대응 방안 내용 (4/5)

● 선진원자로 핵연료주기 관리기술 부재

● 현안 진단

- **선진원자로** 역시 **녹색에너지원**으로 인정받기 위해서는 **고준위 방폐물의 안전한 처분**이 전제
- 다양한 선진원자로 사용후핵연료는 **물리적·화학적으로 적절한 처리 후 안전한 관리**(운반, 저장, 처분) 가능
 - 특히, SMR을 포함한 선진원자로의 수출경쟁력 제고를 위해서는 원전 도입국의 **안전 처분 옵션 제공 차원에서 처리기술의 선제적 확보** 중요
- 하지만, 우리나라는 현재 **선진원자로 개발** 시 핵연료주기 **관리기술 개발**을 고려하지 않고 있어 **관련 기술이 부재**

04 국내 현안 진단 및 대응 방안 내용 (5/5)

● 선진원자로 핵연료주기 관리기술 부재

● 해결방안 제안

- (기술 측면) **선진원자로 개발 단계부터 다양한 사용후핵연료 특성별 맞춤형 안전관리**를 위한 **기술개발 로드맵 수립 및 이행**
 - ✓ 선진원자로 사용후핵연료 및 방폐물 처분시스템 개발 병행이 필요하며, 이를 위해 선진원자로 기원 방폐물 특성 분석과 처분 예비개념 개발 추진
 - ✓ 선진원자로 사용후핵연료 및 고준위 방폐물의 안전 처분을 위한 **처리 기술 개발** 추진
 - ✓ 다양한 농축도에 따른 선진원자로 **사용후핵연료(LEU+, HALEU)의 운반, 저장, 처분에 미치는 영향** 평가
 - ✓ 향후 개발될 **선진원자로의 연료** 관련, 중장기 차원에서 **자체 공급 방안**이 필요할 것이므로, 국내 **HALEU 대응 연료 자체 생산 옵션** 확보
- (정책 측면) **비경수형 선진원자로 사용후핵연료 처리의 국내 실증**을 위해 미국의 **장기동의 확보** 필요

05 총괄적 제언

- 원전 내 임시저장수조 포화 문제 해결을 통한 **원자력의 지속가능성 담보와 2050 탄소중립의 현실화**를 위해 부지내저장 이후 **관리 사업의 조속한 착수 추진 필요**
 - 사용후핵연료 관리에 관한 **특별법 제정 필요**
 - 국가 차원에서 **처리기술 확보**를 위해 **대형 핫셀 구축**을 포함한 **R&D 로드맵 수립 및 이행 필요**
 - 2024년 2월 원진위가 승인한 **고준위 방폐물 관리 R&D 로드맵**의 충실한 이행과 **최신 동향을 반영한 주기적 갱신 필요**
 - **원자력 지속가능성 담보**를 사용후핵연료 관리 **안전성 확보**와 함께 **경제적 효율성 고려도 필요**
- 개발 중인 **선진원자로의 경제성 및 수출경쟁력 확보**를 위해 **선진원자로 기원 방폐물 관리 기술 개발 병행 추진 필요**
 - 선진원자로 개발 단계부터 다양한 사용후핵연료 특성별 맞춤형 안전관리를 위한 **기술개발 로드맵 수립 및 이행 필요**
 - 비경수형 선진원자로 사용후핵연료 처리의 국내 실증을 위한 **미국의 장기동의 확보 필요**

감사합니다.
THANK YOU



사단
법인 한국원자력학회
KOREA NUCLEAR SOCIETY