

# 原子力發電의 安全性 現況 및 向上方案

한국 원자력공학계의 선두주자인 장순홍 한국과학기술원 교수가 지난 8월초 한국인으로서서는 정근모 현 원자력대사에 이어 두 번째로 국제원자력안전자문단(INSAG) 위원으로 임명됐다. 이 글은 장순홍 박사가 INSAG 위원의 입장에서 보는 원자력발전의 안전에 대한 다각적인 논의를 다룬 것이다.



장 순 홍  
한국과학기술원 원자력공학과 교수

원자력발전은 1956년 세계 최초의 원자력발전소가 가동을 시작한 이래 성장을 거듭하여, 현재는 약 430기의 원자력발전소가 전세계 전력생산의 약 16%를 담당하고 있다. 원자력은 많은 나라에서 두 차례의 석유파동을 이겨내는데 크게 기여하였으며, 고갈되어 가는 화석연료의 사용을 억제하는 실제적인 대체에너지로서의 역할을 수행하고 있다. 그러나 1979년과 1984년에 미국 트리마일아일랜드(Three Mile Island, TMI)와 소

련 체르노빌(Chernobyl)의 원자력발전소에서 각각 발생한 대형 사고는 원자력발전소의 안전성에 대한 의구심을 크게 확산시켰고, 이는 산업화에 따른 환경파괴에 대한 일반인들의 고조된 인식과 맞물려 원자력산업의 성장을 둔화시키는 가장 큰 원인이 되었다. 선진국에서의 전력소비 증가의 둔화, 까다로워지는 규제요건에 따른 발전소 건설비 증가와 이로 인한 발전단가의 상승 등도 원자력산업 침체의 중요한 요인이 되고 있다.

## 머리말

이러한 상황은 원자력산업계로 하여금 자신을 냉철하게 성찰해 보는 중요한 계기를 제공하여, 안전 목표 및 안전성확보 원칙 재정립, 가동중인 원전에 대한 안정성 향상 대책 수립 및 시행, 안전성을 크게 증진시킨 신형 원자로의 개발 등이 국제적인 긴밀한 협력하에서 이루어지고 있다. 이러한 측면에서 볼 때, 현재의 원자력산업의 침체현상은 원자력발전소의 궁극적인 안전성 확보나 장기적인 원자력산업의 발전을 위해서는 바람직한 현상이라고도 할 수 있다.

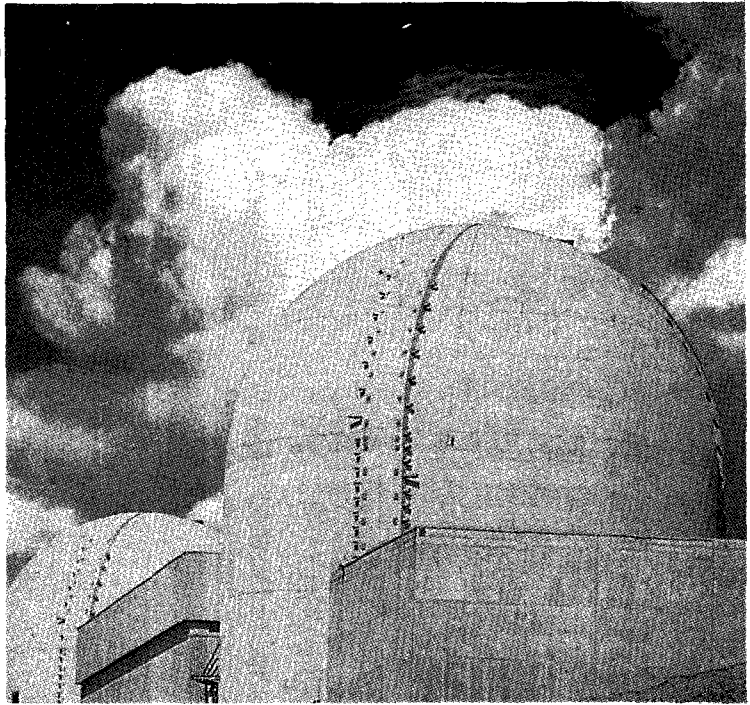
원자력시설에 있어서는 안전성 확보가 최우선적인 과제라는 점이 처음부터 인식되었으므로, 다양한 안전설비들을 갖추어 만일의 사태에 대비하여 왔다. 기존의 원자력발전소들은 여러 가상적인 사고들을 가정하여, 이러한 사고들이 발생하더라도 원자로를 안전하게 유지시킬 수 있도록(즉, 핵연료의 용융을 방지할 수 있도록) 다양한 안전설비들을 구비하였다. 임의의 안전설비를 설계할 때 가장 극심한 사고를 그 안전설비에 대한 설계기준사고라고 한다.

그러나 비록 그 가능성은 극히 낮지만, 안전설비들이 제대로 작동되지 않아서 노심이 녹아내리는 사고, 즉 중대사고를 완전히 방지할 수는 없는 것이 사실이다. TMI 사고는 이러한 중대사고가 실제로 발생할 수 있음을 확인시켰으며, 체르노빌사고는 설비의 결함과 인간의 오만함이 결합될 때 일어날 수

있는 중대사고의 결과가 얼마나 심각할 수 있는가를 보여 주었다. 이 두 사고는 원자력안전에 있어서의 주된 관심이 중대사고의 예방과 만일의 중대사고에 대비한 피해완화 대책으로 모아지는 계기가 되었다. 일반대중이나 환경의 안전은 중대 사고가 발생하지 않는 한 위협받지 않지만, 일단 중대사고가 발생하여 제대로 관리되지 못하면 막대한 피해를 입을 수도 있기 때문이다. 현재 중대사고 허용안전수준에 대해 전세계적인 공감대가 형성되어 있으며, 이를 만족할 수 있도록 원자력발전소들을 설계, 건설, 운전하려는 노력이 기울여지고 있다.

원자력발전소의 안전성과 아울러 핵연료주기 및 방사성폐기물 저장 시설에 대한 안전성 문제도 중요한 관심사이다. 특히 방사성폐기물 저장 시설은 수백년 이상 안전하게 유지되어야 한다는 점 때문에 기술적인 문제들이 해결되었다는 전문가들의 견해와는 상관없이 일반인들의 두려움의 대상이 되고 있으며, 우리나라를 비롯한 몇 나라에서는 원자력의 장래를 결정지을지도 모르는 중요한 현안이 되어 있기도 하다.

우리나라는 현재 9기의 원자력발전소가 운전중으로 전체 전력생산의 약 절반을 담당하고 있으며, 5기가 추가로 건설중이고, 앞으로도 새로운 발전소들이 계속 건설될 예정이다. 이제 국내의 원자력발전소 운전기술은 물론 설계, 제작, 건설 능력도 거의 기술자립을 이룬 상태이고, 차세대원자로를 국내 주도로 개발하려는 계획이 야심적으로 추



진되고 있다. 한편 원자력발전소의 안전성에 대한 국민의 관심은 점점 증대되어 가고 있으며, 객관적인 정보에 대한 욕구도 상당히 큰 편이다.

원자력발전의 안전성에 대한 활발한 논의와는 대조적으로 이에 대한 일반국민들의 이해도는 매우 낮은 편이다. 따라서 이 글에서는 국제원자력안전자문단(International Nuclear Safety Advisory Group, INSAG)에서 발행한 최근 자료들을 토대로 하여, 원자력안전의 본질과 안전성 확보를 위한 원칙, 원자력계가 목표로 하고 있는 안전수준, 현재 운전중인 원자력발전소들의 전반적인 안전수준 및 향상방안, 미래의 발전소들이 추구하는 안전성 확보방안 등을 종합적으로 요약하고자 한다. 이를 통하여 원자력안전에 대한 일반국민들의 이해를 돕고 원자력전문가들에게는 원전의 안전성에 대한 이해를 체계화하는데 도움이 되었으면 한다.

## 원자력안전의 개념과 특성

「안전(Safety)」의 사전적 의미는 「위험으로부터의 자유(Free from Danger)」로 정의된다. 그러나 모든 현대인 중에서 의미대로의 안전을 누리면서 살아가는 사람은 하나도 없을 것이다. 우리 모두는 끊임없는 각종 위험들 속에서 살아가고 있다. 단지 그러한 위험들을 느끼지 못하고 있을 뿐이며, 만일 이러한 모든 위험들을 느끼고 사는 사람이 있다면 그는 이미 정상의 범주에서 벗어나고 있는지도 모른다.

이러한 무수한 위험들 중에서도 유독 원자력의 안전성이 큰 문제가 되고 있는 것은 어떤 이유에서일까? 원자력안전의 본질은 무엇이며, 전기를 생산하는 다른 설비들의 안전과 무엇이 다른가? 이 절에서는 원자력안전의 기본적인 개념과 원자력만이 가지고 있는 안전특성에 대해 간단하게나마 논의해 보

기로 한다.

## 1. 원자력안전의 개념

원자력안전의 본질은 방사선의 존재로부터 찾아야 할 것이다. 화력발전에서는 화학반응에 의해 에너지를 생산하지만, 원자력발전에서는 핵분열(Nuclear Fission)반응에 의해 에너지를 생산하여 전기로 변환시킨다. 우라늄과 같이 무거운 원자핵이 분열할 때는 막대한 에너지와 함께 매우 불안정한 상태의 원자들(핵분열생성물)이 생성되는데, 이들은 알파선, 베타선, 감마선과 같은 방사선을 방출하면서 안정된 상태로 돌아가려고 하는 방사성물질이다. 방사성물질이 방사선을 방출하는 것은 인간의 힘으로는 제어할 수 없는 고유한 성질이므로, 방사성물질이 원자력시설로부터 환경으로 유출되는 것을 방지하고, 또한 방사선을 적절히 차폐해야 한다. 방사선의 위험성과 방사선에 대한 사회의 공포감에 대해서는 굳이 거론할 필요가 없을 것이다.

방사선은 원자력발전과 관련된 거의 유일한 위험요인이라 할 수 있다. 원자력발전소는 폭발의 위험이 없으며, 공해를 유발하지도 않고, 대량의 쓰레기를 발생시키지도 않는다. 따라서 원자력에서의 안전 목표, 안전성 확보원칙, 안전성 확보를 위한 방안 등을 비롯한 모든 안전활동은 바로 이 방사선, 또는 이를 방출하는 방사성물질의 외부 누출을 방지하는데 집중되어 있다고 해도 과언이 아니다. 원자력 안전을 한마디로 정의한다면, 「방사

선재해로부터 인간과 환경의 보호」라고 할 수 있다.

## 2. 원자력안전의 특성

원자력발전소를 비롯한 원자력 관련시설들은 다른 공학적 시설들과 비교할 때 안전성 관점에서 고유한 특성을 지니고 있다.

기술적인 측면에서는 원자로를 적절하게 냉각시키지 못하면, 원자로 내에서 생성되는 핵분열생성물을 외부와 차단하고 있는 방벽들이 파손되어 방사성물질을 외부로 누출시킬 수 있다는 점이 가장 중요한 특성이다. 특히 원자로는 가동이 정지되더라도 상당량의 붕괴열이 계속 생성되므로, 원자로 냉각은 정상운전시 뿐만 아니라 원자로 정지 이후에도 이루어져야만 한다.

그러나 보다 중요한 특성은 사회적인 측면, 즉 다른 공학설비들보다 더 안전할 것을 요구하고 높은 안전성에도 불구하고 신뢰하기를 꺼려하는 사회적 인식에서 찾아야 할 것이다. 이러한 인식의 밑바탕에는 방사선에 대한 공포감이 깔려있음은 물론이며, 이것은 어쩌면 당연한 것인지도 모른다. 그러나 일반인들의 원자력에 대한 의식에는 방사선에 대한 공포 이상의 것이 있다.

사람들은 대개 위험 그 자체보다는 자신이 그 위험을 잘 모르고 있다는 점에 대해서 더 큰 공포를 느낀다. 자동차사고의 위험성은 언론매체와 주변으로부터의 직간접적인 경험을 통해서 우리 모두 너무도 잘 알고 있다. 너무나 잘 알기 때문에 그 위험은 전혀 공포스럽지가

않다. 그러나 대부분의 사람들은 원자력발전에 대해서 친숙하지 못하며 따라서 매우 공포스러운 것이다. 이러한 공포감에 방사선에 대한 두려움이 가중되어 있는 것이 현재 일반대중들이 원자력에 대해서 가지고 있는 안전의식의 밑바탕이다.

따라서 원자력발전의 안전을 논할 때는 얼마만큼 안전한가만을 가지고는 불완전하며, 보다 중요한 것은 얼마만큼 안전하다고 인식하느냐 하는 점이다. 원자력발전소가 안전하다는 사회적 인식이 형성되기 위해서는 방사성물질의 누출로 인한 피해의 가능성이 매우 희박해야 한다. 그 정도는 다른 전력생산 수단과 유사한 수준이어서는 안되며, 그보다는 매우 낮은 수준이어야 한다. 그 이유는 물론 원자력발전소에 대한 특이한 사회적 인식 때문이다.

이와 같이 원자력발전의 모든 안전활동은 방사성물질의 누출방지라는 기본적인 개념하에 궁극적인 안전을 향한 끊임없는 노력의 연속이어야 하며, 이와 병행하여 원자력발전소의 안전수준이 일반대중들에게 받아들여져서 신뢰가 회복되도록 노력해야 한다.

## 안전성목표 및 확보원칙

### 1. 안전성목표

현 시점에서 원자력발전소의 안전성과 관련하여 가장 중요한 두 가지 목표는 중대사고를 방지하는 것과 그럼에도 불구하고 사고가 발생했을 때는 그 영향, 즉 방사성물

질의 누출을 완벽히 차단하는 것이다. 그러나 방사성물질 누출의 완벽한 차단이란 있을 수 없으므로 적절한 안전수준을 설정하는 것이 중요하다. 원자력발전소의 적절한 안전수준은 이미 널리 논의되어 왔으며, 몇몇 국가에서는 다음과 같은 정성적인 안전성목표를 채택하고 있다.

(1) 원자력발전소의 위험도는 일반인들이 살아가면서 접할 수 있는 다른 어떤 위험보다도 훨씬 낮아야 한다.

(2) 원자력발전소는 전기를 생산하는 다른 방식보다 더 안전해야 한다.

(3) 원자력발전소는 원자로가 심각한 손상을 입더라도 원자로 내의 핵분열생성물 중 극히 일부분(스웨덴, 핀란드에서는 0.1%)만이 누출될 수 있을 정도로 설계되고 운전되어야 한다.

이 밖에 중대사고가 발생하고 방어설비가 제 기능을 못했을 경우에 인체에 미칠 수 있는 악영향에 제한을 둬으로써 안전성목표를 설정하는 국가도 있다. 이와는 달리 국제원자력안전자문단(INSAG)에서는 현재 운전중인 발전소에 대해 다음과 같은 안전성목표를 정량적인 수치로서 제안했다.

(1) 심각한 원자로손상의 발생 가능성

10,000가동년수에 한 번 이하

(2) 방사성물질의 대량 외부누출 가능성

100,000가동년수에 한 번 이하

여기서 방사성물질의 대량 외부누출이란 즉각적인 외부적 대응조

치를 필요로 하는 정도의 방사성물질 누출을 뜻한다.

한편 미래의 발전소에 대해서는 위의 두 가지 발생 가능성이 1/10 이하가 되도록 개선할 것을 제안하였다. 미래의 발전소에 대한 이러한 목표는 평범한 표현으로 이해될 수 있다. 이러한 목표가 달성될 경우, 세계적으로 현재 운전중인 발전소의 약 2배 가량인 1,000기의 미래형 발전소가 운전된다고 가정할 때, 평균적으로 100년에 한 번 정도로 TMI와 같은 외부에 피해를 주지 않는 사고를 경험하고, 1,000년에 한 번 정도로 체르노빌과 같이 외부인의 방호를 요구할 만한 사고를 경험할 것이다.

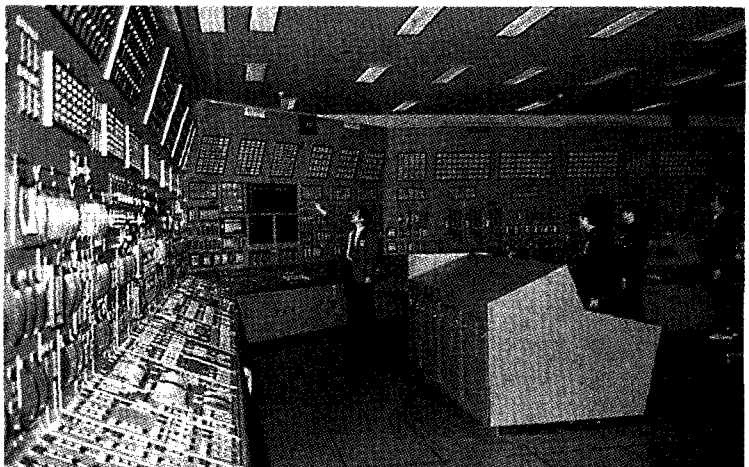
위와 같은 안전성목표가 달성되기 위해서는 설계, 건설, 운전을 포함하는 모든 단계에서 지켜져야 하는 원칙들이 있다.

## 2. 안전수칙

원자력발전소로부터 방사성물질의 누출을 막기 위해서는 다음 세 가지 요건이 준수되어야 한다.

- (1) 원자로출력의 조절
- (2) 핵연료의 지속적인 냉각
- (3) 적절한 방벽 안에 방사성물질을 격납

원자로가 정상운전중일 때는 원자로출력의 조절이 가능해야 하며, 만일 정상상태에서 벗어나는 경우에는 원자로정지가 보장되어야 한다. 원자로는 정지 후에도 지속적인 잔열을 발생하므로 핵연료의 지속적인 냉각이 보장되어야 한다. 이 요건만 완벽하다면 원자로로부터의 방사성물질의 누출은 완전히 차단할 수 있다. 그러나 만일 핵연료의 냉각에 실패한다면, 붕괴열로 인해 노심에 손상이 생기게 되고, 원자로 밖으로 방사성물질이 누출될 수도 있다. 따라서 방사성물질을 적절한 방벽에 내로 한정시킬 수 있는 기능이 요구된다. 이와 같은 안전수칙들은 뒤에서 논의되는 심층방어와 밀접하게 연관되어 있다. 어떠한 상황에서도 위의 세 가지 사항만 만족되면 원자력발전소는 중대사고를 경험하지 않아도 된다.



### 3. 심층방어(Defense in Depth)

원자력발전소 안전성의 기술적 토대는 「심층방어(Defense in Depth)」로 불리는 개념이다. 심층방어는 원자력발전소가 어떤 사고나 실수에 대해 관대한 특성을 갖도록 하는 모든 설계설비 및 운전관행을 포함한다.

심층방어의 개념은 대체적으로 다음 다섯 단계의 연속적인 방어로 설명될 수 있다.

#### (1) 제1단계(정상상태 유지)

발전소를 미리 정해진 정상운전 상태로 유지시킨다.

#### (2) 제2단계(이상상태 조기대응)

장비의 고장이나 인간의 실수 등으로 발전소가 정상운전영역을 벗어났을 경우에 대응하는 설비 및 수단 등을 구비하여, 발전소를 정상상태로 환원시키거나 원자로를 정지시킨다.

#### (3) 제3단계(사고방지)

제1, 2단계 방호가 실패할 경우에 이를 보상해 주는 설비 및 수단을 구비하여 발전소상태가 사고로 발전하는 것을 방지한다.

#### (4) 제4단계(사고완화)

사고가 발생할 경우 발전소의 중대한 손상이 일어나지 않도록 사고 범위를 제한하는 수단을 구비한다.

#### (5) 제5단계(소외대응조치)

발전소의 중대한 손상이 발생하였을 경우라도 작업자나 주변 일반인들에게 피해를 주지 않을 수 있는 적절한 소외대응조치를 구비한다.

심층방어는 발전소 내의 기계적 또는 인간적 실수, 태풍이나 홍수, 지진과 같은 발전소 외부사건 등을

포함한 모든 종류의 사고에 대해 발전소를 보호하도록 구성되며, 또한 혹시 있을지도 모르는 고의적인 파괴행위에 대해서도 효과적인 방어기능을 수행한다.

그러나 심층방어원칙에 따라 건설되어 운전중인 발전소가 위협의 가능성으로부터 완전히 자유스럽다고 보장할 수는 없다. 원자력안전 전문가들은 이 사실을 잘 인식하고 있으며, 따라서 원자력발전소의 안전성을 정량적이고 상대적인 개념으로 파악하고, 예외적으로 높은 수준의 안전성을 달성하고자 노력하고 있다. 이 세상에 절대적으로 안전한 것은 있을 수 없고 원자력 발전소도 예외는 아니지만, 대부분의 사람들이 절대적인 것으로 받아들일 수 있는 훌륭한 안전성을 달성하는 것은 가능하며, 이것이 원자력안전분야의 궁극적인 목표이다.

### 4. 안전문화(Safety Culture)

원전에서 발생하는 모든 문제들은 어떤 의미에서는 인간의 실수에 그 근원이 있으며, 긍정적 측면과 부정적 측면에서 모두 원전의 안전성과 관련된 인간의 역할과 책임은 매우 중요하다. 위와 같은 사실과 TMI 및 체르노빌에서의 사고의 경험으로 미루어 볼 때, 원전의 안전은 규제, 설계, 건설, 운전 등에 관련된 개개인들의 안전에 대한 자세와 그들이 속한 조직 내의 풍토에 좌우된다고도 볼 수 있다. 이러한 관점에서 최근 들어 「안전문화(Safety Culture)」의 개념이 도입되었고, 세계적으로 안전문화의 형

성과 정착에 관한 관심이 고조되어 있다.

안전문화에서는 조직체계와 개인의 자세가 모두 중요하며, 안전의 중요성에 대한 인식, 높은 수준의 지식 및 수행능력, 안전을 최우선 시하는데 대한 관리자와 직원간의 공동인식, 동기부여, 적절한 관리감독, 명확한 책임부여 등이 중요한 요소에 포함된다.

원전의 안전에 관련된 정책의 수립 및 집행을 담당하는 정부기관에서의 안전관행은 그와 관련된 사업체나 개개인들에 커다란 영향을 행사한다. 따라서 안전문화의 정착을 위해 정부는 명확한 안전목표를 확립하고, 적절한 규제를 통하여 이의 실현을 뒷받침해야 한다. 규제 업무에 있어서 외부의 부당한 간섭이나 압력을 배제하는 일과 지속적으로 안전 관련연구와 기술개발을 장려하는 일은 국가적 안전문화의 확립을 위한 핵심적인 사항이라고 볼 수 있다.

원전의 안전에 직접적인 책임이 있는 각 사업체의 경영책임자들은 확고한 안전관행을 사업체 내에 정착시키기 위해, 조직체계와 절차서 등의 문서체계를 확립하고, 교육 및 재교육을 적절히 실시하며, 공정한 공과처리를 위해 지속적으로 노력해야 한다. 특히 공과처리에 있어서 적절한 판단기준을 확립함으로써, 실적 위주의 포상으로 인해 안전이 위협받거나, 지나친 제재로 인해 실수의 은폐가 조장되지 않도록 해야 한다.

성공적인 안전문화 정착의 관건은 앞에서 언급한 전체적인 작업풍

도에 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 대해 의문을 갖는 습관을 길러야 한다. 작업중에는 절차서에 충실하고, 예상치 못한 결과를 간과해서는 안된다. 그리고 작업 후에는 작업내용을 기록하고, 개인간, 조직간의 정보교환을 통해 경험을 축적해 나가도록 한다.

## 현재의 원자력발전소 안전성 및 향상방안

이 절에서는 현재 운전중인 발전소들의 안전수준이 앞에서 제안한 목표에 어느 정도 만족하는지를 알아보고, 안전수준을 향상시킬 수 있는 방안들에 대해서 논의하고자 한다. 현재 전세계적으로 경수로, 중수로, 기체냉각로, 액체금속로 등이 운전되고 있지만, 그 중에서 경수로와 중수로가 대부분을 차지하고 있으며, 또한 가까운 장래에 건설될 원전들도 이들이 주종을 이룰 것으로 예상된다. 따라서 여기에서는 경수로와 중수로의 안전성에만 국한하여 논의한다.

### 1. 현재 발전소의 안전수준

앞에서 INSAG이 제안한 안전 목표에 대해 기술한 바 있다. 그러면 현재의 발전소들이 이러한 목표를 만족하는지의 여부를 어떻게 판단할 것인가. 현재로서는 각각 단점을 지니고 있는 두 가지 방법만이 가능하다. 하나는 역사적인 기

록을 분석하는 것이며, 다른 하나는 확률론적 안전성평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA) 방법이다.

#### (1) 역사적 기록

##### ① 안전성목표와 비교한 평가

현재까지의 상업용 경수로와 중수로의 누적 운전년수는 약 5,000년 정도이다. 금세기말이 되면 이 운전년수는 약 10,000년 정도로 증가할 것이다. 지금까지 발전소 외부에는 피해를 주지 않고 원자로심이 심각한 손상을 입은 대형사고가 단 한 차례 발생했으며, 그 사고가 바로 TMI 사고이다. TMI 발전소는 현재의 원전에 대한 안전기준에 의해 운전되지 않았으므로 통계에서 제외되어야 한다는 주장이 있을 수도 있으며, 그것은 어쩌면 사실인지도 모른다. 그러나 이러한 이유로 통계적인 기록에서 TMI 사고를 제외한다는 것은 적합하지 않다. 왜냐하면 사고가 발생하기 이전까지는 그 발전소도 안전하게 운전중이라고 가정되었을 것이기 때문이다.

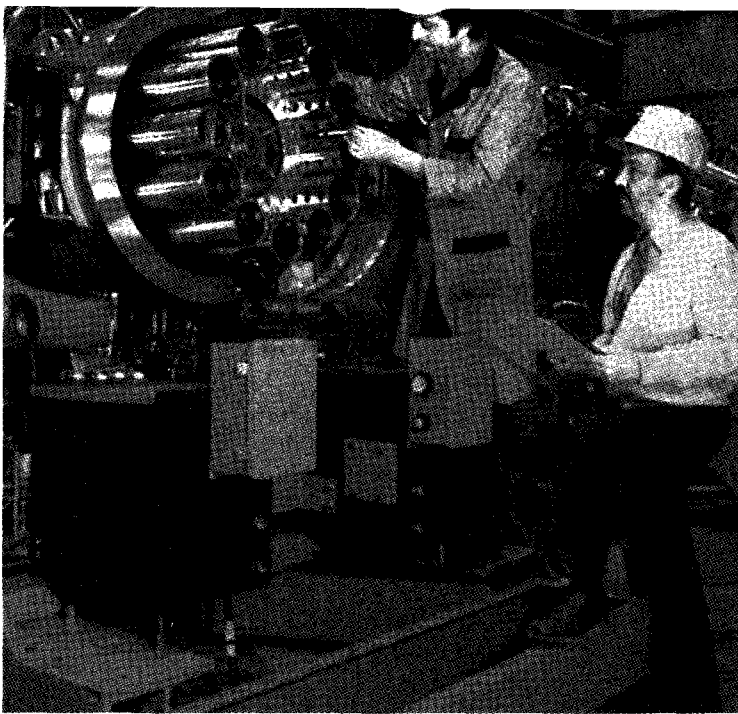
현재의 기록은 외부에 영향을 주지 않고 노심의 심각한 손상을 초래한 중대사고가 5,000년에 한 번 발생했다는 것을 나타낸다. 일견, 이 기록은 10,000년에 한 번 이하로 발생해야 한다는 현대의 안전목표를 만족하지 못한 것으로 보인다. 그러나 통계적으로 역사적 기록이 목표와 불일치하는 것은 아니다. 왜냐하면 만일 예상대로 더 이상의 중대사고가 발생하지 않는다면 해가 갈수록 기록은 목표치에 접근할 것이기 때문이다. 반대로

이 기록이 목표에 일치하느냐고 묻는다면 그것 역시 보장할 수 없다. 기본적으로 안전수준을 신뢰성 있게 평가하기에는 기록의 연한이 너무 짧기 때문이다.

방사성물질의 외부누출 가능성에 대한 역사적 기록의 빈곤은 노심의 손상에서보다 더 심각하다. 대규모 외부누출이 발생했던 체르노빌의 원전은 여기서 논의되고 있는 것과는 다른 원자로형이고, 안전성 측면에서 구조적인 취약성을 지닌 발전소이며, 또한 현재는 가동이 중지되거나 대대적인 안전성향상을 꾀하고 있으므로, 현재 원전의 안전성평가에서 체르노빌사고를 포함시키는 것은 부적절하다. 그리고 TMI 사고에서는 외부로의 방사능 누출이 없었으므로, 5,000운전년수 동안에 외부로의 방사선누출사고가 단 한 건도 없었던 것으로 평가할 수 있다. 그러나 목표가 100,000년에 한 번 이하임을 감안하면 이 기록은 판단에 아무런 도움을 주지 못한다. 따라서 역사적 기록으로부터 현재의 안전목표 달성 여부를 판단하기 위해서는 앞으로도 많은 세월이 지나가야 한다.

#### ② 다른 발전수단과의 상대적인 비교 평가

외부로의 방사선누출사고에 대한 현재 발전소의 안전수준을 역사적인 기록에 의해 평가하기가 곤란하므로, 그 대신 체르노빌발전소를 포함한 모든 원자력발전소로부터의 그간의 인명피해와 다른 전력생산수단에 의한 인명피해를 비교함으로써 간접적인 평가를 할 수 있을 것이다. 이에 관한 비교가 <표 1>



에 나타나 있다.

〈표 1〉에서는 어쩌면 체르노빌 사고에서 가장 큰 영향을 차지할지도 모르는 만성인명피해(방사선피폭으로 인해 나중에 나타날 것으로 예상되는 암, 백혈병 등)는 고려되지 않았다. 〈표 1〉에 나타난 것만을 본다면 지금까지 원자력발전소는 다른 형태의 전력생산설비에 비해 비교적 안전하게 전력을 생산해 왔다고 할 수 있다. 그러나 보다 신뢰성 있는 평가는 만성효과에 대한 정확한 피해가 내려진 뒤에야 가능할 것이다.

〈표 1〉 전력생산설비들의 중대사고에 의한 인명피해

전력생산	사건발생수	인명피해/ 사건 (GW)	총인명피해 (fat/ GW)	총생산전력	인명피해/ 전력
석탄채광시	62	10-434	3,600	10,000	0.34
석 유					
유조선 전복	6	6-123	N/A	21,000	-
정제소 화재	15	5-145	450		0.02
수송중	42	5-500	1,620		0.08
천연가스 화재/ 폭발	24	6-452	1,440	8,600	0.17
수 력	8	11-2,500	3,839	2,700	1.41
원자력	1	31	31	1,100	0.03

N/A : 자료없음

## (2) PSA의 사용

확률론적 안전성평가는 원전의 안전성의 기초를 세우는데 광범위하게 사용된다. 이 평가방법은 다음 사항에 대한 정량적인 값을 제공한다.

- ① 노심을 중대하게 손상시키는 중대사고가 발전소에서 발생할 연간확률 및 사고시나리오
- ② 중대사고 발생 후 격납건물로부터 누출되는 방사선원의 종류 및 양(시간의 함수)
- ③ 방사성물질 누출이 주민의 건강이나 환경에 미치는 영향

이들 영향은 연간 치명상, 연간 치명적인 암 유발 확률, 재정상의 피해 예상액 등 정량적인 값으로 평가된다. 이들 정량적인 수치 일부는 모든 종류의 사고에 대해 합산되어 위험도의 최저선(Bottom Line)을 산출한다. 확률론적 안전성평가의 결과는 성취된 안전 수준에 대한 종합적인 평가에도 사용되지만, 이 경우는 대단히 조심스럽게 평가되어야 한다. 이는 PSA의 방법론 및 사용되는 데이터의 정확도에 상당한 한계가 있기 때문이다. PSA 방법은 오히려 위험도에 크게 기여하는 설계, 운전상의 취약성을 확인하여 설계 및 운전의 반영하는데 더 큰 기여를 하고 있다고도 볼 수 있다.

〈표 2〉 NUREG-1150의 PSA의 결과

	10,000년당 노심손상 확률	100,000년당 방사능 외부 누출 확률
Surry	0.2	0.3
Peach Bottom	0.02	0.3
Zion(Modified)	0.6	1.0
Sequoyah	0.6	2.0
Grand Gulf	0.4	0.1

PSA의 결과가 개별적인 발전소에 대해 안전성의 결정적인 척도로 사용되는 것은 바람직하지 않지만, 일련의 결과들이 종합되면 전반적인 정확성은 개별적인 수치보다는 향상된다. 어쨌든 PSA 방법과 결과는 최근 중요한 연구과제가 되고 있으며, 미국에서는 NUREG-1150으로 알려진 보고서에서 입력자료의 불확실도 효과의 측정이 개선된 새로운 PSA를 다섯개의 미국 경수로형 원전에 대해 수행하여 발표

하였다(표 2). <표 2>의 결과는 외부로의 방사성물질의 누출이 생겼을 때 즉각적인 방호대책이 이루어질 것이라는 가정은 수용하지 않았다. 따라서 <표 2>의 방사성물질 외부누출 확률값들은 사고로 인해 하나 이상의 암에 의한 치명상이 발생할 확률이며, 이것은 INSAG이 제안한 안전목표에 보수적으로 접근한 것이다.

NUREG-1150에서 분석된 모든 발전소가 노심손상과 관련한 현재의 목표를 넘어서고 있으며, Sequoyah 발전소를 제외한 나머지 발전소들은 외부의 방호대책이 요구되는 사고에 대한 목표 또한 만족하고 있다. Sequoyah 발전소는 2배 정도로 못미치고 있지만, 이것은 측정의 불확실도를 감안한다면 만족스럽다고도 볼 수 있는 정도이다.

여기서 언급할 점은 Zion 발전소에 대한 첫번째 평가에서는 위험의 대부분을 차지하는 한 유형의 사고가 발견되었고, 이 사고로 말미암아 총노심손상확률이 10,000년에 한 번을 초과했었다는 점이다. 이러한 이유로 이 예외적인 사고경위를 방지하기 위한 설계변경이 이루어졌고, 그 결과 <표 2>에서 보듯이 10,000년당 0.6으로 줄어들게 되었다. 이것은 PSA의 결과가 발전소의 안전성향상에 어떻게 사용될 수 있는가를 보여주는 것이며, 이것이 PSA 사용의 가장 중요한 혜택이다.

(3) 운전경험의 확률론적 평가  
앞서 기술한 바와 같이, PSA에 의해 계산된 확률값 자체로는 원하

는 만큼의 정확성을 기대하기가 어렵다. 그보다는 시간에 따른 추이가 보다 더 의미있을 수도 있다. 미국 NRC의 보고에 따르면 지난 5년간의 노심손상의 평균적인 확률이 TMI 사고의 교훈이 실제 발전소에 적용되기 이전에 비해 상당히 낮은 것으로 나타나고 있다. 이 보고서는 개별 발전소의 평균적인 노심손상확률이 1979년 이전, 즉 TMI 사고 이전에는  $1.0 \times 10^{-3}$ 이었던 것이 현재는  $1.0 \times 10^{-4}$ 에서  $1.0 \times 10^{-5}$  사이로 향상된 것으로 평가했다. 세계 각국의 원자력발전소 대부분이 안전성 측면에서 거의 유사한 개선을 이루었으므로 비슷한 안전수준을 유지하고 있으리라고 판단된다.

#### (4) 예외적인 경우들

불행하게도 몇몇 발전소들은 INSAG이 제안한 안전목표에 미치지 못하는 것으로 평가되고 있다. 이는 부적당한 안전계통이나 설계의 취약성이 아직 수정되거나 보완되지 않고 있기 때문이며, 이러한 발전소들의 개선을 위한 국가적인 규제계획이 계속 수행되고 있음은 물론이다. PSA의 부정확성을 감안한다면, 이들 발전소들도 INSAG의 안전목표를 충족하고 있는지도 모른다. 그렇지만 보수적인 관점에서 어떤 발전소가 안전목표를 충족하지 못할 가능성이 있다면 개선이 이루어져야 하는 것이 타당한 견해일 것이다.

#### (5) 종합적 판단

앞에서 두 가지 접근방법에 의해 현재 운전중이거나 건설중인 발전소들의 안전수준을 검토하였다. 이

로부터 우리는 몇몇 발전소를 제외하고는 대부분이 현대의 안전목표를 충족하고 있다고 판단할 수 있다. 그러나 현재 설정되어 있는 안전목표는 적절한 수준일 뿐이지, 그것이 곧 가동중인 발전소가 추구해야 할 궁극적인 목표가 될 수는 없다. 그리고 앞에서 논의한 두 가지의 접근방법이 지니고 있는 약점들로 인해 분석결과를 그대로 받아들이는데 다소 무리가 있는 것도 사실이다. 따라서 보다 나은 안전성을 확보하기 위한 노력은 계속되어야 한다.

가동중인 원전은 그 특성상 안전성을 향상시키기 위해 대폭적인 설계변경이나 안전계통의 교체 등은 현실적으로 어렵다. 그러나 올바른 운전관행을 준수한다면, 하는, 주로 인적요인의 개선을 통한 안전성향상은 충분히 가능하다. 하지만 세계 각국의 문화적 배경이 다르고 운전원이나 보수요원의 자질 및 운전관행 등이 서로 다르므로, 인적요인의 개선방안을 일괄지어 논하기는 곤란하다. 따라서 여기서는 국내 원전을 중심으로 가동중인 원전의 안전성을 향상시키기 위한 방안들을 살펴보고자 한다.

## 2. 가동중 원전 안전성향상방안

### (1) 안전확인활동의 강화

가동중 원전에 대한 안전확인활동은 크게 두 가지로 구분된다. 첫째는 시설의 성능유지 및 사고예방의 일환으로 사업자가 자체적으로 수행하고 있는 안전확인활동이며, 둘째는 규제기관에서 수행하고 있는 규제확인활동이다.



우리나라의 가동중 원전의 안전성확인활동은 검사제도, 특히 정기검사를 가장 중요한 수단으로 하고 있다. 이밖에도 물론 현지 주재원이 실시하는 일상검사와 특정사태 발생시의 특별검사 및 수시검사, 그리고 매년 1회 정도 실시하는 품질보증검사(Audit)가 있으나, 대개 그 범위와 목적이 한정되어 있으므로 종합적인 안전성 확인활동으로는 충분하다고 할 수 없다. 그러므로 안전확인활동을 강화하기 위해서는 정기검사활동이 더욱 강화되고 체계화되어야 할 것을 생각되며, 성능(기능)시험 및 보수작업 결과의 평가 및 시정조치사항의 결과를 확인할 수 있는 제도적 장치도 마련되어야 할 것이다.

또한 규제활동을 수행하고 있는 규제요원들의 기술적 능력 및 책임의식을 고양시키는 한편, 이들의 권한을 강화하는 방안이 모색되어야 한다.

(2) 운전원의 자격관리 및 근무환경 개선을 통한 인간실수 억제

가동중 원전의 안전을 향상시키는 가장 중요한 요소는 인간실수(Human Error)를 방지하는 것이다. 이를 위해서는 근무환경을 개선하여 자질있는 운전 및 보수요원을 확보하고, 운전원의 자격관리를 통해 실수를 극소화해야 할 것이다.

근무환경 개선의 목적은 원전종사자의 장기근무가 가능토록 하는 환경을 조성함으로써 경험있는 발전전문가를 축적해서 인간실수를 줄이는 것이다. 근무환경의 개선은 작업장의 환경개선이 우선되어야

하지만, 이에 못지 않게 지역의 환경개선에도 역점을 두어야 한다. 현재의 발전소는 모두가 인구밀도가 낮은 벽지에 건설되어 있기 때문에 중고등학교나 시장과 같은 시설이 거의 갖추어져 있지 않은 상태이다. 따라서 대부분의 발전소 종사자들이 자기가 살고있는 지역에 대한 애착이 없게 되며, 이러한 현상은 자질있는 운전 및 보수요원의 확보를 어렵게 만든다. 따라서 훌륭한 중고등학교의 설립, 종합적인 문화시설의 건립 등을 통해 지역환경을 개선함으로써 발전소종사자들이 지역에 대한 애착을 갖도록 하는 것은 자질있는 운전 및 보수요원들의 확보를 위해 필수적인 요건이라 할 수 있다.

운전원의 자격관리를 통해 인간의 실수를 극소화하기 위해서는 다음과 같은 운전원의 인력관리가 수행되어야 한다.

① 개인별 자료를 종합분석하여 업무별, 경력별, 기술수준별로 분류, 전산화하여 각 조직별로 구성인력의 적정 구성비를 정립하고, 기술정보체제를 확립하여 개인별 경험기술의 관리를 전산화함으로써, 조직적이고 체계적으로 기술인력을 관리한다.

② 전문분야의 교육 및 훈련기관을 체계화하고, 교육훈련 이수자에 대한 사후관리를 철저히 한다.

③ 국내 관련기관의 상호 기술인력을 공동 활용함으로써 효율적인 인력의 관리를 꾀한다.

(3) 가동중 원전의 안전성재평가제도 도입

국내의 원전은 건설 및 운영허가

단계에서 광범위한 안전성검토가 이루어지지만, 일단 운전이 시작된 이후에는 종합적인 재평가작업을 수행하고 있지 않다. 그러나 운영허가(또는 상업운전) 이후의 설비 변경 및 보완, 설비노후화, 안전성 개념 및 원칙의 변화, 안전 관련조직과 기능, 환경조건 등의 변화를 고려한 주기적인 안전성재평가의 필요성이 국내외에서 인식되고 있다. 안전성평가와 아울러, 정기점검, 자체검사, 사고고장, 설비개선 등에 관한 자료를 종합적으로 수집, 분석, 평가하고, 이 결과를 운전반영하는 것은 안전성, 경제성 및 이용률 증진에 기여할 것이다. 또한 이러한 안전성재평가제도는 '앞으로 예상되는 수명연장을 위한 의사결정시에도 많은 도움이 될 것이다.

주요 재평가항목은 발전소 안전조직의 안전관리기능, 운전경험 및 안전성검토, 품질관리, 확률론적 안전성분석, 요원훈련, 방사선방어, 향후 안전활동계획 등으로 사업자와 협의하여 결정하여야 한다. 가동중 원전의 안전성재평가에서 고려해야 할 사항을 세분해 보면 다음과 같다.

① 가동중 원전의 현장에서 진행, 조직되고 있는 안전과 관련된 일에 대한 분석과 요약

② 운전경험과 운전기간 동안 발생했던 사고들에 대한 분석과 요약

③ 상업운전 이후 발전소에서 안전성을 제고할 목적으로 수행된 일들과 중요한 기술개선사항

④ 고장수목(Fault Tree) 및 사건수목(Event Tree)방법을 이용

한 계통신뢰도 해석 및 중대사고 분석

⑤ 안전성과 관련되어 추진 또는 계획중인 프로그램에 대한 분석과 요약

이러한 재평가제도는 원자력안전성 제고와 원자력에 대한 국내외적 신뢰향상에 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 판단되나, 평가주기와 방법의 결정에 있어서는 신중을 기해야 할 필요가 있다. 즉, 재평가의 주기와 방법은 안전성향상에 실질적인 도움을 주면서도 사업자에게 과도한 추가부담을 주지 않아야 한다. 이를 위해서는 다음과 같은 방법이 규제기관, 산업체 및 학계의 공동 연구를 통해 단계적으로 수행되어야 할 것이다.

#### ① 제1단계

사업자와 규제기관이 협의하여 모델 플랜트를 설정하고 가동중 원전의 재평가에 포함될 사항을 설정하여 가동중 원전의 안전성분석을 수행하여 보고서를 작성한다.

#### ② 제2단계

전문규제기관과 관련기관의 자문 및 검토를 통하여 제1단계 보고서의 유효성 및 적합성을 평가한다.

#### ③ 제3단계

제1, 2단계의 결과를 토대로 재평가방법 및 주기를 결정하여 법제화를 추진한다.

#### (4) 데이터베이스의 구축

발전소 운전이력, 특히 고장이나 사고의 원인을 분석 평가하고, 이를 운전에 활용하는 것은 안전성향상에 큰 도움이 된다. 이를 위한 가장 기본적이고 필수적인 요소가 이전 고장사고의 원인, 결과 및 처

리에 대한 철저한 기록과 보관이다. 지금까지도 고장사고에 대한 기록은 유지되어 왔으나 기록이 피상적이고 체계화되어 있지 않은 단점이 있고 기록들이 산재되어 있어서 그 기록들을 향후 안전성향상에 이용하기가 어려운 실정이다. 따라서 산재해 있는 국내외의 고장사고 자료들을 수집하여 정확히 평가, 분류해서 데이터베이스화하는 작업이 수행되어야 한다. 이러한 데이터베이스의 구축 및 활용으로 이후의 유사한 사고에 대한 대책을 수립하여 안전성 및 이용률 향상을 꾀할 수 있다.

#### (5) 예방보수체계의 확립

현재 원전의 보수체계는 정기검사시의 주기보수(Periodic Maintenance)와 기기고장시의 사후보수(Corrective Maintenance)에 중점을 두고 시행되고 있다. 그러나 사후보수는 원전의 이용률을 저하시킬 뿐만 아니라 안전성 자체에도 큰 영향을 미칠 수 있으므로, 사전보수체계인 예견보수(Predictive Maintenance), 운전모드에 따른 유지보수(Condition Based Maintenance) 및 시험 등을 포함하는 원전보수프로그램의 효율적인 적용이 요구되며, 이는 발전소 이용률 및 가동률을 향상시키는 결과를 가져올 뿐만 아니라 안전성 및 신뢰도를 크게 증진시킬 수 있다.

일반적인 정기보수시 실시하는 예방보수를 포함한 가동중 발전소의 안전성을 증진시키기 위한 유지보수는 신뢰도에 기준을 둔 유지보수(Reliability Centered Maintenance, RCM)이어야 하며, 여기

에는 아래의 사항이 포함되어야 한다.

① 고장수목방법에 의한 계통의 성능에 미치는 중요도가 큰 부품의 분석

② 각 기기의 예방보수순서의 조정

③ 안전 및 경제성에 기준을 둔 예방보수항목 및 시험종류의 분류

④ 예방보수주기의 최적화를 위한 예견보수 및 운전모드에 따른 유지보수의 병행 실시

위와 같은 방법으로 RCM 체계를 확립하고 기기이력카드 및 운전자료에 대한 데이터베이스 구축으로 기기나 부품의 수명을 예측하고, 이를 기준으로 예방보수체계를 확립할 경우, 발전소의 안전성과 경제성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

## 신규 원전의 안전성확보 방향 및 이를 위한 노력

### 1. 신규원전의 바람직한 설계특성

앞 절에서 밝힌 바와 같이 미래에 건설될 발전소들에 대해 INS AG이 제안하고 있는 안전수준은 현재 운전중인 발전소들의 안전수준에 비해 10배 정도 개선된 것이다. 이러한 수준은 결코 지나치리 만큼 안전한 수준은 아니며, 앞으로 건설될 발전소의 수가 현재 운전중인 발전소 수의 약 2배 정도 이상으로 증가할 것이라는 점을 고려하면 오히려 평범하다고 보아야 한다.

미래의 발전소는 크게 개량형 발전소와 신형 원자로로 나눌 수 있

다. 개량형 발전소는 현재의 발전소 설계에서 크게 벗어나지 않는 개선을 통해 안전성향상을 추구하는 발전소이며, 신형 원자로는 현재의 발전소기술에 토대들 두되 획기적인 안전개념의 도입을 통해 안전성향상을 추구하는 발전소이다. 어느 것이 되었든 미래의 발전소에서 채택되는 새로운 설계개념이나 안전설비들은 「안전성목표 및 확보 원칙」에서 논의된 안전성 확보원칙들을 위배해서는 안된다. 특히 다음 두 가지 사항은 원자력발전소의 안전을 논의할 때 가장 중요하게 고려되어야 한다.

세 가지 기본적인 안전수칙, 즉 원자로출력을 조절하고, 원자로냉각을 유지하며, 방사성물질을 격납용기 내로 가두는 것은 지속되어야 한다. 설계, 건설 및 운전시의 모든 행위들은 크건 작건 위의 원칙들에 부합되는 방향으로 이루어져야 하며, 위의 원칙들이 보장된다는 것이 입증되어야 한다.

심층방어는 원자력발전소의 안전을 보장하기 위한 기본적인 수단으로서 계속되어야 한다. 이를 위해 모든 종류의 중대사고에 대응하는 방어설비가 설계시에 고려되어야 하며, 그것이 실제 발전소에 적용되어야 한다.

이와 더불어 신규 원전에 대한 안전목표를 달성하기 위해서는 다음 개념들이 고려되어야 한다.

발전소설계의 개념을 운전이나 보수유지절차까지도 포함하도록 확장시킨다. 원전의 안전성은 안전한 설계와 높은 품질의 장비만으로 확보되지는 않으며, 운전이나 유지보

수활동이 설계시 가정된 절차나 제한조건을 만족하지 못한다면 안전이 보장되지 않는다. 그러므로 설계, 제작자는 설계시에 가정된 운전 및 유지보수절차나 제한조건에 따라서 실제로 운전될 수 있도록 필요한 정보를 제공해야 한다.

설계에서는 가능한 한 복잡성을 피한다. 설계자는 발전소설비들이 되도록이면 단순하게 배치되도록, 그리고 불필요한 부품이나 계통들은 제거될 수 있도록 노력해야 한다. 그러나 이러한 노력이 부품이나 계통의 수를 최소화하는 것을 의미하는 것은 아니다. 숫자의 최소화를 위한 지나친 노력은 자칫 안전에 역행할 수도 있기 때문이다. 정상운전절차, 비상운전절차, 감시, 시험, 유지보수 등을 단순화하는 방안들이 모색되어야 한다. 가장 중요한 것은 운전원이나 보수요원이 발전소 자체와 그 운전을 보다 쉽게 이해할 수 있는 방향으로 단순화가 이루어져야 한다는 점이다. 무엇인가를 이해하고 대처하는 것과 그렇지 않은 것과는 큰 차이가 있으며, 향상된 이해는 모든 상황에서 운전원이 자신의 결정에 대해 확신을 갖도록 해주고, 따라서 깨닫지 못하는 사이에 범할 수 있는 실수를 줄일 수 있다.

발전소는 사용자에게 친숙하도록 설계한다. 발전소는 인간공학적인 고려를 통해 배치나 구조가 사용자에게 이해하기 쉽고 친숙하도록 설계되어야 하며, 그림으로써 인간실수를 줄일 수 있다. 각 부품들은 운전원의 실수를 유발하지 않도록 명확하게 정의되고, 위치해야 한

다. 서로 다른 장소에서 동시에 운전을 요구하는 식의 설계는 피해야 한다. 주제어실이나 이곳의 인공지능시스템은 운전원이 발전소의 상태를 명확하고도 완벽하게 이해할 수 있도록 정보의 흐름이나 처리과정에 따른 고장모드 및 효과분석(Failure - Modes - and - Effects Analysis, FMEA)을 수행한 후에 설계되어야 한다.

설계는 초기 운전원 조치에 대한 의존도를 계속 줄여나간다. 원자력 발전소에서 운전원 실수는 알려진 것만큼 자주 발생하지는 않지만 항상 문제가 되고 있는 것만은 사실이다. 특히 발전소의 비상상태와 같이 시간에 대한 큰 부담감을 가지고 어떤 결정을 내려야 할 때에는 실수의 가능성이 커진다. 따라서 발전소가 비정상상태에 처했을 때 즉각적으로 취해야 하는 대응조치는 모두 자동화되는 것이 바람직하다. 그리고 취해진 자동동작에 대해서는 그 내용과 이유가 인공지능시스템에 의해 운전원에게 명확히 전달되어야 한다. 자동동작은 적절한 안전평가에 의해 미리 정해진 시간 동안은 최소한 계속되어야 하지만, 운전원이 자신의 판단에 의하여 자동동작보다 우위에서 조작할 수 있는 기회는 계속 주어져야 한다.

사고시 핵분열물질의 누출방지를 보장하기 위한 계통들은 중대사고 해석에서 얻어지는 온도 및 압력에 대해 설계한다. 발생가능한 중대사고들은 현실적인 방법에 의해 분석되어야 하며, 사고가 발생했을 때 핵분열생성물의 누출을 막기 위한

계통 및 기기들은 사고시 받게 되는 극심한 온도, 압력조건에서 충분한 기능을 발휘한다는 것이 입증되어야 한다.

큰 위험도를 차지하는 사고들은 설계개선을 통해 제거하거나 그 확률 및 결과를 줄인다. 이러한 범주의 중대사고들은 일반적으로 격납기능의 우회나 조기손상을 유발하는 경우가 많다. 강조할 점은 여러 가능한 사상 중에서 돌출되게 위험한 사상을 제거함으로써, 균형잡힌 설계를 통해 방호의 최적화를 꾀해야 한다는 것이다.

발전소는 파괴나 무장공격에 대해 적절한 방어가 가능하도록 설계한다. 원자력발전소는 폭력사태에 대해 특별한 부가기능을 추가하지 않아도 잘 방어할 수 있도록 되어 있다. 방사성물질의 누출을 막기 위한 여러 단계의 장벽들이 있으며, 두껍고 튼튼한 격납용기로 둘러싸여 있기 때문이다. 이들은 발전소직원들에 의한 파업, 파괴행위, 그리고 적대적인 공격행위 등의 가능성에 대해서도 방어기능을 수행한다. 이러한 자연적인 방어사태를 적절히 개선시킨다면, 미래의 발전소에 확장된 방어설비나 수단을 고려할 필요가 없을 것이다.

PSA 결과에 있어서의 불확실도를 감소시킨다. PSA는 설계에 의해 달성된 안전수준과 설계의 취약점을 측정하는데 사용된다. PSA는 효과적인 방법이지만, 계산된 결과가 정확하지 않으면 그 유용성은 줄어든다. 따라서 중대사고의 확률을 줄이는 것과 동시에 이 확률에 대한 불확실도도 줄이기 위한

노력이 이루어져야 한다.

피동안전설비를 적극적으로 고려한다. 피동안전설비란 원자로정지, 지속적인 냉각유지, 핵분열물질의 누출억제 등을 보장하기 위한 공학적 안전설비로서, 외부의 조작이나 전원공급이 없이도 자동적으로 그 기능을 수행하는 설비들을 의미한다. 외부로부터의 전원을 요구하지 않는다는 것은 그 안전기능이 다른 계통들의 신뢰성에 의존하지 않음을 의미하며, 이것은 매우 중요한 이점이다. 안전에 대한 피동성의 이점은 향후 압도적이 될 것이며, 핵심적인 안전기능은 최종적으로 피동안전성만으로도 보장될 수 있는 방향으로 설계개선이 추진되는 것이 바람직하다. 다만 피동안전설비를 너무 과신함으로써 오히려 안전에 역효과를 줄 수도 있다는 사실을 항상 염두에 두어야 한다. 피동안전설비의 채택이 원자력발전소의 안전성향상에 미치는 영향은 검증이나 분석을 통해 입증되어야 하는 것이다.

## 2. 신규 원전 개발동향

기존의 경수로 및 중수로설계를 부분적 또는 혁신적으로 발전시켜 보다 진보된 원자력발전소를 설계하려는 노력이 전 세계적으로 기울여지고 있다. 이러한 원자로들을 명확히 분류하는 것은 어려운 일이지만, 크게 세 그룹으로 나누어 특성을 간단하게나마 살펴보고자 한다.

### (1) 개량형 경수로 및 중수로

여기에 속하는 원자로형들은 발전소가 건설중인 것도 있고, 설계

가 거의 완료되어 건설이 곧 가능한 것도 있다. 개량형 경수로 및 중수로들은 기존의 설계를 거의 그대로 유지하면서도, 앞에서 다룬 바람직한 설계특성을 반영함으로써 미래의 원전에 대한 INSAG의 안전목표 이상의 안전성을 달성하고 있다.

이러한 원자로형들은 입증된 기술에 확고한 근거를 두고 있으며, 복잡한 실증시험 등이 요구되지 않는 큰 장점을 지닌다. 그러나 이러한 개량형 설계가 달성할 수 있는 안전성향상에는 분명히 한계가 있으며, 이러한 점은 인간실수 감소, 발전소 단순화 및 방사성물질 격납기능 향상 측면에서 두드러진다.

대표적인 개량형 경수로에는 ABB-CE의 System 80+, GE 등의 ABWR, 미쓰비시와 Westinghouse의 SPWR, Framatome의 N4+ 등이 포함되며, 개량형 중수로에는 CANDU 3 등이 있다.

### (2) 피동형 수냉각로

피동형 원자로에서는 여전히 입증된 설계에 바탕을 두고 있기는 하지만, 보다 근본적인 변화를 시도한다. 미국의 EPRI(Electric Power Research Institute)에서는 피동형 수냉각로의 주요 안전특성으로 다음을 들고 있다.

- ① 완전히 피동적인 원자로정지 및 냉각계통
- ② 안전기능 수행을 위해 외부전원 불필요
- ③ 사고가 발생하더라도 주민들이 즉각적으로 대응하지 않아도 방사성물질 격납기능

피동형 원자로는 안전성을 보다 본질적으로 향상시키고, 일반인들의 원전에 대한 인식도 증진시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 아직까지도 많은 개발노력을 필요로 하고 있다.

피동형 경수로에는 Westinghouse의 AP600, GE의 SBWR, 미쓰비시의 MS-600 등이 포함된다.

### (3) 고유안전형 수냉각로

원자력발전소에서 절대적인 안전성은 불가능하더라도, 위험도를 거의 무의미한 수준으로 낮추어 실질적인 절대 안전성을 추구하는 개념들이 제시되어 연구되고 있다. 이들이 추구하는 주요 개념들은 다음과 같다.

① 가능한 잉여반응도를 극히 낮게 하여 출력급상승 가능성을 본질적으로 제거

② 붕괴열을 열전도, 자연순환, 열복사 등에만 전적으로 의존하여 제거

③ 설계특성에 의해 냉각재상실 사고의 가능성을 제거하거나 냉각재상실사고시의 냉각을 피동적 방법으로 의존

④ 이상사태시의 운전원개입의 필요성을 완전히 제거

여기에 속하는 노형들은 아직 개념설계단계를 벗어나지 못하고 있지만, 적극적인 관심과 연구개발이 필요하다.

## 핵연료주기 및 방사성폐기물 시설의 안전성

원자력발전의 안전은 원자력발전소 뿐만 아니라, 원자로에 핵연료

를 공급하기까지의 시설들과 사용후핵연료(Spent Fuel) 및 기타 방사성폐기물(Radioactive Waste)을 처리하고 저장하기 위한 시설들의 안전문제까지 종합적으로 고려하여야만 균형잡힌 안전을 달성할 수 있다. 광산에서 우라늄을 채광하는 단계부터 시작하여 사용후핵연료를 최종적으로 처리하는 과정까지를 흔히 핵연료주기(Fuel Cycle)라 부른다.

### 1. 선행핵주기(The Front End of the Fuel Cycle)

핵연료주기의 전단부는 핵분열반응을 위해 원자로에서 사용되기 전까지의 과정으로, 우라늄광석의 채광과 분쇄, 우라늄의 추출과 정제, 핵연료로 사용하기 위한 변환 및 농축 그리고 핵연료의 제조과정으로 나뉜다. 선행핵주기에서의 안전성 문제는 주로 우라늄 채광과 관련된다. 우라늄 채광시에도 보통의 광산에서 일어날 수 있는 위험이 도사리고 있으나, 화재 및 폭발이 발생할 수도 있는 석탄 채광시와 비교할 때 위험도는 훨씬 낮다. 반면에 채광 도중의 라돈 흡입이 암등을 유발시킬 가능성이 있으므로, 환기에 유의하고 있다. 우라늄광산 잔유물로부터의 라돈 방출도 문제를 유발할 수 있으므로 잘 관리되어야 한다.

우리나라의 경우 선행핵주기와 관련된 안전성 문제는 거의 없다고 보아야 할 것이다. 현재 국내에서는 핵연료의 제조만을 하고 있으며, 사용전핵연료의 경우는 방사선 준위 자체가 매우 낮으므로 핵연료

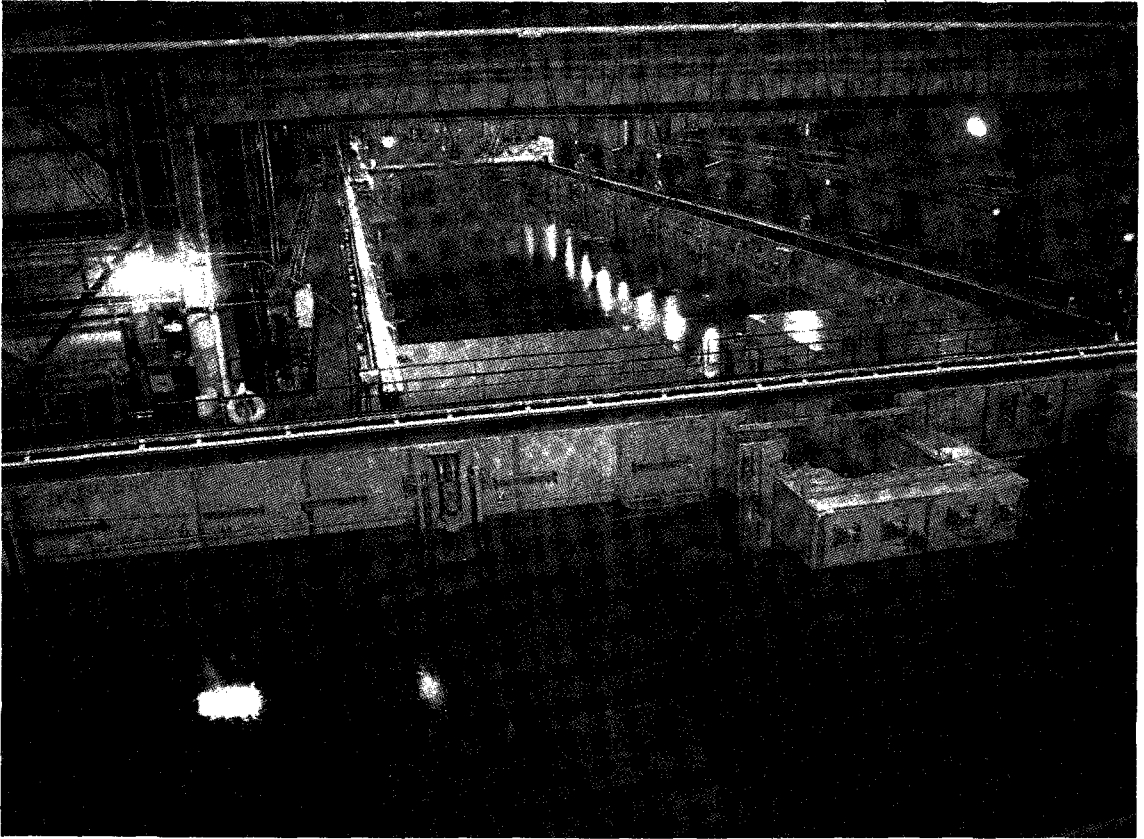
제조과정에서의 위험도는 쉽게 제거할 수 있기 때문이다.

### 2. 후행핵주기(The Back End of the Fuel Cycle)

핵연료주기의 후단부는 핵연료가 원자로 내에서 연소된 후 영구히 폐기처분될 때까지의 과정이다. 축적된 핵분열생성물로 인해 강한 방사능을 띠는 핵연료는 일단 발전소 부지 내의 저장수조에 최소한 수년간 저장된다. 일정 기간이 지나 방사능준위와 붕괴열 발생량이 충분히 줄어든 사용후핵연료는 곧장 영구처분되거나, 화학적인 재처리과정을 통해 유용한 성분을 추출하고 난 후 영구처분된다.

#### (1) 사용후핵연료의 영구처분

영구처분될 사용후핵연료는 비활성물질로 채워져 있는 용기에 저장된다. 이 용기는 부식이나 화학적 반응에 대한 저항력이 강하도록 설계, 제작된다. 밀봉된 핵연료는 오랜 기간동안 지하수가 침투되지 않을 것으로 평가되는 지역에 만들어진 깊은 인공동굴에 묻는다. 물이 침투하지 않으면 용기의 부식이 일어나지 않으며, 또한 지하수를 따라서 방사성물질이 확산되는 것이 방지된다. 사용후핵연료 영구처분 방법에 대해서는 수많은 연구가 수행되었으며, 그 결과 위와 같은 처분방식은 방사성물질이 자연감쇠에 의해 무해해질 정도의 기간까지 사용후핵연료를 안전하게 저장할 수 있다는 결론을 얻게 되었다. 이 기간은 약 10,000년 또는 그 이상으로, 지구상에 문명이 발생한 기간의 약 2배에 해당된다.



설사 많은 사람들이 아직 그 안전성에 대해 의구심을 갖는다 하더라도 과학적인 견해로는 거의 무한에 가까운 기간동안 인간과 환경을 안전하게 보호할 수 있다는 확신을 피력할 수 있다. 이러한 확신은 지하현상의 과학적인 이해에 바탕을 둔 것이며, 각종 실험을 통해 검증된 해석방법들에 기초한 것이다.

### (2) 사용후핵연료의 재처리

사용후핵연료 재처리시설은 영국, 프랑스 등 여러 나라에서 운영되고 있으며, 현재 건설중인 곳도 있다. 핵연료재처리는 유용한 핵분열물질인 플루토늄을 회수할 수 있을 뿐만 아니라 높은 방사능준위의

폐기물 양을 크게 줄이기도 하는 두 가지 측면의 이점이 있다.

재처리과정에서는 삼중수소, 탄소14, 크립톤85 및 요드129 등의 방사성핵종이 공기 중으로 방출된다. 이러한 원소들로 인한 대기 중 방사능은 자연방사능에 비해 매우 작은 것으로 평가되지만, 원자력발전이 크게 늘어나고, 이에 따라 재처리 양도 확대될 경우에는 비활성기체인 핵분열생성물(크립톤85 등)의 격리에 보다 주의를 기울여야 할 것이고, 이에 대한 연구가 진행되어 왔다.

### (3) 고준위방사성폐기물 처분

사용후핵연료를 재처리할 경우

농축된 핵분열생성물이라 할 수 있는 고준위폐기물이 나온다. 이러한 고준위폐기물은 유리화시킨 후 내부식성 용기에 밀봉하여, 사용후핵연료를 곧바로 영구처분할 때와 비슷한 방법으로 동굴 속에 저장한다. 고준위폐기물 처분기술도 기술적으로 잘 확립되어 있다.

### 3. 중저준위폐기물 저장시설

사용후핵연료나 고준위폐기물 이외에도 원자력시설에서는 다양한 종류의 중저준위폐기물이 발생한다. 이들은 고체, 액체, 기체폐기물로 구분되지만, 적절한 처리과정을 거친 다음에는 시멘트와 섞어서 드

럼통에 밀봉 저장되며, 이 드럼통은 자연 또는 인조동굴에 영구히 처분된다. 중저준위폐기물은 사용후핵연료나 고준위폐기물과 비교할 때 방사능준위는 매우 낮지만 그 양은 훨씬 많다는 특징이 있다.

일반인들의 우려와는 달리 중저준위폐기물 처분방법은 아주 잘 확립되어 있으며, 여러 나라에서 아무런 문제를 일으키지 않고 잘 운영되고 있다. 방사능준위가 낮고 반감기 또한 짧기 때문에 이를 관리하는 문제는 고준위폐기물보다 훨씬 쉽다고 할 수 있다.

#### 4. 종합적 고찰

흔히들 원자력폐기물의 처리에는 정답이 없다고들 이야기한다. 하지만 오랜 기간의 연구결과로 만족할 만한 폐기물 처리방법들이 확립되어 있다. 원자력폐기물들은 방사능을 띠고 있는 반면 그 양이 화력발전소에 비해 극히 작아서 상대적으로 작은 공간으로도 처리가 가능하다는 이점이 있다.

원자력폐기물들은 오랜 기간 저장해야 하기 때문에 저장용기의 건전성이 항상 문제가 되어 왔고, 용기의 파손에 따른 방사성물질의 누출을 일으킬 수 있는 환경오염 가능성이 폐기물시설의 안전성에 대한 신뢰를 저해하는 요인이 되어 왔다.

아프리카 오콜로 지방에 있는 우라늄광산의 경우 약 천만년 전에는 우라늄의 농축도가 자연적인 핵분열반응이 일어나기에 충분했으며, 현재의 발전소에서보다 더 많은 핵분열생성물을 방출하면서 낮은 수

준으로 상당 기간 핵분열반응이 지속되었음이 밝혀졌다. 흥미로운 사실은 그 주위에 물이 존재했음에도 불구하고 핵분열생성물이 확산되지 않고 거의 모두 주위에 그대로 남아 있다는 점이다. 이 현상의 발견은 지하수에 의한 방사성물질의 확산에 대한 두려움을 어느 정도 덜어 주었으며, 사용후핵연료 저장시설의 안전성에 대한 확신을 심어주는 역할을 하고 있다.

원자력폐기물 시설은 방사선 위험과 관련하여 우리에게 두려움을 주고 있지만, 매우 잘 확립된 방법으로 운영될 수 있다. 또한 방사선은 화학물질과 달리 누출 즉시 탐지될 수 있다는 장점도 있다. 따라서 중저준위폐기물 처분장이나 사용후핵연료의 저장시설에 대해 무조건적인 반대만을 할 것이 아니라, 그 필요성을 인정하고 가장 안전하고 바람직한 처리방법이 무엇인가에 대한 꾸준하고도 활발한 논의가 있어야 할 것이다.

#### 맺는말

지금까지 원자력발전의 안전에 대한 다각적인 논의를 했다. 역사적인 기록과 확률론적 안전성평가의 결과를 바탕으로 현재 운전 중인 발전소의 안전수준을 검토한 결과, 현재 운전중인 경수로와 중수로는 몇몇의 예외를 제외하고는 INSAG이 제안한 안전목표를 대체로 만족시키고 있는 것으로 나타났다. 그러나 현재 운전중인 발전소들은 아직 안전성을 더욱 향상시킬 수 있는 가능성을 가지고 있

며, 이러한 향상방안에 대해서도 논의가 이루어졌다. 운전중인 발전소에서는 운전원이나 보수요원의 역할, 특히 안전문화의 정착이 요구된다. 미래에 건설될 발전소의 설계방향에 대한 논의도 있었으며, 결국 모든 설계개선은 중대사고의 발생 가능성을 줄이고, 그 결과를 완화시킬 수 있는 방향으로 이루어져야 할 것이다.

에너지의 사용은 특히 개발도상국을 중심으로 계속 증가할 것이라는 것이 일반적으로 받아들여지는 견해이다. 그리고 석탄, 석유, 수력과 같은 에너지원만으로 이러한 수요증가를 감당하는 것은 불가능하다. 따라서 사회의 에너지수요를 충족시키는데 있어서 원자력을 배제해야 한다는 주장은 아무런 기술적인 근거가 없으며, 원자력의 사용은 현재로서는 최선의 선택이다. 원자력발전소의 안전성에 대한 시비에도 불구하고 원자력발전은 앞으로도 계속 발전할 것이며, 문명사회의 포기를 원치 않는한 원자력의 사용을 피할 수는 없을 것이다.

원자력계는 안전성 향상을 위한 노력을 중단하거나 게을리해서는 안된다. 일반인들 대다수가 아직 원자력발전이나 관련설비에 상당한 공포감을 가지고 있는 것이 사실이며, 또한 안전성을 보다 향상시킬 수 있는 여지가 분명히 있기 때문이다. 만약 사회가 더욱 더 안전한 원자력을 원한다면, 그렇게 해야 하고, 또 할 수 있다는 것이 필자의 판단이다.■