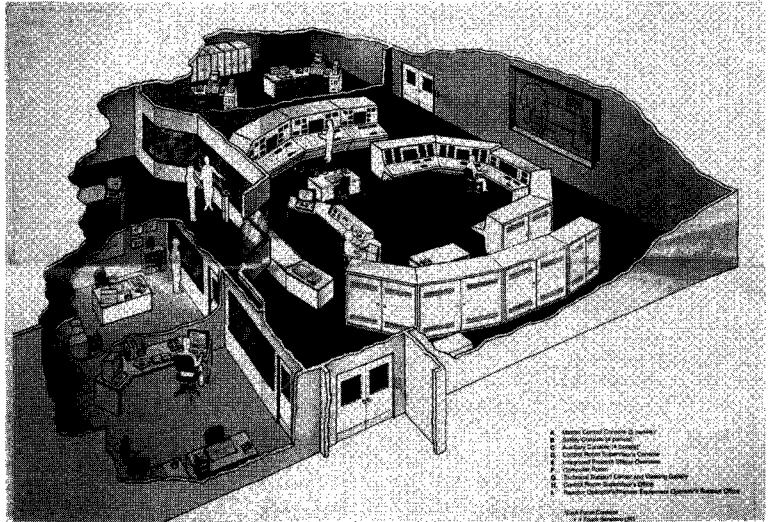


## 특집

### 韓·日原子力산업 세미나 발표 논문



〈「피동성 안전개념」을 도입한 한국형 신모델 原子力발전소의 중앙제어실 상상도〉

# 개량형 원자로의 피동적 안전개념도입 대용량 신형원자로의 기술적 경제적 잇점 살려

張 文 熙

한국원자력연구소

신형원자로 기술개발실장

오늘 발표할 내용은 “被動安全設計 概念을 改良型原子爐에 적용하기 위한 타당성 연구”에 관한 것이다.

먼저 이해를 돕기 위해 이 연구의 遂行背景, 목적과 연구수행방법에 관해서 말씀드린 후, 이 연구에서 평가한 피동안전설계항목, 項目選定 및 평가에 활용한 基準(Criteria)을 간단히 설명하고 평가항목의 설계개념과 평가결과, 결론의 순서로 마무리 짓기로

한다.

현재 원자로 開發時 가장 중요한 관심사는 일반 대중에 의한 원자력 受容性과 관련된 원자로의 安全性向上에 있다는 것은 周知의 사실이다.

이 목표달성을 향한 원자로개발 방향은 개념적으로 크게 두 줄기 즉, Evolutionary 원자로와 Revolutionary 원자로로 구분되고 있다.

원자로의 안전성 향상목표는 한국

## 개량형 원자로의 피동적 안전개념도입

에서도 결코 예외가 아니다. 현재 한국에서 개발하고 있는 次世代原子爐의 대명제도 안전성 향상이며 이에 따라 설계개념개발을 위해 다양한 연구가 수행되었으며, 이 연구는 大容量改良型輕水爐에 피동안전개념을 적용할 때 안전성 향상의 확인 필요성에 따라 수행되었다.

이러한 배경에 따라 이 연구의 목적을 대용량 개량형 경수로에 기술적으로 적용이 가능하며 경제적 잇점이 있는 피동안전개념을 도출하고 적용에 따른 안전성 향상정도, 경제성, 認許可性, 개발가능성 등에의 영향을 定性的으로 평가하여 한국의 차세대원자로 설계개념개발에 채택이 필요한 피동안전개념을 추천하는데 두었다.

이 연구를 효율적으로 수행하기 위하여 피동안전개념 적용대상 參照원자로로 현재 한국에서 건설중인 경수로의 개량형인 미국 ABB-CE사의 SYSTEM 80+를 선정하였다.

연구방향은 참조원자로의 能動安全개념을 피동안전개념으로 부분交替 또는 피동안전개념의 부분적용을 위한 정성적 평가에 있으며, 국제공동연구방법으로 한국에서 KAERI, KOP-EC 두 기관이, 해외에서 美國의 ABB-CE, SWEC, DESI, 英國의 AEA TECHNOLOGY 4개 기관이 참여하였다.

당초 이 연구를 위해서 피동안전개념 뿐만 아니라 일반적으로 안전성을 개선시킬 수 있는 항목을 포함하여 여

기에서 보는 바와 같이 20개의 대상항목을 선정하여 합당한 항목 선정 및 평가기준을 적용하였다.

예비평가를 수행한 후 이것을 10개의 항목으로 줄여 이 연구를 수행하였다. 10개의 항목에 대한 概念 및 평가 결과는 다음에 언급하기로 한다.

여기에서 말하는 항목 선정 및 평가 기준은 연구대상개념들이 원자로 및 PLANT 설계에 적용될 때 주요하게 영향을 미칠 수 있는 사항인 COST, 認許可性, 開發 및 實證性, 安全性, 綜合設計性, 運轉 및 維持補修性 측면에서 定性的으로 수립된 것이며 항목별 상세한 설명은 생략한다.

여기서는 10개의 被動安全設計 항목에 대한 설계개념과 평가결과에 대해 核心的인 내용만 설명하고자 한다.

### Passive Cavity Flooding System

Passive Cavity Flooding System은 重大事故의 결말을 완화시키기 위한 수단으로 Cavity 내부 Line에 Fusible Plug를 설치하여 Plug가 Molten Core에 의해 용해될 경우 냉각수가 중력으로 Cavity 내부에 注入되는 개념이다.

이 연구에서 두 가지 Option 즉, 현재의 Active System을 완전히 Passive System으로 교체하는 것과 Passive System을 Backup 수단으로 사용

하는 개념을 평가하였다.

이 개념의 적용은 Containment의 파손확률을 약 7% 정도 감소시키고 Large Release Frequency를 줄일 수 있어서 일반대중에 대한 Dose를 감소시키는 효과가 있는 것으로 평가되었다.

Fusible Plug 사용에 따른 Plug의 성능 등에 관한 Test가 필요하며 Fusible Plug의 추가설치에 따른 비용은 약 2십만 달러 정도로 예측되었으나, 현재 System의 Backup System으로서 이 개념이 차세대원자로 설계에 적용되도록 추천하였고 계속 연구개발 될 예정이다.

### Fluidic Device 피동개념

Fluidic Device 被動개념은 이 Device를 Safety Injection Tank의 Discharge Line에 설치하여 LOCA시 비상노심 냉각수 注入流量을 피동적으로 제어하여 상당한 시간동안 효율적으로 노심을 냉각하는 설계개념이며 3개의 주요 Nozzle로 구성된다.

이 개념의 적용으로 원자로의 안전성 향상효과가 기대되지 않고 기기의 성능 및 신뢰도 입증을 위한 Full Scale Flow and Pressure Test가 요구되며, Licensig 및 설계해석 Code를 위한 Model 개발이 요구된다.

그러나 이 Device의 活用으로 Emergency Diesel Generator의 작동

시간을 늦출 수 있는 장점과 비교적 적용이 쉬운 측면에서 차세대 원자로의 설계개념으로 추천되었다.

### Flooding Exterior of Reactor Vessel 개념

Flooding Exterior of Reactor Vessel 개념은 중대사고 결말완화(結末緩和)를 위한 수단으로서 Reactor Vessel 외벽을 물로 냉각시켜 Molten Core를 Vessel 내부에 억류시킴으로써 Vessel의 파손을 방지하고자 하는 것이다.

안전성향상과 계통의 다양화측면에서 현재의 Cavity Flooding System을 보조하는 방법이다.

이 개념은 별도의 Water Tank로부터 물을 중력(重力)에 의해 Cavity 내에 注入시키는 개념으로, Containment 내부 약 119 feet 상부에 약 350,000 gallon 정도의 Water Tank 설치가 필요하다.

이는 系統設計와 Containment 내부 유지보수에 심각한 영향을 줄 것으로 평가되었다.

또한 계통성능 및 신뢰도 입증을 위한 검증시험(Verification Test)이 필요하며 1천만 달러 이상의 경비소요가 예측되었다.

따라서 이 개념은 예상되는 안전성 향상효과 보다는 부정적인 요소들로 인해 차세대 원자로 안전설계개념으로

추천되지 않았다.

### Passive Primary Residual Heat Removal System

Passive Primary Residual Heat Removal System은 참조발전소에 설계된 能動殘熱除去계통의 보조수단으로 고려되었으며 자연순환현상을 이용하는 피동개념이다.

殘熱을 Containment 외부로 제거하기 위해 Containment 내부에 중간 熱沈源(Heat Sink)을 설치하고 Containment 외부 높은 곳에 최종 열침원(熱沈源)을 설치하는 개념으로 연구되었다.

그 이유는 현재의 IRWST의 낮은 위치로 인해 냉각수 자연순환현상 활용이 어렵기 때문이다.

PRA 평가결과 이 개념의 채택으로 노심손상 빈도가 약 20% 정도 감소될 것으로 예측되었으나 이미 충분히 낮은 CDF로 인해 감소효과(減少效果)가 매우 적으며, 오히려 RCS System Boundary 연장으로 인해 LOC-A 발생확률(發生確率)이 증가될 것으로 평가되었다.

또한 Containment 내부의 再設計, System의 복잡성으로 인한 약 1천만 달러 이상의 비용소요 등이 안전성 개선효과에 비해 부정적(否定的) 요소로 나타나, 차세대 원자로 설계개발 개념으로 추천되지 않았다.

### Passive External Containment Cooling

Passive External Containment Cooling은 Design Basis Accidents 또는 중대사고 발생시 Containment 내부의 열을 피동적으로 제거하여 Containment의 건전성(Integrity)을 유지키 위한 개념이다.

이 연구에서는 참조원자로가 채택한 설계개념에 대한 4가지의 대안이 검토·평가되었다.

代案 1은 AP600의 개념과 유사한 것으로 Containment Building 상부에 엄청난 양의 물이 저장된 Tank 설치가 필요하며 이는 Seismic Category I 설계와 열전달 성능 Test가 필요한 것이다.

代案 2는 현재의 Containment Spray System을 보조하는 비안전등급으로 공기를 이용한 냉각개념이나 현재의 Double Containment 장점을 살릴 수 없을 뿐더러 개념에 대한 實證 시험의 필요성이 제기되었다.

代案 3은 CSS를 보조하며 Water Vaporization을 활용하는 개념으로 Auxiliary Building 상부에 Water Tank 설치와 수많은 Water Rizer 설치가 요구되며 Licensing을 위한 검증 시험 또한 필요하다.

代案 4는 External Pump를 사용하여 외부의 물을 Containment 벽에 살수(撒水)시키는 것으로 피동개념이

## 개량형 원자로의 피동적 안전개념도입

아니다.

평가결과, 네 가지 대안 모두 Cost 및 설계에의 영향 등 부정적 요소로 인해 차세대 원자로 설계개념으로 추천되지 않았다.

### Catalytic Hydrogen Control Igniters

Catalytic Hydrogen Control Igniters는 事故 때에 Containment 내부 수소농도를 10 v/o 이하로 제어키 위한 설계로 참조원자로는 현재 80개의 Glow Plug Type의 Igniter가 설치되어 있으며 일반적으로 그 성능은 Igniter의 위치와 Gas Flow Rate에 의해 결정된다.

이 연구에서는 대안으로 세 가지 즉, Catalytic Igniter로 전면교체 또는 부분교체, 그리고 Passive Autocatalytic Recombiner로 전면교체하는 방안을 검토·평가하였다.

Catalytic Igniter를 전면교체할 경우 系統의 신뢰성 增大와 계통 단순화가 가능하며 작동에 電氣공급이 필요 없고 Steam Condition에서도 작동이 가능하나 Poisoning으로 인한 不動作 가능성이 제기되었다.

부분교체의 경우 두 가지 서로 다른 개념의 활용으로 계통의 다양화가 가능하며 Poisoning 경우에도 작동의 신뢰성이 보장되었다.

세번째 PAR로 전면교체 할 경우는

현재의 PWR에서 사고완화의 일차적인 수단으로 Credit을 받지 못하고 있는 점이 문제로 제기되었다.

따라서 평가한 결과, 두번째 대안(代案) 즉, 현재의 계통을 Catalytic Igniter로 부분교체하는 방안이 차세대 원자로 설계개념으로 적합한 것으로 추천되었다.

### Containment Overpressure Protection 개념

Containment Overpressure Protection 개념은 熱除去 기능상실 때에 Late Containment Failure 방지를 위한 개념으로 Rupture Disk에 의해 격리된 Filtered Containment Ventilation System이다.

Containment 내부 압력증가에 의해 Rupture Disk가 파손되면 내부 공기가 Filter System을 경유, 외부로 放出되고 내부압력은 감소된다.

이 개념을 적용할 때 Late Containment 파손빈도는 약 30% 정도 감소가 예상되지만 기존 설계에서 Cooling Capability 상실확률이 이미 충분히 낮기 때문에 기여도는 큰 의미가 없는 것으로 평가되었다.

Licensing과 관련된 큰 문제점은 예상되지 않지만 계통성능과 정상상태의 경우 Rupture Disk의 격리 신뢰성 Test가 요구되고 있다.

약 530만달러에 이르는 자본비용이

안전성 개선효과(改善效果) 보다 영향이 큰 것으로 평가되어 차세대 원자로 설계개발에 이 개념을 채택하지 않기로 하였다.

### Passive Secondary Condensing System

Passive Secondary Condensing System은 SGTR, MSLB 등의 事故 때에 殘熱제거를 위한 계통으로서 Containment 외부 10~15 feet 높이에 350,000 gallon 정도의 Condensing Tank를 설치하고 Steam Generator의 Downcomer로 연결하여 溫度차이에 따른 자연순환현상을 이용, 잔열을 제거하는 피동안전개념(被動安全概念)이다.

Condensing Tank Tube Side에서 냉각된 Steam은 물로 응축(凝縮)되어 중력에 의해 다시 Steam Generator로 되돌아가 재순환이 이루어지게 된다.

이 연구에서는 기존의 非常給水계통(EFWS)을 교체 또는 Back-up, 두 가지 경우를 검토·평가하였는데 Core Damage Frequency 감소 측면에서 Back-up System의 경우 약 36% 정도의 높은 감소효과를(교체 경우 1~3% 감소효과) 나타내고 있으며, SGTR의 事故 때에 Dose 감소 효과는 두 경우 모두 26% 정도에 이르는 것으로 평가되었다.

EFWS를 교체하는 경우 기존의 EFWS에 의해 수행되던 안전(安全)기능이 확보되지 않으면 심각한 Licensing 문제가 생길 수 있는 것으로 검토되었다.

예측된 Cost에 비해 안전성 增大 기여도(寄與度)가 훨씬 큰 것으로 평가되어 Back-up System으로서의 PSCS가 차세대 원자로 설계개념으로 추천되었다.

## Passive Spent Fuel Pool Cooling

Passive Spent Fuel Pool Cooling은 Pool의 Maximum Heat Load의 경우 72시간 동안 Active Cooling 조치 없이도 Spent Fuel이 공기 중에 노출되지 않도록 요구하는 EPRI ALWR Requirement를 만족하기 위한 설계개념이다.

참조 발전소의 현재 설계는 Maximum Heat Load의 경우 약 27.5시간이 경과하면 Fuel의 1 feet 상부까지 냉각수의 水位가 떨어지는 것으로 분석되고 있다.

이 연구에서 검토한 개념은 안전등급계통(安全等級系統)의 물 Tank를 설치, 重力에 의한 피동적 방법으로 Pool에의 냉각수를 공급하는 것이며 72시간 이후에는 기존 CVCS를 활용하는 개념이다.

水位요구에 따라 337,000 gallon에

서 438,000 gallon 정도의 水量이 요구되며 만일 PSCS 개념이 적용될 때 PSCS의 Tank 물을 사용할 수 있는 것으로 분석되었으며, 일부 Licensing 관련 문제점 검토가 필요하나 안전등급계통의 Tank 사용은 기존의 Pool Cooling 및 Purification System을 非安全等級化 할 수 있다.

따라서 Cost Saving 잇점이 있는 것으로 평가되어 차세대 원자로 설계개념으로 개발토록 추천하였다.

## Passive Quench System

10개의 항목 중 마지막인 Passive Quench System에 대해 설명드리도록 하겠다.

이 개념은 SGTR 등의 事故 때 피동적으로 原子爐 二次계통의 殘熱을 제거하고 Radioactive Release를 防止하는 설계개념이다.

이는 系統을 Main Steam Line과 연결, 殘熱을 Suppression pool로 제거하는 개념이다.

이 개념은 별도의 Tank를 설치하지 않고 기존의 IRWST 또는 EFW Tank를 사용할 수도 있다.

이 개념의 적용으로 추가적인 殘熱 除去能力이 제공되나 参照원자로의 2차계통 잔열제거능력 多樣化가 이미 충분히 확보되어 있어서 안전성향상 효과 즉, CDF 감소의 기여도는 무시할 정도로 평가되었다.

이 개념은 기존(既存)에 따라 계통의 Add-on 개념이므로 Licensing에의 영향이 매우 적고 實證시험이 필요 없으나 Cost에의 영향이 커서 차세대 원자로의 설계개념으로 채택하지 않기로 하였다.

## 결론

마지막으로 이 研究의 종합적인 요약 결론을 기술하기로 한다.

- ① 현재의 原子爐 개발동향은 완전 피동 안전개념 적용 원자로는 小·中型 出力규모에 제한되고 있으며, 대용량 Evolutionary 원자로는 能力安全개념에 安全性을 의존하고 있다.
- ② 그러나 被動安全개념과 能動安全개념의 결합은 원자로의 안전성을 보다 向上시킬 수 있을 것으로 믿어지고 있다.
- ③ 이에 따라 이 연구에서 수행한 대용량 개량형 原子爐에 피동안전개념 적용성에 관한 定性的 연구결과에 따라 한국의 次世代 原子爐 안전설계개념으로 5개의 피동설계개념이 추천되었으며, 적용을 위한 연구·개발이 계속 될 것이다.
- ④ 또한 앞으로 이어서 개발되는 Evolutionary 원자로에 피동안전개념의 지속적인 적용과 응용이 이루어질 것으로 예상된다.