



해체 기술 특성 및 국내 산업 인프라 현황

박진호

한국원자력연구원 제염해체연구부 위촉연구원

고려대 화학공학 박사

한국원전연료(주) 재변환 공장 건설 (1986~1990)

한국원자력연구원 정련, 변환, 해체 (1975~2011)

한국원자력연구소 위촉연구원 (2012~)

우라늄 변환 시설(년 100톤 규모) 설계, 건설

우라늄 재변환 시설(년 200톤 규모) 설계, 건설

의료용 동위원소(Mo-99) 생산 시설 설계

연구용 원자로 및 우라늄 변환 시설 해체

서론

원전을 포함하는 모든 원자력 시설은 노후화되어 더 이상 운전이 불가능하거나 시설의 효율 가치가 떨어져 운전할 필요가 없을 때 시설이 운전되던 자연 환경으로부터 영원히 퇴출시키는 해체 과정을 거치게 된다.

원자력이 중요한 인류 에너지원의 하나가 된 지 이미 50년이 경과하여 많은 발전용 시설이 노후화 되었으며 과거 냉전 시대에 원자력이 국력의 상징이라 믿어 많은 국가들이 건설한 원자력 시설의 효율 가치가 상실되게 되었다. 이에 따라 1980년대 후반에 들어오면서 많은 원자력 시설이 해체되기 시작하였다.

우리나라는 원자력 발전을 1970년 후반에 시작하여 가장 먼저 운전을 개시한 고리 1호기는 설계 수명 30년을 넘어 1차 연장 운전 중이며 월성 1호기도 연장 운전을 결정하여야 할 때가 되었다.

원전의 운영자는 원전의 연장 운전을 기본 정책으로 하고 있는 것으로 알려져 있으나 2011년 일본의 후쿠시마 원전의 사고 이후 조기 해체의 가능성도 의논되기 시작한 것도 사실이다.

원전의 해체 비용은 호기 당 6천억 원 규모의 막대한 비용이 소모되어 현재 국내에서 운전되고 있는 원전만으로도 70년간 약 14조원이 투입되어야 한다. 조기 해체의 가능성과 막대한 비용의 효율적이고 경제적인 집행을 위하여 국내에서도 원전의 해체에 대비하여야 한다.

원전 해체 대책으로서는 일반적으로 아래와 같은 것들을 결정 또는 수립하여야 한다.

〈표 1〉 즉시 해체의 경우 해체 단계의 구분

해체 단계	소단계	시기 (시작/완료)	일반 원전 해체 시작점(년)	연구로 해체 시작 시기
해체 전 단계	해체 기획 단계	해체 사업 시작	-4	1986
		운전 영구 정지		
	운전 영구 정지	운전 영구 정지	0	1996
		해체 준비		
해체 계획 수립 및 인허가	해체 계획 수립 및 인허가	운전 영구 정지	0	1997
		해체 마무리 단계		
해체 단계	해체 준비	인허가 완료	4	2000
		주요 시설 해체 개시		
	해체 활동	주요 시설 해체 개시	5	2001
		주요 시설 해체 완료		
마무리 단계	해체 마무리	주요 시설 해체 완료	11	2008
		해체 사업 종료		

* 일반적인 원전 해체 시작점은 운전 영구 정지 시점을 0으로 한다. 예를 들면 -4는 4년 전 +4는 운전 영구 정지 4년 후이며 전체 해체 기간은 13년이 된다.

- 해체에 관한 정책과 해체 시기
- 규제 제도의 확립
- 해체 비용의 마련
- 해체 폐기물 관리 방안
- 해체 기술 확보와 산업 인프라 구축

본고에서는 국내에서 수행된 연구용 원자로 및 우라늄 변환 시설 해체 사업에서 얻은 경험을 바탕으로 원전을 포함하는 원자력 시설의 해체 기술과 해체 사업 수행 특성을 분석하고 국내 원전 해체 대책의 하나인 산업 인프라 현황을 살펴보고 이를 토대로 가능한 산업 인프라 구축 방법을 살펴보기로 한다.

해체 기술 특성

1. 해체 기술의 종류

해체 사업을 수행하는 방식은 일반적으로 운전 영구 정지 후 바로 해체하는 즉시 해체, 일정한 준비 작업을 수행한 후 약 30년 간 밀봉 관리(safstor) 기간을 두는 지연 해체, 그리고 구조적으로 또 화학적으로 안정한 물질로 중요 시설을 영구 밀봉하는 entombment의 세 가지로 구분한다.

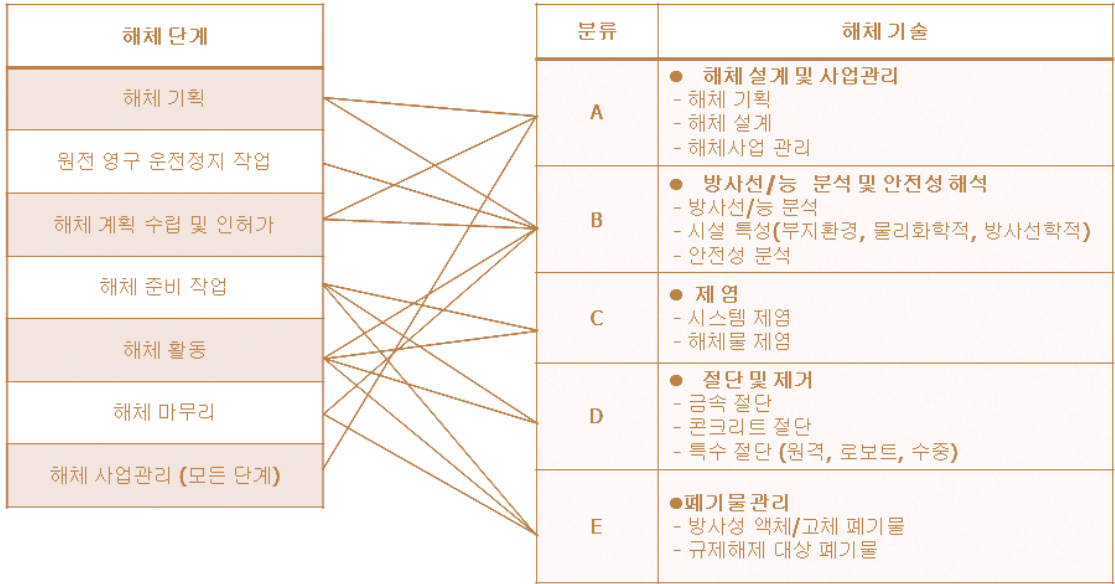
방식에 관계없이 해체 사업이 진행되는 과정을 구

분할 필요에 따라서 OECD/NEA에서는 시설의 방사선학적 상태에 따라서 stage 1, 2, 3로 구분법을 제안하기도 하였지만, [1] 사업 관리 측면에서는 해체 전 단계(pre-decommissioning), 해체 단계(main decommissioning) 그리고 해체 마무리 단계(post decommissioning)로 구분하는 것이 편리하다.

위 각 단계는 다시 몇 개의 소단계로 구분하는 것이 일반적이며 즉시 해체의 경우 이들의 단계명, 시기나 소요 기간은 〈표 1〉과 같다.

이러한 해체 각 단계에서 필요로 하는 기술들은 그 특성상 동일하지 않다. 즉 전혀 다른 기술을 사용하거나 동일한 기술을 사용하였다고 하여도 그 목적이 달라 적용 특성이 다르다.

예를 들면 시설 특성 분석 과정에서 시설 내의 방사능 분석은 적용 기술의 선택, 작업 환경의 결정 등을 위하여 수행되는 것이므로 이에 적합한 정확도를 얻으면 충분하지만, 폐기물의 규제 해체를 위한 방사능 분석은 극저준위 방사능이 비교적 정확하게 분석되어야 하며, 전자는 현장에서 수행되어야 하는 것이 많으나 후자의 경우 분석보다는 시료의 대표성 확보가 분석 자체 기술보다 더 중요하다. 그렇다고 하여도 해체에 관련된 기술을 크게 나누면 〈그림 1〉과 같이 해체 설계 및 사업 관리, 방사선/능 분석 및 안전성 해석, 제염, 절단 및 철거, 그리고 폐기물 관리의



〈그림 1〉 각 해체 단계에서 소요되는 필요 기술 및 이들의 분류

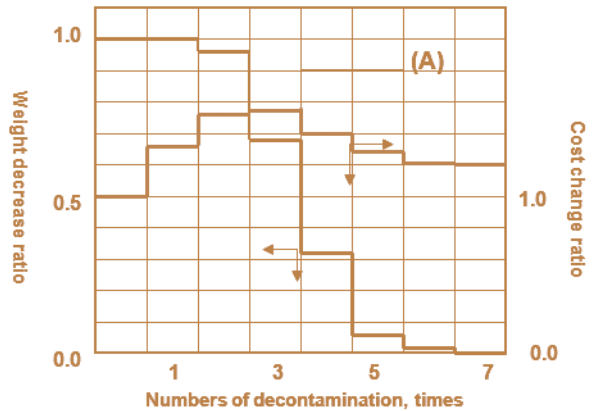
다섯 가지로 나눌 수 있다. 이러한 기술 분류는 기술의 확보 여부나 산업 인프라 구축 여부의 조사시 기술 분류로 사용하면 편리하다.

2. 해체 기술 특성

원자력 시설을 해체하기 위하여 사용되는 기술은 아래와 같은 특성을 가지고 있다.

- 다양한 분야의 기술 집약형 기술
- 관련 정책이나 주변 환경 의존성 큼
- 해체 활동의 자동화/최적화 어려움
- 최첨단 기술보다는 입증된 기술을 선호
- 해체 도중 예상하지 못한 상황 발생
- 해체 비용 예측의 부정확성
- 해체시 다양하고 많은 양의 폐기물 발생

전 해체 과정에서는 다양한 기술을 필요로 한다. 연구용 원자로와 우라늄 변환 시설을 해체하고 있던 2006년 당시 총14명으로 이루어진 해체사업팀과 연구원 지원팀 인력의 전공을 보면, 원자력·기계·화학 등을 포함한 8개의 다른 분야로 구성되어 있다. 또 다른 예로서 재처리 시설을 해체하고 있는 프랑스



〈그림 2〉 제염 횟수에 따른 방사성폐기물량의 감소와 폐기물 처분 비용의 증가

Marcoule Center의 연구개발 분야를 보면, 로봇에서 해체 비용 평가 및 예측까지 매우 다양하며, 이 두 예들은 해체 기술의 다양성을 반증하고 있다.

또 해체 기술의 선택이나 선택된 기술의 효율성은 정책에 따라서 많이 좌우될 수 있다. 한 예로서 연구로 2호기 수조 내 알루미늄 덕트의 해체 및 제염 과정을 들 수 있다. 덕트는 적당한 크기로 세절되어 제염되었으며 해체 사업 도중에 채택한 방사성폐기물에 관한 정책은 '최소화'이었으므로 오염도가 규제 해체 이하로 감소할 때까지 반복적인 제염이 수행되

었다. 이 과정에서 제염 횟수에 따른 방사성폐기물량과 처분까지의 비용의 변화를 보면 <그림 2>와 같다.

여기에서 보는 것과 같이 폐기물 최소화 정책에 따라 수행된 반복 제염의 결과로 모든 닥트 해체물이 방사성폐기물로 처분되지 않게 됨에도 불구하고 해체 비용은 증가하게 되었다. [2]

그러나 이러한 반복 제염의 비용 변화가 모든 해체물에 적용되는 것은 아니며 경우에 따라 매우 다른 양상을 보이므로 제염 횟수의 표준화나 최적화는 가능하지 않았다.

해체 전 단계에서 수행되는 시설의 특성 평가에서 방사선학적 상태를 정확하게 분석하면 해체 도중 예기치 않은 상황의 발생을 최소화할 수 있다고 알려져 있기는 하지만 예기하지 않았던 상황의 발생은 피할 수 없다.

연구로 2호기 해체 과정에서는 열중성자를 이용한 실험을 위한 장치인 thermal column의 알루미늄 라이너의 높은 방사능을 예로 들 수 있다. 방사화되지 않는 알루미늄에 대한 예측과는 다르게 알루미늄의 용접에 사용하였던 불순물 때문에 선량률이 0.5m 거리에서 12.5 R/hr로 높았으므로 당초 계획한 작업자의 근접 수동 절단 방법은 사용할 수 없었다. 따라서 몇 개의 가능한 후보 기술들을 선정하고 이의 기술성, 경제성, 안전성, 기술 접근성 등을 종합 평가하여 원격 플라즈마 아크 절단기를 라이너의 절단 장비로 선택하였다. [3]

세계적으로 해체가 시작되는 1980년 대 후반에는 해체 대상물의 위치가 방사선 구역이라는 특수성 때문에 로봇, 가상 공간에서의 모사, 레이저 제염 등 최첨단 기술이 많이 사용될 것으로 기대하여 선진국에서는 이들의 기술 개발에 많은 투자를 하였다. 그러나 실제 해체 과정에서는 이들 첨단 기술보다는 시장에서 얻을 수 있는 장비나 이들의 개량 장비, 즉 기술이 이미 입증된 기술이 더 많이 선택되었다. 이는 해체 기술은 개발해서 적용하는 것도 필요하겠으나 기존 기술의 활용을 더 고려하여야 한다는 것을 의미한다.

해체 사업 수행 특성

세계적으로 해체 사업을 수행하는 방법은 보는 관점에 따라서 여러 가지로 구분할 수 있으나 사업의 관리 및 작업 수행 관점에서 세 가지로 나눌 수 있다.

처음은 관리와 작업 수행을 모두 다른 기관에 의뢰하는 방법으로서 영국과 스페인의 예를 들 수 있다. 영국에서는 원전의 운전이 종료되면 원전 운영자는 국가기관인 NDA에 해체에 관한 모든 책임과 권리를 이전하며 NDA는 각 해체 부지별로 관리 회사를 지정하고 관리 회사는 전 해체 사업을 관리하는 동시에 작업 수행 회사와 계약에 의하여 실제 절단, 제염, 폐기물 처리 등의 해체 작업을 수행하게 하는 방법을 채택하였다.

두 번째는 관리와 작업 수행을 모두 원전 운영자가 직접 수행하는 방법으로서 일본의 JAPC가 수행하는 Tokai-1호기 해체의 경우에서 예를 찾을 수 있다. 이 경우에는 원전 운영자인 JAPC가 해체 사업을 관리하는 동시에 작업도 자신의 조직에 의하여 수행한다. 다만 몇 가지 반복적인 업무나 특수한 기술이 필요한 경우 외부의 수행 회사와 그 업무만을 계약에 의하여 수행하도록 하고 있다.

세 번째로 사업은 총괄적으로 원전 운영자가 관리하고 작업 수행을 위한 관리와 직접 작업은 타기관에 의뢰하는 경우이다. 프랑스는 작업 수행을 위한 관리를 위하여 원전 운영자 EDF는 자회사인 CIDEN을 설립하여 이를 담당하도록 하고 있으며 CIDEN이 실제 작업 수행 회사와 계약에 의하여 해체 작업을 수행하도록 되어 있다.

이에 비하여 미국의 몇 개의 원전 해체의 예에서 보면 이러한 작업 수행과 작업 수행 관리를 몇 개의 수행 회사의 JV나 컨소시엄에 계약에 의하여 이전하여 해체 사업을 수행한다.

이 중 어떤 것이 가장 유리한가에 관한 일반적인 결론은 없으며 국가나 원전 운영자의 정책과 주변 환경에 의하여 결정된다. 그러나 해체사업의 수행을 위하여 관리 조직과 작업 수행 조직 모두 필요하며 균형 있게 발전되어야 하는 것은 확실하다.

작업 수행 회사는 미국, 프랑스, 영국 및 독일과 같



〈표 2〉 해체 선진국들의 해체 관련 정책 및 규제 법규 현황

국가	해체 방식에 관한 정책	해체 시기에 관한 정책	해체 규제 관련 법규
미국	No	Yes	10CFR, REGuide1,184
영국	100년 밀봉 관리	검토중	LC35
프랑스	즉시 해체	GCR ; Yes	TSN Act
		PWR ; 발표 없음	
독일	즉시 해체	Yes (탈원전)	AET, AtVfV
일본	즉시 해체	Yes (현재는 정확한 발표 없음)	핵원료 물질, 핵연료 물질 및 원자로 규제에 관한 법률

이 원전과 재처리 시설의 해체가 활발한 국가에서 수도 많으며 그 종류 또한 다양한 것으로 조사된다. 이는 수요-공급의 원칙에 따라서 해체의 수요가 있는 국가에서 자생적으로 설립되어 발전되어 왔음을 알 수 있다.

국내에서도 원전의 해체로 작업 수행 회사의 수요가 있으면 설립될 것으로 예상할 수 있으나 이는 해체가 시작된 1980년 대 후반 상황으로 판단하여야 한다. 근래에는 자생적으로 발생한 작업 수행 회사들은 인수, 병합, 구입 등으로 큰 규모의 회사로 발전하여 메이저 회사의 형태를 가지게 되었으며 그 예는 미국의 Energy Solution, 프랑스의 ONET, 스웨덴의 Studsvik 등을 들 수 있다. 이들 회사들의 특징은 아래와 같이 생각될 수 있다.[4]

- 모기업은 원전의 유지 보수, 주요 기기 제작 등을 담당하던 회사가 많음.
- 대개의 경우 다국적 기업으로 해체 사업상의 국경 소멸.
- 해체 사업 관리와 작업 수행, 두 가지 기능 모두를 갖추고 있음.
- 큰 규모의 기업임에도 불구하고 해체 모든 분야를 하나의 기업이 담당하는 것이 불가능하여 이들 사이에 JV나 컨소시엄을 만들어 해체 사업을 담당.

국내 산업 인프라 현황

해체와 관련 산업 인프라에 가장 영향을 주는 인자는 국가와 원전 운영자의 해체 방식과 해체 시기에

관한 정책으로서 해체 선진국에서는 〈표 2〉와 같이 이에 관한 정책을 확정하여 적용중이다. 이와 같은 정책 결정은 작업 수행 회사들의 발생과 발전 시기를 결정하기 때문이다.

근래에 발표된 자료에 의하면[5] 국내 원전의 해체 시기는 빠르면 2019년이며 늦으면 2029년이 된다. 해체 개시 시기가 2029년이면 작업 수행 회사들이 15년 후에 수행될 사업을 위하여 지금부터 준비나 투자한다는 것은 기대하기 어렵게 된다. 국내에서는 근래에 와서 해체 정책 등에 관한 검토가 시작되어 이러한 정책들이 논의되기 시작했지만 아직까지는 확실한 정책은 발표되지 않았다.

국내 해체 규제에 관한 조항은 원자력법 및 그 시행령/시행규칙에 원자력 시설의 해체 책임과 해체 계획서 제출 및 허가 취득의 의무를 규정하고 있다. 그러나 해체를 위한 시설의 규제 범위, 정확한 기술 기준, 안전 관리 기준 등 실무를 위한 조항은 전혀 규정되어 있지 않아 다른 분야의 조항들을 묵시적으로 준용하고 있는 실정이다.

2011년 통합 규제 검토 서비스 수검 결과, 국내 원자력 시설의 해체 제도 정비가 필요하다는 권고에 따라서 현재 제도를 개선 중에 있으므로[6] 원전의 해체가 결정될 때까지는 규제 제도가 완성될 전망이다.

국내 해체에 관한 경험은 한국원자력연구원이 수행한 연구용 원자로 2개 호기와 우라늄 변환 시설의 해체가 전부이다. 그러나 이들 해체 사업 도중에 해체 사업 관리와 작업 수행 능력의 배양을 위한 다양한 연구 개발을 수행하였으며 원자력 중장기 연구 사업의 일환으로 수행된 선진 기술의 개발을 통하여 해체와 관련된 기초 기반 기술은 대부분 확보되었다.

그러나 원전 적용 가능성을 시험을 통하여 확인하고 이들 기술을 좀 더 선진화할 필요는 있다. 국내 산업계도 해체에 직접 참여한 경험은 원자력연구원의 연구시설 해체뿐이다. 그러나 원전의 방사선 안전 관리, 유지 보수, 원전의 건설 등 원자력 관련 51개 기업을 조사한 결과 다수의 기업이 해체 참여 능력이 있다고 판단되거나 참여에 흥미가 있어 소규모이지만 준비하고 있다고 조사되었으며, 그들은 해체에 직접 참여한 경험은 없어도 준용 전문 기술을 보유하고 있는 것으로 판단되었다. 그러나 해체에 참여를 위하여서는 그들의 기술 방향을 개선하고 이들 사이의 integration이 반드시 필요하다는 결론을 얻을 수 있었다.

결론 및 건의

현재 국내의 해체 관련 산업의 인프라는 전혀 없으며 이 원인은 전체적으로 아직 원전 해체의 필요성이 없기 때문에 공급이 없었던 것으로 판단된다. 그러나 해체의 공급이 시작되어 이러한 인프라가 자생적으로 발생하기를 기대한다면 막대한 국내 원전 해체 시장은 외국의 차지가 될 것으로 예상되어 적절한 시기에 인프라의 구축을 유도하여야 할 것으로 보인다. 이러한 해체 산업 인프라 구축에 고려하여야 하는 해체 기술 및 국내 현황 특성은 아래와 같다.

- 해체 사업을 수행하기 위하여 연구 조직의 background가 있어야 함.
- 해체 사업을 수행하는 조직은 관리 조직과 작업 수행 조직으로 구성
- 해체 관련 기반 기초 기술은 확보되어 있으며 해체 준용 기술을 확보하고 있는 기업이 많으나 이들의 integration이 필요함.

이러한 특성을 고려하여 정부 등이 주도하는 top-down 방식과 해체 작업 수행 기업들이 주관이 되는 bottom-up 방식이 조합된 해체 산업 인프라 구축 방안을 제안할 수 있다.

전자는 국내 원전 해체를 위한 사업 주관 기관을

선정하고 이를 중심으로 현장 지식을 확보하고 있는 원전 운영자, 연구 개발과 해체 사업의 경험이 있는 원자력연구원, 설계와 안정성 평가의 전문 기관인 설계 회사, 그리고 작업 수행 기업들을 묶어 이들 사이의 integration을 수행하는 것이다.

그러나 구조만 조직하는 것은 의미가 없으며 표준 해체 절차서나 모의 해체 계획서를 공동으로 작성하여 상세한 국내 기술 현황과 해체 과정에서의 수요 및 공급 방안을 검토하여야 하며 이의 시작 시기는 원전의 해체가 시작되기 적어도 6년 전이 바람직하다는 전문가의 의견이다.[7]

bottom-up 방식에서는 해체 관련 기술을 보유하고 있는 기업들이 준용 기술을 더 발전 또는 개선하는 작업과 소분야별 integration을 시도하여야 한다.

이러한 구축의 초기에는 이러한 개선과 integration을 위하여 국가의 지원이 반드시 필요하다는 것을 인식하여야 한다. 🌐

<참고 자료>

[1] M.W. Davies et al., "A Review of the Situation of Decommissioning of Nuclear Installation in Europe", Report EUR 17622 1977.

[2] 박진호, "Utilization of Decommissioning Information Management System", The 2nd RCM on Innovative and Adaptive Technologies in Decommissioning of Nuclear Facilities", 13~17, Nov. Gaswick, 2006.

[3] 박진호 등, "원자력시설 제염해체 사업", 연말 보고서, KAERI/RR-2508/2003

[4] 박진호 등, "중장기 원전 해체 대책에 관한 연구", 한국수력원자력(주) 보고서, 2011.

[5] 서대권, "한수원 원전해체 기술개발 로드맵 추진현황", 원전해체 기술역량 강화워크숍, 대전 5월 2일, 2013.

[6] 안상면, "원전 해체관련 규제요건 개발 방향", 원전해체 기술역량 강화워크숍, 대전 5월 2일, 2013.

[7] M. Laraia, "Present status and future prospects of worldwide NPP decommissioning", 전문가자문회의, March, 2011.