Journal of Radiation Industry 15 (4) : 301~309 (2021) https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.4.301

국내·외 사용후핵연료 저장 및 최종관리 정책 현황 분석

라현준[1] · 김혁재[1] · 김기훈[1] · 남형우[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Analysis of Domestic and Foreign Spent Fuel Storage and Final Management Policies

Hyun Jun Na[1], Hyeok Jae Kim[1], Ki Hoon Kim[1], Hyeung Woo Nam[1] and Kwang Pyo Kim[1,*]

[1]*Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, Yongin 17104, Republic of Korea*

Abstract - Currently, as the saturation of the temporary storage facility for spent fuel in nuclear power plants is imminent in Korea, it is necessary to prepare additional management. Therefore, it is necessary to investigate the status of domestic and foreign spent fuel management so that an appropriate spent fuel management can be prepared in the future. The objective of this study is to investigate and analyze the status of domestic and foreign spent fuel storage and final management policies. Seven countries, including the United States (US), United Kingdom (UK), and Korea were selected as the target countries. Among spent fuel storage status, the amount of domestic spent fuel storage was found to be 1.5 times of the overseas average (except US). As for the current status of spent fuel storage facilities, spent fuel after temporary storage is stored in ISFSI (Independent Spent Fuel Storage Installation), interim storage facility, and reprocessing facility storage pool abroad. In Korea, since there is no interim storage facility, the spent fuel is stored in the on-site storage facility. In the case of storage methods, both wet and dry storage methods are used in the US, UK, Japan, and Korea. In the case of regulatory and disposal management agencies among the final management policies, each country operates separated regulatory and disposal management agencies. As for the status of adoption of the final management policy, the US, Sweden, and Finland adopt direct disposal as the final management policy for spent fuel. In the France and Japan, reprocessing is adopted as a final management policy. In the UK, reprocessing has been adopted as a final management policy, but will be abandoned. The US, Sweden, and Finland, which have adopted direct disposal as their final management policy, have completed the site selection for the repository. Among the France, and Japan, where reprocessing is adopted as a final management policy, the site selection for a high-level radioactive waste disposal site has been completed in France. Also, in the UK and Japan, the site selection for a repository is in progress. The results of this study can be utilized when preparing a management spent fuel in the future.

Key words : Spent fuel, Storage facility, Direct disposal, Final management policy

서 론

사용후핵연료는 원자로에 장전되어 핵분열시킨 핵연료 물질로서 높은 수준의 열과 방사선을 방출하는 고준위방사

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

성 폐기물이다. 사용후핵연료는 원자로에서 인출된 후 사용후핵연료 저장시설에서 수십년 동안 냉각 및 보관된다. Table 1에 국내 사용후핵연료 저장현황을 나타내었다. 국내 중수로형 월성 원자력발전소 소내 저장시설은 2021년 포화가 임박하였고, 경수로형 원자력발전소 소내 저장시설은 한빛 2029년, 한울 2030년, 고리 2031년, 신월성 2042년 순으로 포화가 예상되고 있다(한국방사성폐기물학회 2019). 이에 따라 사용후핵연료 중간저장시설, 처분장 건설 등의 추가적인 사용후핵연료 관리방안 마련이 시급한 상황이다.

국제원자력기구(IAEA, International Atomic Energy Agency)에서는 방사성폐기물 관리 시 인간 및 환경의 안전을 확보하고, 현재뿐만 아니라 미래에도 안전을 확보하여 후손에게 부당한 부담을 전가시키지 않을 것을 권고하고 있다(IAEA 1997b). 국제원자력기구에서는 1997년 사용후핵연료 관리경험에 대한 데이터 베이스 구축을 위하여 각국의 사용후핵연료 관리 현황 및 관리기술을 조사하여 보고서를 발간하였다(IAEA 1997a). 그리고 1999년, 2003년 국가별 사용후핵연료 저장시설 확보 현황, 저장방식 현황 등에 관한 정보를 조사하여 보고서를 발간하였다(IAEA 1999; IAEA 2003b). 국제원자력기구를 중심으로 2001년 "사용후핵연료 및 방사성폐기물 안전관리에 관한 공동협약"이 발효되었다. 공동협약이 발효됨에 따라 미국, 프랑스 등 공동협약 당사국들은 3년 주기로 국가보고서를 제출하여 협약 준수 여부를 검토하고 있다(ASN 2020; DOE 2020). 공동협약 당사국들은 국가 보고서를 통해 각국의 사용후핵연료 저장현황을 제시하고 있다. 국내에서는 2018년 산업부를 중심으로 미국, 스위스 등 사용후핵연료 선도국에 대하여 사용후핵연료 관리 현황을 조사한 바 있다(산업통상자원부 2018). 에너지경제연구원에서는 국외 사용후핵연료 저장 현황에 대해 조사한 바 있다(에너지경제연구원 2018). 그리고 한국원자력연구원 및 한국원자력환경공단에서는 국외 주요국에 대하여 사용후핵연료 처분장 확보 현황을 조사한 바 있다(한국원자력연구원 2008; 한국원자력환경공단 2017).

현재 우리나라는 사용후핵연료 임시저장시설 외의 저장시설을 확보하지 못한 상황이다. 그리고 명확한 사용후핵연료 최종관리 정책을 결정하지 않고 관망정책을 유지하고 있다(장 등 2020). 사용후핵연료 저장뿐만 아니라 최종관리 정책을 포함하여 종합적인 사용후핵연료 관리방안에 대한 조사 연구는 수행된 바 없다. 국내 사용후핵연료 포화시점이 임박하고 있는 상황에서 적절한 사용후핵연료 관리방안을 마련하기 위해서는 국내·외 사용후핵연료 관리방안 현황을 비교·분석할 필요가 있다.

따라서 본 연구의 목표는 국내·외 사용후핵연료 저장 및 최종관리 정책 현황을 조사·분석하는 것이다. 이를 위하여 국내·외 사용후핵연료 저장량, 저장방식, 저장시설 종류를 조사하였다. 그리고 국가별 규제 및 처분관리기관, 최종관리 정책, 처분장 확보 현황을 조사 및 비교·분석하였다.

재료 및 방법

본 연구에서는 국내·외 사용후핵연료 저장 및 최종관리 정책 현황을 조사·분석하였다. 조사 대상 국가로는 국내를 포함하여 사용후핵연료 관리 선도국인 미국, 영국, 프랑스, 스웨덴, 핀란드, 일본 총 7개국을 선정하였다. 사용후핵연료 저장 현황은 각국의 사용후핵연료 저장량, 저장시설 현황, 저장방식을 조사하였다. 사용후핵연료 저장방식은 크게 냉각방식과 시설 위치에 따라 구분할 수 있다. 사용후핵연료 저장방식은 냉각방식에 따라 습식저장방식, 건식저장방식으로 구분할 수 있다(한국원자력연구원 2009). 건식저장방식의 경우 볼트(Vault) 방식, 사일로(Silo) 방식, 용기(Cask) 방식으로 구분할 수 있다(Bunn *et al*. 2001). 볼트 방식은 사용후핵연료를 금속 저장 튜브, 저장 실린더 등에 수직으로 장전하는 방식이다(한국원자력연구원 2003). 사일로 방식은 사용후핵연료를 금속 라이너(Liner), 금속 캐니스터(Canister) 등에 장전하여 수직 또는 수평 콘크리트 실린더에 저장하는 방식이다. 용기 방식은 사용후핵연료를 콘크리트 혹은 금속 용기에 저장하는 방식이다. 그리고 사용후핵연료 저장방식은 시설 위치에 따라 AR(At Reactor), AFR(Away From Reactor)로 구분할 수 있다. AR방식은 사용후

Table 1. Domestic spent nuclear fuel storage (As of 2021.10)

Nuclear power plant	Plant type	Storage method	Storage (assemblies)	Capacity (assemblies)	Saturation rate (%)
Kori	PWR	Wet	6,737	8,115	83.0
Saeul	PWR	Wet	296	1,560	19.0
Hanbit	PWR	Wet	6,691	9,017	74.2
Hanul	PWR	Wet	6,342	7,066	89.8
Shin-wolsong	PWR	Wet	658	1,046	62.9
Wolsong	PHWR	Wet	154,676	171,912	90.0
		Dry	329,400	330,000	99.8

핵연료를 원자로 가동과 관련된 건물에 저장하는 방식이며 AFR방식은 원자로 밖에 저장하는 방식이다. AFR 방식은 RS (Reactor Site), OS (Off Site)로 구분할 수 있다. RS는 원자력발전소 부지 내에 저장하는 방식이며 OS는 원자력발전소 부지 외부에 저장하는 방식이다.

최종관리 정책 현황은 각국의 규제 및 처분관리 기관, 최종관리 정책 채택 현황, 처분장 확보 현황을 조사하였다. 국내 사용후핵연료 최종관리 정책은 결정된 바 없으므로 최종관리 정책 현황 조사 시 국내는 제외하였다. 사용후핵연료 최종관리 정책은 재처리 후 처분, 직접처분 등 사용후핵연료에 대한 최종적인 관리방안이다(지식경제부 2009). 사용후핵연료 재처리는 사용후핵연료에 존재하는 우라늄, 플루토늄을 분리하여 재사용하는 기술이다(한국방사선진흥협회 2017). Fig. 1에 사용후핵연료 재처리 과정 모식도를 나타내었다. 사용후핵연료 재처리법은 습식 재처리법 및 건식 재처리법으로 구분할 수 있다(장 등 2020). 사용후핵연료 재처리 과정에서 핵분열생성물들이 액체폐기물 혹은 염폐기물의 형태로 발생하게 되고 이를 다시 제거·처리하는 과정에서 고준위방사성 폐기물이 발생하게 된다. 사용후핵연료 직접처분은 사용후핵연료를 인간의 관리없이 영구적으로 인간 생활권에서 격리시키는 것이다(산업통상자원부 2018). Fig. 2에 방사성폐기물 처분방법을 나타내었다. 직접처분은 크게 천층처분, 심층처분으로 구분할 수 있으며 천층처분은 동굴처분, 표층처분, 매립형 처분으로 구분할 수 있다(원자력안전위원회 2021). 일반적으로 심층처분 방식이 사용후핵연료 및 고준위방사성 폐기물에 대한 처분방식으로 제시된다(IAEA 2003a).

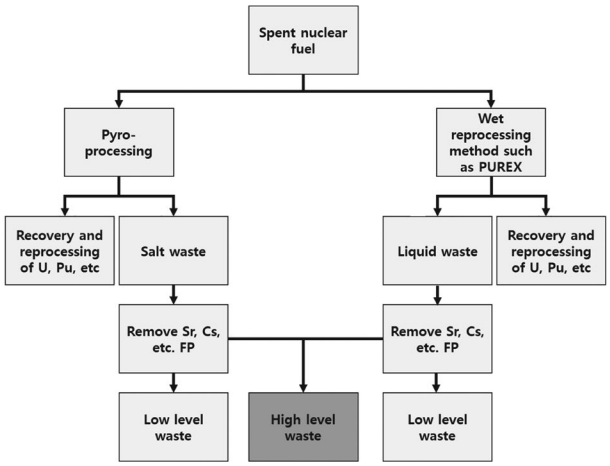

Fig. 1. Schematic of the spent fuel reprocessing process.

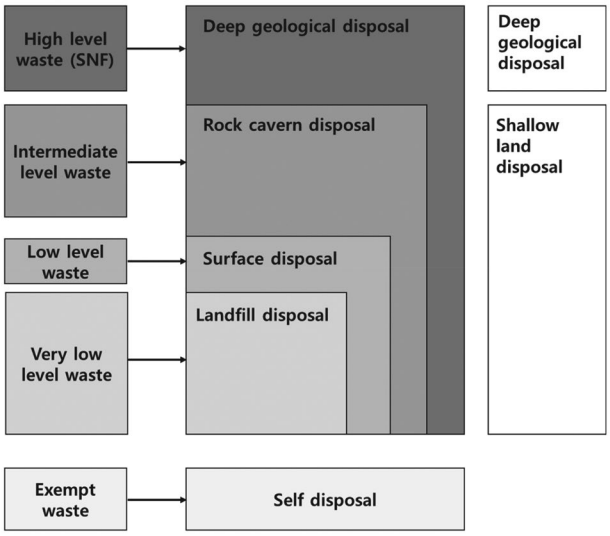

Fig. 2. Radioactive waste disposal method.

결 과

1. 국내·외 사용후핵연료 저장 현황

1.1. 미국

미국에서는 발생된 사용후핵연료를 원자로 격납건물 내 저장조에서 임시저장한 후 독립저장시설로 운반해 직접처분 전까지 저장하고 있다. 미국 에너지부(DOE, Department Of Energy)에 의하면 2020년 기준 미국 내 대학 연구 시설, 원자력발전소 부지 내 저장량 등을 포함한 총 저장량은 약 86,715 ton이다(DOE 2020). 미국에서는 사용후핵연료 저장방식으로 습식저장방식과 건식저장방식을 모두 사용하고 있다. 습식저장시설로는 각 원자로 격납건물 내 저장조, 일리노이(Illinois) 주에 위치한 모리스(Morris) 독립저장시설이 있으며 각각 AR, AFR (OS) 방식으로 운영되고 있다(IAEA 1999). 그 외 독립저장시설은 건식저장시설이며 AFR (RS), AFR (OS) 방식으로 운영되고 있다. 건식저장시설은 볼트 방식인 MVDS (Modular Vault Dry Store), 사일로 방식인 NUHOMS (NUTECH HOrizontal Modular Storage System), 용기 방식인 금속 및 콘크리트 용기 방식을 사용하고 있다.

1.2. 영국

영국에서는 사용후핵연료를 원자로 격납건물 내 저장조에서 임시저장한 후 셀라필드(Sellafield) 재처리시설로 운반해 저장하고 있다. 영국 원자력해체청(NDA, Nuclear Decommissioning Authority)에 의하면 2019년 기준 영국 내 사용후핵연료 저장량은 약 6,100 ton이다(NDA 2019). 영국에서는 사용후핵연료 저장방식으로 습식저장방식과 건식저장방식을 모두 사용하고 있다. 습식저장시설로는 각 원자로 격납건물 내 저장조, 셀라필드 재처리시설 저장조가

있으며 각각 AR, AFR (OS) 방식으로 운영되고 있다(IAEA 1999). 건식저장시설은 Wylfa, Sizewell B 부지에 위치하고 있으며, 각각 볼트 방식인 MVDS, 콘크리트 용기방식으로 운영되고 있다.

1.3. 프랑스

프랑스에서는 사용후핵연료를 격납건물 내 저장조에서 임시저장한 후 라하그(La Hague) 재처리시설로 운반해 재처리 전까지 저장하고 있다. 프랑스 원자력안전국(ASN, Nuclear Safety Authority)에 의하면 2018년 기준 프랑스 내 사용후핵연료 총 저장량은 약 14,168 ton이다(ASN 2020). 프랑스에서는 사용후핵연료 저장방식으로 습식저장방식만을 사용하고 있다. 습식저장시설로는 각 원자력발전소 격납건물 내 저장조, 5개의 라하그 재처리시설 저장조가 있다. 라하그 재처리시설 저장조는 AFR (OS) 방식으로 운영되고 있다.

1.4. 스웨덴

스웨덴에서는 사용후핵연료를 원자로 격납건물 내 저장조에서 임시저장한 후 중앙집중식 중간저장시설 클랩(CLAB, Central holding Storage for Spent Nuclear Fuel)으로 운반해 직접처분 전까지 저장하고 있다. 스웨덴 환경부에 의하면 2020년 기준 스웨덴 내 사용후핵연료 총 저장량은 약 7,291 ton이다(Ministry of the Environment Sweden 2020). 스웨덴에서는 사용후핵연료 저장방식으로 습식저장방식만을 사용하고 있다. 습식저장시설로는 각 원자력발전소 격납건물 내 저장조, 클랩이 있으며 클랩은 AFR (OS) 방식으로 운영되고 있다.

1.5. 핀란드

핀란드에서는 사용후핵연료를 원자로 격납건물 내 저장조에서 임시저장한 후 소내 중간저장시설로 운반해 직접처분 전까지 저장하고 있다. 핀란드 방사선원자력안전청(STUK, Radiation and Nuclear Safety Authority)에 의하면 2013년 기준 핀란드 내 총 사용후핵연료 저장량은 약 1,747 ton이다(STUK 2020). 핀란드에서는 사용후핵연료 저장방식으로 습식저장방식만을 사용하고 있다. 습식저장시설로는 원자력발전소 격납건물 내 저장조, 로비사(Loviisa) 원자력발전소 중간저장시설, 올킬루오토(Olkiluoto) 원자력발전소 중간저장시설이 있으며 모든 중간저장시설은 AFR (RS) 방식으로 운영되고 있다.

1.6. 일본

일본에서는 사용후핵연료를 격납건물 내 저장조, 소내 저장시설에서 임시저장한 후 재처리시설로 운반해 재처리 전까지 저장하고 있다(에너지경제연구원 2018). 일본 원자력규제위원회(NRA, Japan Nuclear Regulation Authority)에 의하면 2017년 기준 일본 내 사용후핵연료 총 저장량은 약 18,398 ton이다(NRA 2017). 일본에서는 사용후핵연료 저장방식으로 습식저장방식과 건식저장방식을 모두 사용하고 있다. 습식저장시설로는 각 원자로 격납건물 내 저장조, 도카이무라(Tokai Mura) 재처리시설, 롯카쇼무라(Rokkasho Mura) 재처리 시설, 후쿠시마 다이치(Fukushima Daiichi) 원자력발전소 저장조가 있다(IAEA 1999). 도카이무라 재처리시설, 롯카쇼무라 재처리시설은 AFR (OS) 방식으로 운영되고 있으며, 후쿠시마 다이치 저장조는 AFR (RS) 방식으로 운영되고 있다. 일본의 건식저장시설은 후쿠시마 다이치 원자력발전소, 도카이 다이니(Tokai Daini) 원자력발전소 부지에 위치하며 AFR (RS) 방식으로 운영되고 있다. 후쿠시마 다이치 건식저장시설은 용기 방식, 콘크리트 모듈방식으로 운영되고 있으며 용기는 금속용기 방식으로 운영되고 있다(한국원자력연구원 2003). 도카이 저장시설에서는 금속용기 방식을 사용하고 있다. 현재 아오모리현 무츠(Mutsu)시에서 사용후핵연료 중간저장시설이 건설 중에 있으며, 2023년에 운영 예정이다.

1.7. 국내

국내에서는 사용후핵연료를 각 원자로 격납건물 내 저장조, 소내 저장시설에서 저장하고 있다. 한국원자력환경공단에 의하면 2015년 기준 국내 사용후핵연료 총 저장량은 약 14,486 ton이다(한국원자력환경공단 2016). 국내에서는 사용후핵연료 저장방식으로 습식저장방식과 건식저장방식을 모두 사용하고 있다. 국내 습식저장시설로는 각 원자로 격납건물 내 저장조가 있으며 AR 방식으로 운영되고 있다. 건식저장시설로는 월성 건식저장시설이 있으며 AFR (RS) 방식으로 운영되고 있다. 월성 건식저장시설은 콘크리트 모듈방식을 사용하고 있으며 콘크리트 모듈방식 시설 중 사일로, 조밀건식저장시설(MACSTOR, Modular Air-Cooled STORage)을 운영하고 있다. 현재 정부에서는 사용후핵연료 관리정책 재검토위원회를 설치하여 사용후핵연료 중간저장시설 건설 등의 사용후핵연료 관리정책에 관한 의견을 수렴하고 있다(사용후핵연료 관리정책 재검토위원회 2021). 사용후핵연료 관리정책 재검토위원회에서는 정부에 대해 중간저장시설 확보를 우선하는 관리정책 마련을 권고하고 있다.

2. 국외 사용후핵연료 최종관리 정책 현황

2.1. 미국

미국은 1977년 이전까지 사용후핵연료를 재처리하였으나 핵비확산 조치의 일환으로 사용후핵연료 재처리를 금지한 이후 사용후핵연료 최종관리 정책으로 직접처분을 채택하고 있다(IAEA 2018). 미국의 사용후핵연료 처분에 대한

규제는 미국 원자력규제위원회(NRC, Nuclear Regulatory Commission)가 담당하고 있으며 실질적인 처분 실시주체는 미국 에너지부이다. 1987년 네바다(Nevada) 주 유카산(Yucca mountain)이 사용후핵연료 처분장의 유일한 후보지로서 부지특성 조사가 수행되었으며, 2002년 처분장 부지로 지정되었다. 그러나 미국 2018, 2019, 2020 회계연도에서는 유카산 사용후핵연료 처분장 건설 프로젝트에 대한 자금 지원 요청이 수용되지 않았다. 2022 회계연도에서 또한 자금 지원이 진행되지 않아, 이에 따른 대안 마련의 필요성이 대두되고 있는 실정이다(CRS 2021).

2.2. 영국

영국은 사용후핵연료 최종관리 정책으로 재처리를 채택하였으나 재처리를 중단하겠다는 의사를 표시하였다(BEIS 2020). 영국의 사용후핵연료에 대한 안전규제는 원자력규제국(ONR, Office for Nuclear Regulation) 및 각 자치정부의 환경규제당국이 담당하고 있으며 실질적인 처분 실시주체는 영국 원자력해체청이다. 영국 원자력해체청에서 운영하는 셀라필드 사용후핵연료 재처리시설에서는 1950년대부터 영국에서 발생하는 사용후핵연료뿐만 아니라 타국의 사용후핵연료 또한 위탁계약하여 재처리를 수행하였다. 셀라필드 재처리시설 중 열 산화물 재처리 시설(THORP, Thermal Oxide Reprocessing Plant)은 2018년 운영 중지되었으며 2070년까지 사용후핵연료 저장시설로 활용될 예정이다. 영국 정부는 2006년 사용후핵연료 재처리 과정에서 발생하는 고준위방사성 폐기물은 유리고화하여 심층처분하는 방침을 결정하였다. 영국은 심층처분장 부지결정을 위하여 고준위방사성 폐기물 심층처분장 확보를 위한 부지선정 절차를 제시하였다. 부지선정 절차는 크게 1) 대화, 2) 워킹 그룹(Working Group) 결성, 3) 지역 조사, 4) 시추공 검사, 5) 지역 지지율 확인(Test)으로 구성된다(Radioactive Waste Management 2018). 2020년 11월, 2021년 1월에는 각각 컴브리아(Cumbria) 주의 코프랜드(Copeland), 알러데일(Allerdale)에서 워킹 그룹이 결성되었다. 그리고 링컨셔(Lincolnshire) 주에서는 워킹 그룹 구성에 대한 논의가 진행되고 있다.

2.3. 프랑스

프랑스는 사용후핵연료 최종관리 정책으로 재처리를 채택하고 있다(IAEA 2018). 프랑스의 사용후핵연료에 대한 안전규제는 프랑스 원자력안전국이 담당하고 있으며 실질적인 처분 실시주체는 프랑스 방사성폐기물관리공단(ANDRA, Agence Nationale pour la gestion Déchets Radioctifs)이다. 프랑스에서는 2006년 방사성폐기물 관리계획법 제정을 통해 사용후핵연료를 재처리하는 과정에서 발생되는 고준위방사성 폐기물에 대하여 “가역성 있는 심층처분”의 실시를 명시하였다. 가역성 있는 심층처분은 처분사업의 단계적 진행과, 기술·환경·경제·사회적 관점에서의 처분장 설계 변경 및 필요에 따른 폐기물의 회수 가능성 등 후세에 선택지를 남기는 것을 목표로 한 사업이다. 프랑스에서는 뷰흐(Bure) 지하연구소 부지에 처분장을 건설할 계획이다. 프랑스 방사성폐기물관리공단은 2015년 뷰흐 부지에 고준위방사성 폐기물 처분장 인허가를 신청하였다. 그리고 2020년 8월 뷰흐의 환경 및 사회·경제성에 대한 평가보고서와 지역 의견 수렴 결과 등을 제출하였다. 프랑스 방사성폐기물관리공단은 2022년 원자력안전기관에 건설 허가 신청서를 제출할 예정이다. 그리고 공개 조사 수행 결과 및 건설 허가 신청서의 심사 결과에 따라, 향후 뷰흐 처분장 건설이 결정될 예정이다.

2.4. 스웨덴

스웨덴은 원자력발전소에서 핵분열 후 발생되는 사용후핵연료 최종관리 정책으로 직접처분을 채택하고 있다(Ministry of the Environment Sweden 2017). 스웨덴의 사용후핵연료 처분에 대한 규제는 스웨덴 방사선안전청(SSM, Swedish Radiation Safety Aurthority)이 담당하고 있으며 실질적인 처분 실시주체는 스웨덴 사용후핵연료 및 방사성폐기물 관리회사(SKB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company)이다. SKB 사에서는 사용후핵연료 처분장 부지로 2009년 6월 오사마르 지자체의 포스마크(Formark)를 선정하였다. 그리고 스웨덴 방사선안전청에서 2020년 10월 포스마크의 사용후핵연료 처분장 건설 신청을 승인하였다. SKB 사에서는 스웨덴 정부에 포스마크 사용후핵연료 처분장에 대한 최종 승인 신청서를 제출하였으며, 허가 심사는 진행 중에 있다.

2.5. 핀란드

핀란드는 원자력발전소에서 핵분열 후 발생되는 사용후핵연료 최종관리 정책으로 직접처분을 채택하고 있다(TEM 2015). 핀란드의 사용후핵연료 처분에 대한 규제는 핀란드 방사선원자력안전청(STUK, Radiation and Nuclear Safety Authority of Finland)이 담당하고 있으며 실질적인 처분 실시주체는 포시바(POSIVA) 사이다. 포시바 사에서는 유라요키(Eurajoki) 지자체의 올킬루오토(Olkiluoto)를 사용후핵연료 처분장 부지 후보로 선정하여, 이에 대한 승인 신청을 하였다. 핀란드 정부는 2015년 11월 포시바 사의 사용후핵연료 처분장 건설을 승인하였다. 그리고 지난 2021년 5월 심층 터널 굴착을 시작하는 등 본격적인 시설 건설이 진행 중에 있다.

2.6. 일본

일본은 사용후핵연료의 직접처분을 법으로 금지하고 있으며 사용후핵연료 최종관리 정책으로 재처리를 채택하고 있다(NRA 1994). 그리고 재처리 과정에서 발생하는 고준위

Table 2. Status of spent nuclear fuel storage by country

Country	Inventory of spent nuclear fuel (ton)	Storage site	Storage method		
			Main category	Middle category[a]	Sub-category[a]
US	86,715	AR AFR (RS) AFR (OS)	Wet / Dry	Vault	MVDS
				Silo	NUHOMS
				Cask	Metal cask Concrete cask
UK	6,100	AR AFR (OS)	Wet / Dry	Vault	MVDS
				Cask	Concrete cask
France	14,168	AR AFR (OS)	Wet	–	–
Sweden	7,291	AR AFR (OS)	Wet	–	–
Finland	1,747	AR AFR (RS)	Wet	–	–
Japan	18,398	AR AFR (RS) AFR (OS)	Wet / Dry	Silo	Concrete module
				Cask	Metal cask
Korea	14,486	AR AFR (RS)	Wet / Dry	Silo	Silo MACSTOR

a: Dry storage facility

방사성 폐기물 유리고화체를 처분대상으로 정하고 있다(국회입법조사처 2017). 일본의 고준위방사성 폐기물 처분에 대한 규제는 경제산업성(METI, Ministry of Economy, Trade and Industry)에서 담당하고 있으며 실질적인 처분 실시주체는 일본 원자력발전환경정비기구(NUMO, Nuclear Waste Management Organization of Japan)이다. 원자력발전환경정비기구는 2002년 12월 고준위방사성 폐기물 등의 최종처분장 설치가능성 조사를 위하여 지역 공모를 수행하였으나 지역 주민들에게 수용되지 않았다. 이에 따라 일본정부에서는 2015년 5월 지자체와의 직접 협의를 통한 처분장 선정을 기본 방침으로 개정하였다. 그리고 2020년 10월 홋카이도의 슷쓰 정과 가모에나이 촌에서 최종처분장 부지 선정에 대한 문헌 조사를 신청하였다(에너지경제연구원 2020).

고 찰

1. 국내·외 사용후핵연료 저장 현황 분석

본 연구에서는 국내·외 사용후핵연료 관리 현황조사 결과를 분석하기 위해 국가별 사용후핵연료 저장 및 최종관리 정책 현황을 비교하였다. Table 2에 국내 · 외 사용후핵연료 저장 현황을 비교하여 나타내었다. Fig. 3에 국내·외 사용후핵연료 저장량을 비교하여 나타내었다. 사용후핵연료 저장량이 가장 많은 미국과 국내 저장량을 비교하였을 때 국내 사용후핵연료 저장량은 미국의 0.17배 수준으로 나타났다. 미국을 제외한 국외 사용후핵연료 저장량을 평균하여 비교하였을 때 국내 사용후핵연료 저장량은 국외 평균값의 1.5배 수준으로 나타났다. 국내 사용후핵연료 저장량이 미국보다 낮은 것은 미국이 원자로 93기를 운영중인 세계 최대의 원자로 보유국이며 사용후핵연료를 별도의 처리나 처분없이 저장 중이기 때문이다. 국내 사용후핵연료 저장량이 국외 평균 저장량(미국 제외)보다 높은 것은 국내 운영중인 원자로는 24기로 조사한 국가인 미국(93기), 프랑스(56기), 일본(33기), 영국(12기), 스웨덴(6기), 핀란드(4기) 중 네번째로 많으며 사용후핵연료를 별도의 처리나 처분없이 저장 중이기 때문이다. 사용후핵연료 저장시설 현황의 경우 미국에서는 독립저장시설, 스웨덴, 핀란드에서는 중간저장시설에서 임시저장 이후의 사용후핵연료를 저장하고 있다. 영국, 프랑스에서는 사용후핵연료 재처리시설 저장조에서 임시저장 이후의 사용후핵연료를 저장하고 있다. 일본, 국내의 경우 중간저장시설을 확보하지 못해 소내 저장시설에서

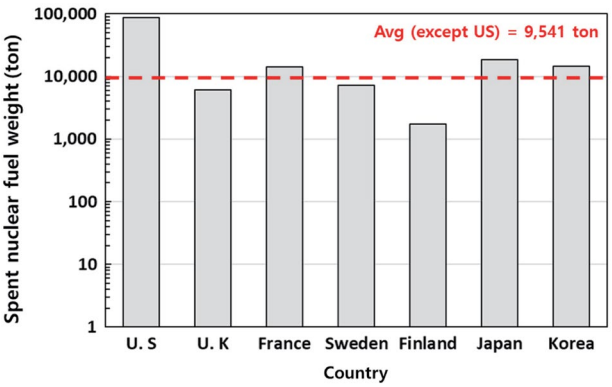

Fig. 3. Spent nuclear fuel storage by country.

사용후핵연료를 저장하고 있다. 일본에서는 아오모리현 무츠시에서 사용후핵연료 중간저장시설이 건설 중에 있으며, 2023년에 운영 예정이다. 저장방식의 경우 미국, 영국, 일본, 국내에서는 습식 및 건식저장방식을 모두 사용하고 있으며, 프랑스, 스웨덴, 핀란드에서는 습식 저장방식만을 사용하고 있다.

2. 국외 사용후핵연료 최종관리 정책 현황 분석

Table 3에 국외 사용후핵연료 최종관리 정책 현황을 비교하여 나타내었다. 규제 및 처분관리 기관의 경우 각국에서는 규제 및 처분관리 기관을 구분하여 운영하고 있다. 최종관리 정책 현황의 경우 미국, 스웨덴, 핀란드에서는 사용후핵연료 최종관리 정책으로 직접처분을 채택하고 있다. 프랑스, 일본에서는 최종관리 정책으로 재처리를 채택하고 있으며 재처리과정에서 발생하는 고준위방사성 폐기물은 직접처분하는 방침을 채택하고 있다. 영국은 최종관리 정책으로 재처리를 채택하였으나 재처리를 중단할 예정이다. 처분장 확보 현황의 경우 최종관리 정책으로 직접처분을 채택하고 있는 미국, 스웨덴, 핀란드는 처분장 부지 선정을 완료하였다. 그 중 핀란드에서는 사용후핵연료 처분장 부지로 울킬루오토를 선정하였으며 처분장 건설이 진행 중이다. 최종관리 정책으로 재처리를 채택하고 있는 프랑스, 일본 중 프랑스에서는 재처리 과정에서 발생하는 고준위방사성 폐기물 처분장 부지로 뷰흐 지하연구소 부지 선정을 완료하였다. 그리고 영국, 일본에서는 처분장 부지 선정이 진행 중이다.

결 론

원자력발전소 소내 저장시설의 포화가 임박함에 따라 추가적인 관리방안이 요구되고 있다. 현재 우리나라는 사용후핵연료 관리방안으로 중간저장시설, 처분장 건설이 논의되고 있지만 최종관리 정책이 수립되지 않았다. 따라서 향후 적절한 최종관리 정책을 채택하고 사용후핵연료 관리방안을 마련할 수 있도록 국내·외 사용후핵연료 관리 현황에 대한 조사가 필요하다. 본 연구에서는 국내·외 사용후핵연료 저장 및 최종관리 정책 현황을 조사하고 이를 분석하였다.

사용후핵연료 저장 현황은 각국의 사용후핵연료 저장량, 저장시설 현황, 저장방식을 분석하였다. 미국을 제외한 국외 사용후핵연료 저장량을 평균하여 비교하였을 때 국내 사용후핵연료 저장량은 국외 평균값의 1.5배 수준으로 나타났다. 사용후핵연료 저장시설 현황의 경우 국외에서는 독립저장시설, 중간저장시설, 재처리시설 저장조 등에서 임시저장 이후의 사용후핵연료를 저장하고 있다. 국내의 경우 중간저장시설을 확보하지 못해 소내 저장시설에서 사용후핵연료를 저장하고 있다. 저장방식의 경우 미국, 영국, 일본, 국내에서는 습식 및 건식저장방식을 모두 사용하고 있다.

사용후핵연료 최종관리 정책 현황은 각국의 규제 및 처분관리 기관, 최종관리 정책 채택 현황, 처분장 확보 현황을 분석하였다. 규제 및 처분관리 기관의 경우 각국에서는 규제 및 처분관리 기관을 구분하여 운영하고 있다. 최종관리 정책 현황의 경우 미국, 스웨덴, 핀란드에서는 사용후핵연료 최종관리 정책으로 직접처분을 채택하고 있다. 프랑스, 일본에서는 최종관리 정책으로 재처리를 채택하고 있으며 영국은 재처리를 채택하였으나 중단할 예정이다. 처분장 확보 현황의 경우 최종관리 정책으로 직접처분을 채택하고 있는

Table 3. Status of spent nuclear fuel final policy

Country	Regulatory body	Disposal entity	Final policy	Repository site	Remarks
U. S	NRC	DOE	Disposal	Mt. Yucca	– The repository construction project is facing difficulties
U. K	ONR	NDA	Reprocessing (to be abandoned)	Undefined	– Repository site is being selected
France	ASN	ANDRA	Reprocessing	Bure	– Construction permit application will be submitted
Sweden	SSM	SKB	Disposal	Forsmark	– Permission is under review
Finland	STUK	POSIVA	Disposal	Olkiluoto	– Repository is being constructed
Japan	METI	NUMO	Reprocessing	Undefined	– Repository site is being selected

미국, 스웨덴, 핀란드는 처분장 부지 선정을 완료하였다. 최종관리 정책으로 재처리를 채택하고 있는 프랑스, 일본 중 프랑스에서는 재처리 과정에서 발생하는 고준위방사성 폐기물 처분장 부지 선정을 완료했으며 영국, 일본에서는 처분장 부지 선정이 진행 중이다.

사용후핵연료 관리방안 설정을 위해서는 주기적인 국내·외 사용후핵연료 저장 및 최종관리 정책 현황에 대한 조사가 이루어져야 한다. 본 연구의 결과는 향후 사용후핵연료 관리방안 설정 시 배경자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

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

참 고 문 헌

국회입법조사처. 2017. 사용후핵연료 관리 정책의 쟁점과 과제. NARS 현안보고서 제307호. 경성문화사. 16pp.

사용후핵연료 관리정책 재검토위원회. 2021. 사용후핵연료 관리정책에 대한 권고안.

산업통상자원부. 2018. 안전한 사용후핵연료 관리를 위한 정책 연구.

에너지경제연구원. 2018. 세계원전시장 인사이트, 세계 사용후핵연료 관리 현황과 시사점. Biweekly 격주간 2018.11.30. 6pp.

에너지경제연구원. 2020. 세계원전시장 인사이트, 사용후핵연료 저장시설의 안전설계 방향. Biweekly 격주간 2020.10.23. 34-35pp.

원자력안전위원회. 2021. 원자력안전법 제70조.

장홍, 조용준, 양맹호. 2020. 우리 손으로 사용후핵연료를 안전하게 관리하는 기술 개발. 원자력정책 Brief Report 2020-03호. 한국원자력연구원 미래전략연구부. 11pp.

지식경제부. 2009. 사용후핵연료 관리방안에 대한 공론화 지침. 지식경제부고시 제2009-152호.

한국방사선진흥협회. 2017. 고준위 방사성폐기물 처리 기술 현황(핵종 분리 기술). 2017 KARA ISSUE PAPER No.04. 6-10 pp.

한국방사성폐기물학회. 2019. 사용후핵연료 발생량 및 포화연도 산정보고서.

한국원자력연구원. 2003. 사용후핵연료 건식 저장현황. KAERI/AR-677/2003.

한국원자력연구원. 2008. 2008 기술현황 분석보고서 - 해외 주요국의 방사성폐기물 처분관련 시설 및 사업추진 현황 개요. KAERI/AR-817/2008.

한국원자력연구원. 2009. 중간저장기술 현황분석. KAERI/TR-3784/2009.

한국원자력환경공단. 2016. 사용후핵연료 이야기 70. 13pp.

한국원자력환경공단. 2017. 국외 고준위방사성폐기물 처분 현황. KORAD/TR/2017-06.

ASN. 2020. France's Seventh National Report on Compliance with the Joint Convention. Joint Convention on the safety of the management of spent fuel and on the safety of the management of radioactive waste.

BEIS. 2020. The United Kingdom's Seventh National Report on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel and on the Safety of Radioactive Waste Management.

Bunn M, Holdren JP, Macfarlane A, Pickett SE, Atsuyuki S, Tatsujiro S and Weeks J. 2001. Interim Storage of Spent Nuclear Fuel, A Joint Report from the Harvard University Project on Managing the Atom and the University of Tokyo Project on Sociotechnics of Nuclear Energy.

Congressional Research Service. 2021. Civilian Nuclear Waste Disposal.

DOE. 2020. National Report for the Seventh Review Meeting of the Spent Fuel Management.

IAEA. 1997a. Further Analysis of Extended Storage of Spent Fuel. IAEA-TECDOC-944.

IAEA. 1997b. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. INFCIRC/546.

IAEA. 1999. Survey of wet and dry spent fuel storage, IAEA-TECDOC-1100.

IAEA. 2003a. Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes. Technical Reports Series No. 413.

IAEA. 2003b. Storage of Spent Fuel from Power Reactors 2003 conference. IAEA-CSP-20.

IAEA. 2018. Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.14.

Ministry of the Environment Sweden. 2017. Sweden's sixth national report under the Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management. Sweden's implementation of the obligations of the Joint Convention.

Ministry of the Environment Sweden. 2020. National Report for the Seventh Review Meeting of the Spent Fuel Management.

NDA. 2019. 2019 UK Radioactive Material Inventory.

NRA. 1994. 原子力の開発利用に関する長期基本計画.

NRA. 2017. National Report of JAPAN for the Sixth Review Meeting. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on The Safety of Radioactive Waste Manage-

ment.
Radioactive Waste Management. 2018. Community Guidance. How we will work with communities in England.
STUK. 2020. National Report for the Seventh Review Meeting of the Spent Fuel Management.
TEM. 2015. Management of spent fuel and radioactive waste in Finland - national programme in accordance with Article 12 of the Council Directive 2011/70/Euratom.

Received: 8 December 2021
Revised: 24 December 2021
Revision accepted: 24 December 2021