해외 원전해체 및 방사성폐기물 처분장 사례연구

Case Studies on the Decommissioning of Nuclear Power Plants and Radioactive Waste Repository Abroad

조남진* · 임동수** · 방현욱*** · 조태연**** · 이정임*****

Cho, Namjin*, Im, Dongsu**, Bang, Hyunwook***, Cho, Teayeon****, and Lee, Junglim*****

Abstract

Before the decommissioning of a nuclear power plant, the core infrastructure and decommissioning equipment must be developed to complete the disassembly technology development. However, research and analysis of the detailed process and full application of technology for domestic decommissioning of nuclear power plants remain lacking. Therefore, a domestic nuclear power company needs to generate an initial market that can participate in the core competency of nuclear decommissioning and create a nuclear decommissioning ecosystem-based deployment. Further, training needs must be provided that are designed for professional staff, and measures need to be put in place, such as building partnerships that include overseas-based consolidation, establishing a nuclear-power plants decommissioning system, and decommissioning by relevant institutions, to prevent fire, ensure public safety, and give confidence to people. The author has written through a field trip on decommissioning of nuclear power plants in Spain to protect the safety of nuclear power plants from radiation prior to the decommissioning of Kori 1 nuclear power plants.

Key words : Decommissioning, Fire Protection, Radiation, Life Safety

요 지

고리 1호기는 해체사업을 추진하기 위해 필요한 고도화-상용화 기술개발 및 국내 미확보 기술 개발을 계획하고 있으며, 원전해체 전에 핵심 인프라 구축 및 해체 장비개발을 통해 본격적인 해체기술들의 개발을 완료할 예정이다. 하지만 아직까지 해체원전에 대한 상세공정 및 전체 적용기술들에 대한 조사 및 분석, 국내 원전기업이 참여 가능한 초기시장의 정립, 원전해체 핵심역량 확충, 원전해체 생태계 기반 구축, 수요 맞춤형 전문인력 양성, 협력관계 구축, 등 해외 진출 기반 강화, 원전해체산업 육성을 위한 제도 마련, 안전성 확보를 위한 해체 관련 제도 정비, 화재방호, 원전해체 전 과정에 대한 국민 안전과 신뢰 확보 등의 조치가 필요하다. 고리 1호기의 원전해체시 원전의 안전 및 방사선으로부터 인명의 안전을 보호하기 위해 스페인 원전해체 사례를 중심으로 제시하였다.

핵심용어 : 해체, 화재방호, 방사선, 안전

*정회원, (주)한국발전엔지니어링, 원전해체기술자, 공학박사(E-mail: cnj7924@hanmail.net)

Member, Ph.D, Korea Power Engineering, Nuclear Decommissioning Engineer

** (주)한국발전엔지니어링 건축기술자(E-mail: ids4648@naver.com)

Korea Power Engineering, Construction Engineer

*** (주)한국발전엔지니어링 소방기술자(E-mail: gusnr175@naver.com)

Korea Power Engineering, Fire Protection Engineer

**** (주)한국발전엔지니어링 전기기술자(E-mail: supercore7922@gmail.com)

Korea Power Engineering, Electrical Engineer

***** 교신저자, 정회원, (주)KPE, 원전기술자(Tel: +82-70-4667-3845, Fax: +82-70-8282-3857, E-mail: freshjl@hanmail.net)

Corresponding Author, Member, Korea Power Engineering, Nuclear Engineer

1. 서 론

원전해체는 원자력시설의 운영정비 후 방사선 및 비방사선의 영향으로부터 작업자와 일반대중의 보건 및 안전을 확보하고, 주변 환경을 보호하며 규제관리를 준수하면서 해체하기 위한 모든 기술적, 관리적 행위 일체를 의미한다.

국내 최초로 고리 1호기의 영구정지가 2017년 6월에 결정되었으며 해체 인허가, 해체 사전준비, 영구정지 관리, 사용후핵연료 냉각 등 I 단계가 진행 중이다. II 단계는 2022년 6월 해체승인이 이루어지고, 폐기물처리시설 구축, 비방사성 계통/구조물 및 기타 구역 철거 등이 이루어진다. 이후 III 단계인 방사성 계통/구조물 철거, 방사성폐기물 처리 등이 이루어지며, 마지막으로 IV 단계에서는 부지복원이 완료되면 원전해체가 종료된다(KHNP Academy, 2018).

고리 1호기는 해체사업을 추진하기 위해 필요한 고도화·상용화 기술개발 및 국내 미확보 기술개발을 계획하고 있으며, 원전해체 전에 핵심 인프라 구축 및 해체 장비개발을 통해 본격적인 해체기술들의 개발을 완료할 예정이다(KHNP Academy, 2018). 하지만 아직까지 해외 해체원전에 대한 상세공정 및 전체 적용기술들에 대한 조사 및 분석, 국내 원전기업이 참여 가능한 초기시장의 정립, 원전해체 핵심역량 확충, 원전해체 생태계 기반 구축, 수요 맞춤형 전문인력 양성, 협력관계 구축 등 해외 진출 기반 강화, 원전해체산업 육성을 위한 제도 마련, 안전성 확보를 위한 해체 관련 제도 정비, 화재방호, 원전해체 전 과정에 대한 국민 안전과 신뢰 확보 등의 조치가 필요하다.

전세계 원전해체 현황은 운전수명에 도달하거나 경제성 측면에서 미국 33기, 영국 30기, 독일 28기, 프랑스 12기 등 세계적으로 157건이며, 정치적 이유로 운영이 정지되는 원자력시설은 25건, 중대사건으로 운영 정지된 원자력시설은 후쿠시마원전 등 11건, 실험로 또는 프로토타입 원자로 45건, 연구로 및 해주기시설 250건 등으로 국내외적으로 후쿠시마 원전사고 이후 조기해체에 대한 필요성이 강조되고 있는 추세이다(KAIF, 2018).

주요 해외 원전해체 사례의 예시는 Table 1 및 Fig. 1과 같다.

Table 1. Major Decommissioning Cases of Overseas NPP

Country	NPP	Power
USA	Haddam Neck	PWR
USA	Maine Yankee	PWR
USA	Three Mile Island	PWR
USA	Millstone Unit	BWR
Germany	Greifswald-1	PWR
Germany	Vakkahl	BWR
Japan	JPDR	BWR
Japan	Fukushima	BWR

Fig. 1. Maine Yankee Decommissioning Cases

2. 연구 내용

2.1 목적

국내 원전해체 1호인 고리 1호기 원전해체 관련 기술개발 및 방사성폐기물 처분장에 대해 해외 원전의 사례를 중심으로 조사하고, 고리 1호기 원전해체시 해외 사례들을 적용하기 위해 가압경수로형인 스페인 해체 원전을 방문하였다.

본 사례연구의 가장 중요한 목적은 고리 1호기 원전해체시 원전의 안전 및 방사선으로부터 인명의 안전을 보호하기 위함이다.

2.2 연구 범위 및 방법

2.2.1 호세 카브레라(Jose Cabrera) 원전해체

호세 카브레라 해체 원전의 주요특성은 다음과 같다(Jose Cabrera NPP, 2018).

- ① 위치: 마드리드, 스페인
- ② 노형: 1-LOOP PWR
- ③ 설비용량: 160 MWe
- ④ 연료다발(Fuel Elements): 69 - 14 x 14
- ⑤ 연료형식(Fuel Type): enrichment 3.6 % (U-235)
- ⑥ 원자로(Reactor Vessel) 크기(Diameter): 2.82 m
- ⑦ 원자로(Reactor Vessel) 높이: 5.87 m
- ⑧ 격납건물(Containment): Reinforced concrete, Stainless Steel Head
- ⑨ 사용후연료(Spent Fuel Pool): In Containment
- ⑩ 냉각(Final cooling): Tajo River
- ⑪ 주요 연혁
 - 1968년 상업운전
 - 2009년 원자력안전위원회 해체 승인
 - 2010년 터빈 해체제염 작업 착수
 - 2016년 원자로 콘크리트 외벽 해체
 - 2020년 해체제염 종료 예정

호세 카브레라 원전해체 전과 후의 상황은 Fig. 2와 같다. 원자력 관련시설인 Pimic (Ciemat)의 Research Reactor & Reprocessing Facilities(마드리드 위치)는 2006년 ~ 2017년에 해체가 이루어졌으며, Tarragona 지역의 Vandellós 1 NPP

(Reactor type, GCR)는 1998년 ~ 2003년에 해체가 이루어졌으나 스페인도 경수로형 원전의 해체는 처음이다. 스페인 원전의 개략도는 Fig. 3과 같다.

Fig. 2. Decommissioning of Nuclear Power Plant

Fig. 3. Reactor and Turbine Building Design

2.2.2 엘 카브릴(EI Cabril) 방사성 폐기물 처분장

방사성 폐기물 처분장의 주요특성은 다음과 같으며 처분장 시설은 Fig. 4와 같다(EI Cabril, 2018).

- ① 위치: 세비야, 스페인
- ② 개요: 중저준위(Low and Intermediate Waste) 처리시설
- ③ 운영주체: ENRESA(국영 해체사업 주체)
- ④ 주요연혁
 - 1985년 El Cabril Disposal Facility 설립
 - 1993년 시설 북부 저장고에 첫 Cask 배치
 - 2001년 극저준위 폐기물(Very Low Level Waste) 배치
 - 2007년 극저준위 폐기물 처리시설 건설
 - 2014년 극저준위 폐기물 처리시설 2번 격납고 건설

Fig. 4. El Cabril Radioactive Waste Disposal Facility

2.3 호세 카브레라 해체원전 분석

2.3.1 호세 카브레라 해체원전 현황

호세 카브레라 원전은 경수로 원전(PWR)으로 원전해체를 2010년 ~ 2020년도까지 계획하고 있으며 현재 내부 기기 및 구조물(콘크리트 제외)들은 모두 해체가 되어 있는 상태이다. 원전해체는 Enresa 사에서 총괄하여 해체 중에 있다.

호세 카브레라 원전은 2010년부터 D&D Execution Project로 원전해체가 진행되며, 2019년도에는 해체가 완료되고 2020년까지 부지복원이 계획되어 있다. 호세 카브레라 원전은 10년 정도의 해체 기간으로 다른 해외원전들의 해체 기간보다 단축된 것은 발전용량이 작아 관련 시설들이 그만큼 많지 않기 때문이다. 예를 들면 국내 경수로형 표준원전은 2-Loop로 증기발생기 2대, 원자로냉각재펌프 4대 등으로 이루어졌으나, 호세 카브레라 원전은 1-Loop로 증기발생기 1대, 원자로냉각재펌프 1대 등으로 관련 시설들이 상대적으로 적어 해체 기간이 그만큼 단축된 것으로 보인다.

현재는 원자로건물 등 콘크리트 구조물만 남아있는 상태로 공정을 80% 정도 진행되었고 원자로건물 내부 콘크리트 제염 및 제거 작업 중이었으며, 원자로건물 내부에 출입시 가동중 원전과 유사한 방사선관리를 수행하고 있었다. 원자로건물 내부의 원자로, 증기발생기, 가압기는 일정 크기로 조각을 내어 처분하였다. 방사성폐기물을 담은 저장용기는 반출전 자동방사선 계측기로 방사선 준위를 측정하고 있었고 오염된 토양은 별도의 시설에서 파쇄, 분리, 측정 과정을 거쳐 처리하고 있다.

2.3.2 해체 진행 현황

- ① 0단계: 사용 후 연료제거 및 준비작업 (100%)
- ② 1단계: 해체준비 및 처리시설 구축 (100%)
- ③ 2단계: 주요한 방사성물질 구성 요소의 분리 (100%)
- ④ 3단계: 제염·해체 및 철거 (80%)
- ⑤ 4단계: 환경복원 (10%)

Fig. 5는 (a) 압력용기 해체, (b) 원자로 건물내 원자로 지지 콘크리트 절단, (c) 원자로 건물내 콘크리트 방호벽에 대한 방사선량 측정, (d) 방사성폐기물 임시저장시설 내부 방사선량 측정 상황이다.

2.3.3 원전 해체시 방사성폐기물

Fig. 6은 원전해체 중 발생된 (a) 고준위 방사성폐기물(HLW), 중저준위(LLW), (b) 극저준위(VLLW) 방사성폐기물을 나타내고 있다.

2.3.4 원전해체 프로세스

Fig. 7은 원전해체 과정에서 배관 절단, 콘크리트 절단 과정을 보여주고 있다.

Fig. 5. Decommissioning in Progress

Fig. 6. (a) High Level Waste (b) Very Low Level Wastes

Fig. 7. (a) Pipe Cutting (b) Concrete Cutting

2.3.5 방사선량 측정 및 오염 토양 처리

Fig. 8 (a)는 방사성폐기물 포장 후 방사선량을 자동으로 측정하는 시설이며, (b)는 방사선에 오염된 토양을 분쇄 및 선별하는 과정이다.

2.3.6 원전해체시 폐기물 발생 현황

Fig 9와 같이 호세 카브레라 원전 해체시 발생하는 폐기물은 대부분 일반 폐기물이다. 방사성폐기물로 분리되는 수량은 5% 이내이다.

Fig. 8. (a) Measurement (b) Soil Selection

Fig. 9. Radioactive Waste Management

2.4 엘 카브릴 방사성 폐기물 처리장 분석

2.4.1 방사성 폐기물 처리장 현황

스페인의 코르도바 지역에 위치한 방사성 폐기물 처분시설은 극중저준위(VLLW and LILW)를 처분하며, 원전해체 폐기물 외에 병원, 연구시설, 원전 관계시설에서 발생한 모든 방사성 폐기물들을 처리한다. Fig. 10은 중저준위 폐기물을 드럼에 저장하고 이후 콘크리트 용기에 저장하는 방식이다. Fig. 11은 극저준위 방사성폐기물을 천층처분 중에 있으며, 천층처분장을 계속적으로 늘려가고 있다.

Fig. 10. (a) Waste Drum (b) Concrete Containers

Fig. 11. (a) VLLW (b) LILW Repository

2.4.2 엘 카브릴 방사성 폐기물 관리

- ① 스페인에서 발생한 모든 저준위(LLW) 및 극저준위 폐기물(VLLW)을 통합하여 관리하는 시스템
- ② 엘 카브릴(EI Cabril) 반입 전 예비처리
 - 생산자의 책임(RR.Ⅱ제외), 후속조절 및 엘 카브릴(EI Cabril)에서 최종 폐기를 위해 ENRESA가 정의한 허용 기준을 준수하며 폐기물 패키지를 생성함.
 - RR.Ⅱ는 엘 카브릴(EI Cabril)에서 처리됨
 - 원자력발전소 운영 중 발생한 저준위 및 중준위 폐기물(LILW) 부피를 줄이도록 노력함
- ③ 엘 카브릴(EI Cabril)로 이송 전까지 각 원전 내 임시 보관
- ④ 방사성 폐기물 운송
 - ENRESA에서 책임운영자로서 수행
 - RR.Ⅱ의 경우 발전소 자체 운송
 - 조건 처리 폐기물은 전문회사 운송
- ⑤ 폐기물 특성 및 수용
 - ENRESA와 폐기물 생산자간에 체결 된 계약
 - 품질검증

2.4.3 엘 카브릴 기술역량

MIR의 방사성폐기물 관리는 소각, 압축, 취급시설이 있으며, 주제어실(MCR)에서 LILW 처리시설의 제어, 시설의 모든 시스템 및 처리과정 감독, 제어 빌딩 및 LILW 처분 보관소의 장비 원격조정, 방사성폐기물 패키지 추적시스템, 소각장, 압축기, 실험실 등이 있다. Fig. 12는 (a) 방사성폐기물 건물 전체를 컨트롤하는 주제어실, (b) 방사성폐기물이 입고되면 실험실에서 육안점검, 방사성량 측정, 무게 등을 측정, (c) 방사성폐기물 중 소각이 가능한 폐기물을 소각하는 시설, (d) 중저준위 방사성폐기물이 저장된 건물을 통해 토양으로 방사성물질이 침투되는지를 확인이 가능하도록 저장소 하부에 샘플을 채취할 수 있는 시설이다.

Fig. 12. Disposal Facility

2.5 종합분석

본 연구에서는 국내 원전해체시 해외원전의 해체사례를 반영하여 다양한 해체기술의 개발, 공정 및 절차 등의 습득을 통해 고리 1호기 원전에 대한 해체를 성공적으로 수행하도록 제시하였다. 또한 해외 원전해체 시장을 공략함으로써 국내 원전산업의 활성화를 이끌어야 한다. 스페인의 호세 카브레라 원전은 우리나라와 유사한 가압경수로형 원전으로 견학을 통해 금속 및 콘크리트 해체기술을 습득하였다.

또한 스페인의 엘 카브릴 방사성폐기물 처분시설은 작업자가 일하면서 방사선의 영향이 거의 없을 정도로 현대화된 관리시설을 갖추고 있다. 중저준위시설은 노후화 및 비로 인한 방사성물질이 토양으로 침투되어 오염이 발생하는지를 주기적으로 실험하고 있으며, 극저준위 방사성폐기물은 천층처분을 통해 처리비용의 절감과 안전성을 모두 만족하고 있다.

3. 결 론

고리 1호기 원전해체는 2017년 해체 승인을 시작으로 2022년에 본격적으로 해체가 이루어질 것이다. 해체시 방사선으로부터 작업자의 피폭을 방지하기 위해서는 해체준비, 해체공정, 운반, 임시저장 등에 대해 보다 면밀히 해체계획 및 절차를 구축해야한다.

국내 원전해체와 관련하여 권고할 내용은 다음과 같다.

- (1) 원전해체 전문인력을 다수 확보하기 위해서는 해외의 해체원전을 직접 배우고 익힐 수 있도록 많은 기회를 주어야함.
- (2) 원전해체시 방사선 종류별, 공정별, 구역별 방사선 피폭을 저감하고 전신을 차폐하기 위한 다양한 차폐소재의 개발이 필요함
- (3) 원전해체시 발생된 방사성폐기물의 이동경로, 저장, 방사선 발생량 등을 추적관리하기 위한 정보통신기술인 RFID, ICT, IOT 등의 개발이 필요함. 현재는 바코드 형식을 활용하고 있어 한방향 통신에 그치고 있으나 IC칩을 활용한 양방향 통신을 통해 추적관리 및 데이터 활용의 효율성과 편리성 향상이 필요함.
- (4) 원전해체시 방사화된 콘크리트 표면 및 방사선 오염된 철골구조물의 방호도장을 제거시 분진으로 인해 2차 공기오염과 작업자의 체내외피폭이 발생한다. 이를 방지하기 위한 새로운 제거 방법인 드라이아이스를 이용한 방법이 필요함.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-원자력연구개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2018M2A8A4 083765).

References

- EI Cabril. (2018). *Spanish experience and practice in LLW & VLLW management: El Cabril near surface disposal facility presentation.*
- Jose Cabrera NPP. (2018). *Dismantling & decommissioning project presentation.*
- Korea Atomic Industrial Forum (KAIF). (2018). *2018 Second half decommissioning of nuclear facilities*

training course.

- Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd. (KHNP) Academy. (2018). *Nuclear dismantling practice training course.*

<i>Received</i>	■	June 17, 2019
<i>Revised</i>	■	June 18, 2019
<i>Accepted</i>	■	July 8, 2019