

# 한국 원자력 발전 시스템의 기술적 현안과 대책



정근모

아주대학교 에너지시스템연구센터 교수

이 글은 지난 1999년 11월 18일 “선도과학기술 개발”을 주제로 과총회관에서 한국과학기술한림원이 주관한 “제1차 한림 국제 심포지엄”에서 정근모 교수가 강연한 내용을 번역한 것이다.

## 1. 머리말

1993년도에 세계에너지회의 (WEC, World Energy Council)는 “Energy for Tomorrow’s World”라는 제목의 특별보고서를 발간하였는데, 이 보고서는 지속가능형 개발 (sustainable development)을 위해서 반드시 해결해야 할 범 세계적, 지역적, 국가적 문제들에 대한 대처 방안의 대강을 제시하고 있다. 이 보고서에서 내린 주요 결론 및 권고들 중 하나는 원자력 발전을 지속해야 하며 이를 위해서는 원자력발전소를 대중의 우려 없이 안전하게 투입할 수 있는 능력을 견지하고, 더욱 개발해야 한다는 것이었다. 1990년대에 일어난 수많은 변화들을 감안하여 WEC 특별위원회는 이 보고서를 현재 개정 중에 있는데 몇 주전에 최종 초안 검토 회의를 가졌었다. 검토 결과 초판 보고서의 분석과 권고 내용들의 대부분은 변함이 없으나 지속가능형 개발로의 진전이 더디며 불확실하

다는 것을 알 수가 있었다. 실제로 이에겐 핵심한 도전들이 이미 존재하고 있으며 수많은 정책 결정과 기술개발이 시급히 그리고 집중적으로 이루어져야 한다.

기후변화에 관한 유엔 기본 협약 당사국들은 제3차 총회를 (COP3) 1997년 12월 교토에서 개최하였다. COP3에서는 지속적인 세계 경제사회 개발을 저해하지 않고 위험한 기후 변화를 방지할 수 있는 수준으로 대기 중 온실가스 농도를 안정시키길 목적으로 교토의정서를 채택하였다. 이 의정서는 지구 차원, 국가 차원의 에너지-환경 개발의 목표를 분명히 제시하고 있다. 그러나 유감스럽게도 후속 COP들은 교토의정서의 실행이 어렵다는 것을 보여주었다. 정책결정자들은 엄격한 이행 계획에 동의할 수가 없는 것이다. COP는 아직도 의정서 이행 절차 제정에 매달려 있으며 온실가스 저감과 에너지 대안 개발을 위한 자발적 행위를 권고만하고 있을 뿐이다. 부에노스아이레스에서 개최된 CDP4와 본에

1. 지속가능형 개발이란 현재의 요구를 충족시키는 가운데 미래 세대가 그들의 요구를 충족시키는 능력을 저해하지 아니하는 개발 방식이다. 경제사회 개발의 목표는 개도국이건 선진국이건, 시장경제이건 통제경제이건 간에 지속가능성의 관점에서 정의되어야 한다. 이러한 개발에서 경제와 사회는 점진적으로 변화된다.

서 개최된 COP5의 각국 대표들간에는 심각한 불만들이 팽배했으며, 전향적 자세의 결여에 대하여 많은 전문가들은 실망했다. 특히 에너지 전문가들은 에너지 공급과 환경 보호 관련 현 상황을 반드시 개선할 수 있는 기술적 옵션에 대한 토의 기회가 없었음을 주시하였다. 절차적인 문제에 대해서는 많은 토의가 있었으나 실질적인 문제에 대한 토의나 행동은 없었다.

아주 비근한 사례가 원자력이다. 원자력은 현재 전세계 발전량의 17%를 차지하고 있으며 (1998년에 약 2,360 TWh) 전력생산 과정에서 탄산가스를 발생시키지 않으므로 지속가능형 개발을 위한 에너지 생산에 분명히 긍정적으로 기여할 수가 있을 것이다. 그러나 COP에서는 원자력의 미래 역할과 첨단 원자력 발전 기술 연구개발에 대한 진지한 토의가 없었다. 원자력 발전 기술은 시작된지 이제 40년 정도이고 대부분의 운전중인 발전소의 나이를 감안하면 20년이다. 따라서 기술이라는 관점에서 원자력 발전 산업은 아직 젊은 산업인바 핵연료 주기 운영에서부터 원자로 설계 운전, 폐기물 관리, 해체까지 기존의 기술을 개선하기 위한 노력을 늘려야 한다. 아직은 젊기 때문에 여러 가지 기술경제적 문제들이 원자력 개발의 현안으로 존재하고 있는 것이다. 따라서 기존 원자력 시설이나 원자력 발전소의 안전 증진, 핵무기 확산 위험성의 근원적 제거, 방사성폐기물의 처리, 안전한 처분, 그리고 무엇보다도 대중의 충분한 이해를 도모하기 위하여 원자력에 대한 올바른 인식과 원자력 관리의 투명성을 제고하는데 힘써야 한다. 지속 가능한 개발에 있어서 원자력 발전과 기타 평화적 원자력 이용이 지니는 막대한 잠재력을 고려할 때 원자력 이용 확대를 저해하는 현존 장애들을 극복해야 한다. 이는 특히 천연 에너지 자원이 부족한 가운데 청정 에너지 공급 증대를 필요로 하는 한국과 같은

공업국가에 있어서 중요하다.

## 2. 한국의 원자력 에너지 개발 과정

최초의 원전인 고리 1호기의 상업운전을 1978년도에 개시한 이래 한국의 원자력 발전 프로그램은 양적으로나 질적으로나 꾸준히 확대되어 왔다. 현재 16기의 원전이 가동중이며 4기의 원전을 건설 중인데 이들 원전은 한국 총발전량의 약 40%를 생산하고 있다. 한국형표준원전의 설계는 (Korean Standardized Nuclear Power Plant, KSNP) 세계적으로 아주 우수한 설계들 중 하나인 것으로 인식되고 있는데, 현재 2기의 KSNP를 한반도에너지개발기구 프로그램의 일환으로 북한에 건설 중이다. 1963년도에 방사성동위원소의 의료, 연구 부문 이용을 위한 최초의 인허가가 발급된 이래로 방사성동위원소 이용 인가 시설의 수는 매년 10~15% 비율로 증가되어 1999년도 9월 현재 이들 시설의 수는 의료, 연구, 교육, 산업 분야에서 총 1,450개에 이르렀다. 한국이 설계, 건설한 연구용 원자로인 하나로는 세계에서 가장 용도가 다양한 시설로 인정되고 있다. 한국의 원자력 관련 기관들은 외국이나 국제기구에 기술 지원 서비스를 제공하고 있다. 이러한 기술적 업적들은 지난 40여년간 맨손으로 시작하여 이룬 것이다. 그 어떠한 측면에서 평가해도 한국은 평화적 원자력 이용의 최선봉으로 인정받고 있다. 어떻게 이러한 일이 일어났을까?

1953년, 한국전쟁이 휴전되고 미국의 아이젠하워 대통령이 "평화를 위한 원자력" 선언을 할 당시 초대 한국 대통령은 과학기술을 통한 국가 개발 정책을 선언하였다. 한국은 국제원자력기구 최초 서명국 중 하나이다. 1957년, 한국은 최초의 연구용 원자로를 착공한 후 정부 조직으로서 1959년에 원자력원을 (한국원자로연

구소의 전신) 창설하였다. 원자력원장은 국무위원의 지위를 지니면서 원자력 관련 업무 뿐 아니라 과학기술시스템 개발을 관장하였다. 젊고 유능한 학생들과 교수진들이 정부 지원 및 국제 장학 지원으로 원자력 관련 기초 과학기술 분야 훈련을 받았다. 특히 중요한 사실은 한국의 정치지도자, 지식인 그리고 대중들이 과학기술을 통한 국가 건설이라는 비전에 동의하여 그 당시 젊었던 한국의 과학기술계를 강력히 지원한 것이다. “하면 된다”라는 신념이 사회를 일깨웠고 발전의 원동력을 제공하였다.

1968년에 한국은 미국의 Westinghouse사와 600MWe급 가압경수로 원자력발전소 건설을 위한 턴키 계약을 체결하였다. Westinghouse의 주도하에 미국의 Gilbert는 설계용역을 담당하였으며, 영국의 GEC는 터빈발전기를 공급하였고, 한국의 현대건설이 시공 업무를 담당하였는데, 1978년에 상업운전을 개시하였다. 두 번째 원자력발전소는 기압중수형으로 (CANDU) 역시 턴키 방식으로 건설되었다. 그 이후로 한국전력공사는 후속 원자력발전소 건설에서 분할발주방식을 채택하여 설계, 제작, 정비, 시공 부문의 국내 업체들이 해외 제휴 업체들의 지원 하에 업무를 수행하도록 사업 조직을 운영하였다. 한국전력기술(주)는 설계 업무를 한국중공업(주)는 주요기기의 제작을, 한전기공(주)은 정비를, 한국원전연료(주)는 핵연료의 설계, 제조를 국내 유수의 건설업체들은 시공을, 한국전력공사는 건설사업을 관리하고 발전소를 운전하는 가운데 한국의 과학기술인과 기능인들은 원자력 발전 기술 노우하우를 습득하였다.

한국 원자력 산업이 원숙기로 접어들기 위한 도약은 기술자립 촉진을 위한 원자력발전소 표준설계 개발을 결정하면서 시작되었다. 1983년, 과학기술부는 한국전력기술에 원자력발전소 표준화 제1단계 선행연구를 위한 자금을 지원하였

다. 이 1단계 연구는 한국전력그룹의 결성, 운영을 통한 900MWe급 가압경수로형 원자력발전소 표준 설계가 타당한 것으로 결론을 내렸다. 이후 약 3년에 걸친 제2단계 연구 과정에서 엔지니어링 팀은 원전 운전, 정비 기록, 발전소 부지 특성, 설계 개선 개념, 발전소 건물 및 기기의 최적 배치, 외국의 표준화 경험들을 연구하였다. 참조 설계를 선정하기 위한 국제 경쟁입찰이 실시되었는데 가장 중요한 선정 조건은 공급자의 기술이전 의지였다. 최종적으로 미국 Combustion Engineering의 System 80 원자로 계통이 참조설계로 선정되었으며 Combustion Engineering과 미국의 설계용역업체인 Sargent Lundy의 기술 지원으로 한국전력그룹은 1,300MWe급 System 80을 1,000MWe급으로 축소 설계하여 참조원전인 영광 3,4호기를 건설하였다. 이후, 인간공학적 설계 등의 결과로 원자로심 사고 확률을 종전의 1/10로 줄이는 등 많은 설계 개선을 이루며 표준원자력발전소는 건설되었다. 국제원자력기구의 안전성 평가 전문가 집단의 평가 결과 이 표준원자력발전소의 설계가 높은 점수를 받은 것은 주목할 만한 일이다. 미국의 Idaho 국립연구소도 핵증기공급계통의 설계 변경에 대한 특별 안전성 평가를 실시하여 문제가 없음을 확인하였다. 한국 기술자들의 이렇듯 끊임없었던 노력은 울진 3,4호기의 준공, 상업운전으로 열매를 맺어 “한국형표준원자력발전소”(KSNP)라는 공식 명칭을 부여받게 되었다. 1995년 미국의 ‘Power Engineering’ 잡지는 그 해의 최우수 프로젝트로 KSNP를 선정하였다.

이러한 KSNP의 성공담은 신기술 기초 연구, 엔지니어링 개발, 상업화의 경쟁력이 부족한 개발도상국들이 첨단 제품이나 시스템을 개발하는데 유용한 중간진입전략의 교과서적인 사례이다. 한국의 원자력계는 국제 기술이전을 현명히 활용하고 효율적인 사업관리와 강력한 추진

으로 취약점을 극복하였다. KSNP 설계 전과정에서 설계, 시공, 운전 부문에서의 안전 특성 증진에 최역점이 주어졌다. KSNP 사업의 가장 중요한 업적은 그 성능으로 인한 경제적 이점이 아니고, 향후 한국 원자력계가 보다 나은 원자력 에너지와 기술 활용을 위한 연구개발을 착수할 자신감을 지니도록 한 것이다.

### 3. 원자력 발전의 기술적 쟁점들

원자력 발전이 지속가능 개발을 위해서 매우 필요함에도 불구하고 현재 세계 원자력 발전의 침체 상태는 원자력에 부정적인 경제적 환경 때문이라고들 한다. 미국의 경우 수 년 전에 이미 원자력발전소 건설은 중단되었으며, 미국의 전력회사들은 신규 원자력발전소 건설에 더 이상 흥미가 없다. 그들은 비생산적인 간섭과 과중한 규제 비용에 기진맥진해 있다. 유럽의 경우 국가별 전력망 통합과 동유럽 전력망과의 통합으로 600GWe의 통합전력망이 구축되었는데, 이들 통합전력망의 첨두전력수요가 450GWe 정도이므로 유럽은 33%의 잉여 발전 용량을 보유하게 되었다. 따라서 가까운 장래에 유럽에서 신규 원자력발전소가 건설될 전망은 없으며 첨두용 발전소가 필요하게 되면 유럽은 개스터빈복합발전소를 건설할 것이다. 이러한 미국과 유럽의 관측은 단기적 관점에서는 타당하다. 그러나 장기적으로 범세계적 에너지 수요를 보면 다른 결론을 발견하게 된다. WEC의 연구가 지적한 대로 세계의 20억 인구가 상업용 에너지 공급을 못 받고 있다. 즉, 현재의 세계 전력 공급량은 이미 수요 성장에 못 미치고 있다. 중국 한 나라만도 전력 수요 최소 성장을 감안해도 매년 10GWe의 신규 발전소를 건설해야 한다. 신규 발전 용량이 지구적 차원에서 필요한 것이다. 원자력 발전 산업은 향후 주

성장 산업이 될 수가 있다. 그러나 지구적 차원의 필요성에도 불구하고 현재는 그렇지 못하며 가까운 장래에 그렇게 될 것 같지도 않다. 왜 이러한 지경에 이르렀을까 하면서 단지 경제 환경만을 탓할 수는 없다. 우리는 기존 원자력 발전 기술이 대중의 신뢰감을 상실한데 그 근본 원인이 있다고 믿는다. 대중은 선진국 원자력계의 피곤한 방어적인 노력을 목도하고 있다. 대중은 원자력발전을 지속가능형 발전을 위한 타당한 선택으로 수용하기 이전에 기술적 혁신과 원자력계 지도자들과 과학기술자들의 열성을 보고 싶어하는 것이다.

원자력 발전에는 근원적으로 세 가지 기술적 쟁점이 존재한다. 이는 원자력발전소 안전에 대한 기술적 확신, 방사성 폐기물의 만족스러운 처분, 핵무기 확산 방지에 대한 수용 가능한 보장이자. TMI와 체르노빌 원자력발전소에서 발생했던 사고들은 대중의 뇌리에 원자로 안전에 대한 의구심을 각인시켰다. TMI의 원자로는 가압경수로로써 가압 경수를 냉각, 감속용으로 사용한다. 가압경수로는 냉각수상실사고를 방지하기 위해서 치밀한 안전 특성을 필요로 한다. 안전 특성을 지니기 위해서 여러 겹의 능동적 방법들을 채택하고 있다. 가압경수로는 고유 안전성이나 능동적 안전성을 지니지 않고 있다. 또한 중요한 사실은 사고 상황을 완화시키기 위해서 운전원이 개입해야만 하는 시점이 사고 후 수분 이내이어야 한다는 점이다. 운전원과 기능원들은 사고 징후의 심각성을 충분히 이해하고 사고 발생을 방지하기 위해서 그들이 개입해야 하는지를 즉각적으로 판단해야 한다. 유사한 결점들은 체르노빌 원자로와 동형인 RBMK나 기타 개스냉각로 설계에서도 발견된다. 이러한 관점에서 CANDU도 근원적 취약점에서 예외는 아니다. 이러한 원자로 안전 문제들은 고유안전성을 지니는 원자로 개발을 통해

서 해결해야 된다.

방사성폐기물 문제는 두 가지 면을 지닌다. 하나는 반감기가 짧은 방사성 폐기물은 처분하고 반감기가 긴 방사성폐기물은 처리하는 것이다. 일반적으로 방사성 폐기물은 방사능 강도에 따라 저준위, 중준위, 고준위로 분류한다. 고준위 폐기물의 대부분은 사용후핵연료에서 나오는데 여기에는 플루토늄이 함유되어 있다. 플루토늄은 원자력 초창기에는 핵탄도 원료로 생산되었었는데, 이는 혼합산화핵연료로 (MOX) 가공하여 원자로 내에서 연소시킬 수가 있다. 대부분의 사람들은 MOX 사용이 플루토늄 이동량을 증가시켜서 핵무기 확산자들의 불법 전용을 조장할 수도 있다는 이유로 이 MOX의 이용에 반대하고 있다. 반면에 플루토늄 239의 반감기는 약 24,000년으로 이를 매립 관리하는 것은 과학적으로나 사회학적으로나 불확실성이 개재된다. 격납 재료들이 그러한 장구한 세월 동안 강도를 유지하지 못할 수도 있으며 기존의 사회경제적 시스템이 이러한 유독 방사성 물질을 장기간 안전하게 지키도록 보장할 수 있다는 어떠한 확신도 없다.

우리는 다음 세대에 대해서 형평성을 지녀야 한다. 우리는 이러한 방사성 물질들을 무기한적으로 다음 세대에 전가시키면 안된다. 국제 원자력계는 MOX 형태로 플루토늄을 원자로에서 연소시키는 것에 찬성하고 있다. 관련 기술은 개발되었고 이미 사용 중이다. 실로 우리는 엄격한 통제 아래서 잉여 플루토늄 핵분열 연소를 가속시켜 세계가 핵무기 확산 위협에서부터 자유롭도록 해야된다.

원자로 내에서의 연소를 통해 플루토늄을 관리한다고 하더라도 반감기가 긴 핵분열생성물과 액티나이드 역시 따로 관리를 해야 한다. 건강에 대한 잠재적 위험도 측면에서 주목할 핵분열 생성물은 테크네튬 99 및 요드 129이다.

이 들은 반감기가 길고 핵분열 과정에서 상당량 생성되는데 지층 조건에서 일반적으로 수용성을 지니고 보통의 지하수 조건에서 비교적 빨리 이동된다. 또 중요한 핵분열생성물은 스트론튬 90과 세슘 137인데 이들은 핵연료 인출 후 최초 수십년 기간 중 주요 열발생원이다. 세슘 137은 또한 사용후 핵연료에서 발생하는 투과성 방사선의 주원인이다. 사용후핵연료의 장기적인 독성은 넵튬 237, 우라늄 234, 236, 플루토늄 239, 240, 242와 같은 액티나이드에 의해서 좌우된다. 비록 액티나이드의 독성은 높지만 지하수에 의한 방사성 핵종 이동이 주요 인자로 작용하는 장기피폭위험도 시나리오에서의 기여는 거의 없다. 이는 액티나이드가 대부분의 지하수 조건에서 비교적 불용성이고 따라서 이동하지 않기 때문이다.

따라서 우리는 장반감기, 유독 방사성 핵종들을 핵반응 공정을 통해서 더 짧은 반감기 또는 안전성을 지니는 핵종들로 변환시키는 것을 모색해야 한다. 목적은 간단하다. 즉, 최종 처분 폐기물의 방사성독성을 우라늄 광산 수준 이하로 줄이고 방사성 폐기물 저장 기간을 인간 수명 수준으로 줄이는 것이다. 또한 우리는 방사성폐기물의 최종 처분을 위해서 아주 강건한 지층 내 저장 시설을 건설할 수도 있다. 그러나 이러한 기술적 도전이 과학 기술 연구개발 노력과 잘 부합되지가 않고 있다. 대중은 우리의 다음 세대들에게 부담을 주거나 현저한 건강 위험을 초래할 수 있다는 우려로 인하여 방사성폐기물의 임시 저장이나 영구 저장을 수용하기를 주저하는 것이다.

세 번째 기술적 문제는 핵무기확산 방지이다. 현존 핵확산금지조약 체제가 지난 25년간 효력은 있었으나 실적은 혼란스러웠다. 법적, 외교적 측면에서의 근원적 취약성이 있어서 이라크나 북한이 보여준 것처럼 잠재적인 핵무기확산국

이 체제를 우회할 수도 있으며, 인도나 파키스탄 같은 국가들은 불평등 조약임을 이유로 체제에 반기를 들었고 인도는 핵무기 폭발로 이를 입증하였다. 어떤 국가가 핵무기의 강력한 개발 의지와 더불어 국제 사회로부터의 정치, 안보, 경제 제재를 감수하겠다는 의지를 지니면 핵무기 개발이 가능한 것이다. 또한 소규모의 불법 집단이 핵분열성 물질의 확보나 핵폭발 장치의 제작을 시도할 수도 있다. 이러한 위협을 완화시키기 위해서는 정치 경제 측면의 감시 체제와 더불어 핵무기 확산 저항성을 지닌 핵연료 주기가 필요하다. 이제까지의 국제 기구들은 정치경제적 감시 체제에 과도하게 의존하여 왔다. 따라서 지금은 핵무기 확산 문제를 기술적 관점에서 조명하여 기존의 핵무기확산방지조약 체제를 핵확산 저항성 핵연료주기 및 원자로 시스템으로 보강해야 할 시점이다. 기존의 우라늄-플루토늄 핵연료 주기는 근원적으로 핵무기 확산에 취약하다.

현존 원자력 발전 기술의 개발 역사를 회고해보면 명확한 결론이 한 가지 있다. 현존 원자력 발전 기술의 대부분은 초창기 개발 당시에 정부의 국방 프로그램으로부터 다양한 형태의 지원을 받았었다. 가압경수로 기술의 대부분은 원자력 잠수함 프로그램의 지원을 받았으며, 개스냉각로 기술은 핵무기 프로그램의 지원을 받았다. 비록 상당한 정부의 보조금을 받기는 했으나 차더라도 전력회사의 관점에서 기술이 선정되지 못했던 것에 문제가 있었던 것이다. 현존 원자력 발전 기술은 우라늄-플루토늄 핵연료 주기의 채택과 국방 프로그램의 잔류효과로 인하여 근원적 취약점을 지니고 있는 것이다.

비록 현존 원자력 발전 기술이 정부가 개발한 국방 기술을 활용하여 경제적 이득은 보았지만 원자력이 지니는 장기적 필요성과 이득이 우리로 하여금 이러한 기술적인 문제들의 근원

으로 접근하여 진정으로 평화적이고 안전한 원자력 에너지, 원자력 기술의 이용을 도모해야 하는 지상명령을 내리고 있는 것이다. 이러한 과제는 선진국의 원숙한 전문가들의 신뢰와 지원을 향유하며 새롭게 부상하는 원자력 발전 그룹들에게 맡겨질 가능성이 매우 높다.

#### 4. 한국을 위한 기술적 선택

21세기 전반기에 한국은 가압경수형 원전과 CANDU형 원전을 운영할 것이다. 비록 지역 혹은 국제 핵연료주기 시설 사업에 한국이 참여할 가능성이 있기는 하지만 한국이 우라늄-플루토늄 사용후 핵연료 재처리 시설을 자체 보유하지는 않을 것이 거의 확실하다. 국제 사회의 양해 아래 어떤 정책 결정이 내려지기 이전까지는 대부분의 사용후 핵연료는 원자력발전소 내에 저장될 것이다. 중간저장시설의 건설은 만약에 대중이 허용한다면 가능성이 있다. 일부 사용후 핵연료는 해외 재처리를 위탁하고 추출한 핵분열성 물질은 국내 원자로 내 연소를 위해서 MOX 핵연료 제조에 사용할 수가 있을 것이다. 한국의 후행핵연료주기 정책 결정의 주요 인자는 남한과 북한의 화합과 통일이다. 북한의 현존 시설들은 한국의 원자력 발전 프로그램에 영향을 줄 것이다. 따라서 한국의 원자력 연구 개발 및 이용 활동은 정치경제적 환경에 따라 매우 유동적임을 예측할 수가 있다.

앞으로 닥칠 정치경제적 환경에 대한 불확실성이 어떻든 간에 남한과 북한 모두 원자력 발전에 의존할 것이다. 남한은 원자력발전소 시설 용량 확대를 계속할 것이며, 40% 이상의 전력을 원자력에서 얻을 것이다. 북한 역시 KEDO 원자로를 통해서 상당 부분의 전력을 얻을 것이다. 원자력 발전 프로그램의 기술개발적 측면에서 한국의 원자력계가 직면한 몇 가지 도전

은 아래와 같다.

- 1) 기존의 우라늄-플루토늄 핵연료 주기를 지속해야 하는가 ?
- 2) 후행핵연료 주기 없이 기존의 원자력발전 프로그램을 지속할 수 있는가 ?
- 3) 재처리한 핵분열성 물질을 국내 원자로에서 연소시킬 수가 있는가 ?
- 4) 대중 수용 하에 원자력발전소 외부에 사용 후핵연료 임시저장시설을 건설해야 하는가 ?
- 5) 장반감기 방사성 액티나이드와 핵분열생성 핵종을 어디에 어떠한 형태로 저장 관리해야 하는가 ?
- 5) 단반감기 방사성 폐기물을 어디에 저장, 관리해야 하는가 ?
- 6) 가압경수로 원전 및 CANDU 원전의 개량형 모델을 이들의 근원적 기술 취약점에도 불구하고 계속 건설해야 하는가 ?
- 7) 필요성이 명백한 단기적인 연구개발, 엔지니어링 활동 이외에 어떠한 장기적인 연구개발 주제가 한국의 원자력발전 그룹에게 개방되어 있는가 ?
- 8) 원자력 발전 분야에서 실현 가능한 지역 협력 프로젝트를 한국이 개발할 수 있는가 ?
- 9) 국제 원자력계로부터 전향적인 연구개발실증 프로그램을 기대할 수가 있는가 ?
- 10) 한국의 원자력계가 향후 수십년 내에 기술적으로 건전하고, 경제적으로 생존력이 있으며 정치적으로 신뢰성 있는 아시아 지역 원자력 발전 프로그램을 개발하는데 중요한 역할을 맡을 수가 있는가 ?

물론 이들 쟁점들은 상호 연계되어 있으므로 이들을 총체적으로 해결하기에 적절한 정책 대안들을 모색해야 한다. 또한 한국은 기존의 원자력 프로그램을 급작스럽게 종식시키지 않으면서 현재 활동 중인 전문 인적 자원과 연구개발 시설을 최대한 활용하여 새로운 선택 대안

들을 부드럽게 도입하는 방안도 기대할 수가 있다.

단기적으로 한국은 기존 원자력발전소의 안전한 운전을 유지하기 위해 지속적으로 가일층 노력할 것이다. 고리 1호기 같은 구형 원자로 모델에 대해서 과거에 우리가 했듯이 구형이거나 수명이 다한 부품, 시스템, 하부 시스템들을 교체 개량해야 한다. 한국의 원자력발전소들은 건설 당시로서는 최고 수준의 방식으로 설계, 시공되었고 가장 엄격한 최신의 안전 규격과 표준을 완전히 만족시키고 있었다. 한국의 가압경수로 및 CANDU 원자력발전소들은 수명기간 종료 시까지 안전하게 운영될 것이다. 한국의 경험 많고 유능한 운전, 보수 팀들은 최상급의 업무를 근면성을 지니고 수행할 것이다. 그러나 한국은 핵연료 주기 활동과 방사성폐기물 관리에는 지속적인 어려움을 지니게 될 것이다. 비록 대중은 원자력발전을 주저하면서도 계속 수용은 하겠지만, 더욱 확신할 수 있는 기술적 옵션을 전향적으로 개발, 활용할 것을 촉구할 것이다.

한국의 원자력발전계는 확고하고 창의적인 장기 개발 프로그램에 착수해야 한다. 여기서 아시아 뿐만이 아니라 전세계적으로 지속가능형 개발을 위한 원자력 에너지 공급을 실현시키며 원자력 평화적 이용의 르네상스를 초래할 기술적 옵션 꾸러미를 제시해 본다.

첫째로, 기존의 우라늄-플루토늄 핵연료주기를 점진적으로 퇴역시키고 토리움-우라늄 핵연료주기를 도입할 것을 권고한다. 이를 통하여 플루토늄 생산이 지나는 핵무기 확산 우려를 배제할 수가 있을 것이다. 플루토늄은 핵무기 프로그램과 연계되어 왔고 대중은 플루토늄이 지니는 핵무기 확산 잠재성과 맹독성을 잊지 않을 것이다. 토리움은 우라늄보다 더욱 매장량이 풍부하며 토리움 232는 원자로 내에서 중성자 포획으로 프로타티늄 233으로 변환되며 이

후 우라늄 233으로 베타 붕괴된다. 이 우라늄 233은 핵분열성 물질로 농축 과정 없이 원자로 연료로 사용될 수가 있다. 순수한 우라늄 233은 장기간의 냉각 과정에서 알파 붕괴나 중성자 포획으로 우라늄 232로 변환되고 이의 자연 오염성이 저장과 취급을 지극히 힘들게끔 한다. 또한 우라늄 232 붕괴 고리에서의 생성 자핵종인 탈리움 208은 2.6 MeV의 고강도 감마선을 방출하므로 원자로 외부에서의 취급이 지극히 힘들다. 여기에 소량의 저농축 우라늄을 혼합시킬 경우 핵무기 원료로서의 효용은 거의 없어지게 된다. 따라서 플루토늄-우라늄 핵연료주는 근원적으로 핵확산 저항성을 지닌다.

둘째로, 설계가 입증된 노형에 국한하여 수냉식 원자로의 유지와 추가를 조심스럽게 실시할 것을 권고한다. 한국의 수냉식 원자로인 가압경수로와 CANDU는 입증이 잘 된 시스템이므로 전력을 신뢰성 있고 경쟁력 있게 공급할 것이다. 그러나 이들 노형은 사용후핵연료 측면에서 근원적인 문제점이 있고 인간 실수 및 계측제어 오만에 취약하다. 대부분의 인공 시스템들이 이와 유사한 결점을 지니고 있는 있음에도 (예를 들자면 항공기) 대중은 실수방지형 원자력 발전 시스템을 원한다. 이점을 고려하여 지속적인 운전이 가능하며 고유 안전로에 아주 가까운 모듈형 원자력 발전 시스템인 AMBIDEXTER<sup>2,3</sup>의 개발에 착수할 것을 제안한다.

이 원자로 시스템은 휘발성 핵분열생성물의 양이 미미하고, 붕괴열원이 적고, 핵분열 물질 장전량이 적고, 잉여반응도가 낮고, 핵연료 온

도 부반응도가 더욱 높고, 증기압이 무시할 정도로 낮고 배관연결부가 필요 없고, 능동 기기가 필요 없고, 압력 손실이 낮고, 초우라늄 액티나이드 함량이 아주 낮고, 변환 생성 핵종이 적고, 사용후핵연료가 거의 생성되지 아니하고, 핵분열 생성물을 분리, 격리 가능하고, 열효율과 이용률이 높고, 의료, 산업, 농업용 방사성 동위원소를 소내 생산할 수가 있다는 많은 장점들을 지니고 있다.<sup>4</sup>

AMBIDEXTER 시스템은 모듈 구조를 지닌다. 이는 에너지와 더불어 방사성 동위원소들을 생산한다. 핵연료 피복재와 구조재가 필요없으며 냉각수상실사고를 걱정할 필요가 없다. 이 시스템은 고유 안전성을 지니며 간단하다. 또한 어떠한 무기나 방위 산업 개발과도 아무런 연관이 없으므로 구차한 설명이 필요가 없다. 무엇보다도 이 시스템은 원자로 안전, 핵무기 확산 방지, 고준위 방사성 폐기물 관리에 대한 파라다임 전환을 보여주고 있다. 이 시스템은 일반 대중의 이익을 위해서 에너지와 아울러 유용한 물질을 생산하므로 원자력 기술에 대한 대중 인식의 새 창구를 열 것이다.

셋째로, 기존의 원자로 핵분열 생성물들을 처리하기 위해서 종합 처리 시스템을 개발할 것을 제의한다. 핵의 결합에너지 보다 높은 에너지를 가하여 핵종변환을 유발시킬 수 있음은 잘 알려져 있다. 이러한 방사화학적 변환 공정은 장반감기 방사성폐기물을 단반감기를 지니며 관리 가능한 물질로 변환시키는데 사용될 수가 있다. 감마선 조사를 통해서 수천년의 반

2. Se Kee Oh and KunMo Chung, "AMBIDEXTER Nuclear Complex : A Practicable Approach for Rekindling Nuclear Energy Application" Paper S1-A4-KR at the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, August 15-20, 1999.

3. AMBIDEXTER : Advanced Molten-salt Break-even Inherently safe Dual-mission Experimental Test Reactor.)

4. Se Kee Oh and KunMo Chung, "An Ultimate Fission Energy System Option" Presentation at the Technical Committee Meeting on "Utilization of Thorium Fuel: Options in Emerging Nuclear Energy Systems", November 15-17, 1999.



감기를 지니는 방사성 동위원소들을 수일간의 반감기를 지니는 동위원소로 변환시킬 수가 있다. 즉, 방사성폐기물이 수일 내에 비방사성 안전 물질로 붕괴될 수가 있는 것이다. 이러한 변환과정을 거친 생성물들이 지니는 단반감기로 인하여 폐기물은 열원이 되는데 이 열원들은 열변환 시스템을 통하여 전기 같은 다른 유용 에너지 형태로 변환 가능하다. 이와 유사하게 중성자를 방사성폐기물의 핵종 변환에 사용할 수도 있다. 중성자 핵종 변환을 통해서 방사성 폐기물을 안전 동위원소로 변환시킬 수가 있는 것이다. 입자빔 역시 방사성폐기물을 안정 동위원소로 변환시키는데 사용할 수가 있는데 감마선이나 중성자속을 이용한 변환이 더 용이하다.

이 분야의 연구개발은 노력을 집중할 가치가 충분히 있으며 아주 실현성이 있음이 입증될 것이다. 이제까지 누적된 골칫거리인 방사성폐기물을 청소할 수 있으므로 대중은 이러한 노력들에 대해서 긍정적으로 반응할 것이다. 궁극적으로는 이러한 노력은 원자력이 사회로부터 전폭적 수용을 받도록 할 뿐 아니라 재래식 연료나 신재생 에너지원보다 훨씬 더 매력을 지니도록 할 것이다.

이외의 흥미있는 가능성들을 지닌 기술적 대안들도 존재하며 이들은 과학기술계를 향하여 열려 있다. 선진국의 전통적인 연구개발 지도자들은 기존 활용 기술의 점진적 개량과 기존 기술의 적합성을 대중에게 설득하는데 노력을 경주하고 있으므로 원자력 발전 분야의 젊은 신규 진출자들은 이렇듯 역동적 가능성에 대하여 주도권을 잡아야 한다. 한국의 원자력계는 미래의 지속가능형 개발을 위하여 이들 기술적 옵션들을 진지하게 검토하여야 한다.

## 5. 맺음말

원자력 발전은 다가오는 세기에서의 에너지 요구에 대한 중요한 해결책임이 자명하다. 원자력은 막대한 양의 청정에너지를 가장 적합한 방법으로 생산할 수가 있다. 그러나 우리는 날로 견고해지는 환경 보호 및 지속가능형 개발에 대한 대중의 인식에 부응하기 위해서 기술을 개선해야 한다. 이 강연에서는 원자력 이용의 확대를 위해서 현재 장애가 문제를 해결하는데 잠재력이 매우 높은 기술적 대안들을 제안하였다. 이들 옵션들은 추가적인 기술적 돌파구를 필요로 하지 않고 엔지니어링과 상용화에 필요한 인력자원과 재정자원만 결집시키면 되므로 정부와 민간의 정책 결정자들이 협력에 나서서 진지하게 고려할 것을 촉구한다.

우리는 지구촌에 살고 있다. 이들 옵션들을 추구함에 있어서 우리는 다른 나라, 다른 경제, 다른 사회와 협력해야 한다. 아시아는 세계의 그 어느 지역보다도 원자력 발전을 필요로 하고 있다<sup>5</sup>. 그래서 아시아 국가들의 결속을 제안하며 아울러 기술적 기반을 지니고 있으며 미래 세계의 물리적, 사회적 환경에 대해 매우 진지한 입장을 지니는 선진국의 참여를 촉구한다.

지난주 캘리포니아 롱비치에서 회동한 태평양 원자력위원회는 원자력발전 개발을 위한 지역협력에 대해서 토의하였다. 이제는 기존의 지역협력 체제 자체에 대한 토의에 부가하여 기술개발을 위한 실질적 행동에 나서야 한다. 우리의 문명은 정의, 지식, 기술의 함양과 더불어 진진함을 인식해야 할 것이다. ☞

5. The Atlantic Council, "An Appropriate Role for Nuclear Energy in Asia's Power Sector" published in December 1997.