

차세대원자로개발에 대한 국제심포지엄

1993년 10월 18일~20일
인터컨티넨탈호텔 그랜드볼룸

아시아의 次世代原子爐 開發

Chattwjee, S. K. (인디아)

He, J. (중국)

Kakodkar, A. (인디아)

강 창 순 (한국)

Masuda, F. (일본)

아시아지역의 국가들은 지난 수십년 동안 원자력을 이용해 왔으며, 전력시설 증가의 잠재력이 매우 큰 지역이다. 장기간 전세계적으로 널리 안전하고 경제적인 운전경험을 가진 원자력은 계속하여 이 지역에서 주요 전력공급원 중의 하나가 될 것이다. 최근, 일반 대중들은 원자력이 보다 안전하고 경제적임을 보여줄 것을 요구하고 있다. 따라서 각국은 원자로 크기, 노형과 관련한

차세대원자로 개발을 추진하고 있다.

차세대원자로 개발을 위한 접근방법은 각국의 기술적 배경과 사회경제적 요구에 따라 다른 형태를 나타내고 있다. 연료주기도 주요 요소가 되고 있으며, 일반적으로 토륨, 천연우라늄 및 플루토늄과 같은 자원의 최적이용에 초점이 맞추어져 있다. 이 지역에서 개량적인 접근은 일반적으로 사용되어 왔으며, 혁신적인 접근이

이어지고 있다. 안전성과 경제성 향상은 지속적인 목표이며, 설계와 안전성이 요구되는 수준에 달성하기 위한 개발이 추진되고 있다.

경제성 향상을 위해 건설비의 절감, 플랜트의 이용률 증가, 수명연장이 추진되고 있다. 건설비 절감을 위해 인허가의 효율화, 설계의 단순화, 건설기간 단축이 제안되고 있다. 또한 연료의 장기화를 통한 이용률 향상, 보다 신속한 연료 재장전, 주기적인 검사의 효율화와 사전예방적인 보수가 제안되고 있다.

안전성 향상을 위해 설계와 엔지니어링에 PSA가 점증적으로 도입되고, 안전성 목표는 원자력이 현존하는 사회활동의 위험을 뚜렷하게 증가시키지 않도록 설정될 것이다. 안전성 목표는 인허가의 요구에 의해서라기 보다는 설계를 위한 수치적 지침으로 사용된다.

이 지역에 있어서 차세대원자로 개발의 성공을 위해서는 안전성 향상과 경제성 증진을 위한 협력이 필수적이다. 이러한 관점에서 IAEA와 같은 조직은 중요한 역할을 수행할 수 있을 것이다.

서 론

아시아 지역의 국가들은 에너지의 안정적 공급이 반드시 필요하다는 것을 인식해 왔다. 특히

전기 에너지에 대한 요구는 전체적인 생활수준 향상과 경제 성장에 따라 증가되어 왔다. 원자력 이외의 적당한 대체 에너지원에 대한 희망은 가까운 장래에는 기대하기 어려운 현실이다. 심지어 21세기 초반에 있어서도 그러한 상황은 개선될 것으로 보이지 않는다. 이러한 관점에서 아시아 국가들은 장기간 세계적으로 널리 안전하고 경제적인 운전 경험을 가진 원자력이 주요 전력공급원 중의 하나가 될 것으로 굳게 믿고 있다.

원자력 개발계획

아시아 국가들은 수십년 동안 성공적으로 원자력을 이용하여 왔다. 원자력기술이 최근 더욱 더 성숙함에 따라 일반 대중들은 원자력이 보다 안전하고 경제적인 것을 보여줄 것을 요구하고 있다. 이러한 상황에 대처하기 위하여 원자력 발전에 대한 개량 개념이 도입되고 있으며, 이것은 원자로의 안전성과 설계에 대해 주로 수행되고 있다.

차세대원자로 개발을 위한 접근방법은 각국의 기술적 배경과 사회경제적 요구에 따라 다른 형태를 나타내고 있으며, 각국이 현재 가지고 있는 원자로 크기와 노형에 의존하고 있다. 연료주기도 또한 이러한 접근방법의 결정에 있어서 주요 요인이다.

현재 이 지역에서 원자력은 주

중국의 원자력 개발 계획

중국의 에너지 수요는 최근 급격히 증가하고 있는데 이러한 추세는 중국의 급속한 경제성장과 생활수준의 향상에 따라 향후 계속될 전망이다. 반면에 화석연료와 수력자원은 그 분포가 편중되어 있다. 이러한 상황에서 또한 산성비와 지구 온난화 등과 같은 환경문제로부터 지구환경을 보호하고 에너지수요를 충족하기 위해 원자력을 개발한다는 것은 당연한 것이다. 그리고 원자력이 안정적이고 조화된 에너지 공급을 위해 중요한 역할을 할 것이

라는 것은 의심의 여지가 없다.

현재 3기의 PWR형 원자력발전소 건설이 진척도에서 차이를 보이며 진행되고 있고, 이의 차세대원자로 시스템에 대한 연구개발이 수행되고 있다. 차세대원자로 시스템은 주로 3가지 형태로 개발되고 있는데 다음과 같다.

- 1) 자연순환 특성의 저온 일체형 열생산용 원자로
- 2) 전기생산 및 공정열 생산을 위한 고온가스로
- 3) 600MW급 피동형 가압수형 원자로

로 경수 및 중수로로 구성되어 있다(중국의 PWR, 인도의 PHWR, 일본의 BWR & PWR, 한국의 PWR & PHWR). 각국은 현존하는 노형에 의존하는 고유한 원자력 프로그램을 가지고 있으며, 연료주기와 노형 선택에 있어서 독특한 전략이 필요하다. 그러나 이 지역에 있어서 궁극적인 접근은 일치하고, 이는 핵연료 자원의 최적 이용을 위한 상업적인 증식으로 개발로 이어진다.

각국 현재 및 장래 원자력 프로그램은 아래와 같이 요약될 수 있다.

중 국

중국은 현재 3단계로 원자력발전소가 건설되고 있다. 첫 단계는 자국에 의해 설계, 건설된 진산의 300MWe PWR 원형로이다. 이 원형로 건설 목적은 PWR에 대한 경험 축적과 기술 성숙, 작업자의 훈련을 위한 것이다. 이 발전소는 현재 시험운전 중이다. 두 번째 단계는 프랑스의 프라마통으로부터 원자로계통과 영국의 GEC로부터 T/G계통을 도입한 대아만의 900MWe PWR 2기이다. 대아만 1기는 1993년말에 가

인도의 원자력 프로그램

원자력 프로그램 제 1단계

원자로 내역	총용량(MWe)
운전중 원자로[2 BWRs(2×160MWe), 7 PHWRs(1×100, 5×220MWe)]	1,720
건설중 원자로[5 PHWRs, 각 220 MWe]	1,100
건설허가된 원자로[2 PHWRs, 각 500 MWe]	1,000
건설허가 대기중 원자로[4 PHWRW(2×500, 4×200 MWe)]	1,880
소 개	5,700
계획중 원자로[8 PHWRs, 각 500 MWe]	4,000
총 계	9,700

장기원자력계획

1단계	PHWR의 건설, PHWR 사용후연료의 재처리와 Pu생산
2단계	Pu를 연료로 하는 FBR의 건설 및 토륨(Th)을 이용한 U-233의 생산
3단계	U-233/Th 연료이용 동력용 원자로

차세대중수로(제 1단계의 확장)

개념적 특성	<ol style="list-style-type: none"> 1. 노심의 2영역화: U²³³을 함유한 토륨과 MOX영역 2. 중수 감속 3. 비등경수 냉각 4. 음의 기포반응도 계수 유지 5. 수직 냉각재 채널의 공장제작 및 교체용이성 확보 6. 경수 vault 내에 잠기는 원자로 용기 7. 피동 안전성 특성
개발목적	<ol style="list-style-type: none"> 1. 국내자원의 최적 사용 2. 기존 기술기반의 지원 유도 3. 기존 설계의 긍정적 특성을 통합 4. 건설기간의 단축과 설계수명의 연장을 포함한 설계목표의 계속 추진을 통하여 안전성과 경제성 향상 5. 가동중 검사와 부품교체의 용이성 확보

인 도

동될 예정이며 이어 6개월 후 대
아만 2기가 가동될 예정이다. 세
번째 단계는 기본설계가 끝나고
상세설계가 수행중인 진산의 2x
600MWe PWR 발전소로 현재
부지정지가 수행되고 있다.

이러한 발전소 건설에 있어서
주요 정책은 일부 국제협력을 얻
어 중국 독자적인 표준형 600
MWe PWR의 설계와 건설을 표
준화하는 것이다. 이 외에 광둥,
질강 지역에서 대형 PWR 건설
을 위한 타당성 조사가 적극적으로
수행되고 있다.

장래의 원자력 프로그램은 전
략적인 에너지 공급, 제한된 화석
에너지원과 환경보호를 고려하여
2단계를 구성되어 있다. 첫번째는
공정열 공급을 위한 가스냉각로,
지역난방로, 전력생산을 위한 피
동형 PWR 개발을 포함하는 원
자력 에너지의 광범위한 이용에
목표를 두고 있다. 위에서 언급된
로형의 타당성 조사와 R&D가
수행중에 있다. 600MWe 피동형
LWR의 표준설계, 일체형 지역난
방로의 실증시설과 10MWt의 시
험용 가스냉각로를 2000년내에
완공할 것을 기대하고 있다.

두번째는 사용후연료의 재처리
를 통해 생산된 플루토늄 혹은
우라늄을 이용하는 증식로 개발
이다.

또한 2000년 경에 약 65MWt
시험용 FBR을 건설하는 것을 목
표로 하고 있다.

인도는 자립 기반에 근거한 원
자력 개발을 추진해 왔다. 핵물질
과 원자력 기기 제조를 위한 고
유한 하부구조의 개발뿐 아니라
전 핵주기 운영에 전문화를 구축
하는 것이었다. 이러한 목적은 대
부분 성취되어 왔다. 장기 전략은
3단계 프로그램을 통하여 인도
내의 대규모 토륨매장량을 개발
하는 것이다.

현재 진행중인 1단계 원자력
프로그램은 220MWe와 500MW
e PHWR을 기본으로 하여 총
10,000MWe 정도의 시설을 건설
하는 것을 목표로 하고 있다. 현
재 9기의 원자로 1,720MWe가
운전중이다. 1993년과 1997년 사
이에 5기의 220MWe 원자로를
완공하기 위해 여러단계의 건설
이 진행중에 있다. 2002년까지
700MWe 시설용량을 달성하기
위해 각각 4기 이상의 220MWe
와 500MWe PHWR을 건설할
계획이다. 또한 1단계 프로그램의
일부로서 추가로 8기의 500MWe
를 계획하고 있다.

40MWt(15MWe)의 FBR 시험
로의 설치로 시작된 2단계는 5
00MWe 고속증식로 원형로의 상
세 설계가 수행되는 뚜렷한 진보
가 이루어졌다. 또한 1단계의 P
HWR의 개량을 위한 AHWR의
설계 개발이 수행되어, 현재 개념
설계가 진행중에 있다. 그러나 이

원자로의 도입은 상세설계와 R
&D 노력이 완결된 후에 결정될
것이다. 인도의 모든 원자력 프로
그램은 독자적인 R&D 노력에
의해 지원되고 있다.

많은 토륨과 제한된 우라늄 자
원을 고려하여 장기 원자력 프로
그램은 3단계로 수행되고 있다. 1
단계의 10,000MWe 시설은 자국
의 천연우라늄 자원의 경제적 이
용을 위해 필수적으로 PHWR 시
스템에 의존하고 있다. 이 원자로
는 산업의 하부구조의 규모를 확
대하고 독자적인 개발로형을 보
완한 것이다. 2단계는 1단계의 사
용후연료의 재처리를 통하여 생
산된 플루토늄을 연료로 하는
FBR의 건설에 기초를 두고 있
다. 3단계는 장기적으로 우라늄
-토륨 주기에 기초를 두고 있다.
이러한 접근에 의해 전기 생산을
위해 이용할 수 있는 잠재적 자
원의 최대 에너지화가 가능하다.
잠재적 자원의 최대 이용은 계획
중이거나 이미 R&D가 시작된 2,
3단계의 원자로 개발 및 상업화
가 성공해야 가능할 것이다.

1단계 원자력 프로그램의 P
HWR 기술은 상당한 진보를 보
여 왔다. 보다 높은 안전성을 얻
기위해 국내 외 경험에 의한 지
침에 의해 기술진보가 이루어져
왔다. 초기의 첫번째 PHWR발전
소에서의 기술진보는 기술의 습
득과 이해였다. 두번째 발전소에
서는 부지조건에 적용할 수 있는
설계 향상이 채택되었다. 차후의

220MWe PHWR발전소에서 보다 높은 안전성과 향상된 개념의 설계가 중요한 변화중의 하나이다.

또한, 설계개선은 약한 지진이 일어나는 부지에서 건설에 초점이 맞추어 졌다. 500MWe PHWR에서는 주로 원자로 규모의 확대에 따른 설계개선과 이에 수반하는 안전성에 노력이 이루어지고 있다. 이러한 개발은 차세대 원자로 설계의 개선에까지 이어진다. 차세대원자로의 건설시기는 상세설계가 끝난 후 결정될 것이다. 이러한 의도는 이 시스템에 대한 정책 결정이 이루어지기 전에 규제 검토와 개념설계를 계속하는 것이다. FBR 개발은 2단계 프로그램의 일부로 진행될 것이다.

일 본

현재 45기의 상업용 원자력발전소(BWR 23기, PWR 23기, GCR 1기, ATR 1기)가 운전중이며, 1991년도의 총 전력의 27.1%를 생산하고 총 시설용량은 36,224MWe에 달한다. 그리고 8기의 원자력발전소가 건설중에 있으며, 1기가 건설 준비중에 있다. 원자력발전소의 이용률은 70% 이상이고, 불시정지 빈도는 0.1회/년 정도로 낮다.

최근들어 이러한 좋은 기록은 운전과 보수에 있어서 숙련된 노동력, 운전중에 부딪치는 여러가

지 문제에 대처할 수 있는 기술 축적을 통하여 얻어왔다. 정기 검사기간(일반적으로 3-4개월)을 고려할 때 이런 발전소들은 정격출력에서 예정된 시간을 거의 대부분 운전했다는 것을 알 수 있다.

일본의 3차 LWR 개량표준화 프로그램은 APWR과 ABWR 최종 설계를 위해 1981년-1985년 사이에 수행되었다. 수년 동안 ABWR 혹은 APWR이 다른 LWRs 중에서 선택되기를 기대해왔다. 2기의 ABWR은 이미 건설중이며, 각각 1996년과 1997년에 운전에 들어갈 예정이다. 그러나 일본은 이런 발전소 건설에 대한 확고한 계획을 갖고 있지는 않다. ABWR은 1,350MWe의 출력을 내며, 내부 원자로펌프, FMC RD, 3개의 안전계통과 복합 원자로 격납용기와 원자로 건물 등을 채택하고 있다. APWR은 1,350MWe의 출력을 내며, 스펙트럼 시프트 로심, 고성능/고신뢰도 증기발생기와 4개의 보조 안전계통 등을 채택하고 있다.

정부의 장기에너지계획은 1990년에 수립되었다. 일본은 2000년에 50.5GWe, 2010년에 72.5GWe 원자력 발전이 필요하다. 이러한 목표를 달성하기 위해 LWR 기술개발에 대한 국가 지침이 1991년에 주어졌다. 이 지침에는 3개의 주요 개발주체 즉, 안전성 향상, 우라늄 자원의 효율적 이용, 미래의 불확실성에 대비한 유연성이 주어졌다.

안전성 향상은 측정장치 개선, 인간 오류에 대한 개선, 안전성 설계의 개선과 피동안전계통 채택 등에 의해 이루어 질 것이다. 우라늄 자원의 효율적 이용은 핵분열성 플루토늄과 감손우라늄의 이용을 포함하고 있다. 유연성은 미래에 있어서 건설부지, 전력요구, 핵연료주기에서 부딪칠 수 있는 불확실성에 대비하기 위한 것이다. 이것은 여러형태의 건설부지 조사, 고성능/고연소 연료를 통하여 달성될 수 있을 것이다.

한편 일본 산업체는 ABWR 개발 프로그램과 단순화된 대형 LWRs 개발과 같은 추가 개량 및 혁신적인 연구에 참여하고 있다. MITI는 이러한 개발노력에 대한 지원 프로그램을 가지고 있다. 이러한 개발노력 이외에 원자로 공급자들은 단순화된 중형원자로를 개발하고 있으며, SBWR과 MS-600이 전형적인 것이다. 이러한 개발과 더불어 일본은 FBR, ATR, HTGR의 개발 프로그램을 가지고 있다.

FBR에 대해서는 1977년 이후 실험로를 운전중에 있다. 원형로 「몬주」의 건설은 1985년에 시작되어 첫 임계는 1994년에 달성될 것으로 기대되고 있다. 1,600MW급의 실증로 건설은 1990년대 후반에 시작될 것이다. 이러한 계획의 성공은 21세기 전반에 상업용원자로 도입을 가능하게 할 것이다.

ATR에 있어서는 원형로 「후

일본에 있어서 원자력은 다음과 같은 이유로 장래 점차적으로 중요하게 될 것으로 보인다.

① 장기간에 걸친 경제의 지속적인 성장과 이와 관련한 전력수요의 증가가 전망된다. ② 천연자원이 부족한 일본에 있어서는 에너지원의 다원화가 필수적이다. 석유 및 석탄의 사용은 환경문제에 의해 제한되어야 한다. ③ 장래 아시아 국가들의 급격한 경제성장과 이와 관련한 환경오염이 우려된다.

그러나 원자력 발전의 전개는 국토가 좁고, 원전부지 확보를 위한 국민의 이해를 얻기 위한 충분한 시간을 갖지 못했기 때문에 원만하게 진행될 것으로 보이지는 않는다. 일본은 지역적으로 분리된 10개의 전력회사(9개 회사가 원자력발전소를 운영하고 있음), 일본원자력발전(주)와 원자력발전 실증시설과 계획을 가진 2개의 공사가 있다. 각 전력회사는 적당한 부지조사와 지역별로 적합한

전력원 개발 프로그램을 가지고 있다. 정부는 이런 계획을 조정하고 지원하고 있다. 전력회사들은 현재 10기의 BWRs과 1기의 ATR을 1990년대에 건설을 시작할 계획을 가지고 있다.

일본 원자력발전의 기본적인 정책은 5년 주기로 일본원자력위원회에서 수립하고 있는 「원자력 개발이용장기계획」에서 제시되고 있다. 이 계획은 핵연료주기와 차세대원자로 개발에 관한 기본 정책을 제시하고 있다. MITI와 STA는 이러한 정책에 따라 구체적인 프로그램을 작성한다. 차세대원자로 개발의 전체적인 구조는 다음과 같다.

근본적으로 산업체의 개발프로그램에 의존한다. 즉, 원자로 공급자 자신의 프로그램 혹은 유틸리티-공급자 협력에 의한 개발 프로그램이다. MITI는 NPEC

(Nuclear Power Engineering Corporation)을 통한 안전성 보증시험으로 이 프로그램을 지원한다. MITI는 또한 필요하다고 판단될 때 개량표준화 프로그램을 지지한다. 3차 표준화프로그램은 1981-1985에 수행되었으며, ABWR과 APWR 설계가 표준화되었다.

이러한 원자로는 아직 개발단계에 있다. 이러한 개발은 정부(STA, MITI)에 의해 지원되고 JAERI, PNC, EPDC(Electric Power Development Cor.)과 JAPC에 의해 주도되고 있다. 일반적으로 말하면, 많은 연구가 필요한 프로젝트는 STA에 의해 지원되고 상업적인 접근이 필요한 프로젝트는 MITI에 의해 지원된다.

겐」이 1979년 이후 운전되어 왔다. 실증로에 대한 기본개념은 끝났으며, 현재 건설허가를 기다리고 있다. ATR의 노심설계에 있어서 높은 유연성으로 인해 일본

에서 추진되었다. HTGR에 있어서는 비록 HTGR이 높은 고유안전성을 가지고 운전성과 보수성이 좋지만, 경제성때문에 주요 발전로로서 채택될 것으로 보이지

는 않는다. 그러나 그것을 모듈화 시킴으로서 LWR과 경쟁할 수 있다는 의견도 있다. JAERI는 1991년 시험로 HTTR의 건설을 시작했다.

한 국

1993년 기준으로 한국은 9기(8기의 PWR과 1기의 PHWR)의 원자로를 운전하고 있다. 원자력 발전시설은 7,616MWe, 발전량은 1992년에 56,530GWh이며 이는 총 발전량의 43.2%에 해당한다. 9기의 발전소는 1992년 평균 84.5%의 이용률을 나타냈다. 이것은 4년 연속 75% 이상의 높은 가동률을 나타낸 것이다. 가장 뚜렷한 가동률은 울진2호기로 거의 90%에 이르렀다. 1991년 10월, 한국 정부는 1991년-2006년 기간 동안의 전력공급계획을 확정하였다. 그 계획은 2006년까지 시설 용량에 있어서 40%, 실제 전력생산량의 50% 이상을 원자력이 담당하도록 되어 있다. 이 계획에 따라 4기의 PWR(4,000MWe)와 3기의 PHWR(2,100MWe)이 1995년-1999년 기간 동안 완공될 수 있도록 추진되고 있다. 추가로 2기의 PWR(2,000MWe)이 2001년, 2002년에 완공될 수 있도록 추진되고 있으며, 9기의 원자로(10,000MWe)가 2003년-2006년 기간동안 상업운전할 것을 계획하고 있다. 전체적인 프로그램은 주로 PWRs로 구성되며, PHWR에 의해 보완되는 것이다.

PHWR은 높은 가동률과 이용률때문에 에너지 공급의 다변화를 위해 좋은 보완책으로 고려되고 있다. 이외에 PHWR은 천연

한국의 원자력발전 현황

원자력 개발 프로그램(2006년까지)

현황(1993.3기준)	로 형	발전소 #	시설용량(MWe)
운전중	PWR	8	6,940
	PHWR	1	680
건설중	PWR	4	4,000
	PHWR	3	2,100
계획중	PWR	8	8,000
	PHWR	3	2,100

장기 원자력개발 전략

1단계(1997-2006)	개량 PWR, CANDU-6
2단계(2006-2015)	수동형 LWR, CANDU-3, 해상 MHTGR
	공정열, 지역난방
3단계(2015-2025)	고전환 LWR 혹은 PHWR, 원형 FBR
4단계(2015-)	상업용 FBR

우라늄을 사용하기 때문에 원자 연료주기 자립에 이점을 가지고 있다. 우라늄 자원 이용을 최대화하기 위하여 PWR 사용후연료를 PHWR에 사용하기(흔히 탠덤주 기라 함) 위해 PWR과 PHWR의 최적 조합이 추진되고 있다. 부록 1은 한국의 원자력 발전 프로그램의 현황을 요약한 것이다.

1989년 한국의 원자력 전문가 그룹은 「한국에 있어서의 2000년대 원자력 전망 및 대처방안 수립에 관한 연구」에 관한 연구를

수행했다. 이 연구에서 원자로 개발전략이 세워졌다. 이 전략에서 PWR이 21세기 초반까지 한국의 원자력 발전을 주도하고, PHWR은 이를 보완하도록 결정되었다. 이 전략은 원자로 개발을 위해 4 단계로 나누었다.

1단계의 원자로 개량(1997-2006), 2단계의 차세대원자로(2006-2015), 3단계의 HCLWR(2015-2025), 그리고 4단계의 FBR(2025년 이후)로 구분되었다. 보완로형으로 1단계에서 PHWR

은 PWR과 병행하고, 2단계에서 CANDU-3과 HTGR 모듈화가 제안되었다. 또한, 2단계에서는 전력생산 이외의 원자력 에너지 이용, 즉 지역난방과 공정열 등이 제안되었다. 3단계에서는 FBR이 경제성을 가질때까지 플루토늄의 보다 효율적인 이용을 위해 M OX를 사용하는 HCLWR이 제안되었다. 4단계에서는 FBR이 실현될 것으로 기대하고 있다. 왼쪽 페이지 표는 한국의 장기 원자력 프로그램을 요약한 것이다.

1단계에서는 2006년까지 새로 건설되는 원자로 참조발전소로 기존의 발전소를 이용하여 단계적으로 설계를 개선하는 것이다. 이는 새로운 개념보다는 기존개념의 개량을 도모한 것이다. 이러한 개량개념 하에서 한국은 2006년까지 6기의 700MWe PHWR과 12기의 1000MWe PWR을 건설할 예정이다. 영광 3, 4호기는 PWR을 위한 참조발전소이다. 그리고 CE의 시스템80+와 EPRI의 ALWR과 같은 수준의 안전성을 확보하는 것이다. 기존 원자력 발전소의 안전성, 경제성 향상 프로그램은 1991년에 시작되어 1997년까지 계속될 것이다.

이 프로그램은 3단계 표준화 프로그램으로부터 얻은 결과인 KSNPP(Korean Standard Nuclear Power Plant)의 설계요구서와 안전성분석보고서에 기초하여 추진될 것이다. PHWR에 있어서는 월성 2호기가 참조발전소이다.

그리고 필요한 설계개선은 APWR과 동일한 수준의 안전성을 확보하는 것이다. 적당한 과정에서 Level-2 PSA가 수행중이다.

2단계 프로그램에서 1992년 정부는 2006년 이후의 전력생산을 위한 차세대원자로 개발을 결정했다. KEPCO는 2007년에 시작하여 약 10년 동안 이 시스템을 운영할 예정이다. 이 프로그램은 차세대원자로 개발을 포함하고 있으며, 이 개발은 2개 과정 즉, 개념 및 상세설계로 이루어진다. 개념설계는 1994년내에 끝내고 상세 엔지니어링이 2001년까지 계속될 예정이다. 이는 2007년까지 첫번째 발전소 건설의 적절한 완공을 위한 것이다.

차세대원자로 개발 작업은 다음과 같이 수행된다. ① 유틸리티 요구서 작성 ② 안전성분석보고서 작성 ③ 엔지니어링의 일류화 구축 ④ 필요한 인 허가 획득. PSA기법 (최소한 Level-2 연구)은 그 시스템의 처음부터 엔지니어링과 설계에 채택될 것이다.

차세대원자로 개발

아시아 지역에 있어서 원자로 개량에 대한 접근은 근본적으로 현존하는 체제에 점차적인 개선에 기초하고 있으며, 이러한 개발 방향은 한동안 계속될 것이다. 차세대원자로의 취지는 주로 안전성 향상, 경제성 증진의 목표를 가진 개량원자로의 개발에 놓여

있다. 이러한 접근은 토륨, 천연우라늄과 플루토늄과 같은 고유한 자원의 최적사용과 엔지니어링과 설계, 건설, 장비 및 물질공급에 있어서 자국 몫의 증가를 추진하기 위한 것이다. 이 지역에 있어서 차세대원자로의 설계와 안전성 목표에서 고려되고 있는 공통의 특징은 아래와 같이 요약된다.

원자력의 경제성은 발전소의 수명연장, 이용률 향상, 건설비 절감에 의해 향상될 수 있을 것이다. 건설비의 절감은 인허가의 합리화, 건설기간의 단축과 설계의 단순화, 표준화, 모듈화에 의해 달성될 수 있다. 높은 수준의 이용률 및 가동률은 연료의 장주기, 설계의 단순화, 운전 및 보수에 있어서 인간오류의 축소, 정기검사와 예방보수의 합리화로 달성될 수 있다.

일반적으로 이 지역의 국가들은 전체 건설비의 20% 절감, 85% 이상의 이용률 그리고 60년의 발전소 수명을 목표로 하고 있다. 또한, 1인 Sv/원자로 년 이하로 직업적 방사선 피폭저감과 방사성 폐기물의 최소화를 광범위하게 추진하고 있다. 원자력발전소의 안전성은 고유안전성과 높은 설계여유를 가진 피동안전 특성을 채택하고 그리고 세심한 엔지니어링을 수행함으로써 향상될 수 있다.

이 지역 국가들은 PSA기법이 차세대원자로의 설계와 엔지니어

링에 광범위하게 사용될 수 있을 것으로 강하게 믿고 있다. 그리고 수치상 안전성 목표가 모든 사회 활동의 위험성을 뚜렷하게 증가시키지 않은 방법으로 설정되어야 할 것이다. 안전성 목표는 인허가 획득보다는 차라리 설계 목적을 위한 수치적 지침으로 사용될 수 있다. 이 지역 대부분의 국가들은 그들의 차세대원자로의 안전성 목표를 10-6/원자로 년 이하의 CDF를 요구하고 있다. 경제성 목표는 60년의 수명, 70% 이상의 자국공급 몫, 18개월 이상의 연료주기, 4-5년의 건설기간, 자본비용 절감 그리고 차후 원자력에 의한 전력생산 비용이 화석연료와 경쟁력을 가지는 것이다.

인도에서는 AHWR의 개발 목표를 토륨의 이용, 안전성과 경제성 제고 등과 같은 전략적인 고려에 기초하고 이에 더하여 현재까지의 PHWR 경험과 기존 기술 기반의 활용, 기존설계의 긍정적 특성 활용 측면을 고려하여 설정되었다. 이 원자로는 중수감속 비등경수 냉각로이며, 음의 기포반응도계수는 유지될 것이다. 냉각재 채널은 공장에서 조립되고 손쉽게 교체 가능한 것을 채택하고 있다. 원자로용기는 경수 vault내에 잠기도록 되어 있다. 이 원자로의 설계목표는 인도 국내 연료자원인 토륨을 최적 활용할 수 있도록 변경가능한 연료주기를 적용하는 것이다. 노심은 U233을

함유한 토륨과 MOX의 두영역으로 구성되어 있다. 또한 이 설계는 많은 피동 안전 특성을 채택하고 있다.

일본은 LWR을 향후 30~40년간의 주요 원자력발전원으로서 고려하고 있으며, 산업계는 주로 PWR과 BWR의 개량을 추구하고 있다. ABWR의 설계요건은 기존 경수로와 동일하거나 더 향상된 안전성을 갖도록 하고, 작업자 피폭선량(ORE)은 1인 Sv이하/GWe 년, 방사성폐기물 발생량은 100 드림/GWE 년 이하가 되도록 하고 있다. 그리고 이용률은 85% 이상이 되게 하여 총체적인 경제성이 기존 경수로보다 20% 향상되도록 하고 있다. 신규 ABWR은 2010년대에 운전에 들어 가도록 계획되어 있다.

설계 목적은 ① 운전 및 보수 유지의 용이성 확보 즉, 운전자의 비상대응 회수를 줄이고 인적 오류에 덜 민감하며 작업자의 보수 유지 환경을 개선하는 것, ② 설계의 간소화 즉, 건설, 운전 및 보수성을 향상하는 것, ③ 노심의 유연성을 증대한 설계 즉, 미래 핵연료주기의 불확실성 특히 플루토늄 활용에 대비한 연료주기를 수용할 수 있도록 한 것, ④ 인공지능화 즉, 발전소 운전 조건을 쉽고 빠르게 인식하고 또한 진단 능력을 향상시킨 것 등이다.

반면에 PWR 그룹은 자체 개발 프로그램을 가지고 있다. A PWR은 90% 이상의 이용율을

가지도록 목표하고 있고, ORE는 0.33인 Sv/원자로 년 이하, 방사성폐기물 발생량은 현존 PWR의 2/3 수준, 연료비용의 20% 절감 및 현존 PWR 노심손상확율(CDF)의 1/10 수준으로 안전성을 증대하도록 하고 있다. 안전성 목표 측면에서 일본의 ABWR과 APWR은 10-8~10-7/원자로 당 범위의 CDF를 가질 것으로 예측되고 있는데, 이보다 더 향상시키는 것이 실제 필요한 것인지에 대한 논의가 계속되고 있다.

한국에서는 현재 원자력발전소의 운전은 일반대중이 수용할 수 있는 범위의 위험도를 가지고 있다고 보고 있다. 일반대중에 대한 수용가능한 위험도를 10-5~10-6으로 잡고, level 2 PSA의 최종결과인 대규모 방출확율(PLR)이 전자와 동일 수준일 것이라고 단순히 가정하여 PLR의 범위가 한국내 존재하는 모든 원자력 시설에 대해 10-6~10-5이/년 되도록 하고 있다.

따라서 개량형 원자로에서는 향후 한국내 원자로 수의 증가(2006년까지 18기 추가)에 대응하여 개량형 원자로의 안전성 목표는 PLR이 1/10로 준 10-7~10-6/원자로 년의 범위를 가지도록 설정되고 있다. 2006년 이후에 건설될 차세대 원자로 설계에서는 설계목표로서 PLR을 10-7~10-8로 할 것을 권고하고 있다. 한국에서 차세대 원자로에 대해서는 또다른 10배정도의 안

결론

한국의 차세대원자로 설계 및 안전성 목표

안전성 목표	
대량방출의 확률	<10 ⁻⁶ /원자로·년
설계기준사고에 대응한 운전원 반응	72시간
로심손상에 영향을 주는 발전소 정전	> 8시간
안전계통	능동, 수동, 혹은 모두
계측 및 제어	디지털
경제성 목적	
운전능력	일일 부하 추종능력
이용률	87%
발전소 수명	60년
강제정지	<1/원자로·년
작업상 피폭	<1인·Sv/원자로·년
재발전 기간	2년
건설기간	<54개월
자본비용	10%절감

전성 향상이 필요하다고 보고 있는데 이는 원자력시설 수의 증가에 대비하고 위험도를 수용수준으로 계속 유지하기 위해서이다.

안전성 목표는 수치로서 제시되고 있는데 이는 규제 목적보다도 신형의 원자력 시스템을 설계하는데 있어서 바람직한 안전성 수준을 성취하기 위한 것이다. 원자력발전의 경제성 향상은 인허가의 간소화, 발전소 표준화, 제작의 모듈화, 건설기간의 단축 등을 통하여 이루어 질 것이다. 위의 도표에서는 KEPCO가 제시

한 차세대 원자로의 설계목적은 나타내고 있다. 안전성 목표에서 PLR을 10⁻⁶/원자로 년 이하라고 수치로서 제시한 것은 전력회사로서 이 수치는 본 논문에서 제시한 목표보다 10배정도 큰 것이다. 전력회사는 아직도 안전성 목표의 권고치를 받아들이기를 꺼려하고 있다. 현재 이에 대한 논의가 진행중이며 개발 프로그램의 개념설계 단계에서 제안된 광범위한 연구들을 통하여 결정될 것으로 보인다.

조사결과에 근거하여 아래와 같은 결론을 제시할 수 있다.

(1) 원자력 기술은 국가의 기술 발전에 대한 기여 이상의 무한한 가치를 가지고 있으며, 타 산업으로의 파급효과 또한 원자력이 기존 에너지원보다도 기술집약적이기 때문에 매우 크다. 따라서 지역내의 각 국가들은 차세대원자로 개발프로그램에서 국산화 비율을 높이려고 하고 있다.

(2) 역내의 기존 원자로 시스템은 크게 개선되어 가고 있고 비교 경제성과 적절한 안전성을 가지고 있다. 차세대원자로 개발은 안전성과 경제성 향상 목표를 계속 추구하는 방향으로 진행되고 있다.

(3) 원자력 안전성은 고유안전성과 피동안전 특성을 적용함으로써 개선될 수 있고 또한 엔지니어링, 설계 및 운전의 세심한 시행을 통하여 개선될 수 있다.

(4) 경제성은 건설비의 절감과 건설기간의 단축, 발전소 가동률의 향상 및 발전소의 설계 수명 연장을 통하여 달성될 수 있다.

(5) 공통 관심사인 안전성과 경제성 향상을 위하여는 하나의 시스템으로 공식화하는 것과 개량을 위하여 밀접하게 협력하는 것이 필요하며, 이러한 관점에서 IAEA같은 조직이 매우 중요한 역할을 할 수 있을 것이다.