



# 세계 핵폐기물 보고서 2019

유럽 특집



# 파트너 및 후원사



세계 핵폐기물 보고서(WNWR)는 면면이 다양한 여러 조력자들이 없었다면 세상에 나올 수 없었을 것이다. 알파벳 순서대로 감사를 전한다. Altner-Combecher Stiftung, Bäuerliche Notgemeinschaft Trebel, BUND, Bürgerinitiative Umweltschutz Lüchow-Dannenberg e.V., 유럽연합 의회 기후위기 및 녹색/유럽자유연합 의원 모임, Heinrich-Böll-Stiftung 베를린, 브뤼셀, 홍콩, 파리, 프라하, 워싱턴 DC 지부, KLAR! Schweiz, Annette와 Wolf Römmig, 스위스에너지재단 관계자 여러분, 모두에게 감사하다.



# 한국어판 편집자의 글

『세계 핵폐기물 보고서』는 레베카 함즈(Rebecca Harms) 전 유럽의회 의원의 주도로 유럽 핵폐기물 전문가팀의 공동 집필을 통해 2019년에 제작되었다. 보고서는 핵폐기물의 분류, 폐기량, 그로 인한 환경 위험 및 건강 위험, 폐기물 관리 개념 및 관련 비용 등을 다루며, 2019년 보고서는 유럽 국가와 미국에 지리적 초점을 두고 있다.

이 간행물은 『세계 핵폐기물 보고서 2019』의 제7장 “국가 사례 연구” 부분을 번역한 것으로 한국에서 핵폐기물 처리의 복잡성에 대한 논의를 불러 일으키고자 한다. 실제로 핵발전소와 핵폐기물은 한국의 많은 사람들에게 우려와 공포의 단어다. 2011년 후쿠시마 제1 원전 사고 이후 지난 10년 동안 다수의 시민 단체, 전문가 및 시민들이 한국 정부의 핵발전소에 대한 지속적인 의존, 관리 및 개발을 비난했지만 소용이 없었다.

이 번역물은 서울의 녹색전환연구소와 하인리히뵐 홍콩지부의 공동 작업의 결과다. 번역가 최진영 님, 검수자 김수진 박사님, 정유진 박사님, 염광희 박사님, 그리고 레이아웃 디자인을 담당해주신 최진규님께 특별히 감사의 말을 전한다.

이 보고서가 한국의 전문가, 시민사회, 핵 문제를 다루는 정책 입안자들에게 유용하기를 바란다. 다음 『세계 핵폐기물 보고서』에는 한국의 핵폐기물 사례에 대한 장이 추가될 예정이다. 이에 대한 많은 독자들의 소중한 의견과 관심을 부탁드립니다.

이 번역의 각주는 『세계 핵폐기물 보고서 2019』의 영문판과 동일하지만 각주 번호는 영문판 제7장의 첫 번째 각주로 시작한다.

편집자

# 차례

파트너 및 후원사 ..... 2  
 한국어판 편집자의 글 ..... 3  
 개요서 ..... 8

• 1-6장은 아직 한글로 번역되지 않았다.

## 1. Introduction

### 2. Origins and classification

- 2.1 Types of waste: the nuclear fuel chain
  - Uranium mining, milling, processing and fuel fabrication
  - Nuclear fission (fuel irradiation)
  - Management of spent fuel
  - Reactor (and fuel chain facility) decommissioning
- 2.2 Waste quantities and activity
- 2.3 Classification systems and categories
  - 2.3.1 The IAEA classification
  - 2.3.2 The EU classification
  - 2.3.3 Examples of national classifications
- 2.4 Summary

### 3. Quantities of waste

- 3.1 Reporting obligations
- 3.2 Waste quantities along the supply chain
  - Uranium mining and fuel fabrication
  - Operational waste
  - Spent nuclear fuel
  - Decommissioning waste
  - Estimated waste quantities along the supply chain
- 3.3 Reported waste quantities under the Joint Convention
  - Uranium mining and fuel fabrication
  - Low- and intermediate-level waste
  - Spent nuclear fuel and high-level waste
- 3.4 Summary

## 4. Risks for the environment and human health

- 4.1 Radiation risks of nuclear waste
- 4.2 Risks from uranium mining, mine tailings, enrichment, and fuel fabrication
  - Health risks from exposures to uranium
  - Uranium mining
  - Uranium mine tailings
- 4.3 Risks from operation
  - Risks from gases, liquids and solid waste
  - Risks to nuclear workers
- 4.4 Risks from spent nuclear fuel
  - Risks of spent fuel in pools
- 4.5 Risks from the reprocessing of spent nuclear fuel
  - Fissile materials
  - Mixed oxide fuel (MOX)
- 4.6 Decommissioning risks
  - Continued radionuclide emissions from decommissioned reactors
  - Decommissioning vs operational exposures
- 4.7 Summary

## 5. Waste management concepts

- 5.1 Historical background
- 5.2 The context of nuclear waste management
- 5.3 Management concepts for nuclear waste
  - Disposal concepts
  - Host rocks
  - LILW-repositories
  - HLW-repositories
  - Deep borehole disposal
- 5.4 Interim strategies: storage
  - Interim storage
  - Extended storage
- 5.5 Summary

## 6. Costs and financing

- 6.1 The nature of the funding systems for decommissioning, storage, and disposal
  - Basic liability for decommissioning and waste management
  - Overview and nature of the funds
  - Accumulation of the funds

- 6.2 Cost estimations and experiences
  - Cost estimation methodologies
  - Decommissioning costs
  - Disposal costs
- 6.3 Financing schemes
  - Financing schemes for decommissioning
  - Financing schemes for interim storage
  - Financing schemes for disposal
  - Integrated financing schemes
- 6.4 Summary

- 7. 국가별 사례 연구** ..... 14
  - 7.1 체코공화국 ..... 14
    - 개괄 ..... 14
    - 폐기물 분류 체계 ..... 14
    - 폐기물의 양 ..... 15
    - 폐기물 관리 정책 및 폐기물 시설 ..... 16
    - 비용 및 자금조달 ..... 17
    - 요약 ..... 18
  - 7.2 프랑스 ..... 19
    - 개괄 ..... 19
    - 폐기물 분류 체계 ..... 20
    - 폐기물로 분류되지 않는 기타 방사성 물질 ..... 20
    - 폐기물의 양 ..... 20
    - 폐기물로 분류되지 않는 기타 방사성 물질 ..... 22
    - 폐기물 관리 정책 및 폐기물 시설 ..... 23
    - 비용 및 자금조달 ..... 25
    - 요약 ..... 26
  - 7.3 독일 ..... 28
    - 개괄 ..... 28
    - 폐기물 분류 체계 ..... 29
    - 폐기물의 양 ..... 29
    - 폐기물 관리 정책 및 폐기물 시설 ..... 31
    - 비용 및 자금조달 ..... 32
    - 요약 ..... 33
  - 7.4 헝가리 ..... 35
    - 개괄 ..... 35
    - 폐기물 분류 체계 ..... 35

폐기물의 양	36
폐기물 관리 정책 및 폐기물 시설	37
비용 및 자금조달	38
요약	39
7.5 스웨덴	40
개괄	40
폐기물 분류 체계	40
폐기물의 양	41
폐기물 관리 정책 및 폐기물 시설	42
비용 및 자금조달	44
요약	45
7.6 스위스	46
개괄	46
폐기물 분류 체계	47
폐기물의 양	47
폐기물 관리 정책 및 폐기물 시설	48
비용 및 자금조달	49
요약	50
7.7 영국	52
개괄	52
폐기물 분류 체계	53
폐기물의 양	53
폐기물로 분류되지 않는 기타 방사성 물질의 양	55
폐기물 관리 정책 및 폐기물 시설	56
비용 및 자금조달	57
요약	58
7.8 미국	59
개괄	59
폐기물 분류 체계	60
폐기물의 양	61
폐기물 관리 정책 및 폐기물 시설	62
비용 및 자금조달	64
요약	65
<b>8. 용어 및 약어 정리</b>	66
<b>9. 작성자</b>	68
임프린트	70



# 개요서

**세계 핵폐기물 보고서**는 각국 정부가 포괄적인 핵폐기물 관리 전략을 개발하고 실행하기 위해 지난 수십 년 동안 겪어온 어려움을 여실히 보여준다. 결국 대부분의 과제는 미래 세대가 떠안게 될 것이다.



## 폐기물 관리 개념

핵에너지 시대가 열린 지 70년이 지났지만 **사용후핵연료의 심지층 처분장을 운영하고 있는 나라는 아직 없다.** 가장 위험한 핵폐기물 유형인 사용후핵연료를 위해 현재 영구 처분장을 짓고 있는 나라는 핀란드가 유일하다. 핀란드 외에는 스웨덴과 프랑스만이 조기 봉인 프로세스의 일환으로 고준위 핵폐기물 처분장 부지를 사실상 선정한 상태이다. 미국의 경우 폐기물격리시범프로젝트(Waste Isolation Pilot Project, WIPP)를 운영하고 있다. 하지만 이 시설은 핵무기의 장수명 초우라늄 폐기물을 처리하는 용도이지 상업용 핵반응로의 사용후핵연료를 처분하기 위한 시설은 아니다.

**방사성 폐기물 처분장 선정 실패 및 포기 사례가 수도룩하지만 현재 국가적 차원과 국제적 차원에서 선호되는 관리 방식은 심지층 처분이 우세하다.** 심지층 처분은 부지 선정, 탐사 및 승인 과정에 대한 명확하고 엄청난 조건을 요구한다. 그래도 여전히 심지층 처분의 실행 가능성을 보장할 수 없다. 그렇기 때문에 처분장 물색 과정은 산업적 실행 가능성에 기초하여 매우 신중하게 접근해야 하며 적절한 모니터링이 수반되어야 한다. 과학계 일각에서는, 면밀한 관리감독 하에 안전하게 보호된 환경에서 장기 보관하는 쪽이 더 책임 있고 훨씬 더 빠르게 달성할 수 있는 처분 방식이기 때문에 이 방식이 이행되어야 한다고 주장한다. 확실한 것은, 현재 수준의 연구와 과학적 논쟁, 그리고 지금과 같은 정치인과 관련 시민의 교류로는 이 도전의 규모를 감당할 수 없다는 사실이다.

핵폐기물 처리, 운송, 저장 및 처분은 핵발전소를 운영하고 있는 모든 나라에서 점차 중차대한 과제가 되고 있다. **각국 정부와 당국은 중간 저장 및 처분 프로그램의 관리를 개선해야 한다는 압박을 받고 있다.** 따라서 양질의 계획과 안전, 품질보증, 시민참여, 안전문화 등 관련 거버넌스에 대한 기준이 제대로 이행되어야 한다.

**사용후핵연료 및 고준위 폐기물의 중간 저장은 앞으로 한 세기 이상 더 지속될 것이다.** 심지층 처분장이 향후 몇십 년 안에 마련되기 어려운 상황에서 **리스크는 중간 저장으로 점차 전가되고 있다.** 오늘날의 사용후핵연료를 위시한 여타 쉽게 분산시킬 수 있는 중고준위 폐기물의 저장 관행은 장기적인 관점에서 계획된 것이 아니다. 강화된 시설에서 고체화, 건식 저장 등의 기타 옵션이 존재하는 마당에 과도한 리스크를 키워 나가고 있는 셈이다. 핵폐기물의 장기적 임시 저장은 당장의 리스크 상승, 비용의 천문학적 증가, 그리고 미래 세대로의 부담 이전을 초래할 뿐이다.



## 폐기물의 양

유럽 국가들은 (우라늄 채굴 및 처리 중에 나오는 부산물을 제외하고도) 수백만 입방미터의 핵폐기물을 양산해 왔다. 2016년 말 기준 **프랑스, 영국, 독일이 핵주기 상에서 3대 핵폐기물 생산국이다.**

**오늘날 6만 톤 이상의 사용후핵연료가 (러시아와 슬로바키아를 제외한) 유럽 전역에 보관되어 있으며, 가장 큰 비중**

을 차지하는 국가는 프랑스다. EU 내에서 사용후핵연료 보유 비중은, 프랑스 25%, 독일 15%, 영국 14% 순이다. 사용후핵연료는 고준위 폐기물로 간주된다. 상대적으로 적은 양으로 존재하나, 막대한 양의 방사선을 방출한다. 영국의 경우, 핵폐기물 총량의 3% 미만을 차지하는 고준위 핵폐기물이 전체 방사능의 97%를 차지한다. 대부분의 사용후핵연료는 열과 방사능을 감소시키기 위해 필수냉각수조(습식 저장)로 옮겨진다. 2016년 기준 유럽에서 사용후핵연료의 81%는 습식 저장 상태에 있다. 보다 안전한 방식은 별도 시설로 사용후핵연료를 옮겨, 건식 저장하는 것이다. 프랑스와 네덜란드는 저장 중인 사용후핵연료의 상당 부분을 재처리할 예정이다. 대부분의 기타 유럽 국가(벨기에, 불가리아, 독일, 헝가리, 스웨덴, 스위스, 가장 최근에 영국까지)는 재처리를 무기한 중단하거나 재처리 계획을 철회했다. 또한 모든 국가가 사용후핵연료 재처리 규모를 보고하고 있는 것은 아니다. 대부분의 경우 재처리에서 발생한 유리화된 고준위 폐기물만 보고하고 있다. 이는 재처리된 우라늄, 플루토늄, 중준위 폐기물, 장기간의 추가 저장이 필요한 사용후 MOX 연료의 경우도 마찬가지이다.

**현재까지 약 250만㎥ 상당의 저중준위 폐기물이 (러시아와 슬로바키아를 제외한) 유럽에서 양산되었다.** 이 중 20%(약 50만㎥)가 최종 처분을 기다리며 유럽 전역에 보관 중이다. 그리고 완전한 처분의 길이 보이지 않는 상황에서 꾸준히 늘어나고 있다. 나머지 80%(거의 200만㎥)는 처분되었다. 그러나 이 사실이 핵폐기물을 성공적으로 영구히 제거했다는 것을 의미하지는 않는다. 예를 들면, 독일의 옛 소금광산에 구축된 Asse II 처분장은 지하수의 지속적 유입이 문제가 되고 있다. 22만㎥에 달하는, 소금과 뒤엉킨 폐기물의 회수는 매우 어려우며 많은 비용이 소요될 것이다. 이 폐기물 양은 소금과 방사성 물질이 뒤섞이면서 원래 폐기물 양의 5배로 불어났다. 따라서 최종 처분이라는 용어는 신중하게 사용되어야 한다.

핵발전소 해체는 대량의 핵폐기물을 추가로 양산할 것이다. 핵주기 시설을 제외한 **유럽의 핵반응로만으로도 발전소 해체 시 나오게 될 저중준위 폐기물은 최소 140만㎥에 달한다.** 발전소 해체는 매우 드문 일이기에 보수적으로 잡은 예측임에도 그렇다. 2018년 기준 (러시아와 슬로바키아를 제외한) 유럽에는 142기 핵반응로가 운전 중이다.

지속적인 핵폐기물 발생과 향후의 핵발전소 해체는 유럽에서 점점 더 큰 문제가 되고 있다. **특히 사용후핵연료의 저장 용량이 서서히 부족해지고 있기 때문이다.** 가령 핀란드의 사용후핵연료 저장 용량은 이미 93% 포화되었다. 스웨덴의 중앙집중식 저장 시설인 CLAB의 포화율은 80%이다. 하지만 모든 국가가 저장 시설의 포화율을 보고하는 것은 아니기 때문에 전체 상황을 조망하기는 어렵다.

핵반응로 수명기간 동안 (러시아와 슬로바키아 제외) **유럽 핵반응로는 약 660만㎥에 달하는 핵폐기물을 배출할 것으로 추정된다.** 이것을 한 군데에 쌓으면 축구장 하나에 919m 높이로 쌓이는 것인데, 이는 세계 최고 높이 건물인 두바이 버즈 칼리파보다 90m 더 높은 것이다. 이 추정치는 사용후핵연료 및 핵발전소 운영에서 해체까지 발생하는 폐기물을 모두 포함한 것으로 보수적인 가정에 기초하여 산출된 것이다. 유럽의 실제 핵폐기물 양은 더 늘어날 가능성이 크다. 30% 비중을 차지하는 프랑스가 유럽 최대 핵폐기물 생산국이다. 영국(20%), 우크라이나(18%), 독일(8%)이 그 뒤를 따른다. 이 4개국이 유럽 핵폐기물의 75% 이상을 차지하고 있다.

여전히 활발한 우라늄 생산국인 러시아를 제외하고, 유럽에서 **우라늄 채굴로 발생하는 핵폐기물을 가장 많이 보유한 나라는 독일과 프랑스이다.** 공식적으로 과거 프랑스 우라늄 채굴업체가 생산한 부산물은 5천만 톤으로 알려져 있다. 하지만 독립 전문기관의 추정치는 이를 훨씬 상회한다. 구 동독(German Democratic Republic)은 프랑스보다 우라늄광 채광 규모가 훨씬 더 컸다. 이 같은 광산이 남겨 놓은 핵폐기물은 결코 적지 않다. 32 km<sup>2</sup>에 이르는 시

설 부지, 낮은 수치이지만 방사선을 방출하는 3억 1100만<sup>m</sup> 부피의 48개 암석 더미, 그리고 총 부피 1억 6000만<sup>m</sup>의 방사성 슬러지로 채워진 4개의 인공호수가 그것이다. 오늘날 유럽은 대부분의 우라늄을 수입하고 있어 이 같은 핵폐기물은 유럽 밖에서 양산되고 있다.



**비용 및 재정**

거의 모든 정부가 핵폐기물 관리, 저장 및 처분 비용을 사업자가 책임지는 오염자부담원칙을 적용한다고 주장한다. 그러나 **실제로는 오염자부담원칙을 일관되게 적용하지 못한다.** 대부분의 국가에서는 폐로 시에만 이 원칙을 시행하고 있다. 하지만 구 동독의 핵반응로 폐로 사례에서 보듯, 정부가 폐로 책임을 떠안는 경우도 있다. 불가리아, 리투아니아, 슬로바키아는 과거 구 소련 시대의 핵발전소를 폐쇄하는 대가로 유럽연합으로부터 폐로 지원을 받았다. 대부분의 나라는 핵폐기물 처분 비용에 대하여 오염자부담원칙을 부과하지 않는다. 결국은 정부 당국이 장기적으로 핵폐기물을 관리하고 처분하는 책임뿐만 아니라 부채도 떠안게 될 것이다. 원칙적으로 사업자는 장기적으로 발생하는 비용을 부담하도록 요구된다. 그러나 오염자부담원칙이 법률적 요건으로 명시된 나라에서도 실제 그 적용은 완전하지 않다. 가령, 최종 처분장이 폐쇄된 후 발생하는 문제에 대해 해당 핵발전소 운영자는 금전적 책임을 지지 않도록 되어 있다. 독일 Asse II 처분장의 사례가 여기에 해당한다. 이 처분장에서 상당량의 폐기물을 회수해야 하는데, 결국 그 비용은 납세자가 부담해야 한다.

**정부는 폐로와 핵폐기물 저장 및 처분에 들어갈 비용을 제대로 예측하지 못한다.** 모든 비용 추산은 장기적 시간 범위, 비용 증가, (비축 기금에 적용할) 추정 할인율 등으로 기저에 불확실성이 있을 수밖에 없다. 이 불확실성의 상당 부분은 특히 폐로와 핵폐기물 관리 프로젝트에 관해 경험이 부족한 것에 기인한다. 핵반응로의 완전한 해체를 포함하여 폐로 프로젝트를 완수하고 관련 데이터를 생성해 본 나라는 미국, 독일, 일본이 유일하다. 2019년 중반 기준 전세계에서 폐쇄된 핵반응로는 181기이다. 이 가운데 폐로가 완료된 것은 단지 19기이며, 이 19기 중에서 “녹지” 상태를 달성한 것은 10기에 불과하다. 그러나 이와 같이 몇 안 되는 사례에서도 비용이 최대 5배까지 차이가 나기 때문에 불확실성이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 미국에서 폐로 비용은 핵반응로에 따라 280 달러/kW에서 1,500 달러/kW 사이로 나타났다. 독일에서의 폐로 비용은, 한 핵반응로가 1,900 달러/kW인데 비해 다른 핵반응로는 10,500 달러/kW였다.

**많은 정부가 오래된 데이터로 비용을 추산하고 있다.** 본 보고서에서 살펴본 프랑스, 독일, 미국 등의 나라는 몇 건 존재하지는 않더라도 실증적 데이터를 바탕으로 추산하기 보다 1970-1980년대 연구자료에 기초해 비용을 추정하고 있었다. 대부분의 경우 사업자, 산업계, 공공기관 등이 작성한 오래된 데이터를 사용하기 때문에, 추정치가 낮게 나오고 과도하게 낙관적인 결론에 이를 공산이 크다.

**많은 정부가 지나치게 낙관적인 할인율을 적용하고 있다.** 폐로 및 핵폐기물 관리비용이 과소평가되는 주요 요인 중 하나는, 지나치게 낙관적인 할인율을 제도적으로 적용하는 데 있다. 폐로 및 핵폐기물 관리를 위한 기금은 시간이 흐를수록 이 기금이 증가할 것이라는 기대에 바탕을 두고 있다. 예를 들어 독일은 핵폐기물 관련 모든 활동에 배정되어 있는 예산 240억 유로가 2099년까지 860억 유로로, 거의 4배 증가할 것으로 전망하고 있다. 적용되는 할인율의 범위가 넓고, 비용이 인플레이션보다 더 빨리 증가할 가능성이 큼에도 불구하고 이를 염두에 두지 않고 추산하는 경우가 많다.

폐로, 폐기물 관리 및 처분에 충분한 자금이 사용될 수 있다는 것을 보장하기 위해, 자금조달 계획은 기금의 확실한

보유 현황을 제시해야 한다(“ring-fencing” 또는 기금용도 지정 조치). 또한 배정된 자원이 실제 비용을 충당할 만큼 충분하도록 해야 한다. 일부 국가는 한쪽 요건은 충족시키나 다른 요건은 만족시키지 못하고 있다.

**핵폐기물 관리, 저장 및 처분을 위한 자금확보 방안은 나라마다 큰 차이를 보인다.** 모든 핵발전 국가가 폐로 기금을 사업자와 분리하여 외부 기관에서 관리하도록 요구하는 것은 아니다. 대부분의 국가에서 핵폐기물의 장기적 관리를 위한 자금은 외부 기관에서 관리하나, 일부 국가에서 폐로는 여전히 사업자 내부의 특수용도 자금으로 집행된다. 폐로와 핵폐기물 보관을 위한 자금조달 문제는 복잡하다. 그래서 한 나라 안에서도 여러 자금조달 체계가 혼재하는 경우가 많다.

나라마다 접근 방식이 다르다는 점에서 암시하듯, 각 정부가 “폐로(decommissioning)”에 포함되는 내용을 항상 제대로 정의하는 것은 아니다. 핵폐기물 관리는 사용후핵연료 관리와 마찬가지로 폐로의 중요한 측면이다. 그러나 두 가지 모두 “폐로”의 하위 분류로 항상 정의되는 것이 아니기 때문에, 국가 간 비용을 비교하는 것이 쉽지 않다. **폐로, 저장 및 처분 과정은 상호 밀접하게 연결되어 있다. 그래서 이 과정에서 발생하는 미래 비용의 자금을 조달하는 가장 적합한 방식은, 하나로 통합된 외부의 특수용도 기금을 마련하는 것이다.** 스웨덴, 영국, 스위스 등 이 방식을 택한 나라는 소수에 불과하다. 스위스의 경우, 폐로용 기금과 폐기물 관리용 기금을 각각 운영하고 있다. **그 어느 나라도 폐로, 핵폐기물의 저장 및 처분에 들어갈 자금을 완전히 확보하지는 못했다.** 이는 핵발전소를 운영하는 모든 나라가 풀어야 할 과제이다.

**비용을 면밀하게 추산하여, 추정치와 이미 확보된 기금 간의 괴리를 없앤 나라는 아직까지 없다.** 대부분의 경우 필요 자금의 일부만이 책정되어 있을 뿐이다. 예를 들어, 스웨덴은 폐로 및 핵폐기물 관리 비용의 2/3에 해당되는 자금을 지금까지 적립해 두었고, 영국은 운전 중인 핵반응로의 경우 적립 금액이 절반 이하이고 스위스는 1/3도 되지 않는다. 핵폐기물 처분을 위한 자금확보 상황도 마찬가지다. 프랑스와 영국이 현재 확보해 놓은 기금은 추정 비용의 1/3가량 밖에 되지 않는다. 경제상황 악화로 일정보다 앞서 가동을 중단하는 핵반응로가 늘어나면서 기금 부족의 리스크가 커지고 있다. 발전소의 조기 운영중단, 기금 부족, 비용 증가 등의 요인으로 인해 일부 핵발전 사업자는 추가 기금이 확보될 때까지 여타 핵반응로의 폐쇄와 폐로 작업을 미루고 있는 실정이다. 한편, 미국과 일본처럼 수수료 인상, 보조금 확보, 수명 연장 등을 통해 핵시설의 비용을 보전할 수 있는 방안을 강구하는 나라도 있다.



**출처와 분류**

**각 국가별로 핵폐기물의 정의에 상당한 차이를 보인다.** 사용후핵연료 및 일부 분리된 물질(플루토늄과 재처리 우라늄)을 폐기물로 볼 것인지, 아니면 자원으로 볼 것인지부터 다르다. 일례로 사용후핵연료와 사용후핵연료에 들어 있는 플루토늄은 대부분의 국가에서 그 맹독성과 플루토늄 분리 및 재사용의 높은 비용을 이유로 폐기물로 분류한다. 그러나 프랑스는 플루토늄을 잠재적 자원으로 간주하고, 법으로 재처리를 요구하고 있다. 재처리는 폐기물 문제 해결을 미룰 뿐만 아니라 폐기물과 관련된 상황을 더욱 복잡하게 만들고 비용을 증가시킨다.

**각 국가별로 핵폐기물을 어떻게 분류하는지도 상당한 차이를 보인다.** 분류 체계가 동일한 국가는 없다. 독일은 붕괴 열 발생 폐기물과 기타 폐기물로만 구분한다. 영국은 방사능 농도를 폐기물 분류의 기준으로 삼는다. 프랑스와 체코는 방사능 농도 및 붕괴 기간(반감기) 두 가지 모두를 고려한다. 미국은 폐기물의 특징이 아니라 출처에 따라 분류하기 때문에, 유럽 국가와 분류 체계가 근본적으로 다르다.

**각 국가별로 핵폐기물 발생량에 대한 보고 방식도 상당한 차이를 보인다.** 모든 나라가 발생한 폐기물량과 이에 관한

관리 제도를 정기적으로 공시한다. 그러나 모든 나라가 빠짐없이 보고하는 것은 아니다. 일부 경우는 발표된 정보로 발생량을 추정하기 어렵다(슬로바키아 등). 일부 국가의 보고서에는 사용후핵연료에 대한 최신 인벤토리 내용이 빠져 있다(네덜란드과 벨기에 등). 러시아는 핵폐기물 인벤토리의 분류 및 현황에 대해 거의 정보를 제공하지 않는다.

이처럼 국가별로 핵폐기물을 정의하고, 분류하고, 보고하는 방식이 차이가 있고 똑같지 않기 때문에 데이터 수집 및 국가 간 비교가 매우 어려워진다. 국가별 차이는 핵폐기물 관리에 대한 일관된 기준이 없다는 것을 보여준다. 국제 사회가 공통된 안전상의 원칙과 정부 활동에 대한 상호 검토 프로세스를 구축하고자 노력했음에도 그러하다. 국제 원자력기구(IAEA)는 핵폐기물 분류에 대한 폭넓은 틀을 제시하고 있다. 사용후핵연료 및 방사성폐기물의 안전한 관리에 관한 2001년의 공동협약이 대부분의 나라에서 기본 방침을 구성한다. 하지만 이행 방식에서는 차이가 크다. 유럽연합은 2011년의 유럽원자력공동체(Euratom) 지침을 통해 회원국의 폐기물 분류 체계를 통일하고자 했으나 현재 뚜렷한 성과를 내지 못하고 있다.



**환경 및 인간에 대한 리스크**

핵폐기물이 건강상의 위해가 되는 이유는 여러 가지이다. 첫째, 핵시설의 주기적 가스 및 액체 폐기물 방출에 따른 위험이 보고된 바 있다. 둘째, 전 세계적으로 재처리로 인한 집단선량이 매우 크다. 셋째, 이미 발생한 핵폐기물 상당량이 만족스럽지 못하고 불안정한 상태에 놓여 있다. 사용후핵연료 및 재처리에 따른 유리화 폐기물 등 고준위 폐기물은 핵폐기물 총 방사능의 90% 이상을 차지한다. 그럼에도 고준위 폐기물 최종 처분장을 가동하고 있는 곳은 단 한 군데도 없다. 핵발전소 필수냉각수조에 장기간 사용후핵연료를 저장하는 현재의 관행은 사람과 환경에 중대한 리스크를 초래하고 있다. 특히 **사용후핵연료 재처리는 보다 쉽게 퍼질 수 있는 맹독성 방사성 폐기물을 만들어 내기 때문에**, 군사적 핵확산 위험, 노동자와 일반인의 방사성 물질에 대한 노출 증가, 환경의 방사능 오염 등 더 많은 문제를 야기한다.

**핵폐기물 리스크를 제대로 평가하여 위험도를 체계화하기에는 정보가 부족하다.** 핵폐기물 내 핵종 인벤토리 정보를 발표하는 나라는 몇 되지 않는다. 각국 정부 또는 공공기관이 관련 자료를 수집하고 배포하는 데 일차적 책임이 있다. 이 자료는 방사능 노출과 건강상의 영향 간 인과 관계를 제대로 평가하기 위해 필요한 것이다. 현재까지 핵폐기물의 핵종에 대한 포괄적인 위해 방지 시스템은 존재하지 않는다.

**핵폐기물 리스크를 평가할 포괄적인 양질의 연구가 부족하다.** 역학 연구에서 리스크가 도출되기도 하나, 존재하는 몇 안 되는 구체적 연구도 수준이 높지 않다. 가령 일부 연구가 암 발병률의 증가를 시사하지만, 통계적으로 유의미한 결과를 끌어내기에는 모집단이 너무 작다. 소규모 연구를 통합한 메타 분석을 통해 통계적으로 유의미한 결론을 도출할 수 있을 것이다. 현재로서는 핵폐기물의 건강상의 영향에 대한 메타 연구는 거의 전무하다. 또한 리스크를 평가하기 위해서는 방사선량 등을 정확하게 측정하는 것이 필요하다. 전체적으로 핵폐기물 리스크에 대한 정성적/정량적 정보는 매우 부족한 실정이다.

**작성 방식 및 향후 계획**

〈세계 핵폐기물 보고서〉는 각 국가의 핵폐기물 관리, 현황, 역사적 추세 등에 대한 국제적 비교를 수행한다. 본 보고서는 유럽을 중심으로 현재 연구가 미진한 이 분야에 자료를 제공하고자 한다. 유럽 밖에서는 각 정부와 사업자의 핵폐기물 관리 관행에 더욱 큰 편차가 존재한다. 이처럼 특별히 문제가 되는 폐기물에 대해 건전한 중장기 해결책을 마련하는 일은 그 자체로 큰 도전이다. 각 정부는 사회적, 정치적, 기술적 및 재정적으로 상당한 어려움에 부딪히고 있다.

본 보고서는 핵폐기물 문제를 본격적으로 다루는 첫 보고서로서, 다량의 완전한 객관적 사실과 수치를 바탕으로 의미 있는 개관을 제시하는 데 많은 어려움이 있었다. 나라별로 핵폐기물의 정의, 분류, 발생량 보고 방식 등에서 큰 차이를 보였을 뿐 아니라, 자료 부족, 언어 장벽, 나라별 서로 다른 용어 사용, 출처 불일치 등의 문제도 있었다. 이 모든 요인으로 인해 평가하는 작업은 더욱 복잡해졌다.

문제를 극복하고 오류를 피하기 위해, 본 보고서 프로젝트 팀은 자료 작성자, 편집자, 감수자가 공동으로 사용할 구체적인 품질관리 방식을 개발했다. 브뤼셀 워크숍(2019년 2월), 용어집 등 저자 공통의 포맷 개발, 국가별 자료 템플릿 개발, 수차례 피드백을 통한 꼼꼼한 검토 과정 수행 등이 그것이다. 각 장은 해당 주제에 전문성을 지닌 한 명의 저자가 작성했다. 일부 저자는 복수의 장을 작성하기도 했다. 하지만 각 장을 개별 저자의 이름을 걸고 발표하지 않음으로써 고품질의 편집 프로세스가 유지되도록 했다. 각 장은 4단계 검토 과정을 거쳤다.

- 첫째, 대표 편집자와 프로젝트 팀 2인의 1차 편집,
- 둘째, 대표 편집자의 장 교차 검토,
- 셋째, 대표 편집자, 프로젝트 팀 3인 및 외부 감수자 2인의 전체 문건 검토,
- 넷째, 마지막으로 개요서를 작성하기 위한 최종 검토 과정을 거쳤다.

본 보고서는, 이 분야 전문가 십수 명이 1년 반에 걸쳐 수행한 엄청난 작업의 결과로 만들어졌다. 덕분에 보고서가 꾸준히 개선되었다. 저자, 편집자, 감수자 모두 사실관계를 재확인하고 입증하기 위해 최선의 노력을 기울였다. 하지만 이 강도 높은 과정도 보고서에 오류가 없다는 것을 보장하지는 못한다. 오류가 있을 경우, 교정과 개선안을 고맙게 받을 것이다.

〈세계 핵폐기물 보고서〉 첫 판은 본 주제에 대한 향후 연구의 밑거름이 되고자 한다. 보고서 작성 과정에서 대두된 질문은 차기 보고서에서 다루게 될 것이다. 적절치 않은 중간 저장의 장기 사용에 따른 리스크, 예측 가능한 중간 저장 용량 부족 현상, 핵확산, 핵발전소 리스크를 평가할 때 고려해야 할 테러 등의 안보 이슈, 우라늄 채굴 관행, 임의 측정에 의한 일부 폐기물의 관리 해제, 부지 선정 과정의 대중 참여 및 역할 등이 그것이다. 차기 보고서는 캐나다, 중국, 핀란드, 일본, 러시아, 한국, 스페인, 우크라이나 등 여타 핵발전 국가를 포함하도록 지리적 영역을 확대할 수도 있을 것이다.



# 7. 국가별 사례 연구

## 7.1 체코공화국

### 개괄

체코의 핵발전 역사는 1940년대로 거슬러 올라간다. 우라늄광 매장량이 풍부한 체코슬로바키아는 냉전시대 동구권의 주요 우라늄 생산국이었다. 1946년부터 마지막 광산이 폐광된 2016년까지 112,000톤의 우라늄이 채굴되었다.<sup>1</sup> 아직도 가채 우라늄 매장량이 최소 119,000톤 남아 있다. 경제성이 확보된다면 체코는 우라늄 채굴을 재개할 계획을 가지고 있다.

당시 체코슬로바키아는 우라늄광을 우라늄염(Yellowcake)까지 제련하고, 추가 가공은 구 소련에서 이루어졌다. Dolní Rožínka 우라늄광 화학처리장은 복구된 구역의 잔류 우라늄만을 처리하는 정도이긴 하나, 지금까지 운영하고 있다.

Dukovany의 첫 핵발전소는 1985-1987년에 운전을 개시했다. 이 발전소는 구 소련의 가압경수로 VVER 440 모델 4기로 구성되어 있으며 총 설비용량은 2,040MW이다. 이 발전소는 2035-2037년까지 가동할 계획이며 수명 연장도 고려하고 있다. Temelín 핵발전소는 2000-2002년에 운전 개시한 VVER 1000 모델 2기로 구성되어 있으며 총 설비용량은 1,055 MW이다. 한편 연구용 핵반응로 LVR-15와 LR-0가 Řež 연구소에 가동 중이며 프라하의 체코 공과대학교에도 연구용 핵반응로 VR-1이 있다.

2018년 기준 체코 핵발전소는 국내 총 전력 생산량의 1/3에 해당하는 28.2 TWh를 생산했다.<sup>2</sup> 체코공화국 국가에너지기본정책에 의하면 2040년까지 적어도 핵반응로 2기가 추가 건설될 계획이다.<sup>3</sup>

### 폐기물 분류 체계

체코의 폐기물 분류 체계는 IAEA 권고사항을 따른다. 최근에 나온 입법 사항을 보면 매우 일반적인 수준에서 폐기물을 분류하고 있다.<sup>4</sup> 고체 폐기물은 다음과 같이 처분 방식에 따라 분류하고 있다.<sup>5</sup>

- 임시 방사성 폐기물: 최대 5년 보관 후 규제해제 미만의 방사능 농도를 나타내는 폐기물
- 극저준위 폐기물: 임시 방사성 폐기물보다 방사능 농도는 더 높으나 처분 시 별도 특수 조치 불필요

1 NEA and IAEA, 2018, Uranium 2018: Resources, Production and Demand, 2019년 5월 29일 참조, <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2018/7413-uranium-2018.pdf>

2 체코 에너지규제청, 2019년, <체코공화국 전력망 2018년 4Q 보고서>, 2019년 5월 29일 참조, [http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Ctvrletni\\_zprava\\_2018\\_IV\\_Q.pdf/f47bc2a0-05e3-4402-a1db-5b6e2b0a44a4](http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Ctvrletni_zprava_2018_IV_Q.pdf/f47bc2a0-05e3-4402-a1db-5b6e2b0a44a4)

3 체코공화국 정부, 2015년, <국가에너지정책>, 2019년 5월 29일 참조, [https://www.mpo.cz/assets/en/energy/state-energy-policy/2017/11/State-Energy-Policy-2015\\_EN.pdf](https://www.mpo.cz/assets/en/energy/state-energy-policy/2017/11/State-Energy-Policy-2015_EN.pdf)

4 체코공화국 정부, 2016년, <방사성폐기물의 안전한 관리 및 핵시설 또는 3급/4급 작업장의 폐로에 관한 법령 제377호>, 2019년 5월 29일 참조 [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/377\\_Radioactive\\_Waste.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/377_Radioactive_Waste.pdf)

5 체코공화국 정부, 2016년, <방사선 방호 및 방사성 물질 보안에 관한 법령 제422호>, 2019년 5월 29일 참조, [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/422\\_Radiation\\_safety\\_fin.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/422_Radiation_safety_fin.pdf)

- 저준위 폐기물: 임시 방사성 폐기물보다 방사능 농도가 더 높고, 동시에 제한된 양의 장수명 핵종 보유
- 중준위 폐기물: 장수명 핵종 상당량을 보유하여 저준위 폐기물 대비 주변 환경과 강도 높은 격리 필요
- 고준위 폐기물: 보관 및 처분 시 핵종 붕괴열을 고려해야 하는 폐기물. 수용 기준을 충족해야 하며 지하 수백 미터의 심지층 시설에 처분

**폐기물의 양**

유럽연합의 신생 회원국 중 체코공화국은 가장 많은 양의 핵폐기물을 보유하고 있다. 냉전시대에는 사용후핵연료를 공급국가인 구 소련에 반환했다. 그러나 1990년대 초 이후 러시아는 더 이상 반환되는 핵폐기물을 받지 않고 있다. 체코 핵발전소를 운영하는 ČEZ社は 필수냉각수조에서 꺼낸 사용후핵연료를 저장하기 위해 발전소 부지 내에 건식 저장 시설을 건설했다. 이 같은 건식 저장 시설은 Dukovany 발전소에 2개, Temelín에 1개 있으며, 사용후핵연료를 보관할 수 있는 총 용량은 3,310톤이다.

체코 정부는 주기적으로 폐기물 인벤토리를 발표한다. 아래 데이터의 출처는 2016년 12월 31일 기준 폐기물 현황을 기록한 인벤토리이다.

**표9: 2016년 12월 31일 기준 체코공화국의 핵 폐기물 현황**

폐기물 종류	저장 방식	부지	폐기물 양
사용후핵연료(고준위 폐기물)	중간 저장(건식)	Dukovany와 Temelín	1,174 tHM
	중간 저장(습식)	Dukovany와 Temelín	654 tHM
액체 중저준위 폐기물	핵반응로 저장탱크	Dukovany와 Temelín	1,439m <sup>3</sup>
고체 중저준위 폐기물	핵반응로 저장 시설	Dukovany와 Temelín	351.3 t
	천층 저장 시설(처분된 폐기물)	Dukovany	11,520m <sup>3</sup>
극저준위 폐기물			자료 없음

출처: 체코 핵안전청의 2018년 EURATOM 보고 내용

핵발전소 및 연구용 핵반응로에서 나오는 중저준위 폐기물은 주로 부지 내에서 처리된다. 액체 폐기물은 역청으로 처리하거나 증합하고, 고체 폐기물은 압축하거나 200리터 통에 압축하기 전에 소각하는 과정을 거친다. 처리하기 부적합한 중준위 폐기물은 일단 임시 저장한 후 훗날 심지층 처분 시설에 저장할 것이다.

체코 정부는, 40년 동안 Dukovany와 Temelín 발전소를 운영할 경우 약 3,500톤의 사용후핵연료가 발생할 것으로 전망하고 있다.<sup>6</sup> 운전 연수가 1년씩 추가될 때마다 Dukovany 발전소에서 35톤, Temelín 발전소에서 36톤의 핵

6 체코공화국 정부, 2017년, “체코공화국 사용후핵연료 및 방사성 폐기물 관리 정책”, 11월 29일, 2019년 5월 29일 참조, <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcnidokumenty/2017/12/Koncepce-nakladani-s-RaO-a-VJP-v-CR.pdf>

폐기물이 추가로 발생한다. 만약 핵반응로 3기가 추가 건설된다면, 22세기 중반까지 처분되어야 할 사용후핵연료는 거의 10,000톤에 달할 것이다. 사용후핵연료 외에도, 처분장은 해체된 핵발전소에서 나오는 폐기물 4,200톤, 운전 폐기물 140톤 및 기타 폐기물 84톤을 수용해야 할 것이다.

Dukovany 발전소에 마련된 천층 영구 폐기물 저장 시설은 중저준위 폐기물용이다. 총 용량은 55,000m<sup>3</sup>이며, 2016년 말 기준 약 11,500m<sup>3</sup>의 폐기물이 저장되어 있다.<sup>7</sup>

체코의 두 핵발전소에서 (60년 수명기간 동안) 배출될 중저준위 폐기물 총량은 18,300m<sup>3</sup>로 추정된다. 두 발전소의 해체 과정에서 추가로 10,800m<sup>3</sup>이 배출될 것이다.

체코공화국은 발전소 운영에서 발생하는 핵폐기물 외에도 우라늄 채굴에서 발생하는 폐기물이 있다. 국영 DIAMO社가 관리 중인 18개 인공호수는 약 600 헥타르에 이르는 면적이 방사성 슬러지로 채워져 있으며 이 슬러지의 총 부피는 5400만m<sup>3</sup>에 달한다. 잔류 우라늄광석을 포함한, 총 4900만m<sup>3</sup>에 달하는 폐기물 371개 더미도 DIAMO社 소관이다.<sup>8</sup>

### 폐기물 관리 정책 및 폐기물 시설

1997년 원자력에너지 및 전리방사선의 평화적 이용에 관한 법률(이하 원자력법)은 체코공화국 핵폐기물 관리의 법률적 토대를 이룬다. 법률이 정한 바에 따라 방사성폐기물처분청(RAWRA)이 산업통상부 산하에 출범하게 되었다. RAWRA는 사용후핵연료의 안전한 저장 등 핵폐기물 관리 주무부처이다.

핵안전청은 2016년의 원자력법에 따라 처분장 등의 핵 안전관리를 맡고 있다.<sup>9</sup> 이 법은 예전 법의 주요 원칙을 유지하고 있다. 그러나 심지층 처분장 부지 선정에 관한 추가 입법이 필요한 상태이다. 관련 입법은 아직 이루어지지 않았다.

2002년 체코 정부는 전략환경평가에 근거한 환경부의 반대를 무릅쓰고 사용후핵연료 및 방사성 폐기물 관리 정책을 채택하였다. 이 정책에 따라 핵폐기물 관리 원칙을 정의하고 기간을 설정했다. 체코 정부는 2017년에 이 정책을 갱신했다.<sup>10</sup> 이 과정에서 공적 논의는 제한적이었다.

사용후핵연료는 핵발전소를 운영하는 ČEZ社의 책임 하에 발전소 부지의 건식 저장소에 보관된다. 사용후핵연료를 폐기물로 확정하게 되면 당국(RAWRA)이 관할한다. RAWRA는 Dukovany, Litoměřice 및 Jáchymov에 처분장을 운영하고 있으며, Litoměřice와 Jáchymov는 비발전용 폐기물을 처분한다. Skalka 부지에 사용후핵연료 중앙집중식 지하 저장소를 수립할 계획이 있었으나, 이제는 시대에 맞지 않는 계획으로 간주되고 있다. 경제적 이유와 기술적 이유로 인해, 사용후핵연료를 재처리할 가능성은 낮다.

7 체코 방사성폐기물처분청(RAWRA), “처분장에 대하여”, 2019년 5월 29일 참조, <https://www.surao.cz/en/public/operational-repositories/about-repositories/>

8 DIAMO社, 2018년, “환경 모니터링에 관한 포괄적 보고”, 4월 20일, 2019년 5월 18일 참조, <https://www.diamo.cz/en>

9 원자력법에 대한 추가 정보 <https://www.sujb.cz/en/legal-framework/new-nuclear-law/>

10 체코공화국 정부, 2017년, <사용후핵연료 및 방사성 핵폐기물 관리 정책>, 11월 29일 채택

2002년 RAWRA는 체코 지질학 조사에서 권한 바에 따라 심지층 처분장으로 적합한 6개 화강암 부지를 선정했다. 스웨덴 처분기술이 이 프로젝트에 영향을 주었다. 스웨덴의 KBS-3 기술은 사용후핵연료를 벤토나이트 점토로 묻은 통에 담아 지하 500미터에 처분한다. 부지 선정 과정에서 RAWRA는 선정된 지방자치단체와 주민들의 우려를 거의 무시했기 때문에 지방정부와 중앙정부 간 분쟁이 이어졌다. 32개 지방자치단체와 14개 협회로 구성된 심지층처분저지모임(Platform Against Deep Repository)이 이 계획에 반대하고 있다.<sup>11</sup> 이에 따라 이 계획은 몇 년째 차질을 빚고 있는 상황이다. 주민 저항은 적으나 지질 여건은 더 열악한 부지가 차선책으로 고려되고 있다. 2019년 현재 RAWRA가 고려하고 있는 잠재적 부지는 9곳이다.<sup>12</sup>

선정 부지의 적합성은 2025년까지 확정될 예정이며 통과될 것으로 보인다. 2030년에 지하 연구소 건설 작업이 시작되고 2050년에 처분장 건립에 들어간다. 2065년에 운전을 개시하는 것이 목표다.

### 비용 및 자금조달

체코 원자력법은 재무부가 관할하는 국가 “핵 계정”을 설치하도록 규정하였다. 이 계정의 기금은 향후 심지층 처분장의 개발, 운영 및 폐쇄를 포함하여 핵폐기물 관리 목적으로 사용된다. 기금의 주요 수입원은 핵폐기물을 발생시키는 사업자가 지불하는 수수료이다. 오염자부담원칙이 적용되었다고 볼 수 있다. 이 계정은 2018년 기준 269억 코루나(12억 4000만 달러)를 보유하고 있다.<sup>13</sup> 원자력법에 의하면, 수수료는 핵발전소에서 생산하는 전력 1 MWh당 55 코루나(약 2.53달러)이며 연구용 핵반응로에서 생산하는 열에너지 1 MWh당 30코루나(약 1.38달러)이다. 여타 핵폐기물 생산자는 처리 비용을 충당할 수 있는 부과금을 1회성으로 납부해야 한다.<sup>14</sup>

체코 정부는 중저준위 폐기물 저장 비용으로 45억 7000만 코루나(2억 1000만 달러)를, 사용후핵연료 및 고준위 폐기물 저장 비용으로 1114억 코루나(51억 3000만 달러)를 추산하고, ČEZ社가 운영비용에서 지불하도록 했다. 체코 공과대학교 분석에 의하면, 이 금액은 미래에 실제 발생할 비용을 충당하기에 역부족이다.<sup>15</sup>

미래 핵시설 폐로와 관련된 또 다른 재정 메커니즘도 있다. 핵시설 운전 허가를 취득한 자는 폐로 비용을 적립하고 관련 일정을 수립해야 하며, 이에 대해 적어도 5년에 한 번 핵안전청의 승인을 받아야 한다. RAWRA는 사업자가 별도 특수 계정에 관련 충당금을 보유하고 있는지 확인해야 한다.

ČEZ社는 Dukovany 발전소 폐로를 위해 매년 2억 9백만 코루나(960만 달러)를 책정해 두고 있다. 2016년 12월 31일 기준 60억 코루나(2억 7600만 달러)가 마련되었으며 발전소가 폐쇄될 시점에는 224억 코루나(10억 달러)에 이를 예정이다. Temelín 발전소 폐로를 위한 총 유보금은 184억 코루나(8억 4700만 달러)에 이를 예정이다. 2016년 12월 31일 기준 ČEZ社의 해당 발전소 유보금은 28억 코루나(1억 2900만 달러)며 매년 1억 9850만 코루나(910만

11 심지층처분저지모임 회원 명단 <http://www.platformaprotiulozisti.cz/cs/clenove-platformy/>

12 체코 방사성폐기물처분청(RAWRA) 홈페이지, “체코공화국 DGR”, 2019년 5월 29일 참조, <https://www.surao.cz/en/public/deep-geological-repository/dgr-in-czech-republic/>

13 RAWRA, 2018년, <방사성폐기물처분청 2017년 연례 활동보고서>

14 체코공화국 정부, 2017년, 법령 제35호

15 Knápek, J., et al. 2017, “Updated Economic Model and Fee Calculation for the Nuclear Account for LLW/ILW and HLW/SNF”, Technical University Study

달러)를 확보하고 있다.<sup>16</sup>

## 요약

체코공화국의 핵폐기물 관리는 아직 해결되지 않은 몇 가지 문제를 안고 있다. 기본적으로 정부가 핵폐기물 최종 처분에 대한 책임을 지고, 폐기물 생산자가 처분 비용을 부담한다. 이를 위해 핵폐기물 생산자는 미래 처분 비용을 충당할 수 있도록 국가 핵폐기물 기금에 수수료를 납부한다. 그러나 핵폐기물 생산자가 지불하는 수수료만으로는 핵 시설 해체 후 발생하는 모든 비용을 충당할 수 없다.

정부 계획은 2065년까지 고준위 핵폐기물 심지층 처분장 운영을 시작하는 것이다. 그러나 부지 선정 과정이 계획보다 늦어지고 있으며 향후 영향을 받을 수 있는 지역사회의 반대는 커지고 있다. 부지 선정 과정을 법률로 규정할 처분장 관련 법안이 오랜 기간 계류되고 있다. 부지 선정 기준이 모호하여 부지가 장기적 안전성이 아닌 주민 수용성을 바탕으로 선정될 실질적 위험이 상존한다. 사용후핵연료의 장기적 중간 저장에 대한 가능성은 아직 공론화되지 않았다.

이에 비해 중저준위 폐기물은 잘 관리되는 편이다. 사실상 포화 상태인 작은 규모의 처분장은 곧 폐쇄될 예정이다. RAWRA는 처분장 두 곳을 운영할 계획이다. 한 곳은 기관 폐기물을 처리하는 Richard 처분장이며, 다른 한 곳은 핵발전소의 중저준위 폐기물을 처리하는 Dukovany 처분장이다.

16 체코 핵안전청, 2018년, <체코공화국 국가보고서>, 사용후핵연료 및 방사성 폐기물의 책임 있고 안전한 관리에 관한 유럽공동체 체계를 수립한 EU 이사회 지침 2011/70/EURATOM(2011년 7월 19일) 제14조 1항에 의거하여 작성, 2019년 5월 29일 참조, [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/narodni\\_zpravy/EuroNZ\\_VP\\_RAO\\_2\\_1A.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/narodni_zpravy/EuroNZ_VP_RAO_2_1A.pdf)

## 7.2 프랑스

### 개괄

프랑스의 핵 역사는 2차 세계대전의 결과로 핵무기를 개발하면서 시작되었다. 프랑스는 군사용 핵물질을 생산하는 소형 핵반응로 6기를 운영한 후, 1960년대에서 1970년대 초반 사이 플루토늄 및 전력 생산용 가스냉각 핵반응로 6기를 추가 건설하였다. 당시 프랑스는 서로 다른 3가지 종류의 핵반응로를 건설하기도 했다. 이 초창기 핵반응로는 현재 모두 폐쇄되었으며 폐로의 여러 수순에 들어가 있다.

이후 프랑스는 19개 부지에 설비용량 900~1,450MW의 가압경수로 58기를 건설했으며, 프랑스전력공사(EDF)가 모든 핵발전소를 운영하고 있다. 이 19곳의 핵발전소는 1977년에서 1999년 사이에 가동을 개시했으며 여전히 현재도 운전 중이다. 이들 핵발전소가 국내 전력 생산의 72%를 담당하고 있다.<sup>17</sup>

2007년 EDF는 유럽형 가압경수로를 Flamanville에 짓기 시작했다. 애초 건설비 33억 유로(37억 달러)에 2012년 가동 개시를 목표로 삼았으나, 이제 그 비용은 적어도 109억 유로(122억 달러)로 증가했고 발전소는 빨라야 2022년 말에 가동될 것으로 보인다.<sup>18</sup>

프랑스는 2001년까지 우라늄을 채굴했으며 당시에 수입량이 생산을 능가했다. 프랑스는 핵연료 주기의 모든 단계에서 대규모 운전 역량을 개발해왔다. 또한 군사 목적의 핵시설도 운영 중이다.

방사성 폐기물의 주요 생산자는 EDF, 핵연료 주기 국영기업인 Orano社, 그리고 원자력 및 대체에너지 위원회(CEA, 이하 원자력위원회)이다. 이들 각 기업은, 방사성 폐기물 관리를 관할하는 공공기관인 ADNRA로 폐기물을 이전하여 처분하기 전까지 핵폐기물 관리에 대한 책임을 진다. ANDRA는 원자력위원회 산하 부처로서, 1979년에 창설되어 1991년 독립한 공공기관이다.

프랑스는 국가 정책의 일환으로 사용후핵연료를 재처리한다. 대부분의 산화우라늄(UOX)은 La Hague에서 재처리된다. 이제는 대부분의 연료가 프랑스산이지만, 과거 La Hague에서는 외국 연료도 상당량 재처리했다. 분리된 플루토늄 대부분은 열화 우라늄과 함께 혼합산화물핵연료(MOX)로 재사용된다. MOX는 프랑스의 가장 오래된 22개 핵반응로의 연료로 투입되고 있다(프랑스 정부는 최신 1,300 MW급 핵반응로에도 MOX를 사용할 계획을 수립했다). 일부 재처리된 농축우라늄(REU 연료)이 2016년까지 핵반응로에 연료로 투입된 적이 있으며, EDF는 2023년부터 이 연료 일부를 다시 사용할 준비를 하고 있다.

프랑스에는 핵 개발의 세월만큼 복잡한 방사성 폐기물이 다량 누적되어 있다. 대부분의 단기 수명 핵폐기물을 수용하는 처분 시설은 운영 중이나, 장수명 중고준위 폐기물을 위한 심지층 처분장 개발 계획은 기술적 문제와 지역사회 반발로 지연되고 있다.

<sup>17</sup> 전력송전네트워크(RTE), 2018년, <2018년 2월 전력수급 현황>

<sup>18</sup> World Nuclear News, 2019년, "Weld repair to delay Flamanville EPR start-up", 6월 20일, 2019년 8월 22일 참조, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Weld-repairs-to-delay-Flamanville-EPR-start-up>

### 폐기물 분류 체계

프랑스의 핵폐기물 분류는 IAEA 권고사항을 준수하면서 몇 가지 고유한 특색을 지닌다. 바로 방사능 농도와 수명을 고려한 것이다. 주요 임계 값은 폐기물 안에서 수명이 가장 긴 핵종의 방사능 농도 및 수명에 기반한다. 아래 [표 10]에서 보듯 수명은 3가지로, 방사능 농도는 4가지로 분류한다. IAEA 가이드라인과 다르게 중준위 폐기물을 장수명 및 단수명으로 구분하고 있다. 대부분의 국가에서 극저준위 폐기물의 일부는 일반 쓰레기 매립장에서 처리하도록 하고 있으나, 프랑스는 극저준위 폐기물에 면제 임계치를 두지 않는다. 이 분류 체계는 구체적인 폐기물 관리 해법을 도출하기 위한 것으로, 일부는 이미 실행 중이며 나머지는 아직 연구단계이다.

[표 10] 2018년 프랑스 핵폐기물 분류 및 관리 현황

	반감기	장수명	단수명	극단수명
		> 30년	≤ 30년 > 100일	≤ 100일
고준위 폐기물	> 109 Bq/g	심지층 처분 연구소(Bure)의 (2006년법 제3조에 의한) 연구 진행		방사성 자연 붕괴로 관리
중준위 폐기물	≤ 109 Bq/g > 106 Bq/g	연구 중 (2006년법 제3조)	표층 처분 폐쇄 시설 1개소: CSM, 운영 시설 1개소: CSA	
저준위 폐기물	≤ 106 Bq/g > 102 Bq/g	전용 천층 처분장 연구 중 (2006년법 제4조)		
극저준위 폐기물	≤ 102 Bq/g	전용 표층 처분장 1개소 운영 중 (Morvilliers)		

출처: ANDRA 2019년 방사성 물질 및 폐기물 국가 인벤토리

주: 현재 특수 관리방안이 연구 중에 있는 트리튬 오염 물질 등 특정 폐기물은 중저준위 표층 처분장에서 처분되지 않는다.

CSA = L'Aube 저장 센터, CSM = La Manche 저장 센터

### 폐기물로 분류되지 않는 기타 방사성 물질

2006년 제정된 방사성 폐기물 관리에 관한 법률에 따르면, “추후 재사용이 계획되거나 고려되는” 물질은 핵물질로 간주하며 폐기물로 정의하지 않는다.<sup>19</sup> 산업계에서 구체적이거나 현실적인 계획이 없더라도 해당 물질을 이용할 의지를 표명하는 것만으로도 핵물질로 분류된다. 따라서 모든 종류의 사용후핵연료, 분리된 플루토늄, 재처리된 우라늄 및 열화 우라늄은 폐기물로 간주하지 않기 때문에 핵폐기물 분류에 포함시키지 않는다. 이 물질 중 일부는 향후 재사용되지 않을 가능성이 제기되어 2016년 새로운 법안이 통과되었다.<sup>20</sup> 이 법률에 따르면, 프랑스 정부는 안전당국 ASN의 권고 하에 핵‘물질’을 핵폐기물로 전환할 수 있다. 그러나 아직까지 실제로 전환한 사례는 없다.

방사성 가스 및 폐수는 폐기물 분류 시스템에 포함되지 않는다. 이들은 핵 시설(대부분이 La Hague 재처리 시설)의 여러 단계에서 생산되는데 (일부는 붕괴되도록 한 동안 저장한 후) 환경에 희석하여 관리하고 있다.

### 폐기물의 양

ANDRA는 3년 주기로 핵물질 및 핵폐기물 인벤토리를 발표한다. 마지막으로 포괄적 인벤토리가 공개된 것은 2018년으로, 2016년 말의 데이터를 제공한다. 일부 카테고리에 대해서는 2019년에 요약 발표된 자료로 2017년 말의 데

19 프랑스 정부, 2006년, <방사성 물질 및 방사성 폐기물의 지속가능한 관리에 관한 법 제2006-739호(6월 28일)>

20 프랑스 정부, 2016년, <핵물질 관련 법령 제14조(제2016-128호, 2월 10일)>

이터를 확인할 수 있다.

ANDRA는 2017년 12월 기준으로 고준위 폐기물을 3,740m<sup>3</sup>, 장수명 중준위 폐기물을 42,800m<sup>3</sup>, 장수명 저준위 폐기물을 93,600m<sup>3</sup>, 단수명 중저준위 폐기물을 938,000m<sup>3</sup>, 극저준위 폐기물을 537,000m<sup>3</sup>로 추정했다. 분류되지 않은 폐기물도 1,770m<sup>3</sup> 있다. 구체적 정보는 [표 11]에 제시되어 있다.

**[표 11] 2017년 12월 기준 프랑스 핵폐기물**

폐기물 종류	저장 방식	부지	폐기물 양
사용후핵연료 (고준위 폐기물)	중간 저장(습식)	핵발전소 부지(핵반응로 1기당 필수냉각수조 1개)	4,040 tHM
	중간 저장(습식)	La Hague	9,788 tHM*
	중간 저장(습식)	Creys-Malville**	106 tHM
	중간 저장(일부 습식, 일부 건식)	CEA 부지	55 tHM
고준위 폐기물	중간 저장	La Hague, Marcoule, CEA 부지	3,740m <sup>3</sup>
장수명 중준위 폐기물 (사용후핵연료 처리 중에 발생)	중간 저장	핵발전소 부지, La Hague, Marcoule, CEA 부지, 연구센터, Bouches-du- Rhone	42,800m <sup>3</sup>
장수명 저준위 폐기물	중간 저장	핵발전소 부지, La Hague, Marcoule, CEA 부지, 연구센터, Le Bouchet	93,600m <sup>3</sup>
트리튬 오염 폐기물	중간 저장	Côte D'Or	5,640m <sup>3</sup>
단수명 중저준위 폐기물	중간 저장	핵발전소 부지, 처리 공장, Marcoule, 연구센터, 우라늄 공장	85,400m <sup>3</sup>
	처분된 폐기물	폐쇄된 지상 처분장(CSM)	527,000m <sup>3</sup>
	처분된 폐기물	운영 중인 지상 처분장(CSA)	326,000m <sup>3</sup>
분류되지 않은 폐기물		명명되지 않은 부지	1,770m <sup>3</sup>
극저준위 폐기물	중간 저장	처리 공장	185,000m <sup>3</sup>
	처분된 폐기물	운전 중인 지상 처분장(CIRES)	352,000m <sup>3</sup>
U-포함 폐기물	쓰레기장 및 슬러리 처리 시설		5,000만 톤
미사용 방사성 물질***			1,700,000m <sup>3</sup>
미래 폐기물 추산	고준위: 12,000m <sup>3</sup> , 장수명 중준위: 72,000m <sup>3</sup> , 장수명 저준위: 190,000m <sup>3</sup> , 단수명 중저준위: 2,000,000m <sup>3</sup> , 극저준위: 2,300,000m <sup>3</sup>		

출처: ANDRA 2018년 자료 및 프랑스 정부 2017년 자료를 바탕으로 자체 편집

주: \* 외국 SNF 30 tHM 포함 \*\* Creys-Malville는 애초 Superphénix 용이었던 비조사 연료 70 tHM도 저장 중 \*\*\* 2015년 말 기준  
CEA = 원자력 및 대체에너지 위원회

ANDRA 자료는 외국산 폐기물도 프랑스 영토에 저장되고 있다면 포함시킨다. 외국산 폐기물은 주로 외국 거래선과의 사용후핵연료 재처리 계약과 관련된다. 프랑스 법은 외국 핵폐기물의 자국 영토 내 처분을 금지하고 있기 때문

에, 이 같은 재처리 작업으로 발생한 고체 폐기물은 원산지 국가로 반환해야 한다. 그러나 운송되는 폐기물의 부피를 줄이기 위해 폐기물 간 대체가 이루어지기도 한다. 이처럼 대체라는 방식을 통해 외국 거래선이 수용하지 않는 (역청화한 중준위 폐기물 등) 문제가 많은 폐기물 운송을 피할 수도 있다. 게다가 예전부터 오늘날까지 외국 핵물질 관련 활동으로 인해 핵폐기물(비조사 증식로 연료 등)과 “재사용 가능한 물질”(재처리된 우라늄 등)이 양산되었는데, 사실 활용처가 없음에도 이제 프랑스산으로 분류되고 있다.

고준위 폐기물은 거의 전적으로 사용후핵연료 재처리 과정에서 발생한다. 2018년 말 기준, 프랑스 및 외국산 연료 34,000 tHM 이상이 La Hague에서 재처리되었다. 그 결과 양산된 고준위 폐기물의 약 95%는 유리화 폐기물 패키지로 처리되어 있다. 나머지는 유리화 공정에 앞서 냉각수조에 저장되어 있다.

장수명 중준위 폐기물의 처리방법은 다양하다. 일부는 최종 처분을 위해 처리되었고, 일부는 전처리 단계이거나 처리를 전혀 거치지 않은 폐기물 상태 그대로 놓여 있다. 이 폐기물은 금속 드럼통에 압축되거나, 슬러지 등 기타 본연의 형태로 저장되거나, 또는 역청화/유리화/고체화 상태로 처리될 수 있다. 그러나 일부 구형 폐기물 패키지가 슬러지는 재가공되기 전에 형질 확정이 필요하다. 화재 위험성이 있는 역청화한 다량의 폐기물은 재가공하는 것이 특히 어렵다.

[표 11]의 미래 폐기물 양은, ANDRA가 아래 전제에 기초하여 국내 운전 중인 58기의 핵반응로 및 관련 시설에서 발생할 것으로 추정된 것이다.

- 기존 핵반응로는 50~60년 동안 운전한다.
- MOX를 포함한 모든 사용후핵연료는 재처리한다.
- 모든 “재사용 가능한” 핵물질은 기존 핵반응로나 미래 핵반응로에 투입하며, 재분류하지 않는다(이 가정 에 따라 발생하는 폐기물은 미포함).
- 현재까지의 양과 비교할 때 미래에 훨씬 더 많은 핵폐기물이 발생할 것이다. 고준위 폐기물은 3배, 장수명 중준위는 1.7배, 장수명 저준위 및 단수명 중저준위는 2배, 극저준위는 4배 이상 증가할 것으로 전망된다.

### 폐기물로 분류되지 않는 기타 방사성 물질

그사이 핵주기 시설 운전 및 재처리 전략으로 재사용이 가능하다고 간주되는 물질이 쌓이고 있다. ANDRA 인벤토리<sup>21</sup>에 의하면 2017년 말 기준 프랑스가 저장하고 있는 핵물질은 다음과 같다.

- 사용후핵연료 14,189 tHM: 현재 폐쇄된 가압경수로를 위시한 여러 핵반응로에서 발생한 것으로, 군사적 활동으로 발생한 사용후핵연료 194 tHM를 제외한 수치이다. 이 수치는 매년 증가할 것이다. 핵반응로에서 발생하는 양이 La Hague에서 재처리하는 규모를 20%가량 상회하기 때문이다(최근 평균치 비교는 1,200 tHM 대 1,000 tHM 임).
- 열화 우라늄 315,000 tHM: 대부분 Tricastin와 Bessines에 저장되어 있다.
- 재처리 우라늄 30,500 tHM: Tricastin와 La Hague에 저장되어 있다. 2016년 말 기준 2,700 tHM은 외국 소유분이다. 과거 프랑스는 외국 소유의 재처리된 우라늄 상당량을 관할하여 보관했으며 이 중 일부는 재농축을 위해 러시아로 보내기도 했다.

21 ANDRA, 2019년, <2018년 국가 방사성 물질 및 방사성 폐기물 인벤토리 - 핵심 사항, 1월>

- 분리된 플루토늄 54 tHM

최근 몇 년 사이 사용후 UOX 연료가 많이 증가했다. 사용후 연료의 증가는 대부분 MOX 및 재처리농축우라늄(REU)에 기인한다. 두 연료 모두 재처리하지 않는다. 2017년 말 기준, 사용후 MOX는 1,910 tHM이며 사용후 REU는 578 tHM에 달한다.

프랑스 정부에 따르면 2016년 말 기준, 분리된 플루토늄과 비조사 플루토늄 연료 및 폐기물을 포함한 비조사 플루토늄 전체 재고량은 65.4톤이다.<sup>22</sup> 이 플루토늄 재고는 비조사 플루토늄 누적을 금지한 정부의 수급 균형 방침에도 불구하고 연평균 1톤 이상씩 증가하고 있다. 증가세의 주요 원인은 최근 몇 년 사이 플루토늄 비중이 높은 MOX 연료 가공 폐기물이 증가했기 때문이다. 또한 프랑스는 2016년 말 기준 외국업체 소유의 플루토늄을 16.3톤 보유하고 있었다.

마지막으로 2001년까지의 우라늄 광산 운영으로 프랑스는 약 5000만 톤의 우라늄 분쇄 찌꺼기를 축적하게 되었다. 이 폐기물은 16개 부지에서 처분되었다. 이외에도 여러 광산에 2억 톤의 폐광석이 남아 있다.

### 폐기물 관리 정책 및 폐기물 시설

지난 수십 년 동안 사용후핵연료 재처리가 프랑스의 핵폐기물 및 핵물질 관리 정책을 주도해 왔다. 이런 이유로 프랑스의 핵시설 체계 및 규제는 매우 복잡하다.

프랑스의 핵폐기물 관리를 위한 법률 및 규제의 틀은 폐기물이 생산된 지 몇십 년이 흐른 뒤에 정비되었다. 방사성 폐기물 관리 연구에 관한 최초의 법률은 1991년에 시행되었다.<sup>23</sup> 최초의 포괄적 접근은 2006년에 이르러 방사성 물질 및 방사성 폐기물의 지속가능한 관리에 관한 법으로 마련되었다.<sup>24</sup> 이를 계기로 핵물질 및 방사성폐기물 국가계획(PNGMDR)이 수립되어 다원적 실무그룹의 정기 토론, ASN 및 정부의 3년 주기 공동보고서 편찬, 핵시설 운영자에 대한 보고서 권고사항의 주기적 입법화 등과 같은 노력이 이루어졌다.<sup>25</sup>

재처리 전략은 사용후핵연료 및 기타 핵물질(분리된 플루토늄 및 재처리 우라늄 등)의 축적을 야기했다. “재사용” 지위 덕택에 폐기물 처분의 부담은 덜었으나, 전용 보관 용량의 포화 압박은 늘어날 수밖에 없다. 가압경수로에서 발생한 사용후핵연료의 약 1/3이 부지 내 필수냉각수조에 저장되어 있고, 나머지 2/3는 La Hague의 냉각수조에 저장되어 있다. 적어도 2030년까지는 포화 상태에 이를 것으로 보여 핵발전소 운영에 도전이 되고 있다. 이에 따라 EDF는 핵시설 중 한 곳에 10,000 tHM 용량의 중앙 사용후핵연료 냉각수조를 신규 건설할 계획이다. 이 냉각수조는 한 세기 이상 운영될 수 있도록 설계될 것이다. 프랑스는 사용후핵연료의 건식 저장 방식은 포기했다.

장수명 폐기물 역시 저장 시설에서 증가하고 있다. 이 폐기물은, 대부분의 고준위 및 중저준위 폐기물이 발생하는 La Hague와 프랑스 2대 저장량을 지닌 Marcoule의 저장 시설에 축적되고 있다. 단수명 폐기물만 유일하게 최종

22 IAEA, 2017년, <플루토늄 관리 정책에 대한 프랑스 정부의 보고 INFCIRC/549/Add.5/21>, 9월 29일

23 프랑스 정부, 1991년, <방사성폐기물관리연구법, 제91-1381호(12월 30일)>

24 프랑스 정부, 2006년, <방사성 물질 및 방사성 폐기물의 지속가능한 관리에 관한 법, 제2006-739호-(6월 28일)>

25 2016-2018년 프랑스 국가 방사성 물질 및 방사성 폐기물 관리 계획 최신판 참조 <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/PNGMDR%202016-2018.pdf>

처분장이 존재한다. 단수명 중저준위 폐기물은 1994년까지 CSM으로 불리는 La Manche 표층 처분장으로 보내졌다. 이곳은 폐기물이 527,000m<sup>3</sup> 이상 포화되어 지금은 폐쇄되었다. 여기 저장된 폐기물의 2/3는 핵발전 부문에서 발생한 것이다. 단수명 중저준위 폐기물은 이제 l'Aube의 표층 처분장(CSA)으로 이송되고 있다. 이 처분장의 용량은 100만m<sup>3</sup>이며, 2017년 말 기준 33%가 포화된 상태이다. 단수명 극저준위 폐기물은 2003년 이래 Morvilliers에 있는 CIRES로 불리는 산업시설로 보내져 분류 및 처분되고 있다. 총 용량이 650,000m<sup>3</sup>인 이 산업시설은 2017년 말 기준 54%가 포화되었다.

2006년 방사성폐기물관리법은 장수명 저준위 폐기물 전용 천층 처분 원칙을 규정했다. 이 전용 천층 처분장은 2013년까지 운영을 시작할 계획이었으나, 기술적 문제와 주민 수용성의 벽에 부딪혀 해당 프로젝트가 유보되었다. 천층 처분장 연구가 진행 중이나, 관리 전략(부지 개수, 위치, 기술적 개념)은 아직 결정되지 않았다. 처분장이 마련될 때까지 장수명 저준위 폐기물은 대부분 발생한 부지에 저장되고 있다.

2006년 법에 규정된 바에 따라, 고준위 폐기물 및 장수명 중준위 폐기물을 위한 CIGEO란 이름의 심지층 처분장이 계획 중이다. 대부분(85%)의 고준위 폐기물은 La Hague에 있고 나머지는 Marcoule에 있다. 장수명 중준위 폐기물도 상당 부분(44%) La Hague에 있고, 나머지는 Marcoule(34%)와 Cadarache(16%)에 저장되어 있다. CIGEO 건설은 2022년에 착수할 예정이다.

CIGEO 부지는 1990년대에 선정되었다. 프랑스 북동부에 위치한 작은 마을 Bure가 점토 지질 연구소 부지로 선정되어 1999년에 허가를 받았을 때 결정된 것이다.<sup>26</sup> 1991년 방사성폐기물관리연구법은 화강암질 지형을 탐사하기 위해 별도의 연구소 설립을 권고하였으나 후보지 주민 반대로 무산되었다. 2010년 ANDRA는 추가 심지층 탐사를 위해 Bure 인근을 '특수 관심 지역(ZIRA)'으로 선포하였고, CIGEO의 정확한 위치는 몇 년 후 결정되었다.<sup>27</sup> 본격 운영에 앞서 1차 시험 산업 단계를 거친다. 이 시험 단계를 통해 최소 한 세기 동안 적용할 회수성 및 가역성의 정의된 수준을 보장하게 된다.<sup>28</sup> CIGEO에서는 2150년 무렵까지 폐기물이 처분되다가 이후 폐쇄될 예정이며, 폐쇄된 후에는 수세기 동안 모니터링될 것이다.<sup>29</sup>

붕괴열 방출량이 막대한 폐기물은 CIGEO에 처분되기 앞서 수십 년간 냉각해야 한다. 첫 번째 재처리 기간에 발생한 수만 톤의 역청화 폐기물은 화재 위험이 존재한다. 화재 위험과 같은 문제에 대처하느라 처분장 건설은 또한 기술적으로 지연될 수 있다. 이렇게 지연되면 처분장 완공 시기가 고준위 및 장수명 중준위 폐기물 저장 시설의 계획된 운영 기한을 초과할 수도 있다. 이에 따른 저장 시설 보강이나 대체 계획은 아직 없다.

일부 "재사용 가능 물질"은 실제 재사용 빈도가 저조하여 재분류할 필요가 있을지도 모른다. 그러나 해당 물질의 관리는 현재 CIGEO 설계 하에서 고려되고 있지 않다. 뿐만 아니라 기타 가능한 옵션에 대한 연구를 통해 해결되고 있지 않다. 처분될 폐기물 인벤토리에 이 물질의 일부를 포함하려면, CIGEO의 설계 규모를 오늘날 고려하고 있는 심지층 처분장의 한계까지 증설해야 할 것이다.

26 프랑스 정부, 1999년, < ANDRA의 방사성 폐기물 처분 가능 심지층 구조 탐사를 위한 Bure 지하 연구소 설치 및 운영 승인령 >

27 ANDRA, 2009년, <회수 가능 심지층 폐기물 프로젝트 - 연구 및 기타 시나리오를 위한 특수관심지역 제안>, 전략위원회 보고서, <https://www.andra.fr/stockage-profond-hama-vl-le-projet-se-precise>

28 프랑스 정부, 2016년, < 법률 제2016-1015호 장수명 중고준위 폐기물을 위한 가역적 심지층 처분 시설에 대한 설비 면허 규정 >

29 ANDRA 홈페이지, "프로젝트 단계", 2019년 2월 22일 참조 <https://www.andra.fr/cigeo/les-installations-et-le-fonctionnement-du-centre/les-differentes-phases-du-projet>

**비용 및 자금조달**

프랑스의 구체적 폐기물 관리 비용에 대해 나와 있는 포괄적 추산은, 2012년 편찬되어<sup>30</sup> 2014년 개정된<sup>31</sup> 프랑스 감사원 자료가 전부다([표 12] 참조). 이에 따르면, 방사성 폐기물의 총 관리 비용은 2013년 말 기준 320억 유로(440억 달러)에 달하며, 이 가운데 80%는 EDF에 의해, 11%는 구 Areva(현 Orano)에 의해, 나머지 9%는 원자력위원회에 의해 초래되었다.

**[표 12] 2013년 기준 프랑스의 총 핵폐기물 관리 비용 추산**

총 비용 (1백만 유로) 2013년	EDF	CEA	AREVA	ANDRA	총계
장기 폐기물 관리	24,370	1,995	1,885	42	28,292
이 가운데, 고준위 및 장수명 중준위	21,981	1,626	1,154	1	24,762
장수명 저준위	832	74	27	17	950
극저준위, 단수명 저준위, 단수명 중준위	1,557	295	704	24	2,580
폐쇄 이후 비용	1,208	411	42	42	1,703
회수 및 처리(기존 폐기물)	0	512	1,541		2,053
<b>총계</b>	<b>25,578</b>	<b>2,918</b>	<b>3,468</b>	<b>84</b>	<b>32,048</b>

출처: 감사원(Cour des Comptes) 2014년

극저준위 및 단수명 중저준위 폐기물을 처분하는 기존 처분장이 폐기물 용량의 90%를 처분하지만, 이 처분장 3곳(CIRES, CSM, CSA)의 금액은 총 비용의 10%가 안 되는 26억 유로(36억 달러)밖에 되지 않는다. 예상 비용의 절대 비중은, 장수명 폐기물의 처분(250억 유로 또는 345억 달러 이상)과 과거 폐기물의 회수 및 처리(약 20억 유로 혹은 28억 달러)가 차지한다. 이 두 견적 모두 큰 불확실성을 지닌다. 프랑스 정부는 CIGEO에 고준위 및 장수명 중준위 폐기물을 처분하는 비용으로 250억 유로(320억 달러)가 투입될 것으로 전망했지만, 이것은 단지 사업자와 ANDRA 간 격차가 큰 추산을 둘러싸고 벌어진 분쟁을 임의로 봉합했을 뿐이다.<sup>32</sup>

게다가 이 추산의 근거가 되는 미래 인벤토리는 사용후핵연료를 모두 재처리한다는 전제 하에 구축된 것이다. ANDRA가 제공한 과거 비용 추산을 보면, 재처리하지 않은 우라늄과 MOX 연료를 포함시키면 CIGEO 예상 비용은 두 배 이상 증가할 것이다. 현재의 총 사용후핵연료 관리비용은 이를 모두 재처리한다는 전제 하에 추산된 것이다.

2006년 제정된 방사성폐기물관리법에 의하면 핵반응로 운전자는, 3년마다 갱신되어야 하는 보고서를 위해 필요한 정보를 정부에 제출해야 한다. 법 규정에 명시된 바에 따르면, 폐기물 관리를 위한 전용 자산은 충분한 수준의 안전성, 다양성, 유동성 및 수익성을 갖추고 총당금을 커버할 수 있어야 한다.

프랑스 감사원은 2014년 개정 보고서에서 미래 폐로 및 방사성 폐기물 관리와 관련된 비용을 커버하기 위한 총당금을 2013년 말 기준 437억 유로(603억 달러)로 추산했다. 그 중 110억 유로(152억 달러)는 핵폐기물 관리에, 101억

30 프랑스 감사원(Cour des Comptes), 2012년, <핵발전 비용>, 공개 보고서  
 31 프랑스 감사원(Cour des Comptes), 2012년, <핵발전 비용 2014년 갱신>, 프랑스 국회 조사위원회 보고  
 32 프랑스 정부, 2016년, <고준위 및 장수명 중준위 방사성 폐기물의 장기적 관리의 이행 비용에 대한 고시 (1월 15일)>

유로(139억 달러)는 사용후핵연료 관리에 책정되었다. EDF의 사용후 MOX 및 URE 연료를 위한 총당금은, 해당 연료를 재처리하지 않고 심지층 처분한다는 “신중한” 가정 하에 산출된 것이기에 CIGEO 비용 산출에 적용된 가정과 일치하지 않는다. 적용된 할인을 덕분에 이 총당금(EDF 75%, 구 Areva(현 Orano) 14%, 원자력위원회 11% 부담)은 미래 비용 추정 금액의 절반에 달한다.

**[표 13] 2013년 기준 프랑스의 폐로 및 폐기물 관리 총당금**

총당금(백만 유로)	EDG	CEA	AREVA	ANDRA	총계
폐로	13,024	2,931	3,661		19,616
사용후연료 관리	9,779	342			10,121
폐기물 관리	7,542	1,311	2,113	47	11,103
이 가운데, 회수 및 재포장		432	1,240		1,672
장기 폐기물 관리	7,397	830	831	36	9,094
폐기물 처분 시설 폐쇄 후 관리 비용	145	49	42	10	246
노심	2,313				2,313
기타		152	483		635
<b>총계</b>	<b>32,658</b>	<b>4,736</b>	<b>6,258</b>	<b>47</b>	<b>43,699</b>
비중	75%	11%	14%		100%
총당금/총 비용	48%	66%	52%	56%	50%

출처: 감사원(Cour des Comptes) 2014년

일각에서는 미래 비용을 커버하기에 총당금이 턱없이 부족하며 불확실성이 매우 크다고 주장한다. 정부의 사업자 통제를 평가할 목적으로, 독립기구인 핵시설 폐로 및 핵폐기물 관리비용 자금조달 국가평가위원회(CNEF)가 2011년에 설립되었다. 이 위원회는 국회의원과 업계 전문가로 구성되어 3년마다 보고서를 발간하도록 되어 있다. 그러나 현재까지 2012년에 발간한 보고서 한 건이 전부이다.<sup>33</sup> 이 보고서는 정부가 권한을 행사할 수단이 부족하고, 사업자의 평가자료는 불확실성을 감안하지 않았으며, 행정 당국에 제공한 정보는 자산에 대한 규제 현황을 확인하기에 부족하고, CNEF는 업무 빈도가 낮아 전문성 유지에 어려움을 겪고 있다고 서술했다.

**요약**

프랑스 핵프로그램은 시초는 군사용이었으나 국가 에너지 정책의 초석으로 급격히 전환되었다. 이 핵프로그램을 통해 수많은 핵반응로와 핵시설이 건설되어 프랑스는 유럽 내 제1의 핵폐기물 및 핵물질 보유국이 되었다. 프랑스는 사용후핵연료 재처리에 기반한 관리 체계를 전략적으로 선택하여 복잡다단한 폐기물 및 핵물질 분류 체계를 만들어 냈고, 결국 저장 시설에 장수명 중고준위 핵폐기물이 지속적으로 증가하게 되었다.

프랑스에서 핵과 관련된 역사적 의사결정은 대부분 관련 법률 및 규제의 틀이 갖추어지기 전에 나온 것이었다. 이 틀은, 1991년 방사성 폐기물 관리 연구에 관한 법으로 시작하여 2006년 방사성폐기물관리법의 제정으로 구축되었다. 이후 이 복잡한 핵폐기물 문제를 해결할 전략을 수립하고 이행하기 위해 3년마다 기본계획을 갱신하고 있다.

33 프랑스 정부, 2012년, 핵시설 폐로 및 핵폐기물 관리비용 자금조달 국가평가위원회

처분 옵션은 지금까지 폐기물 분류상의 일부(극저준위, 단수명 중저준위 폐기물 등)에서만 가능했다. 분류 상의 여타 폐기물은 모두 해결책이 없는 상황이다. 장수명 저준위 폐기물의 천층 처분 계획은 유보된 상태다. 장수명 중준위 및 고준위 폐기물의 심지층 처분 프로젝트는 여전히 기술적 한계 및 정치적 반대에 봉착해 있다. 게다가 프랑스는 나날이 늘어갈 뿐 재사용하지 않거나 일부만 재사용할지 모르는 (플루토늄, 재처리 우라늄, 열화 우라늄 등) 핵물질에 대한 처분 계획을 아직 마련하지 못하고 있다.

이 같은 상황은 기존 저장 시설의 용량과 운전 수명에 대한 압박을 증가시켜, 중앙집중식 사용후핵연료 냉각수조 신규 프로젝트와 같은 시설 증축으로 이어지고 있다. 현재의 비용 추산 및 기금 마련은 이 점을 고려하지 않고 있기 때문에 결국 부족할 것으로 전망된다. 후행 비용의 절대 비중을 부담하도록 되어 있는 EDF는 동시에 노후 핵반응로의 운전비용 증가에 대한 부담도 안고 있다. 여기에 재생에너지의 비중을 늘려야 하는 법률적 의무와 Flamanvill-3 건설 스캔들의 여파로 “투자의 벽”이 생겨 어려움이 가중되고 있다.

## 7.3 독일

### 개괄

1955년, 서독과 동독 모두 핵연구 프로그램을 발족시켰다. 서독은 독자 핵반응로 설계 및 미국 기술의 이전이라는 두 갈래로 핵프로그램을 진행했다. 1956년 독일 최초의 핵발전소 VAK Kahl을 건설하기 위해 첫 번째 경수로가 발주되었다. 1980년대 말에 이르자 서독은 19기의 핵반응로에서 국내 연간 전력 생산량의 30%를 생산했다.

한편 동독은 구 소련의 지원을 받았다. 1966년 첫 시험 핵반응로 Rheinsberg를 전력망에 연결했다. 동독 정부의 초기 계획에서는 1970년까지 핵반응로 20기 건설을 목표로 삼았으나, 결국 Greifswald에 5기를 건설하는 데 그쳤다.<sup>34</sup> 1990년 통일이 되면서 독일 정부는 구 소련 핵반응로 전체를 폐쇄하기로 결정했다. 경제성이 주된 이유였다. 새로이 적용될 서독 원자력법에 따라, 운영을 계속하려면 다수의 안전 장치가 추가로 필요한 상황이었다.<sup>35</sup>

2000년대 초반 사민당-녹색당 연정은 발전사업자와 핵발전 포기에 대한 합의를 이루어 냈다. 이 내용은 2002년 입법화되어(핵발전소의 단계적 폐쇄에 관한 법) 핵반응로의 수명을 32년치의 전력 생산(킬로와트시 할당)으로 제한하였다. 또한 신규 핵발전소 건설을 법적으로 금지했다.<sup>36</sup> 이후 2010년 가을, 보수-자유민주 연정이 핵발전소의 단계적 폐쇄 방침을 뒤집어 핵반응로의 종류에 따라 핵발전소 운전 기간을 8~14년으로 연장하기도 했다. 그러나 운전 연장은 1년도 채 지속되지 못했다. 2011년 일본 후쿠시마 사고 발발 3개월 만에 독일 의회는 폭넓은 정치적 지지 속에 원자력법(AtG)을 개정하여 핵반응로 8기의 운영 허가를 즉시 취소하였다. 나머지 9기는 2022년까지 폐쇄될 예정이다.

2019년까지 녹지 수준을 달성할 정도로 폐로가 완료된 핵반응로는 3기의 소형 원형 핵반응로 뿐이다. 이보다 규모가 큰 핵발전소 2기는 해체는 완료하였으나, 부지의 일부 건물에 여전히 핵폐기물이 보관되어 있어 아직 규제당국의 소관 하에 있다.<sup>37</sup>

동독과 달리 서독은 우라늄을 채굴한 적이 없다. 그러나 Gronau에 우라늄 농축 공장과 Lingen에 핵연료 가공 공장이 있다. Gronau는 URENCO社의 자회사가 운영하고 있다. 이 공장 지분은 독일 발전사업자 Preussen Elektra社와 RWE社가 1/3, 영국 정부가 1/3, 네덜란드 정부가 1/3을 보유하고 있다. Lingen에서는 Framatome社가 (자회사 Advanced Nuclear Fuels GmbH를 통해) 연료 조립을 비롯하여 파우더, 펠렛 등을 자사 연료 가공 공장에 납품하고 있다. 1970년대에 독일은 사용후핵연료 재처리 시설, 연료 가공 시설, 심지층 처분을 위한 소금광산 등 모든 종류의 핵폐기물 시설을 포괄하는 복합핵처분센터를 서독 외곽 지역 Gorleben에 구축할 계획을 수립했다. 이 같은 계획안은 유보되었다가 훗날 포기되었다. 그럼에도 소금광산을 시험 광산으로 개발하기 위한 표층 및 지하 탐사(각각 1979년과 1986년 착수)와 더불어 그곳 중간 저장 시설에 고준위 방사성 폐기물이 쌓여감에 따라, Gorleben는 중앙집중식 핵폐기물 관리구역으로 변모해 갔다.

34 Jonas, A, 1959, "Atomic Energy in Soviet Bloc Nations", Bulletin of the Atomic Scientists, 11월 1일

35 Thierfeldt, S. and Scharmann, F., 2012, "Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen(핵발전 시설의 폐쇄 및 해체)", Brenk Systemplanung

36 Appunn, K. 2018, "The history behind Germany's nuclear phase-out", Clean Energy Wire, 2019년 1월 9일 참조, <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/history-behind-germanys-nuclear-phase-out>

37 Schneider et al 2018

### 폐기물 분류 체계

독일 핵폐기물 분류 체계의 기본 구조는 상대적으로 단순하다. 핵폐기물을 열 방출량에 따라 두 가지로 분류한다.

- 열방출 폐기물
- 경미한 열방출 폐기물

첫 번째 범주는 IAEA의 고준위 폐기물 기준과 거의 일치하여 사용후핵연료 재처리에서 발생한 폐기물과 사용후핵연료 그 자체를 포함한다. 두 번째 범주는 IAEA의 중준위와 저준위 폐기물을 포괄한다. 하지만 일부 열방출 폐기물은 IAEA 기준으로 중준위 폐기물로 간주된다. 일부 극저준위 폐기물은 독일의 일반 쓰레기 매립 기준을 이미 넘어서기 때문에, 경미한 열을 방출하는 폐기물과 함께 심지층 처분(DGD) 시설에서 처분되어야 한다.<sup>38</sup>

독일의 방침은 두 부류의 폐기물을 모두 심지층 처분하되 차별화된 설계를 요하는 별개 부지에 처분하는 것이다.

### 폐기물의 양

독일은 중앙집중식 저장 시설뿐 아니라 핵반응로 부지에 중간 저장 중인 폐기물을 현재 다량 보유하고 있다. 프랑스와 영국 다음으로 독일이 서유럽에서 핵폐기물 보유량이 가장 많다. 아래 데이터는 모두 2016년 4월 1일자 폐기물 현황을 보고한 가장 최신 인벤토리에서 가져온 것이다. [표 14]는 핵폐기물의 총량을 보여준다.

열방출 폐기물: 현재까지 15,155 tHM의 사용후핵연료가 생산되었다. 그 중 절반은 재처리용으로 반출되었고, 327톤은 “재반송 없이 수출”되었고, 나머지 절반은 중간 저장(3,609톤은 여전히 핵반응로 부지에 습식 저장 중) 상태이다. 또한 재처리 후 반송된 577m<sup>3</sup>의 핵폐기물이 대부분 핵반응로 부지에 보관되어 있다. 그래도 여전히 프랑스와 영국에는 재처리 후 독일로 반환되어야 할 폐기물이 26개의 캐스크(cask: 핵폐기물 저장 및 운송 용기)에 남아 있다. 독일의 Schleswig-Holstein, Baden-Württemberg, Hessen, Bavaria 주(Länder)가 해당 캐스크에 대한 관할을 넘겨 받기로 합의하였다. 독일은 약 27,000m<sup>3</sup>에 달하는 열방출 폐기물을 단일 심지층 처분 시설에 처분하려고 한다.

경미한 열방출 폐기물: 약 120,000m<sup>3</sup>의 해당 폐기물이 독일 전역에 다양한 형태로 보관되어 있다. 이 숫자는, 특정 처리를 거치지 않고 생산자 부지에 보관되어 있는 21,000톤의 폐기물은 포함하지 않은 것이다. 모든 경미한 열방출 폐기물은 303,000m<sup>3</sup> 규모의 Konrad 시설에 처분될 예정이다. 보관된 폐기물은 공정 단계에 따라 분류된다. 폐기물 약 100,000m<sup>3</sup>는 Konrad 용기로 처리되어 이곳 처분 시설에 저장하도록 허가를 받았다. 그 외 3,000m<sup>3</sup>의 폐기물은 안정화를 거친 상태이다. 약 24,000m<sup>3</sup>는 중앙집중식 중간 저장 시설(Gorleben, Mitterteich, Greifswald, Ahaus)에 저장되어 있다.

이처럼 중간 저장 중인 다량의 폐기물에 더해 독일은 중저준위 폐기물을 2개 심지층 시설에 처분한 바 있다. Morsleben(Saxony-Anhalt 주, 1971-1991년 및 1994-1998년)에 37,131m<sup>3</sup>를 처분했고 Asse II(Lower Saxony 주, 1967-1978)에 약 47,000m<sup>3</sup>를 처분했다. 그러나 Asse II 부지에서 가압염(Pressurized Salt)이 안정성을 잃고 있고, 지하수 유입으로 건식 운영이 불가능해지고 있다. 저장소가 붕괴될 위험에 놓여 있어 최악의 심층 처분 시나리오가

38 독일 정부, 2018년, <사용후핵연료 및 방사성폐기물의 안전한 관리에 관한 공동협약에 따른 6차 국가보고서>

[표14] 2016년 12월 31일 기준 독일 핵폐기물 현황

폐기물 종류	저장 방식	부지	폐기물 양
사용후핵연료 (고준위 폐기물)	중간 저장(건식)	발전소 부지 저장 시설	4,201톤
	중간 저장(건식)	ZLN, Ahaus, Gorleben	675톤
	중간 저장(습식)	발전소 부지의 핵반응로 냉각수조	3,609톤
	재처리용으로 반출된 사용후핵연료	영국행 851톤, 프랑스행 5,393톤, 벨기에행 14톤, 독일 Karlsruhe에서 85톤 재처리	6,343톤
	재반송 없이 수출된 사용후핵연료	VVER 연료용으로 러시아행 283톤, 스웨덴행 17톤, VVER 연료용으로 헝가리에서 27톤 재사용	327톤
고준위 폐기물	중간 저장	핵발전소 부지, ZLN, 주 집하장, 중앙 저장 시설	577m <sup>3</sup>
증저준위 폐기물*	중간 저장	핵발전소 부지	14,631m <sup>3</sup>
	중간 저장	Unterweser	1,422m <sup>3</sup>
	중간 저장	Gorleben	6,979m <sup>3</sup>
	중간 저장	Mitterteich	8,200m <sup>3</sup>
	중간 저장	ZLN Greifswald	6,830m <sup>3</sup>
	중간 저장	Stade	4,403m <sup>3</sup>
	중간 저장	연구 시설	61,965m <sup>3</sup>
	중간 저장	주 집하장	1,108m <sup>3</sup>
	중간 저장	Ahaus	1,633m <sup>3</sup>
	중간 저장	GNS 및 기타 저장 시설, Daher Nuclear Technologies社, 핵산업계	13,160m <sup>3</sup>
	폐쇄된 심지층 처분장	Asse II	47,000m <sup>3</sup>
	폐쇄된 심지층 처분장	Morsleben	37,131m <sup>3</sup>
극저준위 폐기물	자료 없음		
U-포함 폐기물	쓰레기장 및 슬러리 처리 시설	Wismut(재가동)	저방사성 암석 더미 48개(약 3억 1100만m <sup>3</sup> ), 방사성 슬러지(약 1억 6000만m <sup>3</sup> )로 채워진 인공호수 4곳

출처: 독일 연방환경부의 2018년 자료를 바탕으로 자체 작성  
 주: \* 처리 전 원재료 상태의 폐기물 21,000톤은 포함하지 않음

전개될 수 있다. 2010년에 약 220,000m<sup>3</sup>로 추정되는 소금과 뒤엉킨 방사성 폐기물을 완전히 회수할 계획이 발표되었으나, 기술적으로 전체를 걷어내는 것은 불가능할 수 있다. 현재까지 처분 전략은 확정되지 않았으며 회수 작업은 시작되지 않았다. 한 가지 옵션은, 기술적으로 가능하다면 이 폐기물을 미래 고준위 폐기물 처분장으로 옮기는 것이다. 가장 비싼 시나리오, 세 번째 심지층 처분장 부지 선정 및 처분장 건설이 될 것이다.

독일은 모든 핵발전소 폐쇄 일정이 확정되었기 때문에 열방출 폐기물의 미래 발생량을 확실하게 예측할 수 있는 편이다. 전체적으로 27,000m<sup>3</sup>에 달하는 열방출 폐기물을 처분해야 할 것으로 보인다.<sup>39</sup> 또한 독일 정부의 공동협약에 따른 6차 국가보고서에 따르면, 매년 핵반응로 운전으로 인해 핵반응로 1기당 45m<sup>3</sup>의 경미한 열방출 폐기물이 발생하고, 폐로를 하게 되면 핵반응로 1기당 약 5,000m<sup>3</sup>의 경미한 열방출 폐기물이 발생할 것으로 추정된다.

### 폐기물 관리 정책 및 폐기물 시설

2002년 핵발전소의 단계적 폐쇄에 관한 법은, 2005년 6월부터 해외에서 사용후핵연료를 재처리할 수 없도록 규정했다. 정부는 과학계 인사들로 최종 처분 실무그룹(Arbeitskreis Endlagerung)을 구성하여 처분장 부지 물색 및 선정을 위해 기준에 입각한 투명한 절차안을 제출하도록 했다.<sup>40</sup> 2005년 6월 시점부터 독일의 사용후핵연료 정책은 재처리하지 않고 심지층에 사용후핵연료를 직접 처분하는 것이다. 이에 따라 사용후핵연료와 재처리에 따른 고준위 폐기물은 대부분 Gorleben의 중앙집중식 중간 저장 시설로 보내졌고, 일부는 Ahaus에도 보내졌다. 한편 대부분의 핵발전소는 사용후핵연료를 보관하기 위해 자체 건식 중간 저장 시설을 운영하고 있다.

2011년 3월 후쿠시마 사고는 독일 핵정책 변화에 촉매제가 되었다. 좌우를 막론한 정치적 지지를 바탕으로 독일 정부는 2022년까지 모든 핵발전소의 운영을 중단하기로 했다.<sup>41</sup> 또 주정부 협의체는 Gorleben 부지 선정 및 지질적 적합성 문제에서 제기된 오래된 의구심을 인정했다. 주정부 협의체는 열방출 방사성 폐기물 처분장을 위해 전국 단위의 새로운 부지 선정 절차의 시작을 지지한다고 발표함으로써 Gorleben 문제에 대한 정치적 돌파구를 마련했다. 심지층 처분 시설 관련 향후 정책을 수립하면서 각 정당 및 연방과 주정부 간 이해를 조정할 실무그룹이 구성되었다.<sup>42</sup> 2년 뒤 의회는 2013년 처분장선정법(StandAG)을 통과시켰다. 40년간의 탐사 끝에 800m 깊이의 광산 핵폐기물 처분장과 지상 인프라 건설이 합의되고, 치열한 정치 공방 끝에 Gorleben 암염 탐사가 중단되었다. 더 이상 지하에서 작업이 이루어지지 않는 것이다. 하지만 Gorleben은 최종처분장 신규 부지 선정 절차에 후보지로 올라와 있다. Gorleben은 고준위 폐기물 캐스크 113개(사용후핵연료 5개, 재처리 후 고준위 폐기물 108개)와 독일 전체 중저준위 폐기물의 6%에 해당하는 약 7,000톤의 중저준위 폐기물을 중간 저장 시설에 보관 중이다.

2014년 StandAG를 검토하고 부지 선정 절차를 위한 권고사항을 도출하기 위해 고준위핵폐기물처분장 위원회가 출범하였다. 이 위원회는 안전 및 평가 기준을 설정하고, 의사결정의 변경 가능성과 처분된 폐기물의 회수 가능성을 확보할 수 있는 적응적 절차를 수립하고 있다. 더 나아가 부지 선정 절차는 점토암, 암염, 결정질암 등 독일의 모든

39 사용후핵연료 20,400m<sup>3</sup>, 사용후핵연료 처분에 따른 구조물 부품 및 슬리브 3,400m<sup>3</sup>, 재처리에 따른 유리화 폐기물 1,440m<sup>3</sup>, THTR 핵반응로에서 발생한 폐기물 1,340m<sup>3</sup>, 사용후핵연료의 구조물 부품 포함 폐기물 패키지 3,400m<sup>3</sup> 포함

40 Arens, G., 2002년, <최종처분장선정절차 위원회(AkEnd) 권고안>

41 von Hirschhausen, C. 2018, German Energy and Climate Policies: A Historical Overview. In Energiewende “Made in Germany”, Springer, Cham. pp.17-44

42 Hocke, P and Kallenbach-Herbert, B. 2015, Always the Same Old Story? in A. Brunnengräber et al. Challenges of Nuclear Waste Governance, Springer VS, Wiesbaden, pp.177-201

가능한 지반을 대상으로 삼는다. 최종 보고서는 시민 참여가 동반되는 3단계 절차를 권고하고 있다.<sup>43</sup> 독일 정부는 StandAG법의 2017년 개정에서 이 같은 권고사항을 적용하여 2031년까지 부지 선정을 완료한다는 야심 찬 목표를 기한을 설정하였다.

이와 동시에 독일 정부는 관계부처의 주무 업무를 재정비하여 책임 소재 및 상호독립성을 강화하였다. 2016년 신규 법을 통해 방사선보호청(BfS)이 수행하던 업무를, 핵폐기물안전청(BfE)과 핵폐기물 전담으로 새로 출범한 연방관리공단(BGE)으로 이관하였다.<sup>44</sup> 모든 연방 규제, 허가 및 감독 업무는 BfE 소관이며, 부지 선정 및 심지층 처분장 건립과 운영은 BGE로 이관되었다. BGE는 Konrad 광산 건설도 관할하고 있다(새로운 건설 일정에 따르면, Konrad 핵폐기장은 부지 선정 시점에서 반세기 이상 경과하는 2027년에 운영이 개시될 것으로 보인다).

고준위 폐기물 중간 저장 시설의 소유권은 연방중간저장관리공단(BGZ)으로 이관되었다. 앞으로 핵반응로 부지에 있는 중저준위 저장 시설도 이 공기업 소관이 될 것이다.

부지 선정 절차를 모니터링하고 시민 참여를 확보하기 위해 다원적으로 구성된 국가시민사회이사회(NBG)가 출범하여 2016년 12월부터 활동을 시작했다.<sup>45</sup> 시민사회 참여를 제도화한 것은 독일에서 새로운 시도이다. 지금까지 신규 부지 선정 절차와 참여 과정에 대한 대중적 관심은 미약한 편이다.

### 비용 및 자금조달

원자력법(Atomgesetz, AtG)에 의하면, 핵발전 사업자는 폐로 비용과 핵폐기물 처분을 포함한 핵폐기물 관리 비용을 지불해야 한다. 독일에는 역사적 이유로 두 갈래의 재원 조달 체계가 존재한다. 하나는 공적 자금이 투입되는 것으로, 공적 소유물이 된 구 동독 핵반응로가 여기에 해당된다. 예를 들어, 구 동독의 Greifswald와 Rheinsberg 발전소는 연방재무부의 재원으로 폐로가 진행되고 있다. 양 발전소에 대한 마지막 비용 추산(2016년)은 총 65억 유로(73억 달러)다. 다른 자금출처 방식은 사기업이 소유한 시설과 관련된다. 이외에도 민관 합동 소유의 원형 핵반응로도 있다. 이와 같은 경우에는 별도 합의에 의해 공공과 민간 발전사업자 간 지분에 따라 비용을 나눈다.<sup>46</sup>

2015년 독일 정부의 의뢰로 한 회계 회사는, 23기 상업용 핵반응로의 폐로 및 핵폐기물 관리 비용을 아래와 같이 추정했다. 총 금액은 미할인 기준으로 475억 유로(534억 달러)이다.

- 해체를 포함한 폐로: 197억 유로(221억 달러)
- 캐스크, 운송 및 운전 폐기물: 99억 유로(112억 달러)
- 중간 저장: 58억 유로(65억 달러)
- 경미한 열방출 폐기물 처분 시설: 37억 유로(42억 달러)
- 열방출 폐기물 처분 시설: 83억 유로(93억 달러)<sup>47</sup>

43 독일 고준위방사성폐기물처분장 위원회, 2016년, 최종보고서 K-Drs.268

44 독일 정부, 핵폐기물 관리 주무부처 재정비법 (BGBl., I, S. 1843 768/16).

45 추가 정보 참조 [http://www.nationales-begleitgremium.de/DE/Home/home\\_node.html](http://www.nationales-begleitgremium.de/DE/Home/home_node.html)

46 유럽위원회, 2013년, “EU 핵발전소 폐로 총당금 자료- 위원회 실무자료”, 2019년 6월 28일 참조, <http://aei.pitt.edu/42990/>

47 <핵에너지 부문의 총당금 평가에 대한 전문가 의견>, 2019년 6월 5일 참조 <http://bmwi.pro.contentstream.de/18004initag/ondemand/3706initag/bmwi/pdf/stresstestkernenergie.pdf>

핵발전 사업자는 총당금으로 382억 유로(429억 달러)를 비축해 둔 상태이다. 이 기금은 전기가격을 통해 소비자로부터 징수한 것이다.<sup>48</sup> 하지만 핵폐기물 처분과 폐로에 필요한 추정 비용은 이 총당금을 초과할 것이 자명하다. 사실 오염자부담원칙이 엄정하게 적용되었다면(원자력법에 의하면 그렇게 되었어야 하지만) 사업자는 파산 신청을 해야 했을 것이다.<sup>49</sup> 한편 사업자가 도산 위기에 처한다면 결국 이 부담이 사회에 전가될 것이며, 폐로, 저장 및 폐기물 관리 과정에서 경제적 이유로 안전과 안보가 뒷전이 될 수 있다는 우려가 제기되었다.<sup>50</sup> 이에 대응하여 독일 정부는 자금조달 체계를 검토하기 위한 위원회(KFK)를 설치하였다.

위원회는 자금조달 체계를 근본적으로 바꾸어, 핵폐기물에 대한 금전적 의무와 조직적 의무를 사업자에서 연방 정부로 이관하는 방안을 권고하였다.<sup>51</sup> 해당 권고사항은 새로 제정된 법에 담기게 되었다.<sup>52</sup> 발전사업자가 여전히 폐로와 처리를 책임지지만, 후행 폐기물 관련 업무에서는 배제되었다. 이에 따라 사업자는 리스크 프리미엄을 붙여 폐기물 관리에 대한 기존 총당금 241억 유로를 별도의 외부 공공기금에 이관해야 한다. 2017년 중반 핵폐기물관리기금이 설립되어 ‘안정성과 수익성’있는 투자를 하게 된다. 한편, 핵폐기물에 대한 책임과 향후 리스크를 사회가 지게 되었다는 점에서 오염자부담원칙에 위배된다고도 볼 수 있다.<sup>53</sup> 핵폐기물관리기금은 첫 회계연도에 자산의 일부만이 투자되었고 대부분은 Bundesbank 은행에 0.4% 이자율로 예치되어 있다. 기금의 첫 6개월 동안 약 3900만 유로의 이자 수익이 발생했다.<sup>54</sup>

## 요약

최근 몇 년 사이 독일은 핵폐기물 문제를 정치적으로 활발하게 다루어 왔다. 이것은 부분적으로는 독일 핵정책에 지대한 영향을 미친 2011년 일본 후쿠시마 사고에 의해 추동되었다. 2022년까지 단계적으로 모든 핵발전소를 폐쇄하기로 합의한 후, 정치적 쟁점은 폐로와 폐기물 저장 및 처분으로 옮겨왔다. Gorleben 암염 지대가 갑작스럽게 첫 처분장으로 선정된 지 40년이 흐른 후에, 정부 부처 간 소관 업무 재정비, 신생 연방 공기업 및 규제기관의 설립, 특수 폐기물관리기금의 별도 운영 등으로 신규 부지 선정 절차가 제도화되었다. 시민사회의 체계적 참여는 독일로서는 새로운 접근법이다. 모든 이해당사자 간 공정한 장이 마련될지는 아직 더 두고 봐야 한다. 현재까지 새로운 부지 선정 절차와 참여 과정에 대한 대중의 관심은 크지 않은 편이다.

독일은 현재 다량의 핵폐기물을 중앙집중식 저장 시설과 핵발전소 부지에 중간 저장하고 있다. 독일은 이 폐기물을 두 종류로 분류한다. 경미한 열을 방출하는 방사성 폐기물과 열방출 방사성 폐기물이 그것이다.

고준위 폐기물의 미래 처분 경로는 여전히 불확실성이 크다. 독일은 이제 막 부지 선정 절차에 돌입했다. 중저준위 폐기물 처분을 위해 Konrad에 심지층 처분 시설이 아직 건설 중이며 현재로서는 2027년이 되어야 운영을 시작할

48 Irrek and Vorfeld 2015년

49 Kunz, F., Reitz, F., von Hirschhausen, C. and Wealer, B. 2018. Nuclear Power: Effects of Plant Closures on Electricity Markets and Remaining Challenges. In *Energiewende “Made in Germany”*, Springer, Cham. pp. 117-140

50 Von Hirschhausen, C. and Reitz, F. 2014. Nuclear power: phase-out model yet to address final disposal issue. *DIW Economic Bulletin*, 4(8), pp.27-35

51 핵발전소 단계적 폐쇄 자금조달 재원검토 위원회, 2016년, <책임과 안전 - 처분에 대한 새로운 합의>

52 독일 정부, 2016년, 18대 독일 의회 <핵폐기물 최종 처분 분야 조직 개편 법안(11월 29일)>

53 Jänsch, E., Brunnengräber, A., von Hirschhausen, C. and Möckel, C. 2017. Wer soll die Zeche zahlen? Diskussion alternativer Organisationsmodelle zur Finanzierung von Rückbau und Endlagerung(누가 지불하는가? 핵시설 해체 및 폐기물 최종 처분을 위한 대안적 재무모델에 대한 제언), *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society* 26(2), pp. 118-120

54 Business Report, 2017년, <핵폐기물 최종 처분을 위한 기금 (2018년)>

수 있을 것으로 전망된다. 그때까지 모든 중저준위 폐기물은 중간 저장 시설에 보관될 것이다. 사용후핵연료와 고준위 폐기물의 중간 저장은 적어도 2050년까지는 지속될 것이다. 최종 처분장 부지 선정을 중간 저장의 용량 부족이나 안보상의 우려로 밀어붙여서는 안 되기 때문에, 저장의 안전 문제와 용량 문제를 점검해야 할 필요성을 두고 논쟁이 뜨거워지고 있다.

독일은 핵반응로 폐로에서 어느 정도 경험을 획득했다. 하지만 폐쇄 단계로 넘어온 모든 핵반응로는, 비용 상승 없이 적기에 해당 절차를 결정하는 데 있어 여전히 몇 가지 장애에 부딪히고 있다. 특히 핵폐기물 관리와 관련된 모든 미래 비용 추정은 비용 상승과 이자율로 인해 불확실성이 크다. 미래에 사용하기 위해 적립한 재원이 이 비용을 감당할 수 있을지 의문이다.

## 7.4 헝가리

### 개괄

헝가리 핵에너지의 역사는 1960년대로 거슬러 올라간다. 헝가리 정부는 1966년 핵반응로 4기 규모의 핵발전소를 건립하기로 결정했다. 1974년 Paks에서 첫 삽을 떴다. 전력 생산은 1982년에 시작되었다. 4기 모두 가압경수로(VVER-440/213)이다. Paks는 세계에서 유일하게 연장된 연료주기로 운전하고 있는 핵발전소이다. 연료가 12개월이 아닌 매 15개월마다 교체되고 있다.<sup>55</sup> 2012년 운전 수명 연장 프로그램의 일환으로 핵반응로 4기는 2030년 중반까지 20년가량 더 운영될 전망이다.

2018년 Paks의 4기 핵반응로의 이용률은 89%로 높은 편이다. 여기에서 생산되는 약 15 TWh의 전력량은 국내 전력생산 비중의 거의 절반을 차지한다.<sup>56</sup>

2014년 1월 헝가리 정부는 러시아 정부와 각 1,200MW 설비용량의 핵반응로 2기를 추가 건설하기로 정부 간 협정을 체결했다. 수도 부다페스트에서 남쪽으로 100km 떨어진 Paks에 들어설 예정이다. 그러나 Paks II 발전소 건설이 아직 착수되지 않아 운전 개시 연도가 2020년대 말 이후로 지연될 수 있다.

헝가리의 유일한 우라늄 광산은 1997년 비효율적 운영으로 인해 폐광되었다.<sup>57</sup> Paks의 증설이 예정되어 있는 관계로 헝가리우라늄자원주식회사는 광산을 다시 가동시킬 계획이 있으나, 당국은 우선 해당 사업의 환경 허가신청을 기각한 상태이다. 헝가리는 사용후핵연료 재처리 역량은 보유하고 있지 않다.

### 폐기물 분류 체계

헝가리의 폐기물 분류 체계는 사용후핵연료 및 방사성폐기물 관리 국가기본계획에 명시되어 있다. 첫 번째 원칙은 통제구역에서 발생한 폐기물은 달리 증명되기 전까지 방사성 폐기물로 간주한다는 것이다.<sup>58</sup> 이 기본계획은 국제원자력기구(IAEA) 및 유럽연합 이사회 지침(2011/70/EURATOM)에 바탕을 두고 있다. 1996년 2차 원자력법에 의하면, 헝가리 정부가 방사성 폐기물의 최종 처분을 책임진다.<sup>59</sup>

헝가리는 방사성 폐기물을 상태, 열 방출, 방사능 농도, 반감기에 따라 네 가지 기준으로 분류한다.

- 상태에 따라 방사성 폐기물을 고체, 생물체 기원, 액체, 불연성 기체, 인화성 기체 및 부유 폐기물로 분류한다.
- 열 방출에 따라 중저준위 폐기물과 고준위 폐기물로 구분한다.

<sup>55</sup> 핵반응로 노심(VVER-440/213) 관련 추가 정보, Paks 핵발전소 홈페이지에서 참조, [http://www.atomeromu.hu/en/Documents/2\\_Structure\\_of\\_Paks\\_npp.pdf](http://www.atomeromu.hu/en/Documents/2_Structure_of_Paks_npp.pdf)

<sup>56</sup> Paks 핵발전소 홈페이지, 2019년 2월 26일 참조, <http://www.atomeromu.hu/hu/Rolunk/Hirek/Lapok/HirReszletek.aspx?hirId=650>

<sup>57</sup> Paks 핵발전소 홈페이지, <우라늄 광석 채굴>, 2019년 2월 26일 참조, [http://www.atomeromu.hu/en/Documents/7\\_1Life\\_of\\_uranium\\_1.pdf](http://www.atomeromu.hu/en/Documents/7_1Life_of_uranium_1.pdf)

<sup>58</sup> 헝가리 정부, 2017년, “헝가리 사용후핵연료 및 방사성 폐기물 관리 국가 프로그램”, 2019년 2월 26일 참조, [http://www.mmediu.ro/app/webroot/uploads/files/2017-05-09-Program\\_national\\_HU.pdf](http://www.mmediu.ro/app/webroot/uploads/files/2017-05-09-Program_national_HU.pdf)

<sup>59</sup> 헝가리 정부, 1996년, 원자력법 제116호, 2019년 2월 26일 참조, [http://www.oah.hu/web/v3/HAEAportal.nsf/AF56E3A1E23F3932C1257CA700432BBC/\\$File/1996\\_116\\_tv\\_EN\\_2017\\_06\\_24\\_2017\\_12\\_31.pdf](http://www.oah.hu/web/v3/HAEAportal.nsf/AF56E3A1E23F3932C1257CA700432BBC/$File/1996_116_tv_EN_2017_06_24_2017_12_31.pdf)

- 방사능 농도로 구분할 때도 저준위, 중준위, 고준위 폐기물 분류법을 활용한다.
- 핵종의 반감기에 따라 단기, 중기, 장기(30년 이상) 폐기물로 구분한다.<sup>60</sup>

행정고시(23/1997)에 따르면, 저준위 폐기물의 방사능 농도 미만은 규제가 면제되거나 해제된다. 따라서 규제 면제 또는 해제 수준보다 높은 방사능 농도를 지닌 폐기물을 저준위 폐기물로 정의한다. 그러나 헝가리 규제당국은, 폐기물 패키지 표면으로부터 10cm 거리에서 측정된 감마 방사선량을 기준으로 폐기물을 분류하는 또 다른 체계도 사용하고 있다. 이 경우 저준위 폐기물은 방사선량이 시간당 0.3 mSv/h 미만이고 고준위 폐기물은 10 mSv/h를 초과한 폐기물이다.

### 폐기물의 양

헝가리 정부는 사용후핵연료와 방사성 폐기물 양을 정기적으로 보고하고 있다. 국제원자력기구(IAEA) 공동협약에 따라 보고서를 작성한다. 가장 최신 보고서는 2018년도 협약에 따라 마련되었다. 1998년까지 헝가리는 사용후핵연료(2,331 다발 또는 중금속 273톤)를 재처리 목적으로 러시아로 이송했다. 그 이후로는 Paks 핵발전소 인근 사용후핵연료 중간 저장 시설에 임시 저장하고 있다.

[표 15] 2016년 12월 31일 기준 헝가리 핵폐기물 현황

폐기물 종류	저장 방식	부지	폐기물 양
사용후핵연료 (고준위 폐기물)	중간 저장(습식)	Paks 핵반응로 필수냉각수조	1,800다발
	중간 저장(건식)	Paks의 사용후핵연료 중간 저장 시설	8,707다발
고준위 폐기물	중간 저장	Paks	102m <sup>3</sup>
액체 중저준위 폐기물	중간 저장	Paks 핵반응로 저장탱크	8,131m <sup>3</sup>
고체 중저준위 폐기물	중간 저장	Paks 핵반응로 저장 시설	1,835m <sup>3</sup>
	중간 저장	표층 저장소 RWTDF	225m <sup>3</sup>
	처분된 폐기물	표층 저장소 RWTDF	4,900m <sup>3</sup>
	중간 저장	표층 저장소 NRWR	430m <sup>3</sup>
	처분된 폐기물	표층 저장소 NRWR	876m <sup>3</sup>
극저준위 폐기물	자료 없음		
U-포함 폐기물	쓰레기장 및 슬러리 처리 시설	재가동	1000만m <sup>3</sup> 부피의 폐암석 더미 및 340만m <sup>3</sup> 의 침출 더미

출처: 헝가리 정부, 2017년, 사용후핵연료 및 방사성폐기물의 안전한 관리에 관한 공동협약에 따른 6차 국가보고서  
 주: RWTDF=방사성 폐기물 처리 및 처분장

국가기본계획에 의하면, 폐로에 따른 방사성폐기물은 별도 시설(남부지방 Boda 지역)에 보관될 것이다. Paks 핵발전소 폐로에 따른 저준위 및 중준위 폐기물 배출량은, 각각 1.8m<sup>3</sup> 용량의 컨테이너 9,147개와 3.6m<sup>3</sup> 용량의 컨테이너 2,846개로 추정된다. 심지층 처분장에 처분될 운전 및 폐로에 따른 고준위 폐기물의 총 발생량은 300m<sup>3</sup>로 추정된다.

60 헝가리 정부, 2017년, <사용후핵연료 및 방사성폐기물의 안전한 관리에 관한 공동협약에 따른 6차 국가보고서>

### 폐기물 관리 정책 및 폐기물 시설

헝가리의 방사성 폐기물 관리 방식은 1996년 원자력법에 기초한다.<sup>61</sup> 방사성폐기물관리공단이 전국 4개 방사성 폐기물 처분장을 관할하고 있다. 핵발전 부문에서 나온 폐기물용 시설은 두 군데다.

- Bataapáti 국가방사성폐기물처분장은 Paks 핵발전소에서 발생한 중저준위 폐기물을 저장한다. 이곳으로 운송된 고체 폐기물은 보통 200리터 드럼통에 압축된다. 액체 폐기물은 탱크에 저장된다. 이 처분장의 저장 용량은 3,000드럼이다.<sup>62</sup>
- 두 번째 시설은, Paks 핵발전소 인근에 위치한 사용후핵연료 중간 저장 시설이다. 이 시설은 1998년 운영을 개시했다. 그 전까지는 사용후핵연료를 러시아로 보냈다. 헝가리가 직접 사용후핵연료를 다루기 시작하면서 이 시설의 총 저장 용량을 확장했다. 현재는 사용후핵연료 9,308다발을 보관할 수 있다.<sup>63</sup>

Paks 발전소에서 발생한 일부 저준위 폐기물은, 주로 비발전 분야 용도로 마련된 방사성 폐기물 처리 및 처분장(RWDTF)에 임시 저장되어 있다.<sup>64</sup>

원자력법은 방사성 폐기물 관리를 규제하고, 이 법에 따라 정부는 이 분야에 필요한 요건을 명시하는 행정 명령을 공포할 권한을 지닌다. 이 법은 폐기물 처분과 사용후핵연료 중간 저장 시설의 건설 및 운영에 대한 기본 체계로서 기능한다. 원자력법은 헝가리의 유럽연합 가입 후 유럽연합 규제 및 EURATOM에 부합하도록 개정되었다. 이 법은 방사성 폐기물 관리가 미래 세대에게 부담을 지워서는 안 된다고 명시하고 있다. 이 법에 따라 방사성폐기물관리청이 발족되어 1998년에서 2008년까지 존속한 후 방사성폐기물관리공단(PURAM)으로 전환되었다. 2008년 이래 PURAM은 방사성 폐기물 저장 및 처분을 관할하고 있고, 중앙핵에너지금융기금(Central Nuclear Financial Fund)의 지원을 받는 사업계획 갱신을 책임지고 있다.

1971년 헝가리 정부는 비발전 부문에서 발생한 중저준위 폐기물을 처리하고 처분하기 위한 시설을 건설하기로 결정했다. 1995년에는 장수명 고준위 폐기물 문제를 다루기 위한 국가프로그램이 발표되었다. 그 결과 PURAM은 Paks 핵발전소 옆에 사용후핵연료 중간 저장 시설을 건설하게 되었다. 이 시설은 (계획된 36개 모듈에) 적어도 50년간 사용후핵연료를 저장할 수 있다. 2012년까지 시설은 절반 정도 완성되었다.

Paks 핵발전소에서 나오는 중저준위 폐기물은 Bataapáti 저장소로 이송된다.<sup>65</sup> 이 저장소는 중저준위 고체 폐기물 드럼통 3,000개(각 200리터 용량)의 완충 저장에 대해 운영 허가를 받았다. PURAM에 의하면, Bataapáti 저장소는 Paks 핵발전소의 수요를 충족할 것이고 Paks I 핵발전소의 전체 수명기간 동안 저장소가 포화되지 않도록 지하

---

61 헝가리 정부, 1996년 원자력법 제116호

62 헝가리 국가방사성폐기물처분장(NRWR), “16 drums loaded into 4 transport frames can be put on the vehicle”, 2019년 2월 26일 참조, <http://www.rhk.hu/en/our-premises/nrwr/>

63 헝가리 국가방사성폐기물처분장(NRWR), “History of spent fuel storage”, 2019년 2월 26일 참조, <http://www.rhk.hu/en/our-premises/isfs/history/>

64 Oroszi, B. 2019년, “Tritium Leak and Waste Packaged in Plastic Bags: Questions about the Nuclear Cemetery”, 2019년 2월 26일 참조, <https://english.atlatszo.hu/2019/02/27/tritium-leak-and-waste-packaged-in-plastic-bags-questions-about-the-nuclear-cemetery/>

65 처분장 2008년 가동 개시, 연혁 참조 <http://www.rhk.hu/en/our-premises/nrwr/history/>

공간이 증설될 예정이다.<sup>66</sup>

2015년에 정부는 Boda 지역에서 심지층 처분을 위한 연구에 착수했다. 현재 수준의 과학 지식으로는 헝가리에서 심지층 처분에 가장 적합한 지질 조건은 점토인 것으로 보인다. 현재 최적의 부지 선정 단계까지 연구가 진행되었다. 가장 최근에 발표된 바에 따르면, 처분장은 Paks 핵발전소 폐로가 시작된 후 가동될 수 있도록 2030년에서 2064년 사이에 준공될 예정이다.

잠재적 처분장 후보지역의 지방자치단체장들이 이해관계를 조율하기 위해 1996년 협회를 결성했다. 협회의 취지는 연구 과정에 대한 정보를 제공하고, 모니터링 네트워크를 관리하며, 회원 지역사회의 다목적 개발사업 등을 추진하는 데 있다. 협회는 PURAM과 공동으로 고준위 핵폐기물 최종 처분에 대한 연례 행사를 주최하고 있다. 이 행사에서 전문가들은 고준위 핵폐기물 최종 처분에 대한 정보와 국제적 전망을 제공한다. 2003년 이래 PURAM은 대상 지역에서 폐기물 처분 연구에 대한 인식 및 지역주민의 수용성에 대한 여론조사를 2년마다 진행하고 있다.<sup>67</sup> 지역주민이 정보를 얻을 수 있는 유일한 통로는 지방자치단체 협회 및 PURAM(공식 정보 출처)이다.

### 비용 및 자금조달

Paks 핵발전소의 폐로 자금조달은 원자력법에 의거한다. 1998년부터 운영 중인 중앙핵에너지금융기금이 설립된 것도 이 법에 의해서다. 이 기금은 국고 자금과 일부 정부 예산으로 편성되었다. 재정 안정성을 보장하기 위해 중앙정부의 예산 지원을 받는 것이다. 2014년까지 원자력청이 기금을 관리했고 이후에는 국가발전부로 이관되었다. 중앙핵에너지금융기금의 예산 제안서를 보면, 진행 중인 폐기물 관리 및 기타 관련 프로젝트(고준위 폐기물 최종 처분 연구, 핵시설 폐로 준비 등)에 계획된 예산 지출은 148억 포린트(5300만 달러)이며, 2019년 기금으로 납부된 수입은 270억 포린트(9700만 달러)이다.<sup>68</sup> 기금의 전체 규모는 2016년 기준 2550억 포린트(9억 1000만 달러)이다.<sup>69</sup>

원자력법은 오염자부담원칙을 규정하고 있다. 즉, 방사성 폐기물을 만들어낸 기관이 그 관리 비용을 부담한다. 이에 따라 핵폐기물 관련 기금은 핵폐기물을 생산하는 모든 시설로부터 자금조달이 이루어지며, 그 중 가장 큰 비중을 차지하는 것은 Paks 핵발전소이다(기금 연간 수입의 약 90%는 이 발전소에서 나온다). 기금의 상당 부분이 폐기물 처분장 유지 및 PURAM 예산으로 사용된다. 장기적으로는 기금 예산의 거의 절반이 사용후핵연료 처리에, 1/4가량이 Paks 핵발전소 폐로에 사용될 것으로 전망된다. 2084년까지 가동되는 4기의 핵반응로와 관련하여 기금에서 사용될 지출은 약 54억 유로(62억 4000만 달러)이다. 현재 계획상 Paks 핵발전소의 불입액으로는 이의 절반도 충당하기 어려울 것이다.

나머지 자금조달이 어떻게 이루어질지는 아직 결정된 바 없다. 적립 총당금이 중앙핵에너지금융기금 연간 예산에 기입만 되고 실제로는 사용하지 못할 수도 있다. 헝가리 감사원에 의하면, 계정에 실제로 돈이 없으며 이는 훗날 비

66 헝가리 정부, 2005년, <사용후핵연료 및 방사성폐기물의 안전한 관리에 관한 공동협약에 따른 2차 국가보고서>, 2019년 2월 26일 참조, [http://www.oah.hu/web/v3/HAEAportal.nsf/5E4C87A0B24A7094C1257C5C00364137/\\$FILE/nationrep2.pdf](http://www.oah.hu/web/v3/HAEAportal.nsf/5E4C87A0B24A7094C1257C5C00364137/$FILE/nationrep2.pdf)

67 방사성폐기물관리공사(PURAM), 2019년 3월 8일 참조, <http://www.rhk.hu/projektjeink/nagy-aktivitasu-hulladekok/lakossagikapcsolatok/>

68 헝가리 의회, 2019년, <2019년 중앙핵에너지금융기금 예산 제안>, 2019년 3월 8일 참조, <https://www.parlament.hu/irom41/00503/adatok/fejezetek/66.pdf>

69 방사성폐기물관리공사(PURAM), “재정적 과제”, 2019년 3월 8일 참조, <http://www.rhk.hu/rolunk/mandatumunk/finanszirozasi/>

용이 발생하였을 때 문제를 초래할 것이다. Paks 핵발전소의 신규 핵반응로에서 발생할 향후 비용은 아직 기금에 잡혀 있지 않다.<sup>70</sup>

### 요약

헝가리 핵발전의 역사는 1960년대로 거슬러 올라가지만, 방사성 폐기물 관리는 여전히 초기 단계이다. 핵폐기물 관리 규제는 유럽연합의 법제에 맞추기 위해 지난 수십 년간 몇 차례의 개정을 거쳤다. 또한 헝가리는 국제원자력기구의 법률 및 규제적 권고사항을 대부분 이행하고 있다. 헝가리는 핵폐기물 관리에 관한 장기 계획을 가지고 있으나 Paks II 발전소가 완공되기 전까지 실현하지 못할 수도 있다. 사용후핵연료 처분 및 현존하는 4기의 Paks 핵반응로 폐로에 들어갈 비용을 충당하기 위해 중앙핵에너지금융기금을 마련했으나, 장기적으로는 예상되는 금액 54억 유로(62억 4000만 달러)에 못 미친다. 게다가 방사성 폐기물 최종 처분에 관한 연구가 진행되고 있으나 최선의 안전성이 보장될 수 있을지 미지수이다. 현재 헝가리에서 운영 중인 핵폐기물 시설은 두 군데이다. 하지만 최종 처분장도 시급히 마련되어야 한다. 핵폐기물은 향후 상당히 증가할 것으로 예상된다. Paks 핵발전소 4기의 핵반응로 폐로뿐 아니라, Paks II 핵발전소에 2기의 신규 핵반응로가 계획되어 있기 때문이다.

70 Koritár, Z. 2018, "Postponed Policy", in A Brunnengraber et al. Challenges of Nuclear Waste Governance, Springer VS, Wiesbaden, pp.123-137

## 7.5 스웨덴

### 개괄

스웨덴의 핵에너지 개발 활동은 1940년대 말 중수로에 기초한 군사 및 민간 핵프로그램 공동 추진으로 시작되었다. 2기의 연구용 핵반응로가 1954년과 1960년에 가동되었다. 1964년 운전 개시한 세 번째 지하 핵반응로는 인근 지역에 지역난방을 공급하고 전력을 일부 전력망에 공급했다. 그러나 이 핵반응로의 주된 목적은 스웨덴 핵무기 프로그램에 플루토늄을 공급하는 것이었다. 초창기의 이 3기의 핵반응로는 현재 모두 해체되었거나 해체가 진행 중이다.

1960년대 중반 긴 공적 논쟁을 거쳐, 정부는 군사 프로그램과 함께 중수로 프로그램을 중단하기로 결정했다. 대신 1972년과 1985년 사이에 비등경수로 9기와 가압경수로 3기가 4개 부지에 발주되었다.

최근 스웨덴은 핵에너지 용량 감축에 속도를 내고 있다. 덴마크 국경 인근 Barsebäck 핵발전소에 있는 2기의 핵반응로는 1999년과 2005년에 폐쇄되었다. 이어 Oskarshamn 발전소의 핵반응로 3기 중 2기가 2015년과 2017년에 폐쇄되었다. Ringhals 발전소의 핵반응로 4기 중 2기가 2019년과 2020년에 폐쇄되면 이곳에는 2기만 남을 것이다. Forsmark 발전소에는 핵반응로 3기가 운전 중이다. 2018년 기준 스웨덴에서 운전 중인 핵반응로 8기는 국내 전력의 약 1/3을 공급한다.<sup>71</sup>

2040년까지 100% 재생가능에너지로 전력을 생산한다는 정치적 합의가 2016년부터 유지되고 있다. 하지만 2020년 후에도 운전이 계속될 핵반응로 6기에 대한 단계적 폐쇄 계획은 아직 없는 상태이다. 합의문은 단지 핵에너지에 대해 보조금을 더 이상 지급하지 않고, 남은 핵반응로는 경제성이 없어지면 폐쇄될 것이라고만 밝히고 있다. 현재 신규 핵반응로 건설 계획은 없다. 신규 핵반응로 건설을 금지하는 법은 2010년에 철회된 바 있다.

1960년대에 지하 재처리 공장 건설을 계획했으나 건설은 시작되지 않았다. 하지만 1960년대에 진행된 재처리 연구 및 개발은 스웨덴 초기 핵폐기물 문제의 상당 부분을 차지하는 폐기물 흐름(waste streams)을 초래했다. 이 활동으로 생성된 고준위 재처리 폐기물은 더 이상 스웨덴 국내에 있지 않다. 1970년대 말 스웨덴은 프랑스 및 영국과 재처리 계약을 체결한 바 있다. 하지만 결국에는 사용후핵연료 140톤만 영국에 위탁하여 재처리하였다. 스웨덴은 1980년경 상업적인 이유와 핵 비확산을 위해 사용후핵연료를 재처리하지 않고 직접 처분하기로 결정했다. 스웨덴은 단수명 증저준위 폐기물 처분장을 운영 중이며 사용후핵연료 처분장은 인허가 절차를 진행 중이다. 장수명 중준위 폐기물 처분장도 계획 중이다.

스웨덴은 Ranstad에 있는 우라늄 광산을 1960년대에 단기간 가동한 적이 있다. 이 광산은 1990년대에 폐광되었고, 현재는 환경 복원이 완료된 것으로 간주된다. 스웨덴에는 Västerås에 Westinghouse社가 소유한 연료 가공 공장도 있다.

### 폐기물 분류 체계

스웨덴은 핵폐기물을 방사능 농도와 반감기를 기준으로 분류한다. 스웨덴핵연료및폐기물관리회사(SKB)는 다음 다

71 World Nuclear Association 홈페이지, 2018년, "Nuclear Energy in Sweden", 2019년 4월 22일 참조, <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/sweden.aspx>

섯 가지 분류 체계를 개발하였다.<sup>72</sup>

**[표 16] 2018년 기준 스웨덴 핵폐기물 분류**

폐기물 종류	도착지	정의	기타 고려 사항
규제 해제 물질	처분장 불필요	방사능이 경미하여 규제 해제 가능 물질	없음
단수명 극저준위	천층 매립지	반감기 31년 미만(패키지당 방사선량 0.5 mSv/h 미만)의 단수명 핵종 소량 포함. 반감기 31년 이상 장수명 핵종이 제한된 양으로 존재할 수 있음.	없음
단수명 저준위	단수명 폐기물 최종 처분장(SFR)	반감기 31년 미만인 단수명 핵종 소량 포함. 패키지(와 비차폐 폐기물)당 방사선량 2 mSv/h 미만. 반감기 31년 이상 장수명 핵종이 제한된 양으로 존재할 수 있음.	없음
단수명 중준위	단수명 폐기물 최종 처분장(SFR)	반감기 31년 미만 단수명 핵종 상당량 포함. 패키지당 방사선량 500 mSv/h 미만. 반감기 31년 이상 장수명 핵종이 제한된 양으로 존재할 수 있음.	운송 시 방사선 차폐 필요
장수명 중저준위	장수명 방사성 폐기물 최종 처분장(SFL)	반감기 31년 이상 장수명 핵종이 상당량 존재하여 단수명 폐기물의 제한 기준을 상회함	운송 시 특수 격납용기 필요
사용후핵연료 / 고준위 폐기물	사용후핵연료 최종 처분장	평균 붕괴열이 2kW/m <sup>3</sup> 를 초과하고 반감기 31년 이상 장수명 핵종 상당량을 포함하여 단수명 폐기물의 제한 기준을 상회함	중간 저장 및 운송 시 냉각과 방사선 차폐 필요

출처: SSM 2018

IAEA의 저준위 폐기물 범주 대신 스웨덴은 단수명 폐기물에 초점을 맞춘다는 점에서 IAEA 정의와 미세하게 차이가 난다. 따라서 스웨덴의 단수명 저준위 및 단수명 중준위 폐기물은 IAEA 분류 체계에 따르면 저준위 폐기물이다.

### 폐기물의 양

환경에너지부와 규제당국인 스웨덴방사선안전청(SSM)은 IAEA 공동협약에 따라, 3년마다 인벤토리 보고서를 발간하고<sup>73</sup> 유럽연합 방사성 폐기물 지침에 맞추어서도 보고한다.<sup>74</sup> 보고서에 나와 있는 가장 최신 인벤토리는 2016년 12월 31일 기준이며 [표 17]에 나타나 있다.

<sup>72</sup> 스웨덴 방사선안전청, 2018년, <유럽연합 이사회 지침(2011/70/Euratom) 이행에 대한 2차 국가보고서>, 2019년 4월 22일 참조, <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/press/news/2018/swedens-implementation-of-nuclear-waste-directive-reported-to-european-commission/>

<sup>73</sup> 스웨덴 환경에너지부, 2017년, <사용후핵연료 및 방사성폐기물의 안전한 관리에 관한 공동협약에 대한 6차 국가보고서(Ds 2017:51)>, 2019년 4월 22일 참조, <https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/departementsserien-och-promemorior/2017/10/ds-201751/>

<sup>74</sup> 스웨덴 방사선안전청, 2018년, <유럽이사회 지침(2011/70/Euratom) 이행에 대한 2차 국가보고서>, 2019년 4월 22일 참조, <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/press/news/2018/swedens-implementation-of-nuclear-waste-directive-reported-to-european-commission/>

[표 17] 2016년 12월 31일 기준 스웨덴 핵폐기물 현황

폐기물 종류	저장 방식	부지	폐기물 양
사용후핵연료 (고준위 폐기물)	중간 저장(습식)	핵반응로 필수냉각수조	2,387다발 또는 492 tHM*
	중간 저장(습식)	Oskarshamn 핵발전소 지하 75m 냉각수조 형태의 중앙 천층 중간 저장 시설 (CLAB)	31,817다발 또는 6,267 tHM**
	재처리용으로 반출된 사용후핵연료	Oskarshamn 핵발전소에서 영국행 140 tHM, Barsebäck 핵발전소에서 프랑스행 56 tHM	206 tHM***
단수명 중저준위 폐기물	중간 저장	Studsvik 부지 및 핵발전소	8,500m <sup>3</sup>
장수명 중준위 폐기물	중간 저장	Studsvik 부지, 핵반응로 부지, 중간 저장 시설(CLAB)	5,300m <sup>3</sup>
극저준위 폐기물	중간 저장	핵반응로 부지	2,900m <sup>3</sup>
단수명 중저준위 폐기물	처분된 폐기물	Forsmark 핵발전소 바깥 해저 50m에 있는 천층 처분 시설 (SFR)	38,922m <sup>3</sup>
극저준위 폐기물	천층 매립	핵반응로 부지 (Barsebäck 제외) 및 Studsvik 부지의 천층 매립지	27,841m <sup>3</sup>

출처: SKB 2017

주: \* Studsvik 부지의 연구용 R1 핵반응로 연료 0.04 tHM 포함

\*\* Studsvik 핵연구시설의 고방사선 취급 실험실에서 발생한 사용후핵연료 2.7 tHM 및 독일산 사용후 MOX 연료 22.5 tHM 포함

\*\*\* 연구용 R1 핵반응로의 사용후핵연료 4.7 tHM이 재처리 목적으로 영국으로 반출되었고, 연구용 R2/R2-0 핵반응로의 사용후핵연료 최소 13 tHM이 재처리 목적으로 미국과 벨기에로 반출됨

스웨덴에는 현재 거의 7,000톤의 사용후핵연료가 대부분 중앙집중식 습식 저장 시설(CLAB)에 보관되어 있다. 사용후핵연료는 핵반응로 부지의 필수냉각수조에서 몇 년만 저장된다. 단수명 중저준위 폐기물 약 8,500m<sup>3</sup>과 장수명 중준위 폐기물 5,300m<sup>3</sup>는 현재 중간 저장 시설에 있다. 초기 핵폐기물은 대부분 Studsvik 부지에 있으며, 해체 작업이 진행되면서 점점 더 많은 양의 핵폐기물이 핵반응로 부지에 보관되고 있다. 핵반응로 운전에서 나오는 단수명 중저준위 폐기물은, 현재까지 40,000m<sup>3</sup>의 폐기물이 처분된 기존 처분장(SFR)으로 보내진다. 극저준위 폐기물은 천층 매립장에 처분되며, 현재 4개 시설에 있는 해당 폐기물 양은 약 30,000m<sup>3</sup>이다. 또한 여전히 임시 저장 중인 극저준위 폐기물도 2,900m<sup>3</sup> 있다.

핵반응로 운전 기간에 따른 핵산업계의 시나리오에 의하면, 스웨덴의 사용후핵연료 최종 발생량은 11,400톤에 이를 것으로 전망된다. 모든 핵시설 해체 후 추정되는 폐기물 양은, 단수명 중저준위 폐기물은 153,000m<sup>3</sup>이고 장수명 중준위 폐기물은 16,400m<sup>3</sup>이다.<sup>75</sup>

### 폐기물 관리 정책 및 폐기물 시설

1984년 원자력법에 의하면 핵산업계와 발전업체가 방사성 폐기물 관리 및 최종 처분을 실행하고 그 비용을 부담하

75 스웨덴핵연료및폐기물관리회사(SKB), <2016년 계획: 핵발전 방사성 폐기물 처리 2018년 이후 비용, 2018-2020년 수수료 근거(SKB TR-17-02)>, pp. 35-36, 2019년 4월 22일 참조, <http://www.skb.com/publication/2487964/>

도록 되어 있다.<sup>76</sup> 이 법은 현재 재검토되고 있다. 핵산업계는 3년마다 규제 당국인 스웨덴방사선안전청(SSM)에 연구 개발 보고서를 제출해야 한다. 정부는 보고서를 검토하고 승인해야 하는데, 핵산업계의 조건에 따라 이를 수행할 수 있다. 이것이 정부가 핵산업계의 방사성 폐기물 계획에 대해 변경을 요청할 수 있는 유일한 방법인데 현재까지 그런 경우는 드물다.

규제당국 SSM은 원자력법에 따라 처분장을 위시한 핵시설의 인허가를 검토한다. 1990년대 말 이래 모든 핵시설은 스웨덴 환경법전에 따른 허가도 획득해야 한다. 이 같은 이중 허가 절차로 SSM 및 토지환경법원의 권고사항이 스웨덴 정부에게 전달되고, 이 권고사항을 바탕으로 스웨덴 정부는 핵시설에 대한 최종 허가 결정을 내린다.

핵산업계는 핵폐기물 관련 책임을 수행하기 위한 민간 전문업체를 출범시켰다. 스웨덴핵연료및폐기물관리회사(SKB)는 기존 핵폐기물 시설을 운영하고 신규 시설을 개발한다. 또 다른 전문업체 Svafo AB는 초기 핵폐기물을 관찰할 목적으로 창업되었다. 초기 핵폐기물은 주로 과거 군사 및 민간 연구 프로그램에서 발생한 것이다. 2009년 이래 Svafo AB는 핵산업계의 소유로 운영되고 있다.

핵발전소에서 나오는 사용후핵연료는 먼저 몇 년에 걸쳐 냉각된다. 그 후 Oskarshamn 핵발전소에 위치한 중앙집중식 중간 저장 시설인 CLAB으로 이송된다. 이 습식 저장 시설에는 화강암반 지하 50미터의 동굴에 2개의 냉각수조가 있다. 여타 핵반응로 부지에서 발생한 사용후핵연료는, 핵시설 간 기타 방사성 폐기물 운송용으로도 사용되는 Sigrid라는 특수선으로 이송된다.

다른 많은 국가들처럼 스웨덴에서도 고준위 폐기물 심지층 처분에 대한 연구가 오래 진행되었다. 1970년대 중반부터 핵산업계는 사용후핵연료의 영구 처분을 위해 KBS-3라고 불리는 저장 시스템을 개발해 왔다. 화강암 암반 500미터 지하에 처분장이 계획되어 있다. 5cm 두께의 구리 용기에 사용후핵연료를 담아 지하 터널 바닥의 구멍에 넣어 보관한다. 구리 용기는 완충 역할을 하는 벤토나이트 점토로 감싸고, 터널도 점토로 채워지게 될 것이다. 화강암 암반에 지하수가 흐르는 하나, 구리와 점토로 만들어진 인위적인 장벽이 핵폐기물을 수십만 년 동안 환경과 격리시킬 것이다.

처분장 부지 선정 과정은 지난하고 복잡했다. 2009년 마침내 핵폐기물 회사 SKB가 Forsmark 핵발전소가 있는 암반을 선정했다. 2011년 허가 신청서가 제출되었고 규제당국 SSM과 환경법원이 긴 프로세스 끝에 2018년 1월 스웨덴 정부에 의견서를 제출하였다. 환경법원은 장기적으로 충분한 안전성을 보장할 수 있을 정도로 구리 용기의 견고함이 입증되지 않으면 환경법에 의하여 허가를 기각할 것을 권고하였다. 반면, 규제당국 SSM은 구리 용기 문제는 원자력법에 의거하여 단계적 의사결정 과정에서 추후에 다룰 수 있기 때문에 정부가 허가를 승인해야 한다고 권고하였다. 허가 신청은 이제 정부 검토 단계에 있으며, 구리 부식 문제가 앞으로 증대하게 부각될지는 미지수이다. 정부의 결정은 2020년에 나올 것으로 전망된다.

정부가 처분장 건설 허가 신청을 승인한다면, 정부는 우선 환경법전에 따라 “허용가능성”을 부여하고 조건을 달 수 있다. 여기에 환경법원이 조건부 허가를 내주어야 한다. 그런 후에 원자력법에 따라 정부가 허가서를 발행하고 규제당국 SSM이 단계적인 의사결정 프로세스를 시작한다. 즉, 착공, 운영 및 본격 운영에 대한 의사결정이 순차적으로

76 스웨덴 핵폐기물 국가이사회, <환경법전 및 방사능법에 의한 사용후핵연료 최종 처분장 허가 보고서(2011:2e)>, 2019년 4월 22일 참조, [https://www.karnavfallsradet.se/sites/default/files/documents/report\\_2011\\_2.pdf](https://www.karnavfallsradet.se/sites/default/files/documents/report_2011_2.pdf)

이루어지는 것이다. 이 프로세스는 몇 년 더 소요될 것이며, 따라서 2025년 이전에 착공될 가능성은 적다. 만약 허가가 난다면, 처분장은 준공까지 10년이 걸리고 약 60년간 운영될 것이다.

고준위 폐기물의 심층 처분 계획 외에도, 기타 핵폐기물을 위한 처분장이 몇 군데 운영되고 있거나 계획 중에 있다.

- 장수명 중저준위 폐기물 저장 용도로 SFL이라 불리는 처분장이 계획되었다. 하지만 SKB는 아직 처분 방법을 제시하거나 후보지 선정 과정을 시작하지 않았다.
- 장수명 중저준위 폐기물은 Studsvik 부지의 암반 동굴 안에 있는 중간 저장 시설에 저장되어 있다. 폐기물의 출처는 다양한데, 대부분은 초기 핵폐기물이다.
- 핵발전소에서 발생한 단수명 중저준위 폐기물 저장 용도로 SFR이라 불리는 처분장이 1983년 허가되었다. 이 처분장은 Forsmark 핵발전소 밖 해저 75미터에 위치해 있다. 핵발전소 해체에 따른 폐기물 용도로 해저 120미터에 증설이 계획되어 있고 증설에 대한 허가 절차가 진행 중이다. SFR 처분장 콘크리트 장벽의 견고성과 용기 부식에 대한 문제가 제기된 바 있다. 한편 초기 핵폐기물을 담은 용기도 다수 있다. 이 중 상당수 용기는, 용기에 담긴 내용물이 불확실하거나 장수명 폐기물이 포함되어 있다고 현재 알려졌다. 이 때문에 회수가 불가피한 상황이다.
- Studsvik 핵 연구소 부지에 사용후핵연료 시료의 상업용 실험을 수행하는 고방사선 취급 실험실이 있다. 이 시설에는 방사성 폐기물을 압축하는 소각로와, 방사능 오염을 제거한 후 방출하기 위해 방사성 금속을 제염하고 녹이는 용융기를 갖추고 있다. Studsvik 시설은 1980년대 초반부터 점차 민영화되었다. 2017에 프랑스 전력회사 EDF의 자회사인 Cyclife社가 고방사선 취급 실험실을 제외한 Studsvik AB 시설 대부분을 인수하였다.
- 극저준위 폐기물을 매립하는 천층 처분장이 Ringhals, Forsmark 및 Oskarshamn 핵발전소와 Studsvik 부지에 있다. Studsvik 매립장은 영구 폐쇄되었다.

### 비용 및 자금조달

국제적으로 비교할 때, 스웨덴은 1981년 초기 재정법에 정의된 바에 따라 방사성 폐기물 관리 비용을 상대적으로 조기에 마련해 왔다. 2006년 재정법은, 핵발전 사업자 혹은 방사성 폐기물을 생산하는 자가 폐로와 비용 전액에 대한 책임을 지도록 규정하고 있다.<sup>77</sup> 핵발전으로 생산된 전기에 부과하는 수수료와 핵발전소 운영사의 보증증권이 폐기물 관리 및 핵반응로 폐로 비용을 충당하는 두 가지 주요 수입원이다. 핵산업계는 여러 시나리오별 미래 비용을 전망하는 PLAN 보고서를 3년마다 작성한다. 이 보고서는 방사성 폐기물 수수료 및 보증증권 계산을 위한 자료를 제공한다. 이 보고서는 스웨덴국채청이 면밀히 검토한 후 공공의 검토를 위해 공개된다. 2018년까지 이 업무를 규제 당국 SSM이 관할하였으나, 자금 부족에 대한 리스크가 증가한다는 공감대가 형성되어 국채청으로 업무가 이관되었다. 국채청이 권고안을 제출하면 정부가 최종 결정을 내린다.

2018년-2020년 기간에는 발전단가에 평균 50크로나/MWh(5.40달러/MWh)의 수수료가 책정되었다. 이 수수료는 발전소별로 책정되는데, Oskarshamn 발전소(64크로나/MWh, 약 6.9달러/MWh)가 가장 높고 Forsmark 발전소(33크로나/MWh, 약 3.5달러/MWh)가 가장 낮다. 스웨덴 정부는 또한 사업자가 부담해야 할 보증증권 금액

77 스웨덴 정부, 2006년, <방사능 폐기물 관리 자금법(2006:647)>, 2019년 6월 28일 참조, [https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/lag-2006647-om-finansiering-av-karntekniska\\_sfs-2006-647](https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/lag-2006647-om-finansiering-av-karntekniska_sfs-2006-647)

의 수준도 설정하여, 향후 발전 수수료만으로 계획된 비용을 충당하지 못하는 경우와 예상치 못한 비용이 발생할 경우를 대비하고 있다. 2018년-2020년 기간 추가 비용 상승에 대비한 증권의 “재정적 금액”은 290억 크로나(31억 달러)이며, 예측하지 못한 신규 비용에 대한 증권의 “보완적 금액”은 150억 크로나(16억 달러)이다.

사업자가 납입하는 수수료는 정부 예산과는 별도로 특수 핵폐기물기금에 적립된다. 2017년 말 기준 기금의 규모는 670억 크로나(72억 달러)이다. 핵반응로 폐로뿐만 아니라 모든 방사성 폐기물의 관리 및 최종 처분을 위한 총 비용은 1000~1100억 크로나(107억~118억 달러)로 추산된다.<sup>78</sup> 2008년 금융위기로, 기대했던 것보다 장기 채권에 대한 수익이 줄어들어 자금이 충분하지 않을 리스크가 증가했다.

재정법은 금융 시스템의 리스크를 관리할 목표로 2017년 전폭 개정되었다. 핵폐기물기금의 자금은 이제 원금에 대한 수익률 제고를 위해 국채보다 안정성이 낮아도 투자될 수 있다. 한편, 핵산업계는 남은 핵반응로의 수명을 50년으로 계산할 수 있게 되었다.

스웨덴은 1988년부터 별도의 Studsvik법에 따라 최근까지 초기 핵폐기물의 관리 및 처분 비용을 충당하고자 했다.<sup>79</sup> 이 비용은 초창기 핵 연구의 주요 수혜자로서 핵발전소 사업자가 부담해야 할 부분이기도 했다. 이 핵폐기물기금에 대한 수수료는 핵발전 단가에서 대략 1~3크로나/MWh(0.10~0.30달러/MWh)가량 차지했다. 그러나 이 방식은 2017년 말 폐지되고, 남은 책임은 개정된 재정법에 포함되었다.

## 요약

현재 스웨덴의 핵폐기물 관리 및 처분 통제 시스템은 1980년대 초반에 구축되어 자금조달 및 실행의 책임이 핵산업계에 있음을 명시하고 있다.

스웨덴은 사용후핵연료의 경우 습식 중간 저장만을 하고 있으며, 모든 사용후핵연료는 단일 시설로 집중화되어 있다. 또한 단수명 핵폐기물 처분장이 운영되고 있으며, 해체 폐기물 증가에 따라 증설 재허가 과정이 진행 중이다.

스웨덴은 사용후핵연료의 심지층 처분 계획을 상당히 진행시켰다. 처분장 허가 프로세스가 정부의 의사결정 단계까지 와있다. 폐기물 용기로 구리를 사용한다는 점에 대해 과학적 비판이 제기되어 최종 허가가 날지는 미지수이다.

스웨덴은 핵폐기물 관리 및 폐로를 위해 투명하고 잘 다듬어진 자금조달 시스템을 운영하고 있다. 핵폐기물 기금으로 사용할 수 있는 충분한 자금이 적립되어 있지만, 기금이 부족할 수 있다는 우려가 증가하고 있어 이에 대한 논의도 이루어지고 있다.

78 스웨덴핵연료및폐기물관리회사(SKB), 2017년

79 이 법은 Studsvik 핵연구시설의 이름을 따서 지어졌다. 이 시설에는 대부분의 초기 핵폐기물이 저장되어 있다. 특수방사성폐기물관리자금법(1988:1597) 참조, [https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/lag-19881597-om-finansiering-av-hanteringen-av\\_sfs-1988-1597](https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/lag-19881597-om-finansiering-av-hanteringen-av_sfs-1988-1597)

## 7.6 스위스

### 개괄

핵폭탄을 개발하고 제조한 대국에 비해 스위스는 핵 분야의 후발주자라고 표현할 수 있다. 애초에 스위스라는 나라의 제한된 규모로 인해, 고도로 민감한 핵개발 프로젝트의 구축과 같은 야심 찬 프로그램을 수행할 재정도 인력도 갖추기 어려운 상황이었다. 그럼에도 스위스 역시 2차 세계대전 후 핵무장을 고려했다. 이는 향후 이 나라의 핵산업 구조에 결정적 영향을 미쳤다.

더욱이 제네바는 1955년 이후 핵에너지와 관련한 여러 국제회의 개최지가 되었다. 1955년 1차 국제원자력회의 이후 스위스는 당시 미국이 전시했던 수조형 핵반응로를 매우 우호적 조건으로 인수하였다. 이 프로젝트로 스위스는 핵발전 입성의 초석을 놓게 되었다.

1960년대에 스위스는 독자적으로 중수로를 개발하여 스위스 서부지역 Lucens의 동굴에서 가동하였다.<sup>80</sup> 그러나 1969년, 운영 개시된 지 얼마되지 않아 부분적인 노심 용융 사고가 발생했다. 이 사건으로 스위스의 핵무장 계획은 사실상 종료되었다. 스위스는 1988년 군사무기프로그램도 철회했다.<sup>81</sup>

1969년과 1984년 사이, 설비용량 350MW에서 1000MW급 핵반응로 5기가 Beznau, Leibstadt, Mühleberg 및 Gösgen 부지에서 운전을 시작하여 전력망에 연결되었다.<sup>82</sup> 5개 추가 부지에 핵발전소를 확장할 계획도 있었으나, 1970년대에 형성된 반대 여론과 지나치게 큰 프로그램 규모로 인해 철회되었다. 2018년 기준 스위스 총 전력에서 핵발전이 차지하는 비중은 약 40%이다.<sup>83</sup> 향후 핵발전이 확대될 가능성은 희박하다. 2008년 핵에너지법에 의하면, 핵시설 건설 및 가동은 연방각의(Federal Council)의 일반 면허를 필요로 한다.<sup>84</sup> 스위스 핵산업계는, 중저준위 폐기물 및 고준위 폐기물을 위한 처분장 후보지 물색 작업이 어느 정도 완성된 후 신규 상업용 핵반응로를 추가할 계획이다.

스위스에는 우라늄 광산이 없으며 우라늄 농축이나 핵연료 제작 혹은 재처리는 하지 않는다. 재처리용으로 조사된 핵연료의 수출에 대한 10년 모라토리엄이 2006년 발효되었고 최근 2020년까지 연장되었다.<sup>85</sup> 2016년 La Hague와 Sellafield 재처리 공장에서 재처리되고 유리화된 폐기물 반환이 완료되어, 스위스 재처리 역사(플루토늄 연료

80 Aemmer, F. 1992, Geschichte der Kerntechnik in der Schweiz. Die ersten 30 Jahre 1939-1969(스위스 핵기술의 역사, 첫 30년 (1939년-1969년)), Schweizerische Gesellschaft für Kernfachleute (SGK), Olythus Verlag für verständliche Wissenschaft und Technik

81 Wildi, T. 2003, Der Traum von eigenen Reaktor(독자 핵반응로의 꿈), Chronos Verlag

82 Nagelin, R. 2007, Geschichte der Sicherheitsaufsicht über Schweizerischen Kernanlagen 1960-2003(스위스 핵시설 안전감독의 역사 (1960-2003)), Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen

83 Statista, 2019년, "Anteil des atomar erzeugten Stroms an der gesamten Stromproduktion in der Schweiz von 2003 bis 2017(스위스 발전 총량에서 원자력이 차지하는 비중 2003-2017년), 2019년 5월 10일 참조, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/29583/umfrage/anteil-der-atomenergie-an-derstromerzeugung-in-schweiz-seit-1998/>

84 이 규정은 1978년 10월 10일 연방 법령으로 먼저 도입되었고 2003년 3월 21일 핵에너지법(KEG)에 포함되었다. 제10조와 제13조를 아래 링크에서 독일어로 참조 가능, <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20010233/201801010000/732.1.pdf>

85 스위스 의회, 회보, "15.079 Moratorium für die Ausfuhr abgebrannter Brennelemente zur Wiederaufarbeitung, Verlängerung(재처리용 사용후핵연료 반출에 대한 15.079 모라토리엄)", 2019년 6월 28일 참조, <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/amtliches-bulletin/amtliches-bulletin-dieverhandlungen?SubjectId=37419>

주기)에 마침표를 찍었다.<sup>86</sup>

### 폐기물 분류 체계

스위스는 1970년대 후반 양대 처분장 전략에 기반하여 폐기물 분류 시스템을 개발하기 시작했다.<sup>87</sup> 지난 몇십 년 동안 이 분류 체계는, 오늘날 폐기물 양을 기록하는 MIRAM 인벤토리에 데이터를 제공할 수 있도록 체계화되어 왔다.<sup>88</sup> 스위스는 방사능 농도에 따라 폐기물을 분류하는데, 사용후핵연료, 유리화된 핵분열 생성물 용액, 20,000 Bq/g 이상 ATA 폐기물(알파선을 방출하는 독성 폐기물), 중저준위 폐기물로 구분한다.<sup>89</sup> 사실 이 같은 하위 분류는 2가지 종류의 처분장만을 고려하는 지질학적 처리의 개념을 따른 것이다.

단수명 및 중수명 폐기물에는, 핵발전소 운전에서 발생하는 중저준위 폐기물과 의학, 산업 및 연구 분야에서 발생하는 전체 폐기물이 포함된다.<sup>90</sup> 전자에는 고준위 사용후핵연료, 과거 재처리에서 발생한 유리화 폐기물, 장수명 중준위 초우라늄 폐기물이 포함된다. 최근 몇 년 동안에 스위스는 방사성 붕괴를 위한 저장 시설을 활용해 극단수명 저준위 폐기물을 분류하는 노력을 기울여 왔다. 이러한 폐기물은 방사능을 고려하지 않고 처분할 수 있기 때문에 최종 처분에 들어갈 폐기물의 양을 감소시키는 효과를 가져온다.

### 폐기물의 양

스위스 연방핵안전국(ENSI)은 중간 저장 시설에 보관되어 있는 패키지의 개수를 매년 보고한다. 중간 저장 인벤토리는 스위스 정부의 공동협약 보고서를 통해 열람 가능하다.<sup>91</sup> 스위스의 경우 방사성 폐기물을 추적 관리하는 것은 다른 대부분의 나라들에 비해 상대적으로 용이하다. 주요 배출원이 핵발전소, 그리고 의료, 산업 및 연구용으로 크게 2개로 나뉘기 때문이다.<sup>92</sup>

그러나 스위스의 핵폐기물은 폐기물 내에 들어 있는 중금속 및 유기화합물질 차원에서 보면 다중적이다. 또한 Lucens 용융 사고 핵반응로와 DIORIT 연구용 핵반응로 등을 포함하여, 핵반응로 종류나 연료의 종류, 연료 연소 방법도 각기 다르다.

아래 표는 현재 중간 저장 시설에 보관되어 있는 폐기물의 양을 정리한 것이다.

---

86 Nuklearforum Schweiz, 2016, "Letzter Transport von Wiederaufarbeitungsabfällen in die Schweiz, 21.12.2016(스위스로 재처리 폐기물의 마지막 운송(2016년 12월 21일)", 2019년 4월 22일 참조, <https://www.nuklearforum.ch/de/aktuell/e-bulletin/letzter-transport-von-wiederaufarbeitungsabfaellen-die-schweiz>

87 Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE), Gruppe der Kernkraftwerksbetreiber und -Projektanten (GKBP), Konferenz der Überlandwerke (UeW), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 1978, Die nukleare Entsorgung in der Schweiz(스위스 핵폐기물 처분), 2월 9일

88 Nagra, 2014, Modellhaftes Inventar für Radioaktive Materialien(방사능 물질의 인벤토리 모델) MIRAM 08, NTB 08-, 06

89 스위스연방핵안전국(ENSI), 2015, <폐기물 관리 비교연구, 핵폐기물처분 연방 실무그룹의 방사성 폐기물 연구프로그램>, 2015년 2월 프로젝트 보고서, p. 53

90 IAEA, 2019, Predisposal Management of Radioactive Waste from the Use of Radioaktive Material in Medicine, Industry, Agriculture Research and Education, Specific Safety Guide, No. SG-45

91 스위스연방핵안전국, 2017년, <사용후핵연료 및 방사성폐기물의 안전한 관리에 관한 공동협약 의무 이행>, 2019년 4월 22일 참조, [https://www.ensi.ch/wp-content/uploads/sites/5/2017/10/Joint\\_Convention-Sixth\\_national\\_report-Switzerland\\_2017.pdf](https://www.ensi.ch/wp-content/uploads/sites/5/2017/10/Joint_Convention-Sixth_national_report-Switzerland_2017.pdf)

92 Naegelin 2007년

[표18] 2016년 기준 스위스 핵폐기물 현황

폐기물 종류	저장 방식	부지	폐기물 양
사용후핵연료 및 고준위 폐기물	중간 저장 (습식 및 일부 건식)	핵반응로 필수냉각수조 및 발전소 부지의 ZWIBEZ 중간 저장 시설	688.8 tHM
	중간 저장(습식)	Gösgen 발전소, 냉각수조 및 추가 습식 저장 시설	238 tHM
	중간 저장(건식)	중앙집중식 저장 시설 ZZL	450.4 tHM
ATA*	중간 저장	중앙집중식 저장 시설 ZZL	99m <sup>3</sup>
	중간 저장	중앙집중식 저장 시설 BZP(PSI)	83m <sup>3</sup>
중저준위 폐기물*	중간 저장	핵반응로 저장 및 ZWIBEZ	3,865m <sup>3</sup>
	중간 저장	중앙집중식 저장 시설 ZZL	2,339m <sup>3</sup>
	중간 저장	중앙집중식 저장 시설 BZL(PSI)	2,109m <sup>3</sup>

출처: ENSI(2017년) 자료를 바탕으로 자체 작성

주: \* 알파독성물질(ATA) 및 중저준위 폐기물은 처리된 폐기물과 미처리된 폐기물 모두 포함함

BZL = 연방 중간 저장 시설, PSI = 스위스 Pau-Scherrer 연구소, ZWIBEZ = Beznau 핵발전소 소재 중간 저장 시설, ZZL = 중앙집중식 중간 저장 시설

재처리로 얻은 플루토늄은 MOX 연료의 원료로 사용되었다. 2013년 기준 플루토늄 재고는 1kg 정도였다. 또한 초창기 시절의 플루토늄 비축분 20kg가 존재했는데, 엄격한 보안 하에 Paul-Scherrer 연구소에 수십 년 동안 보관된 후 비무기급으로 변환하기 위해 우라늄과 혼합하여 2016년에 미국으로 최종 수출되었다. 인벤토리에 기록된 것 외에, 5,000톤 이상에 달하는 방사성 폐기물이 1969년과 1982년 사이 대서양에 투기되었다.

2075년까지 예상되는 폐기물의 양은, 스위스 국가방사성폐기물처분협동조합(Nagra)이 공개하는 보고서에 폐기물 종류 및 시설별로 제시되어 있다. 예상 운전 기간 60년 동안 스위스의 총 핵폐기물 발생량은, 사용후핵연료 및 고준위 폐기물 약 4,000톤과 중저준위 폐기물 63,000m<sup>3</sup>이다. 한편 의학, 산업 및 연구 분야에서 중저준위 폐기물 20,000m<sup>3</sup>가 발생할 것으로 전망된다.<sup>93</sup>

### 폐기물 관리 정책 및 폐기물 시설

2003년 핵에너지법은 스위스의 방사성 폐기물을 규제하기 위한 핵심 정책 도구이다. 심지층 처분이라는 개념은 방사성폐기물처분개념 전문가그룹(EKRA)에서 개발된 것이었다.<sup>94</sup>

1972년 이래 핵발전소 사업자와 연방정부는 국가방사성폐기물처분협동조합(Nagra)을 운영해 왔다. Nagra는 방사성 폐기물 처분을 위한 계획 수립 및 처분 작업을 관할하고 있으며 스위스연방핵안전국(ENSI)의 감독을 받는다. 계획 단계(심지층 처분장의 부문 계획인 부지 선정 과정 등)에서는 안전당국 ENSI은 의사결정을 할 수 없고 성명서만 낼 수 있다.<sup>95</sup> 연방에너지청과 환경교통에너지통신부(DETEC)가 인허가를 관할하고 있다. 핵안전위원회는 2차 의

93 NAGRA, 2017, Radioaktive Abfälle, woher, wieviel, wohin?(방사성 폐기물: 어디서 얼마나 와서 어디로 가는가?), 2019년 5월 16일 참조, [https://www.nagra.ch/data/documents/database/dokumente/\\$default/Default%20Folder/Publikationen/Broschueren%20Themenhefte/d\\_th2\\_RadAbfall\\_2017.pdf](https://www.nagra.ch/data/documents/database/dokumente/$default/Default%20Folder/Publikationen/Broschueren%20Themenhefte/d_th2_RadAbfall_2017.pdf)

94 방사성폐기물처분개념 위원회(EKRA), 2000년, <방사성 폐기물 처분 개념 최종보고서>, 연방에너지청, 베른

95 Munz, M. 2016, 스위스 의회 질의(2016년 12월 14일), 제16.4056호, “Hat das ENSI im Sachplanverfahren geologische Tiefenanlager Beratung- und Aufsichtsfunktion(ENSI는 심지층 처분장 분야별 절차 계획에 감독 권한이 있는가?)”, 연방각의는 이에 대하여 2017년 2월 15일에 답변함

견 제안자로 프로그램에 참여하고, 연방각의 또는 DETEC가 공식 의사결정 기관이다.

폐기물은 먼저 핵발전소 필수냉각수조에 수년 동안 보관된 후 중간 저장 시설로 이송된다. 고준위 폐기물의 경우 다음 세 군데의 중간 저장 시설에 저장되어 있다.

- Gösgen 핵발전소에서 나오는 사용후핵연료는 Gösgen 습식 저장 시설에 저장됨
- Beznau 핵발전소에서 나오는 사용후핵연료는 Beznau 소재 ZWIBEZ 시설에 건식 저장됨
- 고준위 폐기물 및 과거 재처리 공정에서 나온 유리화 폐기물은, Würenlingen 소재의 중앙집중식 중간 저장소인 ZWILAG 시설에 저장됨

중저준위 폐기물은 핵발전소 인근 여러 곳과 ZWILAG에 저장되어 있다. 또한 Würenlingen에 소재한 ZWILAG 옆에 위치한 연방중간저장시설은 의학, 산업 및 연구 분야에서 나온 폐기물을 수용한다.

전반적으로 저장 용량은 넉넉한 편이다. 하지만 스위스의 중간 저장은, 여러 발전소와 시설 간 폐기물 분배, 중간 저장 시설의 임시적 성격 등에 따른 어려움을 안고 있다. 특히 기간이 길어질수록 이 같은 조건은 리스크 증대로 이어질 것이다.

스위스는 2008년 심지층 처분장의 부문 계획 절차에 착수했다. 3단계에 걸쳐 심지층 처분장을 한 곳 이상 선정하는 것이 목표이다.<sup>96</sup> 고준위 폐기물을 처분할 암반으로 오팔리너스 점토가 선정되었다. 이 암반은 결정형 기반 위의 퇴적물층에 조성된 약 100미터 두께의 점토층이다. 독일과의 국경 지대에 3개 부지가 선정되었고, 그 중 Schaffhausen시 인근 Zürcher Weinland 지역이 우선순위가 가장 높다. 처분장 건설, 폐쇄 및 모니터링은 100년 넘게 걸릴 것이다. 심지층 처분장 개념은, 처분장 운영이 종료될 때까지 폐기물의 회수 가능성을 염두에 둔 개념이다.

심지층 처분장 건립 절차는 지역 주민의 폭넓은 참여를 보장하도록 기획되었다. 그러나 현장에서는 공청회를 열어 일방적으로 정보를 제공하는 정도가 전부이다. 특히 안전 및 부지 관련 의사결정은 Nagra 또는 당국에 의해 배타적으로 이루어진다. Nagra는 이르면 2060년까지 심지층 처분장이 완비될 것으로 전망하고 있다.<sup>97</sup>

### 비용 및 자금조달

스위스는 오염자부담원칙을 적용한다. 폐기물 생산자가 폐기물 관리 프로그램 이행을 책임지는 것이다. 주요 폐기물 발생원은 핵발전소이며, 대부분이 직간접적으로 공공의 소유이다.

스위스 정부는 1984년과 2000년에 각각 2개의 기금을 설립했다. 하나는 폐로를 위한 자금이고, 다른 하나는 폐기물 처분을 위한 자금이다. 연방각의가 기금 감독을 관할한다. 연방각의는 핵시설폐로기금 및 핵발전소폐기물처분기금(STENFO)의 집행부를 감독한다.<sup>98</sup> STENFO는 5년마다 폐로 및 폐기물 처분에 들어갈 비용 추산을 갱신하여 발

96 ENSI 홈페이지, 심지층 처분장 분야별 계획, 2019년 6월 28일 참조, <https://www.ensi.ch/en/waste-disposal/deep-geological-repository/sectoral-plan-for-deep-geological-repositories-sgt>

97 Nagra, 2016, Waste Management Report 2016 from the Waste Producers, Technical Report 16-01E

98 STENFO, 핵시설폐로기금 및 핵폐기물처분기금 소개, <http://www.stenfo.ch/en/Home>

표하고 있다.

핵발전소 사업자는 이 두 기금을 위해 수수료를 납부해야 한다. 이 수수료는 50년 운전 기간을 가정하고 예상되는 비용을 충당할 수 있도록 산정된 금액이다.<sup>99</sup> 2018년까지 사업자는 기금에 75억 프랑(73억 9000만 달러)을 불입하였고, 사업자가 납부해야 할 금액은 총 240억 프랑(237억 6000만 달러)으로 추산되었다.<sup>100</sup> 하지만 비용 추산은 계속되는 여러 변동 사항에 따라 달라질 것이다.

핵반응로 폐로 및 폐기물 처분 추산 비용이 지난 30년 동안 10배 이상 늘어났다. 1980년대 초 사업자측은 폐로 및 처분 비용을 20억 프랑(19억 7000만 달러)으로 예상했다. 1994년이 되자 Nagra는 이미 폐기물 처분 비용만으로 40억 프랑(39억 4000만 달러)을 추정했다. 오늘날 50년 운전 기간에 예상되는 총 비용은 250억 프랑(246억 3000만 달러)이고, 의학/산업/연구용 폐기물 처리에 추가적으로 25억 프랑(24억 6000만 달러)이 필요할 것으로 추정된다.<sup>101</sup> Oxford 대학교의 추산은 비용을 훨씬 높게 산정하고 있다.<sup>102</sup>

비용 추산에 불확실성이 큰 이유 중 하나는, 경험이 부족하며 참고할 프로젝트가 없다는 데 있다.<sup>103</sup> 이는 특히 처분 비용과 관련된다. 여기에 참고할 수 있는 자료는 동굴 프로젝트뿐이다. 이것은 처분 비용 추정이 지닌 명백한 취약점이다. 또한 500미터 지하의 심지층 처분장 프로젝트만을 염두에 두고 산정된 비용이라는 점도 감안해야 한다. 심부 시추공 처분 옵션 등 기타 심지층 처분 가능성은 포함되지 않았다.

## 요약

스위스의 방사성 폐기물 관리는 IAEA, NEA/OECD 등 주요 국제기구가 조율하는 국제 관행을 따르고 있다. 나라 규모가 작은 스위스는 핵 분야에서 선도적 역할을 한 적은 없으나 근본적으로 국제 관행을 존중해 왔다.

스위스의 핵폐기물 최종 처분의 기본 개념은 다층적 장벽 개념이다. 1970년대 말 재처리를 점차 포기하면서 고준위 핵폐기물 저장 전략에 주된 변화가 생겼다. 재처리에서 발생하는 유리화된 고준위 폐기물 대신 사용후핵연료를 철강 또는 구리 혼합재료의 특수 저장 용기에 담아 포장하게 되었다.

다른 나라들과 마찬가지로 스위스도 50년 넘게 핵프로그램을 영위한 후 폐기물 처분 프로그램을 본격화했기 때문에 처분 프로그램은 여전히 초기 단계에 있다. 그동안 고준위 폐기물과 사용후핵연료는 중간 저장 시설에 보관하고 중저준위 폐기물은 대부분 처리하여 분산형 중간 저장 시설에 보관해 오고 있다. 스위스 처분장은 500미터 깊이를

99 스위스 정부, 2007년, <핵시설폐로기금 및 핵폐기물처분기금 법령>, 2019년 4월 22일 참조, <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20070457/index.html>

100 Swiss Nuclear, 2019년, <폐로 및 폐기물처분 기금 현황>, 2019년 4월 22일 참조, <http://www.swissnuclear.ch/de/Stand-Stillegungs-und-Entsorgungsfonds.html>

101 스위스 연방공중보건청, 2018년, “연방 정부가 방사성 폐기물 처분 비용 추산을 업데이트한다”, 11월 30일, 2019년 4월 22일 참조, [https://www.bag.admin.ch/bag/de/home/gesund-leben/umwelt-und-gesundheit/strahlung-radioaktivitaet-schall/radioaktive-materialien-abfaelle/entsorgung-von-radioaktiven-abfaellen/der\\_bund\\_aktualisiert\\_seine\\_kostenschaetzungen\\_fuer\\_die\\_entsorgung\\_radioaktiver\\_abfaelle.html](https://www.bag.admin.ch/bag/de/home/gesund-leben/umwelt-und-gesundheit/strahlung-radioaktivitaet-schall/radioaktive-materialien-abfaelle/entsorgung-von-radioaktiven-abfaellen/der_bund_aktualisiert_seine_kostenschaetzungen_fuer_die_entsorgung_radioaktiver_abfaelle.html)

102 Budzier, A. et al. 2018, Oxford Global Projects, Quantitative Cost and Schedule Risk Analysis of Nuclear Waste Storage, Schweizerische Energie-Stiftung, 2019년 4월 22일 참조, <https://www.energiestiftung.ch/files/energiestiftung/fliesstextbilder/Studien/QRA%20Report%20V1.0.pdf>

103 Schweizerische Energie-Stiftung, “Atommüll müsste massiv teurer sein(핵발전은 훨씬 더 비싸져야 한다)”, 2019년 4월 22일 참조, <https://www.energiestiftung.ch/atomenergie-kosten.html>

규정한 기존 국가기본계획을 따르고 있다. 부지 선정 프로그램이 진행 중이며 2030년까지 결정짓는 것을 목표로 하고 있다. 고준위 폐기물 처분장은 2060년 전에는 완공하기 어려울 것이다.

다른 곳과 마찬가지로 스위스에서도 오염자부담원칙이 적용된다. 대부분 공적 자금으로 지원되는 운영 회사가 중간 저장과 최종 처분의 기획 및 집행을 책임진다. 처분을 위한 총당금은 두 개 기금으로 관리되고 있다. 50년 운전 기간을 가정한 총 비용은 최소 250억 프랑(246억 3000만 달러)에 이를 것으로 추정된다. 스위스식 처분 개념, 프로그램 조직 및 자금조달 모델이 얼마나 효과적일지는 앞으로 더 지켜봐야 할 것이다.

## 7.7 영국

### 개괄

영국은 초창기 핵기술 개발국 중 하나였다. 처음에는 1940년대에 핵무기 생산을 목적으로 핵기술 개발이 시작되었다. 잉글랜드 북서부 지방에 위치한 Sellafield(구 Windscale) 부지에서 핵무기용 플루토늄을 생산하기 위해 ‘Windscale Piles’ 핵반응로 개발이 이루어졌다. 그 뒤를 이어 무기급 플루토늄과 전력 생산에 모두 이용할 수 있는 이중용도(dual-use) 핵반응로가 개발되었다.<sup>104</sup>

영국은 핵반응로 개발에 있어 특색이 분명한 세 가지 단계를 지나왔다. 첫 번째 단계에서는 이중용도 핵반응로에 기반한 Magnox 디자인을 개발했다. Magnox는 자연 우라늄을 연료로 사용하고 흑연으로 감속하고 이산화탄소로 냉각하는 노형이다. 현재는 모두 폐쇄되었다. 두 번째 단계에서는 여전히 가스흑연 핵반응로를 기반으로 하지만, 이제 농축 우라늄을 연료로 사용하는 선진 가스냉각형 핵반응로(AGR)를 개발했다.<sup>105</sup> 세 번째 단계는 이른바 단축형 단계로 가압경수로 수입과 관련된다. 가압경수로 1기가 1997년에 완공되었다. 1998년 핵발전소는 총 발전량의 28%를 차지하며 정점을 찍었다. 하지만 이후 노후 발전소가 폐쇄되고, 발전소 노후화로 발생하는 문제가 발전소 가동률에 영향을 미치면서 2017년에는 핵발전소 비중이 21%로 감소하였다.<sup>106 107</sup>

오랜 공백 기간을 거친 후, 초창기 가압경수로와 유사한 설계의 유럽형 가압경수로(EPR)인 Hinkley Point C가 현재 건설 중이다. 5개의 신규 대형 핵발전소가 추가로 건설될 가능성도 있으나, 사업자가 재정적 이유를 들어 작업을 중단한 상태라 어찌 될지 미지수이다.<sup>108</sup>

노후 핵시설 구조물의 해체는 더딘 작업이다. 영국 핵산업에서 이야기하는 “유지 보수” 단계<sup>109</sup>는 핵발전소 부지에서 핵반응로 자체, 필수냉각수조, 중저준위 폐기물 보관소 외 모든 건물이 철거된 상태를 말한다. 이 남은 시설은 날씨에 영향을 받지 않도록 처리된다. 약 80년 후에, 남은 시설물이 모두 해체될 것으로 전망된다. 현재까지 Magnox 발전소가 유일하게 유지보수 단계에 이르렀고, 영국 핵폐로청(NDA)은 나머지 발전소도 2029년까지 이 단계로 넘어갈 것으로 전망한다.<sup>110</sup>

영국에는 이 외에도 여러 종류의 핵 구조물이 있다. 핵무기 제조 시설 외에도, 2기의 고속증식로, 여러 원형 핵반응로, 그리고 연구용 시설이 다수 있다. 영국은 우라늄을 채굴하거나 정련한 적은 없으나 그 외의 핵연료 주기 공정에 해당하는 시설을 보유하고 있다. 핵연료의 변환, 농축 및 제조뿐 아니라 사용후핵연료에서 플루토늄과 우라늄을 분리하는 재처리가 여기에 포함된다. 영국은 Sellafield에 두 개 대형 재처리 시설을 운영하고 있다. 하나는 B205

<sup>104</sup> Pocock, R.F. 1977, Nuclear power, Its development in the United Kingdom, Gresham Books

<sup>105</sup> MacKerron, G and Sadnicki, M, 1995, UK nuclear privatisation and public sector liabilities (No.4). University of Sussex, Science Policy Research Unit.

<sup>106</sup> Department of Energy and Climate Change, 2009, 60th Anniversary Digest of UK Energy Statistics, pp.40.

<sup>107</sup> Department of Energy, Industry and Industrial Strategy, 2018, pp.117

<sup>108</sup> Vaughan, A, 2019, “UK’s nuclear plans in doubt after report Welsh plant may be axed”, The Guardian, 2019년 4월 22일 참조, <https://www.theguardian.com/environment/2018/dec/10/uk-nuclear-plant-hitachi-wylfa-anglesey>

<sup>109</sup> Nuclear Decommissioning Authority (NDA), 2018, Business Plan 1 April 2018 to 31 March 2021, 2019년 6월 29일 참조, [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/695245/NDA\\_Business\\_Plan\\_2018\\_to\\_2021.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/695245/NDA_Business_Plan_2018_to_2021.pdf), pp. 9

<sup>110</sup> Nuclear Decommissioning Authority (NDA) 2018.

로 Magnox 핵반응로의 금속 연료를 재처리하도록 설계되었는데, 1962년에 가동을 시작하였고 2020년에 폐쇄될 예정이다. 다른 하나는 열적 산화 재처리 공장(THORP)으로 1994년에 가동을 시작하여 2018년에 폐쇄되었다.<sup>111</sup> THORP는 특히 일본과 독일에서 온 외국 연료 상당량을 재처리해 온 바 있으나, 주된 작업은 선진 가스냉각형 핵반응로(AGR)에서 나오는 영국산 연료의 재처리였다. 이 재처리 공장은 가동률이 못 미치게 운전되다가 경제성 및 기술적 요인으로 폐쇄되었다. 또한 영국은 Sizewell에 사용후핵연료 건식 저장소를 운영 중이며 Sellafield 인근 Drigg 및 스코틀랜드 Dounreay에 저준위 폐기물 처분장을 두고 있다.

Sellafield 부지에는 수백 개의 폐기된 건물과 저장소가 복잡하게 얽혀 있다. 이 부지에 보관된 폐기물의 성질이 규명되고 폐기물이 안전하게 관리되기까지 아직 많은 작업이 남아 있다.<sup>112</sup> 다른 대부분의 나라와 마찬가지로 영국도 중준위 및 고준위 폐기물 최종 처분에 심지층 처분 방식을 활용할 계획이다. 하지만 현재까지 큰 진전은 없다. 스코틀랜드는 영국의 나머지 지역과 다른 정책을 추진하는데, 지역의 모든 핵폐기물을 천층 처분할 예정이다.<sup>113</sup>

### 폐기물 분류 체계

영국 폐기물 분류 체계는 IAEA 체계와 매우 유사하다. 폐기물의 수명에 대한 명시적 고려 없이 주로 방사능 농도에 따라 분류하고 있다. 분류 체계는 다음과 같다.<sup>114</sup>

- 극저준위 폐기물: 방사능 농도가 충분히 낮아 허가된 매립장에서 대부분 처분함
- 저준위 폐기물: 방사능 농도가 낮으나 여전히 관련 설계를 갖춘 천층 처분장에서 관리해야 함
- 중준위 폐기물: 방사능 농도는 저준위 폐기물 상한치를 초과하지만 열은 발생하지 않음
- 고준위 폐기물: 사용후핵연료 재처리로 생산된 폐기물로 방사능 농도가 매우 높을 뿐 아니라 열이 발생함

폐기물 여부에 대한 정의는 나라별로, 시대별로 달라진다. 프랑스처럼 영국은 분리된 플루토늄, 사용후핵연료, 열화 우라늄 또는 재처리 우라늄을 폐기물로 분류하지 않는다. 따라서 이 물질들은 공식 폐기물 집계에 포함되지 않는다. 이 모든 물질이 미래 핵연료 가공에 사용될지도 모른다는 것이 공식적인 이유이다. 그러나 이 같은 활용 가능성은 매우 불확실하며, 이 모든 물질이 연료 가공에 이용된다고 하더라도 이것이 또 추가적인 폐기물 흐름(waste streams)을 초래할 것이다.

### 폐기물의 양

영국 정부는 3년마다 폐기물 인벤토리를 발표한다. 아래 데이터 출처는 가장 최근의 인벤토리로, 2016년 4월 1일 기준 폐기물 현황과 추후 예상되는 폐기물 양을 기록하고 있다. 인벤토리의 주요 특징을 살펴보면 다음과 같다.

---

<sup>111</sup> Government of the UK, 2018, End of reprocessing at THORP signals new era for Sellafield, 2019년 4월 5일 참조, <https://www.gov.uk/government/news/end-of-reprocessing-at-thorp-signals-new-era-for-sellafield>

<sup>112</sup> National Audit Office (NAO) 2018, The Nuclear Decommissioning Authority: progress with a reducing risk. HC 1126, 2019년 4월 22일 참조, <https://www.nao.org.uk/wp-content/uploads/2018/06/The-Nuclear-DecommissioningAuthority-progress-with-reducing-risk-at-Sellafield.pdf>

<sup>113</sup> Government of Scotland 2011, Scotland's higher activity radioactive waste policy, 2019년 4월 22일 참조, <https://www.gov.scot/publications/scotlands-higher-activity-radioactive-waste-policy-2011/>

<sup>114</sup> Department of Business Energy and Industrial Strategy (BEIS) and NDA 2017, Radioactive wastes in the UK: UK radioactive waste inventory report, 2019년 4월 22일 참조, <https://ukinventory.nda.gov.uk>

- 현재 밝혀진 폐기물 흐름(waste streams)은 총 1,337개로 매우 다양하다. 이를 24개 폐기물 그룹으로 분류한다.
- 핵폐기물의 상당 부분이 “원재료(Raw)” (영국식 표현 “보고된”) 형태이다. 이것은 아직 처리되지 않았거나 포장되지 않은 폐기물을 가리킨다. 24개 폐기물 ‘그룹’ 중에서 ‘처리된 폐기물’로 기입된 것은 한 종류 뿐이다. 처리되지 않은 상태의 폐기물 비중은 공개된 바 없으나, 전체 폐기물 양의 절반을 훨씬 넘을 것으로 보인다.
- 액체 및 가스 폐기물은 인벤토리에 포함되지 않는다. 즉, 인벤토리는 여러 형태의 고체 폐기물로만 구성된다.
- 방사능 농도에 따라 분류된 대부분의 폐기물(58%)은 Sellafield에 집중되어 있다(군사 시설에 보관된 것은 0.03%에 불과하다).
- 외국 소유의 폐기물은 영국 인벤토리에 포함되어 있지 않다. 영국 정부와 외국 폐기물 소유주의 정부 간 대리 협정이 몇 차례 영국에서 개최되었으며, 이 협정을 통해 원래의 사용후핵연료와 동일한 방사능 양을 사용후핵연료 소유국가에 반환하도록 규정하였다. 그러나 반환되는 폐기물은 고준위 폐기물의 형태로, 연료 재처리 과정에서 발생하는 여러 다양한 폐기물의 흐름보다 그 양이 훨씬 적다.

영국에서는 향후 수십 년 내에 심지층 처분장이 운영되지 않을 것이기 때문에, 고준위 폐기물이 계속해서 축적되고 이에 따라 중간 저장 시설의 지속적인 확장이 필요함을 지금까지의 영국 인벤토리가 보여주고 있다.

[표 19]는 2016년 4월 1일 기준 영국에서 보관 중인 핵폐기물의 양을 나타낸다. 고준위 폐기물은 모두 재처리의 부산물로 현재 Sellafield에 저장되고 있다. 이 폐기물은 애초에 고준위 질산 용액(HAL: 고준위 방사성 폐액)의 형태인데 증발 공정을 거쳐 스테인리스 용기 안에 유리 덩어리로 고체화된다.

**[표 19] 2016년 12월 31일 기준 영국 핵폐기물 현황**

폐기물 종류	저장 방식	부지	폐기물 양
사용후핵연료(고준위 폐기물)	중간 저장(습식)	핵발전소 부지 내 필수냉각수조	3,549 tHM
	중간 저장(습식)	Sellafield	4,151 tHM
고준위 폐기물	중간 저장	Sellafield	1,960m <sup>3</sup>
중준위 폐기물	중간 저장	Sellafield, Aldermaston, Dounreay, Harwell, 핵발전소	99,000m <sup>3</sup>
저준위 폐기물	중간 저장	Sellafield, Capenhurst, Dounreay	30,100m <sup>3</sup>
	처분된 폐기물	폐쇄(2005년)된 Dounreay 천층 처분장	33,600m <sup>3</sup>
	처분된 폐기물	Dounreay 신규 천층 처분장	3,130m <sup>3</sup>
	처분된 폐기물	Drigg 저준위 폐기물 천층 처분장	905,000m <sup>3</sup>
극저준위 폐기물	중간 저장		935m <sup>3</sup>
	매립지		자료 없음

출처: BEIS/NDA(2017년) 및 Naumann(2010년)자료를 바탕으로 자체 작성.

주: 영국은 사용후핵연료, 우라늄, 또는 플루토늄을 폐기물로 분류하지 않기 때문에, 플루토늄 및 우라늄은 제외됨.

중준위 폐기물은 훨씬 다양하며 현재 최종 처분 방법이 없기 때문에 일단 저장되어야 한다. 용량 기준 중저준위 폐기물의 약 74%가 Sellafield에 보관되고 있다. 나머지 대부분은 핵발전소에 보관되어 있다. 포장할 때 (강철 또는 콘크리트 용기 내에) 시멘트를 넣거나 연강 용기 내 폴리머 상태로 고정할 수 있다. 저준위 및 극저준위 폐기물은 주기적으로 처분되므로 현재 처분 대기 중인 양은 적다.

중저준위 폐기물과 특히 고준위 폐기물은, 저준위 및 극저준위 폐기물에 비해 방사능 농도가 높기 때문에 중요하게 다루어져야 한다. 고준위 폐기물은 영국 인벤토리 방사능 농도의 절대 비중을 차지하고 있다. 고준위 폐기물에는 수 천 년 격리해야 하는 장수명 핵종은 남아 있겠지만, 향후 100년 동안 방사성 붕괴를 통해 방사능 농도는 감소할 것이다.

**폐기물로 분류되지 않는 기타 방사성 물질의 양**

현 시점에서 영국이 우라늄, 분리된 플루토늄 및 사용후핵연료를 폐기물로 분류하지 않는 것은 훗날 핵연료의 재료로 활용될 수 있다는 기대 때문이다. 그러나 실제로 활용처가 있을 가능성이 매우 낮으며, 어느 시점에 가서는 폐기물로 관리되어야 할 것이다. 사용후핵연료는 [표19]에 포함되어 있다. 2020년 기준 재처리가 완료되면 분리된 플루토늄 재고는 140톤에 이를 것이며, 이 중 23톤이 외국 소유이다. 분리된 플루토늄의 민간 보유량으로는 세계 최대이다.<sup>115</sup> 2016년 4월 기준 영국은 천연 우라늄, 열화 우라늄 및 재처리 우라늄을 113,000 tHM 보유하고 있으며 거의 전량이 Sellafield에 있다. 이 대규모 재고의 상당 부분은 우라늄 농축에 따른 열화 우라늄이다.<sup>116</sup>

플루토늄, 사용후핵연료, 우라늄이 언젠가 폐기물로 분류될 시, 방사능 농도와 폐기물 양이 급증할 것이다. 폐기물의 방사능 농도는 사용후핵연료와 플루토늄에 의해, 폐기물 양은 우라늄에 의해 전반적으로 증가할 것이다. 이렇게 될 가능성이 매우 높지만 현재의 정책은 이를 고려하고 있지 않다. 또한 영국 핵폐기물 인벤토리는 2016년과 2125년 사이 크게 증가할 것으로 전망된다. 다음은 신규 핵발전소 건설이 없다는 전제 하에 만들어진 여러 시나리오를 바탕으로 미래 핵폐기물 양을 추산한 결과이다.<sup>117</sup>

- 고준위 폐기물 366m<sup>3</sup>
- 중준위 폐기물 299,000m<sup>3</sup>
- 저준위 폐기물 1,570,000m<sup>3</sup>
- 극저준위 폐기물 2,720,00m<sup>3</sup>

고준위 폐기물의 미래 추산량이 상대적으로 적은 것은, 재처리에 의해 향후 수명이 제한되기 때문이다. 그러나 중준위 폐기물은 약 3배가량, 저준위 폐기물은 1.5배가량 증가할 것으로 예상된다. 이 미래 폐기물의 대부분은 핵발전소와 Sellafield 시설의 해체에서 유래할 것이다(Sellafield 시설이 미래 중준위 폐기물의 62%, 미래 저준위 폐기물의 84%, 미래 극저준위 폐기물의 95%를 차지할 것으로 보인다).

<sup>115</sup> NDA 2019, Progress on plutonium conditioning, storage and disposal, 2019년 4월 22일 참조, [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/791046/Progress\\_on\\_Plutonium.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/791046/Progress_on_Plutonium.pdf)

<sup>116</sup> Department for Business, Energy and Industrial Strategy, and NDA 2017, Radioactive Wastes in the UK: Radioactive Wastes and Materials not Reported in the 2016 Waste Inventory, March, p.16

<sup>117</sup> Department for Business, Energy and Industrial Strategy 2017, Radioactive Wastes in the UK: UK Radioactive Waste Inventory Report, p.23

### 폐기물 관리 정책 및 폐기물 시설

영국에서 군사 핵폐기물은 1940년대부터, 민간 핵폐기물은 1950년대부터 양산되기 시작했다. 저준위 폐기물은 처음부터 천층 처분되었다. 그 외 잠재적 폐기물에 대한 정책은 모든 사용후핵연료를 재처리하는 것으로 오랫동안 유지되었다. 재처리는 처음에는 무기 제조용 플루토늄을 생산하기 위해 필요했고, 나중에는 고속증식로의 연료를 공급하기 위해 필요할 것이라는 확신에 기반하고 있었다. 재처리는 지속되었으나, 1994년 고속증식로 개발이 포기되면서 후자는 합리적 근거를 상실했다.<sup>118</sup> 모든 중준위 폐기물은 중간 저장 대상이 되었다.

방사능 농도가 높은 폐기물(중준위 및 고준위)에 관한 정책은 1970년대까지 다루어 지지 않다가, 왕립환경오염위원회가 신뢰할 만한 핵폐기물 관리가 마련되기 전에는 신규 핵반응로를 개발해서는 안 된다는 권고안을 내면서 논의가 촉발되었다.<sup>119</sup> 이는 중준위 폐기물과 암묵적으로는 훗날의 고준위 폐기물을 위한 심지층 처분에 관한 명시적 계획으로 이어졌다. 이 계획을 실현하고자 했던 모든 시도는 후보지 지역 주민들의 저항에 부딪혀 실패로 끝났다.

독립기구인 방사성폐기물관리위원회(CoRWM)는 2006년 방사능 농도가 높은 모든 폐기물에 대해 심지층 처분을 권고하였다.<sup>120</sup> 또한 견고한 중간 저장을 권고하고, 지역 주민들이 심지층 처분 수용 조건을 직접 협상할 수 있도록 하는 새로운 자발적 프로세스를 제안하였다. 2008년 정부는 이러한 일반적 접근 방식을 지지하기로 결정하고, Sellafield 인근 지역에서 심지층 처분장 유치 노력을 한 차례 진행하였으나 실패하였다.<sup>121</sup> 2019년 초 현재, 정부는 새롭게 설계된 절차로 심지층 처분장을 유치할 지역사회를 모색하고 있다.<sup>122</sup>

핵폐기물 정책은 영국 기업에너지산업전략부(BEIS)에서 관할한다. 2000년대 초반에 이르자 Magnox 핵발전소 폐쇄와 Sellafield의 열악한 상태는, 폐기물의 중단기적 관리에 보다 일관된 정책과 많은 예산이 필요하다는 것을 시사했다. 2004년 에너지법은 핵폐로청(NDA)의 2005년 창설 기반을 마련했다.<sup>123</sup> 이 기관의 설립 목적은, 폐로 및 공공 소유 핵 관련 부지의 정화 작업을 수행하고 핵폐기물의 장기적 관리를 관할하는 데 있다. 영국에서 처음으로 핵폐기물 관리 주무 기관이 설립된 것이다.

핵폐로청은, 과거 군사 및 민간 노후 핵시설과 핵폐기물을 방대한 규모로 보유하고 있는 Sellafield가 가장 문제가 많은 부지임을 인정했다. Sellafield는 영국의 사용후핵연료 거의 전량을 수용하고, 또 상당량의 사용후핵연료를 재처리한다. 또한 그곳에 있는 4기의 오래된 냉각수조 및 사일로(Legacy Ponds and Silos)는 하나같이 주된 위험을 대변하는 시설이다. 이러한 사실은 Sellafield 부지 정화가 핵폐로청의 최우선 과제임을 의미한다.<sup>124</sup>

<sup>118</sup> International Panel on Fissile Materials 2015, Plutonium separation in nuclear power programs: Status, problems, and prospects of civilian reprocessing around the world.

<sup>119</sup> Royal Commission on Environmental Pollution 1976, Nuclear power and the environment: 6<sup>th</sup> report of the Royal Commission on Environmental Pollution, CC 6618

<sup>120</sup> Committee on Radioactive Waste Management 2006, Managing our reactive waste safety: CoRWM's recommendation to Government Doc 700

<sup>121</sup> Defra, BERR and the devolved administrations of Wales and Northern Ireland 2008, Managing our radioactive waste safely: a framework for implementing geological disposal, 2019년 4월 24일 참조, <https://www.gov.uk/government/publications/managing-radioactive-waste-safely-a-framework-for-implementing-geological-disposal>

<sup>122</sup> World Nuclear News 2018, "UK relaunches repository site selection process," 20 December, 2019년 4월 22일 참조, <http://www.world-nuclear-news.org/Articles/UK-relaunches-repository-site-selection-process>

<sup>123</sup> Government of the UK 2004, Energy Act, 2019년 6월 28일 참조, <http://www.legislation.gov.uk/ukpga/2004/20/contents>

<sup>124</sup> National Audit Office (NAO) 2018, part 2.

핵폐로청은 소유권을 넘겨받은 핵시설 부지의 관리 방식을 혁신하고자 시도한 바 있다. 특히 공모를 통해 PBO(Parent Body Organisation)을 선정하여 특정 기간 각 부지별 부지 허가 사업자(Site License Companies)의 작업을 감독하도록 했다. 공모라는 방식을 통해 비용을 절감하고 국제적 전문성을 도입하고자 했다. 그러나 이 모델은 제대로 작동하지 않았고, 결국 현재는 핵폐로청이 폐로 및 핵폐기물 관리에 관한 한 영국의 2대 과제인 Sellafield와 Magnox 부지를 직접 책임지고 관리한다.<sup>125</sup>

Sellafield과 Dounreay 인근 저준위 폐기물 최종 처분장을 제외하면, 영국에는 다른 장기 처분장은 없다. 방사능 농도 및 폐기물 양에 있어 Sellafield가 절대 비중을 차지하기는 하나, [표 19]에서 나타나 있듯 여러 부지에서 그 외 모든 폐기물에 대하여 중간 저장이 실행되고 있다.

### 비용 및 자금조달

영국의 핵폐기물 관리에 소요되는 비용은 막대하다. 핵폐로청이 공적 부문인 초기 핵폐기물(legacy waste)의 미래 비용을 추산하여 발표하고 있다. 이 초기 핵폐기물은 과거에 발생하였거나, (주로 여러 핵 구조물의 해체에 따라) 훗날 피할 수 없게 될 폐기물을 포괄한다. 2006년 기준 핵폐로청은 향후 비용이 미할인 기준 530억 파운드(2006년 약 980억 달러)에 이를 것으로 추산했다. 2018년까지 이 금액은 1210억 파운드(1620억 달러)까지 치솟았다. 이 중 Sellafield에서 발생하는 비용만 910억 파운드(1210억 달러)이며, 이것이 비용이 급증하게 된 주된 요인이다. 핵폐로청은 이제 기준 추정치에 불확실성에 따른 범위를 두어 990~2250억 파운드(1290억~2920억 달러)라고 표현하고 있다.<sup>126</sup> 이 비용 지출은 2125년경까지 지속될 것으로 전망된다.

영국은 폐기물 자금조달에 대한 제대로 된 과거 기록이 없다. 공공 폐기물에 대해 단지 짧은 기간 소규모로 별도 기금을 마련했으나 이마저도 모두 철회되었다. 현재 자금조달 체계는 세 갈래로 이루어져 있다.

- 공공 부문 폐기물에 대해서는 별도 기금이 부재한 가운데, 주된 자금조달 체계는 정부의 연간 보조금이다. 이 보조금으로 핵폐로청의 예산을 지원하고, 핵폐로청이 재처리를 통해 사용후핵연료를 관리하고 사용후핵연료 장기 보관 등의 서비스를 제공하고 받는 수입으로 보조금을 보충하고 있다. 2017-2018년에 이 상업적 서비스의 수입은 총 12억 파운드(15억 달러)였으며 그 중 대부분은 사용후핵연료 서비스에서 발생했다. 영국 정부 보조금 21억 파운드(27억 달러)를 더하면 2017-2018년 총 사용 금액은 약 33억 파운드(43억 달러)이다. 이 중 60%가 Sellafield에 투입되었다. 핵폐로청의 연간 예산은 지난 몇 년 동안 약 30억 파운드(39억 달러) 수준이었다. 2020년까지 모든 재처리 공장이 폐쇄되기 때문에 사용후핵연료 서비스로 거두어들이는 수입은 향후 급감할 것이다.
- 두 번째 자원 조달 체계는 독립 신탁으로 운영되는 핵책임기금(NLF)이다. 현재 기금 원금이 92억 6000천만 파운드(약 120억 달러)이다.<sup>127</sup> 이 기금은 AGR 핵반응로(AGR 사용후핵연료 관리를 위해 핵폐로청에 불입하는 금액 제외) 등 민간 핵시설의 폐로 및 폐기물 관리 비용을 충당하는 데 사용된다. 해당 핵반응

<sup>125</sup> James, S. 2018, "Magnox becomes NDA subsidiary," Nuclear Matters, 4 July, 2019년 4월 22일 참조, [www.nuclearmatters.co.uk/2018/07/magnox-becomes-nda-subsiary](http://www.nuclearmatters.co.uk/2018/07/magnox-becomes-nda-subsiary)

<sup>126</sup> NDA 2018, Annual Report and Accounts 2017, 2019년 4월 22일 참조, <https://www.gov.uk/government/publications/nuclear-decommissioning-authority-annual-report-and-accounts-2017-to-2018>

<sup>127</sup> Nuclear Liabilities Fund 2018, Protecting the future: Annual Report and Accounts 2018, 2019년 4월 22일 참조, [http://www.nlf.uk.net/media/1076/nlf\\_annual\\_report\\_2018.pdf](http://www.nlf.uk.net/media/1076/nlf_annual_report_2018.pdf)

로는 모두 EDF 에너지社 소유이다. 이 기금은 EDF 에너지社 법적 책임의 할인된 가치를 충당할 것으로 기대된다. 지출 적격성 여부는 기금의 승인을 받도록 되어 있다. 해당 핵반응로가 여전히 운전 중에 있어 현재까지 기금의 지출은 제한적이다. 해당 기금은 주로 Sizewell 부지의 사용후핵연료 건식 저장에 사용되었다.

- 세 번째 체계는 현재 기획 중인 폐로기금계획이다. 이 기금은 신규 핵반응로에 적용될 것이다. 핵반응로 소유자는 계획을 수립하고 정부 승인을 받아야 한다. 이 기금은 향후 발생할 수 있는 모든 법적 책임을 충당하고, 핵반응로 사업자가 폐로 및 폐기물 관리의 모든 비용을 부담하도록 설계되어 있다.<sup>128</sup> 이 체계에서는 폐기물 이전 가격을 향후에 설정한다. 이전 가격을 결정하는 시점이 되면, 핵반응로 폐쇄 후 사업자는 비용을 지불하고 영국 정부는 폐기물을 인수한다. 이렇게 미래에 이전 가격을 결정하는 취지는, 모든 후속 핵폐기물 관리 비용을 충당하고도 남은 정도로 충분히 높은 가격을 설정하기 위해서이다.

## 요약

영국에는 1,300여 개 이상의 핵폐기물 흐름(streams)이 존재하고, 2005년 핵폐로청(NDA)을 설립하기 전까지는 폐로 및 폐기물의 적극적 관리를 방기해 온 정책 이력이 존재한다. 2125년까지 핵폐기물 양은 2016년 인벤토리 대비 상당히 증가한 규모가 될 것으로 전망된다. 향후 폐로에서 많은 핵폐기물이 발생하게 될 것이다.

이러한 폐기물 관리는 막대한 비용이 소요되는 어려운 작업이 될 것이다. 향후 폐기물 관리와 관련된 지출의 상당 부분은 공적 자금으로 충당될 것이며, 이 공적 자금은 1200억 파운드(1560억 달러)를 초과할 것으로 전망된다. 영국에서는 사용후핵연료, 분리된 플루토늄 및 우라늄을 폐기물로 간주하지 않기 때문에 실제 폐기물의 양은 공식 추계를 크게 상회할 것이다. 다른 나라와 보조를 맞추면서 고준위 폐기물은 심지층 처분장을 사용한다는 정책을 세워 두고 있다. 하지만 이 정책 추진은 더디게 진행되어, 아무리 빨라도 2040년 전에는 처분장이 마련될 것 같지 않다.

<sup>128</sup> Government of the UK 2011, Energy Act 2008, “Funded decommissioning programme guidance for new nuclear power stations”, December, Part 2b

## 7.8 미국

### 개괄

미국은 핵에너지 기술의 초기 개발국 중 하나로 핵폭탄을 완성시킨 첫 국가이다. 2차 세계대전 이후 ‘평화를 위한 원자력(Atoms for Peace)’ 프로그램에 따라 주요 연구의 맥이 민간 발전 부문으로 옮겨 갔다. 미국의 핵발전 프로그램은 1959년 일리노이주 모리스市 인근 드레스덴 발전소를 효시로 그 시작을 알렸다.<sup>129</sup> 현재 미국 전역에 걸쳐 59개 부지에서 운전 중인 97기 핵반응로가 미국 발전량의 20%를 담당하고 있다.<sup>130</sup> 건설 중인 핵반응로는 2기에 불과하며 둘 다 조지아주 Vogtle 발전소에 있다. 모두 웨스팅하우스 AP-1000 모델이다. 사우스캐롤라이나주에 추가 신설될 예정이었던 2기의 AP-1000 핵반응로는 2017년 7월에 건설 문제 및 비용 초과로 철회되었다.<sup>131</sup>

미국 핵발전의 최근 경향은 핵반응로 폐쇄 쪽으로 기울고 있다. 2013년 이래 핵반응로 8기가 영구 폐쇄되었고 11기에 대하여 2025년까지 폐쇄 가능성이 제기되고 있다. 핵발전소 7곳이 폐로가 완료되었고 부지에 사용후핵연료 저장 시설만 별도로 남아 있다. 상업 부문에서는 일리노이주 모리스에 단독 사용후핵연료 냉각수조 시설이 있다. 기타 운전 중인 반응로가 있는 부지에서 핵반응로 6기가 폐쇄되기도 했다. 폐쇄 핵발전소 4곳에서 핵반응로 해체 작업이 적극 진행 중이며, 5곳이 핵규제위원회가 SAFSTOR(SAFe STORAge의 준말)라고 부르는 폐로 완료 전의 관리 단계 상태에 있다. 미국 핵규제위원회는 폐쇄 후 60년 이내에 폐로를 완료하도록 규정하고 있다.<sup>132</sup>

핵발전 개발의 역사가 긴 만큼 미국에는 핵연료 주기 관련 시설이 다수 존재한다.<sup>133</sup> 핵연료 주기의 가장 앞에 유타주 소재 우라늄 원광분쇄시설이 있고 미국 전역에 우라늄 침출여과 시설이 11곳 있으나, 현재 5곳(와이오밍주에 네 곳, 네브래스카주에 한 곳)만이 우라늄을 추출하고 있다.<sup>134</sup> 우라늄 회수 시설 20곳이 해체 작업 중에 있다.<sup>135</sup> 또 일리노이주 남부 Honeywell 공장에 육불화우라늄 변환 시설이 하나 있는데 핵반응로 연료로서의 우라늄에 대한 수요 감소로 2018년 초 이후 유휴 상태이다.<sup>136</sup>

미국에는 현재 운영 중인 우라늄 농축 공장이 단 한 군데 있다. 뉴멕시코주 유니스에 위치한 Louisiana Energy Services 원심분리기가 그것이다. 이 공장은 유럽기업인 Urenco社 소유이다. 이것은 미국 소유의 우라늄 농축 공장은 없다는 것을 의미한다. 핵규제위원회는 AREVA의 아이다호주 소재 Eagle Rock 원심분리 농축 공장과 GE社의 노스캐롤라이나주 Global Laser Enrichment 공장에 인허가를 내주었으나, 두 곳 모두 건설되지 않았다. 오하

<sup>129</sup> Walker, S. 1992, *Containing the Atom: Nuclear Regulation in a Changing Environment 1963-1971*, University of California Press

<sup>130</sup> US Nuclear Regulatory Commission (NRC) 2019, “List of Operating Power Reactors,” 2019년 5월 9일 참조, <https://www.nrc.gov/reactors/operating/list-power-reactor-units.html>

<sup>131</sup> Plummer, B. 2017, “U.S. Nuclear Comeback Stalls As Two Reactors Are Abandoned,” *The New York Times*, July 31, 2019년 5월 9일 참조, <https://www.nytimes.com/2017/07/31/climate/nuclear-power-project-canceled-in-south-carolina.html>

<sup>132</sup> NRC 2019, *Backgrounder on Decommissioning Nuclear Power Plants*, 2019년 5월 9일 참조, <https://www.nrc.gov/readingrm/doc-collections/fact-sheets/decommissioning.html>

<sup>133</sup> NRC 2019, “Fuel Cycle Facilities,” 2019년 5월 9일 참조, <https://www.nrc.gov/materials/fuel-cycle-fac.html>

<sup>134</sup> US Energy Information Administration 2019, *Domestic Uranium Production Report - Quarterly*, 2019년 5월 9일 참조, <https://www.eia.gov/uranium/production/quarterly/>

<sup>135</sup> NRC 2019, *Locations of Uranium Recovery Sites Undergoing Decommissioning*, 2019년 5월 9일 참조, <https://www.nrc.gov/info-finder/decommissioning/uranium/>

<sup>136</sup> NRC 2018, *January 11th Letter from Jeff Fulks, Plant Manager, Honeywell Conversion Plant to Craig Erlanger*, 2019년 6월 28일 참조, <https://www.nrc.gov/docs/ML1802/ML18023A384.pdf>

이오주 파이크톤 소재 American Centrifuge 공장과 켄터키주 파두카 및 오하이오주 포츠마우스의 오래된 기체확산형 농축 공장은 모두 폐쇄되었다.<sup>137</sup> 상업용 사용후핵연료는 뉴욕주 웨스트벨리에서 웨스트벨리시범프로젝트로 1966년과 1972년 사이 잠시 재처리 되었다. 이곳은 현재 고준위 및 저준위 핵폐기물 상당량을 보관하고 있다.

국내 상업용 핵반응로가 모두 경수로형으로서 저농축 우라늄 연료만 사용하나, 미국은 저농축 및 고농축 우라늄 연료를 모두 생산하고 있다. 노스캐롤라이나주 월밍턴 소재 Global Nuclear Fuel America 공장, 사우스캐롤라이나주 콜럼비아 소재 Westinghouse Columbia Fuel Fabrication 시설, 위싱턴주 리치랜드 소재 Framatome Inc. 공장에서 저농축 우라늄 연료를 생산한다. 버지니아주 린치버그 소재 AREVA 공장은 폐쇄되었다. 저농축 및 고농축 우라늄 연료를 모두 생산하는 곳은, 테네시주 에르윈 소재 Nuclear Fuel Services 시설과 버지니아주 린치버그 소재 BWXT Nuclear Operations Group이다.

### 폐기물 분류 체계

미국 폐기물 분류 체계는 IAEA 및 다른 많은 국가들과 차이점을 보인다. 핵무기 개발의 역사가 길어 미국은 상업용 핵발전소만을 운전하는 국가들보다 폐기물의 흐름이 더 다양하다. 이 같은 국내 폐기물 문제를 다루기 위해 미국은 법률과 규제의 틀에 기반한 복잡한 분류 체계를 구축해 왔다. 미국은 사용후핵연료, 재처리에서 나온 고준위 폐기물(상당 부분은 핵무기 단지에 있음), 그리고 핵무기 단지의 폐기물 유형에만 해당되는 초우라늄 폐기물을 보유하고 있다.<sup>138</sup> 이 폐기물들은 심지층 처분이 필요한 것이다. 또한 핵무기 단지와 관련된 폐기물에는 ‘재처리에 부수적으로 따르는 폐기물(Waste Incidental to Reprocessing)’이라고 지정된 상대적으로 새로운 폐기물 범주도 포함된다. 이 물질은 핵무기 제조용 플루토늄을 추출하기 위해 사용후핵연료를 재처리할 때 발생하는 것으로, 고준위 탱크 폐기물 슬러지의 부산물로 대부분 구성되어 있다. 이 부산물은 탱크에서 제거하기도 어렵고 제거 비용도 많이 든다. 따라서 미국 에너지부는 이 부산물을 일부 지하 탱크에 그대로 둔 채로 회반죽을 채워 넣어, 전체의 핵종 농도를 희석하여 저준위 폐기물 평균 방사능 농도까지 낮춘다는 계획이다.<sup>139</sup>

미국에서는 저준위 폐기물로 지정되지 않은 것을 분류함으로써 저준위 폐기물을 정의한다. 예를 들어, 법률적으로 저준위 폐기물은 사용후핵연료, 고준위 폐기물 또는 부산물이 아닌 물질이다. 미국 저준위 폐기물은 암묵적으로 해당 물질의 원천에 따라 4개 하위 분류로 나뉜다. 특정 핵종의 존재 및 이 핵종의 반감기에 따라 A등급, B등급, C등급 혹은 C등급 이상으로 분류한다.<sup>140</sup> A등급, B등급 및 C등급 폐기물은 천층 매립지에 처분할 수 있다. 에너지부와 핵규제위원회는 현재 C등급 이상의 폐기물에 대해 심지층 처분 여부를 결정 중에 있다.

일각에서는 미국 폐기물 분류 체계가 폐기물의 위험성이 아니라 폐기물의 출처를 기준으로 삼는다는 점을 비판한다. 예를 들어, 고준위 폐기물과 A등급 저준위 폐기물이 같은 핵종을 포함하고 있으나, 고준위 폐기물은 사용후핵연

<sup>137</sup> NRC 2019, Fuel Cycle Facilities, 2019년 5월 9일 참조, <https://www.nrc.gov/materials/fuel-cycle-fac.html>

<sup>138</sup> 미국의 초우라늄 폐기물에는 우라늄보다 원자 번호가 크며 농도가 그램당 10나노큐리 이상인 “초우라늄” 원소가 들어 있다. NRC 2018, Greater Than Class C and Transuranic Waste, Federal Register, 83FR6475, February 14, pp. 6475-6477, 2019년 5월 9일 참조, <https://www.federalregister.gov/documents/2018/02/14/2018-03085/greater-than-class-c-and-transuranic-waste>

<sup>139</sup> Macfarlane, A, 2019 “Incidental” nuclear waste: reconceiving a problem won’t make it go away,’ the Bulletin of Atomic Scientists, January 31, 2019년 5월 9일 참조, <https://thebulletin.org/2019/01/incidental-nuclear-waste-reconceiving-a-problem-wont-make-it-go-away/>

<sup>140</sup> 미 핵규제위원회(NRC)는 연방규정집(Code of Federal Regulation) 10편 61.55절(Title 10, Section 61.55)에 폐기물의 정확한 분류를 위한 표와 구체적 알고리즘을 제시하고 있다.

료 재처리 과정에서 발생한 것이라 A등급 폐기물과 달리 처분되어야 한다는 것이다.<sup>141</sup> 미국의 기타 폐기물 범주에는 우라늄 분쇄 찌꺼기와 열화 우라늄이 있다. 후자는 천층 매립 처분이 적합하지 않을 것이다.

### 폐기물의 양

완전한 기록이 존재하는 것은 아니지만, 미국이 보유한 핵폐기물이 세계에서 가장 규모가 크고 가장 복잡한 폐기물 일 것이다. 규제 당국이 사용후핵연료에 대한 보고를 요구하지 않으므로 상업용 부문에서 사용후핵연료 양에 대한 공식 보고 자료는 없다. 다른 핵폐기물 인벤토리는 여러 정부 문서에 산발적으로 공개된다. 이 같은 전제 하에 [표 20]은 미국의 핵폐기물 추산량을 나타낸다. 연방 정부는 여러 시설에 막대한 양의 고준위 폐기물, 초우라늄 및 저준위 폐기물을 보유하고 있다. 모든 고준위 폐기물과 사용후핵연료는 임시 저장 상태에 있다. 일부 군사용에서 발생한 초우라늄 폐기물은 뉴멕시코주 남서부 지역에 있는 심지층 처분 시설인 폐기물격리시범프로젝트(WIPP)와 네바다 국가안보부지(Nevada National Security Site)에 영구 처분되었다. 저준위 폐기물은 미국 전역 18개 정부 시설에서 처분되고 있다. 우라늄 분쇄 찌꺼기에는 정부 폐기물과 민간 폐기물이 모두 포함되어 있다.

[표 20] 2016년 12월 31일 기준 미국 핵폐기물 현황

폐기물 종류	저장 방식	저장 사이트
<b>소유주: 미국 정부</b>		
고준위 폐기물 & 사용후핵연료	14,000톤	-
TRU (WIPP)	64,630m <sup>3</sup> **	93,500m <sup>3</sup> ***
TRU(네바다 주, 폐쇄된 시설)	-	200m <sup>3</sup>
열화 우라늄	75,296톤	
우라늄 분쇄 찌꺼기	2억 2800만 톤	
저준위 폐기물(A, B, C등급)*	1700만m <sup>3</sup>	
<b>소유주: 민간 사업자</b>		
사용후핵연료(고준위 폐기물)	81,518톤****	
(대학교) 연구용 핵반응로의 사용후핵연료	1,042 kgU	
사용후핵연료(연구 및 핵주기 시설)	79 kgU	
저준위 폐기물(운전 중 부지)		480만m <sup>3</sup>
저준위 폐기물(폐쇄된 부지)		438,000m <sup>3</sup>
GTCC		130m <sup>3</sup>

출처: 통계청(2019년), 에너지부(2009년, 2017년, 2018년, 2019년) 및 핵에너지연구소(2018년) 자료를 바탕으로 자체 작성

주: \* 정부 시설의 천층 처분장에 있는 추가 129개 핵반응로 부속물은 포함하지 않음, \*\* 2017년 12월 31일 기준, \*\*\* 2018년 6월 기준

\*\*\*\* 2018년 12월 31일 기준

TRU = 초우라늄 폐기물, WIPP = 폐기물격리시범프로젝트, GTCC = C등급 이상 방사성 폐기물

상업용 부문의 사용후핵연료는 핵발전소 부지 내 냉각수조 또는 건식 저장 시설에 남아 있다. 연구시설, 동위원소

141 Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, 2012, Report to the Secretary of Energy, 2019년 5월 9일 참조, [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/04/f0/brc\\_finalreport\\_jan2012.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/04/f0/brc_finalreport_jan2012.pdf)

생산용 시설 및 시험 핵반응로도 사용후핵연료를 보유하고 있다. A등급, B등급 및 C등급 저준위 폐기물은 여러 시설에서 처분되고 있으나, C등급 이상 폐기물은 처분 방식에 대한 의사결정이 내려지기 전까지 임시 저장한다.

미래에 발생할 폐기물 양에 대한 추산은 나와 있는 것이 없다. 그러나 대형 경수로 1기에서 연간 20톤의 사용후핵연료가 발생한다는 점을 고려하면, 미국에서 사용후핵연료는 매년 약 2,000톤씩 증가하고 있다.

### 폐기물 관리 정책 및 폐기물 시설

미국은 여러 법률과 규제에 따라 핵폐기물을 관리하고 있다. 상업 부문의 경우, 에너지부가 상업용 핵반응로에서 나오는 사용후핵연료를 포함하여 고준위 핵폐기물의 관리 및 처분에 대한 법적 책임을 지고, 저준위 폐기물은 민간업체가 관리한다. 핵규제위원회는 고준위 및 저준위 폐기물의 관리 및 처분을 규제한다.

1974년 인도의 ‘평화적’ 핵실험 이후, 미국은 상업용 사용후핵연료의 재처리를 ‘무기한 연기’하는 정책을 시작하였다. 여러 대통령(주로 공화당 출신)이 이 정책을 뒤집었지만, 사용후핵연료 재처리는 미국에서 단 한 번도 경제성 있는 관리 방식이었던 적이 없다. 웨스트벨리시범프로젝트가 1966년과 1972년 사이 일부 사용후핵연료를 재처리하였으나, 경제적으로 성공한 적은 없었다. 해당 부지에 대한 소유권은 이후 에너지부로 이관되었다.

미국에서 고준위 핵폐기물의 처분은, 1982년에 제정되어 1987년에 개정된 핵폐기물정책법에 의거한다. 이 법은 상업용 사용후핵연료와 핵무기 시설의 고준위 폐기물에 대한 심지층 처분의 필요성을 정립하였다. 이 법에 따르면, 미국환경보호청이 개발한 방사선 기준에 근거하여 에너지부가 처분장을 선정하여 운영하고, 처분장에 대한 허가는 핵규제위원회가 관할한다. 핵폐기물정책법은 ‘표준 계약’을 수립하였는데, 여기에 따르면 사용후핵연료를 발전소 부지에서 최종 처분장으로 이송하는 시점에 사용후핵연료의 소유권을 사업자에서 에너지부로 넘기고, 그때까지는 사업자가 사용후핵연료 소유권을 유지한다. 현재 사용후핵연료는, 복수의 발전사업자가 소유한 핵반응로나 단일 사업자가 소유한 중앙 저장 시설(일리노이주 모리스 시설)로 이송된 소량을 제외하고는 대부분 핵반응로 부지에 남아 있다.

미국 하원은 핵폐기물정책을 개정하여 네바다주 유카마운틴을 심지층 처분장 적합성 평가를 받을 유일한 부지로 선정하였다. 에너지부는 처분장 건설을 위한 허가 신청서를 2008년 핵규제위원회에 제출하였으나, 오바마 행정부가 2009년에 신청을 철회하고 에너지부의 민간방사성폐기물관리국을 해체한 후 대신 후행 핵연료 주기에 대한 새로운 전략을 구상하도록 미국의 핵 미래에 관한 블루리본위원회를 설립하였다. 블루리본위원회는 2012년에 보고서를 발간하여 심지층 처분장의 시급한 필요성과 ‘합의에 기반(consent-based)한’ 부지 선정 방식을 강조하였다.<sup>142</sup> 핵폐기물정책법은 여전히 유효하지만, 현재 미국 의회는 유카마운틴의 운명을 두고 분열되어 있다.

유카마운틴 처분장의 지반은 응회암(응고된 화산재)으로 구성되어 있고 화산 및 활성단층 지역에 위치한다. 처분장의 수평선이 지하수면보다 높아 지구화학적으로 산화되는 환경에 위치하게 된다. 이러한 설계는 다른 나라의 심지층 처분장 프로그램과 대비된다. 이 부지 자체는, 에너지부가 워싱턴주 리치랜드의 한포드 부지 인근 콜롬비아강 현무암 지대와 텍사스주 북부 암염지대 등 3개의 다른 부지와 함께 선정했다. 기존 핵폐기물정책법은 3개 부지의 적합성을 동시에 평가하도록 하였으나, 법 개정을 통하여 하원은 유카마운틴 단일 부지에만 초점을 맞추었다. 네바다주는 1987년 개정법 통과 이후, ‘네바다주를 망치는 법안’이라고 명명하며 지속적으로 부지 선정을 반대하고 있다.

핵발전소에서는 사용후핵연료를 핵반응로 냉각수조나 건식 저장 시설에 저장하는데, 냉각수조의 경우 저장 밀도를 높이도록 랙(rack)을 재설치하여 저장 공간을 기존 용량의 4배 가까이 확장했다.<sup>143</sup>

상당수 핵발전소에서 사용후핵연료 필수냉각수조가 거의 포화에 이르렀다. 그 결과 미국 핵발전소 59곳 가운데 56곳은 부지에 어떠한 종류든 건식 저장 설비를 갖추고 있다.<sup>144</sup> 일부 핵발전소는 전체 노심을 제거할 수 있는 역량을 갖추지 못하고 있으며 이를 요구하는 어떠한 규제도 없다. 또한 사용후핵연료의 양이나 필수냉각수조 내 관리 방식에 대한 보고를 요구하는 규제도 없다. 그 결과, 발전소가 갖 배출한 사용후핵연료를 필수냉각수조에 분산시키는 지 아니면 단일 냉각수조에 배치하는지 알려진 바가 없다. 또 핵반응로 부지의 사용후핵연료 양을 보여주는 정부 공식 자료도 없다.

최근 핵규제위원회는 사용후핵연료 중앙집중식 저장 시설에 대한 건설 허가 신청을 두 건 접수했다. 한 건은 Holtec International이 뉴멕시코주 남동부 WIPP 부지 인근에 건설하겠다는 것이고, 다른 한 건은 Waste Control Specialists가 텍사스주 앤드류스에 있는 저준위 폐기물 처분장 근처에 건설하겠다는 것이다. 핵규제위원회는 2006년에 유타주 솔트레이크시티 근처에 중앙집중식 저장 시설을 허가하였으나 주정부와 미국 내무부가 부지 운영을 차단한 바 있다.<sup>145</sup>

미국은 세계에서 유일하게 심지층 처분장을 운영하고 있다. 바로 폐기물격리시범프로젝트(WIPP)가 그것이다. 암염 지반 600미터 깊이에 위치한 이 시설은, 뉴멕시코주 카를스배드 소재 핵무기 복합시설에서 나오는 초우라늄 폐기물을 처분한다. WIPP 부지는 1970년대 지역사회에서 자발적으로 수용하여 1999년부터 폐기물을 인수하기 시작했다. 해당 부지는 지역사회로부터 강력한 지지를 받고 있다. 학교 시설이 개선되고, 에너지부 카를스배드 현장 사무소로 사무직 노동자들이 이사 오면서 전반적으로 편의시설이 늘어났기 때문이다. 2014년 방사능 유출 사고로 시설이 2년 동안 폐쇄되는 일을 겪은 후에도 지역사회의 지지는 지속되고 있다.

미국의 저준위 폐기물은 저준위폐기물정책법의 적용을 받는다. 이 법은 1980년 제정되어 1985년 개정되었다. 이 법에 따르면 각 주정부가 저준위 폐기물을 자체적으로 관리하고 통제해야 하지만, 다른 주와 ‘협약(compact)’을 형성할 수도 있다. 이것은 지역 협약을 이룬 주 중 하나에 부지를 선정하여 처분장 시설을 위치시키는 제도이다. 10개 협약이 형성되었으나 3개 협약만 신규 처분 시설 건설에 성공했다. 또 10개 주는 어떤 협약에도 가입하지 않았다.

미국에는 4개 저준위 핵폐기물 처분장이 폐쇄된 바 있다.

- 캔터키주 맥시플래츠 시설: 1963년-1977년 동안 운영되었고 NECO社(현 US Ecology社) 소유로, 토양, 지표수 및 지하수의 광범위한 오염으로 문제가 됨
- 일리노이주 웨필드 시설: 1967년-1978년 동안 운영되었고 NECO社 소유임
- 뉴욕주 웨스트벨리: 1975년 시설 폐쇄됨

<sup>143</sup> Alvarez, R. et al. 2003, Reducing the hazards from stored spent power reactor fuel in the United States, Science and Global Security, 11(1), pp. 1-51

<sup>144</sup> NRC 2019, US Independent Spent Fuel Storage Installations, 2019년 5월 9일 참조, <https://www.nrc.gov/docs/ML1907/ML19071A163.pdf>

<sup>145</sup> World Nuclear News 2013, “Cancellation leaves no options for US nuclear waste,” January 4, 2019년 5월 9일 참조, <http://www.world-nuclear-news.org/Articles/Cancellation-leaves-no-options-for-US-waste>

- 네바다주 비티: 1962년-1993년 동안 운영되었고 US Ecology社 소유임

현재 4군데에서 저준위 핵폐기물 시설이 운영되고 있다. Energy Solution社의 사우스캐롤라이나주 반웰 처분장과 US Ecology社의 워싱턴주 리치랜드 시설은 지역 협약 내 폐기물만 인수한다. Energy Solution社의 유타주 클라이브 처분장은 모든 주로부터 폐기물을 인수하며, 텍사스주 앤드류스의 Waste Control Solutions 시설은 사전 협의가 되면 지역 협약에 포함되지 않는 주의 폐기물도 인수한다.

### 비용 및 자금조달

고준위 핵폐기물 처분은 1982년 핵폐기물정책법으로 수립된 핵폐기물기금으로 지원된다. 이 기금은 오로지 고준위 폐기물의 심지층 처분장 개발 목적으로만 사용된다. 이 기금은 전기요금 납부자에게 MWh당 1달러를 부과하여 마련되며, 연방 하원이 관리한다. 오랜 기간에 걸쳐 기금은 343억 달러 이상 축적되었다.

기금은 본래 에스크로(escrow) 또는 신탁(trust) 계정으로서 기능하도록 되어 있었지만, 하원은 정부 부채를 상쇄하기 위한 용도로 기금을 사용해 왔다. 기금으로 적립된 돈은 세수처럼 취급되고, 기금에서 전용된 돈은 지출 규제 대상이 된다. 그 결과 하원은 필요할 때 자금을 공급하는 데 어려움을 겪고 있다. 해당 정부기관이 핵발전소에서 연료를 제거하는 데 충분한 진전을 이루지 못하자, 2013년 에너지부를 상대로 제기된 소송의 결과로 기금 적립이 더 이상 이뤄지지 않고 있다.<sup>146</sup> 유카마운틴 처분장에서 고준위 폐기물을 처분하는 데 에너지부가 상정한 비용은, 2008년 기준 960억 달러이다.<sup>147</sup> 에너지부는 이미 유카마운틴 개발에 약 150억 달러를 사용한 상태이다.

미국 핵발전소의 재무 구조는 핵폐기물정책법에 포함된 ‘표준 계약(standard contract)’으로 인해 더욱 복잡해졌다. 이 법에 따르면, 에너지부가 1998년 1월 31일까지 핵반응로 부지의 사용후핵연료에 대한 소유권을 인수 받아 지질 저장소로 이송해야 한다. 물론 이런 일은 일어나지 않았고 계약은 위반되었다. 미국 재판부는 발전소 사업자의 손을 들어주었고 발전사업자에게는 이제 보상금이 지불된다. 미국 법무부는 세금으로 조성된 재판 기금에서 매일 약 200만 달러를 운전 여부에 관계없이 정부에 손해배상을 청구한 모든 발전소에 지불하여 사용후핵연료 관리에 사용하도록 하고 있다.<sup>148</sup>

모든 핵발전소 사업자는, 발전소를 결국 폐쇄하게 될 때 시설 폐로를 충당할 충분한 자금을 보유하고 있다는 것을 입증해야 한다. 대부분의 발전소는 운전 기간 동안 필요한 자금을 축적해 나간다. 2년마다 폐로 기금 현황을 핵규제 위원회에 보고한다. 핵규제위원회는 알고리즘을 이용해 충분한 기금이 적립되어 있는지 여부를 결정한다. 폐로 기금을 사용후핵연료 관리에 전용할 수 없다.

<sup>146</sup> Ewing, R. et al. 2018, ‘Reset of America’s Nuclear Waste Management, Strategy and Policy,’ Stanford University, George Washington University, October 15, 2019년 5월 9일 참조, [https://fsi-live.s3.us-west-1.amazonaws.com/s3fs-public/reset\\_report\\_2018\\_final.pdf](https://fsi-live.s3.us-west-1.amazonaws.com/s3fs-public/reset_report_2018_final.pdf)

<sup>147</sup> US Department of Energy 2008, Revised Total System Life Cycle Cost Estimate and Fee Adequacy Report for Yucca Mountain Project, 2019년 5월 9일 참조, <https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-releases-revised-total-system-life-cycle-cost-estimate-and-fee>

<sup>148</sup> Dillon, J. 2019, “Perry: ‘We have to find a solution,’” Energywire, March 27, 2019년 5월 9일 참조, <https://www.eenews.net/energywire/stories/1060130031>

**요약**

미국은 핵폐기물 관리에 있어 어느 나라보다도 가장 큰 도전에 직면해 있다. 상업용 폐기물 양이 막대할 뿐만 아니라, 핵무기 단지에서도 매우 관리하기 어려운 다량의 폐기물이 발생했다. 이 모든 폐기물을 관리하고 최종적으로 처분하기 위해서는, 수십 년에 걸쳐 수천 억 달러의 비용이 소요될 것이다. 미국은 저준위 폐기물 문제는 어느 정도 해소했지만, 중고준위 폐기물을 처리하는 데 여전히 어려움을 겪고 있다. 근래에는 명확한 해결책은 없는 상태이다.



# 8. 용어 및 약어 정리

## 약어      폐기물 종류

- LLW**      Low-level waste 저준위 폐기물
- ILW**      Intermediate-level waste 중준위 폐기물
- HLW**      High-level waste 고준위 폐기물

## 약어

- AGR**      Advanced gas cooled reactor 가스냉각형 핵반응로
- AKEND**      Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte 독일 최종처분장 선정절차 위원회
- ANDRA**      Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs 프랑스 방사성폐기물관리청
- ASN**      Autorité de Sûreté Nucléaire 프랑스 핵안전청
- ATA**      Alphatoxic waste 알파 독성 폐기물
- BEIS**      UK Department of Business Energy and Industrial Strategy 영국 기업에너지산업전략부
- BFE**      Bundesamt für kernteschnische Entsorgungssicherheit 독일 연방핵폐기물안전청
- BFS**      Bundesamt für Strahlenschutz 독일 연방방사선보호청
- BGE**      Bundesgesellschaft für Endlagerung 독일 연방핵폐기물관리공단
- BGZ**      Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung 독일 연방중간저장관리공단
- BZL**      Bundeszwischenlager 스위스 연방 중간 저장 시설
- CEA**      Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives  
프랑스 원자력및대체에너지위원회
- CORWM**      Committee on Radioactive Waste Management of the UK 영국 방사성폐기물관리위원회
- CSM**      Centre stockage de la Manche 프랑스 La Manche 저장 센터
- DEFRA**      Department for Environment, Food and Rural Affairs of the UK 영국 환경식품농업부
- DETEC**      Swiss Department of the Environment, Transport, Energy and Communication  
스위스 환경교통에너지통신부
- DGD**      Deep geological disposal 심지층 처분
- EDF**      Électricité de France 프랑스 전력공사
- EKRA**      Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle 스위스 방사성폐기물처분개념 전문가그룹
- ENSI**      Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat 스위스 연방핵안전국
- EPR**      European pressurized water reactor 유럽형 가압경수로
- EURATOM**      European pressurized water reactor 유럽원자력공동체
- GW**      Gigawatts 기가와트(설비 용량)
- GWh**      Gigawatt hours 기가와트시(생산된 전력량)
- HAL**      Highly active liquor, refers to nitric acid 고준위 방사성 폐액(질산)
- IAEA**      International Atomic Energy Agency 국제원자력에너지기구

<b>KEG</b>	Kernenergiegesetz 스위스 핵에너지법
<b>MIRAM</b>	Modellhaftes Inventar für Radioaktive Materialien 스위스 방사성물질 인벤토리
<b>MOX</b>	Mixed oxide fuel 혼합산화물핵연료
<b>MW</b>	Megawatts (installed capacity) 메가와트(설비 용량)
<b>MWh</b>	Megawatt hours 메가와트시(생산된 전력량)
<b>NAGRA</b>	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle 스위스 방사성폐기물처분협동조합
<b>NAO</b>	National Audit Office of the UK 영국 감사원
<b>NBG</b>	National Begleitsgremium 독일 국가시민사회이사회
<b>NDA</b>	Nuclear Decommissioning Authority of the UK 영국 핵폐로청
<b>NEA</b>	Nuclear Energy Agency of the OECD OECD 핵에너지기구
<b>NLF</b>	Nuclear Liabilities Fund of the UK 영국 핵책임기금
<b>OECD</b>	Organization for Economic Cooperation and Development 경제협력개발기구
<b>PNGMDR</b>	Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs 프랑스 핵물질 및 방사성폐기물 관리 국가계획
<b>PSI</b>	Paul Scherer Institute 스위스 폴 쉐러 연구소
<b>RAWRA</b>	Czech Radioactive Waste Repository Authority 체코 방사성폐기물처분청
<b>SFL</b>	Slutförvar för långlivat [radioaktivt avfall] 스웨덴 장수명 방사성폐기물 최종 처분장
<b>SFR</b>	Slutförvar för [kortlivat] radioaktivt [avfall] 스웨덴 단수명 방사성폐기물 최종 처분장
<b>SKB</b>	Svensk Kärnbränslehantering 스웨덴 원자력연료 및 폐기물관리회사
<b>SNF</b>	Spent nuclear fuel 사용후핵연료
<b>SSM</b>	Strålsäkerhetsmyndigheten 스웨덴 방사선안전청
<b>STENFO</b>	Swiss Decommission Fund for Nuclear Facilities and Waste Disposal Fund for Nuclear Power Plants 스위스 핵시설폐로기금 및 핵폐기물처분기금
<b>SVAFO</b>	Swedish nuclear waste disposal company 스웨덴 핵폐기물 처분 전문업체
<b>t HM</b>	Tons of heavy metal 중금속 톤
<b>THORP</b>	Thermal oxide reprocessing plant 열적 산화 재처리 공장
<b>VVER</b>	Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor 러시아 핵반응로 모델
<b>WIPP</b>	Waste Isolation Pilot Project 미국 폐기물격리시범프로젝트
<b>ZWIBEZ</b>	Zwischenlager Beznau 스위스 Beznau 핵발전소 소재 중간 저장 시설
<b>ZZL</b>	Zentrales Zwischenlager 스위스 중앙집중식 저장 시설



## 9. 작성자

**Manon Besnard**는 프랑스 국립에너지대학 및 그르노블 INP대학원 수력환경공학과(ENSE3) 출신 원자력공학자로 2014년 이래 프랑스 비영리 컨설팅업체 세계에너지정보서비스(WISE)의 핵에너지 전문가로 재직 중이다. 원자력 안전과 폐기물 관리 문제를 중점적으로 연구해 왔다. 프랑스 원자력안전청(ASN), 방사성폐기물청(GPD), 원전퇴역청(GPDEM)의 상설 고문단으로 활동하고도 있다.

**Marcos Buser**(1949년생)는 지난 40년간 핵에너지 및 화학적 독성 폐기물 처분 분야를 연구해 온 사회과학적 지질학자이다. 스위스와 인근 국가에서 대형 폐기물 프로젝트를 맡아 대학, 연구소, 국제기구, 정부기관, 민간 엔지니어링업체 등과 긴밀하게 협업해 온 경력을 지녔다. EKRA 스위스 심지층처분 전문가 위원회 (1999-2002년), 연방 원자력안전위원회(2008-2012년), 산업 매립지 복원 분야의 전문가 위원회 등을 이끌어 왔다. 국제 몬테리 고준위 방사성폐기물연구소 통제위원회장(2000-2013년/2014년)으로 재직하였다. 또한 폐광의 독성 화학폐기물의 심지층 저장 및 처분 관련 프로젝트에도 참여하였다.

**Ian Fairlie**는 환경내 방사성 관련 독립 컨설턴트로 화학 및 방사성 생물학을 전공했다. 런던 임페리얼 대학과 미국 프린스턴 대학에서 핵폐기물 기술이 인체에 미치는 영향 연구로 박사학위를 취득하였다. Fairlie 박사는 영국 정부의 내부피폭조사위원회(www.cerrie.org)의 과학 간사로 재직한 바 있으며 현재 IPPNW, 여러 환경 NGO, 여러 국가의 주정부에 컨설턴트로 활동하고 있다.

**Allison M. Macfarlane**은 현재 미국 조지워싱턴 대학 과학정책 및 국제관계 교수로 재직 중이며 동 대학의 엘리엇 국제관계대학 국제과학기술정책연구소장이다. Macfarlane 박사는 미국 원자력규제위원회장(2012년 6월-2014년 12월)을 지낸 바 있다. Macfarlane 박사는 로체스터 대학에서 지질학을 전공한 후 MIT에서 지질학 박사학위를 취득하였다. 레드클리프 칼리지, MIT, 스탠포드, 하버드 대학에서 펠로십을 하였고 조지아 공대와 조지메이슨 대학에서 교편을 잡은 바 있다. 2010년에서 2012년에 오바마 정부가 출범시킨 미국 핵 미래에 관한 블루리본 위원회의 일원으로 고준위 핵폐기물 국가전략 수립에 이바지하였다.

**Gordon Mackerron**은 서식스 대학교 과학기술정책연구소장(SPRU)으로 재직 중이다. 2005년 4월 이래 동 대학 에너지전문그룹 SPRU를 책임지기에 앞서 동 기관에서 20년 일하였고 런던 NERA 경제 컨설팅사에서 부소장으로 4년 근무한 바 있다. 캠브리지 대학과 서식스 대학에서 수학한 에너지 및 환경 경제학을 전공한 경제학자이다. 전력 및 원자력 발전의 경제학 및 정책적 이슈에 중점을 두어 학계에서 명망을 쌓아 왔으며 관련 출판과 방송을 활발하게 하고 있다.

**Yves Marignac**는 오르세/파리-쉬드 대학에서 과학정보학과를 졸업한 후 1996년 프랑스 비영리 컨설팅업체 세계에너지정보서비스(WISE)에 입사하여 현재 국장(Director)으로 재직 중이다. 폭넓은 핵발전과 에너지 현안에 대하여 국내외 기구, 학계, NGO, 언론에 전문성과 보고서를 제공해왔다. 2006년에서 2013년 사이 프랑스 우라늄 폐광의 환경영향 평가 다자간 그룹 GEP-Mines 간사를 했다. 또한 프린스턴 대학의 후원을 받는 핵분열성물질 국제 패널, ASN 핵반응로(GPR), 기타 시설(GPU), 가압 장비(GPESP) 상설 자문그룹 멤버이다.

**Eszter Matyas**는 중부유럽 대학과 헝가리 국립 엘테 대학교(Eotvos Lorand University)에서 정치학을 전공했고 환경정치학을 주 연구 분야로 삼았다. 2019년 9월 중부유럽대학 환경과학 박사 과정을 시작하였다. 핵에너지에 대한 관심이 깊어 Energiaklub에서 원자력프로젝트 관리를 맡고 있다. 비민주적 사회에서 환경의 영향과 핵산업에 대한 러시아의 영향에 대한 글을 발표한 바 있다. 동료들과 함께 환경 문제를 다루는 라디오 프로그램을 진행하고 있다. 헝가리에서 핵관련 이슈를 공론화하는 탐사보도 기자단의 일원으로도 활동하고 있다.

**Edvard Sequens**는 체코 환경보전협회 의장이며 에너지 컨설턴트로도 활동 중이다. Liptovský Mikuláš의 군사기술대학에서 자동화시스템제어를 전공하였다. 체코의 독립 에너지미래평가 위원회와 체코 환경부의 외부 컨설턴트로도 일한 경험이 있다. 정부의 지속가능한에너지위원회의 일원이기도 하다. 스마트 에너지로 알려진 체코 에너지 산업의 대안적 로드맵 구상에 기여하였다.

**Johan Swahn**는 핵폐기물리뷰의 스웨덴 NGO지부 MKG 국장이다. 그는 MKG에서 스웨덴 사용후핵연료 최종 처분장 인허가 신청서를 검토하는 작업을 이끌었다. Göteborg의 Chalmers 공과대학교에서 물리학 석사, 기술과 글로벌 안정성 연구로 박사 학위를 취득했다. 박사와 포스트닥 논문은 핵비확산, 핵폐기물, 군사급 핵분열성 물질 등을 다루었다. 현재 자리로 오기 전에 Chalmers 공과대학교에서 에너지, 환경, 글로벌 안정성 분야 연구 및 강의를 했다.

**Ben Wealer**는 베를린 공과대학 경제인프라정책워크그룹(WIP)의 연수연구원, 독일경제연구소(DIW Berlin)의 게스트연구원, Heinrich-Böll-Stiftung 연구원으로 활동 중이다. 핵시설 해체, 방사성폐기물관리, 핵발전소 신설, 핵에너지의 이중성 등 핵발전의 경제학을 연구해 오고 있다. 독일을 위시한 유럽과 세계 각국에서 베를린 공과대학과 독일경제연구소가 공동으로 진행하는 핵에너지 연구프로젝트에 처음부터 함께 해왔다. 독일의 첫 독립 해체 모니터링 조사를 공저했고 2018년부터 세계핵산업현황보고서에 참여해 왔다.

# 임프린트

이 보고서는 크리에이티브 커먼즈 라이선스(CCL)에 따라 출간되었다.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0>.

저작자 표시 - 보고서 내용을 인용하고자 할 때에는 저자 혹은 라이선스 보유자가 명시한 방식으로 보고서를 인용해야 한다. 비영리 - 상업적인 목적으로 이 보고서를 사용할 수 없다. 변경금지 - 이 보고서를 편집, 변형 또는 내용을 추가한 수정본을 배포해서는 안 된다.

## 세계 핵폐기물 보고서 - 유럽 특집

2019년 11월

### 저자

Manon Besnard, Marcos Buser, Ian Fairlie, Gordon MacKerron, Allison Macfarlane, Eszter Matyas, Yves Marignac, Edvard Sequens, Johan Swahn, Ben Wealer.

### 프로젝트 팀

Rebecca Harms, Mycle Schneider, Gordon MacKerron, Wolfgang Neumann, Anna Turmann, Arne Jungjohann.

### 편집장

Arne Jungjohann

### 파트너 및 후원

Altner-Combecher Stiftung, BUND, Bürgerinitiative Umweltschutz Lüchow-Dannenberg e.V., 유럽연합의회 기후위기와 녹색/유럽자유연합 의원그룹, Heinrich-Böll-Stiftung 베를린, 브뤼셀, 홍콩, 파리, 프라하, 워싱턴 DC 지부, KLAR! Schweiz, Annette und Wolf Römmig, 스위스에너지재단

### 디자인

Renewable Energy Agency, Andra Kradolfer

### 커버 사진

Sean Gallup/Getty Images News

### 인쇄

Arnold Group, Großbeeren

### 사진 설명

2011년 6월 9일 독일 Lubmin의 Zwischenlager Nord 저장 시설에 있는 핵폐기물 용기. 이 용기에는 해체된 핵발전소에서 나온 고준위 폐기물이 들어 있다.

### 한국어 번역

최진영

### 검수

김수진, 엄광희, 정유진

### 영한 번역 프로젝트 담당 —

**Heinrich-Böll-Stiftung Hong Kong**

클레멘스 쿤즈 (Clemens Kunze)

### 영한 번역 프로젝트 담당 — 한국

이수희

### 한국어판 레이아웃 디자인

최진규

본 보고서는

[WWW.WORLDNUCLEARWASTEREPORT.ORG](http://WWW.WORLDNUCLEARWASTEREPORT.ORG)에서 다운로드 가능하다.

[www.WorldNuclearWasteReport.org](http://www.WorldNuclearWasteReport.org)