



독일의 원전 해체 전략과 기술

전 풍 일

TÜV SÜD Korea(주) 상임고문

독일의 원자력 시설 해체 개요

독일은 2011년 3월 11일 일본의 후쿠시마 원전 대참사 이전까지만 해도 17기 원전을 가동하고 있었으며, 노후 원전의 수명 연장을 고려하고 있었다. 그러나 후쿠시마 원전 사고 이후 정치적으로 원전의 조기 해체를 결정하고 2011년 8월 8기의 원전의 가동을 중단하였으며, 현재 운영중인 9기의 원전도 2022년까지 단계적으로 해체하기로 결정하였다.

독일의 원자력 시설 해체 경험을 살펴보면, <표 1>에서 보여주는 바와 같이, 원전(원형로 및 상용로)의 경우 19기, 연구로의 경우 37기, 핵연료주기 시설의 경우에는 전체 11기가 현재 해체 완료되었거나 해체 중에 있다.

독일의 원자력 시설 해체 전략

1. 원자력 시설 해체 법체계

독일의 원자력 시설 해체 법체계는 해체에 대한 광의적 의미와 협의적 의미에 대한 명확한 이해를 요하고 있다. 광의적 의미에서의 해체는 독일 원자력법 제7항에 규정되어 있으며, 내용은 다음과 같다.

원자력 시설에 대한 해체의 정의는 “시설에 대한 실제적 해체 작업뿐만 아니라 시설의 안전한 격납(Safe Confinement) 또는 부분적인 인허가 요구 사항을 모두 포함하고 있으며, 이러한 것들에 대한 실제적인 적



서울대 원자력공학과 졸업
미국 카네기멜론 대학원 석사, 박사

원자력청 원자력연구사
한국원자력연구원
원자력정책연구부장,
하나로연구로사업 부단장,
중수로핵연료사업부장
과학기술처 원자력안전심사관,
원자력국장
한국원자력연구원
원전사업단장(부원장)
국제원자력기구(IAEA) 원자력발전국장
한국과학기술원(KAIST)
원자력 및 양자공학과 초빙교수
한국연구재단 원자력국제협력관 역임

〈표 1〉 독일의 원자력 시설 해체 현황(2013년 5월 기준)

구분	원형 및 상용로	연구용 원자로	핵연료주기 시설
해체 완료	3	28	7
해체 중	13	3	4
지연 해체	3	2	-
해체 신청 중	-	4	-
총 계	19	37	11

용을 내포하고 있다.”

협업적 의미에서의 해체는 독일 연방정부의 지침서 및 관례에 명시되어 있으며, 이와 관련된 내용을 살펴보면 다음과 같다.

“일반적으로 원자력 시설 해체의 의미는 원자력 시설 운영의 최종적인 중단 이후의 모든 조치들을 포함하고 있으며 관련 시설의 해체 및 부분적 해체뿐만 아니라 안전한 격납 등을 목표로 하고 있다.”

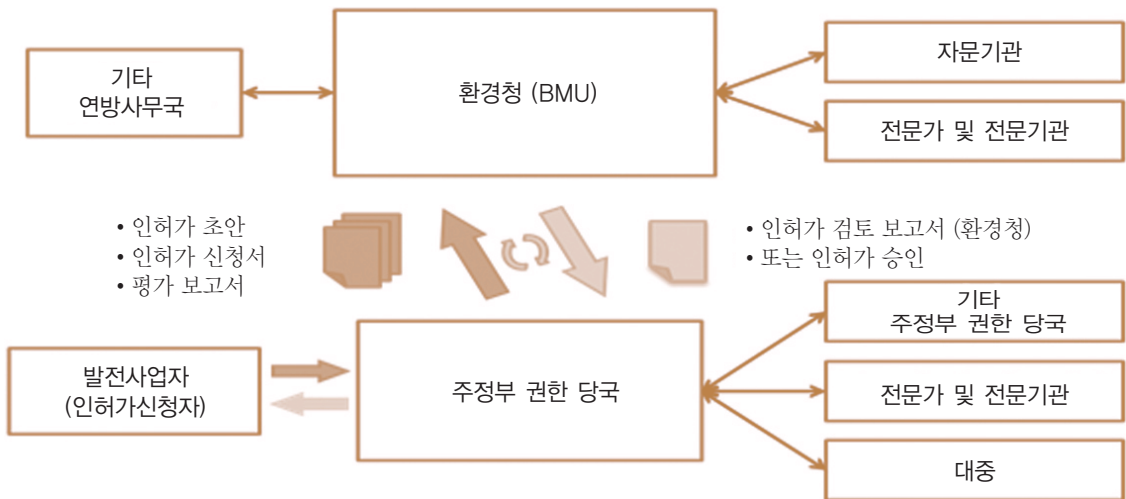
독일의 원자력법에 따르면 독일 내 해체 대상 원전에 대하여 즉시 해체 또는 지연 해체 후 해체를 허가하고 있으며, 영구 밀봉은 법적으로 금지하고 있다. 또한 해체에 대한 모든 법적 책임은 전적으로 해당 시설의 운영자에게 있으며, 해체 대상 시설 운영자는 해체 기간 및 해체 전략을 직접적으로 결정하고, 해체 인허가에 대한 사항 역시 모든 책임을 지도록 하고 있다.

2. 원전 해체 체계 및 인허가 프로세스

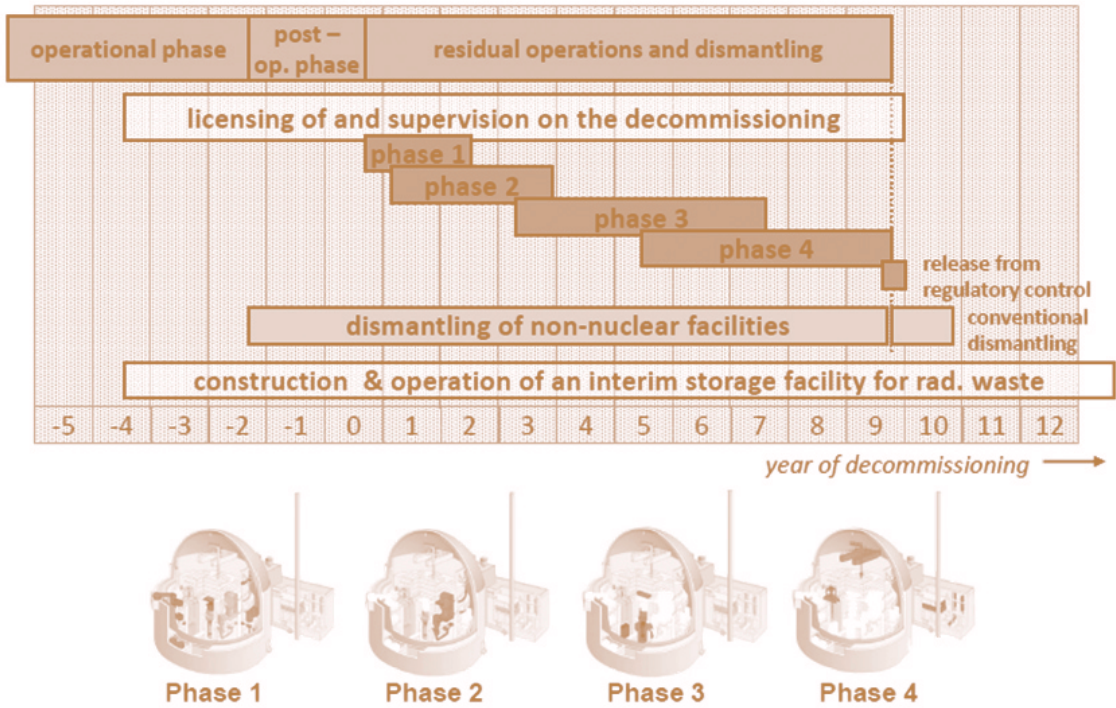
원전 해체와 관련된 독일의 규제 체계는 원자력 법률 및 법령을 기준으로 하여, 규제 지침, 안전 기준, 해체 지침, 원자력안전위원회, 방사선안전위원회, 원자력폐기물관리위원회의 권고 사항, 그리고 원자력 안전 기준 및 기술 규범과 지침을 토대로 하고 있다.

독일의 원전 해체 인허가 프로세스는 〈그림 1〉에 표시한 바와 같이, 크게 두 가지로 진행된다. 첫 번째는 주정부(Land Authority)의 인허가 프로세스로서 해당 주에 속한 발전사업자는 주정부 권한 당국에 해체 인허가 신청서를 제출해야 한다. 제출된 신청서는 주정부 권한 당국을 포함하여 해체 전문가 및 전문기관, 대중 및 기타 주정부 권한 당국에 전달된다.

두 번째는 연방정부의 인허가 프로세스로서 자국 해체 업무를 주관하고 있는 환경청(BMU)은 주정부로부터 제출된 평가보고서 및 발전사업자의 인허가 신청서를 검토하게 된다. 검토는 환경청을 포함하여 자문 기관 및 전문 기관, 기타 연방 사무국과 함께 수행하게 되며, 검토 결과를 종합하여 평가보고서를 주정부에 전달한다. 발전사업자의 해체 인허가 신청이 적절하다고 판단될 시에는 연방정부에서는 해체 인허가 승인을 발급하게 된다.



〈그림 1〉 독일의 원전 해체 인허가 프로세스



〈그림 2〉 독일 해체의 단계적 접근 방식 : Stade 원전 해체 사례
출처 : E.ON Kernkraft GmbH

〈표 2〉 Stade 원전의 해체 단계별 수행 업무

해체 작업	해체 업무	목적 및 주요 내용
1단계	오염 계통 및 부품 제거	해체 업무 수행을 위한 공간 확보 해체 업무 수행 준비 오염 계통 및 부품 제거
2단계	대형 구조물 제거	일차회로의 배관 및 펌프 제거 증기발생기 제거
3단계	원자로 계통 제거	원자로심 내부 구조물 제거 사용후핵연료 저장조 제거 원자로 압력용기 제거 생물학적 차폐 제거
4단계	잔여 계통 및 부품 제거	핵연료 장전 설비 제거 원자로 크레인 제거 환기 계통 제거 배수 처리 계통 제거

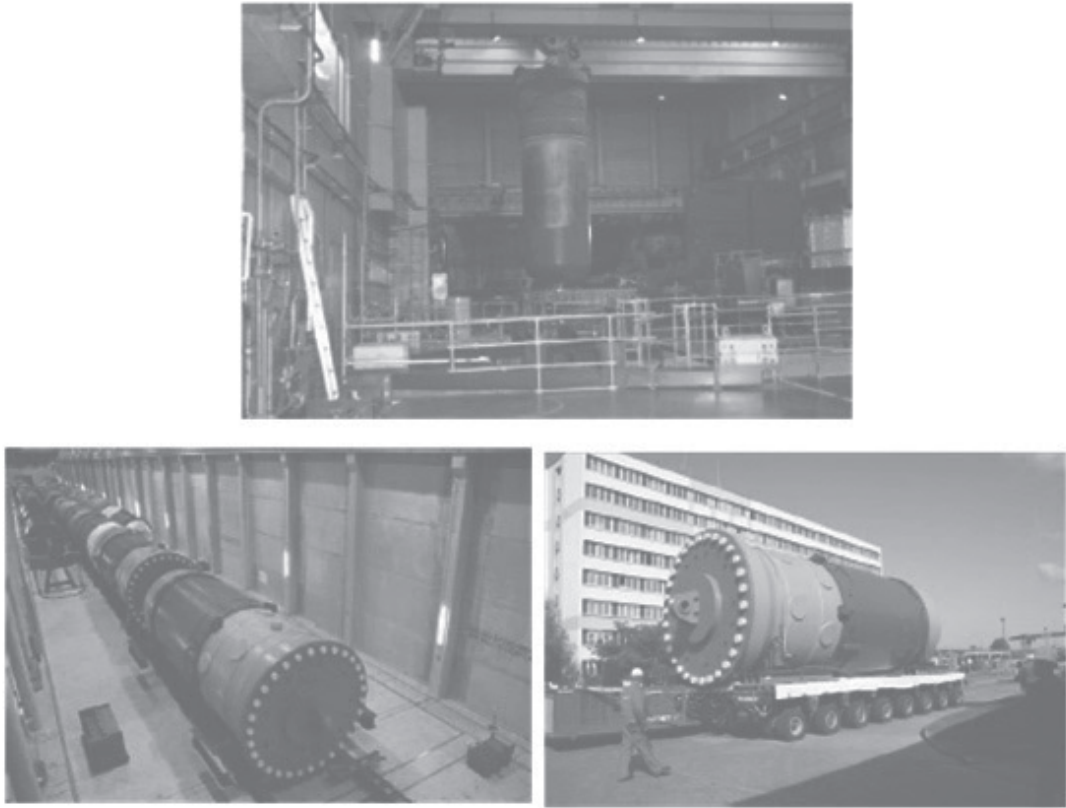
독일의 원전 해체 기술

1. 단계적 접근 방식 적용

독일은 원전 해체에 단계적 접근 방식(Phase

Approaches)을 적용하여 작업 분할 구조도(Work Breakdown Structure)에 따라 점진적인 해체 작업을 수행할 수 있도록 세분화 한다.

원전 해체 작업 방식은 ‘From outside to inside’로서, 크게 ① 터빈 건물 및 관련 계통 제거로 시작하



〈그림 3〉 Greifswald 원전의 원자로 압력용기 제거 및 운송
출처 : R. Borchardt, G. Hillebrecht, EWN

여, ② 원자로 건물 및 관련 계통 제거, ③ 원자로의 제거 순으로 진행된다

2005년에 해체에 착수하여 2015년에 완료 예정인 672MWe Stade PWR 원전의 경우를 살펴보면

〈그림 2〉에서 보여주는 바와 같이 ① 원전의 운영 단계(Operational phase), ② 운영 후 단계(Post-operational phase), ③ 잔여 운영 및 해체 단계(Residual operations and dismantling phase)로 나눌 수 있다.

해체 작업은 네 단계로 나누어 이루어지며, 해체 작업의 핵심은 3단계인 원자로 계통의 해체이다(〈표 2〉 참조).

2. 대형 구조물 해체 기술

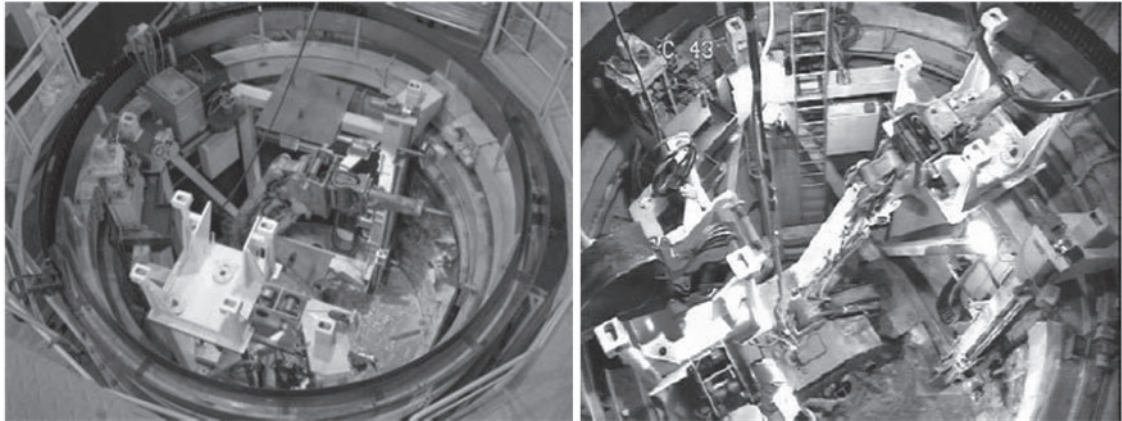
독일은 대형 구조물에 대한 해체 기술을 확보하고 있으며, 본 기술은 다음과 같이 구분될 수 있다.

- 현장 내 해체 기술(in-situ dismantling)
- 부분별 현장 내 해체 기술(partial in-situ dismantling)
- 현장 외 해체 및 제거 기술(ex-situ dismantling and removal)

현장 내 해체는 고준위 방사성폐기물에 대한 해체 작업을 진행하는 단계로서, 즉시 해체를 수행하거나, 가능한 경우 오염 준위 저감을 위한 지연 해체 후 해체를 수행하는 방식으로 진행되고 있다.

현장 외 해체 및 제거는 절단, 제염, 용융 등의 작업을 수행하는 단계로서, 각 업무 별 외부 전문 기관에서 수행하고 있으며, 모든 업무는 독일의 해체 관련 법규 및 규제 사항에 따라 진행된다.

〈그림 3〉은 1995년에 해체 작업이 시행된 440MWe Greifswald PWR 원전의 원자로 압력용기 제거 및 운송 장면을 보여준다.



<그림 4> 원격 제어 기술을 이용한 원형로 MZFR의 해체
출처 : E. Prechtl et al, WAK GmbH, W. Huber et al, Simpelkamp Nukleartechnik GmbH


3. 원격 제어 계통 기술

원격 제어 계통 기술은 주로 작업자의 접근이 불가능하거나 해체 작업의 난이도가 높은 고방사선 구역에서 시행되도록 <그림 4>에서 보이는 바와 같이 독일의 Karlsruhe 연구소에서 1987년 58MWe PWR 원형로의 해체를 원격 제어 계통을 통해 수행하면서 개발하였다.

원격제어 계통 기술을 통해 해체 작업을 수행하기 앞서 통상적으로 냉각시험을 수행한다.

- 해체 방식 : 즉시 해체
- 해체 경험 및 해체 기술
- ① 단계적 접근 방식 적용
- ② 대형 구조물 해체 기술 활용
- ③ 원격 제어 계통 기술 활용

독일은 원전, 연구용 원자로 및 핵연료주기 시설 등을 포함하여 전체 67기의 원자력 시설의 해체 경험을 갖고 있다.

독일의 원자력 시설 해체 기술은 Karlsruhe 연구소 등에서 원격 제어 기술 등 핵심을 기술을 개발하고, 노후 원전의 해체는 원전 사업자의 책임하에 11개 해체 사업체가 참여하여 산-학-연 협동으로 수행하고 있다. 

결론

독일의 해체 기술 현황에 대한 주요 사항들은 다음과 같이 요약할 수 있다:

