

원전 해체 R&D 현황 workshop

KAERI 해체 R&D 추진 현황 및 방향

2017. 05. 17.(수)



韓國原子力研究院
Korea Atomic Energy Research Institute

서 범 경

해체 R&D 추진 현황

해체 핵심기술 개발 목표 및 로드맵

최종 목표

원자력시설 해체 핵심 기술 확보 및 실용화 기반 구축



해체 단위기술

- 원자력 연구시설 해체 적용 기술
(연구로1&2/변환시설)
- 고방사능 시설
제염/해체 단위 기술

해체 핵심 기술

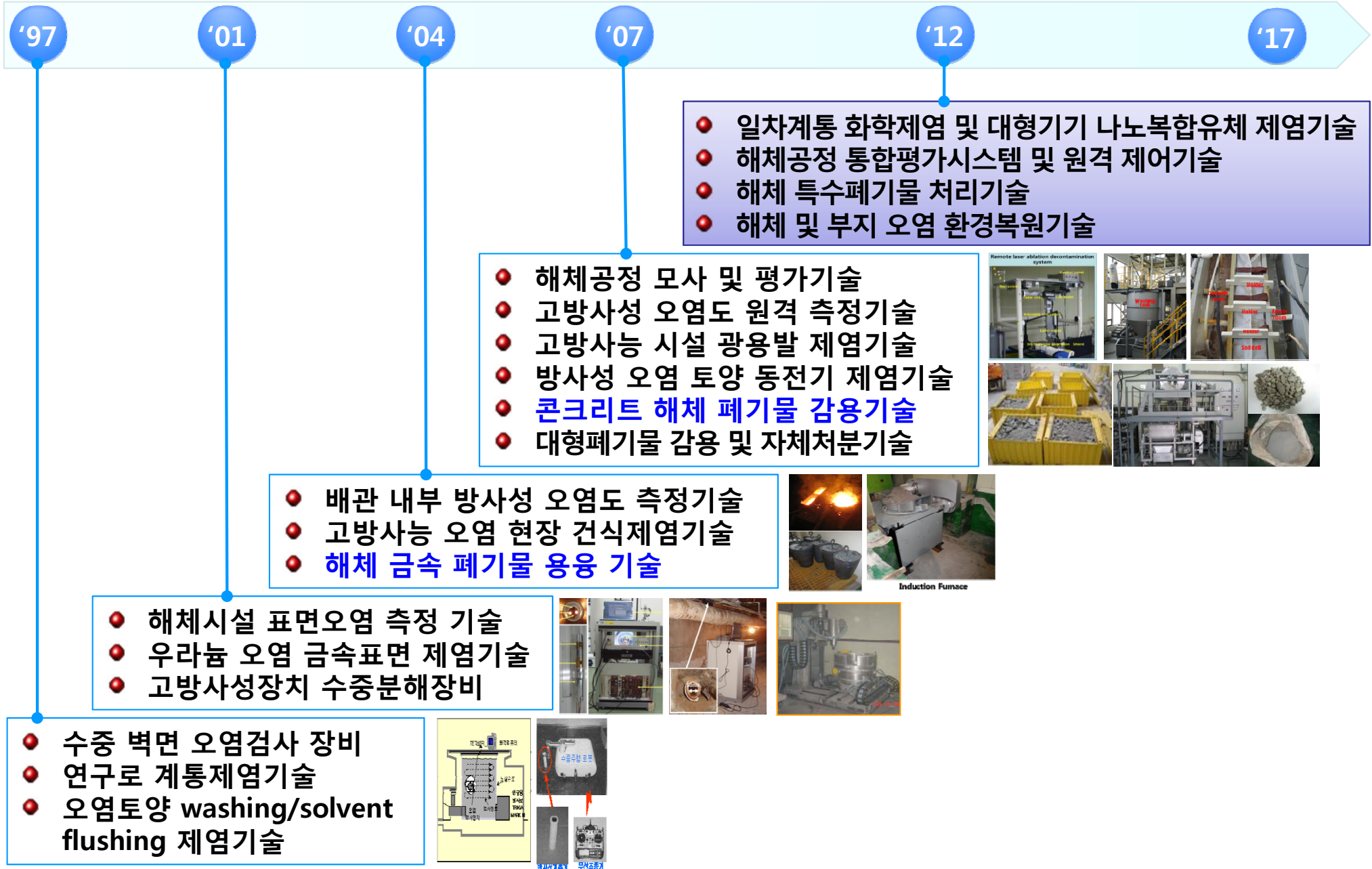
- 방사선학적 특성평가 시스템
- 원전 일차계통 제염기술
- 원격 절단 및 해체 시스템
- 해체 폐기물 처리 시스템
- 부지복원 시스템

기술
고도화
및 검증

기술 실용화

- 국내 원전 해체
- 원자력시설 개선·보수
- 해외 수출
- 북핵시설 해체 대비

기술개발 추진 현황(1997-)





주요성과 요약

- **방사선/능 측정** – 해체 대상 시설 및 폐기물 방사선/능 측정기술
- **화학제염** – 이차폐기물 저감 친환경적 원전 일차계통 및 벽면 제염기술
- **해체공정 통합평가 및 원격절단** – 원전 핵심설비 최적 해체공정 평가 및 원격절단 단위기술
- **해체 폐기물 처리** – 콘크리트, 금속, 및 난처리성 해체특수폐기물 특화 처리 기술
- **부지 재이용 안전성 평가 및 오염도 측정** – 해체 부지 재이용을 위한 평가 및 오염도 측정 기술

해체 대상 및 폐기물 방사선/능 측정

■ 방사선 측정

- 해체 시 작업구역의 **방사선량률 및 표면오염도 측정**
 - ➡ 작업자 피폭관리, 해체 공정 안전성 평가에 활용

■ 방사능 측정

- 방사능 현장 측정 : 해체 전 **대형 구조물** 및 시료채취가 어려운 **복잡한 형상**의 해체 대상물의 **비파괴 현장 측정**을 통한 방사능 농도 평가
- 시료 채취 후 방사능 측정 : 폐기물 및 부지 **규제해제** 등 **정확한 농도 필요 시** 대표시료 채취 후 실험실 측정



공간 및 폐기물 표면
방사선량률 측정



직접



간접

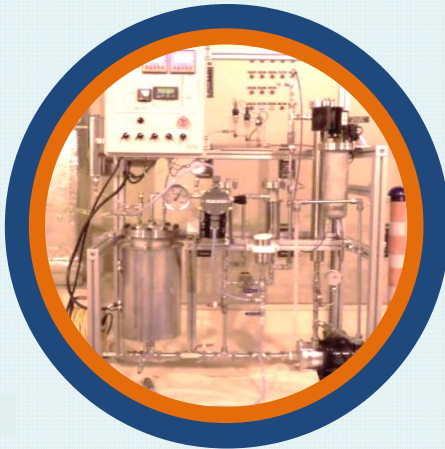
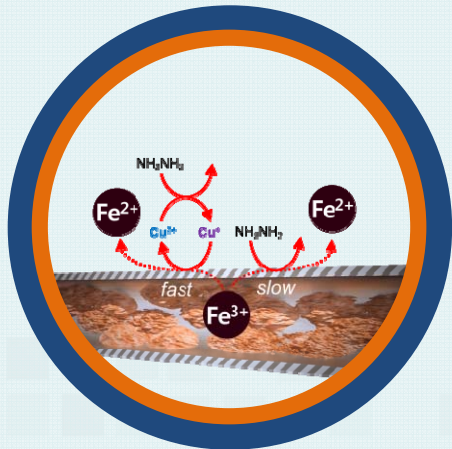


대형 구조물 등의
비파괴 현장 측정



시료채취 후
실험실 방사능 측정

원전 일차계통 화학제염기술



국내 독창적 화학제염제 개발

- 무기산 기조 HyBRID* 제염기술 개발(국내외 특허 등록)
 - Cu이온 함유 제염성능 보강
 - 처분안전성 향상
 - 제염 폐기물발생량 저감

Fe & Ni 주성분의 부식산화막
환원 용해 및 Cu⁺ 재생
(Reductive dissolution)

$$\text{Ni}_3\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4 + 8\text{H}^+ + 2\text{Cu}^+ \rightarrow (3-x)\text{Fe}^{2+} + x\text{Ni}^{2+} + 2\text{Cu}^{2+}$$
 (Cu⁺ regeneration)

$$\text{N}_2\text{H}_5^+ + 4\text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{N}_2 + 5\text{H}^+ + 4\text{Cu}^+$$



- Cu이온 함유 부식저감 산화제염 기술 개발(국내외 특허등록)

HyBRID 기술 현장적용성 확보

- 벤치규모 제염공정 시험장치** 구축
- 방사성 오염시편 제염 성능평가수행
 - FTL시편제염 (DF > 200)
 - FTL계통제염 (공간선량45%이상감소)
 - 고리원전인출I600제염 (DF > 5)
 - 한울원전인출SS-316제염 (DF > 20)



해체 시뮬레이터 및 매니퓰레이터



해체공정 통합평가 시스템 확보

- 원격절단 평가인자 도출을 통한 경제성 평가 체계 개발 (산출 평가인자 정확도 ±10%)
- 공정 시뮬레이션 플랫폼과 통합 연동되는 원격절단 통합평가 시스템 단위 모듈 개발
- 비용 및 안전성 기반 해체공정 평가 기술 개발
- 다양한 해체 시나리오에 대한 통합평가 시스템의 검증 수행

고하중 고정밀 매니퓰레이터 개발

- 모듈형 유압 구동 매니퓰레이터 개발(가반하중 250kg)
- 모터와 센서 일체형 유압 구동 액추에이터 개발
- 고하중 취급 매니퓰레이터의 제어 시스템 개발
- 250kg 가반하중 하에서 궤적 추종 오차 (< 1mm)

*Hydrazine Based Reductive metal Ion Decontamination

** 성능평가항목: 농도, 온도, pH, 유속, 제염유료, S/V 등

해체 특수폐기물 처리



유기혼성 폐기물 처리 장치



우라늄 복합폐기물 처리 공정도

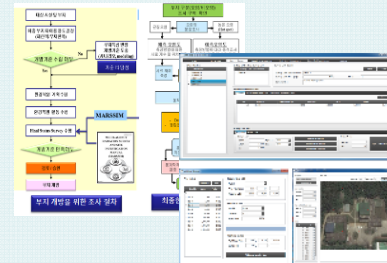
유기혼성 폐기물 처리기술 개발

- 벤치규모(1kg/h) 수증기개질 처리 조합계통 설치
- TBP 분해효율 >99.9%, 감용비 >20 (선진국대비 2배 향상)
 - ▶ 산업체 기술이전(2건) 및 기술지도(2건)

우라늄 복합폐기물 부피감용 공정 개발

- 우라늄 스크랩, 슬러지, 폐촉매 등의 처분 부피 감용 (부피감용율 >50%)
- Target-specific 우라늄복합폐기물 처리공정 개발

부지 재이용 통합평가 및 오염도 측정



부지 재이용 통합 평가시스템



부지 베타/감마 측정시스템

부지 재이용 통합평가 시스템 개발

- 부지특성 및 안전성평가 자료 통합 관리 체계 구축
- 부지 오염분포 가시화, 폐기물량 평가
- 부지개방을 위한 MARSSIM 적용 용이성 확보
 - ▶ 조사설계, 국부오염평가, 자료관리 및 일정관리 자동화

부지 베타/감마 오염도 동시 측정시스템 개발

- 부지 감마 오염도 신속 측정시스템 구축 : 10 ha/day
- 부지 베타 오염도 현장 측정 시스템 구축 : 나노입자 첨가 플라스틱섬광체 이용 검출효율 30% 향상
- 컴프턴 억제형 저준위 측정시스템 구축 : 검출하한값 45% 저감

● TRIGA 연구로 해체 적용기술 개발

- **연구로 해체**를 위한 제염, 절단 및 폐기물 처리기술 확보
 - 연구로 일차계통 화학제염 및 CO₂ 펠렛 분사연마 제염장치 확보
 - 방사화 금속구조물 및 생체차폐 콘크리트 절단장비 개발
 - 금속 및 콘크리트 폐기물 감용기술 확보
- 연구로 해체 사업에 기술 적용
- 연구로 해체 금속/콘크리트 폐기물 감용 처리시설 구축에 기술 활용

● 우라늄변환시설 해체 적용기술 개발

- **우라늄변환시설 해체**를 위한 제염 및 폐기물 처리기술 확보
 - 금속폐기물 규제해제를 위한 전해연마/화학침수 제염기술 확보
 - 우라늄 오염금속 및 콘크리트 폐기물 감용기술 확보
- 우라늄변환시설 해체 사업에 기술 적용
 - 우라늄 오염 SUS 폐기물(53톤) 및 탄소강 폐기물(73톤) 규제해제 대상 폐기물로 전환 (화학침수제염 및 용융기술 적용)
 - 건물 규제해제 후 재이용(PRIDE 시설)

연구용 원자로 해체사업

· 연구로 2호기 (TRIGA MARK-III)

용 량: 2 MWt
운전기간: 1972 ~ 1995
해체기간: 1997 ~ 2009
해체비용: 170 억원



우라늄 변환시설 해체사업

· 핵연료 분말(UO₂) 생산 시설

생산량: 100 ton/year
운전기간: 1988 ~ 1992
해체기간: 2001 ~ 2011
해체비용: 120 억원



해체 R&D 방향

핵심기술 확보

- ◆ 국내 원자력시설 해체 **핵심기술 독자 확보 및 기술 검증**을 통한 해체 역량 강화와 미래 해체시장 준비
 - ❖ 원자력시설 **해체 핵심 기반기술 개발**계획 수립(원자력진흥위, '12.11)
 - ❖ 안전하고 경제적인 원전해체와 원전**해체산업 육성**을 위한 정책방향 수립(원자력진흥위, '15.10)

➤ 당면한 국내 해체문제 해결을 위해 해체 핵심기술 자립 및 집중 투자 필요

- 미확보 해체 핵심기술 위주의 전략적 연구개발
- 국내 해체기술 자립을 위해서는 정부차원에서 최소 10년 정도의 집중투자 필요

➤ 해체 산업 역량강화를 위한 인프라 구축 및 인력 양성 지원 필요

- 인력 양성을 위한 제도 준비 및 산/학/연 역할 정립
- 해체 핵심기술 이전 및 기술 검증을 통한 산업체 활성화 지원 필요

비전

원자력시설 해체기술 자립 및 해체시장 진출 토대 제공

목표

2021

미확보 11개 핵심기술
개발(기확보 27개)

2020 중반

국산 기술로 국내
원전해체 착수

2030년대

세계 해체 시장
진출 토대 제공

중점과제

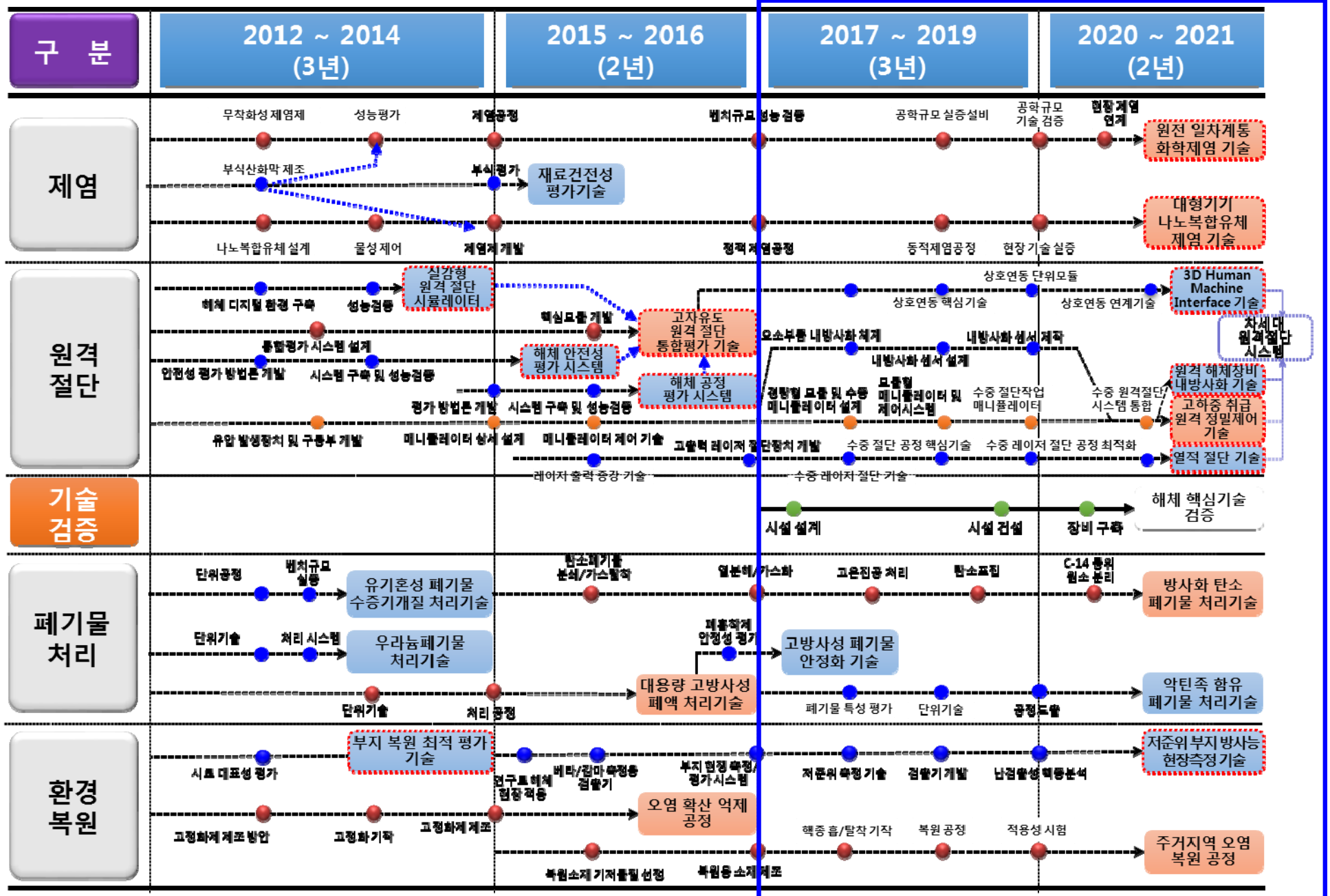
① 핵심 기술
개발

② 인프라/실용
화 기반 구축

③ 해체 전문
인력 양성

④ 국제 기술
협력 확대


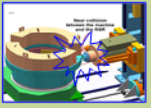
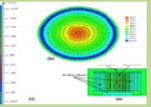





해체 핵심기술 개발 - 로드맵



※ 원자력시설 해체 핵심 기반기술 개발계획 수립(원자력진흥위 '12.11)

해체 핵심기술(38개) 확보 현황

해체 준비

	해체 공정 평가 기술
	해체 안전성 평가 기술
	방사능 재고량 평가 기술
	표면 오염도 측정 기술
	핵종 분석 기술
	환경영향 평가 기술
	방사선 안전관리 기술
	품질 보증 기술

제염

	원전 일차계통 화학제염 기술
	대형기기 나노 복합유체 제염기술
	제염에 의한 재료 건전성 평가 기술
	분사연마 제염 기술
	전해연마/ 화학침수 제염 기술

절단

	원격 해체 장비 내방사화 기술
	고하중 취급 원격 정밀 제어 기술
	3D Human Machine Interface 기술
	열적 절단 기술
	고자유도 원격 절단 통합평가 기술
	실감형 원격 절단 시뮬레이터
	기계적 절단 기술

폐기물 처리

	방사화 탄소 폐기물 처리 기술
	약틴족 함유 폐기물 처리 기술
	유기혼성 폐기물 수증기 개질 처리 기술
	금속 폐기물 절 단 및 제염 기술
	금속 용융 기술
	금속체 방사능 평가 및 재활용 기술
	고방사성 폐기물 안정화 기술
	대용량 고방사성 폐액 처리기술
	유기혼성 폐기물 수증기 개질 처리 기술
	콘크리트 폐기물 재활용 기술
	콘크리트 폐기물 감용 기술
	콘크리트 폐기물 안정화 기술

환경 복원

	저준위 부지 방사능 현장 측정 기술
	주거지역 오염 복원 기술
	광역 오염 확산 억제 기술
	해체부지 복원 최적평가 기술
	부지 규제해체 평가 기술
	오염 토양 처리 기술

확보기술(27개)

전단계 확보기술(10)

미확보기술(11개)

추진배경

- 산업체 참여를 통한 기확보 해체 핵심기술의 검증 및 기술이전

추진전략

- 원전 해체 필요기술 중 KAERI-산업체 시너지 효과를 창출할 수 있는 공동연구 과제 도출
- 원자력 연구시설 해체 경험과 원전 해체 시에 준용할 수 있는 있는 잠재능력을 보유한 산업체를 발굴하여 지속적인 실용화 프로그램 개발
 - 해체기술종합시험시설을 통한 핵심기술 공학규모 검증(KAERI-산업체 공동) 및 폐기물을 이용한 기술 실증(산업체 주도)

추진방법

- 해체 핵심기술 개발 및 실용화 과제 병행 추진
 - KAERI 주도 핵심기술 개발 과제
 - 산업체 주도 실용화 과제
- 기술 검증 및 실용화를 위한 해체기술종합시험시설 구축

분야별 실용화 과제

분야	확보 기술명	연구 내용
방사선학적 특성평가	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 표면오염도 측정기술 ▪ 부지 규제해제 평가기술 ▪ 해체부지 복원 최적평가기술 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 해체 시설/부지 잔류방사선/능 측정 기술 개발 및 검증
원격절단 모사 및 공정평가	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 해체공정 평가기술 ▪ 고자유도 원격절단 통합평가기술 ▪ 실감형 원격절단 시뮬레이터 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 해체 공정 시뮬레이터 구축 및 해체 시나리오 검증
원전 일차계통 제염	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 제염에 의한 재료건전성 평가기술 ▪ 일차계통 화학제염제(HyBRID) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 원전 일차계통 핵심기기 화학제염 기술 검증
해체 폐기물 처리	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 콘크리트 재활용, 감용, 안정화 기술 ▪ 금속 용융 기술 ▪ 유기혼성폐기물 처리기술 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 콘크리트, 금속 및 해체 특수폐기물 처리 기술 검증

해체 핵심기술 개발 계획 - 방사선학적 특성평가



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

해체 전주기에 요구되는 해체 대상 및 폐기물의 방사선학적 특성평가 기술 개발

- 해체 대상 및 폐기물을 효율적으로 관리하고, 처리/처분 용이성 확보를 위한 **특성평가 통합관리 시스템** 개발
- 난분석 핵종 신속.정확한 측정을 위한 **이동형 난분석 핵종 측정 자동화** 기술 개발

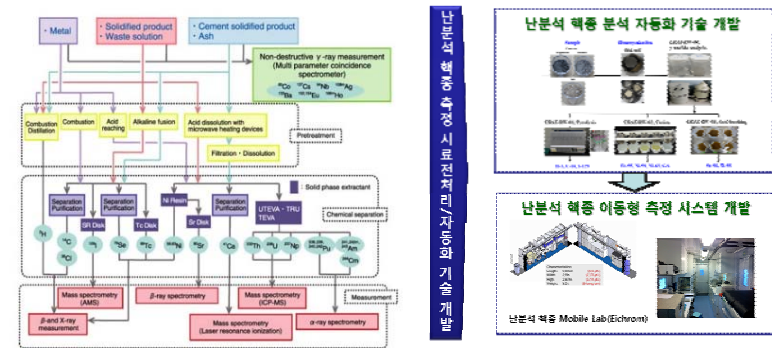
방사선학적 특성평가 통합관리

- 해체 대상 및 폐기물의 방사선학적 특성평가 통합관리 기술 활용 폐기물관리 최적화
 - 폐기물 이력관리, 폐기물량 최소화, 폐기물량 평가 및 처리/처분 용이성 확보

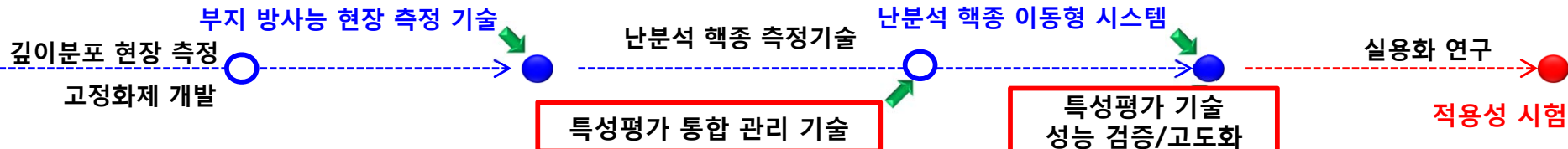


난분석 핵종 측정

- 난분석 핵종 신속분석 및 이동형 자동 측정기술 개발을 통한 해체 폐기물 신속/정확 분석
 - 폐기물 방사선학적 특성 신속 측정, 2차폐기물/작업자 피폭저감, 처리/처분 용이성 확보



'13 '14 '15 '16 '17 '18 '19 '20 '21 '22 '30

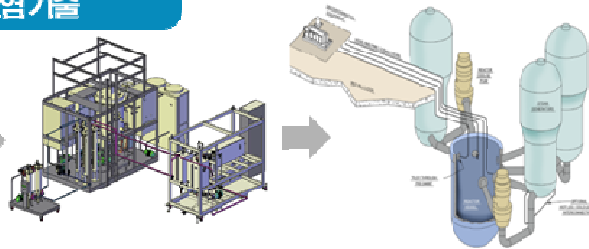
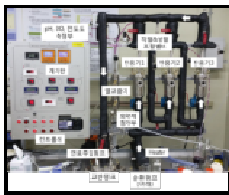


해체 핵심기술 개발 계획 - 제염

원전 일차계통 화학제염 기술의 공학적 검증 및 공정시스템 확보를 통한 실용화 수준의 기술완성

- 가압경수로 일차계통 화학제염공정 시스템 확보 및 공학검증
- 대형기기/대면적 복합유체 제염공정 시스템 확보 및 공학검증
- 중수로 원전 열교환 및 감속재 계통 제염 시스템 개발

일차계통 화학제염기술



무기산기조 HyBRID 공정 고도화

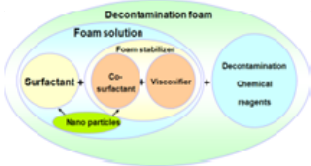
- 공정 스케일업 유효 모델 개발
- 공정 안전성 평가기술 개발

일차계통 통합제염공정 시스템 개발

- 통합제염공정 공학검증 설비 구축 및 성능평가
- 통합제염공정 제어/자동화 시스템 개발

이차폐기물 및 난처리성
이온교환수지 발생량이
최소화된 일차계통 제염기술의
공학검증을 통한 공정 시스템
확보

대형기기/대면적복합유체제염기술



복합유체 제염공정 시스템 개발

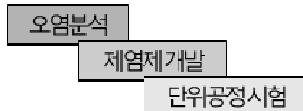
- 충전형 제염공정 공학검증 설비구축/성능평가
- 분사형 제염기술개발 및 타당성 확보

복합유체 동적순환제염 기술 개발

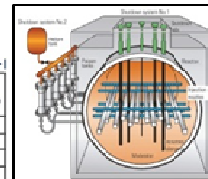
- 동적순환공정 수치해석적 모델 개발/검증
- 동적순환제염공정 타당성 확보

나노입자에 의해 제염성능이
향상된 대형기기/대면적
복합유체 제염기술 공학검증을
통한 공정 시스템 확보

중수로 열교환/감속재 계통 제염기술



Oxide Cation	dissolved oxide				grown on oxide			
	Fe ₂ O ₃ (Magnetite)	Fe ₃ O ₄ (Magnetite)	FeO (Wustite)	Fe ₂ H ₂ O ₄ (Bastnaesite)	Fe ₂ O ₃ (Hematite)	Fe ₂ O ₃ (Hematite)	Fe ₂ O ₃ (Hematite)	Fe ₂ O ₃ (Hematite)
Fe ²⁺	33.6	0	0	1.0E-10	33.3	0	0	0
Fe ³⁺	98.0	98.0	0	1.0E-10	0	0	0	0
Ni ²⁺	0	12.3	100	1.0E-10	0	12.3	0	0
Co ²⁺	0	0	0	1.0E-10	0	0	0	100



중수로 계통 제염기술 개발

- 열교환/감속재 계통 오염특성 평가
- 중수로 계통 화학제염제 formulation 개발
- 중수로 계통 제염 단위공정 기술개발

중수로 원전 열교환 및 감속재
계통 오염특성 분석 및 화학제염
단위공정 개발

'13 '14 '15 '16 '17 '18 '19 '20 '21 '22 '25

HyBRID 화학제염 단위공정 평가
충진형 나노복합유체 안정성 확보

벤치규모 기술개발

HyBRID 제염 공정시스템
확보 및 공학검증

충진형 나노복합 유체
제염 기술확보

HyBRID 통합
제염 시스템 확보

분사형 복합유체
제염 기술확보

중수로 계통
제염기술 개발

동적순환형 복합
유체 제염기술 개발

해체 핵심기술 개발 계획 - 원격절단

기존 절단해체 기술의 한계를 극복할 수 있는 극한환경 적용 핵심 단위기술(원격조작, 고자유도 해체장비, 고효율 절단)의 개발과 통합-연계 시스템 구축

- 극한환경 3차원 환경정보 피드백 기술을 통한 원격조작 상호연동 기술
- 부하 대비 중량비가 높은 수중 절단작업용 모듈형 해체 매니플레이터 기술
- 장초점 광학계에 기반하여 동일출력 대비 우수한 절단성능의 수중 레이저 절단 기술
- 개발 해체장비에 특화된 해체용 요소부품 내방사화 기술

수중 절단작업용 매니플레이터

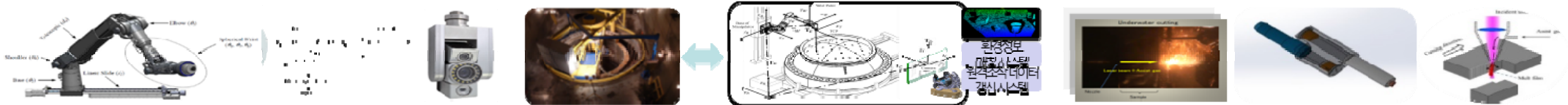
- 부하대비 고중량 취급 모듈형 수중절단 작업용 매니플레이터 및 정밀 원격제어 시스템 개발
 - 고방사능 해체환경 작업을 위한 내방사화 센서 개발
- 고방사능 해체환경 내 원격절단 작업준비 및 설치 효율성, 작업 성능 및 공정 효율성 극대화

극한환경 상호연동

- 3차원 극한환경 정보 인식을 통한 디지털 시뮬레이션 환경 기반 환경정보 피드백 기술
 - 조작 난이도 저감을 위한 원격자율형 원격조작 상호연동 시스템 기술
- 대형 원자력시설의 고방사능 핵심설비의 원격 절단해체 현장과 가상 디지털 시뮬레이션 공간의 상호연동성능 획기적 강화

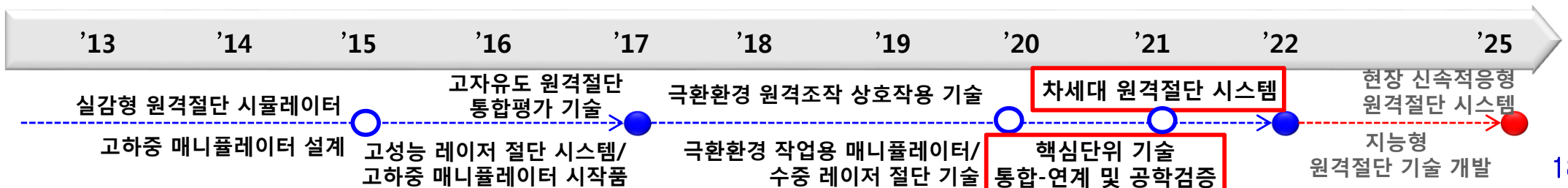
수중 레이저 절단

- 장초점 광학계 기반 고성능 레이저 수중 절단 핵심 기술 및 레이저 기반 원격절단 시스템 개발
- 우수한 절단 성능과 원격조작성을 기반으로 작업종사자 피폭 및 2차 폐기물 발생량 대폭 저감시킴으로써 원격 절단해체 과정의 경제성과 안전성 확보



시스템 통합-연계 및 공학검증

차세대 원격 절단 시스템



해체 핵심기술 개발 계획 - 폐기물 처리

해체폐기물의 안전한 처분과 처분비용 절감을 위한 고감용/안정화/고화 기술 개발 및 검증

- 용액화학 분리공정 기반의 방사성 콘크리트 폐기물 고감용 처리기술 개발
- 폐활성탄 및 탄소폐기물과 같은 난처리성 해체폐기물 열화학적 처리기술 개발
- 유동입자성 폐기물 대상 안정화/고화 처리를 통한 처분적합화 기술 개발

콘크리트폐기물 고도감용 기술

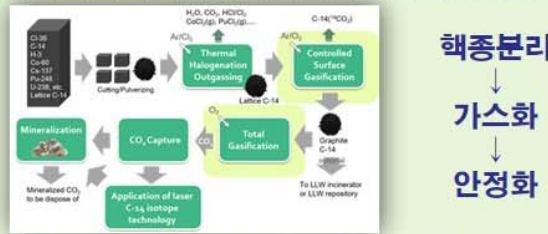
- 방사화 및 오염 콘크리트 폐기물 대상 고감용 분리기술 및 폐액 처리기술 최적화
- 고도감용을 통한 처분비용 절감

용액화학 분리 공정



난처리성 폐기물 열화학 처리기술

- 폐활성탄 및 탄소폐기물 열화학적 제염/핵종 분리/가스화/전환/안정화 기술
- 처분 안전성 향상 및 부피 감용



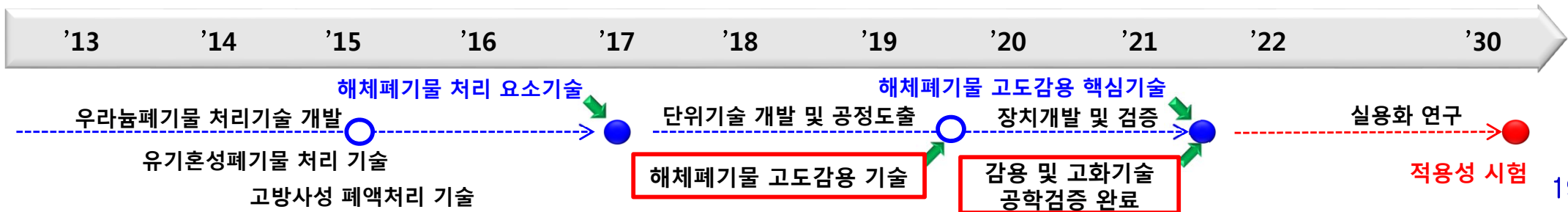
유동입자성 폐기물 고화 기술

- 해체 발생 분산상 폐기물 및 악티늄 폐기물 대상 안정화/고화 매질 개선 및 신매질 개발
- 해체폐기물의 처분 적합화

시멘트 매질개선/무기고분자/세라믹



해체폐기물의 안전한 처분과 처분비용 절감을 위한
"고감용 처분적합화" 기술개발 및 검증



해체 핵심기술 개발 계획 - 부지복원

국내 해체부지 환경에 적합한 오염 토양 복합 처리 시스템 및 현장형 지하수 복원 공정 개발

- 난처리성 점토/실트를 효율적으로 제거할 수 있는 기술 및 오염토양 복합처리 시스템 개발
- 지하수 내 다핵종 및 삼중수소 제거 소재 및 현장적용 기술 개발
- 중대사고 대비 주거지 광역 오염표면 복원 기술 공정 개발 및 검증

난처리성 오염 토양

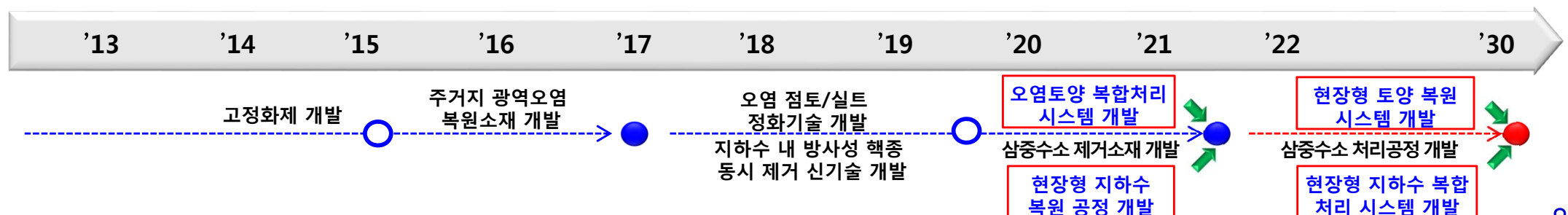
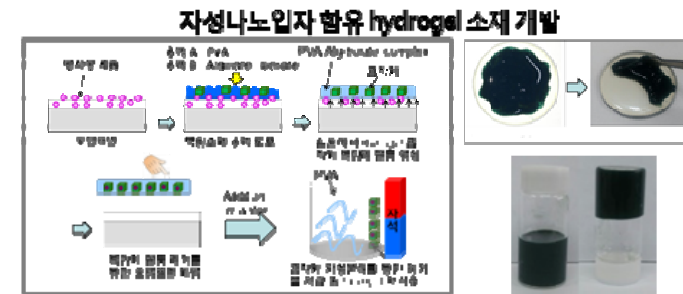
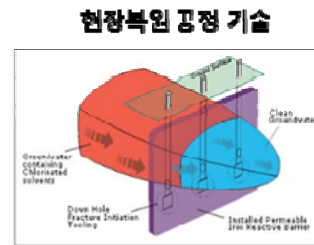
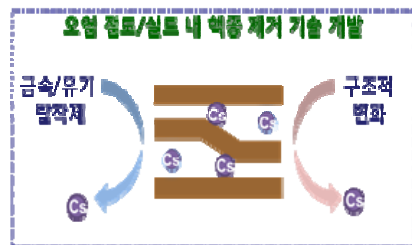
- 방사성 오염 토양 내 난처리성 점토/실트 정화기술 개발 및 토양 폐기물 복합처리 시스템 개발
 - 난처리성 토양 기술 확보 및 토양 폐기물 처분 비용 절감

지하수 복원

- 지하수내 다핵종 제거용 신매질과 현장형 공정 개발 및 삼중수소 제거 핵심 기술 도출 및 매질 제조 기술 개발
 - 지하수 복원기술 및 삼중수소 제거 원천기술 개발

주거지 광역 오염표면 복원

- 주거지 복원소재 성능 향상과 건전성 확보 및 표면오염 복원 시스템 개발
 - 친환경, 저비용 복원소재 개발

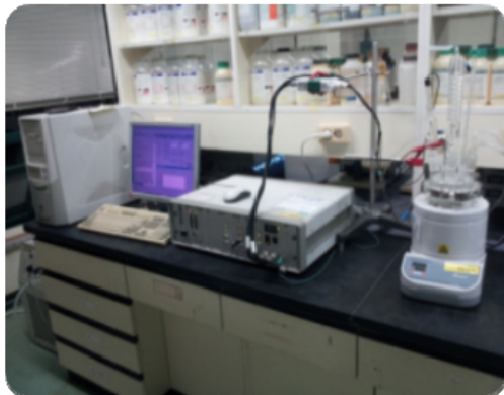


해체기술 검증용 시설 구축

- 후쿠시마 원전 사고, 고리 1호기 해체 결정 등 국내외 원자력시설 해체 문제 중요성 대두
- 해체분야 후발주자로서 국제 경쟁력을 확보할 수 있는 해체 핵심 신기술의 개발과 실용화를 위한 공학규모 검증시설 구축

해체 핵심기술 개발

실험실적 R&D
(원연사 중장기 연구)



공학규모 기술 검증
(해체기술종합시험시설)



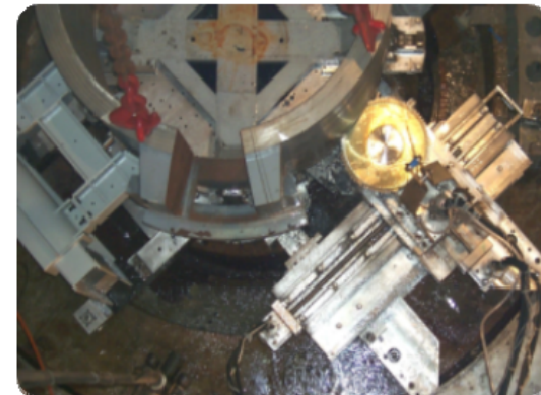
적용 형식

직접적용
(목업)

Demo
(원전 발생
폐기물 대상)

기술 실용화

실제 사업 적용
(시범사업)



(해외시장진출)
국내 기술 자립

대상 및 기능

- 해체 핵심 신기술의 실용화 타당성 검증 및 기술 고도화 시험시설 구축
 - 해체 핵심분야인 특성평가, 제염, 원격절단, 폐기물처리, 부지복원 등 핵심기술 공학 시험용 시설 및 설비 구축
- 해체 대상 목업을 설치하여 기술 검증 및 교육/훈련(산업체 공동)
 - 해체 전문기업 육성(인력교육 및 기술이전)
 - 원전 해체 작업자 훈련/연습

일 정 계 획

	'17	'18	'19	'20	'21
설 계					
시 설 건 설					
장비 구축·시운전					



감사합니다