JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

16(4) : 311-324 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.4.311

국내 원자력발전소 생애주기에 따른 해체 관련 규제요건 가변성 및 상호연계성 분석

이재민[1], 이수연[1], 정재학[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Analysis of Variability and Interrelationship of Decommissioning-related Regulatory Requirements According to the Life Cycle of Nuclear Power Plants in Korea

Jae Min Lee[1], Su Yeon Lee[1] and Jae Hak Cheong[1,*]

[1]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deogyeong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

Abstract Configuration management is being performed for securing safety and reliability during operation in domestic nuclear power plants. The three elements of configuration management are requirements, physical configuration, and facility configuration documentation, and each element must be linked and applied throughout the entire life cycle of nuclear power plants, such as design, construction, operation, and decommissioning. However, in domestic nuclear power plants, configuration management is only applied in operation step and configuration management for decommissioning has not yet been introduced. Therefore, in this study, decommissioning-related regulatory requirements are investigated and variability and interrelationship of decommissioning-related regulatory requirements according to the life cycle of nuclear power plants are analyzed for the safe decommissioning of nuclear power plant. As a result, the difference in requirements according to the life cycle and the complexity of interconnected requirements were confirmed.

Key words: Regulatory requirements, Decommissioning, Interrelationship, Variability, Life cycle

1. 서 론

2011년 3월 후쿠시마 원자력발전소(이하 '원전')의 방사능 누출 사고와 2013년 원전 부품비리 사건 이후로 원전에 대한 사회적인 관심과 안전성에 대한 요구가 증가했다. 형상관리(Configuration management)는 원전의 안전성과 신뢰성을 확보하기 위한 활동의 하나로서 원전의 안전에 중요한 구조물·계통·기기(Structures, Systems, and Components; SSCs)가 항상 제 기능을 발휘함을 객관적으로 보장하기 위한 종합적인 기술관리 체계이다[1]. 즉, 형상관리는 "설계기준, 설비 형상정보 및 물리적 형상들 간의 일치성을 유지하면서, 원전 SSCs의 특성을 식별, 문서화 및 변경을 수행하기 위한 체계적인 접근방법"으로 정의할 수 있다[2]. 원전을 장기 운영할 경우 다양한 이유(예: 노후화된 기술, 안전한 운영을 위한 요건 변경, 직원의 부서 이동 및 인적 결함 등)로 오류(error)가

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry
*Corresponding author. Jae Hak Cheong
Tel. +82-31-201-3689 Fax. +82-31-204-8206 E-mail. jhcheong@khu.ac.kr
Received 25 August 2022 Revised 16 December 2022 Accepted 21 December 2022

발생할 수 있으며, IAEA Incident Reporting System (IRS)에 따르면 기록된 사건의 평균 25%가 형상 오류 및 결함에 의한 것으로 보고하고 있다. 이는 장기 운영원전의 안전성 확보를 위한 형상관리의 필요성과 중요성을 암시하는 것이다[3]. 원자력시설 중 발전용원자로에 적용하는 형상관리(Configuration management)의 기본 개념은 국민과 환경을 보호하기 위해 원전이 실제 인허가 및 설계 기반에 따라 운영 및 유지되고 있는지 확인하여 이해관계자에게 관련 정보를 제공하는 것으로 요약할 수 있다. 형상관리는 시설 및 구성요소뿐만 아니라 관련 문서, 지원장비, 소프트웨어, 가공 처리된 물품, 서비스, 기술문서 등에 적용 가능하다. 원전에서 형상관리를 효과적으로 이행하기 위해서는 설계요건(Design requirements), 설비형상문서(Facility configuration documentation, FCD) 및 물리적 형상(Physical configuration) 세 가지 요소가 서로 균형을 유지해야 하며, 이는 다른 원자력시설에서도 동일하게 적용될 수 있다. 설계요건은 표준(Standards), 규제요건(Regulatory requirements), 최종설계문서에 반영된 기술적 요구사항 등이고, 설비 형상문서는 플랜트 설계·운영 및 유지·보수 방식 등을 정의하는 정보가 포함된 문서의 집합이다. 한편, 물리적 형상이란 현장에 실제 설치·운영되는 SSCs 항목 등을 말한다. 형상관리의 목적은 기본적으로 설계기반 형상을 잘 유지하는 것이라고 할 수 있지만, 주기적으로 변경·삭제 또는 추가되는 항목 또한 정확하게 반영하여 효과적으로 관리해야 한다[4]. IAEA 기본안전원칙(Fundamental Safety Principles)에서 원전 형상관리를 직접 규정하지는 않았지만, 안전원칙 1(안전에 대한 책임: Responsibility for Safety)에 명시된 "안전에 대한 일차적 책임은 방사선 위험을 발생시키는 시설 및 활동에 책임이 있는 사람 또는 조직에 있어야 한다"에 따르면 원전 운영의 안전성을 객관적으로 입증하기 위한 '형상관리'는 원전 운영자의 책임하에 수행되어야 할 활동이라고 할 수 있다[5].

원전에서 형상관리가 체계적으로 이루어지면 운영 중 원전의 SSCs의 기능 및 성능이 설계된 대로 작동·유지될 수 있고, 이를 통하여 사건의 발생 빈도 또는 확률을 저감할 수 있다. 이와 같이 형상관리는 지금까지 운영 중 원전을 대상으로 주로 적용되어 왔으나 IAEA Safety Reports Series (SRS) No. 65 (Application of Configuration Management in Nuclear Power Plants)에서는 원전의 설계, 건설, 운영 및 해체 등 생애주기 전 단계에 걸쳐 형상관리 적용을 권고하고 있다. 특히, 해체는 운영 중에 지속적으로 유지되던 형상관리에 변화를 유발하므로 원전 해체 단계의 형상관리는 하나의 특별한 도전과제(Special challenges)라고 명시하고 있다. 원전 해체 형상관리는 발전소 건물과 부지에 대한 안전한 해체를 목적으로 하는 반면 가동원전 형상관리는 발전소의 안전기능 유지가 목적이므로 차별성을 가진다[4]. 이 연구에서는 원전 해체 단계에서 확인해야 하는 형상관리 3요소를 원전 해체요건(→ 설계요구사항), 해체 설비/부지 형상정보(→ 설비형상문서), 해체물리형상(→ 물리적형상)으로 변경 구분하였다(Fig. 1 참조).

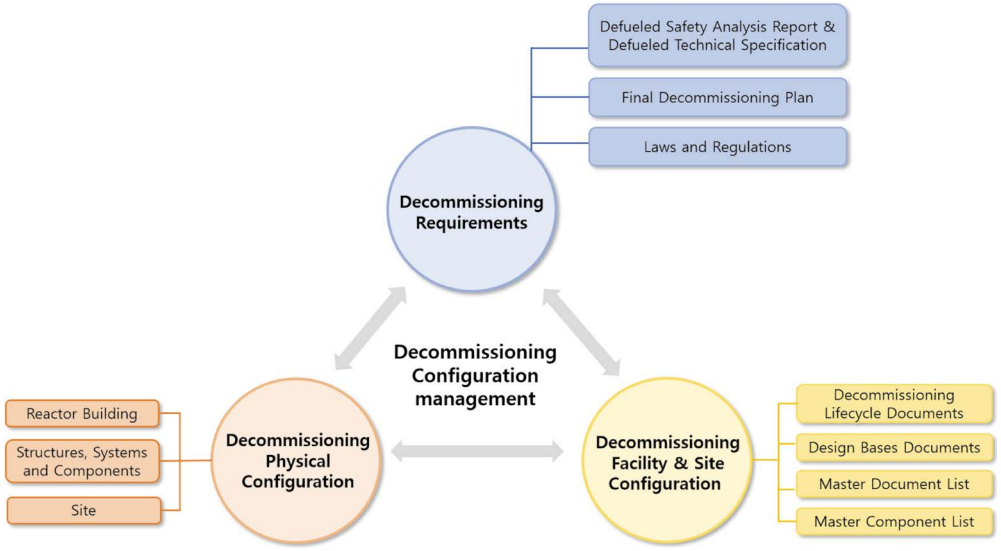

Fig. 1. Configuration management concept in decommissioning step.

안전한 원전 해체를 위한 해체 형상관리의 중요성은 최근 연구에서도 다양하게 제기되고 있다. 박희성 등(2018)은 연구용 원자로 해체 사례를 기반으로 해체 규제요건과 기술기준을 연계한 원전 해체 형상관리 시스템을 개발하였다. 위 연구에서는 연구용원자로 해체 업무분류 체계(Work Breakdown System; WBS)를 기반으로 해체전략, 해체 설계 및 계획, 제염·해체활동, 해체 사업관리로 단계를 구분하여 원전 해체 규제요건을 수집하였다[6]. 2012년 스웨덴 FAVEO 사는 원전 해체사업에서 형상관리의 중요성을 강조하고, 해체 과정에서 발생되는 방사성폐기물의 처분전관리 및 처분에 따른 Safety Case 기반 요건을 도출하고 이러한 요건이 충족됨을 입증하기 위한 요건관리 체계를 제안하였다[7]. 이와 같이, 지금까지 여러 연구에서 원전의 안전한 해체를 위해 해체 형상관리의 중요성을 인지하고 해체 형상관리의 일부로 해체요건관리 방안을 제안하였음을 알 수 있다.

원전 해체요건은 생애주기에 따라 적용될 수 있는 시점에 차이가 있다. IAEA General Safety Guide (GSG) No. 9 (Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment)에서는 해체가 여러 단계로 나뉘며 각 단계별로 방사성유출물에 대한 배출 규제가 다르게 적용되어야 함을 강조하고 있다. 방사성유출물의 배출특성은 해체 진행 단계에 따라 유의미하게 달라질 수 있으므로 각 단계에 적합한 요건이 반영되어야 한다고 명시하고 있다[8].

따라서, 이 연구에서는 해체 형상관리 3요소 중 '해체요건'에 해당하는 현행 국내 법령 및 행정규칙 요건의 가변성을 원전 생애주기에 따라 시점을 나누어 체계적으로 분석하였다. 또한, 시점별로 적용할 원전 해체 규제요건 항목들의 상호연계성을 분석함으로써 복합하게 연계된 해체요건의 추적·변경관리가 가능함을 입증하였다. 이 연구를 통하여 도출된 원전 전 생애주기에 걸친 해체요건관리 방안은 해체 형상관리에 반영하여 궁극적으로 국내 원전의 안전한 해체에 기여할 수 있을 것이다.

2. 방 법

2.1. 원전 생애주기에 따른 해체 규제요건 분석 방법론

안전한 원전 해체를 위해 국내는 원자력안전위원회뿐만 아니라 산업통상자원부, 환경부 등 다부처에서 제시하는 현행법령 및 행정규칙을 모두 충족해야 한다. 그러나 안전한 원전 해체를 위한 요건은 해체 시점에만 확인하는 것이 아니다. 원전 건설 시 해체용이성을 고려하여 원전을 건설해야 하는 것(원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 제85조의 6)처럼 안전한 해체를 위해서는 생애주기별로 확인해야 하는 요건이 다르게 존재한다. 따라서, 이 연구에서

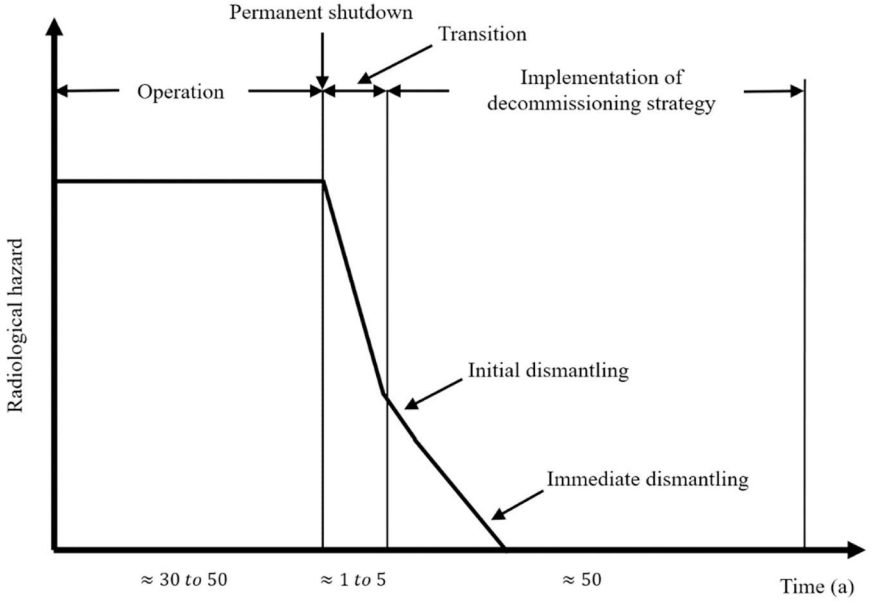

Fig. 2. Transitional decommissioning operations and typical durations in IAEA SRS No. 36.

Table 1. Description of 'Type' for interrelationship analysis

Classification	Type 0	Type 1	Type 2	Type 3
Description	Equal level	High level to low level	Low level to high level	Indirectly interrelated

는 원전의 생애주기에 따라 원전 해체를 위해 확인해야 하는 국내 법령과 행정규칙을 구분하여 수집하고자 하였다. 원전의 생애주기는 IAEA SRS No. 36에서 제시하고 있는 생애주기를 기반으로 하였다(Fig. 2 참조).

원전의 생애주기는 (1) 부지선정, (2) 설계, (3) 건설, (4) 시운전, (5) 운영 및 (6) 해체 등 총 6단계로 구분할 수 있다[5]. 최종 단계인 해체는 방사선학적 특성 조사, 장비 및 시스템의 제염 및 해체, 건물 및 구조물의 철거, 방사성 및 비방사성 폐기물 처리와 같은 작업을 포함한다. 원전의 영구정지(Permanent shutdown)와 해체 사이의 과도기(Transition phase)에는 시설 유형에 따라 고유한 작업이 존재한다. 이 시기에는 해체와 관련된 목표와 요구 조건을 만족시키기 위해 장비, 시스템, 조직 등의 변경이 필요하며, 경영진과 작업자의 사고 변화도 필요하다. 과도기 작업의 예로, 사용후핵연료 인출, 계통 배수, 정화 및 제염, 운영 중 폐기물 처리, 해체 단계에서 더 이상 필요하지 않은 현장 서비스 및 기반 시설 정비작업(Rationalization) 등이 있다.

국내 원전 규제요건은 법제처 국가법령정보센터(law.go.kr)에서 확인할 수 있으며, 현행법령과 행정규칙을 소관 부처별(원자력안전위원회, 산업통상자원부, 환경부)로 구분하여 원전 해체와 관련된 요건을 수집하였다. 수집된 요건은 IAEA SRS No. 36에서 제시된 방사선학적 위험도에 따라 운영 중, 과도기, 해체, 부지 재이용(해체 후) 시점으로 재분류하였다. 현행법령의 경우 개별 조문 단위까지 분류하였다. 행정규칙 중 원자로규칙(원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙)은 세부 조문 단위까지 분류하였고, 원자력안전위원회 소관 고시는 고시 단위로 포괄적으로 분류하였으며, 이미 법령 수준 분석으로 충분하다고 판단한 타 부처 주관 행정규칙은 분석 대상에서 제외하였다.

2.2. 원전 해체요건 상호연계성 분석 방법

국내 현행법령은 법제처 국가법령정보센터에서 관계된 요건을 쉽게 확인할 수 있도록 하이퍼링크 기능을 제공하고 있다. 그 예로, 원자력안전법 제10조제1항에서는 '발전용원자로 및 관계시설을 건설하려고 하는 자는 대통령령으로 정하는 바에 따라 위원회의 허가를 받아야 한다. 허가 받은 사항을 변경하려는 때에도 또한 같다.'라고 명시하고 있으며, 원자력안전법에서 명시한 대통령령으로 정하는 법은 원자력안전법 시행령 제17조 및 제21조를 의미한다. 따라서 이 경우 '두 요건이 상호연계성이 있다'고 할 수 있다. 이렇듯 현행법령 및 행정규칙에서 직접적으로 제시한 상호연계성뿐만 아니라, 일부 요건들이 간접적으로 상호연계되어 있는 경우도 존재한다. 따라서, 이 연구에서는 상호연계된 요건들의 유형(Type)을 나누어 분석하였다. Type 0은 동등한 수준, Type 1은 상위 법령에서 하위 법령과 연계된 경우를 의미하며, Type 2의 경우 하위 법령에서 상위 법령과 연계된 경우를 의미한다. Type 3의 경우 법령에서 언급하고 있지 않지만, 자체적으로 분석하여 간접적으로 연계되어 있는 경우를 의미한다(Table 1 참조).

생애주기별로 수집해야 하는 요건을 바탕으로 상호연계성 분석을 수행하였다. 상호연계성 분석이 모두 수행될 경우 국내 원전 해체 규제요건의 복잡성(Complexity)이 확인될 것이다. 즉, 원전 해체요건 중 하나의 요건이 바뀐다고 하더라도 상하 또는 동등한 수준의 요건들과 상호연계되어 있는 경우가 많으므로, 이 연구를 통해 하나의 요건 변경이 여러 요건에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있을 것이다. 국내 원전 해체요건의 상호연계성이 사전에 모두 분석될 경우 요건 변경으로 인한 혼란을 줄일 수 있을 것이며, 해체요건 변경 관리를 보다 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 기대한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 원전 생애주기에 따른 단계별 해체 규제요건 분석 결과

이 연구에서는 원전의 생애주기를 (1) 운영 중, (2) 과도기, (3) 해체, (4) 부지 재이용(해체 후)으로 구분하였다. 생애주기에 따른 방사선학적 위험도는 Fig. 2에 나타낸 바와

Table 2. Major tasks each life cycle of nuclear power plant

Life cycle	Operation	Transition	Decommissioning	After decommissioning
Tasks	Operating nuclear power plant	Removal of fuel, drainage of circuits, cleaning and decontamination, conditioning of operational waste, rationalization of site services and infrastructure	Radiological surveys, decontamination and dismantling of plant equipment and systems, demolition of buildings and structures and processing of the resulting radioactive and non-radioactive waste	Site reuse, reuse of materials generated by decommissioning

Table 3. Classification of law in each life cycle related to decommissioning of nuclear power plant

Life cycle	Act (Ministry)
Operation	Act On Physical Protection And Radiological Emergency (NSSC), Nuclear Safety Act (NSSC), Radioactive Waste Management Act (MOTIE), Nuclear Liability Act (NSSC), Noise And Vibration Control Act (ME), Wastes Control Act (ME)
Transition	Nuclear Liability Act (NSSC), Act On Physical Protection And Radiological Emergency (NSSC), Nuclear Safety Act (NSSC), Construction Waste Recycling Promotion Act (ME), Radioactive Waste Management Act (MOTIE), Noise And Vibration Control Act (ME), Framework Act On Resources Circulation (ME), Act On The Promotion Of Saving And Recycling Of Resources (ME), Wastes Control Act (ME)
Decommissioning	Nuclear Liability Act (NSSC), Nuclear Safety Act (NSSC), Radioactive Waste Management Act (MOTIE), Construction Waste Recycling Promotion Act (ME), Noise And Vibration Control Act (ME), Framework Act On Resources Circulation (ME), Act On The Promotion Of Saving And Recycling Of Resources (ME), Wastes Control Act (ME)
After decommissioning	Framework Act On Resources Circulation (ME), Groundwater Act (ME), Act On The Promotion Of Saving And Recycling Of Resources (ME), Natural Environment Conservation Act (ME)

※ NSSC (Nuclear Safety And Security Commission), MOTIE (Ministry of Trade, Industry and Energy), ME (Ministry of Environment)

같이 시간의 흐름에 따라 그 위험도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. Table 2는 IAEA SRS No. 36에서 제공하는 원전의 생애주기별 주요 작업을 기반으로 이 연구에서 최종적으로 정의한 원전의 생애주기별 주요 작업이다.

원전의 생애주기에 따라 확인해야 하는 원전 해체 관련 현행법령은 원자력안전위원회, 산업통상자원부, 환경부 총 3가지 소관부처에 대해 분석하였으며, 이를 Table 3에 정리하였다. 현행법령은 생애주기에 따라 분류하였으며, 이때 해체를 위해 검토해야 하는 조문이 존재하는 법령만을 생애주기에 따라 분류하였다.

Table 3에 분류된 생애주기별 해체 관련 현행법령을 기반으로 세부조항을 Table 5에 분석하여 정리하였다. 세부

Table 4. Abbreviation of act and regulations related to decommissioning of nuclear power plant

	Name (Ministry)	Abbreviation
Act	Nuclear Safety Act (NSSC)	NSA
	Act On Physical Protection And Radiological Emergency (NSSC)	PRE
	Nuclear Liability Act (NSSC)	NCL
	Radioactive Waste Management Act (MOTIE)	RWA
	Noise And Vibration Control Act (ME)	NVC
	Framework Act On Resources Circulation (ME)	RCB
	Act On The Promotion Of Saving And Recycling Of Resources (ME)	SRA
	Construction Waste Recycling Promotion Act (ME)	CWR
	Wastes Control Act (ME)	WMA
	Natural Environment Conservation Act (ME)	NEC
	Groundwater Act (ME)	GDW
Regulations	Regulations on Technical Standards for Nuclear Reactor Facilities Etc	NRF
	Standard Format and Content of the Decommissioning Plan for Nuclear Facilities	DP
	Regulation on the Methods of Verifying and Inspection the Decommissioning Status of Nuclear Facilities	DC
	Standards for the Re-use of Site and Remaining Buildings after the Decommissioning of Nuclear Facilities	CL
	Standards for Radiation Protection, etc.	RP
	Regulations for the Packing and Transport of Radioactive Materials, etc.	PT
	Regulations for the Clearance of Radioactive Waste	CD

조항을 보다 직관적으로 확인할 수 있도록 원전 해체와 관련된 현행법령 및 행정규칙의 약어를 Table 4에 정리하였다.

생애주기마다 확인해야 하는 법령의 세부조항이 달라지는 것은 요건의 가변성으로 정의할 수 있다. Table 5에서 제시된 세부조항의 예로서 제20조(NSA-20)에서는 '운영허가'를 위해 발전용원자로 및 관계시설의 해체계획서를 제출해야 한다. 이는 운영 중에도 안전한 해체를 위해 사전에 해체계획을 수립해야 함을 알 수 있다. 과도기, 해체 시점에도 해체 완료 시점까지 운영허가는 지속되지만 본 조항은 운영허가를 위해 고려해야 하는 조항이므로, 과도기, 해체 시점에 의도적으로 고려할 필요가 없다. 다만, 제20조제2항에 명시된 액체 및 기체 상태의 방사성물질 등의 배출계획서는 운영허가를 위해 제출되며, 이때 처리시설 및 감시설비, 시료 채집 및 분석 계획, 배출제한치 등이 종합적으로 규정된다. 즉, 배출계획서는 운영 중 뿐만 아니라 운영허가가 종료되는 시점까지 적용되므로 NSA-20은 과도기, 해체 시점까지 모두 고려해야 한다. 원자력안전법 제23조(NSA-23) '주기적 안전성평가'는 원자로시설의 운영허가를 받은 날부터 10년마다 안전성을 종합적으로 평가하고, 평가보고서를 작성하도록 되어 있으므로 운영 중에도 고려해야 하지만, 목적이 안전한 해체를 위한 주기적 안전성 평가가 아니므로 운영 중에는 제외하였다. 그러나 과도기, 해체 시점에 이루어지는 주기적 안전성평가는 안전한 해체를 위한 안전성평가로 판단되어 과도기, 해체 시점에는 포함하였다. 즉, 법령의 세부조항은 원전의 안전한 해체와 관련이 있는 경우이어야만 하며, 그 시점을 생애주기별로 나누어 분석하였다.

세부조문까지 분류한 원자로규칙(TS-NRF)과 고시단위로 분류한 원자력안전위원회 소관고시는 Tables 6, 7에 분석하여 정리하였다.

3.2. 원전 생애주기에 따른 단계별 방사선안전 관련 해체 규제요건 차등 적용사례

미국의 San Onofre 원전의 Annual Radioactive Effluent Release Report (ARERR)에서 유출물의 배출량은 영구정지 이후 지속적으로 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 1993년에는 기체의 배치배출이 종료되었으므로 기체감쇠탱크에 대한 샘플링과 분석이 더 이상 필요하지 않았다. 2005년에는 액체폐기물처리계통이 영구적으로 제거되었으며 사용후핵연료 저장시설 해체를 위해 펌프, 파이프, 방사선 감시 시스템을 제거하면서 외부 배수구만 남기고 액

Table 5. Classification of detailed law in each life cycle related to decommissioning of nuclear power plant

Operation	Transition		Decommissioning		After decommissioning
NSA-10	NSA-10	NCL-6	NSA-10	NCL-5	NEC-3
NSA-11	NSA-11	NCL-7	NSA-11	NCL-6	NEC-4
NSA-20	NSA-20	NCL-8	NSA-20	NCL-7	RCB-3
NSA-21	NSA-21	NCL-10	NSA-21	NCL-8	RCB-6
NSA-28	NSA-23	NCL-11	NSA-23	NCL-10	RCB-9
NSA-76	NSA-28	NCL-15	NSA-26	NCL-11	RCB-10
NSA-77	NSA-71	NCL-15_2	NSA-27	NCL-15	SRA-12_3
NSA-77_2	NSA-72	NVC-22	NSA-28	NCL-15_2	SRA-16
NSA-77_3	NSA-73	NVC-23	NSA-71	NVC-22	SRA-17
NSA-92	NSA-74	NVC-24	NSA-72	NVC-23	SRA-34_5
NSA-92_2	NSA-75	NVC-40	NSA-73	NVC-24	GDW-7
NSA-103	NSA-91	RCB-3	NSA-74	NVC-25	
RWA-14	NSA-92	RCB-6	NSA-75	NVC-40	
RWA-15	NSA-96	RCB-9	NSA-91	RCB-3	
RWA-17	NSA-97	RCB-10	NSA-92	RCB-6	
NCL-7	NSA-98	RCB-21	NSA-96	RCB-9	
NCL-9	NSA-106	SRA-12_3	NSA-97	RCB-10	
NVC-22	NSA-110	SRA-16	NSA-106	RCB-21	
WMA-5	NSA-110_2	SRA-17	NSA-110	SRA-12_3	
PRE-3	NSA-110_3	SRA-34_5	NSA-110_2	SRA-16	
PRE-4	RWA-5	WMA-3_2	NSA-110_3	SRA-17	
PRE-8	RWA-13	WMA-13	RWA-5	SRA-34_5	
PRE-9_2	RWA-14	WMA-13_2	RWA-13	WMA-3_2	–
PRE-9_3	RWA-15	WMA-17	RWA-14	WMA-13	
PRE-12	RWA-17	WMA-18	RWA-34	WMA-13_2	
PRE-20	RWA-34	WMA-19	RWA-35	WMA-17	
PRE-21	RWA-35	CWR-16	RWA-36	WMA-18	
PRE-35	RWA-36	CWR-17	RWA-37	WMA-19	
	RWA-37	CWR-18	NCL-3	CWR-6	
	NCL-3	PRE-9	NCL-3_2	CWR-7	
–	NCL-3_2	PRE-9_2	NCL-4	CWR-12	
	NCL-4	PRE-10			
	NCL-5	PRE-11	–	–	

※ Notation: Abbreviation - Article Number (E.g. NSA-20: Nuclear Safety Act - Article 20)

체의 배치배출이 종료되었다. 2006년에는 외부 배수구가 영구적으로 제거되었다. 모든 액체 방사성폐기물이 배출되었고, 기체 방사성폐기물도 더 이상 측정되지 않을 정도로 제거되면서 액체 및 기체 유출물의 연속 배출이 종료되었다[9-11]. 이는 해체 단계에서도 상황에 따라 요건이 가변할 수 있음을 보여주는 사례이다. 위와 같은 실제 방사성유출물 배출 규제요건 차등 적용사례에 근거하여 원전 생애주기에 따른 단계별 국내 방사성유출물 배출 규제요건을 다음 그림과 같이 예시할 수 있다(Fig. 3 참조).

Fig. 3에 도시한 바와 같이 방사성유출물 배출 규제요건은 해체 시점에 따라 차등 적용된다. 유출물 관련 설비 기준에 해당하는 '원자로규칙 제20조(계측 및 제어장치)'의 경우 계측 및 제어장치가 영구적으로 제거되면 조문의 적용 대상이 없기 때문에 해당 조문을 적용할 필요가 없다. 마찬가지로 액체 및 기체 상태의 방사성물질등의 배출계획서와 관련된 조항인 '원자력안전법 제20조제2호(운영허

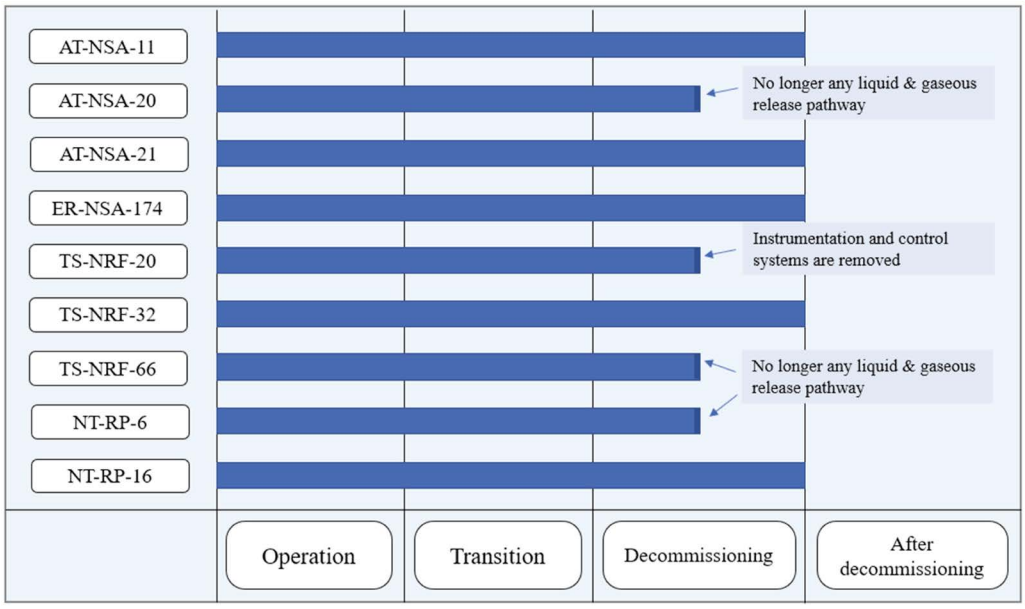

Fig. 3. Analysis of domestic radioactive effluent-related regulatory requirements according to the life cycle.

Table 6. Classification of 'Regulations on Technical Standards for Nuclear Reactor Facilities Etc' in each life cycle related to decommissioning of nuclear power plant

	Regulations
Operation	TS-NRF-20, TS-NRF-32, TS-NRF-66, TS-NRF-85_2, TS-NRF-85_3, TS-NRF-85_4, TS-NRF-85_5, TS-NRF-85_6, TS-NRF-85_7, TS-NRF-85_8, TS-NRF-85_9, TS-NRF-85_10, TS-NRF-85_11, TS-NRF-85_12, TS-NRF-85_13, TS-NRF-85_14, TS-NRF-85_15, TS-NRF-85_16, TS-NRF-85_17
Transition	TS-NRF-20, TS-NRF-32, TS-NRF-66
Decommissioning	TS-NRF-20, TS-NRF-32, TS-NRF-66

※ Regulations on Technical Standards for Nuclear Reactor Facilities Etc: TS (Technical Standards)

Table 7. Classification of 'Regulations of NSSC' in each life cycle related to decommissioning of nuclear power plant

	Regulations
Operation	NT-DP, NR-RP
Transition	NT-DC, NT-RP, NT-PT, NT-CD
Decommissioning	NT-DC, NT-CL, NT-RP, NT-PT, NT-CD
After decommissioning	NT-CL

※ Notices of the Nuclear Safety and Security Commission Notice: NT (NoTice)

가)'와 유출물의 제한치를 규정한 조문인 '방사선방호 등에 관한 기준 제16조'는 액체 및 기체 상태의 유출물이 모두 배출되고, 관련 설비가 모두 철거되어 더 이상 배출 경로가 남아있지 않다면 조문의 적용 대상이 없으므로 해당 조문을 적용할 수 없다. 반면에 방사성물질 등에 따른 인체·물체 및 공공의 재해방지와 국민의 건강 및 환경상의 위해 방지에 관련한 조항인 원자력안전법 제11조와 원자력안전법 제21조의 경우 해체 시점까지 해당 조항을 확인해야 한다. 해당 조문의 관계 조항인 원자력안전법 시행령 제174조, 원자로규칙 제32조, 방사선방호 등에 관한 기준 제16조 역시 해체 시점까지 조항을 적용해야 한다. 이를 통해 특히 해체 진행 중 설비의 철거 또는 관리절차 폐지에 따라 전체 시설 또는 특정 구역에 대한 방사선 관련 세부 규제요건이 차등적으로 적용·해제됨을 알 수 있다. 이렇듯 원전 해체 시점에 따라 특정 설비 및 물질에 적용되는 규제요건이 다를 수 있으므로, 이 연구에서 제시된 생애

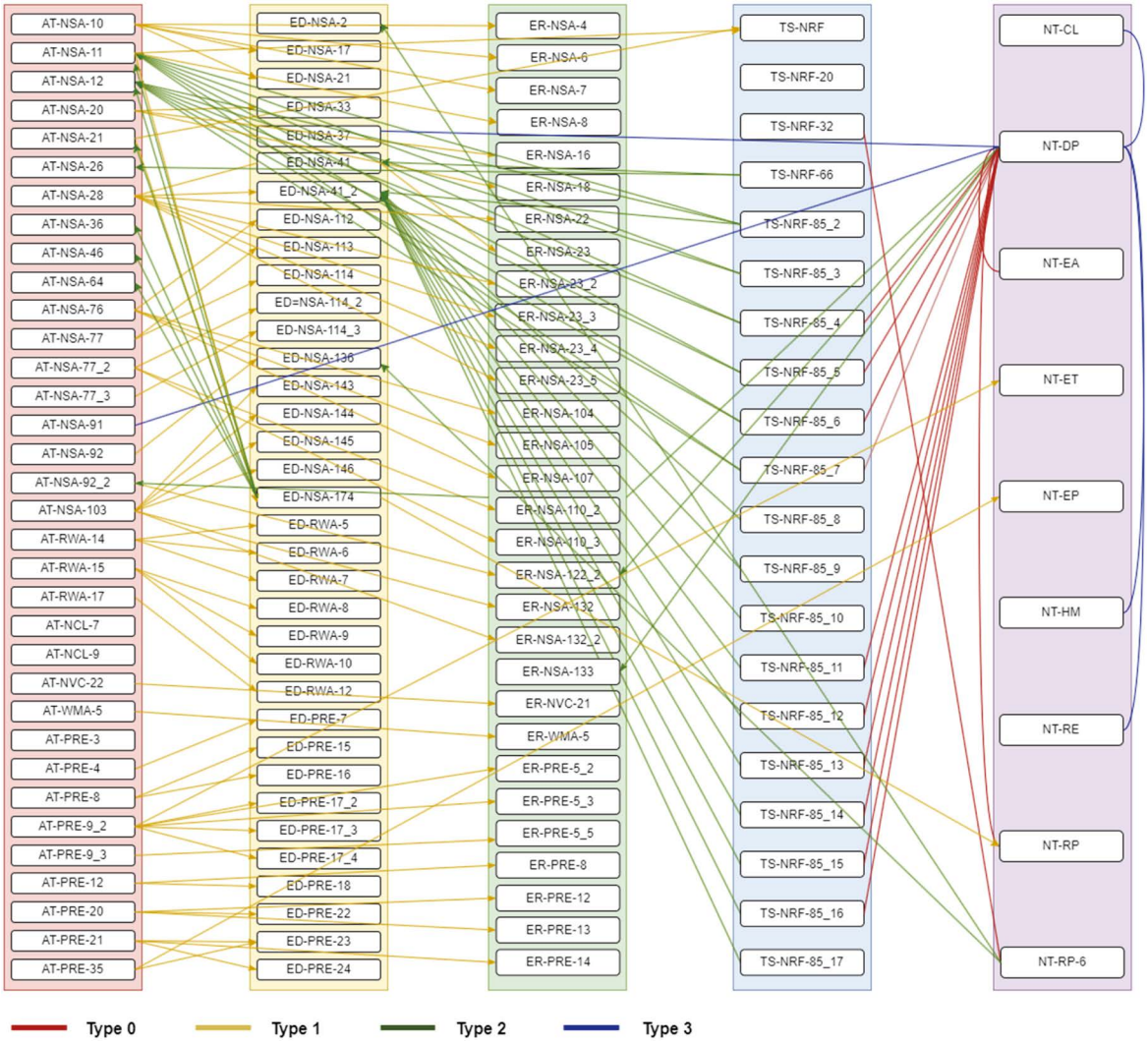

Fig. 4. Result of analysis of interrelationship between regulatory requirements related to decommissioning nuclear power plant (Operation).

주기를 특정 시점에 따라 보다 세분화하여 분석할 필요성이 있다. 그러나 본 연구에서는 생애주기를 단순하게 4가지로 나누었으며, 각 생애주기에 해당되는 요건을 제시한 후 각 요건에 상호연계된 요건을 분석하였다. 추후 연구에서는 생애주기별 해체 작업에 따른 시점을 보다 상세히 구분하여 규제요건의 차등 적용·해체 여부를 제시할 필요성이 있다.

3.3. 원전 해체 규제요건 간 상호연계성 분석 결과

앞서 원전의 생애주기에 따라 원전 해체를 위해 확인해야 하는 현행법령과 행정규칙을 정리하였다. 3개의 소관부처에서 현행법령 11건, 원자력안전위원회 소관 행정규칙은 7건으로, 안전한 원전 해체를 위해 여러 시점에 다양한 부처의 규제요건을 검토해야 함을 확인할 수 있다. 시점별로 원전 해체와 직접적으로 연관이 있는 법령의 세부조항은 Table 5에 정리하였으며, 효율적인 변경 관리와 추적을 위해 이번 장에서는 요건 간의 상호연계성을 분석하였다. Type은 색깔로 구분하여 나타냈으며, Figs. 4~7까지 생애주기별로 구분하여 상호연계성을 분석하였다. 순서는 법률 - 시행령 - 시행규칙 - 원자로규칙 - 원자력안전위원회 고시 순으로 정리하였다. 그림에서 제시된 현행법령 및 행정규칙의 표기 방법은 '법: AT (Act), 시행령: ED (Enforcement Decree), 시행령: ER (Enforcement Regulation), 원자로규칙: TS (Technical Standards), 고시: NT (NoTice)'와 같이 약어로 정리하였다.

해당법령의 조문이 원전 해체를 위해 검토해야 하는 내

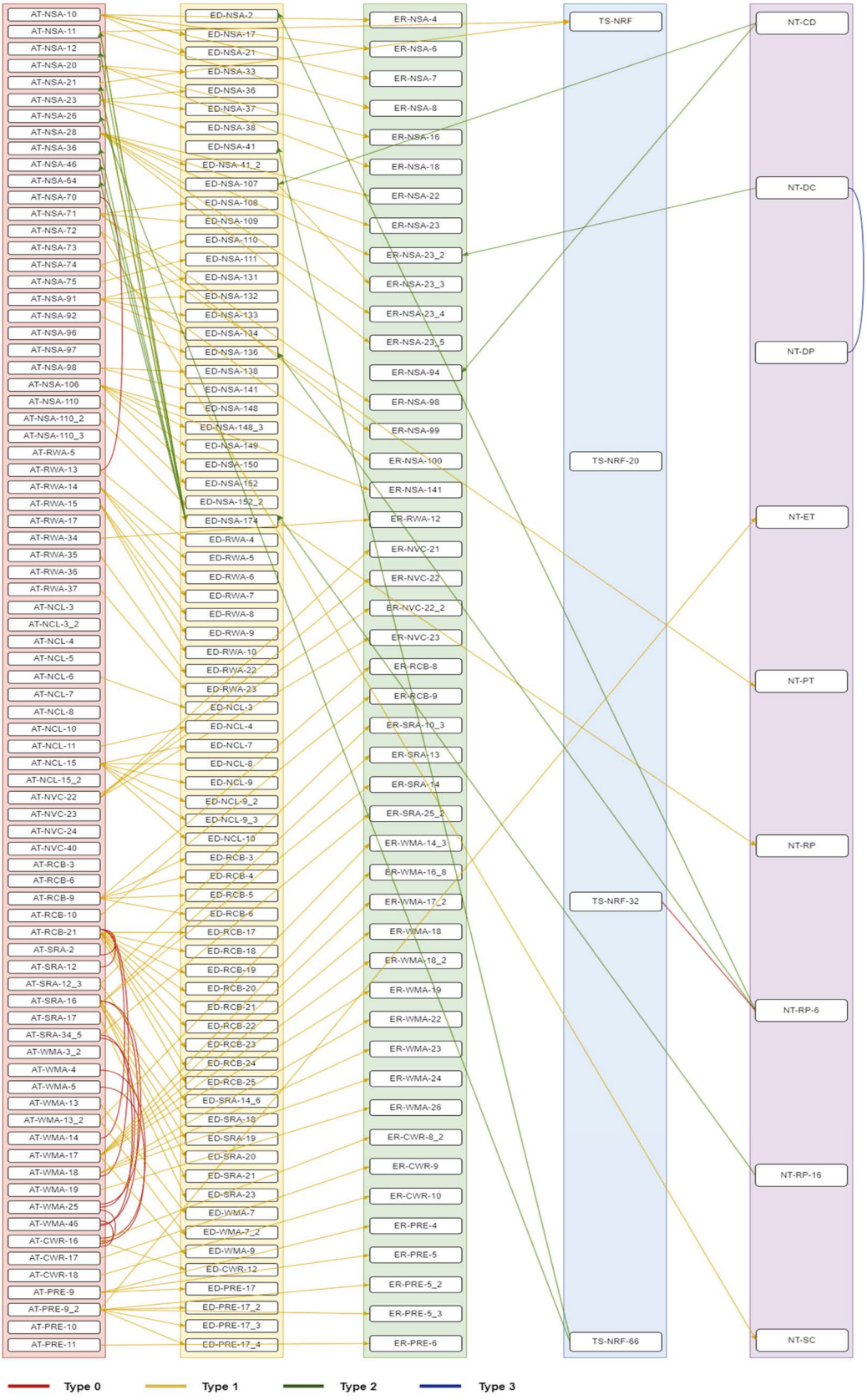

Fig. 5. Result of analysis of interrelationship between regulatory requirements related to decommissioning nuclear power plant (Transition).

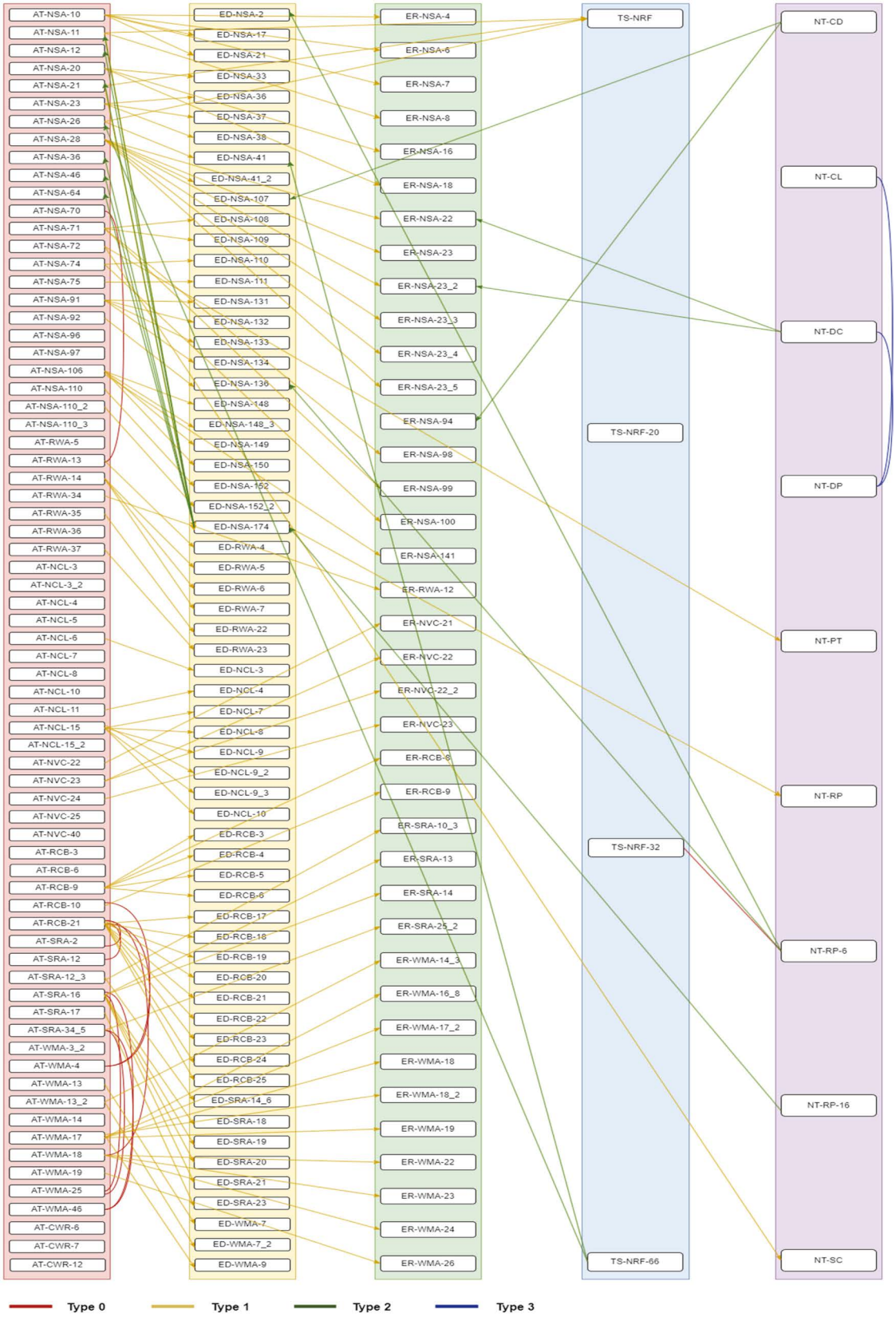

Fig. 6. Result of analysis of interrelationship between regulatory requirements related to decommissioning nuclear power plant (Decommissioning).

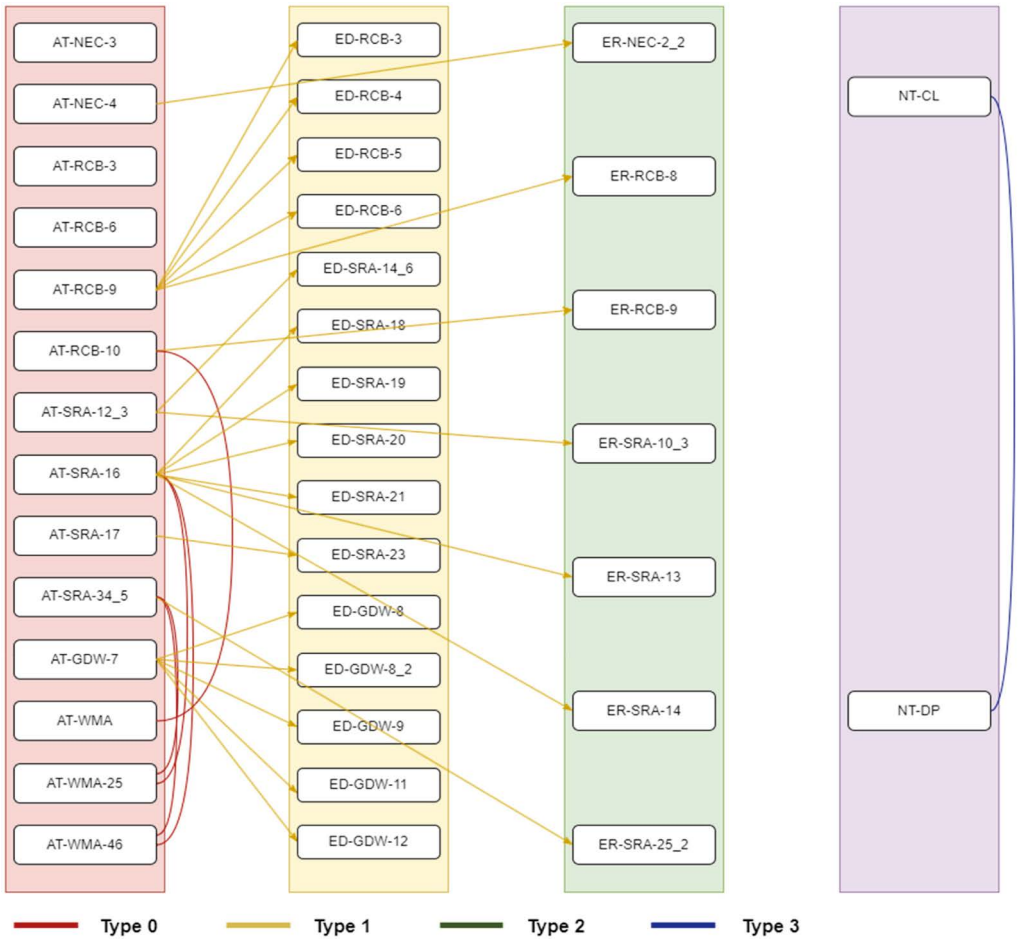

Fig. 7. Result of analysis of interrelationship between regulatory requirements related to decommissioning nuclear power plant (After decommissioning).

Table 8. The number of regulatory requirements related to decommissioning nuclear power plant and related act and regulations

Life cycle		Operation				Transition				Decommissioning				After decommissioning			
	Type	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
No.	Regulatory requirements	28				66				62				11			
	Related act and regulations	14	38	6	46	15	88	14	1	11	71	15	2	5	22	0	1
		Total 104				Total 118				Total 99				Total 28			

용인 경우 해당 조문을 해체 관련요건 또는 해체요건이라고 정의한다. 관계요건은 해체요건과 상호연계되어 있는 요건을 말하며, 조문에 Type별로 연결되어 있는 모든 요건들이 관계요건에 해당된다. 상호연계성 분석 결과 운영 중 확인해야 하는 해체 관련요건으로 28건의 요건이 확인되었으며, 이와 상호연계성이 있는 요건은 104건(Type 0: 14, Type 1: 38, Type 2: 6, Type 3: 46), 과도기 시점의 해체 관련요건은 66건, 관계요건은 118건(Type 0: 15, Type 1: 88, Type 2: 14, Type 3: 1), 해체 시점의 해체 관련요건은 62건, 관계요건은 99건(Type 0: 11, Type 1: 71, Type 2: 15, Type

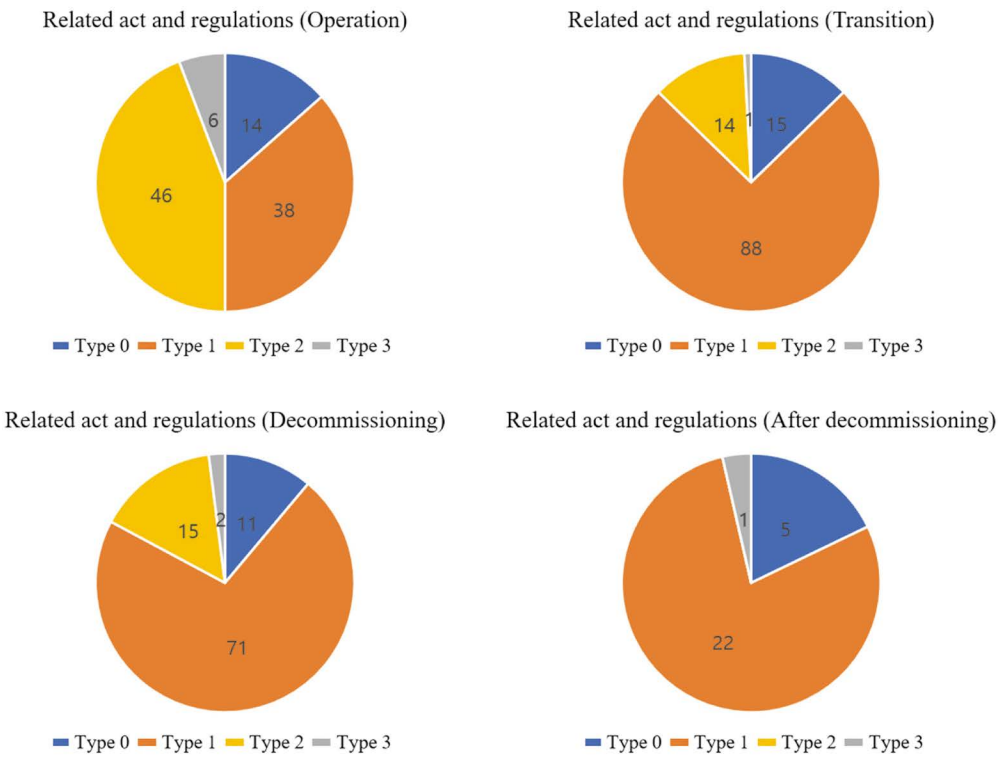

Fig. 8. Result of analysis of interrelationship between regulatory requirements related to decommissioning nuclear power plant (Total).

3: 2), 해체 후 시점의 해체 관련요건은 11건, 관계요건은 28건(Type 0: 5, Type 1: 22, Type 2: 0, Type 3: 1)이다(Fig. 8, Table 8).

4. 결 론

안전한 원전 해체를 위한 국내 요건은 원자력안전위원회, 산업통상자원부, 환경부 3개부처에서 해체 상황에 맞추어 제시하고 있다. 이 연구에서는 원전 해체와 관련된 요건을 IAEA SRS No. 36에서 제시된 원전 생애주기를 기반으로 '운영 중, 과도기, 해체, 해체 후 부지 재이용'으로 나누어 관련요건을 분석하였다. 현행법령은 11건, 원자력안전위원회 행정규칙은 7건이 확인되었으며, 생애주기별로 운영 중 원전 해체를 위해 확인해야 하는 현행법령은 6건(세부조항 28건), 행정규칙은 3건이며, 과도기 시점은 현행법령 9건(세부조항 66건), 행정규칙 5건이다. 해체 시에는 현행법령 8건(세부조항 62건), 행정규칙 6건이며, 해체 후에는 현행법령 4건(세부조항 11건), 행정규칙 1건이다. 행정규칙을 제외하고 안전한 해체를 위해 생애주기와 관련 없이 현행법령에서 확인해야 하는 조항을 검토한 결과 총 167건의 조항이 확인되었다. 생애주기에 따라 적용되는 현행법령 세부조항이 달라진다는 분석 결과는 해체요건의 가변성을 보여준다. 즉, 생애주기별로 요건의 가변성을 사전에 검토하여 원전의 안전한 해체를 수행하여야 한다.

현행법령 세부조항과 관계된 요건을 Type별로 분류하였으며, 그 결과 관계요건은 총 349건이 확인되었다. 해체 관계요건은 해체 관련요건보다 약 2.09배(해체 관련요건 167건, 관계요건 349건) 더 많다. 해체 관련요건이 변경되어도 관계요건이 없는 경우 해당 관련요건만 변경하면 되나, 관계요건이 없는 관련요건은 전체 해체 관련요건 167개 중 22개 요건으로 전체 해체 관련요건의 약 13%밖에 되지 않는다. 이는 대부분의 관련요건에 상호연계된 관계요건이 존재하고 복잡하게 연계되어 있음을 나타내며 해체요건 변경관리의 어려움을 보여준다.

이 연구에서 Type별로 분류된 원전 해체요건을 지속적으로 변경 관리할 경우 해체 시에 규제요건이 변경되더라도 빠짐 없이 추적관리를 할 수 있어 인적 오류/형상 오류를 상당히 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 과도기 시점에서 확인해야 하는 해체 관련요건이 가장 많은 것은 해

체를 직접적으로 준비하는 과도기 시점에 검토해야 하는 요건이 늘어나기 때문이며, 사용후핵연료와 같은 핵물질 제거를 위해 확인해야 하는 요건이 많기 때문이다. 또한 이 연구를 통해 원전 해체 관련요건이라 하더라도 원전을 해체하기 시작할 때나 해체 중에만 확인해야 되는 것이 아니며 운영 중, 해체 후에도 지속적으로 확인해야 함을 알 수 있다.

또한, 실제 방사성유출물 배출 규제요건 차등 적용사례에 근거한 원전 생애주기에 따른 단계별 국내 방사성유출물 배출 규제요건의 변화 분석 결과를 통해, 원전 수명기간 중 방사선 관련 세부 규제요건의 적용 시점에 차이가 있고, 특히 해체 진행 중 설비의 철거 또는 관리절차 폐지에 따라 전체 시설 또는 특정 구역에 대한 방사선 관련 세부 규제요건이 차등적으로 적용·해제됨을 알 수 있다.

이 연구에서 도출한 원전 해체 관련요건은 원자력안전위원회, 산업통상자원부, 환경부 관련 법령만 제시하고 있으며, 국토교통부, 행정안전부, 고용노동부, 소방청 등에서 제시하는 법령은 제외되었다. 본 논문에서 분석한 3개 소관부처 법령 이외에도 공통적으로 적용가능한 일반 산업 요건은 다양한 부처 내에 존재하나 타 부처 법령의 경우 해당 법률에서 정의하는 범위가 광범위하며 개별 조항이 원전 해체 시 필수적으로 검토해야 하는 요건인지를 판단하는 데 어려움이 있어 직접적인 적용대상에서 제외하였다. 이렇듯 이 연구는 3개 소관부처에서 제공하는 원전 해체 관련요건만을 수집하여 일반 산업 요건과 관련된 요건이 모두 포함되지 않았다는 한계를 가지고 있으나, 본 연구의 목적이 원전 해체 관련요건의 가변성과 상호연계성을 분석하는 것이므로 일반 산업 요건에 대한 분석은 추후 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

사 사

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of the Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20191510301290).

참고문헌

1. Ryu D-S. 2013. A Study on the Configuration Management System Development for New Nuclear Power Plant, Department of Project Management Graduate School of Soongsil University.
2. Korea Institute of Nuclear Safety. 2013. Study on Establishment of Regulation Policy for the Reinforcement of Configuration Management and Application in Nuclear Power Plants, Nuclear Safety and Security Commission.
3. IAEA. 2003. Configuration management in nuclear power plants, IAEA-TECDOC-1335. International Atomic Energy Agency. Vienna. Austria.
4. IAEA. 2010. Application of Configuration Management in Nuclear Power Plants, IAEA-SRS-No.65. International Atomic Energy Agency. Vienna. Austria.
5. IAEA. 2004. Safety Considerations in the Transition from Operation to Decommissioning of Nuclear Facilities, IAEA-SRS-No.36. International Atomic Energy Agency. Vienna. Austria.
6. Park HS, Park JS, Hong YJ, Kim JG and Hong DS. 2018. Requirement Management through Connection between Regulatory Requirements and Technical Criteria for Dismantling of Nuclear Installations. JKOSSE **14**(1):63-71.
7. FAVEO. 2012. Systematic handling of requirements and conditions in compliance with waste acceptance requirements for a radioactive waste disposal facility. Radiological Characterization for Decommissioning, April 17-19 2012, Studsvik, Nyköping, Sweden.
8. IAEA. 2018. Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment, IAEA-GSG-9. International Atomic Energy Agency. Vienna. Austria.
9. EDISON. 1993. San Onofre Nuclear Generating Station Annual Radioactive Effluent Release Report. USNRC. Washington DC, US.
10. EDISON. 2005. San Onofre Nuclear Generating Station Annual Radioactive Effluent Release Report. USNRC. Washington DC, US.
11. EDISON. 2006. San Onofre Nuclear Generating Station Annual Radioactive Effluent Release Report. USNRC. Washington DC, US.