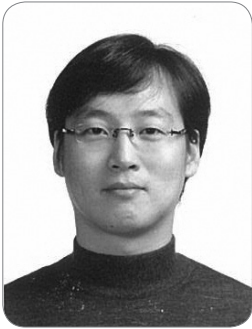


원자력시설 영구정지/해체 현황 및 주요 안전규제 기술기준

지용기

한국원자력안전기술원 해체·핵주기규제PM



- KAIST 기계공학 학사
- KAIST 원자력공학 석사, 박사

- KINS 방사선규제단 선량평가 및 선
원규제
원자력검사단 고리검사A-PM
방사선규제단 해체·핵주기규제PM

- 고리 1호기 영구정지 안전심사 수
행, 해체 전 과도기 활동 규제, 해체
규제 체계 수립 및 해체 기술기준
개발

국내외 원자력시설 영구정지/해체 현황

2017년 11월 기준 IAEA PRIS(Power Reactor Information System, <https://www.iaea.org/PRIS>)에서 제공하는 정보에 따르면, 전 세계적으로 19개국의 157개의 원자로(상업로, 연구로, 실험로, 원형로 등)가 영구정지되었으며, 이 중 21기가 해체가 완료되었으나 나머지 102기는 해체가 진행 중에 있다.

해체가 진행 중인 원전은 대부분 SAFSTOR(Safe Storage) 상태에 있으며, 방사성물질 붕괴 등을 감시하여 자연에 따른 방사능 감쇠, 폐기물 저감 등을 고려하여 향후 적당한 시점에 해체를 추진하기 위해 원자로를 포함한 오염된 시설의 모든 계통/구조물/기기 등을 장기 저장 중에 있다.

영구정지가 이루어진 사유는 원자로의 설계수명에 가까워진 구형 원전 또는 실험로 및 원형로로, 목적 달성(25 ~ 35년 운영) 또는 대부분 경제성 상실이며, 대략 111기가 이러한 사유로 영구정지가 이루어졌다.

반면 사건/사고(DBA) 또는 중대사고(SA)로 인해 이를 해결할 경제적 또는 기술적 능력이 상실되어 해결이 불가능한 25기(이 중 17기는 소련이 설계한 구형 원자로)가 있다.

〈표 2〉(IAEA Reference Data Series No.2, Nuclear Power Reactors in the World, 2016 참조)는 전 세계적으로 해체가 진행 중인 원전 현황을 보여준다.

대부분의 국가들이 해체 폐기물을 최소화하는 동시에 해체 기술을 개발하고자 안전 저장 후 즉시 해체 전략을 택하고 있는 실정이다.

〈표 1〉 영구정지 현황 (고리 1호기 포함)

국 가	영국	미국	독일	프랑스	일본	캐나다	러시아	기타	계
원전 기수	30	34	28	12	17	6	6	31	164

* 영구정지, 장기 저장(Safe Storage or Enclosure), 해체 중 또는 완료 원전

〈표 2〉 해체 진행 현황

국가	영국	미국	독일	프랑스	일본	캐나다	러시아	기타	계
원전 기수	26	18	17	10	7	3	4	17	102

* 즉시 해체(해체 중) 및 지연 해체(장기 저장 등) 모두 포함

〈표 3〉 해체 완료 현황 (*실증로 및 원형로)

국가	원전명	노형	출력(Mwe)	운영년도	정지년도	해체 완료
미국 (16기)	BIG ROCK POINT	BWR	67	1962	1997	2007
	BONUS *	BWR	17	1964	1968	1970
	CVTR *	PHWR	17	1963	1967	2009
	ELK RIVER	BWR	22	1963	1968	1974
	FORT ST. VRAIN *	HTGR	330	1976	1989	1996
	HADDAM NECK	PWR	560	1967	1996	2008
	HALLAM *	X	75	1963	1964	1971
	MAINE YANKEE	PWR	860	1972	1997	2005
	PATHFINDER *	BWR	59	1966	1967	2007
	Rancho Seco	PWR	918	1975	1989	2009
	PIQUA*	X	12	1963	1966	1969
	SAXTON *	PWR	3	1967	1972	2005
	SHIPPINGPORT *	PWR	60	1957	1982	1990
	SHOREHAM	BWR	820	1986	1989	1995
	TROJAN	PWR	1,095	1975	1992	2005
	YANKEE NPS	PWR	167	1960	1991	2005
독일(3기)	GROSSWELZHEIM *	BWR	25	1969	1971	1998
	NIEDERAICHBACH *	HWGCR	100	1973	1974	1995
	VAK Kahl *	BWR	16	1961	1985	2010
일본(1기)	JPDR *	BWR	12	1963	1976	1996
스위스(1기)	LUCENS *	HWGCR	6	1968	1969	2004
총계	총 21기					



미국 Haddam Neck(Connecticut) 원전 해체 전·후

미국의 경우 최근 Active Decon에 따라 다수 지역 해체 원전에 대한 해체를 재개하였으며, 현재 Humboldt Bay, San Onofre, Zion, LaCrosse 원전에 대해 활발한 해체 활동을 수행하고 있다.

〈표 3〉에 해체가 완료된 원자로 중 상업로(발전로)에 대한 해체는 미국이 8기에 대해 완료하였으며, 그 외 국가의 경우 모두 실증로 또는 원형로로서 대단위 시설 및 다양한 노형에 대한 해체 경험을 보유하고 있다. (USNRC Information Digest, 2015)

국내의 경우 2015년 6월 우리나라 최초 상업용 원전인 고리 1호기에 대한 2차 계속운전(2017년 6월 19일부터 2027년 6월 18일까지)을 한국수력원자력(주)(이하 한수원(주))가 신청하지 않기로 결정함에 따라 고리 1호기는 첫 번째 영구 정지되는 원자력발전소가 되었다.

고리 1호기가 영구정지된 후에도 “발전용 원자로 및 관계시설”에 대한 운영허가를 사업자가 유지함에 따라 영구정지 승인 이후부터 해체 승인 전까지의 과도기 기간 동안에도 안전규제(심·검사)가 운영 원전과 동일하게 수행되며, 동 기간 중 안전규제 이행 방안에 대한 해외 사례 및 해체 준비 활동(계통 제염/사전 철거/재활용 등)¹⁾ 등을 포함한 영구정지 원전의 운영 및 안전 관리에 대한 고려사항을 심층 분석하여 향후 해체 승인 전 안전규제를 수행할 필요가 있다.

국내 상업 원전에 대한 해체 경험은 없으나, 연구용 원자로 및 핵주기 시설 등 소규모 시설에 대한 영구정지 및 해체가 진행 또는 완료되었다.

현재 국내 최초의 원자로인 연구용 원자로 1,2호기(TRIGA MARK II & III)는 마지막 해체 작업이 진행 중에 있으며, 대전 한국원자력연구원 내의 핵연료주

¹⁾ IAEA GSR Part 6에는 과도기 기간 중 인허가 또는 변경 허가를 통해 해체를 위한 일부 준비 활동을 할 수 있도록 하고 있으며, IAEA TRS 420(“Transition from Operation to Decommissioning of Nuclear Installation”)에 사전 준비 활동을 기타 해체 활동(minor decommissioning activities)으로 기술하여 ① 일반적 정비/보수, 작은 기기/설비 제거, 운영 기간의 유지보수 차원에서 제거될 수 있는 장비 철거, ② 상대적으로 적게 오염된 기기(제어봉 구동장치, 배관, 밸브 등) 철거, ③ 안전에 필요하지 않은 비방사능 기기/구조물(냉각탑, 변압기, 제어패널 등) 철거를 허용하도록 기술



연구로 1,2호기 해체 전 · 중

기시설인 캔두형 원자로의 핵연료를 가공하는 우라늄 변환 시설이 '12년 해체가 완료되어 사업 폐지 신고가 접수되었다. 아래에 연구용 원자로 및 우라늄 변환 시설의 진행 현황을 간략하게 기술하였다.

[연구용 원자로]

- 1995 : TRIGA MARK II(1월) 및 III(12월) 원자로 가동 정지(영구정지)
- 1998.12 ~ 2000.11 : 해체계획서 신청, 심사 및 승인
- 2000 ~ 현재 : 해체 중

[우라늄 변환 시설]

- 1992 : 캔두형 우라늄 변환 시설 정지(영구정지)
- 2002.11 ~ 2004.07 : 해체계획서 신청, 심사 및 승인
- 2011.05 : 사업 폐지 신고 신청(과거 원자력법 제 43조2)
- 2012.04 : 사업 폐지 승인

※ 과거 원자력법 제100조(허가 등의 취소 또는 사업폐지 등에 따른 조치)에 따라 방사성물질 및 오염된 물질의 양도/오염 제거/기록 인도 등 적합성 검토 후 승인

국내 최초 원자로인 TRIGA MARK-II는 제염 후 원형 보존을 계획(09.12)하였으나, 방사화에 따른 지속적인 안전 관리의 문제로 인해 내부 제염 및 구조물 철거 후 향후 기념관화할 예정이다.

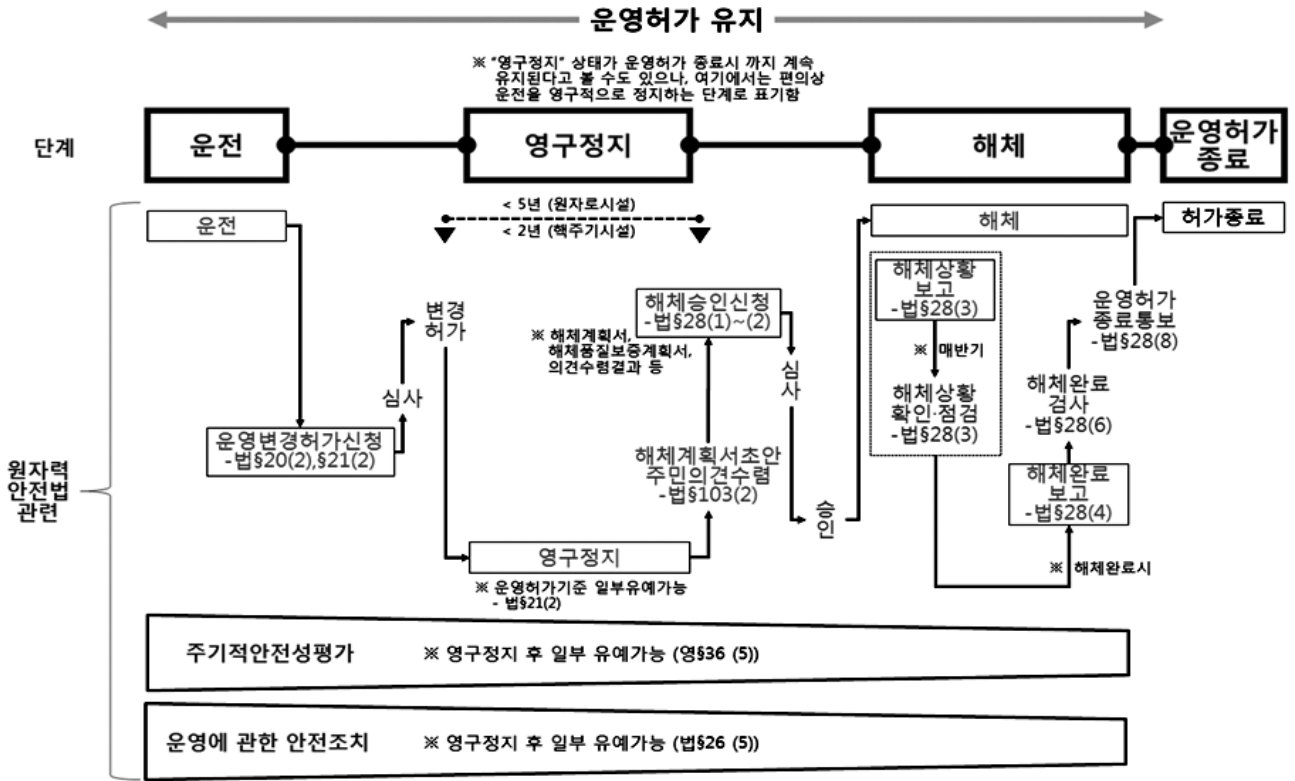
현재 TRIGA MARK-III의 원자로 본체는 완전 해체 완료되었으며, 그 외 원자로 관계시설 등의 제염이 완료되어 부지 복원을 통한 최종 해체가 완료될 예정이었다.

그러나 동 부지의 소유주(한전)가 원자로를 포함한 모든 건물 완전 철거 후 반환을 요구함에 따라 해체계획서 변경 및 추가 해체 작업이 필요함에 따라 해체가 지연되고 있다. 그리고 우라늄 변환 시설(UFC)은 최종 해체가 완료되어 해체 확인·점검을 통해 최종 사업 폐지되었다.

해체 안전규제

1. 해체 안전규제 체계

국내 해체 안전규제에 관한 연구는 고리 1호기가 1차 계속운전을 앞둔 시점부터 이루어져 왔으나, 안전규제 체계 마련을 위한 본격적인 원자력안전법 제·개



〈그림 1〉 해체 안전규제 체계

정은 2011년도 이후로 이루어졌다.

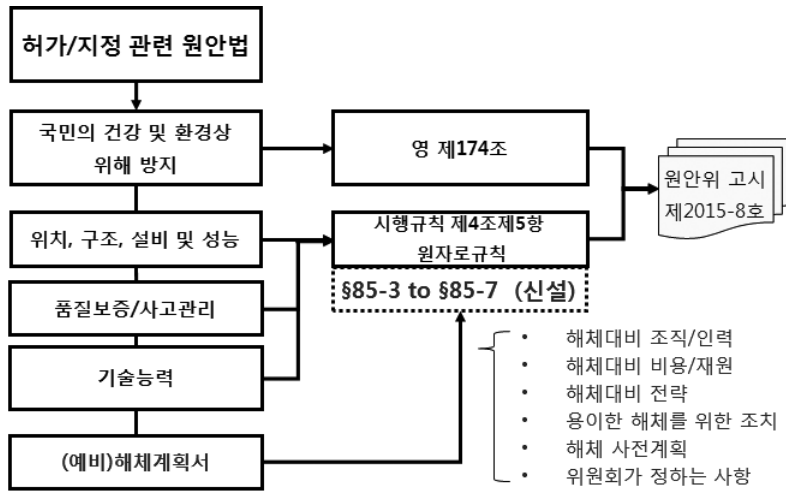
우리나라는 IAEA로부터 안전규제에 대한 통합규제 검토서비스(IRRS)의 수검을 2011년 7월에 받았으며, 해체 관련 권고사항²⁾을 통해 원자력시설에 대한 해체 계획 수립 및 주기적 갱신을 요구받은바 있다.

이에 국내 원자력시설(발전용 원자로/연구·교육용 원자로/핵주기시설)에 대하여 건설 허가 시 (예비)해체계획서를 인허가 문서로 제출하고, 운영 허가 시 이

에 대해 달라진 사항을 제출하여 허가반도록 원자력안전법 제10조(건설 허가) 및 제20조(운영 허가)를 개정하였다.

또한 동법 제28조(발전용 원자로 및 관계시설의 해체), 제34조(준용) 및 제42조(핵연료주기시설의 해체) 개정을 통해 최종해체계획서의 승인 신청, 제출서류, 해체상황보고서 및 확인·점검, 해체완료보고서 및 해체 완료 검사에 대한 사항을 반영하도록 개정(15년 1

2) IAEA IRRS 권고 : "건설 및 운영되는 원자력시설에 대한 해체 계획이 규제 체계하에서 요구되어야 하며, 해당 해체 계획이 주기적으로 개정되어야 함"



〈그림 2〉 예비해체계획서 관련 원자력안전법 관계 규정

을)하였다.

이후 동법 시행령, 시행규칙 및 원자력안전위원회고시를 통해 해체계획서를 포함한 해체 승인에 관한 구체적인 기술기준 사항을 반영하도록 하위 규정을 개발하여 '16년 12월까지 제·개정을 완료하였다.

먼저 원자력안전법 제2조제24호에 따라 “해체”란 발전용 원자로, 연구·교육용 원자로 및 핵연료주기사업에 따라 허가받은 “시설의 운영을 영구적으로 정지한 후, 해당 시설과 부지를 철거하거나 방사성 오염을 제거함으로써 이법의 적용 대상에서 배제하기 위한 모든 활동을 말한다.”로 정의하였다.

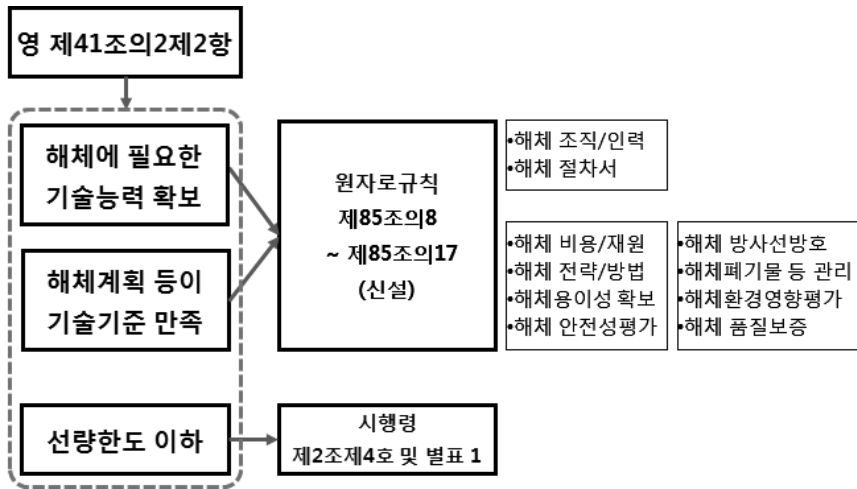
그리고 건설 및 운영 허가 시 제출하는 (예비)해체계획서 기재사항을 원자력안전법 시행규칙 제4조제5항에 따라 ① 원자로 및 관계시설의 해체 전략/일정, ② 방사선으로부터 재해를 방지하기 위한 조치, ③ 방사성물질 등에 따른 오염의 제거 방법 등을 기재하도록 개정('15년 7월)하였으며, 동법 시행규칙 제85조의3

내지 제85조7의 신설을 통해 관련 기술기준을 제시하였다.

또한 (예비)해체계획서의 구체적인 구성, 내용 및 허용기준 등의 기재사항은 원안위고시 제2015호-8호(원자력이용시설 해체계획서 등의 작성에 관한 규정)의 제정('15년 7월)을 통해 마련하였다.

마지막으로 (예비)해체계획서는 국내 정책, 해체 방법, 해체 기술, 재정(비용) 등을 반영하여 10년마다 주기적으로 개정되도록 원자력안전법 제92조의2('15년 1월), 및 동법 시행규칙 제122조의2('15년 7월)를 개정하였다. 〈그림 2〉는 (예비)해체계획서 작성과 관련된 규정을 보여준다.

발전용 원자로, 연구로 및 핵주기사업 허가자에 대해 해체계획서를 승인받도록 한 사항은 원자력안전법 제28조(발전용 원자로 및 관계시설의 해체)에 과거에도 제시되어 있었으나, 동 조항의 세부 개정을 통해 해체 상황 및 완료 보고, 허가 종료 등을 구체적으로 반



〈그림 3〉 최종해체계획서 관련 원자력안전법 관계 규정

영하도록 개정(15년 1월)하였다.

또한 동법 시행령 제41조의2(원자로시설의 해체 승인 신청 등) 제1호를 통해 영구정지한 날로부터 5년 이내에 해체 승인을 신청하고, 제2호를 통해 해체 승인 요건으로 ① 해체에 필요한 기술 능력 확보, ② 해체 계획 등이 기술기준 만족, ③ 해체에 따른 피폭 선량이 선량 한도 이하 등을 제시하도록 조항을 신설(15년 7월)하였다.

또한 법 제28조제2항은 해체승인신청서와 함께 해당 승인 요건을 기술한 최종해체계획서를 포함한 총리령으로 정한 서류³⁾를 제출하도록 개정(15년 1월)되었다.

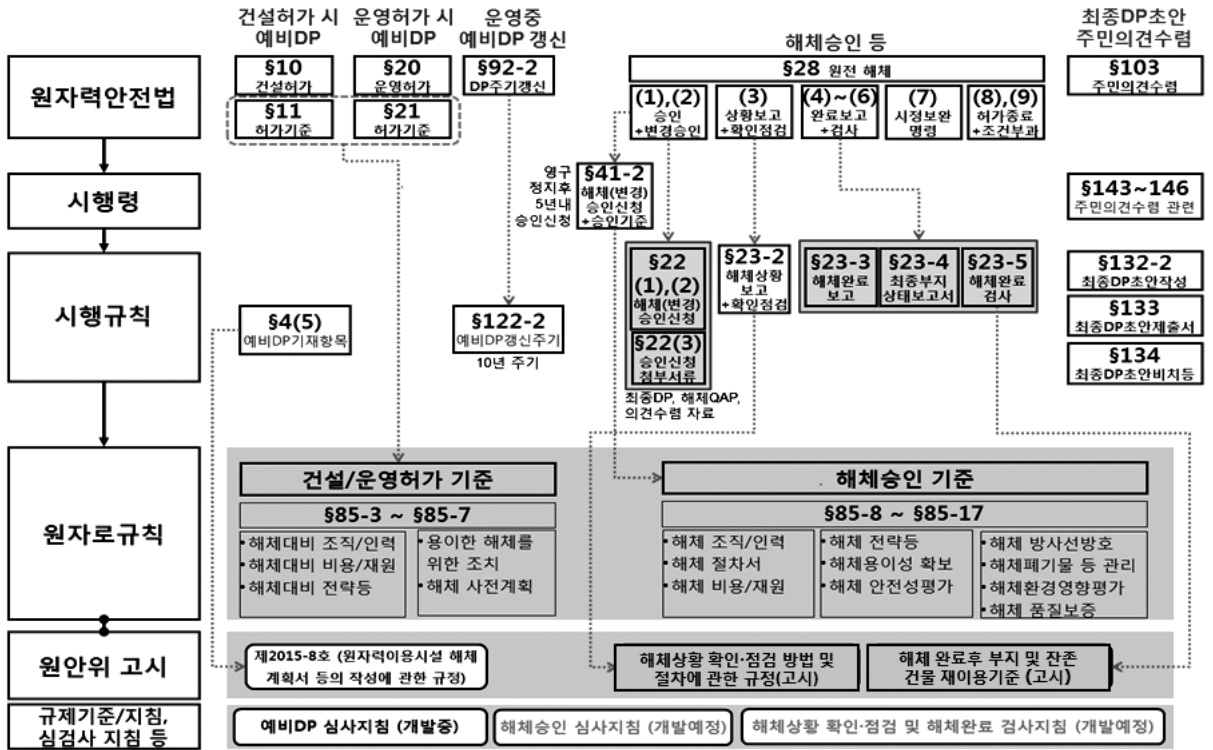
최종해체계획서 등 해체 승인 문서에 관한 기술기준은 동법 시행규칙 제85조의8 내지 제85조의17을 통해

마련하였으며, 구체적인 기재사항은 원안위고시 제2015-08호 상에 (예비)해체계획서와 같이 기술되어 있다.

또한 개정된 법 제28조제3항 내지 제7항과 관련하여 해체 승인 후 해체상황 확인·점검, 해체 완료 보고, 최종부지상태보고서 및 해체 완료 검사에 대한 구체적인 사항이 동법 시행규칙 제23조의2 내지 제23조의5의 신설(15년 7월)을 통해 제시되었다. 〈그림 3〉은 최종해체계획서 작성과 관련된 규정을 보여준다.

해체 승인(최종해체계획서 등) 이후 사업자는 해체 상황에 대한 보고를 하여야 하며, 원자력안전위원회는 이에 대한 현장 확인·점검을 법 제28조제3항에 따라 수행하며, 이에 대한 점검 방법 및 점검 분야는 '16년 12월에 제정된 원자력안전위원회고시 제2016-32

3) 원자력안전법 시행규칙 제22조제3항)인 최종해체계획서, 해체에 관한 품질보증계획서, 해체계획서 초안에 대한 주민 의견 및 공청회 개최 결과(발전용 원자로 및 연구·교육용 원자로에 한해 동법 시행령 제143조 내지 제145조 적용)



〈그림 4〉 안전규제 관련 법령 및 기술기준 체계

호(원자력이용시설 해체상황 확인· 점검 방법 등에 관한 규정)에 제시되어있다.

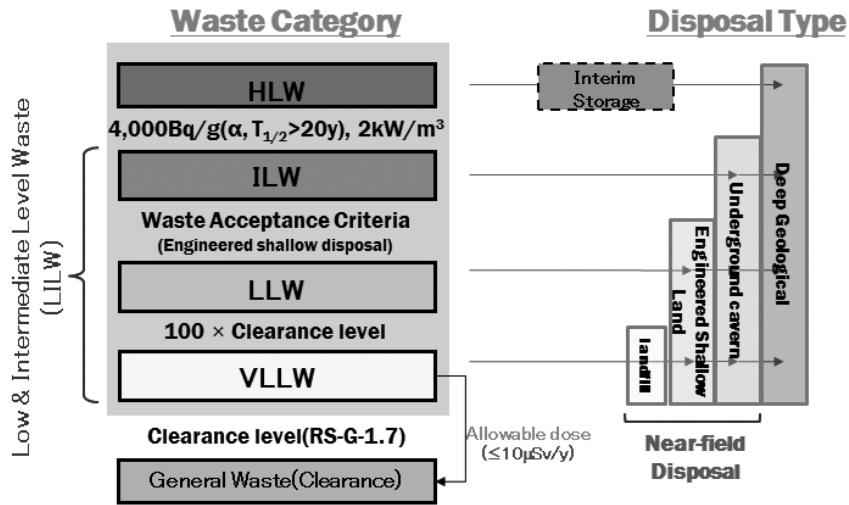
이와 유사하게 해체 완료 시 해체 완료 보고(최종부지상태보고서 포함) 및 원자력안전위원회의 현장 완료검사가 법 제28조제4항 내지 제6항에 따라 수행되며, 최종해체계획서 및 해체완료보고서에 제시된 부지 재이용 기준에 따라 해체가 이루어졌는지를 확인한다.

이와 같이 IAEA IRRS 수검을 통해 도출된 국내 안전규제 체계 개선은 원자력안전법 관계 규정 제·개정을 통해 '15년부터 '16년에 걸쳐 수행되었다.

과거 원자력안전법 제28조에서만 정의된 해체 관련

규정은 발전용 원자로에 한해 해체계획서 승인과 해체 상황 확인· 점검만을 기술하고 있으며, 동 조항에 대한 하위 규정들은 전무했다.

그러나 동 조항의 개정 및 하위 규정 신설을 통해 해체 대상 시설, 예비해체계획서 작성, 주기적 갱신, 해체 승인(최종해체계획서 등 제출), 해체 상황 확인· 점검, 해체 완료 및 허가 종료에 이르게까지 개선함으로써 국내 해체 안전규제 체계를 체계적으로 수립하였다. 〈그림 4〉는 현재까지 이루어진 안전규제 관련 법령 및 기술기준에 관한 흐름을 전체적으로 보여준다.



〈그림 5〉 국내 자체 처분(규제 해제), 폐기물 분류 및 처분 제한

2. 해체 주요 기술기준

과거 연구용 원자로 및 우라늄 변환 시설 해체 시 해체 전략, 비용 등에 대한 규제가 이루어지지 않았으며, 제염 및 부지 재이용에 관한 하위 기술기준이 없음에 따라 제염 기준($\alpha < 0.04 \text{ Bq/g}$ or 0.04 Bq/cm^2 , $\beta/\gamma < 0.4 \text{ Bq/g}$ or 0.4 Bq/cm^2)은 영국 등 유럽 사례 등을 참조하였다.

또한 무제한 재이용 기준으로 0.1 mSv/y 를 산정 하였으며, 이에 대한 평가 방법은 미국의 MARSSIM (Multi-Agency Radiation Survey & Site Investigation Methodology)를 사용하여 안전규제를 수행하였다.

또한 방사성폐기물 준위별 기준의 부재로 자체 처분(규제 해제) 기준(원안위고시 제2014-03호, 개인선량 0.01 mSv/y & 집단선량 $1 \text{ person} \cdot \text{Sv}$ 이하인 별표1 상의 허용농도)을 제외한 방사성폐기물의 분류 및 처분 제한 등에 관한 세부 기준도 없었다.

현재 해체 완료 후 부지 재이용 기준에 관한 세부사항은 원자력안전위원회고시 제2016-33호(원자력이용시설 해체완료 후 부지 및 잔존건물의 재이용을 위한 기준) 제정(16년 12월)을 통해 아래와 같은 세부 기술기준이 제시되어 있다.

- 무제한 재이용 : 잔류 방사능에 의한 모든 피폭 경로를 고려한 결정 집단의 개인에 대한 최대 피폭 방사선량이 유효 선량을 기준으로 연간 0.1 mSv 이하로 규정
- 제한적 재이용 : 무제한적 재이용 기준을 초과할 것으로 예상되는 경우, 방사선 피폭이 가능한 합리적으로 낮게 유지되도록 안전 조치나 제한 조건 등을 적용하여, 결정 집단의 개인에 대한 피폭 선량이 연간 0.1 mSv 를 초과하지 아니하는 경우에 한해 제한적 재이용이 가능($0.1\text{mSv} + \text{ALARA}$)
(+ 안전 조치나 제한 조건 등이 실패하더라도 유

효 선량이 연간 1 mSv를 초과하지 아니함을 입증)
또한 방사성폐기물의 분류에 관한 세부사항은 원자력안전위원회고시 제2014-03호(방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정)에 따라 극저준위, 저준위, 중준위, 고준위로 아래와 같이 구분되며, 방사성폐기물의 준위에 따라 처분 방법에도 제한을 두고 있다. (<그림 5> 참조)

- 극저준위 : 자체 처분 허용 농도 이상이고 허용 농도 100배 미만
- 저준위 : 100배 이상이고 별표2의 핵종별 농도 미만
- 중준위 : 별표2의 핵종별 농도 이상
- 고준위* : 방사능 농도와 열발생률이 위원회가 정하는 값 이상(사용후핵연료)

* 원안위고시 제2014-34호(방사선방호 등에 관한 기준, 반감기 20y 이상의 α > 4,000Bq/g, 열발생률 > 2kW/m³)

원자력 이용 시설의 해체 후 발생된 방사성폐기물 중 약 95%가 규제 해체 가능 대상임을 고려할 때 자체 처분을 통한 규제 해체가 비용에 있어서 가장 중요한 요소이며, 이에 따라 규제 해체에 필요한 시료 채취, 핵종 분석, 방사선/능 측정 및 분석 비용 대비 처분 비용이 상대적으로 저렴하여야만 해체 비용, 일정, 발생되는 방사성폐기물이 줄어들 것으로 예상된다.

결론 및 제언

국내 원자력안전법에서 규정한 원전 안전규제는 원자력안전법 제35조(핵연료주기사업의 허가 등)에 따른 핵연료 정련 사업, 사용후핵연료 처리 사업, 제28조(발전용원자로 및 관계시설의 해체)를 제외하고는 원자력 이용 시설의 전 생애(life-cycle)에 걸쳐 안전

규제를 수행하고 있다.

이 중 해체 안전규제는 현재 당면한 과제로서 과거 안전규제 체계가 개선되기 전 연구용 원자로 및 핵연료주기 사업에 대한 해체가 수행된 경험이 있지만, 해체 대상 및 발생 폐기물의 규모에 비추어볼 때 고리 1호기와 같은 상업 원전은 많은 자원, 기술, 작업자, 전문가 등이 필요할 것이다.

앞으로 사업자는 고리 1호기에 대한 해체 준비 활동(배수, 격리, 사용후핵연료 냉각, 안전 관리 등)을 영구정지 기간 중에 수행하고, 해체 승인을 통한 제염 및 철거를 2030년까지 완료할 계획에 있다. 또한 부지 복원을 통해 2032년까지 허가를 종료할 예정이다.

이에 따라 해체 기간 중 발생하는 방사성폐기물의 처리·저장·처분, 사용후핵연료의 운반, 중간 저장 및 처분 등 해체 사업의 단계별 많은 이슈들이 제기될 것이며, 국내 안전규제 체계 하에서 이를 원활히 해결되어야 한다.

특히 규제 해체 대상(비방사선 관리 구역 포함 여부), 방사성폐기물 감용화, 대형 폐기물의 자체 처분 방법론, 방사성폐기물의 원형 처분, 제염/절단 등 해체 기술 검증 등에 관한 주요 쟁점 사항들에 대한 논의가 지금부터 필요한 실정이다.

이에 이해 당사자(규제기관-사업자-지역 주민) 간의 철저한 준비와 상호 노력이 필요하며, 효율적인 해체가 이루어질 수 있도록 독립적인 안전규제 기술의 개발이 필요한 실정이다.

마지막으로 해체 규제·기술 연구와 상호 협력을 통해 본격적인 해체 착수 전 사전 필요 사항이 충분히 검토 후 도출되고, 안전규제 체계가 더욱더 개선되어 국내 최초 상업 원전인 고리 1호기의 안전한 해체 및 부지 복원이 이루어지길 기대한다. 