

A Status of Technology and Policy of Nuclear Spent Fuel Treatment in Advanced Nuclear Program Countries and Relevant Research Works in Korea

선진 원자력발전국의 사용후핵연료 처리기술 및 정책현황과 우리나라의 관련연구 현황

Gil-Sung You, Won-Myung Choung, Jeong-Hoe Ku, Il-Je Cho, Dong-Hak Kook,
Kie-Chan Kwon, Won-Kyung Lee, Eun-Pyo Lee, Dong-Hee Hong,
Ji-Sup Yoon and Seong-Won Park
Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeokdaero, Yuseong-gu, Daejeon

yougil@kaeri.re.kr

유길성, 정원명, 구정희, 조일제, 국동학, 권기찬, 이원경,
이은표, 홍동희, 윤지섭, 박성원
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

(Received July 9, 2007/Approved September 3, 2007)

Abstract

Status on the spent nuclear fuel management policy and R&D plan of the major countries is surveyed. Also the prospect of the future R&D plan is suggested. Recently so-called fuel cycle nations, which have the reprocess policy of the spent fuel, announced new spent fuel management policy based on the advanced fuel cycle technology. The policy is focused to transmute highly radioactive material and material having a very long half-life, and to recycle the Pu and U contained in the spent fuel. In this way the radio-toxity of the spent fuel as well as the amount of the high level waste to be eventually disposed can greatly be reduced. Most of countries selected the wet process as a primary option for the treatment of the spent fuel since the advanced wet process, which is based on the existing PUREX process, looks more feasible as compared with the dry process. The wet process, however, is much more sensitive in terms of proliferation-resistance compared with the dry process. The pure Pu can easily be obtained by simply modifying the process. On the other hand the pure Pu can not be extracted in the dry process based on the high temperature molten salt process such as a pyroprocess. Even though the pyroprocess technology is very premature, it has a great merit. Thus it is necessary for Korea to have a long term strategy for pursuing a spent fuel treatment technology with a proliferation resistance and a great merit for the GEN-IV fuel cycles. Pyroprocess is

one of the best candidates to satisfy these purposes.

Keywords : spent fuel, treatment, wet process, dry process, fuel cycle.

요 약

전세계 주요 원자력선진국들의 사용후핵연료 처리에 대한 기술 및 정책현황을 알아보고 향후 우리나라의 연구방향을 제시해 보았다. 재처리 정책을 가진 소위 핵연료주기 국가들은 최근 선진핵연료주기기술에 기초한 새로운 사용후핵연료 관리정책을 발표하였다. 그 정책은 사용후핵연료 내에 함유된 우라늄 또는 초우란 원소들을 재순환하고 고독성의 방사성 물질 및 장반감기를 가진 물질들을 소멸하거나 단반감기 원소로 변환하는데 초점을 맞추고 있다. 이러한 정책은 원자력의 자원 활용성을 높일 뿐만 아니라, 영구 처분할 고준위폐기물의 양을 감소시켜 궁극적으로 원자력의 지속가능성을 높여 준다. PUREX 방법에 기초한 습식처리를 우선순위로 선택한 대부분의 국가들은 이 습식방법이 건식방법에 비해 실용화에 앞서 있음을 그 선택의 근거로 든다. 그러나 습식방법은 건식에 비해 핵확산저항성 측면에서 더욱 민감하다. 왜냐하면 이 습식방법은 약간의 공정수정에 의해 순수 플루토늄을 회수 할 수 있기 때문이다. 반면에 아직까지 실용화 단계 까지는 도달해 있지 않지만 고온 용융염을 사용하는 Pyroprocess와 같은 건식처리 방법은 순수한 플루토늄을 회수 할 수 없어서 핵비확산성 측면에서 유리하며, 제4세대 원자로로 고려되는 고속로의 핵연료주기 등에도 여러 가지 이점을 가지고 있다. 따라서 우리나라의 경우 현재 이 Pyroprocess에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

중심단어 : 사용후핵연료, 처리, 습식공정, 건식공정, 핵연료주기

I. 서 론

핵연료를 원자로 내에서 중성자를 이용해 핵분열시키면 막대한 에너지를 발생시킴과 동시에 새로운 핵분열 물질이 생겨난다. 이런 사용후핵연료를 처리하면 내부에 존재하는 핵분열 물질을 회수할 수 있다. 회수된 핵분열 물질은 다시 원자로에 재순환함으로써 핵연료 물질의 활용률을 획기적으로 높일 수 있다. 또한 최근에는 원자력발전의 최대 걸림돌이라 할 수 있는 방사성폐기물 처분문제를 해결하기 위해 사용후핵연료 처리에 대한 연구도 많이 수행하고 있다. 즉, 사용후핵연료를 처리하여 여기서 회수된 초우란 원소와 같은 핵분열 물질을 연료로 제조하여 기존 원자로 및 앞으로 도입될 제4세대 원자로에 장전하여

에너지 재생산에 이용하는 한편 폐기물 처분장 관리에 가장 큰 영향을 미치는 장수명 핵종의 단수명 핵종으로의 변환 및 처분 폐기물 양의 저감화를 위한 연구들이다. 그러나 한편으로는 이런 연구들이 다루는 사용후핵연료 처리 기술은 군사용 핵무기 제작에도 사용될 가능성이 있으므로 국제적으로 민감한 기술로 분류되며, 핵무기를 보유하지 않은 국가가 이런 기술을 개발할 때에는 국제적으로 핵비확산성을 확인시키기 위해 국제원자력기구로부터 많은 감시 및 규제를 받기도 한다.

사용후핵연료의 처리방법으로는 크게 습식 및 건식방법으로 나눌 수 있는데, 지금까지 원자력 선진국들이 사용해 오고 상업화까지 발전된 방법은 습식 용매추출법인 PUREX¹⁾법이다. 이 PUREX법은 먼저 사

용후핵연료봉을 절단하여 절산용액에 넣어 핵연료만 용해시키고 피복관을 제거한다. 그 후 인산트리부틸(TBP²⁾)의 유기용매와 혼합시키면 우라늄과 플루토늄은 용매 측으로 이동하여 남아있는 핵분열생성물과 분리된다. 또한 여기서 플루토늄의 원자가를 바꾸면 용매와의 친화성이 감소하므로 이 특성을 이용하면 우라늄과 플루토늄도 분리할 수 있다. TBP 외에도 여러 가지 유기용매가 검토되었으나 현재로서는 분리성능, 내방사성, 난연성 등에서 TBP보다 우수한 용매는 없는 것으로 보고되어 있다[1]. 분리된 핵분열생성물은 최종적으로 안정한 유리체로 고화하여 처분하는 것이 현재 보편화된 기술이다. 최근에는 이 유리고화체를 지층 심부에 저장하는 방법을 프랑스, 일본 및 영국 등과 같은 재처리 국가에서 많이 연구하고 있다. 이러한 습식에 비해 건식처리 방법은 고온 공정특성에 따른 취급용기의 부식문제 등의 문제점들로 아직까지 상용화 단계까지 발전 되지는 않았으나, 습식에 비해 여러 가지 종류의 핵연료 처리, 비교적 소규모 시설용적 및 고연소도 핵연료 취급에의 이점 등으로 선진 재처리국가들에서도 현재 많은 연구가 수행되고 있다[21].

한편 21세기 중반에 상용화될 예정으로 알려져 있는 사용후핵연료의 재활용 및 소멸을 위한 제4세대 원자로의 도입을 위해서는 현재보다 진보된 개념의 선진핵연료주기기술의 도입이 필수적이다. 습식처리법을 개선한 최근의 선진습식처리법의 개발은 주로 핵비확산성 측면에서의 연구로서, 사용후핵연료로부터 순수한 플루토늄을 단독으로 회수하지 않고 여러 원소들을 함께 추출하는 기술개발이 진행되고 있다. 즉, 미국의 경우 PUREX를 개선한 UREX+³⁾라는 공정을 개발 중이며, 프랑스의 경우 GANEX⁴⁾, 일본의 경우 NEXT⁵⁾라고 불리는 신습식 공정들을 활발히 개발 중이다. 또한 건식처리 방법에 대한 연구도 활발히 수행 중인데 미국은 원자로 개발 초기인 1960년대부터 고속로를 개발해 왔으며, 이를 위한 핵연료주기기술로 Pyroprocess라 불리는 고온용융염을 사용한 야금법을 개발해 왔다. 최근에는 여기에 전기화학법을 적용한 금속전해, 정련법의 개발을 활발히 수행하고 있다. 21세기에 들어 불기 시작한 원자력 르네상스

및 고속로 개발의 추세에 따라 이런 건식방법을 사용한 선진핵연료주기기술의 연구도 원자력선진국들을 중심으로 연구가 수행되고 있다. 다행히 비교적 근래인 1997년경부터 우리나라도 이 대열에 참여하여 활발하게 Pyroprocess연구를 수행해 오고 있다[2-5].

이 논문에서는 최근 세계 원자력선진국들의 사용후핵연료 처리와 관련된 지금까지의 사업추진과정, 최근의 정책변화 및 기술개발 현황 등을 알아보고 우리나라의 사용후핵연료 처리관련 연구현황 및 앞으로 수행되어야 할 연구방향을 나름대로 분석해 보았다.

II. 세계 원자력선진국들의 사용후핵연료 처리 현황

가. 미국

미국은 1940년대 중반에 세계에서 처음으로 원자로로부터 발생된 사용후핵연료를 재처리하여 여기서 나온 플루토늄을 이용하여 핵무기를 만들었으며, 이를 제2차 세계대전에서 사용한 나라이다. 이러한 사용후핵연료 재처리 기술력을 바탕으로 전쟁 후 제창된 '원자력의 평화적 이용'에 따른 경수로 상용원자로의 개발 및 이를 위한 상용 사용후핵연료 재처리기술의 개발에서도 세계를 주도하였다. 1966년에는 상용화된 경수로핵연료의 민간 재처리 사업을 위하여 NFS⁶⁾사가 'West Valley 재처리시설'을 건설하여 6년간 운전한 경험이 있다. 1970년대에 들어와서는 GE⁷⁾, AGNS⁸⁾ 및 EXXON사에 의하여 보다 새로운 기술을 사용한 대규모 상용 재처리시설 건설이 추진되었다. 그러나 GE사의 'Midwest 재처리시설'은 새로 적용된 신기술의 문제점을 해결하지 못하였으며, 또한 AGNS사의 'Barnwell 재처리

- 1) PUREX - Plutonium and Uranium Recovery by EXtraction,
- 2) TBP - TriButyl Phosphate,
- 3) UREX - URanium EXtraction,
- 4) GANEX - Group ActiNides EXtraction,
- 5) New EXtraction System for TRU Recovery,
- 6) NFS - Nuclear Fuel Services,
- 7) GE - General Electric,
- 8) AGNS - Allied General Nuclear Services,

시설'은 시설 건설이 끝나 시운전 중에 카터 대통령의 핵비확산정책의 발표로 시설의 운전이 중단되었으며, 이후 미국 내 모든 상용 재처리사업이 중단되었다[1]. 따라서 미국은 발전소에 누적되는 사용후핵연료 문제를 해결하기 위하여 1982년 사용후핵연료를 심지층에 직접처분하는 정책을 확정하고 2002년에는 네바다주 유카마운틴을 최종 처분장으로 결정하였다. 이후 현재까지 미국은 사용후핵연료의 직접처분 정책을 고수하고 있으며, 사용후핵연료의 처리기술에 대한 연구를 제외한 모든 사업은 중단되어 결국 재처리 정책을 꾸준히 추진해온 프랑스 및 일본과 같은 나라들에 비해 재처리기술의 상업화에서는 수십년 뒤쳐지는 결과를 낳고 말았다.

아직까지 미국은 상용 원자력발전소로부터 배출된 사용후핵연료를 장기 저장하여 이를 처분장을 활용하여 직접처분하는 정책을 유지하고 있고, 유카마운틴 처분장의 법적 수용치는 민수용 63,000 톤 및 군수용 7,000 톤으로 모두 70,000 톤 정도이며, 2005년 현재 미국 내 사용후핵연료 누적량이 약 55,000 톤에 달해 바로 제2처분장을 확보해야 하는 어려운 과제를 안고 있다. DOE⁹⁾는 제2처분장을 확보하지 않으면서도 근본적으로 사용후핵연료의 관리 문제를 해결할 수 있는 하나의 방안으로 선진핵연료주기기술(AFCI¹⁰⁾, 사용후핵연료의 처리/핵종분리 및 고속로에의 소멸)의 연구개발 프로그램을 수년째 수행해오고 있다. 이 AFCI 프로그램은 단·중기적으로는 우선 시급한 고준위폐기물 처분문제를 해결하기 위하여 사용후핵연료 처리공정으로 UREX+ 기술을 이용하며, 장기적으로는 고속로핵연료 처리에 여러 가지 장점을 가지고 있는 고온용융염을 사용한 선진간식처리기술인 PYROX¹¹⁾ 기술을 이용할 계획으로 현재 ARGONNE 및 INL 국립연구소를 비롯한 여러 연구기관 및 대학 또는 국제공동연구들을 통해 활발한 연구를 수행하고 있다. 미국은 이 기술이 실용화된다면 동일 면적의 처분장에 기존의 직접처분 방식에 비해 약 100배 가까이 고준위폐기물을 처분할 수 있으며, 2100년까지 유카마운틴 처분장 하나로 모든 사용후핵연료 처분문제를 해결할 수 있을 것으로 기대하고 있다[6].

2006년 2월 DOE는 사용후핵연료 문제를 해결하면서 동시에 국제 에너지 문제를 해결할 수 있는 21세기 원자력에너지 이용의 국제적 협력 프로그램인 GNEP¹²⁾ 프로그램을 발표하였다. 이 프로그램의 목표는 원자력의 이용을 확대하여 국제적으로 증가추세에 있는 에너지 수요를 충족하는 한편, 사용후핵연료를 재활용하여 고준위 방사성폐기물의 발생량을 감소시키고 핵확산의 위험을 줄이면서 환경친화적으로 세계 경제에 무한한 에너지를 공급하는 것이다. GNEP 프로그램의 7가지 전략 목표는 다음과 같다. 1) 미국 내 원자력 이용의 확대, 2) 핵확산저항성을 가진 재순환 핵연료주기의 실증, 3) 방사성폐기물 발생의 최소화, 4) 선진소멸로의 개발, 5) 신뢰성 있는 핵연료 공급체계의 구축, 6) 개발도상국을 위한 소형 원자로 개발, 7) 선진 안전초치기술 개발 등이다. 이러한 목표달성을 위한 최초의 연구 일정 계획은 아래 표와 같다[7].

기한	연구 계획
2008	최적화된 시스템 엔지니어링 기술을 확보하기 위한 ASL ¹³⁾ 구축
2011	ESD ¹⁴⁾ (25 톤 처리규모) 시설을 건설하여 운전 개시
2014	ABTR ¹⁵⁾ 을 개발
2016	UREX+와 Pyroprocess 기술을 시험할 수 있는 AFCF ¹⁶⁾ 를 건설하여 운전개시
2023	파일럿 규모의 ABR ¹⁷⁾ 을 건설
2025	상용규모(2,500 톤/년)의 SFTF ¹⁸⁾ 를 건설하여 운전을 시작

그러나 뒤이어 미국의 처분장 문제의 시급성 등으로 GNEP 프로그램에서 추구하던 초기 계획들의 상당부분이 조정되고, 초기 계획의 일정들이 보다 앞당겨져 실행될 수 있도록 변경되었다. 이를 위해 산업체의 적극적 참여를 유도하고 이미 상용화된 기술

9) DOE - Department Of Energy.
 10) AFCI - Advanced Fuel Cycle Initiative.
 11) PYROX - PYRochemical OXidation.
 12) GNEP - Global Nuclear Energy Partnership.
 13) ASL - Advanced Simulation Lab.
 14) ESD - Advanced Engineering Scale Demonstration.
 15) ABTR - Advanced Burner Test Reactor.
 16) AFCF -Advanced Fuel Cycle Facility
 최근 Advanced Fuel Cycle Research Facility로 명칭변경.
 17) ABR - Advanced Burner Reactor,
 최근 Advanced Recycling Reactor로 명칭변경.
 18) SFTF - Spent Fuel Treatment Facility.

도입 및 산업체의 연구개발 초기 참여를 통해 두가지 Track 개념의 새로운 GNEP 프로그램을 발표하였다. 즉, GNEP에서 추구하고 있는 대표적 3개의 시설을 Track 1 및 2로 나누고, Track 1에 해당하는 CFTR¹⁹⁾와 ABR 두개의 시설은 2020년까지 상용기술을 도입, 건설을 추진하여 빠른 시일 내 기술을 실증하며, Track 2로는 비교적 장기적인 선진핵연료주기기술 개발을 위해 AFCF라고 명명된 초우란원소를 이용한 고속로 핵연료 제조 및 재순환을 위한 종합핵연료주기기술개발 시설을 국립 연구소를 중심으로 건설토록 한다는 계획이다[8,9].

나. 프랑스

프랑스는 원자로 개발초기부터 폐연료주기 정책을 펼쳐왔으며, GCR²⁰⁾, FBR²¹⁾, PWR 및 RTR²²⁾과 같은 다양한 원자로로부터 나온 사용후핵연료를 재처리하여 핵연료에 잔존하는 핵분열 물질의 재활용을 추구하여 왔다[10]. 원자력 개발 초기인 1958년에는 군사용 플루토늄 생산로를 개발하고 UP1 재처리시설을 Marcoule에 건설하여 군사용 핵무기를 만들기 위한 재처리를 수행하였다. 1965년부터 프랑스 및 해외로부터 발생된 GCR 상업용 사용후핵연료에 대한 재처리를 시작하였으며, 1976년까지 프랑스 원자력청인 CEA²³⁾가 이 사업을 관장하다가 이후부터 COGEMA사로 그 운영권을 이관한 후, UP1은 1998년 운전을 중지하였다. 프랑스는 UP1에 이어 La Hague 지역에 UP2와 UP3라 불리는 재처리 시설을 건설하였다. UP2는 1966년 GCR 사용후핵연료를 재처리하기 위해 지어졌다. 1976년에는 이 시설에서 경수로 사용후핵연료를 재처리하기 위해 HAO²⁴⁾로 명명된 전처리 시설을 추가로 건설하였으며, UP2-400(연간 400 톤 처리)이라 불리던 이 시설에 1994년에 와서는 더 많은 경수로 사용후핵연료를 처리하기 위해 UP2-800(연 800 톤 처리)이라 불리는 시설로 확장하였다. 이 시설과는 별도로 1990년에는 UP3라 불리는 연 800 톤 처리규모의 재처리 시설을 건설하고 이 시설에서는 외국에서 발생된 사용후핵연료만을 처리하고 있다[10]. 이 UP1 및 UP2 두 시설에서 시설 가동 후 지금까지 처리된

사용후핵연료의 양은 2006년 1월 1일 기준으로 21,600 톤에 달한다[11].

한편 프랑스는 사용후핵연료의 재처리에서 나온 폐기물의 처분을 위해 1991년 말에 「방사성폐기물관리 연구법」을 제정하여 고준위·장수명 핵종 방사성폐기물의 심지층 처분의 사업수행을 방사성폐기물관리청(ANDRA²⁵⁾)이 담당하는 것으로 결정하였다. 이 법에서는 방사성폐기물의 안전한 처분을 위하여 15년간의 연구를 수행하도록 명시하였으며, 연구기간 동안 수행된 주요연구 결과는 다음과 같다. 1) CEA가 수행한 균분리 및 소멸연구는 U, Pu, FP, Am, Cm 균분리에 대한 파일럿 규모 과학적 실증이 필요하며, Miner Actinide들의 연소를 위한 더 많은 연구가 필요하다. 2) ANDRA가 수행한 심지층 처분장에 대한 Bure 지하연구실 시험결과는 점토질 토양이 핵종들의 이동제한에 매우 좋은 특성을 가진 것을 실증하였으며, 핵종이동 연구결과 핵종의 백만년까지의 이동 거동을 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 3) CEA가 수행한 장기 전처리 및 저장관련 연구는 장기간 동안의 폐기물의 저장거동에 대한 모델링 및 거동을 파악하였고, 100년 또는 200년 동안 임시저장이 가능한 것으로 결론을 얻었다[12]. 따라서 이러한 연구결과를 토대로 2006년 4월 6일 프랑스 정부는 2015년까지 처분장 건설목표를 정하고 고준위·장수명 핵종 방사성폐기물에 대한 ‘참조해법’으로서 심지층 처분개념을 확립한다는 내용의 새로운 방사성폐기물관리 법안을 프랑스 의회에 제출하였다. 2006년 4월 12일 프랑스 방사선방호·원자력안전연구소(IRSN²⁶⁾)의 의뢰로 실시된 여론조사에 따르면, 자국의 원자력폐기물에 가장 적합한

19) CFTR - Consolidated Fuel Treatment Center
최근 Nuclear Fuel Recycling Center로 명칭변경.

20) GCR - Gas Cooled Reactor.

21) FBR - Fast Breeder Reactor.

22) RTR - Research & Test Reactor.

23) CEA - Commissariat à l'Énergie Atomique
French Atomic Energy Commission.

24) HAO - High Activity Oxide plant.

25) ANDRA - The French National Agency for Radioactive
Waste Management.

26) IRSN - L'Institut de Radioprotection et de Sûreté
Nucléaire.

방식이 심지층 또는 천층처분(지표처분)인지 여부에 관한 프랑스의 여론이 거의 균등하게 나뉜 것으로 나타났다. 새로 제정된 법은 2006년 6월 15일 국회에서 최종 통과되었으며, 그 내용은 다음과 같다.

1) 새법의 가이드라인으로는 재처리 및 재순환에 의한 폐기물 독성과 양을 감소하며, 재순환될 수 없는 폐기물은 임시지층에 저장한다. 지층에 저장할 수 없는 폐기물을 회수 가능한 심지층에 처분한다. 2) 처분시설 및 연구 추진일정과 목표로는 2015년까지 회수가능한 심지층 처분시설의 인허가를 신청하고, 2025년까지 운영을 할 수 있도록 저장 연구를 수행하며, 2020년에 제4세대 원형로가 운영됨에 따라 여기에 부합한 소멸처리 연구를 수행한다[13,14]. 프랑스는 고속 원형로의 개발에 이어서 2035년경에는 고속로 상용화를 목표로 설정하고 있다. 고속로의 도입 이후에도 당분간은 경수로와 고속로를 병행하여 활용하나 2070~80년경에는 경수로를 고속로로 모두 교체하는 계획을 가지고 있다[15].

한편 사용후핵연료의 처리에 대한 기술적 측면으로 보면 프랑스의 경우 지금까지의 습식기술에 대한 대규모 투자 및 세계 최고의 습식기술 보유국이란 강점 때문에 건식처리 기술에 대한 투자는 극히 제한적이었으나, 최근들어 장수명 핵종의 소멸처리 및 제4세대 원자력과 미래 선진핵연료주기기술의 확보를 위해 유럽의 여러 나라와 활발한 공동연구를 수행 중에 있다[13].

다. 일본

일본은 사용후핵연료에 대한 재순환연료주기 정책을 고수하고 있으며 경수로 사용후핵연료에 대해서는 지금까지 영국 및 프랑스에 약 7,000 톤을 위탁 재처리한 바 있다. 또한 1977년부터 가동에 들어간 연간 약 100 톤처리규모의 도카이 재처리시설에서 약 1,000 톤의 사용후핵연료를 처리하였다[1]. 이외에도 연간 800 톤 규모의 로카쇼무라 재처리시설을 건설하여 2006년부터 방사성 시험을 거쳐 2008년부터는 시설의 정상 운영을 계획하고 있다. 이와 관련하여 일본전기사업연합회는 2006년 1월 6일 로카쇼무라의 사용후핵연료 재처리공장 가동에 따라

회수되는 플루토늄의 이용계획을 발표했다. 9개 전력회사와 일본원자력발전 등 각 발전소에서 사용할 연간 플루토늄 이용 계획량은 5.5~6.5 톤으로 이를 MOX²⁷⁾ 핵연료로 제작하여 경수로에 장전, 연소시킬 계획이다. 로카쇼무라에 건설할 MOX 핵연료 가공공장은 2012년 5월경에 운전을 개시할 예정이며, 각 발전소에서 플루토늄의 이용 시기도 2012년 이후가 될 예정이다. 그러나 일본 내에서 발생하는 사용후핵연료의 양은 1998년 연간 약 900 톤에서 2010년 약 1,400 톤, 2020년에는 약 1,900 톤에 이를 전망이므로 재처리할 때까지 중간저장하기 위하여 원전부지 내의 사용후핵연료 저장시설의 확장 및 원전부지 외 사용후핵연료 중간저장시설의 건설을 추진하고 있다. 이와 같이 일본에서의 사용후핵연료의 관리는 재처리와 직접처분 등 4개의 시나리오를 설정 장기계획으로 추진하고 있으며, 특히 사용후핵연료의 재처리 계획으로는 핵연료자원의 합리적이고 효율적인 이용을 위해 안전성, 핵확산성, 환경친화성을 확보하고 경제성을 고려하여 회수된 플루토늄, 우라늄을 효율적으로 이용하는 것을 그 기본방안으로 하고 있다. 또한 중간저장 중인 사용후핵연료는 일본의 재처리 규모 범위 내에서 처리하고, 재처리시설의 처리규모 초과량과 MOX 사용후핵연료를 포함한 앞으로 발생될 사용후핵연료는 중간저장을 기본으로 하되, 로카쇼무라 재처리시설의 운전실적, 고속증식로 핵연료주기기술, 재처리 연구개발 추진상황, 핵비확산 국제동향 등을 고려하여 2010년경 재검토할 예정으로 있다[1].

고속로 핵연료의 경우 핵연료사이클개발기구가 중심이 되어 구 일본원자력연구소, 관련 산업체 및 여러 대학들의 협력 하에 1970년경부터 PUREX법에 의한 고속로핵연료 처리기술 개발을 시작했다. 핵연료사이클개발기구 도카이 사업소에는 기초 프로세스 화학·추출 Flow Sheet 연구를 위한 핫셀인 CPF²⁸⁾(1982~) 및 공학기기 개발을 위한 Cold 시험 시설인 EDF²⁹⁾(1982년~)가 있다.

27) MOX - Mixed OXide Fuel.

28) CPF - Chemical Processing Facility.

29) EDF - Engineering Demonstration Facility.

한편 전력중앙연구소(CRIEPI³⁰)가 1988년부터 미국의 IFR³¹) 프로그램에 참여하면서 Pyrochemical Process 연구를 본격적으로 착수하였다. 1990년대 초 CRIEPI는 금속핵연료주기에 대한 기초연구는 물론 습식공정에서 발생된 고준위폐기물로부터 TRU³²) 원소 회수를 위한 Pyrochemical Process를 독자적으로 개발하였다. IFR 프로그램이 중단된 이후 일본은 IFR 공동연구를 통해 확보된 연구경험을 토대로 Pyrochemical Process 독자개발을 모색하고, CRIEPI, JAERI³³) 및 대학을 중심으로 Pyrochemical 핵심기술 개발에 주력하였다[1].

일본원자력연구개발기구와 전력중앙연구소 및 관련 제작업체들이 1999년 7월부터 안전성 확보를 전제로 한 경수로 핵연료주기 및 기존 전원공급 설비와 비교하여 경제성이 확보되는 고속증식로 사이클 실용화 시설을 구축하고, 장래 주요 에너지 공급원으로 사용하기 위한 기술체계 확립을 목적으로 '고속증식로 사이클 실용화전략 조사연구'를 수행하고 있다. 2006년 3월에 발표한 2단계 연구(2001~2005년) 조사보고서에서는 1단계 연구(1999~2000년)에서 도출한 고속증식로, 재처리 및 연료제조법의 각 후보 개념들에 대한 실현성과 관계되는 요소시험 연구와 분석을 통한 기술적 타당성을 검토하고, 그 성과에 근거한 시스템 설계를 수행하여 각 개념에 포함된 기능들을 극대화하고, 실현 가능한 고속증식로 시스템 및 핵연료 사이클 시스템의 개념을 구축하였다. 보고서에 따르면 2025년경에 원형로급 고속로 개발 및 관련 선진핵연료주기 시스템을 완성할 계획이다. 여기에서는 주개념으로 고속로인 액체금속로와 습식재처리를 통한 산화물핵연료, 그리고 보완개념으로는 액체금속로와 건식처리를 통한 금속 핵연료를 선정한 바 있다. 현재 진행 중인 제 3단계(2006~2010)에서는 공학실증시험 및 개념설계, 그리고 제 4단계(2011~2015)에서는 가장 유망한 개념에 대한 상세설계를 수행하여 2015년경 경쟁력 있는 고속로 핵연료주기기술을 제시할 계획이다[16].

일본의 경제산업성 산하 원자력부회는 2006년 8월 8일 '원자력입국계획' 보고서를 발표하였다. 이

계획은 2005년 10월 결정된 '원자력정책대강'의 기본 방침을 실현하기 위한 구체적인 정책이다. 원자력정책대강은 일본 원자력위원회가 책정한 것으로 주요 기본 목표로는 1) 2030년 이후에도 전력발전량의 30-40%를 원자력으로 충당하며, 2) 핵연료주기의 착실한 추진, 3) 고속증식로의 2050년 상용화 실현 등이다. 이 '원자력입국계획'에서는 다음의 5가지 기본 방침을 제시하였다. 1) 중장기적으로 확고한 국가전략과 정책체제를 확립, 2) 각각의 추진 전략과 시기에 대해서는 국제정세와 동향을 고려하여 전략적 유연성을 유지, 3) 국가, 전기사업자 및 제조업체간 건설적인 협력관계를 강화하고 이를 위해 긴밀한 대화와 비전을 공유하며, 먼저 국가가 방향을 제시하는 최초 조치를 취함, 4) 국가전략과 관련한 개별 지역의 시책을 중시함, 5) 공개적이고 공정한 논의를 통하여 정책을 결정하여 정책의 안전성을 확보함 등이다[17].

라. 러시아

구소련은 1948년부터 1964년에 걸쳐 군사용 플루토늄 생산로의 조사후핵연료로부터 플루토늄을 분리하기 위한 재처리 공장을 러시아 내의 첼리아빈스크-40, 톱스크-7, 크라스노야스크-26의 3지역에 건설하였다. 구소련은 첼리아빈스크-40의 군사용 재처리공장을 상업용 재처리공장인 RT-1으로 개조하고 1977년부터 자국 및 동유럽 제국의 불가리아, 체코 슬로바키아, 핀란드, 헝가리, 구동독 등에서 운전 중인 VVER³⁴)-440형 원자로로부터 인출한 사용후핵연료의 재처리를 수행한 바 있다. 1977년부터 1,000 MWe급 원자로 VVER-1000의 사용후핵연료를 재처리하기 위해 연간 처리능력 1,500 톤의 RT-2의 건설을 개시하였다. 그러나 소련 붕괴 후 경제위기의 발생에 의한 원자력관련 예산삭감 때문에 40% 정도

30) CRIEPI - Central Research Institute of Electric Power Industry.

31) IFR - Integral Fast Reactor.

32) TRU - TRansUranic.

33) JAERI - Japan Atomic Energy Research Institute
[최근 JAEA(Japan Atomic Energy Agency)로 병합됨].

34) VVER - Vodno Vodyanoi Energetichesky Reactor.

의 공사단계에서 RT-2 건설을 중단하였다. 이후 러시아는 RT-1 사용후핵연료 재처리공장의 현대화작업을 통하여 VVER-1000에서 발생한 사용후핵연료를 재처리할 수 있도록 사업을 진행 중이다. RT-1 공장은 현재 원자력잠수함 및 기타 민간·군용 선박과 VVER-440, BN-600 등의 원자로에서 발생한 사용후핵연료를 처리할 수 있는 러시아 유일의 처리시설이다[1].

이러한 습식처리와 거의 병행하여 러시아는 사용후핵연료의 건식처리기술 연구개발도 추진하여 왔으며 1960년대 초반 러시아 RIAR³⁵⁾ 연구소에 고속로 시험로인 BOR-60 건설계획이 확정되면서 이의 핵연료주기를 뒷받침하기 위한 독자적인 Pyroprocess 연구개발을 본격적으로 착수하였다. 1978년에는 VVER 사용후핵연료로부터 플루토늄을 회수하여 고속로에 재순환하는 방침을 확정하고, MOX 핵연료 제조를 위한 DDP³⁶⁾ 공정을 개발하고 ERC³⁷⁾ 시설에서 VIBROPAC이라 불리는 진동 충전법에 의한 핵연료 제조 공정을 개발하여 BN-600용 고속로핵연료의 집합체를 최초로 제조하였다. 1990년대에 공학규모 실증시험을 완료하였으며, 현재는 BOR-60 고속로에 필요한 핵연료 전량을 DDP 공정으로 제조하여 공급하고 있다[1]. 러시아는 BN-600이 노후화됨에 따라 이 발전소를 발전용으로 사용하고, 사용후핵연료의 MA³⁸⁾의 소멸과 여러 가지 핵연료주기 선택사항들을 시험해 볼 수 있는 더 큰 규모의 고속증식로인 BN-800을 2012년까지 건설할 예정이다 있다.

21세기에 들어서면서 러시아는 원자력사업 추진에 대한 21세기 전반기 계획을 발표하였다. 이 계획에 따르면 2010년까지 RT-1 시설 재건설 완공, RT-2의 사용후 핵연료 저장 시설 확충이 포함되고 2030까지의 장기전망에는 대용량 원자로를 위한 사용후 핵연료 재처리 시설의 개발, 고유안전성 고속로의 첫 산업 원형로의 개발·건설 및 시운전, 방사성 폐기물의 방사선 세기 증가(radiation-equivalent) 처분 및 비확산 체제의 기술적 지원과 관련한 첫 재순환핵연료 주기 시설의 개발과 건설 등이 포함되어 있다[18].

2006년 1월 25일에는 러시아 페테스부르크에서 개최된 유라시아경제공동체 정상회의에서 푸틴 대통령이 '국제 핵연료주기 서비스센터'를 제안하였다. 이는 국제 핵비확산체제 내에서 IAEA 감독아래 공동체 회원국들에게 비차별적으로 농축을 포함한 핵연료주기서비스를 제공하며 국제 인프라를 위해 먼저 원형시설을 유라시아경제공동체 차원에서의 설립이 필요함을 강조하였다[19].

마. 영국

영국도 초기 재처리는 군사용 플루토늄의 생산을 목적으로 시작하였다. Windscale 제1시설은 플루토늄 생산로의 핵연료를 재처리하기 위해 건설되었으며, 1952년부터 운전을 시작하였으나 안전문제로 1964년에 운전을 정지하였다. 1955년 영국의 원자력발전이 가스냉각로인 마그녹스로로 확정됨에 따라 이에 상응하는 Windscale 제2시설의 신설이 필요하게 되었다. 마그네슘 합금인 마그녹스 핵연료의 피복은 수중에서의 부식문제 때문에 조기에 재처리가 수행되어야 한다. 처리능력이 연 1,500 톤인 제2 시설은 1964년부터 가동을 시작 했으며 그 후 많은 개량과 보완작업을 거친바 있다. 저농축우라늄 산화물핵연료를 사용하는 개량형 가스냉각로(AGR³⁹⁾)의 출현으로 산화물핵연료에 대한 재처리가 필요하게 되어 제1시설 건물을 이용하여 전처리시설을 신설하고 기존시설을 개조하여 제1사이클 추출 처리를 한 후 제2시설에서 나머지 사이클의 재처리 작업을 수행하였다. 경수로 산화물핵연료 재처리시설인 THORP⁴⁰⁾는 1976년에 정부에 건설신청을 하였으며, 처리능력은 연 1,200 톤이다. 1983년부터 사용후핵연료 수납 및 저장시설의 건설이 개시되어 1992년 건설을 종료하였으며, 1994년 3월 최초의 사용후핵연료가 전단되고 1995년 1월에는 추출공정에 용해액이 공급된 바 있다. 이 시설은 1997년 8

35) RIAR - Research Institute of Atomic Reactor.

36) DDP - Dimitrovgrad Dry Process.

37) ERC - Experimental Research Complex.

38) MA - Minor Actinide.

39) AGR - Advanced Gas-cooled Reactor.

40) THORP - THERmal Oxide Reprocessing Plant.

월에 정부로부터 공식적으로 운영인허가를 받았다 [1].

핵연료주기기술에 대한 연구개발은 원자력개발의 초기부터 UKAEA⁴¹⁾가 군사 및 평화적 이용 전 분야를 총괄하고 계획, 연구개발, 시설의 건설 및 운전 등을 수행하여 왔으며, 1971년 핵연료분야를 분리하여 BNFL⁴²⁾을 창설하였다. BNFL은 Calder Hall, Sellafield, Springfield, Capenhurst 및 Risley에서 각각 원자력발전, 재처리, 핵연료가공, 농축, 기술부문을 운영하고 있으며 재처리기술개발은 고속로관련 부문을 제외하고는 대부분을 여기에서 분담하고 있다. UKAEA는 1990년 4월부터 AEA Technology로 개편되어 보다 채산성을 중요시 하는 기술개발사업체로 운영되었다. 1998년 6월에는 경제성을 이유로 UKAEA의 Dounreay 재처리시설은 폐쇄되었다[1].

2006년 7월 무역산업부 장관이 영국의회에 보고한 '영국의 에너지 검토보고서 2006'에서는 원자력과 관련하여 2003년 에너지백서에서 제시한 목표에 대한 진전사항을 점검하고 보다 구체적인 실행방안을 제시한 바 있다. 주요내용으로는 1) 에너지 공급안보와 기후변화 역제가 영국이 직면하고 있는 에너지 문제의 핵심이며, 2) 이를 해결하기 위해서는 신재생에너지 개발 및 에너지효율 개선과 아울러 원자력 활용 등 균형 잡힌 접근법이 필요하고, 3) 원자력은 에너지안보와 지구 기후변화를 방지하는 데 상당한 기여를 할 수 있고, 4) 신규원전의 건설은 민간사업자가 결정할 사안이지만 원전 건설에 장애가 될 수 있는 요인을 검토, 개선하는 것은 정부의 역할이며, 5) 정부는 이를 위한 다양한 노력을 진행 중이며 2006년 말에 발간예정인 에너지백서에서 보다 구체적인 방안이 제시될 것 등이다. 또한 효과적인 원전해체를 위해 NDA⁴³⁾가 국가전략을 수립하고 있으며 고준위폐기물 관리방안을 검토하기 위해 2003년에 CoRWM⁴⁴⁾가 설립되었다. CoRWM의 중간보고에 따르면 심지층 처분이 현존하는 최선의 방안이며 이를 위한 중간저장이 필요하고 최신 원전은 과거와 비교하여 발생폐기물의 양이 현저하게 감소한다는 것 등이다[20]. 따라서 원자력 산업전반이 침체한 영

국의 경우 최근 정부차원의 원자력 사업재개를 위한 노력이 최근에 와서야 가시화 되고 있는 반면 사용후핵연료의 재처리 확대 등과 같은 구체적인 움직임은 아직까지 보이고 있지 않은 실정이다.

한편 기술적인 측면으로의 여러 가지 사용후핵연료 처리 방법에 대한 연구도 습, 건식 방법 공히 아직까지는 특별한 투자가 이루어지지 않고 있다.

Ⅲ. 우리나라의 사용후핵연료 처리관련 연구 현황 및 종합분석

국제 핵비확산정책 환경 하에서 사용후핵연료에 대한 처리연구는 1990년대 중반까지만 해도 언급조차 하기 힘든 상황이었지만 사용후핵연료의 관리문제에 대한 국제적 관심 및 환경변화로 우리나라도 1997년부터 원자력중장기 연구를 통해 건식공정인 Pyroprocess의 요소기술이라 할 수 있는 금속전환 기술 및 장수명핵종 소멸처리 기술개발이 착수되었다. 원자력중장기사업 2단계(2001~2003년) 초기인 2001년 7월에 발표된 제2차 원자력진흥종합계획에 따라 한국원자력연구원을 중심으로 우리나라 후행 핵연료주기기술의 하나로 경제성, 안전성 및 핵비확산성이 뛰어난 Pyroprocess 공정기술을 개발해 오고 있다. 즉, 사용후핵연료를 고온 용융염 상에서 금속전환하여 핵연료의 부피, 발열량 및 방사선의 세기를 1/4 이하로 감축할 수 있는 사용후핵연료 차세대관리 종합공정(ACP⁴⁵⁾)을 개발하고 있으며 이 공정은 전체 Pyroprocess 공정의 전처리 공정에 해당한다. 또한 이 금속전환 공정개발과 병행하여 1997년부터 Pyroprocess의 후속공정에 해당하는 장수명핵종 소멸처리 기술로 전해정련 및 폐기물 처리 공정 연구도 착수되었다. 현재까지 금속전환의 경우 20 kgU/batch 규모의 차세대관리 종합공정 실증시설(ACPF⁴⁶⁾)을 개발하였고, 전해정련 공정의

41) UKAEA- United Kingdom Atomic Energy Authority.

42) BNFL - British Nuclear Fuels.

43) NDA - Nuclear Decommissioning Authority.

44) CoRWM - Committee on Radioactive Waste Management.

45) ACP - Advanced spent fuel Conditioning Process.

46) ACPF - ACP Facility.

경우 1 kgU/batch 처리용 장치도 개발하였다. 전해 정련 이외에도 염을 증발시키는 Cathode Process, 사용후 용융염내 악티늄 원소를 회수하는 Electrolysis 기술, TRU 회수를 목적으로 하는 Cd 음극 및 개량형 고체음극 기술 등을 개발하고 있다. ACPF 핫셀개발의 경우 2003년에 시설의 상세설계를 완료하고, 2004년에 정부로부터 건설인허가를 받아, 2005년에는 시설을 완공하고 시설의 각 분야별 설계 성능시험을 수행하였으며, 2005년 11월 4일 정부로부터 시설의 정식 운영허가를 받았다. 현재 천연 우라늄 및 모의 사용후핵연료를 사용한 비방사성 시험을 수행 중에 있으며, 이러한 시험을 바탕으로 최적의 운전 조건을 찾고, 신뢰성과 안전성의 향상을 위해 지속적인 보완작업을 수행하고 있다 [21]. 핵물질 계량관리 분야에 있어서는 고온 용융염 전해환원공정의 실험실 규모 실증시설인 ACPF의 핵물질 계량을 위해 비과과 중성자 측정장치 (ASNC⁴⁷⁾)를 개발하여 현재 사용후핵연료를 사용한 성능평가 작업을 수행 중에 있다. 이 장치는 세계 최초로 Pyroprocess 공정에 Cm-balance 기법을 적용한 계량관리 장치로서 한-미-IAEA 3자간 기술검토회의를 통해 장비의 신뢰성을 검증하고 있다.

지금까지 살펴본 원자력선진국 및 우리나라의 사용후핵연료 처리관련 현황을 종합적으로 분석해보면 다음과 같다. 최근 대두되고 있는 전 지구적 에너지 및 환경문제, 특히 화석연료의 사용으로 인한 지구 온난화 문제 등으로 원자력 에너지에 대한 국제적 관심이 점차 높아가고 있으며, 따라서 원자력의 르네상스 시대에 진입한 것을 부정하는 사람은 아무도 없다. 그러나 현재와 같은 원자력 발전체계에서는 핵연료 사용의 효율성 및 사용후핵연료의 관리 문제가 원자력의 지속적인 발전 가능성에 가장 큰 장애물이다. 현재 이러한 장애물을 제거하기 위한 연구가 세계 원자력발전선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있으며, 그 해결책의 하나로 원자력발전소에서 타고 나온 사용후핵연료를 처리하여 사용후핵연료 내에 잔존하는 핵연료 물질들을 열중성자로 및 고속로를 이용해 다시 재활용하고, 또한 장반감

기며 독성이 강한 핵종을 고속로에서 태워 단반감기 핵종으로 변환하고 열발생이 많은 단주기 핵종을 별도 보관/관리함으로써 고준위 발생 폐기물의 양을 최대한 줄여 방사성폐기물 처분장의 활용도를 획기적으로 높일 수 있는 연구 등이 진행되고 있다.

앞서 원자력선진국별로 살펴본 사용후핵연료 처리 현황에서 보듯이 최근 원자력선진국들은 국가에너지 안보 및 환경문제의 궁극적 해결방안의 하나로 지속 가능한 원자력이용의 확대 및 보급을 정책적으로 지지하고 있으며, 이를 위한 기존 사용후핵연료 처리기술에 대한 보다 환경친화적이며 핵확산저항성이 뛰어난 기술의 개발 및 장기적으로는 고속로 핵연료주기에 적합한 선진핵연료주기기술의 개발을 지향해오고 있다.

우리나라는 1978년 고리1호기가 가동된 이후 현재 20기에 달하는 원전이 가동 중에 있으며 국내전력 공급의 약 40%를 원자력이 담당하고 있다. 현재와 같은 고유가 시대에 원자력은 준 국산 에너지로서 안정적이고 경제적인 에너지 공급과 국가 산업 경쟁력강화에 크게 기여하고 있다. 국내에서 원전 가동에 따라 발생하는 사용후핵연료는 연간 700 톤 정도가 방출되고 있으며 지금까지의 총 발생량은 2006년 12월 기준으로 8,671 톤에 달하고 있다. 또한 원전의 지속적인 이용에 따라 2010년에는 11,000 톤 2040년에는 약 34,000 톤에 달할 것으로 전망하고 있다[22].

한편 원전의 지속적인 가동을 위해서는 사용후핵연료에 대한 관리 문제가 국가 차원에서 해결하여야 하는 선결과제로 대두되고 있는 실정이다. 프랑스, 일본 및 영국 등 일부국가에서는 사용후핵연료의 재처리와 재이용이 추진되고 있고, 우리나라와 미국 등 대부분의 국가에서는 원전부지 등에서의 임시 저장 등 국가 상황에 맞게 중·장기적인 해결방안을 모색하고 있다.

따라서 에너지자원이 절대적으로 부족한 우리나라의 입장으로는 지속가능한 원자력발전을 통한 부족 에너지 보완 및 국가에너지 안보를 확보하는 계획을 적극 추진하여야 할 것으로 판단된다. 원자력발전의 지속가능성과 원자력의 최대 걸림돌인 사용

47) ASNC - ACP Safeguards Neutron Counter.

후핵연료의 관리 문제를 해결하고 세계 6위 원자력 발전량을 가진 국가의 위상에 걸맞는 명실상부한 원자력발전국이 되기 위해서는 핵투명성이 확보된 선진사용후핵연료처리기술의 확보는 필수적이라 할 수 있다.

IV. 결 론

이 논문에서는 전세계 원자력선진국의 사용후핵연료 처리에 대한 현황을 알아보고 이에 대한 우리나라의 향후 대처방안도 나름대로 분석해 보았다. 현 단계에서 모두가 인지하고 있는 원자력의 확대 필요성 또는 원자력 르네상스 시대는 이에 맞는 선진핵연료주기기술의 개발을 통해서만 가능하다. 습식방법인 PUREX 공법을 통한 사용후핵연료의 처리 기술은 우리나라가 처한 입장 및 국제환경하에서는 상당히 접근하기 어려운 기술의 하나이다. 그러나 Pyroprocess와 같은 건식 사용후핵연료 처리방법의 경우 비록 그 상업화 가능성에 대한 확증은 아직까지 검증되어 있지 않지만 습식처리법에 비해 핵확산 저항성이 뛰어나고 같은 처리능력의 습식방법에 비해 상당히 축약된 시설 건설이 가능하므로 우리나라와 같이 좁은 국토를 가진 나라의 경우 가장 적합한 기술이라 할 수 있다. 선진 원자력발전국들은 이미 대규모 자금이 투입된 습식기술을 선호할 수 밖에 없는 환경이지만 한편으로는 미래 원자력시스템에 적합한 건식처리 기술개발에도 많은 투자를 아끼지 않고 있다. 비교적 최근에 기술개발을 시작한 우리나라의 경우 건식공정기술의 개발에 집중적 투자만 이루어진다면 중장기 선진핵연료주기의 세계적인 선점이 가능할 것으로 보며, 향후 제4세대 원자로가 적용되는 시점에서는 국내의 원천기술 확보 뿐 만 아니라 수출을 통한 대규모 외화 획득도 가능할 것으로 생각된다.

참고문헌

[1] JST, '일본원자력백과사전', 원자력지식정보관 문국(www.atomic.or.kr), 2007.

[2] 박성원 등, '사용후핵연료 차세대관리 공정 개발', KAERI/RR-2427/2003, 2004.

[3] 유길성 등, '차세대관리 종합공정 실증시설 개발', KAERI/RR-2431/2003, 2004.

[4] 윤지섭 등, '사용후핵연료 원격취급기술 개발', KAERI/RR-2425/2003, 2004.

[5] 김호동 등, '사용후핵연료 특성계량화 기술개발', KAERI/RR-2432/2003, 2004.

[6] US DOE, 'AFCI Program Plan', May 2005.

[7] US DOE, www.gnep.energy.gov, GNEP Program Homepage, 2007.

[8] Office of Nuclear Energy, US DOE, 'Global Nuclear Energy Partnership Strategic Plan', GNEP-167312, Rev. 0, Jan. 2007.

[9] Paul Lisowski, 'The Global Nuclear Energy Partnership Program Overview/University Programs', Hilton Hotel, Gaithersburg, 20 Mar. 2007.

[10] IAEA, 'Status and Trends in Spent Fuel Reprocessing', IAEA-TECDOC-1467, Sept. 2005.

[11] JP Dalcorsio, 'Advances in Spent Fuel Management around the World', KAIF-FAF Seminar, Dec. 2006.

[12] Law No. 91-1381 of December 30, 1991 on Radioactive Waste Management Research, NOR: INDX 9100071 LA.

[13] 유길성 등, '프랑스의 사용후핵연료 처리시설 현황', 추계방사성폐기물학회, Nov. 2006.

[14] SENAT, 'The 2006 Programme Act on the Sustainable Management of Radioactive Materials and Wastes', 15 June 2006.

[15] Denis Acker, 'Advanced Technologies for Sustainable Development of Future Nuclear Energy CEA Proposals', KAIF-FAF Seminar, 12 Dec. 2006.

[16] Japan Atomic Energy Agency and The Japan Atomic Power Company, 'Phase II Final Report of Feasibility Study on Commercialized Fast

Reactor Cycle Systems', Mar. 2006.

- [17] 양명호, '일본의 원자력입국계획 발표와 시사점', 31 Aug. 2006.
- [18] 러시아 연방 원자력부(이은우 번역), '21세기 전반기 러시아의 원자력개발 전략', May 2000.
- [19] 양명호, '유라시아경제공동체 정상회담에서의 러시아 푸틴 대통령의 국제핵연료주기 서비스 센터 제안 내용과 시사점', 27 Feb. 2006.
- [20] 무역산업부, '영국의 에너지 검토보고서 2006', July 2006.
- [21] Gil-Sung You et al., 'Pyroprocess Facilities for a Used Nuclear Fuel Treatment', KNS autumn conference, Nov. 2006.
- [22] 원자력산업회의, '2006 원자력연감', 2007.