



# 차세대 원자력 시스템 개발 방향

Roadmap to the next generation of nuclear power systems

William D. Magwood IV

미국에너지성(DOE) 과학기술국 원자력실장

## 서언

미국의 역사 및 원자력 발전사를 포함한 우리의 역사는 장기간에 걸친 점진적인 변화와 비전 있는 지도자 또는 필연성에 의해 완전히 새로운 패러다임으로 전환되어 전반적인 변화를 불러오는 급진적인 도약으로 구분된다.

흔히 국가를 형성하는 과정에서 발생하였던 사건들은 원자력 기술 개발시 일어났던 사건과 매우 흡사하다. 소극적이고 중립적인 성향으로 자국 내의 문제 해결에 골몰하고 있던 미국은 제2차 세계 대전과 그 이후의 사건들로 인해 서방 세계의 주도국으로 부상하였다.

원자력 기술은 미국식 세계화와 발달된 산업과 더불어 성장하였다. 미국의 원자력 기술 개발은 맨하탄 프로젝트와 그 이후의 냉전 체제 및

1950년대와 1960년대의 원자력의 평화적 이용 프로그램의 중추적 역할을 담당함으로써 영구히 정착되었다.

이는 해군 제독인 Hyman Rick over 및 Glenn Seaborg와 같은 공상가, 경제학과 같은 발전 원동력 및 과학·정부·환경에 대한 대중의 인식 변화로 가능하였다.

오늘날 발전과 혁신(evolution and revolution)은 지속적으로 진행되고 있다. 환경 문제에 대한 세계 각국의 발전된 의식, 즉 냉전의 종식을 수반하였던 극적인 변화 및 점증하는 불확실성과 에너지 공급의 역사적 변화가 세계적으로 원자력 기술의 역할을 형성하는 데 기여하였다. 미래의 동력원이 현재와 다를 것이라고 전망할 이유는 없다.

우리는 미래를 알 수는 없다. 특히 에너지 분야의 장기적인 전망과 계획은 잘 알려진 바와 같이 신뢰성

이 없다. 그럼에도 불구하고 우리는 향후 20,30년간의 에너지원 구성은 전망해 볼 수 있다.

## 1. 세계화

세계화는 20세기 말 가장 많이 사용된 어휘 중 하나일 것이다. 그러나 세계화는 정치·경제 분야에서 즉각적인 변화를 유발할 가장 중요한 원천이 될 것이다. 원자력에 있어서 세계화는 이미 커다란 영향을 미쳤다.

원자력 기술 공급자들은 신속하게 합병하고 있으며, 에너지 기술을 활용하는 전기 사업자들도 뒤따르고 있다. 현재 세계적으로 세 개의 주요 블록이 형성되어 있는데 앞으로도 기업 합병이 계속될 것 같다. 전기 사업자 측면에서 보면 국제적 합병과 소유권의 변화가 이미 발생하고 있다.

지금까지는 원자력 기술 시장이



국가간 단위로 형성되었으나, 21세기에 원자력 시장이 커지고 경쟁이 심화되면 원자력 시장도 세계화 될 것이다.

## 2. 개도국의 부상

세계 역사상 최초로 비교적 단시간 내에 실제적인 과정을 현실화하는 것이 가능해졌는데 이로써 부유층 외에도 대부분의 세계 인구가 전기와 같은 현대적인 편의품 이용을 즐기게 될 것이다.

급격한 민주화가 진행되고 있는 아시아 지역과 민주주의가 성숙하고 있는 라틴아메리카 지역의 에너지 자원 수요는 과거보다 훨씬 높을 것이다.

에너지 이용의 효율성은 광범위한 재생 에너지의 사용과 더불어 이들 지역에서 중대한 문제가 될 것이다. 그러나 이들 국가의 산업 발달은 기저 부하용 발전소를 상당히 필요로 하게 될 것이다.

이것은 원자력에 있어서 중요하고도 새로운 기회가 될 것이며, 원자력을 이용하여 단기간 내에 높은 성장을 달성한 사실로 설명할 수 있다.

## 3. 자유 경쟁 시장의 확대

개발 도상국과 선진국의 시장 경제 체제와 의사 결정의 다양화된 월성이 세계를 여러 형태로 다시 형성하고 있다. 세계 대부분 지역에서는 미국의 전기 산업계처럼 중앙 집

중적인 계획이 경제 분야의 기반이 되고 있다. 전기 공급 비용에 따라 어떤 기술이 유망한가를 결정할 것이다.

규정에 없거나 원가에 직접적으로 영향을 주지 않는 정부 정책, 우선 순위 및 정책 목표는 에너지 공급자의 근거 있고 비용 효과적인 공급자의 요구에 압도당할 것이다.

## 4. 국가적·국제적 환경 문제

시장의 힘은 항상 정부 규제에 의하여 통제를 받는다. 환경 관련 규정은 대기 환경과 기후 변화에 대한 국민의 우려가 고조됨에 따라 향후 수십 년에 걸쳐 더욱 강화될 것이다.

미래의 환경 관련 정부 정책이 어떤 형태로 전개될 것인지 예측하는 것은 불가능하다. 많은 국가에 있어서 환경 관련 규정은 어떤 형태로든 신규 원자력발전소 건설에 장애 요소가 되고 있다.

전력 생산 비용이 증가하고 신뢰성이 저하됨에 따라 정부 정책은 보다 자세한 검토를 받게 될 것이다.

많은 국가들은 환경에 미치는 영향을 최소화하는 수준에서 전력 공급을 증가시키는 법규를 채택하고 있어 향후 원자력에 대한 기회의 창이 보다 확대될 전망이다.

그러나 앞으로는 정부가 방사성 폐기물을 어떻게 처리할 것인지가 주요 관심사로 대두될 전망이다. 새

로운 차원의 원자력발전소가 실현되려면, 사용후 연료 처분을 성공적으로 수행하여야 한다는 사실은 일반적으로 널리 알려져 있다.

지역별로 고준위 방사성 폐기물 처분장 개발 문제가 제기됨에 따라 이 문제는 국제적으로 중대한 관심사로 대두될 것이다.

## 5. 냉전 종식 후의 세계

앞서 제기한 문제들보다 우선하는 것은 냉전의 여파가 지속적으로 원자력 에너지 개발에 영향을 주게 될 것이라는 사실이다.

냉전이 종식됨에 따라 미국 정부는 보유하고 있던 우라늄과 플루토늄을 상업적으로 이용하기 위하여 방출하였다. 이것은 중요한 의미를 가지고 있다. 기반이 취약하던 핵연료 시장이 위축되었으며, 핵분열 물질이 사악한 자의 수중에 들어갈 위험성에 대한 우려가 점차 증가하고 있다.

더욱이 냉전 시대의 양극화 체제 이후 현재 일부 국가는 혼란 상태에 있으며 또 다른 국가들은 국제적으로 우려가 되는 문제를 스스로 해결하려고 하는 더욱 복잡한 구조로 바뀌고 있다.

이러한 도전적인 환경 속에서 신규 원자력 발전소 건설은 전세계적으로 핵물질 확산을 우려하는 전문가들에 의해 지장을 받고 있다. 이러한 우려를 무시하는 것은 개발 도

상국의 원자력 이용 확대 노력에 치명적인 영향을 줄 수 있다.

원자력 에너지의 미래는 이와 같은 힘에 의해 발전될 것이다. 그러한 힘을 인정함으로써 차세대 원자력 발전 시스템에 대한 비전을 정의하는 데 도움이 될 것이며, 미래의 도전에 부합되는 원자력 기술 능력 개발을 보장하는 기본 활동을 가능하게 한다.

#### 미국 에너지성의 역할

미국과 전세계 원자력 에너지의 미래는 수많은 정부 기관이 그 역할을 얼마나 잘 수행하느냐에 달려 있다.

① 전기사업자들은 지속적으로 현재와 2세대 원자력발전소를 높은 수준의 안전성과 비용 효과적인 방법으로 운전해야 하며, 또한 지속적으로 신기술을 개발하고 미래의 신규 원전 건설 정책을 고수하여야 한다.

② 산업계는 기존의 3세대 원전을 개량하여 가능한 한 비용 효과적으로 제작해야 하며, 장기적으로는 진일보된 연구 개발에 관심을 가져야 한다.

③ 정부는 모든 관계 기관의 활동을 적절하게 지원해야 하며, 또한 중장기적 연구 개발 지원 및 미래의 발전소를 지원할 수 있도록 연구와 교육 체계를 확립하여야 한다.

④ 특히 정부 규제 당국은 사업자로 하여금 기존의 원전을 불필요하게 폐쇄하도록 하거나 신규 원전 건설 추진을 저해할 정도로 산업계에 필요 이상의 부담을 주지 않도록 효과적으로 원자력 기술의 안전성을 감시·감독하여야 한다.

지난 십 년간 전세계의 전기 사업자·산업계 및 규제 기관은 각자의 역할을 훌륭히 수행해 왔다. 일부 국가는 기술 개발을 장려하는 역할도 잘 수행하고 있으며, 특히 일본과 프랑스는 장기 연구 개발 활동을 활발하게 추진하고 있다.

비규제적인 측면의 미국 정부 역할은 그다지 성공적이지 못했다. 1990년대와 개량형 경수로 개발이 완료된 1997년 이후 미국 에너지성은 원자력 기술 분야에서의 역할이 불투명하고 명확한 방향 설정이 되지 않았음을 알았다.

미국 에너지성은 원자력의 확실한 후원자인 상원의 Pete Domenici 의원(New Mexico 주), 하원의 Joe Knollenberg 의원(Michigan 주), 원자력 개발 자문 위원회(NERAC: Nuclear Energy Research Advisory Committee), 대통령 과학 기술 자문회의(PCAST: President's Committee of Advisors on Science and Technology) 등의 지원과 인도로 원자력 기술 개발 프로그램의 확고한 방향을 설정하게 되었다.

에너지성은 지난 2년간 신원자력 기술 개발에 대한 지원을 상당히 강화하여 새로운 프로그램을 착수하였으며, 이와 같은 지원은 앞으로 확대될 것으로 보인다.

더욱이 에너지성은 미국 내에서 쇠퇴하는 원자력 연구 프로그램 개발 체계와 위축된 원자력 기술 교육 기반을 적극적으로 다루기 시작했다. 또한 에너지성은 국제 원자력 연구 개발 기관과의 관계를 다시 설정하고 외국 정부와 공동으로 노력함으로써 성공적으로 국제 기관과 접촉하여 왔다.

이와 같은 노력에 따라 NERAC 업무의 중요성을 과대 평가하지 않을 수 없다. NERAC는 종합적인 원자력 기술 개발 장기 계획 및 대단히 가치 있는 원자력 과학 기술 개발 방향 설정에 주도적인 역할을 하였다.

이번 연구 보고서(대학의 원자력 공학 과정과 대학의 연구 및 훈련용 원자로)에는 시의 적절한 권고 내용이 포함되어 있으며, 향후 에너지성이 추진하려고 계획하고 있는 연구 개발과 사회적 기반 구축 작업의 중요한 부분을 형성하고 있다.

마지막으로 차세대 원자력 발전 시스템 연구는 TOPs(Task Force on Technology Opportunities for Increasing the Proliferation Resistance of Global Civilian Nuclear Power

Systems)가 수행한 연구 내용을 보고 받게 될 것이다.

모든 보고서는 미국 에너지성 Web site <www.nuclear.gov>를 이용하여 일반에 공개하고 있다.

아마도 가장 중요한 것은 미국 에너지성이 원자력에 대한 새로운 연구에 적극적으로 개입하여 주도적으로 수행하고 있다는 것이다. 제4세대 원전 개발 제안은 전세계 원자력 산업계에 커다란 관심을 불러 일으켰다.

2000년 8월 관련 국가의 고위 대표단(지금까지는 아르헨티나·브라질·캐나다·프랑스·일본·남아공, 한국·영국이 토론회에 참가하였으나 일부 다른 국가들도 참여에 큰 관심을 보이고 있음)이 한국 서울에서 제4세대 원자력 발전 시스템 도입 연구를 각국 정부가 공동으로 지원하는 방법을 토의하기 위하여 회의를 개최하였다.

서울 회의에서 경제협력기구 원자력기구(OECD/NEA)와 국제원자력기구(IAEA)는 고위 대표단을 파견하여 활용 가능한 지원 역할을 토의하였다.

서울 회의는 좋은 성과를 거두었으며 각국 정부가 현재 심사숙고하고 있는 제안을 이끌어 낼 수 있었다.

회의의 중요성에도 불구하고 각국 정부는 필요한 노력의 한 단면만을 제시하고 있다. 일반적으로 정부

기관의 연구원은 새로운 원자력 기술을 이용하는 사람도 아니고 최초 개발자도 아니다. 전기사업자, 원자력 산업계 및 규제 기관이 제4세대 원전 시스템의 출현에 결정적 역할을 담당하게 될 것이다.

미국 에너지성은 제4세대 원자력 발전소 개발의 차기 단계 토의에 모든 관계 기관을 참여시킬 예정이다.

#### 제4세대 원전 개발 방향

지금부터 2002년 초까지 두 가지 형태의 새로운 원자력 기술 시스템 개발을 분명히 하기 위하여 종합적인 기술 개발 방향을 설정할 예정이다.

① 개량형 제3세대+ 원전 시스템은 2010년까지는 개발될 것으로 예상된다.

② 제4세대 원전은 2030년경에 개발될 것으로 예상된다.

제3세대와 제3세대+ 원전 기술은 대부분 신형 경수로와 일부 신형 가스 냉각로 기술로 구성되어 있으며, 현재 세계 대부분 지역에서 경쟁력이 있다. 제도적인 문제가 성공적으로 처리된다면 미국이나 유럽에서도 경쟁력을 갖추게 될 것이다.

그러므로 이러한 제도적인 문제가 신규 원전 추진에 주요 장애 요인으로 작용하는 한 개발 방향은 기술적 사항을 고려하는 대신 이 문제를 우선적으로 처리할 필요가 있다.

산업계는 이런 측면의 노력에 대한 실질적인 주도권을 줄게 될 것으로 기대된다. 이러한 경우 에너지성의 역할은 이들 기술의 시장 접근성 때문에 훨씬 제한적이다.

미국원자력협회(NEI: Nuclear Energy Institute)나 미국 전력연구소(EPRI: Electric Power Research Institute)와 같은 기관은 이미 회원들끼리 차세대 원전을 주제로 토의하고 있다.

일부 기술적 문제가 있기는 하지만 주된 내용은 장래에 재정적·경제적·법률적 측면 및 안전 규제를 포함하는 적절한 규제 방법을 어떻게 확보할 수 있는가이다.

제대로 추진된다면 이 분야의 발전은 제3세대+ 원전 시스템을 훨씬 성공적으로 진행시킬 수 있고 동시에 제4세대 원전 개발을 가능하게 한다.

그러나 정부의 역할은 장기적이고 위험 요인이 큰 기술 개발에 역점을 두어야 한다. 미국 에너지성의 NERI(Nuclear Energy Research Initiative)는 신형 원자력 기술의 혁신적이고 새로운 개념을 성공적으로 개발하였으며, 이 기술은 방사성 폐기물의 효과적 처리와 감축, 경제성 증진, 원자력 발전의 안전성 향상 및 핵물질 확산과 관련한 문제를 처리 가능하게 할 수 있을 것이다.

그럼에도 불구하고 NERI가 수행

하고 있는 연구 내용(수소 생산용 원자로 : 수명 기간 동안 전연료 장전이 가능한 소형 modular 원자로 및 기타 창의적인 내용을 포함하고 있음)은 완벽한 시스템 설계나 어떤 특정 설계 방법을 제시하는 것은 아니다.

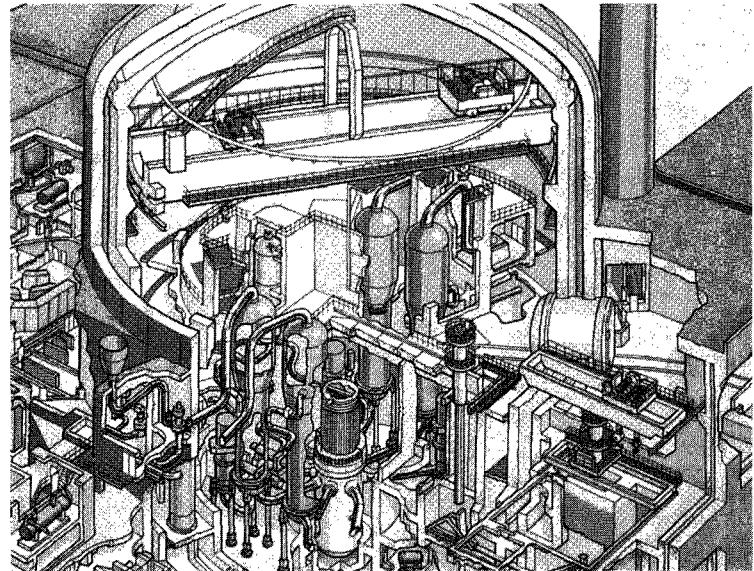
이를 위해서는 다음 단계의 연구가 필요하다. 차세대 원자력 시스템 개발을 착수하기 위해서 제4세대 원전 개념을 확립하였다.

제4세대 원전 개발을 통하여 미국 에너지성은 관련 국제 기관·산업계·학계·원자력규제위원회(NRC) 등과 긴밀한 협조하에 먼 훗날을 위해 개발할 필요가 있는 원전 시스템의 주요 기술적 목표를 종합해야 하는 어려우면서도 필요한 업무를 시작할 예정이다.

우리는 아직 이러한 목표의 상호 연관성과 제3세대 원전 및 3세대+ 시스템의 속성을 알지 못한다.

일부에서는 현재의 기술로 달성 할 수 없는 목표를 설정하는 것은 현재 이용 가능한 개량형 경수로나 기타 기술에 대해 부적합성의 검은 구름을 드리우는 위험한 모험일 뿐이라고 확신하고 있다.

이것은 새로운 형태로 제기된 오래된 논쟁에 불과하다. 즉 항상 변명의 여지가 있는 역사적 사건을 통해서 볼 때 보수적이라는 것은 혁명(revolution)보다는 개선(evolution)을, 혁신(innovation) 보다는



제4세대 원전 개발을 통하여 미국 에너지성은 관련 국제 기관·산업계·학계·원자력규제위원회(NRC) 등과 긴밀한 협조하에 먼 훗날을 위해 개발할 필요가 있는 원전 시스템의 주요 기술적 목표를 종합해야 하는 어려우면서도 필요한 업무를 시작할 예정이다.

현상 유지(status quo)를 옹호한다.

에너지성은 이와 같은 논쟁에 초점을 맞춘 워크숍을 지난 2000년 5월에 개최하였다. 이 워크숍에는 세계 각지의 연구소·산업계·정부·학계 전문가들이 참석하였으며 각각의 시각에 대한 열띤 논쟁을 벌였다.

제4세대 원전 기술 개발이 어떤 방향으로 진행되어야 하는지 명확하지 않지만 원자력이 직면하고 있는 복잡한 문제들은 적극적인 조치 없이는 해결될 수 없다는 것은 명백하다.

제3세대+ 시스템 개발 과정의 연구 내용 변경으로 많은 교훈을 얻게 될 것이지만, 보다 적극적인 목표를 설정할 경우 추가로 얻을 수 있는 이득은 과연 무엇인가?

제4세대 시스템 개발 방향은 NERAC 소위원회(제4세대 원전기술개발 소위원회)에서 설정하게 될 것이다. 이 소위원회는 MIT 대학의 Neil Todras 교수와 GE에 근무한 적이 있는 Sal Levy 박사가 공동 의장을 맡게 될 것이다. 다른 위원들은 산업계·전기사업자 및 학계에서 선출될 예정이다.

이 소위원회는 대규모 연구 기관과의 상호 교류를 통해 혁신과 보수 사이의 기본적인 문제를 토의하고 NERAC의 자문을 받은 후 제4세대 원전 시스템의 독자적인 기술 개발 목표를 수립할 예정이다.

미국 에너지성에서는 이 연구 사업에 선진국과 개발 도상국을 비롯한 국제 사회의 폭넓은 참여를 기대하고 있다.

1990년 말 에너지성은 일반 국민

의 의견을 수렴하기 위하여 연구 개발 목표를 제시한 바 있다. 이후 에너지성은 각 분야의 원자로 기술(예를 들면 경수로·액체 금속로·가스 냉각로 등)에 관한 전문가팀을 지원하여 각 부문별 목표를 달성하기 위한 최선의 방안과 기술을 결정할 예정이다. 모든 사안은 회의에 상정되어 평가를 받을 예정이다.

일단 실행이 되면 보다 심층적인 접근 방안을 채택할 것이며, 채택된 방안들을 완전히 실현시키는 데 필요한 연구가 세분화되어 수행될 예정이다.

이러한 활동을 통해 에너지성과 연구 기관에 NERAC이 설정한 목표를 달성시킬 수 있는 연구 개념을 제시하고, 2030년까지 개발할 수 있도록 한다. 또한 이 개념이 결실을 맺는 데 필요한 연구 개발을 명확하게 할 것이다. 최소한 이 정보가 장래 NERI의 연구 대상이 되도록 할 예정이다.

이것은 종합 개발 프로그램의 기초가 될 수도 있을 것이며, 여러 국가가 참여하는 국제적인 프로그램이 될 가능성도 있을 것이다.

장기 개발 계획의 첫 번째 단계는 현재의 기술적 목표를 수립함으로써 시작되고 있다. 이 사업이 끝나는 시점은 결과가 나올 때까지 모든 과정을 해내려고 하는 관련 기관의 능력과 관심 정도에 달려 있다.

### 원자력의 미래

아무도 신규 원전이 가까운 장래에 건설될지, 또는 이 모든 활동이 성공적으로 수행될지 조차 확실히 단언할 수 없다. 수많은 난관을 극복해야 할 필요가 있다.

미국의 신규 원전 건설 여부에 대하여 국민적 토론에 부쳐야 할 시기가 매우 빠르게 다가오고 있으며, 어쩌면 대부분의 사람이 알고 있는 것보다 훨씬 가까운 시기가 될 수도 있다.

규제 기관의 입장은 우호적이고 제3세대 원전 기술은 이미 입증되어 이용하고 있으며, 전기 사업자는 1999년 한 해 동안에만 수십억 불을 투자하여 기존의 원자력 설비를 가동중이며 앞으로도 원자력에 상당한 규모의 투자를 할 용의가 있음을 보여주고 있다.

미국에서 지난 10년 동안 신규 원전 건설 발주가 없었던 것은 사실이다. 2030년까지 신규 원전 건설 문제는 환경을 비롯한 다른 주요 문제가 어떻게 처리되느냐에 달려 있으나 신규 발주는 불가피할 것으로 보인다.

에너지 자원이 풍부한 미국이 가까운 장래에 신규 원전을 건설하든 하지 않든 다른 국가, 특히 개발 도상국에게는 원자력이 중요한 대안이라는 것은 사실이다. 많은 국가에서 원자력 발전으로 전기를 생산함

으로써 에너지 자립도를 향상시키고 환경 보호를 위한 대기 오염 물질 감축, 고가의 석탄 수송용 철도 건설 및 가스 수송용 파이프 라인을 건설할 필요가 없고 개발 도상국의 기술 발전 및 산업 기반 구축을 위한 유일한 대안이 되고 있다.

많은 개발 도상국들은 이와 같은 이득을 공유하고 있으나, 국제 원자력계는 일부 국가의 원자력 안전에 대한 효과적인 규제, 방사성 폐기물 처리, 핵물질의 확산과 보호에 관련된 문제를 해결하는 능력에 대하여 우려하고 있다. 이런 점을 고려해 볼 때 제4세대 원전 시스템은 이를 채택하는 국가는 물론 국제 원자력계에 상당한 이익을 제공할 수 있을 것이다.

원자력의 미래에 대한 국제적인 토론은 수십 년간 지속되어 왔고 앞으로도 수십 년간 계속될 것이다.

미국은 최소한 21세기 중반까지는 원자력발전소를 운전하게 될 것이며, 원전 보유국은 지금과 같이 핵분열을 이용하여 전기를 계속 생산할 것이다.

세계 에너지 산업계가 직면하고 있는 도전 과제를 고려할 때 원자력 기술은 당분간 현재의 역할을 지속할 것으로 보인다. 이와 같은 현실 과제의 달성을 여부는 원자력의 미래에 관심이 있는 모든 국가의 정부 기관·산업계·연구소 및 대학의 계획과 비전에 달려 있다. 83