

기타보고

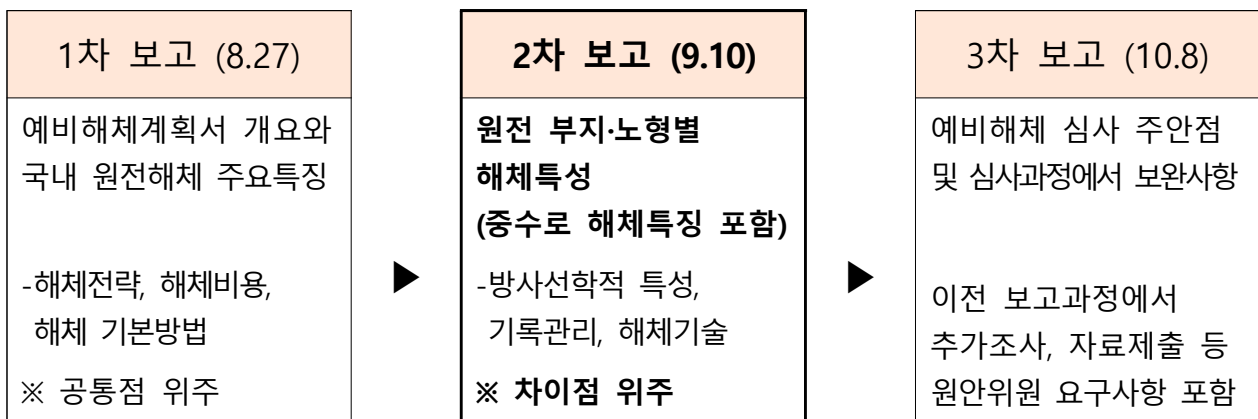
부지·노형별 해체계획 특성 및 중수로 해체 특징

I 보고개요

□ 제146회 원안위 기타보고 논의사항

- 해체 전반에 대한 이해에 도움이 되었으나, 이와 관련한 규제입장에 대해서도 제시가 필요
- 해체심사 전략, 방법, 원칙에 대해 설명을 요청
- 품질보증계획, 화재위험, 선량한도 등 위해도 분석 결과 요구
- 방사선방호원칙에 따른 ALARA 적용 및 공정한 주민 의견수렴 여부
- 원안법상 '해체사업자'에 대한 지위를 신설하는 것을 제안(별도 검토)

□ 보고계획



□ 보고내용

- 제146회 원안위(8.27) 주요 질의사항 답변
- 부지·노형별 해체특성 및 규제방향
- 향후 계획

Ⅱ 제146회 원안위 주요 질의사항 답변

① 해체 수행기관, 기술, 비용 등 (해체승인 단계 확인사항)

- (수행기관) 한수원이 해체사업을 총괄관리하며, 분야별로 한수원 주도하에 전문업체와의 협업을 통해 해체를 진행할 계획

<한수원 사업추진 체계도>



- (해체기술 확보) 한수원은 「원전해체 기술개발 로드맵」 수립을 통해 상용화기술 58개를 도출하고, 현재(‘21.9 기준) 54개 기술을 확보

※ 세부내용은 한수원 배포자료 「원전해체기술 개발현황 보고」 참고

☞ (규제입장) 해체기술 자립 여부 등 보다는 적용 기술의 안전성 및 적합성이 중요

- (OECD NEA 비용차이) 가압경수로(PWR)의 해체비용 차이는 사업 관리, 해체방법, 발생폐기물 및 규제환경(처분 등)의 차이로 인해 발생

항목	Haddam Neck (582MWe, 28년 운영)		Trojan (1095MWe, 16년 운영)	
	비용	사유	비용	사유
재업 및 해체	318	·RPV 분해·절단 ·타 항목간 비용 혼선	79	·대형기기 제거 용이(원형 처분) ·짧은 운영기간에 따른 적은 오염
폐기물 관리	112	·인수기준 초과 폐기물(ISFSI 저장) ·토양토양 재업/감시/처분	52	·대형 주기기 및 다른 해체폐기물의 처분이 가능한 가까운 처분장 확보
사업관리	341	·사업 주체의 변경(직접>외주>직접) ·사업 주체 변경 시 정보공유 미흡	151	·계획 변경이나 차질 없이 사업 진행 (사업자가 직접해체)
부지복원	48	·별도 주 규제기준 적용(추가 작업)	25	·부지 재업 불필요
총비용	819		307	

* OECD/NEA Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants (2016)

(단위: 백만USD)

② 미국 Vermont Yankee 원전 해체비용

- Vermont Yankee 원전은 비등경수로(BWR)로 해당되며, 미국 NRC 해체비용 계산식에 따라 BWR의 해체비용이 30~35% 높게 평가
- 원전소유자(Entergy)는 '14년 경제성 상실로 영구정지 후 비용문제 등으로 지연해체 전략을 채택(8.7억불)하였으나
 - '17년 해체 전문업체(Northstar)로 사업이전 후 경험과 기술력을 바탕으로 즉시해체 전략 채택 (6.4억불)
- ☞ (규제입장) 국내 PWR 노형과 직접적인 비교는 어려울 것으로 판단되며, 특정원전 사례보다는 해체비용 규모평가에 주안점을 두고 심사할 계획

③ 해체 심사 원칙 및 방법론

- 고리1호기 해체승인 서류적합성 검토 및 심사계획 보고내용 참고 및 차기 보고서 예비해체계획서 심사 주안점 종합 보고

④ 규제기준 및 기술기준 등 (해체승인 단계 관련 사항)

- (품질보증 요건) 건설·운영허가 시 품질보증계획서 요건과 동일하나, 해체에 영향을 미치는 기록관리 사항의 추가 검토
- (해체계획서 작성요령) IAEA SRS 45¹⁾ 및 USNRC RG-1.185²⁾를 참고

IAEA SRS 45 (해체계획서)	원안위 고시 제2020-08호 (해체계획서)	USNRC RG-1.185 (정지후 해체활동보고서)
1. 개요	1. 해체계획의 개요	1. 해체계획/활동 개요
2. 시설 설명		
3. 해체전략	4. 해체전략과 방법	2. 해체일정
4. 사업관리	2. 사업관리(2.1 조직, 2.2 인력)	3. 해체비용평가
5. 해체작업	8. 제염해체활동	-
6. 점검 및 유지보수	8.1 제염해체방법(장비관리), 원안법 시행규칙 제145조(기록비치), 기타 운영허가문서	-
7. 방사성폐기물 관리	9. 방사성폐기물 관리	-
8. 비용예측 및 자원조달	2. 사업관리(2.3 비용, 2.4 자원확보)	-
9. 안전성평가	6. 안전성평가	-
10. 환경영향평가	10. 환경영향평가	4. 환경영향
11. 보건 및 안전	7. 방사선방호, 6.6 위해도, 10.3 주민영향 (별도 문서: 해체에 관한 품질보증계획서)	-
12. 품질보증		-
13. 비상계획	『방사능방재법』 적용	-
14. 보안 및 물리적방호		
15. 최종방사선조사	6.4 잔류방사능 및 별도 해체완료보고 (별도 문서 : 최종부지조사보고서)	-
-	11. 화재방호	-

1) Standard Format and Content for Safety Related Decommissioning Documents

2) Standard format and Content for Post-Shutdown Decommissioning Activities Report

- (규제기준 및 기술기준) 운영허가의 일부로써 준용규정의 COD(Code of Cut-off Date)는 동일하며, 기술요건은 '원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙(제85조의3에서 제85조의7)'에 제시
- (안전성평가) 예비해체계획 단계에서는 개략적인 안전성평가 방법론을 제시하며, 최종해체계획 단계에서 상세 방법론 기술

◆ 【참고: (예비해체계획서) 6.1.3.1절 안전성평가 방법론(IAEA SRS 77³⁾ 참조)】

- 방사성·비방사선 위해요소 식별(목록화)
- 체크리스트, 선별분석 및 전문가 판단 등을 통한 평가대상 위해요소 식별
- 정상 해체활동 및 비정상 사건·사고 상황의 시나리오 확인
- 시나리오에 따른 종사자와 주변주민에 미치는 영향 정량화
- 계획된 해체활동 동안 방사선 피폭 저감화를 위한 제약 및 조건 등 확인
- 비정상 사건·사고에 대한 추가 목표치 설정 및 대책 수립
- 안전성평가 결과의 정량적인 계산

- (방사선안전관리 기준) 운영허가의 일부로써 운영원전과 동일
- (화재위험도 분석) 안전정지를 위한 화재위험도 분석은 불필요하나, 해체활동에 따른 화재위험도 분석(화재하중) 및 예방을 위한 화재 방호운영계획은 수립 및 이행
- (방사선방호원칙 적용) ICRP-60 상의 ALARA에 따라 일반인의 선량제약치(환경상의 위해방지 및 부지재이용 기준)가 제시되며
 - 종사자에 대한 관리목표치(선량한도 이내)를 수립하여 피폭 관리
- (주민의견 수렴) 지자체와 사업자는 원안법에 따라 해체계획서 공람 및 공청회를 개최하고, 규제기관은 사업자가 원안법에 따라 주민의견 수렴 절차를 준수하여 그 결과를 제출하였는지를 확인

3) IAEA SRS No.77 "Safety Assessment for Decommissioning" 상의 위험식별→선별→평가 등의 절차에 따른 개략적인 안전성평가 방법론 기술

Ⅲ 부지·노형별 해체특성 및 규제입장

1. 부지·노형별 예비해체계획의 주요 차이

< 부지 및 환경현황과 노형에 따른 방사선학적 특징 비교 >

구분	고리·신고리 (신고리3·4호기)	월성 (월성 3·4호기)
부지 및 환경현황	·(위치) 울주군 서생면 신암리 ·(특징) 인근 2개 광역시 위치 ·(지진) 운영 중 최대 5.8('16) 및 원전영향 0.026g ·(영향) 대기확산인자 : 2.111E-05sec/m ³	·(위치) 경주시 양남면 나아리 ·(특징) 인근 1개 광역시 위치 ·(지진) 운영 중 최대 5.8('16) 및 원전영향 0.0981g ·(영향) 대기확산인자 : 4.643E-06sec/m ³
노형 및 방사선학적 특성	·(노형) 경수로 APR1400 ·(냉각재) 경수(H ₂ O) ·(핵연료) 저농축(2~5%) 우라늄 ·(방사선원 분포특성) 계통 및 시설오염(방사화 포함) ·(운영 중 방폐물관리) - 중저준위 : 저장고 저장(드럼) -SF : SFP에 습식 저장 ·(관심핵종) Fe-55, Co-60, Ni-63, Cs-137, Eu-152 등	·(노형) 중수로 CANDU 6 ·(냉각재) 중수(D ₂ O) ·(핵연료) 천연우라늄 ·(방사선원 분포특성) 계통 및 시설오염(방사화 포함) ·(운영 중 방폐물관리) - 중저준위 : 저장고 저장(드럼) -SF : SFP에 습식 저장, 맥스터/캐니스 건식 저장 ·(관심핵종) H-3, Fe-55, Co-60, N-63, Cs-137, Eu-152 등

구분	한빛 (한빛 1·2)	한울 (한울 3·4)
부지 및 환경현황	·(위치) 영광군 홍농읍 계마리 ·(특징) 인근 1개 광역시 위치 ·(지진) 운영 중 최대 5.8('16) 및 원전영향 0.0045g ·(영향) 대기확산인자 : 5.146E-06sec/m ³	·(위치) 울진군 북면 부구리 ·(특징) 인근 2개 소도시 위치 ·(지진) 운영 중 최대 5.2('04) 및 원전영향 0.179g ·(영향) 대기확산인자 : 6.261E-06sec/m ³
노형 및 방사선학적 특성	·(노형) 경수로 WEC ·(냉각재) 경수(H ₂ O) ·(핵연료) 저농축(2~5%) 우라늄 ·(방사선원 분포특성) 계통 및 시설오염(방사화 포함) ·(운영 중 방폐물관리) - 중저준위 : 저장고 저장(드럼) -SF : SFP에 습식 저장 ·(관심핵종) Fe-55, Co-60, Ni-63, Cs-137, Eu-152 등	·(노형) 경수로 OPR1000 ·(냉각재) 경수(H ₂ O) ·(핵연료) 저농축(2~5%) 우라늄 ·(방사선원 분포특성) 계통 및 시설오염(방사화 포함) ·(운영 중 방폐물관리) - 중저준위 : 저장고 저장(드럼) -SF : SFP에 습식 저장 ·(관심핵종) Fe-55, Co-60, Ni-63, Cs-137, Eu-152 등

□ 부지 및 환경 현황

- 과도기기간(영구정지부터 해체승인 전) 중 해체에 영향을 미치는 부지 및 환경의 업데이트 및 최종해체계획에 반영
 - 해체 중 종사자/주민 영향평가를 위한 시설·부지 및 환경 자료
 - ※ 섭생자료(물이용, 음식물, 거주)는 부지재이용에 활용 가능
 - 해체완료 후 부지재이용 선량평가를 위한 부지특성변수 자료*
 - * 토양오염 면적 및 두께, 침식률, 포화대 및 불포화대 개수, 밀도 및 두께, 공극률, 수리 전도도, 핵종별 분배계수(내부피폭 영향) 등 (일부 변수는 분포함수로 민감도 분석)
- ☞ (규제입장) 해체 승인심사 과정에서는 해체활동으로 발생할 수 있는 기체·액체 폐기물 배출 및 고체방폐물 취급 시 영향 검토
 - 정상 해체활동 및 사건·사고 발생시 부지·환경에 따른 영향과 산업재해 등 비방사선적 위해요소 등을 면밀하게 검토

□ 방사선학적 특성 (방사선원항)

- 과도기기간 중 방사성핵종 재고량의 이론적 계산, 해석, 방사선학적 특성조사 등을 통해 최종해체계획서에 방사선원항 반영
 - (운영이력) 영구정지 시점까지의 연료교체 및 운전시간(계산 및 해석)
 - (사건·사고) 관심핵종 및 방사능오염수준 선정 시 고려
 - (과도기기간) 영구정지 기간 동안의 감쇠효과, 오염제거 등 반영
 - (특성조사) 현장 측정, 시료채취 분석 결과와 계산/해석치 비교
 - ※ 비용평가, 해체방법, 방폐물 발생량, 부지재이용 등 해체계획서 작성을 위한 특성평가 단계로써 운영원전 방사선원항(사용후핵연료 포함) 대비 현격하게 감소된 방사선원항
- ☞ (규제입장) 상세특성은 영구정지 이후에 시료채취 등을 통해 평가가 가능하므로, 예비해체계획서 단계에서는 개략적인 평가방법론만 검토
 - 해체승인 심사단계에서 사업자의 평가결과가 무제한적/제한적 부지재이용 기준(연간 유효선량 0.1 mSv)을 초과하지 않도록 잔류방사능 유도농도가 산출되었는지 여부를 중점적으로 검토할 계획

2. 해체용이성과 운영 중 해체영향 사건 차이점

□ 해체용이성

- 원전 주요 계통은 차폐, 원격조작, 작업시간 최소화 등을 통한 피폭저감화(ALARA) 및 시설배치 최적화 설계특성이 적용
- 방사선기기 및 계통의 분리, 탱크/집수조 설치 등을 통해 방사성물질 오염 가능성을 최소화하도록 설계
- ☞ (규제입장) 기존 원전은 원안법 개정 이전 기준이 적용된 시설로 해체용이성이 고려되지 못한 한계가 있으므로, 규제관점에서는 운영 중 발생폐기물 최소화 관점에서 검토

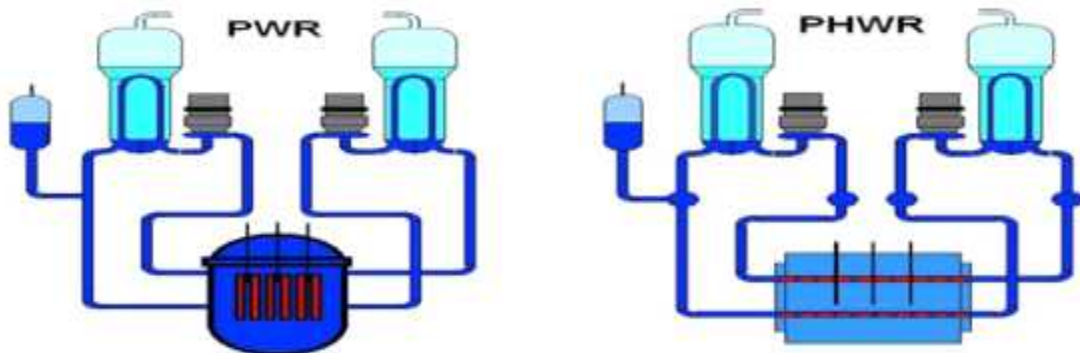
□ 운영이력 (사건사고 포함)

- 장래 해체과정에 영향을 미칠 수 있는 운영이력 기록관리 관련
 - 원자력안전법에서 요구하는 건설·운영에 관한 기록사항
 - IAEA*등에서 제시하는 설계·제작·운영에 관한 주요 기록사항을 전산화하여 기록·관리
- * TRS No.411, Record keeping for the Decommissioning of Nuclear Facilities
- ☞ (규제입장) 운영이력 심사결과 기록사항은 품질보증계획에 근거하여 보존·갱신되고 있으며
 - 현재까지 해체비용, 해체용이성에 영향을 미치는 관리구역 외부로의 대규모 오염 누설 등의 사고는 없음
 - 향후 갱신 심사과정에서 기록관리 적절성을 지속적으로 확인

3. 원전해체 관점에서의 경수로 및 중수로 차이점

□ 시설 특성

구분	경수로	중수로	해체 시 고려사항
공용설비	공용설비 적음	공용설비 많음	(공통) 인접호기(운영 중)의 안전성 확보
원자로 구조	수직형 원자로	수평형 원자로	원자로(칼란드리아)의 방사성학적 특성을 고려한 절단방법(공기중 절단 등) 선정 필요
냉각재 종류	경수(H_2O)	중수(D_2O)	삼중수소제거설비(TRF) 운영을 통한 처리 후 회수 또는 배수
삼중수소	발생량 적음	발생량 많음	삼중수소 포집/감시 설비 운영
사용후핵연료	수중저장 중	수중저장 후 건식저장	건식저장시설 운영에 따른 해체일정 불확실성 감소



□ 사용후핵연료관리 (운영 중 발생폐기물관리 적절성 확인)

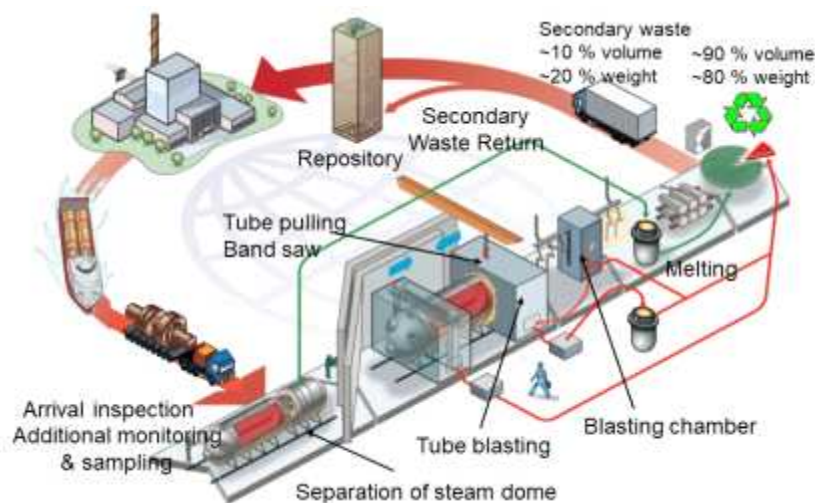
- (발생) 중수로형 원전(월성1,2,3,4)의 경우 상시 핵연료 교체 가능, 경수로형 원전의 경우 계획예방정비기간 중 신연료로 1/3 교체
- (저장) 중수로형 원전의 경우 사용후핵연료 건물 내 습식저장 후 부지 내 건식저장시설(사일로, 맥스터)로 운반 저장, 경수로형 원전의 경우 사용후핵연료 건물 내 습식저장관리
- ☞ (규제입장) 해제승인 심사단계에서 중수로형 원전의 경우 사용후핵연료 운반을 포함하여 습식·건식 저장 적절성 확인

□ **원자로 철거** (해체단계에서 특성평가 완료 후 국내·외 기술 반영)

- (중수로형) 수평형 원자로이며, 원자로건물 내 노출된 형태로 운영됨, 예상되는 철거방식은 공기 중 절단·포장
- (경수로형) 수직형 원자로이며, 원자로건물 내 재장전수조 아래 설치됨, 예상되는 철거방식은 수중 절단·포장
- ☞ (규제입장) 해제승인 심사단계에서 절단·포장 시 사전 제염 적절성 (종사자 안전) 및 발생하는 방폐물(기체·액체·고체)의 특성을 고려
 - 중수로형의 경우 공기 중 비산 및 확산에 의한 종사자 안전관리 대책을 중점 검토하고
 - 경수로형의 경우 수중 절단 작업시 종사자 안전조치를 확인할 계획

□ **방폐물 처리** (해체단계에서 특성평가 완료 후 국내·외 기술 반영)

- (발생) 원전해체 시 방폐물처리를 통해 전체 폐기물의 5% 내외
 - 금속 및 콘크리트 90% 이상
 - 기타(잡고체, 폐수지, 폐필터, 슬러지 등) 10% 미만
- (처리) 화학처리 또는 워터젯(표면오염제거) 후 절단/용융을 통한 부피감용



< 스웨덴 Studsvik社의 증기발생기 방폐물처리(부피감용) 과정 >

- (포장/운반) 절단/압축 및 고형화 등을 통해 저장 후 처분장 운반



< 기계/화학적 제염 >

< 절단 또는 용융 >



< 해중분석 >



< 포장 >



< 운반 >



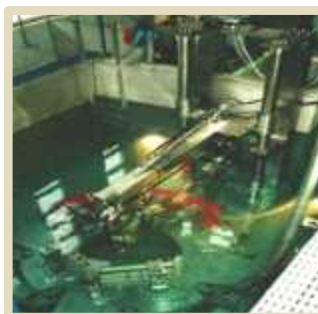
< 처분 >

- ☞ (규제입장) 중수로형 원전의 경우 원전운영 특성에 따라 삼중수소 관리방안(제거·보관 설비)의 적절성 확인이 필요하며

- 경수로형 원전의 경우 방사화된 방폐물의 제거 및 철거에 적용되는 차폐기술의 적절성을 확인할 계획

□ 해체 기술 (상용화 기술, 해체승인 단계에서 국내·외 기술 반영)

- (제염) 고압수/공기 분사, 도막 박리, 전해연마, 화학침수, 분사연마, 초음파, 젤/거품, 콘크리트 표면의 기계적 또는 열적 제염
- (절단/철거) 기계적 절단(Band Saw, Diamond Wire Saw, Circular Saw, 유압절단), 열적 절단(Oxygen-Propane, Plasma Arc, Laser) 등



< 절단 >



< 제염 >



< 제거 >



< 철거 >

V 향후계획

- 10.8. 예비해체계획서 심사 주안점 및 심사과정에서 주요 보완사항 보고