



# 한국형 원전해체(K-Decom), 글로벌 진출 전략

삼일PwC경영연구원 | Industry Focus

January 2026



# 들어가며

원전은 한 세대의 시간이다.

어느 날 콘크리트 언덕 위에 격납건물이 올라가고, 굵은 강관을 타고 물이 돌고, 그 물 속에서 연료가 타올랐다. 한 세대가 그 전기를 쓰며 공장을 돌리고 집을 밝히고 도시를 세웠다. 어느 날, 그 시간은 끝난다. 터빈이 멈추고, 제어봉이 내려가고, 발전소는 조용한 건물이 된다. 그 뒤의 시간, 우리는 그 건물을 뜯어내야 한다.

지금까지 한국 산업은 '짓는 일'에 익숙했다. 철강을 녹여 빔을 만들고, 조선소에서 선박을 띄우고, 배전망을 깔고, 원전을 지어 올렸다. 짓는 일에는 꿈과 속도가 있었다. 더 크게, 더 높게, 더 멀리 가는 것이 미덕이었다. 그러나 에너지의 흐름은 이제 다른 질문을 던지고 있다. "다 쓰고 난 뒤에, 우리는 무엇을 할 것인가." 짓는 산업에서 걷어내는 산업으로, 쌓는 기술에서 허무는 기술로, 무게 중심이 옮겨가고 있다.

원전해체는 눈에 잘 보이지 않는 산업이다. 새 공장처럼 화려하지 않고, 새 선박처럼 사진이 남지 않는다. 있지만 없는 듯이, 멀리서 보면 그저 오래된 설비 하나가 사라지는 일처럼 보인다.

그러나 해체는 한 시대의 전기를 다 쓰고 난 뒤, 그 뒤편을 정돈하는 일이다. 에너지 체계가 남긴 문장을 매만져 끝내는 일이다. 철과 콘크리트, 방사선과 규제, 주민과 정치가 한 자리에 모이는 곳이다. 이 일에 서툰면, 뒤편은 오래 방치되고, 다음 길도 막힌다.

세계의 시간표는 이미 움직이고 있다. 1970~80년대에 세워진 원전들이 수명을 다해 하나둘씩 멈추고 있다. 2050년까지 수백 기의 상용 원전이 해체의 순서를 기다린다. 누구는 먼저 뜯어본 경험을 들고 나오고, 누구는 규제와 기술과 자본을 묶어 패키지로 제시한다. 한 번 자리가 잡히면, 그 공급망은 20년, 30년을 간다. 처음 몇 번의 해체 프로젝트가 어느 나라의 손을 거치느냐에 따라, 이후 수십 년의 일감과 기술과 이익이 배분된다.

한국은 이 갈림길 앞에 서 있다. 우리는 원전을 설계하고, 짓고, 운영하는 법을 익혔다. 수십 년 동안 원전을 돌려본 경험이 있다. 고리와 월성, 한빛과 한울의 시간 속에서 우리는 원전 운영의 기술과 산업 생태계를 쌓아 올렸다. 이제 같은 장소, 같은 설비를 두고 완전히 다른 질문을 마주한다. "이제 어떻게 뜯어낼 것인가. 누구와 함께, 어떤 질서로, 어떤 책임을 지고 해체할 것인가."

해체는 한 회사의 힘으로 할 수 있는 일이 아니다. 발주와 인허가를 책임지는 공기업, 절단·제염·폐기물을 맡을 중견·중소기업, 디지털 트윈과 로봇을 개발하는 기술기업, 위험을 관리하는 규제기관과 보험·금융, 주민과 지자체까지 한 팀으로 움직여야 한다. 이 팀이 없으면, 아무리 좋은 기술을 갖고 있어도 현장은 돌아가지 않는다. 한 기업의 수익을 넘어서, 한 나라의 산업과 지역과 재정을 함께 계산해야 하는 일이다.

원전해체는 두 얼굴을 가진 단어일 것이다. 하나는 비용이다. 지금도 재무제표 어딘가에 해체충당금 항목이 자리 잡고 있고, 숫자는 매년 변동한다. 다른 하나는 기회다. 해체는 한번 하고 끝나는 공사가 아니라, 앞으로 수십 년 동안 이어질 장기 시장이다. 설비를 만들고, 공정을 설계하고, 데이터를 모으고, 해외 프로젝트에 나가는 과정에서 새로운 매출과 기술 자산이 쌓인다.

이 보고서가 말하려는 것은 거창한 구호가 아니다. 고리 1호기와 월성 1호기를 어떻게 해체할 것인지, 그 과정에서 한국 기업과 지역과 인력이 무엇을 준비해야 하는지, 2030년 이후 열릴 글로벌 해체 시장에서 어느 자리에 앉을 것인지에 대한 현실적인 질문들이다. 해체를 피할 수 없다면, 피동적으로 끌려갈 것인지, 주도적으로 질서를 설계할 것인지 선택해야 한다.

이제 발전의 시간만을 말하던 시대는 지나가고 있다. 멈추는 법과 건너내는 법을 알아야 다음을 말할 수 있다. 해체는 끝이 아니라, 다음을 위한 정리이다.



# Contents

Executive Summary	04
01. 왜 지금 원전 해체인가	06
02. 국내 원전 해체 사업의 현주소와 당면 과제	15
03. 글로벌 해체 시장 및 선진 사례	26
04. 핵심 기술 격차 분석 및 고도화 전략	35
05. 산업 생태계 조성 및 지속가능한 인프라 구축	44
06. 글로벌 시장 진출 전략	52
07. 결론 및 제언	57

# Executive Summary

## 불(火)이 꺼진 자리, 다시 버리는 칼 1,000조 폐로(廢爐) 시장과 'K-Decom'의 승부수

### 1. 서(序)

#### 대전환의 서막

2025년 6월, 고리 1호기의 해체가 최종 승인됐다. 1978년 대한민국에 '제3의 불'을 지핀 지 반세기 만이다. 원자로의 불은 꺼졌으나, 그 거대한 콘크리트 돔 안에는 이제 막 태동하는 1,000조 원의 거대 시장이 따리를 틀고 있다. 세계는 바야흐로 '대해체(Great Decommissioning)'의 시대로 진입했다. 2050년까지 400여 기의 원전이 수명을 다한다. 짓는 것만큼이나 잘 부수고, 깨끗이 치우는 능력이 곧 국력(國力)이 되는 시대다. 고리 1호기 해체는 단순한 설비 철거가 아니다. 한국 원전 생태계가 '건설·운영'이라는 반쪽짜리 성공을 넘어, '완성'이라는 마침표를 찍을 수 있느냐를 가늠할 국가적 시험대다.

### 2. 진단(診斷)

#### 트랙 레코드(Track-Record) 부재의 위기

냉정히 직시해야 한다. 우리는 원전 건설의 강자일지언정, 해체 영역에서는 후발주자다. 미국 웨스팅하우스는 '속도전'으로, 프랑스 오라노는 '전 주기 관리'로, 독일 지멘스는 '정밀 기술'로 세계 시장을 선점했다. 반면 우리는 상용 원전을 끝까지 뜯어본 경험이 전무(全無)하다. 기술 자립도는 82%라지만, 고방사능 구역을 누빌 로봇 팔과 디지털 트윈 기술은 여전히 실증이 시급하다. 자칫하다간 1,000조 시장의 주인은커녕, 안방인 고리 1호기마저 외산 장비의 실험장으로 내어줄 판이다. 기술 없이 덤비는 해체는 재앙이고, 준비 없는 시장 진입은 무모한 도박이다.

---

### 3. 전략(戰略)      고리에서 배우고 월성에서 승부한다

그렇다고 손놓고 있을 수는 없다. 위기를 기회로 뒤집을 '이원화(Two-Track)' 전략이 필요하다.

- **Track 1. 고리 1호기 (Fast Follower):** 글로벌 표준인 경수로(PWR)다. 이곳은 국산 레이터 절단 장비와 제염 기술을 검증하는 '실증 테스트베드'가 되어야 한다. 실패를 두려워 말고 국산 장비를 투입해 데이터를 축적해야 한다.
- **Track 2. 월성 1호기 (First Mover):** 승부처다. 세계적으로 상용 중수로(CANDU)를 완벽히 해체한 나라는 아직 없다. 난이도 높은 삼중수소 처리와 칼란드리아 절단 기술을 우리가 먼저 확보한다면, 캐나다와 루마니아 등 중수로 보유국 시장은 고스란히 한국의 독무대가 된다. 이것은 틈새시장이 아니라, 누구도 밟지 않은 설원(雪原)이다.

---

### 4. 해법(解法)      'K-Decom' 패키지와 선단형 진출

단순 시공 하도급으로는 승산이 없다. 'K-Decom'이라는 독자 브랜드를 구축해야 한다. 두산 에너지빌리티의 하드웨어(Cask, 절단기), 한전기술의 소프트웨어(엔지니어링, 디지털 트윈), 한수원의 운영 노하우를 하나로 묶은 '턴키(Turn-key)형 통합 솔루션'으로 승부해야 한다. 여기에 전문기업 인증을 받은 강소기업들을 태워 '팀 코리아(Team Korea)'라는 선단을 꾸려야 만 폐쇄적인 글로벌 시장의 파고를 넘을 수 있다.

---

### 5. 결(結)      골든타임은 기다려주지 않는다

2030년대 중반부터 글로벌 발주 물량이 폭발한다. 남은 시간은 5년 남짓이다. 이 골든타임을 놓치면 한국은 하청 국가로 전락한다. 정부와 기업은 사활(死活)을 걸고 다음 3가지를 실행해야 한다.

- **첫째, 규제 샌드박스 도입:** 낡은 규제의 족쇄를 풀고, 검증된 신기술을 과감히 현장에 투입할 수 있도록 인허가 패스트트랙을 열어야 한다.
- **둘째, Lab to Site (현장형 R&D):** 연구실의 논문이 아니라, 실제 오염된 쉼터를 자르고 녹이는 실전형 기술에 예산을 집중해야 한다.
- **셋째, 세일즈 외교:** 원전 수출 때 보여줬던 민관의 결기를 해체 시장에서도 재현해야 한다. 정부가 보증하고 기업이 뛰는 G2G 협력이 필수다.

원전 해체는 혐오 시설을 치우는 뒷수습이 아니다. 미래 세대의 먹거리를 창출하고, 원전 산업의 순환 고리를 완성하는 제2의 창업이다.



# 01

## 왜 지금 원전 해체인가



## 1.1 성장(成長)의 신화 넘어, 순환(循環)의 역사로

한국 원전사는 건설의 역사였다. 1978년 고리 1호기가 상업운전에 들어간 이후 47년 동안 국가는 거의 한 방향만 보았다. 얼마나 많이 지을 것인가. 얼마나 안정적으로 돌릴 것인가. 설계·조달·시공·운전·정비까지 모든 제도·조직·산업 생태계가 이 질문에 맞춰 짜였다.

그 사이에 다른 질문은 뒤로 밀렸다. 이미 세운 원전을 언젠가 어떻게 없앨 것인가. 자원을 자연으로 어떻게 돌려보낼 것인가. 사용후핵연료와 고준위 폐기물, 영구정지 이후 설비·부지 처리 문제는 '언젠가'의 과제로 취급되었다. 한수원과 일부 연구기관 안에서만 제한적으로 논의되는 주변 이슈였다.

이 틀은 2017년 고리 1호기 영구정지 결정과 2025년 6월 원자력안전위원회의 고리 1호기 해체계획서 최종 승인으로 깨졌다. 산업통상부는 고리 1호기와 월성 1호기를 '국내 첫 해체 경험 확보와 글로벌 시장 진출 기반을 위한 핵심 프로젝트'로 규정했다. "원전해체기술 고도화를 통해 원전 전(全)주기 기술력을 완비하고, 원전해체산업에 대한 국민 신뢰 및 글로벌 경쟁력을 확보하겠다"고 선언한다. 국가가 공식 문서에서 처음으로 '해체'를 전면 의제로 올린 순간이다.

### 원전해체산업 비전 및 3대 추진전략

자료: 산업통상부

	추진과제	일정
1. [기술] 원전해체 기술 글로벌 경쟁력 제고	원전해체 경쟁력 강화 기술개발	'23~'30
	세계최초 중수로 상용로 원전해체 고유 기술 확보	'26. 下
	고부가가치 융합 해체기술 개발	'28. 下
2. [시장] 글로벌 원전해체 시장진출 기반 조성	원전해체 기본계획 수립	'24. 下
	기술인증 및 전문기업 확인제도	'27. 上
	원전해체충당금 개선	'23. 下
	해체실적 지원 및 해외진출 지원	'23~
	인력양성	'26, '30
3. [인프라] 원전해체연구소 인프라 활용	원전해체기술 실검증 체계 구축	'26. 上
	원전해체 기술개발 지원	'26. 上
	해체폐기물 분석 인프라 구축	'26. 下
	원전생태계 네트워크 조성 및 컨설팅	'23. 下



국내 원전해체 시장은 아직 열리지 않은 채, 시곗바늘만 돌아가고 있다. 산업부 추계에 따르면 2030년까지 고리 1호기와 월성 1호기 두 기가 해체에 착수한다. 그 뒤를 잇는 상업용 원전까지 합치면, 국내에서 해체해야 할 원전은 총 30기다. 시장 규모는 약 26조 원에 이른다. 호기당 해체비는 8,726억 원. 「방사성폐기물 관리비용 및 사용후핵연료관리부담금 등의 산정기준에 관한 규정」(‘22.1월 고시)에 명시된 금액이다. 계속운전으로 해체 시점은 뒤로 밀릴 수 있으나 30기를 해체해야 한다는 총량은 변하지 않는다.

지금까지 국내 ‘해체 시장’은 연습경기 수준에 머물렀다. 1997년부터 2021년까지 이어진 연구로 1·2호기 해체가 있었고 2001~2011년 우라늄 변환시설 해체가 있었다. 상업용 원전에서도 증기발생기 교체, 원자로 헤드 교체, 월성 중수로 압력관 교체 같은 부분 해체성 공사는 수행했다. 그러나 이것은 말 그대로 기기 교체, 소규모 프로젝트였다. 본격적인 상업용 원전해체, 즉 ‘한 기를 처음부터 끝까지 해체하고 부지를 복원하는 시장’은 아직 단 한 번도 열리지 않았다.

고리 1호기 해체는 노후 설비 하나를 철거하는 관리행위가 아니다. 고리 1호기는 이 연속된 프로젝트의 첫 단추다. 이 첫 단추가 비틀어 끼워지면 나머지 단추도 어긋난다. 비용 초과, 공기 지연, 안전 논란이 뒤엉키는 실패 시나리오가 현실이 되면, 후속 원전 해체에 대한 국민 신뢰와 정책 동력은 급속히 증발한다. ‘원전 전주기 기술력’이라는 국가 브랜드 역시 상처를 입는다.

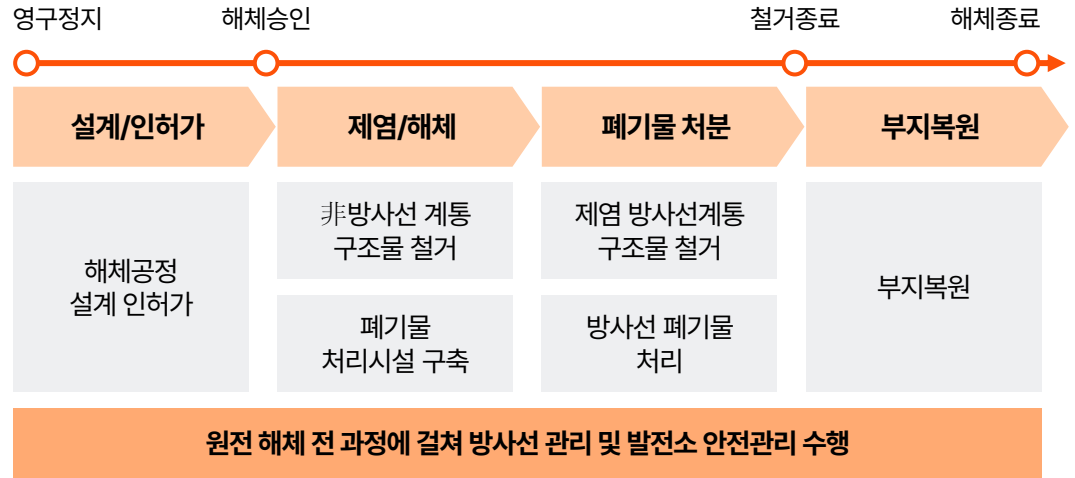
반대로 고리와 월성이 안전하고 예측 가능하게 해체된다면, 한국은 설계-건설-운전-해체-복원까지 하나의 라이프사이클을 책임지는 몇 안 되는 국가로 올라선다.

원전해체산업은 한번 시작하면 최소 15년을 끌고 가야 하는 장기전이다. 한 기 해체비용은 원전 건설비의 20~30%에 이른다. ‘언젠가 한번 하면 되는 일’이 아니라, 건설 못지않은 돈과 시간이 들어가는 두 번째 대공사다.

기간 구조도 만만치 않다. 영구정지 전에 준비만 2년이 필요하다. 안전관리와 사용후핵연료 반출에 최소 5년이 걸린다. 제염·철거 공정에 6년 이상, 부지 복원과 규제 종료에 2년 이상이 추가된다. 설계부터 부지 해체까지 15년이 순식간에 사라진다. 해체를 ‘마무리 공장’쯤으로 보는 인식이 얼마나 현실과 동떨어져 있는지 보여주는 숫자다.

## 원전해체 절차 및 절차별 역무구분

자료: 산업통상부



문제는 이 거대한 수요가 연속적이지 않다는 점이다. 원전마다 영구정지 시점이 달라 해체 수요가 들쭉날쭉할 수밖에 없다. 이 구조에서는 전문 인력과 전문 기업을 꾸준히 키우고 유지하기가 극도로 어렵다. 한 번 띄우려면 10년이 걸리고, 한 번 공백이 생기면 생태계는 바로 꺼진다. 이 불연속성을 어떻게 메울지, 지금 답을 내지 못하면 한국의 해체산업은 '시작도 전에 늙은 산업'이 될 뿐이다.

질문은 바뀌었다. 앞으로 원전을 얼마나 더 지을 것인가에서, 이미 지어진 원전을 어떻게 책임질 것인가로. 재생에너지·수소·SMR 등 새로운 옵션이 백가쟁명하는 가운데, 기존 대형 원전은 무한정 연장 가능한 자산이 아니라, 특정 시점에 반드시 '정리'해야 할 유한 자산이 되었다. 고리 1호기 해체 승인(2025.6)은 이 인식 전환을 제도적으로 확인한 사건이다. 성장 일변도의 시대에서, 순환을 설계해야 하는 시대로 넘어온 것이다.

## 1.2 글로벌 시장 분석: ‘대해체(Great Decommissioning)’의 현실화

세계 원전 해체 수요는 더 이상 추상적 미래가 아니다. 숫자가 이미 말해준다. IAEA에 따르면, 2025년 12월 기준 전 세계 운영 원전은 416기, 영구정지 원전은 215기다. 2010년대 중반까지만 해도 영구정지 원전은 150기 수준이었다. 불과 몇 년 사이 정지 원전이 40% 이상 늘었다. ‘폐로 대기열’이 눈에 띄게 두꺼워졌다.

### 글로벌 운영 원전 현황

자료: IAEA

국가	설비용량(MW)	기수	국가	설비용량(MW)	기수
아르헨티나	1,641	3	멕시코	1,552	2
아르메니아	416	1	네덜란드	482	1
벨라루스	2,220	2	파키스탄	3,262	6
벨기에	3,463	4	루마니아	1,300	2
브라질	1,884	2	러시아	26,802	36
불가리아	2,006	2	슬로바키아	2,302	5
캐나다	12,714	17	슬로베니아	696	1
중국	55,320	57	남아프리카공화국	1,854	2
체코	3,963	6	스페인	7,123	7
핀란드	4,369	5	스웨덴	7,008	6
프랑스	63,000	57	스위스	2,973	4
헝가리	1,916	4	우크라이나	13,107	15
인도	7,550	21	아랍에미리트	5,348	4
이란	915	1	영국	5,883	9
일본	12,631	14	미국	96,952	94
한국	25,609	26	계	376,261	416

### 글로벌 영구 정지 원전 현황

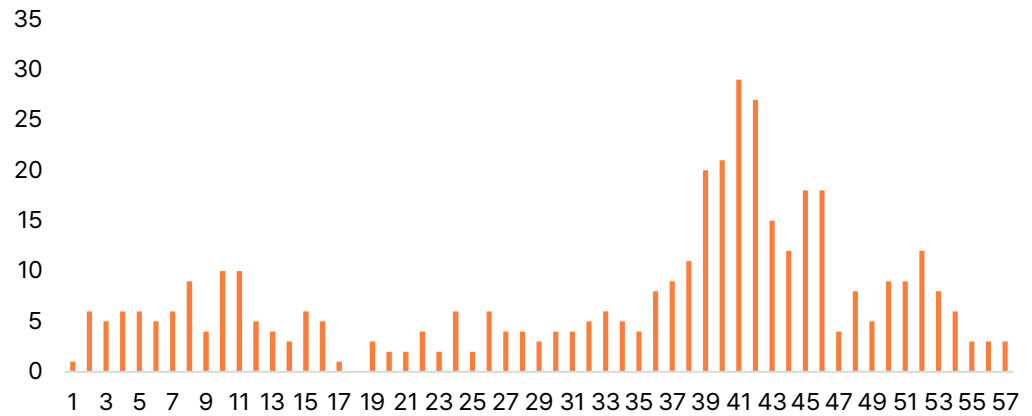
자료: IAEA

국가	설비용량(MW)	기수	국가	설비용량(MW)	기수
아르메니아	376	1	네덜란드	55	1
벨기에	2,469	4	파키스탄	90	1
불가리아	1,632	4	러시아	4,882	11
캐나다	3,173	8	슬로바키아	909	3
프랑스	5,549	14	스페인	1,067	3
독일	26,235	33	스웨덴	4,054	7
이탈리아	1,423	4	스위스	379	2
일본	17,119	27	우크라이나	3,515	4
카자흐스탄	52	1	영국	7,755	36
한국	1,237	2	미국	19,976	41
리투아니아	2,370	2	계	109,369	215

IAEA와 세계원자력협회(WNA) 통계는 이 변화의 구조를 보여준다. 현재 가동 중인 상당수 원전은 1970~80년대 건설된 2세대(Gen-II) 설비다. 2030년까지 설계수명이 만료되는 원전 수가 급증하고, 2050년까지 약 400~500기의 상용 원전이 해체 대상에 편입될 것으로 본다. 연평균 10기 이상이 해체 시장에 쏟아진다.

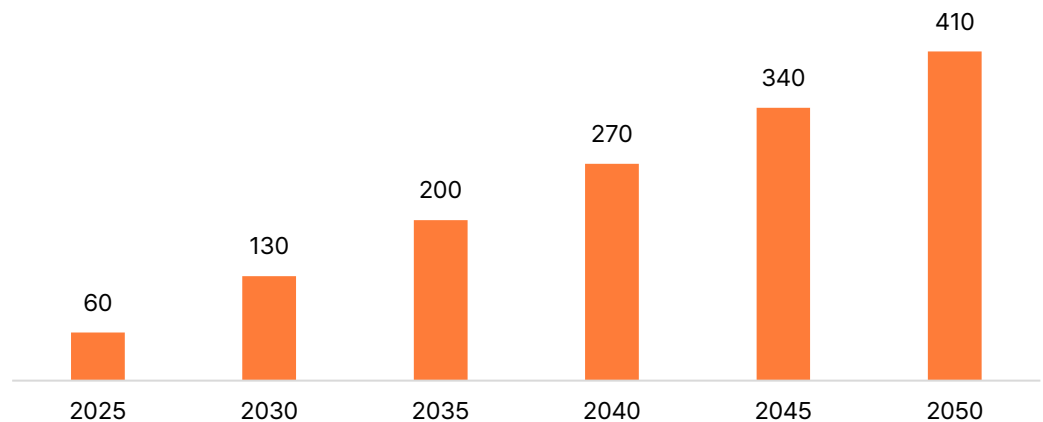
### 글로벌 원전 가동 연수 분포

자료: IAEA



### 설계 수명 도달 원전 전망 (단위: 기)

자료: IAEA, WNA, 삼일PwC경영연구원



글로벌 1,000조 원라는 숫자가 자주 등장한다. 이 수치는 2050년까지 영구 정지가 예상되는 전 세계 원전의 해체와 폐기물 관리에 들어갈 누적 잠재 시장(TAM) 규모다.

이 수치는 단순히 철근과 콘크리트를 부수는 철거 뿐만 아니라 사용후핵연료와 중·저준위 폐기물, 부지 복원과 환경 복구까지 포함한 후행핵주기의 총합이다. 해체를 건설업의 말단 공정으로 볼 것인가, 아니면 거대한 환경·폐기물 산업으로 볼 것인가를 가르는 기준이 바로 여기 있다.

2050년까지 영구 정지될 것으로 예상되는 상업용 원전 기수는 대략 400~500기로 추산하고, 호기당 총사업비를 2조 원 수준으로 놓는다. 이때 직접 해체비는 약 6천억 원, 폐기물 처리와 사용후핵연료의 중간 저장과 최종 처분에 들어가는 비용이 약 1조 4천억 원이라는 가정이다.

물론 국가별 비용구조를 따져 들어가면 차이는 크다. 노후화 정도, 방사선장, 인건비, 처분장 단가, 규제 요건에 따라 호기당 비용은 1조 원에서 3조 원까지 벌어진다. 그럼에도 '수백 기 × 호기당 수조 원'이라는 구조는 변하지 않는다. 1,000조 원이라는 숫자는 이 단순한 곱셈의 결과다.

중요한 것은 구성비다. 해체비와 폐기물·연료관리 비중을 나누어 보면, 해체 산업의 본질이 선명해진다.

시장 규모의 약 30%는 시설 해체에서 나온다. 제염, 원자로 압력용기 절단, 내부 구조물 세분화, 콘크리트 구조물 철거, 부지 복원에 들어가는 비용이다. 엔지니어링, 특수 장비, 로봇, 디지털 트윈, 공정 관리가 이 영역의 핵심 가치 사슬이다.

나머지 70%는 방사성 폐기물 관리와 사용후핵연료 관리·처분에서 발생한다. 중·저준위 폐기물을 용융·소각·파쇄해 부피를 1/5~1/10로 줄이는 감용<sup>(\*)</sup> 기술, 특수 용기 포장과 운송, 처분장 인입, 사용후핵연료 건식저장·중간저장·최종 처분 설계와 운영이 여기에 속한다. 해체 프로젝트가 끝난 뒤에도 수십 년에서 백 년 이상 이어지는 후행 비용이다.

요약하면, 1,000조 원 시장의 70%는 폐기물과 연료에 묶여 있다. 이것은 해체산업의 본질이 토목·건축이 아니라, 환경·폐기물·연료 관리에 있다는 뜻이다. '원자로를 어떻게 자를 것인가' 못지않게 '나온 폐기물을 어디에, 어떻게, 얼마나 줄여서 둘 것인가'가 중요하다는 뜻이다.

여기서 한국이 읽어야 할 시사점이 나온다. 첫째, 1,000조 원이라는 숫자 자체에 흥분해서는 안 된다. 중요한 것은 그 안에서 우리가 겨냥할 수 있는 세그먼트다. 둘째, 단기 시장과 중장기 시장을 구분해야 한다. 2030년까지의 단기 시장은 해체 설계, 인허가, 초기 제염·절단 공정, Dry Storage 설계·구축이 중심이 된다. 본격적인 해체 공사는 2030년대 이후에야 대규모로 나온다. 셋째, 중장기적으로 진짜 돈이 되는 영역은 폐기물 처리·감용·처분, 사용후핵연료 관리 같은 후방 분야다. 이 영역은 한 번 들어가면 수십 년 동안 안정적인 현금흐름을 만들어 낸다.

(\*) 감용(Volume Reduction)은 폐기물의 물리적 형태를 변형(압축, 파쇄, 용융)하여 부피를 최소화하는 공정으로, 전문학적인 처분 비용을 절감하고 한정된 처분장 용량을 확보하기 위한 해체 사업의 핵심 경제성 지표다.

## 원전해체 단계별 시장규모, 비용비중 및 특성

자료: 산업통상부

구분	시장규모	비중	특성
해체준비	130조 원	28%	<ul style="list-style-type: none"> <li>해체 공정, 자금 등 계획과 사업관리</li> <li>고급인력 비중이 높음 (약 70%)</li> <li>Orano 등 Top 3 기업 비중 68%</li> </ul>
제염	23조 원	5%	<ul style="list-style-type: none"> <li>시설물의 방사능 오염제거</li> <li>인건비(52%) 및 장비비(30%)의 비중이 높음</li> <li>Orano, Energy Solutions 등의 회사가 60% 점유</li> <li>폐기물 최소화 등 기술중심 특성 보유</li> </ul>
절단/철거 (해체)	143조 원	31%	<ul style="list-style-type: none"> <li>원자로 해체를 위한 핵심공정</li> <li>인건비(35%) 및 장비비(30%)의 비중이 높음</li> <li>엔지니어링 최적화, 원격제어/절단기술 보유 기업이 시장 선점 중</li> </ul>
폐기물 처리	120조 원	26%	<ul style="list-style-type: none"> <li>방사성 금속 등 위험물 포장 처리 등</li> <li>인건비 비중이 53%로, 노동집약적 특성</li> <li>방폐물 처리에 규제 강도 高</li> </ul>
환경복원	46조 원	10%	<ul style="list-style-type: none"> <li>보조시설물 철거, 토양복원 등 규제해제를 위한</li> <li>단순 노동자 중심(33%)이며, 방사성 폐기물 처리 비용이 높음</li> </ul>

## 1.3 해체의 본질: 철거가 아닌 역(逆)엔지니어링

원전 해체를 '철거공사'로 부르는 순간, 논의는 피상으로 흐른다. 건설과 해체의 본질은 다르다. 건설은 깨끗한 자재를 설계도에 따라 쌓아 올리는 일이지만, 해체는 수십 년 동안 방사선에 노출된 설비와 구조물, 보이지 않는 오염과 방사화가 겹겹이 쌓인 공간을 해부하는 일이다. 구성 요소와 재질, 구조를 알고 있다는 전제 아래, 운전 이력과 방사선·오염 데이터를 겹쳐 '어디가 어떻게 변했는지'를 역으로 복원해야 한다. 역엔지니어링이다.

사회적 라이선스도 해체의 본질이다. 해체는 기술과 자본만으로 진행되지 않는다. 폐기물을 어디에, 어떻게, 얼마나 오래 둘 것인지에 대한 사회적 합의 없이는 공정이 진행되지 않는다. 일본 후쿠시마 사고 이후 폐로·해체 계획이 여러 차례 수정된 이유 중 하나는 오염수·폐기물 처리, 부지 활용, 지역 수용성에 대한 합의 부족이다. 대만 Chinshan 원전에서 사용후핵연료 건식저장시설이 인허가와 주민 반대로 가동되지 못해, 연료 반출과 해체 공정이 지연되는 상황은 '연료·인허가·수용성을 해체 전제조건으로 설계하지 않으면 전체 프로젝트가 멈출 수 있다'는 사실을 보여준다.

결론은 분명하다. 원전 해체의 본질은 철거가 아니다. 복잡성과 불확실성을 다루는 시스템 공학이다. 기술·경제·사회·정치·환경을 동시에 다루는 종합 거버넌스다. 이 본질을 이해하지 못하면, 해체 시장은 숫자만 큰 '그림의 떡'이 된다.



## 1.4 ‘K-Decom’, 추격자에서 선도자로

한국은 원전 건설·운전에서 전형적인 패스트 팔로어(Fast Follower) 모델로 성공했다. 미국·프랑스 기술을 도입·개량해 표준형 원전을 구축하고, APR1400을 개발해 UAE 수출에 성공했다.

해체 시장은 구조가 다르다. 이미 Westinghouse·Orano·Holtec·Siempelkamp 같은 기업들이 수십 기의 해체 실적을 쌓았고, 해체 표준·발주 구조·규제 인터페이스를 사실상 설계하는 위치에 있다.

한국이 나아가야 할 방향은 먼저 해체 영역의 일부 분야에서 선도적 위치를 확보하는 것이다. 그것이 K-Decom이다. K-Decom은 ‘Korean Decommissioning Model’의 약자로, 단순한 기술 묶음이 아니라 경수로·중수로 해체 공법, 디지털 트윈·로봇, 폐기물·연료·부지 복원 전략, 산업 생태계·인력·자원·규제 프레임워크를 통합한 한국형 패키지 모델이다. 고리 1호기 해체가 이 패키지의 ‘경수로 버전’을 입증하는 실증 무대라면, 월성 1호기 해체는 CANDU 시장을 겨냥한 ‘중수로 버전’의 글로벌 교두보다.

이 보고서는 다음 다섯 가지 방향을 중심으로 구성된다.

첫째, 왜 지금 원전 해체를 논의해야 하는지에 대해, 세계적 흐름과 국내 여건을 정리한다.

둘째, 한국의 제도·시장·기술·산업 생태계를 종합적으로 점검하고, 현재 수준과 한계를 진단한다.

셋째, 절단·제염·폐기물·디지털 트윈·로봇 등 핵심 기술 영역의 격차를 수치와 공정 관점에서 분석하고, 단계별 고도화 전략을 제시한다.

넷째, 기업·인력·자본·지역·연구소·전문기업·총당금 등 관련 요소를 아우르는 산업 생태계 및 인프라 구축 방향을 제안한다.

다섯째, 중수로 벨트와 아시아 니치 시장을 주요 타겟으로 하는 K-Decom 수출 모델과 이에 필요한 과제를 종합적으로 정리한다.

# 02

## 국내 원전 해체 사업의 현주소와 당면 과제



## 2.1 한국형 해체 시대의 개막: 고리 1호기(The First Step)

### ‘운전 중 원전’에서 ‘해체되는 원전’으로

고리 1호기는 한국 원전해체 시대의 문을 여는 첫 무대이다. 1978년 상업운전을 시작해 39년 동안 돌아갔다. 2017년 6월 19일 영구정지로 발전소의 시간은 멈췄지만, 정책과 산업의 시계는 오히려 더 빠르게 돌기 시작했다. 이제 고리 1호기는 더 이상 ‘전기를 생산하는 원전’이 아니다. ‘해체를 통해 새로운 용도를 기다리는 원전’이다.

영구정지 이후 한수원은 최종해체계획서를 제출했고, 규제기관의 장기간 심사를 거쳐 해체 승인을 받았다. 이 순간부터 한국의 원전정책은 건설·운영·폐로를 끊어서 보던 시대를 넘어, ‘건설-운영-해체-부지복원’으로 이어지는 완전한 라이프사이클 관리 체제로 접어들었다고 보아야 한다. 고리 1호기는 그 전환을 실제 현장에서 검증하는 첫 파일럿 프로젝트이다.

#### 고리1호기시설 요약

자료: 한국수력원자력

최초 임계	1977. 6. 19	영구정지	2017. 6. 18
상업운전 개시	1978. 4. 29	노형	가압경수로 (PWR)
계속운전허가	2007. 12. 11	출력	595 MWe
영구정지 결정	2015. 6. 16	공급사	웨스팅하우스
운영변경허가 신청	2016. 6. 24	위치	부산시 기장군

### 10년 + α, 해체는 단기 공사가 아니다

한수원과 정부가 제시한 고리 1호기 해체 로드맵은 결코 가벼운 일정이 아니다. 준비 2년, 제염·철거 6년, 부지복원 최소 2년. 짧게 잡아도 10년, 사용후핵연료 반출과 폐기물 처분 여건에 따라 ‘10년 + α’를 전제로 할 수밖에 없다.

해체 과정은 통상 세 단계로 나뉜다. 먼저 해체준비 단계(약 2년)에서는 해체 전담조직을 꾸리고 세부 해체설계와 공법을 확정한다. 이 과정에서 기존의 비용·공정 가정을 다시 들여다보며 해체비용과 공기를 재산정하고, 환경영향평가와 방사선장·방사화 인벤토리 조사, 계약·조달 구조 설계까지 마무리해야 한다. 말 그대로 ‘운전 조직’을 ‘해체 조직’으로 체질을 갈아엎는 구간이다.

그 다음이 제염·철거 단계(약 6년)로, 해체의 본게임에 해당한다. 이 시기에는 계통·기기·구조물 제염을 비롯해 원자로 압력용기와 내부구조물, 증기발생기 같은 대형 방사화 구조물을 수중·원격으로 절단하고, 보조건물을 포함한 각종 구조물을 순차적으로 철거한다. 동시에 방사성폐기물을 오염도에 따라 분류하고, 감용·포장·이송하는 전 공정이 이 단계 안에서 돌아간다. 특히 방사선 관리구역과 비방사선 구역을 명확히 갈라, 비방사선 구역은 일반 플랜트 철거처럼 속도와 효율을 중시해 처리하고, 방사선 구역은 로봇과 수중절단, 차폐 기술이 결합된 고난도 공정으로 접근해야 한다.

마지막으로 부지복원 단계(최소 2년)에서는 부지에 남아 있는 잔류방사능을 정밀 측정하고, 토양과 지하수, 구조물 잔해의 오염 수준을 조사한다. 기준을 넘는 구역은 다시 제염과 복원 공사를 거쳐야 하며, 이 모든 결과에 대해 규제기관의 최종 심사를 통과해야만 비로소 '원전 부지'가 '일반 부지'로 신분을 바꾸게 된다. 겉으로 보기에는 철거 이후의 후속 작업처럼 보이지만, 어느 하나 가벼운 공정이 아닌, 해체의 완결성을 좌우하는 마지막 관문이다.

## 원전 해체 4단계 로드맵

자료: 한국수력원자력

단계		내용
1	영구정지 관리 및 해체준비	<ul style="list-style-type: none"> <li>사용후핵연료 안전관리, 운영허가에 따른 정기 검사 등</li> <li>해체종합설계, 폐기물처리시설 설계/구매 등</li> <li>최종해체계획서 작성, 인허가 신청 및 대응</li> </ul>
2	해체착수 및 처리시설 구축	<ul style="list-style-type: none"> <li>비방사성 구역철거, 해체용 유틸리티 설치 운용</li> <li>방사성폐기물 처리시설 구축</li> <li>사용후핵연료 소외 반출</li> </ul>
3	방사성제염/철거 및 폐기물 처리	<ul style="list-style-type: none"> <li>방사성 계통, 구조물 제염·철거</li> <li>폐기물처리시설 운영(제염·절단·감용·포장 등)</li> <li>방사능 측정결과 검증 및 평가</li> </ul>
4	부지복원 및 해체완료 보고	<ul style="list-style-type: none"> <li>부지복원 공사</li> <li>최종부지상태조사 및 해체완료 검사</li> <li>운영허가 종료</li> </ul>

## 원전 해체 단계별 주요 업무 및 필요 기술

자료: 한국과학기술기획평가원

단계	내용
영구정지	<ul style="list-style-type: none"> <li>원자로에서 핵연료를 제거하고, 원전 운영 이력 등을 조사하여 해체계획 수립에 필요한 핵종 재고량을 평가</li> </ul>
해체준비	<ul style="list-style-type: none"> <li>원자로 냉각기간(약 5년) 동안 환경영향평가 등을 수행하여 해체 계획서를 작성하고 규제기관의 인허가 획득</li> </ul>
제염	<ul style="list-style-type: none"> <li>오염이 가장 심한 원전 일차계통을 대상으로 먼저 오염을 제거한 후 격납용기나 건물 등 시설 표면의 오염을 제거</li> <li>물리적, 화학적, 전기적 제염 기술 등이 필요</li> </ul>
절단/철거	<ul style="list-style-type: none"> <li>오염이 적은 설비부터 시작하여 원자로 격납용기 내부의 압력용기 등 주기기를 제거한 후 최종적으로 격납건물 철거</li> <li>기계적 및 열적 절단 기술과 원격 제어 해체 기술 등이 핵심 요소</li> </ul>
폐기물 처리	<ul style="list-style-type: none"> <li>제염 및 해체를 통해 발생한 방사성 폐기물을 성상별로 분류, 처리, 저감 후 안정화하여 처분</li> <li>방사성 폐기물 저감 및 재활용 기술 등이 핵심 요소</li> </ul>
환경복원	<ul style="list-style-type: none"> <li>해체 후 부지를 재이용하기 위해 필요한 잔류오염도 조사 및 평가를 수행하고 이 결과에 따라 토양, 지하수 복원 및 부지 개방</li> </ul>

## 고리 1호기, 어디까지 와 있나

### 해체 승인 및 물리적 착수

고리 1호기는 인허가의 문턱을 넘어섰다. 2025년 6월 26일, 원자력안전위원회가 한수원이 제출한 최종해체계획서를 심의·의결하면서, 국내 최초 상업용 원전 해체가 공식 승인됐다. 이 결정으로 약 12년, 총 1조 713억 원이 투입되는 해체 사업의 큰 줄기가 확정되었고, '서류로 준비하던 단계'에서 '실제 설비를 대상으로 하는 물리적 해체 단계'로 전환되었다고 보아야 한다.

해체 방식은 '즉시 해체(Immediate Dismantling)'로 결정됐다. 이에 따라 한수원은 우선 방사능 오염 제거, 이른바 제염 작업과 비방사성 설비 철거에 착수하고 있다. 원자로 1차 계통을 이루는 파이프와 밸브, 열교환기 등에 붙어 있는 방사성 물질을 화학약품과 순환계통을 이용해 씻어 내리는 작업이 대표적이다. 동시에 터빈 건물처럼 방사선과 직접 관련이 없는 비방사성 시설은 일반 플랜트 철거와 유사한 방식으로 먼저 해체에 들어간다. 설계도면과 규제 서류 위에서 논의되던 '해체'가 실제 강철과 콘크리트에 손을 대는 단계로 넘어간 것이다.

### 핵심 쟁점: 사용후핵연료(Spent Fuel) 처리

그러나 인허가 승인만으로 길이 열린 것은 아니다. 해체 사업의 가장 큰 병목은 여전히 사용후핵연료 처리 문제에 있다. 고리 1호기의 사용후핵연료는 현재도 원자로 건물 내부의 습식저장조에 167톤가량 전량 보관 중이다. 원자로 압력용기와 내부구조물을 본격적으로 절단하려면, 이 연료 다발을 수조 밖으로 빼내 부지 내 다른 시설로 옮겨야 한다. 그렇지 않으면 고방사선 구역 작업은 구조적으로 제약을 받을 수밖에 없다.

한수원이 그리는 해법은 분명하다. 발전소 부지 안에 별도의 건식저장시설(dry storage, 캐스크)을 신설해, 냉각이 끝난 사용후핵연료를 단계적으로 옮긴다는 구상이다. 관련 사업 자료와 한수원 계획에 따르면, 2020년대 후반까지 설계·인허가와 주민 협의를 마무리하고, 2030년 전후 시설을 준공한 뒤 2031년까지 고리 부지 내 건식저장시설 운영을 시작해, 습식저장조에 있는 연료를 순차적으로 이송한다는 로드맵이 제시되어 있다.

문제는 이 과정이 정치·사회적 변수에 가장 민감한 구간이라는 점이다. 건식저장시설은 고준위 방사성폐기물을 '원전 부지 안에 눈에 보이는 형태로' 쌓아 두는 방식이어서, 지역 주민·지자체의 반발이 거세다. 더구나 '고준위 방사성폐기물 관리 특별법' 시행으로 건식저장시설 설치에도 별도의 행정위원회 승인과 주민 동의 절차가 요구되면서, 인허가 리스크는 오히려 커졌다. 계획대로라면 2031년까지 사용후핵연료 반출을 완료하고, 2035년 부지복원 착수, 2037년 최종 해체 종료를 목표로 하고 있으나, 건식저장시설 일정이 흔들리면 이 숫자들은 언제든 바뀔 수 있다. 사용후핵연료 처리 문제는 단순한 기술 이슈가 아니라, 전체 해체 로드맵을 지탱하는 '최우선 선결 과제'인 셈이다.

## 기술 자립과 인프라 구축

해체 승인과 병행해 기술·인프라 측면에서도 체계적인 기반 조성이 진행되고 있다. 부산 기장군과 울산 울주군 경계에 자리 잡은 한국원자력환경복원연구원은 경수로형 원전 해체기술의 실증과 고도화를 전담하는 거점으로 설계됐다. 이 기관은 실물 모형(Mock-up)에 대한 절단·제염 실험, 방사화 폐기물의 핵종 분석, 해체 공정 데이터베이스 구축, 전문 인력 양성까지 맡아, 고리 1호기와 월성 1호기 해체를 위한 기술 자립과 향후 해외 시장 진출의 교두보 역할을 수행하도록 설계되어 있다.

현장에서 필요한 기술 역시 점차 구체화되고 있다. 고방사선 구역에서 사람 대신 투입될 원격 절단 로봇, 해체 과정에서 발생하는 금속·콘크리트 폐기물의 부피를 줄이는 감용 기술, 제염 효율을 높이면서도 방사성 2차 폐기물 발생을 최소화하는 공정 등이 대표적이다. 이러한 기술들이 실증과 표준화 단계를 밟아야, 고리 1호기의 해체 경험이 이후 원전들의 반복 가능한 '산업 모델'로 전환될 수 있다.

## 향후 계획(Roadmap)

향후 고리 1호기 해체는 대략 세 개의 굵은 축으로 전개될 전망이다. 첫째 축은 제염과 주요 설비 해체이다. 해체 준비를 마친 뒤부터 2030년 전후까지 방사성 계통 제염이 단계적으로 진행되고, 그 과정에서 원자로 압력용기(RPV<sup>(\*)2</sup>)와 내부 구조물(RVI<sup>(\*)3</sup>)의 절단, 증기발생기 등 대형 기기의 철거가 이어진다. 이 구간은 방사선 안전, 작업자 피폭 관리, 공정별 공기 단축과 비용 관리가 한꺼번에 걸려 있는 해체의 '심장부'라 할 수 있다.

둘째 축은 폐기물 처리와 반출이다. 제염·절단 과정에서 발생하는 콘크리트와 금속 폐기물은 오염도에 따라 방사성·비방사성으로 다시 나뉘고, 방사성폐기물은 재제염·감용을 거쳐 경주 중·저준위 방폐장 등 지정된 처분시설로 이송된다. 감용·재활용 효율을 얼마나 끌어올리느냐에 따라, 국내 방폐장 용량과 후속 해체 프로젝트의 연속성에 미치는 영향이 크게 달라질 것이다.

셋째 축은 부지 복원이다. 사용후핵연료를 2031년까지 부지 내 건식저장시설로 이송하고, 방사성 계통·구조물 철거를 마치면, 2035년경부터는 부지의 잔류 방사능을 정밀 측정하고 토양·지하수·구조물 잔해를 조사하는 단계로 넘어간다. 기준치를 넘는 지점은 다시 제염·정화 공사를 거쳐야 하며, 최종 부지상태조사와 규제기관의 해체완료 검사를 통과해야 비로소 고리 1호기 부지는 브라운필드 혹은 그린필드로 재정의된다. 지금 그려지는 이 로드맵이 계획대로 완주될 수 있을지 여부가, 한국형 해체 모델의 실질적인 성패를 가르는 시험대가 될 것이다.

(\*)2 **RPV(Reactor Pressure Vessel, 원자로 압력용기)**: 핵연료(노심)를 수용하여 핵분열 반응을 밀폐 유지하는 원전의 핵심 구조물. 두께 20~30cm의 고강도 강철로 제작되어 방사능 준위가 가장 높으며, 해체 시 원격 제어를 통한 특수 절단 공법이 필수적인 고난이도 핵심 공정 대상이다.

(\*)3 **RVI(Reactor Vessel Internals, 원자로 내부 구조물)**: 압력용기(RPV) 내부에서 핵연료를 지지하고 냉각수 유로를 형성하는 '뼈대' 역할의 정밀 구조물. 방사능 준위가 극도로 높고 형상이 복잡하여, 작업자 접근 없이 몰속에서 로봇으로 자르는 '수중 원격 절단' 기술이 필수적인 해체 기술의 정점이다.



## 고리1호기 해체 일정

자료: 한국수력원자력

구분	기간	진행 내용
인허가	2021. 5	고리1호기 원자로시설 해체승인 신청
	2022. 5 ~ 2025. 2	KINS(한국원자력안전기술원) 최종해체계획서 보완요청 수행 (1~5차)
	2025. 3 ~ 6	원자력안전위원회 최종심사
계통제염	2024. 5 ~ 10	발전소 점검 및 시운전
	2024. 11 ~ 12	실제 제염 수행 (방사선관리구역 내 고방사선량 계통 대상 화학제염)
특성평가	2024. 2 ~ 4	토양 시료 채취 및 분석
	2024. 5 ~ 9	구조물 및 계통 시료 채취·분석

## 2.2 세계 최초의 도전: 월성 1호기

### 경수로(PWR) 해체는 이미 '검증된 전장'이다

가압경수로(PWR)의 해체는 비교적 그림이 뚜렷하다. 설계 자체가 단순하다. 하나의 굵은 원자로 압력용기(RPV) 안에 핵연료, 제어봉, 그리고 감속재 겸 냉각재인 물이 고압 상태로 함께 들어가는 구조다. 압력용기 하나에 모든 것이 모여 있기 때문에, 해체의 핵심 표적도 자연스럽게 RPV와 그 내부 구조물(RVI)에 집중된다. 압력관이 격자처럼 얽힌 중수로와는 출발선부터 다르다.

해체 공법도 이미 국제적으로 표준화되어 있다. 첫째는 세분화 방식이다. 원자로 내부를 물로 채워 차폐를 확보한 뒤, 수중에서 원격 절단 장비로 RPV와 내부 구조물을 잘게 잘라 드럼에 담아 꺼내는 방식이다. 둘째는 대형 블록 인양(large component removal) 방식이다. 압력용기 전체를 통째로 들어 올리거나, 몇 개의 큰 블록으로 나누어 차폐 용기에 담아 한 번에 옮기는 방식이다.

이 과정에서 미국·유럽의 '빅 3' 사업자, 즉 Westinghouse·Orano·Siempelkamp은 수십 기의 RPV·RVI 해체 실적을 쌓아 왔다. 이들의 사업 포트폴리오에는 '어떤 설비를, 어떤 공법으로, 몇 년 안에, 얼마의 비용으로 해체했는지'에 대한 데이터가 쌓여 있다. 경수로 해체는 이제 실험이 아니라, 수십 기의 실적이 뒷받침된 산업적 기술영역이라고 보아도 무리가 없다.

## 글로벌 해체 선도 기업 (Top-tier)의 특화 기술 및 구축 사례

자료: 각 사, 삼일PwC경영연구원

기업명	핵심 역량 및 실적	주요 레퍼런스
<b>Westinghouse (미국)</b>	RVI(내부구조물) 절단 최강자. 기계적 절단 방식을 선호하며, 전 세계 PWR 해체 프로젝트의 다수에 참여	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zion 1&amp;2 (미국): 세계 최대 규모 해체 완료</li> <li>San Onofre (미국): 대형 기기 절단 수행</li> <li>Kori 1 (한국): 해체 기술 자문 역할 등</li> </ul>
<b>Orano (舊 Areva) (프랑스)</b>	해체부터 폐기물 처리까지 전주기 솔루션. 방사성 폐기물 관리 및 운송, 재처리 분야에서 독보적임	<ul style="list-style-type: none"> <li>Crystal River 3 (미국): RPV 절단 및 포장</li> <li>Würgassen (독일): 해체 프로젝트 주도</li> <li>프랑스 내 다수 원전 해체 수행</li> </ul>
<b>Siempelkamp (독일)</b>	금속 절단 및 용융(Melting) 기술 특화. 스테드 텐서너 등 특수 장비와 금속 재활용 (CARLA 플랜트) 기술 보유	<ul style="list-style-type: none"> <li>Greifswald (독일): 대규모 RPV/RVI 해체</li> <li>Stade (독일): 원전 해체 및 폐기물 처리</li> <li>Zion (미국): 웨스팅하우스와 협력하여 폐기물 용기 공급</li> </ul>

## 중수로(PHWR)는 구조도, 방사선장도 '다른 세계'다

중수로, 특히 CANDU형 중수로는 구조 자체가 경수로와 전혀 다른 세계다. 칼란드리아(calandria)<sup>(\*4)</sup>라고 불리는 거대한 탱크 안을 수평 압력관 수백 개가 가로지른다. 월성 1호기(CANDU-6)의 경우 칼란드리아 용기를 380개의 연료채널(압력관)이 가로질러 지나간다. 각 압력관마다 별도로 연료가 장전되고, 후면에는 수백 개의 급수관(feeder pipe)이 거미줄처럼 얹혀 있다. 이 때문에 중수로 1차 계통은 흔히 '배관의 숲'으로 불린다. 로봇 팔이 접근하기 어려운 협소한 공간이 끝없이 반복되는 구조다.

방사선장의 성격도 경수로와는 판이하다. 중수로는 감속재와 냉각재로 중수(D<sub>2</sub>O)를 사용한다. 운전 과정에서 중수가 중성자를 흡수해 삼중중수소(tritium)로 변환되고, 이 삼중중수소가 계통-배관-콘크리트-지지 구조물 곳곳에 흡착·침투한다. 삼중중수소의 방사선 에너지는 낮지만, 물과 친화력이 높고 침투성이 강해 제거가 쉽지 않다. 제염 과정에서 기체-수분 형태로 방출될 수 있어, 작업자 피폭과 환경 방출 관리가 동시에 까다로워진다.

여기에 콘크리트-흑연 등에 축적되는 탄소-14(C-14) 문제가 겹친다. 반감기가 길고 처분 기준이 엄격해, 폐기물 분류·감용·처분 전략이 한층 복잡해진다. 경수로가 '두꺼운 금속 용기와 내부 구조물'을 어떻게 자르고, 어떻게 들어 올릴 것인가의 문제라면, 중수로는 '수백 개의 얇은 튜브와 복잡한 배관, 특수 핵종이 뒤엉킨 공간을 어떻게 정리할 것인가'의 문제이다.

## 경수로(PWR) vs 중수로(PHWR) 구조 및 해체 이슈 비교

자료: 한국과학기술기획평가원, 삼일PwC경영연구원

구분	경수로 (PWR, 고리 1호기 등)	중수로 (PHWR, 월성 1호기)
<b>핵심 구조</b>	수직형 대형 압력용기(RPV) 하나에 연료·냉각재 집중	수평형 칼란드리아 탱크, 380개 압력관
<b>절단 대상</b>	두꺼운 금속 용기 및 내부 구조물	수많은 얇은 튜브, 복잡한 급수관(Feeder)
<b>주요 핵종</b>	코발트-60(Co-60) 등	삼중중수소(H-3), 탄소-14(C-14) 비중이 높음
<b>해체 공법</b>	세분화 또는 대형 블록 인양	정밀 원격제어 로봇을 이용한 반복적 튜브 절단·회수
<b>핵심 난관</b>	고중량물 핸들링, 두꺼운 금속 절단	협소한 공간 접근성, 삼중중수소·C-14 방호
<b>선진 사례</b>	미국 Zion, San Onofre 등 다수	캐나다 Gentilly-2, Douglas Point 등 계획·부분 경험 수준

(\*4) 칼란드리아(Calandria): 가압중수로(PHWR) 방식 원전의 핵심 설비인 원자로 용기. 거대한 원통형 스테인리스 탱크로, 내부에 핵분열 속도를 조절하는 감속재(중수)가 채워져 있으며 핵연료가 장전되는 압력관들이 이를 관통하는 구조로 되어 있다.

## 월성 1호기 해체는 왜 '고위험·고보수 프로젝트'인가

월성 1호기 해체의 첫 난제는 이중관 구조다. 압력관과 칼란드리아관이 짝을 이루는 구조에서, 압력관을 하나씩 인출해 외부에서 처리할 것인가, 아니면 칼란드리아관과 함께 원래 위치에 서 동시 절단할 것인가가 전략적 선택이 된다. 어떤 공법이 피폭, 공기, 폐기물 발생량, 구조 안정성 측면에서 유리한지에 대해 축적된 데이터가 사실상 없다. 경수로처럼 'RPV 통째 인양'이라는 검증된 패턴도 적용하기 어렵다.

둘째 난제는 삼중수소와 C-14 같은 특수 핵종이다. 중수로로는 그 설계 특성상 삼중수소와 C-14 발생량이 경수로보다 많고, 분포도 넓다. 삼중수소는 계통·배관·콘크리트 모서리와 균열 속까지 파고들어 있다. 해체 전 제염 공정이 길어지고, 삼중수소 제거 설비의 설계·운전 역량이 필수적이다. C-14는 반감기가 길어 폐기물 처분 기준이 까다롭고, 콘크리트·흑연에 축적된 오염을 어떻게 잘라내고, 어떤 등급으로 분류해 어디로 보낼 것인지에 대한 전략이 처음부터 끝까지 연결되어야 한다.

셋째 난제는 '상용 CANDU 완전 해체 실적이 없다'는 사실 자체다. 일부 연구용·소형 중수로에 대한 부분 해체 경험은 존재하지만, 월성 1호기와 같은 상업용 PHWR을 처음부터 끝까지 해체해 부지를 복원한 국가는 아직 없다. 캐나다도, 루마니아도, 아르헨티나도 아직은 계획과 논의 단계에 머물러 있고, IAEA 자료 역시 'CANDU 해체는 여전히 계획 또는 초기 준비 단계'라고 정리한다. 즉, 월성 1호기는 누군가가 처음으로 길을 내야 하는 프로젝트다.

그렇다고 해서 손을 놓을 일은 아니다. 한국은 이미 월성 1호기 압력관 교체라는 부분 해체·복원 경험을 갖고 있다. 2011년 수행된 압력관 교체 공정은 수평 압력관을 원격 장비로 분리·인출하고 새 관을 삽입하는 작업으로, 중수로 핵심 설비를 대상으로 한 '절반짜리 해체' 경험에 해당한다. 핵심기술 개발 사업은 여기에서 한 걸음 더 나아가, '중수로 방사화 구조물 원격 절단 통합 시스템', '압력관·칼란드리아관 동시 절단 및 잔편 회수 장치', '중수 계통을 모사한 Mock-up 구축'을 핵심 과제로 설정하고 있다. 이 방향이 옳다면, 완전히 없는 길을 가는 것이 아니라, 이미 밟아 본 압력관 교체 경험 위에 4차 산업혁명 기술을 얹어 리스크를 통제하는 길을 가야 한다는 뜻이다.

월성 1호기 해체는 분명 고위험 프로젝트다. 이 점을 축소하거나 미화해서는 안 된다. 동시에, 이 프로젝트는 세계 최초 상용 CANDU 완전 해체라는 타이틀을 가져올 수 있는 고보수 기회이기도 하다. 캐나다·루마니아·아르헨티나 등 CANDU 보유국이 언젠가 반드시 마주칠 문제를 한국이 먼저 해결해 낸다면, 그 자체가 강력한 전략 자산이 된다.

따라서 이 보고서는 월성 1호기를 '고위험·고보수 프로젝트'로 규정한다. 기술·정책·사회 리스크가 크기 때문에, 해체를 하나의 단일 이벤트가 아니라 디지털 트윈-원격 로봇-단계적 실증으로 이어지는 장기적 공학 프로젝트로 설계해야 한다고 본다. 중요한 것은 '아무도 가보지 않은 길'에 무작정 뛰어드는 것이 아니다. 이미 경험한 압력관 교체와 국내 연구개발 성과 위에, 보다 정교한 데이터와 기술을 쌓아 가며 위험을 수량화하고 통제하는 것이다. 그때 비로소 월성 1호기의 해체는 공포의 프로젝트가 아니라, K-Decom의 기술력을 증명하는 세계 최초 레퍼런스로 자리 잡을 수 있을 것이다.



## 2.3 국내 해체 인프라 및 규제 환경의 현주소

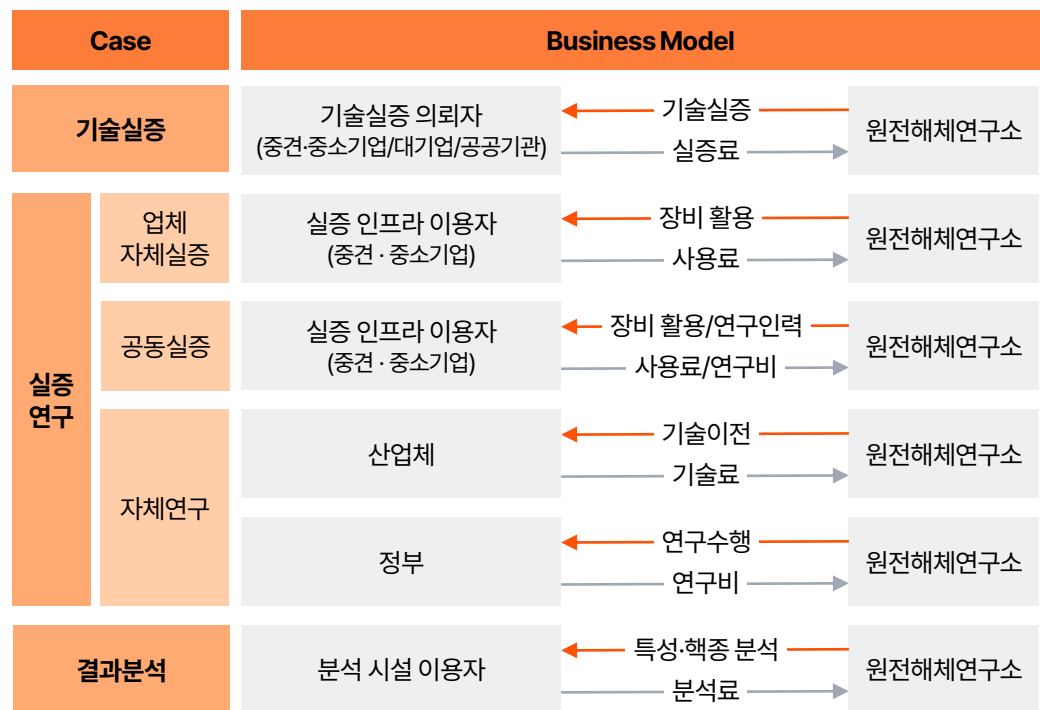
기술과 사업자만으로 해체는 움직이지 않는다. 인프라와 규제, 인력과 재원이 받쳐야 한다. 이 축이 약하면 해체는 '계획'으로만 존재한다.

인프라의 양축은 원전해체연구소와 중수로해체기술원이다. 2022년 정부 발표에 따르면, 부산·울산 접경에 들어서는 원전해체연구소에 산업부 예산 874억 원, 한수원·공공기관 1,934억 원, 지자체 322억 원 등 총 3,130억 원이 투입된다. 경주 인근에 조성될 중수로해체기술원은 월성 1호기 해체에 필요한 중수로 특화 기술 개발·실증의 중심이 된다.

본원은 경수로 실증 거점이다. RPV·RVI·1차계통·SG 등 경수로 주요 설비를 실규모로 모사한 Mock-up 시험동, 제염·폐기물·디지털 트윈·로봇 실증을 위한 연구동, 방폐물 분석동, 교육·훈련동 등이 들어선다. 본원은 중수로 특화 거점이다. CANDU 칼란드리아·압력관 어셈블리 Mock-up, 삼중수소·C-14 분석·처리 설비, 중수 계통 모사 설비, 중수로 폐기물 시험동이 핵심이다.

### 국내 원전해체 인프라 구조도

자료: 한국과학기술기획평가원



연구소는 단순한 R&D 수행 기관이 아닌, 산업계 전반을 아우르는 '기업형 테스트베드'로 그 역할을 재정립할 필요가 있다. 기업들이 개발한 각종 해체 장비와 디지털 솔루션이 실제 현장 투입 전, 고도화된 모형(Mock-up) 환경에서 충분한 신뢰성 검증을 거치도록 지원해야 한다. 여기서 축적된 실증 성적서와 데이터는 발주처와 규제기관의 의사결정을 돕는 핵심 지표가 되며, 이러한 검증 체계의 작동이야말로 연구 성과를 현장으로 연결하는 'Lab to Site' 전략의 선결 조건이다.

원전해체 전문기업 확인제도의 활성화가 시급하다. 현재 국내 시장은 한수원, 한전기술, 두산 등 앵커 기업 중심이며, 중소·중견기업은 단순 하도급에 머무를 공산이 크다. 이에 영국 NAMRC의 F4N(Fit For Nuclear) 프로그램과 같이, 해체 실적이 없더라도 기술·인력·품질 시스템을 갖춘 기업에게 '전문기업' 지위를 부여하는 제도가 필수적이다. 이는 '실적이 없어 사업에 참여하지 못하는' 악순환을 끊고, 기업들이 실적을 쌓을 수 있는 사다리를 놓아주는 정책적 배려다.

원자력안전법에 근거한 규제 시스템은 해체 사업의 안전을 담보하는 기반이다. 다만, 현행 규제 기준이 주로 건설·운영에 맞춰져 있어, 레이저 절단이나 디지털 트윈 같은 혁신 기술을 즉각 수용하기에는 절차적 복잡성이 존재한다. 철저한 안전 검증은 필수적이거나, 명확한 실증 트랙(샌드박스) 제도가 뒷받침되지 않을 경우 기술 개발이 상용화로 이어지는 연결 고리가 약해질 수 있다. 따라서 규제가 안전을 위한 '방패' 역할을 충실히 수행하면서도, 기술 혁신의 속도를 저해하지 않도록 운영의 묘를 살리는 것이 과제다.

마지막 난관은 정책의 불확실성이다. 고준위 방폐장 부지 선정과 특별법 제정이 지연되는 상황에서, 해체의 선결 조건은 '부지 내 건식저장시설(Dry Storage)'의 적기 확보로 귀결된다. 이는 사용후핵연료를 안전하게 옮겨(Unloading) 해체 공간을 확보하는 이중 궤도 전략이다. 다만 Chinshan 원전이 건식저장시설 인허가 문제로 수년간 해체에 착수하지 못한 사례는 우리에게 시사하는 바가 크다. 저장시설 확보와 주민 수용성 문제가 해결되지 않으면, 고리·월성의 해체 시계도 멈춰 설 수 있다.



# 03

## 글로벌 해체 시장 및 선진 사례



### 3.1 기다림의 시대는 갔다, ‘속도’가 곧 돈이다

과거 세계는 해체를 미뤘다. 영구정지를 선언한 뒤 수십 년을 묵혀 두었다. 방사능이 자연 붕괴로 줄어들기를 기다렸다. 이른바 SAFSTOR, 지연 해체 전략이다. 처음에는 합리적으로 보였다. 선량이 낮아지면 작업이 쉬워진다. 초기 피폭과 제염 부담도 줄어든다.

하지만 계산이 빗나갔다. 수십 년간 유지·관리 비용이 쌓였다. 경비·감시·정비·인건비가 눈덩이처럼 불었다. 그 기간 부지는 아무 일도 하지 못한 채 묶여 있었다. 재생에너지, 산업단지, 주거·상업 개발 등 새로운 수요를 모두 놓쳤다. 무엇보다 해체비용은 내려가지 않았다. 인플레이션과 규제 강화, 환경 기준 상향으로 오히려 높아졌다. 기다림이 곧 비용이 된 셈이다.

세계 표준은 즉시 해체로 돌아섰다. 원전이 멈추면 빠르게 전환기를 거쳐 바로 해체에 들어간다. 부지를 조기에 비워 지역에 돌려주는 것이 경제성 측면에서 압도적으로 유리하다는 결론에 도달했기 때문이다. 규제가 강화되고, 주민 수용성이 중요한 시대에 ‘멈춘 원전’이 수십 년간 서 있는 것을 용인하는 정치·사회적 여유가 더 이상 없다.

한국의 고리 1호기 선택도 이 흐름과 다르지 않다. 준비 2년, 제염·철거 6년, 부지복원 최소 2년. 총 10년 남짓한 로드맵이다. 영구정지 후 전환기간을 짧게 가져가고, 뒤를 이어 즉시 해체에 들어간다. 기다리며 방사능 붕괴를 바라보는 안일함을 버린 것이다. 고리 1호기 부지 주변을 둘러보면 이 선택의 의미는 더 분명해진다. 부산·울산·경남을 잇는 산업·물류·해양 클러스터 중심에 원자로 건물 하나를 수십 년 더 세워 둘 것인가. 아니면 해체를 마치고 재개발의 여지를 열 것인가. 선택지는 둘뿐이다.

즉시 해체는 속도전이 아니다. 정밀전이다. 준비와 전환을 제대로 설계한 나라만이 ‘해체(DECON)’를 감당할 수 있다. 미국·프랑스·독일은 이 점을 알고 있다. 그래서 영구정지와 해체 착수 사이의 몇 년을 치밀하게 쓰고 있다. 한국은 이제 막 그 출발선에 서 있다.

#### 글로벌 주요 원전 운영국의 해체 전략 채택 현황

자료: OECD, 삼일PwC경영연구원

국가	채택 전략	주요 특징
미국	즉시 해체 (DECON)	<ul style="list-style-type: none"> <li>경제성 최우선, 부지 조기 재이용 목적</li> <li>상업 원전 대부분 영구정지 후 즉시 착수</li> </ul>
프랑스	즉시 해체 (DECON)	<ul style="list-style-type: none"> <li>기존 지연 해체(30~50년)에서 즉시 해체로 정책 급선회(2000년대)</li> <li>차세대 원전 부지 확보 및 기술 수출 목표</li> </ul>
독일	즉시 해체 (DECON)	<ul style="list-style-type: none"> <li>탈원전 정책과 맞물려 녹지 복원(Greenfield) 가속화</li> <li>엄격한 환경 규제로 지연 해체 불허</li> </ul>
일본	즉시 해체 (DECON)	<ul style="list-style-type: none"> <li>폐로 조치 종료 후 부지 재활용 추구</li> <li>지진 등 자연재해 리스크로 장기 방치 지양</li> </ul>
영국	지연 해체 → 즉시 해체	<ul style="list-style-type: none"> <li>과거 GCR(가스냉각로) 특성상 지연 해체를 선호했으나, 최근 NDA(원자력해체청) 주도로 가속화 전략(Speed-up) 추진 중</li> </ul>

### 해체 전략별 비용 비교

자료: IAEA, 삼일PwC경영연구원

구분	즉시 해체 (DECON)	자연 해체 (SAFSTOR)
초기 10년	<ul style="list-style-type: none"><li>비용 높음 (High Peak)</li><li>제염, 철거, 폐기물 처리에 집중 투자</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>비용 낮음 (Low Flat)</li><li>최소한의 안전 유지 및 감시 비용만 발생</li></ul>
중기 (10~40년)	<ul style="list-style-type: none"><li>비용 소멸 (Zero)</li><li>해체 완료 후 부지 재활용으로 경제적 이익 창출</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>비용 지속 (Long Tail)</li><li>유지관리비, 인건비, 물가상승분이 누적되어 '눈덩이' 효과</li></ul>
최종 총비용	<ul style="list-style-type: none"><li>상대적 낮음 (예측 가능)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>높음 (불확실성 및 규제 강화 리스크)</li></ul>

## 3.2 미국 웨스팅하우스의 실용주의: 통째로 들어내라

미국은 해체에 있어 실용주의를 택했다. '원자료를 더 잘게 썰 수 있는가'라는 질문에 집착하지 않는다. '어떻게 하면 공기를 줄이고 위험을 줄일 수 있는가'라는 질문으로 시작한다. 해답은 간단하다. 통째로 들어내는 것이다.

Westinghouse의 전략은 명확하다. 해체 전환 단계에서부터 폐기물 관점으로 거꾸로 계산한다. 어떤 폐기물이 언제, 어디서, 얼마만큼 나오는지 먼저 본다. 그 다음에 절단·세분화·포장·운반 공정을 설계한다. 복잡한 RVI(내부구조물)는 기계적 절단을 통해 운반 가능한 최대 크기로 최적화하고, RPV(압력용기)는 가능한 경우 통째로 들어내거나 대형 링 형태로 절단한다. 핵심은 '얼마나 작게 자르느냐'가 아니라 '얼마나 적게 잘라서 포장 횟수를 줄이느냐'다. 이것이 바로 Westinghouse 식 효율성이다.

Zion, Maine Yankee, 여러 미국 프로젝트에서 공통으로 드러난 사실이 있다. 잘게 자르면 자를수록 공기가 늘어난다. 셋업과 철수, 장비 교체, 방사능 분진과 슬러지 관리, 작업자 접근이 기하급수적으로 증가한다. 전통적인 방식으로는 600번 잘라 12개 통에 담아야 했지만, 설계를 최적화하여 150번만 자르고 4개의 큰 통에 담았다. 그 결과 피폭량은 절반으로 줄었다.

### Zion 원전 2호기 내부구조물(RVI) 절단 최적화 성과 비교

자료: Zion, 삼일PwC경영연구원

구분	당초 계획	실제 수행	효과
절단 횟수 (Cuts)	약 600회 이상	약 150회 미만	▼ 75% 감소
폐기물 용기 (Canisters)	12개 예상	4개 (초대형 Cask)	▼ 66% 감소
작업자 피폭량 (Dose)	예상치 100%	실제 50% 수준	▼ 50% 저감

한국은 아직 해체 현장을 한 번도 경험하지 못했다. 이 때문에 공기 지연과 비용 폭증 우려가 크다. 우리가 Westinghouse에서 배워야 할 것은 단순한 공법이 아니다. 과감한 결단력과 공정 최적화의 사고방식이다. '완전히 안전할 때까지 기다리자'는 말은 듣기 좋다. 해체에는 맞지 않는다. 안전은 공정을 설계하는 방식으로 달성해야 한다.

Holtec의 모델도 눈여겨봐야 한다. 자산을 통째로 인수하고 8년 안에 해체와 부지 복원을 끝낸다. 사용후핵연료 건식저장을 먼저 세우고, 연료를 옮기고, 해체를 병행한다. 연료·해체·부지복원을 하나의 패키지로 묶는다. 위험과 자산을 함께 인수한다. 그 대신 속도로 수익을 만든다. 한국이 그대로 따라 할 필요는 없다. 다만 '연료·저장·해체'를 한꺼번에 보는 시각은 검토할 필요가 있다.

### Holtec의 신속 해체 (Prompt Decommissioning) 표준 공정선

자료: Holtec International,  
삼일PwC경영연구원

기간	주요 활동	비고
0~3년	<ul style="list-style-type: none"> <li>• [Track A] 사용후핵연료 냉각 및 ISFSI(건식저장) 건설</li> <li>• [Track B] 원자로 내부구조물(RVI) 절단 착수</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 연료 이송과 해체 동시 진행 (병렬 공정)</li> </ul>
3~5년	<ul style="list-style-type: none"> <li>• [Track A] 연료 전량 건식저장시설 이송 완료</li> <li>• [Track B] RPV(압력용기) 및 대형 기기 철거</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 연료가 수조에서 빠지자마자 건물 철거 가속화</li> </ul>
5~8년	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 건물 철거, 폐기물 반출, 부지 복원 및 조사</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 8년 내 부지 개방</li> </ul>



### 3.3 프랑스 오라노의 혜안(慧眼): 준비된 자만이 이긴다

해체는 '준비된 자'와 '그냥 시작한 자'를 가른다. Orano는 이 사실을 몸으로 알고 있다. 프랑스는 영구정지 이후 해체 착수 전까지의 전환 기간을 절대 허투루 쓰지 않는다. 이 기간을 계획·조직·공급망·규제·지역사회 리스크를 흡수하는 골든타임으로 본다.

Orano는 해체를 전 주기 관점에서 본다. 연료·후처리·폐기물·해체·부지복원까지 하나의 체계다. 그 중에서도 전환 기간은 핵심이다. 운전 조직에서 해체 조직으로 인력과 문화, 데이터를 옮기는 시간이다. 이때 운전 인력 일부를 해체 인력으로 전환한다. 운전 현장을 가장 잘 아는 사람을 구조·방사선·오염 정보의 살아 있는 데이터베이스로 활용한다. 조직과 절차, 안전문화의 연속성을 보장한다.

또 하나의 혜안은 '해체의 산업화(Industrialization)'와 '린 매니지먼트(Lean Management)'의 적용이다. Orano는 해체 현장을 단순한 철거 공사판이 아닌, '폐기물을 처리·생산하는 공장'으로 재정의했다.

Orano는 이 전환기에 '오베야(Obeya, 상황실)'를 도입해 매일 아침 공정·안전·방사선 팀이 한눈에 현장 상황을 공유하는 시각적 관리(Visual Management)를 정착시켰다. 또한 방사선 관리자를 작업 팀에 통합시켜, 작업자가 측정 승인을 기다리며 허비하는 대기 시간을 획기적으로 줄였다.

Orano의 선행 해체 프로젝트 사례(Chooz A 등)에 따르면, 실제 작업 도구 가동 시간(Wrench Time)인 생산 가용 시간은 30% 증가했고, 이동이나 대기과 같은 비부가가치 활동(Non-Value Added)은 25% 감소했다. 이는 기술의 승리라기보다, 비효율을 걷어내는 관리 시스템의 승리다. 해체는 결국 조직과 프로세스를 얼마나 정교하게 조율하느냐에 달린 '관리 예술'임을 증명한 것이다.

#### Performance Wave 적용 전후 성과 비교

자료: Orano Decommissioning  
Services

구분	개선 전	개선 후	변화율
현장 생산 가용 시간	100 (기준)	130	▲ 30% 증가
비부가가치 활동	40 (기준)	30	▼ 25% 감소
작업 준비 시간	높음	낮음	



### 3.4 독일의 집요함: 쇳물까지 녹여 줄인다

독일은 국토가 좁다. 환경 기준은 까다롭다. 주민 수용성도 민감하다. 한국과 닮은 점이 많다. 이런 환경에서 해체를 하려면 방법은 하나다. 폐기물 부피를 줄이는 수밖에 없다. 처분장 용량과 규제 눈높이를 동시에 넘어설 수 있는 기술이 필요하다.

Siempelkamp는 이 과제를 정면으로 파고든 기업이다. 이 회사는 대형 방사화 금속 구조물을 원격 수중 절단으로 분할한다. 절단 과정에서 발생하는 에어로졸·슬러지를 수조·하우징·언더프레시 시스템으로 통제한다. 그 다음이 핵심이다. 절단된 금속을 용융(Melting)한다. 고주파 유도로나 전기로에서 쇳물로 녹인다. 부피는 원래의 1/5, 때로는 1/10까지 줄어든다. 방사능은 균질화한다. 일부 금속은 재활용 가능한 수준으로 제염되어 조건부 해제를 통해 비방사성 자재로 전환된다.

독일 프로젝트들은 이를 실전에서 증명했다. VAK, Stade, 독일 연구로 해체에서 용융 공정을 통해 처분장 컨테이너 수를 크게 줄였다. Konrad 처분장의 규격·방사선·중량 한도를 기준으로, 컨테이너 하나당 최대한 많은 폐기물을 채워 넣는 '컨테이너 최적 충전' 전략도 결합했다. 용융·감용·최적 패키징이 결합된 집요한 기술·공정 설계다.

한국은 고준위 폐기물 처분장 부지를 확정하지 못했고, 중·저준위 처분장의 용량 역시 한계가 명확하다. 향후 월성 1호기를 시작으로 폐로가 본격화될 경우, 대량의 방사화 금속과 콘크리트 폐기물 발생은 피할 수 없는 현실이다. 이때 감용과 재활용 기술이 뒷받침되지 않는다면 처분장 포화와 그에 따른 사회적 갈등은 예견된 수순이다.

따라서 독일의 금속 용융 기술은 단순한 선택지가 아닌, 국내 해체 산업의 지속가능성을 담보할 필수 선결 과제다. 현재 '검토 대상'에 머물러 있는 금속 용융 및 재활용 기술을 이제는 '핵심 적용 기술'로 격상해야 한다. 독일이 감용 실패를 곧 정책의 실패로 간주했듯, 우리 역시 폐기물 최소화를 해체의 성패를 가를 핵심 지표로 설정하고, 쇳물 단위까지 부피를 줄이는 독일의 철저한 기술 철학을 벤치마킹할 필요가 있다.

#### 독일 지멜캄프 (Siempelkamp) 금속 용융 기술의 폐기물 저감 및 처리 효과

자료: Siempelkamp,  
삼일PwC경영연구원

구분	핵심 지표	기술 적용 전	기술 적용 후	개선 효과
자원 재활용률	물질 회수율	0%	약 95%	폐기물 95% 감소
부피 감용	밀도 변화	1.0 ~ 1.5 g/cm <sup>3</sup>	7.8 g/cm <sup>3</sup>	부피 1/5 ~ 1/10 축소
적재 효율	용기 내 빈 공간	60 ~ 70%	5% 미만	운반/처분 용기 수



### 3.5 영국·대만이 보여주는 해체정책의 두 얼굴, 그리고 월성 1호기

영국은 다른 길을 택했다. 정부가 앞장섰다. 원전·해체 산업의 공급망을 키우기 위해 NAMRC (Nuclear Advanced Manufacturing Research Centre)를 세우고, 이곳을 중심으로 기업들을 체계적으로 훈련시켰다. F4N(Fit For Nuclear) 프로그램을 통해 중소기업의 기술·품질 시스템을 원전·해체 수준으로 끌어올렸고, 해체 실적이 없는 기업이라도 준비가 되어 있다면 공급망에 진입할 수 있는 통로를 열어 주었다. 정부와 대학, 기업이 함께 생태계를 설계하고, ‘쓸 기업이 없어서 못 쓴다’는 변명을 사전에 차단한 셈이다.

대만은 정반대의 그림을 보여준다. Chinshan 원전의 해체 로드맵은 서류상으로는 흠잡기 어려웠다. 즉시 해체 전략을 택하고, 전환·조사 8년, 해체·철거 12년, 복원 3년, 최종 상태 확인 2년 등 총 25년 계획을 제시했다. 그러나 사용후핵연료 건식저장시설 인허가에서 발목이 잡혔다. 야외 건식저장시설은 이미 물리적으로 건설을 마쳤지만, 토양·수자원 보전과 관련된 인허가, 그리고 주민 수용성에서 제동이 걸렸다. 그 결과 연료 반출이 지연되었고, 해체는 송전선·가스터빈·부속 설비 철거 같은 ‘주변부 공정’부터 우회적으로 시작할 수밖에 없었다. 핵심인 원자로와 연료 쪽은 손도 대지 못한 채 시간만 흘러가고 있다.

Chinshan이 주는 메시지는 명확하다. 방폐장과 저장 정책 없이 해체는 없다. 더 정확히 말하면, 연료를 옮길 곳이 없으면 해체는 시작되지 않는다. 건식저장 인허가, 주민 수용성, 법·제도 설계는 해체 공정보다 앞에서 해결되어야 할 전제조건이다. 이 순서를 거꾸로 뒤집으면, 해체 일정은 공정표 안의 숫자로만 존재하게 된다.

한국은 지금 이 경계선 위에 서 있다. 사용후핵연료 최종 처분장 부지는 아직 정해지지 않았고, 고준위 폐기물 특별법과 사회적 합의도 진행 중인 상태다. 이런 환경에서 고리 1호기는 해체를 위한 기술적 준비와 공정 설계에 집중하고 있지만, 월성 1호기가 직면한 현실은 성격이 다르다. 이 원전 앞에 놓인 가장 큰 과제는 기술이 아니라, ‘갈 곳 잃은 연료’라는 정책적 난관이다. 겉으로 보기에 맥스터(건식저장시설) 증설로 급한 불을 끈 것처럼 보이지만, 실제로는 해체를 위한 공간 확보가 전혀 이루어지지 않은 착시 효과에 가깝다.

월성 1호기의 현주소는 세 가지 키워드로 압축된다.

첫째, '증설의 착시'다. 2022년, 긴 사회적 갈등과 정치적 진통 끝에 월성 원전 부지 내 건식저장시설(맥스터) 7기가 추가로 증설되었다. 표면적으로는 사용후핵연료 저장 공간에 여유가 생긴 듯 보인다. 그러나 천연우라늄을 사용하는 중수로의 특성상, 동일 전력을 생산할 때 경수로 대비 사용후핵연료 다발(Bundle) 발생량은 약 4.5~5배에 이른다. 저장시설 포화 속도가 그만큼 빠르다는 뜻이다. 증설된 맥스터는 어디까지나 현재 가동 중인 월성 2·3·4호기의 계속 운전을 위한 최소한의 완충재일 뿐이다. 매일같이 쌓여가는 2·3·4호기 연료를 수용하기에도 빠듯한 상황에서, 이미 영구정지된 월성 1호기 연료를 별도로 빼내어 보관할 전용 여유 공간은 사실상 없다. 사용후핵연료를 수조에서 꺼내지 못하면 원자로 해체는 시작조차 할 수 없다는 점을 감안하면, 맥스터 증설은 '운전을 겨우 이어가기 위한 산소호흡기'이지, 해체를 위한 근본 처방이라고 보기는 어렵다.

둘째, '출구 없는 미로'라는 구조적 한계다. 원전 해체의 대전제는 사용후핵연료를 원전 부지 밖으로 내보내는 것이다. 그러나 이를 받아줄 중간저장시설도, 최종 처분장도 아직 실체가 없다. 부지 선정은 초기 논의 단계에 머물러 있고, 고준위 방사성폐기물 관리 특별법 역시 국회에서 계류 중이다. 현실을 요약하면 이렇다. 부지 내 수조(wet storage)는 이미 포화에 가깝고, 부지 내 건식저장(dry storage)은 가동 원전인 2·3·4호기의 몫으로 사실상 예약되어 있다. 그럼에도 부지 밖(off-site)으로 나갈 수 있는 중간저장·최종처분의 길은 제도적으로 막혀 있다. 안에서도, 밖에서도 길이 막힌 이 상태는 월성 1호기를 정상적인 해체 프로젝트라기보다는 거대한 고준위 폐기물 임시 창고로 만들 위험이 크다. 연료 반출 로드맵이 확정되지 않는 한, 공정표에 적힌 해체 일정은 종이 위의 숫자에 머물 수밖에 없다.

셋째, '수용성 피로도'라는 보이지 않는 장벽이다. 월성 지역 주민들은 이미 맥스터 증설 과정에서 주민투표, 정치권 개입, 소송과 여론전이 뒤엉킨 극심한 갈등을 경험했다. 이 과정에서 형성된 피로감과 불신은 지역사회에 깊은 상흔을 남겼다. 이런 상황에서 해체를 위해 부지 내에 또 다른 저장시설을 추가로 건설하자고 설득하는 일은, 기술 설계의 문제가 아니라 고도의 정치·사회적 난제다. 대만 Chinshan 사례는 이 리스크의 실체를 잘 보여준다. 사용할 준비를 마친 ISFSI가 있음에도, 지자체 인허가와 주민 수용성의 벽을 넘지 못해 10년 넘게 연료를 꺼내지 못하고 있는 것이다. 월성 1호기 역시 기술적 해체 준비보다, 주민 수용성과 인허가라는 '정책의 덫'이 전체 공정을 지연시키는 최대 변수로 떠오를 가능성이 크다.

결국 월성 1호기가 처한 현실은 저장 공간의 절대 부족, 후방 정책의 부재, 수용성 피로가 겹치며 '저장 공간 동맥경화' 상태를 보이고 있다. 맥스터 증설이라는 단기 처방은 가동 원전의 숨통을 잠시 틔워 줄 뿐, 해체를 위한 구조적 해법과는 거리가 멀다. 이런 맥락에서 월성 1호기의 해체 전략은 기술·공정 로드맵을 논의하기에 앞서, 사용후핵연료 관리 정책과 저장 인프라, 지역사회와의 장기적 합의 구조를 어떻게 재설계할 것인가를 중심에 두고 다시 짜야 한다.

대만을 거둬 상기시키는 이유가 여기에 있다. 월성 1호기 해체는 '중수로 기술의 도전'이자 동시에 '연료·저장·처분·수용성 정책의 시험대'이다. 기술만 보고 뛰어들면 대만의 길을 답습하게 된다. 방폐장과 해체를 따로 볼 수 없다. K-Decom 전략은 Dry Storage, Cask, 연료 언로딩, 중간저장, 최종 처분 정책을 해체 전략 내부에 포함시키는 방향으로 설계되어야 한다.

영국은 정부가 앞장서 공급망과 생태계를 키웠다. 대만은 인허가와 수용성에서 발이 묶였다. 두 나라는 각자의 조건 속에서 치열하게 움직였다. 문제는 우리다. 우리는 지금 무엇을 하고 있는가. 고리·월성의 전환기, 원전해체연구소 설립, 전문기업 확인제도, Dry Storage와 방폐장 정책을 여전히 각 부처의 개별 과제로 쪼개서 볼 것인가, 아니면 하나의 통합된 해체 전략으로 엮어 볼 것인가. 이 선택이 한국 원전해체 산업의 방향을 가를 것이다.

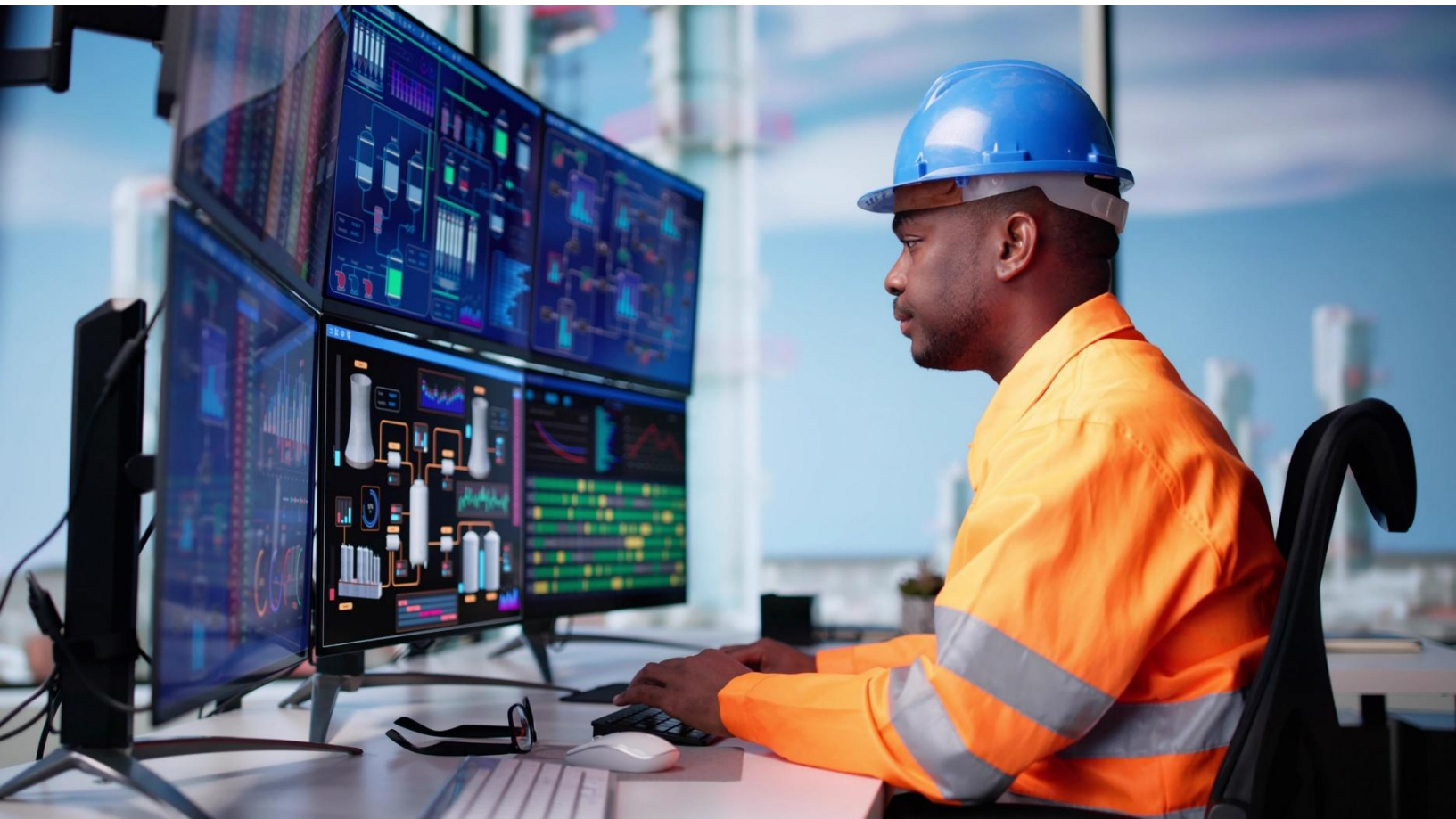
#### 국가별 원전 해체 생태계 육성 및 리스크 관리 전략 비교

자료: NAMRC, Taiwan Power Company, 삼일PwC경영연구원

구분	영국 (NAMRC 모델)	대만 (Chinshan 모델)	한국 (현재)
정부 역할	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 적극적 육성 (Proactive)</li> <li>• 기술/자금 지원의 주체</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 규제 및 관리 (Reactive)</li> <li>• 인허가 심사 위주</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 과도기</li> <li>• 육성 의지 존재</li> </ul>
공급망 정책	<ul style="list-style-type: none"> <li>• F4N 프로그램 가동</li> <li>• 기업 체질 개선 및 인증 부여</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 개별 입찰 경쟁</li> <li>• 각 기업이 알아서 요건 충족</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 전문기업 확인제도 (준비)</li> <li>• 초기 단계</li> </ul>
핵심 변수	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기술력 확보</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지자체/주민 수용성 (건식저장시설 인허가)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사용후핵연료 반출(부지 내 저장시설 확보)</li> </ul>
현재 상태	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공급망 활성화</li> <li>• 중소기업의 해체 시장 진입</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공정 지연 (Bottle-neck)</li> <li>• 핵심 공정 착수 불가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기로(Crossroad)</li> <li>• 고리는 순항, 월성은 지연 리스크</li> </ul>

# 04

## 핵심 기술 격차 분석 및 고도화 전략



## 4.1 톱날을 버리고 빛(Laser)으로 잘라라: 스마트 절단의 조건

수중에서 톱질하던 시대는 끝났다. 밴드쏘와 기계톱에 의존하는 해체 방식은 노동집약적이다. 위험집약적이다. 공기와 비용을 잠식하는 구조다. RPV와 RVI, 증기발생기 같은 방사화 구조 물을 수십·수백 조각으로 잘게 썰어내는 방식은 '기술의 부족'을 인력으로 메우는 구시대의 발상이다. 절단면은 많아진다. 작업자 접근은 늘어난다. 톱날 교체와 장비 셋업은 반복된다. 그만큼 피폭과 2차 오염, 공사 기간이 늘어난다.

원전 해체 현장은 공장이 아니다. 잘못 자르면 사람이 다친다. 방사능이 새어 나온다. 기계적 절단에만 의존한다면, 고리 1호기와 월성 1호기 현장은 '톱날을 가는 현장'이 아니라 '톱날에 사람을 갈아 넣는 현장'이 된다. 이 재앙을 막는 길은 기술의 전환뿐이다. 빛으로 자르는 것이다.

레이저와 플라즈마는 단순히 '새로운 도구'가 아니다. 해체 공정의 철학을 바꾸는 무기(武器)다. 수중 레이저는 고출력 빛을 수 미리의 좁은 영역에 집중시켜 금속을 용융·기화시켜 절단한다. 플라즈마는 고온의 전리 기체로 금속을 태워 절단한다. 공통점이 있다. 절단 속도가 빠르다. 두꺼운 후판에도 대응한다. 원격·자동화와 궁합이 좋다.

한국원자력연구원(KAERI)의 실험 결과를 보라. 공기 중에서 6kW 레이저로 스테인리스강 60mm를 72mm/min 속도로 잘랐다. 10kW 레이저로 100mm 후판을 30mm/min, 150mm를 3mm/min 속도로 절단했다.

주목할 점은 수중 절단 성능이다. KAERI는 9kW 출력으로 수중에서 100mm 두께의 금속을 절단하는 데 성공했고, 한국기계연구원(KIMM)은 세계 최고 수준인 20kW 레이저를 이용해 수중 200mm 후판 절단(3mm/min)을 실증했다. 이는 원전 해체 선진국인 독일(LZH)이나 영국(TWI)의 데이터와 견주어도 100mm 이상의 초후판 영역에서는 오히려 우리가 앞서거나 대등한 수준이다.

독일 LZH, 영국 TWI, 일본 연구기관의 수중 레이저 데이터와 비교해도 뒤지지 않는다. 50~70mm 영역에서는 속도와 두께 모두 대등하다. 100mm~200mm 초후판 영역은 오히려 선행 연구에 가깝다. 실험실·공학규모에서 이미 '선진국과 겨룰 수 있는 무기'를 손에 넣은 셈이다.

**국내외 수중·공기중  
레이저 절단 관련  
연구 현황(2023.12 기준)**

자료: 한국원자력환경복원연구원

연구수행기관	재료	두께	레이저 출력	절단속도	비고
<b>JAEA &amp; WERC(일본)</b>	SS400	50 mm	10 kW	13 mm/min	공기 중
	STS304	50 mm	10 kW	15 mm/min	공기 중
	STS304, SM490A	300 mm	30 kW	8 mm/min	공기 중
<b>CEA(프랑스)</b>	스테인리스강	100 mm	8 kW	7.5 mm/min	공기 중
<b>TWI(영국)</b>	C-Mn강판	35 mm	4.8 kW	50 mm/min	공기 중
<b>KAERI(한국)</b>	스테인리스강	60 mm	6 kW	72 mm/min	공기 중
		100 mm	10 kW	30 mm/min	공기 중
		150 mm	10 kW	3 mm/min	공기 중
		70 mm	6 kW	30 mm/min	수중
		70 mm	9 kW	80 mm/min	수중
		100 mm	9 kW	10 mm/min	수중
<b>KIMM(한국)</b>	스테인리스강	100 mm	12 kW	90 mm/min	공기 중
		50 mm	8 kW	90 mm/min	수중
		200 mm	20 kW	3 mm/min	수중

연마재 워터젯 AWJ(Abrasive Water Jet) 공법은 고압수와 연마재를 혼합해 금속을 절단하는 기술로, 언뜻 보기에는 매력적인 대안이다. 그러나 실상은 다르다. 연마재가 방사성 오염물질을 흡착하면서 2차 폐기물량을 폭발적으로 증가시킨다는 치명적 결함이 있다. 특히 수중 작업 시 발생하는 슬러지와 탁도는 시야를 차단해 작업 효율을 급격히 떨어뜨리며, 폐기물 회수 처리 비용을 눈덩이처럼 불린다. 기계적 절단과 AWJ라는 '과거의 유산'에 집착한다면, 한국은 영원히 선진국의 하청 톱질만 수행하게 될 것이다. 스마트 절단의 출발점은 명확하다. 바로 레이저다.

여기서 멈출 수 없다. 더 큰 도전인 월성 1호기가 기다리고 있기 때문이다. 월성 1호기의 핵심인 이중관(압력관+칼란드리아관) 구조는 전 세계 누구도 끝까지 해체해 본 적이 없는 미지의 영역이다. 압력관을 하나씩 빼내어 자르는 '순차 절단'은 공기가 기하급수적으로 늘어나고, 두 관을 한꺼번에 자르는 '동시 절단'은 이중 금속 용융에 따른 절단면 불안정성이 기술적 난제다. 공법과 경로에 따라 피폭량, 공사 기간, 폐기물 발생량, 구조적 안전성이 판이해진다. 이 영역에서 밀리면 중수로 해체 시장은 영원히 '남의 떡'이 된다.

정부는 '중수로 방사화구조물 원격절단 통합 시스템', '압력관·칼란드리아관 동시 절단·잔편 회수 장치', '중수 계통 모사 목업(Mock-up)'을 핵심 R&D 과제로 지정했다. 그러나 현재 기술 성숙도(TRL)는 2~3단계인 개념 검토 및 시험실 실증 수준에 머물러 있다. 로드맵은 빠듯하다. 2025년까지 목업에서 개념을 검증하고, 2027년까지 공학 규모에서 원격 절단·회수 공정을 실증해야 하며, 2030년에는 실제 월성 1호기 현장에 투입해야 한다.

이 일정은 선택 가능한 옵션이 아니라 반드시 지켜야 할 마감시한이다. 톱날로는 이 전쟁을 치를 수 없다. 고출력 레이저와 정밀 원격 절단, 그리고 이를 뒷받침할 로봇·제어·감시 시스템을 갖추어야 한다.

## 4.2 닦는 것이 아니라 없애는 것이다: 제염(除染)과 감용(減容)의 혁신

제염은 걸레질이 아니다. 콘크리트와 금속 깊숙이 박힌 방사성 오염을 벗겨내는 박피(剝皮) 수술에 가깝다. 잘못 손대면 감염을 더 키운다. 대충 닦고 넘어가면, 차라리 손대지 않은 것만 못하다.

경수로의 1차계통과 열교환기, 배관·펌프·밸브에는 수십 년 동안 형성된 산화막 위로 코발트·세슘·스트론튬 등이 층층이 엉겨 붙어 있다. 콘크리트 표면과 근접층에도 각종 핵종이 스며들어 있다. 월성 중수로의 경우 삼중수소(H-3)와 탄소-14(C-14)가 더해져 양상이 한층 복잡하다. 이 오염을 제대로 걷어내지 않은 채 절단·철거에 들어가면, 작업자 피폭은 폭증하고 폐기물의 방사능 레벨은 치솟는다. 해체 공정 전체가 처음부터 과도한 위험을 안고 출발하는 셈이다.

전통적인 화학 제염만으로는 답이 되기 어렵다. 산·칼레이트제·산화·환원제를 투입해 계통 전체를 순환시키면 제염계수(DF) 10~100 수준의 성능을 확보할 수 있다. 문제는 그 다음이다. 고농도 금속이온과 난분해성 유기물, 각종 방사성 핵종이 섞인 제염폐액이 대량으로 발생한다. 이 폐액을 다시 처리·농축·고형화해야 하므로 비용과 시간, 처분장 부담이 겹겹이 늘어난다.

기계 제염도 사정은 비슷하다. 연마, 스케블링(scabbling), 블라스팅으로 표피를 벗기면 표면 오염 제거에는 분명 효과가 있다. 대신 금속·콘크리트 분말과 분진이 쏟아져 나온다. 2차 폐기물이 폭증하고, 과도한 제거는 콘크리트 구조물의 건전성까지 떨어뜨린다. 한쪽을 줄이려다 다른 쪽을 키우는 악순환이 반복되는 구조다.

이 악순환을 끊기 위한 해법이 하이브리드 제염이다. 화학과 기계를 결합하는 방식이다. 먼저 저농도 화학제나 거품·젤 형태의 제염제를 사용해 표층 오염층을 연화(softening)시킨 뒤, 원격 기계 장비로 2~5mm 정도만 정밀하게 걷어낸다. 계통 제염에서는 화학 순환 후 전해·초음파 등을 병행해 반응성과 제거 효율을 끌어올린다. 목표는 단순하다. 제염계수는 유지하거나 높이되, 제거량과 2차 폐기물을 줄이는 것이다.

콘크리트 표면 제염에서 동일한 제염계수를 기준으로 제거 콘크리트량을 30~50%까지 줄일 수 있다는 것이 연구진의 판단이다. 계통 제염에서도 제염계수를 유지한 상태에서 제염폐액 발생량을 50% 이상 줄이는 것을 목표로 삼고 있다. 이 수치는 단순한 기술 과시가 아니다. 같은 양의 오염을 제거하면서도 방폐장에 들어갈 폐기물과 폐액을 절반으로 줄인다는 뜻이며, 장기적으로는 처분장 수명을 두 배 가까이 늘릴 수 있는 여지다.

여기서 한 걸음 더 나간 개념이 나노 유체 제염이다. 나노입자와 계면활성제, 킬레이트제를 복합한 유체를 활용해 금속 산화막 깊숙이 침투시키는 방식이다. 나노입자는 표면 에너지가 높아 방사성 핵종과 상호작용이 강하고, 계면활성제는 젖음성과 침투성을 높여준다. 킬레이트제는 용해된 금속 이온과 안정한 복합체를 형성해 용출을 돕는다. 제염이 끝난 뒤에는 자기적 특성이나 여과·원심분리 등을 이용해 나노입자를 회수·재사용한다. 그만큼 폐액량과 난분해성 유기물 부하가 줄어든다. 예타에서는 대형기기 제염에서 제염계수 10~30, 제염폐액 50% 이상 감소, 나노입자 재사용률 80% 이상을 목표로 제시하고 있다.

이를 정리하면, 화학 제염은 높은 DF를 얻는 대신 대량의 제염폐액이라는 대가를 치르고, 기계 제염은 표면 오염 제거에는 강점이 있지만 분진·2차 폐기물 증가와 구조물 손상이 뒤따른다. 하이브리드·나노 유체 제염은 이 둘의 장점을 결합해 DF는 유지하거나 높이면서 2차 폐기물을 30~50% 줄이는 것을 지향한다.

### 제염 기술별 성능 및 장단점 비교

자료: 한국원자력연구원

구분	화학 제염	기계 제염	하이브리드/나노 유체
원리	산/환원제 순환을 통한 용해	연마, 절삭, 고압 분사	화학적 연화 + 기계적 정밀 제거
제염계수	10 ~ 100 (높음)	5 ~ 50 (표면에 한정)	유지 또는 향상 (선택적 고효율)
2차 폐기물	대량 발생 (폐액 처리 난항)	분진/에어로졸 다량 발생	30~50% 저감 (폐액 최소화)
한계점	난분해성 유기물 부하, 폐액 처리 비용 급증	구조물 손상 위험, 작업자 분진 피폭 우려	고난도 공정 제어 기술 필요

### K-Decom 핵심 제염 기술 개발 목표 및 기대 효과

자료: 과학기술정보통신부, 산업통상부

기술명	개발 목표	기대 효과
하이브리드 제염	<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 폐기물량: 30~50% 저감</li> <li>표면 제거 정밀도: 2~5mm 제어</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>처분장 부하 경감</li> <li>구조물 건전성 유지하며 오염만 제거</li> </ul>
나노 유체 제염	<ul style="list-style-type: none"> <li>제염계수: 10~30 이상</li> <li>나노입자 재사용률: 80% 이상</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>폐액 발생량 50% 이상 감소</li> <li>난분해성 폐기물 부하 저감</li> </ul>



제염만으로 승부가 나지 않는다. 폐기물 자체를 줄여야 한다. 여기서 독일의 용융(Melting) 기술이 등장한다. Siempelkamp는 대형 방사화 금속을 수중 절단으로 나눈 뒤, 고주파 유도로나 전기로에서 녹인다. 쇳물로 만든다. 부피는 1/5~1/10로 줄어든다. 방사능은 균질화된다. 일부 금속은 재활용 가능한 수준까지 제염되어 다시 쓴다. 독일 프로젝트들은 이 방식으로 Konrad 처분장의 컨테이너 수를 크게 줄였다. 컨테이너 하나당 허용 방사선·중량·부피를 최대한 활용하는 '최적 패키징' 전략과 결합해, 처분장 부담을 획기적으로 줄였다.

### 금속 폐기물 용융(Melting) 처리에 따른 감용 및 자원화 효과

자료: Siempelkamp,  
삼일PwC경영연구원

구분	Melting 전	Melting 후	개선 효과
폐기물 형태	불규칙한 형상의 파이프/구조물 (Void Space 과다)	고밀도 금속 잉곳(Ingot) (Void Space 최소화)	적재 효율 극대화
부피 변화	100 (기준 부피)	10 ~ 20	약 1/5 ~ 1/10로 감용
처분 대상	전량 방사성 폐기물 처분	약 95% 재활용(Clearance) 약 5%만 최종 처분	처분장 소요 용량 95% 절감

한국은 아직 고준위 처분장이 없다. 중·저준위 처분장 용량도 한계가 있다. 월성 1호기 이후 중수로·경수로 해체가 이어지면 폐기물 볼륨은 폭증한다. 제염과 감용으로 이를 줄이지 못하면, 방폐장은 순식간에 포화된다. 그 다음은 없다. 신규 방폐장 부지를 찾는 정치·사회적 혼란만 남는다.

제염과 감용 기술은 부가적 선택사항이 아니다. 하이브리드 제염과 나노 유체 제염, 용융과 소각, 콘크리트 재활용은 K-Decom이 '해체 도중 쓰레기 산에 묻히지 않기 위해' 반드시 확보해야 할 무기다.

## 4.3 가상(假想)에서 먼저 싸워 이겨라: 디지털 트윈과 로봇

사람은 방사능을 이기지 못한다. 이 냉정한 전제를 받아들이는 순간, 원전해체 전략은 다시 써야 한다. 고리 1호기와 월성 1호기 해체 현장에 사람이 직접 들어가 모든 것을 자르고 들어낸다는 발상은 더 이상 허용되지 않는다. 먼저 가상 공간이 전장을 정찰하고, 그 뒤를 로봇이 따른다. 사람은 마지막에 들어가 확인하고 마무리하는 역할을 맡는 것, 이것이 글로벌 해체의 표준이다. IAEA와 OECD/NEA 역시 최근 보고서에서 모바일 로봇과 디지털 기술을 더 이상 선택이 아닌 해체의 핵심 도구로 규정하고 있다.

### 디지털 트윈 기반 원전 해체 통합 플랫폼 (DDT) 아키텍처

자료: IAEA, 삼일PwC경영연구원

단계	주요 활동	핵심 기술	산출물
1. 물리적 계측	• 현장 3D 스캔 및 영상 취득	• LiDAR / Drone / Robot	Point Cloud
2. 가상화/자산화	• 객체 인식 및 모델링 (BIM) • 엔지니어링 속성(DB) 연동	• AI 객체 식별 • Scan-to-BIM	Digital Asset(정보가 살아있는 3D 모델)
3. 지능화/분석	• 3D 방사선 지도 생성 • 작업자/로봇 동선 최적화	• 방사선 분포 예측 • AI 경로 탐색	최적 해체 시나리오
4. 제어/실행	• 로봇 원격 제어 및 모니터링 • 돌발 상황 예측 및 대응	• CPS (Cyber-Physical System) • VR/AR 시각화	안전한 해체 실행

디지털 트윈은 실제 플랜트의 쌍둥이다. 그 구축 과정은 대략 네 개의 층으로 나뉜다. 첫째, 3D 스캔이다. 라이더(LiDAR)와 고해상도 카메라, 필요하다면 드론과 이동 로봇을 동원해 원자로 건물 내·외부, 터빈 건물, 폐기물 처리 건물의 구석구석을 수 mm 단위로 훑어 포인트 클라우드(point cloud)를 만든다. 이것이 3차원 형상의 뼈대가 된다. 영국 셀라필드(Sellafield)는 이미 이 방식을 도입해 레거시 시설 전체를 레이저로 스캔하고, 감마 카메라 데이터를 결합해 3D 방사선 지도를 구축하고 있다.

둘째, BIM(Building Information Modeling)을 통한 자산화다. 포인트 클라우드에서 노이즈를 제거하고 벽·배관·기기·구조물을 분리해 설계 객체로 만든 뒤, 여기에 배관계장도면(P&ID)과 자산 데이터베이스를 엮는다. 장비 ID, 재질, 치수, 무게, 설치 연도 등이 3D 형상과 연결되면서, 단순한 모형이 아니라 엔지니어링 정보가 살아 있는 디지털 자산(digital asset)으로 변한다. 미국 ORNL과 EDF 등은 이를 '설계-운전-해체-폐기물 관리까지 이어지는 전 주기의 사결정 플랫폼'으로 정의하며, 향후 해체 인프라의 중추로 삼고 있다.

셋째, 방사선장(radiation field) 맵핑이다. 운전 이력과 방사화 계산, 현장 선량 계측 데이터를 결합해 구역별 선량률과 주요 핵종 농도, 예상 폐기물 등급을 3D 공간 위에 덧입힌다. 이른바 3D Dose Map이다. 어디까지 사람이 들어가도 되는지, 어디부터는 로봇만 들어가야 하는지, 어떤 구역은 당분간 건드리지 말아야 하는지를 한눈에 보여주는 전장(戰場) 지도가 된다.

넷째, 공정 시뮬레이션이다. 과거의 시뮬레이션이 '가상 모의실험' 수준에 머물렀다면, 최근에는 인공지능과 결합한 공간 지능(Spatial Intelligence)으로 진화했다. 디지털 트윈 상에서 원자로 압력용기(RPV)를 몇 조각으로 나눌지, 통째 인양(one-piece removal)을 시도할지, 어떤 순서와 동선으로 절단·인양·이송할지에 따라 선량·공기·크레인 점유·장비 간섭·폐기물 발생량이 어떻게 달라지는지 수천 번 돌려 본다. EU와 영국은 다중 로봇 시스템과 디지털 트윈을 결합해, 로봇 배치와 작업 순서를 자동으로 최적화하는 프로젝트를 추진 중이다. IAEA는 이러한 디지털 트윈·시뮬레이션을 해체 효율과 안전을 동시에 극대화하는 필수 도구로 규정한다.

한국의 위치도 달라졌다. 2020년 전후까지만 해도 디지털 트윈은 도입하면 좋을 신기술 수준의 구상이었지만, 2025년 현재는 전혀 다른 국면에서 있다. 정부가 추진하는 「원전해체 경쟁력강화 기술개발사업(2023~2030)」은 총 5,666억 원 규모의 장기 프로그램으로, 디지털 트윈·로봇·제염·폐기물 감용 등 핵심 기술을 패키지로 끌어올리는 것을 목표로 한다.

디지털 트윈이 전장을 설계하는 두뇌라면, 로봇은 그 위를 움직이는 팔이다. 이 팔의 수준을 보여주는 상징적인 사례가 이른바 '암스트롱'과 '하이드라'다. 한국원자력연구원이 개발한 고하중 양팔 로봇 '암스트롱(ARMstrong)'은 한 쌍의 팔로 최대 200kg에 이르는 물체를 들어 옮길 수 있는 원전 재난 대응 로봇이다. 이 로봇은 사람처럼 두 팔을 사용해 200kg 이상의 고중량물을 자유자재로 다룬다. 이후 민간 제조사로의 기술 이전이 완료되었으며, 실제 원전 재난 대응 훈련에 투입되어 실전 검증(TRL 8)을 마쳤다. 이제는 연구실을 떠나 고리 1호기의 대형 구조물을 뜯어낼 준비를 마친 셈이다.

정밀(Fine-manipulation) 로봇 분야에서는 국내 유압 로봇 전문기업이 개발한 수중 특화 로봇이 부상했다. 이 로봇은 수심 20m, 200배의 수압을 견디며 수중 레이저 절단을 수행할 수 있다. 2025년 방폭 인증을 획득하며 안전성을 입증했고, 좁은 압력관 틈새나 복잡한 배관망 안으로 파고들어 절단과 계측을 수행해야 하는 월성 1호기 해체에 최적화된 솔루션으로 평가 받는다.

글로벌 시장에서도 극한 환경 로봇의 중요성은 커지고 있다. 2024년 일본 후쿠시마 제2호기에 투입된 원격조종 로봇 '텔레스코(Telesco)'는 원자로 깊숙이 들어가 연료 파편을 채취하는 임무를 수행하며 로봇의 필요성을 다시 한번 입증했다.

높은 방사선량과 구조물 붕괴 위험이 겹친 공간에 사람을 넣지 않고, 로봇을 통해 연료 조각을 채취하고 데이터를 확보하는 이 사례는 "로봇 없이는 고선량 구역 해체가 불가능하다"는 사실을 세계에 다시 한 번 확인시켰다.

이 모든 움직임을 TRL(기술성숙도)<sup>(\*)</sup> 관점에서 보면 과제는 더 선명해진다. 국내 R&D 로드맵은 디지털 트윈과 로봇 기술을 실험실 수준인 'TRL 3에서 상용화 직전인 TRL 8'까지 끌어올리는 것을 목표로 설계되어 있다.

(\*)5) **TRL(Technology Readiness Level, 기술성숙도)**: 기술이 실제 현장에 투입될 수 있는 준비 상태를 1~9단계로 정량화한 척도. NASA에서 최초 도입했으며, 원전 해체 산업에서는 통상 TRL 1~3을 기초 연구, 4~6을 시제품 실증, 7~9를 실제 현장 적용 및 상용화 단계로 분류한다.

2025년 현재, 하드웨어 측면에서는 괄목할 만한 성과가 나타나고 있다. 정부출연연구소가 개발한 고하중 양팔 로봇이나 민간 전문기업의 수중 정밀 절단 로봇 등 핵심 하드웨어는 이미 TRL 7~8(실환경 검증 및 상용화 직전) 단계에 진입했다.

그러나 안심하기엔 이르다. IAEA와 NEA가 지적하듯, 전 세계적으로 하드웨어의 성능 향상 속도에 비해 규제·표준화·데이터 통합 체계(System Integration)는 여전히 '죽음의 계곡'을 건너지 못하고 있다. 한국 역시 예외가 아니다. '개별 로봇'과 '단위 디지털 기술'은 수준급에 올라섰지만, 이들을 하나의 유기적인 통합 시스템으로 묶어 실제 해체 현장에서 안정적으로 운용해 본 경험(Track Record)은 턱없이 부족하다.

결국 고리 1호기와 월성 1호기 해체 사업의 성패는, 이미 확보된 개별 기술들을 어떻게 '시스템화'하여 이 죽음의 계곡을 건너느냐에 달려 있다. 단순한 기술 개발을 넘어, 현장 실증을 통해 운영 데이터와 노하우를 축적하는 '통합 실증'이 시급한 이유다.

정리하면, 한국의 해체 기술 자립은 결국 세 단계로 정리된다. 2025년까지 수중 레이저, 하이브리드·나노 제염, 감용, 디지털 트윈, 로봇 등을 TRL 4~5 수준의 공학 규모까지 끌어올리고, 2027년까지 고리 인근 Mock-up과 일부 실제 설비에서 TRL 6~7 수준의 실증을 끝내야 한다. 최종적으로는 2030년 전후 고리·월성 현장에서 RPV/RVI 절단, 계통 제염, 폐기물 감용 공정에 국산 기술을 투입해 TRL 8~9를 달성하는 것이 로드맵의 종착점이다.

이 일정이 단지 R&D 명분으로만 쓰인다면 한국의 해체 기술은 논문 속에 머무를 것이다. 반대로 고리와 월성의 콘크리트·강판·배관 위에서 이 로드맵을 실제로 검증해 낸다면, 그 순간부터 절단·제염·감용·디지털 트윈·로봇은 '있으면 좋은 기술'이 아니라 K-Decom 생존을 좌우하는 국가 자산이 된다.

# 05

## 산업 생태계 조성 및 지속가능한 인프라 구축



## 5.1 기형적 수직 하청을 깨라: ‘Team Korea’의 조건

고리 1호기와 월성 1호기 해체는 어느 한두 기업의 힘으로 밀어붙일 수 있는 공사가 아니다. 해체계획 수립과 인허가, 계통·구조물 해체 설계, 제염·철거, 대형기기 제작·절단·운반, 사용후 핵연료와 방폐물 관리, 디지털 트윈·로봇·센서까지 단계마다 요구되는 전문성이 다르다. 하나만 잘해서는 소용이 없다. 각각의 톱니가 제대로 돌아가면서 전체 시스템이 맞물려야 비로소 해체 프로젝트가 움직인다.

정부의 「원전해체산업 글로벌 경쟁력 강화 방안」은 이 역할 분담을 ‘Team Korea’라는 말로 묶고 있다. 한수원, 두산에너지빌리티, 한전기술, 한전KPS가 네 개의 앵커(Anchor)로 설정돼 있다. 여기에 고리 인근에 설립 중인 원전해체연구소(본원·분원)가 실증·시험 인프라 앵커를 맡는다. 상단의 4개 기업이 책임과 조율을 지고, 연구소가 시험·검증을 담당하며, 그 아래에 중소·중견 전문기업들이 각 공정별로 포진하는 그림이 정부가 그린 ‘Team Korea’의 골격이다.

먼저 한수원은 발주자이자 사업자(Project Owner)이다. 해체종합계획을 세우고, 원자력안전위원회·KINS와 인허가를 협의한다. 전체 공정·비용·안전 관리를 책임지고, 주요 공정에 대한 발주·계약 구조를 설계하며, 지자체·주민과의 소통과 수용성 확보까지 담당한다. 「원전해체산업 글로벌 경쟁력 강화 방안」이 상정하는 Team Korea의 형태를 결정짓는 최종 의사결정자 역시 한수원이다. 한수원이 어디까지 직접 수행하고, 어떤 영역을 민간에 개방할지에 따라 국내 해체 생태계의 얼굴이 달라진다.

두산에너지빌리티(舊 두산중공업)는 제조 앵커이다. RPV, 증기발생기 같은 주기를 만들어 온 회사다. 해체 국면에서는 대형기기 절단·운반, 건식저장용기(Cask) 제작, 특수 장비 설계가 두산의 역할로 설정돼 있다. 두산의 대외 발표를 보면 단순한 제작을 넘어, ‘해체 엔지니어링과 대형기기 해체·운반 패키지’를 전면에 내세우며, 체코·폴란드·영국 프로젝트에서 신규 원전 건설과 함께 향후 해체·연료 관리까지 포함한 라이프사이클 패키지를 제안하겠다는 전략을 분명히 하고 있다.

한전기술(KEPCO E&C)은 설계·엔지니어링 앵커이다. 이 회사는 「The Digital Twin Technology for NPP Decommissioning」에서 3D 스캔·BIM·선량맵핑·시뮬레이션을 통합한 해체용 디지털 트윈을 구축하겠다고 밝히고 있다. 고리 1호기·월성 1호기의 절단 경로, 폐기물 이동 경로, 작업자·로봇 동선, 장비 배치·공기 시뮬레이션을 사전에 최적화하는 능력이 여기서 나온다.

한전KPS는 현장 시공·정비 앵커다. 수십 년간 발전소 계획·예방정비와 정비공사를 수행하면서 방사선 작업 절차서, 품질·안전 시스템을 축적해 온 회사다. 해체 단계에서는 계통·기기·구조물 제염과 철거, 현장 방사선 작업 관리, 안전·품질 관리가 이 회사의 역할이다.

원전해체연구소(본원·분원)는 실증·시험 인프라 앵커이다. 본원은 경수로 해체를 위한 RPV·RVI·1차 계통·SG Mock-up과 제염·폐기물·로봇·디지털 트윈 실증동을, 분원은 CANDU 칼란드리아·압력관·삼중수소·C-14 분석·모사 설비를 갖추도록 설계되어 있다. 이곳은 두산·한전·기술·한전KPS·중소기업이 개발한 장비와 공법을 실제 원전과 유사한 환경에서 시험·검증하는 ‘공용 Test-bed’이자, 상단 앵커와 하단 공급망을 데이터로 연결하는 허브 역할을 맡는다.

## Team Korea 원전 해체 수행 체계 및 앵커 기업 역할 분담

자료: 산업통상부

구분	기업명	핵심 역할
사업 총괄(Project Owner)	한국수력원자력	<ul style="list-style-type: none"> <li>해체계획서 수립 및 인허가 취득</li> <li>사업 종합 관리 (PM) 및 주민</li> </ul>
종합 설계(Engineering)	한국전력기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>해체 종합설계 및 인허가 기술 지원</li> <li>디지털 트윈 구축 및 공정</li> </ul>
기기/제조(Manufacturing)	두산에너지빌리티	<ul style="list-style-type: none"> <li>사용후핵연료 저장용기(Cask) 설계/제작</li> <li>대형 기기(RPV/SG) 절단 및 해체</li> </ul>
시공/정비(Construction)	한전KPS	<ul style="list-style-type: none"> <li>1차 계통 화학 제염 및 구조물 철거</li> <li>현장 방사선 관리 및 폐기물 처리</li> </ul>

이 네 축과 연구소 앵커는 강점과 약점을 동시에 안고 있다. 강점은 분명하다. 책임 소재가 분명하고, 규제·안전·품질에 대한 경험과 신뢰를 가진 공기업·대기업이 상단에서 리스크를 통제한다. 해체라는 새로운 사업 영역에 진입하는 초기에 이러한 앵커 체제는 분명 의미가 있다. 초기에는 ‘큰 배’가 방향과 속도를 정해 주는 편이 안전하다.

다만 지금의 구조가 그 지점에서 멈춰 있다는 점은 짚어볼 필요가 있다. 대부분의 권한과 역할이 상단 몇 개 기관에 집중돼 있다. 절단·제염·폐기물·디지털·로봇 등 고부가가치 영역에서 혁신을 만들어낼 중소·중견 전문기업의 역할 공간은 상대적으로 좁다. 입찰 기준은 여전히 ‘원전 실적’ 비중이 크고, 실적이 없는 기업은 진입 단계에서부터 부담이 크다. 신기술을 가진 소규모 기업일수록 공급망 안으로 들어오는 데 더 많은 시간과 비용이 든다.

제염·절단·폐기물·부지복원·디지털·로봇 등 각 영역별로 이미 수십 개의 국내 업체가 잠재 공급자로 이름을 올리고 있다. 문제는 “할 기업이 없다”는 것이 아니라, 이 기업들이 Team Korea 구조 안으로 편입될 제도적 통로가 충분히 설계돼 있지 않다는 데 있다. 상단 앵커와 긴밀히 연결된 일부 협력사를 제외하면, 상당수 기업은 아직 주변에서 기회를 엿보는 수준에 머물러 있다.

**국내 원전해체  
산업 분야별 잠재 공급망  
(Supply Chain)  
분포 현황**

자료: 과학기술정보통신부·  
산업통상부, 삼일PwC경영연구원

구분	기업 분포	주요 특징 및 한계	잠재 기업군
절단/철거	다수 (High) (약 35~40%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>일반 건설/기계 철거 역량 보유 기업 다수</li> <li>고방사선 수중 절단/원격 제어 기술은 부족</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>특수 절단 장비 제조사</li> <li>플랜트 해체 전문 기업</li> </ul>
제염/화학	중간 (Medium) (약 20~25%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>일반 산업 세정 기술은 성숙</li> <li>방사성 핵종 제거/폐액 처리 실증 경험 부재</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>화학약품/세정 전문 기업</li> <li>환경 설비 제조사</li> </ul>
폐기물	중간 (Medium) (약 20~25%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>중·저준위 폐기물 처리 및 운반 경험 보유</li> <li>고준위/특수 폐기물(라지베슬) 처리 역량 미흡</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>폐기물 처리/운송 업체</li> <li>드럼/용기 제작사</li> </ul>
디지털/로봇	소수 (Low) (약 10~15%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>타 산업(제조/국방) 로봇 기술 우수</li> <li>내방사선/원전 환경 최적화 진입 장벽 존재</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>유압/협동 로봇 제조사</li> <li>공간정보/VR/AI 기업</li> </ul>

해체는 다양한 공정과 기술이 얹힌 초복합 프로젝트다. 모든 기술과 공급망을 두세 개 대기업 중심으로만 설계하기는 어렵다. 수직 하청 구조만으로는 해체 공정의 복잡성과 변동성을 충분히 흡수하기 어렵다는 지적이 나오는 이유다. 이 구조가 유지될 경우, 고리·월성 해체가 본격화될수록 상단은 과도한 역할 부담으로 병목에 직면할 수 있고, 하단에서는 역량이 있어도 실제 사업에 참여할 기회를 얻기 어려운 기업들이 늘어날 수 있다.

Team Korea가 실질적으로 기능하기 위한 조건은 ‘상단은 책임과 조율, 하단은 혁신과 특화’에 가깝다. 앵커는 전략과 공정, 규제·안전·품질에 대한 최종 책임을 지되, 절단·제염·폐기물·디지털·로봇 등 세부 공정에서는 중소·중견 전문기업을 보다 적극적으로 전면에서 세우는 방향이 바람직하다. 원전해체연구소는 이들 기업의 장비·공법을 검증하는 중립적 시험장으로 기능하고, 한수원은 준비된 기업이면 공급망에 진입할 수 있는 기준과 절차를 마련해 줄 필요가 있다.

현재의 피라미드형 구조를 ‘발주자-대기업-다단계 하청’ 구도로 계속 가져가면, 고부가가치 공정과 기술이 일부 대기업 안에 집중되는 대신 생태계 전체의 다양성과 회복력은 제한될 수 있다. 반대로 앵커 4사와 연구소를 중심에 두고, 절단·제염·폐기물·디지털·로봇 등 분야별 전문기업 클러스터를 수평적으로 배치하는 네트워크형 구조를 설계한다면, Team Korea는 이 름에 걸맞은 역할을 수행할 수 있을 것이다.

결국 선택의 방향은 비교적 분명하다. 고리·월성 해체를 단기적으로는 ‘대형 사업자 중심 프로젝트’로 볼 것인지, 중장기적으로 ‘국내 해체 생태계를 키우는 산업 전략 프로젝트’로 설계할 것인지를 문제다. 전자에 머무르면 일부 기업의 실적은 빠르게 쌓일 수 있지만, 공급망의 폭과 깊이는 제한될 수 있다. 후자를 지향하면 초기에는 조정과 설계에 시간이 더 걸리겠지만, 절단·제염·폐기물·디지털·로봇 등 각 분야에 특화된 기업들이 단계적으로 축적되면서, 향후 수출 가능한 K-Decom 공급망으로 이어질 여지가 커진다. Team Korea가 진정한 ‘팀’으로 진화할지, 몇 개 앵커 기업의 연합 브랜드에 머물지 여부는 이 구조를 얼마나 계획적으로 열어 갈 것인지에 달려 있다.



## 5.2 전문기업의 ‘사다리’를 세워야 한다: 원전해체 전문기업 확인제도

한국 해체 생태계의 가장 큰 취약점은 ‘중소·중견 전문기업의 두께’다. 절단·제염·폐기물·디지털 트윈·로봇·센서·계측·소프트웨어 등 각 공정마다 기술을 보유한 회사들이 산발적으로 존재하지만, 이들이 원전해체 프로젝트의 정식 선수로 투입될 수 있는 제도적 통로는 여전히 좁다.

입찰 현장은 실적 중심으로 돌아간다. ‘원전 관련 실적’이 없으면 서류 단계에서 걸러지는 구조가 여전하다. 기술은 있지만 원전 실적이 없는 기업은 영원한 하청 혹은 주(周)변 서플라이어로 남기 쉽다. “실적이 없어서 못 들어간다 → 못 들어가니 실적이 생기지 않는다”는 악순환 속에서, 해체 실적은 결국 기존 사업자 몇 곳의 장부에만 쌓인다.

이 악순환을 끊기 위해 정부가 꺼내 든 카드가 바로 ‘원전해체 전문기업 확인제도’다. 정부는 2030년까지 원전해체 전문기업 100개, 전문인력 2,500명 양성을 목표로 하고 있으며, 이를 위해 3,482억 원(국고 2,660억 원, 민간·지방비 등 822억 원)을 투입할 계획이다. 이 로드맵 안에 ‘원전해체 전문기업 확인제도’가 구체 과제로 포함됐고, 2027년 상반기까지 기술인증·전문기업 확인제도를 본격 시행하는 일정이 제시되어 있다.

제도의 기본 구조는 비교적 분명하다. 기업이 제염·절단·폐기물·엔지니어링·디지털 등 세부 분야별로 보유 기술과 인력, 장비, 품질·안전 시스템을 자기평가서 형태로 제출하면, 전문평가단이 서류와 현장을 함께 검토한다. 장비·인력·품질·재무 건전성 등을 종합 평가해 기준을 충족한 기업에는 ‘원전해체 전문기업(제염)’, ‘원전해체 전문기업(절단)’과 같은 형태의 확인서를 발급하고, 이 명단을 한수원·한전기술·한전KPS 등 발주·엔지니어링 기관과 공식 공유하는 구조다.

### 원전해체 전문기업 선정 추진절차

자료: 한국원자력산업협회

단계		내용
1	원전해체 사업분류표 제정	• 해체 사업 직무 세분화(서비스, 공사, 장비)
2	산업 실태조사 시행	• 원전기업 대상 해체 관련 인력, 면허/자격, 기술/자입 등 조사
3	평가지표 개발	• 사업분류표 기반 계량화된 확인제도 개발
4	모의제도 시범운영	• 전문기업 모의심사 시행 • 심사기준 및 절차보완
5	전문기업 선정위원회 구성	• 사업 수행역량 심사 및 평가 • 전문기업 선정
6	전문기업등록 및 관리	• 확인제도 신청 안내 • 기업등록 및 사후관리

## 원전해체 사업분류표

자료: 한국원자력산업협회

대분류	중분류	소분류
서비스(Service)	1.설계/인허가/사업관리	1-인허가
		2-사업관리
		3-엔지니어링
		4-방사선환경
	2.안전관리	1-방사선안전
		2-산업안전
	3.폐기물처리	1-방폐물처리
		2-특수폐기물
		3-폐기물재활용
	4.부지복원	1-규제해제
공사(Construction)	1.철거공사	1-석면 철거
		2-일반 철거
		3-방사선구역 철거
	2.제염공사	1-계통제염
		2-기기제염
		3-구조물 제염
	3.부지복원공사	1-부지복원
		2-환경복원
장비(Equipment)	1.운반장비	1-중장비
		2-경장비
	2.측정장비	1-방사선/능 계측
		2-3D 스캐닝
		3-기타 계측
	3.제염장비	1-계통제염
		3-구조물 제염
	4.절단/철거장비	1-기계적절단
		2-열적/전기적절단
	5.폐기물처리장비	1-처리장비
		2-포장용기
	6.부지복원장비	1-부지복원
		2-환경복원
	7.기타	1-원격제어
기타(Others)	1.기타	1-기타

전문기업 확인제도의 본질은 단순하다. “실적이 없더라도, 기술·인력·품질·안전 시스템이 검증되면 해체 프로젝트에 참여할 자격을 부여하겠다”는 약속이다. 즉, 실적 중심 입찰 구조에 ‘제3의 사다리’를 하나 더 놓는 장치다. 이 사다리가 튼튼하게 세워지면, 지금까지 입구에서 막혀 있던 중소·중견 기업들이 Team Korea 공급망 안으로 들어올 수 있다. 반대로 제도가 형식에 그친다면, 중소기업은 다시 한 번 서류만 제출하고 실제 사업에서는 배제되는 들러리에 머물 수 있다.

따라서 인센티브 설계가 핵심이다. 첫째, 한수원과 공공 발주에서 전문기업 인증을 받은 기업에 기술평가 가점을 부여하고, 일정 금액 이상 패키지 공사에서는 ‘전문기업 컨소시엄 참여’를 입찰 요건에 반영하는 방안을 검토할 필요가 있다. 둘째, 정부 R&D 사업 선정 시 전문기업의 참여를 의무화하거나 우선권을 부여해, 연구개발 성과가 자연스럽게 전문기업 실적으로 연결되도록 해야 한다. 셋째, 정책금융기관과 연계해 전문기업에 대한 금리 우대, 보증비율 상향, 장기 저리 설비투자·운전자금 라인을 열어야 한다.

이렇게 해서 인증을 받은 기업을 고리·월성 프로젝트를 넘어 해외까지 끌고 나가는 것이 이른바 ‘선단형 수출’ 전략이다. 체코·루마니아·캐나다·영국 등에서 해체·신규 원전 프로젝트가 발주될 때, 한수원·두산에너지빌리티·한전기술·한전KPS가 컨소시엄 리더로 서고, 인증받은 절단·제염·폐기물·디지털·로봇 기업을 공식 파트너로 내세우는 그림이다. 해체 시장은 공급망의 잠금효과(lock-in)가 강한 산업이다. 초기 몇 건의 해외 프로젝트에서 어떤 한국 기업이 어떤 위치로 진입하느냐가 향후 10~20년의 기회를 좌우한다.



## 5.3 사람과 돈이 없으면 기술도 없다: 인력과 재원의 화급(火急)

결국 해체는 사람이 한다. 로봇도, 소프트웨어도, 절단기·제염장비도 사람 없이 움직이지 않는다. 정부는 2030년대 중반까지 원전해체 산업에 필요한 전문 인력을 약 2,000~2,500명 수준으로 보고 있으며, 2022년 발표된 글로벌 경쟁력 강화 방안에서도 2030년까지 전문인력 2,500명 양성을 목표로 제시했다. 여기에는 단순 작업자뿐 아니라, 해체 설계·해석·계획 엔지니어, 제염·절단 공정 기술자, 방사선보건·안전 전문가, 폐기물·환경 엔지니어, 디지털 트윈·로봇·AI 개발자, 프로젝트 매니저, 규제·정책 전문가까지 모두 포함된다.

정책 문서들이 제시하는 인력 양성 로드맵은 크게 세 층으로 나뉜다. 첫째, 대학·대학원 교육이다. 부산대·UNIST·동국대 경주 등 지역 거점 대학과 한국원자력환경복원연구원, 한수원·두산·한전기술·한전KPS 등이 연계해 해체·폐기물·디지털·방사선 분야 전공·트랙을 강화하고, 졸업생을 해체 관련 조직으로 자연스럽게 연결하는 구조를 만들어야 한다. 둘째, 한수원·원복연·민간기업이 운영하는 OJT와 재교육이다. 운전·정비 인력을 해체 인력으로 전환하려면 D&D 프로세스, 해체 안전, 폐기물 관리, 디지털 도구 운용에 대한 집중 교육 프로그램이 필요하다. 셋째, IAEA·OECD/NEA와의 공동 교육과정과 해외 해체 현장 실습 등 국제 프로그램 활용이다. 글로벌 해체 표준과 실제 프로젝트 운영 방식을 몸으로 익힐 수 있는 경로를 넓혀야 한다.

재원 문제도 피할 수 없다. 해체비용 총당금은 원전 건설·운영 단계에서 전기요금에 포함해 적립해 온 돈이다. 전문가들은 해체비용과 총당금은 장기간의 인플레이션·금융시장 변동·조기 폐쇄·비용 추정 오차 등의 영향을 크게 받기 때문에, '충분성과 안정성을 동시에 확보하는 장기 재원 관리 체계'가 필요하다고 강조한다. 비용 추정이 실제보다 낮았다면 추가 적립이나 요금 조정이 필요하고, 반대로 기술 도입으로 비용을 줄였다면 그 성과가 다시 총당금·요금 정책에 반영돼야 한다.

한국도 예외가 아니다. 고리 1호기와 월성 1호기 해체에서 실제 투입 비용과 공기를 데이터로 확보하면, 이를 토대로 후속 원전의 해체비 추정을 재검토해야 한다.

해체 전문기업을 위한 금융 지원도 중요하다. 해체 전문기업은 초기 투자비가 크고, 첫 프로젝트 수주까지의 리드타임이 길다. 수중 레이저·로봇·제염·감용 설비, Mock-up 시험, 인증·인허가 비용까지 감당해야 하지만, 매출이 안정화되기 전까지는 현금흐름이 불안정하다. 이 공백을 메우는 것이 정책금융의 역할이다.

이와 별개로 정책금융기관은 해체 전문기업을 위한 전용 프로그램을 마련할 수 있다. 보증비율 상향, 금리 우대, 상환유예, 프로젝트 파이낸싱 지원 등이 대표적이다. 특히 수중 설비 투자, 로봇·디지털 플랫폼 구축처럼 CAPEX가 큰 분야는 민간 은행의 일반 대출만으로는 버티기 어렵다. 전문기업 확인제도와 정책금융을 연계해, 기술·품질이 검증된 기업에는 자금 조달 문턱을 낮춰 주는 구조를 만드는 것이 바람직하다.

# 06

## 글로벌 시장 진출 전략



## 6.1 실적(實績)이 곧 면허다: K-Decom의 승부수

글로벌 원전 해체 시장은 냉혹하다. 기술 카탈로그만으로는 문턱도 넘지 못한다. 발주처가 처음 묻는 것은 '어떤 기술을 개발했느냐'가 아니다. '어느 상용 원전을 끝까지 해체해 본 적이 있느냐'이다. 실적(實績)이 곧 면허다. 해체 완료라는 훈장 없는 나라는 입찰장을 둘러볼 자격조차 없다.

고리 1호기와 월성 1호기의 해체 실적은 이 점에서 절대적이다. 고리 1호기 해체 완료는 단지 '국내 첫 사례'가 아니다. 경수로(PWR) 즉시 해체를 설계·수행·종료한 경험이다. 규제·제염·절단·폐기물·복원까지 한 번에 통과한 이력이다. 1,000조 원에 이르는 글로벌 해체·후방 시장에 입장하기 위한 첫 번째 통행증이다. 월성 1호기 해체는 더하다. 세계 최초 상용 중수로(CANDU) 완전 해체라는 실적은 그 자체가 캐나다·루마니아·아르헨티나 등 중수로 보유국을 향한 마스터키다. 이 두 프로젝트를 성공시키지 못하면, K-Decom이라는 이름은 국제 입찰장에서 효력이 없는 종이 조각에 불과하다.

여기서 우리가 팔아야 할 상품은 '부품 몇 개'가 아니다. 턴키(Turn-key) 패키지다. 두산에너지빌리티의 Cask와 대형기기 해체 장비, 한전기술의 설계·해석·디지털 트윈, 한수원의 프로젝트 관리·규제·운영 노하우를 하나의 묶음으로 만들어야 한다. 하청업체 목록이 아니라, '이 패키지를 주면 해체 전체가 돌아간다'는 신뢰를 줘야 한다.

두산에너지빌리티는 대형 주기기 제작에 더해, 대형 방사화 구조물 해체 엔지니어링과 해체용 특수 장비를 포트폴리오에 올렸다. 사용후핵연료 건식저장용기(Cask)와 폐기물 드럼·컨테이너 제작 능력을 기반으로, 체코·폴란드·영국 등 신규 원전 프로젝트에서 '건설-운영-정비-해체'를 아우르는 라이프사이클 패키지를 제안하고 있다. 신규 원전을 짓는 순간부터 언젠가 있을 해체와 연료 관리를 염두에 둔 설계다.

### 두산에너지빌리티 원전 전주기(Life-cycle) 비즈니스 포트폴리오

자료: 두산에너지빌리티, 삼일PwC경영연구원

구분	1단계: 주기기 제작/건설	2단계: 운영 및 정비	3단계: 해체 및 폐기물
핵심 역량	<ul style="list-style-type: none"> <li>RPV(원자로 압력용기)</li> <li>SG(증기발생기)</li> <li>PZR(가압기) 등</li> <li>주단조 소재 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>대형 기기 교체 공사</li> <li>기기 수명 관리 및 정비</li> <li>성능 개선 엔지니어링</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>해체 엔지니어링(절단 공법)</li> <li>특수 절단 장비 개발</li> <li>Cask(사용후핵연료 저장용기)</li> </ul>
수출 전략 (Value Proposition)	Team Korea 주기기 공급 (체코, 폴란드, 영국 등)	장기 서비스 계약 (부품 공급 및 유지보수)	Back-end 패키지 제안 (해체/폐기물 관리 솔루션 동반 제공)
기대 효과	전통적 제조 수익 창출	안정적 현금 흐름 확보	미래 신성장 동력 확보



한전기술은 이 패키지의 두뇌다. 3D 스캔, BIM, 방사선장 맵핑, 공정 시뮬레이션을 결합한 디지털 트윈 플랫폼을 고리와 월성에 입히고 있다. 이 플랫폼이 제대로 작동하면, 어느 구역에서 어떤 절단 공법과 경로를 선택해야 공기·비용·선량·폐기물이 최소화되는지 수천 번 가상실험을 통해 도출할 수 있다. 고리·월성에서 검증된 디지털 트윈과 해체 설계·해석 능력은 해외 발주처에게 '한국은 장비 업체가 아니라 해체 공정을 설계하는 엔지니어링 행위자'라는 신호를 준다.

**한전기술(KEPCOE&C)  
원전 해체 디지털 트윈  
플랫폼 구성**

자료: 한전기술, 삼일PwC경영연구원

단계	핵심 기술요소	기능 및 역할	산출 효과
<b>1. 가상화 (Virtualization)</b>	3D 스캔 & BIM(형상 정보)	<ul style="list-style-type: none"> <li>시설 내·외부 정밀 형상 구현</li> <li>설비 제원(Spec) 자산화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>보이지 않는 것을 보이게 함</li> <li>정밀한 현장 데이터 확보</li> </ul>
<b>2. 가시화 (Visualization)</b>	3D 방사선장 맵핑(오염 정보)	<ul style="list-style-type: none"> <li>공간별 선량률(Dose) 시각화</li> <li>핫스팟(Hot-spot) 식별</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>위험 구역의 사전 식별</li> <li>작업자/로봇 안전 경로 확보</li> </ul>
<b>3. 시뮬레이션 (Simulation)</b>	공정 가상 검증(Engineering)	<ul style="list-style-type: none"> <li>절단 공법(레이저/기계) 비교</li> <li>기기 인양/이송 경로 간섭 체크</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>수천 번의 시행착오 대행</li> <li>최적의 해체 시나리오 도출</li> </ul>
<b>4. 최적화 (Optimization)</b>	4대 핵심 지표 관리(KPI)	<ul style="list-style-type: none"> <li>공기 단축</li> <li>비용 절감</li> <li>피폭 최소화</li> <li>폐기물 감량</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>엔지니어링 솔루션 제공</li> <li>해외 발주처 신뢰 확보</li> </ul>

한수원은 해체 프로젝트의 얼굴이다. 사업자·발주자·규제 대응 창구로서, 인허가·안전·환경·지역 수용성·계약 구조·리스크 분담을 총괄한다. 고리·월성에서 겪은 주민 설득과 지자체 협의, 규제기관과의 협상 경험은 그대로 해외 발주처의 신뢰 잣대가 된다. '한수원이 있는 프로젝트는 중간에 멈추지 않는다'는 평판이 쌓여야, K-Decom 패키지에 무게가 실린다.

실적이 없는 나라에 턴키를 맡길 발주처는 없다. 그래서 고리·월성의 해체는 '내부 정리'가 아니라 '수출 준비'다. 실적이 곧 면허다. 이 면허를 따지 못하면, 두산의 Cask도, 한전기술의 디지털 트윈도, 한수원의 공정관리 역량도 모두 국내에서만 맴도는 기술이 된다. 반대로 이 면허를 확보하면, K-Decom은 하청 국가의 족쇄를 끊고 독자 브랜드로 서게 된다. 이 승부수를 포기하는 것은 국가의 장기 수출전략을 포기하는 것과 같다.

## 6.2 중수로(CANDU) 벨트, 레퍼런스 없는 시장을 선점하라

경수로 시장은 이제 막 본격적인 물량이 쏟아지기 시작한 '성장 시장'이지만, 경쟁 구도는 이미 치열하게 짜여진 시장이다. 미국과 유럽의 대형 기업들이 해체 경험을 앞세워 유럽·북미 프로젝트를 선점하고 있다. 앞으로 수십 년 동안 해체해야 할 경수로 물량은 오히려 늘어나겠지만, 표준 공법·표준 계약 구조·기존 파트너십은 상당 부분 이들 사업자를 중심으로 형성되어 있다. 한국이 이 판에 그대로 뛰어들면, 단순히 우리도 경수로 해체를 할 수 있다는 수준만으로는 하부 공급망·하청 역할에 머물 가능성이 크다.

그렇다고 해서 경수로 시장이 '들어가 봐야 소용없는 곳'은 아니다. 고리 1호기 해체는 경수로 해체 역량을 검증하고, 글로벌 파트너십에 참여할 기본 자격을 확보하는 출발점이다. 다만 이 영역에서는 이미 선행 주자와 강자가 뚜렷하기 때문에, 단순 인력·장비 공급자가 아니라 디지털 트윈·로봇·제염·감염을 결합한 패키지형 솔루션, 일정·비용·선량을 동시에 줄이는 고효율 공법 등으로 '포지션을 어떻게 다르게 가져갈 것인지'를 먼저 정해야 한다.

반대로 중수로(CANDU) 시장은 아직 본격적인 게임이 시작되지 않은 '구조 형성 초기 시장'에 가깝다. 상용 CANDU 완전 해체 실적이 없다. 캐나다·루마니아·아르헨티나·인도 어느 나라에도 처음부터 끝까지 상업용 CANDU를 해체해 부지를 복원한 사례는 없다. 연구용·소규모 실험로에 대한 부분 해체 경험만 있을 뿐이다. IAEA도 중수로 해체를 여전히 계획·논의 단계에 머물러 있는 분야로 분류한다. 이 말은 곧, 경수로와 달리 누가 글로벌 레퍼런스를 쥐게 될지 아직 정해지지 않은 영역이라는 뜻이다.

월성 1호기 해체는 이 우주공산에 꽃는 첫 깃발이 될 수 있다. 세계 최초 상용 중수로 해체. 이 한 줄 실적은 캐나다·루마니아·아르헨티나 중수로 해체 시장을 여는 중요한 열쇠가 된다. 처음에는 그 나라들이 "우리가 왜 한국에게 맡겨야 하는가"라고 되물을 것이다. 그러나 월성 1호기에서 압력관·칼란드리아·중수 계통·폐기물·Dry Storage까지 통합 패키지를 실제로 수행한 경험이 쌓이는 순간, 협상 테이블 위 힘의 구조는 달라진다. 그때 K-Decom은 '중수로 해체에서 유일하게 대규모 레퍼런스를 보유한 파트너'로 자리매김할 수 있다.

중수로 벨트를 열기 위해서는 기술과 사회, 두 개의 관문을 통과해야 한다. 첫째는 기술 관문이다. 이중관 구조(압력관+칼란드리아관) 절단, 삼중수소·C-14 제염, 중수 계통 폐기물 처리, 중수 재고·재활용·처분 전략, 칼란드리아·압력관 해체 공정 등, 아직 어느 나라에서도 완결된 정답을 제시하지 못한 영역을 한국이 먼저 설계해야 한다. 월성 1호기는 이 기술들을 실제로 검증하는 시험대다. 여기서 축적되는 데이터와 성과가 향후 CANDU 해체 시장에서의 설득력 있는 근거가 된다.

둘째는 수용성 관문이다. 대만 Chinshan의 현실이 이를 잘 보여준다. 대만은 한국처럼 국토가 좁고 인구밀도가 높다. Chinshan 원전은 즉시 해체 전략을 세웠지만, 사용후핵연료를 옮길 건식저장시설(ISFSI)이 토양·수자원 보전 인허가와 주민 반대에 가로막혀 승인을 받지 못했다. 연료를 뺄 곳이 없으니 원자로 해체는 시작조차 못했다. 그 결과 해체는 주변 송전선·가스터빈·보조 설비 철거 수준에서 머물고 있다. "기술이 있어서 계획은 즉시 해체인데, 정책·수용성이 따라오지 못해 현실은 지연 해체"가 된 전형적인 사례다.



## 중수로 가동 현황

자료: IAEA, 삼일PwC경영연구원

국가	이름	호기	상태	최초가동	비고
캐나다	Bruce	8	Operational	1977	2x CANDU 791, 2x CANDU 750A, 4x CANDU 750B
루마니아	Cernavoda -1	2	Operational	1996	2x CANDU 6
캐나다	Darlington	4	Operational	1990	4x CANDU 850
아르헨티나	Embalse	1	Operational	1984	1x CANDU
캐나다	Gentilly	2	Operational	1983	1x Prototype CANDU, 1x CANDU 6
인도	Kaiga	6	Operational	2000	4x IPHWR-220 (Based on CANDU), 2x IPHWR-700 (Based on CANDU)
인도	Kakrapar	4	Operational	1993	2x IPHWR-220 (Based on CANDU), 2x IPHWR-700 (Based on CANDU)
파키스탄	Kanupp	1	Operational	1972	1x CANDU
인도	Madras	2	Operational	1984	2x IPHWR-220 (Based on CANDU)
인도	Narora	2	Operational	1991	2x IPHWR-220 (Based on CANDU)
캐나다	Pickering	4	Operational	1971	2x CANDU 500A, 4x CANDU 500B
캐나다	Point Lepreau	1	Operational	1983	1x CANDU C6
중국	Qinshan	2	Operational	2002	2x CANDU 6
인도	Rajasthan	8	Operational	1973	2x CANDU, 4x IPHWR-220 (Based on CANDU), 2x IPHWR-700 (Based on CANDU)
한국	Wolsung	3	Operational	1983	4x CANDU 6
		1	Shut down		
합계		51			

월성 1호기 역시 같은 함정에 빠질 위험을 안고 있다. 사용후핵연료 건식저장·중간저장 정책과 주민 수용성이 함께 풀리지 않으면, 한국도 '계획은 즉시 해체, 현실은 지연 해체'가 될 수 있다. 중수로 시장을 열기 위해서는 기술만으로는 부족하다. 주민과 국제사회가 안심할 수 있는 해체 모델을 만들어야 한다. 부지 복원과 재개발 계획, 삼중수소·C-14 환경영향 정보 공개, 디지털 트윈 기반 가시화, 지역 일자리·경제 효과, 장기 모니터링까지 묶은 '안심(安心) 해체 패키지'가 필요하다.

결국 K-Decom의 전략은 경수로를 버리고 중수로만 가자가 아니다. 경수로에서는 고리 1호기를 포함한 선택적·차별화된 참여로 신뢰와 레퍼런스를 쌓고, 중수로에서는 월성 1호기를 앞세워 아직 열린 시장의 선점자를 노리는 '양손 전략'이어야 한다. 경수로 해체 실적은 글로벌 파트너십에서 기본 신뢰를 얻는 여권이고, 중수로 해체 실적은 그 여권에 찍히는 독점적인 비자에 가깝다. 월성 1호기를 세계 최초 상용 CANDU 해체의 성공 사례로 만들면, 캐나다·루마니아·아르헨티나와의 협상 테이블에서 한국은 따라가는 파트너가 아니라 선행 경험을 가진 협력자로 앉게 된다. 반대로 이 기회를 충분히 활용하지 못하면, 중수로 시장도 언젠가 다른 나라의 손으로 채워질 것이다. 중요한 것은 어느 시장에 들어갈 것인가가 아니라, 각 시장에서 어떤 위치로 들어갈 것인가를 지금부터 분명히 정하는 일이다.

# 07

## 결론 및 제언



## 7.1 글로벌 해체시장 타임라인과 한국의 준비 과제

향후 20~30년은 전 세계적으로 원전해체 수요가 본격적으로 증가하는 시기다. 2025년 기준 전 세계 운영 원전은 416기, 영구정지 원전은 215기다. 이 가운데 상당수가 2050년까지 해체 대상이 된다.

글로벌 발주는 2030년대 중반 이후 본격적으로 쏟아질 가능성이 크다. 그때까지 어느 나라가 어떤 기술과 실적, 어떤 공급망·외교 채널을 갖추느냐에 따라 해체 시장의 '자리 배치'가 상당 부분 정해질 것이다. 한 번 자리 잡힌 공급망과 파트너십은 통상 20~30년 단위로 유지되는 경우가 많다. 해체는 한 번 맡아본 회사에 다음 기회가 돌아가는 경향이 강하고, 공급망 잠금효과(lock-in)가 큰 산업이기 때문이다.

이런 점을 감안하면 2025~2030년은 한국에게 매우 중요한 준비 구간이다. 고리 1호기와 월성 1호기에서 주요 공정을 실증하고, 원전해체연구소·중수로해체기술원 인프라를 가동하며, 원전해체 전문기업 확인제도와 규제 샌드박스 도입, Dry Storage·방폐장 정책 정비의 골격을 이 시기 안에 어느 정도 갖추어야 한다. 그렇지 못하면, 2030년 이후 국제 발주시장에서 한국은 여전히 '기술 잠재력은 있으나 실제 해본 경험이 적은 나라'로 분류될 위험이 있다.

해체 기술과 산업 생태계는 하루아침에 성숙하지 않는다. 절단·제염·감용·디지털 트윈·로봇뿐 아니라 인허가 체계, 자원 조달, 주민 수용성, 전문기업·인력·인프라까지 동시에 숙성돼야 한다. 이 과정에는 통상 10년 정도의 시간이 필요하다. 2030년 이후 시장에 '의미 있는 참여자'로 들어가려면 지금부터 준비를 시작해야 한다는 뜻이다. 앞으로 5~10년 사이에 어떤 제도와 인프라, 기술과 인력을 쌓느냐에 따라 이후 수십 년간 축적될 국부(國富)와 기술자산의 규모가 달라질 것이다.



## 7.2 한국이 선택해야 할 세 가지 전략 과제

앞서 살펴본 것처럼, 한국이 원전해체 시대에 어떤 위치를 차지할지는 향후 10년의 준비 수준에 달려 있다. 이제 필요한 것은 과장된 구호가 아니라, 실행 가능한 전략 선택이다. 이 보고서는 그 가운데 특히 세 가지를 한국이 우선적으로 검토해야 할 과제로 제시한다.

### 1 규제 운영 방식을 한 단계 진화시키기

원전해체는 안전과 직결된 영역이다. 규제의 엄격함은 전제 조건이다. 다만, 건설·운전 단계에서 만든 기준만을 잣대로 삼아 모든 신기술을 일률적으로 제한한다면, 안전성을 높일 수 있는 수단까지 함께 막히는 부작용이 생길 수 있다. 수중 레이저 절단, 하이브리드·나노 유체 제염, 금속 용융·감용, 디지털 트윈, 원격 로봇 등은 국내외 실증을 통해 점차 성능과 안전성을 입증해 가고 있다.

여기서 필요한 것은 규제 완화라기보다 규제 샌드박스형 운영이다. 원전 해체 규제 샌드박스는 안전 기준을 낮추자는 제도가 아니라, 과학적 근거가 충분한 신기술을 제한된 범위·조건에서 시험 적용해 보고, 그 결과를 바탕으로 규제 기준과 가이드라인을 정교화하자는 접근이다. 예를 들어 고리 1호기와 월성 1호기의 일부 공정을 샌드박스 구간으로 지정하고, 원안위·KINS·한수원·지자체·주민 대표·외부 전문가가 함께 참여하는 공동 모니터링 체계를 구축할 수 있다. 이렇게 하면 “안전성을 해치지 않으면서도 새로운 기술을 어떻게 현장에 들여보낼 것인가”에 대한 제도적 해법을 마련할 수 있다.

### 2 연구의 무게중심을 현장으로 옮기기 (Lab to Site)

지난 과거 원전해체 핵심기술 개발사업은 레이저 절단, 제염, 감용, 디지털 트윈, 로봇 등 요소기술의 기초연구·실험실 실증에 상당한 예산을 투입해 왔다. 그 결과 논문·특허와 TRL 3~4 수준의 성과는 적지 않다. 다만 “실제 오염 설비를 어느 정도까지 다뤄 봤는가”라는 질문에는 아직 답이 충분하지 않다. 실험실 비커와 소형 샘플 위에서만 검증된 기술은 가능성을 보여주는 단계일 뿐, 현장의 해체 솔루션으로 자리 잡기에는 부족하다.

이제 R&D의 중심축을 점진적으로 ‘현장’ 쪽으로 옮길 필요가 있다. 이른바 ‘Lab to Site’다. 연구비는 논문 수, 인용 지수뿐 아니라, 실제 공정 투입 여부와 개선 효과까지 고려해 집행해야 한다. 수중 레이저가 고리 1호기 RPV/RVI를 실제로 어느 속도로 자를 수 있는지, 하이브리드·나노 제염이 오염 계통·콘크리트에서 제염수치와 폐액량, 2차 폐기물을 얼마나 줄이는지, 용융·감용이 실제 폐기물 부피를 어느 수준까지 낮출 수 있는지를 현장에서 데이터로 확인해야 한다.

### 3 정책과 비즈니스를 결합한 수출 전략 정립하기

해체 시장은 기술력만으로 승부가 나는 시장이 아니다. 발주국 정부와 규제기관은 기술 수준과 가격뿐 아니라, “문제가 발생했을 때 누가 정치·외교적으로 함께 책임질 수 있는가”도 함께 본다.

정부는 해체를 단순히 원전 수출의 부속 이슈로 다루기보다, 후방(back-end) 협력의 핵심 의제로 끌어올릴 필요가 있다. 체코·폴란드·루마니아·캐나다·대만·일본 등과의 에너지·원전 협력 채널에서 ‘해체·폐기물·후방 관리’를 공식 안건으로 올리고, G2G 협력(MOU·협정·공동 워킹 그룹)을 통해 “한국은 해체·폐기물·안전 기준을 함께 설계하고 책임 있게 실행할 준비가 되어 있다”는 메시지를 분명히 해야 한다. 그 틀 위에서 한수원·두산에너지·한전기술·한전 KPS·전문기업으로 구성된 K-Decom 컨소시엄이 구체 프로젝트를 제안·수주하는 구조를 만들어야 한다.

한국이 원전해체 시대에 의미 있는 역할을 하려면 규제 운영의 진화, 현장 중심 R&D, 정책과 결합된 수출 전략이 동시에 움직여야 한다. 어느 하나라도 뒤처지면 기술은 연구소 안에 머물고, 준비된 기업은 기회를 충분히 활용하지 못하며, 국제 시장에서는 ‘후보기업’에 그칠 가능성이 크다.

이 보고서가 제시하는 전략과 제언은 향후 해체 시장에서 준비된 참여자가 되기 위해 검토해야 할 과제들의 목록에 가깝다. 앞으로 5~10년 동안 한국이 어떤 제도와 인프라, 기술과 인력을 쌓아갈지에 따라, K-Decom의 실체와 한국 원전해체 산업의 위상이 결정될 것이다.

## Author Contacts

### 삼일PwC 경영연구원

이은영 상무

eunyoung.lee@pwc.com

김승철 수석연구위원

seungchurl.k.kim@pwc.com

### 삼일PwC 경영연구원

최재영 경영연구원장

jaeyoung.j.choi@pwc.com

## Business Contacts

### Assurance

최성우 Partner  
sung-woo.choi@pwc.com

최은영 Partner  
eun-young.choi@pwc.com

임지산 Partner  
ji-san.ym@pwc.com

### Tax

김홍현 Partner  
hong-hyeon.kim@pwc.com

박인대 Partner  
in-dae.park@pwc.com

### Deals

한정탁 Partner  
jungtak.han@pwc.com

최성흠 Partner  
seong-heum.choi@pwc.com

### Public Sector

장혜윤 Partner  
hye-yun.chang@pwc.com

이정규 Partner  
jake.lee@pwc.com

### PwC컨설팅

유원석 Partner  
won-seok.yoo@pwc.com

조운희 Partner  
woonhee.cho@pwc.com





PwC Korea의 간행물은 일반적인 정보제공 및 지식전달을 위하여 제작된 것으로, 구체적인 회계이슈나 세무이슈 등에 대한 삼일회계법인의 의견이 아님을 유념하여 주시기 바랍니다. 본 간행물의 정보를 이용하여 문제가 발생하는 경우 삼일회계법인은 어떠한 법적 책임도 지지 아니하며, 본 간행물의 정보와 관련하여 의사결정이 필요한 경우에는, 반드시 삼일회계법인 전문가의 자문 또는 조언을 받으시기 바랍니다.

S/N: 2512W-RP-151

© 2026 PwC Korea. All rights reserved. PwC refers to the Korea group of member firms and may sometimes refer to the PwC network. Each member firm is a separate legal entity. Please see [www.pwc.com/structure](http://www.pwc.com/structure) for further details.