



과학기술정보통신부
Ministry of Science and ICT

원전해체 폐기물 감용 처리 해제 및 부지 복원 환경 평가 기술 연구

2018. 10. 22 [수]

한양대학교 전 상 환

총괄책임자 : 한양대학교 김 용 수

- | | |
|-------------------------|-------------|
| 1 세부과제 : 한양대학교 원자력공학과, | [주]코오롱환경서비스 |
| 2 세부과제 : 충남대학교 신소재공학과, | [주]이노바 |
| 3 세부과제 : 한양대학교 건설환경공학과, | [주]우주에너지테크 |
| 4 세부과제 : 한국기계연구원 | |



한양대학교



충남대학교
CHUNGNAM NATIONAL UNIVERSITY



한국기계연구원
KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS



코오롱환경서비스(주)

innova
INNOVATIVE AND FUTURE-ORIENTED LABORATORY



우주에너지테크
UJU ENERTECH

목 차

1. 선진연구센터 설립목적
2. 연구목표
3. 추진전략
4. 연구진 구성
5. 1차년도 연구성과
6. 향후 센터운영 계획

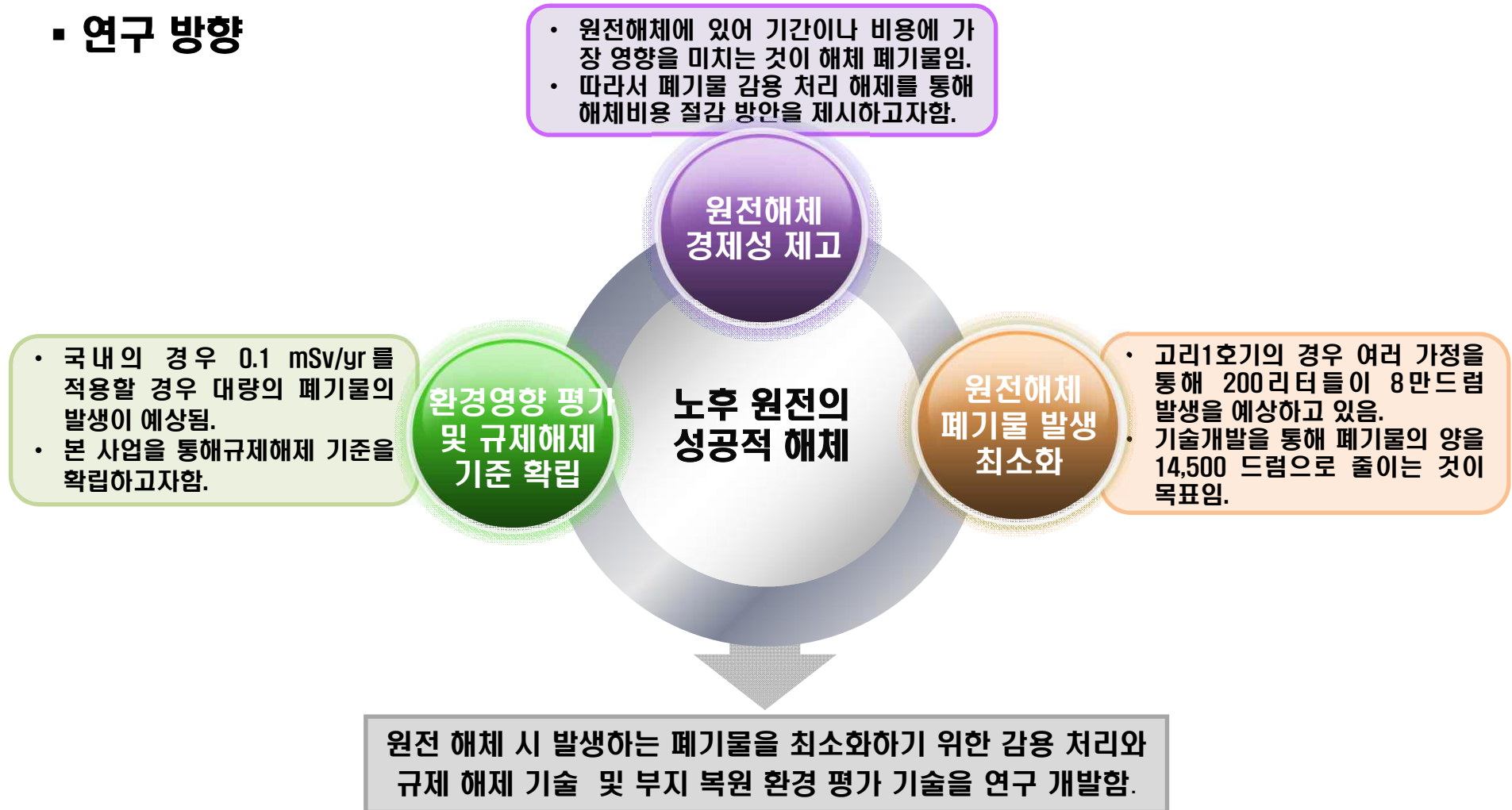
1. 선진연구센터 설립목적

▪ 설립 목표



1. 선진연구센터 설립목적

▪ 연구 방향



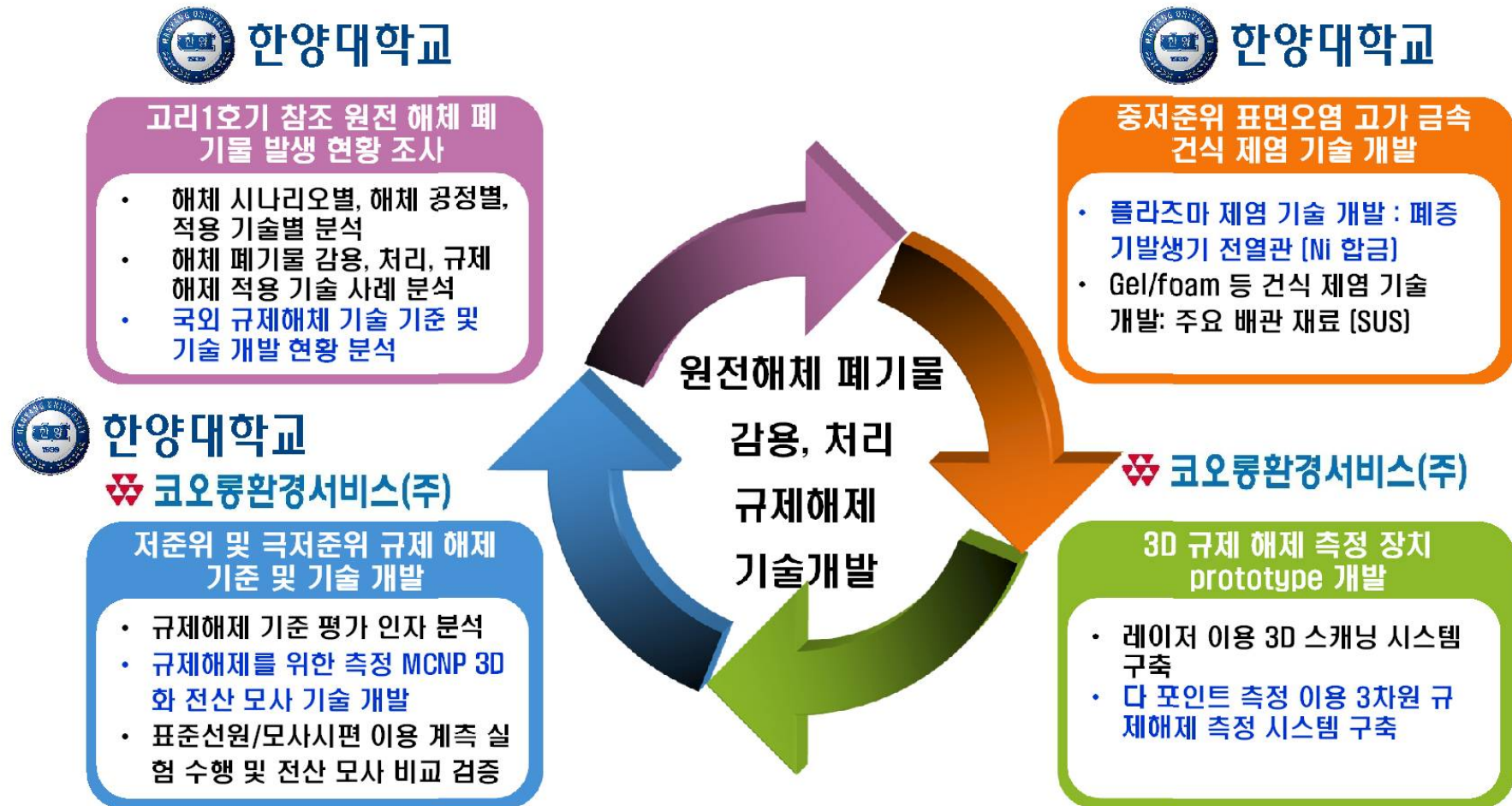
2. 연구목표

■ 세부과제별 연구목표



2. 연구목표

▪ 1세부 연구목표



2. 연구목표

▪ 2세부 연구목표



방사화 유형에 따른 금속 폐기물 분리
기준 수립 및 기술 개발

- 방사화된 부식 생성 산화물
→ 표면 제염
- 미량 방사화 금속 폐기물
→ 체적 제염
- 고가 금속 내부 또는 균열(SCC)로
침투된 방사성 핵종 → 체적 제염



중·저준위 방사화 금속 폐기물의
극 저준위화 및 용융 기술 개발

- 균열된 틈새 내 침투/오염된 방사
성 오염물질 제염처리 기술 개발
- 중·저준위 금속폐기물 극 저준
위화를 위한 용융 기술 개발
- 금속 용융 기술을 통한 규제 해제
이하 재활용 금속 제조



중·저준위 금속 폐기물 대상 규제해
제 회수 전해 제염 기술/장치 개발

- 핵종 용해도 저감 전해질 개발
- 고순도 지르코늄 및 니켈 금속
의 전해 제염 시 발생하는
clearance level 기준 이상의
미량 불순물 처리 기술 개발

원전해체 중저준위
금속폐기물의
규제해제 수준 첨단
제염기술 개발

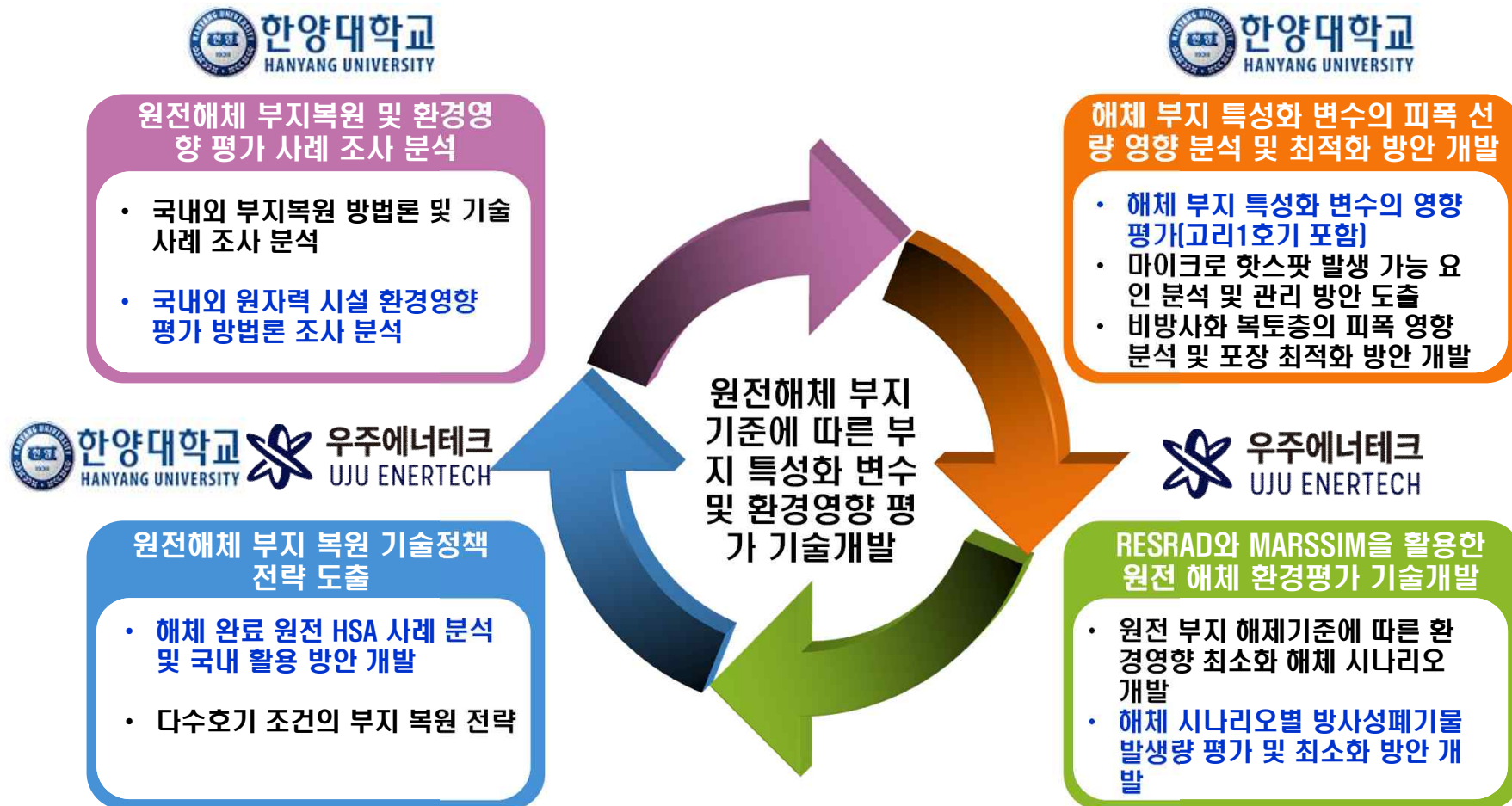


균열된 틈새 내 침투/오염된 방사
성 오염물질 표면 제염처리 기술

- 크랙조건 산화코발트 표면
안정적 증착 조건 설계 제조
- 크랙조건 표면 제염도 평가
및 향상 공정 설계
- 현장 적용 가능 무전극
플라즈마 토치 설계

2. 연구목표

▪ 3세부 연구목표



2. 연구목표

▪ 4세부 연구목표



금속 대상체 별 최적 절단 기술 선정

- 레이저 및 플라즈마 아크 절단 등 가용 기술 분석
- 절단 기술별 절단 성능 분석
- 재질별 두께별 최적 절단기술 분석
- 절단기술에 따른 감용 영향 분석
- 절단 전후 공정 연계 최적절단 기술 개발



수중 레이저 절단 장치 prototype 개발

- 레이저 이용 절단 시스템 구축
- 절단 시스템 수중 평가 검증



절단속도 300 mm/min 이상 수중 레이저/플라즈마 아크 절단 기초 기술 개발

- 금속 절단 성능실험을 위한 기술 절차서 개발
- 금속 절단 장치 설계
- 금속 절단 장치 시제품 제작
- 금속 절단 장치 시제품 성능시험

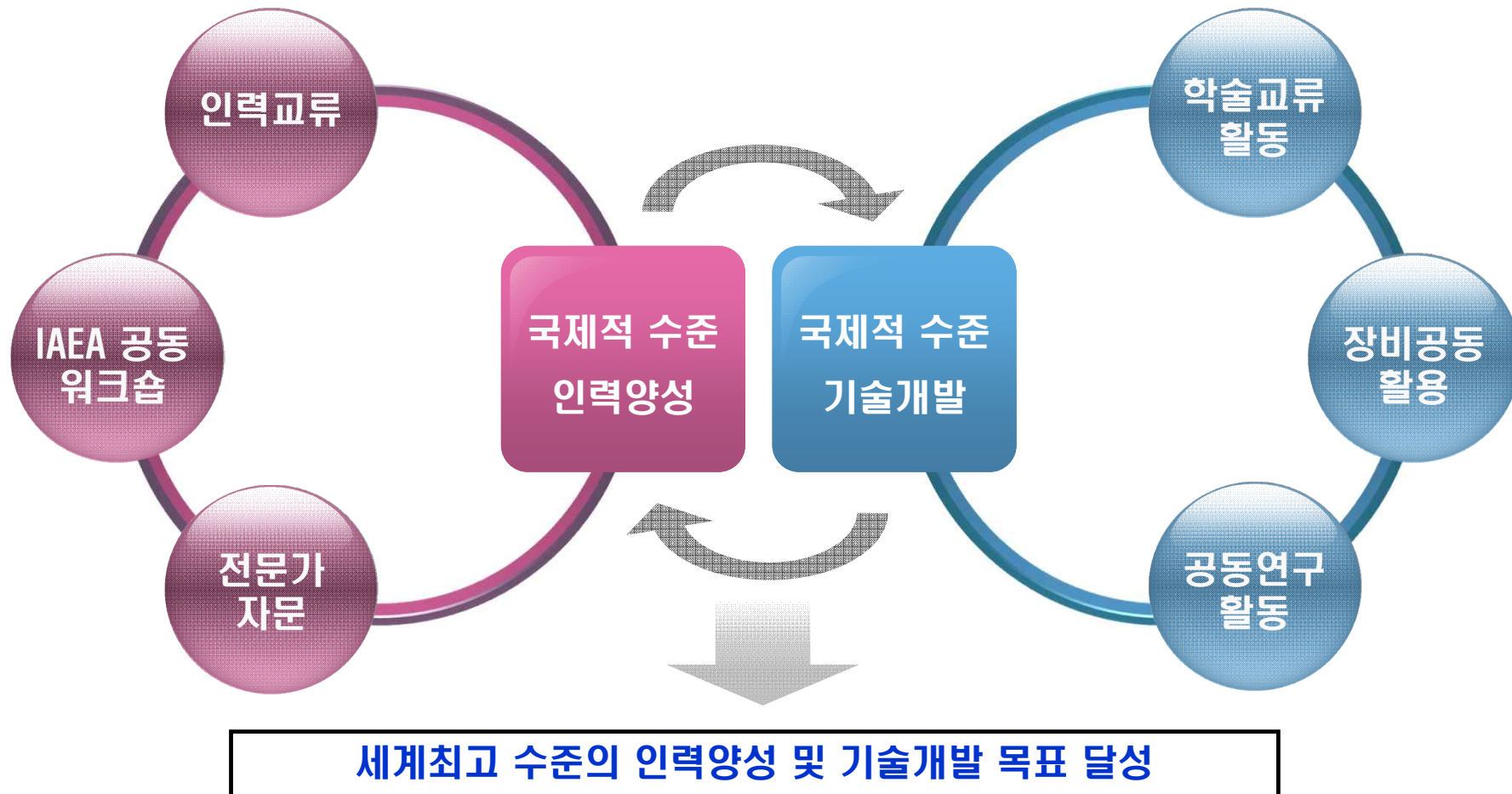
2. 연구목표

▪ 연구센터 추진사업



3. 추진전략

▪ 추진목표



3. 추진전략

▪ 추진일정

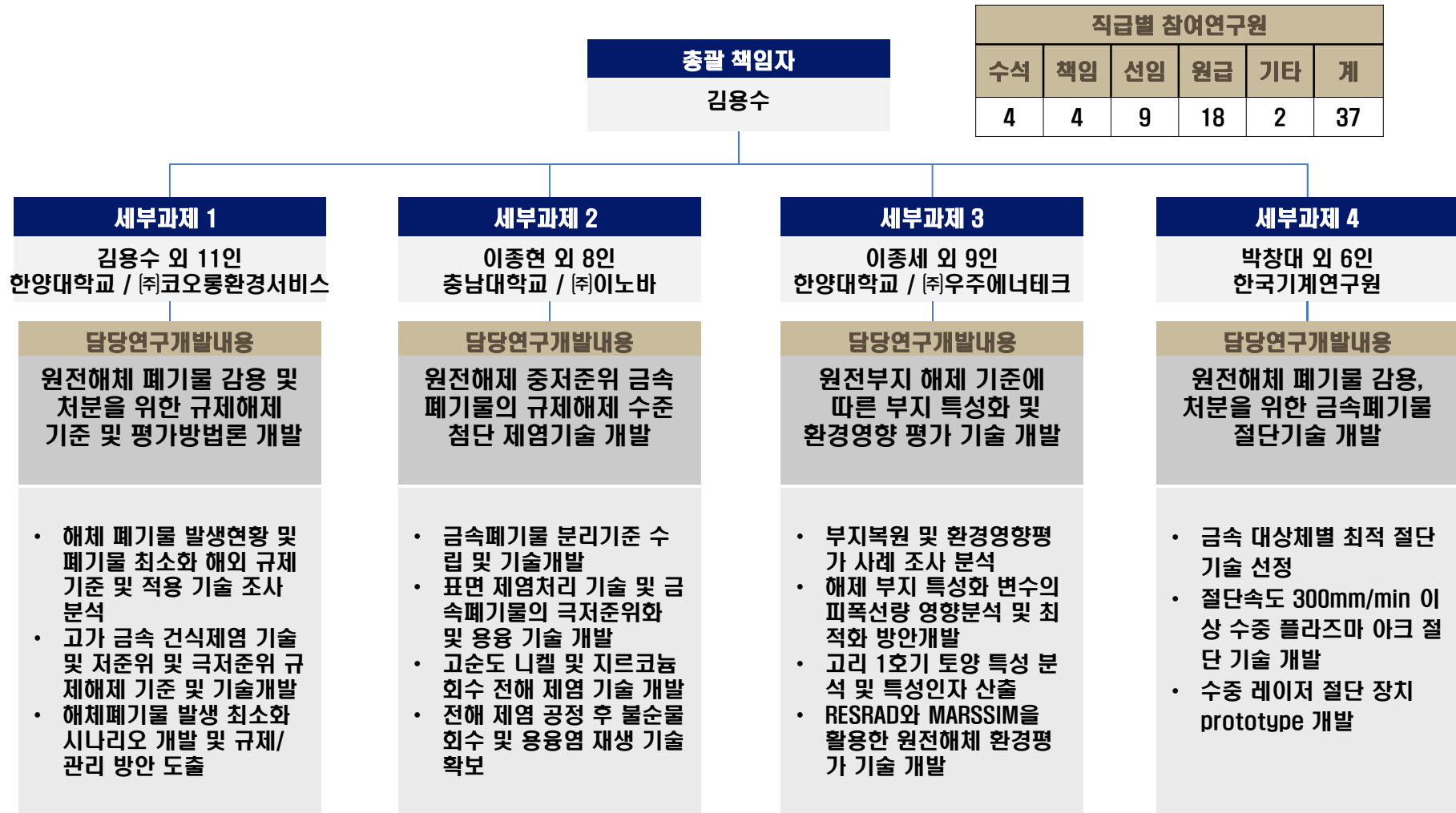
구분	세부연구목표	추진일정				
		1	2	3	4	5
1세부	고리1호기 참조 원전 5-6기 선정 해체 폐기물 발생 현황 조사 분석					
	원전 해체 폐기물 최소화 해외 규제 기준 및 적용 기술 조사 분석					
	폐기물 감용 및 규제 해제를 위한 원전 해체 시 발생하는 중저준위 표면오염 고가 금속(Ni, SUS) 건식 제염 기술 개발					
	저준위 및 극저준위 규제 해제 기준 및 기술 개발					
	해체폐기물 발생 최소화 시나리오 개발 및 규제/관리 방안 도출					
	3D 규제 해제 측정 장치 prototype 개발					
2세부	폐 원전 해체 금속 폐기물 처리 기술 정보 확보					
	방사화 범용 금속(STS 강재 합금) 폐기물 대상 제염 공정 최적화					
	방사화 고가 금속(Ni, Zr 합금) 폐기물 대상 전해제염 공정 최적화					

3. 추진전략

▪ 추진일정

구분	세부연구목표	추진일정				
		1	2	3	4	5
3세부	원전해체 부지복원 및 환경영향 평가 사례 조사 분석					
	해체 부지 특성화 변수의 피폭 선량 영향 분석 및 최적화 방안 개발					
	고리1호기 토양 특성 분석 및 특성 인자 산출					
	원전해체 부지 복원 기술정책 전략 도출					
	RESRAD와 MARSSIM을 활용한 원전 해체 환경평가 기술개발					
4세부	절단조건별 최적 절단 기술 선정					
	수중 플라즈마 아크 절단 토치 시작품 성능시험					
	수중 레이저 절단 장치 prototype 개발					

4. 연구진구성


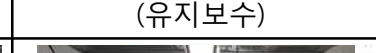
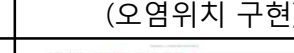


5. 1차년도 연구성과

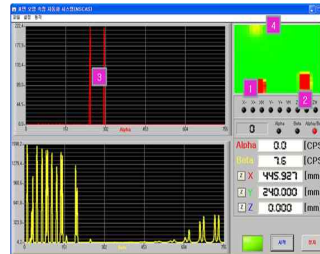
■ 1세부 [한양대학교, (주)코오롱환경서비스]

■ 국내 자체처분 측정기술 연구 사례

- 한국수력원자력 중앙연구원 (KHNP CRI)

<p>시료측정</p>	<p>검출부 인출 (유지보수)</p>	<p>방사능 측정 (오염위치 구현)</p>
		

- **한국원자력연구원 (KAERI)**

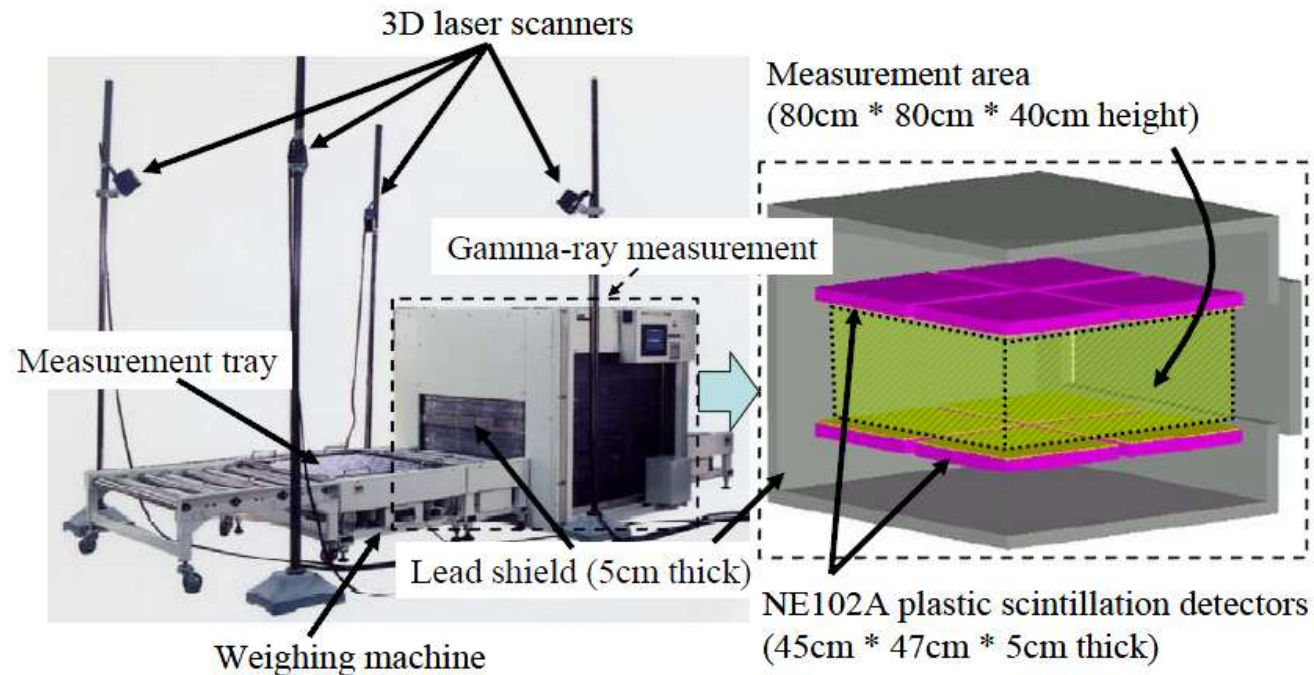


5. 1차년도 연구성과

■ 1세부 [한양대학교, (주)코오롱환경서비스]

▣ 국외 자체처분 측정기술 연구 사례

- 일본, Clearance Automatic Laser Inspection System (CLALIS)



5. 1차년도 연구성과

■ 1세부 [한양대학교, (주)코오롱환경서비스]

▣ 국외 자체처분 측정기술 연구 사례

➤ 독일, Release Measurement Facility (RMF)



Typical batch of material
(insulation sheets, about 280kg)



- Decisive measurements
- Complete gamma activity measuring
- Several large scintillators
- Representative nuclide-mix
- Measuring time: 1min.
- Batch weight: 1,000 kg
- Batch size: 120x100x80cm
- Mobile equipment (20"-container)



5. 1차년도 연구성과

■ 1세부 [한양대학교, (주)코오롱환경서비스]

▣ 국외 자체처분 측정기술 연구 사례

- 미국, ISOCS (In-situ Object Counting System)

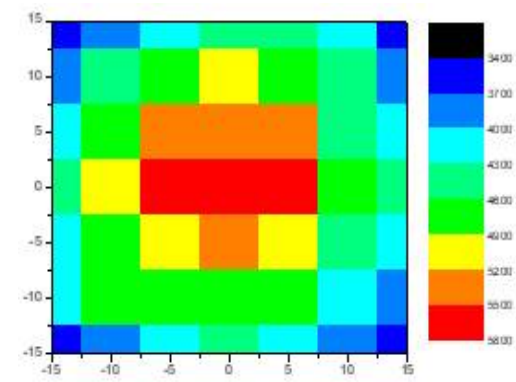
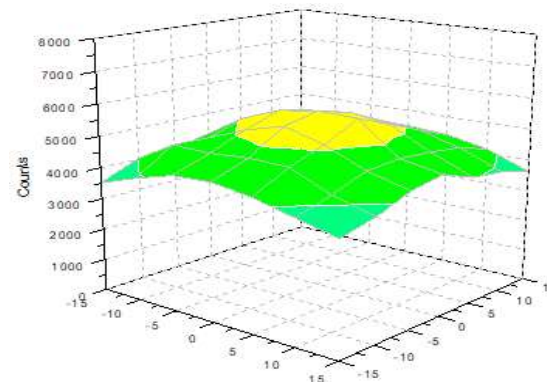
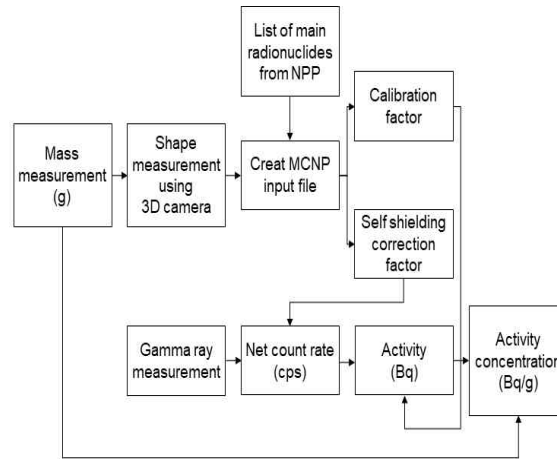


5. 1차년도 연구성과

■ 1세부 [한양대학교, (주)코오롱환경서비스]

■ 현재 연구 개발 중 기술

- ✓ 원전 해체 시 대량 발생하는 극저준위 방사성폐기물 중 규제해제 대상 폐기물을 분류할 수 있는 측정장치 개발이 필요함.
- ✓ 3D 카메라 및 스캐닝, 감마선 검출부로 구성된 규제해제 측정장치 개발을 진행함.
- ✓ 폐기물의 형상과 방사능을 측정하고 MCNP 계산으로 도출한 교정 및 보정계수 규제해제 대상 폐기물 분류 가능함.

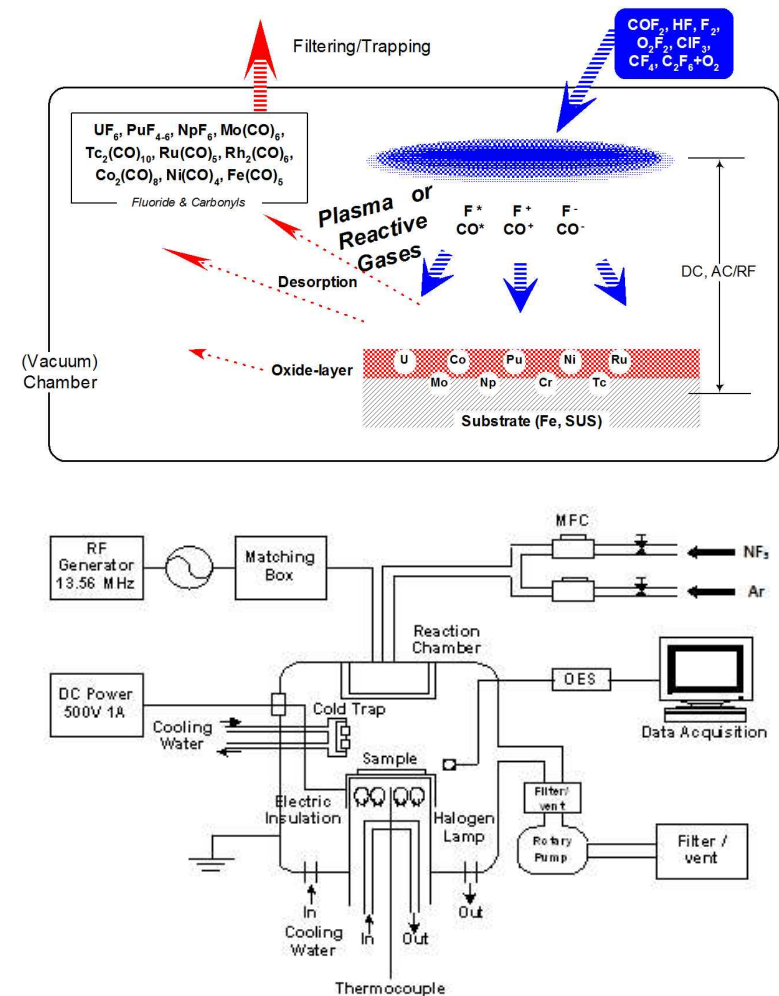


5. 1차년도 연구성과

■ 1세부 [한양대학교, (주)코오롱환경서비스]

▣ 현재 연구 개발 중 기술

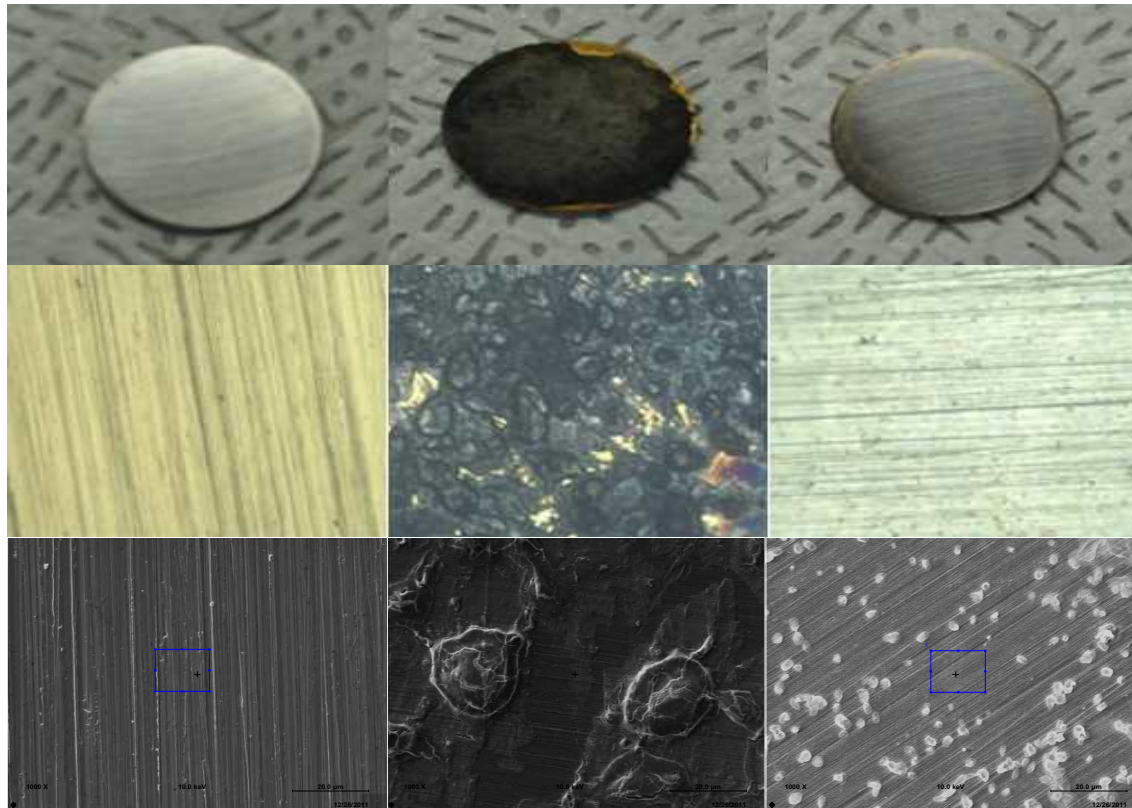
- ✓ 원전의 해체 작업은 대량의 오염 금속구조물 및 각종 기기류 폐기물이 발생됨.
- ✓ 대부분 원전 발생 방사성 금속 폐기물은 표면 오염된 것으로 표면 제염을 통해 폐기물의 양을 획기적으로 줄이면서 모재의 재사용/재활용이 가능한 금속 폐기물 제염 기술 개발이 필요함.
- ✓ 플라즈마 제염은 현재까지 개발된 습식제염보다 이차폐기물 감용효과가 크며, 화학반응을 이용하여 반응속도가 매우 빠른 제염방식으로 핵종별 선택적 식각이 가능하며 모재의 재사용/재활용이 가능함.



5. 1차년도 연구성과

▪ 1세부 [한양대학교, (주)코오롱환경서비스]

▣ 현재 연구 개발 중 기술



플라즈마를 이용한 금속 표면 위 코발트 제염 전· 후 현미경/SEM 사진

5. 1차년도 연구성과

■ 2세부 (충남대학교, ㈜이노바)

■ 국내 금속 용융 제염 기술 적용 사례

- ◆ 원자력연료 가공 또는 생산시설에서 발생하는 금속 폐기물에 대해 일정한 분류기준에 따라 분류하여 용융 제염을 실시.
- ◆ 2012년 도입 후 연간 150드럼 분량의 금속물을 용융 제염 후 자체 처분.

경수로 원자력 연료 제조



중수로 원자력 연료 제조



금속 용융 (Metal melting) 제염

5. 1차년도 연구성과

▪ 2세부 (충남대학교, (주)이노바)

▣ 국외 금속 용융 제염 기술 적용 사례

➤ EnergySolution corp.



➤ ALD France



**Mobile consolidation system
for radioactive contaminated metal scrap**

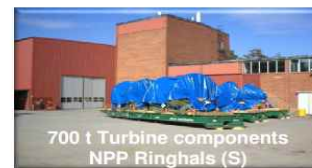
- 미국, 프랑스 등 1950년대에 원자력발전을 시작한 나라의 경우 원자력 시설 해체와 금속 폐기물 재활용을 위한 기술과 시설, 정책, 그리고 관련법규들을 상당 수준 정비해 놓고 있음.
- 특히, 상업적인 금속 용융 시설이 전세계적으로 운영되고 있으며 이러한 시설들은 해외 각국의 외국 폐기물도 처리 중에 있음.

5. 1차년도 연구성과

■ 2세부 (충남대학교, [주]이노바)

▣ 국외 금속 용융 제염 기술 적용 사례

➤ Studsvik corp.

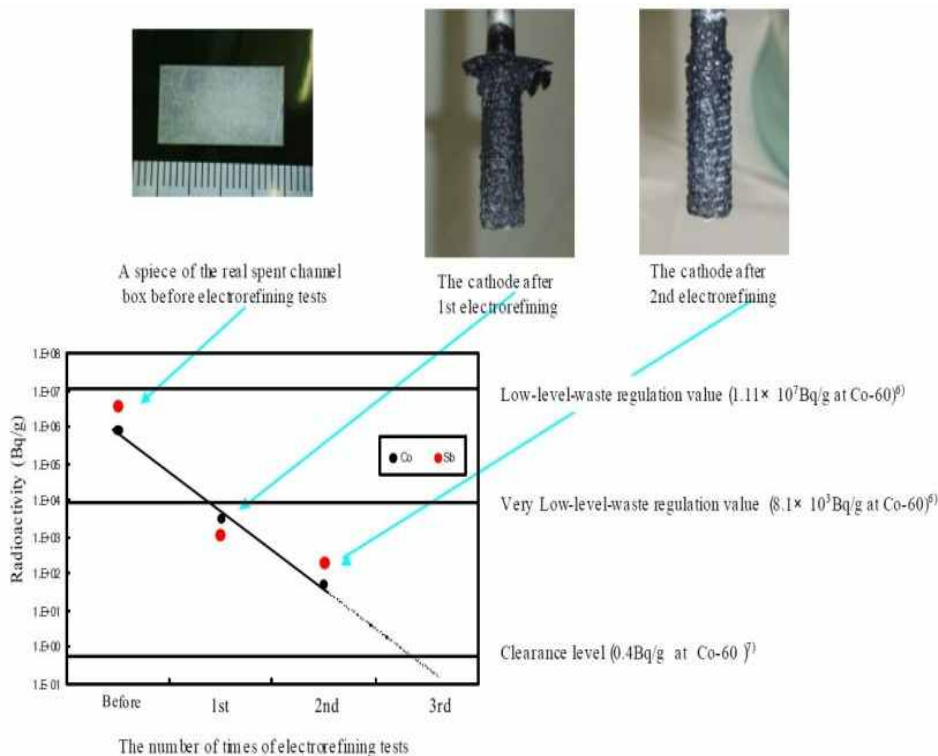


- ◆ 스웨덴에서는 Studsvik에 용융제염시설을 건설하여 1987년부터 실증 실험 실시. 1988년말까지 대부분 400 ton의 저준위 금속 조각을 용융하였는데, 약 90%가 탄소강이며 나머지는 스테인레스강임.
- ◆ 예비 시설은 금속 조각의 분쇄, 1.5 ton/hr 용량의 유도로 및 냉각부분으로 구성되어 있다. 대기로의 방출은 전체 β 와 γ 가 640 kBq, α 방사능은 200 Bq이었다.

5. 1차년도 연구성과

■ 2세부 (충남대학교, [주]이노바)

■ 국외 전해 제염 기술 연구 사례



<JP Toshiba, Electrochemistry, Vol.73, No.8. 2005, pp. 751~753>

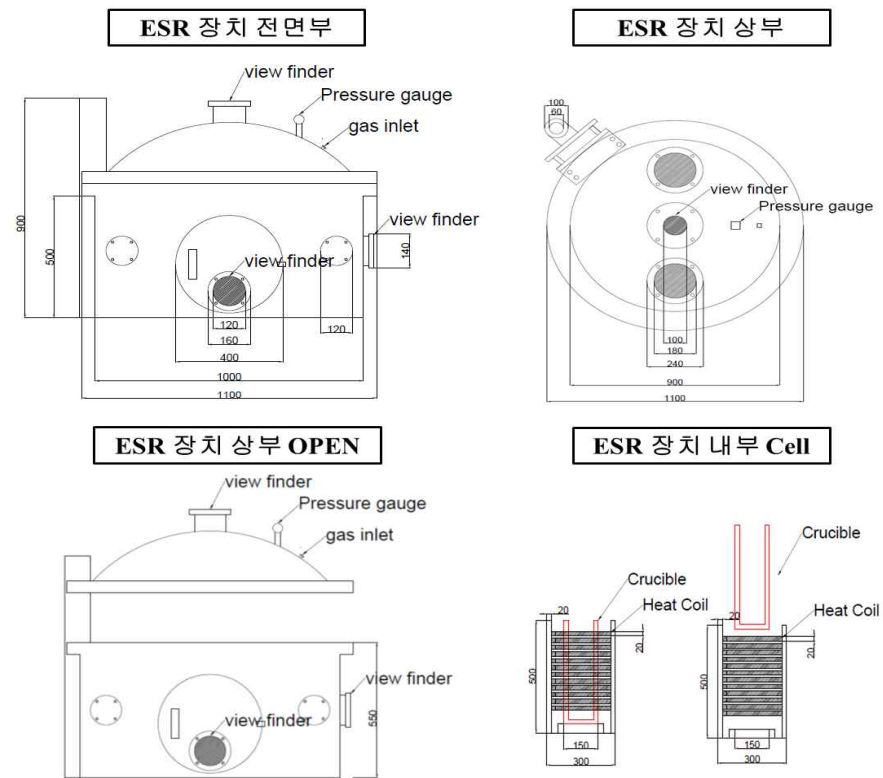
- ◆ 일본 도시바는 923K에서 LiCl-KCl-10wt% LiF 용융염을 사용하는 전해 정련을 통해 비등경수로의 지르칼로이 피복관과 채널 박스(Zircaloy-2)로부터 지르코늄을 회수하는 공정에 대한 연구 및 지르코늄의 지하수 환경 내 부식 실험을 수행하여 회수된 지르코늄의 폐기물 저장 용기로의 활용 가능성을 확인함.
- ◆ 지르코늄 다단계 전해정련 공정을 통해 99.9% 수준의 고순도 지르코늄을 회수하는데 성공하였으며 **500,000** 정도의 제염 계수에 도달할 수 있음을 확인함.

5. 1차년도 연구성과

■ 2세부 (충남대학교, ㈜이노바)

■ 현재 연구 개발 중 기술

➢ 금속(STS) 용융 공정



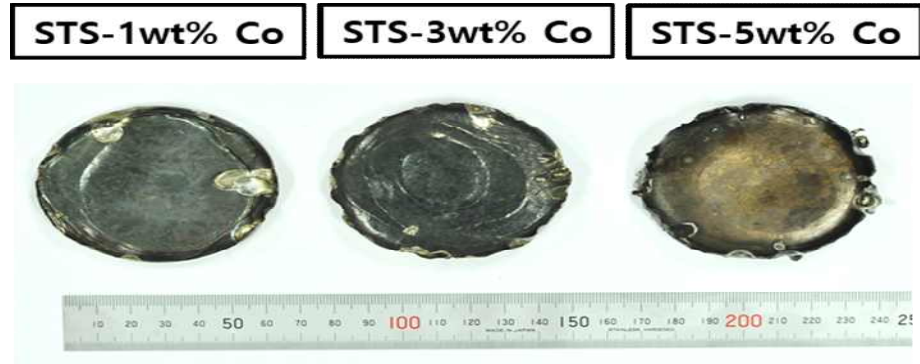
- 용융제염 공정을 위한 ESR장치 재 설계 완료
- 모의 방사화 STS 시편을 제작하여 모의 방사화 핵종의 용융 제염 실험 진행 예정

5. 1차년도 연구성과

▪ 2세부 (충남대학교, ㈜이노바)

▣ 현재 연구 개발 중 기술

➤ 금속(STS) 전해 제염 공정



실험 조건

공정 온도	550 °C
양극	STS-1,3,5wt.% Co
음극	STS Plate
전해질	LiF-KF eutectic

- 용융제염 후 잔류할 것으로 예상되는 Co를 첨가한 모의 방사화 STS 시편 제작
- STS-1wt.% Co 전해 제염 완료 후 현재 전착물 및 용융염 내 잔존 Co 농도 분석 중
- 추가적으로 전착물 재오염 방지를 위한 Ni Foam 분리막 연구 중

5. 1차년도 연구성과

■ 3세부 [한양대학교, (주)우주에너지테크]

■ 국외 기술 수준 및 시장 현황

국가	선량제약치
USNRC (미국)	무제한적 이용 : 0.25 mSv/yr + ALARA 제한적 이용 : 1 mSv/yr 또는 5 mSv/yr
USEPA (미국)	0.15 mSv/yr + 지하수 0.04 mSv/yr , ALARA
독일	무제한적 이용 : 0.01 mSv/yr 300종 이상의 핵종에 대한 농도 기준 규정
영국	규제 기관이 허용하는 기준
헝가리	0.3 mSv/yr (광산에 적용) 표층농도:0.18Bq/g상당
스페인	Andujar: 0.1 mSv/yr 표층농도:0.2Bq/g
스웨덴	사안별적용 Agesta PHWR : 0.5 Bq/cm2 (베타/감마), 0.05Bq/cm2(알파)
노르웨이	하천침적물 Am-241:10Bq/g, Cs-137:100Bq/g
벨기에	선량 기준 불문명/규제기관의 승인필요
이탈리아	반감기 75일 미만에 대해 1Bq/g 이외의 경우, 0.01mSv/yr and 1man-Sv/y and optimized
캐나다	선량한도이하 광산 이외의 시설: 0.01mSv/yr수준

- 미국, 독일, 영국, 일본 등 국가 및 기관들은 원전 해체 후 부지의 복원을 위한 해당 지역의 특성을 고려한 유효선량을 제시하며 부지 복원 기준을 정하고 실제 적용 사례를 보유하고 있음.
- 미국은 원자력 시설 해체 후 부지 및 건물의 개방을 위한 조사에 관해 MARSSIM (Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual) 표준 지침서로 개발. 이는 오염된 토양과 건물에 대해 측정과정과 결정 과정에 대한 종합적인 지침을 제공하고, 방사능 오염이 규제치 충족 여부를 결정하기 위한 계획, 수행, 평가 및 결정 수행 방법을 포함함.

5. 1차년도 연구성과

▪ 3세부 [한양대학교, (주)우주에너지테크]

▣ 국내 기술 수준 및 시장 현황

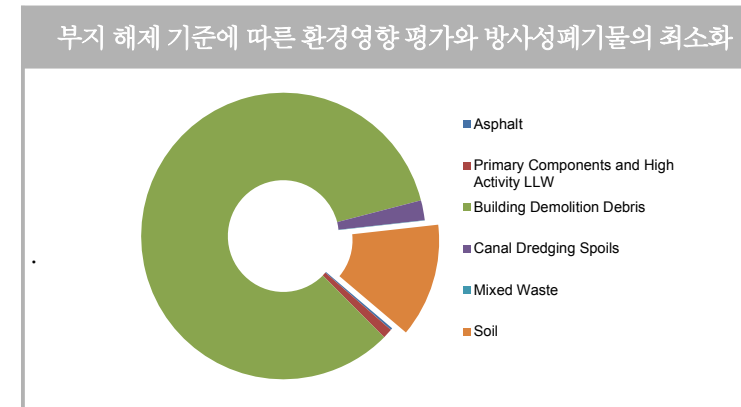
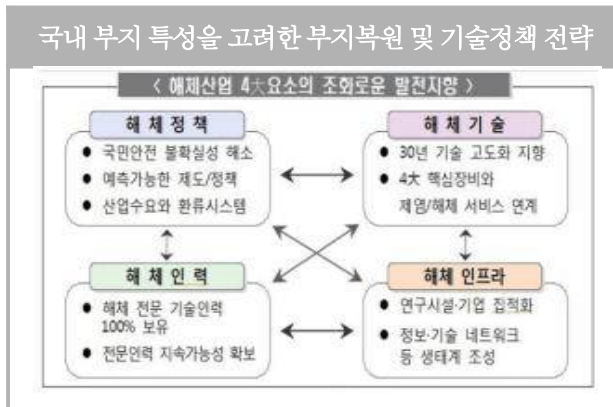
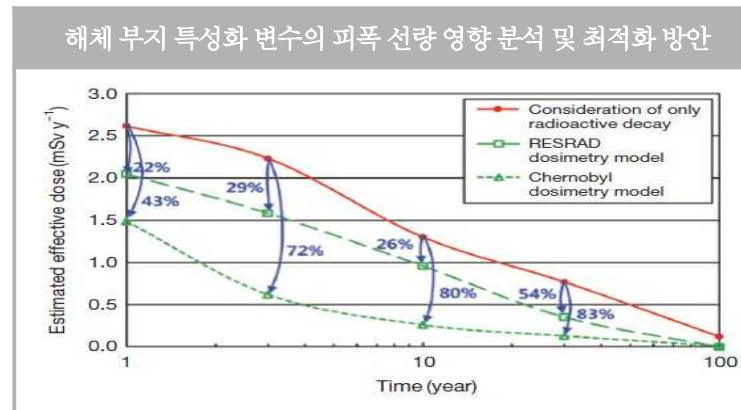
- 국내의 경우 소형 연구용 원자로인 TRIGA Mark-II,III 및 우라늄변환시설 부지에 대한 해체 사례만 존재
→따라서 국내에서 대규모 상용 원전 시설의 부지복원이 진행된 실적은 없음.
- 국내 상용원전 해체는 영구 정지된 고리1호기를 시작으로 진행될 예정이며, 관련된 세부적인 기술기준(규칙·고시)들을 2017년 말 까지 수립할 예정임
- 국내 원자력시설의 부지 복원은 원자력안전위원회고시 제2016-33호(원자력이용시설 해체완료 후 부지 및 잔존건물의 재이용을 위한 기준)의 기준에 따라 진행될 예정임



5. 1차년도 연구성과

■ 3세부 (한양대학교, (주)우주에너지테크)

■ 현재 연구 개발 중 기술



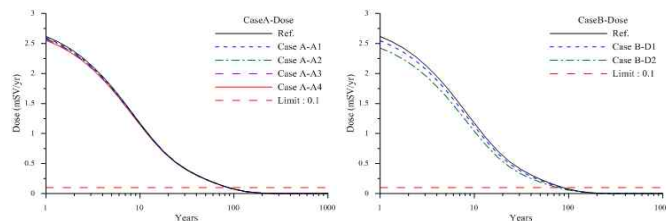
5. 1차년도 연구성과

■ 3세부 [한양대학교, (주)우주에너지테크]

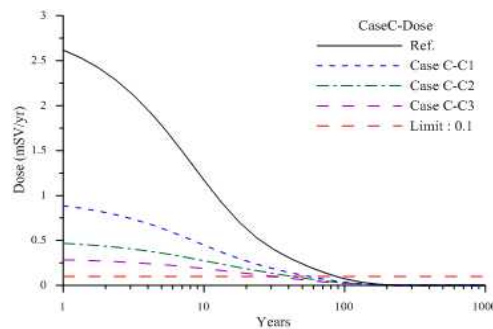
■ 현재 연구 개발 중 기술

부지특성화 변수 분석

■ 오염면적 / 깊이

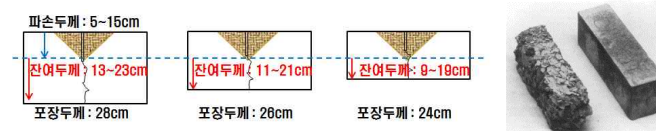


■ 포장두께 (임시 방호 요소)

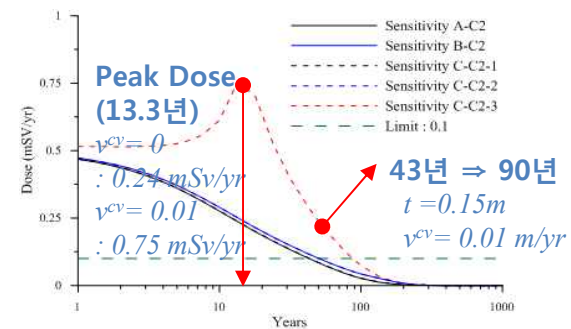


침식률 영향 분석

■ 포장의 내구성과 동결융해 손상



■ 침식률에 따른 피폭선량

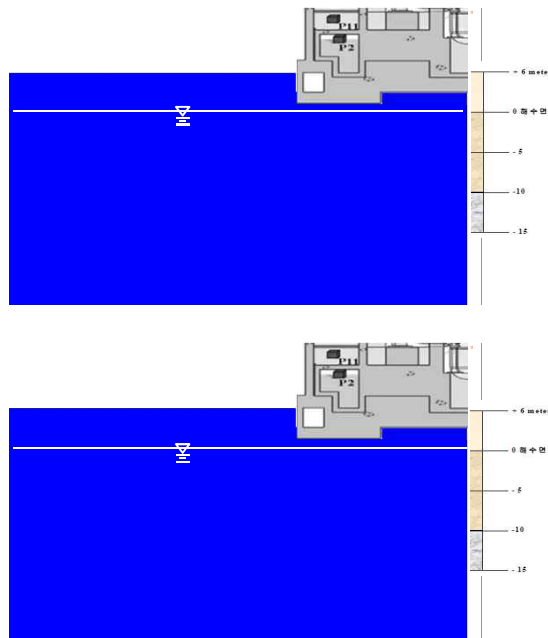


5. 1차년도 연구성과

■ 3세부 [한양대학교, (주)우주에너지테크]

■ 현재 연구 개발 중 기술

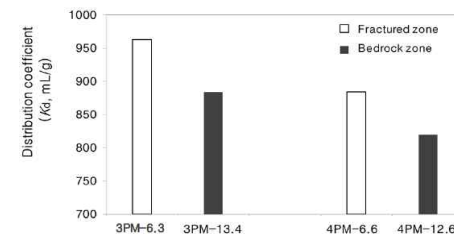
오염확산평가
(by using FE analysis : ABAQUS)



Site Characterization

- geologic & hydrogeologic characterization
- contaminant distribution assessment (vertical & horizontal)
- water table elevation & fluctuations
- presence of LNAPL on top of the water table or isolated globules in the soil matrix
- ground water concentrations.

광물학적 특성에 따른 흡착분배계수(K_d)



5. 1차년도 연구성과

■ 4세부 [한국기계연구원]

■ 국외 원전 해체 절단 기술 연구 사례

USA - Reactor Segmentation Technologies Experience*

Plant Name	Cutting Methods Used	Lessons Learned	Operational Dates	Comments	RPV Activity / Rad Exposure / Waste Vol
Yankee Rowe (MA) 167 MWe PWR	Plasma Arc and Metal Disintegration Machining (MDM)	Dose and contamination control issues	1993	Underwater RI – 1 piece truck and barge RV	0.9 MCi; 100 rem; NA
Big Rock Point (MI) 67 MWe BWR	Underwater Hydraulic Mill Saw and Mechanical Cutting	Low activation levels	1999	Underwater RI – 1 piece rail RV	
Trojan (OR) 1150 MWe PWR	None	One package for shipment and disposal	1999	RV & RI – 1 piece barge and truck shipment RV	
Connecticut Yankee (CT) 565 MWe PWR	Abrasive Water Jet (AWJ) & MDM	Water purification equipment inadequate	2000-2002	Underwater RI – 1 piece truck and barge RV	0.8 MCi; 205 rem; 1250 cf
Maine Yankee (ME) 810 MWe PWR	AWJ & Mechanical Cutting	Integrated testing was successful	2001	Underwater RI – 1 piece barge RV	2 MCi; 50 rem; 1700 cf
SONGS Unit 1 (CA) 463 MWe PWR	AWJ & MDM	Previous projects lessons learned of great use	2001	Underwater RI - Intact RV in canister package on-site	0.4 MCi; 23 rem; 254 cf
Rancho Seco (CA) 913 MWe PWR	Mechanical Cutting (RI) and AWJ (RV); diamond wire cutting RV head	Mechanical cutting acceptable	2005-2006	RV segmented	0.07 MCi; 20 rem; ~1130 cf
LaCrosse (WI) 60 MWe BWR	None	One package for shipment and disposal	2007	RV & RI – 1 piece rail shipment	
Zion Units 1 and 2 (IL) 1085 MWe PWR - each	Oxy-propane (RV) & Mechanical Cutting & wire saw (RI)	Cutting chips control critical	2012-2015	Underwater RI; RV segmented	
Humboldt Bay-3 (CA) 63 MWe BWR	Remote Mechanical Cutting both RV and RI	Always look for opportunity to improve process	2011-2015	RV segmented dry	

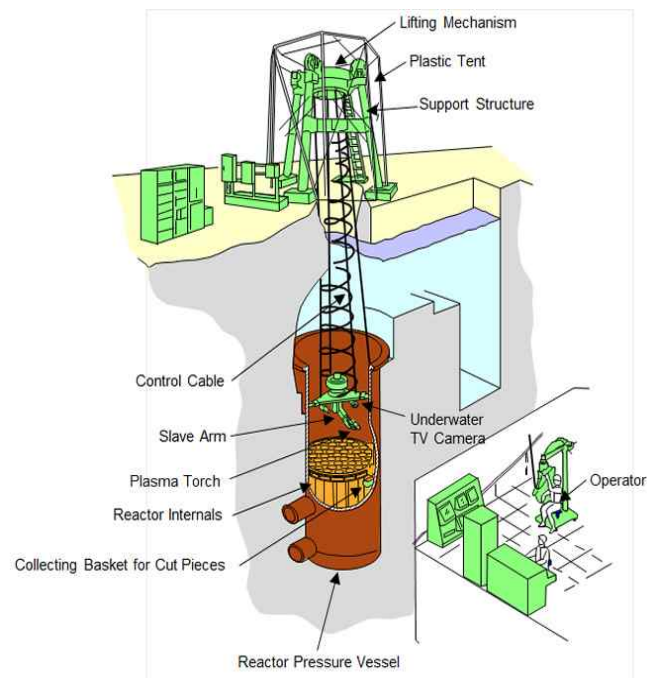
*Data from “PlantDecommissioning.com” website at

<http://www.reactor-decommissioning.com>

5. 1차년도 연구성과

▪ 4세부 [한국기계연구원]

Plasma Arc Cutting of JAEA Japan



*JAEA: Japan Atomic Energy Agency



<Slave arm(Manipulator)>



<Robotic manipulator cutting device>



<Control Room>



<Cutting of feed-water sparger>

5. 1차년도 연구성과

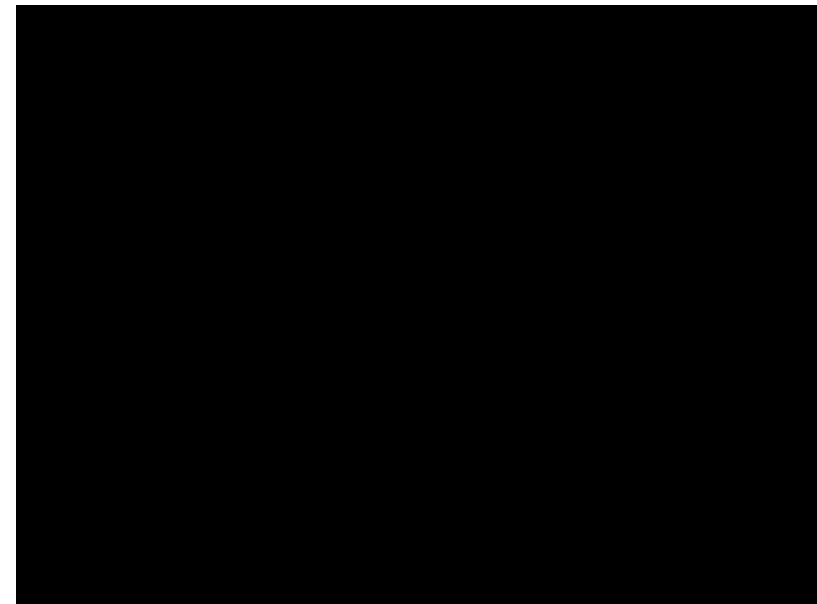
▪ 4세부 (한국기계연구원)

TWI(The Welding Institute) Group United Kingdom

- ✓ **Lasers for decommissioning: reliable technique for remote cutting of pipework, vessels and support steelwork**



<40 mm thick steel cylinder Cutting (x4)>



<12 mm, 35 mm STS Cutting Under water(x5) >

5. 1차년도 연구성과

▪ 4세부 [한국기계연구원]

Kjellberg Finsterwalde Germany

Plasma Cutting



<HiFocus 600i neo>

- Voltage : 400 V
- Cutting Current : 10-360 A
- Marking Current : 5-50 A
- Cutting range: 0.5-160 mm

Kjellberg[®]
FINSTERWALDE

Laser Cutting



<XFOCUS4000>

- Laser Power : 4,000 W
- Dimension: 12.5 × 1 × 1.7 m
- Mass: 470 kg
- Cutting range
 - Mild steel: 0.5-20 mm
 - Stainless steel: 0.3-12 mm
 - Aluminum: 0.3-10 mm

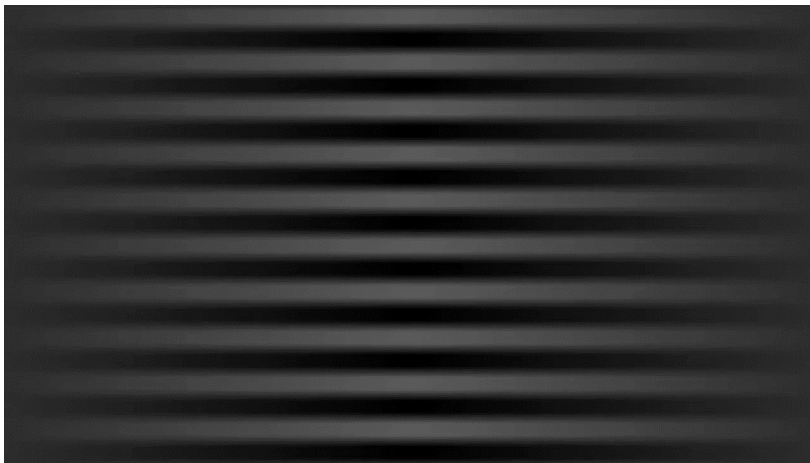
5. 1차년도 연구성과

▪ 4세부 [한국기계연구원]

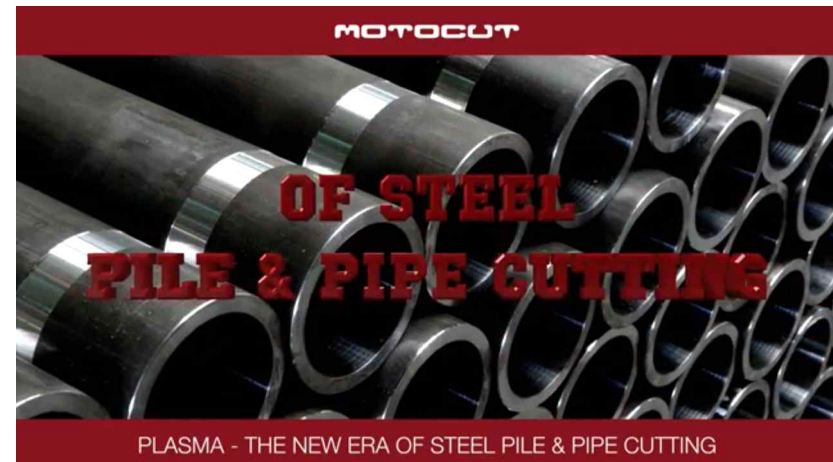
Motocut

Finland

MOTOCUT



<Concrete pile cutting with Mechanical Saw (x3)>



<Steel Pile cutting with Plasma (x2)>

5. 1차년도 연구성과

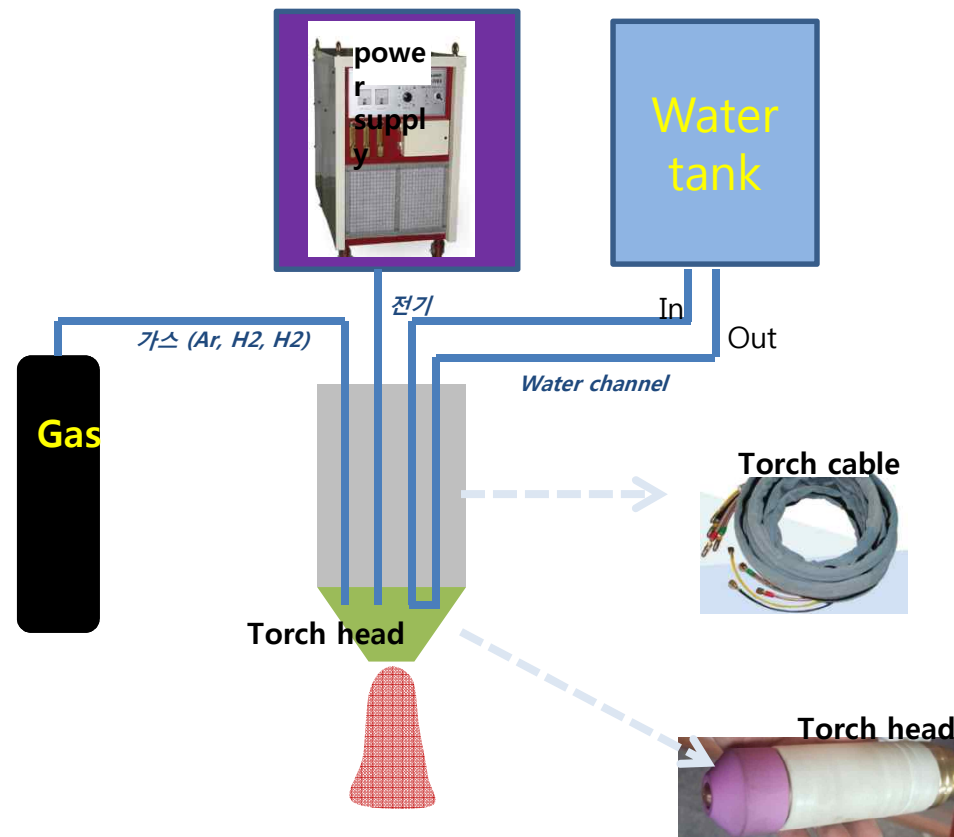
■ 4세부 [한국기계연구원]

■ 현재 연구 개발 중 기술

Plasma Arc Cutting

❖ Plasma 절단 장치

- 절단기 본체(아크 발생용 전원, 제어 장치, 아크 기동장치, 절단토치), 절단정반, 가스 공급장치, 냉각장치, 주행장치, 집진 장치 등으로 구성됨
- 자동절단에는 로봇과 NC 장치 등이 조합
- 시중에서 판매되는 장치는 대부분 토치를 제외하고는 모두 하나의 케이스에 내장된 일체화 방식이 많음



[Layout of plasma arc cutting equipment]

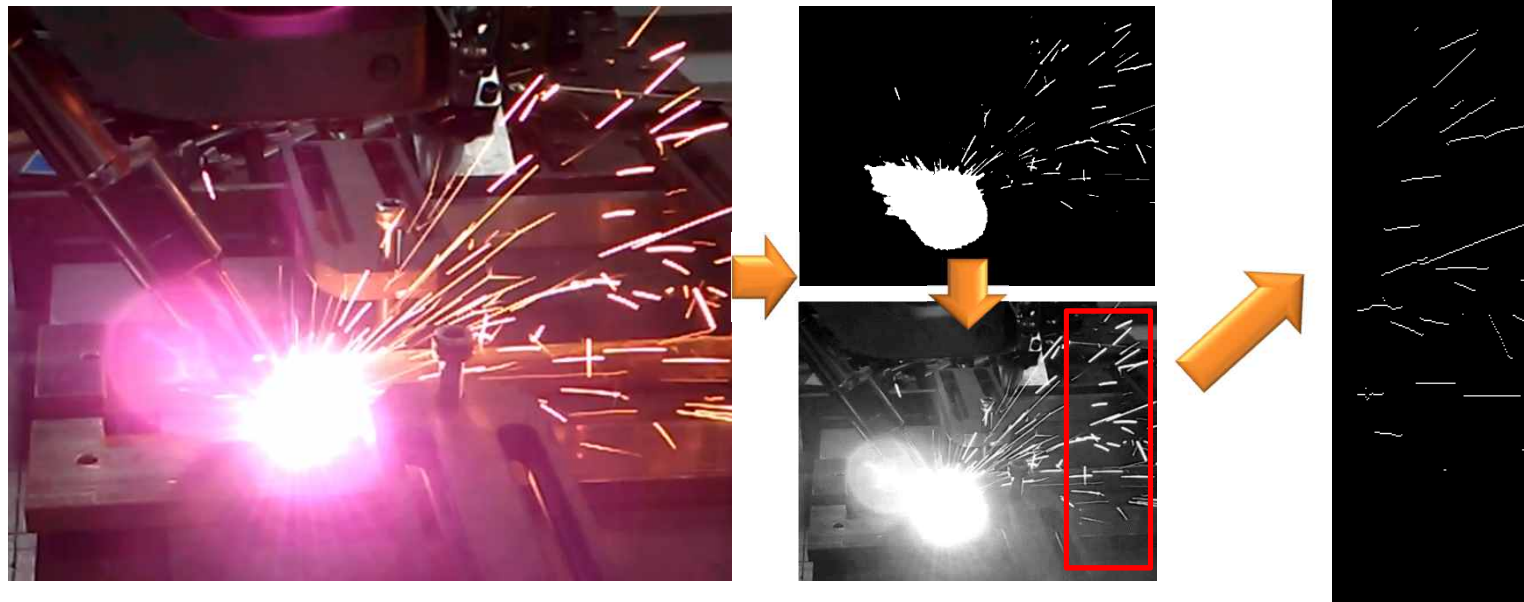
5. 1차년도 연구성과

■ 4세부 [한국기계연구원]

▣ 현재 연구 개발 중 기술

2차폐기물 발생량 평가

- ✓ 2차폐기물 발생량 (Spatter) 등에 대한 평가는 영상처리 기술을 활용하여 분석 가능
 - 절단 공정별 2차폐기물 발생량 평가 가능



6. 향후 센터운영 계획

