

# 핵연료 수급 분과위원회 활동 보고

2024. 10. 23.

한국원자력학회 핵연료전문위원회

제 1분과: 핵연료 수급 및 기술개발/기반시설 이슈

이유호, 김도식, 김동주, 박병기, 양성우, 양승태, 이주석, 이창화

# 1분과 주요 의제: 핵연료 수급, 핵연료 제작/공급, 핵연료 시험/검증 인프라

---

## 1. 가동 경수로 핵연료 수급

- 1.1 해외시장 동향 분석 및 전망
- 1.2 국내 가동 경수로 우라늄 수급 전략 시사점

## 2. 미래형 핵연료 수급 및 제작 기반 시설

- 2.1 미래형 경수로 핵연료 LEU+ 수요 전망 수급 방법 분석
- 2.2 미래형 비경수형 핵연료 HALEU 수요 전망 및 수급 방법 분석
- 2.3 미래형 원전 실증을 위한 비경수형 핵연료 제작 이슈 및 필요 지원

## 3. 핵연료 상용화 및 인허가 이슈

- 3.1 핵연료 인허가 전략과 필요 요건
- 3.1 사고저항성 핵연료 상용화 현황, 이슈, 전망
- 3.2 LEU+ 핵연료 상용화 및 인허가 이슈
- 3.3 차세대 핵연료 검증 및 자격화 (Qualification) 이슈

## 4. 핵연료 기반시설 강화

- 4.1 해외 현황
- 4.2 핫셀 인프라 구축 필요성 및 정부 지원 필요성
- 4.3 핵연료 검증용 원자로 구축 필요성 및 정부 지원 필요성

## 5. 한미 원자력 협력 현안

- 5.1 핵주기 분야 한·미 원자력 협력 강화 전략
- 5.2 한·미 원자력 협정 개정 시사점 및 필요 준비

# 1분과 위원 소개

성명	소속	담당 분야	비고
김도식	한국원자력연구원	• 핫셀 인프라 구축 및 정부 지원 필요성	
김동주	한국원자력연구원	• LEU+ 핵연료 상용화 및 인허가 이슈	
김윤호	한전원자력연료	• 사고저항성 핵연료 상용화 현황, 이슈, 전망	
박병기	순천향대학교		분과 고문
양성우	한국원자력연구원	• 핵연료 검증용 원자로 구축 및 정부 지원 필요성	
양승태	한국수력원자력	• 가동 경수로 핵연료 수급 현안 • 핵주기분야 한-미 원자력 협력 강화 전략 • 한-미 원자력 협정개정 시사점 및 필요 준비	
이유호	서울대학교	• LEU+ 수요 전망 및 수급 방법 분석 • 비경수형 핵연료 제작 이슈 및 필요 지원 • 차세대 핵연료 검증 및 자격화 (Qualification) 이슈	분과 위원장
이주석	한국원자력 안전기술원	• 핵연료 인허가 전략과 필요 요건	
이창화	한국원자력연구원	• 미래형 비경수형 핵연료 HALEU 수요 전망 및 수급 방법 분석 • 비경수형 핵연료 제작 이슈 및 필요 지원	

# 1분과 주요 활동

---

- 2024년 2월 29일 (목) 총괄위원회
- 2024년 3월 11일 (월) 1분과 1차 회의  
의제별 세부 사항 및 위원별 담당 업무 배정  
위원회 운영 방안
- 2024년 5월 2일 (목) 1분과 2차 회의  
위원별 담당 의제 발표
- 2024년 6월 10일 (월)  
'농축 핵연료 수급 현안과 한미원자력협정' 워크숍
- 2024년 7월 3-4일 (수, 목)  
핵연료 전문위원회 중간 발표회
- 2024년 8월 23일 (금)  
1분과 보고서 중간 검토 회의

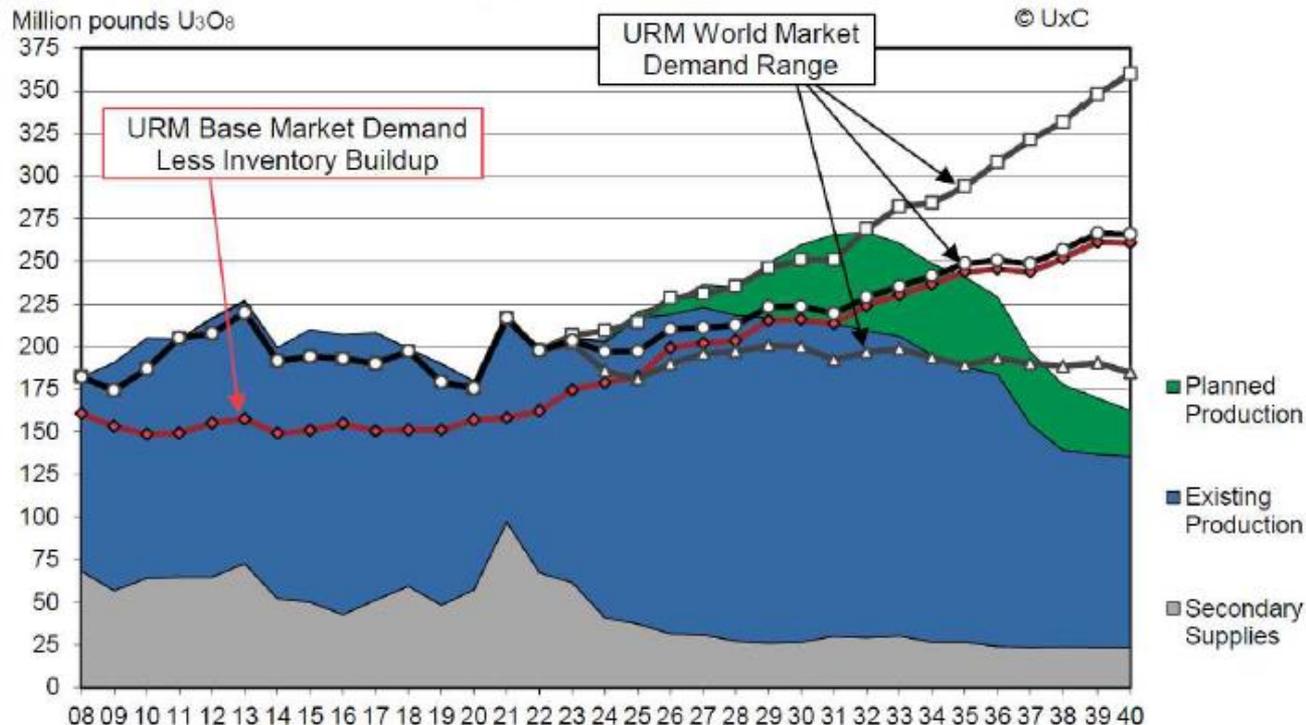
# 1. 가동 경수로 핵연료 수급 현안

# 가동 경수로 핵연료 수급

□ 정광 수요 공급전망 (무조건 생산보다 높은 수요)

\* UxC UMO 2024 1Q

Figure 37. Market Demand vs. High Case Supply Sources, 2008-2040



\*1차 공급: 생산, **2차 공급원:** ① 각국 정부, 전력회사 또는 핵연료주기시설 보유 재고량, ② 냉전 종식 후 미국 및 러시아의 핵무기 해체에 따른 고농축 우라늄(HEU) 희석, ③ 사용후연료 재처리 후 회수한 우라늄, 플루토늄 등

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

# 가동 경수로 핵연료 수급

□ 정광 가격 추이 (우러전쟁 이후 급상승 중)

\* UxC UMO 2024 1Q

Figure B-2. Ux U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> Prices, 2004-2024

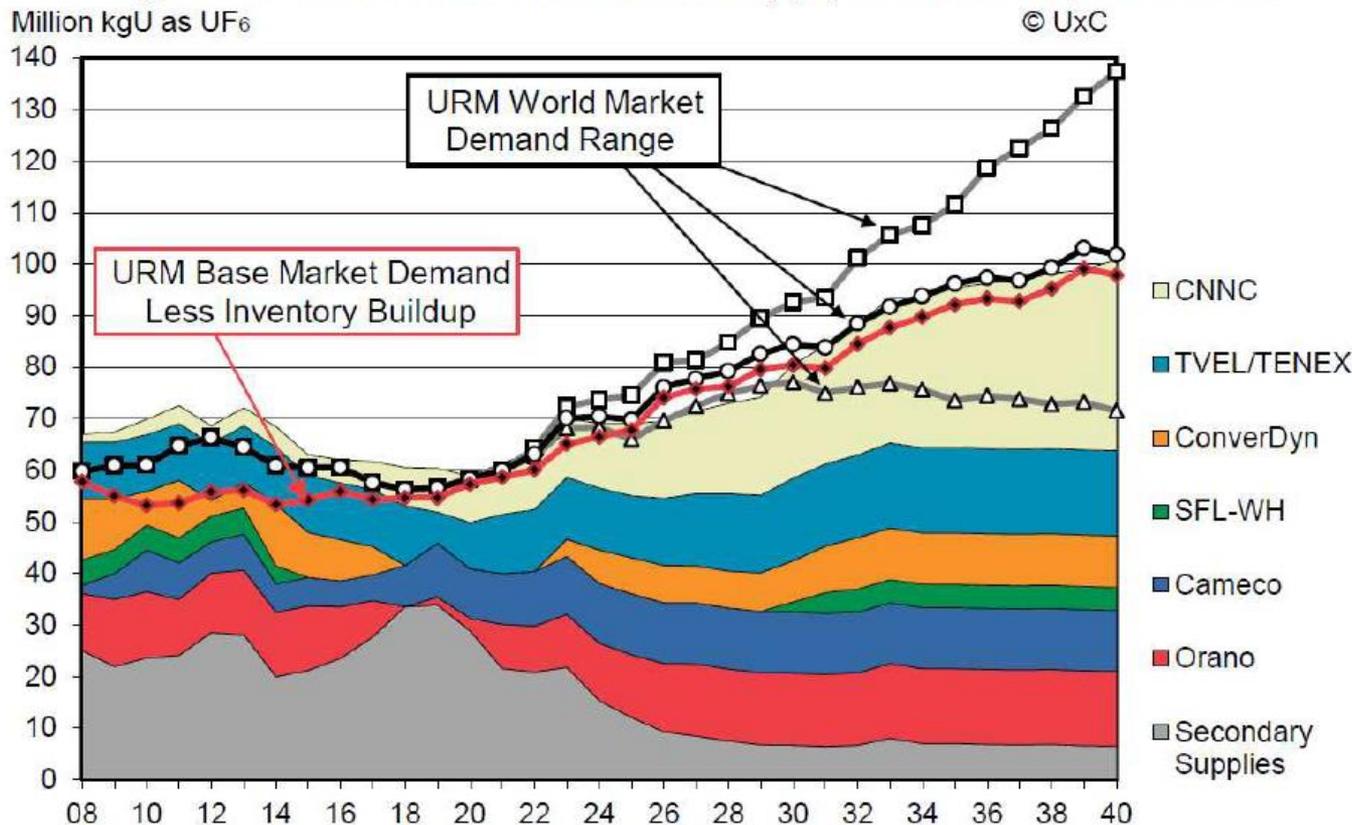


- 원전연료 수요증가에 반해 광산개발 지연으로 '23년 이후 수급불균형에 의한 가격상승
- '20년 이후 post-팬데믹 인플레이션, '21~'23년 지정학적 리스크(러·우 전쟁, 니제르 쿠데타, 홍해 테러로 해상운송 영향 등)로 국제 공급망 환경 악화
- 우-러 전쟁으로 인해 '07년 이후 현물 최고가인 \$113기록('24.1월), 현재 \$88.5 ('24.3월)

# 가동 경수로 핵연료 수급

□ 변환 수요 공급전망 (러 배제시 생산보다 높은 수요 지속)

Figure 28. Base Case Conversion Supply vs. Demand, 2008-2040



\* UxC CMO 2023 4Q

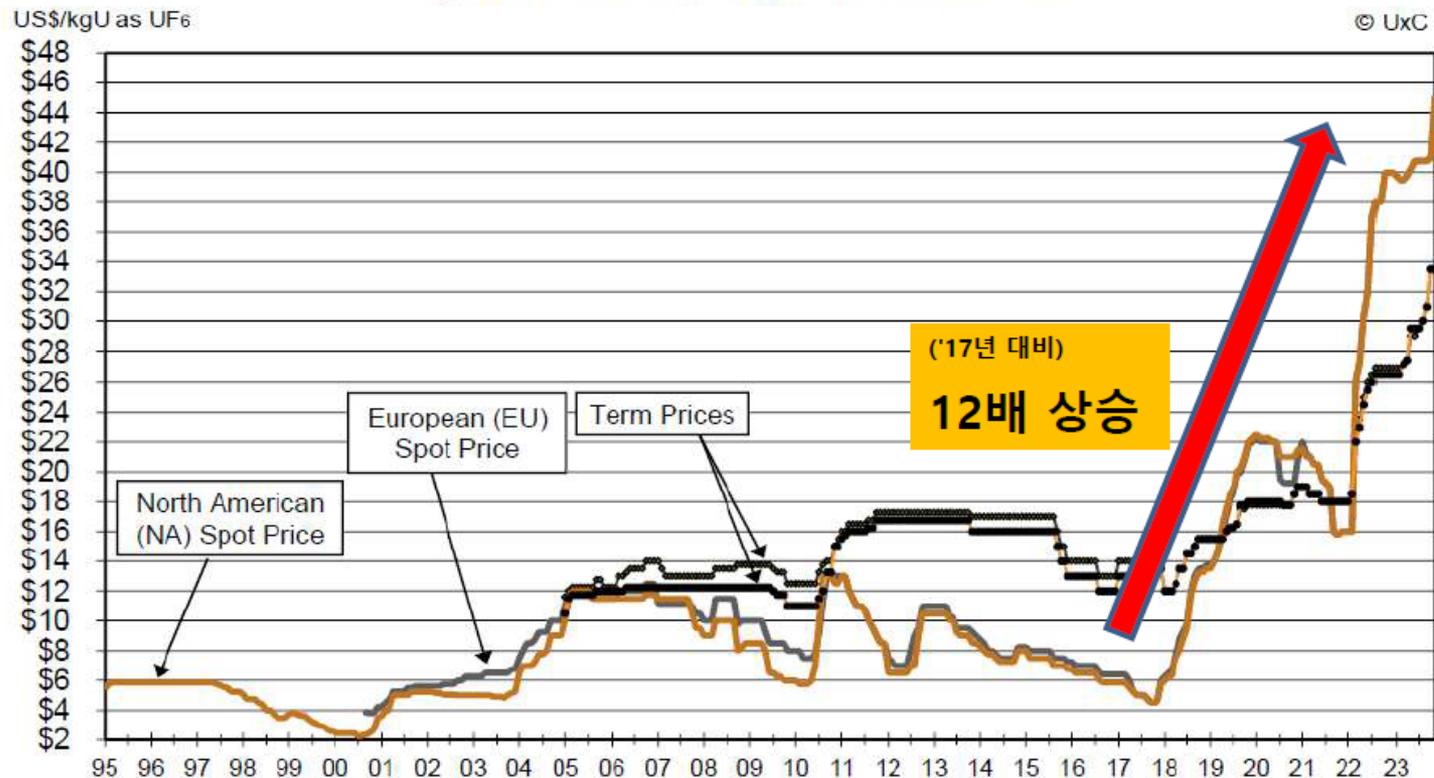
변환은 뚜렷하게 발표된 설비용량 확장 계획이 없어 단기적으로 공급 부족이 예상되나, 설비확장 기간과 비용이 상대적으로 빠르고 낮아, 기존사업자들의 설비 확장으로 공급부족이 완화될 것으로 예상.

# 가동 경수로 핵연료 수급

## □ 변환 가격 추이 (우러전쟁 이후 급상승)

\* UxC CMO 2023 4Q

Figure B-3. Ux Conversion Prices, 1995-2023

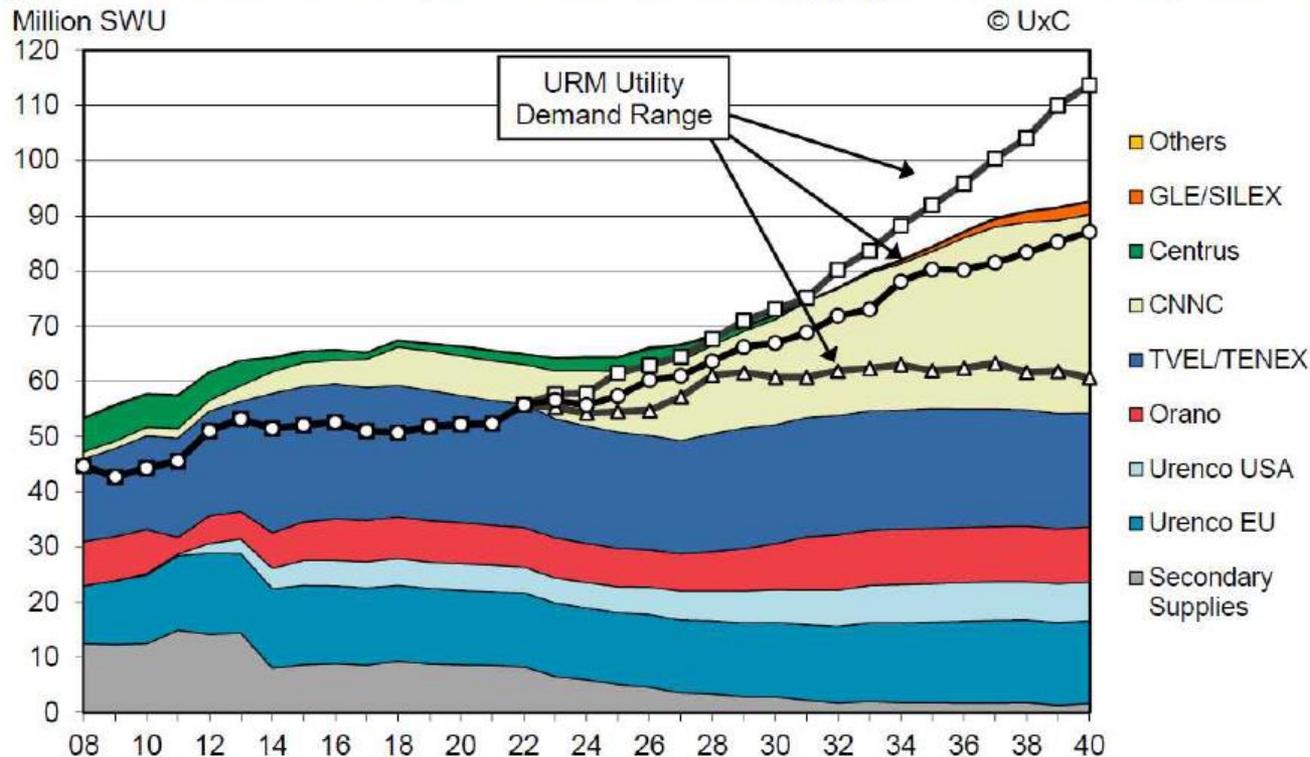


- 우-러 전쟁으로 이후 가격 급등(16→40\$). ConverDyn의 생산을 재개(’23.4월) 했음에도 불구하고 현물가격 계속 상승세 유지. 현재 \$57를 기록(’24.3월)
- 30년까지 공급량 부족이 예상되지만, 공급사들은 시설확장 신중한 자세 유지

# 가동 경수로 핵연료 수급

□ 농축 수요 공급전망 (러 배제시 생산보다 높은 수요 지속)

Figure B-8. Base Case Expected Enrichment Supply/Demand Levels, 2008-2040



\* UxC EMO 2024 1Q

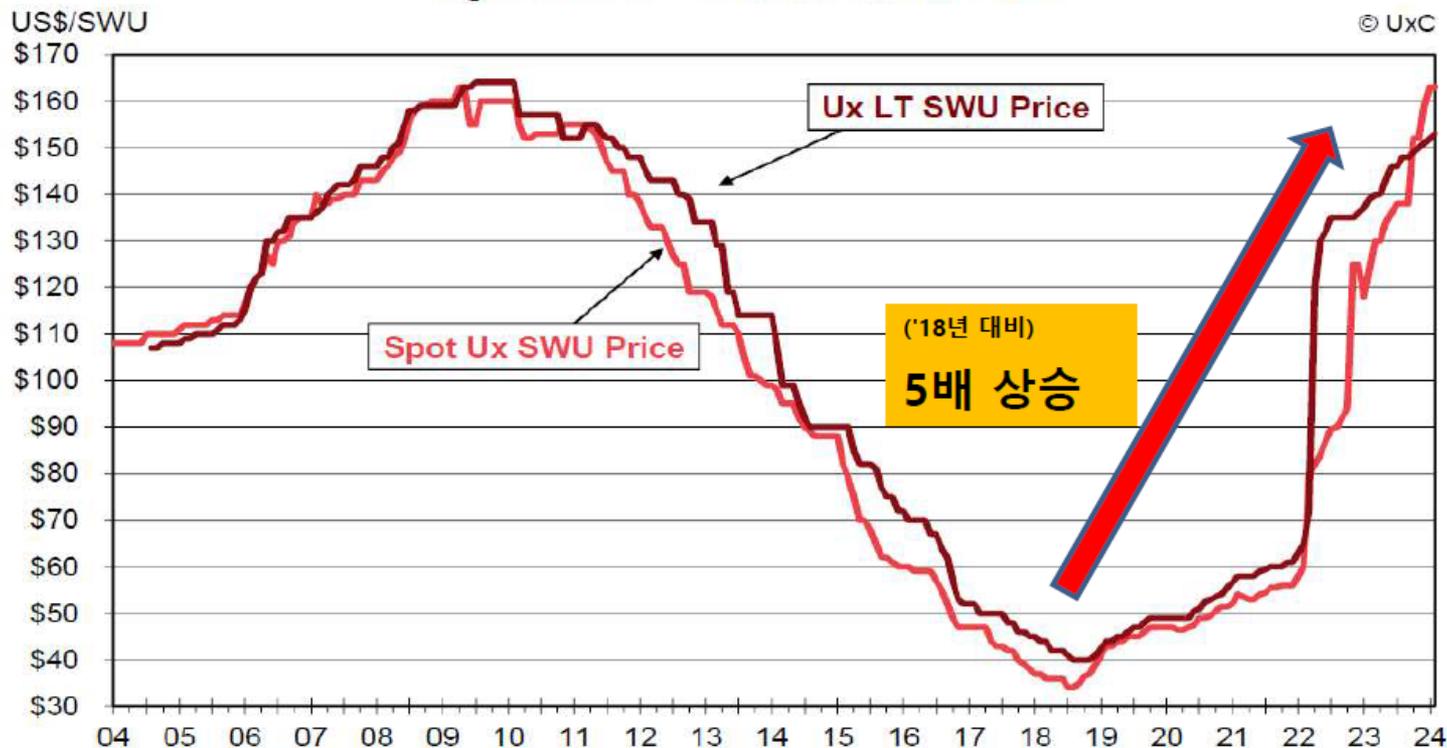
농축은 글로벌 관점에서 수급이 양호한 편이나 러시아가 공급의 40% 이상을 차지하고 있으며, 러시아를 배제하는 경우 서구권 독자 공급망은 신규업체 진입에도 불구하고 2035년까지 중장기 공급 부족 예상

# 가동 경수로 핵연료 수급

## □ 농축 가격 추이 (우리전쟁 이후 급상승)

\* UxC EMO 2024 1Q

Figure B-3. Ux SWU Prices, 2004-2024



□ 우리전쟁으로 22년 한해에만 가격 116%상승[현물가: \$58 → \$125 / 장기가 \$63 → \$136]  
현재 가격 상승 지속(현물가: \$165, 장기가: \$155, '24.3월 기준)

□ 농축시장은 정광, 변환시장에 비해 가장 빠르게 반응하여 시설확장 결정

# 국가별 원전연료 수급 리스크 대응 현황

〈주요 국가별 대 러시아 농축의존도 및 감축 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)

**미국:** 민간 주도로 다양한 시장 참여자를 통해 선행핵주기 역량이 내재화되어 있으며, 러시아 의존도 탈피를 위한 민간참여 선행핵주기 인프라 강화에 정부가 지원.

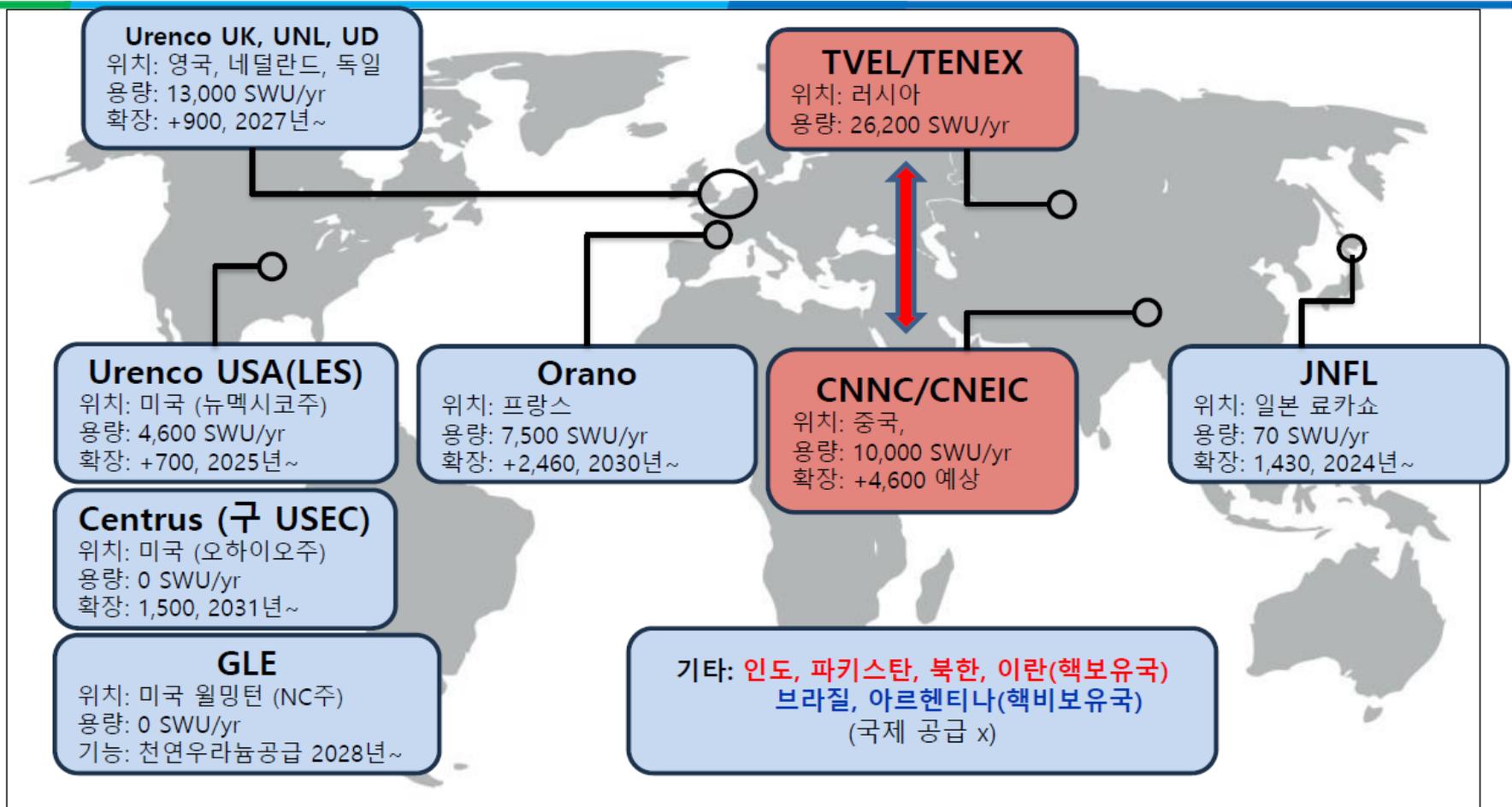
**프랑스:** 정부 및 공기업 주도로 선행핵주기 역량이 내재화되어 있으며, 세계 원전 생태계의 핵심 공급자로 자체 수급이 가능.

**중국 및 러시아:** 강력한 정부 주도 및 원자력 사업의 완전한 수직 계열화. 원전연료의 수급 뿐만 아니라 연료공급이 포함된 해외원전 수출 용이.

**일본 :** 일본은 한국과 유사하게 선행핵주기가 내재화 되어 있지는 않으나, 높은 재고수준 및 시장 중심의 원전 생태계 활성화로 원전연료 수급 리스크는 한국보다 낮음.

- 일본내 5개 상사가 우라늄 정광, 변환, 농축의 국제 거래를 위시하는 시장활동 적극 참여
- 후쿠시마 사고로 축적된 대량의 운영재고가 단기 수급 안정성을 향상 시킴

# 우라늄 농축시장 공급 이해



◎ 러시아 제재에 의한 대체 물량 (약 20,000 tSWU/year, 내수 제외)

- ① G5 국가: 현재까지 7,060 tSWU/year 확장 계획 (2028~2030년 부터 공급 가능 예상)
- ② 중국: 4,600 tSWU/year +  $\alpha$  (카자흐스탄 공동) 예상, 러시아 중계상 가능 (!?)
- ③ 신규진입 가능업체/국가: 사우디아라비아 (?) 등 (Centrus등은 모두 2030년 이후 공급 가능 예상)

# 제언: 대한민국 미래 연료수급을 위한 관·산·학·연 협력 전략



## ◎ 전략 요약

- ① 비축량 증대, 일부 수의계약 추진 등 연료구매 전략 변화
- ② 광산개발, 농축 및 변환의 장기계약과 직접투자 등 서구권 협력 확대 필요
- ③ 한미 양자간 협력체계를 다각적으로 구축. 민간 발전용 농축/재처리 장기 동의를 위한 중장기적 전략 수립 및 협업 추진 필요

## 2. 미래형 핵연료 수급 및 제조현안

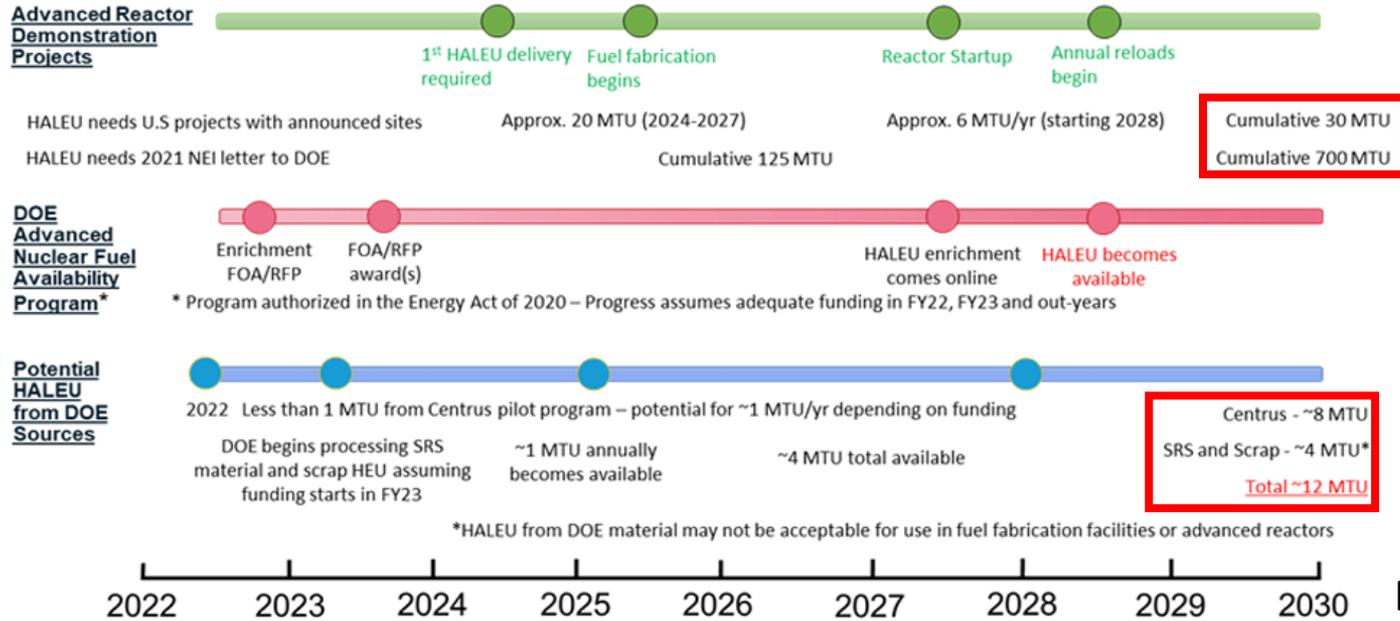
# 미래형 경수로 핵연료 LEU+ 수요전망 및 수급 방법



## ◎ 국내외 현황

- ORANO (社)는 2025년도 까지 6% 상업용 농축 우라늄을 공급하고 2030년도까지 6% 이상의 상업용 농축 우라늄을 공급할 계획임.
- Urenco (社)는 LEU+ (최대 10%) 생산을 위해 미국과 영국 농축공장의 인허가 갱신 추진중에 있음.
- Framatome (社)는 미국의 가동 원전에 2028년 1분기에 최초 LEU+ 상용 장전을 추진하고 있음.
- Westinghouse (社) 역시 2028년 LEU+ 상용장전을 추진하고 있음.
- 미국의 여러 경수로 사이트에서 LEU+ 도입 경제성 평가를 완료, 도입을 추진하고 있음.
- 대한민국은 LEU+ 핵연료 상용화 기술개발을 위한 예비타당성조사 추진중. 2029-2030 경에 최초 LEU+ 시험 핵연료 제작에 필요한 LEU+ 핵연료 국내 공급 수요 발생 예견.
- LEU+ 핵연료는 기존의 농축 우라늄 공급사를 통해 수급 가능할 것으로 전망함.

# 미래형 비경수형 핵연료 HALEU 수요전망 및 수급 방법



## ◎ 국내외 현황

- 미국 HEU down blending: 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 원자료를 처리하고 보관 중인 HEU와 INL의 ATR 사용 연료를 처리하여 총 40 MTU의 19.75% HALEU를 확보할 계획임 .
- 미국 HALEU 농축 인프라 구축: Centrus는 HALEU를 최대 20% 농도로 농축할 수 있는 인가를 받은 미국의 유일한 농축업체. 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.

# 미래형 비경수형 핵연료 HALEU 수요전망 및 수급 방법

---

## ◎ 국내외 현황

- 미국내에서도 조사 기관에 따라 HALEU 수요 예측에는 매우 큰 차이를 보임: HALEU 실수요는 차세대 원전 상용화에 전적으로 달려있어 예측이 불가피하게 어려운 점이 있음.
- ORANO (社)와 URENCO (社) 에서는 시급한 상용 HALEU 수요가 존재한다고 판단하고 있지 않음.
- 주목할 점은 미국은 차세대원자로 기술 개발·실증과 동시에 핵연료 수급 문제를 다루고 있고 입법활동을 통해 미래 핵연료 수급 문제 해결을 지원하고 있음.
  - 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.
- 정확한 국내 HALEU 실수요 시점을 예측하기에는 어려움이 있음.
  - 차세대 원자로 실증 프로그램과 연동 되어있음.
  - 이를 위해선 차세대 원자로 핵연료 자격화 (Qualification)가 선행되어야 함.
- 그럼에도 불구하고, 중장기적 HALEU 수급 노력 및 방안 마련 필요:
  - 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.
  - Centrus (社)와의 계약이 도움이 될 수 있음.

# 미래형 원전 실증을 위한 비경수형 핵연료 제작 이슈 및 필요 지원

## ◎ 입자기반 TRISO 핵연료

- 입자기반 TRISO 핵연료는 차세대 고온 원자로에 범용적으로 사용될 수 있는 핵심 전략기술임
  - 고온가스로, 용융염 원자로, 우주 추진용 원자로를 위시하는 고온 원자로에 범용적으로 사용
- AGR 프로그램을 통해 구축된 TRISO 핵연료 제작 기술과 자격화된 조사시험 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.

# 미래형 원전 실증을 위한 비경수형 핵연료 제작 이슈 및 필요 지원

---

## ◎ 입자기반 TRISO 핵연료

- 국내에는 TRL 3.5 수준의 실험실규모 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.
- 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.

## ◎ 액체 용융염 핵연료

- MSR 실증을 위해서 필요한 핵연료의 양이 수 톤 이상이 될 것임을 가정할 때, 대용량의 금속 HALEU를 고순도의 UCl로 염소화하고, 핵연료를 제조하는 장치의 개발 및 관련시설 구축이 우선되어야 함.

# 제언: 대한민국 미래 핵연료 수급 및 제조 현안

---

## ◎ 제언 요약

- LEU+는 기존의 농축 공급사를 통해 수급 가능할 것으로 전망됨. 국내 LEU+ 핵연료 상용화 사업 진척 (2029-2030년 가동원전 시험용 핵연료 제작 예상) 을 고려하여 사전 협의/계약을 추진하는 것이 바람직함.
- 정확한 국내 HALEU 실수요 시점을 예측하기에는 어려움이 있음. 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.
- 국내에는 TRL 3.5 수준의 실험실규모 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. 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.

### 3. 핵연료 상용화 및 인허가 현안

# 핵연료 인허가 전략과 필요 요건

◎ 환경 변화: 세계적으로 추진되고 있는 가동 원전 성능향상 핵연료 / 선진원자로 핵연료 상용화

구분		종류/원자로(개발사)
사고저항성 핵연료	단기	Cr코팅HANA6/LAS 첨가UO <sub>2</sub> (KNF), Cr코팅M5/Cr첨가UO <sub>2</sub> (Framatome), Cr코팅Opt.ZIRLO/CrAl첨가UO <sub>2</sub> (Westinghouse), ARMOR코팅/FeCrAl피복재(GNF)
	장기	SiC피복재/금속UO <sub>2</sub> 복합소결체(KNF), SiC피복재(Framatome), SiC피복재/U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> 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)

# 핵연료 인허가 전략과 필요 요건

## ◎ 신형 핵연료 인허가 요건 및 전략

- 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), Vendor 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 Cr코팅 피복재에 대해 기존의 경수로형 심사지침(NUREG-0800)을 보완하는 임시지침(ATF-ISG-2020-01)을 발행.
  - 국내에서도 단기적용을 목표로 하는 경수로형 핵연료와 유사한 (코팅 피복재 및 Doped UO<sub>2</sub> 소결체 등) ATF는 경수로형 가능.
  - 美 NRC는 비경수형 원자로의 핵연료 규제를 위해 주요설계기준 및 규제 지침과 금속핵연료 및 TRISO 핵연료에 대한 검증(Fuel Qualification) 지침 발행

# 사고저항성 핵연료 상용화 현황, 이슈 및 전망

---

## ◎ 사고저항성 핵연료 상용화 현황, 이슈, 전망 요약

- 사고저항성핵연료 정의: 2015년 DOE 정의 “현재의 Zr-UO<sub>2</sub> 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.
- 한국수력원자력(주)는 신고리 5,6호기 공론화 이후, 2017년 11월 원전 안전건설·운영특별대책을 발표하면서 ATF 조기 상용화 목표를 수립하였고, 6차 원자력진흥종합계획에 따라 ‘가동원전 안전성향상 핵심기술 개발 사업’으로 한전원자력연료(주) 주관하에 한국수력원자력(주) 및 한국원자력연구원과 협력하여 ATF 개발 추진.
- 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 2030년대 상용 적용되어 원전의 안전성을 개선할 수 있을 것으로 전망.

# LEU+ 핵연료 상용화 현황, 이슈 및 전망

---

## ◎ LEU+ 핵연료 상용화 현황, 이슈, 전망 요약

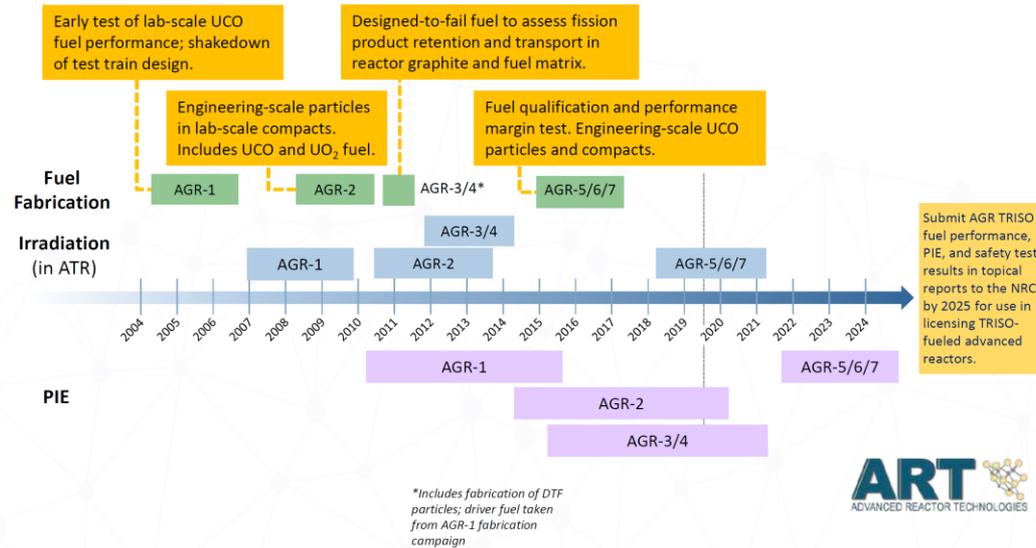
- LEU+ (Low Enriched Uranium Plus) 핵연료는 기존 저농축 우라늄(LEU) 핵연료에 비해 더 높은 농축도의 우라늄을 활용하여 연소도나 출력밀도를 증가시킴으로써, 더 많은 에너지를 생산할 수 있는 형태의 핵연료를 의미.
- LEU+ 상용화를 위해선 핵연료 제조 시설, 핵연료 설계/안전성 평가, 노심설계/안전성 평가, 상용로 연소 시험, 코드개발, 농축우라늄 수급을 아우르는 투자와 지원이 필요함.
- 24개월 연료주기를 통해: 핵연료 교체로 인한 비용의 1/6 을 감소시키고 (+), 일년에 3-5일 전력 생산일 증가 (+), 핵연료 비용 증가 (-), 엔지니어링 및 플랜트 비용 (-) 을 산출 했을때 미국의 대형 경수로의 경우 일년에 호기당 약 \$ 5.25 Million (약 70억) 비용 절감 가능 (2024 TOPFUEL, Framatome).
- 미국에서는 2028년 1분기 LEU+ 상용 장전을 추진 하고 있음. 대한민국도 LEU+를 대형 원전의 경제성 향상 뿐만 아니라 SMR 경제성 향상에도 활용하기 위한 기술개발이 추진되고 있음.

# 차세대 핵연료 검증 및 자격화 (Qualification) 이슈

---

- 차세대 원자력 발전소를 건설하기 위해서는 원전에 사용되는 핵연료의 성능과 안전성 입증의 선행되어야 함. 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.
- 핵연료 자격화는 신형 원자로 구현에 있어 가장 오랜 시간이 소요되는 ‘주공정 (critical path)’ 으로서, 높은 기술력과 더불어 지속적인 국가 지원을 필요로 함.
  - 오늘날 핵연료 자격화는 원전 기술 종주국을 목표로 하는 소수의 국가에서만 추진되는 특징이 있음. 미국, 중국, 러시아, 프랑스, 일본에서만 중장기적인 핵연료 자격화 프로그램이 추진됨.
- 대한민국은 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.

# 차세대 핵연료 검증 및 자격화 (Qualification) 이슈



## 미국 AGR 프로그램 연혁

- 미국의 소듐 냉각로 실증에 필요한 핵연료 자격화 : 과거 EBR-II U-10wt%Zr/HT-9, 연소도 10 at% 데이터 활용. U.S NRC 핵연료의 수명 제한 및 안전 관련 현상들은 잘 알려져 있으며 예측 가능하다 결론. 테라파워 NATRIUM 원자로 ARDP 추진 기반.
- 미국의 고온원전 (고온가스로/용융염) 실증에 필요한 핵연료 자격화: AGR TRISO 핵연료 제조 및 검증데이터 활용.
- 중국의 고온 가스로 실증 (HTR-PM)에 필요한 핵연료 자격화: 네덜란드 Petten 원자로를 활용하여 핵연료 검증/자격화 데이터 생산.

# 선진 핵연료 관련 사업/상용화 수요/수급 로드맵 개요

무봉산 i-SMR 핵연료 성능 검증/인허가



차세대 원자로 핵연료 (TRISO, U-Zr, HT-9, Liquid Fuel) 개발, 제조, 검증, 자격화 수요



LEU+ 고연소도 핵연료 상용화 1단계 사업 (예타 진행중)

LEU+ 고연소도 핵연료 상용화 2단계 사업\*

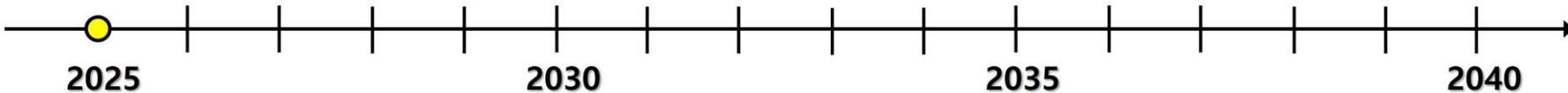


사고저항성핵연료(ATF) 상용화

차세대 사고저항성핵연료(ATF) 기술개발/상용화\*



한·미 원자력협정 (2038)



## 선진 핵연료 관련 사업/상용화 수요/수급 로드맵 개요

(\*표기는 예상 사업. 그외는 진행중이거나 준비중인 사업/상용화/수급 수요)

# 제언: 핵연료 상용화 및 인허가 현안

---

## ◎ 제언 요약

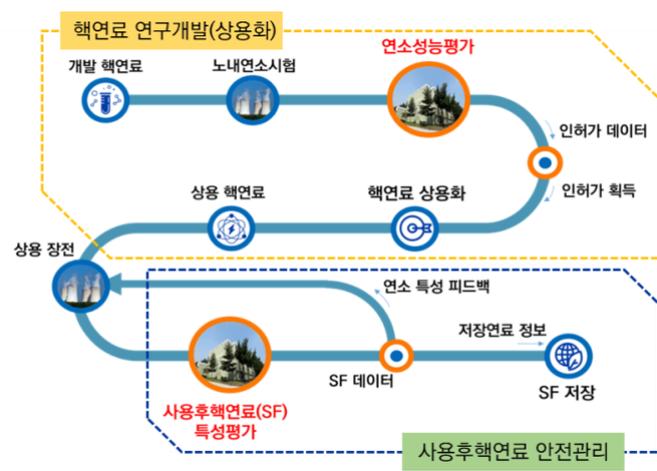
- 크롬 코팅 ATF를 위시하는 예견되어 있는 기존 핵연료와 유사한 차세대 경수로 핵연료는 심사지침서 개선을 통해 효율적인 인허가 추진이 바람직.
- 핵연료 인허가에 필요한 데이터 생산을 위해 국내 한국원자력연구원의 하나로 연구로와 조사후시험 시설에 대한 시설보완 필요.
- 내실있는 한국형 차세대 핵연료 검증 및 자격화 추진 필요. 『자강』 전략을 추진하여 증장기적으로 국내 핵연료 검증 및 자격화 기반시설 (예: 핵연료 조사용 원자로) 구축을 위한 정부 지원 필요. 동시에 『협력』을 통해 해외 핵연료 시험 데이터를 활용한 국내 실증로 개발 및 인허가 전략을 검토하여 국내 사업을 적시에 지원하는 전략 구축 필요.

## 4. 핵연료 기반 시설 강화 현안

# 핵연료 기반 시설 강화 현안

## ◎ 조사후 핵연료 시험 (핫셀) 시설

- 원자로에서 조사 또는 연소된 핵연료의 조사후특성 자료를 취득하기 위한 조사후시험(Post Irradiation Examination, PIE) 및 고준위 방사성폐기물 저장/처리/처분 연구를 담당하는 조사후 시험시설 설비의 확충과 활용성 제고가 절실함.



핵연료 개발 및 사용후핵연료 안전관리 흐름도 내 조사후시험기술의 역할

한국원자력연구원 PIEF 및 IMEF 주요 시설

- 핫셀 인프라 시설의 안정적 운영을 위한 환경을 확립하고 운영 전문 인력 양성 사업 추진 필요.
- 원전의 지속·안전운전을 위한 조사후시험의 필요성에 대한 대국민 공감대 형성, 지자체 및 지역 주민수용성 확보를 위한 정책적 지원 필요.

# 핵연료 기반 시설 강화 현안

## ◎ 연구로 시험 시설

- 하나로 연구로에서 다양한 조사실험 추진이 가능하나, 상용화를 직접적으로 지원하는 인허가 데이터는 생산이 불가능. 산업체/인허가 핵연료 검증 수요 대응을 위해선 추가 계장 및 경수로 환경 Loop 설치 필요.



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 7,659억원(74)이나, 최근의 물가상승, 고성능 원자로를 만족시키기 위한 출력 증가, loop 시설 구축 등에 따른 비용 상승이 예상된다.

운영 및 계획 중인 핵연료/재료 시험로      국내 핵연료 개발/검증을 위한 연구로 상세 시험 기술과 소요 예산 및 기간

- 동위원소 생산 기능의 상당부분이 가장 원자로로 이전될 예정임에 따라 핵연료/재료 조사 기능 강화 방안 마련 중요. 정부 지원과 한국원자력연구원의 의지 중요.
- 중장기적으로 경수로 핵연료 개발/검증 시험은 하나로가 담당하고, 차세대 원자로 핵연료 (고속로등) 시험은 신규 핵연료/재료 시험로 구축 필요.

# 제언: 핵연료 기반 시설 강화 현안

---

## ◎ 제언 요약

- 산업체 및 인허가 기관의 진행 및 예견된 수요를 감당하기 위해선 국내 조사후 시험시설 설비의 확충과 활용성 제고가 필요함. 이를 위한 정부의 지원이 절실한 상황.
- 하나로 연구로에서 다양한 조사실험 추진이 가능하나, 상용화를 직접적으로 지원하는 인허가 데이터는 생산이 불가능. 산업체/인허가 핵연료 검증 수요 대응을 위해선 하나로의 추가 계장 및 경수로 환경 Loop 설치 필요
- 중장기적으로 경수로 핵연료 개발/검증 시험은 하나로가 담당하고, 차세대 원자로 핵연료 (고속로등) 시험은 신규 핵연료/재료 시험로 구축 필요.
- 핵연료 시험에 대한 해외 의존도를 줄여 국내 고유 기술 개발을 추진하는 것이 대한민국 원전 기술 경쟁력의 남아 있는 핵심 과제.

## 5. 한미 원자력 협력 현안

# 핵주기 분야 한·미 원자력 협력 강화 전략

---

## ◎ 환경 변화

- 미국은 민감기술(농축 및 재처리)의 확산 방지를 근간으로 하는 핵비확산을 대외정책의 우선순위로 놓고 추진해 옴.
- 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.
- 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.

# 한·미 원자력협정 개정 시사점 및 필요 준비

## ◎ 분석

- 現 한미 원자력협정은 2015년에 최종 개정된 것으로, 우리나라는 미국으로부터 농축 및 파이로프로세싱에 대한 장기동의(advance long-term consent)를 허용 받지 못했음.
- 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 지금까지 협정 상대국이 보유한 민감 기술역량 수준에 맞춰 협상 레버리지를 인정하여 협정을 체결해 왔음.

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)	은률 (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

# 제언: 핵연료 기반 시설 강화 현안

---

## ◎ 제언 요약

- 핵주기 협력 강화 전략

1. 원자력 고위급위원회 신속한 재가동
2. 미국 내 한국의 평화적 핵주기 추구에 대한 당위성 전파 (Outreach 활동)
3. 미국에게 한국의 핵주기 허용을 위한 차별화 전략 개발 및 제공  
(원전 26기에서 비롯한 경제적 타당성, 핵비확산 체제 추가의정서 등)
4. 미국의 신규 농축기술 및 사업에 투자 (원전연료 상호협력체계/우호적 분위기 조성)
5. 미국식 국제 질서가 담보된 원자력이용 개발 협력 파트너십 강화 및 확대

- 한·미 원자력협정 개정 시사점 및 필요 준비

1. 평화적 핵주기 추구의 당위성을 기반으로 역량 (기술/시설) 극대화  
(예: 우라늄이 아닌 동위원소 원심분리 기술 개발등을 통한 협상력 제고/LEU+ 기술개발 등)
2. 한미 원자력 파트너십 강화를 통한 전략적 이익의 제고 및 협상 관계의 대등성 확보
3. 핵비확산 신뢰성 제고 및 핵주기 활동에 대한 핵비확산성의 확보  
(국내 설익은 핵무장론 지양, 핵비확산성 기술개발 등)

경청해 주셔서 감사합니다