

우리나라 原子力發電所

向後設計要件의 전망

The Review of Design Requirement
for the Korea Nuclear Power Plants

韓國電力技術(株) 社長

辛 基 祚

1. 머리말

에너지 부존자원이 절대적으로 부족한 우리나라는 국내 최초의 원전인 고리 1호기를 도입한 이래 현재 9기의 원전을 운전 또는 건설 중에 있으며, 현재 신규로 영광 3, 4호기의 설계를 시작하는 등 준 국산 에너지인 원자력의 중요성이 점점 높아가고 있다.

그러나, 국내외적으로 볼 때 근래의 TMI 사고와 유류값 인하 등으로 인하여 지금까지 지속적인 발전을 거듭해 오던 원자력 산업은 그 안전성과 경제성에 의문이 제기되면서 위축을 보이고 있다.

이러한 상황 변화에 따라 세계의 원전 선진국들은 기존의 경수로보다 안전하고 경제적이며, 건설기간 등이 단축된 새로운 개량 경수로의 개발에 많은 노력을 기울이고 있다.

이러한 세계 각국의 원전 산업에 대한 기술개발 동향과 국내에서의 원전산업의 중요성을 고려할 때, 향후 건설될 원전은 보다 안전하고 경

제적이어야 할 필요성이 있다.

따라서, 본 고에서는 해외 원전 선진국에서 추진중인 원전 기술개발 현황을 살펴보고, 현재 설계중인 영광 3, 4호기의 설계 내용을 조사한 후, 향후 국내에 건설될 원전의 설계 방향을 살펴보기로 한다.

2. 해외의 원전 기술개발 현황

세계적으로 볼 때 최근 전력 수요의 둔화, 건설비의 증가, 건설공기의 장기화 및 반핵운동의 확산 등에 따른 국민의 원전에 대한 신뢰성저하로 인하여 원전의 건설이 상당히 지연되고 있으며, 활발히 추진되지 못하고 있는 실정이다.

따라서, 원전 산업을 주도하고 있는 나라들은 기존의 원전 기술을 바탕으로 차세대에 사용하기 위한 보다 안전하고 경제적인 원전의 설계에 주력하고 있다.

개량경수로의 개발을 활발히 추진하고 있는 국가는 미국, 프랑스 및 일본 등으로서, 이들 국

가의 기술개발 현황을 살펴보면 다음과 같다.

가. 미 국

미국은 에너지성(DOE)과 전력연구소(EPR I)의 주관하에 원전의 경쟁력을 확보하고 차세대 원전의 바람직한 특성을 고려한 개량경수로(ALWR) 개발사업을 수행중이다.

ALWR 사업은 가압경수로(PWR)와 비등 경수로(BWR)형을 대상으로 대형 원전(900MWe 급 이상)의 개량과 새로운 수동적 안전개념의 소형 원전(600MWe급)의 설계를 적극적으로 추진하고 있다. 국내 원전이 가압경수로형 1,000MWe급을 기본으로 하고 있으므로 대형 가압경수로형에 국한하여 언급하면 다음과 같다.

(1) 안전성

백만년에 한번 이상 발생 가능성이 있는 중대 사고(Severe Accident) 발생시 1/2 마일내에 거주하는 종사자의 전신 피폭량은 25 rem 이하가 되도록 하며, 노심손상 빈도는 10^{-5} /년, 노심용융 빈도는 10^{-4} /년 이하가 되도록 하고 있다.

사소한 사전(Small LOCA등)이 중대사고로 확대되지 않도록 설계하며, 비상노심냉각계통 및 격납용기는 모든 설계기준 사고를 수용하도록 하고, 안전계통의 작동을 유발시키는 상황을 최소화하도록 설계한다.

(2) 가동률

전력생산 계통은 최대한 단순화 시키고, 펌프 밀봉, 주증기 격리밸브 등 보수 빈도가 높은 부품에 대해서는 발전소 배치 및 설계시 우선적으로 고려한다.

핵연료 교체 주기는 2년으로 하고, 핵연료 교체 기간은 18일로 하며, 강제정지 가능성을 연간 1회 이하로 최소화시켜 연평균 87%의 가동률(Avability Factor)을 목표로 한다.

(3) 건설공기

설계, 건설, 시험, 전력회사 승인 등을 총 망

라한 종합적인 계획을 수립하고, 사전 설계율의 향상(90%), 설계 단순화 및 모듈화 공법의 채택, 건설상의 특별한 문제점의 제거, 건설작업에 적당한 공간과 배치를 함으로써 건설공기는 콘크리트 작업에서부터 초기 운전까지 54개월을 목표로 하고 있다.

(4) 방사선 피폭량

주요 방사선 피폭 요인인 증기발생기 또는 재순환 펌프의 보수 또는 사고 예방을 위한 정기 보수 등의 필요성을 최소화하고, 보수 및 점검시 방사선 피폭을 최소화 하도록 설계하여 종사자 방사선 피폭량을 발전소 수명기간 중 100 man-rem/yr 이하로 유지한다. 부식과 방사성 물질의 누적을 방지하도록 재질을 선정하고, 수 화학 기준을 설정한다.

(5) 운전성 및 보수성

부품 및 장비를 표준화하여 형태와 크기의 차이를 최소화하고 주요부품(증기발생기, 주증기 격리밸브, 원자로 냉각재 펌프 등)의 교체를 고려하여 발전소를 배치하며, 환기 및 조명은 모든 작업조건에 적절하도록 설계한다.

발전소로의 접근을 위한 적절한 시설을 설치하고, 접근성, 기중장치, 중하물 운반장비 및 그 경로, 임시보관 장소 그리고 기타 압축공기, 급수, 전원 등을 적절히 설계한다.

(6) 발전소 수명

수명 제한 요인을 제거하여 발전소의 수명이 60년이 되도록 설계한다. 증기발생기, 재순환 펌프 등은 수명기간동안 가동하도록 하되 교체 및 보수가 가능하도록 설계하며, 제촉제어 설비 등은 수명기간중의 교체를 예상하여 설계와 배치를 한다.

(7) 방사성 폐기물

액체 폐기물의 증발처리 대신 탈염기(Demin-

eralizer) 등을 적극 활용하여 방사성 폐기물의 발생량을 호기당 연간 2,500ft³ 이하로 유지한다. 현재의 폐기물 처리설비를 단순화 또는 개선하고, 압축기(Compactor) 및 소각로 등의 최신 감용기술을 채택한다.

나. 프랑스

프랑스는 원자력청(CEA)과 전력회사(EdF) 주관하에 1974년부터 CP1형(900MWe급), CP2형(900MWe급), P4, P'4형(1,300MWe급), N4형(1,500MWe급) 경수로 원전으로 단계적인 개량을 수행하고 있으며, 현재는 자체 기술로서 1990년대에 사용될 N4형 표준 원전을 개발, 건설중에 있다. N4형 원전을 중심으로 언급하면 다음과 같다.

(1) 안전성

인명과 재산에 심각한 영향을 미칠 수 있는 중대사고의 가능성을 배제하기 위한 설계와 건설을 하고 있으며, 중대사고의 발생확률은 호기당 10⁻⁶/년을 넘지 않도록 하고 있다.

허용치 이상으로 방사선을 방출할 사고의 발생확률을 호기당 10⁻⁶/년이 넘지 않도록 설계하고 있다.

확률론적인 검토 결과, 허용할 수 없는 정도의 결과를 초래할 수 있는 사고원인의 발생확률이 호기당 10⁻⁷/년을 초과할 경우는 이를 설계 단계에서부터 고려한다.

(2) 가동률

재질이 허용하는 범위내에서 원전의 안전을 저해시키지 않으면서 발전소의 가동률을 80% 이상으로 유지하도록 한다.

(3) 건설공기

건설공기는 원자로격납건물 천정 크레인의 사용가능 시점으로부터 33개월로 계획하고 있으나, N4형 원전의 첫 호기인 Chooz B1 원전에서는 4개월의 여유를 고려하여 37개월로 계획

하고 있다. 건설비는 기존원전에 비하여 5% 정도 절감한다.

(4) 방사선 피폭량

개인 방사선 피폭량은 현재의 250man-rem/yr에서 150man-rem/yr 정도로 줄인다.

(5) 운전성

30~100%의 출력 범위내에서 계단형 부하중 운전이 가능토록 하며, 제통의 전력수요 부하에 대응할 수 있도록 한다.

핵연료의 평균연소도를 36,000MWD/Ton으로 증대하고, 재장전 주기를 18개월로 연장한다.

(6) 발전소 수명

발전소의 수명은 40년 이상으로 연장시킨다.

다. 일본

일본은 MITI(통상산업성)의 주관하에 1975년부터 1985년까지 경수로 개량표준화 계획을 1, 2, 3차에 걸쳐 추진하였다.

제3차 개량표준화 계획(1981~1985)의 일환으로 개량 가압경수로(APWR)와 개량 비등경수로(ABWR)를 개발하였으나, 여기서는 가압경수로형인 APWR에 대해서만 언급한다.

(1) 안전성

비상노심계통, 격납용기 냉각계통, 보조급수계통 등의 개선으로 안전성을 향상시켜, 기존의 경수로에 비하여 노심손상 빈도를 1/10로 감소하고, 노심용융 빈도는 10⁻⁶/년 이하가 되도록 하였다.

(2) 가동률

장주기 운전과 계획 운전정지기간의 단축을 통하여 85~90% 정도의 가동률을 목표로 하였다. 장주기 운전은 3.2% 핵연료를 사용하여 18개월마다 노심의 1/3씩 교체하는 방안을 검토하였다.

계획 운전정지 기간은 원자로용기 헤드의 단순화, 2차계통 크레인 개선, 분해결합 및 검사장비 개선 등으로 45일 정도로 단축시켰다.

(3) 건설공기

건설공기는 표준 설계도면의 70% 완성시에 건설을 시작하도록 하여 기초 콘크리트 타설로부터 초기운전까지를 50개월로 단축시켰으며, 15% 정도의 투자비 절감을 목표로 하였다.

(4) 방사선 피폭량

방사선피폭 원인조사와 배치설계, 방사선차폐 구조물설계, 원격조정 계통설계, 재질선정, 원자로냉각제 정화능력 및 검사주기 등의 개선을 통해 운전원 피폭량을 50~100man-rem/yr 정도로 감소하도록 하였다.

(5) 운전성

자동주과수 조절과 조속기 자유조절 (Governor Free Control) 방법으로 일일부하추종 운전 (Daily Load Following Operation : 14-1-8-1 시간분포, 100-50-100% 출력운전)이 가능하도록 하였으며, 운전 비용을 10% 정도 절감하도록 하였다.

대형 교체노심의 채택으로 용량 이점 (Scale Merit)을 꾀하고, 발전소 효율을 증가시켰으며, 핵연료 주기비용을 20%정도 감소하도록 하였다.

(6) 방사성 폐기물량

방사성 폐기물 처리제통에 진조기, 소각로, 칼시네이터 (Calcinator), 대형 베일러 (Baler), 고화설비 및 펠렛 설비 등의 도입과 개선을 통하여 방사성 폐기물의 발생량을 호기당 연간100~200 드럼으로 감소하도록 하였다.

(7) 발전소 수명

발전소 수명은 40년을 목표로 하였다.

(8) 부지 이용

1,100MWe 급 발전소와 동일한 부지공간에 1,350MWe급 APWR을 건설하기 위하여 건물과 구조물을 조밀하게 설계하여 부지의 효율적인 이용을 꾀하였다.

3. 영광 3, 4 호기의 설계 내용

영광 3, 4 호기는 최근에 설계중인 관계로 현 국내 원전의 기술수준과 설계 경향을 가장 잘 파악할 수 있다.

영광 3, 4 호기는 1,000MWe급 가압경수로 (PWR)형 발전소로서, 핵증기 공급계통 (NSSS)은 미국 CE사의 System 80 (CESSAR)을 기본으로 하였으며, 터빈 발전기 (T/G) 계통은 미국의 GE사가 공급하도록 되어 있다.

가. 안정성

기존 안전성 평가 (DBA)시 원자로로부터 1/2 마일 이내에 거주하는 종사원의 전신 피폭량은 25rem 이하가 되도록 한다.

안전관련 계통은 2 트레인으로 구성하는 설계개념을 채택하고 있으며, 설계 여유를 5% 이상 고려한다.

핵연료 재장전수 저장탱크 (RWST)는 격납용기 외부에 설치하고 있다.

나. 가동률

발전소 가동률은 핵연료 재장전기간을 포함하여 90% 이상을 목표로 하고 있으며, 이용률 (Capacity Factor)은 70~75%를 목표로 한다. 핵연료 재장전 주기는 12개월을 목표로 하고 있다.

다. 건설공기

건설공기는 기초 콘크리트 타설로부터 상업 운전까지 64개월을 목표로 하고 있다.

라. 방사선 피폭량

종사자 방사선 피폭량은 발전소 수명기간중

약 500man-rem/yr 이하로 유지한다.

다. 운전성 및 보수성

계통의 전력수요 부하에 대응할 수 있도록 계획 부하중 능력(12-3-6-3)을 보유하도록 한다. 증기발생기의 튜브는 부식방지 재료를 채택하고 관막음 여유를 충분히 고려하였으며, 보수 접근성을 개선하였다.

바. 발전소 수명

발전소 수명은 40년이 되도록 설계한다.

사. 방사성 폐기물량

방사성 폐기물 발생량은 호기당 연간 9,300ft³ 정도가 되도록 설계한다.

4. 국내 원전의 설계 방향

원전 선진국들은 자국의 환경에 알맞는 차세대 원전을 의욕적으로 개발하고 있으며, 우리나라의 경우도 현재 영광 3, 4호기의 설계와 차세대 원전 건설을 위한 표준 원전의 설계사업을 추진중에 있다.

미국, 프랑스, 일본의 기술개발 내용과 영광 3, 4호기 설계내용을 고려해 볼 때 향후 개선된 설계개념을 고려하여 앞으로 건설할 국내 원전의 경우 그 설계 방향을 안전성, 경제성, 인허가, 기술자립, 입증신기술 적용 측면에서 살펴보면 다음과 같다.

가. 안전성 측면

국내의 과밀한 인구밀도, Public Acceptance 문제, 지방자치제 등을 고려할 때 보다 엄밀한 안정성이 요구될 것이며, 전력회사 입장에서는 운전성 향상과 더불어 투자보호에 대한 관심이 고조될 것으로 판단되므로 향후 원전의 안전성 기술수준은 다음 사항들을 반영해야 할 것이다.

즉, 기존의 안전성 평가(DBA)는 현재의 안

전성 분석보고서(SAR) 15장에서 요구하는 조건(결정론적 방법)과 큰 차이가 없으므로 기존의 방법을 유지하도록 한다.

중대사고 분석은 미국 NRC가 규제 목표치를 설정하여 인허가로 요구할 전망이므로 이를 고려하도록 한다.

한편, 투자보호 측면에서 현 기존 국내 원전보다는 개선되어야 하나 개선정도는 안전성 평가에 관한 국내기술의 수행능력을 감안하여 제시, 사고 또는 과도현상에 대비한 운전성 확보(운전원 대처시간 확보, 운전여유도, 단순화 개념 등)가 강조되어야 할 것이다.

나. 경제성 측면

향후 국내 원전의 경우 시공기술은 자립되어 있다고 하더라도 모듈화 공법 등의 경험부족으로 인해 미국 ALWR 목표인 54개월 보다는 건설공기가 더 길어질 것으로 판단된다.

또한, 가동률은 기존 국내 원전보다는 높일 수 있으나, 기술적으로 계통설계, 기자재 신뢰도, 수명연장기술 등이 취약하여 미국 ALWR의 목표 달성에는 다소 미흡할 것이다.

지지구조물 단순화, 여유공간 확보 등으로 영광 3, 4호기에 비해 운전 보수성의 개선이 가능하나, 설계단순화, 원단보수장비, 운전관련 Soft Ware 등에서는 미국 ALWR 수준을 달성하기 어려울 것이다. 미국 ALWR과 같은 60년 수명연장은 특수소재사용, 관련기술의 추가개발이 필요하여 기술적으로 어려울 것이므로, 설계시 주요기기(증기발생기 등)의 교체방안을 설계에 반영하여야 할 것이다.

다. 인허가 측면

원전의 원활한 건설을 위하여는 국내 인허가 기준 및 정책의 안정이 필요하나, 아직까지 불확실한 면이 많으므로 인허가 요건의 변동에 대처할 수 있는 설계가 필요하다.

미국 ALWR에서는 설계시 중요 인허가 및 기

술적 쟁점사항을 도출하여 다각적인 해결방안을 모색한 후 규제당국인 NRC의 검토를 받도록 하고 있으며, 기존 인허가 요건외에 미해결 안전성 문제 (USI), 중대사고 가능성 등을 설계에 반영하여 인허가상의 불확실성을 사전에 제거하려고 한다. 따라서, 원전의 설계방식은 인허가상의 불확실성을 고려하여 모든 인허가 요건 및 기술적인 해결에 따라 규제요건에 반영될 소지가 많은 USI 항목과 중대사고 대비책을 설계에 반영하여야 한다.

그러나 이러한 인허가 쟁점사항은 이미 영광 3, 4호기와 미국 ALWR 설계에 어느 정도 반영되고 있으므로 이의 설계개념과 방향을 따르는 것이 인허가상의 불확실성을 최소화할 수 있을 것이다.

라. 기술자립 측면

해외 개량경수로 기술내용을 보면 기존원전보다는 안전성, 신뢰성 및 경제성 측면에서 월등한 차세대 원전을 개발하고자 하는 목적이 있기 때문에 안전제통 및 노심설계변경, 개량제어 기술 활용, 로봇 기술활용, 신소재 채택 등의 기술진보가 필요하다.

따라서 원전의 설계방향은 해외개발현황 및 운전시점을 고려하여 가능한 한 많은 입증된 신기술과 설계개념을 수용하되, 극히 혁신적인 기술의 적용은 피하고 이미 해외에서 검토가 완료되었거나 입증된 신기술만을 선별하여 채택하도록 한다. 그러나, 기술자립에 장기간의 시일이 소요되는 핵심기술 및 신기술 분야는 외국 자문을 통하여 업무를 수행하여야 할 것이다.

마. 입증 신기술 적용 측면

원전기술의 복잡성을 고려할 때 기술 종류에 따라 입증된 신기술의 적용 정도가 달라져야 할 것이다.

재질은 타산업에 활용되어 그 품질이 인정된 재질을 사용하되, 핵등급(Nuclear Grade)은

현재까지의 경험을 토대로 기존의 해석방법으로 입증이 가능하면 사용토록 한다.

유체계통 기기는 기술변화가 심하지 않으므로 원전에 적용된 경험이 있는 기기를 사용하며, 2차측 기자재는 화력 등에 사용된 경험이 있는 기기를 사용하여도 될 것이다.

계측제어 분야는 현재 기술개발이 가장 빠른 편이며, 적용시 원전에 이득이 많으므로 타산업 분야에 적용되어 품질을 인정받은 기술을 채택하되 국내여건(운전원 선호도, 기술능력)을 고려하여 그 범위를 정하도록 한다.

따라서 향후 원전의 건설시 계통구성 및 설계개념이 변경되는 새로운 설계개념의 도입여부를 결정할 때에는 객관적으로 완전히 입증된 기술(NRC 검토 등)을 대상으로 하되, 국내기술 능력과 전력회사 선호도 등을 감안하여 분야별 도입 여부를 신중히 선택하여야 할 것이다.

5. 맺음말

원전의 기술이 꾸준히 향상되는 가운데 발생한 TMI 사고는 원전산업의 침체를 가져온 왔지만, 새로운 시각으로 원전의 안전성을 분석할 수 있는 계기가 되었으며 그 결과, 안전성 및 신뢰성 분야 등에 많은 기술향상이 이루어졌다.

현재 세계각국은 원전이 앞으로의 에너지원으로서 불가피하다는 인식하에 이 침체 기간동안 그간의 운전경험을 분석하고 새로운 해결책을 제시함으로써 보다 안전하고 경제적인 원전을 개발하기 위해 많은 자금을 투자하여 개량경수로 개발에 박차를 가하고 있는 실정이다.

현재 설계중인 영광 3, 4호기의 기술수준은 개량경수로 개발 직전의 기술수준이라고 판단할 수 있으므로, 향후 국내 원전건설시는 앞서 제 안한 바와 같이 미국, 프랑스, 일본 등에서 수행중인 개량경수로 기술을 적절하게 반영하여 보다 향상된 원전 건설이 되도록 하여야 할 것이다.