

## 受動的 安全시스템

本稿는 일본원자력산업회의가 과학기술청의 위탁을 받아 실시한 「수동적 안전시스템에 관한 조사」 내용이다. 이것은 장래의 새로운 원자로의 설계개념 중에서 중요한 역할을 하고 있는 수동적 안전시스템에 대해 그 특성 및 爐에 적용하는 경우의 문제들을 분석한 것이다. 신뢰성에 관한 검토부분을 중심으로 그 개요를 소개한다.

### SPWR

SPWR(System Integrated PWR)은 경수로기술과 경험을 효율적으로 활용함으로써 높은 수동적안전성과 간편한 운전·보수, 높은 경제성을 동시에 달성할 수 있도록 설계중인 새로운 개념의 차세대 발전로이다.

이 원자로는 제어봉을 가지고 있지 않으며 정지시스템으로 봉산수를 충전한 poison탱크를 원자로용기내에 내장하고 탱크위에 주순환펌프의 토출압력으로 작동하는 수압작동밸브를 설치해서 1차수와의 interface로 하고 있는 것을 특징으로 하는一體形PWR이다.

이 설계는 石川島播磨重工業, 日本總研, 岸川特殊밸브의 협력하에 진행되고 있다. 이 원자로가 높은 수동적 안전성을 갖게 되는 이유는 다음과 같다.

1. 제어봉이 없어 급격한 반응도증가의 가능성이 없다(純水주입에 의한 반응도변화는 완만).

2. 수압작동밸브를 사용한 신뢰성이 높은 수동적 爐정지시스템을 채용(밸브는 단순하고 경고한 구조).

3.一體形PWR이기 때문에 大口徑의 1차계 통배관이 없고 또한 배관을 원자로용기의 상부에만 설치하기 때문에 배관파열사고시에 노심이 노출될 때까지의 유체시간이 상당히 길다.

4. 장기냉각시스템으로 수동적均壓注水시스템을 채용(수위저하시에 자동적으로 수압작동밸브가 열려 자연순환으로 주입된다. 3.항의 특성때문에 이 시스템은 적용하기가 쉽다).

5. 수동적냉각을 적용하기 위한 압력억제플형 격납용기를 채용.

### 신뢰성검토

SPWR은 현행 PWR, BWR의 기술, 경험 및 관련기술을 활용하는 것으로 기본적으로 실증이 끝난 원자로라고 할 수 있다. 즉 연료로는 PWR에서 개발이 끝난 연료봉을 사용하는 삼각격자배열로 하고 연료봉지지grid가 다를 뿐이다.

1. 노심에는 제어봉이 없어 제작정밀도가 높지 않아도 된다. 따라서 연료봉지지grid의 구조가 달라도 특별히 개발해야 할 요소는 없다.

2. chemical shim을 사용한 PWR노심은 경험에 의해 그 특성이 충분히 파악되어 있다. 원자로용기의 제조검사기술은 PWR과 BWR에서 충분히 개발되어 있다.

3. 원자로격납용기는 BWR에서 실증이 끝난 압력억제풀형이다.

그러나 다음 항에서 언급한 바와 같이 제어봉을 사용하지 않는다는 것과 증기발생기에 관한 문제가 남아 있다. 또 새로운 개념의 수동적 장기냉각시스템에 관한 실증이 필요하다.

## 신뢰성에 대한 실증

### 1. 수동적안전기기의 실증

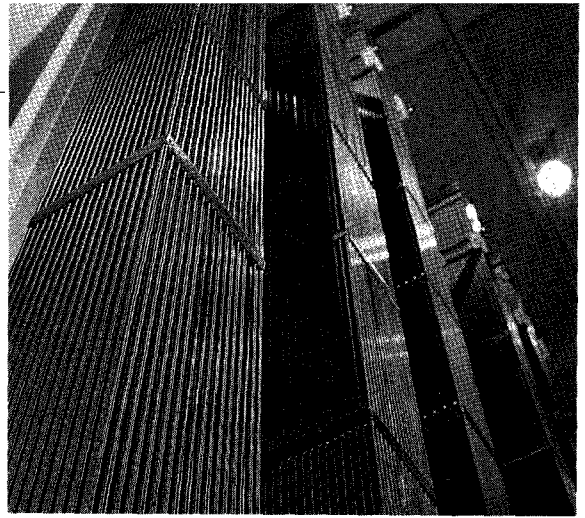
SPWR을 특징짓는 수압작동밸브에 관해서는 두종류의 1/2로 축소한 모델을 제작해 기초시험을 끝냈기 때문에 실현성과 신뢰성에는 문제가 없다고 생각되지만 제어봉에 못지 않게 중요한 기기임으로 실제조건하에서의 실증시험을 계획, 검토중이다. 均壓注入시스템에 사용되는 수압작동밸브도 이같은 실증시험을 할 계획이다.

### 2. 모형시험에 의한 열수력특성의 실증

動特性解析코드에 의한 운전특성해석과 사고해석은 이미 상당한 수준까지 실시되어 SPWR의 특성파악은 진전되어 있지만 보다 직접적으로 현상을 파악하기 위해 노심은 전기히터로 모의한 10MWt 규모의 모형시험을 계획, 검토중이다.

### 3. 爐를 구성하고 있는 중요기기의 실증

SPWR에서 사용하는 증기발생기는 一體型 PWR에 적합한 형식의 貫流式 helical 코일형이다. 이 형식의 열교환기는 일반적으로 많이 사용되고 있는데 원자로용으로는 현재 고속로 발전소용의 중간열교환기와 증기발생기의 개발이 진전되어 있다. 따라서 제조, 검사, 보수점



검기술은 이미 완성되어 있다고 보아도 된다. 또 一體型PWR용으로는 서독의 원자력선 Otto Hahn號의 爐에서 사용된 실적이 있다. 그러나 경수동력로용으로서의 실적은 일본에는 없다. 따라서 실증시험은 빼놓을 수 없는 것으로 생각된다. 전항 2.의 장치에서 동시에 특성을 파악할 수 있을 것이다.

### 4. 수동적장기냉각시스템의 실증

전항 2.의 시험장치를 확장해서 均壓注入 시스템의 실증도 함께 실시할 계획이다.

### 5. 시험로에 의한 실증

解析과 열수력모형시험을 토대로 실제규모의 동력로건설을 실시하는 것도 가능하다고 생각되지만 제어봉을 갖지 않은 원자로는 전례가 없기 때문에 시험로에 의한 실증을 하고 난 다음에 실시하는 것이 바람직하다. 이를 위해서는 다음과 같은 방안을 생각할 수 있다. 즉 SPWR의 기능을 갖춘 원자로에 보조용으로 제어봉을 설치해 놓고 제어봉을 사용하지 않고 운전해서 안전성과 운전성을 확인한 다음 제어봉을 lock(또는 제거)한 가운데 운전해서 실증하는 것이다.

## 爐에의 적용가능성

### 1. 爐출력, 爐사이즈와의 관계

一體型PWR은 증기발생기를 원자로용기에 내장해야 하기 때문에 유니트용량에 한계가 있다. 현재 설계중인 SPWR은 1,100MWt

(350MWe에 상당)이다. 원자로용기의 제작상 문제때문에 현재로서는 이 수준의 爐가 적당한 것으로 판단된다. 그러나 SPWR에서는 제어봉이 필요없기 때문에 생기는 여러가지 효과로 인해 유니트용량이 작더라도 규모면의 결함은 그렇게 대단한 것은 아니다.

또 같은 격납용기에 2기 또는 4기의 爐를 설치하는 것도 가능해 현재 설계중인 爐 4기로 140만kWe의 발전소도 실현가능하다. 앞으로는 1,600MWt 정도(500MWe 상당)도 가능성이 있어 최대 200만kWe의 발전소도 가능할 것 같다. 격납용기내에 복수의 원자로를 설치하는 경우 발전소 전체가 복잡하게 되는 것을 피하기 위해 爐시스템이 간소하고 수동적 안전성이 높고 운전·보수가 용이하다는 등의 특성이 요구되는데 제어봉이 없는 SPWR은 이같은 특성을 갖추고 있다.

반대로 수출용으로 소규모의 爐(예컨대 10만 kWe)가 필요하게 되는 경우 원자로시스템을 공장에서 완성해 중요한 시험·검사를 해서 출하할 수 있다는 큰 이점이 있다(module화가 용이).

.....  
**HSBWR**  
 .....

HSBWR은 중소형원자로의 경제성문제를 수동적 안전시스템을 채용해서 해결하려는 목적으로 그 개념이 검토되어 온 전기출력 60만 kW의 자연순환형BWR이다. 이 개념검토는 이미 끝났는데 그 결과가 BWR메이커 3社의 공동개념검토에 반영되고 있다.

**신뢰성검토**

**1. 신뢰성에 대한 실증**

HSBWR의 각 기기와 시스템은 현재의 BWR기술을 바탕으로 한 것으로 그 신뢰성은 이미 실증이 끝난 상태다. HSBWR의 경우 현행기술의 연장으로 실증이 필요하다고 생각되

는 것은 노심의 자연순환에 관한 특성과 自然放熱型격납용기의 특성이다.

**(1) 자연방열형격납용기**

격납용기안쪽에 배치된 suppression풀과 外周풀내의 유동특성에 관해서는 1/10로 축소한 모델(전열면의 높이 1m)을 사용, 시험해서 3차원계산에 의해 예측되는 흐름을 확인했다. 또 전열면의 높이를 4m로 한 모델을 사용해 전열량을 결정하기 위한 열전달특성시험을 해 지금까지 설계검토시에 적용해온 열전달방식이 타당하다는 것을 확인했다.

**(2) 자연순환특성**

HSBWR은 현행 爐의 재순환펌프시스템을 삭제하고 수동성이 높은 자연순환방식을 채용했다. 그 결과 원자로용기내에 설치된 氣水분리기를 삭제한 단순한 구성이 되었다. 이 자연순환특성의 평가기술은 기본적으로 현행기술을 적용한 것이지만 여기서 더 나아가 실물길이의 모형연료집합체를 사용해서 고압자연순환시의 유동특성실험을 하고 있다. 또 기수분리기의 삭제와 관련해 自由液面에서의 기수분리특성 및 carry-under에 대해 공기·물의 2相流를 사용해 실험적으로 검토했다.

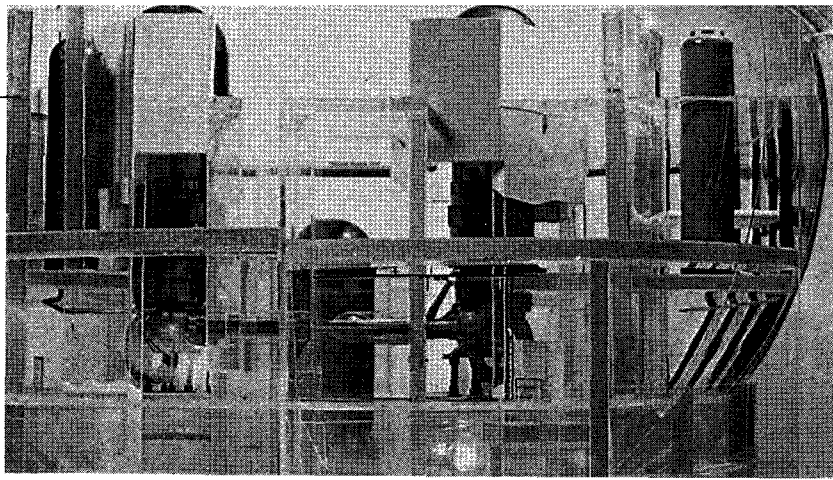
**2. 신뢰성의 저해요인**

앞서도 말한바와 같이 HSBWR은 실증이 끝난 기술을 기본으로 한 것이어서 신뢰성확보를 위한 저해요인은 없는 것 같다.

**3. 신뢰성확보를 위한 대책**

HSBWR의 개념을 검토하는데 있어서의 기본적인 생각은 현행기술을 바탕으로 하고 있고 개개의 기기신뢰성도 현재의 것과 같은 수준에 있다. 또 수동적 안전시스템의 채용으로 시스템의 간소화에 의한 신뢰성이 훨씬 개선되었고 이런 의미에서는 검토내용자체가 대책이라고 할 수 있다. 또 채용된 수동적 안전시스템의 신뢰성확보대책으로는 그 구성이 밸브작동에 의존하는 시스템이 많기 때문에 현행 시스템과 같이 그 신뢰성을 확보할 필요가 있다.

또 설계의 신뢰성에 관해서는 특히 자연방열



형격납용기에 대한 실증시험을 거듭함으로써 그 설계방법을 확립할 필요가 있다.

열전달의 촉진을 검토할 필요가 있다.

## 爐에의 적용가능성

### 1. 爐출력, 爐사이즈와의 관계

전기출력 60만kW로 설계되고 있는 HSBWR을 대형화하는 경우에는 다음의 두가지 점에 대한 검토가 필요하다. 즉, 첫째는 HSBWR이 자연순환로라는 점과 둘째는 자연방열형격납용기의 사용가능성의 문제다.

#### (1) 자연순환특성

자연순환을 채용한 HSBWR은 노심熱설계에서 출력밀도를  $30.4\text{kW}/\text{m}^3$ 로 억제해 이에 따라 노심안정성, 한계출력에 대한 여유를 확보하고 또 24개월운전을 가능하게 하고 있다.

그러나 이대로 원자로출력을 증가시키면 노심직경이 커져 원자로용기가 현행의 110만kW급원자보다 커질 가능성도 있다. 따라서 90만kW급까지의 대형화가 가능하다고 생각되는데 더 대형의 爐에 이 특성을 적용하려면 출력밀도, 연료집합체의 길이 등의 재검토가 필요하다. 또 이같은 대형로에서의 자연순환특성은 충분히 검토할 필요가 있다.

#### (2) 자연방열형격납용기

원자로가 대형화하면 붕괴열도 증가한다. 그러나 격납용기를 원자로출력에 비례해서 증가시키기는데는 한계가 있다. 격납용기벽의 일부를 suppression풀에서 外周풀까지의 전열면으로 이용하는 自然放熱型격납용기에서는 90만kW급까지는 가능한 것으로 보고 있지만 이보다 더 대형화하기 위해서는 전열면의 확대와

## MSPWR

### 신뢰성검토

#### 1. 신뢰성에 대한 실증

##### (1) 원자로정지기능

원자로정지기능에 관해서는 제어봉구동설비, 제어봉안내관 제어봉cluster 등, 제어봉구동시스템의 설계는 재래식爐와 같아 충분히 이를 실증할 수 있다.

##### (2) 붕괴열제거기능

붕괴열제거기능에 관해서는 보조급수시스템 및 충전펌프로 구성되는 능동적안전시스템이 재래식爐와 같은 설비여서 충분히 이를 실증할 수 있다. 장기적인 붕괴열제거시스템에 관해서는 재래식爐에서는 안전시스템의 殘留熱제거시스템을 이용해 붕괴열제거를 하지만 MSPWR에서는 殘留熱제거는 常用시스템이어서 안전시스템을 사용한 붕괴열제거는 증기발생기를 사용해서 하게 된다. 그러나 증기발생기를 사용해서 하는 붕괴열제거는 재래식爐에서도 실시하고 있어 특히 신뢰성이 훼손되는 일은 없다.

LOCA 발생시에 작동할 것으로 기대되는 수동적안전시스템에 관해서는 설비가 탱크, 배관, 밸브로 구성되어 있어 특별히 신규의 것을 사용하는 것이 아니기 때문에 특히 신뢰성이 떨어지는 일은 없다. 시스템으로서의 기능을 달성하느냐 하는 문제에 대해서는 지금까지 실

제로 사용한 일이 없기 때문에 신뢰성을 확인하기 위한 시험을 할 필요가 있다.

구체적으로는 증기발생기에 의한 붕괴열제거 기능확인시험, 1차계통자연순환시험 등을 할 필요가 있다.

(3) 방사성물질방출방지

격납용기는 재래식원자로와 같이 鋼製여서 신뢰성에 대해서는 충분히 실증되어 있다. Annulus부분에 관해서는 적극적으로 fan으로 吸引해 필터를 거쳐 대기에 방출된다. MSPWR은 annulus부분의 압력상승을 이용해서 필터를 거쳐 대기로 방출하고 있기 때문에 필터의 방사성물질제거기능에 대해서는 시험을 통해 성능을 확인할 필요가 있다.

2. 신뢰성확보를 위한 대책

신뢰성확보를 위해서는 앞서 말한 시험에서 얻은 결과에 따라 설계解析모델의 개량, 개발 및 검증을 할 필요가 있다. 또 수동적안전설비로 사용되고 있는 각종 밸브류에 대해서는 종전과 같이 충분한 신뢰성을 갖도록 해야 할 것이다.

3. 爐에의 적용가능성

(1) 爐출력과 관계

MSPWR에서 사용하고 있는 수동적안전시스템은 출력에 대한 제한은 적다. 출력상승에 따라 重力注入탱크의 용량과 復水탱크의 용량을 늘릴 필요가 있으나 증기발생기는 출력에 맞게 基數 및 용량을 선택하기 때문에 수동적안전시스템에 사용할 목적으로 증기발생기의 사이즈가 변경되는 일은 없다.

(2) 재산보호에 대한 배려

수동적안전시스템은 한번 동작하면 1차계통을 물에 잠기게 하기 때문에 재시동하는데는 많은 노력이 필요하게 될 지도 모른다. MSPWR에서는 일부 종전과 같은 능동적안전시스템을 도입해서 수동적안전시스템의 동작확률을 경감시키는 등 재산보호에 대한 배려가 되어 있다.

또 1차계통의 減壓설비도 1차냉각수를 방출하는 곳을 증력注入탱크로 한정하고 있어 설사

1차계통감압설비가 誤動作해도 1차계통이 물에 잠기는 일이 없도록 설계되어 있다.

그외의 검토사항

수동적안전시스템은 외부로부터 연속적인 에너지를 공급하지 않고 증력 등에 의해 안전기능을 달성하려는 것으로 종전의 펌프 등에 의한 강제적인 냉각에 비하면 구동력이 약하다는 것과 계속시간에 한계가 있다는 등의 문제점이 있다. 따라서 시스템을 도입할 때는 그 성능을 시험에 의해 충분히 파악할 필요가 있다.

또 수동적안전시스템은 한번 동작하면 1차계통을 물에 잠기게 하기 때문에 이를 복구하는데는 많은 시간이 필요하게 되므로 발전소의 가동률을 크게 떨어뜨릴 가능성이 있다. 따라서 수동적안전시스템의 동작확률을 일정한 범위내에 억제해서 발전소의 가동률에의 영향을 경감시킬 필요가 있다.

설비상으로는 증력으로 냉각수를 주입하기 때문에 탱크를 높은 위치에 설치해야 하므로 耐震설계가 중요하다. 이 점에 관해서도 충분한 배려가 필요하다.



신뢰성검토

1. 신뢰성에 대한 실증

(1) GDCS(重力落下式 비상용노심냉각시스템)

대형테스트에 의해 각종 테스트가 끝난 상태에서 그 신뢰성의 실증을 했다. 테스트결과 노심이 노출되지 않는다는 것이 확인되었다.

(2) I/C(Isolation Condenser)

높이방향으로 실물크기로 模擬한 대형테스트에 의해 각종 테스트를 했다. I/C dry well 내의 질소의 움직임이 중요해 앞서 말한 테스트에 의해 그 열제거성능을 확인하고 있다. 또

이 시험에 의해 해석코드의 검토도 하고 있다. 이 테스트에서는 I/C의 전열관은 실물길이의 3개로 했지만 앞으로는 I/C 單體의 管群테스트를 할 필요가 있다.

## 2. 신뢰성확보를 위한 대책

신뢰성확보를 위해서는 앞서 말한 테스트에서 얻은 결과에 따라 설계解析모델의 개량, 개발 및 검증을 충분히 할 필요가 있다. 또 PSS(수동적안전시스템)로 사용되는 밸브류에 대해서는 중전과 같이 충분한 신뢰성을 갖추도록 해야 할 것이다.

## 爐에의 적용가능성

### 1. 爐출력과 관계

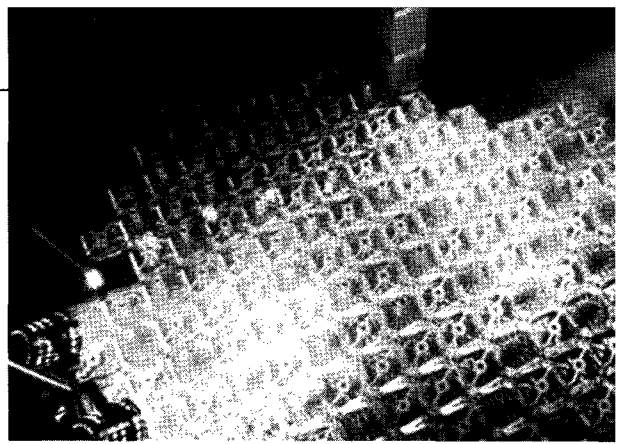
SBWR의 출력은 60만kWe지만 더 출력을 올렸을 경우의 PSS 특히 GDCS 및 I/C의 爐출력과 관계에 대해 살펴보기로 한다.

#### (1) GDCS

LOCA 발생시에 원자로압력용기내의 물은 급속히 격납용기에 방출된다. 원자로출력이 증가하면 원자로압력용기내의 수량을 늘릴 필요가 있다. 또 LOCA 발생시 노심을 노출시키지 않기 위해서는 원자로압력용기를 크게 하던가 아니면 accumulator를 별도로 설치해 LOCA 발생시 원자로압력용기에 냉각수를 주입한다. 또 GDCS를 동작시키기 위해 減壓밸브를 동작시키던가, 爐출력을 증가시켰을 경우에는 감압밸브의 개수를 늘린다. 이렇게 하면 GDCS의 풀수량을 원자로출력에 맞도록 늘릴 수 있어 이에 대처할 수 있다. 위와 같은 대책을 강구함으로써 GDCS는 대형로에도 적용가능한 기술이 될 수 있는 것이다.

#### (2) I/C

I/C는 냉각수를 비축하고 있는 대기에 개방된 I/C 풀의 수중에 설치된 전열관에 의해 除熱된다. 원자로출력을 올렸을 경우에 이 전열면적을 출력에 맞게 증가시키면 붕괴열을 제거할 수 있다. 전열면적을 늘리는 방법은 단지 전열관의 개수를 늘리면 된다. 또 I/C 풀의 수



량은 붕괴열에 상응하는 양으로 증가시킬 필요가 있다. I/C 풀은 격납용기위에 설치되어 있어 스페이스의 문제는 없다. 이상과 같이 I/C는 대형로에도 적용가능한 기술임을 알 수 있다.

## 2. 그 외의 검토사항

### (1) PSS도입에 따른 문제점과 그 해결책

PSS는 외부로부터의 연속적인 에너지공급 없이 重力이나 浮力과 같은 자연력을 이용하는 것으로 확실성은 있지만 動的인 안전시스템에 비해 구동력이 약한 경우가 많다. 따라서 시스템의 실험을 충분히 하고 해석코드에 의해 검증도 충분히 할 필요가 있어 현재 이를 실시중이다.

또 미리 소정의 수량을 높은 장소에 보유하고 있을 필요가 있기 때문에 격납용기나 원자로건물의 배치에 큰 영향을 준다. 따라서 PSS 설계와 배치설계시에 이를 충분히 배려해 균형이 잘 잡힌 설계를 할 필요가 있다. SBWR에서는 이 점을 충분히 고려해 설계하고 있어 격납용기는 직경 31m, 높이 28.5m로 되어 있어 耐震面에서도 문제가 없는 설계로 되어 있다.

### (2) 動的시스템과의 組合

SBWR안전계통의 受動化는 「안전시스템의 기능을 발휘하는데 필요한 에너지 이외는 안전시스템에 외부로부터의 연속적인 에너지공급을 하는 일이 없이 원자로를 안전하게 정지시킬 수 있는 능력을 부여하는 것」을 의미한다. 이런 뜻에서 SBWR의 안전시스템은 수동화되어 있다고 볼 수 있다. 앞서도 말했듯이 수동화함으로써 SBWR의 안전시스템단순화에 도움이 되고 있다.