

# 한국원자력학회 원자력이슈위원회 핵연료전문위원회

## 사용후핵연료 안전관리 분과(2분과) 보고서

- 목차 (Brief Report CONTENTS)
  - 00 핵심 요약 (Executive Summary)
  - 01 서문
  - 02 국내외 동향
  - 03 국내 현안 진단 및 대응 방안
  - 04 총괄적 제언

## 핵심 요약 (Executive Summary)

- 최근 2050 탄소중립과 에너지 안보를 위한 현실적인 방안으로 원자력의 역할이 강조되면서, 전세계적으로 원전 활용이 확대되고 있고 소형모듈원전(SMR: Small Modular Reactor) 등 선진원자로 개발도 활발해지고 있음
- 지속가능한 원자력 활용을 위해서는 사용후핵연료 관리체계\* 확보가 전제되어야 하며, 이는 녹색분류체계\*에서도 요구하는 바임
  - \* 사용후핵연료 관리 단계는 발생 후 임시저장, 중간저장, 처리-처리후 처분 또는 직접처분 등으로 이루어짐
  - \*\* EU 녹색분류체계(Taxonomy): 녹색에너지 인정 조건의 하나로, 늦어도 2050년부터 고준위폐기물 처분을 시작하기 위한 공신력 있는 계획이 있어야 한다고 제시
  - 우리나라의 녹색분류체계: 녹색에너지 인정 조건의 하나로, 고준위폐기물 처분 계획 법제화 제시
- 스웨덴·프랑스·스위스 등은 고준위방폐물 처분부지를 선정하는 등 사용후핵연료 관리체계 완성을 위해 노력하고 있음
  - 핀란드는 2025년 운영 착수를 목표로 고준위방폐물 처분시설 시범 운영에 들어가는 등 운반·저장부터 처분까지 사용후핵연료 관리체계 완성을 목전에 두고 있음
  - 선진원자로 개발과 함께 선진원자로 기원 방사성폐기물 관리 방안 개발도 병행 중임
- 우리나라는 원전 내 임시저장시설 포화가 임박했으나, 이후 관리단계를 위한 활동이 지지부진하며, 사용후핵연료 분야 투자도 저조함
  - 국내 사용후핵연료 임시저장시설 저장공간 포화가 임박해 있어서, 사용후핵연료 관리를 위한 중간저장시설 및 처분시설 확보가 시급함
  - 사용후핵연료 관리기술 개발 분야 투자가 타 분야 대비 적고, 기술수준은 선도국의 60~80%, 전문인력은 약 200여명에 불과함
- 우리나라는 사용후핵연료 관리체계 완성을 위해 임시저장 이후 사용후핵연료 관리 사업의 조속한 착수가 필요함
  - 처분부지 선정 절차 및 유치지역 지원 등이 포함된 고준위방폐물 관리에 관한 특별법 시행
  - 고준위방폐물 관리 R&D 로드맵('24.2 원자력진흥위원회 승인)의 충실한 이행과 지속적인 갱신
  - 심층처분의 안전성, 경제성, 친환경성이 향상된 혁신기술 개발
  - 사용후핵연료 처리기술(대형 핫셀 구축 포함) 확보를 위한 R&D 로드맵 수립·이행 및 국내에서 사용후핵연료 처리 수행을 위한 미국의 장기동의 확보 추진
  - 전문인력의 양성 및 안정적 수급 방안 마련 필요

- 현재 개발중인 선진원자로의 경제성 및 수출경쟁력 확보를 위해 선진원자로 기원 사용후 핵연료 및 방사성폐기물을 효율적으로 관리하기 위한 폐기물 통합관리 기술을 확보하여야 함
  - 이를 위해 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

- 》 지속가능한 원자력발전은 사용후핵연료 관리가 전제되어야 함
- 》 사용후핵연료 관리 단계는 임시저장, 중간저장, 처리, 처분 등으로 이루어짐
- 》 사용후핵연료를 포함한 고준위방폐물 관리 기술 개발에 대한 투자는 타 분야에 비해 적고, 기술수준은 선도국의 60~80% 수준이며, 관련 전문인력은 약 200여명으로 수요에 비해 적음
- 》 운반저장은 규제 체계가 어느 정도 마련되어 있으나, 처리 및 처분은 규제 체계가 미흡하며 중간저장 및 최종처분시설 부지를 확보하지 못하고 있음

## 1. 원자력발전과 사용후핵연료 관리

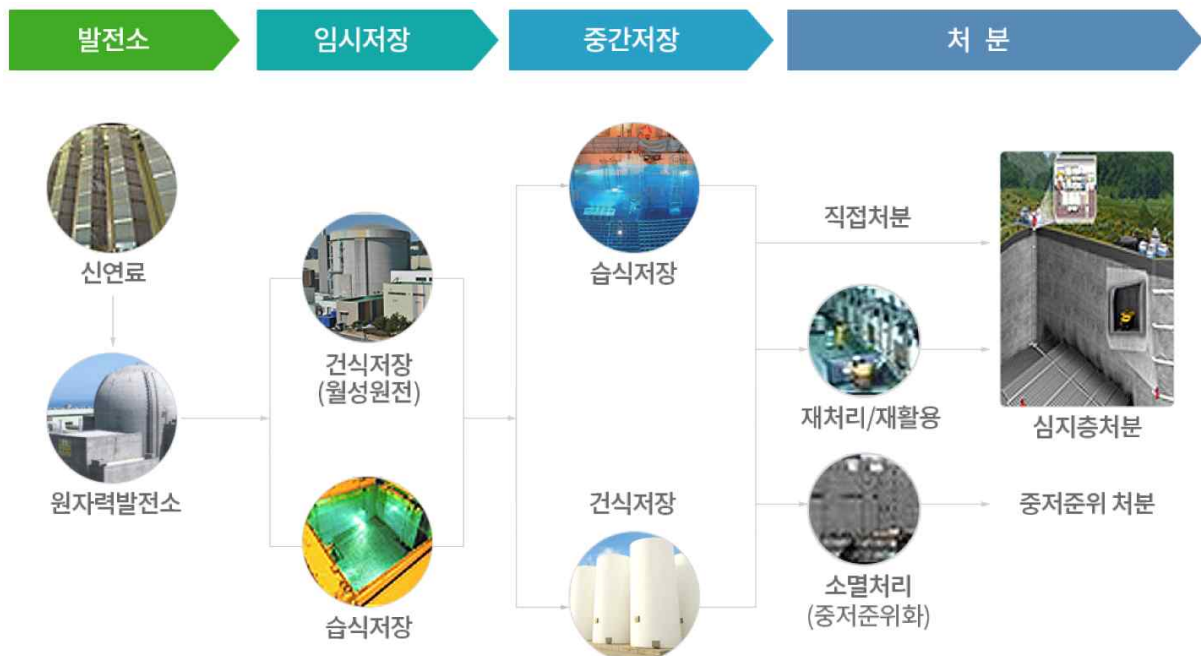
- 최근 2050 탄소중립과 에너지 안보를 위해 원자력발전이 주목받고 있음
  - 제28차 유엔기후변화협약 당사국 총회(COP28)에서 화석연료로부터 멀어지는 에너지 전환을 결의하면서, △재생에너지 3배 확대, △저감 장치 없는 석탄 발전의 단계적 감축, △원자력 및 탄소포집저장 등 저탄소 기술 가속화, △화석연료 보조금 단계적 폐지 등을 합의서에 포함함
  - 국제에너지기구(IEA)는 ‘2050 탄소중립’을 위해 원자력발전 유지와 확장을 로드맵에 포함<sup>1)</sup>
- 지속가능한 원자력발전은 사용후핵연료 관리가 전제되어야 함
  - 원전 사용후핵연료 저장수조 포화 시, 핵연료 교체가 불가능해 원전 가동이 중단됨
  - 원전의 지속적 이용을 위해서는 임시저장 이후 사용후핵연료 관리 단계가 정립돼 있어야 함
  - 국내·외 녹색분류체계에 따라서 원자력이 녹색에너지로 인정받기 위해서는, 사용후핵연료를 포함한 고준위방폐물 관리가 전제되어야 함

## 2. 사용후핵연료 관리 단계

- 원자력발전에 사용된 후 방출된 사용후핵연료는 높은 열과 방사선을 장시간 방출하기 때문에 특별관리를 해야 함
  - 우리나라는 경수로와 중수로에서 두 가지 유형\*의 사용후핵연료가 발생함
    - \* 우리나라 원자로는 월성 1~4호기를 제외한 나머지는 모두 경수로이며, 경수로는 저농축 우라늄을, 중수로는 천연우라늄을 핵연료로 사용함

1) IEA, 2023, Net Zero Roadmap - A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach 2023 Update.

- 사용후핵연료는 임시저장→중간저장→(재처리/재활용)→영구처분의 관리 단계를 거치며, 국가 정책에 따라 사용후핵연료 관리 형태와 경로가 결정됨



[그림 1] 사용후핵연료의 관리 단계(KORAD 홈페이지 자료)

- 임시저장은 원자력발전사업자가 원자로 관계시설인 부지내 저장시설(습식저장\*, 건식저장\*\*)에서 사용후핵연료를 저장, 관리하는 것을 의미함
- \* 습식저장은 사용후핵연료를 수조(水槽)에 넣어서 물로 붕괴열을 냉각하고 방사선을 차폐를 하는 방식으로 모든 원전은 습식 저장시설을 갖추고 있음
  - \*\* 건식저장은 사용후핵연료를 콘크리트나 금속용기에 넣고 공기로 열을 식히는 방법으로 국내의 경우 월성 원전에서 중수로 사용후핵연료 저장을 위해 사일로와 맥스터를 건설하여 운영 중임
- 중간저장은 사용후핵연료 최종처분(재처리/재활용 후 처분 또는 직접처분) 전까지 중장기적으로 (40년~80년) 저장·관리하는 것을 의미함
- 중간저장은 임시저장과 마찬가지로 습식저장 또는 건식저장이 가능함
  - 각 방식은 장단점이 있으나, 세계적으로 용량 확장과 장기 관리 측면에서 유리한 건식저장을 선택하는 추세임
- 재처리는 사용후핵연료를 물리적·화학적 방법으로 플루토늄 등 유용한 물질을 분리추출하여 핵연료로 재활용하는 것을 의미함
- 습식재처리(PUREX) 방식은 핵무기 원료인 순수 플루토늄을 회수할 수 있어서 핵확산 위험성이 있음
  - 상업 습식재처리 시설 보유국은 영국, 프랑스, 러시아, 중국, 인도, 일본 등임

- 처분(심층처분\*)은 사용후핵연료 또는 고준위방폐물을 지하 깊은 곳에 격납하여 인간과 환경으로부터 격리하고, 만일 방사성 핵종이 유출돼도 자연적인 핵종 이동 지연 및 희석을 통해 인간 생활환경으로 나오는 시점에는 자연방사능 수준이 되도록 하는 것을 의미함

\* 심층처분이란 방사성폐기물을 사람의 접근과 방사성핵종의 생태계 유입이 제한될 수 있도록 지하 깊은 곳의 안정한 지층구조에 처분하여 인간 생활권으로부터 영구히 격리하는 것임(원안위고시 제2021-21호)

- 사용후핵연료 특성 평가는 사용후핵연료의 관리 단계별(운반, 저장, 처리, 처분) 안전성과 인허가 획득을 위해 필요한 사용후핵연료의 기계·물리·화학적 특성을 평가하는 기술을 의미함

## 2. 사용후핵연료 관리 국내 수준<sup>2)</sup>

### 가. 재원 투자 현황

- 정부는 1997부터 2022까지 고준위방폐물 관리 기술개발에 1조 1,441억원을 투자함
  - 산업부는 운반·저장 분야를 중심으로, 과기정통부는 부피저감·독성저감 분야를 중심으로 투자함
  - 최근 5년간 산업부는 고준위방폐물 관리 분야 기술개발에 515억원을 투자하였는데, 이는 타 분야(신재생에너지 1.5조원, 전력 7,756억원, 자원 2,842억원, 원전 3,599억원) 대비 매우 적은 수준임

[표 1] 산업부와 과기정통부의 고준위방폐물 관리 기술개발 투자 현황<sup>2)</sup>

[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

- 2021년부터 과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 원자력안전위원회는 다부처 공동 예타 사업인 “사용후핵연료 저장·처분 안전성 확보를 위한 핵심기술개발사업”을 추진 중이며 2029년까지 총 4299.7억원을 투자할 예정임

2) 원자력진흥위원회, 고준위 방사성폐기물 R&D 로드맵, 2024.2.

## 나. 기술 현황

- 1997년부터 고준위방폐물 관리 기술을 개발하여, 현재 우리나라는 선도국 기술 수준의 60~80%에 도달함

[표 2] 기술 분야별 국내 기술 수준<sup>2)</sup>

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

- 운반·저장 분야의 경우, 일부 기술은 상용화 수준에 도달했으나, 처분 분야는 핵심기술 개발 단계, 부피·독성 저감 분야는 세부기술 확보 단계임

## 다. 인력 현황

- 고준위방폐물 관리 분야의 기술개발 인력은 2022년 말 현재 약 195명\*임
  - \* 한국원자력환경공단 38명, 한국원자력연구원 83명, 한국수력원자력 23명, 한국지질자원연구원 40명, 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단(iKSNF) 11명
- 「제2차 고준위 방폐물 관리 기본계획」 이행을 위해서는 관리시설 부지선정 착수 시점부터 연간 평균 약 300여명(최대 410명)이 필요할 것으로 예상됨
- 현재 고준위방폐물 관리 융합대학원(2022~2026 석·박사 65명 양성 계획)과 관련 전공학과(원자력공학, 기계공학, 지질과학, 환경공학, 토목공학, 언론정보학 등)를 통해 전문인력을 양성 중임

## 라. 제도 현황

- 사용후핵연료 저장시설과 중저준위 방폐물 처분시설에 대해서는 규제 기반이 구축되어 있으나, 고준위방폐물 처리·처분<sup>3)</sup>에 대한 규제 기반은 미비함
- 원자력 이용의 지속가능성을 담보하기 위해서는 사용후핵연료 중간저장 및 최종처분시설 확보가 필수적이며, 관리시설 부지선정을 위한 고준위방폐물 관리에 관한 특별법이 국회를 통과하여 올해 9월 시행을 앞두고 있음<sup>4)</sup>

3) 원안위 고시 “고준위방사성폐기물 심층처분시설에 관한 일반기준”(제2021-21호)만이 마련되어 있음

4) 산업통상부 보도자료 “「고준위 방폐물 관리 특별법」 국무회의 의결”. 2025.03.18.



- » 2050 탄소중립 달성, 에너지 안보를 위해 국내외적으로 원자력의 역할이 강조되고 있으며, 원자력이 녹색에너지원으로 인정받기 위한 기준으로 고준위방폐물의 처분 등이 제시됨
- » 많은 국가가 습식 및 건식 중간저장시설을 이미 운영하고 있고, 일부 국가는 고준위방폐물 처분 부지를 선정하였으며, 핀란드는 고준위방폐물 처분시설 운영을 앞두고 있는 등 운반저장부터 재처리 및 처분까지의 핵주기 완성이 가시화됨
- » 우리나라는 사용후핵연료 임시저장시설(저장수조) 포화가 임박했으나, 이후 관리단계를 위한 중간 저장시설 및 처분시설 부지선정조차 진행되지 않고 있으며, 처분부담 저하 및 차세대 원자력을 위한 핵주기 관리기술이 부재함

## 1. 국내외 동향

### 【원자력 이용 확대는 세계적 추세】

- 최근 탄소중립 시대 무탄소(Carbon-Free) 에너지원의 중요성과 러시아-우크라이나 전쟁 이후 대두된 에너지 안보가 중요해짐에 따라 원자력 역할이 커짐
- 탄소중립 실현을 위해 프랑스와 영국은 원전 확대를 추진 중임<sup>5)6)</sup>
  - 프랑스는 2021년 원전 의존도를 낮추겠다고 발표한 정책 기조를 뒤집고, 신규 원전 건설을 재개한다고 선언하여 2035년까지 신규 원전 6기를 건설하기로 함
  - 영국은 전력 생산에서 원전 비중을 15%에서 25%로 높이기로 하고, 2050년까지 최대 8기의 신규 원전을 건설할 계획임
- 미국은 기존 석탄화력발전소를 원자력발전소로 바꾸는 C2N (Coal-to-Nuclear) 프로젝트를 추진하는 등 원전 이용 확대 정책 추진 중임
  - 미국은 석탄발전소 조기 폐쇄 압박이 거세지는 가운데 석탄발전소와 입지 조건이 유사한 소형모듈원전(SMR: Small Modular Reactor)으로 대체 가능성을 검토 중임<sup>7)</sup>
  - 경수로 사용후핵연료를 재활용하여 선진원자로 연료로 공급(CURIE)\*하고, 선진원자로 사용후핵연료와 방폐물 안전관리(ONWARDS)를 위한 연구\*\*를 추진 중임(붙임 1)

\* CURIE: Converting UNF Radioisotopes Into Energy

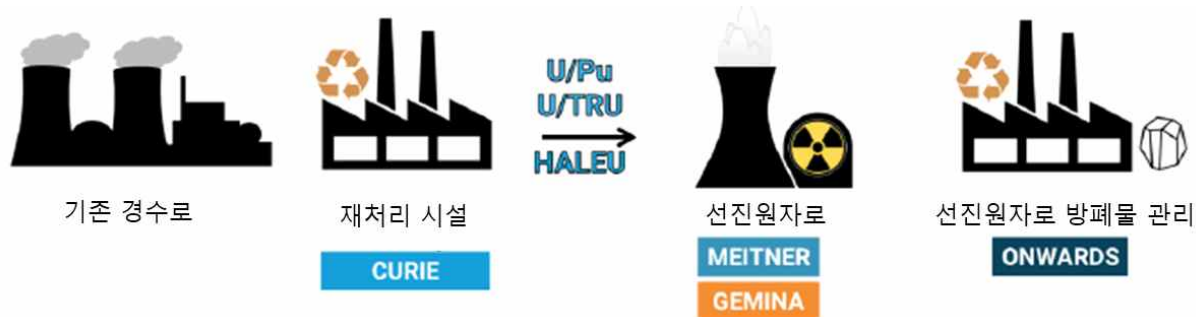
\*\* ONWARDS: Optimizing Nuclear Waste and Advanced Reactor Disposal Systems

5) 동아사이언스, 탈원전 버튼 누른 독일...프랑스·영국은 “원전 확대”, 2023.4.17.

6) 연합뉴스, 독일은 '스톱' 프랑스·영국은 '고'...원전 두고 엇갈리는 유럽, 2023.4.16.

7) 전기신문, 창간기획-글로벌 SMR 패권 경쟁...북미·유럽 C2N 프로젝트 노려라, 2023.5.16.





[그림 2] 미국의 선진원자로 연료공급(CURIE) 및 방폐물 관리기술 개발(ONWARDS) 프로그램  
출처: 미국 고등에너지연구국(ARPA-E)

○ 세계적으로 대형 원전(1000MWe급 이상 경수로) 이용 확대와 함께 SMR 기반의 경수형 및 非경수형(Non-LWR) 선진원자로(AR: Advanced Reactor)의 개발 및 배치 노력이 가속화되고 있음

– SMR 기반 AR 개발 및 배치(인허가 포함)에 대한 국제적 관심이 집중되고 있으며, 세계적으로 70종 이상의 다양한 AR\*이 개발되고 있음

\* 선진경수로(ALWR: Advanced Light Water Reactor), 소듐냉각고속로(SFR: Sodium-cooled Fast Reactor), 초고온가스로(VHTR: Very High Temperature Reactor), 용융염원자로(MSR: Molten Salt Reactor) 등

– 2018년 캐나다는 탄소중립을 위한 SMR 로드맵을 수립하고 SMR 개발·배치를 장려함

– 2020년 미국 NuScale사의 SMR이 규제기관인 NRC로부터 표준 설계 인가를 받음

– 2020년 영국은 SMR 개발 및 투자 계획을 발표함

○ 우리나라도 ‘2050 탄소중립’ 달성을 위해 원전 이용 확대 필요성을 강조하고 있으며, 「제11차 전력수급기본계획」 실무안에 원전 추가 도입을 고려함

– 실무안에는 2038년 발전량 중 무탄소 비중을 70%로 하는 것을 목표로, 3기의 APR1400급 신규 원전 건설 및 0.7GW 규모의 SMR 1기 실증 계획이 포함됨<sup>8)</sup>

### 【원자력의 지속 이용을 위해 사용후핵연료 관리체계 구축 중】

○ 미국, 독일, 캐나다 등 많은 국가들이 원전 부지에서 건식저장시설을 운영하고 있고, 스위스, 스웨덴 등은 중앙집중식 중간저장시설을 운영하고 있으며, 지속적으로 저장 핵심기술의 고도화를 추진 중임

○ 주요국은 원자력을 친환경 에너지로 분류하는 녹색분류체계를 운영 중임

– 유럽연합(EU)은 2023년부터 시행 중인 녹색분류체계(Green Taxonomy)에서, 원자력을 일정한 조건\* 만족을 전제로 친환경 에너지로 분류함<sup>9)</sup>

8) 산업통상자원부 보도자료, 제11차 전력수급기본계획 실무안 공개, 2024.5.31.

9) European Commission, 2022, Commission Delegated Regulation (EU) of 9.3.2022 amending Delegated Regulation (EU) 2021/2139 as regards economic activities in certain energy sectors and Delegated

\* 2025년까지 사고저항성핵연료(ATF; Accident Tolerant Fuel) 적용 등 최적가용기술(BAT; Best Available Technology) 적용, 2045년 이전 원전 건설허가, 2050년까지 고준위방폐물 처분시설을 운영하기 위한 세부계획 제시 등

- 윤석열 정부는 국정과제<sup>10)</sup>를 바탕으로 차세대 원전기술 확보, 방폐물관리 등을 중점 추진 중이고, 환경부는 원전을 친환경 경제활동으로 규정한 한국형녹색분류체계(K-택소노미)\*를 2023년 1월 1일부터 시행 중<sup>11)</sup>

\* 원전을 친환경 경제활동으로 규정하기 위한 인정 기준으로 고준위방폐물 처분시설의 조속한 확보를 담보하는 법률제정, 2031년 ATF 도입 등 제시

○ 선도국은 사용후핵연료 및 고준위방폐물 처분시설 부지를 확보하였음(주요국의 사용후핵연료 관리 정책 현황은 붙임 2 참조)

- 핀란드는 1999년 고준위방폐물 처분시설 최종 후보부지로 선정한 올킬루오토(Olkiluoto) 부지에 대해 2015년 처분시설 건설 허가를 획득하고, 2021년 처분장 운영 허가를 신청하였으며, 2025년 12월 운영 허가 심사가 완료될 것으로 예상함<sup>12)</sup>

- 스웨덴은 SKB사가 1992년에 발표한 연구개발 실증 프로그램에 따라 1993년부터 처분부지 선정을 시작하여 2009년 최종 후보부지로 포스마크(Forsmark) 부지를 선정하였으며, 2022년 처분시설 건설 허가를 획득함

- 프랑스는 방사성폐기물관리연구법에 따른 15년간의 연구결과를 바탕으로, 고준위방폐물 처분 일정, 부지선정 원칙 등이 담긴 「방사성폐기물 등 관리계획법」\*을 제정하고, 2009년 심층처분 시설 부지(ZIRA)를 선정한 후 2023년 처분시설 건설 허가를 신청함

\* 동법에 따르면, 처분시설은 지하연구소시설이 위치한 지층에 한정하여 건설할 수 있어서, Bure 지하 연구시설 주변 약 250km<sup>2</sup> 구역을 대상으로 부지선정을 위한 조사를 수행함

- 스위스는 부문별 계획(Sectoral Plan)\*에 따라 2008년 처분부지 선정을 시작하여 2022년에 로르들리히 뢰게른(Nördlich Läger) 부지를 최종 후보부지로 선정하고, 현재 연방의회의 승인을 준비하고 있음

\* 부문별 계획은 지역과 환경에 중대한 영향을 미치는 사업을 확정하는 절차로 도시계획법과 관련이 있음

- 캐나다는 Adaptive Phased Management(APM)\* 과정을 적용하여 최종 처분 부지를 선정 중임. 처분시설 유치의향서를 제출한 22개 지역에 대해 2018년에 5개, 2020년에 2개 지역을 후보부지로 선별하는 등 부지조사 및 평가를 수행하였음. 2023년 최종 부지를 선정할 예정이었으나, Covid-19에 따른 팬데믹으로 지연되어 2024년 11월 온타리오주 이그나스(Ignace) 지역을 최종 후보부지로 선정함

\* APM은 대중과 전문가들의 대화를 통해 최선 방안과 우선순위를 정하여 적용하는 방식으로, 기술적 방법론과 관리시스템을 조합한 것임

Regulation (EU) 2021/2178 as regards specific public disclosures for those economic activities, Brussel.  
10) 국무조정실 국무총리비서실(2022.7.27), “120대 국정과제”

11) 환경부, 2022.12. 한국형 녹색분류체계 가이드라인(개정).

12) <https://stuk.fi/en/-/stralsakerhetscentralen-behover-mer-tid-for-att-bedoma-posivas-ansokan-om-drifttillstand>

- 우리나라는 「제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획」에 고준위 방폐장 부지선정에 관한 일정을 제시하였으며<sup>13)</sup>, 사업수행의 법적근거로서 고준위방폐물 관리에 관한 특별법을 제정함



[그림 3] 기본계획에 제시된 관리정책 로드맵

### 【선진원자로 사용후핵연료 관리체계 구축 필요성 제기】

- 국제원자력기구(IAEA)는 고연소도 및 장주기 운전을 지향하는 경수 및 비경수형 SMR에서 배출되는 다양한 사용후핵연료 및 폐기물의 안전관리와 고준위방폐물 인수기준 만족을 위한 기술개발 필요성을 강조함<sup>14)</sup>

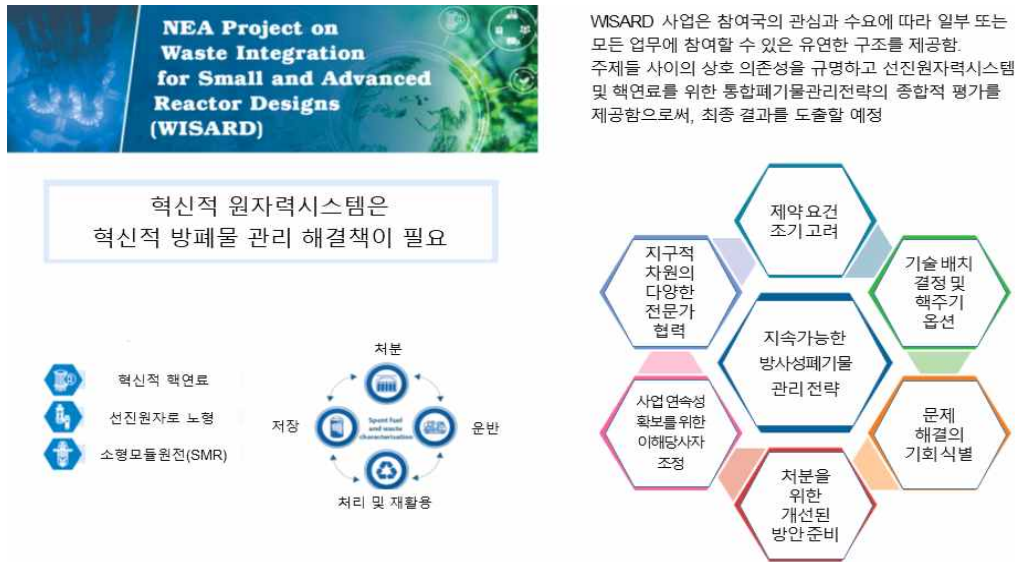


[그림 4] 다양한 SMR 개발을 위한 핵연료주기 기술 수요

13) 산업통상자원부, 2021.12. 제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획.

14) A.G. Espartero and C. Hill, IAEA Ongoing Activities on Challenges and Opportunities for SMRs Spent Fuel Management, OECD/NEA Workshop on the Management of Spent fuel, Radioactive Waste, and Decommissioning in SMRs/Advanced Reactor Technologies, Ottawa (Canada), 7-10 November 2022.

- 경제협력개발기구/원자력기구(OECD/NEA)도 SMR 및 선진원자로의 사용후핵연료 및 폐기물의 혁신적 관리기술 개발 필요성을 강조하면서, ‘SMR 및 선진원자로 폐기물통합관리(WISARD)’ 프로젝트를 준비 중임<sup>15)</sup>

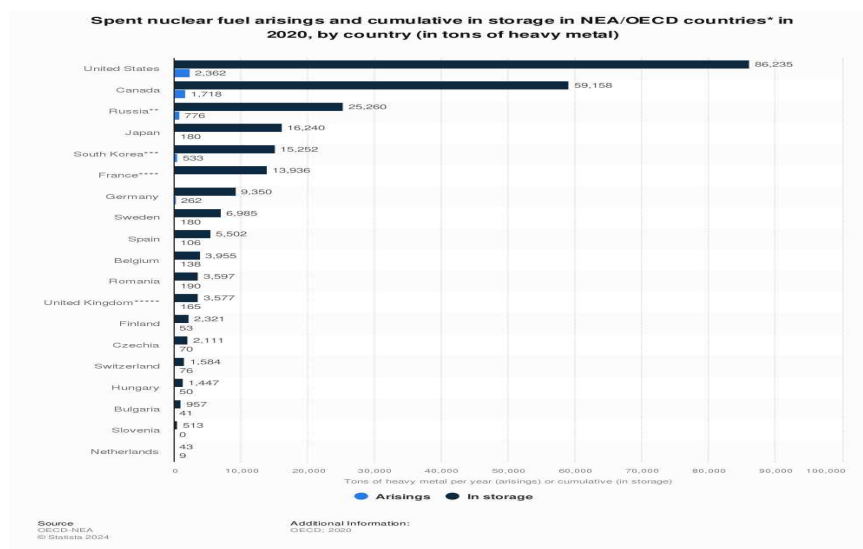


[그림 5] OECD/NEA의 WISARD 프로젝트 개요

## 2. 글로벌 이슈

### [사용후핵연료 발생량 증가]

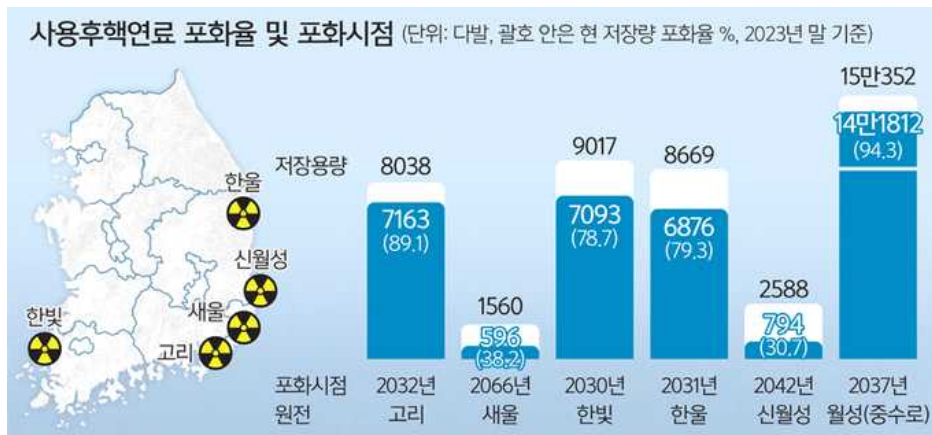
- '20년 기준 세계 각국의 사용후핵연료 발생량과 누적 저장량은 아래 그림<sup>16)</sup>과 같으며 발생된 사용후핵연료는 습식 또는 건식저장시설에 저장되어 있음



[그림 6] 2020년 기준 세계 각국의 사용후핵연료 발생량

15) OECD/NEA, NEA Project on Waste Integration for Small and Advanced Reactor Designs(WISARD), March 7, 2024.  
16) <https://www.statista.com/statistics/1391067/spent-nuclear-fuel-volume-worldwide-by-country/>

- 원자로에서 최초 방출된 사용후핵연료는 원전 임시저장시설에 보관되며 많은 국가가 추가 저장용량 확보를 위해 건식저장시설을 운영함
  - 건식저장시설을 조기 도입한 국가(미국, 독일 등)에서는 초기 인허가 기간의 만료로 인한 저장기간 연장을 추진함
  - 미국은 사용후핵연료 저장 공간 확보를 위해 중앙집중식 저장시설을 추진 중이지만, 지자체와 시민단체의 반대로 어려움을 겪고 있음
- 우리나라는 1978년부터 이어온 원전 이용에 따라 기존 원전 내 사용후핵연료 임시저장 시설 포화가 임박하여 원전의 계속 운전에 걸림돌이 되고 있음
  - 원전 부지 내 임시저장시설(습식저장시설)의 경우, 한빛원전은 2030년, 한울원전은 2031년, 고리원전은 2032년부터 포화할 것으로 전망됨<sup>17)</sup>



자료 : 갈 곳 없는 사용후핵연료...오늘의 '빛'이 미래세대엔 '빛'(세계일보, 2024)

[그림 7] 국내 사용후핵연료 포화율 및 포화시점

- 한국수력원자력(주)은 부지내 임시저장시설 공간 부족 문제 해결을 위해 「제2차 고준위 방사성 폐기물 관리 기본계획」에 따라 고리원전 등 경수로 원전부지에 적용할 수 있는 부지내 건식저장시설 마련 사업을 진행 중이나, 이후 중간저장, 처리, 처분 등에 대한 관리 방안은 불투명함
- 산업부는 「제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획」에 고준위방폐물 처분부지 선정 및 처분장 확보에 관한 일정을 제시하였으며<sup>18)</sup>, 사업수행의 법적 근거 마련을 위해 고준위 방사성폐기물 관리에 관한 특별법을 제정하였으며, 올 9월 시행을 앞두고 있음

👁 (시사점) 국내 사용후핵연료 발생량 증가로 저장 공간이 부족한 상황이 심화될 것으로 예상되며 지속가능하고 장기적인 사용후핵연료 관리를 위한 중간저장시설 및

17) 조선일보, 사용후 핵연료 포화 위기...‘고준위 특별법’에 속 타는 원전 업계, 2024.4.25.

18) 산업통상자원부, 제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획 (2021.12.)



## 처분시설 확보가 시급

### [사용후핵연료 종류 다양화]

- 현재 개발 중인 선진원자로의 지속가능성, 수용성 및 수출경쟁력을 제고하기 위해서는 선진원자로 사용후핵연료 및 방폐물의 관리 방안 제시가 필요함
  - 선진원자로 기원 사용후핵연료는 핵연료 구성 성분 및 설계, 방출연소도(discharge burnup) 등에 따라 기존 경수로 사용후핵연료와 달라지며, SMR은 경수로보다 중성자 누출이 더 클 것으로 예상되어 방폐물 양이 증가할 수 있음<sup>19)</sup>
  - IAEA는 고연소도/장주기 운전을 목표로 하는 선진원자로(경수/비경수)에서 발생하는 다양한 사용후핵연료 및 폐기물의 안전관리와 고준위방폐물 인수기준 만족을 위한 기술개발 필요성을 강조하고 있고<sup>20)</sup>, OECD/NEA도 선진원자로 사용후핵연료 및 폐기물의 혁신적 관리기술 개발 필요성을 강조하며 폐기물관리프로젝트(WISARD) 착수를 준비 중임<sup>21)</sup>
  - 미국은 SMR 기원 고준위방폐물 처분을 위해 「원자력폐기물정책수정법(Nuclear Waste Policy Amendments Act)」 개정을 고려하고 있으며<sup>22)</sup>, DOE 산하 고등에너지연구계획국(ARPA-E)은 SMR 등 선진원자로의 사용후핵연료 및 폐기물 안전관리를 위한 ONWARDS<sup>23)</sup> 프로그램을 발족시킴
  - 다양한 선진원자로 사용후핵연료는 화학적 반응성 때문에 적절한 처리(고형화/안정화) 없이 처분하기 어려울 수 있으므로 사용후핵연료 특성에 적합한 처리기술 및 처분기술 확보가 절실하나<sup>24)</sup>, 우리나라는 아직 선진원자로 개발 시 방폐물 관리 방안을 고려하지 않고 있음

☞ (시사점) 선진원자로가 개발됨에 따라 다양한 종류의 사용후핵연료 및 방폐물이 발생할 것으로 예상되면서 이들 관리 방안 마련이 필요

19) Kim, T.K., L. Boing, and B. Dixon, 2024, Nuclear waste attributes of near-term deployable small modular reactors, Nuclear Engineering and Technology 56, 1100-1107.

20) A.G. Espartero and C. Hill, IAEA Ongoing Activities on Challenges and Opportunities for SMRs Spent Fuel Management, OECD/NEA Workshop on the Management of Spent fuel, Radioactive Waste, and Decommissioning in SMRs/Advanced Reactor Technologies, Ottawa (Canada), 7-10 November 2022.

21) OECD/NEA, NEA Project on Waste Integration for Small and Advanced Reactor Designs(WISARD), March 7, 2024.

22) Park, S. and R.C. Ewing, 2023, US legal and regulatory framework for nuclear waste from present and future reactors and their fuel cycles, Annual Review of Environment and Resources 48, 713-736.

23) Optimizing Nuclear Waste and Advanced Reactor Disposal Systems

24) "Development of small modular reactors and advanced modular reactors-Implications for the management of higher activity wastes and spent fuel," CoRWM(Committee on Radioactive Waste Management), February 2024

## 국내 현안 진단 및 대응 방안

- 》 임박한 사용후핵연료 임시저장시설 포화 문제 해결을 통한 원자력의 지속가능성 담보와 2050 탄소중립의 현실화를 위해 임시저장 이후 관리 사업을 착수하여야 하며, 이를 위해 고준위폐기물 특별법에 근거한 관리시설 부지선정, 사용후핵연료 관리의 경제적 효율성 제고, 기술개발의 효율성 추구를 통한 관리 사업 일정의 유연성 확보 등이 필요함
- 》 개발하고 있는 선진원자로의 실현가능성, 수용성, 수출경쟁력 등을 확보하기 위해 선진원자로 기원 방사성폐기물 관리 기술 개발을 병행하여야 하며, 이를 위해 장기적인 기술로드맵 개발 수립 및 미국의 장기동의 확보 등이 필요함

### 1. 사용후핵연료 임시저장시설 포화 임박

#### 가. 현안 진단

- 정책적 차원에서 원전내 임시저장 이후 중간저장, 처분 등의 정부 계획은 있지만, 사용후핵연료에 대한 위험 인식 및 정부 정책에 대한 낮은 신뢰도 등으로 아직 고준위방폐물 관리 사업이 착수되지 못하고 있음
- 신규원전 도입국과 EUR Rev.E(APR1000) 인증 시 국내 사용후핵연료 관리 기술 수준 문의와 확인 요청이 있었으나 대응할 만한 전략 체계가 미흡함
  - 사우디, 체코 등 신규원전 도입국 및 폴스로이스 SMR 신규사업 추진사 등은 사용후핵연료 관리 기술(건전성/안전성 평가 능력) 보유 여부를 원전 입찰 평가 시 고려 중임
  - 러시아는 원전 기술의 우수성보다 핵연료주기 서비스 제공 역량으로 수출시장 지배를 위해 노력 중임
  - 폴스로이스 SMR사는 사용후핵연료 운반/저장 용기 및 관련 엔지니어링 서비스 제공 가능 여부를 타진함
- 기술적 차원에서 저장, 처리 및 처분에 필요한 제반 핵심 기술들이 개발되고 있으나, 대부분 실험실 또는 공학 규모로 국민 신뢰 확보를 위해서는 실규모에서 실증이 필요함
- 또한, 사용후핵연료 관리 부담을 최소화하고 원자력의 지속가능성을 담보하기 위해서는 안전성 확보와 함께 경제적 효율성에 대한 고려도 필요함
  - 기저 전력원으로서 원자력의 장점 중 하나는 타 발전원에 비해 낮은 발전단가\*임
  - \* 원자력발전단가에는 방사성폐기물 관리 비용이 포함되어 있으며, 이를 위해 정부가 방사성폐기물관리법에 따라 원전사업자인 한수원에 부과(경수로 1다발당 3.2억원, 중수로 1다발당



1300만원)하고 있음<sup>25)</sup>

### < 발전원별 정산 단가 >

(단위 : 원/KWh, '22년)

원자력	유연탄	무연탄	LNG	양 수	유 류	연료전지
52.5	156.7	202.1	239.3	277.6	310.0	184.5
IGCC	수 력	태양광	풍 력	해 양	바이오	
192.2	206.6	191.0	191.5	184.8	229.6	

출처 : 전력통계정보시스템(EP SIS)

- 2012년 기준 사용후핵연료 관리 비용은 약 53조원으로 예상\*되었으나, 처분시스템의 공학적방벽재인 구리, 철, 벤토나이트 등의 원자재 가격이 지속적으로 상승되는 추세<sup>26)</sup>를 감안할 때 사용후핵연료 관리 시 안전은 물론 비용효율적 측면도 고려되어야 함

\* 중간저장에 21조원, 처분에 32조원이 소요될 것으로 예상됨

### ○ 원자력발전이 녹색에너지원으로 인정받기 위한 조건 중 하나로 고준위방폐물의 안전한 처분이 제시되면서, 국내 처분 사업 일정에 영향을 줄 수 있는 변수가 많아짐

- 한국형녹색분류체계(K-Taxonomy)에 따르면 원자력발전이 녹색에너지원으로 인정받기 위한 조건 중 하나가 고준위 방폐장 확보를 담보하는 법률 제정이며, 최근 고준위방폐물 관리에 관한 특별법이 제정됨<sup>27)</sup>
- 2050 탄소중립\*, EU-Taxonomy\*\*, EU의 탄소국경조정세 도입\*\*\* 등 사용후핵연료 관리 일정에 영향을 줄 수 있는 외부 요인들이 있음

\* 원자력의 적극 활용이 2050 탄소중립 달성을 위한 가장 현실적인 방안이라는 의견 대두<sup>28)29)</sup>

\*\* EU-Taxonomy는 원자력이 녹색에너지로 인정받기 위한 조건 중 하나로 처분시설 운영 시기를 내세우고 있으며, 2022년 EU가 EU-Taxonomy를 중심으로 국제표준 ISO14030-3으로 공표하고<sup>30)</sup> 국제적으로 Taxonomy의 세계적 정합성이 필요하다는 인식을 갖고 논의하고 있어<sup>31)32)</sup> EU-Taxonomy가 경제적 영향을 미칠 가능성이 높아지고 있음

\*\*\* EU는 2050 탄소중립 달성을 위해 탄소국경조정제도 도입 예정(EU규정 2023/956)으로, EU 생산 제품과 수입 제품에 동등한 탄소가격을 보장하기 위해, 수입 제품의 탄소배출량(직접배출량+간접배출량)을 분석하여 탄소세를 부과할 계획<sup>33)34)</sup>임. 따라서 EU-Taxonomy를 만

25) 산업통상자원부 고시 제2022-11호, 방사성폐기물 관리비용 및 사용후핵연료관리부담금 등의 산정기준에 관한 규정, 2022.

26) 한국경제, 올들어 벌써 20% 올랐는데... "구리 가격 4배 더 뛴다", 2024.5.24.

27) 헤럴드경제, '고준위방사성폐기물 관리 특별법' 제정, 2025.2.27.

28) 키뉴스, 한국 등 20개국, "탄소중립 위해 원자력 발전량 2050년까지 3배로 늘려야" 선언, 2023.12.2.

29) 연합뉴스, 美 정부, 비싸고 늦어도 원전 되살리기... "2050년까지 3배로", 2024.6.8.

30) 환경부, 2022.12. 한국형 녹색분류체계 가이드라인.

31) OECD, 2020, Developing Sustainable Finance Definitions and Taxonomies: A Brief for Policy Makers, OECD Environment Directorate, Paris, France.

32) World Bank Group, 2020, Developing a National Green Taxonomy: A World Bank Guide, World Bank Group, Washington D.C, USA.

33) Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 Establishing

족하지 못하는 국가의 원자력 에너지원은 무탄소 에너지원에서 배제할 가능성이 존재함

- 고준위방폐물 심층처분 관련 ‘회수가능성’과 ‘가역성’의 정의와 이행 방안이 명확히 정리되지 않음
- 사용후핵연료의 운반·저장, 처리 및 처분 사업에 필요한 안전성평가 및 인허가 획득을 위해 사용후핵연료의 물리·핵적, 화학적, 기계·재료적 특성평가 자료가 필수적으로 확보되어야 하나 이를 위한 연구개발사업이 착수되지 못하고 있음

## 나. 해결방안 제안

### [법적 측면]

- 2차례에 걸친 공론화를 통한 국민 의견수렴 결과와 제1차 및 제2차 기본계획과 부합하도록, 부지 선정 절차 및 처분시설 유치지역 지원 사항 등이 포함된 고준위방폐물 관리에 관한 특별법을 근거로 관리시설 부지선정 프로세스 등을 조속히 추진함
  - 정부 신뢰도가 낮음\* 미국, 프랑스, 일본 등은 사용후핵연료 관리 정책을 법제화하여 정책 신뢰도 확보를 위해 노력함
    - \* OECD 정부 신뢰도 순위에 따르면 2021년 기준 정부 신뢰도는 미국 35%, 프랑스 41%, 일본 42%, 우리나라 45%임
  - 정부 신뢰도가 60% 이상인\* 핀란드, 스웨덴, 스위스, 캐나다 등은 법제화 없이 사용후핵연료 관리 정책을 추진함
    - \* OECD 정부 신뢰도 순위에 따르면 2021년 기준 정부 신뢰도는 핀란드 81%, 스웨덴 67%, 스위스 85%, 캐나다 60%임
  - 독일의 경우, 친원전 세력과 탈원전 세력이 대립하여 사용후핵연료 관리 정책이 계속 변하던 상황 타개를 위해 고준위방폐물 처분부지 선정에 관한 법을 제정하여 정권의 성격에 상관없이 일관적으로 정책을 추진 중임
  - 사용후핵연료 관리 사업은 일관성 있게 체계적으로 추진되어야 하므로 제정된 고준위방폐물 관리에 관한 특별법은 사용후핵연료 관리 사업의 토대가 될 것임

### [정책 측면]

- 원안위고시 제2024-13호 “고준위방사성폐기물 심층처분시설에 관한 일반기준”과 「제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획」에 명시된 ‘의사결정의 가역성’과 ‘고준위방폐물의 회수 가능성’에 대한 명확한 정의와 이행방안을 정립함

---

a Carbon Border Adjustment Mechanism

34) KBCSD(지속가능발전기업협의회), 2021.8. KBCSD CEO 업무 보고서: 한국형 녹색분류체계(K-Taxonomy) 수립 현황 및 주요 쟁점사항.

○ 경수로 사용후핵연료 처리기술의 실증을 위해서는 한미 원자력협정에 따른 미국의 장기동의\* 확보가 필요함

- 우리나라는 現 한미 원자력협정에서 핵물질 분리를 포함하는 사용후핵연료 처리 활동(파이로)\*\*에 대해 미국으로부터 장기 동의를 받지 못한 상황으로, 사용후핵연료를 이용해 핵물질 분리를 포함하는 처리기술 국내 실증을 위해 장기 동의가 필요

\* 처리기술\*\*의 국내 실증을 위한 시설 투자 등을 위해서는 미국의 장기동의 확보가 선행되어야 함

\*\* 국내에서 개발하고 있는 사용후핵연료 처리기술인 파이로 기술은 크게 핵물질 분리 전 단계(전처리 및 전해환원)과 분리 단계(전해정련 및 전해제련)으로 구분되는데, 2015년 한미 원자력협정 개정 시 미국으로부터 핵물질 분리 전 단계까지만 장기동의를 받았음

## [기술 측면]

○ 2024년 2월 원자력진흥위원회가 승인한 고준위방폐물 관리(운반·저장, 처분 및 부피·독성 저감) R&D 로드맵의 충실한 이행 및 주기적 갱신이 필요함



[그림 8] 2024년 2월 원진위가 승인한 고준위방폐물 R&D 로드맵 개념도 요약

- 각 관리 단계별 사용후핵연료 인도·인수 요건 수립과 그에 따른 특성평가 항목 도출 및 기술 개발 방안 제시\*, 사용후핵연료 관리분야와 연계한 특성평가 체계 구축 추진이 필요함

\* 규제기관과의 지속적인 협의를 통한 각 단계별 특성평가 항목 도출이 필요하며 각 항목별 기술 확립을 위한 기술수준 평가(공백기술, 시급기술, 고도화 기술)와 수요 산정이 필요함

\*\* 특성평가 체계 구축은 향후, 대단위 다목적 핫셀 구축 시 적용 가능하도록 설계가 필요함

- 이중목적용기(Dual-Purpose Canister) 활용 등 사용후핵연료 운반·저장을 유기적으로 연계한 관리 옵션을 제시해야 함

- 선진원자로 및 원전 이용 확대 시 증가가 예상되는 사용후핵연료 및 고준위방폐물을 하나의

처분시설에서 모두 처분할 수 있도록 부피, 열부하 저감을 위한 처리 기술개발 추진이 필요함

- 고준위방폐물 처분 선도국의 경험\* 활용과 기술개발의 효율성을 위해 실증 집중 연구개발 및 실증 병행 등으로 구분\*\*하여 추진하고, 연구용 지하연구시설(URL: Underground Research Laboratory)을 적극적으로 활용하여 처분 일정을 앞당기기 위한 노력이 필요함(연구용 URL 관련 상세 내용은 붙임3 참조)

- \* 스웨덴, 핀란드 등 처분 선도국은 '70년대부터 연구개발에 착수하여 지하연구시설에서의 실증도 대부분 완료함
- \*\* 처분부지의 지질매체도 심층처분시스템에 포함되므로 자국 내 지하연구시설에서의 실증은 반드시 필요함

### ○ 심층처분의 안전성, 경제성, 친환경성이 향상된 혁신기술 개발이 필요함

- 2024년 정부는 국가전략기술 특위가 심의한 12대 국가전략기술의 확보를 위해 2030년까지 달성해야 하는 구체적 임무를 명기한 국가전략기술 전략 로드맵을 발표하였으며, 해당 로드맵의 원자력 분야에 사용후핵연료 고효율 처분기술 개발이 제시되어 있음
- 처분면적 저감 및 경제성 향상과 직결된 고효율 처분시스템과 관련하여 타당성이 있다고 평가된 기술\*에 대해서는 공학규모 현장시험을 통한 성능검증이 필요함
- \* 구리 외부용기의 두께를 줄이기 위한 신기술 확보와 처분시설 설계온도 제한치 상향을 위한 지속적인 R&D 노력이 필요함

이슈	고준위폐기물 처분밀도 향상	
공학적 방벽재 특성 규명	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 처분면적 저감을 위한 완충재 장기 건전성 특성 규명 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 설계제한치를 25°C 상향(100→125)할 경우 처분면적 50% 감소</li> </ul> </li> </ul>	
공학적방벽재 제작 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 경제성 향상 위한 처분용기 제작기법 개발 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 저온분사코팅/3D프린팅은 재료비를 절감 (구리층 5cm → 1cm)</li> </ul> </li> </ul>	
고기능성 완충재 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 열-수리-역학-화학적 안전성이 향상된 고기능성 완충재 개발 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 열전도가 증가된 완충재</li> <li>- 안전성 향상을 위한 핵종 제거율 높은 완충재</li> </ul> </li> </ul>	
신개념 처분방식 적용기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 처분면적 저감을 위한 다층처분/심부시추공처분 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 다층처분 (핀란드: 단층처분)을 위해 고응력해석 기술 및 다층처분장 안전성평가 기술개발</li> <li>- 심부시추공처분을 위해 초심부환경 특성조사, 처분용기 정치·회수 기술개발</li> </ul> </li> </ul>	

[그림 9] 현재 개발 중인 처분시스템 효율성 제고 기술

### [재정/인력 측면]

- 처분시설의 인허가를 위해 처분시스템의 안전성 실증이 반드시 필요하므로 대규모 예산 투입이 필요한 연구용 지하연구시설을 빠른 시일 내에 확보하기 위해 방사성폐기물관리기금

및 원자력연구개발기금을 적극 활용해야 함

- 현재 후행핵주기 관련 전문인력이 부족한 바 전문인력의 양성 및 안정적 수급 방안 마련이 필요함

## 2. 선진원자로 핵연료주기 관리기술 부재

### 가. 현안 진단

- 선진원자로 역시 녹색에너지원으로 인정받기 위해서는 선진원자로에서 발생하는 고준위방폐물을 처분할 수 있는 관리체계 확보가 전제되어야 함<sup>35)</sup>
- 다양한 선진원자로 사용후핵연료는 물리적·화학적 특성이 기존 원전의 사용후핵연료와 다르므로, 선진원자로별 발생하는 사용후핵연료 특성에 대한 이해를 바탕으로 적절하게 처리해야 안전하게 관리(운반·저장, 처분)할 수 있음<sup>36)</sup>
  - 특히, SMR을 포함한 선진원자로의 수출경쟁력 제고\*를 위해서는 원전 도입국의 안전 처분 옵션 제공 차원에서 처리기술의 선제적 확보가 중요함

\* 일부 원전 도입국들은 원전 입찰 평가 과정에서 사용후핵연료 처리 서비스의 제공 역량을 문의

- 하지만, 우리나라는 현재 선진원자로 핵연료주기 관리 기술개발을 하지 않고 있음

### 나. 해결방안 제안

#### [기술 측면]

- 선진원자로 개발 단계부터 다양한 사용후핵연료 특성별 맞춤형 안전관리를 위한 기술개발 로드맵 수립 및 이행이 필요함
  - 선진원자로 사용후핵연료 및 방폐물 처분시스템 개발을 병행하는 것이 필요하며, 이를 위해 선진원자로 기원 방폐물 특성 분석과 처분 예비개념을 개발하여야 함
  - 선진원자로 사용후핵연료 및 고준위방폐물의 안전 처분을 위해 필요한 처리 기술 개발을 추진하여야 함
  - 다양한 농축도에 따른 선진원자로 사용후핵연료(LEU+, HALEU)의 운반, 저장, 처분에 미치는 영향 평가가 필요함
  - 향후 개발될 선진원자로의 연료는 주로 HALEU가 사용될 예정으로 중장기 차원에서 자체적인 공급(HALEU 대응) 방안이 필요할 것으로, 향후 HALEU 수급 불안\*에 대비하여 국내에서

35) European Commission, 2022, Commission Delegated Regulation (EU) of 9.3.2022 amending Delegated Regulation (EU) 2021/2139 as regards economic activities in certain energy sectors and Delegated Regulation (EU) 2021/2178 as regards specific public disclosures for those economic activities, Brussel.

36) "Development of small modular reactors and advanced modular reactors-Implications for the management of higher activity wastes and spent fuel," CoRWM(Committee on Radioactive Waste Management), February 2024

HALEU 대용 연료를 자체 생산할 수 있는 옵션(파이로) 확보가 필요함

\* 미국은 2024.5.13일 ‘러시아산 우라늄 및 농축우라늄 수입 금지법’을 제정한 바, 미국 대외정책상 향후 우리나라를 포함한 타국에게도 러시아로부터 농축우라늄 수입 제한을 요구할 가능성이 존재함

### [정책 측면]

○ 비경수형 선진원자로 사용후핵연료 처리의 국내 실증을 위한 미국의 장기동의 확보가 필요함

- 경수로 사용후핵연료뿐만 아니라 비경수형 사용후핵연료 안전 처분을 위한 처리기술 실증을 위해서도 한미 원자력협정에 따른 미국의 장기동의가 필요함
- 따라서 향후 미국과의 장기동의 협상 시 경수로 사용후핵연료와 함께 비경수형 사용후핵연료 처리를 위한 장기동의를 동시에 확보하는 전략을 수립하고 추진하여야 함



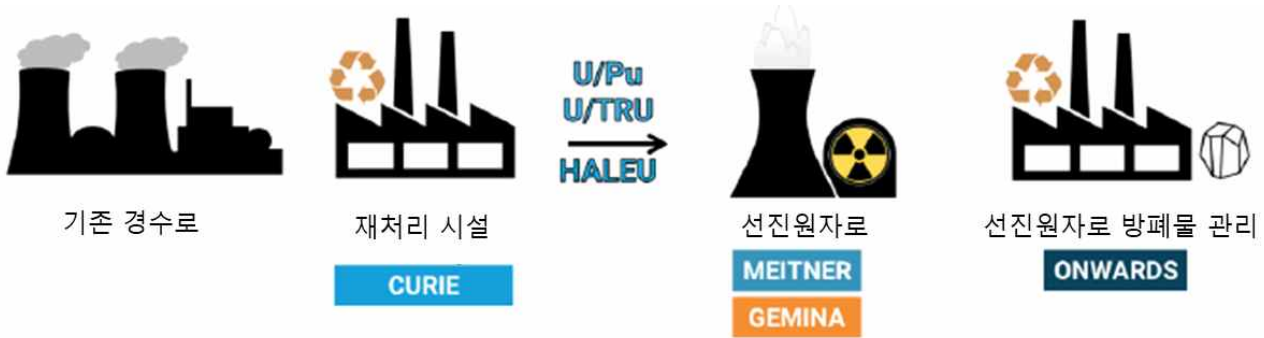
- 임박한 사용후핵연료 임시저장시설(저장수조) 포화 문제 해결을 통한 원자력의 지속가능성 담보와 2050 탄소중립의 현실화를 위해 임시저장 이후 관리 사업의 조속한 착수 추진이 필요함
  - 이를 위해 부지선정 절차, 재정 지원, 의견수렴 방법 등이 포함된 고준위폐기물 관리에 관한 특별법을 근거로 관리시설 부지선정 절차부터 시작해야 함
  - 국가 차원에서 처리기술 확보를 위한 대형 핫셀 구축을 포함한 R&D 로드맵 수립 및 이행과 함께 국내 사용후핵연료 처리 활동 추진을 위한 미국의 장기동의 확보 추진이 필요함
  - 2024년 2월 원자력진흥위원회가 승인한 고준위방폐물 관리(운반·저장, 처분 및 부파·독성 저감) R&D 로드맵의 충실한 이행 및 최신 동향을 반영한 주기적 갱신이 필요함
  - 심층처분의 안전성, 경제성, 친환경성이 향상된 혁신기술 개발이 필요함
  - 전문인력의 양성 및 안정적 수급 방안 마련이 필요함
- 개발하고 있는 선진원자로의 경제성 및 수출경쟁력 확보를 위해 선진원자로 기원 방사성폐기물 관리 기술 개발 병행 추진이 필요함
  - 이를 위해 선진원자로 개발 단계부터 다양한 사용후핵연료 특성별 맞춤형 안전관리를 위한 기술 개발 로드맵 수립 및 이행이 필요함
  - 비경수형 선진원자로 사용후핵연료 처리의 국내 실증을 위한 미국의 장기동의 확보가 필요함



## 붙임 1

## 미국의 CURIE 및 ONWARDS 프로그램 개요

- 미국 에너지부(DOE) 에너지고등연구계획국(ARPA-E)은 기존 경수로의 사용후핵연료를 재활용하여 선진원자로의 핵연료를 공급하는 CURIE(Converting UNF Radioisotopes Into Energy) 프로그램과 선진원자로의 사용후핵연료의 처분 부담 경감을 위한 ONWARDS (Optimizing Nuclear Waste and Advanced Reactor Disposal Systems) 프로그램을 착수함



### <ARPA-E의 핵연료주기 R&D 프로그램 개념>

- (CURIE, '22.9월 착수) 경수로 사용후핵연료를 처리(습식재처리, 파이로)하여 선진원자로 연료로 사용하는 기술개발에 중점 ⇨ 총 12개 기술, 3,800만 달러 투입

※ 습식재처리: 6개, 파이로: 4개, 분석(안전조치): 1개, 기술평가: 1개

목적	구분	개발기술	수행
경수로 SF를 처리하여 선진원자로 연료로 재사용하는 기술개발 <목표> ①연구처분 고준위방폐물 부피 감소(1/10 이상) ② 처분 비용 0.1\$/kWh 범위 유지 ③연 200톤 규모 시설로 선진원자로 연료비 1\$/kWh ④현장(in situ) 핵물질 모니터링 및 불확도 1% 이내 계량 예측 ⑤순수 플루토늄 분리 부재	습식 재처리	① 신속·정확한 방사능 분석기술: 습식재처리시설 안전조치 강화	GE Research
		② 질산수용액에서 U/TRU 동시화수 기술 ▪ 화수 U/TRU 연료물질 사용, 고준위방폐물 부피감용	Univ. of Alabama
		③ 소형 원심분리장치(PACER) 개발·생산: 습식재처리 공정 개선	ANL
		④ 물질계량 시험 플랫폼 개발·운영: 습식재처리 공정모니터링 개선	NuVision Engineering
		⑤ 새로운 습식재처리 공정(NuCycle)* * Curio社가 개발한 모듈식 통합 습식재처리공정으로 Pu 단독 화수 불가	Curio
		⑥ 습식재처리 발생 방사성 배기체 포집 기술(휘발성 핵종 99% 이상 포집): 습식재처리 공정 안전성 확보	Mainstream Engineering
	건식 파이로	① 단일 반응기에서 환원·정련공정 수행: 파이로 공정 단순화	Univ. of Utah
		② 고효율 전해환원 기술 (모니터링 센서, 차세대 양극재료, 셀 설계 최적화): 파이로 전해환원 공정 개선	ANL
		③ 전해환원 양극재료 (이리듐·루테튬 바이메탈) ▪ 파이로 전해환원 공정 개선	INL
		④ 모니터링 기술(염 밀도·수위 분석용 차압센서) ▪ 파이로 공정 모니터링 개선	Univ. of North Texas
	분석기술 (안전조치)	① 고해상도 방사선 분광기술 ▪ 처리공정 핵물질 개량 개선	Univ. of Colorado
	기술 평가	① 경수로 SF 재활용 옵션·경제성 평가, 시설설계 ▪ 경수로 SF 재활용에 대한 평가	EPRI

- (ONWARDS, '22.5월 착수) SMR을 포함한 선진원자료에서 발생하는 사용후핵연료 (방사성폐기물)에 대한 관리방안 개발에 중점 ⇨ 총 11개 기술, 3,600만 달러 투입
- ※ SF 처리: 6개, 방폐물 처리(고화체): 3개, 용기: 1개, 분석(안전조치): 1개



목적	구분	개발기술	연구주체
<p>선진원자료 발생 방폐물 및 사용후핵연료 관리(처리·처분) 기술개발 중점</p> <p>&lt;목표&gt;</p> <p>① 선진원자료의 폐기물 양이나 처분시설 면적을 10배 줄일 수 있는 획기적 기술개발·실증</p> <p>②고성능 선진원자료 폐기물 고화체 개발 등을 목표</p>	사용후핵연료 처리	① 염화물 휘발성(CBV)* 이용 선진원자료 SF 처리기술 * (CBV) Chloride-based Volatility ▸ 금속·산화물·용융염 선진원자료 발생 SF 처리 ▸ 99% 이상 U 회수 ⇨ 10~20배 처분부담 경감	TerraPower
		② TRISO 제조·처리기술* * MgO 매질 TRISO 제조 및 TRISO SF 처리 ▸ 10~20배 방폐물감소, >60% 핵주기 비용 절감	Stony Brook Univ.
		③ MSR 액체 염화물 SF 처리기술(TSCV)* * (TSCV) Two Step Chloride Volatility ▸ [1단계] HCl, [2단계] Cl <sub>2</sub> 를 이용한 U/TRU 휘발·분리	Brigham Young Univ.
		④ 금속 SF 처리 기술(TMZ) * (TMZ) Traveling Molten Zone ▸ TMZ 공정 이용 금속 SF에서 악티늄족 분리	INL
		⑤ 금속 SF 처리공정(파이로)* 시설 상업화 * Oklo AR 금속연료 생산 목적 ▸ 전해정련 자동화(산업화), 모의핵연료 통합공정 실증, 인허가 준비, 폐기물 처리계획 ▸ 향후 수년 내 파이로 시설 상용화 목표	Oklo
		⑥ SF 처리시설 배기체 포집 기술 ▸ 모듈식* 배기체 포집 시스템 개발 * 루테튬, H-3, 요오드, C-14, Kr/Xe, 미립자 포집 ▸ 법적 규제제한 충족, 포집매질 처리	Orano
	고화체 개발	① MSR 액체 염화물 SF 고화체 제조기술 ▸ 탈할로겐화 및 인산염고화체 제조(AI 도입) ▸ (고화체) 폐기물함유 6배 증가, 부피 80% 감소	Citrine Informatics
		② AR 발생 폐기물 cermet* 고화체 제조 기술 * (cermet) 세라믹과 금속분말을 혼합·소결시킨 매질 ▸ 다양한 폐기물(금속, 염, 탄소) cermet 고화체 제조 ▸ 100배 이상 처분공간 감소, 50% 비용절감	Rutgers Univ.
		③ MSR 액체 불화물 SF 고화체(MHP) 제조기술 * (MHP) Metal-Halide Perovskites ▸ 액체 불화물 SF MHP 고화체 제조	Rensselaer Polytechnic Institute
	용기 개발	① AR 발생 폐기물 처분을 위한 범용 캐니스터 ▸ 저장, 운송, 처분*을 하나로 수행 가능한 범용 캐니스터 개발 * 처분은 DBD(Deep Borehole) 고려	Deep Isolation
	분석기술(안전조치)	① SF 관리시설 안전조치 계량 시스템(RADMASS) * (RADMASS) Resonance Absorption Densitometry for Materials Assay Security Safeguards ▸ 불확도 1% 이하의 RADMASS 개발	GE Global Research

## 붙임 2

## 주요국의 사용후핵연료 관리 정책 현황

- 지금까지 핵보유국, 일본, 인도 등은 사용후핵연료의 재활용 정책을 추진 또는 지향해 왔으며, 이외 대다수 소규모 원전 운영 국가들은 사용후핵연료 관리 정책을 유보 또는 직접처분을 고려해 왔음
- 사용후핵연료 관리 정책은 사용후핵연료의 종류 및 발생량, 처분시설 부지 선정에 포함한 사회적 수용성, 지리적 조건, 사용후핵연료 관련 기술개발 수준 등 각 국의 상황에 따라 다를 수밖에 없음
- 전 세계 31개 원전 운영국 중 원전 10기 이상을 운영하는 국가는 한국을 포함하여 9개국이며, 이중 프랑스, 러시아, 중국, 일본, 인도는 재처리 정책을, 미국, 우크라이나, 캐나다는 직접처분 정책을 채택하고 있음

### < 직접처분 국가의 사용후핵연료 관리정책 동향 >

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1987년, 핵폐기물정책법(Nuclear Waste Policy Act)에 따라 직접처분을 근간으로 네바다 유카산(Yucca Mountain)을 유일한 처분시설로 선정하고 사업을 추진</li> <li>• 2009년, 오바마 정부는 유카산 처분시설 사업을 중단하고, 블루리본위원회(Blue Ribbon Commission)를 구성하여 동의기반접근법(consent-based approach)으로 새로운 부지선정 방안을 모색함.</li> <li>• 그러나 아직까지 처분시설 부지를 선정하지 못하고 있으며, 중앙집중식 사용후핵연료 중간저장시설 확보를 위한 노력들이 진행 중이나 이행되지 못하고 있음.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2010년, Oskarshamn 원전 부지 내 중간저장 시설 용량 확장</li> <li>• 2011년, 스웨덴핵연료폐기물관리회사(SKB), Forsmark 처분시설 건설 인허가 신청</li> <li>• 2019년, SKB, 인허가 관련 구리 용기 부식 문제 제기에 대한 답변서 환경부에 제출</li> <li>• 2022년, 처분시설 건설 인허가를 획득</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2012년, POSIVA, Olkiluoto 섬 처분시설 건설 인허가 신청</li> <li>• 2015년, Olkiluoto섬 처분시설(온칼로) 건설 중</li> <li>• 2019년, POSIVA, 지하특성화시설(ONKALO) 내 지하 420m에서 실제 규모 현장 시험 착수</li> <li>• 처분시설이 완공되어 2024년부터 시험 운영 중으로, 2026년부터 세계 최초로 처분시설 운영 예정</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2010년, 방폐물관리기구(NWMO)의 단계적 관리 방안에 따라 부지 선정 착수</li> <li>• 2017년, Ontario 주 19개소, Saskatchewan 주 3개소 부지 후보 중 Ontario 5개 후보 선정</li> <li>• 2024년 최종 후보부지를 선정하였으며, 2040~2045년 운영 시작 계획</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2011년, 원자력발전소 가동 중단 계획 발표</li> <li>• 2013년, 처분부지 선정법과 고준위방폐물 규제기관 설립법을 제정하고 처분부지 선정 착수</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2009년, 중앙집중식 사용후핵연료 중간저장시설 부지 공모</li> <li>• 2011년, Villar de Canas 지자체, 중앙집중식 저장시설 최종 유치지역으로 선정</li> <li>• 2018년, 기존 원자로의 설계수명기간인 2030년까지 원전 폐쇄 계획 발표</li> </ul>

○ 사용후핵연료 재활용 정책을 추진하였거나 추진 중인 국가는 아래의 표와 같음.

- 이들 국가는 既 확보한 상업용 습식 재처리기술을 기반으로 사용후핵연료 재활용 기술개발을 추진 중이며, 국가 차원에서 후행 핵연료주기 개발의 전략적 타당성 및 고준위방폐물 관리 효율성 증대를 위하여 기술개발을 추진 중임
- 원전 10기 미만의 대다수 소규모 원전 운영국가들은 미국의 핵비확산 정책, 사회적 여건, 자국의 기술개발 수준 등을 고려하여 사용후핵연료 관리 정책을 유보 또는 직접처분을 검토 중임

<재처리 국가들의 사용후핵연료 관리정책 동향>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 습식재처리 기반의 사용후핵연료 재활용 정책 추진 중</li> <li>• 방사성폐물관리기관(ANDRA), Bure 부지 주변 지역을 대상으로 부지 선정을 위한 조사에 착수하여 2009년 고준위방폐물 심층처분시설 부지(ZIRA)선정</li> <li>• 2017년, Bure 지하처분산업센터(CIGEO), 운영 및 처분에 대한 마스터 플랜 정부 제출 (2020년 건설 예정, 2025년 파일럿 단계, 2035년 운영 시작)</li> <li>• 2019년, 원자력위원회(CEA), 원형 고속로 건설 프로젝트(STRID) 중단 결정</li> <li>• 2023년, 처분시설 건설인가가 신청</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 습식재처리 기반의 사용후핵연료 재활용 정책 추진 중</li> <li>• 2014년, Mining &amp; Chemical Combine(MCC), Zheleznogorsk에 MOX 핵연료 제조시설 가동</li> <li>• 2014년, BN-800 고속로 건설 완공, 시운전 중</li> <li>• 2016년, MCC, Zheleznogorsk에 재처리 실증시설 및 건식저장시설 건설, 시운전 착수</li> <li>• 2016년, 국영원자력공사(Rosatom), 처분시설 건설 일정 발표 (2030년 부지 선정, 2035년 운영 시작)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 습식재처리 기반의 사용후핵연료 재활용 정책을 추진했으며, 최근 재활용 정책에 대해 재검토 진행 중</li> <li>• 2014년, 심지층처분 시설 건설 계획 백서 출간 (2025년 부지선정, 2040년 운영 시작)</li> <li>• 2017년, Sizewell B 원전 부지에 건식저장시설 운영 시작, 가스로 사용후핵연료 처분 발표</li> <li>• 2018년, Throp 습식재처리 시설 운영 종료 (2020년 Sellafield 습식재처리 시설 운영 종료)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 습식재처리 기반의 사용후핵연료 재활용 정책 추진 중</li> <li>• 2016년, 일본원자력연료주식회사(JNFL), 재처리 기관(NuRO) 신설</li> <li>• 2016년, 몬주 고속로 개발 중단 및 해체 결정</li> <li>• 2018년, 새로운 고속로 개발 로드맵 발표 (2050년 상용화 목표)</li> <li>• 2017년, 최종처분시설 부지 후보 지역을 부지적합성에 따라 분류한 과학적 특성지도를 발표하였고, 현재 홋카이도의 2개 지역에 대해 부지적합성에 대한 문헌조사를 마치고 개요조사를 준비 중이며, 사가현의 1개 지역에 대해 문헌조사 수행 중</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 습식재처리 기반의 사용후핵연료 재활용 정책 추진 중</li> <li>• 2015년, 중국핵공업총공사(CNNC), 서북부 간쑤성에 습식 재처리시설 건설 협약 체결 (2020년 건설 시작, 2030년 운영 시작)</li> <li>• 2015년, CNNC, 동부 장쑤성에 습식 재처리시설 건설 협약 체결 ('20년 건설 시작)</li> <li>• 2018년, Atomic energy law 초안 제출 (국가 핵연료주기 시스템 구축)</li> <li>• 2021년, CNNC, 처분시스템 성능 실증과 부지 적합성 평가를 위해 간쑤성 고비사막에 베이산 지하연구시설 건설 착수</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 습식재처리 기반의 사용후핵연료 재활용 정책 추진 중</li> <li>• 2014년, 러시아 협력 VVER 원자로 건설, 운영 중</li> <li>• 2017년, Kalpakkam에 고속로 핵연료 재처리시설 건설 시작</li> <li>• 2019년, 원형 고속증식로 건설 중 (2020년 입계 예상)</li> </ul>

- 연구용 지하연구시설(Generic URL\*) 개요 (\*Underground Research Laboratory)
  - (개념) 처분 지질환경과 유사한 조건에서 처분시스템의 성능과 안전성 등을 연구하기 위해 처분시설 부지 선정 전 건설하는 시설
  - 처분부지에 설치하여 인허가 자료를 생산하는 처분부지 내 지하연구시설(Site-specific URL)과는 구분되며, 방폐물 반입도 이루어지지 않음

○ 필요성

- (중요성) 고준위방폐물 처분시설 부지선정 전 기술개발과 처분시스템 안전성 사전 확인을 위한 필수시설
- (시급성) 고준위방폐물 관리 기본계획 상 로드맵을 준수하기 위해서는 연구용 URL의 구축과 적기 기술 확보 필요

< 관리정책 로드맵(제2차 고준위방폐물 관리 기본계획) >



- (관리일정의 유연성 확보) 연구용 URL에서 처분시스템의 성능 실증 연구를 조기 착수하고 집중 투자를 한다면 과학기술적으로 관리일정의 유연성 확보 가능

○ 추진 근거

- (법령) 연구기반구축 R&D사업으로서 방폐물 관리를 위한 연구개발사업(방사성폐기물 관리법 제9조) 및 원자력연구개발사업(원자력진흥법 제19조)에 해당
- (계획) 고준위방폐물 관리 기본계획('21.12) 및 R&D 기술로드맵('23.7), 원자력진흥종합계획('21.12), 원자력연구개발 5개년 계획('22.2) 등에 명시

○ 해외 연구용 URL 운영사례

- 해외 10여개 국에서 부지조사 및 처분기술 개발을 위한 연구시설 운영
- 스웨덴, 프랑스, 스위스 등 처분 분야 선도국들은 '70~'90년대부터 지하연구시설을 확보하여 심층처분 관련 연구를 수행

구 분	명 칭	국 가	암종(깊이)	운영기간	시설 활용
연구용 URL	화이트셀	캐나다	화강암(240~420m)	1984~2003	
	아세 광산	독일	암염(490~950m)	1965~1997	기존 광산 갱도
	토노 광산	일본	점토질암(130m)	1986~2004	기존 광산 갱도
	카마이시 광산		화강암(300~700m)	1988~1998	기존 광산 갱도
	미즈나미		화강암(현재 300~500m)	2004~2021	
	호로노베		점토질암(현재 500m)	2005~현재	
	아멜리	프랑스	암염	1986~1992	기존 광산 갱도
	Fanay-Augères		화강암	1980~1990	기존 광산 갱도
	Tournemire		점토질암(250m)	1990~현재	기존 철도터널 확장
	스트리파 광산	스웨덴	화강암(360~410m)	1976~1992	기존 광산 갱도
	아스포		섬록암(240~460m)	1995~현재	
	그림셀	스위스	화강암(450m)	1984~현재	기존 수력발전소 접근터널 확장
	몬테리		점토질암(400m)	1995~현재	기존 도로터널 확장
	Pre Salt Vault	미국	암염(200m)	1959~1962	기존 암염 광산 갱도
	G-터널		응회암(300m)	1979~1990	기존 무기시험 지하공동
	클라이맥스		화강암(420m)	1978~1983	기존 굴착공동 확장
	HADES	벨기에	점토질암(230m)	1984~현재	