

STI Brief

제3호 | 핵데이터와 희귀동위원소 가속기

I 서론 1

- 1. 배경 및 필요성 1
- 2. 기술의 정의 및 범위 6

II 해외 동향 9

- 1. 정책 동향 9
- 2. 시장·산업 동향 23
- 3. 기술개발 동향 30
- 4. 국제협력 동향 32

III 국내 동향 35

- 1. 정책 동향 35
- 2. 시장·산업 동향 39
- 3. 기술개발 동향 41
- 4. 국제협력 동향 44

IV 결론 46

- 1. 시사점 46

참고문헌 48

I 서론

1 배경 및 필요성

❖ (배경) 원자로는 방사성동위원소 연구와 원전 수출과 연계된 국가 핵심 인프라지만, 사용후핵연료 누적과 처분 한계로 지속가능성 확보를 위한 기술 전환 필요성 증대

- 원자로는 발전, 의료·산업, 연구, 원전 수출 분야에서 다층적 기능을 수행하며 활용 범위를 지속적으로 확장
 - * (발전) 국가 전력 공급의 기저부하 발전원, 탈탄소 에너지 전환 과정의 안정적 전력 공급 기반 제공
 - * (의료·산업) 의료 진단·치료 및 산업 공정에 필수적인 방사성동위원소 생산
 - * (연구) 물성·재료 연구, 핵연료 및 구조재 조사시험 등 기초과학 및 응용연구 지원
 - * (산업 확장) 원자로 설계·건설·운영 역량의 원전 수출 산업 확장 및 에너지 외교와 전략 산업 연계
- (상업용) 원자력발전용 원자로는 전력 공급 안정성과 수출 실적 기반의 산업 구조 형성
 - (운영 현황) 상업용 원자로 26기가 가동 중이며 전국 주요 원전 부지에 분산 배치되어 전력 공급 체계 구성
 - (구조) 표준화된 노형과 설계, 시공, 운영 경험을 토대로 해외 원전 건설 사업과 연계된 산업적 확장 구조 형성

| 국내 상업용 원자력발전 원자로 현황 |

구분	주요 내용			
운영 규모	상업용 원자로 26기 운영 중, 총 설비용량 약 26.0 GWe			
주요 부지 및 노형 구성	원전명	위치	기수	원자로 유형
	고리	부산 기장	3기(2,3,4호)	PWR, 가압경수로
	신고리	울산 울주	2기(1,2호)	OPR-1000, 한국표준형원자로
	새울		2기(1,2호)	APR-1400, 신형 원전
	한빛	전남 영광	6기	PWR
	한울	경북 울진	6기	PWR
	신한울		2기	APR-1400
	월성	경북 경주	3기	PHWR, 중수로
	신월성		2기	APR-1400
	* 영구 정지 : 고리 1호기(2017), 월성 1호기(2019)			
수출 현황	UAE 바라카 원전 수주, 체코 두코바니 신규 원전 건설 계약			
특징	높은 가동률과 표준화된 노형을 바탕으로 설계-시공 전주기 수출 가능			

- (연구용) 방사성동위원소 생산과 중성자 활용 연구가 결합된 연구 인프라 형성
 - (운영 현황) 다목적 연구와 RI 생산 특화 연구 중심의 연구용 원자로 체계 운영
 - (구조) 중성자 활용 연구(HANARO)와 방사성동위원소 대량 생산(KJRR)을 통해 연구·생산 기능의 상호 보완적 구조

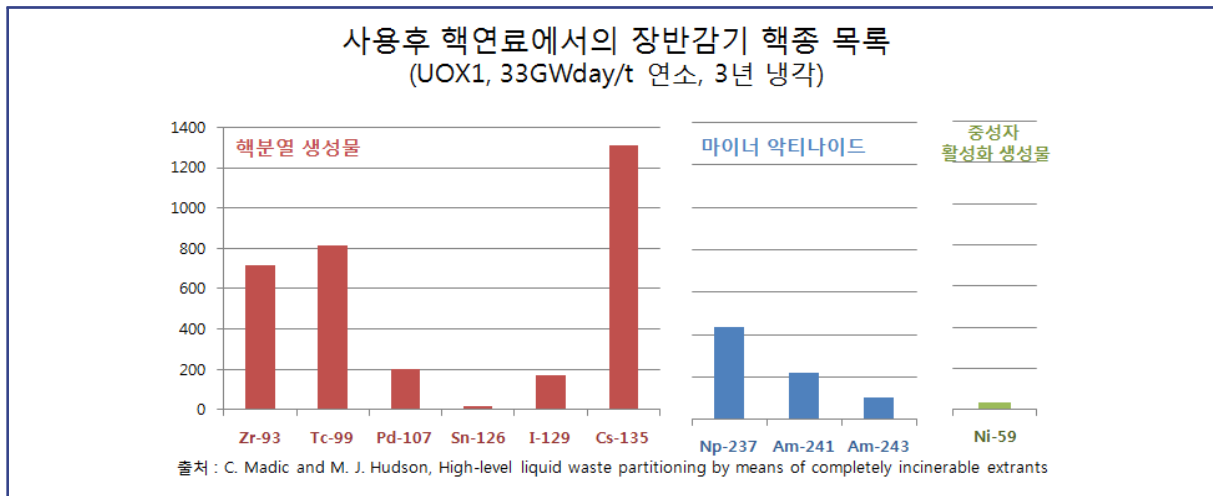
| 국내 연구용 원자로 현황 |

구분	하나로 연구용 원자로(HANARO)	기장 연구용 원자로(KJRR)
목적	다목적 연구 중심 원자로로 중성자 활용 연구 및 RI 연구·시험 (1995년 임계 도달 후 연구 목적 운영)	RI 생산 특화 원자로로 의료·산업용 RI 대량 생산 (국내 두 번째 연구용 원자로)
위치	한국원자력연구원 대전 본원	부산광역시 기장군(새울 원전 인근)
원자로 형태	개방형 풀(pool)형	가압경수로형
열출력	30 MWth	약 15 MW급
기능 및 활용	중성자 기반 재료·연료 시험, 실리콘 NTD, 의료·산업용 RI 연구·시험 생산	의료·산업용 RI 대량 생산, 실리콘 중성자 변환 도핑(NTD), 재료시험
방사성동위원소 (RI) 생산	I-131, Ir-192, Co-60, Mo-99 공정 개발·시험 생산	Mo-99(Tc-99m용), I-131, I-125, Ir-192 등 의료·산업용 동위원소 국내 자체 생산

- (비원자로) 사이클로트론 기반 생산 설비를 병행하여 단수명 및 차세대 방사성동위원소 수요 대응
 - (운영 현황) 의료용 방사성동위원소 생산을 목적으로 한 사이클로트론이 전국 주요 병원에 약 35기 운영 중
 - (구조) PET 진단에 사용되는 F-18 등 단수명 RI를 중심으로 생산
 - (기술 동향) Ac-225, At-211 등 알파붕괴 방사성동위원소 수요 증가에 따라 사이클로트론 기반 생산 확대

✦ (주요 쟁점) 사용후핵연료 누적과 심층처분 부지 확보 등 기술적·사회적 제약 지속

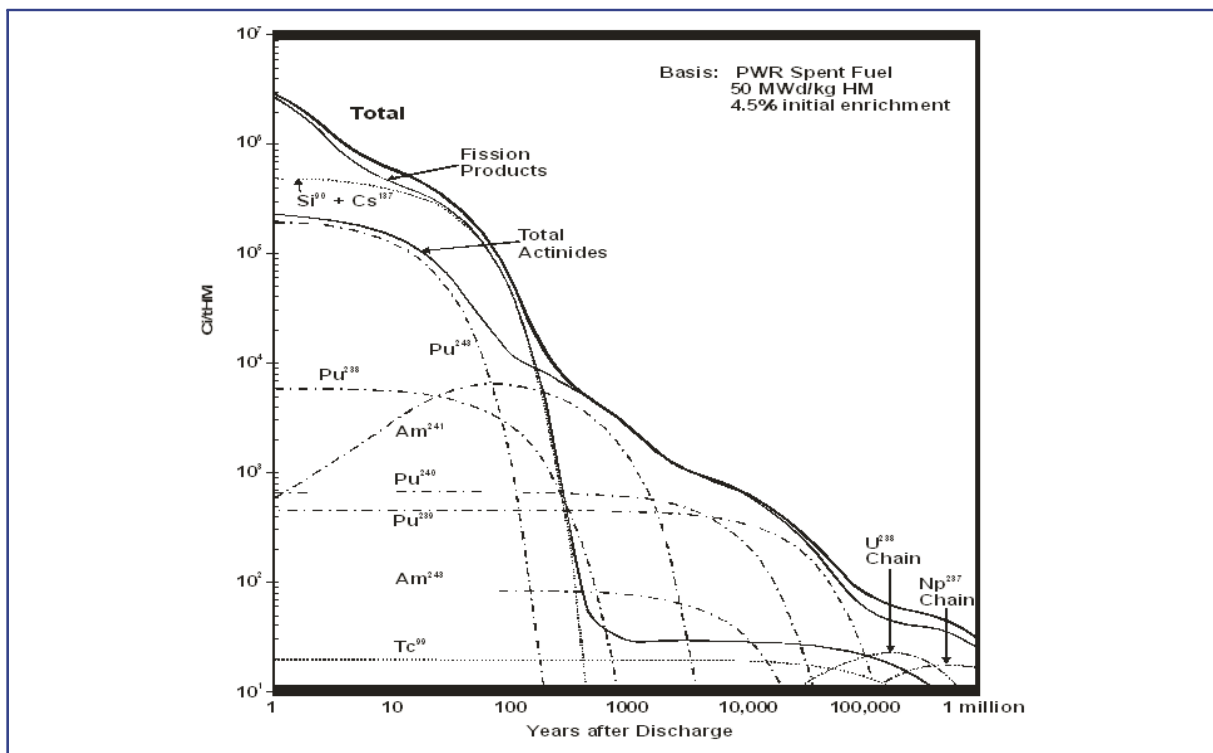
- (현안) 사용후핵연료 관리 정책이 비기술적 요인에 크게 영향을 받으며 장기적 관리 안정성에 대한 불확실성 확대
 - 사용후핵연료 관리가 사회적 수용성 문제에 의존하고 부지 선정 중심의 정책 과제로 접근함에 따른 정책적 한계 부각
 - 기술적 가능성과 무관하게 사용후핵연료 처분 부지 확보 불확실성 장기화로 관리 전략의 지속 가능성 저하
- (기술적 제약) 장기간 관리가 요구되는 핵종으로 인한 처분·관리 부담의 구조적 누적
 - 사용후핵연료에는 반감기가 짧은 핵종과 함께 장수명 방사성 핵종이 다량 포함되어 장기 방사선 방출 불가피



* 연소도 33 GWd/t 조건에서 3년 냉각 후 사용후핵연료 1톤(tHM)당 장반감기 핵종 생성량(g/tHM) 기준

| 사용후핵연료 냉각 3년 후 잔류 방사성동위원소 |

- 경수로에서 생성되는 일부 장수명 방사성동위원소는 수십만 년 이상 관리가 요구되어 기술적 부담 장기화



* 출처: The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study, 2003)

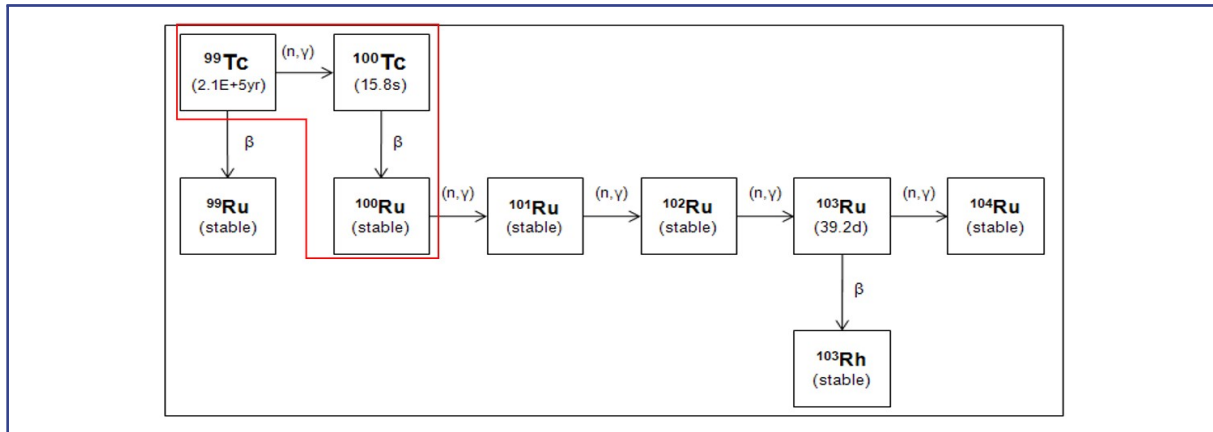
| 사용후핵연료 장수명 핵종 잔존 특성 |

- 사용후핵연료 처분은 단기 기술 문제가 아닌 원자력발전의 지속 가능성과 장기적 안전성 확보가 요구되는 고난도 기술 과제로서 전환 필요

- **(사회적 제약)** 처분 정책 추진 과정에서 사회적 수용성이 정책 추진의 주요 제약 요인으로 작용
 - 고준위 방사성 폐기물 처분장은 기술적 가능성과 별개로 입지 확보와 사회적 합의가 결정적 제약 요인으로 작용
 - * (국내 사례) 안면도(1990), 굴업도(1994), 위도(2003) 등에서 처분장 후보지 선정이 추진되었으나 주민 반대와 사회적 갈등으로 모두 무산
 - * (해외 사례) 미국 Yucca Mountain 고준위 폐기물 처분장 사업은 대규모 예산(약 150~200억 달러)이 투입되었음에도 지역 반대와 정치·법적 갈등으로 중단. 기술 외 요인이 정책 추진의 핵심 제약으로 작용함을 보여줌. 반면, 북유럽 국가는 인구밀도가 낮고, 지역사회 대상으로 장기간 협의가 가능한 구조를 갖추고 있음
 - 높은 인구 밀도와 제한된 국토 여건을 고려할 때 영구 처분장 부지 확보는 장기적 정책 대안으로서 현실성 저하
- **(대안)** 중성자 기반 핵변환 기술 활용으로 사용후핵연료 처분 부담의 구조적 완화
 - 장수명 방사성 핵종을 중성자를 이용해 단수명 또는 안정 핵종으로 전환함으로써 폐기물의 양과 방사성 위해성을 근본적으로 감소시키는 기술을 대안으로 검토
 - 국내 핵데이터 생산 역량은 해외 데이터 의존도가 높은 상황이나 중이온가속기 라온 구축을 계기로 자체 핵데이터 생산 기반 확보 가능성 기대

❖ **(필요성) 사용후핵연료 문제의 근본적 해결을 위해 장수명 방사성 폐기물의 발생량과 방사성 위해성을 획기적으로 저감할 수 있는 핵변환 기술 확보 필요**

- 핵변환 기술을 통한 사용후핵연료 저감 및 핵데이터 정밀화 필요
 - 고속 중성자를 활용한 핵변환 기술은 대규모 처리와 높은 안정성을 동시에 확보할 수 있으나 핵심 설계 및 운전 해석을 위해 정밀한 핵데이터 확보 필수
 - 핵변환 기술의 대표적 접근 방식은 임계 고속로(Fast Reactor)와 가속기 구동 미임계 원자로 (Accelerator Driven Subcritical Reactor, ADSR)로 구분
 - * (임계 고속로) 연속적인 핵분열 반응을 이용하는 방식으로 상용 기술 확보 단계 연구 진행 중
 - * (가속기 구동 미임계 원자로, ADSR) 고에너지 양성자가 표적에 충돌해 생성되는 스펠레이션(spallation) 중성자를 이용하여 미임계 상태($k_{eff} < 1$)의 핵연료계를 구동하는 방식으로 미임계 구조를 통해 본질적 안전성 확보가 가능하고 고속 중성자 이용으로 핵변환 효율 향상 가능
 - ADSR 실현을 위해 가속기, 표적, 냉각재, 내방사선 재료 등 기반 요소기술과 함께 정밀 핵데이터 확보가 핵심 요인으로 작용
 - * 핵데이터 불확실성은 원자로 물리 해석의 신뢰도를 저하시키는 주요 원인으로 작용(민감도 분석 결과, 핵데이터 오차가 시스템 파라미터 오차로 직접 전이)
 - 열중성자부터 고속 중성자에 이르는 에너지 영역에 대한 고정밀 핵데이터 확보가 미래 원자력 기술의 안전성·효율성·경제성 확보를 위한 필수 기반



* Tc-99의 경(반감기 21만년) 중성자 포획반응을 통해 반감기가 16초인 Tc-100으로 변환

| 중성자에 의한 핵변환을 이용한 장반감기 핵종 변환 |

- 방사성동위원소 생산을 위한 핵데이터 확보 필요
 - 상업용 사이클로트론 등 가속기를 활용하여 양성자, 알파입자 등의 빔을 다양한 표적(target)에 조사하고 여러 에너지 조건에서 측정된 핵반응 데이터 확보 필요
 - * 확보된 핵데이터는 생산 핵종의 생성률 예측, 최적 조사 에너지 선정, 불순물 핵종 발생 최소화를 위한 공정 설계의 기초 자료로 활용
 - 암 진단용 양전자방출 단층촬영(Positron Emission Tomography, PET)에 사용되는 방사성 핵종은 양전자(positron) 방출 붕괴(β^+ decay)를 일으키는 핵종으로 반감기가 짧고 생체 내 기능성 분자 표지에 적합한 특성 보유
 - * (대표적 PET용 핵종) ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F 등이며 진단 목적과 표지 분자 특성에 따라 요구되는 핵종 상이

| PET 진단에 활용되는 주요 방사성동위원소 |

핵종	반감기	생산 방식	주요 용도
^{18}F	110min	사이클로트론	PET (FDG 등)
^{11}C	20min	사이클로트론	뇌 PET, 대사·수용체 영상, 약리 연구
^{13}N	10min	사이클로트론	심근 관류 PET
^{15}O	2min	사이클로트론	뇌 혈류 PET(연구 중심)
^{68}Ga	68min	$^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ Generator	표적 PET (신경내분비종양, PSMA 등)
^{82}Rb	1.3min	$^{82}\text{Sr}/^{82}\text{Rb}$ generator	심근 관류 PET
^{64}Cu	12.7h	사이클로트론	표적형 영상 및 치료 연구
^{89}Zr	78h	사이클로트론	항체 기반 면역-PET

- 다양한 방사성동위원소 개발 및 생산 기술 고도화를 위해 신뢰도 높은 핵반응 단면적 및 붕괴 데이터 확보 필요

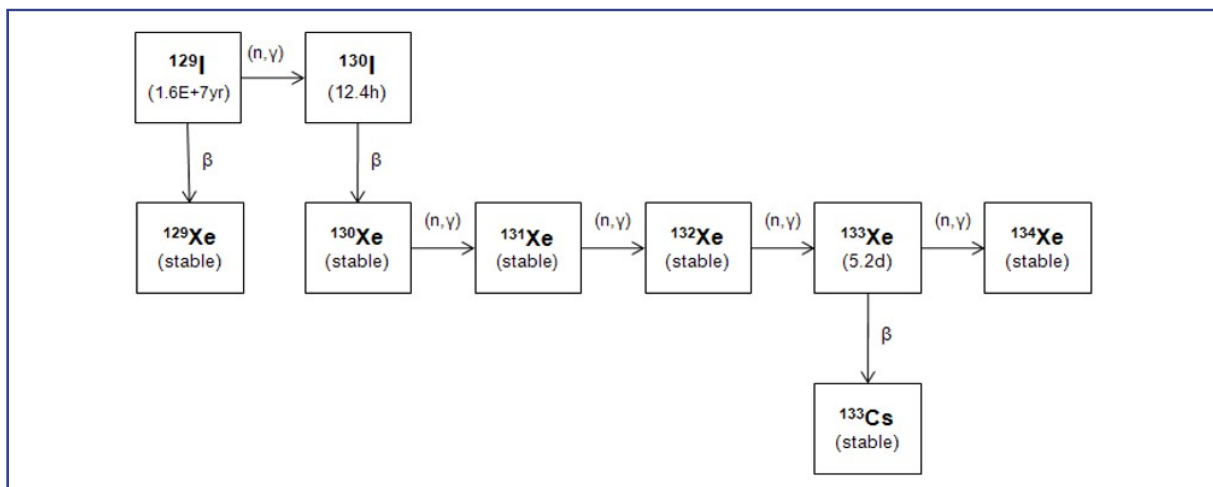
2 기술의 정의 및 범위

중성자를 이용한 핵종변환 기술

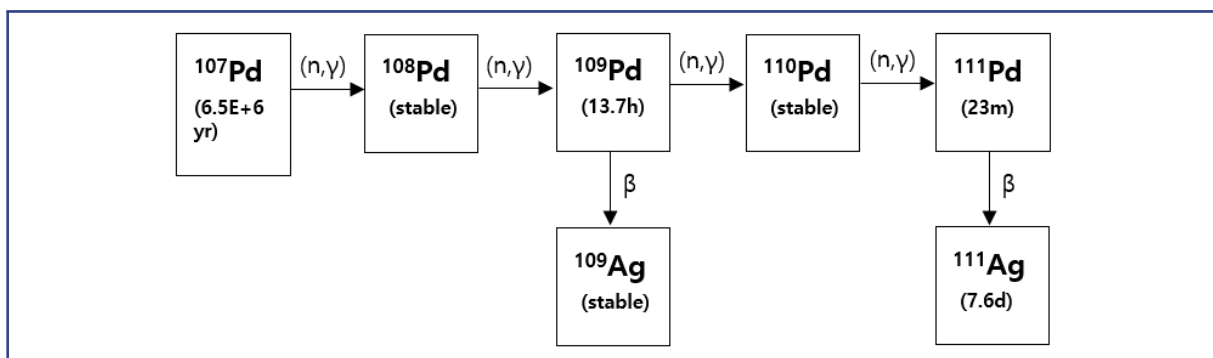
- (기술적 개념) 중성자 조사(neutron irradiation)를 통해 장수명 방사성 핵종의 반감기를 단축하거나 안정 핵종으로 전환하는 핵변환 기술
 - 대표적 LLFP 핵종은 (n, γ) , (n, xn) 등 반응으로 변환 가능

| 중성자 이용 핵종변환 대표 사례 |

변환 전 핵종	반감기	반응 채널	변환 후 핵종
I-129	~1,600만년	(n, γ)	I-130 (12시간)
Pd-107	~600만년	(n, γ)	Pd-108 (안정)
Tc-99	~21만년	(n, γ)	Tc-100 (단수명)
Cs-135	~230만년	$(n, 4n)$	Cs-131 (단수명)



| I-129 핵종변환(I-130) |



| Pd-107 핵종변환(Pd-108) |

- **(적용 범위)** 사용후핵연료 내 마이너 악티나이드(MA) 및 장수명 핵분열 생성물(LLFP)의 방사성 위해성 저감을 주요 목표로 하는 기술에 적용 가능
 - 가속기 구동 미임계 원자로(ADSR)에서는 스펠레이션 중성자원을 이용해 $k_{eff} < 1$ 상태에서 연속 핵변환 운전
 - 임계 고속로(Fast Reactor)에서는 연속 핵분열 중성자로 장기 핵변환 사이클 운전
 - 열중성자 영역부터 고속중성자 및 수백 MeV급 고에너지 영역 포괄
 - 표적, 냉각재(Pb, Bi), 구조재 등에서 발생하는 부수 핵반응과 재료 손상 평가
- **(시스템 구성)** ADSR 기반 중성자 핵종변환 시스템은 양성자 가속기, 스펠레이션 표적, 미임계 코어, 냉각계통으로 구성
 - 고에너지 양성자(1 GeV급)가 납-비스무트(Pb-Bi) 표적에 충돌하여 20~30 MeV 고속중성자원 생성
 - 생성된 고속중성자가 MA 및 LLFP 타겟에 조사되어 (n, γ) , (n, f) , (n, xn) , (n, p) , (n, α) 등 다양한 채널의 핵반응이 동시 발생
 - 냉각재(Pb-Bi, Na)와 구조재(ferritic-martensitic steel)에서 부수 핵반응 발생
- **(핵데이터 요구사항)** 동위원소별 최적 변환 경로 설계를 위해 에너지 의존 핵반응 단면적 및 붕괴 데이터 확보 필요
 - MA(Am, Cm, Np)에 대한 열중성자 (n, γ) , 고속중성자 (n, f) , (n, xn) 반응 단면적 데이터
 - LLFP(I-129, Tc-99, Pd-107, Cs-135)에 대한 (n, γ) , (n, p) , (n, α) , $(n, 2n)$ 반응 단면적 데이터
 - 납(Pb)과 비스무트(Bi) 표적을 이용한 스펠레이션 과정에서, 고에너지 양성자에 의해 발생하는 핵반응 메커니즘과 중성자 생산 효율(수율) 분석 데이터

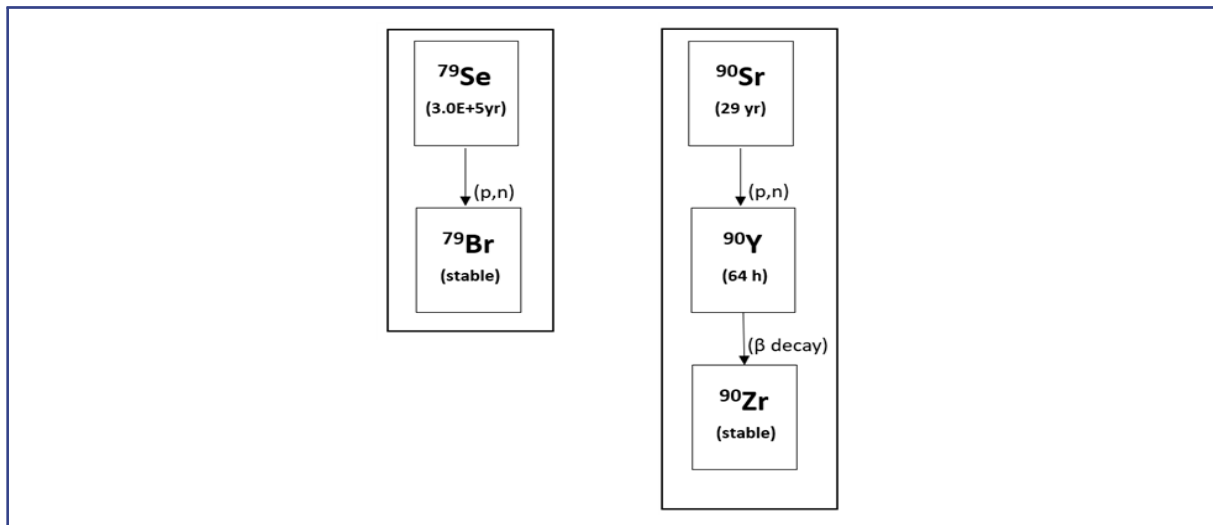
* 중성자 조사 후 생성핵종 분포, 선량, 재료 손상 평가를 위한 몬테카를로 시뮬레이션 입력 데이터로 활용

❖ 양성자를 이용한 핵종변환 기술

- **(기술적 개념)** 양성자 조사(proton irradiation)를 통해 장수명 방사성동위원소를 단수명 또는 안정 핵종으로 전환하는 핵변환 기술
 - 특정 LLFP 핵종은 (p, n) , (p, xn) 반응으로 중성자 대비 높은 변환 효율 제공

| 양성자 이용 핵종변환 대표 사례 |

변환 전 핵종	반감기	반응 채널	변환 후 핵종
Se-79	~30만년	(p, n)	Se-79m (안정)
Sr-90	~29년	(p, n)	Zr-90 (안정)
Zr-93	~160만년	$(p, 2n)$	Nb-91 (단수명)
Sn-126	~100만년	$(p, 3n)$	Sb-123 (단수명)



| 양성자 핵반응에 의한 핵종변환 예시(Se-79, Sr-90) |

- **(적용 범위)** 가속기 기반 핵종변환 및 동위원소 생산 기술
 - 사이클로트론(10~30 MeV), 선형가속기(LINAC, 50~200 MeV)를 활용한 양성자 빔 조사 기술
 - 사용후핵연료 중 중성자 반응으로 처리 어려운 특정 LLFP(Se-79, Zr-93, Sn-126)에 대한 선택적 변환
 - (p,n), (p,2n), (p,3n), (p,α) 반응 채널을 이용한 핵종별 최적 에너지 선정
 - 중성자 이용 ADSR 시스템과 병행 운용하여 보완적 핵변환 전략 수립
- **(시스템 구성)** 양성자 가속기 기반 핵종변환 시스템은 빔 생성기, 표적 챔버, 빔 라인, 냉각·차폐 시스템으로 구성
 - 상업용 사이클로트론은 18 MeV 양성자 빔으로 의료용 핵종 생산 및 LLFP 변환 실증
 - 고에너지 LINAC(100 MeV 이상)는 깊숙한 핵반응 채널(p,3n, p,4n)을 개시하여 장수명 핵종 처리
 - 표적 재료는 고밀도 금속(W, Ta, Pb) 또는 화합물 형태로 제작하며 고열 유출 설계 적용
- **(핵데이터 요구사항)** 양성자 유도 핵반응에 대한 핵반응 단면적 및 생성 핵종 데이터 확보 필요
 - LLFP의 (p,n), (p,2n), (p,3n), (p,α) 반응에 대한 10 MeV~200 MeV 에너지 의존 단면적 데이터
 - 표적 재료(W, Ta, Pb)에서의 양성자 유도 스펠레이션 반응 및 생성 중성자 데이터
 - 생성핵종 수율, 에너지 스펙트럼, 선량 분포를 예측하기 위한 반응 모델 데이터

II 해외 동향

1

정책 동향

❖ 사용후핵연료 관리의 해외 동향

- 주요국은 직접처분·재처리·장기저장·분리·변환 기술을 복합적으로 적용하며 사회적 수용성·기술 성숙도·에너지 전략에 따라 사용후핵연료 관리 방식 차별화 추진

| 주요국 사용후핵연료 관리정책 및 제도·시설 현황 |

국가	처리방향	관리 주체	관리 방식	대표시설 및 프로젝트
 미국	직접처분 (once-through)	에너지부(DOE), 원전사업자	부지 내 장기저장 → 연방 중간저장(CISF)	원전 부지 습식·건식저장, Holtec UMAX(계획)
 유럽연합	직접처분	각국 정부, EU 집행위·규제기관	국가별 프로그램, Euratom 지침	국가 프로그램, PREDIS·SITEX-II 등 공동 R&D
 프랑스	재처리·폐쇄형 연료주기	Orano(연료주기), Andra(처분)	재처리, 심층처분	La Hague(재처리), Cigéo(심층처분)
 벨기에	장기저장, P&T	SCK CEN, FANC	중간저장, ADS 연구	MYRRHA ADS 연구로
 핀란드	직접처분	Posiva Oy, STUK	직접 심층처분	Onkalo 심층처분시설
 스웨덴	직접처분	SKB, SSM	직접 심층처분	Forsmark 심층처분시설(KBS-3)
 영국	직접처분(GDF)	NWS, GDF 파트너십	장기저장 후 GDF 직접 처분	GDF 후보지(4개 지역) 부지평가
 일본	재처리·폐쇄형 연료주기	JAEA, JNFL, METI	재처리, MOX 재활용	Rokkasho 재처리·MOX 공장 건설중
 중국	재처리, 고속로, ADS	CNNC, CIAE, IHEP	재처리·고속로·ADS 연계 추구	Gansu 재처리·MOX, China-ADS, CFR-600
 러시아	재처리·폐쇄형 연료주기	ROSATOM, Rostekhnadzor	재처리, 고속로 재활용	Mayak 재처리, BN-600/800, BN-1200M

① 미국

- **(정책 방향)** 일회성(once-through) 연료 주기 원칙을 유지하며 1977년 이후 상업적 재처리 금지 상태 지속
 - 재처리 금지는 핵확산 우려와 경제성 평가를 근거로 유지되고 있으며 장기 저장 이후 심층 처분을 최종 관리 목표로 설정
 - 연방정부 주도로 사용후핵연료 관리 책임을 통합하되 원전 부지 내 습식·건식 저장을 장기간 병행하는 관리 체계 유지
- **(관리체계 및 제도)** 에너지부(DOE)가 연방 차원 정책 총괄, 원전사업자는 저장·운영 책임 부담
 - 2023년 DOE '동의 기반 부지선정(consent-based siting)' 로드맵 발표로 연방 중간저장시설(CISF) 추진 구체화

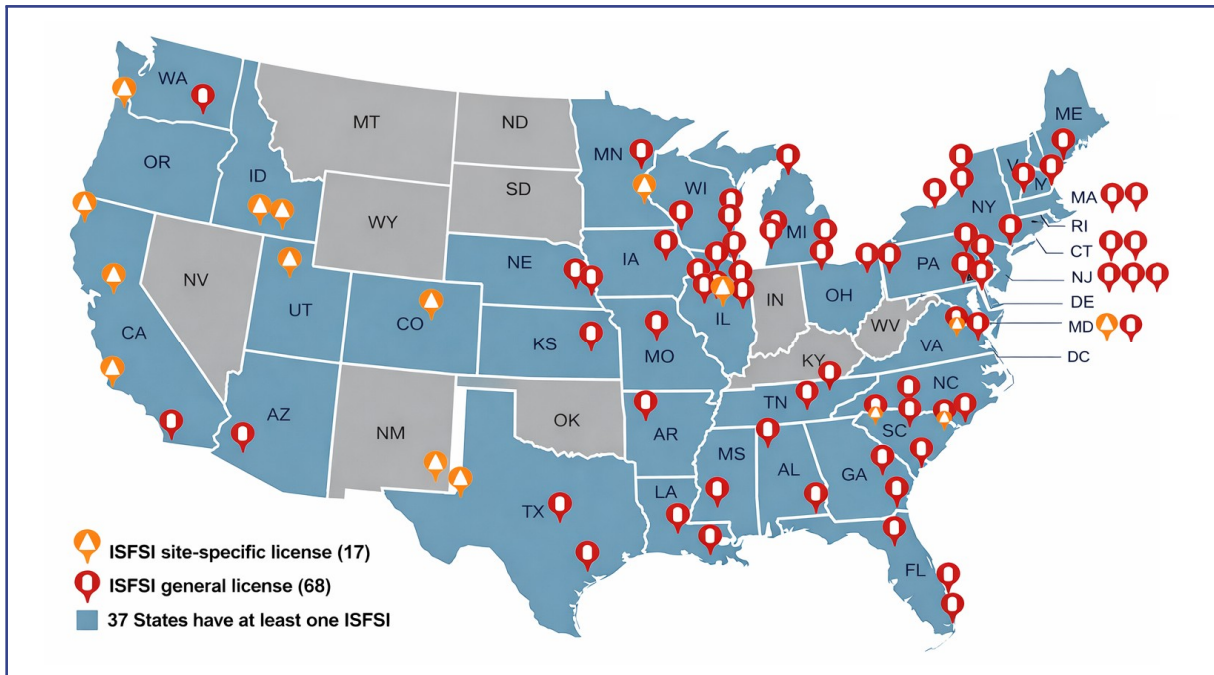
| DOE's Consent-Based Siting 로드맵 주요내용 |

단계	기간	목표	주요내용
Phase 1A	기획	완료 ('22년)	제도·절차 기반 마련
Phase 1B	역량 구축	2~3년 (진행중)	지역사회 참여 기반 강화
Phase 2	부지 선별	1~2년	잠재적 후보지 도출
Phase 3	예비 평가	1~2년	기술·사회적 적합성 검토
Phase 4	상세 평가	2~3년	부지 적합성 최종 검증
Phase 5	선정·협상	1년	최종 부지 확정
Phase 6A	인허가·건설	장기	인허가 및 건설, 초기 운영 준비
Phase 6B	운영·종료		운영·확장·폐쇄·해체

* (정책 목표) 지역사회 자발적 동의를 기반으로 한 연방 통합 중간저장시설 부지 선정 및 운영 기반 마련

- 로드맵의 핵심 원칙으로 자발성, 철회권 보장, 충분한 정보 제공, 특정 지역에 대한 부담 집중 완화, 단계적 의사결정(초기 평가 → 계약 → 운영) 기반의 투명성 강화 제시
- **(시설 및 기술 현황)** 약 90,000톤 이상의 상업용 사용후핵연료를 원전 부지 중심으로 저장 중이며 건식 저장 비중 확대
 - 초기에 높은 냉각 효율과 관리 편의성 때문에 대부분이 원자로 부지 내 수조를 이용한 습식 저장(pool) 방식 채택

- 현재 수조 용량 한계와 장기적 안정성 확보를 위해 점진적으로 건식 캐스크 저장 방식(대략 30% 차지)으로 전환 중
- '23년 기준 미국 전역 약 80여 개 이상의 원전 및 원전 외 ISFSI에서 분산 관리



| 사용후핵연료 저장시설(ISFSI) 분포 현황 |

- Yucca Mountain 처분장은 2010년 이후 중단, 텍사스·뉴멕시코 ISP 시설 CISF 인허가 진행 중
- 미국 원자력규제위원회(NRC) 인증 건식 저장 기술(HI-STORM, NUHOMS)은 공랭식 모듈 구조와 내진·내충격 설계를 적용해 60년 이상 운영 수명 확보
- 차세대 지중형(UMAX) 중간저장시설 인허가 진행 중
- **(추진 특성)** 지역 주민 동의 절차와 연방·주 정부 간 협력을 핵심으로 한 점진적 의사결정 구조
 - 참여 검토를 지원하기 위한 지역사회 활동 자원 제공과 탈퇴 가능 옵션을 포함한 유연한 절차 설계
 - 원전 폐쇄 부지의 연료 이전을 우선 추진하여 사업자 부담을 경감하고 연방 단위의 집중 관리 체계 확립

② 유럽연합(EU)

- (정책 방향) 각 회원국 자국 발생 폐기물 최종 관리 책임 및 일회성 처분 원칙 적용
 - 2011/70/Euratom 지침을 통해 투명성, 이해관계자 참여, 자원 조달, 동등평가 의무 제도화 및 재처리 허용 및 폐기물 발생국 귀속 원칙 명시

| EU 2011/70/Euratom 지침 핵심 내용 |

구분	핵심 내용
지침 목적	<ul style="list-style-type: none"> • 방사성폐기물 및 사용후핵연료의 책임 있는 안전 관리 체계 확립 • EU 차원의 안전 기준 달성과 이행 보장을 위한 법적 프레임워크 제공
국가 정책 의무	<ul style="list-style-type: none"> • 관리의 안전을 보장하는 공식 국가 정책 및 법적·행정적 프레임워크 수립 • 인간과 환경 보호를 최우선으로 하고 책임 소재를 명확히 하며 정보 공개 투명성 확보 요구
핵심 이행 수단	<ul style="list-style-type: none"> • 발생부터 최종 처분까지 전 활동을 포괄하는 국가 관리 프로그램(National Programme) 수립 및 EC 통보
재정 및 책임	<ul style="list-style-type: none"> • 관리 프로그램 이행에 필요한 충분한 재정 자원 확보 • 자국에서 발생한 폐기물의 최종 처분 책임 부담
이행 주기	<ul style="list-style-type: none"> • 최소 10년 주기 국가 프로그램 검토 및 EC 보고 의무

- (관리체계 및 제도) 회원국별 사용후핵연료 및 방사성폐기물 관리 프로그램 수립 의무화, EU 집행위원회 차원 평가 체계 운영
 - 2023년 기준 회원국 국가 관리 프로그램 제출 완료, 정기적 peer review 정례화
 - 초국경 이동 원칙적 제한, 재처리 수행 시 폐기물의 자국 반환 의무 명시
- (시설 및 기술 현황) 초기에는 국가별 중간저장을 중심으로 관리하였으나 장기 처분 기술의 신뢰성 제고를 위해 공동 연구개발 및 기술 표준화 추진
 - 프랑스, 핀란드, 스웨덴이 기술적 선도 역할을 수행하고, 다수 회원국은 부지 탐색 및 사전 검토 단계에 위치
 - 심층처분 관련 공동 연구 프로젝트(PREDIS, SITEX-II) 등을 통해 안전성 평가 및 규제 기반 강화
 - 중간저장시설 설계 가이드(EURATOM Guide) 수립으로 기술 표준화
- (추진 특성) 공동 규범 하에서 회원국 자율성을 존중하는 정책 추진
 - 핀란드, 스웨덴 등 선진국 사례를 공유하고 후발국 지원 확대
 - 사회적 신뢰 확보 위한 공공 소통 및 정보 공개 강화

③ 프랑스

- **(정책 방향)** 폐쇄형 연료주기 유지, 사용후핵연료를 전략자원으로 관리
 - 2006년 방사성폐기물 관리법, 2016년 에너지전환법을 통해 재처리 정책 명문화
 - MOX 연료 사용 비중 약 20% 유지, 우라늄 자원 이용 효율 제고
- **(관리체계 및 제도)** 핵연료주기와 처분 기능의 명확한 역할 분담 체계 구축
 - Orano가 핵연료주기 및 재처리 전담, Andra가 방사성폐기물 처분 관리 총괄
 - * 오라노(Orano)는 프랑스의 다국적 원자력 기업으로 핵연료 주기의 상업 및 산업적 측면을 담당
 - * 안드라(Andra)는 1991년 제정된 법률에 의거하여 설립된 프랑스 국립 방사성 폐기물 관리 전담 공공 기관으로 국가 방사성 폐기물 관리 계획을 수립하고 방사성 폐기물의 안전한 처분을 위한 연구개발을 총괄
 - 국비 및 전력요금 부담금을 활용한 안정적 재원 조달 구조 운영
- **(시설 및 기술 현황)** 초기 습식 저장 중심 운영에서 저장 수명 연장·안전성 강화를 위한 고형화·유리화 기술 확대
 - La Hague 시설에서 연간 약 1,100톤 규모 재처리 수행
 - * 프랑스 북부 라아그(La Hague)에 위치한 오라노(Orano) 그룹 소유의 사용후핵연료 재처리 공장으로 사용후 핵연료의 96%에 달하는 재활용 가능한 우라늄과 플루토늄을 분리·회수



| 프랑스 라아그(La Hague) 사용후핵연료 재처리 시설 |

- 회수 플루토늄은 MOX로 재활용하고 고준위폐기물은 유리화 처리 후 지하 500m 점토층 Cigéo에 처분 예정
- Cigéo는 단계적·되돌릴 수 있는 심층처분 방식 적용, 2027년 시범 운영 목표
 - * Cigéo (Centre industriel de stockage géologique, 산업형 지층 처분 센터)는 프랑스 국립 방사성 폐기물 관리 기관(Andra)이 주관하는 고준위 및 중준위 장수명 방사성 폐기물 심층처분 프로젝트로 재처리 후 남은 4%의 최종 폐기물(고준위 폐기물)을 포함하여, 장기간 위험한 방사성 폐기물을 인간 생활권으로부터 영구적으로 격리하는 것을 목표로 함



| 프랑스 뷔르-소드롱(Bure-Saudron) 지하연구소 터널 |

- (추진 특성) 법·제도·기술 간 일관성에 기반한 장기 정책 유지

- 서방국 중 유일한 완전 폐쇄형 연료 주기 상업 운용 국가
- 주민 보상 체계 및 공론화 제도를 통한 사회적 수용성 확보

④ 벨기에

- (정책 방향) 중간저장을 중심으로 관리하면서 심층처분을 장기 해법으로 검토

- 재처리 정책은 중단, 분리·변환(P&T) 기술은 연구 옵션으로 유지
- MA 및 LLFP 위해성 저감을 위한 연구개발 지속

- (관리체계 및 제도) 연방정부 주도의 연구 중심 관리 체계 운영

- 연방정부가 MYRRHA 프로젝트 예산 승인, SCK CEN이 사업 총괄 수행

* MYRRHA(Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications) 프로젝트는 벨기에 전략을 대표하는 핵심 연구 인프라로 가속기 구동 시스템(ADS)을 기반으로 한 다목적 연구시설. 장수명 핵종의 분리·변환 기술 실증, 차세대 원자로 연료·재료 연구, 의료·산업용 동위원소 생산 등을 목표 구축 중

- FANC이 규제 관리 및 안전성 검증 담당
- 정부·산업·학계 연계형 협력 구조 구축

- (시설 및 기술 현황) 저장 중심 관리에서 핵변환 실증으로 전환

- 과거 습식저장 중심 운영에서 건식저장 및 핵변환 기술 단계로 이동
- MYRRHA는 ADS 기반 실증시설로, 600 MeV 가속기와 Pb-Bi 냉각로 구성
- 2026년 시범 가동 목표, 핵변환·의료용 동위원소 생산·재료 시험 등 다목적 활용
- 2038년 상업적 실증 단계 진입을 목표로 단계적 확대 추진

- **(추진 특성)** 단계적 실증에 기반한 유연한 정책 운영
 - Phase 1 예산 확보 이후 장기 추진 체계 가동
 - 지역 공동체 협의 기반의 사회적 수용성 확보 전략 추진

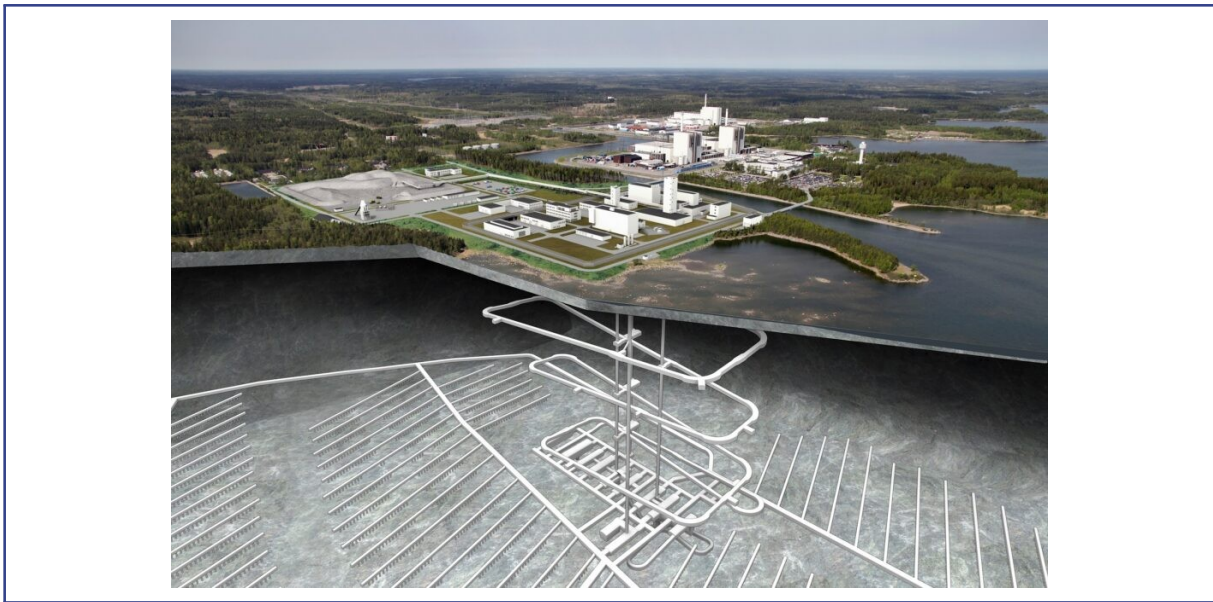
⑤ 핀란드

- **(정책 방향)** 재처리 없이 직접 처분을 원칙으로 하는 단순·확정형 정책 채택
 - 1980~90년대 공론화 및 부지 탐색을 거쳐 사회적 합의 형성
 - 되돌릴 수 없는(irrevocable) 운용 방식으로 정책 확정
- **(관리체계 및 제도)** 사업자 책임 원칙에 기반한 명확한 역할 분담 구조 구축
 - Posiva Oy가 처분시설 건설·운영 전담, STUK이 규제 관리 및 안전성 심사 담당
 - 원전 사업자 책임 하 자원 조달 및 비용 분담 체계 명확화
 - 운영 허가 심사 절차 2025년 종료 예정
- **(시설 및 기술 현황)** 저장 단계에서 상업적 심층처분 단계로 전환 완료
 - 초기 습식저장 후 Onkalo 지하 약 430m 화강암층 처분시설로 이행
 - KBS-3V 방식 적용, 구리 용기와 벤토나이트 완충재를 활용한 이중 차폐 체계 구축
 - 총 처분 용량 약 6,500톤 규모의 세계 최초 상업적 심층처분 단계 진입 사례
- **(추진 특성)** 장기 합의와 주민 참여를 기반으로 한 정책 안정성 확보
 - 사회적 수용성 선확보 후 기술적 검증 단계적 추진
 - 정책 지속성·투명성에 대한 높은 신뢰 유지

⑥ 스웨덴

- **(정책 방향)** 재처리 없이 직접 처분 원칙 유지, 장기 안전성 중심 정책 추진
 - 2009년 Forsmark 지역을 심층처분 부지로 선정
 - KBS-3 기술 적용을 통해 10만 년 이상 장기 안전성 확보를 목표로 설정
- **(관리체계 및 제도)** 사업자 책임 원칙에 기반한 명확한 규제·운영 분담 구조
 - 사용후핵연료 관리 및 처분사업 총괄(SKB), 안전 규제 및 인허가 감독 수행(SSM)
 - 2011년 건설 허가 신청, 2022년 정부 최종 승인 후 건설 단계 착수
 - 처분 비용에 대한 사업자 자원 책임 명문화

- **(시설 및 기술 현황)** 저장 중심 관리에서 상업적 심층처분 단계로 이행
 - 초기 수조 저장에서 벗어나 Forsmark 지역 지하 약 500m 심층처분시설 건설 중
 - KBS-3V(수직 삽입) 방식 적용, 구리 용기·철 삽입체·벤토나이트 완충재를 활용한 삼중 방벽 구조 채택
 - 핀란드와 공동으로 처분 용기 용접 공정 개발 추진
 - 2030년대 운전 개시, 2080년대 처분시설 확장 완료 목표



| 포르스마크(Forsmark) 사용후핵연료 최종 처분시설 |

- **(추진 특성)** 주민 참여와 단계적 의사결정에 기반한 정책 추진
 - Östhammar 지자체 주민투표를 통해 부지 선정에 대한 사회적 합의 확보
 - 북유럽형 장기 합의·단계적 결정 체계의 대표 사례로 평가

⑦ 영국

- **(정책 방향)** 고준위폐기물 및 사용후핵연료를 지층처분시설(GDF)에서 일괄 관리하는 정책 전환
 - 재처리 정책 중단 이후 일회성 처분 원칙으로 전환
 - 2023년 국가 전략에서 GDF 추진을 핵심 국가사업으로 명시
- **(관리체계 및 제도)** 중앙 총괄과 지역 협의를 결합한 협력형 관리 체계 운영
 - Nuclear Waste Services가 GDF 사업 총괄

- GDF Siting Partnership을 통해 지역협의체 중심 의사결정 구조 운영하고 재정 참여 제도 및 장기 지역 지원 프로그램 운영
- 협력 기반의 단계적 부지 선정 절차 지속 추진
- **(시설 및 기술 현황)** 저장 중심 관리에서 심층처분 체계로 단계적 이행 중
 - 기존 저장시설 유지와 지층처분 전환 추진, 현재 4개 후보 지역 대상 부지 적합성 평가 진행
 - * 과거 사용후핵연료를 재처리하던 THORP와 Magnox 재처리 시설은 현재 폐쇄
 - 지하 약 500~1,000m 암반층을 처분 대상 지층으로 검토
 - 자연 방벽과 공학적 이중 차폐를 결합한 GDF 설계 적용
 - 2030년 기술 설계 완료, 2045년 운전 개시 목표
- **(추진 특성)** 사회적 신뢰 확보를 최우선으로 하는 bottom-up 정책 추진
 - 지방정부 참여 보장 및 opt-out 제도 명문화
 - 의사결정 과정의 투명성 확보를 정책의 핵심 원칙으로 유지

⑧ 일본

- **(정책 방향)** 재처리를 전제로 한 폐쇄형 연료주기 정책 유지
 - 플루토늄 관리의 투명성 제고를 정책 핵심으로 설정
 - 후쿠시마 사고 이후 저장과 재처리 기능을 포함한 관리 체계 운영
- **(관리체계 및 제도)** 국가 주도형 연료주기 관리 및 자원 운영 구조 유지
 - JAEA와 JNFL이 시설 운영 및 기술 수행, METI가 연료주기 정책 총괄
 - 국가 특별회계를 기반으로 한 투자·비용 관리 체계 운영
 - 주요 시설 입지에 대해 지방정부 승인 체계 유지
- **(시설 및 기술 현황)** 소규모 재처리에서 상업 규모 재처리 체계로 단계적 확대
 - 초기에는 Tokai 시설에서 연간 약 89톤 규모 재처리 수행
 - 현재는 Rokkasho 재처리시설을 중심으로 연간 약 800tU 규모 상업 재처리 체계 구축 추진 (2026~2027년 가동 목표)
 - MOX 연료 제조공장 및 관련 저장시설 확보
 - 고준위폐기물은 유리화 처리 후 중간저장 기술 고도화 추진 중
- **(추진 특성)** 국제 감시와 정보 공개를 전제로 한 관리 중심 정책 운영
 - IAEA 감시 체계 하에서 플루토늄 보유량 공개 및 국제 검증 절차의 정례적 이행
 - 지역 수용성 확보 및 지속 운영 조율

⑨ 중국

- **(정책 방향)** ADS와 고속로를 연계한 폐쇄형 연료주기 전략 추진
 - 제14차 5개년계획에서 핵연료 재활용을 국가 핵심 과제로 지정
 - 외부 의존 최소화를 목표로 자립형 연료주기 체계 확립 추진
- **(관리체계 및 제도)** 중앙집중형 국가 주도 연료주기 관리 체계 운영
 - CNNC가 연료주기 전반을 총괄하고 간쑤(Gansu) 산업단지를 중심으로 재처리·연료 제조 시설 집적화 추진
 - 재처리(연 200톤), MOX 연료 제조(연 20톤) 시설 건설 진행 중
 - CIAE, IHEP 등이 ADS 핵심 기술 개발 담당
- **(시설 및 기술 현황)** 저장 중심 관리에서 재처리·재활용 기술 실증 단계로의 전환 추진
 - 초기 저장 이후 재처리 기반 연료 재활용 체계로 단계적 이행
 - Huizhou 지역에 China-ADS 실증시설 구축 추진
 - * 1 GeV 가속기와 Pb-Bi 냉각 미임계로 구성된 핵변환 실증 설비
 - CFR-600 고속로는 2024년 임계 달성, 재활용 연료 사용 시험 단계 진입 예정
 - 재처리-고속로-ADS를 연계한 폐쇄형 연료주기 전주기 실증 추진(2030년 목표)
- **(추진 특성)** 기술 자립을 최우선으로 하는 국가 주도 전략
 - 고속로-재처리-ADS를 연계한 일체형 폐쇄형 연료주기 모델 구축
 - 프랑스 Orano형 상업 재처리 모델의 조기 내재화를 지향

⑩ 러시아



- **(정책 방향)** 재처리를 핵심 축으로 하는 폐쇄형 연료주기 정책 유지
 - 사용후핵연료를 폐기물이 아닌 재활용 가능한 전략자원으로 지속 활용
 - 고속로 연계를 통한 우라늄·플루토늄 회수로 자원 효율성 및 전략적 자립성 확보 지향
 - 즉각적 최종처분(Immediate Disposal)을 유보하고 기술 성숙도를 반영하는 ‘지연된 결정(Delayed Decision)’ 정책 채택
- **(관리체계 및 제도)** 국가 주도의 중앙집중형 핵연료주기 관리 체계 운영
 - ROSATOM을 중심으로 사용후핵연료 관리·재처리 기능 일원화, Rostekhnadzor가 규제 및 안전 감독 수행
 - Mayak 단지에서 재처리 및 유리화 시설 통합 운영
 - 재정적·제도적 책임을 국가가 직접 부담하는 구조 유지

- **(시설 및 기술 현황)** 저장 이후 재처리-고속로 연계를 통한 폐쇄형 연료주기 실증 단계
 - 초기 저장 후 재처리 체계로 전환, 고속로와 연계한 연료 재활용 순환 구조 구축
 - BN-600, BN-800 상업 운전 중이며 2027년 BN-1200M(차세대 고속로) 완공 목표
 - 재처리 회수 플루토늄의 MOX·질화물 연료화 및 고속로 재활용
 - 고준위폐기물은 유리화 처리 후 장기 저장을 거쳐 심층처분 검토 연구 수행
- **(추진 특성)** 기술 진화 가능성을 중시하는 국가 주도형 정책 추진
 - 중앙집중적 자원 투입과 일관된 정책 기조 유지로 대규모 기술 실증 가능
 - 조기 처분과 정책 확정성을 중시하는 국가들과 대비되는 기술 유연성 우선 기조
 - 군사·민간 핵프로그램을 포괄한 연료주기 통합 운영 구조 유지

방사성동위원소 생산의 해외 현황

- 의료·산업·연구 분야에서 폭넓게 활용되는 방사성동위원소는 대부분 연구로에서 생산되며 고부가가치 의약품 및 산업용 비파괴검사용 소재 등으로 활용
- 방사성동위원소 생산은 과학기술·보건산업의 핵심 인프라이며 사용후핵연료 발생에 따른 방사성폐기물 관리와 사회적 수용성 확보가 동반되어야 하는 정책적 과제 수반
- 생산 효율과 안전성 확보를 위해 핵데이터의 정밀 확보가 필수 요건으로 작용

| 미국·EU 방사성동위원소 생산 및 공급 정책 |

구분	미국 	유럽연합 
정책	<ul style="list-style-type: none"> • HEU 수입 의존에서 LEU·비원자로 방식 자급으로 전환을 국가 전략으로 추진 • NNSA 주도 비확산·공급안보 목표로 Mo-99·At-211·Ac-225 등 차세대 핵종 자급화 추진 	<ul style="list-style-type: none"> • SAMIRA Action Plan: EU 의료용 방사성·핵기술 공급확보·품질·혁신 종합 계획 • LEU 전환·공급망 다변화(OECD/NEA 선언)
운영 체계	<ul style="list-style-type: none"> • DOE·NNSA 총괄 하 민간기업(SHINE·NorthStar) - 국립연구소 협력 구조 • 「의료용 방사성동위원소 생산촉진법」으로 민간에 기술 이전·조달·공동상용화 지원 	<ul style="list-style-type: none"> • ESA 공급안보 조정, EC·ENSREG 안전 관리 • 각 회원국 연구로 운영·LEU 전환 일정·공공 재정 지원 계획 수립
생산 인프라, 기술	<ul style="list-style-type: none"> • SHINE(위스콘신 Mo-99 비원자로 공장), NorthStar(가속기 Ac-225 등) • ORNL(U-233→Th-229→Ac-225), LANL·BNL(가속기 At-211 실증) 	<ul style="list-style-type: none"> • 네덜란드: HFR(Petten)→PALLAS(신형 연구로, 2030 Mo-99 공급) • 벨기에: BR2+IRE→MYRRHA(ADS 의료 핵종 확대) • 프랑스: JHR(OSIRIS 대체, Mo-99) • 폴란드: MARIA(Mo-99·I-131)
공급 안정화	<ul style="list-style-type: none"> • DOE 주도 시장 모니터링·정부 비축으로 수급 불균형 대응 • 공공투자자와 민간 시장 경쟁 결합해 안정적 공급망 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • LEU 연료 전환과 지역 간 분산 생산체제로 단일 연구로 의존 리스크 완화 • PALLAS·JHR·MYRRHA 등 신규 연구로를 다국적 협력 거점으로 활용

① 미국




- **(정책 동향)** 의료용 방사성동위원소의 안정적 자급을 국가 전략목표로 설정하고 과거 고농축우라늄(HEU) 기반 수입 의존 구조에서 벗어나 저농축우라늄(LEU) 또는 비원자로 방식으로의 전환 추진
 - NNSA(National Nuclear Security Administration)는 비확산과 공급안보를 양대 목표로 설정하고 민간 중심의 생산시장 형성 지원
 - Mo-99, At-211, Ac-225 등 차세대 의료용 핵종 자급화를 통해 미국 내 방사성약품 공급망 강화 추진
- **(운영 체계)** 에너지부(DOE) 및 국가핵안보청(NNSA)이 정책을 총괄하며 민간기업과 국립 연구소가 참여하는 산업 구조를 통해 생산 인프라를 구축
 - DOE는 「의료용 방사성동위원소 생산촉진법」을 기반으로 민간기업에 대한 기술 이전 및 조달 지원
 - SHINE Technologies, NorthStar Medical 등이 LEU 기반 비원자로 생산 공정을 구축 중이며 정부-기업 간 공동 상용화 계약 체결
- **(생산 인프라 및 기술 현황)** 연구로 기반 Mo-99 수입 체계를 대체하기 위해 비핵분열 및 가속기 생산기술 적극 도입
 - SHINE Technologies는 위스콘신주에 고출력 중성자 수득 공정 기반의 Mo-99 공장을 건설 중이며 완공 시 북미 첫 비원자로 Mo-99 생산기지가 될 예정
 - ORNL은 U-233 원료로부터 Th-229를 분리해 Ac-225를 생산하고 있으며 BNL, LANL은 가속기 기반 At-211, Ac-225 생산기술 실증 확대
- **(공급 안정화)** 미국은 의료용 방사성동위원소를 전략 자원으로 관리하며 공공 투자와 민간 시장 경쟁을 결합한 정책 기조 유지
 - DOE는 주기적 시장 모니터링을 통해 수급 불균형 시 정부비축 체계를 가동할 수 있는 정책 기반 마련
 - 고농축우라늄(HEU) 대체 기술 확립과 산업화 연계를 통해 글로벌 시장 내 공급 리스크 완화와 비확산 추구

② 유럽연합

- **(정책 동향)** 방사성동위원소를 보건·산업·공급망 안보 이슈 간주하고 2021년 SAMIRA Action Plan을 통해 3대 축으로 ‘의료용 방사성동위원소 공급 확보’, ‘의료 방사선 품질·안전’, ‘핵신 촉진’ 제시
 - OECD/NEA HLG-MR 공동 선언으로 국제 공급망 다변화와 LEU 전환을 가속화하며 Europe's Beating Cancer Plan 연계해 Lu-177·Ac-225 등 치료용 핵종 개발 중점 지원

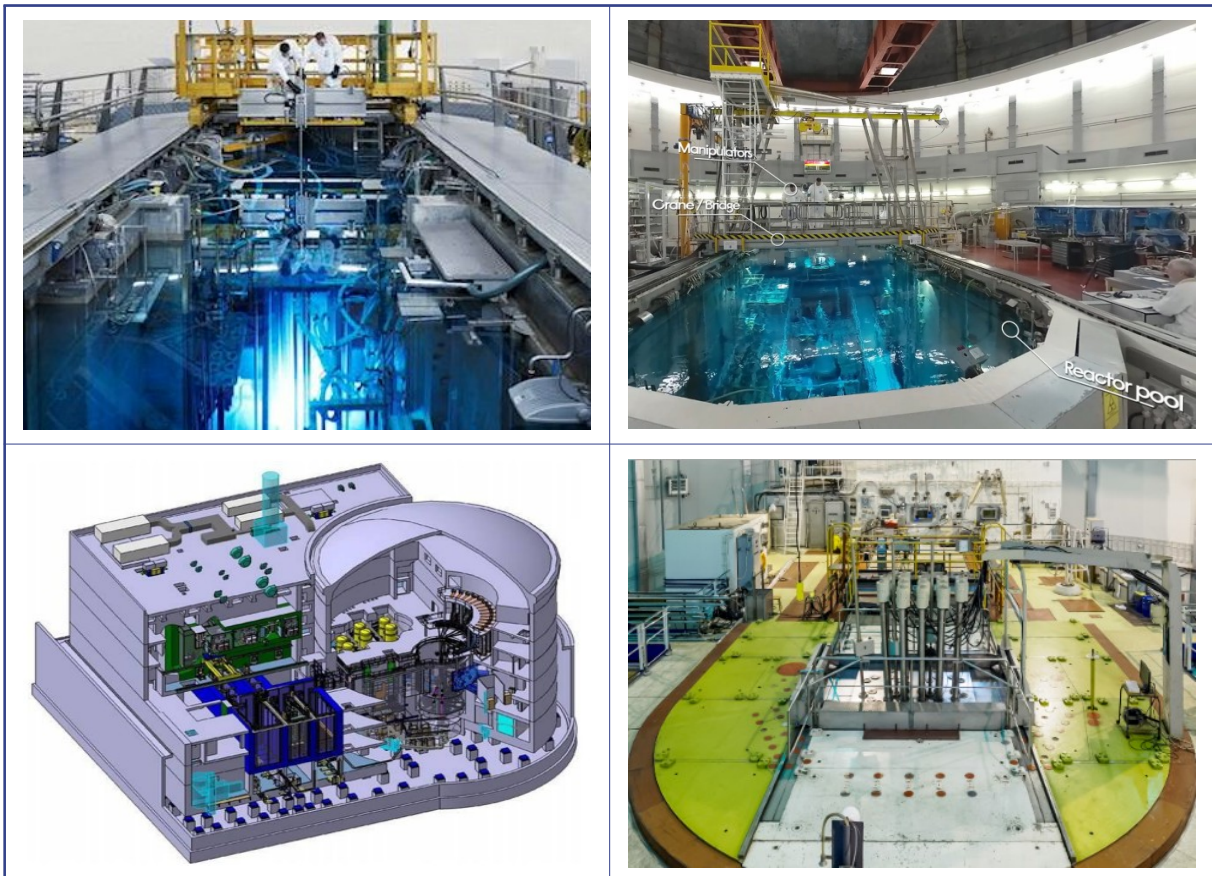
- 연구로 노후화 리스크 관리와 신규 인프라 투자(ERVI 이니셔티브)를 통해 2030년까지 안정적 공급체계 구축 목표 설정

| SAMIRA Action Plan 실행 과제 요약 |

주요 목표	구체적 실행 내용
 의료용 방사성동위원소 공급 확보	연구로 노후화 리스크 완화, LEU 전환, 공급망 다변화 <ul style="list-style-type: none"> • <u>European Radioisotope Valley Initiative(ERVI)</u>: 연구로 노후화 대응, 원료 확보·신규 생산시설 투자 촉진 • <u>연구로 연료 전환 프로젝트</u>: LEU FOREvER(2017-2022, HEU→LEU), EU-QUALIFY(2020-2024, LEU 연료 자격 인증) • <u>공급망 연구</u>: 'EU 내 방사성동위원소 개발·공급 조정 접근' 연구(2021), 'EU 의료 동위원소 지속·탄력적 공급 연구'(2022) • <u>기타</u>: TOURR(연구로 최적화, 2020-2023), SECURE(차세대 핵종 공급망 강화, 2022-2025), PRISMAP(고순도 핵종 생산, 2021-2025)
 의료 방사선 품질·안전 강화	환자·작업자 피폭 최소화, 품질 관리 표준화 <ul style="list-style-type: none"> • <u>Steering Group on Quality and Safety(SGQS)</u>: EU 국가 방사선 보호·건강 당국 협력 플랫폼, 임상 가이드라인·도구 개발 • <u>임상 감사 권고</u>: 2024/1112/Euratom 권고안(2024년 4월 채택, RP 205 JUST CT 연구 기반) • <u>교육·훈련</u>: 연구자·의료인력 양성, 국가 간 불평등 해소 • <u>기타 프로젝트</u>: QuADRANT(임상 감사, 2022), EU-JUST-CT(CT 정당성 감사, 2021-2023), Simplerad(방사성의약품 규제 연구, 2022-2025), Equipment 연구(환자 노출 모니터링, 2022-2024)
 혁신·기술개발 촉진	차세대 핵종 및 디지털 기술 개발, 폐기물 관리 <ul style="list-style-type: none"> • <u>European Research Roadmap</u>: Euratom·Horizon Europe 연계, EURAMED Rocc-n-Roll 기반 • <u>폐기물 관리</u>: ENSREG WG2(비전력 원자력 폐기물 관리 작업반)와 NuBaFA(방사성폐기물 재정 전문가 그룹) 운영으로 EU 회원국 간 폐기물 처리 기준·재정 계획 조율 • <u>기타 프로젝트</u>: PIANOFORTE(방사선 보호 파트너십, 2022-2027), HARMONIC(소아 심장·방사선 치료 영향, 2019-2024), SINFONIA(림프종·뇌종양 환자 위험 평가, 2020-2024)

- **(운영 체계)** Euratom Supply Agency(ESA)가 방사성동위원소 공급안보 조정 기능 담당, EU 집행위원회는 노후 연구로 리스크 점검 및 신규 인프라 투자 지침 마련
 - 각 회원국은 ESA 조정 하에 연구로 운영계획, LEU 전환 일정, 공공 재정 지원 규모를 포함한 국가별 대응계획 수립
 - EU는 ENSREG과 연계해 방사성동위원소 생산시설의 안전 기준 일원화
- **(생산 인프라 및 기술 현황)** 유럽은 오랜 기간 의료용 방사성동위원소의 주요 공급 거점 역할을 수행해 왔으며 현재 Mo-99, Lu-177, I-131 등 다양한 핵종 생산 중
 - 네덜란드: HFR(Petten) 연구로를 통해 Mo-99를 공급 중이나 노후화에 대응해 PALLAS 신형 연구로를 건설 중이며 2030년 상업 운영 목표

- 벨기에: BR2 연구로와 IRE 생산시설을 중심으로 국가 차원의 공급망을 유지하고 향후 MYRRHA ADS를 활용한 의료용 핵종 생산 기능 확대 추진
- 프랑스: JHR 신형 연구로를 통해 Mo-99 공급 능력 확보를 추진하며 노후 OSIRIS 연구로 대체 계획 반영
- 폴란드: MARIA 연구로를 통해 Mo-99 및 I-131 생산을 지속하며 장기 가동 연장 프로그램 추진



| 유럽 의료용 방사성동위원소 생산 연구로(좌측 시계방향 순 NLD, BEL, FRA, POL) |

- (공급 안정화) 의료용 방사성동위원소 생산을 공공 인프라의 연장선에서 관리하며 법·기술적 측면에서 공급 안정화 조치 강화
 - 저농축 우라늄 연료(LEU) 전환과 지역 간 분산 생산체계 구축을 통해 단일 연구로 의존에 따른 공급 리스크 완화
 - PALLAS, MYRRHA, JHR 등 신규 연구로를 다국적 협력 거점으로 활용하여 중장기 수급 리스크를 단계적으로 해소하는 정책 방향 유지

2

시장·산업 동향

+ 사용후핵연료의 처분과 처리 시장·산업 동향

- 사용후핵연료 처분·처리 시장은 심층처분, 재처리, 중간저장, 해체·정화 등으로 구성된 대형 후행핵주기 산업으로 원전 전주기 비용의 10% 내외를 차지하며 장기 고성장 잠재력 보유
- 심층처분은 핀란드 Onkalo, 스웨덴 Forsmark, 프랑스 Cigéo 등 상용·실증 프로젝트를 중심으로 수십억 유로 규모의 장기 투자시장 형성
- ADSR·고속로 등 차세대 재자원화 기술은 동위원소 생산·에너지 회수 기능을 결합한 융합 산업으로 확장 중

- **(시장 규모 및 구조)** 선진국 중심의 분야별(저장, 처리, 처분, 재활용)로 산업화된 대규모 장기 인프라 산업 구조
 - 전 세계 후행핵주기 시장은 연간 수백억 달러 규모로, 사용후핵연료 저장·처리 분야가 가장 큰 비중을 차지하며 선진국을 중심으로 산업화 진행 중
 - * 미국(80~150억 달러), 프랑스(50~80억 유로)
 - **(심층처분 비용)** 심층처분 사업은 프로젝트당 30~50억 유로 규모의 대형 장기 인프라 투자로 장기간에 걸친 금융·기술 리스크 수반
 - * 핀란드: Onkalo 처분시설은 약 5,500~6,500톤 규모의 사용후핵연료를 대상으로 하며, 건설·운영·폐쇄·사후 관리를 포함한 전체 사업비가 약 30~50억 유로 수준으로 추산
 - * 스웨덴: SKB(Svensk Kärnbränslehantering AB)는 자국 사용후핵연료 및 방사성폐기물의 전 주기 관리·처분 비용을 약 1,510억 SEK(약 160억 달러)로 제시
 - **(재처리·재활용)** 프랑스 중심으로 상업적 재처리·재활용 시장 형성
 - Orano의 La Hague 재처리시설은 연 1,000~1,200톤 규모의 사용후핵연료를 처리하며 MOX 연료 생산
 - 일본 및 일부 유럽 국가는 자국 사용후핵연료 처리를 위해 프랑스 위탁 재처리 체계 활용
 - **(중간저장·캐스크)** 미국을 중심으로 민간 주도 시장이 확대되는 추세
 - 건식저장 수요 증가에 따라 Holtec 등 민간 사업자가 텍사스·뉴멕시코 지역에 중앙집중식 중간저장시설 추진 중
- **(주요국 후행핵주기 산업 모델)** 중간저장, 재처리, 재활용, 심층처분 등 기술 수준과 시장 형성, 재원 구조, 사회적 수용성 확보 전략 차이에 따라 구체화

| 국가별 후행핵주기 전략 및 산업 모델 비교 |

국가	유형	핵심 프로젝트/시설	주요 기업/기관	시장 특징
미국	중간저장·건식 저장 중심	원전 부지 저장(8만 톤 이상), HI-STORE CISF	Holtec, Orano USA, Westinghouse, Deep Isolation	연 80~150억 달러, 해체·SMR 연계 성장
프랑스	재처리, 심층처분	La Hague, Cigéo	Orano Group, ANDRA	연 50~80억 유로, 위탁재처리 글로벌 리더
스웨덴	직접 심층처분	Forsmark(KBS-3), CLAB 중간저장	SKB	160억 달러 전체 관리, 국제 모범 모델
핀란드	직접 심층처분	Onkalo (세계 최초 상업화)	Posiva Oy	KBS-3 삼중 방벽, 지역 수용성 성공
일본	위탁·자체 재처리 지연	Rokkasho(800 tU/yr, 투자 25~30조 엔)	JNFL	프랑스 위탁 지속, 경제성 논란
중국	국가주도 전주기 자립	Gansu 재처리, CFR-600 고속로	CNNC, CAS	SFR·ADSR·MSR을 축으로 한 기술 전략과 원전 확대 연계

① 미국

- (정책 구조) 상업용 영구 처분장 부재로 사용후핵연료를 원전 부지 내 습식·건식 저장시설에 분산 관리하는 중간저장 중심 후행핵주기 구조 유지
- (시장 규모 및 구조) 후행핵주기 시장은 연간 약 80~150억 달러 규모로 원전 운영사와 민간 기업이 건식저장 캐스크·중간저장·수송·해체를 분담하는 시장 주도형 산업 구조 형성
- (주요 산업체) Holtec International을 중심으로 Westinghouse, Bechtel, Fluor 등이 건식저장, 수송, 해체, 폐기물 관리 분야 핵심 사업자로 구성

* Holtec International: 사용후핵연료 건식저장, 수송용 캐스크, 원전 해체 및 폐기물 관리 분야에서 세계적인 기업

* Westinghouse Electric Company: 원전 설계와 건설 외, 사용후핵연료 습식·건식 저장, 폐기물 처리, 취급 설비, 연료 관리·해체까지 포함한 통합 서비스 수행

* Bechtel: 세계 최대 EPC(설계·조달·시공) 기업 중 하나로써 미국 에너지부(DOE)와 함께 핵폐기물 정화, 해체 프로젝트, 고준위폐기물 저장시설 건설 등 수행

* Fluor: Bechtel과 유사한 대형 플랜트·환경 정화 기업으로 원전 해체, 폐기물 처리시설, 저장시설 EPC 기업

* Deep Isolation: 방향성 시추(deep borehole) 기반 심층처분 기술을 보유한 신생 기업. 기존 광산 방식이 아닌 석유·가스 시추 기술을 응용한 고준위 폐기물 처분 시도. 소형모듈원자로(SMR) 시대를 대비한 차세대 처분기술 기업

- (산업적 특징 및 전망) 대규모 원전 폐로와 SMR 도입 확대에 따라 사용후핵연료 관리 산업은 해체·정화 산업과 결합된 장기 성장 산업 전망

② 프랑스

- (정책 구조) 사용후핵연료를 전량 재처리해 MOX 연료로 재활용하고 고준위 폐기물은 심층 지질 처분하는 폐쇄형 연료주기 정책 추진
- (시장 규모 및 구조) 후행핵주기 산업 규모는 연간 약 50~80억 유로 수준으로 Orano를 중심으로 재처리·재활용 중심의 국가 주도 산업 구조 형성
- (주요 산업체) Orano를 중심으로 재처리, MOX 연료 제조 산업 형성, ANDRA가 방사성폐기물 관리 및 심층처분 총괄
 - * Orano Group: 세계 최대 수준의 사용후핵연료 재처리·재활용 기업으로, La Hague 시설을 통해 우라늄·플루토늄 회수와 MOX 연료 생산을 수행하며 고준위폐기물의 부피와 방사 위해성저감 실현
 - * 프랑스는 유럽 다수 국가와 일본의 사용후핵연료를 대상 위탁 재처리 대표 국가
- (산업적 특징 및 전망) Cigéo 프로젝트 추진과 함께 유럽 및 일본을 대상으로 한 위탁 재처리 허브로 기능하며 고부가가치 재자원화 산업 경쟁력 유지

③ 스웨덴

- (정책 구조) 재처리를 배제하고 중간저장 후 심층 지질 처분을 원칙으로 하는 직접 처분 정책을 채택하며 원전 운영사 출자 회사인 SKB가 관리 전반을 총괄
- (시장 규모 및 구조) 상업 시장은 제한적이나, Forsmark 처분장 건설·운영을 중심으로 전 주기 비용 160억 달러 수준의 장기 공공 인프라 투자 시장 형성
- (주요 산업체) SKB가 중간저장(CLAB), 캡슐화 시설, 심층처분장을 일괄 운영하는 단일 사업자 구조
- (산업적 특징 및 전망) 민간 수익 시장보다는 국가 재원 기반의 장기 처분 인프라 산업이 지속되는 구조로, 안정성·지속성이 중시되는 국제 모범 모델

④ 핀란드

- (정책 구조) 재처리 없이 사용후핵연료를 전량 직접 처분하는 정책을 채택하고 Posiva Oy가 처분 사업 전담
- (시장 규모 및 구조) Onkalo 심층처분장 건설·운영을 중심으로 총 사업비 약 30~50억 유로 규모의 프로젝트 기반 시장 형성
- (주요 산업체) Posiva Oy 단일 주체가 처분장 설계·건설·운영 수행.
- (산업적 특징 및 전망) 세계 최초 상업용 심층처분 구현 사례로 기술·운영 노하우의 향후 국제 시장에서의 활용 가능성이 산업적 강점으로 작용

⑤ 일본

- (정책 구조) 재처리를 기본 정책으로 유지하되, 사용후핵연료의 상당 부분을 프랑스에 위탁 재처리하는 구조 지속
- (시장 규모 및 구조) 재처리·MOX 관련 누적 투자액은 약 25~30조 엔, 연간 시설 유지·운영비는 약 4,000~6,000억 엔 수준으로 고비용·저효율 구조
- (주요 산업체) JNFL(Rokkasho 재처리시설)를 중심으로 재처리·MOX 인프라 보유
- (산업적 특징 및 전망) 가동 지연으로 산업 수익성 확보에는 제약이 있으며 향후 정책 방향에 대한 검토가 지속되는 과도기적 시장

⑥ 중국

- (정책 구조) 핵연료 전주기 자립을 국가 전략으로 설정하고 CNNC를 중심으로 통합 운영 구조 구축
- (시장 규모 및 구조) 원전 확대와 함께 후행핵주기 분야에 국가 주도의 수십억 달러 규모 장기 투자 시장 형성
 - * 재처리·저장·고속로·ADS 실증 포함, 단일 프로젝트 단위 수십억 달러 수준
- (주요 산업체) CNNC가 재처리·저장·고속로 실증을 총괄하는 국가 단일 주체 구조
- (산업적 특징 및 전망) 기술 자립과 장기 산업화를 지향하는 전략적 투자 시장으로 중장기 성장 가능성 보유

방사성동위원소의 글로벌 시장과 공급 구조

- 글로벌 의료용 방사성동위원소 시장은 2025년 기준 약 70~80억 달러 규모로 암·심혈관 질환 증가와 표적방사선치료 수요 급증으로 2030년대 140~170억 달러로 연평균 8~10% 성장할 전망
- 진단용(Tc-99m, F-18, Ga-68)과 치료용(Lu-177, Ac-225, I-131) 핵종 중심으로 PET/CT·PRRT 시장이 확대되며 공급은 소수 연구로 의존 구조에서 비원자로·가속기 기술로 재편 중

| 국가별 방사성동위원소 생산 및 공급 현황 |

국가·지역	시장 점유율	핵심 핵종	주요 생산시설	공급 특징
유럽	70%	Mo-99, Lu-177, I-131	HFR(Petten), BR2, MARIA	연구로 중심, PALLAS 신로 건설
미국	15%	Mo-99, At-211, Ac-225	SHINE, NorthStar(비원자로)	LEU·가속기 전환 가속화
캐나다	10%	Mo-99	NRU(폐쇄), 신규 계획	과거 30%→현재 축소
러시아	3%	Mo-99, I-131	RIAR 연구로	HEU 지속, 제재 영향
아시아	2%	I-131, P-32	일본, 한국 연구로	지역 수요 충족 한계

* Curium, ITM, Novartis: Lu-177 치료제 상용화 선도, Ac-225 공급망 구축 중

* SHINE Technologies (미국): 비원자로 Mo-99 상용화(2026 목표), 연 7,000 6-day Ci 생산

* PALLAS (네덜란드): HFR 대체 신행 연구로, 2030년 Mo-99 25% 공급 목표

- **(글로벌 시장 규모 및 주요 동위원소)** 글로벌 의료용 방사성동위원소 시장은 치료용 핵종 수요 확대를 중심으로 고성장 지속
 - **(시장 규모 및 성장)** 2024년 67억 달러에서 2034년 144억 달러로 연 7.5~9.2% 성장 전망, Lu-177 치료제 시장 단독 20억 달러 돌파 예상
 - 진단용: Tc-99m(Mo-99 모체, 시장 45%), F-18, Ga-68(PET용 제너레이터 급증)
 - 치료용: Lu-177(PSMA 치료제), Ac-225(알파방출체), I-131, Y-90, Ho-166
- **(글로벌 공급 구조)** 노후 연구로 중심 구조에서 비원자로·가속기 기반 생산과 기업 주도 공급망 전환
 - **(연구로 중심 공급망)** HFR(네덜란드), BR2(벨기에), MARIA(폴란드), SAFARI-1(남아공) 등 5개 연구로가 Mo-99 95%, Lu-177 대부분 공급, 평균 가동연수 50년 초과로 공급 리스크 존재
 - OECD/NEA HLG-MR(2025 최신 보고서): LEU 전환 지연, PALLAS·SHINE 등 신규 시설 필요성 강조
 - **(신형 비원자로·가속기)** SHINE·NorthStar(미국 Mo-99), ITM(독일 Ac-225 가속기), Telix(호주 Lu-177) 등 상용화 가속화로 연구로 의존도 완화 추진
 - **(기업 공급망)** IRE·Curium·NRG가 Mo-99·Lu-177 생산, Novartis·ITM·Telix가 치료제 상용화 및 공급망 주도
- **(주요국 시장 및 공급 구조)** 주요국 의료용 방사성동위원소 시장은 치료용 핵종 수요 확대와 함께 국가별로 상이한 공급 인프라와 기업 중심 공급망 구축

① 미국

- **(시장 동향 및 수요)** Lu-177·Ac-225 치료용 수요 폭증, 국내 시장 15억\$ 이상으로 급성장 중
- **(공급 인프라 및 생산)** SHINE·NorthStar 비원자로 Mo-99(2026 상용화), ORNL·LANL 가속기 At-211·Ac-225 생산 확대
- **(기업 및 공급망)** Novartis·Eli Lilly 제약사 생산·조달 체계 구축, Cardinal Health 유통망 강화

② 유럽연합

- **(시장 동향 및 수요)** Mo-99·Lu-177 글로벌 공급 허브 역할, 영국, 독일 중심 치료제 개발 선도
- **(공급 인프라 및 생산)** HFR(Petten, 네덜란드, Mo-99), BR2(벨기에, Lu-177), MARIA(폴란드, I-131), PALLAS 신로 건설(네덜란드, 2030 목표)
 - * 네덜란드는 HFR 원자로의 노후화를 대비하여 PALLAS 원자로 구축 중
 - * 영국과 EU 제약사들이 루테튬 계열 치료제, 알파 치료제 개발을 주도하고 있음

- (기업 및 공급망) IRE, NRG, Curium가 의료용 방사성동위원소의 글로벌 생산을 담당하고 Novartis, ITM이 이를 기반으로 치료제 개발과 상용화 주도
- * IRE(벨기에, Mo-99·Lu-177 생산), NRG(네덜란드, HFR 기반 Mo-99 공급), Curium(IRE(벨기에) - Curium(프랑스) 합병, 글로벌 생산)
- * Novartis(스위스 글로벌, Pluvicto Lu-177 치료제 상용화), ITM(독일, Ac-225·Lu-177 치료제 개발)

| 유럽 방사성동위원소생산용 원자로 및 생산되는 동위원소 |

원자로	국가	생산 동위원소
HFR (High Flux Reactor)	네덜란드	Mo-99, I-131, Lu-177, Y-90
BR2 (Belgian Reactor 2)	벨기에	Mo-99, I-131, Lu-177, Y-90, Ac-225
MARIA Reactor	폴란드	Mo-99, I-131, Lu-177, Y-90
LVR-15 Reactor	체코	Mo-99, I-131, Lu-177
FRM II	독일	Lu-177, Y-90
ILL High Flux Reactor	프랑스	Ac-225, Bi-213

③ 일본

- (시장 동향 및 수요) 국내 핵의학 수요 충족 중심, At-211 등 차세대 핵종 개발 초기 단계
- (공급 인프라 및 생산) JRR-3 연구로 제한적 생산, 오사카대 RCNP 사이클로트론 At-211 생산 시작
- (기업 및 공급망) JAEA 중심 국내 공급 체계를 기반으로 해외 수입 구조 개선 추진

④ 중국

- (시장 동향 및 수요) 핵의학 및 방사선치료 시장의 고성장세를 바탕으로 아시아와 일대일로 (Belt and Road Initiative) 국가들을 대상으로 수출 목표 설정
- (공급 인프라 및 생산) CNNC Qinshan 원전 내 Lu-177·C-14 상업 생산시설 가동, CIAE 연구로 보완
- (기업 및 공급망) CNNC 국가 전략 산업 육성, 자체 공급망 구축으로 수입

❖ 사용후핵연료 관리 및 동위원소 생산에서의 핵데이터의 중요성

- 사용후핵연료 관리와 방사성동위원소 생산은 핵데이터(단면적, 붕괴 데이터, 감마선 스펙트럼 등)의 정밀도에 직접 의존하며, 데이터 불확실성은 안전성·경제성·환경 리스크 증대
- 핵데이터는 원자로 차폐설계, 잔열 계산, 동위원소 수율 최적화, ADSR 핵변환 효율 등 전 과정에서 필수적이며 국제 협력 및 고정밀 실험데이터 확보가 후행핵주기 산업 경쟁력 핵심

- 사용후핵연료 처리·처분에서는 핵반응 단면적과 붕괴 데이터, 평가 핵데이터 라이브러리가 임계도·잔열·독성 및 장기 안전성 평가의 핵심 근거
- (핵반응 단면적) 중성자에 의한 (n, γ) , $(n, \text{fission})$, $(n, 2n)$ 등 단면적은 핵연료 연소도, 임계도 계산, 잔열·독성 평가에 직접적 영향을 미침
 - 핵분열생성물 및 마이너 악티나이드 붕괴 데이터는 열발생 곡선, 방사선원 항목, 장기 방사선 위험성 평가에 필수

- (장기 안전성 평가) 장수명 핵종(C-14, I-129, Tc-99, Np-237 등) 정밀 데이터는 수십만 년 규모 처분장 안전성 평가, 지하수 이동성 모델링에 요구
- (데이터 라이브러리 활용) ENDF/B, JEFF, JENDL, CENDL, ROSFOND 등 평가 핵데이터 라이브러리가 임계도 벤치마크, 저장시설 안전해석, 심층처분 안전성 평가에 직접 적용
- 표적 핵종의 선택적 생성과 부산물 억제를 통한 수율·순도 관리가 방사성동위원소 생산 필수 요소
 - (생산 수율 최적화) 타겟 물질·불순물에 의한 (n, γ) , (γ, n) , (p, n) , (d, n) 등 핵반응 단면적이 동위원소 제품 수율 결정, 불순물·원치 않는 방사선원 최소화 핵심
 - Lu-177, Ac-225 등 치료용 동위원소 생산 시 순도 확보를 위해 고에너지 중성자·양성자 정밀 핵데이터 필수
 - (반응 경로 선택) 특정 동위원소만 선택적 생산하고 유사 핵종 부산물을 최소화하기 위해 고정밀 핵반응 경로 데이터 요구

3

기술개발 동향

✚ 고준위폐기물 처리 기술과 핵데이터 연구

- 고준위폐기물 처리와 방사성동위원소 생산 기술은 핵데이터 정밀화, ADS·고속로 핵변환 시스템, 고출력 가속기, 고성능 시뮬레이션 등 융합 기술개발 및 적용 가속화
- 핵데이터 불확실성 해소와 실험-모델-기계학습 연계 평가체계 구축이 핵심 과제로 부상하고 있으며 MYRRHA·China-ADS 등 국제 프로젝트를 중심으로 복합 기능 실증 진행 중

- **(주요 기술개발 동향)** ADS·고속로 핵변환 기술과 전산모델링 정교화를 통한 장수명 핵종 소멸 및 핵설계 고도화
 - **(핵변환 시스템)** ADS와 고속로가 (n, γ) , (n, f) , (n, xn) , (n, α) 등 중성자 핵데이터에 의존해 장수명 핵종(Am-241, Cm-244 등) 소멸과 에너지 생산 동시 추구
 - 맞춤형 중성자빔·고감도 감마/중성자 계측기술 발전으로 반응단면 측정 정확도 향상
 - **(전산 모델링)** EMPIRE·TALYS·CoH3 핵반응모델 정교화, MCNP·PHITS·FLUKA Monte Carlo 시뮬레이션이 ADS 핵설계·핵변환을 예측 핵심 도구로 활용
- **(주요국 대표 프로젝트)** 주요국은 핵변환·장수명 핵종 소멸·연료주기 연계 기술의 실증을 목표로 관련 프로젝트 추진
 - 유럽(MYRRHA, 벨기에): 중성자 표적-LBE 냉각재, 고전류 초전도 선형가속기, 연속빔 운전 안정도 연구 중심, 2026년 Phase 1 실증 목표
 - 중국(China-ADS): 초전도 RF 장치·고신뢰도 빔 가용률·고강도 스퍼레이션 표적 자립, Huizhou 실증시설에서 LBE 열수력·빔 전송 통합 시험 진행 중
 - 일본(RIKEN RIBF): ImPACT 프로그램 통해 핵변환·자원재활용 실증, 고속중성자 영역 데이터 확보 기반 제공
 - 미국(DOE SFWST): 사용후핵연료 저장·운반·처분 R&D 로드맵 수립, EBS(Engineered Barrier System) 모델링 및 장기 안전성 평가 기술 개발
 - 프랑스(ASTRID): 마이너 악티나이드 연소와 MOX 연료 재활용 기술 실증, GEN-IV 국제포럼 핵심 프로젝트로 재처리-고속로 연계 폐기물 감용 체계 최적화 추진
 - 러시아(MBIR): BN-800 연계 장수명 핵종 소멸 실증로로, 고속중성자 스펙트럼 활용 핵변환 효율 검증. 2026년 가동 목표로 VVER 폐기물 처리와 수출로 안전성 확보 기술 개발 동시 진행

방사성동위원소 생성과 핵데이터 연구

- **(핵데이터 라이브러리 개발 현황)** 고속로·융합·동위원소 응용 확산에 대응한 핵데이터 라이브러리 고도화와 해석코드와 연계된 산업·서비스 기반 형성
 - **(글로벌 업데이트 동향)** 고온가스·고속로·융합·우주·동위원소 응용 확대에 대응, ENDF/B-VIII.1 (2024), JENDL-5(2021), CENDL-3.2 (2020), ROSFOND-2020.2 등 최신 버전 릴리스
 - 공공 핵데이터 라이브러리를 기반으로 MCNP, SCALE, CASMO 등 상용 해석코드 및 기술 서비스 시장이 형성되어 있으며, 수억 달러 규모로 성장
- **(국가별 핵데이터 전략)** 공공 라이브러리의 지속적 고도화와 국제 공동 벤치마크·검증 협력을 통해 해석 신뢰성과 산업 활용성 확보
 - **(라이브러리 개발 현황)** 핵데이터는 공공재 성격으로 각국 국가 차원에서 개발·유지되며 상용 해석코드·서비스 시장은 수억 달러 규모로 추정
 - * ENDF/B-VIII.1(2024, 미국), JENDL-5(2021, 일본), CENDL-3.2(2020, 중국), ROSFOND-2020.2 (러시아), JEFF-3.3(유럽) 등 최신 버전 업데이트 지속
 - **(협력 체계)** OECD/NEA WPEC를 통해 각 라이브러리 그룹이 공동 벤치마크 수행 및 개선 과제 도출, 실험 검증 협력 추진

| 국가별 기술개발 및 핵데이터 전략 비교 |

국가	대표 프로젝트	핵심기술	핵데이터 라이브러리	주요 기관
벨기에	MYRRHA	LBE 냉각재·고전류 LINAC·연속빔	JEFF-3.3/4.0	SCK CEN, CEA·NRG
중국	China-ADS (Huizhou)	초전도 RF·스퍼레이션 표적·LBE 열수력	CENDL-3.2(2020)	CNDC(CIAE), CNNC
일본	RIKEN RIBF (ImPACT)	고속중성자 핵데이터·핵변환 실증	JENDL-5(2021)	JAEA
미국	DOE SFWST	EBS 모델링·저장·처분 R&D 로드맵	ENDF/B-VIII.1(2024)	NNDC(BNL), NNSA
프랑스	ASTRID (소듐고속로)	MA 연소·MOX 재활용	JEFF-3.3/4.0	CEA
러시아	MBIR 고속로	BN-800 연계 장수명 핵종 소멸	BROND-3.1/ ROSFOND-2020.2	IPPE, ROSATOM

4

국제협력 동향

주요 선진국들은 사용후핵연료 관리와 방사성동위원소 생산 분야에서 GEN-IV, ESFRI, NEA 등 국제협력 프레임워크를 통해 기술개발 및 공급안정화 추진

- 사용후핵연료 관리와 방사성동위원소 생산 분야 국제협력은 고속로·ADSR 기술개발, 핵데이터 공동측정, 공급망 안정화 중심으로 확대되며 EU 플랫폼과 OECD/NEA 체계가 핵심 역할 수행
- IAEA·NEA를 통한 공공재 공유와 GEN-IV 포럼 등 다자간 협력이 기술 표준화와 공급 리스크 완화에 기여

| 사용후핵연료·동위원소 국제협력 현황 |

분야	협력 형태	참여국	핵심프로젝트	주요 내용
고속로, 핵변환	다자	GEN-IV 14개국 (GIF)	ASTRID, MBIR	고속로 핵변환 기술 표준화 및 공동 R&D(10억 달러 규모)
고속로		러시아-프랑스-미국	MBIR, ASTRID, ARC-100	BN-800 연계 장수명 핵종 소멸 기술 표준화
ADSR	양자	중국-벨기에	China-ADS, MYRRHA	LBE 냉각재·고전류 LINAC 기술교류
ADSR, 핵데이터	다자	일본-EU-미국	ImPACT, RIKEN RIBF	고속중성자 핵데이터 워크숍
동위원소 공급		유럽-미국-남아공-캐나다	HLG-MR(NEA)	Mo-99 LEU 전환 로드맵 (80% 목표)
동위원소 공급망		유럽-미국-캐나다	ESA(Euratom)	IRE·Curium 등 생산자와 Cardinal Health 공급망 연계, 공급 중단 대응 프로토콜
핵데이터		IAEA 50여국	Nuclear Data Section	ENDF/B·JEFF 등 라이브러리 국제 배포 및 실험데이터 공유 네트워크 운영
핵데이터		OECD/NEA 30개국	WPEC	불확실성 정량화, 신규측정 우선순위화
인프라 투자		ESFRI 7개국	MYRRHA, PALLAS	고준위폐기물·의료동위원소 생산 인프라 EU 공동투자(50억 유로)

❖ 사용후핵연료 관리 분야 협력

- (고속로·핵변환 기술 개발 협력) 고속로 기반 핵변환 기술을 중심으로 한 장수명 핵종 소멸 공동 연구개발
 - (프랑스-미국-일본-러시아-캐나다) 프랑스 ASTRID(소듐고속로)는 GEN-IV 국제포럼(GIF, 14개국 참여)을 통해 마이너 악티나이드(MA) 연소·MOX 재활용 기술 공동 R&D 추진, 2025년 기준 공동 로드맵 3차 업데이트 완료.
 - (러시아-프랑스-미국) 러시아 MBIR 고속로는 프랑스 ASTRID, 미국 ARC-100과 BN-800 연계 장수명 핵종 소멸 기술 표준화 협력, 고속중성자 스펙트럼 데이터 공유 체계 운영 중
- (ADSR 프로젝트 간 기술교류) 고속중성자 핵데이터와 핵변환 실증 정보를 중심으로 국제 공동 워크숍·플랫폼을 통해 추진
 - (중국-벨기에) 중국 China-ADS는 벨기에 MYRRHA와 LBE 냉각재, 고전류 LINAC 기술교류 시도했으나 정부주도 특성상 제한적, MYRRHA는 ESFRI 지정 EU 플랫폼으로 14개국 60여 기관 참여(벨기에 40% 예산, EU·EIB 투자)
 - (일본-EU-미국) 일본 ImPACT는 RIKEN RIBF 중심으로 EU JRC-Geel, 미국 ORNL과 고속중성자 핵데이터·핵변환 실증 정보교류, 연 2회 워크숍 정례화

❖ 방사성동위원소 생산·공급망 협력

- (공급 안정화 및 LEU 전환 협력) Mo-99 공급 안정화와 LEU 전환 가속을 위한 연구로·비원자로 생산자와 유통 주체 간 다자 협력 체계 운영
 - (유럽-미국-남아공-캐나다) OECD/NEA HLG-MR를 통해 네덜란드 HFR, 벨기에 BR2, 미국 SHINE, 남아공 SAFARI-1 운영사 간 Mo-99 95% 공급 안정화 로드맵 공동수립, 2025년 LEU 전환 80% 달성 목표
 - (유럽-미국-캐나다) Euratom Supply Agency(ESA)가 IRE(벨기에), Curium(유럽), NRG(네덜란드) 등 생산자와 미국 Cardinal Health, 캐나다 공급망 연계, 주기적 공급 중단 대응 협의체 운영

❖ 핵데이터 평가 국제협력

- (공동실험 및 벤치마크 체계) IAEA와 OECD/NEA 주도로 핵데이터 국제 검증과 불확실성 정량화 수행
 - (IAEA 50여국) IAEA Nuclear Data Section이 ENDF/B·JEFF·JENDL·CENDL 등 라이브러리 국제 배포·검증 지원, 실험데이터 공유 네트워크(INDEN) 운영

- (OECD/NEA 30개국) WPEC가 100여 전문가 참여로 벤치마크·불확실성 정량화·신규측정 우선순위화, ADS·고속로 핵심 데이터 국제 검증 수행
- **(다자간 협력 프레임워크)** GEN-IV와 ESFRI를 중심으로 고속로·핵변환 기술과 동위원소 인프라의 다자 협력 체계 구축
 - (GEN-IV 14개국, GIF) ASTRID·MBIR 등 고속로 핵변환 기술 표준화, 공동 R&D 예산 10억 달러 규모
 - (ESFRI 7개국) MYRRHA·PALLAS 등 폐기물·동위원소 인프라 EU 공동투자 50억 유로

III 국내 동향

1 정책 동향

원자력 안전·규제 혁신 정책

- (정책 방향) 안전성 확보와 기술혁신 가속화를 균형있게 추진하는 규제체계 고도화
 - 과학적 근거 기반의 리스크 평가 및 기술기반 규제체계 전환 추진
 - 신형 원자로, SMR, 핵주기 기술 개발에 대응한 맞춤형 심사·인허가 기준 마련
 - 규제기관 전문역량 강화 및 디지털 기반의 기술검증·평가 체계 확립

원자력 연구개발 정책

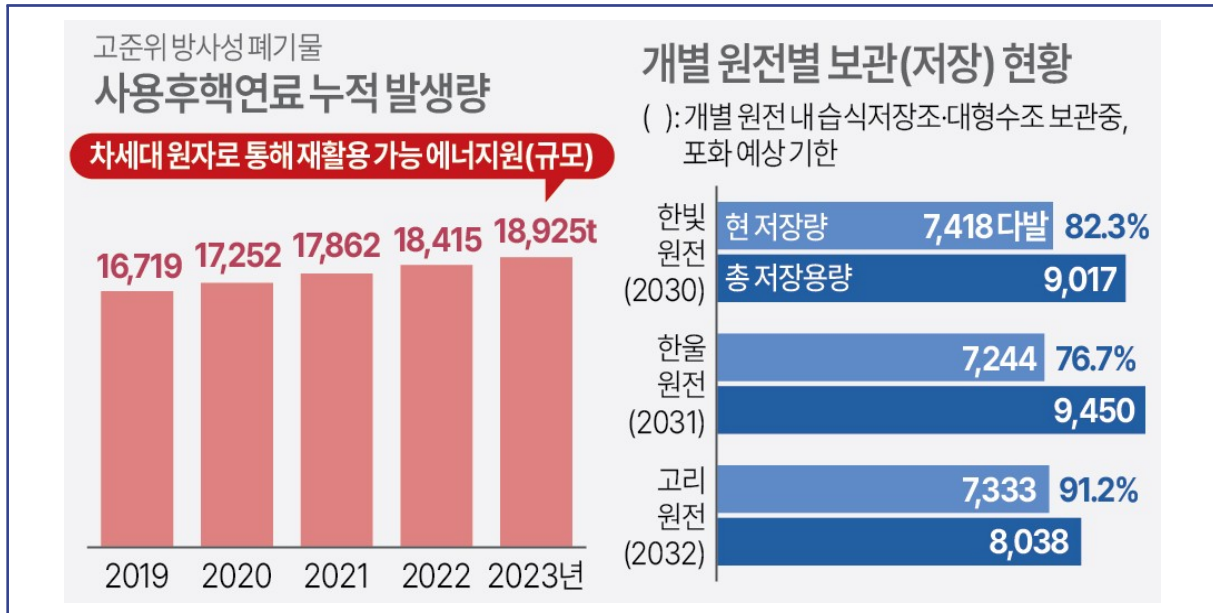


| 국내 26기 원전 배치 및 저장시설 현황(2025년 6월 기준, 출처: 환경운동연합) |

- **(정책 방향)** 원자력 기술의 전략적 자립화 및 글로벌 경쟁력 확대
 - 안전·청정 원자력 기술을 기반으로 차세대 원전 및 핵연료주기 기술 확보 추진
 - 기술자립을 통한 원전 생태계 복원과 민간 주도의 산업 경쟁력 재확립 필요
 - 주요국 연구기관·국제기구와의 협력을 통한 공동실증프로그램 강화
 - 고급 연구인력 양성 및 국제공동연구 확대를 통한 기술 리더십 확보 추진
- **(핵주기 기술 자립화)** 사용후핵연료 감용, 고효율 핵연료 개발, 파이로·SFR 연계 연구 지속 추진(연간 약 1조 원 내외의 투자 규모)
 - 파이로·SFR 통합 연구단 운영, 실증 연구시설(PRIDE) 중심의 기술 고도화 추진
 - 핵주기 기술 자립화 로드맵 수립 및 실증 단계별 운영체계 정비
- **(차세대 원자로 기술개발)** 국산 SMR 설계 인증 및 상용화 기술 확보 추진
 - '24년 정부-민간 공동개발 착수, '30년대까지 SMR 설계 인증 및 실증 착수 목표
 - 수출형 표준설계 확보 및 현지 인허가 지원체계 마련
 - 해외 파트너국과 공급망 협력체계 구축을 통한 글로벌 시장 진출 기반 마련
- **(연구 인프라 확충)** 주요 연구시설 현대화 및 인력양성 추진
 - 원자력연구원 중심 실증용 핵심설비 개선, 전문 연구인력 양성체계 구축
 - 산학연 연계 인프라 고도화 및 공동연구 기반 확충

+ 사용후핵연료 및 폐기물 관리 정책

- **(정책 방향)** 재처리 없는 직접처분 원칙 유지와 관리체계 고도화 추진
 - 한미원자력협정에 따른 직접처분 정책 지속, 중간저장 후 심층처분 원칙 유지
 - 정책 일관성과 사회 수용성 강화를 위한 제도적 기반 확립 필요
- **(관리 기본계획)** 사용후핵연료 관리 기본계획('24) 수립 및 단계별 로드맵 제시
 - '30년까지 중간저장 부지 선정·착공, '60년까지 최종 처분장 운영 목표
 - 연간 750톤 발생량 대응 중간저장 용량 3만 톤 확보 계획
- **(저장시설)** 발전소 내 저장시설 포화에 따라 중간저장시설 도입 필요성 확대
 - 누적 사용후핵연료 발생량 약 2만 톤 수준으로 증가, 습식 저장 풀(약 28,000 Assembly 기준) 80% 이상 포화



| 사용후핵연료 발생량·원전별 저장 현황(2025년 2월, 출처: 한국경제인협회) |

- 경수로는 습식 저장 이후 건식 저장 전환 방안 검토 중이며, 중수로는 건식 캐스크 기반 저장체계 운영 중
- 중간저장시설 도입을 위해 지역 수용성 확보와 연계한 사회적 협의체 운영 필요
- (파이로프로세싱) 재처리 상업화 보류, 연구개발 중심의 저감기술 지속 추진
 - 1997년 이후 파이로, SFR 폐연료 저감기술 국가 R&D 추진
 - 2015년 한·미 원자력협정 개정으로 파이로프로세싱 공동연구 허용
 - PRIDE 시설(연 10tU) 기반 실증 연구 수행 및 후속 협력 검토 중
- (현황 및 과제) 중간저장 및 영구처분 부지 확보 난항, 사회적 합의 필요
 - 장기 관리 로드맵의 현실성 확보와 주민참여형 절차 설계 필요

❖ 방사성동위원소 생산·이용 정책

- (정책 방향) 의료·산업용 동위원소 생산 기반 강화 및 국산화 추진
 - 첨단 RI 생산 기술 확보를 통한 자립적 공급망 구축 필요
 - 민간 산업 참여 확대를 통한 산업화 가치사슬 확립 추진
- (생산기반 현대화) HANARO 연구로 기반 RI 생산시설 개선 추진
 - 노후 설비 교체 및 신규 RI 품목 개발
 - 국내 연구소 중심의 생산 체계 고도화 추진

- **(첨단 RI 국산화)** 루테튬-177 등 치료·진단용 첨단 RI 생산 기술개발 확대
 - 국산 동위원소의 임상·의료 적용 확대를 위한 R&D 지속 추진
- **(공급망 안정화)** 원재료 확보 및 민관 RI 클러스터 구축 추진
 - 수입 의존도 완화를 위한 다원화 체계 구축 및 생산시설 확충 추진

❖ 원자력 기반 데이터·인프라 정책

- **(정책 방향)** 원자력 데이터 고도화 및 기술 인프라 체계적 확립 추진
 - 핵심 데이터를 중심으로 국제 표준과의 호환성 확보 필요
 - 데이터 기반의 원자력 기술 혁신 생태계 구축 추진
- **(핵데이터 고도화)** IAEA, OECD-NEA 등 국제 핵데이터센터와 협력 강화
 - KNTDS(한국핵데이터시스템) 기능 고도화 및 품질 검증 강화 추진
- **(기술 인프라)** 원자력연구원·한전원자력연료 중심 데이터 공유·분석체계 구축
 - 소재 시험·계측·방사선 분석 데이터 통합 플랫폼 구축 추진
- **(표준화)** 방사선 계측데이터의 국내 표준화 및 국제 상호인정 체계 구축 추진

❖ 사회적 수용성 및 제도 개선 정책

- **(정책 방향)** 주민참여 및 투명성 강화 중심의 제도 정비 추진
 - 사회적 공감대 확보를 통한 장기적 수용성 강화 필요
 - 지역 상생 및 산업전환 지원 정책과 연계한 통합형 지원체계 구축
- **(법제 정비)** ‘사용후핵연료 관리법’, ‘원자력안전법’ 개정 논의 진행 중
 - 주민참여·보상제도 도입 검토 및 절차적 투명성 확보 추진
- **(지역 상생 추진)** 경주 고준위폐기물 연구시설 사례를 참고한 지역 협의체 기반 상생 모델 구축
 - 원전 지역(울진·영광 등)을 중심으로 주민 참여형 수용성 제고 프로그램 운영
- **(정책 투명성 강화)** '25년 중간저장 부지 후보지 공개 및 공청회 추진

2

시장·산업 동향

❖ 사용후핵연료 시장 규모 및 산업

- **(사용후핵연료 시장 규모)** 국내 사용후핵연료 시장은 원전 부지 내 저장 운영을 중심으로 형성, 중간저장·심층처분 도입 시 확대 전망
 - 국내 사용후핵연료 시장은 원전 부지 내 습식·건식 저장 운영을 중심으로 연간 약 5,000~7,000억 원 규모 형성
 - * 주요 비용 항목은 습식 저장 풀 운영비(연 약 2,000억 원), 건식 저장 캐스크 제작·운영비(연간 약 100기, 기당 약 50억 원), 운반용기 및 취급·감시 시스템 비용 등으로 구성
 - 중간저장시설 및 심층처분 사업이 본격화될 경우 연간 2~3조 원 수준의 시장 확대 가능
- **(사용후핵연료 산업 구조)** 저장시설 설계·제작·운영과 안전해석·유지관리 중심의 발전소 부지 연계형 산업 구조
 - 저장시설 설계·제작·운영, 안전해석 및 규제 대응, 계통 유지·정비 중심으로 구성되어 있으며, 발전소 부지 내 저장 중심의 관리 산업이 주를 이룸
 - 두산중공업, 한전KPS, 한국원전기술 등은 저장 설비 제작, 유지·보수, 안전성 평가 및 기술 지원 분야에 참여 중
- **(산업적 특징 및 전망)** 단기 저장 중심 산업 지속, 중장기적으로 중간저장·처분 인프라 구축 여부가 산업 확장 핵심 변수
 - 파이로프로세싱 및 고속로 연계 기술이 상업화될 경우 후행핵주기 산업의 구조적 확대가 가능하나 현재는 경제성·비확산 이슈로 R&D 단계 한정
 - 단기적으로는 저장·관리 중심 산업이 지속되며 중장기적으로는 중간저장 및 처분 인프라 구축 여부가 시장 확대의 핵심 변수로 작용

❖ 방사성동위원소 시장 규모 및 산업

- **(방사성동위원소 시장 규모)** 의료용 수요가 주를 이루는 소규모 시장
 - 국내 방사성동위원소 시장은 연간 약 6,000~8,000억 원 규모로 추정되며 의료용이 약 80%(4,500~6,000억 원) 차지
 - * 산업용은 약 1,000억 원, 연구용은 약 300~500억 원 수준으로 형성
 - 의료용 동위원소는 고령화, 암 진단·치료 수요 증가가 성장 요인으로 진단(Tc-99m, F-18)과 치료(I-131, Lu-177, Y-90)를 중심으로 연평균 약 5% 수준 성장 전망
 - * 미국의 방사성동위원소 시장은 약 10조 원, 일본은 약 2조 원 규모로, 우리나라는 일본의 약 30~40% 수준에 해당

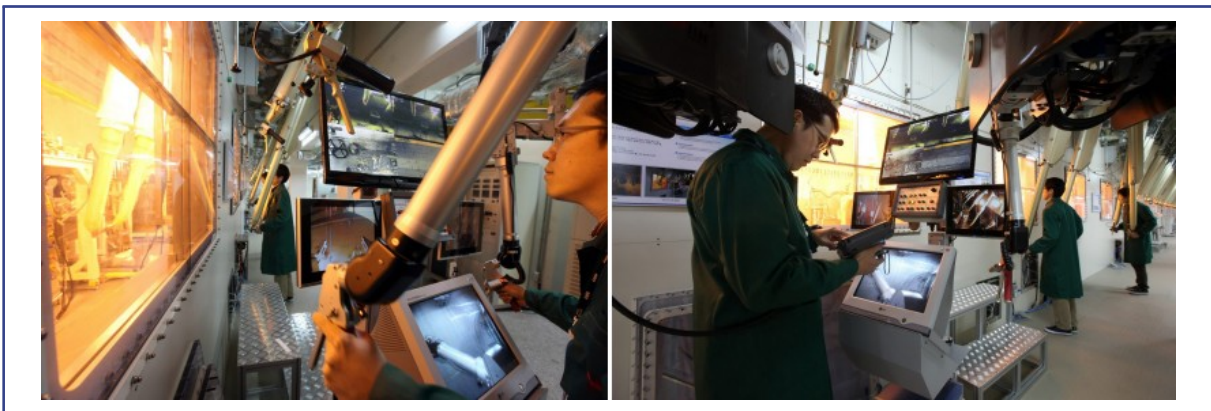
- **(생산 인프라)** 국내 방사성동위원소 생산은 HANARO 연구로를 기반으로 일부 핵종을 공급 중이며 KJRR 가동을 통해 대량 생산 인프라 확충 추진 중
 - HANARO 연구로를 통해 P-32, I-131, Lu-177 등 총 17종의 동위원소를 연간 약 1,000 Ci 생산
 - KJRR 연구로(2028년 완공 예정)는 Mo-99, Ir-192 등 대량 생산 체계 구축 추진 중
 - 전체 수요의 약 70% 수입 의존, Tc-99m 국산화율은 약 30%, F-18은 약 80% 수준
- **(주요 산업체 및 구조)** 의료용 진단·치료와 산업용 비파괴검사 응용을 중심으로 산업 구조 형성
 - (의료용) 원자력의학원, 대형 병원 PET 센터, 제약·바이오 기업이 진단·치료용 제제 생산, 유통 담당
 - (산업용) 두산중공업, 한전KPS 등이 Ir-192 기반 비파괴검사(NDT) 및 Co-60 관련 응용 사업 수행
- **(산업적 특징 및 전망)** 공급 안정성과 국산화 수준이 경쟁력을 좌우하며 치료용 고부가가치 동위원소와 신형 연구로가 성장 축
 - 방사성동위원소 산업은 공공 연구 인프라와 민간 의료·산업 수요가 결합된 구조로 공급 안정성과 국산화 수준이 핵심 경쟁 요소로 작용
 - 신형 연구로 가동과 치료용 고부가가치 동위원소(Lu-177·Ac-225) 확대가 향후 시장 형성의 중심축으로 작용
 - 글로벌 치료제 시장 확대 속 2030년 자급률 100% 목표로 고부가가치 산업 육성 기반 마련

* 과기정통부 '방사선바이오 성과창출 전략'(2024.11.7)

3 기술개발 동향

❖ 핵연료주기 기술개발 동향(사용후핵연료 처리·처분)

- (처리) 파이로프로세싱 및 소듐고속로(SFR) 연계 기술 개발
 - 사용후핵연료의 부피 및 위해성 저감을 목표로 파이로프로세싱과 소듐고속로를 연계한 연료주기 기술을 국가 핵심 R&D로 추진 중



| 파이로프로세싱 및 PRIDE 시설 |

- 파이로프로세싱은 고순도 분리보다 연료주기 단순화와 핵종 저감에 초점을 둔 건식 처리 기술로 직접처분 정책에서 기술적 보완 수단으로 활용
- (소듐냉각고속로 개발) 한국원자력연구원(KAERI) 주도로 150MWe급 소듐냉각고속로 프로토타입 설계 및 안전성 중심 기술 개발 수행
 - 소듐 화재·누출 위험 저감을 위한 PASSIVE 안전계통 및 자연순환 냉각 기술 등 고유 안전특성 확보 기술을 중심으로 연구개발 진행 중
- (파이로 실증 인프라) 핵비확산성 파이로 건식처리 일관공정시설(PRIDE) 시설(10tU/yr 규모) 운영 통해 파이로프로세싱 공정 기술의 성능, 원격운전 및 공정 안정성 검증 수행
 - 파이로프로세싱 핵심 공정의 단계적 실증을 통해 공정 신뢰성 확보 및 향후 실증 확대 기반 마련
- (저장·처분) 심층지질처분 및 건식저장 전환 가속화
 - 고준위 방사성폐기물의 최종 관리 방안으로 심층지질처분을 기본 원칙으로 설정하고 한국원자력연구원(KAERI) 주도의 지질특성 조사 및 심층지하 연구시설(KURT)을 활용한 처분 시스템 핵심 기술 연구 수행 중
 - 발전소 내 습식 저장시설 포화로 사용후핵연료의 건식저장 방식 전환 필요성이 확대되고 있으며 원자로 유형별 특성을 고려한 단계적 전환 방안 검토 중

- 월성 중수로의 MACSTOR 건식저장 운영 경험을 기반으로, 향후 사용후핵연료 건식저장 확대를 위한 제도·기술적 검토 추진 중
- 「고준위방사성폐기물 관리에 관한 특별법」 시행(2025년)에 따라 중간저장시설은 2050년 이전, 최종처분시설은 2060년 이전 운영을 목표로 제도·기술적 기반 마련

❖ 방사성동위원소 기술개발 동향(방사성동위원소(RI) 생산 및 활용)

- **(연구로·가속기 기반 RI 생산)** 연구로 및 가속기를 활용한 의료·산업용 방사성동위원소 생산 체계 운영
 - HANARO 연구로 기반 의료·산업용 방사성동위원소 생산 지속
 - * P-32, I-131, Lu-177, Co-60 등 17종 생산(연 1,000Ci), KJRR(2028 완공) Mo-99·Ir-192 대량생산 목표
 - 사이클로트론 및 중이온가속기(RAON) 기반 RI 생산 경로 확대
 - 기존 대량생산 핵종 중심에서 고부가가치·신규 핵종 생산(Ac-225(알파치료제), Y-90(간암 치료) 등)으로 기술 범위 확장
- **(신규 핵종 및 융합 활용)** 진단·치료 융합 차세대 방사성동위원소 개발 추진
 - 치료·진단 통합(테라노스틱스)용 방사성동위원소 개발
 - 난치성 질환 치료 및 정밀 진단을 위한 신규 핵종 후보 발굴
 - 핵종 선택-분리정제-제제 공정 연계 기술 고도화
- **(공정·품질관리 기술)** 방사성동위원소 생산의 안정성과 고품질 확보를 위한 공정·품질관리 기술 개발
 - GMP 기준 충족을 위한 RI 생산 시설 및 공정 관리 기술 확보
 - 고순도 분리정제 및 품질 안정성 확보를 위한 공정 자동화 기술 개발
- **(핵데이터 및 핵변환)** 국내 핵데이터 생산은 연구로·가속기 인프라를 기반으로 단면적 측정 체계 구축과 IAEA 등재, RAON 고에너지 데이터 확보 중심 추진
 - **(국내 핵데이터 측정 인프라)** 연구로·가속기 기반 핵반응 단면적 측정 체계 구축
 - HANARO 연구로 기반 열중성자 (n, γ) 포획 단면적 측정
 - KOMAC 가속기 활용 10-100 MeV 양성자 유도 (p, x) 단면적 및 중성자 활성화 측정
 - KIRAMS MC-50 사이클로트론 기반 빠른 중성자 (n, xn), (n, x) 단면적 측정
 - 측정 데이터의 IAEA EXFOR 및 한국 핵데이터센터(KNDC) 등재
 - **(RAON 기반 핵데이터 생산)** 중이온가속기 기반 고에너지 핵데이터 생산 기술 확보
 - RAON-NDPS를 활용한 중성자 스펙트럼 측정 및 검출기 성능 검증

- 2단계 완공 이후 600 MeV 고출력 양성자 빔 기반 핵데이터 생산 여건 확보
- NDPS-2(약 100 m TOF) 구축 시 고에너지 영역 핵반응 단면적 정밀 측정 가능
- **(핵변환 핵종 연구)** 장수명 핵종 소멸을 위한 핵변환용 핵데이터 확보
 - 장수명 핵분열생성물(LLFP): Se-79, Tc-99, I-129, Cs-135/137 등 대상 핵 데이터 측정
 - 마이너 악티나이드(MA): Np-237, Am-241/243, Cm-242/244 대상 핵반응 데이터 확보
 - 고속로 및 가속기 구동 미임계로(ADSR) 설계·안전성 평가용 핵데이터 정밀화
- **(엑티베이터 기반 실험 기술)** 고출력 중성자 기반 핵반응 측정 및 활용 기술 개발
 - 엑티베이터(Activator) 장치 개발을 통한 핵반응 단면적 측정
 - 재료 특성 평가 및 방사성동위원소 생산을 포함한 다목적 실험 활용

4

국제협력 동향

❖ 핵주기 및 방사성동위원소 분야 국제협력은 파이로프로세싱·고속로·핵데이터를 중심으로 제도적 협력과 연구시설 연계 기반의 실증·표준·인력 교류 추진

| 핵주기 및 방사성동위원소 분야 국제협력 현황 |

협력 분야 및 형태	협력 대상	주요 협력 내용
제도 기반 협력	한국-미국	<ul style="list-style-type: none"> 2015년 한-미 원자력협정 개정으로 파이로프로세싱 공동연구 허용 후행핵주기 기술 협력의 제도적 기반 유지
고속로·재처리 기술 협력	KAER-ANL(미국)	<ul style="list-style-type: none"> 파이로프로세싱 기술 검증 소듐고속로(SFR) 노심설계·안전해석 코드 공동개발 수동형 안전계통·자연순환 냉각 개념 교류
	KAERI-CEA(프랑스)	<ul style="list-style-type: none"> SFR 노심설계, 소듐 화재 대응 및 안전해석 기술 교류
핵데이터 다자 협력	KAERI-IAEA(NRDC)	<ul style="list-style-type: none"> 국제 핵데이터 평가 참여, 실험 데이터 검증 및 라이브러리 기여
	KAERI-OECD/NEA(WPEC)	<ul style="list-style-type: none"> ADS·고속로 핵데이터 불확실성 평가 및 국제 벤치마크 작업 참여
핵데이터·가속기 기반 협력	KAERI/IBS-RIKEN RIBF(일본)	<ul style="list-style-type: none"> LLFP(Zr-93, Pd-107, I-129) 핵반응 단면적 공동 측정 역운동학(IF) 방식 데이터 교차 검증
	KAERI-JAEA(일본)	<ul style="list-style-type: none"> MA(^{237}Np, $^{241}/^{243}\text{Am}$, $^{242}/^{244}\text{Cm}$) 타겟 공동 확보 및 (n,γ) / (n,f) / (n,2n) 핵데이터 측정
	RAON-RIKEN RIBF(일본)	<ul style="list-style-type: none"> RAON NDPS 기반 중성자 데이터와 RIBF 실험 결과 상호 연계 활용
연구시설 연계 및 표준화	RAON-RIKEN RIBF(일본)-KAERI	<ul style="list-style-type: none"> 측정-생산-평가 역할 분담을 통한 연계형 핵데이터 협력 구조 구축
	한국-일본	<ul style="list-style-type: none"> 공동 실험 데이터의 ENDF/GND 형식 표준화 및 국제 공개
인력·장비 공동 활용	IBS-RIKEN(일본)	<ul style="list-style-type: none"> TOP-TIER 사업 기반 포스닥 파견, 단기 방문 연구, 워크숍 운영
	한국-일본	<ul style="list-style-type: none"> 검출기·타겟·DAQ 시스템 공동 설계 및 상호 활용

❖ 핵주기 및 방사성동위원소 분야 국제협력 동향

- 한-미 원자력협정 기반 협력
 - (한-미 원자력협정) 2015년 협정 개정을 통해 파이로프로세싱 공동연구 허용 범위 확대, 후행핵주기 기술 협력의 제도적 기반 유지
 - (KAERI-ANL) 파이로프로세싱 기술 검증 협력, 소듐고속로(SFR) 노심설계 및 안전해석 코드 공동개발, 수동형 안전계통 및 자연순환 냉각 개념 기술 교류
- 유럽 및 국제기구 협력
 - (한-프랑스) 프랑스 CEA와 소듐고속로(SFR) 노심설계, 소듐 화재 대응 및 안전 해석 기술 교류
 - (한-IAEA) KAERI 핵데이터센터를 중심으로 IAEA Nuclear Reaction Data Centres(NRDC) 참여, 국제 핵데이터 평가 및 벤치마크 활동 기여
 - (한-OECD/NEA) WPEC 활동을 통해 ADS·고속로 핵심 핵데이터 불확실성 평가 및 국제 벤치마크 작업 참여
 - (한-이탈리아) 이탈리아 JRC 맞춤형 중성자 액티베이터 시스템 벤치마킹을 통한 핵데이터 측정·활용 기술 교류
- 한-일 핵데이터 및 가속기 시설 기반 협력
 - RIKEN RIBF와의 협력을 통해 Zr-93, Pd-107, I-129 등 장수명 핵분열생성물(LLFP) 핵반응 단면적 공동 측정
 - RIKEN RIBF 역운동학(IF) 방식 데이터와 RAON 가속기 기반 측정 데이터의 상호 비교·보완 연구 추진
 - JAEA 협력을 통한 마이너 악티나이드(MA) 타겟 공동 확보 및 ^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am , $^{242/244}\text{Cm}$ 핵데이터 측정 협력
 - RAON NDPS 기반 중성자 핵데이터((n,γ) , (n,xn) , (n,f)) 측정 결과를 수십 keV~수백 MeV 에너지 영역에서 상호 활용
- 한-일 연구시설 연계 프로그램
 - RAON-RIKEN RIBF-KAERI 간 역할 분담을 통해 측정-생산-평가 연계형 핵데이터 협력 구조 구축
 - 공동 실험 데이터의 ENDF/GND 형식 표준화 및 국제 공개를 통한 활용성 제고
- 한-일 인력·장비 공동 활용 협력
 - TOP-TIER 사업을 중심으로 IBS-RIKEN 간 포스닥 파견, 단기 방문 연구, 워크숍 개최 등 인력 교류 추진
 - 검출기, 타겟, 데이터 수집 시스템(DAQ) 공동 설계 및 상호 활용을 통한 실험 효율성 제고

IV

결론

1

시사점

❖ 사용후핵연료 관리와 미래 원자력 시스템의 실현 가능성은 핵데이터 확보 역량에 따라 좌우되는 구조로 전환 중

- 고속로, ADSR, 핵변환 기술은 정밀 핵데이터 없이는 안전성·효율성 검증이 불가능하며 데이터 불확실성은 기술 상용화의 구조적 제약으로 작용
- 단순 저장·처분 중심 접근에서 벗어나 핵종 특성에 기반한 과학적 관리 체계 구축이 기술 경쟁력의 핵심 요소로 부상

❖ 중이온가속기 RAON의 국내 핵주기·방사성동위원소 기술 공통 기반 인프라로 전략적 가치 확대

- RAON의 고에너지·고전류 양성자빔은 스펙레이션 중성자 기반 핵데이터 생산이 가능한 국내 유일의 실험 인프라
- NDPS·TOF 기반 측정체계는 열중성자부터 고에너지 영역까지 연속적 데이터 확보를 가능하게 하여 고속로·ADSR·RI 생산 전반에 활용 가능

❖ 국제 협력 연계를 통한 핵데이터 생산·검증 체계가 기술 신뢰성과 국제 기여도의 핵심 경로로 작용

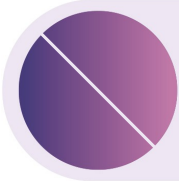
- RIKEN RIBF의 희귀동위원소 역운동학 데이터와 RAON 중성자 기반 데이터는 상호 보완적 구조 형성
- TOP-TIER 프로그램 활용으로 공동 연구, 인력 교류, 데이터 공유를 프로그램 단위로 연계하여 국제 핵데이터 라이브러리 반영 가능성 확대

❖ 핵데이터는 사용후핵연료 관리, 방사성동위원소 생산, 미래 원자력 설계를 연결하는 공통 전략 자산 기능

- MA·LLFP 핵데이터 확보는 폐기물 감용, 시스템 안전성 평가, 핵변환 효율 분석의 핵심 입력 요소
- 정밀 핵데이터 축적은 방사성의약품 생산, 고속로 노심 설계, 차세대 원자로 검증까지 파급 효과 확대

❖ RAON 기반 핵데이터 연구는 국가 핵주기 전략의 실증성과 신뢰성 확보에 핵심 역할 수행

- RAON-KAERI-RIKEN 연계 구조는 데이터 생산-평가-국제 표준 기여로 이어지는 실질적 협력 경로 제공
- 핵데이터 로드맵의 체계화는 국내 원자력 기술의 국제 경쟁력과 장기 정책 신뢰성 확보의 핵심 과제로 부각



참고문헌

1. K. N. Choo 외, "Contribution of HANARO Irradiation to RI Production and Related Research", Nuclear Engineering and Technology, 2014.
2. Ul Jae Park, "RI Production and Development at HANARO", IAEA TECDOC-1713 Supplement, 2010.
3. C. Park 외, "Current Status of the KJRR Project and its Design Features", IGORR-16 Proc.
4. S. G. Lee 외, "Progress of Kijang Research Reactor Construction for the Production of Fission ^{99}Mo ", KNS Autumn Meeting, 2020.
5. Min Jun Kim 외, "Current Trends in Cyclotrons and Radionuclide Production: A Comprehensive Analysis in the Republic of Korea", Nuclear Engineering and Technology, 2025.
6. R. J. Yoo 외, "History of Radiopharmaceutical Sciences in Korea", Korean Society of Nuclear Medicine.
7. S. O. Yang 외, "Present and Future of Theranostic Radioisotopes in South Korea", Journal of Nuclear Medicine, 2024.
8. G. S. Bodvarsson et al., "Overview of scientific investigations at Yucca Mountain—the potential repository for high-level nuclear waste," Journal of Contaminant Hydrology 38.
9. U.S. Government Accountability Office, Effects of a Termination of the Yucca Mountain Repository Program, GAO-11-229.
10. U.S. Department of Energy, Analysis of the Total System Life Cycle Cost of the Civilian Radioactive Waste Management Program, DOE/RW-0591.
11. U.S. Department of Energy, Consent-Based Siting Process for Consolidated Interim Storage of Spent Nuclear Fuel, 2023.
12. Council Directive 2011/70/Euratom, Establishing a Community framework for the responsible and safe management of spent fuel and radioactive waste, 2011.
13. Zheng et al., "Design of the CiADS timing and fast protection system", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 1082, 170907 (2026)
14. The Supply of Medical Radioisotopes: The Path to Reliability (OECD/NEA Medical Radioisotopes Series)
15. Current Trends in the Supply and Utilisation of Medical Radioisotopes (OECD/NEA, 2025)
16. Technavio, Nuclear Spent Fuel Market 2024–2028, 2024.
17. OECD/NEA, Current Trends in the Supply and Utilisation of Medical Radioisotopes, 2025.
18. Zion Market Research, Medical Radioisotopes Market 2024–2034, 2024.
19. CNNC/CAEA, Isotope Production at Qinshan and Dedicated Medical Isotope Reactors, 2024–2025.
20. NNDC, ENDF/B-VIII.1 Release Notes, 2024.

21. O. Iwamoto et al., Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 5 (JENDL-5), JNST, 60(1), 2023.
22. Z. Ge et al., CENDL-3.2: The New Version of Chinese General Purpose Evaluated Nuclear Data Library, EPJ Web Conf., 2020.
23. OECD/NEA, Nuclear Data (WPEC & Major Libraries Overview), 2020–2024.
24. G. Aliberti et al., “Sensitivity Analysis for ADS and Fast Reactors,” Annals of Nuclear Energy.
25. J. Yang et al., “Progress of the China-ADS Superconducting Linac and Accelerator System Development,” Physical Review Accelerators and Beams.
26. T. Jenni et al., “Neutron-induced reactions on actinides,” European Physical Journal A.
27. T. Siren, “Overview of Finnish Spent Nuclear Fuel Disposal Programme,” Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers.
28. Neutrons For Science Facility Overview, GANIL Technical Reports.
29. IBS CENS, “Nuclear reaction study for $^{93}\text{Zr}+p$ at 27A MeV at RIBF-RIKEN using OEDO beamline,” Institute for Basic Science.
30. S. Kunieda et al., “JENDL/ImPACT-2018: A new nuclear data library for innovative studies on transmutation of long-lived fission products,” Journal of Nuclear Science and Technology 56.
31. A. Santamarina et al., “The JEFF-3.3 Nuclear Data Library,” OECD/NEA Report.
32. Korea Nuclear Data Center Annual Report, Korea Atomic Energy Research Institute.
33. A. Stankovskiy et al., “Accelerator-Driven System MYRRHA: Engineering Design and R&D Status,” Annals of Nuclear Energy.
34. S. Deleplanque et al., “Design Progress of the MYRRHA ADS System: Accelerator and LBE-Cooled Reactor,” Nuclear Engineering and Design.
35. Posiva Oy, Final Disposal of Spent Nuclear Fuel in Olkiluoto – Cost Estimate and Programme Overview.
36. H. Wang et al., “Spallation reaction study for the long-lived fission product ^{107}Pd in the context of nuclear waste transmutation,” EPJ Web of Conferences 239.
37. R. Fujita, “Reduction and Resource Recycling of High-level Radioactive Wastes through Nuclear Transmutation: Overview and Current Progress of the ImPACT Program,” JPS Conference Proceedings 32.
38. H. Wang et al., “Nuclear Reaction Study for Long-lived Fission Products in High-level Radioactive Waste,” JPS Conference Proceedings 32.
39. RAON Facility Technical Design Report, Rare Isotope Science Project, IBS.
40. H. Sakurai, “Nuclear physics with RI Beam Factory,” Frontiers of Physics 13, 132111.
41. IBS-RIKEN, “Korea-Japan ‘One Team’ Research Project for Extreme Rare Isotope Science under the Top-Tier Program,” Joint Press Release.
42. Y. Kim, “TOPTIER 사업과 극한희귀동위원소 과학 국제협력 플랫폼,” 물리학과 첨단기술 웹진.
43. TOPTIER Coordination Group, TOP-Tier Platform in Extreme Rare Isotope Science (TOPTIER): Program Overview.

44. L. Mokhtari Oranj et al., "Cross sections of proton-induced nuclear reactions on bismuth and lead up to 100 MeV", Phys. Rev. C 95, 044609 (2017).
44. J. Y. Lee et al., "Measurements of Thermal Neutron Capture Cross Sections of Ce-136, Dy-156, and Yb-168 Nuclear Data Sheets", 119, p. 154 (2014)
45. V. Chavan et al., "Monoenergetic neutrons from the $^9\text{Be}(p, n)^9\text{B}$ reaction induced by 35, 40 and 45-MeV protons" Nuclear Physics A 1018 (2022) 122374