

단순화 가압경수로의 타당성 평가

田畑 廣明

일본원자력발전(주) 연구개발단 단장

吉村 元孝

일본원자력발전(주) 연구개발단 부장

요약

본의 대학과 연구 기관들은 피동형의 고유 안전 계통을 갖는 중소 용량의 경수로에 관한 연구를 수행해 왔다. 지금까지 일본은 신규 원전의 부지 확보에 어려움을 겪어왔기 때문에, 가급적 대용량의 원전을 선호해 왔다.

따라서 당분간 일본에서 중소 용량의 원자로 (600MW급)가 건설될 가능성은 낮다.

그러나 일본의 사업자들은 단순 피동형 기술을 대용량의 원자로 (1,000 MW 이상)에 적용시키기 위하여 제너럴일렉트릭사·도시바

사·히다치사·웨스팅하우스사·미쓰비시사 등과 협력하여 왔다(그림 1).

일본에서 원자력 발전 사업이 지속될 수 있기 위해서는, 다음과 같은 문제가 해결되어야 한다.

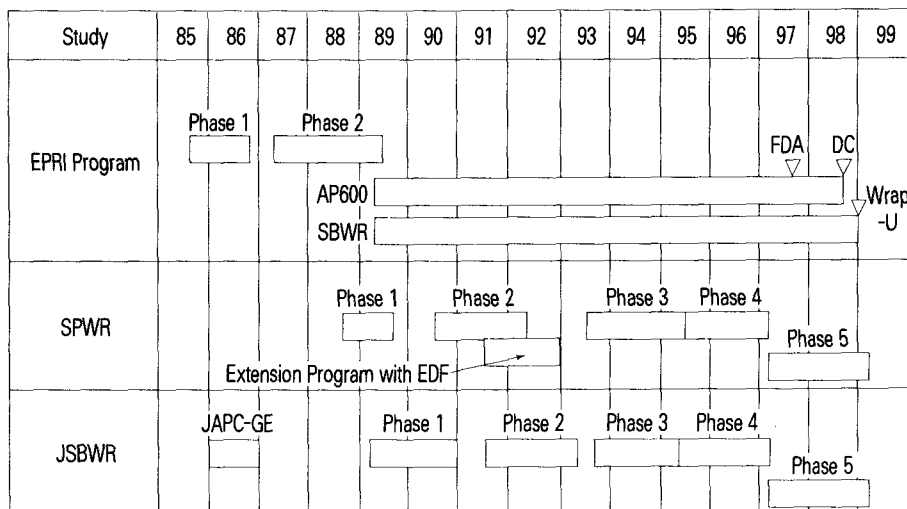
① 원자력의 필요성에 대한 지역

주민의 이해 및 국민적 합의 도출

② 에너지 수요가 높은 지역에 근접한 신규 원전 부지의 확보

③ 여타 전력원에 대한 경제적 우위의 확보

④ 가동 원전의 증가에 따른 우수 인력의 확보



(그림 1) 미국과 일본의 피동형 원자로 연구 현황

⑤ 장기적인 기술 관리 시스템의 확립

SPWR의 개념

피동형 원전 설계는 기존의 능동형 안전 계통을 피동형 안전 계통으로 대체하는 개념이다.

피동형 안전 계통은 펌프 또는 터빈과 같은 구동 부분을 활용하지 않는 대신, 중력과 저장된 에너지를 사용한다.

기존 경수로의 능동형 안전 계통은 보조 계통을 포함하여 대단히 복잡하게 구성된다.

이에 비해서 피동형 안전 계통은 외부 전원을 필요로 하지 않고, 탱크와 밸브 같은 비교적 단순한 기기로 구성된다.

게다가 사고 후 72시간 정도는 운전원의 조치를 필요로 하지 않기 때문에, 운전원의 업무 부담을 완화시킬 수 있도록 설계된다.

이러한 설계 개념은 많은 이점을 지니고 있다.

① 발전소 설계의 단순화에 따라서 전체 기기수가 줄어들고 정비가 쉬워진다.

② 안전성과 신뢰성이 증진된다.

③ 사고 및 과도 상태에서 조치가 용이하며, 인적 실수 가능성을 줄여줌으로써 신뢰도가 증가된다.

④ 원자력에 대한 합의의 도출이 용이해진다.

SPWR의 개발

일본원자력(주)는 1,000MW급 차세대 원자로의 개발에 필요한 피동형 기술의 개발을 주도하고 있다.

일본원자력(주)는 운영과 정비가 용이하고 발전 단가면에서 다른 전력원과 경쟁할 수 있는 BWR 및 PWR의 설계에 노력을 기울이고 있다.

단순화 가압 경수로 (SPWR Simplified PWR)의 연구에는 홋카이도·간사이·시코쿠 및 큐슈 지역의 전력 회사와 프랑스전력공사·웨스팅하우스사·미쓰비시사 등이 참여

하고 있다.

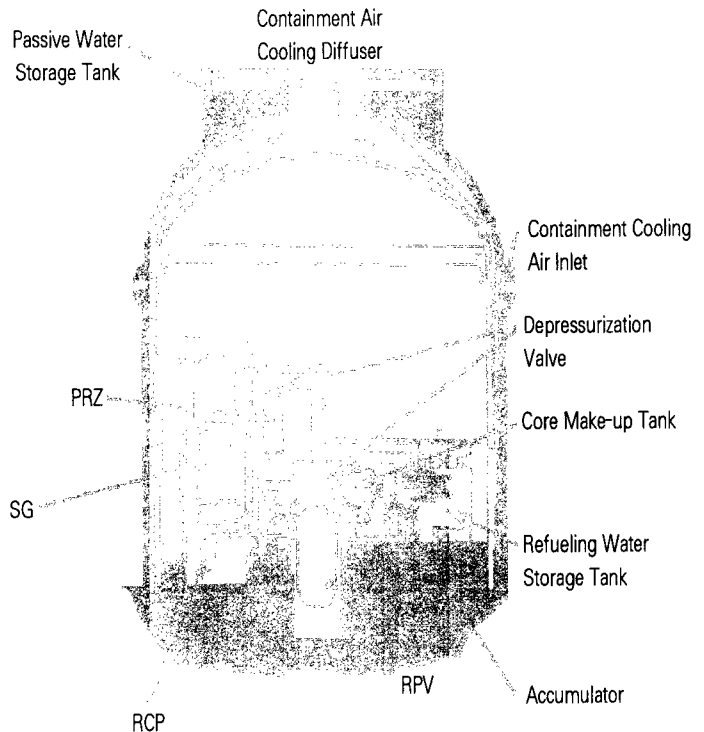
AP-600 설계의 토대 위에서 1,000MW급 3-루프 SPWR이 타당성이 입증되었다.

SPWR은 일본의 안전 규제 요건과 지진 안전 요건에 부합됨은 물론, 일본 전력 사업자의 선호도를 만족할 수 있도록 설계된다(그림 2).

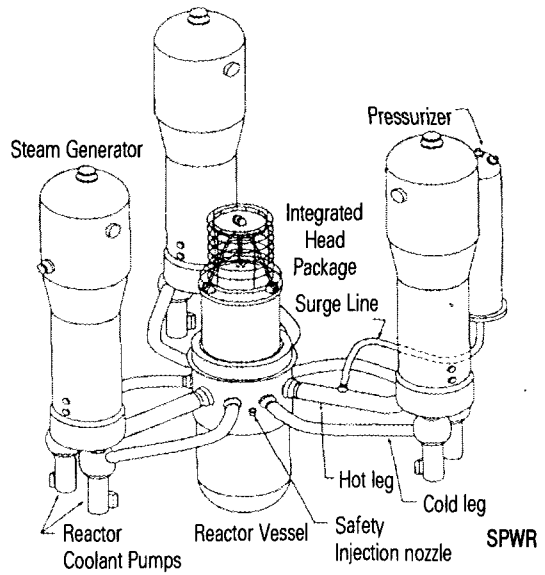
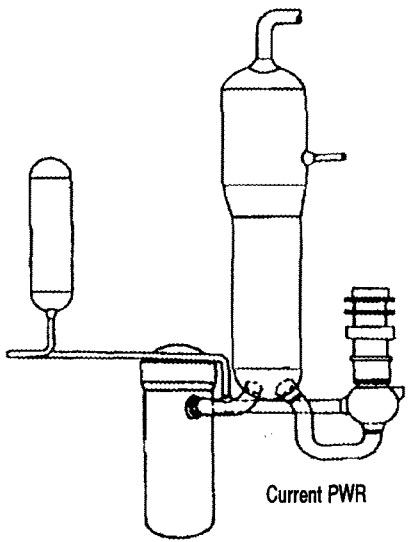
이러한 합작 연구는 차세대 원자로의 개발에 많은 기여를 하였다.

SPWR의 연구 개발

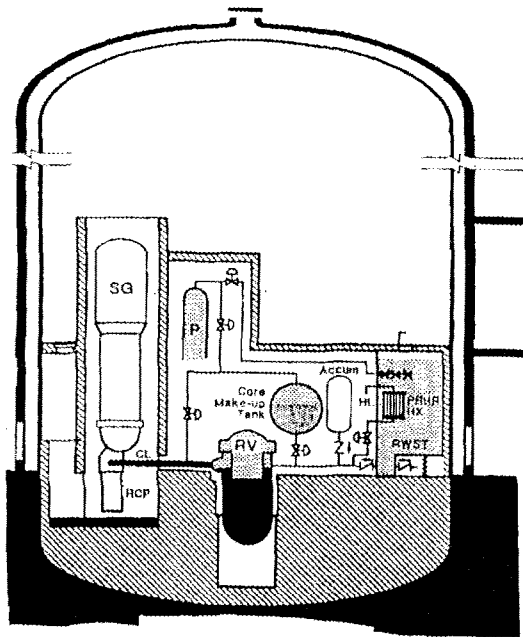
1. SPWR의 기본 개념



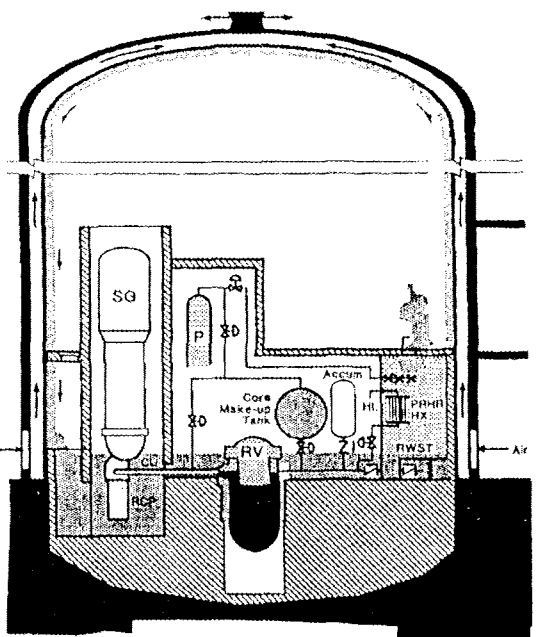
〈그림 2〉 SPWR의 개념



(그림 3) 원자로 냉각 계통



LOCA(Initiation)



LOCA(Long Term)

(그림 4) 피동형 안전 설비

AP-600은 원자로 냉각재 펌프로 canned motor pump를 이용함으로써 cross overleg와 shaftseal을 제거하였다.

그러나 기존의 canned motor pump의 제작상의 능력으로 인하여 2개의 저온관이 1개의 루프로 합쳐지도록 되어 있다.

안전 계통은 기존의 고압 안전 주입 펌프 대신에 노심 보충 탱크(CMT)로 구성된 중력 주입 계통을 이용하며, 방출 밸브와 격납 건물 내의 재장전수 저장 탱크(IRWST)도 이용된다(그림 4).

잔열 제거를 위한 장기 노심 냉각은 자연 대류와 중력 살수 계통이 담당한다.

안전 계통에서 모든 펌프를 배제함으로써 필수 교류 전원, 보조 냉각 계통 및 환기 계통과 같은 안전 기준을 만족하도록 설계되어야 하는 많은 보조 계통이 불필요해지며, 이러한 보

조 계통들의 공통 원인 고장의 가능성도 배제된다.

SPWR은 위에서 설명한 AP-600의 설계 개념을 채택하고 있다.

기본 개념의 안전성은 피동형 안전 계통이 건전하다는 것을 입증할 수 있도록 계통별로 분석된다.

2. SPWR의 평가

가. 안전성 평가 결과

확률론적 안전성 평가와 안전 설비는 SPWR이 기존의 원전에 비해서 과도 상태시 및 사고시에 보다 안전하게 운영된다는 것을 입증하였다.

① 설계 기준 사고

피동형 안전 계통은 기존의 비상 노심 냉각 계통과 같은 고압 안전 주입 펌프를 가지고 있지 않지만, 기존의 안전 기준을 모두 만족하고 있다.

예를 들면 냉각재 상실 사고시 핵연료의 최대 온도는 노심 출력 밀도를 낮추고, 원자로 용기의 크기를 크

게 하여 원자로 냉각재 재고량을 증가시킴으로써 감소되었다.

1,000MW급 이상의 원전에 대한 사고 해석 결과, 사고 후 72시간은 운전원의 조작 없이도 발전소는 안전한 상태를 유지함이 입증되었다.

피동형 안전 계통의 냉각수 주입과 압력 방출은 증기 발생기 세관 파열과 소형 냉각재 상실 사고와 같은 사고 직후에 이루어지는 복잡한 운전원 조작을 불필요하게 하였다.

② 확률론적 안전성 평가(PSA)

SPWR의 노심 손상 확률은 10E-7reactor-year이다.

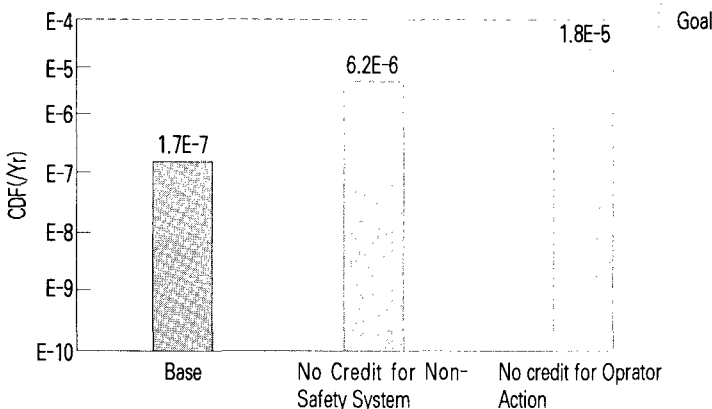
이 수치는 비상 교류 전원을 보장한 일본의 개량형 원자로의 노심 손상 확률과 동일한 것이다.

SPWR은 기존의 원전보다 적은 수의 기기를 이용하고, 운전이 용이함에도 불구하고 높은 안전 수준을 유지하고 있다.

AP-600이나 SPWR이 교류 전원 완전 상실시나 운전원의 조치가 없는 최악의 사고시에 연료 손상 확률을 10E-5reactor-year보다 훨씬 낮은 값이다.

SPWR은 공기를 자연 순환시킴으로써 격납 용기를 냉각시키는데, 이 방법은 격납 용기를 이용한 잔열 제거 방법으로 상당한 신뢰성을 갖는다.

조치하기 어려운 사고 상황에서도 위에서 언급한 격납 용기 냉각 방식은 결코 실패할 수 없기 때문에 격납



(그림 5) AP-600 확률론적 안전성 평가(출력 운전중)

용기 내부 압력은 격납 용기 손상 압력보다 현저하게 낮게 유지된다.

따라서 격납용기는 방사능의 유출을 방지하면서 건전성을 유지하게 된다.

③ 피동형 안전 계통의 문제점

피동형 안전 계통은 펌프에 의한 주입 계통보다 더 작은 주입구(injection head)를 가지고 있다.

따라서 주입 배관의 체크 밸브가 고착되지 않았는지, 피동형 안전 계통이 모든 사고에 적절히 대응할 수 있는지를 확인하는 것이 필요하다.

미국과 유럽에서는 AP-600의 계통 및 기기에 대한 안전성 시험이 광범위하게 수행되었다.

피동형 안전 계통의 성능에 관한 우려, 예를 들면 중력 계통의 약한 안전 주입력 등에 관한 문제는 미국 원자력규제위원회(NRC)의 안전 심사가 끝나는 97년경에는 밝혀질 것이다.

안전 주입에 관한 주요 시험은 현재까지 수행중에 있다.

NRC는 일본 원자력연구소의 ROSA 실험 장치를 이용하여 NRC의 사고 해석 코드의 타당성을 확인하기 위한 실험을 수행하였다.

그 시험은 94년말에 완료되었으며, 피동형 안전 계통은 예상하였던 성능을 발휘하였다.

피동형 계통은 기기보다는 계통 자체에 그 성능을 의존하고 있기 때문에 원자력 산업계는 피동형 계통을

일본의 원전에 본격적으로 적용하기에 앞서 충분한 사전 시험을 수행하여야 한다.

나. 일본의 SPWR 수용 가능성

미국과 일본의 규제 요건의 가장 큰 차이점은 내진 설계 및 선량 평가 기준 및 방법론에 있다.

① 지진 안전성 향상

원자로 1차 계통과 원자로 건물의 지진 해석은 일본의 지진 조건과 토양과 구조물과의 상호 작용에 기초하여 수행되었다.

기초 암반, spring constant와 dumping coefficient 등은 일본 내의 기존 원전 부지 중에서 최악의 조건을 적용하였다.

지진 안전성 분석 결과 1,000MW급 SPWR은 다음과 같은 설계 변경을 통해 일본의 지진 안전성 요건을 만족하는 것으로 확인되었다(그림 6).

첫째, 차폐 건물의 상부는 돔 형식으로 건설되어야 한다.

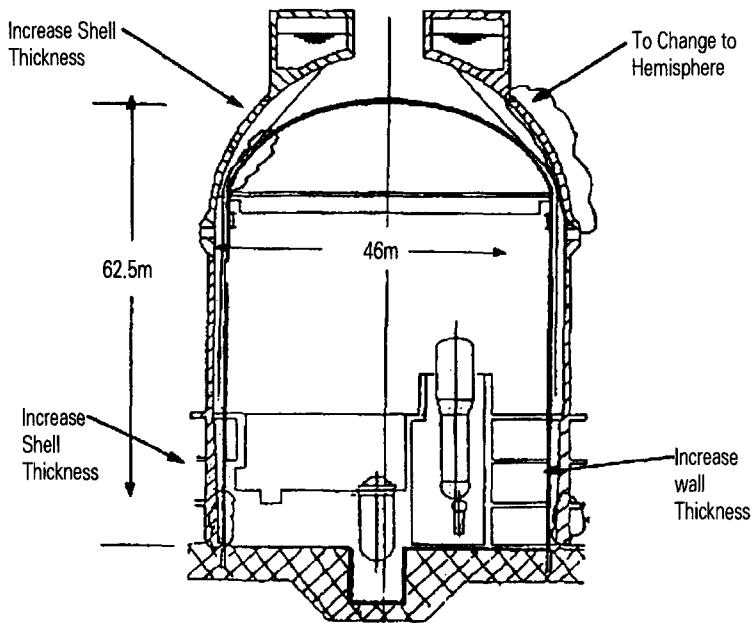
둘째, 원자로 건물의 하부 폭은 최소한 65m 이상이 되어야 한다.

셋째, 차폐벽의 두께는 1.4m 이상이어야 하며, 고강력 콘크리트(41N/cm³)로 건설되어야 한다.

넷째, 격납 용기 하부 셸의 두께는 44mm 이상이 되어야 한다.

② 방사선량 감소를 위한 조치

피동형 필터 계통에 관한 연구는



(그림 6) 내진 설계

AP-600이 새로 설정된 실제적인 선원항에 의해서 평가되었기 때문에 SPWR은 기존의 요오드 필터를 필요로 하지 않는다.

그러나 일본에서는 아직도 새로운 선원항이 적용되지는 않고 있다.

따라서 pneumatic accumulated source에 의해서 구동되고 기존의 선원항하에서 교류 전원에 의존하지 않고 선량 한도 기준을 만족할 수 있는 요오드 필터가 개발되어 있다(그림 7).

SPWR의 고도 방출에 의한 확산 효과를 평가하기 위한 시험이 수행되었다.

선박의 굴뚝 설계를 기초로 하여 상이한 형태를 가진 몇개의 확산기에

대한 성능 시험이 풍동 내에서 수행되었다.

여러개의 구멍을 가진 주변판을 갖춘 회전 확산기는 K/Q 값을 약 55% 감소시켰다.

활성탄 필터의 요오드 흡착 시험이 저온·저유속·고습도 환경에서 수행되었다.

부지 경계선에서의 전신 선량은 상기 설계 요소가 결합된 피동형 환경정화 계통을 활용함으로써 15~19rem으로 감소될 수 있다.

이 수치는 기존 원전의 경우와 유사한 값이다.

다. 단순화

SPWR에서는 안전 계통과 잔열 제거 계통이 격납 용기 내에 설치됨

으로써 원자로 건물의 크기를 줄이는 것이 가능하다.

그리고 화학 및 체적 제어 계통, 잔열 제거 계통, 기기 냉각 해수 계통 등은 비안전 등급으로 설계될 수 있다.

따라서 전체적인 계통이 단순화되어 건설 비용이 절감된다(그림 8).

또한 저출력 밀도의 노심과 피동형 안전 계통의 도입으로 1차 계통 탱크의 체적은 동급의 기존 원전에 비해서 120% 정도 증가되었다.

그러나 이 피동형 계통은 펌프의 용량을 50% 감소시켰으며, 밸브의 숫자를 55%, 건물의 체적을 40% 감소시켰다.

이러한 설계상의 변경은 정비를 용이하게 하고 많은 문제점들을 해소시켰다(그림 9).

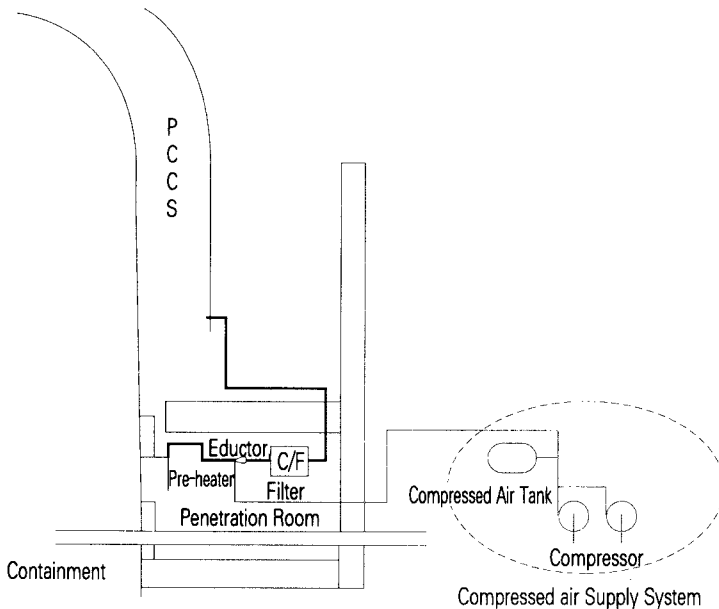
전형적인 비상 노심 냉각 계통 작동시, 기존의 원자로의 경우 냉각수가 노심 내로 주입되는 시간 동안 비상 디젤 발전기, 펌프, 모터 등의 많은 보조 기기들이 운전된다.

그러나 SPWR에서는 비상 노심 냉각 계통 작동시 단지 주입 배관의 밸브만이 동작하며, 냉각수 주입시 노심 냉각은 완전히 안정된다.

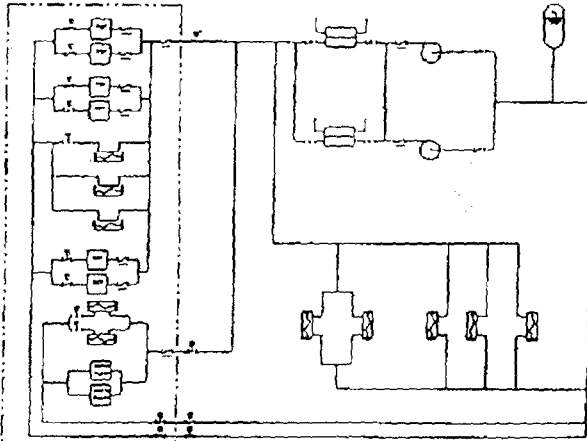
피동형 안전 계통이 격납 용기 내에 위치하고, 보조 계통이 보다 단순하기 때문에 기존의 안전 계통보다 정비가 용이하며, 경제적이고 신뢰성이 높게 된다.

라. 건설 비용의 절감

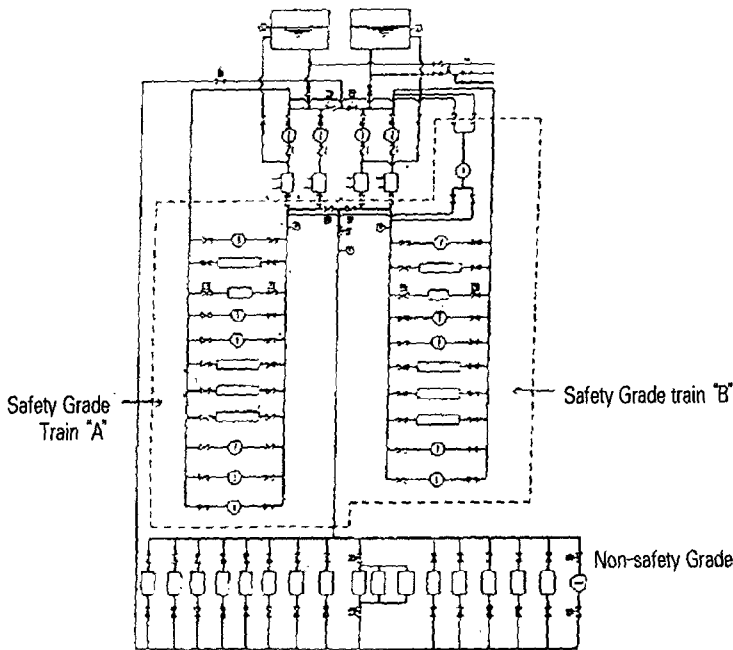
피동형 안전 계통은 구동 기기의



(그림 7) 피동형 환경 정화 계통



SPWR CCW System(Non-safety Grade)



CCW System of Conventional PWR

〈그림 8〉 기기 냉각수 계통의 단순화

숫자를 대폭 줄이고 보조 계통을 단순화시켰기 때문에, 안전 계통의 건설비를 절감을 가져왔다. 안전 계통 기기들이 격납 용기 내

에 위치하게 됨으로써 원자로 건물의 체적이 축소되었다.

1차 계통(원자로, 노심, 증기 발생기)은 can type의 원자로 냉각재 펌프를 채택한 것 외에는 기존의 원자로와 동일한 배열을 가지므로 건설 비용은 동일하다.

WH사는 SPWR의 건설비가 기존의 1,000MW급 원전 건설비의 80% 정도에 달할 것으로 평가하고 있다.

SPWR의 건설비는 격납 용기 제작에 이용되는 고인장 금속과 대용량의 격납 용기 및 탱크 등과 같은 요인을 고려하여 산출되었다.

이러한 구성품으로 인한 비용이 추가되지만, 안전 계통을 격납 용기 내에 설치함으로써 배관 길이를 단축시킬 수 있고, 원자로 건물의 크기를 줄임으로써 궁극적으로는 건설비가 절감되게 된다.

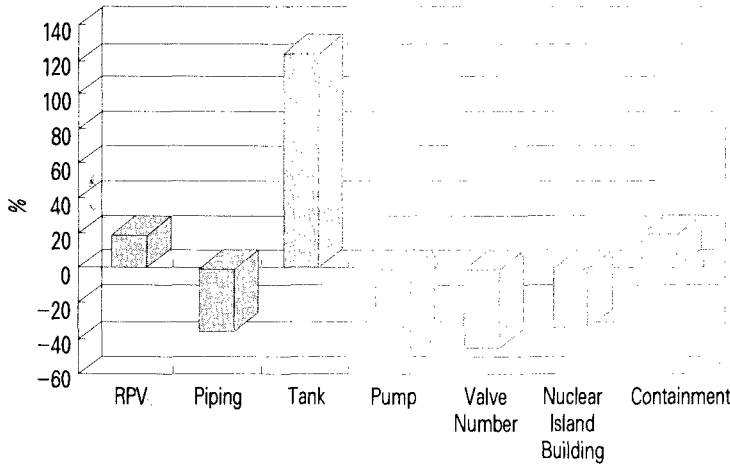
원자로 건물은 내부 기기들을 재배치함으로써 현재보다 더 줄일 수 있다.

건물의 크기를 줄이기 위한 연구가 현재도 진행중이다.

피동형 안전 개념은 기존의 원자로(hybrid power plant)에도 이용될 수 있다.

그러나 능동형 안전 계통의 일부 기기가 지속적으로 요구된다면, 안전 등급 전력 공급 계통 및 기기 냉각 계통은 제거될 수 없다.

따라서 hybrid power plant의 경



(그림 9) SPWR 자재 소요량 평가

제적 이익은 별로 없게 된다.

마. 작업 비용 절감

2000년경이 되면 일본의 산업 인력 규모가 축소되기 시작할 것으로 예측되고 있다.

또한 인력의 고령화도 시작된다.

원전의 주기적인 검사에 필요한 관리 인력 부족 현상이 이미 나타나고 있다.

따라서 건설하는 데 있어서 숙련 노동자가 보다 적게 요구되는 계통의 설계가 필요하다.

SPWR에서는 많은 구성품들이 줄어들어 시험 및 검사 필요성도 적어지고 있다.

연구원들은 1차 계통의 주기적 점검에 요구되는 인력 분석을 수행한 결과, 그러한 가정이 타당함을 확인

하였다.

그러한 분석을 통하여 다음과 같은 결과가 도출되었다.

피동형 계통의 기기들은 단순한 외관 검사만을 요구하는 탱크와 같은 단순한 것들이다.

그러나 기존의 계통은 상세한 검사와 연동 시험 등을 요구하는 펌프 등을 사용한다.

따라서 피동형 계통의 검사가 보다 용이하다.

SPWR의 건설에 소요되는 자재의 총량이 크게 감소됨으로써, 기존 원자로의 건설에 소요되는 투입 인력의 2/3만으로도 건설이 가능하다.

단순화된 계통에서는 펌프 및 밸브에 대한 복잡한 점검을 수행하는 데 기존 투입 인력의 1/2로도 수행이 가

능하다.

바. 환경적 측면

SPWR은 기존의 원전에 비해 소요 자재량, 발전소의 크기 및 부지 면적면에서 우위를 점하고 있다.

따라서 환경적으로도 적은 부담을 안고 있다.

SPWR은 건설 및 폐쇄가 상대적으로 용이하고 부지를 적게 사용한다.

기존의 발전소를 SPWR로 전환시키는 것도 용이하다.

맺는말

일본에서 차세대 원자로로서 요구되는 용량(1,500~1,700MW)의 SPWR을 설계하고 건설하는 것은 까다로운 일일 수 있다.

그러나 1,200MW의 용량을 갖는 중간 규모의 원전은 해외 시장에서 상당한 수요가 있으며, 일본 내에서도 아직까지는 건설의 필요성이 인정되고 있다.

따라서 SPWR은 인간 친화적인 특성을 갖는 고신뢰도의 안전한 원전으로 개발될 수 있다.

게다가 SPWR은 운전하고 정비하는 데 기존 원전과 같은 고도의 기술적 숙련을 요구하지 않고 경제성에도 불구하고, 높은 수준의 안전성을 달성하고 있다.

따라서 개발 도상국에게는 매력있는 원전이 될 것이다. ☼