

## KAERI의 제염 해체 R&D 협업과 기술 사업화 현황 및 전망

문제권

한국원자력연구원 해체기술연구부 책임연구원



· 연세대 화학공학 학사, 석사, 박사  
· 한국원자력연구원 제염 해체 및 방사성폐기물 처리 연구 책임연구원  
· 제염해체연구부장

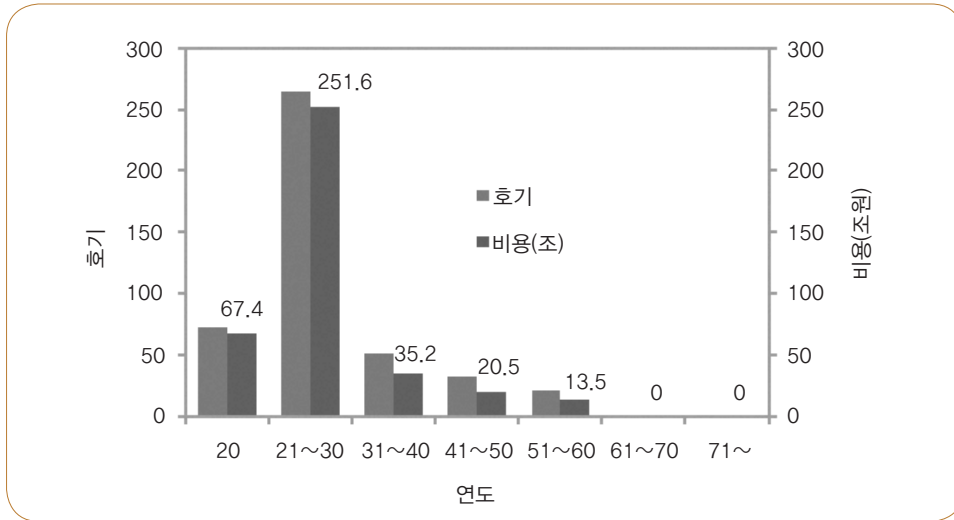
### 국내외 해체 현황

후쿠시마 원전 사고의 영향으로 더욱 촉발되긴 했지만 원전의 역사가 길어지면서 해체는 자연스럽게 세계적인 이슈로 부상하고 있다. 현재 가동 중인 원전 약 440여기의 해체 시장 규모는 350조원 이상이 될 것으로 보이며, '20~'30년 사이에 260여기가 설계 수명이 종료되어 약 250조원의 최대 규모가 될 전망이다.

국내의 경우에도 현재 25기가 운영 중이며 전체 해체 비용은 16조 이상으로 예상된다. 국내 원전은 가동 이력이 길지 않아 대부분의 경우 해체 결정까지는 아직 시간이 걸릴 것으로 보이지만 후쿠시마 원전 사고의 여파로 고리 원전의 영구정지가 결정(2017년 6월 18일)되었고 다른 원전의 수명 연장에도 영향을 미칠 것으로 보인다.

원전의 해체는 원전 사업자에게는 비용 부담이어서 수명 연장, 지연 해체 등에 따라 시장 형성의 시기는 유동적이다. 그러나 20년대에 고리 1호기를 포함하여 12호기가 설계수명이 종료될 예정이고 가동 연장의 불확실성도 있어서 본격적인 해체 시장이 조기에 형성될 가능성도 있다.

안전한 원전의 지속 운영을 통해서 저렴하고 안정적인 에너지를 공급하는 것이 더 중요하지만, 정책적으로 결정된 고리 1호기의 해체를 잘 활용하여 국내 독자적 해체 산업 역량을 확보하고 국내 해체 문제를 해결



〈그림 1〉 연도별 세계의 해체 예상 원전 수 및 비용 규모

및 해외 해체 시장 진출이 가능하도록 준비해야 할 것이다.

### KAERI의 해체 R&D 추진 현황

국내 해체 기술 역량 확보를 위해 정부에서는 2012년과 2015년 두 차례에 걸쳐 종합계획을 수립하고 진흥위원회 의결을 통해 계획을 확정된 바 있다. 2012년 미래부 주도로 추진한 1차 계획은 후쿠시마 원전 사고 이후 국내의 해체 기술 기반을 확보하기 위한 원자력시설 해체 핵심 기술 개발 계획이며, 2차는 고리 1호기 해체가 결정된 후 산업부 주도로 추진한 원전 해체산업 육성 정책 방향 수립 계획이다.

미래부의 추진 계획은 국내 해체 기술 자립과 해외 시장 진출 토대 제공을 목표로 미확보 해체 핵심 기술을 '21년까지 10년 내에 달성하도록 설계되었으며 KAERI 주도로 추진해오고 있다.

해체 핵심 기술의 전략적 확보를 위해 해체에 필요한 핵심 기술을 38개로 분류하고 국내 개발 현황 분석을 통하여 도출한 21개의 미확보 핵심 기술 개발에 주력하고 있다.

38개 핵심 기술에는 정상 가동 중지된 경수로원전 해체 기술뿐만 아니라 후쿠시마 원전 사고 환경 복원과 같이 최근에 현안이 된 기술, 원전 운영 중 현안 기술 등이 포함되어 있다.

다만, 최근 대두되고 있는 중수로 원전 해체나 SF 재활용을 위한 고방사성 설비(핫셀 등) 해체에 필요한 핵심 기술은 추가 반영이 필요한 상태이다.

또한 핵심 기술의 도출은 3년 이상의 중장기 연구를 통해 개발할 수 있는 기술들만을 대상으로 하였고, 사업자의 단기간 노력에 의해 해결 가능하다고 판단되는 엔지니어링 및 설계 기술 등은 포함하지 않고 있다.

개발 기술의 국제 경쟁력 확보를 위해 미확보 핵심



〈그림 2〉 해체 핵심 기술 개발 현황

기술 중 8개는 세계 기술을 선도할 수 있는 혁신형 개념을 도입하고 있다. 2016년 말까지 10년 중 5년 계획 추진을 통하여 10개의 추가 핵심 기술을 개발하였고, 38개 중 나머지 11개 핵심 기술은 향후 5년간의 추가 개발을 통해 완성할 예정이다.

### 해체 핵심 기술의 실용화 추진 현황

#### 1. 해체기술의 실용화 절차 및 해외 현황

KAERI에서 개발하고 있는 해체 기술은 궁극적으로 산업체에 이전되어 실용화하는 것이 목표이다. 그런데 해체 기술이 실험실적 개발에서부터 사업화에 이르기 위해서는 실험실에서 개발된 기술의 실용화 타당성이 확보되어야 한다.

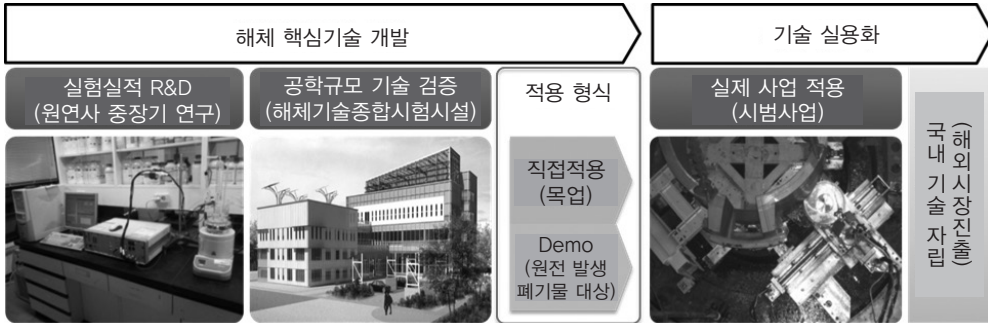
실용화 타당성 확보는 실험실 수준의 개발 기술을

실제 상황과 유사한 환경에서 기술의 성능을 확인함으로써 이루어진다. 이를 공학 검증이라 하는데 공학 검증을 통해 입증된 기술은 실용화 타당성을 확보하게 되며, 다만 사업화 시 경제성 측면에서 공정의 최적화는 필요하다.

기술의 최적화는 공학적으로 검증된 기술을 실제 환경에서 시범적으로 적용하는 과정을 통해 완성되고 상용 기술로 발전하게 된다. 국내의 실험실적 성공 기술이 실용화되지 못하는 대부분 이유도 공학 검증이 충분하지 않기 때문이며 공학 검증은 실용화의 중요한 단계이다.

#### 2. KAERI의 해체기술 실용화 추진 계획

KAERI에서 개발하고 있는 원자력시설 핵심 기술은 10년 완성 계획을 가지고 있다. 각 기술의 특성에



〈그림 3〉 KARI의 해체 핵심 기술 실용화 추진 절차

미국	영국	프랑스	일본
CP5 실증시설(ANL)	Workington 실증시설(NNL)	MAESTRO 실증 설비 (CEA)	JPDR 실증시설(JAEA)

\*CP5 (Chicago Pile 5), ANL (Argonne National Laboratory), NNL (National Nuclear Laboratory), JPDR (Japan Power Demonstration Reactor), JAEA (Japan Atomic Energy Agency)

〈그림 4〉 해외의 해체 기술 검증 및 실증 시험 시설 예

따라 3년에서 10년까지 개발의 완성 시기가 달라지는데 궁극적으로는 산업체가 활용할 수 있는 수준까지는 개발해야 한다.

미확보된 핵심 기술은 21년까지 KAERI 주도로 계속 개발하되, 기 확보된 핵심 기술 중 산업체 기술 이전 효과가 기대되는 11개 기술을 중심으로 기술의 검증 및 기술 이전을 위한 KAERI-산업체 공동 협력 과제를 추진하고 있다. 실용화 추진 과제는 11개 핵심 기술을 특성별로 분류하여 <표 1>과 같이 재구성하였다.

4개 분야에서 공모를 통하여 적합한 산업체를 선정하였으며 2017년부터 3년 동안 산업체 주도로 추진하고 KAERI는 기술의 검증을 지도하게 된다.

각 분야별 주관 산업체는, 방사선학적 특성 평가 분야에 (주)미래와 도전, 원전 1차계통 제염 분야에 한전KPS/경북대학교/선광티앤에스, 원격 절단 모사 및 공정 평가 분야는 두산중공업(주), 해체 폐기물처리 분야에는 오르비텍(주관)/선광티앤에스(참여) 등이다.

협력 과제로 도출된 기술들은 KAERI 자체의 결과

〈표 1〉 해체 핵심 기술 분야별 실용화 추진 과제 분류

분야	확보 기술명	연구 내용
방사선학적 특성평가	- 표면오염도 측정 기술	해체 시설/부지 잔류 방사선/능 측정 기술 개발 및 검증
원전 1차계통 제염	- 제염에 의한 재료 건전성 평가 기술 - 1차계통 화학 제염 기술 (HyBRID)	원전 1차계통 핵심 기기 화학 제염 기술 검증
원격 절단 모사 및 공정 평가	- 부지 규제 해체 평가 기술 - 해체 부지 복원 최적 평가 기술	해체 공정 시뮬레이터 구축 및 해체 시나리오 검증
해체 폐기물 처리	- 콘크리트 재활용, 감용, 안정화 기술 - 금속 용융 기술 - 유기 혼성 폐기물 처리 기술	콘크리트, 금속 및 해체 특수 폐기물 처리 기술 검증

이지만 반복성 및 재현성 확인 만 필요할 정도로 기술의 완성도가 높아 사업 환경만 조성되면 실용화 가능성이 높다.

이 외에 아직 개발 중인 핵심 기술들의 공학 검증을 위한 해체 기술 종합 시험시설 구축도 추진하고 있다. 이 시설은 2018년부터 설계를 시작하여 21년까지 핵심 기술의 검증 시험이 가능하도록 계획하고 있는데, 궁극적으로는 이 시설이 해체 핵심 기술의 실용화 촉진을 위한 산-학-연 협력 센터의 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

### 해체 기술의 사업화 현황 및 전망

#### 1. 해체 사업의 특징 및 사업화 장애 요인

해체 사업은 국가의 정책과 규제 제도에 의해 많은 영향을 받는다. 원전의 안전한 해체를 위해서는 SF를 타 부지로 이동해야 하는데 임시 저장이던 영구 처분이던 SF 관리 방안이 선행되어야 한다. 또한 안전한 해체에 대한 규제 정도에 따라 기간, 비용 등이 크게

영향을 받는다.

원전의 해체는 SF이 없는 상태에서 진행되기 때문에 폭발 사고와 같은 중대한 사고의 위험이 없다. 그러나 방사능이 포함된 시설의 환경 복원임을 고려하면 해체 시의 작업자 방사선 안전 규제, 발생 폐기물의 환경 방출에 따른 안전성 확보를 위한 규제 기준이 제시된다.

이 규제 기준은 IAEA에서 각 사례들을 분석 평가하여 가이드라인을 제시하고 있기는 하지만 각 나라마다 정책이 다르고 기준도 조금씩 다르게 적용하고 있다. 방사선의 환경 및 인체에 미치는 영향은 많이 연구되어 있기는 하지만 엄격한 규제 기준으로 때로는 사업자 입장에서 비용을 지나치게 감내해야 하는 경우도 발생할 수 있기 때문에 합리적인 규제 기준 제시는 매우 중요해 보인다.

또한 해체 사업은 예측하지 못한 사항의 발생으로 사업의 기간이 늘어나거나 추가 비용이 발생하는 경우가 많다. 장기간 운영 중에 발생할 수 있는 부지 오염 등에 의한 추가 업무 및 비용의 증가 요인이 된다.

해체 사업은 10년 이상의 장기간 진행되기 때문에 예측하기 어려운 불확실성을 고려한 비용 산정이 필요하다. 안전 규제 측면에서도 갑작스럽게 발생한 비용 증가 때문에 사업의 차질을 우려해 해체 계획서에 해체 비용 조달 계획을 요구하고 있다. 다만, 우리나라는 공기업인 한수원이 사업 발주자이고 일정 금액을 적립하고 있기 때문에 이런 문제를 염려할 필요는 없을 것으로 본다.

해체 기술의 사업화를 위해서는 우선 해체 시장이 활성화되어야 한다. 산업체의 입장에서는 가시적 이익이 발생하지 않으면 새로운 해체 기술이 개발되어도 기술에 대한 관심이 적어지기 마련이다.

해외 시장은 부분적으로 형성되어 해체 사업 기관이 많이 있지만, 국내에서는 원전의 SG 교체 등 유지 보수 관련 사업은 부분적인 사업이나 소형 연구로나 우라늄 변환 시설 해체와 같은 작은 해체 사업밖에는 없었다.

최근에 고리 1호기 해체가 결정되면서 해체 산업에 대한 관심이 생기긴 했지만 국내 기술 개발이 늦게 시작되었고 기술 개발의 실용화를 촉진시킬 수 있는 시험 시설 등 인프라의 부족과 전문 인력은 선진국에 비해 절대적으로 부족한 실정이다.

국내에서 개발된 신기술의 해체 사업 적용에 대한 규제기관의 확실한 지침 부재도 해체 기술 사업화 촉진의 장애 요인이다. 단지 안전성의 문제로 해외에서 입증된 기술 적용을 요구한다면 국내 고유의 기술 실용화의 길이 묘연해진다.

국내 고유의 원천성 있는 기술 대신에 해외 기술을 도입하여 해체를 한다면 산업체의 기술 도입에 따른 수익률은 저하되고 해체산업 경쟁력 확보도 어려울 것으로 보인다.

## 2. 해외 해체 시장 및 산업 현황

국내 산업체가 해외 해체 시장 진출을 위한 환경 분석으로 지역별 시장 현황과 사업 환경을 분석하여 <그림 5>에 나타내었다.

세계 원전 해체 시장을 미국, 캐나다가 있는 북미 지역, 영국을 포함한 유럽, 일본 동유럽 및 기타 지역의 4개 그룹으로 분류하였다. 그룹별 시장 규모로 보면 동구 및 기타 지역이 많지만 러시아를 제외하면 적은 원전 수의 많은 나라들이 포함되어 있다.

단일 국가로 보면 100여기의 해체 대상 원전이 있고 실제로 15기를 해체한 미국이 가장 활성화 되어 있다. 원전 가동을 경제성 관점에서 접근하기 때문에 설계 수명을 연장해서 운영하는 경우가 많아 시장 형성의 불확실성이 많은 것이 특징이다.

물론 안전성 확보를 위해 비용이 많이 든다고 판단 되면 해체를 결정하기 때문에 해체 원전이 생길 수도 있다. 현재까지 해체한 미국의 상용 원전 대부분 원전이 이러한 경우에 해당된다.

미국은 Utility가 스스로 하는 경우보다는 입찰에 의한 오픈 경쟁을 하는 경우가 많아 산업체의 경쟁력만 확보된다면 진출이 가능하다. 그러나 고정 가격으로 계약하기 때문에 해체 중에 예상하지 못한 상황 발생에 따른 위험 요인이 있다.

유럽은 20년 이내에 100여기의 해체 수요가 예상되며 해체 시장 활성화가 예상된다. 유럽 국가들 간의 경계가 없고 해체 전문 기업들이 가장 많은 지역이다.

특히, 독일은 원전 제로 정책을 선언하고 해체 분야에서 세계 시장 확보에 대한 야심이 크다. 해체 사업은 분야별 컨소시엄이나 JV (Joint Venture)를 통한 사업 발주가 이루어지고 있다. 시장이 열려 있어서 경쟁력 있는 기술의 진입은 가능하나 EU 자체의

국가별 해체시장 분석

Market	North America	EU	JAPAN	Eastern Europe & others
Size	118	117	48	152
Cost	90.4	126	36	129
Boom-up	2030	2020	2020	2020
Peak	2045	2035	2043	2035
Control	Utility	Varied	Utility	Gov.
Accessibility	Open	Difficult	Open	Varied
Competition	high	High	high	Rel. low



Primarily CYCLE D&D market



2<sup>nd</sup> biggest market (58 reactors)



RAMPED-up Early-end



Still strong D&D demand on Fukushima



Gov. control Lack of Proj. M. Strong Sci. background



Rapid Nucl. Growth Large SOE Good financing

국가별 해체시장 분석 요약

	미국	EU	일본	동구권 및 기타
해체 수요	2035년까지 38개의 원전 해체 수요 발생	20년 이내 100여개의 원전 해체 수요 발생	가동정지 원전을 비롯 단계적 해체 수요 증가	장기적 해체 수요 증가
시장 예측	다양한 D&D 전략 및 수명 연장 등에 따른 시장예측 불확실	상대적으로 해체 시장 확대 중	10년 수명연장 정책에 따른 '40년대 피크 예상	20년대 중반 동구권 해체 수요 증가 (중국시장 향후 40년 이후)
사업 형태	Utility의 self-Perform 또는 fixed-price 계약	컨소시엄 및 alliance, 또한 JV 등의 수평적 계약	자국 기업위주의 시장형성	주요 정부주도의 해체 SOE에 의해 진행
시장 진입	진입장벽은 낮으나 경쟁 강도는 높음	경쟁력 있는 기술의 시장진입이 가능하나 EU 자체 시장장벽 여전히 높음	자국 기업의 기술력, 자금력 등에 의해 외국 업체 시장진입이 다소 어려움	정부주도의 vertical supply chain에 의해 다소 시장진입이 어려움
위험 요소	Fixed-price 계약에 의한 사업 경제성 위험	PBO 계약자의 시장 점유가 상당히 높음	Fukushima 사고에 따라 현 해체 시장의 방향이 유동적임	Financial 불확실성 존재
종합 분석	시장의 불확실성이 높으나 경쟁력 있는 사업체의 진입 가능성은 높음	시장 활성화 전망은 밝지만 미래 시장의 경제성은 제한적	경쟁력 있는 기술의 시장진입 가능하나 일본내 거대 vendor와의 경쟁 치열	Cost-effective 전략에 따른 시장 진입 가능성이 상대적으로 높음

〈그림 5〉 해외 지역별 해체 시장 현황 및 사업 환경

시장 장벽이 여전히 높다. 특히 PBO(Parent Body Organization)의 시장 점유가 높다.

일본은 후쿠시마 원전 사고 이후 원전 제로 정책을 선언했다가 에너지 문제로 원전 운영 정책으로 선회하고 있어서 당초 예상처럼 대대적인 해체 시장 형성은 어려울 것으로 보인다. Utility가 스스로 사업을 추진하면서 부분적으로 자국 내 산업체의 기술력으로 해결하고 있어 외국 업체, 특히 한국 업체의 시장 진입은 매우 어려울 것으로 보인다.

마지막으로 동구 및 기타 지역은 20년 대 중반부터 해체 대상이 증가할 것으로 예상되며 장기적으로도 꾸준한 해체 수요가 발생할 수 있는 지역이다. 정부

주도로 사업이 진행되어 시장 진입의 어려움은 있으나 자본력이 약하기 때문에 비용 절감 전략으로 접근하면 상대적으로 진입이 용이할 수도 있다.

세계적으로 원형로 및 실증로 포함 원전 19개가 해체되었고 150여기 이상이 영구 정지 또는 일부 해체 단계에 있어서 미국, 유럽을 중심으로 여러 해체 산업체가 활동하고 있다. 해체 산업체가 대개는 강점이 있는 분야별로 특화되어 있지만 산업체의 규모가 커지면서 주계약 사업자가 해체 사업을 관리하고 부분적으로 용역 계약하는 방식으로 추진하기도 한다. 대표적인 분야별로 강점이 있는 해체 산업체와 일부 업체의 매출 예를 〈그림 6〉에 나타내었다.

D&D 관련산업



D&D 관련 기업 분야별 분석



주요 해체 관련 기업 데이터 분석

Company	Revenue (MUSD)	Work-force	Years	Projects	Strengths	Note
AREVA	219 (2013)	4,017	>40	Chooz A,	High performance Decon.	D&D, cleanup
ENERCO SOLUTIONS	150 (2014)	-	>20	BRP, CY, YR, Zion, etc.	-	-
Studsvik	64 (2012)	1,100	>65	Ndcon, Obrigheim	-	D&D, waste treat.
NUKEM	-	-	>25	Brenniis EL4	remote controlled robot	-
Westinghouse	-	~5,000	>50	-	Efficient cutting tech.	-
CH2MHILL	>700	-	~70	TMI, MY, CY	ENR#1 Project management	-
Stempelkamp	234 (2012)	500	>30	Stade, Zion	PM & dismantling	-
NUVIA	251	1,500	~25	Kozloduy, Sellafield	all fieldD&D	-

<그림 6> 세계의 주요 해체산업체 현황

아직 본격적인 시장이 형성되지 않아 연 3천억 이 내의 소득을 보이고 있지만 해체가 10년 이상 장기간에 걸쳐 진행되어 지속적 수입은 가능하고, 향후 그 규모는 크게 증가할 것으로 본다.

3. 해체 기술 사업화 방안

세계적으로 해체 시장은 확대되어 2030년 말에 최대가 될 것으로 보인다. 그러나 미국, 유럽 등에서 시장이 열려 있어서 외견상 진입 가능성도 있으나 기술적, 정책적 내부 장벽은 생각보다 높은 편이다.

이러한 세계 해체 시장에 진출하기 위해서는 국내 산업체의 국제 경쟁력 있는 해체 기술 역량 확보가

관건이다. 미국, 유럽, 일본 등의 원자력 선진국은 이미 다양한 해체 경험을 통해 독자적 해체 기술을 확보하고 있기 때문이다.

다행인 것은 선진국의 해체 사업이 기존의 원전 건설, 운영의 경험을 가진 회사들이 해체에 특화된 기술이 아니라 많은 부분을 이미 개발된 타분야 유사 기술을 응용해 적용하고 있어서 경쟁력 확보가 가능하다는 것이다.

개발되고 있는 기술이 사업화에 이르기까지는 핵심 기술의 개발과 실용화 타당성 검증 및 시범 사업 등 단계적 절차가 필요하다. 사업화의 주체는 산업체이고 사업화의 선결 조건은 해체 시장의 형성이다.



〈표 2〉 해체 기술 분야별 기업군 조성 특성

기술 분야	기업군 조성 특성
사업 관리	전체 기술과 엔지니어링 전반에 걸친 전문성 필요
방사선 측정·분석	현재 기술 수준은 높으며 중소기업들이 경쟁 체제로 존재하며 소규모 사업 경험 보유
제염/폐기물 처리	해당 기술 분야 중소기업의 참여가 가능
절단/철거	대형 설비의 운영 등 중견 기업의 참여 필요

고리 1호기의 해체 사업이 국내 해체산업 역량 확보 및 생태계 조성에 중요한 이유도 여기에 있다.

해체 산업은 해외의 경우에서 보는 바와 같이 해체 전문 기업 형태가 바람직하나 기술 분야별 특화된 산업체 기반이 필요하다. 해체 사업 관리, 방사선 측정·분석, 제염, 해체, 폐기물 처리 등의 분야별 기업군 조성이 가능하리라 본다.

원전 1호기 해체를 위해서는 10여개의 산업체 참여가 가능하고, 각 분야별 기업간 경쟁이 가능한 규모를 위해서는 기술 분야별로 2~3개 기업은 필요할 것으로 보인다. 해체의 기술 분야 별 기업군 특성을 〈표 2〉에 나타내었다.

이러한 해체산업 생태계 조성을 위해서는 역량 확보의 초석을 제공하는 해체 시범 사업이 필요하다. 원전 유지 보수 과정에서 발생한 폐기물(퇴역 SG, 폐수지/폐활성탄 등)의 처리 사업과 최초 호기 해체는 국내 산업체 컨소시엄이 참여하는 시범사업으로 추진하여 국내 해체 기술 자립과 해체산업 생태계 조성의 기회로 활용할 필요가 있다.

국내 해체 산업체의 국제 경쟁력이 확보되면 30년 대에는 해외 시장 진출도 가능하리라 본다. 특화된 강소기업의 컨소시엄으로 선별적 해체 시장 진출 방안이 유력하리라 판단된다.

우선 기술 장벽이 비교적 낮고 자체 자본력이 충분

치 않은 동구권, 남미, 아시아 등을 대상으로는 국내 기업의 장점인 고효율 엔지니어링 통한 비용 절감 방향으로 추진하고, 선진국 대상으로는 특화된 단위 기술을 활용하여 해외 업체의 컨소시엄을 형성해 진출하는 방안이 있다. 원전 1차계통 신화학 제염, 차세대 원격 절단 등 세계 선도형 최신 기술로 경쟁하면 가능하리라 본다.

## 결언

원자력의 역사가 깊어지면서 해체 문제는 선택이 아니라 필연적인 이슈로 다가오고 있다. 원자력의 지속적 이용을 위해서도 주기의 마지막에 해당하는 해체는 필수적이다.

시설의 운영자 측면에서는 비용 부담이지만 기술 소유의 산업체에게는 수익 창출의 시장이 될 가능성이 많다. 해외 선진국에 비해 비록 늦게 기술을 개발하고 있지만 원자력 이용의 경험과 우수한 전문 인력을 활용하여 개발되고 있는 세계 선도형 핵심 기술의 개발을 성공적으로 완수할 경우 국내 해체 문제 해결은 물론 다가올 세계 해체 시장 진출도 가능하리라 본다.

이를 위해서는 국내 고유의 해체 기술 자립 정책을 기조로 정부, 연구기관, 사업자 및 산업체의 일관성 있는 추진 계획과 협력 의지가 중요하리라 본다. 🌟