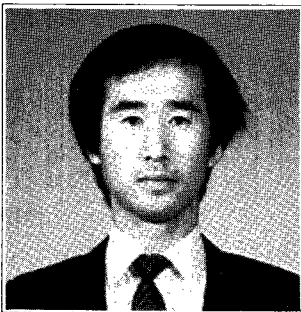


## 일체형 원자로의 설계 개념

IAEA 기술위원회의

95. 10. 9~10. 12

러시아 IPPE 연구소



이 두 정

한국원자력연구소  
고유안전로개발과제  
책임자

### 원

자력 선진국들은 원자로 사고 방지 능력을 제고하고 원자력의 사회적 수용을 고려한, 안전성과 경제성이 보다 향상된 새로운 개념의 원자로 개발을 적극적으로 추진해 오고 있다.

이들 원자로는 능동적 안전 개념을 중력·자연 대류·기체 압력 등을 이용한 피동적 안전 개념으로 전환하여 안전 계통의 신뢰성을 확보하고, 노심 손상 확률을 대폭 감소시키며, 경제성을 향상시키기 위하여 계통의 단순화·모듈화·표준화 및 건설 기간의 단축 등을 추구하고 있다.

중소형 원자로는 대용량 원자로에 비해 이러한 새로운 개념을 접목하기에 보다 더 적합하므로 원자력 선진국들은 대용량 원자로 개발과 병행하여 신개념의 중소형 원자로를 최근 활발히 개발하고 있다.

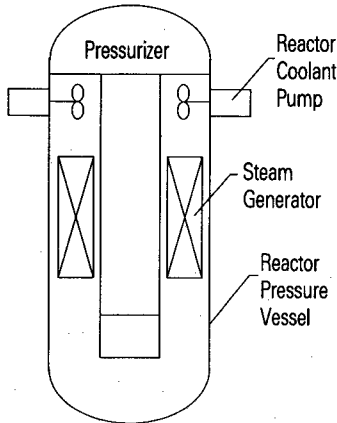
중소형 원자로는 전기를 생산하는 목적 외에 해수의 담수화, 지역 난방,

열병합 발전 및 선박용 원자로 등의 목적으로 개발되고 있다.

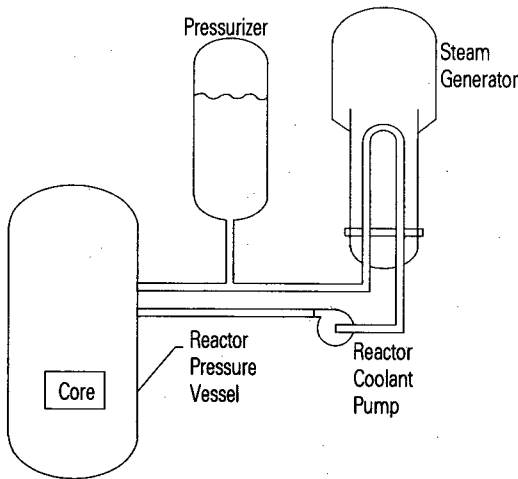
이들 원자로의 특징은 전기를 생산하는 목적으로 사용되고 있는 대용량 경수로의 형태가 대부분 원자로·증기 발생기·가압기 및 원자로 냉각재 펌프 등의 주기기들이 배관 계통에 의하여 연결된 분리형 원자로인데 반하여, 계통의 단순화를 통해 안전성과 신뢰성을 강조하고 공간 확보에 유리한 일체형 원자로가 주류이다 (그림 1).

IAEA에서는 94년 5월 러시아 Obninsk에 소재하는 IPPE 연구소에서 9개국의 전문가들이 참석하여 일체형 원자로 설계 개념에 관한 제1차 IAEA 기술위원회의를 개최하여 각국에서 개발하고 있는 일체형 원자로 설계 개념에 관한 발표회를 가졌으며, 일체형 원자로의 주요 현안 문제, 안전성, 운전 및 보수성, 제작성 등에 대한 토의를 하였다.

올해의 회의는 일체형 원자로 설계



(a) Integral type reactor



(b) Loop type reactor

〈그림 1〉 일체형 원자로와 분리형 원자로 계통 구성 비교

개념에 관한 제2차 IAEA 기술위원회 의로서, 제1차 회의의 장소였던 러시아 IPPE 연구소에서 10월 9일부터 10월 12일까지 4일간 개최되었다.

이번 회의는 크게 두 개의 세션으로 나뉘어 진행되었다. 세션 I에서는 각국에서 현재 개발중인 일체형 원자로의 설계 특성에 대한 발표가 있었으며,

순환에 의해 운전되는 일체형 원자로이다. 이 원자로는 외딴 지역에서의 전기 및 지역 난방을 목적으로 하는데, 여러 채널의 피동 잔열 제거 계통이 설계되어 있는 것이 특징이다.

AST 500은 대도시 주변에 건설되어 지역 난방을 목적으로 하는 일체형 원자로인데, 자연 순환에 의해 운전되

며 IAEA에 의해 안전성을 인정받은 바 있다. VPBER 600은 640MWe 용량의 일체형 원자로인데, 정상 운전시에는 강제 대류에 의해 운전되며 잔열 제거는 자연 대류에 의해 이루어진다. VPBER 600은 최근에도 주요 설계 변경이 이루어지는 등 개념 설계 단계에 있으며 광범위한 실험이 수행되고 있다고 한다.

**각국의 일체형 원자로 설계 현황**

**1. 러시아**

러시아의 OKBM 연구소에서는 지역 난방 및 선박용의 일체형 원자로를 설계·운전해왔는데, 이번 회의에서는 ATETS-200, AST 500, VPBER 600에 대해 발표했다.

ATETS-200은 80MW, 150MW, 250MW 용량의 설계가 있으며, 자연

순환에 의해 안전성을 인정받은 바 있다.

VPBER 600은 640MWe 용량의 일체형 원자로인데, 정상 운전시에는 강제 대류에 의해 운전되며 잔열 제거는 자연 대류에 의해 이루어진다.

VPBER 600은 최근에도 주요 설계 변경이 이루어지는 등 개념 설계 단계에 있으며 광범위한 실험이 수행되고 있다고 한다.

러시아의 RDIPE에서는 UNITHERM과 NIKA 120에 대해 발표했다. UNITHERM 역시 외딴 지역에서의 열병합 발전을 위해 설계된, 용량이 6MW에서 30MW인 일체형 원자로이다 (그림 2).

UNITHERM 원자로는 1차측과 2차측 사이에 중간 열교환기를 도입했는데 참석자들 사이의 토론 도중 열병합 원자로에 꼭 필요한 설계 개념으로 받아들여졌다. 중간 열교환기를 도입함으로 인해서 증기발생기와 터빈의 방사능 오염에 대한 위험성을 제거했으며, 이로 인해 고급 운전원의 필요성도 없어졌다.

이러한 설계 개념의 단점으로는 원자로 건설시 추가 비용이 소요되며, 또한 열효율의 저하로 인한 발전 단가의 상승이 지적되었다.

NIKA 120은 북부 러시아에서 사용하기 위해 설계된 부동원자로 (floating power unit)로서, 하나의 플랜트에 42MW용량의 원자로 2기가 설치되는 개념이다.



#### 4. 한국

해수 담수화 및 전력 생산을 위한 한국의 열병합 원자로 개발 계획에 대해서도 발표되었다.

한국의 열병합 원자로 개발 계획은 94년부터 시작되었는데, 2005년에 건설 완료를 목표로 하고 있으며, 안전성을 제고하기 위해 압력 용기와 설계 압력이 같은 safeguard vessel을 사용하는 것이 특징이다.

스프레이나 히터 없이 Nitrogen 가스로 1차 계통의 압력을 유지하며, 나선형 전열관을 사용한 관류형 증기발생기를 사용하고 있다.

육각형 구조의 핵연료 집합체를 사용하고 있으며, 미세한 제어가 가능한 CRDM도 개발중에 있다.

새로이 도입된 설계개념에 대한 검증을 위한 광범위한 실험도 수행되고 있다 (그림 3).

#### 5. 인도네시아

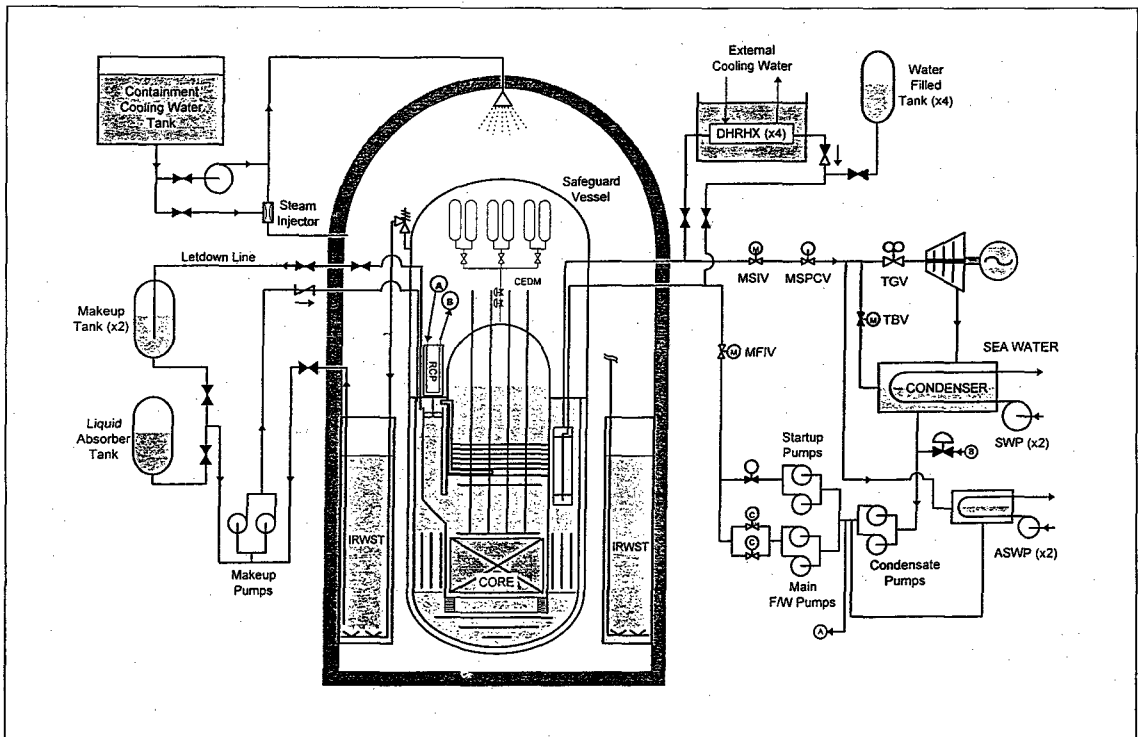
인도네시아는 2019년까지 1,200 MWe급의 원자로를 건설할 계획인데, 일체형 원자로로 개발할 것인가에 대한 가능성을 검토중이며, 수많은 섬에 설치할 수 있는 30MW 용량의 일체형 원자로에 대한 시장성이 있음을

밝혔다.

#### 6. 이탈리아

이탈리아의 ANSALDO 연구소에서는 ABB ATOM사에서 개발된 PIUS원자로 개념에 사용된 density lock의 원리를 이용해 ISIS(Inherently Safe Immersed System)원자로를 개발하고 있는데, 이 원자로에서는 안전 계통의 시동을 위해 제어 계통이나 밸브 등의 움직임이 필요없는, IAEA에서 정의한 category b 수준의 피동형 원자로이다.

발표에 의하면 안전성보다는 경제



(그림 3) 한국형 열병합원자로 계통도

적인 측면에서의 경쟁력이 문제이며, 경제적인 경쟁력을 높이기 위한 작업이 진행중에 있다.

**증기발생기 설계 · 안전성  
유지보수 · 해체**

**1. 증기발생기 설계**

① 일체형 원자로와 관류형 증기발생기 : • 대부분의 상용 원자로에서 사용되고 있는 재순환형 증기발생기의 경우 습분 분리기와 증기 건조기 등이 많은 공간을 요구하고 있고, 또한 증기발생기를 압력용기안에 위치시킬 경우 1차측과 2차측의 냉각수 유로 형태, 유동장의 안전성 문제 때문에 일체형 원자로에서는 관류형 증기발생기의 도입이 일반화되어 있다.

• 전열관은 직관과 나선관을 사용할 수 있으며, 직관형의 경우 지지 구조물의 설계가 용이하다.

• 증기발생기는 CSB(Core Support Barrel)와 압력용기 사이에 위치하게 되며, 방사능에 의한 증기발생기 재질의 손상과 2차측 냉각수의 방사화 등을 고려해 노심과의 거리를 결정해야 한다.

• Crud가 축적되는 것을 방지하기 위해 2차측 냉각수의 화학적 순도를 높여 유지해야 한다.

• 평행 전열관에서의 수력학적 안정을 위해 전열관 입구에 orifice를 설치해야 한다.

② 증기 발생기를 압력용기 안에 위

치시키기 위해서는 단위 부피당 열전달률이 높고, 사용 가능한 공간을 최대한 활용할 수 있는 compact한 증기발생기의 설계가 요구된다.

③ 전열관 재질로는 Titanium, Inconel-690 그리고 Incoloy-800이 추천할만 한데, 특히 Titanium은 Inconel에 비해 열전도 계수가 작지만 다음의 장점을 가지고 있다.

Stainless steel에 비해 선형 열팽창이 40% 정도 작으며, 또한 이로 인해 열적 부하에 민감하지 않고 corrosion에 강한 특성이 있다.

④ 2차측 냉각수가 전열관 안쪽으로 흐르는 설계 개념은 다음의 장점을 가지고 있다.

- 부식 균열에 대한 높은 저항
- 전열관 파단시 상대적으로 안전함
- 전열관과 전열관 plate 사이에 crud가 축적될 확률이 작아짐
- 전열관 파단 사고시 노심의 반응도에 미치는 영향이 작음
- 1차 계통의 압력 강하가 작아짐

**2. Nitrogen의 사고시 영향**

이 이슈가 중요하다는데 의견을 같이 하고 IAEA-sponsored 프로그램을 제안했다.

연구되어야 할 기본 현상은 solution, dissolution 그리고 Nitrogen이 열전달에 미치는 영향 등인데, IAEA에 이미 데이터가 있으므로 사용 가능한 데이터와 후후 생산해야 할 데이터의 정의가 선행되어야 한다.

**3. 일체형 원자로의 안전 및 사고**

① 일체형 원자로는 accident initiator의 수가 작고 원자로의 고유한 안전 개념 때문에 분리형 원자로에 비해 안전성이 향상됐다.

② RELAP/SCDAP/MELCOR 등과 같은 컴퓨터 코드를 일체형 원자로에 적용시 신뢰도와 코드의 수정 및 검증의 필요성에 대한 평가가 이루어져야 한다.

③ 일체형 원자로는 작은 용량과 compactness 때문에 안정성 측면에서 유리한데, 피동 계통이 피동적으로 기동하게 설계함으로 인해서 다중성의 요구 조건이 완화될 수 있다.

④ 열병합 원자로의 경우 1차계통과 2차계통 사이에 설치된 중간 계통의 압력을 1차계통 보다 높게 설계하면 사용자로의 방사능 누출 가능성을 제거할 수 있다.

**4. 운전 및 유지 보수**

일체형 원자로의 경우 compactness, 1차 계통의 배관 계통 제거, 1차 계통에 자연 순환 도입 등으로 인해 고장 확률이 상대적으로 작다.

일체형 원자로의 가동률을 높이기 위해서는 증기발생기의 유지 보수 및 압력용기 내측 표면 검사가 설계 단계에서부터 고려되어야 한다.

압력용기 안쪽에 위치한 기기의 교체는 상대적으로 복잡한데, 주요 기기의 교체 가능성은 설계 단계에서부터 고려되어야 하고, 이러한 문제는 신뢰

도가 높은 기기를 사용함으로써 해서 해소될 수 있다.

### 5. Decommissioning

일체형 원자로의 모든 설계 단계에서 decommissioning에 대한 고려를 해야 한다.

일체형 원자로에서는 노심과 압력용기 사이에 두꺼운 물층이 있으므로 원자로 구조물에 대한 중성자 조사량이 작고, 따라서 준비 작업 후 즉각적인 decommissioning이 가능하다.

#### 일체형 원자로 설계 특성

앞에 언급된 일체형 원자로의 설계 특성을 요약 정리하면 다음과 같다.

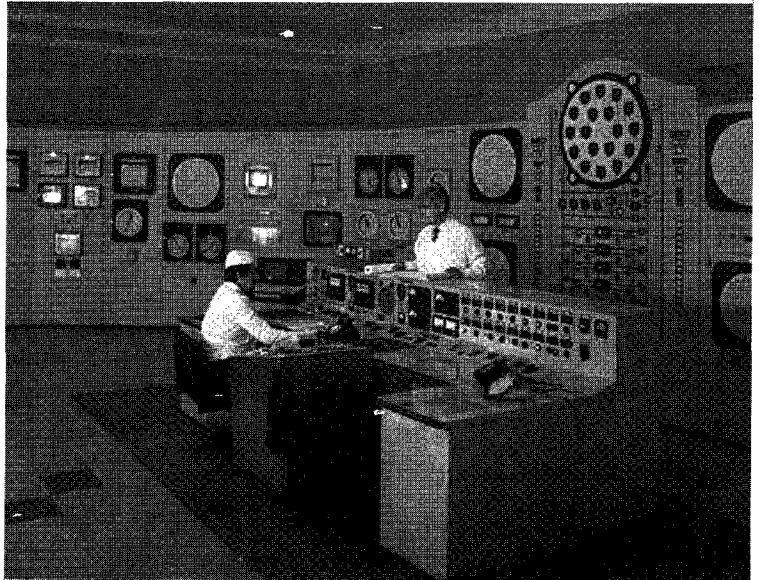
#### 1. 일체형 원자로의 장점

① 방사능으로 오염된 1차 계통 냉각수를 하나의 압력용기안에 국한시킴으로 인해 안전성이 높고, 노심 손상 가능성이 작다.

② Guard vessel 개념을 도입해 잔열 제거와 1차 냉각수 inventory제어를 위한 안전 계통의 단순화가 가능하다.

③ 1차 계통 유로의 단순화로 인해 자연 순환에 의한 잔열 제거가 가능하며, 자연 순환만으로 정상 출력을 낼 수 있는 원자로의 설계가 가능하다.

④ 압력용기에 대한 중성자 조사량의 감소로 인해 압력용기 수명이 길어진다.



상용원자로(1,300MWe) 노심 전체를 모사하여 시험할 수 있는 임계시험시설(러시아)

⑤ 공장 조립 생산 비율이 증가해 공기가 단축되고 품질 보증이 용이하다.

⑥ decommissioning이 간단하고 site의 재사용이 가능하다.

#### 2. 일체형 원자로의 단점

① 원자로의 크기 및 무게가 증가해 제조·조립 및 운반상의 문제가 있을 수 있다.

② 산업체에서 제작 가능한 압력용기의 크기 제한으로 인한 원자로 용량의 제한이 있다. 최대 용량은 700 MWe으로 추정된다.

실제 건설·운전하고 있는 러시아·중국 등의 과학자들의 발표와 그들과의 토론이 관심을 끌었다.

그들의 경험 및 경험에 기초한 개선된 설계 기술의 발표를 통해, 중·소 용량의 신형 가압 경수로 설계는 일체형 원자로 설계 개념이 공학적으로 입증됐고 안전성을 향상시킬 수 있는 진보된 방향이라는 확신을 가질 수 있었다. 또한 세계 각국의 일체형 원자로의 설계 개념에 많은 공통점이 있음을 발견할 수 있었으며, 관심있는 국가간에 국제 공동 연구의 필요성도 제기되었다.

이번 회의를 통해 일체형 원자로의 개발 방향을 파악할 수 있었고, 국내의 신형 원자로 개발 계획에도 많은 참고가 되었다.

#### 결언 및 소감

이번 회의에서는 일체형 원자로를