

한국원자력학회 원자력이슈위원회 핵연료전문위원회

핵연료 수급 분과(1분과) 보고서

- 목차 (Brief Report CONTENTS)
 - 00 핵심 요약 (Executive Summary)
 - 01 서문
 - 02 가동 경수로 핵연료 수급 현안
 - 03 미래형 핵연료 수급 및 제조 현안
 - 04 핵연료 상용화 및 인허가 현안
 - 05 핵연료 기반 시설 강화 현안
 - 06 한미 원자력 협력 현안
 - 07 총괄적 제언

핵심 요약 (Executive Summary)

○ 가동 경수로 핵연료 수급 현안

- 원전은 무탄소 기후변화 대응 및 높은 에너지밀도에서 비롯한 에너지안보 장점 등 여러 배경으로 인해 미래 역할 및 이용 범위가 확대될 전망이나, 높은 수요대비 더딘 우라늄 광산 개발과 미중패권 경쟁, 우리전쟁, 경제 블록화 등 지정학적 불확실성으로 안정적 원전연료 수급은 미래 원전산업의 가장 큰 위협 요소임.
- 우리나라는 상기 원전연료 수급 불확실성에 대응하기 위해 비상대응용 비축량 증대, 전략적 공급처 다변화, 수의계약 등 계약방법 개선, 신뢰할 수 있는 우방국과의 협력 및 투자확대와 더불어 정부 정책에 기반한 한 중장기 핵주기 자강 전략이 필요함.

○ 미래형 핵연료 수급 및 제조 현안

- 기존 상업용 경수로 핵연료 농축도 제한치인 5%를 초과하는 LEU+ 핵연료 (농축도 5-10%)는 차세대경수로의 핵연료 방출 연소도와 연료봉 출력증진에 활용될 수 있음. 국내에서는 2029-2030년 부터 LEU+ 시험 핵연료 제작에 필요한 LEU+ 핵연료 수요가 발생할 것으로 전망함. 국내 LEU+핵연료 상용화 기술은 2030년대 후반 - 2040년대 초반에 완성되고 2040년대 초반부터는 본격적인 상용 LEU+ 핵연료 국내 수요가 발생할 것으로 예상됨. LEU+ 핵연료는 기존 해외 공급사를 통해 수급 가능하나 초기 시장의 LEU+ 공급량은 제한적일 것으로 예상되는 만큼 기존 해외 공급사와의 협의를 통해 LEU+ 수급을 적기에 추진할 필요 있음.
- HALEU (농축도 10-20%) 핵연료는 비경수형 차세대 원자로에 실증에 범용적으로 활용 될수 있으며 국내 차세대 원자로 실증 연구개발 진척도에 따라 국내 수요 시기가 결정될 것으로 전망함. HALEU 핵연료는 미국의 Centrus 사와의 협의 및 장기 선매 계약 등을 통한 수급을 추진해 볼 수 있음. LEU+ 핵연료와는 달리 HALEU 핵연료는 기존 농축 시설을 활용한 생산이 불가능 하기에, 기존의 해외 농축 우라늄 공급사를 통한 수급 가능성에 많은 불확실성이 존재함. 따라서, 적기 수급을 위한 사전 준비가 더욱 중요할 것으로 전망함.

- 입자기반 TRISO 핵연료는 차세대 고온 원자로에 범용적으로 사용될 수 있는 핵심 전략기술로써 미국과 중국을 위시하는 차세대 원자력 기술 선도 국가에서는 관련 제조 기술과 시험 검증 기술을 확보하였음. 이는 차세대 고온 원자로 실증의 초석이 되었음. 국내에는 TRL 3.5 수준의 실험실규모 TRISO 핵연료 제조 핵심기술이 확보되어 있으나, 퇴직에 의한 연구자 자연감소 및 정부지원 감소로 인한 연구자 이탈로 국내 피복입자핵연료 연구 역량 소실의 위기에 직면하고 있음. 국내 고온 가스로 실증 사업을 계기로 피복입자핵연료 연구 인프라 재구축이 절실함. 동시에 국내 용융염 원자로 사업의 실물화를 위해서는 용융염 핵연료 제작 설비 구축에 대한 지원이 확대되어야 함.

○ 핵연료 상용화 및 인허가 현안

- 사고저항성핵연료 (ATF)는 후쿠시마 원전 사고와 같은 대형사고 발생을 방지할 수 있는 핵심 요소 기술로 국내에는 2030년대 상용 적용되어 원전의 안전성을 개선할 수 있을 것으로 전망.
- LEU+ 및 핵연료 인허가연소도 증가 기술을 안전성 기반의 ATF에 적용할 경우 원전의 탄력운전 성능 및 안전성 향상, 핵연료 효율성 향상, 사용후 핵연료 방출량 저감, 탄소중립 이행 증진과 가동원전 경제성 향상 가능.
- 단기적용을 목표로 하는 경수로형 핵연료와 유사한(코팅 피복재 및 Doped UO₂ 소결체 등) ATF는 경수로형 심사지침서 개선을 통해 효율적인 인허가 심사 가능.
- 세계적으로 차세대 원자로 실물화를 위한 핵연료 검증 및 자격화의 중요성이 높아지고 있음. 미국과 중국을 위시하는 차세대 원자로 실물화를 선도 국가에서는 핵연료 자격화 전략을 수립·추진 하고 있음. 국내에서도 핵연료 실증 시험과 자격화 전략을 수립하고 관련 기반 시설 확충을 통한 고유 역량 확보를 바탕으로 내실 있는 해외 협력을 추진 해야 함.

○ 핵연료 기반 시설 강화 현안

- 원전 수출, 가동 원전 안전성 강화 및 사용후핵연료 발생량 저감 요구에 따른 차세대 핵연료 개발뿐만 아니라 사용후핵연료 안전관리 기준 수립을 위하여 핵연료 조사항특성 연구 기반시설로서 핫셀 인프라의 확충이 요구되고 있음.
- HALDEN 시험 원자로의 운영 중단 이후 핵연료의 성능 검증을 위한 연구로 시험 시설은 전 세계적으로 부족한 상황임. 핵연료 시험기술 기반 확보가 실물 원자로 기술 자립과 실증에 핵심적인 요소임에 따라 전폭적인 국가 지원이 필요함.

○ 한미 원자력 협력 현안

- 한미 원자력협력에서 최우선 과제는 농축, 재처리에 대한 한미고위급위원회의 장기 동의를 얻는 것이며, 이를 위해 관,산,연의 전략개발부터 면밀한 준비와 협업이 필요함.
- 미국측 장기동의를 얻기 위해서는 NPT체재를 포함한 평화적이용에 대한 당위성과 확신을 주어야 하며, 한국만의 차별화전략, 공동번영을 위한 영구불변의 협력체계, 미국의 핵주기 재구축에 대한 재정적 공헌, 협상을 위한 고유 핵주기 기술개발 등이 필요함.

- 》대한민국이 직면하고 있는 농축 우라늄 수급 시장 변화, 핵연료 개발 및 상용화 현안, 그리고 핵연료 기반 시설 강화 필요성 정리.
- 》국가 원자력 기술력 제고에 필수적인 우라늄 수급 및 핵연료 기술 역량 강화를 위한 전략 수립 및 정부 지원 필요성과 선행핵주기 역량 강화를 위한 한·미 원자력 협력 분야 분석.

○ 배경 및 목표

- 원전 산업 경쟁력의 근간이 되는 핵연료 기술은 국가 원전 경쟁력의 핵심 요소임.
- 원전 기술 선도를 목표로 하는 오늘날, 대한민국의 핵연료 기술 및 농축 우라늄 수급 역량의 중요성이 재조명되고 있음.
 - * 사고저항성핵연료, 농축도 상향 LEU+ 핵연료의 대형 경수로 및 소형모듈원전 (SMR) 적용, 고연소도 핵연료 상용화를 통한 원전 경제성 제고 및 사용후핵연료 배출량 저감 등을 아우르는 국내외 원전 산업의 핵심 기술과 인허가 현안의 상당 부분이 핵연료 기술 현안으로부터 기인하는 상황.
 - ** 농축우무 가격은 우-러 전쟁 이후 글로벌 공급 불확실성으로 인해, 전쟁 전 약 60\$/SWU에서 2년 만에 160\$/SWU으로 3배 가까이 급등. 정광-변환-농축을 아우르는 우라늄 수급의 전 과정을 해외에 의존하고 있는 우리나라는 농축 우라늄 수급 안정화를 위한 중장기적 국가 전략 수립 필요.
 - *** LEU+, HALEU 핵연료를 아우르는 미래형 핵연료 수급 전략 수립 중요.
- 동시에 차세대 원자로 실물화에 필수적인 핵연료 자격화(Qualification)의 중요성이 전 세계적으로 재조명되고 있음. 이에, 국내 차세대 핵연료 시험 및 자격화 역량과 관련 기반 시설의 현주소를 파악하고 고유 역량 제고를 위한 내실 있는 전략 수립의 중요성이 과거 어느 때보다 중요해짐.
 - * 미국의 차세대 원자로 실증프로그램 (Advanced Reactor Demonstration Program, ARDP)의 핵연료 검증(Qualification) 방법과 전략을 참고, 국내 차세대 핵연료 검증 역량의 현주소를 진단하고 자강과 협력 전략 제시.
 - ** 핵연료 기술개발의 핵심 인프라인 조사후 핵연료 시험시설 (핫셀)과 핵연료 검증용 연구로 국내외 현황 조사. 국내 기반시설 강화 필요성과 이를 위한 정부 지원 분석. 핫셀과 국내 연구용 원자로 계장 및 신규 구축 지원 필요성 정리.
- 대한민국 원자력계가 직면하고 있는 핵연료 수급 및 기술개발/기반 시설 관련 현안을 정리하고 필요 정부 지원과 주요 쟁점을 정리 분석함. 나아가 대한민국의 선행 핵주기 역량 강화를 위한 한·미 원자력 협력 분야를 분석·제시함.

○ 보고서 구성

- 보고서 구성은 표 1-1에 나타나 있음.

[표1-1] 핵연료 전문위원회 1분과: 핵연료 기술개발 및 수급 현안과 기반 시설 조성

보고서 내용 (챕터)	상세 내용
가동경수로 핵연료 수급 현안 (2장)	해외 시장 동향 분석 및 전망 국내 가동 경수로 우라늄 수급 전략 시사점
미래형 핵연료 수급 및 제조 현안 (3장)	미래형 경수로 핵연료 LEU+ 수요 전망 및 수급 방법 분석 미래형 비경수형 핵연료 HALEU 수요 전망 및 수급 방법 분석 미래형 원전 실증을 위한 비경수형 핵연료 제작 이슈 및 필요 지원
핵연료 상용화 및 인허가 현안 (4장)	핵연료 인허가 전략과 필요 요건 사고저항성 핵연료 상용화 현황, 이슈, 전망 LEU+ 핵연료 상용화 및 인허가 이슈 차세대 핵연료 검증 및 자격화 (Qualification) 이슈
핵연료 기반 시설 강화 현안(5장)	해외 현황 햇셀 인프라 구축 및 정부 지원 필요성 핵연료 검증용 원자로 구축 및 정부 지원 필요성
한미 원자력 협력 현안 (6장)	핵주기분야 한·미 원자력 협력 강화 전략 한·미 원자력 협정개정 시사점 및 필요 준비

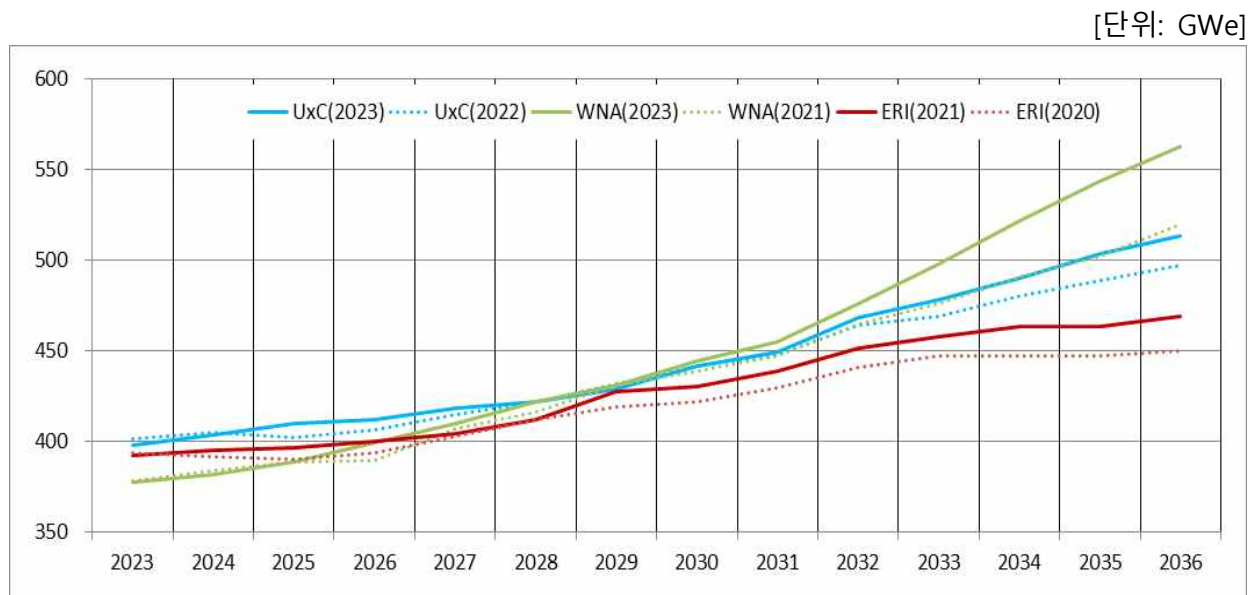
가동 경수로 핵연료 수급 현안

- » 원전은 무탄소 기후변화 대응 및 높은 에너지밀도에서 비롯한 에너지안보 장점 등 여러 배경으로 인해 미래 역할 및 이용 범위가 확대될 전망이나, 높은 수요대비 더딘 우리나라 광산 개발과 미중패권 경쟁, 우러전쟁, 경제 블록화 등 지정학적 불확실성으로 안정적 원전연료 수급은 미래 원전산업의 가장 큰 위협 요소임.
- » 우리나라는 상기 원전연료 수급 불확실성에 대응하기 위해 비상대응용 비축량 증대, 전략적 공급처 다변화, 수의계약 등 계약방법 개선, 신뢰할 수 있는 우방국과의 협력 및 투자확대와 더불어 정부 정책에 기반한 한 중장기 핵주기 자강 전략이 필요함.

1. 세계 원전연료 시장 동향 및 전망

가. 원자력 발전 현황 및 전망

- '23년 말 기준, 32개 국가에서 운영 중 원전은 415기(373GWe), 건설 중 원전은 60기(63GWe)로 세계 전력생산량 중 약 9%를 담당하며¹⁾, '30년 운영 중 원전은 433기(444GWe)로 증가 전망²⁾.

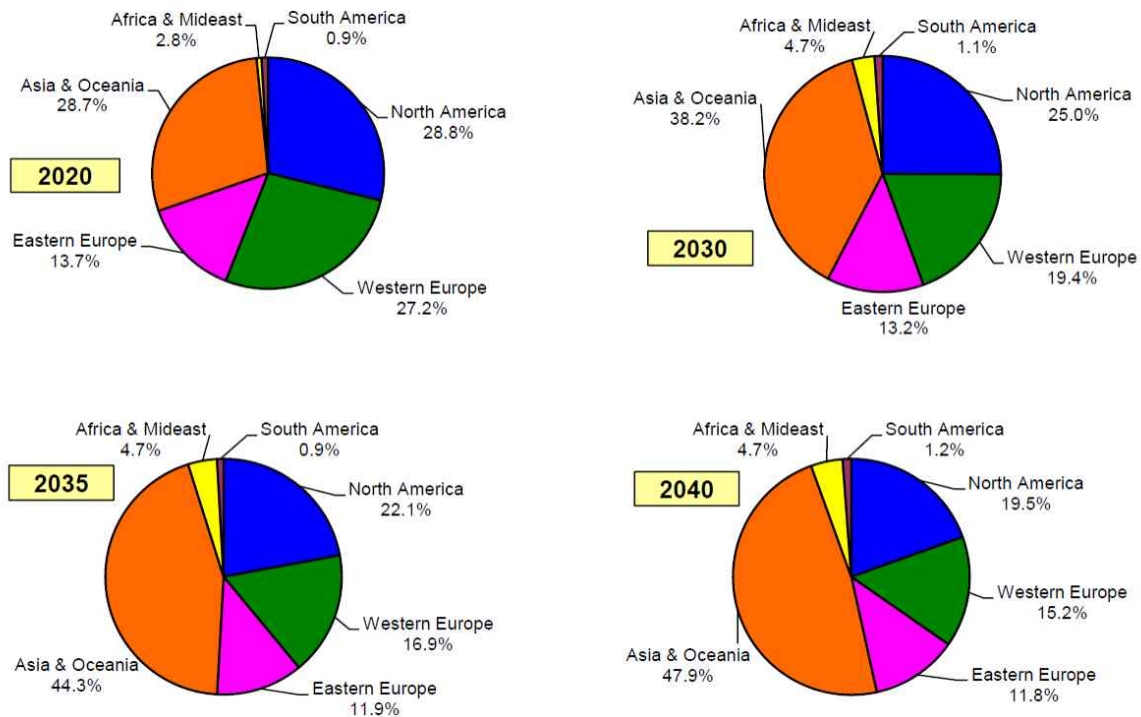


[그림 2-1] 세계 원자력 발전용량 전망³⁾

1) IAEA PRIS(Power Reactor Information System) - Current Status(2024. 8.)

2) WNA, The Nuclear Fuel Report 2023-2040('23.09)

- 글로벌 원전수요를 포함한 세계 원전산업은 점진적으로 북미·유럽 지역에서 한·중·일의 아시아 지역으로 변화할 것으로 전망.



[그림 2-2] 지역별 원자력 발전용량 점유율 전망4)

- 국제에너지기구(IEA)는 IA 등 세계적인 전력수요 증대*, 청정 에너지에 대한 투자 증대**, 열 공급에 있어 탄소배출 억제 추세***, 저탄소 수소^{주)}에 대한 수요 증가**** 등은 향후 국제 원전 시장 확대에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 예측⁵⁾.

* '21년 기준, 세계 전력 수요는 24,700 TWh로 최종 에너지 소비에서 20%를 차지하고 있으며, '30년에는 22~28%, '50년에는 28~52%에 이를 것으로 추정.

** '23년 기준, 세계적으로 청정 에너지에 1조7,000억 \$ 이상이, 화석 에너지 공급에 9,500억 \$가 투자될 것으로 예상되며, 특히 저탄소 발전원은 '21~'30년 동안 연평균 1조1,000억 \$ 이상의 투자가 필요할 것으로 전망.

*** '21년 기준, 세계에서 상업적으로 판매된 열에너지의 90%는 화석연료에서 공급되었으며 13억 톤의 이산화탄소를 배출함. IEA의 '탄소중립 시나리오'에 의하면 저탄소 에너지원은 '30년 전체 열 공급량의 40%, '40년에 거의 100%에 이를 것으로 전망.

**** '20년 저탄소 수소 생산량은 세계 수소 생산량 90 Mt의 10% 수준이었으나, '탄소중립 시나리오'에 의하면 '50년에는 전 세계 수소 생산량(500 Mt)의 대부분이 청정 수소로 예측.

3) UxC LLC Uranium Market Outlook(2022.4Q, 2023.4Q), WNA The Nuclear Fuel Report(2021, 2023), ERI Nuclear Fuel Cycle Supply and Price Report (2020, 2021)

4) UxC LLC, Uranium Market Outlook(2024.1Q), pp 40.

5) IEA('22), Nuclear Power and Secure Energy Transitions: From today's challenges to tomorrow's clean energy systems, pp.30~33.

주) 수소의 생산방식에 따른 분류체계는 국가별로 다소 상이하지만, 탄소포집저장(CCS) 기술로 생산과정에서 탄소를 제거한 ‘블루수소’ 또는 생산과정에서 탄소배출이 없는 ‘그린수소’를 저탄소 수소에 포함(원자력의 경우 그린수소에 포함하거나(영국), 별도로 분류(미국은 핑크, 독일은 옐로우))⁶⁾.

○ 전력시장에서 재생에너지 등 간헐성 에너지의 증가로 인한 전체 전력 시스템의 비용 상승 및 경직성 증가를 완화시킬 수 있는 원전의 역할은 더욱 중요해질 전망이다.

－ 환경 의존적이어서 출력이 간헐적이고, 변동성이 높은 재생에너지의 비중 증가는 전체 전력 시스템의 비용 상승*과 전력 계통의 불안정성을 초래**.

* 국제에너지기구(IEA)는 ‘40년까지 저탄소 에너지 시스템을 실현하기 위해 67조 7,000억 \$가 필요하다고 예측⁷⁾.

** 일조량과 바람 등 기상 조건과 관련된 발전원의 비중 증가는 타 전원의 출력을 더 자주, 더 큰 폭으로 변경해야 한다는 의미.

※ 국내에서도 봄철 전력수요 감소 및 태양광발전의 증가로 전남 일부 원전의 출력을 제어하고 있으며 태양광/풍력 발전 비중이 높은 제주도의 경우 ‘15년 출력 제한 명령이 3회 내려진 이래 해마다 횟수가 늘어나 ‘22년에는 132회로 증가.

－ 대표적 수요대응 전원인 화석연료는 비중이 점차 감소할 전망이며, 수력 및 탄소포집저장(CCS) 기술 등은 확장성 및 수용 가능한 부지 확보에 어려움을 겪거나 경제성 미진.

－ 원전을 포함한 전력 시스템 구성 비용은 신재생만으로 구성된 전력 시스템에 비해 경제적이며*, 원전의 부하추종운전을 통해 전력 수급에 따른 유연한 대처 가능**.

* 프린스턴, 스탠포드, E3(Energy and Environmental Economics)가 실시한 저탄소 전력공급 모델링 결과, 신재생e만으로는 경제적인 저탄소 공급이 어려우며 원자력을 포함한 다양한 에너지 전력원 믹스가 필요하다는 결론 도출⁸⁾.

** 원전의 제어봉 및 봉산수 조절을 통해 부하추종운전이 가능하며 프랑스의 경우 ‘70년대 부터 365일 24시간 일일부하추종운전 및 주파수 제어 운전 시행 중.

○ 향후 원전의 이용 범위는 전기 생산뿐만 아니라 파생·융합 분야로(수소 및 열 공급, 해양/우주 연계 등) 확대될 계획.

－ 수소는 산업 공정, 운송 및 에너지 저장수단으로 그 수요가 확대되고 있으며*, 현재의 저탄소 수소(약 10%)의 경우 대부분 탄소포집저장(CCS) 기술과 연계되어 있으나 향후 저탄소 생산에 있어 신재생에너지와 함께 원전 활용이 검토 중**.

6) 원자력정책 Brief Report 2022-01호(통권 63호), 청정 수소생산 기술과 원자력의 활용 가능성, p.3.

7) IEA(‘20), World Energy Outlook 2018, p.50.

8) Jane C.S. Long et al.(‘21), Clean Firm Energy is the Key to California’s Clean Energy Future, p.4.

* 국제에너지기구(IEA)는 세계 수소 소비량이 '20년 90 Mt/년 수준에서 '30년에 200 Mt/년, '40년에 390 Mt/년으로 급증 전망.

** 미국은 최소 1개의 원전 수소 생산 시설을 포함한 지역청정 수소 허브 개발에 80억 \$를 투자하기로 하였으며, 주요국은 950°C에서 운용될 수 있는 초고온가스로(VHTR)를 개발 중.

나. 원전연료 시장 현황 및 전망

1) 원전연료 시장 현황

○ 우리전쟁 이후 자원안보 관점에서 원전 핵주기산업 강국인 러시아 농축 의존도를 줄이려는 미국주도 서방국가들과 반러시아 국가들의 노력이 진행 중.

– 정광·변환·농축 가격은 우-러 전쟁 이후 글로벌 공급 불확실성으로 인해, 전쟁 전보다 약 3~5배로 급등.

– 미국은 에너지 자원안보 및 자국의 핵주기 산업 보호를 위해 러시아산 농축우라늄 수입금지법을 공포(H.R.1024, 2024.5.13.)*.

* 2040년까지 러시아산 농축우라늄 수입 금지, 대체자원이 없거나 러 농축우라늄 수입이 국익에 부합하는 경우에 한하여 2027년까지 적용 유예.

– 러시아산 VVER 노형이 설치되고 원전연료를 전량 러시아에 의존하던 동유럽 국가들은 원전연료 소요량의 일부 또는 전량을 서구권으로 전환하기 시작.

– 캐나다, 일본, 프랑스, 영국, 미국 5개국은 G7 원자력에너지 포럼에서 글로벌 선행핵주기 공급망 강화를 위해 5개국 주도로 42억 달러 투자에 합의(2023.3.).

○ 러시아 의존도 감축 기조로 2024년부터 서구권의 수요 대비 공급은 정광·변환·농축 각각 80%, 80%, 90% 수준으로 공급 부족이 발생.

– 러시아는 정광·변환·농축의 글로벌 공급 점유율이 각각 15%, 30%, 40%를 차지하고 있으며, 각 영역에서 서구권으로 공급 중.

– 변환과 농축은 공급사가 전 세계에 4~6개 수준인 과점 시장으로, 단일 업체들의 평균 점유율이 20% 내외인 점을 감안하면 단기적 공급 부족 발생 가능.

2) 원전연료 시장 전망

○ 탈탄소에 따른 원전 확대 트렌드로 글로벌 핵연료 수요는 2040년까지 현재 대비 50% 증가가 예상되나, 정광·변환·농축의 공급은 각각 20%, 20%, 30% 확대에 그칠 것으로 예상*.

- 특히 정광과 변환은 2040년 수요 대비 공급이 각각 80%, 90%에 그칠 전망.

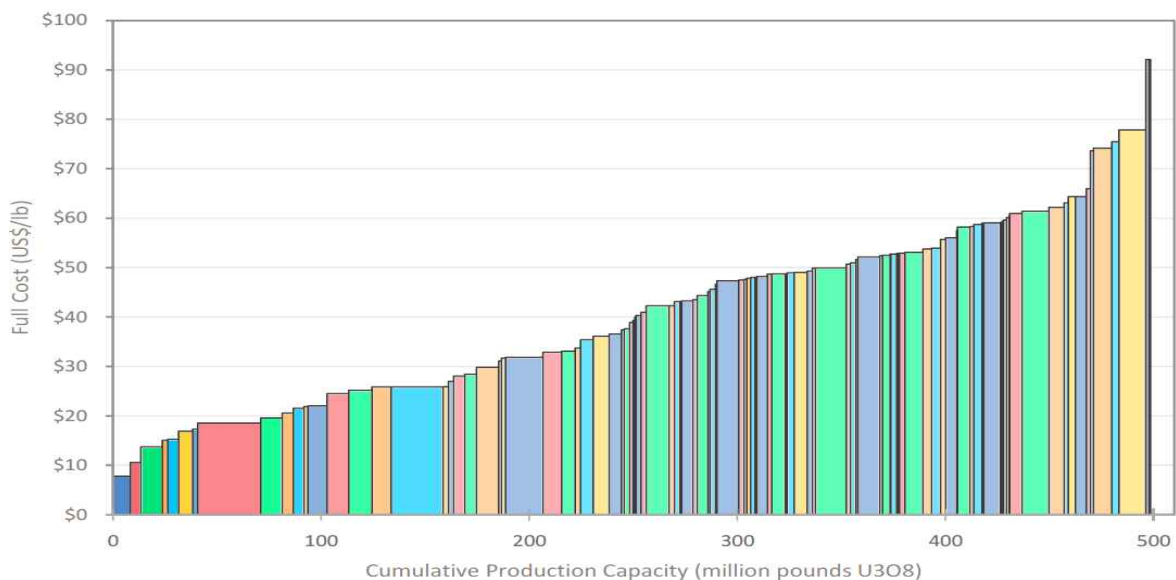
[표 2-1] 세계 원전연료 수요 및 공급 전망

구 분	원전 수요	원전연료 공급		
		정광	변환	농축
2024년	394GWe	55,000tU	66,500tU	64,000tSWU
2040년	599GWe	66,000tU	77,500tU	84,500tSWU
증가율	50%	20%	20%	30%

* 현재 발표된 계획 기준, 농축의 경우 차세대 기술을 포함한 농축시설 증대계획 반영.

* 유티 우라늄 광산의 생산재개 및 신규/기존 변환사의 변환용량 확충 계획은 가시화된 부분이 아직 미미한 수준.

- 정광은 기존 채굴광산의 고갈 등으로 인해 2030년 전후부터 공급 부족이 발생할 것으로 전망되나, 가격 상승으로 유티광산의 생산재개 및 생산단가가 높은 광산의 탐사·개발 투자가 확대되어 공급부족이 해소될 것으로 전망.



[그림 2-3] 글로벌 우라늄 광산(운영, 탐사·개발, 채굴중지) 누적용량 및 생산 단가⁹⁾

- 변환은 뚜렷하게 발표된 설비용량 확장 계획이 없어 단기적으로 공급 부족이 예상되나, 설비확장 기간과 비용이 상대적으로 빠르고 낮아, 기존사업자들의 설비 확장으로 공급부족이 완화될 것으로 예상.

9) UxC LLC, Uranium Production Cost Study(2023.9.), pp 56.

- 서구권의 대 러시아 직·간접적 제재에 따른 글로벌 수급 불안정성에 대비하기 위해 원전운영사들은 비축 및 보유재고를 증가시켜 단기적으로 수요공급 불균형이 심화.
 - 대부분의 기존 변환 사업자들은 변환 사업이 자사의 핵심 사업이 아니며, 주력사업인 정광 및 농축 사업 확장을 우선적으로 수립 중.
- 농축은 글로벌 관점에서 수급이 양호한 편이나 러시아가 공급의 40% 이상을 차지하고 있으며, 러시아를 배제하는 경우 서구권 독자 공급망은 신규업체 진입에도 불구하고 2035년까지 중장기 공급 부족 예상.

[표 2-2] '23년 세계 농축시설 설비용량 및 점유율¹⁰⁾

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* 및 프랑스**는 서구권의 탈 러시아 기조로 취약해진 농축 공급망 강화를 위해, 보유 농축시설 용량의 15~30% 확장 계획을 수립하였으며, 2028~2030년부터 공급이 가능할 것으로 전망.

* Urenco: 영국 Capenhurst 고순도저농축우라늄(HALEU) 생산설비 구축계획(150kSWU) 및 네덜란드 Almelo(+750kSWU) 및 미국 뉴멕시코(+700kSWU) 확장계획 수립.

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

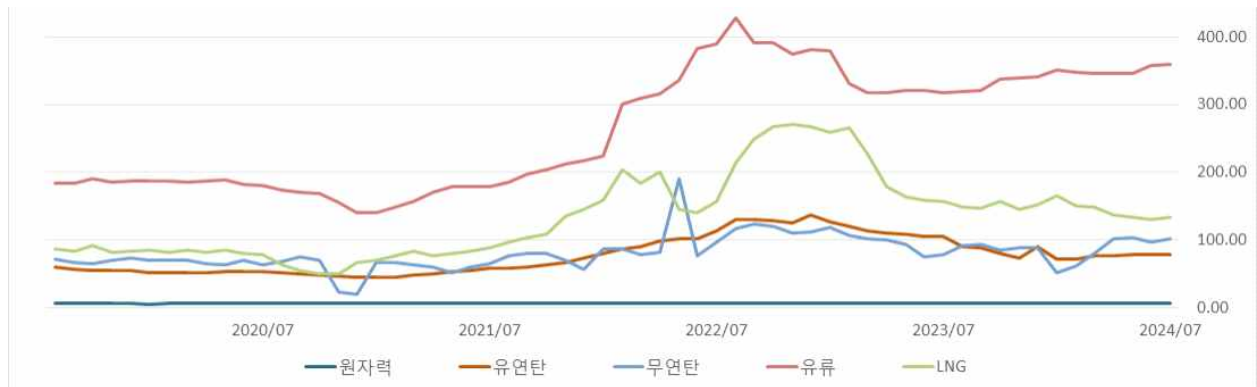
- 농축 신규/재진입 업체는 미국 Centrus*, 일본 JNFL 등이 있으나, 상용화에 따른 추가 공급은 모두 2030년 이후로 전망.

* 미국 DOE는 Centrus사의 고유 원심분리기 개발을 지원, 오하이오 주 Piketon 지역에 설치·운영하는 HALEU Demonstration Project를 수립하였으며, '23년 말 HALEU 최초 시범생산 및 납품에 성공(2023.12.).

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

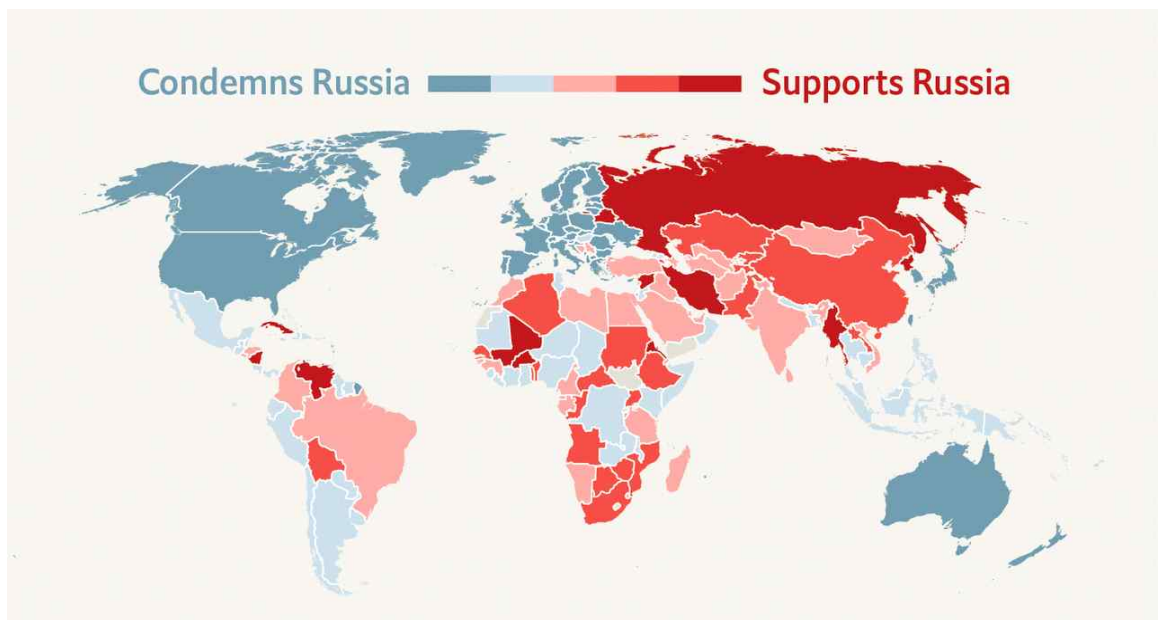
2. 국내 가동 경수로 우라늄 수급 전략 시사점

- 국내 원자력은 화력 등 타 발전원과 비교하여 발전원가 대비 연료비 비중이 매우 낮아 전기요금 상승 등 국가경제 위기 유발 가능성은 적으나, 연료수급 자체에 대한 불확실성 증가 중.
- 최근 5년간 발전원별 정산단가 대비 연료비단가의 비중은 원자력 11.5%, 유연탄 64.9%, 무연탄 64.4%, 유류 86.8%, LNG 80.4%를 기록.



[그림 2-4] 발전원 별 연료비 단가 이력(2019~2024년)¹¹⁾

- 우리전쟁 이후 전 세계는 미국·EU 중심의 서구권과 중국·러시아 진영의 경제 블록화가 가속화되고 있어, 자원안보의 중요성 증가.



[그림 2-5] 글로벌 경제 블록화¹²⁾

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

12) The Economist - “Who are Russia’s Supporters?” (2023. 3. 31.)

- 대한민국은 세계 주요 원자력 강국 중 유일하게 자국 내에 원전연료 선행핵주기 시설이 완비되어 있지 않아, 자국의 원전연료 수급이 지정학적 여건 및 세계 경제 정책 등에 매우 민감함.

[표 2-3] 원자력 주요 국가별 원전 및 선행핵주기 시설 현황¹³⁾

국가		대한민국	프랑스	미국	중국	러시아	일본
운영원전(기)		26	60	94	56	36	33
건설원전(기)		2	1	0	32	4	2
핵주기 시설	정광	없 음	Orano Mining (프)	Cameco(캐)	CNUC, CGN	Uranium One ARMZ	5개 상사*
	변환		Orano CE(프)	Cameco(캐) ConverDyn(미)	CNEIC	TVEL/TENEX	없 음
	농축		Orano CE(프) Urenco(영)	Urenco USA (미)	CNEIC	TVEL/TENEX	JNFL
	성형 가공	KNF	Framatome (프)	Westinghouse (미)	CNNFC	TVEL	NFI, 미쯔비시

* 미쯔비시, 미쓰이, 스미토모, 마루베니, 이토추 중심으로 우라늄 광산 소싱, 투자 및 거래 중.

- 미국은 민간 주도로 다양한 시장 참여자를 통해 선행핵주기가 내재화되어 있으며, 러시아 의존도 탈피를 위한 민간참여 선행핵주기 인프라 강화에 정부가 지원.
- 프랑스는 정부 및 공기업 주도로 선행핵주기가 내재화되어 있으며, 세계 원전 생태계의 핵심 공급자로 자체 수급이 가능.
- 중국 및 러시아는 강력한 정부 주도 및 원자력 사업의 완전한 수직 계열화로 원전연료의 수급 뿐만 아니라 연료공급이 포함된 해외원전 수출에도 유리.
- 일본은 한국과 유사하게 선행핵주기가 내재화 되어 있지는 않으나, 높은 재고수준 및 시장 중심의 원전 생태계 활성화로 원전연료 수급 리스크는 한국보다 낮음*.

* 일본 내 5개 상사가 우라늄 정광, 변환, 및 농축의 국제거래 등 시장활동에 적극적으로 참여 중.

* 지역별 원전운영사는 일본 상사와 함께 우라늄 광산, 농축시설 등 선행핵주기 투자에 공동으로 참여하여, 선매권 등 안정적 수급을 위한 대책 마련.

* 후쿠시마 사고 이후 원전가동 급감으로 인해 발생·축적된 대량의 운영재고는 오히려 단기 수급 안정성을 향상시켜 주고 있음.

13) World Nuclear Association - Information Library/Country Profile(2024. 5.)

○ 원전연료 수급 불확실성을 완화하기 위해 전략적 공급처 다변화, 신뢰할 수 있는 우방국과의 협력과 정부 주도의 핵주기 자강 등 자원안보 전략이 필요.

- 한국은 상대적으로 저렴한 러시아산 원전연료(정광·변환·농축)에 대한 의존도가 타 국가 대비 상대적으로 높아, 자원안보 위협을 저감할 수 있는 공급 포트폴리오의 개선 필요

[표 2-4] 주요 국가 별 대 러시아 농축 의존도 및 목표

국가		대한민국	EU	미국	일본
러시아 의존도	현재	35~40%	30~35%	20~25%	낮음(10% 미만)
	목표 (’28년~)	감축(수치 미정)	10~15%	완전 자립(0%)	유지(10% 미만)

- 선행핵주기의 단기적 내재화가 불가한 상황에서, 한국은 선행핵주기 주요 국가의 인프라를 활용하여 원전연료 수급 리스크를 저감하는 것이 필수적임.
- 한국과 여건이 유사한 일본의 모델을 참조하여, 민간 주도의 원전 생태계 다변화 및 정부의 정책적/경제적 지원 확대를 통해 우라늄 수급의 유연성 향상 필요.
- 중장기적으로는 원전산업 구조 개편, 국내 핵주기시설의 유치 등 국가간 협력을 통한 국내 핵주기 산업의 부분적 수직계열화 달성을 목표로 추진.

○ 한국 미래 연료수급을 위한 관산학연 협업 전략 요약을 하면 다음과 같음.

- 우선적으로 비축량 증대, 일부 수의계약 추진 등 한수원의 연료구매 전략의 변화 필요.
- 둘째 광산개발, 농축 및 변환의 장기계약과 직접투자 등 서구권 협력 확대 필요.
- 마지막으로 한미 양자간 협력체계를 다각적으로 구축하고, 이를 바탕으로 핵주기의 마지막 퍼즐인 농축/재처리 장기동의를 얻도록 관산연이 장기적인 협업을 해야 함.



[그림 2-6] 한국 미래 연료 수급을 위한 협업 전략

미래형 핵연료 수급 및 제조 현안

- » 기존 상업용 경수로 핵연료 농축도 제한치인 5%를 초과하는 LEU+ 핵연료 (농축도 5-10%)는 차세대경수로의 핵연료 방출 연소도와 연료봉 출력증진에 활용될 수 있음. 국내에서는 2029-2030년 부터 LEU+ 시험 핵연료 제작에 필요한 LEU+ 핵연료 수요가 발생할 것으로 전망함. 국내 LEU+핵연료 상용화 기술은 2030년대 후반 - 2040년대 초반에 완성되고 2040년대 초반부터는 본격적인 상용 LEU+ 핵연료 국내 수요가 발생할 것으로 예상됨. LEU+ 핵연료는 기존 해외 공급사를 통해 수급 가능하나 초기 시장의 LEU+ 공급량은 제한적일 것으로 예상되는 만큼 기존 해외 공급사와의 협의를 통해 LEU+ 수급을 적기에 추진할 필요 있음.
- » HALEU (농축도 10-20%) 핵연료는 비경수형 차세대 원자로에 실증에 범용적으로 활용될 수 있으며 국내 차세대 원자로 실증 연구개발 진척도에 따라 국내 수요 시기가 결정될 것으로 전망함. HALEU 핵연료는 미국의 Centrus 사와의 협의 및 장기 선매 계약 등을 통한 수급을 추진해 볼 수 있음. LEU+ 핵연료와는 달리 HALEU 핵연료는 기존 농축 시설을 활용한 생산이 불가능 하기에, 기존의 해외 농축 우라늄 공급사를 통한 수급 가능성에 많은 불확실성이 존재함. 따라서, 적기 수급을 위한 사전 준비가 더욱 중요할 것으로 전망함.
- » 입자기반 TRISO 핵연료는 차세대 고온 원자로에 범용적으로 사용될 수 있는 핵심 전략기술로써 미국과 중국을 위시하는 차세대 원자력 기술 선도 국가에서는 관련 제조 기술과 시험 검증 기술을 확보하였음. 이는 차세대 고온 원자로 실증의 초석이 되었음. 국내에는 TRL 3.5 수준의 실험실규모 TRISO 핵연료 제조 핵심기술이 확보되어 있으나, 퇴직에 의한 연구자 자연감소 및 정부지원 감소로 인한 연구자 이탈로 국내 피복입자핵연료 연구 역량 소실의 위기에 직면하고 있음. 국내 고온가스로 실증 사업을 계기로 피복입자핵연료 연구 인프라 재구축이 절실함. 동시에 국내 용융염 원자로 사업의 실물화를 위해서는 용융염 핵연료 제작 설비 구축에 대한 지원이 확대되어야 함.

1. 미래형 경수로 핵연료 LEU+ 수요 전망 및 수급 방법 분석

- LEU+는 농축도 5-10% 구간의 핵연료를 지칭함 (그림 3-1). 기존 상업용 경수로 핵연료 농축도 제한치인 5%를 초과하는 LEU+핵연료는 차세대경수로의 핵연료 방출연소도와 연료봉 출력증진에 활용될 수 있음.



[그림 3-1] 핵연료 농축도 분류: LEU(<5%), LEU+ (5-10%), HALEU (10-20%)

- 핵연료 5% 농축도 제한치는 1954년 미국의 AEC (U.S Atomic Energy Commission)의 Hafstad의 보고서에서 유래함 (Lawrence R. Hafstad's Memorandum)¹⁴).
- 해당 보고서는 미국의 해외에 연구로 수출 관련 규제에서 적정 핵물질 제한량에 대한 근거가 담긴 보고서로, 임계시 1kt TNT의 폭발력을 기준으로 핵연료 분량을 제한하고 있음. 보고서 발췌: “No foreign country ought to receive enough material to make a single nuclear explosive device with a yield of one kiloton TNT equivalent.”
- 위 보고서에서 20% 농축도를 지닌 31kg의 핵연료는 이론적으로 1kt TNT의 폭발력을 가질 수 있는 것으로 계산됨.
- 이는 연구로 핵연료 제한치를 결정하는 기준으로 사용되어 오늘날에도 20% 농축도는 저농축과 고농축 핵연료를 구분하는 기준으로 사용되고 있으나 31kg는 폐기되었음. 이는 20% 농축도 기준의 근거와 실효성에 대한 의문을 제시하는 근거로 작용하고 있음.
- AEC의 보고서에서 농축도 10% 이하의 핵연료는 핵무기로 전환될 수 없음을 적시하고 있음.

○ LEU+는 기존의 농축 공급사를 통해 수급 가능할 것으로 전망됨. 국내 LEU+ 핵연료 상용화 사업 진척을 고려하여 사전 협의/계약을 추진하는 것이 바람직함.

- LEU+ 핵연료는 기존 해외 공급사를 통해 수급 가능함*.
- * ORANO (社)는 2025년도 까지 6% 상업용 농축 우라늄을 공급하고 2030년도까지 6% 이상의 상업용 농축 우라늄을 공급할 계획임. Urenco (社)는 LEU+ 생산을 위해 미국과 영국 농축공장의 인허가 갱신을 추진중에 있음.

14) Lawrence R. Hafstad, Research Reactors for Foreign Application (Enclosure “C”), Washington, DC, 1954, ipfmlibrary.org/haf54.pdf

- 초기 시장의 LEU+ 공급량은 제한적일 것으로 사료됨. 기존 해외 공급사와의 협의를 통해 LEU+ 수급을 적기에 추진할 필요가 있음.
 - * LEU+ 핵연료가 미래 원자로의 기술 격차를 결정하는 초격차 기술로 활용되는 가능성을 배제할 수 없음. 이에, 사전에 농축 공급사와의 협의/계약을 통해 사전에 물량을 확보하는 것이 중요할 것으로 예상됨.
- LEU+ 핵연료의 가격은 기존 5% 이하 농축 핵연료에 비해 증가할 것으로 예상되나, 정확한 가격 예측은 현시점에서 불가능함.
- 미국 DOE는 Centrus사의 고유 원심분리기 개발을 지원, 오하이오 주 Piketon 지역에 설치·운영하는 HALEU* Demonstration Project를 수립하였으며, '23년 말 HALEU 최초생산 및 납품에 성공(2023.12.).
 - * 고순도저농축우라늄(High Assay Low Enriched Uranium): 농축도 10~20%의 농축우라늄으로, 향후 소형모듈형원전(SMR)을 포함한 제4세대 원전의 연료로 사용.
- 대한민국은 LEU+핵연료 상용화 기술개발을 위한 예비타당성조사를 추진하고 있음. 위 기술개발 계획이 추진될 경우 약 2029-2030년 부터 LEU+ 시험 핵연료 제작에 필요한 LEU+ 핵연료 국내 수요가 발생함.
 - 연소 시험에 필요한 LEU+ 시험 연료봉 (Lead Test Rod, LTR) 및 시험 집합체 (Lead Test Assembly, LTA) 제작 수요가 발생할 것으로 예상됨. 이에, 2027-2028년에는 해외 공급사를 통한 구체적인 LEU+ 수급 계획이 도출되어야 함.
 - * 2024년에 추진중인 산업통산자원부 차세대 핵연료 기술 예비타당성조사 논의 내용 참고.
- 국내 LEU+핵연료 상용화 기술은 2030년대 후반 ~ 2040년대 초반에 완성될 것으로 추정됨. 2040년대 초반부터는 본격적인 상용 LEU+ 핵연료 국내 수요가 발생할 것으로 예상됨.
 - 국내 핵연료 제조 시설 인허가, 핵연료 운반 용기 인허가, 핵연료 검증용 조사 실증 시험을 포함한 일정*.
 - * 2024년에 추진중인 산업통산자원부 차세대 핵연료 기술 예비타당성조사 논의 내용 참고.

2. 미래형 비경수형 핵연료 HALEU 수요 전망 및 수급 방법 분석

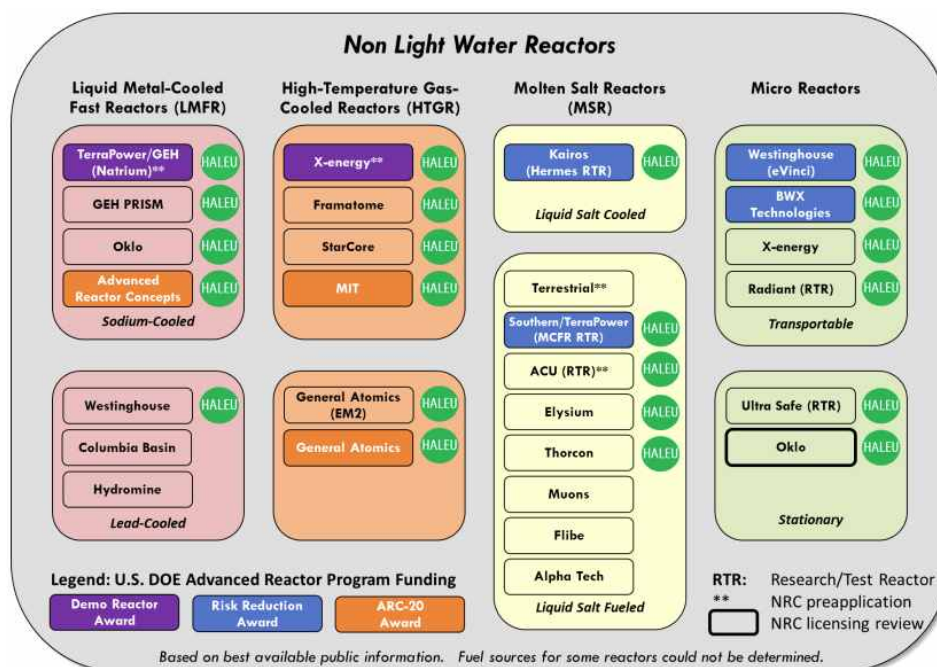
- 미래형 비경수형 원자로로는 물이 아닌 냉각재로 사용하는 차세대 원자로를 지칭하며, 2022년 기준, 전 세계적으로 약 67종의 비경수형 원자로를 소형모듈 원자로(SMR) 형태로 연구개발 중¹⁵⁾.

- 냉각재의 종류에 따라 액체금속냉각고속로(Liquid Metal-Cooled Fast Reactor, LMFR), 고온가스냉각로(High-Temperature Gas-Cooled Reactor, HTGR), 용융염원자로(Molten Salt Reactor, MSR) 등으로 구분*.

* 운전온도 : HTGR (약 700°C ~ 1,000°C), LMFR (약 400°C ~ 550°C), MSR (약 550°C~700°C).

- 상대적으로 작은 크기의 노심으로 원자로의 효율을 증대시키고 운전 수명을 늘리기 위해 재순환 연료(Pu, TRU 등)를 제외하면 대부분 HALEU를 핵연료로 설계.

- U-235 농도가 5%~20%로 농축된 HALEU를 사용할 경우, 핵연료 이용률 증가, 원자로 성능 향상, 초장기 운전 가능, 재장전 주기 축소, 노심 크기 축소, 폐기물 감소, 핵확산 저항성 증가 등의 장점 확보 가능¹⁶⁾.



[그림 3-2] 미국에서 건설 계획 중인 미래형 비경수형 원자로의 핵연료¹⁷⁾

가. 유럽의 미래형 비경수형 핵연료 공급 방안

- 유럽은 과학, 산업, 의료에 필요한 동위원소 생산을 목적으로 하는 연구용 원자로의 핵연료로서 HEU를 사용해 왔으나, 핵확산 위험성 방지 및 안전성을 강화하기 위한 조치로 HEU를 HALEU로 전환하는 프로젝트를 진행 중이며

15) Third Way, 2022 Advanced Nuclear Map : Charting a Breakout Year (2022).

16) Lucy Ashton, Fuelling the Future: Building Fuel Supply Chains for SMRs and Advanced Reactors, Nuclear Innovations for Net Zero, IAEA Bulletin, Vol.64-3 (2023).

17) Centrus Energy, Centrus Energy Corp: Poised for Growth (2021).

2035년까지 완료할 예정.

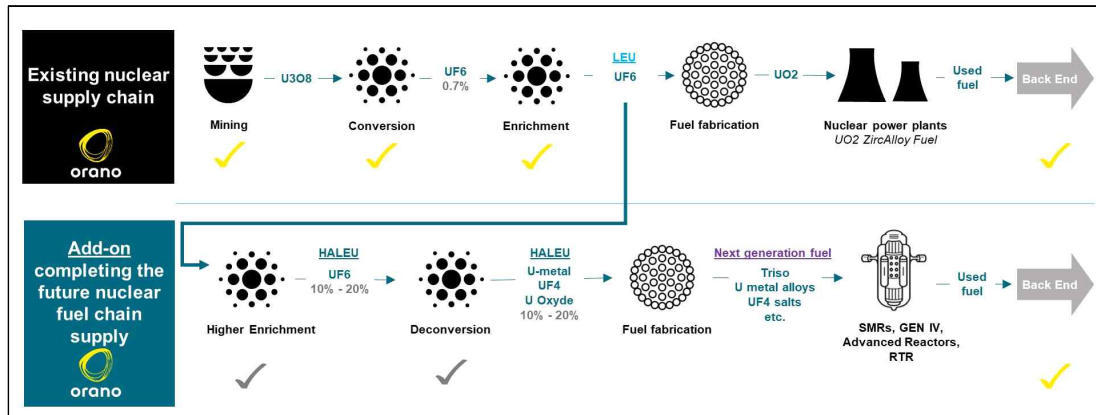
- HALEU는 연구용 원자로와 방사성 동위원소 생산 이외에 소형모듈원자로 (SMR)와 4세대 비경수형 원자로 시스템 또는 핵 추진 우주 탐사를 위한 선진원자로 배치를 위해 필수적이며 향후 수요가 크게 증가할 것으로 전망.
- 특히, 유럽연합(EU)는 현재 HALEU를 주로 러시아와 미국에서 수입하고 있지만, 지정학적 위험과 공급망 문제로 의존도를 줄이기 위한 방안을 모색.
- 러시아의 HALEU 공급에 대한 의존은 유럽의 에너지 안보를 위협할 수 있는 요소로 인식되면서, HALEU 공급을 다변화하기 위해 러시아 외의 공급원, 특히 미국과 같은 동맹국과의 협력을 강화하고 있음.

Country	Research Reactor	Power (MW)	Annual Demand HALEU 2030 (kg/y) 2019 Report	Annual Demand HALEU 2035 Maximum Scenario (kg/y)	Annual Demand HALEU 2035 Minimum Scenario (kg/y)
Austria	TRIGA Mark II	0.25	1476	1256	676
Belgium	BR2	60			
Czechia	LVR15	10			
France	JHR	100			
	RHF	58			
Germany	FRM II	20			
Greece	DEMOCRITOS	5			
Hungary	VVR M2	10			
Italy	TRIGA	1			
	HOR Delft	2.3			
	HFR	50			
Netherlands	PALLAS	25 - 30			
Poland	MARIA	30			
Romania	PIETESTI	14			
Targets	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc				
Total				1256 kg/y	~700 kg/y

[그림 3-3] 유럽의 연간 HALEU 수요 전망¹⁸⁾

- 또한, ORANO, Urenco가 보유하고 있는 기존의 우라늄 농축 기술을 사용하여 HALEU를 독자적으로 생산할 수 있는 시설과 인프라를 구축하여 공급망의 안전성을 확보하기 위한 노력을 기울이고 있음.

18) Euratom Supply Agency, Securing the European Supply of 19.75% Enriched Uranium Fuel (2022).



[그림 3-4] ORANO 농축시설 확충 계획¹⁹⁾

- HALEU 공급 대안으로서 기존의 사용후핵연료 재활용 및 재처리 기술을 적극 활용하여 미래형 비경수형 선진원자로의 안정적인 핵연료 공급과 공급망의 취약성을 줄이기 위해 노력(ex. ORANO 재처리 후 MOX/TRU 공급, 영국 잉여 Pu 처리 프로그램 등).
- EU는 HALEU의 공급망의 안정성을 높이기 위해 HALEU의 전략적 비축, 공급망 위기 관리, 장기계약 체결 등 정책적, 규제적 지원을 강화하고 있음.

나. 미국의 미래형 비경수형 선진원자로 HALEU 수요

- B. Dixon 등은 2050년 탄소중립 시나리오를 달성하기 위해 필요한 미래형 선진원자로 배치를 가정하여 HALEU 수요를 예측한 보고서²⁰⁾를 통해, 2020년부터 시작한 ARDP에서 계획하고 있는 단기형 실증 비경수형 선진원자로인 소듐냉각고속로 Sodium과 고온가스로 Xe-100의 배치 시나리오에 따라 필요한 HALEU 양을 계산한 결과, 2027년 초기 노심 공급을 시작으로 재장전용 노심을 포함하여 2035년에는 약 80 MTU/yr, 2050년에는 약 520 MTU/yr의 HALEU(19.75% U-235)가 필요할 것으로 예상하고, 누적량은 2050년 기준으로 5,350 MTU에 이를 것으로 전망함.
- ARDP(Advanced Reactor Demonstration Program) : 미국 의회와 정부는 2020년부터 선진원자로 실증 프로그램 추진을 통해 7년 내 배치를 위한 2개의 비경수형 선진원자로인 Sodium (SFR)과 Xe-100 (HTGR)과 10년~14년 내에 배치를 위한 5개의 원자로(KP-FHR, eVinci, BWXT, SMR-160, MCFR) 및 2030년대 중

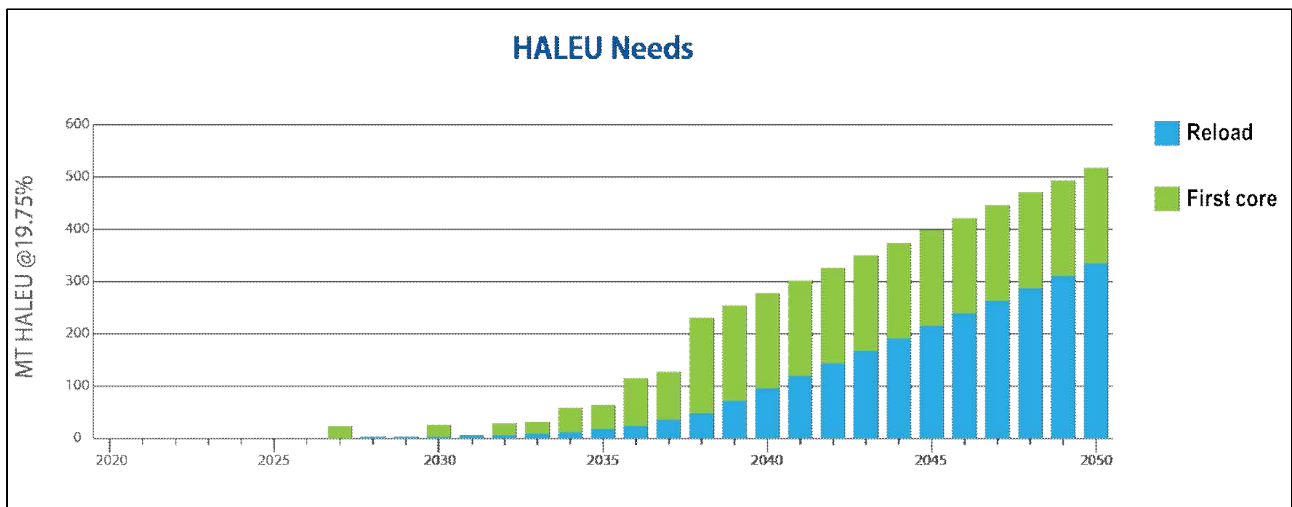
19) <https://www.orano.group.usa>

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

반에 실증을 위한 3개의 원자로 개발을 지원하고 있으며, 연방 정부 및 수많은 민간 자금 지원을 통해 탄소중립 시대에 원자력 산업의 주도권을 확보하기 위한 노력을 기울이고 있음.

- 2020년 NEI가 선진원자로 개발자를 대상으로 조사한 결과에서는 2035년 연간 HALEU 수요량이 약 500 MTU로 예측함. 이는 선진원자로 배치 속도와 배치 시점이 다르고, 선진형 경수형 원자로에 요구되는 HALEU가 포함되었기 때문임.

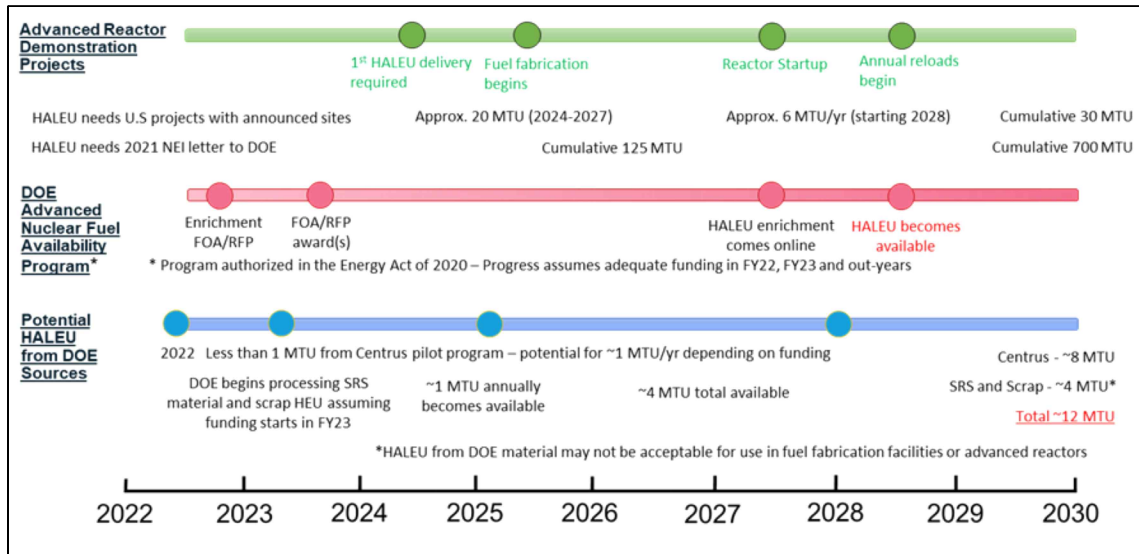
○ ARDP에서 10~14년 내 실증을 목표로 하는 4개의 비경수형 원자로에도 추가적인 HALEU 공급이 필요할 것으로 예상하고 있으며,²¹⁾ 민간기업들도 2020년대 중반~2030년대 초반까지 HALEU를 이용한 비경수형 선진원자로를 배치하는 것을 목표로 하고 있어 HALEU 수급의 필요성을 강조하고 있음.



[그림 3-5] 미국 비경수형 선진원자로를 위한 HALEU 수요전망(B. Dixon 외)

○ NEI가 미국 및 캐나다의 선진원자로 배치를 위해 필요한 HALEU 수요를 조사하여 예측한 자료에 따르면, 미국 내에 원자로 부지가 공개된 ARDP 프로젝트에 필요한 HALEU를 포함하여 2026년까지 누적 HALEU 수요가 125 MTU, 2030년까지는 700 MTU에 이를 것으로 추정함.

21) Nuclear Energy Institute (NEI), Establishing a High Assay Low Enriched Uranium Infrastructure for Advanced Reactors, NEI White Paper (2022).



[그림3-6] 미국 내 HALEU 잠재적 수요 및 생산 시점 비교(NEI)

다. 미국의 비경수형 선진원자로 HALEU 핵연료 공급 방안

- 미국은 비경수형 선진원자로 개발을 통해 기후변화에 대응하고, 선진원자로 기술 수출을 주도하고자, 안정적이고 경제적인 HALEU 공급을 위한 다양한 노력을 기울이고 있음.
- 2018년도부터 선진원자로 개발 및 배치를 지원하기 위해 핵 혁신 및 현대화 법안(Nuclear Innovation and Modernization Act), 핵 에너지 혁신 및 역량 법안(Nuclear Energy Innovation and Capabilities Act), 2020년 에너지법(Energy Act of 2020), 인프라 투자 및 일자리 법안(Infrastructure Investment and Jobs Act) 등을 제정함.
- 2020년 에너지법(Energy Act of 2020)의 HALEU 가용 프로그램*(HALEU Availability Program)과 인플레이션 감축법** 등을 통해 비경수형 선진원자로를 배치하는데 필요한 HALEU를 단계적으로 확보하기 위한 방안을 수립하고 실질적인 지원을 수행하고 있음.

* HALEU 가용성 프로그램(HALEU Availability Program) : 미국 내 HALEU 생산 공급 능력 확보를 위한 연구, 개발, 실증, 상업적 활동을 지원하기 위한 프로그램. 산업계의 HALEU 수요를 전망하고, HALEU의 단기, 장기적 공급 보장, HALEU를 이용한 선진원자로 실증 지원, HALEU 생산 비용 회수 계획 수립 등을 위해 NEI, GAIN, EPRI를 비롯한 70개 기관으로부터 300명 이상이 참여하는 HALEU 컨소시엄을 발족함.

** 인플레이션 감축법(Inflation Reduction Act, IRA) : 선진원자로 배치에 필요한 HALEU를 적기에 생산, 공급하기 위해 HALEU 가용 프로그램에 2026년 9월까지 총 7억달러의 예산

지원을 명시. 이에 따라 DOE는 HALEU 생산에 5억달러, HALEU 운반 시스템 설계/인허가에 1억달러, 기타 연구개발 및 실증, 상용화 지원 등에 1억달러를 HALEU 공급망 구축에 투자 예정.

- HEU downblending : HALEU 농축을 위한 상업적 생산 기반 구축의 진행과 함께, 선진원자로에 필요한 HALEU를 공급하기 위해, DOE는 1) INL의 EBR-II 사용후핵연료 처리를 통해 얻은 고농축 우라늄(HEU)을 희석(downblending)하는 작업을 진행하여 2028년까지 약 10 MTU의 HALEU를 확보하고, 2) Savannah River Site (SRS)에 연구용 원자로를 처리하고 보관 중인 HEU와 INL의 ATR 사용 연료를 처리하여 총 40 MTU의 19.75% HALEU를 확보할 계획임.
- 농축 인프라 구축 : 농축 우라늄의 수입 의존도를 줄이기 위해 미국 내 우라늄 생산 역량을 확대하고 있음. 특히, U-235 5%이하의 저농축 우라늄(LEU)에 대한 인프라 구축은 되어 있으나, 10% 이상의 농축도를 요구하는 HALEU를 생산하고 공급하기 위한 시설은 구축 단계임. Centrus는 HALEU를 최대 20% 농도로 농축할 수 있는 인가를 받은 유일한 농축업체로, 2019년 DOE와의 계약에 따라 오하이오 Piketon에서 HALEU 생산을 시연하기 위해 16개의 AC100M 원심분리기 캐스케이드를 건설하여 HALEU 생산 중.
 - 2023년 처음으로 20 kg의 HALEU 생산에 성공함. 2024년에는 900 kg를 생산하여 DOE에 공급할 예정이며, 원심분리기 캐스케이드를 확장 건설하여 연간 생산 역량을 6 MTU으로 올리는 것이 목표.
- HALEU 대안 기술 개발 : 미국 DOE는 CURIE* 프로그램을 통해서 경수로 사용후핵연료에서 유용한 자원을 회수하여 차세대 고속원자로의 핵연료로 재활용함으로써, 방사성폐기물의 양을 줄이고, 안전하고 효과적으로 관리할 수 있는 기술을 개발하고 있음. 이는 사용후핵연료의 재처리 기술을 통해 지속 가능한 핵연료 주기를 확립하고, 폐기물 문제를 해결하고, 미국의 에너지 안보를 강화하는 역할을 목적으로 함.

* CURIE : Consolidated Uranium Recovery and Integrated Extraction

라. 국내 비경수형 미래형 원자로 상용화를 위한 HALEU 수급 및 대안

- 2050 탄소중립 달성, 에너지 안보 강화, 원전 수출 경쟁력 확보를 위해서는 차세대 선진원자로 개발이 신속하게 추진되어야 함.

- 하지만, 러시아-우크라이나 전쟁으로 인해 전 세계적으로 HALEU의 수급이 불안해지고, 우라늄 농축 역량을 보유하고 있는 국가들은 자국의 HALEU를 우선 공급할 가능성이 매우 높기 때문에 국내에서 개발하는 선진원자로의 배치를 위해서는 HALEU 수급 노력과 함께 대안 수립이 병행되어야 함.
- 1안) MOX 연료 구매 : 프랑스 Orano는 Melox 공장에서 연간 150톤 규모로 생산하고 있는 MOX를 구입하고 변환하여 비경수형 선진원자로 핵연료로 활용(단기적 대안으로 적절하나, 한미원자력협정에 따라 미국의 동의가 필요).
- 2안) 위탁재처리 : Orano La Hague 재처리 시설을 통해 국내 경수로 사용후핵연료를 위탁 재처리하여 MOX 핵연료를 공급(단, 한미원자력협정에 따라 미국의 동의가 필요하며 사용후핵연료 운반비용 추가 및 방사성폐기물 이슈 발생 가능).
- 3안) 국내 파이로 처리 : 장기적인 방안으로 국내 경수로 사용후핵연료의 파이로 처리를 통해 TRU 연료 확보(에너지 안보 및 수출 경쟁력 확보의 장점이 있으나, 파이로 전 공정에 대한 미국의 장기 동의와 파이로 시설 건설 비용 발생).

3. 미래형 원전 실증을 위한 비경수형 핵연료 제작 이슈 및 필요 지원

가. 입자기반 TRISO 핵연료

- 입자기반 TRISO 핵연료는 차세대 고온 원자로에 범용적으로 사용될 수 있는 핵심 전략기술임.
- 고온가스로, 용융염 원자로, 우주 추진용 원자로를 위시하는 다양한 고온 원자로에서 TRISO 핵연료를 도입하고 있음.
- 미국 에너지성 (Department of Energy, DOE)은 자국 내 고온가스로 개발을 지원하기 위해 AGR Fuel Development & Qualification 프로그램을 통해 TRISO 핵연료 자격화 (Qualification)에 필요한 제조공정과 품질관리/보증 체계를 기술을 개발하고 중성자 조사 및 안전성능 시험자료를 확보.
- 미국 원자력규제기관 (U.S NRC)은 AGR 핵연료 관련 TR 승인하고 선진원자로 핵연료 자격화 평가체계를 구축하였음. 이를 통해 신규 TRISO 핵연료 자격화를 위한 조사시험 최소화와 인허가 기간 단축이 가능해짐.
- AGR 프로그램을 통해 구축된 TRISO 핵연료 제작 기술과 자격화된 조사시

협 데이터는 미국의 차세대원자로 실증사업 (Advanced Reactor Demonstration Program, ARDP)의 근간을 이루고 있음.

- X-ENERGY(社)의 Xe-100 노형이 ARDP의 최우선 실증 순위인 Demonstration 랭킹에 선정된 배경에는 AGR 프로그램을 통해 자격화된 TRISO 핵연료를 활용하는 점이 주요했음.
- KAIROS POWER(社)의 용융염 원자로 HERMES의 실증로 건설인허가 취득에도 AGR 프로그램을 통해 검증된 TRISO 핵연료 사용이 주요한 기술적 배경으로 작용했음.
- 중국은 고도화된 TRISO 핵연료 제작 기술과 실증 데이터를 보유하고 있음. HTR-10과 HTR-PM 실증을 통해 TRISO 핵연료 기술을 세계 선도 수준으로 고도화 하였으며 이는 중국이 추진하는 다양한 고온 원자로 실증프로그램에 활용되고 있음.
- 일본 역시 자체 TRISO 핵연료 제조 시설을 구축하였음.
- 국내에는 TRL 3.5 수준의 실험실규모 UO_2 TRISO 핵연료 제조 핵심기술이 확보되어 있으며 추가적으로 UCO 연료핵 제조, 파일럿규모 유동층 피복 등의 기술을 확보할 경우, 단기간에 인허가 수준의 국내 TRISO 핵연료 공급 기반 구축이 가능함.
- 국제적으로 경수로용 UO_2 소결체 핵연료, 고속로용 금속핵연료와 더불어 피복입자핵연료는 (초)고온가스로 핵연료로 상용화가 급속히 진행되고 있으며 최상의 안전성과 신뢰성을 기반으로 초소형, 이동형 및 우주용 원자로 등에 활용 영역이 확대일로에 있어 국산화 기반 구축이 시급함.
- 퇴직에 의한 연구자 자연감소 및 정부지원 감소로 인한 연구자 이탈로 국내 피복입자핵연료 연구역량 소실의 위기에 직면하고 있는 바, 국내 고온가스로 실증을 계기로 피복입자핵연료 연구 인프라 재구축이 절실함.

나. 액체 용융염 핵연료

- 용융염원자로(MSR) 실증을 위한 핵연료 제작 이슈 및 필요 지원.
- 미래형 비경수형 선진원자로 중 하나인 용융염원자로*는 고체연료를 사용하는 SFR 또는 VHTR과 달리 고온의 액체 용융염을 핵연료로 사용.

* 용융염원자로(Molten Salt Reactor, MSR) : 알칼리 또는 알칼리 토금속의 양이온(Li+, Be2+, Na+, K+, Mg2+ 등)과 할로젠 이온(F-, Cl-)이 이온 결합한 화합물을 운반체 염 또는 냉각재 염으로 사용하고, 악티나이드 화합물(UCI₃, UF₄, (TRU)Cl₃ 등)과 혼합한 액체연료를 사용하는 원자로.

- 국내에서 실증을 목표로 개발하는 MSR은 열출력 100 MWth의 선박 추진용이며, 초기노심은 HALEU 기반의 UCl₃와 NaCl-KCl이 혼합된 염소기반의 용융염 핵연료로 설계하고 있으며, 초기 연료 장전 후 교체 없이 30년 동안 장주기 운전하는 개념임.
- MSR 실증을 위해서 필요한 핵연료의 양이 수 톤 이상이 될 것임을 가정할 때, 대용량의 금속 HALEU를 고순도의 UCl₃로 염소화하고, 핵연료를 제조하는 장치의 개발 및 관련시설 구축이 우선되어야 함.
- 특히, MSR의 장기 운전 시, 구조재의 부식을 최소화하기 위해서는 대용량의 초기 용융염 핵연료 내 포함되는 불순물과 수분을 수~수십 ppm 이하로 낮출 수 있는 전처리 기술 및 장치 개발이 필요.
- 제조된 대용량의 HALEU 액체 핵연료를 원자로 vessel에 주입하거나, MSR 주요 기기의 개별효과, 종합효과 시험 검증을 위해 전처리 된 냉각재 용융염 또는 모의 DU 액체핵연료를 저장, 운반, 주입할 수 있는 용기 및 장치의 개발이 필요.
- 초기 노심을 위해 제조된 용융염 핵연료의 열물리 물성, 화학 물성, 농도, 불순물 등의 측정을 위한 분석용 Ar 핫셀 구축이 필요.
- 건설인허가 획득과 관련하여 중성자 조사 전·후, 연료 및 구조재료의 특성을 평가하고 노심 발생 off-gas를 분석할 수 있는 시설 구축 또는 해외 기관과의 공동협력 필요.

핵연료 상용화 및 인허가 현안

- » ATF는 후쿠시마 원전 사고와 같은 대형사고 발생을 방지할 수 있는 핵심 요소 기술로 국내에는 2030년대 상용 적용되어 원전의 안전성을 개선할 수 있을 것으로 전망.
- » LEU+ 및 핵연료 인허가연소도 증가 기술을 안전성 기반의 ATF에 적용할 경우 원전의 탄력 운전 성능 및 안전성 향상, 핵연료 효율성 향상, 사용후 핵연료 방출량 저감, 탄소중립 이행 증진과 가동원전 경제성 향상 가능.
- » 단기적용을 목표로 하는 경수로형 핵연료와 유사한(코팅 피복재 및 Doped UO₂ 소결체 등) ATF는 경수로형 심사지침서 개선을 통해 효율적인 인허가 심사 가능.
- » 세계적으로 차세대 원자로 실물화를 위한 핵연료 검증 및 자격화의 중요성이 높아지고 있음. 미국과 중국을 위시하는 차세대 원자로 실물화를 선도 국가에서는 핵연료 자격화 전략을 수립·추진 하고 있음. 국내에서도 핵연료 실증 시험과 자격화 전략을 수립하고 관련 기반 시설 확충을 통한 고유 역량 확보를 바탕으로 내실 있는 해외 협력을 추진 해야 함.

1. 핵연료 인허가 전략과 필요 요건

가. 환경변화

- 최근 가동 원전의 안전성, 효율성 및 경제성 향상을 위해 사고저항성 핵연료(ATF)와 우라늄 농축도 상향(5% 미만→20% 미만)을 통한 고연소 핵연료의 상용화 추진.
- 한전원자력연료社(KNF)는 사고저항성 핵연료(Cr 코팅 HANA-6/LAS 소결체)의 시범연료봉(‘24.4 장전) 및 시범집합체(‘25 장전 예정) 연소시험 수행과 상용화 추진²²⁾.
- 해외 핵연료 주요공급사인 WEC社(Cr코팅 ZIRLO 및 SiC 피복재, UN 소결체), Framatome社(Cr코팅 M5, SiC/금속 복합재 등), GNF社(FeCrAl 및 ARMOR 피복재 등)는 사고저항성 핵연료 시범연료 연소시험 수행(‘19년 이후) 및 상용인허가 신청 예정(‘26년 예정)²³⁾.
- 美 NEI 는 ‘20년대 중반까지 5% 이상의 LEU+적용하여 연소도 ~75 GWD/MTU

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

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

범위까지 인허가 연소도 상향 추진²⁴⁾.

※ 최근 WEC는 최대 8% 농축된 LEU+ ADOPT 소결체를 영국 스프링필드에서 생산하였고 ('24.8) Vogtle-2 원자로에서 시범연료집합체 조사시험 수행 예정('25년)²⁵⁾. 또한 WEC는 ATF를 적용한 EnCore 핵연료의 인허가 연소도를 62 GWD/MTU 이상으로 승인 받음²⁶⁾.

- 국내 과기정보통신부는 SMR 사용후핵연료 발생량 저감을 위한 LEU+/ATF 적용 핵연료 개발 착수('24.5)²⁷⁾.
- 美 NRC는 경수로에서 5% 이상(LEU+/HALEU) 농축된 핵연료를 사용할 수 있도록 하는 법제화 계획 승인(NRC, SECY-21-0109, '22.3).

○ 제4세대 선진원자로 및 SMR 개발과 맞물려 기존의 산화물 핵연료와 상이한 금속핵연료 및 TRISO 등 다양한 종류의 핵연료에 대한 인허가 수요 예상.

- 최근 국가과학기술자문회의에서 SMR과 선진원자력시스템 개발을 세부중점기술로 선정('24.8)²⁸⁾. 과기정통부는 민관합작 차세대원자로 개발과²⁹⁾ 한국형 차세대 원자로 기술개발 및 실증 프로그램(K-ARDP*) 추진('24.6)³⁰⁾.
 - * K-ARDP는 고온가스로(HTGR), 소듐냉각고속로(SFR), 용융염원자로(MSR) 등을 대상으로 단기실증(4~5년) 및 중장기(6~9년) 전략 유형으로 구분하며 기술개발 및 실증 지원
- 美DOE는 2억3천 달러 규모의 신규원자로 실증프로그램(ARDP)* 신설('20.5)³¹⁾
 - * 현재 TerraPower社의 Sodium 소듐냉각고속로, X-energy社 Xe-100 고온가스로, Kairos Power社 KP-FHR 용융염원자로 등 선정.

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

25) Westinghouse produces first batch of LEU+ fuel pellets (NuclearNewswire, '24. 8. 10)

26) Westinghouse accident tolerant fuel in US licensing 'first' (world nuclear news, '24. 8. 19)

27) 과기기술정보통신부, 2024년도 소형모듈원자로 사용후핵연료 발생량저감 핵연료기반기술 개발사업 신규과제 공고

28) 국가과학기술자문회의, 대한민국 과학기술주권 청사진, 24.8

29) 원자력진흥위원회, 차세대 원자로 민관협력 추진전략(안), 24.2

30) 과기기술정보통신부 보도자료, 인공지능·디지털 시대의 무탄소 에너지원, 차세대 원자력 신속 확보 본격화, 24.6

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

[표4-1] 상용화를 위해 개발 중인 핵연료*

구분		종류/원자로(개발사)
사고저항성 핵연료	단기	Cr코팅HANA6/LAS 첨가UO ₂ (KNF), Cr코팅M5/Cr첨가UO ₂ (Framatome), Cr코팅Opt.ZIRLO/CrAl첨가UO ₂ (Westinghouse), ARMOR코팅/FeCrAl피복재(GNF)
	장기	SiC피복재/금속UO ₂ 복합소결체(KNF), SiC피복재(Framatome), SiC피복재/U ₃ Si ₂ 혹은UN(Westinghouse)
선진 원자로 핵연료	산화물	iSMR(혁신형소형모듈원자로개발사업단), BWRX-300(GE-Hitachi), NuScale(NuScale Power), SMR-160(Holtec), SMR(Westinghouse), EM2 (GA)
	금속연료	Natrium(TerraPower), AURORA(OKLO), PRISM(GE Hitachi), ARC-100(ARC Clean Technology)
	TRISO	Xe-100(X-Energy), KP-FHR(Kairos Power), StarCore(StarCore Nuclear), eVinciTM(Westinghouse), SC-HTGR(Framatome), GT-MHR(GA), MMR(USNC), U-Battery(U-Battery Canada)
	용융염	MCFR(TerraPower), IMSR(Terrestrial Energy), MCSFR(Elysium Industries), GEM*STAR(Muons), ThorCon(Martingale), LFTR(Flibe Energy), Yellowstone(Yellowstone Energy)

*美 NRC 및 DOE 등 자료 재구성

나. 신형 핵연료 인허가 요건 및 전략

○ 규제기관은 신형 핵연료 및 원자로에 대한 효율적이고 효과적인 인허가를 위해 요건 및 규제조직 정비와 국제협력을 활발히 진행 中.

－ 美, 청정에너지를 위한 다목적선진원자력 배치 가속화법 (ADVANCE Act of 2024) 상원통과('24.6) 및 대통령 승인('24.7)³²⁾.

※ 동 법은 美 NRC의 미션을 조정하고 원자로 인허가 규정 정비와 ATF 및 신형 핵연료에 대한 인허가 능력 등 전문인력을 강화하는 내용 포함

－ 美 NRC는 비경수로 포함 신형원자로를 대상으로 하는 기술범용 (Technology-Inclusive)의 위험정보활용 및 성능 기반의 규제규칙 10CFR Part 53 개발 중('25년 완료 목표, SECY-23-0021).

※ 기존의 대형경수로 중심의 규제규칙 10CFR Part 50과 Part 52 하에서 신형 원자로에 대한 규제

32) Senate Passes Key Legislation To Speed Up Deployment Of New Nuclear Reactors(NUCNET, '24.6.19)

유연성을 일부 허용하고 있으나, 비경수형 등 선진원자로 설계가 새로운 규제이슈를 야기하므로 기술독립적이며 성능기반을 바탕으로 하는 새로운 Part 53 규제규칙 마련 중.

－ 佛 규제조직인 ASN(원자력안전청)과 IRSN(원자력안전.방사선방호연구소)의 통합을 결정하고 법률안을 의회에 제출('23.2) 및 상/하원 최종 승인('24.4). '25년 ASNR(원자력안전 및 방사선 방호청) 출범 예정. EPR2 원자로 건설 인허가(6~14개) 간소화 기대³³⁾.

－ 규제기관인 美 NRC, 加 CNSC, 英 ONR은 차세대 원자력 기술에 대한 기술검토 협력 MoC(Memorandum of Cooperation) 체결('24.3)³⁴⁾.

※ 동 협약의 일환으로 각국의 규제요건을 충족시키기 위해 공통 기준 수립과 기술 검토 수행 및 신규 혁신 기술 분야 협력 포함.

※ CNSC와 NRC는 GE Hitachi社가 개발한 SMR 노형 BWRX-300과 TRISO 핵연료 등에 대해 공동 검토 보고서 발간('23년)³⁵⁾.

○ 신형 핵연료에 대한 적기의 인허가를 위해 규제기관의 사전검토와 기술검토 절차개선 및 특정기술주제보고서 제도 등 활용 가능.

－ 규제의 불확실성을 최소화 하고 인허가 예측성을 높이기 위해 규제기관은 사전설계검토(韓, 원안위), Pre-Application Activities(美, NRC), Vender Design Review(加, CNSC), Generic Design Assessment(英, ONR) 제도 운영 중.

－ NRC는 ATF의 효율적인 심사를 위해 기존의 핵연료 개발이 완료된 후의 인허가 심사 착수 전략에서 핵연료의 개발 진행 중에 기술정보를 취득하고 관련 심사지침과 검증코드를 개발하는 전략으로 변경(NRC, ATF Project Plan, '19).

※ NRC는 ATF 검증기술 개발을 위해 주요 현상에 대한 PIRT(Phenomena Identification and Ranking Table) 수행 후 심사지침 및 검증전산코드 개발.

※ NRC는 Cr코팅 피복재에 대해 기존의 경수로형 심사지침(NUREG-0800)을 보완하는 임시지침(ATF-ISG-2020-01)을 발행.

－ 국내에서도 ATF의 조속한 상용화를 위해 규제기관 포함 4개 기관(KINS, KHNP, KAERI, KNF)이 기술협약 체결('22.5) 후 기술정보 공유 중.

－ 단기적용을 목표로 하는 경수로형 핵연료와 유사한(코팅 피복재 및 Doped UO₂ 소결체 등) ATF는 경수로형 심사지침서 개선을 통해 효율적인 인허가 심사 가능.

－ 특정기술주제보고서 승인제도는 원자력안전법 제100조에 따라 운영하고 있으며 승인된

33) Final Approval for ASN-IRSN Merger: Parliament Passes New Nuclear Safety Governance Law(Sfen, '24.4.16)

34) US, Canada And UK To Work Together On Technical Reviews of Next-Generation Reactors (NucNet, '24. 3. 13)

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

보고서를 인허가 신청서에서 참조할 경우에는 해당 신청 건의 적용 타당성만을 검토.

○ 신형 원자로 및 핵연료 인허가를 위한 규제기술 확보 현황 및 전략.

- 韓 원안위는 iSMR의 원활한 인허가를 위해 쟁점 기술사항에 대한 사전설계검토와 검증기술 확보 추진*. 비경수형 원자로에 대해서도 '30년 초까지 규제기준과 검증기술 등 안전규제 기반 구축 예정**36).

* 사전설계검토를 통해 개발의 시행착오와 규제의 불확실성을 최소화하고, 'SMR 규제연구 추진단'을 중심으로 검증·평가 기술 확보.

** 비경수로 규제를 위한 기반기술, 공통적용기술 등에 대한 신규 R&D 착수, 노형별 세부 검증기술 개발과 적기 인허가 심사 이행을 위한 규제인력 확충 및 양성 추진.

- 美 NRC는 비경수형 원자로의 핵연료 규제를 위해 주요설계기준(Principal Design Criteria)*37)과 금속핵연료 및 TRISO 핵연료에 대한 검증(Fuel Qualification)** 지침 발행38)39).

* 규제지침(RG 1.232) 문서로 SFR과 HTGR 비경수로의 주요설계기준 개발 절차 제공.

** 금속핵연료 및 TRISO 핵연료를 위한 검증지침은 NUREG-2246에 기술되어 있으며, 액체핵연료 검증지침은 NUREG/CR-7299 기술되어 있음.

2 사고저항성 핵연료 상용화 현황, 이슈 및 전망

가. 사고저항성 핵연료 개요

- 후쿠시마 사고 이후, 미국 에너지부(DOE, Department of Energy) 주도하에 산업체 3개 기관(WEC, Framatome, GE)이 사고저항성 핵연료 (Accident-tolerant Fuel, ATF)개발 시작.

- WEC, Framatome, 및 GE는 단기 적용 및 중장기 적용 목적의 ATF 후보 소재를 선정하고 개발 로드맵 수립.
- 단기 적용 목적으로 지르코늄 합금 피복관의 외면에 Cr을 코팅하는 피복관과 산화물을 소량 첨가하는 소결체(Doped UO₂ Pellet) 개발.
- 장기적으로는 탄화규소(SiC) 기반의 복합소재 피복관, 철계기반의 FeCrAl 합금 피복관, 열전도도 향상 및 우라늄 장전량 증가를 위한 우라늄 소결체 개발.

36) 과학기술정보통신부 보도자료, 인공지능·디지털 시대의 무탄소 에너지원, 차세대 원자력 신속 확보 본격화, 24.6

37) RG 1.232, Guidance for Developing Principal Design Criteria for Non-Light-Water Reactor

38) NUREG-2246, Fuel Qualification for Advanced Reactors

39) NUREG/CR-7299, Fuel Qualification for Molten Salt Reactors

[표4-2] 국외 핵연료 공급사들의 ATF 개념⁴⁰⁾

구 분	WEC	Framatome	General Electric
단 기 용	Cr-코팅 피복관	Cr-코팅 피복관	코팅 피복관 (ARMOR TM)
	Cr ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ Doped UO ₂ 소결체 (ADOPT TM)	Cr-doped UO ₂ 소결체	-
장 기 용	SiC 피복관	SiC 피복관	FeCrAl 피복관 (IronClad TM)
	고밀도/열전도도 향상 UN 소결체	열전도도 향상 doped UO ₂ 소결체	-

○ 미국은 ATF 정의를 후쿠시마 원전 사고를 고려하여 2015년에는 주로 안전성 강화에 중점을 두었으나, 2019년에는 안전성을 기반한 원전 경제성 증가로 확장.

- 미국 DOE는 2015년 미국 의회에 ATF 개발 계획을 수립한 보고서를 제출하면서 ATF를 “현재의 Zr-UO₂ 기반 핵연료에 비해 원전의 정상 운전 조건에서도 핵연료의 성능이 향상되거나 유지되면서, 능동적인 노심 냉각기능이 상실된 상태에서도 핵연료의 건전성을 장시간 유지할 수 있는 핵연료”로 정의^{*41)}.

* ATF가 가져야 할 주요 특성으로 안전성 측면에서 우수한 고온 수증기 산화 저항성, 핵연료 피복관의 성능개선, 핵연료 소결체의 성능개선 및 핵분열 생성물 고용도 증가 요건 강조

- 미국 정부는 가동원전의 지속활용을 위해 2019년 원자력혁신현대화법(NEIMA, Nuclear Energy Innovation Modernization Act)를 통해 ATF를 “가동원전의 사고(Nuclear Incident Section 11 of the Atomic Energy Act of 1954)에 대한 저항성을 높이면서 상업 원전의 경제성을 증가시키는 연료”로 정의^{*42)}.

* ATF의 특성으로 안전성 외에 원전의 장주기 운전에 적합한 고연소 활용과 출력 증발에 기여할 수 있는 경제성 개선 효과를 제시⁴³⁾.

나. 사고저항성 핵연료 관련 정책

○ 미국 DOE는 2021년 1월 미국 원전 산업 재건을 위한 원자력 전략비전(DOE NE Strategic Vision)에 가동원전의 경제성 향상을 위해 2025년까지 ATF의 상용화 및 2030년대 ATF를 원전에 광범위하게 활용하는 것을 주요 수행지

40) Frank J. Goldner et al., The U.S. Accident tolerant fuels program update on national initiative, ORNL, 2021.

41) U.S. DOE, Report to Congress, Development of Light Water Reactor Fuels with Enhanced Accident Tolerance, 2015.04., p.3.

42) U.S. Congress, Public Law 115-439, Nuclear Energy Innovation and Modernization Act, 2019.1.

43) www.energy.gov/ne/articles/5-things-you-should-know-about-accident-tolerant-fuels

표로 선정⁴⁴⁾).

○ 유럽집행위(European Commission, EC)는 원자력을 친환경 녹색투자에 포함하는 EU-Taxonomy 보충위임법(Complementary Delegate Act, CDA) 최종안⁴⁵⁾을 2022년 2월 유럽의회 및 이사회 배포. 이후, 2022년 7월 승인 및 2023년 1월 발효.

- 원자력을 전환부문에 포함시켜 2045년까지 신규원전 건설 및 2040년까지 가동원전 수명연장을 한시적으로 인정하면서 2025년 이후 ATF 적용을 명시.
- 유럽원자력산업회의(FORATOM)은 성명서를 통해 2025년까지 ATF 상용화는 현실적이지 못하다는 의견을 제시⁴⁶⁾.

○ 환경부는 2022년 한국형 녹색분류체계(K-Taxonomy) 수정안에 원자력을 전환부문에 포함하면서 2031년 이후 ATF 적용을 권고⁴⁷⁾.

- K-Taxonomy는 법적 구속력을 갖는 유럽과 달리 녹색경제활동을 정의하는 자발적 지침서로서, “환경기술 및 환경산업 지원법”에 근거하여 개발되었고 수립 목적이 금융기관의 환경책임투자를 지원 및 활성화하는 것이므로 법적 구속력은 없고, 금융기관의 환경책임투자를 위한 판단기준 제시.

다. 사고저항성 핵연료 개발 현황

○ 미국의 WEC(Westinghouse Electric Company)는 단기 적용을 위한 ATF 기술로 Cold-spray^{㉞)}를 이용한 Cr 코팅 지르코늄 피복관*과 Cr 및 Al 산화물 첨가 소결체인 ADOPTTM 소결체**를 후보 소재로 선정하고 2019년부터 상용원전에서 시범연료봉 연소시험을 착수***하였고 2025년부터 ATF 연료에 농축도가 6 wt.% 수준인 LEU+를 적용한 시범집합체 연소시험 수행 예정⁴⁸⁾.

* 미국의 Army National Lab 및 위스콘신 대학과 협업을 통한 Cr 코팅 피복관 개발.

** 미량의 Cr 및 Al 산화물을 첨가하여 UO₂ 소결체의 고온변형률 향상, 핵분열 가스 방출량 저감에 따른 피복관-소결체 상호작용으로 인한 손상 저항성을 강화한 소결체.

*** Byron 2호기에서 1주기 연소시험을 완료하고 2021년 8월부터 ORNL에서 조사후시험(PIE, Post-Irradiation Examination)을 수행 중. 2주기 연소시험 완료 이후 2024년 1월 INL로 ATF 시범연료봉을 운반하여 조사후시험 착수. 또한, Byron 2호기에서 2023년 가을부터 고연

44) DOE NE, Strategic Vision, 2021., p.7

45) EC. Commission Delegated Regulation (EU) 2022/1214, 2022

46) www.nucleareurope.eu/press-release/foratom-welcomes-adoption-of-complementary-delegated-act-by-commissioners

47) 환경부, 한국형 녹색분류체계 가이드라인, 2022.12.

48) NRC homepage, www.nrc.gov/reactors/power/atf/licensing-activities/licensing-actions.html.

소도 연소시험을 위한 3주기 연소시험 중.

주) Cold-spray 기술은 Cr 분말을 고속으로 피복관 표면에 충돌시켜 코팅하는 기술로 코팅공정 속도가 빨라 생산성이 우수하나 생산 단가가 높고 후속공정 추가 필요.

[표4-3] WEC의 ATF 연소시험 현황

구 분	발전소	피복관	소결체	현황
시험연료봉	Byron 2 ('19.3)	Cr 코팅	ADOPT	2주기 완료, PIE 중
시험연료봉	Doel 4 ('20.9)	Cr 코팅	×	3주기 연소 중
시험집합체	Vogtle 2 ('25 예정)	Cr 코팅	ADOPT, 6wt.% LEU+	제조 중

- DOE 지원으로 2020년대 ATF 상용화와 함께, 우라늄 농축도를 현행 수준으로 유지하면서 인허가연소도를 현재의 62 GWD/MTU에서 68 GWD/MTU 까지 상향, 그리고 우라늄 농축도를 현재의 5 wt.% 수준을 초과하는 LEU+^{주)} 기술개발과 함께 인허가연소도를 75 GWD/MTU까지 상향하기 위한 기술 개발 추진.

주) LEU+ : HALEU(High-Assay Low Enrichment Uranium)으로 우라늄 U-235 농축도가 5~10 wt.% 인 우라늄.

- WEC는 SiC 소재에 SiC 섬유를 결합한 SiC/SiCf 세라믹 복합체 기반 피복관과 열전도도가 높고 우라늄 장전량이 높은 질화우라늄(Uranium Nitride, UN) 소결체를 장기 적용 ATF로 개발.

○ 프랑스 Framatome은 단기 적용을 위한 ATF 기술로 HiPIMS (High power impulse magnetron sputtering)^{주)}를 이용한 Cr 코팅 지르코늄 피복관*과 Cr 산화물 첨가 소결체인 Cr-doped UO₂ 소결체**를 후보 소재로 선정하고 2019년부터 상용원전에서 시험연료봉 및 2021년 시험집합체 연소시험 수행⁴⁹⁾.

* 프랑스 원자력 유관기관인 CEA(Commissariat à l'énergie atomique)와 협업을 통한 Cr 코팅 피복관 개발.

** Cr 산화물을 미량 첨가하여 UO₂의 입자(grain) 크기를 40 μm 이상 증가시키고, 고온변형률을 향상시켜 핵분열 가스 방출량을 낮추고 피복관-소결체 상호작용으로 인한 손상 저항성을 높여 원전의 탄력운전에 장점이 있는 소결체.

주) HiPIMS 기술은 강력한 전압 펄스를 사용하여 균질하고 밀도 높은 플라즈마를 형성, 코팅하는 기술로 고품질의 코팅 피복관 제조가 가능하나, 생산성이 낮아 시설투자가 필요.

- 미국 DOE와 프랑스 정부 지원으로 ATF 상용화 및 핵연료 인허가연소도 증가를 위한 LEU+ 기술을 2027년까지 개발 완료하는 목표로 인허가* 추진.

* 2023년 3월 미국 NRC로부터 핵연료 농축도를 5 wt.% 이상으로 변경하는 특정기술주제보고서 승

49) NEI High Burnup Workshop, Drive to Deploy ATF with Increased Enrichment and Higher Burnup, 2023.

인을 획득하였고 운송 및 LEU+ 생산을 위한 시설인허가를 추진 중이며, 2027년 말까지 모든 ATF 및 LEU+ 관련 인허가 절차를 완료할 예정.

[표4-4] Framatome의 ATF 연소시험 현황

구 분	발전소	피복관	소결체	현황
시범연료봉	Vogtle 2 ('19.3)	Cr 코팅	Cr-doped UO ₂	3주기 완료
시범연료봉	Gösgen ('19.6)	Cr 코팅	×	3주기 연소 중
시범연료봉	ANO 1 ('19.11)	Cr 코팅	×	3주기 완료
시범연료봉	Monticello ('21.3)	Cr 코팅	—	2주기 연소 중
시범집합체	Calvert Cliffs ('21.11)	Cr 코팅	Cr-doped UO ₂	2주기 연소 중

— Framatome은 장기 적용 ATF 기술로 SiC 세라믹 튜브와 지르코늄 피복관을 접목시킨 샌드위치 형태의 피복관과 소결체 열전도도 향상을 위한 Cr-variant UO₂ 소결체 개발.

○ 한국수력원자력(주)는 신고리 5,6호기 공론화 이후, 2017년 11월 원전 안전 건설·운영특별대책을 발표하면서 ATF 조기 상용화 목표를 수립하였고, 6차 원자력진흥종합계획에 따라 ‘가동원전 안전성향상 핵심기술 개발 사업’으로 한전 원자력연료(주) 주관하에 한국수력원자력(주) 및 한국원자력연구원과 협력하여 ATF 개발 추진.

— 단기 적용을 위한 ATF 기술로 AIP(Arc Ion Plating)을 사용한 Cr 코팅 피복관*과 La₂O₃-Al₂O₃-SiO₂(LAS) 산화물을 미량 첨가한 LAS-doped UO₂ 소결체**를 후보 소재로 선정하고 2024년부터 상용원전에서 시범연료봉 연소시험*** 수행.

* 2020년 Prototype 코팅장비 구축, 2022년 상용 제조기술 개발 완료 및 코팅 피복관 시제품 출시, 2023년 원자력급 품질등급 준수를 위한 양산인증시험 완료.

** La₂O₃-Al₂O₃-SiO₂(LAS) 산화물을 1000 ppm 미만으로 첨가하여 UO₂의 입자(grain) 크기를 증가시키고, 고온변형률을 향상시켜 핵분열 가스 방출량을 낮추고 피복관-소결체 상호작용으로 인한 손상 저항성을 높인 원전의 탄력운전에 장점이 있는 소결체. 2023년 원자력급 품질등급 준수를 위한 양산인증시험 완료.

*** 시범연료봉 연소시험은 2024년 새울2호기에서 연소시험을 착수하고 시범집합체 연소시험은 2025년 한울6호기에서 착수 예정.

※ AIP 기술은 Cr 금속을 아크방전에 의해 녹이고 이온화시켜 코팅하는 기술로 균질하고 우수한 코팅특성을 갖으며 HiPIMS에 비해 코팅공정 속도가 빨라 대량 제조가 가능.

— 장기 적용 ATF 기술로 기존의 피복관 소재인 지르코늄 합금을 대체하는 고성능 철계 기반 합금 피복관 기술*과 피복관이 손상되는 극한의 환경에서도 외부로의 방사성 물질의 누출을 완전히 차단시킬 수 있는 TRISO-SiC 복합체 기술**을 개발.

* 고온산화 저항성이 현 지르코늄에 비해 100배 이상 우수하고 고온 기계적 강도가 우수하

여 피복관 파손을 방지할 수 있는 피복관으로 길이 4m 이상, 두께 0.35mm의 상용 제조 기술 기반 확보.

** 중대사고 모사 조건에서 세계 최고 수준인 50시간 이상 사고 대처 시간 확보 및 세계 최초 대용량 제조가 가능한 상압 소결 기술 확보.

라. 사고저항성 핵연료 이슈 및 전망

○ LEU+ 및 핵연료 인허가연소도 증가 기술을 안전성 기반의 ATF에 적용할 경우 원전의 탄력운전 성능 및 안전성 향상, 핵연료 효율성 향상, 사용후 핵연료 방출량 저감, 탄소중립 이행 증진과 가동원전 경제성 향상 가능⁵⁰⁾.

－ 핵연료의 인허가연소도 증가를 위해서는 고연소도 핵연료의 FFRD (Fuel Fragmentation, Relocation, and Dispersion) 현안 해결*과 원전의 출력 증발 운전을 위한 새로운 평가 방법론 검토 필요.

* 미국 NRC는 FFRD 현안 해결을 위해 아래와 같이 5가지 규제기반 대안 제시⁵¹⁾:

1. No Action / 2. Redefine LBLOCA / 3. Develop FFRD regulation / 4. Post FFRD consequence / 5. Risk-Informed LOCA(LBB).

－ LEU+ 및 핵연료 인허가연소도 증가 기술을 위한 규제 인프라 개발과 LEU+ 공급망 확보 필요.

○ 노르웨이 할덴 연구로 영구 폐쇄, 전 세계 연구로 노후화 및 러시아-우크라이나 전쟁에 따른 핵연료 연소성능 검증을 위한 연구로 및 조사후시험 시설 부족을 해결하기 위해 국내 한국원자력연구원의 하나로 연구로와 조사후시험 시설에 대한 시설보완 필요.

○ ATF는 후쿠시마 원전 사고와 같은 대형사고 발생을 방지할 수 있는 핵심 요소 기술로 2030년대 상용 적용되어 원전의 안전성을 개선할 수 있을 것으로 전망.

○ ATF 적용을 통한 원전의 안전성 및 경제성 제고는 전 세계적으로 온실가스감축 및 탄소중립 이행을 위한 원전 확대 정책에 기여할 것으로 전망.

3. LEU+ 핵연료 상용화 및 인허가 이슈

가. 고연소도 LEU+ 핵연료

50) Aladar A. Csontos, NEI ATF working group updates, EPRI CRAFT Meeting Dallas, TX, April 2, 2024.

51) James Corson, NRC update on FFRD topics, CRAFT FFRD technical expert group meeting, April 3, 2024.

- 고연소도 LEU+ (Low Enriched Uranium Plus) 핵연료는 기존 저농축 우라늄(LEU) 핵연료에 비해 더 높은 농축도의 우라늄을 활용하여 연소도를 증가시킴으로써, 더 많은 에너지를 생산할 수 있는 형태의 핵연료를 의미.
- 기존 LEU 핵연료는 5% 미만의 U-235를 함유하고 있지만, 고연소도 LEU+ 핵연료는 5% 이상 10% 미만의 U-235를 포함⁵²⁾하여 더 높은 연료 효율을 구현.
- 고연소도 LEU+ 핵연료는 핵연료 주기 길이 연장, 연료 교체 빈도 감소 및 사용후핵연료 발생량 저감 등의 다양한 장점을 통하여 원전 경제성 및 운영 효율성 크게 향상 가능.

[표4-5] 핵연료 우라늄 농축도에 따른 분류

	Low-enriched uranium			
		LEU+	HALEU	
Enrichment assay	<5%	5%-10%	5%-19.75%	19.75%
Chemical form	Oxide	Oxide	Oxide, salt, metal	Metal
End use	GEN III	GEN III, SMRs	GEN IV, SMRs	Research reactors

나. 고연소도 LEU+ 핵연료 기술을 위한 농축도 상향 인허가 이슈

- 최근 해외 핵연료 공급사 및 원전 운영사들은 핵연료 농축도 인허가 기준 상향을 추진 중.
- 농축도 상향을 통하여 운전 유연성(Operational flexibility) 증가, 핵연료 구매량 감축, 고연소도 달성 등의 이점을 얻고자 하며, 이는 사고저항성핵연료 적용과 연관⁵³⁾.
- 현재 미국 NRC 규정에 따르면 원전 핵연료의 U-235 농축 수준은 추가적인 제한, 플랜트 시스템 또는 분석이 구현되지 않는 한 5 중량%를 넘을 수 없음.
- 연료 제조 및 사용에서 농축 수준 증가에 대한 승인을 받으려면 핵연료 공급사와 원전 운영사는 해당 NRC 규정 및 허가 면제를 요청하여 허용 농축도를 상향 적용할 수 있음.
- 우라늄 농축도 상향은 전체 핵연료 주기에 광범위한 영향을 미칠 수 있으며, 고연소도 LEU+ 핵연료 상용화 및 인허가를 위하여 다양한 분야에서의 노력이 필요.

52) World Nuclear Association, High-Assay Low-Enriched Uranium (HALEU) (2023).

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

- 핵연료 농축/제조 시설에 대한 임계 안전 해석 및 시설 변경.
 - UF₆, UO₂ 및 신연료 집합체용 운송 용기 개발.
 - 선원항 계산 변경.
 - 원자로 핵연료 해석 코드 개선.
 - 사용후핵연료 저장조 임계 안전 해석.
 - 건식저장 용기 개발 및 분석.
- 미국 NRC는 농축도 상향 규정 개정 및 지침 개발과 관련하여 “Rulemaking Plan on use of Increased Enrichment of Conventional and Accident Tolerant Fuel Designs for Light Water Reactors (SECY-21-0109)” 계획에 대한 검토를 진행⁵⁴⁾.

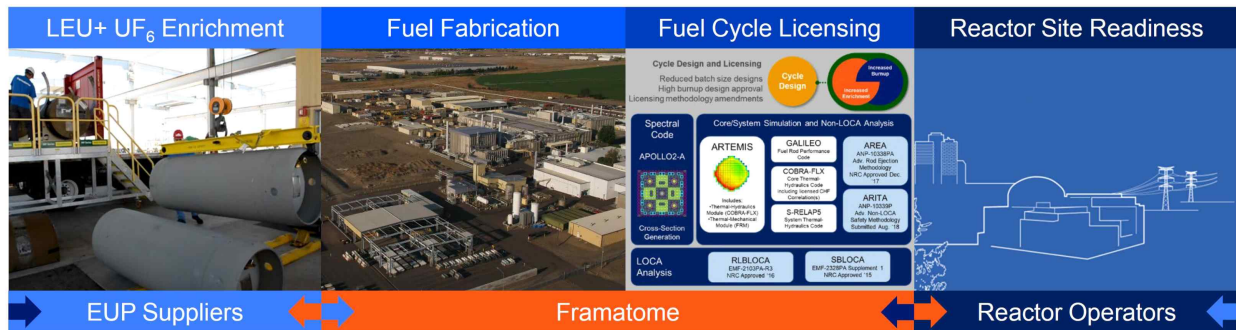
다. 고연소도 LEU+ 핵연료 기술 상용화 및 인허가 추진 해외 현황

- Framatome은 선진 핵연료 관리(Advanced Fuel Management, AFM) 프로그램을 통하여 농축도 상향 및 연소도 증가 기술을 개발하여 핵연료 및 원전 효율성을 높이고자 함.
- 원전 운영/유지(Operational and Maintenance, O&M) 비용 절감, 핵연료 취급량 및 건식저장 감소를 통한 사용후핵연료 발생량 저감 등의 이득을 얻고자 하며, 우라늄 농축 단계부터 운송, 제조, 핵주기 인허가, 원전 운영 적용 등 다양한 분야에서 개선을 진행 중⁵⁵⁾.

54) Staff Requirements-SECY-21-0109: Rulemaking Plan on use of Increased Enrichment of Conventional and Accident Tolerant Fuel Designs for Light Water Reactors (2022).

55) Framatome, 12th EPRI-DOE-INL WS on ATF and HBU (2023).

Framatome is actively developing LEU+ fuel fabrication capabilities and methodologies for high burnup LEU+ fuel



Key elements of Framatome's LEU+ fabrication upgrades and reload supply planning:

1. Engaging with EUP suppliers (Urenco, Orano) to be ready for LEU+ UF₆ supply as it develops
2. Progressing through the LEU+ upgrade project timeline for the Richland, WA fuel fabrication facility
3. Developing and submitting extensions of fuel cycle licensing methodologies for high burnup LEU+ fuel cycles
4. Engaging with plant operators with an implementation guideline to assist in being ready for LEU+ reloads

framatomé

EPRI/INL/DOE - ATF update by Framatome
J. Reed - Dallas, Tx - April 3, 2023 © Framatome - All rights reserved

7

[그림 4-1] Framatome의 선진 핵연료 관리 프로그램을 통한 고연소도 LEU+ 핵연료 개발

- Framatome은 2021년 고연소도 LEU+ 핵연료 및 원자로 시스템의 안전 운전을 지원하는 핵연료/노심 코드 및 방법론(advanced codes and methods)을 위하여 노물리, 열수력, 기계, non-LOCA 및 LOCA 방법론 등을 포함하는 Topical Report를 제출.
- 2022년에는 U-235 농축도 8%까지의 신연료 집합체를 운송할 수 있는 운송용기 인허가를 U.S. NRC로부터 취득함⁵⁶⁾. 2023년에는 U-235 농축도 5% 이상의 운전 조건에서 적용할 수 있는 핵연료/노심 코드 및 방법론을 승인 받음⁵⁷⁾.

56) Framatome receives U.S. NRC approval to transport higher enriched fuel, Framatome (2022).

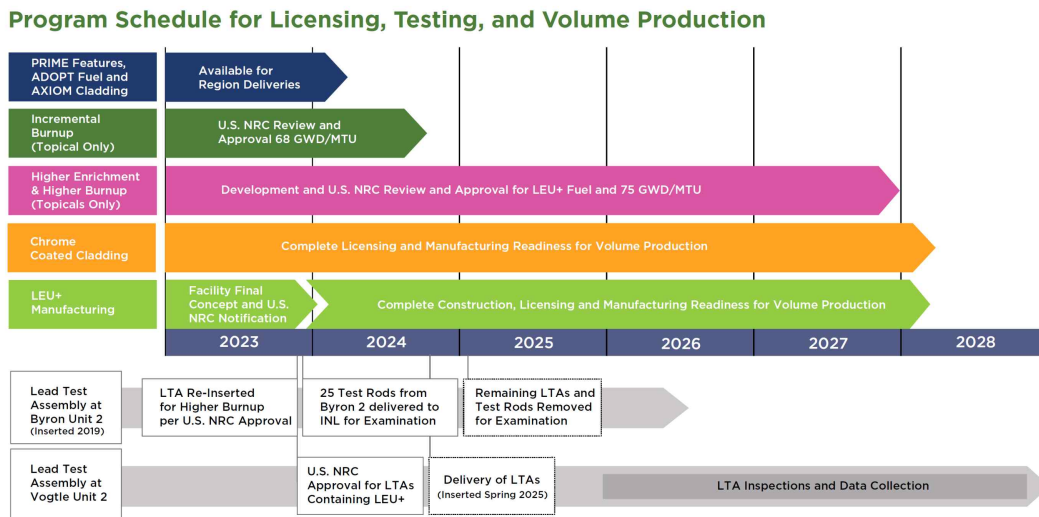
57) NRC approves use of Framatome codes in advanced nuclear fuel development, World Nuclear News (2023).



[그림 4-2] Framatome의 LEU+ 핵연료 운송용기, 핵연료/노심 코드 및 방법론

○ Westinghouse는 High Energy Fuel 프로그램을 통하여 안전성과 신뢰성을 확보하는 핵연료 기술 개발을 추진함.

- High Energy Fuel 프로그램에서 핵연료 주기 비용 최소화, 운전 유연성 증가, 연소도 증가 및 농축도 상향 등을 통하여 핵연료 출력 효율 증가, 공급의 다변화, 사고저항성 핵연료 적용, 핵연료 손상 방지 등 다양한 이점을 추구함⁵⁸⁾.



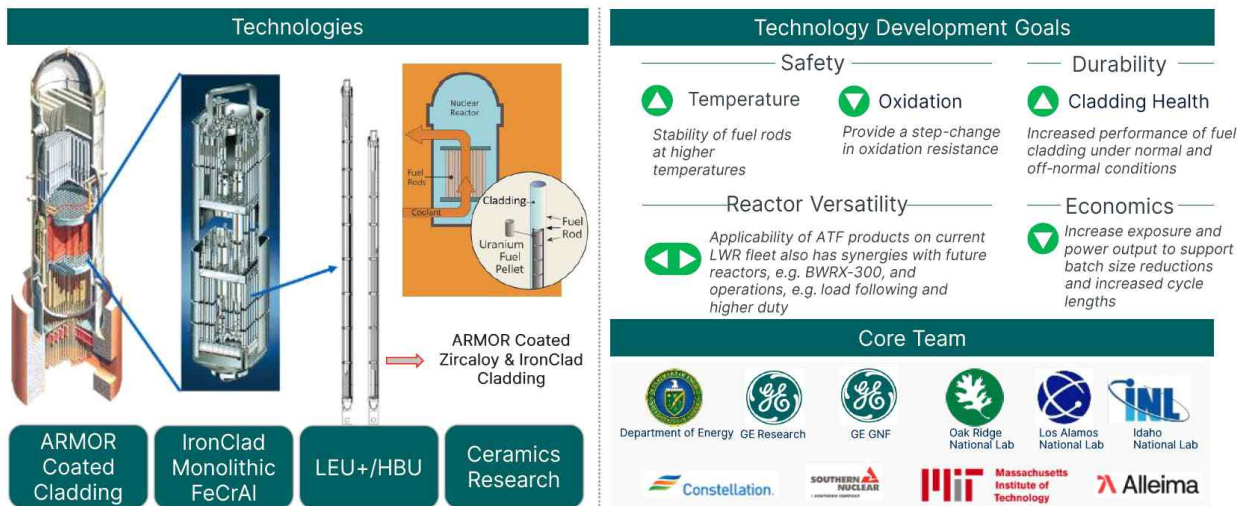
[그림 4-3] Westinghouse의 High Energy Fuel 프로그램을 통한 고연소도 LEU+ 핵연료 개발

○ Westinghouse는 고연소도 LEU+ 핵연료 적용을 위하여 U.S. NRC에서 기 승인된 노심 설계, 핵연료 성능, 열수력 설계, LOCA 및 non-LOCA 해석을 포함하는 코드 및 방법론에 대한 Topical Report를 2023년 제출함.

58) <https://www.westinghousenuclear.com/nuclear-fuel/westinghouse-high-energy-fuel-program/>

- 2023년 미국 Columbia 핵연료 제조 시설 내에 고연소도 LEU+ 핵연료 제조 기술 연구 센터를 설립함⁵⁹⁾.
 - 2023년 미국 Vogtle 2호기에서의 U-235 농축도 6% LEU+ 핵연료 연소시험 수행을 NRC로부터 승인 받았고, 2024년 8월에는 상용로 시험용 LEU+ 핵연료 소결체 첫 배치 제조에 성공함⁶⁰⁾.
 - 2025년에는 Vogtle 2호기에서 상용로 시험이 진행될 예정임.
- GE VERNOVA (GNF)는 사고저항성핵연료 프로그램에 고연소도 LEU+ 핵연료 기술을 포함함으로써 안전성뿐만 아니라 경제성을 함께 향상하는 기술을 확보하고자 함.
- BWR 및 PWR 노형에 사고저항성핵연료 기술 적용을 위해서는 U-235 6-7% 농축도 상향을 통하여 약 80 GWD/MTU 수준의 고연소도 LEU+ 핵연료를 개발하고자 함⁶¹⁾.

GE's Accident Tolerant Fuel Technologies



© 2023 GE Vernova and/or its affiliates. All rights reserved.

2

[그림 4-4] GE VERNOVA의 사고저항성핵연료 프로그램을 통한 고연소도 LEU+ 핵연료 개발

○ GE VERNOVA는 2024년 2월 U-235 농축도 8%까지의 고연소도 LEU+ 핵

59) Westinghouse Establishes Center of Excellence for LEU+ Fuel Manufacturing in the United States, Westinghouse (2023).

60) Westinghouse Produces First Batch of Higher Enriched Fuel Pellets, U.S. DOE (2024).

61) GNF-A, SNM-1097 License Amendment Pre-Application Meeting LEU+ Fuel Fabrication (2022).

연료에 대한 제조, 운송, 성능 해석 방법론에 대한 U.S. NRC 승인을 취득함.

- 미국 Wilmington에 위치한 핵연료 제조 공장에서 농축도 8% 까지 LEU+ 핵연료 제조가 가능하도록 인허가 개정을 승인 받음⁶²⁾.

○ 국내에서는 고연소도 LEU+ 핵연료 기술 개발 및 적용을 위한 ‘차세대 핵연료 기술개발사업(가칭)’ 기획을 통하여 LEU+ 핵연료 기술, LEU+ 핵연료 제조/운반/운영 기술, 핵연료 연소도 증가 기술 등을 체계적으로 확보할 예정입니다.

- 현행 우리나라 농축도 허용 범위에서의 핵연료 연소도 증가 기술은 '32년 상용 인허가 ToR을 작성할 계획이며, 고연소도 LEU+ 핵연료 기술은 '32년까지 LTR 장전 및 LTA 준비를 진행하고 '37년 경 상용 인허가 ToR 작성이 예상됨.

○ 고연소도 LEU+ 핵연료는 대형원전의 경제성 향상뿐만 아니라 소형모듈원자로(SMR)에서의 사용후핵연료 발생량증가 이슈도 해소할 수 있는 방안으로써 고려되고 있음.

- SMR의 소형화 노심은 중성자 손실 증가에 의한 운전환경 및 연소도 차이로 대형원전 대비 전력생산당 사용후핵연료 발생량이 필연적으로 증가함⁶³⁾.

○ SMR의 소형화 노심으로 인한 사용후핵연료 이슈를 해소하고 SMR 사용후핵연료 문제에 선제적으로 대응하는 다양한 기술 전략 및 연구 개발이 추진 중이며, 고연소도 LEU+ 핵연료는 그 대안으로써 국내외적으로 연구 개발을 진행 중임.

4. 차세대 핵연료 검증 및 자격화 (Qualification) 이슈

가. 핵연료 자격화 (Qualification)

○ 차세대 원자력 발전소를 건설하기 위해서는 원전에 사용되는 핵연료의 성능과 안전성 입증의 선결과제이다. 원자로 운전 환경에서 핵연료 설계 수명 (Designed lifetime)에 걸쳐 정상 운전과 과도상황을 아우르는 평가가 수행되어야 하고, 이를 통해 노내 환경에서 핵연료 성능과 안전 위협 현상에 대한 충분한 파악과 예측이 가능한 상태에 이르게 하는 것을 핵연료 자격화 (Qualification)라 함.

62) GNF gets approval to manufacture higher enrichment fuel, World Nuclear News (2024).

63) L.M. Krall et al., Nuclear waste from small modular reactors, PNAS (2022).

- 일반적으로 핵연료 자격화는 실제 원자로 운전 환경과 같거나 상당히 비슷한 환경에서 핵연료 설계 수명에 걸쳐 이루어짐. 따라서 가속화 실험과 모사 환경에서 수행하는 것이 일반적으로 불가능함. 이 때문에, 핵연료 자격화는 신행 원자로 구현에 있어 가장 오랜 시간이 소요되는 ‘주공정 (critical path)’으로써, 높은 기술력과 더불어 지속적인 국가 지원을 필요로 함.
- 오늘날 핵연료 자격화는 원전 기술 중주국을 목표로 하는 소수의 국가에서만 추진되는 특징이 있음. 핵연료 자격화는 국가의 차세대 원전의 핵심 ‘뿌리’ 기술력을 총체적으로 보여줌.
 - 미국, 중국, 러시아, 프랑스, 일본에서만 중장기적인 핵연료 자격화 프로그램이 추진 됨.
 - 해외 기술을 도입하여 원자력 발전소를 운영하는 기술 도입국 및 추격 국가에서는 핵 연료 자격화가 내실 있게 추진되기가 어려운 상황임.
- 해외에서 기개발된 경수로 기술을 도입하여 국산화 시켜온 대한민국은 핵연료 자격화의 경험이 매우 부족함. 거의 모든 핵연료 자격화 관련 경험은 경수형 핵연료에 국한되어 있음.
- 그 결과 차세대 원자로 기술개발과 실증에 있어 내실 있는 뿌리 기술 확보를 추진하기 이전에 핵연료 제작, 검증, 자격화를 아우르는 핵연료 핵심 기술을 해외에 의존하는 상수(常數)로 인식하는 경향이 강함. 이는 오늘날 대한민국 차세대 원자력 발전 기술 개발과 자립에 있어 중대한 한계점으로 작용하고 있음.

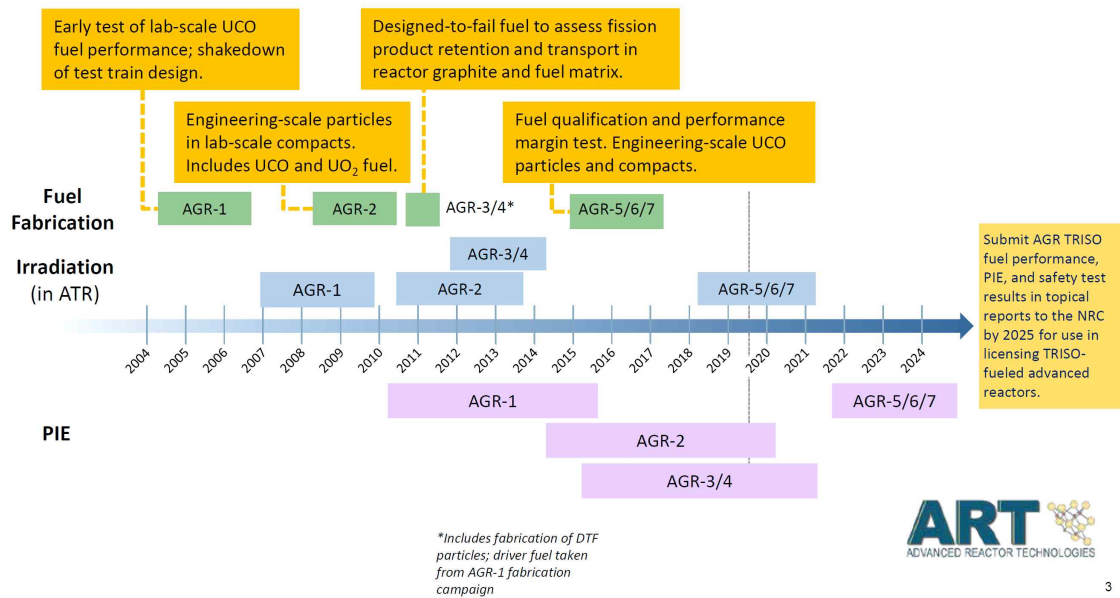
나. 국내외 동향

- 오랜 시간이 소요되는 핵연료 자격화 (qualification)는 차세대원자로 실증 속도를 결정하는 핵심 기술 개발 사안임.
 - 미국은 2010년대 후반에 다목적 시험로 Versatile Test Reactor (VTR) 프로그램을 추진하여 차세대 원자로 핵연료 자격화 기반 시설 구축을 추진한 바 있음.
 - 하지만 VTR 프로그램은 2020년대 초반에 들어 전격적으로 취소되었음. 이러한 배경으로는 VTR 설계와 건설과 실증로 인허가에 필요한 데이터 생산에 많은 시간이 소요되어 산업체 수요를 적기에 감당할 수 없는 이유가 주요했음.
 - 이에 미국은 다른 핵연료 자격화 전략을 통해 차세대 원자로 실증을 추진하기로 결정

함.

- 2022년 U.S NRC의 Fuel Qualification for Advanced Reactors (NUREG-2246) 보고서⁶⁴⁾에서는 차세대 원자로 핵연료 자격화를 위해서는 해당 원자로의 운전 환경에서의 조사시험과 안전 제한치 개발, 실험 데이터를 활용한 안전 해석 모델 개발 및 검증을 필수 조건으로 명시하고 있음.
 - 이러한 핵연료 검증 규제 기준을 만족하기 위해서는 원칙적으로는 관련 기술 개발을 모두 완료 해야 하고 이는 10년 이상의 시간이 필요함. 이를 우회하기 위한 전략으로 미국에선 과거 연구 개발을 통해 확보한 자격화된 핵연료를 전면적으로 활용하는 방안을 추진함.
 - AGR 프로그램을 통해 자격화된 TRISO 핵연료를 활용하고 고속로에 대해선 과거 EBR-II를 통해 검증된 핵연료를 활용하는 전략을 추진함.
 - 즉, 차세대 원자로의 실증에 있어 대한민국과 미국은 가용할 수 있는 핵연료 기반 기술에 있어 다른 출발선에 서 있다는 점을 인식하는 것이 중요함. 이를 통해, 맹목적인 해외 사례 벤치마킹이 아닌 내실 있는 국내 차세대 원자로 기술 개발 및 실증 전략을 수립·추진 해야 함.
 - ARDP는 미국 내에서 추진된 TRISO 핵연료 및 고속로핵연료 (U-10%Zr, HT9 피복관) 자격화 데이터를 기반으로 추진되고 있음.
 - 미국은 2000년대 초반부터 AGR 프로그램을 통해 고온 가스로 개발을 추진해 왔음. 주목할 점은 고속로 프로그램이 공식적으로 종료된 이후에도 TRISO 핵연료 개발 및 검증은 오늘날까지 지속되온 점임 (그림 4-5).
 - 미국의 지속적인 TRISO 핵연료 기술 자격화 지원과 관련 성취는 오늘날 ARDP의 최우선 실증 순위 (Demonstration 랭킹)에 선정된 X-ENERGY(社)의 Xe-100 노형과 KAIROS POWER(社)의 용융염 원자로 HERMES의 초석이 되었음*.
- * HERMES 원자로는 AGR 프로그램을 통해 검증된 TRISO 설계를 도입하고 있음. 핵연료 운전조건과 환경이 과거 AGR에서 검증된 시험 영역을 벗어난 경우는 (예: TRISO 입자당 출력 [mW/particle]), (1) 규제기관과의 사전 신청 활동 (Pre-application activities)을 통한 협의와 (2) 안전 위협 현상을 원천적으로 배제하는 실증로 설계 (예: 낮은 원자로심 출력 밀도)등을 통해 해결함.

64) U.S NRC, Fuel Qualification for Advanced Reactors, NUREG-2246,2022



[그림 4-5] 미국의 AGR 프로그램 연혁

- 미국의 차세대 소듐 냉각로 실증에 필요한 핵연료 자격화는 과거 Experimental Breeder Reactor (EBR-II) 경험과 데이터에 의존하고 있는 상황임^{*,**,***}

* U.S NRC는 EBR-II의 U-10wt%Zr/HT-9, 연소도 10 at% 데이터를 활용한 금속 핵연료 인허가 적격성을 검토. 10at% 연소도 범위 안에서는 핵연료의 수명 제한 및 안전 관련 현상들은 잘 알려져있으며 예측 가능하다고 결론 (보고서 발췌: *Up to the proposed 10 at% BU limit, life-limiting and safety-related fuel behaviors are well known and predictable.*)

** 2024년 오늘날 고속로 핵연료 자격화는 기반 시설 부재로 전 세계적으로 진척이 사실상 중단된 상황임. 미국에서는 다목적 연구로 (VTR) 프로그램이 중단된 상황이고, 일본의 고속로 실험로인 JOYO는 2026년 재가동을 목표로 하고 있음. 러시아의 BOR-60는 러시아-우크라이나 전쟁으로 관련 협력이 계속적으로 추진되기 어려운 상황임.

*** 미국 오크리지국립연구소 (Oak Ridge National Laboratory, ORNL) 연구소의 고속 중성자 조사 시설인 HFIR을 활용하여 다양한 고속로핵연료 신재료의 조사 성능을 시험할 수 있으나, 규제기관이 요구하는 수준의 인허가 자료는 생산 불가능 (연구와 인허가/상용화 기능이 분리되어 있음). 이에 미국의 대다수의 고속로 실증은 EBR-II 핵연료 데이터를 활용하여 인허가 가능한 범위에서 추진되고 있음.

- 중국은 고온가스로인 HTR-PM 실증에 필요한 TRISO 페블 핵연료 자격화와 검증 데이터를 네덜란드 Petten 원자로 시험을 통해 확보하였음.

- 중국내에서 기가동 중이던 HTR-10 실증로의 페블 핵연료에 비해 HTR-PM 핵연료

는 연료 충밀도 (packing fraction)가 높아, 해외 실험로를 활용하여 핵연료 자격화를 성공적으로 수행하였음.

- 중국은 독자적인 고속로 핵연료 시험 검증 및 자격화를 위해 최근 고중성자속 (High Neutron Flux) 시험로 설계를 시작한 상황임.
- 미국과 중국으로 대표되는 차세대 원자로 기술 개발 선도 국가들은 핵연료 자격화를 미래형 원전 실증의 핵심으로 인식하고 자체적인 전략을 수립하고 장기적인 지원에 심혈을 기울이고 있음.
- 이에 반해 국내에는 핵연료 자격화에 대한 중요성에 대한 인식이 매우 부족한 상황임. 내실 있는 핵연료 기술 개발 및 연구 기반 시설과 지원이 절실하고 진정성 있는 핵연료 시험 기술에 대한 중장기적인 지원이 없이는 차세대 원자로 기술을 선도할 수 없음. 원자로 설계의 가장 핵심이 되는 핵연료 기술은 항상 기술 종주국에 의존해서는 만성적 기술 추격국의 위치를 벗어날 수 없음.
- 원자력 기술에 대한 미국의 실력 행사와 강화된 자국 기술 보호 움직임이 비단 원전 수출에서만 아니라 연구 개발 R&D 에서도 뚜렷하게 감지되고 있는 점은 주목해야할 대목임. 최근 미국의 에너지성은 원자력 분야의 주요 컴퓨터 프로그램 소스코드 공개를 금지하였고, 미국의 주요 원자력 시설을 활용하는 실험 연구 개발 협력도 과거에 비해 매우 어려워진 상황임.
- 이러한 상황에서 미국과의 협력을 통한 차세대 원자로 핵연료 자격화 추진을 낙관하기만은 어려운 상황임. 일부 해외 민간 업체와의 계약을 통해 자격화된 핵연료를 공급받는 방안이 고려 될 수는 있으나, 이는 차세대 원자로의 핵심 기술 자립도를 저해하여 훗날 관련 기술 상용화 단계에서 기술 경쟁력을 중대히 위협하는 요소로 작용할 수 있음.

다. 국내 차세대 핵연료 개발 및 자격화 전략: 자강과 협력

- 이러한 상황에서 국내외 상황에 대한 이해를 바탕으로 내실 있는 국가 차세대 핵연료 개발 및 자격화 전략을 수립할 필요 있음. 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 기술 개발 수요를 적기에 지원하는 전략을 병행하는 것이 바람직함.

○ 자강 전략

- 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 접적으로 지원할 수 있는 데이터 생산이 가능하도록 기존의 하나로 연구시설 보완 필요**.
- * 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 고속 중성자 조사 시설 설비 구축 검토 필요. 고속 중성자 조사 시설은 현재 대한민국에서 추진중인 용융염 원자로 (MSR) 및 소듐 냉각 고속로 (SFR) 개발에 중요. 핵연료 자격화에 활용될 수 있는 고속 중성자 조사 시설 없이 관련 차세대 원자로 개발을 추진할 시 상당한 수준의 해외로 부터의 기술 이전과 전향적인 규제기관의 해외 데이터 활용이 전제되어야 함.
- 단기에 성과를 내기 위한 종이 원자로 (Paper Reactor) 개발을 지양하고 실물 원자로 개발 풍토가 뿌리 내려야 함. 이를 위해선 정부의 지속적인 핵연료 자격화 시설에 대한 지원이 절실함.

○ 협력 전략

- 해외 핵연료 시험 데이터를 활용한 국내 실증로 개발 및 인허가 전략을 동시에 검토하여 국내에서 개발 중인 차세대 원자로 개발 사업*을 지원할 필요 있음.
- * 특히, 용융염원자로 (MSR)과 소듐 냉각 고속로 (SFR)은 국내 시설을 구축하여 규제기관이 요구하는 수준의 핵연료 검증 데이터를 생산하기까지 10년 이상의 시간이 소요될 것으로 예상됨. 이에 위 두 원자로의 핵연료 자격화는 해외 협력을 통해 진행하는 것이 현실적이라 판단됨. 다만 해외 협력을 진행함에 있어서도, 국내 고속 중성자 조사 시설 구축등을 진행하여 국내 고유 핵연료 자격화 역량을 갖추는데 노력을 기울여야 함.
- 해외 협력에 있어 규제기관과의 사전 협의가 중요함. 규제기관과의 핵연료 자격화에 필요로 하는 검증 데이터를 협의하고 해외 협력을 진행하는 것이 바람직함. 이를 통해 실물 원자로 개발과는 무관한 학술연구에 많은 자원이 소진되는 것을 지양 해야 함.
- 미국 이외의 국가들의 시설 활용도 폭 넓게 검토해 볼 필요 있음 (예: 중국의 네덜란드 Petten 연구로를 활용한 HTR-PM 핵연료 자격화 사례 참고).

핵연료 기반 시설 강화 현안

- » 원전 수출, 가동 원전 안전성 강화 및 사용후핵연료 발생량 저감 요구에 따른 차세대 핵연료 개발뿐만 아니라 사용후핵연료 안전관리 기준 수립을 위하여 핵연료 조사후특성 연구 기반시설로서 핫셀 인프라의 확충이 요구되고 있음.
- » HALDEN 시험 원자로의 운영 중단 이후 핵연료의 성능 검증을 위한 연구로 시험 시설은 전 세계적으로 부족한 상황임. 핵연료 시험기술 기반 확보가 실물 원자로 기술 자립과 실증에 핵심적인 요소임에 따라 전폭적인 국가 지원이 필요함.

1. 해외 현황

가. 조사후 핵연료 시험 (핫셀) 시설

- 원자로에서 조사 또는 연소된 핵연료의 조사후특성 자료를 취득하기 위한 조사후시험(Post Irradiation Examination, PIE) 및 고준위 방사성폐기물 처리/처분 연구는 고방사성 물질의 취급이 가능한 핫셀 시험시설에서 수행되며, 전 세계 원자력 선진국에서는 원전의 지속적이고 안전한 운영 및 원천기술 확보를 위하여 다수의 핫셀 시험시설을 운영 중.

[표5-1] 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)

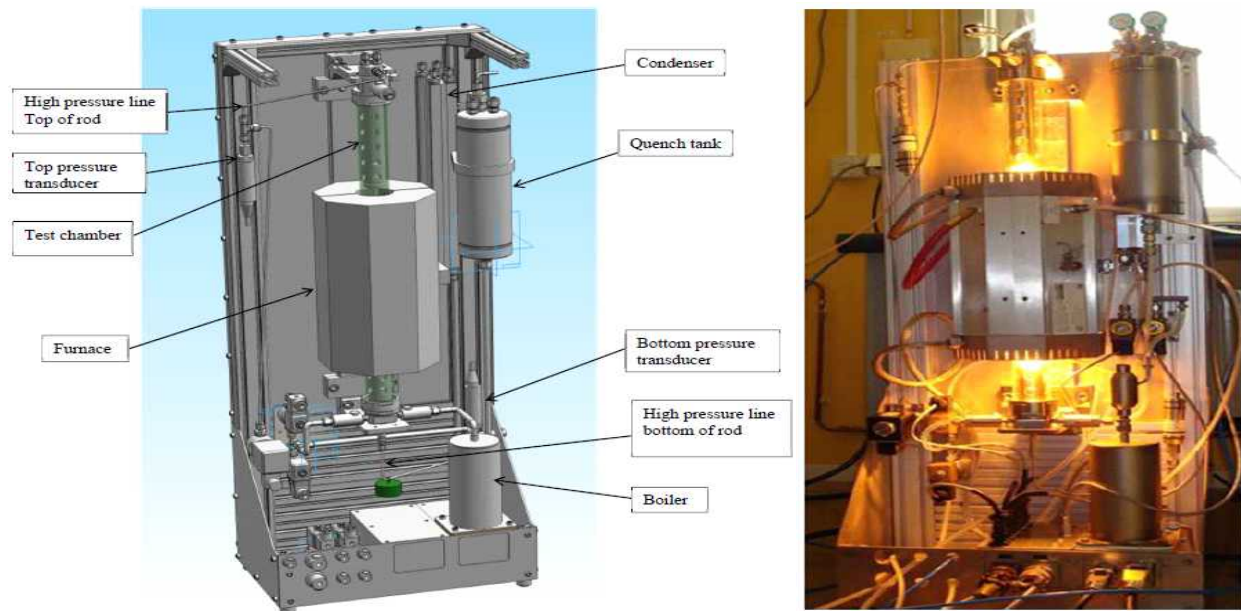
러시아	Research Institute of Atomic Reactors (RIAR)
일본	JAEA Hot Laboratories(RFEF, WASTE, BECKY) Nippon Nuclear Fuel Development Co. (NFD)
중국	Hot Laboratory of Nuclear Power Institute of China (NPIC) Hot cell facilities, China Institute of Atomic Energy (CIAE)

○ 스웨덴 핫셀 시험시설 개요 및 조사후시험 설비 보유 현황 - Studsvik Nuclear AB.

- Studsvik은 스웨덴에서 원전의 개발 및 운영을 위해 1947년 AB Atomenergi로 시작하여, 2000년부터 민간소유의 기관으로 전환되어 운영 중.
- 7개의 콘크리트 핫셀을 갖추고 있으며, 신규 핵연료의 성능평가, 가동 핵연료 손상 원인분석 및 조사재료 평가 등 수행.
- 핵연료 pellet 및 금속 등의 화학적 분석을 수행할 수 있는 Laser ablation system 과 냉각재상실사고(Loss of Coolant Accident, LOCA)를 구현할 수 있는 설비 등 고도화된 조사후시험기술 구축.
- 국제 원자력 유관기관들과 공조하여 SCIP(Studsvik Cladding Integrity Program), SMILE(Studsvik Material Integrity Life Extension) 등 다수 국제 공동 프로젝트 수행.

[표5-2] Studsvik Nuclear AB 조사후시험 설비 현황

Available Techniques	
Visual examination	Sieve analysis
Profilometry	High temperature annealing
Axial gamma scanning	Hardness testing
Burnup measurement	Mechanical tests
Eddy current examination	Mandrel testing for PCI
Oxide thickness measurement	Light optical microscopy
Cladding inside inspection	SEM, TEM, STEM
LOCA testing	Chemical and radiometric analyses



[그림5-1] Studsvik LOCA 시험장비(좌) 및 시험 중 모습(우)

(Studsvik, NRC LOCA tests at Studsvik, 2012.)

○ 미국 핫셀 시험시설 개요 및 조사후시험 설비 보유 현황 - Idaho National Laboratory(INL).

- 미국의 에너지부 DOE의 17개 국립연구소 중 하나인 INL은 원자력, 재생에너지 및 보안 솔루션 등의 연구를 수행.
- 특히 원자력 부문에서는 신연료 개발, 조사 재료시험 등과 함께 일반적인 파괴 및 비파괴 조사후시험은 물론, 사고저항성 핵연료의 특성 평가를 위한 LOCA 모사 시험 등 다양한 핵연료 조사후시험과 연구를 수행.
- Post Irradiation Examination Facilities는 HFEF(Hot Fuel Examination Facility), AL(Analytical Laboratory), EML(Electron Microscopy Laboratory), Irradiated Materials Characterization Laboratory 및 CAES(Center for Advanced Energy Studies)로 구성됨. 이 시설들에서는 조사 핵연료 및 재료의 조사후특성 평가를 위한 핫셀 시설로 다양한 파괴 및 비파괴 시험을 수행하며, HFEF의 고순도 불활성기체 (Ar gas) 분위기 핫셀(17.8m L × 7.6m W × 6.4m H) 및 공기(air) 분위기 핫셀(5.1m L × 7.6m W)에서는 다양한 형태의 핵연료를 취급 및 조사후시험을 수행.

[표5-3] Idaho National Lab HFEF 설비 현황

Available Techniques	
Density	Machining
Visual examination	Tensile testing
Gamma scanning	SEM
Rod length measurement	Metallurgical analysis
Profilometry	Coated particle sieving and inspection
Bow examination	Carbon, Oxygen, Nitrogen analysis
Eddy current testing	Gamma spectroscopy
Neutron radiography	ICP atomic emission spectroscopy-DE
Gas assay sample and recharge	Atomic absorption analysis
ICP/MS	Thermal ionisation mass spectrometry
Gross alpha/beta analysis	Nanoindenter
Element analysis	Dual beam focused ion beam
Alpha/beta spectroscopy	Positron annihilation spectroscopy
Gass mass analysis	Atom probe
Processing of isotopes	Raman spectroscopy
Thermal diffusivity	TEM
X-ray diffraction	DTA DTG DSC
EPMA	FEGSTEM
Micro hardness testing	Optical microscopy

- Irradiated Materials Characterization Laboratory(IMCL)는 조사 핵연료 및 재료의 미소구조, 화학 및 기계적 조사후특성 평가를 위한 핫셀 시설로 다양한 파괴 시험을 수행.

[표5-4] Idaho National Lab IMCL 설비 현황

Available Techniques	
Optical microscopy	Electron probe microanalysis(EPMA)
Dual-beam focused ion beam(FIB)	TEM
Local electrode atom probe	SEM
Measurement of material, physical and thermal properties	Thermal property characterization
X-ray microscopy(XRM)	X-ray diffractometer(XRD)

○ 미국 핫셀 시험시설 개요 및 조사후시험 설비 보유 현황 - Oak Ridge National Laboratory (ORNL).

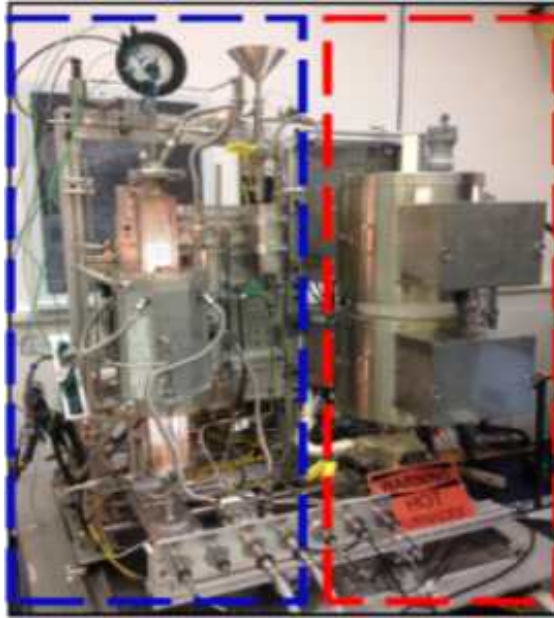
- 미국의 에너지부 DOE의 17개 국립연구소 중 하나인 ORNL은 핵연료 개발과 동위원

소 생산 등 다양한 원자력 R&D를 주도하는 연구소이며, 조사재료를 시험하는 시설인 IMET(Irradiated Materials Examination and Testing Facility)와 조사후연료를 시험하는 IFEL(Irradiated Fuels Examination Laboratory)을 운영.

- IFEL은 핵연료 및 원자로 부품의 화학적 및 물리적 특성을 평가하는 ORNL의 대표시설 중 하나이며, 최근 Westinghouse의 사고저항성 핵연료의 인허가 자료 생산을 위해 LOCA를 포함한 조사후시험을 수행.
- 또한, IFEL에 SATS(Severe Accident Test Station)을 개발 및 구축하여 설계기준사고(Design basis accident, DBA) 및 설계기준초과사고(Beyond design basis accident, BDBA) 조건 등 다양한 사고 시나리오에서 핵연료 시험을 수행할 수 있도록 선진화된 핫셀 기술을 선도.

[표5-5] Oak Ridge National Laboratory IFEL 설비 현황

Available Techniques	
Visual examination	Fuel rod sectioning
Indexing for precision length measurement	Oxide layer thickness measurement
Profilometry	Neutron radiography
Axial gamma scanning	Hydrogen measurement
Eddy-current examination	Microgamma scanning
Thermal imaging	Pellet grain size and porosity
Fission gas analysis	Mechanical testing
Length and diameter	Burst and creep testing
Gamma Scanning	Microstructural analysis



[그림5-2] SATS에 설치된 DBA 모듈(청색점선)(좌), BDBA 모듈(적색점선)(우)
(Nathan Capps et. al., “Integral LOCA fragmentation test in high-burnup fuel,”
Nuclear Engineering and Design, 2020.)

○ 프랑스 핫셀 시험시설 개요 및 조사후시험 설비 보유 현황 - LECA-STAR Hot Cell Facility.

- CEA 산하의 LECA-STAR 시설에서는 조사 연료봉의 파괴 및 비파괴 조사후시험이 가능한 핫셀을 운영 중⁶⁵⁾.
- 연구용 원자로, 해군용 연료 및 신연료 개발에 필요한 조사후시험을 수행하는 시설이며, 최근에는 LOCA 과정에서 발생할 수 있는 핵연료의 FFRD(Fuel Fragmentation, Relocation and Dispersal)를 평가하기 위해 EDF, CEA 및 Framatome이 공동으로 VINON-LOCA 프로그램을 추진하면서 각종 조사후시험기술의 선진화를 선도⁶⁶⁾.

65) HOTLAB, Keys figures and services at the CEA LECA STAR facility (2015)

66) EPJ Web of conference, The VINON-LOCA test facility (2021)

[표5-6] LECA-STAR 조사후시험 설비 현황

Available Techniques	
Optical microscopy	SIMS
SEM	Retained gas measurement
Image analysis	Numerical macroscope
EPMA	Oxidation furnace
Heat treatments with on-line gas analysis	Length and diameter
X-ray diffraction	Eddy current testing
Density	Oxide layer thickness measurement
Micro-coring	Gamma scanning
Burnup	Visual examination



[그림5-3] 핵연료 사고 시나리오 평가를 위한 시험장비(LECA-STAR, VERDON)

- 일본 핫셀 시험시설 개요 및 조사후시험 설비 보유 현황 - Japan Atomic Energy Agency(JAEA).
 - RFEF(The Reactor Fuel Examination Facility)에서는 경수형 원전 사용후핵연료 및 재료에 대한 안전성 및 신뢰성 평가를 위한 조사후시험을 수행하며, 수조 1개와 중 콘크리트 차폐 핫셀 8개, 납 차폐 핫셀 5개를 운영 중.

[표5-7] Japan Atomic Energy Agency RFEF 설비 현황

Available Techniques	
Visual examination(assembly, rod)	X-ray radiography
SEM	Dimension measurement(assembly, rod)
Tensile and burst test	Eddy Current testing
EPMA	Annealing test of pellet
Rod defueling	LOCA quench test
Metallography	X-ray diffractometry
Density	Oxide layer thickness measurement
Ultra-micro hardness test	Gamma scanning
Thermal diffusivity measurement	Gas analysis

- WASTEF(The Waste Safety Testing Facility)에서는 사용후핵연료 재처리과정에서 발생하는 고준위 방사성폐기물의 저장 처분에 대한 안전성 시험을 위해 건설되었으나 1996년 이후 조사 재료에 대한 고온 시험과 TRU(transuranium) 취급시험을 수행하며, 중 콘크리트 차폐 핫셀 5개, 납 차폐 핫셀 1개 및 글러브박스 6개를 운영 중.

[표5-8] Japan Atomic Energy Agency WASTEF 설비 현황

Available Techniques	
Fuel cladding fracture toughness test	Fuel cladding tensile and compression test
Slow strain rate tensile test(SSRT)	Uniaxial constant load test
Autoclave test	Dissolution test
Heating surface corrosion test	Fuel cladding SSRT
Leaching test	Small-scale molten-solidified production fabrication
TRU compound manufacture examination	X-ray diffraction examination
Chemical treatment & analysis	Composition analysis
Thermodiffusion coefficient measurement	Specific-heat-capacity measurement
TEM	Focused ion beam(FIB) machining

- BECKY(The Back-End Fuel Cycle Key Elements Research Facility)에서는 사용후핵연료 재처리 및 방사성폐기물 처분량 저감과 같은 후행핵주기와 연관된 기초 연구를 수행하며, 중 콘크리트 차폐 핫셀 3개, 철 차폐 핫셀 3개 및 글러브 박스 30개를 운영 중, 이들 중 철 차폐 핫셀과 일부 글러브박스는 저산소 조건에서 시험을 수행하기 위해 고순도 불활성기체(Ar gas) 분위기에서 운영.

나. 연구로 시험 시설

- 현재 전 세계적으로 227기의 연구로가 운영 중⁶⁷⁾이나, 이 중 경수로 핵연료의 시험을 수행할 수 있는 수준의 연구로(재료시험로, Material Testing Reactor)는 약 9기에 불과함.
- 연구로의 운영 목적은 교육, 기초 연구, 동위원소 생산, 중성자빔 활용, 방사화 분석 등으로 매우 다양하나, 경수로 핵연료의 시험을 수행하기 위해서는 경수로와 유사하거나 높은 중성자속을 발생시켜야 하므로 비교적 높은 출력의 연구로가 주요 대상임.



[그림5-4] 현재 운영 및 계획 중인 재료시험로

- 최근까지 활발히 국제적으로 협력하여 시험 프로그램(HRP)을 운영했던 할덴원자로(HBWR)의 폐로가 결정*된 이후 핵연료 관련 시험을 수행할 수 있는 재료시험로는 빈약함**.
- 특히 핵연료의 인허가와 관련된 loop 시설을 활용한 연소시험 기술, 시험 중 핵연료의 특성을 측정하는 기술, RAMP/LOCA/RIA 구현 시험 기술 등을 확보한 시설은 극히 제한적으로 최근 관련 기술을 확보하기 위한 다양한 노력이 진행되고 있음.
- * 재료시험로의 대부분은 1960년 내외에 건설되어 운영 중으로, 장기적인 운전에 따른 노후화 및 시설 개선 요구 비용이 급격히 상승하고 있어 이에 대한 지원이 수반되지 않을 경우 안정적인 운영이 어려움.
- ** 국제적으로 할덴원자로의 기술 의존도가 상당히 높아 각국의 재료시험로 활용 기술은 상

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

대적으로 미성숙하였음.

[표5-9] 현재 운영 중인 주요 재료시험로의 핵연료 시험 특성 비교

연구로명	원자로 출력 (MW)	운전 착수년도	시험시설 특성 요약	비고
ATR (US)	250	1967	77개의 조사공, PWR 모사 loop 시설 보유	기장로 핵연료 LTA 시험이 수행됨
HFIR (US)	85	1965	31개의 조사공	하나로와 유사함(다목적 활용, 주기길이 등), Loop 시험시설 없음
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	2027년 까지 현대화 프로그램 진행 예정
BR2 (Belgium)	100	1962	PWR 환경에서 정상 및 과도 환경 시험 수행 가능	우리나라에서 활용한 사례는 현재 수행 중인 U-Si 관형핵연료 시험이 유일함
HFR (Netherland)	45	1961	후속 연구로(PALLAS) 건설 이후 폐로 예정	현재 진행 중인 시험 프로그램은 없는 것으로 판단됨
MIR.M1 (Russia)	100	1966	Loop를 포함하여 다양한 시험에 적용 가능	현실적으로 loop를 활용할 수 있는 유일한 연구로나, 우크라이나와의 분쟁으로 불확실성이 매우 큼
LVR-15 (Czech)	10	1957	Loop 시설을 포함한 재료 시험 가능	핵물질이 포함된 시험은 적용이 어려움
HANARO	30	1995	7개의 노심 내부 조사공	Loop 시설 활용 어려움, 계장 시험 및 비정상 운전 조건 구현 추진 중

- 재료시험로 건설에 대한 신규 투자가 거의 전무한 상황에서 프랑스에서는 2000년대부터 신규 재료시험로인 JHR(Jules Horowitz Reactor)을 건설 중* 이나, 후쿠시마 사고로 인한 규제 기준 변화 대응 및 원자로 설계 변경 등으로 지연 중임**.

* 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 예상⁶⁸⁾.

- 핵연료의 인허가 자료를 확보할 수 있는 재료시험로의 활용은 과거 친화적인 국제협력 기반의 운영과는 다르게 변화가 예상되므로 관련 기술 확보가 중요함.

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

- 재료시험로 관련 기술 역량을 확보하고 있는 국가는 미국, 프랑스, 러시아 등으로 대부분 우리나라의 원자력 시스템 수출 경쟁국임.

- 러시아-우크라이나 전쟁 사례에서도 확인할 수 있듯이 국제적인 제재에 의해 원자력 관련 협력이 무산될 가능성도 있음.

○ 기존에 활용 중이던 재료시험로의 연속적인 폐로 결정*에 의해 국제적으로 활용 가능한 재료시험로가 부족하므로 OECD/NEA를 중심으로 FIDES(Framework for Irradiation Experiments)**를 운영하고 있음⁶⁹⁾.

- FIDES-II에서는 현재 8개의 JEEP(Joint Experimental Programmes)을 운영 중임.

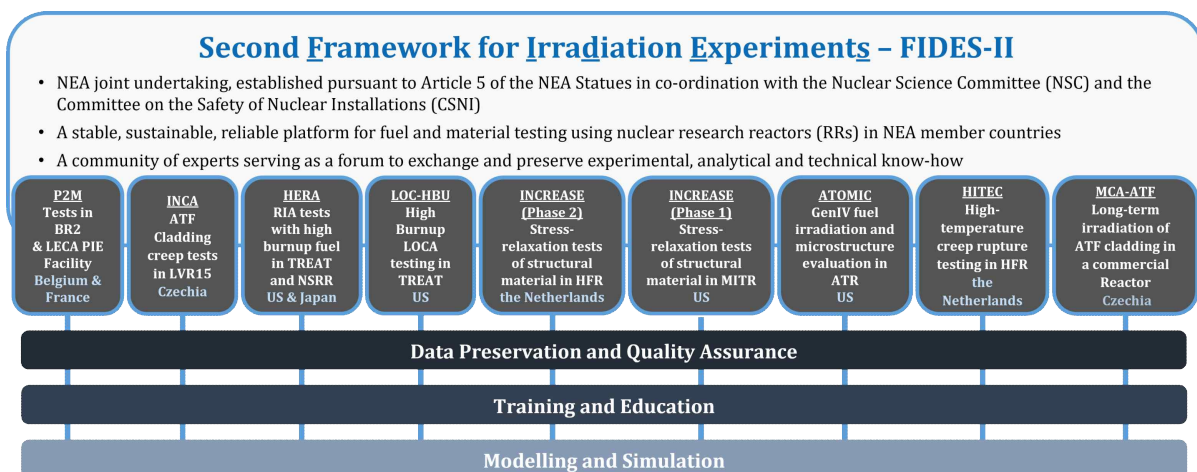
- 참여국가: 벨기에, 체코, 핀란드, 프랑스, 독일, 헝가리, 일본, 한국***, 네덜란드, 스페인, 스웨덴, 스위스, 영국, 미국, 유럽연합.

- 다만 FIDES-II에 의한 시험 결과는 참여국가에 공유될 것으로 예상되므로 보안이 중요한 핵연료 인허가 자료는 활용할 수 없음.

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

** 2024년부터 2027년까지 FIDES-II를 운영할 예정임

*** 우리나라의 경우 2024년부터 FIDES-II에 참여하고 있으며, 연구로와 핫셀 시설을 갖추고 있어 향후 별도의 JEEP을 구성할 수 있을 것으로 기대됨



[그림5-5] FIDES-II의 주요 시험 주제 및 협력 현황

○ 미국에서는 NSUF(Nuclear Science User Facility)를 조직/운영하여 보유하

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

고 있는 시설을 활용한 연구를 국가에서 지원하고 있음⁷⁰⁾.

- 활용 가능 연구로는 미국 내 ATR, ATR Critical Facility, TREAT, MITR, PULSTAR, HFIR, OSU-NRL, ACRR이며, 벨기에의 BR2까지 확장(2017년)하였음.
- 경쟁적인 시험 제안 및 채택 시스템을 갖추고 있음, 채택된 시험 비용은 지원하지만 별도의 예산 지원은 없음.

○ 위와 같이 국내 핵연료 개발을 위한 연구로 시험 인프라는 향후 기술 자립 측면에서 매우 중요함.

- 경쟁 국가와 유사한 수준의 시험 인프라가 구축되지 않을 경우 기술 격차 발생 및 관련 인허가 자료 미확보로 인하여 원자력 시스템 수출에 상당한 위협이 예상되므로 필수적인 시험 기술은 반드시 확보해야 함.
- FIDES-II 등 국제적인 협력을 통해 국내 빈약한 연구로 시험 기술을 국제적인 수준으로 상승시켜야 함.
- 선진국의 사례와 같이 국가차원에서의 관련 인프라를 활용한 연구 활성화 지원이 필요함.

2. 핫셀 인프라 구축 및 정부 지원 필요성

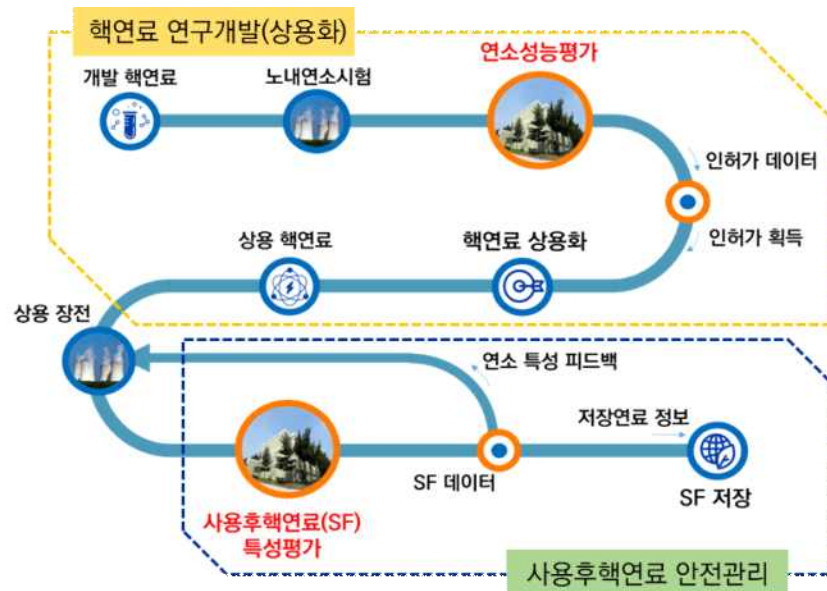
가. 배경

- 현 정부의 '30년 원전 수출 10기 목표 및 가동 원전 안전성 강화 요구에 따른 핵연료 연구개발 계획이 급속도로 추진되고 있으며, 원전 수조 내 사용후 핵연료 저장용량 포화 시점이 도래함에 따라 장기적이고 안전한 사용후핵연료 관리 방안 마련이 시급.
- EU 택소노미 및 한국형 녹색분류체계(K 택소노미)는 원자력 발전을 지속가능 에너지원으로 인정하기 위해 ATF(Accident Tolerant Fuel, 사고저항성 핵연료) 적용 요구 및 시한을 규정(EU 택소노미 : ~'25년, K 택소노미 : ~'31년⁷¹⁾).
- '16년 파리협정 이후 한국은 기후변화 대응에 대한 정책 의지를 반영, '30년

70) NSUF homepage, <https://nsuf.inl.gov/>

71) 한국형 녹색분류체계(K-Taxonomy) 가이드라인, 환경부(2022.12)

국가 온실가스 감축목표 상향(안)을 UN에 제출('20.12월). 무탄소 전원인 원전의 지속 활용 및 비중 확대, 탄소중립 실현의 핵심 기술인 SMR(소형모듈 원자로, Small Modular Reactor) 개발 및 활용을 위해 차세대 핵연료 개발 필수.



[그림5-6] 핵연료 개발 및 사용후핵연료 안전관리 흐름도 내 조사후시험기술의 역할

나. 핫셀 인프라 활용 계획

1) 차세대 핵연료 개발

○ 후쿠시마 원전 사고 이후 핵연료 자체의 사고저항성 향상 필요성이 대두, 미국 상원의회에서는 에너지부(DOE)에 원전 사고 발생 시에도 저항성을 갖는 핵연료 개발 권고('12년)⁷²⁾. 세계 각 국은 핵연료 안전성능 향상을 목적으로 ATF 기술 개발 수행.

- (국내) ATF 상용화를 위한 상용로 연소시험('24년~) 중.
- (미국) DOE 주도로 ATF 개발 프로그램 시작('12년), ATF 상용화 추진(~'25년).
- (프랑스) CEA, EDF, Framatome 공동 R&D 체계 구축, 연구개발 로드맵 수립 및 착수.

○ 탄소중립 실현을 위해 SMR 개발을 통한 '30년대 해외 원전 시장 선점 목표로 혁신형 SMR(i-SMR) 표준설계 인가(~'28년) 추진 중.

72) H.R.Conference Report 112-331, U.S. 112th Congress(2011.12)

- 사용후핵연료 절대 발생량 감축을 위해 기존 대비 핵연료의 농축도를 상향(6~7 wt.%)하여 사용후핵연료 발생량을 저감할 수 있는 LEU+(농축도 상향 핵연료, Low Enriched Uranium Plus) 핵연료 개발 추진 중.

2) 사용후핵연료 안전관리를 위한 장기 저장 중 건전성 평가

- 제10차 전력수급계획을 반영한 사용후핵연료 발생량 산정 시, 기존 대비 포화 시점 단축 전망에 따라 원전 내 임시저장시설 건설 적기 착수 필요성 제기.
- 사용후핵연료 재검토위원회 공론화 이후, 제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획('21.12월)에 따라 고준위 방폐물을 국가 책임하에 안전하게 관리하기 위한 기본계획 수립⁷³⁾.
- 관리정책 로드맵에서는 영구처분시설 부지선정 절차 착수 후 '37년 내 영구처분시설 확보 계획 수립, 중간저장시설은 관리시설 부지확보 이후 약 7년 내 건설하는 것으로 계획.

다. 신규 조사후시험·평가 설비 구축 계획 추진

- 핫셀 인프라 활용 계획에 따른 조사후시험을 적기 수행하기 위하여 기존 조사후시험 설비의 성능 개선 및 아래의 신규 조사후시험설비 구축 완료 필요.

[표5-10] 신규 구축된 조사후시험설비 현황

과도/사고조건 핵연료 안전성능 시험 평가 장비	
항목	평가
Integral LOCA test	냉각재상실사고 시 핵연료가 겪는 조건(고온가열, 증기산화, 급랭)을 모사하여 핵연료의 열화/손상 특성 평가
PCI-Mandrel test	탄력운전에 따른 소결체-피복관 상호작용 특성 평가
MBT(Modified Burst test)	반응도사고에서 소결체 팽창이 핵연료 피복관(파열)에 미치는 영향 평가
EDC(Expansion Due to Compression)	반응도사고에서 소결체 팽창이 핵연료 피복관(변형)에 미치는 영향 평가
FFRD(Fuel Fragmentation, Relocation, Dispersal)	원전 사고에서 핵연료 온도 증가가 소결체 파편화에 미치는 영향 평가
PQD(Post Quenched Ductility) test	냉각재상실사고에 따른 핵연료 가열·냉각 후 피복관 잔존 연성 평가

73) 제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획(안), 산업통상자원부(2021.12.)

핵연료 분석 및 물성 평가 장비	
항목	평가
Laser ablation	발전소에서 연소된 핵연료 소결체의 국부적인 조성 분석(연소특성 평가)
Nano-indenter	핵연료 미세 코팅층 기계적 물성 평가
열확산도 측정기	핵연료 영역별 열전도도 측정
연소도 측정	핵연료 연소도 측정(화학분석법)
핵분열기체 성분분석시스템	핵분열기체 성분분석

라. 핫셀 인프라 시설의 안정적 운영을 위한 환경 확립 필수

- 조사후시험시설의 안전 운영을 위한 공기조화설비, 전력공급설비, 방사선안전 관리설비 등 운전설비의 업그레이드 및 선진 운영기술 도입을 위한 안정적 운영 재원 지원.
- 국가 원자력 연구 개발 계획 완수를 위한 첨단 조사후시험설비 및 시험기술 확충 재원 필요.
- 원전의 지속·안전운전을 위한 조사후시험의 필요성에 대한 대국민 공감대 형성, 지자체 및 지역 주민수용성 확보를 위한 정책적 지원.

마. 핫셀 인프라 운영 전문인력 양성 사업 추진

- 원전의 해외 수출과 함께 건설 이후 장기간에 걸쳐 국내 독자 개발 핵연료를 안정적으로 공급하고, 운전 중 원전의 안전성을 검증하기 위해서는 고도의 지식과 경험을 가진 전문 인력의 지속적인 양성이 필요.
- 우리 기업의 원전 및 핵연료 관련 해외 시장 기회를 창출할 수 있는 글로벌 수준 전문 운영 인력 양성.
- 수요맞춤형 인재양성을 위한 산·학·연 연계 프로젝트 운영.
- 산업계 수요를 반영한 실무 단기 집중교육 과정 운영.

바. 핫셀 인프라 구축에 따른 기대효과

- 단기적으로는 ATF 인허가 자료 생산 및 상용화에 기여, EU 텍소노미 및 K 텍

소노미에서 요구하는 ATF 적용 기한의 시급성을 해소.

- 국내 핫셀 인프라 미비 시 해외 위탁시험으로 인한 국내 독자개발 기술의 해외 유출 및 시험비용 지출 등 경제적 손실을 방지.
- i-SMR 및 상용원전 농축도 상향 핵연료(LEU+) 연소성능 평가에 활용하여 사용후핵연료 발생량 저감과 핵연료 경제성 제고에 기여.
- 해외 선도 시설 동등 이상의 조사후시험설비 및 기술을 구축하여 세계 최고 수준의 핵연료 안전성 평가 자료 생산.

- 》 한국원자력연구원은 국내에서 유일하게 조사 핵연료 및 재료에 대한 조사후시험을 수행할 수 있는 조사후연료시험시설(PIEF, Post Irradiation Examination Facility) 및 조사재시험시설(IMEF, Irradiated Material Examination Facility)을 운영 중.
- 》 지난 30여년간의 다양한 조사후시험기술 개발 및 조사후시험 수행을 통하여 핵연료 연소성능 평가, 원전 핵연료 및 부품의 손상원인 규명, 경수로 압력용기/중수로 압력관 감시시험, 저연소도 사용후핵연료 장기저장 건전성 평가 등 핵연료 전주기에 대한 조사후특성 자료를 생산·제공하여 왔으나 기존 조사후시험설비의 심각한 노후화 및 차세대 핵연료 개발을 위한 과도/사고조건 모사 시험 및 평가 기술 미확보 상태.

가. 조사후연료시험시설(Post Irradiation Examination Facility, PIEF)

- 1985년 준공되었으며, 지상 2층, 지하 3층 규모의 시설*임.

* 중소형 핫셀 4개, 납 핫셀 2개, 대형 수조 3개(핵연료 반입, 저장, 수중시험용).

[표5-11] 한국원자력연구원 PIEF 시설 현황

Specifications of Hotcell & Pool (PIEF)			
종류	크기(L×W×H, m)	차폐벽 두께(m)	기능
대형 수조	6.5×3.0×15.5 (1개) 6.5×3.0×10.0 (1개) 7.5×3.9×15.5 (1개)	중 콘크리트 1.1	Cask unloading(FA, FR) Fuel storage PSE, Dismantling of FA
중소형 핫셀	6.5×1.5×3.5 (1개) 4.0×1.5×3.5 (1개) 2.0×1.5×3.5 (1개) 3.0×1.5×3.5 (1개)	중 콘크리트 0.85	Nondestructive test Internal pressure measurement Sample storage Specimen preparation
납 핫셀	1.2×1.0×2.5 (1개) 1.2×1.8×1.5 (1개)	납 0.15	Metallography Densimetry
핫랩	10.8×10.8×5.25 (1개) 8.1×8.1×5.25 (1개)	납 차폐 글러브박스, 납 차폐벽	Mechanical test SEM

※ FA; Fuel assembly, FR; Fuel rod

- 국내 상용원전 핵연료 집합체 및 연료봉에 대한 조사후시험이 가능한 국내 유일의 시설로서 핵연료 국내 독자 개발 연구 및 사용후핵연료 안전관리를 위한 장기 저장 중 건전성 검증용 조사후 특성 시험자료 생산 및 평가.
- － 상용원전 연소 핵연료의 건전성 및 조사특성 평가, 손상원인 규명 및 재발방지 대책 수

립.

- 개량 핵연료/신 연료 조사후특성시험을 통한 DB 구축 및 국내·외 인허가 획득 지원.
- 사용후핵연료 건식 및 습식 장기저장 건전성 시험 및 평가.

[표5-12] 한국원자력연구원 PIEF 구비 기술 현황

Available Techniques	
Visual examination	SEM
Dimensional measurement	Element analysis
Gamma scanning	Hardness testing
Flaw detection	Mechanical Testing
Oxide layer thickness measurement	Density
Internal pressure measurement	Optical microscopy
Section gamma scanning	Hydrogen analysis



[그림5-7] 차세대 핵연료 개발 및 조사후시험·평가 기술 확충 로드맵

나. 조사재시험시설(Irradiated Materials Examination Facility, IMEF)

○ 1993년 준공되었으며, 지상 3층, 지하 1층 규모의 시설*임.

* 중대형 콘크리트 핫셀 8개, 납 핫셀 1개, 소형 수조 1개(핵연료 및 재료 반입용).

[표5-13] 한국원자력연구원 IMEF 시설 현황

Specifications of Hotcell & Pool (IMEF)			
종류	크기(L×W×H, m)	차폐벽 두께(m)	기능
소형 수조	6.0×3.0×10.0 (1개)	—	Cask unloading(capsule)
중형 핫셀	7.0×3.0×6.0 (1개)	중 콘크리트 1.2	Nondestructive test
	7.0×3.0×6.0 (1개)		Dismantling capsule
	4.7×3.0×6.0 (1개)		Specimen preparation
	2.3×3.0×6.0 (1개)		Sample storage
	7.1×2.0×4.0 (1개) 4.8×2.0×4.0 (1개)	중 콘크리트 0.8	Mechanical test
대형 핫셀	23.4×2.0×4.0 (1개)	중 콘크리트 1.1	Process test
	10.3×2.0×4.3 (1개)	중 콘크리트 0.9	
납 핫셀	1.5×2.6×4.65	납 0.2	Metallography
핫랩	5.8×7.5×8.4	납 차폐벽	EPAM, TEM, X-ray system

- 하나로 연구용 원자로 조사 연료 및 재료 그리고 상용 원전 중성자 조사 재료·부품의 조사후특성 시험.
- 가동 중 원자로 압력용기 및 노심기기의 수명평가 및 노내 이물질 분석 시험.
- 선진 원자로 구조재료의 조사거동 검증 시험.
- 선진 원자로 핵연료를 개발하기 위한 조사후시험.

[표5-14] 한국원자력연구원 IMEF 구비 기술 현황

Available Techniques	
Visual examination	TEM
Length and diameter	Density
Gamma scanning	Thermal diffusivity
Eddy current testing	Mechanical testing
Oxide thickness measurement	Micro hardness testing
Rod puncture	X-Radiography
Optical microscopy	Image analysis
SEM	EPMA



[그림5-8] 조사재시험시설 공정 절차도

3. 핵연료 검증용 연구로 구축 및 정부 지원 필요성

가. 배경 및 필요성

- 그동안 핵연료의 시험은 연구개발 초기 단계에서의 성능 관찰에 집중되어 있었기 때문에 최근 산업계로부터 요청된 시험을 수행하기에는 기술적 역량이 다소 부족함.
 - 산업계에서 요구하고 있는 수준의 시험 결과를 도출하기 위해서는 기술적인 수준을 높여야 할 뿐만 아니라 품질보증 등의 요건을 만족시켜야 함.
 - 2000년대까지 상용 원전에 적용되는 핵연료에 대한 개발 요구가 비교적 낮았으나*, 후쿠시마 사고 이후로 성능 및 안전성을 증가시킨 핵연료의 개발 요구 급증.
 - * 하나로를 활용한 시험이 다수 수행되었으나 대부분 기초적인 성능 관찰에 집중되어 있었기 때문에 인허가 데이터로 활용하기에는 다소 부족함.
 - 현재 핵연료의 인허가 자료 생산을 위한 연구로 연소시험은 전적으로 국외기술에 의존하고 있으나, 이는 원자력 시스템 수출 전략에 상당한 위협이 될 수 있어 장기적으로 국내 연구로 시험 기술을 확보해야 함.
- 혁신형 소형모듈원자로의 개발 요건 중 하나는 무봉산 운전으로써 이를 구현하기 위해 주기 초 노심 반응도를 제어할 수 있는 가연성흡수봉* 개발이 필수적이며, 해당 가연성흡수봉의 성능은 연구로 시험을 통해 검증되어야 함.

* 국내에서는 기존 가연성 흡수소재인 가돌리니아를 활용한 핵연료 기술을 개발하고 있으며, 하나로를 활용하여 시험을 수행 및 계획 중임.

- 현재 하나로에서의 핵연료 시험 기술은 TRL 6 이하의 시험에만 적용이 가능한 것으로 평가되고 있어, TRL 7이상의 시험을 위해 기술 개발이 다소 필요함.

○ 우라늄 자원의 효율적인 활용과 사용후핵연료 발생 저감을 만족시키는 장주기 운전 실현을 위해 고연소도 핵연료 기술 검증이 필요.

- 상용 핵연료의 고연소도 달성 및 농축도를 5% 이상 향상시킨 LEU+ 핵연료를 개발*하기 위해서는 연구로를 활용한 안전성 평가가 수반되어야 함.

* 하나로를 활용한 시험이 계획 중이며 다양한 시험 환경에서의 안전성을 평가해야 함.

○ 신재생에너지의 확대에 의한 간헐성을 보완하기 위해 그동안 고정적인 출력으로 기저부하를 담당했던 원자력 발전의 운영 방안 변화가 예상됨.

- 탄력운전 시 가장 우려되는 부분은 핵연료의 반복적인 출력 변화에 의한 PCI(Pellet Cladding Interaction) 성능으로 해당 연구를 수행할 수 있는 시설은 연구로가 유일함.

○ 원자력 수소 생산, 무탄소 선박 동력 확보, 국내 고유의 핵연료 주기 수립 등을 위해 비경수형 원자로 개발을 수행 중.

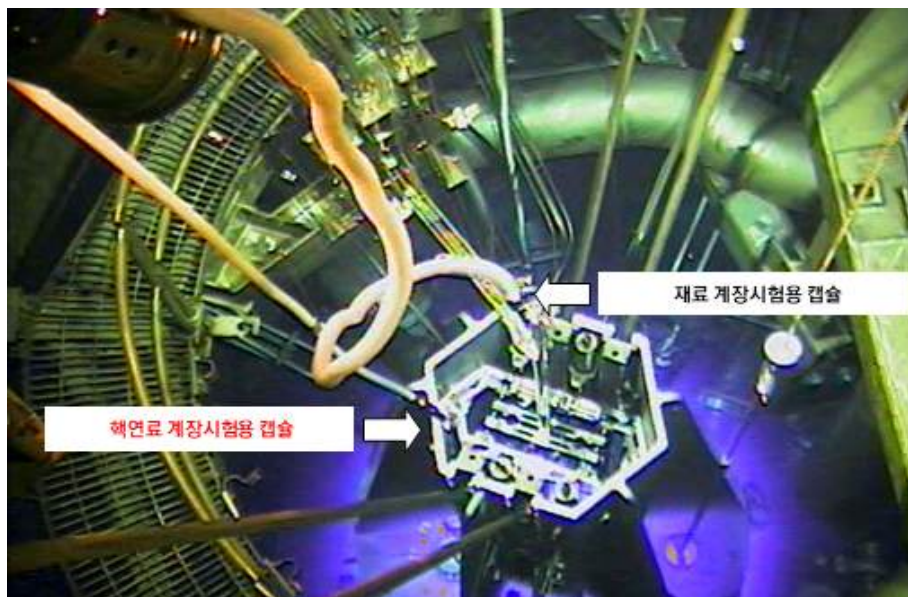
- 비경수형 원자로의 실증을 위해서는 관련 핵연료의 성능 및 안전성을 검증해야함.

[표5-15] 국내에서 개발이 예정된 주요 핵연료의 하나로 조사시험 계획

개발 핵연료	개발 주체	후보소재	조사시험 계획	비고
iSMR용 가연성 흡수봉	산업계	CIMBA, 고탐량 Gd 소결체, HIGA 등	하나로 시험 착수 (2025~)	산업계 최초의 핵연료 하나로 시험
	학계	CSBA pellet 등	하나로 시험 착수 (2024~)	연소도 30,000 MWD/tU 까지 시험 예정
고연소도 핵연료	산업계	미정	-	과제 기획 중
	연구계	LEU+ 핵연료	하나로 시험 계획 (2025~)	관련 과제 수행 중
비경수형 원자로 핵연료	학계 및 연구계	피복입자핵연료, 금속핵연료, 용융염 등	하나로 시험 계획 (2027~)	과제 기획 중

나. 국내 연구로(하나로) 현황 및 시험 기술 확보 전략

- 국내에서는 하나로를 활용하여 다양한 핵연료 시험을 수행하였으나 연구로 핵연료를 제외하면 인허가 자료로 사용할 수 없는 비교적 낮은 기술 수준이 적용됨.
- 연구로 핵연료: U-Mo, U-Si 계열의 연구로 핵연료 시험을 9회 이상 수행하였음, 최근 기장연구로의 핵연료로 적용될 U-Mo 판형핵연료의 검증 시험을 수행하였음.
* .
* 하나로에서의 연구로 핵연료 시험은 적용 환경이 유사하므로 인허가 자료 생산이 가능함.
- 경수로 핵연료: 큰결정립 소결체의 경우 약 70,000 MWD/tU 까지의 연소시험을 수행하였으며, DUPIC 핵연료 등 다양한 핵연료를 대상으로 수 건의 계장 기술**을 적용한 바 있음.
** 단, 해당 계장 시험은 시험 장치 건전성 확인이 주요 관심사항이었기 때문에 단주기 시험에 집중되어 있어 핵연료의 연소 초기 성능 일부만 측정되었음.
- 제4세대 원자력 시스템 핵연료: 피복입자핵연료(VHTR) 및 U-Zr 금속핵연료(SFR)를 대상으로 연소시험 수행하였음.
- 하나로에서 적용된 핵연료 시험은 조사공 내 고정된 캡슐에서 시험이 수행되므로 조사 환경이 하나로 운전 환경에서 크게 벗어날 수 없었기 때문에 활용이 제한적임.



[그림5-9] 하나로에서 수행된 경수로 핵연료의 계장시험

- 하나로는 경수로 핵연료의 시험을 수행할 수 있는 충분히 높은 중성자속을 가지고 있지만 동위원소 생산, 중성자빔 활용 등의 다목적 연구로의 역할을 수행하기 위해 별도의 압력용기가 없음.
 - 경수로 핵연료의 경우 하나로에서 상용 원전 대비 최대 선출력의 2.5배에 달하는 선출력을 나타냄*.
 - * 하나로 노심 내부의 조사공은 상용 원전 대비 상대적으로 높은 중성자속을 나타내므로 충분한 역량을 가지고 있음.
 - 하나로가 보유한 장점과 단점을 분석하여 핵연료의 시험 기술 개발 방향을 선정해야 함.
 - 신규 연구로인 기장연구로가 2017년 12월부터 가동 예정이므로 다목적 연구로인 하나로의 역할은 재조정*될 필요가 있음.
 - * 수직조사공 활용을 공유하던 동위원소 및 NTD 생산 기능 약화에 따라 상대적으로 조사 시험 기능에 집중할 수 있음.
- 국내에서도 사고저항성핵연료 개발을 위해 상용 원전 실증장전을 적극적으로 활용하고 있으므로 정상상태의 핵연료 연소 시편은 상용 원전 실증 시험을 통해 획득하고 조사후시험을 통해 관련 DB를 확보해야 함.
 - 연구로에서는 특정 환경의 시험 조건 조성* 및 실시간 측정**에 집중해야 함.
 - * LOCA 및 RIA는 시험 핵연료의 급격한 온도 변화 및 파손에 따른 처리가 필요하므로 비교적 복잡한 시설을 요구하지만 RAMP 시험 시설은 충분히 구축이 가능할 것으로 평가.
 - ** 계장기술을 통해 획득 가능한 핵심 자료는 핵연료의 중심온도 측정이며 이를 통해 핵연료의 열물성 관련 DB를 확보할 수 있음.

[표5-16] 핵연료 개발을 위한 시험 방법 역할 분담(안)

시험방법	운전모드	대표시설	비고
상용 원전 실증시험	정상운전 환경(장기간 정적 시험), 연구로 loop 시험의 경우 시험 중 핵연료의 특성 측정 및 고출력 연소시험	국내 원전	적극 활용 필요
연구로 시험		MIR.M1, ATR 등	하나로에서 일부 수행 가능
연구로 시험	비정상 운전환경 (RAMP, LOCA, RIA 등)	MIR.M1, TREAT 등	하나로에서 일부 수행 가능
조사후시험	정상 또는 비정상 운전 환경 모의	Studsvik	KAERI내 관련 시설에서 일부 수행 가능

○ 핵연료 검증을 위한 연구로 시험 인프라 및 기술은 긴 시간과 상당한 예산을 필요로 하며 전략적으로 다뤄져야 하므로 국가 차원의 지원*이 필요.

- 단기(5년 이내) 확보 전략**: 기존 하나로를 활용한 시험 기술의 개선 및 신규 기술 개발을 통해 개발이 시급한 핵연료의 성능 자료 확보.
- 중장기(5년 이상) 확보 전략***: 연구로 loop 시험 기술 확보, 신규 재료시험 전용 연구로 구축.

* 주요 선진국의 사례로 볼 때 원자력 시스템을 지원하기 위한 연구로 시설에 대한 투자는 지속적으로 필요하며, 시간 및 비용에 따라 단기/중기/장기 전략으로 분류될 수 있음.

** 하나로에서의 핵연료 RAMP 성능 시험 기술, 조사핵연료 재조사 시험 기술, 계장시험 기술, 조사핵연료 열물성 측정 기술 등.

*** 하나로에서의 loop 시험 기술, 정상/과도상태 구현 가능한 재료시험로 구축 등.

[표5-17] 국내 핵연료 개발을 위한 연구로 시험 기술 상세 및 확보 방안

시험 기술명	기술 사양	예상되는 개발 필요 예산 및 기간	비고
핵연료 출력변동 및 계장 시험 기술	핵연료의 다양한 출력 변화 요건을 구현하고, 온도/출력 등을 실시간으로 측정	300~400억/ 5년 이내	핵연료의 고유 안전성 및 탄력운전 성능 검증, 핵연료의 열적 특성 측정을 통한 안전성 분석 기초 자료 획득
경수로 환경(loop 적용)에서의 시험 기술	고온/고압 loop 계통 구축, 원전 냉각수와 유사한 수화학 환경 구현	500~800억/ 5년~10년	정상상태의 핵연료의 실시간 거동을 측정할 수 있어 종합적인 인허가 데이터 획득 가능
신규 재료시험로 구축	정상/과도상태 구현이 가능한 수준의 기술 확보	2조 이상*/ 10년 이상	특히 하나로에서 구현이 어려운 기술(LOCA, RIA 및 비경수형 원자로 환경 구현)을 중심으로 개발 필요

* 가장연구로 구축을 위한 총사업비는 7,659억원⁷⁴⁾이나, 최근의 물가상승, 고성능 원자로를 만족시키기 위한 출력 증가, loop 시설 구축 등에 따른 비용 상승이 예상됨.

74) 헬로디디, ‘수출형신형연구로’건설 본격, 난치성 암 치료 동위원소 국산화, 2023.5.1

한미 원자력 협력 현안

- 》 한미 원자력협력에서 최우선 과제는 농축, 재처리에 대한 한미고위급위원회의 장기동의를 얻는 것이며, 이를 위해 관,산,연의 전략개발부터 면밀한 준비와 협업이 필요함.
- 》 미국측 장기동의를 얻기 위해서는 NPT체제를 포함한 평화적이용에 대한 당위성과 확신을 주어야 하며, 한국만의 차별화전략, 공동번영을 위한 영구불변의 협력체계, 미국의 핵주기 재구축에 대한 재정적 공헌, 협상을 위한 고유 핵주기 기술개발 등이 필요함.

1. 핵주기 분야 한·미 원자력 협력 강화 전략

- 미국은 민감기술(농축 및 재처리)의 확산 방지를 근간으로 하는 핵비확산을 대외정책의 우선순위로 놓고 추진해 옴.
 - 미국은 1970년 핵비확산조약(NPT) 발효와 함께 1974년 인도가 재처리를 통해 핵 실험에 성공하자 1978년 핵비확산법(NNPA)을 제정하고 강력한 핵비확산 정책을 추진해 왔음.
- 미국은 '70년대부터 우리나라의 재처리 추구에 대해 적극 개입해 왔으나, 핵비확산성 사용후핵연료 처리기술(DUPIC*)에 대해서는 허용하는 등 대상국의 기술력 수준과 국제 지정학적 변화에 맞게 유연한 정책을 추진하기도 함.
 - 미국은 우리나라의 '70년대 재처리 및 '80년대 연계핵연료주기 개입, '90년대 DUPIC 협력 및 허용, '00년대부터 파이로 활동의 개입과 협력 등 핵주기 분야에서 지대한 정책결정의 영향력을 행사하고 있음.
 - 요컨대 미국은 우리나라의 핵주기 활동에 대한 무조건적인 반대가 아닌 일정 조건을 만족하면 허용하는 협력이 가능할 수 있음을 보여줌.
- * 경중수로연계핵연료주기(DUPIC) 기술은 경수로 사용후핵연료를 처리하여 중수로 핵연료로 사용하는 개념으로 핵물질 분리 활동을 포함하지 않음.
- 우리나라는 '70년대와 달리 26기의 원전을 운영하는 세계 5위의 원자력발전 국가로, 국가 발전량의 33%를 담당하는 원자력발전의 안정적 연료 공급 및

사용후핵연료 처분 부담 저감을 위한 농축 및 재처리/재활용 추구의 타당성이 있음.

- 탄소중립 시대 무탄소 에너지원인 원자력의 지속가능한 이용과 함께 러-우 전쟁 이후 에너지 안보 강화를 위해서는 자체적인 연료 공급 방안과 사용후핵연료 처분 부담 저감 노력이 필요함.

- 현재 원전을 20기 이상 운영*하면서 농축 및 재처리 역량이 없는 국가는 우리나라가 유일하며, 이는 해외에서 연료 공급 방안을 확보하지 못할 경우 에너지안보와 정책적 원전수출 국가 목표를 달성함에 있어서도 취약할 수 있음을 의미함.

* 원전 20기 이상 운영 국가는 미국, 중국, 프랑스, 러시아, 한국, 인도, 일본 (후쿠시마 사고 이전 원전 54기 운영)임.

- 더불어 무탄소 국가목표 달성 및 원전 수출 경쟁력 제고를 위해서는 EU 택소노미 (Taxonomy)에서 요구하는 처분장 확보와 함께 재활용 방안도 함께 마련되어야 함.

○ 이러한 의미에서 우리나라가 미국의 핵비확산 정책에 부합하면서도 에너지 안보 강화를 위한 한미 핵주기 협력 강화 전략이 필요하며, 다음의 추진 방안이 필요함.

○ 첫째, 한미 정부간 평화적 차원의 전략적 협의체인 원자력 고위급위원회 (HLBC: High Level Bilateral Commission)의 신속한 재가동.

- 現 한미 원자력협정에 따라 설치된 고위급위원회는 농축, 파이로 등 민감 핵주기 활동의 허용 여부를 협의할 수 있는 원자력 분야의 양국 정부간 최고위급 전략적 대화 채널임.

- 그러나 현재 한미 간에는 지식재산권, 수출통제 등의 문제로 고위급위원회가 가동되지 않고 있는 상황으로, 범정부적 협의를 통해 고위급위원회가 재가동될 수 있도록 노력해야 함.

- 이를 통해 세계 원전 시장이 러·중 주도에서 한미로 전환될 수 있는 전략적 파트너십 구축과 함께 우리나라의 핵주기 역량 확보를 위한 논의를 추진해야 함.



[그림 6-1] 한·미 고위급위원회 조직도

○ 둘째, 미국 내 한국의 평화적 핵주기 추구에 대한 당위성의 전파.

- 미국이 핵주기 활동을 허용한다는 것은 자국의 핵비확산 정책과 부합할 수 있다는 것임으로, 미국이 인정할 수 있는 평화적 핵주기 활동의 당위성과 체계를 정부 및 이해당사자들에게 전파 및 설득하는 것이 필요함.
- 아울러 미국 내 학회, 싱크탱크 등에서 국내 핵무장론을 철저히 배제하는 평화적 차원의 에너지 안보 및 원전 수출을 위해 핵연료의 안정적 공급 및 사용후핵연료의 처분 부담 저감 역량이 중요함을 아웃리치(Outreach) 활동을 통해 전파해야 함.

○ 셋째, 미국에게 한국의 핵주기 허용을 위한 차별화 전략을 개발 및 제공.

- 미국이 한국에게 핵주기 활동을 인정할 경우 미국은 후발 국가에게 동일한 대우를 해달라는 요청을 받을 것으로, 이에 대응할 수 있는 차별화 전략 개발이 필요함.
- 즉, 핵주기 역량 허용은 핵주기 수요의 경제적 타당성을 갖는 일정 규모 이상의 원전 운영(원전 25기 이상), 평화적 이용을 담보할 수 있는 최고 수준의 핵비확산 체제 가입(추가적정서 등), 핵주기 활동을 포함하는 국가 계획 등을 보유 시 허용하는 차별화 전략을 마련*하는 것임.

* 원전 25기 이상 운영하면서 핵주기 활동의 경제성을 확보할 수 있는 국가는 한국이 유일.

○ 넷째, 미국의 신규 농축기술 및 사업에 투자.

- 미국은 Megatone to Megawatt 프로젝트를 통해 러시아를 통해 농축우라늄을 공급 받았고 장기간 농축공장을 운영하지 않았기 때문에, 러시아 제재 이후 우라늄 자원 위기에 대응하고자 새롭게 신규 농축공장 건설을 추진하고 있음.
- 미국이 추진하는 원심분리 농축공장(Centrus)과 레이저 농축공장(GLE) 건설사업에 선매계약을 통해 장기간 농축공급을 받도록 하고 후순위로 직접투자를 검토하여, 미국과의 원전연료 상호협력체계와 함께 우호적인 분위기를 조성할 필요가 있음.

○ 다섯째, 미국식 국제질서가 담보된 원자력 이용개발을 위한 핵비확산, 핵안보, 공동번영을 위한 SMR 패러다임 변환을 위한 공동연구 등 협력의 파트너십 강화.

- 두 국가 다수의 원자력 관련 기관간 다양한 협력체계 구성을 유도할 필요가 있음. 이를 위해 첫 번째는 미국이 가장 중요하게 여기는 핵비확산/핵안보 정책 공동연구와

더불어 이분야 제3세계의 교육 등에 있어 관련기관간 협력을 추진할 필요 있음.

- 즉 우리나라 KINGS(원자력대학원)와 부설기관으로 최근 설립한 INC(국제핵비확산 협력센터) 등을 활용하여 다양한 미국 유관기관과 정책 및 교육 교류를 추진.
- 미국은 러시아, 중국의 국가주도 대형공기업이 주도하고 있는 현재의 대형원전시장에서는 경제의 승산이 적은 것으로 판단하고, 상대적으로 적은 자본력으로 단기간에 건설이 완료 될 수 있어 기본적으로 사기업의 접근성과 활동성이 보장되는 SMR 시장으로 패러다임 전환을 국가적 전략으로 삼고 있음. 이를 위해서는 다양한 건설경험과 능력이 우수하며 Supply Chain이 굳건한 한국과의 협력체계 구축이 매우 필요함을 알고 있음. 이에 부흥하여 다양한 미국 SMR 기관과의 협력체계 구축과 필요시 직접투자 등 양국간 패러다임 전환을 위한 공동협력체계 구축에 매진하는 것이 윈윈전략이 될 것임.

2. 한·미 원자력협정 개정 시사점 및 필요 준비

- 現 한미 원자력협정은 2015년에 최종 개정된 것으로, 우리나라는 미국으로부터 농축 및 파이로에 대한 장기동의(advance long-term consent)*를 허용받지 못했으며 이에 조속히 고위급위원회 개최를 통해 장기동의 취득을 추진해야 함.
- 現 한미 원자력협정은 농축 및 파이로에 대해 장기동의를 부여할 수 있는 절차를 담고 있어, 협정 개정 없이 미국이 장기동의만 해주면 국내에서 농축 및 파이로 활동이 가능.
- * 장기동의란 원자력협정 유효기간 동안 농축, 파이로 등 활동에 대해 미국의 동의 (consent)를 미리 포괄적으로 받는 것을 의미.
- 이를 추진하기 위해서는 해당 실무기관인 한국수력원자력(주), 한국원자력연구원 뿐만 아니라, 정부 담당부처인 산업부와 과학기술부, 협상총괄을 담당하는 외교부 간의 협업이 중요하며 최종 목적달성을 위한 세부적인 협상전략 개발이 필요함.

[표 6-1] 농축재처리 장기동의 획득을 위한 고위급위원회 협력 체계

협상분야 협력기관	농축	재처리(위탁재처리 포함)
총괄협상	외교부	
담당부처	산업부	과학기술부
실무기관	한국수력원자력	한국원자력연구원

- 미국은 한미 원자력협정 개정 시 우리나라의 원자력 이용개발에 있어 농축 및 파이로의 필요성 및 독자 추진의 당위성, 핵주기 보유 역량, 북한 핵문제

해결, 국내의 핵무장론 우려 등을 고려하여 장기동의를 부여하지 않았음.

- 미국은 협정 개정 시 우리나라의 '08년 UAE 원전 수출, 원전 20기 이상을 운영하는 세계 5위의 발전국가, 선진 원자력 기술개발 프로그램 등 원자력 선진국의 지위를 인정함.
- 미국은 당시 안정적인 농축시장의 존재로 미국 주도로 안정적인 핵연료 공급이 가능하다는 점과 파이로 기술의 미성숙, 일본과 달리 핵주기 기술역량의 부족(시설·기술의 未 보유), 북한 핵문제 영향 등을 이유로 농축 및 파이로에 대한 장기동의를 부여하지 않았음.
- 그러나 지금 환경은 우선 미국이 안정적인 농축서비스를 제공하지 못하고 있으며, 매우 불안정한 원전연료 시장으로 말미암아 자원위기 상황이며 한국은 더욱 큰 시장을 개척하여 규모의 경제성을 충분히 확보하고 있어 장기동의를 받기에 논리성과 확률이 높아진 상황.
- 다만, 당시 미국은 우리가 보유하고 있던 파이로 연구개발 시설과 관련된 일부 활동은 허용.
- * 파이로는 크게 전처리, 전해환원, 전해정련(우라늄 분리), 전해제련(플루토늄을 포함한 핵물질 분리) 공정으로 구분되는데, 미국은 핵물질 분리 전 단계로서 전처리 및 전해환원을 허용함.

○ 한편, 미국은 지금까지 협력 상대국이 보유한 민감 기술역량 수준에 맞춰 협상 레버리지를 인정하여 협정을 체결해 왔음.

- 미국은 일본, 유라툼(EURATOM), 스위스, 브라질 등과의 원자력협정 개정 과정에서 이들 국가가 보유한 민감 기술역량 내에서 이를 인정함.

[표 6-2] 미국의 차등적 원자력 협력 수준 비교

상대국 요구 반영	← 민감 활동 허용				민감 활동 통제 →			미국 요구 반영
	전면적 허용	전략적 허용	부분적 허용		적극적 통제	아주 적극적 통제		
허용 방식	장기동의 (농축, 재처리 등 모든 활동)	장기동의 (농축, 재처리 등)	장기동의 (농축만 허용)	조건부 장기동의 (농축/파이로 합의시 허용, 재이전 허용)	건별 동의 (농축·재처리를 포함한 모든 활동)	은물 (농축·재처 리 정치적 자제)	황금률 (농축·재처 리 자국내 금지)	통제 방식
대상국	일본, 유라툼	인도, 스위스 (위탁재처 리)	브라질, 아르헨티 나, 남아공, 호주	한국 (‘15년 한미협정, ’90년대 DUPIC, ’00년대 파이로)	우크라이나 등 대다수 국가 (‘72년 한미협정, ’70년대 재처리, ’80년대 연계핵주기)	베트남	UAE, 대만 (‘56년 한미협정)	대상국
비고	민감 기술/시설의 보유 또는 활동 추진			非 민감시설 보유(허용)	민감 기술/시설의 非 보유			비고

○ 이러한 의미에서 우리나라가 앞으로 미국으로부터 핵주기 분야를 인정받기 위해서는 다음의 3개 분야에서 준비가 필요할 것임.

○ 첫째, 평화적 핵주기 추구의 당위성을 기반으로 역량(기술/시설)을 극대화.

- 미국이 협력 상대국의 민감 보유 수준에 따라 이를 허용하는 협력을 보여왔는바, 미국과의 장기동의 협상 전 핵주기 역량을 극대화하는 것이 중요함.
- 우라늄이 아닌 동위원소의 원심분리 기술 등 유사기술 개발 등을 통한 협상력 제고.
- 파이로는 한미공동연구(JFCS) 지속 및 국내 투자 확대를 통해 기술 역량을 최고 수준으로 높이며, 농축은 미국의 러시아산 농축우라늄의 수입 금지*, 서방세계와 공산권의 블록화 등으로 농축서비스 시장이 불안정할 수 있을 것으로, 향후 국내 및 수출 원전의 안정적 연료 공급을 위한 시설 보유의 필요성을 강조.

* 러시아는 전 세계 농축우라늄의 46% 이상을 공급하고 있으나, 미국은 '24.5월 러시아산 농축우라늄 수입을 금지하는 법을 제정한바, 향후 우리나라의 러시아산 농축우라늄 수입에도 영향을 미칠 수 있음.

○ 둘째, 한미 원자력 파트너십 강화를 통해 전략적 이익의 제고 및 협상 관계의 대등성을 확보.

- 원전 수출은 경제적 이익뿐만 아니라 도입국과 60년 이상 원자력 협력 관계를 맺는 것으로, 원전 공급을 통한 핵비확산을 포함하는 상대국과의 전략적 협력 관계를 강화할 수 있음.
- 그러나 미국은 대형 원전 시장에서의 경쟁력이 떨어지고 있는 상황으로, 한미간 원전 수출 파트너십 구축을 통해 전략적 차원에서 경제적 이익과 핵비확산 정책 목표를 동시에 달성할 필요가 있음.
- 이를 통해 한미간 전략적 이익을 제고하고 협상 관계의 대등성을 확보하여 핵주기 허용을 위한 협상력을 제고하는 것임.

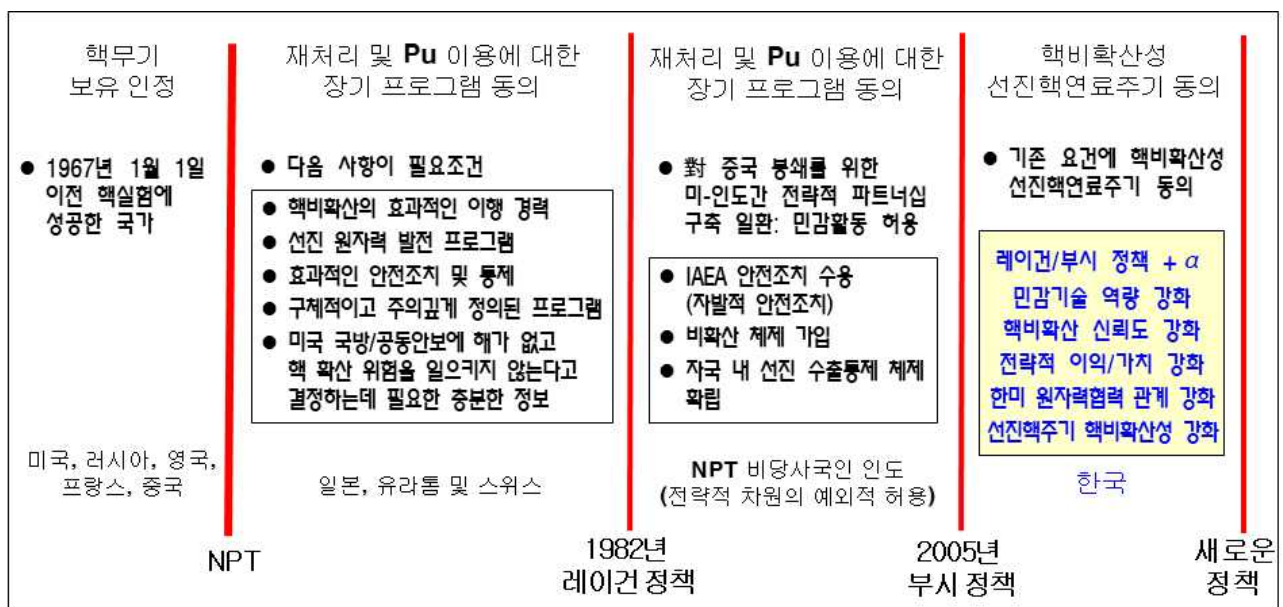
○ 셋째, 핵비확산 신뢰성 제고 및 핵주기 활동에 대한 핵비확산성의 확보.

- (정책) 국내의 핵무장론은 미국의 대외정책 우선순위인 핵비확산 정책과 상충되는 것으로, 국내의 핵비확산 역량 강화, 미국과 핵비확산을 위한 정책 공동연구 등 핵주기 추구를 위한 평화적 이용을 보장받을 수 있는 노력이 필요함.
- (기술) 미국이 한국에게 핵주기 활동을 허용해도 선진화된 안전조치 기술 적용을 통해 충분히 통제가 가능함을 보여주는 핵비확산성 기술개발* 협력을 강화하는 것임.

* 인공지능을 활용한 공정 모니터링, IAEA 현장 사찰실 운영, 미국의 참여 등 최고 수준의 안전조치 및 핵비확산 수단들을 개발.

- 한편, 더 이상 군사적 차원의 북한 핵을 빌미로 평화적 차원의 국내 핵주기 활동이 저해 받아서는 안 될 것으로, 북핵과의 차별화 전략이 필요함.
- 국내 한전국제원자력대학원대학(KINGS)내 국제핵비확산협력센터(INC) 설립을 통해 해외 다수국가 학생들을 대상으로 핵비확산 교육 시행.

○ 이를 통해 미국이 일본, 유라툼(EURATOM), 스위스 및 인도 외에도 한국에게 핵주기 허용을 통한 새로운 정책 선을 긋을 수 있도록 노력해야 함.



[그림 6-2] 미국의 핵비확산 관련 정책

- 가동 원전의 안정적 핵연료 수급은 기후변화 대응과 에너지 안보 강화 등 원자력 발전의 미래 역할 확대 측면에서 핵심 과제임. 그러나 미·중 경쟁, 러시아-우크라이나 전쟁, 경제 블록화와 같은 지정학적 불확실성으로 인해 안정적이며 경제적인 농축 우라늄 수급이 위협받고 있음. 따라서 우리나라는 전략적 비축 확대, 공급처 다변화, 계약방식 개선 및 우방국과의 협력 강화 등 정부 차원의 중장기적 선행 핵주기 자강 전략 수립이 시급함.
- 차세대 원자로용 LEU+(농축도 5-10%)와 HALEU(농축도 10-20%) 핵연료의 국내 수요 증가가 예상됨에 따라, 해외 공급사와의 협의 및 장기 선매계약 등 선제적인 수급 체계를 마련할 필요가 있음. 또한, 고온가스로 구현에 범용적으로 필요한 입자기반 TRISO 핵연료 및 용융염 핵연료 제작 설비 구축에 대한 정부 지원을 강화하여 국내 핵연료 제조 기술 역량을 발전시켜야 함.
- 사고저항성 핵연료(ATF)는 국내 원전 안전성과 경제성을 증진 시킬 수 있음. LEU+ 및 연소도 상향 핵연료 기술과 결합하여 원전 운영 성능을 높이고 경제성을 개선하는 방안이 적극 추진되어야 함. 또한 차세대 원자로의 실물화를 위한 국내 고유 핵연료 검증 및 자격화 전략을 수립하고 시설 확충을 통해 내실 있는 국내 핵연료 자격화 역량 강화를 지원해야함.
- 핵연료의 성능 검증과 사용후핵연료 관리 기준 마련을 위한 조사후특성 연구 시설(핫셀)의 확충과 함께 핵연료 시험시설 구축에 대한 국가적 차원의 적극적인 지원이 필수적임.
- 한미 원자력 협력의 핵심 과제는 농축 및 재처리 분야의 장기동의 확보임. 이를 위해 국내 고유의 핵주기 기술개발을 추진하고 평화적 이용에 대한 당위성을 강화해야 함. 아울러 한·미 공동 번영을 위한 협력체계를 구축하고, 미국의 핵주기 역량 재구축 과정에 기여하는 등 전략적인 접근을 추진해야 함.