



각국의 후행 핵연료주기 정책 동향

김창락

한국방사성폐기물관리공단 사업전략실장



국 제원자력기구(IAEA) 자료에 따르면 2009년 현재 전 세계 31개 국가에서 436기의 원전이 운영되고 있고, 중국 등 14개 국가에서 53기의 원전이 건설 중에 있다. 운영 중인 436기 원전의 총설비 용량은 327.26GWe(net 기준)로, 세계 전력 수요량의 14%를 공급하고 있다.

원자력이 화석연료의 고갈과 온실가스 감축을 위한 현실적인 대안으로 인식되면서 원자력 발전의 이용 확대 및 신규 원전 도입을 추진하려는 움직임이 세계 각국에서 뚜렷하게 진행되고 있다.

IAEA는 2008년 9월 발표한 자료를 통해 세계 원전 설비 용량이 2030년까지 현재의 1.2배에서 최대 2배 이상 증가하여 최대 748GWe에 달할 것으로 전망하고 있다. 이에 따라 사용후핵연료

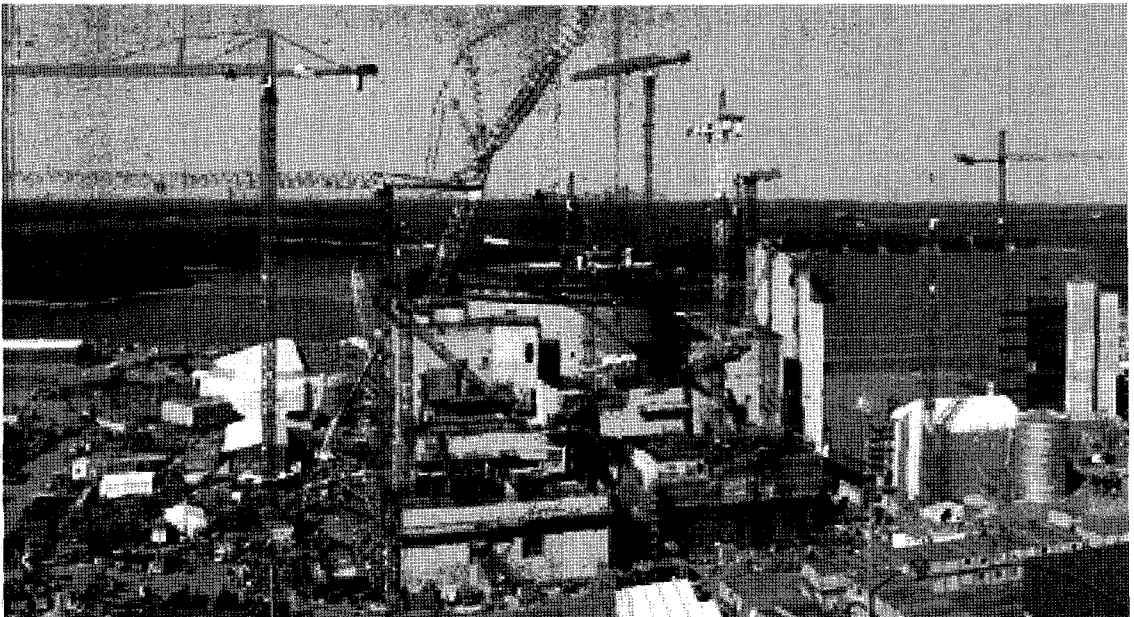
발생량도 대폭 늘어날 전망이다.

그러나 원자력 발전 과정에서 발생하는 사용후핵연료를 어떻게 관리할 것인가에 대한 이른바 후행 핵연료주기 관리 정책의 결정 문제는 여전히 원전을 운영하는 전 세계 국가들의 공통된 과제로 남아 있다.

대표적으로 미국은 1977년 카터 대통령이 핵확산 문제를 이유로 사용후핵연료의 상업적 재처리를 금지하는 정책을 채택하여 30년 넘게 재처리 금지 정책을 유지하여 왔으나, 조지 부시 행정부 때인 2006년 2월 사용후핵연료의 재처리를 골자로 하는 '세계 원자력에너지 파트너십(GNEP)' 정책을 발표함으로써 그 동안 고수해 온 재처리 금지 정책을 사실상 철회하여 세계 원자력계의 관심을 끌었다.

그러나 2009년 오바마 행정부

서울대 원자핵공학과 졸업
미국 버클리대 핵공학 석사, 박사
한국원자력연구소 선임, 책임연구원
한전 원자력환경기술원 안전평가팀장
한수원 원자력발전기술원 책임, 수석
연구원 역임



핀란드에 건설되고 있는 EPR 원전

가 들어서면서 GNEP 예산의 완전 삭감 및 GNEP 웹사이트를 없애는 등 사실상 GNEP 추진을 중단했다. 뿐만 아니라 2009년 초에 오바마 행정부의 Steven Chu 에너지부(DOE) 장관은 1987년 방사성폐기물정책법에 따라 추진해 왔던 Yucca Mountain 사용후핵연료 처분 사업 역시 사실상 중단하였다.

한편 세계적으로 사용후핵연료 처분 시설을 운영하고 있는 국가는 아직 없다. 부지를 확보한 핀란드와 스웨덴, 그리고 관련법에 처분장 운영 목표 연도를 규정한 프랑스만이 2020년~2030년에 처분장을 운영한다는 목표를 가지고 있을 뿐 나머지 대다수 국가들은 2030년~2050년경에나 처분장을 운영할 계획이다. 그만큼 고준위 방사성폐기물 관리 정책 역시 불확실성이 높다고 할 수 있다.

본고에서는 세계 원자력계를 선

도하고 있는 미국, 영국, 프랑스, 일본, 러시아 등 5개 원자력 선진국의 후행 핵연료주기 정책 동향 및 방사성폐기물 관리 현황을 검토함으로써 향후 우리나라 원자력 정책 수립시 기초 자료로 활용될 수 있도록 하였다.

미국

미국은 현재 31개 주에서 104기의 원전을 운영 중에 있으며, 2008년말 기준 총 41,190억kWh의 생산 전력 중에서 석탄화력 49%, 가스 22%, 원자력 20%, 수력 6% 등의 비중을 차지하고 있다. 총전력 설비 용량은 1,088GWe로, 이중 원자력은 약 1/10인 100,582MWe이다.

1977년에 미국 정부는 핵비확산을 이유로 상업용 원전에서 발생하는 사용후핵연료의 재처리를 금지하는 정책을 발표했다. 그때

까지 미국은 군사 프로그램의 일환으로 사용후핵연료를 재처리한 경험을 갖고 있었으며, 상업용 재처리 시설 3개가 건설 또는 운영되고 있었다.

하나는 뉴욕 West Vally에 있는 300t/y 용량의 재처리 시설로서, 1966년부터 1972년까지 성공적으로 운영되었다. 그러나 규제 요건이 강화되면서 시설 보수와 그에 따른 비용 증가로 경제성에 문제가 생겨 운영을 중지했다.

또 하나는 일리노이의 Morris에 있는 300t/y 용량의 재처리 시설로, 기술적 문제로 1974년에 운영을 포기했다.

마지막 하나는 사우스 캐롤라이나의 Banwell에 있는 1,500t/y 용량의 재처리 시설로, 이 시설은 정부의 재처리 금지 정책에 따라 운영 개시를 하지 못한 채 조업을 포기했다.

그러나 2002년부터 시작된 미국



〈표 1〉 UREX+ 계열의 재처리 공정의 종류

Process	Product #1	Product #2	Product #3	Product #4	Product #5	Product #6	Product #7
UREX+1	U	Tc	Cs/Sr	TRU+Ln	FP		
UREX+1a	U	Tc	Cs/Sr	TRU	All FP		
UREX+2	U	Tc	Cs/Sr	Pu+Np	Am+Cm+Ln	FP	
UREX+3	U	Tc	Cs/Sr	Pu+Np	Am+Cm	All FP	
UREX+4	U	Tc	Cs/Sr	Pu+Np	Am	Cm	FP

TRU : Transuranic elements (Pu, Np, Am, Cm)

Tc : Long-lived fission product

Cs/Sr : Primary short-term heat generators

Ln : Lanthanide fission products

FP : Fission products other than Cs, Sr, Tc, I, and Ln

의 에너지 정책 변화에 따라 사용후 핵연료의 재처리 가능성이 점차 높아지고 있다. 2005년 6월에 미국 상원 세출위원회(Senate Appropriations Committee)가 승인한 에너지 및 수자원 관련 예산 보고서에는 새로운 원자력 기술의 확보 필요성을 강조하고 있다.

DOE가 추진하고 있는 신형 핵연료주기 프로그램(AFCI)은 재처리를 포함하여 제4세대(Generation IV) 원자로에 적합한 새로운 핵연료주기 기술 개발을 목표로 하고 있는 것으로 총8,500만 달러 규모로 추진되고 있다. 미국이 재처리를 추진하고자 하는 가장 큰 원동력은 고준위 폐기물의 처분량을 줄여야 할 필요성 때문이다.

사용후핵연료 재처리는 신형 원자로의 개발 추진에 따라 정부와 원자력 산업계에 의해 더욱 그 필요성이 강조되고 있다.

2005년 말 미국 원자력학회는 “고속로 기술에 기반을 둔 신형 원자로의 개발과 추진은 세계 에너지 장기 공급의 지속 가능성, 신뢰성 및 안보성에 있어서 중요한 일”이라는 요지의 성명을 발표했다.

미국의 원자력산업체인 Nuclear Energy Institute는 미국 원자력 산업계는 장수명 핵종의 소멸 처리를 위한 사용후핵연료 재활용 계획을 수립하여 추진해 나갈 필요가 있다는 성명을 발표했다.

새로운 재처리 기술의 개발은 2006년에 미국이 제안한 Global Nuclear Energy Partnership (GNEP)의 핵심 요소이기도 하다. 이 정책은 미국과 원자력 선진국이 중심이 되어 핵비확산성 사용후핵연료 재활용 기술을 개발하여 개발도상국들이 농축 시설이나 재처리 시설을 보유하지 않고도 핵연료를 공급받을 수 있도록 하기 위한 것

이다.

GNEP 정책은 많은 비판과 함께 재처리의 재개 가능성 때문에 많은 관심을 끌었다. 그러나 2009년 오바마 행정부가 들어서면서 DOE는 GNEP 홈페이지를 없애고 2010 회계연도 예산 신청 항목에서도 제외하는 등 GNEP 추진을 중단하는 입장을 취했다.

2009년 6월에는 환경 영향 평가(PEIS)를 더 이상 추진하지 않겠다고 DOE는 발표했다. PEIS는 전임 조지 부시 행정부가 미국 내 GNEP 프로그램의 핵심으로 삼았던 미국 내 상업용 재처리 시설 건설을 위한 활동의 일부이다.

GNEP에 대한 미국 정부의 부정적 태도에도 불구하고 AFCI를 통한 연구 개발 활동은 계속적으로 추진되고 있다. 새로운 재처리 기술인 UREX+ 계열의 공정 개발을 위한 실증 프로젝트가 DOE의

자금 지원 하에 아르곤 국립연구소(ANL)에서 수행되고 있다.

DOE는 또한 Areva의 COEX와 같은 재처리 기술에 대해서도 연구를 수행하고 있다. COEX 기술은 프랑스, 영국, 러시아 및 일본이 이용하고 있는 Purex 재처리 기술에 기반을 둔 기술이다.

한편 미국은 사용후핵연료를 고준위 폐기물로 간주하여 정부가 책임을 지고 심지층 처분장에 처분하는 정책을 추진해 오고 있다. 그 대신 원자력 발전 사업자는 0.1센트/kWh의 비용을 방사성폐기물관리기금에 납부하고 있다.

기금 규모는 2008년 9월 기준으로 이자율 포함하여 총 310억 달러가 누적된 상태이다. 매년 7억5,000만 달러가 징수되고 있으며, 이자까지 포함하면 매년 약 10억 달러가 기금에 적립되고 있는 것으로 알려지고 있다.

DOE는 70,000톤의 사용후핵연료 및 고준위 폐기물을 처분할 수 있는 심지층 처분장을 네바다주의 Yucca Mountain에 건설을 추진해 왔다. DOE는 이 처분장에 63,000톤의 민간 사용후핵연료와 2,333톤의 DOE 소유 사용후핵연료, 그리고 4,667톤의 DOE 소유 고준위 폐기물을 처분한다는 계획을 갖고 있다.

2008년 기준으로 58,000톤의 민간 사용후핵연료가 처분을 기다리고 있고, 약 12,800톤의 정부 소유 사용후핵연료 및 고준위 폐기물이 역시 처분을 기다리고 있다. 또한 매년 2,500톤이 발생되고 있다.

그러나 Yucca Mountain 처분장은 건설 예산의 부족, 법적 문제, 그리고 정치적 반대 등으로 인해 건설이 계속 지연되어 왔다.

2009년 초 오바마 행정부의 Steven Chu 에너지부(DOE) 장관은 1987년 방사성폐기물정책법 규정에도 불구하고 Yucca Mountain 처분장은 더 이상 고려할 수 있는 옵션이 아니라는 요지의 발언을 했다.

이어 오바마 행정부는 2010 회계연도의 Yucca Mountain 건설 사업 예산 대부분을 삭감했다. 사실상 Yucca Mountain 처분장 건설 사업의 종단을 의미하는 것이다.

현재 Yucca Mountain 사업을 포기하는 대신 새로운 대안 마련을 위한 '블루리본위원회'가 운영되고 있다.

DOE가 방사성폐기물정책법에 규정된 의무를 다하지 못하자 원자력 산업계는 사용후핵연료 관리를 위한 새로운 조직을 만들어야 한다고 요구하고 있다. 새 조직은 정부 및 민간이 합동으로 파트너십을 구축하여 사용후핵연료 중간 저장 시설과 재활용 시설 건설을 추진해 나가야 한다고 제안하고 있다.

한편 앞으로 신규 원전 건설을 희망하는 원자력 발전 사업자는 DOE와의 새로운 표준 계약에 의거하여 사용후핵연료를 기한에 관계없이 발전소 부지 내에 저장할 수 있도록 하는 약관에 동의해야 하며, 이렇게 되면 DOE는 처분장 건설 지연에 대한 법적 책임을 지지 않아도 된다. 다만 DOE는 최초

연료 장전 후 20년 이내에 사용후핵연료를 인수해가면 되도록 되어 있다.

2009년 1월 현재 19건의 계약이 이루어졌다. 표준 계약은 신규 건설 또는 계속운전을 위한 인허가 발급에 필수적이다.

영국

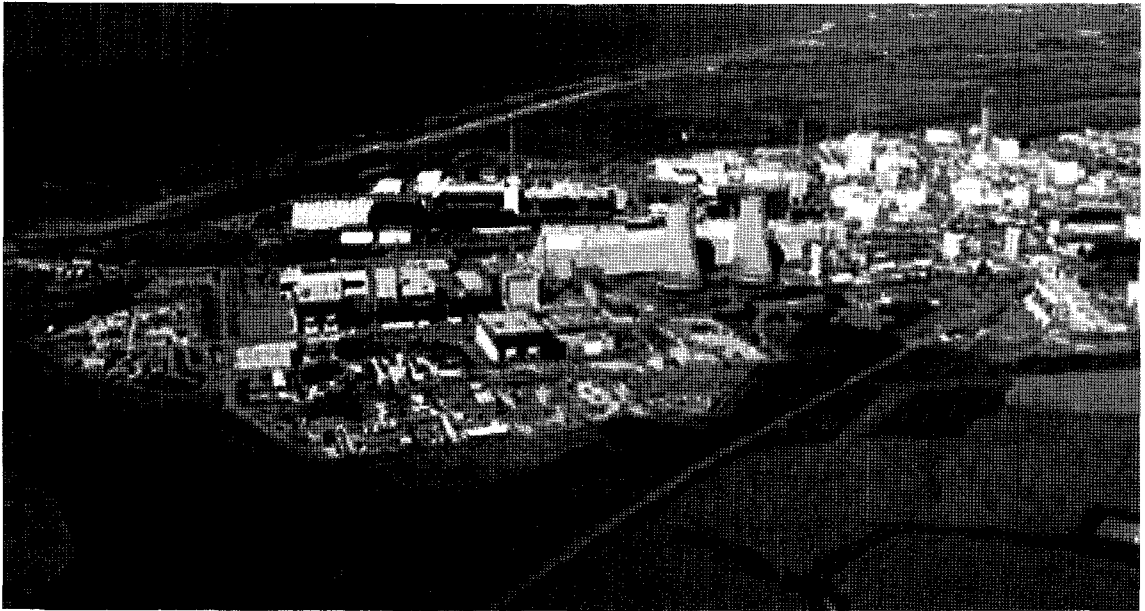
2009년 현재 영국은 19기의 원전을 운영하고 있으며, 설비 용량은 11.95 GWe이다. 전체 소비 전력의 15.1%를 원자력으로 공급하고 있다.

영국은 사용후핵연료에 대한 관리 방안을 원자력 발전 사업자의 판단에 맡기고 있는데, 현재는 사용후핵연료의 일부를 재처리하고 나머지는 저장 관리하는 방식을 채택하고 있다.

1964년부터 운영된 1,500t/yr 처리 규모의 Magnox 연료(금속) 재처리 시설은 Magnox형 원전이 폐쇄되는 2012년경부터 함께 폐쇄될 예정이다. Magnox 연료는 핵연료 피복관의 화학적 특성 때문에 장기간 저장이 어려워 빠른 시간 내에 재처리를 해야 한다.

18억 5,000만 파운드를 투입하여 1994년부터 운영을 시작한 산화우라늄 연료용 850t/yr 처리 규모의 Thorp 재처리 시설은 주로 해외 고객용으로 운영되고 있다.

영국 내 신형가스로(AGR) 원전에서 발생된 2,160톤의 사용후핵연료 중에서 약 절반 정도만이 재처리 되었다. AGR 원전의 수명 종료 때까지 발생될 약 4,500톤의



영국의 Sellafield 원자력 단지

AGR 사용후핵연료는 재처리하지 않고 저장 관리할 계획이다.

Thorp 재처리 시설은 PWR 원전인 Sizewell B에서 발생하는 사용후핵연료도 재처리할 수 있으나 아직까지 재처리한 실적은 없으며 원전 부지 내에서 저장 관리되고 있다.

2005년 4월에 발생한 Thorp 재처리 시설의 핫셀 내 파이프 결함으로 인한 사고는 Thorp 재처리 시설의 안전성에 대해 심각한 우려를 자아내게 만들었다. 결함이 발견된 파이프는 질산에 녹은 사용후핵연료가 지나가는 통로이다. 이 파이프의 결함으로 83,000 리터의 용액이 핫셀 내부로 흘러나갔다.

이 사고는 국제 원자력 사고 등급 3등급으로 판명되었다. 3등급은 심각한 사고이기는 하나 외부 환경에 방사선적 영향은 없을 때 부여하는 사고 등급이다. 누출된

용액은 그 해 6월에 전량 회수되었으나 운영 재개는 2008년 1월부터 시작되었다.

한편 영국의 원자력 발전 사업자들은 플루토늄 재활용을 비경제적인 관리 방안으로 평가하고 있다. 그래서 재처리하여 회수한 플루토늄을 원전의 연료로 재활용하지 않고 저장 관리하고 있다.

MOX 연료 가공비는 일반 산화우라늄 연료 가공비보다 5배나 비싼 것으로 평가되고 있는데, 전체 연료 주기비로 볼 때 2배 정도 비싸지게 되는 것으로 알려지고 있다.

2007년 6월에 재처리 시설 운영 책임을 맡고 있는 NDA(Nuclear Decommissioning Authority)는 「Uranium and Plutonium: Macro-economic Study」라는 제목의 보고서를 작성했다.

100톤의 플루토늄과 60,000톤의 재처리 및 감손 우라늄을 2012년부터 사용 가능한 것으로 가정

할 때 1) 이들 물질을 폐기물로 간주하여 심지층 처분, 2) 장기 저장 관리, 3) 핵연료로 재활용(또는 재활용 용도로 판매)하는 3가지 옵션 중 어떤 옵션이 가장 경제적인가에 대해 분석한 보고서이다.

여기서 우리나라는 3종류로 구분되었다. 하나는 농축 과정에서 발생한 감손우라늄(UF₆ 형태) 25,000톤이고, 또 하나는 Magnox 사용후핵연료를 재처리하는 과정에서 얻어진 감손 우라늄 30,000톤이며, 마지막 하나는 산화우라늄 연료 재처리 과정에서 얻어진 통상적인 우라늄 5,000톤이다.

이들 플루토늄과 우라늄을 원전의 연료로 재활용할 경우 3GWe 규모의 신규 PWR 원자로를 60년 동안 가동하는 데 필요한 핵연료를 공급할 수 있거나 또는 12GWe 규모의 고속로를 700년 동안 가동하는 데 필요한 핵연료를 공급할 수 있는 양이다.

이 보고서는 최적 대안 제시는 하지 않았지만, 우라늄 가격이 낮을 경우 폐기물로 간주하여 심지층 처분하는 옵션이 가장 경제적인 것으로 나왔고, 우라늄 가격이 US\$ 80/lb U₃O₈ 이상이 되는 경우에만 재활용이 경제성을 가질 수 있음을 밝히고 있다.

그러나 2007년 10월에 후속 보고서의 성격인 「Spent Fuel Management: Life Cycle Analysis Model」이라는 제목의 보고서에서 NDA는 상기의 3가지 옵션을 심층 분석한 결과 현재의 우라늄 가격 수준에서 비교해 봤을 때 사용후핵연료를 재처리하여 재활용하는 옵션이 가장 경제적인 것으로 나타났다 밝혔다.

한편 영국의 후행 핵연료주기 사업은 2004년 에너지법(2004 Energy Act)에 의거하여 설립된 NDA(Nuclear Decommissioning Authority)가 수행하고 있다.

NDA는 39기의 원자로, 재처리 시설을 포함한 5개의 핵연료주기 시설, 그리고 각종 연구 시설 등 20개의 원자력 시설 부지에서의 방사성폐기물을 관리하는 임무를 부여 받았다. NDA의 예산 규모는 연간 28억 파운드에 알려지고 있다.

2008년 7월에 NDA는 Sellafield 원자력 단지과 26기의 Magnox 원전, 그리고 Dounreay, Windscale, Harwell 및 Winfrith 연구 시설의 해체 및 환경 복원 사업에 소요되는 비용이 407억 파운드가 소요될 것으로 추정했다. 또한 심지층 처분장 건설, 운영 및 폐쇄 비용으로 34억 파운드가 소요되어 총소

요 비용은 441억 파운드에 달하는 것으로 추정되었다.

재처리 과정에서 발생하는 고준위 방사성폐기물은 유리고화 후 스테인리스 스틸로 된 처분 용기에 담아 사일로에 저장하고 있다. 모든 고준위 폐기물은 처분에 앞서 냉각을 위해 50년 동안 저장된다.

2009년 중반까지 Sellafield 유리화 시설에서 처리된 폐기물의 양은 3,000m³이며, 유리고화체로는 750m³이 된다. 매년 400개의 처분 용기가 만들어지고 있으며, 2009년 중반까지 5,000개의 처분 용기가 만들어졌다. 2010년부터 약 10년에 걸쳐 1,850개의 처분 용기가 해외 재처리 위탁 국가들에게 반환된다.

영국 정부는 1978년부터 '방사성폐기물관리자문위원회(Radioactive Waste Management Advisory Committee)'를 운영하면서 정책 자문을 받아왔다. 그 후 2004년에 각계 대표 및 전문가들로 구성된 '방사성폐기물관리위원회(Committee on Radioactive Waste Management; CoRWM)'로 대체하여 운영하고 있다. CoRWM은 중준위 및 고준위 방사성폐기물의 장기 저장 및 처분 옵션을 검토하는 임무를 맡고 있다.

CoRWM은 고준위 폐기물 관리 방안에 대한 공론화를 3년 동안 수행한 후 2006년에 결과보고서를 발간했다. CoRWM은 이 보고서를 통해 중준위 및 고준위 폐기물의 관리 방안으로서 심지층 처분이 바람직하다고 권고하고, 처분할 때까지의 기간 동안은 저장

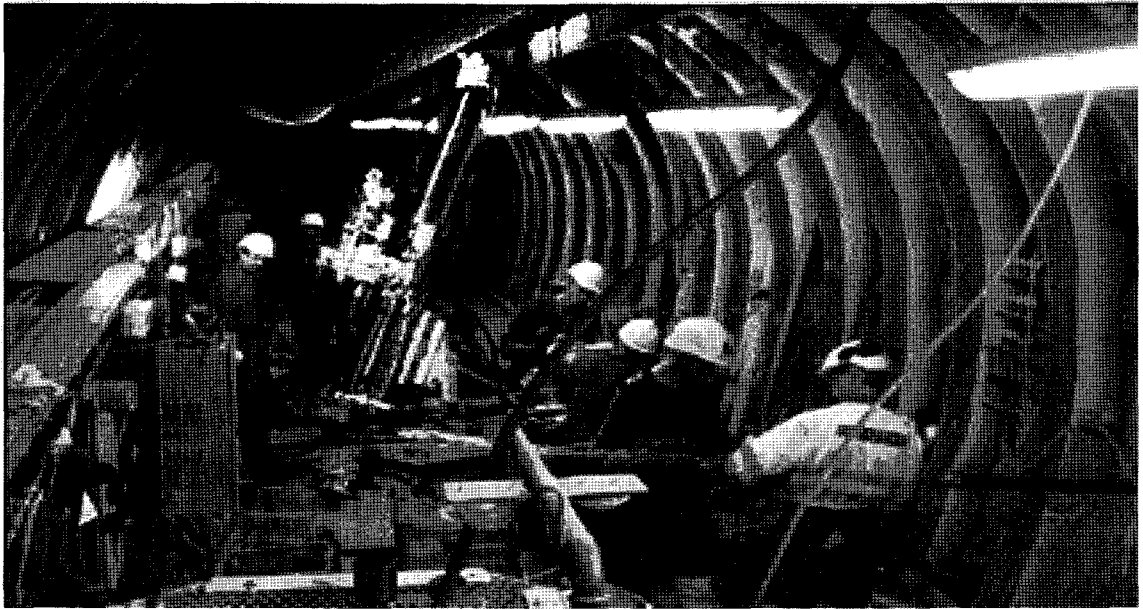
관리하도록 권고하고 있다. 또한 처분장 입지 방식은 지역의 동의를 얻어 추진하도록 하고 있는데, 처분장이 건설되는 지역에 대해서는 인센티브를 제공하도록 하고 있다.

CoRWM은 2006년 7월에 작성된 이 권고보고서를 정부에 제출했고, 정부는 계획을 실행하는 데 필요한 자문을 받기 위해 CoRWM의 명칭은 그대로 두고 대신 위원들을 새로 구성하여 운영해 나가겠다고 밝혔다. 2007년 10월에 영국 정부는 CoRWM의 새로운 위원들이 선임됐다고 발표했고, 위원들은 주로 심지층 처분과 관련된 기획 업무를 수행하는 데 필요한 전문가들로 구성되었다고 밝혔다.

한편 1982년에 중준위 폐기물 처분장 건설을 위해 British Energy, BNFL, UKAEA, 그리고 정부가 공동으로 설립한 UK Nirex Ltd.(원래 명칭은 Nuclear Industry Radioactive Waste Management Executive)는 1994년에 Sellafield 인근을 대상으로 심지층 처분장의 건설지로 적합한지 조사하기 위해 지하 시험 시설(URL) 건설을 신청했으나 3년 후 거절당했다.

2006년 10월에 정부는 NDA가 중준위 및 고준위 폐기물의 저장 및 심지층 처분 업무를 수행하는 기관이라는 점을 고려하여 NDA가 Nirex를 인수한다고 발표했다.

2007년 3월부터 NDA는 저준위 폐기물 관리 시설의 운영을 포함하여 저준위 폐기물 관리를 위한 국가 전략 개발이라는 임무도



프랑스의 고준위 폐기물 지하 시험 장면

수행하고 있다.

2007년 4월에 NDA는 Radioactive Waste Management Directorate(RWMD)를 설립했다.

RWMD는 영국에서 발생하는 고준위 폐기물을 안전하고, 환경 친화적이며, 국민이 수용할 수 있는 심지층 처분장을 건설하는 임무를 부여받았다.

RWMD는 처분장 입지, 인허가, 건설 및 운영과 관련된 업무를 수행하게 된다. 이를 위해서는 Nirex의 기술과 경험이 필요하며, 이것이 Nirex의 기능을 인수한 이유라고 NDA는 설명하고 있다.

NDA는 현재 중준위 및 고준위 폐기물 처분을 위한 심지층 처분장 건설 계획을 수립중에 있다. 처분장 개념 설정부터 2100년으로 예상되는 폐쇄에 이르기까지 약 75억 파운드의 비용이 소요될 것으로 추정되고 있다. 2007년 6월에 입지 선정 기준에 대한 여론 수

렴 작업이 시작되었다.

한편 영국 정부는 2008년 2월에 미래 방사성폐기물 관리 정책(안)을 발표했다. 이 정책에 따르면 발전소 운영자는 원전 건설 전에 향후 수명 종료 후 원전 해체 및 폐기물 처분에 대한 세부 계획 및 비용 확보 방안을 마련하여 정부에 제출하여야 한다. 정부는 중준위 폐기물 및 사용후핵연료의 처분 단가를 설정하여 원전 운영자로부터 비용을 징수, 기금으로 적립하고, 대신 정부는 처분 책임을 지게 된다.

프랑스

프랑스는 현재 59기의 원전을 운영하면서 전체 전력의 76.9%를 원자력으로 공급하고 있다. 총전력 설비 용량 116GWe 중 원자력 63GWe, 화력 26GWe, 수력 25GWe를 차지하고 있다. 원자력

전력 생산량은 4,300억kWh에 이른다.

프랑스는 원자력 개발 초기 단계부터 우라늄 자원 활용의 가치를 높이고 고준위 폐기물의 발생량을 줄이기 위해 사용후핵연료 재처리 및 재활용 정책을 추진해 오고 있다. 사용후핵연료를 재처리하여 PWR에 재활용할 경우 우라늄 자원의 활용 효율이 30% 이상 높아지는 것으로 평가되고 있다. 재처리를 포함한 핵연료주기 사업은 Areva NC가 수행하고 있다.

사용후핵연료 재처리는 노르망디에 있는 La Hague 시설에서 행해지고 있다. La Hague 시설은 프랑스에서 발생하는 사용후핵연료 뿐만 아니라 해외로부터도 위탁받고 있다. 재처리는 원전에서 발생된 후 4년 동안 수조에서 냉각시킨 사용후핵연료를 대상으로 하고 있다.

원전 운영자인 프랑스전력공사

(EdF)는 매년 발생하는 1,200톤의 사용후핵연료 중에서 850톤을 La Hague 재처리 공장으로 보내고 있다. 나머지는 제4세대 원자로(Generation IV)의 연료로 사용하기 위한 플루토늄을 확보하기 위해 비축해 두고 있다. 매년 850톤의 사용후핵연료를 재처리하여 8.5톤의 플루토늄과 810톤의 우라늄을 회수하고 있다.

플루토늄은 Marcoule 인근에 있는 195t/yr 처리 규모의 Melox 혼합핵연료(MOX) 공장으로 보내고 있다. 매년 약 100톤의 MOX 연료가 생산되어 900MWe급 PWR 원전 20기에 공급되고 있다. 현재 4기가 추가로 MOX 연료 이용을 위한 인허가 절차가 진행되고 있다.

재처리하여 얻은 우라늄은 Pierre-latte에 있는 Comurhex 변환 공장으로 보내어 U₃O₈로 만든 다음 저장 보관하거나 또는 UF₆로 만든 다음 프랑스 내에서 농축하거나 러시아에 있는 Seversk 농축 공장으로 보내어 농축하고 있다. Seversk 농축 공장에서의 농축은 2010년까지 하는 것으로 계약되어 있다.

농축된 우라늄(UF₆)은 Areva NP의 150t/yr 처리 규모의 FBFC Romans 공장으로 보내어 UO₂ 연료로 가공된다. 이렇게 만들어진 핵연료는 1980년대 중반부터 EdF의 900MWe급 Cruas 원전의 연료로 이용되고 있다.

La Hague 재처리 공장은 2006년 말까지 총 24,000톤의 경수로(LWR) 사용후핵연료를 처리한

실적을 갖고 있다. 초기에는 천연 우라늄을 사용하는 가스냉각로(GCR)의 사용후핵연료 5,000톤을 재처리한 경험도 있다.

1997년에 폐쇄된 Marcoule에 있는 UP1 재처리 공장에서도 18,000톤의 GCR 사용후핵연료를 재처리한 경험이 있다.

2008년 말에 Areva와 EdF는 재처리 및 MOX 연료 공급 계약을 새로 체결하여 서비스 공급 기간을 2040년까지 연장하기로 하였다. 이와 관련하여 Areva는 La Hague 재처리 공장의 용량을 2008년 기준보다 3분의 1이 늘어난 1,500t/yr로 확장할 계획이다. 목표는 2015년까지이다.

EdF도 연간 850톤의 사용후핵연료 재처리 양을 2010년부터 연간 1,050톤으로 늘리고, MOX 연료도 현재 연간 100톤에서 연간 120톤으로 늘릴 계획이다.

1990년에 운영을 시작한 La Hague 재처리 시설은 설계 수명이 40년이지만 그 동안 계속적으로 보수 공사를 해온 덕택에 운영기간을 2040년까지로 연장할 수 있을 것으로 Areva는 생각하고 있다.

이 시기는 제4세대 원전(Generation IV)의 운영이 예상되는 시기이기 때문에 Areva는 재처리와 관련된 연구를 다음과 같이 3가지 분야에 초점을 맞추고 있다:

○ 우라늄만을 단독으로 추출하거나 또는 우라늄과 플루토늄을 함께 추출하는(co-extraction) 기술인 COEX 공정을 개발함으로써 현재의 PUREX 공정의 단점으

로 지적되고 있는 핵확산성 측면을 보완

○ DIAMEX 공정을 보완하여 아메리슘(Am)과 퀴륨(Cm) 등 장수명 핵종을 선택적으로 추출하여 우라늄과 함께 제4세대 원전(Generation IV)인 고속로의 연료(blanket fuel)로 사용하는 기술을 개발

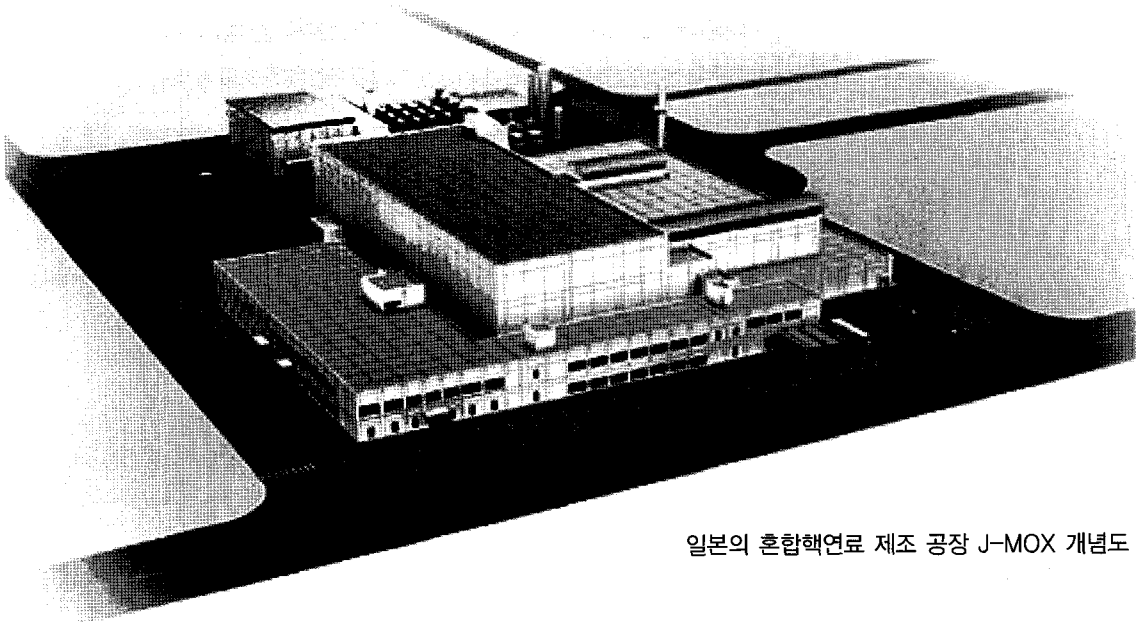
○ 우라늄-플루토늄 및 마이너 액티나이드를 그룹으로 추출하여 고속로의 연료(driver fuel)로 사용하는 GANEX 공정을 장기 기술 개발 과제로 추진

한편 프랑스에서의 방사성폐기물 관리의 1991년에 제정된 폐기물관리법(1991 Waste Management Act, 1996년에 개정)에 의거하여 추진되고 있다. 이 법에 근거하여 국가 방사성폐기물 관리 기관인 ANDRA가 설립되었고, 고준위 폐기물에 대한 연구도 수행되고 있다.

2006년에 ANDRA는 방사성폐기물 관리 계획에 관한 보고서를 작성하여 정부에 제출하였는데, 이 보고서는 「Nuclear Materials and Waste Management Program Act」로 만들어져 상원 및 하원의 전폭적인 지원하에 2006년 6월의 회에서 통과되었다.

이 법은 2006년부터 15년 동안 수행되어야 할 추진 계획을 담고 있다. 이 법은 고준위 및 장수명 폐기물의 관리 방안으로 심지층 처분 방식을 선정하고 있는데, 2015년 처분장 건설 인허가, 2025년 처분장 운영이라는 목표도 설정하고 있다.

이 법은 또한 폐기물의 양과 독



일본의 혼합핵연료 제조 공장 J-MOX 개념도

성을 줄이기 위해 사용후핵연료를 재처리하여 재활용하도록 규정하고 있으며, 장수명 핵종의 소멸 처리(partitioning & transmutation)를 실증하기 위한 원형로급의 제4세대 원자로를 2020년까지 건설할 것도 규정하고 있다.

심지층 처분장의 건설비는 150억 유로로 추정되고 있는데, 총비용의 40%는 건설비, 40%는 100년 동안의 운영비, 그리고 나머지 20%는 세금과 보험료 등 기타 비용이 될 것으로 예상하고 있다. 폐기물 관리 계획은 매 3년마다 개정하여 공개하도록 규정되어 있다.

일본

일본은 2009년 3월 현재 55기의 원전을 운영하면서 전체 전력의 27.5%를 공급하고 있다. 운영 중인 원전의 설비 용량은 49,580MWe로, 세계 3위의 원전 설비 보유국이다. 또 3기가 건설 중에 있고, 10기가 건설 준비중에

있다.

일본은 에너지 안보를 위해 1956년부터 우라늄 가격에 관계 없이 우라늄 이용도를 최대화 한다는 기본 방침하에 사용후핵연료를 재처리하여 잔존 우라늄과 플루토늄을 MOX 연료로 재활용함으로써 우라늄 이용률을 25~30% 높이는 이른바 ‘플루서멀(Plu-thermal)’ 전략을 추진하고 있다.

이러한 전략에 따라 도카이에 파일럿 규모(90t/yr)의 재처리 시설을 1977년부터 2006년까지 운영하여 1,000톤 이상의 사용후핵연료를 재처리한 경험을 쌓았다.

이러한 경험을 바탕으로 로카쇼에 연간 800톤 처리 규모의 상업용 재처리 시설 건설을 추진하여 13년에 걸친 공사 끝에 현재 운영을 앞두고 있다. 공사 후 28개월에 걸쳐 시험 운영을 하고 있으나, 문제점 발생으로 운영이 지연되고 있다. 현재 2010년 10월로 운영 목표를 잡고 있다.

로카쇼 재처리 시설은 프랑스

아레마의 La Hague 재처리 공정을 기본적으로 적용하였다. 그러나 핵확산에 대한 우려를 줄이기 위하여 우라늄과 플루토늄이 50:50으로 섞이도록 하는 변형된 Purex 공정을 채택하였다.

한편 재처리의 경제성 문제가 국가적인 이슈로 떠오르자 2004년 10월에 일본원자력위원회에서 로카쇼 재처리 시설의 건설을 계속 추진해야 할지에 대해 토론과 표결이 이루어졌는데, 표결 결과 30대 2로 계속 추진을 압도적으로 찬성하였다. 로카쇼 재처리 시설의 건설비는 약 2.4조 엔(약 200억 달러)이 소요되는 것으로 추정되고 있다.

2004년에 수행된 정부의 후행 핵연료주기 경제성 평가 결과 향후 60년을 고려할 때 재처리 1.6 엔/kWh, 직접 처분 0.9~1.1 엔/kWh로 직접처분이 유리한 것으로 평가되었다. 원자력 발전 단가로 계산하면 재처리를 하지 않을 경우 4.5~4.7엔/kWh인 반면 재

처리를 할 경우 5.2엔/kWh이 되는 것으로 평가 되었다.

지금까지 일본은 영국의 BNFL (4,200톤)과 프랑스의 AREVA (2,900톤)에 재처리를 위탁해 왔다. 2008년부터 로카쇼 재처리 시설이 가동될 계획이었기 때문에 AREVA와의 계약 기간을 2005년까지로 했다.

일본전기사업자연합회(FEPC)는 9개 회원사들이 ‘플루서멀(Plu-thermal)’ 계획에 따라 2015년부터 16기~18기의 원자로에 MOX 연료를 사용할 계획이다. 이를 위해서는 연간 약 6톤의 플루토늄이 필요하다.

위탁 재처리에서 얻어진 약 40톤의 플루토늄을 이용하여 유럽에서 MOX 연료를 만들었으나 MOX 연료 이용에 대한 지역의 우려로 플루서멀 계획의 이행이 늦어지고 있다.

지금까지 일본은 4차례에 걸쳐 2톤이 넘는 플루토늄을 유럽의 재처리 시설에서 일본으로 들여왔다. 첫 번째는 1992년에 들여온 것으로, FBR 원형로(prototype)인 ‘몬주(Monju)’에 사용하기 위해 플루토늄 산화물 형태로 들어왔다. 그러나 1996년에 발생한 나트륨 누출 사고로 가동이 정지된 상태에 있기 때문에 아직까지 연료 장전이 이루어지지 않고 있다.

두 번째는 1999년에 들여온 것으로, 경수로에 사용하기 위해 MOX 형태로 들어왔다. 이 MOX 연료의 일부는 영국의 BNFL에서 온 것인데, 간사이 전력의 다카하마 원전에 장전할 계획이었으나

품질 관리 데이터에 오류가 있음이 발견되어 2002년에 영국으로 반환되었다.

세 번째는 동경전력(TEPCO)의 가시와자키-가리와 3호기에 장전할 목적으로 BNFL로부터 MOX 형태로 들어왔고, 네 번째는 추부의 하마호카(BWR), 시코쿠의 이카타(PWR), 그리고 큐슈의 겐카이(PWR)에 장전할 목적으로 2009년 5월 프랑스로부터 들어왔다. 곧이어 2009년 10월 초에 겐카이 3호기에 MOX 연료가 장전되었다.

일본은 2008년 말 현재 25.2톤의 플루토늄을 소유하고 있는데, 13.8톤은 프랑스에, 11.4톤은 영국에, 그리고 6.6톤은 일본원자력연구개발기구(JAEA)와 일본원연주식회사(JNFL)가 보유하고 있다.

2005년 4월에 아오모리현은 로카쇼무라 재처리 시설 옆에 MOX 연료 제조 공장(J-MOX plant) 건설을 허락했다. 협정서에는 아오모리현 지사와 로카쇼무라 촌장, 그리고 일본원연주식회사(JNFL) 사장이 서명을 했다.

JNFL은 130t/yr 규모의 J-MOX 공장의 건설 및 운영 허가를 신청하여 2007년 말에 건설에 착수할 계획이었으나, 지진 관련 평가 기준 변경으로 2년이 지연되었다. 운영은 2015년 중반에 할 예정이며, 건설비는 1,900억 엔(약 19억 달러)으로 추정되고 있다.

일단 MOX 연료 이용이 본격화 되면 유럽에 보관되어 있는 플루토늄을 향후 15년에 걸쳐 매년 6톤 정도 사용하고, 로카쇼 재처리

시설에서 나오는 플루토늄도 매년 4톤 정도 사용할 것으로 보인다.

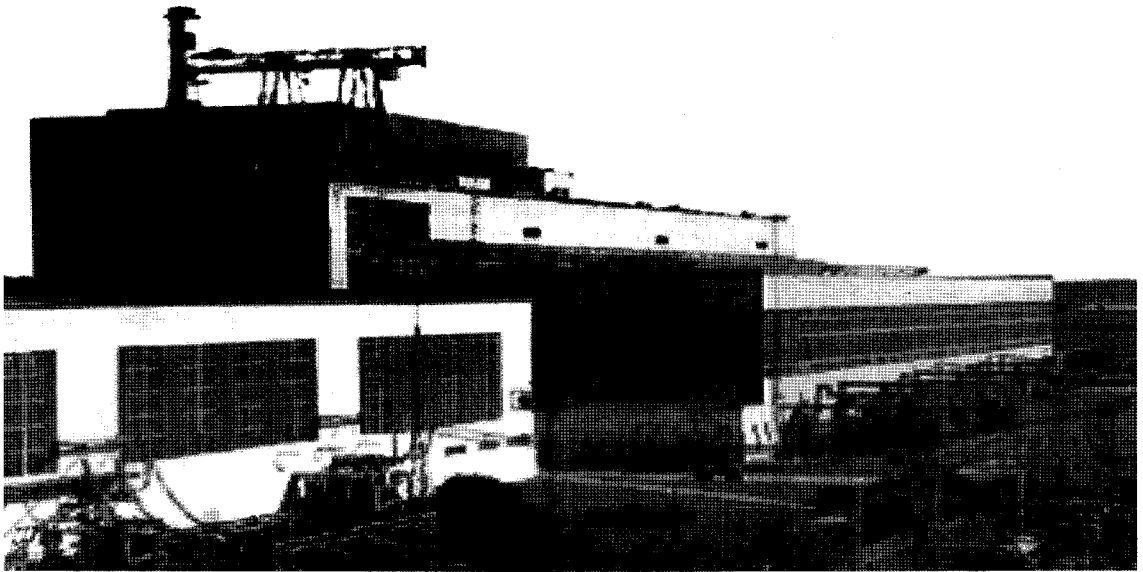
한편 2000년 5월에 일본 의회는 「특정 방사성물질의 최종처분에 관한 법률」을 통과시켰다. 동법은 사용후핵연료 재처리 과정에서 발생하는 유리화 폐기물만을 고준위 폐기물로 규정하고, 심지층 방식으로 처분할 것을 규정하고 있다.

이와 함께 2000년 10월에 ‘방사성폐기물관리기구(Nuclear Waste Management Organization; NUMO)’를 설립하여 고준위 폐기물 관련 부지 선정, 지하 시험 시설(URL) 운영, 처분장 건설 및 운영을 포함한 고준위 폐기물 처분 사업을 수행하도록 했다.

NUMO는 현재 부지 공모를 실시 중인데, 2012년부터 상세 지질 조사를 수행하여 2030년에 최종 부지를 선정할 계획이다. 2035년부터 처분장 운영을 목표로 하고 있으며, 사업비는 3조 엔(약 280억 달러)으로 추정하고 있다. 이 비용은 전력 회사로부터 징수하는 0.2엔/kWh의 기금 적립금으로 충당하고 있다. 이 금액에는 정부가 지방 정부에 주는 지역 지원금은 포함되지 않은 것이다.

고준위 폐기물 관련 기술 개발 업무는 일본원자력연구개발기구(JAEA)가 수행하고 있는데, 지난 20년간 지속적으로 기초 연구를 수행하여 왔다.

2000년부터 홋카이도에 지하 시험 시설(Horonobe Underground Research Center)을 건설 중에 있는데, 지하 500m 깊이의 퇴적암을 대상으로 연구할 계획이다.



러시아의 고속로 BN-600 전경

2005년 11월부터 수직구 굴착 작업이 시작되었다.

또한 JAEA는 기후현의 도키 지역에 '토나지화학센터'를 운영 중에 있는데, 지하 1,000m 깊이의 화성암에 대한 연구를 목적으로 지하 시험 시설(Mizunami Underground Research Laboratory)를 건설 중에 있다.

2005년 10월에 후행 핵연료주기 관련법에 의거하여 설립된 '원자력환경정비촉진·기금관리센터(Radioactive Waste Management Funding and Research Center; RWMC)'가 고준위 폐기물 관리 기금 업무를 담당하고 있다.

러시아

러시아는 현재 27기의 원전을 운영하면서 전체 소비 전력의 16.0%를 원자력 발전으로 공급하고 있다. 원전 설비 용량은 23.19GWe로 세계 4위의 규모이다.

러시아는 가능한 한 사용후핵연료를 재처리하여 회수 우라늄을 재활용하고, 회수 플루토늄도 혼합핵연료(MOX)로 재활용한다는

정책을 추진하고 있다. 그러나 현재 사용후핵연료 재활용은 매우 제한적으로 이루어지고 있다.

RBMK 원자로 및 VVER-1000 원자로에서 발생하는 사용후핵연료는 재처리하지 않고 대부분 원전 부지 내에서 저장 관리하고 있다. 현재는 VVER-440 원자로와 BN-600 고속로, 그리고 잠수함용 원자로에서 발생하는 사용후핵연료만을 재처리하고 있다.

재처리는 우랄 지역 켈라빈스크에서 북서쪽으로 70km 떨어진 Kyshtym 인근의 Ozersk에 있는 Mayak Chemical Combine의 RT-1 공장(Chelyabinsk-65)에서 행해지고 있다. 처리 규모는 400t/yr이다.

RT-1 공장은 1971년에 운영이 시작되었고, Purex 공정을 채택하고 있다. 지금은 해외 위탁 재처리 물량이 줄어들어 100t/yr 규모로 운영되고 있는 것으로 알려지고 있다.

처리 물량의 약 93%는 러시아 및 우크라이나의 VVER-440 원자로에서 발생한 사용후핵연료이고, 3%는 잠수함용 원자로에서

발생된 사용후핵연료, 그리고 나머지 3%는 BN-600 고속로에서 발생한 사용후핵연료이다.

재처리하여 회수된 우라늄은 2.6%로 재농축하여 RBMK 원자로의 연료로 사용되고 있고, 플루토늄은 저장 관리되고 있다. 고준위 폐기물은 유리화하여 저장 관리되고 있다.

현재 RT-1의 처리 용량을 늘리고 VVER-1000 원자로에서 발생하는 사용후핵연료를 처리할 수 있도록 하기 위한 작업이 진행되고 있는데, 2012년부터 500t/yr 규모로 확장 운영하는 계획이 2009년에 정부에 의해 승인되었다. 사용후핵연료 저장 시설의 용량도 현재의 6,000톤에서 9,000톤으로 확장 중에 있다.

시베리아의 Zheleznogorsk (Krasnoyarsk-26)에 RT-2 재처리 시설의 건설을 추진했으나 중단되었다. 그러나 최근 Global Nuclear Infrastructure Initiative 구상의 일환으로 재검토에 들어갔다. 6,000톤 규모의 사용후핵연료 저장 시설이 1985년에 건설되어 VVER-1000 사용후핵연료가 저

장되어 있다. 이 부지에는 군사용 플루토늄 원자로와 지하 재처리 시설도 함께 있다.

Zheleznogorsk에 8,600톤 규모의 사용후핵연료 건식 저장 시설이 2004년부터 건설되고 있는데, 2010년에 완공 예정이다. 사업비는 5억 달러인 것으로 알려지고 있다.

이 저장 시설은 Leningrad 원전 및 Kursk 원전에서 발생하는 사용후핵연료를 저장하기 위한 시설로, 2016년까지 36,000톤 규모로 용량을 확장할 계획이다.

Ozersk의 Mayak에 소규모 MOX 연료 제조 공장이 1993년부터 운영되고 있다. 이 공장은 연간 고속로용 MOX 연료 집합체 40개를 생산하고 있다.

Zheleznogorsk에 60t/yr 규모의 MOX 공장 건설을 계획하고 있고, 시베리아의 Seversk (Tomsk-7)에도 군사용 플루토늄을 이용한 MOX 연료 제조공장의 건설을 계획하고 있다.

한편 러시아에는 동위원소 폐기물 처분장이 지역마다 운영되고 있으나, 원전 운영 과정에서 발생하는 중·저준위 폐기물과 재처리 과정에서 발생하는 고준위 폐기물을 처분하는 곳은 아직 없다.

사용후핵연료를 포함한 고준위 폐기물 처분장 건설을 위해 현재 Kola 반도에 있는 화강암 지역을 대상으로 부지 선정 작업을 진행 중에 있다. 2003년에 모스크바에서 동쪽으로 7,000km 떨어진 Chita 지역의 Krasnokamensk가 고준위 폐기물 처분장 부지로 추

천되었다. 2008년에는 Krasnoyarsk Territory의 Nizhnekansky Rock Mass가 처분장 부지로 추천되었다.

국영 원자력공사인 Rosatom은 2015년부터 지하 시험 시설(URL)을 운영할 계획이다. 처분장 건설은 2025년에 시작하여 2035년부터 운영할 계획이다. 처분장은 20,000톤의 장수명 및 고준위 폐기물을 처분할 수 있는 규모로 건설할 계획이다.

원전 운영 과정에서 발생된 중·저준위 폐기물을 처분하기 위해 2010년에 추진 계획을 수립하고 2020년~2035년 사이에 처분장을 운영할 계획이다.

맺음말

미국은 신형 원자로의 개발 추진과 고준위 폐기물의 처분량을 줄여야 할 필요성에 따라 사용후핵연료 재처리의 필요성이 강조되고 있는 분위기이다.

대표적으로 DOE는 고준위 폐기물 처분 문제의 해결, 플루토늄의 군사적 전용 방지, 사용후핵연료의 재활용, 그리고 차세대 원전의 핵연료주기 개발을 위해 자금 지원폭을 대폭 늘리고 있다.

오바마 정부는 2010 회계연도의 핵연료주기 개발 관련 예산을 2009 회계연도보다 32% 증가한 1억9,200만 달러를 요청한 상태다.

영국의 후행 핵연료주기 사업을 책임지고 있는 NDA도 재처리가 경제성이 있는 옵션이라는 결론의 보고서를 발간했다.

프랑스는 단기적으로 우리나라 플루토늄을 함께 추출하는 기술인 COEX 공정을 개발함으로써 현재의 PUREX 공정의 단점으로 지적되고 있는 핵확산성 측면을 보완하고, 장기적으로는 우리나라 플루토늄 및 마이너 액티나이드를 그룹으로 추출하여 고속로의 연료로 사용하는 공정개발을 추진하고 있다.

일본은 로카쇼무라에 연간 800톤 처리 규모의 상업용 재처리 시설 운영을 앞두고 있고, 러시아는 현재 운영중인 RT-1 재처리 시설의 용량을 확장함과 아울러 두 번째 재처리 시설의 건설을 검토 중에 있다.

이처럼 이들 나라의 후행 핵연료주기 정책 동향의 특징은 원자력 발전 규모의 확대에 따른 사용후핵연료의 발생량 증가 문제를 해결하고, 아울러 우리나라 자원 이용의 효율성을 높이기 위해 재처리 및 재활용을 적극적으로 추진 또는 검토 중에 있다는 것이다.

그러나 현재의 Purex 기술은 핵확산 가능성 및 경제성이 낮다는 문제점이 있어 단기적으로는 이를 일부 보완할 수 있는 기술 개발에 초점을 맞추고 있고, 장기적으로는 장수명 핵종의 소멸 처리와 재활용 등 고속로 개발과 연계된 핵연료주기 개발에 초점을 맞추고 있다. 이와 함께 고준위 폐기물 처분장 건설 사업도 병행하여 추진하고 있다. 