



# 원자력발전소의 안전개념 및 원칙

장 순 흥

(한국과학기술원 원자력공학과 교수)

## 1. 머 리 말

원자력에 대한 다양한 주제들, 특히 오늘 논의하고자 하는 원자력발전소의 안전성 문제를 다루려면 우선 원자력에 대한 바른 이해가 뒤따라야 한다. 왜냐하면 소위 제3의 불이라고 일컬어지는 원자력에 대해 정확히 이해하는 것이 왜 수많은 공학설비 중에서 원자력발전소를 포함하는 원자력 시설의 안전만이 그토록 문제가 되는가를 설명해 주는 열쇠가 되기 때문이다.

우리가 원자력을 이용한다는 것은 핵반응에 의해 생성되는 에너지, 반응 후 생성되는 또 다른 물질(방사성 물질), 반응 중 또는 반응 후에 발생하는 방사선을 모두 이용하는 것을 의미한다. 이 세 가지 -에너지, 방사성 물질, 방사선-은 인류가 사용하고 있는 거의 모든 기기들이 그렇듯이 경우에 따라서 인간에게 유익할 수도 있고 해가 될 수도 있다. 원자력이 생산하는 에너지는 현재 전세계 전력 사용량의 17% 정도를 공급하고 있으며, 국내로 들어오면 40%를 넘어선다. 방사성 물질이나 방사선은 의학, 농학, 공학의 여러 분야에서 인류의 보다 향상된 문명을 위하여 알게 모르게 광범위하게 사용되고 있다. 반면에 지금은 그 위험이 다소 줄어들었다 하더라도 핵폭탄은 인류문명을 파괴시킬 수 있는 유력한 가능성 가운데 하나로 인식되고 있으며, 다량의 방사선 피폭이 인간에게 미치는 영향은 거의 치명적이다.

인간에게 주어진 대부분의 문명의 기기중 유익과 해악, 둘 중에 하나만 가지고 있는 것은 거의 없다고 보는 것이 옳다. 문제는 그것이 어느 쪽에 가까운가 하는 기술적, 사회적 판단이며, 원자력을 반대하는 사람들과 찬성하는 사람들의 견해 차이는 바로 이러한 판단의 차이에서 기인한다고도 볼 수 있다. 원자력이 세상에 모습을 드러낸 초기에는 인류의 문명을 파괴하기 위한 무기의 모습이였다. 그러나 그 후 원자력이 가지고 있는 위험요인을 줄이기 위한 노력은 끊이지 않고 계속되어 왔으며, 앞으로도 계속될 것이다. 원자력이 가지고 있는 위험을 줄이기 위한 끊이지 않는 노

력, 그것이 원자력 안전의 시작인 것이다.

## 2. 원자력 안전의 개념과 특성

앞에서 언급한 대로 원자력의 세 가지 본질은 에너지, 방사성 물질, 그리고 방사선이다. 원자력발전은 화력발전과 같이 대량의 폐기물을 방출하지도 않고, 온실효과나 산성비와 같은 대기오염도 일으키지 않는 장점을 가지고 있다. 반면, 다른 발전원과는 달리 생성되는 에너지나 방사성 물질, 그리고 방출되는 방사선을 아직은 인간의 의지대로 완벽하게 제어할 수 없다. 화력발전의 경우에는 비상시 연료공급을 차단하면 에너지 생산원이 소멸되지만, 원자력발전은 핵반응을 중지시켜도 방사성 물질의 붕괴에 의한 에너지가 장시간 방출된다. 또한 원자로 내의 핵분열 반응에서 생성되는 방사성 물질인 핵분열생성물은 원치 않는 부산물이긴 하나 물리적인 고유한 성질로서 제어할 방법이 없으며, 방사성 물질이나 방사선을 사용하는 영역에서도 방출되는 방사선을 사용할 뿐 그것을 조절할 능력은 없다. 따라서 원자력 안전의 거의 모든 관심은 반응정지 후에도 생성되는 열 에너지를 냉각하는 것과 이로 인해 원자로가 파손되었을 경우 방사선 또는 방사성 물질이 환경으로 누출되는 것을 억제하는데 모아지고 있다.

거의 모든 공학적 시설이 위험을 내포하고 있고, 객관적인 위험도 분석의 결과도 원자력 시설에 의한 위험보다는 다른 공학시설, 예를 들면 원자력발전소와 같이 전기를 생산하는 여타 전기생산 설비들, 자동차, 비행기 등과 같은 운송수단들의 위험도가 월등히 높게 나타나고 있다. 그럼에도 불구하고 유독 원자력 시설에 대한 안전성이 문제가 되고 있는 근본적인 이유가 바로 방사선의 존재이며 이것이 원자력 안전의 특성이다. 반응 정지 후에도 발생하는 붕괴열도 방사선만 존재하지 않는다면 안전을 위협할만한 요소는 되지 못한다. 따라서 원자력에서의 안전목표, 안전성 확보를 위한 방안 등을 비롯한 모든 기술적인 안전활동은 바로 이 방사선, 또는 이를 방출하는 방사능 물질의 외부누출을

방지하는데 집중되어 있다고 해도 과언이 아니다.

방사선의 존재라는 특이성을 갖는 원자력발전소의 안전은 다른 분야와 다른 세 가지 특성을 갖는다.

첫째는 고도의 기술적인 안전성이 요구된다는 점이다. 현재 원자력과 관련되어 행해지고 있는 거의 모든 연구를 안전성 관련 연구라고 할 수 있을 만큼 안전성 향상을 위한 연구가 원자력 분야에서 차지하고 있는 비중은 절대적이다. 이러한 연구들의 결과로 앞으로 건설될 원자력발전소의 경우 방사선이 외부로 누출되어 공중에 피해를 줄 수 있는 사고가 발생할 확률을 1백만년에 한번 이하로 할 것을 권고할 수 있게 되었다. 사고확률 0%를 요구하는 사람들을 예외로 한다면 이 수치는 인간이 달성할 수 있는 최상의 안전수준이다. 그럼에도 불구하고 안전성 향상을 위한 기술적 혁신은 앞으로도 계속될 것이다.

둘째는 기술적인 안전성 못지 않게 사회적인 안전성 확보가 매우 중요한 문제가 된다는 것이다. 어떤 공학적 시설이 얼마나 안전한가 하는 것은 그것이 가지고 있는 객관적인 기술적 안전성보다는 그것이 얼마만큼 안전한가에 대한 인간의 주관적인 판단에 좌우되는 경우가 많다. 이렇게 어떠한 시설의 안전성에 대해 인간이 가지고 있는 주관적인 판단기준을 사회적 안전성이라 한다면, 원자력발전소를 비롯한 원자력 관련 시설들이 달성된 기술적 안전성에 비해 사회적 안전성은 그리 높지 않은 것이 사실이다. 이렇게 된 데는 많은 이유가 있을 수 있으나 근본적으로는 방사선의 존재에서 그 이유를 찾을 수 있을 것이다. 자기집 뒷마당에 중저준위 방사성 폐기물 처분장이 들어섰을 때 받을 수 있는 피해는 일주일에 담배 1개피를 피웠을 때 받는 피해와 같다는 주장이 공허하게 들리는 현실은 사회적 안전성의 확보가 얼마나 중요한가를 말해주는 것이라 할 수 있다.

셋째는 원자력 안전이 한 국가만의 문제가 아니라 범 세계적인 문제라는 것이다. 최근에 발생한 성수대교의 붕괴는 우리에게만 말할 나위없이 슬프고 가슴 아픈 일이지만 다른 나라에서는 해외토픽 감으로 다룰 수도 있는 문제이고, 실제로 그러하기도 했다. 그러나 한 국가의 원자력발전소에서 원자로심이 용융되는 중대사고가 발생하면 그것은 그 국가만의 문제가 아니라는 교훈을 원자력계는 미국의 TMI 사고와 구 소련의 체르노빌 사고로부터 얻었다. 비교적 최근에 그 중요성을 인식하게 된 원자력 안전의 국제 협력에 대한 필요성은 국제안전협약을 체결하게 하는 등 그 움직임이 활발해지고 있다.

### 3. 안전성 목표 및 확보 원칙

원자력발전소의 안전에 있어서 가장 중요한 두 가지 목표는 방사선 누출의 가능성이 있는 사고를 방지하는 것과 그럼에도 불구하고 만일 어떤 사고가 발생했을 때는 그 영향, 즉, 방사능 물질의 누출을 완벽하게 차단하는 것이다. 그러나 100% 완벽한 차단이란 있을 수 없다. 설사 100%에

근접할 수 있다 하더라도 그러한 시설은 매우 비경제적인 것이 되어버리고 만다. 사람들은 그토록 무서운 방사선을 차폐하는데 경제적인 고려를 해야 한다는 것을 이해하지 않으려고 하겠지만 경제성과 안전성은 적절하게 조화되어야 한다. 안전이라는 개념은 사용을 전제로 하는 것이므로 사용할 수 없을 만큼 비싼 시설의 안전성은 현실적이지 못한 것이다. 따라서 원자력 안전의 가장 기본적인 원칙은 안전성과 경제성의 적절한 조화이다.

안전성과 경제성의 조화는 ALARA(As Low As Reasonably Achievable)라는 개념이 설명해 준다. 이를 해석하자면 합리적으로 달성 가능한 수준까지 사고의 가능성을 줄여나가는 것을 의미한다. 합리적이라는 것은 안전성 이외의 모든 요소들, 즉 경제적 타당성, 기술적 능력 등을 포함하는 총체적인 표현이다. 즉, 기술적 고려하에 사고의 가능성을 최소화하는 것이 원자력 안전의 궁극적인 목표이다.

이러한 궁극적인 목표는 각 원자력 시설마다 구체적으로 설정되어 있으며, 원자력 시설의 대명사격이라고 할 수 있는 원자력발전소에 대해서는 다음과 같은 안전성 목표들이 채택되어 있다.

- 원자력발전소의 위험은 일반인들이 살아가면서 접할 수 있는 다른 어떤 위험보다도 훨씬 낮아야 한다.
- 원자력발전소는 전기를 생산하는 다른 방식보다 더 안전해야 한다.
- 원자력발전소는 원자로가 심각한 손상을 입더라도 원자로 내의 핵분열생성물 중 극히 일부분(예를 들면, 스웨덴과 핀란드에서는 0.1%)만이 누출될 수 있을 정도로 설계되고 운전되어야 한다.

이와는 달리 국제원자력기구(IAEA) 산하의 원자력 안전 전문가들의 모임인 INSAG(International Nuclear Safety Advisory Group, 국제안전자문단)에서는 현재 운전중인 발전소에 대해 다음과 같은 안전성 목표를 정량적인 수치로서 제안했다.

- 심각한 원자로 손상의 발생 가능성 : 10,000 가동 년수에 한번 이하
- 즉각적인 외부적 대응을 요구하는 방사능 물질의 대량 외부누출 가능성 : 100,000 가동 년수에 한번 이하
- 미래의 발전소에 대한 위의 두 가지 발생 가능성은 1/10로 개선되어야 한다.

물론 핵연료 주기시설(농축, 재처리 등), 폐기물 처분시설, 기타 실험시설 등 원자력발전소 이외의 시설에 대해서도 위와 유사하거나 보다 강화된 안전목표들이 설정되어 있다. 이러한 안전성 목표를 달성하기 위해서는 설계, 건설, 운전을 포함하는 모든 단계에서 지켜져야 하는 원칙들이 있다.

#### 3.1 안전수칙

원자력발전소로부터 방사능 물질의 누출을 막기 위해서는 다음과 같은 세 가지 수칙이 준수되어야 한다.

- 정상상태의 유지

- 비정상상태시 사고로의 확산 방지  
 - 사고 발생시 적절한 방벽 내로의 방사능 물질의 한정

원자력발전소는 전기를 생산하는 것이 주 목적이기 때문에 정상적인 상태를 유지하는 것이 가장 중요하다. 원자력발전소가 아무런 이상없이 전기를 생산하는 정상운전중일 때는 원자로 출력의 조절이 가능해야 하며 만일 정상상태에서 벗어났을 경우에는 원자로를 안전하게 정지시킬 수 있어야 한다. 그러나 앞에서도 언급했듯이 원자로의 반응이 정지된 후에도 방사성물질의 붕괴에 의한 붕괴열이 지속적으로 발생한다. 원자로 정지 후의 붕괴열은 원자력발전소에서 가정할 수 있는 거의 모든 사고의 유일한 원인이다. 따라서 원자로 정지후에도 핵연료의 지속적인 냉각이 실패한다면, 붕괴열로 인해 노심에 손상이 생기게 되고 원자로 밖으로 방사능 물질이 누출될 수도 있다. 따라서 마지막 단계로 원자로 밖으로 누출된 방사성 물질이 외부 환경으로 누출되지 않도록 적절한 방벽 내로 방사성 물질을 한정시킬 수 있는 기능이 요구된다.

3.2 심층방어(Defence in Depth)

원자력발전소의 안전성을 달성하기 위한 기본적인 기술적 근거는 심층방어로 불리는 개념에서 발견된다. 심층방어란 원자력발전소에서 어떤 사고가 발생했거나 발전소 종사자들이 중대한 실수를 범했다 하더라도, 이에 대해 관대한 특성을 갖도록 하는 모든 설계설비 및 운전관행을 포함한다. 관대한 특성이란 하나의 사고가 더 큰 다른 사고로 연결되거나, 운전원의 중대한 실수가 곧바로 사고로 연결되지 않는 특성을 갖는다는 의미이다. 이를 위해, 원자력발전소에서는 발생 가능한 운전원의 실수나 기계적 고장을 보상하고 방사성 물질의 환경누출을 막아주는 연속적인 방벽들을 포함하는 다단계 방호를 중심으로 하는 심층방어 개념이 수행된다. 이 개념은 방벽들을 보호하기 위한 여러 수단들을 포함하며 방벽들이 충분히 효과적이지 못하더라도 공중과 환경을 보호할 수 있는 배치들을 포함한다. 심층 방어는 대체적으로 다음과 같은 연속적인 방어로 설명될 수 있다.

제 1단계:(정상상태 유지) 발전소를 미리 정해진 정상운전 상태로 유지시킨다.

제 2단계:(이상상태 조기 대응) 장비의 고장이나 인간의 실수 등으로 발전소가 정상운전 영역을 벗어났을 경우에 대응하는 설비 및 수단을 구비하여, 발전소를 정상상태로 환원시키거나 원자로를 정지시킨다.

제 3단계:(사고방지) 제 1, 2단계 방호가 실패할 경우에 이를 보상해 주는 설비 및 수단을 구비하여 발전소 상태가 사고로 발전하는 것을 방지한다.

제 4단계:(사고완화) 사고가 발생할 경우 발전소의 중대한 손상이 일어나지 않도록 사고범위를 제한하는 수단을 구비한다.

제 5단계:(소의 대응조치) 발전소의 중대한 손상이 발생하였을 경우라도 누출된 방사선이 작업자나 주변 일반인들에게 피해를 주지 않도록 하는 적절한 소의 대응조치를 갖춘다.

심층방어는 발전소 내의 기계적 또는 인간적 실수뿐만 아니라 태풍이나 홍수, 지진과 같은 발전소 외부 사건 등을 포함한 모든 종류의 사고에 대해 발전소를 보호하도록 구성되며, 또한 혹시 있을지도 모르는 고의적인 파괴행위에 대해서도 효과적인 방어 기능을 수행한다.

그러나 이러한 노력에도 불구하고 심층방어를 반영하여 운전중인 또는 건설중인 발전소가 위험의 가능성에 대해 완전히 자유스럽다고 확인할 수는 없다. 오히려 완벽한 안전이라는 것은 어디에도 있을 수 없다는 것을 인식시키고, 원자력발전소가 상대적으로 다른 어떤 것보다도 안전하다는 것을 정량적으로 깨닫게 하는 것이 원전의 안전을 다루는 전략이 되어야 할 것이다. 무엇보다 중요한 것은 아무리 노력한다 하더라도 절대적으로 안전한 것은 있을 수 없으며 원자력발전소도 예외는 아니라는 점이다. 그러나 일반인들이 원자력발전소는 절대적으로 안전하다고 믿게끔 하는 것은 가능하며 이것이 원자력 안전분야의 기본적인 목표이다.

3.3 안전문화

원자력발전소를 비롯한 원자력 시설들은 다른 시설에 비해 매우 안전하게 설계되어 있다. 따라서 이들 시설에서 발생하는 문제들은 어떤 의미에서는 인간의 실수에 그 근원이 있다고 할 수 있다. 반면에, 일단 발생한 문제들을 포착하고 해결하는데 있어서는 아직 그 어느 것도 인간을 능가하지 못한다. 이와 같이 긍정적 측면과 부정적 측면에서 모두 원자력의 안전과 관련된 인간의 역할과 책임은 매우 중요한 것이다. 위와 같은 사실과 TMI 및 체르노빌에서의 사고의 경험으로 미루어 볼 때, 원자력 안전은 규제, 설계, 건설, 운전 등에 관련된 개개인들의 안전에 대한 자세와 그들이 속한 조직 내의 풍토에 좌우된다고도 볼 수 있다. 이러한 관점에서 최근 들어 안전 문화의 개념이 도입되었고, 세계적으로 안전 문화의 형성과 정착에 관한 관심이 고조되고 있다.

안전 문화란 원자력에 관련된 활동에 종사하는 모든 개인과 조직이 안전성에 관련되는 정보를 자유롭게 교환할 수 있는 개방적인 태도를 가지며, 실수가 있을 때는 이를 솔직히 시인하고, 안전에 대한 철저한 인식과 책임의식을 갖고 있는 문화적 풍토를 말한다. 이러한 안전 문화의 형성과 정착을 위한 방안들은 정부, 각 사업체, 그리고 개별 종사자들의 차원으로 나누어 논의되는 것이 효율적이다.

원자력 안전에 관련된 정책의 수립 및 집행을 담당하는 정부기관에서의 안전 관행은 그와 관련된 사업체나 개인들에게 커다란 영향을 행사한다. 따라서 안전 문화의 정착을 위해 정부는 명확한 안전 목표를 확립하고, 적절한 규제를 통하여 이의 실현을 뒷받침해야 한다. 규제 업무에 있어서

외부의 부당한 간섭이나 압력을 배제하는 일과 지속적으로 안전 관련연구와 기술 개발을 장려하는 일은 국가적 안전 문화의 확립을 위한 핵심적인 사항이라고 볼 수 있다.

원전의 안전에 직접적인 책임이 있는 각 사업체의 경영 책임자들은 확고한 안전 관행을 사업체 내에 정착시키기 위해, 조직 체계와 절차서 등의 문서 체계를 확립하고, 교육 및 재교육을 적절히 실시하며, 공정한 공과 처리를 위해 지속적으로 노력해야 한다. 공과 처리에 있어서 특히 주의할 점은, 실적 위주의 포상이 안전을 위협하지 않도록 하고, 지나친 재재가 실수의 은폐를 조장하지 않도록 하기 위해, 적절한 판단 기준을 확립해야 한다는 것이다.

성공적인 안전문화 정착의 관건은 앞에서 언급한 전체적 작업 풍토에 의해 영향을 받은 개별 종사자들의 수행 여부에 있다. 개개인들은 모든 작업에 임하기 앞서 자신의 책임 및 수행작업과 안전과의 연관성, 그리고 실패의 가능성 및 그 대책에 대해서 의문을 갖는 습관을 길러야 한다. 작업 중에는 절차서에 충실하고, 예상치 못한 결과를 간과해서는 안된다. 그리고 작업 후에는 작업 내용을 기록하고 개인간, 조직간의 정보 교환을 통해 경험을 축적해 나가도록 한다.

#### 4. 맺 음 말

지금까지 원자력발전소의 안전에 관한 기본적인 개념들을 살펴보았다. 물론 이상에서 살펴본 안전 목표 및 원칙들은 기술적인 안전성을 달성하기 위한 것들이다. 전술하였듯이 이들이 달성되었다고 해서 원자력 안전에 대한 모든 것이 해결된 것은 아니며, 기술적으로 달성된 안전성을 바탕으로 사회적 안전성을 달성하기 위한 노력도 병행되어야 한다. 사회적 안전성을 달성한다는 것은 국민들로 하여금 기술적으로 달성된 안전성을 믿을 수 있고 받아들일 수 있도록 하는 모든 활동이 포함된다. 몇년전만 하더라도 이 부분에 대한 노력이 특히 우리나라에서는 매우 부족했던 것이 사실이다. 그러나 최근 들어 공청회 제도가 정착되고 국민에 대한 홍보가 적극성을 띠는 등 점차 원자력 안전의 사회적 측면이 부각되고 있는 중이다.

에너지의 사용은, 특히 개발도상국을 중심으로, 계속 증가할 것이라는 것이 일반적으로 받아들여지는 의견이다. 그리고 석탄, 석유, 수력과 같은 에너지원만으로는 이러한 수요 증가를 충족시킬 수 없으며, 석탄이나 석유와 같은 화석연료에 대한 매장의 한계나 대기의 오염문제 등도 간과할 수 없는 것들이다. 따라서 사회의 요구를 충족시키는데 원자력을 배제해야 한다는 주장은 아무런 기술적인 근거가 없으며 원자력의 사용은 현재로서는 최선의 선택이라고 본다.

원자력발전소의 안전성에 대한 시비에도 불구하고 원자력발전은 앞으로도 계속 발전할 것이며, 문명사회의 포기를 원치 않는 한 원자력의 사용을 피할 수는 없다. 그러나 그렇다고 해서 원자력발전소의 안전성 향상을 위한 노력을 중단하거나 게을리해서는 안된다. 아직, 원자력 발전이나 이에 관계된 설비들에 상당한 공포감을 가지고 있는 것이 사실이며, 이를 없애기 위한 끊임없는 노력이 계속되어야 한다. 만약 사회가 더욱 더 안전할 것을 원한다면, 그렇게 할 수 있고 또 해야 한다.

#### 저 자 소개



##### 장순흥(張舜興)

1954년 5월 6일생. 1976년 2월 서울대 공대 핵공학과 졸업. 1979년 12월 M.I.T. 핵공학과 졸업(석사). 1981년 5월 M.I.T. 핵공학과 졸업(공학). 1978년 1월 - 1979년 8월 M.I.T. 연구조교. 1979년 9월 - 1981년 5월 M.I.T. 강의조교. 1981년 6월 - 1982년 6월 Bechtel Power Corporation(U. S. A)핵공학부 안전해석 Staff 1987년 1월 - 1987년 12월 Chalk River Nuclear Lab. (Canada) 초청 연구원. 현재 원자력 안전기술원 안전심의 위원, 국제학술지 "System Safety & Reliability Engineering" 편집위원, 국제원자력기구 안전자문단(INSAG) 위원, 원자력위원회 안전전문위원, OECD/NEA 안전위원회 위원, 한국과학기술원 원자력공학과 교수.