

우리나라의 사용후핵연료 관리 기술 및 정책에 대한 견해

Perspectives on Spent Nuclear Fuel Management
Technologies and Policies in Korea



우리나라의 사용후핵연료 관리 기술 및 정책에 대한 견해

Perspectives on Spent Nuclear Fuel Management Technologies
and Policies in Korea

위원장

김재환(한국과학기술한림원 정회원, 인하대학교 교수)

위원

문주현(단국대학교 교수)

윤종일(한국과학기술원 교수)

이정익(한국과학기술한림원 차세대회원, 한국과학기술원 교수)

정범진(경희대학교 교수)

간사

남효은(한국원자력연구원 책임연구원)

요 약 문

원전의 지속적인 운영으로 사용후핵연료 누적량이 증가하면서 원전 부지 내 임시저장시설이 2030년부터 순차적으로 포화될 것으로 예상됨에 따라, 국가 차원의 관리 정책 수립이 시급한 과제로 대두되었다. 사용후핵연료는 영구 격리가 필요한 고준위폐기물이자, 약 95%가 우라늄과 초우라늄 원소로 구성되어 재활용이 가능한 자원이라는 이중적 특성을 지닌다. 본 보고서는 이러한 현황과 기술적 특성을 바탕으로 우리나라가 나아가야 할 합리적이고 과학적인 정책 방향을 제시하고자 한다.

사용후핵연료 관리 방식은 크게 '직접처분'과 '재활용 후 처분'으로 구분할 수 있다. 직접처분은 사용후핵연료를 심지층에 영구 격리하는 국제적 표준 방식으로, 우리나라는 최근 「고준위 방사성폐기물 관리에 관한 특별법」 제정으로 영구처분장 부지 확보를 위한 법적 기틀을 마련했다. 우리나라 지질환경에 최적화된 처분시스템 개발과 사회적 수용성 확보가 향후 핵심 과제이다. 반면 재활용은 유용 자원을 회수하여 고준위 방사성폐기물 부피와 독성을 획기적으로 줄이고 에너지 자원 활용도를 극대화하는 방식이다. 특히 우리나라는 핵확산 저항성이 강화된 건식재처리 기술인 파이로프로세싱(Pyroprocessing)을 선제적으로 개발해 왔으며, 이 기술의 실증과 상용화를 위해서는 한미 원자력협력협정에 따른 미국의 포괄적이고 장기적인 동의 확보가 필수적이다.

지금까지 우리 정부는 재활용 여부를 결정하지 않는 '관망(Wait & See)' 정책을 유지하며 장기적인 정책 불확실성을 키워 왔다. 최근 제정된 특별법 역시 영구처분시설 부지 확보에만 초점을 맞춰 재활용을 포함한 총체적 정책 방향을 제시하지 못하고 있다. 특히, 원전 부지 내 저장시설 용량 제한, 부지 간 사용후핵연료 이송 금지 등 일부 독소조항은 원전의 안정적 운영을 저해할 수 있는 문제점을 안고 있다.

이에 본 보고서는 현행 관망 기조에서 벗어나 능동적이고 전략적인 정책 추진을 제언한다. 즉, 직접처분을 위한 영구처분장 확보 계획은 차질 없이 추진하되, 과거 기술에 얽매이지 않고 안전성과 효율성을 높인 최신 기술의 적용을 고려해야 한다. 이와 동시에 에너지 안보 강화와 처분 부담 경감을 위한 재활용 옵션을 적극적으로 고려해야 한다. 구체적으로는 핵확산 우려가 적은 국제 협력 모델인 해외 위탁재처리와 핵확산 저항성이 강화된 다자간 건식재처리(파이로프로세싱) 시설 도입 등을 국가 정책의 주요 대안으로 추진할 필요가 있다.

이러한 재활용 정책을 추진하기 위한 가장 핵심적인 선결과제는 한미 원자력협력협정의 개정이다. 재활용 옵션에 대한 포괄적이고 장기적인 동의를 확보하여 정책적 자율성을 확보하는 것이 미래 에너지 안보 확립과 사용후핵연료 문제의 근본적 해결을 동시에 달성하는 길이 될 것이다.

I	서문	11
	01. 배경	12
	02. 사용후핵연료 관리에 관한 의견들	14
	03. 목적 및 방법	17
II	사용후핵연료 발생, 저장, 관리 현황	19
	01. 국내 사용후핵연료 발생 현황 및 저장 방식	20
	02. 원전 부지 내 저장시설 저장 현황 및 포화 전망	23
	03. 해외 사용후핵연료 저장 및 관리 현황	25
III	사용후핵연료 재활용 및 폐기물 저감	31
	01. 사용후핵연료 재활용(Recycling) 및 폐기물 저감 기술 개요	32
	02. 해외 사용후핵연료 재활용 정책 및 연구개발 현황	34
	03. 국내 사용후핵연료 재활용 정책 및 연구개발 현황	41
	04. 사용후핵연료 재활용 기술개발의 도전과제	42
	05. 사용후핵연료 재활용 기술의 가치	45

IV	사용후핵연료 처분	47
	01. 방사성폐기물 처분 개념과 방식	48
	02. 고준위 방사성폐기물 심지층 처분의 기본 구조	50
	03. 처분 안전성 및 불확실성 관리	58
	04. 해외 심층 처분 사례 분석	60
	05. 국내 심층 처분 기술개발 현황 및 도전과제	65
V	국내 사용후핵연료 관리 정책	69
	01. 사용후핵연료 관리 정책 현황	70
	02. 국내외 주요 정책 동향	72
	03. 한미 원자력협력협정	76
	04. 사용후핵연료 관리 정책 수립을 위한 제언	79
VI	결론 및 제언	89
	01. 사용후핵연료 관리에 대한 결론	90
	02. 사용후핵연료 관리에 대한 제언	93
	참고문헌	95

표 2.1.	국내 가동 중인 원전 사용후핵연료 종류	20
표 2.2.	국내 사용후핵연료 임시저장 현황	21
표 2.3.	국내 원전 부지별 사용후핵연료 저장량	23
표 2.4.	원전 본부별 예상 포화시점(2023년 2월 산정)	24
표 3.1.	국가별 사용후핵연료 관리 정책	34
표 5.1.	세계 농축시설 설비용량 및 점유율(2023년 기준)	73
표 5.2.	고준위 방사성폐기물 특별법 주요 내용	75
표 5.3.	위탁재처리 후 회수 물질 국내 사용을 위한 협정 개정 방향	82
표 5.4.	다자간 사용후핵연료 건식재처리 시설 도입을 위한 협정 개정 방향	83

그림 1.1. 사용후핵연료 관리 단계	12
그림 3.1. 사용후핵연료 특성과 핵종별 맞춤 관리	32
그림 3.2. 사용후핵연료 습식재처리 기술 개념	33
그림 3.3. 사용후핵연료 파이로 처리기술 개념	34
그림 3.4. 미국의 사용후핵연료 재활용 및 폐기물 관리 혁신기술 개발	35
그림 3.5. 프랑스의 라아그 습식재처리 시설	37
그림 3.6. 러시아의 ODEK 고속로 연계 순환형 핵연료주기시설의 조감도	37
그림 3.7. 일본의 롯카쇼 습식재처리 시설	38
그림 3.8. 중국의 사용후핵연료 재활용 전략	39
그림 3.9. 인도의 원자로 및 사용후핵연료 재활용 정책	40
그림 3.10. 사용후핵연료 파이로 처리 공정	42
그림 4.1. 핀란드와 스웨덴에 적용된 KBS-3 처분 개념	51
그림 4.2. 스위스의 다중방벽시스템 모식도	63
그림 5.1. 우라늄 정광 현물시장 가격 추이	73
그림 5.2. 사용후핵연료 관리 정책 대안	79

KAST

Research Report

2025

I

서문



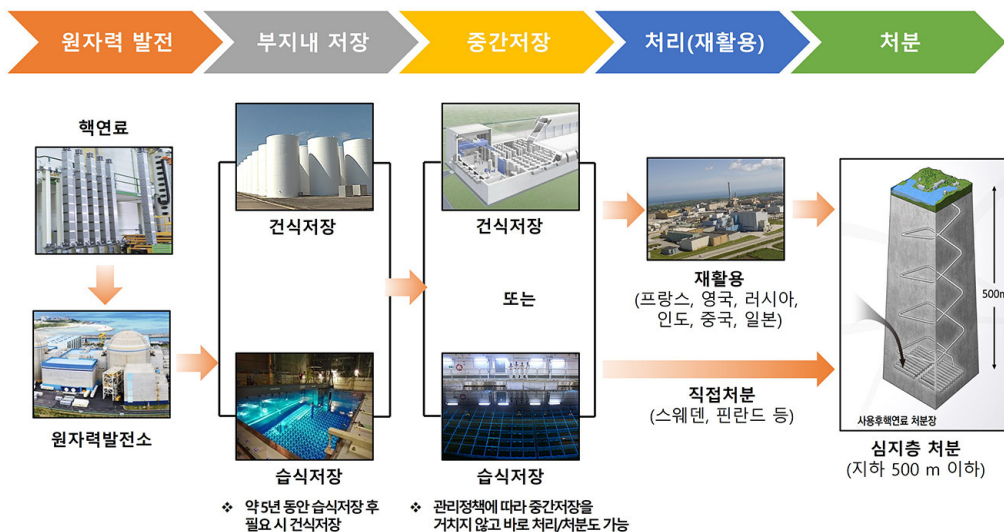
I

서문

01 배경

- 원자력발전은 탄소배출이 적고 저렴하지만 필연적으로 사용후핵연료가 발생함. 사용후핵연료는 원자로에서 핵연료가 일정 기간 사용된 후 원자로에서 배출된 것을 말하며 초기에는 높은 수준의 방사선과 열을 방출하므로 원전 부지 내 사용후핵연료 저장조에서 보관되나 수년이 경과하면 단반감기 핵종이 모두 붕괴하면서 방사선 준위가 급격히 낮아짐. 그러나 악티나이드(Actinides) 계열의 장반감기 핵종이 다수 포함되어 장기간 방사능을 띄므로 특별히 관리되어야 함.
- 우리나라에서 발생한 사용후핵연료는 원전 부지 내 임시저장 용량의 98%에 육박하고 있으므로 원전을 지속적으로 가동하기 위하여 사용후핵연료에 대한 관리가 시급함.
- 사용후핵연료의 관리의 원전 부지 내 습식 또는 건식 임시저장, 소외 중간저장을 거쳐 직접처분(영구처분) 하거나 처리(재처리 또는 재활용)를 거쳐서 영구처분의 관리 단계로 이루어짐.

〈그림 1.1.〉 사용후핵연료 관리 단계



- 중간저장은 사용후핵연료를 원전부지 외에 별도의 장소를 마련하여 영구처분하기 전까지 일정기간 저장하는 것으로, 습식 또는 건식으로 보관함.
 - 직접처분은 500m 이하의 지하에 사용후핵연료를 저장하고, 여기서 내뿜는 방사선이 자연 방사능 수준으로 떨어질 때까지 기다리는 심지층 처분 방식임.
 - 현재는 스웨덴과 핀란드가 채택해 부지 선정과 건설을 추진하고 있고, 국내에서도 심지층 처분을 연구하고 있음.
 - 직접처분장을 건설하는 것은 핵연료 재처리와 무관하게 공히 요구되는 것이며 이를 위해 적합하면서 방대한 면적의 지질층이 필요함.
 - 국가 사용후핵연료 관리 정책에 따라 부지 내 저장 중인 사용후핵연료가 중간저장시설을 거치지 않고 바로 재활용되거나 처분될 수도 있음.
- 사용후핵연료의 약 95%가 핵반응을 거치지 않은 우라늄과 초우라늄 원소로 구성되어 있으며, 이를 분리해 활용할 경우 영구처분의 대상인 고준위폐기물을 약 5% 수준으로 낮출 수 있음. 이러한 이유로 사용후핵연료 재처리는 ‘재활용’이라고도 불림.
- 사용후핵연료의 처리 방법은 습식처리와 건식처리로 나뉘며 습식처리의 경우에는 핵무기로 활용될 가능성으로 인해 전면 금지되어 있고, 이른바 파이로프로세싱(Pyroprocessing)이라 불리는 건식처리 방식에 대해서는 핵확산 저항성 여부에 대한 논의가 진행되고 있음.
 - 회수한 우라늄과 초우라늄은 소듐냉각고속로(SFR)용 핵연료나 경수로의 혼합핵연료(Mixed Oxide Fuel)로 가공되어 재활용할 수 있음.
 - 직접처분과 재처리는 서로 장단점이 있으며 기술적 성숙도도 다름. 따라서 본 정책연구보고서에서는 이 기술들이 과학기술적으로 어떤 장단점이 있는지 면밀히 검토하고 이 기술들을 어떻게 전개하는 것이 국가의 미래 사용후핵연료 관리에 적합한지에 대한 정책적인 자료를 제시하고자 함.

02 사용후핵연료 관리에 관한 의견들

■ 사용후핵연료는 장기간 국가적 관심사항이었으나 사실상 고려되어야 할 본질적인 영역에 대한 검토가 충분하였다고 보기 어려움. 따라서 본 정책보고서에서는 이에 대해 우선 검토하고자 함.

■ 사용후핵연료와 고준위폐기물의 차이

- 사용후핵연료를 재활용이 가능한 자원으로 볼 것인지 방사성폐기물로 볼 것인지에 대해서는 여러 가지 견해가 있음. 적절한 처리 방식을 택해 재활용할 것이라는 관점에서는 자원이지만 처리과정을 거치지 않고 직접 영구처분할 것으로 본다면 그 자체가 방사성폐기물이 됨.
- 따라서 현재까지 통용되는 정의는 사용후핵연료 가운데 원자력안전법 제35조제4항¹⁾에 따라 폐기하기로 결정된 것만을 고준위폐기물로 보며 처리 방침이 결정되지 않고 보관 중인 사용후핵연료는 폐기물로 분류되지 않음.

■ 고준위폐기물 영구처분장을 조속히 확보해야 한다는 생각

- 고준위폐기물 영구처분장을 조속히 혹은 원자력 사업 초기부터 확보했어야 했다고 여기는 경우가 많으나 이는 상식적이지 않음.
- 또한 사용후핵연료 관리기술도 관리 정책 확보 후 기술 적용 시점에 최적의 관리기술을 적용하는 것이 합리적이므로 기술 옵션을 미리 확정할 필요가 없음.
- 원전 산업은 화장실 없는 맨션을 지은 것인가?
 - 원전 산업이 고준위 방사성폐기물 처분장에 대한 대책이 없이 원전 건설과 운영만 하였다는 식의 폄훼는 반핵단체가 제기하는 만연한 생각임.
 - 고준위 방사성폐기물 영구처분장은 하루에도 수차례 사용하는 화장실로 비유되기보다는 수십 년간 안전하게 저장 후 영구처분한다는 측면에서 묘지로 비유되는 것이 타당함.

■ 민감기술

- 사용후핵연료를 재처리하는 과정에서 우라늄과 플루토늄이 분리됨. 우라늄-235를 90% 이상 농축하는 데에는 농축시설 필요하나, 재처리하면 순수 플루토늄을 분리할 수 있어 상대적으로 핵무기 제조에 필요한 핵물질 확보가 용이함.

1) 이 조항은 제36조의2로 신설(2024.10.22)되었으나 보고서 작성 시점이 본 조항의 시행일인 2025년 10월 23일 이전이므로 이전 조항인 제35조제4항을 사용함.

- 따라서 사용후핵연료를 취급하는 일련의 연구와 절차는 핵보유국의 감시 대상이며 민감기술로 분류되고 있음. 이에 따라 우리나라는 핵비보유국으로서 관련 연구가 허용되지 않고 있음.

■ 직접처분과 재처리

- 가동원전이 많지 않다면 사용후핵연료를 재처리하는 것은 경제적 이득을 얻기 어려우므로 직접처분을 하는 것이 타당함.
- 그러나 가동원전이 20기 이상이 되면 사용후핵연료를 재처리하는 것이 경제적 타당성이 있음. 따라서 정치적 이유로 재처리를 하지 않고 있는 미국²⁾을 제외한 중국, 프랑스, 러시아, 영국, 일본, 인도는 재처리 정책을 추진하고 있음.
- 우리나라는 핵비보유국 가운데 원전기수가 30여기에 달하므로(현재 26기 운영 중이며 건설 중인 4기가 준공될 예정) 경제적으로는 재활용의 타당성은 있으나 정치·사회적으로는 재활용을 할 수 없음.
 - 특히 우리나라는 북한과의 휴전상태에서 핵무장 가능성이 높은 국가로 분류되기 때문에 우리나라의 사용후핵연료 재활용은 매우 민감한 정치적 사안임.

■ 고준위폐기물 연구

- 1979년 미국 TMI-2호기 원전사고 이후 미국 내 신규원전 발주가 중단됨에 따라서 원자력 연구는 새로운 노형개발보다는 기존 원전의 안전성 향상에 집중하도록 추진되었음. 이에 따라서 연구자들은 기존 원전의 위험인자를 발굴하는 것이 주요 관심사였으며 이를 통하여 기존 원전의 안전성은 크게 향상되었으나 연구비를 확보하는 과정에서 원전의 위험성을 지나치게 부각하기도 하였음.
- 고준위폐기물에 관한 연구도 유사하게 진행되었음. 연구가 필요하나 현실적으로 고준위폐기물 영구처분장을 건설하는 나라는 스웨덴, 핀란드 등 몇 개 국가에 불과하기 때문에 국내 고준위폐기물 연구자들은 고준위폐기물에 대해 객관적이고 균형 잡힌 인식을 심어 주지 못했음.
 - 영구처분장 건설이 매우 시급한 사안인 것처럼 부각하거나 고준위폐기물에서 발생하는 열과 방사선이 높은 수준을 장기간 유지하는 것처럼 인식시켰음.
 - 관련 국제기구 등의 활동을 통해 규제기준을 높이기도 하였음. 처분 대상인 방사성폐기물에 대한 포장에 높은 요건을 부여하거나 1만 년 혹은 10만 년간 관리해야 한다는 식의 논의가 이에 해당됨. 1만 년 전이 석기시대였음을 감안한다면 향후 1만 년 동안 관리할 계획을 현 세대에서 현재의

2) 2025년 8월 기준 영구정지한 원자로를 포함해 미국이 135기, 중국 57기, 프랑스 71기, 러시아 47기, 영국 45기, 일본 41기, 인도 21기를 현재 운영하거나 과거 운영하였음.

기술로 수립하는 것은 합리적인 요구가 아님.

- 따라서 고준위폐기물에 대하여 합리적이고 학문적인 접근이 필요함.

■ 동반성장적 성격

- 선진국의 원전산업은 기술적 기반하에 시작되었으며 이러한 기술적 기반을 원자력발전소를 건설하는 방식으로 연결하고 부족한 부분을 채우는 방식으로 진행되었음. 그러나 우리나라는 기술적 토대가 없는 상태에서 원전사업을 시작하면서 중공업, 건설, 제조업 등을 동반성장시켰음.
- 사용후핵연료와 관련하여 원자력 기술보다 지질, 지진 등 토양에 관한 연구, 부식, 충전층 등 재료에 관한 연구 핵종분리 등 화공부문의 연구가 필요하나 이러한 토대가 구축되지 않은 상태에서 원자력 부문의 필요에 의해 이들 영역을 성장시켜야 하므로 우리나라 원자력 산업에는 과중한 부담이 있음을 인지할 필요가 있음.

■ 국가 정책역량의 위축

- 우리나라 원자력 정책은 장기간 과학기술정보통신부가 수행하였음. 1실 7과에 달하는 원자력 조직은 원자력안전위원회의 분리·독립으로 3개과로 축소되었다가 현재는 1.5과로 위축되었음.
 - 싱크탱크의 역할을 해야 할 한국원자력연구원은 정책부서를 1/3 수준으로 축소시켰으며 한국 원자력협력재단(KONICOF), 한국연구재단(NRF)의 정책기능도 미미한 상태임.
- 산업통상자원부는 비슷한 시기에 원자력산업과 1개과에서 2개 국 규모로 확대되었으나 원전에 특화된 정책을 수행하며 현안에 대한 관리 위주로 업무를 수행하면서 정책기능이 약화되었음.
 - 방사성폐기물과 관련하여 정부를 보좌하기 위해 설립된 원자력환경공단(KORAD)은 관련 연구개발을 수행하면서도 정책수립에 있어서 연구개발의 결과를 반영하는 데 보수적이며 자체적 전문성을 확보하지 못함.
 - 외교부에도 국 단위의 원자력 조직이 만들어졌으나 원자력 관련 외교행사의 개최 및 원자력 외교부문에서 역할이 잘 드러나지 않음.
- 따라서 장기적 국가 정책을 수립하고 민감기술에 대한 핵보유국과의 다양한 협상을 벌일 수 있는 여건이 마련되지 못한 상태임.

03 목적 및 방법

- 본 정책연구보고서는 우리나라의 사용후핵연료 발생 현황, 중간저장 그리고 직접처분 및 재처리에 대한 기존의 문헌을 정리하고, 전문가 토의를 토대로 합리적이고 과학적인 사용후핵연료의 관리 정책의 방향성을 제시하고자 함.
- 이를 위하여 사용후핵연료의 전문가뿐만 아니라 원전정책, 안전성 등의 전문가를 포함한 전문위원회를 구성하여 집중적인 토의를 진행하였음. 특히 본 연구는 기존의 사용후핵연료 전문가 중심의 사고를 벗어나 미래지향적인 관점에서 이 사안을 검토하고, 이를 통해 장기적인 구상을 제시하고자 하였음.

II

사용후핵연료 발생, 저장, 관리 현황



II

사용후핵연료 발생, 저장, 관리 현황

01 국내 사용후핵연료 발생 현황 및 저장 방식

- 우리나라 원전은 1978년 고리 원전 1호기의 상업 운전 이래 2025년 7월 기준 가압경수로(PWR) 23기와 가압중수로(CANDU) 3기 모두 26기가 운영 중이며, 2017년 6월 고리 1호기(PWR)가 2019년 12월에는 월성 1호기(CANDU)가 운영 정지하였음.
- 원자력발전의 부산물인 사용후핵연료는 원자로 종류에 따라 크기와 특성이 다름. U-235 함량(농축도)이 약 3~5%인 경수로 사용후핵연료 1다발은 길이가 4~4.5m, 폭이 약 20cm인 사각 기둥 형태이며, 천연우라늄(U-235 약 0.7%)을 연료로 사용하는 중수로 사용후핵연료는 길이 약 50cm, 직경 약 10cm의 원기둥 형태임.

〈표 2.1〉 국내 가동 중인 원전의 사용후핵연료 종류

	경수로형 핵연료		중수로형 핵연료
가동원전	23기		3기
냉각재	경수(H ₂ O)		중수(D ₂ O)
사용연료	저농축우라늄(U-235: 약 3~5%)		천연우라늄(약 0.7%)
원자로 형태	수직(1개의 원통용기)		수평(380개의 압력관)
핵연료 형상	표준형	웨스팅하우스형	 <p>길이: 약 50cm 직경: 약 10cm 다발무게: 약 24kg 우라늄 무게: 약 19kg</p>
	 <p>길이: 약 4.5m 폭: 약 20cm 다발무게: 약 639kg 우라늄 무게: 약 430kg</p>	 <p>길이: 약 4m 폭: 약 20cm 다발무게: 약 673kg 우라늄 무게: 약 450kg</p>	

(김영호, 2020)

- 사용후핵연료는 최종 처리 또는 영구처분 전까지 발생자(원전 운영사업자인 한국수력원자력(한수원))가 원전 부지 내 임시저장시설에 보관하게 되는데 이를 임시저장이라고 하며, 사용후핵연료 또는 고준위 방사성폐기물 관리사업자(원자력환경공단)가 별도의 부지에 저장하는 중간저장과 구별하고 있음.
- 원전에서 방출된 사용후핵연료를 임시저장하는 방식은 크게 습식저장과 건식저장으로 나눌 수 있으며, 에너지를 생산하고 나서 원자로에서 방출된 경수로와 중수로 사용후핵연료들은 열발생률이 높아 1차적으로 모두 원전 부지 안의 습식저장조(Spent-Fuel Pool, SFP)에 임시보관함.

〈표 2.2.〉 국내 사용후핵연료 임시저장 현황

	원전 부지 내 습식저장	원전 부지 내 건식저장
경수로		운영 중 시설 없음
중수로		  <p>〈사일로〉 〈맥스터〉</p>

- 습식저장은 수심 7m 이상의 수조에 연료 집합체를 거치해 물이 방사선 차폐와 열 제거를 동시에 담당하게 되며, 초기 냉각 효율이 우수하고 연료를 꺼내 점검하기도 쉬워 전통적으로 널리 쓰였음.
 - 그러나 전원·정수·환기 설비를 상시 가동해야 해 운영비가 높고, 수중 부식으로 인한 부유물과 방사성 액체폐기물이 지속적으로 발생하는 단점이 있으며, 대용량의 물을 유지하는 만큼 지진이나 냉각수 손실 사고에 취약하다는 점도 후쿠시마 사고 이후 주요 이슈로 부각됨.
 - 원전 부지 내 사용후핵연료 저장용량의 한계로 현재 경수로 사용후핵연료 저장조는 고밀도저장랙(HDSR)을 이용한 조밀저장 방식으로 변경하여 수조의 저장용량을 1.6배가량 늘렸음. 그럼에도

불구하고 고리·한빛·한울원전은 2030년대 초에 포화가 시작될 것으로 예상되어 추가 저장시설의 확보는 원전의 지속 운영을 위해 시급히 해결해야 하는 문제임.

■ 중수로 사용후핵연료는 경수로 사용후핵연료에 비해 상대적으로 열 발생 및 방사선 방출이 각각 1/10, 1/20 수준으로 낮아 건식저장이 상대적으로 용이하며, 따라서 월성원전 부지의 중수로 사용후핵연료는 습식저장시설 외 별도로 건식저장시설을 이용해 임시저장하고 있음.

- 월성원전 부지에는 중수로 사용후핵연료 540다발을 저장할 수 있는 콘크리트 사일로가 300기, 중수로 사용후핵연료 24,000다발을 저장할 수 있는 맥스터(MACSTOR) 모듈이 14개 구축되어 있어 총 498,000다발의 중수로 사용후핵연료를 저장할 수 있음.
- 건식저장은 충분히 냉각된 연료를 기체 헬륨으로 충전한 금속 캐스크나 콘크리트 모듈에 밀봉해 자연대류로 열을 내보내는 방식으로, 전원이 끊겨도 내부 온도가 규정치(섭씨 400℃ 이하)로 관리되고 추가 폐기물이 거의 없다는 장점이 있어 장기 보관 수단의 국제 표준이 되고 있음.

■ 우리나라는 사용후핵연료의 중간저장 및 처분 등을 위한 부지를 확보하지 못하였기 때문에 아직 중간저장시설은 운영되지 않고 있음.

- 정부가 2021년에 수립한 '제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획'은 최종 처분장 부지 확정 연도로부터 20년 이내에 중앙집중형 건식 중간저장시설(Consolidated Interim Storage Facility, CISF)을 확보하겠다고 명시하였음.
- 2025년 초 국회 산자위(산업통상자원중소벤처기업위원회)를 통과한 '고준위 방사성폐기물 관리에 관한 특별법안(이하 고준위 특별법)'에서는 2050년 이내 중간저장시설을 확보하도록 규정하고 있음.

02 원전 부지 내 저장시설 저장 현황 및 포화 전망

- 2024년 말 기준, 가동 중인 26기의 원자로와 운영 정지한 2기의 원자로에서 발생한 사용후핵연료는 경수로 23,621다발, 중수로 517,272다발로, 모두 원자력발전소의 부지 내 임시로 저장하고 있음.
- 국내 원전에서 방출된 사용후핵연료를 임시저장하는 부지 내 저장시설은 급속히 포화되고 있고, 한국원자력환경공단에 따르면 한빛원전은 2030년, 한울원전은 2031년 고리원전은 2032년부터 부지 내 저장시설이 포화될 것으로 예측됨.

〈표 2.3〉 국내 원전 부지별 사용후핵연료 저장량

(2024년 말 기준)

부지(저장 방식)		저장용량(다발)	저장량(다발)	포화율(%)
경수로	고리(습식)	8,038	7,333	91.2
	새울(습식)	1,560	696	44.6
	한빛(습식)	9,017	7,418	82.3
	한울(습식)	9,450	7,244	76.7
	신월성(습식)	2,588	930	35.9
	소계	30,653	23,621	77.1
중수로	월성(습식)	133,072	122,592	92.1
	부지 내 저장시설(건식)	498,000	394,680	79.3
	소계	631,072	517,272	82.0

(열린원전운영정보, 2025)

- 임시저장시설이 포화되면 원자력발전소는 더 이상 가동할 수 없게 되며, 이는 국가 전력 공급 안정성에 심각한 타격을 줄 수 있기 때문에, 한국수력원자력은 원전 부지 내 건식저장시설을 추가 확보하기 위해 노력 중이나 지자체, 주민 및 환경단체의 반대 등으로 어려움을 겪고 있음.
- 2023년 2월 발표된 사용후핵연료 저장시설 포화시점 산정 결과에 따르면 제10차 전력수급기본계획에 따른 원전 운영 계획을 반영할 경우 한빛원전 저장시설 포화(2030년)를 시작으로, 한울원전(2031년)과 고리원전(2032년) 저장시설이 순차적으로 포화될 것으로 예상하였음(산업통상자원부, 2023).
- 제10차 전력수급기본계획에서는 제9차 전력수급기본계획과 달리 2026년 이전 운영허가가

만료되는 고리 2~4호기, 한빛 1, 2호기의 계속운전을 결정함에 따라 사용후핵연료가 추가 발생하고, 포화시점이 단축되는 것으로 평가되었음.

- 부지 내 건식저장시설을 적기에 확보하지 못하는 경우 연료 저장 공간 부족으로 원자로 가동을 중단해야 하는 상황이 올 수 있으며, 이러한 시나리오는 에너지 안보 차원에서도, 탄소중립 달성을 위한 원전 이용률 확보 측면에서도 큰 부담임.

〈표 2.4〉 원전 본부별 예상 포화시점(2023년 2월 산정)

	고리 (경수로)	한빛 (경수로)	한울 (경수로)	새울 (경수로)	신월성 (경수로)	월성 (중수로)
포화 시점	2032년	2030년	2031년	2066년	2042년	2037년

(산업통상자원부, 2023)

- 경수로가 집중된 고리원전은 고리 2호기 조밀저장랙 적용을 고려하여 2032년을 전후해 습식저장조(SFP)가 포화될 것으로 예상됨.
 - 고리는 국내 최초 상업운전 부지로 설계 시점이 오래된 탓에 수조 면적(저장용량)이 작고, 고리 1호기가 운영 중지되며 원자로 내 습식저장조를 더 이상 활용하지 못하기 때문에 저장용량 확보에 어려움이 있었음.
 - 한수원은 고리 부지 내 건식저장시설을 확보하기 위해 노력하고 있음.
- 전라남도에 위치한 한빛원전의 6기 경수로도 상황이 비슷해, 2030년경 부지 내 임시저장시설이 포화될 것으로 예상되며, 한수원은 부지 내 건식저장시설 확보를 추진하고 있음.
- 울진 해안의 한울원전은 현재 8기를 운영하며 추가 증설 계획도 남아 있음. 조밀저장랙 교체로 잠시 여유를 확보하였지만, 출력이 큰 APR-1400 사용후핵연료가 대량 배출되면 2031년경 저장 한계에 도달할 예정임.
- 새울 부지의 새울 1, 2호기는 설계 당시부터 충분한 용량의 습식저장조를 고려하여 포화 예상시점이 2066년으로 여유가 있음.
- 월성 부지에는 중수로 2~4호기 외에도 경수로 2기가 가동 중이며, 포화시점은 2042년경으로 예상하였음.

- 월성 부지의 중수로 사용후핵연료는 습식저장조, 콘크리트 사일로, 맥스터 모듈에 나누어 저장하고 있으며, 2022년 초 맥스터 7개 모듈을 추가 건설하며 저장용량을 추가 확보하였음. 이에 따라 추가 맥스터 건설이 없더라도 2037년까지는 여유가 있음.
- 우리나라 원전 부지는 2030년부터 차례로 임시저장시설의 저장 한계에 직면할 것으로 예상됨에도 불구하고, ‘고준위 특별법’ 등에서 확인할 수 있듯이 부지 외 중간저장시설의 확보는 요원한 상황임(법상 2050년까지 확보하도록 명시).
- 따라서 사용후핵연료 관리에 대한 국가 정책 및 사용후핵연료 관리시설 부지를 확보하려는 중장기적인 노력과 동시에 단기적으로는 원전 부지 내 건식저장시설을 확보하려는 노력이 매우 중요함.
 - 중간저장시설 확보 전까지 사용후핵연료 관리 책임을 지는 발전사업자인 한수원은 임시저장시설의 포화로 인한 원자로 가동 중단을 막기 위해 2030년 초 포화가 예상되는 한빛, 고리, 한울원전 본부에 건식저장시설의 확보를 추진하고 있음.
 - 한빛, 고리, 한울원전 부지에 건식저장시설을 적기에 구축할 수 있도록 정부는 제도적 지원을 아끼지 말아야 할 것임.

03 해외 사용후핵연료 저장 및 관리 현황

- 전 세계적으로 많은 국가가 “초기 습식 냉각 → 장기 건식저장 → (재처리) → 최종 심층 처분”의 단계를 거치는 사용후핵연료 관리 정책을 추진하고 있음. 사용후핵연료의 재처리 여부와 무관하게 사용후핵연료 또는 고준위 방사성폐기물은 심층 처분하여 격리함. 국가별 상세 관리 현황은 아래와 같음.
- 미국
 - 미국은 세계에서 가장 많은 상업용 사용후핵연료를 보유하고 있음. 2010년 유카 마운틴(Yucca Mountain) 처분장이 사실상 중단된 이후, 대부분의 원전 사업자는 부지 내 독립형 건식저장시설 (Independent Spent Fuel Storage Installation, ISFSI)을 증설하여 2,100개 이상의 메탈 캐스크 (40년 기본 허가, 연장 시 100년)로 보관 중임.
 - 정부 부처 간 공방이 계속되는 가운데, 민간 컨소시엄은 연방 차원의 중앙집중식 중간저장시설

(Consolidated Interim Storage Facility, CISF) 허가에 도전하고 있음. 대표 사례로 홀텍(Holtec)의 HI-STORE 프로젝트가 2023년 미국 원자력규제위원회(NRC) 인허가를 획득했으나, 뉴멕시코·텍사스주와의 법적 분쟁으로 착공이 지연. 2025년 미 연방대법원이 연방법 우위를 확인하면서 큰 걸림돌은 제거됐지만, 주정부의 반대와 주민 수용성 확보가 여전히 과제임.

■ 캐나다

- 캐나다는 원전 부지 내 습식저장조와 대형 건식저장용기(Dry Storage Canisters, DSC)를 이용해 사용후핵연료를 저장 중임. 2002년 제정된 핵연료관리기구(The Nuclear Waste Management Organization, NWMO) 법은 '적응형 단계적 관리'를 채택해 20여 년에 걸친 지역 참여 과정을 거쳤고, 2024년 온타리오주 와비군 호수 오지브웨이 공동체-이그네이스 지역을 심층 자료 평가 후보지로 확정하였음. 원주민 공동체와의 합의 형성은 국제적으로도 중요한 사례로 평가되고 있음.

■ 핀란드

- 핀란드 포시바(Posiva)는 2015년 온칼로(Onkalo) 처분장 건설 허가를 취득했으나, 규제기관(STUK)이 최신 성능평가 보완을 요구하면서 운영 허가는 2026년 획득할 예정임. 구리 용기와 벤토나이트 완충재를 결합한 처분시스템이 세계 최초로 상용화될 가능성이 높음.

■ 스웨덴

- 스웨덴은 2022년 중앙정부가 포스마크(Forsmark) 처분장과 오스카섬(Oskarshamn) 포집·캐니스터 공장을 승인하였음. 토지·환경재판소 판결을 거쳐 건설 허가를 획득하였고 현재 건설을 준비 중이며, 지방자치단체·정당 간 폭넓은 합의 덕분에 사업이 원활하게 지속될 것으로 예상됨.

■ 독일

- 2011년 후쿠시마 사고 이후 탈원전을 가속화해 2023년 4월 마지막 원자로 3기를 영구정지함. 1,900여 개의 건식 캐스크가 16개 저장고에 분산돼 있고, 40년 허가기간 이후 '연장 저장'이 필요한 상황임. 2013년 고어레벤(Gorleben) 소금광산 처분 후보지를 철회하면서 새 부지 선정을 2031년까지 완료해야 하나, 일정 지연이 예상됨.

■ 프랑스

- 라아그(La Hague) 재처리 공장을 운영해 17,000톤의 연료를 회수·재활용하였으며, 고준위 유리화

폐기물은 시제오(Cigéo) 점토층 처분장(뷔르 지역)에 처분 예정임. 2023년 재처리 후 고준위폐기물을 처분하기 위한 처분장 건설 허가 심사를 개시함.

■ 영국

- 셀라필드(Sellafield)가 세계 최대 규모의 습식저장시설을 유지하고 있음. 영국의 흑연감속 가스냉각로에 사용되었던 마그녹스(Magnox) 핵연료는 재처리해 왔으나 마그녹스 원자로가 단계적으로 가동을 중단하면서 재처리 시설도 2022년에 운영을 종료함. 영국 정부는 캐나다식 지역 호스트 모델을 벤치마킹해 고준위폐기물의 처분을 위한 후보지를 공모 중임.

■ 스위스

- 스위스는 2022년 뇌르들리히 래게른(Nördlich Lägern) 지역을 처분장 부지로 채택함.

■ 체코

- 체코는 호르카(Horka)를 우선 후보지로 선정해 2065년 처분장 가동을 목표로 함.

■ 헝가리

- 헝가리는 러시아형 가압경수 원자로인 VVER 타입의 원자로에서 발생한 연료를 모듈형 건식보관소(Modular Vault Dry Storage, MVDS)에 저장하면서 2067년까지 역내 공동 처분 해법을 모색하고 있음.

■ 러시아

- 러시아는 로사톰(Rosatom)이 상업용 및 군사용 원자로에서 발생한 사용후핵연료를 통합 관리하고 있음. VVER에서 발생한 고연소도 사용후핵연료와 흑연감속 비등경수형 원자로인 RBMK에서 발생한 사용후핵연료는 크라스노야르스크(Krasnoyarsk) 공단에서 공랭 방식으로 저장한 뒤 폐쇄형 연료주기로 재처리 후 처분하는 방식을 추진함. 니즈네캄스크(Nizhnekamsk) 화강암 지층에서 고준위폐기물 처분 부지 확보를 위해 심층 시추 시험을 수행 중임.

■ 스페인

- 스페인은 2018년 정부 정책 변화로 비야르 데 카냐스(Villar de Cañas) 중앙저장소 건설을

중단하였으며, 현재는 부지 내 건식저장을 연장하여 저장하고 있음.

■ 벨기에

- 벨기에는 부분적 탈원전을 재검토하고 있으며, 기존 저장시설의 수명연장과 신규 저장시설 구축을 병행 논의 중임.

■ 일본

- 사용후핵연료가 10개 부지에 나뉘어 저장되어 있으며, 재처리 핵심인 롯카쇼(Rokkasho) 공장은 2026년 준공 예정임. 원전 부지 내 습식저장조 포화를 막기 위해 2023년 무쓰(Mutsu) 중간저장시설(3,000다발, 50년)을 가동하였음. 고준위폐기물 처분을 위한 처분 부지를 확보 중임.

■ 중국

- 원전 규모가 급속히 증가하는 중국은 간쑤성 진타(Jinta)에 재처리 실증시설, 베이산(北山) 사막에 지하연구실(Underground Research Laboratory)을 구축 중임.

■ 대만

- 대만은 란위섬(蘭嶼) 저장시설 철거 이후 모든 사용후핵연료를 원전 부지 내 임시저장시설에 저장 중임.

■ 인도

- 인도는 재처리·고속증식로를 축으로 한 순환형 핵주기 기술개발을 추진하고 있음. 타라푸르(Tarapur)·칼파캄(Kalpakkam) 중앙 습식저장소 외에 저연소도 중수로 사용후핵연료 다발을 대상으로 건식저장이 진행 중. 처분 부지 확보도 진행 중임.

KAST

Research Report

2025

III

사용후핵연료 재활용 및 폐기물 저감



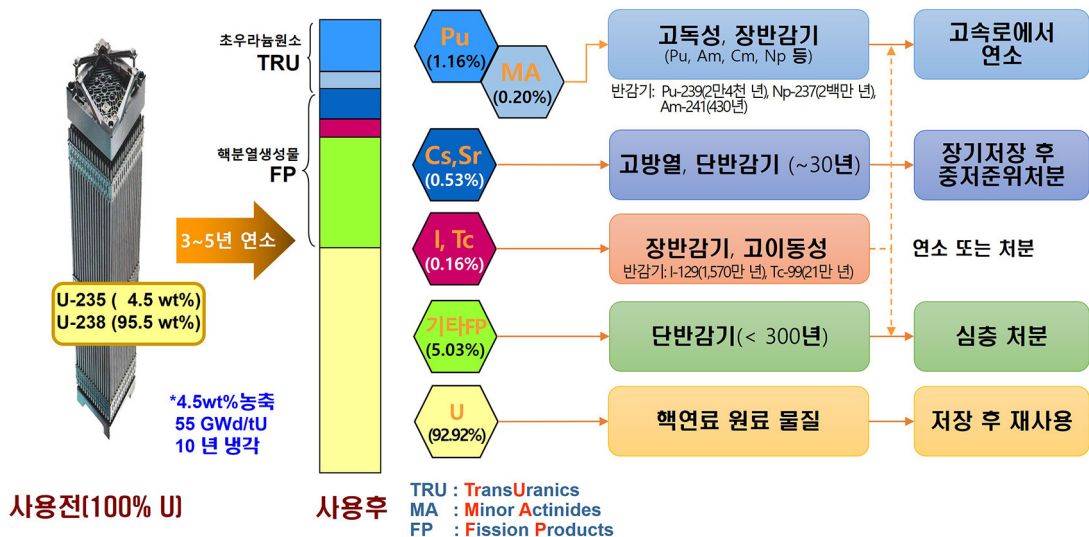
III

사용후핵연료 재활용 및 폐기물 저감

01 사용후핵연료 재활용(Recycling) 및 폐기물 저감 기술 개요

- 원자로에서 연소 후 방출되는 사용후핵연료에는 타지 않은 우라늄(대부분 U-238)이 여전히 약 93% 남아 있으며, 연료로 재활용이 가능한 플루토늄(Pu), 넵투늄(Np), 아메리슘(Am), 퀴륨(Cm)과 같은 초우라늄(TRU) 원소들이 약 1.5%, 기타 핵분열생성물(Fission Product, FP)들이 나머지를 차지함.
- 방사성 독성이 크고 반감기가 매우 긴 플루토늄을 비롯한 초우라늄 원소들은 원자로 연료로 재활용할 수 있어, 고속로 등 선진원자로에서 연료로 연소시켜 없앨 수 있다면 경제적, 환경적으로 큰 이득이 되며 폐기물량과 독성이 줄어 관리 부담도 저감됨.
- 또한 사용후핵연료의 대부분을 차지하고 있는 우라늄도 고속로 등에 재사용하거나 안정화하여 처분하게 되면 고준위 방사성폐기물의 양을 크게 줄일 수 있음.

〈그림 3.1〉 사용후핵연료 특성과 핵종별 맞춤 관리



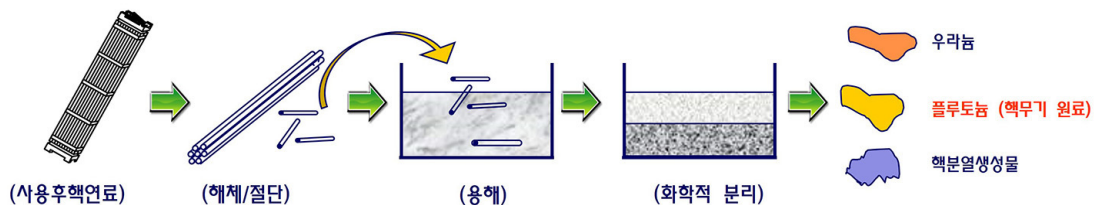
■ 사용후핵연료에 포함된 핵종들을 특성에 맞게 분리·회수해 고속로 등 선진원자로에서 재활용하기 위한 기술은 통상적으로 핵연료를 다시 처리한다는 측면에서 사용후핵연료 재처리(Reprocessing) 기술이라고도 불리고 있음.

- 그러나 재처리 기술을 통해 분리·회수한 핵물질을 원자로 연료로 재활용할 수도 있지만, 사용후핵연료에서 순수한 플루토늄을 분리해 핵무기의 원료로 사용할 수 있다는 점에서 재처리라는 용어는 온전히 가치중립적으로 사용된다고 보기는 어려움.
- 따라서 국내에서 개발하고 있는 사용후핵연료 재활용 기술인 파이로프로세싱 기술은 재처리 기술보다는 사용후핵연료 재활용 또는 재순환 기술로 부르고 있음.

■ 프랑스, 영국, 러시아, 인도, 일본, 중국 등 핵무기 보유국 및 원자력 강국들이 보유한 상용 습식재처리(Aqueous Reprocessing) 기술인 PUREX(퓨렉스) 기술은 사용후핵연료를 질산 용액에 녹인 후 화학물질(Tributyl Phosphate, TBP)을 이용하여 질산용액에서 순수한 플루토늄과 우라늄을 분리하는 기술임.

- 상용 습식재처리 시설을 보유한 국가들은 사용후핵연료에서 분리한 플루토늄과 우라늄을 혼합하여 혼합산화물(MOX) 연료를 제조하고, 이를 경수로 및 고속로에서 다시 연료로 재활용하고 있음.

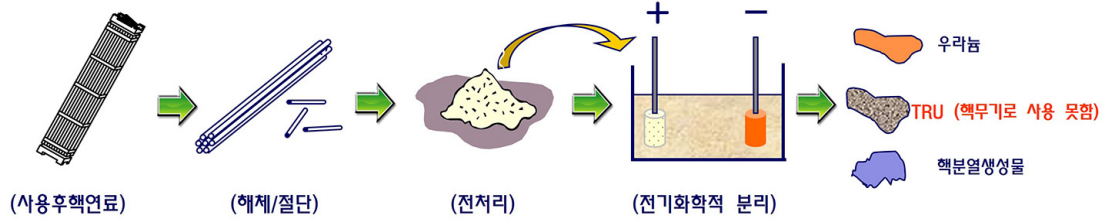
〈그림 3.2.〉 사용후핵연료 습식재처리 기술 개념



■ 국내에서는 사용후핵연료에서 플루토늄을 순수하게 분리하지 않고, 플루토늄을 기타 초우라늄원소들과 함께 분리·회수해 핵확산 저항성을 높이는 방식의 파이로프로세싱(Pyroprocessing) 기술을 개발해 왔음.

- 파이로 기술은 사용후핵연료를 고온(500~650℃)의 용융염(LiCl-KCl 등)에 녹인 후 전기화학 반응을 통해 우라늄과 TRU를 분리하는 기술로, 질산 용액을 사용하는 습식재처리 기술과 구분하여 건식처리(Dry Processing) 또는 전기화학 재활용(Electrochemical Recycling) 기술이라 부르고 있음.

〈그림 3.3〉 사용후핵연료 파이로 처리기술 개념



02 국외 사용후핵연료 재활용 정책 및 연구개발 현황

- 사용후핵연료를 보유한 34개국 중 미국, 핀란드, 스웨덴을 포함한 10개국은 사용후핵연료를 재활용하지 않고 처분하는 ‘직접처분’ 정책을, 프랑스, 영국, 일본, 러시아, 중국 등 6개국은 ‘재활용 후 처분’ 정책을 채택함.

- 우리나라를 포함한 18개국은 관리 정책 결정을 유보한 상태임.

〈표 3.1〉 국가별 사용후핵연료 관리 정책

직접처분 (10개국)	미국, 핀란드, 스웨덴, 스위스, 스페인, 캐나다, 독일, 루마니아, 슬로바키아, 대만
재활용 후 처분 (6개국)	프랑스, 영국, 일본, 러시아, 중국, 인도 (일본을 제외한 5개국은 핵무기보유국)
정책결정 유보 (18개국)	벨기에, 체코, 남아공, 한국, 아르헨티나, 아르메니아, 브라질, 불가리아, 헝가리, 이란, 이탈리아, 카자흐스탄, 리투아니아, 멕시코, 네덜란드, 파키스탄, 슬로베니아, 우크라이나

(사용후핵연료 관리 정책 의견 수렴 속의 자료집(2020))

- 대부분의 원자력 강국들은 상용 습식재처리 기술인 플렉스 기술을 이용하여 사용후핵연료에서 재사용이 가능한 핵물질을 회수하여 재활용하고 있으며, 그 과정에서 발생하는 방사성폐기물을 처분하고 있음.

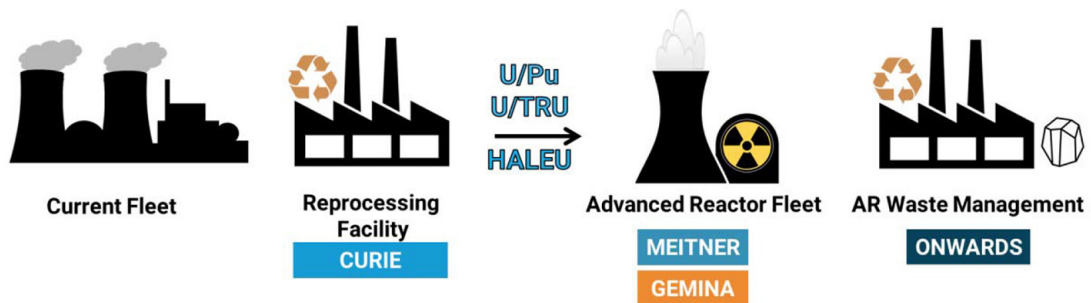
- 미국을 제외한 원전을 다수 보유한 국가들은 사용후핵연료를 관리 부담을 저감하고, 핵연료의 이용률을 높이는 사용후핵연료 재활용 정책을 추진 중임.

- (미국) 에너지부(Department of Energy, DOE) 주도로 사용후핵연료의 직접처분 기술과 함께 사용후핵연료 재활용을 위해 파이로프로세싱 기술을 포함한 다양한 사용후핵연료 처리기술도

개발하고 있음.

- 1960년대부터 사용후핵연료를 파이로 처리 후 고속로에서 재활용하는 순환형 핵연료주기 기술개발을 추진하였으며, 1980년대 중반 파이로와 고속로를 연계한 일체형고속로(Integral Fast Reactor, IFR) 핵연료주기 기술개발을 추진 중임.
- 1990년대 중반부터 2000년대 초반에는 선진핵주기구상(Advanced Fuel Cycle Initiative, AFCI)에 따라 미국 등 원자력 강국 중심의 순환형 핵연료주기 체제를 추진한 바 있음.
- 2010년대 후반부터 선진원자로 개발에 따른 고수준저농축우라늄(High-Assay Low Enriched Uranium, HALEU) 연료 수요가 증가함에 따라 미국 내 자체 농축 역량 확보 노력과 함께, 파이로 기술을 활용해 과거의 고농축우라늄을 처리해 HALEU 연료를 확보하기 위한 노력도 진행 중임.
- 2022년부터 선진원자로의 폐기물 양 또는 처분장 면적을 10배 줄이기 위한 혁신기술 개발 및 실증을 위한 ONWARDS 프로그램과 사용후핵연료 처분 부담 및 환경 영향 저감을 위한 순환형 핵연료주기 혁신기술 개발사업인 CURIE 프로그램을 론칭함.

〈그림 3.4〉 미국의 사용후핵연료 재활용 및 폐기물 관리 혁신기술 개발



(ARPA-E)

- ONWARDS(Optimizing Nuclear Waste and Advanced Reactor Disposal Systems): 사용후핵연료 최적 처리를 통한 선진원자로 처분 부담 저감 연구에 3,600만 달러 투자.
- CURIE(Converting UNF Radioisotopes Into Energy): 사용후핵연료에 남은 방사성동위원소를 재활용해 에너지로 전환하기 위한 연구에 3,800만 달러 투자.
- 2025년 5월 트럼프 2기 행정부는 원자력 산업 기반 활성화에 관한 행정명령에서 미국 내 핵연료주기 공급망 강화의 일환으로 사용후핵연료 재활용 역량을 확보하기 위한 조치를 강구함.
 - 현재 민간 기업 오클로(Oklo), 큐리오(Curio) 등을 중심으로 국내에서 개발 중인 파이로 기술과 유사한 건식처리 기술의 상용화를 선진원자로 사업과 연계하여 추진 중임.

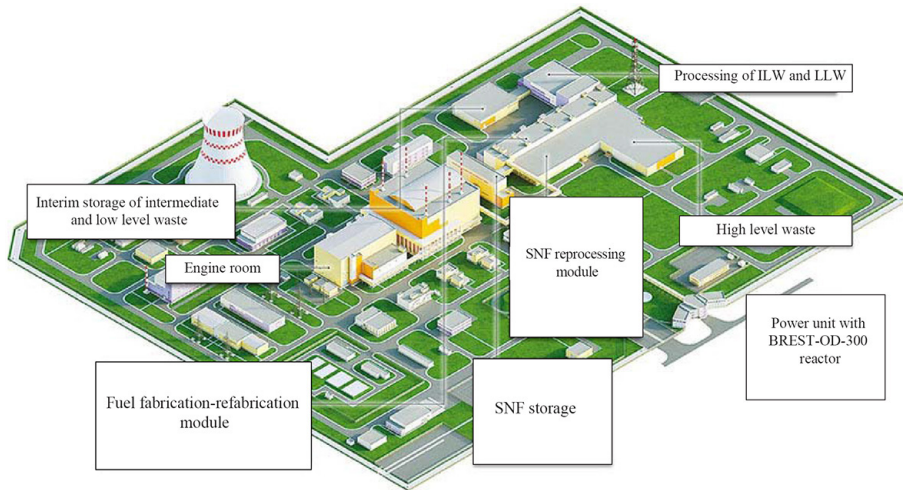
- 미국은 또한 민간회사를 중심으로 다양한 선진원자료를 개발하고 있으며, 연방정부는 2030년대에 선진원자료를 배치하기 위해 예산과 국립연구소의 인프라를 적극 지원하고 있음.
 - U-235를 최대 20%에 가깝게 농축한 HALEU 원자료를 사용할 예정인 소듐냉각고속로(SFR), 용융염원자로(MSR), 고온가스냉각로(HTGR) 등 다양한 비경수 냉각 원자로는 사용후핵연료에서 회수한 TRU를 연료로 사용할 수 있기 때문에 사용후핵연료 재활용을 위한 선진원자로 기술 확보는 순조롭게 진행 중임.
 - 전미과학공학의학한림원(NASEM)이 선진 핵연료주기 및 폐기물에 대한 검토보고서를 통해 선진원자로 개발 및 배치를 고려하여 중장기 순환형 핵연료주기 기술개발 필요성을 강조하는 등 선진원자로 산업의 대두와 함께 순환형 핵연료주기 기술 확보의 중요성이 강조되고 있는 추세임.
- **(프랑스)** 오라노(Orano)는 라아그에 연간 1,700톤의 경수로 사용후핵연료를 처리할 수 있는 습식재처리 기반의 재처리 시설을 운영하고 있으며, 사용후핵연료 재처리 후 제조한 MOX 핵연료를 자국의 원자로에서 1회 재활용하는 부분 재활용(Partial Recycling) 정책을 추진하고 있음.
- 장기적으로는 반복 재활용(Multi Recycling) 및 완전 재활용(Full Recycling)을 목표로 습식으로 재처리하기 어려운 선진원자로 사용후핵연료의 처리기술 개발 등 핵확산 저항성이 높은 선진 처리기술과 고속로 개발을 추진 중임.
 - 오라노는 부분 재활용을 통해 사용후핵연료의 부피를 약 1/5, 처분장 면적을 약 1/4 감소시키는 효과가 있다고 평가하고 있음.
 - 또한 고준위 방사성폐기물 관리 효율성을 높이기 위한 선진 습식재처리 기술 및 파이로 기술개발 등 다양한 재활용 처리기술도 개발하고 있음.
 - 오라노는 습식재처리 기술 중 핵확산 저항성이 크고 상용화에 가장 근접한 것으로 평가되는 COEX(Co-Extraction of Uranium and Plutonium) 공정을 개발 중이며, 프랑스 원자력청(CEA)은 고속로 사용후핵연료 처리를 위해 핵확산 저항성이 강화된 GANEX(Group Actinide Extraction) 공정을 개발 중임.
 - 파이로 기술에 대한 연구는 CEA를 중심으로 기초적인 옵션 연구 차원에서 추진 중임.

〈그림 3.5〉 프랑스의 라아그 습식재처리 시설



- **(러시아)** 400톤 규모의 Mayak 상용 습식재처리 시설을 보유하고 있으며, 경수로 사용후핵연료를 MOX 연료로 재활용하는 부분 재활용 정책을 추진하고 있음. 또한 습식 처리기술과 고속로를 연계한 반복 재활용 기술 확보로 고준위 방사성폐기물을 최소화하는 전략을 채택하고 있음.
- MOX 연료를 사용하는 4세대 원전인 소듐냉각고속로(SFR) BN-800을 시험·운영 중이며, 사용후핵연료 재활용을 위한 납냉각고속로(LFR)인 BREST-OD-300을 개발하고 있음.

〈그림 3.6〉 러시아의 ODEK 고속로 연계 순환형 핵연료주기시설의 조감도



- 러시아는 1950년 후반부터 RIAR(Research Institute of Atomic Reactors) 연구소를 중심으로 DDP(Dimitrovgrad Dry Process) 공정과 진동 충전법으로 구성된 독자적인 파이로 기술을 개발해 왔으며, 최근에는 Breakthrough(러시아어로 Proryv) 프로젝트를 통해 BREST-OD-300의 사용후핵연료 재활용을 위해 파이로와 습식재처리를 결합한 하이브리드 처리기술을 개발하고 있음.
 - BREST-OD-300 원자로, 사용후핵연료 재처리 모듈, 재활용 연료 제조 및 재가공 모듈을 포함하는 실증용 파일럿 에너지 복합단지(Pilot Energy Complex, ODEK) 건설을 추진 중임.
- **(일본)** 미국과의 원자력협력협정을 통해 사용후핵연료 재처리에 대한 권한을 인정받아 사용후핵연료 재활용 정책을 추진하고 있으며, 이를 위해 롯카쇼 지역에 800톤 규모의 상용 습식재처리 시설을 건설하였음.
 - 2011년 후쿠시마 사고 이후 강화된 원자력 시설 안전규제 요건에 맞게 롯카쇼 재처리 시설도 보강 작업이 이루어져 왔음. 그러나 후쿠시마 사고 이후 대부분의 원자로 가동이 중단되며 사용후핵연료 재처리 시설의 가동도 필요 없어졌기 때문에 현재 운영은 하고 있지 않음.

〈그림 3.7.〉 일본의 롯카쇼 습식재처리 시설



- 일본 정부는 사용후핵연료 재활용을 위해 FaCT(Fast Reactor Cycle Technology Development) 프로그램 등 다양한 핵연료주기 기술개발을 추진해 왔으며, 습식재처리-고속로 연계 기술개발과 병행하여 제4세대 원자로와 연계한 파이로-고속로 연계 기술도 보조 개념으로 기술개발을 추진하고 있음.
 - 2006년부터 FaCT 프로그램을 통해 선진 습식재처리 기술인 NEXT(New Extraction System for TRU Recovery)를 개발하는 동시에, 보조 개념으로 파이로 기반의 고속로 사용후핵연료

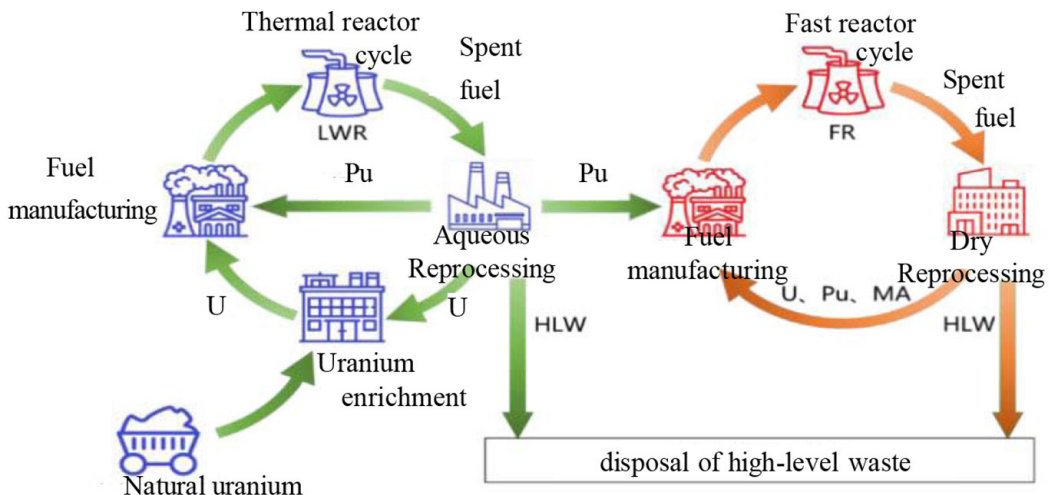
처리기술 개발을 추진하고 있음.

- 후쿠시마 사고 이전에는 일본원자력연구개발기구(JAEA)와 전력중앙연구원(CRIEPI)을 중심으로 파이로 연구개발이 활발히 진행되었으나, 현재는 소규모 연구개발만 진행 중임.
- 2000년 초 파이로 시설 개발을 위해 경수로 및 MOX 사용후핵연료의 파이로 처리시설에 대한 개념설계를 수행하였음(시설 용량: 32, 48 및 192톤/년).
- 현재 JAEA를 중심으로 후쿠시마 사고에서 손상된 핵연료를 파이로 기술을 이용해 처리하는 방안을 검토 중임.

■ **(중국)** 습식재처리-고속로 연계를 통한 재활용 정책을 추진하고 있으며, 장기적으로 금속핵연료를 사용하는 고속로의 경우 파이로 기술을 통해 사용후핵연료의 반복 재활용을 추진할 계획임.

- 2030년대 상용 습식재처리 시설(800톤/년), 50톤 규모 MOX 연료 제조 시설을 운영할 예정이며, MOX 연료는 상용 소듐냉각고속로 CFR-1200(China Fast Reactor)에서 사용할 계획임. 현재 CFR의 실증을 위한 CFR-600 2기가 건설 중임.
- 이와 병행해 고속로에서 발생한 사용후핵연료의 재활용을 위해 파이로 기술을 연구개발 중이며 2035년 파이로 실증시설 건설을 계획하고 있음.

〈그림 3.8〉 중국의 사용후핵연료 재활용 전략



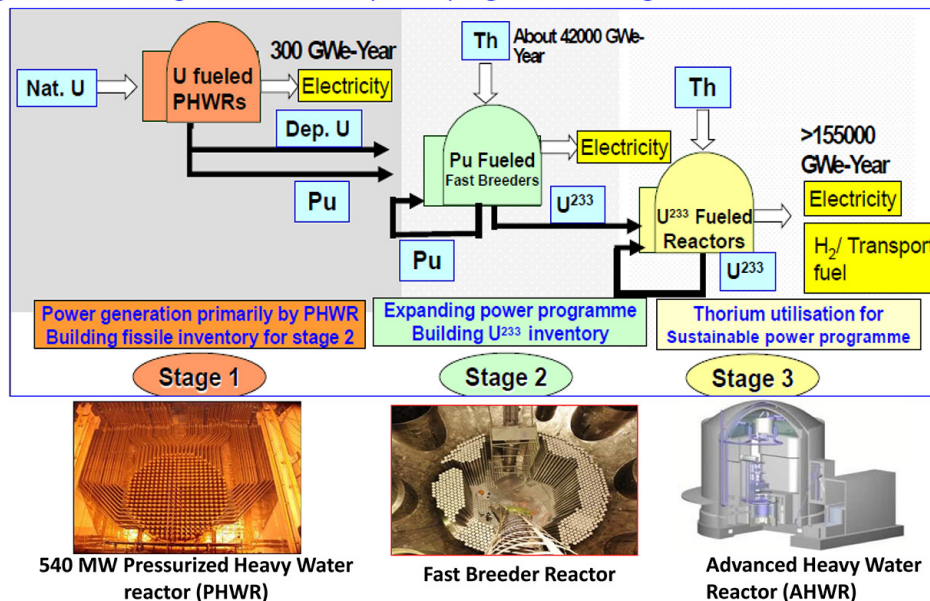
(CIAE)

- (인도) 인도는 중수로(Pressurized Heavy Water Reactor, PHWR)에서 발생한 사용후핵연료를 습식재처리로 회수한 플루토늄을 고속증식로(Fast Breed Reactor)에서 토륨과 함께 재활용하고, 고속증식로 사용후핵연료에서 회수한 U-233을 토륨과 함께 첨단중수로(Advanced Heavy Water Reactor, AHWR)에서 태우는 독자적인 개념의 재활용 정책을 추진하고 있음.

〈그림 3.9〉 인도의 원자로 및 사용후핵연료 재활용 정책

Indian Three stage Nuclear Power Program

The goal of three stage Indian nuclear power programme is long term resource sustainability



(Madhuri Shetty, 2018)

- 다른 나라들과 마찬가지로 상용 습식재처리 기술을 우선 활용해 사용후핵연료의 재활용을 추진하고 있으며, 장기적으로 고속증식로에 적합한 금속핵연료 공급을 위해 파이로 기술을 활용할 계획을 갖고 있음.
- 1990년대부터 파이로프로세싱 관련 기초 연구를 IGCAR(Indira Gandhi Centre for Atomic Research)에서 수행한 바 있음.

03 국내 사용후핵연료 재활용 정책 및 연구개발 현황

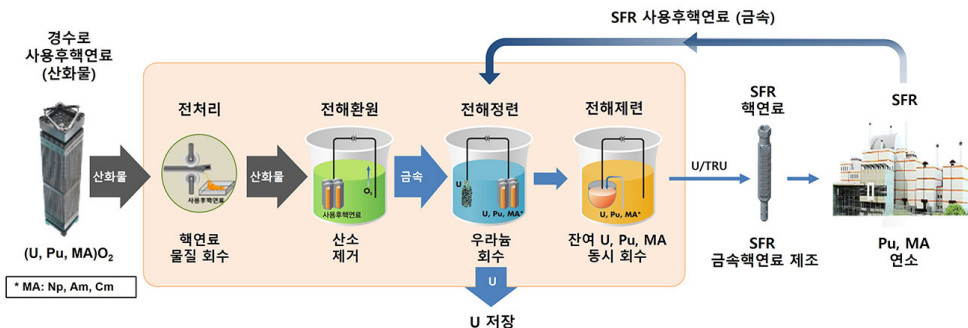
- 우리나라는 원자력의 지속적 이용과 사용후핵연료 문제 해결을 위해 미래 원자력시스템인 고속로와 핵비확산성 파이로프로세싱 기술을 연계한 친환경 순환형 핵연료주기 시스템 개발을 과거부터 선제적으로 추진하였음.
 - 특히 2008년 원자력진흥위원회에서 파이로와 SFR을 연계한 ‘미래 원자력시스템 연구개발 장기 추진계획(안)’을 의결하면서 파이로와 SFR 연구개발이 본격 추진되었음.
 - 당시 계획상 파이로는 2025년 실용화시설 건설·운영을, SFR은 2028년 실증로 건설·운영을 목표로 하여 20년대 후반부터 파이로 시설에서 사용후핵연료를 처리하여 SFR 핵연료를 공급한다는 계획이 있었음.
 - 또한 2011년부터는 한미 공동으로 파이로 공정의 기술성, 경제성, 핵비확산성을 검증하기 위한 10년간의 공동연구도 착수하는 등 연구개발이 활발히 진행되었음.
- 그러나 2010년대 후반 국회와 시민단체를 중심으로 파이로 및 SFR 연구개발의 적정성에 대한 문제 제기 및 비판이 지속됨에 따라, 2017년 말부터 2018년 초까지 국회 협의를 통해 ‘사용후핵연료 처리기술 연구개발사업 재검토위원회’가 구성·운영되며 사용후핵연료 처리기술 연구개발 지속 추진 여부에 대한 검토를 진행함.
 - 3개월간의 검토 이후 재검토위원회는 대규모 예산이 투입되는 실증을 제외한 핵심 기술개발을 중심으로 연구를 지속하되, 한미 공동연구가 종료되는 2020년 이후 한미 공동연구 결과를 바탕으로 기술개발 지속 여부를 다시 검토할 것을 권고함.
 - 그 결과 2020년 이후 파이로와 SFR 실증 시설에 대한 내용은 국가 중장기 계획에서 삭제되었으며, 파이로는 한미 공동연구를 통한 타당성 검증에 초점을 맞추어 연구개발이 추진되었음.
- 10년간의 한미 공동연구가 종료된 2021년, 국회 협의로 구성된 ‘사용후핵연료 처리기술 적정성 검토위원회’가 다시 한번 파이로-SFR 연계시스템 기술개발의 적정성에 대한 재검토를 진행함.
 - 한미 공동연구 및 국내 연구개발 결과를 기반으로 한 적정성 검토 결과 적정성 검토위원회는 파이로와 SFR을 연계한 사용후핵연료 처리기술이 기술성과 안전성 및 핵비확산성을 갖춘 사용후핵연료 관리기술로서의 가능성이 있다고 판단함.
 - 이에 따라 처리기술 적정성 검토위원회는 연구개발을 지속하고, 파이로 시설에 대한 미국의 장기동의 확보를 위한 노력을 지속할 것을 권고함.

- 이후 국내 재활용 기술개발 사업은 국내 실증 전 확보해야 하는 파이로 공정 자동화/모듈화 및 공백기술 확보 등 핵심기술을 개발하는 소규모 연구개발 사업이 진행되고 있음.
- 파이로 기술로 사용후핵연료에서 분리·회수한 핵물질은 SFR 외에도 다양한 선진원자로에서 연료로 재활용이 가능하기 때문에, 파이로 기술 실증이 완료되기 전까지 선진원자로 기술개발은 별도의 연구개발 사업을 통해 추진 중임.
- 현재 국내에서는 해양·산업 분야 활용 및 수출을 목적으로 SFR 외에도 용융염원자로(Molten Salt Reactor, MSR), 고온가스로(High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR) 등 다양한 종류의 선진원자로가 개발되고 있음.

04 사용후핵연료 재활용 기술개발의 도전과제

- 국내에서 개발하고 있는 파이로프로세싱 기술은 단위공정 기술들로 이루어지며, 파이로 공정은 크게 아래의 4가지 공정으로 구성됨.
- 사용후핵연료 집합체를 해체하고 피복관으로부터 핵물질을 분리하여 후속 공정의 입력물질을 준비하는 전처리 공정.
- 경수로 사용후핵연료와 같은 산화물 연료를 용융염에서 전류를 흘려 금속으로 전환하는 전해환원 공정.
- 금속 연료를 용융염에서 전기화학적으로 우라늄만 회수하는 전해정련 공정.
- 용융염에 녹아 있는 잔여 우라늄과 TRU를 동시에 회수하는 전해제련 공정.

〈그림 3.10.〉 사용후핵연료 파이로 처리 공정



(한국원자력연구원)

- 국내에서는 20년 이상의 국내 파이로 기술개발과 10년간의 한미 공동연구를 통해 파이로 전체 공정에 대한 기술적 타당성을 검증하였으며, TRL(Technology Readiness Level)상 이제는 국내에서 사용후핵연료를 이용해 파이로 기술을 실증해야 하는 단계임.
 - 그러나 국내에서 실제 사용후핵연료를 이용해 파이로 전체 공정을 실증하기 위해서는 우라늄과 초우라늄 원소를 전기화학적으로 분리 회수하는 파이로 전해회수(전해정련과 전해제련) 공정에 대한 미국의 장기동의(Long-term Programmatic Consent)를 확보하여야 함.
- 2015년 개정된 한미 원자력협력협정에는 파이로 기술의 국내 활용을 위한 장기동의 절차를 담았으며, 장기동의 협상의 기술적 판단 근거로 당시 진행 중이던 파이로 한미 공동연구 결과를 활용할 수 있도록 하였음.
 - 2011년부터 한국과 미국은 한미 원자력 연료주기 공동연구를 통해 파이로의 기술적 타당성, 경제적 실행 가능성, 핵비확산 수용성에 대한 검증을 수행해 왔으며, 2021년 10년간의 공동연구 결과를 담은 기술성, 경제성, 핵비확산수용성 분야 보고서 3편을 작성하여 양국 정부에 제출함.
 - 비록 한미 공동연구 10년 보고서가 미국 내 관련 법령 및 양국 간 계약에 따라 비공개됨에 따라 구체적인 내용과 결과는 공개되지 않았으나, 한미공동연구 10년 보고서를 검토한 '사용후핵연료 처리기술 적정성 검토위원회'가 파이로와 고속로를 연계하는 순환형 핵연료주기 기술이 국내 사용후핵연료 관리기술로서의 가능성이 있다고 판단한 것에서 간접적으로나마 파이로 기술의 타당성을 확인할 수 있음.
- 한미 양국 간 10년 공동연구를 통해 파이로의 기술성, 경제성 및 핵비확산 수용성을 검증이 일차적으로 완료되었으나, 미국이 장기동의 협상에 필요한 핵비확산 수용성의 정확한 평가를 위해 고연소도 사용후핵연료를 이용한 추가 연구의 필요성을 제기함에 따라 2024년부터 추가적인 공동연구가 진행되고 있음.
- 국내에 순환형 핵연료주기 기술을 확보하기 위해서는 파이로 기술에 대한 장기동의를 확보해야 하며, 이를 위해 우리 정부는 우선적으로 고연소도 사용후핵연료를 이용한 한미공동연구가 적기에 성공적으로 완료될 수 있도록 정책적 지원을 아끼지 말아야 할 것임.
 - 또한 미국과의 장기동의 협상 전 국내 파이로 처리기술 활용에 대한 필요성과 당위성을 설득할 수 있도록, 순환형 핵연료주기 기술 확보를 위한 중장기 국가계획을 국가 사용후핵연료 관리 정책, 국가 선진원자로 개발 정책과 연계해 체계적으로 검토하고 수립할 필요가 있음.

■ 파이로프로세싱을 이용한 사용후핵연료 재활용 정책에 대한 수용성을 확보하기 위해 민감기술인 파이로프로세싱의 기술개발 수준 및 경제적 실행 가능성에 대한 대중 및 과학기술계의 이해를 돕기 위한 노력이 지속될 필요가 있음.

- 한미가 공동으로 파이로프로세싱 연구를 수행하면서 민감기술인 파이로프로세싱에 대한 정보 공개는 매우 제한적으로 이루어져 옴에 따라 대중은 물론 원자력계 내에서도 기술의 실현 가능성에 대한 의문이 제기되어 왔음. 특히 10년간의 한미 공동연구의 주요 성과물인 파이로프로세싱에 대한 기술적 타당성, 경제적 실행 가능성, 핵비확산 수용성에 대한 보고서도 미국의 민감기술 관리규정에 따라 공개되지 않은바, 파이로프로세싱에 대한 이해도 증진 노력이 더욱 중요해짐.
- 제한적으로 전문가 위원회 구성을 통해 파이로와 SFR을 연계한 처리기술에 대한 연구개발 지속의 적정성을 검증하였으나, 향후 기술개발의 진전과 함께 대중 및 과학기술계를 대상으로 기술에 대한 이해를 높이기 위한 노력이 필요함.

■ 파이로프로세싱 사용후핵연료 처리기술과 SFR 등 선진원자로 기술은 현재 개발 중인 상황으로 경제성 평가 결과에 대한 불확실성이 존재함. 이를 고려해 파이로프로세싱과 선진원자로를 연계하는 사용후핵연료 재활용 옵션에 대한 경제성을 지속적으로 평가하여 정책 결정 시 객관적인 경제성 평가 결과를 제시할 필요가 있음.

- 한미 공동연구를 통해 파이로프로세싱 처리, SFR 건설/운영/해체 비용, 사용후핵연료의 직접처분 또는 재활용 폐기물 처분 등 모든 수명주기 동안 발생하는 비용을 고려해 평가한 경제성 평가에서 비용 불확도를 고려할 때 사용후핵연료의 직접처분 대비 재활용 옵션의 수명주기 비용이 유의한 차이가 없음을 확인하였음.
- 폐기물 처분부담 저감, 에너지 자립, 자원 활용성 등 화폐가치로 환산할 수 없는 다양한 사회 환경적 영향을 함께 고려할 때 재활용 옵션이 한국의 사용후핵연료 관리를 위한 경제적으로 실행 가능한 방안의 하나로 평가함.

05 사용후핵연료 재활용 기술의 가치

- 세계 각국은 에너지 자립 및 탄소중립을 목표로 원자력 이용을 확대하고 있으며, 최근 AI 기술 발전으로 안정적인 전력 공급원이 필요해짐에 따라 소형모듈원자로(SMR) 및 선진원자로의 필요성도 더욱 설득력을 얻고 있는 상황임.
 - 국내에서도 원자력은 필수 에너지원으로 지속 이용될 전망이며, 미래에는 기존 대형원전의 사용후핵연료뿐만 아니라 새로운 특성의 선진원자로 사용후핵연료도 발생해 사용후핵연료 관리 부담은 가중될 전망이다.
 - 또한 선진원자로의 연료로 사용되는 20%에 가까운 농축도의 저수준고농축우라늄(HALEU)을 안정적으로 확보하는 것도 에너지 안보와 직결될 새로운 숙제가 될 것임.
- 파이로 기술은 국내에서 원자력을 지속적으로 이용하기 위해서는 필수적으로 확보해야 하는 원자력 전주기 핵심 기술임.
 - 첫째, 사용후핵연료 관리 부담을 저감할 수 있음. 사용후핵연료를 파이로 처리하여 장수명/고독성 초우라늄원소를 분리하여 재활용하고 그 과정에서 사용후핵연료 부피의 대부분을 차지하는 우라늄과 기타 고방열 원소들을 분리하게 되면 고준위 방사성폐기물의 부피와 독성이 줄어 심지층 처분 부담이 줄어듦.
 - 둘째, 파이로 기술을 이용하면 미래형 원자력 시스템인 SMR 및 선진원자로에서 요구하는 HALEU 연료를 전적으로 외국에 의존하지 않고, TRU 연료를 사용하는 선진원자로 시스템을 운영할 수 있어 에너지 안보를 강화할 수 있음.
 - 셋째, 파이로 기술을 이용하면 향후 SMR/선진원자로 등 새로운 노형의 원전에서 다양한 조성, 특성 및 제원을 갖는 사용후핵연료가 발생하더라도 안정화하여 경수로 사용후핵연료 처분장에서 안전하게 처분할 수 있기 때문에 우리나라의 지속 가능한 원자력 이용을 위해서는 반드시 확보해야 할 것임.

IV

사용후핵연료 처분



IV

사용후핵연료 처분

01 방사성폐기물 처분 개념과 방식

■ 사용후핵연료의 법적 지위

- 「원자력안전법」 제35조제4항은 사용후핵연료의 처리·처분에 관한 사항을 「원자력진흥법」 제3조에 따른 원자력진흥위원회의 심의·의결을 거쳐 결정하도록 규정하고 있으며, 「고준위 방사성폐기물 관리에 관한 특별법」 제2조제2호는 ‘폐기하기로 결정한 사용후핵연료는 고준위 방사성폐기물로 본다’고 명시하고 있음. 따라서 원자력진흥위원회가 특정 사용후핵연료를 폐기하기로 결정하면, 해당 사용후핵연료는 이들 법적 근거에 따라 ‘고준위 방사성폐기물’로 분류되어 관리됨.

■ 방사성폐기물 처분 개념

- 방사성폐기물 처분은 원자력 에너지의 이용 과정에서 필연적으로 발생하는 다양한 방사성폐기물을 인간과 환경으로부터 장기간 안전하게 격리하는 과정임. 방사성폐기물은 저준위, 중준위, 고준위로 구분되며, 일반적으로 고준위 방사성폐기물은 처분이 결정된 사용후핵연료 또는 그 재처리 잔여물로서 방사능과 열출력이 높아 장기간 인간과 환경으로부터 격리되어야 함. 방사성폐기물 처분의 역할은 이러한 폐기물로부터 인류와 생태계를 장기간 보호하고, 방사성물질이 환경에 미치는 영향을 실질적으로 차단하는 데 있음.
- 국제원자력기구(IAEA)는 처리·저장의 임시성과 구분되는 처분의 본질적 특성을 “추가적인 인적·기술적 개입 없이 미래 세대에 대한 안전을 지속적으로 보장하는 폐기”로 정의함(IAEA, 1995). 즉, 안전한 방사성폐기물 처분은 원자력 에너지의 지속적 활용과 에너지 안보, 환경 안전 담보를 위한 필수요건임. 고준위 방사성폐기물 처분은 장기 안전성을 담보하기 위해 과학적으로 검증된 기술과 체계적 관리가 필수며, 이는 부지 선정, 다중방벽 설계, 장기 안전성 평가뿐 아니라 사회적 수용성 확보까지 포함하는 종합적인 과정임.
- 따라서, 방사성폐기물 처분은 단순히 폐기물을 보관·격납하는 기술적 행위를 넘어 국민의 건강과 환경, 나아가 사회적 신뢰와 핵연료주기의 책임 있는 마무리를 실현하는 국가적 임무 수행이라 할 수 있음.

■ 방사성폐기물 처분 방식

- 방사성폐기물의 처분을 위해 국제적으로 논의되고 실험된 주요 처분 방법은 우주 처분, 빙하 처분, 그리고 심지층 처분으로 구분됨. 각 방법은 기술적 가능성, 경제성, 안전성, 국제 규제 환경 등에서 상이한 특성을 지님.
- 우주 처분은 고준위 방사성폐기물을 로켓으로 지구 대기권 밖이나 태양 궤도로 운반해 영구적으로 격리하는 이론적 방안임. 전미과학공학의학한림원(NASEM) 산하 국립연구위원회(NRC)는 과거 우주 처분의 안전성, 환경성, 경제성을 연구하였으나 기술 실패 시 치명적 환경오염 우려와 경제적 비효율성으로 인해 채택하지 않았음. 현재 스페이스X 팰컨9 기준 로켓 발사 비용은 화물 1kg당 약 3,000달러에 이르며 국제적으로 연간 발생하는 고준위 방사성폐기물 약 11,000톤을 처리하기 위한 경제 부담은 현실적으로 수용이 불가능함. 또한 로켓 발사 실패율(약 2% 내외)에 따른 대형사고 위험, 우주 파편(Debris) 발생, 재진입 시 방사능 누출 등 다양한 문제로 IAEA와 경제협력개발기구(OECD) 산하 원자력기구(NEA) 등 국제기구는 현실적 대안으로 간주하지 않음.
- 빙하 처분은 남극이나 그린란드의 두꺼운 빙하층에 고준위 방사성폐기물을 매립(직접 용융 투입 등)하는 방안임. 두꺼운 빙하층 자체가 방사성핵종의 확산을 저지하는 자연방벽 역할을 수행할 것으로 기대되지만, 1991년 남극조약 환경보호의정서에 따라 남극에서의 방사성폐기물 처분은 국제적으로 금지되었음(The Antarctic Treaty, 1991). 해양투기와 마찬가지로 환경파괴 우려와 국제법적 금지(빙하 및 극지 환경 보호 원칙)가 강력하게 적용되어 현재는 실질적으로 검토 대상이 아님. 또한 장기적으로는 기후변화와 빙하 이동·용해로 인한 안정성 미확보, 극지 생태계 및 글로벌 해양 순환에 미치는 영향 등도 한계점으로 지적되고 있음.
- 심지층 처분은 지하 300~1,000m 이하의 안정된 지질환경에 고준위 방사성폐기물을 영구 매설하는 방식으로, 현재 전 세계적으로 가장 실용적이고 과학적으로 검증된 기술로 인정받고 있음. 심지층 처분은 공학적 방벽(처분용기, 완충재 등)과 천연방벽(지질층)으로 구성된 다중방벽시스템을 적용하여, 인공 및 자연의 장벽이 상호보완적으로 방사성핵종의 이동을 차단하고 장기적 안전성을 확보함. IAEA와 OECD/NEA 등 국제기구는 심지층 처분이 고준위 방사성폐기물 최종관리의 현실적 방안을 공식 권고하고 있으며 핀란드 온칼로, 스웨덴 포스마크 등 여러 국가에서는 실제 심지층 처분시설을 건설 중임. 심지층 처분은 50년 이상의 지하연구 및 안전성 평가를 통해 기술적 타당성과 경제성, 장기 환경 안전성이 입증된 유일한 방법이며, 주요 원전국은 모두 장기적 국가 정책으로 채택하고 있음.
- 결국 우주 처분과 빙하 처분 등은 경제적 비현실성, 국제법적 제한, 환경 위험성 등으로 인해 실효성이나 실현 가능성이 없으며 심지층 처분이 국내외에서 기술적, 정책적, 실질적으로 채택·추진되고 있는 고준위 방사성폐기물 처분 방식임.

02 고준위 방사성폐기물 심지층 처분의 기본 구조

■ 심지층 처분의 개념과 원리

- 고준위 방사성폐기물의 심지층 처분(Deep Geological Disposal)은 처분장의 수만 년 이상 장기적 안전성을 확보하기 위해 땅속 깊은 암반층에 폐기물을 영구 격리하는 방법임. 이 방식은 공학적 방벽(Engineered Barrier)과 천연방벽(Natural Barrier)을 결합한 다중방벽시스템(Multi-barrier System)을 통해 방사성 물질이 인간과 환경에 유해한 영향을 미치지 않도록 격납·격리하는 것이 핵심 목표임.
- 공학적 방벽은 처분용기 및 완충재(Buffer) 등 인위적으로 설계·설치하는 구조물을 말하는데, 대표적으로 고준위 방사성폐기물을 내식성 금속용기에 격납하고, 이 금속용기를 팽윤성 점토(Bentonite)로 에워싸 외부 암반과의 직접적인 접촉을 최소화하는 것임. 점토 완충재는 수분 흡수 시 부피 팽창하여 미세균열을 메우고, 용기 부식과 방사성핵종 확산을 동시에 억제하는 역할을 함. 두 방벽은 상호보완적으로 작동해 방사성폐기물 처분시스템의 안전성을 보장함.
- 천연방벽(지질학적 방벽)은 처분 깊이 수백 미터 이상의 안정된 암반층 자체를 의미하며 결정질암, 점토질암, 암염층 등 지층의 투수성 및 화학적 특성이 장기간 안정적으로 유지될 수 있는 암반이 선호됨. 이러한 지질학적 방벽은 지반 운동, 수리학적 유동, 화학적 반응 등 자연 과정에도 불변의 격리 기능을 제공함.
- 처분장 운영 기간에는 작업 갱도의 환기, 방사성폐기물 포장 상태 모니터링, 주변 지하수의 화학분석 등을 수행하며, 폐쇄 후에는 별도의 작업이 필요하지 않는 완전한 피동 안전(Passive Safety) 상태를 유지함. 이는 운영 중단 이후에도 추가 설비나 인력 개입 없이 수만 년간 핵종의 방출을 제한함.
- 심지층 처분은 전 세계 국가들의 연구개발 및 부지 평가를 거쳐 그 안전성과 구현 가능성이 국제적으로 인정받고 있음. 핀란드와 스웨덴은 약 400~500m 심도의 결정질 암반에 처분시설(온칼로, 포스마크) 건설을 완료했거나 진행 중이며, 스위스는 점토층인 뇌르들리히 래게른(Nördlich Läger)을 최종 부지로 확정하고 허가 절차를 진행하고 있음. 프랑스 역시 500m 심도 점토층에 고준위 및 중준위 장수명 폐기물을 함께 처분하는 시제오 프로젝트를 추진 중임.
- KBS-3 처분 개념
 - KBS-3은 스웨덴의 Svensk Kärnbränslehantering AB(SKB)가 개발한 고준위 방사성폐기물 심지층 처분시스템으로, '핵연료 안전(Kärnbränslesäkerhet)'을 의미함. KBS-3 개념은 다중 방벽시스템을 구체화한 것으로, 주요 구성요소는 다음과 같음.

- ◆ 중간저장(Interim Storage): 사용후핵연료는 처분 전 최소 30년간 습식 또는 건식저장을 통해 방사성 독성 및 열 출력 감소.
 - ◆ 처분용기(Canister): 주철(Cast Iron) 내장재가 있는 철 주조 용기 내부에 연료를 넣어 일차 격납 기능을 수행하고 이를 구리(CuOFP 합금) 외피로 감싸 내부 부식을 방지하고 장기 내식성을 보장.
 - ◆ 완충재: 벤토나이트 점토를 구리용기 주변에 충전하여 우수한 수밀성·팽윤성으로 누설 경로를 차단하고, 방사성핵종의 이동을 억제.
 - ◆ 처분공: 굴착 깊이를 약 500m로 하여 결정질암반에 수직(또는 수평)으로 굴진한 직경 2m, 깊이 8m의 처분공을 이용해 처분용기를 배치(KBS-3V 혹은 KBS-3H).
 - ◆ 갱도 밀폐 및 표시: 모든 처분공 및 접근 갱도를 완충재 및 밀폐 물질로 메우고, 부지 폐쇄 후 위치 표시를 통해 후대의 인위적 침습을 방지.
- KBS-3 개념은 방사성폐기물 처분용기, 완충재, 지질환경의 세 가지 방법이 상호작용하여 장기 안전성을 확보하도록 설계되었음. 특히 구리 캡슐은 수십만 년에 걸친 부식 저항성을 목표로 개발되었으며, 벤토나이트는 수분 유입 시 양이온의 이온교환으로 방사성 금속이온 흡착·확산 저지 기능을 제공함.
- SKB의 SR-97 안전성 보고서는 이 개념의 과학적 타당성과 구현 가능성을 OECD-NEA 전문가 검토를 통해 입증함(OECD-NEA, 2000). 핀란드의 포시바는 스웨덴과 동일한 KBS-3V 방식을 온칼로 처분장에 적용 중이며, 이러한 실제 적용 사례를 바탕으로, KBS-3V는 다중방벽 개념의 대표 사례로 인정받고 있음.

〈그림 4.1〉 핀란드와 스웨덴에 적용된 KBS-3 처분 개념



■ 다중방벽시스템 구조

● 폐기물 형태 및 처분용기

- 고준위 방사성폐기물의 처분에서 첫 번째 방벽은 폐기물 자체와 이를 격납하는 처분용기임. 고준위 방사성폐기물은 재처리 없이 직접처분하는 사용후핵연료와 사용후핵연료를 재처리한 후 남은 폐기물을 물리적, 화학적으로 안정화한 고화체 폐기물로 구분함.
- 사용후핵연료는 원자로에서 핵분열 반응을 통해 에너지를 생산한 후 인출된 핵연료로, 우라늄-235의 핵분열생성물과 우라늄-238이 중성자를 흡수하여 생성된 초우라늄 원소들을 포함하고 있음. 이러한 핵종들은 수 초에서 수만 년에 걸쳐 방사선을 방출하며 특히 처분 초기에는 높은 방사성붕괴에 의한 열을 발생함. 사용후핵연료는 핵분열 반응이 끝났음에도 불구하고 계속해서 열을 발생시키기 때문에 인출 직후 직접처분이 불가능하며, 최소 5년 이상 습식저장을 통해 방사능과 열 출력을 충분히 감소시킨 후 처분함.
- 재처리 과정에서 발생하는 고준위 방사성폐기물은 주로 유리 고화(Vitrification)하여 처분함. 현재 널리 상용화된 기술은 붕규산유리(Borosilicate Glass)를 이용한 유리 고화체로, 약 50년의 운영 역사를 보유하고 있음. 유리 고화체는 무정형 구조의 특성으로 인해 주기율표의 대부분 원소를 수용할 수 있으며, 약 1,100도에서 용융된 상태로 제조되어 캐니스터에 저장됨. 그러나 세슘과 같은 휘발성 물질의 휘발 문제와 백금족 원소의 낮은 수용성 등 한계가 있어, 최근에는 유리 고화체의 대안으로 세라믹 고화체, 유리복합재료 등이 연구되고 있음.
- 처분용기는 고준위 방사성폐기물을 장기간 안전하게 격납하는 핵심 구성요소이며, 스웨덴과 핀란드에서 채택한 KBS-3 개념에서는 압력에 강한 주철 내장재와 부식에 강한 구리 외피로 구성된 이중구조의 처분용기를 사용함. 구리 캡슐은 수십만 년에 걸친 부식 저항성을 목표로 개발되었으며, 지하수와의 접촉 시에도 장기간 건전성을 유지할 수 있도록 설계됨. 처분용기는 다목적 캐니스터(Multi-purpose Canister, MPC) 개념을 적용하여 운반, 저장, 처분의 전 과정에서 사용할 수 있도록 표준화된 외부 치수를 갖추고 있으며, 각 캐니스터는 13mm 용접 스테인리스강으로 제작되며, 최대 45kW의 열 부하를 견딜 수 있도록 설계됨.

● 완충재 및 뒤채움재(Back-fill Materials)

- 완충재와 뒤채움재는 심층 처분시스템의 공학적 방벽 구성요소로서 고준위 방사성폐기물을 안전하게 격리하고 방사성핵종의 누출을 지연시키는 역할을 수행함. 완충재는 처분용기 주변에 직접 설치되는 재료로, 뒤채움재는 처분고의 빈 공간을 채우는 물질을 의미함.
- 현재 고준위 방사성폐기물 처분장의 완충재로서 가장 유력한 후보 재료는 몬모릴로나이트(Montmorillonite)를 주성분으로 하는 벤토나이트로, 수분과 접촉 시 부피가 팽창하는 팽윤 특성을 보임. 이러한 팽윤 특성으로 인해 처분용기 주변의 미세한 균열이나 틈새를 메우고, 지하수의

침투를 차단하는 수밀성(Waterproofing) 기능을 제공함.

- 벤토나이트 완충재의 주요 기능은 다음과 같음. 첫째, 낮은 투수성을 통해 지하수의 침투를 억제하고 방사성핵종의 이동을 제한함. 일반적으로 완충재의 수리전도도는 압축밀도가 낮고, 모래함량과 온도가 높을수록 증가하는 경향을 보임. 둘째, 높은 팽윤압을 통해 처분용기를 안정적으로 지지하고 암반과의 밀착성을 확보함. 셋째, 이온교환 능력을 통해 방사성 금속이온을 흡착하고 확산을 저지할 수 있음.
- 완충재의 성능에 영향을 미치는 주요 인자로는 온도, pH, 그리고 지하수의 화학적 조성 등이 있음. 고준위 방사성폐기물에서 발생하는 열은 벤토나이트의 광물학적 변화를 유발할 수 있음. 특히 일라이트화(Illitization) 반응이 진행되면 팽윤 특성이 감소할 수 있기 때문에 온도 관리가 중요함. 또한 시멘트나 콘크리트 구조물에서 발생하는 고알칼리 환경($\text{pH} > 12$)은 벤토나이트의 팽윤압과 투수성에 부정적인 영향을 미칠 수 있음.
- 뒤채움재는 처분터널 전체를 봉쇄하는 역할을 함. 핀란드 포시바는 2025년 3월 온칼로 처분시설에서 약 12m 길이의 터널을 뒤채움 점토로 채우는 시험을 성공적으로 완료했으며, 터널 뒤채움 정도 98% 이상이라는 목표치를 초과 달성했다고 발표함. 이러한 현장시험을 통해 뒤채움재의 공극을 최소화하는 시공 기술과 품질 관리 방안이 지속적으로 개선되고 있음.
- 천연방벽(모암 및 지질환경)
 - 천연방벽은 처분장에서 방사성핵종의 이동, 처분시설로의 지하수 침투, 사람의 침입 및 고준위 방사성폐기물의 노출을 제한할 수 있는 천연의 지하 구조 및 지표 구조로서, 처분된 고준위 방사성폐기물이나 공학적 방벽을 둘러싼 암반과 토양 등을 포함함. 천연방벽은 심층 처분시스템에서 가장 중요한 방벽 중 하나로, 수십만 년에 걸친 장기적 안전성을 제공하는 핵심 요소임.
 - 고준위 방사성폐기물 심지층 처분에서 선호되는 기반 암종으로는 결정질암, 암염, 점토질암 등이 있는데, 이러한 암종들은 안정된 지질환경을 제공하고 물리적으로 지하에 위치한 처분시설을 보호할 수 있음. 또한 안정된 지하수의 수리지화학적 완충작용을 통해 방사성핵종의 이동을 지연 및 제어할 수 있는 특성을 가짐.
 - 결정질암은 스웨덴과 핀란드 그리고 우리나라에서 채택한 암종으로, 높은 기계적 강도와 낮은 투수성을 가짐. 결정질암반은 지질학적으로 안정하며, 지하수의 흐름이 주로 절리나 단층과 같은 불연속면을 따라 발생하는데, 이러한 특성으로 인해 처분시설 설계 시 불연속면을 피하여 건전한 암반 내에 처분공을 배치할 수 있음. 스웨덴 포스마크와 핀란드 온칼로 처분장은 모두 약 500m 깊이의 결정질암반에 건설되고 있음.
 - 점토질암은 프랑스와 스위스에서 연구되고 있는 암종으로, 매우 낮은 투수성과 높은 흡착 능력이

- 특징임. 점토질암은 자체적으로 팽윤 특성이 있어 굴착으로 인한 손상영역이 자연적으로 치유되는 자가봉합(Self-sealing) 능력을 보임. 스위스는 2022년 뇌르들리히 래게른 지역의 오팔리누스 점토층을 최종 처분 부지로 선정했으며, 이 지층은 약 1억 7천만 년 전에 형성된 안정한 암반임.
- 암염층은 독일과 미국에서 연구하고 있는 심지층 암종으로, 매우 낮은 투수성과 높은 열전도성을 특징으로 함. 암염은 소성변형 특성이 있어 굴착으로 인한 손상영역이 시간이 지남에 따라 자연적으로 폐쇄되는 특성을 보임. 또한 암염층에는 지하수가 거의 존재하지 않아 방사성핵종의 이동 매체가 제한적임.
 - 천연방벽의 성능평가에서는 지질학적 안정성, 수리학적 특성, 지화학적 특성, 그리고 장기적 진화 과정이 중요하게 고려됨. 지질학적 안정성은 지진, 화산활동, 빙하작용 등의 자연재해에 대한 저항성을 의미하며, 수리지질학적 특성은 지하수의 흐름 패턴과 속도를 결정함. 지화학적 특성은 방사성핵종의 용해도와 흡착 특성에 영향을 미치며, 장기적 진화 과정은 기후변화나 지질학적 변화에 따른 천연방벽의 성능 변화를 예측하는 데 필요함.

■ 처분장 운영 및 폐쇄

● 운영 단계별 관리 체계

- 처분장 운영 단계는 설계·시공, 운반·배치, 모니터링·검증, 그리고 폐쇄 준비의 네 단계로 구분됨(IAEA, 1991).
- 첫째, 설계·시공 단계에서는 방사성폐기물 처분을 위한 지하 갱도 및 처분공 시험 굴착, 처분시설 구조물 설치, 완충재·뒤채움재 조달·시험 등이 수행됨. 이 단계에서 안전성 평가 및 시험 시공 데이터가 확보되며, 설계 변경 사항이 도출됨.
- 둘째, 운반·배치 단계에서는 중간저장시설에서 처분용기로 이송된 고준위 방사성폐기물을 처분고에 격납함. 이 과정에서 폐기물의 방사능·열 출력 검증, 용기 상태 점검, 격납 절차 준수 여부 등이 검토됨.
- 셋째, 모니터링·검증 단계에서는 처분시설 내부 및 주변 환경의 물리·화학·방사능 지표를 주기적으로 측정함. 온도·지압·지하수 화학분석, 갱도 변형 감시 등이 포함되며, 안전성 평가 모델에 대한 실증 데이터를 제공함(IAEA, 2013).
- 마지막으로 폐쇄 준비 단계에서는 처분공 및 갱도 밀폐 계획을 확정하고 관련 장비·자재를 확보함. 이 단계에서 갱도별 시험 밀폐, 밀폐 재료 성능 검증, 최종 안전성 평가를 완료하여 규제기관의 폐쇄 허가를 획득함.

● 폐쇄 절차 및 기준

- 폐쇄 절차는 처분시설의 기능을 영구히 종료하고 장기 피동 안전을 확보하기 위한 일련의 활동을 말함.
- 처분공·갱도 밀폐(Backfilling): 처분공 내부의 완충재가 불충분한 구간을 보충하고, 터널 및 접근로 전 구간에 암석이나 벤토나이트·모래 혼합 물질을 충전하여 누설 경로를 차단.
- 밀폐(Sealing): 지하 깊이에서 처분공 입구·환기 갱도에 세라믹·콘크리트 등 기밀성 재료로 플러그를 설치함. 밀폐 물질은 수밀성을 유지하고 외부 지하수 유입을 최소화하도록 설계.
- 규제 승인: 폐쇄 완료 후 규제기관의 최종 폐쇄 허가를 받아야 함. 허가 기준은 밀폐 물질 성능시험, 모형 예측 결과 비교, 안전성 평가 결과 충족 여부 등(OECD-NEA, 2002).

● 처분장 폐쇄 후 관리 및 모니터링 방안

- 폐쇄 후 관리·모니터링은 규제기관 및 관리사업자가 설정한 기간 동안 수행되며, 이는 제도적 통제(Institutional Control) 기간과 비제도적 통제(Passive Surveillance) 기간으로 구분됨(IAEA, 1999). 아래와 같은 처분장 폐쇄 후 관리 및 모니터링 방안은 처분장 장기 안정성을 보장하고, 미래 세대에 대한 환경 안전 책임을 다하도록 설계된 체계임.
 - ◆ 제도적 통제 기간: 폐쇄 허가 후 50~100년간 부지 접근 제한, 지표·지하 모니터링 유지, 기록 관리, 안전성 확인 절차를 보장함. 모니터링 항목은 지표수·지하수 화학성분, 지반 변위, 열류, 밀폐체 상태 등.
 - ◆ 비제도적 통제 기간: 제도적 통제 종료 후 인력·장비 개입 없이 안전성을 유지하도록 설계된 수동 안전 체계임. 이 기간에 후세대의 모니터링 유지 여부는 사회적 판단에 맡김.
- 처분장 설계·운영·폐쇄에 관한 모든 기록은 국가 기록 시스템에 영구 보존됨. 이는 후대의 안전성 재평가, 긴급 대응 및 부지 재사용 판단 자료로 활용됨. 모니터링 결과는 정기적으로 안전성 평가 모델과 비교·검증되며, 예측 불일치 시 추가 조사·보수 조치를 시행할 수 있음. 다만, 손상을 최소화하기 위해 비침습적 기법(원격 감시, 표층 샘플링) 위주로 모니터링을 시행함.

■ 심지층 처분 관련 실증 연구시설

- 심지층 처분의 안전성과 기술적 타당성을 검증하기 위해 세계 여러 국가는 다양한 실증 연구시설인 지하연구실(Underground Research Laboratory, URL)을 구축해 운영하고 있음. URL은 일반 부지(URL on generic sites)와 처분 부지(URL at repository sites)로 구분되며, 각기 다른 목적과 기능을 수행함.
- 일반 부지 URL은 실제 처분장이 들어설 예정이 아닌 장소의 대표적 지질환경에서 운영됨. 이

시설들은 다양한 암종(결정질암, 점토층, 암염 등)에서 방사성핵종의 이동, 암반 내 수리·화학적 거동, 방벽 재료의 장기성능, 시공 및 봉쇄기술 등을 실험규모로 시험하는 데 중점을 둬. 대표적으로 캐나다에서 1980~2010년 운영한 AECL URL(Lac du Bonnet 지역 결정질암), 일본 JAEA 호로노베(Horonobe) 연구시설(퇴적암층), 독일의 아세(Asse) 연구시설(암염층), 스위스의 몽테리(Mont Terri) URL(점토층)이 있음. 이러한 일반부지 URL은 암종별 특성 데이터 축적과 모델 검증과 같은 처분기술의 실증 연구에 사용되었음.

- 처분 부지 URL은 실제의 최종처분장 부지 또는 그 인근에서 시공·운영되어, 해당 부지의 구체적인 지질환경에서 안전성·건설성·운영성 검증 데이터를 직접 확보함. 프랑스의 방사성폐기물관리기구(ANDRA)가 운영하는 뷰흐(Bure) 지하연구시설은 처분 부지 URL의 대표적 사례로, 시제오(Cigéo) 처분장 건설 예정지의 3km 인근에서 운영되고 있음(ANDRA, 2020). 프랑스 방사성폐기물관리 기구는 2000년부터 20년 이상 이 시설을 운영하며, 처분시스템의 장기 안전성을 입증하고 처분기술의 효율성과 경제성을 제고하기 위한 심층 연구를 수행해 왔음. 또 다른 처분 부지 URL의 운영 사례로, 핀란드 온칼로 URL, 스웨덴 SKB의 외스피(Äspö) HRL(Hard Rock Laboratory), 스위스 나그라(Nagra)의 그림젤(Grimsel) 연구터널 등이 있음. 이들 처분 부지 URL에서는 실제 규모로 처분용기 운반, 벤토나이트 완충재 충전, 봉쇄 시공, 천연방벽 내 장기수리지질·지화학 환경 변화 관측 등이 수행됨. 처분 부지 URL은 해당 부지의 장기 안전성 평가, 시공·운영 계획 신뢰성, 처분 부지 지역 주민에게 투명성을 제공하는 데 기초가 됨.
- 실증 연구시설 운영을 통해 얻은 데이터와 경험은 장기 안전성 평가의 신뢰성을 높이고, 예기치 못한 현장 문제에 대한 대처 방안을 마련하는 데 필수적임. 실제로 주요 원전국의 심지층 처분 정책에서는 URL 실증 결과가 처분 부지 최종 승인과 운영허가 심사에서 핵심적인 인허가자료로 활용되고 있음. 국제원자력기구와 OECD/NEA 등 국제기구도 심지층 처분의 성공적 이행을 위한 필수 요소로 URL의 구축과 지속적 운영을 권고하고 있음.

■ 심지층 처분 주요 이슈

- 고준위 방사성폐기물 심지층 처분에서 직면하는 주요 이슈는 크게 기술적 이슈와 사회적 이슈로 구분됨. 기술적 이슈는 40여 년 전 개발된 기존 처분 개념의 한계와 이를 극복하기 위한 기술 고도화 필요성에 초점을 맞추고 있으며, 사회적 이슈는 지역사회의 수용성 확보와 투명한 의사결정 체계 구축에 중점을 두고 있음.
- 기술적 이슈
 - 고준위 방사성폐기물 심지층 처분의 기술적 이슈는 현재 국제적으로 표준화된 처분 개념의 한계와 이를 극복하기 위한 기술 고도화에 집중되어 있음. 주요 처분 개념인 KBS-3 방식은 1970년대

후반에서 1980년대 초반에 개발되어 약 40여 년간 검증되었으나, 당시의 기술 수준을 바탕으로 설계된 한계점들이 지속적으로 제기됨. 대표적인 문제점으로는 처분용기의 장기 내구성, 벤토나이트 완충재의 열-수리-역학-화학적 거동 예측 불확실성, 그리고 처분시설의 건설성 및 경제성 개선 필요성 등이 있음.

- 처분 부담 완화를 위한 기술적 개선 사항 중 가장 중요한 것은 열 부하(Thermal Load) 규제 완화임. 현재의 온도 제한은 벤토나이트 완충재의 물성 변화를 방지하기 위해 설정되었으나, 이로 인해 처분 터널 간격이 넓어지고 전체 처분 면적이 증가하여 경제적 부담이 가중되고 있음. 이를 해결하기 위해 내열성이 향상된 완충재 개발, 처분용기 설계 최적화, 그리고 열 제거 효율을 높이는 공학적 방벽 기술이 연구되고 있음.
- 또한 핵종 이동 모델링의 정확성 향상, 처분시설 장기 모니터링 기술 고도화, 신소재 처분용기 개발 등 차세대 기술 도입도 중요한 과제임. 특히 인공지능과 고성능 컴퓨팅을 활용한 통합 성능평가(Total System Performance Assessment, TSPA) 기술 발전은 불확실성을 줄이고 안전성을 확보하면서도 경제성을 제고할 수 있는 핵심 기술로 인식되고 있음. OECD/NEA와 IAEA는 이러한 기술적 한계 극복을 위해 국제 공동연구와 실증시설을 통한 기술 검증을 지속적으로 권고하고 있음.

● 사회적 이슈

- 고준위 방사성폐기물 심지층 처분의 사회적 이슈는 주민 수용성 확보가 핵심이며, 이는 기술적 안전성보다도 더욱 복잡하고 중요한 문제로 인식되고 있음. 주민 수용성이 사회적 이슈가 되는 근본적 이유는 고준위 방사성폐기물에 대한 대중의 위험 인식과 실제 과학적 위험도 간의 괴리, 정보의 비대칭성, 그리고 과거 원자력 정책에 대한 불신 경험의 복합적으로 작용하기 때문임.
- 주민 수용성 문제는 단순한 님비(NIMBY) 현상을 넘어 처분시설의 장기적 안전성에 대한 불확실성, 미래 세대에 대한 책임, 지역사회에 미칠 사회경제적 영향 등에 대한 근본적인 우려에서 비롯됨. 특히 고준위 방사성폐기물은 수만 년 이상의 관리 기간이 필요하여 현재의 과학기술과 제도로는 완전한 안전 보장이 어렵다는 점이 주민들의 불안감을 증폭시키고 있음.
- 이러한 문제를 해결하기 위해 OECD/NEA와 IAEA는 이해관계자 참여와 투명한 의사결정의 중요성을 강조하고 있음. OECD/NEA는 “신뢰받는 원자력 규제기관의 특성” 보고서에서 규제기관의 개방성과 투명성을 핵심 요소로 제시하고 있으며, 이해관계자와의 지속적인 소통을 통한 신뢰 구축을 권고하고 있음(OECD-NEA, 2021/2024). IAEA는 이해관계자 참여에 관한 일련의 워크숍을 통해 ‘소통자의 신뢰성’을 가장 중요한 특성으로 확인하였으며, 포용적이고 지속 가능한 의사결정 접근법의 필요성을 강조하고 있음.
- 국제기구들은 특히 정보 공유, 공론화, 참여 보장, 그리고 이해관계자 간 협력 체계 구축을 사회적

수용성 확보의 핵심 요소로 제시하고 있음. 스웨덴과 핀란드의 성공 사례에서 보듯이 법적 거버넌스, 주민투표, 지원협약 등을 통한 민주적 정당성 확보와 장기적 신뢰 관계 구축이 필수적임. 이러한 국제기구의 권고사항은 우리나라의 고준위 방사성폐기물 특별법 제정과 지역협의체 구성, 사회적 대화 체계 구축에도 중요한 지침이 되고 있음.

03 처분 안전성 및 불확실성 관리

■ 처분 안전성의 과학적 근거

- 고준위 방사성폐기물 심층 처분의 안전성은 다중방벽시스템의 상호보완적 기능에 기반하며, 자연적, 공학적 방벽이 시간이 경과하더라도 방사성핵종의 이동을 억제하도록 설계되었음.
- 천연방벽으로서의 지질환경은 수백만 년 단위의 지각 안정성, 낮은 지하수 함량 및 흐름, 환원 조건의 지화학 환경을 제공하여 핵종 용해·확산 속도를 제한함.
- 공학적 방벽은 처분용기(Canister)-완충재(Buffer)-갯도밀폐(Sealing)로 구성됨. 처분용기는 부식저항성을 확보한 금속으로 수십만 년 이상 구조 건전성을 유지하도록 개발되었고, 벤토나이트 완충재는 수분 팽윤성으로 미세균열을 치유하며 이온교환으로 세슘, 스트론튬 등의 확산을 지연시킴. 갯도밀폐 물질은 지하수 유입 경로를 차단해 최종적으로 수만 년 이상 피동 안전을 보장함(IAEA, 2013/2019). 이들 방벽의 성능은 지질·수리지질·수화학·부식반응 모델링과 실험데이터, 그리고 지하연구시설에서의 현장시험을 통해 다각도로 검증됨.

■ 안전성 평가방법론

- 심지층 처분 안전성 평가는 규제 기준 준수를 입증하기 위한 정량적·정성적 절차로, 크게 결정론적 안전성 평가와 확률론적 안전성 평가를 포함함(Freeze, 2013).
- 결정론적 안전성 평가
 - 결정론적 안전성 평가는 보수적 가정을 통해 기준 시나리오의 핵종 이동과 인체 노출 경로를 검증함. FEPs(Features, Events and Processes) 기반 시나리오 개발 후, 최악의 물리·화학 조건(최대 지하수 흐름 속도, 최소 완충재 성능 등)을 가정하여 핵종 누출률과 방사선량을 예측함(OECD-NEA, 2002). 주요 모델은 지하수유동 모델, 용해·확산 모델, 방사선 선량 모델로 구성되며, 규제 한계치(예: 연간 0.25mSv)를 초과하지 않음을 확인함.

● 확률론적 안전성 평가

- 확률론적 안전성 평가는 모델·매개변수·시나리오 불확실성을 확률분포로 표현하고 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 방사성핵종의 장기 거동 및 인체 선량의 확률분포를 산출함. 이는 불확실성 저감 우선순위 설정, 민감도 분석, 위험도 제한치 확률(규제 기준을 초과할 확률) 계산에 활용됨(Takeda, 2009). 예컨대 지하수 이동속도, 방사성핵종 용해도, 처분용기 부식 속도 등에 대한 통계 분포를 정의하고 수천 회 이상 시나리오를 반복 실행하여 누적밀도함수를 도출하는 방식임.

■ 장기 안전성 평가와 불확실성 관리

● 장기 안전성 평가 기술

- 장기 안전성 평가는 처분 후 수만 년에 걸친 시스템 거동 예측을 위한 종합안전성능평가(Total System Performance Assessment, TSPA) 기술을 활용함. TSPA는 모든 방벽 구성요소의 상호작용을 묘사하는 다분야 통합모델로, 지질·수리지질·지화학·구조해석·방사성핵종 운반 모델을 연계함(NDA, 2016).
- 모델 개발 단계에서는 데이터 신뢰도 확인, 매개변수 민감도 분석, 모델 검증·검증(Verification&Validation)을 거치며, 사전시험과 현장시험 데이터를 통해 신뢰도를 확보함. 최근 인공지능 기반 모델 최적화의 기법을 적용해 실시간 모니터링 데이터와 모델 예측을 상시 비교·보정하는 연구가 진행 중임. 장기 안전성 평가는 다중방벽 성능에 대한 증거 및 논거 등을 축적하며, 불확실성 저감 목표 달성을 위해 모니터링·연구개발을 적용하여 지속적으로 보완·개선함.

● 불확실성 요소와 관리 방안

- 불확실성 관리는 시스템 신뢰도 확보의 핵심으로, 모델링 불확실성, 매개변수 불확실성, 시나리오 불확실성으로 분류됨.
 - ◆ 모델링 불확실성: 물리·화학 모델 간 차이를 비교·보완하는 다중모델 접근으로 감소.
 - ◆ 매개변수 불확실성: 현장시험, 실험실 테스트, 유사 부지 데이터 확보를 통해 분포를 좁히고, 지속적 모니터링 데이터를 사용해 경도 모니터링 결과와 시뮬레이션 모델을 통한 도출값의 보정을 수행.
 - ◆ 시나리오 불확실성: 인간 침입, 지질 재활동화 등 비전형 시나리오를 포함한 대체 시나리오를 도출하고, 결정론적·확률론적 평가로 모두 검증.

04 해외 심층 처분 사례 분석

■ 결정질암반 처분 사례(스웨덴, 핀란드)

- 결정질암반 처분은 수억 년에 걸쳐 안정성을 유지하는 화강암과 같은 경질 암반층에 고준위 방사성폐기물을 영구 격리하는 방식임. 이는 천연방벽인 결정질암반의 낮은 투수성과 높은 기계적 강도를 이용하여 지하수 흐름과 방사성핵종 이동을 최소화하는 개념에 기반함. 스웨덴과 핀란드는 모두 1.9~1.85억 년 전 형성된 핀노스칸디아 지각(Fennoscandian Shield) 상의 화강암 지층을 대상으로 처분시설을 건설 중이며, 처분 심도는 약 500m로 설계되어 있음. 양국 모두 구리와 주철로 구성된 이중구조 용기에 폐기물을 담고 벤토나이트 완충재로 감싸는 KBS-3 처분 개념을 적용하여, 처분용기-완충재-천연방벽이 유기적으로 작동하여 장기 안전성을 확보함.
- 주요 사업 현황
 - 핀란드 포시바(Posiva)는 올킬루오토(Olkiluoto) 부지에 건설 중인 세계 최초의 심층 처분시설 온칼로에 대해, 2023년 11월 정부로부터 세계 최초로 운영 인허가를 취득하였음. 이는 2021년 운영 허가 신청 이후 방사선안전규제기관(STUK)의 엄격한 안전성 심사를 통과한 결과로, 2026년 상업 운영 개시를 목표로 최종 시험 및 준비 단계에 있음.
 - 스웨덴 SKB는 포스마크 지역에 건설될 심층 처분시설에 대해 2022년 1월 정부로부터 건설 허가를 최종 승인받았음. 2024년 10월 환경법원으로부터 환경 허가를 취득하여 현재 지상 시설물 건설 등 초기 공사를 진행 중이며, 2030년대 중반 운영 개시를 목표로 사업을 추진하고 있음.
- 부지 선정 과정
 - 핀란드 포시바는 1983년부터 부지 선정 절차에 착수하여 전국 6개 후보지에 대한 단계적 조사를 진행함. 지질학적 특성, 환경 영향, 사회적 수용성을 종합 평가하여 4곳의 심층 조사 후보지를 선정하였음. 최종적으로 지하수 유동이 적고 지역 주민의 지지(1999년 Eurajoki 시의회 승인)를 확보한 올킬루오토를 2000년 최종 부지로 선정하여 정부에 제안, 2001년 국회의 비준을 얻었음. 2003년 건설 허가, 2004년 착공이 이루어짐.
 - 스웨덴 SKB는 1977년부터 지방자치단체의 자발적 참여 의사(Voluntarism)를 밝힌 지자체를 중심으로 부지 조사를 시작함. 여러 후보지에 대한 조사가 주민 반대 등으로 중단되는 과정을 겪은 후, 2002년부터 포스마크와 오스카삼 두 지역을 대상으로 정밀 비교 조사를 수행함. 7년간의 심층 지질 조사 결과, 지하수 유동이 적고 암반의 균열이 적어 장기적 안전성이 더 우수하다고 평가된 포스마크를 2009년 6월 최종 부지로 선정하였음.

● 기술적 특징

- 온칼로와 포스마크 처분장 모두 KBS-3 심층 처분 개념을 채택하였으며, 주요 기술적 특징은 다음과 같음.
 - ◆ 첫째, 처분심도 500m 이상의 결정질 암반에 수직(혹은 수평) 방향으로 굴착된 직경 2m, 길이 8m 규모의 처분공에 처분용기를 배치.
 - ◆ 둘째, 이중 캐니스터 구조로 내부는 주철 내장(Cast Iron Insert), 외부는 구리 외피(Copper Canister)로 구성되어 수십만 년간 부식을 방지.
 - ◆ 셋째, 벤토나이트 완충재를 캐니스터 주위에 충전하여 수밀성, 팽윤성, 이온 흡착 성능으로 누설 경로를 차단.
- 포스마크는 깊이 500m 화강암의 균열 빈도가 매우 낮고, 환원 조건과 염분 농도가 완충재 안정성에 유리한 것으로 평가됨. 온칼로는 지하연구시설(지하 455m)에서 얻은 상세 지질·지하수 데이터를 기반으로 2004~2014년 시험 시공을 통해 암반 특성과 공학적 방벽 성능을 검증함. 두 시설 모두 폐쇄 후 피동 안전 설계를 통해 추가 인력 개입 없이 장기 격리를 유지하도록 설계됨.

● 사회적 수용성 확보 방안

- 핀란드와 스웨덴 두 국가 모두 지역사회 참여와 투명한 의사결정 과정을 핵심으로 삼았음. 스웨덴 SKB는 초기부터 지자체 자발적 참여원칙을 적용하고, 후보지 조사 전후에 주민설명회, 기술 워크숍, 현장 방문 등을 통해 정보 제공과 의견 수렴을 병행하였음. 특히 2009년 스웨덴은 독창적인 부가가치 프로그램(Added Value Programme, AVP)을 도입하여 사회적 수용성 확보의 새로운 모델을 제시함(Wikberg, 2020).
- AVP는 총 15~20억 SEK(약 2억 유로) 규모의 지역발전 투자 프로그램으로, SKB와 원자력발전 사업자가 처분장 후보지인 외스트함마르(Östhammar)와 캡슐화시설 후보지인 오스카삼 두 지자체에 제공하는 경제적, 사회적 지원책임. 이 프로그램의 핵심은 “패자는 없고 모두가 승자(No loser, but two winner)”로, 최종 선정되지 않은 지역에 75%, 선정된 지역에 25%의 지원금을 배분하여 두 지역 모두가 혜택을 받도록 설계되어 있음(Setzman, 2014). AVP는 단순한 금전적 보상이 아닌 지역 인프라 개발, 고용 창출, 교육 프로그램, 기업 육성 등 다양한 형태의 부가가치 창출에 중점을 둠.
- AVP의 운영은 SKB 이사회 의장·부의장·CEO와 두 지자체 시장으로 구성된 운영위원회가 담당하며, 지역사회가 직접 사업 아이디어를 제안하고 실행할 수 있도록 하여 지역 자율성을 보장함. 이 프로그램은 방사성폐기물 기금이 아닌 원자력발전사업자의 직접 투자로 운영되어 투명성을 확보하였음. 실제로 포스마크 처분장에 대한 지역 주민 찬성률은 2003년 65%에서 2012년 82%로 상승하였으며, 2024년 조사에서는 90% 이상의 주민이 SKB 운영이 지역에 긍정적

영향을 미칠 것이라고 응답함.

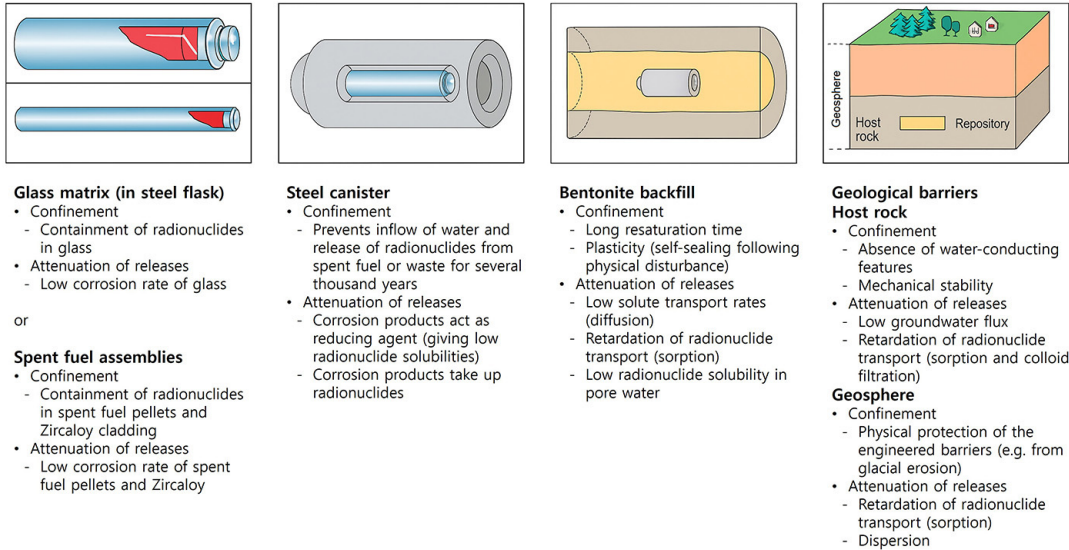
- 핀란드 포시바는 전국 순회 설명회와 지역 공청회를 통해 지질 특성, 장기 안전성 평가 결과를 투명하게 공개함. 에우라요키(Eurajoki) 시의회는 정보에 입각한 결정을 위해 실무단과 원주민 대표 참여 위원회를 설치했고, 지역 기반시설 개선과 향후 재활용 공동 이익 분배 방안을 합의해 최종 승인을 이끌어 냄. 핀란드의 경우 폐기물 수출입 금지 원칙을 명확히 하여 지역 우려를 해소한 것이 특징적임(Kari, 2021).
- 두 국가 모두 주민투표나 시의회 승인 등 민주적 정당성과 지역 상생 모델을 결합하여 처분장 신뢰를 구축하였음. 특히 스웨덴의 AVP는 단순한 보상을 넘어 지역과의 파트너십을 통한 상생발전 모델로서, 국제원자력기구와 OECD/NEA 등 국제기구로부터 사회적 수용성 확보의 모범사례로 높이 평가받고 있음.

■ 점토층 처분 사례(스위스)

● 지질학적 특성과 처분 개념

- 스위스 심층 처분은 주로 중생대 쥐라기 지층에 분포하는 유백 점토(Opalinus Clay) 암반을 천연방벽으로 활용함. 이 점토질 암반은 평균 두께 약 100m 이상, 심도 400~900m 구간에 안정적으로 분포하며, 점토 고유의 낮은 투수성과 높은 수밀성으로 인해 방사성핵종의 이동을 확산 작용만으로 크게 지연시킴. 또한, 암반 내부는 환원성 조건을 유지하여 이는 처분용기의 장기적 안전성(내식성) 확보에 유리하게 작용함.
- 유백 점토는 자가밀폐 특성을 지니고 있어서 굴착 시 발생하는 미세균열이 점토의 팽윤 작용으로 자연 치유됨. 또한 점토입자의 이온교환 능력은 세슘(Cs), 스트론튬(Sr) 등 양이온성 핵종을 효과적으로 흡착하여 핵종 이동을 저지하는 기능을 제공함.
- 스위스의 처분 개념은 고준위 및 중·저준위폐기물을 함께 처분하는 복합처분시설(Combined Repository)로, 다중방벽시스템 처분 개념을 채택함. 고준위폐기물은 강철-구리 이중 용기에 밀봉하고, 주변을 고밀도 벤토나이트 완충재로 채워 효율적으로 격리함. 최종적으로 처분터널과 수직 통로 등을 밀폐하여, 인위적 개입 없이도 장기간 안전성이 유지되는 피동안전시스템을 구축함(Fries, 2008).

〈그림 4.2.〉 스위스의 다중방벽시스템 모식도



(Fries et al., 2008)

● 부지 선정 결과

- 스위스 정부는 ‘부문별 계획(Sectoral Plan)’이라는 단계적 절차에 따라 2008년부터 부지 선정을 추진함. 1단계에서 국토 조사를 바탕으로 6개 후보 지역을 선정하고, 2단계에서 이를 3개(쥐라 동부(Jura Ost), 취리히 노르도스트(Zürich Nordost), 뇌르들리히 래게른(Nördlich Lägern))로 압축한 뒤, 2019년부터 3년간의 심층 시추조사를 통해 안전성, 경제성, 기술적 실행 가능성 등을 종합 평가함.
- 2022년 9월, 처분사업자인 나그라는 지질학적 안정성이 가장 뛰어나다고 평가된 뇌르들리히 래게른을 최적 후보지로 선정하여 연방 정부에 제안함. 뇌르들리히 래게른은 유백 점토층이 가장 두텁고 균질하며, 인접 수층과의 거리가 최대(약 200m 이상)이고, 암반 내 단층 및 균열 밀도가 가장 낮아 장기적인 지질 안정성이 특히 우수한 것으로 평가됨.
- 나그라가 2024년 제출한 일반 인허가(General Licence) 문서는 현재 스위스 연방 정부와 원자력안전감독청(ENSI) 등 규제기관의 검토 단계에 있음. 이 검토가 완료되고 연방의회의 승인을 거친 후, 2031년경 최종 결정을 위한 국민투표가 시행될 수 있음. 모든 허가 절차가 순조롭게 진행될 경우, 2045년경 건설을 시작하여 2050년부터는 중·저준위 방사성폐기물을, 2060년부터는 고준위 방사성폐기물 처분을 개시하는 것을 목표로 하고 있음.

■ 동의 기반 후보지 선정 사례(캐나다)

● 정보 기반 자발적 수용 원칙

- 캐나다의 후보지 선정 체계에서 핵심 원칙 중 하나는 ‘정보에 기반한 자발적 수용 원칙’임. 이 원칙은 후보지 지역사회가 처분시설의 목적·설계·위험 및 이익을 충분히 이해한 후에 자발적으로 수용 의사를 표명해야 한다는 것을 의미함.
- 2010년 캐나다 방사성폐기물관리공단(NWMO)이 발표한 보고서(NWMO, 2010)는 이 원칙을 다음과 같이 정의함. 처분시설이 건설될 지역사회는 프로젝트에 대한 영향을 이해하고 있어야 하며, 자신들의 의사에 따라 시설 유치를 자발적으로 수용할 수 있음을 보여야 한다. NWMO는 이 과정을 위해 다음과 같은 절차를 시행함(NWMO, 2025).
 - ◆ 학습 및 정보 제공 단계: 후보지 의회·원주민 대표·일반 주민을 대상으로 전문기술 워크숍, 현장 방문, 설명회 등을 개최하여 방사성폐기물 처분 기술, 안전성 평가 결과, 장기 관리 계획을 투명하게 공개.
 - ◆ 사회적 수용성 평가 계획 수립: 2023~2027년 NWMO 5개년 계획에서는 ‘사회적 수용성’과 ‘수용 지역사회’를 명확히 정의하고, 이를 입증하기 위한 평가 지표(참여도, 이해도, 신뢰도 등)를 개발(NWMO, 2023).
 - ◆ 의사결정 권한 보장: 후보지 의회나 원주민 자치 기구가 언제든지 과정에서 탈퇴하거나 철회권을 행사할 수 있도록 보장.
 - ◆ 보상 및 공동 이익 모델: 후보지 지역사회는 처분시설 건설·운영으로 인한 지역 발전 기금, 고용, 인프라 투자 등 구체적 이익 분배안을 체결 협상하며, 이러한 협약은 법적 구속력 있는 파트너십 계약 형식으로 문서화.
- 위와 같이 정보 제공과 자율적 수용을 결합한 절차를 통해 NWMO는 기술적 타당성과 함께 민주적 정당성을 확보하고자 함. 이를 통해 지역사회가 처분시설의 안정성·영향·이익 분배를 스스로 검증·결정하도록 하여 장기적 합의 기반을 마련함.

● 주민투표를 통한 사회적 수용성 확보

- 캐나다 적응형 단계적 관리(Adaptive Phased Management, APM) 부지 선정 절차에서 지역사회의 수용 의사를 공식화하는 가장 직접적인 방법은 주민투표임. 2024년 기준으로 두 차례의 주민투표가 시행되어 후보지의 사회적 수용성을 확인하였음.
- ◆ South Bruce 주민투표(2024년 10월 28일): 온타리오주 South Bruce에서 실시된 주민투표는 전체 유권자 4,525명 중 69.3%가 투표에 참여하였으며, 찬성 51.2%(1,604표), 반대 48.8%(1,526표)로 법적 구속력 있는 과반 투표율과 과반 찬성 모두 충족함. 이 투표는 지방자치단체

차원에서 실시된 첫 공식 수용 절차로, NWMO는 “지역사회가 충분히 학습하고 스스로 결정하였다”라는 점을 높이 평가.

- ♦ Wabigoon Lake Ojibway Nation 투표(2024년 11월 18일): 북서부 온타리오의 Wabigoon Lake Ojibway Nation은 자신들의 주권적 권한에 근거하여 ‘수용 의사’를 묻는 찬반투표를 실시. 이 투표는 프로젝트 승인이 아닌 환경·기술 평가 단계로 진행할 ‘수용 의사’를 수렴하는 투표였으며, 투표를 통해 과정 진행 의사를 확인하여 후보지로서 APM 절차(NWMO, 2025)의 다음 단계로 진입.

- 두 사례 모두 투명한 정보 제공(기술 브리핑, 현장 조사)과 법적 구속력 있는 의사 표명 수단(법정 기준을 충족하는 투표율·찬성률)을 결합하여 사회적 수용성을 확보하였다는 점에서 모범사례로 평가됨. 특히 캐나다 원주민의 주권적 의사결정 절차를 존중함으로써, 원주민 권리와 지역사회 자율성을 동시에 보장함. 이러한 경험은 전 세계 고준위 방사성폐기물 처분장 부지 선정에서 민주적 정당성과 사회적 신뢰를 구축하는 선례로 활용될 수 있음.

05 국내 심층 처분 기술개발 현황 및 도전과제

■ 국내 심층 처분 기술개발 현황

- 우리나라는 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료의 안전한 최종 관리를 위해, 1997년부터 원자력연구개발사업을 통해 지하 500m 깊이의 암반에 영구적으로 격납·격리하는 심층 처분 방식의 기술개발을 추진하고 있음.
- 2021년 4월 출범한 ‘사용후핵연료관리핵심기술개발사업단(iKSNF)’을 중심으로, 해외 선진국 수준의 핵심 기술을 확보하고 한국 고유의 처분시스템을 개발하기 위한 연구가 본격적으로 수행되고 있음.
- 현재 개발 중인 핵심 기술은 크게 4가지 분야로 구성됨.
 - 처분 부지 평가 기술: 국내 지질환경에 적합한 처분 부지를 과학적으로 조사하고 평가하는 기술.
 - 처분시스템 설계 및 성능 실증 기술: 처분용기, 완충재 등 다중방벽시스템을 설계하고, 그 성능을 입증하는 기술.
 - 처분 안전성 평가 기술: 수만 년 이상의 기간 동안 처분시스템이 안전하게 유지될 수 있는지 종합적으로 평가하는 기술.
 - 안전규제 기반 구축: 처분장의 건설, 운영, 폐쇄에 이르는 전 주기에 대한 규제요소 개발과 안전성을

검증하는 기술.

- 또한 한국원자력연구원 내에 구축된 소규모 지하처분연구시설(KAERI Underground Research Tunnel, KURT)을 활용하여 개발된 핵심 요소 기술들의 성능을 실증하고 데이터를 축적하는 연구를 진행하고 있음. 이를 통해 2030년대까지 해외 선도국 기술 수준의 90%를 확보하고, 향후 건설될 연구용 지하연구시설에서의 실증 연구를 통해 한국형 처분시스템의 안전성을 입증할 수 있는 핵심 기반 기술을 구축하는 것을 목표로 함.

■ 심층 처분 기술개발의 도전과제

- 국내 심층 처분 기술을 성공적으로 확보하기 위해서는, 장기적 안전성을 기반으로 효율성을 높이는 기술적 완성도 제고와 함께 사회적 수용성 확보라는 두 가지 큰 도전과제를 해결해야 함.
- 기술적 측면에서는, 좁은 국토와 높은 인구밀도라는 국내 환경에 최적화된 ‘한국형 처분시스템’ 모델을 완성하는 것이 핵심임. 이를 위해 아래와 같은 도전과제들을 해결해야 함.
 - 효율적인 처분시스템 개발: 핀란드 및 스웨덴의 처분 방식 대비, 충분한 냉각기간을 거친 사용후핵연료를 특성에 맞게 조합하여 용기당 저장용량을 늘리고, 처분 밀도를 높여 전체 처분장 면적을 줄이는 기술개발이 필요함.
 - 효율성과 안전성을 모두 고려한 공학적 방벽 최적화: 지속적인 외부 압력과 부식 환경에 수만 년 이상 견뎌야 하는 처분용기의 안전성을 확보하면서도, 과도한 설계를 피하고 신기술을 적용하여 처분용기의 구리 두께를 최적화하는 등 효율성을 높이는 연구가 요구됨. 또한 벤토나이트 완충재의 성능을 100℃ 이상에서도 유지하여 처분장 설계 유연성을 확보하고 비용을 절감하는 방안도 주요 과제임.
 - 연구용 URL의 조속한 확보 및 활용: 영구처분장과 유사한 지질환경에 건설되는 연구용 URL은 처분장 부지 확보 이전에 처분시스템의 안전성을 실증하고 평가 모델을 검증할 수 있는 핵심 시설임. URL을 통해 영구처분장의 핵심 지질 데이터를 선제적으로 확보하면, 향후 처분장 인허가에 소요되는 시간을 단축시켜 전체 사업 기간을 효율적으로 관리하고 10년 이상 단축하는 효과를 기대할 수 있음.
- 기술개발과 아울러 추진되어야 할 부지 선정 과정에서는 투명한 정보 공개와 과학적 데이터를 근거로 지역사회와의 소통이 필요함. 국민적 신뢰와 사회적 수용성은 심층 처분의 성공을 위한 필수 전제조건임. 또한 초기 단계부터 규제기관과 긴밀히 협의하며 인허가 요건을 함께 검토해 나감으로써, 절차의 투명성을 제고하여 사업 지연 가능성을 줄여야 함.

KAST

Research Report

2025

V

국내 사용후핵연료 관리 정책



V

국내 사용후핵연료 관리 정책

01 사용후핵연료 관리 정책 현황

■ 정책 수립 주체와 근거

- 수립 주체: 「원자력진흥법」 제3조에 따른 원자력진흥위원회
- 법적 근거: 「원자력안전법」 제35조제4항
 - 동 조항은 사용후핵연료 처리·처분에 관한 사항은 「원자력진흥법」 제3조에 따른 원자력진흥위원회의 심의·의결을 거쳐 결정하도록 규정하고 있음.
 - 따라서 원자력진흥위원회의 사용후핵연료 또는 고준위 방사성폐기물에 관한 의결사항이 의결 당시의 사용후핵연료 관리 정책이라 간주할 수 있음.

■ 원자력진흥위원회(舊 원자력위원회)³⁾ 의결사항

- 제220차 원자력위원회(1988.7.27.)
 - 사용후핵연료는 재처리 또는 영구처분에 대한 국가 정책 결정시까지 중간저장 관리하며, 이를 위한 중간저장시설은 1997년 12월 말까지 원전 부지 이외의 장소에 집중적으로 건설하고, 중간저장시설 가동 시까지 사용후핵연료는 원전 부지 내에서 관리함.
- 제249차 원자력위원회(1998.9.30.)
 - 사용후핵연료는 소 내 저장능력을 확충하여 2016년까지 각 원전 부지 내에서 관리하고, 저장대책의 유연성 확보를 위해 처리/처분에 대한 국가 정책 결정 시기 및 방향에 따라 단계별로 소 내 저장대책을 수립함.
 - 사용후핵연료 중간저장시설은 2016년 준공 목표로, 2008년까지 건설에 착수하고 저장 방식은 부지 여건, 기술개발 상황 등 제반 사정을 감안하여 건설 착수 시까지 습식 또는 건식 방식 중 결정함.

3) 2011년 「원자력법」이 「원자력진흥법」과 「원자력안전법」으로 분리되기 전 ‘원자력진흥위원회’의 역할을 ‘원자력위원회’가 수행하였음.

- 제253차 원자력위원회(2004.12.17.)
 - 사용후핵연료는 원전 부지 내 임시저장 능력을 확충하여 2016년까지 각 원전 부지 내에서 관리하고, 중간저장시설 건설 등을 포함하여 사용후핵연료 관리방침에 대해서는 국가 정책 방향, 국내외 기술개발 추이 등을 감안하여 중·장기적으로 충분한 논의를 거쳐 국민적 공감대하에서 추진함.
- 제2차 원자력진흥위원회(2012.11.20.)
 - 사용후핵연료 관리 대책을 수립함에 있어 안전을 최우선으로 고려하고 공론화위원회의 운영을 통해 사회적 수용성을 확보하여 추진하기로 함.
- 제6차 원자력진흥위원회(2016.7.25.)
 - 「고준위 방사성폐기물⁴⁾ 기본계획」을 수립하여 국민 안전을 위해 고준위 방사성폐기물의 안전한 관리 절차와 방식 등을 중심으로 단계별 로드맵을 제시함.
- 제10차 원자력진흥위원회(2021.12.27.)
 - 사용후핵연료 관리 정책 재검토위원회의 권고안을 바탕으로 마련된 제2차 「고준위 방사성폐기물 관리 기본계획」을 의결함.
 - 부지 선정 절차 착수 이후 20년 내 중간저장시설 확보, 37년 내 영구처분시설 확보 계획을 제시함.
 - 특별법 제정과 독립된 전담조직 신설을 추진함.
 - 사용후핵연료 처리기술(파이로) 연구개발은 기초·원천기술 확보를 위해 실증·실용화 전 단계(TRL 6)까지 지원함.

■ 현 정책의 문제점

- 정책 방향성 부재로 인한 불확실성 증대
 - 앞의 원자력진흥위원회(또는 원자력위원회)의 의결사항에서 보듯이, 현재 우리나라는 사용후핵연료 재활용 여부에 대해 명확한 입장을 정하지 못한 상황(Wait & See)임.
 - 지금까지 우리 정부는 원자력진흥위원회의 명확한 의결 없이, 직접처분을 가정하고 이에 따른 사용후핵연료 관리 계획과 기술개발 로드맵을 수립하고 투자를 해 왔음.
 - 미국의 사전 동의와 국제 정세 등을 고려해야 하다 보니 재활용 여부 결정이 쉽지 않지만, 우라늄

4) 고준위 방사성폐기물은 원자력안전위원회 고시 제2025-3호 「방사선방호 등에 관한 기준」 제3조(고준위 방사성폐기물)의 기준을 초과하는 폐기물을 말한다. 일반적으로 사용후핵연료와 고준위 방사성폐기물을 등치하여 사용하지만, 법적으로는 원자력안전법 제35조제4항에 따라 폐기하기로 결정한 사용후핵연료만이 이에 해당한다.

시장이 갈수록 불안정해지며 에너지 안보의 중요성이 커지는 현 상황에서는 이른 시간 내에 사용후핵연료 재활용 여부에 대한 명확한 입장을 정할 필요가 있음.

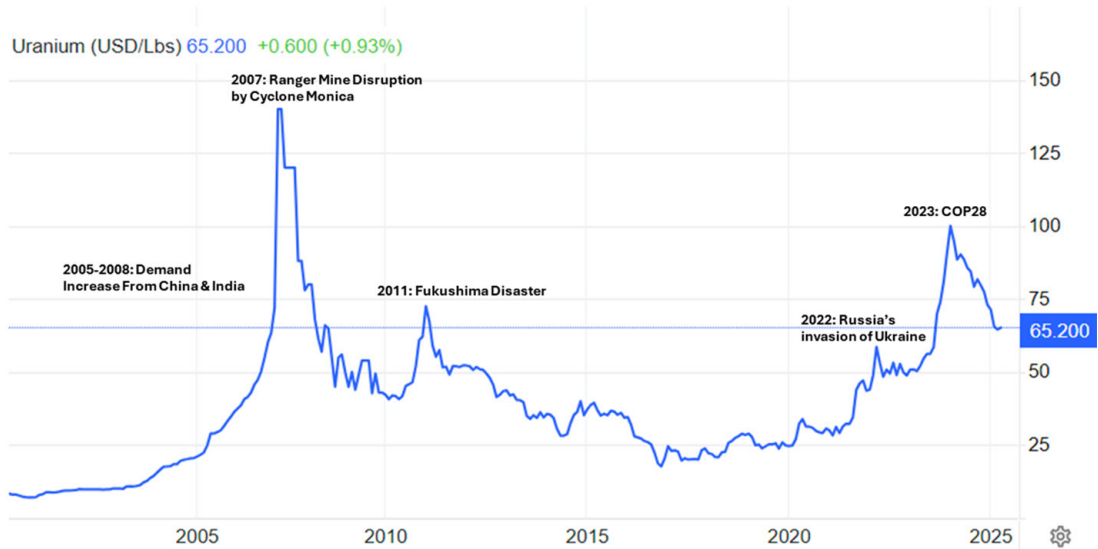
- 특히, 사용후핵연료를 재활용하고자 한다면 관련 기술개발 및 인프라 구축과 이를 위한 재원 조달 방안 마련이 선행되어야 하므로, 적절한 시점에 명확한 의사결정이 있어야 함.
- 최종 처분 형태(사용후핵연료 자체 또는 재활용 후 고준위 방사성폐기물)가 정해지지 않아서, 영구처분 개념 및 용량 등 영구처분시설 설계의 조기 확정이 어려움. 만약 처분사업 도중 정책이 변경될 경우, 시설설계 변경이 이루어질 수도 있음.

02 국내외 주요 정책 동향

■ 세계 우라늄 시장 불안정 심화

- 기후위기 극복과 에너지 안보 강화를 위해 원전 이용을 확대하려는 세계적인 움직임이 생기며 우라늄 수요가 치솟기 시작했음. 그러나 우라늄 공급이 수요를 따라가지 못하면서, 장기적으로 조달이 어려워질 것으로 전망되고 있음.
 - 현재 계획된 개발·증설 계획에 따르면, 2040년까지 서구권의 정광·변환·농축 수요 대비 공급 비율은 각각 80%, 80%, 90% 수준으로, 공급 부족이 발생할 것으로 예측됨(Trading Economics(2025)).
- 서방국이 러시아의 우크라이나 침공에 대한 제재로 러시아산 우라늄 수입을 금지하고, 러시아는 이에 대한 대응 조치를 취하는 등 우라늄이 언제든 전략 무기화될 수 있음이 밝혀짐에 따라 세계 우라늄 시장의 불안정성이 커지고 있음.
 - 조 바이든 前 미국 대통령은 2024년 5월 러시아산 우라늄의 미국 수입을 금지하는 법안에 공식 서명함. 푸틴 러시아 대통령은 이에 대한 맞대응으로 2024년 11월 미국으로의 농축우라늄 수출을 일시 제한하는 조치를 함.
- 원자력 수요 증가와 우라늄의 전략 무기화 등으로 인해 우라늄 자원 가격이 폭등 수준으로 상승하고 있음.

〈그림 5.1〉 우라늄 정광 현물시장 가격 추이



(Trading Economics, 2025)

- 우라늄 자원별 공급 부족은 국제 정세 등에 따라 해소 시기가 달라질 것으로 예상됨.
 - 우라늄 정광과 변환은 단기적으로는 공급 부족이 예상되지만, 설비와 탐사에 대한 투자가 확대되면 해당 공급 부족은 곧 해소될 것으로 보임.
 - 상황은 안정적인 편이지만, 전 세계 공급량의 40% 이상을 차지하는 러시아를 배제할 경우, 서구권 단독 공급망만으로는 신규 사업자의 시장 진입에도 불구하고 2035년까지 우라늄 농축 서비스의 공급 부족이 이어질 것으로 예상됨.

〈표 5.1〉 세계 농축시설 설비용량 및 점유율(2023년 기준)

국가	회 사	설비용량 (천SWU/년)	시장 점유율
프랑스	Orano	7,500	12%
영국	Urenco EU	13,300	22%
	Urenco USA	4,600	8%
러시아	TENEX	26,500	44%
중국	CNNC	8,700	14%
기타	JNFL 등	200	~1%
합 계		60,800	

(UxC, 2024b)

- 영국⁵⁾과 프랑스⁶⁾는 서구권의 脫러시아 기조로 취약해진 농축 공급망 강화를 위해, 보유 농축시설 용량을 15~30% 확장할 계획이며, 2028~2030년부터 공급 확대가 가능할 것으로 전망됨.
- 신규/재진입 농축 서비스 업체로는 미국 Centrus와 일본 JNFL 등이 있으나, 시장 공급이 가능한 시기는 모두 2030년 이후로 전망되고 있음.

■ 「고준위 방사성폐기물 관리 특별법」 제정

- 국내 원전 부지 내 저장시설의 포화가 임박함.
 - 1978년 고리원전 1호기가 상업 운전을 시작한 이후 국내 원전에서 방출된 사용후핵연료를 저장하는 부지 내 저장시설이 포화하고 있어, 이 추세대로라면, 한빛원전은 2030년, 한울원전은 2031년, 고리원전은 2032년부터 부지 내 저장시설이 포화할 것으로 예측됨.
- 사용후핵연료 문제의 근본적 해결책으로서 ‘처분시설’ 부지 확보를 위한 「고준위 방사성폐기물 특별법」 제정이 추진됨.
 - 주요 경위
 - ◆ 22대 국회에서 특별법 제정안 5건 발의
 - 김석기 의원 대표발의(2024.5.30.), 이인선 의원 대표발의(2024.5.30.), 김성원 의원 대표발의(2024.6.5.), 정동원 의원 대표발의(2024.6.20.), 김성환 의원 대표발의(2024.6.20.)
 - ◆ 국회 산업통상자원위원회 통과(2025.2.19.)
 - ◆ 국회 본회의 통과(2025.3.4.)
 - ◆ 국무회의 의결(2025.3.18.) 및 공포(2025.3.25.)
 - ◆ 공포 후 6개월이 경과한 날부터 시행
 - 주요 내용
 - ◆ 「고준위 방사성폐기물 관리 특별법」의 주요 내용은 <표 5.2.>와 같음.

5) 우렌코(Urenco)는 영국 케이프너스트(Capenhurst) 부지에 고수준저농축우라늄(HALEU) 생산설비(150k SWU) 구축, 네덜란드 알멜로(Almelo) 부지 시설 확장(+750k SWU) 및 미국 뉴멕시코의 시설(+700k SWU) 확장 계획을 수립함.

6) 오라노(Orano)는 프랑스 트리카스탱(Tricastin) 지역 GB-II 농축시설 확장(+2,500k SWU) 계획을 수립함.

〈표 5.2.〉 고준위 방사성폐기물 특별법 주요 내용

항목	주요 내용	관련 조항
고준위 방사성폐기물 관리 위원회 설치	국무총리 소속으로 위원회 설치, 법 시행일로부터 5년간 존치 후 중앙행정기관으로 전환할지 검토	제6조~제16조
관리시설 운영시점	중간저장시설은 2050년 이전, 처분시설은 2060년 이전 운영 개시를 목표로 노력	제17조
부지 조사 및 선정 절차	부지적합성 기본조사 → 심층조사 → 예정부지 도출 → 주민투표 → 위원회 심의·의결	제20조~제23조
관리시설 유치지역지원	관리시설 유치지역 지원위원회를 설치하여, 지원계획을 수립하여 지원	제24조~제29조
고준위 방사성폐기물 관리 사업자	한국원자력환경공단을 전담기관으로 지정	제38조

- 특별법이 원전 운영에 미치는 독소조항과 영향

- ◆ 특별법 일부 조항은 폐기물 관리의 본질과 무관하게 원전의 지속적인 운영을 제약하는 ‘독소조항’으로 작용할 수 있다는 비판이 제기되고 있음. 해당 조항들은 불필요한 규제를 추가하여 정책적 신뢰를 해칠 수 있다는 지적도 있음. 주요 제약 조항과 그 영향은 다음과 같음.
- 원전 부지 내 저장시설 용량 제한(제36조제6항)
 - ① 동 조항은 원전 부지 내 건식저장시설의 용량을 제한함. 이는 폐기물 관리와 무관하게 원전의 계속운전을 막는 장치로 작용하여, 예상보다 빠른 원전 가동 중단을 초래할 수 있다는 분석이 있음.
- 원전 부지 간 사용후핵연료 이송 금지(제36조제7항)
 - ① 동 조항은 부지 내 저장시설에 다른 원전의 사용후핵연료를 반입할 수 없도록 규정함.
 - ② 이로 인해 저장조가 포화 상태인 노후 원전의 사용후핵연료를 저장 공간에 여유가 있는 신규 원전으로 이송하는 효율적 관리가 원천적으로 차단됨. 결국 저장 공간이 부족한 원전은 인근에 여유 공간이 있어도 별도의 저장시설을 건설해야 하는 비효율이 발생함.

- 특별법 시행에 따른 기대 효과

- ◆ 사용후핵연료 관리의 법적 안정성 및 일관성 확보:
 - 수십 년간 논의만 반복되던 사용후핵연료 관리 문제에 대한 법적 기반을 마련함으로써, 장기적이고 예측 가능한 정책 추진이 가능해짐.
 - 정책 불확실성이 해소되어 관련 사업의 계획 수립, 자원 조달, 기술개발에 안정적인 기반을 제공함.
- ◆ 미래 세대에 대한 책임 이행 및 지속 가능한 원자력 이용 기반 마련:

- 고준위 방사성폐기물에 대한 최종 관리 방안을 법적으로 명시함으로써, 현 세대의 원자력 이용으로 발생하는 폐기물 부담을 미래 세대에 전가하지 않고 책임감 있게 관리하는 기반을 마련함.
- 이는 원자력발전의 윤리적·사회적 수용성을 높이고, 장기적 관점에서 원자력발전이 지속 가능한 에너지원으로 기능할 수 있는 기반이 됨.
- ◆ 국민 수용성 제고 및 사회적 갈등 완화 기반 마련:
 - 법률에 명시된 투명하고 절차적인 사업 추진 과정을 통해 국민과 지역 주민의 신뢰를 확보할 수 있는 기반을 마련함.
 - 공론화 및 소통 강화를 통해 사회적 갈등을 줄이고, 방사성폐기물 문제에 대한 합리적인 해결책을 모색할 수 있는 사회적 분위기를 조성함.

■ 파이로프로세싱(Pyroprocessing) 연구 진행

- 우리나라는 1990년대 후반부터 사용후핵연료에서 유용한 핵물질을 회수하고 고준위 방사성폐기물 부피와 독성을 줄이기 위해 건식재처리 기술인 파이로프로세싱 연구를 시작함.
- 현재 파이로프로세싱에 대한 연구에 대한 지원은 계속되고 있으나, 예산규모가 대폭 축소되어 겨우 명맥만 유지하고 있는 상황임.

03 한미 원자력협력협정

■ 원자력협력협정 개요

- 미국 정부는 1954년 제정된 미국 「원자력법(Atomic Energy Act, AEA)」 제123조(외국과의 협력)에 따라, 미국의 핵물질, 기자재, 기술을 사용하려는 국가와 그 사용조건과 절차를 명시한 협정⁷⁾을 체결해야 함.
- 미국 원자력법 제123조에 규정된 9가지 핵비확산 조건은 다음과 같음.
 - 이전된 핵물질과 기자재는 영구 사찰 대상임.
 - 핵비보유국은 모든 주요 원자력시설에 대하여 IAEA의 쏘 범위 사찰을 수용해야 함.
 - 핵비보유국인 경우, 이전된 핵물질, 기자재, 기술의 핵무기 개발 또는 군사 목적으로 전용을 금지함.

7) 원자력법 123조에 따른 협정이라 하여 '123 협정'이라고도 불림.

- 핵비보유국이 핵실험을 하거나 IAEA의 사찰 규정을 어길 경우, 이전된 물질과 기자재는 미국으로 반환해야 함.
- 핵물질이나 보안자료를 재이전시 미국의 동의가 필요함.
- 이전 또는 생산된 핵물질, 시설은 물리적 방호가 충분해야 함.
- 20% 미만의 농축이나 재처리시 미국의 사전 동의가 필요함.
- 20% 이상 농축이나 재처리시 새 협정을 통한 미국의 사전 승인이 필요함.
- 상기 8개 핵비확산 조건은 핵물질, 생산시설, 이용 시설에 공히 적용함.
- ‘123 협정’ 체결은 미국 의회의 승인이 필요하며 미국 의회는 제출된 협약(안)을 90일 이내에 결정하게 되어 있으며, 이 기간에 의회의 반대 결의가 없으면 협정은 자동 승인된 것으로 간주함.

■ 「한미 원자력협력협정」 체결 및 개정 경위

- 1956.2.3. 양국은 「원자력의 비군사적 사용에 관한 협력 협정」을 최초 체결하고, 연구용원자로 도입을 계기로 2차례 개정함(1958.3.14., 1965.7.30.).
- 1972.11.24. 양국은 발전용 원자로 도입을 계기로 「원자력의 민간 이용에 관한 대한민국 정부와 미합중국 정부 간의 협력을 위한 협정」(이하 ‘민간 원자력협정’)으로 상기 협정을 대체함.
- 1974.5.15. 발전용 원자로 확대에 대비하여 농축우라늄 공급 상한선을 상향하여 ‘민간 원자력협정’을 개정함(만료 기한: 2014년).
- ‘민간 원자력협정’ 유효기간 만료 시한이 다가옴에 따라, 2010년 10월부터 협상을 거쳐 2015.6.15. 개정함(만료 기한: 2035년).
- 우리나라가 사용후핵연료 관리 정책에 미국산 사용후핵연료에 대한 형상 변경(재처리) 또는 재이전(위탁재처리)을 고려할 때, 이 협정은 미국의 사전 동의를 필수적으로 요구하는 근본적 제약으로 작용함.

■ 「2015 한미 원자력협력협정」의 주요 내용

- 사용후핵연료 관리 및 핵연료 공급 자율성 확대
 - 조사후시험 및 전해환원 연구 허용: 국내 현존 시설에서 사용후핵연료 관련 연구(조사후시험, 전해환원 등)를 수행하는 것에 대한 장기동의를 확보함.
 - 해외 위탁재처리 허용: 한국의 사용후핵연료를 한미 양국이 합의한 제3국에 위탁하여 재처리하는

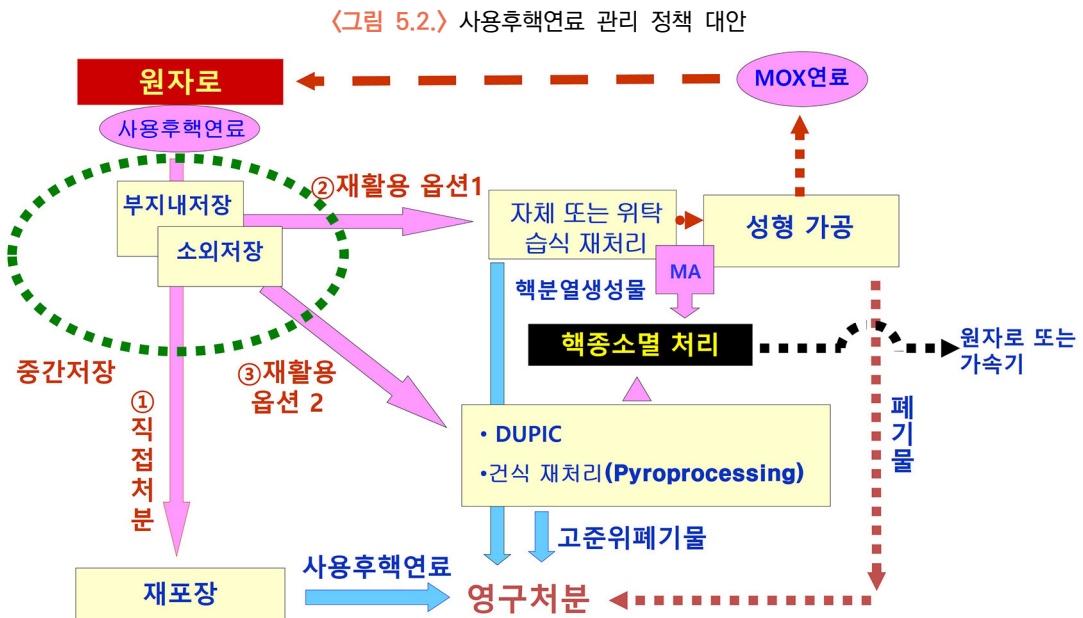
것을 허용함.

- 우라늄 저농축(20% 미만) 경로 마련: 미래에 미국산 우라늄을 이용한 20% 미만의 저농축이 필요하게 됐을 때, 양국의 협의를 통해 합의하여 추진할 수 있도록 경로를 마련함.
- 원전 연료의 안정적 공급 지원: 미국의 원전 연료 공급 지원 노력을 규정하고, 핵연료 시장 수급 불균형 상황 발생 시 상호 비상 공급 지원 협의를 명시함.
- 원전 수출 증진: 핵물질, 원자력 장비 및 부품의 제3국 재이전에 대한 장기동의를 확보하고, 수출입 인허가를 신속하게 추진하기로 함.
- 전략적, 미래지향적 이행 협력 체제 구축
 - 상설 고위급위원회(차관급) 신설: 미국이 체결한 원자력협력협정 중 최초로 상설 고위급위원회를 신설하여, 양국 간 원자력 협력을 포괄적으로 논의하고 결정하는 체제를 구축함.
 - 실무그룹 운영: 고위급위원회 산하에 사용후핵연료 관리, 원전 연료의 안정적 공급, 원전 수출 증진, 핵안보 등 4개 실무그룹을 설치함.
- 협정 유효기간 단축: 기존 40여 년에 달했던 협정 유효기간을 20년으로 단축하여, 미래 변화에 유연하게 대응할 수 있도록 함.

04 사용후핵연료 관리 정책 수립을 위한 제언

■ 사용후핵연료 관리 정책 대안

- 국제 우라늄 시장의 불안정성 심화, 사용후핵연료 누적에 따른 처분 부담 가중 등과 같은 국내외 상황을 반영하여, 우리나라 사용후핵연료 관리 정책으로 고려할 수 있는 대안은 <그림 5.2.>와 같음.



- <그림 5.2.>는 사용후핵연료 관리 및 처분과 관련된 다양한 전략적 옵션을 종합적으로 제시하며, 주요 내용은 다음과 같음.

- 초기저장 및 중간저장

- ♦ 원자로에서 배출된 핵연료는 먼저 원전 부지 내 저장시설에 임시 보관된 후, 장기 보관을 위한 중간저장시설로 이송됨.
- ♦ 중간저장은 사용후핵연료 관리의 핵심 단계로서, 이후의 관리 방안 결정 전까지 안전하게 보관하는 역할을 함.

- ① 직접처분

- ◆ 중간저장된 사용후핵연료의 주요 경로 중 하나는 직접처분임. 이 경우, 사용후핵연료는 추가적인 재활용 과정 없이 재포장을 거쳐 영구 처분됨. 이는 사용후핵연료를 지하 깊은 곳에 처분하여 환경으로부터 격리하는 방식으로, 안전성과 장기적인 관리가 중요함.

- ② 재활용 옵션 1 : 습식재처리 경로

- ◆ 재활용 옵션 1은 자체 또는 위탁재처리를 통해 사용후핵연료에서 우라늄과 플루토늄을 분리하여 재활용하는 과정임. 이 과정을 통해 플루토늄과 우라늄을 혼합해 만든 MOX 연료를 생산하여 다시 원자로에서 사용할 수 있음. 다만, 습식재처리는 순수 플루토늄의 분리가 가능하다는 특성 때문에 우리나라가 독자적으로 습식재처리 시설을 확보하기란 사실상 불가능함. 이에 따라 분리된 핵물질을 핵비확산성이 보장된 범위에서 제3국에 위탁하여 재처리한다면 상대적으로 실현 가능성이 더 높을 것으로 판단됨.
- ◆ 재처리 과정에서 배출되는 핵분열 생성물 등은 회수하여 방사성 핵종 특성에 따라 처리한 후 영구처분하며, 장수명 핵종인 마이너 악티나이드(Minor Actinides)는 가속기 등을 이용한 핵종 소멸 처리를 통해 단수명 핵종으로 변환하여 처리하거나 MOX 연료에 마이너 악티나이드를 혼합한 MA-MOX 연료를 만들어 재사용할 수 있음.

- ③ 재활용 옵션 2 : 건식재처리 경로

- ◆ 경수로 사용후핵연료를 CANDU 중수로형 핵연료로 재활용하는 기술인 DUPIC(Direct Use of Spent Fuel in CANDU reactor)을 통해, 경수로 사용후핵연료를 재활용할 수 있음. 과거 우리나라가 개발한 기술이기도 함.
- ◆ 순수 플루토늄 회수가 가능하여 국제적으로 엄격하게 통제되는 습식재처리 대신, 핵비확산성이 강화된 건식재처리(파이로프로세싱) 기술을 이용하여 사용후핵연료를 재활용할 수 있음. 건식재처리일지라도 핵확산에 대한 우려를 완전히 잠재우기 어려운 경우, 미국 등과 공동 운영하는 다자간 시설 도입을 고려할 수 있음.
- ◆ 다자간 시설은 우라늄 농축, 사용후핵연료 재처리 등 핵확산에 민감한 기술과 시설을 다수의 국가가 공동 소유·운영·관리하는 협력 체제임. 이러한 시설 도입의 근본 목적은 원자력의 평화적 이용 권리를 보장하면서, 개별 국가의 민감 시설 단독 보유에서 비롯될 수 있는 핵물질의 군사적 전용 및 기술 유용 위험을 억제하는 것임. 이는 다국적 참여를 통한 투명성 강화, 상호 감시, '이탈 비용' 증가로 핵비확산의 신뢰를 제도적으로 담보함으로써 달성됨.
- ◆ 그러함에도 불구하고 다자간 시설이 널리 확산하지 못한 데에는 구조적인 장애물들이 존재함. 막대한 초기 투자 비용과 복잡다단한 국제 협상 과정은 높은 진입 장벽으로 작용하며, 에너지 주권의 일부를 양보해야 하는 정치적 부담감과 다수 지역에 여전히 부재한 지정학적 신뢰 역시 현실적인 한계로 지적됨.

- ◆ 그러나 우리나라는 세계 5위의 원전 운영국이자 원전 수출국으로서 다자 시설 유치에 필요한 경제적 타당성과 기술적 역량을 이미 보유했음. 또한, 한미동맹이라는 강력한 지정학적 신뢰 자산은 국제 협력의 견고한 기반이 됨. 무엇보다, 사용후핵연료 저장시설 포화 압박과 농축우라늄 공급망 불안이라는 당면한 에너지 안보 위기 상황이 다자간 시설 도입의 현실적 당위성을 강력하게 뒷받침하고 있음.

- 영구 처분

- ◆ 어떠한 핵연료주기 옵션을 택하든 고준위 방사성폐기물은 필연적으로 발생하며, 이 방사성폐기물을 생태계로부터 영구히 격리하는 단계가 영구처분임.

■ 위탁재처리 및 다자간 시설 도입을 위한 「한미 원자력협력협정」 개정 필요성⁸⁾

- 미국산 사용후핵연료 재활용을 위해서는 미국의 사전 동의가 필요함.
 - 한미 원자력협력협정 제11조에 따라, 미국에서 공급받은 우라늄을 사용한 사용후핵연료 또는 미국산 장비나 기술을 사용하여 생산된 사용후핵연료를 재활용하기 위해서는 미국의 사전 동의(한·미 양국의 서면합의)가 있어야 함.
 - 현행 협정에서 파이로프로세싱 기술의 초기 단계인 전해환원에 대해서는 장기동의를 받았으나, 그 후속 단계 연구와 상용화 및 이와 관련한 시설을 국내에 건설하기 위해서는 미국의 사전 동의가 있어야 함.
- 미국산 사용후핵연료 위탁 재처리시 미국의 사전 동의가 필요함.
 - 위탁재처리 개념: 국내 발생 사용후핵연료를 습식재처리 시설을 보유한 해외 국가에 보내 재처리를 위탁하는 방식임.
 - ◆ 위탁재처리 후 생성되는 물질(재처리 우라늄, 플루토늄 등)은 위탁 국가에 보관하거나 국내 반입하여 활용할 수 있음.
 - ◆ 위탁재처리 후 남은 고준위 방사성폐기물은 해외에서 직접처분하거나, 부피가 줄어든 상태로 국내로 반입하여 처분 부담을 경감할 수 있음.
 - 현행 협정상 위탁재처리를 명시적으로 금지하지는 않고 있으나, 협정 제10조와 합의의사록 제3조에 따라 사용후핵연료를 영국이나 프랑스 또는 한·미 양국이 합의하는 제3국으로 재처리를 위탁할 수 있음.
 - ◆ 위탁재처리 후 생성되는 물질(재처리 우라늄, 플루토늄 등)의 국내 반입 및 활용을 위해서는

8) 이 절은 참고문헌 문주현(2025), “글로벌 에너지 대전환기 속 국내 에너지 안보 강화를 위한 한·미 원자력협력정의 개정 방향”, 국가전략에서 발취하여 재정리한 것임.

미국과의 추가 합의가 필수적이며, 현행 협정의 개정이 필요함. 이와 관련한 사항을 <표 5.3.>에 정리하였음.

〈표 5.3.〉 위탁재처리 후 회수 물질 국내 사용을 위한 협정 개정 방향

항목	현행 조항	개정 방향
위탁 재처리 후 회수 핵물질 국내 사용	회수 핵물질 반환 조건의 구체화 및 포괄적 사전 동의	<ul style="list-style-type: none"> 협정 ‘합의의사록(Agreed Minute)’ 제3절제4항은 미국이 재처리 후 회수된 핵물질의 한국 반환에 동의한다고 명시했지만, “(b) 양 당사국이 서면으로 합의하는 형태 및 물리적 방호 약정에 따라 이전되어야 한다”는 조건을 달고 있음. 이는 핵물질 반환 시 형태(예: MOX 연료)와 방호 조치에 대해 건별로 미국의 사전 동의를 받아야 함을 의미함. 이 조항을 개정하여, 사전에 양국이 합의한 제3국 재처리 시설(영국, 프랑스)에서 생산된 특정 사양의 회수 핵물질(예: MOX 연료)에 대해서는 별도의 건별 동의 없이 반환할 수 있게 포괄적 사전 동의를 받도록 해야 함.
	국내 저장시설에 대한 포괄적 사전 동의 확보	<ul style="list-style-type: none"> 협정 제10조제1항은 플루토늄 등 분리된 핵물질은 “양 당사국이 합의하는 시설에만 저장”하도록 규정하고 있음. 이는 회수된 핵물질을 국내에 들여와 저장하려면 그 시설에 대해 미국의 동의가 필요하다는 의미임. ‘합의의사록’의 부속서(Annex)에 회수된 핵물질을 저장하거나 가공·사용할 수 있는 국내 시설(예: MOX 연료 가공 시설 및 원전 등) 목록을 추가하고, 이 목록의 시설은 미국이 포괄적 동의를 한 것으로 간주한다는 내용으로 개정해야 함.
	회수 핵물질 사용(가공)에 대한 사전 동의 확보	<ul style="list-style-type: none"> 협정 제11조는 재처리 등 핵물질의 형태 변경에 미국의 서면 동의를 요구하고 있음. 영국, 프랑스에서 재처리하는 것뿐만 아니라, 반환된 플루토늄을 한국에서 MOX 연료로 가공하는 것 또한 ‘형태 변경’에 해당하여 별도의 동의가 필요할 수 있음. 현재는 사용후핵연료 조사후 시험(PIE) 등 제한된 활동에 대해 사전 동의를 부여되어 있음. 회수된 핵물질을 국내 특정 시설에서 MOX 연료 등으로 가공하는 활동에 대해서도 ‘합의의사록’ 제5절의 방식처럼 ‘포괄적 사전 동의’를 받도록 조항을 개정할 필요가 있음.
	장기적이고 예측 가능한 ‘약정’ 프레임워크 도입	<ul style="list-style-type: none"> 협정 ‘합의의사록’ 제6절은 국내에서 파이로프로세싱과 같은 신기술을 개발하고 적용하기 위한 장기적 협의 절차와 ‘약정(Arrangements)’ 수립에 대해 다루고 있음. ‘약정’ 개념을 제3국 위탁재처리 순 과정에 적용하여 협정 개정을 하는 것이 근본적인 해결책이 될 수 있음. 즉, (영국/프랑스) 재처리 → 회수 핵물질 사양 정의 → 국내 반입 → 지정된 시설에서 MOX 연료 가공 → 원전 내 사용에 이르는 전 과정에 하나의 포괄적인 ‘약정’을 수립하여 장기적이고 예측 가능한 협력의 틀을 마련하는 것임.

- 다자간 사용후핵연료 건식재처리 시설을 국내 도입하기 위해서도 미국의 사전 동의와 협정의 개정이 필요함. 이와 관련한 사항을 <표 5.4.>에 정리하였음.

〈표 5.4〉 다자간 사용후핵연료 건식재처리 시설 도입을 위한 협정 개정 방향

항목	현행 조항	개정 방향
다자간 사용후핵연료 건식재처리 시설	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 협정 ‘합의의사록’ 제6절에 따라, 파이로프로세싱 도입을 위해서는 한미 ‘공동 핵연료주기 연구(Joint Fuel Cycle Study)’를 통해 기술적 타당성, 경제성, 효과적인 안전조치, 비확산성 강화라는 네 가지 핵심 전제 조건을 충족해야 함. 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 이 단계는 개정보다는 성실한 이행이 중요함. 다자간 시설 도입을 주장하기에 앞서, 파이로프로세싱 기술이 협정이 요구하는 기준을 충족한다는 것을 한미 공동으로 확인하는 절차를 완료해야 함.
	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 상기 전제조건이 충족되면, 합의의사록’ 제6절에 따라 한미 양국은 ‘서면 약정’을 체결해야 함. 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 합의의사록 제7절의 개정과 마찬가지로, 이 ‘약정’의 주체를 한미 양국에 국한하지 않고, ‘제3국 당사자들’까지 확대해야 함.
	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 협정 ‘합의의사록’ 제6절에 따라, 재처리 시설은 한미 양국의 서면 합의를 통해 부속서 II(Annex II)에 등재되어야 함. 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ ‘합의의사록’ 부속서 II에 다자간 농축 시설 추가 시 한미 양자와 관련국 모두의 ‘서면 합의’에 의해 등재될 수 있도록 절차를 변경해야 함.

■ 사용후핵연료 관리 정책 수립

● 사용후핵연료 관리의 최종 목표 제시

- 사용후핵연료 관리 정책은 궁극적으로 원자력발전의 지속 가능성을 확보하고, 고준위 방사성폐기물로부터 국민과 환경을 영구히 안전하게 보호하며, 미래 세대에 대한 현재 세대의 책임을 다하는 것을 목표로 해야 함.

● 사용후핵연료 관리를 위한 구체적 방향 제시 필요

- 전략적 유연성을 갖춘 핵연료주기 정책 추진

- ◆ 재활용 옵션(위탁재처리 및 다자간 시설 도입 등)에 대한 심층 검토 및 연구개발 지속: 국제 우라늄 수급의 불안정성과 고준위 방사성폐기물 처분 부담 경감의 필요성을 고려하여, 핵확산 저항성 재처리 기술(특히 파이로프로세싱)에 대한 연구개발 및 실증을 강화할 필요가 있음.
- ◆ 「한미 원자력협력협정」 개정을 통해 핵비확산성이 보장되는 범위 내에서 재활용 활동 범위를 점진적으로 확대하여 자원 재활용과 폐기물 감량 효과를 극대화하는 기회를 확보할 필요가 있음. 프랑스, 러시아, 일본, 중국, 인도 등 주요 원자력 이용 국가들이 파이로-소듐냉각고속로 연계 순환형 핵연료주기를 최종 사용후핵연료 관리 정책으로 추진하고 있음을 감안하여, 우리나라도 이 방향으로의 기술 역량을 확보해야 함.
- ◆ 고준위 방사성폐기물 관리법의 성공적 이행: 법률에 명시된 절차에 따라 투명하고 과학적인 부지 선정 절차를 추진하고, 지하 심층 처분 기술의 고도화 및 안전성 확보를 위한 지속적인 투자, 재활용 여부와 관계없이 최종적으로 처분될 폐기물을 안전하게 관리하기 위한 필수적인 인프라 구축을 추진해야 함.

- 안정적인 중간저장시설의 적기 확보
 - ◆ 영구 처분장 또는 상업적 재처리 시설이 확보되기 전까지 사용후핵연료의 안전한 저장을 위한 중간저장시설의 부지 선정 및 건설을 서둘러 추진할 필요가 있음.
 - ◆ 이는 원전 부지 내 저장시설 포화로 인한 원전 가동 중단 또는 계속운전 중단 위험을 해소하고, 최종 관리 방안 마련까지의 시간을 벌기 위한 것임.
- 국민과의 소통 및 신뢰 구축의 지속적 강화
 - ◆ 사용후핵연료 관리 사업의 전 과정에 대한 정보를 투명하게 공개하고, 다양한 채널을 통한 국민과의 양방향 소통을 활성화해야 함.
 - ◆ 과학적 근거에 기반한 교육 및 홍보를 통해 불필요한 오해와 불신을 해소해야 하고, 공론화 과정을 통해 사회적 합의를 지속적으로 모색하여 국민적 수용성을 높여야 함.
- 국제 협력 확대 및 핵비확산 모범국으로서의 선도적 역할
 - ◆ 사용후핵연료 관리 문제 해결은 전 세계적 과제임을 인식하고, 핀란드, 스웨덴 등 심층 처분 선도국과 프랑스 등 재처리 선진국들의 경험과 노하우를 적극적으로 벤치마킹할 필요가 있음.
- 핵심 인력 양성 및 원자력 기술 자립 강화
 - ◆ 핵연료주기 전반에 걸친 기술개발 역량을 강화하고, 사용후핵연료 관리 분야의 전문 인력 양성을 위한 체계적이고 장기적인 투자를 지속해야 함.
 - ◆ 이를 통해 장기적인 관점에서 사용후핵연료 관리 기술 자립을 달성하고, 국내 원자력 산업 생태계의 지속적인 발전을 도모할 수 있음.

■ 재활용 추진 시 경제성 및 핵비확산성 확보 방안 제언

● 재활용 경제성 확보 방안

- 기술 혁신을 통한 비용 절감
 - ◆ 파이로프로세싱과 같은 건식재처리 기술개발을 통해 기존 습식재처리 공정 대비 공정을 단순화하고, 사용되는 화학물질을 줄이며, 폐기물 발생량을 최소화하여 비용 절감 효과를 극대화할 필요가 있음.
 - ◆ 자동화 및 원격 제어 기술 도입을 통해 작업자의 피폭을 줄이고 운영 효율성을 높여 인건비 등 운영 비용을 절감해야 함.
- 규모의 경제 실현
 - ◆ 충분한 사용후핵연료 처리 규모를 확보하여 시설 투자 및 운영의 효율성을 증대해야 함. 초기

건설 비용이 많더라도 장기적인 관점에서 대량 처리를 통해 단위 비용을 낮추는 전략이 필요함.

- 핵연료 재활용 가치 극대화

- ◆ 회수된 핵물질(재처리 우라늄, MOX 연료 등)의 효율적인 재활용을 통해 원자력발전의 연료 비용을 절감해야 함. 우라늄 시장 가격 상승 시 재활용 연료의 경제적 가치는 더욱 커짐.
- ◆ 장수명 핵종을 소각하여 방사성 독성을 줄임으로써 최종 처분장의 규모를 축소하고, 장기 관리 비용을 절감하는 효과를 화폐 가치로 환산하여 경제성 평가에 반영해야 함.

- 장기적 관점의 경제성 평가

- ◆ 단순히 재활용 시설 건설 및 운영 비용만을 고려하는 것이 아니라, 사용후핵연료 처분 비용 감소, 우라늄 구매 비용 절감, 장기적 에너지 안보 가치 등을 종합적으로 고려한 총체적인 비용-편익 분석 수행이 필요함.
- ◆ 미래 세대에 대한 처분 부담 감소 효과를 경제적 가치로 평가하여 정책 결정에 반영할 필요가 있음.

● 핵비확산성 확보 방안

- 핵확산 저항성 기술개발에 집중

- ◆ 파이로프로세싱과 같이 고순도 플루토늄 추출이 어렵고 핵무기 전용이 어려운 형태로 핵물질을 추출하는 기술개발에 집중해야 함.
- ◆ 공정 과정에서 핵물질을 항상 혼합된 형태로 유지하거나, 고방사능 상태를 유지하여 물리적 방호가 어려운 형태로 만드는 기술을 개발해야 함.

- 투명성 및 검증 강화

- ◆ IAEA(국제원자력기구) 등 국제기구의 사찰 및 검증을 적극적으로 수용하고, 재처리 시설 운영 전 과정의 투명성을 극대화할 필요가 있음.
- ◆ 핵물질 계량 및 통제 시스템을 최첨단으로 구축하고, 실시간 감시 시스템을 도입하여 핵물질의 이동 및 재고를 철저히 관리해야 함.

- 국제 공동연구 및 개발

- ◆ 미국을 포함한 주요 원자력 선진국과의 공동연구 및 개발을 통해 기술개발 초기 단계부터 핵비확산 원칙을 반영하고 국제사회의 신뢰를 확보해야 함.
- ◆ 국제 사회와 기술 정보를 공유하고 상호 검증을 통해 기술의 핵비확산성을 입증할 필요가 있음.

- 강력한 핵물질 관리 및 물리적 방호

- ◆ 재활용 시설 내 핵물질에 대한 철저한 계량 관리 및 최첨단 물리적 방호 시스템(감시 카메라,

센서, 출입 통제 등)을 개발해야 함.

- ◆ 사이버 공격 등 비전통적 위협에 대비한 정보 보안 시스템을 강화해야 함.

- 국제 규범 준수 및 외교적 노력

- ◆ 핵확산금지조약(NPT) 및 추가 의정서 등 국제 핵비확산 체제의 의무를 성실히 이행해야 함.
- ◆ 핵비확산 모범국으로서 국제사회에서의 한국의 위상을 강화하고, 외교적인 노력을 통해 재활용 활동의 정당성과 핵비확산성을 설명하고 지지를 확보해야 함.

KAST

Research Report

2025

VI

결론 및 제언



VI

결론 및 제언

01 사용후핵연료 관리에 대한 결론

■ 사용후핵연료 관리의 이중성

- 사용후핵연료의 위험에 대한 대중 이해
 - 사용후핵연료는 원자로에서 방출된 직후 극도로 높은 방사선과 열을 방출하기 때문에 우리 생태계와 격리해야 하는 위험한 물질임.
 - 그러나 방사선 붕괴의 특성으로 인해 시간이 경과함에 따라 사용후핵연료의 방사선량과 열은 300년 이내에 급격히 감소하여 자연냉각으로 충분한 수준에 이르며, 이후에는 장기간에 걸쳐 서서히 줄어드는 특성을 보임.
 - 환경과 상호작용하며 오염수나 오염기체를 방출하는 일반 산업폐기물과 달리 사용후핵연료는 시간에 따라 별도의 조작 없이 방사선이 자연 소멸하는 성질을 가지며 과학기술적으로 충분히 안전하게 관리할 수 있는 폐기물임.
 - 사용후핵연료는 영구적으로 환경을 위협하는 고위험 폐기물로 대중들에게 인식되지만, 이는 대중들에게 잘못 알려져 있는 부분임.
- 사용후핵연료 처분의 시급성에 대한 대립되는 견해
 - 사용후핵연료의 처분 필요성에 대해서 일부는 이를 즉시 처리해야 할 물질로 보지만, 다른 일부는 장기간 안전하게 보관 가능하다고 판단함.
 - 지난 50여 년간 국내외에서 사용후핵연료는 안전하게 관리되어 왔고, 원전 내 저장수조 용량 부족 시 건식저장시설을 도입하는 방식이 이미 선진국에서 안전성을 입증한 바가 있으며, 후쿠시마 사고에서도 건식저장 사용후핵연료는 문제가 없었음.
 - 그러나 과거 수십 년간 안전관리가 가능했다고 해서 향후 수백 년간 동일한 안전성을 보장할 수는 없으며, 장기 보관 중 연료 피복재의 붕괴 가능성 등 잠재적 위험이 존재함.
 - 따라서 사용후핵연료를 향후 10~20년 안에 즉각 처분할 필요성은 없지만, 100~200년 내에는 반드시 처리해야 할 당위성을 가짐. 이러한 특성을 고려할 때 사용후핵연료 최종 처분시설이

없는 원전 건설을 ‘화장실 없는 맨션’에 비유하는 것은 부적절하며, 오히려 사용후핵연료 최종 처분시설은 ‘묘지’로 보는 것이 더 적절함.

- 또한 고준위폐기물 영구처분장을 원자력발전 정책과 연계시키거나 조속한 마련을 중용함으로써 미성숙된 기술을 조기에 채택하도록 강제하는 것은 바람직하지 않음.
- 사용후핵연료의 자원성과 폐기물성에 대한 대립되는 견해
 - 사용후핵연료는 법적으로 폐기물이 아니며, 원자력안전법에 따라 폐기하기로 결정한 사용후핵연료만이 고준위 방사성폐기물로 정의됨.
 - 핵연료의 약 4~5%는 핵분열이 잘 되는 우라늄-235이고 나머지는 우라늄-238이기 때문에, 원자로에서 방출된 사용후핵연료의 대부분은 연소되지 않은 우라늄 산화물(UO₂)임.
 - 사용후핵연료는 그 외에도 약 0.7%의 우라늄-235와 1% 내외의 플루토늄이 포함되어 있음. 이는 천연우라늄보다 두 배가량 많은 핵분열성 물질 비중을 가지며, 다양한 희귀 원소도 포함하고 있음.
 - 따라서 단순한 폐기물이 아니라 재활용 가능한 자원으로 평가할 수 있기 때문에 사용후핵연료는 폐기물성과 자원성을 동시에 지니고 있음.

■ 사용후핵연료 처분과 처리(재활용)의 선택

- 사용후핵연료 최종 관리는 수십 년 내에 당장 시행해야 하는 시급한 문제는 아니지만 장기적 관점에서 대책이 필요한 것은 틀림없음.
 - 사용후핵연료 관리는 직접처분과 처리(재활용) 후 처분이라는 두 가지 방식이 존재함. 직접처분은 사용후핵연료를 가공하지 않고 그대로 영구 격리하는 것이며, 처리(재활용)는 사용후핵연료에서 유용 자원을 회수한 뒤 상대적으로 소량의 고준위 방사성폐기물만 처분하는 방식임.
 - 처리(재활용)는 처리 공정 자체의 비용은 크지만 고준위 방사성폐기물의 양을 약 5% 미만으로 줄여 장기적 처분 비용을 낮출 수 있고, 사용후핵연료 재활용으로 연료 비용도 낮출 수 있음.
 - 사용후핵연료 관리 정책 결정시 국가별 원전 규모와 기술 역량에 따라 직접처분과 처리 후 처분의 경제성이 달라질 수 있다는 점과, 재처리 기술은 핵무기 제조와 직결될 수 있어 국제적 제약을 극복해야 한다는 점 등 다양한 측면을 고려하여야 함.
- 지금까지 우리 정부는 사용후핵연료를 처분할 것인지 처리 후 처분할 것인지에 대한 입장표명을 하지 않는 Wait & See 전략을 고수해 왔음. 그러나 원전 가동 규모 확대와 사용후핵연료 저장시설 포화 압박이라는 현실 속에서 국가적 차원의 정책적 결단이 불가피함.

■ 국내 사용후핵연료 관리의 최신 기술 적극도입 필요성

- 본 한림연구보고서에 정리한 바와 같이 사용후핵연료를 안전하게 관리하기 위한 기술은 지속적으로 발전하고 있음. 따라서 특정 시점의 기술을 고정적으로 적용하기보다는 해당 시점에서 가장 적합한 최신 기술을 활용하는 것이 합리적임.
 - 1980년대 스웨덴과 핀란드에서 개발된 KBS-3 처분 방식은 당시에는 유효했지만 폐기물 처분 비용을 과도하게 상승시키는 과거의 보수적 측면으로 개발된 기술임. 최신 연구 성과를 반영하면 두꺼운 구리 용기 없이도 안전성을 확보할 수 있고, 캐니스터 적재 효율을 높이는 방식으로 비용 절감도 가능함.
 - 따라서 국내 정책 당국이 최신 기술을 유연하게 반영하지 않고 과거 1980년대 KBS-3 기술을 고수하는 것은 비합리적임.
 - 사용후핵연료 직접처분과 재활용 기술 모두 연구개발이 진행 중이며 기술개발의 결과는 국가 정책에 지속적으로 반영되고 개선되어야 함.

■ 고준위폐기물 특별법의 한계

- 최근 제정된 고준위 방사성폐기물 관리에 관한 특별법은 몇 가지 독소조항을 포함하고 있음.
 - 원전 내 건식저장 용량 제한, 발전소 간 사용후핵연료 이동 금지 등이 대표적이며 이는 국제적으로 이미 안전성이 입증된 방안을 불필요하게 제약하는 것임. 이러한 규제는 사업자의 합리적 권한을 침해할 수 있으며 위험 소지가 있다는 점에서 문제로 지적됨.
 - 나아가 특별법 시행으로 부지 내 저장시설 증설이 제한되면서 2030년 이후 순차적으로 포화가 예상되며, 기술 외적인 이유로 사용후핵연료 관리가 시급한 문제로 변질되고 있음.
- 또한 특별법은 직접처분 부지 확보를 위한 법적 기반을 마련하는 것이 주목적으로, 사용후핵연료의 재활용 여부 등 국가 사용후핵연료 관리 및 핵연료주기 정책의 불확실성을 해소하지는 못함.

02 사용후핵연료 관리에 대한 제언

■ 국가 사용후핵연료 관리 정책의 결정

- 원자력발전의 지속 가능성을 확보하고 사용후핵연료 관리에 대한 미래 세대의 부담을 경감하며, 나아가 에너지 자원 활용을 극대화하기 위해서는 현재의 관망(Wait & See) 기조에서 벗어나 보다 능동적이고 전략적인 정책 결정이 필요하다.
- 직접처분을 위한 영구처분장 확보는 정부 계획대로 차질 없이 추진해야 하며, 동시에 처리(재활용) 연구를 병행하여 장기적 자원 활용성을 극대화해야 함.
- 이를 위해 한미 원자력협정의 제한 조항을 개정하거나 미국의 장기동의를 확보하는 것이 핵심 과제임.
- 또한, 사용후핵연료 관리 전반에 대한 국민과 국제적 신뢰를 얻기 위해 투명한 정책 수립과 사회적 합의 절차를 강화해야 함.

■ 정치적 영향을 배제한 장기적이고 안정적인 정책 추진

- 사용후핵연료 정책은 정권 변화에 흔들리지 않도록 독립적인 거버넌스를 가져야 하며 장기적 지속성과 재정적 안정성이 보장되어야 함.
- 이를 위해 사용후핵연료 관리기금의 독립적인 운영, EU 텍소노미 등 국제기준과의 정합성 확보, 사용후핵연료 처분/재활용 기술의 장기적이고 안정적인 연구환경 조성 및 전문인력 양성을 국가차원에서 뒷받침하여야 함.
- 전문가 집단은 직접처분과 처리(재활용)라는 분야별 이해관계를 넘어 국가 차원의 최적 정책을 수립해야 하며, 대중과의 소통을 통해 과도한 불안을 경계하면서도 최신 연구성과가 정책에 반영될 수 있도록 해야 함.

■ 사용후핵연료 안전관리를 위한 처분, 재활용 기술의 확보

- 사용후핵연료의 재활용 여부와 무관하게 고준위 방사성폐기물의 처분 기술은 필요하다. 고준위 방사성 폐기물을 안전하게 격리하기 위해 우리나라의 지질특성에 최적화된 한국형 사용후핵연료(또는 고준위 방사성폐기물) 처분 개념을 개발하고, 지하연구시설(URL) 등으로 처분 기술을 검증해 사회적 수용성 확보를 추진하여야 함.
- 지속 가능한 원자력발전을 위해서는 안정적인 연료 수급과 사용후핵연료 처분 부담 저감이 가능한

사용후핵연료 재활용 기술을 활용할 필요가 있음. 다만, 위탁재처리와 다자간 파이로 처리 시설과 같은 국제 협력 방안을 적극 활용하고, 재활용 기술에 대한 국제사회의 핵확산 우려를 정치·외교적으로 극복하여야 함.

■ 부지 내 건식저장시설을 확충

- 고준위폐기물 중간저장시설과 영구처분장의 건설이 지연되는 경우에도 원자력발전소의 계속운전을 위하여 부지 내 건식저장시설을 확충하여야 함.
- 특히 사용후핵연료 저장용량의 조기포화가 예상되는 한빛, 고리, 한울원전 부지에 건식저장시설을 적기에 구축할 수 있도록 정부는 제도적 지원을 아끼지 말아야 할 것임.

참고문헌

- 김영호(2020). “사용후핵연료 저장시설의 안전설계 방향”, 세계원전시장 인사이트 2020. 10. 23, 한국에너지경제연구원.
- 문주현(2025). “글로벌 에너지 대전환기 속 국내 에너지 안보 강화를 위한 한·미 원자력협정의 개정 방향”, 국가전략, 제31권 4호, 세종연구소, pp. 47~73.
- 산업통상자원부(2023). “사용후핵연료 저장시설 포화시점 1~2년 단축 전망(2021.12월 대비)”, 보도자료 2023.2.10.
- 열린원전운영정보(2025). “사용후핵연료 저장현황('24.4분기 기준)”, 한국수력원자력(주).
- 한국원자력학회 원자력이슈위원회 핵연료전문위원회(2025). “핵연료 주기기술 현안 진단과 해결방안 정책제언”, 한국원자력학회 보고서, KNS(I)-001-2025, p. 6.
- Delay Jacques., Huret Emilia., Armand Gilles., Salsac Marie-Delphine., Dewonck Sarah., Bosgiraud Jean-Michel. (2020). “ANDRA’s Underground Research Laboratory in Bure: Major Role in the Cigeo Development-20005”, WM Symposia (2021) Proceedings. Tempe, AZ.
- Freeze, G., M. Voegelé, P. Vaughn., J. Prouty., W.M. Nutt., E. Hardin., and S.D. Sevougian.(2013). “Generic Deep Geologic Disposal Safety Case”, SAND2013-0974P, FCRD-UFD-2012-000146 Rev. 1, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Fries, T., Claudel, A., Weber, H., Johnson, L., Leupin, O.(2008) “The Swiss Concept for the Disposal of Spent Fuel and Vitrified HLW”, Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository, International Conference.
- IAEA(1991). “Guidelines for the Operation and Closure of Deep Geological Repositories”, IAEA-TECDOC-630.
- IAEA(1995). “The Management of Radioactive Waste: A Safety Guide”, IAEA Safety Series No. 111-F
- IAEA(1999). “Maintenance of Records for Radioactive Waste Disposal”, IAEA-TECDOC -1097.
- IAEA(2001). “Monitoring of Geological Repositories For High Level radioactive Waste”,

- IAEA-TECDOC-1208.
- IAEA(2003). “Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes”, TRS 413.
- IAEA(2019). “Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes”, IAEA-TECDOC-6568
- Kari, M., Kojo, M., Lehtonen, M.(2021). “Role Of The Host Communities In Final Disposal Of Spent Nuclear Fuel In Finland And Sweden”, Progress in Nuclear Energy.
- NDA(2016). “Geological Disposal – Generic Post-Closure Safety Assessment”, DSSC-321-01, Nuclear Decommissioning Authority.
- NWMO(2010). “Moving Forward Together: Process for Selecting a Site for Canada’s Deep Geological Repository For Used Nuclear Fuel”, Nuclear Waste Management Organization
- NWMO(2023). “Implementing Adaptive Phased Management 2023-27”, Nuclear Waste Management Organization
- OECD-NEA(2000). “An International Peer Review of Safety Report 97: Post-closure Safety of a Deep Repository for Nuclear Spent Fuel in Sweden”, NEA No. 2468.
- OECD NEA(2002). “The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety of Deep Geological Disposal”, Workshop Proceedings, NUCLEAR ENERGY AGENCY
- OECD-NEA(2015). “Fostering a Durable Relationship Between a Waste Management Facility and its Host Community”, NEA No. 7264
- OECD-NEA(2024). “Characteristics of a Trusted Nuclear Regulator”, NEA No. 7618
- Setzman, E.(2014). “Preparing for Implementation, Construction and Public Support / the Added Value Programme-14508”, WM2014 Conference
- The Antarctic Treaty(1991). “Protocol on Environmental Protection to the Antarctic Treaty (Madrid Protocol)”.
- Wikberg, P.(2020). “Status of the Swedish Nuclear Waste Disposal Programme”
- Seiji Takeda., Naofumi Minase., Hideo Kimura.(2004). “Probabilistic safety assessment for HLW disposal system”, Imprint Title: Proceedings of the 7th NUCEF seminar, pp. 133~134.
- NWMO(2025). Guiding principles, <https://www.nwmo.ca/site-selection/how-it-was-developed/guiding-principles>

Trading Economics(2025). 우라늄 정광 현물시장 가격 추이, <https://ko.tradingeconomics.com/commodity/uranium>, TRADINGECONOMICS.

KAST Research Report 2025
한림연구보고서 156

우리나라의 사용후핵연료 관리 기술 및 정책에 대한 견해

Perspectives on Spent Nuclear Fuel Management Technologies and Policies in Korea

발 행 일 2025년 12월

발 행 처 한국과학기술한림원

발 행 인 정진호
전화 031) 726-7900
팩스 031) 726-7909
홈페이지 <http://www.kast.or.kr>
E-mail kast@kast.or.kr

편집/인쇄 경성문화사 02) 786-2999

I S S N 2799-5135
977-2799513-00-9 56

- 이 책의 저작권은 한국과학기술한림원에 있습니다.
- 한국과학기술한림원의 동의 없이 내용의 일부를 인용하거나 발췌하는 것을 금합니다.

