원자력시설 해체 종사자의 방사선피폭 관리를 위한 피폭방사선량 관리체계 및 관리 목표치에 대한 연구

이화정[1] · 지승우[1] · 김우진[1] · 도태관[1] · 김도연[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Study of Decommissioning Organization and Target Doses for Management of Radiation Exposure to Workers at Nuclear Facilities

Hwa Jeong Lee[1], Seung Woo Ji[1], Woo Jin Kim[1], Tae Gwan Do[1], Do Yeon Kim[1] and Kwang Pyo Kim[1,*]

[1]*Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University*

Abstract - During decommissioning of a nuclear facility, the radiation dose to workers should be managed not to exceed a certain level. The objective of this study was to review decommissioning organization and target doses for management of radiation exposure to workers at nuclear facilities. The review was performed for the 7 nuclear facilities in the US, including commercial nuclear power plants, research and experimental reactor, and other nuclear facilities. For all the facilities, decommissioning organizations were established and given in decommissioning activities report and decommissioning plan. Certain department and associated supervisors were in charge of radiation protection of workers. They had an authority to stop radiation works not to exceed a certain level. In 10 CFR 20, only dose limits not target doses are given. Therefore, each facility set its own target doses and applied it during the facility decommission. The target doses were set 50~100% (25~50 mSv·year^{-1}) level of dose limits for the commercial nuclear power plants and 10~50% (5~25 mSv·year^{-1}) level of dose limits for the research and experimental nuclear plant and other nuclear facilities. It is suggested that 70~90% (14~18 mSv·year^{-1}) level of dose limits is appropriate for near future decommissioning of a commercial nuclear power plant considering target doses for previous decommission of nuclear facilities in other country and management dose limits set for operational nuclear power plants in Korea.

Key words : Decommissioning of nuclear facility, Occupational exposure, Dose management, Decommissioning organization, Target doses, Dose limit

서 론

국내 최초 상용 원자력발전소인 고리1호기 원자력발전소가 2017년 6월 18일 영구 정지되었다. 원자력발전소는 운영을 정지하더라도 종사자의 방사선피폭을 야기하는 방사선원이 존재하므로, 원자력발전소 해체 시 종사자의 방사선피폭관리가 이루어져야 한다. 국제방사선방호위원회(ICRP)에서는 종사자가 작업을 수행하는 상황에 대한 선량제한

* Corresponding author: Kwang Pyo Kim, Tel. +82-31-201-2560, Fax. +82-31-273-3592, E-mail. kpkim@khu.ac.kr

치의 상한선 역할을 하는 선량한도 개념을 제시하고 있다 (ICRP 1991; ICRP 2007). 국내 원자력안전법에서도 국제방사선방호위원회 60권고에서 제시하는 선량한도를 근거로 하여 방사선작업종사자의 법적 선량한도를 제시하고 있다 (원자력안전위원회 2017). 따라서 원자력발전소 해체 시 종사자의 피폭방사선량은 국제방사선방호위원회 및 국내 원자력안전법에서 제시하는 법적 선량한도 미만으로 관리되어야 한다.

미국은 원자력발전소 해체 경험이 많은 나라로 2017년 6월 기준으로 영구정지 된 원자로의 개수가 34기이다(IAEA PRIS 2017). 미국에서는 원자력발전소 해체 작업을 해체 착수 전 단계, 해체단계, 해체 완료 후 단계로 구분하여 해체 작업을 진행하고 있다. 미국은 해체 착수 전 단계에서 정지 후 해체 활동 보고서(Post shutdown decommissioning activities report, PSDAR)에 해체활동계획, 상세일정, 예상금액, 환경영향평가 등에 대한 사항을 기술하여 미국 원자력규제위원회(NRC)에 제출하여야 한다. 미국 원자력규제위원회에서는 국제방사선방호위원회 26권고에서 제시하는 선량한도를 근거로 하여 방사선작업종사자의 법적 선량한도를 제시하고 있다(ICRP 1977). 미국의 정지 후 해체활동 보고서에는 종사자의 피폭방사선량이 미국 원자력규제위원회에서 제시하고 있는 법적 선량한도를 초과하지 않도록 방사선피폭 관리체계 및 자체적으로 설정된 피폭방사선량 관리 목표치가 기술되어 있다. 피폭방사선량 관리 목표치는 종사자의 피폭방사선량이 미국 원자력규제위원회에서 제시하고 있는 법적 선량한도를 초과하지 않도록 일정 여유분을 두어 선량한도 이하로 설정된 피폭방사선량 기준치이다. 원자력발전소 해체 시 종사자의 피폭방사선량은 자체적으로 설정된 피폭방사선량 관리 목표치를 초과하지 않도록 관리된다.

국내 원자력발전소 해체 시에도 종사자의 피폭방사선량이 국내 원자력안전법에서 제시하는 법적 선량한도 미만으로 관리되어야 한다. 이를 위해 원자력발전소 해체 종사자에 대한 방사선피폭 관리체계 및 피폭방사선량 관리 목표치를 수립하여야 한다. 미국의 정지 후 해체활동 보고서 및 해체계획서(Decommissioning plan, DP)에서는 원자력발전소 별 해체 시 방사선피폭 관리체계 및 피폭방사선량 관리 목표치를 제시하고 있으나, 미국의 방사선 방호기준과 국내 방사선 방호기준은 서로 상이하다. 따라서 국내 실정을 고려하여 국내 원자력발전소 해체 시 적용하기 위한 방사선피폭 관리체계 및 피폭방사선량 관리 목표치를 수립할 필요가 있다. 이를 위해서는 원자력발전소 및 원자력시설 해체 시 적용된 방사선피폭 관리체계 및 피폭방사선량 관리 목표치에 대한 사전 조사가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 원자력발전소 해체에 대한 경험이 많은 미국을 대상으로 원자력시설 해체 시 적용된 방사선피폭 관리체계 및 피폭방사선량 관리 목표치를 조사하였다. 이를 위해 미국의 원자력시설 해체 시 제출된 정지 후 해체활동 보고서 및 해체계획서를 조사하였다.

재료 및 방법

미국의 원자력시설 해체 시 적용된 방사선작업종사자의 피폭방사선량 관리체계와 관리 목표치를 파악하기 위하여, 정지 후 해체활동 보고서(PSDAR)와 해체계획서(DP)를 조사하였다. 정지 후 해체활동 보고서 및 해체계획서 조사는 미국 원자력규제위원회(NRC)에서 제공하고 있는 웹 기반의 아담스(ADAMS) 기록 관리 시스템을 활용하였다(NRC ADAMS 2017). 정지 후 해체활동 보고서는 미국에서 원자력시설 해체 착수 전 의무적으로 제출해야 하는 문서로서, 해체활동계획에 대한 상세일정, 예상금액, 환경영향평가 등의 내용으로 구성되어 있었다(KINS 2006). 해체활동계획은 세부적으로 해체 활동 시 종사자 방사선 피폭관리, 업무분담에 대한 사항 등으로 구성되어 있었다. 정지 후 해체활동 보고서 및 해체계획서 상의 종사자 방사선피폭 관리체계에서는 일반적으로 미국 원자력규제위원회 규제지침에 제시되어 있는 법적 선량한도와 방호최적화 원칙을 만족시키겠다는 언급만 되어있었으며, 구체적인 목표치는 제시되어 있지 않았다.

해체계획서는 10 Code of Federal Regulations (CFR) 50 개정 이전 원자력시설 해체 시 의무적으로 제출된 문서이다. 일부 원자력 시설에서는 10 CFR 50 개정 이전 해체계획서를 작성하여 미국 원자력규제위원회에 제출하였다. 해체계획서에도 해체활동계획에 대한 상세일정, 예상금액, 환경영향평가 등의 내용이 기술되어 있었다. 해체계획서에는 정지 후 해체활동 보고서와 달리 종사자에 대한 피폭방사선량 관리 목표치가 구체적인 수치로 기술되어 있었다. 본 연구에서는 미국의 7개 원자력시설 해체 시 적용된 피폭방사선량 관리체계와 관리 목표치를 조사하였다(Table 1 참조) (YAEC 1993; Mallinckrodt Inc. 2002; UM 2004; Xcel Energy 2004; Mallinckrodt Inc. 2008; SAIC 2009; Dairyland Power Cooperative 2010; ENERCON 2012). 조사된 시설 중 3개는 상업용 원자로시설이며, 2개는 연구용 및 실험용 원자로시설, 나머지 2개는 기타 원자력관계시설(사용후핵연료 재처리 시설(WVDP)과 광석채취 시설(CT-Plant))이다.

1. 피폭방사선량 관리체계 조사

원자력시설 해체 시 종사자의 방사선피폭과 운영 시 종사자의 방사선피폭은 상이하다(IAEA 2013). 따라서 원자력시설 해체 시에는 해당 작업의 특성을 반영하여 해체작업에 최적화된 프로젝트 조직을 구성할 필요가 있다. 특히 원자력발전소의 경우 영구정지 후 운전을 위한 조직이나 운영체

Table 1. Reactor type of nuclear facilities

Reactor type	Nuclear facility	Note
Power reactor	Yankee Rowe	175 MW
	La Crosse	50 MW
	Pathfinder	66 MW
Research & test reactor	Ford	2 MW
	BMRC (Buffalo materials research center)	1 MW
Other nuclear facilities	WVDP (West valley demonstration project)	Reprocessed 600 tons of spent fuels
	C-T (Columbium-Tantalum) Plant	Processed 50,000 tons of uranium products

계 등을 해체를 위한 조직이나 운영체계로 전환하는 과정이 필요하다(신 2016). 미국에서는 원자력시설 해체 시 해체를 위한 프로젝트 조직을 구성하였다. 프로젝트 조직에는 종사자의 방사선피폭을 관리하는 담당자가 존재하였다. 본 연구에서는 정지 후 해체활동 보고서 및 해체계획서를 통해 각 원자력시설 별 해체를 위한 프로젝트 조직의 피폭방사선량 관리체계를 조사하였다.

2. 피폭방사선량 관리 목표치 조사

원자력시설 해체 시 종사자의 피폭방사선량이 법적 선량한도와 유사하도록 작업을 계획할 경우, 피폭방사선량 평가의 불확도 및 예상하지 못한 상황 등의 다양한 요인으로 인하여 종사자의 피폭방사선량이 선량한도를 초과할 가능성이 있다. 그리고 국제방사선방호위원회(ICRP)의 As Low As Reasonably Achievable (ALARA) 원칙에 따라 경제적 요인, 사회적 요인 등을 고려하여 종사자의 방사선피폭을 합리적으로 최소화할 필요가 있다(ICRP 1991). 미국에서는 원자력시설 해체 시 피폭방사선량 관리 목표치를 설정하여 종사자의 방사선피폭을 관리하였다. 피폭방사선량 관리 목표치는 원자력시설 별 경제적 요인, 사회적 요인 등을 고려하여 자체적으로 설정하는 피폭방사선량 기준치이다. 본 연구에서는 정지 후 해체활동 보고서 및 해체계획서를 통해 각 원자력시설 별 적용된 피폭방사선량 관리 목표치를 조사하였다.

결과 및 고찰

1. 피폭방사선량 관리체계

정지 후 해체활동 보고서 및 해체계획서를 통해 상업용 원자로시설, 연구용 원자로시설, 기타 원자력관계시설을 포함한 미국의 7개 원자력시설 해체 시 적용된 피폭방사선량 관리체계를 조사하였다. Yankee Rowe 발전소는 매사추세츠 주에 위치하였으며, Westinghouse Electric Corporation (WEC)가 설계하고 Yankee Atomic Electric Company (YAEC)가 운영한 발전소이다. 175 MW의 전기 에너지를 생산하도록 설계되어, 1961년 상업 운전을 시작하였으며, 약 30년간의 상업 운전을 한 Yankee Rowe 발전소는 원자로용기의 무결성과 관련된 규제 불확실성으로 인하여 1992년 최종적으로 영구 정지되었다(YAEC 1993). 관리체계 예시로, Fig. 1에 Yankee Rowe 발전소의 해체 프로젝트 조직을 나타내었다. 발전소 감독관은 방사선방호 프로그램을 효과적으로 이행하고, 해체와 관련된 모든 구성원의 방사선피폭을 최소화하는 업무를 수행하였다. 방사선방호 관리자는 방사선방호 프로그램 정책 개발 및 시행에 대한 책임을 가지고 있다. 해당 관리자는 종사자의 불필요한 방사선피폭이 발생하거나, 종사자의 피폭방사선량이 일정 수준에 도달할 경우 종사자의 작업을 중단할 권한을 가지고 있다. 그리고 방사선방호 관리자 하부에는 방사선방호 엔지니어, ALARA 감독자, 방사선방호 감독자, 폐기물 감독자, 화학/환경 엔지니어 등 5개 분야의 직원들이 있으며, 종사자의 방사선방호 상황을 방사선방호 관리자에게 보고할 책임이 있다. 해당 요원들도 종사자의 불필요한 방사선피폭이 발생하거나, 종사자의 피폭방사선량이 일정 수준에 도달할 경우 종사자의 작업을 중단할 권한을 가지고 있다.

La Crosse 발전소는 위스콘신 주에 위치한 50 MW 용량 발전소이며, 1969년 정상운전을 시작하고 20년 동안 운영되었으나, 원자력발전의 경쟁력이 약화되고 지역사회의 점차 낮아지는 전기 수요로 인해, 1987년 영구 정지되었다(Dairyland Power Cooperative 2010). La Crosse 발전소의 해체를 감독하는 프로젝트 조직도에 방사선 관련 업무를 담당하는 직책은 (1) 발전소 관리자, (2) 보건, 안전, 유지, 보수 책임자, (3) 방사선 방호 기술자로 구분된다. 발전소 관리자는 최상위의 감독자로서 원자력 시설에 대한 안전, 운영, 감시, 장기 계획, 라이센스 등의 전반적인 부분을 담당하였다. 이 외에도 사용후핵연료 독립저장시설(Independent Spent Fuel Storage; ISFS)에 대해서도 동일한 업무를 수행하였다. 그리고 La Crosse 발전소의 전 직원이 ALARA 원칙을 준수하는지 확인하는 작업을 수행하였다. 보건, 안전, 유지, 보수 책임자는 원전 인근 지역주민들의 방사선학적 방호, 직원 및 방문객들의 안전을 담당하였다. 그리고 방사선

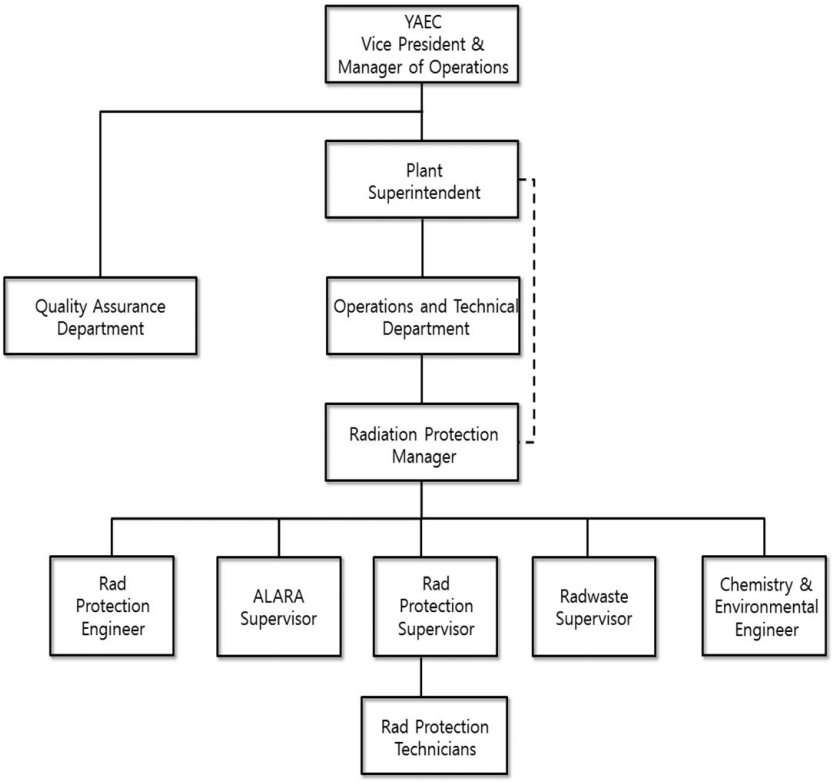

Fig. 1. Decommissioning organization of Yankee Rowe nuclear power plant.

환경 모니터링을 수행하고 방사선피폭을 통제하며 종사자의 피폭방사선량이 일정 수준을 초과하지 않도록 관리하였다. 방사선방호 기술자는 방사선방호, 작업 계획을 담당하였다. 그리고 방사선피폭을 합리적으로 달성할 수 있는 수준으로 낮추도록 보건, 안전, 유지, 보수 책임자와 협력하여 활동업무를 수행하였다. 이외에도 운영검토위원회(Operations review committee, ORC), 안전검토위원회(Safety review committee, SRC), 품질보증(Quality assurance, QA)을 운영하였다. 운영검토위원회는 발전소의 독립적인 부서로서 작업현장을 직접 관리하는 역할을 수행하였다. 발전소 관리자와 운영검토위원회는 종사자의 방사선피폭이 일정 수준을 초과할 경우 작업을 중단시킬 권한을 가지고 있었다.

Pathfinder 발전소는 사우스다코타 주에 위치한 66 MW 용량의 시설이며, 1966년 상업 운전을 시작하였으나, 1967년 이후 영구적으로 운영이 중단되었다(Xcel Energy 2004). 영구 중단 후 1991년 원자로와 연료 저장시설의 해체가 시작되었다. 발전소 관리자는 발전소 해체활동에 대한 전반적인 책임을 가지며, 최상위의 감독자로 업무를 수행한다. 해체 프로젝트 관리자는 해체 프로젝트의 계획, 개발, 시행을 직접 담당한다. 방사선안전관리자(Radiation Safety Officer; RSO)는 방사선 작업 허가, 절차, 조사, 퇴역에 대한 방사선 모니터링 등의 방사선안전 프로그램을 담당한다. 방사선 안전관리자는 종사자의 피폭방사선량이 일정 수준을 초과할 경우 작업을 중단시킬 권한을 가지고 있었다.

연구로 및 실험로에 대해서는 미시간 대학의 Ford 원자로, 뉴욕주립대학교의 버팔로재료연구센터(Buffalo material research center, BMRC)의 실험원자로에 대해 조사하였다(UM 2004, ENERCON 2012). Ford 원자로는 미시간 대학교의 Michigan Memorial Phoenix Project (MMPP)에서 운영한 2 MW 용량의 연구용원자로다. 1957년 원자로 가동이 시작되었고, 2003년 가동이 중단되어 약 47년간 운영이 되었다. Ford 원자로의 해체를 감독하는 관리체계를 Fig. 2에 나타내었다. 이 경우 해체는 대학이라는 특수성 때문에, 외부업체와 계약을 통해 이루어 졌다. 해체 프로젝트에서 최상위 감독자는 미시간 대학교 경영자이며, 전체적인 계획, 관리, 자금 지원을 담당하였다. 방사선방호에 대해서는 대학의 방사선안전책임자가 종사자의 방사선피폭을 관리하는 업무를 수행하였다. 그리고 해체 프로젝트의 조직을 결정하는 역할을 수행하였으며, 해체 활동으로 인한 집단선량을 감독하며 안전에 대한 전반적인 부분을 담당하였다. 버팔로 재료연구센터는 1 MW 용량의 연구 및 실험원자로를 운영하는 시설로, 1961년 가동을 시작하였으나, 1963년 원자로 가동을 중단하였다. 그 이후 미사용 연료는 노스캐롤라이나 대학교로 운송되었고, 사용후핵연료는 아이다호 국립연구소로 운반

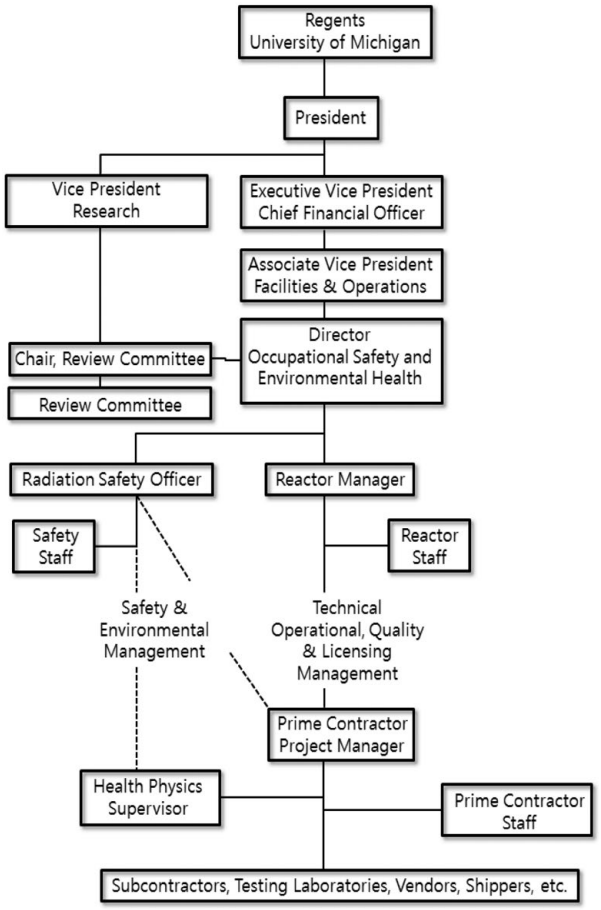

Fig. 2. Decommissioning organization of Ford research nuclear reactor.

되었다. 해체 관리체계에서 프로젝트 관리자가 임명되어 해체과정 전체를 감독하였다. 이외에도 방사선안전과 일반산업안전을 관리하기 위하여 방사선안전 직원, 해체안전 직원을 임명하였다.

기타 원자력관련시설에 대해서는 상업용 핵연료 재처리 시설인 West Valley Demonstration Project (WVDP) 시설과, 광석채취 시설인 Columbium-Tantalum (C-T) 시설에 대해 조사하였다(Mallinckrodt Inc. 2002; Mallinckrodt Inc. 2008; SAIC 2009). WVDP 시설은 미국 원자력규제위원회의 허가를 받은 원자력시설 중 유일하게 미국에서 운영된 상업용 핵연료 재처리 시설로, 1972년까지 우라늄과 플루토늄을 회수하기 위해 핵연료를 재처리하였다. 재처리 작업으로 약 600,000 갤런의 고준위 폐기물이 발생하였으며, 발생한 고준위 폐기물은 지하 폐수 탱크에 저장되었다. 미국에너지부(DOE)는 1980년 오염 제거 및 해체에 대한 법적 의무에 따라 해당 시설의 해체를 결정하였으며, 1981년과 2003년에 미국 원자력규제위원회에 WVDP 시설의 해체계획서를 제출하였다. WVDP 시설 해체에 대한 관리체계를 Fig. 3에 나타내었다. 해당 관리체계에서는 방사선 관리책임자와 보건안전 관리자를 별개로 두어 체계적으로 해체 작업을 관리하고자 하였다. C-T 시설은 미주리 주에 위치한 니오븀과 탄탈럼을 광석으로부터 채취하는 시설이다. 1961년 C-T 생산을 가동하기 시작하였으며, 1987년 시설이 영구 정지되었다. 이후 1993년 제염 · 해체를 허가 받아 본격적으로 해체 작업을 시작하였다. 해체 관리체계에서는 C-T 프로젝트 관리자와 방사선 안전관리자가 최상위의 감독자로 전체 해체 프로젝트를 감독하였다.

상업용 원자력발전소, 연구용원자로, 기타 원자력관련시설 모두 정지 후 해체활동 보고서 또는 해체계획서에 종사자의 방사선피폭을 관리하기 위한 해체 프로젝트 조직을 구성하였다. 해체 프로젝트 조직에는 종사자의 방사선피폭을 담당하는 관리부서 및 관리자가 존재하였으며, 종사자의 피폭방사선량이 일정 기준을 초과할 경우 작업을 중단시킬 권한을 가지고 있었다.

2. 피폭방사선량 관리 목표치

본 연구에서는 해체를 실시한 미국의 7개 원자력 시설에 대해 정지 후 해체활동 보고서 및 해체계획서를 통해 각 원자력시설별 적용된 피폭방사선량 관리 목표치를 조사하였다. 미국의 원자력시설에서는 해체 프로젝트 조직을 구성하였으며, 각 조직에서 종사자의 방사선피폭을 전담으로 담당하는 관리부서 및 관리자가 존재하였다. 해당 관리부서 및 관리자는 종사자의 피폭방사선량이 자체적으로 설정한 피폭방사선량 관리 목표치를 초과하지 않도록 관리하였다. Table 2 및 Fig. 4에 본 연구에서 조사한 미국의 원자력시설별 해체 시 적용된 피폭방사선량 관리 목표치를 나타내었다. 관리 목표치는 총 유효선량당량(Total Effective Dose Equivalent: TEDE), 총 장기선량당량(Total Organ Dose Equivalent: TODE), 수정체선량당량(Lens Dose Equivalent: LDE), 표층선량당량(Shallow Dose Equivalent: SDE), 임신기간 중 배/태아에 대한 선량으로 주어져 있으며, 모든 선량에 대해 선량한도에 대한 관리 목표치의 비율은 동일하였다.

본 연구에서 조사한 상업용 원자로시설의 경우 피폭방사선량 관리 목표치는 미국 원자력규제위원회에서 제시하고 있는 법적 선량한도의 50~100% (25~50 mSv · year^{-1}) 수준에서 설정되어 시설 해체 시에 적용되었다. Yankee Rowe 발전소에서는 피폭방사선량 관리 목표치를 원자력규제위원회에서 제시하고 있는 선량한도와 동일한 수준인 연간 50 mSv로 설정하였다. 방사선방호 관리자와 관련 담당자들은 종사자의 연간 피폭방사선량이 선량한도를 초과하지 않도록 관리하였다. La Crosse 발전소에서는 피폭방사선량 관리 목표치를 25 mSv 및 40 mSv 두 단계로 설정하였다. 발전소

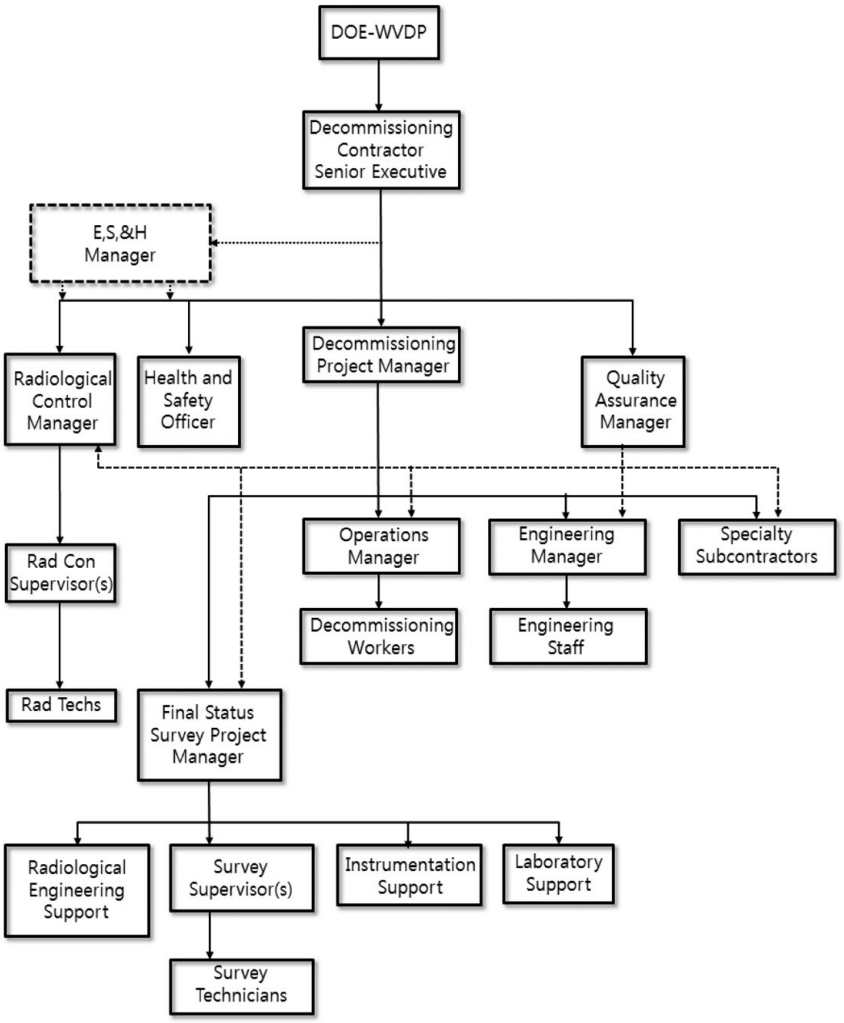

Fig. 3. Decommissioning organization of WVDP (West Valley Demonstration Project).

관리자는 종사자의 연간 피폭방사선량이 25 mSv를 초과하지 않도록 관리하였으며, 운영검토위원회는 피폭방사선량이 40 mSv를 초과하지 않도록 하였다. 반면 Pathfinder 발전소에서는 피폭방사선량 관리 목표치를 25 mSv로 설정하였다.

연구로 시설의 경우 피폭방사선량 관리 목표치는 선량한도의 10~40% (5~20 mSv·year^{-1}) 수준에서 설정되어 시설 해체 시에 적용되었다. Ford 연구로 시설에서는 피폭방사선량 관리 목표치를 연간 20 mSv로 설정하였으며, 버팔로재료연구센터에서는 종사자의 연간 피폭방사선량이 5 mSv를 초과하지 않도록 관리하였다.

기타 원자력관련시설 경우 피폭방사선량 관리 목표치는 선량한도의 10~50% (5~25 mSv·year^{-1}) 수준에서 설정되어 시설 해체 시에 적용되었다. 핵연료재처리 시설인 WVDP에서는 피폭방사선량 관리 목표치를 연간과 일일로 구분하여 해체 시 종사자의 방사선피폭을 보다 엄격하게 관리하였다. 연간 관리 목표치는 5 mSv로 설정하였으며, 일일 관리 목표치는 1 mSv로 설정하였다. 광석채취 시설인 C-T 시설에서는 피폭방사선량 관리 목표치를 연간 20 mSv로 설정하였다.

미국 원자력규제위원회에서는 종사자에 대한 선량한도만을 제시하고 있고, 관리 목표치는 제시하고 있지 않다. 원자력시설 해체 시 종사자의 피폭방사선량이 선량한도와 유사하도록 작업을 계획할 경우, 피폭방사선량 평가의 불확도 및 예상하지 못한 상황 등의 다양한 요인으로 인하여 종사자의 피폭방사선량이 선량한도를 초과할 가능성이 있다. 따라서 각 해체시설에서는 피폭방사선량 관리 목표치를 자체적으로 설정하고 운영하였다. 본 연구의 조사에 의하면, 미국의 상업용 원자력발전소 해체 시 종사자의 피폭방사선량 관리 목표치는 선량한도의 50~100% (25~50 mSv·year^{-1}) 수준으로 설정되었다. 연구용원자로 및 기타 원자력관계시설에서는 종사자의 방사선피폭을 합리적으로 최소화하기 위하여 상업용 원자력발전소에 비하여 관리 목표치가 낮게,

Table 2. Annual target doses

Reactor type	Nuclear facility	Annual target doses (mSv)				
		TEDE[a]	TODE[b]	LDE[c]	SDE[d]	Embryo/Fetus[e]
Power reactor	Yankee Rowe	50	500	150	500	5
	La Crosse (ORC)	40	400	120	400	4
	La Crosse (Plant manager)	25	250	75	250	2.5
	Pathfinder	25	250	75	250	2.5
Research & test reactor	Ford	20	20	20	20	1
	BMRC	5	50	15	50	5
Other nuclear facilities	WVDP	5	50	15	50	5
	C-T Plant	25	250	75	250	2.5

[a]Total effective dose equivalent
[b]Total organ dose equivalent
[c]Lens dose equivalent
[d]Shallow dose equivalent
[e]Dose received by an embryo/fetus during entire pregnancy due to occupational exposure

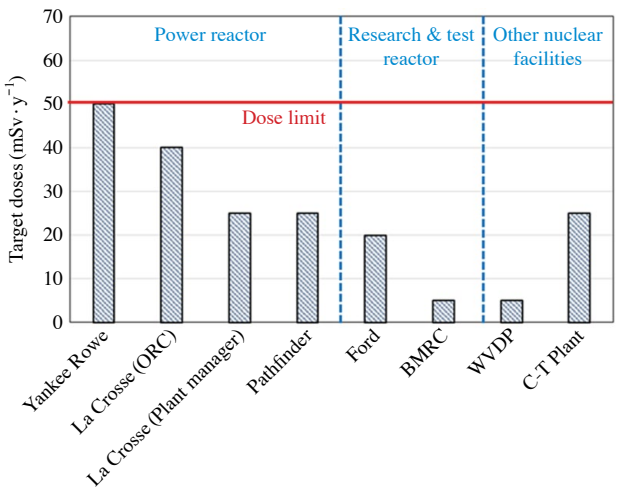

Fig. 4. Annual target doses of nuclear facilities in total effective dose equivalent (TEDE).

선량한도의 10~50% (5~25 mSv·year^{-1}) 수준으로 설정되었다.

국내의 경우에도, 향후 원자력발전소 해체 시 시설의 특성을 반영하고, 경제적 요인, 사회적 요인 등을 반영하여 관리 목표치를 설정하고, 이를 종사자의 방사선 안전관리에 적용해야 할 것이다. 관리 목표치는 기본적 방호수준을 나타내며, 항상 해당 선량한도와 같거나 이보다 낮아야 할 것이다. 국내의 경우 운영 중인 원전에 대해서도 원자력안전법에서 정하고 있는 선량한도보다 낮은 자체 관리기준을 두어 방사선작업종사자의 피폭방사선량을 관리하고 있다. 해당 관리 기준은 국내 법적 선량한도, 원자력발전소의 방사화 및 오염 정도를 기반으로 설정된 수치이다. 경수로의 경우 일반적으로 법적 선량한도의 80~90% (16~18 mSv·year^{-1}) 수준에서, 중수로의 경우에는 70~80% (14~16 mSv·year^{-1}) 수준에서 설정되어 운영되고 있다. 원자력시설 해체 시 국외의 관리 목표치 수준, 운영 중인 국내 원전의 관리기준 등을 종합적으로 고려하였을 경우, 국내에서 원전 해체 시 관리 목표치를 법적 선량한도의 70~90% (14~18 mSv·year^{-1}) 수준에서 설정하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 현재 미국 원자력규제위원회에서 제시하고 있는 법적 선량한도는 ICRP 26 권고에서 제시하는 선량한도를 근거로 하여 연간 50 mSv이다 (ICRP 1977). 하지만 국내의 경우 법적 선량한도는 ICRP 60 권고를 기반으로 하고 있으며, 이는 대략 연간 20 mSv (연간 50 mSv를 넘지 아니하는 범위에서 5년간 100 mSv)에 상응한다 (ICRP 1991, 원자력안전위원회 2017). 따라서 상업용 원자력발전소 해체 시 관리 목표치를 법적 선량한도의 70~90% (14~18 mSv·year^{-1}) 수준으로 설정하여도, 미국 상업용원자로 해체 시 해체 시 적용되었던 관리 목표치 (25~50 mSv·year^{-1})보다 훨씬 낮은 수준이다.

결 론

원자력발전소의 해체 작업 시 종사자의 피폭방사선량 관리가 이루어져야 한다. 본 연구에서는 원자력발전소 해체에 대한 경험이 많은 미국을 대상으로 상업용 원자로시설, 연구용 원자로시설, 기타 원자력관계시설 해체 시 적용된 방사선피폭 관리체계 및 피폭방사선량 관리 목표치를 조사하였다.

상업용 원자력발전소, 연구용원자로, 기타 원자력관련시설 모두 정지 후 해체활동 보고서 또는 해체계획서에 종사자의 방사선피폭을 관리하기 위한 해체 프로젝트 조직을 구성하였다. 해체 프로젝트 조직에는 종사자의 방사선피폭을 담당하는 관리부서 및 관리자가 존재하였으며, 종사자의 피폭방사선량이 일정 기준을 초과할 경우 작업을 중단시킬 권

한을 가지고 있었다.

미국 원자력규제위원회에서는 종사자에 대한 선량한도만을 제시하고 있고, 관리 목표치는 제시하고 있지 않다. 따라서 각 해체시설에서는 피폭방사선량 평가의 불확도 및 예상하지 못한 상황 등의 다양한 요인을 반영하여 피폭방사선량 관리 목표치를 자체적으로 설정하고 운영하였다. 본 연구의 조사에 의하면, 미국의 상업용 원자력발전소 해체 시 종사자의 피폭방사선량 관리 목표치는 법적 선량한도의 50~100% (25~50 mSv·year^{-1}) 수준으로 설정되었다. 연구용원자로 및 기타 원자력관계시설에서는 종사자의 방사선피폭을 합리적으로 최소화하기 위하여 상업용 원자력발전소에 비하여 관리 목표치가 낮게, 선량한도의 10~50% (5~25 mSv·year^{-1}) 수준으로 설정되었다.

국내의 경우에도, 향후 원자력발전소 해체 시 시설의 특성을 반영하고, 경제적 요인, 사회적 요인 등을 반영하여 관리 목표치를 설정하고, 이를 종사자의 방사선 안전관리에 적용해야 할 것이다. 국외의 관리 목표치 수준, 운영중인 국내 원전의 관리기준 등을 종합적으로 고려하였을 경우, 국내에서 원전 해체 시 관리 목표치를 법적 선량한도의 70~90% (14~18 mSv·year^{-1}) 수준에서 설정하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 본 연구의 결과물은 향후 국내 원자력발전소 해체 시 종사자의 최적화된 작업계획을 수립하기 위한 피폭방사선량 관리 목표치 설정 그리고 종사자의 방사선피폭 관리체계 정립에 활용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

원자력안전위원회. 2017. 방사선방호 등에 관한 기준. 원자력안전위원회고시 제2017-36호.

신종한. 2016. 방사성폐기물관리시설 안전규제 체계 선진화 방안 연구-북한 비핵화에 대비한 원자력 관련시설의 해체 등 방사성폐기물 대응을 중심으로. The Institute for unification education No 51. 통일부 통일교육원.

Dairyland Power Cooperative. 2010. La Crosse Boiling Water Reactor Decommissioning Plan Revision. Dairyland Power Cooperative.

ENERCON. 2012. Decommissioning Plan Buffalo Materials Research Center. ENERCON.

IAEA. 2013. Safety assessment for decommissioning. IAEA Safety Reports Series No 77. International Atomic Energy Agency Vienna.

IAEA PRIS. 2017. Country statistics of nuclear power reactors. IAEA PRIS Homepage. Available from: https://www.iaea.org/pris/. Accessed on June 8.

ICRP. 1977. Recommendations of ICRP. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1(3). International Commission on Radiological Protection. Oxford. Pergamon Press.

ICRP. 1991. 1990 Recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3). International Commission on Radiological Protection. Oxford. Pergamon Press.

ICRP. 2007. The 2007 Recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2-4). International Commission on Radiological Protection. Oxford. Pergamon Press.

KINS. 2006. Nuclear safety regulation for decommissioning of nuclear facilities in the United States of American and Japan. KINS/RR-411. Korea Institute of Nuclear Safety.

Mallinckrodt Inc. 2002. Phase 1 Plan for C-T Decommissioning. Mallinckrodt Inc.

Mallinckrodt Inc. 2008. C-T Phase 2 Decommissioning Plan-revision 2. Mallinckrodt Inc.

NRC ADAMS. 2017. Research of DP and PSDAR. Web-based ADAMS. Available from: https://adams.nrc.gov/wba/. Accessed on Nov 11.

SAIC. 2009. Phase 1 Decommissioning Plan for the West Valley Demonstration Project. Science Applications International Corporation.

UM. 2004. Decommissioning Plan for the Ford Nuclear Reactor. The University of Michigan.

Xcel Energy. 2004. Pathfinder Decommissioning Plan. Xcel Energy.

YAEC. 1993. Yankee Nuclear Power Station Decommissioning Plan Revision: 0.0. Yankee Atomic Electric Company.

Received: 3 February 2018
Revised: 7 March 2018
Revision accepted: 17 March 2018