

21세기 세계 원자력 전망

양 창 국
대한전기협회 전문이사

1. 머리말

선사시대부터 신탄, 석탄, 석유, 가스 등 자연에서 채취할 수 있는 에너지원에 의존하던 인류는 20세기에 새로운 에너지원인 원자력 에너지를 가용 에너지원으로 개발하였다.

1900년대 초반, 러더포드와 보어 등은 원자의 모형을 확인하였으며, 아인슈타인은 희랍시대 아낙사고라스로부터 18세기 라부아지에 이르기까지 고수되어 온 질량불변의 법칙에서 한 걸음 나아가 질량과 에너지의 등가성을 밝혀냈다.

1930년대에 들어 한과 스트라스만은 우라늄의 인공 핵분열 가능성을 예언하였으며, 미국 물리학자 한스 베테는 태양열의 근원이 가벼운 원소의 핵융합 에너지일 거라고 발표하였다.

1940년대, 세계 2차대전중 미국 등 열강은 다투어 인공 핵분열과 인공 핵융합 과정에서 발생하는 질량 결손이 에너지로 바뀔 때 나오는 막대한 열을 전쟁 목적에 이용하기 위한 핵무기 개발에 착수하였다. 미국은 우라늄과 플루토늄을 인공적으로 핵분열시키는데 성공하여 1945년 원자탄을 개발하고 2차 세계대전을 조기에 종결시키는데 기여하였으며, 1952년에는 인공 핵융합에 성공하여 수소탄을 개발하였다.

인공핵분열 또는 인공핵융합 때 발생하는 막대한 에너지를 전쟁 목적이 아닌 평화 목적에 사용하는 연구도 병행하였으며, 1952년 12월 아이젠하워 미국 대통령은 유엔 총회에서 원자력의 평화적 이용을 주창하였다.

핵분열 에너지의 평화적 이용은 1954년 소련에서 최초

의 원자력 발전소인 오브린스크(Obninsk)를 건설한 이래 미국, 영국 등이 줄이어 원자력발전소의 상용화에 성공하였으며, JAIF 자료에 의하면 1998년말 현재 전세계에서 총 422기 3억 5900만kW 용량의 원자력발전소를 가동중이며, 세계 전력 수요의 17%를 공급하고 있다.

핵융합 에너지를 상용화하기 위한 연구는 미국, 소련 등이 앞장서 개발하였으나 일억도의 고온에서 플라즈마를 다루는 기술개발이 예상보다 쉽지 않아 그 상용화 시기는 2050년경으로 늦춰졌다.

1973년 석유파동후 원자력 발전은 석유 에너지를 대체하는 기술이 입증된 대용량 에너지 공급원으로 각광을 받았으나, 에너지 수요의 감소, 화석연료와의 가격경쟁에서 상대적 우위 상실, 안전규제 강화로 건설공기 장기화, 그리고 1979년 TMI 사고와 1986년 체르노빌 사고의 여파로 악화된 반핵 운동 집단의 일부 국가에서의 집권 참여 등 여건악화로 일본, 한국, 중국 등 극동 국가와 동구 일부 국가를 제외한 다른 나라에서 신규 원자력발전소 수주가 주춤한 상태이다.

꿈의 원자로라고 불리는 고속증식로 개발은, 고속증식로가 플루토늄을 연료로 사용하여야 하는宿命 때문에 1970년대말 미국은 핵확산 방지라는 명분으로 상용 재처리 중지와 동시에 개발을 중단하였다. 개발 초기 계속 올라갈 것으로 예상했던 우라늄 값이 저가 안정세를 계속 유지하고, 고속증식로의 건설비가 경수로 건설비에 비하여 상대적으로 높아 고속증식로의 경제성이 확인되지 않고 있으며, 냉각재로 사용하는 금속 나트륨의 기술적인 문제도 계속 불거져 기술적, 경제적, 정치적 이유로 고속증식로 개발은 담보 상태를 면하지 못하고 있다.

1950년대 핵융합로 개발을 미국, 소련 등이 독자적으로 추진하였으나, 1960년대에 들어 소련에서 개발하던 토카막 개념을 전세계가 채택하여 개발 정보를 서로 교환하며 개발에 박차를 가하여 20세기내 핵융합로 상용화를 기대하였었다. 그러나 핵융합로 개발도 당초 예상보다 기술적으로 훨씬 어려워 그 상용화 시기가 2050년경으로 늦춰지면서 그 상용화 시기가 너무 요원하고, 연구비가 많이 소요되어, 어느 한 나라가 단독으로 개발을 추진하기에는 너무나 벽차 국제원자력기구 주관으로 미국, 일본, 러시아, 유럽 연합이 공동투자하여 연구 개발하는 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor) 프로젝트를 추진하고 있다. ITER 프로젝트도 1998년에 마치기로 한 상세 설계가 3년간 연기되고 예산을 이유로 미국이 1999년 회계년도 이후 연구비 부담에 난색을 보이고 있어 그 전망이 불투명하다.

〈ITER 등 핵융합로 개발계획〉	
• 1985년	: 미·소 정상회담에서 공동연구 합의
• 1988~1990	: 개념설계(독일 Garching에서 수행)
• 1992~1998	: 공학 설계(일본 NAKA, 독일 Garching, 미국 샌디에고) ⇒ 3년간 연기
• 2010	: ITER 완성(1GW, Q값: 50)
• 2020	: 실험로
• 2030~2050	: 실증로

원자력 발전을 추진하는데 가장 걸림돌이 되는 방사성 폐기물 처리 처분 관련, 그 처리기술은 이미 입증되어 실제 사용하고 있으며, 그 기술을 계속 개량중이다. 처분 기술 중 중저준위방사성 폐기물의 처분기술은 입증되어 기술적으로 아무런 문제없이 상용 처분장을 운영중이다. 고준위 방사성폐기물의 처분방법으로 일부 국가는 사용 후 핵연료를 재처리하여 우라늄과 플루토늄은 회수하여 다시 연료로 사용하고 고준위 폐기물만 따로 모아 유리시켜 중간 저장후 영구 폐기할 예정이며, 일부 국가는 사용 후 핵연료를 재처리하지 않고 그대로 직접 처분하는 방법을 채택하고 영구처분장을 물색중이다.

20세기는 원자력 에너지가 개화한 세기이기도 하지만 원자력의 평화적 이용이 반핵의 물결에 밀려 고전하며 세

기말을 맞고 있다.

2. 21세기 원자력 전망

가. 원전 건설 전망

20세기에 원자력 에너지는 화석 연료의 대체 에너지원으로 각광을 받았으나, 21세기에는 원자력 에너지는 화석연료의 대체 에너지원으로서 뿐만 아니라 온실 가스를 방출하지 않는 에너지원으로도 각광을 받을 것이다.

세계에너지협의(WEC)는 2000년대 원자력의 역할이 증대될 것으로 예측하고 있다. 1998년 세계 1차 에너지의 5.5%를 공급했던 원자력은 WEC 예측 시나리오 B Case의 경우 2020년 6.6%, 2050년에는 13.8%를 공급하여 그 역할이 계속 늘어날 것으로 예측하고 있다.

21세기에 원자력 에너지의 공급이 위에 예측한 것과 같이 늘어나기 위해서는 첫째, 지구 온난화 가스인 탄산가스 방출에 각국이 얼마나 능동적으로 대처하느냐가 그 요인의 하나가 된다. 원자력 발전은 화력발전과 비교하여 거의 탄산가스를 방출하지 않으므로 교토 협정에서 합의한 대로 탄산가스 방출을 줄이며 늘어나는 전력 수요를 충당하는 방법 가운데 최선의 방법 중 하나이다. 각국이 검토하고 있는 탄소세 부과와 교토 협정의 신축성 메커니즘에 의한 탄산가스 배출권 시장에서의 가격형성 등도 21세기 원자력발전소 신규 건설에 큰 영향을 줄 것이다.

둘째, 원자력의 경제성 확보이다. 원자력과 가격 경쟁 관계에 있는 화석연료의 수급과 가격 전망이 신규 원자력 발전소 건설과 직결된다. 지금과 같이 저유가, 저탄가 추세가 계속 유지되는 한 신규 원자력발전소의 대폭적인 도입은 기대할 수 없다.

셋째 원자력 안전성 확보와 방사성폐기물의 처분 문제 등 기술적인 문제의 해결이다. 원자력발전소의 안전성을 월등히 향상시킨 차세대 원자로 중 개량 원자로(Evolutionary Reactor)는 이미 그 기술이 상용화 단계이며, 수동형 원자로(Passive Reactor)는 개발단계로 그 도입시기는 확실치 않으나 안전성 향상에 획기적인 성과가 기대된다. 중저준위 방사성폐기물의 처리 처분은

계속적인 감용 기술개발로 그 처분에 소요되는 비용의 절감도 기대할 수 있으며, 고준위 방사성 폐기물의 처분장은 2010년경 처음으로 그 시설을 선보일 것으로 예측된다. 고준위 폐기물 처분장이 하루라도 일찍 선보이고 안전 운영이 실제로 입증될 때 원자력의 장래에 긍정적인 효과가 있을 것이다.

넷째, 원자력의 국민 수용성을 어떻게 높일까 하는 것이 당면한 가장 어려운 문제 중 하나이다. 많은 나라에서 국민의 원전 수용성이 떨어져 원전 부지 확보와 방사성폐기물 처분장 부지 확보에 어려움을 겪고 있다. 독일, 불란서 등 원자력을 강력히 추진하던 나라들도 반원전 정당인 녹색 정당이 집권에 참여함으로써 기존 원전의 운영과 새로운 원전의 추진에 어려움을 겪고 있다.

2000년대 초반 극동의 몇 나라와 동구 몇 나라를 제외하고 신규 원전 수주를 기대할 수 없다. 세계에서 가장 많은 원전을 보유 운영하고 있는 미국의 경우 EIA 보고서에 의하면 향후 20년 내에는 신규 원자력발전소의 도입이 없을 것으로 전망하고 있다. 미국은 신규 원자력발전소를 건설하는 대신 원자력발전소의 수명연장과 가동률 향상에 주력하고 있다. 그 결과 1990년 66.1%였던 원전 평균가동률이 1995년 76.7%, 1996년 74.9%로 높아졌다. 또한 발전소 수명을 40년에서 60년으로 연장하는 것도 착실히 추진되어 미국은 수명 연장과 가동률 향상으로 당분간은 신규 원전 도입 없이도 수십 기의 원전을 새로 건설하는 효과를 얻게 되었다. 서구 제국도 전력 수요의 정체와 반핵 무드의 고조로 당분간 새로운 원전의 도입은 기대할 수 없다. 현재와 같은 환경 하에 2020년도에 WEC가 예측한 원자력용량을 확보할 수 있을지 의문이다. 표 1은 WEC가 예측한 2050년까지 원자력 에너지 개발 전망이다.

나. 핵연료주기

21세기에는 핵연료 주기 중 특히 농축과 재처리 분야에 획기적인 새로운 기술이 상용화될 전망이다.

1990년대 후반 상용화를 목표로 1980년대부터 미국을 비롯하여 기술 개발한 레이저 기술을 이용한 농축방법

이 2010년경 상용화될 것으로 예상된다.

레이저 농축 기술의 상용화에 따라 핵주기에 변화가 예상된다. 레이저 농축법은 기체확산법이나 원심분리법에서 육불화우라늄을 농축 매체로 사용하는 것과는 달리 금속 우라늄을 매체로 사용하므로 변환 및 재변환 과정이 바뀌어야 한다. 우라늄 정광을 천연 육불화 우라늄으로 변환하고, 농축 육불화 우라늄을 농축 이산화 우라늄으로 재변환하는 과정이 우라늄 정광을 천연 우라늄 금속으로 변환하고, 농축 금속 우라늄을 농축 이산화 우라늄으로 재변환하는 공정으로 바뀌어야 한다.

성형가공 과정은 고연소도 연료가 도입되어 1990년대 말 50,000MWD/MTU 수준이던 연소도가 2010년경에는 100,000MWD/MTU까지 높아질 것으로 예상되며, 그에 따라 질칼로이 합금을 주로 쓰던 핵연료 피복재가 세라믹 등 새로운 재료로 바뀔 것이며 펠렛 제조 기술 등도 따라서 바뀔 것이다.

재처리 공정은 1940년대부터 상용화된 습식방법이 계속 사용될 전망이다. 핵확산 저항성이 크고 방사선 폐기물 발생량이 적은 건식 재처리 방식의 기술이 개발되어 상용화될 전망이며, 고연소도 핵연료 상용화에 따라 악티늄 계열 동위원소가 상대적으로 다량 포함된 고연소도 사용후핵연료의 재처리 기술도 개발될 것이다.

고속증식으로 개발 지연에 따라 재처리 후 쌓이는 플루토늄 처분을 위하여 경수로에 혼합 연료사용이 유럽 국가와 일본에서 본격화될 것이며, 미국도 SALT II 협정에 따라 해체되는 핵무기에서 회수되는 플루토늄을 연소하여

〈표 1〉 원자력 발전 전망

구 분	1990	2020	2050
인구(10억)	5.26	7.92	10.06
1차에너지, GTOE	8.98	11.43~15.38 (13.55)	14.25~24.84 (19.83)
원자력, GTOE	0.45	0.58 ~ 1.03 (0.90)	0.52 ~ 2.90 (2.74)
최종에너지, GTOE	6.45	8.54~ 11.41 (10.07)	9.90 ~ 17.47 (14.18)
전 기	0.83	1.21 ~ 1.72 (1.45)	1.72 ~ 3.03 (2.34)

주 : ()는 WEC 예측 사나리오 B의 경우

소진하기 위하여 1970년대 후반 카터 행정부부터 견지하던 비순환핵주기 정책을 깨고 2006년부터 일시 혼합연료를 원자로에 장전할 것이며, 그것이 미국의 핵연료주기 정책을 근본적으로 바꾸는 계기가 될지 주목된다.

1980년대 중반부터 생산량이 수요를 따라가지 못하고 비축 물량으로 생산과 수요의 갭을 메우던 우라늄 정광 수급 추세는 20세기 초반에도 계속될 것으로 예측하고 있다. 그 추세는 각국이 비축하고 있는 우라늄 정광 및 농축 우라늄과, SALT II 협정에 의해 미국, 러시아에서 핵무기 해체로 회수되는 물량이 소진될 때까지 이어질 것이다. 표 2는 우라늄 협회(Uranium Institute)가 예측한 우라늄 생산과 수요 예측이다.

〈표 2〉 전세기 우라늄 생산과 수요 예측

단위 : 천톤 U

구 분	1999	2000	2005	2010	2020
소요량	63.1	64.6	67.5	70.6	73.7
생산량	42.4	42.6	45.3	45.3	45.3

다. 방사성폐기물 처분

중저준위 방사성 폐기물은 유리화 등 획기적인 감용기술이 개발되어 가압수형 경수로의 경우 1990년대말 호기당 약 200드럼 발생하던 중저준위 폐기물 발생량이 30~40드럼으로 대폭 감소되고, 처분할 방사성폐기물 형태가 안정되어 그 처분이 더욱 용이해질 것으로 예상된다.

고준위 방사성폐기물의 영구 처분은 미국, 캐나다를 비롯한 일부 국가는 사용후 연료를 직접 처분할 것이며, 핀란드, 영국, 일본 등 재처리 주기를 채택한 국가는 유리화된 고준위 폐기물을 영구 처분할 것이다. 영구처분장은 2010년경 최초로 선보일 것으로 예상되며, 영구처분장 건설 운영에는 기술적인 문제보다는 대국민 설득에 많은 노력이 필요할 것으로 예상된다.

표 3에 세계 여러나라의 고준위 방사성폐기물의 처분 계획을 요약하였다.

〈표 3〉 외국의 고준위 방사성폐기물 처분장 건설계획

국 명	추진 내용	방사물 형태	운영목표년도
스웨덴	2003년 부지선정완료예정	사용후 연료	2008
독 일	부지 선정 : 골리벤	유리 고화체	2010
미 국	부지 조사중 : 유카마운틴	사용후 연료	2010
프랑스	부지조사중 : 4개소	유리화 고체	2020
핀란드	2000년까지 부지 선정	사용후 연료	2020
스페인	2000년까지 부지선정	사용후 연료	2020
캐나다	지하시설 연구중	사용후 연료	2025
벨기에	2015년까지 부지 조사완료	유리화 고체	2035
일 본	부지조사중	유리화 고체	~2040
영국, 스위스	최종 처분 방식 검토중	유리화 고체	미정

3. 맺는말

21세기 에너지 분야에서 원자력의 역할 증대여부는 원자력 발전의 경제성 확보, 안전성 제고와 방사성폐기물 처리 처분 관련 국민 수용성 향상, 지구 온난화 가스의 방출 억제 등을 위한 각국의 시책 등 주변여건에 따라 결정될 것이다

21세기 초반 유럽, 미국 등 선진국의 새로운 원자력발전소의 도입 전망은 밝지 않으며, 아시아, 동유럽 등의 일부 국가에서는 새로운 원전 발주가 예상된다.

고속증식로 개발도 언제 다시 본격적으로 추진될 것인지 지금으로서는 전망하기 어려우며, 핵융합로 개발도 연구자금 확보가 용이하지 않을 전망이다.

핵연료 주기는 레이저 농축기술 도입, 고연소도 핵연료 개발, 건식 재처리 기술 개발 등 비교적 활발한 연구개발이 계속될 전망이며, 고준위 방사성 폐기물 처분 시설도 2010년경 도입되어 방사성 처분에 새로운 장을 열 것으로 기대된다.

지구 온난화를 방지하기 위하여 탈탄소 전원으로서 원자력이 어느 정도 기여할 수 있을 것인가는 국민 수용성을 어느 정도 높일 수 있는가 하는 것이 그 관건이 될 것이다. ■

참고문헌

1. Global Energy Perspectives, 1998, WEC
2. 원자력 백서, 1998, 산업자원부, 한국전력
3. Uranium, 1998, Uranium Institutes
4. 보문집, 1999. 4. 7~4. 9 제14회 한국원산/원자력학회