

# 국제 원자력 환경 변화와 안전성 향상 기술 개발

박 창 규

한국원자력연구소 선임 단장

## 원자력 환경 변화 – 기회의 시대를 대비하자

### 1. 원전의 안전성 향상으로 사고 의 악몽에서 깨어나고 있다.

안정적인 에너지 공급은 모든 국가에 있어서 가장 중요한 정책 기조의 하나이다. 1970년대 초 석유 파동을 겪으면서 원자력 발전이 안정적인 에너지 공급원으로 널리 각광을 받게 되었으나, 1979년 TMI 사고와 1987년 Chernobyl 원전 사고를 경험하면서 미국을 비롯한 선진국에서 원자력발전소의 신규 건설을 중단하는 등 원자력 산업이 침체의 길을 걸어왔다.

그러나 최근 들어 대체 에너지 개발의 부진과 화석 연료로 인한 지구 온난화 등으로 현실적인 에너지원으로서의 원자력 발전을 재인식하게 되었으며, 여기에는 그 동안 원전의 안전성 향상에 대한 부단한 노력과 경험적 신뢰가 크게 작용을 하

였다.

### 2. 원자력 이용의 확대가 예상 된다.

2000년 말 현재 세계적으로 438 기의 원전이 운전중이며 31기가 건설중으로, 총전력 생산의 16%를 담당하고 있으며, 개발 도상국의 산업 발전과 생활 수준의 향상, 전기 자동차 및 수소 에너지의 이용 등으로 2020년까지 세계의 전력 수요가 현재의 약 1.6배 정도 증가할 것이라는 예상도 신규 원전 건설의 필요성을 뒷받침하고 있다.

대표적인 예로 미국 정부가 2001년 5월에 향후 20년간 50기의 원전을 추가로 건설하겠다는 내용을 포함한 「국가 에너지 정책」이 이를 뒷받침하고 있으며, 우리 나라一样 그 동안 꾸준히 원자력을 추진해 온 우리는 수출 산업으로의 중요한 계기를 맞고 있다.

### 3. 국민의 수용성과 경제성 향상 이 관건이다.

이러한 국내외적인 환경과 원자

력 이용의 많은 긍정적인 측면에도 불구하고, 방사성 물질을 다룬다는 단점 때문에, 안전성 향상을 통한 국민의 원자력 수용성과 경제성의 향상이 뒷받침되지 않으면 원자력의 확대 이용이 원활히 추진되지 못할 것이다.

## 원자력 안전성 향상 기술의 방향 - 위험도 총량 개념

### 1. 현재 우리의 원자력 안전 수준

원자력 발전은 방사성 물질을 다룬다는 단점과 핵폭탄과 같은 부정적인 이미지 때문에 그 어느 산업보다 안전성을 중요하게 다루어 왔다.

우리는 처음에 원자력 발전의 안전성을 위해, 기기나 구조물의 안전성과 안전 계통의 성능에 대해 열심히 연구해 왔다.

그러나 운영 경험이 쌓이면서, 인간의 실수가 안전성을 위협하는 데 매우 중요한 것으로 드러났고, 다시 조직의 문제가 부각되었다. 이

제는 결국 안전 문화가 문제가 아니냐라는 데에까지 와 있다.

그러나 우리는 이러한 안전에 대한 관심이 하나 해결이 되어서 변했다가보다는 계속 새로운 문제가 추가되었던 것이다.

사실, 여전히 기기는 고장을 일으키고, 사람이나 이를 통제하는 조직은 실수를 하고 있다. 이를 줄이기 위해 300여개가 넘는 TMI 후속 조치에서 보듯이 우리는 많은 노력을 하였고, 그 결과 안전성은 많이 향상되었다.

한국 표준형 원전은 초창기 원전에 비해 안전성이 10배 이상이며, APR 1400은 50배 이상이다.

우리 나라의 원전은 불시 정지 횟수는 약 0.8회/reactor-year<sup>1)</sup>이고, 가동률은 90%를 육박하는 세계 최고 수준이며, 미국의 TMI, 일본의 몬주 및 미하마 원전, 러시아의 체르노빌 등 굵직한 사고가 우리나라에서는 다행스럽게도 일어나지 않았다.

## 2. 위험 사회에서의 원자력 위험 도 총량 개념

그렇다고 우리의 원전은 절대로 안전하다는 것이냐. 그렇게 단정하기는 사실 어렵다. 그것은 자동차가 충돌 시험에 합격하고 별 다섯 개를 받았다고 해서 안전하다고 말할 수 없는 것과 같다.

우리는 위험 속에 살고 있다. 성수대교 붕괴, 삼풍백화점, 자동차 사고, KAL기 추락, 씨랜드 화재 등의 대형 사고가 아니라도 매일매일 우리는 위험에 노출되어 있다.

위험사회론(Risk Society)에서는 이 같은 각종 사고와 사건은 우발적인 것이 아니라 일정 확률을 가지고 상시적으로 발생하는 일상성의 한 부분이라고 지적하고 있다.

원자력 사고도 이러한 위험의 한 요소이고, 국민이 받는 위험 총량의 한 부분을 차지하고 있다는 것을 우리는 인정해야 한다. 따라서 우리는 원자력으로 인한 위험의 총량이 어느 정도 이상을 넘지 않아야 한다는 안전에 관한 철학을 정립하여야 할 것이다.

### 3. 우리의 두 가지 큰 숙제

이러한 위험도 총량 개념은 수명 연장 및 원자력의 이용 확대와, 경제성 향상의 논리적 근거를 제공함과 동시에, 국민의 원자력 안전성에 대한 확신을 제공할 수 있을 것이다. 이를 위해서는 우리는 현재 가동중인 원전의 안전성을 향상시키는 일과, Zero 위험도 수준의 미래형 원전을 개발하여야 한다.

문제는 원자력에 의한 위험을 국민이 어느 정도 인정할 것인가 하는 것이다. 현재의 기술과 원자로의 개념으로 원자력으로 인한 위험을 타

산업체에 의한 위험의 1000분의 1 수준 이하로 끌어 내렸다(예를 들면, 항공기·자동차·댐 등과 같은 산업보다 1000배 이상 안전하다는 것이다).

이러한 수치로 볼 때 지금의 원자력이 현대와 같은 산업 사회에서 국민이 수용할 수 있을 정도의 충분한 안전성은 가지고 있다고 판단된다.

그러나 국민은 원전의 필요성은 인정하지만(여론 주도 인사들은 73.4% 공감), 거주지 내의 원전 건설은 20.4% 정도의 지지로 낮은 상황이다.<sup>2)</sup> 이 이야기는 어떻게 하든 조그마한 위험도 허용하지 않겠다는 것이며, 원전에서 안전에 상관이 있든지 없든지 간에 고장이 났다는 얘기는 듣고 싶지 않은 것이다.

원전도 자동차와 같이 필요에 의해 인간이 만든 기계여서 고장도 날 수 있기 때문에 안전에는 해가 없도록 한다고 국민에게 이해를 시키는 노력도 해야겠지만, 여러 가지 안전성 관련 혼란들을 해결함으로써 국민이 원하는 Zero Risk에 조금이라도 가까이 가야 하는 것이다.

두 번째 숙제는, 지금과 같이 핵연료가 녹아서 방사선의 피폭이 염려될 수 있는 그러한 사고가 근본적으로 일어날 수 없거나 거의 확률이 없는 전혀 새로운 개념의 제4세대 원전을 개발하자고 하는 것이다.

1) reactor-year : 원전 한 기가 일 년을 운전하는 것을 뜻함.

2) 한국원자력문화재단 미디어 홍보실

이것은 비록 2030년경에나 가시화가 되는 미래의 일이지만, 우리가 안고 있는 문제를 일거에 해결하자는 것이며, 후손을 위해 이를 위한 착실한 준비를 해야 한다.

#### 4. 첫 번째 숙제 - 기동 원전의 4 단계 안전 전략과 안전 현안

안전성 확보는 전부하지만 여전히 안전에 관한 우리의 가장 고전적인 개념인 심층 방어 (Defense-in-depth)가 그 기조를 이루고 있다.

첫째, 고장이나 비정상적인 상황이 없어야 하겠다.

둘째, 그러한 고장이 노심 손상과 같은 사고로 발전하지 않아야 하겠다.

셋째, 핵연료가 녹아도 격납 건물만은 안전해야겠다.

넷째, 방사성 물질이 외부로 유출되어도 일반 국민과 환경의 피해는 최소화해야겠다.

우리는 이 4단계의 안전 전략을 충분히 실현시킬 수 있다면 안전성이 확보된다고 말할 수 있다. 이 개념은 다시 사고의 빈도를 줄이거나, 사고의 확산을 막는 두 가지 축으로 구성된다.

그러면, 이러한 개념에서 우리가 안고 있는 안전 현안들이 무엇이며 이를 해결하기 위해 우리는 어떠한 노력을 해야 하는지 생각해 보자.

##### 가. 불시 정지

우리나라는 1999년까지 124

calendar year(102 reactor year)의 운전 이력을 보이고 있다. 이 기간 동안 119회의 정기 계획 정지와 392회의 불시 정지가 일어났다. 2000년에는 14회의 정지가 있었으며, 2001년 현재 11건의 정지 이력을 가지고 있다.

우리 나라의 불시 정지는 평균하여 호기당 일 년에 한 번도 안 되는 꼴이고 외국에 비해서도 낮은 수치이다. 그러나 불시 정지가 잣다는 것은 그 만큼 사고의 범위를 제공할 수 있다는 점에서 안전성에 좋지 않으며, 국민의 원자력 수용성 측면에서도 매우 나쁜 영향을 미치고 있다. 따라서 원자력진흥종합계획에서는 불시 정지를 0.5회까지 줄인다고 되어 있다.

또한, 하루의 불시 정지는 10억 원 정도의 경제적인 손실이 있는 만큼, 우리는 불시 정지가 되었다가 다시 기동한 것으로 만족하면 안 될 것이며, 원인을 철저히 분석하고 이를 줄이기 위한 노력이 더욱 필요하다.

불시 정지는 철저한 원인 분석과 경험 전파로 많은 부분이 개선될 수 있다. 특히 30% 정도를 차지하는 인간의 실수는 사례 전파와 교육, 절차서 개선 등으로 해결할 수 있으며, 원인 불명으로 분류되어 있는 17%도 전문가를 동원하면 많은 부분이 밝혀질 것이다.

##### 나. 외부 사건

외부 요인에 의한 사고는 동일 부지의 모든 발전소에 영향을 주고 대체로 사고 복구에도 많은 시간이 걸린다. 외부 요인은 지진·화재·산불·홍수·호우·산사태·태풍·해양 생물·폭설 등이 되겠다.

외부 요인에 의한 사고는 유형에 따라 발전소의 정전 사고로 이어질 수 있는데, 이는 안전에 중대한 영향을 미칠 수 있는 것으로, 이에 대처하기 위해 비상 발전기 등을 준비해 놓고 있지만, 부지 근처에 있는 산불·집중 호우로 인한 침수 등에 대비한 안전성 분석 및 대비책 또한 미리 준비해 놓아야 할 것이다.

미국은 원전의 화재가 10년에 3.6회 정도 일어났고, 우리나라는 발전소 정지와 건설중에 미미한 화재가 두 건이 있었을 뿐이다. 외국의 사례로 볼 때, 화재로 인한 대형 사고는 발전기의 수소 누설과 터빈 고장인데, 우리나라는 이러한 예가 대형 사고로 이어지지는 않았지만 항상 관심을 기울여야 할 것이다.

1989년 스페인의 Vandelllos-1호기는 터빈 날개가 파손되어 대형 화재로 이어져 발전소를 폐쇄하였으며, 미국의 Salem-2호기는 역시 터빈 날개가 Casing을 관통하여 수소와 윤활유에서 화재가 발생하여 6개월 간의 복구가 소요되었다. 비록 방사선 누출과는 관련이 없는 사고였지만 막대한 경제적 손

실과 국민의 수용성에 영향을 준 사고이다.

또한, 올해 들어 새우와 해파리에 의해 울진 원전이 세 번이나 정지하였다. 지금까지 이러한 해양 생물로 인한 정지는 12건, 출력 감발은 27건이나 된다.

이 자료를 분석해 보면, 새우는 2월에서 5월 사이에 새벽 3시에 집중적으로 몰려오고, 해파리는 8~9월에 집중되고, 가시고기는 2~3월의 산란철에 출몰하고 있다.

이와 같은 해양 생물에 의한 피해는 외국에서도 간혹 있으나, 우리나라처럼 거의 매년 불시 정지를 일으킬 정도로 심각한 경우는 없다. 우리는 해양 생물의 생태 분석부터 취수구의 시설 보강 등 다각적인 노력을 기울이고 있지만 현재까지 특별한 효과를 보고 있지는 않다. 이 문제는 우리 나라 고유의 사건으로, 우리의 힘으로 해결하지 않으면 안 될 것이다.

월성 단층에 대한 논란은 지금 연구가 진행되고 있으니만큼 결과를 봄아 하겠지만, 기기의 내진 평가 및 보강 기술에 대한 연구가 미리 이루어져야 할 것이다. 또한 이번 기회에 우리가 따르고 있는 미국식의 활성 단층에 대한 정의도 재검토를 해 보아야 한다.

일본은 진도 8.5 정도의 강진 지역에도 원전을 운영하고 있으며, 이는 활성 단층이라 해서 건설이 불가

한 것이 아니라 그에 견디는 내진성을 가지면 되는 것이고 이는 경제성의 문제인 것이다.

다. 위험도 정보 이용 규제 및 응용 앞에서 우리는 위험 사회에 살며, 일정 부분의 위험을 항상 가지고 산다고 하였다. 위험도의 개념이 없으면, 지금 우리가 하고 있는 일이 얼마나 위험한지를 잘 알 수가 없다. 자동차의 브레이크를 제때에 갈지 않아도 작동은 한다. 그러나 위험도는 높은 것이며, 이렇게 높은 위험도는 피해야 하는 것이다.

위험도 정보 규제는 원전의 규제를 이러한 위험도의 척도를 가지고 규제하겠다는 것이며, 이를 위해서는 얼마나 위험한지를 정확히 계산할 수 있어야 하고, 계산의 불확실성을 줄이는 일이 매우 시급한 일이다.

우리는 외국에서 수행하는 정도의 기술은 보유하고 있으나, 아직 우리 나라 운전 경험을 반영한 신뢰도 데이터 베이스조차 제대로 가지고 있지 못하며, 방법론에서도 정지/저출력 운전, 디지털 기기의 신뢰도, 인간 신뢰도, 공통 원인 고장 등 많은 분야에서 기술의 고도화가 필요한 부분이 많다.

위험도 정보를 이용하면 과보수성이 있는 부분과 취약한 부분을 파악할 수 있고, 이를 활용하면 안전성과 경제성을 동시에 향상시킬 수 있는 것이며, 규제의 효율성 및 효

과성을 제고하는 데도 크게 기여할 것이다.

#### 라. 경제성 향상을 위한 노력

경제성 향상 노력의 대표적인 분야는 수명 연장, Power Uprating, 장주기 운전, 계획 정지 기간의 단축, 시험/검사 횟수 등의 최적화 등이다. 이러한 경제성의 향상 노력은 안전성의 확인이라는 선결 조건이 있다.

미국 PECO사의 Limerick 원전은 최근에 17일만에 계획 정비를 끝낸 기록을 가지고 있고, Vogle과 같은 원전은 대개 20일 정도에 계획 정비를 끝내지만, 우리 나라는 40~60일 정도가 걸린다. 대부분 공정과 조직 운영이 큰 영향을 미치지만, 이때에도 안전성의 확보는 늘 고려되어야 할 것이다.

수명 연장은 이미 미국에서 활발히 행해지고 있으며, 우리 나라도 이를 못할 이유가 없다고 생각된다. 단지 원자로, 일차 계통의 압력 경계, 격납 건물 등 원전의 폐쇄까지 보수하기 힘든 부분에 대한 수명 예측과 관리 기술이 필요하며, 운영 이력이 많은 원전에 대해 지속적으로 안전성을 유지하기 위한 규제 체계가 정비가 되어야 할 것이다.

수명 연장을 미국처럼 10년 단위로 할 것인지, 매년 정기 검사로 인허가를 할 것인지, 발전 회사의 수명 관리 프로그램에 대폭 맡길 전지 등에 대한 정책이 필요할 것이다.

장주기 운전은 핵연료의 안전성, 계측 제어 기기의 신뢰성, 가동증보수로 인한 위험도 평가 등이 선결되어야 하며, Power Uprating은 최적 운전 여유도를 계산할 수 있는 능력을 보유하여야 할 것이다.

#### 마. 인적 요인 및 안전 문화

원전도 결국 사람이 운전하는 것 이므로 인간에 의한 실수가 항상 내재해 있다. 외국의 경우도 인적 오류에 의한 사건이 거의 50%를 차지하고 있다. 그러나 가장 분석하기 힘들고 해결하기도 힘든 부분이기도 하다.

우리는 이를 위해 과학적이고 체계적인 분석 방법을 개발해야 하고, 경험의 전파 및 교육의 효율화를 실현하여야 한다.

조직과 문화가 다른 상태에서 인간도 다양한 행위를 보이기 때문에 방법론은 외국의 연구 결과를 참조할 수 있겠지만, 우리 나라의 문화와 조직, 인간성에 맞는 데이터 역시 매우 중요하다. 이 분야는 공학 일변도의 원자력 기술에 인문 사회적인 기법이 상당히 요구되는 분야이기도 하다.

#### 바. 노심 손상 방지 및 중대 사고의 완화

원전에서 가장 큰 안전 개념은 일단 핵연료가 녹는 것을 막는 것이다. 핵연료가 녹는 사고를 분석하기 위해, 안전성 평가에서는 17개 정도의 사고를 분석하고 있으며 이 중

냉각재 상실 사고, 급수 상실 사고, 발전소 정전이 총위험도의 각각 15% 정도를 차지하고 있다.

이러한 사고에 대한 해석은 이미 많은 부분이 선결되어서 원전을 건설하고 운영까지 하고 있지만, 아직도 현실적인 해석 코드의 개발, 실증 실험을 통한 검증 등은 지속적으로 연구되어야 할 부분이며, 중대 사고 관리도 사고의 피해를 줄이는 관점에서 절차서·조직·계측 제어 기기·훈련 등에 대한 대책이 철저히 마련되어야 할 것이다.

#### 사. 증기발생기 문제

고리 1호기는 증기발생기 문제로 3번 정지한 이력이 있고, 따라서 증기발생기를 교체하였다. 영광 2호 기에서도 1996년 누설로 인한 정지를 한 적이 있고, 현재 이러한 문제로 관막음(Plugging)한 튜브가 1,050개, 관재생한 튜브는 2,957개에 이른다. 이는 0.48%로 허용률 5~10%에는 아직 이르지 않았다.

그러나 증기발생기의 튜브는 일차측 냉각수가 이차측과 접한 부분으로 튜브가 깨질 때에는 이차측 오염이라는 문제가 생길 수 있으므로 재료 및 열수력학적인 측면의 개선이 필요하다.

미국의 Indian Point 2는 작년에 증기발생기에서 냉각수가 유출된 사고가 있었고, 비록 환경의 영향은 거의 없었지만, 6개월간 국민

의 질타를 받은 적이 있다.

이는 안전성에 문제가 없다 하더라도 국민은 이를 얼마나 심각히 바라보는지를 우리는 생각해야 할 것이다.

#### 야. CANDU 문제

우리나라는 4기의 중수로 원전이 월성에서 운전되고 있는데, 우리는 지금까지 캐나다에 많은 부분을 기술적으로 의지하고 있었다. 그러나 중수로는 캐나다 외에는 세계적으로 많이 운전되고 있지 않은 노형이어서 상대적으로 투자가 적은 부분이다. 따라서 우리는 안전에 관한 독자적인 해결 능력을 가지고 있어야 할 것이며, 또한 중수로의 특성을 고려한 규제 체계가 시급히 정비되어야 할 것이다.

### 5. 두 번째 숙제 - 미래의 획기적인 원자로 개발

앞에서 우리는 크고 작은 산적한 문제들을 짚어 보았다. 어떤 것은 매우 쉽게 해결되지만, 어떤 것은 아마 앞으로도 영원히 해결하기 힘든 부분도 있고, 이는 우리가 부담하고 가야 되는 부분이다.

이 모든 문제는 핵연료가 녹을 수 있다는 가능성 때문이며, TMI에서처럼 실제로 녹은 뼈아픈 경험이 있다. 이것을 일거에 해결하는 방법은 녹지 않는 핵연료를 개발하거나, 녹을 수 없는 시스템을 개발하는 것이다. 이러한 노력이 지금 9개국이 참여하여 제4세대 원전의 국제 공동

개발로 이어지고 있으며, 이에 대한 우리의 노력이 가시화되어야 할 것이다.

### 결 어

#### 1. 미래는 밝다.

결론적으로 국제 원자력 환경은 새로운 전기를 맞이하고 있다. 안정적이며, 환경 친화적이고 안전한 에너지 공급원으로서 원자력의 역할이 최근 재인식되고 있으며, 이를 바탕으로 신규 원전 건설에 대한 가능성이 새롭게 열리고 있다.

한편으로는 원자력 산업체의 재편과 경쟁력 제고, 신형 원자로 개발에 대한 노력이 활발히 진행되고 있으며, 의학·생명공학·환경 분야에 방사선 및 방사성 동위원소의 이용이 세계적으로 확대되고 있다.

우리나라는 외환 위기 때는 원자력 발전이 효자 노릇을 톡톡히 하였으며, 이제는 가동중인 원전이 16기에 이르는 원자력 대국으로 발전하였고, 기술 자립을 통한 수출 산업화 가능성이 매우 높은 분야이기도 하다.

#### 2. 숙제를 잘하기 위한 세 가지 제언

그러나 원자력에 대한 이러한 긍정적인 새로운 시각에 부응하기 위해서는 우리가 안고 있는 크고 작은 안전 관련 문제를 지속적으로 해결하여야 한다.

첫째, 그동안 정부의 연구 개발 사업의 지속적인 추진으로, 이제 우리는 겨우 열수력·PSA·재료·구조·안전 해석 등 안전과 관련한 각 기술 분야에서 연구 기반의 Critical Mass와 전문가를 어느 정도 양성해 놓은 상태이다.

그러나 우리는 여전히 이러한 전문가 집단이 선진국에 비해 취약하며, 세계적인 전문가 집단으로 자랄 수 있도록 적극 양성하고 유지하여야 우리의 독자적인 기술로 안전 문제를 해결할 수 있는 기반을 구축할 수 있다.

이를 위해 원자력 연구 개발 사업을 전문가 집단을 중심으로 지속적으로 추진하여야 할 것이다.

둘째, 국가적인 관점에서 기관을 넘어 원자력 연구 개발의 결과를 적극적으로 활용해야 할 것이다.

이를 위해서 연구 개발 결과의 사후 활용까지를 고려하여 기획을 하여야 하며, 연구자는 항상 사용자를 생각하고, 사용자도 우리의 연구 결과를 적극적으로 활용하려는 자세가 필요하다.

셋째, 안전 현안의 해결을 위해서는 정보의 공개가 필수적이다. “병은 널리 알려라”라는 격언과 같이 크고 작은 문제들을 널리 알려야 많은 전문가들이 알게 되고, 해결 방안도 효율적으로 찾을 수 있다.

이를 위해 각종 현안을 상시적으로 공개하고 사안에 따라 Safety

Issue로 정하고, 해결 방안을 체계적으로 모색하는 시스템이 구축되어야 한다.

#### 3. 같이 사는 사회

우리는 그동안 아무리 작은 사건도 원자력에 관한 한 매우 크게 보도되어 왔고, 안전하다고 아무리 설득하여도 잘 믿어 주지 않는 답답한 현실을 지켜 보아왔다.

우리는 그것을 다른 사람이 원자력을 이해하지 못한다고 하였고, 그래서 이해시키기 위해 노력해 왔다. 또는 안전하지 않아서가 아니라 이슈화가 되는 것이 두려워서 덮어 버린 적도 있을 것이다.

원자력 안전에 대한 부정적인 시각은 이러한 폐쇄성과 소극성에 있다고 할 것이다.

원자력이 현실적인 대안이고 미래를 위해 필요하다면, 친원자력과 반원자력은 대립이 아니라 상호 보완적인 관계로 정립되어야 하며, 사업자와 규제자도 안전을 위해서는 같이 힘을 합하여야 하고, 연구자는 이를 위한 기반의 구축에 힘을 다하여야 할 것이다.

이제 우리는 원자력의 안전에 대해 상당한 자신감을 가지게 되었다. NGO나 환경 단체와 같은 외부의 시각을 의식하기보다는, 모든 것을 투명하게 공개하여 같이 고민하고 같이 해결하는 원자력 사회의 분위기를 만들어야 할 것이다. ☺