

[2022 한국원자력학회 춘계 Workshop]
사용후핵연료 관리 기술개발 현황 및 추진 방향



사용후핵연료 처리 기술개발 현황 및 추진 방향

2022년 5월 18일(수)

류 재 수
핵주기공정연구부

한국원자력연구원

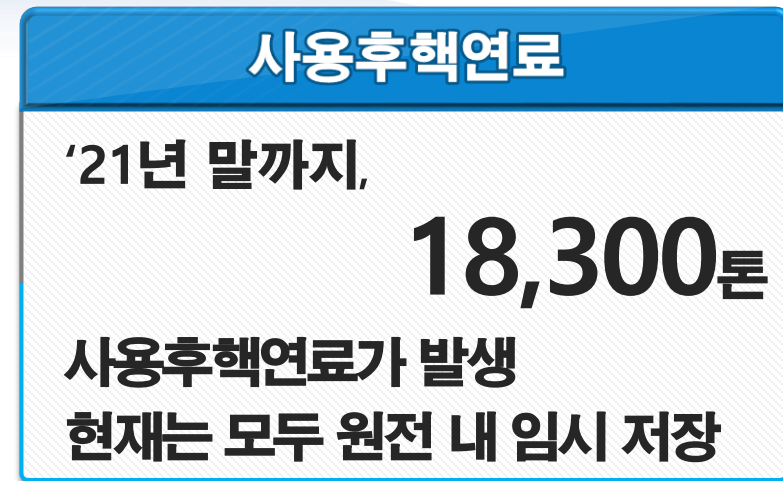
CONTENTS

- I . 추진 배경
- II . 주요 연구 성과
- III . 향후 연구개발 방향
- IV . 결론 및 제언

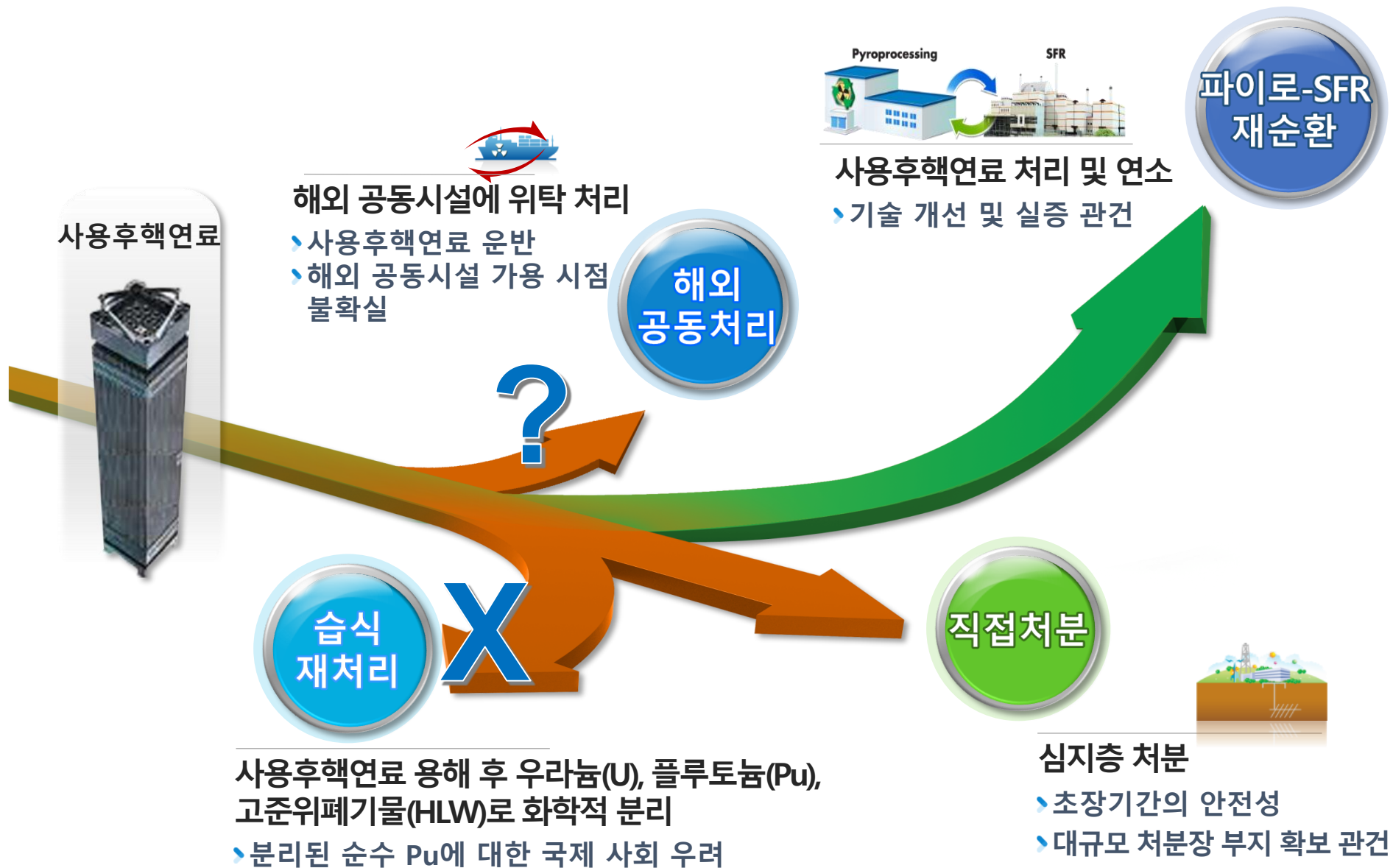
I. 추진 배경



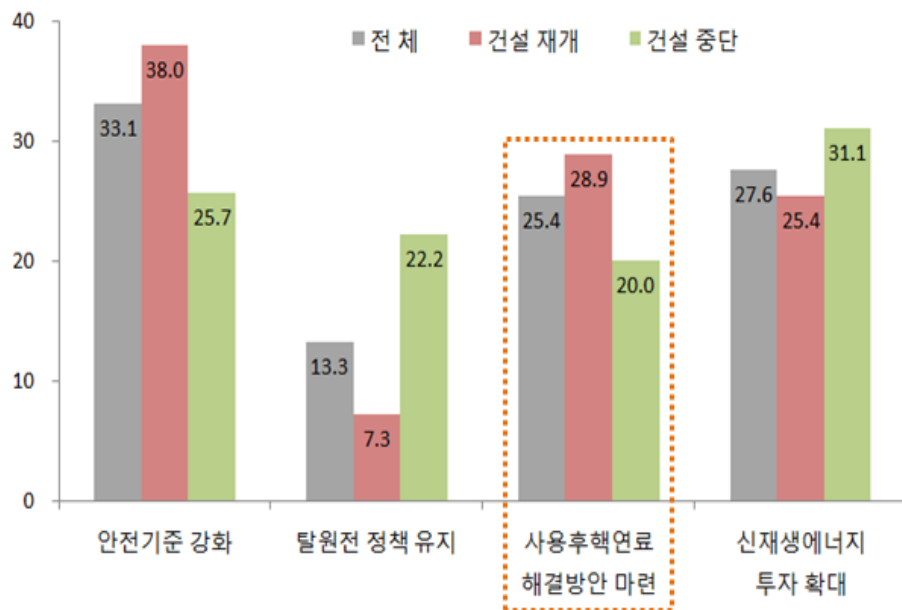
현재 운전/건설 중인 원전에서
~38,400톤* 사용후핵연료 발생 예상
윤석열 정부에서 원전 이용 확대 시 발생량 확대 예상
효율적인 사용후핵연료 안전관리 정책은?



*: 경수로 26,700톤, 중수로 11,700톤 (제8차 전력수급기본계획)



사용후핵연료 해결방안 마련의 중요성을 인식 재순환 처분과 같은 대안 기술에 대해 긍정적 입장



신고리 5·6호기 공론화 시민참여형 조사 보고서, 2017.10.20

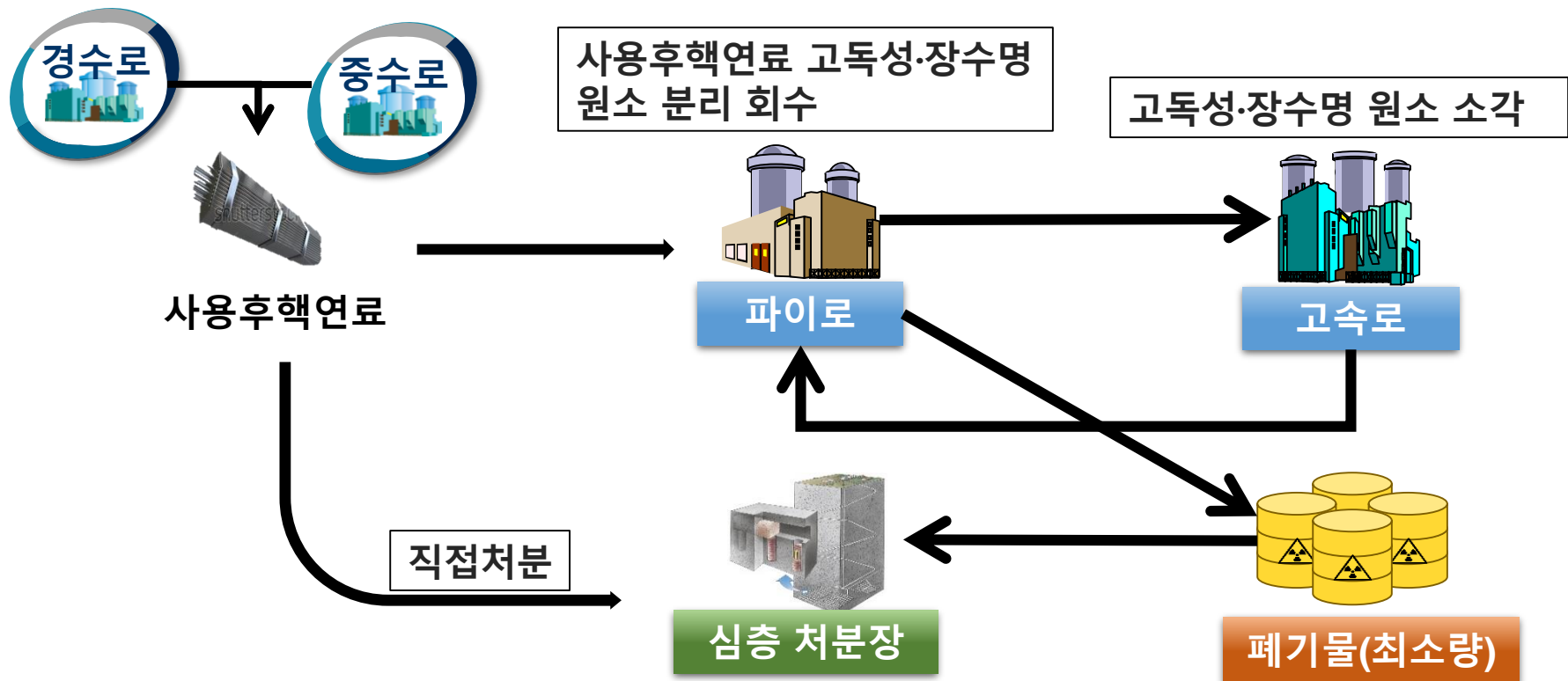
Q10: 사용후핵연료 재순환에 대해 선생님께서는 어떤 입장을 취하시겠습니까?



‘한-미 사용후핵연료 국민 인식 조사 결과 비교’,
2014.4, 사용후핵연료 공론화위원회 대변인

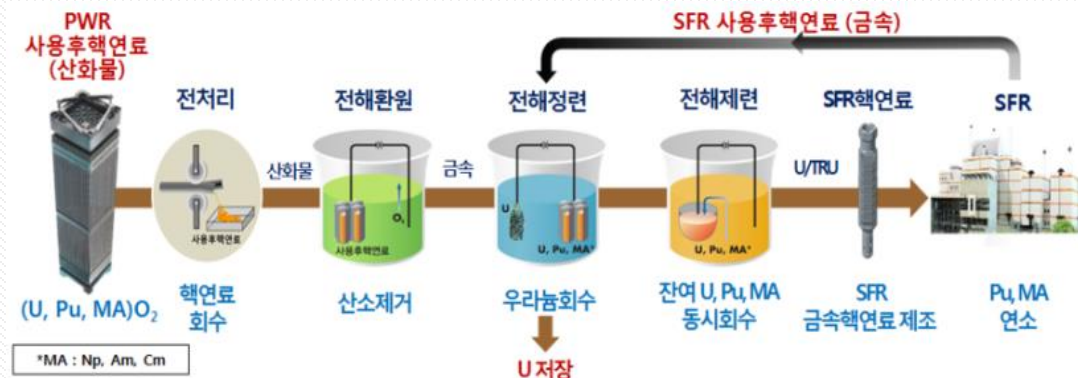
개발 목적

- ▶ 사용후핵연료 처분 부담 경감(부피/독성 저감)을 위한 파이로-고속로 시스템 적용에 필요한 기술성 · 경제성 · 환경성 · 안전성 차원의 자료 제공
 - 직접처분 대비 폐기물 양과 처분 면적을 획기적으로 저감
 - 직접처분 대비 방사성 독성 감소 기간 저감



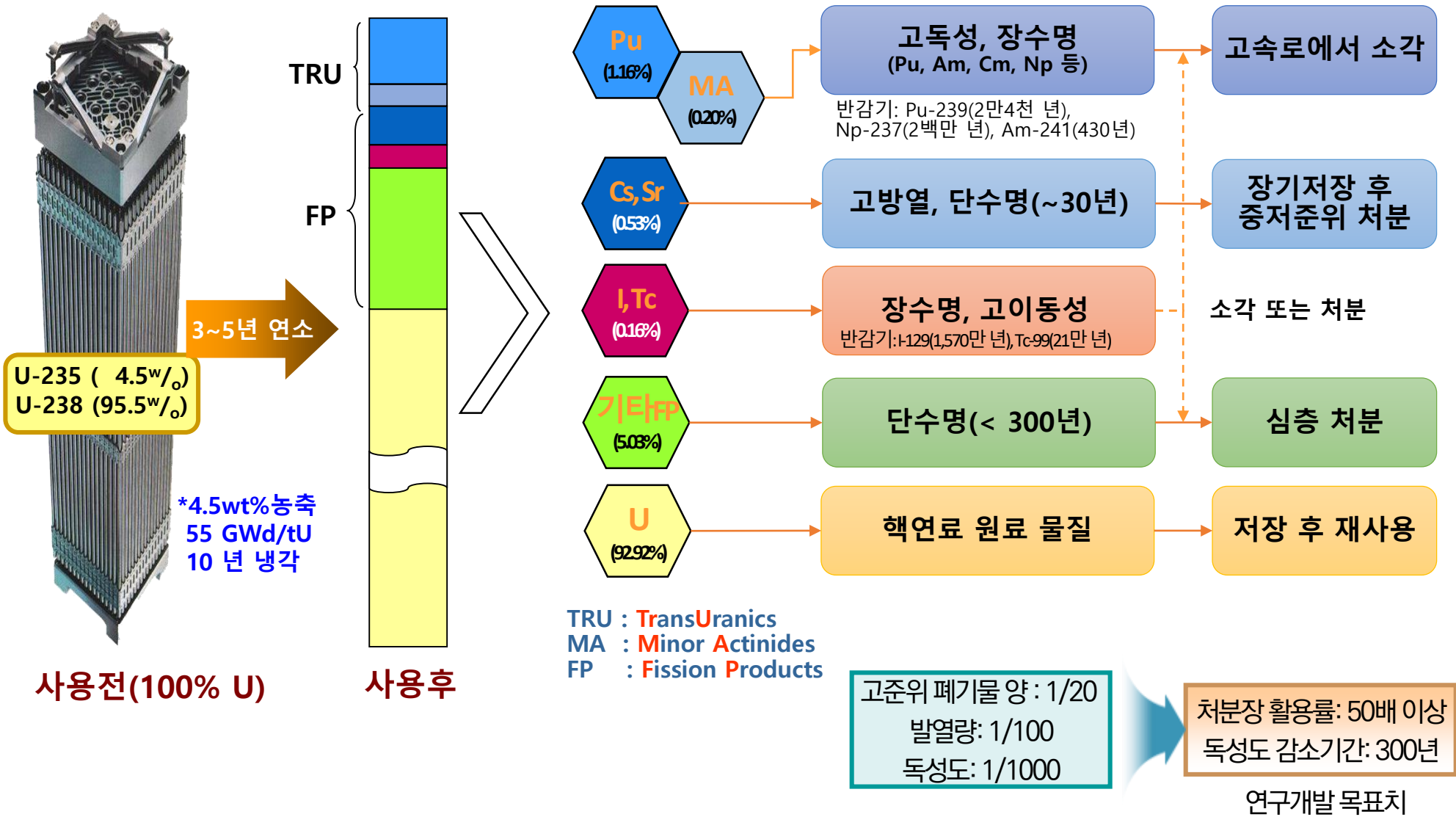
기본 원리

- ▶ 파이로는 고온(500~650°C) 용융염 매질(LiCl, LiCl-KCl) 내에서 전기화학적 방법을 이용하여 사용후핵연료로부터 우라늄(U)과 초우라늄 원소(TRU) 등의 핵연료 물질을 회수하는 기술
- ▶ 고방열 핵종(Cs, Sr)도 별도 분리/저장 가능



주요 특징

- ▶ **(핵비확산성)** 습식재처리방식과는 다른 기술로, 전기 화학적 특성상 고순도의 플루토늄 회수가 매우 어려움
- ▶ **(안전성)** 파이로 공정은 소규모 회분식(Batch) 장치를 독립적인 핫셀에 배치하므로, 습식공정에 비하여 선원향이 상대적으로 적고 임계 사고와 시설 전체로의 사고 확산 가능성이 낮아 안전성이 높음
- ▶ **(환경친화성)** SFR과 연계하여, 사용후핵연료 내 고독성 장수명원소를 회수하여 고속로에서 소각하고, 열을 많이 내는 Cs과 Sr 방사성물질을 별도 처리 및 관리함으로써, 환경친화성의 극대화
- ▶ **(경제성)** 습식 대비 공정이 단순하고 시설이 소규모로, 상용화 시 습식에 비해 동일 용량 대비 경제성 우수 예상



II. 주요 연구 성과



〈제1,2차 원자력진흥종합계획〉('97~'06)

〈제225차 원자력위원회〉('08.12)

〈제1차 원자력진흥위원회〉('11.11)

- ▶ ('97~'06) 소규모 과제 중심의 기초 단위 연구 수행
- ▶ ('08) 미래원자력시스템 개발 장기 추진계획 수립
 - ※ 종합 파이로 시설(KAPF) 건설 완료('25년), 실증로 표준인가 및 건설('28년) 목표
- ▶ ('11) 미래원자력시스템 개발 장기 추진계획 수정
 - ※ 공학규모시설 건설 취소, 한미공동연구로 기술검증, 실증로→원형로, 표준설계→특정설계

〈재검토 위원회〉('17.12~'18.3)

〈JFCS 10년 보고서 승인〉('21.7)

〈적정성 검토 위원회〉('21.9~12)

- ▶ ('17~'18) SF 처리기술 R&D사업 추진여부 결정을 위한 재검토위원회 운영
 - ※ '20년까지 파이로-SFR 사업 추진 후 '20년 이후 지속 여부는 재 판단 권고
- ▶ ('21) 한미는 파이로 10년 공동연구결과를 담은 'JFCS 10년 보고서' 승인
 - ※ 파이로의 기술성, 경제성 및 핵비확산성에 대한 연구결과
- ▶ ('21) 사용후핵연료 처리기술 연구개발 적정성 검토위원회 운영
 - ※ 파이로-고속로가 기술성, 안전성 및 핵비확산성을 갖춘 관리 기술로 가능성 있다고 판단

〈제10차 원자력진흥위원회〉
('21.12.27)

- ▶ ('21) 적정성 검토위 권고를 바탕으로 SF 처리기술 연구개발 지속 의결
 - ※ (단기) 공백원천기술 확보 및 한미 간 고연소도 사용후핵연료 연구 추진
 - ※ (중장기) 실증.상용화 연구는 성과 점검 및 JFCS 완료 후 국내 정책 상황 고려 추진 검토

목표 : 사용후핵연료 처리 타당성을 검증하기 위한 파이로 핵심기술 개발

기술성

- » 공학규모(kg/회) SF 시험으로 기술성 평가
- » TRU 그룹 회수 핵심기술 개발
- » 기술적 타당성 입증

안전성

- » 파이로 공정/시설의 안전성 확인

현

안

경제성

- » 상용규모(연 400톤) 경제성 평가
- » 국내 환경 고려 종합평가
- » 직접처분 대비 경제성 확인

핵확산
저항성

- » 중간규모(연 30톤) 핵비확산 수용성 평가
- » 파이로 안전조치 가능성 확인

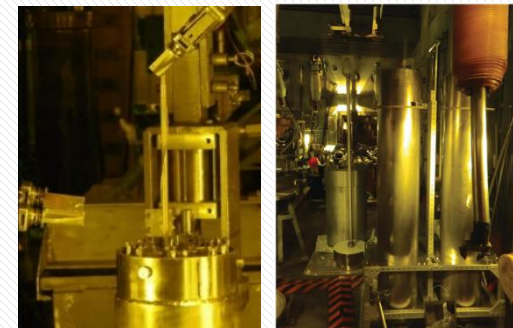
기술자료
제공

타당성
평가

- » 한미원자력연료주기공동연구(JFCS)를 통한 실증자료 생산
- » 재순환 처리 기술 타당성 평가를 위한 핵심 기술 개발 주력
- » 국내 기 구축된 시험 시설을 활용한 연구개발 수행

성과내용

- ▶ 파이로 쏠 공정기술을 실제 사용후핵연료 공학규모 처리시험으로 확보
 - 공학규모 파이로 공정으로 실제 산화물 사용후핵연료로부터 TRU 회수
 - 파이로로 회수한 TRU로 재순환 금속핵연료 제조, 조사시험으로 성능 검증 성공
- ▶ 파이로의 기술적 타당성, 경제적 실현가능성, 핵비확산 수용성 검증
 - 실험실 규모 파이로 공정시험으로 파이로의 기술적 타당성을 실험실 규모에서 확인
 - 실제 사용후핵연료를 사용한 공학규모 시험으로 파이로 타당성 검증자료 (JFCS 10년 보고서) 확보



성과 의의

- ▶ 세계 최초로 실제 산화물 사용후핵연료를 사용한 파이로 쏠 공정을 공학 규모로 실증함으로써, 파이로 타당성 확인을 위한 검증자료 확보

성과내용

- ▶ 독자 기술로 구축한 세계 최대 규모(50kg/회) 파이로 일관공정 모의시험시설
 - 자체 개발한 주요 공정기술(흑연음극 등)로 구축
 - 회당 50kg의 핵물질을 처리 가능: 세계 최대 규모(일본의 10배)의 시설
- ▶ PRIDE에서 파이로 용량 증대 기술 및 IAEA 안전조치기술 개발
 - 모의핵물질로 파이로 전(全)공정(전처리→전해환원→전해정련→전해제련) 용량 증대 검증 및 혁신기술(흑연 양극, 텅스텐 음극 등) 검증
 - IAEA는 PRIDE를 이용한 사찰관 교육 프로그램 운영 중



성과 의의

- ▶ 국내 시설을 활용하여 모의핵연료를 사용한 공학규모 공정시험으로 향후 파이로 용량증대 가능성 확인

		기초연구		실험		시작품		제품화		사업화
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
		기초이론실험	실용목적 개념검립	실험실규모 기본검증	실험실규모 성능평가	시작품제작	시작품 제작성능평가	산외성평가및 수요기업평가	시제품인증및 표준화	사업화
공정 기술	전처리	'97~'11	'12~'17			'18~'20				
	전해환원	'97~'11	'12~'17							
	전해회수(정련, 제련)	'97~'11	'12~'17							
	금속핵연료 등	'12~'17								
시설 기술	시설설계	'97~'11	'12~'17		'18~'20					
	공정 자동화	'12~'17	'18~'20							
안전 조치 기술	시스템 설계	'97~'11	'12~'17		'18~'20					
	계량/모니터링	'97~'11	'12~'17	'18~'20						

※ 기술수준(TRL): 미국 NASA의 우주개발 프로그램의 기술수준 평가에 사용된 방법

» '97년부터 '20년까지(24년) 연구개발 수행

기초부터 공학규모까지 공정기술 개발



1997~ 2011

공학규모 기술 검증



2012~2020

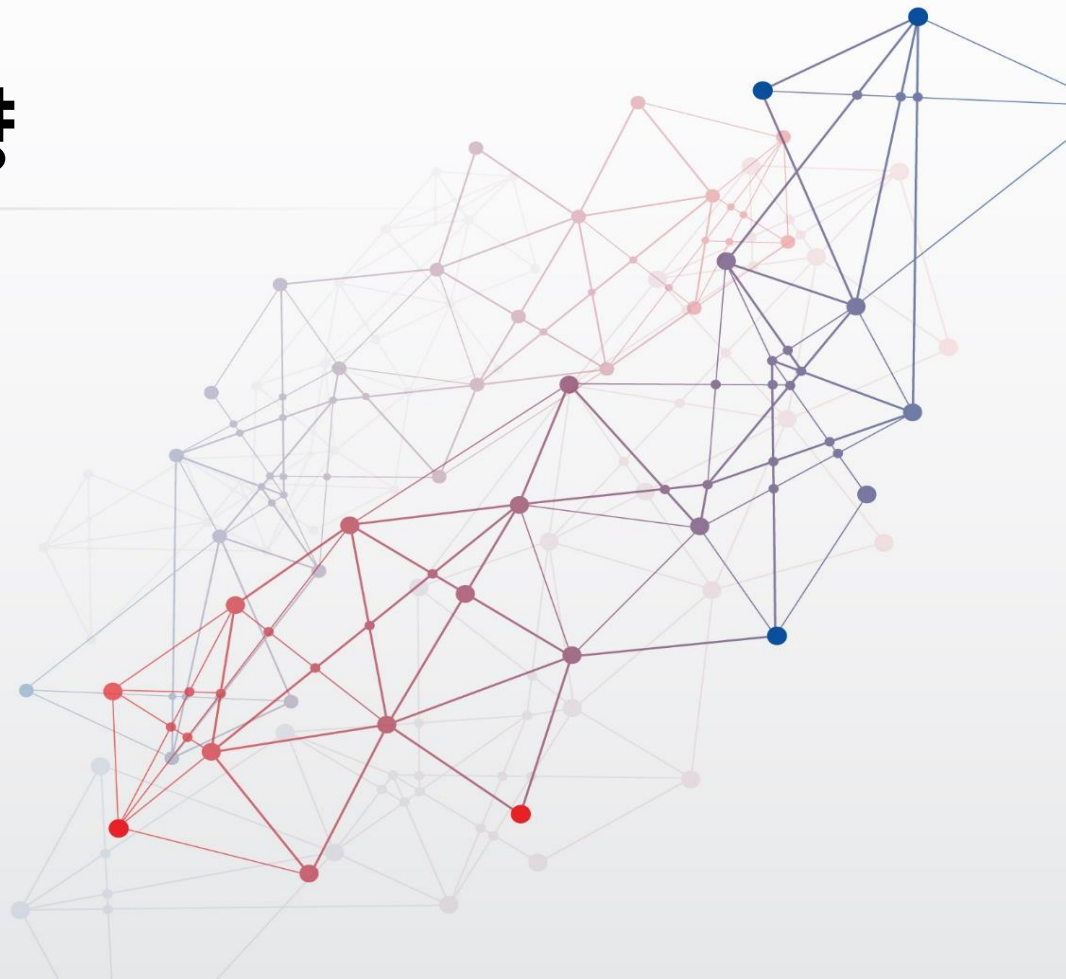
자동화 및 모듈화 기반
국내 실증 연구 추진

'21 2022~
[국내 재검토]

한미 원자력연료주기 공동연구('11~'21)



Ⅲ. 향후 연구개발 방향



현재 기술의 한계

- ▶ 공학규모 기술 타당성은 확인하였으나, 공정 조건 최적화 및 공정간 연계성 강화 필요
- ▶ 공정 전체 과정의 단기간(수년) 성능은 검증하였으나, 시설 수명(60년)에 부합하는 공정 장기 운전성에 대한 추가 검증 필요
- ▶ 핵물질 계량관리 중심의 안전조치 기술로 안전조치 적용 가능성은 확인하였으나, 상용시설 안전조치를 위해서는 성능 개선 필요

해소방안

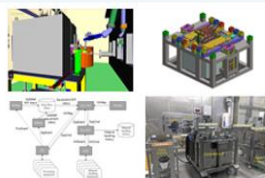
- ▶ 국내 파이로 기술 실증을 위해 공정과 계량/모니터링/운전 제어를 연계한 선진 안전조치 기술을 개발하여 고유 핵비확산성을 확보하고 국제 협력(한-미-IAEA 등)을 통한 성능 입증
- ▶ 파이로 실증에 필요한 미확보 공백기술을 도출하고 집중적인 연구개발을 통해 파이로 실증 전 필요기술 확보 -> 자동화 및 모듈화 기반의 파이로 기술 실증

최종 목표 '30년대말 사용후핵연료 관리 정책 결정을 위한 기술 실증 자료 생산

파이로

고도화를 통한 공정효율개선 및 핵비확산성 강화 기술

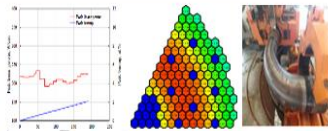
- 파이로 공정 최적화 기술
- 파이로 핵비확산 강화기술
- 파이로 모듈형 단위공정 개발



소각로

TRU 핵연료 제조/TRU 노심 안전성 검증기술 고도화 및 소듐위험도 저감용 이중배관 구조 건전성 검증

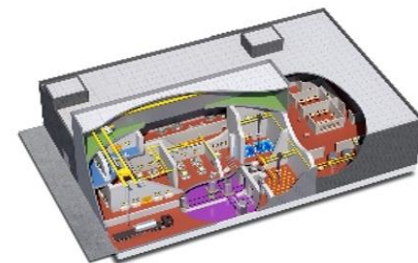
- TRU 핵연료 및 피복관 제조 기술
- TRU 소각로 안전성 검증기술



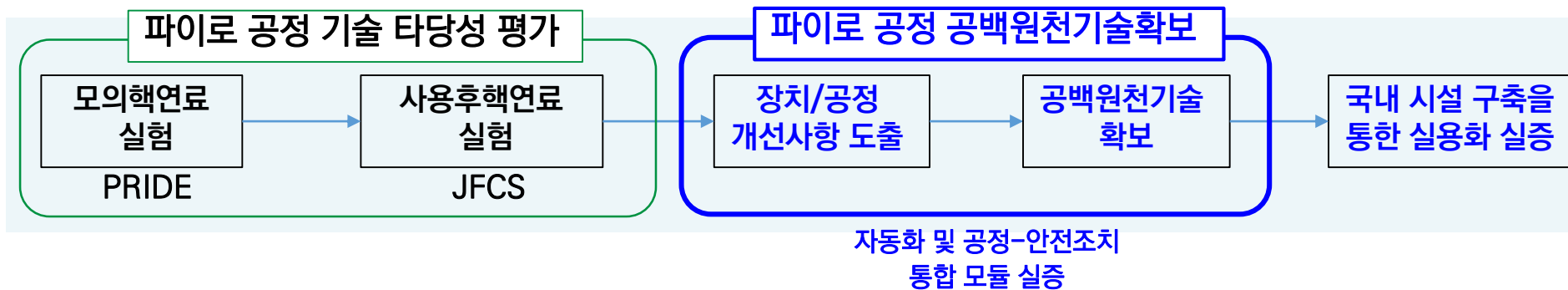
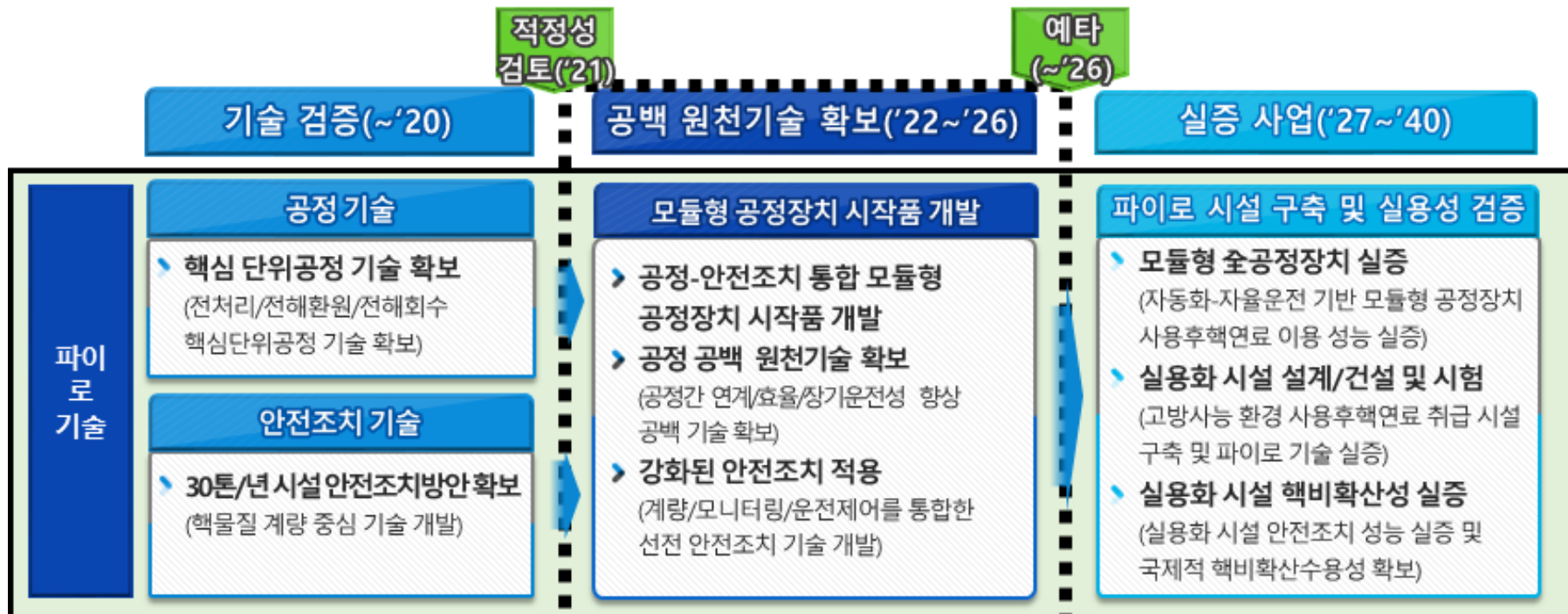
공백 원천기술
확보

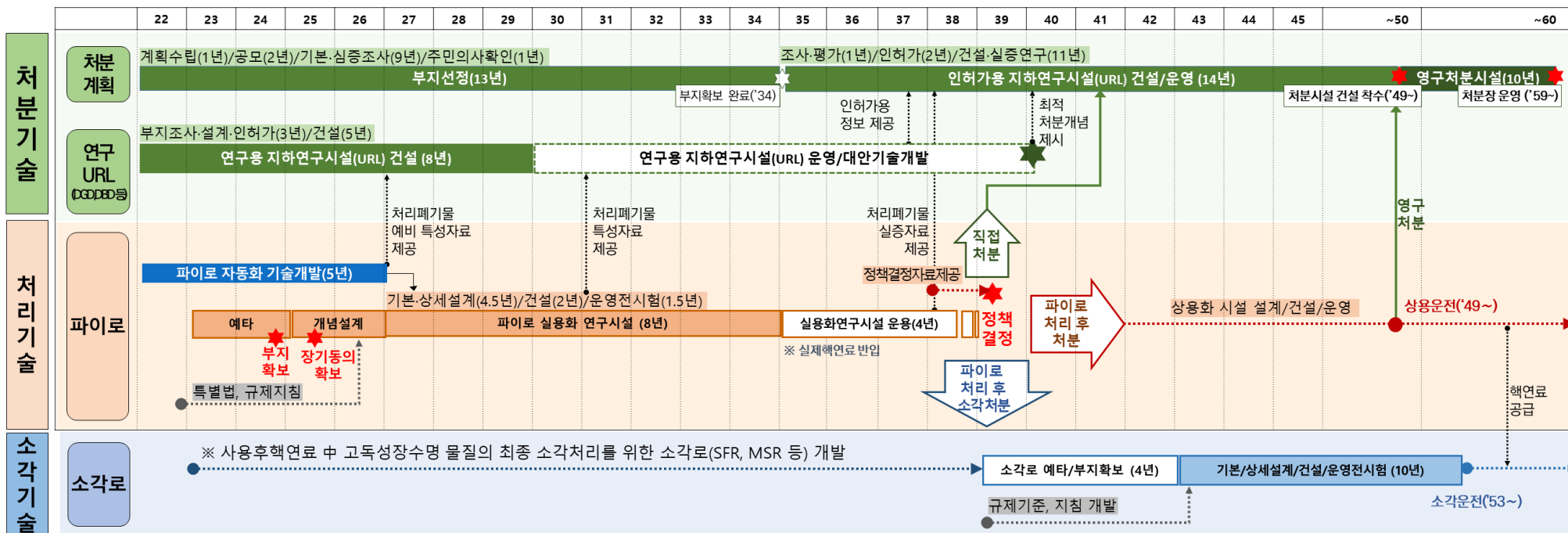


기술 고도화



사용후핵연료
처리기술
실증기반 마련





※ 제2차 고준위방폐물관리 기본계획 일정에 차질이 없도록 직접처분 연구와 파이로 연구를 병행하고, 2038년까지 최종 정책 결정에 필요한 파이로 연구결과를 제공: 국민 가장 좋은 방안을 국민이 선택할 수 있도록 추진

- 윤석열 정부 내에서 사용후핵연료 관리 정책 결정이 이루어질 경우, 사용후핵연료 관리 특별법 제정을 통해 Rolling Plan으로 4~5년마다 기술개발 결과를 평가하여 최종 정책 결정에 필요한 자료 제공

IV. 결언 및 제언



- » **사용후핵연료 직접처분은 현재 안전한 기술로 평가되나, 국민수용성 제고 차원에서 SF를 효율적으로 관리하고 처분장 효율을 극대화할 수 있는 '처리 대안기술' 확보 필요**
 - 대안기술로 파이로를 통해 고준위폐기물 양을 저감하고, SF 내 '장수명 고방사성 원소'를 소각 처리하여 사용후핵연료 처분 부담을 최소화
 - 파이로 기술 자체만으로도 대안 처분을 위한 다양한 옵션을 제공 가능
- » **핵심 후보기술들에 대한 충분한 기술개발 및 검증을 바탕으로 과학적 근거 하에 “국가가 SF 최종 관리정책을 결정할 수 있도록 '사용후핵연료관리 특별법'에 저장/처분과 함께 연구개발 차원에서 처리를 포함”**
 - 파이로 기술은 이제 실증단계로 진입한 상황으로, 법 제정을 통해 정권교체와 상관 없이 안정적으로 효율적인 SF 관리 기술의 실증자료를 산출할 수 있는 기반 마련 중요
- » **특히, EU 택소노미의 핵심은 사회/환경적으로 부담이 최소화된 순환 경제로, 향후 K 택소노미에 원자력이 포함되는 논의 과정에서도 사용후핵연료 처분 부담 최소화와 재활용의 기반을 제공할 수 있는 파이로 기술개발은 필요**

미래를 위한 원자력

Thank you for your attention
Clean Energy! Clean Korea!

