

차세대 원전 개발현황 및 전망

최영상

한국전력공사 전력연구원 신형원전개발팀장

1. 서론

주요 선진국과 국민 1인당 전력소비량을 비교해 볼 때 우리 나라는 2016년까지 전력소비량이 지속적으로 증가할 것으로 전망된다. 증가하는 전력수요에 대응하여 우리 나라에서 가능한 전력공급원은 현실적으로 원자력과 화력으로 대별된다.

세계 석유 매장량의 약 60% 이상이 중동에 집중되어 있으며 대략 그 사용한도는 50년을 넘지 않을 것으로 예측하고 있다. 천연가스는 약 60년, 석탄은 200년 정도 사용할 수 있는 양이 매장되어 있는데 지역적으로 편중되어 있어 지역 정치여건에 따라 화석에너지의 공급불안 요소가 상존해 있다. 그리고 1992년 UN 환경개발회의에서 채택된 기후변화협약에 따라 온실가스 배출규제는 더욱 강화될 것으로 예상되며 최근 교토의정서를 통해 제기된 탄소방출량에 대한 국제적인 규제 움직임 및 화석연료 사용으로 인한 생태계 파괴, 이상 기후 등의 심각성을 감안할 때 화석연료의 지구에너지로서의 한계를 감지할 수 있다.

세계적으로 수많은 원자력발전소가 건설·운영·해

체되면서 그간 원자력산업계는 나름대로 많은 기술과 경험을 축적하였다. 운전경험상 30년 이상 원자력발전소가 운영되었으며, 약 40,000원자로·년(Reactor·year) 정도의 원전 운영경험을 갖게 되면서 일반 국민들이 막연한 불안감을 갖고 있는 원자력발전소가 그렇게 위험한 설비가 아님을 차츰 인식하게 되었다.

그러나 1979년 미국 TMI와 1986년 소련 Chernobyl 원전사고는 원자력산업에 대한 일대 위기를 몰고 왔다. 특히 TMI 사고에 따라 미국 원자력규제위원회(USNRC)는 TMI 사고 후속조치로 안전성을 보장하는 차원에서 운전중이거나 건설중인 원전에 대해 사고를 완화하는 각종 설비를 추가로 설치할 것(Backfitting)을 요구하였다. 이에 따라 기존 원자력발전소의 안전성은 일부 보완되었지만, 원전설비의 최적화를 설비 설치 초기단계에서부터 고려하지 않은 탓에 궁극적으로 원전의 경제성이 떨어지게 되었다. 특히 TMI와 Chernobyl 원전 사고에 따라 지금까지 원전설계시 고려하지 않았던 중대사고에 대한 관심이 높아지게 되었으며 원전설계에 이를 고려할 필요성이 요구되었다.

지금까지 수많은 원전이 설계되었으나 주로 원자로 제작자(Vendor)나 플랜트 종합설계자(Architectural Engineer) 위주의 설계로 일관되어 왔다. 이에 따라 설비의 최적화가 이루어지지 못했으며 운전 편의성 및 보수성이 매우 부족했다. 이는 발전소 설계자와 운전을 담당하는 운전자 (Utility 즉 발전소 Owner)가 서로 달랐기 때문으로, 이로 인하여 운전 및 보수 경험이 설계 단계에서부터 체계적으로 반영되지 못했기 때문이다. 이러한 배경 및 필요성에 따라 운전편의성 및 보수성이 체계적으로 반영되고 인간공학 측면이 고려된 첨단 차세대원전 설계개발을 국가 과학기술선진화 과제의 일환으로 전력사업자인 한전이 주도하여 추진하게 되었다.

2. 세계 각국의 신형원전 개발동향

세계 각국에서 개발중인 신형원전은 지난 30년 이상의 운전경험에서 알 수 있듯이 신뢰성이 입증된 경수로가 주류를 이루고 있다. 경수로형 원자력발전소란 물을 이용하여 핵분열에 의해 핵연료에서 나오는 열에너지를 전기로 변환하는 원자력발전소로서, 원자로에서 직접 증기를 생산하는 비등경수로와 증기발생기를 거쳐 증기를 생산하는 가압 경수로가 있다. 특히 가압경수로는 우리 나라는 물론 세계 원전의 주류를 이루고 있다.

경수로형에 대한 연구의 주류는 크게 개량형 원자로와 피동형 원자로로 대별된다. 개량형 경수로(Evolutionary Reactor Type)는 기존 원전을 개량하여 안전여유도를 증가시키고 첨단 계측제어 설비를 활용하여 자동화 범위를 확대함으로써 안전성 및 신뢰성을 향상시키는 노형이다. 이에 반하여 피동형경수로(Passive Reactor Type)는 원전의 안전성 확보에 물리적인 자연현상을 이용하는 피동안전개념을 도입하여 안전성 및 신뢰성을 향상시키는 노형이다. 예를 들면 원자로에 이상사태가 발생하여 비상냉각수를 주입할 필요가 있을 때 기존 원자로에서는 펌프를 이용하여 냉각

수를 공급하게 되어 있으며 펌프를 운전하기 위한 동력이 필요하나, 피동형원자로는 냉각수 주입이 필요할 때 원자로 상부에 설치된 탱크에서 항상 중력에 의해 자동 주입되도록 설계함으로써 별도의 동력원 없이 물리적인 자연현상으로 안전성을 확보하도록 하는 설계개념이다. 따라서 설비가 단순해진다. 이들 개량형과 피동형은 기술개발 특성상 각기 장단점을 가지고 있다. 개량형 경수로는 그 동안 사용경험이 많기 때문에 기술개발이 비교적 용이하며, 피동형경수로는 개념적으로 우수한 장점이 있으나 현재 기술개발 실적이 많지 않아 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

이러한 경수로형 차세대원전의 개발을 위하여 유럽은 최근 프랑스, 독일 등을 중심으로 유럽의 안전규제 제도와 산업환경에 적합한 차세대원전을 개발중이며 일본 또한 웨스팅하우스 등 미국 원자로 제작자와 기술제휴로 차세대원전을 개발하고 있다. 원자력발전의 종주국인 미국의 경우 2000년대 전력수요 충족 및 환경보전을 위하여 원자력의 역할이 새삼 강조되는 가운데 미국 전력연구소(EPRI)가 중심이 되어 차세대원자로가 갖추어야 할 기본요건을 설정하였고, 기본요건에 따라 컴버스천 엔지니어링사(ABB-CE)가 시스템 80+(System 80+)를, 웨스팅하우스(Westinghouse)사가 AP-600이라는 차세대원자로를 개발하여 미 원자력 안전규제위원회의 설계인증을 받은 상태이거나 또는 설계인증 획득을 추진하고 있다. 이들 System 80+와 AP-600은 각각 중대사고 및 TMI 요건 등이 반영된 개량형 차세대원전과 피동형 차세대원전의 선두주자로 현재 안전성 확인에 필요한 기본설계가 완료된 상태이다. 특히 ABB-CE사의 System 80+는 새로운 인허가 절차인 10 CFR 52 One-step Licensing(원전 건설단계와 운영단계로 나누어 두 번 인허가를 받도록 하는 대신에 설계단계에서 설계인증을 해주는 제도) 절차에 따라 설계인증(Design Certification)을 '97년 7월에 획득한 바 있다. 표 1은 지금 개발중에 있는 세계

의 차세대원자로 현황을 보여주고 있다.

〈표 1〉 세계의 차세대원자로 개발현황

국 가	Vendor	차세대원전	원자로형	용 량
미 국	ABB-CE	Sys. 80+	PWR	1,350MW
	W	AP-600	"	600MW
	GE	ABWR SBWR	BWR "	1,350MW 600MW
일 본	미쓰비시	APWR	PWR	1,300MW
	도시바	ABWR	BWR	1,300MW
프랑스 및 독일	NPI	EPR	PWR	1,500MW

3. 차세대 원전의 주요 설계특징

1987년 영광 3, 4호기를 시작으로 설계기술을 도입한 후 복제설계기술 및 부분적인 설계개선능력만을 보유하고 있던 우리는 선진 외국에서 개발중인 신형로와 경쟁 가능한 수준의 기술성 확보, 근본적인 안전성 확보, 방사선방출 최소화 및 경제성 있는 원전설계를 목표로 차세대원전 설계개발을 추진하고 있으며 그 설계 특징은 다음과 같다.

가. 첨단 주 제어실 설계

기존 원자력발전소의 주 제어실은 수천 개의 지시계, 경보기, 조작 스위치 등으로 가득 메워져 있어 발전소 과도상태시 운전원이 처리해야 하는 정보가 너무 많고 정보의 중요도를 인지할 수 없었으나 차세대원전의 주 제어실은 소형 Workstation으로 필요한 모든 정보 및 제어를 할 수 있도록 하였으며 여러 개의 독립된 Workstation을 사용하여 한 개가 고장이라 해도 운전에는 영향이 없도록 하였다. 또한 대형정보 표시판을 설치하여 발전소 전체를 한눈에 보고 발전소 상황을 인식할 수 있도록 하였으며, 발전소 필수기능 및 안전계통의 상황 파악에 필요한 정보를 제공하고 모든

Workstation 고장시에도 발전소 안전기능은 계속 유지될 수 있도록 하였다. 또한 이 대형정보표시판은 운전교대시나 현장운전원이 주 제어실 운전원을 지원할 때 신속히 발전소 상황을 파악할 수 있도록 해준다. 다수의 데이터를 종합하여 표시하는 신호검증 및 보상처리기능을 통해 운전원이 처리해야 하는 정보의 양을 경감시키도록 하였으며 컴퓨터 그래픽을 사용하여 운전원이 필요한 정보에 효과적으로 접근하여 쉽게 처리할 수 있도록 하였다. 또한 과도상황시 정보홍수 상태가 되는 것을 방지하기 위하여 불필요한 경보 억제 및 중요도에 따라 경보를 우선 순위로 처리할 수 있도록 하였다.

나. 중대사고 대비설계

미국의 TMI 및 구소련의 체르노빌 원전사고 이후 중대사고에 대한 관심이 높아지면서 차세대원전에 중대사고에 대비한 설비를 반영하게 되었다. 초기 원자력발전소 설계 당시에는 핵연료가 녹는 사고가 없을 것으로 예측하였으나 미국의 TMI 원전에서 핵연료가 용융하는 사고가 발생했다. 이 사고로 원자로에서 핵연료가 용융되더라도 큰 사고로 이어지지 않는다는 것을 입증할 수는 있었지만 핵연료가 용융하는 중대사고에 관심을 가지게 되는 계기가 되었다. 원자로에서 핵연료가 용융하면 핵연료피복재의 산화반응으로 수소가 발생하게 되고 용융물이 원자로용기 하부로 모이게 되어 원자로용기를 손상시킬 수가 있는데 차세대원전에서는 이런 중대사고시의 문제점을 해결하기 위하여 격납용기내의 수소를 피동적으로 재결합시킬 수 있는 기구(PAR, Passive Auto Catalytic Recombiner)를 설치하여 발생된 수소를 효과적으로 제거할 수 있도록 하였으며, 노심이 녹았을 경우 노심용융물을 원자로 용기내에 가두어두고 냉각할 수 있도록 원자로 용기 외벽을 침수시켜 냉각하는 설계개념을 도입하였다. 아울러 원자로용

기가 파손되더라도 노심용융물이 격납용기를 손상시키지 않도록 원자로 공동 Cavity를 설치하여 노심용융물의 비산을 최소화하고 용융물을 수용할 수 있도록 하는 등 중대사고에 대처할 수 있도록 설계하였다.

다. 발전소 건물 및 기기 배치의 최적화

발전소 건물 및 기기 배치설계는 발전소의 안전성은 물론 이용률 향상을 위한 운전성, 보수성 및 접근성, 경제성 등과 밀접한 관련이 있을 뿐만 아니라 운전 및 보수요원의 방사선 피폭저감 등 발전소 전반에 걸쳐 그 미치는 영향이 지대하다고 할 수 있다. 차세대원전의 계통구성 및 설비형식은 울진 3, 4호기 등 국내원전과 System 80+ 및 EPRI-URD 설계개념을 참조하고 국내 건설 및 운전경험을 반영하여 최적의 기기 및 건물배치가 되도록 하였다. 참고로 차세대원전의 성능목표는 표 2와 같다.

〈표 2〉 차세대원전의 설계 성능목표

항 목	성능 목표
〈경제성 및 성능관련〉 • 경제성 • 설비용량 • 설계수명 • 건설공기 • 가동률 • 불시정지 • 부하추종운전능력 • 핵연료 교체주기 • 계측제어방식 • 작업자피폭선량	- 타 기저부하 전원대비 20% 우위 - 140만kW급 - 60년 - 48개월 - 90% - 연간 0.8건 미만 - 일일부하추종능력보유 - 18개월 - 디지털방식 - 연간 100 man-rem
〈안전성관련〉 • 노심 손상 빈도 • 격납건물 손상 빈도 • 설계기준 • 내진 설계 • 핵비등 여유도 • 운전원 조치 여유 • 전원상실시 대처 여유 • 비상노심냉각방식 • SG 세관분쇄 여유도	- 10만년에 1회 미만 (저출력시, 외부사건 포함) - 100만년에 1회 미만 (DBA + 중대사고) - 0.3g - 10% 이상 - 30분 - 8시간 - 4 Trains 직접주입 - 10% 유도(Inconel 690)

* DBA : Design Base Accident

4. 설계개발 일정

가. 단계별 개발 일정

이러한 설계목표를 달성하기 위한 차세대원자로 기술 개발은 10여년에 걸쳐 3단계로 나누어 진행되며 단계별 기간 및 주요 설계개발업무는 표 3과 같다.

〈표 3〉 단계별 기간 및 주요 추진업무

단 계	기 간	주요 추진업무
1단계	'92.12~'94.12	-개발노형 확정 -설비용량 등 42개 기본요건 개발 확정 -차세대원전의 계통구성 개념 확정
2단계	'95.01~'99.02	-기본설계 개발 -표준안전성 분석보고서 작성 및 NSSS 주요 기기 Spec. 작성 -계통설명서 작성 -주요 기기에 대한 설계규격 (Design Spec) 작성 -설계인증에 필요한 안전해석
3단계	'99.03~2001.12	-표준설계인가 획득 -장기소요기술 개발 -경제성 제고를 위한 설계최적화

* NSSS : Nuclear Steam Supply System

나. 지금까지 개발현황

1992년 차세대원자로 기술개발계획이 확정되어 사업이 착수된 이후 설계개발 1단계에서는 해외에서 연구 개발중인 신형원전의 설계동향을 파악하고 설계특성 분석 및 우수 설계인자를 도출하였으며 특히, 해외에서 개발중에 있는 개량형 원전(Evolutionary Reactor Type)과 피동형원전(Passive Reactor Type)을 비교 검토하여(표 4 참조) 국내 차세대원전의 노형을 개량형 원전으로 결정하였다.

개량형 원전으로 결정후 해외 신형원전(System 80+, N4, APWR 및 EPR 등)에 대해 그 설계 추진 동향 및 주요 설계특성 검토를 바탕으로 각 노형의 안전성, 기술성(인허가성), 건설성 및 경제성에 대한 비

〈표 4〉 노형비교 결과 장단점

분 야	피 동 형	개 랑 형
기 술 성	-용량격상의 한계 •국내여건에 불합리 -기술의 불확실성으로 인한 기술개발의 위험성 내재	-입증된 기술 -많은 연구개발이 되어 있음
경 제 성	-불리	-유리
운전/건설경험	-운전/건설경험이 세계적 으로 전무	-운전/건설경험이 충분 히 축적됨
기 타	-축적된 국내기술의 활용저 하 우려 -기술개발국의 기술협력 기 피 등	

교평가를 수행하여 최적의 노형을 선정하였고 해외 신형원전과의 차별성을 확보하고 실질적인 한국형 고유모델이 될 수 있도록 한국형 표준원전(KSNP)을 모체로 하고 국내 원전경험 및 해외 신형원전의 특성을 적절히 반영하여 차세대원전의 계통구성개념을 확정하였다. 이를 요약하면 표 5와 같다.

1단계에서 확정된 노형 및 계통구성개념에 따라 2단계에서는 상세설계를 위한 설계지침인 계통별 성능요건, 계통구성원칙 등 사업자 설계요건(KURD)을 개발하였다. 또한 1단계에서 확정된 기본설계요건에 부합하

도록 발전소 배치도 작성, 원자로 초기노심설계, 원자로계통 설계, 플랜트 종합설계, 주기기 제작성 검토 등 기본설계개발을 완료하였으며 기본설계에 따른 표준안전성분석보고서(SSAR)를 작성하고 원전 안전성검토기관인 한국원자력안전기술원에서 기본설계에 대한 설계안전성 검토를 의뢰하였다.

차세대원전 설계개발과 병행하여 모든 발전소 설계정보를 Data Base화하여 체계적으로 관리하고, 3-D CAD를 이용하여 설계 편의성 등을 향상시킴과 동시에 향후 발전소 운영은 물론 폐로시까지의 정보를 종합할 수 있는 정보관리체계를 개발하여 운영하고 있으며 향후 건설 및 운영시 정보를 효과적으로 유지 관리할 수 있게 되었다. 2단계 연구개발결과를 요약하면 다음 표 6과 같다.

5. 향후 계획 및 전망

지구온난화와 산성비, 오존층 파괴 등 환경오염에 대해 국제적으로 관심이 높아지면서, 전세계 전력량의 17%를 담당하고 있는 원자력발전은 산성비나 지구 온

〈표 5〉 차세대원전의 계통구성 개념

주요항목	세 부 내 용
핵연료/노심	-고연소도 핵연료 사용가능(교체주기 18개월 이상 가능한 수준) -UO ₂ 핵연료 사용/미래의 여건에 대비 Pu Burner 기능 보유
원자로계통	-NI는 국내 원전기술을 근간으로 개발(격납건물/기기구조물 배치 등) -Passive Design Feature 연구결과를 반영
터빈발전기계통	-울진 3, 4호기의 TI를 근간으로 설계개선 및 해외신기술 적용 -T/G Envelop를 개발하여 TI 설계
MMIS	-High Technology 적용 • Compact Workstation/Multi Loop Controller 등 -한국적 인간공학 요소 반영
발전소 건물 및 기기 배치(GA)	-Power Block은 격납건물, 보조건물, 터빈건물, 출입통제 건물로 구성 • 보조건물은 기존 원전의 1, 2차 보조건물, 비상디젤발전기 건물, 핵연료 건물의 기능 수행 -방사성 폐기물 처리건물은 2호기 공용설비로 설계 -각 건물별 운전층의 일치(선행호기 개선 요구사항) -모든 지반특성(Rock and Soil)을 포괄토록 설계

* NI : Nuclear Island, TI : Turbine Island, MMIS : Man Machine Interface System.

난화와 같은 지구환경에 부정적 영향을 미치지 않는 현실적인 최선의 청정 에너지원으로 새롭게 인식되고 있

다. 그러나 원전에 대한 국민의 불안은 아직 상존하고 있으므로 에너지 경쟁력이 곧 국가 경쟁력인 지금은 우리

의 국제경쟁력 기반조성을 위해서도 확고한 안전성을 바탕으로 한 저렴하고 깨끗한 에너지 공급이 절실히 요구되고 있는 시대라 할 수 있다. 우리는 이런 시대적 요구에 따라 원전기술 선진화를 이룩하여 확고한 안전성을 바탕으로 원전에 대한 국민적 신뢰기반을 조성하고 대내외적으로 경쟁력을 갖춘 차세대원전 개발을 추진해 오고 있다.

2단계에서 기본설계개발이 완료된 차세대원전은 3단계에서 표준설계인가 획득, 경제성 제고를 위한 설계최적화 및 첨단 주 제어실 설계 등의 분야에 중점적으로 집중될 것이며 3단계가 종료되는 2001년말 원전기술 선진국과 경쟁이 가능한 안전성, 경제성 및 운전편이성이 획기적으로 개선된 우리 고유의 첨단 차세대원전 이미지로 국민 앞에 다가설 것이다. 2010년에 예정되어 있는 차세대원전 1호기 준공후 우리 나라는 원전기술에 대해 세계 선두주자와 어깨를 나란히 할 것으로 예상되며 원자력 산업이 수출주도 사업으로 육성 가능한 수준에 도달할 것으로 여겨진다. 1호기가 준공된 2010년 이후 차세대원전은 국민의 신뢰와 경제성을 바탕으로 우리 나라를 대표하는 1400MWe급 원전으로서 자리를 굳히게 될 것으로 예상되며 원전기술 선진국으로서의 한국의 이미지를 세계에 심어주게 될 것이다. ■

〈표 6〉 2단계 설계개발 성과

주요 성과	세 부 내 용
사업자 설계요건 (KURD)개발	-계통별 성능요건 -계통구성 원칙 등 상세한 설계지침
표준 안전성분석보고서 (SSAR) 작성	-안전해석
기본설계 개발	-초기 노심설계 개발 -원자로계통 설계 개발 •NSSS P&ID(Pipe and Instrument Drawing) 발행 •각 계통설명서 발행 •주기기 설계사양서(Design Specification) 작성 •계통 안전 해석 -플랜트 종합 설계 •발전소 배치도(General Arrangement : GA) 작성 •2차계통 계통설명서 •P&ID 발행 •구조해석 및 내진해석 -기기제작성 검토 •NSSS 주기기, 원자로 내부구조물 제작성 검토 •터빈 발전기계통 설계 관련 연계자료 생산 •1차계통 주요기기 설계도면 발행 •증기발생기 성능분석보고서 및 기기 설계도면 발행 •원자로 내부기기 설계도면 발행 등 -인간-기계 연계계통(MMI) 주 제어실 설계 •주제어실 개념 설계 완료 •인간 공학적 운전원 직무분석 •시뮬레이터와 연계한 동적 모형(Dynamic Mock-up) 개발 •Man-Machine Interface 개념의 최첨단 주제어실에 대한 개념설계 •주제어실 동적 모형을 개발하여 설계개념 검증 -핵심기술 개발 •차세대원전 부하추종 운전 Logic 개발 •안전주입탱크내 유량조절장치(Fluidic Device) 실험 요건 결정 •압력방출밸브(POSRV) 예비 해석 •중대사고, 인간공학 독립검토, DVI(Direct Vessel Inj.) 해석 •IRWST Sparger, 제어봉구동장치(CEDM) 등 연구
안전규제 기술개발 및 인허가 제도개선	-국내 안전규제 체계 정립 -안전규제 요건개발 -KNGR 설계안전성 검토
차세대원자로 종합분석	-제3차 종합분석 평가 수행 •안전성, 가동성, 경제성, 건설성 및 방사선 방호성 등 5개 분야 -제2차 평가결과 설계 Feedback 및 반영
정보관리체계 개발	-설계정보관리 프로그램 개발 및 운영 •문서관리시스템 개발 및 운영 •설계 데이터베이스 연계(설계 DB와 DMS간 Interface 개발) 개발 -설계 데이터베이스(EDB) 개발 •NSSS 분야 EDB 확대 개발 •장기간 데이터 건전성 유지방안 연구('98. 9~'99. 2) -원자력기술정보센터(NIC) 운영 •기술자료 입수 및 전산가공 (CE 자료 2,300여건 전산화 완료) •보유자료는 사내 인트라넷을 통한 정보제공 •Network 및 H/W, S/W 운영 (한전-한기간 전용선 구축 운영중)