JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

16(4) : 343-355 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.4.343

해체용이성 설계 관련 규제요건 및 국내 원전 설계 반영 사례 고찰

한 강[1,*]

[1]현대엔지니어링 (주)

Review of the Regulatory Requirements and Design Cases of Domestic Nuclear Power Plant Considering Decommissioning

Kang Han[1,*]

[1]Hyundai Engineering Co., Ltd., Hyundai Bldg. 75, Yulgok-ro, Jongno-gu, Seoul 03058, Republic of Korea

Abstract The decommissioning of nuclear facilities should minimize the worker exposure, the generation of radioactive waste and its impact on environment, and should reduce costs by optimizing the decommissioning process. For safe and economical decommissioning, it is necessary to design in consideration of decommissioning-related matters such as minimization of facility and environmental contamination and the minimization of radioactive waste in preparation for decommissioning from the design stage. Therefore, this paper reviewed the regulatory requirements for considering decommissioning at the design stage, which should be considered to prepare for future decommissioning and not expected to affect the operational safety of nuclear facilities, and the design cases reflected on domestic nuclear power plants when designing nuclear facilities. This is accomplished by reviewing the regulatory requirements, and analyzing the composition of a preliminary decommissioning plan. The reflection of the design of domestic nuclear power plants was reviewed, with emphasis on the APR1400 Design Control Document and Preliminary decommissioning plan for Shin-Kori Unit 56.

Key words: Considering decommissioning, US NRC RG 4.21, APR1400 Design Control Document, Preliminary decommissioning plan

1. 서 론

원전 해체에 대한 사전대비 필요성이 대두되면서 IAEA에서는 2014년 GSR Part 6을 발간하여 원전 해체에 대한 안전기준을 상세 정립하고, 원자력시설 전 수명(설계, 건설, 운영 단계)에 걸쳐 해체에 대한 대비가 필요하다는 것을 권고하였다.

한편, 국내에서는 2011년 IAEA의 통합규제검토서비스(Integrated Regulatory Review Service: IRRS) 수검을 통해 해체 관련 권고사항이 도출되었다. 권고사항에 따라 운영 및 건설 중인 원자력시설 해체계획에 대한 규제체계가 개선되었으며, 해체계획은 주기적으로 갱신하도록 2015년 원자력안전법이 개정되었다.

원자력안전위원회 고시와 IAEA 안전기준에 따라 발전용 원자로 및 관계시설 건설 운영허가를 받기 위해서는 허가문서로 예비해체계획서를 작성하여 원자력안전위원회의 승인을 받아야 하며, 예비해체계획서에는 원자력이용시설 설계단계에서 해체용이성을 고려한 설계특성과 건설 또는 운영 시 용이한 해체를 위한 조치방안 등을 기술해야 한다.

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author.** Kang Han
Tel. +82-2-2134-5704 E-mail. hanriver7@hec.co.kr

Received 4 October 2022 **Revised** 14 December 2022 **Accepted** 19 December 2022

이에 본 논문에서는 원자력발전소 설계 시, 미래의 해체를 대비하고 원자력발전소의 운영안전성에 영향을 미치지 않도록 고려되어야 하는 해체용이성 관련 규제요건과 국내 원전에 반영된 설계 사례를 살펴보고자 한다. 이를 위해 원전 설계 시 해체용이성 관련한 규제요건을 조사하고, 해당 요건을 충족하기 위해 국내 원전 설계에 반영된 사례를 APR-1400 원전 위주로 살펴보았다.

2. 재료 및 방법

2.1. IAEA 규제요건

IAEA GSR Part 6 Requirement 10 Planning for decommissioning 에서는 원자력시설 해체를 위한 충분한 재정 마련과 오염 최소화를 위해 조기 계획 수립을 요구하고 있으며, 사업자가 시설의 전 수명에 걸쳐 해체계획을 유지/관리하도록 요구하고 있다[1].

IAEA Technical Report 460에서는 해체를 대비하여 원자력시설 설계 및 운영 시, 고려사항들을 제시하고 있으며, 시설의 운전 수명 기간 동안 문서화하여 보관해야 할 기록들을 각 단계별로 구체적으로 제시하고 있다. 원자력시설 해체를 대비하여 고려해야 할 사항은 다음과 같다[2].

- 시설 및 구성품의 배치
- 기기 및 재료 선정
- 방사성폐기물 발생 최소화 방안과 발생되는 방사성폐기물 처리방안
- 폐기물 재활용과 재사용
- 시설의 유지 보수 및 지원 활동
- 문서화 및 기록 유지

2.2. 미국 규제요건

US NRC 10 CFR 20 Subpart E - Radiological Criteria for License Termination의 1406 “Minimization of contamination” 에 따라 1997년 8월 20일 이후 인허가 신청 원전은 원전 설계 단계와 운영 중, 환경오염 및 방사성폐기물의 최소화 방안과 해체용이성 방안을 신청서에 수록하여야 한다[3].

US NRC RG 4.21 Minimization of Contamination and Radioactive Waste Generation: Life-Cycle Planning에서는 설계단계에서부터 해체용이성을 위한 수단을 시설 운영 및 절차에 반영하도록 하고 있다. 또한 방사성물질의 유출 및 누설에 대한 기록을 유지하고 해체가 용이하도록 어렵지 않게 접근 가능하도록 요구하고 있다. 부록 A에는 10 CFR 20.1406 요건의 해체용이성을 충족하기 위한 기록의 유지관리, 계획 및 절차, 매립배관의 최소화, 설계단계에서 시설 및 설비의 제거를 위한 고려사항 등의 7개 방안이 제시되어 있다[4].

NEI 08-08A Generic FSAR Template Guidance는 해체용이성을 위한 설계 및 운영 특성과 기록관리에 대한 주요 내용을 담은 최종안전성분석보고서 작성안을 제시하고 있다[5].

2.3. 국내 규제요건

원자력안전법 시행규칙 제4조 5항에는 원자로시설의 해체계획서에 포함되어야 할 사항들이 제시되어 있다. 해체계획서에는 해체용이성을 고려한 시설의 설계특성을 기술하도록 하고 있으며, 해체용이성 설계개념을 만족하기 위하여 시설 설계, 건설 및 운영 시 적용하는 조치방안에 대하여 기술하도록 요구하고 있다[6].

원자력안전위원회 규칙 제30호 제85조의6에 원자로시설의 안전하고 용이한 해체를 위해 시설의 설계, 건설 및 운영 시 적용되어야 하는 요건들이 규정되어 있으며, 다음과 같다[7].

- 방사성오염의 발생 가능성 최소화
- 방사성물질의 누설 가능성 최소화
- 해체가 용이한 시설배치
- 구조물, 계통 및 기기에 대한 제염방안
- 방사성폐기물 발생량 최소화
- 기록 보존

3. 결 과

3.1. 국내 설계반영 개요

현재 운영 중인 국내 원자력발전소는 대부분 당초 설계단계에서 높은 수준의 해체개념을 고려하지 않았기 때문에 설계 당시 해체계획이 수립되지 않았으며 US NRC RG 4.21에 따른 해체용이성을 고려한 설계특성이 반영되어 있지 않다. 다만, 포괄적인 ALARA 설계개념과 운영 관리 방안이 적용되어 해체를 고려한 설계개념이 일부 포함되어 있다.

2017년 유럽사업자요건(European Utility Requirements, EUR) 인증과 2019년 US NRC로부터 설계인증(Design Certification, DC)을 취득한 APR1400(신고리 3,4호기, 신한울 1,2호기, 신고리 5,6호기, UAE BNPP 1~4호기)은 해체용이성이 설계단계에서 반영되었다. 신고리 5,6호기는 2015년도에 제정된 원자력안전위원회 고시(원자력이용시설 해체계획서 등의 작성에 관한 규정)에 따라 예비해체계획서를 작성하여 "해체용이성을 위한 설계특성과 조치사항"을 별도의 장절로 기술하였다.

이에, 국내 원전 중 해체용이성이 설계반영된 사례는 APR1400 원전의 APR1400 Design Control Document와 신고리 5,6호기는 예비해체계획서를 중심으로 살펴보았다.

3.2. APR1400 Design Control Document[8]

US NRC의 설계인증 신청 문서인 Design Control Document 12.4.2절에는 10 CFR 20.1406 및 US NRC RG 4.21의 해체용이성 설계요건과 부합하는 설계특성 및 운영 관리 프로그램을 6가지 목표로 제시하고 있다. 이에, 방사성 오염 가능성이 있는 42개의 대상 계통을 Table 1과 같이 선정하여 해체용이성 관점에서 고려해야 하는 목표와 이를 달성하기 위한 제어 조치사항의 만족 여부를 평가하였다.

3.2.1. 설계 고려사항

US NRC RG 4.21에 따라 설계 관점에서 고려해야 하는 목표 및 이를 달성하기 위한 제어 조치사항은 다음과 같다.

(1) Objective 1 - Prevention/Minimization of Unintended Contamination(의도하지 않은 오염의 방지 및 최소화)

- 과도한 오염 발생 없이 공정 운전 조건을 견딜 수 있도록 부식 방지 배관 등 SSCs별 적합한 재료 선택
- 오염되거나 오염 가능성이 있는 SSCs 주변에 격납벽 또는 Dike 적용
- 오염의 방지 및 최소화를 위해 누수 감지 설비, 배수 수집 설비, 이중관 배관, 누수 감지 기능이 있는 배관 슬리브 사용
- 매설 및 매립 배관, 매립 배수로 최소화(대안으로 누수 감지 기능이 있는 콘크리트 구조물 또는 이중관 배

Table 1. APR1400 plant systems requiring full US NRC RG 4.21 evaluations

System code		System title	System code		System title
1	AF	Auxiliary Feedwater	22	IW	In-Containment Water Storage
2	AS	Auxiliary Steam	23	MS	Main Steam
3	AT	Auxiliary Feedwater Pump Turbine	24	PR	Radiation Monitoring
4	CA	Condenser Vacuum	25	PS	Process Sampling
5	CC	Component Cooling Water	26	PX	Primary Sampling
6	CD	Condensate	27	RC	Reactor Coolant
7	CM	Containment Monitoring	28	RG	Reactor Coolant Gas Vent
8	CP	Condensate Polishing	29	SC	Shutdown Cooling
9	CS	Containment Spray	30	SD	Steam Generator Blowdown
10	CV	Chemical and Volume Control	31	SI	Safety Injection
11	CW	Circulating Water	32	SX	Essential Service Water
12	DE	Radioactive Drain	33	TA	Main Turbine and Auxiliaries
13	DM	Miscellaneous Building Drain	34	VB	Compound Building HVAC
14	DT	Turbine Generator Building Drain	35	VF	Fuel Handling Area HVAC
15	ES	Extraction Steam	36	VK	Auxiliary Building Controlled Area HVAC
16	FC	Spent Fuel Pool Cooling and Cleanup	37	VP	Reactor Containment Building HVAC
17	FT	Feedwater Pump Turbine	38	VQ	Reactor Containment Building Purge
18	FW	Feedwater	39	WH	Turbine Generator Building Open Cooling Water
19	GW	Gaseous Waste Management	40	WT	Turbine Generator Building Closed Cooling Water
20	HD	Heater Drain	41	WV	Liquid Waste Management
21	HG	Containment Hydrogen Control	42	WX	Solid Waste Management

관을 사용)
- 의도하지 않은 누출 및 배출을 방지하기 위한 인터록 및 알람 설비, 행정적인 통제에 대한 규정 마련
- 부품 고장 가능성 최소화를 위해 원자력 업계의 검증된 기술 적용, 품질 관리 강화, 관련 Codes & standards 엄격히 준수

(2) Objective 2 - Provision of Adequate and Early Leak Detection Capability (적절한 조기 누설 감지)
- 적합한 누설 감지 설비 적용 (잠재적인 누출 가능성이 있는 SSCs에 대해 개별적인 누설 감시 설비 적용)
- 집수 배관 쪽으로 바닥경사 설계, 집수조 수위 계측기, 배수가 원활하도록 매끄러운 표면, 집수조 적용
- 배수 집수조 및 경로, 누출 예상 원인에 가능한 한 가깝게 탐지 장비 배치
- 민감한 (소량의 액체 누설 수집 감지) 액체/습기 감지 기기 사용
- 누출 감지 기기의 주기적인 교정 및 교체
- 누출, 탱크 넘침 감지 시 작업자 대응을 위한 접근 경로 및 공간 확보
- 관리 및 운영 중, 즉각적인 분석 및 평가를 위한 적절한 샘플링 지점에 접근 경로 및 공간 확보

(3) Objective 3 - Reduction of Cross Contamination, Decontamination, and Waste Generation (교차오염, 제염 및 방사성폐기물 발생 절감)
- 방사성 오염의 유형, 준위, 특성에 따라 폐기물 구분
- 현장 제염 설비 구축
- 방사성 액체를 취급 및 운송하는 기기/배관에 대한 세척 성능 (Flushing capabilities) 확보
- 기기 및 구조물 표면은 쉽게 표면 제염이 가능하도록 에폭시 도장 등을 적용하여 매끈하게 처리
- 오염이 발생한 장비 또는 구역을 일시적으로 격리하고 적시에 적절한 대응을 제공하기 위해 신속하게 작업자 조치 수행
- 폐기물 처리, 포장, 취급, 보관 및 처분 등 폐기물 관리 전주기에 대한 계획 수립

(4) Objective 4 - Decommissioning Planning (해체 계획)
- 모듈 단위 시공 (Modular construction)
- 매립/매설 배관 및 기기의 최소화
- 해체를 고려하여 관련 문서 및 정보는 통합 관리
- 구조물, 계통 및 기기의 해체가 용이하도록 제거 가능한 블록벽 적용
- 해체 작업 시 방사성폐기물 발생을 최소화하는 구조물, 계통 및 기기 적용

3.2.2. 운영 관리 프로그램 고려사항

시설 운영 및 유지 관리를 지원하는 절차 및 프로그램, 시설의 운영 설계 수명 동안 발생할 수 있는 사건에 대한 관리 목표와 이를 달성하기 위한 제어 조치사항은 해체용이성을 고려한 운영 절차를 개발하고 부지 방사선 환경 감시를 위한 개념적 부지 모델을 개발하여 충족할 수 있다.

(1) Objective 5 - Operations and Documentation (운영 및 문서화)
- 오염 확산 방지/최소화를 위한 SSCs 추가 제어 절차
- 직원 자격인증 및 교육훈련 절차, Lessons learned와 최신 개정사항을 반영한 주기적 절차서 검토 절차
- 해체 용이성 관련 설계, 시공, 유지보수, 운영, 사고에 대한 기록 및 문서화 절차
- 방사성폐기물 처리 및 관리 프로그램 개발
- US NRC RG 4.21 및 US NRC RG 4.22에 따른 유지보수 및 감시 프로그램 개발
- 10 CFR 20.1501에 따른 지하 방사능 조사 결과의 문서화

(2) Objective 6 - Site Radiological Environmental Monitoring (부지 방사선 환경 감시)
- 부지에 대한 수문지질학, 잠재적 이동 및 지하수 수송 경로
- 부지의 수문지질학적 특성에 대한 건설로 인한 영향 평가
- 10 CFR 20.1406 및 US NRC RG 4.21에 따라 배출원에서 수용 지점까지의 잠재적 지하수 경로에 대한 부지별 오염 모니터링 프로그램 수립

3.2.3. 오염 최소화를 위한 설계 세부 사항

(1) 조기 누설 감지 설비

액체 방사성물질이 있는 구역의 조기 누설 감지 설비는 밸브피트 또는 트렌치에 설치하며, 레벨 스위치가 있는 배

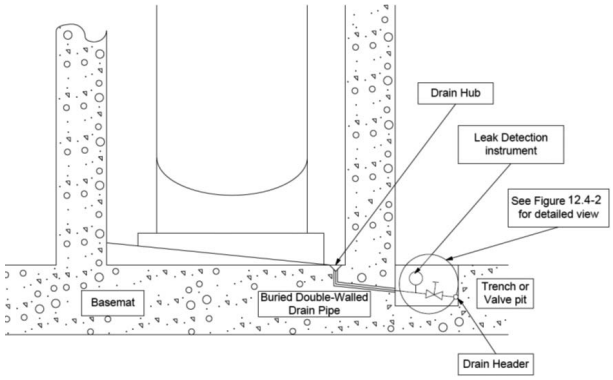

Fig. 1. Typical design details of drainage and leak detection configuration (refer to APR1400 DCD TIER 2 Figure 12.4-1).

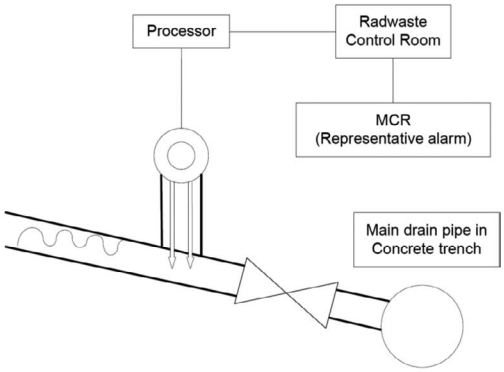

Fig. 2. Typical design details of leak detection instrumentation (refer to APR1400 DCD TIER 2 Figure 12.4-2).

수배관과 수동밸브로 구성된다. 배수배관은 누출 또는 넘침으로 인한 액체 방사성물질을 수집 이송한다. 조기 누설 감지를 위한 배수배관은 2 in 스테인리스 스틸 배관으로 건물 바닥에 매설되어 있으며 배수가 용이하도록 밸브 피트 또는 트렌치 쪽으로 기울어져 있다. 배수배관의 누설 방지를 위해 배관 매설 부분은 이중관 배관으로 구성되며, 이중관 배관의 내부 배관이 액체 방사성물질을 집수조로 이송한다. 배수배관은 소형 배관으로 적은 누수도 감지할 수 있어 조기 감지가 가능하며, 작업자의 신속한 조치가 가능하도록 레벨스위치는 MCR에 경보를 울린다. 조기 누설 감지 설비는 즉각적인 감지 및 대응을 위해 액체 방사성물질을 포함하거나 잠재적으로 포함할 수 있는 기기 주변 및 구역에 설치한다. 조기 누설 감지 설비의 일반적인 구성 및 설계개념은 Fig. 1과 같으며, 누설 감지 장비는 Fig. 2와 같다.

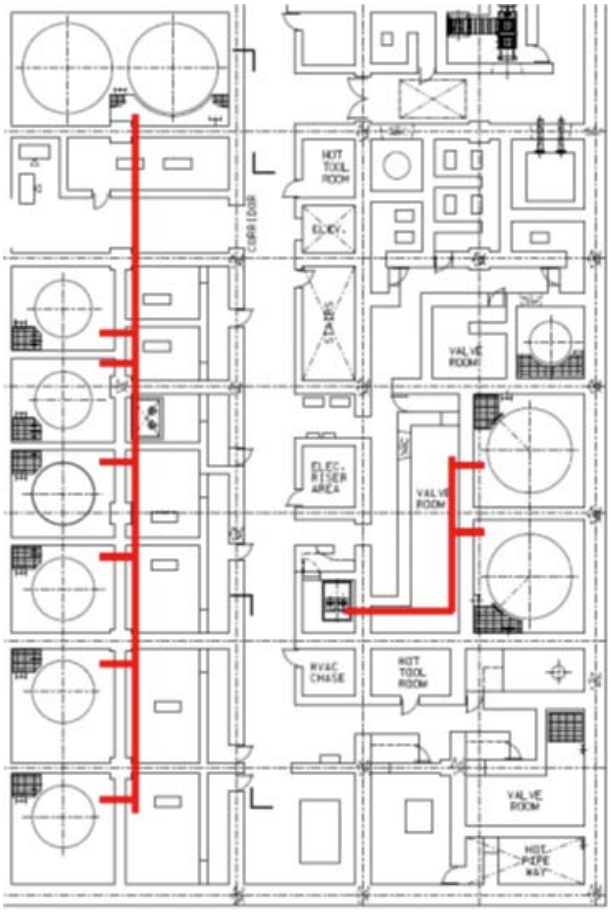

Fig. 3. Typical compound building trench location schematic (refer to APR1400 DCD TIER 2 Figure 12.4-3).

(2) 누설 수집 트렌치

방사성 배수 집수조로 누수 및 누설 수집이 용이하도록 보조건물 및 복합건물의 바닥에 콘크리트 트렌치를 설치한다. 트렌치는 에폭시 코팅이 되어 있으며 트렌치 흐름 경로를 따라 유체가 축적되는 것을 방지하고 흐름이 용이하도록 기울어져 있다. 누설 감지 장비의 검사 및 교정, 트렌치 청소, 에폭시 코팅 점검 및 유지보수를 위한 접근이 용이하도록 트렌치에는 제거 가능한 그레이팅을 설치한다. 상당한 이물질이 있을 것으로 예상되는 구역의 배수는 집수조에 고형물이나 잔해물을 이송하지 않고 유체 흐름이 용이하도록 트렌치에 스크린 또는 배수배관을 설치한다. 일반적인 복합건물의 트렌치 설계개념은 Fig. 3과 같다.

(3) 건물 관통부 배관

액체 방사성물질의 의도치 않은 환경으로의 누출을 방지하고자 서로 떨어져 있는 건물 간 연결 배관은 배관 슬

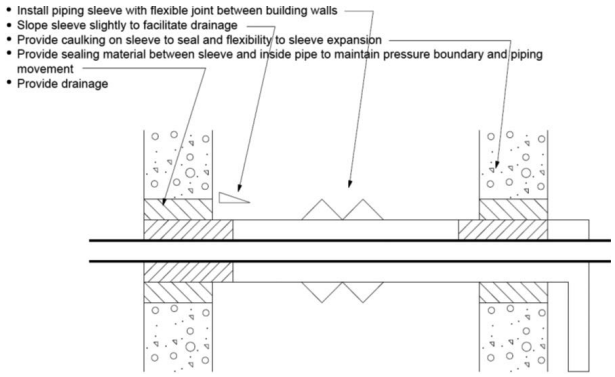

Fig. 4. Typical design for building sleeves schematic (refer to APR1400 DCD TIER 2 Figure 12.4-4).

리브 또는 이중관 배관으로 설치한다. 건물 간 이격거리에 따라 배관 슬리브 또는 이중관 배관의 사용 여부를 선정하며, 일반적으로 이격거리가 가까우면 배관 슬리브를 사용하고 이격거리가 멀면 이중관 배관을 사용한다.

배관 슬리브와 이중관 배관의 외부 배관에는 건물 압력차를 견디고 건물 외부에서 물과 공기가 내부로 유입되는 것을 방지하기 위해 실링을 설치한다. 배관 슬리브와 외부 배관에는 어느 정도 건물 움직임을 수용할 수 있도록 슬리브 조인트가 장착된다. 배관 슬리브와 외부 배관은 완만한 경사로 설치하여 내부 배관 누수 시 액체의 배수가 용이하도록 하며, 누수는 인근 집수조로 직접 배수된다. 건물과 건물 관통부 배관, 건물 슬리브에 대한 일반적인 설계개념은 Fig. 4와 같다.

3.2.4. US NRC RG 4.21에 따른 설계목표 및 설계반영 사례

해체용이성 설계 및 운영 관점에서 US NRC RG 4.21에서 제시하는 각각의 목표를 달성하기 위해 적용된 계통설계특성과 내용을 APR1400 Design Control Document에 제시하였다. 앞서 Table 1에서 42개 대상 계통에 대하여 설계반영 특성을 평가하였으며, 대표적으로 원자로냉각제계통의 설계반영 사례는 다음과 같다.

3.3. 신고리 5,6호기 예비해체계획서[9]

원자력안전위원회 고시와 IAEA 안전기준에서 해체용이성은 방사성폐기물 저감 및 방사선피폭 저감(ALARA)에 그 목표를 두고 있다. 이를 위해 시설 및 환경에서의 방사성오염을 최소화하고, 해체를 용이하게 하며, 방사성폐기물의 발생을 최소화하도록 하고 있다. 이에 신고리 5,6호기는 설계단계에서부터 예비해체계획서를 통해 해체를 고려하였으며, 관련 고시에 따라 해체계획을 주기적으로 검토하고 갱신하고 있다.

3.3.1. 해체용이성을 위한 ALARA 설계

원자력발전소는 해체과정 중 작업자의 피폭방사선량을 합리적으로 달성 가능한 한 낮게 유지하기 위해 설계 측면 및 운영 관리 측면을 모두 고려하고 있다.

해체용이성 측면에서 ALARA 설계특성은 해체 시점에서 복원이 요구되는 시설과 부지에 대한 잔류방사능을 최소화하고 구조물, 계통 및 기기의 해체를 용이하도록 설계하며, 시설의 안전하고 효율적인 해체를 위해 중요한 운영기록을 문서화하여 유지하는 데 있다. 이 기록 문서에는 해체에 영향을 미칠 수 있는 설계변경사항 및 시설의 운영 기간 동안 환경으로 누설된 방사성오염의 준위와 오염사건이 포함된다.

발전소 운영 시 적용되는 ALARA 특성은 발전소 해체 시에도 동일하게 적용된다. 해체용이성을 위한 신고리 5,6호기 ALARA 설계특성은 다음과 같다.

(1) 방사선구역 내 체류시간 최소화
- 유지보수 작업 빈도를 줄이고, 정비 작업자 피폭을 저감하기 위하여 운전 신뢰성이 높은 기기 선정
- 펌프 및 관련 배관은 기기의 운반이 용이하도록 가능한 플랜지로 연결하고, 펌프 내부 구조물 또한 분리가 가능하도록 설계
- 제거가 필요한 밸브는 플랜지 연결 설치
- 작업자의 접근 및 기기 제거가 용이하도록 모터, 펌프를 포함한 일체형 기기는 스키드에 설치

(2) 방사선구역 내 방사선피폭 최소화
- 펌프케이싱은 제염이 용이하도록 배수라인을 설치
- 기기 및 배관은 방사성부식생성물(크러드)의 축적을 최소화하도록 설계
- 이온교환기는 완전 배수가 가능하고, 원격으로 용기에서 폐수지를 추출하여 고체방사성폐기물관리계통으로 이송할 수 있도록 설계
- 액체여과기 하우징에는 배기라인을 설치하여 액체여과기의 완전 배수가 가능하도록 설계하고 원격으로 필터 카트리지 제거가 가능하도록 필터 하우징과 카

Table 2. US NRC RG 4.21 design objectives and applicable (Example for reactor coolant system)

	Objective	SSC control measures/Design features in DCD to meet objective
1	Prevention/Minimization of unintended contamination	• The system design, including wetted parts of the reactor vessel, the steam generators, the pressurizer, the reactor coolant pumps, and the associated piping, is designed with stainless steel cladding or base material, and has welded construction for life-cycle planning, thus minimizing leakage and unintended contamination of the facility and the environment.
		• The RCS components are designed to provide the first barrier to contain the radioactivity resulting from power operation and damaged fuel. These components are designed with proven materials and fabrication techniques, and are housed inside the reactor containment structure, which provides the second barrier. The basemat of the reactor containment structure is equipped with steel liners to prevent and minimize the spread of contamination from leaked reactor coolant. The in-core instrumentation (ICI) sump is provided at the basement level to collect leaks, and the reactor containment sump is provided at the reactor vessel operating floor to collect leaks from the other components. The reactor floor is also lined with a steel layer to prevent contamination of the concrete structure.
2	Provision of adequate and early leak detection capability	• The RCS components are designed with multiple level, pressure, and temperature, and radiation detection instruments to provide reasonable assurance of safe operation of the SSCs, including the associated piping, and provide alarms to the operating personnel in the event of off-normal conditions. Releases from over-pressurization and leaks are collected in the reactor drain tank (RDT), the ICI sump, the containment sump, and the IRWST.
		• Leak detection methods are segregated into two classifications: "unidentified leakages" and "Identified leakages". Unidentified leakages are monitored by containment sump level, area particulate radiation detection, and containment atmosphere humidity instruments. Leakages are collected in sumps and a computer program is developed to estimate leakage rates based on flow measurements. This approach can detect 0.5 gpm leakage within 1 hour. Additionally, 19 locations within the containments are equipped with acoustic leak detection instruments where leakage is considered critical.
		• Containment area radiation monitors, temperature and pressure monitors, sump levels and sump pump flow rates are programmed to provide leakage information and notification in the MCR for operator actions.
3	Reduction of cross contamination, decontamination, and waste generation	• Manual valves 2 inches and larger are designed with a double-packed stem and a lantern ring with an intermediate leak drain connection. The drains are routed to the drain system for collection and treatment. This design approach minimizes the spread of contamination and the contamination of the facility.
		• The SSCs are designed with life-cycle planning through the use of nuclear-industry proven materials compatible with the chemical, physical, and radioactive environment, thus minimizing waste generation.
		• The RCS components are made of steel with low cobalt content as much as it is practicable. The approach minimizes waste generation.
		• Shop welding of major piping to larger pieces is maximized to reduce the field welding. Piping safe-ends are provided for field welding connections to minimize the potential for leaking.
4	Decommissioning planning	• The top surface of the containment basemat is sloped and lined with a layer of steel to prevent contamination of the basemat by facilitating draining of leakage to the ICI sump and the containment sump. This layered approach facilitates easier decommissioning and minimize waste generation.

Table 2. Continued

	Objective	SSC control measures/Design features in DCD to meet objective
4	Decommissioning planning	• The SSCs are designed for the full service life and are fabricated as individual assemblies for easy removal.
		• The RCS is designed with no embedded or buried piping, thus facilitating decommissioning planning and preventing unintended contamination.
5	Operations and documentation	• The RCS is designed for remote and automatic operation with operator supervision. Adequate instrumentation, including level, flow, temperature, and pressure elements, radiation monitors, and acoustic leak detection instruments, is provided to monitor and control the operations to prevent undue interruption, and minimize the spread of contamination and waste generation.
6	Site radiological environmental monitoring	• RCS inclusion in the site radiological environmental monitoring program is not required. However, a site radiological environmental monitoring program is included for the whole plant for detection radiological of contamination.

트리지를 설계
- 탱크는 완전배수가 가능하고, 제염을 위한 내부세척이 가능하도록 설계
- 고방사선구역 내의 기기조작 및 핵연료취급을 보조하기 위해 원격장비 설치
- 준위에 따라 내방사성 재질 선정

(3) 설비 배치 설계
- 기기에 대한 접근이 용이하도록 충분한 공간 확보
- 방사성 오염의 확산을 예방하기 위해 방사성계통과 비방사성계통을 분리하여 배치
- 유지보수 빈도, 운전특성, 방사능준위 등을 고려하여 계통기기를 격실에 분리 배치
- 환기계통은 공기 중 방사성물질이 저방사선구역에서 고방사선구역으로 환기될 수 있도록 설계하여 공기 중 오염 확산을 최소화시키며, 잠재적으로 고방사능 물질을 함유하는 구역에 대해서는 부압 유지
- 원자로건물 등 방사선구역 내에 설치되는 계측설비는 작업자 피폭 저감을 위하여 가능한 접근이나 교체가 용이한 위치에 설치

(4) 핵증기공급계통 설계 반영 사항
- 1차계통 냉각재, 수지, 농축물과 같은 방사성물질을 포함하는 기기들은 물 세척 또는 화학제염 세척을 위한 연결관 설치
- 핵증기공급계통 기기는 제염이 용이하고 크러드 누적을 최소화하도록 설계
- 중성자 방사화로 인한 작업자 피폭을 줄이기 위하여 차폐물을 설치할 수 있는 공간 확보
- 1차계통 냉각재에 접촉하는 재질은 안티몬과 코발트의 함량을 제한하는 등, 핵증기공급계통의 전 수명기간 동안 크러드의 누적을 최소화하도록 설계

3.3.2. 방사성물질 누설 최소화 설계

신고리 5,6호기 발전소는 구조물, 계통 및 기기에서 방사성 유체의 누설이 최소화될 수 있도록 설계되었다. 만약 구조물, 계통 및 기기로부터 방사성 유체가 누설되는 경우에도 원자로건물바닥배수, 보조건물바닥배수, 복합건물배수 및 기타 바닥배수는 각각 바닥배수계통을 거쳐 역삼투압설비 패키지로 처리된다. 보조건물 기기배수 및 기기폐액은 기기폐액 부계통으로 보내지고 역삼투압설비 패키지로 처리된다. 방사화학실험실, 핵연료취급지역, 기기제염배수 및 기타 화학폐액은 화학폐액 부계통으로 보내지고 역삼투압설비 패키지로 처리되도록 설계되었다.

구조물, 계통 및 기기에서 방사성 유체의 누설을 최소화하기 위한 구체적인 설계 사례는 다음과 같다.
- 오염의 확산을 방지하고 제염이 용이하도록 방사선관리구역의 콘크리트 벽과 바닥은 도장 처리
- 방사성 유체의 누설이 발생할 수 있는 구역에는 연석(curb)을 설치하여 오염물질 확산 방지
- 방사선관리구역의 환기계통은 공기 중 방사성물질이 확산되는 것을 방지하기 위하여 공기가 저방사선구역에서 고방사선구역으로 흐르도록 설계

- 제염에 사용된 오염수의 확산을 방지하기 위해 배수는 방사성 집수조로 수집
- 방사성물질을 포함하는 기기들은 잠재적으로 침적될 수 있는 방사성입자를 제거하기 위하여 세척용 설비 설치
- 배수배관은 정체 없이 중력으로 이송될 수 있도록 경사지게 배치하여 크러드의 축적 방지

3.3.3. 환경방출 방사성오염 및 운영 중 방사성폐기물 발생 최소화 설계

- 해체작업으로 발생하는 방사성폐기물은 신고리 5,6호기 운영 중 사용하는 기체방사성폐기물관리 계통, 액체방사성폐기물관리 계통 및 고체방사성폐기물관리 계통을 통해서 처리가 가능하다.
- 정상운전 중 오염된 구조물, 계통 및 기기 등의 해체폐기물은 ALARA 및 오염최소화 설계특성에 따라 오염이 최소화되며, 해체단계에서는 재고량 특성 평가 및 오염도 조사를 통하여 오염 준위에 따라 폐기물을 분류하고 가능한 부분은 제염작업을 통해서 오염준위를 낮춤으로써 해체폐기물 발생을 최소화한다.

4. 고찰 및 결론

원자력시설 해체는 작업자의 피폭을 최소화하고 방사성폐기물의 발생과 이로 인한 환경적 영향을 최소화하며, 해체과정의 최적화로 비용 절감을 목표로 한다. 안전하고 경제적인 해체를 위해서는 설계단계부터 해체에 대비하여 원자력시설과 환경의 오염을 최소화하고, 시설 운영 및 해체 중 발생하는 방사성폐기물의 양을 최소화하는 등 해체 관련 사항들을 고려하여 설계해야 한다.

이에 본 논문에서는 원자력발전소의 설계단계부터 해체에 대비한 해체용이성 설계와 관련된 규제요건과 국내 원전에 반영된 설계 사례를 살펴보았다.

국내 원자력발전소의 설계 및 운영에는 해체용이성을 위해 다음과 같은 설계특성이 반영되어 있음을 알 수 있다.

- ALARA 원칙과 부합하도록 해체용이성을 고려한 설계특성
- 구조물, 계통 및 기기에서 방사성물질 누설 가능성 최소화 설계특성
- 계획, 통제되지 않은 방사성물질의 환경 유출, 운영 중 방사성폐기물 발생 최소화 설계특성
- 작업자의 접근성과 기기철거의 편의성을 고려한 시설 배치의 최적화 설계특성

해체용이성과 관련된 국내외 규제요건들을 만족하여 설계 및 운영되는 원자력발전소는 신속하고 용이한 해체가 가능하여 작업자의 방사선피폭과 방사성물질로 인한 환경오염을 최소화할 수 있다. 또한, 해체 과정에서 발생되는 방사성폐기물의 양과 방사능준위를 줄이고 해체 작업시간을 단축함으로써 안전하고 경제적인 해체가 가능할 것이다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20191510301180),

참고문헌

1. IAEA. 2014. Decommissioning Facilities. IAEA safety standards, No. GSR Part 6.
2. IAEA. 2007. Considerations for Waste Minimization at the Design Stage of Nuclear Facilities. Technical Reports Series No.460.
3. U.S.NRC. Standard for Protection Against Radiation. 10 CFR 20.
4. U.S.NRC. 2008. Minimization of Contamination and Radioactive Waste Generation: Life-Cycle Planning. Regulatory Guide 4.21.
5. NEI. 2009. Generic FSAR Template Guidance for Life Cycle Minimization of Contamination. NEI 08-08A.
6. Article 4 of the Enforcement Ordinance of The Nuclear Safety Act Article 4
7. 'Ministerial Ordinance of Technical Requirements Applying to the Nuclear Installations', Nuclear Safety and Security Commission, administrative rule 30 (2021)
8. KOREA ELECTRIC POWER CORPORATION, KOREA HYDRO & NUCLEAR POWER CO., LTD. 2018. APR1400-K-X-FS-14002-NP. APR1400 Design Control Document Tier 2.
9. Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd. 2017. Shin-Kori Units 5&6 Preliminary Decommissioning Plan.

부 록 - 해체용이성 관련 국내외 규제요건

1. IAEA 규제요건

• IAEA GSR Part 6. Decommissioning of Facilities

7. Planning for Decommissioning during the Lifetime of the Facility

Requirement 10: Planning for decommissioning

The licensee shall prepare a decommissioning plan and shall maintain it throughout the lifetime of the facility, in accordance with the requirements of the regulatory body, in order to show that decommissioning can be accomplished safely to meet the defined end state.

7.1. The regulatory body shall ensure that the licensee takes decommissioning into account in the siting, design, construction, commissioning and operation of the facility, by means which include features to facilitate decommissioning, the maintenance of records of the facility, and consideration of physical and procedural methods to limit contamination and/or activation.

2. 미국 규제요건

• 10 CFR 20 Standard for Protection Against Radiation

§ 20.1406 Minimization of contamination.

(a) Applicants for licenses, other than early site permits and manufacturing licenses under part 52 of this chapter and renewals, whose applications are submitted after August 20, 1997, shall describe in the application how facility design and procedures for operation will minimize, to the extent practicable, contamination of the facility and the environment, facilitate eventual decommissioning, and minimize, to the extent practicable, the generation of radioactive waste.

(b) Applicants for standard design certifications, standard design approvals, and manufacturing licenses under part 52 of this chapter, whose applications are submitted after August 20, 1997, shall describe in the application how facility design will minimize, to the extent practicable, contamination of the facility and the environment, facilitate eventual decommissioning, and minimize, to the extent practicable, the generation of radioactive waste.

(c) Licensees shall, to the extent practical, conduct operations to minimize the introduction of residual radioactivity into the site, including the subsurface, in accordance with the existing radiation protection requirements in Subpart B and radiological criteria for license termination in Subpart E of this part.

• US NRC RG 4.21 Minimization of Contamination and Radioactive Waste Generation: Life-Cycle Planning

3. Facilitation of Decommissioning

3.1. General Statement

In general, the means for facilitating decommissioning begins at the design stage and should be incorporated into the procedures and operations. The objective is to ensure that throughout the life of the facility, the design and operating procedures minimize the amount of residual radioactivity that will require remediation at the time of decommissioning.

3.2. Facilitation of Decommissioning with Proper Records

The provisions of 10 CFR 50.75 (g) contain requirements for maintaining records "...of information important to the safe and effective decommissioning of the facility." These records are required to contain details on contaminating events and residual levels of contamination in the environment

during the life of the facility. In addition, 10 CFR 30.35 (g), 10 CFR 40.36 (f), 10 CFR 70.25 (g), and 10 CFR 72.30 (d) have records retention requirements related to decommissioning. Records on events involving leaks or spills should be maintained and readily accessible to facilitate cleanup and eventual decommissioning of the facility.

A-3. Facilitating Decommissioning

To facilitate decommissioning, 10 CFR 20.1406 applicants should consider the following specific measures (or a combination thereof):

a. To facilitate decommissioning, all information relating to the facility design, facility construction, facility design changes, site conditions before and after construction, onsite waste disposal, onsite contamination, and results of monitoring and radiological surveys should be centrally located and readily recoverable.

b. Applicants should establish procedures to ensure adequate and complete documentation of corporate knowledge of instances of facility and environmental contamination and operational events over the lifetime of the facility, in accordance with applicable information collection requirements such as 10 CFR 70.50, "Reporting Requirements"; and Subpart D, "Records, Reports, Inspections, and Enforcement," of 10 CFR Part 72, "Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste, and Reactor-Related Greater than Class C Waste." In addition, 10 CFR 30.35 (g), 10 CFR 40.36 (f), 10 CFR 50.75 (g), 10 CFR 70.25 (g), and 10 CFR 72.30 (d) have recordkeeping requirements important to decommissioning. This program can provide information that will be important in preparing an historical assessment of a nuclear facility, which can save time and effort during decommissioning planning.

c. Decommissioning activities in the past have been complicated by radioactivity that was not adequately documented before decommissioning began. Applicants covered by 10 CFR 20.1406 are encouraged to consider maintaining records of instances of facility and environmental contamination events that result in residual contamination that may complicate the decommissioning process.

d. Plans and procedures to facilitate decommissioning should include (1) comprehensive video records of the equipment layout in areas where radiation fields are expected to be high following operations, and (2) as-built drawings of the facility. Furthermore, the records should include global positioning system readings that pinpoint all buried component locations, particularly components in the site environs. However, it is recognized that obtaining reliable ground positioning system readings within certain SSCs is not practical because of structural interference with signal quality.

e. Facility designs should minimize the use of embedded pipes in facility walls, floors, and the like to the extent practicable, consistent with maintaining radiation doses as low as is reasonably achievable during operations and decommissioning. Embedded pipes, especially those that are small in diameter (e.g., less than 6 inches), could complicate decommissioning activities because they can be very difficult to remove or survey. Their location should be carefully documented to facilitate eventual decommissioning.

f. Temporary piping installed during construction should be removed to avoid undocumented random piping in the field that, when uncovered, will raise questions about the extent of site contamination during decommissioning. Construction debris should not be disposed of within the controlled area.

g. During the design stage, consideration should be given to facilitating the removal of any equipment and/or components that may require removal and/or replacement during facility operation or decommissioning. When designing buildings or enclosures for large equipment (e.g., steam generators, large piping, tanks), an applicant should determine how the equipment will be removed for replacement/repair or how it will be permanently removed at the time of facility decommissioning.

10 CFR 20.1406 applicants should evaluate the following:

- size/space clearances
- installation of removable roofs/walls
- placement of cranes and lifts for replacement or removal of heavy equipment or components
- installation of lifting lugs
- design of anchor points for lifts
- use of shearable nuts and bolts
- use of quick-disconnect components
- ease of insulation removal
- setdown areas

• NEI 08-08A Generic FSAR Template Guidance

5. Facilitation of Decommissioning

5.1. Design and Operational Features that Facilitate Decommissioning

5.1.1. The means for facilitating decommissioning begins at the design stage and should be incorporated into the procedures and operations. The objective is to ensure that throughout the life of the facility, the plant design and the operating procedures minimize the amounts of residual radioactivity that will require remediation at the time of decommissioning.

5.1.2. The applicant will establish a remediation protocol to prevent migration of licensed material off-site and to minimize decommissioning impacts that are consistent with Reference 3 and Reference 4 and will:

a. Establish written procedures outlining the decision making process for remediation of leaks and spills or other instances of inadvertent releases. This process is site specific and shall consider migration pathways.

b. Evaluate the potential for detectible levels of licensed material resulting from planned releases of liquids and/or airborne materials.

Note: Applicants should use the first 5 years of effluent release data to perform the evaluation in section 5.1.2.b. This time frame allows the licensee to obtain statistically valid data sets for radioactive effluent releases and for on-site ground water monitoring samples over time, while the plant completes at least one refueling outage. Licensees will perform on-site ground water monitoring throughout the plant's operation, beginning at initial fuel load.

c. Evaluate and document, as appropriate, decommissioning impacts resulting from remediation activities or the absence thereof ((Identify and describe site procedure(s) that will implement section 5.1.2)).

5.2. Decommissioning Records

5.2.1. Records of instances of facility and environmental contamination and operational events that are of interest for decommissioning or that result in residual contamination will be documented over the lifetime of the plant.

5.2.2. The applicant will ensure that records of leaks, spills, and remediation efforts are retained and retrievable to meet the requirements of 10 CFR 50.75 (g) and 10 CFR 72.30 (d).

5.2.3. The above documented events will assist in developing a historical assessment of the site and facility, thereby reducing the time, effort, and potential hazard to personnel during decommissioning activities. These records should also be used to determine an area's classification for purposes of performing surveys during decommissioning (See NRC Regulatory Issue Summary 2002-02 Lessons Learned Related to Recently Submitted Decommissioning Plans and License Termination Plans) (Reference 9).

3. 국내 규제요건

• 원자력안전법 시행규칙

제4조 (건설허가의 신청)

⑤ 법 제10조제2항에 따른 원자로시설의 해체계획서에는 위원회가 정하여 고시하는 바에 따라 다음 각 호의 사항을 적어야 한다.

1. 원자로시설의 해체를 위한 조직, 인력, 비용 및 재원
2. 원자로시설의 해체 전략 및 일정
3. 해체를 용이하게 하기 위하여 설계 시 반영한 사항 및 건설·운영 시 조치하도록 한 사항
4. 방사선으로부터 재해를 방지하기 위한 조치
5. 방사성물질등에 따른 오염의 제거 방법
6. 방사성폐기물의 처리·저장·처분 방법
7. 방사성물질등이 환경에 미치는 영향의 평가 및 대책
8. 그 밖에 원자로시설의 해체에 따른 재해를 방지하기 위하여 위원회가 정하는 사항

• 원자력안전위원회 규칙 제30호 (원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙)

제85조의6 (용이한 해체를 위한 조치) 원자로시설은 안전하고 용이한 해체를 위하여 다음 각 호의 기준에 따라 설계·건설 및 운영하여야 한다.

1. 원자로시설의 주요 계통은 방사성오염의 발생 및 방사성물질의 누설 가능성을 최소화할 수 있을 것
2. 원자로시설의 주요 구조물 및 기기는 철거가 용이하도록 배치할 것
3. 방사성물질에 오염된 구조물·계통 및 기기를 제염하기 위한 방안을 갖출 것
4. 방사성폐기물의 발생량 (방사능 및 부피를 말한다)을 가능한 한 최소화할 것
5. 해체에 영향을 미칠 수 있는 설계·건설 및 운영에 관한 주요 기록을 보존할 것