

改良型原子爐 開發動向과 IAEA의 役割

Juergen Kupitz, John Cleveland

IAEA 原子力發電處 技術開發部

에너지공급은 사회경제개발의 중요한 전제조건이 되며, 이것은 특히 국민1인당 에너지소비량이 선진공업국의 몇분의 1 밖에 안되는 개발도상국에서는 그렇다. 원자력에너지는 원래 환경보전차원에서 받아들일 수 있는 발전, 지역난방, 공정용 열공급에 이용할 수 있는 무한정한 에너지자원이다. 그러나 원자력에너지의 이같은 잠재력은 원자력발전소에 대해 점차 높아져가고 있는 안전요건과 경제성 및 국민적 합의 등의 난제를 해결했을 때에만 그 실현이 가능한 것이다. 우리는 지금까지 발전용원자로개발과 인허가과정 및 건설, 운전을 통해 많은 경험을 쌓아왔다. 이러한 경험은 앞으로의 개발의 바탕이 되는 것이다.

많은 나라에서 개량형원자로개발을 추진하고 있는데, 그 개발목적은 원자력발전에 대한 우려를 해소하기 위해 경제성, 신뢰성, 안전성을 높이는데 있다. 현재 개발중인 개량형원자로로는 앞으로 선진공업국과 개발도상국의 신규발전소수요를 충족시키는데 큰 도움이 될 것으로 본다. 이것은 비단 發電에 한하지 않고 지역난방, 淡水化 및 기타 공정용으로 사용되는 열을 공급하는데도 이용될 것이다.

세계에서 유일하게 원자력발전문제를 다루고 있는

국제관리기구인 IAEA는 개량형원자로개발계획을 갖고 있는 모든 나라들간의 정보교환과 국제협력을 추진하고, 이 분야를 개척 또는 연구하려는 나라들을 지원하고 있다.

서 언

많은 나라들이 이미 전력생산을 위해 원자력에 많이 의존하고 있다. 1991년 12월 현재 전세계에서 운전중인 원자력발전소는 421기로 그 전체용량은 326GWe다. 일부 국가에서의 원자력발전점유율은 매우 높아 1990년 현재 프랑스가 74.5%, 벨기에 60.1%, 한국 49.1%이다. 세계에서 원자력발전설비용량이 가장 큰 미국(101GWe)은 전체전력수요의 20.6%를 원자력으로 충당하고 있다.

원자력에너지는 앞으로 전세계 인구에 에너지를 공급하는데 중요한 역할을 할 수 있을 것이다. 그러나 원자력에너지는 몇가지 전제조건 하에서만 성공을 거둘 수 있을 것이다. 즉 이것은 매우 엄격한 안전요건을 충족시켜야 하고, 경제성을 갖추고 있어야 하며, 일반국민들이 받아들여야 한다. 원자력산업은 이같은 조건을 충족시키기 위해 큰 도전에 직면해 있다. 일부 국가에서는 정부와 민간기업이 개량형원자로개발에 공동참여해 큰 진전을 보이고 있다.

원자력발전의 역할(과거, 현재, 미래)

원자력에너지는 원래 무한정한 에너지원이다. 그러나 원자력발전이 새로 도입되기 시작한 초창기에는 이의 보급에 대해 매우 낙관적인 전망을 하고 있었던 것 같다. 왜냐하면 현재 화석에너지자원의 이용에 대한 우려의 소리가 높아지고 있는데도 원자력발전소의 보급률이 당초 예상했던 것보다 훨씬 낮기 때문이다. 원자력발전의 보급률이 당초 기대했던 것보다 이렇게 낮아진데에는 많은 요인이 있겠지만, 그 중 중요한것을 들어보면 다음과 같다. 1. 다른 대체에너지에 비해 경제적인 이점이 없다. 2. 발전소의 건설, 운전에 관한 인허가취득에 많은 어려움이 뒤따른다. 3. 원자로의 안전성과 방사성폐기물처분에 대한 일반국민들의 우려가

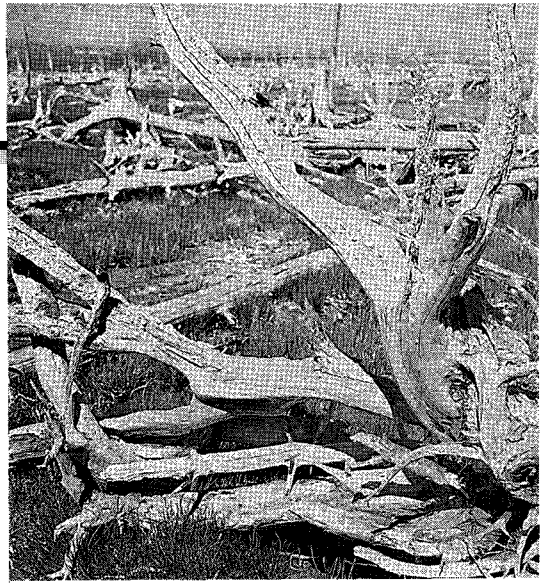
높다. 4. 대체적으로 에너지수요증가율이 둔화되었다 (이것은 특히 1970년대의 석유과동 이후로 대부분의 선진공업국에서 에너지절약과 효율개선에 치중하는 정책을 폈기 때문이다).

그러나 어쨌든 인류역사상 최초로 핵연쇄반응을 제어하기 시작한 이후로 원자력발전설비는 세계의 전체 발전설비용량(2,800GWe)의 17%를 차지하기에 이르렀다. 앞으로 발전설비용량이 더 늘어날 것인지는 예측하기 어려운 문제로 이에는 사회적, 정치적 및 경제적인 요인도 작용하게 된다. 경제성장과 인구증가는 모두 신규의 발전설비용량을 필요로 한다.

그러나 선진공업국과 개발도상국들이 소비경제주도의 경제성장을 지속해도 우리의 취약한 생태계가 보전될 수 있다는 지금까지의 고정관념에 의문이 제기되고 있다. 우리는 과학기술의 이용을 적절히 제한함으로써 환경보전차원에서 큰 성과를 올리고 있지만 어쨌든 우리는 생태계의 균형을 유지하는 범위 내에서 세계인구를 유지하는 방법을 모색하지 않으면 안된다. 또한 복지제도 중심으로 국가경제를 운영하려는 방법은 다행히도 퇴색해가고 있다. 환경보전면에서 받아들일 수 있는 경제발전과 과학기술의 적절한 이용에 관심이 높아짐에 따라 발전용량증가율을 낮출 수 있을 것으로 본다.

EC 위원회와 세계에너지협의회(WEC)주최로 헬싱키에서 열린 「전력과 환경」에 관한 심포지움에서 밝혀진 장래의 전력수요전망에 따르면 세계의 발전용량은 1990년에서 2010년 사이에 거의 2배로 늘어날 것으로 전망하고 있고, IAEA에서도 2010년까지 현재의 326 GWe에서 456~577GWe로 증가할 것으로 예측하고 있다.

점차 높아지고 있는 안전요건과 경제성 및 국민적 합의 등의 문제를 충족시킬 수 있다면 세계인구에 에너지를 공급하는데 원자력이 앞으로 더 중요한 역할을 할 수 있을 것이다. 화석연료(또한 귀중한 원료이기도 하다)보존에 대한 욕망과 CO₂배출량을 일정 수준 이하로 줄이려는 움직임 및 재생에너지원의 대대적인 이용에 대한 제한적인 전망 등은 모두 원자력발전의 이용을 강조하게 되는 요인이 된다. 최근에 열린 헬싱키 심포지움에서 내린 결론은 매우 주목을 끄는데, 이에



따르면 화석연료사용시설에서 배출되는 CO₂로 인한 지구온난화현상과 기상변화로 높아져 가고 있는 위험성을 줄일 수 있는 최선의 방법은 개량형원자로를 발전시키는 것이다.

현재 몇기의 원자로가 발전 이외의 용도에 사용되고 있다(온수 및 증기공급용으로 전체용량은 5GWth에 불과하다). 그러나 현재 세계의 1차에너지소비량의 30%가 발전용으로, 15%가 수송용으로, 나머지 55%가 온수, 증기, 열로 사용되고 있다. 이것을 보면 전력 이외 분야에서의 원자력의 이용가능성은 매우 높다. 전력 이외의 이용분야로는 담수화공정, 난방용 온수, 정유공정, 석유산업, 석탄 및 갈탄에 의한 차량연료용 메탄을 생산공정 등에 대한 열공급을 들 수 있다.

원자력발전의 필요성은 매우 크다. 선진적인 원자력 발전계획의 목적이 달성된다면 원자력발전은 안전하고 경제적인 장기에너지공급을 보장할 수 있을 것이다.

개량형원자로의 개발

원자로설계자들은 점차 높아지고 있는 안전요건과 경제성 및 국민적 합의 등의 문제를 해결하기 위해 새로운 방법을 개발하지 않으면 안된다. 이 논문에서 「개량형」이라는 말은 지금까지 건설, 운전된 일이 없어 새로 개발, 설계해야 한다는 것을 의미한다. 경우에 따라서는 이같은 개발, 설계과정이 건설초기까지 연장될 수도 있을 것이다. 지금까지 원자로의 인허가, 건설, 운전을 통해 얻은 많은 경험은 개량형원자로를 개발하는데 활용되어야 한다.

개량형원자로는 경수냉각로, 중수냉각로, 액체금속 냉각로, 가스냉각로 등의 여러가지 형식으로 개발되고

있다. 이러한 개발의 일부는 발전적인 성격을 띠고 있다. 즉, 현재 운전중인 원자로에서 얻은 경험을 살려 이를 기술, 설비, 건설, 운전면에 반영, 개선하는 것이다. 또다른 개발형태는 이것 역시 발전형이기는 하지만 안전성을 보장하기 위한 수동형안전시스템과 같은 혁신적인 특성을 추가한 것이다. 혁신적인 특성을 추가한 형식은 이를 상용화하기 전에 원형로 또는 실증로를 필요로 한다.

1. 개량로개발의 목적과 방법

개량로개발의 목적은 높은 안전성과 신뢰성 및 경제성을 달성하는데 있다. <표 1>은 이러한 목적을 달성하기 위해 취해야 할 여러가지 과정을 요약한 것이다.

높은 안전성을 달성하려는 목적은 일반국민, 발전소인원, 환경에 미치는 영향을 최소로 줄이는데 있다. 높은 안전성을 달성하기 위해서는 새로 주어진 안전특성이 전체적인 테두리 내에서 그대로 발휘될 수 있도록 다중방어방식의 테두리 내에서 고려되지 않으면 안된다.

노심은 모든 정상운전방식에서 안전성이 유지되고 어떠한 이상상태에서도 항상 안전성이 보장되어야 한다. 노심은 항상 단계적인 자체안전성을 갖고 장기적으로는 정지를 위한 충분한 負의 반응도삽입능력을 갖도록 충분한 안전여유도와 최적의 고유온도계수를 갖추고 있지 않으면 안된다.

또한 정지상태에서의 붕괴열의 제거가 보장되어야 한다. 이같은 보장은 운전원이나 설비에 의존함이 없이 충분한 붕괴열제거능력을 갖추고 있을 때에만 가능한 것이다. 운전원의 조작 없이 노심의 최고온도를 소정의 제한치 이하로 제한하는 능력도 확보되어야 한다.

높은 안전성을 유지하기 위해 많은 개량형원자로에는 고유안전성이 추가되고 수동형안전시스템이 이용되고 있다. 고유안전성은 원자로안전성에 대한 내부적인 장애요소를 제거한다. 개량형원자로는 재료선택, 그 수량과 물리적 특성 및 배치방법 등을 통해 고유안전성을 갖추게 된다.

수동형안전시스템은 운전원의 조작, 또는 외부로부터의 기계적, 전기적 힘이나 신호 없이 안전기능을 발

<표 1> 개량형 원자로발전소의 목적과 목적달성방법

1. 고도의 안전성 달성

- 노심의 안전성 확보
 - 충분한 안전여유도, 負의 반응도계수, 장기정지 등을 확보하기 위해 재료와 연료농축도 및 배치를 선택할 것
- 붕괴열제거기능을 확보할 것
- 고유안전특성을 부여하고 수동적안전시스템을 이용할 것
 - 재료선정, 물리적 특성, 배치방법 등을 통해 위험요소를 사전에 제거할 것
 - 수동적시스템에 의한 안전기능을 확보할 것. 즉 자연대류, 열전도, 열복사, 재료특성을 이용할 것
- 개선된 Man-Machine Interface시스템을 이용할 것
 - 운전원의 개입을 최소한으로 줄일 수 있도록 계장제어계통과 원자로보호시스템 등의 설계에서 선진기술을 이용할 것
- 현장에 대한 영향을 최소한으로 줄일 것
 - 부식생성물발생과 방사능방출을 최소한으로 줄일 수 있는 재료를 최대한 이용할 것
 - 직업적 피폭선량을 최소한으로 줄일 수 있도록 보수, 점검이 용이하도록 발전소를 설계할 것
- 정상운전시에 외부에 대한 영향을 최소한으로 줄일 수 있도록 할 것(방사성 및 화학폐기물, 열배출 등)
- 사고에 의한 외부영향을 최소한으로 줄일 것
- 외부사고와 내부적인 개입으로 인한 영향을 최소한으로 줄일 것

2. 고도의 신뢰성, 가동률, 이용률 달성

- 점검, 보수하기에 편리하도록 설계할 것
 - 자동설비, 운전상태감시설비 등 사용
- 보수, 교체작업에 편리하도록 설계할 것
- 설비를 단순화시키도록 설계할 것
- 표준화를 실시할 것
- 신기술은 발전소에 적용하기 전에 재확인할 것

3. 높은 경제성 달성

- 설비장수명화를 도모한 설계를 할 것
 - 기기교체에 대한 대책 마련
- 건설 전에 설계상의 안전성을 재확인할 것
- 규제상의 안정성을 재확인할 것
- 건설공기단축을 달성할 것
 - 공장조립을 최대한 활용
- 운전보수비를 최소한으로 줄일 것
- 발전소철거비용을 최소화시킬 수 있도록 설계할 것
- 투자비용이 최대한 보상되도록 설계할 것

휘한다. 이 시스템은 자연대류, 열전도, 열복사와 같은 자연현상 대신에 재료의 특성과 내부축적에너지에 의존한다. 많은 개량형원자로에서는 수동적안전시스템이



최소한 능동적안전시스템 정도의 신뢰성과 효율성을 갖추도록 많은 노력이 기울여지고 있다.

또한 운전원이 주제어실에서 원자로운전을 쉽게 할 수 있도록 인적요인에 관한 배려가 크게 이루어지고 있다. 모든 상황 하에서 고도의 자동화가 이루어짐으로써 인적과실의 기회와 가능성을 최소화하는 것이 목표이다. 계장제어계통과 원자로방어시스템은 운전원의 개입을 최소화하도록 설계되고 있다. 마이크로 프로세서, 비디오 디스플레이, Multiplexing, 섬유광학과 같은 전자식정보처리기술이 이용되고 있다.

개량형원자로는 사고시에 외부에 대한 영향을 최소화하도록 설계되고 있다. 이를 위해서는 사고의 중대성과는 관계없이 사고를 예방, 관리, 축소할 수 있고 외부에 대한 영향을 무시할 수 있을 정도로 줄일 수 있도록 다중방어의 각 요소들을 재검토하지 않으면 안된다.

높은 신뢰성과 가동률을 달성하기 위해서 개량형원자로에는 계획 및 계획외정지횟수를 최소한으로 줄여야 한다. 또한 원자로에는 점검, 보수, 기기교체 등이 용이하도록 설계되고 있다. 구조 및 운전면에서 최소한의 보수만을 필요로 하는 설비가 사용된다. 가동률을 개선, 비용효율성을 높이기 위해 가동중검사범위를 넓히고 자동기기를 사용하게 된다. 원자로배치도 기기의 보수, 교체작업의 편의를 위해 기기의 제거, 설치가 신속하고 쉽게 이루어지도록 설계되고 있다. 또한 원자로설계의 모든 면에서 신뢰성과 이용률을 높이기 위한 노력이 기울여지고 있다.

표준화는 신뢰성과 이용률을 높일 수 있는 또 하나

의 요인이다. 표준화는 상세한 기기제작사양은 다르더라도 최소한 기능면의 사양만은 같아야 하는 것이 기본목표이다. 그러나 넓은 의미에서 표준화의 목적은 설계의 세부사항을 규격화하고 검증시험에 대비하는 것이며 세계적으로 재사용할 수 있는 설비기준을 마련하는 것이다.

이미 입증된 기술에 대해서는 모든 개량형원자로가 과거의 경험을 널리 활용하고 있다. 혁신적인 설계의 일부는 아직도 경험이 부족한 내용을 담고 있다. 이같은 기기와 시스템은 발전소에서 사용되기 전에 시작품을 통해 시험하지 않으면 안된다.

많은 자본투자와 이의 상환을 고려해 경제성을 높이기 위해 개량형원자로에는 가능한 한 수명이 길어지도록 설계되고 있다. 원자로의 수명을 늘리기 위한 기기점검, 교체에 관한 사항이 설계내용에 제시돼 있다.

발전소건설기간이 연장되는 일이 없도록 하기 위해 발전소의 세부설계와 기기 및 시스템의 시험은 건설공사가 시작되기 전에 완료돼야 한다. 발전소건설기간중의 누적되는 이자를 감안해 건설기간을 단축해 조기에 들어갈 수 있도록 하기 위한 노력이 기울여지고 있다. 기기의 공장조립과 설치 전의 사전시험을 통해 건설현장인원을 줄이는 일도 검토되고 있다.

운전보수비가 원자력발전소의 경제성에 큰 영향을 미친다는 점과 평균적으로 이같은 비용이 현재 운전중인 발전소에서 높아가고 있다는 점을 감안해 이같은 비용의 요인들이 개량형원자로에서는 면밀하게 검토되고 있다.

원자로의 폐쇄는 최근에 와서 큰 비용으로 인식되기

시작했다. 이를 위해 폐쇄는 사전에 이에 대한 계획을 세우고 운전기간중 이 비용을 충당할 수 있도록 준비금을 마련하도록 배려해야 할 것이다.

투자보호면에서 사고 후 기기의 제염 및 보수, 교체와 연관된 시간과 비용을 최소한으로 줄여야 한다. 특히 사고 후의 발전소의 운휴상태는 가급적 피해야 한다. 발전소의 안전성을 높이는 대책이 어느 정도 투자를 보호하는 결과를 가져온다. 특히 이러한 대책은 연료의 핵분열생성물방출을 억제하는 효과를 가져온다.

2. 개량형원자로의 개발

(1) 경수로

현재의 경수로(LWR)기술은 경제적이고 안전하고 신뢰성이 있는 것으로 밝혀져 있다. LWR은 성숙된 기본구조와 규제기준을 갖고 있다. 현재 운전중인 원자로의 75% 이상이 LWR이다. LWR은 또 세계적으로 최고의 운전실적을 갖고 있다.

대부분의 선진공업국들은 1990년대와 그 이후까지 900MW급 이상의 대형로개발을 계속할 것이다. 이 발전형 ALWR은 기존 노형에서 얻은 경험을 토대로 개선, 발전시킨 것이다. 예를 들어 현재 프랑스에서 건설중인 N4爐(1,400MW)는 표준화된 P4爐(1,300MW)를 개량한 것인데 P4爐에 비해 kW당 건설단가가 5% 줄어들었다. Westinghouse社와 미쓰비시社가 공동개발한 개량형가압수로(APWR, 1,350MW), 영국의 Sizewell-B PWR(1,250MW), ABB/Combustion Engineering社의 SYSTEM 80 PLUS(1,300MW), General Electric, 히다치, 도시바 3社가 공동 개발한 개량형비등수로(ABWR, 1,360MW) 등이 대형의 발전형 ALWR이다.

프랑스전력공사(EDF)가 1989년에 시작한 「REP 2000」계획은 유럽 전력회사들의 요구사항을 종합한 시방서를 마련하게 될 것이다. 한편 메이커쪽에서는 Framatome社와 Siemens社가 합작으로 Nuclear Power International社(NPI)를 설립했다. 同社에서는 안전성을 높인 신형발전로를 개발중인데, 앞으로 이를 양국 안전당국의 공동심사에 붙일 예정이다. 이러한 절차는 양국의 안전요건을 조화시키는 계기를 마련할 것이며, 앞으로 더욱 그 범위가 확대될 것으로 보

인다. 스웨덴에서도 ABB Atom社가 핀란드의 TVO 전력회사와 공동으로 BWR-90을 개발중인데, 이 爐는 현재 스웨덴에서 운전중인 BWR을 개량한 것이다.

600MW급의 중형 ALWR도 수동적안전특성에 역점이 두어진 가운데 개발되고 있다. 여기서 언급하고 있는 노형은 대형과 중형 ALWR 모두 발전형으로 원형을 필요로 하지 않는 노형들이다. 이러한 중형의 수동형 ALWR로서는 Westinghouse社의 Advanced Passive PWR(AP-600)과 General Electric社의 Simplified BWR(SBWR)이 있다.

미국의 개발계획은 미국 전력회사들에 의해 운영되는 전력연구소(EPRI)에 의해 1984년에 본격적으로 시작되었다. 일부 외국의 전력회사들도 이 계획에 참여했는데 이 계획을 통해 사용자의 요구사항을 종합한 시방서가 제시되었다. 이 시방서에 맞는 ALWR이 개발되고 있는데, 이 개발사업은 미국 에너지성에서도 일부 지원하고 있다. 전력회사들의 시방서는 1,200 MW급의 대형 BWR, PWR과 600MW급의 중형 BWR, PWR에 대해서 작성되었다. 미국원자력규제위원회(NRC)의 설계승인이 이 계획의 관건이 되는데 설계승인이 나는대로 1990년대에 표준화한 개량로를 시장에 내놓을 계획이다.

이들 ALWR은 모두 설계가 단순화되고 설계마진이 크고 여러가지 설계 및 운전절차에 개선이 이루어져 있다. 이러한 개선사항으로는 연료의 성능과 연소도의 개선, 컴퓨터와 정보·디스플레이를 이용한 Man-Machine Interface의 개선, 운전원에 대한 시뮬레이터 훈련개선 등을 들 수 있다.

러시아에서는 VVER-88의 개량형인 VVER-92의 설계작업이 시작되고, 또다른 노형인 VVER-91이 핀란드와 공동으로 개발되고 있다. 러시아에서는 또 발전형인 VVER-500(AP-600과 같은 설계개념)과 더욱 혁신적인 VPBER-600도 개발되고 있다.

ABB-Atom社에서 개발한 PIUS 경수로에 대해서도 차세대를 위한 혁신적인 개선이 이루어지고 있다. PIUS의 개념설계는 600MW급의 중형이지만 이 보다 소형으로도 가능하다. 이 원자로의 안전성개선방식은 원자로의 정지와 사고 후의 붕괴열제거를 위한 노심냉각이 완전히 수동적으로 이루어진다는 것이다. 이

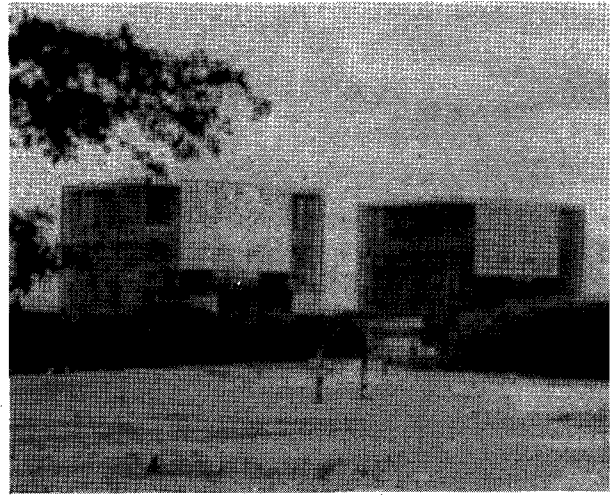
PIUS방식은 노심의 정지, 냉각에 많은 양의 붕산수를 사용하게 된다. 붕산수는 정상운전시에는 비중의 차로 1차냉각수로부터 분리된 상태로 있지만, 정지시에는 노심을 통해 자연적으로 대류한다. 이 PIUS의 수동적인 노심정지, 냉각방식은 몇가지의 다른 혁신적인 BWR과 PWR에서도 고려되고 있다. ISER(東京大學)과 SPWR(日本原子力研究所)의 설계개념도 강철 용기 내의 소형로에 이 PIUS방식을 이용하고 있다. Loop를 이용한 확인작업이 이미 실시되었지만, PIUS방식을 완전히 증명하기 위해서는 실증로가 필요할 것 같다.

여러가지 이유로 증식로의 실용화가 지연됨에 따라 효율적인 유라늄이용문제가 발전형LWR개발의 또다른 문제로 대두되었다. 일부 개선방안에는 1회專用사이클에 의한 유라늄이용에 적합하도록 노심설계를 어느 정도 변경하는 일도 포함돼 있다. 이같은 방식은 경제적인 위험성이 적고 그 일부는 이미 기존발전소에서 사용되고 있다. LWR에서의 플루토늄재순환을 확대함으로써 자원이용률을 더 높일 수 있을 것이다. 발전형 LWR개발의 기술적, 경제적 타당성과 안전성이 현재 미국, 日本, 독일, 그리고 특히 프랑스 등의 일부 국가에서 진행중인 확인작업과 개발작업에서 곧 확인될 것으로 보인다. 이러한 개조가 만족스러운 것으로 밝혀지면 앞으로 3~5년 내에 기존의 원자로에도 적용될 것이다.

(2) 중수로

중수로(HWR) 역시 경제적이고 안전하고 신뢰성이 있는 것으로 밝혀졌다. 성숙된 기본구조와 규제기준이 몇개국 특히 HWR개념을 개발, 발전시킨 캐나다에서 마련되었다. 현재 가동중인 발전용원자로의 약 7%가 HWR이다. 2가지형의 가압중수로(PHWR)가 개발되었는데 모두 압력관과 압력용기를 갖추고 있다. 이 노형들은 모두 그 성능이 완전히 입증된 것으로 몇백 MW에서 900MW까지의 HWR을 구할 수 있다. HWR의 이용률은 모든 상업용원자로에서 최고수준이고 안전성도 매우 높은 것으로 밝혀졌다. 중수감속에 의한 고유의 중성자경제성 때문에 연료비가 낮아진다는 사실도 증명되었다.

현재 캐나다에서 진행중인 HWR의 설계, 개발계획



은 주로 발전소의 원가절감과 발전소성능을 개선하기 위한 발전형HWR의 개발 및 경수로에서 하고 있는 것과 같은 안전성개선 등에 역점을 두고 있다. 이러한 노형으로는 450MW급의 CANDU-3과 665MW급의 CANDU-6 MK2형이 있다. 이외에 현재 개발중인 것으로는 인도의 500MW급 원자로와, 아르헨티나 설계회사와 독일의 Siemens社가 공동 개발하고 있는 380MW급 ARGOS원자로가 있다. 日本에서도 600MW와 1,000MW급의 ATR(중수감속·비등경수냉각·압력관형 원자로)이 개발되고 있다.

(3) 가스냉각로

영국과 프랑스에서는 CO₂가스냉각로가 상당한 운전실적을 올리고 있다. 영국에서는 전체전력량의 20%가 가스냉각로에 의해 공급되고 있다. 그러나 Heysham 2호기와 Torness발전소의 준공과 함께 영국에서의 개량형가스냉각로(AGR)는 종말을 고할 것으로 보인다. 이 CO₂가스냉각로의 개발은 앞으로 기존발전소의 성능개선과 수명연장에 관한 연구에 치중할 것으로 보인다.

초기의 헬륨냉각로온가스냉각로(HTGR)의 운전실적은 매우 만족스럽고 이 노형의 몇가지 독특한 특성은 이미 증명되었다. 이 노형에 속하는 원자로로는 영국의 Dragon발전소와 독일의 AVR 및 미국의 Peach Bottom발전소가 있다. 그러나 그 후에 개발, 건설된 HTGR인 미국의 Fort St. Vrain(330MW)과 독일의

THTR-300(300MW) 원전에서의 실적은 그렇게 만족스러운 것이 아니어서 결국 운전정지되었다. 운전정지된 이유는 헬륨냉각, 흑연중성자감속, 구조용 흑연재료사용 또는 안전문제 등의 원자로의 기본개념과 관련된 문제 때문이 아니고, 주로 처음 사용되는 시스템과 기기의 기술적, 경제적인 문제 때문이었다.

HTGR개발은 미국, 독일, 러시아, 日本, 中國에서 이루어지고 있는데 주로 80~170MW급의 작은 모듈형HTGR을 개발하고 있다. 개발목표는 앞으로 건설될 발전소의 안전성개선에 두고 있는데 이 목표를 달성하기 위해 소출력의 모듈형원자로와 각 모듈의 노심설계에 중점을 두고 있다. 또한 품질개선과 건설에 소요되는 시간과 비용절약을 위해 공장조립을 최대한으로 활용하는 방안도 검토되었다.

이러한 특성을 갖추게 하기 위해서 HTGR은 양질의 헬륨냉각재, 낮은 출력밀도, 연료와 잘 결합된 다량의 흑연감속재, 항상 負의 값이 유지되는 출력계수, 세라믹재료의 多重層으로 코팅된 입자모양을 하고 있는 연료 등이 가장 중요한 요소가 된다. 흑연감속재와 함께 이 연료는 건전성을 유지하면서 매우 높은 온도를 지탱할 수 있는 능력을 갖추고 있어야 한다.

모듈형HTGR은 그 독특한 특징과 특성으로 보아 형식승인과 상업화 전에 원형로에 의한 실증이 필요하다. 처음에는 비교적 소출력의 모듈 하나를 사용해 시험하고, 나중에 상업용의 복수모듈형발전소를 통해 시험하면 된다.

日本에서의 HTGR계획은 고품질의 증기생산과 고효율의 발전을 하기 위한 것이지만 1차적으로는 생산공정을 위한 다량의 열을 얻기 위해 노심출구에서의 높은 헬륨냉각재온도를 낼 수 있는지를 시험해 보는데 있다. 이 시험을 위해 현재 30MW급의 고온시험로(HTTR)가 日本에서 건설되고 있다.

(4) 액체금속냉각로

지금까지 액체금속냉각로에 대해서는 실험용의 중형 액체금속고속로(LMFR)를 통해 200爐·年 이상의 운전경험을 쌓았다. 그러나 LMFR을 발전용중수로로 발전시키는 것은 短中期수요를 충족시킬 수 있는 적정가격의 우라늄자원을 마련할 수 없기 때문에 이를 발전시킬 수 있는 계기가 마련되지 않고 있다. 그러나 선진

공업국에서는 증가되는 에너지수요를 충족시키기 위해 21세기 초기에는 증식로가 필요하게 될 것이라는 인식이 높아가고 있다.

개량형액체금속냉각로(LMR)는 차세대발전용 원자로가 될 것이라는 인식 아래 개발이 추진되고 있고, 이와 함께 핵연료연소도를 높이는 등의 핵연료주기개발도 계속되고 있다.

유럽, 日本, 러시아에서의 개발은 혼합산화물연료를 사용하는 대형 노형에 집중돼 있다. 유럽과 러시아에서는 1,500~1,600MW의 LMR이 개발되고 있는데 이것들은 프랑스의 Phénix, Superphénix, 영국의 PFR, 러시아의 BN-350, BN-600 등의 발전형증식로에서 얻은 경험을 살려 기기설계, 발전소설계, 연료주기개발 등이 이루어지고 있는 것들이다. 지금은 이 노형에 수동형안전시스템을 사용하는 문제도 검토되고 있는데 그 한 예로 공기냉각기를 사용한 수동형붕괴열 제거시스템을 갖고 있는 유럽형고속로(EFR)가 있다.

日本과 印度에서는 다음 단계로 소형증식로에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 280MW급의 「몬주」 원형원자로가 1992년에 초임계를 달성할 것으로 예상되는데, 그 다음 단계로는 日本에서 루프형실증로의 개발이 이루어질 것이다. 印度도 고속증식시험로(FBTR)개발에서 500MW급의 풀형원형로(PFBR)개발단계로 옮겨가고 있다.

핵연료주기개발은 대부분 혼합산화물연료에 대해 이루어지고 있으나, 미국에서 현재 개발되고 있는 3원속연료(U-Pu-Zr)와 사용후연료의 고온처리방법은 장래성이 있는 것으로 보인다. 이 고온처리방법의 특징은 처리과정에서 플루토늄과 함께 움직이는 장수명 Actinide원소 대부분을 원자로에 재순환, 연소시킬 수 있다는 것이다. 이 과정에서 Actinide는 핵분열을 통해 단수명핵분열생성물로 변해 폐기물흐름에서 제외되기 때문에 폐기물처분이 용이해진다.

미국에서의 액체금속냉각로개발은 General Electric社에서 개발한 PRISM과 같은 모듈형이 주류를 이루고 있다. 개발활동은 안전성의 향상과 경제성 및 효과적인 폐기물관리에 중점을 두고 있다. 현재 제안되고 있는 발전설비는 1기의 465MWe급 터빈발전기에 3기의 471MWth급 모듈형원자로를 연결시킨 것이

다. 이 발전소는 여러가지 혁신적인 특성을 지니고 있는데 여기에는 3원금속연료주기의 이용, 열반응 및 방사능반응에 의한 고유의 원자로정지기능, 수동적인 붕괴열제거기능, 기타 모듈방식으로 인한 건설 및 운전상의 이점 등이 포함된다. 이 계획은 현재 개념설계와 이에 대한 사전승인단계에 놓여 있는데, 그 다음에는 완전한 규모의 원형모듈에 대한 광범한 시험을 거친 후 설계승인을 받게 된다.

3. 개량형원자로의 경제성과 국민적 합의

경제성면에서 원자력은 앞으로도 화석연료로부터 큰 도전을 받게 될 것이다. 원자력발전소는 화력발전소보다 연료비는 낮지만 초기자본비는 높다. 2010년에서의 개량형화력발전소와 개량형원자력발전소의 연간발전비용을 비교평가한 자료(헬싱키심포지움에서 발표된)에 따르면 개량형원자력발전소가 경제성이 있는 것으로 나타나 있다.

국민적 합의문제에 관해서는 1991년 9월 IAEA 주최로 빈에서 열린 「원자력발전안전성에 관한 국제회의」에서 얻은 결론이 개량형원자로가 일반사람들을 보호할 수 있는 능력이 충분하다는 것이 기술적으로 증명되어 비상계획에서의 요구조건이 상당히 완화되어야 한다는 것이었다. 예를 들어 비상사태 하에서 신속히 대피할 필요가 없게 되는 것 등이다. 분명히 이것은 원자력발전에 대한 국민적 합의를 얻는데 큰 영향을 미치는 것으로, 차세대원자력발전소를 실현시키려면 원자력발전에 대한 국민적 수용태세가 개선되는 것이 매우 중요하다.

원자력의 광범한 이용

「원자력발전의 역할(과거, 현재, 미래)」에서 언급했듯이 전력 이외 분야에서의 원자력의 이용가능성은 매우 크다. 전력 이외 분야에서의 원자력의 이용은 필요한 온도조건이 매우 다양하다. 지역난방용 온수와 海水淡水化공정용 열은 80~200°C 범위의 온도를 필요로 한다. 250~550°C 범위의 온도는 정유공정에 필요하다. 중유회수율을 높이기 위한 열의 이용방법으로는 온수 또는 증기주입법이 있다. 중유회수에 필요한 온

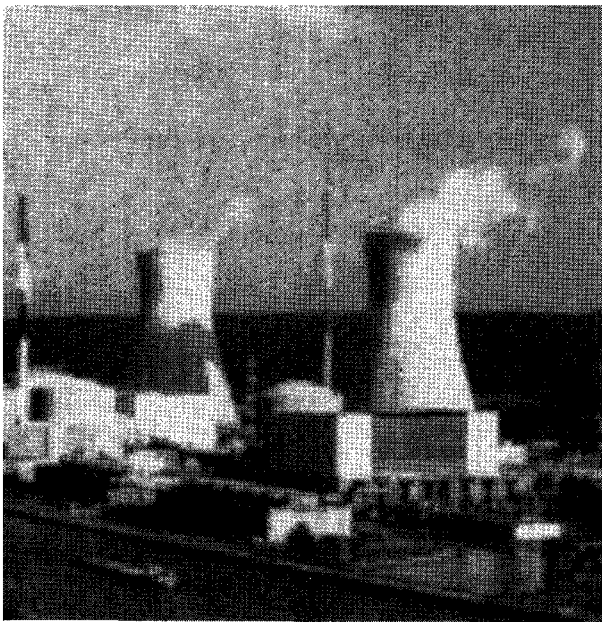
도 및 압력은 유전의 지질학적 조건에 따라 크게 달라지지만 550°C 이상이다. Oil Shale과 Oil Sand의 처리공정에서 필요한 온도는 300~600°C다. 석유화학공정에서는 600~880°C의 높은 온도가 필요하다. 더 높은 온도(950°C까지)가 석탄 또는 갈탄을 정제하는데(차량용 연료에 사용되는 메탄올생산) 필요하다. 900~1,000°C의 온도가 물분해에 의해 수소를 생산하는데 필요하다.

550°C까지의 열은 비교적 낮은 운전압력에서 증기로 공급할 수 있지만 그 이상의 온도를 얻기 위해서는 다른 에너지원반체에 의해 공급하지 않으면 안된다. 공정용 열원자로의 금속재료는 최고 1,000°C까지의 공정용 열을 장기간 지탱할 수 있는 강도로 설계돼 있다. 제강공정과 같이 1,000°C 이상의 온도가 필요한 공정에서는 전기, 수소, 합성가스과 같은 2차적인 에너지원반체를 통해서만 원자력에너지를 이용할 수 있다.

경수냉각로는 최고 300°C까지의 열을 공급할 수 있고 액체금속냉각고속로는 최고 540°C까지의 열을 공급할 수 있다. 가스냉각로는 더 높은 온도의 열을 공급할 수 있는데, 개량형가스냉각핵연감속로(AGR)는 650°C까지, 고온가스냉각로(HTGR)는 950~1,000°C까지의 열을 공급할 수 있다.

주택용 및 공업용 전기, 증기, 열을 동시에 공급하는 원자력발전소를 이용하면 상당히 유리하다. 러시아, 中國, 캐나다, 체코슬로바키아, 스위스, 독일, 헝가리, 불가리아에서도 경수냉각로가 전기, 열 동시공급용으로 사용되고 있다. 원자로에 의한 공정용 증기를 최대로 이용하고 있는 곳 중의 하나가 캐나다 온타리오주에 있는 Bruce원자력개발단지다. 이곳에서는 CANDU PHWR들이 6,000MWe의 전력과 Ontario Hydro社와 입접한 공업단지에서 사용될 공정용 스팀과 열을 동시에 공급하고 있다.

용량 10MWt의 SLOWPOKE원자로가 캐나다원자력공사(AECL)에 의해 개발되고 있는데, 이 원자로는 빌딩밀집지역, 연구소 등에 대한 열공급과 도시지역난방용 열공급을 위해 특별히 설계된 것이다. 이 원자로를 이러한 목적을 위해 85°C의 온수를 공급하게 된다. 2MWt의 실증로 1기가 1987년부터 캐나다 Manitoba州의 Whiteshell연구소에서 가동중이다.



스팀의 이점은 공정용 열을 얻는데 화석연료 대신에 원자력에너지를 이용하다는 것과 환경공해(특히 이산화탄소배출)를 줄일 수 있다는 것이다. 1991년 3월 日本原子力研究所 산하 大洗研究所에서 고온시험로(HTTR)의 설치공사가 시작됨으로써 공정용열원자로 개발에 큰 전환점을 맞이했다. HTTR은 950°C의 노심출구온도를 낼 것으로 기대되는데 이 爐는 고온의 공정용열을 이용하는 설비에 연결되는 세계최초의 원자로가 될 것이다.

개량로개발분야에서의 IAEA활동

中國에서는 HR-5 열공급시험로가 北京市에 있는 原子力研究所(INET)에 의해 개발되었는데 이 원자로는 5MWt급의 경수냉각자로 1989년에 운전에 들어가 INET에 60~90°C의 온수를 공급하고 있다. 이 원자로는 앞으로 中國에서 원자력지역난방을 적용하는데 있어 그 기술적인 토대를 마련할 것이다.

러시아에서는 지역난방용 온수공급을 위해 특별히 설계된 AST 경수냉각로가 개발되었는데 50~500MWt급의 노형이다.

Shevchenko공업단지는 西카자흐스탄지방에 물, 전기공급문제를 해결하는데 크게 기여하고 있는데 이 건조한 지역은 이를 이용해 천연자원을 개발, 활용할 수 있게 되었다. Shevchenko단지에는 고속증식로(BN-350형) 1기와 화력발전소 3개소 및 열중류설비를 갖춘 海水淡水처리공장 1개소가 있다. 이 단지 내의 海水淡水처리공장은 세계에서 최초로 원자로를 海水淡水처리에 사용하고 있는 곳으로 앞으로도 당분간 세계에서 유일한 시험공장으로 남아있게 될 것이다.

HTGR은 950~1,000°C의 열을 공급할 수 있는 유일한 원자로다. 재래식 증기터빈설비에 의한 발전에 사용되는 것 외에 HTGR은 고효율의 가스터빈발전소에서 사용되는 850°C의 헬륨가스를 공급할 수 있고 고온의 공정용열공급용으로 최고 1,000°C까지의 헬륨가스를 공급할 수 있다. 또 석탄, 석유, 가스의 정제 및 전환설비에 원자로의 공정용열을 사용해 환경공해가 없는 액체에너지 운반체를 개발하기 위한 연구, 개발, 실증계획이 실시돼 왔는데, 이 액체에너지운반체는 수송 및 열공급용 연료로 사용되는 것이다. 이러한 시

원자력발전의 초기개발은 대부분 국가별로 이루어졌으나 개량로개발은 주로 국제협력 하에 이루어지고 있으며 IAEA도 이를 권장하고 있다. 특히 혁신적인 개념을 도입하는 설계에서는 막대한 개발비용을 줄이기 위해 공동관심분야에 대해서는 자원과 기술을 공동활용함으로써 실효를 건울 수 있을 것이다.

전세계적으로 원자력의 평화적 이용을 촉진시킨다는 IAEA의 고유기능을 수행하기 위해 IAEA의 원자력 발전기술개발사업은 원자로개발사업을 추진하고 있는 회원국가간의 기술정보교환 및 협력을 권장하고 있고, 연구개발사업에 관심을 갖고 있는 회원국에 대해서는 이를 지원하고 있으며, 현행 원자력개발상황에 대해 관심을 가지고 있는 모든 회원국에 대해서는 이들 회원국들을 위해 각종 보고서를 발간하고 있다. IAEA의 활동은 현재 원자력의 발전에 장애요인이 되고 있는 문제(예를 들어 안전성, 높은 자본비, 복잡하고 비용이 많이 드는 운전절차 등)에 초점을 맞추고 있다.

경수냉각로, 액체금속냉각로, 가스냉각로의 개발에 대한 IAEA의 지원활동은 이들 노형개발부문에서 자국에서 책임자급으로 있는 전문가들로 구성된 3개의 국제실무자그룹(IWG)에서 맡게 된다. 각 IWG는 각국의 개발사업에 관한 정보교환과 현황보고를 위해 정기적으로 모임을 갖고 국제협력이 필요한 부분을 가려내 IAEA가 해야 할 기술적인 지원계획과 활동을 동기구에 권유하게 된다. 이러한 정기적인 검토는 운전경험과 개발사업을 솔직하게 논의하는 공개회의형식으로 진행된다.

각 IWG의 활동 중에는 기술정보교환을 위한 회의 개최와 연구협력사업 등이 포함된다. 소규모의 전문가 회의도 공동관심사로 돼있는 기술분야의 진척상황을 논의하기 위해 소집된다. 회의참가범위를 더욱 확대해 대규모의 기술위원회회의, 심포지움, 워크숍 등이 열리고 있다. IWG는 국제적으로 공동개발하기 위해 공동 관심분야에 대해서는 국제협력사업을 계획하도록 IAEA에 권고하고 있다. 이러한 협력활동은 연구협력사업(GRP)을 통해 수행된다. 이 GRP사업은 통상 3~5년 걸리는데 여기에는 시험적인 활동도 포함된다. 이같은 GRP활동은 국가별로 하는 개별적인 활동보다 국제적으로 이를 공동시행함으로써 비용을 절감할 수 있고, 이에 참여하는 여러 기관들의 경험과 전문기술을 서로 교환하게 되므로 큰 효과를 거둘 수 있다.

이같은 GRP활동의 한 예로 Paul Scherer연구소(스위스, Villigen市)의 PROTEUS실험시설에서 현재 진행되고 있는 국제적 프로젝트가 있는데 여기서는 이 프로젝트에 참가하고 있는 나라에서 개발중인 HTGR 노형에 관한 데이터를 확인하기 위한 일련의 실험을 계획, 실시, 분석하는 작업을 공동으로 벌이고 있다. 또다른 GRP프로젝트의 예로는 액체금속고속중성자로(LMFBR)에서의 나트륨비등 또는 나트륨/경수 반응을 검출하기 위한 음향신호처리방법을 연구하는 프로젝트가 있는데 여기서는 나트륨비등 또는 나트륨/경수 반응을 신속하고 고감도로 검출하는 방법을 찾아내기 위해 실험데이터와 음향신호처리기술을 연구하고 있다.

정보교환을 촉진하기 위해 최근에 IAEA 주관으로 열린 전문기술위원회회의에서 논의된내용은 다음과 같다.

1. 개량형경수냉각로

- (1) 개발, 설계의 진척상황
- (2) 원가 절감가이드라인
- (3) 구조물재료
- (4) 공정용 열원자로에 의한 공정용증기공급

2. 액체금속냉각로

- (1) 증기발생기고장 및 이의 파급효과

- (2) 고속로의 개량형 제어기기

3. 가스냉각로

- (1) 노심의 물리적 계산상의 불확정요소
- (2) 흑연개발방향
- (3) 사고시의 연료거동

원자로개발사업을 벌이지 않고 있는 회원국에 대한 IAEA의 지원은 몇가지 방식으로 이루어진다. 즉 IAEA를 통한 기술지원방안이 개발도상국을 위해 마련돼 있는데 여기에는 전문가의 조언, 교육훈련, 연구 제휴, 연구용 특별장비제공 등이 포함된다. 이같은 IAEA의 지원은 개량형원자로가 실용화되는 단계에 가서 개발도상국들도 이것을 이용할 수 있도록 사전에 그들을 돕기 위한 것이다.

결 언

개량형원자력발전시스템은 환경적으로 받아들일 수 있는 방법으로 세계에너지수요를 충족시키는데 크게 기여할 것으로 기대되는데 현재 그 개발이 활발하게 진행되고 있다. 이 새로운 시스템들은 전력공급과 지역난방, 공정용 열공급에 모두 이용할 수 있다. 또한 이 시스템들은 점차 높아지고 있는 안전성에 대한 요구조건과 경제성 및 국민적 수용태세 등의 제반여건에 맞도록 개발되고 있다.

개량형원자로의 개발(특히 혁신적인 노형인 경우)은 많은 개발비가 투입되기 때문에 개량형원자로개발사업을 벌이고 있는 회원국들은 기술개발단계에서 국제적으로 협력할 수 있는 방안을 모색중이다. IAEA의 원자력발전기술개발에 대한 지원사업은 기술정보교환 및 공동연구활동을 통한 국제협력을 장려하기 위한 것이다. IAEA의 회원국들에 대한 지원활동이 실효를 거둘 수 있도록 경수냉각로, 액체금속냉각로, 가스냉각로개발에 대한 IAEA의 지원활동은 각국의 각 분야별 전문가들로 구성된 3개의 국제실무자그룹에 의해 이끌리고 있다. 이들 국제실무자그룹의 테두리 내에서 이루어지는 협력을 통해 참가국들의 경험과 연구기술이 공동이익을 가져오는 분야에서 공동노력할 수 있게 되는 것이다.■