

[서평]

Uncertainty Underground: Yucca Mountain and the Nation's High-Level Nuclear Waste

Macfarlane, A. M. and Ewing, R. C. 편저<sup>1)</sup>, MIT Press (2006) 431p.

ISBN 0-262-13462-4 (보급판. U\$30), 0-262-63332-9 (양장본. U\$72)

1. 서언

필자가 'Uncertainty Underground'를 처음 소개받은 것은 2007년 3월 즈음이었다. 경주 중·저준위 방사성 폐기물처분장 심사가 막 시작된 때라 미국의 고준위 방사성 폐기물(이하 고준위폐기물)처분사업 반세기와 유카산 프로젝트(미국 유타주의 유카산 수 백 미터 아래의 동굴에 고준위방사성폐기물을 영구처분하려는 국책 사업) 30여년의 기술현안과 정책변화의 역사가 고스란히 담겨 있는 이 책이 안전심사 담당자들에게는 동굴처분에 관한 전반적인 현안을 짚어보는데 좋은 참고문헌이 되어 주었다.<sup>2)</sup> 이 책은 편저자인 Macfarlane과 Ewing이 그들을 포함한 장절별 저자 34인의 글을 하나의 책으로 편집한 것이다. 1999년 편저자 2인이 식탁 테이블 냅킨위에서 책 발간을 처음 구상하였고, 학회 특별세션, 워크샵 등을 통하여 유카산 프로젝트에 직간접적으로 관여한 각 분야의 전문가들 중에서 참여자를 모아 2001년부터 본격적인 작업에 착수한 후 2006년 봄에 책으로 발간하게 되었다. 유카산 프로젝트의 역사만큼이나 오랜 작업기간이다. 국가적으로 사용후핵연료처리 공론화가 시작 단계에 있는 이 시점에서 관련분야 전문가는 물론이고 정책 입안자와 일반 국민의 합리적인 판단과 현명한 선택에 도움이 될 만한 '전문교양서적'이라고 생각되어 이 책에 대해 소개하고자 한다.

2. 책의 구성과 내용

이 책은 제1부 정책, 제2부 과학과 기술, 그리고 제3부 불확실성관리의 순으로 전체 3부 24장으로 이루어져있다. 내용이 많고 분야가 다양한 제2부는 다시 5개의 소절로 나누어서 유카산부지의 환경조건에서 시작하여 고준위 폐기물의 형태에 이르기까지 순차적으로 주제를 나열하였다. 편저자들은 기술적인 내용에 앞서 서언을 두어 사

용후핵연료를 포함한 고준위폐기물의 특성과 현황, 미국 고준위폐기물 처분과 유카산 프로젝트의 역사와 정책, 유카산부지의 지질환경, 공학적 시스템 그리고 대표적인 기술적 현안들에 대해 책의 흐름을 소개하는 형식을 빌려 이 책의 전반(全般)에 대해 잘 간추려 정리하였다.

가. 제1부 정책

제1부 '정책'에서는 미국의 방사성폐기물 관리현황과 고준위폐기물처분장의 입지에 관한 기술정책, 그리고 유카산부지에 적용된 안전규제기준이 시간의 흐름에 따라 잘 정리되어있다. 여기에서는 미국의 고준위폐기물 처분 사업이 어떻게 시작되었으며, 정책입안, 사업의 궤도수정과 그에 따른 정부정책의 변화, 후보부지의 선별과정과 유카산부지의 선정, 부지특성조사-운영-폐쇄후 안전성에 이르는 전반적인 흐름을 이해하는데 더없이 좋은 참고 자료를 제공한다. 또한 유카산 처분장의 장기적인 안전성에 대한 최종적인 확인을 위해 미국 에너지부(DOE)가 개발한 종합성능평가(TSPA, Total System Performance Assessment)법을 소개하고 그에 대한 장단점을 심도 있게 분석하였다.

나. 제2부 과학과 기술

제2부 '과학과 기술'은 다시 지구과학, 수리학, 열수리학, 폐기물포장용기의 거동특성, 그리고 폐기물의 형태로 나뉘어져 유카산부지에 적용된 과학기술요소 전반에 대해 분야별로 그간의 연구내용과 기술현안에 대해 상세히 정리하고 분석하였다. 장별 저자들이 과학과 기술에 관한 유카산 처분장의 거의 모든 현상과 계획에 대하여 최대한 찬반양론을 균형감 있게 다루고자 노력했다는 흔적을 독자들은 책을 읽는 과정에서 쉽게 확인할 수 있을 것이며, 이는 책머리에서 밝힌 바와 같이 편저자들이 이 책의

<sup>1)</sup>Allison M. Macfarlane은 매사추세츠공대의 과학, 기술과 사회 프로그램의 연구교수이며, 원자력분야에 대한 그녀의 업적이 인정받아 미국규제위원회(USNRC) 위원 후보에 까지 올랐었다. Rodney C. Ewing은 미시간대학의 지질과학과 Donald R. Peacor Professor이며, 같은 학교의 원자력공학 및 방사선과학과와 재료과학 및 공학과에서도 교수의 위치에, 그리고 뉴욕대학교에서 Emeritus Regent's Professor이다.

<sup>2)</sup>부지환경신기술CoP (2009) 고준위폐기물처분과 부지환경: 유카산 프로젝트의 이해. 한국원자력안전기술원, 427p.

기획당시에 장별 저자들에게 주문했던 사항이기도 하다.

**천연방벽.** 먼저 고준위폐기물로부터 거리상으로는 가장 먼 ‘방벽’인 지구과학분야에서는 유카산부지와 그 주변의 지질, 지구조환경, 화산활동, 기후변화 등을 다루었는데, 여기에는 아직까지도 안전성에 관한 찬반양론이 팽팽한 유카산부지의 단층운동과 화산활동의 이력에 관한 과학적 주장들도 포함되어있다. 또한 유카산부지의 가장 큰 강점 중의 하나인 이 지역의 건조한 기후 또한 장기적인 기후변화의 영향과 맞물려 여러 시각에서 분석되고 재평가된 사례도 소개가 되어있다. 방사성폐기물의 직접적인 확산 매체가 되는 수리화학분야에서는 열수상승에 의한 처분동굴로의 지하수 침입 가능성, 불포화대를 통한 지하수와 방사성핵종의 이동, 방사성핵종의 콜로이드 이동, 포화대 내 방사성핵종의 거동에 대하여, 열수리화학분야에서는 열수리학적 효과와 상호작용, 유카산 근계영역에서의 연동작용효과에 대하여 그간의 다양한 연구결과들이 잘 기술되어있다. 여기까지가 천연방벽(또는 자연방벽)으로서 방사성폐기물이 자연의 상태로 돌아가는데 걸리는 기간(영구폐쇄후 수만에서 수십만 년)까지 자연계로부터의 격리를 담당하게 되는 시스템이다.

**공학적 방벽.** 방사성폐기물을 부지내로 반입하는 시점에서 시작하여 처분장의 영구폐쇄후 천연방벽이 주도적인 역할을 하게 되는 시점까지는 포장용기, 방호기구, 폐기물의 형태 등으로 이루어진 공학적 방벽이 폐기물을 격리시키는 주도적인 역할을 하게 된다. 이 책의 폐기물 포장용기분야에서는 포장용기의 부식, 방호덮개 및 뒷채움 등에 적용 예정인 재료와 설계에 관해 소개하고 또한 물리적인 파괴, 부식, 이완 등의 열화환경과 그에 따른 방벽들 간의 상호작용에 대한 그간의 연구결과와 논점을 정리하였다. 마지막으로 폐기물형태에 관해서는 지르코늄피복관, 사용후핵연료, 유리고화체, 세라믹고화체 등의 다양한 폐기물 형태의 장점과 단점에 대하여 기술되어 있으며, 이와는 별도로 하나의 장을 할애하여 천연방벽과 공학적 방벽간 상호작용과 그로 인한 방벽들의 성능변화에 대해 논의되어온 몇 가지 시나리오를 소개하였다.

#### 다. 제3부 불확실성관리

제3부 ‘불확실성관리’에서는 유카산 프로젝트에 내재된 불확실성과 향후 전망을 종합적으로 재조명하였다. 여기서 저자들은 유카산 프로젝트의 성공적인 마무리를 위하여 필요한 발전적인 제안을 사업주체는 물론이고 정책입안자,

규제기관, 프로젝트참여자 그리고 일반 국민을 대상으로 제시하고 있다. 여기에는 미국뿐만 아니라 스웨덴, 핀란드, 독일의 사례에 대한 간략한 소개와 교훈도 포함되어 있다. 책의 말미에서 편집자 Macfarlane은 ‘시급한 일’이라는 잘못된 인식이 현재의 미국 고준위폐기물처분사업의 정책적 문제점과 과학기술적 불확실성의 주요 원인이었던 것으로 정리하였다. 또한, 지금까지의 제안된 여러 가지 방안 중에서 지층처분이 최선의 선택이라는데 대해 저자들 모두가 동의하며, 향후 수십만 년을 예측해야 하는데서 오는 내재된 불확실성을 올바르게 이해하고 그에 따른 확실한 대안이 설 때 까지 충분한 시간을 갖고 연구와 실험을 지속적으로 해나가야 할 것임을 한 번 더 강조하면서 책을 맺고 있다.

### 3. 논평

‘Uncertainty Underground’에 대한 몇 개의 추천사만으로도 이 책의 성격과 가치를 짐작할 수 있다. 前 미국 원자력규제위원회 위원장 John F. Ahearn은 추천사에서 이 책은 유카산 프로젝트 지지자에게는 극복해야 할 기술적 현안들의 중요성을 이해시키고, 반대자에게는 지지자를 이해할 수 있도록 만드는 그런 책이라고 기술하였다. 클린턴 대통령의 과학기술 보좌관이었던 John H. Gibbons는 이 책을 고준위폐기물 현안들을 학술적인 권위를 유지하면서도 이해가 쉽고 포괄적으로 잘 풀어쓴 수필 같은 책으로 소개하였으며, 이러한 현안들에 대하여 심도 있는 지식에 관한 폭넓은 이해가 필요한 정책 결정권자에게는 없어서는 안 될 보물이라고 강조하였다. 이렇듯 이 책 ‘Uncertainty Underground’는 미국의 고준위폐기물처분 사업 반세기와 유카산 프로젝트 30여년의 역사에 대한 전반적으로 과학과 사실에 근거한 칭찬과 비판이 어느 한쪽에 치우치지 않고 균형 있게 다루고 있으며, 지층처분과 관련하여 만날 수 있는 거의 대부분의 기술적 현상들은 물론이고, 지금까지 이 사업을 진행하면서 미국이 겪어온 과학적, 공학적 사실과 정치적 배경들을 균형 잡힌 시각으로 가감 없이 풀어쓴 잘 정리된 실험노트 같은 책이라 할 수 있겠다.

‘Uncertainty Underground’는 또한, 고준위폐기물 영구처분을 위한 예정부지로 지정된 유카산부지의 장기적인 부지특성과 성능평가에 내재된 불확실성을 검토한 최초의 시도이며, 유카산부지의 적합성에 대한 판단을 한 것이 아니라 부지의 안전성에 연결된 공론과 질문에 도움이 되는 신뢰할 만한 과학에 기반을 둔 정보를 제공한다. 지구과학계, 산업계, 정부 소속의 많은 전문가들이 각자가

맡은 분야에 대해 내재된 불확실성을 검토하였다. 미국의 고준위폐기물처분사업과 관련된 이력과 규제의 관점에서 우선 정리한 후 기후변화와 화산활동과 같은 외부 자연 환경 요인을 조사하여 그들이 처분장의 성능에 미칠 수 있는 영향을 검토하였고, 그 다음으로 유카산부지의 내적 요인, 즉 수리학적, 지질학적 환경특성과 이들이 방사성폐기물과 방사성폐기물 포장용기와 어떻게 반응하며, 처분장의 성능에 어떻게 작용하는지에 대해 검토하였다. 'Uncertainty Underground'는 정책입안자나 일반 대중을 포함한 광범위한 독자층에게 이러한 중요한 기술적 현안들을 이해시키는데 눈에 띄는 역할을 했다는 평을 받고 있다.

'Uncertainty Underground'는 국내외의 고준위폐기물 처분과 관련한 이러한 흐름 속에 있는 우리에게 구체적으로 무엇에 관심을 갖고 집중해야 하는지를 미국의 50년 경험을 바탕으로 분야별로 조목조목 맥을 잘 짚어줄 것이다. 정책입안자와 관련 전문가들에게는 이 책이 미국 유카산 고준위폐기물 처분사업에서 드러난 기술적, 정치적 현안에 대한 전반적인 이해와 한국의 성공적인 고준위폐기물처분사업을 위한 장기적인 계획 수립에 소중한 길잡이가 되어줄 것이라 생각한다.

#### 4. 맺음말

고준위폐기물처분장은 그 안에 처분될 방사성폐기물이 자연 상태의 준위로 돌아가는데 걸리는 수만에서 수십만 년 동안 안정적으로 차폐 내지는 확산 지연을 위한 성능을 유지해야한다. 이러한 연유로 미국을 비롯한 선진국들은 수십 년 전부터 고준위폐기물처분을 준비해오고 있고, 일부 국가는 가까운 미래에 그 결실을 맺을 준비를 하고 있다. 미국은 사용후핵연료를 포함한 고준위폐기물의 처분을 위하여 지난 30여 년간 투입된 국가적 노력과 엄청난 사업예산(현재까지 100억 달러 이상 투입)에도 불구하고 고준위폐기물의 '처분'은 아직 시작을 못하고 있으며, 최근 새 정부의 정책 선회로 인하여 유카산 프로젝트

트는 또 다른 여정을 시작하는 듯 보인다. 스웨덴은 두 개의 후보부지에서 오랜 기간의 연구와 실증시험을 통해 올해 초 그중 하나를 최종적으로 선정하였고 2035년 운영을 목표로 사업을 추진 중인 상태이고, 일본은 2025년 부지선정과 2040년 운영을 목표로 고준위폐기물 영구처분을 위한 연구개발을 진행 중에 있다.

국내에서는 지금 사용후핵연료처리 공론화가 한국방사성폐기물관리공단 주도로 진행 중에 있다. '처리'는 영구처분 전에 사용후핵연료를 지상에서 가공하는 공정으로서 처리시설과 임시저장시설이 필요하며, 영구적으로 인간사회와 생태계에서 격리를 시키는 '처분'의 전 단계에 해당된다. 고준위폐기물 영구처분을 위해서는 원자력중장기 연구사업의 일환으로 연구와 실증실험이 한국원자력연구원의 주도로 일부 진행 중에 있는 정도이다. '처리'가 당장 처분해야할 폐기물을 줄여주는 효과는 있다 하더라도, 처리든 처분이든 방사성폐기물의 양과 방사능의 정도의 문제이지 미래의 어느 시점에는 결국 자연계로부터 영구적으로 격리 즉 영구처분되어야 하는 고준위의 방사성폐기물이 우리 손에 여전히 남게 된다. 따라서 우리도 미국이 겪어온 진통을 먼 미래의 일로 보아 넘기기 보다는 좀 더 구체적인 계획을 세우고 본격적인 준비를 해야 할 것이다. 'Uncertainty Underground'는 이러한 국내의 실정을 고려할 때 참으로 시의 적절하고 요점정리가 잘 된 고준위폐기물처분사업 전반에 대한 교과서 역할을 할 수 있을 것이라는 생각이 든다.

---

#### 이현우

한국원자력안전기술원 구조부지실  
대전광역시 유성구 과학로 34  
Tel: 042-868-0576  
Fax: 042-868-0523  
Email: heanu@kins.re.kr