한국원자력학회 원자력이슈위원회
핵연료전문위원회

핵연료 기반 조성·지원 분과(3분과) 보고서

❍ 목차 (Brief Report CONTENTS)

00 핵심 요약 (Executive Summary)
01 서문
02 고준위 방사성폐기물 관리 특별법 필요성과 추진경과
03 심층처분시설 부지 조사·선정 규제 참여
04 안전특성을 고려한 심층처분시설 건설·운영허가 이원화
05 고준위방폐물 관리 인허가 제도 개선
06 선·후행핵주기 관련 국제협력 전략
07 핵연료물질 활용 연구 규제 개선 방향
08 첨단 원자력분야 기술경쟁력 확보를 위한 가속기기반 연구활성화 전략
09 현안 대응 방안
10 총괄적 제언

00

핵심 요약 (Executive Summary)

- 22대 국회에서 “고준위방폐물 관리 특별법안”이 통과되고 국무회의 의결을 거쳐 2025년 9월 시행을 앞두고 있으나, 주요 쟁점 사항인 부지 내 저장시설의 저장용량 및 이동, 원자력안전법과 중복 규제, 관리시설(중간저장시설과 심층처분시설) 운영 시점 등에 대해 원자력계의 합의된 의견 개진과 향후 특별법 개정 필요

- 심층처분시설의 부지선정부터 건설·운영허가 신청까지 장기간 소요되는 점을 감안하여 심층처분시설의 개발단계부터 시설의 안전성을 체계적으로 확인할 수 있어야 함. 이를 위해 부지선정을 포함한 인·허가 관련 다양한 사업자의 활동에 대한 규제기관의 지속적인 지침·의견 제공이 필요함. 아울러 부지 고유 안전성 실증을 위한 “처분부지 URL”에 대해 심층처분시설로의 전환 등 처분시설의 일환으로 규제 방안 검토 필요

- 대부분의 국가에서는 심층처분시설의 건설 및 운영에 관한 인·허가 절차를 분리하여 단계별로 안전성 심사를 수행하는 반면, 국내의 경우 현행 원자력안전법령에서 방사성폐기물 처분시설에 대한 건설·운영 단일 허가 체계를 유지하고 있음. 건설기간이 장기간 소요되는 심층처분시설에 대해 건설허가와 운영허가의 이원화 분리 및 이에 따른 제도화가 필요

- 국내 심층처분시설 관리와 관련하여 중·저준위 처분시설 사례를 준용하여 폐쇄 후 300년간의 관리와 이에 따른 비용으로 약 2조 원 이상이 사용후핵연료 관리분담금에 반영될 것으로 예상됨. 폐쇄 후 관리기간을 준용하되 해외 현황을 참고하여, 발생자 및 일반 국민의 사용후핵연료 관리에 대한 부담 경감을 위한 합리적인 관리비용 산출방법 제시 필요

- 러-우 전쟁으로 인한 공급망 불안과 차세대 소형모듈원전(SMR) 개발 경쟁이 치열해 지면서 2022년부터 우라늄 시장 가격의 유동성이 커짐에 따라 HALEU 확보를 위한 전략적 투자와 대안 마련 필요. 아울러, 핵물질 공급 및 취급에

대한 궁극적인 대안을 위해 사용후핵연료 재활용 기술개발 사업을 완성하기 위한 전략 수립 필요

❍ 국내 핵연료물질에 대한 사용허가 면제 수량은 타국과 비교해 수십에서 수백 분의 1 수준으로, 이는 연구의 제한성을 초래하여 심도 있는 다양한 연구를 저해하고 있음. 원자력 분야에서 국가 경쟁력을 제고하기 위해 연구의 다양성을 보장하고, 이를 통해 전문인력을 양성하기 위해서는 규제면제 수량의 현실화 필요

❍ 현재 국내에 구축되어 있는 대형가속기 내 핵물질 및 방사성 물질을 활용할 수 있는 빔라인 부재. 원자력 분야 국가 경쟁력 제고를 위해서는 대형 가속기 등에 핵물질 및 방사성 물질을 활용할 수 있는 빔라인 확보와 관련분야 연구를 위한 R&D 활성화 정책 제시 필요

01

서문

》 우라늄 농축 핵연료의 안정적인 확보와 관련하여, 글로벌 공급망 불안정이 지속되고 있음에 따라 미국과의 협력을 통해 핵연료 자원 확보에 대한 전략적 접근이 필요함

》 고준위 방사성폐기물 관리의 법적, 기술적 기반을 확립하고, 시급한 사업 착수 및 주민 수용성 확보를 위한 장기적 비전이 필수적임

》 한국의 방사성폐기물 관리 정책을 국제 기준에 부합하게 발전시키고, 국내 연구 역량과 인프라를 강화하여 원자력 안전성과 지속 가능성을 확보하는 데 주력해야 함

1. 러-우 전쟁 이후 농축우라늄 확보 문제와 한미 협력

❍ 2022년 시작된 러시아-우크라이나 전쟁으로 인해 글로벌 에너지 및 농축우라늄 공급망에 큰 혼란이 발생함

❍ 미국을 중심으로 한 서방 국가들은 러시아 의존도를 줄이기 위한 다양한 대응책을 모색하고 있지만, 우리나라는 아직 명확한 대안을 마련하지 못한 상태임

❍ 이에 따라, 미국과의 협력 강화를 통해 안정적인 핵연료 공급망을 확보하는 것이 기존 원자력 발전 운영과 신형 소형모듈원전 개발 모두에 시급함

2. 유럽연합 택소노미의 후행핵주기 무역장벽과 고준위방폐물 관리 특별법

❍ 유럽연합이 지속 가능한 에너지로 원자력을 인정하는 택소노미 규정을 도입함으로써, 원자력 발전이 국제 무역의 중심에 다시 등장하게 됨

❍ 그러나 이 택소노미가 동시에 2050년까지 구체적인 처분시설 가동계획을 요구하면서 원전 수출의 후행핵주기 관련 무역장벽을 새롭게 형성하고 있음

❍ 한국은 22대 국회에서 고준위방폐물 관리 특별법을 제정함

3. 고준위방폐물 관리 사업의 시급성과 장기적 중요성

❍ 고준위 방폐물 관리 사업은 부지선정, 건설, 운영 및 폐쇄후 관리 등 수백년 이상의 장기간이 소요되는 사업임에도 불구하고 역설적으로 장기간 추진되는 사업으로 인해 그 시급성을 인정받지 못하고 있음

❍ 특히, 부지선정 및 건설허가에는 상당 기간이 소요될 수 있으며, 이를 감안할 때 지금 당장 사업에 착수해야만 미래의 안정적인 방폐물 관리를 기대할 수 있고, 이 과정에서 규제, 제도 등의 개선도 같이 이루어져야 함

4. 국내 고준위방폐물 관련 인력과 연구 인프라의 부족

❍ 한국 내 고준위방폐물 관리 관련 연구 인프라는 비슷한 규모의 원자력 발전을 운영하는 다른 국가와 비교하여 부족한 상황으로, 지하처분연구시설과 가속기 기반 첨단 원자력 실험시설, 사용후핵연료를 취급할 수 있는 핫셀 등이 조속히 마련되어야 함

❍ 국내의 고준위방폐물 관련 전문 인력이 매우 부족한 상황이며, 대학 중심의 인력 양성 프로그램 개발과 함께 산업계와 연구계에서 체계적인 일자리 창출이 병행되어야 함

❍ 특히, 국내 대학은 천연 우라늄과 같은 핵물질을 교육용으로 활용하기 매우 어려운 환경이므로 관련 제도의 개선 역시 필요함

02

고준위 방사성폐기물 관리 특별법과 추진 경과

》 국민의 안전을 위한 절차와 제도의 법제화 필요

》 한국 원전의 유럽 수출 경쟁력 강화 (EU 택소노미의 요구조건을 충족)

》 3건의 관련 법안이 21대 국회에서 발의되었지만 합의 실패로 폐기 (중간저장 및 심층처분 시설 운영 시점, 부지 내 건식저장시설 용량 이견), 22대 국회에서 특별법 통과

1. 필요성

❍ 국민의 안전을 위한 절차와 제도의 법제화

– 사용후핵연료의 안전한 관리를 위해서는 「원전부지 내 건식저장」, 「중간저장」, 「심층처분」을 위한 정책이 법적 기반 위에서 안정적으로 추진되어야 함

❍ 미래 세대에게 미룰 수 없는 우리 세대가 해결해야 할 과제

– 現 세대에서 사용한 에너지 문제를 해결하고 세대 間 갈등 발생을 방지함

❍ 한국 원전의 유럽 수출 경쟁력 강화

– EU 택소노미의 요구조건을 충족시키기 위한 영구처분 시설 문제를 해결함

2. 시급성

❍ 주민 수용성 확보 (국민신뢰)

– 박근혜 정부에서 정책 결정 (제1차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획, 2016.7월)

– 문재인 정부에서 정책 확인 (제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획, 2021.12월)

– 윤석열 정부에서 정책 재확인 (새정부 에너지정책방향, 2022.7월)

⇨ 고준위 특별법(안)은 건식저장시설의 건설과 관련한 주민의견 수렴 절차, 협의의 근거 등 주민 수용성 확보의 법적 기반이 됨*

* 건식저장시설 설치는 원자력안전법에 근거하나 특별법에 관련 절차를 추가, 원전 주변 지역주민들이 건식시설의 영구화를 우려해 특별법의 조속한 제정을 요구

❍ 건식저장시설의 건설 착수 (2023.10., 필요 최소량)

– 2030년부터 한빛-한울-고리 順으로 습식저장조 포화(3개 원전본부의 건식저장 설계 용량은 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 상황이 발생함

3. 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)

❍ 국회 산중위 법안소위 1~8차 심의('22.11.22 ~ '23.5.24) 및 입법 공청회('23.1.26)를 실시했으나, 실질적 법안 심사 부재

– 9차('23.7.13) 및 10차('23.8.21) 법안소위를 통해 10개 쟁점 중 8개 합의, 2개 미합의

구분	쟁 점	소위 결과	비 고
9차 소위	①**입법형식**	특별법 vs. 방폐법 전부개정 ➠ **특별법 제정**	**합 의**
	②**제명**	**「고준위 방사성폐기물 관리에 대한 특별법」**	〃
	③**관리委 국회보고의무**	**4건의 법안에 포함된 중요업무* 보고** * 법안 공통 보고요건 + ①기본계획 수립·변경, ②예정부지 도출, ③부지선정·취소 ④부지조사계획 수립·변경 ⑤기본·심층조사 결과	〃
	④**기본계획 수립**	**관리위가 계획 수립 → 원진위 심의·의결**	〃
	⑤**부지선정 취소시 주민투표**	**사실상 결격사유이므로 주민투표 불필요**	〃
	⑥**부지선정 절차의 가역성**	**절차상 하자 시 이전 단계로 돌아가 재심의**	〃
10차 소위	⑦**관리위원회 지위**	**일반행정위 출범**, 존속기한 내 중앙행정기관 변경 검토 후 국회 상임위 보고	〃
	⑧**관리사업자 지정**	**한국원자력환경공단**을 관리사업자로 법률에 명시	〃
	⑨**관리시설 확보시점**	여당·정부**중간저장시설 및 처분시설** 확보시점 명시 vs. 야당**처분시설** 확보시점만 명시	**쟁 점**
	⑩**원전부지 내 (건식)저장시설 규모**	여당·정부원자로 **운영허가 기간** 중 발생예측량 vs. 야당원자로 **설계수명 기간** 중 발생예측량	〃

– 11차 소위('23.11.22)에서 논의 보류 후, 여·야 지도부 상정 결정

❍ '여·야 2+2 협의체*'에 여당 측 주요 안건으로 상정('23.12.6) 후 3차례 협의를 진행하였으나 합의 실패

* 정책위의장(국**유의동**, 민**이개호**) + 원내수석부대표(국**이양수**, 민**박주민**)

– 12차 법안소위 미개최로 21대 국회 종료와 함께 자동폐기(‘24.5.29)

4. 제22대 국회 고준위 특별법안 발의 및 제정(붙임2 참조)

❍ 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 中에서 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 저장용량과 주민의견 수렴·지원

구분	국 김석기	국 이인선	국 김성원	국 정동만	민 김성환
저장용량	설계수명(위원회의결)	언급없음	설계수명(위원회의결)	설계수명(위원회의결)	설계수명
주민의견수렴	O	O	O	O	O
주민직접지원	100분의50 범위	100분의50 범위	100분의50 범위	100분의50 범위	100분의50 범위

❍ 22대 국회에서 여야합의를 통해 고준위방폐물 특별법이 통과되어 9월 시행을 앞두고 있음[1)]

– 2050년까지 중간저장시설, 2060년까지 처분시설을 마련한다는 계획

1) 산업통상부 보도자료 “「고준위 방폐물 관리 특별법」 국무회의 의결”. 2025.03.18.

붙임 1 국내 방사성폐기물 처분장 부지선정 추진경과

구분	추진 경과
❶ 울진·영덕·영일 ('86~'89)	▪ 문헌조사를 통해 3개 후보지를 도출했으나 부지조사 실시 중 주민반대로 철수
❷ 안면도('90~'91)	▪ 안면도에 설치 추진 중 주민반대로 백지화
부지선정방침 변경 ('91.6월)	**▪ 부지 공모 및 부지 조사 병행 추진**
❸ 고성·양양·울진·영일·장흥·태안 ('91~'93)	▪ 연구용역과 공모 등을 병행하여 6개 지역을 발표하였으나 주민반대로 실패
❹ 양산군 장안읍·울진군 기성면 ('93~'94)	▪ 부지 공모를 통해 장안읍·기성면의 일부 주민들이 시설유치 의사를 표명하였으나, 다른 주민 반대로 실패
방촉법 제정 및 추진주체 변경 ('94.1월)	**▪ "방사성폐기물관리사업 촉진 및 지역지원에 관한법률" 제정** - **(주요내용)** 시설지구의 지정 전에 주민의견청취(개발계획 공고 및 공청회 개최 등) 및 주민협의절차, 지원사업계획 등 **▪ (주체변경)** 과기처 → 방사성폐기물관리사업추진위원회(범정부 조직)
❺ 굴업도('94~'95)	▪ 전문가와 관계기관 의견을 토대로 굴업도를 후보지로 지정 고시했으나, 활성단층이 발견되어 지정고시 해제
주관기관변경('97.1월)	**▪ 과기부(원자력연구소) → 산업자원부(한전)로 변경**
❻ 영광·고창·강진·완도·진도·보령·울진 ('97~'01)	▪ 7개 지역 주민이 유치의사를 표명하였으나, 정식 유치로 이어지지는 않음
❼ 울진·영덕·고창·영광('01~'03)	▪ 한수원이 연구용역을 통해 4개 후보지를 도출하였으나 각 지역의 주민반대로 무산
❽ 부안군('03)	▪ 부안이 단독 유치 신청하였으나 주민반대로 실패
❾ 울진·영광 등 7개 시·군('04)	▪ 정부가 주민투표 도입을 전제로 공모하여 7개 시·군 주민이 청원하였으나 지자체장 반대로 무산
관리방침 변경 ('04.12월) 및 특별법 제정('05.3월)	**▪ 중·저준위와 고준위방폐물 관리시설을 분리하기로 결정** **▪ 중·저준위방폐물 처분시설의 유치지역지원에 관한 특별법 제정** - **(배경)** ❶유치관심지역지자체장 및 유치단체에서 정부의 지원 약속 등을 담보할 수 있는 관련 법 우선 제정 요청, ❷시민단체에서 주민투표 반영 요구
❿ 경주 · 군산 · 영덕 · 포항('05)	▪ 4개 지역(경주시, 포항시, 영덕군, 군산시) **유치신청**('05.8월) 후 부지조사 및 **주민투표 실시**('05.11.2) - **(지역별 찬성률)** 경주 89.5%, 군산 84.4%, 영덕 79.3%, 포항 67.5% **▪ 경주를 최종 부지로 선정**('05.11.3)

붙임 2 제22대 국회 고준위 방사성폐기물 관리 특별법안 발의현황

구분		국 김석기 의원 (2024.5.30.)	국 이인선 의원 (2024.5.30.)	국 김성원 의원 (2024.6.5.)	국 정동만 의원 (2024.6.20.)	민 김성환 의원 (2024.8.13.)
법안명		고준위 방사성폐기물 관리 및 유치지역 지원에 관한 특별법안 (6호)	고준위 방사성폐기물 관리에 관한 특별법안 (44호)	고준위 방사성폐기물 관리시설의 설치·운영 및 주민지원 등에 관한 특별법안(149호)	고준위 방사성폐기물 관리시설 등에 관한 특별법안(729호)	고준위 방사성폐기물 관리에 관한 특별법안(2778호)
관리범위		운반, 저장, 처분	좌동	좌동	좌동	좌동
관리시설		중간저장시설 (부지내 저장시설 제외) 처분시설, 지하연구시설	좌동	좌동	좌동	좌동
		중간저장시설(2051년) 처분시설(2061년)	중간저장시설(2050년) 처분시설(2065년)	중간저장시설(2045년) 처분시설(2060년)	중간저장시설(2050년) 처분시설(2060년)	중간저장시설(2050년) 처분시설(2060년)
관리위원회		국무총리 소속의 고준위방사성폐기물 관리위원회	좌동	좌동	좌동	좌동
관리 기본계획		30년을 계획기간으로 5년마다 수립	좌동	좌동	좌동	좌동
		부지 내 저장시설 설치·운영에 관한 사항 포함	좌동	좌동	좌동	좌동
지하 연구시설		연구용 지하연구시설(처분시설 부지 환경과 유사한 조건) +처분시설 부지 내 지하연구시설	좌동	좌동	좌동	좌동
관리사업 재원		방사성폐기물관리기금, 원자력기금(연구개발)	좌동	좌동	좌동	좌동
관리사업자		한국원자력환경공단	좌동	좌동	좌동	좌동
부지내 저장시설	용량	설계수명으로 제한 (위원회 심의·의결로 변경)	언급없음	설계수명으로 제한 (위원회 심의·의결로 변경)	설계수명으로 제한 (위원회 심의·의결로 변경)	설계수명으로 제한
	의견 수렴	한수원	좌동	좌동	좌동	좌동
	지역지원 방안마련	관리위원회 (한수원과 지자체 협의)	좌동	좌동	좌동	좌동
	주민직접 지원사업	지원금 총액의 50% 범위	좌동	좌동	좌동	좌동
	설치 근거	관리위원회 승인, 원안법	좌동	좌동	좌동	좌동

03

심층처분시설 부지 조사·선정 규제참여

》 심층처분시설 장기 안전성 확보의 기반이 되는 부지조사의 중요성을 감안하여 부지조사·선정의 주요 시점에서 규제 의견을 제시하는 절차 필요

》 아울러, 부지 고유 안전성 실증을 위한 "처분부지 URL"[2]에 대해 심층처분시설로의 전환 등 처분시설의 일부로 규제하는 방안 검토 필요

1. 해외 선행국가 현황

❍ 심층처분은 수십년의 장기간 동안 개발되고, 복잡한 의사결정 구조를 가지므로, 처분 시스템 개발 초기 단계부터 규제기관의 사전 참여를 IAEA, OECD/NEA 등 국제기구에서는 권고하고 있으며, 선행국 또한 규제기관의 사전 참여가 이루어짐

- (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 일부로써 후보부지(2곳)에 대해 규제기관(SSM)이 처분사업자(SKB)의 안전성분석 보고서에 대한 적합성을 검토한 바 있음

<규제기관 사전참여에 대한 국제기구 권고사항>

국제기구	주요 내용
IAEA	Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste (SSG-14, 2011) 부지선정단계에서 규제기관의 역할에 대해 다음과 같이 규정하고 있음 - 개념설계·계획단계 : 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

2) 시설 명칭 혼동을 막기 위해 "연구용 URL → 일반부지 URL", "인허가용 URL → 처분부지 URL"로 검토 필요 (제47차 원자력이용개발전문위 후속회의 결과(`23.7.14))

OECD/NEA	The Evolving Role and Image of the Regulator in Radioactive Waste Management (2012) 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

❍ 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
- (핀란드) 심층처분부지의 상세 부지특성조사를 위해 지하특성조사시설(ONKALO)를 통한 부지특성조사 및 실증연구 결과를 바탕으로 심층처분시설의 건설허가를 신청('12.3월)한 바 있음
- (프랑스) 심층처분부지의 상세 부지특성조사를 위해 지하특성조사시설(M/HM, Bure)를 통한 부지특성조사 및 실증연구 결과를 바탕으로 심층처분시설(Ciego)의 건설허가를 신청('23.1월)한 바 있음

※ "일반부지 URL" 개발은 기초연구의 일환으로, 규제 대상으로 고려하지는 않음. 다만 일반부지 URL에서 규제기관도 참여하여 규제 관련 연구를 활발히 수행하는 것에 대한 검토 필요

<처분부지 URL에 대한 국제요건>

구분	주요 내용
IAEA	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. 처분용기 구조물과 필요한 기능을 가진 인공 방벽 건설의 실행 가능성에 대한 입증은 (예를 들면 지하연구시설에서와 같은) 안전성평가의 목적을 위해서 그리고 적합한 수준의 성능이 달성될 수 있다는 신뢰성 확보에 대한 기여를 위해서도 중요하다.

<처분부지 URL에 대한 국내요건>

구분	주요 내용
원자력안전위원회 고시	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.

2. 국내 규제적용 방향

가. 필요성

❍ 심층처분시설 개발단계부터 시설의 안전성을 체계적으로 확인할 수 있도록, 부지선정을 포함한 인·허가 신청 前 다양한 사업자의 활동에 대한 규제기관의 지속적인 지침·의견 제공이 필수적임

– 부지특성 조사 결과를 주기적으로 검토하여 얻어진 자료가 허가에 직·간접적으로 연계되는지를 검토할 필요가 있음

※ 심층처분시설 건설허가가 신청된 이후 규제기관이 해당 자료의 신뢰성과 객관성을 확인하는 것은 한계가 존재

❍ 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 前 사업 활동을 검토하여 원활한 안전규제 여건 조성이 필요함

나. 적용 방향

❍ 예정부지 확정 이전 단계

– (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

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

❍ 예정부지 확정 이후 단계(부지특성조사 및 허가 준비 단계)

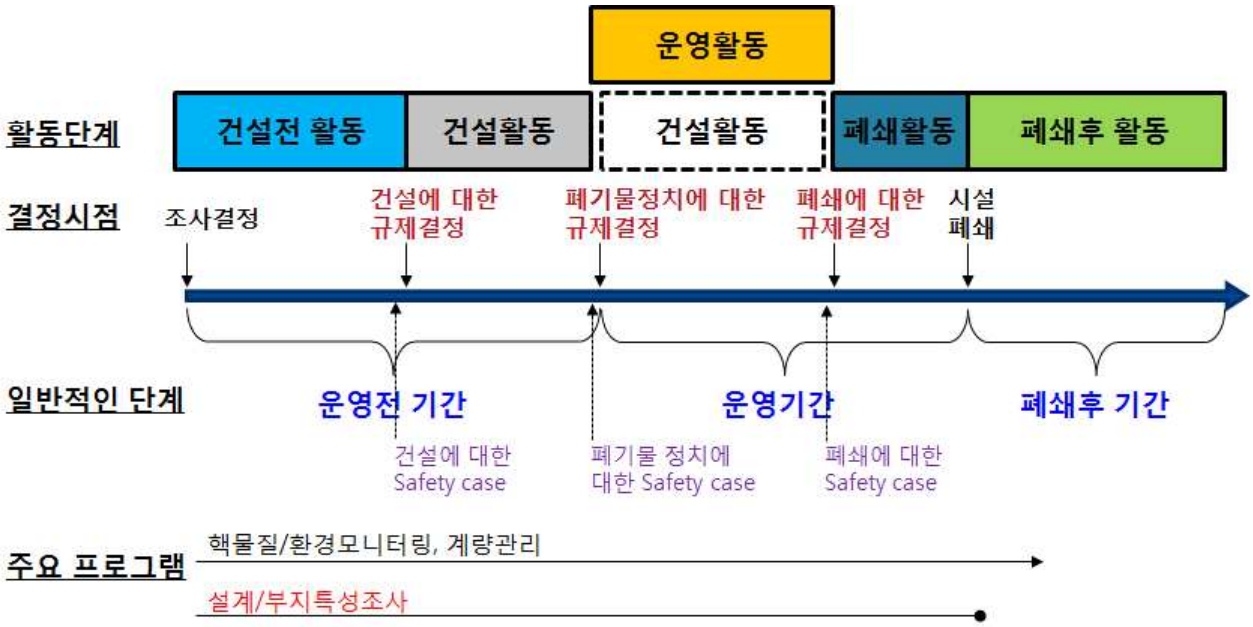
- (규제기관) 허가신청에 필요한 규제요건 등의 제공과 안전성 확인을 위한 정보확보 등

다. 기대효과

❍ 규제기관의 사전 참여를 통한 독립적 검토는 처분사업의 신뢰성 향상에 기여, 국제기구의 권고와 국제적인 추세에도 부응하는 것임

❍ 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 기대함

붙임 1 심층처분시설 단계별 주요활동[3] [IAEA SSG-14, 2011]



	주요 활동
개념화 및 계획	■ 부지선정 요건 등 결정 ■ 요건적용을 위한 절차 개발 ■ 설계최적화에 적용되는 기간 (안전성평가 기간 등) ■ 부지선정절차, 기반암 결정 등
지역조사	■ 단계별 screening을 통한 후보부지 선정 – regional mapping 단계와 screening 적용(배제요건, 선호부지 등)
부지조사	■ 사전 부지특성 설계에 필요한 자료 획득 및 평가 ■ 지표 및 가능한 수준의 지하 특성 조사(시추공 조사 등) ■ 사전안전성 평가 수행
상세부지특성조사	■ 상세 부지 특성 자료 확보

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

붙임 2 주요국 지하연구시설(URL) 운영 현황[4]

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	기존 광산 갱도
	토노 광산	일본	점토질암(130 m)	1986~2004	기존 광산 갱도
	카마이시 광산		화강암(300-700 m)	1988~1998	기존 광산 갱도
	미즈나미		화강암(현재 300-500 m)	2004~2021	
	호로노베		점토질암(현재 500 m)	2005~현재	
	아멜리	프랑스	암염	1986~1992	기존 광산 갱도
	Fanay-Augères		화강암	1980~1990	기존 광산 갱도
	Tournemire		점토질암(250 m)	1990~현재	기존 철도터널 확장
	스트리파 광산	스웨덴	화강암(360~410 m)	1976~1992	기존 광산 갱도
	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	미국	암염(200m)	1959-1962	기존 암염 광산 갱도
	G-터널		응회암(300 m)	1979~1990	기존 무기시험 지하공동
	클라이맥스		화강암(420 m)	1978~1983	기존 굴착공동 확장
	HADES	벨기에	점토질암(230 m)	1984~현재	
처분부지 URL	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	

4) 제48차 원자력이용개발전문위원회(`24.2.13~15) 심의 참고자료 中 발췌

04

안전특성을 고려한 심층처분시설 건설·운영허가 이원화

》 IAEA[5] 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

1. 해외 선행국가 현황

❍ 해외 선행국가의 심층처분시설 건설허가는 예비설계, 부지특성, 환경영향 등이 주 심사 대상이며, 운영허가는 최종설계, 운영프로그램, 비상계획 등이 주 심사 대상으로 파악[6]되고 있음

– (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

2. 국내 규제적용 방향

가. 필요성

❍ 현행 원자력안전법령에서는 방사성폐기물 처분시설에 대해 건설·운영 단일허가 체계가 수립되어 있는데,

– 시설의 건설기간이 장기간 소요되는 심층처분시설에 대해서는 특화*(건설허가와 운영허가 이원화 분리 등)된 허가체계가 필요함

* 심층처분시설 특성상 운영허가에 필요한 데이터 확보 등에 충분한 시간 필요

5) IAEA SSG-14(Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste), 2011
6) KINS, 고준위방사성폐기물 심층처분에 대한 규제기관 최적 역할모델 연구 최종보고서, 2018

❍ 다만, 현 시점에서 심층처분시스템 개발에 당장 영향을 미치는 사항이 아니므로,
  – 방사성폐기물관리시설 전반의 규제체계 개편을 함께 검토함이 바람직할 것임

나. 적용 방향

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

다. 기대효과

❍ 장기간의 건설과정에서 취득한 부지고유 특성자료를 바탕으로 한 심층처분시설 안전성 확인, 처분사업 신뢰성 향상에 기여할 수 있을 것임

05

고준위방폐물 관리 인허가 제도 개선

》 합리적인 사용후핵연료 관리비용 산출을 위한 기술적 근거를 제공함으로써 과도한 국민 부담 경감

1. 합리적인 고준위방폐물 처분시설 폐쇄후 관리방안 도출

가. 필요성

❍ 사업과 사용후핵연료관리 부담금 산정 등에 활용되는 처분시설의 합리적이고 적정한 폐쇄 후 관리기간 설정 필요

– 중저준위 처분시설의 폐쇄후 관리기간은 원안법에 명시되어 있으나, 고준위방폐물 처분시설에 대해서는 부재

– 현재 고준위방폐물로 간주하여 부과되는 사용후핵연료관리 부담금 내 폐쇄후 관리 비용은 중저준위 처분시설 사례를 준용하고 있으나 이에 대한 비용이 상당한 수준

– 예를 들어 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

– 현재 사용후핵연료 관리에 필요한 총사업비 내 처분시설 폐쇄 후 관리비용은 300년 기간에 약 2조 원 이상이 반영되어 있는데 이는 중저준위방폐물 관리비용을 근거로 능동적이고 적극적인 관리비용이 반영

– 학회 차원에서 폐쇄후 관리기간 동안 모니터링 방안을 능동과 수동으로 구분하는 합리적 아이디어를 제안하여 현재 반영되어 있는 비용을 합리적으로 총사업비에 반영할 필요

나. 해외현황

❍ (스웨덴) 폐쇄 후 관리기간 및 모니터링 방법에 대한 법적인 규제는 없음

❍ (스위스) 법에서는 처분후 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

다. 논의결과 * 원자력안전법 개정보다는 학회차원의 대안제시 필요

❍ 현행 원자력안전법에 정의하는 폐쇄 후 관리 기간은 수십 미터 내에 처분되는 천층처분의 시설 특성을 감안하여 설정한 기간이며,

❍ 지하 약 500m 심도에 위치하는 처분시설은 천층처분과의 명확한 안전성 측면에서 차이가 있으므로 폐쇄 후 관리 기간을 규제법령에 명시하는 것은 기술적으로 비합리적임

❍ 또한 고준위방폐물인 사용후핵연료 관리시설의 폐쇄 후 관리 기간을 원자력안전법에 명시하기에는 시기적으로 이른 측면을 감안하되,

❍ 사용후핵연료관리 부담금에 반영되는 폐쇄 후 관리 비용의 합리적인 산출을 위해 중저준위방폐물 처분시설의 폐쇄 후 관리비용을 준용하되, 관리방법을 능동적과 수동적으로 구분하여 학회차원에서 대안을 제안할 필요

< 대안(예) >

(모니터링 기간) 해외 일부국가에서는 폐쇄전 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 폐쇄전 5년 이전 평가를 통해 폐쇄전 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 중저준위 방폐물 관리비용내 폐쇄후 관리비용의 항목을 준용하여 산출하되, 폐쇄후 5년 이후에는 관련 비용에서 수동적인 비용(울타리 유지보수 비용 인간출입 통제와 관련된 울타리 유지보수 등 최소한의 비용)만을 반영

라. 추진전략

❍ 학회 이슈위원회 보고서로 개선사항을 반영하여 사용후핵연료관리 부담금 산정시 활용할 수 있도록 정부에 제공

– 이슈위원회 개선사항은 타 개선사항과 함께 학회 학술대회 내 워크숍을 통해 충분한 전문가 의견수렴을 거쳐 수정보완후 정부에 제공

마. 기대효과

❍ 합리적인 폐쇄 후 관리비용 산출방법 제시로 발생자·일반국민의 사용후핵연료 관리에 대한 부담 경감

06

선·후행핵주기 관련 국제협력 전략

》 러-우 전쟁으로 인한 공급망 불안과 차세대 SMR 개발 경쟁이 치열해짐에 따라 2022년부터 우라늄 가격이 불안정해 짐에 따라 HALEU 확보를 위한 전략적 투자와 대안 마련 필요

》 아울러, 핵물질 공급 및 취급에 대한 궁극적인 대안 마련을 위해 사용후핵연료 재활용 기술 개발사업을 완성하기 위한 전략 수립 필요

1. 선행핵주기 관련 국제협력

가. 배경

❍ 국제적인 원자력 이용개발 확대에 따라 선행핵주기 시장의 수요와 규모는 확대될 전망으로 선행핵연료 시장의 안정성은 그 어느 때보다 중요해지고 있음

– 원전 운영 효율성 개선 및 선진원자로/SMR 개발에 필요한 5% 이상의 높은 농축도의 우라늄(LEU+, HALEU) 등의 수요와 새로운 시장 기회도 발생 중

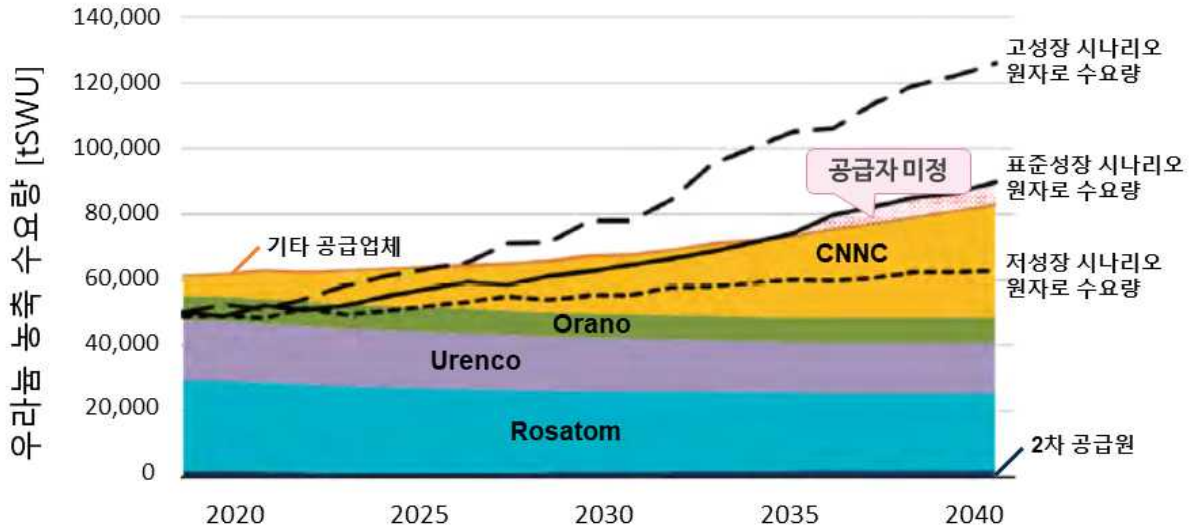
<선행핵주기 분야별 시장 동향>

국제기구	주요 내용
채광	– (수요) 장기간의 낮은 우라늄 현물 가격으로 인해 우라늄 채광 및 정련 산업이 침체되었으나, 2022년 이후 회복세에 있고 생산량도 증대되고 있음 – (시장 구조) 카자흐스탄, 캐나다, 나미비아, 호주 등의 우라늄 자원 보유량 및 탐사 개발 수준에 의존하는 소수국가에 의존하는 시장임 – (가격 추이) 2024년 3월 기준 우라늄 현물 가격*은 87.75 USD/lb U3O8로 16년 만에 최고치를 기록했으며 이는 2016~2021년 보합세 가격인 20~30 USD/lb U3O8의 3배 수준
변환	– (수요) 대형원전 활성화에 따라 우라늄 변화 수요도 2022년 이후 수요 급등 – (시장 구조) TENEX(러시아), CNNC(중국), Cameco(캐나다), Orano(프랑스)가 과점 – (가격 추이) 현물 가격은 2024년 1월 기준 55 USD/kgU로, 10년 내 최저 수준인 2017년의 4.5 USD/kgU 대비 12배 이상 급등
농축	– (수요) LEU+ 및 HALEU 등 농축 서비스 수요가 증대될 것으로 예상 – (시장 구조) TENEX(러시아), Urenco(영국·독일·네덜란드), Orano(프랑스), CNNC(중국) 등 4개 업체가 독점시장 형성. TENEX가 가장 높은 시장점유율(46%)을 차지 – (가격 추이) 24년 163 USD/SWU로, '18년의 34 USD/kgU 대비 약 5배 증가

❍ WNA의 농축 수급 전망 시나리오에 따르면 현재의 농축 시장 구조 하에서는 이르면 2020년대 후반 또는 2030년대 중반부터 공급량이 수요량 추월 전망

– 부족분은 2차 공급원* 확대 및 추가 농축용량 확장 등을 통해 충족될 수 있을 것으로 예상

* 2차 공급원(secondary supply)은 전력회사·핵연료회사 소유 우라늄 재고, 정부 소유 재고, 사용후핵연료 재처리로 생긴 플루토늄 및 군사용 잉여 플루토늄을 이용한 핵연료, 감손우라늄 재농축 등으로부터 공급되는 우라늄을 의미



❍ 서방국가들은 對러시아 제제의 일환으로 농축 시장을 독과점하고 있는 러시아를 배제하기 위해 러시아 핵연료 시장 견제를 본격화하는 중

– (미국) 미국 상무부는 2020년 10월 Rosatom과의 러시아産 우라늄 수입상한제*를 개정·연장하여 2028년까지 러시아産 우라늄 수입 비중을 15%로 단계적으로 감축할 계획이며, 이에 더해 2028년부터 2040년까지 러시아産 우라늄 수입을 공식적으로 금지하는 법**이 제정(대통령 서명 5월 13일)되면서 러시아 핵연료 의존도 탈피를 위한 노력이 가속화될 전망

* 우라늄 수입상한제: 미국은 러시아의 우라늄 덤핑(정상가격보다 낮은 가격으로 판매)으로부터 자국 산업을 보호하기 위해 관세를 부여하는 반덤핑조사(anti-dumping investigation)를 유예하는 대신 연간 수입량에 상한(미국 농축 수요의 일정 비중을 기준으로 kg U-235 총량과 수입 형태별 한도 설정)을 두고 있음

** Prohibiting Russian Uranium Imports Act: 러시아산 미조사 저농축우라늄 수입을 금지하고, 대체 가능한 연료 공급원이 없는 원전 운영자에 대해 2027년 말까지 면제제도 마련하도록 한 법으로, 제정 90일 후 발효 될 예정

– (EU) 유럽의회는 2023년 2월 Rosatom에 대한 제재를 촉구하는 결의안을 통과시켰으나, EU 이사회는 같은 달 10번째 EU 제재 패키지에 Rosatom를 포함한 러시아의 주요 민간 원자력 산업체를 제재목록에 포함시키지 않음*

* Rosatom 자회사인 FSUE 아톰플로트(원자력 쇄빙선 운영)만 패키지에 포함되어 유럽 내 제재받고 있음

- (VVER 이용국) 유럽 내 VVER 원전 운영국의 러시아산 핵연료 의존도를 낮추면서 핵연료를 안정적으로 공급하기 위한 가속화 프로그램(APIS)이 2023년 1월 착수되었으며, EU는 Euratom Work 프로그램 2023-25를 통해 APIS에 1,000만 유로를 기여함

※ 웨스팅하우스는 과거부터 핀란드, 우크라이나의 VVER 연료 공급에 협력해왔으며, 최근 불가리아('22.12), 체코('23.3) 등과도 연료 공급 계약을 체결

❍ 미국, 영국, 프랑스, 캐나다, 일본 등 5개국은 2023년 4월 각국의 민간 원자력 발전 부문의 자원과 역량을 활용하여 가동 원전 및 미래 선진원자로를 위한 연료 공급을 보장함으로써 러시아의 공급망 영향력을 약화시키기 위한 'Sapporo 5' 동맹을 결성

- 2023년 12월 향후 3년 동안 우라늄 변환 및 농축 역량을 강화하여 러시아로부터 자유롭고 탄력적인 우라늄 공급 시장을 구축하기 위한 42억 달러의 정부 주도 투자계획을 발표

나. 전망 및 평가

❍ 선행핵주기 시장은 더욱 확대될 것으로 보이며, 핵연료 분야의 對 러시아 제재 조치가 현실화 된다면 서방국가 주도의 핵연료 시장 구축 노력이 보다 가속화될 것으로 전망

- 미국의 러시아産 우라늄 수입 금지 법안이 제정됨에 따라, 국내 농축 수요의 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

- 우리나라를 포함한 많은 원자력 신흥국과 이용 확대국가들은 기술옵션에 선진원자로/ SMR을 포함하고 있는바, 이들을 지원하기 위한 HALEU 공급망 구축 노력을 주목할 필요

- 미국의 동맹국 중심의 HALEU 공급망 구축 력과 함께 소다자화 · 블록화 되어가는 핵연료 시장에 대비한 우리의 전략적 투자와 공급 대안 마련이 필요

❍ 러시아産 화석연료 수입 제한 조치*와 달리 핵연료 시장, 특히 농축 시장에 진입 가능한 공급국이 제한적이고 VVER 원전 연료의 대안이 아직 충분히 확보되지 않았음을 고려하면, 즉각적인 제재 효과는 제한적일 것으로 평가

* 美 바이든 대통령은 2022년 3월 러시아로부터 석유, 석탄, 천연가스 수입을 금지하는 행정명령을 발표했고, EU도 제재 패키지 하에 러시아産 석탄, 석유 수입을 제한하고 가격 제한치를 두는 등의 단계적 조치를 취함

다. 국제협력 전략

❍ 현실적으로 미국에서 생산되고 있는 농축 기업으로부터 핵물질을 공급받을 수밖에 없는 우리의 상황을 고려하여 미국 내 농축사업[참고1]에 지속적으로 모니터링 수행

❍ 미국 내 사업에 자금 압박 등이 발생할 경우 국내 관심기업을 통해 투자를 진행하여 적극적인 핵물질 확보 노력 수행

※ 한전원자력연료(주) 등 관련 기업과 사전 전략 마련 필요

❍ 테라파워(주) 등 한국과 기술개발 협력 의지가 있는 기업과 전략적인 제휴관계를 맺어 핵연료 공급처 확보

– 핵연료를 공동으로 사용할 수 있는 대상 원자로: 소듐냉각고속로(테라파워 Natrium), 고온가스로 (USNC 핵연료)

❍ 장기적으로 핵연료 공급 안정성 확보를 위해 선진원자로 용 핵연료 제조기술 확보와 핵연료 시설에 대한 설계 사업 추진

2. 후행핵주기 관련 국제협력

가. 배경

❍ 국내 사용후핵연료의 직접처분 사업 추진 환경이 불투명해진 바, 선진원자로를 활용한 폐기물 저감 기술 개발에 투자 확대 중

– 에너지부는 오바마 정부에서 유카산(Yucca Mt.) 프로젝트가 중단된 이후 동의 기반 부지 선정(Consent-Based Siting)을 통해 하나 이상의 연방 통합 저장 시설(Consolidated Federal Interim Storage) 구축 추진 중

– 2022년 9월 동의 기반 부지 선정의 의견수렴 결과, 지역 사회 공론화 초기 단계이기는 하지만 실제 동의를 얻을 수 없거나, 너무 오래 걸릴 것이라는 우려가 제기

– DOE ARPA-E*는 ONWARDS, CURIE** 프로그램을 통해 선진원자로 폐기물 처분 최적화와 경수로 사용후핵연료 재활용 분야 기술 혁신에 예산 투자 중

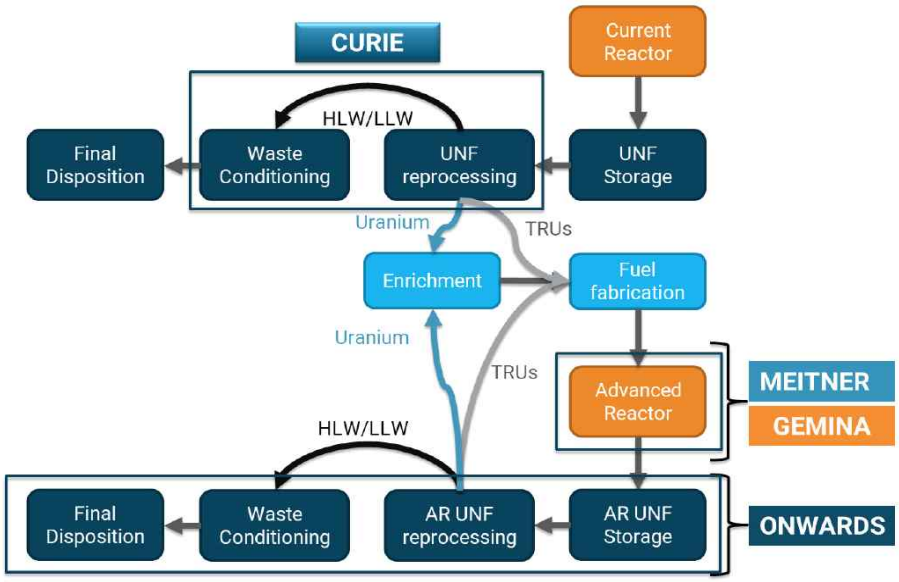
* Advanced Research Projects Agency-Energy

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

❍ 선진원자로 개발사들이 선진원자로 폐기물 부담 저감 및 연료 공급을 위한 목적으로 재활용 기술개발의 상업화를 추진 중

나. 후행핵주기 기술개발 현황

❍ ONWARDS는 선진원자로 폐기물의 처분 영향을 최소화하기 위한 목적의 기술 개발인 반면, CURIE는 경수로 사용후핵연료 재활용 공정의 경제성 및 안전조치 기술 개선을 위한 목적



❍ 선진원자로 개발사인 Oklo는 연료 재활용 기술을 개발하여 재활용 연료를 선진원자로 연료로 공급할 계획

- Oklo는 현재 EBR-II 개념에서 파생된 15 MW 용량의 Aurora 원자로를 개발중이며, 원자로 건설, 운영 주체로서 연료 공급 측면에서 재활용이 충분한 경제성을 가질 수 있을 것으로 판단

※ 2024년 INL 부지에 첫 번째 Aurora 원자로 건설을 위한 COLA를 제출할 계획이며, 이르면 2028년까지 오하이오주에 2기의 15 MW Aurora 원자로를 배치할 수 있을 것으로 기대

- EBR-II 사용후핵연료 재활용에 활용되는 염화물 전해정련 기반 기술을 이용하여 TRU 원소들을 공회수 및 연료로 재활용하며, 국내 파이로 기술과 유사할 것으로 판단
- ARPA-E ONWARDS & CURIE 프로그램 등을 통해 파이로 기반 재활용 공정 기술을 기 보유한 ANL, INL과 공동 연구 수행 중

<Oklo 社의 정부 과제 수주 및 참여 현황>

	지원 프로그램	과제 내용	지원 금액	협력 기관
1	DOE TCF	핵심 **재활용 공정 효율 개선**을 위한 선진 센서 개발	200만 달러	ANL(주관)
2	ARPA-E OPEN 2021	인공지능, 머신러닝을 이용한 **시설 설계 및 안전조치 기술** 개발	360만 달러 (22.06 - 25.06)	ANL(주관)
3	ARPA-E ONWARDS	전해정련 기반 **재활용 기술 상용화 검증**	400만 달러 (22.07 - 25.10)	ANL, INL, Deep Isolation
4	ARPA-E CURIE	경수로 핵연료 재활용을 위한 **전기화학적 산화환원 공정** 개발	490만 달러 (23.03 - 26.03)	ANL(주관)

❍ CURIO Solutions은 경수로 사용후핵연료의 재활용 및 희귀 동위원소의 회수·공급을 목적으로 “NuCycle”이라고 명명한 화학 공정을 개발 중

- 고산화 상태인 육불화물의 고온 휘발성 차이를 이용하여 사용후핵연료 내 핵물질을 분리하는 Fluoride Volatility 기술 이용
- 상용 시설은 30년 내 미국 내 사용후핵연료를 전량 재처리할 수 있는 4,000 톤/년(모듈 당 400 톤/년, 10개 모듈)로 미식 축구 경기장 크기에 약 50억 달러의 건설비를 예상
- CURIO는 사용후핵연료 재활용 과정에서 부수적으로 희귀 동위원소를 회수하여 활용할 수 있을 것으로 평가

※ CURIO는 로듐과 같은 사용후핵연료 내 희귀 동위원소 재활용으로 4,000톤 처리 시 10억 달러 이상의 수익 창출이 가능할 것으로 평가

- ARPA-E CURIE 및 DOE GAIN(Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear) 프로그램을 통해 국립연구소와 공동 연구 수행 및 국립연구소 전문 인력을 현물 지원받고 있음.

<Curio Solutions 社의 정부 과제 수주 현황>

	지원 프로그램	과제 내용	지원 금액	협력 기관
1	ARPA-E CURIE	경수로 핵연료 재활용을 위한 실험실 규모 NuCycle 공정 개발	500만 달러 (23.03 - 26.03)	ORNL, PNNL, INL, SNL
2	DOE GAIN	NuCycle 핵확산저항성 악티늄 회수 공정을 위한 Redox 포텐셜 실험 자료 수집	국립연구소 인력 현물 지원	INL

다. 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

❍ 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

❍ 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

07

핵연료물질 활용 연구 규제 개선 방향

》 국내 감손/천연우라늄 규제 수량은 국외 사례와 비교했을 때 수십~수백 분의 1로 매우 적은 수량이며, 이로 인해 대학 단위에서의 핵연료 연구가 활발히 이루어지고 있지 못함

》 국내 핵주기 연구의 다양성 및 전문인력 확보를 통한 원자력분야 국가 경쟁력 제고를 위해서는 감손/천연우라늄에 대한 규제를 국외 사례를 고려하여 현실화하는 것이 필요

1. 국내 핵연료물질 규제 기준 및 사용허가 현황

< 규제현황 요약 >

◇ 법인 단위에서 300g을 초과하는 감손우라늄 및 천연우라늄을 사용하기 위해서는 원자력안전위원회의 허가가 필요하며, 신규 인허가 심사에 최소 260일에서 최대 822일의 시간이 소요됨

◇ 소규모 핵연료물질 사용허가를 위해 방사선 방호, 폐기물 관리 등에 필요한 다양한 시설이 요구되어, 대학에서 연구를 목적으로 감손/천연우라늄을 신규로 취급하기에 부담됨

가. 원자력안전법령에 따른 핵연료물질 규제체계

❍ 원자력안전법령*에서 핵연료물질은 감손우라늄, 천연우라늄, 농축우라늄을 모두 포함하며, 감손우라늄 및 천연우라늄은 취급량이 300g을 초과하는 경우, 농축우라늄은 모든 수량에 대해, 사용허가를 득한 이후 사용하도록 규정**

* 원자력안전법 시행령 제3조(핵연료물질) 제1호에서 천연우라늄, 제2호에서 감손우라늄, 제5호에서 농축우라늄을 정의

** 원자력안전법 제71조(사용허가가 필요하지 아니한 핵연료물질)의 제1호에서 천연우라늄, 제2호에서 감손우라늄의 사용허가 불필요 수량을 규정

– 단, 감손우라늄과 천연우라늄은 독립적으로 규제되고 있어, 감손우라늄과 천연우라늄이 각 300g을 초과하지 않는 경우*, 사용허가 대상이 아님**

* 감손우라늄 200g과 천연우라늄 300g을 사용하는 경우 사용허가가 불필요하나, 감손우라늄 400g 사용 시에는 사용허가 필요

** 천연우라늄 및 감손우라늄 규제 기준 수량 300g은 일본 원자력기본법의 내용을 따라 결정되었으나, 일본 원자력규제위원회에서도 관련 근거 문서는 보유하고 있지 않음

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

❍ 핵연료물질의 사용허가를 위해서는 방사선관리구역 설정, 배기/배수 감시, 저장 및 폐기시설 등의 다양한 시설 및 관련 조직, 규정 등을 갖추어야 함*

* 원자력안전법 제45조(핵연료물질의 사용 등 허가), 시행령 제72조(허가기준) 및 시행규칙 제49조(핵연료물질 사용허가의 신청 등)에서 관련 내을 규정함

<원자력안전법령 내 핵연료물질 관련 규정>

분류	조항	조항명
원자력안전법	제2조	정의
	제45조	핵연료물질의 사용 등 허가
	제46조	허가기준
원자력안전법 시행령	제3조	핵연료물질
	제71조	사용허가가 필요하지 아니한 핵연료물질
	제72조	허가기준
	제73조	시설검사
	제174조	환경상의 위해방지
원자력안전법 시행규칙	제49조	핵연료물질 사용허가의 신청 등
	제51조	경미한사항의 변경신고
	제52조	기술능력

나. 핵연료물질 신규 인허가 소요기간

❍ 2018년부터 2023년까지 허가된 핵연료물질 사용허가는 총 6건이며, 인허가 신청에서 완료까지 평균 403일로 1년 이상이 소요되었으며, 최대 822일로 2년 이상이 소요된 경우도 존재함[7)]

- 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

<원자력안전법령 내 핵연료물질 관련 규정>

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

기관	접수일	완료일	심사 소요 일자
A	2016년 11월 21일	2018년 3월 8일	472일
B	2017년 5월 18일	2018년 3월 28일	314일
C	2018년 9월 14일	2020년 12월 14일	822일
D	2020년 8월 25일	2021년 5월 25일	273일
E	2020년 9월 3일	2021년 5월 25일	264일
F	2020년 9월 8일	2021년 6월 8일	273일

다. 핵연료물질 사용허가 현황

❍ 핵연료물질 사용허가를 취득한 대부분 기관은 산업체 또는 연구기관*이며, 대학**에서의 핵연료물질 활용은 매우 제한적임[8)]

* 한전원자력연료, 한국원자력연구원, ㈜한국수력원자력 중앙연구원, 한국원자력통제기술원 등에서 수 kg에서 톤 단위의 핵연료물질 사용허가를 취득하여 활용 중임

** 핵연료 연구 등을 목적으로 가장 많은 핵연료물질을 허가받은 대학은 5.5kg 규모의 울산과학기술원이며, 서울대학교가 2.9kg의 핵연료물질을 보유 중이나, 폐기대상 감손우라늄, 천연우라늄 물질의 형태로 연구목적으로 사용 중인 핵연료물질은 없음

<국내 핵연료물질 사용허가기관 요약>

기관명	사용 물질	총사용량(kg)	피폭선량* (mSv/y)
A 기관	DU, NU, EU	70	4.36(DU/NU 20kg)+α
B 기관	DU, NU	2.9	0.027
C 기관	DU, Th	1.5	0.186(외부피폭)+α
D 기관	DU, NU, EU, Th, Pu	355,308	23.2395+α
E 기관	Th 폐기물	52드럼(200L)	α
F 기관	DU	1.6334	0.88
G 기관	DU, NU, EU	0.5	1.32
H 기관	DU 폐기물	8,698드럼(200L)	16.12
I 기관	DU	4.43	0.125
J 기관	DU	0.5	0.8311
K 기관	DU, NU, EU	2.4	0.14
L 기관	DU, NU, EU, Th, Pu	0.06	0.12
M 기관	DU, Th	5.5	4.478
N 기관	DU, NU, EU, Pu	5,061	46.97
O 기관	DU	50	0.0418
P 기관	DU	66	9.583

* 허가 신청 시 제출했던 환경영향평가보고서, 피폭선량평가 보고서 등을 근거하여 작성됨

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

2. 국외 핵연료물질 규제 현황

- ❍ 미국, 프랑스, 캐나다에서는 연간 10~500kg 이내의 감손우라늄 및 천연우라늄의 사용에 대해서는 별도의 허가를 받지 않고 활용하는 것이 가능하며, 일본은 우리나라와 같은 기준으로 핵연료물질의 사용을 규제함[1)]
- ❍ 허가를 위해 필요한 시설, 장비(방사선 방호, 폐기물 관리 등)의 수준은 국가별로 큰 차이가 없음

<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
미국	분산형태(액체, 기체, 파우더) 천연/감손우라늄, 토륨	7kg 이하 (1.5kg/회 이하)
	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

가. 일본

❍ 핵원료물질, 핵연료물질 및 원자로 규제에 관한 법률*에서 한국과 동일하게, 농축우라늄 및 300g을 초과하는 감손우라늄과 천연우라늄을 사용하려고 하는 경우, 사용허가를 받도록 하며**, 허가를 위해 필요한 서류 및 시설, 조치사항은 국내와 매우 유사함[7)]

* 법 제52조(사용허가) 및 시행령 제39조(사용허가를 필요로 하지 않는 핵연료물질의 종류 및 수량)

** 1958년 관련 법령이 개정되면서 작성된 내용으로, 일본 원자력규제위원회는 감손우라늄 및 천연우라늄 규제 대상 수량(300g)에 대한 근거 자료가 없다고 밝힘

나. 미국

❍ 원자력법(Atomic Energy Act) Section 62에서 우리나라의 핵연료물질에 해당하는 물질을 특수핵물질*, 선원물질**, 부산물***로 분류하여 정의함

* 특수핵물질(Special Nuclear Material): 플루토늄, 농축우라늄 등 인위적으로 농축된 물질

** 선원물질(Source Material): 우라늄, 토륨 등을 포함하는 물질 (감손우라늄, 천연우라늄 등)

*** 부산물(Byproduct Material): 특수핵물질을 생산, 사용하는 과정에서 생성된 방사성물질

❍ 감손/천연우라늄에 해당하는 선원물질은 일반면허(general license)*를 가지고 있는 기관의 경우, 물리적 형태에 따라 연간 7kg 또는 70kg 이하에 대해서는 특별한 사용허가 없이 사용 가능**

* 특정 자격 요건을 충족하는 개인이나 기관이 별도의 신청 절차 없이 규정된 조건 하에 방사성물질을 사용할 수 있도록 허용하는 제도

** 액체, 기체, 파우더와 같은 분산형 물질의 경우 연간 7kg 이하(1회 사용량 1.5kg 이하), 비분산성 물질의 경우 연간 70 kg 이하(1회 사용량 7kg 이하) 사용 가능

다. 프랑스

❍ 국방법(Code de la défense)의 입법부분(Partie législative) Article R.1333-1에서 핵연료물질을 정의하고 있으며, 플루토늄, 우라늄, 토륨 및 핵융합에 사용될 수 있는 중수소, 삼중수소, Li-6 등이 포함됨

❍ Article R.1333-8에서는 승인이 필요한 수량을 규정하며, 500 kg을 초과하지 않는 천연우라늄과 감손우라늄에 대해서는 허가 없이 사용 가능하며, 농축우라늄 및 플루토늄은 1g을 초과하는 경우, 허가가 필요함*

* 해당 기준은 핵안보 측면에서 결정된 것으로 판단됨. Article R.1333-70의 핵안보 이행을 위한 핵연료물질 분류체계에서 등급이 부여되는 농축우라늄 및 감손/천연우라늄의 수량이 각 1g 이상, 500kg이상으로 Article R.1333-8에서 제시된 허가가 필요한 수량과 일치함

라. 캐나다

❍ 핵물질 및 방사선 장치 규정(Nuclear Substances and Radiation Devices Regulations) section 5에서 면제 가능 핵연료물질 수량을 기술하고 있으며, 연간 사용량 10 kg을 넘지 않는 감손/천연우라늄의 사용은 면제 대상임

- 농축우라늄의 경우, 별도의 면제 기준이 제시되어 있지 않아, 전량 허가 대상임

3. 국내 핵연료물질 사용허가 면제수량 개선 필요

❍ 현행 핵연료물질 사용에 대한 규제는 적은 수량(300g)을 취급하기 위해, 과도한 설비를 갖추도록 요구하고 있으며, 인허가 심사기간 또한 길어, 대학에서의 다양하고 깊이 있는 핵주기 연구를 저해하는 요인임

❍ 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

- 국내 핵연료물질에 대한 사용허가 면제수량을 타국과 비교하면, 수십~수백 분의 1의 수준으로 적으며, 국내 기준 결정에 참고가 된 일본 법령은 1950년대에 제정되어 관련 근거를 찾기 어려움
- 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

08

첨단 원자력분야 기술경쟁력 확보를 위한 가속기기반 연구활성화 전략

》 현재 가동중인 대형 방사광가속기의 경우, 핵물질/방사성물질 전용 빔라인 부재로 인해 관련 연구가 활발하게 이루어지고 있지 못함.

》 국내 선진원자로 개발 및 핵주기 연구의 다양성 확보 등 원자력분야 국가 경쟁력 제고를 위해서는 현재 구축 중에 있는 대형가속기 등에 원자력 분야와 연계한 전용 빔라인 및 R&D 활성화를 위한 전략 제시 필요

1. 국내 대형가속기 구축 · 운영 현황

❍ 국내 대형가속기는 방사광가속기 3기, 양성자가속기 1가, 중이온가속기 1기, 중입자가속기 1기 등 총 6기가 운영(3세대 원형 포항가속기, 4세대 선형 포항가속기, 양성자가속기) 중에 있거나 구축 중에 있음(4세대 다목적방사광가속기, 중이온가속기, 중입자가속기)

❍ 현재 운영 중인 대형가속기 중 기초 및 응용과학분야에 파급효과가 큰 방사광가속기의 경우 핵물질 및 RI 물질을 활용한 핵주기 연구를 할 수 있는 빔라인은 없으며, 현재 구축 중에 있는 다목적 방사광가속기 초기 10개 빔라인 중 1기에는 포함되어 있으나, 핵물질 및 RI 물질 전용 빔라인 구축 여부 미지수

❍ 중이온가속기 역시 원자력분야와 연계한 연구 활성화를 위한 대응책 필요

<국내 대형가속기 구축·운영 현황>

구분		형태	활용목적	운영주체	비고
방사광가속기	3세대	원형	물질의 구조, 현상분석/활용연구	포항가속기연구소	운영 중
	4세대	선형		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

2. 대형가속기 기반 원자력분야 국외 이용 · 연구 동향

가. 방사광가속기 이용 · 연구 동향

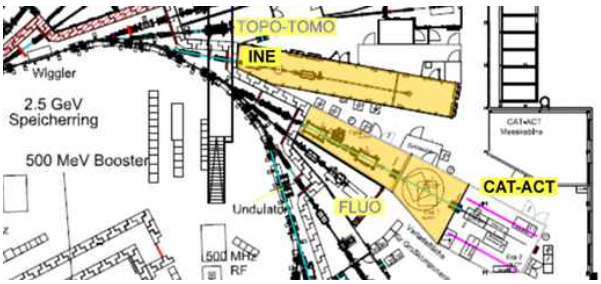
❍ 국내 방사광가속기는 핵물질 및 RI를 이용한 전용 빔라인이 부재한 반면, 해외에서는 원자력선진국을 중심으로 핵물질/RI 전용 빔라인을 구축하여 다양한 원자력분야의 연구를 활발히 수행하고 있음[표2]

<해외 핵물질/RI 전용 빔라인 운영현황>

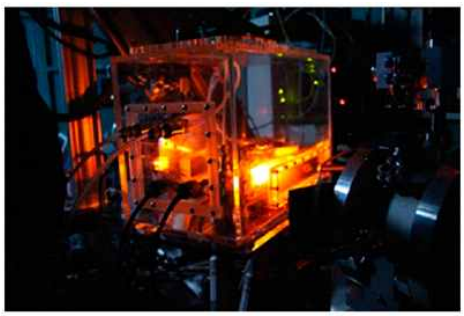
국가	방사광가속기	핵물질/RI 전용 빔라인	운영기관	비고
유럽연합	ESRF	ROBL(BM20)	HZDR	
독일	KARA	INE	KIT-INE	
		CAT-ACT		
프랑스	SOLEIS	MARS	CEA	최대 185 GBq 취급가능
일본	Spring-8	Actinide Science I	JAEA	
		Actinide Science II		
스위스	SLS	X05LA	PSI	
미국	SLAC	핵물질 및 RI 물질만을 위한 전용 빔라인은 없지만 별도의 차폐용기를 활용하여 핵물질 및 RI 물질 측정 가능		
	ALS			
	APS			
영국	DLS			

❍ (영국) Diamond Light Source(DLS) 방사광가속기 내의 다양한 빔라인을 이용하여 원자력 분야의 방사성폐기물/해체폐기물 연구에 집중적인 연구가 진행되고 있음. 또한, 세계 유일의 Long Duration Experiment(LDE) 시설이 빔라인과 연동되어 핵물질 및 방사성폐기물의 장기 거동 연구를 체계적으로 연구할 수 있는 환경이 갖춰져 있음

❍ (독일) 독일의 ANKA 가속기에는 2 개의 핵물질/RI 전용 빔라인을 (INE, CAT-ACT) 운영하고 있음. 특히 INE 빔라인에는 고온 in-situ 실험이 가능한 빔라인 장치를 구현하여 다양한 환경에서의 고준위폐기물 관리, 심지층 처분을 위한 장기안전성 연구 및 핵물질 거동 연구에 활용되고 있음

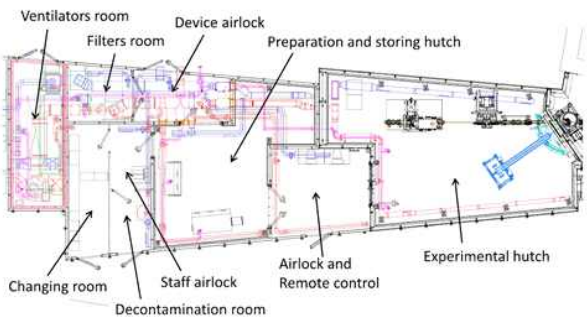


<핵물질/RI 전 빔라인 모식도(INE, CAT-ACT)>

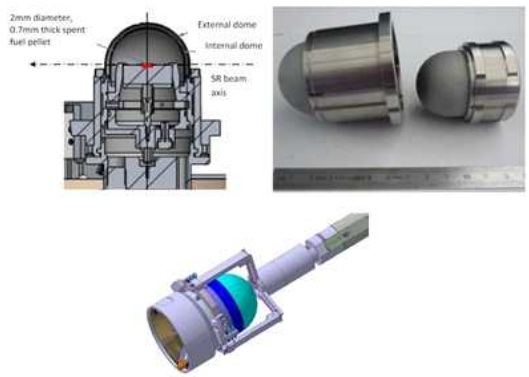


<INE 빔라인 내 고온 In-situ 셋업>

❍ (프랑스) SOLEIS 방사광가속기의 MARS 빔라인은 사용후핵연료 시료 분석 및 방사성물질 응용연구를 위한 전용 빔라인으로 운영되고 있으며, MARS 빔라인에서는 모든 형태의 방사성물질 분석이 가능하며 최대 185 GBq(시료당 최대 18.5 GBq)의 시료 분석이 가능하도록 설계되어 있음. 또한, 사용후핵연료 특성평가를 위한 다양한 연구를 위해 사용후핵연료 취급장치를 별도로 개발하여 운영중에 있음



<핵물질/RI 전용 MARS 빔라인 모식도>



<MARS 빔라인 내 SF 시료 취급장치>

❍ (일본) Spring-8 방사광가속기 내에 에너지 영역대에 따라 연엑스선과 경엑스선을 이용하는 2개의 핵물질/RI 전용 빔라인을 운영 중에 있음. 두 빔라인의 주체는 일본 원자력분야 전문 연구기관인 JAEA에서 운영하고 있으며, 후쿠시마 사고 대응을 위한 원자력 안전, 다양한 핵연료주기 연구에 활용되고 있음

나. 중이온가속기 해외 이용 · 연구 현황

❍ 세계적으로 희귀동위원소를 생성하고 있는 대형 가속기는 2022년 기준 대략 5기가 존재하며, 2개는 구축중에 있음. 주로 캐나다, 프랑스, 유럽, 일본, 독일, 미국, 중국 등에 중이온가속기가 구축·운영중에 있음. 희귀동위원소 발생을 위해 ISOL, 또는 IF 방식을 활용하고 있으며, 다양한 분야를 대상으로 연구를 수행하고 있음

<해외 중이온가속기 현황>

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

❍ (일본) RIKEN RIBF(Radioactive Isotope Beam Factory)는 중이온 사이클로트론을 이용하여 자연계에서 존재하지 않는 중성자 과잉 희귀동위원소를 새로 발견하고 특성측정을 위한 목적으로 설립되어 운영중에 있음

❍ (캐나다) TRIUMF ISAC I(Isotope Separator and Accelerator-1)은 양성자 사이클로트론을 이용하여 자연계에서 존재하지 않은 중성자 과잉 희귀동위원소의 질량을 측정하거나 중성자 달무리를 이루는 특별한 원자핵의 내부 구조 연구를 수행하고 있음

❍ (독일) GSI FAIR(Facility for Aniproton and Ion Research)는 중이온 선형가속기와 원형가속기인 싱크로트론을 이용하여 자연계에서 존재하지 않는 중성자 과잉 희귀동위원소의 특성을 측정하고 있으며, 원자핵을 이루고 있는 입자(양성자, 중성자)의 특성을 연구하고 있음

<국외 주요 중이온가속기의 사양 및 활용분야>

연구시설	사양	활용 연구 분야
RIKEN RIBF (일본)	350MeV/u 100kW(우라늄), <345MeV/u(희귀동위원소)	· 자연계에 존재하지 않는 중성자 과잉 희귀동위원소를 새로 발견하고 특성을 측정(약 50종)
TRIUMF ISAC I (캐나다)	500MeV/u 50kW(양성자), 11MeV/u(희귀동위원소)	· 별의 내부에서 무거운 원소를 합성하는 과정 규명 · 자연계에 존재하지 않는 중성자 과잉 희귀동위원소 질량 측정 · 중성자 달무리를 이루는 특별한 원자핵의 내부 구조 연구
GSI FAIR (독일)	1GeV/u 80kW(우라늄), <0.9GeV(희귀동위원소)	· 자연계에 존재하지 않는 중성자 과잉 희귀동위원소 질량 측정 · 원자핵을 이루고 있는 입자(양성자, 중성자)의 특성 연구 · 별 내부의 무거운 원소를 합성하는 과정을 규명

3. 국내 대형가속기와 연계한 원자력분야 연구의 활성화 추진 필요

❍ 대형가속기는 기초과학의 대표적인 대형연구시설로 최근에는 국가 전략사업 및 반도체, 신약개발, 신소재, 의료 등으로 산업적 활용 범위와 영향력이 증가되고 있는 추세임

❍ 최근 들어, 청주 오창의 다목적방사광가속기, 대전의 중이온가속기, 부산의 중입자가속기가 새롭게 구축되어지고 있음. 4세대 다목적방사광가속기(오창방사광가속기)와 중이온가속기의 경우 구축비용만 1조원 이상이 드는 대규모의 정부예산이 투자되고 있기에 활용도를 극대화 할 수 있는 면밀한 중장기 운영전략이 필요함. 또한, 이들 대형가속기의 성공적 구축을 위해 많은 전문가의 역량이 집결될 필요가 있음

❍ 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/RI 물질 활용이 가능한 빔라인이 선정됨

❍ 국내에는 가속기 관련 전문가 그룹이 많지 않기에 구축 기획단계에서부터 기존 대형가속기 및 연구시설 운영경험과 가속기 이용 경험을 가지고 있는 원자력계의 전문가들이 많은 기여를 하였음. 현재 진행되고 있는 다양한 핵주기 분야의 연구, 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 참여를 통한 연구 활성화가 될 수 있도록 정책적 지원이 필요함

붙임 1 오창방사광 가속기 우선 구축 빔라인 선정 과정

1. 도출 절차

❍ 기술기획위원회와 수요조사를 통해 우선 구축 빔라인 도출

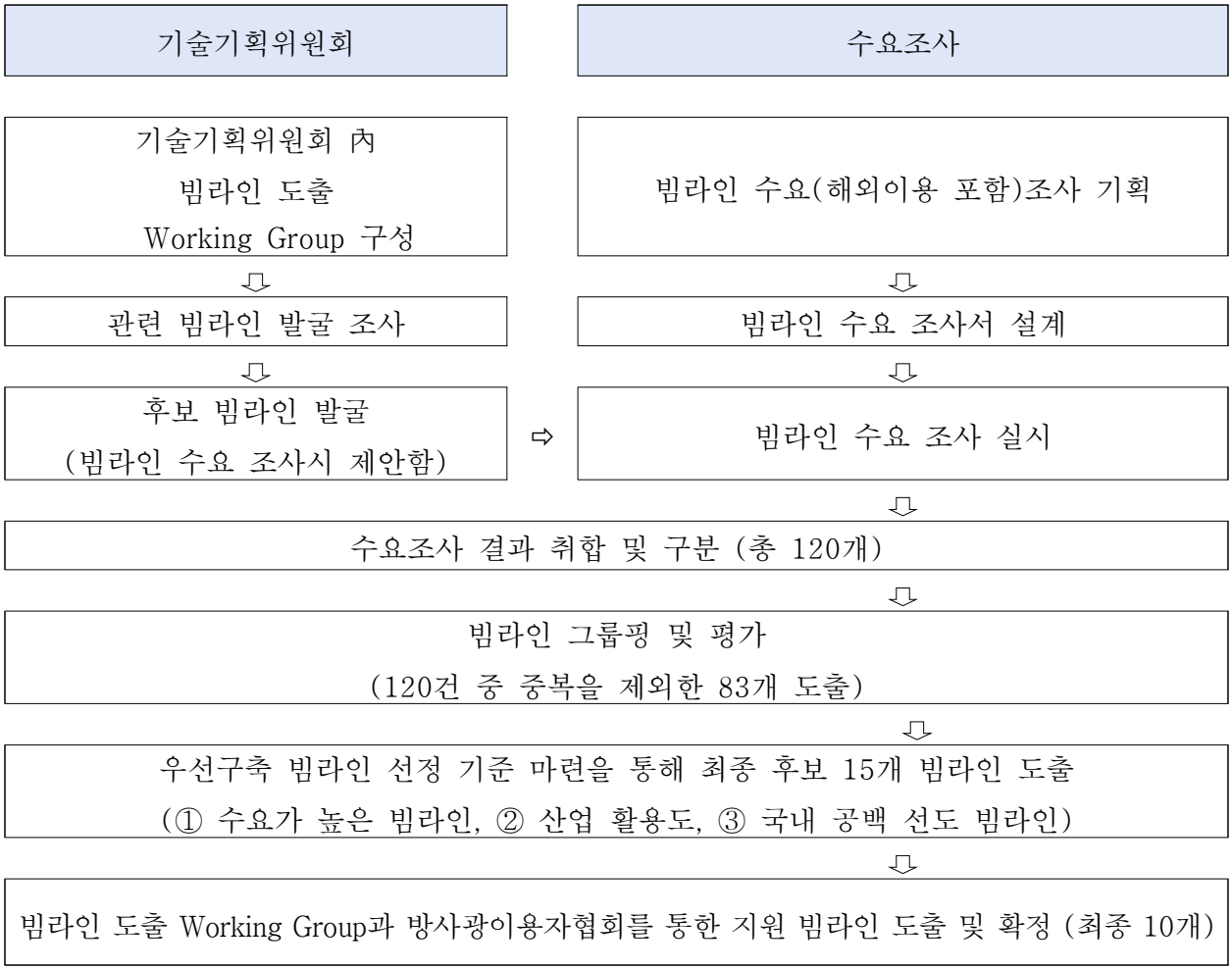


그림1. 우선 구축 빔라인 도출 방법

2. 도출 경과

❍ 해외 선도 가속기 분석을 통한 61개 빔라인 수요 도출 (포항가속기연구소 23개, 한국기초과학지원연구원 20개, 한국원자력연구원 18개)

❍ 방사광이용자협회 및 해외 가속기 이용자 대상 빔라인 1차 수요조사 (총 120개 중 중복 제외 83개)

※ 2020.04.07. ~ 2020.04.24. 방사광이용자협회 주관 수요조사 진행 (다목적 방사광가속기 빔라인 제안 및 해외 빔라인 이용현황 조사)

- 해당 수요조사는 서울대, KAIST, POSTECH 등 국내 13개 대학과 KAERI, KBSI, PAL등 6개 연구기관들을 포함하여 19개 기관에서 65개의 전문연구그룹 참여

- 해외방사광이용현황조사와 관련하여 17개의 연구 기관, 33명의 전문가들이 해외이용조사서 46건을 제출함
- 국내 빔라인 부재, 성능, 빔타임 부족, 시료취급 및 설비 한계 등이 해외빔라인 이용의 주요 사유로 도출됨
- 120건(중복제외 83건)의 빔라인 제안서 중 중복성 검토를 통해 83건으로 도출함

❍ 빔라인 도출위원회의 수요조사 분석을 통하여 15개 후보 빔라인 도출
- 우선순위 결정기준 : ① 수요가 높은 빔라인, ② 산업 활용도, ③ 국내 공백 선도 빔라인

❍ 방사광이용자협회 분과 회의를 통한 분과별 우선 빔라인 반영

❍ 빔라인 도출위원회와 방사광이용자협회 간 협의를 통한 최종 10기 빔라인(안) 도출
- 2020.05.04. 최종 후보 빔라인(안) 확정

❍ “다목적 방사광가속기 구축사업”에서 제시된 ‘우선 구축빔라인(안)’의 주요 쟁점 해소를 위해 전문가로 구성된 다목적 방사광가속기 빔라인 검토위원회를 거쳐 다목적 방사광가속기의 성능과 이용연구/서비스에 부합하는 최적의 ‘우선 구축 빔라인(안)’을 최종 선정
- 최종 후보 빔라인(안) 10기에 핵물질/방사성물질 활용 가능 빔라인(나노프로브) 선정

<다목적방사광가속기(Korea-4GR) 10기 빔라인>

빔라인	사양	활용	비고(특징)
1.바이오신약-바이오 소각산란 (산업우선지원)	• 빔에너지: 5~20 keV • 실험기법: Bio-SAXS	바이오	• 8~25 keV 최적화 • SDD(시료와 검출기 사이 거리) 6m까지 확보 • 자동화시스템 도입
2. 소재 구조분석 (산업우선지원)	• 빔에너지: 5~40 keV • 실험기법: XRD(Powder XRD), XAFS	소재, 에너지	• HRPD, XAFS 실험기법 구현
3. 연엑스선 나노프로브 (산업우선지원)	• 빔에너지: 0.1~5 keV • 빔크기: 1 μm 이하 필수 • 실험기법: XPS, XAS	반도체, 소재	• EPU+IVU Tandem ⇒ 0.1~5 keV • 2개의 Branch 빔라인 설계 • Beam size - 100 nm (Soft X-ray) 이하 - 10 μm (Tender X-ray) 이하
4. 나노스케일 각분해 전자분광	• 빔에너지: 0.1~2 keV • 빔크기: < 100(H) × 100(V) ㎚² • 공간 분해능: 30 nm 이하 • 실험기법: Nano-ARPES	반도체, 소재	• 50~200 eV 최적화 • 2개의 Branch 빔라인 설계 • Beam size - 100 nm (NanoARPES) 이하 - 10 μm (MicroARPES) 이하
5. 결맞음 X-선 회절	• 빔에너지: 3~30 keV • 빔크기: 1 μm 이하 • 실험기법: XRD, CDI	반도체, 소재, 지질, 화학	• Micrometer beam Focusing
6. 결맞음 소각산란	• 빔에너지: 4~40 keV • 실험기법: SAXS/WAXS(GI기법포함), XPCS	소재, 화학	• 결맞음 빔의 확보. (Wave front preserve)
7. 실시간 엑스선 흡수분광학	• 빔에너지: 5~40 keV • 실험기법: XAFS	에너지, 환경, 소재, 지질	• XES 기반 실시간 엑스선 흡수 분광 실험장치 고려
8. 생체분자 나노결정학 빔라인	• 빔에너지: 5~20 keV • 분해능: 1 Å 이하 • 실험기법: MX	바이오	• 8~25 keV 최적화 • NanoMX • 신약개발 지원
9. 고에너지 현미경 빔라인	• 빔에너지: 5~100 keV • 분해능: 0.1 μm (100 m 기준) • 실험기법: Projection imaging	에너지, 바이오	• Bending Magnet • 근거리 허치 제외 (백색광 사용)
10. 나노 프로브	• 빔에너지: 5~25 keV • 실험기법: Ptychography, XRS, XRF	반도체, 소재, 에너지, 환경, 화학	• Nano beam focusing 추구 • 5f-블록원소 및 RI 물질 위한 설계 → Radiation safe Protocol 준비 후 실험가능 가능

09

현안 대응 방안

》 핵연료 기반조성 및 지원과 관련된 산재되어 있는 주요 이슈 및 현안에 대하여 원자력계 전문가 그룹의 심층 검토를 바탕으로 이를 해결할 수 있는 기술적, 정책적 근거를 제시하고 국가 정책에 적극적으로 반영시킬 노력이 필요

1. 고준위 방사성폐기물 관리 특별법 대응

가. 현안 진단

❍ 22대 국회에서 고준위 방사성폐기물 관리 특별법 통과 후 9월 시행 예정

나. 해결방안 제안

❍ 학회는 고준위방폐물 관리에 대한 기술적 전문성을 바탕으로, 특별법 시행에 객관적이고 신뢰할 수 있는 자료와 분석을 제공

❍ 다양한 이해관계자의 의견을 폭넓게 수렴하고 합의를 도출

– 학회는 이러한 논의를 주도하며, 합리적이고 공정한 법 시행이 이루어질 수 있도록 중재 역할을 수행

2. 심층처분시설 부지 조사 · 선정 규제 참여

가. 현안 진단

❍ 심층처분시설 장기 안전성확보의 기반이 되는 부지조사의 중요성을 감안하여 부지조사·선정의 주요 시점에서 규제 의견을 제시하는 절차 필요

❍ 부지고유 안전성실증을 위한 “처분부지 URL”[9] 에 대해 심층처분시설로의 전환 등 처분시설의 일환으로 규제방안 검토 필요

9) 시설 명칭 혼동을 막기 위해 “연구용 URL → 일반부지 URL”, “인허가용 URL → 처분부지 URL”로 검토 필요 (제47차 원자력이용개발전문위 후속회의 결과(`23.7.14))

나. 해결방안 제안

❍ 예정부지 확정 이전 단계

– (정부)

▸부지선정단계 규제참여방안 결정 및 (필요시) 제도화

▸“처분부지 URL” 규제방향 결정 및 (해당시) 제도화(승인 제도 등)

– (규제기관)

▸(해당시) 규제참여방안 이행계획 및 지침 수립

▸심층처분 부지개발 및 천연방벽 등 세부규제기준 수립

▸“처분부지 URL” 규제요건/규제지침 수립

※ 심층처분시스템 규제요소 개발 (’21～’29, KINS 규제연구 수행중)

❍ 예정부지 확정 이후 단계(부지특성조사 및 허가 준비 단계)

– (규제기관) 허가신청에 필요한 규제요건 등의 제공과 안전성 확인을 위한 정보확보 등

3. 안전특성을 고려한 심층처분시설 건설 · 운영허가 이원화

가. 현안 진단

❍ 해외 선행국가의 심층처분시설 건설허가는 예비설계, 부지특성, 환경영향 등이 주 심사대상이며, 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

나. 해결방안 제안

❍ (정부) 심층처분시설 건설허가/운영허가 분리 결정 및 제도화

❍ (규제기관)

▸(해당시) 건설허가/운영허가 규제요건 제정 (허가절차, 신청서류, 허가기준 등)

4. 고준위방폐물 관리 인허가 제도 개선

가. 현안 진단

❍ 사업과 사용후핵연료관리부담금 산정 등에 활용되는 처분시설의 합리적이고 적정한 폐쇄 후 관리기간 설정 필요

❍ 해외의 경우 폐쇄후 관리기간 및 모니터링 방법에 처분 안정성을 충분히 고려하면서 각국의 기준에 맞는 합리적인 기준을 채택하고 있음

나. 해결방안 제안

❍ 사용후핵연료관리부담금에 반영되는 폐쇄후 관리비용의 합리적인 산출을 위해 중저준위방폐물 처분시설의 폐쇄후 관리기간을 준용하되, 300년에 걸친 폐쇄후 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 사용후핵연료관리부담금 산정시 활용할 수 있도록 정부에 제공

5. 선·후행핵주기 관련 국제협력 전략

가. 현안 진단

❍ 러-우 전쟁으로 인한 공급망 불안과 차세대 SMR 개발 경쟁이 치열해짐에 따라 2022년부터 우라늄 가격이 불안정해 짐에 따라 HALEU 확보를 위한 전략적 투자와 대안 마련 필요

❍ 핵물질 공급 및 취급에 대한 궁긍적인 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

나. 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

6. 핵연료물질 활용 연구 규제 개선 방향

가. 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

나. 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

7. 첨단 원자력분야 기술경쟁력 확보를 위한 가속기기반 연구활성화 전략

가. 현안 진단

❍ 현재 운영 중인 대형가속기 중 기초 및 응용과학분야에 파급효과가 큰 방사광 가속기의 경우 핵물질 및 RI 물질을 활용한 핵주기 연구를 할 수 있는 빔라인은 없으며, 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

나. 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 참여를 통한 연구 활성화 전략을 수립하여 정책에 반영

❍ 현재 추진 중인 오창방사광가속기 초기 구축 빔라인에 포함된 핵물질/RI 활용 가능한 빔라인이 계획되로 구축되고 효율적이고 안정적으로 운영될 수 있도록 중장기 운영전략 도출(원자력유관 학회 등에서 유저 그룹 활성화 전략논의 등)

10 총괄적 제언

❍ 현재 국내 고준위 방사서폐기물 관리 관련 정책은 시급성과 중요성에도 불구하고, 체계적인 장기 비전 부재로 인해 지속적인 추진이 어려운 상황임. 고준위 방폐물 관리 특별법의 조속한 시행이 필수적이며, 이를 통해 법적 기반 아래 정부와 지역 사회 간의 신뢰 구축하고, 중간저장 및 영구처분 시설의 단계적 건설이 이루어져야 함

❍ 핵물질 자원 확보를 위한 전략적 투자가 요구됨. 글로벌 공급망 불안정성, 특히 러-우 전쟁으로 인한 농축우라늄 확보 어려움에 대응하기 위해 미국 및 다른 서방 국가들과의 협력을 강화해야 함

❍ 국내 방사성폐기물 관리 관련 연구 인프라와 인력양성 프로그램 확충이 시급함. 이는 국제적 기준에 부합하는 기술력 확보를 위해서 필수적인 사안이나 지하처분 연구시설, 가속기 기반 첨단 원자력 실험설비, 사용후핵연료 취급 핫셀 등의 핵심 연구시설이 부족하며, 대학의 핵물질 취급 등의 제도도 다른 국가의 사례를 참고하여 개선이 필요함