

KNS(R)-002-2024



한국형 고준위방사성폐기물 처분 솔루션

2024.07.

한국원자력학회
사용후핵연료 관리방안 특별위원회

제 출 문

한국원자력학회 회장 귀하

본 보고서[보고서명: 한국형 고준위방사성폐기물 처분 솔루션]를 「사용후핵연료
관리방안 특별위원회」의 최종보고서로 제출합니다.

2024.07.31.

집필진

위원장	정 범 진(경희대)
위원	문 주 현(단국대)
위원	박 홍 준(iKSNF)
위원	윤 종 일(KAIST)
위원	조 동 건(KAERI)

감수위원

前포항공과대학교총장	김 무 환
前한국방사성폐기물학회회장	이 종 인
前한동대학교총장	장 순 홍
前한국원자력연구원장	하 재 주

요 약 문

I. 제 목

한국형 고준위방사성폐기물 처분 솔루션

II. 주요 내용

1. 배경

원전 이용국은 고준위방사성폐기물(이하 ‘고준위방폐물’이라 함)을 영구처분하기 위한 처분장을 확보해야 한다. 일부 국가는 영구처분장을 건설하고 있다. 그러나 대부분 국가에서는 건설이 이뤄지지 않고 있다. 이는 각 국가가 처한 상황도 다르고, 고준위방폐물 문제를 다루는 방식도 다르기 때문이다. 그래서 다른 국가들이 어떻게 하는지를 평균하는 방식으로는 우리나라 실정에 적합한 솔루션을 찾기 어렵다. 세계적 현황은 참고하되, 지금까지 우리가 연구해 온 것과 우리 실정을 반영하여, 우리만의 솔루션을 찾아야 한다.

고준위방폐물 영구처분장을 확보하는 것은 시급한 문제이다. 고준위방폐물 영구처분장 문제를 해결하기 위해서는 우리가 안고 있는 문제가 무엇인지를 냉정하게 따져보고, 그간 연구를 통해 축적된 지식과 자료를 바탕으로, 우리나라에 적합한 고준위방폐물 처분 솔루션이 무엇인지를 그려보는 것이 필요하다. 이에 따라 「한국원자력학회 사용후핵연료 관리방안 특별위원회」(이하 ‘특별위원회’라 함)는 약 6개월간의 논의를 거쳐 한국원자력학회 차원의 고준위방폐물 처분 솔루션을 제안하게 되었다.

2. 국내외 정책 및 기술 동향

□ 정책 및 사업추진 현황

- 고준위방폐물 처분장을 확보한 3개국(핀란드, 스웨덴, 프랑스)은 모두 심층 처분을 기본으로 하고 있다. 이 방식은 방사성핵종 이동이 제한적인 지하 깊은 암반에 사용후핵연료를 처분함으로써 처분 안전성을 확보할 수 있다.
- 상기 처분장 확보 3개국은 처분장 부지선정 절차를 자국의 사회적 환경에 맞춰

진행하였다.

- 핀란드와 스웨덴은 부지선정에 관한 법을 별도로 만들지 않고 정부 계획만으로 부지를 선정하였다. 반면 프랑스는 처분장 마련을 위해 단계적으로 법률을 제정하고, 이를 뒷받침하는 Cigeo 프로젝트를 수행했다.
- 처분장 확보 3개국은 목적이 뚜렷한 연구개발을 바탕으로 처분개념을 개발하고 이를 실제 처분사업과 연계했다.
- 스웨덴과 핀란드는 처분장 부지선정과 인허가 지원이라는 해법 지향적인 연구개발을 진행했으며, 프랑스는 「방사성폐기물관리연구법」제정을 통해 목표 지향적인 연구개발을 진행하였다.
- 우리나라의 과거 사례들을 통해, “정부에 대한 신뢰 확보가 국가 현안 해결의 필요조건임”을 알 수 있었다.
- 우리 정부는 중저준위방폐물 처분장 부지 공모에 앞서 특별법 제정을 통해 처분장 유치지역 지원을 약속함으로써, 정부의 신뢰도를 높여 처분장을 확보할 수 있었다.

□ 기술 동향

- 처분장 확보 3개국은 자국의 지질환경과 지역주민 수용성 등을 고려하여 처분장 암종을 선정하였다.
- 핀란드와 스웨덴은 결정질암(화강암) 지역을, 프랑스는 점토질암 분포 지역인 뷰흐(Bure)를 영구처분장 부지로 선정하였다.
- 해외 주요국은 자국의 심부 지질환경 및 고준위방폐물 특성(처분 대상, 처분장 암종 등)을 반영하여 자국 고유의 고준위방폐물 처분개념을 개발하고 있다.
- 사용후핵연료 자체를 처분 대상으로 하는 핀란드와 스웨덴은 결정질암(화강암) 지역 지하 500m에 처분터널을 설치하고, 터널 바닥에 수직으로 구멍을 뚫은 후 사용후핵연료를 적치한다.
- 사용후핵연료 재처리 후 폐기물을 처분대상으로 하는 프랑스는 점토질암 지역 지하 500m에 처분터널을 설치하고, 수평으로 처분공을 뚫어 고준위방폐물을 적치한다.

3. 사용후핵연료 처분 솔루션 제안

□ 처분부지

- 국내 처분장 모암은 우리나라는 지질 특성상 가장 풍부하면서도 처분안전성 확보에 적합한 결정질암(화강암 등)으로 선택하는 것이 바람직하다.
 - 해외 사례를 볼 때, 고준위방폐물 심층처분에 적합한 암종은 결정질암(화강암 등), 점토질암(셰일 등), 그리고 암염 등이다.
 - 국내에는 암염이 존재하지 않으며, 점토질암도 암반 두께와 넓이 등 측면에서 충분치 않다. 옥천변성대, 태백산분지, 경상분지 등에 존재하는 퇴적암층은 지층의 불균질성으로 인해 고준위방폐물 처분 모암으로서 부적합하다.

□ 특별위원회 제안 처분 솔루션

【최상위 요건】

[안전성]

- 처분 시스템은 심층방어 개념과 피동 안전성을 적용해 원자력안전위원회 고시 제2021-21호의 안전목표치를 만족하고, 외부 환경변화에 따라 회수 가능성을 확보해야 한다.
- 고준위방폐물 처분장은 모암으로 화강암반이 적합하며, 산소가 없는 환원 환경이고 방사성물질의 이동이 어려운 500m의 심도에 위치하여야 한다.
- 처분용기는 지속적인 외부 압력과 부식 환경에 견딜 수 있게, 구리(외부)-주철(내부) 이중 용기를 사용하여야 한다.

[경제성]

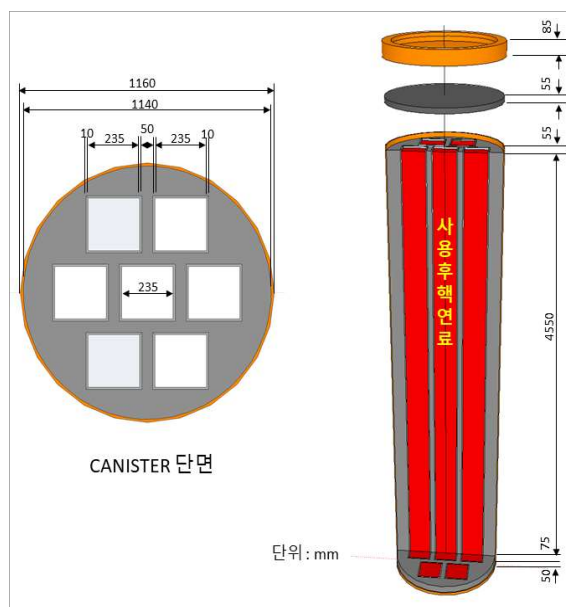
- 지하 500m의 환원환경에서는 부식이 제한적이므로 두께 5cm의 구리용기는 과도하므로 두께를 줄여야 한다. 다만, 최근 제기된 완충재에서의 미생물 발생 가능성에 따른 산성물질 발생과 이에 따른 용기외벽 부식 문제는 추가 평가가 필요할 수 있다.
- 벤토나이트 완충재는 100℃ 이상에서도 성능을 유지하므로, 처분장의 설계온도 제한치를 100℃ 이상으로 높여 처분 면적과 처분 비용을 줄여야 한다.
- 설계에 모든 인자를 상세하게 고려할 수 없으므로, 중요도가 낮은 성능평가 항

목에 대해서는 공학적 여유도(Engineering margin)를 적용하여, 처분안전성을 확보하는 것이 바람직하다.

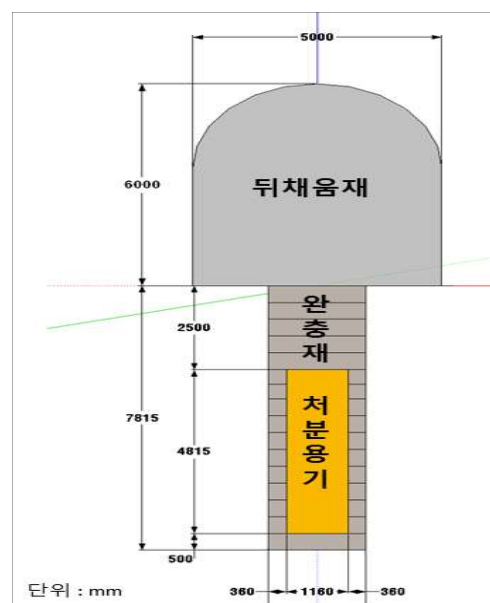
- 장기 냉각된 고준위방폐물의 경우, 처분용기내 처분다발 수를 최적화하고 처분공 이격거리를 합리화한다.

【처분 솔루션】

- 처분시설은 심도 500m의 화강암반에 위치시킨다. 수평으로 처분터널을 만든 후, 처분터널에 수직공을 뚫고 이 안에 처분용기를 영구히 격리한다.
- 사용후핵연료를 담는 처분용기는 주철로 제작한 내부 용기와 구리로 제작한 외부 용기로 구성한다.
- 공학적 최적화 및 3D 프린팅 등 신기술을 적용하여 구리 외부 용기의 두께를 1cm로 줄인다.
- 처분용기당 사용후핵연료 장전량은 7다발로 하되, 사용후핵연료 집합체 붕괴열을 최적으로 조합하여 장전한다.
- 처분용기와 암반 사이는 벤토나이트 완충재로 채우고, 처분터널은 뒤채움재로 밀봉한다. 단, 처분장의 장기성능 유지를 위한 완충재에 대한 최대온도 설계제한치를 130℃로 한다.



처분용기 개념



공학적 방벽 모듈

〈그림 S.1〉 특별위원회 제안 한국형 심층처분 개념

【특별위원회 처분 솔루션의 우수성】

- 한국형 심층처분 개념은 구조적 건전성, 책임제 및 방사선 차폐능, 처분장 주변 거주 주민에 대한 피폭방사선량에 관한 요건을 모두 만족한다.
- 동일 물량을 처분한다고 가정할 때, 한국형 심층처분 개념은 핀란드 심층처분 개념 대비 처분 면적을 70% 이상 줄이고 경제성을 30% 이상 높일 수 있다.

II. 정책 제언

우리 특별위원회는 우리나라 고준위방폐물 처분사업의 원활한 추진과 영구처분장의 조속한 확보를 위해 아래와 같은 정책 제언을 한다.

- 산·학·연 처분 전문가 그룹은 EU 텍소노미 요건을 충분히 만족시키는 고안전, 고효율, 친환경 처분 기술의 적기 개발에 전력을 다해야 한다.
- 우리나라 사용후핵연료(고준위폐기물) 처분시스템은 우리 실정에 맞춰 안전성을 확보하고, 1980년대 기술이 채택된 핀란드 처분장 대비 높은 경제성을 담보해야 한다.
- 정부는 2050년대 처분장 운영을 위한 필수적 수단이며, 심지층 처분시스템의 장기 안전성 실증을 위해 필수 시설인 지하연구시설(연구용 URL)을 늦어도 2030년대 초에는 운영하여야 한다.
- 원자력안전위원회는 고준위방폐물 처분에 관한 최신 연구 성과, 과학·기술적 근거, 규제기준과 안전목표의 합리적 현실성 등을 고려하여 처분에 관한 안전규제 체계 및 기준을 마련하여야 한다. 인류문명의 존속기간을 상회하는 초장기 시간 이후에도 규제를 적용하는 것은 비현실적이므로, 국제 원자력계와 협력하여 합리적으로 개선해 나갈 필요가 있다.
- 국회는 고준위방폐물 처분부지의 확보를 위한 절차, 방식, 일정 등이 포함된 특별법을 조속히 제정하여 원전 지역주민과 미래 세대에게 고준위방폐물 관리의 책임을 전가하지 말아야 한다.
- 정부는 고준위방폐물 이슈를 실효적으로 해결하기 위하여 ‘고준위방폐물 관리 전담기관’을 신설해야 한다.

목 차

요약문	i
제1장 서문	2
제2장 국내·외 고준위폐기물 처분 정책 및 기술 동향	6
2.1 주요국 정책 및 사업추진 현황	6
2.2 주요국 심층처분 기술개발 현황	11
2.3 주요국 심층처분 안전규제 현황	14
2.4 국내 사용후핵연료 정책 동향	15
2.5 시사점	20
제3장 국내 사용후핵연료 처분 솔루션 제안	25
3.1 처분장 부지	25
3.2 특별위원회 제안 처분 솔루션	29
3.3 이행방안	36
3.4 안전규제에 대한 보완	39
3.5 고준위방폐물 관리 전담기관 신설	40
제4장 정책 제언	42
제5장 참고문헌	46

〈표 차례〉

〈표 2.1〉 방사성폐기물 처분장 부지선정 시도 경위	16
〈표 3.1〉 한국형 기준처분시스템(KRS) 처분개념	29
〈표 3.2〉 핀란드 처분시스템과 특별위원회 제안 처분시스템 처분면적 비교	35
〈표 3.3〉 원자력안전위원회 고시 제2021-21호 제6조제6호	39

〈그림 차례〉

〈그림 2.1〉 핀란드/스웨덴의 사용후핵연료 처분개념	12
〈그림 2.2〉 프랑스의 사용후핵연료 처분개념	13
〈그림 2.3〉 미국의 사용후핵연료 처분개념	14
〈그림 2.4〉 제2차 고준위방폐물 관리 기본계획상 주요 마일스톤	19
〈그림 3.1〉 영구처분장 부지선정 관련 기술 확보 일정(안)	28
〈그림 3.2〉 붕괴열 조합(최적화 이전)	32
〈그림 3.3〉 붕괴열 조합(최적화 이후)	32
〈그림 3.4〉 처분용기 개념	33
〈그림 3.5〉 공학적 방벽 모듈	33
〈그림 3.6〉 특별위원회 제안 처분개념에 대한 열적·구조적 안정성 평가결과	33
〈그림 3.7〉 특별위원회 제안 처분개념에 대한 방사선학적 안전성 평가결과	34
〈그림 3.8〉 완충재 최고온도 130℃인 경우 배치 및 처분면적	35
〈그림 3.9〉 특별위원회가 재평가한 사용후핵연료 처분장 운영일정 수정(안)	36
〈그림 3.10〉 처분사업 이행을 위한 요소기술 확보 일정(안)	38

제1장

서 문

서 문

원전 이용국은 고준위방사성폐기물¹⁾(이하 '고준위방폐물'이라 함)을 영구처분²⁾하기 위한 처분장을 확보해야 한다. 일부 국가는 영구처분장을 건설하고 있다. 그러나 대부분 국가에서는 건설이 이뤄지지 않고 있다. 그 원인은 다양하다. △어떤 국가는 사용후핵연료를 임시로 건식 저장할 공간이 충분해서, △어떤 국가는 정치적 불안정으로 국가적 추진 동력을 얻지 못해서, △어떤 국가는 사용후핵연료 재활용 가능성을 남겨두기 위하여, △또 다른 국가는 대중 수용성 악화로 부지확보가 어려워서 등이다. 따라서 처분장 건설 지연의 이유를 기술적 난제 때문만으로 치부하는 것은 옳지 않다.

각 국가는 처한 상황에 따라 고준위방폐물을 취급하는 방식이 다르다. 그래서 다른 국가들이 어떻게 하는지를 평균하는 방식으로는 우리나라 실정에 맞는 솔루션을 찾기 어렵다. 세계적 현황은 참고하되, 지금까지 우리가 연구해 온 것과 우리 실정을 반영해, 우리만의 솔루션을 찾아야 한다.

고준위방폐물 처분장 건설이 지연된다 해도, 국가적으로 고준위방폐물 안전관리와 영구처분을 위한 기술력을 확보하고 유지해 나갈 필요가 있다. 이에 따라 우리나라를 비롯해 각 국가는 고준위방폐물 관련 연구를 지속하고 있다. 그런데 이 과정에서 기술적 현안 해결보다는 연구를 위한 연구나 현실과 괴리된 연구가 진행되는 부작용이 발생하기도 한다.

예컨대, 영구처분장 부지 특성 변수에 불확실성이 있을 때, 불확실성을 규명하기 위한 연구나 조사의 기간과 비용이 과도할 때가 있다. 이 경우, 부지 특성 평가나 공학적 방벽 설계 시, 불확실성을 상회하는 공학적 여유도(Margin)를 부여하는 것이 일반화된 공학적 접근방식이다. 따라서 불확실성을 규명하는 방식으로만 문제 해결을 고집하는 것은 바람직하지 않다.

또 다른 예로, 스웨덴과 핀란드는 고준위방폐물 처분용기의 부식방지를 위해 두꺼운 구리용기를 채택하고 있다. 이를 우리나라에 그대로 적용할 경우, 구리 처분용기에만 해도 수조에서 수십조 원이 든다. 처분용기당 사용하는 구리의 양을 줄인다면 상당한 비용 절감이 가능하다. 고준위방폐물이 처분될 환경이 산소가 없는 환원 환경임 등

1) 원자력안전법령에 따르면, 고준위방사성폐기물은 방사성폐기물 중 그 방사능 농도 및 열발생률이 원자력안전위원회가 정하는 값 이상인 방사성폐기물을 말하며, 여기에는 사용후핵연료가 포함된다.

2) 원자력안전법령에 따르면, 영구처분은 방사성폐기물을 회수할 의도 없이 인간의 생활권으로부터 영구히 격리하는 것을 말한다.

을 고려하면, 두꺼운 구리용기는 필요하지 않다. 그런데 현재 진행 중인 연구는 이러한 비용 요소에 대한 고려가 부족하다.

우리 정부가 제시하고 있는 고준위방폐물 처분에 관한 R&D 로드맵에도 유사한 문제가 있다. 고준위방폐물 영구처분을 위한 ‘솔루션 찾기’라는 목적과는 다소 거리가 있다. 영구처분장 확보 시점을 명확히 하고, 이를 달성하는 데 필요한 전략적 R&D 과제 구성과 다소 거리가 있어 보인다. 우리가 확보하지 못했거나 기술 수준이 떨어지는 기술들을 확보하기 위한 R&D 과제들을 모아놓은 데 그치고 있다. 이제는 고준위방폐물 처분에 관한 R&D의 성격과 방향을 ‘솔루션을 찾는’ 방향으로 바뀌어야 한다. 우리 여건에 맞는 고준위방폐물 처분시스템을 개발하고, 처분장 부지확보를 위해 반드시 해야 할 R&D의 전략적 수행과 공학적 최적화(Engineering optimization) 등을 통해 고준위방폐물 처분 R&D의 효율성과 효과성을 높여나가야 한다.

국제사회는 고준위방폐물 영구처분에 관해 과도한 규제를 제안하고 있다. 예를 들어, 고준위방폐물에 대한 안전성 평가가 그러하다. 고준위방폐물에 대한 안전성을 1만 년 후까지, 그것도 보수적인 방식으로 평가할 것을 요구하고 있다. 그런데 지금으로부터 1만 년 전이 신석기시대의 시작이었다는 점을 감안하면, 1만 년은 인류문명의 존속기간을 넘어서는 초장기 시간이다. 이러한 먼 미래까지 평가하고 대비하라는 것은 비현실적이므로 재검토가 필요하다.

지금이라도 이러한 과도한 규제의 타당성을 검토하고, 현실화할 필요가 있다. 그동안 국제 관행이라는 이름으로 무비판적으로 수용해 왔던, 고준위방폐물 처분에 관한 방사선방호 기준, 검사 기준, 안전성 평가 기간 등에 대해 과학적 분석과 책임 있는 논의를 국제 원자력계와 함께 시작해야 한다. 이러한 과정을 거쳐, 우리 후손을 실질적으로 보호하면서도 과잉의 규제는 걷어내는 노력을 전개해 나갈 필요가 있다. 왜냐하면, 세계적으로 고준위방폐물 영구처분장에 대한 구체적 논의가 시작될 때이기 때문이다.

고준위방폐물 영구처분장 확보는 우리에게 시급한 문제이다. 원전 소내 임시 저장 시설 포화가 멀지 않다. 부지 내 저장시설을 확충해야 하지만, 고준위방폐물 처분장 확보에 관한 확실한 국가 계획을 제시하라며, 지역주민이 저장시설 확충을 반대하고 있다. 고준위방폐물 처분 문제를 원전 정책과 연계하여, 원전 이용 확대의 반대 근거로 사용하려는 시도도 있다. 또 원전 수출에 걸림돌이 될 수 있다는 주장도 있다. 고준위방폐물 처분장 확보 일정을 제시하고 있는 「EU Green Taxonomy」 요건 충족

여부가 우리 원전의 수출에 영향을 미칠 수 있다고 보기 때문이다.

경주에 중·저준위방사성폐기물 처분장을 건설할 때, 부지를 먼저 결정하고 이후 처분 방식을 결정하는 과정에서 많은 사회적 낭비와 공학적 시행착오가 있었다. 고준위 방폐물 영구처분장에 대해서도 같은 시행착오를 되풀이해서는 안 된다.

고준위방폐물 영구처분장 문제를 해결하기 위해서는 우리가 안고 있는 문제가 무엇인지를 냉정하게 따져 보고, 그간 연구를 통해 확보한 지식과 데이터를 바탕으로, 우리나라에 적합한 고준위방폐물 처분 솔루션을 제시할 필요가 있다. 이에 약 6개월간의 집중 분석과 토의를 거쳐, 한국원자력학회 차원의 고준위방폐물 처분 솔루션을 제안하게 되었다. 이 보고서는 고준위방폐물 처분에 관한 모든 것을 담고 있지는 않으며, 고준위방폐물 문제의 실질적 해결을 위해, 기존과 다른 접근방식을 제시하는 데 주안을 두었다. 이 보고서는 다음과 같이 구성돼 있다.

- 제2장 국내·외 사용후핵연료 정책 및 기술 동향
- 제3장 국내 사용후핵연료 처분솔루션 제안
- 제4장 정책 제언

이 보고서에서는 사용후핵연료 처리에 대해서는 명시적으로 다루지 않았다. 그러나 이것이 사용후핵연료 처리기술 자체나 처리기술 개발의 필요성을 배제하는 것이 아님을 분명히 밝힌다.

이 보고서가 불편한 감정을 일으킬 수 있다. 하지만 이런 불편한 사실을 직시하고 극복하지 않는 한, 우리 실정에 맞고 후세대 부담을 최소화할 수 있는 고준위방폐물 처분시스템을 제때 확보하기는 어렵다. 이 소명 의식이 우리 집필진으로 하여금 이 보고서를 쓰게 하였다. 우리 학회의 제안을 기점으로, 우리나라에 적합한 고준위폐기물 처분 솔루션이 무엇인지에 대한 더 구체적인 논의가 활발해지기를 기대한다. 이와 함께 영구처분장 확보 일정에 대한 논의와 영구처분장 후보 부지를 좁혀나가는 과정도 진행되면서, 우리 세대의 가장 큰 숙제를 해결하는 데 하나의 밑알이 되길 소망한다.

제2장

국내·외 고준위폐기물 처분 정책 및 기술 동향

- 2.1 주요국 정책 및 사업추진 현황
- 2.2 주요국 심층처분 기술개발 현황
- 2.3 주요국 심층처분 안전규제 현황
- 2.4 국내 사용후핵연료 정책 동향
- 2.5 시사점

제2장 국내·외 고준위폐기물 처분 정책 및 기술 동향

2.1. 주요국 정책 및 사업추진 현황

- ◇ 사용후핵연료(고준위방폐물) 처분 선도국은, 자국의 지질환경 자료에 근거하여 처분장 모암 요건을 제시하고 이에 적합한 부지를 찾고 있다.
- ◇ EU가 고준위방폐물 처분장을 2050년부터 운영함을 전제로 원자력을 「EU Green Taxonomy」에 포함하면서, 유럽의 원전운영국 중심으로 사용후핵연료 문제 해결을 위해 적극적인 정책 및 사업을 추진하고 있다.

2.1.1 핀란드

핀란드는 고준위방폐물 처분사업의 진도가 가장 빠른 나라로서, 사용후핵연료 처분 시설 운영을 앞두고 있다. 현재 2개 원전(올킬루오토(Okiluoto), 로비사(Loviisa)) 부지에 사용후핵연료 저장시설을 한시적으로 운영하고 있다.

핀란드는 선캄브리아기 페노스칸디아 순상지에 속한다. 주로 시생대나 고원생대 변성암과 화성암이 기반암이며, 이후 고원생대나 중원생대의 고철질 암맥, 화강암 등이 관입하여 형성되었다. 후기 원생대와 고생대 퇴적암 일부가 국지적으로 존재한다[1].

핀란드는 처분장 부지선정 시 모암을 미리 결정하지는 않았지만, 단열대 분포를 바탕으로 후보 부지를 선별하는 과정에서 결정질암 지역을 대상으로 처분장 부지를 찾는 것으로 보인다.

핀란드는 1983년부터 부지선정 과정을 시작했다. 예비조사 대상 부지로는 대규모 단열대가 없는 안정한 기반암 블록을 정하였다[2]. 결정된 예비조사 부지는 결정질암인 편마암 지역(Romuvaara), 화강암/편마암 지역(Veitsivaara), 토날라이트 지역(Syyry), 화강섬록암 지역(Kivetty), 화강암/화강편마암 지역(Okiluoto)이었다. 이후 지질의 장기안전성, 건설 타당성, 사회적 영향과 비용 등을 평가항목으로 하는 처분 적합성 평가를 수행하였다. 이 평가 결과를 토대로 2001년 올킬루오토(Okiluoto)를 처분시설(온칼로(Onkalo) 시설이라 부름)의 부지로 결정하였다.

그 이후 규제기관(STUK)으로부터 건설허가를 획득하여 2016년부터 처분시설 건설을 시작하였다. 2021년 처분시설 운영허가를 신청하였다. 처분시설 준공은 계획보다 일정이 늦어져 금년 내에 이뤄지고, 운영허가는 2025년 획득할 것으로 전망되고 있

다. 운영허가 획득 후에는 2년간 시운전을 하고, 2027년부터 처분시설을 본격 운영할 것으로 보인다. 온칼로 처분시설에는 올킬루오토 3호기 이전 원전에서 2070년까지 발생하는 고준위방폐물이 처분될 계획이다. 올킬루오토 3호기 이후 건설된 원전에서 발생하는 고준위방폐물은 처분장의 확충 등을 통해 처분할 계획이다.

핀란드의 처분사업 과정을 살펴보면, 핀란드 정부는 자국 상황과 여건에 적합한 정책을 결정하고, 이를 바탕으로 고준위방폐물 처분시스템 개발을 포함해 처분부지 선정과 처분시설 건설 등 처분사업을 일관되게 추진하였음을 알 수 있다. 이러한 핀란드의 행보는 세계 고준위방폐물 처분 분야를 선도하며 후발 국가의 처분사업 수행에 직간접적으로 도움을 주었다는 데 큰 의의가 있다.

2.1.2 스웨덴

스웨덴은 1985년부터 오스카샴(Oskarshamn) 원전 부지 내에 중간저장시설(CLAB)을 확보·운영 중이다. 2022년 6월 중간저장시설을 확장하여, 처분 전 사용후 핵연료를 보관하고 있다.

스웨덴의 기반암은 주로 스베코카렐리아 조산운동에 의해 형성된 원생대 화강암이다[3]. 그리고, 원생대의 화성활동과 지각변형 이후 14억 년 전부터 지각 융기 및 침강을 반복하였다.

이러한 지질 특성을 배경으로, 스웨덴은 “처분장은 장기적으로 안정한 지질환경에 위치해야 하고, 미래 세대에 경제적 가치가 없을 것으로 생각되는 기반암이어야 한다.”는 원칙을 정했다[4]. 이러한 원칙 아래, 1970년대 수행한 광역 지질조사 결과를 활용하여, 전국 기반암을 적격 가능성 있는 기반암, 부적격 가능성 있는 기반암, 부적격 기반암으로 분류하였다. 이후 지질학적 적합성 지표, 기준, 요건 등을 개발하여 부지선정 과정에 적용하였다. 마침내 2009년 화강암/화강편마암의 결정질암이 기반암인 포스마크(Forsmark) 지역을 최종 후보 부지로 결정하였다[5]. 스웨덴은 핀란드와 지질환경이 매우 유사하여, 처분방식이나 처분시설이 위치하게 될 암반의 종류, 즉 암종이 같다.

스웨덴은 핀란드보다 앞서 처분시설의 건설허가를 2011년에 신청했지만, 신청 직후 후쿠시마 원전 사고가 발생하고 구리용기 부식 문제가 이슈화되면서 심사 기간이 늘어났다. 2022년 1월이 되어서야, 세계에서 두 번째로 처분시설에 대한 정부의 건설허가 승인이 있었으며, 2030년대 중반에 처분시설을 운영할 예정이다.

2.1.3 프랑스

프랑스는 핀란드나 스웨덴과 달리 사용후핵연료를 직접 처분하지 않고, 재처리한 후 처분한다. 프랑스는 1976년부터 라하그(La Hague) 지역에 재처리시설과 함께 중간저장시설을 건설·운영하고 있다.

프랑스는 칼레도니아 조산운동, 알프스 조산운동 등 다양한 지질학적 사건이 발생하여, 퇴적암, 석회암, 결정질암 등 다양한 암종이 존재한다[6]. 이에 따라, 처분부지 선정의 목적으로 화강암, 점토질암, 암염 등을 대상으로, 1987년부터 부지 조사를 시작했으나, 해당 지역 등의 반대로 중단하였다.

1991년 제정된 「방사성폐기물관리연구법」에 따라, 1998년 점토질암 지역인 뷰흐(Bure) 지역을 지하연구시설(URL) 부지로 선정하였다. 그 외 화강암 등 지역은 암반 위 지하수(Water table) 존재 등으로 URL 부지로 선정되지 못했다. 2006년에 제정된 「방사성폐기물관리계획법」에 따라 URL이 위치한 지층에 한정하여 처분장을 건설할 수 있게 됨에 따라, 뷰흐(Bure) URL 주변 지역을 대상으로 조사에 착수하였고, 2009년 이 지역을 심층처분장 부지로 선정하였다[7].

2023년 1월 프랑스 환경청은 ANDRA의 뷰흐 처분시설 건설허가 신청을 접수하여 서류 적격심사를 하였다. 현재 프랑스 환경청은 원자력 안전규제 행정부처인 ASN, 안전규제기관인 IRSN과 함께 처분시설 건설허가 문서를 심사하고 있다. 현재 계획대로라면, 프랑스는 2040년대 초 처분시설을 운영할 수 있을 것으로 예상된다.

프랑스는 많은 수의 원전을 운영한다는 점에서 우리나라와 비슷하지만, 사용후핵연료를 재처리한 후 처분하는 방식을 채택했다는 점에서 핀란드, 스웨덴과 다르다. 프랑스는 사용후핵연료에서 재활용 가능한 핵물질을 추출한 이후 남은 폐기물을 유리화한 고화체를 처분용기에 담아 처분한다. 하지만, 처분부지 선정 지원을 위한 법률 제정, 일반부지 URL을 활용해 처분 안전성을 실증하고 이를 바탕으로 지역주민을 지속적으로 설득함으로써 처분장 부지확보에 성공했다는 점은 우리에게 시사하는 바가 크다.

2.1.4 스위스

스위스는 핀란드나 스웨덴처럼 운영하는 원전 수가 적은 국가이며, 사용후핵연료 중간저장시설(쓰빌락, Zwiilag)을 건설하여 운영 중이다.

스위스 북부와 북서 지역은 점토질암, 석회암, 석고 등으로 구성된 퇴적암층이다. 알프스 북쪽에는 중생대에 퇴적된 사암, 점토질암 등이 있다. 알프스 중앙 및 남쪽에는

조산운동으로 인한 결정질암이 존재한다.

1978년부터 처분 실현 가능성을 연구한 스위스는 2002년에 발간한 「처분 실현 가능성 실증 프로젝트」 보고서에서 오팔리너스(Opalinus) 점토질암을 처분장 모암의 암종으로 제안하였고, 2006년 연방평의회가 이를 승인하였다[8].

2005년에 제정한 원자력령에 따라, 스위스는 단계별 계획(Sectoral Plan)을 통해 처분장 부지를 정하기로 하고, 이 계획에 처분장 모암에 대한 필요 요건을 명시하였다. 이 필요 요건은 암반의 크기, 수리적 특성, 지화학적 조건, 장기 안정성, 침식 특성, 조사 및 분석 용이성, 암반역학적 특성 등 과학·기술적 조건과 사회·경제적 조건을 포함하고 있다.

스위스는 2008년부터 이 계획에 따라 부지선정 프로세스를 시작하였고, 2022년 점토질암 지역인 뇌르틀리히 레게른(Nördlich Lägern) 지역을 처분장 최종 후보 부지로 선정하였다[9]. 스위스는 올해 안으로 연방의회에 최종 승인을 신청할 계획이다. 이후 10여 년간 인허가 심사를 거쳐, 2040년경 처분시설 건설에 착수하여 2050년대 초에 운영할 것으로 보인다.

2.1.5. 미국

미국은 원전 부지 내 저장시설을 한시적으로 운영하며 사용후핵연료를 저장하고 있다. 홀텍(Holtec) 등 민간 회사 주도로 중간저장시설 확보를 추진 중이나, 반원자력 단체의 소송 제기로 인해 어려움을 겪고 있다. 하지만 미국은 원전 부지내 건식저장시설이 비교적 원활히 운영되어, 사용후핵연료 보관과 원전 운영에는 큰 문제가 없는 상황이다.

미국은 서부와 동부의 지질 특성이 다르다. 서부에는 판의 충돌로 높게 솟은 산맥이 있고, 침식과 풍화작용을 많이 겪은 지역이 있다. 동부에는 45억 년 동안 지질학적 사건을 크게 경험하지 않은 순상지가 존재하는 등 다양한 지질이 존재한다[10]. 이 때문에 미국의 지층은 퇴적암 62.8%, 침성암 14.8%, 변성암 13.3%, 화산암 7.2%로 구성되어 있다.

미국은 1982년부터 부지선정 과정을 시작하였다. 미국은 ‘모암과 지역의 다양성’ 원칙을 고려하여, 1986년 5개의 기본조사 대상 부지를 선정하였다. 하지만, 소요 시간과 예산을 이유로, 1987년 「방사성폐기물관리수정법」을 공포하면서 화산재 기원 퇴적암인 응회암 지역에 있는 유카산(Yucca Mountain)을 기본조사 대상 부지로 지정하

였다[11]. 유카산에 대한 부지 조사 끝에, 2008년 미국 에너지부는 규제기관인 원자력 규제위원회(NRC)에 처분장 건설허가 서류를 제출하였다. 그러나 오바마 대통령은 주민 수용성 미확보를 이유로 2009년 유카산 프로젝트를 무기한 연기하였다.

미국은 2012년 발표된 ‘블루리본 위원회’의 권고안을 바탕으로, 지금까지 다양한 암종에 대해 다양한 처분 방식을 연구하고 있다. 유카산 프로젝트 무산 이후, 사용후핵연료 및 고준위방폐물 처분과 관련해 큰 진전이 없는 상황이다.

2.1.6 독일

독일은 친원전 정권과 탈원전 정권이 번갈아 집권하면서 원전 정책도 수시로 바뀌었다. 이 때문에 사용후핵연료 관련 사업도 상당한 난항을 겪고 있다. 사용후핵연료 중간저장시설을 건설하고도 사용후핵연료 수송에 반대하는 반핵단체 등으로 인하여 운영에 어려움을 겪고 있어 원전 부지에 별도의 건식 저장시설을 추가로 건설·운영하는 비효율을 자초하고 있다.

독일은 1976년에 처분부지 선정에 착수하여 1977년 암염 분포 지역인 고어레벤(Gorleben)을 처분장 부지로 제안하고 상세 조사를 시작했다. 이후 다양한 의견 충돌로 정권이 바뀔 때마다 고어레벤 부지에 대한 조사 중지와 재개가 반복되었다.

2013년 「부지선정법」이 제정되면서 암염, 점토질암, 결정질암 등 여러 암종 지역에 대해 처분 가능성을 조사하고 있다[12]. 하지만 암종에 따라 처분 개념이 달라지므로 부지 조사 및 처분 개념 개발에 필요한 자원이 분산되고 있다. 「부지선정법」에는 2031년을 처분부지 선정 목표연도로 제시하고 있지만, 현재 지표 조사를 위한 지역을 확인하고 있는 단계임을 고려할 때, 목표 달성은 현실적으로 어려울 것으로 전망된다.

2.1.7 일본

일본은 프랑스와 마찬가지로 사용후핵연료 재처리 후 처분을 정책으로 추진한다. 롯카쇼 지역에 재처리시설을 운영 중이며, 무츠(Mutsu) 지역에 중간저장시설을 건설하고 있다. 또 2개 원전에서 한시적으로 원전 부지 내 저장시설을 운영하고 있다.

일본은 2002년부터 처분시설 부지선정에 착수해, 현재 2개 신청 지역을 대상으로 문헌 조사 중이다. 원자력발전환경정비기구(NUMO)와 경제산업자원에너지청이 영구처분에 관한 전국 순회설명회를 추진하는 등 처분장 부지확보를 위해 노력하고 있지만, 아직 큰 진전은 없는 상황이다.

퇴적암층인 호로노베(Horonobe)와 화강암층인 미즈나미(Mizunami) 지역에 2개의 일반부지 URL을 보유하고 있었으나, 미즈나미 URL은 해당 지자체와 계약종료 등의 이유로 폐쇄하기로 결정하였다. 이는 일반부지 URL을 구축하려는 우리나라에 지자체와 URL 사용기간과 활용 방안 등을 협의할 때 유의가 필요함을 알려주고 있다.

2.1.8 중국

중국은 프랑스나 일본과 같이 사용후핵연료를 재처리한 후 유리고화체로 만들어 처분하는 정책을 추진 중이다.

중국 정부는 2021년 6월 고비사막 베이산(Beishan) 지역에 URL 건설을 시작하였으며, 2028년 완공 예정이다. 베이산 지역의 인구가 적고 중국 정부의 정책추진력 등을 고려할 때, URL 완공 이후 다양한 실험과 연구를 거쳐 최종 처분장으로 적합하다는 결론이 도출되면, 이 부지를 영구처분장 부지로 확정할 가능성이 크다.

2.2 주요국 심층처분 기술개발 현황

- ◇ 처분 선도국들은 자국의 심부 지질환경 및 고준위방폐물 특성에 맞게 심층 처분 개념을 개발하고 있다. 즉, 자국에서 처분해야 할 고준위방폐물이 사용후핵연료 또는 재처리 후 폐기물이나, 처분장 모암이 결정질암 또는 퇴적암이나 등에 따라 처분 개념을 달리하고 있다.
- ◇ 일부 국가는 발전된 처분기술을 반영하지 못하고 40~50년 전 개념을 그대로 따르고 있어 처분효율이 낮다.

2.2.1 핀란드/스웨덴

핀란드와 스웨덴의 처분 개념은 심부 결정질암반(화강암)에 사용후핵연료를 처분하는 것으로서 두 나라의 처분 개념은 동일하다[13, 14]. <그림 2.1>에서 보듯이, 사용후핵연료를 담은 처분용기를 처분터널 바닥 아래 원통형으로 만든 수직공에 넣고, 수직공 암반과 처분용기 사이에 벤토나이트 점토를 채우는 개념이다. 이때 처분터널은 지하 약 500m에 수평으로 설치되며, 처분이 완료되면 뒤채움재로 밀봉된다.

처분용기는 주철-구리로 만들어져 있다[15, 16]. 주철로 만든 내부 용기는 외부 하중에 견디는 역할을 하며, 구리로 된 외부 용기는 처분용기가 부식되는 것을 막는 역

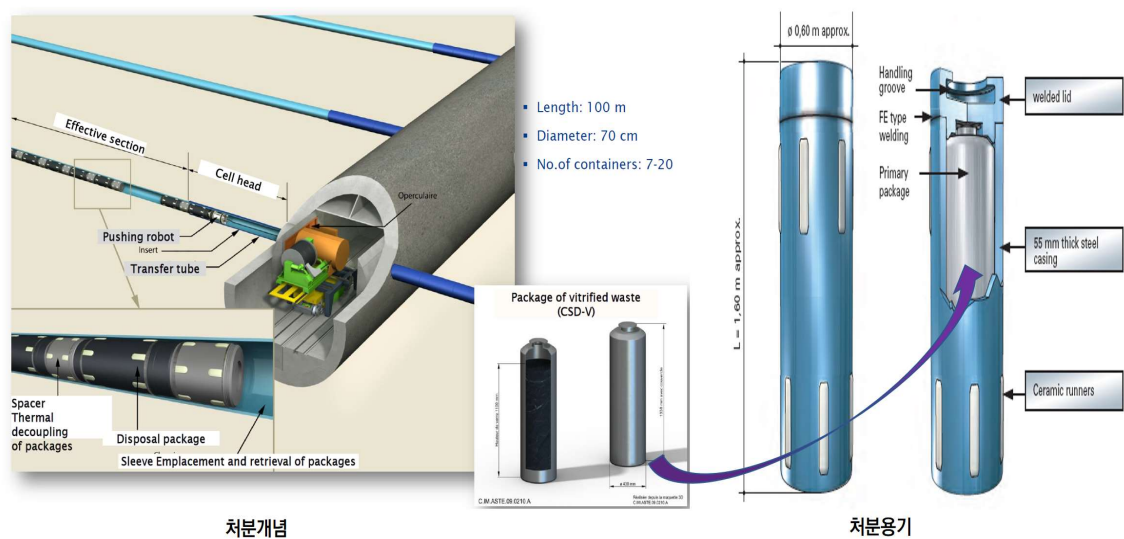
할을 한다. 벤토나이트 완충재는 외부 충격으로부터 처분용기를 보호하면서[17, 18], 지하수를 차단하고, 만약 방사성물질이 처분용기로부터 누출돼도 외부 환경으로 이동하는 것을 억제하는 역할을 함께 한다. 외부 용기의 구리 두께는 5cm로 고려하고 있다. 그런데, 스웨덴이 내부식 성능을 평가한 결과, 100만 년 동안 부식되는 구리의 두께는 약 0.5mm에 불과한 것으로 밝혀졌다[19]. 처분용기에는 경수로 사용후핵연료 4다발이 장전되며, 처분장 설계온도 최대값을 100℃로 적용하였다[20]. 이러한 특성 때문에 처분 밀도가 7.2~7.7 kgU/m³에 불과하여, 미국의 처분 개념에 비해 매우 낮은 편이다[21, 22].



〈그림 2.1〉 핀란드/스웨덴의 사용후핵연료 처분개념[13, 14]

2.2.2 프랑스

프랑스는 사용후핵연료를 재처리한 후 발생하는 고준위 및 장수명 중준위 폐기물을 약 500m 깊이의 점토층에 처분하는 개념을 개발 중이다[23]. 프랑스 처분방식은 우선 고준위방폐물을 스테인레스 저장용기에 넣고, 이 저장용기를 5.5cm 두께의 철판으로 만든 처분용기(Disposal package)에 장입한다. 이 처분용기는 직경 70cm의 수평공에 적치한다. 주위 암반이 점토이므로 처분용기와 암반 사이에 완충재를 채우지는 않는다[24]. 〈그림 2.2〉은 프랑스의 고준위방폐물 처분개념을 보여주고 있다.



〈그림 2.2〉 프랑스의 사용후핵연료 처분개념[24]

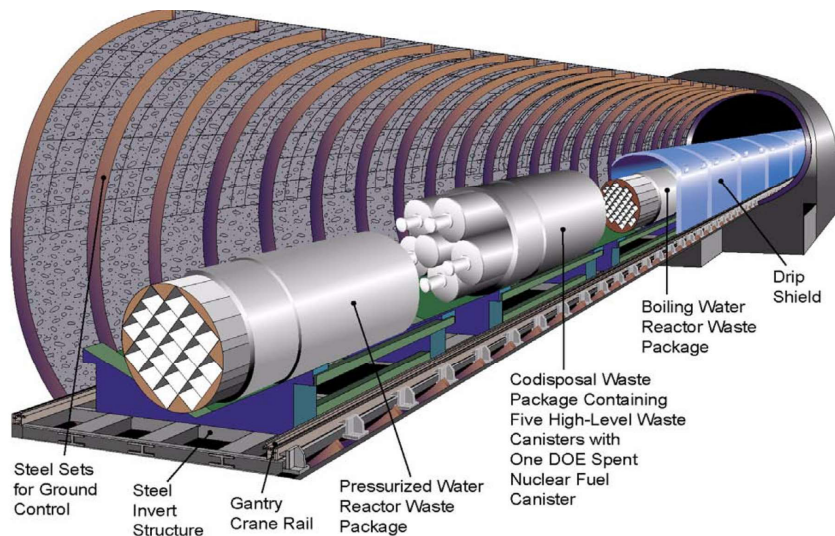
방사성물질의 흡착 및 이동 지연 역할을 핀란드/스웨덴 처분방식에서는 벤토나이트 완충재가 담당하고 있지만, 프랑스 처분방식에서는 점토질암 자체가 담당한다. 그런데 점토질암의 수직 방향 두께가 130~160m여서[25], 프랑스는 이 점토층을 최대한 활용하기 위해 수평 처분방식을 채택하고 있다.

2.2.3 미국

미국은 네바다주 사막 지역 지하 300~500m 위치의 응회암에 사용후핵연료를 처분하는 개념을 채택하고, 이를 바탕으로 처분장 건설허가를 신청했으나, 오바마 정부의 백지화로 중단된 상태이다[26].

〈그림 2.3〉와 같이, 처분터널에 사용후핵연료를 담고 있는 처분용기를 터널바닥에 수평으로 정치한다[27]. 사막 지역이라 지하수가 적어서 터널과 용기 사이를 채우지 않는다. 낙석과 사막 지역에 간간히 내리는 빗방울로부터 처분용기를 보호하기 위해 티타늄 재질의 드립실드를 설치한다.

지하수가 없어서 처분터널의 인위적 냉각이 쉬워서, 약 50~150년 동안 공기로 강제냉각 후 뒤채움 없이 터널 입구와 진입로만 폐쇄한다. 그리고 최종 폐쇄하기 전까지 일정 기간 관리한다[28]. 미국 처분방식의 처분밀도는 15.04 kgU/m^2 로, 핀란드와 스웨덴 처분방식보다 월등히 높다. 이는 지하수가 없는 지질조건과 환경을 반영한 결과로 볼 수 있다.



〈그림 2.3〉 미국의 사용후핵연료 처분개념[27]

2.3 주요국 심층처분 안전규제 현황

◇ 핀란드, 스웨덴, 프랑스 등 고준위방폐물 처분 분야 선도국은 IAEA 등 국제기구가 제시한 심층 처분시스템 관련 권고사항[29]과 국가별 고준위방폐물 특성과 정책을 고려하여 심층처분에 대한 안전규제체계를 수립하고 있다..

핀란드는 법(Act), 기타 법률(Other Legislation), 규제 지침(Regulatory Guides), 산업표준(Industrial Standards) 등으로 구성된 원자력 및 방사선 안전 및 규제 체계를 보유하고 있다. 핀란드 규제기관인 방사선원자력안전청(Radiation and Nuclear Safety Authority, STUK)은 STUK 규정(STUK Regulation), 원자력 안전 관련 규제 지침(YVL Guide), 방사선 안전 관련 규제 지침(ST Guide) 등을 발간한다. 핵심 규제 요건은 원자력 에너지 법령과 STUK 규정(STUK Y/1/2018, STUK Y/4/2018 등)에 포함돼 있으며, 세부 규제 사항은 원자력 안전 관련 규제 지침(YVL Guide)에 포함되어 있다.

스웨덴도 핀란드와 유사한 원자력 및 방사선 안전규제체계를 보유하고 있다. 스웨덴 방사선안전청은 원자력 안전 및 방사선 방호에 관한 규정인 SSMFS(Swedish Radiation Safety Authority Regulatory Code)를 약 50건 발간한 이후 지속적으로 개정하고 있다.

프랑스는 「원자력분야 투명성 및 보안에 관한 법(TSN Act)」에 따라 원자력안전청(French Autorité de Sûreté Nucléaire, ASN)이 원자력 활동 규제와 감독을 수행하

고 있다. 프랑스의 심층처분시설은 프랑스 환경법에 따라 기본원자력시설(Basic Nuclear Installations, BNI)로 분류돼 관리되고 있다. ASN은 BNI에 대한 기본 안전 규칙(Basic Safety Rules, RFS)을 발간해 오고 있다. RFS는 법적 강제성은 없으나, 시설 운영자가 RFS를 충족하지 못하면 대안을 제시하여 해당 시설이 안전 목적을 충족함을 입증해야 한다. 프랑스는 2016년 이후 환경법(Environment Code)을 개정하였고 심지층 처분시설에 관한 규제 체계를 지속적으로 갱신하고 있다.

일본은 우리나라와 유사하게 원자력 안전 관련 법령은 법, 시행령, 시행규칙 등으로 구성되어 있다. 일본은 후쿠시마 원전 사고 이후 원자력안전위원회(NSC) 원자력안전보안원(NISA), 원자력안전기반기구(JNES)를 모두 폐지하고, 사고 발생 시 신속한 대응을 위한 목적으로 원자력규제청(Agency for Nuclear Regulation)을 설립하였다. 심층처분과 관련된 규제 요건은 「특정 방사성폐기물의 최종처분에 관한 법률(特定放射性廃棄物の最終處分に關する法律)」과 동법 시행령, 시행규칙에 규정되어 있다.

선도국 사례를 검토해 본 결과, 대부분의 나라가 고준위방폐물 처분장과 관련하여 부지선정(다단계), 건설, 운영, 폐쇄 등 다단계 인허가 체계를 가지고 있었다. 그러나 세부 규제 내용은 국가별로 차이가 있는데, 이는 전 세계적으로 고준위방폐물 처분 사업이 초기 단계에 있고, 자국 여건이나 특성이 반영된 결과라고 판단한다. 세계적으로 보편화된 규범에 따라 만들어진 원전 건설 인허가 체계와 같이, 고준위방폐물 영구처분에 대해서도 국제적으로 통용되는 기본 입장과 원칙이 합리적 수준에서 정립될 필요가 있다.

2.4 국내 사용후핵연료 정책 동향

- ◇ 우리나라는 과거 9차례 사용후핵연료 처분부지를 확보하려고 했으나 실패하였다.
- ◇ 대국민 사용후핵연료 공론화를 2차례 했으나, 기술적 합의가 없는 상태에서 공론화를 추진함으로써, 실질적 성과를 내지 못한 채 사용후핵연료 처분사업 일정만 뒤로 미룬 결과를 낳았다.

2.4.1 국내 처분부지 선정 시도

우리나라는 원자력발전소 26기를 운영하는 세계 5위의 원자력 강국이지만, 고준위방폐물 처분 분야에서는 아직 영구처분장 부지선정 절차조차 시작하지 못한 후발국이다. 물론 우리 정부가 고준위방폐물 처분부지를 확보하기 위해 노력하지 않은 것은 아니

다. <표 2.1>에서 보듯이 1986년부터 2004년까지 9차례에 걸쳐 중저준위 및 고준위 방폐물을 한 곳에 처분하기 위해 부지확보를 시도하였다. 그러나, 지역주민의 거센 반발에 부딪혀 결국에는 중단할 수밖에 없었다.

〈표 2.1〉 방사성폐기물 처분장 부지선정 시도 경위

구 분		내 용
1차	3개 후보지 도출 (1986~1989)	• 경북 울진, 영덕, 영일을 후보지로 선정 → 주민 반대로 지질조사 중지
2차	특정지역 지정 (1990~1991)	• 충남 안면도에 제2 원자력연구소와 함께 처분장 설치 계획 → 안면도 주민 반대로 실패
3차	용역/부지공모 (1991~1993)	• 강원 고성·안양, 경북 울진·영일, 전남 장흥, 충남 안면 등 6곳을 후보 부지로 발표 → 주민 반대로 실패
4차	부지공모 1993~1994	• 경남 양산군 장안읍과 경북 울진군 기성면 유치신청 → 주민 반대로 실패
5차	도서지역 추진 (1994~1995)	• 국무총리 산하에 범부처 방사성폐기물관리사업 추진단 설치 • 굴업도 방폐장 후보지 발표 → 환경단체와 덕적도 주민의 반대, 지질 자원(연) 활성화추진 발령으로 백지화
6차	부지공모 (2000~2001)	※ 1997년, 전담기관 변경: 원자력(연) → 한국전력 • 전남 영광·강진·진도·완도, 전북 고창, 충남 보령, 경북 울진 등 7개 지역 유치 청원 → 지방의회의 청원 기각으로 무산
7차	사업자 주도 추진 (2001~2003)	※ 2001년, 전담기관 변경: 한국전력 → 한국수력원자력 • 용역을 통해 경북 울진군 근남면, 경북 영덕군 남정면, 전남 영광군 홍농읍, 전북 고창군 해리면 등 4개 지역 도출('03.2) • 정부, 부지선정 변경안 공고 → 유치지역 발전방안 및 양성자가속기 사업 연계 추진으로 4개 후보지 이외의 지역이라도 부지 적합성이 확인되면 유치신청 가능('03.6)
8차	부지공모 (2003~2004)	• 전북 부안군 위도 주민 서명을 받아 유치 신청을 요구하였으나, 부안 군의회에서 부결('03.6) • 군의회 부결에도 불구하고 부안군수와 부안군의회 의장의 유치신청서 제출('03.7) • 7차 추진시 4개 후보지와 자원지역 등에서 지역 내 갈등 우려로 예비신청 포기, 부안군 내 격렬한 반대활동을 통해 중저준위방폐장 위도 유치 백지화('04.2)
9차	정책변경 및 부지공모 추진 (2004~2006)	※ 2004년, 제253차 원자력위원회에서 중저준위방폐물 처분장과 사용후 핵연료 중간저장시설 분리 결정 ※ 2005년, '방사성폐기물 관리시설 유치지역 지원에 관한 특별법' 제정 → 특별지원금 3천억원 제공, 한수원 본사 이전, 양성자가속기 사업 추진 등 지역지원사업 추진 발표 • 산자부 장관은 8월 31일까지 유치신청, 9월 15일까지 주민투표 실시 등 '중저준위 폐기물 처분시설 부지선정 등에 관한 공고'를 발표 • 부지공모 마감 결과, 경북 경주, 전북 군산, 경북 영덕, 포항 등 4개 지자체에서 유치 신청 • 2005년 11월 2일, 4개 지역 주민투표를 실시, 찬성률이 가장 높은 경주시(89.5%)를 최종 부지로 선정 • 2006년 1월 2일, 정부는 경북 경주시 양북면 봉길리를 중저준위 방사성폐기물 관리사업 예정구역으로 지정·고시

이에 모든 준위의 방사성폐기물을 한꺼번에 처분할 수 있는 부지확보가 어렵다고 판단한 정부는 중·저준위방폐물과 고준위방폐물 처분을 분리하여 추진하기로 결정하고, 2005년 「중·저준위 방사성폐기물 처분시설 유치지역 지원에 관한 특별법」을 제정하였다. 이 법에 따라 부지를 공모한 결과, 4개 지자체가 중·저준위방폐물 처분시설 유치를 신청하였고, 주민투표 결과 찬성률이 가장 높은 경주가 최종 후보지로 결정되었다.

이는 중·저준위방폐물 처분장 부지를 확보했다는 점에서 긍정적으로 평가할 수 있다. 반면 중·저준위방폐물과 고준위방폐물 처분을 분리하여 추진한 결과, 상대적으로 해결이 수월한 이슈만 해결한 채, 고준위방폐물(사용후핵연료) 중간저장과 최종 처분 이슈는 해결을 더욱 어렵게 만들었다는 부정적 평가도 있다. 거버넌스 측면에서도, 경주에 한국수력원자력(주)와 한국원자력환경공단을 묶어서 이전케 함으로써, 향후 처분 부지 선정과정에서, 유치 희망 지역에 제공할 수 있는 인센티브 패키지 구성을 더 어렵게 만들었다는 평가도 있다.

2.4.2 사용후핵연료 공론화위원회 및 관리정책 재검토위원회 활동

중·저준위방폐물 처분 문제가 해결되면서, 정부는 2013년 10월 사용후핵연료 문제 해결을 위해 공론화위원회를 출범시켰다. 약 20개월간의 활동 끝에, 사용후핵연료 공론화위원회는 2015년 6월 사용후핵연료 관리에 대한 권고안을 정부에 제출하였다. 권고안의 주요 내용은 △사용후핵연료 관리정책의 최우선 원칙은 국민 안전, △임시저장 중인 사용후핵연료는 안정적인 저장시설을 마련하여 이송, △2051년까지 처분시설을 건설하여 운영, 2020년까지 지하연구시설(URL) 부지 선정, 2030년부터 실증연구 시작, △사용후핵연료 관련 기술개발 및 단계별 관리를 위한 ‘사용후핵연료 기술·관리공사’ 설립, △「사용후핵연료 특별법」의 조속한 제정 등이었다. 그러나 이 권고안은 하나도 이행되지 못하였다. 공론화위원회가 충분한 기술적 근거 없이 권고안 자체를 마련하는 데만 초점을 맞춰 논의를 진행했고, 공론화에 참여한 위원 대부분이 충분한 전문 지식을 갖추지 못해 소수 위원이 공론화를 주도하면서 현실적 권고안을 마련하지 못했기 때문이다.

문재인 정부 출범 후, 사용후핵연료 공론화위원회의 2015년 권고안이 NGO의 참여가 없었다는 이유로 ‘사용후핵연료 관리정책 재검토위원회’가 발족하였다. 약 23개월간의 재검토 끝에 2021년 4월 권고안이 발표되었다. 이 권고안의 핵심 내용은 △사용후핵연료 관리에 관한 특별법 제정 권고, △관리정책 결정 및 시행을 위한 독립 행

정위원회 신설, △동일 부지에 중간저장시설과 영구처분시설 확보 등으로, 이전 공론화위원회가 발표한 내용과 크게 다르지 않았다. 결과적으로, 시간만 허비한 셈이었다. 또한 34명의 위원 가운데 NGO 출신 위원 11명이 출범 2개월 만에 탈퇴를 선언하여 ‘NGO 불참’이라는 당초의 문제로 회귀하였음에도 재검토위원회 활동이 지속된 것도 납득하기 어렵다.

이러한 두 차례의 사례를 볼 때, 충분한 기술적 근거 없이 사용후핵연료 관리정책을 수립한다는 것은 시간만 낭비할 뿐이며, 권고안이 나온다고 해도 추상적이고 원론적인 내용으로 이루어져 처분사업 추진 관점에서 큰 도움이 되지 않음을 알 수 있다. 이는 미국 ‘블루리본 위원회’의 경우도 마찬가지여서, 명망가를 중심으로 한 위원회가 고준위방폐물에 대한 실질적 해법을 제시할 수도 없고, 공론화나 사회적 타당성을 부여하지도 못했다는 것을 확인할 수 있다.

2.4.3 고준위방폐물 관리 기본계획

우리 정부는 사용후핵연료 공론화위원회가 2015년 6월 권고한 내용을 바탕으로 2016년 7월, 「제1차 고준위방폐물 관리 기본계획」을 발표하였다. 이 기본계획에는 사용후핵연료 관리시설 부지선정 절차, URL 추진 방안, 중간저장 및 영구처분 추진 일정, 법제화 및 실행기구 구성 등이 포함돼 있었으나, 이 역시 계획대로 진행된 것이 없다.

2021년 12월 정부는 ‘사용후핵연료 관리정책 재검토위원회’의 권고안을 바탕으로 「제2차 고준위방폐물 관리 기본계획」을 발표하였다. 주요 내용으로는 사용후핵연료 관리시설 부지선정 절차, URL 추진, 중간저장 및 영구처분 추진 일정, 고준위폐기물 특별법 법제화 등으로 제1차 기본계획과 크게 달라진 것이 없다. <그림 2.4>와 같이, 이 계획에는 Y+37년(Y는 시작연도) 이후에 고준위방폐물 처분장이 운영되는 것으로 되어 있다. 발표 당시만 해도 2022년 부지선정 절차에 착수하면 2059년에는 고준위방폐물 처분장이 운영될 것으로 예상하였다. 그러나 2024년 현재까지 실질적으로 진척된 것이 하나도 없다. 이 계획을 지금 당장 시작해도 2061년이나 되어서야 처분장을 운영할 수 있다.

한편 이 계획에 대해, 사업 시작 시점도 명시하지 않았고, 단계별 소요 기간도 지나치게 느슨하게 예측하였으며, 세부 사업을 병행 추진하는 가능성을 고려하고 있지 않아서, 사업추진 일정을 단축할 여지가 크다는 평가가 있다.



〈그림 2.4〉 제2차 고준위방폐물 관리 기본계획상 주요 마일스톤

2.4.4 법제화 추진 과정

사용후핵연료 관리를 위한 법제화도 추진되었다. 2016년 11월 정부가 「고준위방사성폐기물 관리시설 부지선정절차 및 유치지역지원에 관한 법률안」을 발의하였다. 이 법안은 관리시설 부지선정위원회 운영, 부지적합성 조사 절차, 관리시설 유치지역 지원, 원자력발전소 내 사용후핵연료 저장시설의 건설 등을 담고 있다.

2018년 7월에는 우원식 의원이 「고준위방사성폐기물 관리에 관한 특별법안」을 발의하였다. 이 법안의 주요 내용은 2016년 정부가 발의한 법과 큰 차이가 없으나, 이행력 강화를 위해 사업을 총괄하는 ‘고준위방폐물 안전관리위원회’를 국무총리 소속으로 설치·운영하는 것을 담고 있다. 그러나 이 두 법안은 구체적인 논의 없이 20대 국회 회기 종료로 폐기되었다.

21대 국회가 출범하면서 2021년 9월 김성환 의원, 2022년 8월 김영식 의원과 이인선 의원이 고준위방폐물 관리 특별법안을 발의하였다. 세 명의 의원이 발의한 내용은 약간씩 차이가 있으나 이 모든 법안을 통합하면 앞서 두 번에 걸쳐 제시된 내용과 거의 유사하다. 이들 법안에 대한 법제화 논의가 있었으나, 21대 국회에서도 합의되지 않고 폐기되었다.

21대 국회에서 고준위방폐물 특별법안이 3건이나 발의되는 등 사용후핵연료 문제 해결을 위한 의지가 어느 때보다 높았으나, 이 법제화 과정에서 원자력계를 포함한 각

계의 한계가 노출되었다. 원자력계는 △처분부지 선정 절차나 제도가 처분사업 추진의 걸림돌이 되지 않는지, △고준위방사성폐기물 관리위원회가 제대로 기능할지, △기능이 어렵다면 보완은 어떻게 해야 할지 등 처분사업 추진에 핵심적인 사안을 검토하기보다는 사용후핵연료 처리 연구를 법안에 포함할지 등 부수적 사안에 천착하여 내부 갈등을 표출하였다. 국회도 특별법안 심사 과정에서 고준위방폐물 문제 해결을 위한 법률의 제정 취지와 관련 없는 원전의 계속운전 제한 등의 독소조항을 핵심 쟁점으로 부각하여 여야 정쟁의 대상으로 삼았다. 정부도 고준위방폐물 처분 문제를 제대로 해결하기보다는 법안 자체를 통과시키는 데에만 주안을 두었다.

2.5 시사점

2.5.1 정책 동향

- ◇ 사용후핵연료(고준위폐기물) 처분 선도국은 처분장 부지선정 절차를 자국의 사회적 환경에 맞춰서 수립하고 진행하였다.
- ◇ 처분 선도국은 목표 지향적 연구개발을 바탕으로 처분 개념을 개발하고 이를 실제 처분사업과 연계했다.

이 장에서 다룬 주요국은 모두 심층처분을 기본으로 하고 있다. 이 방식은 방사성 핵종의 이동이 제한적인 지하 깊은 암반에 사용후핵연료를 처분함으로써 처분 안전성을 확보하고 있다.

처분장 확보 3개국은 처분장 부지선정 절차를 자국의 사회적 환경에 맞춰 진행하였다. 핀란드와 스웨덴은 부지선정에 관한 법을 만들지 않고 정부 계획만으로 부지를 선정하였다. 반면 프랑스는 처분장 마련을 위해 단계적으로 법률을 제정하고, 이를 뒷받침하는 Cigeo 프로젝트를 수행했다. 이들 국가의 법률제정 여부는 국민의 정부 신뢰도 수준에 따른 것이라고 볼 수 있다.³⁾ 처분장 부지선정 및 건설이 장기간 이뤄지는 과정이기 때문에 정부와 처분사업기관의 일관된 입장 견지와 사업 이행이 매우 중요하다. 국민의 정부 신뢰도가 양호한 스웨덴과 핀란드는 법률 제정의 필요성이 낮았지만, 그렇지 못한 프랑스는 법률 제정의 필요성이 상대적으로 컸을 것이다. 이는 정권교체에 따라 원전 정책이 뒤바뀌는 우리나라에 시사하는 바가 크다.

3) 정부 신뢰율: 핀란드 81%, 스웨덴 67%, 프랑스 41%, 대한민국 45% (출처: 한눈에 보는 정부 2021, OECD, 2021).

처분장 확보 3개국에서 찾을 수 있는 공통점은 해법 중심의 연구개발을 바탕으로 처분 개념을 개발하고 이를 실제 처분사업으로 연계했다는 것이다. 스웨덴과 핀란드는 처분장 부지선정과 인허가 지원이라는 목적과 목표가 뚜렷한 연구개발을 진행하였다. 프랑스는 1991년 「방사성폐기물관리연구법」 제정을 통해 연구 주제와 연구 기간까지 정해 연구개발을 진행하였다. 이 결과를 바탕으로 ‘가역성 있는 심층처분’을 처분 방식으로 결정하고, 처분 일정과 부지선정 원칙 등이 담긴 「방사성폐기물관리계획법」을 제정하였다. 이처럼 연구개발을 국가 현안인 ‘사용후핵연료 처분 문제’ 해결을 위한 솔루션 확보 수단으로 사용한 것이다.

우리나라의 과거 사례들을 통해, ‘정부에 대한 신뢰 확보가 국가 현안 해결의 필요 조건’임을 알 수 있다. 우리 정부는 중저준위방폐물 처분장 부지 공모에 앞서 “중저준위 방폐물 처분장이 있는 지역에는 고준위방폐물 처분장을 건설하지 않으며, 처분장 유치지역을 지원하겠다”고 특별법 제정을 통해 약속하였다. 국민의 정부 신뢰도가 낮은 우리나라에서 법 제정은 처분장 유치 지역주민에게는 정부의 약속 이행을 담보하는 최고의 보증 조치였고 이는 정부 신뢰도를 높인 효과로 나타났다.

한편, 기술적 실체가 마련되지 않은 채 진행된 토론과 설득은 실효성이 없음을 과거 두 차례 사용후핵연료 공론화를 통해 확인됐다. 두 차례 공론화를 통해 대동소이한 결론을 얻었을 뿐이며, 사용후핵연료 처분사업 일정만 뒤로 밀렸다. 이를 반면교사로 향후 사용후핵연료 처분사업 진행 시, 지역주민과 국민을 대상으로 한 설명회나 공청회 등에서는 구체적인 기술적 실체를 바탕으로 추진되어야 할 필요가 있다.

제1차와 제2차의 「고준위방폐물 관리 기본계획」의 내용을 비교해 보면 동일한 추진 계획이 시점만 순연되었음을 확인할 수 있다[30, 31]. 이는 우리 정부가 사용후핵연료 처분 문제를 조속히 해결하기 위한 의지가 부족했다고 볼 수 있다. 사회·정치적 이유로 처분사업 일정이 늦어지더라도 처분시설을 가능한 한 앞당겨 운영할 수 있는 전략과 방법은 없는지 고민하고 이를 정책화하는 것이 바람직하다. 사용후핵연료 처분시설 운영 시점이 지연되는 만큼, 총사업비가 늘어나고 후세대에 더 큰 부담을 안긴다. 지금이라도 △사용후핵연료 처분부지 확보 시점을 앞당길 수 있는지, △그것이 가능하다면 얼마나 앞당길 수 있는지, 그리고 △어떻게 가능한지를 종합 검토하고, 이를 「고준위방폐물 관리 기본계획」에 반영할 필요가 있다.

2.5.2 기술 동향

- ◇ 사용후핵연료 처분 분야 선도국들은 자국 지질환경을 고려하여 처분장 모암에 관한 요건을 제시하고 처분장 부지선정 시 활용하였다.
- ◇ 사용후핵연료 처분 분야 선도국들은 자국 지질환경과 처분 대상 폐기물의 양이나 형태 등에 따라 고준위방폐물 처분 개념을 개발하였다.

고준위방폐물 처분 분야 선도국은 자국 지질환경과 지역주민 수용성 등을 고려해 처분장 암종을 선정하였다.

핀란드는 1983년 부지선정 작업을 시작하여 장기안전성, 건설 타당성, 사회적 영향 등을 고려하여 결정질암(화강암)인 올킬루오토(Okiluoto) 지역을 2001년 최종후보부지로 결정하였다. 스웨덴 역시 지질학적 적합성 지표, 기준, 요건 등을 개발하여 부지선정 과정에 적용하였다. 2009년 결정질암(화강암)인 포스마크(Forsmark) 지역을 최종후보부지로 결정하였다. 프랑스는 퇴적암, 석회암, 결정질암 등 다양한 암종이 존재한다. 다른 암종 지역은 해당 지역 반대로 중단되었으나, 점토질암 분포 지역인 뷰흐(Bure) 지역은 고준위폐기물 처분장으로서도 적합하고 지역주민도 찬성하여 이 지역을 2009년 심층처분장 부지(ZIRA)로 선정하였다. 스위스도 점토질암 및 결정질암이 모두 존재하나, 암반의 크기, 수리적 특성, 지화학적 조건, 장기 안정성 등의 조건을 만족하는 뇌르틀리히 레게른(Nördlich Lägern) 지역을 최종 후보부지로 제안하였으며, 금년 안에 연방의회에 최종 승인을 신청할 계획이다.

이에 반해, 미국과 독일은 주민 수용성 부재와 일관되지 못한 정책 때문에 처분장 후보부지를 선정하지 못하고 있다. 미국은 2009년 주민 수용성 미확보를 이유로 유카산 프로젝트를 무기한 연기하였으며, 2012년 발표된 '블루리본 위원회' 권고를 바탕으로 지금까지 다양한 암종에 대해 다양한 처분 방식을 연구하고 있다. 독일은 1976년 처분부지 선정에 착수하여 암염 분포 지역인 고어레벤을 처분장 부지로 제안하고 상세 조사를 시작했지만, 정권이 바뀔 때마다 조사 중지와 재개가 반복되었다. 2013년 「부지선정법」이 제정되면서 암염, 점토질암, 결정질암 등 여러 암종 지역에 대해 처분 가능성을 조사하고 있다.

이렇듯 처분장 부지 결정 시 중요하게 고려할 사항은 첫째, “자국의 기반암이 어떤 암종으로 이루어져 있는가?”, 둘째, “처분장 성능과 관련한 모암 조건을 만족하는 곳이 어디인가?”, 셋째, “처분장 후보지로서 주민들이 동의하는가?”이다.

고준위방폐물 처분 개념과 관련하여, 처분 선도국들은 자국의 심부 지질환경 및 고

준위방폐물 특성에 맞게 처분 개념을 개발하고 있다. 즉, “자국에서 처분해야 할 고준위방폐물이 사용후핵연료인가 또는 재처리 폐기물인가?”, “처분장의 모암이 결정질암인가 또는 퇴적암인가?” 등에 따라 처분 개념을 달리하고 있다.

핀란드와 스웨덴은 처분 대상이 사용후핵연료 자체이며, 처분장이 결정질암(화강암)이므로 지하 500m에 처분터널을 수평으로 설치하고 터널 바닥에 수직으로 구멍을 뚫은 후, 이 안에 사용후핵연료 처분용기를 넣고 암반과 처분용기 사이에 완충재를 채우는 개념을 채택하고 있다. 1983년에 제안된 처분 개념을 현재도 그대로 유지하고 있어 5cm의 구리 외부용기 두께를 사용하는 등 처분 효율성이 떨어지고 경제성이 낮은 것은 개선되어야 할 점이다.

프랑스는 심층처분 대상이 고준위 및 장수명 중준위폐기물이며, 처분장이 점토질암이므로, 이를 반영하여 처분개념을 개발 중이다. 고준위방폐물을 스테인레스 저장용기에 넣고 이 저장용기를 처분용기에 넣은 후, 이 처분용기를 직경 70cm의 수평공에 적치한다. 주위 암반이 점토이므로 처분용기와 암반 사이에 완충재를 채우지는 않는다.

핀란드와 스웨덴 처분방식에서는 방사성 물질 흡착 및 이동 지연 기능을 벤토나이트 완충재가 담당하지만, 프랑스 처분방식에서는 점토질암 자체가 담당한다. 그런데 점토질암의 수직방향 두께가 130~160m로 제한적이어서, 프랑스는 이 점토층을 최대한 활용하기 위해 수평처분 방식을 채택하고 있다.

미국은 네바다주 사막 지역 지하 300~500m 위치의 응회암에 사용후핵연료를 처분하는 개념을 채택하고, 이를 바탕으로 처분장 건설허가를 신청하였으나, 오바마 정부의 백지화로 중단되었다. 미국은 사용후핵연료를 담고 있는 처분용기를 처분터널 바닥에 수평으로 정치한다. 사막 지역이라 지하수가 적어서, 터널과 용기 사이를 채우지 않는다. 낙석과 사막 지역에 간간히 내리는 빗방울로부터 처분용기를 보호하기 위해 티타늄 재질의 드립셴드를 설치한다. 지하수가 없어서 처분터널의 인위적 냉각이 용이하여 약 50~150년 동안 공기로 강제냉각 후 뒤채움 없이 터널 입구와 진입로만 폐쇄한다. 강제냉각이 이루어지므로 처분밀도가 15.04 kgU/m³로 핀란드 및 스웨덴보다 월등히 높다.

이처럼 처분 선도국들은 자국에서 처분해야 할 고준위폐기물과 처분장 모암 특징을 반영하여 처분개념을 개발하고 있다. 후발 주자인 우리나라는 처분개념 개발 시 이들의 개념을 적극 참조하되 신기술을 적용하여 안전성 및 경제성을 높일 필요가 있다.

제3장

국내 사용후핵연료 처분 솔루션 제안

3.1 처분장 부지

3.2 특별위원회 제안 처분 솔루션

3.3 이행방안

3.4 안전규제에 대한 보완

3.5 고준위방폐물 관리 전담기관 신설

제3장 국내 사용후핵연료 처분 솔루션 제안

3.1 처분장 부지

3.1.1 국내 처분장 모암

◇ 축적된 국내 지질특성 자료에 따르면, 화강암 등의 결정질암이 국내 고준위방폐물 처분장 암반으로 가장 적합하다.

처분장 부지선정을 효율적으로 추진하기 위해서 우리나라 지질 특성을 바탕으로 처분장 모암의 암종 후보군을 선별해야 한다.

대한민국 국가지도집 2권(2020)에 따르면[32], 우리나라는 약 25억 년 전 형성된 신시생대 변성화성암이 가장 오래된 암석이며, 고원생대 변성퇴적암과 화성암이 기반암으로 주로 존재한다. 신원생대와 고생대 퇴적암도 한반도 곳곳에서 관찰된다. 고생대 말기와 중생대 백악기까지 한반도 주변에 섭입대가 형성되면서 화성암이 광역적으로 관입하였고, 고원생대 암석과 함께 한반도의 기반암이 되었다. 신생대에 들어와서 동해가 형성되면서 일본이 한반도에서 분리되었으며, 백두산, 울릉도, 한라산 등 화산이 형성되었다. 이렇게 우리나라는 지각변동이 잦아 여러 차례의 변형 구조가 중첩되는 복합적인 구조변형이 일어났다.

고준위방폐물 심층처분에 적합한 암종은 화강암 등 결정질암, 셰일 등 점토질암, 그리고 암염 등이다. 그런데 국내에는 암염이 존재하지 않는다.

퇴적암은 옥천변성대(고생대 변성퇴적암), 태백산분지(고생대 조선누층군, 평안누층군), 경상분지(중생대 경상누층군) 등에 주로 위치한다. 옥천변성대 퇴적층은 주로 천매암, 편암, 규암, 각섬암, 점판암 등으로 구성되며, 대륙충돌 영향으로 변성되어 균질하나 점토질암을 찾기는 어렵다.

태백산분지 조선누층군의 경우, 하부(양덕층군)는 규암, 셰일, 점판암, 천매암, 역암 등으로 구성되고, 상부(대석회암층군)는 주로 석회암질로 구성되어 있어 지층이 불균질하다. 이 때문에 처분장 모암으로는 부적합하다. 태백산분지 평안누층군은 다양한 종류의 쇄설성 퇴적암이 교차하는 육성 퇴적암층으로, 15m 이상 두께의 이암이 있으나 얇은 셰일의 사암 염층이 교차되고 혼합되어 나타나며 하부에 석탄층이 존재하여, 처

분장 모암으로는 부적합하다.

중생대 퇴적암은 주로 백악기에 호수 환경에서 쌓인 육성층으로, 경상분지에 퇴적되어 있다. 이 경상누층군은 분포 지역이 상대적으로 국한되고 주로 셰일과 사암으로 구성되며, 역암, 탄질 셰일, 무연탄이 협재되어 불균질성이 높아 처분장 모암으로 부적합하다.

신생대 퇴적암은 대부분 백두산과 한라산의 화산활동과 관련된 화산 쇄설성 퇴적암이다. 그 분포가 매우 작거나 포항-경주 일대 등 지구조적으로 불안정한 지역에 위치하여 처분장 모암으로 부적합하다.

우리나라는 화강암이 주종이며 다른 적합한 암종은 우리나라에 널리 분포되어 있지 않다. 따라서 가능성이 높은 암종으로 선택한다는 차원에서 국내 처분장 부지의 모암은 화강암 등 결정질암 가운데 처분장 부지를 선택하는 것이 바람직하다.

3.1.2 처분장 부지선정 단계 및 우리의 기술 수준

- ◇ 화강암반을 대상으로 처분장 부지선정을 위한 부지적합성 기본조사 기술을 대부분 확보하였다.
- ◇ 부지적합성 심층조사 기술은 아직 개발이 필요한 상태이나, 해당 기술의 요구시점 이전에 확보할 수 있을 것으로 전망된다.

IAEA 안전표준권고(IAEA SSG-14)에 따르면[29], 처분장 부지선정은 △개념설정 및 계획단계, △지역 조사 단계, △예비 부지특성조사 단계, △상세 부지특성조사 단계 등 4단계를 거쳐 이뤄진다.

개념설정 및 계획단계에서는 부지선정 절차에 관한 전반적인 계획을 수립하고 가용한 자료를 참조하여 처분장 모암의 암종 등을 정한다. 지역 조사 단계에서는 기존 자료를 이용하여 관심 대상 지역들을 단계적으로 선별하고 법과 규제 등을 고려하여 조사 대상 후보 부지를 선정한다. 예비 부지특성조사 단계에는 지표 조사, 실내 실험 등이 동반된 지질조사 자료 및 사회적 자료를 활용하여 선호 부지를 결정한다. 상세 부지특성조사 단계에서는 결정된 선호 부지를 대상으로 지질, 미래 변화, 수리지질, 지화학, 인간활동, 건설 등 공학적 조건, 환경 보전 등의 측면을 종합적으로 평가하여 최종 후보부지를 선정하고 처분장 인허가에 필요한 부지 특성 자료들을 생산한다.

핀란드의 처분사업기관인 Posiva가 심층처분장 건설 인허가를 위해 제출했던 종합 안전성입증보고서(Posiva 2011-02, 2012-07)에 따르면, 부지선정 과정을 △부지적합성 조사계획 수립 단계, △부지적합성 기본조사 단계, △부지적합성 심층조사 단계로 분류하였다. 21대 국회에 제안됐던 고준위방폐물 특별법에서도 이 분류체계를 따랐다. IAEA 권고와 핀란드의 부지선정 과정을 매칭해 보면, △부지적합성 조사계획 수립 단계는 IAEA 권고의 개념설정 및 계획단계와 지역 조사 단계, △부지적합성 기본조사 단계는 IAEA의 예비 부지특성조사 단계, △부지적합성 심층조사 단계는 IAEA의 상세 부지특성조사 단계에 해당한다.

우리나라는 1997년부터 원자력연구개발사업을 통해 처분장 부지 조사 기술, 처분장 부지의 부지특성 모델 구축 및 지하수/용질 이동 모델링 기술 등을 개발해 왔다. 이들을 종합해 ‘개념개발 단계 종합안전성입증보고서’를 작성하였다[33-41]. 1997년부터 2007년까지는 한반도 지질 및 암종별 특성을 정리하여 후보 암종을 도출하는 등 처분장 부지 개념을 수립하고 지표 기반 부지 조사 기술을 개발하였다. 이들 기술을 경주 중·저준위방폐물 처분장 부지 건설 및 운영 인허가에 활용하기도 했다.

2007년부터 2017년까지는 2006년에 완성된 소규모 URL인 KURT(한국원자력연구원에 위치)를 활용하여 처분 안전성 평가에 필요한 부지특성 모델 구축 기술과 부지조사 불확실성 저감기술을 개발하였다. IAEA의 전문가 검토(Peer Review)를 받아 KURT 기반의 「개념개발 단계 종합안전성입증보고서」를 발간하기도 하였다. 2017년부터는 원자력연구개발사업과 저장·처분 다부처 공동 예타사업⁴⁾을 통해, 처분장 부지에서 일어날 수 있는 단기적·장기적 환경변화와 그에 따른 처분시스템 성능 변화를 평가하는 기술을 개발하고 있다.

처분장 부지선정 단계별로 필요한 기술의 개발 상태를 살펴보면 다음과 같다. 부지적합성 조사계획 수립 단계에서 필요한 기술들은 현재 다부처 공동 예타사업을 통해 필요 기술 대부분을 개발하고 있다. 이들 기술은 사회적 합의가 필요한 기술이거나 이미 존재하는 자료들을 DB화하는 것으로서, 처분부지 선정 프로세스를 시작하기 전에 개발을 완료할 수 있을 것으로 예상된다.

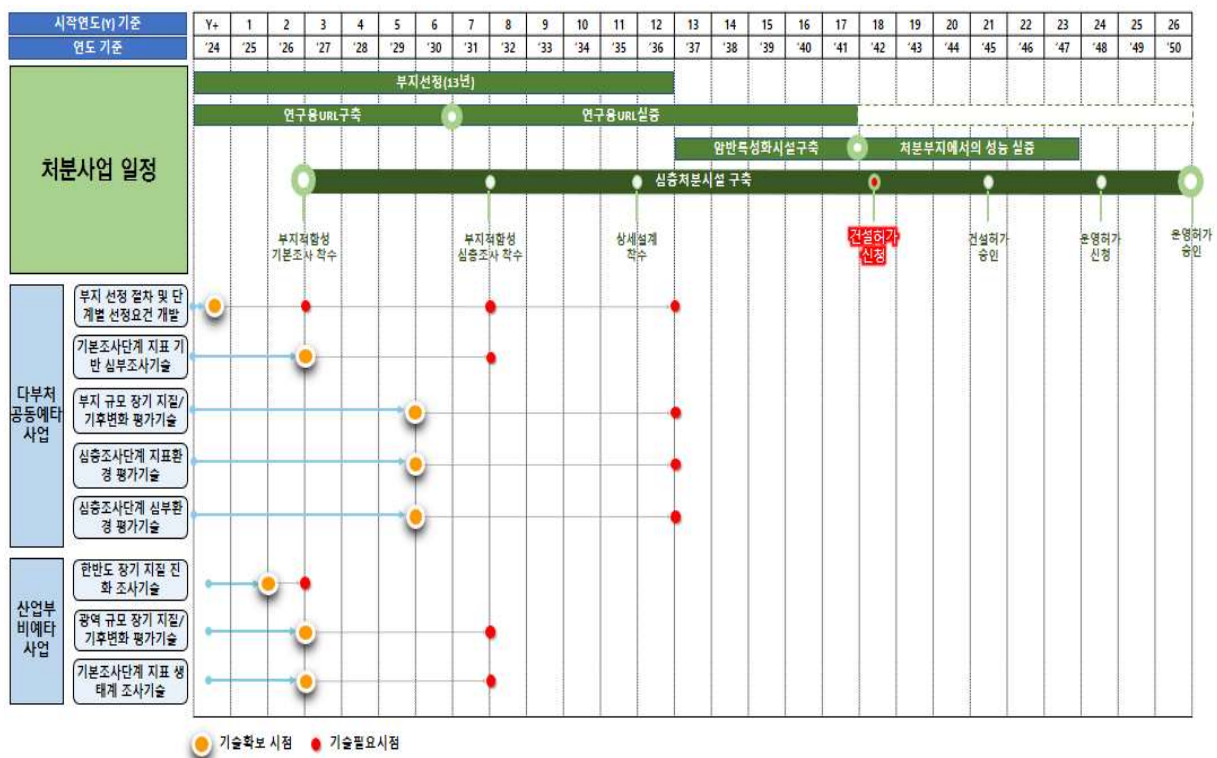
부지적합성 기본조사 단계에서 필요한 기술 중, 부지의 현재 상태를 규명하는 기술은 개발을 완료하였다, 지표 환경 및 장기 환경변화 평가와 관련된 기술은 아직 미흡한 수준이나 다부처 공동 예타사업을 통해 개발 중이다. 부지선정 프로세스가 시작되

4) 「사용후핵연료 저장·처분 안전성 확보를 위한 핵심기술개발사업」

면, 부지적합성 기본조사 단계 이전에 개발을 완료할 수 있을 것으로 예상된다.

부지적합성 심층조사 단계에 필요한 기술들은 아직 수준이 낮아서 개발이 필요하다. 최종 후보부지 선정에 필요한 장기 지질/기후 현상 평가기술, 지표환경 평가기술, 심부환경 평가기술 중 시추 중 조사 기술과, 처분장 건설 인허가에 사용될 구축에 필요한 심부환경 평가기술 등이 그러한 기술들이다. 반면 시추공 기반 조사 기술들은 개발이 완료되었으나, 연구용 URL에서 검증이 필요한 상황이다. 지표 환경 및 장기 환경변화 평가와 관련된 기술은 현재 다부처 공동 예타사업을 통해 개발 중이며, 부지적합성 심층조사 단계 이전에 개발을 완료할 수 있을 것으로 예상된다. 처분장 건설 인허가를 위한 자료 구축에 필요한 기술들도 다부처 공동 예타사업을 통해 현재 개발 중으로 사업 종료 전까지 개발을 완료하여 연구용 URL에서 실증할 수 있을 것으로 예상된다.

〈그림 3.1〉은 처분장 부지 확보와 관련한 기술 확보 현황 및 계획을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 부지선정 과정에서 각 기술이 필요한 시점 이전에 충분히 확보될 수 있음을 알 수 있다.



〈그림 3.1〉 영구처분장 부지선정 관련 기술 확보 일정(안)

3.2 특별위원회 제안 처분 솔루션

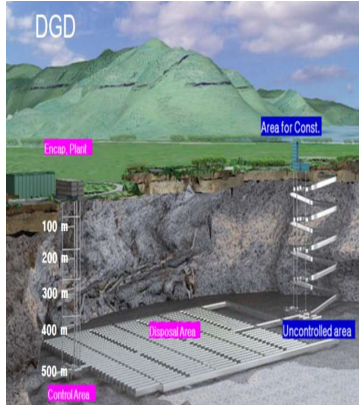
3.2.1 고준위방폐물 처분개념

◇ 특별위원회가 제안하는 고준위방폐물(사용후핵연료) 처분개념은 핀란드/스웨덴 개념을 바탕으로 하지만, 핀란드/스웨덴 처분개념 대비 처분면적은 70%, 처분비용은 약 30% 줄이는 것을 목표로 하고 있다.

가. 최상위 요건

국내 사용후핵연료 처분기술은 과학기술부 주도로 1997년부터 우리나라 암반 조건과 유사하고 처분사업 상용화에 근접한 핀란드/스웨덴 개념을 참조하여 개발해 왔다. 제1~2차 원자력연구개발사업(1997~2006)을 통해 처분시설 설계 및 안전성 평가 기초기술을 확보하였다. 국내 심부 화강암반 특성 및 사용후핵연료 특성을 반영하여 2006년 한국형 기준처분시스템(KRS, Korean Reference disposal System for Spent Nuclear Fuels)을 제시하였다[42]. 이 시스템의 주요 특징은 <표 3.1>에서 제시하는 바와 같다.

<표 3.1> 한국형 기준처분시스템(KRS) 처분개념[42]

KRS 처분용기/공학적 방벽 및 배치개념도		
지질환경/심도	- 화강암 기반/심부 500 m	
처분용기 개념  이중 구조 : 구리 + 주철 - 구리 : 내부식성, 5 cm 두께 - 주철 : 구조적 건전성 유지 용량 : PWR 사용후핵연료 4개 집합체	공학적 방벽 개념 	처분장 배치 개념 

제3~5차 원자력연구개발사업(2007~2020)을 통해 처분부지 평가, 처분시설 설계 및 안전성 평가, 처분용기 및 완충재 제작, 처분용기 및 완충재 장기 건전성 평가, 처

분용기-완충재-암반과의 복합상호작용 평가와 관련한 기반 기술을 확보하였다.

상기 연구개발 결과를 바탕으로 도출된 ‘한국형 처분 솔루션’이 갖춰야 할 최상위 요건은 다음과 같다.

[안전성]

- 처분 시스템은 심층방어 개념과 피동 안전성을 적용해 원자력안전위원회 고시 제2021-21호의 안전목표치를 만족하고, 외부 환경변화에 따라 회수 가능성을 확보해야 한다.
- 고준위방폐물 처분장은 모암으로 화강암반이 적합하며, 산소가 없는 환원 환경이고 지하수의 이동이 매우 느린 500m의 심도에 위치하여야 한다.
- 처분용기는 지속적인 외부 압력과 부식 환경에 견딜 수 있도록 구리(외부)-주철(내부) 이중 용기를 사용하여야 한다.

[경제성]

- 지하 500m의 환원환경에서는 부식이 제한적이므로 두께 5cm의 구리용기는 과도하므로 두께를 줄여야 한다. 다만, 최근 제기된 완충재에서의 미생물 발생 가능성에 따른 산성물질 발생과 이에 따른 용기외벽 부식 문제는 추가 평가가 필요할 수 있다.
- 벤토나이트 완충재는 100℃ 이상에서도 성능을 유지하므로, 처분장의 설계온도 제한치를 100℃ 이상으로 높여 처분 면적과 처분 비용을 줄여야 한다.
- 설계에 모든 인자를 상세하게 고려할 수 없으므로, 중요도가 낮은 성능평가 항목에 대해서는 공학적 여유도(Engineering margin)를 적용하여, 처분안전성을 확보하는 것이 바람직하다.
- 장기 냉각된 고준위방폐물의 경우, 처분용기내 처분다발 수를 최적화하고 처분 공 이격거리를 합리화한다.

나. 처분 솔루션

1) 설계전략[43]

본 보고서에서 제시하는 처분 솔루션은 앞 절의 최상위 요건을 바탕으로, 다음의 설계전략을 적용하여 도출하였다.

- 중수로 사용후핵연료는 연소도가 낮고 방사성물질의 양이 상대적으로 적으므로 붕괴열 최적화를 하지 않으며, 방출연소도 8.1GWd/tU, 냉각기간 55년을 방사선 원향으로 한다.
- 경수로 사용후핵연료는 처분용기당 붕괴열이 낮아지도록 최적으로 조합하여 장입하며, 처분용기당 열량 제한치는 1,600와트(Watt)이다.
- 처분장의 장기성능을 유지하기 위해 완충재에서의 최대온도 설계제한치는 130℃로 한다.
- 심부 처분환경에서 장기간의 정수압과 완충재 팽윤압에도 건전성을 유지할 수 있도록 처분용기의 구조성능 유지에 필요한 안전계수[항복강도/최대응력]는 2.0 이상이어야 한다.

상기 설계전략에 따라 도출된 특별위원회의 처분 솔루션이 핀란드/스웨덴 처분개념과 다른 주요 특성은 다음과 같다. 첫째, 핀란드/스웨덴의 처분용기는 가압경수로 사용후핵연료 4다발을 수용하나, 특별위원회의 처분 솔루션은 충분한 임시저장 기간을 거쳐 붕괴열이 낮아진 사용후핵연료를 붕괴열에 따라 적절히 조합하여 용기당 장전량을 7다발로 증가시켜 처분 효율을 높였다. 둘째, 처분 면적과 직결되는 처분장의 최대 설계온도도 실험 결과에 근거하여 높였다. 셋째, 공학적 최적화 및 3D 프린팅 신기술 등을 적용하여 구리용기 두께를 1cm로 줄였다. 이렇게 함으로써 핀란드/스웨덴의 KBS-3 처분개념보다 처분면적은 약 70% 이상 줄이고, 경제성은 30% 이상 높일 수 있을 것으로 기대한다.

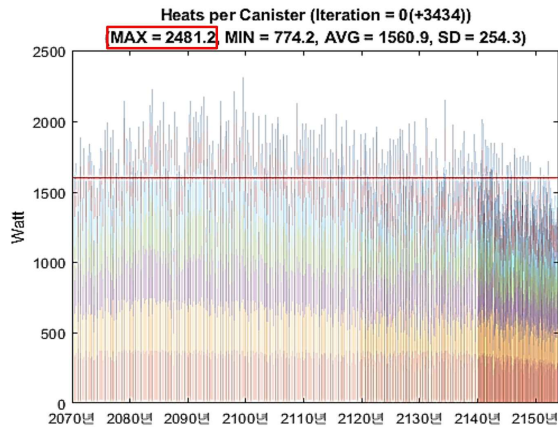
2) 방사선원향

처분대상 사용후핵연료 물량은 「제2차 고준위방폐물 관리 기본계획」에 제시된 중수로 576,800다발, 경수로 58,500다발을 대상으로 하였다.

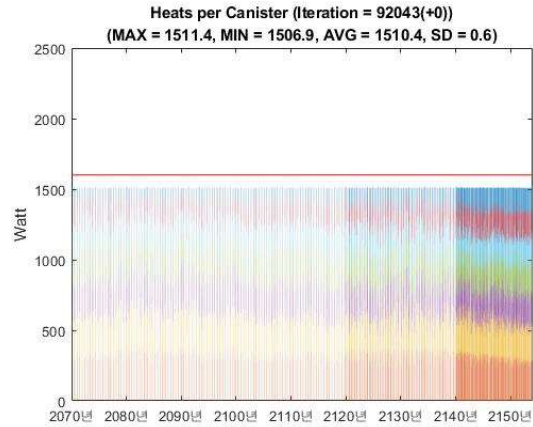
붕괴열이 낮아 처분면적이 작은 중수로 사용후핵연료는 보수성을 부여하여 모든 사용후핵연료가 방출연소도 8.1GWd/tU, 냉각기간 55년을 갖는 것으로 가정하였다. 붕괴열이 높고 방출연소도 및 냉각기간이 사용후핵연료 집합체마다 다른 경수로 사용후핵연료는 처분용기당 붕괴열을 낮추고 처분효율(kgU/m³)을 극대화를 위해 붕괴열 최적화를 수행하였다[43].

〈그림 3.2〉와 〈그림 3.3〉은 사용후핵연료 붕괴열 조합 전산프로그램을 활용하여 처

분용기 내 7개 사용후핵연료 집합체를 최적 조합한 결과를 보여주고 있다. 최적 조합 결과, 처분용기당 붕괴열은 약 1,511W로 평가되었으며, 처분개념 설계를 위한 여유를 고려하여 처분용기당 열량을 1,600W로 설정하였다.



〈그림 3.2〉 붕괴열 조합(최적화 이전)[43]

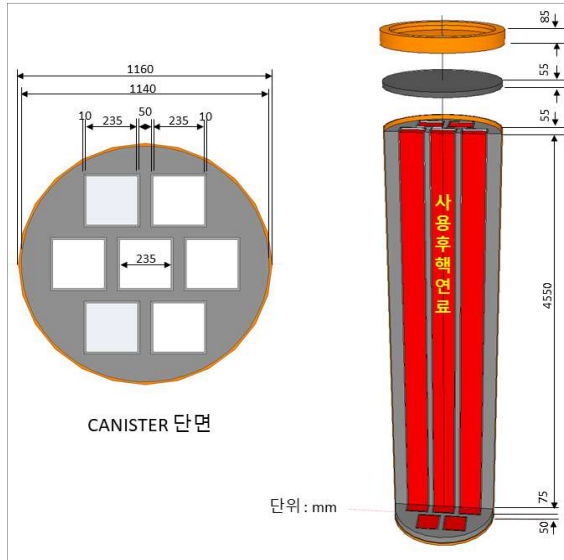


〈그림 3.3〉 붕괴열 조합(최적화 이후)[43]

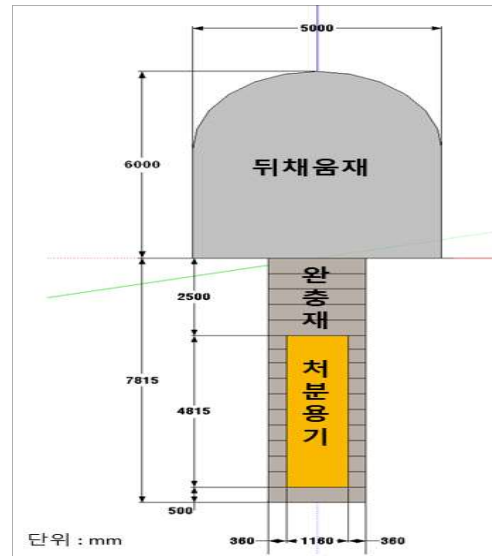
3) 공학적 방벽 및 처분모듈[43]

중수로 사용후핵연료 처분영역은 전체 처분면적의 1/20 수준이므로[42], 본 보고서에서는 고려하지 않기로 한다. 가압경수로 사용후핵연료 처분용기 개념설계안 및 그에 따른 처분터널과 처분공 개념은 다음과 같다.

처분용기는 구조적 건전성을 유지하기 위한 내부 주철용기와 내부식성을 확보하기 위한 외부 구리셸(두께 1cm)로 구성한다. 처분용기는 처분터널 바닥에 수직으로 뚫은 처분공에 정치한 후 암반과 처분용기 사이는 벤토나이트 완충재로 채운다. 〈그림 3.4〉와 〈그림 3.5〉는 처분용기 개념과 공학적 방벽 모듈 개념을 보여주고 있다.



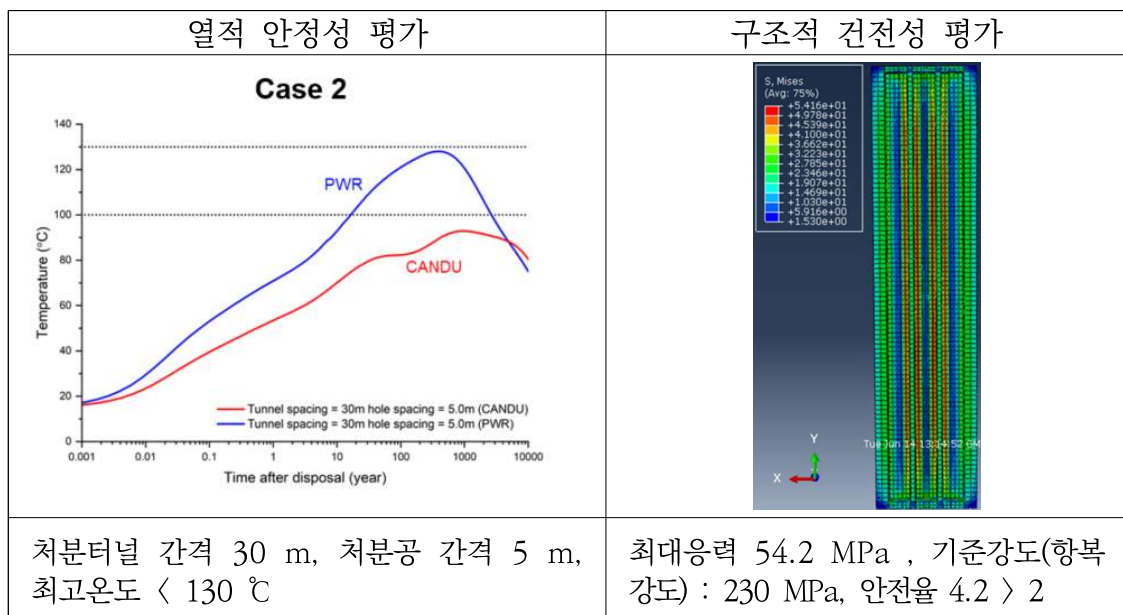
〈그림 3.4〉 처분용기 개념[43]



〈그림 3.5〉 공학적 방벽 모듈[43]

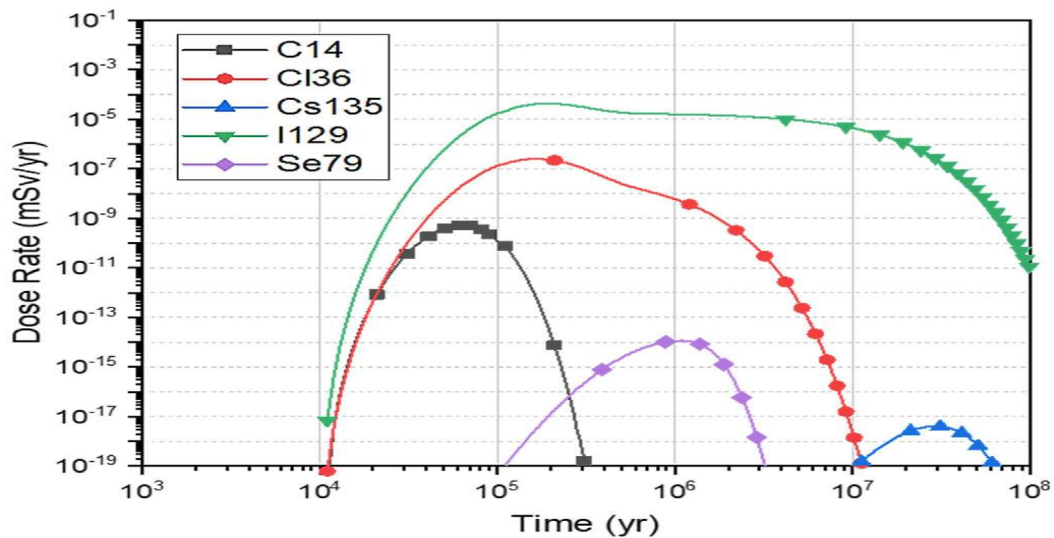
4) 종합성능 평가[43]

앞서 기술한 처분개념에 대한 열적 안정성(Thermal stability) 및 구조적 건전성 (Structural integrity) 평가 결과는 〈그림 3.6〉과 같다. 이 결과를 바탕으로 얻어진 처분터널 간격은 30m, 처분공 간격은 5m이다. 또 처분장 설계온도 제한치는 130℃ 이다. 처분용기의 직경은 116cm이며, 이때 구조적 건전성 지표인 안전계수는 4.2로 나타나 안전성을 충분히 확보한 것으로 평가됐다.



〈그림 3.6〉 특별위원회 제안 처분개념에 대한 열적·구조적 안정성 평가결과

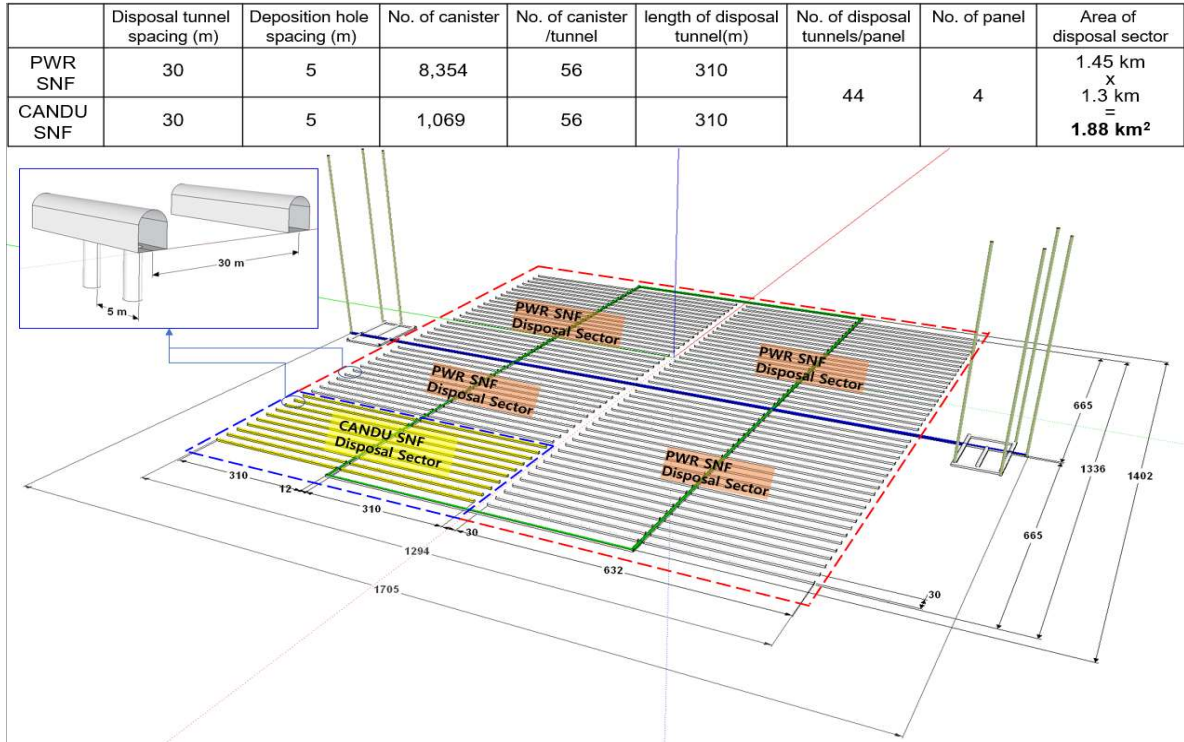
이 설계개념에 대해 핵임계 및 방사선차폐능 평가를 수행한 결과는 핵임계 요건 ($k_{eff} < 0.95$) 및 방사선 차폐능 요건을 만족한다. 처분장 폐쇄후 방사선학적 안전성 평가 결과는 <그림 3.7>과 같다. 사용후핵연료 처분 후 사용후핵연료 처분장 위에 거주하는 주민이 받는 피폭방사선량은 원자력안전위원회 고시 제2021-21호에서 제시하는 피폭선량 제한치 값(10mSv/yr) 대비 1/1,000로 나타나, 방사선학적 안전성도 충분하다.



<그림 3.7> 특별위원회 제안 처분개념에 대한 방사선학적 안전성 평가결과[43]

5) 특별위원회 처분 솔루션의 우수성

특별위원회가 솔루션으로 제안하는 처분개념은 사용후핵연료 봉괴열 최적화, 3D 프린팅 제작기술, 설계온도 제한치 130℃를 적용함으로써 효율성을 높였다. <그림 3.8>에서 보는 바와 같이, 처분면적은 1.88 km²로 나타났다. 이는 핀란드 처분개념 대비 약 70% 처분면적이 감소하고, 처분밀도는 300% 이상 증가한 값이다. 또 처분용기, 완충재, 굴착량 감소로 인해 처분 비용도 30% 이상 절감될 것으로 평가됐다.



〈그림 3.8〉 완충재 최고온도 130℃인 경우, 배치 및 처분면적

〈표 3.2〉 핀란드 처분시스템과 특별위원회 제안 처분시스템 처분면적 비교

	핀란드 처분시스템[22]	특별위원회 제안 처분시스템[43]	
	온도 제한 < 100 ℃ EPR(OL3 발전소) SNF	온도 제한 < 130 ℃ PWR SNF	CANDU SNF
총 집합체 수	4,700	58,500	576,800
집합체 수/처분용기 (kU/처분용기)	4 (2,130)	7 (3,015)	480
총 처분용기 수	1,175	8,354	1,201
처분터널 간격 (m)	40	30	40
처분공 간격 (m)	8.2	5	5.2
집합체당 처분면적 (m ² /집합체)	82 (100 %)	22 (27 %)	
처분밀도 (kgU/m ²)	6.5 (100 %)	20.1 (307 %)	

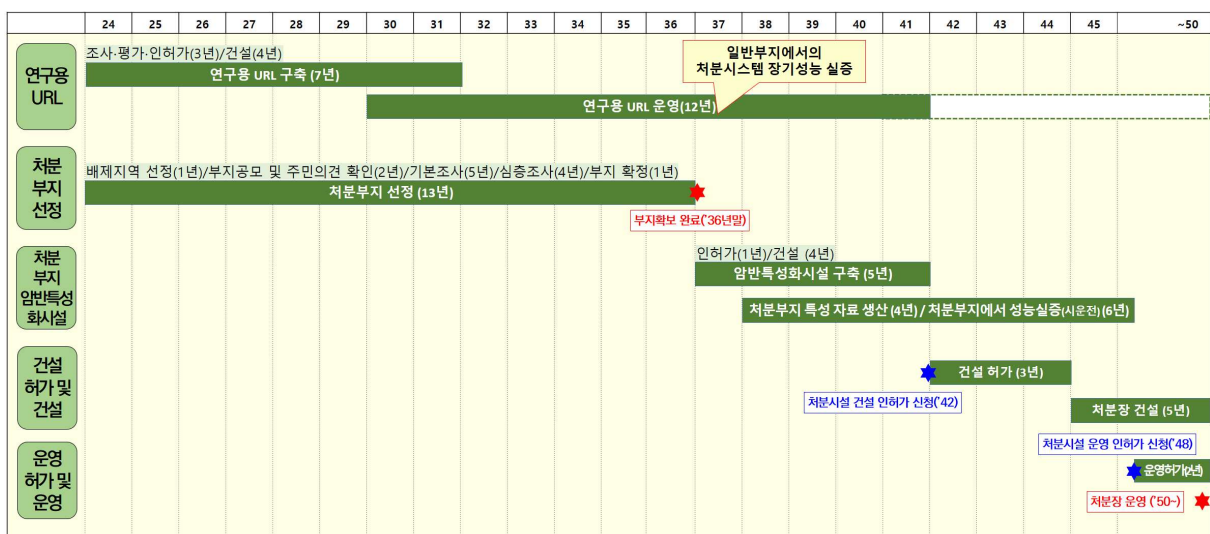
3.3 이행방안

◇ 사용후핵연료 처분장 운영은 2050년 이내에 가능하며, 아직 확보되지 않는 기술 및 안전성 실증 데이터는 현재 추진 중인 연구개발 사업과 연구용 URL 조기 확보 및 운영을 통해 문제없이 확보할 수 있다.

3.3.1. 처분사업 일정

본 보고서에서 제시하는 처분 솔루션은 실제와 유사한 처분환경에서 현장실증을 제외하고는 공학적 타당성이 대부분 확인되었다. 이 처분 솔루션으로 사용후핵연료(고준위방폐물)을 처분하기 위해서는 처분장 부지확보가 선결되어야 하며, 부지확보는 주민 동의 없이는 불가능하다. 따라서 실제 처분환경과 유사한 환경에 연구용 URL을 최대한 빨리 구축하고 처분안전성 실증데이터를 확보해야 한다.

2021년 12월에 의결된 「제2차 고준위방폐물 관리 기본계획」은 처분장 부지 확보 시점을 부지선정 절차 개시 후 13년으로 제시하고 있으며, 원자력진흥위원회에서 2024년 2월 의결한 「고준위방폐물 R&D 로드맵」은 2030년을 연구용 URL운영 목표 시점으로 제시하고 있다. 「고준위방폐물 R&D 로드맵」의 연구용 URL 구축 및 운영계획과 「고준위폐기물 관리 기본계획」의 부지선정 절차를 <그림 3.9>처럼 추진할 경우, 처분시설 건설 인허가는 2042년, 처분시설 운영 인허가는 2048년에 신청하여 2050년대 초에는 처분장 운영이 가능할 것으로 예상된다.



<그림 3.9> 특별위원회가 재평가한 사용후핵연료 처분장 운영일정 수정(안)

위 사업 일정에서 가장 중요한 과정은 연구용 URL의 조속한 구축과 이를 효과적으로 활용하는 것이다. 연구용 URL은 영구처분시설이 들어설 곳과 유사한 지질환경을 갖는 암반에 건설한다. URL 운영을 통해, 처분장 부지 확보 이전에 △수리지질 모델링 기술개발 △처분개념 개발 및 안전성평가 모델 검증 △처분시설 설계안 성능실증 등을 수행하여 처분안전성 평가에 필요한 사항들을 미리 확보할 수 있다. 연구용 URL이 없으면, 앞의 사항들을 처분장 부지가 확보된 이후에 수행해야만 한다. 향후 처분장 부지가 확보되면, 현장에서 획득한 데이터(암반 특성 자료/수리 지질 모델)를 추가하여 최종 안전성 평가를 수행하여 처분장 인허가를 진행할 수 있다. 이렇듯 연구용 URL은 전체 사업기간을 단축하는 효과를 가져온다. 연구용 URL을 적극 활용하면, 기존에 제시된 사업 기간을 약 10년 단축할 수 있을 것으로 판단된다.

앞서 제시된 <그림 3.9>의 사업 일정은 1997년부터 33년(1997~2029)간 획득한 처분 기술과 향후 연구용 URL에서 12년간 획득할 처분안전성 실증자료, 처분부지에서 4년간 획득할 부지특성 자료 등 총 49년 동안 얻어진 자료를 근거로, 2042년에 처분장 건설허가를 신청하는 것을 가정하고 있다. 처분시설 운영과 관련해서도 사전인허가 검토(Pre-licensing review)를 통해 규제기관이 처분시설 개발단계부터 개입함으로써 운영 시점을 앞당길 수 있을 것으로 본다.

3.3.2. R&D 로드맵

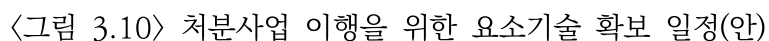
본 특별위원회가 제안하는 처분 솔루션이 공학적으로 타당성을 갖지만, <그림 3.9>에서 제시한 처분사업 일정을 계획대로 이행하기 위해서는 현재까지 확보되지 않은 기술에 대한 확보 노력이 병행되어야 한다.

처분부지 확보를 위한 기술은 기본조사 기술, 심층조사 기술, 부지성능평가 기술이 필요하다. 기본조사 기술은 이미 확보하고 있다. 심층조사 기술은 「고준위방폐물 R&D 로드맵」의 연구용 URL 구축 과정에서 확보될 예정이다. 처분부지 장기성능평가 기술은 현재 과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 원자력안전위원회가 추진하는 다부처 공동 예타사업을 통해 2029년 말까지 확보될 예정이다.

처분시스템 설계와 관련해서는 처분시설 설계 및 안전성 평가기술은 이미 보유하고 있으며, 불확실성을 저감하여 신뢰도를 높이는 연구가 현재 진행되고 있다. 사용후핵연료 장전량 7다발을 갖는 1cm 두께 구리 처분용기 및 130℃ 고온조건 하에서의 벤토나이트 완충재 장기성능 평가는 과학기술정보통신부가 추진하고 있는 「고준위폐기물

특별위원회 제안 처분시스템 설계안에 대해 건설허가를 받기 위해 가장 중요한 것은 연구용 URL에서 2040년까지 처분안전성 실증을 끝내는 것이다. 이는 현재 추진 중인 다부처 예타사업을 통해 안전성 실증에 필요한 사전 핵심기술을 2029년까지 개발하고 2030년부터 실증에 돌입하는 것으로 해결할 수 있을 것으로 보인다.

〈그림 3.10〉은 현재 진행되고 있거나 계획된 사업을 기반으로 핵심기술이 확보되는 시점과 그 기술이 실제 필요한 시점을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 실제 필요한 시점 이전에 핵심기술이 모두 확보될 수 있음을 볼 수 있다.



3.4 안전규제에 대한 보완

고준위방폐물 처분에 대한 안전규제체제는 아직 구체적으로 수립되어 있지 않다. 왜냐하면 규제는 사업 진도에 비례하여 구체화되기 때문이다. 핀란드, 스웨덴, 프랑스 등 몇몇 주요국에서만 고준위방폐물 처분사업이 시작되었기 때문에, 이들 국가의 사업 추진에 따라 규제지침이 구체화되고 있다.

우리나라의 경우, 2017년 공포된 원자력안전위원회고시(제2021-21호)가 고준위방폐물 심층처분시설에 관한 일반기준으로 설정된 상태이며, 구체적인 규제요건과 지침은 다부처 공동 예타사업으로 추진 중인 「사용후핵연료 저장·처분 안전성확보를 위한 핵심기술개발사업」이 종료되는 2029년경 구체화될 예정이다.

한편 폐기 대상인 중·저준위 및 고준위방폐물에 대해 과도한 검사를 요구하거나 고준위방폐물 안전성 평가를 지나치게 장기간에 대해 수행하라고 요구하는 등 세계적으로 과도한 규제를 요구하는 경향이 있다. 우리나라도 원자력안전위원회 고시 제6조제6호에서 심층처분시설 폐쇄 후 1만 년 이후까지 처분안전성 평가를 요구하고 있다. 안전성 평가방법론 측면에서도, 불확실성이 높은 1만 년 이후 기간에 대해 결정론적 분석을 요구하는 현재의 방식도 문제다. 그러나 이는 국제사회에서 관행처럼 제시되는 요건이므로 국내 문제만은 아니다. 따라서 이에 대해 국제 원자력계와 협력하여 더 현실적이고 실질적인 규제체계를 만들 필요가 있다.

〈표 3.3〉 원자력안전위원회 고시 제2021-21호 제6조제6항

제6조(안전성평가) 6. 안전성평가의 기간은 해당 처분시스템의 성능기간을 포함하되, 안전 목표치에 대한 부합성을 판단하기 위한 평가기간은 심층처분시설의 폐쇄 시점으로부터 1만년으로 할 것. 다만, 예상되는 방사선영향(총 연간위험도 또는 피폭시나리오별 연간 선량 및 위험도)이 1만년 이내에 최고치에 도달하지 않는 경우에는 1만년 이후에 환경으로 방사성핵종의 누출이 현저히 증가하지 않을 것이며, 개인에게 결정론적 영향을 일으키는 방사선량이 발생하지 않을 것이라는 타당한 논거를 제시하여야 한다.

3.5 고준위방폐물 관리 전담기관 신설

우리나라는 1980년대부터 9차례에 걸쳐 방폐물처분장 부지선정을 시도했지만 무산됨에 따라 고준위와 중·저준위방폐물 처분을 분리하여 추진하기로 하였다. 2005년 「중·저준위 방사성폐기물 처분시설의 유치지역지원에 관한 특별법」을 제정하였고 그 이후 한국원자력환경공단(KORAD)이 신설되어 중·저준위 방사성폐기물 처분사업을 담당하고 있다.

핀란드(POSIVA), 캐나다(NWMO), 일본(NUMO) 등은 고준위폐기물(사용후핵연료 포함)만을 별도로 관리하는 전담기관을 설립하여 관련 정책 및 기술개발은 물론 부지선정을 주도하는 등 성과를 거두었다. 우리나라의 경우, 방사성폐기물 관리법 제10조(방사성폐기물 관리사업자)에 따라 한국원자력환경공단이 전담기관 역할을 하고 있으나, 사업기획 및 관리, R&D, 인력양성, 대국민 수용성 증진 등을 아우른 종합적인 역할을 수행하기에는 부족한 실정이다. 이에 한국수력원자력(주), 한국원자력환경공단, 한국원자력연구원, 사용후핵연료관리핵심기술개발단 등 여러 기관에 흩어져 있는 기능과 전문인력들을 한 곳으로 모아 새로운 형태의 전담기관을 신설하는 방안을 적극적으로 검토해야 한다.

처분부지 확보에 성공한 주요국의 공통적인 특징은 사업준비 이전인 R&D 단계에서부터 전담기관이 지정되어 운영되었다는 것이다. 따라서 우리나라도 부지선정 단계부터 이해당사자에게 설명회를 개최하고 사업 추진시 발생하는 각종 민원을 해결하는 창구를 일원화하는 것이 필요하다. 또한 부지선정 과정 중, 전담기관 본원을 처분시설 유치 지역으로 이전하여, 지역주민과 함께 생활한다고 약속함으로써, 고준위방폐물 처분의 안전성에 대한 지역주민의 불신을 불식시킬 필요가 있다.

하지만, 한국원자력환경공단은 「중·저준위 방사성폐기물 처분시설의 유치지역지원에 관한 특별법」에 따라 경주를 떠날 수 없다. 또 중·저준위 방폐물 처분시설을 유치한 경주에는 사용후핵연료를 반입할 수 없기 때문에 지질학적 타당성과 상관없이 고준위 방폐물 처분시설을 건설할 수 없다. 따라서, 중·저준위 방폐물과 고준위방폐물 문제를 분리해서 운영하는 핀란드, 캐나다, 일본 등과 같이 고준위방폐물 관리 전담기관을 서둘러 신설해야 한다.

이에 본 특별위원회는 고준위방폐물 문제를 실효적으로 해결하기 위하여 「고준위 방폐물 관리 전담기관」 신설을 제안하는 바이다.

제4장

정책제언

제4장 정책제언

기후변화는 인류의 지속가능한 발전을 담보하기 위해 국제사회가 협력하여 해결해야만 하는 글로벌 핵심 과제이다. 우리나라를 포함한 선진국들은 온실가스를 줄이고 저탄소 경제의 이행을 위해 2050 탄소중립을 선언하였다. 우리가 인지하듯이 전 세계적으로 주된 온실가스 배출원은 에너지 부문에서 비롯되고 총 온실가스 배출의 약 87%를 차지한다. 따라서, 친환경 지속가능성을 충분히 담보하는 무탄소 에너지원의 확보가 글로벌 기후변화 대응에 가장 효과적인 길이다.

우리나라와 유럽연합(EU)은 2050년까지 탄소중립을 위한 실효적인 정책 수단으로 「Green Taxonomy」를 도입하였고 여기에 원자력 발전을 포함했다. 다만, 유럽연합은 원자력을 택소노미에 넣으면서 2050년까지 고준위방폐물(사용후핵연료) 처분시설의 운영계획을 요구하고 있다. 우리 정부도 원자력을 K-택소노미에 포함하면서 고준위방폐물 관리 특별법의 제정을 전제조건으로 제시하고 있다.

원자력 발전의 필연적인 부산물로 발생하는 사용후핵연료(고준위방폐물)는 고방사능 물질로 오랜 시간 동안 안전한 관리가 필요하다. 핀란드는 사용후핵연료 심층 처분장을 건설하였고 2025년부터 2년간의 시운전후 2027년경 최초로 상업 운영에 들어갈 예정이다. 스웨덴도 영구처분장의 건설인허가를 획득하여 건설에 착수하였다. 프랑스도 영구처분 부지를 확보하여 인허가 절차를 밟고 있다. 이러한 사례들로부터 최소한 이들 선도국에서는 고준위방폐물 심층 처분시설에 대한 기술적 안전성이 입증되었고 사회적 수용성도 확보하였다는 것을 알 수 있다.

이에 반해 우리나라는 고준위방폐물 심층 처분에 대한 사회적 수용성을 확보하지 못하고 있다. 우리가 풀어야 할 숙제이다. 우리 정부는 오랜 기간 사용후핵연료 관리 정책에 관해 ‘관망 정책(Wait-and-see policy)’을 취해 왔다. 이는 기술개발 성과들을 시의적절하게 원자력 정책에 반영하자는 취지지만, 실상은 ‘폭탄 돌리기’와 ‘넘트 현상(Not In My Term)’이나 진배없다. 하지만, 사용후핵연료 정책이 ‘직접 처분’이든 ‘재처리 후 처분’이든 간에 영구처분장은 공통적으로 필요한, 매우 중요한 국가 기간 시설이다.

사용후핵연료는 우리 사회에 엄연히 존재하고 있다. 누구도 우리 대신해 이 문제를 해결해 주지 않는다. 거의 반세기 동안 무탄소 에너지원으로 값싸고 안정적인 원자력 발전의 혜택을 누려온 현세대가 미래 세대에게 사용후핵연료 관리의 책임을 전가해서

는 안 된다. 이제 ‘폭탄 돌리기’를 멈춰야 한다.

이에 「한국원자력학회 사용후핵연료 관리방안 특별위원회」는 고준위방폐물 처분에 대한 솔루션과 정책적 제안을 아래와 같이 한다.

첫째, 산·학·연 처분 전문가 그룹은 EU 텍소노미 요건을 충분히 만족시키는 고안전, 고효율, 친환경 처분 기술 적기 개발에 전력을 다해야 한다. 특히 고준위방폐물 영구처분시설의 운영 시점을 앞당기는 기술은 원자력에 대한 국민 수용성으로 이어질 것이다. 2050년대 처분장 운영은 EU 텍소노미 요건을 충족하여, 우리나라가 유럽 금융권으로부터 녹색금융지원을 받아 원전을 수출해야 하는 경우, 유리하게 작용할 것으로 판단된다.

둘째, 우리나라의 사용후핵연료(고준위폐기물) 처분시스템은 우리 실정에 맞춰 안전성을 확보하고, 1980년대 기술이 채택된 핀란드 처분장 대비 높은 경제성을 담보해야 한다.

- 고준위방폐물 처분장은 모암으로 화강암반이 적합하며, 산소가 없는 환원 환경이어서 방사성물질의 이동이 어려운 500m의 심도에 위치하여야 한다.
- 처분용기는 지속적인 외부 압력과 부식 환경에 견딜 수 있도록 구리-주철 용기를 사용하여야 한다.
 - 구리-주철 처분용기를 사용하여 사용후핵연료를 처분할 경우, 우리나라 화강암반에서 안전성을 충분히 확보할 수 있으므로, 핀란드나 스웨덴이 적용하고 있는 구리 두께 5cm는 과도하여 상당히 줄일 필요가 있다[19].
 - 단조 방식의 구리용기 제작은 단가가 비싸고 두께 조절에 자유도가 적으므로, 이 단점을 해소할 수 있는 신기술을 적용해야 한다.
- 벤토나이트 완충재는 100℃ 이상에서도 성능을 유지하므로[34, 35], 처분장 설계온도 제한치를 100℃보다 높여 처분 면적과 처분 비용을 줄일 필요가 있다.
- 처분시스템 설계에 모든 인자를 상세히 고려할 수 없으므로, 중요도가 낮은 성능평가 항목에 대해서는 공학적 여유도(Engineering margin)를 적용해 처분안전성을 확보해야 한다.

셋째, 정부는 2050년대 처분장 운영을 위한 필수적 수단이며, 심지층 처분시스템의 장기 안전성 실증을 위해 필수 시설인 지하연구시설(연구용 URL)을 늦어도 2030년대

초에는 운영하여야 한다. 최근 원자력진흥위원회는 2030년 연구용 URL 운영을 심의 의결하였다. 정부는 이에 대한 후속 조치로 연구용 URL 유치 지역을 공모하고 있다. 2029년에 종료 예정인 다부처 공동 예타사업의 연구 성과들이 연구 절벽 기간 없이 연구용 URL에서 실증될 수 있도록, 연구용 URL 운영 시점을 맞출 필요가 있다.

넷째, 원자력안전위원회는 고준위방폐물 처분에 관한 최신 연구 성과, 과학·기술적 근거, 규제기준과 안전목표의 합리적 현실성 등을 고려하여 처분에 관한 안전규제 체계 및 기준을 마련하여야 한다. 인류문명의 존속기간을 상회하는 초장기 시간 이후에도 규제를 적용하는 것은 비현실적이므로, 국제 원자력계와 협력하여 합리적으로 개선해 나갈 필요가 있다.

다섯째, 국회는 고준위방폐물 처분부지의 확보를 위한 절차, 방식, 일정 등이 포함된 특별법을 조속히 제정하여 원전 지역주민과 미래 세대에게 고준위방폐물 관리의 책임을 전가하지 말아야 한다. 특히, 사회적 여건을 고려할 때 우리나라는 프랑스와 매우 유사하다고 판단되므로 부지선정에 있어 특별법이 매우 유용한 수단으로 중요하다고 판단한다. 제도와 절차를 명확히 해야 하고 절차나 부가 조건 등 그 자체가 사업추진에 있어 걸림돌이 되어서는 안 된다. 관리위원회의 역할과 기능을 모호하게 설정하여 책임소재나 역할을 불분명하게 해서도 안 된다.

여섯째, 정부는 고준위방사성폐기물 처분장 사업을 성공적으로 수행하고 있는 국가와 같이 우리나라 고준위방폐물 전문가들을 함께 모아 고준위방폐물 이슈를 실효적으로 해결하기 위하여 「고준위방폐물 관리 전담기관」을 신설해야 한다.

제5장

참고문헌

제5장 참고문헌

- [1] M. Nironen, Guide to the geological map of Finland – Bedrock 1:1000000, Geological Survey of Finland Special Paper 60 (2017) 41-76.
- [2] T. McEwen and T. Äikäs, The Site Selection Process for a Spent Fuel Repository in Finland – Summary Report, 2000, POSIVA 2000-15.
- [3] “The Bedrock of Sweden,” Survey of Sweden,
<https://www.sgu.se/en/geology-of-sweden/rocks/the-bedrock-of-sweden>.
- [4] Svensk Kärnbränslehantering AB(SKB), RD&D Programme 2019, 2019, TR-19-24.
- [5] “How Forsmark Was Selected,” SKB,
<https://skb.com/future-projects/the-spent-fuel-repository/how-forsmark-was-selected>.
- [6] E.M. Moores and R.W. Fairbridge, Encyclopedia of European and Asian Regional Geology, Springer, 1998.
- [7] 이정환 외, 프랑스 고준위방폐물 부지선정에서 지하연구시설의 역할, 한국자원공학회지 54 (2017) 358-366.
- [8] Nagra, High-Level Waste Repository-Induced Effects, 2016, Technical Report 14-13.
- [9] “Nagra proposes “Nördlich Lägern” as the site for Switzerland’s deep geological repository,” Nagra,
<https://nagra.ch/en/media-release-nagra-proposes-nordlich-lagern-as-the-site-for-switzerlands-deep-geological-repository>.
- [10] “Geologic Provinces of the United States: Records of an Active Earth”, U.S. Geological Survey,
<https://web.archive.org/web/20130625144411/http://geomaps.wr.usgs.gov/parks/province/index.html>
- [11] 고용권 외, 해외 고준위 방폐장 부지선정 현황 분석, 2009,

KAERI/AR-827/2009.

- [12] 함철훈, 장윤석, 사용후핵연료론-정책과 법제, 화산미디어, 2018.
- [13] Svensk Kärnbränslehantering AB(SKB), Design Premises for a KBS-3V, Repository Based on Results from the Safety Assessment SR-Can and Some Subsequent Analyses, 2009. SKB Technical Report TR-09-22.
- [14] T. Saanio et al., Design of the Disposal Facility 2012, POSIVA Oy Report, 2013. Working Report 2013-17.
- [15] H. Raiko, Canister Design 2012 Analysis Report for the Canister, Svensk Kärnbränslehantering AB Technical Report, 2010, SKB-TR-10-28.
- [16] H. Raiko, Canister Design 2012, POSIVA Oy Report 2012-13.
- [17] Svensk Kärnbränslehantering AB(SKB), Buffer and Backfill Process Report for the Safety Assessment SR-Can, SKB Technical Report, 2006. SKB-TR-06-18.
- [18] M. Juvankoski et al., Buffer Production Line 2012-Design, Production and Initial State of the Buffer, POSIVA Oy Report, 2012. POSIVA 2012-17.
- [19] F. King et al., An Update of the State-of-the-Art Report on the Corrosion of Copper under Expected Conditions in a Deep Geologic Repository. 2011, POSIVA 2011-01.
- [20] Posiva, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto- Description of the Disposal System 2012, 2012, POSIVA 2012-05.
- [21] Svensk Kärnbränslehantering AB(SKB), Underground design Forsmark Layout D2, 2009, R-08-116.
- [22] K. Ikonen and H. Raiko, Thermal Dimensioning of Olkiluoto Repository for Spent Fuel, 2012, Working Report 2012-56.
- [23] ANDRA, Submission of the construction licence application for Cigeo,

CIGEO MAG 2023.

- [24] ANDRA, Cigeo Project Deep geological disposal facility for radioactive waste in Meuse/Haute-Marne, summary of project owner file, 2013.
- [25] ANDRA, Dossier 2005 Argile, SYNTHESIS Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation, Meuse/Haute-Marne site, 2005.
- [26] The Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future (BRC), Report to the Secretary of Energy, 2012.
- [27] R.P. Rechard and M.D. Voegele, Evolution of repository and waste package designs for Yucca Mountain disposal system for spent nuclear fuel and high-level radioactive waste, Reliability Engineering and System Safety 122 (2014) 53-73.
- [28] U.S. Department of Energy Office of Civilian Radioactive Waste Management, Yucca Mountain Science and Engineering Report Technical Information Supporting Site Recommendation Consideration, Revision 1, 2002, DOE/RW-0539-1.
- [29] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide, IAEA SAFETY STANDARDS SERIES No. SSG-14. 2011.
- [30] 산업통상자원부, 제1차 고준위방폐물 관리 기본계획(안), 2016.
- [31] 산업통상자원부, 제2차 고준위방폐물 관리 기본계획(안), 2021.
- [32] 국토교통부 국토지리정보원, 대한민국 국가지도집 II, 2022, http://nationalatlas.ngii.go.kr/pages/page_94.php
- [33] 김경수 외, KURT 기반 파이로공정 고준위폐기물 처분시스템 개념개발 단계 Safety Case (AKRS-16): Safety Case 종합보고서, 2016, KAERI/TR-6726/2016.
- [34] 이종열 외, KURT 기반 파이로공정 고준위폐기물 처분시스템 개념개발 단계 Safety Case (AKRS-16): I. 처분시스템과 처분시설, 2016,

KAERI/TR-6727/2016.

- [35] 지성훈 외, KURT 기반 파이로공정 고준위폐기물 처분시스템 개념개발 단계 Safety Case (AKRS-16): II. 처분부지, 2016, KAERI/TR-6728/2016.
- [36] 조동건, 이민수, KURT 기반 파이로공정 고준위폐기물 처분시스템 개념개발 단계 Safety Case (AKRS-16): III. 방사성폐기물 유형 및 특성, 2016, KAERI/TR-6729/2016.
- [37] 이민수 외, KURT 기반 파이로공정 고준위폐기물 처분시스템 개념개발 단계 Safety Case (AKRS-16): IV. 공학적 방벽시스템, 2016, KAERI/TR-6730/2016.
- [38] 조동건, 김정우, KURT 기반 파이로공정 고준위폐기물 처분시스템 개념개발 단계 Safety Case (AKRS-16): V. FEP과 시나리오, 2016, KAERI/TR-6731/2016.
- [39] 조동건 외, KURT 기반 파이로공정 고준위폐기물 처분시스템 개념개발 단계 Safety Case (AKRS-16): VI. 모델과 자료, 2016, KAERI/TR-6732/2016.
- [40] 김정우 외, KURT 기반 파이로공정 고준위폐기물 처분시스템 개념개발 단계 Safety Case (AKRS-16): VII. 폐쇄 후 안전성평가, 2016, KAERI/TR-6733/2016.
- [41] 정종태 외, KURT 기반 파이로공정 고준위폐기물 처분시스템 개념개발 단계 Safety Case (AKRS-16): VIII. 보조적인 고려사항, 2016, KAERI/TR-6734/2016.
- [42] J. Lee et al., Concept of a Korean reference disposal system for spent fuel, J. Nucl. Sci. Technol. 44 (2007) 1565-1573.
- [43] J. Lee et al., High-efficiency deep geological repository system for spent nuclear fuel in Korea with optimized decay heat in a disposal canister and increased thermal limit of bentonite, Nuclear Engineering and Technology 55 (2023) 1540-1554.