



원자력 에너지에 대한 패러다임 관점 고찰

에너지 패러다임 변화와 분화

최종서

(주)대우건설 플랜트사업본부 엔지니어링실 기계설계팀 차장



· 경희대 대학원 석사(원자력공학)
· 북한대학원대학교 졸업(북한학)

머리말

사회 여러 분야에서 ‘패러다임(paradigm)’이란 용어가 변화 또는 전환(shift) 등의 표현과 함께 폭넓게 사용되고 있다. 에너지 분야도 예외는 아니다. ‘패러다임’을 처음 의미있게 도입한 토머스 쿤은 이를 하나 이상의 과학적 성취에 확고히 기반을 둔 활동, 즉 정상 과학(normal science)¹⁾ 이라는 개념을 설명하면서 사용하였다.

하나의 패러다임은 인정된 모형(model) 또는 유형(pattern)이 되며, 한 시대 특정 분야의 학자들이나 사회 전체가 공유하는 이론, 지식, 가치 등을 일컫는 개념이다. 사고와 인식의 틀을 의미한다고도 할 수 있다.

그러니까 산발적으로 각자 무리를 지어 연구하는 동의된 패러다임 이전의 상태에서부터, 훌륭한 과학적 업적을 이룩하여 하나의 모형으로써 모든 사고와 인식의 기준이 되고, 과학자 공동체에 의해 인정되고 그들이 이 모형을 따라 하고 학습하게 된다면 패러다임이 정립되는 것이다.

그런데 쿤에 따르면, 정상 과학을 하다 보면 변칙 사례(anomaly), 즉 패러다임에서 예상한 것과 다른 일이 생기는 상황이 발생하는데, 이런 상황이 누적되면 정상 과학은 위기를 맞으면서 결국 붕괴된다. 이 위기를 해결할 조짐이 보이면 그 새로운 아이디어를 추종하는 사람들이 생겨나며, 그

1) 토머스 쿤, 과학혁명의 구조, 제4판, 김명자, 홍성욱 옮김, 까치글방, 2013

런 사람들이 충분히 모여서 동의된 모형이 수립되면 새로운 패러다임이 형성된다고 하였다.

즉, 새로운 패러다임은 그냥 형성되는 것이 아니라 과학 혁명을 통해서 이루어진다. 예컨대 코페르니쿠스 혁명, 뉴턴 역학, 상대성이론과 양자역학 같은 경우에 해당한다. 생물학 분야의 경우, 창조론의 전통은 다윈의 진화론이 정설로 받아들여지면서 대체되었다.²⁾ 혁명이 종료되면 새로운 패러다임을 기반으로 한 정상 과학이 시작된다.

본고에서는 패러다임이라는 과학철학의 개념을 기준으로, 에너지 분야에 적용되어 있는 에너지 패러다임 변화의 의미를 살펴보고, 에너지 패러다임 변화 관점에서 원자력 에너지의 위치를 고찰하고자 한다. 이어서 에너지 패러다임 분화 관점에서 원자력 에너지의 위치와 역할, 그리고 향후의 이행 방향에 대해 살펴보하고자 한다.

에너지 패러다임의 의미와 원자력에너지

에너지 패러다임이란 우리 사회에서의 에너지에 대한 인식, 에너지를 사용하는 생활 패턴이나 산업 구조 등 사회의 구조와 가치를 말하는 것이다. 때문에 에너지 패러다임을 전환한다는 것은 이러한 사고, 생활, 산업 구조 등의 체제가 완전히 다른 체제로 바뀌는 '혁명적인 과정'을 의미한다.³⁾

그렇다면 과연 에너지 분야에서의 패러다임 변화는 왜 필요한 것인가?

인류가 사용해 온 주에너지는 목재에서 시작하여 석탄, 석유, 가스로 이어져 왔고, 20세기 중반 이후 현재 까지도 석유는 최대 에너지원으로 이용되고 있다.

그런데 이러한 탄소 기반 에너지 체제를 전면적으로 부정하는 과학적 연구, '기후 변화'현상에 대한 연구가 1824년 프랑스의 수학자이자 물리학자인 푸리에(Jean-Baptiste Joseph Fourier)에 의해 시작되었다. 그가 처음으로 설명한 대기 에너지 전도의 비대칭성은 훗날 '온실 효과(Greenhouse effect)'로 명명되어 오늘에 이른다.

이 현상을 처음으로 실험을 통해 증명해 낸 사람은 영국 물리학자 틴들(John Tyndall)이었다. 틴들은 1859년 5월 18일 수증기, 이산화탄소, 아산화질소, 메탄, 그리고 오존 분자가 온실 효과를 일으키는 기체들이라는 최초의 증거를 얻었다.⁴⁾

이렇게 출발한 기후 변화 현상 연구를 통해, 일부 기후 변화 회의론자들에 의한 반박도 있었지만, 인간이 온난화를 초래했다는 점은 사실상 논란의 여지가 없는 것으로 인식되고 있다. 2007년 노벨평화상을 수상하기도 했던 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 기후 변화에 관한 정부 간 협의체)는 5차 평가 종합보고서에서 아래와 같이 결론을 내고 있다.⁵⁾

2) 코페르니쿠스 혁명은 지구가 우주의 중심에 가만히 있고 모든 천체들이 지구를 중심으로 돈다고 했던 천동설이 없어지고, 태양이 중심이고 지구는 그 주위를 도는 행성에 불과하다는 지동설로 바뀐 사건임. 만유인력의 광범위한 패러다임을 구축했던 뉴턴 역학은 상대성이론과 양자역학으로 대체되었음. 생물학의 경우, 창조론에 의해 지구와 생물의 역사를 해석했던 전통은 뿌리가 뽑히고, 다윈의 진화론으로 대체되었음. 다윈주의 패러다임에 의하면 생물의 진화는 '돌연변이'와 '자연 선택'이라는 자연 법칙에 의해 이루어지고, 그 과정에 개입하는 창조주도 없고 설계를 해준 존재도 없다고 생각하게 되었음. 장하석, 과학, 철학을 만나다, 이비에스미디어(주), 2014

3) 김남규, 주영준, 에너지패러다임의 미래, (사)한국물가정보, 2011

4) 최재천, 최용상, 기후변화 교과서, 환경재단 도요새, 2011

5) IPCC, 기후변화 2014 종합보고서, 제5차 평가 종합보고서, 2014



“인간이 기후 시스템에 영향을 미치고 있다는 점이 확실하며, 그 정도가 점차 심화되고 있을 뿐만 아니라, 지구상 전 대륙과 해양에 걸쳐 관측되고 있다는 것을 확인하였다. 1950년대 이래로 관측된 변화 중 상당수는 수십 년에서 수천 년 내 전례가 없던 것이었다. IPCC는 최근 나타나고 있는 지구 온난화의 주원인이 인간이라는 것에 95%의 확신을 가지고 있다.

또한, 본 종합보고서에서는 기후 시스템을 방해하는 인간 활동이 많아질수록 관련 위험은 더욱더 심각하고, 만연하며 돌이킬 수 없는 영향을 인간 및 생태계에 가져올 뿐만 아니라 기후 시스템의 모든 요소가 장기적으로 변화할 수 있다는 점을 밝혔다. 그러나 기후 변화와 그 위험을 제한할 방법이 있으며, 다양한 수단을 마련하여 경제 및 인간의 개발을 지속할 수도 있다는 점 또한 본 보고서에서 제시하였다.

그럼에도, 기온 상승 정도를 산업화 이전 수준과 비교하여 2°C 이내로 안정화시키기 위해서는 즉각적이면서도 근본적으로 BAU(Business As Usual)에서 벗어나야 한다. 또한, 우리가 관련 조치를 늦춘다면, 미래에 감당해야 할 기술·경제·사회 및 제도적 문제와 비용은 더욱 증가할 것이다.”

탄소 기반 에너지 체제에서의 인간 활동 증가는 지구 환경에 심대한 악영향을 주게 됨으로써 인류의 생존과 직결되는 문제가 된다는 것이다. 이러한 화석연료의 대규모 사용에 따른 기후 변화 현상을 과학적으로 밝혀내었다는 것이야말로 에너지 패러다임 변화의

가장 근본적인 원인이자 에너지 분야에서의 과학 혁명적 사건이라고 할 수 있다.

즉, 탄소를 주성분으로 하는 목재, 동·식물 등이 퇴적 후 가열, 압축되어 형성된 것으로 알려진 압축 탄소 원인 석탄, 석유, 가스를 통해 이루어 온 오늘날의 산업화⁶⁾·도시화 과정에 대해, 변화 없이 계속 추진하는 것은 안 된다는 것을 명시하고 있는 것이다. 다시 말해, 에너지 패러다임 변화라는 것은 기후 변화 패러다임과 같은 의미라고 할 수 있다.

IPCC에서는 에너지 패러다임 변화를 위해 지구 온난화 완화 기술의 예로 바이오 에너지, CSS(Carbon Capture and Storage, 이산화탄소 포집 및 저장), 풍력/태양광과 함께 원자력을 제시하였다.⁷⁾

화석연료 연소에 따른 이산화탄소 방출은 지구 온난화의 주요소이며, 2010년의 경우 에너지 부문(연료 연소, 탈루 배출)에서 세계 온실가스의 68%를 배출⁸⁾하는 등 큰 비중을 차지하고 있기 때문에, 발전 도중에 이산화탄소를 배출하지 않는 원자력 에너지가 대안 기술로 고려된 것으로 이해된다.

이와 관련 각 기술들이 기존 화석연료 에너지에 비해 얼마나 저탄소 기술인지를 비교, 평가 결과를 살펴보는 것이 필요하다. <그림 1>과 <그림 2>에는 다양한 발전원 별로 전 수명 기간 동안의 온실가스 방출량을 도시하였다.⁹⁾

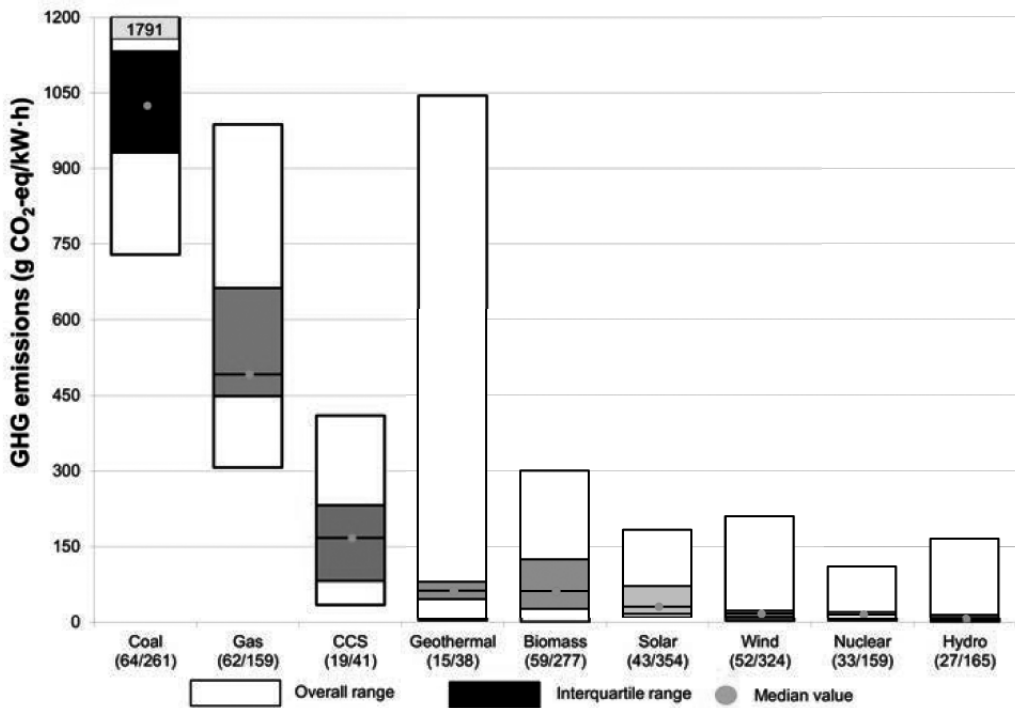
<그림 1>에 보면 석탄과 가스는 각각 중앙값 1,025 및 492 gCO₂-eq/kW·h로 압도적 높은 수치를 나타

6) 산업화 시대를 1750~2011년의 기간으로 고려할 때, 인위적 이산화탄소 누적 배출량 중 절반 정도는 특히 지난 40년 간 배출된 것임. 1970년 이래로, 화석연료 연소, 시멘트 생산, 플레어링(flaring)으로 인한 누적된 이산화탄소 배출량은 세 배가 되었음. IPCC, 앞의 보고서

7) IPCC, 앞의 보고서

8) 에너지경제연구원(노동운), 세계 에너지시장 인사이트 제16-5호, 최근 세계 온실가스 배출 추이와 시사점, 2016

9) IAEA, Climate Change and Nuclear power 2015, 2015



〈그림 1〉 발전원별 전 수명 기간 동안의 온실가스 방출량

내었다. 〈그림 2〉에는 재생 에너지와 원자력 에너지를 함께 확대 비교하였는데, 중앙값 기준으로 바이오매스 61, 태양광(PV) 49, 집광형 태양열 발전(CSP) 27.3, 풍력 16.4, 원자력 14.9, 수력 6.6 gCO₂-eq/kW·h을 나타내었다. 전체적으로 이 기술들은 석탄의 온실가스 방출량 대비 6% 미만의 낮은 수준이며, 원자력의 경우 약 1.5% 수준이었다.

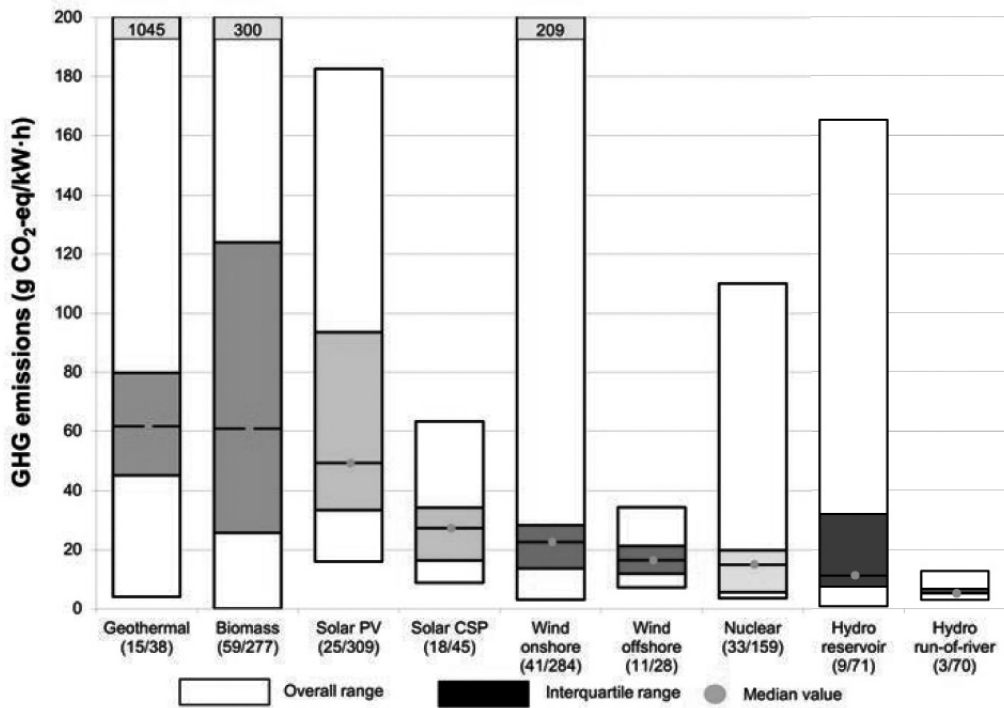
탄소 기반 에너지는 석탄, 석유, 가스 등의 연소를 통해 열원을 얻기 때문에, 연소 과정에서 필연적으로 발생하는 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등의 온실가스는 물론, 대기 오염 물질인 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx) 등을 수반하게 된다.

반면에 현재의 전력 생산용 상용 원자력 에너지는

질량-에너지 등가원리에 따라, 우라늄-235의 연쇄반응 과정에서 발생하는 에너지를 열원으로 증기를 발생, 터빈을 돌려 발전을 하기 때문에 환경에 치명적인 연소 가스가 운영 과정에서 발생하지 않는다는 강점이 있다.

재생 에너지도 마찬가지로, 말 그대로 재생이 가능한, 주로 자연 상태로 존재하는 에너지원으로부터 발전을 하기 때문에 기후 변화 패러다임에 적합한 청정 에너지원이라고 할 수 있다.

기존의 패러다임으로부터 새로운 패러다임으로 변화하는 것은 기존 지배적 구조를 일신해야 한다는 측면에서 매우 어렵고 힘든 과정이 될 수 있다. 또 한편으로는 새롭게 부각되는 대안 기술들 간에도 안정적인



〈그림 2〉 발전원별 전 수명 기간 동안의 온실가스 방출량 : 재생에너지 및 원자력

위치를 차지하기 위해 각축이 예상된다.

앞으로 이들 저탄소 기술들은 기후 변화 패러다임에 맞추어 온실가스 저감은 당연한 것이고, 경제성 측면, 에너지 안보(에너지의 안정적 확보) 측면 등, 한마디로 에너지를 값싸고 안정적으로 공급하면서도 친환경의 공급 수단으로서 한 치의 양보도 없는 치열한 경쟁을 통해 선택되고, 더욱 성숙한 기술로 발전될 것으로 생각된다.

한편, 재생 에너지 옹호자 입장에서는 원자력 에너지의 안전성, 방사성폐기물, 핵확산 등을 문제 삼아 원자력이 지속 가능한 발전에 부합하지 않으며, 원자력

이 온실가스 감축 수단으로 포함될 경우 재생 에너지에 대한 투자가 줄어들 것이라며 원자력의 배제를 강력하게 주장하고 있다.¹⁰⁾

화석연료의 대규모 사용에 의한 기후 변화 현상의 과학적 입증은 20세기 이래로 현재까지 에너지 분야에서의 과학 혁명적 사건이라고 할 수 있으며, 앞으로도 에너지 패러다임 변화의 가장 근본적인 근거가 될 것이다. 에너지 패러다임 변화의 시기에 각 대안 기술들은 치열한 경쟁이 불가피할 것이며, 이러한 현상은 에너지 패러다임 분화 과정으로 설명이 가능하다.

10) 한국원자력연구원 정책연구부(양명호, 이종희, 김수은), 원자력정책 Brief Report 2016-1호(통권 30호), 신기후변화체제(Post-2020)와 원자력, 2016

에너지 패러다임 분화와 에너지 선택

앞서 언급하였듯이, 세계 온실가스 배출량에서 에너지 산업이 가장 큰 비중을 차지하기 때문에 이 분야에서 온실가스 저감 노력은 에너지 패러다임 변화에 대응한다는 측면에서 매우 중요하다.

이런 측면에서 IPCC는 풍력/태양광과 같은 재생 에너지와 함께 원자력을 지구 온난화 완화 기술로 제시한 바 있다. 이들은 기후 변화 패러다임에 대처 가능한 대안 기술이라는 점에서 동일한 특성(저탄소 기술)을 갖는다. 그러나 본질적인 에너지 특성 측면에서는 재생 에너지와 원자력 에너지는 전반적으로 상당히 상이한 특징을 나타낸다. 그래서인지 각 에너지의 옹호자 간에는 치열한 공방이 벌어지기도 한다.

쿤에 따르면, 1859년 다윈은 자연 선택에 의한 진화 이론을 제시하였는데, '자연 선택'이라는 메커니즘이 보다 정교하고 복잡하며 훨씬 더 분화된 유기체들이 점진적이지만 꾸준히 출현할 수 있는 원인으로 설정되었다.

과학 혁명의 완결 과정도 과학자 공동체 내에서 미래의 과학을 수행하는 가장 적합한 길을 찾으려는 갈등에서 비롯되는 선택의 과정이다.¹¹⁾

즉, 새로운 패러다임의 등장에 의해 새로운 문제들이 제기되고, 이에 따라 이전의 기술이 잘 했던, 기여했던 일들은 잊혀질 수 있다. 또한 진화론과 유사하게 과학기술도 새 패러다임에 기반한 대안 기술들로 대체되면서 진보하는 방향으로 나아간다는 것이다.

그렇다면 기후 변화에 대응하는 에너지 패러다임 변화의 틀 안에서, 대안 기술들은 어떻게 발전해 갈 것인가?

쿤은 과학 지식의 성장은 '진화의 나무'같은 패턴을 따른다고 생각하였다. 하나의 종에서 다른 독립된 종이 여럿 분기되어 나가듯이, 과학 지식 역시 하나의 전문적인 영역을 형성, 과학 공동체가 세분되어 독립된 전문 영역의 수가 증가함에 따라 성장하게 되는 것이다.

또한 과학 이론의 분화는 종의 분화와 유사하다. 하나의 종에서 다양한 종들이 분화되듯, 과학에서도 한 분야에서 전문화된 여러 영역이 분화하여 나오게 된다. 그런데 이렇게 분화된 전문 영역들은 서로 다른 종들이 생식적 장벽에 의해 분리되어 있는 것과 마찬가지로 각각 독립적이며 불연속한다.¹²⁾

상기한 내용을 에너지 패러다임 변화 측면에서 살펴볼 수 있다. 재생 에너지와 원자력 에너지는 모두 에너지 패러다임 변화 시기의 대안 기술로 고려되고 있으나, 이들은 각자의 기술적 기반과 특성을 지니면서 발전하여 왔고, 고유의 '분화'된 전문적인 영역을 형성한 상황(분화된 패러다임)으로 볼 수 있다.

이러한 상황, 즉 분화된 패러다임이 형성된 경우의 상호 관계에 대해, 과학의 다원주의 이론 관점에서 설명이 가능하다.¹³⁾ 즉, 이 두 가지 분화된 패러다임은 어느 하나로 교체되거나, 서로 각각 발전되어 서로 다른 영역을 차지하고 계속 발전해 가거나, 에너지 패러다임 변화라는 큰 울타리 내에서 공존하거나, 또는 잡종이 생기는 것이다.

11) 토머스 쿤, 앞의 책

12) 박영대, 정철현, 쿤의 과학혁명의 구조, 과학과 그 너머를 질문하다, 작은길, 2015

13) 장하석, 과학의 한 분야 내에서도 가능한 여러 가지 실천 체계를 발달시키고 유지하는 것이 좋으며, 하나의 패러다임이 독점하지 않아도 정상 과학의 기능을 살릴 수 있다는 입장임. 패러다임 간의 경쟁은 분화를 일으킬 수 있고, 서로 공존할 수 있다는 입장임. 앞의 책



4가지 방향성 중에서 어떤 방향으로 진행될 것인지는 주로 각 단위 지역(국가 또는 지자체) 상황과 여건에 의존하겠지만, 재생 에너지와 원자력 에너지의 고유 특성을 살펴봄으로써 방향성에 대하여 고찰하고자 한다.

재생 에너지 기술에는 여러 가지가 있기 때문에,¹⁴⁾ 대표적인 재생 에너지로 태양광 기술을 살펴보고자 한다. 이는 지난 2006년부터 2010년까지 세계 시장의 연평균 성장률이 85%에 이를 만큼의 급격한 성장세를 보였고,¹⁵⁾ 재생 에너지 산업의 선두주자로 각광받고 있는 점을 고려하였다.

태양광과 원자력기술, 그리고 분화된 패러다임 간의 이행 방향

태양광 기술은 광기 전력 효과와 광전 효과의 원리를 바탕으로, 태양전지를 이용한 전기 생산 방법이다.¹⁶⁾ 태양광을 에너지로 활용하는 방법은 1839년 에드문트 베크렐(Edmund Becquerel)이 광기 전력 효과를 처음으로 관찰하면서 시작되었다. 이후 이 기술이 폭넓게 시장 진입을 할 수 있었던 계기는 벨(Bell) 연구소 연구자들에 의해 1954년 공식적으로 태양전지가 처음으로 개발되었을 때였다.

벨 연구소는 최초로 작동하는 태양광 모듈 개발을 이끌었다. 이 모듈은 1950년대 말까지 빠르게 진전되

었다. 1960년대의 인공위성과 우주 운송 수단에 적용되는 중요한 동력 시스템을 지원하는 계속된 연구와 개발로 이 기술에 대한 긍정론이 퍼지게 되었으며, 1970년대의 석유 파동으로 인해 더 큰 지지를 받게 되었다.

그러나 80년대 들어서 태양광 기술은 당시 세계 태양 에너지 시장의 거의 80%를 차지하던 미국 레이건 행정부에 의해 주춤하게 되었다. 이 여파는 90년대까지 이어져 약 20년 동안 세계적으로 태양 에너지 산업의 발전을 가로막았다.

2000년대에 들어서는 일본의 선샤인(sunshine) 프로그램과 독일의 10만 태양열 지붕 프로그램(100,000 solar roofs program) 등의 노력과 프로그램이 계기가 되어 다시 산업이 증진되었다.¹⁷⁾

에너지 패러다임 변화에 대한 인식 재고와 함께 각국에서는 태양광 기술에 대한 지원을 강화하고 있다. 이러한 각국의 지원은 지속적인 기술의 발전으로 태양광 설비가 더욱 경제성을 갖출 것이라는 전망에 기초하고 있다.

전 세계 태양전지 설치량은 1999년 124MW에서 2008년 4.5GW로 증가하여 연평균 43%의 성장률을 보였다. 양적인 성장과 함께 기술 혁신과 공정 개선에 따라 제조 비용도 꾸준히 개선되고 있는 추세이다.¹⁸⁾

태양광 기술은 지구로 공급되는 태양의 빛 에너지를 별도의 비용 없이 공급받아 바로 전기를 생산할 수 있

14) 우리나라 신에너지 및 재생 에너지 개발·이용·보급 촉진법(17.09.22 시행) 2조 2항에는 재생 에너지를 태양 에너지, 풍력, 수력, 해양 에너지, 지열 에너지, 바이오 에너지, 폐기물 에너지, 기타 에너지로 정의하고 있음.
15) 이충훈, 알기 쉬운 신재생 에너지, 북스힐, 2015
16) 광기 전력 효과는 어떤 종류의 반도체에 빛을 조사하면, 조사된 부분과 조사되지 않은 부분 사이에 전위차(광기전력)를 발생시키는 현상임. 광전 효과는 1905년 아인슈타인에 의해 발견되었음. 빛의 입자성을 이용, 금속 등 물질에 일정 이상 진동수를 갖는 빛을 비추면 물질 표면에서 전자가 튀어나오는 현상임. 신정수, 신재생에너지 시스템공학, 일진사, 2015
17) 트래비스 브래드포드, 태양에너지 혁명, 강용혁 옮김, 네모북스, 2008
18) 김남규, 주영준, 앞의 책

고, 지역적 제한이 거의 없다는 점에서 큰 장점을 갖는다. 그러나 태양광이 분화된 에너지 패러다임 체계에서 주에너지원으로 자리잡기 위해서는 해결해야 할 기술적 특성이자 한계점이 있다. 그것은 바로 상대적으로 저밀도 에너지원이라는 점이다. 이는 재생 에너지의 전반적인 특성이기도 하다.

지구에 도달하는 태양 에너지는 대기권 밖에서는 1.38kW/m^2 , 지표면에서는 약 1kW/m^2 정도이다. 그렇기 때문에 중대형 규모의 발전 시스템에서는 한계가 있다. 대규모 공업단지나 인구 밀도가 높은 지역보다는 농어촌의 가옥이나 소규모 공장 등을 대상으로 하는 소규모 전력원으로 적합하다.¹⁹⁾

시간대(밤과 낮의 주기), 기후 및 계절에 영향을 받는다는 특성도 있으나, 이는 향후 태양전지의 효율 향상 및 축전지를 이용한 ESS(Energy Storage System)를 통하여 개선이 될 것으로 기대된다.

현재 상용화된 원자력 기술은 질량-에너지 등가원리와 우라늄-235의 연쇄반응 현상에 기초하여, 핵분열 시 발생하는 에너지를 이용한 전기 생산 방법이다.

1905년 아인슈타인(Einstein)에 의해 질량-에너지 등가원리가 발견되었으며, 1938년에는 오토 한(Otto Hahn)과 프리츠 슈트라스만(Fritz Strassman)이 우라늄-235의 연쇄반응 실험에 성공하였다.

1942년 12월 2일, 엔리코 페르미(Enrico Fermi)의 주도하에 설계된 세계 최초의 원자로 CP-1에서, 핵분열에 의한 연쇄반응에 성공함으로써 새로운 개념의 에너지를 처음으로 인류에 소개하였다.

이어서 미국 아르곤 국립연구소에서는 전기를 생산하는 최초의 원자로 EBR-1을 개발하여, 1951년에는 이 원자로에서 나온 전기를 사용하여 건물 조명을 하였다.

1953년 12월 8일, 미국 아이젠하워 대통령은 UN총회에서 '원자력의 평화적 이용(Atoms for Peace) 안'을 제안하였다. 1956년에는 최초의 상용 원자로인 영국의 콜더 홀(Calder Hall) 발전소가 가동되었고, 1957년에는 미국에서 쉬핑포트(Shipping port) 원전이 시험 가동에 들어갔다.

1960년대에 들어 원자로 생산 기술을 확보하고 있던 미국의 GE, 웨스팅하우스, B&W(Babcock and Wilcox), CE(Combustion Engineering) 등은 터키 플랜트를 시장에 공급하였다. 1960년대 미국으로부터 세계로 퍼져 나간 원자력 발전은 1970년대 초 제1차 에너지 위기를 계기로 더 빠르게 확산되었다.

그러나 1979년 미국 스리마일섬(TMI) 사고에 이어 1986년 구 소련(현 우크라이나) 체르노빌 사고가 터지면서, 원전 산업은 침체기로 접어들었다.²⁰⁾ 이후 기후 변화 대응 및 화석연료의 가격 상승 등 요인으로 '원전 르네상스'를 전망하고 있던 즈음, 일본 후쿠시마 원전 사고가 발생하여 원전에 대한 사회적 수용성 측면에서 위기를 맞고 있다.²¹⁾

태양광과 대비되는 원자력 기술의 고유 특성은 우선 에너지 밀도가 높다는 점이다. 석탄 1kg이 3kWh를 발전하는 데 비해, 우라늄 1kg은 50MWh를 발전한다. 발전소의 출력량도 크기 때문에 원전에 필요한

19) 김남규, 주영준, 앞의 책

20) 우리나라의 경우 이런 세계적 추세와 달리, 80~90년대에 오히려 적극적인 원전 확대 정책을 통해 에너지 확보 및 기술 자립을 이룰 수 있었음. 이 시기의 기술자립은 2009년 UAE 원전 수출의 밑거름이 되었음.

21) 이은철, 북한핵과 경수로 지원(부록 1), 서울대 출판부, 1996 / 김명자, 원자력 딜레마, 사이언스 북스, 2011



부지는 재생 에너지에 비해 10~1,000배까지 적다.²²⁾ 표준화된 원자력발전소 1기의 설비용량은 1,000MWe 이상이다. 또한 온실가스가 적다는 점과 함께 산성비의 주요 원인인 이산화황이나 광화학적 스모그를 형성하는 질소산화물을 만들지 않는다는 점²³⁾은 전술한 바와 같다.

상반되는 또 다른 특성은 태양광과 같은 재생 에너지는 근본적으로 분산 발전(Distributed Generation)의 성격을 가지며, 원자력은 중앙 집중형 발전(Centralized power generation)을 갖는다는 점이다.

인류 최초의 발전소인 Pearl Street Station은 분산 발전 설비로서 1882년 토마스 에디슨(Thomas Edison)에 의해 미국 뉴욕에 설치되었다. 그러나 20세기 들어 증기 터빈 기술의 실용화와 함께 발전 규모가 커지면서 발전 시설은 점차 도심 외곽 지역으로 옮겨지게 되었다. 70년대 이후 대형 원자력 발전의 보급과 함께 중앙 집중형 발전 시설을 기반으로 발전되어 왔다.²⁴⁾ 이런 방식은 산업화에 따른 대용량의 전력을 안정적으로 공급하는 측면에서는 유리하지만, 송전망 구축 및 송배전 시의 전력 손실이 발생한다는 단점이 있다.

한편, 태양광 등 재생 에너지의 특성이자 단점은 시간대(밤, 낮)나 날씨, 계절에 따라 발전량이 불규칙하

여 조정이나 예측이 어렵다는 점이다. 전력 생산이 불규칙한 재생 에너지를 기존의 전력망에 대규모로 연결하기 위해서는 스마트 그리드(Smart Grid) 개념²⁵⁾과 반드시 접목이 되어야 한다.

고도화된 제어 기술과 통신 기술을 통해 현존하는 전력 네트워크를 기반으로 발전량이 항상 일정하지 않은 태양광 등 재생 에너지원의 발전을 효율적으로 통합, 활용하여 안정적으로 분산 및 이동시킴으로써 전력 계통 운영의 안정성을 향상시킬 수 있다.²⁶⁾

또한 궁극적으로 태양광 등 재생 에너지만으로 충당할 수 있는 사회를 이루는 것을 목표로 한다면, 제로 에너지 하우스와 같은 에너지 자립형 건물 개념을 더 확장하고, 스마트 그리드와 연계하여 소위 ‘스마트 시티’를 구축하여야 한다.

이러한 인프라 구축 사업은 그 기술의 확보와 시행착오 등 문제점 해결은 논외로 하더라도, 막대한 예산과 기간, 그리고 높은 대민 이해도가 함께 뒷받침될 때 가능할 것이다.

그러나 앞서도 언급한 바와 같이, 재생 에너지 옹호자는 원자력 에너지에 대해 안전성, 방사성폐기물, 핵확산 문제를 제기한다. 특히 사용후핵연료를 포함하는 방사성폐기물은 원자력 발전을 가로막는 결정적 걸림돌로 비판한다. 중·저준위 폐기물은 300~400년,

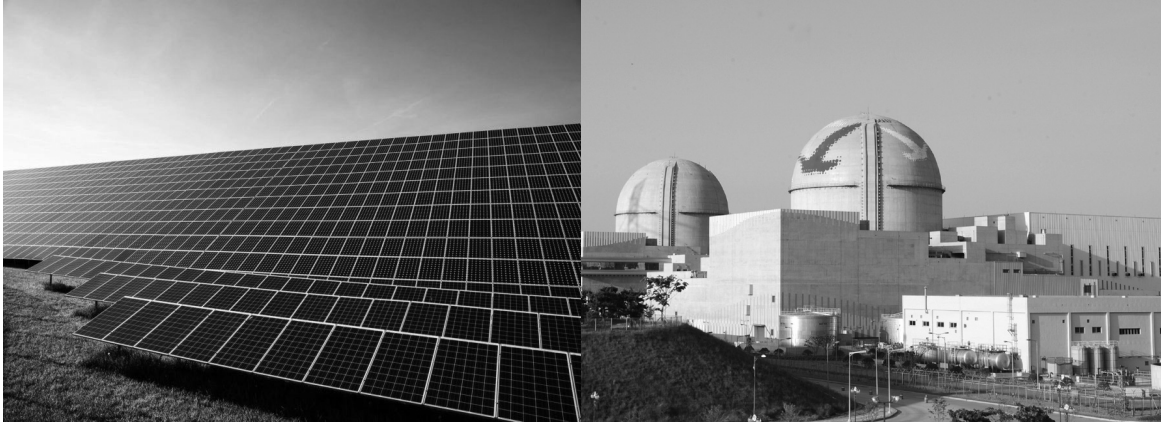
22) 전남 고흥 거금도에는 축구장 80개 크기(55만 8,810m²) 부지에 태양광발전소가 건설, 운영되고 있음. 이 부지의 전기 발전 설비용량은 25MW임. 신정수, 앞의 책

23) 바츨라프 스밀, 새로운 지구를 위한 에너지 디자인, 허은영, 김태유, 이수갑 옮김, 창비, 2008

24) 분산 발전은 전력 수요자 인근 지역에 설치 가능한 소규모(수kW~수십MW급) 발전 설비를 이용하여 수요자에게 필요 전력을 공급하는 발전 방식임. 손정락, 분산발전 기술의 동향 및 전망, 기계저널 11월호, 제45권 제11호, 2005

25) 스마트 그리드는 ‘지능형 전력망’으로, 기존의 전력망에 정보·통신 기술을 접목하여 공급자와 소비자가 실시간으로 정보를 교환함으로써 지능형 수요 관리, 신재생 에너지 연계, 전기차 충전 등을 가능하게 하는 차세대 전력인프라 시스템임. 지식경제부, 한국스마트그리드사업단, 2009-2011 스마트그리드 연차보고서, 2012

26) 스마트 그리드에서는 시간대에 따른 적절한 가격 정보를 제공하고, 피크 시간에 소비자 스스로 실시간으로 전력 사용량을 파악하여 전기 사용량을 줄이거나 사용 시간대를 옮기도록 유도하여 피크타임 수요를 감축할 수 있다. 한국디자인진흥원(이용주), 스마트시티, 에너지 신산업: 지능적으로 에너지를 관리하는 스마트 시티를 위한 스마트 그리드, 2016



인간 사회는 끊임없이 새로운 대안 기술들을 개발하여 왔으며, 이들 중 보다 나은 능력, 신속하고 안정적이며 저렴한 기술을 채택했고, 그렇지 못한 것은 기술 개발을 이루어 성능과 경제적 측면에서 합리성이 생길 때까지 보류되어야만 했다. 이런 측면에서 원자력은 일정 기간 최소한 가교 에너지(bridge energy) 역할을 수행하여야 할 것이다. 더욱이 원자력을 주에너지원으로 사용하고 있는 우리나라의 경우는 이런 역할이 불가피하다.

고준위 폐기물은 1만년 이상 생태계에서 격리되어야 하는데, 이런 오랜 기간 격리 상태 유지를 위한 처분 방안이 없다는 점을 지적하는 것이다.

또한 원자력은 저탄소 사회로 가는 것을 오히려 지연시킨다는 견해를 갖는다. 즉, 원자력 발전이 에너지 효율 개선과 재생 에너지에 투자할 돈과 시간을 가로챌으로써 에너지 공급 구조를 바꾸고 에너지 효율성 향상과 재생 에너지에 기초한 에너지 시스템으로 전환하는 데 걸림돌이 된다는 의견이다.²⁷⁾

원자력 발전 시설은 100만개 이상의 부품으로 구성된 공학적 시설로, 핵분열 반응으로부터 에너지를 얻어내는 인간 지식의 결집체라고 할 수 있다. 원자력 시설의 안전성 문제는 개발 초기부터 중요한 과제로 인

식, 기술 개발을 주도했던 미국의 경우 원자력 활동을 총괄하기 위해 1946년 설립된 원자력위원회(Atomic Energy Commission, AEC)는 안전 전문가들을 중심으로 독립적인 안전성 검토를 수행할 수 있도록 원자로안전자문위원회(Advisory Committee on Reactor Safeguards, ACRS)를 조직하였고, 원자력을 개발하던 대부분의 나라들도 비슷한 관행을 채택하였다.

원자로 출력 급상승 사고 방지 대책, 사고 시에도 환경으로의 방사성물질 방출 방지를 위한 격납용기 요건, 연속적인 보호 방법 및 보호 조치를 고려하는 심층 방어 전략, 설계기준 사고에 대한 결정론적 및 확률론적 안전성 평가 도입 등이 이루어졌다.²⁸⁾

원자력발전소의 상업 운전 이후, 세 차례의 대형 사

27) 김수진, 오수길 등, 기후변화의 유혹, 원자력, 도요새, 2011

28) 설계기준 사고란 원자력 시설의 운전 과정에서 발생할 수 있는 최악의 상황을 가정, 설계를 위해 상정한 사고를 나타냄. 이 사고를 방지할 수 있도록 각종 안전 장치를 설계 단계부터 고려하게 됨. 장순홍, 백원필, 원자력안전, 청문각, 2001



고를 경험한 바 있다. 1979년 미국 TMI 사고, 1986년 구소련 체르노빌 사고, 2011년 후쿠시마 사고인데, 이들의 공통점은 설계기준 사고를 초과, 원자로 노심 손상이 발생한 중대사고(또는 노심 용융 사고)라는 점이다.

체르노빌 사고를 통해서도 안전문화 및 격납용기의 중요성이 재인식되었다. 후쿠시마의 경우, 자연 재해에 의한 중대사고 시에도 환경에 대한 영향 최소화를 위한 계획되고 통제된 운영 체제 개선 측면에서 중요한 계기가 되었다. 중대사고가 발생했음에도 환경에 직접적인 피해를 주지 않았던 TMI 경우는 큰 의미를 가진다. TMI 사례와 같이, 설계기준 사고를 뛰어넘는 어떠한 중대사고 시에도 이를 차단, 최소한 환경으로의 방사능 누출을 억제 관리할 수 있어야 비로소 안전성을 확보했다고 할 수 있을 것이다.

방사성폐기물의 경우, 중·저준위급 폐기물에 대해서는 이미 저장, 처리 및 처분에 대한 기술 및 경험이 확보, 적용되고 있다. 문제는 고준위급 폐기물, 주로 사용후핵연료에 있다. 우리나라의 경우 사용후핵연료 관리 정책이 확정되진 않았지만, 임시/중간 저장을 거쳐 지하에 영구히 격리시키는 직접 처분 기술은 그 방안이 수립되어 있다.

가장 실용성 있는 방법은 심지층(지하 300~1,000m 깊이에 격리) 및 초장 심도 처분(약 3,000~5,000m 깊이에 격리) 방법이다.²⁹⁾ 이는 사용후핵연료의 높은 방사능과 독성, 매우 긴 반감기를 고려할 때, 심층 매립을 통해 인간 생활권으로부터 격리한다는 측

면과 핵확산 저항성(proliferation resistance) 측면에서도 장점을 갖는다.

이렇게 안전성, 방사성폐기물, 해체 등의 문제를 공학적으로 강화한 고신뢰도 기술을 적용함으로써 해결해 나갈 때 원자력 기술의 미래도 보장될 수 있을 것이다. 이 과정에서 원자력 발전의 경제성에 도전을 받을 수 있을 것이나, 이는 역시 원자력 패러다임 내에서 해결하여야 하는 문제이다. 핵융합³⁰⁾ 처럼 사용후핵연료 문제를 거의 근본적으로 해결하는 기술 개발에도 노력하여야 하는 이유이다.

기술 공학적 진보와 함께, 결국은 사회적 수용성을 확보하기 위한 적극적인 ‘설득’이 필요하다. 원자력이라고 하는 분화된 패러다임 기술에 대하여 쉽고, 이해가 되며, 장점과 단점, 한계를 있는 그대로 알리고 소통할 때 수용성을 높일 수 있을 것이다.

맺음말

지금까지 과학철학계의 중요 개념인 ‘패러다임’을 ‘틀(frame)’로 적용하여, 에너지 패러다임 변화와 분화에 대하여 살펴보았다.

현대의 산업화를 이루는 데 근간이 되었던 석탄, 석유, 가스 등의 탄소 기반 에너지 체제는 ‘기후 변화’ 현상에 대한 지구 온난화 연구를 통해 전면적으로 부정되고 있다. 즉, 탄소 기반 에너지 체제에서의 인간 활동 증가는 지구 환경에 심대한 악영향을 주게 됨으로써, 인류의 생존과 직결되는 문제가 되고 있는 것이다.

29) 국회입법조사처(유재국), 사용후핵연료 관리정책의 쟁점과 과제, NARS 현안보고서 제307호, 2017

30) 핵융합은 태양이 에너지를 생산하는 과정과 같은데, 토카막 같은 특별한 장치를 통해 섭씨 1억도 이상 조건에서 중수소와 삼중수소 반응을 통해 에너지를 얻는 기술임. 핵분열을 이용한 현재의 상용 원자로와 달리, 장반감기와 독성을 갖는 사용후핵연료가 발생하지 않는다는 측면에서 만일 상용화에 성공한다면 새로운 원자력 패러다임이 형성된다고 할 수 있는 기술임.

기후 변화에 대응하기 위해 에너지 패러다임 변화가 불가피한 상황에서, 2014년 IPCC에서는 지구 온난화 완화 기술의 예로 태양광 등과 함께 원자력을 제시하였다. 변화의 시기에 대한 기술로 선택된 것이다.

태양광과 원자력은 기후 변화 패러다임에 대처 가능한 대안 기술이라는 점에서 동일한 특성을 가지지만, 본질적인 에너지 특성 측면에서는 상당히 상이한 특징을 갖는다.

모두 100년 이상의 기술적 성장 배경을 갖고 있으며, 1950년대에 상업적인 의미의 시장 진입이 있었다. 서로 다른 기술적 배경 하에 전문 영역을 형성해 오면서 점차 다른 전문 영역과의 의사 소통이 필요 없게 발전해 온 것이다. 즉, 자기 영역 고유의 이론, 특성, 논리, 용어와 기술력을 판단하는 잣대를 갖게 된 것이다.

같은 저탄소 기술이라는, 에너지 패러다임 변화라는 커다란 테두리 내에 속한 기술이지만, 서로 다르게 분화된, 나름의 패러다임을 갖고 있는 것이다.

그러다 보니 의사소통의 장벽이 발생하면서 갈등이 생기게 되었다. 상대적으로 보다 앞서 시장 점유를 하고 있던 원자력 발전은 높은 에너지 밀도, 대용량 발전원, 적은 원료 공급 비용 등 장점을 내세워 입지를 지키려 애쓰고 있다.

반면 태양광 등 재생 에너지 옹호자들은 안전성, 방사성폐기물 등의 문제점을 지적하며, 원자력이 재생 에너지에 기초한 에너지 시스템 전환의 걸림돌이라는 견해를 갖고 있다는 것도 살펴보았다.

이제 분화된 패러다임 기술 간의 경쟁, 구체적으로 태양광과 원자력의 상호 작용 및 관계가 어떤 방향으로 갈 수 있는지에 대하여 논하고 이 글을 마무리하고자 한다.

자연 상태로 존재하는 에너지원으로부터 전기를 얻을 수 있는 재생 에너지는 분명히 단점을 덮고도 충분히 남을 수 있는 장점을 갖고 있다.

그러나 인류의 궁극적인 에너지를 재생 에너지로부터 안정적으로 얻는 것을 목표로 한다면, 단계적인 접근이 필요하다.

저밀도 및 불규칙한 간헐 특성을 기술적으로 보완하기 위해서는, 스마트 그리드를 포함하여 재생 에너지를 염두에 둔 계획 도시, 스마트 시티와 같은 인프라가 함께 병행, 구축되어야 한다.

이 병행 구축 기간이 어느 정도 소요될지 예측하는 것은 쉽지 않은 일이다. 분명한 것은, 이 기간 동안에도 대규모 공장단지(태양광 원료인 폴리실리콘, 잉곳(ingot), 웨이퍼(wafer) 등의 생산 공장도 포함하여), 대도시와 같은 지역에 무난하게 전력을 공급할 수 있어야 한다는 것이다.

앞에서 2개의 분화된 패러다임이 경쟁 관계에 있을 때는 4가지 상호 작용 결과가 가능할 것으로 고려하였다. 즉, 어느 하나로 교체되거나, 각각 발전되어 서로 다른 영역을 차지하고 계속 발전해 가거나, 에너지 패러다임 변화라는 큰 울타리 내에서 공존하거나, 또는 잡종이 생기는 것이다.

태양광과 원자력의 현실과 특성을 고려할 때, 앞으로 일정 기간 이 두 기술의 공존은 불가피할 것으로 생각된다.

각 기술이 서로 잘 할 수 있는 부분이 명확하기 때문에 원자력은 기저 발전 위주로 기여하고, 제로 에너지 하우스와 같은 에너지 자립형 건물 보급을 확대, 단지화해가면서 지능형 전력망(스마트 그리드)과 연계하면, 효율적 수요 관리와 함께 첨두 발전원 수요도 감소



시킬 수 있다.³¹⁾

이런 시스템에 계획 단계에서부터 태양광을 체계적으로 적용해 간다면 두 기술은 함께 자기의 역할을 하면서 공존할 수 있을 것이다.

한편, 원자력의 안전성 문제는 경제성 문제와도 바로 연계되는 문제이다. 이런 문제가 서로 복합적으로 작용하면서 계속 누적이 되어 간다면, 다시 기술적인 내부 혁신 또는 더 나아가 과학 혁명이 일어나거나, 아니면 기술적으로 교체가 될 것이다.

원자력 내에서 새로운 패러다임을 끌어낼 수 있다면, 사용후핵연료 문제를 해결할 수 있는 핵융합 기술과 같은 것이 될 것으로 생각한다.

인간 사회는 끊임없이 새로운 대안 기술들을 개발하여 왔으며, 이들 중 보다 나은 능력, 신속하고 안정적이며 저렴한 기술을 채택했고, 그렇지 못한 것은 기술 개발을 이루어 성능과 경제적 측면에서 합리성이 생길

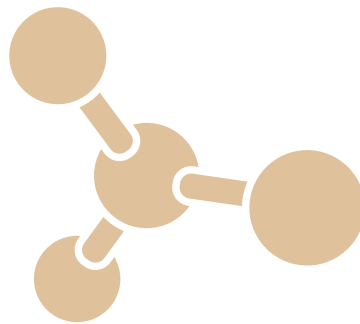
때까지 보류되어야만 했다.

이런 측면에서 원자력은 일정 기간 최소한 가교 에너지(bridge energy) 역할을 수행하여야 할 것이다. 더욱이 원자력을 주에너지원으로 사용하고 있는 우리나라의 경우는 이런 역할이 불가피하다. 그렇기 때문에 사회적 수용성을 확보하기 위한 적극적인 '설득'과 '소통'노력이 병행되어야 한다.

특정 자원의 과·부족이 아닌 대체 기술에 의해 한 시대가 바뀔 것이라는 의미있는 견해를 인용하면서 본고를 마무리하고자 한다.

석유 패권국 사우디아라비아의 석유장관이었던 셰이크 야마니(Sheikh Yamani)는 이렇게 말했다.³²⁾

“석기 시대가 종말을 고한 것은 돌맹이가 없어서가 아니다. 석유 시대도 석유가 바닥나기 전에 종말을 고하게 될 것이다.”



31) 지식경제부, 한국스마트그리드사업단, 앞의 보고서

32) 양훈승, 한국경제매거진 경영전략트렌드, 제969호, 2014.06.23