



APR1400 중대 사고 대처 설계

이 세 원 · 박 중 남

한국전력기술(주) 차세대원자력사업

서론

APR1400의 정량적인 안전성 목표로서 전체 노심 손상 빈도는 $1.0 \times 10^{-5}/\text{ry}$ 이하, 부지 경계에서 24시간 피폭 선량이 $0.01\text{Sv}(1 \text{ rem})$ 을 초과할 확률은 $1.0 \times 10^{-6}/\text{ry}$ 이하를 적용하고 있다.

이러한 정량적인 목표를 만족하기 위해 기존의 심층 방호 개념이 안전성 확보의 기본 원리로 사용되고 있으며, 사고 방지와 사고 완화 개념 사이에 균형있는 설계를 꾀하고 있다.

사고 방지 측면에서 증대된 설계 여유도, 설계 단순화 및 계통 신뢰도 향상은 사고를 방지하는 중요한 요소이며, 사고 완화 개념도 설계 기준 사고뿐만 아니라 중대 사고에 대처하는 설비를 요구하고 있다.

APR1400은 한국 내 강화된 중대 사고 관련 인허가 요건에 대비해서 발전소의 건물 및 기기 배치, 계통 설계, 격납 건물 및 내부 구조물 설계 등에 중대 사고 방지 및 완화

설계 개념을 최대한 반영하였다.

APR1400은 설계 기준 사고와 중대 사고의 방지 및 완화를 위한 많은 설계 개선 항목(ADF)들을 사용하고 있다. 사고 방지를 위한 설계 특성은 천이 사고 발생을 최소화 하고, 불가피할 경우 사고 심화를 억제하며, 최종적으로 노심 손상, 즉 중대 사고 방지를 목적으로 하며, 사고 완화를 위한 설계 특성은 중대사고를 완화하기 위한 것이다.

주요 설계 특성

1. 사고 방지 주요 설계 특성

APR1400의 사고 방지를 위한 주요 설계 특성은 다음과 같다.

가. 4 트레인(Train) 안전 주입 계통(SIS)

안전 주입 계통(SIS)은 단순성을 유지하고 계통 신뢰도를 높이기 위해 상호 연결 배관이 없는 4개의 독립된 Train으로 설계되어 있으며, 비상 노심 냉각수는 주입수가 파손된 저온관을 통해 유출되는 것을 방

지하기 위해 원자로 용기로 직접 주입된다.

기존 원전의 주입 및 재순환 운전 모드는 IRWST에 의해 안전 주입 모드로 통합되어 있으며, 저압 안전 주입 기능을 수행하던 정지 냉각 계통(SCS)은 붕괴열 제거 기능만 수행한다. 또한 안전 주입 탱크(SIT) 내에 피동 유량 조절 장치를 추가하여 안전 주입 기능을 향상시켰다.

나. 안전 감압 배기 계통(SDVS)

안전 감압 배기 계통(SDS)은 2차 계통을 통한 붕괴열 제거에 실패했을 경우 충전 및 유출 운전(feed & bleed operation)에 의해 노심을 냉각시키기 위해 가압기의 상단에 설치된 4개의 POSRV를 통해 RCS를 급격히 감압시키는 계통이다.

POSRV 방출 배관은 방사능 물질 방출에 의한 격납 건물의 오염 가능성을 제거시키기 위해 IRWST 내에 침수되어 있는 Sparger로 직접 연결되어 있다(그림 1) 참조).

다. IRWST 계통

IRWST 계통은 IRWST, Holdup Volume Tank (HVT), 증기 방출 장치인 Sparger, 원자로 공동 침수 계통(CFS) 등으로 구성되어 있다(〈그림 2〉 참조).

IRWST는 핵연료 재장전, 안전 주입, 격납 건물 살수, 원자로 공동 침수, 가압기에서 방출된 증기의 응축 및 냉각 등에 필요한 냉각수를 제공한다.

IRWST를 채택함으로써 비상 노심 냉각 운전시 주입 모드에서 재순환 모드로의 전환을 제거하였다.

기존 원전의 핵연료 재장전 저장 탱크(RWST)와 비상 썸프의 역할을 동시에 수행하기 때문에 IRWST와 일체화된 안전 주입 펌프, 정지 냉각 및 살수 펌프는 IRWST로부터 연속적으로 물을 공급받는다.

따라서 기존 원전 PSA에서 노심 손상 빈도의 주요 기여 인자로 나타나는 재순환 모드 전환 실패, 즉 안전 주입 및 살수 운전시 RWST가 고갈되고 Sump에 수집된 물을 재순환시킬 때 기기 고장이나 배관 정렬을 위한 운전원 조치 실패 가능성을 근원적으로 제거하였다.

라. 정지 냉각 계통(SCS)과 격납 건물 살수 계통(CSS) 펌프

정지 냉각 계통과 격납 건물 살수 계통은 서로 독립된 기능을 가지고 있으나 두 계통의 펌프는 기능면에

서 동일하여 상호 교환이 가능하도록 설계되어 있으며, 따라서 두 계통은 상호 보완적이며 보다 높은 신뢰성을 제공하고 있다.

마. 보조 급수 계통(AFWS)

보조 급수 계통은 각 100% 용량의 모터 구동 펌프 2대, 터빈 구동 펌프 2대로 구성되어 있으며 주급 수상실시 증기발생기에 급수를 공급하는 기능을 수행한다. 터빈 구동 펌프는 발전소 정전 사고(SBO)시 잔열을 제거하는 유일한 안전 설비이며, 이러한 보조 급수 계통 설계의 다중성과 다양성은 2차측을 통한 잔열 제거 실패 확률을 상당한 수준으로 낮추었다.

바. 안전 계통 다중 트레인의 물리적 분리

APR 1400에서는 주요 안전 관련 계통과 기기 냉각수 계통 등의 보조 계통이 4트레인으로 설계되어 있으며, 이들 계통을 효율적으로 배치하기 위해 2분면(Division) 분리 개념을 강화한 4분면(Quadrant) 분리 개념을 도입하였다. 이로 인해 운전 보수성이 향상되었으며, 공통 원인 고장(CCF) 완화로 계통의 이용률이 증가되었다.

특히 화재·침수·고에너지 배관 파단시 4분면 중 1분면만이 상실되므로 기존 호기에 비해 재해 방호 능력이 제고되어 안전성이 크게 향상되었다(예; 화재 및 침수 사고로 인한 CDF는 $1.5 \times 10^{-7}/\text{ry}$ 임).

사. 공학적 안전 설비(ESF) 지원 계통

그 밖에 기기 냉각수 계통, 전기 계통 등의 공학적 안전 설비를 지원하는 계통도 4트레인 개념으로 설계되어 안전성 향상에 기여하고 있다. 또한 발전소 완전 정전 사고(SBO)에 대비하여 두 호기 공용의 비안전 등급 AAC 발전기를 설치하였다.

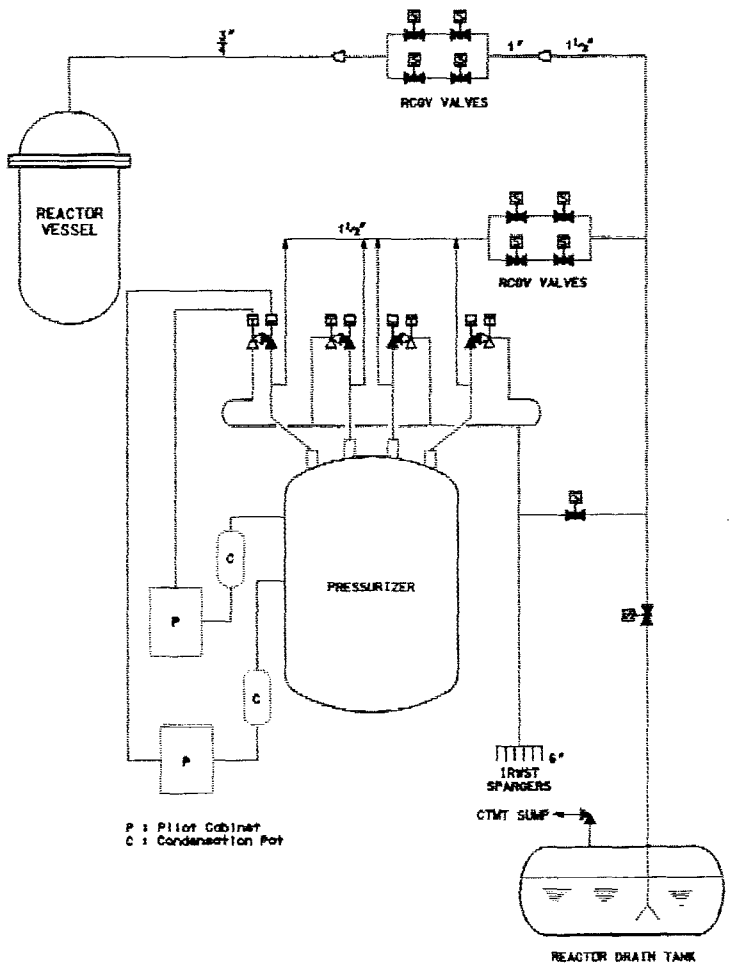
2. 사고 완화 주요 설계 특성

상기와 같은 사고 방지를 위한 설계 특성 이외에도 APR 1400은 사고 완화 기능을 증진시키기 위하여 많은 설계 특성을 지니고 있다. APR 1400의 중대 사고 대처 전략은 다음과 같다.

- 중대 사고 초기, 즉 사고 후 24 시간 이내, 격납 건물 파손 유발 현상에 대하여, 비록 사고 발생 확률이 낮을 경우에도 사고 완화 계통을 갖추거나 이러한 현상에 대처하는 설계를 반영하였다.

- 사고 완화가 이루어지지 않았을 경우 후기 격납 건물 파손을 유발할 수 있는 현상에 대해서는 확률론적 안전성 목표와 경제성을 고려하여 사고 대처 설비를 갖추고 있다.

APR 1400 설계에서 고려하고 있는 주요 중대 사고 현상의 대처 범위 및 관련 설비는 〈표〉와 같이 요약할 수 있으며, 사고 완화를 위



(그림 1) APR1400 안전 감압 배기 계통

한 중대 사고 대처 설비의 주요 설계 특성은 다음과 같다.

가. 견고한 격납 건물

APR 1400의 격납 건물은 기존 원전 보다 큰 자유 체적과 높은 극한 내압 능력을 갖도록 설계되어 있다. 증가된 체적은 중대 사고 조건 하에서 예기치 않은 수소 연소 가능

성이나 에너지 및 방사능 누출 결과를 제한시키고 또한 제어하는 역할을 수행한다.

격납 건물 내압 능력과 격납 건물 극한 강도는 충분히 높아 수소 연소 하중, 격납 건물 직접 가열(DCH) 하중, 24시간 최대 중대 사고 과압 하중 등 중대 사고 부하가 격납 건

물 ASME Factored Load Category (FLC) 이하로 유지되어야 한다.

예를 들어, APR 1400의 100% 금속-물 산화 반응으로 생성된 수소의 Adiabatic Isochoric Complete Combustion (AICC) 압력 부하는 약 117 psia으로, APR 1400의 FLC 값인 124 psia에 비하여 충분한 여유도를 가지고 있다.

또한 증가된 격납 건물 체적과 함께 격납 건물 내압 능력은 후기 격납 건물 과압 파손과 관련된 방사능 방출시간을 충분히 지연시키는 효과를 가지고 있다.

나. IRWST

IRWST는 상기 기능 이외에도 원자로 공동 내 노심용융물 냉각을 위한 원자로 공동 침수 계통(CFS)에 냉각수를 공급하며, 고압 노심용융 방출(HPME)을 방지하기 위하여 가압기로부터 급속 감압시 방출되는 수증기를 응축시키고 IRWST로 유입된 핵분열 생성물을 포획함으로써 격납 건물 대기로 방출되는 핵분열 생성물을 감소시키는 기능을 수행한다.

다. 안전 감압 배기 계통

안전 감압 배기 계통은 충전 및 유출 운전을 통한 노심 열 제거가 실패할 경우 고압 노심 용융물 방출(HPME) 및 격납 건물 직접 가열(DCH) 현상을 예방하기 위하여 원자로 용기 파손 전에 RCS 압력을

약 250psia 이하로 신속 감압시키는 기능을 수행하며, 이를 통해 조기 격납 건물 파손 가능성을 줄였다.

라. 원자로 공동 설계

APR 1400의 원자로 공동은 중대 사고 현상인 DCH, 노심 용융물-냉각수 상호작용(FCI), 그리고 노심용융물-콘크리트 반응(MCCI)에 의해 야기되는 위험에 대처하도록 설계되어 있다.

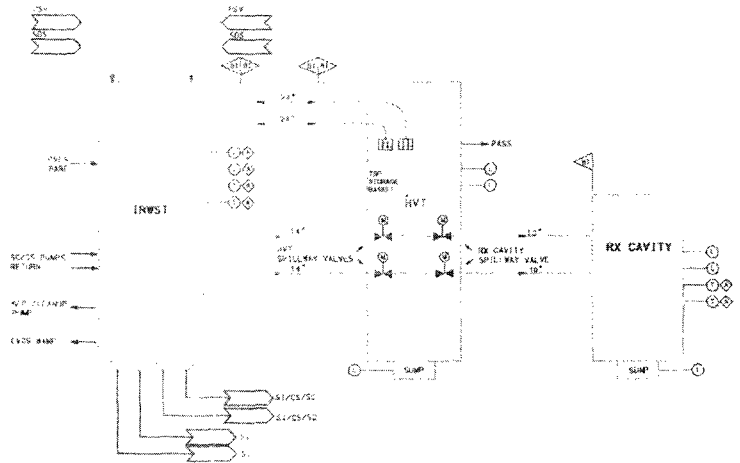
첫째, DCH를 방지하기 위하여 노심 용융물이 격납 건물 대기로 직접 방출되는 것을 최소화시켰다. <그림 3>에서 보는 바와 같이 노심 용융물이 이동할 수 있는 경로를 복잡하게 설계하였다.

둘째, 증기 폭발에 대처하기 위하여 원자로 공동 벽체의 동압 능력(dynamic pressure capacity)을 높게 설계하였다.

셋째, 노심 용융물 냉각 가능성을 확보하고 MCCI을 완화시키기 위해 충분한 원자로 공동 바닥 면적(MWt당 0.02m²이상)을 확보하였으며, 바닥 두께는 사고 후 24시간 동안 콘크리트 침식으로부터 격납 건물 전진성이 유지되도록 설계하였다.

마. 수소 완화 계통(HMS)

APR 1400의 수소 완화 계통은 중대 사고 전과정 동안 평균 및 국부 수소 농도를 10 vol% 이하로 유지하여 수소 폭발을 방지하는 기능



<그림 2> APR1400 IRWST 계통

<표> 중대 사고 현상 대처를 위한 APR1400의 주요 설계 내용

중대 사고 현상 대처 범위	APR1400 대처 설계
격납 건물 과압 방지	격납 건물 내압 능력 향상(124psia의 FLC 설계) 격납 건물 살수 계통(4계열) 작동 신뢰도 향상 비상 격납 건물 살수 보조 계통 설치
수소 제어	국부 수소 폭발 방지를 위한 격납 건물 내부 배치 최적화 PAR 및 수소 점화기 설치
증기 폭발 대처	원자로 공동 구조 설계 보강(극한 동적 내압 능력 향상)
격납 건물 직접 가열 완화	노심 용융물 포획 격실 설치 및 복잡한 접근 경로 설계
원자로 공동 바닥 용융 관통 방지 및 노심 용융물 장기 냉각 확보	원자로 공동 침수 계통 설치 원자로 공동 바닥 면적 확대(MWt당 0.02m ² 이상 확보)

을 수행하도록 설계되어 있다.

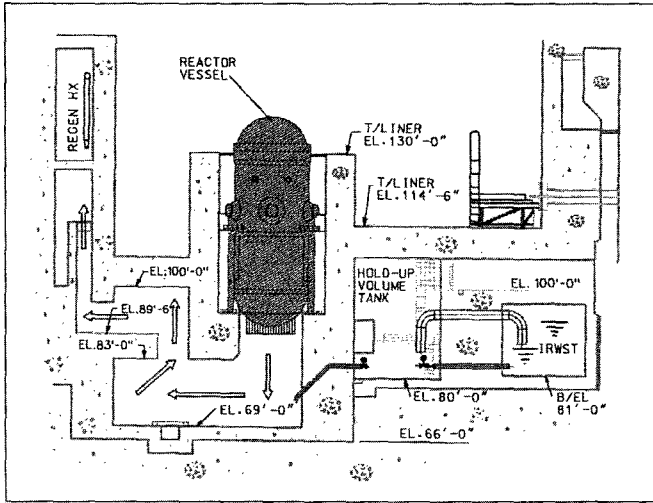
피동 안전성을 향상시키고 보수·유지 등의 경제성을 고려하여 <그림 4>와 같은 PAR를 도입하였으며, 예상 수소 방출 지점 및 주요 유로에 수소점화기를 보완적으로 설치하였다.

중대 사고시 요구되는 PAR의 개수는 26개이며, 과도한 수소 방출

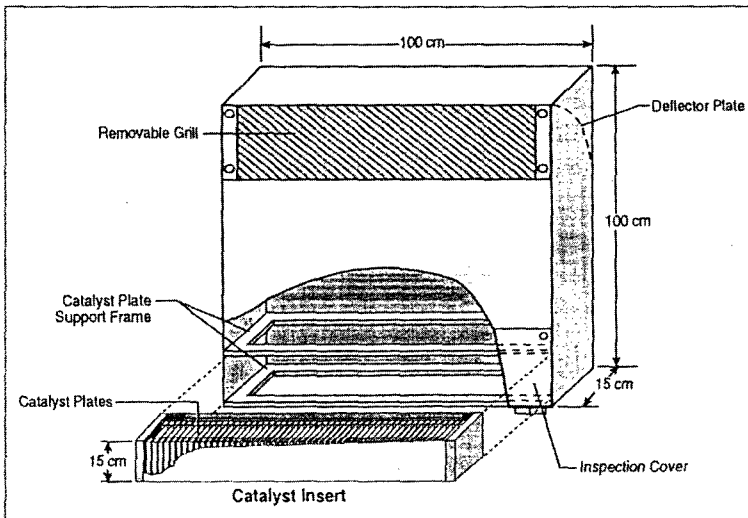
지점에 설치된 백열 플러그식 점화기는 10개이다.

바. 격납 건물 살수 계통(CSS)

APR 1400의 격납 건물 살수 계통은 설계 기준 사고와 중대 사고시 격납 건물의 압력 및 온도를 제어하고 핵분열 생성물을 제거함으로써 외부 환경으로의 방사성 물질 유출을 방지하도록 설계되어 있다.



〈그림 3〉 APR1400 원자로 공동 설계



〈그림 4〉 APR1400 PAR

격납 건물 살수 계통의 기능 및 성능을 충분히 보장하기 위하여 정지 냉각 계통의 펌프를 공유하고 있으며, 특히 소내 전원 공급 계통과

는 무관하고 외부 수원을 사용하는 비상 격납 건물 살수 Backup 계통을 설치하여 살수 기능의 신뢰도를 극대화시켰다.

결론

이러한 사고 방지 및 중대 사고 대처설비를 설계에 반영함으로써 APR 1400은 발생 확률이 매우 낮은 중대 사고에 대해서도 심층 방어 개념을 적용한 신형 원전으로서의 지위를 갖추게 되었다.

다음과 같은 확률론적 안전성 평가(PSA) 결과는 APR 1400의 중대 사고 대처능력을 정량적으로 제시해 준다.

- 내부 사건에 의한 노심 손상 빈도(CDF)는 전출력시 $2.6 \times 10^{-6}/\text{ry}$ 로 외부 사건을 포함하더라도 APR 1400 안전성 목표인 $1 \times 10^{-5}/\text{ry}$ 를 만족하고 있다.

- 격납 건물 파손 확률도 $2.8 \times 10^{-7}/\text{ry}$ 로 역시 안전성 목표를 만족하고 있다.

따라서 이러한 APR 1400의 사고 방지 및 사고 완화 측면의 많은 설계 개선 사항들은 APR 1400의 안전성을 기존 원전에 비해 훨씬 향상시켰으며, 아울러 APR 1400은 안전성 향상 측면에서 중대 사고에 대한 대처 능력 확보를 강조하고 있는 국내 인허가 환경 변화에도 적극적으로 대처하고 있다.