



# 원자력을 신세기의 기간(基幹) 에너지로 부활

- 미국 NERI(Nuclear Energy Research Initiative)의 활동 -

김 중 회

과학문화연구원 이사

**미**국은 원자력 에너지에 관하여 제2차 세계 대전 후 항상 지도적 입장에 있었으나, 핵확산, 원자력 발전의 경제성, 원자로 운전의 안전성 및 방사성 폐기물의 처분 문제로 인하여 미국 국민은 오늘날과 장래의 핵분열 에너지 이용에 의문을 가지고 있기 때문에 과거 20년간이나 상업용 발전로의 신규 발주가 없었으며, 금후에도 새 원자로를 제조할 계획은 없는 상황이다.

이러한 사실은 정부나 기업이 핵분열 에너지에 관한 연구개발의 투자 의욕을 감퇴시켰으므로 젊고 능력있는 인재들이 이 분야를 자신들의 연구 개발 활동의 장으로 선택할 것을 주저케 하는 결과를 만들게 하였다.

이러한 결과는 미국이 이 분야에 있어서 기술력의 후퇴가 계속될 것이며, 신세기에 있어서의 에너지원으로 또는 발전성이 있는 학술적 연구 개발 분야로서 원자력이 위기적

인 상황에 있다고 할 수 있다.

이와 같은 상황에서 1997년 1월 클린턴 대통령은 대통령과학기술자문위원회(President's Committee of Advisors on Science and Technology :PCAST)에 대해 미국 에너지성(Department of Energy : DOE)이 중심이 되어 수행하고 있는 현재의 에너지에 관한 연구 개발의 상황을 평가하여 미국이 신세기에 있어서의 에너지 확보와 지구 환경 보호의 양면에서 필요로 하는 에너지 연구 개발의 전략을 책정하도록 요구하였다.

따라서 관계 기관은 이것을 받아들여 동년 12월에 PCAST 에너지 연구개발패널(Panel on Energy Research and Development)에서 신세기를 향해 금후 추진해야 할 연구 개발의 기본적인 방침을 제시한 「21세기를 향한 연방 정부의 에너지 연구 개발에 관한 대통령에 대한 보고서 (Report to the President on Federal Energy

Research and Development for the challenges of the Twenty-First Century)」(이하 「PCAST Report」)를 제출하였다.

PCAST 보고서에서는 핵분열 에너지는 이산화탄소 배출이 극히 적으며 온실 효과와 가스의 방출 억제에 효과적인 에너지라는 점을 착안하여 금후의 개발 도상국에 있어서 에너지 수요의 증가에도 대비하기 위해 적극적인 연구 개발을 실시함으로써 핵분열 에너지의 이용에 수반되는 여러 가지 문제를 해결하여 금후 미국이 이 분야에 있어서 국제적인 지도력을 유지해야 한다고 하였다.

DOE는 PCAST 보고서에 의거하여 원자력 에너지의 연구 주도(Nuclear Energy Research Initiative : NERI)를 위한 예산을 수립하여 신세기에 있어서 원자력의 위상을 모색하기 시작하였다.

20세기에 등장한 거대 과학 기술의 대부분은 그 존재가 사회에 미치

는 영향이 기술적인 검토만으로는 문제가 해결되지 않는 측면을 갖는다.

NERI의 활동이 그와 같은 특징을 단적으로 나타내고 있는 원자력의 제문제를 해결하는 돌파구가 된다면 이와 같은 문제를 안고 있는 다른 과학 기술 분야에 있어서 문제를 해결하는데 좋은 선례(先例)가 될 것으로 생각된다.

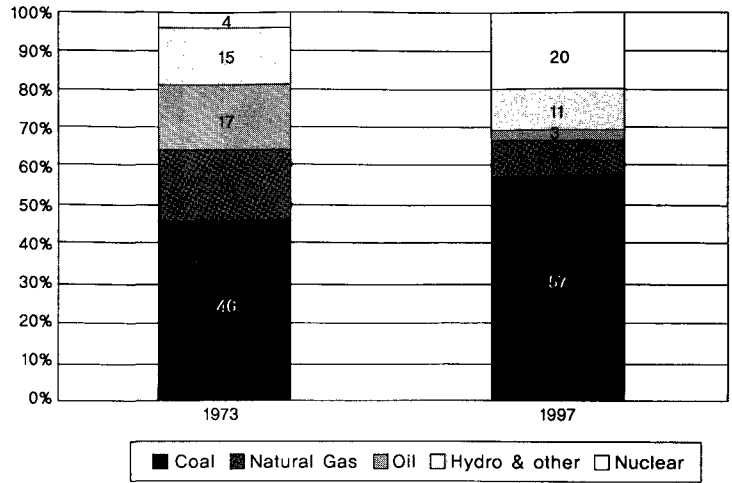
차기(次期)의 「원자력 연구 개발 및 이용에 관한 장기 계획」 책정에 관한 논의가 시작된 이 시기에 논의에 대한 일조(一助)가 되기를 바라며 또한 미국에 있어서 새로운 활동의 중심이라고도 할 수 있는 NERI의 내용을 소개한다.

**핵분열 에너지에 관한 미국의 현황**

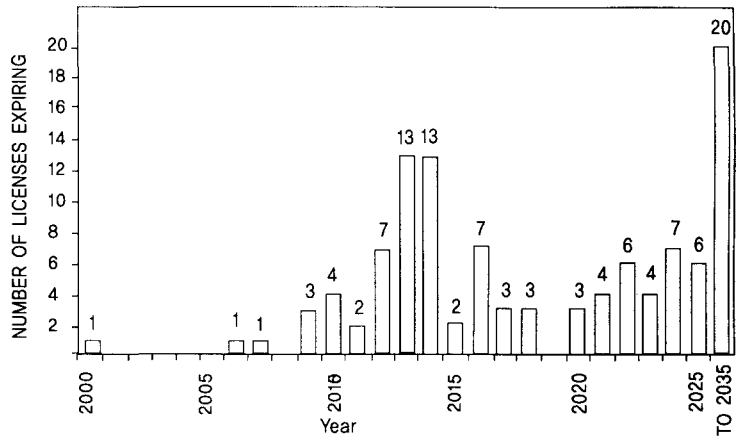
PCAST 보고서에서 권고한 배경을 이해하기 위하여 미국에서 핵분열 에너지에 관하여 최근 2년간 미국 정부의 관계 기관에서 발표된 주요 보고서를 토대로 살펴보기로 한다.

**1. 원자력발전소 건설 계획**

미국은 현재 세계에서 가장 많은 109기의 원자로를 운전하고 있으며 총전력 발전량의 20%를 발전하고 있다(그림 1) 참조). 그러나 연간 전력 소비량의 신장이 급격히 저하된 점, 천연 가스의 가격이 싸져서 Combined Cycle Plant의 효율이



〈그림 1〉 미국 발전량의 내역



〈그림 2〉 미국의 상용 원자력발전소 허가 기한 만료 예정 수

향상된 점, 원자로의 건설비가 인상된 점, 방사성 폐기물의 처리 및 보관 문제가 해결되지 않고 있는 점, 핵확산 및 안전성에 불안감이 있는 점 등의 이유로 과거 20년 동안 발전소의 신규 발주가 없었으며, 금후 10년에서 20년간도 신규 발주의 전망이 없다.

더욱이 현재 운전중인 원자로 중 57기는 2017년이면 설치 허가의 기한이 만료될 전망이지만 (〈그림 2〉 참조) 미국원자력규제위원회 (U.S. Nuclear Regulatory Commission : NRC)로부터 설치

허가의 연장을 얻기 위한 비용이 불확정되어 앞에서 언급한 57기만이 아니라 허가 기한의 만료를 기다리지 않고 조기 폐쇄를 해야 할 원자로가 적지 않게 있을 것으로 예상된다.

이런 결과로 2030년경에는 현재의 원자력발전소가 거의 폐쇄될 것으로 예상되고 있다(〈그림 3〉 참조).

**2. 정부의 연구 개발 투자**

미국 정부의 원자력에 관한 연구 개발 투자는 원자력에 대한 장래의 기대감을 표시하는 지표의 하나로 생각된다.



유카마운틴(Yucca mountain) 고준위 폐기물 처분장의 조사(1999년도 3억5,700만불) 및 해군 선박용 원자로에 관한 연구 개발(1999년도 6억6,000만불)에는 알맞은 투자를 하고 있으나, 원자력 발전(發電)에 관한 연구 개발비는 <그림 4>에 표시된 것과 같이 1986~1997년 간에 지출이 대폭 감소되었다.

또 <그림 5>에 표시된 것과 같이 자원별로 보더라도 원자력 관련 연구 예산이 차지하는 비율이 작아지고 있다.

### 3. 인재 (人材)

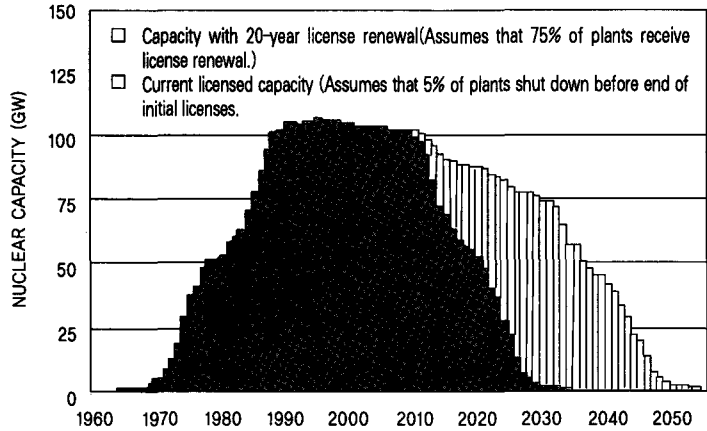
원자력에 관한 분야에 있어서 대학원 등 고등 교육의 장소가 축소되고 있다.

1975년에 50개가 있었던 원자력 공학과나 프로그램은 현재 35개로 감소되었고, 1975년에 76기였던 대학의 연구용 원자로도 현재 34기로 감소되었다.

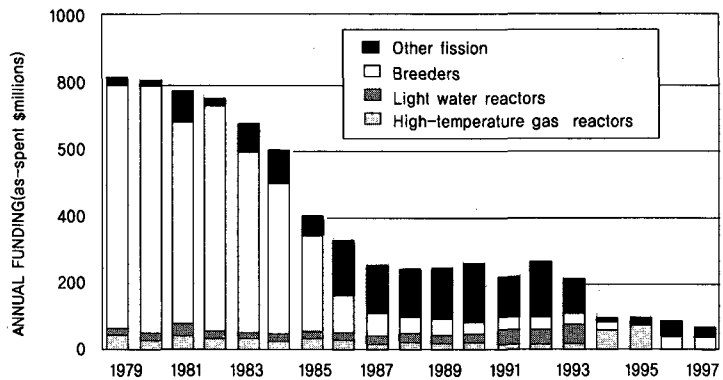
원자력공학과와 입학자 수는 1992년부터 급격히 감소되고있다 (<그림 6> 참조).

PCAST Report에서는 국가나 산업계에서 필요한 원자력 분야의 인재를 확보하기 위하여 원자력 관계의 교육 프로그램을 활성화하여 높은 능력을 가진 학생에게 매력 있는 것으로 하지 않으면 안된다는 인식이 표시되어 있다.

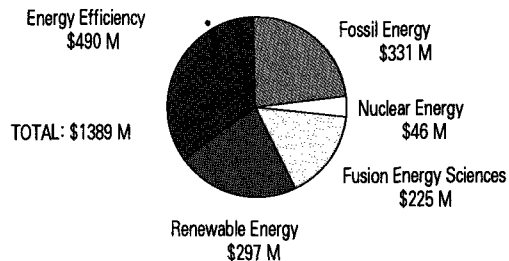
이에 대응하여 DOE는 1998년도



<그림 3> 미국의 원자력 발전 용량의 예측



<그림 4> 핵 분열 에너지의 연구 개발 투자



<그림 5> DOE의 에너지 자원별 연구 개발비 1998년도 요구

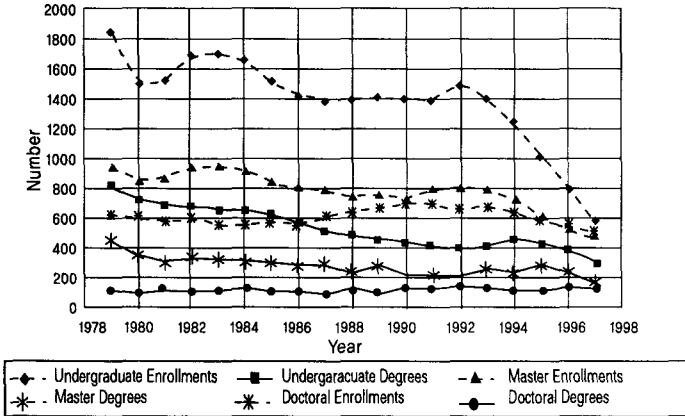
부터 원자력공학 교육 연구 프로그램 (Nuclear Engineering Education Research (NEER) Program)을 만들었다.

초년도는 장래 원자력공학이 유망한 영역으로 될 수 있게 하는 연구에 대한 조성금으로 600만불을

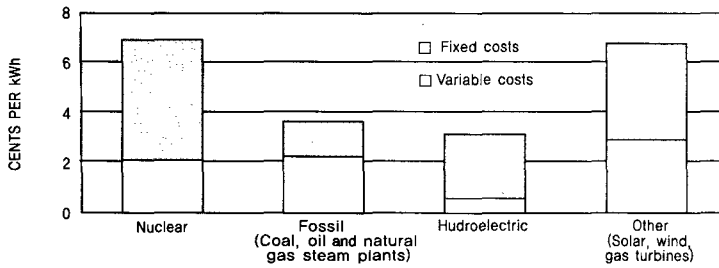
투입하고 대학에 설치되어 있는 원자로에 대한 지원, 대학의 원자력 교육 프로그램의 지원을 하고 있다.

### 4. 경제성

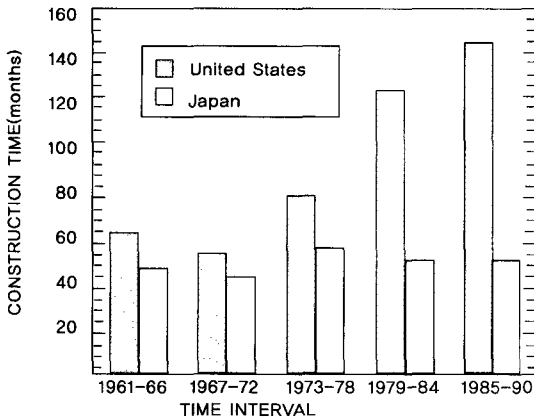
원자력발전소는 다른 형식의 발전에 비해 초기의 설비 투자가 크지



〈그림 6〉 과거 18년간의 미국 대학에 있어서 원자력공학과 입학자 및 학위 취득자 수의 동향



〈그림 7〉 전력 cost



〈그림 8〉 미국 및 일본의 건설에 요하는 시간

만 운전예 수반되는 연료비 등은 적 나 새로운 원자력발전소 건설을 축  
 다고 해왔다(그림 7) 참조). 그러 진하기 위해서는 설비 투자에 따른

자본의 부담을 감소시키는 것이 원  
 가면에서 경쟁력을 갖기 위해서나  
 또는 투자에 따른 위험(Risk)이나  
 불확실성을 감소시키기 위해서도  
 불가결한 것이다. 따라서 이 때문에  
 건설 기간의 단축이 과제가 된다  
 (〈그림 8〉 참조).

제도적으로는 NRC의 설치 허가  
 수속의 번잡한 것도 건설 기간을 늘  
 리는 요인이 되고 있다.

이러한 과제에 대하여 미국에서  
 는 각 전력 회사가 운전예 수반되는  
 제경비 삭감에 노력하는 동시에  
 DOE와 기업이 공동으로 건설예 용  
 이하며 더욱이 운전 경비가 적게 드  
 는 선진적 경수로를 설계하기 위한  
 연구 개발을 해 왔다. GE(General  
 Reactor)나 Westinghouse사의  
 AP600이 그것에 해당된다.

이들의 설계는 확률론적 위험 평  
 가에 의해 현재 사용되고 있는 경수  
 로에 비해 안전성이 높은 원자로로  
 평가되고 있다.

### 5. 방사성 폐기물

미국은 다른 원자력발전소 보유  
 국과 동일하게 영구적인 처분 방법  
 으로 지층 처분을 계획하고 있으며,  
 1987년, 미국 의회는 네바다주의  
 유카마운틴(Yucca Mountain)을  
 처분 후보장으로 선정하였다. 그  
 후 DOE에 의한 이 분야의 연구 개  
 발은 Yucca Mountain의 처분장  
 으로서 적정 평가에 관한 것으로 집



중하고 있다.

방사성 폐기물의 처분에 대하여 미국의 막대한 비용과 노력에도 불구하고 입지주(立地州)가 이 계획에 여전히 반대하고 있으며 미국 의회도 DOE의 이제까지의 성과에 만족하고 있지 않다.

환경보호청(EPA)이나 NRC는 사용후 연료의 지층 처분 인허가를 위한 기준 등을 최종적으로 확정하지 않고 있으며, 처분 개시가 당초의 1998년에서 2010년으로 연기되었다.

이 때문에 원자력발전소에서 발생하는 사용후 연료의 저장 시설 여유가 없어지고 있으므로 일각이라도 빠른 대응이 요구되고 있는 상황이다(〈표 1〉 참조).

한편 군분리(群分離)·소멸 처리를 재검토하여 Yucca Mountain 계획 추진에 도움이 되도록 하려는 움직임이 있다. 1998년도에는 뉴멕시코(New Mexico)주에서 선출된 도메니치 상원 의원의 발의로, 가속기(加速器)를 이용한 군분리·소멸 처리의 유효성을 재평가하여 그 위치 부여를 명확히 하자는 이른바 Road Mapping Project에 대한 예산이 책정되어 현재 DOE의 민간방사성폐기물관리국(Office of Civilian Radioactive Waste Management) 관할로서 주로 Los Alamos 국립연구소가 제창하고 있는 Accelerator-driven Transmutation of Waste(ATW)

〈표 1〉 사용후 연료의 저장 능력을 초월한 원자로 수(기)

	사용후 연료의 저장 능력을 초월하여 연료를 사용하고 있는 원자로 수	사용후 연료의 저장 능력을 초월하여 연료를 사용하고 있는 원자로 수	(a)/78기(%표시)
2000년 이전	13	13	16.7
2001년	5	18	23.1
2002년	5	23	29.5
2003년	5	28	35.9
2004년	5	33	42.3
2005년	1	34	43.6
2006년	15	49	62.8
2007년	4	53	67.9
2008년	1	54	69.2
2009년	1	55	70.5
2010년	6	61	78.2
2011년	5	66	84.6
2012년	2	68	87.2
2013년	5	73	93.6
2014년	1	74	94.9
2015년	0	74	94.9
2016년	1	75	96.2
2017년	0	75	96.2
2018년	1	76	97.4
2019년	0	76	97.4
2020년 이후	2	78	100
합 계	78	78	100

주: NRC의 Data에서 저장 능력을 초월하여 연료를 사용하는 시기가 명확한 78기의 원자로에 대해서만 정리하였다.

의 평가 검토가 진행되고 있다.

### 6. 핵확산

원자력 이용에 따른 국제적 핵확산의 염려는 미국이 제일 강하다. 미국은 국제원자력기구(IAEA)를 중심으로 한 국제 감시 체제를 지지하고는 있으나, 이 분야에 대하여

연구 개발을 적극적으로 추진하고 있는 상황은 아니다. 고속로에 대해서도 그 경제성과 핵확산으로 인한 문제로 연구 개발은 하지 않을 방침이다.

핵확산 방지의 관점에서 신규 기술의 개발, 기술 수출 등의 역제는 산업의 활성화와 젊고 우수한 인재

의 이 분야 참가를 저지하고 있다.

### 7. 안전성

1979년에 미국에서 발생한 TMI 발전소의 사고나 1986년에 일어난 러시아의 체르노빌 발전소 사고는 원자력 발전의 안전성에 대하여 큰 의문을 갖게 하는 계기가 되었다.

다만 현실적으로 미국에서는 발전소 사업소 외의 일반 대중의 건강에 영향을 미칠만한 방사성 물질이 방출되는 사고는 발생하지 않았고, 미국연구평의회(National Research Council)는 일반 대중의 건강에 관해 현재 운전중인 원자로의 위험성은 낮으며 안전하다는 생각을 하고 있다.

DOE는 국내 원자로의 안전성에 한정된 연구 개발은 하고 있지 않으나, 개량형의 경수로(ALWR) 등과 관련있는 연구 개발은 진행하고 있다.

또 국제적인 원자로의 안전 확보의 중요성 때문에 러시아의 원자로 운전 안전 확보에 대한 지원을 하고 있다.

근래 원자력을 포함한 에너지에 관한 연구 개발의 중요성을 강조한 보고서가 잇달아 나오고 있으며 <표 2> 참조, 또 1997년 12월에 나온 PCAST 보고서를 받은 DOE는 NERI를 설치하여 적극적인 연구 개발을 실시하는 등 정채되어 있었던 것으로 생각된 미국 원자력에

있어 새로운 움직임이 보이고 있다. 이 움직임에 대하여 다음 장에서 설명하기로 한다.

### PCAST 보고서

이 보고서에서는 ①수송·건축물 등 말단에서의 에너지 이용의 효율화 ② 풍력 발전·태양열 에너지 바이오마스 에너지·지열 에너지 등 재생 가능한 에너지 기술 ③ 핵융합 에너지 ④ 핵분열 에너지 ⑤ 석유·석탄·천연 가스 등의 화석 연료로부터 에너지에 관한 연구 개발의 중요성이 지적되어 있다.

①에서 ④까지는 예산의 증액을 요구하고 있으나 ⑤에 대해서는 실시되고 있는 연구 과제를 현행 예산 범위 내에서 변경 또는 재편성할 것을 요구하고 있다.

핵분열 에너지에 대해서는 ① 플루토늄 이용에 따른 핵확산 ② 원자력 발전의 경제성 ③ 방사성 폐기물 처리·처분 ④ 안전성에 관한 문제가 미해결중인 난제로 존재하지만, ⑤ 정정(政情)이 불안정한 중동 지역의 원유에 크게 의존한 에너지 공급 체제를 개선하고, 에너지의 안정적 확보를 도모할 것 ㉠ 원자력 이용에 의한 핵물질 확산을 방지하고 ㉡ 에너지에 관한 미국의 지도적인 입장을 유지할 것 ㉢ 이산화탄소를 발생시키지 않는다는 핵분열 에너지의 특징을 살려 온실 효과 가스의

억제를 도모하며 네 가지의 시점에서 핵분열 에너지를 미국에 있어서 장래에도 유지할 필요성은 무시할 수 없으며 금후에도 연구 개발을 해야 한다고 권고하고 있다.

### 1. NERI의 설립

DOE가 종래 해왔던 연구 개발에서는 DOE 내의 계획 담당 부서가 연구 개발의 목적·목표·수법 등을 모두 결정한다는 방법을 채택해 왔으나 원자력을 중점으로 한 여러 가지 문제를 해결하기 위하여 연구 개발 공동체 안에 있는 새로운 제안을 장려하며 육성하기 위하여 경쟁적인 공모 제도(公募制度)를 도입할 필요가 있다고 한다.

이에 대한 구체적인 제안으로서 DOE는 NERI를 설립하고 초년도에 5,000만불, 그후 2002년까지는 예산 규모를 1억불까지 확대하여 원자력이 직면한 문제를 해결하기 위한 연구 과제에 대하여 투자해야 한다고 하고 있다. (실제로 실현한 예산 규모에 대해서는 「DOE의 2000년도 예산 요구」 장 참조).

### 2. 현재 운전중인 원자력발전소의 상황 파악

이산화탄소 방출문제에 대처하기 위해서는 현재 운전중인 원자력발전소가 전력 업계에서 규제 완화 후의 시장에서도 운전을 계속하는 것이 바람직하다. 그러기 때문에



DOE는 원자력발전소의 운전에 관한 상황을 파악해 둘 필요가 있다고 하고 있다.

또 증기발생기와 같은 주요 기기의 교환 원가나 NRC의 안전 규제에 적합토록 하기 위한 개선 원가의

저하를 도모하기 위한 연구 개발 노력이 필요하다고 하고 있다.

**NERI의 개요**

DOE는 앞에서 기술한 PCAST

보고서를 받고 원자력에 관한 미국의 국제 경쟁력, 인재 및 지적 기반을 유지하며 미국의 지도력을 강화할 것을 목적으로 하여 핵확산·경제성·방사성 폐기물·안전성 등 장애 원자력 이용에 방해가 되는 과학

**<표 2> 최근의 미국 에너지 관련 보고서**

보고서명	포괄적 국가 에너지 전략 (Comprehensive National Energy Strategy)	미국 에너지성 전략 계획 (U.S. Department of Energy Strategy Plan)	원자력 에너지에 관한 연구 개발 계획의 DOE에 대한 권고 (Recommendation for Deoartment of Energy Nuclear Energy R&D Agenda)	온실 가스의 방출을 억제 하기 위한 기술 개발 (Technology Oppotunity to Reduce U.S. Green-house Gas Emissions)
책정 기관	DOE	DOE	DOE 원자력 관계 국립연구소	DOE 연구소
책정 년월	1989년 4월	1997년 9월	1997년 12월	1997년 10월
개요	에너지는 '경제의 혈액' 이므로 국가의 에너지 장래 전략의 중요성을 강조하고, 아래와 같이 생각하지 않으면 안될 3가지 문제를 열거하였다. 1. 에너지 안전 보장의 확보 2. 에너지 시장에서 경쟁력 유지 3. 기상 변화에 대응	미국 DOE의 에너지의 안전 보장, 국가 안전 보장, 환경 보호, 연구 개발의 선도 등 네 가지의 역할에 대하여 그 방침을 제시하고 있다.	미국은 원자력 에너지 연구 개발에 관하여 엄격한 정세이지만, 장래의 투자에 대해 결단을 내리는 것은 세계적으로 에너지나 국가의 안전 보장에 있어서 지도적인 입장을 취할 미국의 능력에 큰 영향을 미칠 것으로 생각되어 아래의 세 가지 목표를 가지고 연구 개발을 추진해야 한다고 하고 있다. ① 국제적인 기술 및 정책의 논의장에서 미국의 지도적인 입장의 유지 ② 원자력 에너지 및 안전 보장에 관한 중요 기술의 경쟁력 유지 ③ 환경 및 에너지 안전 보장	원자력 에너지 지구 규모의 이산화탄소 억제에 관하여 중요한 대응책이다.
연구 영역	① 에너지 시스템의 효율 개선 ② 에너지 위기에 대한 보증 ③ 에너지 생산과 건강 및 환경을 배려한 이용 촉진 ④ 장래의 에너지 선택기의 확대 ⑤ 지구 규모의 문제에 대한 국제적인 협력	① 원자로의 신뢰성 및 가동률을 1996년에는 76%였던 것을 2010년까지 85%로 높인다. ② 원자력을 장래의 선택기로서 존속 가능한 상태로 유지하고 전력 업계와의 협력에 의해 2010년까지는 새로운 국내 원자력발전소의 발주를 목표로 한다. 등	① 원자력 에너지 기초 연구(대학 및 국립 시험 연구 기관과 공동) ② 미국의 이산화탄소 방출의 감소를 위한 원자력 에너지 연구 개발 ③ 핵연료 사이클의 핵확산 방지 강화 ④ 고효율 핵연료의 공동 개발 ⑤ 국제적인 원자력 협력	① 원자로의 수명을 연장시켜 최대한으로 활용할 것 ② 차세대 핵분열 원자로의 연구 개발을 추진할 것 ③ 핵융합의 연구 개발을 추진할 것

〈표 3〉 NERI의 주요 연구 분야와 구체적인 내용

<ul style="list-style-type: none"> <li>• 핵비확산성이 높은 원자로 및 연료에 관한 기술(Proliferation-resistant Reactor Fuel Technology)</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 고연소도 연료 이용의 원자로</li> <li>② 재처리를 필요로 하지 않는 핵연료 Recycle</li> <li>③ 핵비확산 대응의 재처리</li> <li>④ 국제적으로 감시된 저장 시설</li> <li>⑤ Thorium cycle의 이용</li> <li>⑥ 합금 연료를 사용한 플루토늄 연소 원자로</li> <li>⑦ 기초 재료 과학</li> <li>⑧ 사용후 연료의 핵확산 방지</li> </ol>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 고효율 원자로의 설계(New High Efficiency Reactor Designs)</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 에너지 전환 연구</li> <li>② 혁신적인 원자로와 핵연료의 개념</li> <li>③ 새로운 원자로와 노심의 개념</li> <li>④ 선진 Computer Architecture</li> <li>⑤ 선진적인 계측 기기의 개발과 수법</li> <li>⑥ 선진 재료의 연구</li> </ol>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 선진 저출력 원자로에 관한 설계 응용(Advanced Low Power Reactor Designs and Application)</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 원격지의 전력 공급, 의료용 RI 생산, 탈염(脫鹽), 수소 발전을 위한 저출력 원자로의 개념</li> <li>② 용이한 수송 및 장시간 이용 가능한 노심과 간결한 구조로 된 소형 원자로의 개념</li> <li>③ 새로운 연구로의 설계 및 개념</li> <li>④ 해군 선박용 원자로 생산 계획과의 협력</li> <li>⑤ 가스 냉각 및 액체 금속 원자로</li> </ol>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 방사성 폐기물에 관한 사업소 및 알은 지층에 있어서 저장에 관한 새 기술(New Technology for Onsite and Surface Storage of Nuclear Waste)</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 고체 폐기물에 대한 방사선의 영향</li> <li>② 사용후 연료의 부식(腐蝕) 영향과 그 제어 방법</li> <li>③ 중간 저장 기간중의 사용후 연료의 거동 예측을 위한 Modeling 수법</li> <li>④ 중간 저장 기간 도중 영구 저장 시설에 수송하기 위한 모델</li> </ol>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 소멸 처리(消滅處理)(Transmutation)</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 소멸 처리의 가능성을 판정하기 위한 재평가</li> </ol>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 분리과학 및 감손(減損) 우라늄의 유효이용(Separation Science/Beneficial Uses of Depleted Uranium)</li> <li>• 폐기물 및 지층 처분(Waste Forms/Geologic Disposal)</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 핵확산을 방지한 분리 수법</li> <li>② 특별한 핵종을 분리하는 방법 : 예를 들면 세슘(Cesium)의 공업 응용</li> <li>③ 차폐를 개선하기 위한 감손 우라늄 혼합 방법</li> <li>④ 연료 거동이나 환경중의 거동 연구를 하기 위한 대용 핵종으로서 감손 우라늄의 이용</li> <li>① 여러 가지 폐기물의 장기 안전성을 입증하기 위한 Computer Modeling</li> <li>② 저장 시설의 확실한 장기 Monitoring 방법</li> <li>③ 장기간의 폐기물 격리에 적당한 방호벽 (Barrier)을 개발하기 위한 재료 설계</li> </ol>

기술상에 있어서의 제문제를 해결하기 위하여 NERI를 창설하였다.

NERI에 대하여 대학·국립연구소 및 기업 등에서 이루어진 연구 개발 제안은 경쟁적으로 채택된다. 공모의 대상이 되는 연구 제목은 아래와 같은 것을 포함하도록 장려하고 있으나, 이것들에 한정시키지 않게 되어있다.

복수 기관에 걸쳐 공동 연구를 하도록 되어 있으며 그 대상이 되는 중점 과제는 다음과 같다.

- ① 내핵확산성(耐核擴散性)이 있는 원자로 또는 핵연료 사이클
- ② 고효율·저가로서 세계 시장에서 충분한 경쟁력이 있고 개선된 안전성을 가진 새로운 원자로의 설계
- ③ 개발 도상국등에서 이용되는 저출력 원자로
- ④ 방사성 폐기물의 사업소 내, 지표(地表) 저장 및 영구 처분을 위한 신기술

제안을 접수하기 전에 DOE는 NERI계획위원회를 설립하고 구체적인 대상 영역, 과제의 선정, 연구추진 방법 등에 대해 검토를 하였다. 1998년 4월에는 공개 워크숍(Workshop)이 개최되어 대상이 되는 연구 영역 등이 논의되었다.

금후 NERI에서 연구 개발의 구체적인 내용을 추량(推量)하는 데 중요하다고 생각되므로 Workshop





<p>• 선진 핵연료 (Advanced Nuclear Fuel)</p>	<p>①경수로의 고연소도 연료 ② 핵연료 사이클의 경제성, 사용후 연료의 안전성과 감량에 관한 특성, 연료 및 원자로의 안전 유도(安全裕度) 및 핵 확산을 방지한 연료 특성에 관한 식건을 얻는 연구 ③ 장래의 모든 형의 원자로 시스템에 대한 선진 연료 및 기술개발 ④ 우라늄 농축 원가를 낮추는 기술 ⑤ 핵연료를 위한 선진적인 재료나 아금 공정에 있어서 미세 구조의 제어 기술 개발</p>
<p>• 횡단적 과학 기술 (Crosscutting Science and Technology)</p>	<p>Recycling System의 기술적인 특징에 관하여 과거 수십년간에 얻은 모든 식건을 이용하여 주요한 기술적 문제점 등에 대하여 기록 평가를 할 것. 이 평가에는 원자로 및 연료의 설계, 연료 사이클의 선택, 재처리 기술, 핵물질 방호, 제어 기술 및 고준위 방사성 폐기물의 설계를 포함.</p>
<p>• 제도(制度) 및 사회 과학에 관한 연구 (Institutional and Social Science Research)</p>	<p>① 에너지 시스템 평가 모델(Model) ② 제도적인 설계 기준 규제의 용이 ③ 국민의 이해 증진</p>

Summary Report 중에서 관건(Key)이 될 연구 분야로 선택한 제목은 <표 3>과 같다.

NERI는 본 심사에 앞서 1998년 11월 20일 마감으로 예비적 제안을 접수하였다. 이 단계에서 564건이 제안되어 이루어졌으며 그 중에서 275건이 본 제안 제출을 권장하였다.

각 본제안(1999년 1월 29일 마감)에 대해서는 1단계로 과학 기술적 가치를 판단하는 검토가 있었으며, 2단계에서는 DOE의 목적에 일치하는지 등 종합적인 평가를 하게 된다.

1999년도는 1,900만불이 책정되었다. 개개의 연구 과제는 연간 100만불을 상한으로 하고, 대체적으로 연간 10만불에서 40만불을 표

준적인 규모로 하고 있다.

**DOE의 2000년도 예산 요구**

DOE는 2000년도 예산으로 총액 약 178억4,200만불(전년도비 0.1% 감)을 미국 의회에 대해 요구하였다. 이 중 사업비는 176억 1,900만불(대전년도비 2.9% 증)이다.

DOE의 네 가지 임무에 대한 예산 요구액은 <표 4>에 표시한 대로이며 그 중 하나인 에너지 자원 관련은 사업비 전체의 대전년도비 2.9% 중에 비교하면 0.3% 증가에 불과하고 특히 중점을 두고 있는 것 같이 보이지는 않는다.

그러나 주목해야 할 것은 에너지 자원 관련 예산의 요구 내용이다.

<표 4>에 명시된 바와 같이 PCAST 보고서에서 가장 추진되어야 한다고 권고한 수송이나 건축물의 에너지 효율을 개선하고 에너지 소비를 절감하기 위한 연구 개발에는 총액 약 6억4,600만불(전년도비 23.0% 증가)이며, 두 번째로 추진되어야 할 신에너지원에 관한 기술에 대해서는 태양열 에너지나 풍력 에너지에 관한 기술 개발비의 증액 등에 의해 총액 약 3억9,800만불(전년도비 18.7%)로 파격적인 증점화가 기도되고 있다.

이것에 잇따라 증액해야 한다고 권고되었던 핵융합 에너지에 대해서는 총액 약 2억2,300만불(대전년도비 0.0%)로 거의 전년도와 같은 정도이다.

그리고 원자력에 관한 연구 개발에 대하여 기술하면 <표 4>에 표시된 바와 같이 총액 약 1억3,600만불(대전년도비 18.4% 증)의 연구 개발에 중점을 두었으며 그 중에서도 NERI는 총액 2,500만불(대전년도비 31.6% 증)과 강하게 증점화가 기도된 에너지 절감 및 새 에너지에 관한 연구 개발의 신장을 초월한 증점화이며, 신규로 설립된 원자력발전소 이용의 최적화를 위한 연구 개발(총액 500만불)과 더불어 핵분열 에너지에 극진한 배분을 하고 있다.

반대로 지구 온난화 가스를 발생 하는 화석 연료를 사용한 에너지에

〈표 4〉 미국 에너지부 2000년 예산 요구의 개요

	FY 1998 → 예산 →	FY 1999 → 예산 →	FY 2000 → 예산 요구	FY 2000	FY 1999
Total, Department of Energy	16,858,994	17,856,806	17,842,014	-14,378	-0.1%
Business Lines	16,520,178	17,116,806	17,619,054	502,248	2.9%
(1) Environment Quality	6,323,705	6,338,273	6,452,050	113,777	1.8%
(2) National Security	5,718,056	5,984,295	6,228,000	243,705	4.1%
(3) Science and Technology	2,502,527	2,706,269	2,844,493	138,224	5.1%
Fusion Energy Science	217,290	222,636	222,614	-22	-0.0%
(4) Energy Resources	1,975,890	2,087,969	2,094,511	6,542	0.3%
Energy Conservation R&D	450,215	525,701	646,515	120,814	23.0%
Solar and Renewable Resources Technology	269,904	336,000	398,921	62,921	18.7%
Fossil Energy R&D	356,517	384,056	364,000	-20,056	-5.2%
Nuclear Energy R&D	51,107	73,766	87,345	13,579	18.4%
University Reactors Fuel Assistance and Support	7,000	11,000	11,345	345	3.1%
Nuclear Energy Plant Optimization			5,000	5,000	
Nuclear Energy Research Initiative		19,000	25,000	6,000	31.6%

대하여 PCAST 보고서는 재검토를 권고하였으나, 실제로 화석 연료에 관한 연구 개발에 대해서는 총액 약 3억6,400만불로 전년도비 5.2% 감소되었다.

이와 같이 2000 회계년도의 예산 요구에서는 PCAST 보고서에 표시된 방침에 따라 정책을 실시한다는 자세를 볼 수 있다.

**고찰-신세기에 있어서 연구 개발의 의의**

각 분야에서 제출된 미국의 보고서에 따른 기본 인식은 ① 장래에 있어서 에너지의 안정적인 확보 ② 기후 변동 등의 환경 문제와의 조화 ③시장에 있어서의 경쟁, 기술 개발 및 정책 결정에 대한 국제적인 지도

력 유지의 세가지 기본 인식(의의)에 대하여 넓은 Consensus를 얻어 연구 개발을 실시할 체제를 정비해 가고 있다는 것이다.

또 원자력 분야에 있어서 해결하지 않으면 안될 문제점(목표)은 핵 확산·안전성·방사성 폐기물·경제성 등 네 가지 점에 거의 집약되어 있으며 연구 개발의 의의와 목표가 거의 정해졌다고 할 수 있다.

PCAST와 DOE는 독립된 기관에 의한 종합적인 평가를 받아 이와 같은 견해를 집약하였다는 점에 PCAST 보고서의 중요성이 있다.

연구 개발 목표에 대해서도 평화 이용의 원자력 분야에 있어서 구체적인 연구 테마로 영동한 것이 나올 가능성은 적으며, 지금까지 어디선

가 단편적으로 제안되어 있었던 Variation, 혹은 조합을 바꾼 것이 될 가능성이 크다.

그러나 미국이 중점 목표를 명확히 하고 그것을 향해 원자력 관계자가 경쟁을 통해 힘을 집결시키려고 하고 있음을 알 수가 있다.

각 분야에서 나온 미국의 보고서에는 위에서 기술한 기본 인식에 따른 구체적인 연구 개발 과제가 표시되어 있는 것은, PCAST 보고서에 따라 설정된 NERI의 Workshop Summary Report(U.S.Department of Energy, Summary Report of the Nuclear Energy Research Initiative Workshop 1998)뿐이며, 미국도 구체적인 연구 개발 과제를 검토하기 시작한 단계라고 생각된다.



금후 NERI의 Project가 채택되어 실제의 성과가 나옴에 따라 그 방향성이 보다 명확해질 것으로 추측되며, 이제부터 몇 년이 미국의 원자력에 대한 방향성을 결정할 중요한 시기가 될 것으로 생각된다.

**NERI의 연구 과제 선정 배경 및 목적**

앞에서 기술한 바와 같이 클린턴 미국 대통령이 1997년 1월, 대통령 과학기술자문위원회(PCAST)에 의뢰한 사항은 다음과 같다.

1. 현재의 국가 에너지 연구 개발에 대한 평가
2. 21세기의 국가 에너지 및 환

경을 위해 필요한 사항들을 충족시킬 수 있는 프로그램을 확립할 전략 개발

따라서 PCAST는 1997년 11월, 원자력의 이용 확대를 위한 집중적인 연구 개발이 필요하다고 결정하고, 에너지부(DOE)가 NERI를 위시하여 원자력 연구 개발을 활성화할 것을 권고하였으며 또한 DOE는 PCAST의 권고를 받아들여 1999년도 예산으로 1,900만불을 확보하였으며, DOE는 이에 따라 과제를 공모하여(1999년 5월 18일) 총 300개 이상의 응모 과제를 접수하였으나 이 중에서 45개 과제를 선정하여 발표하였으며 그 내용은

<표 5>와 같다.

- \* 연구 기관 수는 대학(21개), 민간 기관(16개), 국립 연구소(8개), 연방 기관(1개)
- 3. 원자력 발전의 성능, 효율성, 핵비확산성 및 경제성을 제고하기 위한 새로운 원자로 및 핵연료 주기 개념 개발
- 4. 원자력 기술 관련 문제에 있어서 미국의 국제적 지도력을 유지하기 위한 미국의 원자력 기술 진보
- 5. 미래의 기술 수요를 충족시킬 원자력 과학기술의 연구기반 증진 및 유지

**<표 5> NERI 연구 과제별 주요 내용**

제 목	직접 에너지를 전환하는 핵분열 원자로 (Direct Energy Conversion Fission Reactor)
연구기관	SNL, LANL, General Atomics, Texas A&M Univ.
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 직접 에너지를 전기로 전환하는 원자로에 대한 타당성 조사</li> <li>-분열 에너지를 열로 전환하지 않고, 바로 전기로 전환함으로써 80% 이상 효율이 향상되며 운전 온도나 압력에 무관</li> <li>-이 개념은 50년대 말부터 60년대 초에 이미 검토했으나 컴퓨터·레이저 등 기술 발달로 다시 타당성 조사 수행</li> </ul>
제 목	혁신적 통합 원자로/출력 변환 시스템 (Novel, Integrated Reactor/Power Conversion System)
연구기관	New Mexico Univ., Westinghouse
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 개도국이 필요로 하며, 핵비확산성, 신뢰성과 경제성이 확보되는 원격지 전력 공급용의 새로운 통합 원자로/에너지 전환 장치 개발</li> <li>-고속로의 열전달 매체로서, AMTEC(Alkali Metal Thermal to Electric Converter)의 에너지 전환 매체로서 액체 금속을 이용</li> </ul>
제 목	장래 원자력 시설의 설계, 제작 및 건설비 삭감을 위한 선진 기술 개발 (The Development of Advanced Technologies to Reduce Design, Fabrication, and Construction Costs for Future Nuclear Plants)
연구기관	Duke Engineering, SNL, ABB-CE, MIT, North Carolina Sta., Univ.
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 새 원전의 투자비는 건설 전과정의 이행에 결정적 영향을 받기 때문에 새 기술의 적용 수단으로서 DPCIT(Design, Procure, Construct, Install, Test) 주기의 조사 목적</li> <li>• 이 혁신적 방법은 세 가지로 요약되는데, 50% 이상 기간을 줄인 제작 기술, 모듈화/단순화를 통한 설계/건설 기술, Internet 등을 통한 정보 기술 개발임.</li> </ul>

제 목	충분한 수동적 안전성을 갖는 모듈 또는 Full size의 단순화된 BWR 설계 (Modular and Full Size Simplified Boiling Water Reactor Design with Fully Passive Safety Systems)
연구 기관	Purdue Univ., BNL
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 차세대 200MWe 모듈 및 1200MWe 용량의 단순 비등로(SBWR)에 대한 개념 설계</li> <li>-SBWR은 기존 LWR에 비해 완전 수동형 안전 계통 보유</li> <li>• 주요 목표</li> <li>-노심 물리 및 노심 열수력의 총효적 설계</li> <li>-실규모 시험 시설의 시험 및 원형 설계의 수동 안전성 실험</li> <li>-계통 해석 도구 개발 및 수동 안전성 평가</li> <li>-200MWe, 1200MWe급 SBWR의 최종 개념 설계 개발</li> </ul>
제 목	원자력을 이용한 수소 연료의 고효율적 생산 (High Efficiency Generation of Hydrogen Fuels Using Nuclear Power)
연구 기관	General Atomics, Kentucky Univ., SNL
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기존의 전기 분해에 의한 수소 생산을 신형 고온로(AHTR)를 이용하여 열 또는 열/전기 분해 결합에 의한 생산으로 대체하는 데 대한 경제성 타당성 조사</li> <li>-수소는 수송 연료로서 화석 연료에 비해 환경적으로 유리</li> </ul>
제 목	구면 전송 측정에 의한 철단면적의 혁신적인 연구 및 재료의 취하성 연구를 위한 입자 수송 계산 (Novel Investigation of Iron Cross Sections via Spherical via Spherical Shell Transmission Measurements and Particle Transport Calculations for Material Embrittlement Studies)
연구 기관	Ohio Univ., Pennsylvania State Univ.
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 구면 전송(spherical shell transmission) 방법을 이용한 단면적 측정 수행과 압력 용기의 두꺼운 부분을 통과할 때 중성자 수송 경로를 새로 측정된 단면적이 어떻게 잘 예측하는지 확인하는 연구</li> <li>-원자로 압력 용기(RPV) 내의 중성자 fluence 때문에 존재하는 것으로 알려진 결함 완화 목적</li> </ul>
제 목	다목적 소형 경수로 (Multi-Application Small LWR)
연구 기관	INTEL, Bechtel Corp., Oregon State Univ.
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 이 연구의 목적은 안전하고 경제적인 목적 경수로 개발과 설계 타당성 조사임.</li> <li>• 소형 자연 대류 PWR을 전기 생산뿐만 아니라 공정열 이용, 다용도로 응용할 수 있도록, 경제성/공학적 분석을 통하여 설계와 안전성 개념을 정립하고 통합 시험 시설을 이용한 test를 통하여 기술적 타당성을 입증할 것임.</li> <li>• 첫 해는 기본 개념 개발, 둘째 해는 개념 최적화, 셋째 해는 개념 완성, 실험 test 및 문서화할 예정임.</li> </ul>
제 목	원자로 압력 용기 구조 건전성 평가에 대한 혁신적 실험 및 계산 기술 응용 (Application of Innovative Experimental and Numerical Techniques for the Assessment of Reactor Pressure Vessel Structural Integrity)
연구 기관	SNL, 미국 NRC, OECD/NEA
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 노심 용융 사고시 원자로 압력 용기 아래 부분은 심각한 열적/압력적 부담을 받음.</li> <li>• 이 연구의 목적은 그 부분의 손상에 대한 실험적 성격 규명과 각 온도/압력 조건에 대해 예측 가능한 분석 능력 개발에 있음.</li> </ul>
제 목	수요 추종 원자력 에너지 모듈 (Demand-Driven Nuclear Energizer Module)
연구 기관	ORNL
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 새로운 원자로 개념인 NEM(Nuclear Energizer Module)에 대한 개념 설계 수행</li> <li>-열 전달 특성 및 초고온에서의 기계적 특성이 향상된 신재료 활용</li> <li>-전기 생산, 동위원소 생산, 수소 생산 등 다목적으로 활용 가능</li> </ul>



	<ul style="list-style-type: none"> <li>-구동체나 유체없이 수요에 추종하여 열 생산</li> <li>-고유 안전성 및 핵비확산성 증대</li> <li>-지상 및 우주의 가혹하거나, 멀리 있거나, 접근하지 못할 환경에서 장기간 신뢰성 있는 전력원으로 이상적</li> </ul>
제 목	안전하게 수송이 가능한 자율형 경수로 : STAR-LW (The Secure Transportable Autonomous Light Water Reactor : STAR-LW)
연구 기관	Westinghouse Electric Co., Berkeley Univ., MIT Polytechnical Institute of Milan
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• STAR-LW의 주요 목표</li> <li>-15년 이상 연료 교체 없이 운전함으로써 핵비확산성 제고</li> <li>-노심 손상이 없는 고유 안전성 향상</li> <li>-연료 교체기, 비상 노심 냉각 계통, 제어봉 구동 장치, 파이프와 벨브 절감 등을 통한 단순화 경제성 제고</li> <li>-장수명 노심으로 방사성 폐기물의 획기적 절감</li> <li>• 이를 위한 혁신적 기술 개발</li> <li>-hard 중성자 스펙트럼을 가져서 내부 conversion ratio가 커서 장수명에 적합</li> <li>-노심 상부에서 비등을 허용하여 자연 대류를 증가시키고, 고온을 유지하여 고효율 가능</li> <li>-핵연료 설계 특징은 열전달 표면적을 증대</li> <li>-stainless steel 감속재로 신뢰성 제고</li> <li>-압력 용기 관통을 줄이는 내부 제어 및 정지 계통 채택</li> </ul>
제 목	원자력 시설의 원가 효과가 높은 배치와 모듈화를 위한 기준 (Standards and Guidelines for Cost Effective Layout and Modularization of Nuclear Reactor Plants)
연구 기관	Westinghouse Electric Co.
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 새로운 원자로형의 전체 비용을 줄일 수 있는 배치 및 모듈화에 대한 표준 및 지침 개발</li> <li>-배치는 운영·유지, 인허가, 자본비 등에 대한 영향 지대</li> <li>-모듈화 및 동시 제조는 비용 절감 효과 지대</li> </ul>
제 목	미래의 원자력 시설의 규제 및 설계에 요구되는 것에 대한 위험도 평가 (Risk Informed Assessment of Regulatory and Design Requirements for Future Nuclear Power Plants)
연구 기관	ABB-CE, SNL, INEEL, MIT, North Carolina Univ., Duke Engineering, Egan Associates
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 새로운 원자로형을 단순화하기 위해 위험 분석 도구를 활용한 과학적이고 위험도 정보를 이용한 평가 접근 방안 개발</li> <li>-신뢰도나 안전성에 크게 기여하지 못하는 규제 요건이나 산업 표준을 파악하여 폐지 또는 개정하는 것이 목적</li> </ul>
제 목	안전하게 수송이 가능한 원자로 시스템, 내장형 핵분열 열원 (STAR: The Secure Transportable Autonomous Reactor System, Encapsulated Fission Heat-Source)
연구 기관	Berkeley Univ., Westinghouse, ANL, LLNL
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 최근 발명된 새로운 원자로 개념에 대한 타당성 평가</li> <li>-핵분열로 생성된 열을 원자로 용기를 통해 일차 냉각 계통에서 이차 냉각 계통으로 바로 전달</li> <li>-따라서 원자로 용기는 평생 밀봉된 채 유지</li> <li>-이 원자로는 경제성, 안전성, 핵비확산성 및 국민 이해 측면에서 우수할 것으로 전망</li> </ul>
제 목	화석 자원의 환경 오염 없이 효율적으로 이용하기 위해 원자력에서 발생한 열 이용 (Nuclear Process Heat for Clean and Efficient Utilization of the Fossil Resource)
연구 기관	LANL, Texas A&M Univ.
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 고온가스냉각로의 열을 온철 화학 공정(endothermal chemical preocess)에 결합시킬 대안 탐색</li> <li>-스팀으로 메탄을 개조시키는 것이 설계 노력의 요체</li> </ul>

제 목	차세대 원자력 시설을 위한 지능형 자가 진단 모니터링 (On-Line Intelligent Self-Diagnostic Monitoring for Next Generation Nuclear Power Plants)
연구 기관	PNL
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 차세대 원자력 시설을 위한 지능형 자가 진단 감시 시스템(SDMS: Self-Diagnostic Monitoring System)의 개발과 데모</li> <li>-원전 열화 메커니즘 및 영향의 탐지, 감시 및 진단</li> </ul>
제 목	미래의 원자력 시설을 위한 고신뢰성 제어 구조의 자동 개발을 위한 새로운 패러다임 (A New Paradigm for Automatic Development of Highly Reliable Architecture for Future Nuclear Plants)
연구 기관	ORNL, North Carolina Univ., Tennessee Univ.
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 21세기 원자로 제어 시스템의 실례를 개발하고, 이를 시험, 평가</li> <li>-자동성 및 결함 용납성 향상을 통해 유용성 제고, 사고 위험성 감소, 운영비 절감 등 목적</li> <li>-제어 알고리즘, 결합 진단, 분산 체제에서의 통신 등 분야에서 연구 수행</li> </ul>
제 목	원자력 안전에 관한 재료에 관련된 탄화수소의 건전성 검증을 위한 혁신적인 화학 기술 (Innovative Chemithermal Techniques for Verifying Hydrocarbon Integrity in Nuclear Safety Materials)
연구 기관	Pacific-Sierra Corp., Virginia Univ., Maryland Univ.
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 재료 상태 감시 및 수명 평가 도구로서 OIT(Oxidation Induction Time)의 활용 가능성 조사</li> <li>-원전 안전 시스템 재료(탄화수소·폴리머 등)의 기능적 통합성은 원전의 신뢰도 및 안전성에 매우 중요</li> <li>- 이들 재료의 노후화에 따른 사고 위험을 줄이기 위해서는 재료 상태를 평가하고 남은 수명을 예측할 수 있는 선진 기술 필요</li> <li>-OIT는 비파괴 형식으로 재료의 화학열 특성을 기존 방식보다 더 민감하게 측정</li> </ul>
제 목	장래 원자력 시설의 운전에 있어서 신뢰성 및 안전성을 개선하기 위한 현명한 기기 및 시스템 (“Smart” Equipment and Systems to Improve Reliability and Safety in Future Nuclear Plant Operations)
연구 기관	SNL, Pennsylvania 주립대학, MIT, ABB-CE, Duke Engineering
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 원전의 경제성, 신뢰도 및 안전성을 향상시킬 수 있는 자체 감시 및 자체 진단에 의한 수리 기능을 갖는 “smart”한 장비 개발</li> </ul>
제 목	경수로를 위한 선진적 핵비확산 대응 저원가, 우라늄·토륨 연료 (Advanced Proliferation Resistant, Lower Cost, Uranium-Thorium Dioxide Fuels for Light Water Reactors)
연구 기관	INEEL, ANL, Purdue 대학, MIT, ABB-CE, Westinghouse Electric Co., Framatome Tech., Siemens Power Corp.
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기존 및 미래의 상업용 경수로에 사용할 수 있는 고연소 도토륨-우라늄 혼합 핵연료 개발</li> <li>• 주요 업무</li> <li>-PWR에서 Th/U 주기의 경제적 타당성을 결정하기 위한 중성자 물리 분석 및 경제성 분석</li> <li>-Th/U 연료의 경제적 제작 가능성 평가</li> <li>-Th/U 연료의 정상·비정상·사고시 거동 평가</li> <li>-Th/U 주기 폐기물의 장기 안전성 평가</li> </ul>
제 목	상용 원자로를 위해 개량된 가연성 독물질 개발 (Development of Improved Burnable Poisons for Commercial Nuclear Power Reactors)
연구 기관	ORNL
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 독물질을 격리시키기 위한 동위원소의 분리 가능성 조사, 분리 시험 및 개량 독물질 제조</li> <li>-가돌리늄(Gd)이나 보론(B)과 같은 가연성 독물질 사용에 따른 부반응도 효과를 저감하고 헬륨 생성에 의한 연료관내의 압력을 제거 또는 저감하는 것이 목적</li> </ul>
제 목	금속 Matrix에 있어서 Once-Through Cycle을 위한 연료 (Fuel for a Once-Through Cycle (Th,U)O <sub>2</sub> in a Metal Matrix)
연구 기관	ANL



내 용	• 토륨 주기에 있어 기존 경수로 기술과 부합하는 혁신적 핵연료 개발
제 목	고연소시 개량 지르코늄 합금의 부식 메커니즘 (Fundamental Mechanism of Corrosion of Advanced Zirconium Based Alloys at High Burn-Up)
연구 기관	Westinghouse Electric Co., Pennsylvania Stat., Univ. ANL, INTEL
내 용	• 원전의 운전 신뢰도 향상을 위해 고연소도용 내부식 특성이 우수한 지르코늄 합금 개발 - 조사/미조사 시료의 부식을 비교 시험, 개량 광자원(photon source)을 이용한 Oxide Film의 X-Ray 회절 및 형광 연구, Oxide Film과 조사 후 지르코늄 합금의 Transmission Microscope 연구, 전자화학 Impedance 분광 등 수행
제 목	상용 원자로를 위한 연속 섬유 세라믹 복합 피복재 (Continuous Fiber Ceramic Composite Cladding for Commercial Water Reactor Fuel)
연구 기관	Gamma Engineering Corp., MIT, Modermott Tech.
내 용	• 기존의 지르칼로이 피복재를 대체할 수 있는 CFCC (continuous fiber ceramic composite) 개발 - CFCC는 micro 단위 크기의 섬유질로서 취하에 강하고 지르코늄 같은 금속에 비해 고온에서도 강도 유지 - 탄소나 질소 함유 CFCC보다 산소 함유 CFCC는 고온에서 화학적으로 안정
제 목	고연소도를 위한 안정적인 경수로 연료 재료의 개발 (Development of a Stabilized Light Water Reactor (LWR) Fuel Matrix for Extended Burnup)
연구 기관	PNNL, California Univ., Berkeley Univ.
내 용	• UO <sub>2</sub> 연료에 수용성 불순물을 첨가하여 핵연료의 화학 특성을 변화시킨 안정된 핵연료 설계 - 기존의 NRC 규제에서는 경수로용 연소도를 62 Gwd/으로 제한
제 목	지르칼로이 피복재를 위한 혁신적인 세라믹 부식 방지 시스템 (An Innovative Ceramic Corrosion Protection System for Zircaloy Cladding)
연구 기관	Florida Univ.
내 용	• 금속에 흡착하는 능력이 뛰어난 얇은 세라믹 필름의 핵연료 코팅에 대한 타당성 조사 - 지르코늄 합금의 부식이 핵연료 성능 저하의 원인 중 하나
제 목	연소도 증가 및 연료 저장 기기의 감소를 위한 핵비확산 대응의 육각격자(六角格子) BWR 연료 노심 설계 (A Proliferation Resistant Hexagonal Tight Lattice BWR Fuel Core Design for Increased Burnup and Reduced Fuel Storage Requirements)
연구 기관	BNL, Purdue Univ., Hitachi Ltd.
내 용	• 핵비확산성과 경제성을 가지는 고전환 비등경수로(HCBWR)의 개발에 필요한 연구 수행 - 핵분열성 플루토늄과 토륨 산화물을 연료로 사용 - 토륨을 U-233으로 전환시키고, 국가의 플루토늄 재고량을 줄이는 반면에 이용 가능한 에너지 생산이 목적 - 원자로심 설계에는 Monte Carlo 수송 모형 사용 - 열수력적 해석에는 RELAP5, RAMONA, PARCS 등의 전산 모형 사용 • 경제성 분석 포함, 토륨 핵연료 주기에 대한 연구도 수행
제 목	사용후 연료 중에 있는 넵투늄의 화학적 특성 (Chemical Speciation of Neptunium in Spent Fuel)
연구 기관	MIT, ANL
내 용	• 사용후 연료 중에 존재하는 넵투늄의 화학적 특성 조사 - 넵투늄은 NERI 워크숍에서 관심을 가진 방사성 핵종으로 확인되었으나 사용후 핵연료에 있는 넵투늄의 화학적 형태에 관한 정보가 없는 상태 - 사용후 핵연료에 있는 넵투늄 종의 확인을 통해 폐기물에서의 넵투늄 형태와 장기적인 변화에 관한 심화된 과학적인 이해 가능

	-분석에는 SEM, TEM, XRD 등의 기존의 방법 등 사용
제 목	핵폐기물량의 감소를 위한 단일 재료 접근 (A single Material Approach to Reducing Nuclear Waste Volume)
연구 기관	ANL
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수용액에 이온 형태로 존재하는 대다수의 금속 방사선 원소를 선택적으로 흡착하는 혁신적인 단일 물질 연구 수행</li> <li>• Diphosil로 알려진, 다공질의 실리카 이온 교환 물질을 기초로 이 물질의 단점을 개선하는 연구 수행</li> <li>-Diphosil은 산성 수용액에서 고전하를 띤 금속 이온을 선택적으로 흡착하는 성질 보유</li> <li>-중성이나 약산성하에서의 Diphosil의 효과를 관찰하는 실험 수행</li> </ul>
제 목	핵폐기물 격납에 있어서 콘크리트의 내구성에 관한 감시 (Monitoring the Durability Performance of Concrete in Nuclear Waste Containment)
연구 기관	MIT, CEA(프랑스)
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 방사성 폐기물을 격납하고 있는 콘크리트 용기의 내구성 평가 및 정량화를 위한 과학적 지식과 공학적 도구 개발</li> <li>- 콘크리트는 방사성 폐기물 처분에 있어서 격납 방호벽용 건축 재료로서 일반적으로 이용되고 있으나, 위험성이 있는 폐기물 격납을 위한 콘크리트 재료로 안정적으로 사용하기 위해서는 관련 연구 필요</li> <li>-특히 칼슘 leaching에 의한 화학적 열화에 대한 비관적인 시나리오를 적용하여 분석</li> </ul>
제 목	고준위 핵폐기물의 부식 손상에 대한 확정론적 예측 (Deterministic Prediction of Corrosion Damage in High Level Nuclear Waste)
연구 기관	SRI International
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 유카미운틴 처분장의 고준위 폐기물 처분 용기에서 발생하는 부식 손상을 예측할 수 있는 확정론적 모형의 개발 및 전산 모형화</li> <li>-고준위 폐기물을 안전하게 처분하는 것은 20세기와 21세기의 가장 큰 기술적 문제 중 하나</li> <li>-처분 기간 동안 용기에 발생할 수 있는 현상에 대한 자료가 부족하기 때문에 실험 결과만으로는 대중 설득 불가능</li> <li>• 중요한 여러 동력학적 특성 자료를 얻기 위해 Alloy C-22와 탄소강에 대한 실험 수행</li> </ul>
제 목	사용후 핵연료의 안전한 수송·저장·처분을 위한 연소도 보장의 실험적 연구 credit의 실험적 조사 (Experimental Investigation of Burn-up Credit for Safe Transport, Storage, and Disposal of Spent Nuclear Fuel)
연구 기관	SNL
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 저능축 연료를 이용하여 임계 assembly를 만들고 적합한 임계 실험을 설계하여 수행</li> <li>-임계 안전성을 보증하기 위해서는 벤치 마크 시험을 통한 성능 검증 필요</li> <li>- 이 연구가 성공적으로 수행되면, 사용후 핵연료의 선적·저장·처분시 고려되는 연료 특성에 직접적으로 관련된 벤치 마크 임계 자료 제공</li> <li>-사용후 핵연료 내의 핵분열 생성물이 reactivity에 미치는 영향 분석 매우 중요</li> </ul>
제 목	핵폐기물 개선을 위한 저에너지 핵반응의 과학적 타당성 연구 (Scientific Feasibility Study of Low-Energy Nuclear Reactions (LENRs) for Nuclear Waste Amelioration)
연구 기관	Illinois Univ.
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 금속 박막에 금속 원자당 0.9개 이상의 양성자를 주입(loaded) 시키고 낮은 전기장 상태를 유지하여 핵종 변환 반응을 일으키는 실험 수행</li> <li>-실험 결과가 성공적으로 이루어지면, pilot plant 수준으로 용량을 격상하기 위한 후속 프로젝트 수행 제안 예정</li> <li>-Illinois 대학에서는 이미 Pd/Ni/Ti으로 이루어진 박막을 사용하여 핵반응에 성공</li> <li>-본 연구에서는 U/Th 박막을 사용하여 실험 수행</li> </ul>
제 목	부식 가속화 균열 환경에서의 Alloy 600의 IGA/SCC의 메커니즘 조사 (An Investigation of the Mechanism of IGA/SCC of Alloy 600 in Corrosion Accelerating Crevice Environments)





연구 기관	Rockwell Science Center, LLC
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 균열 부위에서의 화학 반응을 제어함으로써 증기발생기에서 발생하는 부식을 제어할 수 있는 메커니즘에 대한 이해를 높이기 위해 증기발생기와 유사한 조건에서의 실험과 모델링 수행</li> <li>- 증기발생기 세관과 세관 지지판의 교차점에 생기는 균열(Crevice)에는 증기발생기의 물에 존재하는 비휘발성 불순물이 축적됨.</li> <li>- 이러한 축적물은 부식의 원인이 됨.</li> </ul>
제 목	<p>유사 확산 노심 모형에 기반한 혁신적 노심 해석 방법론 (An Innovative Reactor Analysis Methodology Based on a Quasidiffusion Nodal Core Model)</p>
연구 기관	Texas A&M Univ., Oregon State Univ.
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 전체 노심의 고유치(eigenvalue)와 출력 분포를 계산하기 위해 사용되고 있는 노달 확산 모형(nodal diffusion approximations)에 대한 이론적 기초를 구축하고, 이 이론을 이용하여 개선된 모델 개발</li> <li>- 현재 모형은 성질이 다른 집합체들 사이에서 충돌 단면적, 확산 계수, 불연속 계수 등이 부정확하게 계산되는 단점 보유</li> </ul>
제 목	<p>수냉각로에 있어서 물의 방사선 분해의 효과 (Effects of Water Radiolysis in Water Cooled Nuclear Reactors)</p>
연구 기관	Notre Dame Univ., PNL, AEC
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 실험 경우로에 나타난 것처럼 비표준 조건하에서 방사선이 aqueous 시스템에 끼치는 영향을 계산하기 위한 모형 개발</li> <li>- 이 모형에는 실험과 계산을 통한 지식과 전문성이 반영되도록 할 예정임.</li> <li>- 고온의 aqueous system에 방사선이 미치는 영향은 일부만이 알려져 있으며 그나마 대부분 고수 전자에 관한 것임</li> <li>• heavy ion과 heavy LET 입자의 방사선 영향 분석</li> <li>• 최신의 확률론적 시뮬레이션 방법 개발</li> </ul>
제 목	<p>고온 핵분열로를 위한 선진 세라믹 복합체 (Advanced Ceramic Composites for High-Temperature Fission Reactors)</p>
연구 기관	PNNL
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• structured 세라믹의 방사선 조사 효과에 대한 기존 지식을 이용하여 방사선에 강한 세라믹 복합체 모델링</li> <li>- 이를 확장하여 핵분열로의 조건하에서 세라믹 복합체의 고유한 특성을 탐구하는 데 도움을 줌</li> <li>- 방사선에 강한 SiC/SiC와 같은 개량 세라믹 복합체는 고온(1000℃ 이상) 원자로를 가능하게 하며 이는 원자로 효율 향상을 의미</li> </ul>
제 목	<p>신형 원자로 시스템에서의 고온 흐름의 기초적 열유체 물리 (Fundamental Thermal Fluid Physics of High Temperature Flows in Advanced Reactor Systems)</p>
연구 기관	INTEL, Iowa State Univ., Maryland Univ., General Atomics
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 전산 및 실험 연구를 통해 고온의 복잡한 기하학적 구조에서의 유체의 열-유체 물리에 관한 과학적·공학적인 이해를 높임으로써 신형 원자로의 설계에 기여</li> </ul>
제 목	<p>신형 원자로용 재료 개발의 새로운 접근법 (A Novel Approach to Materials Development for Advanced Reactor Systems)</p>
연구 기관	Michigan Univ., PNNI, ORNL
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 양성자 조사를 이용해서 방사선 조사에 의한 응력·부식·균열 (IASCC: Irradiated Assisted Stress Corrosion Cracking)의 메커니즘 연구</li> <li>- 효율과 성능을 향상시킨 신형 원자로의 재료는 기존의 원자로에 비해 가혹한 조건에서 운전되므로 원자로 재료의 열화를 해결하는 것이 중요</li> <li>- 양성자 조사는 조사 시간이 짧고 조사량이 많으며 잔류 방사선이 최소화되기 때문에 이를 이용하면 재료 손상에 효율적인 연구 가능</li> <li>- 우선 304 Stainless Steel의 IASCC를 연구하고, 다음으로 양성자 조사법을 지르칼로이와 원자로 압력 용기강의 방사선 영향의 분석에 응용할 가능성을 연구</li> </ul>

제 목	납냉각고속로와 가속기 구동 시스템의 물리적 특성 측정 (Measurements of the Physics Characteristics of Lead-Cooled Fast Reactors and Accelerator Driven Systems)
연구 기관	ANL, CEA
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 납냉각고속로와 가속기 구동 시스템의 물리적 특성 측정</li> <li>- 납 냉각 임계/미임계 원자로의 물리적 특성은 잘 알려져 있지 않은 상태</li> </ul>
제 목	조사 후 원자로 구조 합금의 변형에 있어서 흐름의 국지화 과정의 매핑 (Mapping Flow Localization Processes in Deformation of Irradiated Reactor Structural Alloys)
연구 기관	ORNL
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 실험을 통해 원자로 구조 합금의 변형 모드에 대한 초기 지도 작성</li> <li>- DCD(dislocation channel deformation) 형태의 국지적인 소성 변형은 방사선 취화, plastic instability failure, radiation-assisted 응력-부식 균열 등에 관련됨.</li> <li>- 주요 원자로 합금인 austenitic stainless steel, ferritic 압력 용기강, 지르칼로이에서 DCD가 보고되고 있지만 그 관련 정도나 영향의 범위 등은 알려져 있지 않음</li> <li>- 작성된 지도는 재료 선정, 문제 해결, 성능 예측 등에 필수적인 도구인 보다 광범위한 지도를 위한 기초가 됨.</li> </ul>
제 목	액체 금속을 시스템의 경계면 수송 현상 및 안정성 (Interfacial Transport Phenomena and Stability in Molten Metal-Water Systems)
연구 기관	Wisconsin Univ., ANL
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 고온의 액체 금속과 물 사이의 에너지 교환이 최적으로 이루어지는 운전 조건 영역을 결정하는 것이 목적</li> <li>• 주요 목표</li> <li>- 액체 금속과 물 사이의 반응을 관측할 수 있는 실험 장치의 설계 및 운전</li> <li>- 반응 영역과 안정성을 결정하기 위한 반응의 총체적 행태 측정</li> <li>- 상호간 질량 및 열 교환 계측</li> <li>- 최적 에너지 교환이 이루어지는 운전 영역의 결정</li> </ul>
제 목	고온·고압 수중에서의 조사 화학과 부식에서의 역할 (Radiation-Induced chemistry in High Temperature and Pressure Water and Its Role in Corrosion)
연구 기관	ANL, AECL-Chalk River Lab.
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 임계점을 넘는 고온·고압 상태에서의 물의 방사화학적 특성 연구</li> <li>- 특히 일차 계통 재료의 부식에 미치는 영향을 조사</li> <li>- 450℃, 250기압의 고온·고압으로 원자로를 운전하면 열효율이 약 30% 향상 가능</li> </ul>
제 목	Proton 조사를 사용한 개량 원자로 구조 재료의 개발 (Developing Improved Reactor Structural Materials Using Proton Irradiation a Rapid Analysis Tool)
연구 기관	ANL-West, Michigan Univ.
내 용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 신형 원자로를 위한 개선된 원자로 구조 재료의 개발</li> <li>- 원자로 구조 재료의 environmental cracking resistance와 void swelling resistance를 향상시키는 데 필요한 새로운 기초 지식 제공</li> <li>- 양성자 조사 방법은 많은 재료의 신속 분석 가능</li> </ul>
제 목	열적·화학적 상호 반응이 존재하는 장에서 다소 냉각된 유체의 수치 해석 시뮬레이션 (Complete Numerical Simulation of Subcooled Flow Boiling in The Presence of Thermal and Chemical Interactions)
연구 기관	UCLA



<p>내 용</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 실제 실험 결과와 일치하고, 핵연료 주기 설계에 이용될 수 있는 완전한 수치 해석 시뮬레이션 모형 개발</li> <li>- 현재의 핵연료 주기 설계 지침은 PWR 노심의 AOA(Axial Offset Anomalies)를 방지하기 위해 운전중인 원자로의 실험 자료를 기초로 하고 있음.</li> <li>- 현재까지는 핵연료 피복관에서의 증기 생성 과정을 열수력적·화학적·핵적 특성을 동시에 통합적으로 고려하는 접근법이 존재하지 않음.</li> <li>- 새로운 모형을 통해 경제성 향상 AOA 감소 가능</li> </ul>
<p>제 목</p>	<p>차세대 원자로 시스템에서의 손상-저항성 합금의 새로운 개념 (Novel Concepts for Damage-Resistant Alloys in Next Generation Nuclear Power Systems)</p>
<p>연구 기관</p>	<p>PNL, General Electric Corporate Research, Michigan Univ., FRAMATOM</p>
<p>내 용</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 노심 재료의 시간에 따른 경화, 취화, 응력-부식 균열, void swelling 등을 지연시키거나 감소시키는 새로운 손상-저항성 합금의 개념 개발 및 시험</li> <li>- 차세대 원자로의 개발이 성공하기 위해서는 보다 가혹한 운전 조건에서도 견딜 수 있는 구조 재료의 개발 필요</li> <li>- FBR이나 핵융합로의 경우에는 관련 재료에 대한 연구가 진행되었으나 경수로의 고유한 특성에 맞춘 재료 개발 연구는 상대적으로 취약</li> </ul>

**\* 약어로 표시된 기관의 명칭**

- ABB-CE Asea Brown Boveri-Combustion Engineering
- AECL Atomic Energy of Canada, Ltd.
- ANL Argonne National Laboratory
- BNL Brookhaven National Laboratory
- CEA Commissariat L'Energie
- INEEL Idaho National Engineering & Environment Laboratory
- LANL Los Alamos National Laboratory
- NRC Nuclear Regulatory Commission
- MIT Massachusetts Institute of Technology
- OECD/NEA OECD Nuclear Energy Agency

- ORNL Oak Ridge National Laboratory
- PNNL Pacific Northwest National Laboratory
- SNL Sandia National Laboratory
- SRI Stanford Research Institute
- UCLA University of California, Los Angeles

**결론**

dufj 문제를 안고 장기간의 정체와 교착 상태의 시기에 있었던 미국의 원자력이 최근 2, 3년간에 신세기를 향해 여러 가지 움직임을 보이고 있다. NERI는 그 중에서도 더욱 주목할 만한 핵이 될 움직임을 하고 있으며, 급후 미국의 원자력의 방향성을 결정하는 중요한 단계가 될 것이다. 방사성 폐기물 처분 등 많은 문제

를 안고 있으면서도 확대해 온 경수로 노선(輕水爐路線)은, 미국에서는 21세기의 주력 시스템으로 보고 있는 것 같지 않다. 차세대의 시스템은 적어도 현재의 제문제를 해결할 수 있는 것이 아니면 안되지만, NERI에 의해 그와 같은 시스템의 운곽이 보이기 시작하면 그 실현을 위해 미국은 총력을 다해서 뛰기 시작할 것이다. ☞

\* 본고는 다음 자료에서 발췌 번역하여 편저하였다.

1. Journal of the Atomic Energy Society of Japan, V.41(9), 912-923, 1999
2. Nuclear Energy Research Initiative-Research Abstracts. Office of Nuclear Energy, Science and Technology, US. Department of Energy