

핵연료 주기기술 현안 진단과 해결방안 정책제언

한국원자력학회 원자력이슈위원회
핵연료전문위원회

목차

요약

01 서언

02 국내외 현황 및 시사점

03 현안진단 및 해결방안

04 결언

감수위원

現부산외국어대학교 총장	장 순 홍
前한국원자력환경공단 이사장	이 종 인
前한국원자력연구원 정책본부장	김 현 준

- 한국원자력학회는, 원자력이 무탄소 에너지원으로서 2050년 탄소중립 목표 달성 및 에너지 안보 강화를 위해 필수적인 에너지원임을 감안하여, 기존 가동 원전의 안전성 및 효율성 향상과 함께, △ 경수형/비경수형 소형모듈원자로(SMR)를 포함한 선진원자로용 핵연료 기술개발 및 사용후핵연료 안전관리 방안, △ 관련 기반 확보의 정책적/기술적 근거, △ 원자력의 대국민 수용성 제고를 위해 추진해야 할 내용을 담은 보고서를 발간함.
- 이를 위해 학회는 원자력이슈위원회 산하에 ‘핵연료전문위원회’를 구성·운영하였으며, 유관 학회(한국방사성폐기물학회, 한국핵물질관리학회, 한국핵정책학회) 및 기관(KAERI, KNF, KHNP, KORAD, KINS, KINAC)의 검토와 감수를 거쳐 보고서를 발간함.
 - 핵연료전문위원회에는 총괄위원회(위원장: 수석부회장)와 3개의 분과위원회(핵연료수급, 사용후핵연료 안전관리, 핵연료 기반조성·지원)로 구성되어 20명 이상의 전문가가 참여하였으며, 1년간의 심도있는 논의와 검토를 거쳐 본 보고서를 발간함.
 - 분과위원회별 보고서 중 중복/반복되는 내용을 통합조정하여 총괄보고서로 재구성함.
- 본 보고서는 국내외 원자력발전 현황에 대한 진단과 전망을 바탕으로 우리나라가 시급히 해결해야 할 7가지 핵연료주기 분야 쟁점과 해결 방안을 도출하여 게재하고 있음.
 - 선행 핵연료주기 분야 주요 쟁점: ‘핵연료 연료물질 안정 수급’과 ‘신형핵연료 개발 및 상용화 준비’
 - 후행 핵연료주기 분야 주요 쟁점: ‘사용후핵연료 안전관리’와 ‘사용후핵연료 다양화 대비’
 - 공통 쟁점: ‘기반시설 확충’, ‘규제제도 개선’ 및 ‘전문인력 양성’
- 7가지 주요 쟁점에 대한 현황 진단과 해결 방안을 요약하면 아래와 같음.
 - (핵연료 연료물질 안정 수급) ① 단기적으로는 공급처 다변화 및 우방국과 협력하여 안정적 공급처 확보, ② 장기적으로는 연료물질(농축우라늄)의 궁극적 자급을 위한 노력(기술개발, 한미 협정 개정 등) 전개
 - (신형핵연료 개발 및 상용화 준비) ① ATF(사고저항성핵연료)와 LEU+(농축도상향) 경수로 핵연료 조사후시험을 위해 국내 시설 선제적 보강 및 주민동의 확보, ② HALEU(고순도저농축우라늄) 핵연료 체계적 기술개발 및 상용화 준비 기술개발
 - (사용후핵연료 안전관리) ① 제정된 고준위방폐물 관리 특별법을 근거로 사회적 갈등을 최소화 하면서 영구처분장 부지 선정, ② 연구용 지하연구시설 적기 운영 등 기존 고준위방폐물 관리 기술개발 로드맵의 충실한 이행, ③ 심층처분의 안전성, 경제성, 친환경성이 향상된 혁신기술 개발
 - (다양한 사용후핵연료 발생 대비) ① 선진원자로 기술개발 초기부터 맞춤형 사용후핵연료 관리기술 개발, ②

사용후핵연료 처리기술 미국 장기동의 확보 및 2035년 협정 개정 준비

- (기반시설 확충) ① 단기적으로는 기존 시설(하나로, 조사재시험시설(IMEF), 조사후시험시설(PIEF)) 보강으로 국내 시험수요 대응, ② 중장기적으로는 신형핵연료 자격화(Qualification)를 위해 하나로의 핵연료/재료 전용 시험로로 전환 및 신규시험로 구축, ③ 핵연료 개발 및 사용후핵연료 특성 분석 위한 종합조사후시험시설 구축
- (규제제도 개선) ① 농축도상향(LEU+) 핵연료 인허가 효율화 및 핵물질 규제 면제의 현실화, ② 고준위방폐물 심층처분시설 단계적 허가(건설허가와 운영허가 분리) 도입
- (전문인력 양성) ① 산학연 공동으로 중장기 핵연료주기 전문인력 수급 계획 수립이행

주요 쟁점		현황 및 현안 진단	해결 방안
선행 핵연료 주기	핵연료 연료물질 안정 수급	<ul style="list-style-type: none"> • 라-우 전쟁 자원 안보 강화 등에 따라 원전 연료물질(농축우라늄) 수급 불안정성 증가 • 전량 수입에 의존하는 상황에서 단계별 안정 수급 전략 마련 시급 	<ul style="list-style-type: none"> • (단기) 공급처 다변화, 우방국 협력을 통한 안정적 공급처 확보 • (장기) 연료물질(농축우라늄) 자급을 위한 노력(기술개발, 한미 협정 개정 등) 전개
	신형핵연료 개발 및 상용화 준비	<ul style="list-style-type: none"> • 원전 안전성/경제성 향상을 위한 핵연료 성능향상 및 미래 수요 대비 필요 • ATF, LEU+ 핵연료 개발 추진 및 HALEU 핵연료 상용화 준비 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • ATF, LEU+ 핵연료의 국내 조사후시험을 위한 선제적 시설보강 및 주민동의 • HALEU 핵연료 체계적 기술개발 및 상용화 준비 기술개발
후행 핵연료 주기	사용후핵연료 안전관리	<ul style="list-style-type: none"> • 여야 합의가 어려웠으나 22대 국회에서 특별법 제정으로 사업 착수 가능 • 탄소중립 실현 및 원전 수출의 걸림돌로 작용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 제정된 특별법을 근거로 사회적 갈등을 최소화 하면서 영구처분장 부지 선정 • 연구용 지하연구시설 조기 운영 등 기존 고준위방폐물 관리 기술개발 로드맵 충실 이행 • 심층처분의 안전성, 경제성, 친환경성이 향상된 혁신기술 개발
	다양한 사용후핵연료 발생 대비	<ul style="list-style-type: none"> • 기존 원전과 다른 선진원자로(경수형 및 비경수형) 사용후핵연료 발생 예상 • 상용화까지 고려한 연료물질 수급 및 사용후핵연료 관리기술 대비 	<ul style="list-style-type: none"> • 선진원자로 기술개발 초기부터 맞춤형 사용후핵연료 관리기술 개발 • 사용후핵연료 처리기술 미국 장기동의 확보 및 2035년 협정 개정 준비
공동 인프라	기반시설 확충	<ul style="list-style-type: none"> • 핵연료(경수로, SFR, VHTR, MSR) 성능검증, 인허가, 상용화를 위한 핵연료/재료시험로와 조사시험시설 보강 및 신규시설 확보 • 핵연료 개발 및 사용후핵연료 특성 분석 위한 종합조사후시험시설 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • (단기) 기존 시설(하나로, IMEF, PIEF) 보강으로 국내 시험수요 대응 • (중장기) 하나로 핵연료/재료 전용 시험로로 전환 및 신규시험로 구축 • 핵연료 개발 및 사용후핵연료 특성 분석 위한 종합조사후시험시설 구축
	규제제도 개선	<ul style="list-style-type: none"> • 신형핵연료 개발 계획에 부합하는 인허가 관련 규제제도 개선 필요 • 고준위방폐물 심층처분시설 건설허가 현실화 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 농축도상향(LEU+) 핵연료 제조시설 인허가 효율화 및 핵물질 규제면제 현실화 • 고준위방폐물 심층처분시설 단계적 허가(건설허가와 운영허가 분리) 도입
	전문인력 양성	<ul style="list-style-type: none"> • 원전의 안전성과 효율성은 핵연료 및 사용후핵연료의 전문적인 관리에 기인 • 퇴직 인력증가와 연구자원 축소로 핵연료주기 전문인력 조기 양성 절실 	<ul style="list-style-type: none"> • 산학연 공동으로 중장기 핵연료주기 전문인력수급 계획 수립이행

- 》 2050 탄소중립 실현 및 에너지 안보 강화 수단으로 원자력이 국내·외적으로 재조명
 》 원자력의 지속적 이용을 위해 안정적인 핵연료 수급과 사용후핵연료 안전관리가 필요하며, 이를 위한
 현안 도출 및 해결책 마련 시급

○ 최근 2050 탄소중립과 에너지 안보를 위해 원자력발전이 주목받고 있음.

- 2023년 제28차 유엔기후변화협약 당사국 총회(COP28)에서 화석연료에서 멀어지는 전환을 결의하면서 ‘재생에너지 3배 확대, 석탄발전의 단계적 감축, 원자력 및 탄소포집저장 등 저탄소 기술 가속화, 화석연료 보조금의 단계적 폐지’ 등을 담은 결의문을 채택함.
- 국제에너지기구(IEA)는 2050 탄소중립을 위해 원자력발전의 보존과 확장을 로드맵에 포함함¹⁾

○ 핵연료 기술은 국가 원전산업 경쟁력을 좌우하는 핵심 요소임.

- 원전 안전성과 효율성이 강조되는 현 상황을 고려하면, 우리의 핵연료 기술*과 핵연료(농축 우라늄) 수급 역량**이 더욱 중요해지고 있음.

* 대형 원전 및 소형모듈원자로(SMR)에 필요한 사고저항성핵연료(ATF), 농축도 상향 LEU+ 핵연료를 포함해 고연소도 핵연료의 상용화를 통한 원전 경제성 제고 및 사용후핵연료 배출량 저감 등 국내외 원전 산업의 핵심 기술 현안 중 상당 부분이 핵연료 기술 관련 현안임.

** 러-우 전쟁 이후 글로벌 공급 불확실성 증가로 전쟁 전 약 60\$/SWU였던 우라늄 농축서비스 가격이 현재는 170\$/SWU로 2년 만에 3배 가까이 급등함. 정광-변환-농축을 아우르는 핵연료 수급 전 과정을 해외에 의존하는 우리나라는 핵연료(농축우라늄) 수급 안정화를 위한 중장기적 국가 전략 수립이 필요함.

○ 지속가능한 원자력발전은 사용후핵연료 관리가 전제되어야 함.

- 원전부지 내 저장시설이 포화하면 핵연료 교체가 불가능해져 원전 가동이 중단됨.
- 원전부지 내 저장 이후 관리 단계가 마련되어, 사용후핵연료가 순차적으로 원활하게 관리되어야 원전의 지속적 이용이 가능함.
- 한국 및 유럽의 개정된 녹색분류체계에서도 사용후핵연료 포함 고준위방폐물의 안전관리 체계 마련을 ‘원자력을 녹색에너지로 인정’하기 위한 전제조건 중 하나로 제시하고 있음.

○ 본 보고서는 우리나라 원자력 산업이 직면한 핵연료 수급 및 사용후핵연료 관리 현황을 진단하고 주요 쟁점과 그 해결 방안을 도출하였음.

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

국내·외 현황 및 시사점

- » 국내·외 원자력발전 이용 확대를 위해 러-우 전쟁 등 지정학적 요인으로 인한 핵연료 수급의 불안정성을 해소하고 미래 수요 신연료 개발 및 상용화를 위한 준비가 필요
- » 고준위방폐물 관리 특별법 제정 및 저장/처분시설 확보와 더불어 핵연료주기 전반에 걸쳐 필요한 시설·인력·제도 등 국가 인프라의 선제적 확충 및 개선이 절실

1. 원자력발전 현황 및 전망

- 전 세계적으로 운영 중인 원전은 415기(373GWe)로 세계 전력 생산의 약 9%를 담당하고 있음.²⁾ 2030년 가동 원전은 433기(444GWe)까지 증가할 것으로 전망됨.³⁾
- 신규 원전 수요를 포함해 세계 원전산업의 중심이 점차 북미·유럽 지역에서 한·중·일이 속한 아시아 지역으로 변화할 것으로 전망됨.
- 국제에너지기구(IEA)는 세계적인 전력수요 증대, 청정에너지에 대한 투자 증대, 열 공급에 있어 탄소배출 억제 추세, 저탄소 수소에 대한 수요 증가 등은 향후 글로벌 원전 시장 확대에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 예상함.⁴⁾
- 세계적으로 대형(1000MWe 이상) 원전(경수로) 이용 확대와 함께 SMR 형태의 경수형 및 비경수형(Non-LWR) 선진원자로(Advanced Reactor)* 개발 및 배치 노력이 가속화되고 있음.
 - 세계적으로 약 80종 이상의 경수형 또는 비경수형 SMR 개발이 진행 중임('24년 기준).⁵⁾
- * 선진경수로(ALWR: Advanced Light Water Reactor), 소듐냉각고속로(SFR: Sodium-cooled Fast Reactor), 초고온가스로(VHTR: Very High Temperature Reactor), 용융염원자로(MSR: Molten Salt Reactor) 등
- 비경수형 SMR은 노심을 작게 만들어 효율을 높이고, 경제성 제고를 위해 일부는 재순환 연료(Pu, TRU 등) 또는 농축도 20% 미만의 HALEU 핵연료를 사용할 것으로 예상됨.
- 우리나라도 2050 탄소중립 목표 달성을 위해 원전 이용 확대 필요성을 강조하고 있으며, 제11차 전력수급기본계획에 원전 추가 도입 계획을 포함함.

2) IAEA, PRIS (Power Reactor Information System) - Current Status (2024.08)

3) WNA, The Nuclear Fuel Report 2023-2040 (2023.09)

4) IEA, Nuclear Power and Secure Energy Transitions: From today's challenges to tomorrow's clean energy systems, pp. 30~33 (2022)

5) IAEA, Small Modular Reactors - Catalogue 2024 (2024)

- 실무안은 2038년 발전량 중 무탄소 전원 비중 70%를 목표로 설정하였으며, 신규 원전(APR1400) 3기 건설과 SMR(0.7GW 규모) 1기 실증 계획을 포함하고 있었으나,⁶⁾ 2024년 4월21일 확정된 제11차 전력수급기본계획에는 신규 원전 2기와 SMR 1기가 건설되며 3.1GW는 유보되어 제12차 전기본에서 확정될 전망이다⁷⁾.

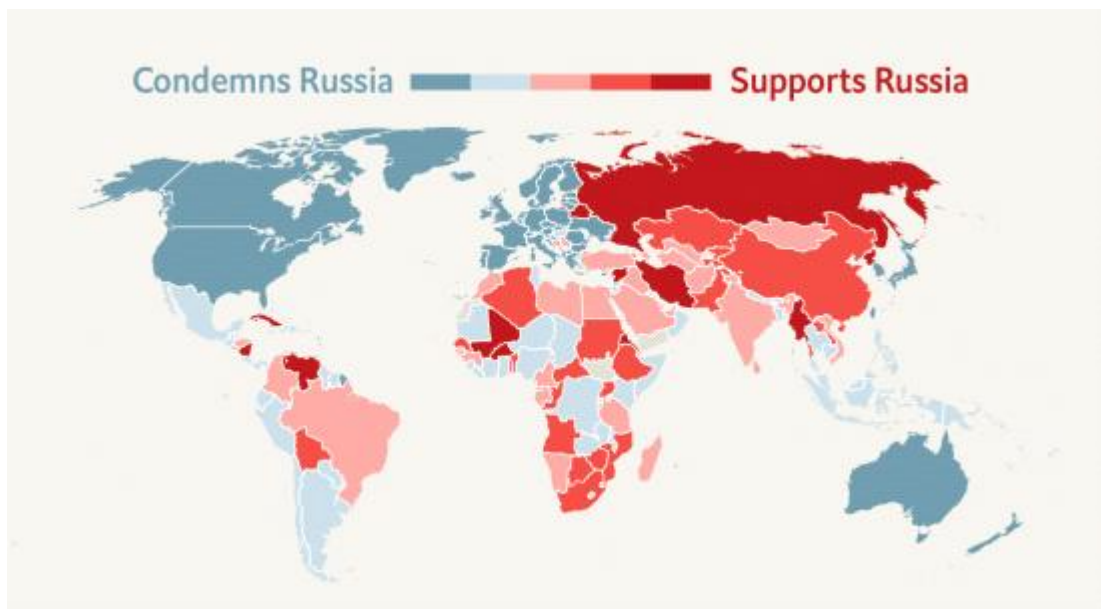
○ 유럽연합(EU)은 2022년 녹색분류체계(Green Taxonomy)를 개정하여 2023년부터 시행하고 있으며, 원자력발전을 조건부* 친환경 에너지로 분류함.⁸⁾

* 2025년까지 사고저항성핵연료(ATF, Accident Tolerant Fuel) 적용 등 최적가용기술(BAT, Best Available Technology) 적용, 2045년 이전 원전 건설허가, 2050년까지 고준위방폐물 처분시설 운영을 위한 세부 계획 제시 등

2 핵연료 수급 현황 및 시사점

[핵연료물질 수급]

○ 2022년 러시아의 우크라이나 침공 이후 미국 주도로 반러시아 국가들이 연합하여 러시아산 농축우라늄 의존도를 낮추려는 노력이 진행 중임.



[그림 1] 글로벌 경제 블록화⁹⁾

○ 러시아 의존도 감축 기조와 현재 계획된 개발·증설 계획에 따르면, 2040년까지 서구권의 정광·변환·농축 수요 대비 공급 비율은 각각 80%, 80%, 90% 수준으로, 공급 부족이 발생함.¹⁰⁾

6) 산업통상자원부 보도자료, 제11차 전력수급기본계획 실무안 공개 (2024.5.31.)

7) 산업통상자원부 보도참고자료, 제11차 전력수급기본계획 확정안 공개 (2025.4.21.)

8) European Commission, 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 (2022)

9) The Economist - "Who are Russia's Supporters?" (2023. 3. 31.)

10) UxC LLC, Uranium Market Outlook(2024.4Q), pp 53, Conversion Market Outlook(2023.12.), pp 7, Enrichment

○ 탈탄소를 위한 원전 확대 추세로 글로벌 핵연료 수요는 2040년까지 현재 대비 50% 증가하나, 정광·변환·농축 공급은 각각 20%, 20%, 30% 증가에 그칠 것으로 예상됨.

- 정광과 변환은 단기적인 공급 부족이 예상되지만, 설비와 탐사에 대한 투자가 확대되면서 공급 부족이 곧 해소될 것으로 예상됨.
- 농축은 수급이 양호한 편이지만, 공급의 40% 이상을 차지하는 러시아를 배제할 경우, 서구권 독자 공급망으로는 신규업체 진입에도 불구하고 2035년까지 공급 부족이 이어질 것으로 예상됨.

[표 1] 2023년 세계 농축시설 설비용량 및 점유율¹¹⁾

국가	회 사	총 설비용량 (천SWU/년)	점유율
프랑스	Orano	7,500	12%
영국	Urenco EU	13,300	22%
	Urenco USA	4,600	8%
러시아	TENEX	26,500	44%
중국	CNNC	8,700	14%
기타	JNFL 등	200	~1%
합 계	19.5	60,800	

- 영국*과 프랑스**는 서구권의 脫러시아 기조로 취약해진 농축 공급망 강화를 위해, 보유 농축시설 용량을 15~30% 확장할 계획이며, 2028~2030년부터 공급 확대가 가능할 것으로 전망됨.

* Urenco: 영국 Capenhurst 고순도저농축우라늄(HALEU) 생산설비(150k SWU) 구축, 네덜란드 Almelo(+750k SWU) 및 미국 뉴멕시코 시설(+700k SWU) 확장 계획 수립

** Orano: 프랑스 트리카스탱 지역 GB-II 농축시설 확장(+2,500k SWU) 계획 수립

- 신규/재진입 농축 서비스 업체로는 미국 Centrus와 일본 JNFL 등이 있으나, 시장 공급이 가능한 시기는 모두 2030년 이후로 전망되고 있음.

👁 (시사점) 러시아의 우크라이나 침공 이후 자원 안보의 중요성이 높아지고 원전 연료 물질(농축우라늄) 수급의 불확실성도 커지고 있으므로 이에 대한 대비가 필요함.

[신형핵연료 개발 및 상용화 준비]

○ 가동 원전의 안전성, 이용률과 경제성 동시 향상을 위해 사고저항성핵연료(ATF)와 우라늄 농축도를 높인(5% 미만 → 10% 미만) LEU+¹²⁾ 핵연료 상용화가 추진 중임.

Market Outlook(2023.4Q.), pp 7,

11) UxC LLC, Enrichment Market Outlook, pp. 48 (2024.2Q)

- 한전원자력연료(KNF)는 사고저항성핵연료(Cr 코팅 HANA-6 & LAS 소결체) 시범연료봉(2024.4 장전) 및 시범집합체(2025년 장전 예정) 연소시험 및 상용화를 추진 중임¹³⁾.
- 해외 주요 핵연료 공급사인 WEC(Cr코팅 ZIRLO 및 SiC 피복재, UN 소결체), Framatome(Cr코팅 M5, SiC/금속 복합재 등), GNF(FeCrAl 및 ARMOR 피복재 등)는 사고저항성핵연료 시범연료 연소시험을 수행하고(2019년 이후) 상용 인허가 신청을 할 예정(2026년 예정)임¹⁴⁾.
- 미국 원자력협회(NEI)는 2020년대 중반까지 농축도 5% 이상인 LEU+ 핵연료를 적용하여 연소도를 75GWD/MTU까지 늘리는 것을 추진 중임¹⁵⁾.

○ LEU+ 핵연료는 기존 농축 공급사를 통해 연료물질 수급이 가능할 것으로 전망됨.

- 우리나라는 2030년 전후로 상용화 시험을 위한 LEU+ 핵연료 수요가 발생하고, 2040년대 초반부터 본격적으로 상용 LEU+ 핵연료 수요가 발생할 것으로 예상됨.

○ HALEU¹⁶⁾ 핵연료는 연구용 원자로와 RI 생산 연구로를 포함해 4세대 비경수형 SMR과 우주 탐사용 원자로 배치를 위해 꼭 필요하여, 향후 수요가 급증할 것으로 전망됨.

- 미국 아이다호국립연구소(INL)는 HALEU 수요 예측 보고서¹⁷⁾를 통해, 비경수형 선진원자로인 소듐냉각고속로 Sodium과 고온가스로 Xe-100 배치 시나리오에 따라 필요한 HALEU(농축도 19.75% 기준) 양은 2035년 80MTU/y, 2050년 520MTU/y이며, 누적량은 2050년 기준 5,350 MTU에 이를 것으로 전망함.
- EU는 현재 HALEU를 주로 러시아와 미국에서 수입하지만, 러-우 전쟁 이후 HALEU의 전략적 비축, 공급망 위기관리, 장기계약 체결 등을 통해 對러시아 의존도를 낮추려 하고 있음. 아울러 비경수형 선진원자로 핵연료의 안정적 공급 방안으로 기존 사용후핵연료 재활용 및 재처리 기술을 적극 활용하려 하고 있음(ORANO: 재처리 후 MOX/TRU 공급, 영국: 잉여 Pu 처리 프로그램).

○ 제4세대 선진원자로 개발과 맞물려 기존 산화물핵연료와는 다른 금속핵연료, 피복입자 핵연료, 용융염핵연료 등 다양한 종류의 신형핵연료에 대한 수요 증가가 예상됨.

- 미국 DOE는 2.3억 달러 규모의 신규원자로 실증프로그램(ARDP)*을 신설함(2020.5)¹⁸⁾.

* TerraPower의 Sodium 소듐냉각고속로, X-energy의 Xe-100 고온가스로, Kairos Power의 KP-FHR 용융염 원자로 등을 선정하여 실증을 추진 중

👉 (시사점) 신형핵연료 적기 수급을 위해 기존 해외 핵연료 공급사와의 협력 강화뿐만 아니라 국내에서 신형핵연료 자체 개발 및 상용화 준비가 필요함.

12) Low Enriched Uranium +의 약자로, 우라늄 농축도 5~10%의 저농축우라늄을 가리킴.

13) 국내외 사고저항성 핵연료 개발 동향 및 상용화 추진 계획, 2023 원자력안전규제정보회의

14) <https://www.nrc.gov/reactors/power/atf.html>

15) NEI, Drive To Deploy ATF with Increased Enrichment and Higher Burnup (2023)

16) High-Assay Low-Enriched Uranium의 약자로 농축도 5~20%의 저농축우라늄을 가리킴.

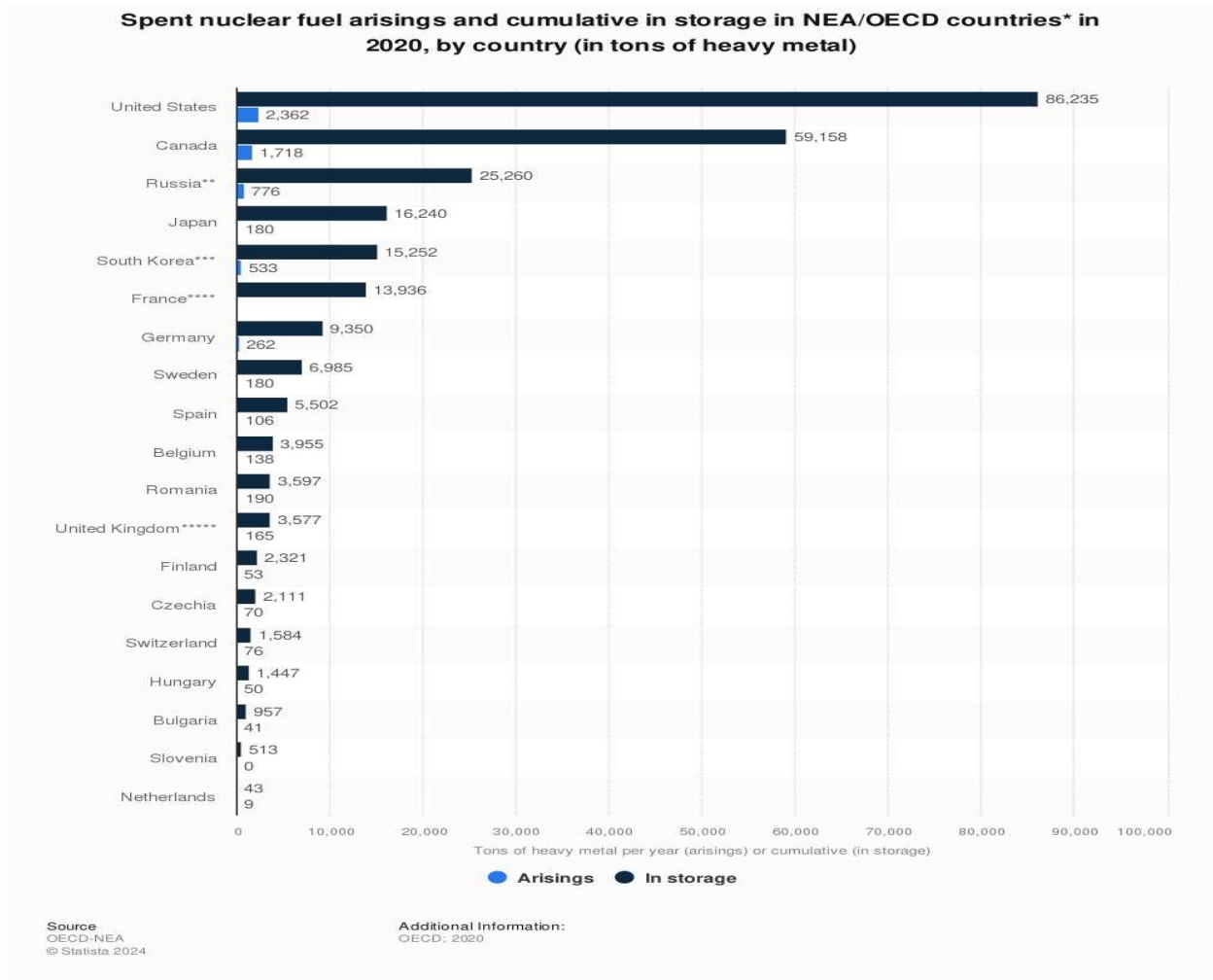
17) Brent Dixon et al., Estimated HALEU Requirements for Advanced Reactors to Support a Net-Zero Emissions Economy by 2050, INL/EXT-21-64913 (2021)

18) <https://www.energy.gov/ne/advanced-reactor-demonstration-program>

3 사용후핵연료 관리 현황 및 시사점

[사용후핵연료 안전관리]

○ 2020년 기준 세계 각국의 사용후핵연료 발생량과 누적 저장량은 아래 그림과 같음.



[그림 2] 2020년 기준 세계 각국의 사용후핵연료 발생량과 누적 저장량¹⁹⁾

○ 원자로에서 방출된 사용후핵연료는 원전 부지 내 저장시설에 일정 기간 보관함.

- 원자로에서 최초 방출된 사용후핵연료는 원전부지 내 저장시설(습식저장조)에 보관하며, 다수 국가가 추가 저장용량 확보를 위해 건식 저장시설을 운영 중임.
- 건식 저장시설을 조기 도입한 국가들(미국, 독일 등)은 최초 인허가 기간이 만료됨에 따라, 건식 저장시설 저장기간 연장을 추진함.
- 미국은 사용후핵연료 저장 공간 확보를 위해 중앙집중식 사용후핵연료 저장시설을 추진 중이나 지자체와 시민단체의 반대로 어려움을 겪고 있음.

19) <https://www.statista.com/statistics/1391067/spent-nuclear-fuel-volume-worldwide-by-country/>

○ 몇몇 국가의 고준위 방폐물 처분장 부지 선정, 핀란드의 고준위 방폐장 운영 현실화 등 운반·저장부터 재처리 및 처분까지의 핵연료주기 완성이 가시화되고 있음.

- 핀란드는 1999년 고준위방폐물 처분장 최종 후보부지로 선정한 올킬루오토(Olkiluoto)에 대해 2015년 처분장 건설 허가를 획득하고 2021년 처분장 운영 허가를 신청하였으며, 2025년 12월 운영 허가 심사가 완료될 것으로 예상함²⁰⁾.
- 스웨덴은 연구개발 실증프로그램에 따라 1993년부터 처분장 부지 선정을 시작하여 2009년 최종 후보부지로 포스마크(Forsmark) 부지를 선정하고, 2022년 건설을 승인받음.
- 프랑스는 「방사성폐기물관리연구법」에 따른 15년간 연구 결과를 바탕으로, 고준위 방폐물 처분 일정, 부지선정 원칙 등이 담긴 「방사성폐기물 등 관리계획법」*을 제정하고, 2009년 심층처분장 부지(ZIRA)를 선정한 후 2023년 처분장 건설 허가를 신청함.

* 처분장은 지하연구소가 위치하는 지층에 한정하여 건설할 수 있어 Bure 지하연구소 주변 약 250km² 구역을 대상으로 부지 선정을 위한 조사를 착수함.

- 스위스는 2022년에 노르틀리히 래게른(Nördlich Lägern) 부지를 최종 후보부지로 선정하고 현재 연방의회 승인을 기다리고 있으며, 캐나다는 당초 2023년 최종 부지를 선정할 예정이었으나 Covid-19 팬데믹으로 지연되어 2024년 11월 온타리오주 이그나스(Ignace) 지역을 최종 후보부지로 선정함.

○ 우리나라는 1978년부터 원전을 이용해 옴에 따라 기존 원전부지 내 사용후핵연료 저장시설 포화가 가시화되고 있어 원전의 계속 운전이 걸림돌이 되고 있음.

- 국내 원전의 계속 운전이 진행될 경우, 원전부지내 저장시설(습식저장조)의 포화 시기는 한빛 원전은 2030년, 한울 원전은 2031년, 고리 원전은 2032년이 될 것으로 예상됨²¹⁾.
- 한수원은 부지 내 저장 공간 부족 문제 해결을 위해 「고준위방폐물 관리 기본계획」에 따라 전체 경수로 원전 부지에 적용할 수 있는 부지 내 건식 저장시설을 마련하는 사업을 진행 중이나, 그 이후 중간저장, 처리, 처분 단계에 대한 관리 방안은 불투명한 상황임.
- 산업부는 「제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획」에 고준위방폐물 처분부지 선정 및 처분장 확보에 관한 일정을 제시하였으며²²⁾, 사업수행의 법적 근거 마련을 위해 특별법을 제정하려 노력하고 있으나, 21대 국회에서 특별법 제정이 무산되면서 중간저장, 처분 단계를 위한 사업 착수 시기가 불투명하게 됨.

👁 (시사점) 국내 사용후핵연료 발생량 및 누적 저장량 증가로 원전부지 내 저장 공간이 부족한 상황이 심화할 것으로 예상되며 원전의 안정적 계속 운영을 위해 사용후핵연료 관리를 위한 저장 및 처분시설 확보가 시급함.

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

21) 조선일보, 사용후 핵연료 포화 위기... '고준위 특별법'에 속 타는 원전 업계 (2024.4.25.)

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

[다양한 사용후핵연료 발생]

- 국제원자력기구(IAEA)는 고연소도 및 장주기 운전을 목표로 하는 경수형 및 비경수형 SMR에서 발생하는 다양한 사용후핵연료와 폐기물의 안전관리, 고준위방폐물 인수기준 만족을 위한 기술개발 필요성을 강조함.²³⁾



[그림 3] 다양한 SMR 개발을 위한 핵연료주기 기술 수요

- OECD/NEA도 SMR 및 선진원자로 사용후핵연료/폐기물의 혁신적 관리기술 개발 필요성을 강조하며, ‘SMR 및 선진원자로 폐기물통합관리(WISARD)’ 프로젝트를 준비 중임²⁴⁾.
- 현재 개발 중인 선진원자로의 지속가능성, 수용성 및 수출경쟁력을 제고하기 위해서는 선진원자로 사용후핵연료 및 방폐물에 대한 관리 방안 마련이 필요함.
 - 선진원자로 기원 사용후핵연료 및 방폐물은 핵연료 구성 성분, 핵연료 설계, 방출연소도(Discharge burnup), 원자로 구조재 측면에서 기존 경수로 사용후핵연료와 다르며, SMR은 기존 경수로보다 방출연소도가 낮아서 방폐물 양은 오히려 증가할 수도 있음²⁵⁾.
 - 미국의 경우, SMR 기원 고준위 방폐물 처분을 위해 「방사성폐기물정책수정법(Nuclear Waste Policy Amendments Act)」 개정 필요성이 제기되었으며,²⁶⁾ 고등에너지연구계획국(ARPA-E)은 SMR 등 선진원자로 사용후핵연료 및 폐기물 안전관리를 위한 ONWARDS²⁷⁾ 프로그램을 추진함.
 - 선진원자로 사용후핵연료는 화학적 반응성으로 적절한 처리(고형화/안정화) 없이는 처분하기 어려울 수 있으므로, 사용후핵연료 특성에 따른 적절한 처리·처분 기술 확보가 절실함²⁸⁾.

23) 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.

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

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

26) Park, S. and R.C. Ewing, 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 (2023)

27) Optimizing Nuclear Waste and Advanced Reactor Disposal Systems

☞ (시사점) 선진원자로 개발로 인해 다양한 종류의 새로운 사용후핵연료 및 방사성폐기물 발생이 예상됨에 따라 이들에 대한 관리 방안 마련이 필요함.

4. 기술개발 인프라 현황 및 시사점

[기반시설]

- (조사후시험시설) 가동원전 핵연료(ATF, LEU+) 및 신형핵연료(금속핵연료, 피복입자핵연료, 용융염핵연료) 개발 시 반드시 거쳐야 하는 조사후시험(Post Irradiation Examination, PIE)과 사용후핵연료 특성 평가는 고방사성 물질 취급이 가능한 핫셀 시험시설에서 수행되며, 원자력 선진국은 핵연료 원천기술 확보를 위해 다수의 핫셀 시험시설을 운영 중임.

[표 2] 해외 주요 핫셀 시험시설 현황

주요 국가	조사후시험시설 보유 기관명
미국	Idaho National Laboratory (INL)
	Oak Ridge National Laboratory (ORNL)
	Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)
캐나다	Canadian Nuclear Laboratories (CNL)
프랑스	LECA-STAR Hot Cell Facility, CEA
	Laboratory for Studies on Irradiated Fuel (LECI), CEA
스웨덴	Studsvik Nuclear AB
스위스	Paul Scherrer Institute (PSI)
벨기에	SCK-CEN
독일	EC, JRC Institute for Trans-uranium Elements (ITU)
영국	National Nuclear Laboratory (NNL)
노르웨이	Institute for Energy Technology (IFE)
러시아	Research Institute of Atomic Reactors (RIAR)
일본	JAEA Hot Laboratories(RFEF, WASTE, BECKY)
	Nippon Nuclear Fuel Development Co. (NFD)
중국	Hot Laboratory of Nuclear Power Institute of China (NPIC)
	Hot cell facilities, China Institute of Atomic Energy (CIAE)

- 우리나라는 한국원자력연구원에 조사후시험시설(PIEF)이 있으나, 1991년부터 운영되어 크게 노후화됨.
- (핵연료 및 재료 시험로) 현재 세계적으로 227기의 연구로가 운영 중²⁸⁾이나, 이 중 경수로 핵연료 시험을 할 수 있는 연구로(핵연료/재료시험로, Fuel & Material Testing Reactor)는 9기에 불과함.
 - 연구로 운영 목적은 교육, 기초연구, 동위원소 생산, 중성자빔 활용, 방사화 분석 등으로 다양하나,

28) "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.

29) IAEA Research Reactor Database (RRDB), <https://nucleus.iaea.org/rrdb/#/home>

핵연료/재료 시험은 원전환경과 유사하거나 가속 시험을 위해 높은 중성자 속이 필요하여 비교적 높은 출력의 연구로에서만 할 수 있음.

○ 최근까지 활발히 시험 프로그램을 운영했던 할덴 원자로(HBWR)의 폐로가 결정*된 이후 핵연료/재료 시험이 가능한 핵연료/재료시험로는 많지 않음.**

– 특히, 핵연료 인허가와 관련된 원전 환경 루프시설을 활용한 연소시험 기술, 시험 중 핵연료 특성을 측정하는 기술, Ramp/LOCA(Loss-Of-Coolant Accident)/RIA(Reactivity-Initiated Accident) 구현 시험 기술 등을 확보한 시설은 극히 제한적임.

* 핵연료/재료시험로 대부분은 1960년대에 건설되어 운영 중으로, 장기 운전에 따른 노후화 및 시설 개선 요구 비용이 급격히 상승하여 안정적 운영이 어려운 상황임.

** 지난 수십 년간 국제적으로 할덴 원자로에 대한 의존도가 상당히 높아 각국의 재료시험로 활용 기술은 상대적으로 미성숙하였음.

[표 3] 운영 중인 주요 핵연료/재료시험로의 특성 비교

연구로 명	출력 (MW)	운전착수	시험시설 특성 요약	비고
ATR (US)	250	1967	77개의 조사공, PWR 모사 loop 시설 보유	기장로 핵연료 LTA시험 수행
HFIR (US)	85	1965	31개의 조사공	다목적 활용, 주기길이 등 하나로와 유사
MITR (US)	6	1958 (MITR-I), 1974 (MITR-II)	3개의 노심 중앙부 시험 조사공, Loop 시설 운영	PWR loop가 있으나 활용성이 낮음
MARIA (Poland)	30	1974	다목적 연구로	2027년까지 현대화 프로그램 진행 예정
BR2 (Belgium)	100	1962	PWR 환경에서 정상 및 과도 환경 시험 수행 가능	현재 U-Si 관형 핵연료 시험에 활용 중
HFR (Netherland)	45	1961	후속 연구로(PALLAS) 건설 이후 폐로 예정	현재 진행 중인 시험 프로그램은 없음
MIR.M1 (Russia)	100	1966	Loop를 포함하여 다양한 시험에 적용 가능	현실적으로 유일하게 loop 시험 가능 (러-우 분쟁으로 불확실함)
LVR-15 (Czech)	10	1957	Loop 시설을 포함한 재료 시험 가능	핵물질이 포함된 시험은 불가능
HANARO	30	1995	7개의 노심 내부 조사공	Loop 시설 활용 어려움 (계장 시험 및 비정상 운전 조건 구현 추진 중)

○ 세계적으로 핵연료/재료시험로 신규 건설이 부진한 상황에서 프랑스는 2000년대부터 신규 재료시험로인 JHR(Jules Horowitz Reactor)을 건설 중*이나, 후쿠시마 사고로 인한 규제 강화 대응 및 원자로 설계 변경 등으로 건설 일정이 상당히 지연되고 있음**.

* 수조 원에 달하는 재료시험로 건설 비용을 국제 컨소시엄을 통해 충당할 예정, 컨소시엄 참여 시 자료 보안, 시험 우선권 확보, 시험 비용 절감 등의 혜택 부여

** 최근 평가된 최초 임계 목표 시기는 2032년으로 이후 원자로 특성 평가 기간을 고려하면 본격적인 시험 활용은 2030년대 중반 이후부터 가능할 것으로 예상³⁰⁾

○ 핵연료 인허가 자료 확보에 필수적인 핵연료/재료시험로는 과거에는 상호 우호적인 협력 원칙에 따라 운영됐으나, 최근 이런 기조가 바뀌면서 관련 기술 자체 확보가 중요해짐.

- 재료시험로 관련 기술 역량을 확보한 국가는 미국, 프랑스, 러시아 등으로 대부분 우리나라와 원전 수출 경쟁국임.
- 러-우 전쟁 상황에서 확인할 수 있듯이, 국제 제재로 원자력 협력이 무산될 가능성도 있음.

○ 오래된 핵연료/재료시험로의 연속적인 폐로 결정*에 의해 국제적으로 활용가능한 시험로가 부족해지면서, OECD/NEA를 중심으로 FIDES(Framework for Irradiation Experiments)**를 운영하고 있음.³¹⁾

- FIDES-II는 현재 8개 JEEP(Joint Experimental Program)을 운영 중이며, 참여국은 벨기에, 체코, 핀란드, 프랑스, 독일, 헝가리, 일본, 한국, 네덜란드, 스페인, 스웨덴, 스위스, 영국, 미국, EU임.
- FIDES-II 시험 결과는 참여국에 공유될 것으로 예상되나, 기술 보안이 중요한 핵연료 인허가 자료는 활용할 수 없음.

* 프랑스의 OSIRIS, 캐나다의 NRU, 일본의 JMTR, 노르웨이의 HBWR

** 2024년부터 2027년까지 FIDES-II 운영 예정(우리나라는 2024년부터 FIDES-II에 참여하고 있음)

○ (대형 가속기 설비 활용) 국내 대형가속기는 3기가 운영(3세대 원형가속기, 4세대 선형가속기, 양성자가속기) 중이며, 1기는 시범운영(중이온가속기), 2기는 구축(4세대 다목적방사광가속기, 중입자가속기) 중에 있음.

- 현재 운영 중인 대형가속기 중 기초/응용과학 분야에 파급효과가 큰 방사광가속기에 핵물질/RI를 활용한 핵주기 연구를 할 수 있는 빔라인이 없음.
- 다목적 방사광가속기 초기 구축 단계에서는 10개 빔라인 중 1기를 핵물질/RI 전용 빔라인으로 구축하려 했으나, 전용 빔라인 구축 여부는 미지수임.

○ 원자력 선진국은 대형가속기에 핵물질/RI 전용 빔라인을 구축하여 다양한 원자력 분야의 연구를 활발히 수행하고 있음.

- 세계적으로 희귀동위원소를 생성하고 있는 대형가속기는 2022년 기준 대략 5기가 존재하며, 2개는 구축 중임. 주로 캐나다, 프랑스, 유럽, 일본, 독일, 미국, 중국 등에 중이온가속기가 구축·운영 중에 있음.
- ISOL(Isotope Separation On-Line) 또는 IF(In-Flight Fragmentation) 방식으로 생성한 희귀동위원소로 다양한 분야의 연구를 수행하고 있음.

30) Jules Horowitz Reactor Project, JHR project Korean seminar (2024.04)

31) Second Framework for Irradiation Experiments (FIDES), www.oecd-neo.org/jcms/pl_70867/second-framework-for-irradiation-experiments-fides-ii

- 우리나라는 중이온가속기 역시 초기 구축 단계에서 원자력 분야 가속기 전문가 참여가 가능했으나, 응용연구 분야에서는 원자력 분야 전문가가 참여하지 못하고 있음.

[표 4] 해외 핵물질/RI 전용 빔라인 운영 현황

국가	방사광가속기	핵물질/RI 전용 빔라인	운영기관	비고
유럽연합	ESRF	ROBL(BM20)	HZDR	
독일	KARA	INE	KIT-INE	
		CAT-ACT		
프랑스	SOLEIS	MARS	CEA	최대 185 GBq 취급
일본	Spring-8	Actinide Science I	JAEA	
		Actinide Science II		
스위스	SLS	X05LA	PSI	
미국	SLAC	핵물질 및 RI 물질만을 위한 전용 빔라인은 없지만 별도의 차폐 용기를 활용하여 핵물질 및 RI 물질 측정 가능		
	ALS			
	APS			
영국	DLS			

- ☞ (시사점) 국내 핵연료 개발 및 사용후핵연료 특성 분석을 위해 종합조사후시험시설, 핵연료/재료시험로, 대형방사광가속기(원자력 전용 빔라인) 등의 연구 인프라 확보가 필요함.

[규제제도]

- (신형핵연료 규제) 원자력 선도국 규제기관은 신형핵연료 및 선진원자로에 대한 효율적이고 효과적인 인허가를 위해 요건 및 규제조직을 정비하고 국제협력을 활발히 진행 중임.
 - 미국의 경우, 「청정에너지를 위한 다목적 선진원자력 배치 가속화법」(ADVANCE Act of 2024)³²⁾ 이 상원을 통과(2024.6)하고 대통령 승인(2024.7)을 받음.
 - * 미국원자력규제위원회(NRC)의 미션을 조정하고 원자로 인허가 규정 정비와 사고저항성핵연료(ATF) 및 신형핵연료에 대한 인허가 능력 등 전문인력을 강화하는 내용 포함
 - 미국 NRC는 비경수로 포함 신형원자로 대상의 기술 범용(Technology-Inclusive) 위험정보 활용 및 성능 기반 규제규칙인 10CFR Part 53을 개발 중(2025년 완료 목표, SECY-23-0021)임.
 - 프랑스는 ASN(원자력안전청)과 IRSN(원자력안전방사선방호연구소)의 규제조직 통합을 결정하는 법률안이 상/하원 최종 승인(2024.4)을 받았고, 2025년 ASNR(원자력안전 및 방사선 방호청)을 출범시킬 예정임. EPR2 원전 건설 인허가(6~14개) 효율화도 추진 기대 중임³³⁾.
 - 캐나다 규제기관인 CNSC와 美 NRC는 GE Hitachi가 개발한 SMR(BWRX-300)과 피복입자 핵연료 등에 대해 공동 검토 보고서를 발간함(2023년)³⁴⁾.

32) Senate Passes Key Legislation To Speed Up Deployment Of New Nuclear Reactors (NUCNET, 2024.6.19)

33) Final Approval for ASN-IRSN Merger: Parliament Passes New Nuclear Safety Governance Law (Sfen, 2024.4.16)

34) <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/advanced.html>

- 미국 NRC, 캐나다 CNSC, 영국 ONR은 차세대 원자력에 대한 기술검토 협력 MoC(Memorandum of Cooperation)*를 체결함(2024.3)³⁵⁾.

* 각국의 규제 요건을 충족시키기 위해 공통 기준 수립과 기술 검토 수행 및 신규 혁신 기술 분야 협력 포함

○ (핵물질 사용 규제) 우리나라 원자력안전법은 감손우라늄, 천연우라늄, 농축우라늄 모두를 핵연료물질로 간주하고 있으며, 감손우라늄 및 천연우라늄은 취급량이 300g을 초과하는 경우, 농축우라늄은 모든 수량에 대해 사용 허가를 취득한 이후 사용하도록 규정하고 있음.

- 단, 감손우라늄과 천연우라늄은 독립적으로 규제되고 있어, 감손우라늄과 천연우라늄이 각 300g을 초과하지 않을 땐 사용 허가 대상이 아님.*

* 천연/감손우라늄 규제 기준 수량 300g은 일본 원자력기본법 내용에 따라 결정되었으나, 일본 원자력규제위원회에서도 이에 관한 근거 문서를 보유하고 있지 않음.

- 우라늄 300g은 UO_2 기준 핵연료 펠렛 60개 정도를 제작할 수 있는 양으로 다양한 핵연료 연구를 하기에는 매우 부족한 수량임.

○ 2018~2023년 허가된 핵연료물질 사용 허가는 총 6건이며, 인허가 신청에서 완료까지 소요 기간은 평균 403일이었으며 최대는 822일이었음³⁶⁾.

- 핵연료물질 사용허가를 위해서는 방사선관리구역 설정, 배기/배수 감시, 저장 및 폐기 시설 등의 다양한 시설 및 관련 조직, 규정 등을 갖추어야 함.
- 신규 인허가를 위해 필요한 시설 구비, 인허가 서류 작성 등의 시간을 고려하면, 통상 2년 이상의 기간이 소요될 것으로 예상됨(통상적인 수행 연구과제가 3~5년임을 고려하면, 대학에서 핵연료물질의 인허가를 지양하는 형태로 연구가 진행될 수밖에 없음).
- 미국, 프랑스, 캐나다는 연간 10~500kg 이내의 감손/천연우라늄에 대해서는 별도 허가 없이 사용하는 것이 가능하며, 일본은 우리나라와 같은 기준으로 핵연료물질의 사용을 규제함.

○ (처분시설 인허가) 심층처분은 장기간(수십 년) 개발되고 복잡한 의사결정 구조를 가지므로, 국제기구(IAEA, OECD/NEA 등)는 처분 시스템 개발 초기 단계부터 규제기관의 사전 참여를 권고하고 있으며, 선행국 또한 규제기관의 사전 참여가 이루어짐.

- 핀란드는 심층처분시설 운영허가 심사 중으로, 규제기관(STUK)이 처분 사업자(POSIVA)의 심층처분 부지 선정 과정에서 독립적인 안전 검토를 수행하였음.
- 스웨덴은 2022년 1월 심층처분시설 건설 승인을 받았으며³⁷⁾, 승인 전에 허가전 자문(pre-licensing consultation) 절차의 일환으로, 후보부지(2곳)에 대해 규제기관(SSM)이 처분사업자(SKB)의 안전성분석 보고서의 적합성을 검토한 바 있음.

35) US, Canada And UK To Work Together On Technical Reviews of Next-Generation Reactors (NucNet, 2024.3.13)

36) 한국원자력안전기술원, 핵연료물질 규제 제도 모니터링 및 개선안 도출, KINS/HR-1886 (2023)

37) <https://skb.com/future-projects/skbs-licensing-processes/>

- 프랑스는 처분사업 초기부터 원자력안전청(ASN)이 관여하여, 2005년 심층처분시설의 기술적 타당성 평가, 2009년 운영 안전성 및 가역성 옵션 평가, 2016년 안전성 옵션 검토 등에 참여함.
- 핀란드, 스웨덴 등 처분 선도국의 심층처분시설 건설허가는 예비설계, 부지특성, 환경영향이, 운영허가는 최종설계, 운영프로그램, 비상계획 등이 주요 심사대상으로 파악³⁸⁾ 되었음.
- 우리나라의 현행 원자력안전법령은 방사성폐기물 관리시설에 대해 건설·운영 단일 허가 체계를 규정하고 있는데, 건설기간이 장기간인 심층처분시설에 대해서는 특화*(건설허가와 운영허가 이원화 분리 등)된 허가 체계가 필요함.

* 심층처분시설 특성상 운영허가에 필요한 데이터 확보 등에 충분한 시간 필요

☞ (시사점) 신형핵연료 개발과 심층처분시설 인허가를 위한 규제 개선이 필요함.

[전문인력]

- 경수로용 핵연료(UO₂ 산화물핵연료) 및 선진원자로용 핵연료(금속핵연료, 피복입자핵연료, 용융염 핵연료)가 최상의 안전성과 신뢰성을 확보하고 적기 공급될 수 있도록 기술개발 전문인력 양성이 시급함.
- 신규 연구자 유입 부족, 퇴직에 의한 핵연료 연구자 자연 감소 및 정부 지원 축소로 인한 연구자 이탈 등으로 국내 핵연료 연구 역량이 소실될 위기에 직면하고 있어 국내 상용원전 및 경수형/비경수형 SMR 연구개발에 필요한 핵연료 전문인력 양성체계 재구축이 매우 절실함.
- 2024년 2월 원자력진흥위원회에서 의결한 고준위 방사성폐기물 R&D 로드맵에 따르면, 고준위방폐물 관리 분야의 기술개발 인력은 195명*에 불과함.
- * 2022년말 기준, 한국원자력환경공단 38명, 한국원자력연구원 83명, 한국수력원자력 23명, 한국지질자원연구원 40명, 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단(iKSNF) 11명
- 「제2차 고준위 방폐물 관리 기본계획」 수행을 위해서는 관리시설 부지선정 착수 시점부터 연간 평균 300여명(최대 410명)의 인력이 필요할 것으로 예상됨.
- 현재 고준위방폐물 관리 융합대학원(2022~2026년 약 65명의 석·박사 양성 계획)과 관련한 전공학과(원자력공학, 기계공학, 지질과학, 환경공학, 토목공학, 행정학, 정치외교, 국제관계 등)를 통해 전문인력을 양성 중이다. 예상 인력 수요 충족을 위해서는 여전히 부족한 상황임.

☞ (시사점) 신형핵연료 연구개발과 사용후핵연료 안전관리를 위한 전문인력이 매우 부족한 상황으로 인력양성을 위한 대책 마련이 필요함.

38) KINS, 고준위방사성폐기물 심층처분에 대한 규제기관 최적 역할모델 연구 최종보고서 (2018)

현안 진단 및 대응 방안

- 》자원 안보 강화를 위해, 경수로 핵연료와 미래 신형핵연료(금속, 피복입자, 용융염) 연료물질(농축U, LEU+, HALEU)의 안정적 수급을 위한 전략 마련이 필요
- 》고준위방폐물 관리 특별법 제정, 관리시설 확보를 위한 구체적 전략 및 계획 필요
- 》미래 대비 핵연료주기(선행+후행) 기반시설·제도개선·인력양성 등 국가 인프라의 선제적 확충

1. 원전 핵연료 연료물질 안정 수급

가. 현안 진단

- 국내 원자력발전은 화력 등 타 발전원과 비교하여 발전원가 대비 연료비 비중이 매우 낮아 우리나라 가격 상승으로 전기요금 급등을 유발할 가능성은 적으나, 국제 정세 불안 등으로 안정적 핵연료 수급에 대한 불확실성이 커지고 있음.
 - 최근 5년간 발전원별 정산단가 대비 연료비 비중은 원자력 11.5%, 유연탄 64.9%, 무연탄 64.4%, 유류 86.8%, LNG 80.4%를 기록함.³⁹⁾
 - 러시아의 우크라이나 침공 이후 전 세계는 미국·EU 중심의 서구권과 중국·러시아 진영이 대립하는 경제 블록화가 가속화되고 있어 자원 안보의 중요성이 증가하고 있음.
- 우리나라는 주요 원자력 선도국 중 자국에 선행 핵연료주기 시설을 완비하지 못한 유일한 나라로, 핵연료 수급이 지정학적 여건 및 국제 정세 등에 크게 영향을 받음.

나. 해결방안 제언

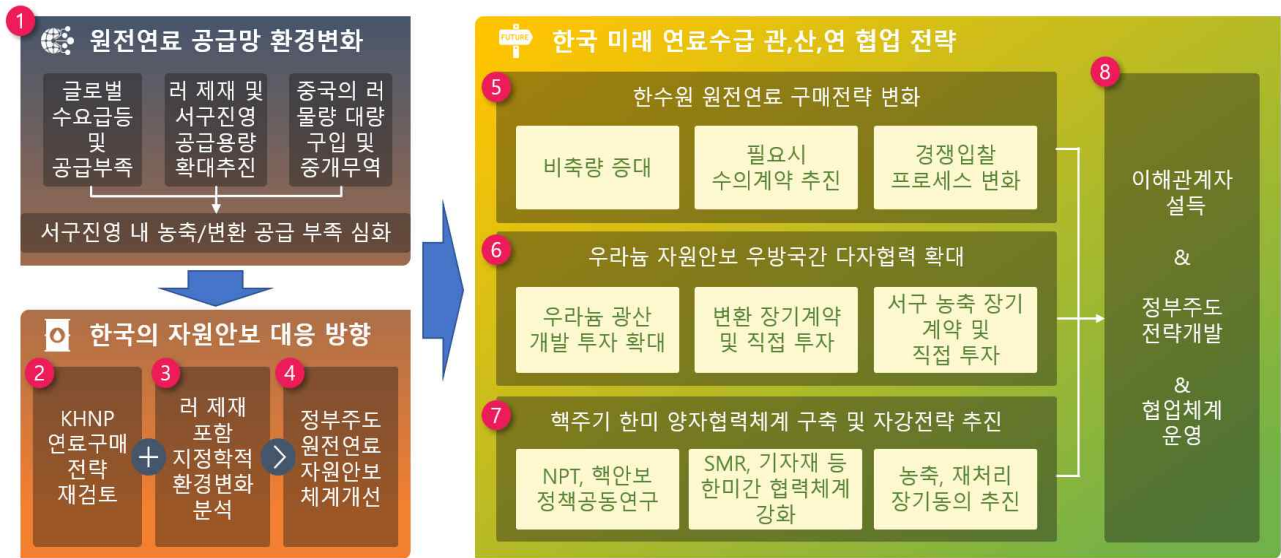
- 핵연료물질(농축우라늄) 수급 불확실성 완화를 위해 전략적 공급처 다변화, 신뢰할 수 있는 우방국과의 협력 강화, 핵연료주기 기술 자립 등이 포함된 자원안보 전략을 수립·이행함.
 - 한국은 상대적으로 저렴한 러시아산 핵연료(정광변환농축)에 대한 의존도가 타국에 비해 크므로 자원 안보 위협을 낮추기 위해 공급망 개선이 필요함.
 - 한국과 유사한 여건의 일본을 참조하여 원전 생태계를 민간 주도로 다변화하고, 정부의 정책적 재정적 지원을 확대하여 우리나라 수급의 유연성을 향상함.

39) EPSIS 전력통계정보시스템 - 연료비단가, 정산단가 (2019.8.~2024.7.)

- 중장기적으로는 원전산업 구조 개편, 핵연료주기 시설의 국내 유치 등 국가 간 협력을 통해 국내 핵연료주기 산업을 부분 수직계열화함.

○ 핵연료 비축량 증대, 일부 수의계약 추진 등 한수원의 연료구매 전략을 바꾸고, 광산개발, 농축 및 변환 서비스 장기계약 및 직접투자 등 서구권과의 협력을 확대함.

○ 한미 양자 간 협력체계를 다각적으로 구축하여 핵연료주기의 마지막 퍼즐인 농축/재처리에 대한 장기 동의를 얻을 수 있도록 중장기적 전략을 수립하고 협업을 해나감.



[그림 4] 핵연료 안정 수급을 위한 협업 전략

2. 신형핵연료 개발 및 상용화 준비

가. 현안 진단

○ LEU+ 핵연료는 기존 공급사를 통해 수급이 가능하나, LEU+ 초도 공급량이 제한적일 것으로 예상되는 만큼 LEU+ 적기 수급을 위해 기존 공급사와 긴밀한 협의가 필요함.

○ HALEU 핵연료는 기존 농축시설을 활용해 생산할 수 없어서, 기존의 해외 농축 공급사가 공급할 수 있을지 불확실하여 적기 수급을 위한 사전 준비가 더욱 중요함.

○ 피복입자핵연료(TRISO핵연료)는 차세대 고온로에 공통으로 적용되는 핵심 전략 기술이므로 미국과 협력하여 피복입자핵연료 자격화(Qualification)에 필요한 제조공정과 품질관리/보증체계를 개발하고 중성자 조사 시험자료를 확보할 필요가 있음.

- 미국 NRC가 핵연료 관련 TR을 승인하고 자격화 평가 체계를 구축함에 따라, 신규 TRISO 핵연료 자격화를 위한 조사시험 최소화와 인허가 기간 단축이 가능해질 것으로 전망됨.

- 중국은 HTR-10과 HTR-PM 실증을 통해 TRISO 핵연료 기술을 세계 선도 수준으로 고도화하고, 중국이 추진하는 다양한 고온 원자로 실증프로그램에 활용하고 있음.
- 비경수형 선진원자로 중 하나인 용융염원자로*는 고온 액체 용융염을 핵연료로 사용하는데, 우리나라는 용융염핵연료 제조 및 정화 장치 등의 연구 인프라가 부족함.

* 용융염원자로(Molten Salt Reactor, MSR) : 알칼리 또는 알칼리 토금속의 양이온(Li^+ , Be^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} 등)과 할로젠 이온(F^- , Cl^-)이 이온 결합한 화합물을 운반체 염 또는 냉각재 염으로 사용하고, 악타나이드 화합물(UCl_3 , UF_4 , $(\text{TRU})\text{Cl}_3$ 등)과 혼합한 액체연료를 사용하는 원자로임. 국내에서 개발 중인 MSR은 열출력 100 MWth의 선박 추진용임. 초기노심은 HALEU 기반의 UCl_3 와 NaCl-KCl 이 혼합된 염소 기반의 용융염 핵연료로 설계하고 있으며, 최초 연료 장전 후 교체 없이 30년 동안 장주기 운전하는 개념임.

나 해결방안 제언

- LEU+ 핵연료는 기존 농축우라늄 공급사와 사전 협의 및 계약을 추진함.
- HALEU 핵연료는 정확한 실수요 시점을 예측하기 어렵지만, 아래의 대안을 모색하는 한편, 중장기적으로는 농축 기술 확보를 추진함.
 - (1안) MOX 연료 구매 : 프랑스 Orano의 Melox 공장에서 연간 150톤 규모로 생산하고 있는 MOX를 구입하고 변환하여 비경수형 선진원자로 핵연료로 활용(단기적 대안으로 적절하나, 한미 원자력협정에 따라 미국의 동의가 필요).
 - (2안) 위탁재처리 : 프랑스 Orano의 La Hague 재처리 시설에 국내 경수로 사용후핵연료를 위탁 재처리하여 MOX 핵연료 공급(단, 한미 원자력협정에 따라 미국 동의가 필요하며, 사용후핵연료 운반 비용 추가 및 방사성폐기물 이슈 발생 가능).
 - (3안) 국내에서 파이로 처리 : 장기적 방안으로 국내 경수로 사용후핵연료를 파이로 처리하여 TRU 연료 확보(에너지 안보 및 수출경쟁력 확보 차원에서 장점이 있으나, 파이로 전 공정에 대한 미국의 장기 동의와 파이로 시설 건설 비용 발생).
- 신형핵연료 기술개발 및 상용화 인프라 구축을 추진함.
 - 국내외 상황에 대한 이해를 바탕으로 내실 있는 국가 신형핵연료 개발 및 자격화 전략을 수립하고, 국내 핵연료 검증 및 자격화 역량을 중장기적으로 확보하는 『자강』 전략과 함께 해외 『협력』 을 통해 진행되고 있는 차세대 원자로 개발 사업의 핵연료 검증 및 자격화 기술개발 수요를 적기에 지원하는 전략을 병행 추진함.
 - 한국원자력연구원의 하나로 연구로 시설 개선을 통해 열중성자속* 핵연료/재료 자격화 데이터를 생산하는 것이 현실적인 핵연료 자격화 국내 역량 배양의 첫 단계. 단순 학술 연구 활동을 넘어 핵연료 자격화를 직접적으로 지원할 수 있는 데이터 생산이 가능하도록 기존의 하나로 연구시설 보완이 필요함**.

* 열중성자속을 활용하는 고온가스로 및 차세대 경수로 핵연료 검증 및 자격화에 하나로 연구로가 활용될 수 있도록 관련 시설 (예: 환경 조성 루프) 및 계측 시스템 업그레이드 중요.

** 기존의 하나로 연구로의 동위원소 생산 기능이 건설 중인 기장 연구로로 이전됨에 따라 핵연료 검증 및 자격화 기능이 강화될 수 있음.

- 중장기적인 관점에서 용융염원자로(MSR) 및 소듐냉각고속로(SFR) 개발에 중요한 고속중성자 조사시설 설비 구축 검토가 필요함.
- 단기에 성과를 내기 위한 종이 원자로(Paper Reactor) 개발을 지양하고 실물 원자로 개발 풍토가 뿌리 내려야 함.
- 해외 협력에 있어 규제기관과의 사전 협의가 중요하며, 규제기관과의 핵연료 자격화에 필요로 하는 검증 데이터를 협의하고 해외 협력을 진행하여 실물 원자로 개발과는 무관한 기술 개발에 과도한 자원이 소진되는 것을 지양해야 함.

3. 사용후핵연료 안전관리

가. 현안 진단

○ (정책적 측면) 원전부지내 저장 이후 중간저장 및 처분 단계에 관한 우리 정부의 계획은 있지만, 사용후핵연료에 대한 부정적 인식, 정부 정책에 대한 낮은 신뢰도 등으로 인해 아직 고준위방폐물 관리 사업 착수가 지연되고 있음.

○ 신규 원전 도입국과 EUR Rev.E(APR1000) 인증 시, 국내 사용후핵연료 관리 기술 수준 문의와 확인 요청에 대응*할 만한 구체적 관리체계가 마련돼 있지 않음.

- 사우디아라비아, 체코 등 신규 원전 도입국 및 폴스로이스(SMR 신규사업 추진)* 등은 사용후핵연료 관리 기술(건전성/안전성 평가 능력) 보유 여부를 원전 입찰 평가 시 고려하였음.

* 폴스로이스는 사용후핵연료 운반/저장 용기 및 관련 엔지니어링 서비스 제공 가능 여부를 타진함.

○ 2050 탄소중립, 녹색분류체계, EU의 탄소국경조정세 등 국내 처분사업 일정에 영향을 줄 수 있는 변수들이 다수 발생하고 있음.

- 한국형 녹색분류체계(K-Taxonomy)는 원자력발전이 녹색에너지로 인정받기 위한 조건 중 하나로 고준위 방폐장 확보를 담보하는 법률 제정을 요구함. 21대 국회에서 고준위방폐물 관리 특별법 제정을 추진했으나 무산됨⁴⁰⁾.
- 기후위기 대응 방안으로 도입된, 2050 탄소중립, EU-Taxonomy*, EU의 탄소국경조정세 도입** 등이 국내 사용후핵연료 관리 및 고준위방폐물 처분사업 일정에도 영향을 주고 있음.

* EU-Taxonomy는 원자력이 녹색에너지로 인정받기 위한 조건으로 처분장 운영시기를 내세우고 있음. 2022년 EU는 EU-Taxonomy를 중심으로 국제표준 ISO14030-3으로 공표하고⁴¹⁾ Taxonomy를 세계적인 정합성을 갖춘 체계로 만들어야 한다는 인식이 있어⁴²⁾⁴³⁾ EU-Taxonomy가 경제적 영향을 미칠 가능성이 높음.

40) 노컷뉴스, "한시가 급한데"...고준위 특별법 폐기에 원전 중단 우려 확산 (2024.5.29)

41) 환경부, 한국형 녹색분류체계 가이드라인 (2022.12.)

** EU는 2050 탄소중립 달성을 위해 탄소국경조정제도를 도입할 예정(EU규정 2023/956)임. EU는 EU 생산 제품과 수입 제품에 동등한 탄소 가격을 보장하기 위해, 수입 제품의 탄소배출량(직접 배출량+간접 배출량)을 분석하여 탄소세를 부과할 계획⁴⁴⁾⁴⁵⁾임. 따라서 EU-Taxonomy를 만족하지 못하는 국가의 원자력 에너지원은 무탄소 에너지원에서 배제할 가능성이 존재함.

- 고준위방폐물 심층처분 관련 ‘회수가능성’과 ‘가역성’의 정의와 이행 방안이 명확히 정리되지 않음.
 - (기술적 측면) 사용후핵연료 저장·처리·처분에 필요한 기술들이 개발되고 있으나, 처리·처분 분야는 아직 실험실 또는 공학적 규모 기술이어서 실사용을 위해서는 실규모 실증이 필요함.
 - 사용후핵연료 관리 부담을 최소화하기 위해서는 안전성과 함께 처분 효율과 경제성까지 고려할 필요가 있음.
 - 2012년 기준 사용후핵연료 관리 비용은 약 53조원으로 예측⁴⁶⁾되었으나, 처분시스템의 공학적 방벽체인 구리, 철, 벤토나이트 등의 원자재 가격이 계속 상승하는 추세⁴⁶⁾를 감안할 때, 관리 비용 절감 방안을 고려하지 않을 수 없음.
- * 중간저장에 21조원, 영구처분에 32조원이 소요될 것으로 예상
- 사용후핵연료 및 고준위방폐물의 운반·저장·처리·처분 사업에 필요한 안전성 평가 및 인허가 획득을 위해서는 사용후핵연료 및 고준위방폐물의 물리·화학적, 핵적, 기계·재료적 특성 평가 데이터 확보가 필수적이나, 이를 위한 연구개발사업이 착수되지 못하고 있음.

나 해결방안 제언

- 2차례에 걸친 공론화를 통한 국민 의견수렴 결과와 제1차 및 제2차 기본계획과 부합하도록, 부지 선정 절차 및 처분시설 유치지역 지원 사항 등이 포함된 고준위방폐물 관리 특별법이 제정됨. 다만, 원전내 고준위방폐물 저장용량 제한 등에 있어서는 국민 모두가 수용할 수 있는 법적/기술적(중간저장시설의 안전하고 시의적절한 건설 등) 대응 방안 마련이 필요함
 - 독일의 경우, 친원전 세력과 탈원전 세력이 대립하며 사용후핵연료 관리 정책이 계속 바뀌던 상황을 타개하기 위해, 고준위방폐물 처분부지 선정에 관한 법을 제정하여 정권 교체와 무관하게 정책을 일관되게 추진 중임.

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

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

44) Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 Establishing a Carbon Border Adjustment Mechanism

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

46) 한국경제, 울들어 벌써 20% 올랐는데... "구리 가격 4배 더 된다" (2024.5.24)

- 사용후핵연료 및 고준위방폐물 관리 사업은 사업 과정 중 사회적 갈등을 최소화하며, 일관성과 지속성을 갖춘 체계 속에서 추진되어야 성공할 수 있는 사업이므로, 이를 뒷받침하기 위한 법제화가 필요함.
- 경수로 사용후핵연료 처리기술 실증 추진을 위해, 한미 원자력협정에 따른 미국의 장기 동의를 확보함.
- 현행 한미원자력협정은 핵물질 분리를 포함한 사용후핵연료 처리 활동(파이로)에 대한 장기 동의를 포함하고 있지 않아서, 핵물질 분리를 포함한 사용후핵연료 처리기술의 국내 실증을 위해서는 미국의 장기 동의가 필요함.
- 원안위고시 제2024-13호 “고준위방사성폐기물 심층처분시설에 관한 일반기준”과 제2차 고준위방폐물 관리 기본계획에 명시된 ‘의사결정의 가역성’과 ‘고준위방폐물의 회수 가능성’에 대한 명확한 정의와 이행방안을 정립함.
- 2024년 2월 원자력진흥위원회가 의결한 고준위방폐물 관리(운반저장, 처분 및 부과독성 저감) R&D 로드맵의 충실한 이행 및 최신 동향을 반영해 갱신함.
- 관리 단계별 사용후핵연료의 인도·인수 요건 수립, 이에 따른 특성평가 항목 도출 및 기술개발 방안 제시, 사용후핵연료 관리 분야와 연계한 특성평가 체계 구축 등이 필요함.
- 이중목적 용기(Dual-Purpose Canister) 활용 등 사용후핵연료 운반저장을 유기적으로 연계한 관리 옵션을 제시할 필요가 있음.
- 선진원자로 배치 시 발생이 예상되는 고준위방폐물과 폐기가 결정된 사용후핵연료를 단일 처분장에서 모두 처분할 수 있도록, 부피와 열부하 저감을 위한 처리 기술개발 추진이 필요함.
- 고준위방폐물 처분 선도국의 경험을 바탕으로 기술개발의 효율 향상을 위해 연구개발과 실증*을 병행 추진하고, 연구용 지하연구시설(URL: Underground Research Laboratory)을 적극적으로 활용하여 처분사업 일정상 유연성을 확보할 필요가 있음.
- * 처분부지의 지질매체도 심층처분시스템에 포함되므로 자국 내 지하연구시설(URL)에서 실증 필요
- 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 향상에 유용한 고효율 처분시스템 개발에 관련된 기술*에 대해서는 공학규모 및 현장시험을 통한 검증 추진이 필요함.
- * 구리 용기 두께를 줄이기 위한 신기술 확보와 처분장 설계온도 제한치 상향을 위한 지속적인 R&D 필요
- 처분시설 인허가 가속화를 위해서는 처분시스템 안전성 실증이 필요하므로, 대규모 예산(방사성폐물관리기금 및 원자력연구개발기금) 투입이 필요한 연구용 지하연구시설을 앞당겨서 확보함⁴⁷⁾.

47) 한국원자력환경공단은 2024년 12월 18일 연구용 지하연구시설 건설 후보지로 강원 태백시를 선정함

4. 다양한 사용후핵연료 발생 대비

가. 현안 진단

- 선진원자로도 녹색에너지로 인정받기 위해서는 선진원자로에서 발생하는 고준위 방폐물을 처분할 수 있는 관리체계 확보가 전제되어야 함⁴⁸⁾.
- 선진원자로에서 발생하는 사용후핵연료는 기존 원전의 사용후핵연료와 물리·화학적 특성이 다르므로, 선진원자로별 사용후핵연료 특성에 대한 이해를 바탕으로 적절하게 처리해야 안전하게 관리(운반·저장·처분)할 수 있음.⁴⁹⁾ 그러나 현재 우리나라는 선진원자로 핵연료주기 관리 기술개발을 하지 않고 있음.
 - 선진원자로 SMR의 수출경쟁력을 제고하기 위해서는 원전 도입국에 제공할 수 있는 처분 옵션을 확보하는 차원에서 처리기술을 선제적으로 확보할 필요가 있음.

* 일부 SMR 도입국은 원전 입찰 평가 과정에서 사용후핵연료 처리 서비스의 제공 역량을 문의

나. 해결방안 제언

- 선진원자로 개발 초기 단계부터 선진원자로에서 발생하는 사용후핵연료 특성에 맞춘 안전관리 체계 개발을 위한 기술개발 로드맵을 수립·이행함.
 - 선진원자로 사용후핵연료 및 방폐물 처분시스템을 병행 개발하는 것이 필요하며, 이를 위해 선진원자로 기원 방폐물 특성 분석과 처분시스템 예비 개념을 개발함.
 - 선진원자로 핵연료(LEU+, HALEU, 금속핵연료, 피복입자핵연료, 용융염핵연료)의 농축도 및 형태에 따라 사용후핵연료 운반·저장·처분에 미치는 영향을 평가함.
- 선진원자로 사용후핵연료 처리기술을 국내에서 실증할 수 있도록, 미국의 장기동의 확보를 추진함.
 - 경수로 사용후핵연료뿐만 아니라 비경수형 사용후핵연료의 안전 처분을 위한 처리기술 실증을 위해서도 한미원자력협정에 따른 미국의 장기동의가 필요함.
 - 이를 위해 경수로 사용후핵연료와 비경수형 선진원자로 사용후핵연료의 처리 기술 실증 계획(시설 포함)을 담은 중장기 로드맵 수립, 대미 협상 체제 구축 등 장기동의 확보 전략의 수립·이행이 필요함.

48) European Commission, 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 (2022)

49) "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

5. 기반시설 확충

가. 현안 진단

- ATF와 LEU+ 산화물핵연료 연소성능 평가와 금속핵연료, 피복입자핵연료, 용융염핵연료 등 선진원자로 핵연료 개발을 위해, 기존 조사후시험시설(PIEF)의 성능 개선과 사용후핵연료 특성분석과 안전관리 기술개발 수행이 가능한 종합조사후시험시설 구축이 필요함.
 - 할덴 연구로 등 가용한 시험로의 영구 폐쇄 및 노후화, 러-우 전쟁에 따른 협력 단절 등으로 핵연료 연소성능과 재료조사 검증을 할 수 있는 핵연료/재료시험로 시설이 거의 없음.
 - 우라늄 자원의 효율적 활용과 사용후핵연료 발생량 저감을 만족시키는 장주기 운전 실현을 위해 연구로를 활용한 고연소도 핵연료 기술 검증이 필요함.
- 재생에너지 확대에 따라 필요성이 점증하는 원자력발전소의 탄력운전을 지원하기 위해서는 핵연료의 안전성이 담보되어야 함.
 - 원자력발전소의 탄력운전으로 가장 우려스러운 부분은 반복적인 출력 변화에 따라 초래되는 PCI(Pellet Cladding Interaction) 현상으로, 이 현상에 따른 핵연료 성능과 안전성을 확인할 수 있는 시험시설은 핵연료/재료시험로가 유일함.
- 원자력 수소생산, 무탄소 선박동력, 핵연료주기 자립 등을 위해 선진원자로 개발을 수행 중이며, 이를 위해서는 선진핵연료 성능 및 안전성 검증 등 자격화가 필요함.
 - 신형핵연료 자격화는 실제 원자로 운전 환경과 같거나 매우 유사한 환경에서 핵연료 설계 수명에 걸쳐 이루어지는데, 이는 선진원자로 개발 과정에서 가장 긴 시간이 걸리는 임계공정(critical path)으로서, 높은 기술력과 기반시설이 뒷받침되어야 가능함.
 - 현재 선진원자로 핵연료 자격화는 '원전 기술 중주국'을 지향하는 소수 국가만 시행하고 있으며, 선진원자로 개발의 총체적 '뿌리' 기술력*을 보여주는 상징적 사항임.
 - * 해외에서 기개발된 경수로 기술을 도입하여 국산화시킨 우리나라는 경수로(APR-1400) 핵연료 자격화의 완성으로 핵연료를 공급할 수 있게 됨에 따라 상용원전 수출을 달성할 수 있었음
 - 선진원자로 핵연료의 제작검증자격화를 포함해 핵연료의 안정적 공급은 선진원자로 기술 자립 여부를 판가름하는 핵심 사항임.
- 다목적 방사광가속기 구축 초기에는 10개 빔라인 중 하나를 핵물질 및 RI 물질 전용 빔라인으로 계획했으나, 현재 이 전용 빔라인이 구축됐는지는 미지수임.

나. 해결방안 제언

- 조사후시험시설의 안정적 운영을 위한 환경을 조성함.

- 조사후시험시설 안전 운영에 필요한 공기조화설비, 전력공급설비, 방사선안전관리설비 등 운전 설비를 업그레이드하고 선진 운영기술 도입을 위한 운영 재원을 지원함.
 - 국가 원자력연구개발 계획 완수를 위한 첨단 조사후시험설비 및 시험 기술을 확충함.
 - 주민 수용성, 운반경로 및 안전성, 수요자 접근성 등을 종합적으로 고려하여 최적의 방법으로 조사후시험시설 구축 사업 추진이 필요함.
 - 조사후시험시설 운영인력 양성을 위한 산학연 연계 프로젝트를 운영하고 산업계 수요를 반영한 단기 실무교육 과정을 운영함.
- 열중성자속* 핵연료/재료 자격화 데이터를 생산하여 핵연료 자격화를 직접적으로 지원할 수 있도록 하나로를 전면 개선(Renovation)함**
- * 단기적으로 열중성자 속을 활용하는 경수로/고온가스로 핵연료 검증/자격화에 하나로 연구로가 활용될 수 있도록 관련 시설 및 계측 시스템 업그레이드
- ** 중기적으로는 하나로 연구로의 동위원소 생산 기능이 향후 가장 연구로로 이전됨에 따라 핵연료/재료 전용 시험로로 전환 검토
- 장기적으로는 고속중성자 핵연료 연소/재료 조사 시험로 구축을 추진함.
- 고속중성자 연소/조사 시설은 선진원자로 핵연료 자격화에 필수적 시설로서, 이 시설이 없으면, 선진원자로 기술의 대외 중속이 불가피함.
- 대형가속기를 첨단 원자력 기술 개발에도 활용할 수 있으므로, 현재 구축 중인 대형가속기에 원자력 분야 전용 빔라인을 설치하여 활용함.

6. 규제제도 개선 및 전문인력 양성

가. 현안 진단

- 최근 해외 핵연료 공급사와 원전 운영사들은 핵연료 농축도 상향 및 사고저항성핵연료의 인허가를 추진 중임.
- 농축도를 높일 경우, 운전 유연성 향상, 핵연료 구매량 감축, 고연소도 달성 등의 이점이 있음⁵⁰⁾.
 - 미국 NRC에서는 Cr 코팅 피복재에 대해 기존의 경수로형 심사지침(NUREG-0800)을 보완하는 임시 심사지침(ATF-ISG-2020-01)을 발행하였음. 뿐만 아니라 농축도 상향 LEU+ 핵연료 상용화에 필요한 개별 관련 기술 인허가에 착수하였음.
 - 핵연료 공급사와 원전 운영사가 농축도 상향 연료를 제조 및 사용하기 위해서는 NRC의 승인을 받거나 허가

50) <https://www.nrc.gov/reactors/power/atf/technologies/enrichment.html> (2024).

면제를 받아야 함.

- 우리나라의 핵연료물질 사용 허가 면제 수량은 타국의 1/10~1/100 수준이며, 이 기준 설정 시 참고된 일본 법령은 1950년대에 제정되어 관련 근거를 찾기 어려움.
 - 감손 및 천연우라늄 기준으로 300g을 초과하여 사용하고자 할 때 허가를 받아야 하며, 신규 허가 취득에 오랜 시간이 걸려 대학에서 연구 목적으로 이들 물질을 신규 취급하기에 부담이 매우 큼.
- 고준위 방사성 폐기물 관리사업은 부지선정, 건설, 운영 및 폐쇄후 관리 등 수백 년 이상의 장기간 추진되어 역설적으로 그 시급성을 인정받지 못하고 있음.
 - 사업 기간이 장기임을 고려하여, 심층처분시설 규제 체계 개선을 추진할 필요가 있음.
- 우리나라 핵연료주기 분야 전문인력이 절대 부족한 상황임⁵¹⁾.

나. 해결방안 제언

- 기존 상용원전의 핵연료 성능을 개량한 사고저항성핵연료(ATF, 코팅 피복관 및 Doped UO₂ 소결체 등) 및 LEU+ 핵연료는 제한적인 범위의 규제기준 개발과 선제적인 규제검증기술 개발로 인허가 기간을 단축함.
- 국내 핵연료주기 연구의 다양성 확보와 전문인력 양성에 필요한 핵연료주기 연구를 활성화하기 위해 감손/천연우라늄 규제면제 수량 기준을 현실화함.
 - 핵확산 위험, 방사학적 안전성 등을 고려한 국내 상황에 적합한 핵연료물질 규제면제 수량에 대한 규제 기준을 개선함(국외 상황을 고려 시, 수 kg까지 상향하는 것도 가능함).
- 아래와 같이 고준위방폐물 처분에 필요한 사항을 고려하여 관련 제도를 개선함.
 - 처분장 부지 조사선정 과정 중 규제기관이 규제 의견을 제시하는 절차가 있어야 함.
 - 부지 고유 안전성 실증을 위한 “처분부지 URL”⁵²⁾이 심층처분시설로 전환 가능성이 있으므로, 이 URL을 잠재적 처분시설로서 규제하는 방안도 검토할 필요가 있음.
 - 장기간 추진되는 사업특성을 고려하여 건설 허가과 운영 허가를 분리하는 방안도 검토할 필요가 있음.
- 핵연료주기(선행+후행) 분야 전반에 필요한 전문인력 수요를 예측하고 이를 바탕으로 국가 차원의 중장기 전문인력 수급 계획을 수립하고 인력양성 프로그램을 운영
 - 미국, 유럽 등의 원자력 전문인력 양성 프로그램을 조사 분석하고, 국내 산학연이 연계하여 양성된 전문인력이 취업할 수 있는 일자리를 창출할 필요가 있음.

51) 원자력진흥위원회, 고준위 방사성폐기물 R&D 로드맵 (2024.2.)

52) 시설의 명칭 혼동을 막기 위해 “연구용 URL → 일반부지 URL”, “인허가용 URL → 처분부지 URL”로 검토 필요 (제47차 원자력이용개발전문위 후속회의 결과, 2023.7.14)

- 본문에서 서술한 내용을 핵연료주기 측면에서 재구성하면 3개 영역(선행 핵연료주기, 후행 핵연료주기, 공통 인프라)으로 크게 구분할 수 있음.
- 선행 핵연료주기의 주요 쟁점은 ‘핵연료물질 안정 공급’과 ‘신형핵연료 개발 및 상용화 준비’로 다음의 해결 방안을 제시함.
 - (핵연료물질 안정 공급) ① 단기적으로는 공급처 다변화 및 우방국과 협력하여 안정적 공급처 확보, ② 장기적으로는 연료물질(농축우라늄)의 궁극적 자급을 위한 노력(기술개발, 한미 협정 개정 등) 전개
 - (신형핵연료 개발 및 상용화 준비) ① ATF(사고저항성핵연료)와 LEU+(농축도상향) 경수로 핵연료 조사후시험을 위해 국내 시설 선제적 보장 및 주민동의 확보, ② HALEU(고순도저농축우라늄) 핵연료 체계적 기술개발 및 상용화 준비 기술개발
- 후행 핵연료주기의 주요 쟁점은 ‘사용후핵연료 안전관리’와 ‘다양한 사용후핵연료 발생 대비’로 다음의 해결 방안을 제시함.
 - (사용후핵연료 안전관리) ① 제정된 고준위방폐물 관리 특별법을 근거로 사회적 갈등을 최소로 하면서 영구처분장 부지 선정, ② 연구용 지하연구시설 적기 운영 등 기존 고준위방폐물 관리 기술개발 로드맵의 충실한 이행, ③ 심층처분의 안전성, 경제성, 친환경성이 향상된 혁신기술 개발
 - (다양한 사용후핵연료 발생 대비) ① 선진원자로 기술개발 초기부터 맞춤형 사용후핵연료 관리기술 개발, ② 사용후핵연료 처리기술 미국 장기동의 확보 및 2035년 협정 개정 준비
- 공통 인프라의 주요 쟁점은 ‘기반시설 확충’, ‘규제제도 개선’, ‘전문인력 양성’으로 다음의 해결 방안을 제시함.
 - (기반시설 확충⁵³⁾) ① 단기적으로는 기존 시설(하나로, 조사제시험시설(MTF), 조사후시험시설(PHF)) 보강으로 국내 시험수요 대응, ② 중장기적으로는 신형핵연료 자격화를 위해 하나로의 핵연료/재료 전용 시험로로 전환 및 신규시험로 구축, ③ 핵연료 개발 및 사용후핵연료 특성 분석 위한 종합조사후시험시설 구축
 - (규제제도 개선) ① 농축도상향(LEU+) 핵연료 인허가 효율화 및 핵물질 규제면제 현실화, ② 고준위방폐물 심층처분시설 단계적 허가(건설허가와 운영허가 분리) 도입

53) 인프라 구축 등에 대해서는 핵비확산 통제가 필요하므로 국가 차원의 중장기 계획 수립 시 이에 대한 IAEA 안전조치 측면의 사전 검토 필요

- (전문인력 양성) ① 산학연 공동으로 중장기 핵연료주기 전문인력 수급 계획 수립이행

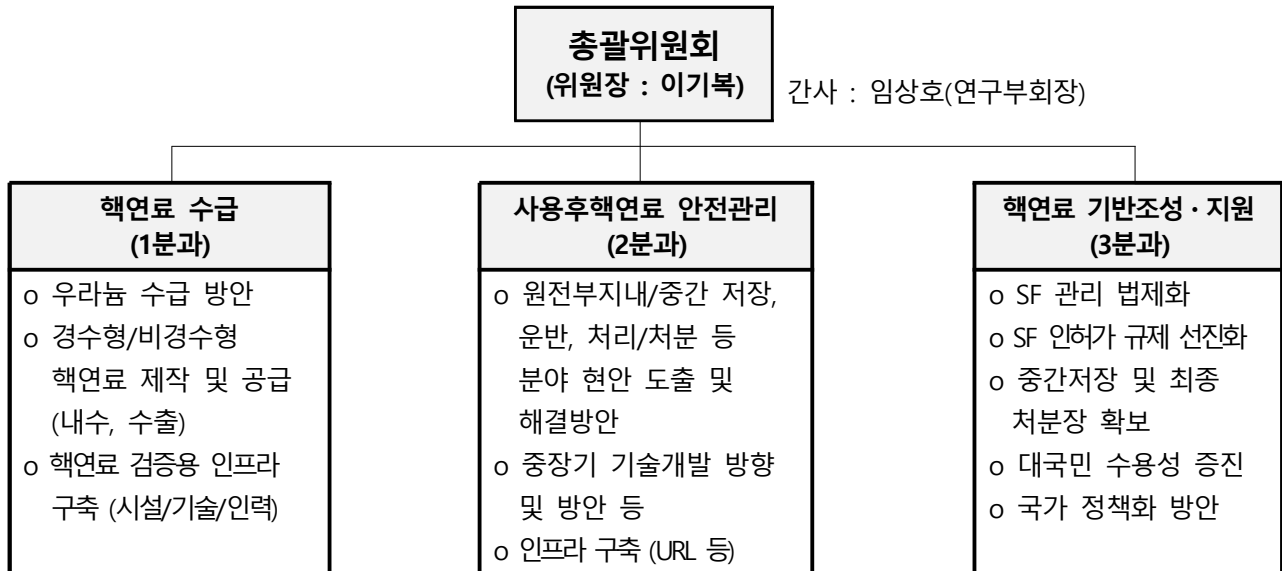
○ 정리하면 아래 [표 5]와 같음.

[표 5] 결언 요약

주요 쟁점		현황 및 현안 진단	해결 방안
선행 핵연료 주기	핵연료 연료물질 안정 수급	<ul style="list-style-type: none"> • 러-우 전쟁 자원 안보 강화 등에 따라 원전 연료물질(농축우라늄) 수급 불안정성 증가 • 전량 수입에 의존하는 상황에서 단계별 안정 수급 전략 마련 시급 	<ul style="list-style-type: none"> • (단기) 공급처 다변화, 우방국 협력을 통한 안정적 공급처 확보 • (장기) 연료물질(농축우라늄) 자급을 위한 노력(기술개발, 한미 협정 개정 등) 전개
	신형핵연료 개발 및 상용화 준비	<ul style="list-style-type: none"> • 원전 안전성/경제성 향상을 위한 핵연료 성능향상 및 미래 수요 대비 필요 • ATF, LEU+ 핵연료 개발 추진 및 HALEU 핵연료 상용화 준비 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • ATF, LEU+ 핵연료의 국내 조사후시험을 위한 선제적 시설보강 및 주민동의 • HALEU 핵연료 체계적 기술개발 및 상용화 준비 기술개발
후행 핵연료 주기	사용후핵연료 안전관리	<ul style="list-style-type: none"> • 여야 합의가 어려웠으나 22대 국회에서 특별법 제정으로 사업 착수 가능 • 탄소중립 실현 및 원전 수출의 걸림돌로 작용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 제정된 특별법을 근거로 사회적 갈등을 최소화 하면서 영구처분장 부지 선정 • 연구용 지하연구시설 적기 운영 등 기존 고준위방폐물 관리 기술개발 로드맵 충실 이행 • 심층처분의 안전성, 경제성, 친환경성이 향상된 혁신기술 개발
	다양한 사용후핵연료 발생 대비	<ul style="list-style-type: none"> • 기존 원전과 다른 선진원자로(경수형 및 비경수형) 사용후핵연료 발생 예상 • 상용화까지 고려한 연료물질 수급 및 사용후핵연료 관리기술 대비 	<ul style="list-style-type: none"> • 선진원자로 기술개발 초기부터 맞춤형 사용후핵연료 관리기술 개발 • 사용후핵연료 처리기술 미국 장기동의 확보 및 2035년 협정 개정 준비
공동 인프라	기반시설 확충	<ul style="list-style-type: none"> • 핵연료(경수로, SFR, VHTR, MSR) 성능검증, 인허가, 상용화를 위한 핵연료/재료시험로와 조사시험시설 보강 및 신규시설 확보 • 핵연료 개발 및 사용후핵연료 특성 분석 위한 종합조사후시험시설 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • (단기) 기존 시설(하나로, IMEF, PIEF) 보강으로 국내 시험수요 대응 • (중장기) 하나로 핵연료/재료 전용 시험로로 전환 및 신규시험로 구축 • 핵연료 개발 및 사용후핵연료 특성 분석 위한 종합조사후시험시설 구축
	규제제도 개선	<ul style="list-style-type: none"> • 신형핵연료 개발 계획에 부합하는 인허가 관련 규제제도 개선 필요 • 고준위방폐물 심층처분시설 건설허가 현실화 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 농축도상향(LEU+) 핵연료 제조시설 인허가 효율화 및 핵물질 규제면제 현실화 • 고준위방폐물 심층처분시설 단계적 허가(건설허가와 운영허가 분리) 도입
	전문인력 양성	<ul style="list-style-type: none"> • 원전의 안전성과 효율성은 핵연료 및 사용후핵연료의 전문적인 관리에 기인 • 퇴직 인력증가와 연구자원 축소로 핵연료주기 전문인력 조기 양성 절실 	<ul style="list-style-type: none"> • 산학연 공동으로 중장기 핵연료주기 전문인력수급 계획 수립이행

첨부: 핵연료전문위원회 조직 및 구성

◎ 위원회 조직



◎ 위원 구성

	총괄위원회		1분과 위원회		2분과 위원회		3분과 위원회	
	성명	직책(소속)	성명	직책(소속)	성명	직책(소속)	성명	직책(소속)
위원장	이기복	수석부회장 (KNS)	이유호	교수 (서울대)	조동건	단장 (KAERI)	최성열	교수 (서울대)
고문	송종순	교수 (조선대)	박병기	교수 (순천향대)	문주현	교수 (단국대)	윤종일	교수 (KAIST)
	백종혁	책임연구원 (KAERI)						
위원	백민훈	소장 (KAERI)	김윤희	실장 (KNF)	김기영	부장 (KHNP/CRI)	서은진	책임연구원 (KINS)
	조석진	본부장 (KHNP)	양승태	처장 (KHNP)	이성기	부장 (KNF)	권원택	처장 (KHNP)
	최재돈	본부장 (KNF)	김도식	부장 (KAERI)	이상훈	교수 (계명대)	이영준	부장 (KAERI)
	박홍준	본부장 (iKSNF)	이창화	책임 (KAERI)	류재수	부장 (KAERI)	임상호	부장 (KAERI)
	이재학	본부장 (KORAD)	양성우	책임 (KAERI)	정해룡	실장 (KORAD)	성기열	팀장 (KORAD)
	박상길	전문위원 (법무법인 광장)	이주석	박사 (KINS)	지성훈	부장 (KAERI)	박재영	교수 (UNIST)