

원전 해체 핵심실증시설의 차폐 및 환경에 대한 방사선영향평가

2022.10.19

한국원자력연구원
노시완

본 발표 내용은 "원전 해체 핵심실증시설 안전성 평가 및 설계기술 개발" 과제의 연구결과이며
추후 해당 시설의 인허가 신청 시 신청서류의 내용과 상이할 수 있음

목차

1. 방사능 재고량 산출
2. 방사선차폐평가
3. 환경에 대한 방사선영향평가

방사능 재고량 산출

설계기준 시설 반입 물질의 정의

- 핵심실증시설(핫셀)에서는 원전해체 시 채취되는 기기 시료를 절단 및 가공하여 시편을 제작하고 이를 이용하여 다양한 물리화학적 특성시험을 수행
- 핫셀에서는 중준위급 시료가 반입되며 원자로압력용기와 원자로내부구조물을 주요 반입시료로 선정
- 시설설계 및 안전성평가를 위해 반입되는 시료의 크기 및 수량에 대한 정의가 필요

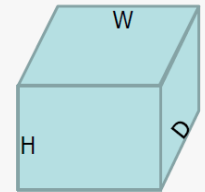
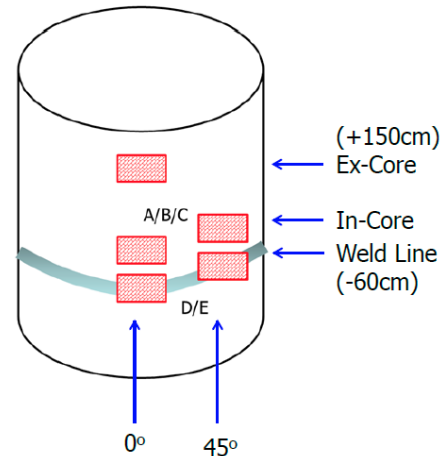
방사능 재고량 산출

원자로압력용기

- 원자로압력용기의 조사취화는 후속기의 수명연장에서 가장 우선 고려되어야 할 기기
- 조사취화 실증 평가를 통해 수명연장 인허가 및 공공수용성 향상에 기여
- 노심대 모재 및 용접부에 대한 충격, 인장, 인성, 조직검사, 화학분석

1개 호기 해체 시 원자로압력용기 시료 정보

활용 기기	시료크기 (cm ³)	수량	시료채취 위치	시편
원자로 압력 용기	20x22x 17	3	노심대 모재	Charpy, 인장, PCVN, 1/2T-CT, 조직
	20x12x17	2	노심대 용접부	
	20x20	1	노즐부 cold leg	Charpy/PCVN, 소형인장



Base: W20 x H22 x D17 cm

Weld: W20 x H12 x D17 cm

각 블록의 일정 깊이에서
충격시편 15개, 인장시편 3개,
1/2T-CT 시편 4개 이상 채취 가능

원자로압력용기 시료 채취 정보
(한국원자력학회 2016년 추계학술대회, 고리1호기
주기기 재료 활용연구 workshop)

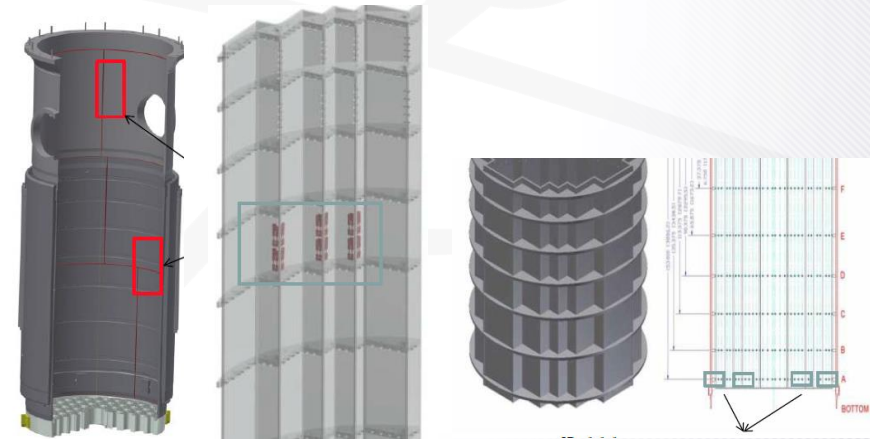
방사능 재고량 산출

원자로내부구조물

- 장기가동원전의 내부구조물 조사응력부식균열(IASCC)이 중요한 열화메커니즘으로 부각
- 중성자조사 재료의 기계적 인장물성, 파괴인성 및 치수변화 실증 평가 필요
- Core barrel, baffle plate, baffle former bolt

1개 호기 해체 시 원자로내부구조물 시료 정보

활용 기기	시료크기 (cm ³)	수량	시료채취 위치	시편
원자로 내부 구조물	10×20×4.445	4	Core barrel	항복응력, 최대인장응력, 연신률, 파괴인성값측정, 조사집적량과열화 에의한치수측정, 조직검사
	10×20×2.86	9	Baffle plate	
	-	20	Baffle former bolt	



원자로내부구조물 시료 채취 정보
(한국원자력학회 2016년 추계학술대회, 고리1호기
주기기 재료 활용연구 workshop)

방사능 재고량 산출

핵심실증시설 연간 설계기준 반입물량

- 연간 2개 호기 해체시료가 반입되는 것으로 가정

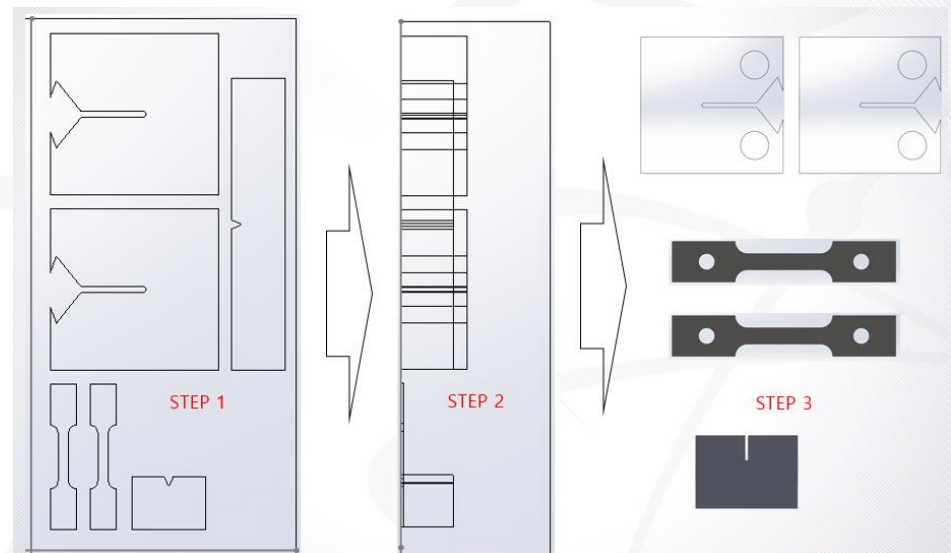
<핵심실증시설 연간 설계기준 반입물량>

활용기기	시료채취 위치	시료크기(cm)	시료재질	시료부피 (cm ³)	시료무게 (kg)	수량
원자로 압력 용기	노심대 모재	20×22×17	carbon steel (7.82g/cm ³)	7,480	58.5	6
	용접부	20×12×17	carbon steel (7.82g/cm ³)	4,080	31.9	6
원자로 내부 구조물	core barrel	10×20×4.445	Type304 stainless steel (7.94g/cm ³)	889	7.06	8
	baffle plate	10×20×2.86		572	4.54	18
	baffle former bolt	-		12	0.096	40

방사능 재고량 산출

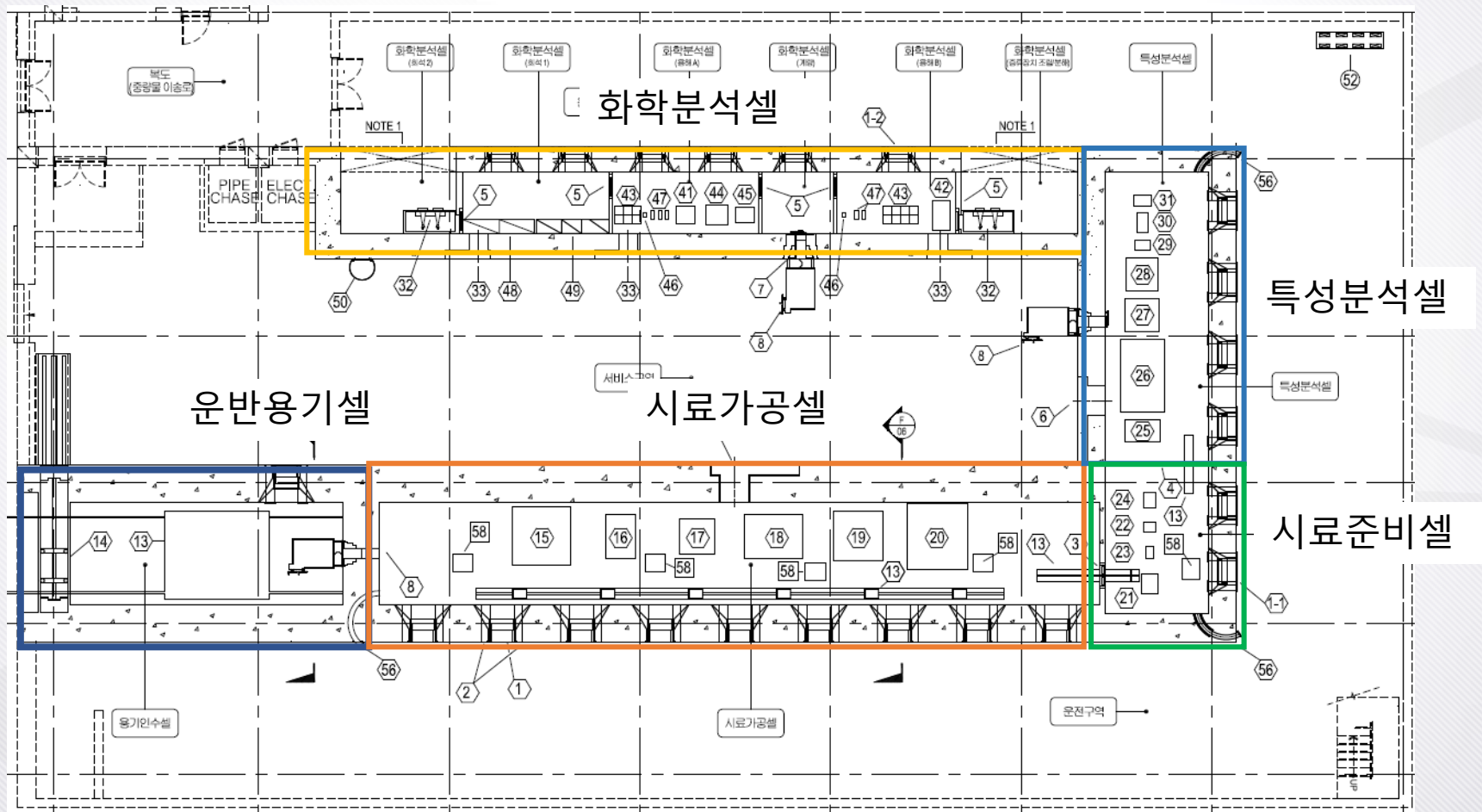
핫셀별 설계기준 취급물량 산출

- 인수저장셀: 반출입 대상 시료의 임시저장
- 시료가공셀: 반입된 해체시료의 1차 기계적 절단 및 재료특성 시험시편 가공
- 시료준비셀: 정밀분석을 위한 미세시료 제작
- 특성분석셀: 제작된 시편의 재료특성분석과 미세조직관찰
- 화학분석셀: 화학분석을 위한 전처리 및 시료이송



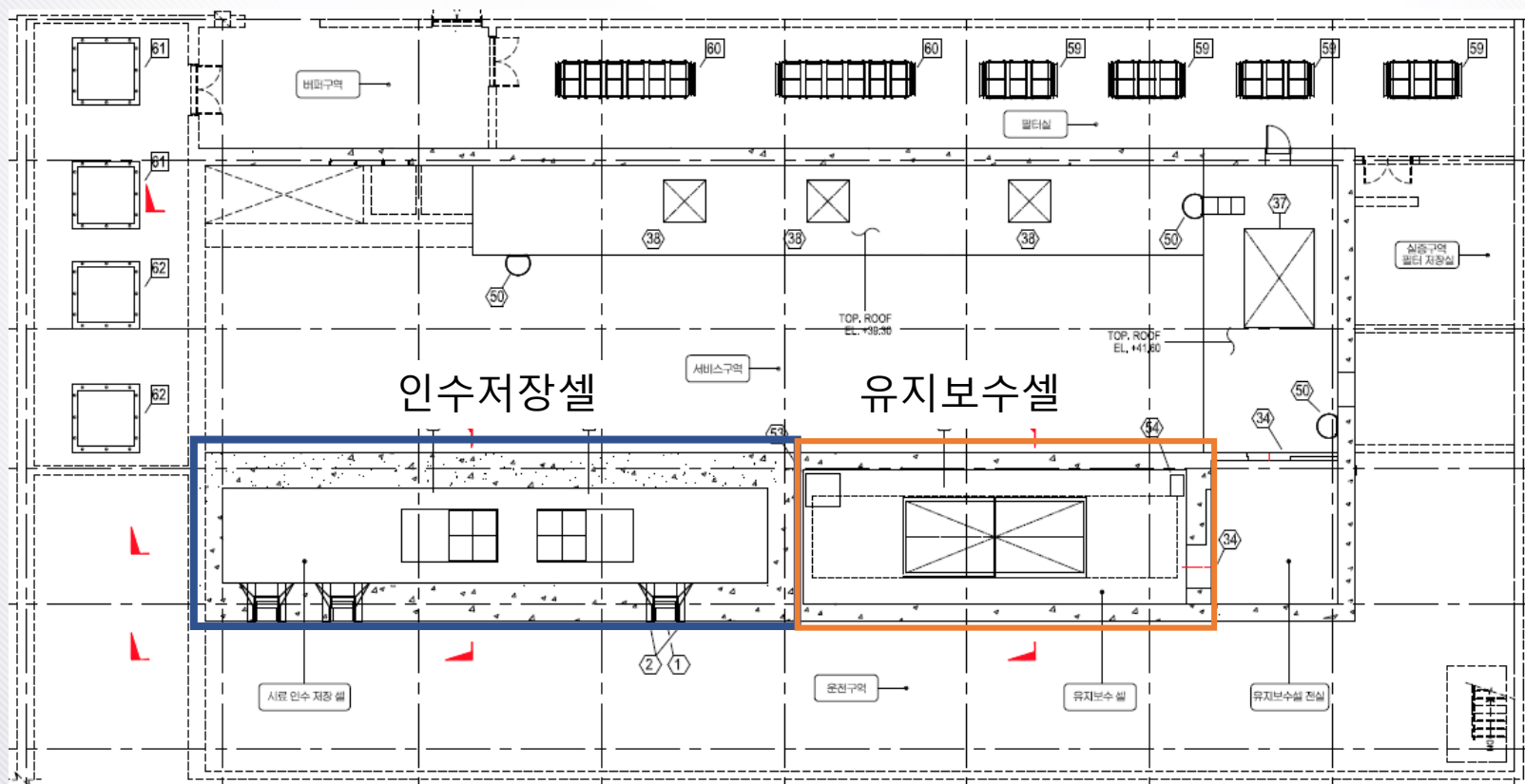
방사능 재고량 산출

< 지상 1층 >



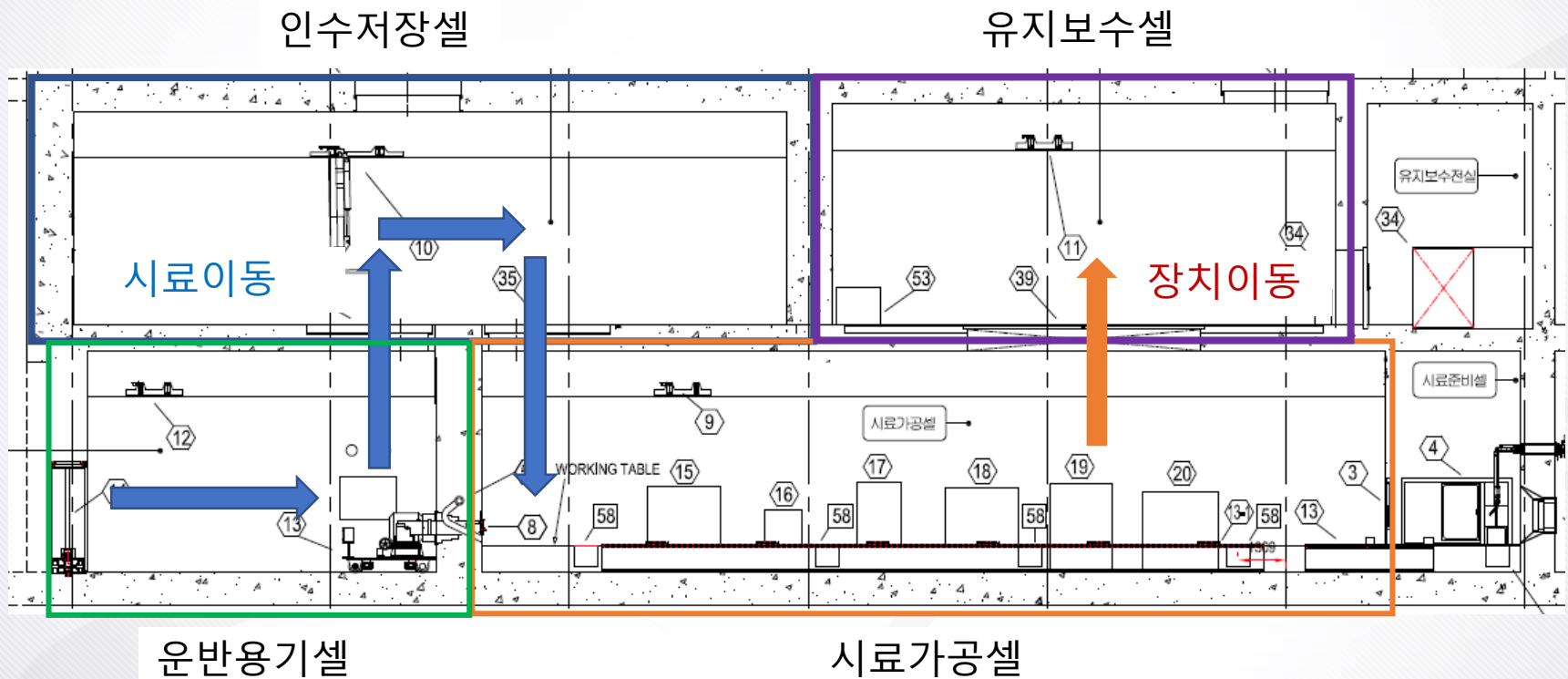
방사능 재고량 산출

< 지상 2층 >



방사능 재고량 산출

< 시료 반출입 및 장치 유지보수경로>



방사능 재고량 산출

핫셀별 설계기준 취급물량 산출 시 가정사항

- 운반용기셀에는 baffle plate 시료 9개(1개 호기 분량)가 담긴 운반용기가 반입
- 인수저장셀에는 연간 설계기준 반입물량이 동시에 저장
- 시료가공셀에는 노심대모재, 원자로압력용기 용접부, core barrel, baffle plate, baffle former bolt 시료가 각각 2개씩 동시에 취급 가능
- 시료준비셀, 특성분석셀에는 가공된 시편 4개가 동시에 취급
- 화학분석셀은 화학분석시편 18개가 동시에 취급 가능
- 시편은 보수적으로 방사능농도가 제일 높은 baffle plate 시료로 가정

방사능 재고량 산출

핫셀별 설계기준 취급물량

핫셀	시료채취위치	시료크기(cm)	시료부피(cm ³)	시료무게(kg)	수량
운반용기셀	baffle plate	10×20×2.86	572	4.54	9
인수저장셀	원자로압력용기 (노심대 모재)	20×22×17	7,480	58.5	6
	원자로압력용기 (용접부)	20×12×17	4,080	31.9	6
	core barrel	10×20×4.445	889	7.06	8
	baffle plate	10×20×2.86	572	4.54	18
	baffle former bolt	-	12	0.096	40
시료가공셀	원자로압력용기 (노심대 모재)	20×22×17	7,480	58.5	2
	원자로압력용기 (용접부)	20×12×17	4,080	31.9	2
	core barrel	10×20×4.445	889	7.06	2
	baffle plate	10×20×2.86	572	4.54	2
	baffle former bolt	-	12	0.096	2
시료준비셀	baffle plate	3.2×3.1×1.3	12.9	0.10	4
특성분석셀	baffle plate	3.2×3.1×1.3	12.9	0.10	4
화학분석셀	baffle plate	0.86×0.86×0.86	0.64	0.005	18

방사능 재고량 산출

방사능 재고량 산출

- 원자로압력용기 및 내부구조물은 방사화에 의해 다양한 방사성핵종이 생성
- 핫셀별 시료 재고량 정보와 시료별 방사능 농도 정보를 이용하여 핫셀별 방사능 재고량 산출
- 고리 1호기 해체보고서가 심사중이므로 보수적인 설계를 위해 가용한 참고문헌 중 주요 핵종인 **Co-60 농도가 가장 높은 자료 활용** (Co 불순물농도: 2214ppm, 10년 냉각 가정)
래드코어. 경수로 노심 및 주변구조물 방사화 폐기물 선원항 평가 및 검증 보고서, 2015

원자로압력용기		core barrel		baffle plate (baffle former bolt)	
핵종	방사능농도(Bq/g)	핵종	방사능농도(Bq/g)	핵종	방사능농도(Bq/g)
Co-60		Co-60		Co-60	
H-3		Ni-63		Ni-63	
Ni-63		Fe-55		Fe-55	
Eu-152		Ni-59		Ni-59	
Nb-93m		H-3		Nb-93m	
C-14		C-14		C-14	
-		-		H-3	
Total	9.07E+06	Total	1.49E+09	Total	3.24E+09

방사능 재고량 산출

방사능 재고량 산출

- 방사화로 생성된 핵종 중 유의미한 감마선을 방출하는 핵종은 Co-60 및 Eu-152
- Co-60에 비해 Eu-152의 농도가 매우 낮으므로 차폐 관점에서 **Co-60이 핵심**
- 환경영향 관점에서도 Co-60이 핵심
- Co-60은 금속모재의 코발트 불순물에 의해 생성되므로 코발트 불순물 농도가 매우 중요

	⁶⁰ Co	⁶³ Ni	⁵⁵ Fe	⁵⁹ Ni	^{93m} Nb	¹⁵² Eu	³ H	¹⁴ C
반감기	5.3년	100.1년	2.7년	1.0E+5년	16.13년	13.5년	12.3년	5.7E+3년
주요방출 감마선(MeV) 및 방출율	1.17 (1.0) 1.33 (1.0)	-	-	-	-	0.12 (0.29) 0.34 (0.27) 0.78 (0.13) 0.96 (0.15) 1.09 (0.10) 1.11 (0.14) 1.41 (0.21)	-	-
배기중배출 관리기준 (Bq/m ³)	7E+00	2E+02	2E+02	5E+02	2E+02	2E+00	3E+03	1E+04

방사능 재고량 산출

방사능 재고량 산출

- 핫셀별 시료 재고량 정보와 시료별 방사능 농도 정보를 이용하여 핫셀별 방사능 재고량 산출
- 참고문헌에서 baffle plate (baffle former bolt) 시료의 Eu-152 방사능 정보가 가용하지 않아 원자로압력용기의 Eu-152 방사능 농도 정보를 적용

운반용기셀		인수저장셀		시료가공셀		시료준비셀		특성분석셀		화학분석셀	
핵종	방사능 (Bq)	핵종	방사능 (Bq)	핵종	방사능 (Bq)	핵종	방사능 (Bq)	핵종	방사능 (Bq)	핵종	방사능 (Bq)
Co-60		Co-60		Co-60		Co-60		Co-60		Co-60	
Ni-63		Ni-63		Ni-63		Ni-63		Ni-63		Ni-63	
Fe-55		Fe-55		Fe-55		Fe-55		Fe-55		Fe-55	
Ni-59		Ni-59		Ni-59		Ni-59		Ni-59		Ni-59	
Nb-93m		Nb-93m		Nb-93m		Nb-93m		Nb-93m		Nb-93m	
C-14		C-14		C-14		C-14		C-14		C-14	
H-3		H-3		H-3		H-3		H-3		H-3	
Eu-152		Eu-152		Eu-152		Eu-152		Eu-152		Eu-152	
Total	1.32E+14	Total	3.63E+14	Total	5.21E+13	Total	1.29E+12	Total	1.29E+12	Total	2.90E+11

방사선차폐평가

차폐 설계기준

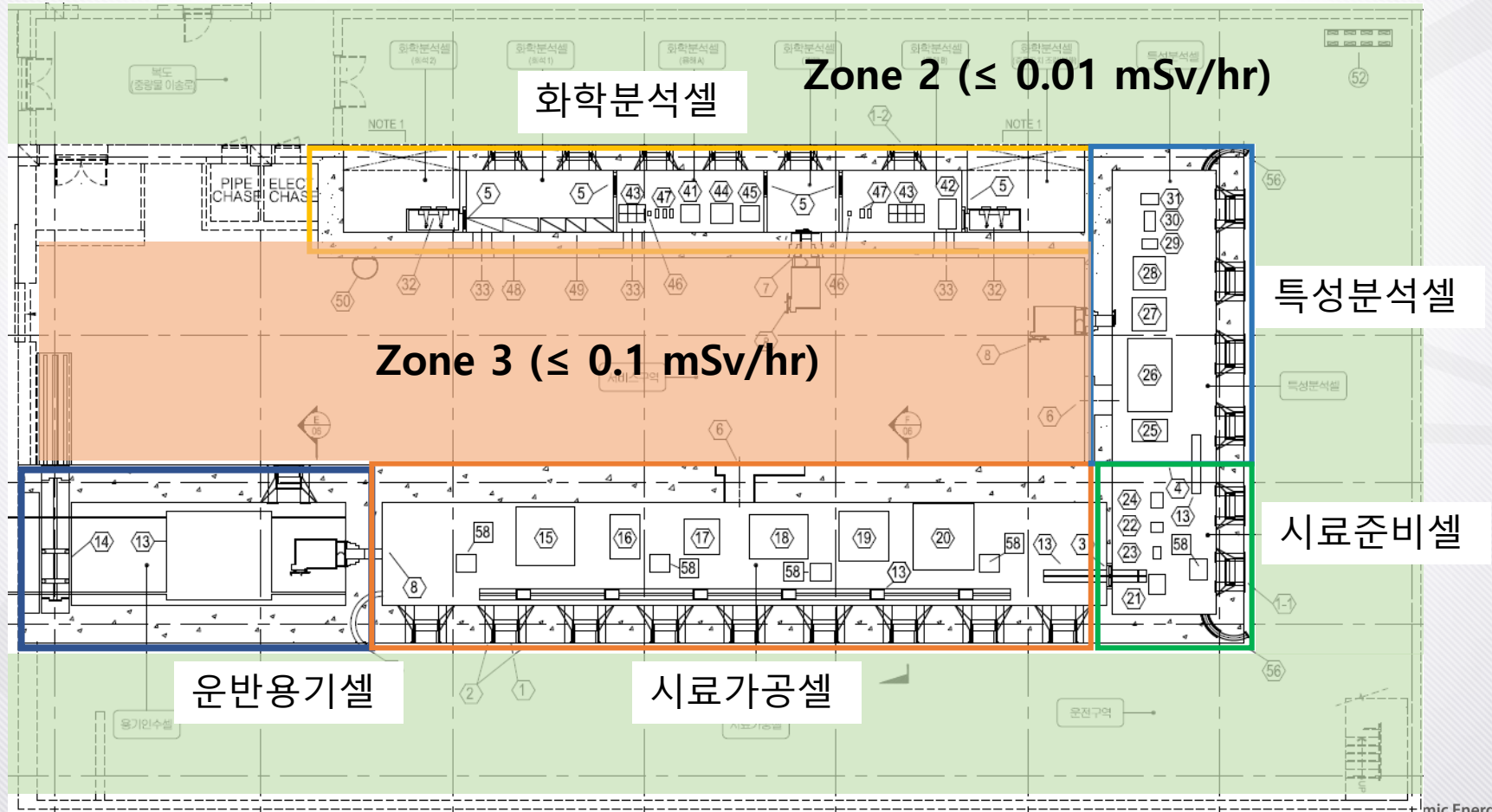
- 원안위고시 제2019-10호 <방사선방호 등에 관한 기준> 제13조(차폐물의 설계기준)
 - 사용시설 등의 내부에 사람이 상시 출입하는 장소는 연간 방사선량이 20mSv를 초과하지 아니 하여야 하고 1주당 방사선량은 1mSv를 초과하지 아니 하여야 한다
 - 사용시설 등의 경계에 인접하여 사람이 거주하는 구역은 연간 방사선량이 1mSv를 초과하지 아니하여야 하고 1주당 방사선량은 0.1mSv를 초과하지 아니 하여야 한다
- 시설 내 모든구역을 동일한 기준으로 설계하는 것은 관리 상 비효율 적이므로 선량률에 따라 구역을 구분하되 주당 출입시간 관리를 통해 선량기준을 만족

구역 분류	설계선량률(DR)	구역 설명
	(mSv/hr)	
Zone 1	$DR \leq 0.0005$	비관리구역
Zone 2	$0.0005 < DR \leq 0.01$	제한출입, 40시간/주 이하
Zone 3	$0.01 < DR \leq 0.1$	제한출입, 4시간/주 이하
Zone 4	$0.1 < DR \leq 1$	제한출입, 20분/주 이하
Zone 5	$DR > 1$	출입통제

방사선차폐평가

평가대상

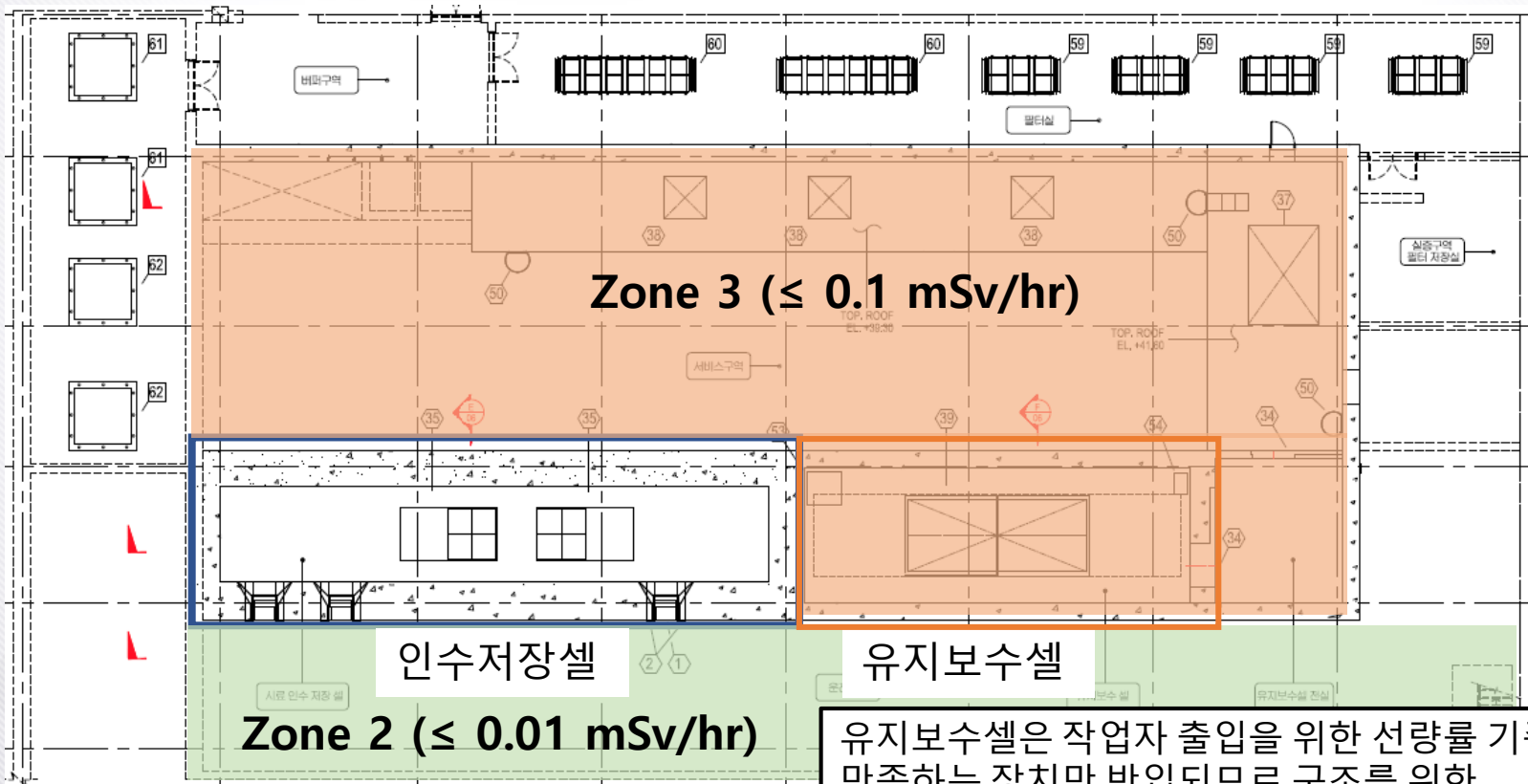
< 지상 1층 >



방사선차폐평가

평가대상

< 지상 2층 >

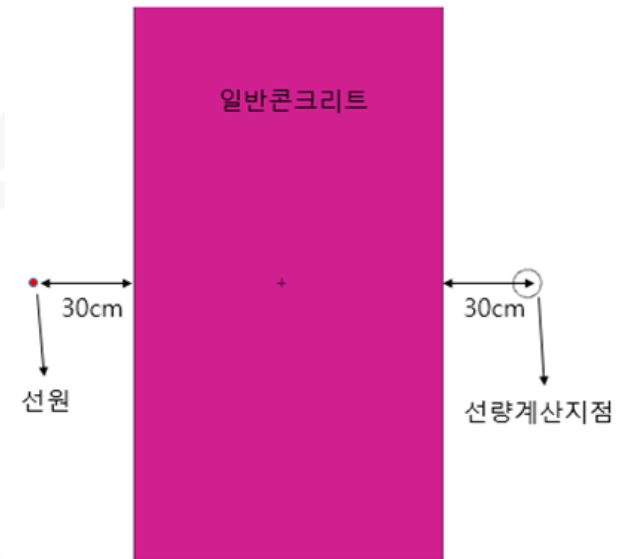


유지보수셀은 작업자 출입을 위한 선량률 기준을 만족하는 장치만 반입되므로 구조를 위한 벽두께로 충분한 차폐능 확보

방사선차폐평가

평가방법 및 가정사항

- MCNP 6.2 전산프로그램 사용
- 핫셀 내 모든 방사선원은 핫셀 내벽 30cm 떨어진 곳에 한 점에 존재하는 것으로 가정
- 선량률 계산은 핫셀 외벽 30cm 떨어진 곳에서 수행
- 일반콘크리트 (밀도: 2.35g/cc)
- 콘크리트 조성은 ANSI/ANS-6.4 Ordinary Type04 적용
- 인수저장셀은 전면(Zone 2)과 후면(Zone 3)의 선량률기준이 다르므로 각각 평가
- 납차폐창은 콘크리트와 동등한 차폐능을 갖도록 설계됨
- ICRP Publication 74 AP방향 선량환산계수 적용
- 모든 평가결과는 5% 미만의 상대오차를 가짐



방사선차폐평가

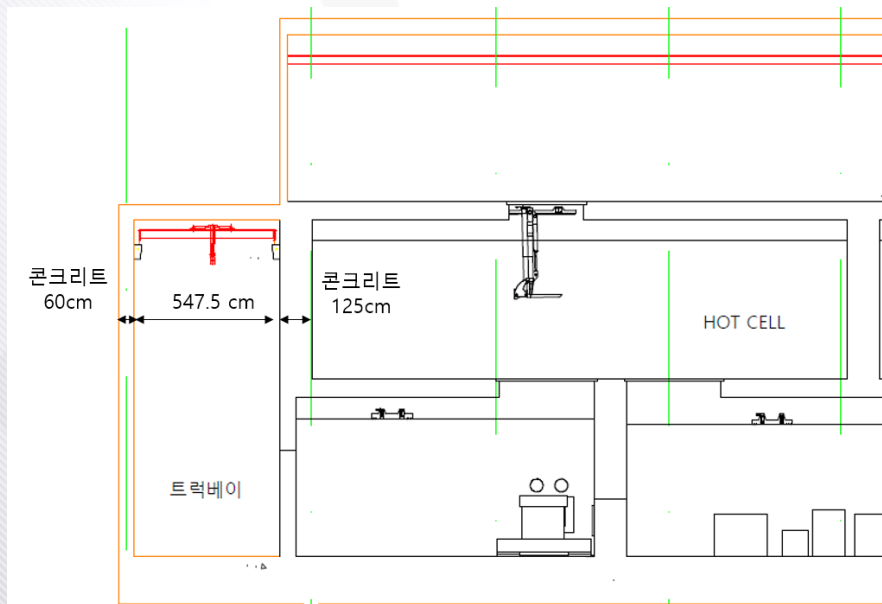
핫셀 차폐평가 결과

관심지점	최소 차폐체 두께 (mm)	방사선량률 (mSv/h)	주당예상피폭 방사선량 (mSv)	연간예상피폭 방사선량 (mSv)	차폐물의 설계기준 (mSv)	
					주당	연간
운반용기셀	1,250	4.4E-03	1.8E-01	8.8E+00	1	20
인수저장셀(전면)	1,350	9.2E-03	3.7E-01	1.8E+01	1	20
인수저장셀(후면)	1,250	3.3E-02	1.3E-01	6.6E+00	1	20
시료가공셀	1,250	4.7E-03	1.9E-01	9.4E+00	1	20
시료준비셀/특성분석셀	950	6.1E-03	2.4E-01	1.2E+01	1	20
화학분석셀	850	5.1E-03	2.0E-01	1.0E+01	1	20

방사선차폐평가

시설 외부 방사선차폐평가

- 원안위고시 제2019-10호 <방사선방호 등에 관한 기준> 제13조(차폐물의 설계기준)
 - 사용시설 등의 경계에 인접하여 사람이 거주하는 구역은 연간 방사선량이 1mSv를 초과하지 아니하여야 하고 1주당 방사선량은 0.1mSv를 초과하지 아니 하여야 한다
- 보수적으로 건물 외벽에서의 연간 및 주당 방사선량을 평가하여 위의 기준 만족여부를 확인하고자 함
- 핫셀로부터 가장 가까운 건물 외벽인 트럭베이 외벽에서의 방사선량을 평가함



방사선차폐평가

시설 외부 방사선차폐평가

- MCNP 6.2 전산프로그램 사용
- 인수저장셀 내 모든 방사선원은 핫셀 내벽 30cm 떨어진 곳에 한 점에 존재하는 것으로 가정
- 선량률 계산은 핫셀 외벽에서 수행
- ICRP Publication 74 AP방향 선량환산계수 적용
- 평가 결과 연간 방사선량은 0.011 mSv, 1주당 방사선량은 0.00023 mSv로 원안위 고시 기준인 연간 1mSv, 1주당 0.1mSv를 충분히 만족함을 확인



환경에 대한 방사선영향평가

- 발전용원자로, 연구용원자로, 핵연료주기시설 및 방사성폐기물관리시설은 시설운영으로 인한 주민선량평가를 수행하고 방사선환경영향평가서를 제출해야 함
- 핵심실증시설의 경우 **방사성동위원소 사용시설(원안법 제53조)**로 인허가를 추진하며 이에 따라 방사선안전보고서를 제출계획
- 방사선안전보고서에서는 주민선량평가 없이 **배기 및 배수 중 농도**를 평가하고 이를 기준농도치와 비교

8. 주변환경에 대한 방사선영향		
가. 배기에 의한 영향		<ul style="list-style-type: none"> ○ 공기공급 및 경화계통을 설치하는 경우에는 배기구를 통한 예상 방출농도와 연간 방출량을 핵종별로 추정하여 제시하고 기준치 이하임을 입증한다.
나. 배수에 의한 영향		<ul style="list-style-type: none"> ○ 방사능을 하수 방출하는 경우에는 배수설비의 성능을 고려하여 배수구를 통한 예상 방출농도와 연간 방출량을 핵종별로 추정하여 제시하고 기준치 이하임을 입증한다. ○ 배수를 통하여 방출되는 핵종의 반감기, 화학적 특성 등을 고려하여 하수계통에 방사능이 누적될 가능성 여부를 판단하여 기술한다.
다. 직접방사선의 영향		<ul style="list-style-type: none"> ○ 대단위사업 및 핵융합실험장치에 경우에는 차폐 등을 고려하여 인접지역에 미치는 예상 방사선량률을 평가하고 노출시간 등 선량계산에 필요한 가정과 예상 피폭선량을 제시하여 안전함을 입증한다. ○ 핵융합실험장치의 경우에는 방사선이 주변환경에 미치는 영향에 대하여 기술한다.

원안위고시 제2019-21호
방사선안전보고서 작성지침
[별표]

환경에 대한 방사선영향평가

배기에 의한 영향

- 핵심실증시설의 경우 방사성동위원소 사용시설(원안법 제53조)로 인허가를 추진하며 이 경우 배기구를 통한 예상방출농도를 산출하고 이를 **배출관리기준**과 비교
- 핵심실증시설에서는 액체 방사성폐기물이 거의 발생하지 않으며 소량 발생한 액체 방사성폐기물은 임시저장 후 해체 원전의 처리시설로 이동
- 따라서 **배수에 의한 영향은 고려하지 않음**

환경에 대한 방사선영향평가

배기에 의한 영향

- 배기에 의한 영향 평가 시 핫셀 내 부유물질의 대부분을 차지할 것으로 예상되는 시료가공셀 내 방사능 농도를 활용
- 환기회수는 시간당 20회로 운영되며 시료 종류에 무관하게 일일 최대 한 개 시료를 가공
- 핫셀 내 방사능 농도 산출 상세 과정은 UNIST 발표 참고
- 배구기에서의 배출율은 핫셀 내 농도의 1% 가정
(공기여과기 HEPA 필터의 여과효율은 99.97% 이상이나, 보수적으로 1% 배출을 가정)
KINS 규제지침 12장, KINS/RG-N.12.02
- H-3와 C-14 핵종은 HEPA 필터에서 거의 여과되지 않으므로 모두 방출되는 것으로 가정
- 배기 중 방사능농도를 배출관리기준과 비교
- 배출관리 기준 대비 약 7.5% 수준임을 확인
- Co-60이 97% 이상을 차지
- 시설 내 타 구역(실증실, 방사화학분석실 등)의 배출농도와 합산

결론

- 핵심실증시설 설계 및 안전성평가에 가장 기초가 되는 시설 반입물량 및 핫셀별 방사능재고량 산출
- 핵심실증시설 차폐평가를 통한 차폐벽 두께 도출
- 배기 중 방사능농도 평가 및 기준치 만족여부 확인
- 본 연구결과는 원전해체연구소 핵심실증시설 설계 및 인허가에 유용하게 활용될 것으로 기대



THANK YOU