

Plutonium for Energy?

Explaining the Global Decline of MOX



A Policy Research Project of the
LBJ School of Public Affairs
University of Texas at Austin



NUCLEAR PROLIFERATION
PREVENTION PROJECT

 The University of Texas at Austin

Edited by Alan J. Kuperman

1

플루토늄 재활용 무엇이 잘못되었나?

알랜 쿠퍼먼

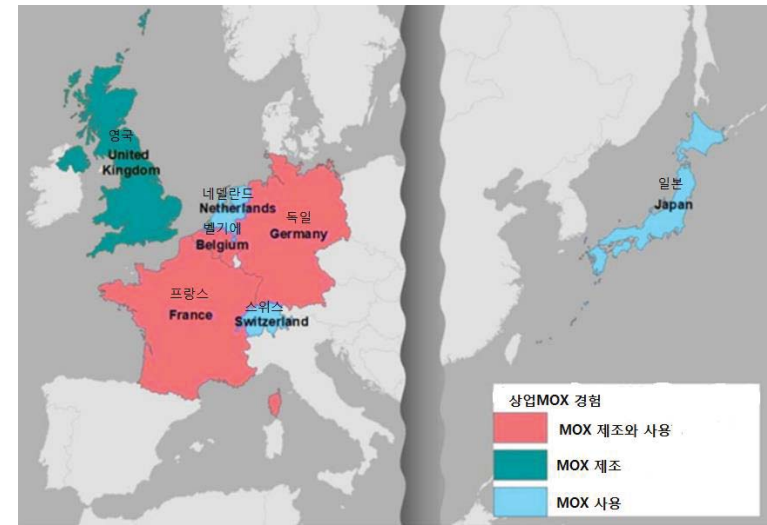
이 소개 장에서는 관례적으로 우라늄핵연료를 사용하는 원자로에 혼합핵연료(MOX)를 사용하는 "에너지를 위한 플루토늄"에 대한 최초의 포괄적 국제연구인 우리 책의 결과를 요약한다. 사용후핵연료의 재처리 결과 얻어지는 인간이 만든 원소인 플루토늄은 암을 유발하고, 핵무기에 사용되고, 정제하여 핵연료로 제조하는데 고비용이 든다는 세가지 이유로 논쟁의 여지가 있다. 우리팀은 열중성자 MOX의 상업적 생산 또는 사용에 종사하는 벨기에, 프랑스, 독일, 일본, 네덜란드, 스위스, 영국 7 개국 모두에서 연구를 수행했다. 7 개국 중 5 개국이 이미 상업적 MOX 활동을 단계적으로 중단하기로 결정한 것처럼 우리는 급격히 감소하는 산업을 발견했다. 이러한 후퇴는 이제는 극복된 연료의 초기 성능 문제 때문이 아니라 플루토늄의 고유한 위험에 기인한다. 플루토늄은 독성이 있기 때문에 MOX 핵연료 제조업자들은 대중의 반대에 직면하였고, 비용은 늘고 생산량은 감소하는 특별한 예방조치를 취했다. 열중성자 MOX 핵연료 제조를 위한 세계 6 대 상업 생산시설 중 5 곳이 저조한 실적으로 조기 마감했다. 상업용으로 사용된 6 개국의 열중성자 MOX 핵연료 가격은 전통적인 우라늄 핵연료보다 3 ~ 9 배 높다. 환경 및 핵 확산 우려로 인해 플루토늄 연료는 독일, 일본, 벨기에, 스위스 등 4 개국에서 정치적으로 논란의 여지가 있어 그 동안 원자력을 계속 허용하면서 MOX 핵연료 활동의 일부 또는 전부를 중단했다. 한번의 수송을 위한 신 MOX 핵연료에는 수십 개의 핵무기 제조에 충분한 플루토늄이 들어 있고, 원자로 운영자는 물리적 방호를 크게 강화하지 못했고, 수송은 테러 공격에 취약하기에 보안 또한 중요한 관심사이다. 역설적이게도, 플루토늄 핵연료는 원래 원자력 산업에 필수적인 것으로 간주되었지만, 실제로는 원자력의 경제성, 보안 및 대중성을 훼손시키기만 했다. 이 장은 원자력을 위한 플루토늄의 재활용에 관여하고 있거나 숙고하고 있는 국가에 대한 교훈으로 결론을 맺는다.

재활용은 일반적으로 좋은 것으로 간주된다. 재활용은 쓰레기를 자산으로 바꾸어 원료와 폐기물 처리의 필요성을 줄인다. 그러나 원자력을 위한 신핵연료를 만들기 위해 이전에 사용된 핵연료의 플루토늄 재활용은 논란의 여지가 많다. 이것은 주로 플루토늄의 3 가지 큰 단점 (암을 유발할 수 있고, 핵무기 제조에 사용될 수 있으며, 주로 (처음 두 가지 특성으로 인해) 정제하고 핵연료로 제조하는 데 매우 비쌌) 때문이다. 이러한 어려움에도 불구하고 벨기에, 프랑스, 독일, 일본, 네덜란드, 스위스, 영국 등 7 개국은 전통적인 원전(핵분열을 위해 고속중성자가 아니라 열중성자를 사용하는)에서 에너지를 얻기 위해 플루토늄을 상업적으로 재활용하고 있다. 그들은 플루토늄과 우라늄을 혼합한 핵연료(MOX)를 제조 사용하여 기존의 저농축 우라늄 핵연료(LEU)를 대체했다. 또한 중국, 인도, 일본, 러시아, 한국, 미국을 포함한 몇몇 국가들은 열중성자 또는 고속중성자 원자로를 사용하여 플루토늄을 재활용하기 위해 새로운 국내 시설을 모색하고 있다. 국제 안보, 공중 보건 및 원자력의 금융 실용성에 대한 엄청난 잠재적 결과에 비추어 볼 때, 그러한 결정은 열중성자 MOX 핵연료의 과거 세계적 경험에 대한 포괄적 분석을 통해 통보되어야 한다. 유감스럽게도 지금까지는 그러하지 않았다.¹

이 책은 열중성자 원자로에서 플루토늄의 상업적 재활용에 종사한 7 개국(그림 1)을 연구한 첫 번째 연구이며, 각국에 대한 현장 조사를 실시하였다. 이들 국가 중 벨기에, 프랑스, 독일은 MOX 핵연료를 상업적으로 생산하여 사용했다. 일본, 네덜란드, 스위스는 MOX 핵연료를 상업적으로 생산하지는 않았지만, 사용은 하였다. 영국은 MOX 핵연료를 상업적으로 생산은 하였지만, 사용은 하지 하였다.

그림 1

원전용 상업용 MOX 에 관련된 7 개국



출처 : 김여리.

우리 연구의 주요 발견은 열중성자 MOX 핵연료 산업이 급속히 감소하고 있다는 것이다. 2018 년 현재, 7 개국 중 5 개국이 상업적 MOX 활동을 이미 종료했거나 단계적으로 폐지하기로 결정했다 (표 1). 벨기에에는 2006 년 MOX 생산과 사용을 모두 중단했다. 스위스는 2007 년 MOX 생산을 종료했다. 영국은 2011 년 상업용 MOX 생산을 종료했다. 독일은 1991 년에 MOX 생산을 중단했고, 2017 년에 최종 MOX 핵연료 집합체를 장전했으므로 2020 년에 방사선 조사가 끝난다. 네덜란드는 2026 년에 마지막 MOX 핵연료 집합체를 적재하고 4 년 후 이를 방출할 계획이다. 마지막 경우를 제외하고는 원자력을 단계적으로 중단하기로 결정하기 전에 상업적 MOX 활동이 감소했다. 이러한 실적은 원전의 상업용 MOX 를 계속 계획하고 있는 프랑스와 일본 두 국가만 남겨두고,

그들의 프로그램도 재정적, 정치적 도전에 직면하고 있다.

전반적인 쇠퇴의 원인과 각 국가간 성과의 차이를 평가하기 위해, 이 책은 경제, 보안, 안전/환경, 성과, 대중 수용성과 같은 각 국가의 열중성자 MOX 경험의 5 가지 측면을 조사한다. 이러한 질문에 대한 일부 정보는 이전의 공개 문헌에서 이용 가능했지만, 일반적으로 오래되었고 불완전했다. 많은 경우 우리의 연구원들은 구술 및 기록 증거를 제공 한 정부, 전력사업체, 산업계 및 비정부기구(NGO)의 현직 및 퇴직 공무원과의 인터뷰를 통해서만 주요 데이터를 수집했다. 각 장의 초안을 작성한 후 출판을 위해 개정하기 전에 추가적인 전문가 의견을 구했다.

표 1
열중성자 원자로용 상업용 MOX의 감소

국가	MOX제조	MOX 사용
벨기에	X	X
프랑스	✓	✓
독일	X	↘
일본		✓
네델란드		↘
스위스		X
영국	X	

기호 :
 X = 종료
 ↘ = 단계적폐지
 ✓ = 지속중

잘못 인식된 필요성

플루토늄을 에너지로 재활용한다는 아이디어는 핵연료를 위한 우라늄의 세계적 매장량은 부족했고 원자력 에너지에 대한 수요는 기하 급수적으로 증가 할 것이라는 1960 년대의 두 가지 오해에 기반하였다. 인지된 해결책은 플루토늄의 에너지 생성 동위 원소

(Pu-239)에 "핵분열성"이 아니기 때문에 열중성자 원자로에서 전력을 생산할 수 없는 주요 우라늄 동위원소(U-238)를 에너지 생성 플루토늄 동위원소(Pu-239)로 변환함으로써 우라늄이 생산할 수 있는 에너지를 증가시키는 것이었다. 우라늄의 99% 이상이 비핵분열성 동위원소이기 때문에 그러한 변환은 세계 우라늄 공급에서 얻을 수 있는 에너지를 크게 증가시킬 수 있다. 전통적인 LEU 핵연료가 원자로 내에서 탈 때, 소량의 U-238 이 플루토늄으로 전환되고 나중에 재처리 공장에서 분리되어 신 핵연료를 만드는데 사용된다.

충분한 양의 U-238 을 플루토늄으로 변환시키기 위해서는 열중성자(저에너지)에 의존하는 전통적인 경수로(LWR)보다 더 빠른(고에너지) 중성자를 가진 고속증식로(FBR)의 개발을 필요로 한다. 1970 년대에 원전 운영회사들은 FBR 연료로 사용하기 위해 사용후핵연료를 상업적으로 재처리하여 플루토늄을 분리하기 시작했다. 그러나 FBR 의 상업화가 지연되었기 때문에 원전 운영회사들은 대신 경수로를 위한 MOX 핵연료로 플루토늄의 일부를 재활용하기 시작했고, 나머지 플루토늄은 대규모 재고로 남게 되었다.²

금세기까지 전세계 FBR 개발프로그램의 대부분이 실패했다. 원전 운영회사들은 사용후핵연료를 재처리하면 플루토늄을 상업적으로 재활용 할 수 있는 유일한 방법은 경수로를 위한 MOX 핵연료가 될 것이라는 것을 깨달았다. 원전을 보유한 대부분의 국가에서 원전 운영회사들은 그러한 재활용을 추구하지 않기로 결정했다. 대신, 그들은 1970 년대까지 세계 우라늄자원이 훨씬 더 많고 원자력 에너지에 대한 수요가 이전에 예상했던 것보다 훨씬 적어졌음이 분명해짐에 따라 사용후핵연료를 폐기물로 처리하기로 했다. 1976 년부터 미국은 플루토늄 분리가 핵확산과 핵테러의 위험을

증가시킬 것이라는 우려로 사용후핵연료의 재처리를 전 세계적으로 못하게 하였다.³ 그럼에도 불구하고 이 책에서 검토된 7 개국은 열중성자 MOX 핵연료의 상업화를 시작했다.

열중성자 원자로에 대한 MOX 핵연료의 추후 감소는 주로 핵연료 성능의 문제 때문이 아니었다. 초기에 MOX 는 열중성자 원자로에서 몇 가지 기술적 과제에 직면했다. MOX 제조사는 산화제를 균일하게 혼합하는데 문제가 있어 핵연료 펠릿에 플루토늄 덩어리가 생겼는데, 이러한 펠릿은 원자로 내에서 연소 중에 고온의 반점, 더 많은 핵분열가스 방출, 피복관 파손 그리고 냉각수 및 감속재 역할을 하는 원자로 내 물의 방사성 오염으로 이어졌다. 또한 플루토늄은 열 중성자를 흡수하고 핵 분열되는 경향이 더 크다. 이로 인해 중성자 스펙트럼을 경화시켜 과도한 핵분열을 제어하는 데 사용되는 "독극물"의 효과를 감소시키고 원자로 장비를 더 많은 양의 파괴적인 고속 중성자에 처하게 만들었다. 관련된 문제는 인접한 MOX와 LEU 집합체 사이의 중성자 흐름 경사의 발생으로, 이는 노심 관리를 복잡하게 하고 단일 노심의 MOX 핵연료에 몇 가지 다른 함유율의 플루토늄을 사용할 필요가 있게 만들었다. MOX 핵연료는 또한 기존의 저농축우라늄(LEU) 핵연료보다 연소도가 낮아서, 동일한 원자로 노심에서 두 가지 다른 핵연료 장전주기가 필요했다. 또 다른 문제는 우라늄에 비해 플루토늄의 핵분열은 상대적으로 지발중성자가 적어 원자로 제어 메커니즘을 수정해야 한다는 것이다. 그러나 결국 이러한 근본적인 기술적 문제는 오늘날 MOX 가 LEU 와 상당히 유사하게 수행되는 범위에서 어느 정도 극복되었다. 이러한 기술적 성공에도 불구하고 열중성자 MOX 산업은 플루토늄의 3 가지 위험 (암, 핵무기, 비용)으로 인해 급격히 감소하여 이러한 핵연료의 제조 및 사용이 저해되고 있다.

열중성자 MOX 핵연료 제조

6 개 상업용 열중성자 MOX 핵연료 제조시설 중 5 개가 조기에 폐쇄되었고, 대부분이 운영 중 실적이 저조했다. 일곱 번째 시설은 공사가 끝난 후 취소되었다. 이러한 실적 부진의 주요한 근본 원인은 플루토늄이 우라늄보다 훨씬 위험하기 때문에 높은 비용과 대중의 반대를 불러온다는 것이었다. 대부분의 플루토늄은 상당히 긴 반감기 그리고 높은 수준의 알파선을 방출하는 동위원소로 구성되어있다. 플루토늄 중 한 동위원소는 비교적 빨리 붕괴하여 강한 알파선 방출하는 Am-241 로 변환된다. 그러한 알파선은 피부를 비롯한 많은 물질에 의해 차단될 수 있기 때문에 신체 외부의 주요 문제는 아니다. 그러나 폐에 흡입되어 박히면, 플루토늄과 아메리슘의 동위원소는 보건물리학자가 결국 암을 유발할 것이라고 믿는 유전자변이를 일으키는 알파 입자를 주변 조직에 지속적으로 방출시킨다.

이러한 위험은 플루토늄이 흡입될 수 있는 산화물의 형태인 MOX 핵연료 생산에서 특히 발생한다. 금속형태로 플루토늄을 처리하는 핵연료주기 시설은 착화하여 흡입할 수 있는 에어로졸을 발생시킬 추가적 위험이 있다. 직원 및 주변 지역의 건강 위험을 줄이기 위해 MOX 공장은 공기 청정기, 글로브박스 및 자동화장비와 같은 값비싼 하드웨어를 사용하고 누설을 정화하기 위해 긴 시스템 종료와 같은 값 비싼 절차를 사용한다. 심지어 플루토늄을 얻는데 드는 상당한 비용을 제외하고라도, 이것들은 LEU 핵연료에 비해 MOX 핵연료의 생산비용을 실질적으로 3 배 이상 끌어 올린다. 이러한 제조 비용을 줄이기 위해 운영자는 때때로 절차 등을 무시하는데, 이는 사고, 기기정지, 스캔들 및 대중의 항의 증가로 인해 역효과를 낳고 그것 때문에 생산량은 줄고 단위 비용은 증가한다.

가장 큰 실패는 영국의 BNFL Sellafield MOX Plant (SMP) 였는데, 연간 120 톤의 MOX 핵연료를 생산할 계획이었다. 실제로는 2001 년에서 2011 년까지의 가동기간 동안, 이 시설은 겨우 14 톤 연평균 1 톤 정도 즉, 목표된 생산량의 약 1 %를 생산했다 (4 장 참조). 이 중대한 실패의 두 가지 주요 원인은 근로자의 피폭노출을 줄이기 위한 검증되지 않은 자동화 된 기술과 근로자 보호 조치의 비용을 줄이기 위한 부당하게 작은 시설 공간이란 플루토늄의 안전 위험으로부터 야기 되었다. 그 결과는 장비 고장, 고비용 수리 및 장기간의 생산 중단이었다. SMP 의 문제는 실험 기술과 빈약한 설계에 기인할 수 있지만, 그러한 선택은 모두 플루토늄의 건강 위험에 대한 우려와 그것을 완화하는 비용에서 비롯되었다.

BNFL 의 이전의 훨씬 작은 규모의 상업용 플랜트인 MOX 실증시설 역시 정도는 작지만 실패로 끝났다. 그 공장의 생산용량은 연간 MOX 8 톤이었다. 1993 년에서 1999 년까지의 기간 동안 MOX 총 20 톤을 생산했는데 연간 평균 3 톤 즉, 약 40 % 생산 능력이었다. 그러나 작업자들이 품질관리 데이터를 반복적으로 위조한 것이 드러나 조기에 폐쇄되었다. 이로 인해 1 억 달러의 벌금이 부과되고 미조사 MOX 핵연료가 일본으로부터 반환되는 국제 스캔들이 되었다. BNFL 이 지속적으로 품질관리를 모니터링하는데 실패한 이유는 분명하지 않지만 SMP 와 마찬가지로 플루토늄의 건강 위험을 완화하는데 드는 높은 비용을 상쇄하려는 시도가 있었을 가능성이 있다.

독일의 Alkem Hanau 공장은 지속적인 실적부진 후 방사선 사고로 1991 년에 조기 폐쇄되었다 (6 장 참조). 그 시설의 잠재적 생산량은 연간 25 톤이었지만, 1972 년에서 1991 년까지 연평균 생산량은 8 톤이었으며 생산능력의 약 30%였다. 이 부족분은 "어려운 글러브박스 상태에서의 수리작업"과 "시간 소모적인 정화를 필요로

하는 제조 지역에서의 플루토늄 오염"을 포함한 플루토늄 독성의 문제로 인해 부분적으로 발생했다. 플루토늄의 무기 위험은 또한 강요적인 EURATOM 안전조치 검사와 수송 보안에 대한 국내 논쟁으로 인해 생산을 저해했다. 1991 년 한 공장노동자가 글러브박스 사고로 오염되었고, 대중의 분노로 인해 시설이 영구적으로 폐쇄되었다. 이러한 논란은 1995 년에 취소된 거의 완성된 후속 시설 Hanau 1 의 운영도 막았다.

Dessel 의 Belgonucléaire 가 운영하는 벨기에의 P0 공장은 상대적으로 성공적이었지만 비효율, 경쟁 및 MOX 에 대한 전세계 수요감소로 조기에 폐쇄되었다 (2 장 참조). 이 공장은 연간 32 톤 MOX 핵연료봉을 생산할 수 있으며, 생산된 핵연료봉은 FBFC 가 소유한 인근 시설에서 핵연료집합체로 합쳐졌다. 1973 년부터 2006 년까지 P0 공장은 약 600 톤의 MOX 핵연료봉을 생산하여 연평균 18 톤, 즉 생산용량의 55 %를 달성했다. 그러나 플루토늄의 건강위험에 대처하기 위한 노력으로 인해 비용이 극도로 높아졌다. 결국 P0 공장은 특히 수요가 감소함에 따라 프랑스의 보다 효율적인 MELOX 시설과 경쟁할 수 없었기 때문에 벨기에 공장은 플루토늄 핵연료의 위험성과 인기 없음에 근거한 경제적 이유로 폐쇄되었다. 한편, 1990 년대 중반에 인접한 FBFC 설비에서 깨진 MOX 핵연료봉은 해당 설비의 MOX 및 우라늄 시설 가동을 폐쇄한 후 값비싼 오염제거를 실시한 다음 MOX 핵연료집합체 전용 새 부속 시설을 비싸게 건설해야 했다.

프랑스는 두 개의 연속 시설에서 열중성자 MOX 생산에 성공적이었지만 경제성 및 안전 문제에 직면해 있다 (3 장 참조). 상업 생산은 1989 년 Cadarache 의 ATPu 공장에서 시작되었는데 그 용량은 MOX 핵연료봉 연간 20 톤에서 40 톤으로 점차적으로 증가되었고, 벨기에 나 프랑스의 공장에서 MOX 핵연료봉을

집합체로 결합했다. 1995년에 지진위험 때문에 프랑스 안전당국은 그 공장이 "2000년 직후에" 가동을 중지하도록 명령했으며, 2003년에 중지했다. 지진으로 인해 플루토늄 화재, 임계 사고 또는 기타 방사능 누출이 발생할 수 있는 사고의 위험이 있다. 따라서 이 MOX 공장의 조기 폐쇄는 적어도 부분적으로는 플루토늄의 안전과 핵무기 위험에 기인할 수 있다.

지금까지 가장 성공한 열중성자 MOX 생산공장이면서 여전히 운영중인 유일한 상업시설은 프랑스의 MELOX이다. 이 공장은 최대 연간 250톤 생산용량으로 설계되었지만 연간 195톤 이상으로 허가된 적이 없으며 실제로는 훨씬 적게 생산하였다. 지난 2014년부터 2017년까지 4년 동안 MELOX는 연간 평균 125톤 이하, 즉 최초 설계용량의 절반 이하를 생산했다. 국내 원전업체는 고비용 때문에 MOX 핵연료의 사용량 증가를 거부하는 가운데, 이러한 침체된 생산은 주로 외국수요의 급격한 감소에 기인한다(2015년 이후 독일은 없으며 최근 몇 년 동안 네덜란드와 일본에서 합쳐서 연간 약 10톤). 2017년 MELOX는 생산량을 연간 110톤으로의 감소를 해명할 수 있는 "기술적 생산 어려움"을 또한 보고했다.

열중성자 원자로에서의 MOX 핵연료

열중성자 원자로에서 MOX 핵연료를 상업적으로 사용하는 6개국은 모두 그 가격이 전통적인 LEU 핵연료의 수 배가 된다는 것을 알았다. 주요 원인은 특히 플루토늄의 건강위험 뿐만 아니라 작은 핵연료집합체 배치 크기, 2개 산화물을 균일하게 혼합하는 문제, 수송을 위한 강화된 보안 등 다른 요인들로 인한 핵연료 제조비용의 증가였다. 가장 큰 비용의 영향은 핵연료봉을 제조하는 활동에 있었다. 그러한 노력을 주도한 벨기에 업계 관계자들의 기사에 따르면, "MOX 핵연료의 경우 LEU 핵연료보다 핵연료제조

활동의 비용이 일반적으로 15배에서 25배 높다."⁴

또 다른 상당 비용은 LEU 핵연료를 재처리하여 MOX 주성분인 플루토늄을 얻는 것이었지만,⁵ MOX 핵연료에 대한 비용 영향은 회계 절차에 달려있었다. 일반적으로 산업계는 폐기물 관리의 일부로 재처리를 고려하므로 결과로 분리된 플루토늄은 신핵연료 생산을 위한 무료 재화로 간주한다. 사실, 원자력산업 시장에서 실제로 플루토늄은 실질적으로 부정적인 가치를 지니므로 소유주는 다른 사람이 그것을 가지고 가기 위해 높은 가격을 지불해야 한다(8장 참조). 이 현상을 설명하는 두 가지 요인은 첫째, 제조 원가가 높기 때문에 MOX 핵연료에 대한 시장 수요가 사실상 없고, 둘째, 플루토늄을 폐기물로 처분하는 대안 처분 경로는 물질의 독성 및 보안 위험 때문에 비용이 많이 든다는 것이다.⁶ MOX 핵연료의 또 다른 비용은 일반적으로 우라늄 농축의 폐기물로 풍부하고 값 싸게 구입할 수 있는 열화우라늄이다. 따라서 원자력 산업계는 MOX 핵연료의 중금속 부분이 상당한 비용이 드는 LEU 핵연료(천연 우라늄과 농축)와는 달리 기본적으로 비용이 들지 않는다고 간주한다. 재처리를 통해 플루토늄을 얻는 데 드는 높은 비용이 이러한 방식으로 무시된다면, MOX 제조보다 MOX 핵연료에 대한 가격 불이익이 덜 심각하다.

그럼에도 불구하고 MOX 핵연료는 LEU 핵연료보다 훨씬 비싸다는 것이 입증되었다. 보도자료에 따르면, 최근 일본 전력회사들은 수입 MOX 핵연료에 대해 적어도 LEU 핵연료의 9배를 지불했다.⁷ 일본 원자력위원회에 따르면, 일본이 계획한 국내 핵연료주기 시설을 진행할 경우, 열중성자 MOX 핵연료는 LEU 핵연료보다 12배 더 비쌀 것이라고 한다.⁸ 벨기에의 1998년 산업계 연구에 따르면, LEU 핵연료에 드는 재료비용은 고려하고 MOX 핵연료에 드는 재료비용은 무시하더라도 MOX 핵연료는 LEU 핵연료의 5배

이상의 비용이 든다는 것을 알았다.⁹ 독일에서는 정부, 산업계, 시민 사회의 전문가에 따르면 MOX 핵연료를 생산비용이 LEU 핵연료의 3 ~ 5 배에 달하는 것으로 나타났다.¹⁰ 네덜란드에서 MOX 핵연료의 상업적 사용을 시작하기 위한 2010 년 원전업자 인허가 제출은 LEU 의 5 배인 제작 비용을 기술했다.¹¹ 영국의 에너지부는 1979 년 열중성자 원자로의 핵연료의 제조비용이 우라늄보다 MOX 의 경우 4 배 높다고 추정했다.¹² 스위스에서 원전업자는 역사적으로 LEU 핵연료의 현재 가격과 같이 MOX 핵연료의 경우 약 6 배 (인플레이션 조정 후)를 지불했다.¹³

프랑스의 경우 규모의 경제에도 불구하고, 업계 및 다른 면담자들에 따르면,¹⁴ 제조용량보다 많이 낮은 MELOX 공장의 저가동으로 인해, MOX 핵연료는 LEU 핵연료 제조의 4 ~ 5 배의 비용이 소요되는 것으로 나타났다.¹⁵ 프랑스 정부보고서에 따르면 2000 년에 재처리를 통해 플루토늄을 얻는 것을 포함하여 MOX 핵연료를 생산하는 총비용은 LEU 핵연료의 4.8 배에 달했다.¹⁶ 최근 재처리 및 MOX 가공시설에서 처리량이 감소하여 단위 생산비용이 상승함에 따라 이러한 불이익이 증가했을 가능성이 높다.

MOX 지지자들은 원전건설에 의해 크게 좌우되는 원자력 발전 생산에 드는 총비용에 미치지 못하는 그러한 추가 비용을 경시한다.¹⁷ 그러한 건설의 할부상환을 완료하기 전에 LEU 핵연료의 전반 핵주기 비용은 총 전력생산 비용의 5 ~ 10%에 불과한 것으로 추산된다. MOX 핵연료가 장전되면 일반적으로 LEU 를 원자로 노심의 약 1/3 을 대체한다. MOX 핵연료 가격이 LEU 핵연료 가격의 5 배인 경우 MOX 를 도입하면 전반 핵주기 연료비는 133% 증가하지만 총 비용은 7 ~ 13% 증가한다. 또한 그러한 비용은 역사적으로 규제당국에 의해 납세자에게 전가되었으므로 원전업체는 거의 고통을 받지 않았다.

그러나 MOX 핵연료의 추가비용은 발전소 건설의 할부상환을 완료한 후, 특히 현대 전력시장의 규제완화를 고려할 때 훨씬 더 중요해진다. 원전건설비용이 완전히 상환될 때 LEU 핵연료 노심의 비용은 총 비용의 약 30%까지 상승할 수 있다. MOX 가 노심의 1/3 을 대체하고 LEU 의 5 배 가격이면 전력 생산 총 비용은 40 %나 증가한다. 규제가 완화된 전력시장에서 소비자는 옵션을 가지고 그러한 증가된 비용을 지불할 수 없기 때문에 전력회사는 이익 감소 또는 손실에 직면하게 된다. 열중성자 MOX 에서의 플루토늄 재활용의 광범위한 포기는 오래된 원전의 완전한 상환과 전력시장의 규제 완화와 일치했다.

MOX 핵연료를 시작한 원전회사는 당시에는 거의 대안을 찾지 못했다. 그러나 그들은 비용, 안전성, 운영상의 어려움, 규제 승인, 장기적으로는 사용후 LEU 보다 훨씬 더 많은 열과 방사능을 방출하는 사용후 MOX 의 폐기를 포함하여 MOX 에 대한 우려를 숨기고 있었다. 원전회사가 1970 년대에 처음 그런 결정을 내렸을 때, 그들의 국가는 일반적으로 사용후핵연료의 중간 저장에 대한 법적 또는 실행 계획 규정이 없었기 때문에 재처리는 원자로의 조기 폐쇄 위험을 피할 수 있는 유일한 방법으로 간주되었다. 플루토늄이 재처리에 의해 분리된 후, 원전사업자는 유일하게 실현 가능한 처리 경로로서 MOX 에서 재활용을 검토했다. 따라서, 많은 원전사업자는 그들의 불안에도 불구하고 MOX 핵연료를 시작하도록 강요 받았다.

원자력보다 더 논란의 여지가 있음

MOX 의 감소는 단순한 경제현상이 아니며, 원자력으로부터의 세계적인 후퇴에 부수적인 것이 아니다. 사용후핵연료 재활용은 플루토늄의 안전과 핵무기 위협으로 인해 우라늄 핵연료의 전통적인 비순환 사용보다 덜 대중적이라는 것이 판명되었다. 독일에서는 특히 재처리를 위한 사용후핵연료의 수출 및 고준위

폐기물의 수입 등 플루토늄 재활용을 위한 국제 선적의 환경 및 핵확산 위험에 초점을 맞추기 시작한 1990 년대에 반핵 시위가 확대되었다. 대중의 분노는 2005 년 이후 재처리를 위해 사용후핵연료의 수출을 금지한 2002 년 독일법을 촉발시켰고 2021 년까지 원자력의 단계적 폐기를 명령했다 (6 장 참조). 역설적이게도 원래 원자력을 유지하기 위해 필요하다고 생각한 플루토늄 재활용이 원자력을 훼손시키는데 도움이 되었다.

일본에서도 플루토늄 재활용은 건강과 안전 문제로 인해 국내외 관객 모두에게 원자력 그 자체보다 더 논란이 많았다 (5 장 참조). 1999 년 일본의 반핵 민간단체는 안전문제를 근거로 타카하마-4 원자로에 수입된 MOX 핵연료를 거부하고 반환하는데 성공적으로 정부를 설득했지만, 그 당시 원전을 폐쇄하거나 2011 년 후쿠시마 사고 후 원전의 재가동을 막을 수 없었다. 2001 년 다시 한번 안전을 이유로 일본 유권자들은 카시와자키-카리와-3 원전을 LEU 핵연료로 계속 가동할 수 있게 허용하였지만, 그 원전에서 MOX 핵연료의 사용을 막았다. 또한 2001 년 주지사는 안전문제 우려로 후쿠시마 원전에서 MOX 사용에 대한 동의를 철회했다. 플루토늄 재활용에 대한 이 3 가지 반란은 일본에서 상업적 MOX 사용을 10 년 지연시켜 지금은 47 톤을 초과하는 일본의 플루토늄 재고를 악화시켰다. 중국, 한국, 북한을 비롯한 주변국들은 5,000 개가 넘는 핵무기 제조에 충분한 이 플루토늄 누적에 대한 강력한 안보우려를 표명했다.¹⁸ 따라서 일본의 MOX 추구는 원자력 프로그램에 대한 국내외 문제를 야기했다.

다른 나라들에서도 플루토늄 재활용은 전통적인 원자력보다 논란이 많다. 스위스에서는 2003 년 국민투표가 재처리를 위한 사용후핵연료 수출에 대한 유예를 부과했지만 (2006 년부터 유효) 스위스 유권자들은 원전의 폐쇄를 반복적으로 반대하다가, 일본

후쿠시마 사고로 2050 년경까지 원자력을 단계적으로 폐지하기로 2017 년 투표에서 결정하였다 (7 장 참조). 벨기에에서는 1990 년대에 NGO 가 플루토늄의 확산, 테러 및 환경 적 위험에 대한 반핵 캠페인에 집중했다. 이러한 노력으로 1993 년 벨기에정부는 새로운 재처리 계약에 대한 유예를 선언하고 MOX 핵연료 재평가를 시작하여 1998 년에 기존의 재처리 계약을 종결 지었다 (2 장 참조). 1998 년 벨기에의 부총리는 "우리가 경제적 및 생태적 측면에 관한 정보를 기반으로 재처리 기술을 미래에 사용하는 것은 정당화되지 않는다"고 설명했다.¹⁹ 이는 정부가 2003 년에 2025 년을 목표로 원자력을 완전히 폐기하기로 결정하기 몇 년 전의 일이다.

프랑스와 네덜란드 두 나라에서만 열중성자 원자로에서의 플루토늄의 재활용이 대중의 결정적인 반대를 자극하지 않고 진행되었다. 프랑스에서는 강력한 산업계와 정부의 동맹관계로 인해 재처리의 환경적 위험과 플루토늄 수송의 보안위험을 강조하기 위한 그린피스와 그린파티의 노력을 막아내었다 (3 장 참조).²⁰ 네덜란드에서는 유일한 원전과 폐기물 처리시설이 프랑스 재처리시설과 MOX 공장의 운송경로 인 벨기에 국경을 따라 남서쪽에 위치하고 있어 소수의 네덜란드 거주자만 플루토늄 재활용을 위한 수입 및 수출의 영향을 받는다. 네덜란드 원전업자는 13 년 간의 MOX 사용에 대해 단일 계약을 맺음으로써, 다른 국가에서 효과가 입증된 바와 같은 국내 반핵 NGO 와 정치인들이 잠재적인 계약 갱신에 공개 반대하는 것을 박탈했다. 프랑스와 네덜란드의 경험에 따르면 플루토늄 재활용은 강력한 국내 이익으로 뒷받침되거나 대중의 철저한 검토를 피하도록 제한하면 정치적으로 성공할 가능성이 더 높다.

보안 위험

이 책은 또한 핵무기 제조에 사용될 수 있는 플루토늄을 포함한 신 MOX 핵연료의 물리적 보안의 적절성 대한 심각한 우려를 제기하고 있다. 원전의 일부 보안 절차가 비밀 임에도 불구하고 우리의 사례연구에 따르면 원전에서의 물리적 방호는 MOX 핵연료가 도입될 때 크게 강화되지 않는다고 한다. 원전업자는 핵연료 공급 중단 시 예비로 유지될 수 있는 신 LEU와는 달리 수송 후 즉시 원자로에장전함으로써 신 MOX 의 저장시간을 최소화하려고 한다. 원자로 운영자들은 플루토늄의 더 높은 방사능을 다루기 위해 작업자 안전절차를 수정한다. 또한 그들은 잠재적인 국가 차원의 핵확산에 대처하기 위해 신 LEU 또는 사용후 LEU와 비교하여 신 MOX 의 검사를 보다 자주 모니터링하기 위한 국제 안전조치 요구사항을 준수한다. 일부 원전업자들은 신 MOX 핵연료가 플루토늄을 포함하고 있기 때문에 신 LEU 보다 엄격하게 보호하고 플루토늄을 포함하고 있는 사용후 LEU 핵연료와 동일한 방식으로 이를 보호한다고 말한다.

이러한 조치들 중 어느 것도 테러리스트나 범죄자의 위협에 적절히 대처하지 못한다. 신 MOX 는 핵무기용 플루토늄을 얻기 위한 절도와 가공을 막을 수 있는 높은 방사능이 부족하기 때문에 사용후 LEU 보다 훨씬 더 큰 준국가 보안 위험을 제기한다. 원자로 운영자들과 정부 관료들은 큰 덩치의 신 MOX 핵연료 집합체 (수백 킬로그램)와 원자로 수조나 건식저장시설에 보관하는 것이 절도를 막기에 충분하다고 믿는 것처럼 보인다. 그들은 이 플루토늄을 확실하게 핵무기 물질로 보호하지 않는 것으로 보인다. 협조된 테러 공격의 경우, 그것은 재앙이 될 수 있다.

추가적 보안은 수백 마일을 종종 가로 지르는 신 MOX 핵연료의 지상 운송에 적용된다. 그러나 그러한 조치는 일반적으로 중앙통신

사령부와 무선통신을 하는 몇 대의 경찰 차량이 안내하는 장갑수송트럭의 사용으로 제한된다. 성형장약, 징갑관통 탄약 및 로켓추진 소화탄을 포함하여 과거에 사용한 무기로 무장한 테러리스트들의 공격을 받으면 그러한 수송은 도난의 위험에 처하기 쉽다. 이 취약점은 병목과 정지가 포함되어 공격에 이상적인 기회를 제공하는 일상적이고 예측 가능한 경로를 사용하는 운송수단에 의해 악화된다.²¹ 가압경수로용 단일 MOX 핵연료집합체는 보통 최소 3 개의 핵무기에 충분한 30kg 이상의 플루토늄을 포함하고 있다. 또한 각 MOX 선적에는 원자로에 장전하기 위해 십여 개 이상의 핵연료집합체가 포함될 수 있으며 그러한 운송은 프랑스에서 매주 진행된다. 최근에 통합시설이 운영될 때까지 MOX 핵연료봉을 다른 공장으로 운송하여 핵연료집합체로 조립하는 또 다른 취약점이 있다 (2 장과 3 장 참조).

프랑스에서 더욱 위험한 것은 분리된 플루토늄 산화물을 재처리 시설에서 MOX 제조시설로 선적하는 것인데, 각 선적은 최소 24 개 이상의 핵무기에 충분한 적어도 250kg 의 플루토늄을 담고 있다.²² 이러한 선적은 매주 두 번씩 진행되며 600 마일 이상을 주행한다. 수백 톤 또는 수천 개의 핵무기에 충분한 양의 엄청난 분리된 플루토늄을 각각 포함하고 있는 프랑스의 재처리 시설과 MOX 공장에 대해서도 보안 문제가 제기되고 있다. 핵연료주기회사 Orano 의 전무이사는 2018 년에 회사의 보안 지출을 두 배로 늘리면 프랑스 전기 요금의 약 0.2 %가 추가될 것이라고 증언했다.²³ 핵무기로 사용 가능한 플루토늄의 테러리스트 도둑질의 엄청난 잠재적 결과에 비추어 볼 때 그러한 보안투자의 증가는 신중한 것처럼 보일 것이다.

주목할 만하게도, 일부 외국정부와 산업계 관계자들은 이 신화가 수십 년 동안 뿔러있었음에도 불구하고 원자로등급 플루토늄을

핵무기 제조에 사용할 수 없다고 주장하고 있다. 일본의 전 유엔주재대사 류키치 이마이는 1993년에 "원자로등급 플루토늄은... 핵폭탄 제조에 아주 적합하지 않다"고 분명히 말했다.²⁴ 벨기에 관료들도 비슷한 주장을 했다 (2장 참조). 프랑스에서는 2017년 10월 정부보고서에서 "MOX 핵연료에 플루토늄을 사용하는 것은... 남은 플루토늄의 동위원소 조성을 현저하게 저하시키므로 이 기술은 핵비확산적이다"라고 주장했다.²⁵

그러한 주장은 열중성자에 의한 핵분열에 의존하는 경수로를 모든 플루토늄 동위원소가 연쇄반응을 유지할 수 있도록 고속 중성자에 의존하는 핵무기와 혼돈하여 플루토늄의 특정 동위원소만이 연쇄반응을 지속할 수 있다고 혼란을 일으킨다. 정부와 독립적인 전문가에 의해 반복적으로 문서화된 것처럼, 모든 동위원소 혼합물의 원자로등급 플루토늄은 신뢰할 수 있는 핵무기를 만드는데 사용될 수 있다.²⁶ 그러한 플루토늄의 임계질량은 여전히 작고, 추가적인 열은 전도시키거나 또는 피트 삽입을 지연시키거나 내폭발을 위한 부상식 코어 또는 내열성 폭발물 사용함으로써 처리할 수 있고, 핵무기의 조기폭발은 빠른 조합 또는 삼중수소 첨가로 해결될 수 있다. 스위스의 인터뷰 대상자들은 그들의 정부와 군대가 부분적으로 핵무기 옵션 확립을 돕기 위해 사용후핵연료의 재활용을 지원했음을 밝히고 원자로등급 플루토늄으로부터 이 위험을 암묵적으로 인정했다(7장 참조).

동아시아와 그 너머를 위한 교훈

이 책은 최소한 세 그룹의 국가들에 대한 교훈을 제공한다. 첫째로는 프랑스와 일본 두 국가는 열중성자 원자로에서 MOX 핵연료의 장기적인 상업적 사용을 계속할 계획이다. 둘째로는 중국, 영국, 미국(핵무기로 원래 제조된 플루토늄을 처분하는 마지막 경우) 3개국으로 열중성자 원자로에서 MOX 핵연료의 대규모

사용을 고려하고 있다. 셋째로는 인도, 한국, 러시아, 중국을 포함한 국가들로 플루토늄의 독성, 핵무기 능력 및 관련 비용과 유사한 우려를 제기할 수 있는 고속로 및 파이로프로세싱과 같은 대체 기술로 사용후핵연료의 재활용을 추진하고 있다.

첫 번째 교훈은 에너지 목적으로 사용후핵연료를 재활용하는 것은 핵연료주기시설에서 플루토늄의 안전 및 건강위험에 대처하는데 드는 높은 비용 때문에 극도로 비싸다는 것이다. 둘째는, 에너지 안보와 폐기물 관리와 같은 플루토늄 재활용의 표면상의 이점은 엄청난 비용을 보상하기 위해서 너무 미미하다. 이것은 열중성자 원자로의 MOX 뿐만 아니라 최근의 권위있는 연구에 의하면 고속로를 포함한 다른 기술에도 적용된다.²⁷ 셋째는 사용후핵연료의 재활용에 적용되는 보안 조치는 원자로급 플루토늄의 핵무기 능력, 핵무기를 획득하고 사용하려는 일부 테러집단의 명시된 목적, 9/11 과 같은 정교한 공격을 수행하고자 하는 그러한 테러집단의 증명된 능력 등 몇 가지 우려에 직면하여 부적절하다. 넷째, 세계의 풍부한 우라늄 공급과 농축을 고려할 때, 원자력의 지속적이고 효율적인 생산을 위해서 사용후핵연료를 재활용하는 것은 불필요하다. 따라서 플루토늄 재활용을 위해 실질적인 경제적, 보안 및 안전 위험을 초래할만한 정당성이 없다. 다섯째, 높은 비용과 보상 혜택이 없음에도 불구하고 플루토늄 연료를 지속적으로 추구하는 국가들은 국제 평화와 안보를 악화시킬 수 있다고 다른 나라들로부터 의심받을 수 있다.

이러한 교훈은 위에 명시된 3개 국가그룹들마다 권고안을 제시한다. 비경제적이고 위험한 열중성자 MOX 사용을 계속하려는 프랑스와 일본 두 나라는 국내 정치가 허용하는 한 빨리 그것을 폐지해야 한다. 프랑스는 정부와 산업계에서 강력하고 확고한 친 플루토늄 관련 이익을 가지고 있다. 그러나 국가 원전업자들은

플루토늄을 재활용하는 것이 전기요금을 인상한다는 것을 알고 있는데, 이는 분리된 플루토늄, 재처리 용량, MOX 제조용량 및 MOX 를 사용하는 원자로 용량의 4 가지 요구 사항에서 국내 잉여에도 불구하고 MOX 연료의 사용이 증가하지 않은 이유를 설명한다. 안전과 보안 문제가 프랑스에 MOX 프로그램 재평가를 강요하지 않는다고 하더라도, 경제적 불이익은 결국 그렇게 할 것이다.

일본의 친 플루토늄 로비는 아직 상업적 재처리 및 MOX 제조시설을 운영하지 않기 때문에 엄청난 규모는 아니다. 그 대신 재활용을 위한 가장 강력한 압력은 사용후핵연료가 쌓이기를 두려워하는 원자로 근처와 미준공 재처리시설과 MOX 공장 지역 사회에서 나올 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해 일본 정부는 기술의 안전성과 신뢰성을 해당 지역 사회에 설명하고, 지질처분장을 완공하기 전에 일시적인 폐기물 저장장소 역할을 하는데 대해 보상하면서 사용후핵연료의 건식캐스크저장시설을 확장하는데 투자해야 한다. 일본정부는 또한 영국정부가 플루토늄 22 톤에 대한 소유권을 행사하여 일본의 비축량을 거의 절반으로 줄일 수 있도록 상당한 규모의 재처리기금(핵폐기물 관리를 위한 원전업자들로부터의 기부금)의 일부를 사용해야 한다. 일본 국내 플루토늄의 대부분은 현재 원자로에서 사용할 수 없는 형태이기 때문에 정부는 비슷한 처분 프로그램이 있는 미국과 협력하여 폐기물로서 폐기해야 한다.²⁸ 나머지 일본의 플루토늄(국내에서 2 톤, 프랑스에서 15.5 톤)은 MOX와 폐기물의 조합으로 상대적으로 신속하게 처분되어야 하는데, 그러면 일본은 플루토늄 비축량을 5 년 내에 없앨 수 있다.²⁹

열중성자 원자로에서 MOX 대규모 사용을 고려하고 있는 중국, 영국, 미국 3 개국은 이 옵션이 비경제적이고 불필요하다는 점을

인정해야 한다. 미국 정부는 비용이 급증한 MOX 제조 공장의 부분 건설에 수십억 달러를 낭비한 후 이러한 결정에 도달한 것 같으며 지금은 잉여 핵무기 플루토늄을 폐기물로 처리할 계획이다.³⁰ 영국은 반세기 이상 사용후핵연료를 재처리하였으나 경제성 및 다른 이유로 원자로에서 생성된 플루토늄을 상업적으로 재활용하지 못했다(4 장 참조). 그 결과 국내적으로 영국은 110 톤의 분리된 민간용 플루토늄을 보유하고 있으며, 이는 핵무기로 보유한 3.2 톤의 플루토늄을 훨씬 능가하고 있다. 공식적으로 이 민간용 플루토늄에 대한 영국정부의 선호 옵션은 MOX 제조시설 또는 MOX 를 사용하도록 허가된 원자로가 국내에 없음에도 불구하고 MOX 핵연료로서 이 플루토늄을 재활용하는 것이다. 영국은 이러한 허구를 끝내고 플루토늄을 폐기물로 처분해야 한다.³¹ 분리된 플루토늄의 잉여를 아직 만들지 않았기 때문에 중국은 3 개국 중 가장 좋은 위치에 있지만, 중국에서의 재처리 및 MOX 가공공장 건설에 대해 Orano 와 협상 중이다. 중국이 서구의 산업화를 성공적으로 모방했지만, 열중성자 MOX 가 서구지역에서 값 비싸고 위험한 실수를 저질렀다는 점을 감안할 때 이 경우에 그렇게 하는 것은 무분별하다.

마지막으로 인도, 한국, 러시아, 중국과 같은 국가들은 대체 기술을 사용하여 에너지를 위한 플루토늄의 재활용을 추진하고 있다. 이론상으로는 고속로는 핵연료 중 플루토늄과 다른 악티나이드를 더 많이 소비 할 수 있어 고준위폐기물의 장기간 열과 방사능을 감소시킨다. 파이로프로세싱은 순수 플루토늄 분리를 피할 수 있으므로 전통적인 재처리와 비교하여 폐쇄 핵연료주기의 핵 테러 위험을 다소 줄일 수 있다. 그러나 학자들은 이러한 알려진 이득이 크게 과장되어 있음을 보여주었다.³² 그러한 기술은 이전의 사용후핵연료의 재활용에서 고생한 안전, 핵무기 및 비용 등의 플루토늄의 세 가지 근본적인 위험을 극복할 수 없다. 따라서 이들

국가가 대체 기술을 추구함에 있어서 열중성자 MOX 를 사용한 국제 경험을 검토하여 왜 실패했는지 검토하는 것이 좋다. 그렇게 함으로써 그들은 플루토늄을 에너지로 재활용하려는 제안된 접근 방식이 기술적으로나 경제적으로 거의 실패한 고속로를 상업화하는 장애물 외에도 유사한 문제에 직면하게 될 것이라는 것을 깨닫게 될 것이다.³³

플루토늄을 추출하기 위해 사용후핵연료를 재처리하는 것은 핵무기를 생산하는 훌륭한 방법이다. 그러나 이 책에 설명된 역사는 그것은 전기를 생산함에 있어서 비효율적이고 위험하며 불필요한 방법임을 보여준다. 사용후핵연료 재활용의 안전성, 보안성 및 경제성이 크게 개선될 때까지 이 책이 제기한 "에너지 생산을 위한 플루토늄?"이라는 질문에 대한 답은 확실한 부정으로 남을 것이다.

미주

¹ 유익한 기사와 논문은 개별 국가 프로그램에 있으며 이 책의 사례 장들에서 인용된다. 최소한 두 가지 간단한 비교 국가연구도 있다. Per Högselius, "Spent nuclear fuel policies in historical perspective: An international comparison," *Energy Policy* 37, 1 (2009): 254-263, and D. Haas and D. J. Hamilton, "Fuel cycle strategies and plutonium management in Europe," *Progress in Nuclear Energy* 49, 8 (2007): 574-582. 1990년대 일본의 한 NGO는 MOX의 안전, 보안 및 경제성을 평가했지만 비교 국가 체제에서는 평가하지 않았다. 다음을 참조, Jinzaburo Takagi, et al., *Comprehensive social impact assessment of MOX use in light water reactors* (Tokyo: Citizens' Nuclear Information Center, 1997), http://www.cnrc.jp/english/publications/pdf/ima_fin_e.pdf. 그 시대의 짧은 비판은 Frank Barnaby, "How Not to Reduce Plutonium Stocks: The Danger of MOX-fuelled Nuclear Reactors," Corner House Briefing 17,

December 30, 1999, <http://www.thecornerhouse.org.uk/resource/how-not-reduce-plutonium-stocks>.

² Thomas B. Cochran, et al., *Fast Breeder Reactor Programs: History and Status* (International Panel on Fissile Materials, 2010).

³ J. Samuel Walker, "Nuclear Power and Nonproliferation: The Controversy over Nuclear Exports, 1974-1980," *Diplomatic History* 25, 2 (2001): 215-249. 이 미국의 정책은 표면상 평화로운 사용후핵연료에서 분리된 플루토늄이 핵무기 제조에 사용될 수 있음을 보여준, 1974년 인도의 평화적 핵폭발에 대한 반응이었다. 이 정책은 미국에서 시작되거나 미국 기술을 기반으로 한 원자로에서 조사된, 미국의 동의 권리에 따르는 사용후핵연료의 재처리에 대한 허가를 보류하겠다고 위협함으로써 강압적인 수단을 사용했다.

⁴ A. Vielvoys and H. Bairiot, "Economic optimization of MOX fuel," *Nuclear Europe Worldscan*, 11, 1/2 (1991): 13. MOX 핵연료의 경우, 이러한 활동으로 막대한 제조비용이 발생한다. 대조적으로, LEU 핵연료의 경우, 이러한 활동에는 핵연료봉 및 핵연료집합체 용 하드웨어, UF6에서 UO2로의 변환, 엔지니어링 및 경제적 조항, 원전으로의 운송 등 제조비용의 약 20%만 발생한다. 제작 비용에는 중금속 비용이 포함되지 않습니다.

⁵ *Plutonium Separation in Nuclear Power Programs: Status, Problems, and Prospects of Civilian Reprocessing Around the World* (International Panel on Fissile Materials, 2015).

⁶ 2018년 미국의 "희석 및 처분" 계획은 플루토늄 1kg 당 약 50만 달러의 비용이 소요될 것으로 추산된다. 상당히 비싸지만 이는 플루토늄 1kg 당 160만 달러가 넘는 MOX 핵연료를 통한 예상 처분비용의 1/3도 안된다. U.S. Department of Energy, "Surplus Plutonium Disposition Dilute and Dispose Option Independent Cost Estimate (ICE) Report," April 2018, <https://s3.amazonaws.com/ucs-documents/global-security/dilute-and-dispose-independent-cost-estimate-4-18.pdf>.

유럽에서는 플루토늄에 대한 시장가격이 1kg 당 마이너스 수만 달러가 된다(8장 참조).

⁷ See Chapter 5. "MOX imports have cost at least ¥99.4 billion, much higher than uranium fuel," *Energy Monitor Worldwide*, February 23, 2015.

⁸ Atomic Energy Commission Bureau, "Estimation of Nuclear Fuel Cycle Cost," November 10, 2011, http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/kettei/seimei/111110_1_e.pdf.

⁹ Chapter 2 참조. Belgonucléaire, "Comparison of MOX & U Fuel Assembly Costs," 1998, 3.

¹⁰ Chapter 6 참조. Jurgen Krellmann, interview with Kelli Kennedy, Marseilles, France, January 4, 2018. Dr. Christoph Pistner, interview with Kelli Kennedy, Darmstadt, Germany, January 10, 2018. Dr. Klaus Janberg, interview with Kelli Kennedy, Dusseldorf, Germany, January 6, 2018. Wolfgang Heni, Interview with Kelli Kennedy, Darmstadt, Germany, January 12, 2018. Wolfgang Heni, "Physical, Technological, Ecological, and Economic Aspects for The Optimization of the Nuclear Fuel Cycle," Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 1994.

¹¹ Chapter 8 참조. EPZ, "Milieueffectrapportage Brandstofdiversificatie," July 2010, Figure 2.9.1.

¹² Peter Jones, *The Economics of Nuclear Power Programs in the United Kingdom* (New York: St. Martin's Press, 1984): 55.

¹³ Chapter 7 참조. 익명을 요구한 이전의 원전 운영자 직원, 2018년 1월 10일 Harry Kim 면담. 결과적으로, 스위스 원전업자들은 구입해야 할 MOX 핵연료 제조량을 최소화하기 위해 플루토늄이 천연우라늄보다 열화우라늄과 혼합되도록 계약했다. H. Bay and R. Stratton, "Use of Mixed Oxide Fuel in a Pressurized Water Reactor Experience of NOK, Switzerland," International Topical Meeting on Safety of Operating Reactors, American Nuclear Society, San Francisco, CA, 1998, 293.

¹⁴ Chapter 3 참조.

¹⁵ Vielvoye and Bairiot, "Economic optimization of MOX fuel," 15, "MOX 핵연료 제조공장은 합리적인 제조비용을 유지하기 위해 처리용량 또는 그 근처에서 작동해야 한다."고 주시한다.

¹⁶ *Plutonium Separation in Nuclear Power Programs*, 138 (footnote 16), www.fissilematerials.org/library/cha00.pdf, which analyzes Jean-Michel Charpin, Benjamin Dessus, and René Pellat, "Economic forecast study of the nuclear power option," Report to the Prime Minister, July 2000, Appendix 1.

¹⁷ 총 비용의 약 3/4 으로 추정. 다음 참조, "The Future of the Nuclear Fuel Cycle," MIT, April 2011, 21.

¹⁸ Yukio Tajima, "Japan's 'plutonium exception' under fire as nuclear pact extended; Beijing and Seoul question why US allows only Tokyo to reprocess," *NIKKEI Asian Review*, July 14, 2018, <https://asia.nikkei.com/Politics/International-Relations/Japan-s-plutonium-exception-under-fire-as-nuclear-pact-extended>. Lee Min-hyung, "NK slams Japan's plutonium stockpiling," *The Korea Times*, August 5, 2018, https://www.koreatimes.co.kr/www/nation/2018/08/356_253381.html.

¹⁹ WISE-Paris, "Belgium: Scheduled End to Reprocessing and to MOX Use," January 21, 1999, http://www.wise-paris.org/index.html?/english/ournews/year_1999/ournews0000990121.html. 다음에 의하면, 그는 또한 핵확산 우려를 주요 근거로 꼽았다. Jan Vande Putte, interview with Valentina Bonello, January 12, 2018.

²⁰ *Sécurité nucléaire: le grand mensonge*, film documentary, directed by Éric Guéret, ARTE, 2017.

²¹ *Sécurité nucléaire: le grand mensonge*.

²² 각 선적은 최대 280kg 의 플루토늄 산화물을 포함한다 (3 장 참조).

²³ "Audition de M. Philippe Knoche, directeur général d'Orano (ex-Areva)," Commission d'enquête sur la sûreté et la sécurité des installations nucléaires, March 8, 2018.

²⁴ Nuclear Control Institute, "The Plutonium Threat," <http://www.nci.org/new/nci-plu.htm>.

²⁵ Republic of France, "Sixième rapport national sur la mise en œuvre des obligations de la Convention commune," October 2017, 36, which states, "l'utilisation du plutonium dans les combustibles MOX

permettant de consommer environ un tiers du plutonium, tout en dégradant significativement la composition isotopique du plutonium restant, fait que cette technologie n'est pas proliférante."

²⁶ Gregory S. Jones, *Reactor-Grade Plutonium and Nuclear Weapons* (Arlington, VA: Nonproliferation Policy Education Center, 2018). Bruce T. Goodwin, "Reactor Plutonium Utility in Nuclear Explosives," Lawrence Livermore National Laboratory, November 6, 2015. 과거의 회의론자들은 사용후 MOX 핵연료로부터 분리된 플루토늄으로 신뢰할 수 있는 핵무기를 만들 수 있는 잠재적인 어려움을 강조했다. 다음 참조 Bruno Pellaud, "Proliferation aspects of plutonium recycling," *C. R. Physique* 3 (2002): 1067-1079. 전 세계 민간용으로 분리된 플루토늄의 약 1%만이 사용후 MOX 에서 추출되었다.

²⁷ National Research Council, *Nuclear Wastes: Technologies for Separations and Transmutation* (National Academy Press, 1996): 3. Lindsay Krall and Allison Macfarlane, "Burning waste or playing with fire? Waste management considerations for non-traditional reactors," *Bulletin of the Atomic Scientists* 74, 5 (2018): 326-334.

²⁸ Frank von Hippel and Gordon MacKerron, *Alternatives to MOX: Direct-disposal options for stockpiles of separated plutonium* (International Panel on Fissile Materials, 2015). 양국은 미국-일본 플루토늄 관리 전문가그룹이라는 기술 협력을 촉진 할 수 있는 양자 간 메커니즘을 이미 가지고 있다. 다음 참조 U.S. National Nuclear Security Administration, "Prevent, Counter, and Respond – A Strategic Plan to Reduce Global Nuclear Threats, FY 2017 – FY 2021," Report to Congress, March 2016, 2-4.

²⁹ Alan J. Kuperman and Hina Acharya, "Japan's Misguided Plutonium Policy," *Arms Control Today* (October 2018): 16-22, <https://www.armscontrol.org/act/2018-10/features/japan's-misguided-plutonium-policy>. Alan J. Kuperman, "How not to reduce Japan's plutonium stockpile," *Kyodo News*, op-ed, July 13, 2018, <https://english.kyodonews.net/news/2018/07/f91d38319475-refiling-opinion-how-not-to-reduce-japans-plutonium-stockpile.html>.

³⁰ Timothy Gardner, "Trump administration axes project to generate power from plutonium," *Reuters*, May 13, 2018.

³¹ von Hippel and MacKerron, *Alternatives to MOX*. 그러한 처분은 국제 플루토늄관리 원탁회의로 알려진 영국, 프랑스, 일본 및 미국을 포함하는 기존의 다자간 구상 하에 국제기술협력에 의해 촉진 될 수 있다. 다음 참조 U.S. Department of Energy, "Departmental Response: Assessment of the Report of the SEAB Task Force on Nuclear Nonproliferation," October 2015, 12-13.

³² National Research Council, *Nuclear Wastes*. Krall and Macfarlane, "Burning waste or playing with fire?" James M. Acton, "The myth of proliferation-resistant technology," *Bulletin of the Atomic Scientists* 65, 6 (November/December 2009): 49-59. Edwin S. Lyman, "The Limits of Technical Fixes," in *Nuclear Power & the Spread of Nuclear Weapons*, eds. Paul Leventhal, et al. (Dulles, VA: Brassey's Inc., 2002): 167-184.

³³ 고속로 BN-600 은 1980 년부터 1997 년까지 증기발생기에서 14 차례의 나트륨화재를 겪었지만 가장 성공적인 예외는 러시아다. 다음 참조 Thomas B. Cochran, et al., "It's Time to Give Up on Breeder Reactors," *Bulletin of the Atomic Scientists* 66, 3 (2010): 50-56.