

# 시스템80+ 표준형 원전

## - 개발 경위와 전망 -

**J. R. Rec**  
ABB-CE사  
시스템80+ 시운전/원전  
분야 책임자

**J. Longok Jr.**  
ABB-CE사  
시스템80+ 기술개발 책임자

**R. A. Matzie**  
ABB-CE사  
엔지니어링 담당부사장

**P. I. Parker**  
ABB-CEII사 서울지사장

시스템80 설계를 팔로버디(Palo Verde) 원자력발전소에 성공적으로 건설하면서 ABB-CE사는 전력 산업의 필요와 요구에 부응하는 개선된 원전 설계를 개발하는 작업에 착수했다.

이 노력은 두 가지 평행선상의 개발 경로로 이루어졌다.

그 첫 번째 경로는 여러 가지 개량형 설비들과 설계 개선점들을 반영하여 최근의 미국의 규제 요건(예 : 중대한 사고) 및 사업자 설계 요건(예 : 미국 전력연구소(EPRI)의 차세대 개량형 경수로 사업자 요건서(URD))를 충족시키는 시스템 80+ 표준형 원전의 개발을 해왔다.

시스템80이 단지 원자로 공급 계통(NSSS)을 포함하고 있는 데 반해 시스템80+ 표준형 원전은 세계 시장을 향한 차세대 원자력발전소를 건설하는 발전소 전체 기술로서 선택되었고, 94년 7월에 미국 정부의 최종 설계 승인(FDA)을 받았다.

또 다른 경로는 초기의 80시스템 설계로부터 보다 단계적으로 개선된 개량형 원자력발전소를 설계하는 것이다.

이 프로그램은 어떤 특정 고객의 필요와 요구에 의한 것으로 이미 선별하여 입증된 설계 특성들을, 인허가 취득이나 건설 일정상에서 리스크 없이 단기간의 건설 프로젝트에 무사히 반영해가는 좀 더 점진적이고 단계적인 방법이다.

이 접근의 결과가 바로 최근 한국에서 가동중이거나 건설중에 있는 개량형 원전 시리즈인 것이다.

이 글은 70년대 초반에 팔로버디 원자력발전소에 최초로 건설된 시스템80 표준형 NSSS 설계로부터 시작되는 점진적인 개발 과정과 위에서 언급한 바와 같이 두 가지 설계 경로를 통한 진행 내용을 설명한 것이다.

이 두 가지 평행선상의 경로들로 한국에서는 개량형 원전 설비를 이룩하였고, 미국에서는 시스템80+ 표준

형 원자력발전소의 개발과 인허가 취득이라는 결과를 낳았다.

ABB-CE사의 근간은 이미 80여년 전에 화력 발전소 보일러에서 시작되었다.

60년 이래 본 회사와 관계회사들은 세계의 증기 발생 설비의 40%를 공급해 왔다. 전력 산업에 대한 ABB-CE사의 능력과 장래성은 ABB사(Asea Brown Boveri)가 89년에 CE사를 취득할 때 확실하게 인정받았다.

### ABB-CE사의 원전 설계의 발달 과정

70년대 중반에 ABB-CE사는 원자력 산업의 개발에 대한 현실적 문제점을 인지했다.

즉 전기 1MW당의 생산 비용을 줄이기 위하여 발전량이 대형인 발전소를 찾게 되었고, 더 높은 발전소 이용도와 안전 여유도의 확보가 중요한 문제로 대두되었다.

게다가 70년대 중반에 고속중식로(FBR) 도입보다 우선하여 경수로의 핵연료 사이클(nuclear fuel cycle)을 완성시키는 것과 플루토늄 재사용에 대하여 커다란 관심이 일었던 것이다.

이러한 추세로 볼 때 안전 해석 및

새로운 발전소 설계의 인허가와 관련한 비용이 다른 동력 발전 기술에 소요되는 비용을 훨씬 초과하여 원자력 발전에 소요되는 총건설 비용이, 계속적으로 증가할 것이 분명했다.

이것에 대비하여 ABB-CE사는 산업 표준화보다도 한 걸음 나아감은 물론, 80년대와 그 이후에도 고객의 요구를 충족할 수 있는 표준화된 핵 증기 공급 계통(NSSS) 설계의 개발에 전념하게 되었다.

기본적으로 설계 목표를 정하였는데 이는 발전소의 경제성 향상, 안전 여유도 증대, 완전한 플루토늄 재활용 능력 확보, 그리고 가동 및 유지 보수 개선 등이었다.

이러한 목표들을 세워 노력한 결과 전력 생산 능력 향상과 고온 운전, 그리고 원자력의 정지 보수 비용을 줄일 수 있도록 Economizer 증기발생기를 갖춘 시스템80 NSSS를 개발하였던 것이다.

이 설계는 또한 혼합 산화물 노심 장전은 물론 우라늄에 대해 안전 여유도를 증대하기 위하여 독특한 원자로 용기 상층 안내관 구조물과 제어봉 배치 등을 포함하고 있다.

게다가 하부 진입 노심 내 계측 장치와 고정 및 이동식 노심 계측기의 설치를 추가함으로써, 노심 출력 분포에 대하여 더욱 자세하고 지속적인 계측을 할 수 있게 되어 노심 활동 관측의 정확도가 증대되고 향상된 운전 효율을 얻게 되었다.

결국 이와 같이 필요한 안전 여유도를 유지하면서 안전성에 관한 변수들의 불확실성을 최소화함과 동시에 노심 출력을 극대화하기 위하여 반도체 디지털 방호 계통을 포함시켰다.

그런 후에 미국 원자력규제위원회(NRC)의 표준형 플랜트 인허가 방법하에서 설계의 안전성 검토 및 승인을 받고자 새로운 시스템80 NSSS 설계를 제출했다.

CE사의 표준안전성 분석보고서(CESSAR)는 83년 12월 미국 원자력규제위원회로부터 최종 설계 승인을 받았다.

이 표준형 원전 설계로 ABB-CE사는 70년대 말경 서로 다른 다섯 개의 사업체와 총 17건의 시스템80 NSSS에 대한 공급 계약을 체결하였다.

본 설계는 각기 다른 다섯 곳의 Bop 설계자들과 시스템80 NSSS의 수정 없이도 그들의 발전소 전체 설계를 완성시킬 수 있었다.

그 중에서도 특히 주목할 만한 것은 시스템 80 NSSS가 세 가지의 서로 상이한 격납용기 유형에 합체되었다는 것이다.

① 프리스트레스 철근 콘크리트 원통형 격납용기(pre-stressed reinforced concrete cylindrical containment), ② 원통형 강철제 이중 격납용기(cylindrical steel dual containment), ③ 구형 강철제 이중 격납용기(spherical steel dual

containment) 등이 바로 그것이다.

흥미로운 것은 플랜트 종합 설계자이자 사업자인 두 회사 모두 구형 강철제 이중 격납용기 설계를 택한 점이다.

그 이유는 바로 장기 운전 및 유지보수의 개선으로, 이것이야말로 일단 발전소가 운전 상태에 돌입하면 사업자에게 있어서 근본적으로 가장 중요하기 때문이다.

70년대 말에서 80년대 초까지 전력 수요에 있어서 계획 성장이 극적으로 감소됨으로 인해서 미국에서는 모든 유형의 동력 발전에 대한 추가 건설이 축소되었다.

그 당시 건설 중이던 시스템80의 원전 설비 10기 중에서 오직 3기의 설비만 완성되어 운전에 들어갔다.

85년부터 87년까지 상업 운전을 시작한 팔로버디 원전 설비 3기가 바로 그들이다.

장래의 고객 요구를 충족시키기 위한 지속적인 설계 과정은 원래의 시스템80 설계의 목적이었다.

새롭게 개선하여 향상된 설비들을 이미 검증된 설계에 접목시킨다는 철학은 최근 한국에서 건설중인 원전들에 적용되어 왔고 시스템80+™ 개량형 설계와 더불어서 지속되어 왔다.

이러한 개선점들을 위한 구동력은 미국 전력연구소의 차세대 개량형 경수로 사업자 요건서(EPRI ALWR URD)에 구체화된 바와 같이 설비 운전에서 얻은 경험, 새로운 규제 요

건들, 그리고 미래의 잠재 고객들의 요구에서 비롯된 것이었다.

차세대 개량형 원자로 사업자 요건서는 미국 전력 회사와 원자력발전소 판매자들에 의해 합작으로 개발되었으며, 그 요건들은 원전 운전 경험, 종래의 정부 규제 및 새로운 규제, 경제적인 교섭, 그리고 원자력 산업계에서 제안한 다른 요소들을 바탕으로 구성되었다.

그 요건서는 잠재 고객들에게 그 설계의 장점들을 충분히 보강해 주기 위한 포괄적인 요건들을 망라하고 있다.

미국 전력연구소의 차세대 개량형 경수로 사업자 요건서가 개발되고 있을 즈음에 많은 인허가 개정 활동이 미국의 원자력 산업계에 의해 시작되었고 미국 원자력규제위원회의 지지를 받고 있었다.

장래 원전 소유자들의 재정적인 리스크를 충분히 감소시킬 차세대 원자력발전소의 인허가 취득을 위한 새로운 접근 방법들이 개발중에 있었다.

이러한 환경에서 ABB-CE사는 시스템80을 기초로서 사용할 개량형 경수로(ALWR) 설계를 개발하기 위하여 미국 에너지부(DOE)와 협력하여 대규모 프로그램을 시작했다.

그 개량형 설계는 그 기원을 반영시키기 위하여 시스템 80+™이라는 이름으로 부르게 된 것이다.

시스템80+ 설계 프로그램을 진행하는 동안에 한국과 원자력발전소를

제공하기로 계약을 체결하였다.

한국 건설 프로젝트의 설계 및 건설할 프로그램상의 단계적 요건을 충족시키기 위하여 선별된 설계 개선점들을 시스템80에 반영시키는 일과 시스템80+의 설계 개발이 거의 동시에 병행하여 시작된 것이다.

시스템80+ 표준형 설계로 수렴되는 이러한 두 가지 발전적인 경로는 <그림1>에 묘사되어 있다.

이중의 경로로 나타나 있음에도 불구하고 이에 포함된 설계 과정은 서로에게 도움이 되었다.

이중 경로를 통한 접근은 <그림2>에 자세히 묘사되어 있다.

시스템80+ 원전 일족에 대한 지속적인 개발에 있어서 가장 중요한 면은, 이러한 새로운 설계 유형들을 이미 운전 중에 있는 잘 검증된 시스템80+설계에 반영하는 과정인 것이다.

### 시스템 80 원전들에 대한 단기 발전 과정

87년에 ABB-CE사는 한국의 회사들과 2건의 원자로 계통 공급을 제공하기로 계약을 체결했다.

고객의 필요와 요구 사항에 근거하여 팔로버디 발전소의 시스템80 설계를 원용하였고, 그 설계의 입증을 위해 크게 모험을 감수하거나 인·허가의 과도한 위험 부담이 없도록 선별된 설계 개선점들을 반영시키기로 결정했다.

한국의 에너지 수요를 충족시키기 위하여 정상적인 계획에 따라 추가적인 원전들이 건설되어야 했기 때문에 부가적인 개선점들이 후속의 설계에 가미될 수 있다는 것을 깊이 인식하였다.

점진적인 변화를 가진 이미 검증된 설계에 대하여 많이 강조되는 이 접근 방법은 고객의 기대와 일치하는 것이었다.

각각의 성공적인 프로젝트에서 형성될 수 있었던 그 점진적인 변화는 시스템 80+™의 변화와 유사했으며, 시스템 80+™ 개발이라는 면에서 그 변화들은 본질적으로 공통된 설계의 결과를 낳았다.

영광 원자력 3·4호기는 개량형 시스템80 설계를 바탕으로 한국에서 건설한 첫 번째 원전이다. ABB-CE사는 한국 회사들이 참여한 원전들의 건설에 이 설계를 공급했다.

<표1>은 (팔로버디 발전소의)시스템80 설계를 원용한 후 주된 개선점들의 리스트를 나타내고 있으며, 그들이 합체시켜 왔고 앞으로도 설계에 반영해 나갈 원전들을 가리키고 있다.

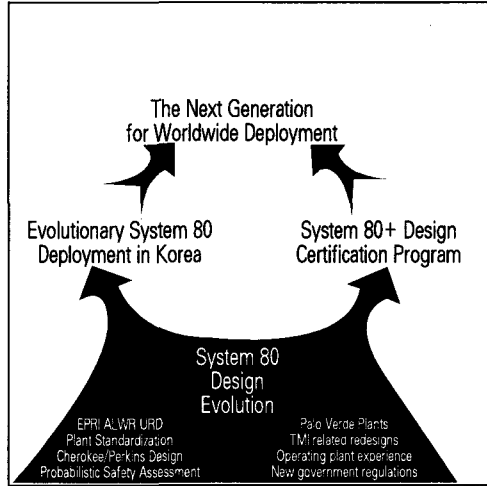
영광 원자력 3·4호기에 반영된 설계 변경은 팔로버디 발전소에서 얻은 경험을 바탕으로 선택되었으며, 그것은 낮은 리스크(risk)에 높은 성과를 거둔 설계 개선 작업이었다.

팔로버디 발전소에 적용된 시스템 80 표준형 설계가 1,300MW의 전기

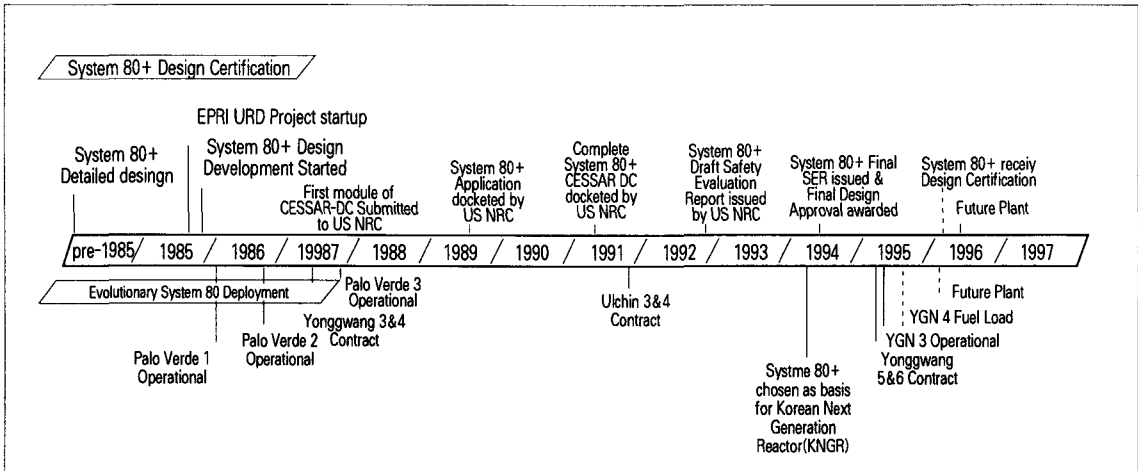
출력(MWe)을 낼 수 있는데 반해 영광(YGN) 3·4호기에 대한 설계에서는 1,000MW로 용량이 감소되었다.

팔로버디 발전소와 관련하여 영광(YGN) 3·4호기에 대한 원자로 공급 계통 설계의 주된 설계 변경들은 다음 사항을 포함하고 있다.

① 증기 발생기와 가압기의 크기는 시스템80 표준형 설계치에서 축소되지 않아 MW당 구성 부품들의 체적이 보다 크게 되었다. 이렇게 더욱 큰 체적은 원자로 냉각재계통(RCS Reactor Coolant System)으로 하여



〈그림1〉 시스템80+ 표준형 설계 발전 경로



〈그림2〉 시스템80+ 표준형 설계 발전 과정

금 예상치 못한 과도 현상(transit)에 대하여 더욱 느리게 반응하도록 하여, 그것에 의해서 추가적인 운전 여유도를 제공하고 안전 밸브에의 부담을 줄여 주는 이점이 있는 것이다.

② 원자로 압력용기는 강판보다는

환형 단조물로 성형하여, 세로로 난 용접 부위의 문제를 해결하고 총 용접 부위의 수를 줄이게 되었다. 이것은 원자로 용기 용접 부위의 사용중 검사에 대하여 유리한 영향을 끼치게 된다.

③ 원자로 냉각재 계통의 주요 부품에 있어서 작은 직경의 노즐에는 산업 관심사와 고온 환경에서 인코넬 합금 600을 사용하던 경험에 부응하여 인코넬 합금 690이 사용되었다.

④ 설계 기준 사고를 넘어선 중대

〈표 1〉 시스템 80+ 원전 일족에서의 주요 설비

설계 유형	YGN3&4 1987	UCN 3&4 1991	YGN 5&6 1995	UCN 5&6 1996	Future Plant	System 80+™
원전 설비 전반						
60년 설계 수명						
원자로 냉각재 계통						
MW당 가압기 체적 증대						
MW당 증기발생기 체적 증대						
환형 단조용기						
NII 연성 온도 개선 <sup>1)</sup>						
SGT Plugging 여유도 증대 <sup>2)</sup>						
증기발생기 manway 직경 증대						
인코넬 합금 690 소직경 RCS 노즐						
인코넬 합금 690 CEDM 노즐 <sup>3)</sup>						
인코넬 합금 690 SGT						
MSL, S에 LBB적용 <sup>4)</sup>						
DVI Lines 원자로용기 직접 주입관						
Lower THOT						
DVI						
핵연료와 노심						
개량형 핵연료 설계						
운전 위한 부분 제어봉 집합체						
15년 수명의 제어봉						
20년 수명의 제어봉						
NSSS 안전 및 보조 계통 <sup>5)</sup>						
안전 감압 및 배기 계통						
비상 급수 계통 개선						
실수 화학 추가 계통 개선						
계통간 LOCA 설계 <sup>6)</sup>						
화학적 제어 계통 개선						
보조 원자로 냉각재 펌프 밀봉수 주입 펌프						
원자로 냉각재 가스 배기 용량 증대						
4열의 안전 주입 시스템						
전용 정지 냉각 계통 LPSI 펌프 삭제 <sup>7)</sup>						
정지 냉각 계통 및 격납용기 실수 계통의 호환성						
EPRI URD에 의한 안전감압시스템 <sup>8)</sup>						
계속 제어 계통						
PLC's 사용(다양한 방호:제어봉 구동 제어) <sup>9)</sup>						

사고에 대한 새로운 규제 요건들을 해결하기 위하여 안전감압설비 (SDS)가 반영되었다. 그리하여 증대 사고의 발생 가능성을 줄이게 된 것이다.

⑤ BOP 제어 계통에 대한 신뢰성을 증대시키고 복잡성을 줄이기 위하여 디지털 제어 계통을 적용하였다.

⑥ 발전소 정전과 관련된 최근의 규제 관심사에 부응하기 위하여 대체 교류 전원을 추가하였다.

이 설계 개선은 울진 3·4 호기에 서 계속되었는데, 91년에 그 계약을 체결하였다.

이 원전들에 대한 설계는 ABB-CE사의 지원과 자문으로 한국 회사들이 작성하고 있다.

이 원전들은 영광 3·4 호기를 참조 설계로 사용하여 〈표1〉에 보여지는 바와 같이 개선된 설계가 추가 반영되고 있다.

가장 주목할 만한 점은 다음과 같다.

① 인코넬 합금 690 노즐의 균열에 대한 산업 경험에 부응하여 원자로 용기 헤드에 있는 제어봉 구동 장치 (CEDM)노즐에 인코넬 합금 690을 지정하였다. 비록 이러한 문제는 ABB-CE사의 원자로에서는 발생한 적이 없어서 ABB-CE사의 설계에 대한 중요한 하자로는 믿어지지 않지만, 이것은 신중하면서도 비용 면에서 효과적인 변경인 것으로 받아들여

설계 유형	YGN3&4 1987	UCN 3&4 1991	YGN 5&6 1995	UCN 5&6 1996	Future Plant	System 80+™
디지털 보조 설비 부문 제어 계통						
확상 표시 설비 감시						
비안전 field multiplexing						
감소된 재고 운전을 위한 준위 계측 개선						
다중의 디지털 NSSS 제어 계통						
UNIX 개량형 workstation						
증기관 N-16 감시						
Nuplex 80+ 개량형 제어 콤플렉스						
보조 설비 부문 계통						
CCWS용량 개선 <sup>10)</sup>						
예비의 급수 펌프와 복수 펌프						
탈기기 (deaerator)						
기동 급수 계통						
선택적 교류 전원						
MW당 원자로 공동 바다 면적 증대						
배전 체계 개선						
수소 점화기						
6개의 성능좋은 축전지						
공동 범람 계통						
비산을 차폐의 대체를 위한 두부 영역						
cable tray 체계						
격납용기 실수 긴급 보조 연결						
영구적인 핵연료 재장전 밀봉						
다중·독립의 CCW 및 SSW계통 <sup>11)</sup>						
노심 이물질 보유 공동을 가진 이중의						
구형 격납용기						
IRWST <sup>12)</sup>						

주 1) NII (Nuclear Installation Inspectorate, 원자력시설검사항- 영국)  
 2) SGT (Steam Generator Tube) 증기발생기 진열 세관  
 3) CEDM (Control Element Drive Mechanism) 제어봉 구동 장치  
 4) LBB (Leak Before Break) 배관 파열전 누설  
 MSL (Main Steam Line) 주증기관  
 SI (Safety Injection) 안전 주입  
 DVI Line (Direct Vessel Infection Line) 원자로용기 직접 주입관  
 5) NSSS (Nuclear Steam Supply System) 핵증기 공급 계통  
 6) LOCA (Loss Of Coolant Accident) 냉각재 상실 사고  
 7) LPSIS (Low-Pressure Safety Injection System) 저압 안전 주입 계통  
 8) EPRI URD (Electric Power Research Institute, Utility Requirements Document)  
 미국 전력연구소의 차세대 원자로 사업자 요건서  
 9) PLC's (Programmable Logic Controllers) 프로그램 가능 논리 제어기  
 10) CCWS (Component Cooling Water System) 기기 냉각수 계통  
 11) SSSWS (Station Service Water System) 소내 용수 계통  
 12) IRWST (In-Containment Refueling Water Storage Tank) 격납용기 내 연료 교환수 저장 탱크

진다.

② 시스템간 냉각재 상실 사고 (LOCA)에 대한 연구 내용이 이 설계에 반영되고 있다. 이것은 원자로 냉각재가 제어 계통 외의 경로를 통하여 누설될 수 있다는 가능성 때문에 최근 몇 년간 규제 관심사가 되어 온 것이었다.

③ 감소된 재고 운전(inventory operation)시 개선된 수위 측정 계기가 냉각재 수위를 좀 더 정확히 감시할 수 있도록 그 설계에 추가되고 있다.

④ 펌프 용량을 높이고 cavitating venturi를 부착함으로써 비상 급수 계통(EFS)을 개선하고 있다.

⑤ 계측과 제어(I&C)의 개선점들이 비(非)안전 신호(non-safety signal) 계통에도 multiplexing의 도입이 확장되고 있다. 이것은 현장 배설 작업과 관련된 재료 및 설치 비용을 절감시킨다.

⑥ 영광 5·6호기에 대한 계약이 95년 초에 체결되었고, 이들 설비들도 <표1>에서 보여진 바와 같이 추가적인 설계 첨가 사항들을 반영함으로써 설계 개선을 계속할 것이다.

⑦ 보조 원자로 냉각재 펌프(RCP)의 밀봉 주입 펌프가 발전소 정전 사태시에 펌프 밀봉을 냉각시켜줌으로써 원자로 냉각재 펌프의 밀봉이 어떠한 냉각재 손실 사고(LOCA)의 원인이 되지 않도록 설계에 추가된다. 이 설비는 시스템80+ 설계에 포함되

있으며 인허가를 취득한 것이다.

⑧ 화학 체적 제어 계통(CVCS)에 있어서 정변위(positive displacement) 충전 펌프들이 원심 충전 펌프로 대체되고 있고 감속 유량 제어를 위해 orifice를 추가하고 있다. 이 설계 변경들로 인해 유지 보수 요건들이 감소되고 (그리하여 운전 및 유지 보수 비용이 더욱 낮아지고), 감속 유량 제어가 좀 더 나아질 것이다.

⑨ 추가적인 계측 제어(I&C) 개선 작업들로는 다중의 디지털 NSSS 제어 시스템을 부가함으로써 보다 높은 신뢰성을 확보하고, 주제어실에서 좀 더 정보 처리 기능이 뛰어난 설비 감시 작업을 하기 위해 UNIX 워크스테이션을 사용하고 있다.

또한 <표1>에서 보여진 바와 같이 미래의 원전 설비들에 추가할 설계 첨가 사항들과 개선점들을 위한 계획이 있는데, 그들 중 대다수를 이미 반영하여 왔으며 시스템 80+설계로써 인허가를 받은 상태이다.

추가적인 설비 중 많은 것들은 그 설비와 부품의 수명을 연장하고, 많은 교체품의 재고에 대한 문제를 감소시키기 위하여 계획되었다.

예를 들면, 인코넬 합금 690을 증기발생기 배관에 사용한 것이나 15년 수명의 제어 기기 설계 등이다.

다른 설비들은 중대 사고 규제에 대한 원자력 산업의 대응에 부응하기 위하여 계획되어졌다.

예를 들면, 격납 용기 내에서 수소 점화기의 사용과 주증기관에 N-16감마 감시기의 사용 등이다.

시스템80 설계의 발전 과정에서 다음 단계는 Nuplex 80+™ 개량형 제어 Complex(ACC, Advanced Control Complex)가 될 것으로 믿는다.

ACC는 오늘날의 모든 인적 이용 요소 요건들을 충분히 만족시키는 수준에까지 인간 공학적 설계(MII)의 개선을 가져 올 것이며, 종합적이고도 조직적이며 쉽게 이해할 수 있는 방법으로 중요한 정보를 제공하고, 또한 상당히 많은 양(약 60%)의 계측 장비의 전선 및 케이블 트레이 및 단자를 제거함으로써 원전 건설 비용을 줄이게 될 것이다.

**시스템80+ 표준형 원전시스템에 대한 설계 개량 과정**

한국에서 건설중에 있는 원전 설비들은 시스템 80설계로부터 현상태로 점진적으로 발전되어 온 것인데 반해, 시스템80+ 표준형 원전은 시스템 80으로부터 단번에 발전한 것이다.

시스템80+ 표준형 원전 설계는 원자력에 대한 다년간의 원자력발전소 운전 경험에서 습득한 교훈들에 의해 발전된 개선점들을 결합한 것이다.

그것은 매우 성공적인 시스템80 NSSS 설계와 건설 및 운전 경험들

근거로 하며, 거의 모든 점에서 EPRI ALWRURD와 일치하는데, 이는 그 설계가 본래 URD 와 같은 때에 개발되고 있었기 때문이다.

팔로버디 발전소에 적용된 시스템 80에 비하여 시스템80+에 있어서의 주된 설계 개선점들은 <표1>에 나타나 있다.

**1. 안전 계통**

시스템80+ 설계는 트리마일 섬(Three Mile Island, 미국 Pennsylvania 주 소재)에서의 원전 사고의 결과로서 야기된 중대 사고 문제에 특별히 대응하고 있다.

격납용기 구조가 미국기계학회(ASME)의 규약 요건에 맞게 설계된 강철제 구형인데 그것은 원통형의 콘크리트 차폐 건물 내에 밀폐되어 있다.

그 격납용기 구조는 중대한 노심 손상 사고의 중요성을 경감시키기 위하여 특별히 설계된 것이다.

이중의 격납용기는 차폐 건물 내부의 강철 격납용기로부터 어떠한 누출이라도 막아줌으로써 환경으로 방사성 유출이 안 될 가능성을 보여 준다.

수소점화기와 더불어 이 격납용기의 크기와 설계는 중대 사고시 유출될지도 모를 수소가스의 혼합, 희석 및 제어도를 향상시켜서, 격납용기 건전성에 손상을 입힐 수도 있을 수소의 폭연 작용이나 폭발을 막아 준다.

원자로 용기 캐비티(cavity)와 Cavity Flood System의 배치는 노심 용융시 낮은 원자로 용기 캐비티 영역에 모이고 냉각될 수 있게 하며, 이는 결국에는 격납용기 기능 상실 초래를 막아 준다.

안전 계통들은 구형의 격납용기 구조물(반구형 영역)에 배치되어 있다.

이 배치는 외부 사건으로부터 안전 계통 부품들이 좀 더 잘 보호될 수 있도록 하여 주고, 방호 계통들과 원자로 냉각재 계통간에 배관 거리를 더욱 짧게 만들며 4열(列)의 안전 주입 계통(SIS)의 열(列)에 있어서 표준화를 매우 편리하게 한다.

안전성을 증대시키는 근본적인 방법은 주요 안전 계통들을 다중적으로 설계하는 것이다.

시스템80+ 설계는 안전성을 개선하기 위하여 다중 설계를 함은 물론 운전 신뢰성을 개선한다.

안전 주입 계통, 주급수 계통과 비상 급수 계통, 설비 냉각수 계통, 그리고 현장 전력 공급 등이 다중 설계에 추가되었다.

예를 들면, 주급수 손실의 사건 발생시 원자로를 냉각시켜 줄 비상 급수 계통(EFS)은 4열(펌프·밸브·배관 등)로 구성되었다.

공통 모드 고장을 막기 위해서는 2개의 비상 급수 계통 펌프가 전기 모터에 의해서 구동되고, 또다른 2개의 펌프가 증기 터빈에 의해서 구동된다.

호환성과 융통성도 또한 설계 목적인데, 둘 다 안전성을 향상시키고 부품들을 표준화하기 위한 것이다.

일례로, 정지 냉각 계통에 있는 펌프들은 격납용기 살수 계통에 있는 펌프들과 동일한 것이다.

그리고 배관·밸브 및 열교환기 등도 두 계통에서 호환적으로 사용될 수 있다.

이와 같이 정지 냉각 계통의 2열이 모두 상실되었다면, 1열의 격납용기 살수 계통이 원자로 노심의 잔열 제거 작업을 할 수 있다.

마찬가지로 2열의 격납용기 살수 계통이 모두 상실되었다면 1열의 정지 냉각 계통이 이 작업을 대신할 수 있다.

발전소 정전 사태에 대한 규제 기관의 관심사를 해결하기 위하여 시스템80+ 설계는 비상용 디젤 발전기와 축전지 보조 시스템(battery backup system)에 추가하여 다중의 교류 전력 공급(연소 터빈)을 포함하고 있다.

이 방법을 사용한다면 어떠한 임계 기능의 상실도 전혀 발생하지 않을 것이다.

화재·홍수 또는 태엽 등의 사건이 발생하더라도 피해를 최소화하기 위해서 각각의 안전 계통은 설비의 별개 부분에 격납되어 있다.

어떤 사건이 발생하여 하나의 안전 계통을 손상시켜도 이로써 다른 안전 계통들을 손상시킬 수는 없게 된다.

시스템80+의 안전 계통들은 발전소 운전에 최근 사용되었던 재래식 계통들에 비해 향상되었다.

안전 여유도를 더욱 확보하고 사고 발생시 이를 극복하기 위한 더 많은 융통성을 제공하기 위해 다음과 같은 추가 설계 개선 사항들이 있다.

① 최근 원전 설비의 주입 유량 능력을 2배로 증대시키고 대형 배관 파열에서도 노심과 냉각기를 보호할 수 있는 안전 주입 계통

② 계통간 냉각재 상실 사고(LOCA)들을 최소화하기 위하여 설계 압력을 증가시킨 정지 냉각 계통

③ 사고 후 격납용기 최대 압력 및 온도를 감소시키기 위하여 증가된 제열 능력을 갖춘 격납용기 살수 계통

④ 비응축 가스를 제거하고 원자로 냉각재 계통(RCS)의 감압을 도와주는 더욱 큰 용량의 원자로 냉각재 가스 배기 계통

이들 안전 계통 첨가 사항들은 본질적으로 시스템80 설계에 이미 추가된 개선점들이다.

게다가 시스템80+ 설계는 안전 여유도를 훨씬 더 증대시키고 새로운 인허가 요건들에 부응하는 전혀 새로운 안전 계통들을 반영하였다.

한 예를 들면, 안전 감압 설비(SDS)는 격납용 기내 연료 재장전 저수조(IRWST)에서 안전하게 압력을 낮추고 여과하기 위하여 원자로 냉각 계통(RCS)을 수용했다.



안전 주입 계통(SIS)과 더불어 안전 감압 설비(SDS)는 노심을 냉각시켜서 중대한 사고를 방지하는 feed and bleed 능력을 제공하고 있다.

이것은 격납용기 내 연료 재장전 저수조(IRWST)내의 수중 분사기를 통하여 원자로 냉각 계통(RCS)으로부터 증기를 응축함으로써 완성되었다.

## 2. NUPLEX80+ 개량형 제어 콤플렉스

시스템80+ 설계의 또 다른 매우 중요한 설비는 Nuplex 80+ 개량형 제어 콤플렉스(ACC)이다.

ACC의 목적은 다음과 같다.

① 운전자와 설비 사이에 인간 공학적 설계(MMI)를 개선하는 것

② 운전자에게 중요한 정보를 직접적이고 집중된 방법으로 제공하도록 발전소 안전을 개선하는 것

③ 원전 건설의 비용을 줄이는 것

④ 차세대 개량형 경수로 사업자 요건서(EPRI ALWR URD)와 NRC의 새로운 규제들을 따르는 것.

Nuplex80+ ACC는 아날로그 방식에서 전(全)디지털 소프트웨어 방식의 제어 콤플렉스로의 순조로운 전이를 촉진할 최근의 유용하고 입증된 계측 제어 기술의 독특한 조합을 활용한다.

주요 설계 사항들은 다음과 같다.

① 정상적인 조건에서든 비정상적인 조건에서든 운전자의 인식을 개선

한 인간 공학적 설비(MMI)를 가진 개량된 정보처리 및 디스플레이(display)

② 원자력 분야에 검증된 시제품 사용

③ 인허가, 훈련, 운전 또는 유지보수를 방해할 수도 있는 검증되지 않은 기술이나 독특하고 특별한 하드웨어 품목을 회피

④ 장비 손상의 효과를 최소화하기 위하여 분산된 건축 구조 이용

## 3. 설계 현황

시스템80+ 표준형 원전 설계는 94년 7월에 미국 원자력규제위원회(NRC)로부터 최종 설계 승인(FDA)을 받았다.

FDA의 취득은 설계와 안전성 문제들에 관련된 모든 규제들이 해결되고 승인되었다는 것을 의미한다는 점에서 중요하다.

또한 시스템80+ 설계는 80년대 중반에 처음 정한 다음과 같은 목표들을 충족시켰다.

① 원자력의 안전성에 있어서 대중적인 확신을 증대시키고,

② 실제적인 프로젝트가 시작되기도 전에 사전 승인 받은 설계를 갖게 됨으로써 인허가 과정이 매우 간단해지며,

③ 그 동안 수년 동안의 운전에서 얻어진 경험을 반영하고 있는 EPRI ALWR URD 요건들을 충족시킴으로써 그 설계를 이용할 사업자의 요

구를 만족시켰다.

이런 점에서 시스템 80+ 원전 설계는 오직 EPRI ALWR URD의 요건들을 충족시키기 위해서만 진행된 것이 아니라는 것을 주목해야 한다.

운전 설비로부터의 피드백은 지속적으로 그 설계에 반영되어 왔다.

일례로서, 증기발생기 배관 파열과 그에 따라 후속되는 폐쇄 및 우회와 관련된 새로운 관심사는 재료 변경(인코넬 합금 690)과 설계 첨가(N-16 감마 감시기의 추가)에 의해 해결되었다.

또한 이중 경로의 발전적 개발 과정은 한국의 원자력 프로그램에 있어서 현재 사용중이거나 개발중인 설계로부터 나온 입력 정보를 제공해 주었다.

영광 5·6 호기 설계에 사용될 시스템80+ CVCS의 Letdown Line에서의 밸브와 orifice의 조합은 종전의 시스템80 설계보다 밸브 특성 면에서 더욱 허용 폭이 넓다.

<표 2>에서 본 바와 같이 점진적인 방법을 경유하여 시스템80 원전에 추가된 설비들은 한결같이 시스템80+ 설계를 향하여 변화되어 간다.

아직 남아 있는 주된 차이점은 다음과 같다.

① 설계부문 : 시스템80 개량형 설계가 오직 원전 설비의 NSSS부분만을 지향하는 반면, 시스템80+ 설계는 전체인 원자력발전소를 포함하고 있다.

② 격납용기의 유형 : 시스템80 설계는 PS콘크리트 원통형 격납용기를 가지고 있는 반면 시스템80+ 설계는 구형 강철제 이중 격납용기를 가지고 있다.

③ 시스템80 은 2열의 안전 계통을 사용하지만 시스템80+ 설계는 4열의 안전 계통을 사용한다.

이와 같이 서로 다른 개발 기간을 가진 두 가지 발전적 경로는 각각의 개발 단계에서 서로 보완해 왔고, 규제적인 입장과 산업적인 입장에서 현재 및 미래의 요건들을 충족시키는 일반적인 접근 방법을 이용하고 있다.

### 원전 소유자에게 이익이 되는 발전과정

시스템80 원전 일군(一群)의 발전 과정에서 고찰된 이중 경로는 안전성을 향상시키고, 건설 비용과 시간을 감소시키며, 발전 비용을 낮추고, 운전과 유지 보수를 더욱 간단하고 효율적이게 만드는 것은 물론, 방사선 피폭과 유출을 줄여 주는 설계를 만들어 낸 것이다.

다양한 설계 개선점들과 첨가 사항들은 그 설계 과정에서 일체화되어 감에 따라, 위에 언급한 영역들에 가능한 효과에 대하여 고려하게 되었다.

특정 설비의 안전성에 대한 상대적 중요도를 평가하기 위하여 확률론적 안전성 평가에 대한 효과가 결정되었

다.

안전성에 대한 중요도를 가지고 있지 않은 설비들에 있어서 산업 경험, 고객의 요구 조건들, 설비의 경제성, 그리고 원전 운전 및 유지 보수 등이 제일의 고려의 대상이었다.

이러한 요소들을 바탕으로 개량형 설계에 반영된 각각의 설계 개선점을 위하여 하나의 이론적 근거가 마련되었다.

다음은 이러한 과정의 결과로서 인식되고 있는 주된 이점들을 요약한 것이다.

### 1. 안전성

어떤 설계가 안전성에 끼치는 영향은 돌발적인 초기 사건들과 이러한 초기 사건들로부터 초래될 수 있는 노심 손상 및 원전 경계 밖으로 상당히 많은 양의 방사능이 유출될 가능성 등을 감소시키는 것에 의해 평가될 수 있다.

이러한 것들은 확률론적 안전성 해석(PSA)과 자세한 과도 현상(사건) 분석을 통하여 이루어진다.

미국 정부와 미국의 원자력 산업, 그리고 다양한 국제 단체들에 의해 이루어진 양적인 안전성 목표들은 <표 2>에 표시되어 있다.

이들 목표들은 노심 손상 빈도와 현재 가동중인 원전에 비교되는 대량의 방사선 유출이 일어날 가능성에 있어서의 한계 수치나 그 이하의 수치를 요구하는 것이다.

시스템80 원전에 반영된 개량 설계 사항들은 <표 3>에서 볼 수 있는 바와 같이 점진적으로 노심 손상 빈도(CDF) 및 외부 유출 가능성을 줄이도록 유도해 왔다.

게다가 운전 정지에 대한 위험도 분석이 포함되어 있으므로 운전정지 기간 중에 실질적이거나 가정적인 사건들이 전체적인 리스크를 불러올 수 있다는 것이 증명되고 있다.

결론적으로 설계 특성들은 원전 정지중에 발생하는 중대 사고의 발생 가능성을 최소화하도록 반영되어 있다는 것이다.

수많은 설계 개선점들이 안전성을 위해 중요한 공헌을 하는 동안, 몇 가지 특성들은 노심 손상 빈도를 전반적으로 감소시키는 물론 방사선 유출 가능성까지도 감소시키는 중요한 역할을 한다.

앞서 언급한 이들 특성들은 원자로 냉각 계통을 빠르게 감압시키는 방법을 제공하고, 증기발생기를 통하여 좀더 믿을만하게 원자로 냉각 계통을 냉각시키며, 정전 상태에서 교류 전원을 유지한다.

이것이 노심 손상을 초래하고 결과적으로 수치를 줄이는 어떤 연쇄적인 사고에 대한 가능성을 줄여준다.

다중적 설계를 증대시키고 주요 특성과 시스템에 대한 backup 장치를 부가함으로써 노심 손상 빈도를 추가적으로 줄여 왔다.

이들은 2열의 독립적인 안전 주입

계통을 4열로 확대하여, 전용의 직접 용기 주입 배관을 통해 고순도의 봉산 냉각수를 공급하며, 성능 좋은 여러 개의 축전지의 용량을 확장시킨다.

모든 경우에 있어서, 개선된 설계 안정 특성들은 안전성 기능을 수행하는 데 있어 상호 보완하도록 발전소 설계에 반영된다.

시스템80+ 설계는 또한 운전 여유도를 증대시키고 원전 운전을 개선하는 설계들을 포함한다.

낮아지는 RCS의 온도는 좀 더 높은 노심 운전 여유도(최소한 15%)를 제공하고, 연료 피복과 기본적인 시스템 부품의 부식을 줄이게 되며, 이로써 원전으로 하여금 발생 가능한 방사선 유출에 대한 대응력을 향상시킨다.

개량형 제어실 설계는 안전성 계통의 발생 가능한 사태를 운전자에서 경고하여 운전자로 하여금 원전 운전을 더욱 자세히 감시할 수 있도록 해준다.

**2. 건설 비용 및 계획**

시스템80+ 설계를 개발하는 동안 원자력발전소의 건설 기간을 줄이기 위하여 경험있는 건설자와 미국 에너지부가 후원한 시공성 향상을 위한 설계와 같은 프로그램들로부터 중요한 입력 정보를 얻었다.

더구나 한국에서의 건설과 운전 경험을 바탕으로 설계 개선점들을 수용

〈표 2〉 개연적인 안전성 평가에 있어서의 양적인 목표

요구 기관	노심손상 빈도 <sup>1)</sup> (원자로 1년당 사건수)	대량의 외부유출 빈도 <sup>2)</sup> (원자로 1년당 사건수)
미국 NRC 목표	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-6</sup>
EPRI ALWR URD 목표	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>
국제적인 목표	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>

- 1) 노심 손상 빈도(CDF)는 내부적인 사건, 외부적인 사건 및 운전 정리 리스크를 포함한 것임.
- 2) EPRI는 대량 유출을 24시간 이상 동안 25Rm을 초과하는 양으로 정의함. NRC는 이에 대하여 정의한 바 없음.

〈표 3〉 노심 손상 빈도 (국제 CDF 목표 ≤ 10<sup>-5</sup> 사건/년)

리스크 분류	80년대의 일반적인 원전	영광 3·4호기	후속의 개량형 시스템 80 원전	시스템 80+
내부 사건	1.7E-4	8.4E-6	3.6E-6	1.7E-6
외부 사건 <sup>2)</sup>	5.9E-5	"	2.4E-6	1.3E-6
운전 정리 리스크	4.5E-5	"	1.9E-6	8.4E-7
합 계	2.7E-4	"	7.9E-6	3.8E-6

- 주 1) 외부 사건과 운전 정리 리스크는 영광 3·4호기의 경우 이용 불가
- 2) 외부 사건은 지진·화재와 홍수 및 태풍 등을 포함함.

하는 능력을 크게 향상시켰다. 더욱 효과적이고 표준화된 건설 기술에 더하여지는 이러한 변화들은 미래의 원전 건설에 있어서 그 시간 및 비용을 줄여줄 것이다.

Nuplex80+™ 개량형 제어 콤플렉스는 안전성을 개선함을 동시에 원전 소요 비용을 줄이기 위해 개선된 설계 특성의 좋은 예이다.

Nuplex80+ 설계가 발전소 전체에 걸쳐서 계측 제어의 Multiplex를 이용하기 때문에 현장 전선 작업의 양은 실질적으로 줄어든다.

이것은 재료의 양을 줄여줄 뿐만 아니라 설치 시간과 비용도 줄여준다.

하나의 원전을 건설함에 있어 1,220,000m의 전선과 16,300m의 깔판 재료 및 10,500m의 전선관 그리고 85,000개의 연결 단자를 줄여주는 것이다.

설비함이 편리한 시기에 설치된 terminal과 연결되어 있으므로 초기에 multiplexer를 배치하면 단자까지의 배선 작업을 건설 계획보다 일찍 마칠 수 있다.

초기 시스템 가압과 신호 연결성 시험은 공장에서 시스템 integration 중에 수행될 수 있다.

이로써 건설 현장에서 설치 및 시험 시간을 더욱 줄일 수 있는 것이다. Nuplex80+ 개량형 제어 콤플렉

스는 입계 경로 시간을 두 달까지 감소시키고 재료비 및 인건비를 거의 5,000만 달러까지 절약하게 하는 것으로 평가되어 왔다.

건설을 위한 설계 최적화 작업과 건설 경험으로부터 오는 실질적인 설계변역/건설 단가를 감소하게 해 주고 더욱 확실하게 건설 공정을 달성하도록 기여해왔다.

### 3. 운전 및 유지 보수

시스템80 설계의 이중 경로를 통한 설계 개선은 계통 이용 능력 증대와 간단해진 운전 및 유지 보수, 그리고 다중성과 호환성 덕분에 동력 발전의 건설 단가를 줄이도록 하는 설계 특성을 이끌어냈다.

시스템80 계열의 발전적인 설계들은 운전 및 유지 보수(O&M)의 비용을 줄이는 데 중요한 영향을 줄 설계 특성들을 개발하고 반영하는 데 관심을 집중해왔다.

시스템80+ 설계에서 O&M의 절약은 다음 사항들에 기인한다.

- ① 동력 기동 능력을 갖춘 개량형 연료 주기의 사용
- ② 원전에 관하여 기술 사양에서의 운전 요건들을 완화하는 것으로 믿어지는 대체 계통들 (대체 교류 전원 등)
- ③ 부품의 설계 수명을 연장하게 하고 검사와 실험의 기반이 되는 개선된 재료와 제작 기술
- ④ 산업 분야에서 널리 사용됨으로

써 증명된 높은 신뢰성을 가진 부품의 선택

⑤ 접근, 장비의 제거, 그리고 작업 공간 등에 대한 요구 사항들을 미리 예상하여 유지 보수가 편한 배치

⑥ 더욱 높은 신뢰성과 유용성을 가진 디지털 BOP(보조설비부문) 제어 시스템의 사용

⑦ 증기발생기 튜브 밀봉 여유도 증대와 유지 보수에 있어서 더욱 쉽게 접 근할 수 있도록 증기발생기 사 람 출입구의 직경 증대

시스템80+ 설계는 훨씬 더 O&M 비용을 줄이고 운전을 간단하게 하며, 감독과 유지 보수를 줄이는 다른 개선된 설비들을 포함하고 있다.

자기 진단 기능을 갖춘 개선된 전기 기계들과 장비 진단 설비들, 유체 안전성 계통을 위한 총유량 시험 능력, 개선된 제어 와 경고음 및 display, 그리고 연료 재장전 시간을 최소화하는 연료 재장전 계통과 절차 등은 단지 몇가지 예일 뿐이다.

O&M 비용, 소모 시간, 방사선 유출액, 그리고 직원의 방사선 피폭 등을 더욱 감소시키는 것은 Nuclear Island에 포함된 다른 설계 특성들에게 이익을 준다.

예를 들면 다음과 같다.

- ① 유용한 작업 공간을 75% 증대 시킨, 격납용기 안의 넓은 운전 영역
- ② 지정된 접근로, 계획된 작업 공간, 영구적인 플랫폼, 장비의 유지 보

수를 위한 넓은 공간, 지정된 레이아웃(laydown) 영역, 작업 영역의 차폐, 엘리베이터, 그리고 영구적으로 설치된 많은 인양 장비

③ 갱의실의 위치, 오염 제거 시설, 그리고 작업 영역에서 가까운 연장 보관 창고

④ 원자로 냉각 계통에서 낮은 코발트 재료의 사용

⑤ 작업자의 피폭을 줄이기 위한 영구적인 차폐

⑥ 냉각된 부품의 부식을 줄이기 위한 폐쇄 기기 냉각수 계통(CCWS)

⑦ 방사성 폐기물과 비방사성 폐기물을 더욱 효과적으로 나누기 위한 바닥과 장비 배수의 분리

⑧ 영구적인 연료 재장전 캐비티(cavity) 밀봉

⑨ Nuplex80+™의 자동화 시험, 진단, 표준화

이러한 설비들은 원전 1기당 매년 1,300만 달러의 O&M 비용을 절약하게 하고 60년 수명 동안에 8억달러를 초과하여 절약하게 하는 것으로 평가된다.

이러한 절약들의 실질적인 면은 원전의 향상된 유용성에 기인한다.

단지 연료 재장전을 위한 운전 정지 시간을 줄이는 것만으로도 연간 200만 달러 이상을 절약하는 것이 가능하다. ☞