



원전 안전성과 과학기술적 이슈¹⁾

정법진

경희대학교 원자력공학과 교수



· 서울대 원자핵공학과 학사, 석사, 박사

- 과학기술부 원자력사무관
- 영국 맨체스터대 연구원
- 제주대 에너지공학과 교수
- 한국연구재단 원자력단장
- 국무총리실 원자력이용개발전문위원회 위원
- 산업통상자원부 전력수급기본계획 수립위원회 위원

· 경희대 원자력공학과 교수(13~)

서론

원전의 안전성에 대한 논란은 1954년 세계 최초로 원전이 건설된 이래 지금까지 지속되어 왔으며(Ramana, 2009) 이러한 논란은 시간이 경과하면서 수렴되기보다는 더욱 확산되고 있다. 원전 안전성에 대한 구체적 관심은 일반 대중보다는 주로 원전산업 관계자와 규제자 그리고 연구자의 영역에 있었으나 최근에는 일반 대중의 관심도 증가하고 있다. 특히 2011년 후쿠시마 원전 사고 이후 원전 안전성에 대한 대중적 우려는 독일, 이탈리아 등 일부 국가의 탈원전 정책으로 이어지고 있어서 지식이 없는 막연한 불안감에 대한 해소를 위한 전문가 사회의 노력이 요구된다.

원전의 안전성은 과학기술이 발전하고 원전 운전 경험이 축적되면서 함께 진보하여 왔으나 대중들이 감각적으로 느끼는 안전성에는 진보가 없었고 오히려 세계적인 원전 사고를 경험하면서 인식이 악화되고 있다.

이러한 인식의 차이에 대하여 원자력 전문가 집단이 대중과의 소통에 소홀했다는 평가가 내려지고 있으나 실은 원전의 안전성과 관련한 가짜뉴스와 악성 루머의 양산으로 이득을 보는 집단의 적극적 활동으로 인하여 대중적 우려를 증폭시킨 측면이 더욱 강하다고 본다.

최근에는 원자력에 대한 전문지식이 없는 환경운동가, 과학기술적 소양

1) 이 글은 원자력을 전공하지 않은 일반인에게 원전의 안전성을 확보하기 위한 노력이 어떻게 진화하여 왔는지 또 원자력시설의 안전성을 확보하기 위한 과학기술적, 사회적 방법론을 소개하기 위하여 작성된 것으로, '세계 원전시장 인사이트(에너지경제연구원 발간)'에 게재되었던 것을 보완하였음.



방사선 발견의 초기에는 방사선에 대한 이해가 부족했기 때문에 위험도 인지하지 못하였고 안전에 대한 관심도 없었기 때문에 피해가 발생했지만 이는 주로 소수의 연구자들에 국한되었다. 방사선을 최초로 발견한 뢰트겐은 위험 의식 없이 아내의 손을 수 차례 촬영하기도 하였으며, 노벨상 수상자였던 퀴리부인은 연구의 대부분을 헛간에서 안전 장구 없이 수행하였다.

만 가진 타분야 전문가, 종교계 인사, 그리고 유명인이 전면에서 나서서 일반인과 별반 차이가 없는 그들의 안전 인식을 전파하는 것이 대중에게 쉽게 수용되는 게 큰 문제로 부각되고 있다.

원전의 안전성은 약 50년 전 원전이 세계 최초로 건설될 당시에 비하여 비약적으로 발전하였으나 대중의 인식은 악화되고 있으므로 대중의 눈높이에 맞는 언어로 원전의 안전성을 설명할 필요가 있다.

원자력 안전성의 역사

1. 방사선 발견의 초기

방사선 발견의 초기에는 방사선에 대한 이해가 부족했기 때문에 위험도 인지하지 못하였다. 이에 따라서 안전에 대한 관심도 없었기 때문에 피해가 발생했지만 이는 주로 소수의 연구자들에 국한되었다.

뢴트겐(Roentgen)은 1895년 방사선을 최초로 발

견하고 ‘미지의 광선(X-ray)’이라 명명하였으며 위험 의식 없이 아내의 손을 수 차례 촬영하기도 하였다. 노벨상 수상자였던 퀴리부인 역시 재생불량성 빈혈(Aplastic anemia)로 67세에 사망하였으며 이는 생애 동안에 과도하게 방사선에 노출된 것을 원인으로 보고 있다. (Carl 2004) 퀴리부인의 연구는 대부분 헛간에서 안전 장구 없이 수행되었고, 심지어 방사성동위원소가 담긴 시험관을 주머니에 넣고 다니거나 책상 서랍에 보관하였다고 한다.

2. 원자력의 태동기

제2차 세계대전 중 전시 연구(Wartime research)를 통해 확인된 핵분열 현상을 이용하여 새로운 기기와 장치가 출현하면서 이에 맞는 새로운 안전장치와 개념이 도입되었다.

원자로에서 제어된 연쇄 반응을 구현할 때, 핵폭탄과 같이 급격하게 에너지를 방출시키는, 출력 급발전



(Fast power excursion)이 발생하지 않도록 하고 방사성을 띤 핵분열 생성물에 대해 방호가 필요하다는 인식이 시작되었다.

- 엔리코 페르미(Enrico Fermi)가 최초의 임계시설인 Chicago Pile(1942)을 설계할 때, 중심에 중성자를 잘 흡수하는 물질을 포함한 막대기를 꽂을 수 있도록 함으로써 비록 200 와트에 불과했지만 원자로 출력이 급격히 상승할 경우 핵분열 연쇄 반응을 정지시킬 수 있도록 하였다. 이것이 현대적 원자로 정지 계통(Reactor Scram System)의 시작이었다.
- 1945년 군사용 Handford 원자로를 건설할 때, 인구 밀집 지역으로부터 격리된 원격지에 건설(Remote siting)하는 개념이 도입되었다.
- 1945년 미국 원자력위원회(US AEC: Atomic Energy Commission)가 설치되어 원자력 안전규제를 시작함으로써 국가 행정이 개입하여 안전을 확인하는 별도 절차가 마련되었다.
- 1947년에는 격납용기 개념이 도입되고 1955년 Hyman G Rickover 대령이 핵잠수함용 원자로를 개발하면서 핵연료를 피복관 내에 가두는 개념이 추가되었다. (Zirconium alloys for cladding).
- 이러한 안전 개념을 토대로 1957년 펜실베이니아에서 최초 전력 생산 원자로인 Shippingport (60 MWe급) 원전이 건설되었다.

3. 성장기

원자력 기술이 미국 이외의 지역으로 확산되고, 원전 건설, 원자력 관련 연구 시설, 재처리 시설 등이 건설되면서 각종 사고가 발생하였다. 이들 사고를

현재의 국제 원자력 사고척도(INES: International Nuclear Event Scale) (IAEA 2009)로 보면 대부분 방사성물질의 외부방출이 없는 0등급의 사고지만 일부 사고는 최고 7등급 가운데 6등급에 이른다. 다만 이 시기에 건설된 원자력시설의 용량이 작았던 것이 사고의 여파가 확산되지 않았던 이유로 판단된다.

이 시기에 원전의 용량 증대 등 기술적 진보도 있었지만 발생했던 각종 사고에 대한 분석을 통하여 안전 개념도 혁신적으로 발전하였다.

- 1957년 구소련 Mayak, Kyshtym 핵연료 재처리 공장에서 국제 원자력 사고척도(INES) 6등급의 대형 방사선 오염 사고가 발생하였다.
- 같은 해 미국 캘리포니아의 Simi Valley에서는 Santa Susana Field Laboratory의 나트륨냉각 원자로 실험에서 노심의 일부가 용융되었다.
- 영국에서는 Cumberland의 핵무기 설비인 Windscale에서 화재가 발생하여 노심이 손상되고 740 TBq(Terabecquerel)의 방사성 요오드(I-131)가 환경으로 누설되는 사고가 발생하였다.
- 1961년 미국 Idaho주의 National Reactor Testing Station인 SL-1이 폭발하면서 3명의 운전자가 사망하였다.
- 1966년 미국 Michigan주의 Enrico Fermi 원전이 노심이 일부 용융되었다. 환경으로의 방사성 물질 누설은 없었으나 132 백만 달러의 손실을 가져왔다.
- 1969년 스위스 Lucens 원전에서 냉각재 상실 사고(LOCA)가 발생하여 노심 일부가 용융되고 대규모 방사성 물질이 누설되었다.
- 1975년 러시아 Leningrad 원전 1호기의 노심이 일부 용융되었고, 동독 Greifswald에서는 전력

문제로 화재가 발생하여 5개의 주급수 펌프가 손상되었다.

- 1976년 체코슬로바키아에서는 핵연료 교체 중 기능 고장이 발생하여 핵연료가 원자로에서 원자로 홀로 배출되었고, 이듬해에는 심각한 부식이 발생하여 방사성물질이 원전 부지로 방출되었다.
- 1979년 미국 Pennsylvania의 Three Mile Island 2호기에서 냉각재 상실 사고가 발생하여 노심이 용융되면서 24억 달러에 달하는 재산상의 손실을 가져왔다.

이 시기에 각종 사고가 발생하였으나 원자력시설의 용량이 작았고 원자력 태동기 때 축적된 기본적인 안전 개념을 충족시키면서 설계되었기 때문에 환경과 인명 및 재산상의 손실은 미미하였다.

4. 장년기

이 시기에 원전의 용량이 확대되었고 보급 또한 국제적으로 증가하였다. TMI-2(1979), Chernobyl(1986), Fukushima(2011) 원전 사고와 같은 대형 원전 사고가 발생하면서 대중적 인식이 나빠진 시기이기도 하다.

1979년 TMI-2 원전 사고는 원자력 안전 부문에 있어서 이정표가 된 사고였다. 설계기준 사고(DBA: Design Basis Accident)를 초과한 사고가 발생했기 때문이다. 그 결과 사고가 발생했던 미국뿐만 아니라 원전을 도입한 대부분의 국가가 중대사고(Severe Accident)에 대한 연구와 대응 방안을 모색하게 되었다.

또한 동 사고가 미국 원자력규제위원회가 발간한 WASH-1400이라는 원자력 안전 연구 보고서(US

NRC 1975)에서 예측되었던 시나리오로 진행되었던 바, 항공 우주 분야에 도입되어 안전성 향상을 도모했던 확률론적 안전성 평가(PSA: Probabilistic Safety Analysis)가 원전 부문에도 도입되는 계기가 되었다.

한편 이 시기에는 원전 선진국의 전력 수요가 포화되고 에너지 다소비 산업을 제3국으로 이전함에 따라 선진국 내 신규 원전 건설이 둔화되었다. 이에 따라서 새로운 원자로형 개발 등의 연구 대신 기존 운영 중인 원전의 안전성과 효율을 향상시키고 수명을 연장하는 연구가 주로 수행됨으로써 원전의 안전 연구가 집중적으로 수행되었다.

원자력 안전규제가 강화되면서 강화된 요건을 충족시키기 위한 안전 연구가 수행되었고, 한 번 발생한 사고는 다시 발생하지 않도록 한다는 Lesson learned에 따라 사고 사례를 각국으로 전파하고 사고를 방지하고 사고의 결과를 완화하기 위한 국제 공동 연구도 수행되어 안전성의 획기적 향상이 이루어졌다.

이 시기에 원자력 관련 연구자들은 원전에서 발생할 수 있는 사고 시나리오를 찾아내면 연구비를 확보할 수 있었기 때문에 원전의 시스템적 오류를 찾기 위한 적극적이고 대대적인 연구자의 활동이 전개된 시기이다.

이와 같이 원전에서 발생할 수 있는 사고의 가능성이 발견되면 이를 확화와 규제기관을 통하여 홍보하고 이러한 홍보 활동이 연구비 비즈니스로 연계됨에 따라 원전의 불안 요소를 찾기 위한 노력이 경주되었고 이같은 활동이 원전의 안전성 향상에 기여하기도 하였다. 이와 같은 활동은 현재에도 진행중이다.

과학기술과 원전 안전성

원전의 안전성에 대하여 과학기술자와 일반 대중의



인식 차이는 과학적 접근 방법의 차이이다. 즉 과학기술자는 과학적 계산을 통하여 안전성을 확인하는 반면 일반 대중은 일상생활에서의 경험을 통해 안전성에 접근한다.

한편 원자력 안전에 관해서는 일상생활에서 경험하기 어렵기 때문에 감(感)을 형성하지 못한다. 따라서 직관적 판단에 의존하는 접근 방식은 계산에 의한 과학적 접근 방식과 매우 큰 인식의 차이를 가져온다.

과학기술력이 일천하던 시기에 개발된 원전이 각종 사고를 경험하면서도 인간과 환경에 극심한 피해를 주지 않은 것은 우연이 아니라 과학적 방법론에 의해 설계·건설·운영된 것이기 때문이었다.

TMI-2 사고와 후쿠시마 원전 사고의 사망자는 없으며 체르노빌 원전 사고에서만 43명의 사망자가 발생한 것은 전 세계 원전의 규모와 역사 그리고 핵태과 비교할 때 막대한 피해로 보기는 어렵다. (UNSCEAR 2008) 본 장에서는 안전성을 접근하는 과학적 방법론에 대해 기술하고자 한다.

■ 절차와 규제(Procedure & Regulation)

예컨대 호랑이는 위험한 동물이다. 그러나 동물원의 안전성은 호랑이에 의해서도 결정이 되지만 호랑이를 가두는 철창의 두께와 방벽의 개수에 의해서 결정된다. 이와 같이 위험성은 그 자체로 판단하는 것이 아니라 위험물을 관리하는 규제와 절차에 의해서 관리될 수 있다는 것이 과학기술적 접근법이다. 따라서 위험에 대한 합리적 접근방식은 위험한 것도 규제와 절차를 강화함으로써 관리가 가능하다고 보는 것이다.

■ 보수성과 안전여유도

(Conservatism and Safety Margin)

최첨단 과학기술로도 정확히 예측하기 어려운 복잡한

현상이 있다면 최대치를 계산하여 최대치가 나온다고 하더라도 감당할 수 있도록 장치를 만들거나 가용한 기술로 예측하고 이에 안전여유도(Margin)를 더하는 방식으로 안전을 기할 수 있게 된다. 예컨대 교량을 건설하는 경우 교량을 지탱하기 위한 교각의 두께를 결정하기 위해 이러한 최대치와 안전여유도의 개념이 사용된다.

원전의 설계에 있어서는 보수성(Conservatism)이라 하여 안전여유도를 높게 적용하는 방식으로 안전을 확보한다.

■ 자정 작용(Natural Purification)

오염 물질이 환경으로 방출되면 환경 오염이라고 여기는 것은 자정 능력을 간과한 것이다. 환경 오염의 정의는 자정 능력을 초과하는 오염 물질이 환경으로 배출될 때 발생하는 것이다. 즉 자정 능력 이내의 배출에 대해서는 오염으로 간주하지 않는 것이 과학적 태도이다. 이러한 자정 작용에 따라서 오염 물질의 배출 기준이 제시된다. 따라서 환경으로 미량의 오염 물질이 배출되는 경우에도 환경 오염이라고 보는 관점은 이러한 환경 이론의 기초가 없는 주장이다.

■ 사회경제적 효과(Socioeconomic Effect)

우리 사회를 구성하는 다양한 설비의 안전성은 최적화될 필요가 있다. 우리 사회의 여러 가지 위험 요소에 대한 안전성을 높이기 위하여 사회적 자원을 합리적으로 배분하는 것이 필요하다.

어떤 위험 요소는 방지하고 특정 설비를 안전하게 하는 데에 엄청난 비용을 지출하는 것은 합리적인 사회가 아니다. 결국 원전의 안전성도 다른 설비의 안전성과 사회경제적 수준을 함께 고려하여 안전도를 결정하게 된다.



〈그림〉 원자력발전소의 다중 방호(Defense in Depth) 설비

■ 심리적 효과(Psychologic Effect)

인간은 발생할 가능성이 있는 사건은 반드시 발생한다고 믿는 경향이 있다. 특히 대형 사고의 경우 이러한 경향이 높는데, 이는 사고 사망자가 적은 비행기 사고를 자동차 사고보다 훨씬 우려하는 경향에서도 나타난다. 이런 대중의 심리적 효과를 그대로 받아들이는 것은 정치학의 영역이고 과학기술의 영역은 대중의 믿음보다 과학기술적 수치를 믿는 것이다.

■ 절차와 규제(Procedure & Regulation)

원전의 안전성을 확보하기 위한 설계 개념은 기본적으로 다중 방호(Defense in Depth)의 개념이다. 이는 다중의 방벽을 두어서 하나의 방벽이 실패하는 경우에도 다른 방벽이 막을 수 있도록 하는 개념과 다중의 대응 절차를 두어서 사고나 고장의 진행 경과에 따라서 복

수의 대응을 실현하는 것을 의미한다.

원전의 안전성이 다른 설비의 안전성과 구별되는 특징은 방사성동위원소가 축적된다는 것이다. 이에 따라서 사고가 발생했을 경우 방사성동위원소가 외부로 방출되지 않도록 하기 위해 다수의 방벽을 두고 있다. 핵연료 펠릿, 연료봉, 냉각재 압력 경계, 격납용기, 부지 경계 등 다중의 방벽을 두어서 하나의 방벽이 실패하더라도 다른 방벽이 방사성 물질의 외부 방출을 방지하도록 설계된다.

또한 다단계의 방어 전략을 준비한다. 즉 사고 예방(Accident Prevention)을 위해서 일련의 절차를 개발하여 두고 만일의 사태에 시행할 수 있도록 한다. 또한 사고가 발생하는 경우에도 사고 완화(Accident Mitigation)를 위한 다단계의 절차를 개발하여 시행하는 것을 말한다.

이와 같이 사고 발생 이전에 대응 시나리오를 미리 결



정해 됨으로써 사고 상황에서 판단을 위한 시간을 절약하고 개별 전문가의 판단을 회피하도록 하는 것이다.

◆ 일반 기술 원칙(General Technical Principle)

원자력발전소를 설계, 건설, 운영하는 데 일관적으로 적용되는 안전성을 도모하기 위한 원칙이다. 여기서 원칙이라는 표현은 어떤 경우에도 바뀌지 않고 적용된다는 것을 의미한다.

■ 입증된 공학적 관행

(Proven Engineering Practices)

원자력발전소에 사용되는 설비와 공학적 관행은 대부분에 적용되어 성능이 입증된 후에 채택된다. 예컨대 고용량 터빈은 석탄발전소에 적용되어 안전성이 확인된 이후에 원전에 채택한다.

■ 품질보증(Quality Assurance)

최고의 산업규격(Codes and Standards)을 적용하고 설계부터 운전애 이르는 전 단계에 품질보증을 거친다. 여기에는 설계 단계에서 설계자, 검토자, 승인자의 실명제를 포함하며 건설과정의 품질에 대해서도 품질보증 절차에 따라 관리하게 된다.

■ 안전성 평가와 검증

(Safety Assessment and Verification)

원전의 성능이 아니라 안전성을 별도로 평가하고 검증하는 것을 말한다. 즉 자동차를 예로 든다면 운전과 관련한 성능이 아니라 안전성만을 별도로 평가하고 검증하도록 하는 것이다.

■ 운전 경험(Operating Experience)

원전을 운전하는 과정에서 발생된 각종 사건/사고는

재발 방지를 위하여 별도로 추적되고 대비책이 강구된다. 따라서 한 원전에서 발생한 사고는 다른 원전으로 전파되어 동일한 사고가 발생하지 않도록 하는 데 기여하며 결국 경험을 통한 교훈(Lesson learned)을 통하여 원전군 전체의 안전성 향상에 기여하는 것이다.

■ 인간 요소(Human factor)

원전은 인간이 불완전한 존재라는 전제하에 설계되고 건설되고 운전된다. 설계, 건설, 운전의 각 단계에 오류가 발생할 수 있고 그럼에도 불구하고 안전성이 유지되기 위한 방안을 수립하는 것이 안전 관리의 철학이다. 설계와 건설 단계에서는 다중 방벽을 통하여 이 문제를 해결하며 운전 단계에서는 운전원은 사고 시 바른 판단과 조치를 기대하기 어렵다는 점을 전제로 처리 절차를 우선적으로 구비시키는 방식으로 원전을 설계하고 운영 시스템을 수립한다.

◆ 보호 및 안전계통 설계 원칙

(Protection and Safety System Design Principles)

원전에서 보호 및 안전계통은 평소 운전애 관여치 않고 사건/사고가 발생했을 때 안전애만 관계되는 설비를 말한다. 자동차에서 에어백(Air bag)과 같이 운전이나 편이를 위한 시설이 아니라 사고만을 대비하여 두는 설비를 말한다. 이러한 설비를 설계하는 원칙은 다음과 같다.

■ 다중성(Redundancy)

중요한 설비이기 때문에 고장나면 안되는 설비인 경우 2개 이상을 설치한다.

■ 다양성(Diversity)

2개 이상의 설비가 동시에 같은 원인에 의하여 실패하

는 경우를 대비하기 위하여 동일한 사양이지만 다른 회사의 제품을 사용한다.

■ 물리적 분리(Physical Separation)

펌프를 다중으로 설치한다면 이를 위한 전원, 공간 등도 물리적으로 구분함으로써 하나가 실패하는 경우에도 다른 것이 살아남을 수 있도록 한다.

■ 고장 시 안전 개념(Fail-Safe Principle)

고장이 나더라도 안전한 쪽으로 고장나는 설비를 채택한다. 예컨대 밸브가 고장나는 경우에도 열리는 쪽으로 고장나는 것이 바람직한 경우가 있고 닫히는 쪽으로 고장나는 것이 바람직한 경우가 있다. 냉각재를 공급하는 쪽의 밸브라면 고장 시 열리는 편이 유리하고 방사성 물질을 차폐하기 위한 밸브라면 닫히는 쪽으로 고장나는 편이 유리하다. 이를 고려하여 고장 시보다 바람직한 방향으로 고장나는 설비를 채택하는 것을 말한다.

■ 연동 장치(Interlock)

예컨대 이중문이 설치된 출입구의 경우 한쪽 문이 닫힌 경우에만 다른 쪽 문이 열리도록 설치함으로써 이 중문이 동시에 개방되지 않도록 하여 방사성물질의 유출 등이 방지되도록 설비를 구축하는 것이다.

■ 고유 안전성(Inherent Safety)

출력이 증가하여 온도가 증가하면 핵반응의 확률이 줄어드는 메커니즘을 활용하면 운전자의 개입이 없어도 자동으로 출력 조절이 가능해진다. 이와 같이 자연적으로 있는 조절 기능을 최대한 활용하여 원전을 설계함으로써 인위적인 조치 이전에 자연법칙에 의하여 안전한 방향으로 조절이 되도록 설계한다.

◆ 과학기술 외적 방법에 의한 원전 안전성의 향상

과학기술적 방법을 보완하여 원전의 안전을 도모하는 방안을 소개하고자 한다. 원자력 안전규제, NGO 등에 의한 감시, 국제기구를 통한 국가 간 견제 및 지원, 안전문화 등 사업자 스스로의 안전 활동 등을 소개하고자 한다.

■ 원자력 안전규제

규제는 자유로운 활동을 금지하는 것에서 출발한다. 그렇기 때문에 공익적 목적을 위하여 수행되어야 한다. 1945년 미국 원자력위원회(US AEC: Atomic Energy Commission)가 설치되면서 원자력 안전규제가 시작되었다. 이를 통하여 사업자와 별도의 주체가 독립적으로 안전성에 대한 확인을 수행하고 이를 통과한 경우에만 원자력 시설을 운영하도록 함으로써 원전 안전성에 대한 국가 관리의 체제가 구축된 것이다. 이러한 원자력 안전규제는 사업자와의 독립성을 확보하기 위하여 원자력위원회로부터 분리되어 원자력 규제위원회(US NRC: Nuclear Regulatory Commission)라는 독립기구로 설치되어 오늘에 이른다. 원자력 규제위원회는 독립성, 공개성, 효율성, 명확성, 합리성 등의 규제원칙에 따라서 사업자의 원자력 활동을 감시, 통제하게 된다.

■ NGO(Non-Government Organization)를 통한 감시 현대 사회가 작은 정부를 추구함에 따라서 감시 역할의 상당 부분이 시민과 NGO에 의하여 수행된다. 이들이 건강한 감시를 수행하면서 제기한 문제들은 원전의 안전성을 향상시키는 데 기여할 수 있다. 그러나 꼬투리잡기, 침소봉대 등을 통하여 원전 안전성에 대한 사회적 이슈만을 제기하고 증폭시키는 것은 오히려 안전운전을 방해하기도 한다.



■ 국제기구를 통한 안전성 향상

국제원자력기구(IAEA: International Atomic Energy Agency)는 원전 안전성에 대한 표준(Safety Standards)을 지속적으로 발간하면서 안전성 향상을 위한 현실적 지침을 제공한다. 또한 원전 사건/사고 소식을 전 세계로 전파하면서 공통 원인에 의한 재발을 방지하고 원전 안전성 및 방재와 관련한 교육 훈련 및 방문 점검 서비스를 제공하고 있다.

특히 체르노빌 원전 사고 이후 원전 사고의 결과가 국경을 초월할 수 있다는 점에 착안하여 원자력안전협약(Nuclear Safety Convention)을 구축함으로써 국가 간 원자력시설의 안전성에 대한 상호 감시, 견제, 격려하는 시스템을 구축하고 있다.

■ 안전문화

체르노빌 원전 사고를 경험하고 단순히 규정을 준수하는 것 이상의 안전을 도모하기 위한 활동이 필요하다고 보고 안전문화를 확산하기 위한 노력을 경주하고 있다. 이를 통하여 규정을 만족시키는 것이 그치지 않고 사업자가 자발적으로 스스로의 안전문화를 점검하고 강화할 수 있도록 하고 있다.

■ 안전연구자의 활약

신규 원전 건설이 중단된 원전 선진국을 중심으로 연구자 차원에서 원전에서 발생할 수 있는 사고 시나리오를 찾아내는 것이 중요한 과제가 되었고, 기업의 차원에서도 특정 기기의 오류 가능성을 통한 비즈니스 창출이 가능해짐에 따라서 경쟁적으로 원전에서 발생할 수 있는 사고 시나리오를 찾아내게 되었고 이런 과정을 통해 안전성이 향상되고 있다.

원전 안전성의 위기

1957년 세계 최초로 원전이 건설된 이후 지금까지 60년이 흘렀으며 가압경수로(PWR: Pressurized Water Reactor)의 경우 17,000 원자로·년(RY: Reactor Year)의 운전 경험을 축적하였다.

과학기술의 진보와 운전 경험의 축적은 원자력 안전성에 있어서 현격한 진보를 가져왔으나 대중의 우려는 여전하다. 본 장에서는 원전 안전성에 도움이 되지 않는 사회적 이슈를 언급하고자 한다.

■ 기우(杞憂) 장사

원전에 대한 기피가 이념화되면서 반대를 위한 반대, 걱정을 위한 걱정거리를 만드는 경향이 나타나고 있다. 합리성의 결여된 과도한 안전을 요구하는 것이다. 필요 이상으로 안전기준을 높이는 것이 그 대표적인 경우이다.

점점 더 가설적인 상황에 대한 안전 대비를 요구하면서 오히려 다른 곳에 투자해야할 비용을 덜 중요한 곳에 투입하도록 하는 것이다. 이는 원전 안전에 대한 대중적 무지와 포퓰리즘에 의하여 증폭되는 경향을 보인다.

■ 분화되지 않은 조치

안전기준이 너무 낮은 것이 문제라면 안전기준을 높여야 하고 안전기준이 적절하나 지키지 않는 것이 문제라면 이행을 강제하는 것이 필요하다. 또 안전기준도 적절하고 이행도 잘하고 있는데 우려가 제기된다면 대중 소통 활동을 늘리는 것이 필요하다.

그런데 대중 소통을 늘려야 하는데 안전기준을 높이는 쪽으로 조치가 이루어진다면 병중에 합당하지 않은 처방이 내려지는 것과 같이 바람직한 방향이 아니다. 혼



원전의 안전성은 지난 60여년간 축적된 과학기술력과 원전 운전 경험으로 인하여 비약적으로 발전하였다. 그러나 1979년 TMI-2 원전 사고, 1986년 체르노빌 원전 사고, 2011년 후쿠시마 원전 사고를 경험하면서 원전 안전성에 대한 대중적 우려는 오히려 증가하였다. 이러한 대중적 우려는 원자력산업계의 소통 부재 및 부적절한 소통에 기인하나 언론의 선정적 보도 자세, 선동기들의 가짜뉴스 생성, 각종 이익집단의 발호 등의 영향으로 더욱 증폭되고 있다.

히 규제기관이 대중적 문제 제기에 대해 포퓰리즘적으로 대처할 때 구사되는 상용수단이다.

■ 사회적 이슈화에 따른 안전 투자

안전상 중요도가 낮은 항목이 사회적 이슈화에 성공하면서 과학기술적 이유가 아니라 사회적 이유로 투자가 이루어지는 경우가 있다. 원전 다수 호기에 대한 문제가 사회적 이슈가 되면서 사실상 안전상의 이득이 크지 않은 주제에 안전연구비가 투자되는 상황이다.

■ 비전문가의 발호

원전의 안전 체계에 대한 지식은 없고 과학적 소양만 가진 타부문의 전문가가 원자력 전문가를 자처하면서 사회적 이슈를 생성하는 문제이다. 다중적 안전 방

벽 가운데 하나의 방벽에 문제가 생긴 것을 마치 전체적인 방벽에 문제가 있는 것처럼 선동하거나 시스템에 대한 지식이 없는 의사나 물리학자가 상식선의 문제를 제기하는 것이다.

■ 우려의 생산

원자력 안전성이 이미 상당 수준으로 전문화되었기 때문에 안전공학에 대한 이해 없이 과학적 소양만 있는 타분야의 전문가, 그리고 일반인의 눈높이에서 설명할 능력을 갖추지 못한 원자력 전문가에 의하여 대중적 우려를 줄여주지 못함에 따라서 사회적인 이슈가 제기되고 있다. 또한 연구자의 연구 욕심에 따라서 특정 분야로 투자를 유도하기 위한 우려를 생산하는 경우도 발생하고 있다.



〈표 1〉 국제 원전 안전 연구 동향

국가	원전 안전 연구 현황
미국	<ul style="list-style-type: none"> • 「DOE 2020 원전산업 기술개발 로드맵」, 가동 원전 안전성 강화, 신규 원전 개발, 핵연료관리주기 개발, 핵물질 통제 기술 개발 등 4개 분야 추진 • 2010년부터 약 1,500억 원을 투입하여 가상원자로(VERA) 개발을 위한 프로젝트(CASL)를 수행하여 산업계 안전 현안 해결을 위한 도구로 사용 중 • 2012년부터 사고 저항성 핵연료(ATF)를 개발 중이며, '17년에 연구계, 산업계, 규제기관이 참여하는 협의체를 구성하여 단기 적용 개념의 산업체 활용을 위한 성능 검증 및 인허가 전략 수립 • 고성능 원전 기술 개발, 광역 피해와 안전 정지 강화 기술 개발, 소형 모듈 원전 개념 개발, 고온가스로 개발, 핵연료 재처리 기술 개발 등
EU	<ul style="list-style-type: none"> • FP7(Framework Programme)에 따라, 가동 원전 안전성 강화, 신규 원전 개발, 방폐물 관리 기술, 방사선 방호 기술, 인프라 지원 및 인력양성 등 5개 분야 추진 중 • 고성능 안전성 평가 방법론, 중대사고 예방·완화, 방사선 대처 설계 기술, 폐기물 관리 측면을 고려한 제4세대(GEN-IV : GFR, LFR, MSR, SFR, SCWR, VHTR) 개념 설계 개발 및 핵융합 사업(ITER) 등
일본	<ul style="list-style-type: none"> • 「환경에너지 기술 혁신 계획」(2013년 9월, 종합과학기술회의)에서 중대사고 대처 등 원전 안전성 강화 기술, 효율 향상 원전 운영 기술, 방사성폐기물 최종 처분 종합 기술 분야로 추진 • 설계기준 사고 이상의 상황 대응 조치 강화, ITER 등 핵융합 기술 지속 추진, 재처리시설 검증 실험, 재사용핵연료 저장 설비 입증, 방사능 독성 저감용 핵종 변형 기술 개발 등
러시아	<ul style="list-style-type: none"> • Federal Target Program(FTP)에 따라 후행 핵주기 기반 고속로 개발, 중소형 원자로 개발, 경수로 성능 개선 등 원전 안전성 강화, 장기적으로 핵융합 개발 추진 • 피동 비상 노심 냉각 계통/피동 원자로건물 냉각 계통을 추가한 VVER 1200, VVER-TOI, 우라늄 소모량을 최소화한 Super VVER 노형 개발 추진, 나트륨 냉각 고속중성자 원자로 기술 개발, 중소형 원전 기술 개발
중국	<ul style="list-style-type: none"> • 원전 안전에 관한 기술 개발 계획('12년 2월)을 공표하고, 운영 원전 안전성 강화, 기존 신규 원전 지속 개발 추진 중 • 원전 운영 안전성 및 복합 재해 대비 능력 향상을 위한 13개 기술 개발 추진, 개량형 원전 및 일체형 소형 경수로 개발 추진
캐나다	<ul style="list-style-type: none"> • 압력관 건전성 기술 개발을 통하여 설계수명 연장의 안전성을 확인하고 자국 내 중수로형 원전에 적용
국제기구	<ul style="list-style-type: none"> • NEA는 첨단 원자력 안전 기술의 산업체 활용 지원을 위한 Nuclear Innovation 2050 계획을 수립하고, 다자간 공동 연구를 통한 기술 지원 추진

최근 안전성 현안 및 R&D

국내외적으로 최근 원전 안전성과 관련한 현안은 후쿠시마 원전 사고에서의 문제점을 파악하고 이에 대한 보완과 연구를 수행하는 것이다. 후쿠시마 원전 사고는 원자력 이용에서 안전성 확보가 최우선적 요건임을

다시 인식하는 중요한 계기가 되었다. 후쿠시마 원전 사고에서 나타난 문제점은 자연재해에 대한 대비, 중대사고가 발생했을 때의 대응 능력 등이다.

따라서 원전의 안전성을 향상시키기 위하여 비상 냉각 능력을 강화시켜 중대사고가 발생하지 않도록 하고 만일 중대사고가 발생하는 경우에도 결과를 완화하는

〈표 2〉 국내 원전 안전 연구 동향

부처	원전 안전 연구 현황
과학기술정보통신부	<ul style="list-style-type: none"> • 고정밀 열수력 해석코드(CUPID) 개발, 고위험 다중 복합 사고 및 핵연료 재배치 조건에서 원전 냉각 성능 실증으로 원전 열수력 거동 정밀 예측·평가 기술 개발 • 열수력 종합효과 실험장치(ATLAS)를 활용하여 설계기준 초과 사고에 대한 안전해석 코드 검증 및 안전 여유도 정량화 및 OECD-ATLAS 국제 공동 연구 주관으로 안전 연구 분야 선도 • 중대사고 시 원자로용기 관통부 파손 실증 실험 수행 및 국제 수준의 격납건물 모의 실험 장치 (SPARC) 구축 • 중수로 노후 압력관 변형 평가 체계, 감속재 실험 시설, 노심 노물리 국산 해석 모델 원형 및 중대사고 종합관리 지원 체계 요소 기술(SAACS, 사고 추론 엔진, 시뮬레이터 원형) 개발 • 국내 고유 최적 다수기 리스크 평가 체제 구축 • 리스크 안전 목표의 정밀 평가를 위한 신 PSA 기술 개발, 복합 재해 평가 기술 개발 및 신규 도입 안전 계통의 신뢰도 평가 기술 개발 • 국내 고유 지진 특성을 고려한 지진 안전성 평가 기술 개발 • 사고 저항성 핵연료 고유 기술 개발 및 국제 공동 연소 성능 시험 착수 • 원자로용기 손상부 보수 원천 기술 국제 ASME 원자력 설계 표준 채택 방사성물질 대기·해양 확산 영향 평가 고유 시스템(LADAS/LORAS) 기술 개발
산업통상자원부	<ul style="list-style-type: none"> • 원전 기술 자립을 위한 핵심·원천 기술 개발 및 상용화 • 최신 안전 해석 및 전산 기술 적용 원전 설계코드(SPACE, CAP) 국산화 • 피동 비상 노심 냉각 계통 및 피동 원자로건물 냉각 계통 기술 개발 • 중대사고 평가 및 대처 방안 수립을 위한 코드(CINEMA) 국산화 기반 구축 • 중대사고 시 격납건물 파손 방지를 위한 여과 배기 기기 국산화 • 국내 고유 대용량(1,500MWe급) 신형 원전 APR+ 표준설계 인가 획득 • 전원 상실 사고 대응 능력 강화를 위한 전원 백업 시스템(ESS) 소재, 시스템 개발 및 실증 연구 • 경주지진에서 나타난 고진동수 지진 특성에 대한 지진 안전성 확보 기술 • 다수기 안전성 현안 해결을 위한 고리부지의 다수기 리스크 평가 모델 개발(한수원) • 최신 2/3단계 PSA 기술을 이용한 주요 원전 부지의 리스크 평가 및 디지털 주제어실의 인간 신뢰도 평가 기술 개발(한수원) - 원전 광역 화재를 고려한 정량적 화재 영향 평가 기술 개발

등 심층 방어 개념을 강화하는 것이 중요한 연구의 축이다.

또한 위험도 정보를 활용하여 안전성 평가를 수행하는 체계를 더욱 심화하고 극한 재해로 인한 리스크 평가를 통해 종합적인 안전성 평가를 수행할 필요성을 인식하게 되었다.

기술적 측면뿐만 아니라 제도적·기술적·문화적 측면에서도 원전 안전성을 개선하기 위한 대책을 강구하고 극한 재해 상황에서의 체계적 의사 결정을 할 수

있는 조직의 중요함을 인지하게 되었다.

이는 기술적 측면에서 설계기준 초과 사건(bDBA: beyond Design Basis Accident)을 포함하는 확대 설계 조건(EDC: Extended Design Condition)에 대한 중대사고의 예방 조치를 강화하고 저빈도 사건에 대한 리스크 평가를 통해 종합적인 안전성 평가를 수행하도록 하는 것이다.

원자력 안전과 관련된 최근의 국제적 연구 동향은 후쿠시마 원전 사고의 교훈을 반영하여 원자력 시



설의 안전성을 강화하고 원자력 발전의 지속가능성 (Sustainability)을 보장하기 위해 가동중 원전과 신형 원전의 안전성을 확보하는 것이다.

미국의 경우 가동 원전의 경제성 향상을 통한 원전 이용의 지속가능성 보장에 역점을 두고 가동 원전의 핵심 이슈 해결에 적용할 수 있는 다분야 융합형 기술 개발과 이를 위한 선진 모델링·해석 기법의 개발 및 적용 등에 역점을 두고 기술 개발을 추진중에 있다. 유럽의 경우 고정밀 해석 체계의 구축 및 가동 원전의 안전성 강화에 역점을 두고 있다.

우리나라는 후쿠시마 사고 이후 원전 안전성 향상을 정부 최우선 과제로 추진하면서, 극한재해 등으로 인한 중대사고 예방 및 대처 기술 개발을 추진하고 있다. 과학기술정보통신부는 원전 사고 예방 및 중대사고 대응과 관련한 원전 기술 개발을 지원하고 있으며, 산업통상자원부는 중대사고 대응을 위한 피동 냉각 계통 설비, 국내 고유 안전 해석 코드 개발 및 안전성 강화 기술 개발 등을 지원하고 있다.

맺는 말

원전의 안전성은 지난 50여년간 축적된 과학기술력

과 원전 운전 경험으로 인하여 비약적으로 발전하였다. 그러나 1979년 TMI-2 원전 사고, 1986년 체르노빌 원전 사고, 2011년 후쿠시마 원전 사고를 경험하면서 원전 안전성에 대한 대중적 우려는 오히려 증가하였다.

이러한 대중적 우려는 원자력산업계의 소통 부재 및 부적절한 소통에 기인하나 언론의 선정적 보도 자세, 선동가들의 가짜뉴스 생성, 각종 이익집단의 발호 등의 영향으로 더욱 증폭하고 있다.

최근 자연과학이나 의학 전공자가 전문가를 자처하거나 심지어 환경운동가가 전문가를 자처하면서 자행하는 악의적 대중 선동이 대중에게 쉽게 전파되는 것은 안타까운 사실이다.

본고를 통하여 원전의 안전성이 어떠한 과학적 토대하에 어떠한 역사적 발전을 이루었으며 현재 어떠한 연구가 추진되고 있는지를 살펴보았다.

필자의 기대는 원전의 안전성에 대해서 상식의 잣대와 감각적 판단을 일반화하려는 시도는 옳지 않다는 것을 알려드리고자 한 것이며, 원전의 안전성을 향상시키기 위해서는 선동이나 이념화가 아니라 과학과 합리가 결정할 수 있는 풍토가 조성되어야 함을 강조하고자 한다. 🍌

<참고문헌>

- M.V. Ramana, Nuclear Power: Economic, Safety, Health, and Environmental Issues of Near-Term Technologies, Annual Review of Environment and Resources, 2009, 34, p. 136.
- Rollyson, Carl (2004), Marie Curie: Honesty In Science. iUniverse, prologue, x. ISBN 0-595-34059-8
- IAEA (2009), INES : The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual, 2008 Edition
- US NRC (1975), WASH-1400, 'The Reactor Safety Study'
- US (2008), UNSCEAR 2008 Report: "Sources and effects of ionizing radiation"
- 한국원자력학회 원자력열수력안전 미래전략 특별위원회 (2014) '원자력열수력 미래전략'