



# 차세대 원전 설계 기술 선도

## 한전 전력연구원 신형원전개발센터

### 최영상

한전 전력연구원 신형원전개발센터 센터장



의회에서 국가 선도 기술 개발 사업 (G-7 사업)으로 선정하였다.

본 차세대 원전 사업은 원전의 안전성을 대폭 증가시키면서 원전 설비를 단순화하고 이용률을 높임으로써 경제성이 뒤지지 않는 차세대 원전의 표준 상세 설계를 92년부터 2001년까지 개발하는 것을 주요 골자로 하고 있다.

### 신형원전개발센터 설립과 미션

전력연구원 신형원전개발센터는 차세대 원자로 기술 개발 사업이 2단계부터는 많은 인력과 예산이 소요되고, 사업 기간도 10여년 이상 소요될 것에 대비해 96년초 원자력발전연구실 신형로개발팀을 확대하여 발족되었다.

신형원전개발센터는 전력연구원에 속해있는 11개 부서 중의 하나로서 차세대 원전 사업을 전담하는 역할을 담당하고 있다.

현재 신형원전개발센터에는 총괄

관리그룹, 설계종합그룹, 종합분석그룹 등 3개 그룹에 60여명의 연구원들이 차세대 원전 사업에 전담하여 참여하고 있다.

이외에도 차세대 원전에 대한 연구는 원자력발전연구실, 기계공학연구소 및 시스템통신연구소 등 협력소(실)에서 40여명의 연구원들이 분담하여 추진중에 있다.

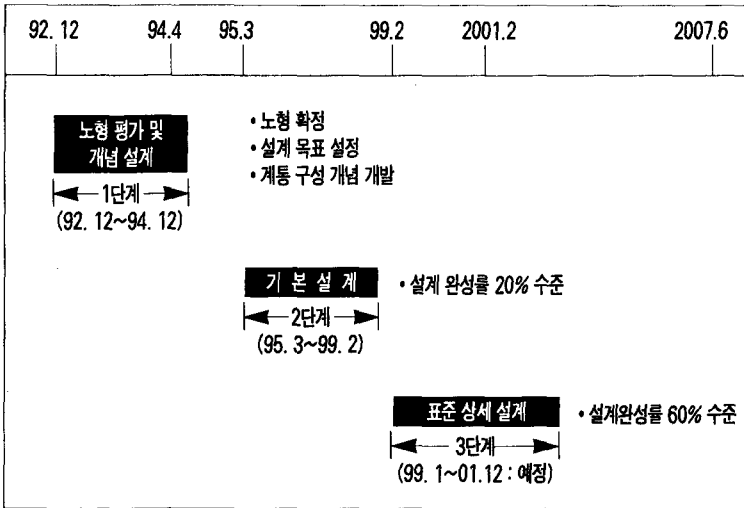
차세대 원전 사업은 발전량 1백30만kW급 차세대형 원자력발전소 건설에 필요한 표준 상세 설계를 개발하는 사업으로, 본 기술 개발 결과는 전원 개발 계획상 2007년과 2008년에 준공되는 차세대 원전 1·2호기에 적용할 계획이다.

92년에 시작하여 94년에 완료된 1단계에서는 차세대 원전의 노형 확정, 설계 목표 선정 및 계통 구성 개념을 개발하였다.

현재 2단계 사업인 기본 설계가 95년부터 진행중인데, 오는 99년 2월 완료할 예정이며 97년말 기준 약

**차**세대 원자로 기술 개발 과제는 종합 과학 시스템 기술 개발 과제로서 신소재, 첨단 계측 제어, 시스템 설계 분야 등 타분야에 대한 기술 개발 수요 창출과 2차적 파급 효과가 매우 큰 국가 기간 사업이라 할 수 있다.

따라서 자원 빈국인 우리 나라에서 안정된 에너지 공급 기반을 구축하기 위해서 가장 유리하다고 판단된 원자력 에너지에 대한 에너지 안보 측면 등을 고려하여 92년 정부 종합과학심



(그림 1) 차세대 원전 기술 개발 단계별 목표

60%의 공정률을 보이고 있다.

2단계에서는 주요 기기에 대한 Design Spec. 작성과 안전성 입증에 충분한 수준의 안전 해석을 수행하여 표준 안전성 분석 보고서(SSAR)를 작성하여 규제 기관에 제출할 계획이다.

이들 2단계 결과물들은 3단계 표준 상세 설계 단계의 입력 자료로 활용될 예정이다.

3단계 사업은 오는 99년 착수되어 2001년까지 제작 및 구매 사양, 시운전 및 검사 사양, 건설 시방서 등을 작성해 차세대 원전의 표준 상세 설계를 완료할 수 있도록 추진할 계획이다.

**기술 개발 목표 및 일정**

**1. 근본적인 안전성 확보**

차세대 원자로는 비상 사고시나 이

상 상태 발생시 안전 장치에 크게 의존하지 않고도 원자로가 건전성을 유지할 수 있도록 충분하게 여유를 갖도록 설계하는 것을 목표로 한다.

물론 기존의 원자로도 설계 여유를 가지고 있지만, 고유 안전성이나 설계 여유보다는 안전 장치에 더 의존하는 방식이다.

이러한 방식은 사고시 안전성을 유지하는 데는 문제가 없으나 사고시 재정적 손실을 방지하는 데는 미흡하다 하겠다.

따라서 차세대 원자로는 충분한 설계 여유, 즉 안전 여유를 확보하여 사고시 일반 대중에 대한 안전 보장은 물론 재정적 손실을 최소한으로 줄일 수 있도록 설계하는 것이다.

이러한 설계 목표를 달성하기 위한 계통으로는 가압기 및 증기발생기의 용량 증대, 정지 냉각 계통 및 격납

건물 살수 계통 펌프의 기능적 상호 교환, 4 Train 안전 주입 계통 및 원자로 직접 주입, 안전 감압 계통, 피동 이차측 응축 계통, 비안전 등 예비 대체 발전기 확보 및 격납 건물 재장전 수조(IRWST) 등을 들 수 있다.

**2. 사고 완화 및 방사선 방출 최소화**

차세대 원자로의 사고 방지 측면뿐만 아니라 사고 발생시에도 사고 완화 및 사고 관리를 개선시키기 위한 독특한 특성을 갖추고 있으며, 기상 및 액상으로 방출되는 방사선의 양을 최소화할 수 있는 근본적인 설계 개념을 채택하였다.

물론 기존의 원자로에서도 다중의 방어 개념이 도입되어 방사선의 환경 누출이 근본적으로 제한되고 있으나 차세대 원자로 설계에서는 이를 더욱 강화하였다.

이러한 계통으로는 이중 격납 건물, 안전 감압 계통, 수소 점화 계통, 격납 건물 살수 계통 등을 들 수 있다.

**3. 경제성 있는 원자로 설계**

원자력발전소는 매우 복잡한 설비임에 틀림없다. 이는 발전 용량의 증가에 따른 설비의 추가와 안전성을 강조한 각종 설비의 추가로 인한 것이다.

이렇게 설비가 추가됨에 따라 안전성을 달성할 수 있으나 경제성은 더

욱 어려워지게 된다.

따라서 한차원 높은 안전성과 경제성을 동시에 확보하기 위해서는 기존의 설비 추진 개념보다는 설계 방식의 재검토를 통한 설비의 단순화·표준화·모듈화 등을 추진함과 동시에 열출력을 대폭 증가(4,000MWth)시켜 설계함으로써 달성 가능하다.

이외에도 표준 상세 설계를 통해 인허가 기간 단축 등 사업 관리 비용의 절감과 체계적인 정보 관리 체계를 개발하여 부대 비용을 줄이는 것도 한 방안이다.

즉 차세대 원전 설계 개발과 병행하여 모든 발전소 설계 정보를 데이터 베이스화하여 체계적으로 관리하고, 3-D CAD를 이용하여 설계 편의성 등을 향상시킴과 동시에 향후 발전소 운영은 물론 폐로시까지의 정보를 종합할 수 있는 정보 관리 체계를 개발하여 건설 관리 및 운영 유지 비용의 절감을 기하고자 하는 것이다.

**4. 축약형 주제어실 설계**

TMI 사고 이후 인간 공학적 요소는 특히 중요시되고 있다.

한국적 인간 공학적 요소를 충분히 반영한 주제어실 설계는 차세대 원자로 설계의 기본 요건이다.

차세대 원전 주제어실 개발에서는 대형 Display Panel 채용, Digital 제어 적용 및 전산화된 운전 지원 계통 채용 등 인간-기계 연계(Man-Machine Interface) 개선에 중점을

〈표 1〉 차세대 원전의 설계 기본 요건

항 목	차세대형 원전
<b>경제성 및 성능 관련</b>	
경제성	- 석탄 대비 20% 우위
설비 용량	- 135만kW급
설계 수명	- 60년
건설 공기	- 48개월
가동률	- 90%
불시 정지	- 연간 0.8 건 미만
부하 추종 운전 능력	- 일일 부하 추종 능력 보유
핵연료 교체 주기	- 18~24개월
계측 제어 방식	- 디지털 방식
작업자 파폭 선량	- 연간 100 man-rem
<b>안전성 관련</b>	
노심 손상 빈도	- 10만년에 1회 미만(저출력, 외부 사건 포함)
격납 건물 손상 빈도	- 100만년에 1회 미만
설계 기준	- DBA + 중대 사고
내진 설계	- 0.3g
열적 여유도	- 10~15%
운전원 조치 여유	- 30분
전원 상실시 대처 여유	- 8시간
격납 건물	- 이중 격납 건물
비상 노심 냉각 방식	- 4 Trains 직접 주입
SG 세관 봉쇄 여유도	- 10% 여유도(Inconel 690)

두어 다중 워크스테이션을 채택하여 개발중에 있다.

이러한 설계 목표를 달성하기 위해 차세대 원자로 기술 개발은 10여년에 걸쳐 3단계로 나누어 진행된다(그림 1).

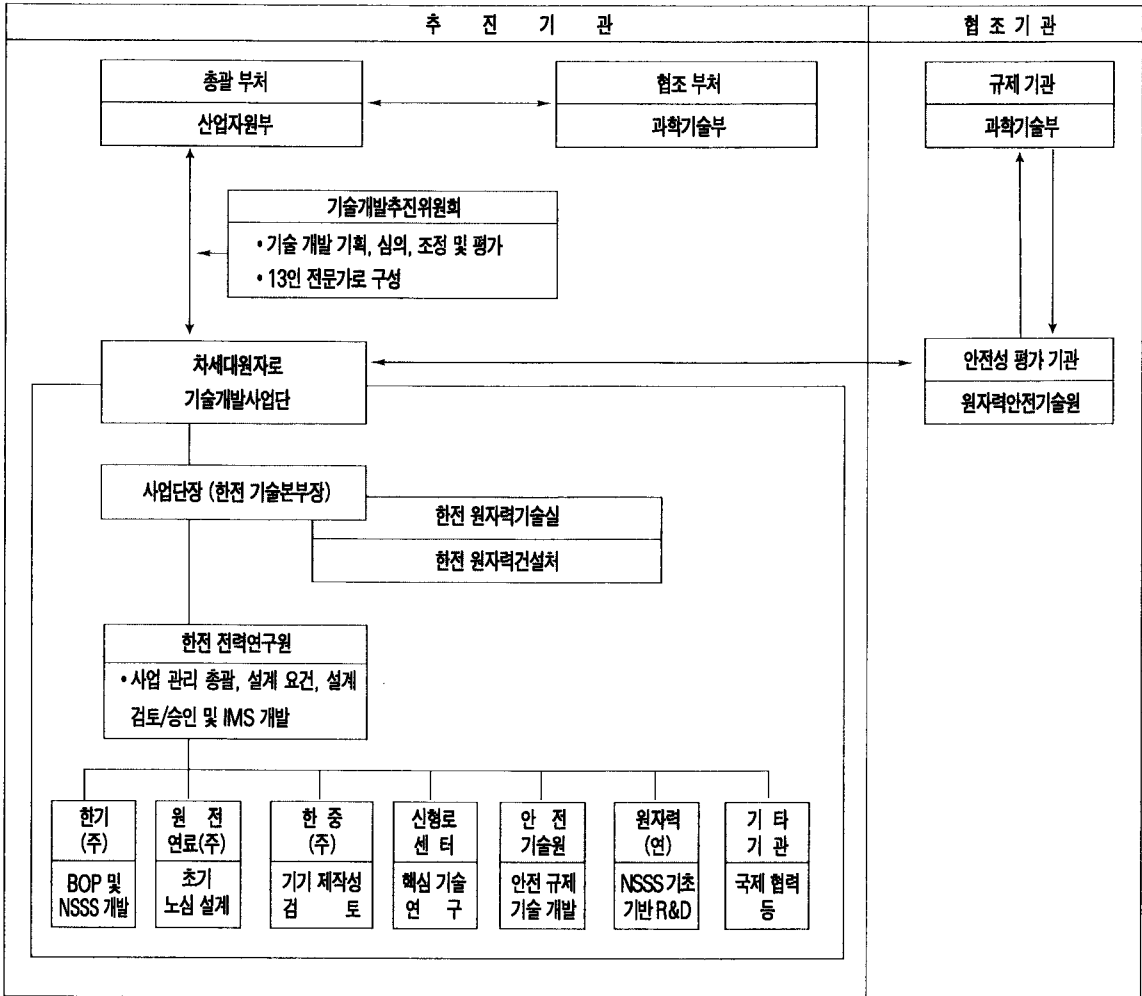
**설계 기본 요건 개발 및 계통 구성**

1단계 연구 개발의 주요 성과는 우리 실정에 적합한 한국 고유 특성을

갖는 차세대 원자로형(Evolutionary Type)을 결정하였고, 해외 신형 원자로 등의 개발 동향을 반영하여 설계 기본 요건 및 설계 개념을 확정하였다.

〈표 1〉은 설계 기본 요건 중 경제성 및 안전성 관련 주요 요건을 정리한 것이다.

1단계에서 개발된 차세대 원전의 계통 구성 개념을 정리하면 다음과 같다.



〈그림 2〉 차세대 원자로 기술 개발 추진 체계

가. 핵연료/노심

- 고연소도 핵연료 사용 (현행 45,000MWD/MTU에서 60,000MWD/MTU 정도로 증가)
- 미래의 여건에 대비 Full Core MOX 성능 보유

나. Nuclear Island (NI)

- 표준 원전(KSNP)의 확대 발전
- Passive Design Feature(PDF) 및 이중 격납 건물 등 안전성 강화
- Turbine Island (TI)
  - 울진 3·4호기의 TI를 근간으로 설계 개선
  - Envelope 개념의 설계 개발

라. MMI (Man Machine Interface)

- Compact Work Station을 활용한 Digital I&C System 채택 설계

마. 발전소 건물 및 기기 배치 (GA)

- Power Block은 격납 건물, 보조

건물, 터빈 건물, 출입 통제 건물로 구성

- 선행 호기 개선 요구 사항 반영
- 모든 지반 특성(Rock and Soil)을 포괄토록 설계

**기술 개발 추진 체계**

**1. G-7 프로젝트로 추진**

차세대 원자로 기술 개발은 국가 선도 기술 개발 사업(G-7 사업)으로 선정하여 기술 개발을 추진중에 있다.

원활한 기술 개발 사업을 추진하기 위해 산·학·연·관의 전문 협동 연구 기관이 차세대 원자로 기술개발사업단을 구성하여 추진중에 있는 차세대 원자로 기술 개발 사업 체계는 <그림 2>와 같다.

**2. 사업자 중심으로 추진**

차세대 기술 개발의 특징 중의 하나가 사업자 위주의 연구 개발(User Friendly Design)이다.

이는 지금까지의 원전 설계가 Vendor나 A/E 위주로 수행됨에 따라 운전 및 보수 경험이 설계에 충분히 반영되지 못했다는 단점을 들 수 있다.

이런 운전 및 보수 경험을 반영하기 위해서는 사업자 위주의 설계 개발이 필요하다는 것이다.

즉 미국 전력중앙연구소(EPRI)나 프랑스전력공사(EdF)의 예에서 보

는 바와 같이 개발 주체가 사업자인 것이 현재의 추세이다.

따라서 국내에서도 사업자인 한전을 중심으로 한국전력기술(주), 한국원자력연구소, 한국중공업(주), 한국원전연료(주), 신형로연구센터 및 한국원자력안전기술원 등 국내 산업체, 학교 및 연구소 등이 협동 연구 형태로 차세대 원자로 기술 개발 사업을 추진중에 있다.

한편 차세대 원전 설계 결과와 병행하여 차세대원전 설계에 직접 적용할 수 있는 설계 요건을 병행하여 개발중에 있다.

이 설계 요건은 향후 차세대 원전의 설계 Spec.으로서 중요한 자리매김을 할 것으로 여겨진다.

또한 향후 차세대 원전의 해의 진출에도 중요한 밑거름이 될 것으로 판단된다.

이러한 이유 등이 설계 요건을 2단계 기간중에 설계 개발과 병행하여 개발하는 중요한 사유라 할 수 있다.

한편 차세대 표준 설계 과정에서 보완적으로 개발이 필요한 분야에 대해서 핵심 기술 연구를 수행해 이 연구 결과를 설계에 반영(Feedback)하도록 추진하고 있다.

또한 지금까지의 기존 원전 설계는 설계 과정에서 발생하는 각종 기술 개발 위주의 설계라기보다는, 원전을 건설하기 위한 설계 결과물 위주의 설계가 이루어짐으로 인해서 설계 과정에서 발생하는 많은 설계 정보가

사장되게 되었고, 또한 필요한 때에 설계 정보를 찾아볼 수 없는 경우가 많이 발생되었다.

따라서 이러한 설계 과정중에 발생하는 각종 설계 정보를 체계적으로 관리하기 위한 정보 관리 체계(IMS) 개발 과제를 차세대 원자로 기술 개발 과제와 병행하여 추진하는 것도 User Friendly Design의 한 단면이라 할 수 있다.

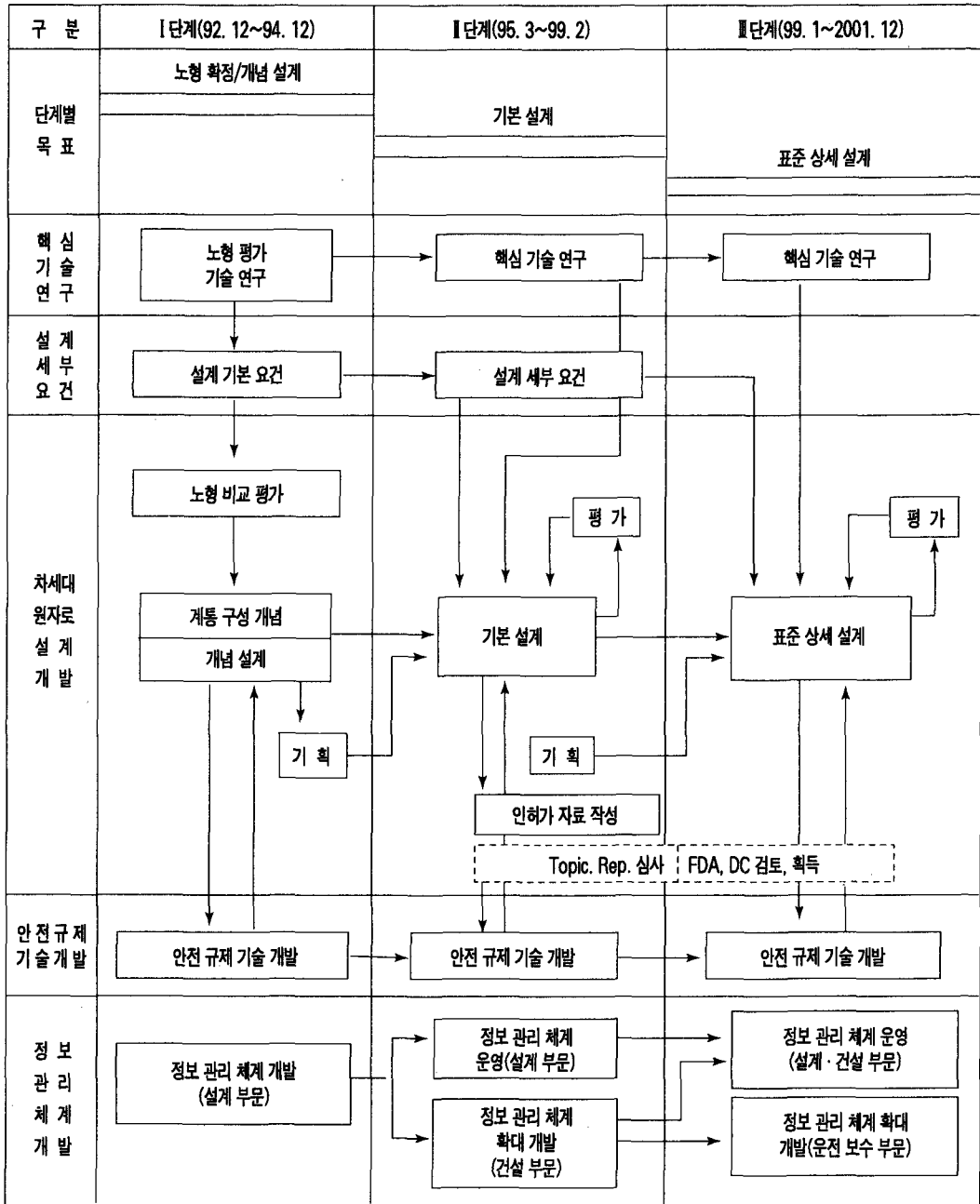
**3. 인허가 규제 제도 개선 병행 추진**

차세대 원전 개발 사업은 새로운 안전 개념을 도입하여 획기적으로 안전성을 높이는 것을 목표로 차세대 원전을 개발중에 있다.

따라서 설계 개발에서 추구해야 할 안전 목표와 원칙을 설정하고 설계에 적용해야 할 안전 규제 요건을 확정하는 과제도 동시에 수행할 필요가 있어 안전 규제 기술을 차세대 원자로 기술 개발에 포함하여 추진중에 있다.

이와 같이 국가 차원의 안전 규제 제도를 병행 연구 개발한다는 것이 G-7 과제로 선정하는 데 중요한 배경이 되었다.

따라서 차세대 원자로 기술 개발 사업을 추진함에 있어 안전 규제 기술 개발에서는 안전 목표 및 원칙의 설정과 안전 규제 요건 및 심사 지침, 인허가 절차를 개선함은 물론, 기술 개발을 병행하여 달라지는 안전 규제



(그림 3) 차세대 원자로 기술 개발 과제 추진 일정

기준과 제도에 미리 대처함으로써 안전 규제 기준과 기술 개발이 조화된 안전 규제 제도 정착 등의 조기 정착이 예상된다 하겠다.

**과제 구성 체계**

차세대 원전 개발 사업의 단계별 기술 개발 체계는 <그림 3>과 같다.

2단계에서 추진중에 있는 과제는 핵심 기술 연구, 설계 세부 요건 개발, 차세대 원자로 설계 개발, 정보 관리 체계 개발 및 안전 규제 기술 개발 등 5개 중과제로 나누어진다(표2).

**차세대 원전의 GA 개발**

발전소의 건물 및 기기 배치 설계는 발전소의 안전성은 물론, 이용률 향상을 위한 운전성·보수성·접근성·경제성 등과 밀접한 관련이 있을 뿐만 아니라, 운전 및 보수 요원의 방사선 피폭 저감 등 발전소 전반에 걸쳐 그 미치는 영향이 지대한 것이 그 특징이라 할 수 있다.

차세대 원전은 특정 부지가 아닌 어느 부지에서나 건설할 수 있는 포괄 부지 특성을 고려한 표준 설계를 개발중이다.

또한 건물 기초는 격납 건물과 보조 건물을 공동으로 받쳐주는 공동 매트 구조로 설계하였으며, 격납 건물은 이중 격납 건물, IRWST와 증기발생기의 일체식 교체 (One Piece

(표 2) 차세대 원자로 기술 개발(III) 과제 구성 및 개발 목표

중과제명	개발 목표	주요 참여 기관
핵심 기술 연구	차세대 원자로 설계 기술 개발에 보완적으로 필요한 핵심 기술 연구 개발	한전/CARR
설계 세부 요건 개발	차세대 원전 설계 개발에 필요한 설계 요건(URD) 작성	한전/KOPEC
차세대 원자로 설계 개발	주요 기기에 대한 Design Spec. 작성 및 안전성 인증이 충분한 수준의 안전 해석 수행	한전/각 기관
정보 관리 체계 개발	차세대 원전 기본 설계 단계에 필요한 정보 관리(DB, 네트워크 구축 및 연계 등) 체계 개발	한전/KOPEC
안전 규제 기술 개발	안전 규제 지침 및 인허가 절차 제도 개선과 KNGR 설계 결과물 인허가성 검토	한전/KINS

Removal)가 가능하도록 설계하였다.

보조 건물은 격납 건물을 둘러싸고 있는 Wrap-around 배치와 사분할 배치(Quadrant) 형태로 핵연료 건물과 PSCS를 포함하여 설계를 추진 중이다.

한편 폐기물 처리 건물을 2호기 공용으로 사용하고 52 inch Turbine Blade 및 방사형의 터빈 건물을 채택하여 설계하였다.

**종합 분석 평가 결과**

차세대 원전 기본 설계 기간 중 실시한 안전성 예비 평가 결과 노심 손상 빈도(Core Damage Frequency : CDF)는 피동 이차 응축 계통(PSCS), 격납 건물 재장전 수조(IRWST), 원자로 직접 안전 주입(DVI) 등을 채택하여 설계를 추진함에 따라  $7.9 \times 10^{-7}$ 로 크게 개선되었다.

이 결과는 기존 원전의 노심 손상

빈도  $8.4 \times 10^{-6}$ 에 비해 10배 정도 개선되었으며, 차세대 원전의 설계 기본 요건  $1.0 \times 10^{-5}$ 를 충분히 만족시키는 것으로 나타났다.

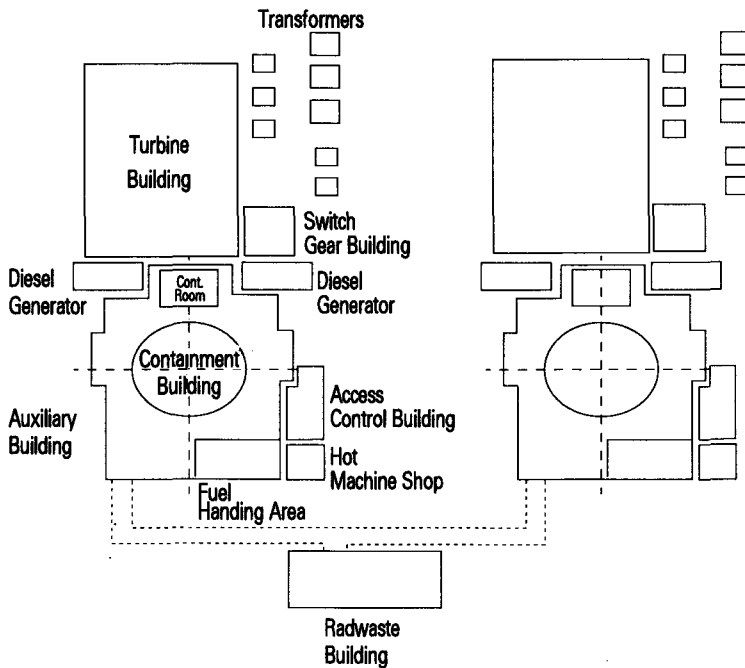
또한 해외 개량형 원전인 System 80+의 CDF  $1.7 \times 10^{-6}$ 에 비해서도 훨씬 양호하게 나타나 해외 신형 원전과도 충분히 경쟁 가능한 결과를 보여주고 있다.

경제성 예비 평가 결과 차세대 원전 1·2호기는 석탄 화력 500MWe 대비 12%, 석탄 화력 800MWe 대비 3% 이상의 비교 우위를 갖는 것으로 나타났다.

또한 차세대 원전 Nth호기(통상 5·6호기)는 석탄 화력 500MWe 대비 24%, 석탄 화력 800MWe 대비 17% 이상의 경쟁력 우위를 갖는 것으로 분석되었다.

이러한 점에 비추어 차세대 원전은 타전원과 비교하여 확실한 경쟁 우위를 갖고 있다고 판단된다.

한편 차세대 원전은 국내 1,000MW



(그림 4) 차세대 원자력 발전소 건물 배치 형태

년부터 99년 2월까지 주요 기기에 대한 설계 명세서(Design Spec.)와 안전 해석을 위한 2단계 기본 설계 업무를 진행중에 있다.

현재 2단계 3차년도 설계 개발이 진행중에 있는데, 97년말 기준 2단계 업무의 약 60%의 설계 공정을 보이고 있다.

2단계 기간중 차세대 원자로에 대해 실시한 예비 안전성 및 경제성에 대한 평가 결과, 안전성 측면에서 해외 신형 원전과 충분히 경쟁 가능한 수준으로 나타났으며, 경제성 측면에서는 타원원(석탄 화력) 대비 경제성 우위가 확실한 것으로 나타났다.

따라서 99년 2월 기본 설계를 완료하게 되면 차세대 원전의 실체를 확인할 수 있을 것이며, 한국의 차세대 원전에 관한 구체적 자료가 제시될 수 있을 것으로 예상된다.

한편 3단계 표준 상세 설계 완료시 원자력 기술에서 국가간 경쟁력 우위를 점하게 됨에 따라 세계 시장이 개방되는 WTO 체제하에서 국내 원전 산업을 보호할 수 있는 기술 선진화가 구축되어, 원자력 산업이 수출 산업으로 육성 가능한 수준에 도달할 것으로 여겨진다.

또한 에너지 발전원별로 균형을 갖추게 되어 200년 이후 예상되는 전력 수요에 안정적으로 대처할 수 있게 되며 에너지 안보 차원에서 그 기대 효과가 크다 하겠다. ☼

표준 원전과의 경제성 비교에서도 한 단계 높은 결과를 보여주고 있다.

특히 차세대 원전은 공동 매트와 이중 격납 건물 용기의 채택으로 인한 건설 절대 물량의 증가에도 불구하고, MW당 물량은 오히려 감소하는 것으로 분석되었으며, 공정에 대한 영향 역시 거의 없는 것으로 분석되었다.

한편 가시와자키 가리와 3호기 및 6호기 등 일본의 신형 원전과의 비교에서도 건물 체적 및 물량 측면에서 거의 대등한 수준으로 나타나 해외 신형 원전과도 경제성 측면에서 대등한 결과를 보여주고 있다.

한편 가동성 예비 평가도 89%로

나타나 90~96년 국내 원전의 실적 85%를 훨씬 웃도는 것으로 나타났다.

중사자 피폭은  $90 \text{ man} \cdot \text{rem}/\text{unit} \cdot \text{yr}$ 로 나타나 설계 기본 요건  $100 \text{ man} \cdot \text{rem}/\text{unit} \cdot \text{yr}$ 를 만족시키는 것으로 나타났다.

기체·액체 및 고체 방사물 발생량도 설계 기본 요건을 만족시키는 것으로 나타나는 양호한 결과로 분석되었다.

이상에서 살펴본 바와 같이 차세대 원자로 기술 개발 사업은 먼저 1단계로서 94년까지 국내 실정에 적합하면서 한국 고유 특성을 갖는 노형 선정과 계통 구성 개념을 설정하였고, 95