

기·술·세·선

APR1000 설계 요건과 안전 설계 특징

Current Status of NRC Pre-Application Review on 4S

김명기, 유근배
한전 전력연구원

KEPCO는 APR1000 원전을 개발 중에 있다. APR1000은 2루프 1000MWe급의 가압경수로로, 국내에서 운영중이고 건설중인 검증된 OPR1000 설계를 기반으로 하고 있다. APR1000은 원전 수요자의 요구에 응하기 위해 안전성, 신뢰성 및 경제성을 설계에 고려하여 개발 중에 있다.

APR1000의 대표적인 설계 특성으로는 60년 수명, 0.3g 내진 설계, MMIS, 저온 덩개 원자로(Cold Head Reactor), 안전 주입 탱크 내의 피동형 유량 조절 장치 등이 있다. 본고에서는 APR1000의 설계 요건과 안전 관련 설계 특징을 소개하고자 한다.

개요

전 세계는 1960년대 이후 원자력발전소가 도입된 이후 꾸준히 안전성과 운전성 향상에 노력을 기울여 왔으며, 최근 미래 혁신 원자로인 GEN IV(4세대) 원자로를 연구중에 있다.

일반적으로 현재 가동중인 원전이나 신규 원전을 2세대, 3세대, 3+세대로 구분할 수 있는데, 이는 안전성, 설계 수명, 내진 설계, 피동형 설비 구비 등을 기준으로 분류하고 있다.

이런 기준에 따르면 국내 OPR1000을 비롯한 전 세계 가동 원전은 2세대 원전, APR1400과 같이 건설중이거나 신규 원전은 3세대 원전, 그리고 보다 피동형 설비를 구비한 APR+, AP1000은 3+세대 원전으로 명명할 수 있다.

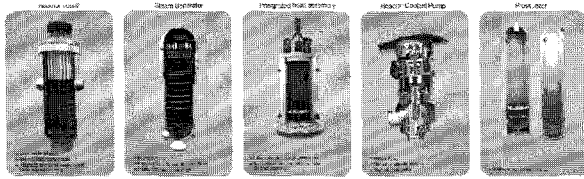
최근 원자력 시장과 규제 동향을 보면 신규 원전은 가동중인 2세대 원전보다 안전하고 기술적으로 진보

된 3세대 이상의 원전을 요구하고 있기에 원전 수출을 위해서는 3세대 원전 개발이 필수라 하겠다.

또한 세계 원전 시장을 용량 기준으로 보면 소형 원자로, 중형 원자로, 대형 원자로 시장으로 구분할 수 있는데, IAEA의 원자력 에너지 보고서에 따르면 개발도상국들은 자국의 전력망을 고려할 때 대정보다 중소형원자로를 희망하는 것으로 나타났다.

현재 시장에 나와 있는 가용한 중소형 원자로는 3세대 이상의 원전으로 AP1000(W/H), VVER(러시아), ATMEA1(아레바-미쓰비시), ACR1000(AECL)이 있다. 그러나 이들은 설계중이거나, 건설중에 있으며 아직 상업 운전 경험이 없다는 단점이 있다.

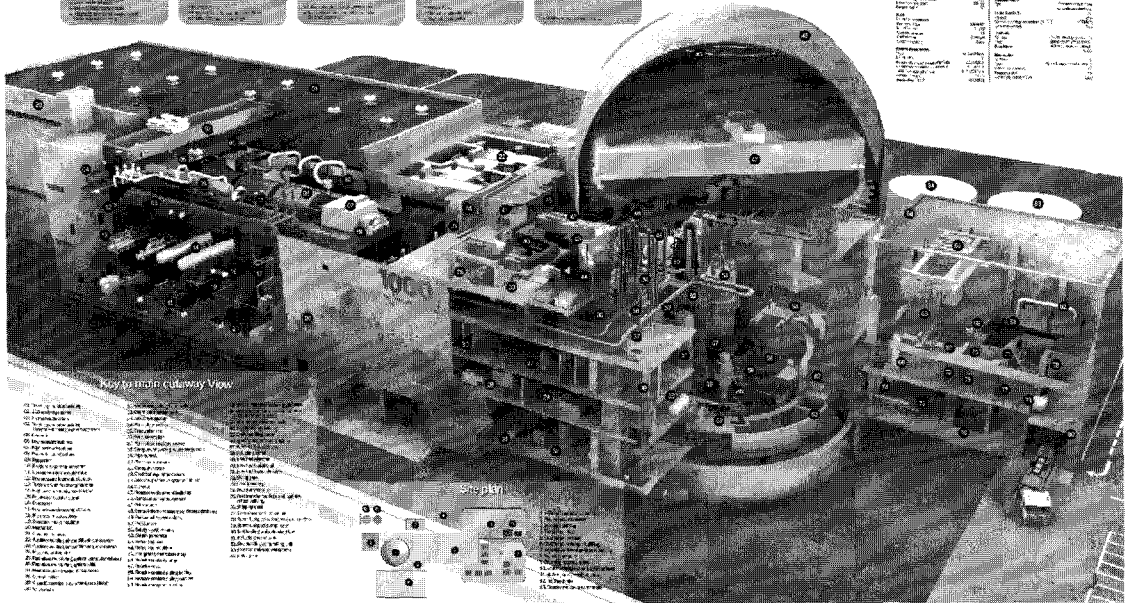
국내의 경우, 국내 표준형 원전을 바탕으로 지속적으로 안전성과 운전성이 향상된 OPR1000 원전은 그간 건설 경험과 우수한 운전 실적을 보이고 있으나 2세대 원자로라는 점에서 해외 진출을 위해서는 안



APR 1000

Main power plant data

Item	Value	Item	Value
Capacity	1000 MWe	Reactor Vessel	28.0 m
Primary Loop Pressure	15.5 MPa	Steam Generator	12.0 m
Secondary Loop Pressure	15.5 MPa	Integral Steam Generator	12.0 m
Design Life	60 years	Reactor Containment	30.0 m
Core Burnup	55,000 MWD/tU	Pressurizer	12.0 m
Core Power	3000 MWth		
Core Length	4.0 m		
Core Diameter	1.2 m		
Core Volume	1.5 m ³		
Core Mass	150 t		
Core Material	Low alloy steel		
Core Fabrication	Welded		
Core Inspection	Visual		
Core Replacement	Hot		
Core Refueling	Shut down		
Core Refueling Cycle	18 months		
Core Refueling Method	Shut down		
Core Refueling Frequency	Once		
Core Refueling Duration	18 months		
Core Refueling Cost	100 million USD		
Core Refueling Risk	Low		
Core Refueling Safety	High		
Core Refueling Reliability	High		
Core Refueling Availability	High		
Core Refueling Flexibility	High		
Core Refueling Efficiency	High		
Core Refueling Effectiveness	High		
Core Refueling Quality	High		
Core Refueling Quantity	High		
Core Refueling Quality	High		
Core Refueling Quantity	High		



APR1000 개요도

전성 향상이 요구되는 실정이다.

이런 상황에서 OPR1000을 바탕으로 한 수출형 1000MWe급 원전 개발이 KEPCO 최고 경영진에 의해 결정되었다.

이를 위해 먼저 수출 시장의 다양한 요구, 운영자 요건 및 최신 인허가 현안을 조사하였다. 조사 결과 중동 및 동남아시아를 중심으로 1000MWe 급 원전 시장이 존재한다는 것, 시장은 입증된 기술로 설계된 3세대 이상의 원전을 요구한다는 것, 조기 시장 진입 (Time to Market)이 해외 원전 시장 진출에 가장 중요하다라는 것이 도출되었다.

이러한 배경 하에 OPR1000을 기반으로 APR1400에서 이미 입증된 최신 안전 설비를 선별적으로 적용하는 3세대 APR1000 개발이 본격 착수되었다. APR1000의 개발은 1단계로 시장 조기 진입을 위해 기본 설계를 2년에 완성하고, 2단계는 부지가 확정되면 이를 반영한 상세 설계를 추진하는 것으로 정하였다.

그러나 통상적으로 신규 원전 설계에서 언급하는 기본 설계시의 설계 완성도와 APR1000의 기본 설계시의 설계 완성도를 비교하면 APR1000은 이미 검증된 OPR1000을 기반으로 하기에 설계 완성도가 매우 높다 하겠다.

다음은 APR1000의 일반 특징과 설계특징에 대해

설명하고자 한다.

APR1000의 일반 특징

<표 1>에서 보여주는 바와 같이 APR1000 일반 설계 요건은 안전성 향상, 운전 편이성, 그간 OPR1000 건설, 운영을 통하여 취득한 경험을 바탕으로 도출되었다.

먼저 안전성 향상을 위해 신형 원전 기준에 부합하는 노심 손상 빈도 요건 만족, 중대 사고 대처 설비 추가, 포괄 부지 내진 설계, 충분한 안전 여유도 확보를 들 수 있으며 운전성 향상을 위해서는 원전 설계 수명 60년, MMIS 적용, 운전 여유도 확보 등과 중동 및 동남아시아의 기후 조건, 해양 온도 조건 등이 설계에 고려되었다.

APR1000의 안전성 수준은 다음과 같이 신규 원전의 요건을 충족한다.

- 노심 손상 빈도(CDF)는 1.0×10^{-5} /reactor-year
- 대량 방사선 누출 빈도(LDF)는 1.0×10^{-6} /reactor-year

1. APR1000에 적용된 안전성 향상 설계 특성

〈표〉 APR1000의 주요 설계 요건

항 목	요 건
일반 요건	
용량	2,825MWt/1000MWe
설계 수명	60년
내진 설계 기준	안전정지 지진 0.3g
부지 및 계통 주파수	일반 부지/ 50Hz 혹은 60Hz
I&C	완전 디지털, MMIS
안전 관련 요건	
노심 손상 빈도	< 10-5/Ry
대량 누설 빈도	< 10-6/Ry
운전 여유 시간	최소 30분
SBO 대처 시간	최소 8시간
열적 여유도	> 10%
안전 해석	다중 증기발생기 전열관 파단 사고
노심 설계 요건	
운전 주기	18~24개월
연료	UO2 및 30% MOX
부하 추종 운전	주파수 제어를 포함한 자동 부하 추종
성능 요건	
발전소 이용률	> 90%
불시 정지	< 0.5회/year
재장전 정지 기간	< 20일

- 원전 포괄 부지 설계 및 0.3g 내진 설계
- 안전 주입 탱크 내에 있는 냉각수를 더욱 효율적으로 사용하기 위한 피동형 유량 조절 장치 설치
- 안전 감압 기능을 더욱 신뢰성 있게 하기 위한 POSRV(Pilot-Operated Safety Relief Valve) 설치
- 중대 사고시 고압 노심 용융 사고를 완화시키기 위한 중대 사고 전용 감압 밸브 설치
- 중대 사고시 노심 용융 상태에서 용융물을 원자로 내부에 가두기 위한 ERVC(External Reactor Vessel Cooling) 적용
- 중대 사고시 원자로 집수조 전용 침수 계통 설치
- 분산 디지털 I&C 시스템으로 인간 공학적으로 설계된 MMIS를 가진 완전히 디지털화 된 컴퓨터 기반의 제어실

- 격납 건물 항공기 충돌에 대한 내하력 분석
- 원전 운전의 유연성을 제공하고 불필요한 발전소 안전을 위협하는 요소를 줄이기 위하여 열적 여유도 증가

2. APR1000의 운전성 향상을 위한 설계 특성

- 원전 설계 수명 60년 설계
- 중동 및 동남 아시아 지역 요건(부지 조건, 해양 조건, 대기 조건)에 적합한 설계
- 자동 부하 추종 및 주파수 제어 운전 능력 보유
- 30% MOX 연료 장전 및 24개월 장주기 능력 확보

3. APR1000의 경제성 향상을 위한 설계 특성

- 기존 모듈화 공법을 바탕으로 4D 시뮬레이션을 통한 공정 관리 프로그램 개발
- 40개월(F/C부터 F/L) 공기 개발
- 주증기관 LBB 적용 기술 개발

APR1000의 주요 건물은 원자로 건물, 보조 건물, 복합 건물, 터빈-발전기 건물, 핵연료 건물 및 비상 디젤발전기 건물로 이루어져 있다. 터빈-발전기 건물은 원자로 건물에 대하여 수직 방향으로 배치되어 있으며, 복합 건물은 출입 통제 구역, 핵폐기물 처리 구역 및 방사성 기계공작실을 포함하고 있고, 양 호기 건설을 대비하여 양 호기에서 공동으로 사용되도록 설계되었다.

단일 호기를 기준으로 APR1000의 일반 배치가 설계되고 있는데, 양 호기 건설시 Slide-along 배치로 쉽게 확장이 가능하다.

APR1000 주요 설계 특징

1. 60년 수명

APR1000은 방사선 조사, 설계 기준 사건과 기계적 및 열적 하중으로 기인한 경년 열화 효과를 고려하여 60년 동안 RCS의 주요 기기와 구조물의 건전

성이 유지되도록 설계된다. 그리고 주급수 계통의 LBB 적용을 위해 설계요건이 개발된다.

2. 0.3g 내진 설계

원자력발전소의 구조물, 계통 및 기기는 지진에 견딜 수 있도록 설계하거나 지진을 견디는 데 적합하다는 것을 보여야 한다. 내진 설계 요건의 기본 개념은 ① 일반 대중은 사고시 방사선 누설로부터 반드시 보호되어야 하며 ② 지진이 발생중이거나 지진이 발생한 후에 안전하고 순차적인 운전 정지를 보장하는 것이다.

이를 위하여 내진 설계 요건에 따라, 2종류의 지진, 즉 운전 기준 지진(Operating Basis Earthquake, OBE)과 안전 정지 지진(Safe Shutdown Earthquake, SSE)이 원자력발전소 설계 단계에서 고려된다.

APR1000 설계에서는 NRC의 요건에 비추어 OBE의 수준이 SSE 수준의 1/3이므로 OBE에 대한 지진 해석은 설계에 반영되지 않고 SSE가 설계에 반영된다.

OBE의 경우는 설비와 기기의 검사 및 검증 기준으로 사용된다. 설계에 사용되는 SSE의 첨두가속도는 0.3g이며, OBE에서와 같이 2개의 수평 방향과 1개의 수직 방향 가속도 성분은 같은 값을 가진다.

SSE 지진이 발생했을 경우 구조물, 계통 및 기기가 주어진 기능을 할 수 있고, 허용 응력, 허용 변형도 및 변형 한계 내에 있도록 설계된다.

3. 50Hz/60Hz 전력망 적용

APR1000은 50Hz 전력망 혹은 60Hz 전력망에 연결되어 운전할 수 있도록 설계된다.

APR1000이 50Hz에서 연결되기 위해서는 50Hz 용 원자로 냉각재 펌프 요건 개발, 터빈 발전기 특성 분석, 그리고 각종 모터에 미치는 영향을 RCS 열수력 현상과 일반 설비 배치에 대한 분석을 통하여 설계 요건이 개발된다.

60Hz일 경우에 기존 OPR1000 설계 요건을 적용하면 되므로 APR1000은 50Hz 전력망 혹은 60Hz

전력망에 공히 사용될 수 있다.

4. 저온 덮개 원자로

APR1000의 원자로 덮개가 저온이 되도록 설계된다. 저온 덮개는 원자로 덮개 부위 내부의 유체 온도가 저온 관측 배관 내부 유체 온도만큼 낮은 온도를 유지하는 것을 의미한다.

저온 덮개 원자로는 통상적인 고온 덮개 원자로에 비해 두 가지 장점을 가진다. 첫 번째 장점은 원자로 용기 하양 유로와 윗덮개 사이의 온도차가 작게 됨으로써 두 부분 사이 경계에 있는 플렌지에 작용하는 열응력이 작다는 것이다.

두 번째 장점은 원자로 용기 윗덮개를 관통하는 노즐에 PWSCC(Primary Water Stress Corrosion Cracking)가 발생할 가능성이 낮아지게 된다는 것이다. PWSCC는 노즐 주변 냉각재의 온도에 민감한 것으로 알려져 있다.

따라서 APR1000 원전은 기존 원전에 비해 원자로 플렌지 및 원자로 노즐 부위의 건전성이 보다 확보되도록 설계된다.

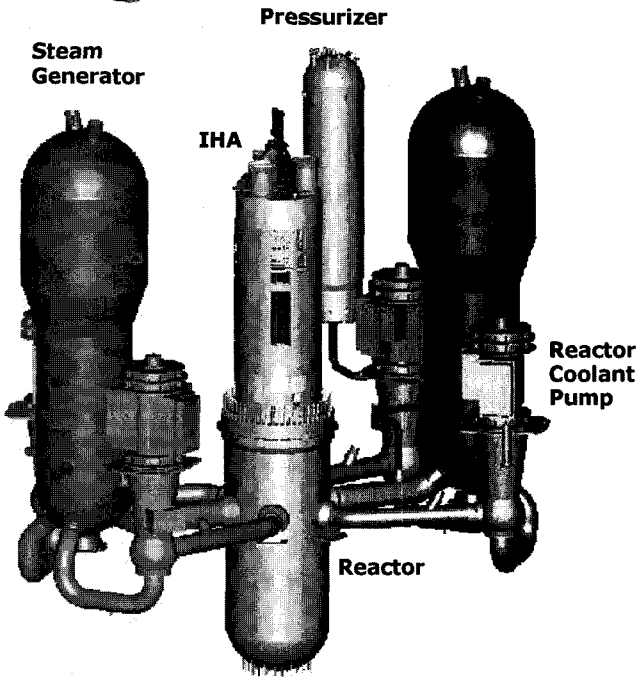
5. 환경 적응성

APR1000은 중동 지역이나 동남아시아 지역과 같이 높은 해수 온도와 혹독한 대기 상태와 같은 가혹한 조건에 운전되도록 설계된다. 이러한 가혹한 조건을 극복하기 위하여 환경 조건에 따른 기기 설계와 일반 배치 변경이 최적화도록 설계된다. 대표적으로 영향을 받는 계통 및 기기로는 냉각 계통, 공조 계통 및 관련 열교환기이다.

또한 해수를 발전소 냉각수로 상용할 수 없는 부지에서, 냉각원으로 냉각탑을 사용할 경우를 대비하여 냉각탑에 대한 설계 요건이 개발된다.

6. 30% MOX 연료 사용

APR1000 원자로로는 UO₂ Fuel Cycle을 연료로 사용할 수 있도록 설계된다. 그러나 향후 MOX(Mixed



APR1000 Reactor Coolant System

Oxide Fuel) 연료 사용을 대비하여 30%까지 MOX 연료(나머지는 UO₂ 연료)를 사용할 수 있도록 노심을 설계한다.

MOX 연료는 UO₂ 연료와 비교했을 때 상대적으로 큰 열중성자 흡수 단면적을 가지고 있어 임계 봉산 농도가 높아지고 낮은 제어봉가치를 갖기 때문에 낮은 정지 여유도를 가지게 되는 부정적인 영향을 준다. 이러한 역효과 상황에서도 노심이 충분한 정지 여유도를 갖도록 노심을 설계한다.

7. 핵연료 사용의 유연성

APR1000 설계는 연료 주기의 유연성을 최대화하기 위하여 높은 중성자 이용률과 저누출 장전 모형을 채택하여 연료 주기 비용을 최소화한다.

APR1000의 노심은 평균 발전소 이용률이 90%라는 가정 하에 18개월에서 최대 24개월까지의 재장전 주기를 갖도록 개발된다. 초기 노심은 24개월의 평형 노심 주기를 갖도록 설계하며 18개월 운전에서 최적화 되도록 설계된다.

노심으로부터 나오는 전체 중성자 누설을 낮추기

위하여 사용된 연료는 노심의 외곽에, 신연료는 노심의 안쪽에 위치시킨다. 신연료는 출력 분포와 연소 제어를 위하여 몇 개로 그룹화하여 배치된다.

8. 부하 추종 및 주파수 제어 기능

APR1000은 제어봉 집합체 제어 기술을 사용하여 부하 추종 및 주파수 제어 기능을 갖도록 설계된다.

APR1000의 제어봉 집합체는 12-Finger와 4-Finger 형태로 되어 있다. 4-Finger 제어봉 집합체는 기능에 따라 다시 2개 형태로 나뉜다.

하나는 온도 오차 신호에 따라 출력과 감속재 온도를 조절하는 제어용 제어봉 집합체이다. 다른 하나는 부분 강도 제어봉 집합체라 불리는 것으로 축방향 출력 분포를 조절하기 위해 사용된다.

일반적으로 부분 강도 제어봉 집합체는 최대의 출력 분포 제어 능력을 위하여 노심의 상부에 위치시킨다. APR1000은 축방향 출력 분포 오차에 따라 부분 강도 제어봉 집합체가 자동으로 움직이도록 하는 출력 분포 조절 시스템을 가지게 된다.

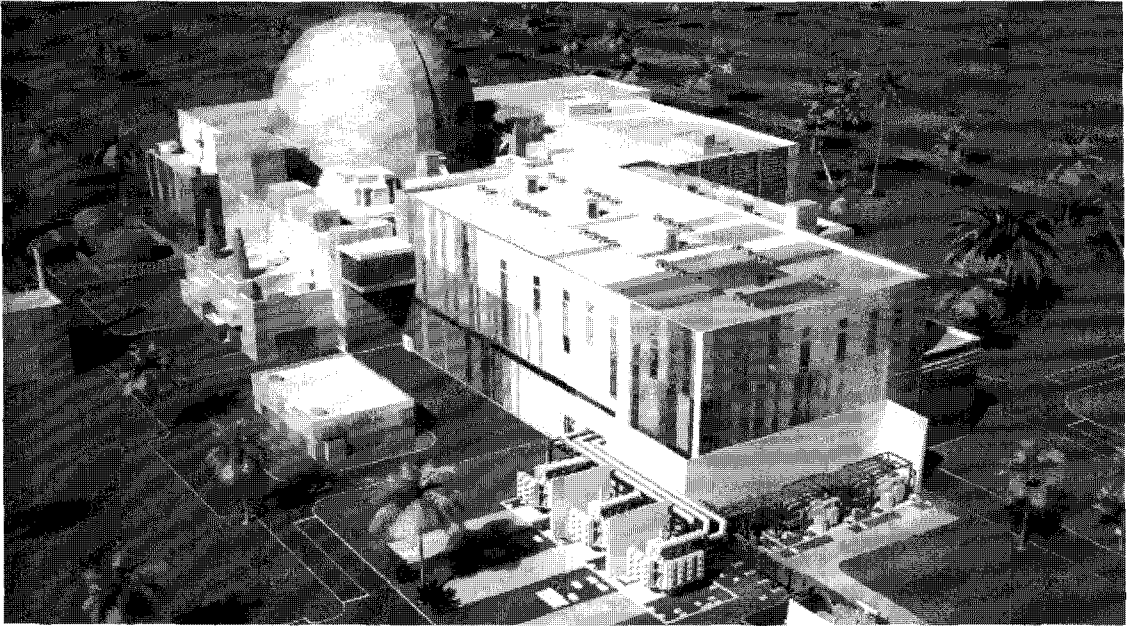
제어용 제어봉 집합체와 부분 강도 제어봉 집합체의 조합된 기능으로 최소의 출력 분포 변화, 즉 매우 작은 계는 변화로 주파수 제어를 할 수 있게 된다.

봉산 농도 제어 방법은 빈번하게 제어봉 집합체를 사용함으로써 생기는 출력 왜곡을 최소화하면서 일일 부하 추종과 같은 큰 출력 변화에 대응하도록 설계된다. 부하 추종 운전을 위한 운전 시스템은 출력 분포 왜곡을 최소화하기 위한 적절한 봉산 시나리오가 개발된다.

9. 유량 조절 장치를 가진 안전 주입 탱크

APR1000의 안전 계통은 두 계열로 이루어진 고압 안전 주입(HPSI) 계통, 4대의 안전 주입 탱크 계통, 그리고 두 계열로 이루어진 저압 안전 주입(LPSI) 계통으로 구성되어 있다.

각 안전 주입 탱크 속에는 봉산수 주입을 효과적으로 조절하기 위하여 유량 조절 장치가 설치된다. 유량 조절 장치는 대형 냉각재 상실 사고 초기 안전 주입 유량이 과다하게 주입되는 것을 방지하고 후반부에 봉산수가 계속 주입되도록 봉산수를 효율적으로



APR1000 조감도

제어하는 피동형 장치이다. 피동형 유량 조절 장치가 설치됨으로써 냉각재 상실 사고시 핵연료를 보다 효율적으로 냉각할 수 있어 충분한 안전성 마진을 제공한다.

10. POSRV를 사용한 과압 보호

APR1000의 냉각재 계통은 과압 방지를 위하여 3개의 POSRV(Pilot-Operated Safety Relief Valve)를 가지고 있다.

냉각재 계통 압력이 설계 기준 사고로 인하여 야기되는 설계 압력의 110% 이하로 제한되도록 POSRV를 통하여 가압기 내 증기가 배출되도록 설계된다. 또한 완전 급수 상실 사고시 일차 계통을 충분히 감압할 수 있도록 설계된다.

POSRV는 가압기 상부에 설치되며 3개의 POSRV는 각 독립된 배관으로 가압기와 연결되어 있다. POSRV를 통하여 배출된 증기는 전용 배관을 통해서 원자로 배수 탱크(Reactor Drain Tank)로 방출된다.

POSRV는 2개의 스프링 동작형 파일럿 밸브와 2개의 모터 동작형 파일럿 밸브로 구성되어 있다. 스프링 작동형 파일럿 밸브는 과압 방지를 위하여 높은 계통의 압력에 의해 열리고 계통 압력이 특정 설정치 이하로 낮아지면 닫히게 된다. 2개의 모터 동

작형 파일럿 밸브는 운전원이 주제어실에서 수동으로 조작할 수 있다.

11. 중대 사고용 감압 밸브

발전소 완전 정전 사고 등 중대 사고시 냉각재 계통의 압력을 급속도로 감압하기 위하여 가압기 상부에 중대 사고용 전용 감압 밸브가 설치된다. 중대 사고용 감압 밸브는 고압 중대 사고를 사전에 예방할 수 있다. 즉 고압 중대 사고로 인하여 용융된 노심이 고압 상태에서 분출되어 야기시킬 수 있는 원자로 건물의 직접적인 가열을 예방한다. 감압 밸브는 주제어실에서 수동으로 작동된다.

12. 원자로 용기 외부 냉각

APR1000은 중대 사고를 방지하기 위해 심층 방어의 개념으로 원자로 용기 외부 냉각 방식을 채택한다. 원자로 용기 외부 냉각은 중대 사고 상태에서 원자로 압력 용기 외면을 침수시킴으로써 원자로 압력 용기를 냉각하여 원자로 압력 용기가 녹아내리는 것을 사전에 예방하는 전략이다. 원자로 재수조 침수를 위하여 전용 침수 계통이 설치되며, 원자로 외벽 냉

각을 보장하기 위하여 원자로 보온재를 통해 유로를 형성시켜준다.

일반적으로 원자로 외부 냉각을 위해서는 냉각재 계통 압력은 낮거나 충분히 낮춰져야 하는데, 이는 고압 방지를 위해서 설치된 중대 사고용 감압 밸브 혹은 POSRV가 사용되며, 원자로 용기의 크립 파괴와 열충격을 방지하기 위해서는 원자로 용기 안쪽 하부에 노심 용융물이 침적되기 전에 원자로 용기 바깥쪽 하부가 침수되도록 원자로 재수조 침수 계통이 설계된다. 원자로 외벽 냉각이 적절히 이루어지도록 원자로 보온재 구조가 설계된다.

13. MMIS

APR1000의 MMIS(Man Machine Interface System)는 감시 계통, 보호 계통, 제어 계통으로 구성되며 완전 디지털화된 설비이다.

MMIS 운전원 조작 장치는 주제어실, 원격정지실, 기술지원실, 그리고 현장 제어반에 설치된다. 주제어실은 워크스테이션, LDP(Large Display Panel) 그리고 안전 콘솔로 구성된다.

APR1000의 MMIS 구조는 MMIS의 안전 관련 및 비안전 관련 부분으로 구성되며 발전소 네트워크는 안전 관련 네트워크와 비안전 관련 DCS 네트워크로 나뉜다. 안전 관련 네트워크는 비안전 관련 DCS 네트워크와 독립된다.

14. Cable Bridge 형의 IHA

IHA(Integrated Head Assembly)의 케이블 지지 설비는 제어봉 구동 장치 전력 케이블과 같이 원자로 덮개에 설치되는 케이블의 경로와 지지대를 제공해주는 설비이다.

통상적인 IHA의 케이블 지지 설비는 Integrated Platform 형태로 IHA 위에 설치되어 원자로 덮개 영역 케이블과 일반 케이블의 경로를 제공하고 지지한다.

그러나 현행 구조는 복잡하고 크기가 커서 정비 기간 동안 케이블 제거 및 설치 작업 시간이 과다하게 소요되고 적지 않은 설치 공간을 차지한다. 이러한

단점을 개선하기 위해서 APR1000의 IHA에는 개선된 IHA Cable Bridge가 설치된다.


개선된 IHA의 케이블 지지 계통은 IHA Cooling Shroud Assembly 외부에 설치되고 RDP(Refueling Disconnect Assembly)는 Primary Shield Wall에 설치된다. IHA Cable Bridge 설치 작업 유연성의 강화, 케이블 연결과 분리를 단순화, 작업 공간을 작게 하는 등의 이점이 있다.

결론

한국표준형원전이 개발되고 이를 바탕으로 안전성과 운전성을 향상시킨 OPR1000 원전이 건설, 운영된 이래, OPR1000 원전은 높은 이용률과 가장 낮은 불시 정지 기록을 가지고 있다.

이런 설계, 건설, 운전 경험을 바탕으로 안전성과 운전성이 더욱 향상된 제 3세대 원전인 APR1000이 개발 중에 있다. APR1000의 특징은 입증된 원전인 OPR1000을 기본으로 APR1400의 최신 안전 설비를 도입하여 안전성을 더욱 강화시켰으며, OPR1000을 통하여 축적된 운영 경험이 반영된 원전이다.

APR1000 개발은 2단계로 구성되어 있으며, 1단계에서는 최신 안전 설비를 반영한 APR1000의 기본 설계 요건이 개발되며, 2단계에서는 부지 요건이 반영된 상세 설계 요건이 개발된다.

APR1000 개발을 통하여 KEPCO의 원전 수출 상품으로 중형 원전으로는 APR1000, 대형 원전으로는 APR1400을 갖게 되었다. 

<참고 문헌>

[1] IAEA Nuclear energy Series, "Common User Considerations by Developing Countries for Future Nuclear energy systems: Report of Stage 1," No. NP-T-2.1, 2009

[2] KEPCO, "APR1000 System Description," Mar. 2010