

사용후핵연료 관리 현안 및 정책 제언

Spent Nuclear Fuel Management in South Korea: Current Status and the Way Forward

황용수 · 장선영 · 한재준[†]

Yongsoo Hwang · Sunyoung Chang · Jae-Jun Han[†]

한국원자력통제기술원 정책연구센터

Center for Nuclear Strategy and Policy, Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control

(Received April 14, 2015; Revised May 22, 2015; Accepted May 29, 2015)

Abstract : This paper presents future directions for spent nuclear fuel and high-level radioactive waste management. The successes and failures of siting nuclear waste repository experienced by the United States and other countries are reviewed with the current policy stance. Further, the needs for establishing management policy, considering the high-level radioactive waste produced by the dismantlement, nuclear security concerns, and cost-effectiveness analysis for the total nuclear fuel cycle, are emphasised. Technical discussions are organised into three main topics: interim storage, permanent disposal, and reprocessing. Licensing regimes are also investigated to suggest strategic plans for research and development programmes in the Republic of Korea.

Key Words : Spent Nuclear Fuel, High-Level Radioactive Waste, Nuclear Waste Policy, Waste Management

요약 : 본 논문은 국내·외 사용후핵연료 및 방사성폐기물 관리 현안 분석을 바탕으로 향후 나아갈 방향을 제시한다. 원자력 발전을 앞서 이용해 온 미국 사례를 중심으로 다양한 국가들의 처분장 확보 및 실패 사례와 최근의 관리 정책 기조를 정리하였다. 아울러, 원전 해체에 따른 고선량 방사성폐기물, 핵안보 사안 그리고 핵연료 전주기 관점에서 평가한 경제성 기반 정책 수립의 필요성을 논하였다. 사용후핵연료 및 방사성폐기물 관리의 핵심 사안을 세부적으로 중간저장, 영구처분 그리고 재처리로 분류하고 기술 검토와 인허가 체제 구축 및 연구 추진 방향성에 대한 정책 제언을 담았다.

주제어 : 사용후핵연료, 고준위폐기물, 핵폐기물 정책, 폐기물 관리

1. 서론

미국은 1982년 핵폐기물정책법(Nuclear Waste Policy Act, NWPA)¹⁾ 및 1987년 개정안²⁾에 따라 단일 후보지를 사용후핵연료 처분장으로 지정하고 유카마운틴프로젝트(Yucca Mountain Project, YMP)를 추진하였다. 막대한 자본과 노력에도 불구하고 2009년 지역 주민의 반대로 프로젝트가 중단되면서 정부 주도의 정치적 수단에 입각한 정책으로는 부지를 확보할 수 없다는 인식이 강해졌다. 밖으로는 사회적 동의에 기반한 스웨덴과 핀란드의 부지 확보 사례와 사회적 동의 기반 정책으로 전환한 국가들이 미국의 변화를 촉진시켰다.³⁻⁵⁾

2013년 1월 미국 에너지성(Department of Energy, DOE)은 블루리본위원회(Blue Ribbon Commission, BRC) 권고 보고서⁶⁾의 핵심원칙을 수용한 사용후핵연료 관리 방안⁷⁾을 발표했다. 이 방안에서 DOE는 사용후핵연료의 안전 관리를 위해 기술적 노력(system design), 사회적 동의에 기반한 부지확보(consent based facilities siting) 그리고 체제 구축 및 재원 확보(governance and funding)의 세 가지 축이 유기적으로 결합된 정책 도입을 강조했다. 이러한 미국의 최근 기조는 부지확보 과정에서 여러 지역사회의 적극적인 참여를 유도하기 위한 것으로서 기존의 단일 저장소 기반 접근법으로부터의 정책 전환을 의미한다. 전환을 계기로 사용후

핵연료 관련 저장 및 영구처분 연구가 가속화 되었고,⁸⁾ 각종 핵연료주기 옵션을 비교/분석한 아이다호국립연구소(Idaho National Laboratory, INL) 최종보고서⁹⁾가 2014년 10월 발간되었다. 아울러 BRC보고서의 권고에 따라 폐기물 관리 연구/개발을 효율적으로 운용하기 위한 전담기구(Management and Disposal Organization, MDO) 설립 등의 제도 개편이 추진되고 있다.

미국의 사례는 이제까지 원자력 기술개발 및 실용화가 선도해 온 문제 해결 방식이 민주주의가 발달한 사회에서는 더 이상 통용되지 않는다는 것을 보여준다. 따라서, 원자력 산업의 아킬레스건인 사용후핵연료 및 방사성폐기물 문제를 처리하기 위해서는 기술 주도가 아닌 정치·사회·과학이 융합된(trans-scientific) 정책이 제시되어야 한다. 우리나라보다 앞서 원전을 이용한 국가들은 사용후핵연료 및 방사성폐기물 관리와 관련된 문제들을 겪어 왔으며, 국가에 따라 다양한 사례를 가지고 있다. 그러므로 각국의 관리 정책의 성공 및 실패 사례와 선진 연구 동향을 파악하는 것은 우리나라의 향후 관리 방안을 효율적으로 수립하는 기반이 될 것이다. 이러한 관점에서 본 논문에서는 원자력발전 역사가 가장 깊은 미국의 사례를 중심으로 여러 국가의 사용후핵연료 및 방사성폐기물 관리 정책 기조를 조망하고 현안을 논의하였다.

[†] Corresponding author E-mail: jjhan@kinac.re.kr Tel: 042-860-9747 Fax: 042-860-9859

사용후핵연료 및 방사성폐기물은 최종적으로 영구처분되어야 하지만 현실적으로는 대부분의 국가가 중간저장이 필요한 실정이며 일부 국가는 재처리 과정을 거치고 있다. 즉, 사용후핵연료 및 방사성폐기물 관리에 있어 세가지 주요 현안은 중간저장, 재처리 그리고 영구처분이다. 다음 장에서는 관리 정책 수립 시 종합적인 관점에서 고려해야 할 사항들과 국외 및 국내 현황을 다루었다. 중간저장, 재처리 그리고 영구처분의 세부 현안을 각각 3장, 4장 그리고 5장에 걸쳐 분석하였으며, 중간저장과 영구처분 현안의 경우 2001년 9·11테러 이후 쟁점이 된 핵안보(nuclear security) 측면에서 보완 사항을 점검하였다. 끝으로 6장에서는 논문의 결론을 제시하였다.

2. 관리 정책 수립 시 고려 사항

국제 사회에서 약 40년간 축적되어 온 사용후핵연료 관리 사업의 교훈을 종합해 보면, 핵심 요소들은 각각 사회적 동의기반 부지선정(consent-based siting), 저장(storage), 수송(transportation) 그리고 전략적 사업추진(strategic crosscuts)이며 각 요소들은 융합적이고 유기적으로 추진되어야 한다.¹⁰⁾ 각국의 사례를 보면 관리 기반인 부지 확보를 위해서는 무엇보다도 지역사회 동의에 기반한 선정 방식이 효과적임을 알 수 있다. 스웨덴과 핀란드는 민간 발전회사 연합체가 주체가 되어 지역사회 지원의사 표명방식을 통해 복수의 후보 부지를 선정하였으며, 선의의 경쟁 속에 최종 부지를 효과적으로 선정하였다.^{3,4)} 반면 미국의 경우에는 오랜 기간 동안 정부기관인 DOE 산하 전담부서를 두고 부지 확보에 노력해 왔으나, 유카마운틴프로젝트가 중단되면서 결국 정책기조를 변경하였다. 중·저준위 폐기물의 경우는 텍사스 주 민간기업 WCS (Waste Control Specialists)가 처분장을 확보하여 운영 중이다.¹¹⁾ WCS는 지역사회 동의에 기반한 부지 선정 경험을 바탕으로 중간저장시설과 궁극적으로 사용후핵연료 처분장 확보 사업에 많은 관심을 보이고 있다.¹²⁾ 부지 선정과 더불어 사용후핵연료의 저장 및 수송 체계를 구축하기 위한 노력이 경주되고 있으며, 이를 총괄하기 위한 전략적 사업추진의 중요성이 부각되고 있다.^{10,13)}

2.1. 폐로 원전

관리 정책 수립 시 고려해야 할 주요사안 중 하나는 폐로(decommissioning) 원전에 남아있는 사용후핵연료 및 시설 해체(dismantlement) 과정에서 발생하는 방사성폐기물의 처분이다. 해체 원전에서는 비교적 높은 준위의 방사성폐기물이 발생하게 되며, 미국에서는 10CFR61.55기준¹⁴⁾에 따라 GTCC (Greater Than Class C) 폐기물로 분류된다. 미국은 저준위 C등급 이하 폐기물과 사용후핵연료는 각각 천층처분과 심층처분하는 것으로 되어있지만 그 중간인 GTCC 폐기물은 현재 처분을 하지 못한 상태로 임시저장 되고 있다. 폐로의 경험을 보유한 미국은 GTCC 폐기물 관리가 오

래 전부터 논의되어 왔으며, 일정기간 거치 후 심지층 또는 시추공(borehole) 처분하는 방안을 고려 중이다.¹⁵⁾

최근 미국의 샌 오노프레(San Onofre) 및 버몬트 양키(Vermont Yankee) 원전을 포함한 일부 발전소의 재산성이 맞지 않아 수명 만료 이전에 조기 폐쇄를 결정하였다. 이러한 추세는 세일가스 산업의 경쟁력 강화, 국제 원유시장의 WTI (West Texas Intermediate), 북해산 브랜트유, 두바이유 등의 급속한 가격 하락에 의해 가속화 될 수 있다. 폐로의 수가 증가할 것을 감안하여 DOE는 2013년 1월 사용후핵연료 관리 사업계획 수정안⁷⁾에서 전국에 산재되어 있는 폐로의 사용후핵연료를 중앙집중식 저장시설로 2021까지 이송할 것을 제안하고, 현재 가동중인 원전에서 발생하는 사용후핵연료 중간저장 관리는 2025년까지 시행토록 하였다. 이를 위해 PNNL주도 하에 폐로가 결정된 또는 논의 중인 12개 가동 중단 시설에 대해 사용후핵연료 또는 GTCC 방사성폐기물 제거 예비평가¹⁶⁾가 수행되었다.

국내의 경우 아직까지 폐로가 결정된 원전은 없으나 2029년까지 원전 23기 중 약 50%가 설계 수명이 종료된다. 일부 원전에 대한 연장 허가를 낙관적으로 가정하더라도 일부 폐로 시설에 대한 폐기물 저장 문제가 현실적으로 도래할 것이다. 국내 폐기물은 극저준위, 저준위, 중준위, 고준위(사용후핵연료)로 구분된다(원자력안전법, 원자력위원회고시 제2014-3호, “방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정”). 해체 단계에서 나오는 고선량 폐기물(미국기준 GTCC)은 국내의 중준위에 해당한다. 이처럼 구분 체계가 동일하지 않으므로 선행되고 있는 미국의 폐로 및 유관 저장 정책과 법안 체계를 분석하되 이를 바탕으로 국내 실정에 맞는 저장량 예측 및 관리 프로그램이 개발되어야 한다.

2.2. 핵비확산 및 핵안보

사용후핵연료 및 방사성폐기물 관리를 포함하여 전 원자력 산업에 있어 쟁점이 되고 있는 사안은 핵비확산과 핵안보이다. 우리나라는 1991년 한반도 비핵화 선언 이후 꾸준히 비핵화 의지를 지속적으로 표명해왔다. 특히 세 차례 핵안보정상회의를 통해 핵비확산·핵안보 분야 글로벌 리더로서 국제사회 및 지역 사회 공헌을 약속한 바 있다. 사용후핵연료 및 방사성폐기물 관리 정책 수립 및 연구사업 추진에 있어 이러한 핵비확산성을 제고하고 핵안보를 강화하는 일이 무엇보다도 필요한 바 이를 위해서는 기술적 수단 확보와 함께 일관된 정책수단 개발 및 해외 협력이 필요하다. 핵비확산과 관련하여 우리나라는 NPT가입국으로서 IAEA안전조치 이행을 성실히 수행하며 2012년 한-IAEA 통합안전조치 협력강화 약정을 체결하는 등 국제적인 모범 사례로서 자리 잡고 있다. 아울러, 2015년 4월 22일 가서명이 이루어진 한·미원자력협정 개정⁷⁵⁾에서도 차관급으로 구성된 고위급 위원회 산하에 핵안보 실무그룹을 4개 실무그룹을 설치하기로 합의하였다. 따라서, 본 논문에서는 국내를 포함해서 국제적으로 보완 필요성이 제기되고 있는 핵안보 현안들을 각 장에서 중점적으로 다루었다.

2.3. 핵연료주기 경제성 분석 및 기술 개발

경제적 부가 가치를 창출하는 원자력 발전(發電) 기간이 30년에서 60년 정도 인 것에 비해 부산물인 사용후핵연료 관리에는 수백 년에서 수십만 년 이상의 시간이 소요된다. 중간저장 기간만 수십년 이상이며 직접처분의 경우 처분장 폐쇄 후 1만년의 감시기간(institutional control period), 안전성평가 대상기간은 1백만년을 상회한다.¹⁷⁾ 따라서, 해당 정부는 국가 책임의식을 바탕으로 자국에 적합한 핵연료주기 옵션을 평가하고 결정할 수 있어야 한다.

사용후핵연료의 직접처분이 아닌 순환형핵연료주기(closed nuclear fuel cycle)를 채택하는 경우, 원자력발전 시스템 자체의 변혁이 필요하다. 이처럼 사용후핵연료 관리 정책을 결정하는 일은 경우에 따라 수 백조 이상이 집행되는 국가 재정의 중대 사안이다. 따라서 각각의 핵연료주기에 따른 경제성 평가가 이뤄져야 한다. 특히 최근 국내에서 논란이 되고 있는 소멸처리 연구의 경우 종합적인 평가가 중요하다. 소멸처리 설비 구축 비용은 높지만 소멸 가능한 양에 따라 최종 처분 비용 절감 효과가 더 클 수 있다. 미국의 경우 유카산 사업에서 6만 3천톤을 처분하는데 약 60조원으로 평가되었으며 이 중 처분 용기 개발이 가장 높은 비중을 차지한다. 따라서, 안정적인 폐기물 고화체 개발에 의해 처분 용기 수요가 획기적으로 줄어들면 소멸 처리 방안의 경제성이 높아진다. 반면에 소멸 처리 시스템이 추가 원자로나 원자로/가속기 복합체를 필요로 하는 경우 이로 인한 비용 부담으로 인해 경제성이 악화될 수 있다. 이러한 경제성 평가는 각국의 상황에 따라 우라늄 원광 확보에서부터 최종 폐기물 처분까지 원자력 전 주기를 고려하여 분석이 이뤄져야 한다. 그러므로 원활한 장기 사업 추진과 핵심기술 확보를 위해서는, 미국의 핵연료주기 장단점 비교/평가⁹⁾와 같은 거시적인 관점에서의 평가가 선행되어야 한다.

사용후핵연료 및 방사성폐기물 처리 방안을 논의할 때 핵심어(keyword) 세 가지는 중간저장, 직접처분(영구처분) 그리고 재처리이다. 우리나라에서는 파이로 공정 등 선진 재처리 기술을 종종 재활용 기술로 소개하고 있으나, 본 논문에서는 포괄적인 의미로서 이와 같은 특수 기술들을 모두 재처리 기술로 기재하였다. 처분장을 확보한 국가들을 제외하면 중간저장은 영구처분 또는 재처리를 하기 위한 과정이며, 각 국가들은 그 이후 기술개발 진척과 사회적 수용성 등을 고려하여 관리 방안을 결정하게 된다. 이어지는 각각의 장에서는 세가지 핵심어와 관련된 실현 가능한 기술적 옵션들과 현안들을 조망해 보고자 한다.

3. 중간저장 관리 현안

현재 우리나라는 콘크리트 저장용기에 대한 안전성 해석 등 일부 기술만 확보한 수준이며 경수로 사용후핵연료 중간저장 시설의 모형도 결정되지 않은 시작 단계에 불과하다 (송중순 외, “방사성폐기물 산업 기반 조성을 위한 연구개발

추진전략 수립,” 지식경제부(2009)). 미국의 경우 2012년 BRC 권고보고서와 2013년 1월 DOE의 정책기조 발표 이후 NRC와 협력하여 중간저장 연구 개발 및 인허가 체제 구축이 집중적으로 이루어지고 있다.¹⁸⁾ 중간저장과 관련된 미국 내 최대 현안은 독립저장시설(Independent Spent Fuel Storage Installation, ISFSI) 수명연장에 대한 원자력 진흥기관과 안전 규제기관의 독립적이면서도 효율적인 협력 체제 구축이다. 미국은 최근 저연소도 사용후핵연료 저장 수명을 20년에서 40년으로 연장한 이후, 고연소도 사용후핵연료 저장의 수명연장을 추진하고 있다. DOE는 미국전력연구소(EPRI)와 전력회사 도미니언(Dominion) 그리고 건식저장 용기와 전체 설비를 제공하는 AREVA와 손잡고 고연소도 사용후핵연료 저장 시설의 수명연장 연구에 착수하였다. 이 프로젝트는 10CFR72.42¹⁹⁾에 명시된 기존 20년으로 한정된 고연소도 핵연료저장 용기의 수명을 40년으로 연장하는데 그 목적이 있다. 수명연장은 인허가 기관인 NRC의 승인이 필요하므로 DOE와 NRC는 초기 프로젝트 구성 단계에서부터 유기적으로 협의하고 결과를 공유하며 향후 연구 방향을 공동 설정하고 있다.²⁰⁾ 건식저장시설 수명연장 문제에 관심이 많은 독일 BAM, 일본 CRIEPI 등도 컨소시엄(consortium)을 구성해서 이 연구에 참여하고 있다.²¹⁾ 이와 같은 국제 컨소시엄 구성에는 DOE의 역할과 더불어 국제 사회에서 원자력 진흥 기관들과 다양한 공동 연구 프로그램을 수행해 온 EPRI의 영향력이 발휘된 것으로 판단된다. 우리나라도 발전사업자인 한국수력원자력(주)이 EPRI와 공식적인 협력 체제를 갖추고 있으므로 향후 국내 기관들과도 적극적인 교류가 이뤄지기를 기대한다.

3.1. 중간저장 기술 현안

저장 분야의 기술적 현안 중 하나는 해풍 속에 함유된 염소 성분에 의한 부식 문제이다.²⁴⁾ 부식 문제 해결을 위해서는 실증 연구가 중요하므로 DOE는 매릴랜드와 캘리포니아 주 등의 중간저장 시설에서 해풍에 함유된 염소로 인한 부식의 영향을 분석하고 있다. 향후 우리나라가 건식저장 시설을 운영할 경우, 연안에 입지할 가능성이 있으므로 DOE의 연구 진행 상황을 지속적으로 주목할 필요가 있다.

저장 시설의 장기적인 재료·구조 건전성 또한 확보되어야 한다. 고온에서 시간의존적으로 발생하는 크리프 변형(creep deformation)^{23,24)}이나 수소화물재배열(hydride reorientation)²⁵⁾ 등이 발생하면, 방사성 물질의 밀폐기능에 영향을 미칠 뿐 아니라 향후 처분/처리를 위해 보관된 핵연료 집합체를 회수(retrieval)하는 과정에서도 불안정요인이 된다. 중간저장 기간은 기술적 또는 사회적 요인에 의해 변동될 수 있으므로 이를 대비하기 위해서는 저장사업 준비 단계부터 최종처분 또는 재처리를 위한 회수 시점까지에 대한 장기 건전성 평가가 이뤄져야 한다.

또 다른 현안은 사용후핵연료의 방사성핵종 특성에 대한 실증 연구이다. 원자력 계에서는 안전성에 기반한 효율적인 사용후핵연료 관리를 위해 전산모사 방법을 이용해서 핵

중의 방사선 준위를 예측하고 있다. 향후 본격적인 사용후 핵연료 중간저장 사업을 추진하기 위해서는 전산모사로 예측된 핵종별 방사선준위에 대해 검증이 선행되어야 한다. 이를 위해서는 사용후핵연료 시편의 파괴실험을 통해 조성을 확인하는 작업이 필요하다. 미국은 DOE를 중심으로 ANL (Argonne National Laboratory) 등 국립연구소들이 NFST (Nuclear Fuel Storage & Transportation) 프로그램에 적극적으로 참여하여 데이터베이스를 구축하고 있다.¹⁰⁾ 우리나라의 경우, 20종류가 넘는 핵연료가 공급되어 왔으며 향후 이에 대한 대규모의 실험 검증이 수행되어야 한다. 국내에서 이러한 규모의 실험을 수행할 수 있는 시설은 한국원자력연구원 유일하나, 기존 시설로 대규모 실험을 적기에 수행할 수 있는가를 판단하고 추가 시설이 필요하다면 적정 규모와 설비 운영 계획은 수립해야 한다.

3.2. 수송 관련 인허가 체제

이와 함께 저장 사업의 원활한 추진을 위해서는 수송 관련 인허가 문제가 해결되어야 한다.²⁶⁾ 미국은 지리학적 연유로 사용후핵연료 및 방사성폐기물 수송 시 철도 및 도로를 이용한 내륙 운송이 주요 수단이다.²⁷⁻²⁹⁾ 우리나라 고속도로망은 과적차량 제한기준이 40톤으로 규정(도로법 시행령, 대통령령 제25985호, 제79조 “차량의 운행 제한 등”) 되어 있고, 국내 제작 중간저장 용기 KN-12와 KN-18의 중량은 각각 75톤과 104톤³⁰⁾임을 감안하면 내륙 운송은 현실적으로 어려울 수 있다. 관련 법률을 개정하거나 저장 용기의 용량을 줄더라도 사회적 수용성 문제가 대두될 수 있다. 이는 철로의 경우에도 대도시 철도역을 경유해야 하므로 마찬가지이다. 해상 운송의 경우, 국내 원전 단지들은 시공 시 물자 수송을 위한 임시 부두를 건설한 바 있어 선박을 이용한 사용후핵연료 수송 제반 설비가 갖춰져 있다. 하지만, 우리나라는 사용후핵연료 해상 운송 경험이 전무하므로 이를 오랜 기간 활용해 온 유럽 국가들의 수송 현황과 규정을 살펴볼 필요가 있다. 스웨덴은 이미 80년대 중반부터 사용후핵연료 중간저장시설인 CLAB (Center Interim Storage for Spent Fuel)으로 연안 해상 운송을 이용했다. 약 30여 년간 2천톤급 로로선(ro-ro ship)인 시진(Sigyn)을 운영해왔으며, 2014년 1월 사용후핵연료 수송 적재량이 20% 증가된 선박 시그리드(Sigrid)로 교체하였다.³¹⁾ 영국 PNTL과 프랑스 AREVA-TN도 국제 또는 국내 해상 운송을 활용하고 있으며 국제원자력수송협회(World Nuclear Transport Institute, WNTI)는 수송 관련 연구 및 적용 우수 사례들을 보유하고 있다.^{32,33)} 이처럼 선진 기술 및 운영 경험을 보유한 기관들과의 교류를 통해 우리나라에서의 해상 운송 가능성을 검토하고 관련 규제 체제를 정비해야 한다.

3.3. CANDU 원전의 사용후핵연료

우리나라에는 2015년 3월 기준 가압경수로형 원전 19기와 캐나다에서 수입한 CANDU 원전 4기가 운영되고 있다. 전체 원전이 모두 CANDU형인 캐나다는 NWMO (Nuclear

Waste Management Organization)를 중심으로 본격적인 저장/처분 부지 확보를 위한 공론화를 지속적으로 확대 추진하고 있다. 2015년부터 2019년까지의 계획 초안(draft for public)을 공개하고 공공의 의견을 수렴하였으며, 이를 바탕으로 매년 보고서를 발간할 예정이다.^{34,35)} 표면 처리를 위한 콜드 스프레이(cold spray), 전해(electrodeposited) 기술 등 중수형 원자로에서 발생한 사용후핵연료 처분을 위한 기술 개발에도 적극 나서고 있다.³⁶⁾ 우리나라의 경우 수조 내에 사용후핵연료가 임시저장 중인 가압경수로와는 달리 현재 월성 원전 1-4호기에서 발생하는 사용후핵연료는 부지 내 사일로 방식인 캐니스터와 조밀건식저장 모듈인 맥스터(MACSTOR/KN-400)로 저장되고 있다. 현재 구비된 설비로는 2018년까지 저장이 가능하며, 추가로 7모듈을 설치·운영한다 하더라도 2026년경 포화가 예상되므로 장기적인 관리를 위해서는 해당 기술 중주국인 캐나다 저장/처분 연구 현황에 대한 추적 조사가 이뤄져야 한다.

3.4. 중간저장 관련 핵안보 사안

9·11 사건 이후 미국 내 테러에 대한 우려는 피해가 극대화될 수 있는 원자력 관련 시설로 집중되었고, NRC는 기존 가동 원전 및 사용후핵연료 저장 시설의 안보 강화 계획을 발표하였다.³⁷⁾ 원자력 안전과 안보의 궁극적인 목표는 인류를 방사선에 의한 직·간접적인 피해로부터 보호하는 것이다. 미국 원전 관련 시설의 방사선량 제한 수치를 보면 NRC규정¹⁹⁾에 따라 원전 정상상태인 경우 전신기준 연간선량당량(the annual dose equivalent) 0.25 mSv이며, 우리나라의 경우도 원자력안전법(원자력위원회고시 제2014-34호, “방사성방호 등에 관한 기준”)에 방사성 물질 관련 시설의 경계에서 유효선량 0.25 mSv 기준을 제시하고 있다. 미국과 우리나라 모두 현행 규정에 안보 사고에 대한 선량 기준을 따로 구분하지는 않는다. 정상 상태를 유지하는 것을 안보 사고 예방으로 간주하면, 테러 공격(terrorist attack)에 대해서도 중간저장 시설의 경계에서 선량이 0.25 mSv 이하로 유지되어야 한다. 따라서, 비상 시 사용후핵연료 저장 설비로부터 방사성 물질의 유출을 막거나 최소화하기 위해 악의적 행위에 대한 탐지(detection), 지연(delay) 그리고 최종 대응(response)의 3요소를 갖춘 물리적 방호체계(physical protection system)³⁸⁾가 갖춰져야 한다.

중간저장과 관련된 핵안보 현안으로는 수송 과정에서의 용기 파손, 저장 기간 중 방사능 물질의 불법 유출, 항공기 충돌, 미사일 공격 등이 거론되고 있다. 시설 내 보관된 사용후핵연료가 외부로 불법 유출되는지를 탐지하기 위한 방법으로는 전통적으로 저장용기의 격납손상여부를 판별하기 위한 기압 측정 방법³⁹⁾이 활용되어 왔다. 건식저장용기는 일반적으로 내부가 불활성 기체로 충전되며 상층 기압이 유지 되므로 내부 기압을 실시간으로 측정하여 불법 유출을 감지할 수 있다. 또한 저장 용기 내부에 방사선 준위를 측정할 수 있는 소형 센서를 삽입하고 무선 신호로 방사선 준위 변화를 감지하는 방법도 있다.⁴⁰⁾ 저장 용기에 삽

입하는 소형 센서 개발은 ORNL 등에서 DOE의 지원을 받아 연구를 수행해 왔으며 최근 개발된 기술을 기반으로 상용센서를 제작하려는 기업도 등장하고 있다.⁴¹⁾ 처분장 확보가 지연되는 경우, 중간저장 기간이 장기화 될 수 있으며 소형 센서는 고방사선 환경에서 저장 수명만큼 견딜 수 있어야 한다. 아직까지는, 장기적인 내구성 확보는 극복할 문제로 남아있다.

중간저장 시설 주변에 민간 또는 군용 비행장이 존재하는 경우 항공기 충돌로 인한 충격 및 화재의 영향이 고려되어야 한다. 미국은 이를 인허가 심사 단계에서 평가하도록 하고 있다.¹⁹⁾ 항공기 충돌 및 화재는 대규모이며 복합적인 피해를 유발하므로 전산 모사 예측과 더불어 실증 실험이 이뤄져야 한다. 항공기 충돌 실험은 DOE 내 핵안보청(National Nuclear Security Administration, NNSA) 산하 샌디아국립연구소에서 수행되었다.^{42,43)} 이와 같이 규제 관련 사안을 진흥 기관이 협력하면서도 각각의 독립성을 유지하는 것은 핵안보 관련 인허가 심사의 효율성 측면에서 매우 중요하다. 더욱이 국내 연구 재원은 미국에 비해 부족하므로 향후 원자력 규제 관련 연구 사업에 적극적으로 고려할 사안으로 판단된다. 항공기 충돌과 같이 국내 여건상 실증 연구가 현실적으로 어려운 특정 현안에 대해서는 한·미간 기술 교류를 통해 관련 자료를 확보해야 한다. 안보 관련 연구에는 민감 정보가 포함되므로 이러한 정보를 양국간 활발히 교류하기 위해서는 원자력계와 더불어 범정부 차원의 대미 협력이 이뤄져야 한다.

항공기 충돌과 더불어 미사일 공격에 대한 수송 용기 및 저장 시설의 건전성도 보장되어야 한다. 국제 핵안보 법률 및 규제 관련 권고문 IAEA INFCIRC/225/Rev.5³⁸⁾은 적성 국가의 공격을 고려하는 것이 아니라 테러 집단의 공격에 대응하는 것으로 명시하고 있다. 따라서, 핵안보 측면에서 원자력 관련 시설에 대한 미사일 공격이란 대륙간 탄도 미사일이나 대규모 미사일이 아닌 소규모 테러 집단의 견착식 미사일 등으로 공격하는 것을 의미한다. HOLTEC, AREVA, NAC 등 세계적 저장용기 공급 업체들은 이와 같은 물리적 방호 요건에 맞추어 저장 용기를 개발하고 실증 실험을 통해 미사일 공격에도 용기가 건전성을 유지하는 것을 검증하고 있다.⁴⁴⁾ 우리나라에도 이와 같이 고속 물체에 의한 구조물 건전성을 실측하는 일정 규모 시설이 존재하고 국방 분야 연구 개발 등에 활용되고 있는 것으로 알려져 있다. 사용후핵연료 건식저장용기에 대한 미사일충돌 건전성 연구는 방사성폐기물관리 기술개발 사업^{72,73)}을 통해 2009년부터 원자력환경공단, 원자력연구원 및 국방과학연구소의 참여로 진행되고 있다. 해당 프로젝트를 통해 저장용기의 특성을 지닌 철근 콘크리트 패널에 대한 포탄 충돌 연구가 진행되었으나,⁷⁴⁾ 관련 인허가 서류 작성 및 심사를 위해서는 실증 실험에 대한 연구를 포함한 관련 자료 구축이 시급히 추진되어야 할 것이다.

이처럼 최근 전통적인 안전성 측면을 벗어나 원자력 규제의 핵심으로 떠오르고 있는 핵안보 분야에 대한 기술 개

발이 원전 선진 국가들에 의해 진행 중이다. 안전과 안보는 방사선 물질의 유출 방지라는 공통 목적이 있으므로 설계 단계에서부터 안보를 고려하면 물리적인 설비뿐 아니라 관찰·감시 측면에서도 통합적인 체계를 갖출 수 있다. 이와 같이 원전 시설의 안보를 목적으로 기존 원자력 시설의 안전 수단과 연계하여 효율적인 방안을 강구하는 것을 안전-안보 연계(Safety-Security Interface, SSI) 또는 3S연계(Safety, security and safeguards)라 하며 최근 국제적으로 논의가 이뤄지고 있다.⁴⁵⁻⁴⁷⁾ 우리나라에서도 일부 대학과 연구기관에서 관련 연구가 수행 중이며,⁴⁸⁻⁵¹⁾ 향후 국내 인허가 체제에 반영된다면 국제 교류를 통해 모범사례(best practice)를 제시하는 등 국내외 핵안보 체제 수립에 기여할 수 있을 것이다.

4. 사용후핵연료 재처리 기술 현안

최근 가서명이 이뤄진 개정된 한·미 원자력 협정⁷⁵⁾에는 핵연료 농축과 사용후핵연료 재처리를 명시적으로 금지하는 ‘골드 스탠다드(gold standard)’ 조항이 포함되지 않았을 뿐 아니라, 사용후핵연료 연구를 매년 동의를 얻던 것을 ‘포괄적 장기 동의’ 형태로 변경하여 자율성을 확보하였다(외교부 외 관계부처 합동 보도자료, “한미 원자력협정 전면 개정”). 재처리와 관련해서는 파이로프로세싱의 전반부인 전해환원 공정의 연구활동에 대한 장기 동의를 확보하였으며, 한·미 핵연료주기 공동 연구의 향후 결과를 바탕으로 고위급 위원회의 협의를 통해 재처리 공정을 추진할 수 있는 경로를 마련했다고 평가되고 있다. 역사적으로 보면 과거 두 차례 오일 쇼크, 최근 세일 가스 등장 그리고 원유가격 급등락 등 에너지 시장의 불확실성이 존재하므로, 에너지원 확보의 관점에서는 직접처분이 아닌 대안 기술을 개발하는 것이 중요하다. 따라서, 본 논문은 사용후핵연료 관리의 장기적인 관점에서 재처리 기술을 습식과 건식으로 구분하여 기술개발 동향과 현안 그리고 관리정책 수립 시 고려사항을 기술하였다.

4.1. 습식 재처리 기술

미국 및 유럽의 경우 원자력 발전이 도입된 50년대부터 원자력 발전은 필연적으로 재처리와 연계되어 에너지 자원을 재순환하는 방안을 중심으로 추진되어 왔다. 특히 프랑스는 석유 등 에너지 부존자원이 부족한 여건을 감안해 에너지 국산화를 최우선으로 삼고 순환형핵연료주기를 국가 정책으로 채택하였다. 제2차 세계 대전 직후 재순환 정책을 추진하기 위한 기술 개발 주체로 원자력청(CEA)을 설립하고 이를 기반으로 세계 최초의 상용 재처리 기술인 플루토늄우라늄추출(Plutonium-Uranium EXtraction, PUREX)을 개발하였다. 이러한 프랑스의 정책 기조는 TMI (Three Miles Island), 체르노빌 그리고 후쿠시마 원전 등 일련의 사고에도 불구하고 현재까지 지속적으로 추진되고 있다.

일본의 경우에도 나카소네 전 수상은 정책 기조를 근간으로 1960년대부터 순환형 원자력 시스템 도입을 추진해 왔다. 3·11 후쿠시마 사고 이후 원전 운전을 중단한 상황 속에서도 로카쇼무라 재처리공장 정상화 시도와 더불어 다가오는 2018년 미·일 원자력협정 개정을 통해 제2의 재처리 시설을 추진하는 등 순환형핵연료주기 정책을 지속적으로 개선하고 있다. 일본 로카쇼무라, 프랑스 La Hague 그리고 영국 Sellafield와 THORP (Thermal Oxide Reprocessing Plant) 시설 등에서 채택한 PUREX 재처리 기술은 순수 플루토늄을 독립적으로 추출하는 방식으로 전 세계적으로 상용 및 군사 시설에서 활용되어 왔다. 따라서 NSG (Nuclear Supply Group) 및 NPT (Nuclear non-Proliferation Treaty) 등에서 핵확산(nuclear proliferation)의 우려가 있는 민감기술(sensitive nuclear technology)로 규정하였고 물질, 인력 확산과 함께 기술 확산을 방지하기 위해 노력하고 있다.⁵²⁾

일부에서는 상용 경수로에서 발생하는 사용후핵연료에는 군사용으로 사용하는 700 MWD 정도의 저연소도 사용후핵연료와는 달리 고방열 연쇄반응 억제물질인 짝수(even number) 플루토늄 Pu-238과 Pu-240이 상대적으로 높게 함유되어 있어 핵폭탄 제조가 어렵다고 주장한다. 하지만 이는 기술적으로 해결될 수 있는 사안이며 설령 완전한 핵무기 전용이 어렵다고 하더라도 여전히 고성능의 더티밤(dirty bomb)을 제조할 수 있기 때문에 PUREX 및 유사 기술은 향후에도 민감기술로 간주될 것이다. 일본 로카쇼무라의 경우 플루토늄 분리 추출에 대한 논란을 의식해 최종 단계에서 우라늄과 혼합해 추출하고 있으나, 근본적으로 PUREX는 플루토늄을 단독 추출할 수 있는 기술로 바라보는 국제적인 시각에는 변함이 없다.⁵³⁾

반면, 핵물질 계량 관리의 측면에서는 국가 차원의 불법행동(diversion activity)에 의해 내부 구조물이 변경되지 않는 한 PUREX 시설 내 재고량을 비교적 정확하게 파악할 수 있다는 장점이 있다. 액상 상태로 균일하게 용해된 물질들의 샘플 농도 측정을 통해 언제 어디서나(any time, any where) 주요 지점(Key Measurement Point, KMP)에서 특정 민감핵물질 질량을 비교적 손쉽게 계측할 수 있기 때문이다. 이러한 장점에 기반하여 최근 국가의 핵물질 전용을 방지하고자 이행되는 IAEA 안전조치(safeguards) 규범은 일본 습식 재처리 시설에 초점을 맞추고 있다.

비용의 관점에서 보면 PUREX는 경수로형 원전을 개조해 사용할 수 있어 재처리 공정의 설비 건설비용이 절약되지만 추출한 플루토늄을 혼합핵연료(Mixed Oxide Fuel, MOX)로 가공하기까지의 비용이 높다는 단점이 있다.⁵⁴⁾ 공식적인 국제 위탁재처리 비용은 대부분이 대외비이며 1 kg의 사용후핵연료당 약 2,000달러 이상의 비용이 소요되는 것으로 알려지고 있다. 이는 재처리 비용뿐 아니라 해외로 사용후핵연료를 수송·이관하는 비용 및 해외에서의 임시저장 등 기타 제반 요소들을 감안한 것이다. 아울러, MOX가 공비용은 재처리 비용과 같은 수준이 될 것으로 추정되고 있다. 국외 비용을 경감하고자 자국 내 재처리를 추진하는

일본의 경우, 연산 800톤 규모의 설비 건설을 완료하고 운영을 준비 중인데 건설비만 대략 25조 수준이며 운영비를 합산하면 200조가 넘을 것으로 추정된다.

영구 처분 관점에서는 고준위 폐기물의 부피가 약간 감소하는 효과가 있고 사용후핵연료에 존재하는 휘발성 방사성핵종(volatile fission product)인 요오드 등을 안전하게 고화시키는 부수적인 효과는 있으나 처분 부담을 확연히 경감시킬 정도로 영향이 크지는 않다. 또한, AREVA 등 관련 업체의 지속적인 노력에도 불구하고 여전히 다량의 중저준위 폐기물을 발생시키기 때문에 이를 위한 별도의 처분장이 요구된다. 상용 재처리를 대규모로 추진해 온 영국의 경우 80년대 초반부터 사용후핵연료 절단 공정인 전처리공정(head end process) 폐기물과 습식공정에서 대량 발생하는 액체폐기물 고화체의 영구처분장 건설을 위해 국가적인 노력을 경주했으나 현재까지도 많은 어려움을 겪고 있다. 이처럼, 전통적인 습식재처리로는 고준위폐기물과 더불어 중·저준위폐기물의 영구 처분이 여전히 해결 과제로 남으며, 채산성 측면에서도 도입국의 상황을 고려하여 면밀한 검토가 필요하다.

이와 같은 전통적인 습식 재처리의 한계를 극복하기 위해 미국, 프랑스, 일본 등은 처분 부담을 획기적으로 줄이고 더 나아가 영구적인 자원 재순환을 위해 선진핵연료 주기(Advanced Nuclear Fuel Cycle, ANFC)의 일환으로 기술 개발을 하고 있다. 대표적인 기술들로는 미국 주도의 TRU EX (TRans Uranic EXtraction), UREX (URanium EXtraction), 프랑스 주도의 COEX (CO-EXtraction of actinides), GANEX (Grouped Extraction of Actinides) 등이 있다.⁵⁵⁾ 이들의 궁극적인 목표는 초우라늄(TRans Uranium, TRU)을 고속로의 에너지원으로 재활용하고 이를 통해 부피를 감소시켜 처분장 건설면적을 줄이는 것과 사용후핵연료에서 Cs-135, Tc-99, Se-79 등 일부 붕괴열(decay heat)이 높은 핵종들을 분리 및 고화시킴으로써 처분안전성을 높이는 것이다. 하지만 이런 습식 ANFC 기술들은 아직 소규모 실험 단계에서 벗어나지 못하고 있다. 특히 미국의 경우 분리된 TRU 핵연료를 활용할 IFR(integral fast reactor) 고속로는 경수로에 비해 고가의 비용이 소요될 것으로 추정되므로, 우라늄 원광 또는 원유의 급격한 가격 상승이 유지되지 않는 한, 상용화 추진은 상당 기간 동안 어려울 것으로 판단된다. 이러한 현실을 감안해 DOE는 ANFC 기술 개발을 ‘very long term’ 대안으로 구분하고 관련 기초 연구를 수행하고 있다.⁵⁶⁾

4.2. 건식 재처리 기술

앞에서 언급한 습식재처리 기술 중 PUREX 기술은 이미 상용화되어 대규모 재처리 시설에서 사용하고 있으나, 건식 재처리/재활용 기술은 아직 연구실 규모의 개발 수준에 머무르고 있다. NPT체제 하에서, 프랑스가 핵보유국으로서 습식재처리를 해온 것과는 다르게 우리나라는 비핵국으로서 핵확산 저항성이 우수한 건식재처리 기술을 주도적으로 개발해왔다. 이런 연유로 우리나라는 건식 재처리 연구에

있어 수준 높은 연구를 수행해 왔으며, 대표적인 건식 재처리 기술로는 파이로프로세싱(pyroprocessing)과 DUPIC (direct use of spent PWR fuel in CANDU)이 있다. 파이로프로세싱은 사용후핵연료의 부피와 독성을 줄일 수 있고 순수 플루토늄 회수가 어려워 핵비확산성(nuclear nonproliferation)이 우수한 공정으로 평가 받고 있으며, 2011년부터 10년간 3단계로 나눠 한·미 공동연구가 진행 중이다.⁵⁷⁾

파이로프로세싱과 마찬가지로 DUPIC 기술도 미 국무성 (Department of State, DOS)과 DOE 등에서 높은 핵비확산성을 인정한 기술로 부각된 바 있다.⁵⁸⁾ DUPIC은 경수로-중수로 연계 핵연료주기로서 경수로에서 발생하는 사용후핵연료를 중수로 핵연료로 제조하여 CANDU 원자로에 재활용하는 기술이다.⁵⁸⁾ 기술적으로는 원전 적용 가능성까지 검증이 이뤄졌으나,⁵⁹⁾ 기존 CANDU설비의 일부 개량이 필요하다는 점과 CANDU 원전이 경수로에 비해 상대적으로 경쟁력이 낮다는 사유로 현재는 중단된 상태이다. 비록 DUPIC 기술을 적용하면 운영 측면에서 수천억 규모의 추가 비용이 발생할 수 있으나, 사용후핵연료 관리 측면의 이익을 고려하여 재평가할 가치가 있다. 우선, 사용후핵연료 재활용을 통해 누적재고량을 줄일 수 있고, 재활용된 연료가 다시 사용후핵연료로 나올 때의 붕괴열은 상당량 감소한다. 따라서, 전체적인 사용후핵연료 발생량은 유사하더라도 기존 경수로 사용후핵연료 처분장보다 면적이 최대 10배 가량 감소되어 전체 비용은 절감될 수 있다. 방사성폐기물 관리비용은 2012년 말 대폭 증가하였으며, 사용후핵연료 관리를 포함한 후행핵연료주기 관리비용이 전체 발전비용의 약 23%로 평가되었다(지식경제부(현 산업통상자원부) 보도자료, “원전사후처리비용 대폭 현실화”). 향후 중간저장 및 최종 처분 사업 실시에 따른 부대 비용에 의해 총비용은 더 증가할 수 있다. 이와 같이, 사용후핵연료 관리 정책을 수립할 때에는 단순히 원전 건설/운영 비용 중심으로 경제성을 판정할 것이 아니라 우리나라 원광 채굴에서 최종 폐기물 처분까지 전 주기(total system life cycle)에 대한 분석이 이뤄져야 한다.

국내 원자력계 일부에서는 연간 가압경수로 발생 사용후핵연료량이 400톤 규모에 훨씬 못미치는 것을 언급하며 향후 재처리 소요량에 대비한 저장·보관의 필요성을 주장해 왔다. 현재 가압경수로에서 발생하는 사용후핵연료 양이 연간 400톤 규모에 육박하고 있고 향후 지속적인 신규 원전 도입에 따라 사용후핵연료 발생량이 꾸준히 증가할 것으로 예상되므로 재처리를 위한 사용후핵연료를 저장 보관할 필요성은 점점 희박해 질 것이다. 재처리는 핵연료 전 주기의 관점에서 보면 중간 단계의 옵션에 해당한다. 재처리를 통해 핵연료를 다시 연료로 사용할 수도 있고, 독성과 부피를 줄여 처분할 수도 있다. 각국의 상황에 따라 재처리 여부로 사용후핵연료 관리 정책이 달라지지만, 결국 핵연료는 최종 단계에서 영구처분이 되어야 한다. 우리나라는 처분장 건립을 위한 공론화가 진행 중이며, 더불어 건식재처리 및 이를 연료로 사용할 고속로 연구도 수행하고 있다.

이러한 다양한 대안들을 바탕으로, 사용후핵연료 발생량을 고려한 핵연료 전 주기 평가가 이뤄진다면 향후 재처리 연구의 보다 유기적이고 효율적인 장기계획 수립에 도움이 될 것이다. 이어지는 장에서는 사용후핵연료와 방사성폐기물의 종착지인 영구처분에 관한 현안과 관리 방안에 대해 논의하였다.

5. 영구처분 현안

5.1. 지반 조사 및 공학적인 방벽 개발

영구처분 관련 연구는 직접처분을 사용후핵연료 및 방사성폐기물 관리 정책으로 하는 미국과 스웨덴을 중심으로 개발되어 왔다. 심지층 영구 처분의 목적은 방사성 물질을 안정적으로 격리하는 것이므로 개발된 처분 기술은 안정적인 지질매질 확보와 공학적인 방벽 개발에 초점을 두고 추진되었다.

미국은 1982년 핵폐기물정책법을 제정하며 처분장 후보지를 9개로 한정하고 1983년부터 부지 조사를 시작하였다. 이후 9개 부지에 대한 상세 지질 조사에 천문학적 비용이 소요됨을 인식하고, 후보 부지를 서부 지역의 세 곳으로 압축하였다. 세 곳의 후보부지는 텍사스 주 데프스미스카운티의 암염 암반층, 워싱턴 주 헨포드의 현무암(basalt), 그리고 네바다 주 유카마운틴의 응회암(welded tuff) 암반층이며 각기 다른 세가지 암반 매질에 대한 평가가 수행되었다.⁶⁰⁻⁶²⁾ 1980년대에 이러한 평가가 가능했던 것은 1950년대부터 캔자스 지역의 암염 처분 연구 등 다양한 기반기술이 확보된 상태였기 때문이다. 특히, 19세기부터 축적된 석유 시추 기술은 지하 700 미터에 이르는 암반층의 지질학적 특성 평가 시 핵심 기술로 활용되었다.

스웨덴의 경우 70년대 후반부터 사용후핵연료와 고준위 방사성폐기물을 영구 처분하기 위한 KBS-1 개념을 개발한 이래 꾸준히 연구를 추진하여 최종적으로 제시된 것이 KBS-3 개념이다. KBS-3 개념은 천연 방벽과 다양한 공학적 방벽으로 구성된 시스템을 도입하여 사용후핵연료 관리로 인한 인간 및 환경에 미치는 방사선적 영향이 미미한 수준으로 국한될 수 있다는 것이다.⁶³⁾ 여기서 천연 방벽이란 화강암 반과 같은 결정질 암반을 의미하는 것으로 결정질 암반 이외에도 암염이나 점토층과 같은 퇴적암반 등에서도 안전성이 보장될 수 있다고 알려져 있다. KBS-3 개념에서는 사용후핵연료를 구리 등으로 제작된 처분 용기에 거치하고 그 용기를 다시 벤트나이트 블록에 의해 보호하여 사용후핵연료의 안정적인 거치와 오랜 용기 수명으로 방사성 핵종들의 외부 유출을 최대한 지연시키는 방법이다.⁶⁴⁾

5.2. 사회적 수용성과 공론화

미국의 유카마운틴프로젝트 중단 사례는 기술적인 측면과는 별도로 사용후핵연료 심지층 처분을 위해서는 사회적 동의가 반드시 수반되어야 한다는 것을 말해 준다. 사회적

신뢰성 증진은 오랜 기간 동안 꾸준히 수행되어야 하며, 대표적인 성공사례는 스웨덴과 핀란드이다. 스웨덴은 사업 추진 초기 단계인 70년 말부터 투명하고, 지속적이고, 치밀한 사전 준비를 바탕으로 신뢰성 확보를 위한 논의가 시행되었다. 그 결과 최종 부지 확보를 위한 국가적 노력이 경주된 2000년대 초반 양대 후보 부지인 오스타마 및 오스카삼양 지역에서 처분장 운영에 대한 확고한 지역 사회의 지지 의사를 표명²²⁾하였고 이를 기반으로 최종 부지가 확정되었으며 그 과정과 결과 또한 공개되어 있다. 최종 부지로 확정된 바텐폴 원전이 위치한 오스타마 지역을 대상으로 2011년 3월 인허가 신청서를 접수하여 현재 평가가 진행 중이다. 스웨덴 법 체제에 따르면 처분장 인허가와 관련된 법안은 원자력 관련 2법과 환경 관련 1법이 있어 이를 모두 만족해야 하며 최종적으로는 지역 사회의 의견 수렴을 거치도록 되어 있다.

직접 처분을 추진한 국가 중 핀란드는 처분장 운영에 가장 근접해 있다. 1980년대부터 국가 차원에서 부지 확보 장기 전략을 설정하였고, 1995년 방사성폐기물 처분 사업자인 포시바(Posiva Oy)가 설립되었으며, 1999년 최종 부지로 유라요키(Eurajoki) 소재 올킬루오토가(Olkiluoto) 선정되었다. 2015년 2월 규제 기관인 STUK은 처분시설인 ONKALO 내부의 저장소 건립을 승인하였으며, 2020년 처분장이 운영될 예정이다.⁶⁵⁾ 성공적인 핀란드의 사례를 보면 처분장 계획에서 운영까지는 대략 40년이 소요된다. 이 기간 중 처분장 확보가 절반이고 나머지 절반에도 상업 운영 시점 조율 기간이 포함되는 것을 감안하면, 총 소요기간은 국가가 사회적 합의를 얼마나 잘 이끌어 내는가에 의해 좌우됨을 알 수 있다. 우리나라는 2009년 방사성폐기물관리법(제6조 2(공론화 등))을 개정하여 공론화의 법적 근거를 만들고 2013년 공론화 위원회를 출범시켜 부지 선정 과정에서 사회적 합의를 도출하고자 노력하고 있다.

5.3. 처분 연구 사업 관리 및 체제 구축

간과해서는 안될 것은 직접 처분을 추진하는 국가들이 사회적 합의를 논할 때에는 처분 관련 기술 확보를 전제로 하고 있다는 점이다. 최근 NRC는 2014년 보편적 안심확인(Waste Confidence) 수평판⁶⁶⁾을 공표하면서 기술적인 측면만을 고려하면 사용후핵연료 처분장은 계획 입안 단계에서 최종 운영 단계까지 약 25년에서 30년이 소요된다고 언급하였다. 이는 사용후핵연료 처분 사업자인 DOE가 2013년에 제시한 처분장 준공·운영 목표인 2048년과 부합한다. 즉 사업자와 규제기관 모두 향후 30년 이내에 처분장 건립과 관련된 기술적 문제는 해결될 것으로 판단하고 있다. 이를 국내에도 원용하면 지속적으로 처분 기술 개발에 대한 적극적인 연구 지원이 있는 경우 2024년 사용후핵연료 중간저장 시설이 준공·운영될 시점에 본격적으로 사용후핵연료 처분 사업을 추진하면 이로부터 30년이 지난 2055년경 처분장 준공·운영이 가능하다는 판단을 할 수 있다. 현재 우리나라의 영구 처분과 관련된 기술 개발 수준은 미

국, 영국, 스웨덴, 프랑스, 일본에 비해 미미하므로 향후 약 10년 동안 선진 기술 수준에 도달할 수 있도록 기술 개발 계획을 세워야 한다. 미국의 경우 1982년 핵폐기물정책법이 제정된 이래 20조 이상의 연구비가 직접 처분 연구에 투입된 바 있는바, 우리나라도 실제 사업에 적용되는 기술을 충분히 확보할 수 있도록 구체적이고 효율적인 재원 공급이 이뤄져야 할 것이다.

특히 초기 연구 단계에서는 지질 특성 연구, 실제 사업 준비 단계에서는 처분 용기 및 관련 시스템 개발 연구, 초기 연구부터 실제 인허가 심사 전 과정에서는 방사선적 안전성 평가 연구가 진행되어야 한다. 이러한 연구 개발 사업을 유기적으로 추진하기 위해서는 연구 사업들을 종합적으로 평가하는 프로그램을 최우선적으로 갖춰야 한다. 특정 현안과 관련된 우선 순위가 높은 연구 항목을 도출하기 위해서 미 WIPP (Waste Isolation Pilot Plant)사업에서 개발된 SPM (system prioritization method)⁶⁷⁾과 같은 연구 주제 선정 프로그램이 개발되어야 하며, 장기 처분 사업에 필수적인 품질 보증 시스템 개발 등 핵심 연구 인프라 구축 사업이 시급하게 추진되어야 한다.

5.4. 수출 관련 관리 정책

적극적인 원전 수출 사업에 대비한 사용후핵연료 관리 정책도 수립되어야 한다. 원전 수출은 원전 건설·운영을 통해 전기료를 징수하는 방식과 운영권을 수입국에 턴키 베이스(turn key base)로 넘기는 방식으로 나눌 수 있다. 원전 수출에서 사용후핵연료 관리가 고려되는 경우는 전자의 경우와 턴키 베이스로 하되 핵연료 공급 및 사용후핵연료 관리 문제는 해외에 의존해야 하는 소위 ‘골드 스탠다드(gold standard)’ 준수국들이다.

최근 원전을 건설하기로 한 이집트, 요르단, 베트남을 포함해서 동유럽, 동남아시아, 아프리카 국가들의 원전 수입은 지속적으로 이뤄질 전망이다. 원전 수출 시 우리나라가 경쟁국인 일본, 중국 등에 비해 대규모 재정 지원 안을 제공하는 것은 어려울 수 있다. 현실적인 대안으로 터키 원전 수출 시 고려했던 우리 측 부담으로 원전을 건설하고 현지 전력 판매를 통해 비용을 회수하는 방식이 있다. 이 때, 수출 원전의 사용후핵연료 관리 방안으로는 저장/처분 시설을 도입국에 건설하거나, 국내로 해외 발생 사용후핵연료 반입하거나, 제 3국에 위탁하는 세 가지 안이 있다. 원전 수입국이 대규모 또는 지속적으로 도입하는 경우 수입국에서 저장 및 처분 시설 도입을 추진하는 것이 타당할 수 있으나 소규모로 원전을 도입하는 경우 수입국 입장에서 관리 부담을 원전 운영 주체에게 위임할 수 있다. 이런 경우를 대비해 우리나라는 향후 국제 공동 저장 및 처분 시설을 운영하는 ‘Plan B’가 필요하다. 기존 국제 공동 처분장 건립 실패 사례들을 교훈 삼아, 지정학적 지역 불안 요소를 걱정하는 미국 등과 컨소시엄을 구성하여 수요자들이 유치 후보국을 위한 국제법률적, 재정적 사안들을 마련하여 제시하는 등의 노력이 필요할 것이다.

5.5. 처분 관련 핵안보 사안

사회적 동의, 기술 보유 현안과 더불어 최근 주목 받는 것은 사용후핵연료 처분 관련 핵안보 사안이다. 사용후핵연료는 원자로에서 적출된 이후 단기간 동안은 단반감기 핵분열 생성물로 인해 고방사능을 방출하게 된다. 일부를 제외한 핵분열 생성물로 인한 방사능은 단시간에 소멸되며 수백년이 경과하면 방사능 준위는 현저하게 낮아져 접근이 가능할 수 있다. 일정기간 경과 후 악의적인 행위자가 침입하여 사용후핵연료를 강탈하거나, 처분 당시 의도적으로 다른 물질과 사용후핵연료를 바꿔 지하 처분장에 거치되는 경우 안보에 위협이 될 수 있으므로 이를 방지하기 위한 기술적, 제도적 방안이 논의되어야 한다. 일부에서는 처분장 운영 기간 종료 후에도 예상치 못한 사건 대비해서 또는 미래 기술로 사용후핵연료를 처리하기 위해서 영구 처분 사용후핵연료의 회수 가능성을 열어두고 있는데,⁶⁸⁾ 이러한 회수성(retrievability)은 핵안보 관점에서는 위험 인자이므로 이를 고려한 종합적인 논의가 이뤄져야 한다. 또한 향후 심층 처분될 사용후핵연료 방호 측면에서 악의적인 행위 수준을 분석하고 안보 설비 및 체계를 검토하는 것도 필요하다. 유럽을 중심으로 IAEA에서 추진하고 있는 ASTOR 프로젝트에서는 관련 정책 원칙 수립 등을 선도하고 있는 바,⁶⁹⁻⁷¹⁾ 우리나라도 적극적으로 이러한 국제 동향에 맞추어 정책 및 기술 개발을 추진해야 한다.

6. 결론

사용후핵연료 관리는 국가 에너지 수급 정책, 국제 비확산 체제, 경제성과 기술성 그리고 무엇보다 최근 중요한 사회적 수용성 등 다양한 측면을 고려해야 한다. 따라서 특정 국가의 성공 사례가 다른 국가에서도 동일한 결과를 가져오는 것은 아니므로, 각 국가의 모범 사례 분석을 바탕으로 국내 실정에 적합하도록 정책을 수립하여야 한다.

본 논문에서는 사용후핵연료 관리의 단기 현안인 중간저장 및 관련 제반 사항과 최종 관리 방안인 영구 처분 그리고 장기 관리의 옵션으로 고려될 수 있는 재처리 기술에 대해 조망하였다. 관리 방안의 종합적인 계획 수립을 위해서는 우리나라 실정을 고려하여 핵연료 전주기에 대한 경제성 평가가 수행되어야 한다. 이후, 그에 기반한 유망 기술의 집중 투자 및 유기적인 사업관리가 이뤄져야 한다. 이와 관련한 ‘부합성 평가’는 후속 논문으로 상세히 다룰 예정이다.

저장 관리에 대해서는 일부 제도 개선과 기술 개발 및 국제 협력을 통해 원활한 사업 추진이 가능할 것으로 예상된다. 단, 원전 해체에 따른 사용후핵연료 및 방사성폐기물 관리 방안이 마련되어야 한다. 체계화 되어있지 않은 영구처분에 대해서는 해외 선진국에 비해 미미한 수준이므로 연구 개발에 시급한 투자가 필요하다. 그러나 연구 개발 계획을 대규모로 확대 추진하는 경우 지엽적 주제에 과다 투자

되는 부작용이 발생할 수 있으므로 SPM (system prioritization method)과 같은 연구 주제 선정 프로그램의 개발과 통합 품질 보증 체제 구축이 선행 되어야 한다. 더불어 연구 및 규제 분야 상호 역할 분담 등을 통해 효과적인 기술 개발 체제를 구축하는 것이 무엇보다 필요하다. 현재로서는 직접처분이 국제적으로 유망한 방안이지만 에너지 시장은 불확실성이 존재하므로 장기적인 대안으로서 재처리 연구는 지속되어야 한다.

국내에서는 지금까지 사용후핵연료 장기 관리에 대한 의견을 산업부와 미래부 등 원자력 진흥 기관들에서 제시하였으며 국가 원자력 안전 및 핵비확산·핵안보를 총괄하는 규제기관의 입장 표명은 없었다. 이는 규제기관인 원자력안전위원회의 비교적 짧은 운영 기간에 기인한 현실적 제약이 크다 할 수 있다. 하지만 최근 규제기관들은 국민들이 안심하는 원자력 규제 차원에서 선도적인(proactive) 규제 및 안전 문화 창달을 위해 많은 노력을 기울이고 있으므로 이러한 현안은 조속히 해소될 것으로 기대한다.

Acknowledgement

본 연구는 원자력안전위원회와 한국방사선안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업(No. 1305017)과 한국원자력통제기술원에서 수행한 ‘사용후핵연료주기 관리 방안 연구(B5-8162)’의 연구결과입니다.

Abbreviations

DOE	Department of Energy
BRC	Blue Ribbon Committee
UNF	Used Nuclear Fuel
NWPA	Nuclear Waste Policy Act
YMP	Yucca Mountain Project
MDO	Management and Disposal Organization
WCS	Waste Control Specialists
GNEP	Global Nuclear Energy Partnership
NRC	Nuclear Regulatory Commission
NWMO	Nuclear Waste Management Organization
WTI	West Texas Intermediate
GTCC	Greater than Class C
PNNL	Pacific Northwest National Laboratory
ISFSI	Independent Spent Fuel Storage Installation
EPRI	Electric Power Research Institute
ORNL	Oak Ridge National Laboratory
SSI	Safety Security Interface
SSEL	Safe Shutdown Equipment List
SSCs	Structures, Systems and Components
SNL	Sandia National Laboratory

NNSA	National Nuclear Security Authority
IAEA	International Atomic Energy Agency
NFST	Nuclear Fuel Storage & Transportation
ANL	Argonne National Laboratory
WNTI	World Nuclear Transport Institute
CLAB	Center Interim Storage for Spent Fuel
ANFC	Advanced Nuclear Fuel Cycle
TUREX	Trans Uranic Extraction
PUREX	Plutonium-Uranium Extraction
UREX	Uranium Extraction
COEX	Co-Extraction of Actinides
GANEX	Group Actinide Extraction
TMI	Three Miles Island
THORP	Thermal Oxide Reprocessing Plant
TBP	Tributyl Phosphate
SNT	Sensitive Nuclear Technology
NSG	Nuclear Supply Group
NPT	Nuclear Non-proliferation Treaty
KMP	Key Measurement Point
MOX	Mixed Oxide Fuel
DUPLIC	Direct Use of Spent PWR Fuel in CANDU
OREOX	Oxidation Reduction of Oxide fuel
TRU	Trans Uranium
IFR	Integral Fast Reactor
ONWI	Office of Nuclear Waste Isolation
OCRWM	Office of Civilian Radioactive Waste Management
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant
EPA	Environmental Protection Agency
SPM	System Prioritization Method

KSEE

References

1. U. S. Congress, "Nuclear Waste Policy Act of 1982," *Pub. Law*, **97**(425), 42(1983).
2. U. S. Congress, "Nuclear Waste Policy Amendments Act of 1987 (NWPAA)," 100th Congress, 1st Session(1987).
3. World Nuclear News, http://www.world-nuclear-news.org/WR-Swedish_waste_fees_rise_to_reflect_repository_cost-1010118.html, 10 October(2011).
4. World Nuclear News, http://www.world-nuclear-news.org/WR-Approval_for_expanded_Olkiluoto_repository-0406098.html, 4 June(2009).
5. Korea Institute of Nuclear Safety, KINS/RR-1255(2015)
6. Hamilton, L., Scowcroft, B., Ayers, M., Bailey, V., Carnesale, A., Domenici, P., Eisenhower, S., Hagel, C., Lash, J. and Macfarlane, A., "Blue Ribbon Commission on America's nuclear future: report to the secretary of energy," Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future (BRC), Washington, DC(2012).
7. Department of Energy, Strategy for the management and disposal of used nuclear fuel and high-level radioactive waste (2013).
8. Sandia National Laboratories, "Evaluation of options for permanent geologic disposal of spent nuclear fuel and high-level radioactive waste-Vol. I," SAND2014-0187P(2014).
9. Wigeland, R., Taiwo, T., Ludewig, H., Todosow, M., Halsey, W., Gehim, J. and Jubin, R., "Nuclear fuel cycle evaluation and screening-Final report," Idaho National Laboratory Report, INL/EXT-14-31465, FCRD-FCO-2014-000106(2014).
10. Nutt, M., "Nuclear fuel storage and transportation planning project (NFST) overview," In proceedings of INMM 30th Spent Fuel Seminar, Arlington(2015).
11. Broussard, B., "Texas low-level radioactive waste disposal status update," WM Symposia Phoenix, Arizona, 25 Feb(2013).
12. Nuclear Energy Institute, <http://globenewswire.com/news-release/2015/02/09/704548/10119322/en/West-Texas-Facility-Promising-Project-for-Interim-Storage-of-Used-Nuclear-Fuel.html#sthash.NHerhUOn.dpuf>, 9 February (2015).
13. Lyons, P. B., "Management, transportation, storage and disposal of used nuclear fuel and HLW in the United States," In proceedings of INMM 30th Spent Fuel Seminar, Arlington (2015).
14. U. S. Code of Federal Regulations, Title 10, Part 61, "Licensing requirements for land disposal of radioactive waste," (2006).
15. Kirk, J. S., "GTCC and spent nuclear fuel interim storage," In proceedings of INMM 30th Spent Fuel Seminar, Arlington(2015).
16. Maheras, S. J., Best, R. E., Ross, S. B., Buxton, K. A., England, J. L. and McConnell, P. E., "Preliminary evaluation of removing used nuclear fuel from shutdown sites," Department of Energy(2013).
17. Cantlon, J., "Nuclear waste management in the United States: The Nuclear Waste Technical Review Board's perspective," Topseal Conference, June(1996).
18. Bevelacqua, J. J., "Nuclear regulation in the united states and a possible framework for an international regulatory approach," *Int. Nuclear Saf. J.*, **2**(1), (2013).
19. U. S. Code of Federal Regulations, Title 10, Part 72, "Licensing requirements for the independent storage of spent nuclear fuel, high-level radioactive waste, and reactor-related greater than class C waste," (2006).
20. Energetics Inc., "Life beyond 60 workshop summary report," NRC/DOE Workshop U. S. Nuclear Power Plant Life Extension Research and Development, Bethesda, Maryland (2008).
21. Hanson, B., Alsaed, H., Stockman, C., Enos, D., Meyer, R. and Sorenson, K., "Gap analysis to support extended storage of used nuclear fuel," Nuclear Waste Technical Review Board Fall 2011 Board Meeting, Utah(2011).
22. Sjoland, A., "The Swedish nuclear fuel management," In proceedings of INMM 30th Spent Fuel Seminar, Arlington (2015).

23. Einziger, R. E., Atkin, S. D., Pasupathi, V. and Stellrecht, D. E., "High temperature postirradiation materials performance of spent pressurized water reactor fuel rods under dry storage conditions," *Nuclear Technol.*, **57**(1), 65~80(1982).
24. Goll, W., Spilker, H. and Toscano, E. H., "Short-time creep and rupture tests on high burnup fuel rod cladding," *J. Nuclear Mater.*, **289**(3), 247~253(2001).
25. Aomi, M., Baba, T., Miyashita, T., Kamimura, K., Yasuda, T., Shinohara, Y. and Takeda, T., "Evaluation of hydride reorientation behavior and mechanical properties for high-burnup fuel-cladding tubes in interim dry storage," *ASTM Special Technical Publicat.*, **1505**, 651~673(2009).
26. Valenzano, M., "The future of used fuel transportation in the US," WM Symposia Phoenix, Arizona, 25 Feb(2013).
27. Supko, E. M. and Schwartz, M. H., "Overview of high-level nuclear waste materials transportation: Processes, regulations, experience and outlook in the US," Energy Resources International, Inc, ERI-2030-1101(2011).
28. Code of Federal Regulations, Title 49, Transportation, Part 174, "Carriage by rail," (2011).
29. Code of Federal Regulations, Title 49, Transportation, Part 174, "Carriage by public Highway," (2011).
30. Korea Institute of Nuclear Safety, KINS/RR-1105(2014).
31. World Nuclear News, <http://www.world-nuclear-news.org/NN-Swedish-ship-makes-first-shipment-2801144.html>, 28 January (2014).
32. Narayanan, P., "NUHOMS extended optimized storage," In proceedings of INMM 30th Spent Fuel Seminar, Arlington (2015).
33. Neau, H.-J., "International Spent Fuel Issue," In proceedings of INMM 30th Spent Fuel Seminar, Arlington(2015).
34. Nuclear Waste Management Organization, Implementing adaptive phased management 2014 to 2018, March(2014).
35. Chapman, M., "Overview of used fuel management in Canada," Atomic Energy Energie atomique of Canada Limited du Canada limitee(2010).
36. Nuclear Waste Management Organization, "Progress through collaboration-Annual Report 2014," (2014).
37. U. S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Reactor Regulation, "Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants: LWR edition," NUREG-0800, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC(1987).
38. IAEA, Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities, IAEA Nuclear Security Series 13, INFCIRC/225/Rev. 5(2011).
39. Bare, W. C. and Torgerson, L., "Dry cask storage characterization project-Phase 1: CASTOR V/21 cask opening and examination," NUREG/CR-6745, U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC(2001).
40. English, B., "Wireless Sensors for Dry Cask Monitoring," In proceedings of INMM 30th Spent Fuel Seminar, Arlington (2015).
41. Liu, Y., "Monitoring Helium Integrity in Welded Canisters," WM Symposia Phoenix, Arizona, 25 Feb(2013).
42. Sugano, T., Tsubota, H., Kasai, Y., Koshika, N., Ohnuma, H., Von Riesenmann, W., Bickel, D. and Parks, M., "Local damage to reinforced concrete structures caused by impact of aircraft engine missiles Part 1. Test program, method and results," *Nuclear Eng. Design*, **140**(3), 387~405(1993).
43. Sugano, T., Tsubota, H., Kasai, Y., Koshika, N., Itoh, C., Shirai, K., von Riesenmann, W., Bickel, D. and Parks, M., "Local damage to reinforced concrete structures caused by impact of aircraft engine missiles Part 2. Evaluation of test results," *Nuclear Eng. Design*, **140**(3), 407~423(1993).
44. Anton, S., "HI-STORM UMAX underground storage systems," In proceedings of INMM 30th Spent Fuel Seminar, Arlington (2015).
45. Bean, R. S., Bjornard, T. A. and Hebditch, D. J., "Safeguards-by-design: An element of 3S integration," Idaho National Laboratory Report, INL/CON-09-15652(2009).
46. Suzuki, M., Izumi, Y., Kimoto, T., Naoi, Y., Inoue, T. and Hoffheins, B., "Investigating 3S synergies to support infrastructure development and risk-informed methodologies for 3S by design," IAEA-CN-184/64(2010).
47. Zakariya, N. I. and Kahn, M., "Safety, security and safeguard," *Annal. Nuclear Energy*, **75**, 292~302(2015).
48. Nuclear Safety and Security Commission, "Development of national interface technology between nuclear safety and security," (2013).
49. Lee, N. Y., Lee, J. H., Yoo, H. S. and Jeong Y. H., "Two views on nuclear material accounting and control (NMAC)," Symposium on International Safeguards: Linking Strategy, Implementation and People, Vienna(2014).
50. Korea Nuclear Nonproliferation and Control, KINAC/CR-009/2014(2014).
51. Korea Nuclear Nonproliferation and Control, KINAC/CR-008/2014(2014).
52. National Research Council, Proliferation Risk in Nuclear Fuel Cycles: Workshop Summary, The National Academies Press, Washington, DC(2011).
53. National Research Council, Improving the Assessment of the Proliferation Risk of Nuclear Fuel Cycles, The National Academies Press, Washington, DC(2013).
54. Nuclear Energy Agency, Management of Separated Plutonium: The Technical Options, OECD(1997).
55. Nuclear Energy Agency, Advanced nuclear fuel cycles and radioactive waste management, OECD(2006).
56. Pasamehmetoglu, K., "Advanced fuels campaign execution plan," Idaho National Laboratory, INL/EXT-10-18954, FCRD-FUEL-2010-000058(2010).
57. The U. S. Government Publishing Office, "Proposed subsequent arrangement," *Federal Register*, **78**(105), 32640~32643 (2013).
58. Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/RR-2022/99(1999).
59. Yang, M. S., Choi, H., Jeong, C. J., Song, K., Lee, J., Park, G., Kim, H., Ko, W., Park, J. and Kim, K., "The status and prospect of the DUPIC fuel technology," *Nuclear Eng. Technol.*, **38**(4), 359~374(2006).

60. U. S. Department of Energy, 1986b, Environmental assessment overview for Deaf Smith County Site, Texas: OCRWM, DOE/RW-0075(1986).
61. U. S. Department of Energy, 1986d, Environmental assessment overview for Hanford Site, Washington: OCRWM, DOE/RW-0076(1986).
62. U. S. Department of Energy, 1986g, Environmental assessment overview for Yucca Mountain Site, Nevada: OCRWM, DOE/RW-0079(1986).
63. SKBF, Final Storage of Spent Nuclear Fuel - KBS-3: Summary, Swedish Nuclear Fuel Supply Co./Division KBS, Stockholm(1983).
64. KBS, Handling of spent nuclear fuel and final storage of vitrified high level reprocessing waste, KBS, Stockholm (1977).
65. Teollisuuden Voima Oy, Final disposal of spent fuel in the Finnish bedrock - Preliminary site investigations, Nuclear Waste Commission of Finnish Power companies, Report YJT-92-32(1992).
66. The U. S. Government Publishing Office, "Continued storage of spent nuclear fuel," *Federal Register*, **79**(182), 56238~56263(2014).
67. Helton, J., Beyeler, W. and Hora, S., "Conceptual basis of a systems prioritization methodology for the Waste Isolation Pilot Plant," *Reliability Eng. System Saf.*, **57**(3), 203~222 (1997).
68. Nuclear Energy Agency, "Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel," NEA/RWM/R(2011)4, (2011).
69. Demuth, S. F., "Safeguards and Security Considerations for Permanent Geologic Disposal of Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste," (2014),
70. Fritzell, A., "Concerns when designing a safeguards approach for the back-end of the Swedish nuclear fuel cycle," (2006).
71. Okko, O., "Experts' Group meeting Report on Task JNT/C 1204 of the Member States' Support Programme to IAEA Safeguards," (2004).
72. Korea Radioactive Waste Management Corporation, Project Number 2009T100200028(2011).
73. Korea Radioactive Waste Agency, Project Number 2011710 200011(2014).
74. Lee, S., Cho, S.-S., Jeon, J.-E., Kim, K.-Y. and Seo, K.-S., "Impact analyses and tests of concrete overpacks of spent nuclear fuel storage casks," *Nuclear Eng. Technol.*, **46**(1), 73~80(2014).
75. World Nuclear News, <http://www.world-nuclear-news.org/NP-South-Korea-wins-revisions-to-nuclear-treaty-with-USA-2241501.html>, 22 April (2015).