

Review Paper

Global Radioactive Waste Disposal Trends and Prospects

Jihye Kim[#]  · Seongmuk Lee[#]  · Heejeong Choi[†]  · Hyunyoung Park[†]  · Sokhee P. Jung[†] 

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea

(Received February 22, 2023; Revised March 22, 2023; Accepted April 4, 2023)

Abstract : Nuclear power generation, which began in the Soviet Union in June 1954, has now become a main source of electrical energy in 33 countries around the world. However, radioactive waste and its safety have always been at the center of controversy, and even after 70 years, there is no official regulation on the disposal of radioactive waste under international law. In this review, the policies and current status of radioactive waste disposal in major countries around the world, including Korea, are investigated. Based on this, the direction for radioactive waste management in Korea was presented. Currently, radioactive waste is disposed of in two ways. Finland, Sweden, and France are conducting deep permanent disposal according to the recommendation of the International Atomic Energy Agency, and Japan, the United Kingdom, and India are promoting reprocessing of spent nuclear fuel to reduce waste and the volume of the repository. Korea has been temporarily storing radioactive waste at the site of the power plant since the completion of Kori Unit 1 in 1978, but it is expected that the capacity of the temporary storage facility will reach its limit in 2031. Accordingly, the securing of a permanent disposal site and the development of reprocessing technology are being studied together, but no tangible results have been achieved so far. Korea's radioactive waste disposal has problems such as a small land area, institutional difficulties in developing reprocessing technology, frequent policy changes, ignorance and indifference, and lack of smooth communication. Although public concern about nuclear power generation has increased due to the Fukushima disaster, not many people are interested in spent nuclear fuel. Within the framework of reprocessing and permanent disposal, Korea should refrain from frequent policy changes that can confuse public opinion and research and development, and come up with a long-term realistic policy.

Keywords : Spent nuclear fuel, Radioactive waste, Temporary storage, Deep geological disposal, Reprocessing

The Korean text of this paper can be translated into multiple languages on the website of <http://jksee.or.kr> through Google Translator.

[†] Corresponding author

E-mail: sokheejung@chonnam.ac.kr, sokheejung@gmail.com
Tel: 062-530-1857

[#]These authors are the co-first authors

© 2023, Korean Society of Environmental Engineers



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

총 설

세계 방사성 폐기물 처리 방법 및 전망

김지혜^{#1b} · 이성목^{#1b} · 최희정^{1b} · 박현영^{1b} · 정석희^{†1b}

전남대학교 환경에너지공학과 광주캠퍼스

요약: 1954년 6월 소련에서 시작된 원자력 발전은 현재 세계 33개국에서 주요 전기 에너지 공급원으로 자리를 잡았다. 하지만 방사성 폐기물과 안전성은 늘 논란의 중심에 있었고, 70년이 지난 지금도 방사성 폐기물의 공식적인 국제법상 처분 규정은 없는 실정이다. 본 총설에서는 한국을 포함한 세계 주요 국가의 방사성 폐기물 처분에 대한 정책과 현황을 조사하였다. 이를 바탕으로 한국 방사성 폐기물 관리에 방향을 제시하였다. 현재 방사성 폐기물은 두 가지 방식으로 처분되고 있다. 핀란드, 스웨덴, 프랑스는 국제원자력기구의 권고에 따라 심층 영구 처분을 진행하고 있으며, 일본, 영국, 인도는 폐기물 및 처분장 부피 감소를 위해 사용후핵연료의 재처리를 추진하고 있다. 한국은 1978년 고리 1호기 준공 이후 발전소 내 부지에 방사성 폐기물을 임시 저장하고 있으나, 2031년에 임시 저장 시설 용량의 한계에 도달할 것이라 예상되고 있다. 이에 따라, 영구 처분 부지 확보와 재처리 기술 개발이 함께 연구되고 있으나, 아직까지 가시적인 성과를 이루지 못하고 있다. 한국 방사성 폐기물 처리에는 좁은 국토 면적, 재처리 기술 개발에 대한 제도적 어려움, 잦은 정책 변동, 무지와 무관심, 원활한 소통 부재와 같은 문제가 있다. 후쿠시마 사태로 원자력 발전에 대한 국민적 우려는 높아졌지만, 사용후핵연료에 관심 갖는 사람은 많지 않다. 한국은 재처리와 영구 처분의 큰 틀 내에서 국민여론과 연구 개발에 혼신을 주는 잦은 정책 변경을 지양하여 장기적으로 현실성 있는 정책을 마련해야 한다.

주제어: 사용후핵연료, 방사성 폐기물, 임시저장, 심층처분, 재처리

1. 서론

세계적으로 탄소 제로 시대의 진입이 가속화됨에 따라, 탄소 배출을 하지 않는 에너지원에 대한 관심과 투자가 급증하고 있다. 이를 위하여 환경에너지 분야에서도 다양한 시도가 이뤄지고 있으며¹⁻¹²⁾, 그 중에서도 원자력 발전은 매우 중요한 기술 중 하나이다.

2021년 한 해 인류가 소모한 에너지는 14,215 MTOE이며, 그 중 화석 에너지가 차지한 비율은 77.91%이다. 같은 해 이산화탄소는 36,257 Mt배출되었고, 이러한 다량의 화석연료 사용은 환경오염과 기후변화의 위기를 초래하였다. 인류의 보전과 안녕을 위하여 친환경적이고 지속할 수 있는 탄소 중립적 에너지원은 필수적인 요소가 되었다.¹³⁾ 이에 탄소 배출이 거의 없고 대량 발전이 가능한 원자력 발전이 다시 떠오르고 있다.

2021년 세계 원자력 발전 용량은 2800TWh로 2020년을 제외하면 9년간 꾸준히 증가했다. 2023년 2월 기준으로 전 세계 33개국에서 422기의 원자력 발전소가 가동되고 그 중 중국과 인도는 각각 18기와 8기, 한국은 3기의 원전을 추가 건설하고 있다. 그 외에도 러시아와 터키 4기를 합쳐 전 세계에서 57기

가 증가할 예정이다. 총 원자력 발전량은 전년 대비 4.2% 증가했지만, 주요 국가들의 전년 대비 원전 비율 변동을 살펴보면 미국은 -1.2%, 스웨덴은 8.2%, 영국은 -8.5%, 독일은 7.5%로 증가했다. 그러나 신규원전의 비율이 낮고 원전의 노후화로 인해 원전 비율이 감소했던 미국이나, 후쿠시마 사고 이후 탈원전에 박차를 가했던 일본, 친환경 에너지 정책을 내세우던 영국 등 다수 국가가 다시 원자력에 초점을 두고 있어 변동량이 감소세였던 국가들도 증가세로 돌아서며 발전량은 더욱 늘어날 것으로 보인다.^{14,15)}

우리나라는 2020년 기준 전체 발전량에서 원전이 비중이 29%, 2021년에는 27.8%로 신규 원전 건설과 노후 원전 폐쇄로 한동안은 현상 유지될 것으로 예상된다. 그렇기 때문에 사용후핵연료에 대한 사회적 관심과 국가 차원의 해결방안 마련이 시급하다. 현재 국내 에너지 생산의 상당 부분을 차지하며 앞으로도 수십 년 동안 이어질 가능성이 있는 원자력 발전은 에너지 효율만 주목될 뿐 그 과정에서 발생하는 사용후핵연료에 대한 처리는 뒷전이다.

국내에는 44년간 발생한 다량의 사용후핵연료가 쌓여있다. 소수의 국가들은 IAEA에서 가장 적합하다고 권고하는 심층 처분을 시도하거나, 신기술 개발을 통한 재처리를 목표로 하

지만, 현재 대부분의 국가는 방사성 폐기물의 처리가 주로 중·저준위에 한정되어 있고, 고준위 방사성 폐기물은 처리 방식과 안정성에 관한 기준이 뚜렷하지 않아 추진이 어렵다.

보통 방사성 폐기물은 임시 저장 혹은 중간 저장 이후 재처리나 영구 처리를 통해 최종적으로 매립 저장하는 흐름이 일반적이다. 앞서 말한 대로 영구 처리는 소수 국가만이 건설 개발 단계에 이르고 있으며 나머지 국가는 이미 중간 저장 단계를 유지하며 향후 영구 저장을 추진할지, 기술개발을 통해 재처리할 것인지 논의하는 상황이다. 하지만 우리나라는 중·저준위 방사성 폐기물만을 경주 방사성 폐기물 처분장에서 영구 보관하고 있을 뿐, 고준위 방사성 폐기물은 아직도 임시저장 단계에 머무르고 있으며 국내 임시저장고 용량도 한계에 다다랐다. 따라서 본 보고서에서는 국내의 사용 후 핵연료의 처리 현황과 과정을 알아보고, 우리나라가 처한 사태의 시급함을 알리고자 한다.

2. 본 론

2.1. 방사성 폐기물의 정의와 분류기준

원자력안전법 제2조 제18호에 의하면 “**방사성 폐기물**”이란 방사성물질 또는 그에 따라 오염된 물질(이하 “**방사성물질**” 등이라 한다.)로서 폐기의 대상이 되는 물질(제35조 제4항에 따라 폐기하기로 한 사용후핵연료를 포함한다.)을 말한다.

즉, 방사성 물질이 일정 농도 이상 검출되거나 방사능에 오염된 모든 물질을 의미한다. 이러한 물질들을 칭하는 용어로 1986년, 방사성 폐기물’이 법적으로 인정되었다. 그 중 고준위 방사성 폐기물은 대중에게 ‘핵폐기물’이라는 용어로 더욱 친숙하다. 때문에 본 보고서에서는 용어 혼용에 의한 혼란을 방지하고, 정확한 의미 전달을 위해 ‘고준위 방사성 폐기물’로 기재하였다.

고준위 방사성 폐기물은 원자력안전위원회에서 고시하는 **방사성 폐기물 분류 및 자체 처분 기준에 관한 규정 제3조**에 따라 다음 기준을 만족하는 폐기물을 의미한다(**Fig. 1**).

- 1) 반감기가 20년 이상이며 알파선을 배출하는 핵종을 포함하는 물질
- 2) 방사능 농도가 4,000Bq/g 이상이고, 열 발생률은 2 kW/m³ 이상인 폐기물

2.2. 중·저준위 방사성 폐기물

Fig. 1의 분류기준 2가지를 충족하지 못하는 폐기물은 중·저준위 방사성 폐기물로 분류되는데, 이는 고준위 방사성 폐기물에 비해 상대적으로 안전하다. 방사능 농도와 열 방출량이 낮은 것도 있지만, 반감기가 20년이 되지 않아 일정 기간만 안전하게 보관할 수 있다면 그 이후에는 위험성이 적기 때문이다. 따라서 재처리를 제외하고 심층 처분밖에 할 수 없는 고준위 방사성 폐기물에 비해 처분 방법이 다양하다. 중·저준

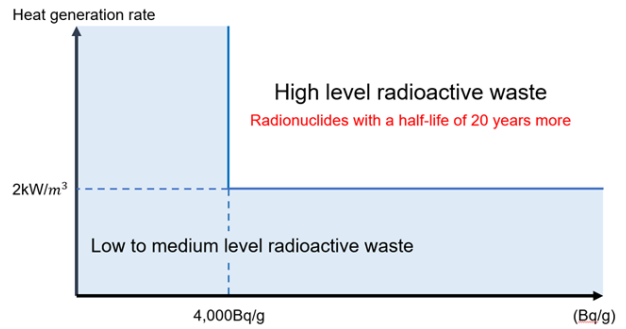


Fig. 1. Standard for classification of radiation waste under nuclear power-related laws.¹⁶⁾

위 방사성 폐기물은 아래에 기준에 따라 다시 4가지로 분류한다.¹⁷⁾ 아래에서 자체 처분 허용농도는 ‘방사성 폐기물 분류 및 자체 처분 기준에 관한 규정’에 의해 “방사성 폐기물의 자체 처분에 따른 개인에 대한 연간 예상 피폭 방사선량이 10마이크로시버트(uSv) 미만이고 집단에 대한 연간 예상 총 피폭 방사선량이 1만시버트 (man-Sv) 미만이 되는 값을 말한다.”고 규정되어 있다.

1) 규제해제폐기물

자체 처분 허용농도 기준을 만족하는 폐기물로 자체 처분(소각, 매립, 재활용)이 가능하다.

2) 극저준위방사성 폐기물

자체 처분 허용농도 초과량이 100배 미만인 폐기물로 자체 처분을 제외한 매립형 처분, 표층 처분, 동굴 처분, 심층 처분이 가능하다.

3) 저준위방사성 폐기물

자체 처분 허용농도의 초과량이 100배 이상이지만 저준위 농도 제한 미만의 폐기물로 표층 처분, 동굴 처분, 심층 처분이 가능하다.

4) 중준위방사성 폐기물

저준위 농도 제한을 초과하나, 방사능 농도, 열 발생률, 반감기에 의해 고준위 방사성 폐기물로 분류되지 않으며 동굴 처분, 심층 처분이 가능하다. 현재 우리나라에는 심층 처분 시설이 없어 고준위 방사성 폐기물 영구 처분장이 건설되면 같이 처분할 수 있으며 현재는 동굴식 처분인 경주 방사성 폐기물 처분장에서 대부분 처분하고 있다.

2.3. 사용후핵연료

원자력 발전 원료의 성분비는 U-235가 약 3~5%이고, 나머지 대부분은 U-238로 구성되어 있다. 이 핵연료를 대략 4년 동안 사용하면 U-235는 약 1% 정도 남고 플루토늄이나 세슘과 같은 방사성 물질들로 바뀌는데, 이것이 ‘사용후핵연료’이다(**Fig. 2**).

사용후핵연료에서 나오는 열과 방사선은 인체에 영향을 미친다. 방사선이 인체 조직을 통과하면 조직을 이루고 있는 원자는 에너지를 흡수해 전리 현상이 일어난다. 전리 현상이 체

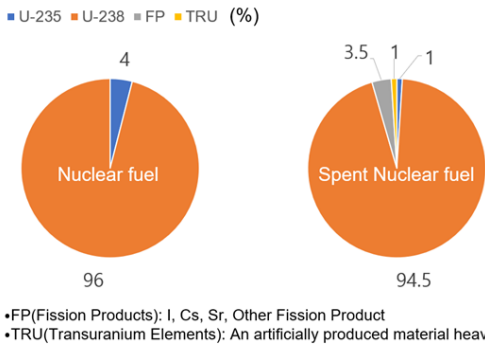


Fig. 2. Changes in nuclear fuel composition ratio after combustion.¹⁸⁾

내에서 일어나면 물 분자의 일부가 분해되는데, 이때 생성된 산소 유리기는 신체의 세포에 영향을 끼친다. 방사선은 세포 핵의 DNA를 파괴하여 손상을 주며 전리 현상으로 생성된 물질(H₂O₂, HO₂)의 독성으로 세포핵이 손상되게 되며 다량의 방사선이 인체에 노출되면 피부질환, 탈모, 구토, 백혈구의 급격한 감소 등 급성 질환이 나타날 수 있고, 장기간 노출 시 암과 백내장 같은 만성 질환이나 기형아를 유발할 수 있다.¹⁹⁾

또한 방사선이 대기로 유출될 경우에는 대기오염을 유발하여 생명체의 호흡에 영향을 미치고 냉각수가 방사능에 오염되어 외부로 흘러나갈 시엔 수질오염을 유발해 강과 바다에 서식하는 생물에게 피해를 준다. 이를 방지하기 위해 사용후핵연료는 재처리를 거쳐 재사용하거나 저장고에 보관된다.

2.4. 재처리기술

원전에서 수명을 다한 사용후핵연료의 96% 이상은 재처리를 통해 재사용 될 수 있지만 현재는 일본, 미국, 프랑스, 러시아, 영국 등의 일부 국가에서만 이루어지고 있다. 폐기물 처리 문제도 덜어내면서 에너지원으로 재사용 할 수 있다면 원자력을 이용하는 어느 국가도 재처리하지 않을 이유가 없다. 그러나 재처리하지 않는 주된 이유는 기술 경제성과 효율성뿐만이 아니다. 재처리 과정에서 분리한 플루토늄은 핵무기로 사용될 수 있기 때문에 핵확산방지조약(NPT: Non Proliferation Treaty)에 따라 이미 핵무기를 보유한 나라 혹은 국제사회에서 인정되는 국가만이 사용후핵연료를 재처리할 수 있다. 프랑스, 영국, 중국, 일본 러시아 등이 공식적으로 재처리 공장을 가동하고 있으며, 벨기에, 독일, 이탈리아, 미국은 재처리 공장을 가동했었으나 현재는 가동을 중단하였다. 인도와 파키스탄 또한 재처리를 진행하고 있지만 예외적으로 NPT 조약에 가입하지 않은 국가이다.²⁰⁾

재처리 기술은 건식처리와 습식 처리로 나뉘어진다. 건식 처리공정은 처리 과정에서 수용액을 사용하지 않으며 처리 후 고체상의 처리물이 남는다. 습식 처리기술에 비해 임계질량이 낮아 상대적으로 안전하며, 공정 과정이 간단한 데 비해 고농축의 처리가 가능하다. 습식 처리기술은 수용액을 이용하

는 처리기술로 사용후핵연료를 용해시킨 질산 용액에 침전제나 유기용매 물질을 이용하여 핵종을 분리한다. 우라늄과 플루토늄을 얻을 수 있으며 고방사성 물질을 다량 생산한다. 또한 건식처리가 773K의 고온에서 이루어지지만, 습식처리는 373K 온도의 다소 낮은 온도에서 이루어지고 건식처리의 Pu 회수율 99.5%에 비해 99.9%에 가까운 높은 회수율을 가진다. 이러한 이유로 습식 처리기술은 건식 처리기술보다 상용화되어 있고 대중적이다. 하지만 핵무기 개발 목적으로 이용되기도 하여 핵확산에 대한 우려로 이를 방지하기 위한 기술이 개발 중이다.

2.4.1. 건식 처리기술

Airox, oreox, dupic과 같은 기술이 개발되었지만 그중 가장 눈에여겨보아야 할 것은 파이로프로세싱(Pyroprocessing)이다. 이는 경수로 사용후핵연료를 금속전환시킨 다음, 전해정련 및 전해제련의 단계를 거쳐 잉여우라늄금속과 TRU금속을 회수하는 기술과 금속핵연료를 처리하여 재순환하는 기술로 구분된다.²¹⁾ 파이로프로세싱은 지리적 여건으로 처리장소가 제한된 우리나라의 사용후핵연료 처리에 기여할 뿐만 아니라 플루토늄의 단독 추출이 불가능해 핵확산 저항성(PR: Proliferation Resistance)이 높아 한반도 비핵화 협정 문제, 한미 원자력 협정으로 미국 승인하에 재처리를 할 수 있는 대한민국의 현재 상황에 가장 적합하다고 평가받는다.

파이로프로세싱이 연구, 개발 단계를 마치고 상용화에 이르게 된다면 이를 통해 얻은 U를 소듐냉각고속로(SFR: Sodium-cooled Fast Reactor)와 연계하여 소모하는 것으로 사용후핵연료의 일부분을 처리하는 데 이용될 것이다. 소듐냉각고속로는 제4세대 원자로로, 나트륨을 냉각재로 이용한다. 경수로에서 사용된 사용후핵연료에서 파이로프로세싱을 통해 회수한 U를 원료로 이용하며 다른 원자로에 비해 에너지 효율이 높고 발생하는 사용후핵연료의 양을 1%까지 줄일 수 있기 때문에 고준위 방사성 폐기물 처분에 관한 문제를 해결하는 데에 도움을 줄 수 있어 1990년대부터 한미 공동연구 개발을 진행하고 있다.

2.4.2. 습식 처리기술

PUREX, UREX COEX, GANEX, DIAMEX, TRUEX 등의 공법이 있으며 이 중 시카고 대학이 개발한 PUREX 공법이 가장 대표적으로 사용되었으나 경제성 및 핵확산 문제로 인해 지금은 프랑스, 일본, 영국, 러시아 등의 일부 국가에서만 사용되고 있다. 대부분의 공법은 사용후핵연료를 강질산에 용해한 뒤 고형, 액상 물질의 분리를 거쳐 우라늄과 플루토늄을 회수하여 분리하고, 낮아진 우라늄 농도를 조정함과 동시에 플루토늄의 재산화가 이루어지는 최종정제공정을 거쳐 이루어진다.^{22,23)} 공정 처리 후 얻은 우라늄을 농축하고 추출한 플루토늄은 혼합하여 MOX(Mixed Oxided Fuel)로 만들면 경수

로의 연료로 사용할 수 있다.

2.4.3. 재처리 기술의 문제점

재처리 기술은 폐기물량, 처분장 부피, 핵연료 자원량 감소 효과를 가져올 수 있다. 그러나 재처리 기술에는 다음과 같은 부정적인 측면이 있어 이를 상용화한 국가는 일부에 불과하다.

1) 핵전쟁 가능성의 증가

2.4에서 서술된 핵확산방지조약(NPT)에 따라 핵무기 보유국 또는 국제사회에서 승인한 국가만이 재처리를 진행할 수 있다. 그래서 승인받지 못한 대부분의 국가는 기술 개발 시작 단계에서부터 국제사회의 압박을 받게 되며, 이미 핵무기를 보유한 선진국으로부터의 기술 지원을 받을 수 없게 되어 기술 개발에 어려움을 겪게 된다. 일부 국가는 자국의 기술 개발을 막으려는 목적이라고 변호하지만, 실제로 러시아-우크라이나 전쟁으로 핵전쟁 분위기가 고조되고 있으며 자국 보호를 위한 핵무장을 주장하는 국가들이 늘어나고 있다. 또한 NPT 조약 가입 자체를 거부하고 재처리를 진행한 인도나 파키스탄 등이 핵무장을 하는 것을 보면 전 세계적으로 큰 우려 사항임이 틀림없다.

2) 사고 발생 시 위험성

국제 원자력 기구(IAEA)에서는 원자력 관련 사고 단계를 0~7등급까지의 8단계로 구분하고 있다. 이 중 대사고로 분류되는 가장 높은 7등급의 사고로는 체르노빌, 후쿠시마 원자력 사고가 있으며 이를 통해 원자력 발전이 100% 안전한 시스템은 아니라는 것이 알려졌다. 재처리 공장 또한 이와 마찬가지로 사고 발생 시 방사능 유출과 인명피해를 야기할 수 있다. 관련 사례로 1957년 11월 29일 러시아의 미야크 재처리 공장에서 발생한 사고로 200명의 사람이 목숨을 잃었으며, 47만 명이 피폭되었다. 이 사고는 원자력 사고 6등급에 해당하는 사고로 기록되었으며 이에 따라 미야크 재처리 공장의 가동이 중단되었다.²⁴⁾ 원전 안전 운영정보 시스템에 공개된 자료에 따르면 우리나라는 3등급 이상의 사고는 아직 없지만 2019년까지 383건의 기록되어 있으며 가장 최근의 사고는 2004년 2월 고리 3호기의 수소 누설이 기록되어 있다.

3) 효율성

우리나라의 연평균 가격이 2012년부터 2021년까지 49(USD/lb)에서 35.63(USD/lb)로 지속해서 감소하고 있었기 때문에 재처리의 필요성에 대한 의문이 제기되었다. 그러나 2022년 10월 기준 53.29(USD/lb)로 크게 급등하였으며 국제 유가와 천연가스의 가격변동, 원자력 에너지 생산 확대 기조 등 복합적인 변수들로 장기적인 측면에서의 효율성은 단정 짓기 어렵다. 이렇듯 불확실한 효율성은 기술 개발에 부정적인 영향을 줄 수 있다.

2.5. 저장고 보관

직접 처분 시 사용후핵연료는 임시저장, 중간 저장, 영구처

분의 단계를 거쳐 처리하는데, 임시 저장은 발전소 부지 내에 저장하는 것을 말한다. 중간 저장 방법은 임시저장 방법과 유사하지만, 원자력안전법에서는 임시저장 시설을 “발전소 시설 운영에 필수적인 관계시설”로 보고 있다. 즉, 고준위 방사성 폐기물의 임시저장고는 원전 내에 있고 중간 저장고는 원전 밖에 존재한다는 점에서 구분된다. 영구처분은 국제원자력기구(IAEA)에서 권고하고 있는 처분 방식으로, 인간 및 자연의 영향을 최소화할 수 있는 심층 지층에 처분하는 방식이다. 다만 강제 시행이 아닌 권고 사항이기 때문에, 오랜 연구를 통해서 선정된 부지의 적합성과 기술력이 검증되기 전까지는 영구 처분을 보류하고 있는 것이 대부분의 원전 국가의 상황이다.

임시, 중간 저장 단계에서는 습식 저장과 건식 저장의 2가지 방법으로 나뉘어 저장된다. 건식은 사용후핵연료를 공기로 냉각하고 금속 용기나 콘크리트 안에 저장하고, 습식은 원전 내 저장 수조와 같이 물을 이용해 사용 후 핵연료를 냉각시키고 방사선을 차폐하는 방식이다. 이 방법은 핵연료를 감싼 피복재가 녹을 때 발생하는 수소에 의해 폭발할 수 있어 지속적인 관리와 수온 조절을 위한 에너지 공급이 필요하다. 독일·일본·미국은 1990년대부터 원전 부지 내에 건식 저장 방식의 중간 저장시설을 운영 중이다. 프랑스나 스웨덴은 원전 부지 외부에 습식 저장 방식을 택했는데, 그 이유는 습식과 건식의 특징이 다르기 때문이다.

우리나라는 경수로로는 습식, 중수로로는 습식과 건식을 모두 사용한다. 습식 저장은 40년이 넘게 보편적으로 사용되어오면서 효율성과 안전성을 증명했고, 유지보수 역시 간단하지만 높은 운영 비용이 요구된다. 부지면적이 작아 높은 저장 효율을 갖지만 용량 확장이 어려우며, 방사성 폐기물을 생성한다. 그에 비해 건식은 자연 냉각 시스템으로 전원이 필요하지 않아 안전성과 장기 관리에 유리하여서 후쿠시마 사태 이후 건식 저장이 선호되고 있다. 관리 비용과 건설 비용이 비교적 저렴하며, 주민 수용성도 높은 편이다. outdoor 방식은 용량 확장이 용이하고, indoor 방식은 건설 비용이 증가하지만 항공기 충돌이나 테러 같은 사고에서의 보안과 안전성에서 우수하다.²⁵⁾

2.6. 국내 정책 및 현황

2.6.1. 원자력 발전 현황

Table 1은 2023년 2월 기준 전 세계 원전 현황으로, 가동

Table 1. Current nuclear power generation status around the world.²⁶⁾

Classification	Cardinal number	Capacity (MWe)	Number of country
In Operation	422	378,314	32
Under Construction	57	58,858	18
Permanently Stop	204	99,047	21



Fig. 3. Korea nuclear power plant status 2022.²⁷⁾

중인 원전은 422개로 설비용량은 378,314Mwe이며, 건설 중인 원전은 57개로 총 58,858Mwe이다. 우리나라는 22년 12월 신한울 1호기를 준공하면서 총 설비용량 24,431Mwe, 원전 25기를 가동하고 있으며 2기는 영구 정지되었다. 이외에도 신한울 2호기, 새울 3·4호기(구 신고리 5·6호기)로 3기의 원전을 추가 건설 중이다.

강원도 삼척시에 건설 예정이었던 원전은 과거 탈원전 정책에 의해 건설 중단되었다. 그러나 2030년 원자력 발전의 비중을 정하는 NDC를 기존 23.9%에서 30%로 상향함에 따라 건설 중단된 신한울 3·4호기는 재추진될 것으로 보인다. 아래 그림은 운전 정지 및 가동 중인 국내 원전들을 정리한 것이다. 충청, 세종 및 수도권 지역에는 원전이 없고 대부분이 동해안에 분포한 양상을 보인다(Fig. 3).

A. Ulsin	
Hanul no.1 ~ 6	In operation
Shin-Hanul no.1 ~ 2	Preparing for operation
Shin-Hanul no.3 ~ 4	Construction Projected

B. Gyeongju	
Wolseong no.2 ~ 4	In operation
Shin-Wolseong no.1 ~ 2	In operation

C. Busan	
Kori no.2 ~ 4	In operation
Shin-Kori no.1 ~ 4	In operation
Shin-Kori no.5 ~ 6	Under Construction (Ulsan located)

D. Yeonggwang	
Hanbit no.1 ~ 6	In operation

2.6.2. 고준위 방사성 폐기물 저장 현황

앞서 언급했듯이 습식 저장이 건식 저장에 비해 위험함에도 불구하고 우리나라의 대부분 저장고는 습식으로 운영되고 있으며 유일하게 월성 원전만이 건식과 습식 저장을 같이 사용한다. 그 이유는 원전별 저장량에서 알 수 있다(Fig. 4).

사용후핵연료는 중수로인 월성 원전에서 주로 발생하고, 현재 월성 원전의 사용후핵연료 저장량이 가장 많기 때문에 다른 경수로 원전보다 먼저 건식 저장고를 설치하여 이용하고 있다. 다만 건식 저장고를 이용한다고 해도 4~5년간 습식 저장고에 저장하여 열을 식힌 뒤 건식 저장고로 옮겨야 한다. 따라서 경수로 원전에서 건식 저장고를 이용하더라도 습식 저장고에 임시 저장하는 과정은 필요하다. 건식 저장은 자연 대류를 통해 냉각시키기 때문에 습식과 달리 전원이 불필요하

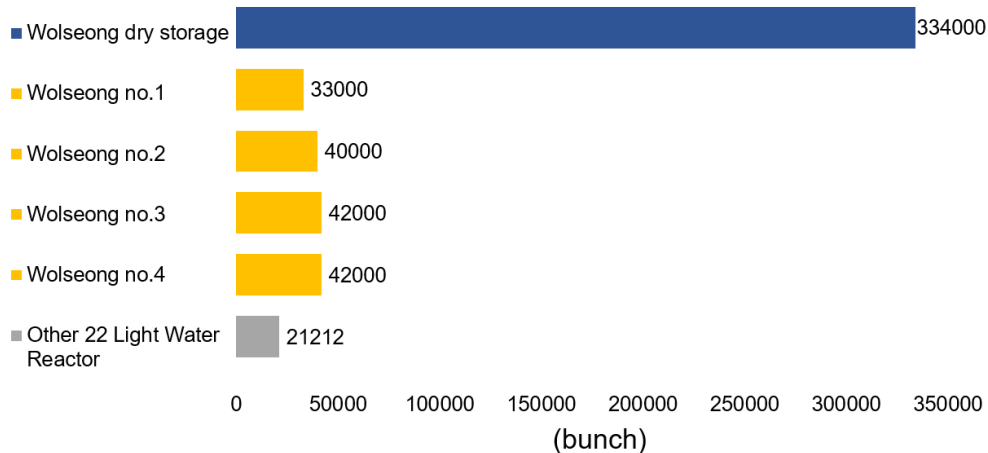


Fig. 4. Korea spent nuclear fuel storage status 2021 Q4.²⁸⁾

다는 점에서 장기 관리에 유리하다. 또한, 안정성이 높고 추가 설치도 비교적 간단하다. 건식 저장은 맥스터와 캐니스터 방식으로 나뉘는데, 두 방식 모두 금속이나 콘크리트로 방사선을 차단하고 공기를 순환시켜 자연 냉각한다.

차이점은 캐니스터는 원기둥 모양의 콘크리트 구조물을 지표 위에 세워놓은 형태이고, 맥스터는 콘크리트 구조물 내부에 원통형 용기를 일정하게 세워 두는 방식이어서 맥스터의 저장용량이 동일 면적대비 캐니스터의 2.7배로 더 많기 때문에 향후 증설될 건식저장고는 대부분 맥스터일 것으로 예상된다. 실제로 기존 300기의 캐니스터와 7기의 맥스터가 운영되던 월성원전은 2022년 이내에 포화가 예상되어 2016년경부터 원자력 안전 위원회는 맥스터 증설을 위해 운영 변경 인허가 신청을 추진했고 원자력 안전 위원회는 2020년 1월 해당 증축을 승인하였지만, 지자체와의 의견 충돌로 인해 지체되었다. 이후 사용후핵연료 관리정책 재검토위원회는 총 145명의 시민참여단을 대상으로 3주간 공동 속의 과정을 거치며 3차례에 설문조사를 진행하였다.

조사 결과, ‘지역발전 상생협력 기본 합의서’와 공동협력 사업안을 발표해 협의가 이루어졌다. 750억 원의 주민복지 증진 사업 지원금 지원, 해당 지역 일자리 창출, 공공 의료복지 지원, 지역 현안 사업 추가 지원금 300억 원 지원, 건설 기간 시민 참관단 운영, 문자 알림 및 전광판을 통한 건설정보 공개와 같은 협의를 통해 1차 조사에서의 58.6%에 불과하던 찬성률은 2차에서는 80%, 최종 3차 조사에서는 81.4%로 증가하였고 이에 따라 협의가 완료되어 2020년 8월부터 증설이 시작되어 19개월간의 공사를 거쳐 2022년 3월 14일 증설이 완료되었다. 이 7기의 추가 맥스터는 월성 2~4호기의 중수로에서 발생하는 사용후핵연료를 저장할 예정이다. 추후 중간 저장이나 영구 저장이 이루어지지 않는다면 앞으로도 위와 유사한 과정을 통해 발전소 내의 임시저장고가 증설되는 형식이 주를 이룰 것으로 보인다.

2.6.3. 폐기물 재처리 현황

우리나라는 2014년도까지 한미 원자력 협정에 사용후핵연료의 농축과 재처리 과정을 금하는 골드 스탠더드 조약(Gold Standard)이 포함되어 있었다. 그러나 2015년 한미 원자력 협

정에서 이 조약이 빠져 사용후핵연료 연구에 매년 미국의 동의를 받아야 했던 이전과 달리 장기동의 형태로 바뀌었으며 현재 미국과의 공동연구를 통해 파이로프로세싱 공법을 개발 중이다. 그러나 재처리 기술이 다른 국가들에 비해 상당히 뒤쳐진 상태이며, 재처리와 우라늄 저농축의 경우 이전처럼 미국의 승인하에만 진행할 수 있다. 원자력 장비 또는 물품의 수출, 방사성 폐기물의 타국 위탁 처리가 가능해진 것 등은 폐기물 처리의 장기적 측면에서 긍정적이지만 폐기물을 위탁할 수 있는 국가는 네덜란드와 이란뿐이고, 그 비용과 처리 후 돌아온 폐기물의 처분 역시 고려하여야 한다.²⁹⁾

2.6.4. 부지선정 및 정책 현황

현재 국내 사용후핵연료는 임시저장 시설에서 저장 및 관리되고 있지만 저장용량 한계의 대책 마련이 시급한 상황이기 때문에 2030년까지 지하 연구시설 부지 확보, 2035년까지 국내 지질에 맞는 사용후핵연료 심층 처분시설 설계 기준을 개발할 예정이다. 그 외엔 국제 공동 사용후핵연료 영구처분 시설의 건설 방안 논의, 파이로프로세싱을 이용한 핵연료를 사용하는 소듐냉각고속로를 개발 중이다. 이를 위한 공동 연구를 추진 중인데, 운반·저장 분야는 한미 공동연구, 처분 분야는 핀란드·스웨덴 공동연구로 국제협력을 하고 있다. 고준위 방사성 폐기물 관리 기본계획은 인허가용 지하 연구시설(URL), 중간 저장 및 영구 처분시설을 동일한 부지에 단계적으로 확보하고 연구용 URL은 별도 부지에 건설하는 것이다. 부지 확보 진행 절차는 Fig. 5와 같다.

고준위 방사성 폐기물 관리 정책에 있어서는 2021년 4월 사용후핵연료 관리 정책 재검토위원회에서 사용후핵연료의 관리 정책에 대한 권고안을 정부에 제출했으며, 주된 내용은 원전 방사성 폐기물 관리 특별법 제정 및 관리 정책 전담 독립 위원회 신설이다. 권고안의 내용을 반영하여 수립된 “제2차 고준위 방사성 폐기물 관리 기본계획”에 따르면, 지자체는 지역주민과 지방의회의 의견을 수렴한 뒤에 부지 적합성 조사를 신청할 수 있으며, 최종 부지를 결정하기 전 반드시 주민투표를 거쳐야 한다. 부지선정 절차를 13년 이내에 끝내고, 7년 안에 중간 저장시설을 건설할 계획이며 동시에 영구처분을 위한 지하 연구시설 건설 및 실증연구를 14년간 진행하고, 10

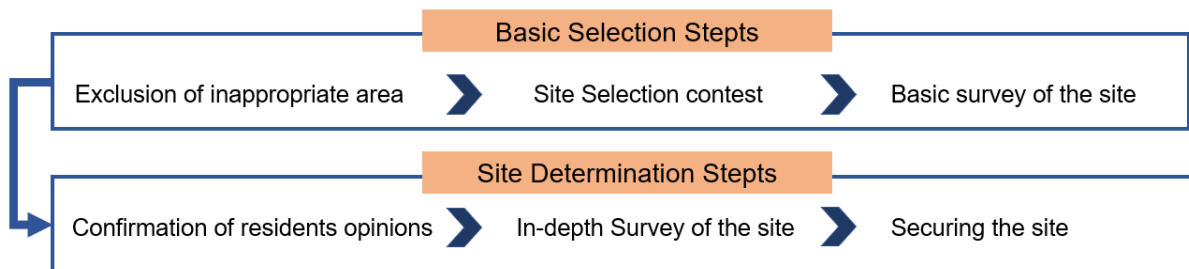


Fig. 5. Procedures for securing a permanent disposal site for radioactive waste.³⁰⁾

년 이내에 영구 처분시설을 확보할 계획이다(Fig. 5).

국내 고준위 방사성 폐기물 중간 저장 및 영구처리장은 없지만 중·저준위 방사성 폐기물은 영구처리장이 위 계획안과 유사한 방식으로 경주에 건설되었다. 경주 부지는 동해안 남쪽을 따라 위치하며 신월성 1, 2호기 원자력발전소 부지에 접해있다. 처분시설은 해안 부근의 신생대 제3기에 형성된 화강암에 설치된다. 시추조사에 의하면 암반은 주로 각섬석-흑운모 화강암 및 중립질 화강섬록암으로 구성되며, 암맥이 일부 나타난다. 화강암은 백악기 퇴적암류를 관입해 있으며, 기반암 상부 퇴적물은 지하 20 m까지 세사, 풍화토 및 풍화암으로 구성되어 있다. 화강암 표면의 풍화로 지형적으로는 완만한 경사를 이루고 있다.

원전 부지와 가깝기 때문에 운반 비용 절감 및 운반과정에서 생기는 위험도가 감소하고 화강암 지역은 지질의 안전성, 투수계수가 낮아 지하수의 유동이 적고 누출된 핵종을 흡착시켜 누출시 지하수에 의한 생태계 오염을 감소시키는 효과가 있다. 지형적으로 완만한 경사 또한 마찬가지로 누출시 오염속도를 늦추고 지반의 안정성을 가져오기 때문에 당초 이러한 지질 특성들을 바탕으로 경주를 비롯해 군산, 영덕, 포항 등이 부지로 선정되었으며 최종 투표 결과 70.8%의 투표율, 89.5%의 찬성률로 경주가 선정되었다. 이러한 선례를 참고하여 고준위 방사성 폐기물 영구처리장을 더욱 신중하게 선정해야 한다.

2.6.5. 고준위 방사성 폐기물 영구처분장 부지 조사 현황

고준위 방사성 폐기물 영구처리장 선정을 위해 대전 유성구에 위치한 한국원자력연구원의 KURT에서 심층 방사성 폐기물 처리에 관한 부지 선정에 있어서 다양한 분석이 이루어지고 있으며 암석, 지온 등의 특성 자료를 수집 및 분석하여 가능성 있는 후보지 조사를 진행하고 있다. 초기 KURT는 고준위 방사성 폐기물 처분을 위한 이론과 연구 결과를 기준처분 시스템(KRS)에 적용하기 위해 건설되었다. 이는 KURT의 계획단계에서 phase 1에 속한다. Phase 1에서는 암반과 주변 지질의 손상 없이 터널을 뚫고 장기적으로 연구가 진행될 수 있는 장소를 설계하는 것이 주목적이었다. 인허가를 받은 다음 2005년 3월부터 2006년 12월까지 준공이 이루어졌으며 이 과정에서 약간의 곡선 부와 대부분의 직선으로 이루어진 총 263m의 터널이 설치되었다. Phase 1의 주목적이었던 터널이 성공적으로 설치된 후 지화학 조사를 통한 연구, 시추공과 모니터링 등의 방법을 통해 암반 열특성, 손상대 파악 및 평가, 열역학 및 수리적 특성 등 심층 처분 부지확보에 이용할 수 있는 모델링을 만들었다.

이후 전기 및 통신과 연구 설비들이 보강되고 현장시험이 추가로 이루어짐에 따라 시설의 용량 한계에 부딪혔고, 제4차 원자력 연구개발사업(2012~2016)이 진행됨에 따라 2014년부터 2015년까지 시설을 확장하였다. 시설확장과 이후의 연구

를 phase 2로 분류되는데 2단계에서는 Geoscience, Natural barriers, Engineered barriers, International programme의 4개 분야에서 총 12가지의 현장시험 계획안을 토대로 연구가 진행되고 있다. Phase 2에서 이루어지고 있는 가장 대표적인 현장시험으로 MWCF(Main Water Conductive Features)와 IN-Debs(In-situ Demonstration of Engineered Barrier System)가 있다.³¹⁾

IN-Debs는 THM 복합거동 예측시스템을 이용하여 열과 수리학적 복합 데이터를 측정하는 설비로 한국원자력기술원에서의 자체개발과 국내 기술만을 이용하여 2012년부터 2016년까지 4년에 걸쳐 제작되었다. THM 복합거동 예측시스템이란 온도, 지하수의 유동 특성, 응력, 열전도도, 수리 전도도 등 상호 작용하며 복합적으로 변동하는 특성을 측정하는 센서이다. 이러한 In-Debs를 이용하면 향후 고준위 방사성 폐기물의 심층 처리 부지 선정과 처리장 건설이 본격적으로 착수될 때 현장의 공학적 방벽에 대한 성능을 검증하고 완충재와 암반의 열, 수리 역학 데이터의 수집을 통해 국내 처분 시설 개발의 토대로 이용할 수 있다. 현재는 KURT 3번 연구 모듈에 설치되어 2016년 7월부터 데이터를 수집하는 중이다.

지하수의 유동은 처분장 주변 지질 및 암반의 안정성에 큰 영향을 미치는 요소 중 하나이다. 자연 암반과 인공적 방벽이 설치되어 있다고는 하나 지하수는 유동하면서 미세한 틈을 통해 침투하거나 부식시킨다. 이 과정에서 방사성 핵종이 유출될 수 있기 때문에 Phase 2 시설 확장 단계에서 중요한 설계 요소로 고려되었고 이를 측정하기 위해 KURT에서 시행되고 있는 것이 MWCF 추적자 시험이다. 그러나 유동 변동성을 오차 없이 계산하기 어렵기 때문에 국내뿐만 아니라 심층 처분 개발 계획을 추진하고 있는 다른 나라에도 TRUE(Tracer Retention Understanding Experiment)라고 불리는 국제 공동 연구과제로서 스웨덴, 프랑스, 핀란드, 일본 등의 나라들이 참여하여 지하수 주 유동로 및 복합적 특성을 파악하기 위한 연구가 진행되고 있다.³²⁾

2.7. 해외의 정책 및 현황

2.7.1. 프랑스

프랑스는 방사성 폐기물 처리 시설 안전성 평가 기준으로 시간에 따른 방사선 독성 변화를 고려한다. 시간에 따른 처리 시설의 성능 수준은 폐기물의 특성, 공학적 시스템 그리고 현장 특성에 따라 달라진다. 또한, 정상 진화 시나리오는 10,000년 동안 0.25 mSv 미만으로 측정되어야 한다.³³⁾

프랑스는 라아그 시설을 통해 세계 최대 규모의 재처리를 하고 있다. 그 영향으로 2022년 원자력 에너지 비중은 70% 이상으로 추정된다. 또한 2050년까지 신규 원전을 6기 이상 건설하겠다는 정부의 원전 건설 계획에 따라 생산량이 더욱 증가할 예정이다. 발생한 방사성 폐기물은 라아그에서 재처리하고, 극저준위 폐기물은 매립 처분, 중·저준위 폐기물은 로

브(L'Aube) 방사성 폐기물 시설에서 천층 처분하며, 사용후핵연료는 1년에 1600톤씩 재처리된다. 이때 발생한 고준위 방사성 폐기물은 유리고화 후 라아그 재처리시설 부지에 보관한다. 유리고화체는 고온에서 녹인 규산 유리와 혼합된 고화체로서 스테인리스강 캐니스터에 밀봉하여 아레바의 라아그 재처리 시설 및 구 마클 재처리 시설에서 냉각 후 저장할 계획이다. 현재 Bure 고준위 폐기물 지하 실험시설을 운영하며 심지층 처분을 위한 지하 연구와 건설을 동시에 수행하고 있다. 이는 2025년부터 운영되며 라아그 재처리시설에 보관해둔 고준위 폐기물을 옮겨와서 처분 방식에 따라 400~1000 m의 압반 지층에 처분할 예정이다. 수명이 긴 고준위 핵종을 수명이 짧은 핵종으로 변환하는 소멸 처리 연구를 수행 중이며, 2006년 고준위 및 중준위 폐기물 심지층 처분장인 CIGEO를 건설할 계획이다. 이는 사용후핵연료 재처리를 동반한 가역성 있는 처분장으로, 2022년 현재 건설 허가 신청 단계에 있으며, 2025년 건설 허가 취득을 목표로 하고 있다.

부지선정의 경우, 처리장 부지로 선정되는 곳의 지질구조는 1차 시험 산업 단계의 추가 심지층 탐사를 통해 최소 한 세기 동안 적용할 회수성 및 가역성이 보장되어야 한다. 프랑스는 점토층을 기반으로 그 상하에는 석탄암층이 끼워져 있는 형태이고, 두께 130~160 m의 균질한 심층이지만 투수성이 매우 낮은 부지를 선정했다. 2150년까지 운영 후 폐쇄할 예정이고, 수 세기 동안 모니터링할 계획을 제시했지만 분류상의 여타 폐기물 처리 기술에 대한 한계로 아직 시행 전에 있다. 또한, 재처리 결과 발생한 사용후핵연료와 다른 핵물질로 인해 냉각 수조가 2030년 포화될 것으로 예측됨에 따라 시설 중 한 곳에 10,000 tHM 용량의 중앙 냉각수조를 건설할 계획이다. 결론적으로 프랑스는 재처리 정책을 택했지만 최종 처분 기술의 한계와 정치적 반대, 재생에너지 비중 증가 정책에 부딪혀 난항을 겪고 있다. 결국 용량의 한계로 시설 증축을 선택하였지만 예정보다 증가하게 될 예산 문제가 남아있다.³⁴⁾

2.7.2. 스웨덴

스웨덴은 1972년 4개 전력회사 공동 자금으로 설립한 방사성 폐기물 회사(SKB)에서 방사성 폐기물을 관리하고 있다. 중·저준위 폐기물은 1988년부터 해저 동굴처분 시설인 SFR에 영구처분하고 있으며, 사용후핵연료는 지하 30 m 깊이의 저장 수조인 클랩(CLAB) 중간 저장시설에 습식 저장 중이고 그 저장용량을 기존 8천 톤에서 11천 톤으로 확장할 예정이다. 2023년부터는 영구 처분장을 운영할 예정이며, 지층처분 연구와 시험을 위해 현재 에스포 지하 연구시설을 운영 중이다.

심층 처분 방식으로 지하 500 m 이상의 결정질암 중에 직접 처분할 예정이며 캐니스터, 완충재 등의 다중 방벽 시스템으로 폐기물을 격리하는 KBS-3을 도입하여 핵연료를 밀봉 후 캐니스터의 외측에 약 50 mm 두께의 구리, 내측에는 주철인 용기를 이용하여 처분한다. BWR(비등수형 원자로)에서 배출

된 핵 다발을 밀봉할 경우 채널 박스를 붙인 상태로 최대 12개가 수납되고, PWR(가압 경수형)의 배출 핵연료 다발의 경우는 제어봉을 삽입하기 때문에 최대 4개가 수납된다. KBS-3란 처분 실시 주체인 SKB가 검토하는 처분개념 중 하나로 캐니스터로 밀봉 후 그 주변을 벤토나이트 같은 완충재로 둘러싸고, 안정한 암반 내 정치하는 방법이다. 인공 방벽과 천연 방벽을 조합하여 격리함으로써, 격리하지 못하는 경우에도 방사성 핵종의 방출을 지연시킬 수 있다.

지층 처분장 건설 예정지는 포스 마크를 포함하는 스웨덴 남동부의 암반으로 19.5~17억 년 전 형성된 결정질암 지역이다. 서양 측 판 운동의 압력에 의하여 스칸디나비아산맥이 형성됨에 따라 스웨덴 남동부에도 대규모의 단층이 생겨났는데 단층 근처에는 빙상의 움직임에 따라 결정질 암석이 뜰려 잘게 파쇄되어 있다. 하지만 일정 거리 이상 떨어진 곳의 암체는 렌즈 상의 덩어리로 남아 있어 구조 렌즈라고 불리는데, 판 활동 및 빙상 하중의 변동에 영향을 받지 않는 구조 렌즈를 발견하였고, 처분장의 부지로 확정했다. 2022년 포스마크 지역의 사용후핵연료 최종처분 및 밀봉시설의 건설 계획이 승인됨에 따라 10년 이내에 인허가 절차를 거쳐 완공할 것으로 예상된다.

2.7.3. 일본

일본은 1992년부터 아오모리현에 중·저준위 방사성 폐기물 천층 처분 시설을 운영하였고, 고준위 유리화 폐기물 저장시설을 해외 위탁 재처리 폐기물과 국내 발생 폐기물로 각각 아오모리현과 이바라키현에 나누어 운영하고 있다. 재처리 용량이 초과하면 실내 건식 저장으로 보관하며, 현재는 무쓰시에 외부 중간 저장시설 운영을 계획하고 있다. 처분시설 인허가 절차가 있어 사업자가 처분 허가를 신청하면 경제산업성에서 안정성 검토를 의뢰하고, 원자력위원회와 원자력안전위원회에서 이중 검토를 한 뒤 허가를 받아 처분시설을 건설할 수 있고, 고준위 폐기물 처분장은 현재 원자력발전 환경 정비 기구 추진 하에 부지 선정을 진행하고 있다.

일본 정부는 2017년 “지질 처리를 위한 과학적인 특징의 전국 지도”를 발표해 국토의 65%를 폐기시설 건설 적합 부지로 판단하였다. 일본에서는 원자력 발전과 최종처분에 관한 논의가 같이 시작되었고, 수년간의 개발로 유리화 폐기물 기술과 재정 지원을 확립하였으나, 실질적인 최종 처리 시설에 진전은 없었다. 그 이유 중 하나로, 일본의 비핵화 폐기물 관리의 원자력 정책과는 별도로 논의되고 있어 장래가 불확실하다. 후쿠시마 사태 이전엔 상업용 원자로까지 총 54기를 운행하였다. 그러나 사고 이후 투명성과 대안성 측면에서 주민들의 신뢰를 얻지 못하였고 후쿠시마 제1 원전 6기 및 15개의 원전이 영구 정지되어 현재까지 33기의 원자로만 가동되고 있다. 이 중 13개만이 적합성 심사를 우선으로 통과하였고 나머지 20기는 심사 중이거나, 심사 신청 미결 상태이며 3기의

원자로가 건설 중이다.³⁵⁾ 일본 제 6차 에너지기본계획에서는 화력과 원자력 에너지의 의존도를 낮추고 태양광의 발전량을 2배로 늘리겠다고 발표하였으나 최근 잦아진 전력난으로 앞으로 어떤 방향성을 가질지 미지수이다.

2.7.4. 독일

독일은 연방방사선방호청(BfS)에서 처분사업을 실시하고, 처분시설 건설 및 운영은 DBE에 위탁해서 수행하고 있다. 또한, 방사성 폐기물 처분 시 발생하는 열의 영향을 고려해 폐기물을 발열성과 비발열성으로 구분한다. 발열성의 경우 사용후 핵연료 재처리 중에 발생하는 고준위 방사성 폐기물의 유리 고화체, 초우라늄(TRU) 폐기물 등으로 구성되어 있다. 비발열성의 경우 콘라드 처분장에 보관하는 것을 목표로 하고 있으며, 앞서 처분시설의 경우 안전성 문제로 중·저준위 방사성 폐기물을 콘라드 시설에 최종 처분할 예정이다. 이전에는 중·저준위 폐기물을 처분하는 앞서 시험 처분장, 구동독의 몰스레벤 처분장을 운영하였으며 현재 콘라드 처분장을 건설하고 있다. 폐암염 광산에 건설한 몰스레벤 처분장의 경우 남은 용량을 채운 뒤 폐쇄될 예정이며 고준위 폐기물 처분은 직접 처분 정책을 채택하여 1979년부터 고어레벤을 대상으로 처분장 건설을 위한 부지 조사를 수행하고 있다. 현재 탈원전 정책으로 원전 수명을 32년으로 제한했으며 2022년까지 모든 원전을 폐쇄할 예정이나 에너지 위기 속에 남은 3기의 원전 중 2기의 운영을 내년 4월까지 연장할 것이라고 발표하였다. 사용후핵연료의 경우 1971년부터 1990년까지 파일릿 재처리 시설 WAK를 운영하였고, 1989년부터 2005년까지 프랑스와 영국에 재처리 위탁을 진행하다가 중단하고 현재 발전소 내 저장 관리 중에 있다.

2.7.5. 핀란드

핀란드는 울킬루오트의 지하 약 400~450 m 결정질암에 사용후핵연료 직접 처분장인 온칼로를 오는 2023년 가동할 계획에 있다. 캐니스터는 외측에 구리, 내측 주철의 이중 층 구조이다. 핀란드에서는 원자로 방식에 따라 발생하는 사용후핵연료의 크기별로 용기 고려된다. WER용의 경우 길이 3.55 m이며, BWR은 4.75 m, EPR(유럽 가압수형원자로)은 5.2 m 이고 처분개념에 있어서는 스웨덴의 KBS-3개념과 거의 동일하다. 방사성 핵종을 캐니스터에 밀봉하고 완충재를 덮고, 심층으로 되는 다중 방벽 시스템에 의해 격리하는 방법을 검토 중이다.

최종 처분지는 유라요키 지자체의 울킬루오트로 핀란드 남서부 시터쿠티지역의 남부에 있으며 기반암은 선캄브리아기의 페노스칸디아 순상지의 약 8억년간의 지질 이력을 가지고 있다. 19억년 전 조산 운동에 의해 변형과 변형을 받은 퇴적암과 화성암으로 구성되어 있고, 울킬루오트의 기반암은 미그마타이트질의 운모편마암 등의 결정질암이다.

처분 실시 주체인 포시바는 핵연료를 최대 6500톤과 로비사 1~3호기 합계 5기의 원자로로 50~60년간 운전할 때 발생하는 양을 감축할 수 있는 처분장을 지하 400~450 m 깊이에 설치할 계획이며 처분 갱도의 연장거리는 42 km이고, 처분 구역은 면적 2~3 km²이다. 핀란드의 처분지 선정 경위는 먼저 전 국토에서 100~200 km² 크기의 목표지역을 선정하고 인구밀도나 환경적인 요인, 기반암의 크기나 지형 등 지질학적 면이나 방사성의 영향을 받을 수 있는 요인이 가장 적은 곳을 조사하여 목표지역을 좁혔다. 그리고 지자체의 동의를 얻는 과정 등을 통해 개요 부지 특성을 조사하였고, 적합한 장소에 대하여 환경영향 평가를 실시하여 4개의 지역을 선정했다.³⁶⁾

2.7.6. 미국

1982년 원자력폐기물 정책법을 도입, 원자력폐기물 정책개정법(1987), 에너지정책법(1992) 순으로 개정하였고 독립 규제기관으로서는 환경기준을 설정하는 미국 환경보호청(EPA)과 표준 및 허가시설을 시행하는 미국 원자력규제위원회(NRC)가 있다. 기술/프로젝트 관리는 미국 원자력폐기물 기술검토위원회(NWTRB)에서 담당한다. 장기적 안전을 위해 유카산의 경우 10,000년 동안 0.15밀리시버트(mSv)/년, 이후 100,000년까지 1 mSv/년, 기타 부지의 경우 10,000년 동안 0.15 mSv/년을 기준으로 한다.

미국은 부지 내외에 독립형 건설 중간 저장시설을 운영 중이다. 현재 장수명 초우라늄 (TRU) 폐기물로 분류되는 원전 폐기물의 경우, 1999년부터 뉴멕시코주에 위치한 폐기물 격리 파일릿 플랜트(WIPP)에 보관한다. 플루토늄 생산 프로그램의 일환으로 방위 관련 사용후핵연료를 재처리 한 적이 있으며, 소량의 상업용 사용후핵연료가 뉴욕의 웨스트 밸리에서 재처리되면서 추가로 두 개의 상업용 재처리 공장이 건설되었지만, 가동되지 않았고 현재는 상업 목적인 재처리가 진행되지 않는다.

지역관할 구역에 대한 정책으로 대통령이 의회의 승인을 위해 부지를 추천할 경우에는 주지사에 의해 주 거부권이 행사될 수 있고, 이는 상하 양원에서 다수결로 무효가 될 수 있다. 시설 수용을 위해 지역사회에 주는 혜택은 원자력폐기물 정책 개정법에 포함되어 있다.

미국의 유카산 지역은 2002년 의회로부터 저장소 개발을 승인받았으나, 2010년에 행정부는 유카산 프로젝트가 실행 불가능하다고 발표했고 이후 의회는 사업비를 지원하거나 부지 선정 변경을 위한 방사성 폐기물 정책법을 개정하지 않았다. 인접한 캐나다의 경우 2033년에 저장소의 설계와 건설을 시작하여 2040년에 운영할 계획을 가지고 있으나, 저장소 운영에 아직 결정된 사항은 없다.³⁷⁾

2.8. 우리나라의 현재 문제점

2.8.1. 임시 저장고 용량의 한계

Table 2. Saturation year calculated by the Korean Radioactive Waste Society(2021).³⁸⁾

Nuclear power plant	Kori	Hanbit	Hanul	Saeul	Shin-wolseong	Wolseong
Current saturation	83.8%	74.2%	80.8%	19.0%	62.9%	98.8%
Saturation forecast (yr)	2031	2031	2032	2066	2044	-

우리나라가 처한 가장 주요한 문제는 저장고의 용량이 제한적이라는 점이다. 한국수력원자력에서 발표한 2021년 3분기 사용후핵연료의 임시저장은, 새로 증설된 7기의 맥스터를 제외하고 기존 월성원전의 맥스터 7기 용량의 99.8%가 포화한 상태이며, 고리 93.3%, 한울 80.8%, 한빛 74.2%, 신월성 62.9%가 저장된 것으로 나타난다. 저장량이 저장용량을 초과하는 연도를 포화 연도라 하는데 기존 2016년 7월 정부 기본계획에서는 고리와 한빛이 각각 2024년경 포화할 것으로 예측되었으나 이후 2020년 관리정책 재검토위원회의 발표에 따르면 고리가 2031년, 한빛이 2029년으로 증가하였다. 월성원전의 중수로의 경우 2022년을 포화 연도로 발표하였으나 앞서 언급된 맥스터 추가 증설로 인해 어느 정도 미뤄질 것으로 보인다(Table 2).

가장 최근의 ‘제9차 전력수급기본계획’을 기준으로 하여 한 21년 한국 방사성 폐기물 학회에서 산출한 포화 연도는 관리정책 재검토위원회에서 예측한 포화 연도보다 더 증가하여 각각 한빛 2031년, 고리 2031년, 한울 2032년, 신월성 2044년, 새울 2066년이다. 포화 연도의 예측이 미뤄졌다는 것은 일부 낙관적이라고 볼 수도 있지만 포화 연도의 산출 방법은 경수로는 20개월(16.5개월 운전, 정비 및 정지 3.5개월)을 기준으로 최근 실적을 반영하여 산출하고 중수로는 월성 2~4호기의 10년 동안의 운전량을 기준으로 하여 최근 발생량 실적 비교하는 것이기 때문에 포화 연도를 산출하는 연도의 에너지 수요와 원전 운전의 변화에 따라 변동이 일어날 수 있다(Table 2).

Table 2의 포화 예상 연도는 당시 에너지 정책의 탈원전 기조와 원전을 배제한 ‘재생에너지 3020 이행계획’을 바탕으로 산출된 자료이다. 이 때문에 원전 가동률을 높이고 폐원전을 재가동하며, 원전을 증축하겠다는 현재의 기조를 바탕으로 다시 산출하였을 경우 포화 연도가 29년으로 당겨질 가능성도 우려되고 있다. 그렇다면 10년도 채 남지 않은 시간 동안 저장고 용량 문제를 해결해야 하는데, 현재 임시저장고 증설과 관련하여 특별법 제정과 방사성 폐기물법 개편을 내세우고 있지만 결국 장기간 보관해야 하는 사용후핵연료의 특성상 임시방편에 불과하기 때문에 사용후핵연료 저장 공간에 대한 신속하고 실효성 있는 해결 방안이 필요하다.

2.8.2. 임시 저장고의 안전성

방사능과 환경오염의 위험은 사용후핵연료를 보관하는 나라의 가장 큰 문제점이다. 후쿠시마 사태는 원자력 발전 및 사용후핵연료 저장의 안전성 문제를 단적으로 보여주는 예이며, 지진과 해일 같은 자연재해로 전기 공급이 중단되어 자동

냉각기능이 정지되고, 이에 따라 내부 노심의 용융으로 인해 연쇄적인 수소폭발이 일어난 사건이다. 당시 후쿠시마 원자력 발전소의 사용후핵연료는 제1원전 4호기에 습식 보관되고 있었는데 이곳까지 손상을 입었고, 수조 내부 냉각수에 문제가 생긴다면 사용후핵연료의 공기 중 누출로 인한 수소 발생으로 더 큰 연쇄 폭발과 피복재가 녹아 생긴 독성 방사성 기체의 외부 유출까지 발생할 수 있었다. 다행히 저장 수조 내에는 문제가 없어 위와 같은 사태는 일어나지 않았다. 이처럼 습식 저장고는 지속적인 전기공급으로 온도를 조절해 주어야 하므로 건식저장에 비해 상대적으로 위험성이 큰데 우리나라는 대부분 습식 저장을 하고 있다. 또한 저장 방식과 관계없이 원자력 발전소 내에 위치한 임시 저장고는 위처럼 연쇄적인 사고로 이어질 수 있다. 우리나라도 최근 잦아지는 지진으로 원전 사고의 안전지대가 아니기 때문에 습식 저장, 임시 저장의 위험성을 배제할 수 없으며 월성원전의 건식저장고 같은 경우 지표 위에 저장고가 노출되어 있기 때문에 테러나 전시상황에서 그 표적이 될 수 있어 휴전국으로서 잠재적인 위험 요소로 볼 수 있다. 이처럼 많은 요인에 의해 저장고의 안전성은 위협 받고 있으며, 실제로 2022년 3월 4일 울진에서 발생한 산불은 한울 원전 부지 내에 전원을 공급하는 ‘스위치 야드’까지 번져 위험한 사태를 초래한 적이 있었다(Fig. 6).

2.8.3. 관련 기술 개발의 불확실성

핵확산 문제로 휴전국이라는 명목과 비핵화 협정으로 인해 국제사회의 눈치를 볼 수밖에 없는 우리나라는 재처리 연구의 대부분이 파이로프로세싱과 SFR 분야에 치중되어 있었다. 2017년 개발 지속의 타당성 문제로 개발이 중단되었지만, 2021년 사용후핵연료 검토위에서 재개발이 권고되어 다시 착수될 예정이다. 그러나 파이로프로세싱의 폐기물처리 공정에서 세슘, 스트론튬과 같은 고 방사성 물질을 환경 유출 없이 안전하게 보관할 수 있는지, 경수로 사용후핵연료만을 처리할 수 있는 파이로프로세싱의 특성상 사용후핵연료의 절반 이상이 중수로에서 발생하는 우리나라에서 그 실용성을 제대로 발휘할 수 있는지는 미지수이다. 더불어 높은 건설단가와 취급하기 까다로운 소듐 냉각재, 고농축 핵연료 사용의 안정성 등에 의해 개발이 늦춰지고 있는 SFR 또한 파이로프로세싱의 상용화를 늦추고 있다. 파이로프로세싱에 의해 재처리된 사용후핵연료는 오직 전용 원자로에서만 사용할 수 있기 때문에 SFR과 파이로프로세싱 양쪽 연구의 연계가 제대로 이루어지지 않는다면 무용지물에 가깝다고 할 수 있다. 20년간 수천억이 투입된 연구가 실패한다면 자원적인 낭비와 더불어 지금까

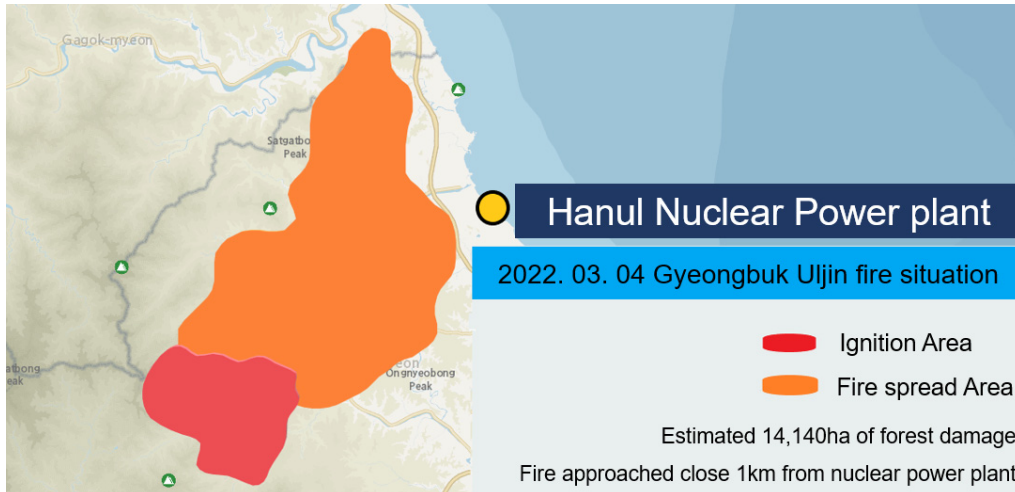


Fig. 6. Fire progress near the Hanul Nuclear Power Plant 2022. 03. 04.³⁹⁾

지 파이로프로세싱과 SFR에만 매달린 시간이 허사가 된다.

더불어 2022년 5월 21일 개최된 한미 정상회담에서 공동 원자력 공급망 구축 및 소형모듈원자로 SMR(Small and Medium sized Reactor)의 개발 협력에 대해 공동성명을 하였다. SMR은 1000MWe의 발전 용량을 가진 대형원전에 비해 상대적으로 적은 300MWe의 발전 용량을 가지며 증기발생기, 냉각 펌프, 가압기 등의 주요 장치를 모듈화하여 대량 제작할 수 있는 원전이다. 우리나라는 이미 1997년부터 개발에 착수하여 2012년에 한국형 소형원전 SMART를 개발하여 표준설계 인증을 받았으며 2015년 12월부터 사우디아라비아와의 협력을 통해 상용화를 추진했던 적이 있다. 하지만 국내의 인허가 체계 미비와 원자력안전위원회의 정책지원 지연으로 인해 지금까지 상용화를 하지 못했으며 원전 의존 비율을 줄이는 에너지 전환정책 기간 동안 미국, 중국, 러시아, 영국 등 다른 개발국들에 뒤처졌다. 이러한 상황에서 다른 나라들과 기술 경쟁을 할 만큼의 효용성이 있는지 의문이 제기되고 있다.

SMR은 계절별 전기에너지 소모 차가 큰 우리나라의 특성상 모듈 건설을 통해 용량을 조절할 수 있고, 설계 규모가 작은 점과 안전성의 측면에서 국토 면적이 적은 우리나라에 적합하다는 장점이 있다. 그러나 이미 대형 원전을 다수 보유 중인데 초반 경제성이 떨어지는 소형 원전 개발은 적절하지 않아 보인다. 게다가 SMR이 기존 원전보다 사용후핵연료를 최소 2배에서 30배까지 더 많이 생산한다는 연구 결과가 있다. 연구에 따르면 일부 SMR의 경우 처리하기 어려운 폐기물을 생성하여 관리 및 처분 비용이 증가하며, 방사능 독성이 최소 50% 높아 부지 선정을 신중히 진행해야 한다.

이처럼 SMR은 아직 충분히 검증되지 않았으며, 실제 구상됐던 서해안 설치 계획 역시 해안 운송의 안전성 및 주민 반발로 반려되고 있던 기술로 연구개발과 부지 선정에 있어 각계의 노력이 필요하다. 또한, 사용후핵연료를 재사용하여 감축한다는 파이로프로세싱 - SFR 기술의 개발 취지와도 상반된

다. 따라서 고비용을 투자한 파이로프로세싱 - SFR 기술 개발을 채 끝내지 못한 상태에서 SMR 기술 개발에 예산과 시간을 이중 소모하는 점과 앞으로의 사용후핵연료 처리 기술 개발 방향의 불분명성을 해소해 줄 로드맵이 제시되어야 한다.⁴⁰⁾

2.8.4. 원전 정책의 변동

사용후핵연료는 원자력 발전의 부산물로서 발생하기 때문에 처리 과정에 있어 원전 정책에 직접적인 영향을 받는다. 장기적으로 일관성 있고 체계적인 정책하에서 그 처리가 수월하게 이루어질 수 있지만 우리나라 원전 정책의 현주소는 그렇지 못하다. 예를 들어 2017년 5월 국회입법조사처는 탈원전 시나리오를 가정할 경우, 2030년경 원전의 총 용량과 발전량이 감소할 것이라는 답변을 내놓았다.³⁶⁾ 2018년까지는 탈원전에 기초를 두어 원자력의 비율이 23.4%까지 감소하였으나 2021년 기준으로 27.8%까지 증가하였고 2022년 원전의 비중을 확대하겠다는 정책안을 발표함에 따라 2030년 원전 비중을 32.8%까지 확대할 전망이다.

2017년 7%에 불과한 재생에너지 비율을 2030년 20%까지 상승시키고 동시에 원전에 대한 의존도를 낮추는 것을 목표로 하였던 '재생에너지 3020 이행계획'으로 당초에는 신한울 3·4호기 건설 중단, 천지 1·2호기 건설 계획 취소, 월성 1호기 조기 폐쇄 조치가 이루어졌다. 그러나 2022년 2월 25일 건설 중인 신한울 1·2호기와 2017년 7월 중단되었다가 재개된 신고리 5·6호기(현 새울 3·4호기)의 건설을 가속하겠다는 정부 발표와 신한울 3·4호기 건설 재개 및 기존 원전 수명 연장 등의 영향으로 원전 비중은 더욱 늘어날 것으로 보인다. 또한 에너지 정책과 관련하여 최근 파리협정, UN 기후 정상 회의와 코로나19 사태 동안 일어난 기후변화의 심각성을 파악하고 확산을 방지하는 장기 저탄소 발전 전략 LEADS(Long term low greenhouse gas Emission Development Strategies)가 UN에 제출됨에 따라 EU와 중국 등의 주요국들이 탄소중

립을 주장하였다. 이에 의해 국내도 ‘2050 탄소중립 추진전략’이 2020년 12월에 마련되었다. 당초에는 신재생에너지의 증가와 원자력 발전 의존도를 낮추고자 하였지만, 신재생에너지만으로는 해결하기 어려워 온실가스 감축목표(NDC)에서 원전이 차지하는 비중을 23.9%에서 32.8%로 8.9%나 상향 조치하였다. 이렇듯 일관성이 부족하고 단기적이며 예측 불가능한 원전 정책은 사용후핵연료 처리에 혼란을 가중하고 대처를 늦출 수 있다.

3. 결론

국내의 사용후핵연료 관련 자료들은 저장시설의 용량 한계가 2031년 한계에 다다를 것으로 예측하며 우리나라의 방사성 폐기물 처리 기간에 여유가 없음을 보여준다. 스웨덴의 경우 사용후핵연료 영구 처분 시설 연구에만 40년, 건설 허가 승인에 11년이 소요되었고, 2023년 가동되는 핀란드 온칼로 영구 저장소의 경우 부지 선정 절차부터 허가까지 20년 이상 소요되었다. 우리나라는 제2차 고준위 방사성 폐기물 관리 기본계획에 따라 부지선정 절차 착수 후 37년 내 영구 처분 시설을 확보하겠다는 입장을 밝혔으나 스웨덴, 핀란드와 비교하여 국내 처분 기술이 57.4%밖에 못 미친다는 점을 감안하면 향후 신속한 처리가 필요하다.

또한 핵확산방지조약(NPT), 한미 원자력 협정의 골드스탠더드, 한반도 비핵화 협정과 같은 여러 요인으로 재처리 기술의 개발이 늦춰졌고, 현재 미국과 공동 개발 중인 Pyroprocessing - SFR 연계 처리도 그 실효성과 경제성이 명확하지 않다. 다른 나라들도 재처리에 의문을 던지고 있는 현 상황에서 지속적인 비용 소모와 더불어 성공 여부가 불확실한 개발 투자에 대해 우리나라는 향후 방향과 현재의 입장을 확고히 하여야 한다.

기술 개발이 중단될 가능성과 프랑스의 사례처럼 재처리 후 발생하게 될 핵물질을 고려하여 IAEA가 권고한 심층 처분을 KURT에서 예측한 ‘2042년 영구 처분장 가동 계획 가안’의 시기보다 앞당겨야 한다. 이 과정에서 경주 중·저준위 방사성 폐기물 처분장 선정과 2022년 월성 원전 맥스터 증설의 사례를 통해 KURT와 지자체는 해당 지역 주민과 협력이 잘 이루어지도록 부지를 선정하고, TRUE를 통한 국제 공동 연구과제를 통해 부지 선정을 신속히 할 수 있도록 해야 한다. 또한, 정책에 따른 운전비용 변동, 시설 증축 및 해체의 경제성 평가를 공정하고 정확하게 추산하여 안전성과 경제적 손실을 고려해야 한다. 그러기 위해선 단기적으로 변동하는 일관성 없는 정책을 지양하고 스웨덴, 핀란드와 같은 선진적인 사례를 적용하여 시행 과정을 투명하게 공개하고 장기적으로 현실성 있는 정책을 마련해야 한다. 이처럼 안정적인 탄소제로시대의 달성을 위하여 각 분야에서 다양한 원천 기술 개발과 정책적 시도가 이뤄져야 할 것이다.⁴¹⁻⁵²⁾

Acknowledgement

이 연구는 대한민국 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 중견연구자지원사업의 지원으로 수행되었습니다 (No. 2021R1A2C1013989). 본 논문 내용은 YouTube에서도 <https://youtu.be/0nzhldCA8yk>에서 감상할 수 있습니다.

Reference

1. S. P. Jung, Practical implementation of microbial fuel cells for bioelectrochemical wastewater treatment, *Journal of the Korean Society of Urban Environment* 13(2), 93-100(2013).
2. H. W. Chai, Y. H. Choi, M. W. Kim, Y. J. Kim, S. P. Jung, Trends of microbial electrochemical technologies for nitrogen removal in wastewater treatment, *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, 34(5), 345-356(2020).
3. S. H. Park, W. Kim, M. S. Kim, Y. J. Kim, S. P. Jung, Trend of treatment and management of solar panel waste, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 38(3), 200-213(2021).
4. S. H. Son, Y. J. Kim, M. W. Kim, S. P. Jung, Recent trends and prospects of microbial fuel cell technology for energy positive wastewater treatment plants treating organic waste resources, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 43(10), 623-653(2021).
5. N. R. Ha, S. H. Oh, S. H. Lee, Y. J. Jung, J. Y. Choi, S. P. Jung, Institutional management plan for hazardous chemical substances in textile products, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 43(5), 390-405(2021).
6. J. R. Park, H. J. Jang, S. H. Choi, R. Jung, S. P. Jung, Current and prospects of waste heat utilization and cooling technology in data centers, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 44(11), 493-503(2022).
7. S. H. Lee, M. G. Lee, W. Jeon, M. S. Son, S. P. Jung, Current status and perspectives of carbon capture and storage, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 44(12), 652-664(2022).
8. B. Y. Koo, S. P. Jung, Trends and perspectives of microbial electrolysis cell technology for ultimate green hydrogen production, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 44(10), 383-396(2022).
9. S. H. Son, S. P. Jung, Trends and prospects of sediment microbial fuel cells as sustainable aquatic ecosystem remediation technology, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 44(11), 468-492(2022).
10. H. J. Kim, G. Y. Yang, C. R. Nam, S. H. Jeong, S. P. Jung, Solar photovoltaic industry in Korea: current status and perspectives, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 45(2), 107-118 (2023).
11. D. H. Son, K. M. Seo, Y. H. Kim, J. H. Lee, S. P. Jung, Organic waste resource gasification: current status and perspectives, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 45(2), 96-106(2023).
12. B. Y. Koo, S. P. Jung, Recent trends of oxygen reduction catalysts in microbial fuel cells: a review, *Journal of Korean Society*

- of Environmental Engineers, 41(11), 657-675(2019).
13. Bp Statistical Review of World Energy Home Page, <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>, (2022).
 14. M. Schneider, A. Froggatt, J. Hazemann, A. Ahmad, M. Budjeryn, Y. Kaido, T. Laconde, M. L. Moal, M. V. Ramana, H. Sakiyama, T. Suzuki, B. Wealer, A. Stienne, N. Schneider, F. Meinass, Status of nuclear power in the world, The world nuclear industry status report 2021, World Nuclear Industry Status Report, Paris, France, pp. 394(2021).
 15. PRIS Home Page, STATUS REPORTS, <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>, (2023).
 16. Korea Institute of Nuclear Safety Home Page, Nuclear waste, <https://www.kins.re.kr/wacid/rw01>, (2020).
 17. J. H. Yoon, Quality control process related to the disposal of low- and middle-level radioactive waste, Nuclear safety and security commission in Proceedings of the Nuclear safety & security information conference 2020, Daejeon, Korea, pp. 5(2020).
 18. Korea Radioactive Waste Agency Home Page, Story of Nuclear waste 70, https://www.korad.or.kr/korad/board/view.do?menu_idx=52&manage_idx=10&board_idx=1306735, December (2018).
 19. Korea Disease Control and Prevention Agency Home Page, Radiation exposure and defense, <https://www.kdca.go.kr/contents.es?mid=a20305010000>, December(2022).
 20. European Nuclear Society Home Page, Reprocessing plants, world-wide, <https://web.archive.org/web/20150622040852/http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/r/reprocessing-plants-ww.htm>, (2022).
 21. B. H. Park, G. S. Kim, Spent fuel processing technologies for waste recycling, Journal of Institute of Convergence Technology, 2(1), 7-12(2012).
 22. H. R. Jang, J. S. Seo, W. I. Go, Analysis of technical alternatives for spent nuclear fuel treatment process, in Proceedings of Korean Radioactive Waste Society Autumn 2007, Korea Atomic Energy Research Institute, Busan, Korea, pp. 69-70(2007).
 23. S. H. Kim, A trend of sustainable recycling systems of spent nuclear fuels, Journal of Energy Engineering, 20(3), 236-241 (2011).
 24. R. Pollock, Soviets experience nuclear accident, Critical Mass Journal, 3(10), 7-8(1978).
 25. J. G. Yoo, Management of spent nuclear fuel, Industrial resources department(Ed), Issues and problem of spent fuel management policy, National Assembly Research Service, Seoul, Korea, pp. 5-6(2017).
 26. Korea Atomic Industrial Forum Home Page, Current Status of World Nuclear Power Plant, https://www.kaif.or.kr/?c=news&s=6_2, (2023).
 27. KFEM Home Page, National Status of Nuclear Power Plants, <http://kfem.or.kr/?p=225067>, (2022).
 28. Korea Institute Of Nuclear Safety Home Page, The amount of radioactive waste generated by facilities in the second quarter of 2021, <https://www.kins.re.kr/wacid/mdlev02?catId=03>, (2021).
 29. Chung-ang university energy system engineering department, Nuclear information charging station, Dusan donga, Seoul, Korea, pp. 76-81(2014).
 30. Industry and Energy Ministry of Trade, Site selection of management facilities by social agreement, in: Nuclear power plant environment department(Ed), Second high level radioactive waste management base plan, MOTIE, Sejong, Korea, pp. 14-15(2022).
 31. G. Y. Kim, G. S. Kim, J. Y. Lee, W. J. Jo, J. S. Kim, Current status of the KURT and long-term in-situ experiments, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 54(4), 344-357(2017).
 32. Y. K. Koh, Development of technology for characterization of geological environment in KURT, Korea Atomic Energy Research Institute(Ed), HLW long-term management system development, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea, pp. 39-47(2016).
 33. G. Ouzounian, S. Voinis, F. Boissier, Radioactive waste management in France: safety demonstration fundamentals, 41(3-4), 286-293(2012).
 34. M. Besnard, M. Buser, I. Fairlie, G. MacKerron, A. Macfarlane, E. Matyas, Y. Marignac, E. Sequens, J. Swahn, B. Wealer, World Nuclear Waste Report 2019, <https://worldnuclearwastereport.org/>, (2019).
 35. L. Okamura, Nuclear waste management in Japan., L. Mez, L. Okamura, H. Weidner(Eds), The Ecological Modernization Capacity of Japan and Germany, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, Germany, pp. 69-85(2020).
 36. S. J. Lee, Status of high level radioactive waste disposal in Finland, Korea Radioactive Waste Agency (Ed), Status of overseas radioactive waste disposal 2017, Korea Radioactive Waste Agency, Gyeongju, Korea, pp. 20-33(2017).
 37. J. M. Bahr, S. M. Becker, K. L. Peddicordm, A. G. Croff, P. J. Turinsky, T. Illangasekare, U.S. Nuclear Waste Technical Review board, <https://www.nwtrb.gov/our-work/reports/survey-of-national-programs-for-managing-high-level-radioactive-waste-and-spent-nuclear-fuel-2022-update>, (2022).
 38. Industry and Energy Ministry of Trade, Current status and forecast of high-level radioactive waste, Second high level radioactive waste management base plan, MOTIE, Sejong, Korea, pp. 8(2022).
 39. E. S. Park, Wildfires marched 3 kilometers in front of the nuclear power plant, threatening “switch yards”, Message of forest fires, carbon reduction and anti-nuclear, Pressian Coop., Seoul, Korea, pp. 1(2022).
 40. L. M. Krall, A. M. Macfarlane, R. C. Ewing, Nuclear waste from small modular reactors, in Proceedings of the national academy of sciences, 119(23), 1-12(2022).
 41. S. H. Jung, Impedance analysis of Geobacter sulfurreducens PCA, Shewanella oneidensis MR-1, and their coculture in bioelectrochemical systems, International Journal of Electrochemical Science, 7(11), 11091-11100(2012).
 42. H. G. Kang, E. J. Kim, S. P. Jung, Influence of flowrates to a reverse electro-dialysis (RED) stack on performance and

- electrochemistry of a microbial reverse electro dialysis cell (MRC), *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(45), 27685-27692(2017).
43. H. G. Kang, J. S. Jeong, P. L. Gupta, S. P. Jung, Effects of brush-anode configurations on performance and electrochemistry of microbial fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(45), 27693-27700(2017).
 44. S. P. Jung, E. J. Kim, B. Y. Koo, Effects of wire-type and mesh-type anode current collectors on performance and electrochemistry of microbial fuel cells, *Chemosphere*, 209, 542-550(2018).
 45. N. Savla, S. Pandit, N. Khanna, A. S. Mathuriya, S. P. Jung, Microbially powered electrochemical systems coupled with membrane-based technology for sustainable desalination and efficient wastewater treatment, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 42(7), 360-380(2020).
 46. S. H. Son, B. Y. Koo, H. W. Chai, H. V. H. Tran, S. Pandit, S. P. Jung, Comparison of hydrogen production and system performance in a microbial electrolysis cell containing cathodes made of non-platinum catalysts and binders, *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101844(2021).
 47. B. Y. Koo, S. P. Jung, Improvement of air cathode performance in microbial fuel cells by using catalysts made by binding metal-organic framework and activated carbon through ultrasonication and solution precipitation, *Chemical Engineering Journal*, 424, 130388(2021).
 48. A. Amrut Pawar, A. Karthic, S. M. Lee, S. Pandit, S. P. Jung, Microbial electrolysis cells for electromethanogenesis: materials, configurations and operations, *Environmental Engineering Research*, 27(1), 200484(2022).
 49. N. Savla, M. Guin, S. Pandit, H. Malik, S. Khilari, A. S. Mathuriya, P. K. Gupta, B. S. Thapa, R. Bobba, S. P. Jung, Recent advancements in the cathodic catalyst for the hydrogen evolution reaction in a microbial electrolysis cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, (2022).
 50. H. V. H. Tran, E. J. Kim, S. P. Jung, Anode biofilm maturation time, stable cell performance time, and time-course electrochemistry in a single-chamber microbial fuel cell with a brush-anode, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 106, 269-278(2022).
 51. T. Naaz, A. Kumar, A. Vempaty, N. Singhal, S. Pandit, P. Gautam, S. P. Jung, Recent advances in biological approaches towards anode biofilm engineering for improvement of extracellular electron transfer in microbial fuel cells, *Environmental Engineering Research*, 28(5), 220666(2023).
 52. S. P. Jung, S. H. Son, B. Y. Koo, Reproducible polarization test methods and fair evaluation of polarization data by using interconversion factors in a single chamber cubic microbial fuel cell with a brush anode, *Journal of Cleaner Production*, 390, 136157(2023).

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors and Contribution Statement

Jihye Kim

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, student, ORCID[®] 0000-0003-0072-6189: Writing - original draft.

Seongmuk Lee

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, student, ORCID[®] 0000-0002-1887-9872: Writing - original draft.

Hyunyoung Park

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, student, ORCID[®] 0000-0002-8572-3923: Writing - original draft.

Heejung Choi

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, student, ORCID[®] 0000-0002-1104-4506: riting - original draft.

Sokhee P. Jung

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Associate Professor, ORCID[®] 0000-0002-3566-5649: Funding acquisition, Project administration, Resources, Supervision, Writing - review and editing.