

[한국원자력학회 2025 춘계 워크숍 : 사용후핵연료의 안전한 저장을 위한 준비]
한국형 사용후핵연료 관리시설 설계기술 개발 현황

2025. 5. 21.(수)

한국원자력환경공단
문 태 철



CONTENTS

- I. 개 요
- II. 중간저장시설 개념설계(안)
- III. 재포장 시설 개념설계(안)
- IV. 향후 계획
- V. 공지사항

연구배경

❖ 우리나라는 '제2차 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획' 내 사용후핵연료의 관리를 위한 주요 일정은 수립되었으나, 중간저장 방식, 영구처분 방식 등 세부적 관리 방법(용기/시설)은 미확정

- 사용후핵연료는 최초 발생 후 최종 처분까지 다양한 관리 단계를 거치며, 재포장과 같은 불필요한 관리 공정을 최소화하기 위해서는 연계관리에 대한 고려가 매우 중요

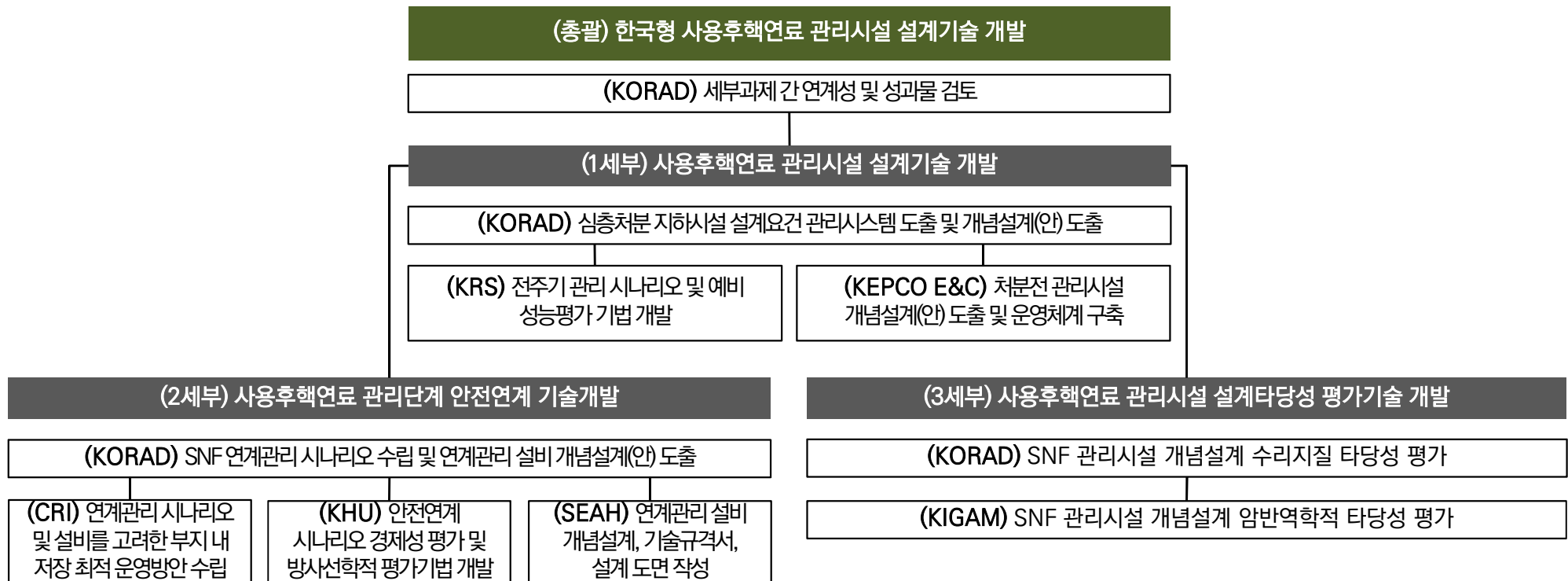


[사용후핵연료 관리 단계간 연계관리 고려사항]

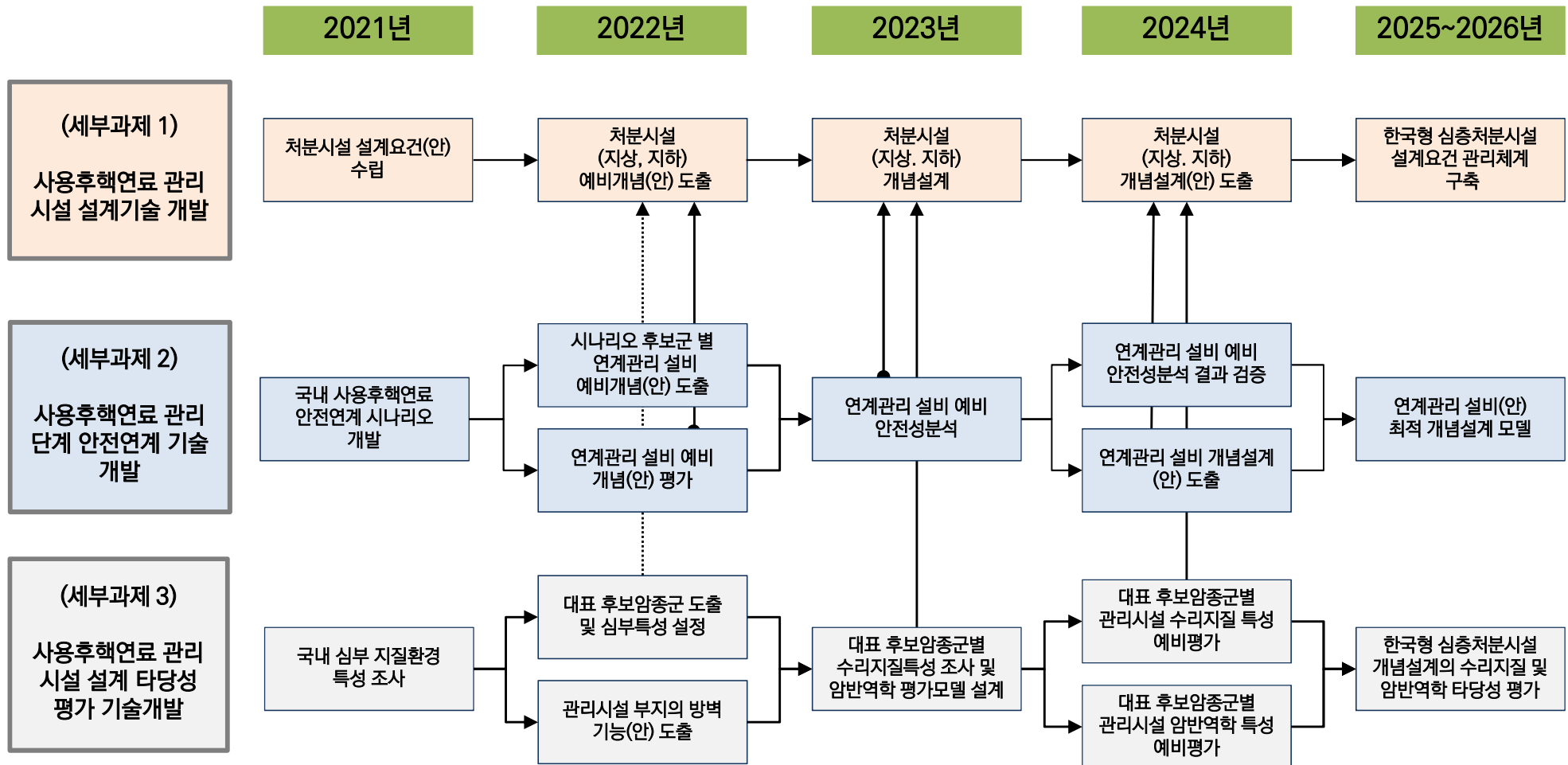
- ❖ 선도국들은 연계관리에 필요한 설비의 개념설계 이후 기본·상세 설계를 진행 중이거나 완료한 상태이며, 선도국과의 기술격차를 해소하기 위해 개념설계 단계부터 연구가 필요
- ❖ 공단은 안전하고 경제적인 사용후핵연료 전주기 관리체계구축을 위해 관리단계 간 연계를 고려한 관리시설 및 설비에 대한 설계기술 개발 진행 중

과제 기본정보

- ❖ 사업명 : 21년도 에너지기술개발사업(품목지정형)
- ❖ 과제명 : (총괄) 한국형 사용후핵연료 관리시설 설계기술개발
 (1세부) 사용후핵연료 관리시설 설계기술개발
 (2세부) 사용후핵연료 관리단계 안전연계 기술개발 / (3세부) 사용후핵연료 관리시설 설계타당성 평가 기술 개발
- ❖ TRL : [시작] 3단계 ~ [종료] 5단계
- ❖ 기간 : '21.05. ~ '26.04. (60개월)



과제 수행 로드맵



II. 중간저장시설 개념설계(안)

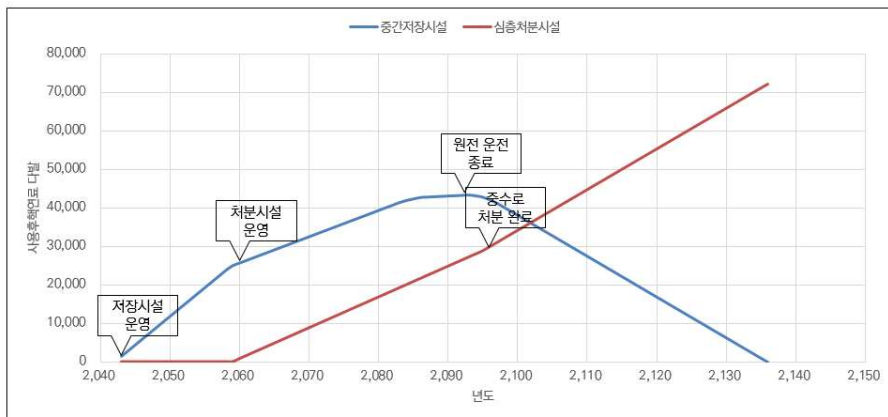
중간저장시설 규모 산정을 위한 가정사항

❖ 산출 가정사항

- 제10차 전력수급기본계획 : 신규 원전 운영계획을 포함한 최대 예상 사용후핵연료 발생량(72,035다발) 반영
- 중간저장시설 운영 개시('43년) 및 처분시설 운영('60년) 시점 가정
- 연간 중간저장시설 운반량(약 1,480 다발) 및 처분량(약 800~1,056 다발) 가정

❖ 가정사항을 바탕으로 한 최대 중간저장시설 저장량 산출

- 최대 저장량 : 43,227다발('93년)
- 사용후핵연료 관리정책 불확실성을 고려한 저장량 마진 10% 적용
: 47,550다발 → 37다발 기준 최대 1,286개 용기 저장 공간 필요
- 두 가지 형태로 중간저장 방식 개념 도출
① 금속검용용기+옥내형 저장 / ② 콘크리트용기+옥외형 저장



[경수로 사용후핵연료 중간저장시설 반입 및 반출 물량]

❖ 국외 중간저장시설 현황 분석 및 벤치마킹

- 독일 STEAG/WTI, 일본 Mutsu 등

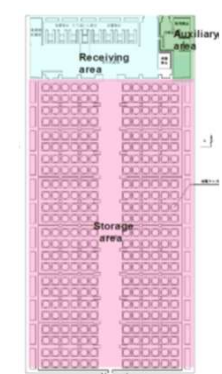
구 분	STEAG 방식	WTI 방식	Mutsu
저장용량(Cask)	125개	152개	288개
저장용기	CASTOR V/19	CASTOR V/19	MSF-24P/NEO
용기 직경	2.44m	2.44m	2.45m
열용량	39 kW / Cask	39 kW / Cask	20 kW / Cask
배열조건	5 × 25 배열	4 × 20 × 2단 배열	6 × 24 × 2단 배열
시설 규모	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 폭 : 27m ▪ 너비 : 110m ▪ 높이 : 23m 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 폭 : 38m ▪ 너비 : 102m ▪ 높이 : 19.5m 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 폭 : 62m ▪ 너비 : 131m ▪ 높이 : 28m
용기 취급설비	Overhead Crane	Overhead Crane	Air Pallet
벽 두께	1.2m	0.85m	1.5m
지붕 두께	1.3m	0.65m	1.0m
용기 간격 (중심간)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 가로 : 3.285m ▪ 세로 : 3.285m 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 가로 : 2.75m (5.40m) ▪ 세로 : 3.00m 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 가로 : 4.10m (4.50m) ▪ 세로 : 3.50m
공기입구 크기	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 가로 × 세로 : 5.57m × 2.80m 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 가로 × 세로 : 5.30m × 2.60m 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 가로 × 세로 : 7.375m × 3.80m



[STEAG]



[WTI]



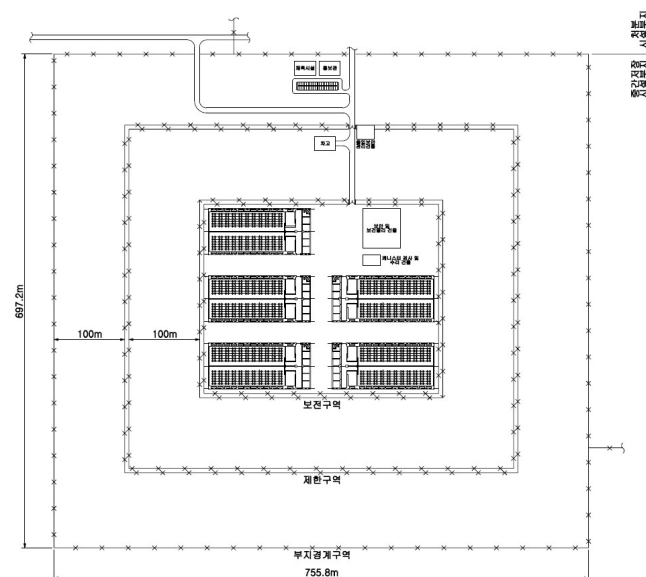
[Mutsu]

II. 중간저장시설 개념설계(안)

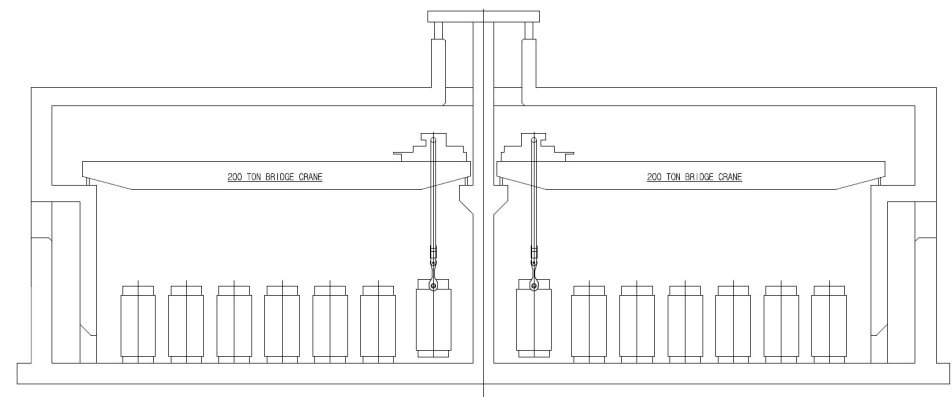
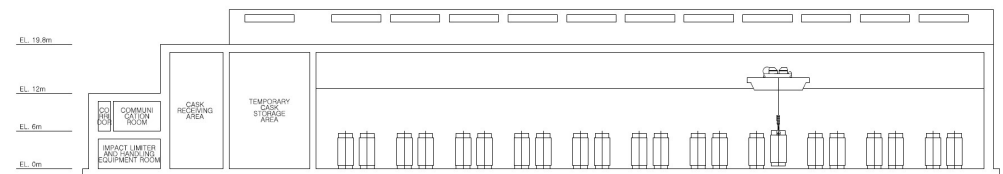
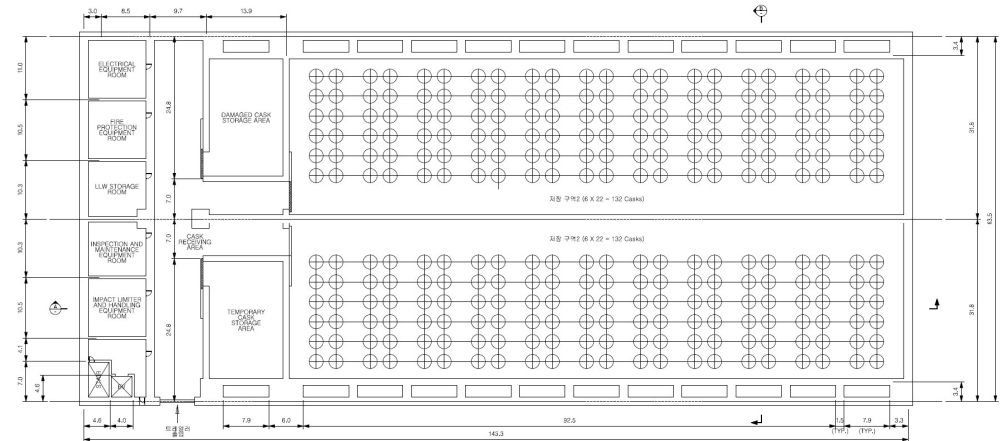
금속용기 + 옥내형 방식 중간저장시설 개념

❖ 금속검용용기 + 옥내형 저장 방식

- 용기 인수구역은 각 옥내형 건물마다 존재
- 264 Casks/동 x 5개동 = 1,320 Casks (>1,286)
- 배열 : 6 x 22 x 2단 배열
- Cask 이송 : overhead crane 2기
- 시설 두께 : 벽 1.5m / 지붕 1.3m
- 저장용기 간격
 - 용기 표면 간 간격 1m / 2열 단위 간 간격 3.5m
 - 저장용기 이동 통로 5.75m



[옥내형 중간저장시설 배치 개념도]



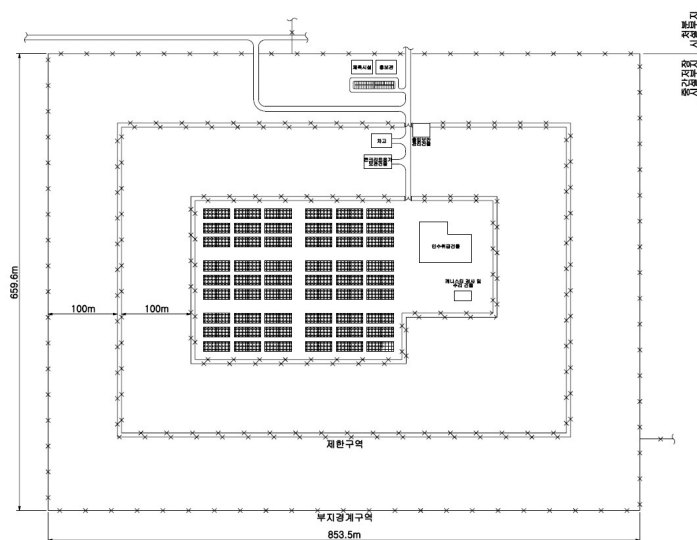
[옥내형 중간저장시설의 개념도]

II. 중간저장시설 개념설계(안)

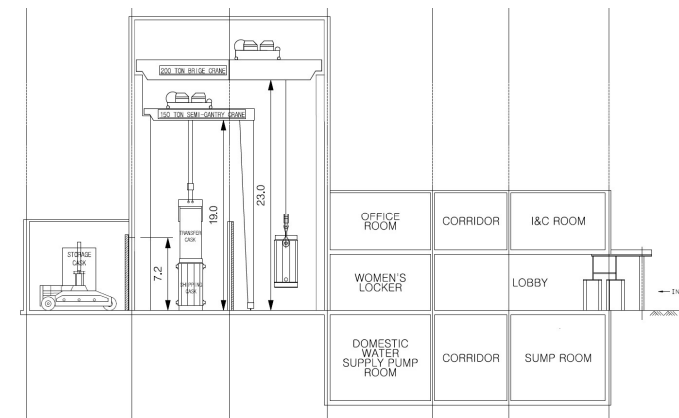
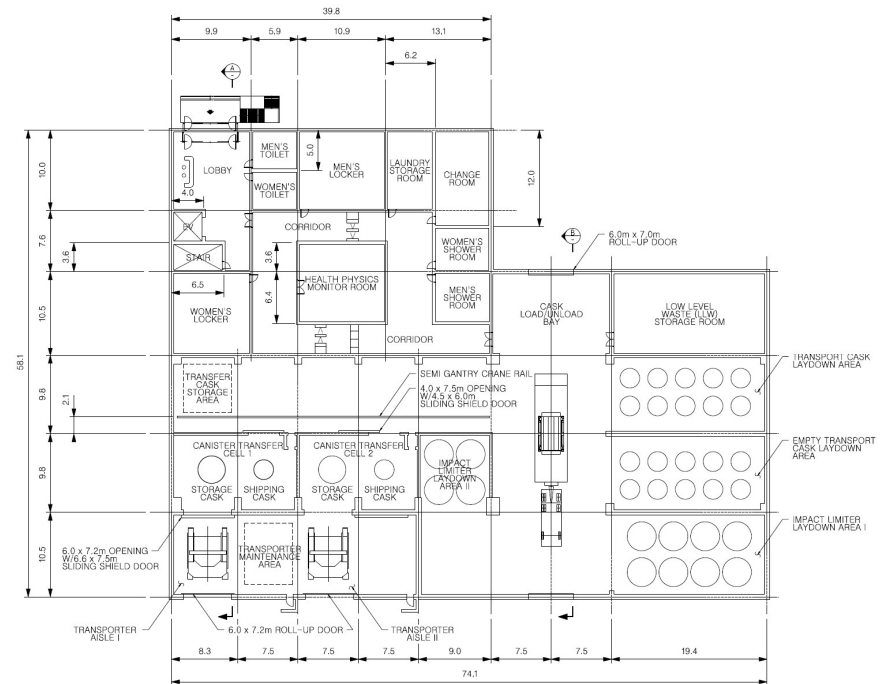
콘크리트용기 + 옥외형 중간저장시설 개념

❖ 콘크리트용기 + 옥외형 저장 방식

- 용기 인수건물이 별도로 존재하며, 인수건물에서 운반용기 검사, 완충체 제거, 캐니스터 저장용기 장입 등의 작업을 수행
- 인수건물 내 크레인 2기로 용기 및 캐니스터를 이송하고 장입된 저장용기를 옥외 패드로 운반 시 수직 이송기 이용
- 저장용기의 캐니스터를 향후 재포장 시설로 반출시에는 인수건물에서 운반용기로 포장
- 24 Casks/패드 x 54 패드 = 1,296 Casks 개 저장
- 배열 : 3 x 8 (패드) x 54 배열
- 용기 표면 간 간격 1.4m



[옥외형 중간저장시설 콘크리트 용기 저장 패드 배치 개념도]

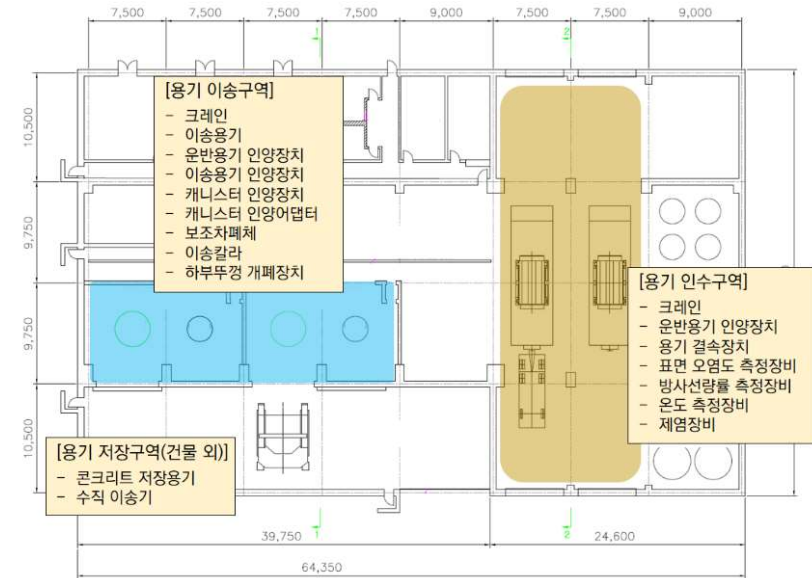


[옥외형 중간저장방식 용기 인수취급시설의 개념도]

II. 중간저장시설 개념설계(안)

중간저장 시설 필요 설비 목록 도출

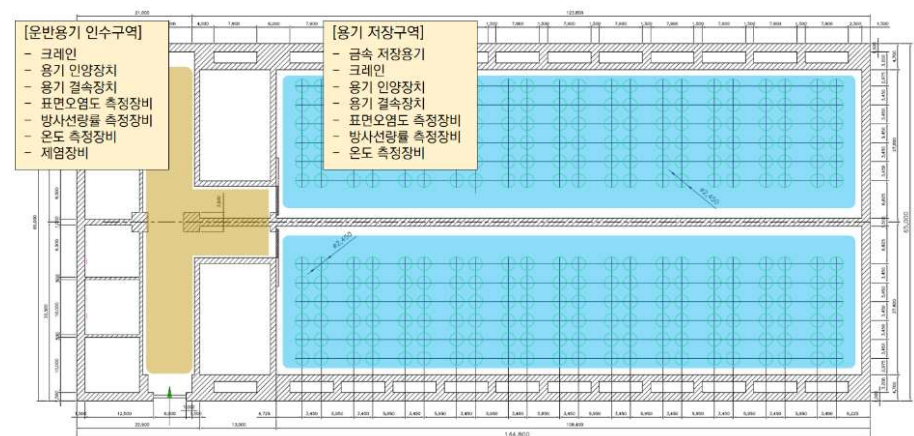
- ❖ 중간저장 형태(옥내형/옥외형) 별 필요 설비 목록 도출
 - 용기 인수구역 / 이송구역 / 저장구역 구분
 - 설비 형태별 분류
 - 용기 : 운반용기, 저장용기
 - 인양 및 이송 설비 : 크레인, 어댑터, 이송용기, 수직 이송기 등
 - 취급설비 : 결속장치, 보조 차폐체, 이송칼라 등
 - 검사설비 : 표면 오염도 · 방사선량률 · 온도 측정장비, 제염장비 등
 - 검사설비는 상용화된 설비를 활용하므로 개념설계 대상에서 제외
- ❖ 설비 운영 시 작업 시간과 운영 공정 도출
 - 작업자 방사선학적 영향평가 시 활용



[옥외형 중간저장 인수시설 구역별 필요 설비 목록]

공속 저장용기 운영공정 (임시보관구역 有)	운반용기 이송라인	작업시간 (분)	공속 저장용기 이송라인	작업시간 (분)	비고	
Day 1	용기 인수구역	- 운반용기의 식별번호와 관련서류 확인 및 인수구역 이동	10	운반용기 준비		
		- 운반차량 표면오염 측정 및 보호용 후드 제거	10			
		- 운반용기 육안검사 후 운반 중 쌓인 먼지나 이물질 제거	20			
		- 충격완충체 체결볼트 제거 및 용기에서 충격완충체 분리	40			
		- 트러니언 체결볼트 제거 및 트러니언 육안검사	10			
		- 크레인에 운반용기 인양장치 설치	10			
		- 상부 트러니언에 인양장치 장착 후 수직 인양	20			
	용기 검사구역	- 용기검사구역으로 운반용기 이동	10			운반용기 검사
		- 운반차량에 대한 오염도를 측정하고 물양장으로 이동	10			
		- 용기검사구역 작업대 안에 운반용기 안착 및 육안검사	10			
	용기 임시보관구역	- 운반용기 표면온도, 방사선량률, 표면오염도 검사	60	운반용기 검사		
		- 용기 임시보관구역으로 공속 저장용기 이송	10			
	용기임시 보관구역	- 용기 임시보관구역 내 지정된 위치에 공속 저장용기 안착	10	임시보 관		
		- 크레인에 장착된 인양장치 분리 및 지정장소 보관	10			
용기임시 보관구역		- 크레인에 공속 저장용기 인양장치 설치	10	임시보 관		
		- 크레인을 이용하여 공속 저장용기를 저장구역 입구로 이송	20			
저장구역		- 저장구역 지정된 위치에 공속 저장용기 이송 및 안착	30	용기저 장		
		- 공속 저장용기 표면온도, 방사선량률, 표면오염도 검사	60			
운반용기 이송라인 전체 작업시간		220	콘크리트 저장용기 이송라인 전체 작업시간		140	
전체 작업시간(분)					360	

[중간저장 방식 별 운영 공정 도출]



[옥내형 중간저장시설 구역별 필요 설비 목록]

II. 중간저장시설 개념설계(안)

용기(운반, 저장) 개념설계(안)

❖ 한수원 부지 내 건식저장 캐니스터와 호환 될 수 있도록 설계에 반영

[캐니스터 제원]

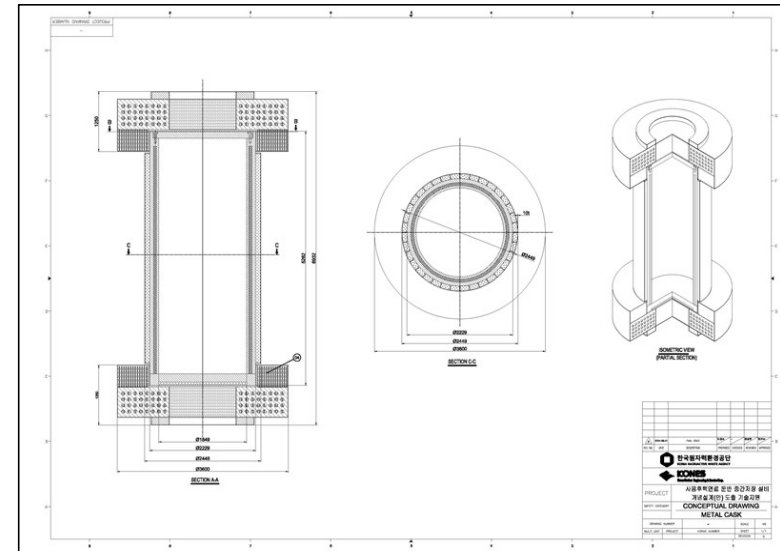
- 용량 : 37다발
- 캐니스터 외경/높이 : (외경) 1,828.8mm / (높이-WE) 4,692.7mm, (높이-CE) 4,870.5mm
- 붕괴열 : 중간저장시설로의 소외 운반을 고려하여 캐니스터 당 23kW 수준 우선 고려 (미국 NAC사 MAGNATRAN 용기 붕괴열 우선 참고)
- 무게 : 약 46.6ton

[운반용기 제원]

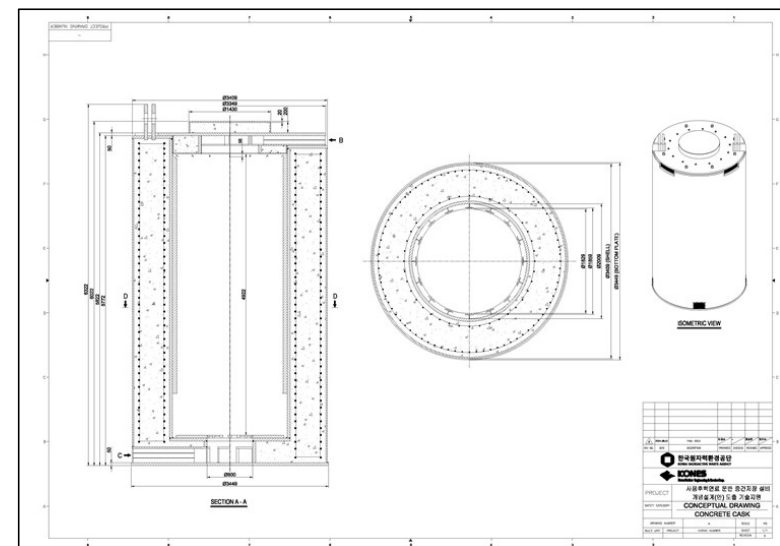
- 용량 : 경수로 사용후핵연료 37다발 (WE/CE 공용)
- 외경 / 내경 : 2,449mm / 1,849mm
- 높이(완충체 포함) / 내부 높이 : 5,282mm / 4,892mm
- 무게(캐니스터 제외) : 약 92ton
- 외부 쉘 안에 납 재질 감마차폐체 삽입

[콘크리트 저장용기 제원]

- 외경 / 내경 : 3,449mm / 1,829mm
- 높이(완충체 포함) / 내부 높이 : 6,022mm / 4,922mm
- 무게(캐니스터 제외) : 약 117ton
- 유로 출입구 : 각 4개 (자연대류 냉각)



[운반-저장 겸용용기 개념도]



[콘크리트 저장용기 개념도]

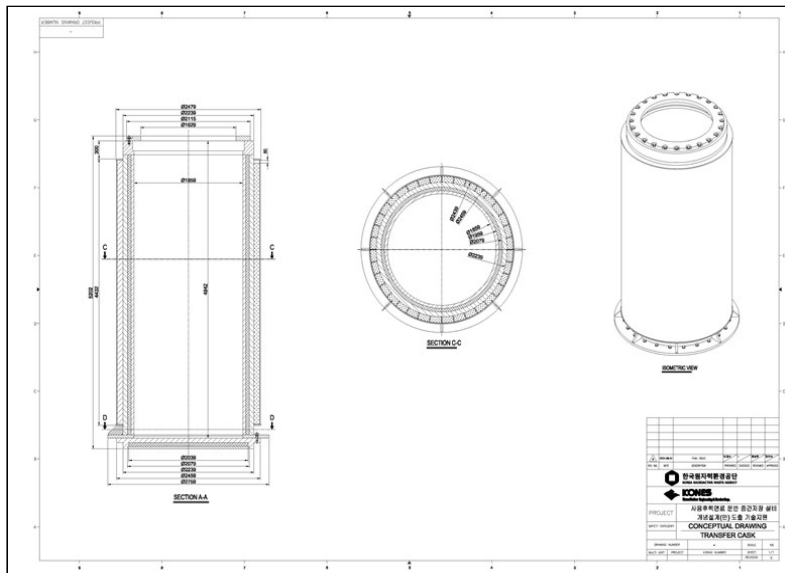
II. 중간저장시설 개념설계(안)

이송용기 및 용기 취급 설비 개념설계(안)

- ❖ 이송용기 : 운반용기와 저장용기 사이 캐니스터를 인출하고 장입할 때 작업자 대상 방사선 차폐 목적으로 사용
(볼트로 체결되는 뚜껑부와 슬라이드 형태로 개폐되는 하부판 구조)

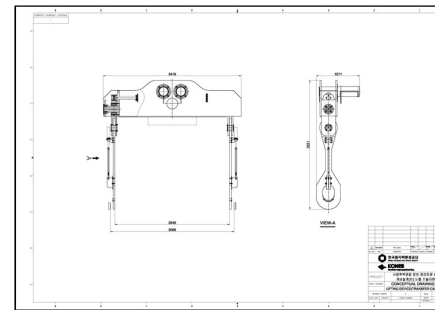
[이송용기 제원]

- 외경 / 내경 : 2,759mm / 1,859mm
- 높이(완충체 포함) / 내부 높이 : 5,202mm / 4,942mm
- 무게(캐니스터 제외) : 약 72ton
- 외부 쉘 안에 납 재질 감마차폐체 삽입

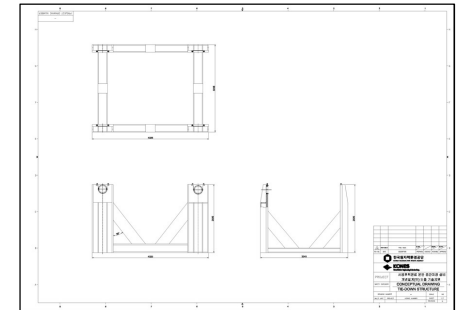


[이송용기 개념도]

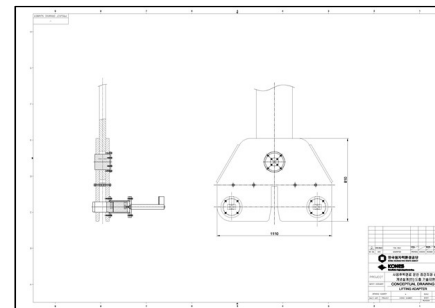
- ❖ 중간저장 시설 내 용기 취급 설비 : 성능 요건, 개념도 및 설계 사양 도출



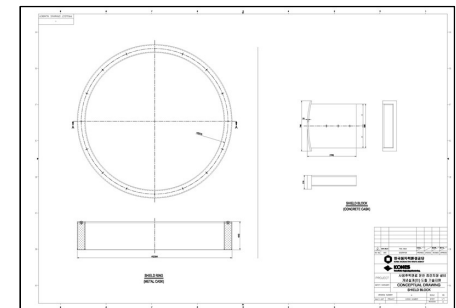
[운반용기 인양 장치]



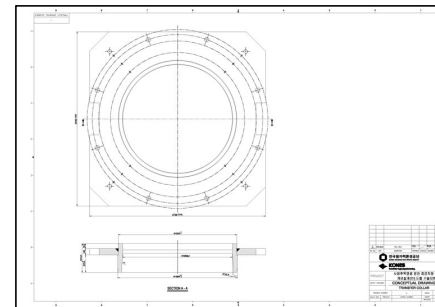
[운반용기 결속 장치]



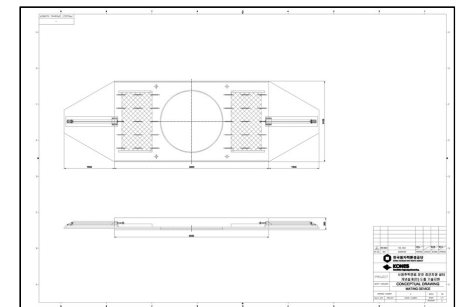
[캐니스터 인양 장치]



[보조 차폐체]



[이송 칼러]

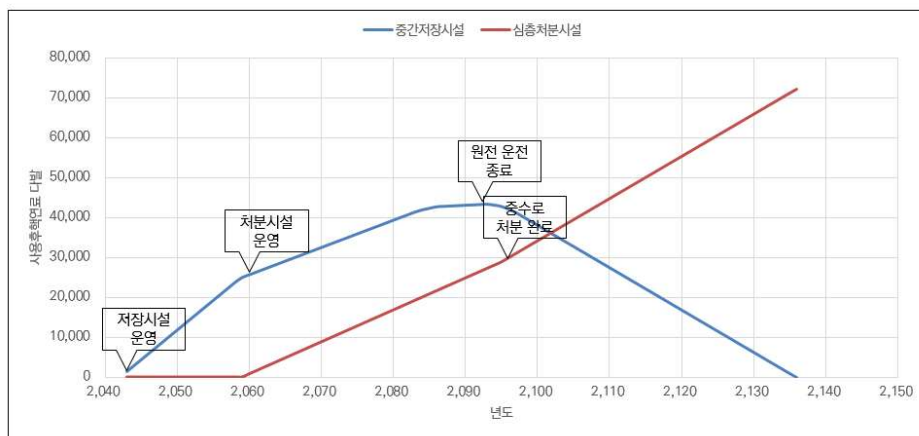


[이송용기 하부뚜껑 개폐 장치]

III. 재포장 시설 개념설계(안)

재포장 시설 설계 가정사항

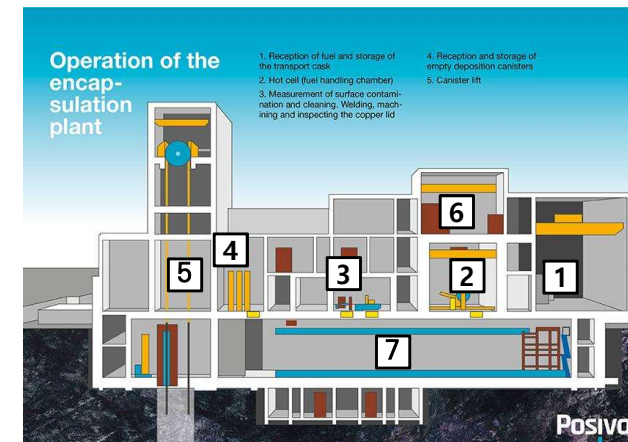
- ❖ 경수로 사용후핵연료 처분량 산정 가정사항
 - 처분시설 운영 시점 : '60년
 - 사용후핵연료 최소 냉각기간 : 40년
 - 연간 경수로 사용후핵연료 처분량*
 - 2060년~2095년 : **연간 800다발** (중수로 동시 처분 상황 가정)
 - ⇒ 처분용기 **연간 200개** 재포장 필요
 - 2096년~ : **연간 1056다발** (중수로 처분 완료 상황 가정)
 - ⇒ 처분용기 **연간 264개** 재포장 필요
- * 원전 운전 완전 종료 시점에 발생한 사용후핵연료의 최소 냉각기간 40년 도달 시점에 처분장으로 운반하여 처분 완료하는 것으로 보수적 가정



[경수로 사용후핵연료 중간저장시설 반입 및 반출 물량]

핀란드 재포장 시설 설계 사례 검토

- ❖ 핀란드 재포장 시설은 건식 환경에서 재포장을 수행하며, 현재 시설 건설은 완료되어 내부 설비 반입 및 설치 진행 중
 - **주당 1개**의 처분용기 재포장을 수행하며, **연간 약 40~50개** 재포장 (3교대 활용 시 연간 최대 100개 가능)
 - 중간저장시설에서 **습식 운반용기**를 이용해 사용후핵연료를 반입하며, 핀란드 원전에서 발생하는 사용후핵연료의 종류(EPR, VVER, BWR)에 따라 반입되는 운반용기 종류와 용량이 다름
 - 작업자의 접근을 최소화하여 **대부분의 작업이 원격으로 수행**



[핀란드 재포장시설 단면도]

- ① 운반용기 인수 및 저장 구역, ② 연료 취급 셀, ③ 처분용기 용접, 표면처리, 검사 스테이션, ④ 빈 처분용기 인수 및 저장 구역, ⑤ 처분용기 처분장 이송 구역, ⑥ 연료취급셀 설비 제어 및 정비 구역, ⑦ 운반용기 및 처분용기 이송 복도 (출처: Posiva Homepage)

III. 재포장 시설 개념설계(안)

국외 사례 시사점 분석

국외 사례(핀란드 등)와 국내 처분 여건 간 비교 분석을 통해 국내 경수로 사용후핵연료 재포장 시설 설계 시사점 도출

(1) 사용후핵연료 인출 준비 과정

핀란드의 경우 습식 운반용기(Bare fuel형)를 사용하지만, 국내 사용후핵연료 운반/저장방식은 캐니스터형 용기를 사용할 것으로 예상

(시사점)

- 캐니스터형 운반 용기는 사용후핵연료 인출을 위해 연료 취급 셀과 유사한 밀폐된 환경에서 캐니스터 절단 작업 필요

(해결방안)

- 별도의 캐니스터 절단 구역을 추가하고, 절단 칩이 캐니스터 내외부에 분사될 위험이 적은 캐니스터 절단 수단 적용

(2) 사용후핵연료 검사

핀란드는 습식 중간저장시설에서 사용후핵연료 반출 전 결함 유무를 검사

(시사점)

- 캐니스터에 포장된 사용후핵연료는 재포장 시설에서 개봉 하기 전 결함 유무 확인이 어려우므로, 연료 취급 셀 내부 에서 결함을 검사하는 과정이 필요

(해결방안)

- 연료 취급 셀 내부에 연료 검사 공간을 추가

(3) 폐 캐니스터의 처리

Bare fuel 방식과 달리 캐니스터 방식 운반용기는 사용후핵연료 인출 후 폐캐니스터와 절단된 뚜껑 등 폐기물 발생

(시사점)

- 절단된 캐니스터는 폐기되거나 혹은 재활용 될 수 있으며, 운반용기 취급 시 절단된 캐니스터 뚜껑을 별도로 취급하여 반출하는 공정 필요

(해결방안)

- 절단된 뚜껑과 폐캐니스터를 제염 후 반출하는 별도 구역을 추가

(4) 연간 재포장 물량

우리나라의 사용후핵연료 발생량과 누적량은 핀란드(운영 원전 5기)에 비해 훨씬 방대하며, 핀란드는 연간 계획된 포장 처분용기 수가 40개에 불과

(시사점)

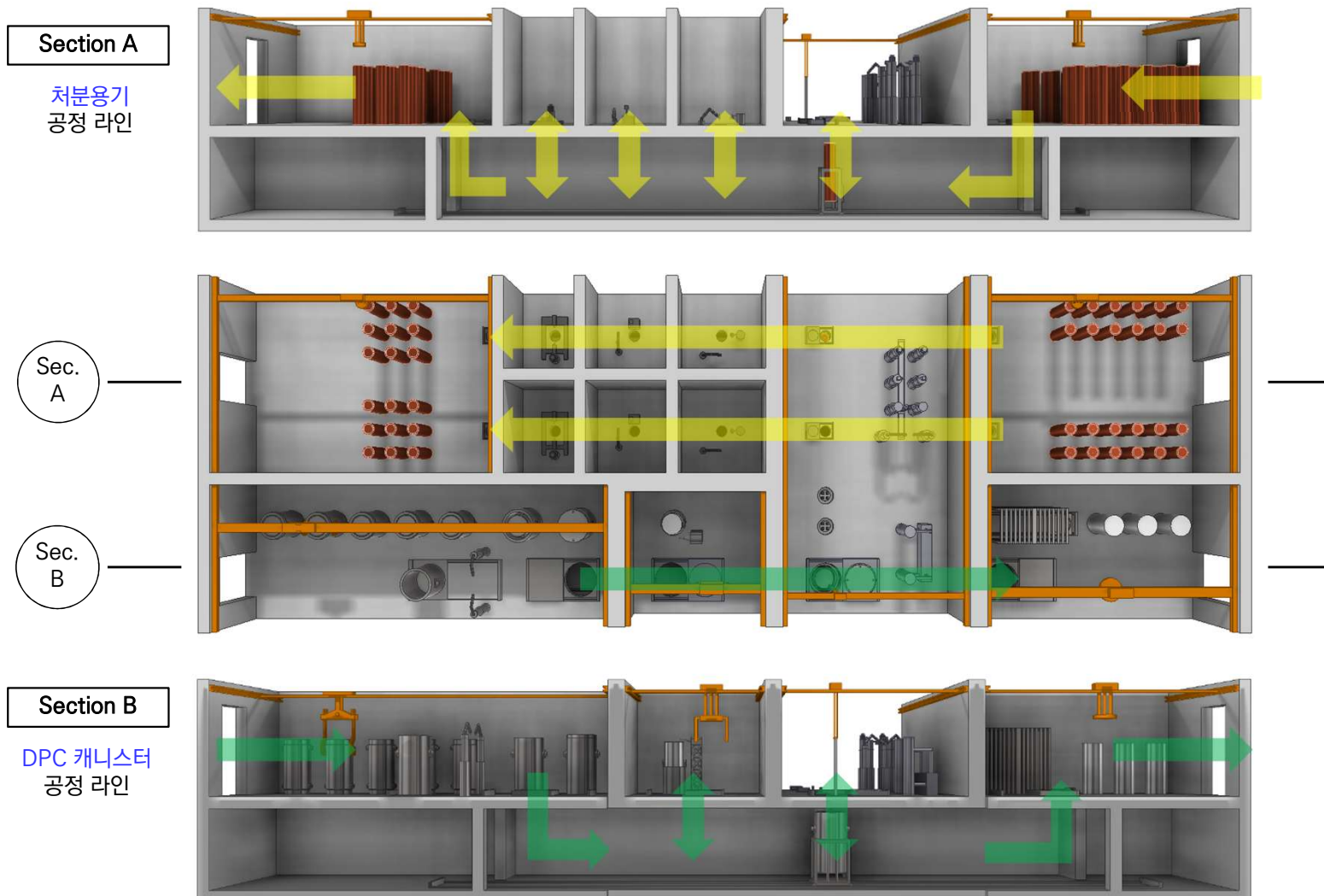
- 재포장 시설 확장(재포장 라인 추가) 또는 교대근무 도입 등을 통해 연간 재포장 수량 증가 필요

(해결방안)

- 2교대 작업을 도입하고, 처분용기 이송라인을 2개로 증설하여 사용후핵연료 장전과 처분용기 용접 작업이 교차로 진행되도록 함으로써 재포장 효율 증대

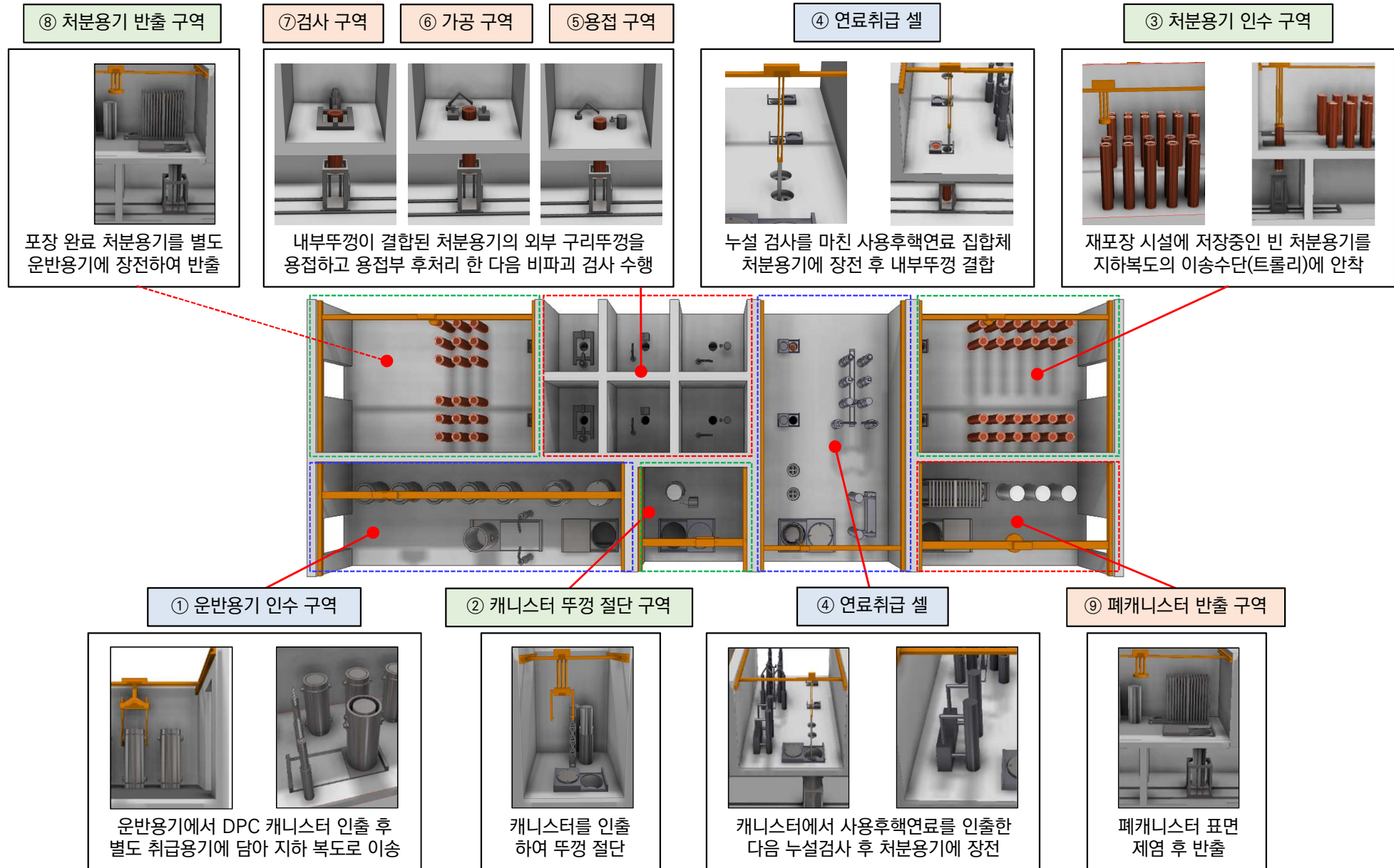
III. 재포장 시설 개념설계(안)

재포장 시설 작업 흐름도



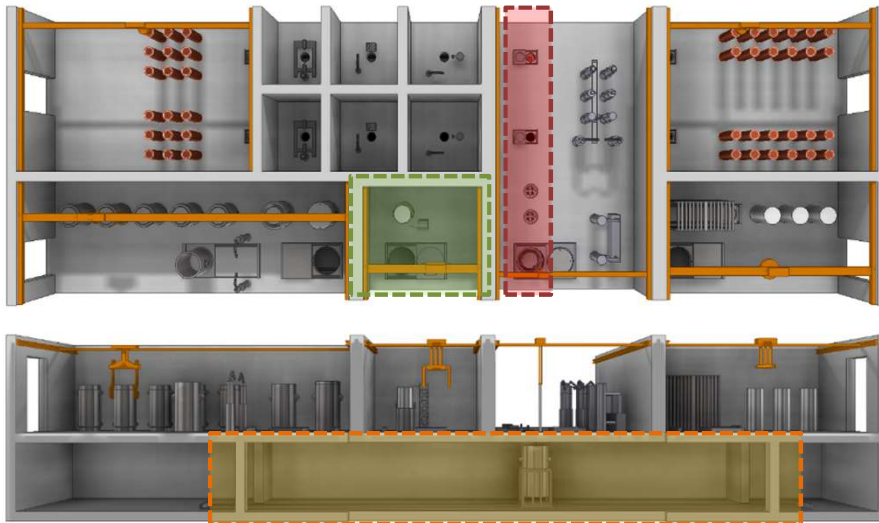
III. 재포장 시설 개념설계(안)

재포장 시설 작업 구역



III. 재포장 시설 개념설계(안)

재포장 구역 별 설비 개념설계

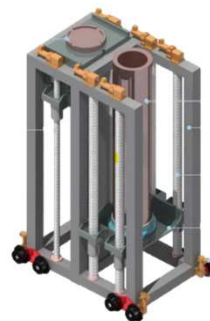


취급용기 이송 트롤리



운반용기로부터 인출된 SF 캐니스터를 담은 취급 용기를 지하복도에서 이송하고 1층 작업 구역에 도킹시키는 설비

처분용기 이송 트롤리

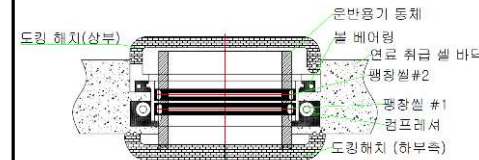


처분용기와 처분용기 구리뚜껑을 지하 복도에서 이송하고 1층 작업 구역에 도킹시키는 설비

사용후핵연료 취급장치 / 용기 도킹 스테이션

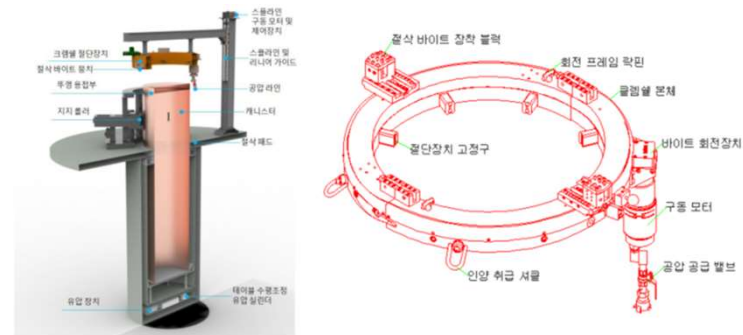


SF 캐니스터로부터 사용후핵연료를 인출하여 내부 검사구역 및 처분용기 안으로 장입하는 취급 설비



캐니스터가 보관된 취급용기 및 처분용기를 도킹시키고 구역 밀폐를 유지하는 설비

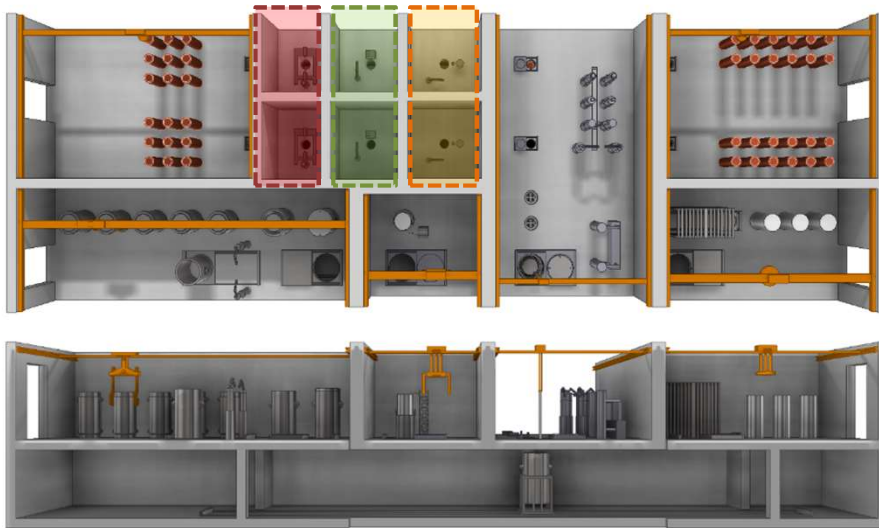
SF 캐니스터 뚜껑 절단 스테이션



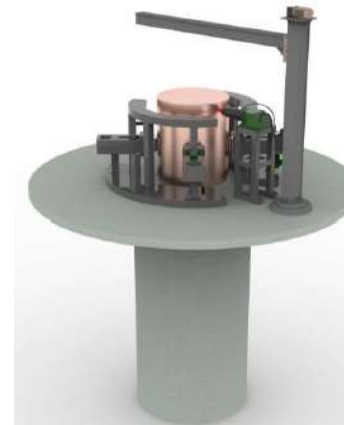
SF 캐니스터 뚜껑을 절단하기 위해 캐니스터를 안착시키는 절단 스테이션 및 절단 설비(클램프 방식)

III. 재포장 시설 개념설계(안)

재포장 구역 별 설비 개념설계



처분용기 용접부 검사 설비



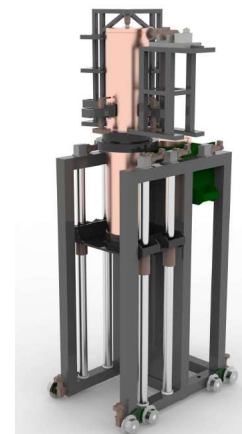
용접 및 표면 가공을 마친
처분용기가 도킹된 후
바닥의 회전테이블로
용기를 회전시키면서
용접부의 비파괴 검사를
수행하는 설비

처분용기 뚜껑 용접 설비



처분용기가 도킹된 후
바닥의 회전테이블로
용기를 회전시키면서
마찰교반용접을 수행하는
설비

처분용기 용접부 가공 설비



처분용기가 도킹된 후
바닥의 회전테이블로
용기를 회전시키면서
용접된 표면을 가공하는
설비

성과물 활용계획

- ❖ 향후 관리시설 및 설비 확보 시 기초 자료로서 활용
 - 소외 운반용기 및 중간저장 용기, 재포장 설비, 중간저장시설 및 재포장 시설 등
- ❖ 다부처 예타사업의 종합안전성 입증체계 구축의 데이터로 활용

후속 연구 계획

- ❖ 중간저장시설 안전성 입증을 위한 운영 및 평가기술 개발
 - 운영 및 취급시스템 설계 구체화 및 확률론적 안전성 평가 기술 개발
- ❖ 중수로 사용후핵연료 처분용기 개념과 처분 전 재포장 방안 마련
 - 한국원자력연구원 과거 연구 사례를 기반으로 개선 적용 방안 도출
 - 중수로 바스켓 처분성 검토 및 재포장 개념 도출
- ❖ 경수로 사용후핵연료 재포장 설비 개념 구체화 및 실증연구 추진

IAEA 특별워크숍 개최

❖ 배경: 공단은 IAEA 요청으로 SFERA와 PASSED 기술 회의 공동 개최 수락

- SFERA(Spent Fuel Research and Assessment): 사용후핵연료 건전성에 대한 국제공동연구(운영기간: '21.11 ~ '25.12)
- PASSED(Performance Assessment of Storage Systems for Extended Durations): 건식저장용기 장기 안전성에 대한 국제공동연구(운영기간: '22.6 ~ '26.9)

❖ 참여국: 15개 이상의 회원국(미국, 영국, 독일, 프랑스, 네덜란드 등)

❖ 참여인원: 운반·저장 분야 국내외 전문가 100~150여명

* 국내전문가는 IAEA 기술회의에 Observer로 참석 가능

❖ 주관: IAEA/한국원자력환경공단

❖ 후원: 한전원자력연료, 한수원, 라온넥스텝, 한국원자력연구원

❖ 일시/장소: '25.6.23.(월) ~ 6.27.(금) / SKY31(롯데타워)



❖ 참석여부 신청사이트 : <https://naver.me/xs3cceNe>

감사합니다

