

21세기를 위한 원자력 에너지

-미국과 한국의 현황과 전망-

이 재 승

미시간 대학교 교수

Department of Nuclear Engineering and Radiological Sciences

오 늘 한국원자력산업회와 한국원자력학회 및 미국원자력학회 한국지회가 공동으로 주최하는 원자력계 월례 조찬 강연회에서 강연 기회를 갖게 되어 기쁘게 생각한다.

먼저 강연의 서두로서 세계 에너지 수요와 이산화탄소를 배출하지 않는 청정 에너지원으로서 원자력 에너지의 증가 필요성에 대해 언급하고자 하며, 이어서 최근 미국에서의 원자력 에너지 개발 동향과 원자력과 관련하여 우리가 직면하고 있는 문제들에 대해 본인이 느끼고 있는 바에 대해 말씀드리고자 한다. 그리고 마지막으로 한국 원자력계가 직면한 문제들에 대한 본인의 견해를 바탕으로 몇 가지 제안을하고자 한다.

세계 에너지 수요와 원자력 에너지의 필요성

여러분들은 전 세계적으로 증가

되고 있는 청정 에너지의 필요성에 부합하는 원자력 에너지의 역할에 대해 모두 잘 알고 계시기 때문에 여기에 대해서는 간략하게 말씀드리겠습니다.

현재 원유 소비율과 향후 수십년간 얼마나 많은 전력이 필요한지에 대해 여러분과 함께 전망해 보겠다.

9.11 테러 직후 <뉴욕 타임즈>지는 원유 비축량과 원유 소비율에 관한 기사를 게재하였다. 2001년 10월 14일 추산에 따르면 세계적으로 원유 비축량은 약 1조 배럴이고 이중의 2/3가 정치적으로 불안정한 중동 지역에 몰려 있다. 미국의 원유 비축량은 단지 300억 배럴뿐이다.

연간 세계 원유 소비량은 300억 배럴이고 미국은 연간 70억 배럴 또는 전체의 25%를 소비하고 있다.

세계적으로 원유 비축량은 최근 유가가 배럴당 50달러 이상으로 상승되고 있으므로 다소 증가될 것으로 보인다.

그러한 고유가의 경제적인 면과

원유에 대한 지속적 의존에 의한 환경적 영향은 별문제라 하더라도 원유는 매우 귀중하고 한정된 자원이기 때문에 가능하다면 그중 일부를 인류의 미래를 위하여 보존하고 싶다는 것만은 확실하다고 하겠다.

여러분에게 또다른 각도에서 말씀드리고 싶은 것은 현재의 세계적 전력 이용 현황이다.

60억 인구를 위하여 우리는 현재 총 1800GWe의 발전량을 보유하고 있으며, 그것은 1인당 0.3kWe 비율로 환산된다.

한국은 4,600만 인구를 위하여 62GWe의 시설 용량, 즉 국민 1인당 평균 1.3kWe를 보유하고 있다.

만약 전 세계가 한국이 현재 누리고 있는 전력 이용 수준에 도달한다면 우리는 또 다른 6,000GWe의 발전량을 추가해야만 할 것이다.

만약 우리가 이 추가 전력의 1/2만을 원자력으로 공급한다면 우리가 현재 보유하고 있는 원자력 발전량의 약 10배를 추가해야 된다.

이런 일이 언제 일어날지는 알 수 없지만 이산화탄소를 배출시키지 않는 기술을 이용하여 많은 발전소를 세워야 할 것이다.

이러한 사실은 원자력의 중요한 역할을 간략하게 표시해 주고 향후 수십 년간 우리가 풀어야 할 문제를 던져준다.

원자력 에너지 개발을 위한 필요 조건

Generation IV Roadmap 프로젝트는 2년 전 6개의 concept group이 선정되기 전에 차세대 원자력 에너지 시스템을 위하여 100개 이상의 concept를 평가하기 위해 4개의 주요 목표를 선정하였다.

오늘 아침에는 Gen IV의 목적 자체를 논하는 대신에 하버드대학교 John F. Kennedy School of Government의 John Holdren 교수에 의해 제창된 필요 조건 목록 [출처 : The Bridge, National Academy of Sciences (2001) and Proceedings of the Symposium on Energy and the Environment : The Role of Nuclear Power, University of Michigan (2003)]을 제시코자 한다.

Hodren 교수는 미국에서 가장 잘 알려진 영향력 있는 에너지 정책 학자이며 캘리포니아 버클리 대학에서 강경한 반핵 환경론자로서 출

발하였다.

그 후 그의 태도는 많이 바뀌어 원자력 에너지 개발을 지지하고 있다.

그러나 그의 주장은 환경 문제에 실질적으로 변화를 일으킬 수 있을 정도로, 현재보다 훨씬 큰 규모로 원자력을 개발해야 된다는 차원에서 지지하겠다는 것이다.

그가 주장한 필요 조건을 우선 순위별로 나열해 보겠다.

(1) “신형원자력발전소의 발전 단가는 이산화탄소를 배출하지 않는 다른 대체 에너지원에 대해 경쟁력이 있어야 한다.”는 것이다.

이것은 여러 Gen IV 관련 토론회에서 본인이 강조했던 사항이지만 Gen IV Roadmap에 있어서 많은 주목을 받지 못했던 사항이다.

(2) “우리가 현재 운전하고 있는 것보다 10배나 많은 원자력발전소를 설치하여 가동한다는 시나리오 관점에서 볼 때 신형 원자로의 안전성과 신뢰성 역시 10배 향상되어야 한다.”는 것이다.

이것은 원자력발전소의 안전성과 신뢰성 분석을 위하여 사용하는 특정 방법론에 관계없이 우리가 거부하기 어려운 단순한 논리이다.

또한 그는 원자력발전소의 안전 수준은 단순히 미국만이 아니라 전 세계에 유지되어야함을 강조하고 있다.

아울러 본인은 Gen IV 원자력발전소가 Gen II 및 Gen III 발전소

보다 더 나은 발전소 시설 자체 방어 및 보안을 제공해야 한다고 생각한다.

(3) “방사성 폐기물 관리를 위해 정책적, 기술적으로 수용 가능한 방법은 개발되어야 한다.”는 것이다.

미국에서는 인허가 과정에서 추진중인 Yucca Mountain 프로젝트와 사용후연료 변환 기술을 포함하고 있는 첨단 핵연료 주기(AFCI)를 통하여 폐기물 관리 문제를 다루려고 한다.

한국의 경우 방사성 폐기물 관리는 어려운 미해결 문제로 남아있음을 알고 있다.

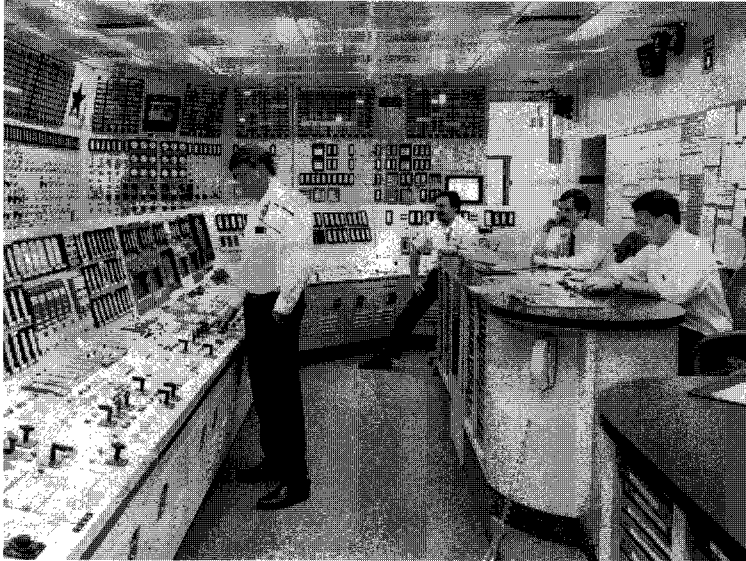
(4) “원자력 에너지와 원자력 무기 및 테러간의 연관성은 최소화되어야 한다.”는 것이다.

미국의 경우 핵을 이용한 테러의 가능성은 매우 중요한 사안으로 남아 있으며 북한의 핵무기 확산은 부시 정권하에서 여전히 주요 문제로 전개되고 있다.

이러한 점에서 사용후핵연료의 재처리하는 어떠한 경우라도 플루토늄 처리를 최소화시켜야만 한다.

(5) “원자력 에너지의 확장 및 개발 필요성에 대한 대중의 이해와 수용이 있어야 한다.”는 것이다.

미국의 경우 지역별로 다르긴 하지만, 석탄과 천연 가스가 풍부한 지역이 많기 때문에 아직 미래의 원자력 에너지 개발에 관해 합의를 이루지 못하고 있다.



미국의 Arkansas Nuclear One 원전의 중앙제어실

미국의 원자력 에너지 개발 현황과 앞으로의 과제

우선 미국의 원자력 에너지 이용과 개발 현황에 대해 몇 가지 주요 사항을 말씀드리겠습니다.

(1) 미국에는 현재 103기의 원자력발전소가 가동중에 있으며 90%의 가동률을 유지하여, 총 전력의 20%를 공급하고 있다.

(2) AFCI, Generation IV, 차세대원자력발전소(NGNP) 프로젝트를 중심으로 활발한 연구 프로그램이 진행중에 있다.

지난 주 승인된 의회의 에너지 및 급수비 예산안을 볼 때 사용후핵연료 변환 기술을 포함한 신형 핵주기

및 수소 제조를 위한 초고온가스냉각원자로(VHTR)의 안정된 R&D 기금을 기대할 수 있다.

(3) 지난 수 년간에 걸쳐 25개 대학의 원자력공학과 입학생 수가 점차 증가하고 있다. 미시건 대학의 경우 3개 학급에 80명의 학부생이 있으며 이는 1997~1999년 기간의 26~28명의 수보다 3배나 된다.

(4) 미국 에너지부(DOE)는 2010년까지 원자력발전소 건설 계획을 수립하면서 통합 인허가 승인 과정을 위하여 전력사 컨소시엄들을 재정적으로 지원할 것을 결정하였다.

(5) 미국 원자력규제위원회(NRC)는 9월에 AP1000에 대한 최

종 설계 승인을 하였으며, 이것은 이러한 승인을 받은 첫 번째 Gen III+ 디자인이다.

웨스팅하우스사는 몇 개의 발전소를 건설하게 되면\$1000~\$1200/kWe의 건설 비용이 가능하다고 제시하고 있다.

(6) Battelle Memorial Institute의 관리하에 현재의 아이다호 국립공학·환경연구소(Idaho National Engineering and Environmental Laboratory)의 에너지 부문 및 서부 아르곤 국립연구소(Argonne National Laboratory-West)를 통합한 신 아이다호 국립연구소(new Idaho National Laboratory)는 십년 내에 원형(prototype) VHTR 발전소 건설을 계획하고 있다.

(7) 최근 2명의 저명한 환경론자들이 원자력 에너지에 대한 지지를 발표하였으며, 그 결과 「지구의 친구들(Friends of Earth)」이라는 환경 단체와 결별하게 되었다.

• James Lovelock, 지구상에 존재하는 생명체간의 상관 관계에 관한 가이아 가설(Gaia hypothesis)의 주창자

• Bishop Hugh Monteflore, 영국 가톨릭 교회의 주교

이러한 긍정적인 징후에도 불구하고 미국에 있어서 계속적인 원자력 에너지 개발에 대한 여러 가지

과제는 여전히 남아 있다.

(1) 높은 수준의 발전소 안전성과 신뢰성 유지가 필요하다. 이러한 점에서 한 가지 깨우쳐야 할 사항은 2002년도에 발견되었던 Davis-Besse 압력 용기 헤드 마모 문제이다.

여러분들도 잘 아시다시피 이 용기 헤드는 제어봉 구동 장치 노즐의 틈으로 붕산을 함유한 1차 냉각수의 장기 누수로 인해 심하게 마모되었으며, 냉각재 누출 사고를 막을 수 있었던 것은 5mm 두께의 스테인리스 스틸 라이너가 남아 있었던 것이다.

나는 미국 의회의 조사 및 감사 기관인 General Accounting Office의 심의위원회 위원으로서 Davis-Besse 문제에 관해 연구했으며, 본 연구의 결과를 통해 발전소를 운전하였던 First Energy Nuclear Operating Company에서 안전 문화가 매우 결여되어 있음을 알게 되었다.

또한 NRC는 규제의 부적절한 적용과 상주 감독관과 관리 직원의 충분한 의사 소통의 결여로 적절한 감독을 수행하지 못하였다.

(2) Gen III+와 Gen IV 발전소의 발전 단가는 이산화탄소를 배출하지 않는 다른 대체 에너지원과 경쟁력이 있어야 한다.

그러나 4년 간의 건설 기간을 가정하고 통합 인허가를 거친다 해도 \$1,200~1,500/kWe의 총시설 단

가는 초기 몇몇 발전소의 경우 달성이 힘들 수도 있다.

(3) 사용후핵연료 재처리와 폐기물 극소화 및 핵확산 위험 극소화를 위한 연료주기 기술 개발에 관해서는 추가 연구가 필요하다.

새로운 연료 주기는 전체 연료 주기에 걸쳐 플루토늄의 사용을 현저하게 감소시켜야 한다.

미시간 대학교에서는 천연 우라늄과 혼합된 토륨의 사용에 관해 연구하고 있다.

(4) 미국 대중의 상당수가 원자력 에너지 사용 확대의 필요성을 여전히 납득하지 못하고 있다. 이러한 저항과 반대는 (a) 보이지 않는 방사선에 대한 두려움과 (b) 원자력 시대 초기부터 형성된 원자력과 핵무기와의 연관성, 그리고 (c) 1960~70년대의 언론 자유 운동 (Free Speech Movement)이 환경 운동과 반원자력 에너지 캠페인을 중요한 목표로 설정했다는 점 등에 기인한다고 본다.

우리가 미국의 원자력 부흥을 위한 과제를 지금 적극적으로 추진해야 된다는 점을 거듭 강조하는 뜻에서 저온 살균 처리를 발견한 프랑스 과학자인 루이 파스퇴르(Louis Pasteur)가 남긴 간단한 말을 써 본다.

“기회는 준비된 자의 편에 선다”

한국의 미래 원자력 에너지 개발을 위한 과제

한국의 경우 지속적인 원자력 에너지 개발을 위한 과제에 대해 논의하기에 앞서 한국이 지난 25년간에 걸쳐 이룩하였던 놀랄만한 경제 성장을 보여주는 몇 가지 사항들에 대해 말씀을 드리고자 한다.

(1) 4,600만 인구에 1,500만대의 자가용 차량이 있는데 이는 인구 3명당 1대를 소유하고 있는 셈이다. 사실 내가 알고 있는 대부분의 가정들은 최소 2대의 차량을 소유하고 있다.

(2) 한국인들은 3,500만대의 이동 전화기, 즉 한국인들이 지칭하는 ‘휴대폰’의 자랑스러운 이용자들이다. 여담이지만 KAIST 캠퍼스에서 같은 학부의 동료 교수 한 분과 나 자신을 포함하여 두 사람만이 휴대폰의 이로운 혜택을 누리지 못하는 불쌍한 사람들일 듯 한다.

(3) 앞에서 말씀드렸던 것처럼 한국은 현재 총 62GWe의 발전 시설 용량을 보유하고 있으며, 이는 1990년의 21GWe와 1980년에 9GWe였던 것에 견주어 볼 때 지수함수적 성장을 보여주고 있다.

(4) 한국에서의 출산율은 매우 저조하여 미래에는 현재의 인구를 유지하기가 어려울지도 모른다.

한국을 자주 방문하지 못하는 내가 알게 된 비과학적이고 단편적인



KSNP+ 중앙 제어실

지식을 통해 볼 때 한국이 과거에 경험하였던 빠른 경제 성장률을 지속적으로 유지해 나갈 수 있을지 의문이다.

국가가 향후 10년간에 걸쳐 약 1.0GWe의 시설 용량을 매년 추가할 것을 계획하고 있는 반면, 원자력에 대한 대중의 지지는 세대에 따라 나뉘어져 있으므로, 이러한 관찰은 한국 원자력계에 대한 중대한 도전과 과제를 제시해 줄 것이다.

나는 이러한 세대 차이가 장기적 사회의 안전성을 내포할 수도 있다고 피상적으로 생각하고 있으며, 한국에 고조되어 있는 이러한 논쟁에 선뜻 끼여들 생각은 없다.

그럼에도 불구하고 한국의 원자력산업의 미래는 단순히 국내 전력 소비 증가보다는 원자력발전소 수

출에 보다 더 의존할지 모른다.

우리 자신의 좁은 분야에서 이러한 문제점들을 더욱 강조하기 위해 다음 사항을 말씀드리겠다.

(1) 한국의 대학은 과학 기술 분야에 있어 많은 졸업생들(학부로부터 박사 과정까지)을 배출(41%)하였으며, 이는 일본(29%)과 미국(18%)보다도 많은 숫자이지만 현재는 이공계 분야로 우수한 학생들을 유치하는데 많은 어려움을 갖고 있다.

본인은 이것이 단순히 최근 대학 졸업생의 40%가 취업을 못하고 있는 문제 외에도 매우 복잡한 사회적 문제임을 알고 있다.

(2) 서울대학교 원자핵공학과 학생들의 수준은 공과대학에서 가장 낮다. 이것은 커리큘럼에도 영향을 주어 이 선택 과목으로 설정되어 원

자핵공학과 학생이 원자로의 임계에 대한 충분한 지식도 없이 졸업하게 될지도 모른다.

(3) KAIST의 원자·양자공학과는 학급마다 겨우 5명의 학생들이 있으며 대학원 학생의 15%는 다른 아시아 국가 출신들이다. 현재 학과 교수진 모두가 우수한 학생들을 유치하기 위해 각고의 노력을 다하고 있다.

한국의 원자력계를 위한 제안

여러분들께서 진부하다고 생각하실 듯도 하지만, 다음과 같은 3가지 제안을 드리고자 한다.

(1) 우리는 기술자와 과학자로서의 전문가 의식과 구조(professionalism)를 증진시켜야 할 것이다.

사회는 전문가들을 양성하고 인정하고 보상하는 방안을 강구해야 한다.

한국에서 가동하고 있는 19기의 원자력발전소의 최소 40년 수명을 연장할 것을 계획하고 있는 시점에서, 우리는 특히 원자력발전소의 최초 설계로부터 건설 및 운영 분야에서의 실무 경험이 있는 원자력 전문가가 많이 필요하다.

한국이 세계 시장에서 신형 원자력발전소의 개발과 건설에 참여하려면 처음부터 끝까지 기술적 과제를 수행할 수 있는, 경험이 많은 엔지니어와 기술자가 필요할 것이다.

이러한 견해와 함께 몇 가지 세부적인 방안을 말씀드리고자 한다.

㉔ 원자력 전문 직업인으로서의 긍지와 국가의 장기적 에너지 확보에 기여하고 있다는 자부심을 주입시키기 위해 원자력계에서 캠페인을 일으키는 것이다.

㉕ 관리직계(Track)와 대조되는 전문가 직계를 구성하여 선인 전문가가 충분한 권한과 인정을 받도록 해야 한다.

예를 들면 선임 연구원에게 독립된 출장 비용과 업무 지출비 등을 위하여 적당한 예산 권한을 부여해야 한다.

㉖ 매년 전문가 및 관리직계 모두에 있어서 성과에 기준을 둔 급여 제도를 구성하는 것이다.

이것은 재직 기간에 상관없이 공정하고 투명한 평가 체계를 토대로한 급여 인상을 포함하여야 한다.

기업이나 연구소의 기관장은 업적이 뛰어난 직원이나 연구원을 내부, 외부의 포상에 추천하는 것을 중요한 임무로 수행해야 한다.

이러한 포상 프로그램은 직원이나 연구원으로 하여금 58세부터 65세까지의 정년 연령을 초월하여 능력과 기술의 우수성을 유지토록 할 것이다.

퇴직은 단순히 신체적 나이가 아닌 개인별 기술능력을 반영해야 한다.

㉗ 또한 공적에 근거한 직원 평가 시스템은 자신들의 잠재력을 최대

한 발휘하지 않는 전문가들을 정리해 주는 공정하고 평등한 방법을 포함해야 한다.

동시에 조직원으로 하여금 그들의 활동 기간중에 능력을 계속 유지토록 충분한 기회를 제공해야 한다.

(2) 우리는 원자력 분야로 우수한 학생들을 끌어들이야 한다.

한국의 경우 이미 6개의 원자력 관련 학과에 학급당 200~250명의 학부생을 모집할 수 있는 충분한 할당량을 갖고 있는데, 학생들의 수준을 높이고 향상시켜야 한다.

원자력공학은 미시적 과학과 거시적 시스템 분석을 독특한 방법으로 결합시키고 있으며, 대부분의 다른 공학 부문 이상으로 높은 수준의 수학과 물리학을 요구한다.

내가 산업계 지도자들에게 드리고 싶은 한 가지 각별한 제안은 원자력 전공 학부 출신 학생들에게 원자로 운전원 면허를 취득할 수 있는 기회를 부여하여 해당 기관에 채용될 기회를 늘려달라는 것이다.

이것은 내가 지난 5월 북경에 있는 칭화대학교 방문시 느꼈던 생각이며, 그곳에서 우수 대학교 졸업생들이 많은 급여 인센티브로 인해 원자력발전소로 유입되고 있음을 알게 되었다.

미국의 많은 원자력 회사 임원들도 원자로 운전원부터 시작했음을 주지시키면서 비슷한 내용을 미국 원자력계에 제안하였다.

(3) 우리는 학생들과 엔지니어들에게 평생 학습할 수 있는 기술을 제공해야 한다.

정규 교육 이상으로 학습하는 것을 유지하는 능력은 우리 엔지니어들에게 단순히 3가지 다른 직업이 아닌 3가지 직종으로 준비시키는데 매우 중요하며, 미시간 대학교에서도 학생들에게 이와 같은 기술을 가르치려고 노력하고 있다.

이것은 사회적 문제들을 이해하기 위해 말과 글로써 의사 소통하고 사회에 영향을 미치는 윤리적 해결에 참여하는 능력을 요구한다.

이것은 위에서 언급한 전문가주의(professionalism)를 달성하는데 큰 역할을 할 것이다.

이러한 제안이 한국 사회에 관한 피상적인 관찰로부터 나온 단순한 제안임에는 틀림없다. 또한 이러한 제안 사항들이 쉽게 이행되리라고는 생각하지 않지만 강연을 끝내기에 앞서 Mahatma Ghandi의 다음과 같은 가르침에 대해 말씀드리고자 한다.

“우리 자신은 세상에서 기대하는 변화 그 자체가 되어야 한다.”

그리고 마지막으로 General Electric의 유명한 Jack Welch 전 회장의 다음과 같은 소견을 말씀드리고자 한다.

“변화를 사랑하는 법을 배우는 것은 부자연스러운 행동이다.” ☞