

국내 원전 해체 기술 개발 현황과 계획

김 희 근

한수원 중앙연구원 방사선환경연구소 해체기술팀장

“

원전의 안전한 해체를 위해서는 원전의 운전 이력과 방사성 오염 정보 등 원전의 운영과 관련된 특성 정보(Characteristic information)가 절실히 필요하다. 이에 따라 많은 국가에서는 원전 운영자가 직접 수행하거나 또는 원전 운영자가 별도 자회사를 설립하여 추진하고 있다. 또한 국내 원전의 해체에는 해외 원전의 해체 경험과 교훈이 충분히 반영되어야 하며, 새로운 기술의 개발은 물론 국제적인 협력과 공동 연구가 필요하다. 궁극적으로 해체 비용은 전력 생산 원가에 반영되므로 국민의 부담을 최소화하기 위한 경제적 해체 방안을 강구해야 하며, 이와 더불어 안전한 해체 방안을 마련해야 한다.

”

서론

원전의 해체는 운전 수명이 종료된 원자력발전소를 안전하게 해체하여 처리하고 처분하는 과정으로, 원전 안전의 마지막 단계이다.[1] 원자력 선진국에서는 오래 전부터 국가적 차원에서 원전 해체에 관한 기술 개발에 박차를 가해, 상당한 기술의 진전을 이루었다. 이에 따라 원전 해체에 대한 기술 수준이 연구 개발 단계에서 실용 기술의 적용 단계로 접어들었다. 이러한 기술의 성숙과 원전 해체 시장의 상업성을 고려하여 원전 해체 전문 기술 회사를 설립하여 원전해체 시장에서 치열하게 경쟁 중에 있다.[2, 3]

우리나라는 1978년 고리 1호기의 운전을 시작으로 현재 23기가 운전 중에 있다.[4] 이들 국내 원전의 운전 현황과 해체와 연관이 깊은 설계수명을 <표 1>에 나타내었다. 한편 신월성 2호기, 신고리 3, 4, 5, 6호기, 신한울 1, 2, 3, 4호기 등 9기의 원자력발전소를 건설 중에 있다.[4] 국내에서 운영 중에 있는 원전은 대부분 30~40년 수명으로 설계되었기 때문에 2020년 이전에 2기 원전이 설계수명에 다다르며, 2030년까지 많은 원전의 설계수명이 종료될 예정이다.

국내에서 원전 운영이 계속되고 있고 많은 원전이 설계수명에 도달되고 있지만, 수명이 다한 원전의 해체에 대한 정책이나 기술 개발, 규제 지침의 개발은 아직 시작 단계에 있다. 국내에서 가장 오래된 고리 1호기는 2007년 30년 설계수명이 다해 10년을 수명 연장하여 계속 운전 중에 있다. 또한 월성 1호기는 초기 설계수명 30년이 이미 종료되어, 현재 계속운전을 위한 인허가 심사가 진행 중에 있다. 이렇듯 국내에서 운영 중인 많은 원전이 실제로 해체해야할 시점이 도래하고 있는 실정이다.

이 논문은 국내 원전의 해체를 위해 원전 운영자 입장에서 지금까지 수행한 원전 해체에 관한 기술 개발 경험을 조사하였다. 아울러 향후 추진할 기술 개발 계획을 기술하였다. 이를 바탕으로 원전 해체 사업과의 연계성

〈표 1〉 국내 원전의 운전 현황

발전소	노형	용량(MWe)	운전 개시	운전 종료	비고
고리1	PWR	587	1978	2017	설계수명 30년 운전후 계속운전(10년)
고리2	PWR	650	1983	2023	설계수명 40년
고리3	PWR	950	1985	2025	"
고리4	PWR	950	1986	2026	"
월성1	PHWR	679	1983	2012	설계수명 후 계속운전(10년) 심사 진행 중
월성2	PHWR	700	1997	2027	설계수명 30년
월성3	PHWR	700	1998	2028	"
월성4	PHWR	700	1999	2029	"
한빛1	PWR	950	1986	2026	설계수명 40년
한빛2	PWR	950	1987	2027	"
한빛3	PWR	1,000	1995	2035	"
한빛4	PWR	1,000	1996	2036	"
한빛5	PWR	1,000	2002	2042	"
한빛6	PWR	1,000	2002	2042	"
한울1	PWR	950	1988	2028	"
한울2	PWR	950	1989	2029	"
한울3	PWR	1,000	1998	2038	"
한울4	PWR	1,000	1999	2039	"
한울5	PWR	1,000	2004	2044	"
한울6	PWR	1,000	2005	2045	"
신고리1	PWR	1,000	2011	2051	"
신고리2	PWR	1,000	2012	2052	"
신월성1	PWR	1,000	2012	2052	"

과 준비 현황을 제시하고자 하였다.

원전 해체 및 기술 개발 경험

국내에서는 2001년부터 2009년까지 서울 공릉동에 위치한 Triga Mark-II 연구용 원자로를 해체한 경험이 있다.[5] 또한 2011년부터 2014년까지 Triga Mark-I 연구용 원자로 해체를 추진 중에 있다.[5] 이외에 2012년 우라늄 변환 시설의 해체를 완료한 바 있다.

한편 상용 원전에서는 1998년 고리 1호기 증기발생기 교체, 2012년 한울 1, 2호기 증기발생기 교체, 2013년 한울 4호기 증기발생기 교체, 2009년부터 2011년까

지 중수로 원전인 월성 1호기의 압력관(Pressure tube) 등 대형 설비를 다수 교체한 경험을 보유하고 있다. 이러한 대형 설비 교체는 원전이 노후화되어 감에 따라 지속적으로 늘어날 것으로 판단하고 있다.

국내에서는 지금까지 한국수력원자력(KHNP)과 한국원자력연구원(KAERI)을 중심으로 약 30건의 해체 관련 단위 연구가 수행되었다. 그렇지만 이들 연구의 대부분은 해체에 관한 정책성 과제이거나 연구용 원자로 해체에 관한 과제가 대부분이라 할 수 있다.

이에 비해 국내 상업용 원전에서는 원전 운영과 연계하거나 원전 해체 비용을 산정하려는 목적으로 원전 해체에 관한 기술 개발이 간헐적으로 수행되었다. 따



〈표 2〉 국내 원전의 해체 기술 개발 주요 완료 과제 소개

	과제명	주관 연구기관/ 공동 연구기관	연구 기간	연구 목표	주요 실적
정책 / 전략 개발 분야	원자력발전소 해체 방안 정립 및 비용 평가 기술 개발	KHNP-CRI/ KAERI	'93.9~'95.8	국내 원전 해체에 대비한 비용 산정 및 원전해체 종합 대책(안)수립	10년 밀폐 관리 후 해체 철거를 근거로 비용 산정
	원전 폐로 관리 프로그램 개발	KHNP-CRI/ RSCS	'07.2~'09.5	원전 해체 선원량과 폐기물량의 산정, 원전 해체 비용 평가 전산 프로그램 개발과 이에 근거한 해체 비용 평가	950 MWe급 가압경수로형 원전의 선원량과 물량 산정, 원전 해체 비용 평가 전 산프로그램(DeCAT) 개발과 이에 근거한 원전 해체 비용의 평가
	대형 금속 폐기물 처리 실용화 방안 연구	KHNP-CRI/ EPRI	'12.02~'13.7	원전의 대형 금속 폐기물 처리 방안 및 처리 설비 실용화 전략 수립	대형 금속 폐기물 처리 적용 기술 평가, 처리 방안 기술 및 경제성 평가, 대형 금속 폐기물 처리 상용 설비 설계 개념(안)도출 및 관리 실용화 방안 수립
요소 기술 개발 분야	방사성폐기물 감응을 위한 금속 표면 오염 제거 기술	KHNP-CRI	'00.4~'03.3	발생 특성 분석 및 제염 방안 수립, 표면 제염 공정 개발 및 재활용 방안 수립과 안전성 평가	금속 폐기물 종류별 적용 가능 제염 공정(안)제시, 전해 제염 공정 개발 및 금속 폐기물 재활용 안전성 평가방안 제시
	토양 환경 방사능 관리 기술 개발	KHNP-CRI	'01.4~'04.3	오염 토양 발생 특성 평가, 오염 토양 제염 공정 개발, 토양 허용 오염 기준 및 안전성 평가	원전 발생 토양 오염의 특성 평가, 오염 토양 제염 최적 공정 및 제염 장치의 개발
	중수로 원전 해체 선원량 평가 기술 개발 및 검증	KHNP-CRI/ KAERI	'07.11~'10.10	중수로 원전 해체 방사화 재고량 평가 기술 개발과 방사화 폐기물량 산정 및 분류	중수로 노심 조사 시편 샘플링 방안 수립, 방사화 핵종 재고량 평가 불확도 분석 및 해체 폐기물 분류, 중수로 원전 방사화 재고량 평가 프로그램 개발
	원전 저오염 방사성폐기물 자체 처분 기술 개발 연구	KHNP-CRI	'12.3~'13.7	저오염 방사성폐기물 제염 기술 확보 및 안전성 평가 방법 개발	저오염 금속 폐기물 제염 기술 분석 및 실험, 마이크로 버블을 이용한 연류 방사능 제염 및 세탁 성능 평가 제시

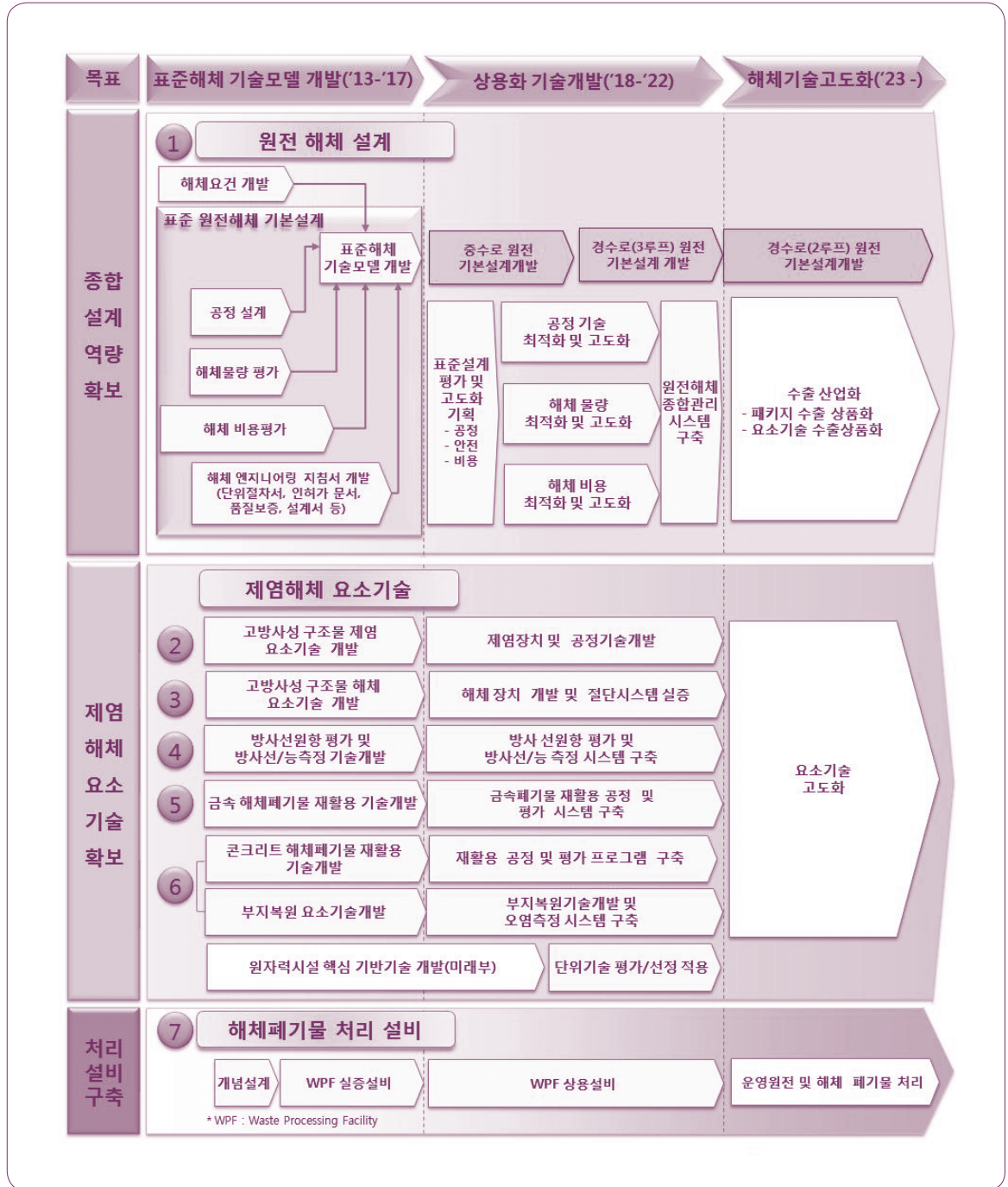
라서 상용 원전의 해체를 위한 연구는 본격적으로 추진되지 못하고 있는 실정이다. 국내 원전의 해체 기술 개발 과제 중에서 완료된 주요 과제 내용을 〈표 2〉에 요약하였다. [6]

원전 해체 기술 개발 로드맵과 이행 계획

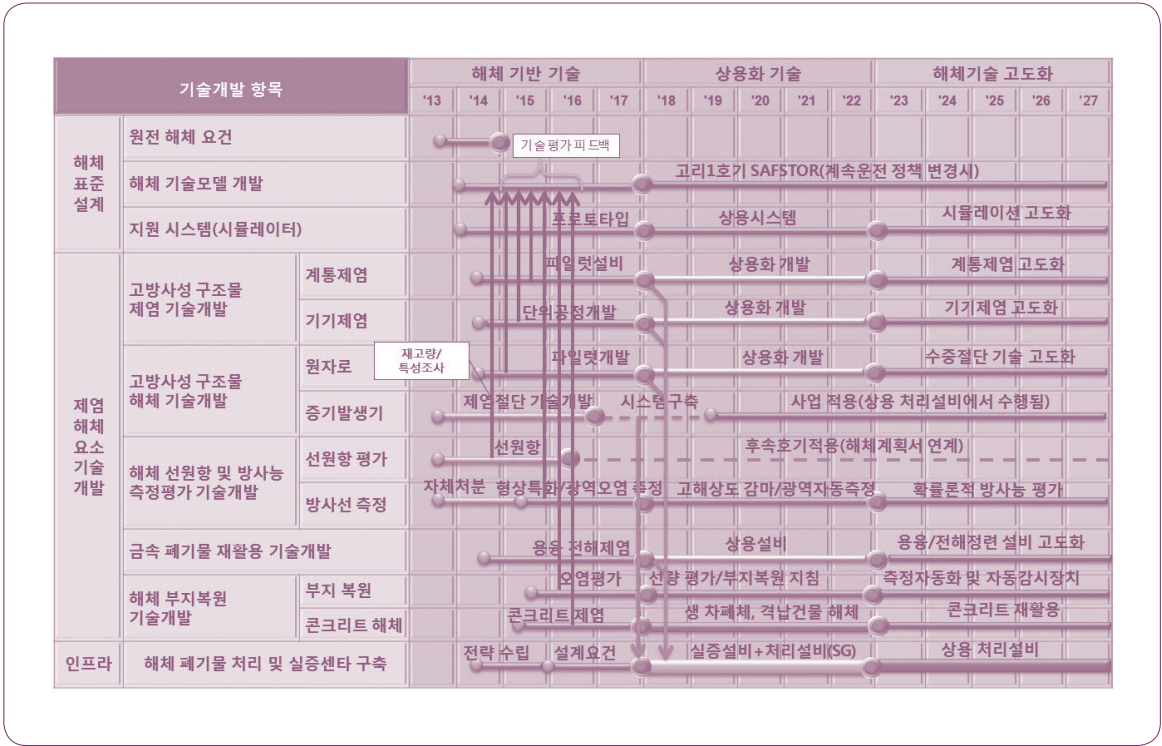
발전용 원자로의 해체에는 방사선 안전 관리, 시공,

기계, 화학, 물리, 제어, 전기 등 다양한 분야의 지식과 기술이 요구되는 물론, 복합된 종합 엔지니어링과 융합이 요구되는 기술이다. [1] 특히 타분야에서 이미 상용화된 기술이나 또는 첨단 신기술의 접목이 밀접하게 요구되고 있다. [7]

또한 원전의 해체는 고방사성 물질이나 고방사선의 극한 환경에서 기술을 적용하고, 방사선 작업을 수행해야 하는 고난이도의 기술로 분류된다. 특히 원전



〈그림 1〉 원전 해체 기술 개발 로드맵



<그림 2> 원전 해체 기술 개발 표준 설계와 요소 기술 연계도

의 해체는 10년 이상 소요되고 반드시 인허가가 수반되는 기술 분야이다. 그렇기 때문에 통상적인 예상 범위를 벗어난 민원, 오염, 피폭 등의 위기 관리(Risk management)에 대한 대응 능력이 요구되고 있다.

원전의 안전한 해체를 위해서는 원전의 운전 이력과 방사성 오염 정보 등 원전의 운영과 관련된 특성 정보(Characteristic information)가 절실히 필요하다. 이에 따라 많은 국가에서는 원전 운영자가 직접 수행하거나 또는 원전 운영자가 별도 자회사를 설립하여 추진하고 있다.[1-3, 8]

또한 국내 원전의 해체에는 해외 원전의 해체 경험과 교훈이 충분히 반영되어야 하며, 새로운 기술의 개발은 물론 국제적인 협력과 공동 연구가 필요하다.[8] 궁극적으로 해체 비용은 전력 생산 원가에 반영되므로 국민의 부담을 최소화하기 위한 경제적 해체 방안을 강구해야 하며, 이와 더불어 안전한 해체 방안을 마련

해야 한다.

이러한 배경 하에서 안전하고 효율적인 국내 원전의 해체를 위해 기술 개발 로드맵을 마련하였다.[9, 10] 여기에서는 2017년까지 표준 해체 기술 모델을 개발하고 2023년까지 원전 해체 기술의 완전 확보를 통해 최종적으로 원전 해체 설계 및 종합 사업 기술을 확보하고자 장기적인 원전 해체 기술 개발 목표를 설정하였다.[9, 10]

원전 해체 기술 개발 로드맵과 이행 계획에 의하면, 2017년까지 진행되는 1단계에서는 해체 사업 기술 요건 정립, 해체 기본 설계, 표준 해체 기술 모델 개발, 제염·해체 요소 기술 개발, 해체 처리 설비 개발 등을 통해 표준 해체 기술 모델 개발을 목표로 하고 있다.

2018년에서 2023년까지 진행되는 2단계에서는 표준 해체 기술 모델 최적화, 노형별 해체 절차서 개발, 제염·해체 적용 기술 개발, 해체 폐기물 처리 설비 구축

등을 통해 해체 사업 적용 기술 개발을 목표로 하고 있다. 2023년 이후에 진행되는 3단계에서는 원전 해체 설계 기술 수출 상품화 및 제염 해체 요소 기술 고도화 등을 통한 해체 기술 고도화를 목표로 설정하였다. 이러한 원전 해체 기술 개발 로드맵과 이행 계획의 기술 개발 목표와 세부 추진 내역을 <그림 1>에 나타내었다. [9, 10]

기술 개발과 원전 해체와의 연계

원전 해체의 성공적인 추진과 국외 해체 시장 진입을 위해서는 연구계, 학계 및 산업계가 상호 협력하여 기술 역량을 강화하고 관련 전문가 양성에 힘을 기울여야 할 필요가 있다. 이러한 원전 해체 기술 개발은 기술 소요 시기와 예산 등을 감안하여 순차적으로 추진할 계획이다.

이를 위해 정부와의 상호 공조를 통해 투자 효율적이고, 통합적인 기술 개발 추진 체계를 구성하였다. 또한 사안별 역할 분담 또는 경쟁형 기술 개발 추진 체제로 효율성과 기술 품질을 제고할 수 있도록 구성하였고, 개발된 기술에 대해서는 반드시 실증을 통해 활용성과 인허가성을 확보하도록 하였다. 또한 해외 원전 및 연구소와의 국제 협력 등 가능한 네트워크를 최대한 활용하고 중간 진입 전략을 구사해 부족한 기술을 단기간에 확보하고자 계획하였다.

이처럼 원전 해체 사업을 수행하는 데 직접 필요한 원전 해체 표준 설계 기술은 자체 예산을 투입해 주관하여 개발하고, 요소 기술은 각 전문 기관이나 관련 산업체가 주도적으로 개발하도록 각 기관별 또는 단계별 역할을 명확히 하였다. [9, 10] 이러한 원전 해체에서 표준 설계와 요소 기술 개발 과제의 연계성을 <그림 2>에 나타내었다.

국내 원전의 운전 연수가 늘어남에 따라 대형 설비가 지속적으로 교체될 것으로 판단하고 있다. 2020년까지 약 30대의 증기발생기 교체, 2030년까지 약 10대의 증기발생기 추가 교체 등이 예상되고 있다. 또한 원전의 계속운전 인허가 여부에 따라 수 기의 원전을 해체할 가능성이 상존하고 있는 실정이다.

이에 따라 국내 원전에서는 향후 이루어질 원전 해체

와 연계하여 보다 실질적인 해체 사업 계획을 수립 중에 있고, 중장기적인 해체 예상 비용을 평가하여 충당하는 방안을 마련하고 있다. [11, 12] 또한 원전 해체 기술 개발 및 사업 조직을 신설하였고, 해체 전담 기술 개발 조직을 신설하였다.

결론

국내에서는 2013년 원전 해체 기술 개발의 필요성을 인지하고, 원전 해체 기술 개발 로드맵을 수립하였다. 이러한 기술 개발 로드맵을 실천하기 위한 세부 이행 계획을 마련하였고, 여기에 맞추어 기술 개발을 체계적으로 추진 중에 있다. 이에 따라 원전 해체에 대한 준비는 순조롭게 그리고 철저히 진행될 수 있을 것으로 예상하고 있다. 🌐

<참고 문헌>

1. International Atomic Energy Agency (IAEA), Standard Format and Content for Safety Related Decommissioning Documents, IAEA SRS-45, 2005
2. 김경민, 장지호, 국내 원전해체 시장전망과 해체 핵심기술, 건설관리학회지, 2013
3. International Atomic Energy Agency, Status of Decommissioning of Nuclear Facilities around the World, ISBN 92-0-108704-7, 2004
4. Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd. (KHNP), Annual Report on Radiation Safety Management in Nuclear Power Plants, KHNP, 2012
5. K.W. Lee, S.B Hong, J.H Park and U.S. Chung, Final Status of the Decommissioning of Research Reactors in Korea, JNST, Vol.47, p.1229-1232, 2010
6. 김희근, 한수원의 원전해체 기술개발 현황 및 향후 계획, 범부처 해체기술개발 협의회 발표자료, 2014. 4
7. 박진호, 연구용원자로 해체 경험, 한수원세미나, 2013
8. Michael Siemann, International Symposium in Radiation Safety Management (ISRSM), Future Challenges in Decommissioning and Radiological Protection Worldwide, 2013 ISRSM, Daejeon, Korea
9. 김희근, 원전해체 기술개발 로드맵과 이행계획, 한국방사성폐기물학회 춘계 워크샵, 2014. 5
10. 변충섭, 원전해체 표준설계 개발계획 및 전략, 한국원자력학회 추계워크샵, 2013. 10
11. 한수원중앙연구원, 원전폐로관리 프로그램 개발 최종보고서, 2009
12. 한수원중앙연구원, 표준형 및 중수로형원전 해체비용 평가에 관한 연구개발 기본계획서, 2014