웨스팅하우스社의 AP600

미국 에너지성(DOE), 미국전력연구소(EPRI)와 협력하여 웨스팅하우스社는 AP600을 개발중에 있는데, 이는 표준전기출력 600M We급 원자력발전소설계로 실증된 가압경수로 기술과 혁신적피동형안전계통을 결합시킨 것이라고 AP600의 설계사업을 주도하고 있는 웨스팅하우스社는 말하고 있다.

AP600 설계사업은 웨스팅하우스社가 주도하고 있으며 개발팀의 주요 참가회사로는 Bechtel社(1차계통 및 건물), Burns and Roe社(부속건물, 출입구, 디젤발전기 및 고체 방사성폐기물건물과 계통), Avondale Industries社(모듈방식조립), MK-Ferguson社(건설계획 및 관리), Chicago Bridge and Iron社(격납용기 설계) 그리고 Southern Electric International社(2차계통 및 건물설계)이다. AP600 개발팀은 AP600이 전력회사의 요구에 부응하는 개량형 경수로가 되도록 전력회사, 산업계 및 정부측과도 긴밀한 협조하에 설계사업을 추진하고 있다.

단순화된 기술

AP600은 전반적으로 보다 단순한 설계방식이며 1차계통(Nuclear Island)은 60% 감소된 밸브, 75% 감소된 배관, 80% 감소된 제어케이블, 35% 감소된 펌프, 다른 재래식 원자로보다 50% 감소된 내진격납건물 용적으로 구성되어 있다.

저출력밀도노심에는 12피트(3.65 m) 길이의 연료가 내장된 표준형 17×17 연료봉배열의 145개의 연료봉다발이 있다. 이 설계방식은 저농축우라늄235를 사용하는 개발된 연료기술을 기반으로 하고 있다. 가용성붕소와 가연성독을 사용하여 가동정지와 연료연소반응을 제어한다. 부하추종과 출력제어를 위해 저제어값 Gray 제어봉(16개 제어봉 집합체)이 있다.

표준연료주기는 18개월로 발전소 가동률을 향상시켰다. 노심은 중성자누설을 감소시키는 스테인리스강 및 물로 된 중성자방사형 반사체로 둘러싸여 있어 농축 및 연료주기비용을 절감하게 된다. 낮은 원자로 누설 덕분에 노심에서 원자로용기로 누설되는 중성자속을 60년 원자로용기설계수명동안 2×10^{19}n/cm^{2}로 하여 재래식 발전소의 전형적인 수치인 40년 수명동안 5×10^{19}n/cm^{2}에 비해 더 줄일 수 있다.

원자로 내부는 본질적으로 재래식 설계방식이므로 새로운 제작기술개발의 필요성은 없다. 단순화된 소형발전소 설계방식으로 적절한 차폐수단과 함께 검사, 보수, 보관 및 제거에 필요한 공간을 확보할 수 있다. 예를 들면 2-Loop 600MWe급 재래식 발전소의 격납건물 직경이 105피트(32m)인데 비해 AP600의 직경은 130피트(39.6m)이다. 추가로 확보된 작업공간은 교통체증을 감소시키고 발전소 정지기간중 귀중한 여분의 임시보관장소를 격납건물내부에 확보할 수 있다.

계통설명

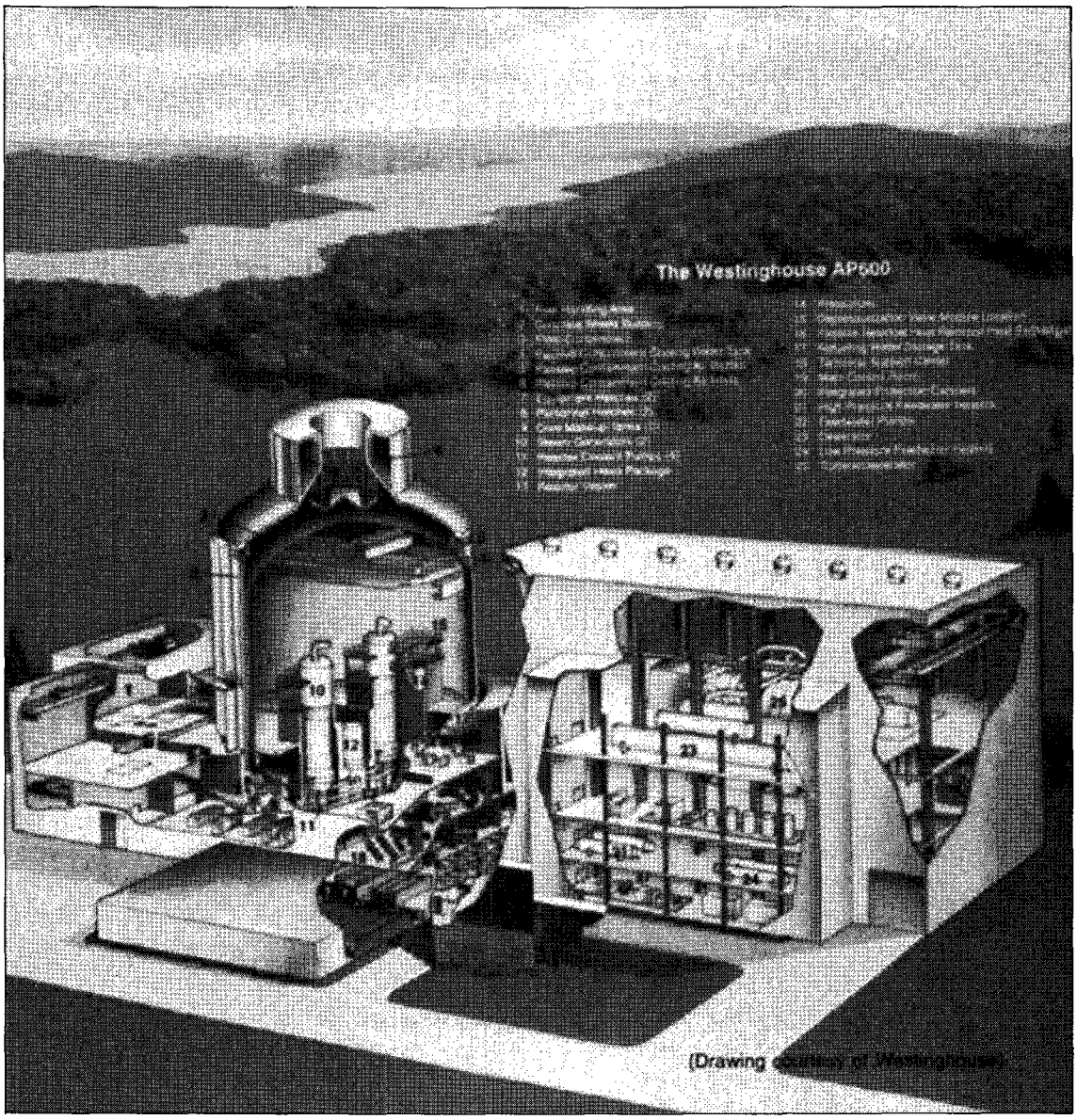
AP600 원자로냉각계통(RCS)에는 보수와 검사를 줄일 수 있는 단순화된 설계사례가 매우 많다.

2개의 최적화된, 모델 델타 75로 알려진, 모델 F 증기발생기가 있는

데 이 증기발생기는 삼각 피치상의 인코넬 690 열처리세관, 구멍이 있는 세관지지판, 보강된 진동방지 Bar, 단층분리기, 개선된 보수특성 및 로봇장비의 접근과 보수가 용이하도록 한 1차측 출입구설계 등을 향상시킨 근본적으로는 모델 F 설계방식이다. 모든 증기발생기 세관들은 원격감시 및 수리가 가능하고 Channelhead로 사람이 들어갈 필요가 없다.

원자로냉각계통(RCS)은 입증된 설계방식에 따라 피복된 모터펌프를 사용하며, 축밀봉, 보조유동체계통 및 여분의 루프배관을 제거하고 축밀봉에서 냉각재상실사고(LOCA) 가능성을 배제시킨다.

Integrated Head Package는 하나



〈그림 1〉 웨스팅하우스社 AP600 설계도(웨스팅하우스社 제공)

의 구조물에 있는 여러가지 별도 부품들을 결합시킨 것으로 원자로 재장전을 단순하게 한다. 이 패키지는 원자로용기덮개, 제어봉구동장치, 내진장치, 케이블, 케이블 트레이 및 케이블 브리지로 되어 있다. 더욱이 노심내부계장계통은 원자로 뚜껑 위에 설치되어 이 패키지에 포함되며, 따라서 패키지는 함께 움직인다. 이 원자로 헤드 패키지는 단일구조물에 의한 운전으로 정지시간의 단축은 물론 근무자들의 방사선피폭량도 줄인다.

노심내부계기계통에는 열온도측정장치가 있어 일반적으로 이들 장치는 Conoseal을 사용하여 밀봉한 계기측정봉 내부에 설치되어 있으며 이로써 발전소 기동중 누설로 인한 정지시간 연장의 원인이 되었으나 AP600 설계에서는 이들 Conoseal을 더 적고 단순한 스웨이지 피팅으로 교체시켰으며 하부에 장착된 계장계통과 함께 발전소에 사용된다.

Gray Rod로 알려진 저반응도제어값을 가진 제어봉은 예상되는 근무자들의 피폭량을 간접적으로 줄이는데 도움이 된다. Gray Rod로 가용성붕소농축도를 매일 변화시키지 않고도 일일부하추종을 달성할 수 있어 붕소냉각재 처리시에 사용되는 보조시스템을 크게 단순화시킨다.

연료재장전과 관련하여 추가로 개선한 사항들은 고준위 방사선구역에서 재장전전에 밀봉할 필요가 없도록 영구설치된 원자로공동밀봉, 원자로용기덮개 패쇄시간단축을 위한 다중 스터드볼트장치 및 운전실로부터 제어되며 신속히 열리는 연료수송관잠금장치 등이 있다.

또한 개량된 마이크로프로세서 계장계통은 발전소의 운전과 보수를 단순화시키고 개선했다. 다양한 디지털제어계통은 결선에 의한 상사형제어 및 케이블배선실을 개선함으로써 제어케이블의 양을 현 원자력발전소보다 80%나 크게 줄이게 된다.

계장계통구성의 특성은 자가진단은 물론 기판교환 수준의 보수도 가능하다. 대부분의 하자는 프린트기판 전자회로카드나 계기모듈을 교환함으로써 신속히 치유된다. 그 밖에 발전소 안전성과 신뢰도를 향상시킨 계장계통의 특성으로 연동장치 분리, 자가진단 및 장비감시 기능이 있다.

광범위한 인적요인연구를 통해 도출된 자료들을 계장계통과 제어실설계 전반에 걸쳐 사용함으로써 운전성을 향상시키고 운전원 실수의 가능성을 줄인다. 제어실 설계에서 인적요인 영향분석은 운전원이 어떻게 결정을 내리느냐를 이해함과 동시에 운전원이 필요로 하는 것의 확인, 발전소 특성에 대한 이해 및 사람과 기계에 부여된 임무를 적절히 배분하는데서부터 시작된다.

인적요인은 그 다음에 최종적으로 경보계통설계, 디스플레이장치, 제어 및 절차서 등과 결합시킨다. 컴퓨터에 의한 도형과 안전성이 확보된 디스플레이장치는 운전원이 정보를 완전하고도 쉽게 이해하도록 도와준다. 그러한 결과 운전원이 발전소에 도움을 주는 것이 아니라 발전소가 운전원에게 도움을 주도록 한다는 제어실설계개념으로 나타난다고 웨스팅하우스社는 말하고 있다.

피동적안전특성

웨스팅하우스社에 따르면 AP600의 피동적안전특성 즉 자연중력, 대류, 응축 및 증발을 이용함으로써 재래식 가압경수로설계보다 안전성 여유가 더욱 추가된다고 한다. 따라서 이러한 계통에서는 운전원의 조치나 복잡하고 불필요한 비상장비를 더욱 줄일 수 있게 된다.

중력에 의해 공급되는 많은 양(500,000gal)의 물이 격납건물내에 저장되어 있어 정상운전중에 발생될 수도 있는 소량의 누수나 대형냉각재상실사고(LOCA)의 경우에도 운전원이 물을 보충할 필요가 없다. 다음에 설명하는 모든 안전계통에는 성능이 입증된 부품과 계통구성을 이용하고 있으며 안전시스템의 기본이 된다.

피동적 잔열제거열교환기계통은 증기발생기의 열제거기능이 정지될 경우 노심붕괴열을 제거한다.

재장전수조 내부에는 원자로냉각계통(RCS)의 압력폐쇄자연순환루프의 일부로서 일종의 피동적열교환기가 있다. 열교환기는 열을 잃을 때 개방되는 기체구동밸브에 의해 작동된다. 자연순환방식에 의해 냉각재가 고온관입구(Hot-Leg)에서 열교환기로 전달되고 그다음 증기발생기 Channelhead의 저온관입구

(Cold-Leg)쪽으로 내려보내진다.

자동감압계통(ADS)은 노심 냉각수충전수로(Core Makeup Tank)의 수위가 내려가면 원자로냉각계통을 감압시키고, 또 감압이 되면 격납건물내 재장전수조(IRWST)로부터 중력에 의해 원자로냉각계통에 냉각수를 주입시키며, 이는 대기압에서 이루어진다. 필요시 ADS가 확실히 작동하고, 밸브 가개폐에 따른 결과를 최소화하도록 ADS는 각 단계에서 가압기에 연결된 2개조의 보완성밸브에 의해 3단계로 감압시킨다. 방출은 격납건물내 재장전수조(IRWST)내 Sparger를 통해 이루어진다. 4번째 감압단계는 역시 2개조의 보완성밸브와 함께 원자로냉각계통 고온관입구(Hot-Leg)에 연결되어 격납건물로 직접 방출된다. 이러한 감압계통구성으로 최대 유량을 감소시킬 수 있다.

피동형격납냉각계통(PCCS)에서는 격납용기 외곽을 설계압력인 45psig를 초과하지 않도록 하는 안전등급 최종열방출원(Ultimate Heat Sink)이 있다. PCCS는 강철격납용기 외곽과 콘크리트차폐건물 사이에 자연공기순환이 되도록 하고 있다. 사고상황하에서 공기냉각기능은 강철격납용기 외곽에 살수함으로써 향상된다. 살수용 물은 차폐건물 지붕에 설계된 350,000gal의 환형수조에서 중력에 의해 공급되며, 이 수조는 3일간 냉각시킬 수 있는 충분한 물을 저장하고 있다. 그리고 3일 후에 냉각수가 추가로 공급되지 않는다 해도 공기냉각 그 자체만으로도 공안을 유지하는데 충분하다.

웨스팅하스社에 따르면 실제로 이 PCCS는 격납용기 냉각에 매우 효과적이므로 현재의 격납건물 내부 기자재의 적격한 외피들은 지나친 것이 아니라고 한다. 예를 들어 분석결과에 따르면 최악의 설계사고발생후 24시간 내에 격납용기 온도를 190°F까지 낮출 수 있다고 한다.

웨스팅하우스社는 간소화된 AP600 능동적계통 역시 자연구동안전등급의 피동적계통과 같은 기능을 수행한다고 말한다. 피동적계통이 작동된 후라고 하더라도 능동적계통이 뒤이어 역효과가 나지 않도록 작동될 수 있다.

주제어실의 난방, 환기 및 공기조절(HVAC)계통 역시 소내정전비상시에 대비한 피동형시스템이다. 이 시스템은 주위의 콘크리트 구조물(벽, 바닥, 천정 포함)이 열을 흡수하도록 하여 기기, 사람 및 설비들을 피동적으로 냉각시킨다.

더욱이 주제어실 HVAC 시스템은 2개조의 보완적인 별도 압축공기저장탱크로부터 호흡할 수 있는 공기를 근무자들에게 공급한다. 또한 이 공기에 의해 주제어실내의 압력이 약간 높게 유지됨으로써 주위에서 공기에 의한 오염물질의 침투를 최소화할 수 있다.

허가사항

웨스팅하우스社에서는 AP600이 NRC로부터의 설계인증을 추진중에 있으며 NRC에 의해 인증되는 최초의 중형규모의 피동적개량형경수로설계가 될 것이라고 말한다. AP600 추진계획은 1992년에 설계인증서를 취득하기 위한 2가지 주요한 업적을 거양했는데, 완전한 표준안전성분석보고서와 확률론적 위험성평가서를 NRC에 제출한 것이 그것이다.

이러한 노력을 지원함에 있어 AP600 시험프로그램도 성공적으로 추진중에 있다. 웨스팅하우스社는 AP600 피동형안전계통의 사용가능성이 개념설계프로그램에서 완성된 안전성분석과 원리입증(Proof-of-Principle)시험을 통해 확인됐다고 말한다. 현행 동 프로그램은 3가지 일반범주로 나뉜 시험이 있는데 피동형격납냉각계통, 피동형안전주입계통 및 부품설계검증이 그것이다. 웨스팅하우스社는 현재까지 이러한 시험프로그램의 결과로 AP600 설계인증 취득을 뒷받침함과 동시에 새로운 원자력발전소를 건설하겠다는 확신을 전기사업자에게 심어줄 수 있는 근본적인 기술자료를 제공해 왔다고 말한다.

더욱이 웨스팅하우스社와 NRC는 최근 시험프로그램상의 상기 3가지 시험자료를 공유하기로 합의했는데 그중 2가지는 미국내 기존 설비에서, 나머지 하나는 이탈리아에서 실시됐다.

이러한 업적의 조기달성으로 웨스팅하우스社는 원자력감시위원회(Nuclear Power Oversight Committee)의 전략에서 밝힌 바와 같이 금세기말경에는 새로운 원자력발전용량을 공급하기 위해 1995년까지 산업계가 목표로 하고 있는 표준화 설계에 맞도록 사업을 추진중에 있다고 말한다.■