

2024 KNS 추계학술발표회 워크숍

핵연료전문위원회 활동 결과보서: 핵연료 기반·조성 분과(3분과)

권원택, 박재영, 서은진, 성기열, 윤종일, 이영준, 임상호, 최성열*

한국원자력학회 핵연료전문위원회 3분과

2024년 10월 23일 (수)

창원 컨벤션센터 700A



핵연료주기 분야 주요 쟁점

■ 러-우 전쟁 이후 농축우라늄 확보 문제와 한미 협력

- 2022년 러시아-우크라이나 전쟁으로 우라늄 농축 핵연료의 글로벌 공급망 불안정성 지속
- 미국을 중심으로 한 서방 국가들은 러시아 의존도를 줄이기 위한 다양한 대응책을 모색중
- 한미 협력 강화를 통한 안정적인 핵연료 공급망을 확보 시급
 - 기존 원자력 발전 운영 및 신형 소형모듈형원자로 개발 모두에 영향

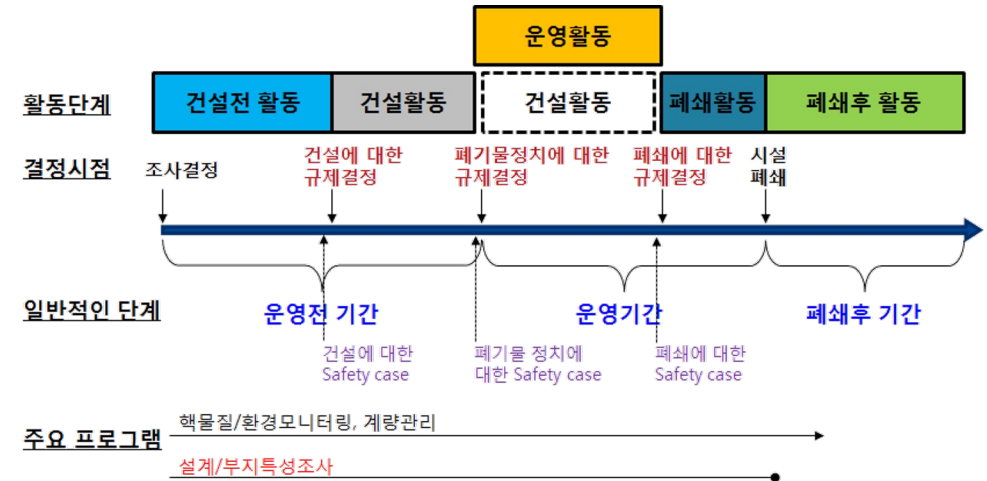
■ EU Taxonomy의 후행핵주기 무역장벽과 고준위 방사성폐기물 관리 특별법

- '22년 유럽연합(EU)에서는 원자력을 지속 가능한 녹색분류체계 (Taxonomy)에 포함하는 방안 가결
 - 단, 2050년까지 구체적인 방사성폐기물 처분시설 가동계획이 포함되는 조건
- 원전 수출의 새로운 무역장벽으로 후행핵주기 문제 대두
 - 반면, 한국은 이러한 국제적 흐름에 대응하지 못한 채 고준위방폐물 관리 특별법의 제정에 어려움을 겪고 있음

핵연료주기 분야 주요 쟁점 (계속)

■ 고준위방폐물 관리 사업의 시급성 및 장기적 중요성

- 고준위방폐물 관리 사업은 수백년 이상의 장기간이 소요되는 사업이나 그 시급성을 인정받지 못하고 있음
- 부지선정 및 건설허가에는 상당 기간이 소요될 수 있으며 미래의 안정적인 방폐물 관리를 위한 사업 착수 시급
- **규제, 제도 등의 동반 개선 필요**



■ 국내 고준위방폐물 관련 인력과 연구 인프라의 부족

- 국내 고준위방폐물 관리 관련 연구 인프라는 비슷한 규모의 원자력 발전을 운영하는 다른 국가와 비교하여 부족한 상황
 - 지하처분연구시설과 가속기 기반 첨단 원자력 실험시설, 사용후핵연료 취급 핫셀 등의 조속한 마련 필요
- 국내 고준위방폐물 관련 전문 인력의 부족
 - 대학 중심의 인력양성 프로그램 개발 및 산업계·연구계의 체계적인 일자리 창출 병행되어야 함.
 - 특히, 국내 대학은 천연 우라늄과 같은 핵물질을 교육용으로 활용하기 매우 어려운 환경이므로 관련 제도의 개선 역시 필요함

고준위방폐물 관리 특별법 제정 필요성 및 시급성

■ 고준위방폐물 관리 특별법 제정 필요성

- 국민의 안전을 위한 절차와 제도의 법제화 필요
 - 사용후핵연료의 안전한 관리를 위해서는 「원전부지 내 건식저장」, 「중간저장」, 「심층처분」을 위한 정책이 법적 기반 위에서 안정적으로 추진되어야 함
- 우리 세대 해결 당면 과제: 세대에서 사용한 에너지 문제를 해결하고 세대 갈등 발생을 방지
- 한국 원전의 유럽 수출 경쟁력 강화 (EU Taxonomy 요구조건 충족)

■ 고준위방폐물 관리 사업의 시급성

◦ 주민 수용성 확보: 국민 신뢰 제고

- 고준위 특별법(안)은 건식저장시설의 건설과 관련한 주민의견 수렴 절차, 협의 근거 등 주민 수용성 확보의 법적 기반이 됨
 - 건식저장시설 설치에 원자력안전법에 근거하나 특별법에 관련 절차를 추가, 원전 주변 지역주민들이 건식시설의 영구화를 우려해 특별법의 조속한 제정을 요구

◦ 건식저장시설의 건설 착수 ('23.10., 필요 최소량)

- 2030년부터 한빛-한울-고리 으로 습식저장조 포화 (3개 원전본부의 건식저장 설계용량은 2030~2042년 분량)
- 2035년까지 심층처분 부지가 확정되지 않을 경우, 원전에서 발생한 사용후핵연료의 중간저장시설로 이동 불가능
 - 건식저장시설의 설계와 건설이 늦어지면, 운영 원전의 안정적인 전력 생산이 위협받는 상황 발생 가능

* 박근혜정부에서 정책결정(제1차고준위방사성폐기물관리기본계획, 2016.7월)
문재인정부에서 정책확인(제2차고준위방사성폐기물관리기본계획, 2021.12월)
윤석열정부에서 정책재확인(새정부 에너지정책방향, 2022.7월)

고준위방폐물 관리 특별법(안) 추진 경과

제21대 국회 고준위 특별법안 추진경과

- **민**김성환('21.9.15)·**국**김영식('22.8.30)·**국**이인선('22.8.31) 의원이 「고준위 방사성폐기물 관리 특별법」, **민**홍익표 의원('23.2.21)이 「방사성폐기물관리법 전부개정안」 각각 발의(여·야 각 2건)

구분	쟁점	소위 결과	비고
9차 소위	①입법형식	특별법 vs. 방폐법 전부개정 ➡ 특별법 제정	합의
	②제명	「고준위 방사성폐기물 관리에 대한 특별법」	"
	③관리·국회보고 의무	4건의 법안에 포함된 중요업무* 보고 * 법안 공통 보고요건 + ①기본계획 수립변경, ②예정부지 도출, ③부지선정 취소 ④부지조사계획 수립변경 ⑤기본심층조사 결과	"
	④기본계획 수립	관리위가 계획 수립 → 원진위 심의·의결	"
	⑤부지선정 취소시 주민투표	사실상 결격사유이므로 주민투표 불필요	"
	⑥부지선정 절차의 가역성	절차상 하자 시 이전 단계로 돌아가 재심의	"
10차 소위	⑦관리위원회 지위	일반행정위 출범, 존속기한 내 중앙행정기관 변경 검토 후 국회 상임위 보고	"
	⑧관리사업자 지정	한국원자력환경공단을 관리사업자로 법률에 명시	"
	⑨관리시설 확보시점	여당-정부: 중간저장시설 및 처분시설 확보시점 명시 vs. 야당-처분시설 확보시점만 명시	쟁점
	⑩원전부지내 안전저장 시설 규모	여당-정부: 원자로 운영허가 기간 중 발생예측량 vs. 야당-원자로 설계수명 기간 중 발생예측량	"

- '여·야 2+2 협의체'에 여당 측 주요 안건으로 상정('23.12.6) 후 3차례 협의를 진행하였으나 합의 실패, 12차 법안소위 미개최로 21대 국회 종료와 함께 자동폐기('24.5.29)

제22대 국회 고준위 특별법안 발의현황

- 사용후핵연료 관리를 위한 고준위방폐물 관리 특별법 제정 추진
 - 국가정책, 기술개발, 중간 및 영구처분 시설의 건설을 법적 기반으로 이행
 - 사용후핵연료 관리는 국민적 공감대 하에서 추진
- **국**김석기('24.5.30), **국**이인선('24.5.30), **국**김성원('24.6.5), **국**정동만('24.6.20), **민**김성환('24.8.13) 대표발의

21대 국회 미결사항 시설의 운영시점

구분	국 김석기	국 이인선	국 김성원	국 정동만	민 김성환
중간저장시설	2051년 이전	2050년 이전	2045년 이전	2050년 이전	2050년 이전
영구처분시설	2061년 이전	2065년 이전	2060년 이전	2060년 이전	2060년 이전

사용후핵연료 부지내 건식저장시설 관련 사항

구분	국 김석기	국 이인선	국 김성원	국 정동만	민 김성환
저장용량	설계수명(위원회 의결)	언급없음	설계수명(위원회 의결)	설계수명(위원회 의결)	설계수명
주민의견수렴	○	○	○	○	○
주민직접지원	100분의50범위	100분의50범위	100분의50범위	100분의50범위	100분의50범위
본부간 연료이동*	X	X	X	X	X
사업계획 승인**	관리위원회	관리위원회	관리위원회	관리위원회	관리위원회

심층처분시설 부지 조사 · 선정: 해외 선행국가 사례

■ 처분 시스템 개발 초기 단계부터 규제기관의 사전참여 (IAEA, OECD/NEA 권고사항)

국제기구	주요 내용	국제기구	주요 내용
IAEA	<p>Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste (SSG-14, 2011)</p> <p>부지선정단계에서 규제기관의 역할에 대해 다음과 같이 규정하고 있음</p> <ul style="list-style-type: none"> - 개념 설계·계획 단계 : 부지선정계획을 규제기관과 협의 (consultation)하여 수립·이행 - 지역조사단계(screening 포함) : 일반적으로 규제기관의 의사결정은 요구되지 않음 - 부지조사단계 : 선호부지가 처분시설 건설에 적합한지 여부와 계획된 부지확정 조사가 허가신청으로 이어질 수 있을지 여부 등을 규제기관이 검토 	OECD/NEA	<p>The Evolving Role and Image of the Regulator in Radioactive Waste Management (2012)</p> <p>허가 신청 이전 단계의 규제기관 참여 범위는 국가별로 다양하며, 규제기관의 법적체계에 따라 달라질 수 있으나, 적극적인 규제 참여(regulatory involvement)가 성공적인 부지선정을 이끌어 왔으며, 규제기관의 조기 참여가 규제 독립성을 유지하면서도 가능하며, 바람직함</p>

◦ 핀란드

- 현재 심층처분시설 운영허가 심사 중으로, 규제기관(STUK)이 처분사업자(POSIVA)의 심층처분 부지선정 과정에서 독립적인 안전검토를 수행한 바 있음

◦ 스웨덴

- 현재 심층처분시설이 건설허가 심사 중으로, 허가전 자문(pre-licensing consultation) 절차의 일부로서 후보부지(2곳)에 대해 규제기관(SSM)이 처분사업자(SKB)의 안전성분석 보고서에 대한 적합성을 검토한 바 있음.

심층처분시설 부지 조사 · 선정: 해외 선행국가 사례 (계속)

- 부지고유 안정성 실증 기능과 심층처분시설로의 전환 등 처분시설의 일환으로 **처분부지 URL 규제방안 검토 필요**
 - 처분부지 URL에서 취득한 자료는 심층처분시설 허가자료로 활용될 것으로 예상되므로 부지 특성조사 결과를 주기적으로 검토하여 얻어진 자료가 허가에 직·간접적으로 연계되는지를 검토할 필요가 있음

구분	국제요건	구분	국내요건
	Disposal of Waste (SSR-5, 2011) 요건 16. 처분시설의 설계 4.32 처분시설, 특히 고준위폐기물 처분시설은 공학적 적용에서 통상적으로 고려하고 있는 기간보다 보다 장기간에 걸쳐 성능이 유지되도록 기대된다. 자연유사 물질이 자연 상태의 지층 구성에서 어떤 식으로 거동하는지 또는 장기간에 걸쳐 어떻게 고대 인공구조물이 거동해 왔는가에 대한 조사는 장기간 성능 평가에 있어서의 신뢰성 확보에 기여할 것이다. 처분 용기 구조물과 필요한 기능을 가진 인공 방벽 건설의 실행 가능성에 대한 입증은 (예를 들면 지하 연구시설에서와 같은) 안전성평가의 목적을 위해서 그리고 적합한 수준의 성능이 달성될 수 있다는 신뢰성 확보에 대한 기여를 위해서도 중요하다.		제2021-21호 (고준위방폐물 심층처분시설에 관한 일반기준) 제8조(종합안전성 구축) ② 심층처분시설의 부지 선정과 설계, 건설, 운영, 폐쇄 및 폐쇄 후 관리 등 처분시설 전체 단계의 제반사항은, 심층처분시스템의 특성을 파악할 수 있는 지하연구시설에서 수행한 연구결과에 바탕을 두어야 한다. ③ 처분시스템 고유의 특성을 확인하고 장기성능을 예측하기 위하여 처분시설 부지에 지하연구시설을 설치·운영하여야 한다.
핀란드 <ul style="list-style-type: none"> · 심층처분부지의 상세 부지특성조사를 위해 지하특성조사시설(ONKALO)를 통한 부지특성조사 및 실증연구 결과를 바탕으로 심층처분시설의 건설허가를 신청한 바 있음 ('12.3월) 		원자력안전위원회 고시	
프랑스 <ul style="list-style-type: none"> · 심층처분부지의 상세 부지특성조사를 위해 지하특성조사시설(M/HM, Bure)를 통한 부지특성조사 및 실증연구 결과를 바탕으로 심층처분시설(Ciego)의 건설허가를 신청한 바 있음 ('23.1월) 			

심층처분시설 부지 조사 · 선정: 해외 선행국가 사례 (계속)

■ 주요국 지하연구시설 (URL) 운영 현황 (참고)

구 분	명 칭	국 가	암종(깊이)	운영기간	시설 활용
일반부지 (연구용) URL	화이트셀	캐나다	화강암(240~420 m)	1984~2003	
	아세 광산	독일	암염(490~950 m)	1965~1997	기존광산갱도
	토노 광산		점토질암(130 m)	1986~2004	기존광산갱도
	카마이시 광산	일본	화강암(300~700 m)	1988~1998	기존광산갱도
	미즈나미		화강암(현재 300~500 m)	2004~2021	
	호로노베		점토질암(현재 500 m)	2005~현재	
	아멜리		암염	1986~1992	기존광산갱도
	Fanay-Augères	프랑스	화강암	1980~1990	기존광산갱도
	Tournemire		점토질암(250 m)	1990~현재	기존 철도터널 확장
	스트리파 광산	스웨덴	화강암(360~410 m)	1976~1992	기존광산갱도
	아스포		섬록암(240~460 m)	1995~현재	
	그림셀	스위스	화강암(450 m)	1984~현재	기존 수력발전소 접근터널 확장
	몬테리		점토질암(400 m)	1995~현재	기존 도로터널 확장
	Pre Salt Vault		암염(200m)	1959~1962	기존 암염 광산 갱도
	G-터널	미국	응회암(300 m)	1979~1990	기존 무기시험 지하공동
처분부지 URL	클라이맥스		화강암(420 m)	1978~1983	기존 굴착공동 확장
	HADES	벨기에	점토질암(230 m)	1984~현재	
	ONKALO	핀란드	화강암(500 m)	2003~현재	처분시설 건설 중
	M/HM(Bure)	프랑스	점토질암(450~500 m)	2000~현재	
	고어레벤	독일	암염(900 m)	1985~1990	
	유카산처분장 실증시설	미국	응회암(300 m)	1996~2010	

심층처분시설 부지 조사 · 선정: 국내 규제 적용

필요성

- 심층처분시설 개발단계부터 시설의 안전성을 체계적으로 확인할 수 있도록, 부지선정을 포함한 인·허가 신청 다양한 사업자의 활동에 대한 규제기관의 지속적인 지침·의견 제공이 필수적
 - 부지특성 조사 결과를 주기적으로 검토하여 얻어진 자료가 허가에 직·간접적으로 연계되는지를 검토할 필요가 있음
- 심층처분시설 부지선정부터 건설허가 신청까지 장기간(30년 이상) 소요되는 점을 감안, 처분시설 개발 초기 단계부터 규제 측면에서 적합한 방향으로 사업이 진행될 수 있도록 유도하고, 건설허가 신청 사업 활동을 검토하여 원활한 안전규제 여건 조성이 필요함

규제 적용

■ 적용 방향

※ 심층처분시스템 규제요소 개발 ('21 ~ '29, KINS 규제연구 수행 중)

- 예정부지 확정 이전
 - 정부: 부지선정단계 규제 참여방안 결정 및 (필요시) 제도화, “처분부지 URL” 규제방향 결정 및 (해당시) 제도화 (승인 제도 등)
 - 규제기관
 - (해당시) 규제 참여방안 이행계획 및 지침 수립
 - 심층처분 부지개발* 및 천연방벽 등 세부규제기준 수립
 - “처분부지 URL” 규제 요건 및 지침 수립
- 예정부지 확정 이후 (부지특성조사 및 허가 준비 단계)
 - 규제기관: 허가신청에 필요한 규제요건 등의 제공과 안전성 확인을 위한 정보확보 등

기대효과

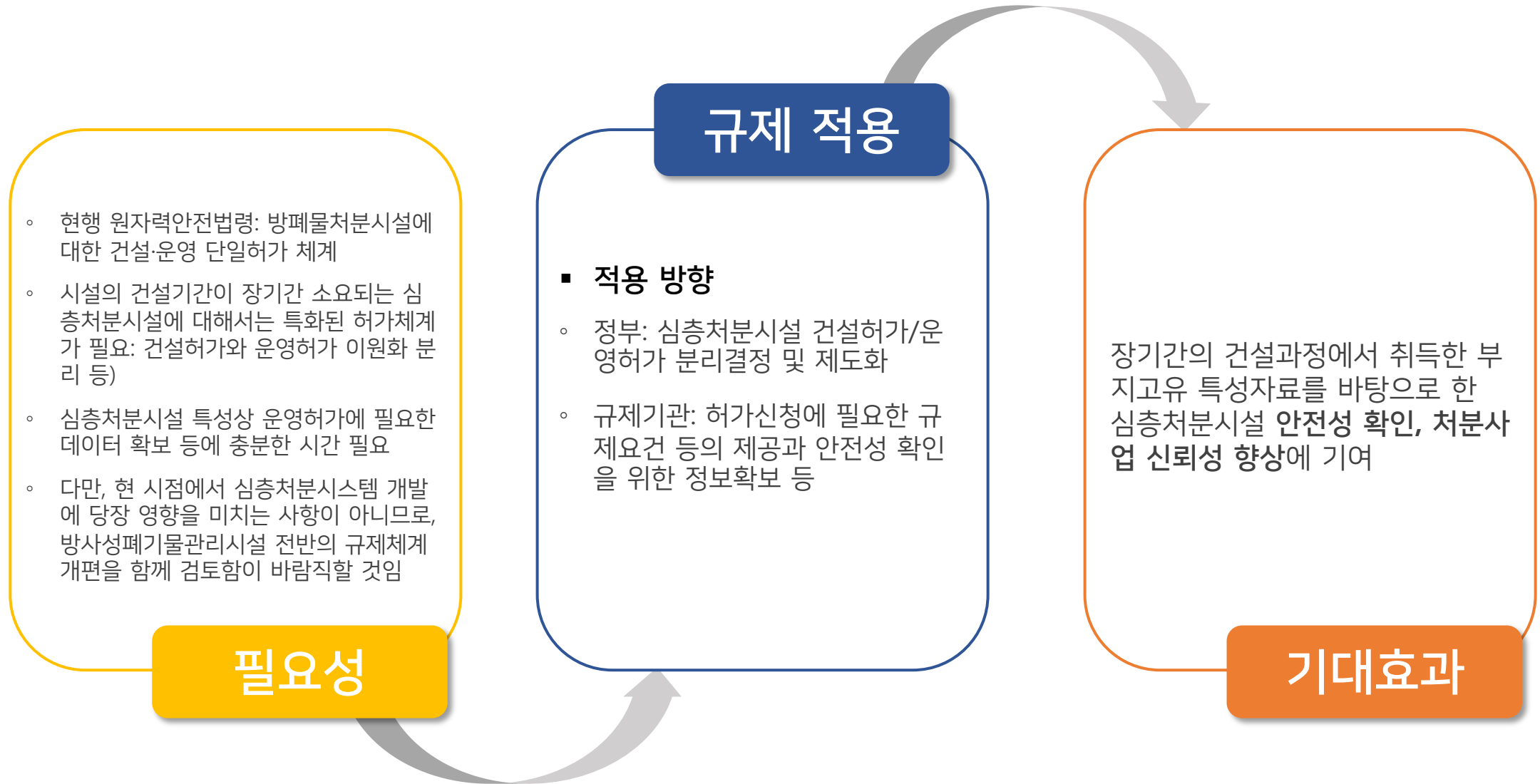
- 규제기관의 사전 참여를 통한 독립적 검토 통한 **처분사업의 신뢰성 향상**, 국제기구의 권고와 **국제적인 추세에 부응**
- 처분부지의 초기 시설인 “처분부지 URL”에 대한 체계적인 규제 제도화를 통해 향후 전체 처분시설 안전성 확인 기반 구축 및 처분사업 신뢰성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대

심층처분시설 건설 · 운영허가: 해외 선행국가 사례

- IAEA 등 국제기구에서도 심층처분시설은 부지선정 이후, 부지특성 조사 및 확인, 설계, 건설, 운영 및 폐쇄의 다수 활동이 필요하며, 건설, 운영 및 폐쇄는 규제기관의 승인에서 중요한 단계임을 명시*
- 대부분의 국가에서는 심층처분시설 건설 및 운영에 관한 인·허가 절차를 분리하여 단계별 안전심사를 통해 시설의 안전성 강화를 도모
 - 건설허가: 예비설계, 부지특성, 환경영향 등
 - 운영허가: 최종설계, 운영프로그램, 비상계획 등
- 핀란드
 - 원자력법(Nuclear Energy Act)에 따라 부지선정에 대한 정부 원칙결정 절차와 함께, 건설허가 및 운영허가 단계로 구분
 - 심층처분시설 건설허가/운영허가 이원화 체계로, 건설허가('15.12월), 운영허가 신청('21.12월) ('24년 말 운영허가 예상)
- 스웨덴
 - 원자력법(Act on Nuclear Activities) 및 환경법(Environmental Code)에 따라 부지선정에 대한 정부결정과 함께, 건설/운영/폐쇄허가 단계로 구분



심층처분시설 건설 · 운영허가: 국내 규제적용



고준위방폐물 관리 인허가 제도 개선

■ 합리적인 사용후핵연료 관리비용 산출 필요

- 현재 사용후핵연료 관리에 필요한 총사업비 내 처분시설 폐쇄 후 관리비용은 300년 기간에 약 2조 원 이상이 반영 중저준위방폐물 관리비용에 근거, 능동적이고 적극적인 관리 가정
→ 과도한 국민부담 경감 필요

■ 합리적이고 적절한 폐쇄 후 관리기간 설정 필요

- 고준위방폐물 처분 시설에 대한 폐쇄 후 관리기간 원자력안전법에 부재
- 현재 고준위방폐물로 간주하여 부과되는 사용후핵연료관리 부담금 내 폐쇄 후 관리 비용은 중저준위 처분시설 사례를 준용하고 있으나 이에 대한 비용이 상당한 수준
 - **학회 차원**에서 폐쇄 후 관리기간 동안 모니터링 방안을 **능동과 수동으로 구분**하는 합리적 아이디어를 제안, 현재 반영되어 있는 비용을 합리적으로 총사업비에 반영할 필요

관리방법 대안(예)

- **(모니터링 기간)** 해외 일부국가에서는 폐쇄 전 약 50년에서 70년 정도 모니터링을 실시하고 폐쇄후는 캐나다만 약 5년 정도 능동적 관리 기간을 설정한 사례를 감안하여 국내의 경우 능동적 모니터링 기간을 보수적으로 폐쇄 전 70년과 폐쇄 후 5년으로 설정. 다만 다양한 불확실성을 감안하여 폐쇄 전 5년 이전 평가를 통해 폐쇄 전 모니터링 기간 연장에 대한 검토 추진. 능동적 모니터링 기간 이후에는 인간의 출입 등 수동적 통제(울타리 설치)를 위한 기간을 국내 중저준위방폐장 사례를 적용(300년)
- **(모니터링 비용)** 능동적 기간동안의 비용은 국내 중저준위방폐물 관리비용내 폐쇄 후 관리비용의 항목을 준용하여 산출하되, 폐쇄 후 5년 이후에는 관련 비용에서 수동적인 비용(울타리 유지보수 비용 인간출입 통제와 관련된 울타리 유지보수 등 최소한의 비용)만을 반영

해외 고준위방폐물 처분시설 폐쇄 후 관리방안 사례

■ 스웨덴

- 폐쇄 후 관리기간 및 모니터링 방법에 대한 법적인 규제는 없음

■ 스위스

- 법에서는 처분 후 모니터링 실시 및 모니터링 이후 시설 폐쇄를 명시하고 있으나, 모니터링의 구체적 기간은 제시하지 않음. 다만 전담기관인 NAGRA에서는 모니터링 기간을 50년으로 예상

■ 캐나다

- 전담기관인 NWMO에서 시설운영 종료 후 연장 모니터링과 해체·폐쇄 이후 폐쇄 후 관리를 추진할 계획이며, 폐쇄 후 평가는 미래 불확실성을 감안하여 제도적 통제(능동적/수동적 조치 포함)는 수백년으로 제한
 - 연장 모니터링: 약 70년간 지상·지하시설 등에 대해 관리 및 유지보수
 - 폐쇄 후 관리: 폐쇄 후 능동적 관리 기간은 처분시설 폐쇄 후 약 5년 예상

■ 핀란드

- 원자력 관련 법령에서 처분시설 폐쇄 후 계획 수립을 명시
 - 법에서는 처분의 안전성 보장을 위해 폐쇄후 모니터링이 필요하지 않도록 처분할 것을 요구
 - 다만, 안전조치·보안·환경 관점에서 폐쇄 후 모니터링 필요 가능성이 존재하여 EC 집행위원회 및 IAEA와 논의를 진행 중이며 향후 법률 개정 시 고려 예정



국내 고준위방폐물 처분시설 폐쇄 후 관리방안에 대한 논의

논의 결과

- 현행 원자력안전법 폐쇄 후 관리 기간: 천층처분 시설 특성을 감안하여 설정
→ 천층처분과의 명확한 안전성 측면에서 차이가 있으므로 폐쇄 후 관리 기간을 규제법령에 명시하는 것은 기술적으로 비합리적
- 또한 고준위방폐물인 사용후핵연료 관리시설의 폐쇄 후 관리 기간을 원자력안전법에 명시하기에는 시기적으로 이른 측면을 감안
- 사용후핵연료관리 부담금에 반영되는 폐쇄 후 관리 비용의 합리적인 산출을 위해 중저준위방폐물 처분시설의 폐쇄 후 관리비용을 준용하되, 관리방법을 능동적과 수동적으로 구분하여 학회차원에서 대안*을 제안할 필요



기대 효과

합리적인 관리비용 산출방법 제시
사용후핵연료 관리 부담 경감

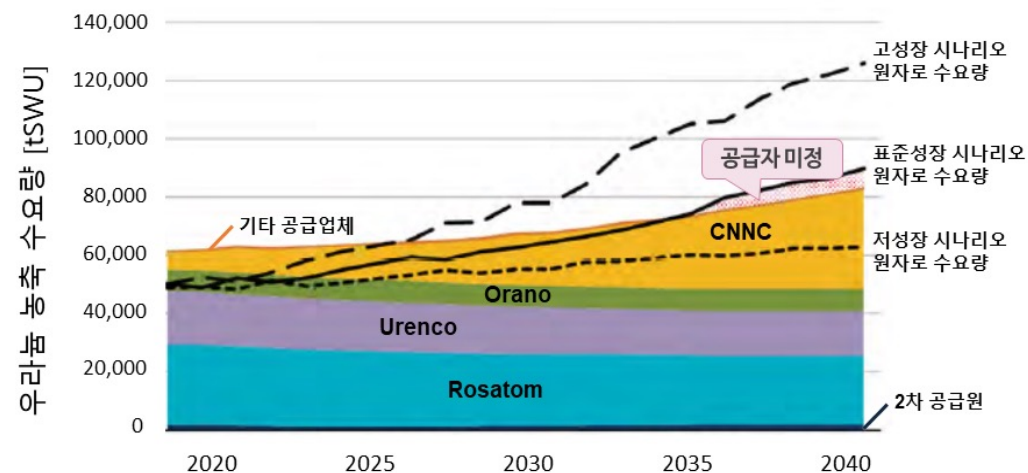
추진 전략

학회 이슈위원회 보고서로 개선사항 반영

- 사용후핵연료관리 부담금 산정 시 활용할 수 있도록 정부에 제공
- 이슈위원회 개선사항은 타 개선사항과 함께 학회 학술대회 내 워크숍을 통해 충분한 전문가 의견수렴을 거쳐 수정 보완 후 정부에 제공

선행핵주기 세계 시장의 변동

- 국제적인 원자력 이용개발 확대에 따라 시장의 수요와 규모 확대 전망
 - 러-우 전쟁으로 인한 공급망 불안 및 원자력 확충 예정에 따른 수요 확대 예정
 - WNA의 농축 수급 전망 시나리오에 따르면 현 농축 시장 구조하에는 2020년 후반 또는 30년 중반부터는 공급량이 수요량 추월 전망
- 서방국가들은 러시아 제제의 일환으로 기존 농축 시장의 변화를 계획
 - , , , , 5개국은 2023년 4월 각국의 연료 공급을 보장하고 러시아의 공급망 영향력을 약화하기 위한 'Sapporo 5' 동맹 결성
 - 2023년 12월 향후 3년 동안 우라늄 변환 및 농축 역량을 강화하여 탄력적인 우라늄 공급 시장을 구축하기 위해 42억 달러의 정부 주도 투자계획 발표



<그림. WNA의 농축 수급 전망 시나리오>

국제 협력 전략을 통한 핵연료 수급 안정화

■ 선행핵주기 시장의 확대, 핵연료 분야의 러시아 제제 조치에 따른 시장 블록화

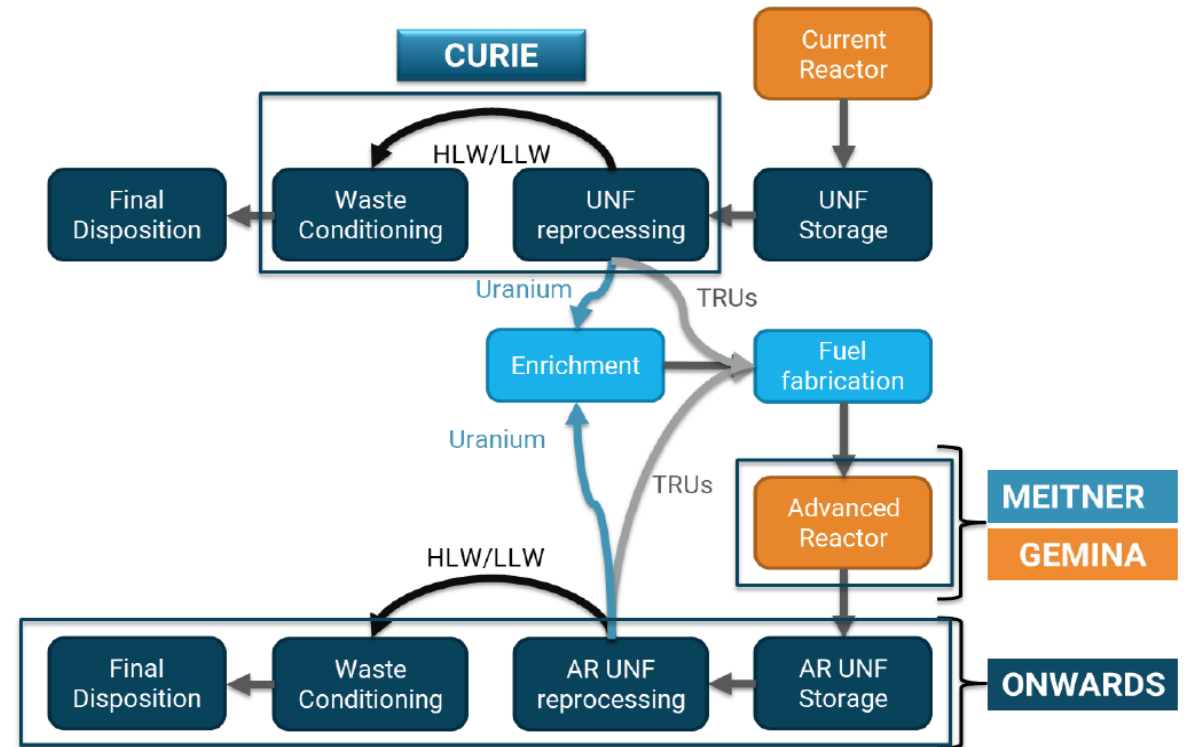
- 서방국가 주도의 핵연료 시장 구축 노력이 보다 가속화 된다면 국내 농축 수요 1/3을 러시아로부터 공급받고 있는 우리나라도 러시아산 우라늄 수입 금지 가능성에 대한 대비 필요
- 높은 우라늄 농축시장 점유율을 가진 러시아를 시장에서 배제할 경우 핵연료 시장이 불안정해질 것인바, 핵연료의 수급 안정을 위한 서방국가들과 그 동맹국들의 공동의 노력과 협력 방안이 계속해서 모색될 것으로 평가

■ 국제협력 전략 수립

- 미국 내 농축사업에 지속적으로 모니터링 수행
 - 미국에서 생산되고 있는 농축 기업으로부터 핵물질을 공급받을 수밖에 없는 우리의 현실적 상황 고려
- 테라파워(주) 등 한국과 기술개발 협력 의지가 있는 기업과 전략적인 제휴관계 통해 핵연료 공급처 확보 노력
- 미국 내 사업에 자금 압박 등이 발생할 경우 국내 관심기업을 통해 투자를 진행, 적극적인 핵물질 확보 노력
 - 한전원자력연료(주) 등 관련 기업과 사전 전략 마련 필요

후행핵주기 기술 개발 확대 현황

- 미국 내 사용후핵연료의 직접처분 사업 추진 환경이 불투명해진 바, 선진원자로를 활용한 폐기물 저감 기술 개발에 투자 확대 중
 - 선진원자로 개발사들이 선진원자로 폐기물 부담 저감 및 연료 공급을 위한 목적으로 재활용 기술개발의 상업화를 추진 중
 - DOE ARPA-E*는 ONWARDS, CURIE** 프로그램을 통해 선진원자로 폐기물 처분 최적화와 경수로 사용후핵연료 재활용 분야 기술 혁신에 예산 투자 중
 - 이외에 Oklo는 연료 재활용 기술을 개발하여 재활용 연료를 선진원자로 연료로 공급할 계획



* Advanced Research Projects Agency-Energy

** ONWARDS(Optimizing Nuclear Waste and Advanced Reactor Disposal Systems), CURIE(Converting UNF Radioisotopes Into Energy)

후행핵주기 기술 개발 확대 현황의 전망 및 평가

- 최근 아칸소주 하원의원 Jack Ladyman은 아칸소주 의회에 사용후핵연료 재활용의 기술적 및 경제적 가능성을 조사하도록 요구하는 법안을 발의하는 등 정책 환경의 변화도 감지되고 있으며, 선진원자로와 연계한 재활용 기술 확보 노력은 지속될 전망
- Oklo 및 Curio의 자사 기술에 대한 핵비확산성, 비용-효과성, 용량증대, 인허가 등 다양한 리스크 관리 동향을 주시 필요
- ONWARDS, CURIE 프로그램이 추구하는 목표가 국내 파이로 연구개발 사업의 목표와 일치하는 바, 한미 양국 정부 간 재활용 기술개발 협력은 장기적 관점에서 지속 추진 필요
 - 다만, 미국 민간 회사가 재활용 기술의 사업화를 주도하는 상황에서 지식재산권 문제로 R&D 협력 분야 및 범위에 한계가 있을 것으로 판단
- 미국과의 협상력 제고를 위해 자체적인 핵심기술개발 사업 발굴 및 운영 추진



* Advanced Research Projects Agency-Energy

** ONWARDS(Optimizing Nuclear Waste and Advanced Reactor Disposal Systems), CURIE(Converting UNF Radioisotopes Into Energy)

핵연료물질 활용 연구 규제 개선 방향

■ 국내 감손/천연우라늄 규제 수량의 제한

- 원자력안전법령*에서 핵연료물질은 감손우라늄, 천연우라늄, 농축우라늄을 모두 포함하며, 감손우라늄 및 천연우라늄은 취급량이 300g을 초과하는 경우, 농축우라늄은 모든 수량에 대해, 사용허가를 득한 이후 사용하도록 규정
- 이는 해외 원자력 선진국과 비교해 수십~수백 분의 1로 매우 적은 수량이며, 이로 인해 대학 단위에서의 핵연료 연구가 활발히 이루어지고 있지 못함
- 원자력안전법령*에서 핵연료물질은 감손우라늄, 천연우라늄, 농축우라늄을 모두 포함하며, 감손우라늄 및 천연우라늄은 취급량이 300g을 초과하는 경우, 농축우라늄은 모든 수량에 대해, 사용허가를 득한 이후 사용하도록 규정
- 핵연료물질의 사용허가를 위해서는 방사선관리구역 설정, 배기/배수 감시, 저장 및 폐기시설 등의 다양한 시설 및 관련 조직, 규정 등을 갖추어야 함**

<국외 주요국가와의 핵연료물질 사용허가 면제수량 비교>

국가	종류	연간 취급 수량
한국	천연/감손우라늄	300g 미만
	토륨	900g 미만
일본	천연/감손우라늄	300g 미만
	토륨	900g 미만
	분산형태(액체, 기체, 파우더) 천연/감손우라늄, 토륨	7kg 이하 (1.5kg/회 이하)
미국	천연/감손우라늄, 토륨	70kg 이하 (7kg/회 이하)
	분석대상 천연/감손우라늄, 토륨	70kg 이하 (7kg/회 이하)
프랑스	플루토늄, U-233, 농축우라늄	1g 미만
	천연/감손우라늄, 토륨	500kg 미만
캐나다	천연/감손우라늄	10kg 이하
	토륨	10kg 이하



• 원자력안전법 시행령 제3조(핵연료물질) 제1호에서 천연우라늄, 제2호에서 감손우라늄, 제5호에서 농축우라늄을 정의
 • ** 원자력안전법 제45조(핵연료물질의 사용 등 허가), 시행령 제72조(허가기준) 및 시행규칙 제49조(핵연료물질 사용허가의 신청 등)에서 관련내를 규정함

핵연료물질 활용 연구 규제 개선 방향

■ 핵연료물질 신규 인허가 소요기간 개선

- 2018년부터 2023년까지 허가된 핵연료물질 사용허가는 총 6건이며, 인허가 신청에서 완료까지 평균 403일로 1년 이상이 소요되었으며, 최대 822일로 2년 이상이 소요된 경우도 존재함
- 신규 인허가를 위해 필요한 시설 구비, 인허가 서류 작성 등의 시간을 고려하면, 통상 2년 이상의 기간이 소요될 것으로 예상
 - 통상적인 대학 수행 연구과제가 3~5년임을 고려하면, 대학에서 핵연료물질의 인허가를 지양하는 형태로 연구가 진행될 수밖에 없음

■ 핵주기 연구 독려를 위한 면제수량 개선 필요

- 국내 핵주기 연구의 다양성 및 전문인력양성을 확보를 통한 원자력분야 국가 경쟁력 제고를 위해서는 대학에서 핵주기 연구를 할 수 있도록 독려해야 하며, 이를 위해서는 감손/천연우라늄에 대한 규제면제 수량을 국외 사례를 고려하여 현실화하는 것이 필요함
- 핵확산 위험, 방사선적 안전성 등을 고려하여, 국내 상황에 적합한 핵연료물질 면제 수량을 도출하기 위한 연구가 필요하며, 국외 상황을 고려했을 때 수 kg 정도까지 상향하는 것도 가능할 것으로 판단됨

첨단 원자력분야 기술경쟁력 확보를 위한 가속기 기반 연구활성화 전략

- 국내 현재 가동중인 대형 방사광가속기의 경우, 핵물질/방사성물질 전용 빔라인 부재로 인해 관련 연구가 활발하게 이루어지고 있지 못함
 - 현재 운영 중인 대형가속기 중 기초 및 응용과학분야에 파급효과가 큰 방사광가속기의 경우 핵물질 및 RI 물질을 활용한 핵주기 연구를 할 수 있는 빔라인 부재
 - 현재 구축 중에 있는 다목적 방사광가속기 초기 10개 빔라인 중 1기에는 포함되어 있으나, 빔라인 설계 주체에 원자력 전문가가 미 참여하기에 핵물질 및 RI 물질 전용 빔라인 구축 여부 미지수
 - 중이온가속기 역시 초기 구축단계에서 원자력분야 가속기 전문가의 많은 도움을 받았으나, 응용연구분야에서는 원자력분야 전문가가 배제되어 있음. 이에 원자력분야 연구 활성화를 위한 대응책 필요

<국내 대형가속기 구축·운영 현황>

구분		형태	활용목적	운영주체	비고
방사광 가속기	3세대	원형		포항가속기연구소	운영 중
	4세대	선형	물질의 구조, 현상분석/활용연구	포항가속기연구소	운영 중
	다목적	원형		한국기초지원연구원	구축 중
중이온가속기		선형	희귀동위원소 생산 및 활용연구	기초연구원	구축 중
양성자가속기		선형	물질변화, 중성자 생산	한국원자력연구원	운영 중
중입자가속기		원형	암치료 및 치료기술	서울대학교	구축 중

대형가속기 기반 원자력분야 해외 이용·연구 동향

■ 방사광가속기 이용·연구 동향

- 방사광가속기는 핵물질 및 RI를 이용한 전용 빔라인이 부재한 반면, 해외에서는 원자력선진국을 중심으로 핵물질/RI 전용 빔라인을 구축하여 다양한 원자력분야의 연구를 활발히 수행하고 있음

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



대형가속기 기반 원자력분야 국외 이용·연구 동향

■ 중이온가속기 이용·연구 동향

- 세계적으로 희귀동위원소를 생성하고 있는 대형 가속기는 2022년 기준 대략 5기가 존재하며, 2개는 구축중에 있음.
- 희귀동위원소 발생을 위해 ISOL, 또는 IF 방식을 활용하고 있으며, 다양한 분야를 대상으로 연구를 수행하고 있음

<해외 핵물질/RI 전용 빔라인 운영현황>

국가	연구시설	가속에너지	가속출력	RI빔에너지	발생방식	연구분야	비고
일본	RIKEN RIBF	350MeV/u (우라늄)	100kW	345MeV/u	IF	핵과학	운영중
캐나다	TRIUMF ISACII	500MeV/u (양성자)	50kW	6MeV/u	ISOL	핵, 물성	운영중
독일	GSI FAIR	3.7GeV/u (중이온)	80kW	1.5GeV/u	IF	핵, 천체, 입자, 원자, 물성	~'25
프랑스	GANL/SPIRAL II	15MeV/u (중이온)	160kW	6GeV/u	ISOL	핵과학	운영중
유럽	CERN-ISOLDE	1.4GeV/u (중이온)	2.8kW	10MeV/u	ISOL	핵, 천체, 입자, 원자, 물성	운영중
미국	MSU/FRIB	200MeV/u	400kW	<150MeV/u (Sn-132)	IF	핵과학	구축중
중국	IMP/HRFL	500MeV/u	1010pps	-	IF	핵과학	운영중

대형가속기 기반 원자력분야 해외 이용·연구 동향

■ 해외 중요 중이온가속기 이용·연구 동향

- 일본 (RIKEN RIBF)
 - 자연계에 존재하지 않는 중성자 과잉 희귀동위원소를 새로 발견하고 특성을 측정 (약 50종)
- 캐나다 (TRIUMF ISAC I)
 - 별의 내부에서 무거운 원소를 합성하는 과정 규명
 - 자연계에 존재하지 않는 중성자 과잉 희귀동위원소 질량 측정
 - 중성자 달무리를 이루는 특별한 원자핵 내부 구조 연구
- 독일 (GSI FAIR)
 - 자연계에 존재하지 않는 중성자 과잉 희귀동위원소 질량 측정
 - 원자핵을 이루고 있는 입자 (양성자, 중성자)의 특성 연구
 - 별 내부의 무거운 원소를 합성하는 과정을 규명

국내 대형가속기와 연계한 원자력분야 연구의 활성화 추진 필요성

- 대형가속기는 기초과학의 대표적인 대형연구시설로 최근에는 산업적 활용 범위와 영향력이 증가되고 있는 추세
 - 국가 전략사업 및 반도체, 신약개발, 신소재, 의료 등
- 대형가속기의 성공적 구축을 위해 많은 전문가의 역량이 집결될 필요가 있음
 - 중이온가속기의 경우 구축비용만 1조원 이상이 드는 대규모의 정부예산이 투자되고 있기에 활용도를 극대화 할 수 있는 면밀한 중장기 운영전략이 필요함.
- 대형가속기의 성공적 구축을 위해 많은 전문가의 역량이 집결될 필요가 있음
 - 중이온가속기의 경우 구축비용만 1조원 이상이 드는 대규모의 정부예산이 투자되고 있기에 활용도를 극대화 할 수 있는 면밀한 중장기 운영전략이 필요함.
 - 오창방사광가속기의 경우, 한국방사광이용자협회에서 우선순위 결정 기준을 바탕으로(수요도 높은 빔라인, 산업적 활용도 및 국내 공백 선도빔라인) 실시한 수요조사를 통해 우선 구축 빔라인을 선정하였으며 선정된 10기 빔라인 중 핵물질/RI물질 활용이 가능한 빔라인이 선정됨

국내 대형가속기와 연계한 원자력분야 연구의 활성화 추진 필요성

- 원자력분야 국가 경쟁력 제고를 위해 현재 구축 중에 있는 대형가속기 등에 원자력분야와 연계한 전용 빔라인 및 원자력 전문가 참여를 통한 연구 활성화가 될 수 있도록 정책적 지원이 필요
 - 국내에는 가속기 관련 전문가 그룹이 많지 않기에 구축 기획단계에서부터 기존 대형가속기 및 연구시설 운영경험과 가속기 이용 경험을 가지고 있는 원자력계의 전문가들이 많은 기여를 하였음.
 - 하지만, 구축 착수 이후 이를 이용한 활용연구 단계에서 원자력계 전문가의 의견이 반영되지 않거나 배제되어지고 있는 실정임.
 - 다목적방사광가속기의 경우 우선 구축 10기 빔라인에 핵물질/RI 전용 빔라인이 계획되어 있으나, 현재까지 빔라인 설계 주체에 원자력 전문가가 미참여하고 있어 전용 빔라인 구축 여부가 불투명함
 - 중이온가속기의 경우에도 초기 구축 계획단계에서 다수의 원자력계 전문가가 참여하였으나, 활용연구를 위한 기획에는 배제되어 있음

현안 대응 방안: 고준위 방사성폐기물 관리 특별법

■ 현안 진단

- 고준위 현재 발의된 5건의 「고준위 방사성폐기물 관리 특별법」 중 4건의 법안에서 부지 내 저장시설의 용량을 설계수명 기간 발생량으로 제한함
- 중간저장시설의 운영 시기를 제2차 방폐물기본계획보다 늦은 2045~51년으로 명기

■ 해결방안 제안

- 특별법의 주요 사항에 대해 객관적인 기술 자료와 분석을 제공하여 여야 간 이견을 조정
 - 학회는 고준위방폐물 관리에 대한 기술적 전문성을 바탕으로, 국회에 객관적이고 신뢰할 수 있는 자료와 분석을 제공
- 다양한 이해관계자의 의견을 폭넓게 수렴하고 합의를 도출
 - 학회는 이러한 논의를 주도하며, 합리적이고 공정한 법 제정이 이루어질 수 있도록 중재 역할을 수행

현안 대응 방안: 심층처분시설 부지 조사·선정 규제 참여

■ 현안 진단

- 심층처분시설 장기 안전성확보의 기반이 되는 부지조사의 중요성을 감안하여 부지조사·선정의 주요 시점에서 규제 의견을 제시하는 절차 필요
- 부지고유 안전성실증을 위한 “처분부지 URL” 에 대해 심층처분시설로의 전환 등 처분시설의 일환으로 규제방안 검토 필요

■ 해결방안 제안

- 예정부지 확정 이전 단계

정부	<ul style="list-style-type: none">• 부지선정단계 규제참여방안 결정 및 (필요시) 제도화• “처분부지 URL” 규제방향 결정 및 (해당시) 제도화(승인 제도 등)
규제기관	<ul style="list-style-type: none">• (해당시) 규제참여방안 이행계획 및 지침 수립• 심층처분 부지개발 및 천연방벽 등 세부규제기준 수립• “처분부지 URL” 규제요건/규제지침 수립 <p>※ 심층처분시스템 규제요소 개발 ('21~'29, KINS 규제연구 수행중)</p>

- 예정부지 확정 이후 단계(부지특성조사 및 허가 준비 단계)
 - (규제기관) 허가신청에 필요한 규제요건 등의 제공과 안전성 확인을 위한 정보확보 등



현안 대응 방안: 안전특성을 고려한 심층처분시설 건설·운영허가 이원화

■ 현안 진단

- 해외 선행국가의 심층처분시설 건설허가는 예비설계, 부지특성, 환경영향 등이 주 심사 대상이며, 운영허가는 최종설계, 운영프로그램, 비상계획 등이 주 심사대상으로 파악되고 있음
- 현행 원자력안전관계법령에서는 방사성폐기물 처분시설에 대해 건설·운영 단일허가 체계가 수립되어 있음. 장기간 소요되는 심층처분시설의 특성상 건설허가와 운영허가 이원화 분리에 대한 검토 필요

■ 해결방안 제안

- 정부
 - 심층처분시설 건설허가/운영허가 분리 결정 및 제도화
- 규제기관
 - (해당시) 건설허가/운영허가 규제요건 제정 (허가절차, 신청서류, 허가기준 등)

현안 대응 방안: 고준위방폐물 관리 인허가 제도 개선

■ 현안 진단

- 사업과 사용후핵연료관리부담금 산정 등에 활용되는 처분시설의 합리적이고 적절한 폐쇄 후 관리기간 설정 필요
- 해외의 경우 폐쇄 후 관리기간 및 모니터링 방법에 처분 안정성을 충분히 고려하면서 각국의 기준에 맞는 합리적인 기준을 채택하고 있음

■ 해결방안 제언

- 사용후핵연료관리부담금에 반영되는 폐쇄후 관리비용의 합리적인 산출을 위해 중저준위방폐물 처분시설의 폐쇄후 관리기간을 준용하되, 300년에 걸친 폐쇄 후 관리기간을 능동적과 수동적으로 구분하되 구분된 기간에 따른 합리적인 모니터링 방법을 도출하여 불필요한 사회적비용 발생을 방지하고 장기간 수행되는 모니터링 업무의 효율성을 확보
- 유관학회 학술보고 및 워크숍을 통해 충분한 전문가 의견수렴을 거쳐 사용후핵연료관리 부담금 산정시 활용할 수 있도록 정부에 제공

현안 대응 방안: 선후행핵주기 관련 국제협력 전략

■ 현안 진단

- 러-우 전쟁으로 인한 공급망 불안과 차세대 SMR 개발 경쟁이 치열해짐에 따라 2022년부터 우라늄 가격이 불안정해짐에 따라 HALEU 확보를 위한 전략적 투자와 대안 마련 필요
- 핵물질 공급 및 취급에 대한 궁극적인 대안 마련을 위해 **사용후핵연료 재활용 기술** 개발사업을 완성하기 위한 전략 수립의 필요성 대두
- 최근 아칸소주 하원의원 Jack Ladyman은 아칸소주 의회에 사용후핵연료 재활용의 기술적 및 경제적 가능성을 조사하도록 요구하는 법안을 발의하는 등 정책 환경의 변화도 감지되고 있으며, 선진원자로와 연계한 재활용 기술 확보 노력은 지속될 전망

■ 해결방안 제안

- Oklo 및 Curio의 자사 기술에 대한 핵비확산성, 비용-효과성, 용량증대, 인허가 등 다양한 리스크 관리 동향을 주시 필요
- 미국과의 협상력 제고를 위해 자체적인 **핵심기술개발** 사업 발굴 및 운영 추진

현안 대응 방안: 핵연료물질 활용 연구 규제 개선 방향

■ 현안 진단

- 국내 핵연료물질에 대한 사용허가 면제 수량은 타국과 비교, 수십~수백 분의 1 수준으로 국내 기준결정에 참고가 된 일본 법령은 1950년대에 제정되어 관련 근거를 찾기 어려움
- 법인단위에서 감손 및 천연우라늄 기준 300g을 초과하여 사용 시, 허가가 필요하며 신규 인허가에 상당한 시간이 소요되어 대학 내 연구목적으로 감손/천연우라늄을 신규로 취급하기에 부담이 매우 큼

■ 해결방안 제안

- 국내 핵주기 연구의 다양성 및 전문인력양성 확보를 통한 원자력분야 국가 경쟁력 제고를 위해서는 대학에서 핵주기 연구를 할 수 있도록 독려해야 하며, 이를 위해서는 감손/천연우라늄에 대한 규제면제 수량을 국외 사례를 고려 현실화하는 것이 필요함
- 핵확산 위험, 방사선적 안전성 등을 고려하여, 국내 상황에 적합한 핵연료물질 면제수량을 도출하기 위한 연구가 필요하며, 국외 상황을 고려했을 때 수 kg 정도까지 상향하는 것도 가능할 것으로 판단됨

현안 대응 방안: 첨단 원자력분야 기술경쟁력 확보를 위한 가속기 기반 연구활성화 전략

■ 현안 진단

- 현재 운영 중인 대형가속기 중 기초 및 응용과학분야에 파급효과가 큰 방사광가속기의 경우 핵물질 및 RI 물질을 활용한 핵주기 연구를 할 수 있는 **빔라인은 부재**
- 현재 구축 중에 있는 다목적 방사광가속기 초기 10개 빔라인 중 1기에는 포함되어 있으나, 빔라인 설계 주체에 원자력 전문가가 미 참여하기에 핵물질 및 RI 물질 전용 빔라인 구축 **여부 미지수**
- 중이온가속기 역시 초기 구축단계에서 원자력분야 가속기 전문가의 많은 도움을 받았으나, 응용연구분야에서는 원자력분야 전문가가 배제되어 있음. 이에 원자력분야 연구 활성화를 위한 대응책 필요

■ 해결방안 제안

- 선진원자로에 활용될 핵연료 성능연구 및 원자력기반의 기초연구에도 대형가속기와 연계한 연구가 필수적인 만큼 원자력분야 국가 경쟁력 제고를 위해 현재 구축 중에 있는 대형가속기 등에 원자력분야와 연계한 **전용 빔라인 및 원자력 전문가 참여**를 통한 연구 활성화 전략을 수립하여 정책에 반영
- 현재 추진 중인 오창방사광가속기 초기 구축 빔라인에 포함된 핵물질/RI 활용가능한 빔라인이 계획대로 구축되고 효율적이고 안정적으로 운영될 수 있도록 **중장기 운영전략 도출(원자력유관 학회 등에서 유저 그룹 활성화 전략논의 등)**

결론 및 제언

■ 국내 고준위 방사성폐기물 관리 관련 정책의 진척

- 시급성과 중요성에도 불구하고, 체계적인 장기 비전 부재로 인해 지속적인 추진이 어려운 상황
- 고준위방폐물 관리 **특별법의 조속한 제정**이 필수적
- 이를 통해 법적 기반을 확립하여 정부와 지역사회 간의 신뢰 구축
- 중간저장 및 영구처분 시설의 단계적 건설을 위해 나아가야 함

■ 핵물질 자원 확보를 위한 전략적 투자

- 글로벌 공급망 불안정성, 특히 러-우 전쟁으로 인한 농축우라늄 확보 어려움 등에 대응하기 위하여 미국 및 다른 서방 국가들과의 협력 강화 필요

■ 기술력 확보를 위한 국내 방사성폐기물 관리 관련 연구 인프라 및 인력양성 프로그램 확충

- 지하처분연구시설, 가속기 기반 첨단 원자력 실험설비, 사용후핵연료 취급 핫셀 등의 **핵심 연구시설의 부족**
- 대학의 핵물질 취급 등의 제도 해외 사례 참고하여 개선 필요



Thank You

Prof. Sungyeol Choi (choisys7@snu.ac.kr)

Nuclear Fuel Cycle and Nonproliferation Lab (www.snunfc.com)

Department of Nuclear Engineering

Seoul National University