JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

16(2) : 151-160 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.2.151

국내·외 원자력시설 부지 내 방사성폐기물 처리시설 현황 분석

김혁재[1], 라현준[1], 김기훈[1], 서현수[1], 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Analysis of Domestic and Foreign Radioactive Waste Treatment Facility on Nuclear Facility Site

Hyeok Jae Kim[1], Hyun Jun Na[1], Ki Hoon Kim[1], Hyun Su Seo[1] and Kwang Pyo Kim[1,*]

[1]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deokyoungdae-ro Giheoung-gu, Yongin 17104, Republic of Korea

Abstract When disposing of radioactive waste, the treatment must be preceded to reduce the amount of radioactive waste and retain the safety of disposal. Currently, many nuclear power plants in Korea are about to be shut-down, and accordingly, large amounts of low- and intermediate- level waste are expected to be generated due to decommissioning in the future. Because there are limits to treating all those wastes through nuclear power plant radioactive waste management system, it is necessary to establish an on-site radioactive waste treatment facility as an alternative. To establish on-site treatment facility, the investigation of on-site treatment process and related equipment must be preceded. The purpose of this study is to investigate the status of on-site radioactive waste treatment facilities in domestic and foreign nuclear facility. We selected on-site radioactive waste treatment facilities of Germany's Greifswald Nuclear Power Plant, Sweden's Oskarshamn Nuclear Power Plant, Finland's Loviisa Nuclear Power Plant, Japan's Nuclear Science Research Institute, and the Korea Atomic Energy Research Institute as facilities to be investigated. As a result of analyzing the major treatment processes of on-site treatment facilities at domestic and foreign nuclear facilities, there were ten major treatment processes in the facility, including measurement for clearance, compression, cutting, decontamination, incineration, melting, vaporization, and evaporation. Germany's Greifswald nuclear power plant, Sweden's Oskarshamn nuclear power plant, and Finland's Loviisa nuclear power plant considered treatment of operational and decommissioning waste. In the case of decommissioning is being performed, decontamination treatment is being carried out. On-site treatment facilities of all nuclear power plant were not considering evaporation, and that treatment process was performed only at the Japan Nuclear Science Research Institute and the Korea Atomic Energy Research Institute. As a result of the analysis of the equipment utilized in the treatment facility, equipment for treatment is different depending on the treatment process of radioactive waste. In the case of cutting and decontamination, relatively flexible treatment equipment could be selected. Because the matrix for solidification is determined differently according to the characteristics of radioactive waste, the solidification treatment equipment utilized by each treatment facility were different. The results of this study can be used as basic data when establishing on-site radioactive waste treatment facility in the future.

Key words: Low- and intermediate- level waste, On-site treatment facility, Treatment process, Treatment equipment

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author.** Kwang Pyo Kim
Tel. +82-31-201-2560 Fax. +82-31-273-3592 E-mail. kpkim@khu.ac.kr
Received 23 May 2022 **Revised** 15 June 2022 **Accepted** 22 June 2022

1. 서 론

원자력발전소에서는 원자로 운전 및 계통관리, 발전소 유지보수 등의 과정에서 다양한 중·저준위 방사성폐기물(LILW, Low- and Intermediate-Level Waste)이 발생한다. 국내에서는 운영 중인 다수 원자력발전소의 영구정지 시기가 임박함에 따라, 기존 방사성폐기물 외에도 대량의 해체폐기물이 발생할 것으로 예상되고 있다[1,2]. Fig. 1에 국내 방사성폐기물 누적발생량 전망을 나타내었다. 이러한 중·저준위 방사성폐기물은 일반적으로 자체처분되거나 천층처분 방식을 통해 최종 처분된다[3]. 중·저준위 방사성폐기물 처분 시에는, 폐기물의 총 부피를 저감하고 처분 안전성을 확보하기 위하여 처리 과정이 선행되어야 한다. 원자력발전소에서는 방사성폐기물 관리 계통(RWMS, Radioactive Waste Management System)을 통해 처리 과정이 진행되며, 국내의 경우 한국원자력환경공단(KORAD, Korea Radioactive Waste Agency)에서 폐기물 인수기준(WAC, Waste Acceptance Criteria)에 부적합한 방사성폐기물 중 일부에 대하여 처리를 수행하기도 한다.

국제원자력기구(IAEA, International Atomic Energy Agency)에서는 방사성폐기물 관리 시 인간 및 환경의 안전을 확보하고, 미래 후손에게 부당한 부담을 전가시키지 않을 것을 권고하고 있다[4]. 국제원자력기구에서는 원자력발전소 및 연구용 원자로 운영에 따라 발생하는 방사성폐기물의 처분 전 관리에 대한 권고사항을 제시한 바 있다[5]. 그리고 원자력발전소의 방사성폐기물 처리에 적합한 기술 및 전략에 대한 정보를 제시하였다[6]. 독일의

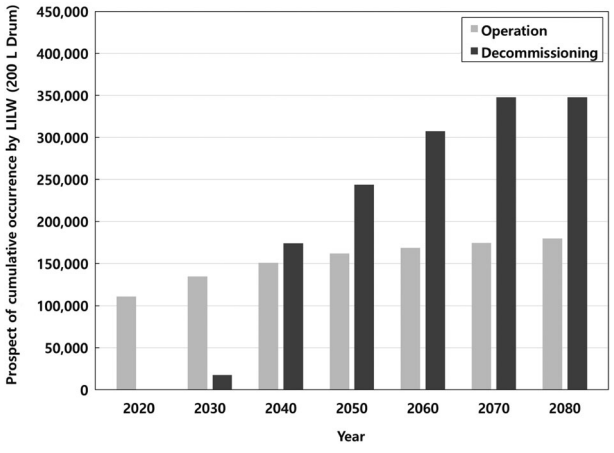

Fig. 1. Prospect of cumulative occurrence by LILW.

Greifswald 원자력발전소와 스웨덴의 Oskarshamn 원자력발전소에서는 해체 전략으로서 소내 방사성폐기물 처리시설의 활용을 채택하고 있다[7,8]. 핀란드 Loviisa 원자력발전소의 경우 고화 시설(Solidification plant)을 통해 액체 방사성폐기물 처리 과정에서 발생하는 농축폐액, 이온교환수지 등의 고화 처리를 수행하며 향후 해체 시에도 해당 시설을 활용할 예정이다[9,10]. 한국수력원자력에서는 고리1호기 해체를 수행하기 위한 전략으로서 소내 폐기물 처리시설 구축을 채택함에 따라, 국내에서는 이를 실현하기 위한 연구가 수행되고 있다[11,12]. 국내 원자력발전소 해체폐기물의 처리기술 및 설비 개발을 위한 연구가 다수 수행되기도 하였다[13-16]. 한국원자력연구원에서는 부지 내 처리시설의 운영 현황 분석 연구를 수행하였다[17,18]. 그리고 원자력시설 해체폐기물의 종합처리시설 구축 및 운영을 위한 연구 또한 수행한 바 있다[19].

향후 원자력발전소에서 발생할 대량의 운영 및 해체폐기물을 모두 방사성폐기물 관리 계통에서 처리하기에는 한계가 있다. 따라서 이에 대한 대안으로 별도의 소내 방사성폐기물 처리시설이 운영될 필요가 있다. 국내의 경우 방사성폐기물 처리기술 및 원자력 연구시설의 부지 내 방사성폐기물 처리시설 관련 연구는 다수 진행되었다. 그러나 국내에서는 원자력발전소 소내 방사성폐기물 처리시설 구축 및 운영 경험이 전무하며, 원자력발전소 내 처리시설의 운영 현황 및 처리시설 내 처리 공정별 설비 분석 연구는 부족한 실정이다. 국내 실정에 적합한 소내 방사성폐기물 처리시설 구축을 위해서는 국내·외 원자력시설 부지 내 처리시설 운영 현황 분석이 선행되어야 한다.

본 연구의 목표는 국내·외 원자력시설의 부지 내 방사성폐기물 처리시설 운영 현황을 조사·분석하는 것이다. 이를 위하여 국내·외에서 운영되고 있는 원자력발전소 및 원자력 연구시설 부지 내 처리시설 운영 현황을 조사하였다. 그리고 각 처리시설에서 수행되고 있는 주요 처리 공정 및 관련 설비 운용 현황을 비교·분석하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 국내·외 원자력시설 부지 내 방사성폐기물 처리시설에서 수행되고 있는 주요 처리 공정과 각 공정을 수행하기 위한 설비의 운용 현황을 조사하였다.

조사 대상 국가로는 국내를 포함하여 방사성폐기물 관리 선도국인 독일, 스웨덴, 핀란드, 일본을 선정하였다. 독일의 Greifswald 원자력발전소와 스웨덴의 Oskarshamn 원자력발전소에서는 발전소 운영 또는 해체에 따라 발생하는 방사성폐기물 처리를 수행하기 위하여 소내 처리시설을 다수 운영하고 있다. 핀란드 Loviisa 원자력발전소에서는 농축폐액, 이온교환수지 등의 고화 처리를 위한 고화 시설을 운영하고 있다. 일본 원자력과학연구소(NSRI, Nuclear Science Research Institute)와 한국원자력연구원(KAERI, Korea Atomic Energy Agency)에서는 원자력 관련 연구를 진행함에 따라 발생하는 폐기물을 처리하기 위해서 부지 내에 처리시설을 운영하고 있다[20]. 부지 내 처리시설별 주요 처리 공정 및 설비 운용 현황 조사는 각 시설의 관리 기관에서 발간한 문헌자료를 기반으로 수행하였다.

Table 1에 국제원자력기구에서 제시한 원자력발전소에서 발생하는 방사성폐기물의 유형 및 발생원을 나타내었다[5]. 원자력발전소에서 발생하는 방사성폐기물은 크게 기체, 액체, 고체 방사성폐기물로 구분할 수 있다. 기체 및 액체 방사성폐기물은 발전소 운전에 따른 다양한 계통 운영에 의해 발생한다. 고체 방사성폐기물은 발전소 내 유지보수 작업, 기체 및 액체 방사성폐기물 관리 계통의 운영, 발전소 해체 과정에서 발생하며, 유리수(Free water) 함량에 따라 건식, 습식 고체 방사성폐기물로 구분할 수 있다[21]. Fig. 2에 국제원자력기구에서 제시한 방사성폐기물의 처리 및 처분 절차를 나타내었다. 기체 및 액체 방사성폐기물은 대부분 여과, 농축 등의 처리과정을 통해 방사능 농도를 저감한 후 배출관리기준 이하임을 확인하여 소외로 배출시킨다. 폐이온교환수지, 농축폐액과 같이 액체 방사성폐기물 처리 과정에서 발생하는 부산물은 일반적으로 습식 고체 방사성폐기물로 분류되며, 해당 폐기물은 고화 처리 후 처분된다. 그리고 고체 방사성폐기물은 압축, 절단, 제염 등의 처리를 수행한 뒤 최종 처분된다[3]. 본 연구에서는 1) 건식 고체 방사성폐기물, 2) 습식 고체 방사성폐기물, 3) 액체 방사성폐기물에 대한 처리 공정을 조사하고, 각 처리 공정에 필요한 처리 설비를 분석하

Table 1. Source and kind of radioactive waste by type

Type	Source and kind of radioactive waste
Gas radioactive waste	Leakage from the coolant The moderator systems of the reactor itself Degasification systems for the coolant Condenser vacuum air ejectors or pumps The exhaust from turbine gland seal systems Activated or contaminated ventilated air
Liquid radioactive waste	Reactor coolant letdown Evaporator concentrates Runoff from equipment drains Runoff from floor drains Laundry waste Contaminated oil Waste arising from the decontamination and maintenance of facilities and equipment
Solid radioactive waste	Spent ion exchange resins (both bead resins and powder resin) Cartridge filters and precoat filter cake Particulate filters from ventilation systems Charcoal beds Tools Contaminated metal scrap Core components Debris from fuel assemblies or in-reactor components Contaminated rags, clothing, paper, and plastic

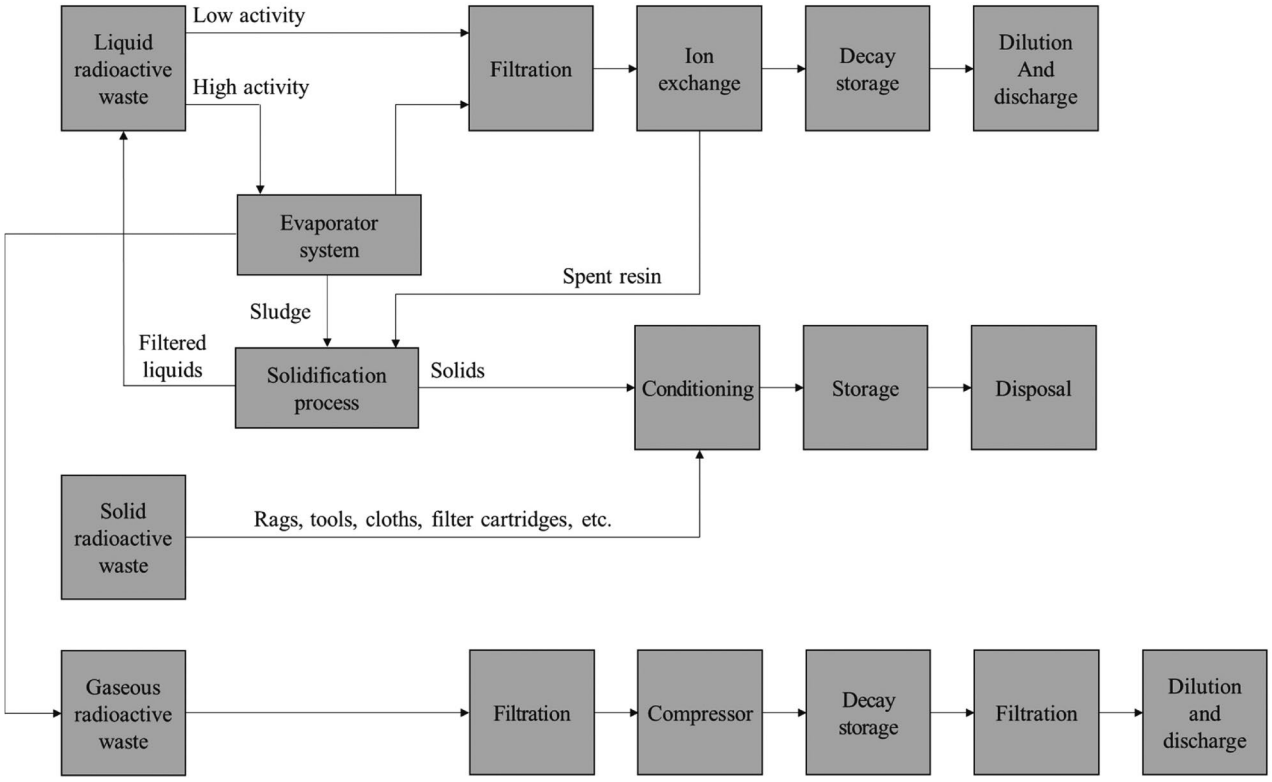

Fig. 2. Generic treatment and disposal procedures of radioactive waste.

였다.

방사성폐기물 처리란 저장, 처분, 재활용을 위하여 방사성폐기물을 물리적·화학적 방법으로 다루는 것을 의미한다. 국제원자력기구에서는 방사성폐기물의 처리 공정에 대하여 크게 1) 부피 감용, 2) 방사성핵종의 제거, 3) 물리적 변화, 4) 화학적 변화로 구분하고 있다[5]. 부피 감용은 주로 고체 방사성폐기물에 대한 압축 및 절단이 해당되며, 가연성 또는 금속 폐기물의 경우 소각 및 용융을 통해 수행되기도 한다. 방사성핵종의 제거와 물리적 및 화학적 변화는 배출관리기준, 자체처분 허용기준, 처분시설 인수기준 여부 판단에 있어 상대적으로 큰 영향을 미친다. 방사성핵종의 제거는 폐기물에 잔류해 있는 방사성오염의 제거 공정을 의미한다. 물리적 및 화학적 변화는 방사성폐기물의 소외 배출, 자체처분, 처분시설로의 인수를 위한 특성 변화를 의미하며 고화, 캡슐화(Encapsulation), pH 조절 등이 포함된다. 본 연구에서는 부피 감용, 방사성핵종의 제거, 물리적 및 화학적 변화 중 원자력시설 부지 내 처리시설에서 수행되는 공정을 주요 분석 대상으로 선정하였다.

3. 결 과

3.1. 독일 Greifswald 원자력발전소

독일 Greifswald 원자력발전소는 1970년부터 건설되기 시작하여 1974년부터 상업용 발전을 목적으로 운영되었다. 해당 원자력발전소의 노형은 가압경수로이며, 호기당 평균 출력은 440 MWe 수준이다. Greifswald 원자력발전소는 약 20년간의 운영 이후, 1990년 5호기를 마지막으로 발전소 내 모든 원자로가 영구정지되었다[22,23]. Greifswald 원자력발전소에서는 해체를 진행함에 따라 약 1,800,000 ton의 폐기물이 발생할 것으로 예상되고 있다. 발전소 폐기물 중 약 564,000 ton은 방사성폐기물에 해당되어 처리 공정을 통해 적절한 용기에 포장되어야 한다. Greifswald 원자력발전소는 해체에 따라 대량으로 발생할 것으로 되는 방사성폐기물의 처리를 위하여, 소내 방사성폐기물 처리시설을 운영하고 있다[24]. Greifswald 원자력발전소 내 운영되고 있는 주요 방사성폐기물 처리시설로는 1) 방사화폐기물 처리 작업장(Warm work shop), 2) 중간저장시설(ISN, Interim Storage North), 3) 규제해제시설

(Clearance facility)이 있다. 그리고 해당 시설들을 통해 방사성폐기물의 제염, 절단, 건조, 압축, 자체처분 준비를 수행한다.

방사화폐기물 처리 작업장과 중간저장시설에서는 주로 자체처분 대상 폐기물에 대한 처리가 수행된다. 방사화폐기물 처리 작업장에서는 주로 폐기물의 절단과 제염이 수행된다. 방사화폐기물 처리 작업장의 폐기물 절단 처리는 띠 절단기(Band saw), 열 절단기, 유압절단기 등을 통해 수행되며, 제염 처리는 고압의 살수 설비(Box for high pressure water blasting)와 전기화학적 제염설비가 사용된다. 중간저장시설에서는 사용후핵연료 중간저장뿐 아니라 중·저준위 방사성폐기물에 대하여 건조, 절단, 압축 처리 또한 수행된다[25]. 폐기물의 건조 작업은 별도로 마련되어 있는 건조 설비를 통하여 수행된다. 절단작업, 압축작업 시에는 각각 띠 절단기 및 고철 가위(Scrap Shear), 고압 압축기(High pressure compactor)가 활용된다. 규제해제시설에서는 원자력발전소 내 자체처분대상 폐기물에 대하여 잔류 오염을 측정하고 자체처분 준비 작업이 수행된다[26]. 자체처분을 수행하기 위해서는 폐기물의 방사선학적 특성이 법적 허용기준을 만족해야 하므로, 이를 확인하기 위하여 측정 설비가 마련되어 있다.

3.2. 스웨덴 Oskarshamn 원자력발전소

스웨덴 Oskarshamn 원자력발전소는 1966년부터 건설되기 시작하여 1970년부터 상업용 발전을 목적으로 운영되었다. 해당 원자력발전소의 원자로 노형은 비등경수로이며, 호기당 평균 출력은 868 MWe 수준이다. Oskarshamn 원자력발전소 1호기, 2호기는 약 50년간의 운영 이후 영구정지되었으며, 현재 3호기만이 운영 중에 있다[27,28]. Oskarshamn 원자력발전소에서는 발전소 운영에 따라 발생하는 방사성폐기물을 처리하기 위하여 소내 처리시설이 다수 운영 중에 있다. Oskarshamn 원자력발전소에서는 해체에 따라 발생하는 방사성폐기물의 효율적인 처리를 위해, 각 처리시설의 활용을 해체 전략으로서 채택하고 있다[29-31]. Oskarshamn 원자력발전소 내 운영되고 있는 주요 방사성폐기물 처리시설로는 1) 폐기물 취급 건물(AVF, Waste Handling Building), 2) 저준위 방사능폐기물 관리 건물(HLA, Waste Management Building for Low Active Waste)이 있다. 그리고 해당 시설들을 통해 방사성폐기물의 제염 및 고화를 수행한다.

폐기물 취급 건물에서는 발전소에서 발생하는 폐수의 재사용 및 소외 배출을 위한 정화가 수행되며, 이에 따라 발생하는 폐이온교환수지 등의 고화 처리 및 일부 고체 방사성폐기물의 제염 처리가 수행된다. 폐기물 취급 건물의 제염작업은 고온수 세척 설비(Hot water machine)를 통해 수행된다. 고화 처리의 경우 시멘트를 이용한 고화를 수행함에 따라, 시멘트 주입 및 혼합설비와 고화설비가 운용되고 있다. 저준위 방사성폐기물 관리 건물에서는 주로 발전소의 건물자재, 작업도구 및 장비, 고철 등 저준위 방사성폐기물의 제염 처리가 수행된다. 이를 위하여 시설 내 별도의 작업 구역이 운영되고 있으며, 해당 구역에서는 고압의 물을 이용한 제염이 수행된다.

3.3. 핀란드 Loviisa 원자력발전소

핀란드 Loviisa 원자력발전소는 핀란드 최초의 원자력발전소로서, 1971년부터 건설되기 시작하여 1977년부터 상업용 발전을 목적으로 운영되고 있다. 해당 원자력발전소의 노형은 가압경수로이며, 호기당 평균 총 출력은 496 MWe 수준이다. Loviisa 원자력발전소는 2027년부터 해제가 시작될 예정이었으나 현재 수명 연장이 검토 중에 있다[32,33]. Loviisa 원자력발전소에서는 발전소 운전에 따라 2020년 기준 약 67.5 ton의 중준위 방사성 농축폐액과 이온교환수지가 누적되었다[34]. Loviisa 원자력발전소에서는 발전소 운전 및 향후 해체에 따라 발생할 것으로 예상되는 농축폐액 및 이온교환수지를 처리하기 위하여, 소내 고화 시설을 운영하고 있다.

고화 시설에서는 액체 방사성폐기물 처리과정에서 발생하는 폐이온교환수지, 농축폐액 등에 대해 고화 처리가 수행된다. 해당 시설에서는 폐이온교환수지, 농축폐액 등의 고화 시 고화체로서 시멘트, 고로 슬래그(Blast furnace slag)를 활용한다. 이에 따라 시멘트 및 고로 슬래그 고화처리를 수행하기 위한 설비로서 시멘트 및 고로 슬래그 주입 설비, 혼합 설비, 고화 설비 등이 운용되고 있다. 추가적으로 콘크리트 최종 처분 용기의 포장을 위한 밀봉설비와 시설 내 중간저장 구역으로 폐기물을 운반하기 위한 설비 또한 마련되어 있다[9,10].

3.4. 일본 원자력과학연구소(NSRI)

일본 원자력과학연구소는 일본 원자력기구(JAEA, Japan Atomic Energy Agency) 소속의 주요 원자력 연구시

설이다. 일본 원자력과학연구소는 2009년에 설립되었으며, 일본의 원자력과 방사선 사용을 발전시키기 위한 연구를 수행하고 있다. 해당 연구시설에서는 연구용 원자로, 가속기, 방사성동위원소 및 핵연료물질 취급시설 등이 운영되고 있다. 다양한 원자력 관련 연구를 진행함에 따라 방사성폐기물이 발생되고 있으며, 해당 폐기물의 처리를 수행하기 위하여 부지 내 방사성폐기물 처리시설이 운영되고 있다[20]. 일본 원자력과학연구소에서 운영되고 있는 방사성폐기물 처리시설로는 1) 제1폐기물처리시설, 2) 제2폐기물처리시설, 3) 제3폐기물처리시설, 4) 폐기물 감용시설(Waste Volume Reduction Facility), 5) 폐기물 감용 및 저장시설(Waste Size Reduction and Storage Facility)이 있다. 그리고 해당 시설들을 통해 방사성폐기물의 소각, 절단, 압축, 증발농축, 고화, 용융, 제염을 수행한다.

제1폐기물처리시설에서는 일반적으로 방사능 준위가 비교적 낮은 고체 방사성폐기물 중 가연성 폐기물의 소각 처리를 수행한다. 소각 처리 시에는 소각로 및 소각로 제어 설비가 활용되며, 폐기물을 소각하고 발생한 소각재는 스테인리스강 드럼 및 콘크리트 라이닝(Lining) 드럼에 포장된다. 제2폐기물처리시설에서는 압축성 고체 폐기물과 액체 폐기물의 처리를 수행한다. 압축성 고체 폐기물은 절단 및 압축 처리가 수행되며, 액체 폐기물은 증발농축 및 역청 고화 처리가 수행된다. 이에 따라 제2폐기물처리시설에는 해당 작업을 수행하기 위한 압축기, 절단기, 증발농축 설비(Evaporator), 역청 혼합 고화 설비 등의 설비가 마련되어 있다. 제3폐기물처리시설의 경우 방사능 준위가 낮은 액체 방사성폐기물의 처리를 수행한다. 해당 시설에서는 액체 방사성폐기물의 증발농축, 역청 및 시멘트 고화 처리가 수행된다. 그리고 각각의 작업을 수행하기 위한 설비로서 증발농축기, 역청 및 시멘트 고화 설비 등이 마련되어 있다. 이외에 제3폐기물처리시설에서 취급되는 일부 액체폐기물은 희석 시 배출관리기준 이하임이 확인되는 경우 희석시설을 통해 외부로 배출된다. 폐기물 감용시설에서는 비금속 및 금속 폐기물의 처리가 진행된다. 비금속 및 영구용 원자로 외에서 발생하는 금속 폐기물의 경우 용융 처리가 수행되며, 연구용 원자로에서 발생하는 금속 폐기물은 추가 압축 처리가 수행된다.

폐기물 감용시설에서는 용융 처리를 수행하기 위해 금속 및 비금속 폐기물별 용광로, 몰딩(Molding) 설비, 플라즈마로(Plasma furnace)가 활용된다. 몰딩 설비의 경우 용융된 금속 폐기물을 드럼으로 재활용하기 위하여 사용된다. 추가 압축 처리를 수행하기 위한 설비로는 추가 압축기 등이 마련되어 있다. 폐기물 감용 및 저장시설에서는 일반적으로 탱크와 같은 대형 폐기물의 처리를 수행한다. 해당 시설은 크게 감용 처리 구역과 저장 구역으로 구분된다. 감용 처리 구역에서는 대형 폐기물의 세척, 절단, 제염이 수행된다. 감용 처리 구역에서 절단된 폐기물은 드럼에 포장되어 저장 구역에 보관된다. 폐기물 감용 및 저장시설에서는 세척 및 절단 작업을 위해 세척 설비, 레이저 절단기, 플라즈마 및 가스 절단기가 활용된다. 제염 작업 시에는 건식 고압 제염 설비(Dry blasting decontamination system)가 활용된다.

3.5. 한국원자력연구원(KAERI)

한국원자력연구원은 국내 유일의 원자력 종합 연구개발 기관이다. 한국원자력연구원은 1959년 설립되었으며, 방사선의 산업적 이용, 동위원소 생산, 미래 원자력에너지, 방사선의 의학적 이용 등에 대한 연구를 수행하고 있다. 해당 연구시설에서는 일본 원자력과학연구소와 유사하게 연구용 원자로, 동위원소 생산시설, 조사후연료시험시설 등을 운영함에 따라 다양한 방사성폐기물이 발생된다. 한국원자력연구원의 연구용 원자로 시설 내에는 방사성폐기물 관리계통이 별도로 운영되고 있지 않으며, 방사성폐기물의 처리를 수행하기 위하여 부지 내 방사성폐기물 처리시설이 운영되고 있다. 현재 한국원자력연구원에서 운영되고 있는 주요 방사성폐기물 처리시설로는 1) 액체 및 고체 폐기물 처리시설, 2) 자연증발 시설이 있다. 그리고 해당 시설들을 통해 증발농축, 고화, 절단, 압축, 제염, 자연증발을 수행한다.

액체 및 고체 폐기물 처리시설은 액체 방사성폐기물의 처리를 위한 구역과 고체 방사성폐기물의 처리를 위한 구역으로 구분된다. 액체 방사성폐기물의 경우 증발농축, 이온교환 및 아스팔트 고화처리가 수행되며, 고체 방사성폐기물의 경우 압축기 및 절단기를 통한 부피 감용 처리가 수행된다. 그리고 연구원 내의 방사성 오염기기의 제염 작업 또한 수행된다. 방사성 오염기기의 제염 시에는 침액탱크, 모래분사제염기, 초음파제염기, 오염 피폭 세탁을 위한 세탁 설비 등이 사용된다. 자연증발 시설에서는 액체 방사성폐기물의 증발농축 처리에서 발생하는 정제액과 연구용 원자로에서 발생하는 극저준위 액체 방사성폐기물에 대하여 최종 증발 처리를 수행한다. 해당 시설에

서는 면과 폴리에스터(Polyester)가 함유된 합성섬유를 증발 매체로 하여 외부 공기를 강제 송풍시켜 증발 처리를 수행한다[18]. 자연증발시설은 증발 처리를 위해 정제액 순환펌프, 증발천, 송풍기 등의 설비를 운용하고 있다.

4. 고 찰

본 연구에서는 국내·외 원자력시설 부지 내 방사성폐기물 처리시설 운영 현황 분석을 위해 각 시설별 주요 처리 공정 및 처리 설비 현황을 비교하였다. Table 2에 국내·외 원자력시설 부지 내 처리시설별 주요 처리 공정을 비교하여 나타내었다. 원자력발전소 및 원자력 연구시설 부지 내 처리시설에서 수행되는 주요 처리 공정은 자체처분을 위한 측정을 포함하여 압축, 절단, 제염, 소각, 용융, 고화, 건조, 자연증발, 증발농축 등 10가지로 구분되었다. 독일 Greifswald 원자력발전소, 스웨덴 Oskarshamn 원자력발전소, 핀란드 Loviisa 원자력발전소의 소내 처리시설에서는 일본 원자력과학연구소, 한국원자력연구원에 비하여 상대적으로 적은 수의 처리 공정이 수행되는 것으로 나타났다. 이는 일본 원자력과학연구소와 한국원자력연구원의 경우 연구용 원자로 운영 등에 따라 발생하는 방사성폐기물은 주로 방사성폐기물 처리시설로 운반되어 해당 시설에서 직접 처리되기 때문인 것으로 판단된다[3,35].

소내 처리시설을 운영하고 있는 독일 Greifswald 원자력발전소, 스웨덴 Oskarshamn 원자력발전소, 핀란드 Loviisa 원자력발전소의 경우, 운영 및 해체에 따라 발생하는 폐기물의 처리 공정을 고려하고 있는 것으로 나타났다. 특히 해체가 진행 중인 Greifswald 원자력발전소와 Oskarshamn 원자력발전소의 소내 처리시설에서는 제염처리를 수행하고 있으며, 이는 해체 폐기물의 대부분인 저준위 방사성폐기물의 방사능 준위를 낮춤으로써 총 처분 비용을 줄이기 위한 것으로 판단된다[6,31]. 소각 및 용융 처리의 경우 Greifswald 원자력발전소, Oskarshamn 원자력발전소, Loviisa 원자력발전소 소내 처리시설에서 수행되지 않는 것으로 나타났다. 이는 유럽의 중앙집중식 처리시설 Studsvik에서 스웨덴, 독일, 핀란드 등 다양한 유럽 국가의 방사성폐기물을 위탁 처리하고 있으며, 해당 시설에서 소각 및 용융의 처리 또한 수행하고 있기 때문인 것으로 판단된다[36-38]. 원자력발전소의 액체 방사성폐기물 관리계통의 경우 정상운영뿐만 아니라 예상과도 운전 시에도 폐기물을 처리할 수 있도록 충분한 여유도를 가지고 설계되며, 해체 시 액체 방사성폐기물은 고체 방사성폐기물에 비해 발생량이 급격히 증가할 개연성이 적다. 이에 따라 증발농축 처리는 일본 원자력과학연구소, 한국원자력연구원의 처리시설에서만 수행되는 것으로 나타났다.

Table 3에 주요 처리 공정별 운용되고 있는 설비 현황을 요약하여 나타내었다. 처리 공정별 관련 설비는 다양하게 나타났으나, 같은 처리 공정인 경우 유사한 설비가 활용되고 있는 것으로 나타났다. 절단, 제염 처리의 경우 설

Table 2. On-site major radioactive treatment process by nuclear facility

Type	Treatment	Greifswald NPP	Oskarshamn NPP	Loviisa NPP	NSRI[a]	KAERI[a]
Solid radioactive waste (Dry)	Compaction	√			√	√
	Cutting	√			√	√
	Decontamination	√	√		√	√
	Incineration				√	
	Melting				√	
	Measurement[b]	√				
Solid radioactive waste (Wet)	Drying	√				
	Solidification		√	√	√	√
Liquid radioactive waste	Evaporation				√	√
	Vaporization					√

[a]Radioactive wastes are directly transferred to the on-site treatment facility to treatment.
[b]This measurement is for the clearance of radioactive waste.

Table 3. Equipment status by radioactivity treatment process

Major process	Equipment for process	
Compaction	- Compactor	- Super compactor
Cutting	- Band saw - Scrap shear - Lasor shear - Gas shear	- Thermal saw - Hydraulic shear - Plasma shear
Decontamination	- Ultrasonic wave equipment - Hot water machine - Box for high pressure water blasting	- Electrochemistry equipment - Sand blast equipment
Incineration/melting	- Incinerator - Plasma furnace	- Blast furnace - Molding equipment
Drying/Vaporization	- Drying equipment - Air blower	- Drying fabric
Evaporation	- Evaporation equipment	
Solidification	- Solidification equipment by matrix (Polymer, Cement, Bitumen, etc.)	
Measurement	- Measurement equipment for clearance	

비 운용에 대한 유연성이 비교적 높은 것으로 나타났다. 이는 절단, 제염의 경우 처리 대상 방사성폐기물의 종류, 크기 등 특성에 따라 다양한 처리 설비를 활용할 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 방사성폐기물의 절단을 수행하기 위하여 띠 절단기, 열 절단기, 유압 절단기, 디스크 절단기, 레이저 절단기, 고철가위 등이 사용될 수 있다. 제염 시에는 고압 살수 설비, 전기화학적 제염 설비, 모래분사 제염기, 초음파제염기 등이 사용될 수 있다. 고화 처리는 방사성폐기물의 최종 처분을 위해 안정된 고화체가 제조되어야 하므로, 안전성을 만족시킬 수 있는 고화체가 고려되어야 한다[19]. 고화 처리 시에는 고화 대상 방사성폐기물의 특성, 처분시설의 인수기준 등에 따라 폴리머, 시멘트, 역청 등 다양한 고화체가 사용될 수 있다. 따라서 처리시설별 사용되는 고화체의 종류에 따라 운용되는 고화 처리 설비는 상이한 것으로 판단된다.

5. 결 론

국내 다수의 원자력발전소는 영구정지 시기가 임박함에 따라 향후 대량의 해체폐기물이 발생할 것으로 예상되고 있으며, 기존 방사성폐기물 관리계통 및 한국원자력환경공단의 처리 공정에 의존하기에는 한계가 있다. 따라서 국내·외에서 운영 중인 부지 내 방사성폐기물 처리시설의 주요 처리 공정 및 관련 설비를 파악하고, 이를 기반으로 국내 실정에 적합한 원자력발전소 소내 방사성폐기물 처리시설을 구축할 필요가 있다. 본 연구에서는 국내·외 원자력시설 부지 내 방사성폐기물 처리시설 현황을 조사하고, 시설 내에서 수행되는 주요 처리 공정과 관련 설비를 분석하였다.

국내·외 원자력시설 부지 내 처리시설의 주요 처리 공정 분석 결과, 시설 내 주요 처리 공정은 자체처분을 위한 측정을 포함하여 압축, 절단, 제염, 소각, 용융, 고화, 건조, 자연증발, 증발농축 등 10가지로 구분되었다. 독일 Greifswald 원자력발전소와 스웨덴 Oskarshamn 원자력발전소, 핀란드 Loviisa 원자력발전소의 소내 처리시설에서는 모두 해체폐기물의 처리를 고려하고 있으며, 해체가 진행 중인 원자력발전소의 경우 제염 처리를 수행하고 있는 것으로 나타났다. 스웨덴에서는 중앙집중식 처리시설을 운영하고 있음에 따라 Greifswald 원자력발전소, Oskarshamn 원자력발전소, Loviisa 원자력발전소에의 소내 처리시설에서 소각 및 용융 처리는 수행되지 않는 것

으로 나타났다. 원자력 연구시설인 일본 원자력과학연구소와 한국원자력연구원의 부지 내 처리시설에서는 비교적 다양한 처리 공정이 수행되는 것으로 나타났다.

처리시설 내 운용되고 있는 처리 설비의 분석 결과, 방사성폐기물의 공정에 따라 다양할 설비가 활용되고 있으며, 같은 처리 공정인 경우 유사한 설비가 활용되고 있는 것으로 나타났다. 절단, 제염 처리는 처리 대상 방사성폐기물의 종류, 크기 등 특성에 따라 다양한 처리 설비를 활용할 수 있기 때문인에 설비 운용에 대한 유연성이 비교적 높은 것으로 나타났다. 고화 처리 시에는 고화 대상 방사성폐기물의 특성, 처분시설의 인수기준 등에 따라 폴리머, 시멘트, 역청 등 다양한 고화체가 사용될 수 있다. 이에 따라 운용되는 처리시설별 고화 처리 설비는 상이한 것으로 나타났다.

방사성폐기물의 종류, 특성에 따라 필요한 처리 공정과 이를 위한 설비가 상이하므로, 국내 원자력발전소 소내 방사성폐기물 처리시설 구축 시에는 운영, 해체폐기물의 종류와 필요한 처리 공정 및 설비가 적절히 고려되어야 할 것으로 시사된다. 본 연구 결과는 원자력시설 부지 내 방사성폐기물 처리시설 내 처리 공정 및 설비의 현황을 파악하는 데 활용될 수 있을 것이다. 그리고 향후 소내 처리시설 구축을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

사 사

본 연구는 한국에너지기술평가원에서 주관하는 에너지기술 개발사업의 일환으로 수행된 연구입니다(No. 20211710200001B).

참고문헌

1. MOTIE. 2020. Korean 2nd Basic Plan for the Management of LILW.
2. KORAD. 2020. Implementation Plan for the Management of LILW in 2020.
3. KINS. 2020. Korean Seventh National Report under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. KINS/AG-020.
4. IAEA. 1997. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. INFCIRC/546.
5. IAEA. 2016. Predisposal Management of Radioactive Waste from Nuclear Power Plants and Research Reactors. No. SSG-40.
6. IAEA. 2006. Innovative waste treatment and conditioning technologies at nuclear power plants. IAEA-TECDOC-1504.
7. BfS. 2011. Decommissioning in Germany; Greifswald NPPs.
8. Westinghouse. 2010. Decommissioning Planning for Forsmark and Oskarshamn NPPs.
9. Fortum. 2018. Integration of Safety, Reliability and Technology based on experience of nuclear waste management in Finland.
10. Fortum. 2019. Loviisa power plant; Our environment 2019.
11. Son H-D. 2017. Matters to be prepared by enterprises for the decommissioning of Gori Unit 1. *KAIF* **37**(12):73-78.
12. Choe Y-G. 2017. Kori Unit 1 Decommissioning Project Promotion Plan. *KAIF* **37**(12):40-49.
13. Song J-S. 2016. Current and future of nuclear power plant decommissioning waste treatment technology. Konetic Report 2016-134. Korea Environmental Industry & Technology Institute.
14. Baek S-G, Ryu H-G, Choi K-H, Yang D-H, Baek H-H, Lee B-I and Kim K-Y. 2015. Cutting Robot for the Nuclear Plant Decommissioning. Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Spring and Autumn Conference 2015. 4131-4136.
15. Yoon H, Kim N, Cho Y, Lee T, Jo S and Jeong J. 2020. Plasma Torch System for Radioactive Waste Treatment in Decommissioning. Proceedings of the Korean Society for Fluid Machinery Summer Conference 2020. 407-408.
16. Jeong HJ, Lee HG, Lee U, Byun J, Lee K and Chung S. 2020. A Conceptual Design Study of Mobile Compaction Facility for Effective Volume Reduction of Nuclear Power Plant Decommissioning Waste. *J. Radiat. Ind.* **14**(4):441-446.
17. KAERI. 1994. The management of Radioactive Waste Treatment facility. KAERI-MR-247/94.
18. KAERI. 2001. The management of Radioactive Waste Treatment facility. KAERI/MR-365/2001.
19. KAERI. 2017. Construction and Operation of Practical Scale Decommissioning Waste Treatment Facilities. KAERI/RR-4330/2017.
20. IAEA. 2007. Radioactive Waste Management Profiles. a Compilation of Data from the Net Enabled Waste Management Database (NEWMDB). IAEA/WMDB/8.
21. NRC. 2012. Radioactive Waste Management Self Study. ML12151A430-0879-H202S.
22. BMU. 2020. Germany's 8th National Report under the Joint

Convention on Nuclear Safety.
23. BMU. 2021. Germany's 7th National Report under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Radioactive Waste Management.
24. EWN. 2011. The Greifswald Decommissioning Project.
25. Hartmann B and Leushachke DF. Dr. 1999. The Role of the World's Largest Interim Storage for Waste and Fuel within the Decom Project of 6 WWER Reactors in Greifswald and Rheinbsberg (Germany).
26. Thurow E and Zimmer R. 2012. Radiological Charcterisation - the Greifswald NPP approach.
27. Naturvårdsverket. 2019. Finnish 8th National Report under the Joint Convention on Nuclear Safety.
28. Naturvårdsverket 2020. Finnish 7th National Report under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Radioactive Waste Management.
29. Rannemalm T, Eriksson J and Bergh N. 2016. Decommissioning Planning for Nuclear Units at the Oskarshamn Site.
30. SKB. 2013. Decommissioning Study of Oskarshamn NPP. R-13-04.
31. SSM. 2017. General data in accordance with the requirements in article 37 of the Euratom Treaty; Dismantling of the nuclear reactors Oskarshamn 1 and 2 in Sweden.
32. STUK. 2019. Finnish 8th National Report under the Joint Convention on Nuclear Safety.
33. STUK. 2020. Finnish 7th National Report under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Radioactive Waste Management.
34. Fortum. 2020. Loviisa power plant; Our environment 2020.
35. JAEA NSRI. Treatment of Radioactive Waste. https://www.jaea.go.jp/english/04/ntokai/backend/backend_01_02.html
36. Studsvik. 2021. ANNUAL REPORT 2021.
37. Studsvik. 2010. Waste Volume Reduction by Studsvik Nuclear AB.
38. Studsvik. 2016. Options for Steam Generator Decommissioning.