

장 문 희 실장

〈 특 집 〉 차세대 원자로의 기술개발

핵증기공급계통(NSSS)개발

안전성의 획기적 向上과 경제성 우위  
확보가 우선적인 목표

장 문 희

한국원자력연구소 차세대원자로 기술개발종합및총괄분야책임자(실장)

## 기기 및 계통의 단순화, 계통간의 간섭·의존도 최소화 천이사고 대처위해 원자로 안전상태 유지, 완화 기능강화 등에 중점

### I. 개 요

원자로의 안전성 확보는 원자력 발전소에 의한 청정에너지의 안정적 공급은 물론 나아가 환경의 보존과 유지에 직결된다. 따라서 지금까지 원자로의 안전성 확보에 원자로 개발·설계

의 모든 주안점이 주어져 왔으며 실제 원자로는 그 목표에 부응해 왔다.

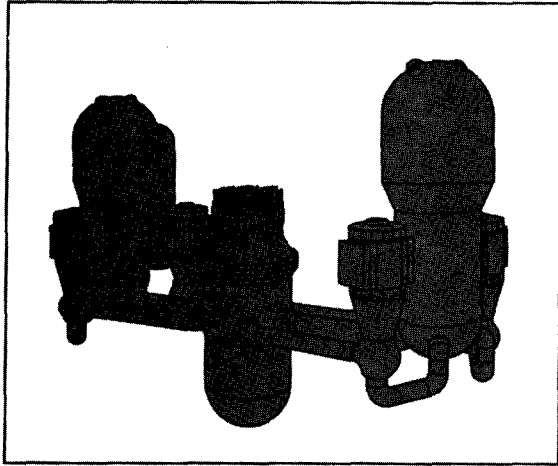
그러나 세계의 양대 원전사고(TMI 및 체르노빌) 이후 원자로의 안전성 향상은 보다 부각된 공통인식이 되었으며 이에 각국의 차세대원자로 개발은 자연스럽게 안전성 제고에 중점을 두고 있다.

우리 나라의 차세대원자로도 이와 동일한 관점에서 기존의 원자로에 비

해 안전성 향상과 타 발전원에 비해 제고된 경제성 향상을 목표로 개발하고 있다.

즉, 원자로의 중대사고와 관련된 노심 손상 방지와 노심 손상 빈도의 저감을 실현하여 안전성을 보다 높이고 원전의 가동률 향상, 핵연료 이용률 향상, 성능제고 등을 통하여 경제성 향상을 목표로 개발하고 있는 것이다.

특히 안전성 향상의 주요관점은 중



〈미국과 독일의 합작개발 차세대원자로 Sys. 80+의 개략도〉

대사고의 방지를 위한 대처능력의 강화, 즉 원자로 운전중대사고로 발전·진행할 수도 있는 각종 천이사고(transient accidents)에 적절하게 대처하여 원자로를 안정한 상태로 유지하거나 중대사고시 이를 완화시킬 수 있는 기능을 강화하는 것이다.

이를 위하여 핵증기 공급계통(NSSS)의 개발은 중대사고 대처능력 확보 측면에서 기기 및 계통의 단순화와 기능을 분리하여 계통간의 간섭 또는 의존도를 최소화 시켜 기능을 제고시키고, 설계 여유도 증대를 통하여 원전의 과도상태 대응능력을 향상시키며, 기존의 심층 방호개념을 강화한 안전설계 개념을 도입한 것이다.

이와 같은 관점에서 개발·설계되는 우리 나라의 차세대원자로는 지금까지의 기존 원전의 운전 및 설계 경험을 바탕으로 입증된 기술에 의해 개

발하고 신기술의 적용을 확대하여 인허가 안전화를 도모하고자 한다.

다음에서 우리의 차세대원자로에 대한 설계개발 개념을 핵연료 및 노심, 각종 NSSS 계통 측면에서 살펴보고자 한다.

## II. 핵증기 공급계통(NSSS) 설계개념

### 1. 핵연료 및 노심

원자로심은 열생산을 위한 핵연료와 원자로의 제어를 위한 제어계통 그리고 각종 원자로심 내부구조물로 구성된다.

차세대원자로의 노심은 기존원전 대비 용량이 약 30% 이상 증대된 열

출력 3914MWt을 생산하기 위하여 241개의 핵연료 집합체가 장전되며 핵연료 이용률 향상과 원전의 가동률 향상 측면에서 18개월 또는 24개월의 운전주기를 가질 수 있도록 설계된다.

또한, 향후 원전이 기저부하전담 역할에서 나아가 부하추종 운전 수행에 대비하여 출력제어 운전능력을 보다 향상시켰다.

안전성 및 경제성 측면에서 기존 원자로에 비하여 차세대원자로의 노심 설계개념의 특성을 요약하여 살펴보면 다음과 같다.

- 열적여유도의 15% 이상 확보
- 설계여유도(또는 운전여유도) 향상에 기여하는 고온관 온도 감소
- SLB 사고시 재임계 도달방지를 위한 정지여유도 증대
- 핵연료 이용률 향상과 원전 가동률 향상을 위한 장주기 운전(18개월 이상)
- 고연소도 핵연료 사용
- 천이사고시 자체 흡수능력 제고를 위한 노심 출력밀도 감소
- 약흡수봉(gray rod) 사용을 통한 출력제어 운전능력 제고 등이다.

한편 핵연료는 울진 3, 4호기와 동일한 16x16 표준형을 바탕으로 설계 개선을 수행하여 장주기 운전과 핵연료 이용률 향상을 위하여 고연소도 핵연료를 개발하여 사용한다.

원로심은 운전중 상태에서 항상 감

## 특집 : 次世代원자로의 기술개발

시 보호되는 특성을 갖추고 있어서 운전자의 원전 운전부담을 감소시키게 되어있다.

또한 노심의 출력분포와 반응은 제어에 사용되는 독물질로서는  $UO_2$  핵연료와 혼합되어 장전되는 독봉의 개념으로 기존의 Gd 사용과 아울러 Gd에 비하여 감속계 온도계수 제어효과가 향상된 것으로 알려진 Erbium 사용도 고려되고 있다.

표 1은 차세대원자로(次世代原子爐) 노심 및 핵연료의 주요 특성적인 사항을 보여준다.

## 2. 원자로 냉각재 계통

원자로 냉각재 계통은 원자로용기,

주배관, 가압기, 냉각재 펌프, 증기발생기 등 1차계통 냉각재가 순환되는 폐회로 계통으로 구성된다.

원자로 냉각재 계통은 다중보호개념에 의거 사고정지 능력을 증대시키고 노심 손상 방지 또는 발생된 사고의 완화능력(緩和能力)을 향상시키는 개념을 반영하고 있으며, 이를 위하여 계통의 개념은 기본적으로 계통의 단순화, 설계여유도 증대, 감시능력 향상, 및 고유안전성 증대를 포함하게 된다.

원자로 압력용기(原子爐壓力容器)는 원자로 냉각재, 노심 그리고 핵분열 생성물을 보유한 고건전성 압력경계를 이루면서 방사성 핵분열 생성물 누출에 대한 이차방벽의 주요한 역할

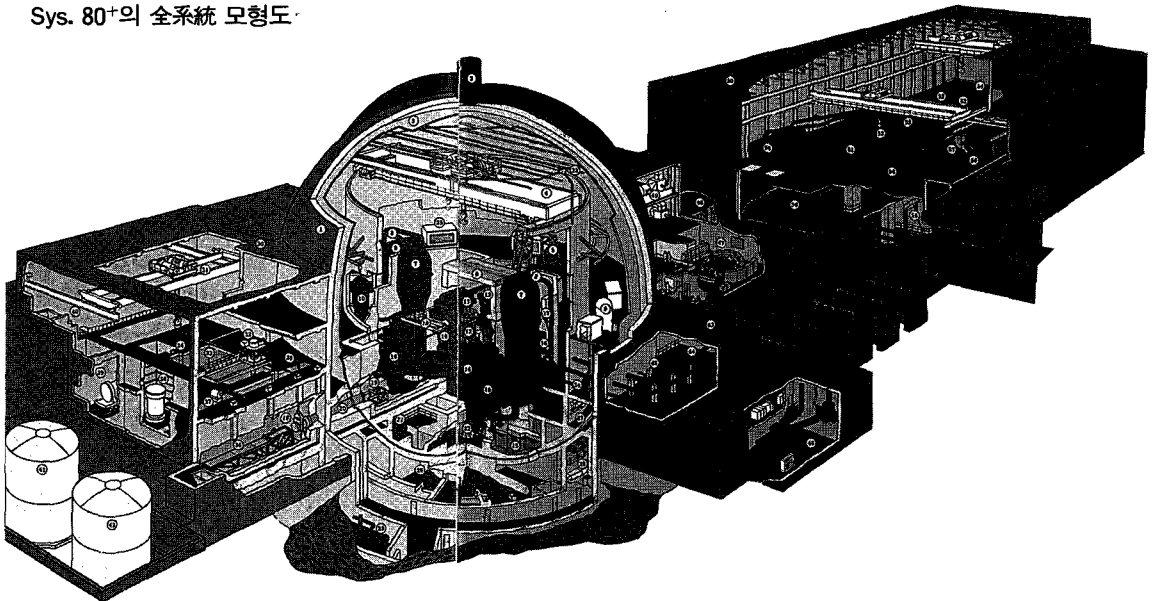
을 담당한다.

기존원전(울진 3, 4호기)에 대비하여 주요한 차이가 나는 설계개념의 특성은 다음과 같다.

- 60년 수명설계
- 저합금강(모재의 Cu, Ni, P, S 함량 제한) 사용으로 원자로용기 취성(脆性 embrittlement) 파손인성 개선
- 압력용기계의 중성자 조사량 감소( $\leq 6.2 \times 10^{19}$  nvt)

증기발생기는 고온의 일차측 냉각재의 열을 받아 이차계통의 증기를 생산하며 원자로냉각재의 압력경계로서 원자로 냉각재 계통과 증기발생기 이차측 사이의 경계 또는 방벽을 제공한다.

Sys. 80+의 全系統 모형도



증기발생기는 또한 발전소 정지시 잔열제거 계통이 운전될 수 있는 조건까지 주급수 또는 보조급수를 사용하여 원자로냉각재로 부터 이송되는 잔열 또는 붕괴열 제거의 일차적 수단을 제공하는 안전계통의 역할을 수행하게 된다.

안전성 향상 관점이 보다 강조된 차세대원자로의 증기발생기 설계개념 중 기존 원전에 비하여 차이가 나는 특성은 다음과 같다.

- 세관봉쇄 여유도를 10%까지 증가
- 이차측 용량을 증가시켜 이차측 급수의 Boil Dry 시간을 약 50% 증가
- 세관의 부식저항을 높이기 위하여 세관재질을 Inc-690으로 사용
- 보수·유지성을 향상시키기 위한 Manway 크기의 증가 등이다.

가압기는 일차계통 고온관에 연결되어 원전의 정상운전 또는 과도상태시 원자로 냉각재 계통의 압력과 수위를 유지시켜 원자로의 안정화 역할을 담당하게 된다.

특히 일차계통의 압력변화가 큰 과도상태시 가압기 자체의 능력으로 과압 과도상태를 수용할 수 있도록 가압기 체적을 동일 용량 원자로에 비하여 약 30% 이상 증가시켰으며, 유동저항을 최소화 하고 열성충화를 방지할 수 있는 밀림관 설계개념이 채택되었다.

또한 원자로 정지사고시 히터에 의

한 압력조절이 가능한 기능을 부여한 설계개념으로 채택하였다.

### 3. 안전계통

안전계통은 원자로 및 원자력발전소의 안전성 확보와 안전성 향상에 절대적으로 기여하는 가장 주요한 계통이며 모든 원자로 설계개발 및 설계개념의 개선은 안전계통 개선에 집중되고 있다.

안전계통은 원자력발전소의 과도상태나 천이사고 또 중대사고의 발전 가능성 등 이상상태 발생시에 원전의 안정화(安定化)를 유지하기 위해 절대적으로 필요한 계통이며 따라서 계통의 신뢰성과 성능이 무엇보다도 강조된다.

차세대원자로의 안전계통은 특히 기존원전에서 완벽을 기하지 못했다고 비판되어온 중대사고에 대한 대처능력을 확보하고 향상시키는 설계개념에 중점을 두고 있으며, 계통의 기능에 따라 안전계통은 크게 안전주입계통, 안전감압계통, 정지냉각계통 및 비상급수계통으로 구성된다.

안전계통과 관련하여 차세대원자로에서 채택하고 있는 가장 특징적인 설계개념은 격납용기내 재장전용수조(IRWST)이다.

이는 향후 국내의 인·허가시 중대사고 목표가 강화된 것을 대비한 개념으로서 기존 원전의 격납용기 외부에 설치된 재장전 용수조를 격납용기 내

부에 설치하여 각종 안전계통에 필요한 급수원이 된다.

이의 장점으로는 기존 원전개념에 대하여 비상시 노심냉각을 위한 냉각수원의 변경 필요성을 제거하여 동일수원과 지속적인 냉각수 공급이 이루어질 수 있다는 것이다. 이것은 또한 노심손상 빈도의 감소 및 격납용기의 성능향상에 직접적으로 기여하게 된다.

IRWST의 주요기능을 요약하면 다음과 같다.

- 재장전 운전을 위한 봉산수 공급
- 안전주입계통, 격납용기 살수계통, Cavity Flooding 계통 등의 안전등급 봉산수 공급
- 체적제어 탱크 저수위 도달시 충전펌프의 수원
- 계통에서 누설되는 냉각수 수집
- 감압계통으로 부터 방출되는 일차냉각재의 열침원 기능제공

안전주입계통은 LOCA 등 냉각재 유실시 노심냉각재(爐心冷却材) 재고량을 확보하여 노심용융(爐心熔融)사고를 방지하기 위해 일차계통의 비상냉각수 주입기능을 담당하며 안전주입탱크, 안전주입 펌프 및 관련배관으로 구성된다.

차세대원자로 안전주입계통 설계개념의 특성적인 요소를 살펴보면 다음과 같다.

- 계통의 신뢰성과 성능보장을 위해 4개의 독립적인 Mechanical

## 특집 : 次世代원자로의 기술개발

### Train 설치

- 기존의 저온관 주입방식을 원자로 압력용기에 직접주입(DVI)
- 안전주입 운전시 IRWST에서 격납용기 sump로 전환운전 배제
- 안전주입 Train에 설치되어 있는 공동헤더의 제거

- 안전주입 기능과 잔열제거 기능을 분리하여 계통의 신뢰성과 기능을 강화
- 저압 안전주입계통의 제거
- 안전주입탱크(축압기)에 피동개념 사용 유량조절용 Fluidic Device 설치



〈Sys. 80\*의 NSSS를 건조중인 기술자들〉

안전감압계통(安全減壓系統)은 발전소의 과도상태 또는 급수 불능사고에 대처하여 비상냉각수 주입을 원활히 하기 위한 일차계통의 감압기능을 담당한다.

차세대원자로의 안전감압계통의 주요 기능은 기존원전의 감압계통과 유사하나 노심냉각 능력을 향상시켜 노심용융 빈도를 감소시키고 중대사고 대처능력을 향상시키기 위하여

- 가압기 살수계통 이용 불능시 원자로냉각재 계통(RCS)의 압력감소
- 급수 완전상실 사고시 Feed and Bleed 운전을 위한 RCS 감압
- 중대사고 발생시 RCS 감압능력 제공
- 가압기 및 원자로 상부헤드의 비응축성 가스 제거 등 기능을 강화하였으며 IRWST 개념채택과 연계하여 설비를 최적화 하였다.

특히 차세대원자로의 안전감압계통은 사고시 RCS 감압기능을 갖는 SDS 설치와 SDS의 Bleed Path가 IRWST로 연결되어 기존원전에서 격납용기 내부로 방출되는 Bleed Path와는 다른 개념을 채택하고 있으므로 중대사고 대처능력이 보다 향상된 것이다.

정지냉각계통은 원자로의 정상(正常)정지, 비상(非常)정지, 핵연료 재장전 및 보수유지를 위한 냉각기능을 수행한다.

정지냉각계통은 원자로의 정상(正常)정지, 비상(非常)정지, 핵연료 재장전 및 보수유지를 위한 냉각기능을 수행한다.

특히 증기발생기(NSSS)에 의한 일차계의 잔열 및 붕괴열 제거기능을 이루어질 수 없는 온도영역의 경우에서 일차계의 냉각기능을 수행하게 된다.

차세대원자로 정지냉각계통은 기존 원전에 비해 Intersystem LOCA 가능성을 제거하고 장기적 냉각성을 증진시켜 노심용융빈도를 감소시킬 수 있도록 계통의 신뢰성을 보다 증대(增大)시키기 위한 설계개념(設計概念)을 도입하였으며 주요한 특성은 다음과 같다.

- 설계압력증대(900Psia)로 냉각기간중 운전원 역할을 단순화
- 원자로 비상시 잔열제거를 위한 잔열제거 기능을 강화
- 정지냉각계통 펌프와 격납용기 살수계통 펌프를 교차 연결하여 상호기능을 보완
- 기존원전의 격납용기 살수계통 열교환기 공유에서 별도 열교환기 설치
- Thermal Relief 밸브를 체크밸브로 교체하여 신뢰도 향상

비상급수계통은 증기발생기 주급수계통 기능의 상실로 일차계열 열제거가 불가능할 경우 증기발생기에 비상급수를 공급하여 이차측 잔열제거 기능을 확보하여 정지냉각계통 작동조건이 만족될 때까지 원자로냉각재 계통의 감압 및 냉각을 수행하는 계통이다.

궁극적으로 이차측 잔열제거 능력

향상으로 노심손상방지 능력을 향상시키는데 기여하는 비상급수 계통의 설계개념 특성으로서

- 비상급수계통과 기동급수계통을 분리하여 계통의 신뢰도 향상
- 비상급수계통의 트레인간 분리로 다중성 확보
- 안전등급 전용급수 탱크 설치
- 2대(100%)의 모터 구동펌프와 2대(100%)의 터빈 구동펌프 사용
- 유량제어용 Cavitating Venturi 사용 등을 들 수 있다.

표 3은 차세대원자로 안전계통 설계개념의 주요특성 및 재원을 보여준다.

#### 4. 화학 및 체적 제어계통

화학 및 체적제어계통(CVCS)은 보조계통으로 분류되며 계통의 주요기능은 다음과 같다.

- 정상운전, 출력변화, 기동 및 중지중 원자로냉각재 계통의 체적유지를 위한 냉각재량 조절
- 정상운전 및 원자로 정지시 냉각재 내의 붕소농도 조절
- 가압기 감압을 위한 보조살수 제공
- 냉각재의 탈염 및 여과 등 정화 기능 제공 등

화학 및 체적제어계통은 크게 충전 펌프 및 추출수 계통으로 나뉘어지며 계통의 신뢰성과 기능의 제고를 위하

여 차세대원자로에서 채택한 계통의 주요 설계개념은

- CVCS의 안전기능을 제거, 비안전 등급화하여 CVCS를 사고완화와 안전정지 수단으로 사용하지 않음.
- 기존원전(울진 3, 4호기)은 3대의 왕복동 펌프로 충전하나 이는 압력변동에 따른 피동현상을 유발시키므로 이의 근본적인 제거를 위해 3대의 비안전등급 원심형 다단펌프를 사용하며 정상 운전시는 1대만 사용하여 최소 요구 유량 200gpm 공급
- 추출수 계통에서는 추출수 감압으로 오리피스스를 사용하며 추출수 열교환기를 오리피스스 전단에 설치하여 열교환 효과를 제고하는 등으로 나타내고 있다.

이와 같은 특성을 지니는 CVCS 설계개념을 채택함으로써 상승하는 효과는 오작동 안전주입 신호발생으로 인한 발전소 이용률 저하요인을 제거하고 있으며 왕복동 펌프가 유발하는 펌프진동으로 인한 사고를 감소시킬 수 있게 되었다.

### Ⅲ. 인간기계연계시스템(MMIS) 설계개념

MMIS는 원자력 발전소의 감시, 제어 및 보호기능을 수행하는 계통으로써 크게 계측제어(I&C)계통과 제어실

(MMI)로 구성된다.

차세대 원전 MMIS는 한국규제요건, K-URD 및 EPRI URD CH. 10 MMIS 요건을 만족하도록 체계적인 인간공학원리의 적용과 발전소 단순화 및 표준화를 통해 발전소 신뢰성과 운전성 및 유지 보수성을 향상함으로써 원전의 안전성과 경제성을 증진한다.

## 1. MMI 설계

차세대 원전 MMI의 개선을 위해서는 그 기능의 주체가 되는 인간을 중심으로 설계의 관점을 전환함으로써 기존의 문제점을 해결하고, 입증된 여러 첨단기술을 적절하게 응용할 수 있는 체계가 절실하게 요구되므로 한국 운전원의 특성을 고려한 체계적인 인간공학 원리의 적용으로 MMI를 향상시킨다.

MMI의 설계는 하향식 설계기법에 따른 제어실 및 각종 계측제어기기의 최적배치로 제어실을 단순화시키고 운전원 직무분석을 통한 기능부담 최적화(機能負擔最適化)로 정상운전시 운전원 1명으로 발전소 운전이 가능하도록 설계한다.

기존 원자로에 비해 차세대 원전 MMI 설계개념 특성을 요약하면 다음과 같다.

- 제어실 및 각종 계측제어기기의 최적배치 및 운전원 기능부담 최적화로 정상운전시 운전원 1

명으로 운전이 가능하도록 함

- 효율적인 발전소 운전을 위해 제어실 내의 모든 정보표현 및 제어방법을 VDU방식 채택
- 제어를 컴퓨터 구동중심으로 하여 효율성을 증대시는 Soft 제어방식 채택
- 운전원의 혼란과 인적오류 감소를 위한 경보의 최적화 기법 적용
- 원전원의 발전소 상태진단을 지원하기 위해 대형정보표시판 설치
- 운전지원기능 강화
  - 연속온라인 시험능력 및 자동 주기기능시험 기능 등
  - CRT에서의 동적화면으로 표시되는 운전절차서 표시기능
  - 기술지침서 감시기능
  - 필수안전변수 감시기능
  - 안전 및 보호계통 가용도 감시기능
- 정보표시의 한글화 실현
- 유지보수성 증대를 위해 MMI 기기형식 및 모델 일원화.

한편, 제어실 설계시 하향식 방식의 기능적 직무분석 및 업무할당을 위한 인허가 현안을 만족하도록 한다.

즉 NUREG-0933의 USI, GSI 등의 인간공학적 현안들을 해결하며, 이를 위해서 기능적 직무분석 방법에 의한 설계와 제어실 설계의 인간공학 적 확인 및 검증을 수행한다.

## 2. 계측제어계통

차세대 원전 계측제어계통은 인간 공학적 하향식 설계기법에 따른 기능적 직무분석의 결과로 각 계통을 최적 배치함으로써 발전소 안전 및 운전에 필요한 제어 및 감시기능을 수행하도록 한다.

아나로그 계측제어계통의 문제점을 해결하기 위해 많은 장점을 갖는 입증된 디지털 기술을 사용하여 표준화된 계통설계 그리고 표준화된 하드웨어 및 소프트웨어를 사용하는 개방형 구조로 설계한다.

기존 경수로 대비 차세대 원전 계측 제어계통 설계개념의 주요 특징은 다음과 같다.

- 표준화된 계통설계를 이룩하고 표준화된 off-the-shelf 기기 및 인터페이스를 사용하여 구성함으로써 설계를 단순화시키고 노후화 및 기기단종에 적절히 대처하도록 하기 위해 개방형 구조(open architecture)를 채택
- 각 시스템을 표준화된 모듈로 구성함으로써 장비교체의 영향을 최소화하고 모듈단위의 고장 검출 능력을 향상하도록 모듈화 설계 이룩
- 제어의 효율성을 증대시킬 수 있는 Multi-Loop Controller 채택

- 통신망을 적용한 분산시스템으로 구축함으로써 정보 접근을 용이하게 하고 각 기능간의 인터페이스를 단순화시키며, 케이블 감소 등으로 경제성을 제고할 수 있는 LAN 적용
- 현장신호를 다중화함으로써 케이블 길이를 줄여 경제성을 제고할 수 있는 Multiplexing 기법 적용
- 통신망 채택에 따른 정보 플랫폼을 구성 기능의 효율성을 유지할 수 있도록 발전소 주전산기의 분산구조화
- 다양한 시험 및 유지보수지원 기능
  - 계기의 정확도 향상을 위해 온라인 교정기능 채택
  - 계통의 신뢰도를 향상시키기 위해 수동으로 개시되고 자동으로 수행되는 주기적인 기능 시험 구비
  - 안전 및 보호기능에 지장을 주지 않는 범위에서 운전중에 보수 및 수리활동을 수행할 수 있도록 온라인 보수 및 수리 기능 채택
  - 계통 하드웨어의 건전성을 확인하기 위한 연속적인 온라인 자가진단기능 채택.
- 설계변경 및 기능확장을 위한 유연성과 노화 등으로 인한 장비교체능력을 제공하고 주요 계통의 충분한 성능여유도를 제공

하기 위한 충분한 확장성 및 예비율 확보

- 신뢰성이 향상된 센서 사용 및 센서 교정능력 향상 등 instrumentation에 대한 신기술 적용
- 일관화된 설계 및 I&C 기기형식과 모델 일원화 설계

아울러 디지털 기술의 채택에 따른 공동모드공장 대책 등 제반 신규 인허가 현안을 반영한다.

이를 위하여 안전 관련 디지털 계통의 신규 인허가 요건인 IEEE 7-4.3.2-1993의 요건을 적용하여 소프트웨어의 신뢰성을 높이고 기능적 다양성을 이룩한다.

#### IV. 결론 및 향후 개발 계획

원자력발전소의 안전성(安全性) 확보는 원자로의 안전성 확보에서 달성될 수 있으며 안전성 확보는 핵증기 공급계통을 구성하고 있는 각종 계통의 신뢰성 있는 기능수행에 의해서 이루어질 수 있다.

이와 같은 관점에서 차세대원자로의 핵증기 공급계통은 기기 및 계통의 단순화와 기능을 분리하여 신뢰성 제고를 기하고 설계자유도 증대를 피하여 원전의 과도상태에 대한 자체 대응능력을 향상시키도록 하였으며, 기존의 심층방어개념을 강화하여 기존 원전설계에서 간과되어 왔던 중대사고

에 대비한 대응기능을 확보하여 노심손상 빈도의 저감 등 안전성 향상을 크게 달성토록 하였다.

또한 강화되는 인허가 요건으로 원전설비의 지나친 보완요건에 따른 복잡성 등은 타발전원에 대비한 원전의 경쟁력 약화를 유발하고 있으므로 차세대원자로로는 설비의 단순화, 발전소 가동률 증대, 핵연료 이용률 증대, 성능제고 등을 통한 경제성 향상이 이루어질 수 있도록 설계개념을 채택하였다.

확정된 설계개념을 바탕으로 향후 차세대원자로 설계개발 계획은 기존 원자력발전소 운전경험과 설계 경험 및 자립기술을 최대한 활용하고 신기술 적용확대를 위한 공동개발 방법 등을 포함하여 국제협력(國際協力)을 보다 구체적으로 강화하는 방향으로 추진되어야 한다.

한편 부족한 기술의 자체 연구개발과 함께 현재 추진중인 신기술의 실증 실험, 신소재 연구개발 및 안전성관련 중·장기 연구개발 과제 기술개발 결과를 최대한 활용하는 방법으로 추진될 계획이다.

아울러 차세대원자로에 대한 인허가 안정화 측면에서 변화될 수 있는 인허가 방향에 적극적으로 대처하고 연구개발 과정에서 인허가 기관과의 상호보완 협력체계를 구축하여 추진할 계획이다.



특집 : 次世代원자로의 기술개발

표 1. 핵연료 및 원자로심 제원 및 특성

주요계통	제 원	특 성
핵연료 (FUEL)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 연료집합체                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 집합체 수 : 241</li> <li>- Array : 16 × 16</li> </ul> </li> <li>• 연료봉                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연료봉 크기 : 외경 9.7mm 높이 : 3,810mm</li> <li>- 최대 농축도 : 5.0 W/ O</li> <li>- Pellet : 직경 : 8.3mm, 길이 : 9.9mm, 밀도 : 10.96g/ cm<sup>2</sup></li> <li>- 피복관 : 내경 : 8.4mm</li> <li>- 용융온도 : 2,800℃</li> </ul> </li> <li>• 제어봉집합체 : 93개                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Full Strength CEA                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· 12 Element CEA : 48개</li> <li>· 4 Element CEA : 20개</li> </ul> </li> <li>- Part Strength CEA : 25개</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 연료집합체                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Leaf Spring형 Zircaloy- Spacer Grid</li> <li>- Leaf Spring형 Inconel-625V 하단 Spacer Grid</li> </ul> </li> <li>• 연료봉                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 재질 : UO<sub>2</sub>(MOX 연료사용가능)</li> <li>- 피복관 : 재질 : Zircaloy-4</li> </ul> </li> <li>• 제어봉집합체                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 설계수명 : 20년</li> <li>- Full Strength CEA 피복관재질 : Inconel 625                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· 12 Element CEA : B<sub>4</sub>C/ Felt Metal &amp; Reduced Dia.B<sub>4</sub>C</li> <li>· 4 Element CEA : Hafnium Metal</li> </ul> </li> <li>- Part Strength CEA : Inconel 625(피복재 와 독물질 동일)</li> </ul> </li> <li>• 가연성독물질 : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - B<sub>4</sub>C / UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub></li> </ul>
원자로심 (Reactor Core)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 노심 열출력 : 3914MWt (전기출력 : 1350MWe)</li> <li>• Batch 수 : 3</li> <li>• 냉각재 온도                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 저온관 온도 : 292.2℃(558°F)</li> <li>- 고온관 온도 : 323.9℃(615°F)</li> </ul> </li> <li>• 출력밀도 : 95.5 W/ cc</li> <li>• Active Core Height : 381cm</li> <li>• Radial Peaking Factor(Rod) : 1.55</li> </ul>	<p>주기길이(평형주기) : 18개월(432EFPD)                      장전모형(1주기) : 부분적 저누출 장전 모형                      노심열적여유도 향상                      고온관온도 감소                      붕산농도 변화없이 출력제어</p>

표 2. 원자로냉각재계통 제원 및 특성

주요계통	제 원	특 성
원자로 (Reactor Vessel)	내경 : 462.9cm(182.25 in) 외경 : 663.6cm(261.25 in) : NOZZLE 포함 설계압력 : 75.8bar(2500Psia) 설계온도 : 343.3℃(650℉) 운전압력 : 68.2bar(2250Psia)	불시정지횟수 : 년 1회 미만 노심운전여유도 : 10 ~ 15% 설계수명 : 60년 -환형단조 제작 -중성자 조사량 감소 -취성파손인성개선 · EOL RTNDT 감소 · 저합금강재질 사용
원자로 냉각재배관	고온관 : 106.7cm(42in) 저온관 : 76.2cm(30in) 원자로냉각재총체적 : 337m <sup>3</sup> (15,834ft <sup>3</sup> ) 설계압력 : 75.8bar(2500Psia)	LBB 개념 적용
증기발생기 (Steam Generator)	형태 : 직립U튜브타입 × 2 (습분분리기 및 Economizer) 높이 : 1524cm(50ft) 설계압력 : 75.8bar(2500Psia) Manway : 533(21in)	세관재질 : Inconel-690 관폐쇄여유도 : 10% 2차측 Boil Dry Time 증대(45분) 내부식성 세관재질
원자로냉각재펌프 (Reactor Coolant Pump)	형태 : 직립 원심형펌프 × 4 설계압력 : 175.8bar(2500Psia) 설계유량 : 421,538 ℓ/ min(111,400gal/ min) 모터형태 : AC Induction Single Speed Type 모터출력 : 12,000hp	펌프의 건전성 향상 -Seal 건전성 향상 -Seal 설계수명 : 48개월 보수성 개선
가압기 (Pressurizer)	설계압력 75.8bar(2500Psia) 체적 : 51m <sup>3</sup> (2400ft <sup>3</sup> ) -물 : 25.5m <sup>3</sup> -증기 : 25.5m <sup>3</sup>	발전소 과도상태 대응능력 향상 -가압기 체적증대 -열성충화 최소 밀림관 설계

## 특집 : 世代원자로의 기술개발

표 3. 안전계통 제원 및 특성

주요계통	제 원	특 성
정지냉각계통 (SCS)	설계압력 -입구 62.1bar(900psig) -출구 62.1bar(900psig)	CSS와 열교환기 공유 Mid-loop 운전대처 설계 설계압력 증대로 Interface System LOCA 감소 격납용기살수계통/ 정지냉각계통 상호 보완 기능 재순환 모드 재정열 불필요 RHR 기능강화
안전주입계통 (SIS)	Train 수 : 4 펌프 수 : 100% × 4	고압안전 주입계통으로만 구성 IRWST설치(재순환 자동정열제거) 4 Train으로 다중성 증가 원자로용기 직접주입방식(DVI) CVCS의 안전기능 제거 전유량 시험능력 구비
안전감압계통 (SDS)	RCGVs -Solenoid 구동 1 inch Globe 밸브 10개 감압밸브 -모타 구동 6 inch Gate 밸브 2개 -모타 구동 6 inch Globe/ Angle Valve 2개	발전소 과도상태 및 급수불능 사고에 대처하도록 감압기능 SDS Bleed는 IRWST로 방출(Feed & Bleed) 비응축성가스 배기(기압기 및 원자로용기 상부)
재장전수조 (RWST)	탱크 수 : 1대 농도 : 4,000 ~ 4,400ppm 체적 -물 : 545,800 gallons -Free Volume : 57,100 ft <sup>3</sup>	격납용기내설치 비상시 노심냉각을 위한 냉각수원 변경 불필요 중대사고 대처능력 및 격납용기 성능 향상 SDS, SIS와 연계하여 Feed & Bleed운전
비상급수계통 (EPWS)	펌프 수 -모터 구동 : 100% × 2 -터빈 구동 : 100% × 2	Startup Feedwater System과 분리 안전등급 보조급수 탱크 별도 설치 비상급수계통 트레인간 분리

표 4. MMIS 비교

항 목	NUPLEX 80+	차세대 原電
1. 설계전략 인간공학적 설계 설계기법  적용기술	미국운전원 기준 인간공학 요건 적용 하향식 설계기법 적용, 부분분석 수행  디지털 기술	한국운전원 기준 인간공학 요건 적용 하향식 설계기법, 전체에 대한 분석 (MMIS 개념 적용) 디지털 기술
2. 제어실 운전원수 디스플레이 기기 경보표시 방식 대형화면 주 정보표시 방법 Configuration (Control panel type)	3명 단색 ELD, CRT 경보축약 및 전자경보창 IPSO(고정형 1개) DIAS의 단색 ELD, CRT Hybrid	정상운전시 1인 운전 가능 천연색 FPD, CRT 경보축약 및 전자경보창 고정형 및 가변형 대형정보판, 천연색 FPD, CRT VDU based control room
3. 계속제어 기술성          계통기능 -계측 및 제어 계통  -감시 및 경보 계통  -운전지원 기 능	디지털 기술 자기진단 가능 자동주기 가능시험 부분 온라인 교정 및 보수 off-the-shelf 기기  일부 신호검증 기법 일부 통신망 기법  공통모드 고장 대처 RF I/ EMI 대처(검증자료 보완 필요) 소프트웨어 확인 검증 (IEEE 7-4. 2-1993 근거로 계획단계 의 문건만 완료) 일부 현장기기에 분산기법	디지털 기술 자기진단 가능 온라인 주기 가능시험 온라인 교정 및 보수기능 off-the-shelf 기기 개방형 구조및 범용 소프트웨어 신호검증기법 통신망 기법 소프트제어기법 공통모드 고장대처 RF/ EMI 대처 소프트웨어 확인 검증(IEEE 7-4. 3. 2-1993)  분산 제어계통(DCS)
	대부분 디지털 신호처리 (일부 안전등급 신호 제외) 일부 오류허용 기법 경보축약 및 우선순위화 기법 단색 FPD(Flat Panel Display) IPSO 1면 자료처리 계통(DPS) CFMS, COLSS SPM(EPG) ESF status monitoring	디지털 신호처리  오류 허용기법 경보축약 및 우선순위화 기법 천연색 FPD 대형 정보표시판 3면 분산컴퓨터 계통 CFMS, COLSS EOP 전산화 RPS & safety system availability monitoring, Tech. spec. monitoring