



원전의 올바른 이해 토론에서 무엇이 달라졌는가?

Making Sense of Nuclear What's changed in the debate

Sense about Science¹⁾

영국의 'Sense about Science'는 최근 원전에 대한 국민 이해 문제를 다룬 보고서 'Making Sense of Nuclear'를 발표했다. 보고서는 서문에서 “최근 몇 년 사이에 환경론자 가운데 일부는 원전의 옹호자로 바뀌었다.”면서 원전에 적대적이었던 기관이나 단체들의 태도가 누그러지기 시작했고 대부분의 반원전 단체가 원전이 미래의 저탄소 배출 에너지에 포함되어야 하는 문제에 대해 토론했고 있다면서, 원전에 대해 경제성, 방사능, 기후 변화 등 논쟁 양상의 폭이 점차 넓게 변화하고 있음을 지적했다. 본 보고서를 발간하는 목적에 대해서는 “원전을 저탄소 에너지의 근간으로서 홍보하려는 것이 아니다. 여러분들이 원전이 어떤 상황에서 적절한 것인지 판단하는 데 도움이 되도록 에너지 생산 수단 전체를 폭넓게 살펴보려는 것이다. 우리는 사람들이 절대 낡은 정보를 근거로 판단하지 않기를 원하기 때문에 그 동안 바뀐 사실이 무엇인지 그리고 무엇이 사람들의 마음을 바꾸도록 만들었는지를 알아본 것이다.”고 밝혔다.

서문

최근 몇 년 사이에 환경론자 가운데 일부는 원전의 옹호자로 바뀌었다. 영화감독, 국회의원, 언론인, 그리고 환경운동가 등이 모두 망라되어 있는 그 사람들은 한때 원전에 반대하던 마음을 완전히 고쳐먹게 된 것이다.

원전에 적대적이었던 기관이나 단체들의 태도가 누그러지기 시작했고 대부분의 반원전 단체는 원전이 미래의 저탄소 배출 에너지에 포함되어야 하는 문제에 대해 토론했고 있어서 환경 운동 그룹 내부에는 이제 긴장감마저 감지되고 있다.

¹⁾ 기고 및 토론 참여자 Tracey Brown Sense about Science 이사, Stephanie Mathisen Sense about Science 정책담당 매니저, Chris Peters Sense about Science 과학담당 매니저, Adrian Bull 영국 국립원자력연구소 대외협력국장, Andrew Sherry 영국 국립원자력연구소 수석과학담당관, Kirsty Gogan Energy for Humanity 공동설립자겸 대표, Rachel Law 맨체스터대 Dalton 원자력연구소 지역봉사 및 홍보담당관, Francis Livens 맨체스터대 Dalton 원자력연구소 이사, Vicky Plane 맨체스터대 과학기술학부 홍보 및 마케팅 매니저, Gerry Thomas 런던 임페리얼 칼리지 분자병리학과장, Christopher White 영국 자원봉사 연구단체 Institute of Physics 기관지 발행 및 편집자

◆ Sense about Science

영국의 중립이고 독립적인 비영리 단체로서 명백한 근거도 없이 수립된 정책이나 잘못 알려진 과학적 문제에 대해 증거를 바탕으로 바로잡아 알려주고 있다. 과학적 연구 결과에 대해 개방성과 정직성을 바탕으로 접근하여 공공의 이익에 부합하는 올바른 과학적 성과만을 뒷받침함으로써 대중의 이해와 정책 수립에 도움이 되도록 사회 공헌을 추구하는 단체이다. 세계적인 연구기관의 과학자들과 각 지역 사회 자원 봉사단체들의 재능 기부로 운영되고 있다. www.senseaboutscience.org

원전의 경제성에 대한 토론은 수없이 많은데 다른 분야에서 부담하는 재원으로 원전에 보조금을 지급할 수 있는 것인지, 에너지 기반 시설에는 반드시 보조금을 주어야 하는지, 그리고 신형 원전에 대한 특별한 배려가 적당한 것인지 등이 그 토론에 포함되어 있다.

경제성이라는 문제 외에도 원전과 관련된 다른 문제에 대해서 우려하는 사람들도 있다. 사실이 아닌 것으로 이미 드러났음에도 불구하고 일부에서 주장하는 원전의 안전 문제는 마치 유산처럼 끈질기게 따라다니고 있는데, 안전성에 별 문제가 없다면 경제성이라도 한번 따져보는 식으로 원전에 대한 논쟁은 지속되고 있다.

그럼에도 원전업계와 정부는 원자력설비에 대한 정보를 자세히 공개하는데 열린 태도를 보여준 적이 없었다. 그렇기 때문에 이제는 우리 과학단체들이 힘을 합쳐 이 안내서를 만들어 최신 정보를 바탕으로 한 토론을 해 보려는 것이다.

원전에 반대하던 의견을 바꾼 사람들 중 몇몇은 기후변화가 너무 빨리 일어난다는 점을 생각을 바꾸게 된 이유로 들고 있다. 온실가스 배출을 줄이면서도 필요한 에너지 생산을 유지하려면 각각 다른 에너지 생산 수단 사이의 균형을 반드시 고려해야만 하는데, 특히 원전을 완전히 배제시킨다면 화석연료의 사용은 늘어날 수밖에 없음을 명심해야 한다.

또 다른 이유도 있는 것 같다. 이제 우리는 방사능이 장기적으로 건강에 미치는 영향에 대한 더 확실한 데이터, 그 동안 원전 관리를 통해 축적된 경험 그리고 원전의 안전성과 효율성을 높이고 폐기물을 줄일 수 있을 만큼 발전된 신기술을 가지게 되었다는 점이다.

이런 이유 때문에 논쟁의 양상은 점차 폭넓게 변화하고 있다. 영국에서도 원전에 대한 일반대중의 지지율이 2005년 26%에서 2013년 32%로 약간 증가했으며, 수십 년 동안 원전을 문젯거리로만 보면서 토론에 임하던 정치인들도 이제는 원전을 문제의 해결책 가운데 하나로 보고 있다.

이 안내서는 원전을 저탄소 에너지의 근간으로서 홍보하려는 것이 아니다. 여러분들이 원전이 어떤 상황에서 적절한 것인지 판단하는데 도움이 되도록 에너지 생산 수단 전체를 폭넓게 살펴보려는 것이다.

우리는 사람들이 절대 낡은 정보를 근거로 판단하지 않기를 원하기 때문에 그 동안 바뀐 사실이 무엇인지 그리고 무엇이 사람들의 마음을 바꾸도록 만들었는지를 알아본 것이다.



에너지 수요가 증가하는 상황에서 탄소 배출 줄이기

“열성적인 환경운동가로서 원전에 관해 이야기 하는 것은 우리에게 괴로우면서도 갈피를 잡기가 어려운 일이었다. 또한 원전에 대한 입장을 바꾼다는 것은 친구를 적으로 돌리게 하고 동료들과 소원해지는 등의 대가를 치르게 해 우리 모두에게 부담스러운 일이었다. 그렇지만 우리는 기후 변화라는 위기 속에서 가장 기본적인 저탄소 배출 에너지인 원전을 대안도 없이 폐쇄하는 것이야말로 고상한 모양으로 위장한 광기일 뿐이라고 믿는다.” – George Monbiot²⁾, MarkLynas, ChrisGoodall

1. 탄소 배출 저감 목표

2015년 12월에 이루어진 파리 기후변화협약은 전 세계 평균 온도의 증가를 섭씨 2°C 이하로 유지하고 산업화 이전의 수준보다 섭씨 1.5도 이상 올라가지 않도록 제한하기로 약속한 것이다.³⁾

이 협약에 참여한 나라들이 탄소 배출을 줄이기 위해⁴⁾ 나름대로 각별한 노력을 기울이는 동안 많은 논평가들은 파리협약의 목표를 달성할 수 있을 만큼 확실한 전략이 없다는 점과 지금 상태로 가면 3°C 혹은 그 이상으로 기온이 올라갈 수도 있다는 일부 과학자들의 우려를 크게 걱정하지 않는 태도를 지적했다.⁵⁾

“각국 정부가 탄소 배출을 줄이는 정책을 조금만 더 강하게 시행한다면 지구의 기온 상승을 1.5°C 이내로 제한하는 것이 가능한 일이라고 사람들이 생각하도록 만든 것이 파리협약의 의외의 성과 가운데 하나라고 생각했지만 사실은 그렇지 않다.” – Dr. Andrew King, 호주 멜버른대 지구과학대 이상기후연구소 연구원⁶⁾

영국은 2008년 기후변화법을 제정하여 2050년까지 온실가스를 1990년대 배출량의 20% 수준까지 줄이는 법적 구속력이 있는 목표를 설정한 바 있다.⁷⁾ 영국의 이런 목표는 기온 상승을 대략 2°C로 제한하는 것을 토대로 한 파리협정의 목표보다 훨씬 분명하다.⁸⁾

목표를 확실하게 달성하기 위해서 영국은 5년 단위의 탄소 배출 할당량을 마련하고 있다.⁹⁾ 2020년까지의 목표 중에서 처음 3단계 중기 목표는 달성에 성공했지만 2025년까지 50% 수준으로 탄소 배출을 줄이지는 못할 것 같다.¹⁰⁾

이처럼 기후 변화 상황이 악화되는 것을 방지하는 데 제 몫을 하는 국가라고 칭찬 받는 영국조차 파리협정을 제

2) Monbiot, G 외(2015), 우리는 원전에는 찬성하지만 Hinkley C원전은 폐기해야 한다. The Guardian(online) 9월 18일자

3) Carbon Brief(2015) Interactive: 파리 기변협약

4) Carbon Brief(2015) Paris 2015: 기후 변화에 대처하기로 한 국가들의 약속을 추적한다.

5) Global Carbon Budget(2015), 세계 탄소 배출 허용 총량

6) Carbon Brief(2016), IPCC special report : 섭씨1.5도 실현 가능성의 면밀한 조사

7) Climate Change Act 2008 영국 기후변화법

8) Committee on Climate Change(2016) 탄소 배출 할당량 2016년도 의회 제출 경과보고서

9) Committee on Climate Change(일자 미상) 탄소 배출 할당량과 목표량

10) Committee on Climate Change(일자 미상) 영국의 탄소 배출 현황

대로 지킬 수 없는 것이 현실이다.

2. 기후 변화에 직면하게 되자 지지를 받게 된 원전

탄소 배출 줄이는 것이 이렇게 어려운 일이었기 때문에 2009년에 영국에서 가장 목소리 높은 환경운동가 4명이 원전에 대한 생각을 공개적으로 바꾸기에 이르렀다. 그 사람들은 그린피스의 전임 대표 Stephen Tindale, 당시 영국 환경청장 Chris Smith경, 과학저술가 Mark Lynas, 그리고 당시 녹색당 활동가 Chris Goodall인데 이들 모두 온실가스 배출을 줄이기 위해서는 반드시 원전이 필요하다는 취지로 원전 지지 선언을 하였다.

“지금까지 환경운동가로 행세하기 위해서는 원전에 반대해야 하는 것이 필수적이었다. 그러나 이제는 많은 환경운동가들과 이 문제를 논의하고 있는데 비록 원전이 이상적인 것은 아니지만 기후 변화를 방지하는 것 보다는 낫다는 관점이 상당히 널리 퍼져 있다.” - Stephen Tindale, Alvin Weinberg 재단 이사¹¹⁾

3. 일반 대중의 생각

일반인의 원전 지지율 역시 같은 기간 동안 2005년 26%에서 2013년 32%로 증가했다.¹²⁾ 흥미로운 것은, 기후 변화라는 요소는 이러한 변화에 영향을 주지 않은 것 같다는 점이다. 특히 기후 변화를 억제하는 수단으로서 원전을 지지하는 비율은 오히려 2005년 54%에서 2013년 47%로 좀 낮아졌다.

이것은 기후 변화는 어쨌든 발생하고 말 것이라는 믿음이 줄어들었거나 전력 공급 문제를 우려하는 차원에서 원전을 선호하는 등의 다른 이유들이 반영된 결과로 보인다.

4. 세계적 에너지 소비와 에너지 접근성의 문제

국제에너지기구(International Energy Agency)는 2014년부터 2040년 사이에 전 세계의 에너지 수요는 37%까지 증가할 것으로 예상한다.¹³⁾ 이렇게 증가하는 전력 수요는 대부분 OECD 이외의 나라에서, 주로 중국과 인도에서 늘어나는 수요 때문이다.

영국을 비롯한 OECD 국가들의 전력 수요는 에너지 효율이 개선되고 에너지 절약 정책이 시행되는 덕분에 약간 줄어들 것으로 예상되고 있다. 영국의 경우에는 2015년도 기준으로 2035년까지 에너지 수요가 3% 감소할 것으로 예상된다.¹⁴⁾

만약 탄소 배출을 줄여야 한다는 주장에 동의하지 않는다 해도, 전 세계적으로 아직도 더 많은 에너지가 공급되어야 하는 것은 분명한 사실이다. 12억 명으로 추정되는 사람들이 아예 전기 없는 세상에서 살고 있으며 27억 명 정도의 인구가 아직도 가축의 똥 같은 고품 생물 자원 연료나 석탄을 취사용으로 사용하면서 건강에 해로운 환경

¹¹⁾ Connor, S(2009). Nuclear power? Yes please.. The Independent(online) 2월23일자

¹²⁾ UK Energy Data Centre(2013). 후쿠시마 원전 사고 이후 원전과 기후 변화에 대한 대중의 태도

¹³⁾ International Energy Agency(2014). 세계 에너지 전망 2014 자료

¹⁴⁾ Department of Energy and Climate Change(2015). 최신 에너지 및 탄소 배출 예상



속에서 살고 있다.¹⁵⁾

UN은 인류의 보편적 에너지 접근성을 2030년까지 달성하겠다는 새로운 목표를 세웠지만 낮게 잡은 그 기준마저 선진국의 일반적인 수준에는 한참 못 미치는 것이다.¹⁶⁾

5. 탈탄소화

지구 온난화에 더 소극적으로 대처하는 방식인 탈탄소화의 목표를 달성해야 하는 시기는 훨씬 시급한데 이 목표를 달성하려면 화석연료는 점차 퇴출되어야만 하고 탄소가 적거나 전혀 없는 연료로 반드시 대체되어야 한다. 그러나 전력 생산을 위한 에너지원을 저 탄소 에너지믹스로만 구성하는 이 바람직한 목표를 어떻게 달성할 것인가에 대한 논의는 종종 현실성조차 없는 혁신적 기술이나 정치적 약속에 기대하는 이상론으로 흘러가기 일쑤다. 시급하게 현실적인 해결 방안을 찾으려는 사람들에게는 실망스러운 일이 아닐 수 없지만 최근에는 실용적인 접근을 중요시하는 새로운 그룹과 단체들이 등장하기 시작했다.

“기후변화 문제는 대부분 에너지 문제와 직결되어 있다.” - 故 David MacKay 교수, 전 영국 에너지 및 기후변화부 장관

저탄소 배출을 실현하는 방법은 여러 가지 있는데 이것들을 잘 조합하는 것이 필요하다. 왜냐하면 효율성이 아무리 뛰어난 에너지라고 해도 한 가지 에너지원만으로는 늘어나는 세계적 에너지 수요를 감당할 수 없을 뿐만 아니라 탄소 배출을 확실하게 줄일 수는 없기 때문이다.

가장 적절한 에너지원을 결정하는 데에는 실용성, 가용성, 수용성, 그리고 공급의 규모와 안정성 등 모든 요소 사이의 균형이 매우 중요하다.

모든 에너지의 생산 방식에는 강점과 제한성이 존재한다. 예를 들면 많은 에너지원이 전 세계 각 지역에서 기상 조건과 지리적 요소에 의한 각각 다른 제한을 받게 되는데, 특히 재생에너지 분야에서는 더욱 심각하다.

따라서 각기 다른 국가나 지역에 가장 적합한 에너지 생산 방식을 결정할 때에는 이러한 요소들을 신중하게 고려해야 한다. 기상 조건이 변화할 가능성도 반드시 감안해야 하는데, 예를 들자면, 지금은 겨울이 짧고 일년 내내 일조량이 풍부한 나라에서는 태양열 발전을 활용하는 것이 최선이지만 언젠가는 태양 에너지를 비효율적으로 저장하는 방식을 써서 일조량이 적은 나라에서도 태양열 발전을 더 많이 활용하는 것이 가능할 수도 있다.¹⁷⁾

6. 좁은 선택의 폭

화석연료에서 더 빨리 벗어나기 위한 방법으로 원전의 활용이 강조되는 긍정적인 현상과 함께, 지난 6년 동안 일본과 독일에서 원전이 선택의 대상에서 제외됨으로써 원전산업에 미치는 직접적인 부정적 영향도 우리는 목격할 수 있었다.

¹⁵⁾ International Energy Agency(2015), 세계 에너지 전망 2015

¹⁶⁾ 유엔총회(2015), 우리 세상을 바꿉시다 : 지속 가능한 발전을 위한 2030 Agenda

¹⁷⁾ Nelson, A(2015), 모로코는 desert mega-project를 시작할 준비에 착수함으로써 solar power 초강대국이 되려 하고 있다. The Guardian(online) 10월26일

가. 일본

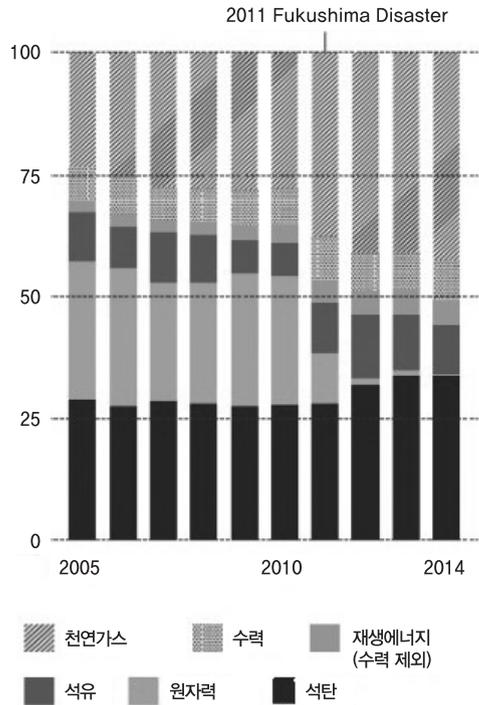
영국과 마찬가지로 일본 역시 온실가스를 감축하려는 노력을 기울여 오면서 2010년까지 가스와 석탄의 소비를 안정적으로 유지했다.¹⁸⁾ 그런데 2011년 발생한 진도 9.0의 동일본 대지진과 이어진 쓰나미로 인해서 후쿠시마 제1원전이 심각한 손상을 입었다. 쓰나미의 여파로 원전의 전원이 끊어지는 바람에 원자로의 노심이 과열되어 연료봉이 녹아버렸던 것이다. 원자로 격납용기에는 구조적인 손상이 발생하였고 원자로가 들어있는 건물에서 수소 폭발이 일어나 방사능 물질이 원전 내부에 누출되고 말았다.¹⁹⁾

지진과 쓰나미 때문에 16,000명 가까운 사람이 목숨을 잃었지만²⁰⁾ 세계 언론의 관심은 그보다 후쿠시마 원전에 집중되었다. 사고가 발생한 후 누출된 방사능으로 인해 사망한 사람은 한 명도 없었지만 아직도 많은 사람들이 기억하고 있는 것은 원전에서 핵연료가 녹아내린 사건이다.

일본 정부는 국민의 격렬한 항의가 두려워 모든 원전을 폐쇄해 버리고 말았다.²¹⁾ 1970년 이래 처음으로 일본은 원전 없이 전력을 생산하게 된 것인데 사고 한 해 전인 2010년에 원전은 일본 전력의 26%를 생산하고 있었다.²²⁾ 원전 폐쇄에 따른 전력 생산 부족분은 어쩔 수 없이 가스, 석유, 그리고 석탄 발전으로 메울 수밖에 없었다.

온실가스 배출은 급증하여 2013년에 최고점을 찍었다. 통계수치가 잡히는 마지막 해인 2014년에는 배출량이 좀 줄어들기는 했지만 아직도 2010년도 배출 수준보다는 높다.²³⁾

일본 정부가 재생에너지 투자에 대한 인센티브를 늘리면서 대처는 했지만 그와 함께 몇 곳의 원전을 다시 가동할 준비에 들어가기 시작했다.



〈그림 1〉 일본의 에너지 공급 현황

18) Carbon Brief(2016). Analysis : 후쿠시마 참사의 유산

19) IAEA(2015). 후쿠시마 제1원전 사고

20) 일본 경찰당국에 의하면 2016년 9월9일 현재 사망자는 15,894명이며 실종자는 2,557명임.

21) Betty, D(2012). 일본 마지막 원전의 가동을 중지시키다. The Guardian(online) 5월5일

22) World Development Indicators상의 원전에 의한 전력 생산 비율, World Bank

23) 일본의 2014년도 온실가스 배출, 일본 국립 환경연구소



나. 독일

후쿠시마 원전 사고 이후 독일 역시 17곳의 원전 전부를 2022년까지는 폐쇄할 것이라고 발표했다.²⁴⁾ 독일은 원전 폐쇄로 부족해지는 전력을 재생에너지와 단계적으로 폐쇄하려고 계획 중이던 석탄발전으로 대체하고 있다.²⁵⁾

결국 1990년대 초부터 2010년까지 꾸준하던 독일의 온실가스 배출량 감소세는 멈추고 말았다. 독일 최대 규모의 Grafenheinfeld 원전이 가동을 멈춘 2015년에는 오히려 0.7%가 증가했다.²⁶⁾

더 추워진 기상 조건 등이 원인이 되었을 가능성도 있겠지만 분명한 것은 저탄소 에너지원인 원전을 없애버리면 이산화탄소의 배출을 줄이기가 더욱 더 어려워지는 것이다.

화석연료를 쓰는 발전 설비와 동시에 원전 가동까지 조금하계 중지시키면 두 가지 발전 시설을 한꺼번에 대신해야 할 재생에너지 발전 설비에 대한 투자와 건설이 그렇게 빠르고 쉽게 이루어지기가 어렵기 때문이다.

7. 후쿠시마 원전 사고에 대한 그 밖의 대응 방식

중국도 후쿠시마 원전 사고에 이후 대응책을 시행하였다. 국가위원회는 종합적인 안전성 검토를 시행해야 한다는 이유로 새로운 원전 건설 프로젝트의 승인을 보류시켰다.

하지만 중국은 2012년 10월 대규모의 원전 건설을 신속하게 재개하도록 하는 결정을 내렸다.²⁷⁾ 중국 정부는 2015년 현재 겨우 3% 수준인²⁸⁾ 원전의 전력 공급 비율을 2030년까지 8~10%로 끌어올리려고 한다.²⁹⁾

중국이 원전 비중을 높이려는 가장 큰 이유는 석탄에 의한 공해를 줄이기 원하기 때문이다. 2013년 한 해에 중국은 39억5천7백만 톤의 석탄을 태웠는데 소비하는 석탄의 양은 당분간 더 증가될 것으로 보인다.³⁰⁾

“원전이 없으면 지구 온난화에 대처할 방법은 없는 것과 마찬가지이다. 심지어 상당수의 환경운동가들도 사석에서는 이 사실을 인정하고 있다.” – Mark Lynas³¹⁾

24) Bredhardt, A(2011). 독일정부는 적어도 2022년까지 원전 퇴출을 원한다. Reuter(online)5월30일

25) Rueter, G(2015). 독일 탈원전의 길 얼마나 진행되고 있나? Deutsche Welle(online) 6월29일

26) 독일 환경국 및 연방 환경자연보호전문, 원자력안전부(2016). UBA 온실가스 배출 자료에 따르면 Climate Action Programme 2020의 지속적인 시행이 시급함(online 영어 보도자료) 3월17일

27) IAEA(2015). 각국의 원전 현황

28) IAEA(2017). 2015년도 원전의 전력 생산 부담률

29) World Nuclear Association(2017). 중국의 원전 상황

30) US Energy Information Administration/ 국제 에너지 통계

31) Lynas, M(2012). 원전이 없으면 지구 온난화와 싸우기를 포기하는 것. Guardian(online) 9월14일

방사능이 장기적으로 인체에 미치는 영향 바로 알기

원전이 인체의 건강에 미치는 영향에 관한 예전의 토론들을 되돌아보면 두 가지 점에서 한계가 있다는 것을 분명히 알 수 있다. 우선 자료로 삼을만한 장기적인 데이터가 없다는 점과 석탄발전소 등에서도 발생하는 방사능의 위험성과 비교해 봄으로써 균형성을 확보한 비교 자료가 없었다는 점이다.

냉전시대 핵무기 경쟁의 공포에 영향을 받을 수밖에 없었던 예전의 원전관련 논쟁에서는 원전 사고로 생길만한 결과에 대한 예상이 정말 제멋대로였다.

그래서 옛 소련의 노후한 체르노빌 원전에서 1986년도에 사고가 터졌을 때 많은 사람들은 수백만 명이 죽게 될 것이라고 생각했다.³²⁾ 체르노빌 원전 사고가 한 지역 사회를 파괴해버린 것은 분명하지만 방사능 누출로 인한 암이 급속하게 늘어날 것이라는 예상은 잘못된 것으로 판명되었다.

당시에는 그런 주장을 반박할만한 자료도 없었지만 지금은 충분히 있다. 그렇기 때문에 이제는 방사선 영향에 관한 UN과학위원회(UNSCEAR)가 설립되어 후쿠시마 원전 사고에서 그랬던 것처럼 원전 사고가 발생하면 신속하고 훨씬 더 정확하게 사고 결과에 대한 평가를 할 수 있게 된 것이다.

1. 체르노빌과 후쿠시마 원전 사고가 인체에 미친 영향에 관한 자료

2011년 4월 UNSCEAR은 중전에 발표했던 2000년과 2008년의 ‘체르노빌 원전사고에 의한 방사선피폭의 영향 보고서’를 다시 업데이트해서 발표했다.³³⁾

최신 보고서를 발표한 목적은 사고 발생 지역의 주민들을 20년 이상 추적 조사해서 누적된 자료를 바탕으로 한 “방사능이 인체에 미치는 영향을 신뢰할만하고 확실하게 조사한 결과를 제공해 주기 위한” 것이었다.

이 보고서에 따르면, 체르노빌 사고에 의한 방사선 피폭의 영향이 심했던 우크라이나와 벨라루스, 그리고 러시아에서 가장 오염도가 높았던 지역 4곳의 아동과 청소년 중에서 갑상선암이 증가한 것으로 나타났다.

2005년까지 피폭 당시 18세 미만이었던 아이들 6,848명에게 암이 생긴 것으로 보고되었는데, 갑상선암은 대개 치료가 가능하기 때문에 15명만이 치명적인 상태인 것으로 밝혀졌다.³⁴⁾

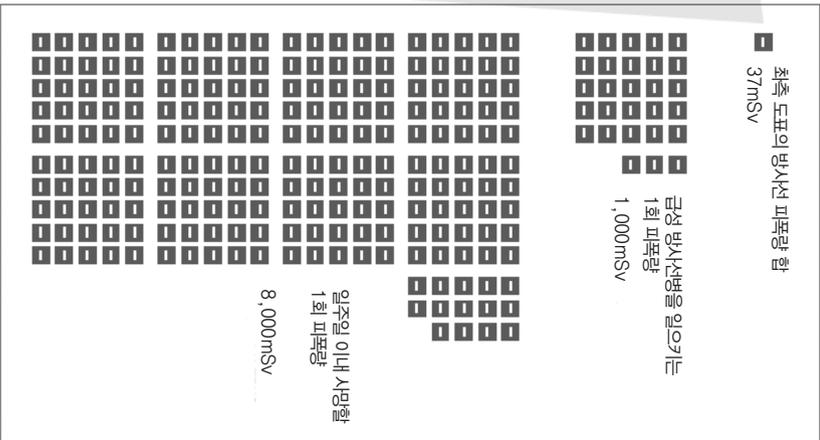
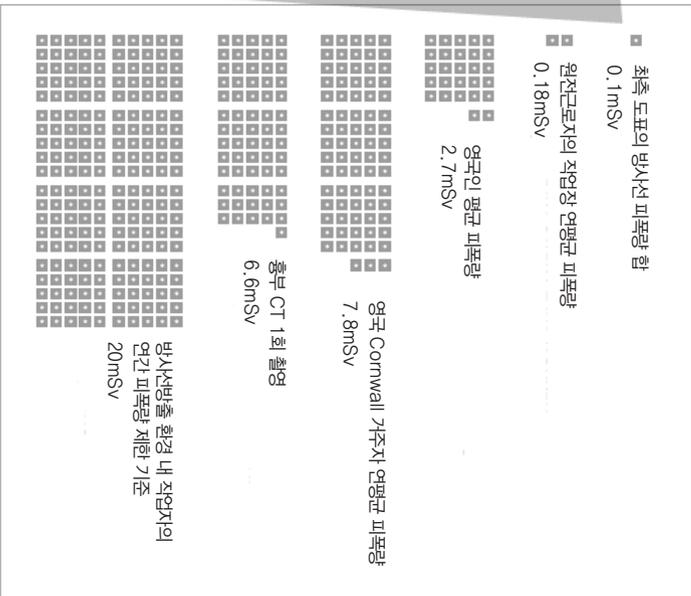
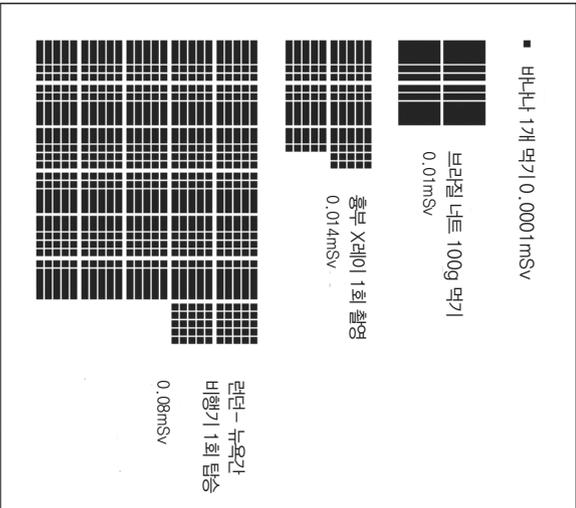
대부분의 경우 갑상선암은 피폭된 직후 요오드칼륨 치료를 받으면 예방할 수 있으며, 방사능에 피폭이 된 소에서 짜낸 우유를 통한 방사능 요오드-131 피폭의 가능성이 있는 경우에도 마찬가지다. 그렇지만 체르노빌 원전사고 당시에는 그와 같은 대응책이 즉각적으로 시행되지 못했던 것이다.

후쿠시마의 원전사고 경우는 방사능이 사람들에게 끼친 영향이 더욱 분명하게 밝혀졌다. 방사선 피폭으로 인해 사망자는 하나도 없었다. 2013년도에 UNSCEAR는 “후쿠시마 제1원전 사고에 의한 방사선 피폭은 일반인들은

32) Balonov, M(2012). 잘 모르는 독자들을 체르노빌 신화로부터 지켜내기. Journal of Radiological Protection 5월8일

33) UNSCEAR(2000). 체르노빌 원전 사고의 방사선 피폭 및 인체의 영향

34) UNSCEAR(2011). 전리 방사선의 근원과 영향



1X = 1,000 x

1X = 370 x
1X = 370,000 x

〈그림 2〉 방사선이 장기적으로 건강에 미치는 영향 - 방사선 피폭량 비교

물론 현장에 있던 사람들의 건강에 직접적인 영향을 끼치지 않았다.”³⁵⁾는 결론을 내렸다. ³⁶⁾

UNSCEAR 보고서는 또 일반인의 피폭량은 전반적으로 낮거나 아주 낮았으며 일반인이나 그 자손들에게 방사선과 관련된 건강상의 문제가 생길만한 눈에 띄는 사고는 없을 것이라고 결론지었다.

UNSCEAR가 밝혀낸 바에 의하면 피폭 아동들에게는 특히 갑상선암의 발생 비율이 증가할 수도 있으나 현재까지의 자료에 의하면 그런 특이한 현상이 발생한다 해도 그 이유는 방사선 때문이라기보다는 피폭 아동들에 대한 적극적인 검사 프로그램 때문일 가능성이 크다고 한다. ³⁷⁾

발전소와 협력업체 직원, 사고 처리에 동원된 대원 및 자원봉사자 등을 포함해 후쿠시마 원전 사고 당시 현장에 있었던 약 2만5천명의 사람들 가운데 피폭으로 인해 사망하거나 직접적인 건강상의 피해를 입은 사람은 없었다.

UNSCEAR는 피폭량이 가장 컸던 작업자 12명의 검사 자료를 조사한 결과, 갑상선암이나 다른 갑상선 질환의 발생 가능성이 다소 높아질 위험성이 있다고 판단을 내렸다. 이들 외에도 약 160명 정도의 작업자들이 대략 100mSv 이상으로 추정되는 방사능에 피폭되어 앞으로 암이 발병될 위험성이 좀 높아질 것으로 예상된다.

그렇지만 피폭된 작업자의 숫자가 너무 적은 탓으로, 그 가운데 몇 명 정도에게 새로운 질환이 더 발병할 것이라는 예상이나 확실하게 일반인보다 암 발생률이 어느 정도 높았다고 말하기는 어려울 것이다.

사고 현장의 방사능 유출로 인한 예방적 조치로 업체류와 사고 현장 인근지역의 풀을 먹인 소에서 짜낸 우유는 판매가 금지되었다. 이 같은 품목들에 대한 철저한 검사 조치는 계속 취해졌고 2015년에 시행한 분석 결과 대부분 채소의 방사능 수치는 급속하게 낮아졌는데 사고 이후 5개월만에 시행한 검사에서도 소량의 샘플에서만 제한 수치를 초과했다. ³⁸⁾

EU와 일부 다른 지역 국가들은 예방적 차원에서 후쿠시마 인근 지역에서 생산한 식품의 수입을 거부했지만 위험성이 확인된 경우는 없었다. 또한 UNSCEAR는 만년의 건강상에 문제가 생길 정도로 방사선에 피폭된 사람들이 많지 않았음을 확인하였다. 같은 시기에 세계보건기구(WHO)의 보고서에서도 동일한 사실이 확인되었고³⁹⁾ 뒤 따라 나온 IAEA의 대규모 조사보고서에서도 마찬가지였다. ⁴⁰⁾

2. 사고 지역 주민의 소개 효과

원전 사고 후 세월이 흐른 뒤에 나오는 장기적인 자료를 보면 또 다른 유형의 우려할만한 일이 생기는 것을 알 수 있다. ⁴¹⁾ 최근 연구에서는 심각한 방사선 사고에 의한 비상상태가 정신적인 문제의 원인이 될 수가 있으며 저준

³⁵⁾ United Nations Information Service(2013). UN 과학전문가위원회는 후쿠시마 원전 사고에 의한 인체의 직접적인 위험 요인은 없다고 발표.

³⁶⁾ UNSCEAR(2013). 전리 방사선의 근원, 영향 및 위험 요소, UNSCEAR 2013 UN총회 보고서

³⁷⁾ Ohira, T 외(2016). 후쿠시마 원전 사고 이후 체외 피폭량에 근거한 세 지역의 아동기 갑상선암 유병률 비교, Medicine(Baltimore)

³⁸⁾ Merz, S 외(2015). 후쿠시마 원전 사고 이후 일본 식품에 대한 방사성 핵종 조사의 분석, Environmental Science and Technology(2875-2885쪽)

³⁹⁾ WHO(2013). 2011년 후쿠시마 원전 사고 이후의 초기 피폭량을 근거로 한 인체 유해성 조사

⁴⁰⁾ IAEA(2015). 후쿠시마 제1원전 사고

⁴¹⁾ Bromet, EJ Havenaar, JM(2007). 체르노빌 원전 사고에 의한 정신건강학적 영향 : 20년간의 조사, Health Physics(516-521쪽)



위 방사선 피폭의 위험성이 미리 과장되어 퍼지는 상황 자체가 매우 위험하다는 사실이 밝혀지고 있다.⁴²⁾

방사선 사고로 발생하는 비상사태에서는 사람들의 신체적인 위험을 방지하고 더 이상 방사선에 피폭될 가능성을 최소화시키는 것이 가장 우선이다.⁴³⁾ 그러나 이런 조치를 위해서 보통은 해당 지역의 인구 전체를 소개시키게 된다. 이런 조치는 필요 이상으로 주민들의 일상생활을 망가뜨릴 뿐만 아니라 때로는 너무 오랫동안 너무 많은 사람들이 소개되는 바람에 외상 후 스트레스나 우울증 등 정신적 질환의 징후에 시달리기도 하는데 이는 방사선의 위험성을 과도하게 부풀리는 데서 악화되는 문제들이다.

“우리는 방사선에 피폭된 사람에게 그 위험성에 대한 정보를 올바르게 알려주는 방법을 제대로 배우지 못한 것 같다. 체르노빌 원전 사고 지역에서 피해를 입었던 사람들에게는 방사선의 위험 요인들과 직접적인 관계가 없는 정신적인 후유증도 많았는데 그런 점에 대한 연구도 거의 없었다. 이제 방사능의 위험성은 반드시 전체적 상황이라는 맥락에서 파악되어야 한다.”

- Gerry Thomas 교수, 런던 Imperial College

3. 방사선 환경의 작업자

방사선에 영향을 받는 작업 환경에서 일하는 사람에 대한 국제적인 제한규정은 작업장이 원전이나 혹은 의료시술용 기구를 다루는 병원이나에 상관없이 연간 20mSv로 되어 있다.⁴⁴⁾

피폭량에 대한 이같은 제한은 큰 논란거리가 되어왔다. 이 제한 규정이 너무나 엄격해서 치과같은 곳에 터무니 없는 비용 부담을 지운다고 생각하는 사람이 있는가 하면, 현행의 규정이 그리 엄격하지 않을 뿐 아니라 다른 방사선 오염원에 더 노출되어 있는 사람들도 이론상 위험에 처해 있다고 믿는 경우도 있다.

원전에 의한 방사선 피폭의 영향은 일반적으로 다른 방사선 피폭의 경우들과 함께 전체적 맥락에서 다루어본 적이 없다. 영국의 일반인들은 발을 딛고 살고 있는 땅에서 방출되는 것을 포함해 1년 평균 2.7mSv의 방사선에 피폭되고 있는데⁴⁵⁾ 대서양을 건너는 비행기 안에서 0.5mSv, 흉부CT촬영으로 7mSv 등 수없이 많은 근원으로부터 방사선의 영향을 받으며 살고 있다.

4. 우리가 아는 것과 모르는 것

세계적으로 원전 사고뿐 아니라 의료용 촬영, 비행기 탑승, 자연적 방사선 그 밖의 경로를 통한 것 등 각각의 방사선 피폭량이 인체에 미치는 영향에 대한 현재의 정보는 1990년에 비해 훨씬 더 많아졌다.

사람마다 살면서 각기 다르게 피폭되는 방사선의 유형과 수준에 대해 정확하게 조사하는 것은 매우 복잡한 일이다.⁴⁶⁾ 그러나 방사선 피폭이 인체에 미치는 영향을 정확하게 알아내는 것은 반드시 해야 할 일이며 바로 그것을

42) Ohtsuru, A 외(2015). 원전 사고와 건강 문제 : 얻은 교훈, 문제점, 제안. The Lancet(489-497쪽)

43) Bromet, EJ(2015). 원전 사고의 정서적 영향. Health Physics(206-210쪽)

44) 공중보건과 안전의 시행지침. (영국) 전리 방사선 규정 1999

45) 영국 공중보건. 우리가 알아야 할 전리 방사선

46) UNSCEAR(2008). 전리 방사선의 근원과 영향. UN총회 보고서 2권.

위해 UNSCEAR가 설립된 것이다.

유감스럽게도 우리가 안다고 생각하는 것들 사이에는 중요하지만 매우기 어려운 틈이 존재한다. 방사선 피폭의 결과는 한 사람이 피폭된 양과 그 피폭에 대한 반응(피폭에 의한 영향) 사이의 관계에 의해서 나타나는데, 대개 피폭량이 많을수록 인체에 미치는 영향은 더 해롭다.

그런데 우리는 매우 높은 수준의 방사선 피폭의 영향에 대해서는 잘 알고 있지만 소량의 피폭에 대해서는 잘 모르고 있다. 우리는 현재 피폭량의 크기에 의한 선형비율적 효과로 방사선 피폭의 영향을 추정하고 있는데, 그것이 바로 선형무역치 모델(LNT)이며 이 모델은 아무리 낮은 수준의 피폭량이라도 암 발생의 위험성을 증가시킨다고 추정한다.

따라서 LNT 모델은 방사선 피폭에 대한 주의를 지나치게 높은 수준으로 요구하고 있는데 오늘날 모든 방사선 방호지침과 관련 규정들은 이 모델을 근거로 삼고 있다.

그렇지만 우리가 살고 있는 주변 환경에서 배출되는 것처럼 극히 낮은 수준의 방사선도 인체에 해롭다는 확실한 증거는 없다(전혀 해롭지 않을 수도 있다⁴⁷⁾). 그래서 이제는 LNT 모델에 의문을 제기하는 사람이 많아지게 되었으며⁴⁸⁾⁴⁹⁾ 프랑스 정부와 미국 정부가 의뢰한 연구 결과 보고서들은 LNT 모델 방식의 접근법을 뒷받침해 줄 만한 증거가 없다는 결론을 내렸다.⁵⁰⁾⁵¹⁾

영국의 Cornwall이나 이란의 Ramsar 같이 자연 상태의 방사선 수준이 높은 지역에 사는 주민들이라고 암 발생률이 더 높은 것 같지는 않다.⁵²⁾⁵³⁾ 심지어 아주 낮은 방사선 피폭은 오히려 인체에 이롭다는 증거도 있는데, 2016년에 발표된 어느 장기적인 연구보고서는 1940년 이후에 의대를 졸업한 방사선과 의사들의 원인불명 사망률이 사회경제적인 위치가 거의 비슷하면서 방사선 피폭과는 거리가 먼 정신과 의사들과 비교해서 같거나 낮았다는 사실을 밝혀냈다.⁵⁴⁾

이 보고서는 비슷한 내용의 연구 중에서 규모가 가장 큰 것이었다. 방사선과 의사들의 피폭 수준은 원전 근로자 같이 방사선에 노출되어 있는 다른 직종보다 훨씬 더 높기 때문에 이와 같은 연구보고서는 장기적인 저준위 방사선피폭의 영향을 이해하는 데 매우 도움이 될 것이다.

LNT 모델은 뒷받침할 증거가 빈약함에도 불구하고 인체의 보호를 우선시하는 측면에서 당분간 고수될 수밖에

47) Thomas, G(2015). 후쿠시마 이후의 원전 불신 문제는 풀 수 있다. New Scientist(online) 8월6일

48) 미국 방사선방호추진심의회(2001). 전리 방사선 측정을 위한 LNT 용량-반응모델 평가보고서

49) Cohen, BL(2008). 방사선 발암에 대한 LNT 이론은 반드시 부인되어야 한다. Journal of American Physicians and Surgeons(70-76쪽)

50) Tubiana, M과 Aurengo(2006). 저준위 전리 방사선의 발암성과 선량 효과 사이의 관계와 평가: Academie de Sciences(Paris)와 Academie Nationale de Medecine의 합동보고서. International Journal of Law Radiation(135-153쪽)

51) 미국 방사선방호추진심의회(1995). 집단적 방사선방호의 원칙과 적용(보고서 제121호)

52) Etherington, DJ 외(1996). 영국 남서부 지역의 암 발생 및 라돈 수치에 대한 환경적 연구. European Journal of Cancer(1189-1197쪽)

53) Ghiassi-nejad, M 외(2002). Ramsar 지방의 매우 높은 자연 방사선, 이란 : 생물학적 예비연구. Health Physics(87-93쪽)

54) Berrington de Gonzalez, A 외(2016). 미국 방사선 의사 43,763명과 정신과 의사 64,990명의 장기적 사망률 비교. Radiology(847-858쪽)



없는 가설로 인정할 수도 있겠지만 그에 상대적인 측면도 있다.

원전 건설에 막대한 비용이 들어가는 이유 가운데 하나는 현행 방사선 장해 방지 규정을 준수하기 위해서 방사선 유출량을 극소화하는 극단적인 공학 기술을 적용하기 때문이다.

이제는 누구나 다 아는 사실이지만 석탄화력발전소가 방출하는 방사선 수준이 원전보다 더 높아서 석탄화력발전소 80km 이내에 사는 사람들의 피폭량은 연간 0.003mSv인 반면 원전 근처에 사는 사람은 0.0009mSv에 불과하다.⁵⁵⁾

석탄이 연소될 때 자연적으로 생기는 방사선 물질은 비산(飛散)되는 재나 바닥의 재 안에 응축되어 남게 된다. 석탄화력발전소에서 발생시키는 재에는 원전에서 방출되는 것보다 100배 많은 방사선이 들어 있는 것이다.⁵⁶⁾

더 중요한 것은 LNT 모델을 따를 경우, 방사선의 피해를 입지 않았음에도 이 모델 방식에 근거한 규정상 사고 지역 인근의 주민들은 살던 곳에서 소개될 수밖에 없어서 집을 떠난 사람들이 큰 고통을 겪기 때문에 특히 후쿠시마 원전 사고 이후에 LNT 모델을 대신해서 적용할 새로운 방식을 찾아내려는 열망이 점점 커지고 있다.

원전 프로젝트 관리 경험으로 얻게 된 것

역사적으로, 원전이 인체의 건강에 미치는 영향 외에 지금까지 우리가 가장 크게 우려한 것은 ① 방사성폐기물 처리를 어떻게 할 것인가, ② 원전이 더 많이 생기면 핵무기 개발의 가능성이 더 커지거나 혹은 테러의 목표물이 더 늘어나게 될 가능성이었다.

모두 방사능 물질의 특성과 관련된 이 두 가지 문제에 대해서 우리가 새롭게 인식하게 된 점은 사실 별다른 것이 아니라 우리가 오랫동안 알고 있던 것들이다. 또한 그 문제들은 우리가 원전과 관련해서 건강 문제와 기후 변화 문제 다음으로 자주 생각하고 있는 것이다.

그러나 이 두 가지 문제는 수 없이 화젯거리로 오르기도 하고 방사능 물질을 관리하는 데 있어 고려해야 할 새로운 관련 정보가 있을 수 있기 때문에 이번 토론에도 포함을 시켰다.

1. 방사성폐기물

핵연료의 제조, 원자력 발전, 사용후핵연료의 재처리 및 연구개발 프로젝트 등을 모두 포함하는 원전산업은 영국에서 발생하는 전체 방사성폐기물의 94%를 차지하는 최대의 폐기물 발생원이다.⁵⁷⁾ 나머지 방사성폐기물은 의료용, 식품 및 의료 장비 소독용, 연구용, 군사용 목적의 발생원에서 나온다.⁵⁸⁾

그렇지만 영국에서 처리해야 하는 방사성폐기물 가운데 압도적으로 많은 부분은 예전에 가동하던 원전들과

55) Want to estimate your annual radiation dose? <http://scilearn.sydney.edu.au>

56) McBride, JP 외(1978). 석탄발전소와 원전에서 공기를 통해 배출하는 방사성 물질의 영향. Science(1045-1050쪽)

57) 영국 에너지 및 기후변화부(2014). 영국의 방사성폐기물: 2013년 보유량 개요

58) 영국 방사성폐기물 현황. 방사성폐기물의 출처. <https://ukinventory.nda.gov.uk>

1950년대의 핵무기 등에서 배출한 물려받은 유산적 폐기물이다. 이 폐기물의 대부분은 핵폐기물 처리나 원자로 폐기와 관련된 문제 따위는 나중에 생각해도 되는 일쯤으로 치부하던 시대의 유산인 것이다.

문제를 그렇게 생각 없이 처리한 결과 초창기에는 각기 다른 준위의 방사능 물질을 함께 섞어서(예를 들면 고준위 방사능 물질을 담은 봉인 용기를 연구원들이 착용했던 장갑이나 옷 또는 철거한 원전 건물의 콘크리트 폐기물 등과 분리하지 않은 채) 폐기했다. 2013년 시행된 폐기물 조사에서 영국에 있는(모든 출처에서 나온 모든 종류의) 방사성폐기물의 양이 430만 m³에 이르는 것으로 밝혀졌다.

반면에, 오늘날의 원전산업에 적용되고 있는 규정과 현재 국방을 위한 군사용, 의료용, 산업용 목적으로 쓰이는 방사능 물질의 사용량에 근거하여 영국 핵물질폐기국(NDA)은 향후 100년 동안 영국에서 약 16만 m³의 방사성폐기물이 나올 것으로 추정하고 있다.

물론 앞으로 어떤 유형의 원자로들이 얼마나 많이 가동될지도 모르면서 폐기물이 정확히 얼마나 발생할 것인지 말할 수는 없다. 원전산업 측에서는 현재 건설되고 있는 제3세대 원자로들은 이전에 지어진 원자로보다 폐기물을 훨씬 적게 발생시킬 것이라고 주장하고 있지만⁵⁹⁾ 정부에서 구형 원자로를 조기에 퇴역시키지 않을 수도 있다.

어찌되었든 원전의 폐쇄와 핵폐기물의 관리 문제는 이제 발전 단계에서 접어들면서 계획들을 제대로 세우고 있기 때문에 여전히 아무 생각 없이 유산적 폐기물을 엄청나게 쌓아놓지는 않을 것이다.

2. 유산적 폐기물의 처리

영국에서는 들어있는 방사능의 양과 열 발생량에 의해서 방사성폐기물이 분류된다. 폐기물 중에 약 94%는 당연히 준위가 낮거나 매우 낮으며, 중준위의 폐기물은 6%, 고준위 폐기물은 0.1%도 되지 않는다.

전체 폐기물 가운데 고준위 폐기물이 차지하는 양이 극히 적다하더라도 그 안에는 배출된 방사능의 95%가 들어있기 때문에 폐기물의 대부분을 차지하는 저준위 폐기물에는 전체 배출 방사능의 0.01% 밖에 들어 있지 않다.

핵폐기물에는 방사능이 오랜 시간에 걸쳐 감소하는 방사성 동위원소가 들어 있기 때문에 위험한 것이다. 방사능은 물질에 들어 있는 방사능의 값이 절반으로 떨어지는 데 걸리는 시간인 '반감기'로 측정이 된다. 동위원소들의 반감기는 각각 달라서 1초도 안 걸리는 것부터 몇 백만 년 혹은 몇 십억 년 이상 걸리는 것까지 극도로 서로 다른데, 반감기가 길다고 해서 꼭 몸에 해로울 가능성이 더 큰 것은 아니다.

3. 폐기물의 유형

저준위 폐기물에는 고철, 종이, 플라스틱 그리고 핵 관련 시설에서 사용된 옷이나 장갑 같은 모든 종류의 품목들이 포함된다. 중준위 폐기물에는 주로 핵연료 용기 같은 금속류와 원자로 부품, 그리고 노심에 들어간 흑연 등이 포함되며 고준위 폐기물로는 재처리된 사용후핵연료가 있다.

⁵⁹⁾ 세계원자력협회. Our mission (<http://www.world-nuclear.org/who-we-are/mission>)



4. 방사성폐기물의 처리법

저준위 폐기물은 규정에 따라 매립하면 된다. 소량의 초저준위 폐기물은 일반적인 생활 쓰레기 또는 산업 폐기물과 함께 안전하게 처리하거나 매립하면 된다.

대부분의 중준위 폐기물은 대형 스테인리스 용기나 시멘트 상자 안에 넣어서 시멘트로 밀봉 처리하는데, 먼저 가능한 한 압축하여 크기와 수분 함량을 줄인다. 중준위 폐기물을 두꺼운 무쇠 용기에 직접 저장하기도 하는데 이렇게 하면 저장 시설에서 별도 차폐 작업을 하지 않아도 된다.

고준위 폐기물은 내부의 방사능에 의해 많은 열을 발생시키므로 우선 질산용액에 넣은 다음 땅속 깊이 저장하는 동안 안정성을 유지시키기 위해 유리로 만드는 유리화 작업을 진행한다.⁶⁰⁾

원전에서 사용이 끝난 핵연료의 40~50년 후 방사능 수준은 1천분의 1까지 떨어지게 되며 1천년 후에는 우라늄광의 방사능 수준과 같게 된다.⁶¹⁾ 따라서 핵폐기물을 저장하는 일에 종사하는 기술자들은 1,000년 동안 고준위 폐기물을 안전하게 저장할 수 있는 기술을 개발해야 하는 것이다.⁶²⁾

5. 지층 처리법

방사성폐기물을 관리하는 방법 중 하나는 지층처리법으로서 폐기물을 땅속 깊이 묻는 것이다. 이 처분 방식은 폐기물 저장 시설을 두껍고 밀도가 높은 차단층 내부에 매립하면 방사선을 수월하게 차단할 수 있으므로 기술적으로 단순한 편이다.

지층의 폐기물 저장 시설은 통상 안정적인 암석 지형을 300미터 또는 1,000피트 정도로 깊이 파낸 곳에 만들기 때문에 폐기물이 지하수에 노출될 염려가 없고 지진이 일어나도 저장 상태가 손상되지 않는다. 또한 유지 보수 작업 없이 장기적인 격리 저장 상태를 지속할 수 있는 시설이다.

핀란드는 이런 장기 지층 폐기물 저장 시설을 처음으로 운영할 나라인데 Onkalo(동굴)라고 이름 붙인 이 저장 시설은 핀란드 남서연안에 있는 한 섬의 화강암층에 건설되고 있다.

핀란드 당국은 2023년부터 이곳에 고준위 폐기물을 저장할 수 있게 될 것으로 기대하고 있는데 점토로 둘러싼 폐기물을 금속제통 속에 담아서 2120년까지 저장한 다음 영구히 밀폐시킬 계획이다. 이렇게 처리하면 폐기물의 위험성이 다 사라진 후에도 수천 년 동안 안전한 격리 저장이 가능할 것이다.⁶³⁾

6. 핵폐기물의 재활용

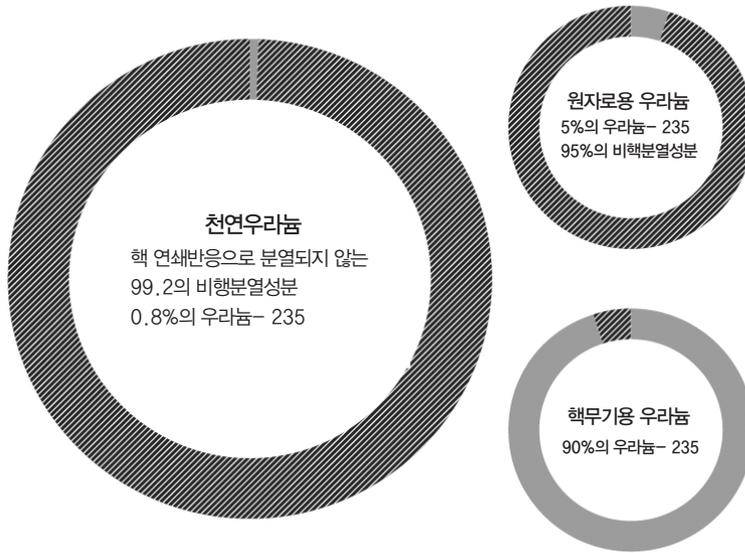
‘핵폐기물’은 원전에서 발생하는 모든 부산물을 일컫는 말로 흔히 쓰이고 있지만 그 중 일부는 재활용할 수가 있다. 사용후핵연료는 재처리 과정을 통해 우라늄과 플루토늄을 회수한 다음에 새로운 연료를 만드는 데 다시 사용

60) 세계원자력협회(2016). 방사성폐기물의 관리와 처리 (<http://www.world-nuclear.org>)

61) 세계원자력협회(2016). 방사성폐기물의 관리 (<http://www.world-nuclear.org>)

62) MacKay, D JC(2008). Sustainable energy without the hot air(24장170쪽)

63) Gibney, E(2015). 왜 핀란드는 핵폐기물 저장의 세계적 리더가 되었나? Nature(online) 12월2일



〈그림 3〉 우라늄의 종류

할 수 있다.⁶⁴⁾

혼합산화물(MOX) 연료는 사용 후 핵연료에서 회수한 플루토늄을 열화우라늄과 섞어서 만드는데⁶⁵⁾ 이를 더 가공하면 핵무기용으로 바꿀 수도 있다.⁶⁶⁾

그래서 MOX의 대안으로 재생성 혼합물(REMIX) 연료를 테스트하고 있는 중인데, 이 연료는 분리되지 않은 재활용 우라늄과 플루토늄을 새로 농축한 우라늄과 함께 가공해서 연료로 다시 사용할 수 있게 만든 것이다.

이런 새로운 방식으로 핵연료 사이클을 마무리하려는 노력이 결실을 맺으면 앞으로 발생하는 방사성폐기물을 줄이는 동시에 첨단 기술들을 활용해 기존의 폐기물들도 처리할 수 있는 길이 열릴 수 있다.

7. 핵무기

원자력으로 전기를 생산해 내는 기술을 개발하는 것이 핵무기의 기본적인 구성 요소들을 고안해 내는 것과 비슷하다고 생각하는 사람들이 있다. 큰 나라에서는 에너지 프로그램과 국방 프로그램이 다소 관련될 수도 있겠지만 에너지 생산에 쓰이는 핵물질은 기본적으로 무기용으로는 적합하지 않다.

핵폭탄을 만들기 위해서는 특정 유형의 핵분열성 우라늄과 플루토늄(방사성 핵종 우라늄-235와 플루토늄-239)이 반드시 필요하고 또 이 물질들을 고도로 농축해야만 가능하기 때문이다.

64) 영국 방사성폐기물 현황 (<http://ukinventory.nda.gov.uk>)

65) 세계원자력협회(2016), 혼합산화물(MOX)연료 (<http://www.world-nuclear.org>)

66) 미국 원자력규제위원회(2017), 혼합산화물 연료에 관해 자주하는 질문 (<http://www.nrc.gov>)



원전에 사용되는 농축우라늄에는 우라늄-235가 5%까지 들어 있지만 핵폭탄에 사용되는 우라늄은 우라늄-235의 수준이 90%가 되도록 농축해야만 한다.⁶⁷⁾ 원자로 연료용 플루토늄은 우라늄-238을 몇 년 동안 연소시킨 폐기물인데 이를 플루토늄 원자로에 사용하면 전기를 생산해낼 수 있지만 이 물질 안에는 중성자를 더 가지고 있는 동위원소 플루토늄-240이 들어있다. 그런데 무기용으로 쓰는 플루토늄에는 함유된 플루토늄-240의 양이 거의 없어야 하고 또 아주 특수한 조건에서 매우 신속하게 만들어야만 생산이 가능하다.

우라늄 농축은 비용이 대단히 많이 들어가는 매우 어려운 작업이며 아주 특별한 시설도 필요하다. 다행히 우리에게는 1970년부터 시행된 역사적인 핵무기비확산조약(Treaty on Non-Proliferation of Nuclear Weapons) 같은 국제적인 핵비확산 조약이 있는데다 UN의 핵무기 감시 활동 등도 있어서 비밀리에 핵무기를 만드는 것은 비용 부담이 엄청날 뿐만 아니라 기술적으로도 매우 어려운 일이다.

그러나 만약 어느 나라가 국제조약을 무시할 마음을 먹는다면 원전에 대한 규제 조항 정도로는 그런 나라의 핵무기를 개발 계획을 막을 수가 없다. 그렇다고 해서 아무나 남몰래 우라늄을 농축하려 하거나 무기용 플루토늄을 제조하려고 시도할 것 같지는 않다. 그래도 할 수만 있다면 핵물질을 통제하는 규칙과 새로운 유형의 핵관리 시스템 등을 마련하기 위한 모든 노력을 기울임으로써 핵확산의 위험성을 더 줄일 수 있는 가능성은 있다고 본다.

변화하는 원전 기술

원전 기술이 발전하는 것도 일부 환경운동가들의 원전에 대한 시각을 바꾸어 놓는 데 일조를 한 것으로 보인다. 신형 원자로들은 폐기물 배출량은 적으면서도 전력 생산성은 더 높아서 효율성이 높을 뿐 아니라 안전성도 더 뛰어나다.

1. 구형 원전의 안전성

지난 40여년 동안 일어난 가장 심각한 원전 사고 두 건은 체르노빌과 후쿠시마 사고이다. 아무 원전 사고도 일어나지 않았다면 더 좋았겠지만, 이 두 건의 원전사고 덕분에 우리는 극한 원전 사고 상황의 확실한 자료를 얻을 수 있었고 이는 개선책을 세우는 데 큰 도움이 되고 있다.

영국과 미국, 일본 그리고 그 밖의 많은 나라에서 지금 가동되고 있는 원전들은 대부분 노후화되고 있다. 사고가 일어난 후쿠시마 제1원전은 비교적 더 오래된 원전으로서 이 원전의 원자로 6기 중 첫 번째 원자로는 1971년에 가동을 시작한 것이다.

6기 모두 다 비등수원자로인데 이미 1972년부터 안전검사관들이 안전성에 우려를 제기한 바 있다.⁶⁸⁾ 그렇지만 일본 정부는 후쿠시마 제1원전이 일부 문제점만 개선하면서 가동을 연장할 수 있게 승인을 해 주었고 바로 이런

⁶⁷⁾ 세계원자력협회(2017). 핵연료로 사용할 수 있는 핵탄두 (<http://www.world-nuclear.org>)

⁶⁸⁾ Goldenberg, S(2011). 일본 원자력의 위기: 규제당국의 경고를 받은 원자로의 위험성. The Guardian(online) 3월14일

개선 대책이 2011년 발생한 지진과 쓰나미에 원자로가 고장 나는 원인이 된 것으로 밝혀졌다.⁶⁹⁾

일본은 극도로 활동적인 지진대에 위치하고 있어서 후쿠시마 제1원전은 진도 5.7의 지진에도 견딜 수 있도록 건설되었다. 그런데 원전을 덮친 쓰나미의 높이는 15미터였다. 지진이 시작되자 원자로의 가동은 정상적으로 작동 정지되었지만, 원자로를 냉각시켜서 노심의 용융을 방지해야 할 비상디젤발전기와 충전지마저 뒤이어 밀려온 쓰나미에 침수되어 작동을 멈추고 말았다. 비상디젤발전기는 지하층에 있었는데 원전의 저층 지역은 “공학적으로 그리고 원전 규제상 사고 위험성이 가장 큰 장소”라고 표현되는 곳이었다.⁷⁰⁾

이런 문제는 원전의 위험성을 증가시키는 하나의 사례로 연구 대상이 되었다. 그렇지만 이번 사고는 오랫동안 원전에 반대해온 언론인이며 환경론자인 George Monbiot 같은 사람도 다음과 같은 좀 의외의 결론을 내리도록 만들었다.

“안전성이 제대로 확보되지도 않은 형편없고 낡은 원전이 엄청난 지진과 거대한 쓰나미에 일격을 당했다. 전력 공급이 끊겨 냉각 시스템이 엉망이 되자 폭발하기 시작한 원자로의 노심은 녹아버리고 말았다. 이 참사는 수준이 낮은 설계에다 부실한 공사가 더해진 웬지 눈에 익은 과거의 유산을 다시 드러낸 사고이다. 그런데도 치명적 수준의 방사선에 피폭된 사람은 우리가 아는 한 아직 전혀 나타나지 않았다. 원전은 가능한 가장 혹독한 시험 과정을 거치도록 되어있기 때문에 사람과 자연 환경에 끼친 영향은 생각보다 그리 크지 않았던 것이다. 그래서 이번 후쿠시마 원전 사고로 생긴 위기 상황은 내가 원전을 지지하도록 생각을 바꾸게 된 이유와 명분이 되었다.”⁷¹⁾

2. 그렇다면 새로운 기술은 무엇인가?

George Monbiot의 말이 옳다. 후쿠시마 원전은 너무 오래된 것이어서 1971년에 개발된 원자로에는 손대야 할 것이 너무 많았던 것이다. 우리는 여기서 현재와 미래에 사용하게 될 원자로의 안전성을 담보할만한 증거와 그에 관련된 의견을 더 중요시하는 사람들이 관심을 가질만한 점들을 얘기하고 있다. 따라서 그런 사람들에게는 신형 원전의 피동형 안전성 문제와 다양성 문제 같은 원전기술의 발전 분야가 가장 의미 있을 것이다.

3. 피동형 안전성

원전에 가장 큰 위험이 되는 요소는 냉각시스템의 고장이다. 체르노빌 원전과 후쿠시마 원전의 사고는 둘 다 냉각시스템이 작동을 멈춰서 발생한 사고였다.

냉각시스템은 핵분열이 일어나는 노심의 열을 제거하는 것이다. 만약 외부의 전력 공급이 끊기는 등의 문제가 발생할 경우 노심이 과열되어 냉각파이프의 파열 같은 손상을 입게 되거나 화재가 발생해서 결국은 핵연료가 용융되고 만다.

⁶⁹⁾ HM Chief Inspector of Nuclear Installations(2011). 일본의 지진과 쓰나미: 영국 원전산업에 던지는 의미 (<http://www.onr.org.uk>)

⁷⁰⁾ Synolakis, C와 Kanoglu, U(2015). 후쿠시마 원전 사고는 막을 수 있었다. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. (<http://rsta.royalsocietypublishing.org>)

⁷¹⁾ Monbiot, G(2011). Going critical. [Blog, online] 3월21일 (<http://www.monbiot.com>)



이런 사태에 대한 보완책으로 외부의 전력이 끊기면 원자로 내부의 핵분열이 서서히 멈추도록 만드는 시스템을 갖추고 있어서 원자로 내부의 열 축적과 노심이 과열되는 것을 억제해 주게 된다.⁷²⁾

근래의 원자로 설계는 체르노빌 원전과 후쿠시마 제1원전의 원자로 설계와는 이미 많이 달라졌지만 지금은 더 새로운 냉각시스템과 보완시스템이 나와 있다. 이런 새 시스템은 영국, 프랑스, 핀란드, 미국, 중국 등의 원자로에 지금 사용되고 있거나 사용될 예정이다.

가. 중력의 활용

원전에 전력 공급이 정지되는 위험한 상황이 발생하면 무엇보다 우선 노심 내부의 핵분열 반응을 중단시켜야 한다. 이를 위해서는 제어봉을 노심 안으로 떨어뜨려 주어야 하는데 전통적인 원자로의 안전시스템은 능동형으로 되어 있어서 누군가가 조작 버튼을 누르거나 전기로 가동되는 자동시스템으로 작동시켜야 한다.

이에 따라 대부분의 신형 원자로들은 피동형 안전시스템으로 바꾸게 되었다. 한 가지 방식을 예로 들자면, 제어봉을 노심 위에 위치시킨 다음 전자석으로 붙여 놓는 것이다. 만약 전력 공급이 끊기면 전기로 유지되던 전자석은 기능을 멈추게 되고 제어봉은 무게에 의해서 저절로 떨어지게 되는 것이다.

나. 액체 금속

전통적으로 노심의 과열을 방지하기 위해서 물을 사용해 왔다. 그렇지만 물은 지속적인 펌프 작동으로 높은 압력을 유지시켜야만 증기화되는 것을 방지할 수 있다. 이런 단점을 가진 물을 대신하는 냉각 방식이 지금 시험되고 있는데 여러 가지 장단점을 가지고 있다.

새로운 설계 중에는 노심을 나트륨 용액에 담그는 방식의 설계가 있는데 나트륨 용액이 냉각수 역할을 하면서 발생하는 열을 열 교환 방식으로 물을 끓이는 데 전용하는 것이다. 나트륨 용액의 비등점은 물보다 훨씬 높아 증발을 막기 위한 고압 장치가 필요 없으므로 안전성 면에서 상당한 이점이 있다. 또 나트륨은 열전도율이 월등해서 나트륨 냉각 방식 원자로는 사고가 발생했을 경우에도 열이 정상적으로 식기 때문에 오히려 안전할 수가 있다.

그렇지만 절대 안전한 시스템은 없는 법이다. 나트륨은 공기와 물속에서의 반응이 매우 강한 편이어서 항상 공기와 물에 직접 노출되지 않도록 튼튼한 용기 내부에 담아 놓아야 한다. 이 나트륨 냉각 방식 원자로는 아직 시험 단계에 있다.

4. 신형 원자로

가. 소형 모듈원자로(SMRs)

일반적으로 기존 원자로의 3분의 1 크기인 소형 모듈원자로는 건설과 운영이 훨씬 더 용이한 원전이라고 할 수 있다. 초기 투자 비용의 규모가 크지 않고 건설 공기가 더 짧으며 부품의 모듈화가 가능해 공장에서 제조한 부품

⁷²⁾ 세계원자력협회(2016). 원자로 안전 (<http://www.world-nuclear.org>)

을 조립하기 때문에 현장에서 맞춤형으로 건설하는 대형 원자로부터 효율성이 우월하다.

2014년에 시행한 타당성 조사에서 영국은 현재 설계되어 있는 소형 모듈원자로를 그대로 사용해도 2025년까지 가동할 수 있다는 사실을 확인했다.⁷³⁾ 영국 정부는 2015년 “가격 대비 성능이 가장 뛰어난 소형 모듈원자로 설계의 연구”⁷⁴⁾와 소형 모듈원자로를 채택한 원전이 저탄소 배출 에너지원으로서 자리를 잡을 수 있도록 준비하는데 2억5천만 파운드를 투자할 것이라고 발표했다.

나. 토륨 원자로

전통적인 원전의 또 다른 대안으로 언젠가 토륨을 연료로 쓰는 원자로가 나올 수도 있다. 토륨은 우라늄보다 매장량이 많고, 폐기물의 발생도 적으며 어떤 면에서는 본질적으로 더 안전할 뿐 아니라 핵확산의 위험성도 거의 없어 보인다. 그래서 현재 추진중인 원전 프로그램들은 전부 폐기하고 토륨원자로 개발 프로그램으로 대체되어야 한다고 주장하는 논평가들도 있지만 아직은 개발 단계에 있을 뿐이다.⁷⁵⁾

영국이 경험해본 원자로는 대부분 우라늄을 연료로 쓰는 것이었기 때문에 토륨 원자로의 기술을 확립하여 상용화하기까지의 전반적인 문제를 다 경험하려면 연구와 개발 프로그램을 처음부터 끝까지 또다시 수행해 보아야 하므로 빠른 시일 안에 이 원자로가 탄소 배출 문제와 전력 수요에 대처할 수 있는 대안이 되기는 어렵다.

다. 핵융합 원자로

핵분열의 반대 개념인 핵융합으로 에너지를 생산할 수 있는 날도 언젠가는 올 것이다. 이 원자로의 모델은 핵융합 원자로라고 할 수 있는 태양이다. 묻는 사람에 따라 다르기는 하겠지만 물리학자들 사이에는 핵융합이 가능해질 날이 20~40년 밖에 남지 않았다는 농담 같은 얘기가 있다고 한다.

그러나 핵융합 원자로는 반응하는 경원소의 전리기체를 섭씨 수백만 도에서 가두어 둘 수 있어야만 가능하다. 그럼에도 여기에 언급하는 이유는 이 원자로가 정기적으로 뉴스의 기사로 다루어지고 있는데다 유럽의 주요한 연구 계획의 주제 가운데 하나이기 때문이다.

유럽 토러스공동연구시설(Joint European Torus/JET)은 발전소와 같은 여러 환경에서의 핵융합에 관해 연구하는 곳이다. 이 연구소는 1991년 핵융합 에너지의 방출제어 연구에 성공했으며 그것을 기반으로 국제핵융합실험로(ITER)를 짓고 있다. 그러나 영국 에너지 및 기후변화부의 전 고문이었던 고 David MacKay교수의 주장처럼 지금 우리들에게 더 시급한 문제는 탄소 배출 에너지에서 벗어나는 것이다.

“핵융합 에너지는 아직 불확실하고 실험 단계에 있는 것에 불과하다. 나는 핵융합 에너지 문제가 해결될 것으로 예상하는 사람들이 좀 무모하다고 생각한다.”⁷⁶⁾

⁷³⁾ National Nuclear Laboratory(2014). 소형 모듈원자로(SMR) 타당성 조사 (<http://www.nnl.co.uk>)

⁷⁴⁾ HM Government(2015). 정부 예산지출검토 및 추계보고서 (<http://www.gov.uk>)

⁷⁵⁾ Evans-Prichard, A(2016). 영국은 Hinkley 원전을 뛰어넘어 21세기 원전 혁명을 주도해야만 한다. The Telegraph(online) 8월17일

⁷⁶⁾ MacKay, DJC(2008). Sustainable energy without the hot air(24장 172쪽)



5. 핵연료 순환재처리

앞으로는 폐기물 관리와 전력 생산 문제를 핵연료사이클 일체형 고속로(IFRS)가 한꺼번에 해결해 줄지도 모른다. 이 원자로는 달리 활용할 가치가 없어 폐기해야 하는 방사성 중 원소들을 핵분열시키는 방식으로 핵폐기물을 재활용할 수 있다.

또 이 원자로는 연료로 사용하기 위해 95% 우라늄으로 농축한 비핵분열성 우라늄-238을 에너지 생산용으로 쓸 수 있는 플루토늄으로 변화시켜 사용하는 것보다 더 많은 연료를 생산할 수도 있다.

전통적인 원자로에서는 열화우라늄이나 사용후핵연료 안의 우라늄-238에 남아있는 재활용 가능한 물질들을 그냥 폐기했다. 핵연료를 순환 처리하게 되면 한동안 우라늄을 새로 채굴할 필요가 없어지는데, 최근 한 연구에 의하면 현재 영국에 남겨진 핵폐기물만 활용해도 영국에서 500년 동안 쓸 수 있는 전기를 생산하기에 충분할 것으로 추산했다.⁷¹⁾

최종 의견

각 나라마다 에너지 수요에 대처하고 이산화탄소 배출을 줄이기 위해서 원전의 연구와 개발에 대한 민간 및 공공의 투자는 꾸준히 이루어져 왔다. 따라서 현재 개발되고 시험 중에 있는 원전 신기술들이 세계적으로 상당히 많을 뿐만 아니라 가동되는 원전이 늘어나면서 그로부터 나오는 관련 자료들도 계속 많아지고 있다.

원전에 관련된 정보는 반드시 투명해야 하고 원전이 석유와 가스 및 석탄의 대안으로 자리잡기 위한 논의에 유용하게 제공되어야 한다. 선택할 수 있는 원전 기술은 한 가지가 아니라 여러 가지 있으며 앞으로 10여년 동안 점점 더 많아질 것이다. 지금까지 정부와 원전산업의 원전 프로그램들은 상당히 비밀스럽고 폐쇄적으로 진행되었다. 그런 문제가 조금 해결되는 듯 했지만 이후 대형 에너지 기반 건설 사업의 발주와 입찰은 각국 정부와 업체들이 자기들이 선호하는 에너지 생산 방식과 그에 맞는 정보 제공 등으로 한정시키는 바람에 각 에너지원마다의 장점을 있는 그대로 보여주는 것조차 어려운 형편이었다.

따라서 연구자, 환경운동그룹, 과학단체 등 우리 모두는 최신 원자로와 안전시스템들을 정직하게 비교해 볼 수 있고 가격 변동이나 각각 이득이 되는 점 등에 대한 최신 정보를 공개하도록 관련자들에게 압력을 가해야 한다. 원전을 열린 마음으로 반대하는 사람인지, 마지못해 받아들이는 사람인지, 아니면 열성적으로 옹호하는 사람인지를 떠나 우리 모두 그래야만 한다는 것이 우리의 결론이다. 🌍

⁷¹⁾ Clarke, D(2012). 차세대원자로 방사성폐기물을 연료로 쓴다. The Guardian(online) 2월2일