

연료주기비용 절감은 이밖에도 중성자 흡수율이 낮은 지르칼로이 그리드와 스테인리스강제 래디얼 반사체에 의해서도 가능한데, 이 래디얼 반사체는 노심에서의 중성자 누출을 줄이는 효과가 있다.

이들 부품 사용으로 연료주기비용이 현재의 노형보다 5% 절감된다.

나. 원자로 내부부품

8개의 스테인리스강제 ring block으로 구성된 래디얼 반사체는 연료주기비용을 줄일 뿐만 아니라 원자로용 기와 원자로 내부부품의 신뢰성을 높이는 결과를 가져온다.

이것은 래디얼 반사체가 원자로용 기내의 중성자 유량을 현재 노형의 절반 이하로 줄이고, 또한 현재 노형에서 사용하고 있는 노심 baffle을 대신 할 수 있기 때문이다.

노심 baffle은 2,000개 이상의 볼트로 결합된 plate 조립체로 돼있는데 이를 볼트들은 중성자 유량이 많은 곳에 놓여 있다.

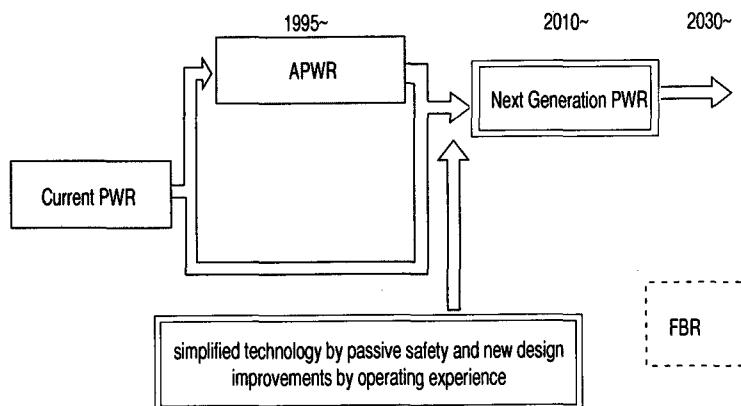
래디얼 반사체를 사용함으로써 이를 볼트가 모두 제외되는 것이다.

래디얼 반사체 외에 원자로 내부부품에는 많은 설계변경이 이루어졌다.

예를 들어 큰 노심을 수용하기 위해 lower plenum에서 안정된 흐름이 일어나도록 lower tie plate(원형)가 사용되었으며, reactivity control cluster(RCC)의 fretting 마모를 방지하기 위해 개량된 guide tube가 사용되었다.

(표 1) Principal Parameters of the APWR

	APWR	Current 4-loop PWR
Electrical Output	approx. 1,420MWe	1,180MWe
Thermal Power	approx. 4,100MWt	3,423MWt
Fuel Type	Advanced 17×17	17×17
Number of Fuel Assemblies	257	193
Effective Length of F/A	approx. 3.7m	approx. 3.7m
Core Loading	approx. 119MTU	approx. 89MTU
Number of RCCs	77	53
Reactor Vessel	approx. 5.2m IDx14m H	approx. 4.4m IDx13m H
Steam Generator	70F-1	52F
Reactor Coolant Pump	100A	93A-1
Flow Rate(m ³ /h/loop)	approx. 2.5×104	approx. 2.0×104
Turbine	TC6F52	TC6F44
Reactor Containment	PCCV	PCCV
Engineered Safeguard Sys.	4train(mechanical)	2train
Refueling Water	inside CV	outside CV
Reactor Protection Sys.	digital	analog
Reactor Control Sys.	digital	digital
Main Control Board	advanced type (console type) (touch screen)	base (bench board) (hard switch)



(그림 1) Flow of Development of PWR in Japan

다. 원자로용기

원자로용기 내경은 257개의 연료다발을 수용하기 위해 5.2m나 된다.

이같이 큰 용기임에도 불구하고 노

심 부위에 대해서는 일본에서 이미 해

오고 있는 대로 ring 단조방식이 사용되었다.

래디얼 반사체를 사용함으로써 원

자로용기의 신뢰성도 높아졌다.

원자로용기 헤드의 관통부분의 응력부식균열을 방지하기 위해 재질을 변경하고(합금600에서 열처리된 합금690으로) 원자로용기 헤드의 냉각재 온도를 원자로 용기입구온도까지 내리는 방안이 채택되었다.

〈그림 2〉는 APWR과 현재의 4-루프형 PWR을 비교한 것이다.

2. 주요기기

가. 증기발생기

APWR의 증기발생기(SG) 형식번호는 70F-1로 그 전열면적은 터빈발전기의 효율을 높이기 위해 기존의 원전에서 사용하고 있는 것보다 높은 증기압력을 기준으로 하여 크기가 결정되었다.

또한 튜브 크기도 기존의 원전에서 사용하고 있는 7/8인치에서 3/4인치로 축소했는데, 이것은 내진설계를 위해 더 작고 견고한 부품을 사용하자는 데 그 목적이 있다.

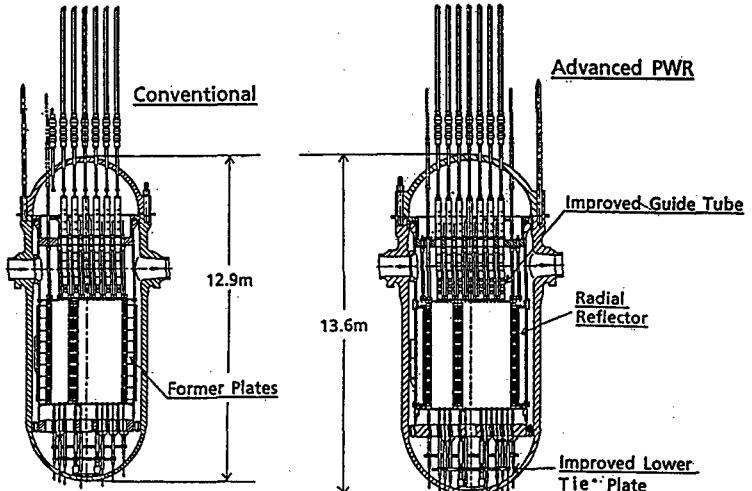
증기발생기의 튜브는 열처리된 690(TT690) 합금으로 만들어지는데, 이 합금은 내식성이 강해 전세계 대부분의 원전에서 사용하고 있다.

또한 튜브다발의 U-밴드 부분의 방진용 bar를 변경함으로써 신뢰성을 높였다.

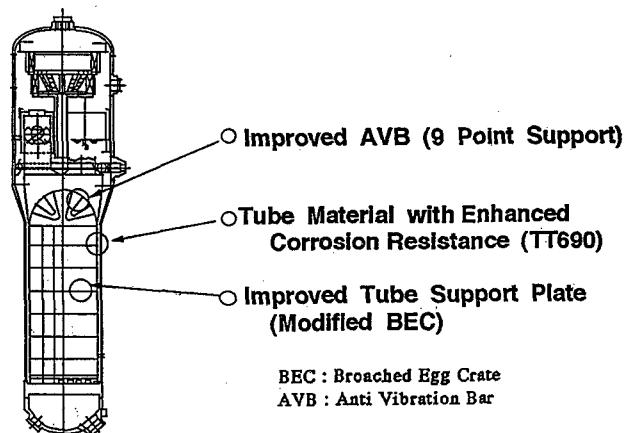
증기발생기의 개념도는 〈그림 3〉과 같다.

나. 원자로냉각재 펌프

100A형(60Hz) 원자로냉각재 펌



〈그림 2〉 Reactor



〈그림 3〉 Steam Generator

프(RCP)가 사용되고 있는데, 이것은 기존 원전의 RCP보다 유량을 15~20% 증가시킬 수 있기 때문에 사용되고 있다.

다. 주냉각재 파이프

주냉각재 파이프의 출입구측 파이

프 내경은 유량을 늘이기 위해 crossover 파이프와 같은 31인치로 확대시켰다.

신뢰성과 검사의 편의를 위해 스테인리스강으로 피복된 저합금강이 사용될 것이다.

다. 터빈발전기

저압터빈 최종단에 52인치의 대형 블레이드가 사용되며 최신식 3차원 흐름분석방식을 통해 고효율의 터빈 운전이 가능하게 되었다.

또한 응력부식균열을 방지하기 위해 monoblock 로터가 사용된다.

습기분리 재열기도 2단 재가열형으로 효율을 높일 수 있게 되었다.

라. 안전시스템

APWR의 안전시스템은 설계기준 사고를 최소화하도록 설계돼 있을 뿐 아니라, TMI와 체르노빌 사고에서 얻은 경험을 반영시켰다.

비상노심냉각시스템(ECCS)은 4개의 독립된 시스템으로 나뉘어져 있는데, 이렇게 함으로써 기존 원전에서 사용되고 있는 2-train 방식에서 요구하는 연결배관을 제외할 수 있게 된다.

기존 노형에서는 ECCS의 냉각수 주입은 고·저압 펌프와 accumulator를 통해 이루어지는데, APWR에서는 고압주입펌프에 의한 직접적인 용기주입과 공급특성을 개선한 개량형 accumulator를 사용하고 있어 저압안전주입펌프를 제외하고 있다.

마지막으로 격납용기(CV)에 연료 장전용수 저장탱크가 설치돼 있기 때문에 주입에서 재순환으로 전환시키는 장치가 제외되었다.

재래식과 APWR 방식의 ECCS 시스템을 <그림 4>에 비교해 놓았다.

증기발생기튜브 파열사고(일본 미하마원전 2호기에서 발생)와 방사능 누출사고(주증기관 파손 등), 중대사고 등을 최소화하기 위한 연구가 현재 진행되고 있다.

대체적으로 노심손상사고 발생확률은 APWR쪽이 일본의 기존 원전보다 훨씬 낮을 것으로 전망된다.

마. 주제어실과 계장·제어시스템

주제어반과 계장·제어 시스템은 최신식 기술을 도입해 설계되었다.

일본의 최신식 원전의 주제어반에는 인간공학적인 차원에서 모니터링과 운전능력을 개선하기 위해 CRT가

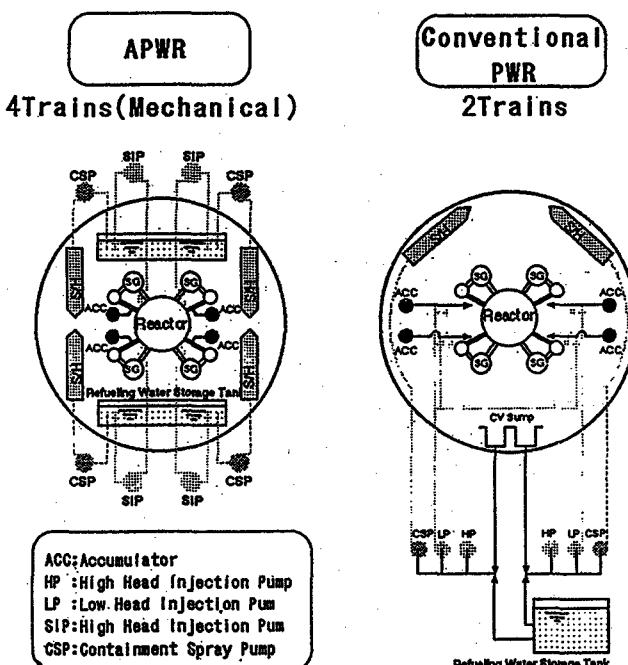
널리 사용되고 있다.

APWR도 모든 모니터링과 제어기능을 취합한 콘솔형 제어반을 도입함으로써 보다 개선된 기능을 갖추게 되었다.

운전면에서는 터치 스크린 운전시스템을 도입해 개별적인 스위치들은 제외시켰다.

운전의 편의를 위해 자동운전 부분을 늘였으며 이를 위한 운전지침도 마련될 것이다.

따라서 APWR의 주제어실은 인간적인 과정을 최소화하고 운전원의 작업량을 줄이도록 설계되었다고 볼 수



<그림 4> ECCS(Increased Redundancy and Independence)

있다.

원전의 디지털 제어방식은 당초 현장설비제어반과 보조설비제어반(폐기물처리시설제어반 등)에만 적용되었으나, 최근에는 주제어반까지 확대 적용하고 있다.

APWR에서도 안전방호설비를 포함해 모든 계장·제어설비에 디지털 방식이 적용될 예정이다.

신뢰성·운전성·보수성 등의 개선이 디지털제어설비의 자가진단기능과 완전자동시험기능을 활용함으로써 가능하게 되었다.

차세대 PWR

일본의 원자력발전에 대한 기본정책은 경수로에서 고속증식으로로 발전시켜 나가는 것이지만, 앞으로의 우리나라의 수급추세와 고속증식로의 개발현황을 감안할 때 적어도 21세기 중반까지는 경수로가 여전히 큰 역할을 할 것으로 전망된다.

따라서 앞으로 다음 사항을 추구해 나가는 것이 매우 중요할 것으로 생각된다.

- 원전의 경제성 제고
 - 운전 안전성과 신뢰성 제고
 - 발전소 요원들의 작업량 경감
 - 환경영향 최소화
- 이같은 목표를 달성하기 위해 일본의 PWR 운영업체 협의단체가 차세대 PWR을 개발중인데, 2010년대의 기동을 목표로 하고 있다.

1. 차세대 PWR 개발원칙

경수로가 지금까지 일본에서는 매우 양호한 안전운전실적을 올리고 있다는 점을 감안할 때, APWR도 더욱 높은 안전성과 신뢰성·운전성·보수성 등을 갖출 것으로 전망된다.

APWR 기술을 바탕으로 차세대 PWR의 개발은 다음 사항을 중점적으로 개선해야 할 것으로 보인다.

가. 경제성 제고

불안정한 화석연료 가격과 다른 종류의 발전기술 개발로 원자력발전의 경쟁력이 위협받고 있다.

원전의 경제성은 원자력발전이 앞으로도 계속 발전의 주류가 되도록 하기 위해 개선해 나가지 않으면 안된다.

차세대 PWR은 60년의 수명과 최소한의 발전원가를 구현할 수 있도록 개발해 나가야 할 것이다.

- 자본비 절감 : 시스템 간소화 등
- 가동률 제고 : 운전주기 연장, 고연소도 연료 사용, 연차보수 기간 단축 등
- 보수비용 절감
- 기기수명 연장, 부품교환 간소화

나. 안전성 제고

경수로는 이미 충분한 안전성을 확보하고 있지만, 21세기의 미래사회에 대비하기 위해서는 다음 사항들이 연구·검토돼야 할 것이다.

- 중대사고 관리
- 인간공학적인 개선 : 피동형 안전시스템, 원전설계 여유도의

최적화, 사고·고장시의 운전원

들의 작업량 경감 및 단순화

다. 발전소 요원들의 작업량 경감
21세기에는 노령화 사회로 들어가 인구분포에 큰 변화가 있을 것으로 전망된다.

따라서 그때에는 우수한 인력을 확보하기가 더욱 어려워질 것으로 전망되므로 운전·보수요원들의 작업량을 줄일 필요가 있다.

이를 위해서는 다음 사항을 중점적으로 연구·개발해야 할 것이다.

- 시스템 단순화
- 자동화
- 설비진단 개선
- 기기보수 간소화
- 피폭선량 경감

라. 환경영향 최소화

오는 21세기에는 사람들이 환경문제에 더욱 관심을 갖게 될 것으로 보이므로, 원전부지 확보도 더욱 어려울 것으로 전망된다.

따라서 앞으로는 다음 사항에 역점을 두어야 할 것으로 보인다.

- 방사성물질 배출감소
- 방사성폐기물 감소
- 환경과 조화되는 건축물 설계

2. 개발계획

2010년대에 첫번째 원전 가동을 목표로 차세대 PWR 개발은 다음과 같이 이루어질 전망이다.

- 95년말까지 전력업체 요구사항을 바탕으로 설계시방서 작성

- 97년 말까지 개념설계 완료
- 98년부터 5년간에 걸쳐 새로운 기기 및 계통에 대한 확인시험 실시

3. 차세대 PWR의 새로운 설계

차세대 PWR의 새로운 설계 내용 일부를 소개하면 다음과 같다.

가. 노심설계

차세대 PWR의 전기 출력은 1,500 MWe로 장기적인 주기운전을 하도록 돼 있다.

따라서 이 PWR의 노심은 APWR 보다 크다.

〈그림 5〉는 차세대 PWR의 새로운 노심설계 형태이다.

① 연료설계

20×20 배열에 14피트 높이의 새로운 연료형이 차세대 PWR의 큰 노심을 위해 현재 개발되고 있다.

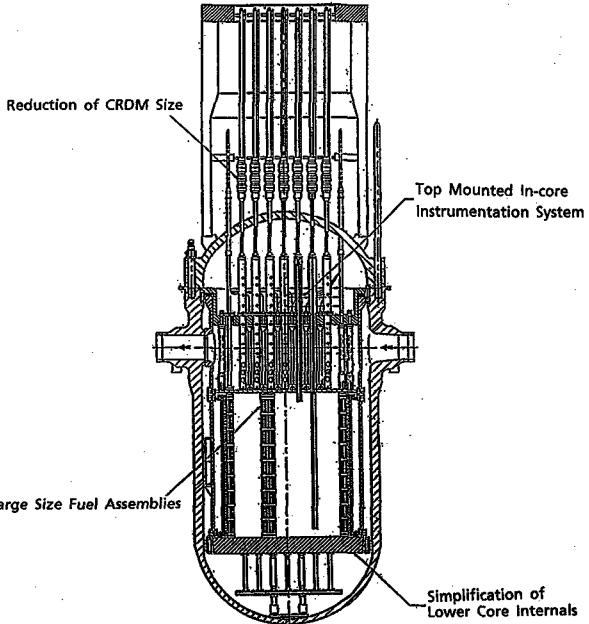
이같은 설계는 재장전되는 연료다발수를 줄임으로써 연료재장전기간을 단축하자는 목적이 있다.

② ICIS를 상부에 설치

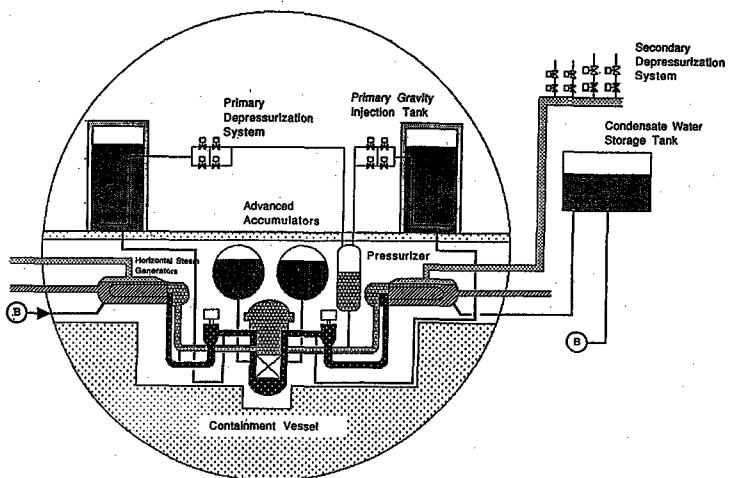
최상부에 ICIS를 설치하는 새로운 형식이 현재 개발되고 있다.

재래식 ICIS는 최하부에 설치하도록 설계돼 있지만 원자로용기의 신뢰성을 높이기 위해 이같이 설계를 한 것이다.

나. 노심냉각과 LOCA 발생시 열전달
피동형 노심냉각시스템과 피동형 안전시스템의 하나로 LOCA 발생시 최종 열흡수재에 열을 전달하는 피동



〈그림 5〉 Candidates of Technology Application for Next Generation PWR



〈그림 6〉 Passive Core Cooling System and Passive System for Heat Transfer to Ultimate Heat Sink during LOCA

형 안전시스템에 관해 설명한다.

〈그림 6〉은 차세대 PWR의 한 예를 보여주고 있다.

1차계통에도 2차계통과 같이 가압기 상부에 자동식 감압밸브가 설치돼 있다.

연료장전용수 저장탱크로 사용되고 있는 격납용기내에 설치된 중력식 주입탱크는 중력식 주입관을 통해 1차계통과 연결돼 있다.

LOCA 발생시 최종 열흡수재에 열을 전달하기 위해 사용되고 있는 수평형 증기발생기는 1차계통내에서 자연순환이 일어나도록 하기 위해 마련된 것이다.

〈그림 7〉은 1인치 정도의 작은 파열로 일어난 LOCA의 분석결과를 보인 것이다.

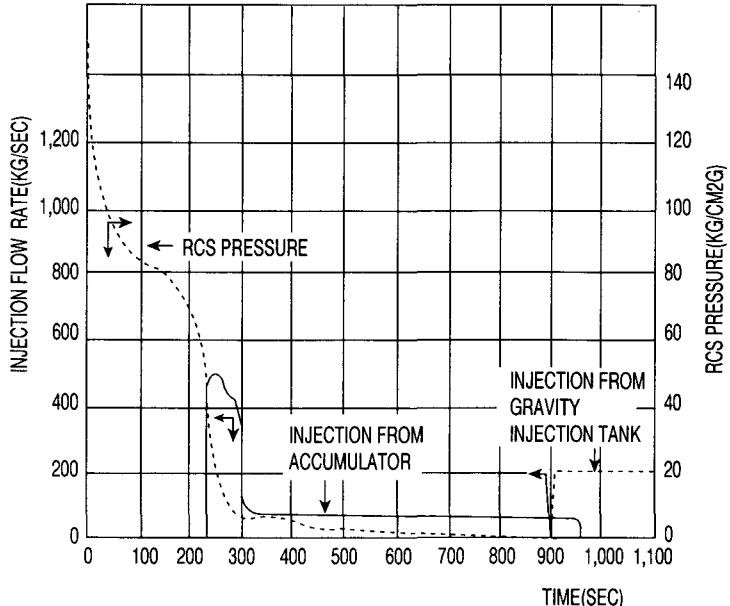
LOCA 발생시에는 1·2차계통의 감압밸브가 작동해 1차계통의 압력이 서서히 내려가 개량형 accumulator 와 중력식 주입탱크로부터 물이 공급된다.

〈그림 8〉은 증기발생기에 의해 최종 열흡수재에 열이 전달되는 과정을 보인 것이다.

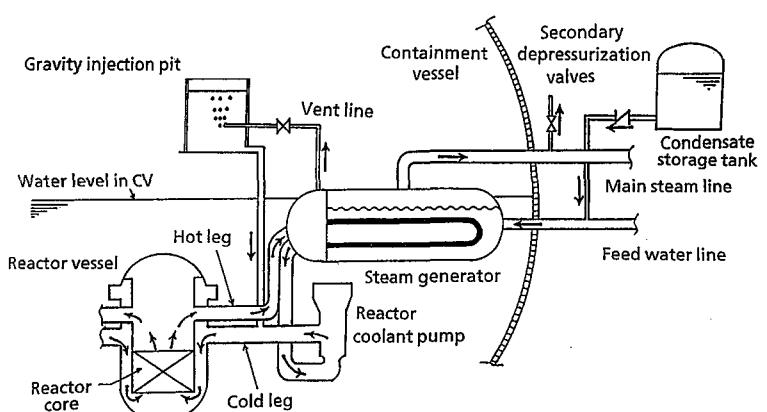
자연순환이 이루어지고 있는 1차계통은 파열사고 발생시 중력식 주입수에 의해 채워진다.

컨덴서가 중력에 의해 증기발생기 1차측에 냉각수를 보내 증기발생기안의 증기는 감압밸브를 통해 대기로 방출된다.

이 컨덴서는 3일간 봉괴열을 제거



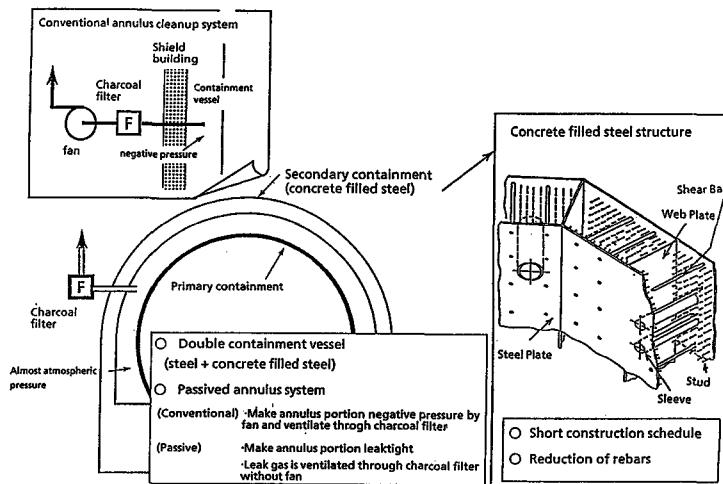
〈그림 7〉 Injection flow and pressure transients during unexpected opening of pressure relief valve



〈그림 8〉 Steam Generator Cooling System

하기에 충분한 냉각수 저장능력을 갖추고 있다.

불용축가스가 1차계통에 혼입된다 해도 증기발생기 채널 헤더에 설치된



〈그림 9〉 Passive Annulus Filter System by Using Double Containment

배기관을 통해 가스가 배출되기 때문에 1차계통의 자연순환에는 지장이 없다.

이 시스템의 특성을 들면 다음과 같다.

① 노심냉각과 LOCA 발생시의 최종 열흡수재에 대한 열전달은 피동형 안전계통에 의해 이루어지기 때문에 3일간의 유예기간이 주어진다.

② 1차 냉각수는 1차계통의 감압밸브를 통해 중력식 주입탱크로 배출되며, 감압밸브의 오동작으로 1차계통이 넘치는 경우는 없다.

③ 대규모 파열 LOCA 발생시 대량의 물이 1차계통으로 유입되기 때문에 노심내에서의 물의 비등현상은 단시간내에 끝난다.

따라서 격납용기 내부 공간에 방출되는 에너지양은 한정된 양이기 때문

에 격납용기 스프레이 시스템과 같은 내부공간을 냉각시키기 위한 장치는 필요없게 된다.

수평형 증기발생기에 대해서는 이미 이에 대한 기초연구가 끝났으며, 연구결과 사고시 1차계통에 불응축가스가 혼입된다 해도 자연순환이 그대로 유지된다는 것과 정상운전시에는 수직형 증기발생기와 같은 신뢰성을 유지할 수 있는 것으로 나타났다.

만약 재래식 PWR에서 사용되고 있는 수직형 증기발생기를 채택한다면 1차계통의 자연순환을 유지하기 어렵게 되는데 이는 적기에 잔열체거 시스템으로 시스템 전환을 해야 하기 때문이다.

이밖에 앞으로 더 연구·검토해야 할 문제들이 남아 있는데 증기발생기의 형식선정문제, 피동형 안전시스템

의 적용범위 문제 등이 그것이다.

다. 피동형 Annulus 시스템

재래식 PWR은 일반적으로 콘크리트조의 외부 차폐물로 둘러싸여 있다.

LOCA 발생시 annulus(격납용기 외부 차폐물사이의 공간)로 누출된 가스는 안전하게 설치된 팬에 의해 여과기를 통해 대기로 배출된다.

그러나 피동형 안전계통을 갖춘 원전에서는 능동형 안전시스템에 의존함이 없이 사고후 72시간 동안 원전 안전성을 유지할 필요가 있다.

이같은 요구조건을 충족시켜 주는 것이 여기서 말하는 피동형 annulus 시스템이다.

이 시스템은 〈그림 9〉에서 보는 바와 같이 샌드위치 모양으로 2개의 강판 사이에 콘크리트를 충전한 격납용기를 갖추고 있다.

이 2차 격납용기는 강판에 1차 격납용기와 함께 이중구조의 격납용기를 형성한다.

따라서 격납용기와 외부 차폐물 사이의 annulus 부분이 강철로 둘러싸인 기밀한 밀폐공간으로 대치되는 셈이다.

따라서 안전면에서 본다면 사고시 누출되는 방사성가스는 이 annulus 부분에 밀폐되는 것이다.

이같은 새로운 설계를 통해 APWR과 차세대 PWR은 안전성과 신뢰성·운전성·보수성·경제성 등이 모두 개선될 것으로 보인다. 88