

에너지전환과 원자력의 미래

2019 과학기자대회

2019. 9. 26.

동국대학교 에너지공학
박종운

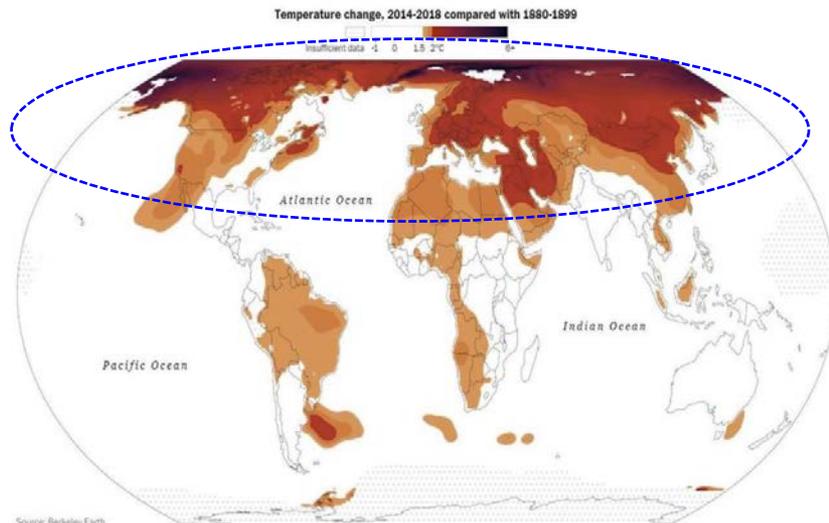
전세계 온도 상승

- 북반구 북부 산업화가 집중, 온도 상승이 가장 크다. 이 지역에 원전도, 재생 에너지 집중, 그러나 최근 10년간 이들이 지구 온도 상승을 줄인 효과가 얼마나 있을까?

“병주고 약주나, 아직 약효 없다”

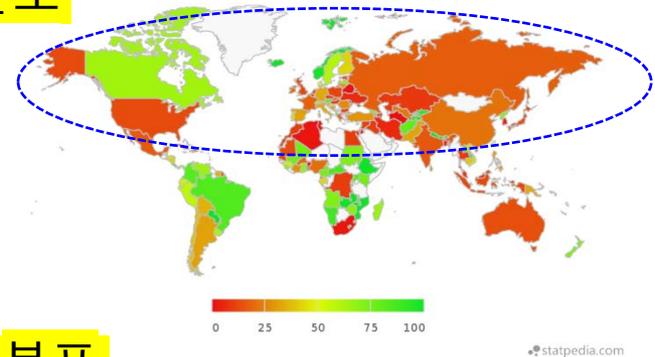
지구면적 10% 기온상승 억제선 넘어섰다.
(2019. 9. 15, 한겨레 광노필 기자)

산업화 이전보다 2도 이상 올라...미국 땅 5배 크기
1.5도 상승 지역은 20%나...중동,유럽 등 최고 올라

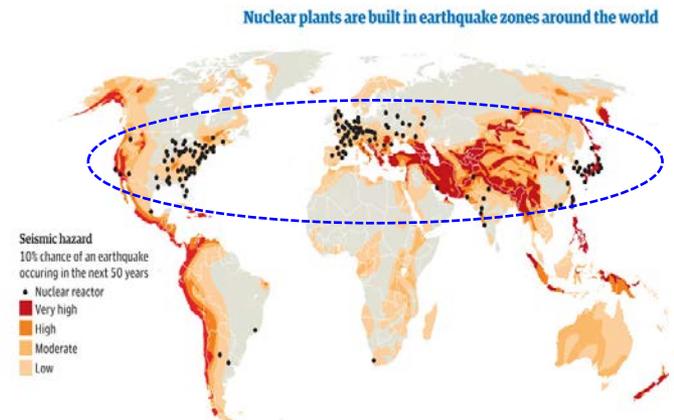


산업화 이전(1880|1899) 대비 현재(2014~2018) 기온 상승폭. 주황색은 1.5도, 빨간색은 2도 이상 상승 지역. 워싱턴 포스트에서 인용

RE 분포 Percentage of Renewable Energy by Country



원전 분포



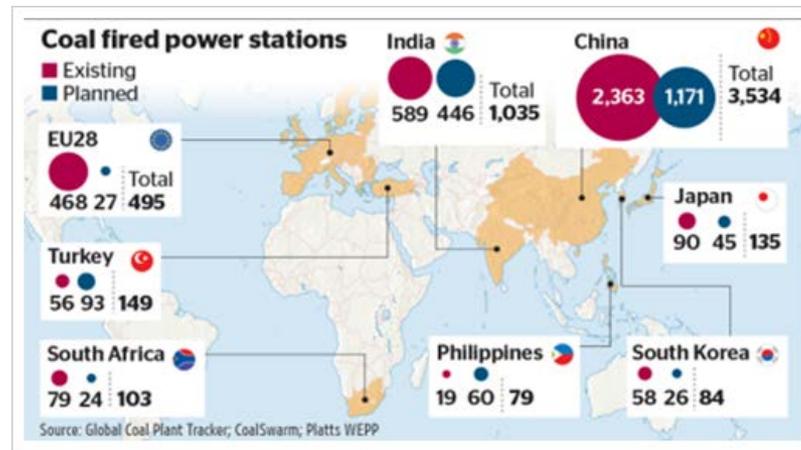
에너지 전환과 현실

- 누구를 위한 에너지 전환인가?

- EU를 제외하고 중국/인도/한국의 석탄발전 건설은 계속
- 탈원전, 이행보다 선언이 너무 빠르고 확고했다. 국내는 탈원전 하면서 해외 원전 수출 지향하는 모습
- 원전에 의존하는 탈원전

“기후환경회의, “최근 신고리 4호기 원전이 가동되는 등 전력예비율에 여유가 있기 때문에 석탄을 줄이고 LNG 발전가동을 높이면 겨울철 수급에도 큰 문제가 없을 것”

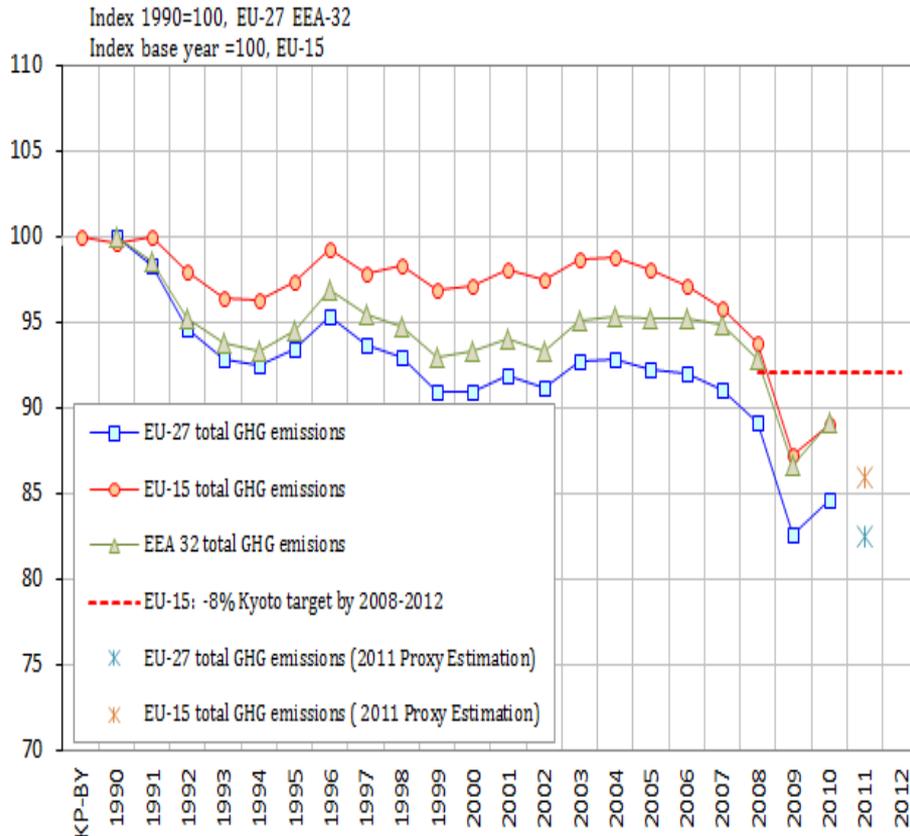
(연합뉴스, 2019. 9. 16. 미세먼지 줄이려 '석탄발전 전면 감축안'..겨울 전력수급 괜찮나)



에너지 전환의 온실가스 저감 효과? - EU

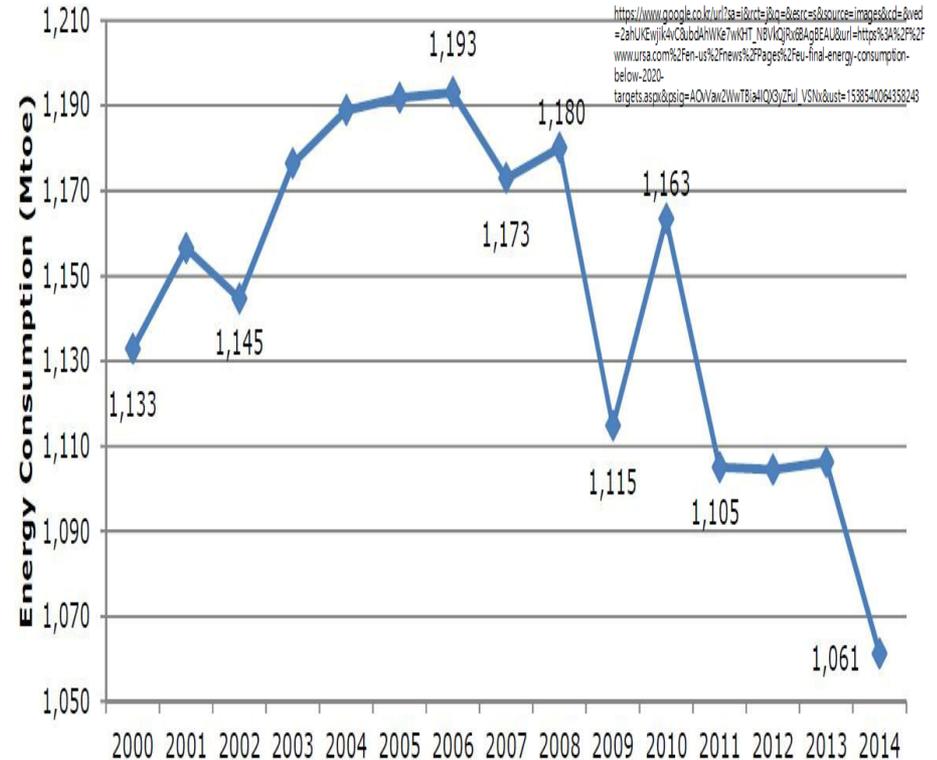
- 온실가스 저감은 에너지 소비 감소가 주원인으로 보인다.
 - 에너지 소비와 온실가스 모두 10% 감소 (2006년 대비 2014년 기준)

온실가스 10% 감소



에너지 소비 10% 감소

Final Energy Consumption, EU-28

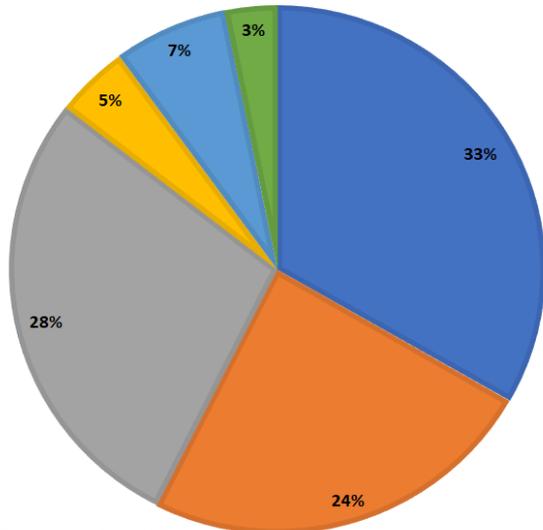


전세계 원전과 재생에너지 비중

- 전세계 최종에너지의 15%만이 전기에너지, 전체의 85%는 대부분 화석에너지로 구성된 비전력 부문에서 발생
- 원전/재생에너지는 전기 생산 측면에서만 온실가스 저감에 기여, 전세계 최종에너지에서 원자력 발전 5%, 재생에너지(수력제외) 발전은 3%에 불과
 - 전력생산에서만 원전 10%, 수력 제외 재생에너지 5.6%에 불과 (도토리)
 - 비전력 부문의 화석연료 85%를 과연 어찌할 것인가.

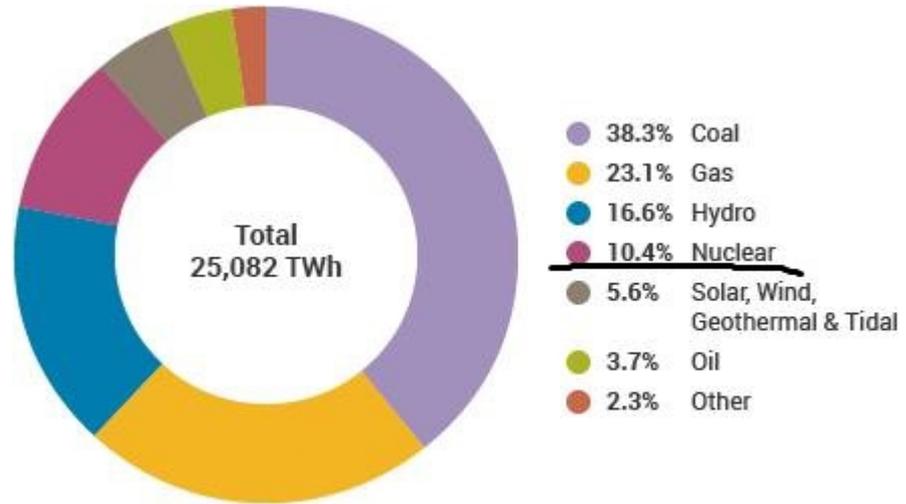
GLOBAL PRIMARY ENERGY CONSUMPTION BY SOURCE

Oil Natural Gas Coal Nuclear Energy Hydroelectric Modern Renewables



Data source: BP Statistical Review of World Energy 2017

© Robert Rapier



Source: IEA Electricity Information 2018

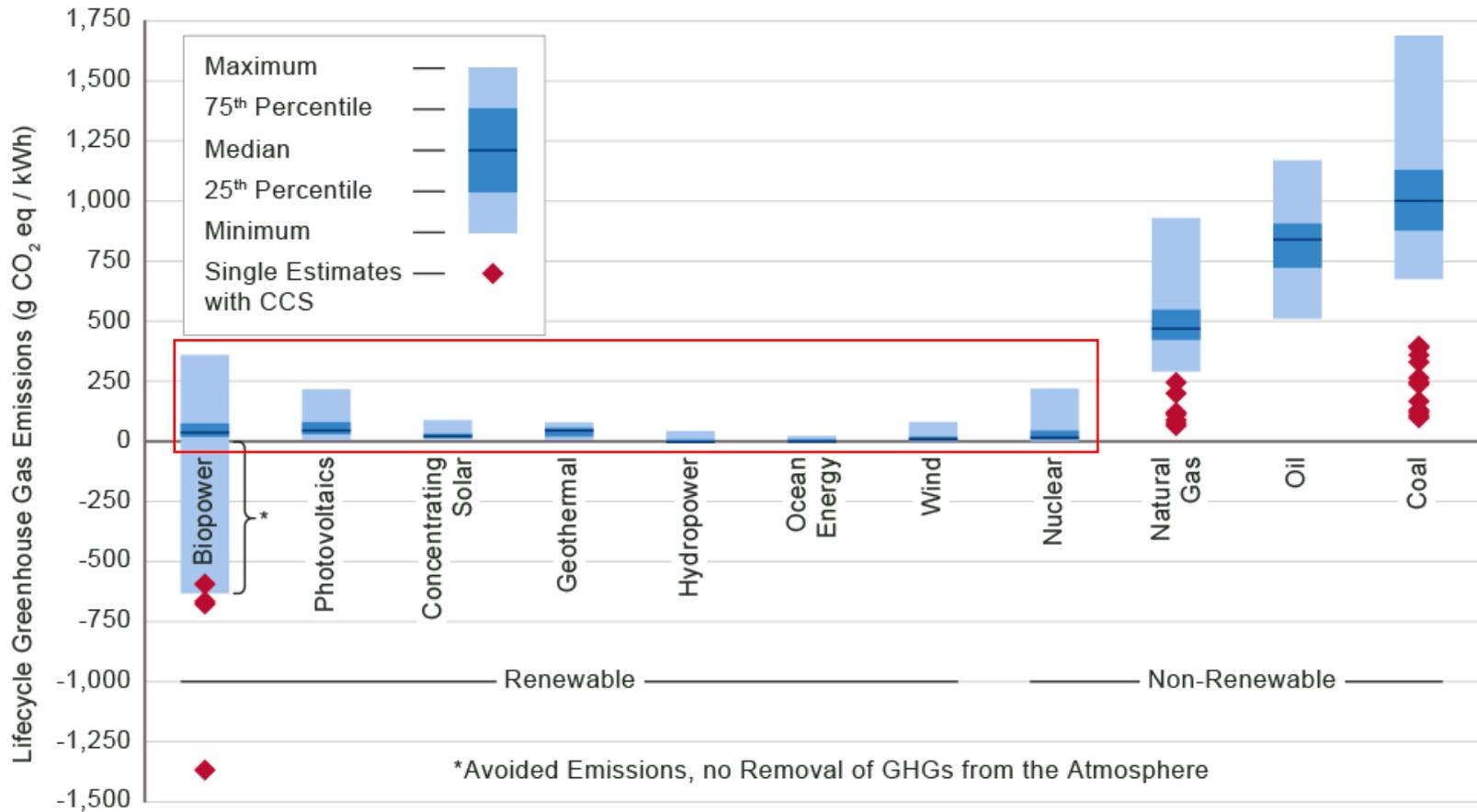
에너지 정책과 온실가스 배출

- 저탄소 측면에서 원전 일정 비율 유지 정책 (미국, 영국, 일본 등)
 - 미국은 주별로 비교적 차이는 큼
- 원전 비중 높을수록 재생에너지 비중 높고, 온실가스 배출도 적다 (2016)
 - EU 재생에너지 발전량: 프랑스(17%) > 독일(15%) 및 영국(9%)
 - EU 온실가스 배출량 비중: 독일 21%, 영국 11.6%, 프랑스 10.7%로 독일의 절반
- 원전 탈피는 수력발전 많거나, 산업/인구/에너지 소비 적은 나라들만이 쉽게 달성
 - 스웨덴, 벨기에, 스위스, 이탈리아 등이 그 예이다. 이탈리아는 수력 22%에 비해 태양광/풍력은 14%로 상대적으로 적다. 반면, 독일은 석탄발전이 30%를 넘어 어려움
 - 노르웨이, 덴마크는 비원전국으로 우리가 참조하기 어렵다. 노르웨이 전력의 거의 대부분은 수력이며, 덴마크는 땅 면적은 남한의 반이나 되나 인구 570만명에 전력소비도 그만큼 적다. 전력만 보면 풍력 42%로 많아 보이나 총에너지로는 7%에 불과

덴마크

Fuel shares compared to IEA average						
Fuel	TPES (%)	IEA average* (%)	IEA range (%)	Electricity (%)	IEA average (%)	IEA range (%)
Coal	12	17	0-69	29	28	0-84
Oil	36	36	7-58	1	2	0-10
Gas	17	27	2-40	7	27	1-51
Hydro	0	2	0-43	0	13	0-96
Nuclear	0	10	0-44	0	19	0-73
Biofuels	25	6	2-27	18	3	0-26
Wind	7	1	0-7	42	6	0-42
Geothermal	0	1	0-23	0	0	0-18
Solar	1	1	0-3	2	2	0-13

* IEA Average - total supply per fuel / TPES for 29 IEA countries

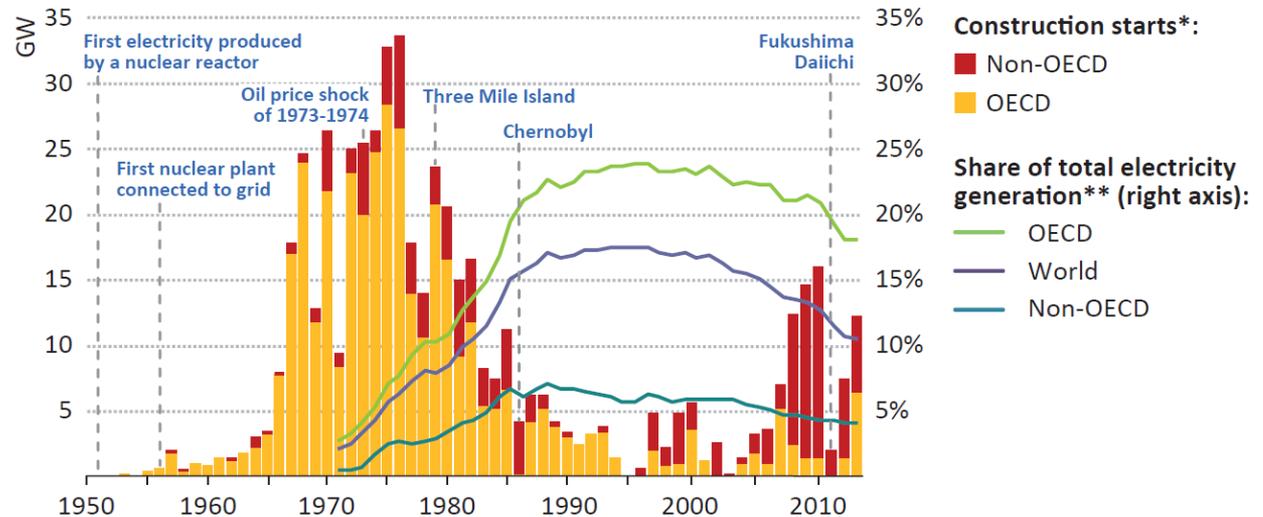


Source: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2012)

전세계 역대 원전 건설

- 원전은 OPEC 결성 및 오일 쇼크 대항을 위해 1960~1970에 건설 급증, 저렴한 석유보다, 전력생산에서 오일 대체를 위한 전략적 에너지로 출발
- 건설비 비싸, 대부분 부자나라(미국, 영국, 프랑스 등)에서 정부지원 보조금 통해 건설 촉진
- 2000년대 이후에 비 OECD 국가의 건설 증가하였으나, 주로 중국/러시아/인도/한국 몰림

Figure 10.1 ▶ Reactor construction starts and timeline of events



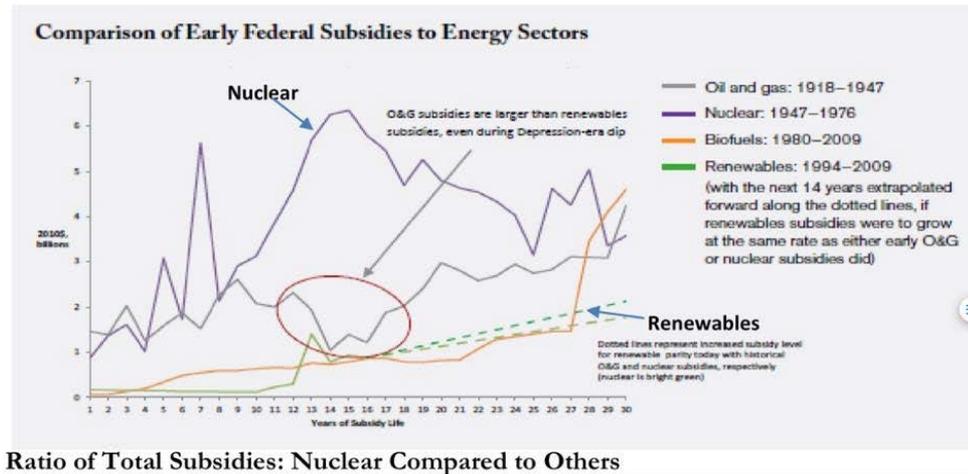
* The data do not include construction starts for units that were later cancelled. Some reactors that are currently under construction, however, may yet be cancelled. ** Data are available from 1971.

Sources: International Atomic Energy Agency (IAEA) Power Reactor Information System; IEA databases.

역대 원전 건설시 보조금 (미국)

- 미국 원전 초기 건설 단계에서도 현재도 보조금에 의존
 - 미국 1947~1976 원전 집중 건설단계 연방정부 보조금

EXHIBIT IV-2: FEDERAL SUBSIDIES FOR INFANT ENERGY INDUSTRIES AND BEYOND



- 현재, 미국 뉴욕주, 일리노이주에 이어 오하이오주는 원전 2기에 저탄소 보조금 지급
 - 퍼스트에너지사는 원전 가격경쟁력 상실로 주에서 보조금을 안주면 2기의 원전을 조기 폐쇄하겠다 주장 (A Fight Over Subsidies for 2 Ohio Nuclear Plants Draws Claim That China Is 'Invading' the Electric Grid, AUG. 30, 2019)

미국, 역대 원전 관련 연방정부 지원

Historical Subsidies ^a	
Nuclear Waste Technical Review Board (since 1987)	70,000,000
Uranium Facilities Decontamination and Decommissioning Fund (since 1994) ^b	2,100,000,000
Research & Development (since 1948)	83,100,000,000
TOTAL	85,270,000,000
^a All values given in 2007 dollars	
^b This assumes that the fund has collected \$2.25 billion, the maximum amount allowed by the Energy Policy Act of 1992	

10조원

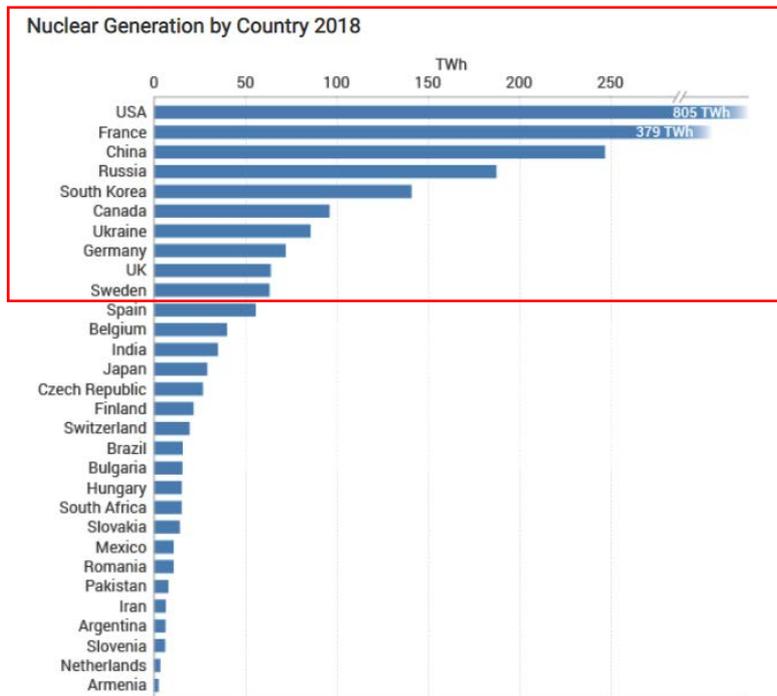
Recent Subsidies ^a	
Nuclear Production Tax Credit	5,700,000,000
Modification to Special Rules for Nuclear Decommissioning Costs	1,290,000,000
Decommissioning Pilot Program	16,000,000
Demonstration Hydrogen Production ^b	100,000,000
Stand-by Support ^b	2,000,000,000
Loan Guarantees for Nuclear and Uranium Enrichment ^c	20,500,000,000
Next Generation Nuclear Plant Project	1,250,000,000
TOTAL	30,856,000,000

3.7조원

<https://www.taxpayer.net/energy-natural-resources/nuclear-power-subsidies/>

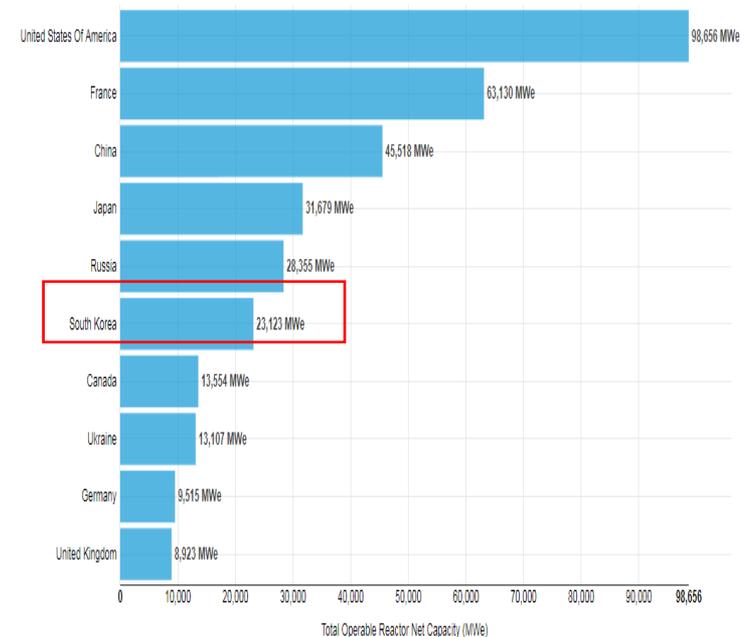
세계는 탈원전인가? NO

- 원전, 실질적으로 감축되려면 상위 보유 10개국이 줄여야 하나, 독일 제외하고 모두 유지 내지 확대 정책, 터어키, 벨로우시, UAE 등 신규 진입국 발생
 - 서방(미국, 프랑스, 영국, 캐나다), 일본 유지 정책, 중국, 러시아/우크라이나, 인도는 확대 정책 (총 360여기, 용량기준 6위 한국 포함)



Source: IAEA PRIS Database

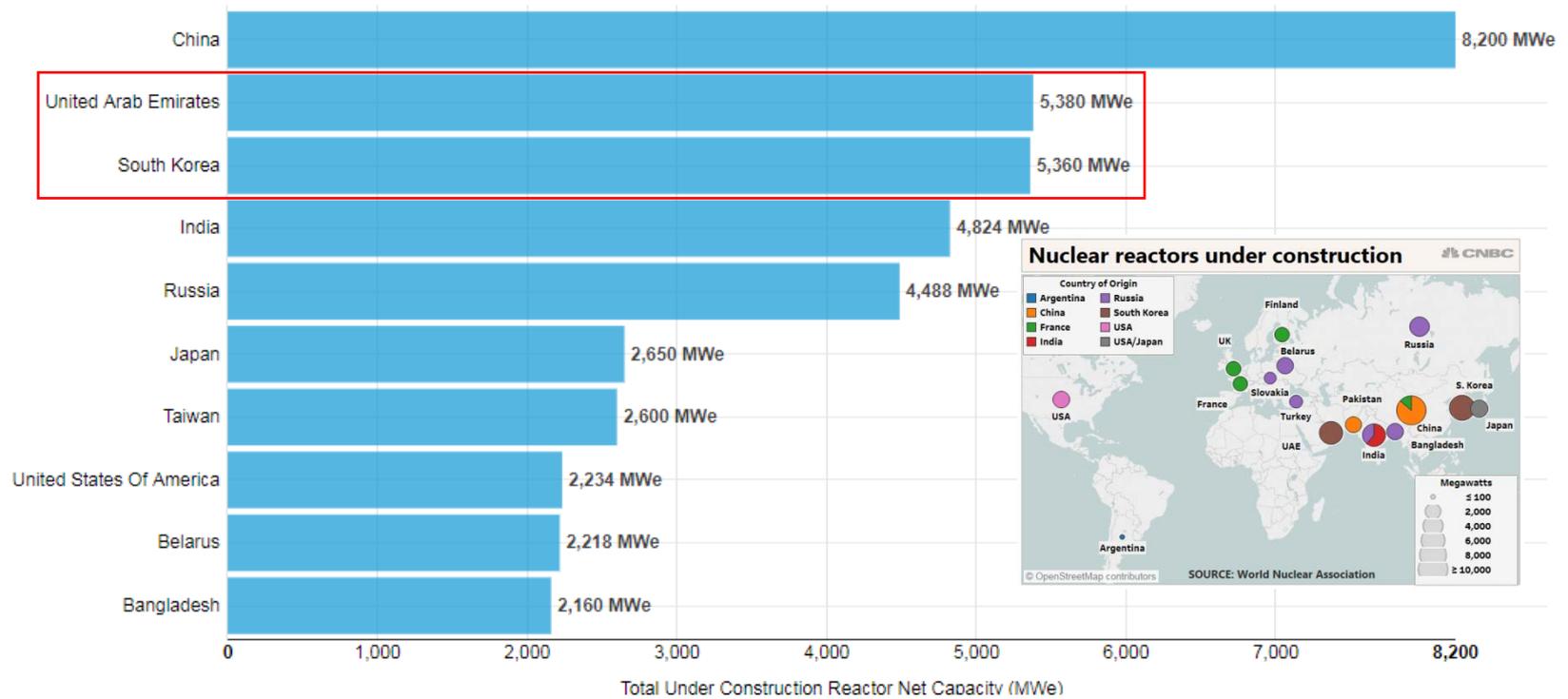
Total Operable Reactor Net Capacity (Top 10)



한국은 탈원전인가? NO

- 2018년 건설 중 원전 용량: 한국 세계 2위 (한국+UAE = 10 GW 세계 1위)
 - 한국, 러시아/인도 보다 많다. 러시아는 자국보다 해외 수출이 많다.

Reactors Under Construction Net Capacity (Top 10)



<https://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/reactor-database.aspx>

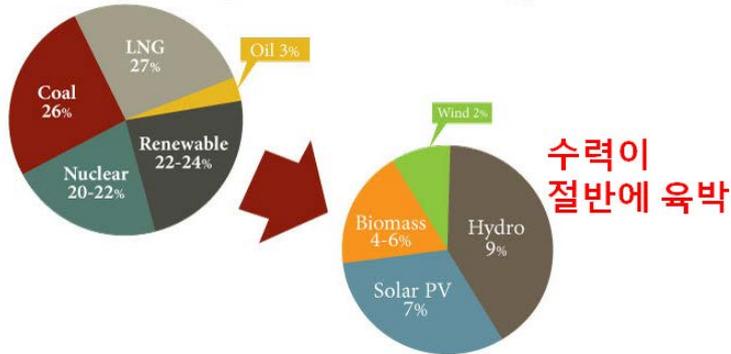
세계는 모두 탈원전인가? NO

- **미국 자연 감소** 1980년대 이래 원전 건설 (거의) 부재이나
 - 중국에 AP1000 10기 수출, 최근 10년간 원전의 상대적 경제성 저하로 감소 추세, 수명 20년 연장 원전들도 일부 조기 폐쇄, 자구노력으로 이용률은 90%로 상승, 인구 많은 주들은 원전 보조금 지급
- **프랑스 유지**
 - 원전 비율 감소 추구 2050 년 50% (절대 원전 용량 미지)
 - 프라망빌 1기 건설 중, 건설비 초과, 공기 10년으로 난항
- **영국 유지**
 - 원전 20% 유지 전략, 기존 가스로를 경수로로 대체하는 노력이나 천문학적 건설비로 도시바-웨스팅하우스, 히타치-GE 모두 철수
 - 리스크 저감 위해 RAB로 투자 방식 변경 추진 중
- **일본, 유지 희망이나 실질적 탈원전 진입**
 - 54기의 원전 중 사고난 후쿠시마 원전을 포함 재가동 안전보강 경제성 없어 20여기는 폐기 예정이며, 나머지 중 9기만 가동 중, 영국/터어키 사업 전면 철수
 - 2030년 원전 발전량 20%를 위해서는 30기를 재가동해야 하나 지역반대와 법적인 문제 등으로 불가능한 상황 -> 신임 환경부장관 원전 완전 폐기 주장
- **기타 유럽 다수국 포기, 중동 신규 진입 계획**
 - 독일, 이탈리아, 스페인, 벨기에, 스위스, 대만 등 원전 증장기 포기
 - 헝가리, 터어키, 벨로루시 등 신규 건설 중, (폴란드, 체코 등 신규 계획)
 - 중동 UAE, 이란, 사우디 건설 중 혹은 계획

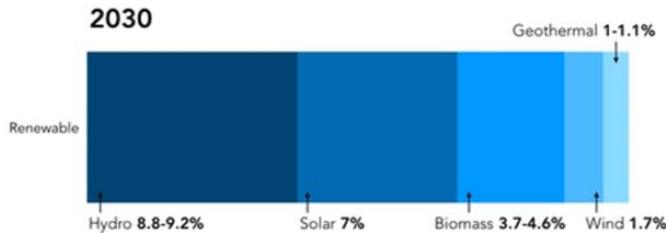
에너지 전환 – 일본이 탈원전?

- 한국엔 자원이 거의 없는 수력발전을 제외하면, 2030년 한국보다 적은 15% 수준 (바이오매스 포함)
- 재가동 9기에서 정체 (2018. 10 현재), 2019년 추가 재가동 없음. 주민반대, 소송 등이 원인으로, 2030 원전 20~22% 계획 달성 어려움 예상

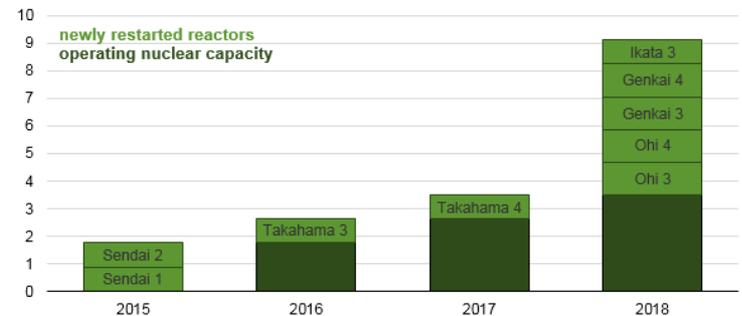
Japan's 2030 Best Energy Mix



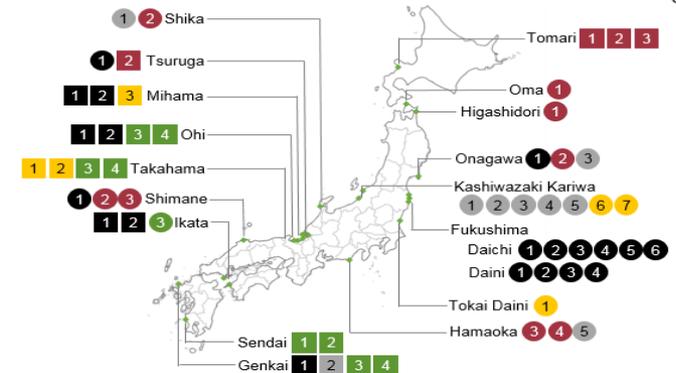
Japan's energy mix (in percent)



Japan's operating nuclear electricity generation capacity (2015-October 2018) gigawatts



Current status of Japan's nuclear reactor fleet, November 2018



Permanently shutdown post-Fukushima
 No restart application with NRA
 Restart application under NRA review
 Restart application approved by NRA
 Operating reactor

□ Pressurized water reactor
 ○ Boiling water reactor

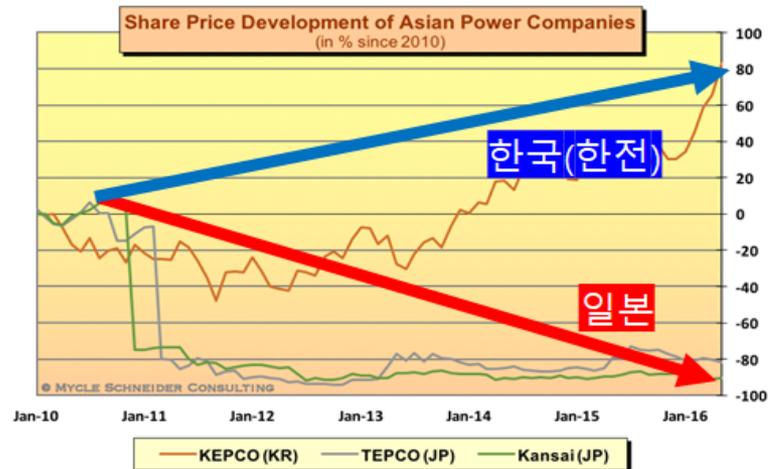
<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=37633>

원전의 경제성

- 다른 모든 기술과 달리 원자력 비용은 시간이 지남에 따라 상승
 - 원전 지지자들조차도 원자력이 자유 시장 환경에서 원자력발전이 경쟁력을 발휘한 적은 없다는 인식: 이에 원자력산업이 “부정적 학습 곡선”을 따랐음 지적
 - 전세계 발전량의 10%에 불과함이 증명, 또한 상위 10개국에 90% 집중
 - 대형 사고후 안전성 보강이 주요인
- 원자력에너지기구(NEA)와 국제원자력기구(IAEA)도 원자력이 “저탄소 기저부하 전력 공급원”이나, 기후변화에 대응한 일정한 역할을 담당하기 위해서는, **늘어나는 비용, 안전 및 폐기물 처리에 관한 심각한 문제를 해결이 전제되어야 한다.**

원자발전회사 주가 하락 (2016년까지 10년간)

- 프랑스, 심지어 원전 급속 확대중인 중국마저 하락 추세. 반면, 한전 주가는 상승



세계 원전 발전량 지표인 우라늄 판매

- Nuclear Slump?
- 우라늄이 안팔린다.
- 원전 감소로 우라늄 가격이 최저치를 치고 있다.

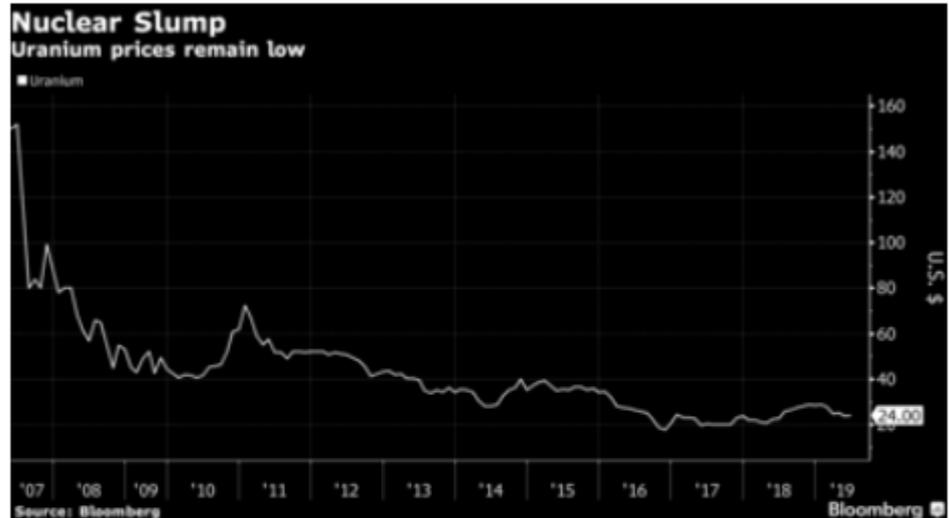
Bloomberg

Business

Top Uranium Producer Is Gloomy About Nuclear Power, for Now

By Will Wade

2019년 6월 6일 오전 8:29 GMT+9 Updated on 2019년 6월 6일 오후 11:32 GMT+9



There were 55 nuclear plants under construction in the first quarter, the lowest number in a decade, according to BloombergNEF. While China is booming, with 11 of those projects, developed countries remain wary. That's partly due to lingering concern from the 2011 Fukushima nuclear catastrophe in Japan, and partly due to high costs, Pirmatov said.

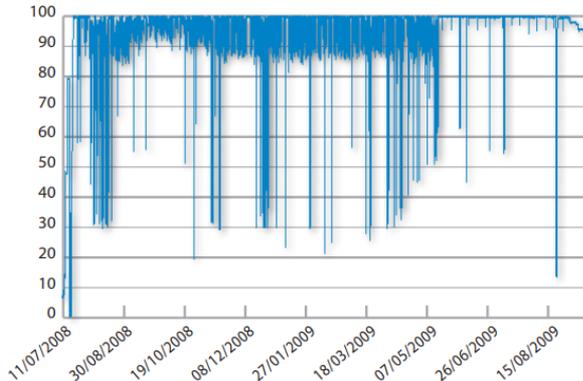
RE 백업과 원전의 부하추종

- 프랑스는 원전 비중 높아 부하추종 수행 중, 독일도 재생에너지 증가로 인한 기술적 및 가격 조절을 위해 부하추종 운전 경험
- 일반적으로 대부분 원전 부하추종 가능하나 많은 추가적 시험과 분석 데이터, 인허가 등이 필요. 그러나 원전기기나 핵연료의 피로/노화 방지 등 수명과 안전을 위해 단순한 독립적 운전이 유리, 원전 비중 20~30% 수준에서는 더더욱 기저부하 타당

countries. The share of nuclear power in the national electricity mix of some countries has become so large that the utilities have had to implement or to improve the manoeuvrability capabilities of their NPPs in order to be able to adapt electricity supply to daily, seasonal or other variations in power demand. This is the case in France where more than 75% of electricity is generated by NPPs, and where some nuclear reactors operate in load-following mode (see Figure 1).

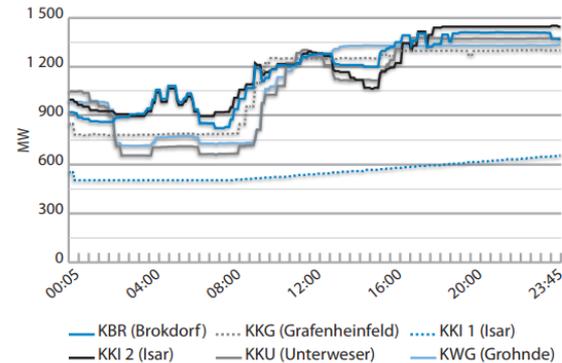
den influx of large amounts of wind power, German power markets have experienced several hours of *negative* electricity prices in recent years and many more hours with prices that were lower than the variable costs of nuclear power plants, which have the lowest variable costs among the large-scale established power sources. For these reasons, some German utilities have started operating their NPPs in load-following mode (see Figure 2).

Figure 1: Typical power history during an EDF reactor cycle (in % of rated power)



Courtesy of Électricité de France (EDF).

Figure 2: Example of load-following during 24 hours at some German nuclear power plants



Courtesy of E.ON Kernkraft.

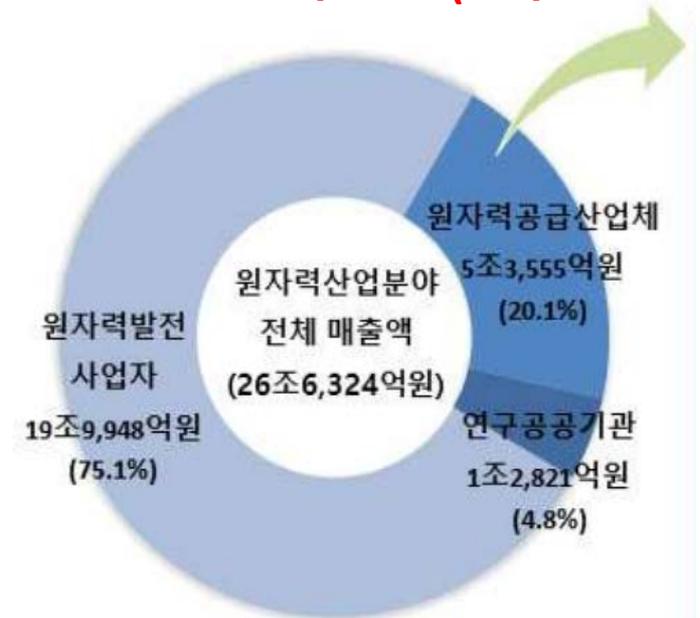
원전 산업 규모, 매출/인력 공기업/공공기관 편중

- 원전산업 규모 삼성전자 1개사의 1/10에 불과. 한수원 발전매출 20조, 공공기관 제외 협력사 5조 (2016년)로 역피라미드 구조 개선 필요 (아웃소싱 증대)
- 2016년 기준 원자력산업에 핵공학 전공자 8% 수준으로 사무직 10%보다 적다, 핵공학 전공자가 리드한다면 그것은 가방끈이 길어서 (40% 이상이 석박사 학위 소지자)
- 오래 전부터, 전공에 관계없이 우수인력들은 공기업/국책연구원/공공기관에 몰려 실제 원전산업에서 한수원을 제외하고 소규모 협력업체에선 우수 인력 확보 어려워 기술개발, 성장, 수출 등 애로

삼성전자 1개사 200 조



원전 산업 전체 27조 (한수원 20조)



2016 원자력산업 실태

원전 이용률에 대한 시각

- 2012년, 탈원전 이전, 원전 이용률 증대는 안전에 위협
- 2018년에는 탈원전에 의한 이용률 저하를 질타

2012년 3월



하지만 고리 1호기 사건은 이런 한수원의 자량에 정면으로 의문을 제기하게 했다. 고리 1호기의 비상 디젤발전기는 지난달 9일 정전사고 때는 물론 이달 15일 점검에서도 돌아가지 않았다. 조선대 김승평(핵공학과) 교수는 "안전이 최우선이란 걸 감안하면 이용률이 높다는 게 자랑스러운 것만은 아니다"고 말했다. '날림 점검' 의혹은 한수원 내에서도 나오고 있다. 한 관계자는 "과거 원전의 정기 정비기간이 40~50일이었는데 최근엔 20~30일이 됐다"면서 "기간은 짧아지는데 점검할 건 많아지니 작업자들의 집중도는 떨어질 수밖에 없다"고 말했다.



2018년 10월



원전 이용률이 떨어지니 한전의 원자력발전 전력 구매비용이 줄었고, 대신 화력발전(석탄·LNG) 전력 구매비용은 늘었다. 윤 의원은 "상대적으로 값싼 원자력발전을 덜 샀고 비싼 화력발전을 더 샀기 때문에 총 전력 구매비용이 올라갈 수밖에 없었다"고 말했다.

실제 지난해 상반기와 올해 상반기의 전력거래금액 변화를 보면, 원자력발전 구매비용은 지난해 4조5352억원에서 올해 3조5311억원으로 1조원가량 감소했다. 반면 화력발전 구매비용은 15조5229억원에서 18조3899억원으로 약 3조원 증가했고, 결국 총 구매비용은 2조원 가까이 늘었다. 한전이 올해 상반기에만 1조1600억원의 당기손익 적자를 기록한 배경이라고 윤 의원은 설명했다.

원전 대형 방사능누출사고의 후유증

- 조기사망은 매우 적으나, 암발생률 증가 ->
- 대형 피난(대피)에 따른 수년 이상의 장기간 홈리스의 과도한 스트레스, 건강 악화
- 체르노빌 (Chernobyl)과 후쿠시마 (Fukushima) 사고는 눈에 보이지 않는 환경오염에 의한 방사능 피폭에 대한 심리적 두려움. 이 두려움은 히로시마와 나가사키를 연상시키며, 사고지역 사람들을 원폭 피해 도시 사람들과 동일시 (**Bulletin of the atomic scientists, Aug. 20, 2019**)

낙진이 가장 많이 떨어진 벨로루시 암발생률 증가
1990년대부터 암발생률 증가

Advance Access publication 27 May 2004

doi:10.1093/ije/dyh201

CANCER

Thyroid cancer incidence trends in Belarus: examining the impact of Chernobyl

Martin C Mahoney,¹ Silvana Lawvere,¹ Karen L Falkner,¹ Yuri I Averkin,² Vladislav A Ostapenko,¹ Arthur M Michalek,³ Kirsten B Moysich¹ and Philip L McCarthy¹

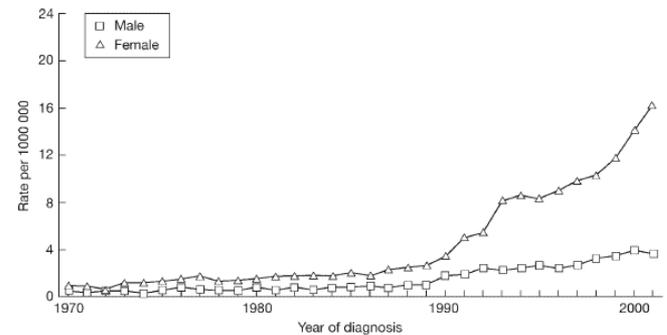


Figure 2 Annual age-adjusted thyroid cancer incidence rate, by calendar year and gender, Belarus, 1970–2001. Adjusted using World 2000 standard population.

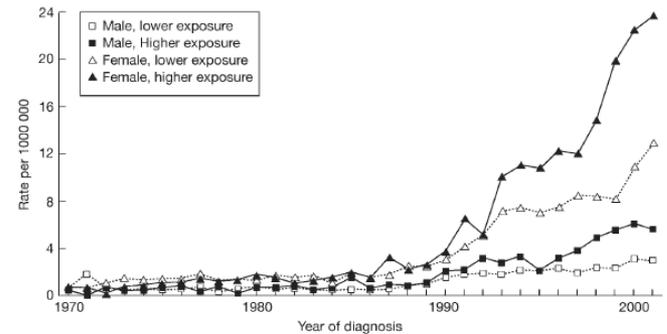


Figure 3 Annual age-adjusted thyroid cancer incidence rate, by calendar year, gender, and area of exposure,^a Belarus, 1970–2001. ^a See Methods for description of areas of exposure. Adjusted using World 2000 standard population.

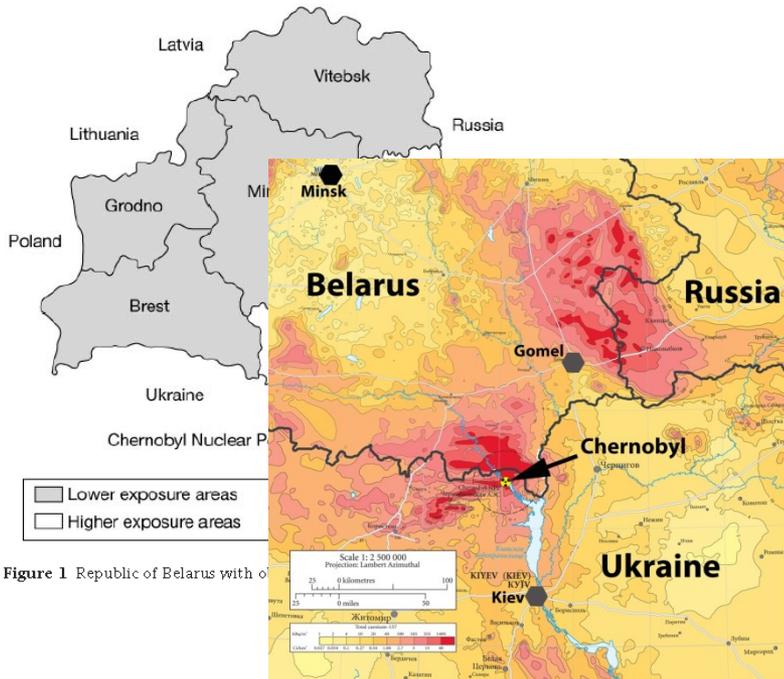


Figure 1 Republic of Belarus with

원전 안전운영

- 원전 운영/수명연장 안전/경제성 평가 신뢰도
 - 7천억원 들어 수명연장한 월성1호기는 안전성 거론 없이 가동할수록 적자라고 조기폐쇄
 - 월성 2,3,4호기 수명연장에 압력관 교체에만 총3조원 소요 예상 -> 무조건 포기?
 - 격납건물 100여개의 공극이 발생, 비록 보수한다 하나 되메움한 콘크리트의 접합도와 구조강도 확인 어려움
 - 한빛원전은 적자 걱정 때문에 재가동 신청과 승인



원전 안전규제

- 원력안전위원회 전문성은 원전 안전에 필수
 - 규제자 비전문성은 한빛원전 출력급증 같은 사태 및 후속조치 미흡 위험 가중
 - 현 원안위원들 원전 시스템/운전/사고 등 지식/경험 없어, 세밀한 기술검토 불가능(전문위원들도 교수들로는 역부족)
 - 원자력 전공 교수들 배제는 원전 이용자 연구비 수령보다, 그동안 사업자에 편파적으로 우호적인 태도나 결정이 있었음을 돌아보아야 함
 - KINS 원자력안전기술원 전문가 전문성에 의존, 존재 필요성 의구심
- 탁상공론식, 모순된 안전성강화 사례는 비전문성 기인
 - 원전 사고시 사업자 무한 책임 부과, 규제자는 책임에서 자유로운가?
 - 10년마다 최신기준 적용은 운영허가를 갱신하는 수준으로, 이미 발행한 40내지 60년 운영허가와 완전 배치. 프랑스와 미국법 혼합 -> 어느 나라에 물어보아도 의아해 할 것
 - 법이 바뀌어도 기존 원전 소급 불가. 현재
 - **10년마다 최신기준 넣으면 이론적으로 무한 수명 인정하는 것**

원자력 미래기술 R&D

- 신규 원전건설 중단에 영향은 빠르는데, 먼 미래에 상용화나 산업화 조차 불투명하거나 미미한 분야 R&D 투자는 대안이 되지 못함
 - 기존 연구에서 이름만 바꾼 가상원자로
 - 미래형 소형원자로 같이 경제성 미입증 및 상용화 불확실 연구
 - 러시아/중국 이외에 서방국 관심 없는 해상부유식 원자로
 - 우주기술/핵융합 등
- 신규 산업 일자리나 기존 기업의 새로운 이득이 창출되는 분야에 집중해야 현재 그렇지 못하다.
 - 중앙정부가 잘 지도하여 지자체도 경쟁적, 전시성의 소형로 개발, 제2 원자력연구원 같은 근거없고 비현실적 과장 없도록 해야

원자력 미래기술 연구/투자 방향 모호

- 국고지원 지차체 – 미확인된 유치 선언, 성과위주, 경제적 효과 과대 포장, 중복성

08.01 (목) 헤드라인 뉴스 김정은 방사포 사격 지도 "과녁에 핵" (1/2)



서울경제

부산시, 원전해체 미래원자력기술 인력 양성한다

기사입력 2019.08.01. 오전 8:14 | 기사원문 | 스크랩 | 본문듣기 · 설정

공감 댓글

로그인 | 회원가입 | 정보수

기록뉴스 | 정책뉴스 | 분야별뉴스 | 행사·현장 | 인물·오피니언



전체 | 뉴스 | 자치 | 오피니언 | 포토

HOME > 사회

원전보유 울산, '원전산업 메카' 성

ⓒ 노병일 기자 | 승인 2016.06.07 21:16 | 댓글 0

신고리 3,4호기 이어...5, 6호기 착공 임박



The ScienceTimes

August 01, 2019

Notice | 과기정통부, 과학기술지식정보서비스 동영상 공모전

분야별뉴스 | 과학기술 | 응용과학

경주 국제 에너지 과학연구단지 조성 탄력

중수로 해체기술원·원자력기술연구원 유치

f t G+ TALK

경북도와 경주시가 국제 에너지 과학연구단지에 들어설 핵심시설인 중수로 해체기술원과 원자력기술연구원을 유치해 단지 조성사업이 본격화에 올랐다.

16일 경북도와 경주시에 따르면 가동 원자력발전소의 안전성 확보를 위한 지속적인 연구개발을 위해 경주 감포관광단지에 국제 에너지 과학연구단지 조성을 추진하고 있다.

경향신문

전체

최신기사 많이 본 기사

Booking.com

부산·발루 호텔 부산 | 지금 예약

부산·보리송 호텔 보리송 | 지금 예약

프리미엄·EA 호텔 콘솔 여수 | 지금 예약

울주 삼남면에 원자력방재타운 만든다

백승욱 기자 smbaks@kyunghyang.com

f t < m



2019.08.01 (목) | 출간특기 | 모바일버전 | 전체기사

울산저널

뉴스 | 기획/특집 | 오피니언 | 포토·영상



타임세일

8월 4일까지만 프: 할인 + 추가 3만원

HOME > 뉴스 > 환경

'소형 모듈형 원자로의 미래' 울산에서 논한다

이기일 기자 | 기사승인 : 2019-07-02 13:24:04

f t G+ P N B

'제17차 IAEA 인프로 다이얼로그 포럼' 2일~4일까지 울산 롯데호텔에서 열려



원전 수출 조급증

- 원전 수출은 정치.경제.군사적 영향력의 산물. 한국은 기술 홍보 집중했으나 지난 10년간 성과 제로 상황에서 러시아 40여기, 중국이 20여기 수출 보면 기술이 관건 아님
 - 러시아/중국 경수로 건설/운영 경험, 한/미/일 보다 매우 적다
- 영국은 히타치/도시바 모두 철수, 원전 건설 사업성 없는 나라 입증 (비싸도 하는 나라)
- 동구/아프리카는 이미 러시아가 모두 섭렵, 그 영향권 진입 불가
 - 체코 기존 원전 모두 러시아 원전으로 한국 원전 도입 미지수
 - 터어키/헝가리는 러시아가 사용후핵연료 회수 (한국은 불가능)
 - 일본 터어키 편당 협상후 비용과다로 철수
- 사우디 포함 중동 지역은 전쟁 위험으로 원전 부적합



세 정상 의 그림자 블라디미르 푸틴 러시아 대통령(왼쪽), 레제프 타이이프 에르도안 터키 대통령(가운데), 하산 로하니 이란 대통령이 16일(현지시간) 터키 앙카라에서 3국 정상회담을 마친 뒤 기자들 앞에서 포즈를 취하고 있다. 앙카라 | EPA연합뉴스

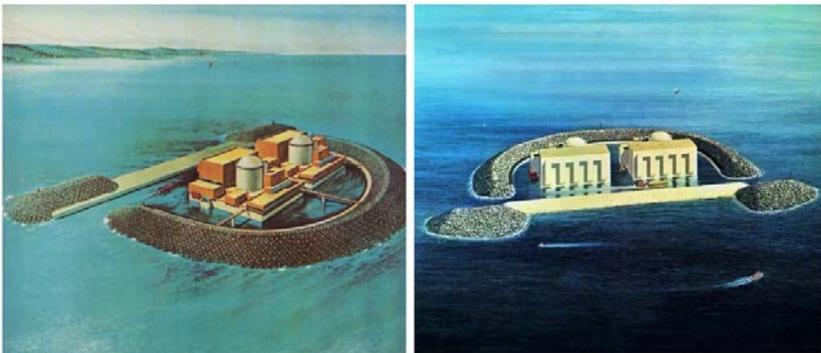


소형원자로 ~ 예측은 빛나가라고 있다.

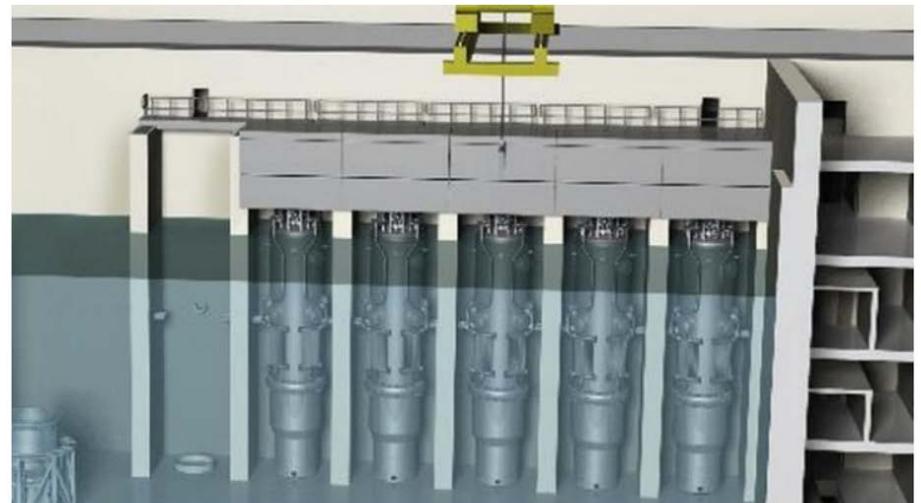
- 기존 가압경수로 기반 Offshore Power Systems (OPS) 해상원자로
 - 1970년대에서는 원전은 미국에서 꿈의 에너지였음.
 - 1975년엔, 미국 전력의 4%가 원자력발전, 2000년대 초반에는 50%가 될 것으로 예상. 실제 20% 수준에 그침.
 - 심지어, 1970년대 초반, 1999년까지 10기의 1150 MW급 해상 원전 계획 시도 (각각 60만 인구 도시에 전력 공급 예상)
 - 안전성 미입증, 주민반대로 지연하다, TMI 2호기 원전 사고로 건설/계획 취소
- 미국이 앞서가는 소형모듈화원자로(SMR)도 경제성이 불확실함. 용융염 등 혁신적 소형 원자로 등은 개발안 된 불투명 미래. 경제성 없어 2000년대에 제3세대 대형원전에 밀려난 것을 서랍에서 다시 꺼내다.

미국 NuScale 다중 SMR 개념도

70년대 취소된 뉴저지주 해상원전 개념도



Artists' renderings of Offshore Power Systems' proposed nuclear power plant for the New Jersey coast.
(Smithsonian/PSEG)



Multiple NuScale SMR modules could make up a plant (Image: NuScale)

소형원자로 경제성

Simposio LASANS 2007 / 2007 LASANS Symposium
 XVIII Congreso Anual de la SNM / XVIII SNM Annual Meeting
 XXV Reunión Anual de la SMSR / XXV SMSR Annual Meeting
 Copatrocinado por la AMEE / Co-sponsored by AMEE
 Cancún, Quintana Roo, MÉXICO, del 1 al 5 de Julio 2007 / Cancun, Quintana Roo, MEXICO, July 1-5, 2007

Economic Comparison of Different Size Nuclear Reactors

M. D. Carelli, B. Petrovic, C. W. Mycoff
 Westinghouse Electric Company LLC
 1344 Beulah Road, Pittsburgh, PA 15235, USA
 Tel: (412) 256-1042, Fax: (412) 256-2444, Email: carellmd@westinghouse.com

P. Trucco, M. E. Ricotti, G. Locatelli
 Politecnico di Milano, Italy
 Via Ponzio, Milano 34/3, Italy 20133

- Carelli, B. et al., Westinghouse Electric Company LLC, Economic Comparison of Different Size Nuclear Reactors, 2007

Table IV. Quantification of factors evaluated in SMRs/large plant comparison (Figure 2)

Factor	Individual SMR/Large	Cumulative SMR/Large
(1) Economy of scale	1.7	1.7
(2) Multiple units	0.86	1.46
(3) Learning	0.92	1.34
(4) (5) Construction schedule and timing	0.94	1.26
(6) Design specific	0.83	1.05

SMR: One 335 MWe plant, as part of four units

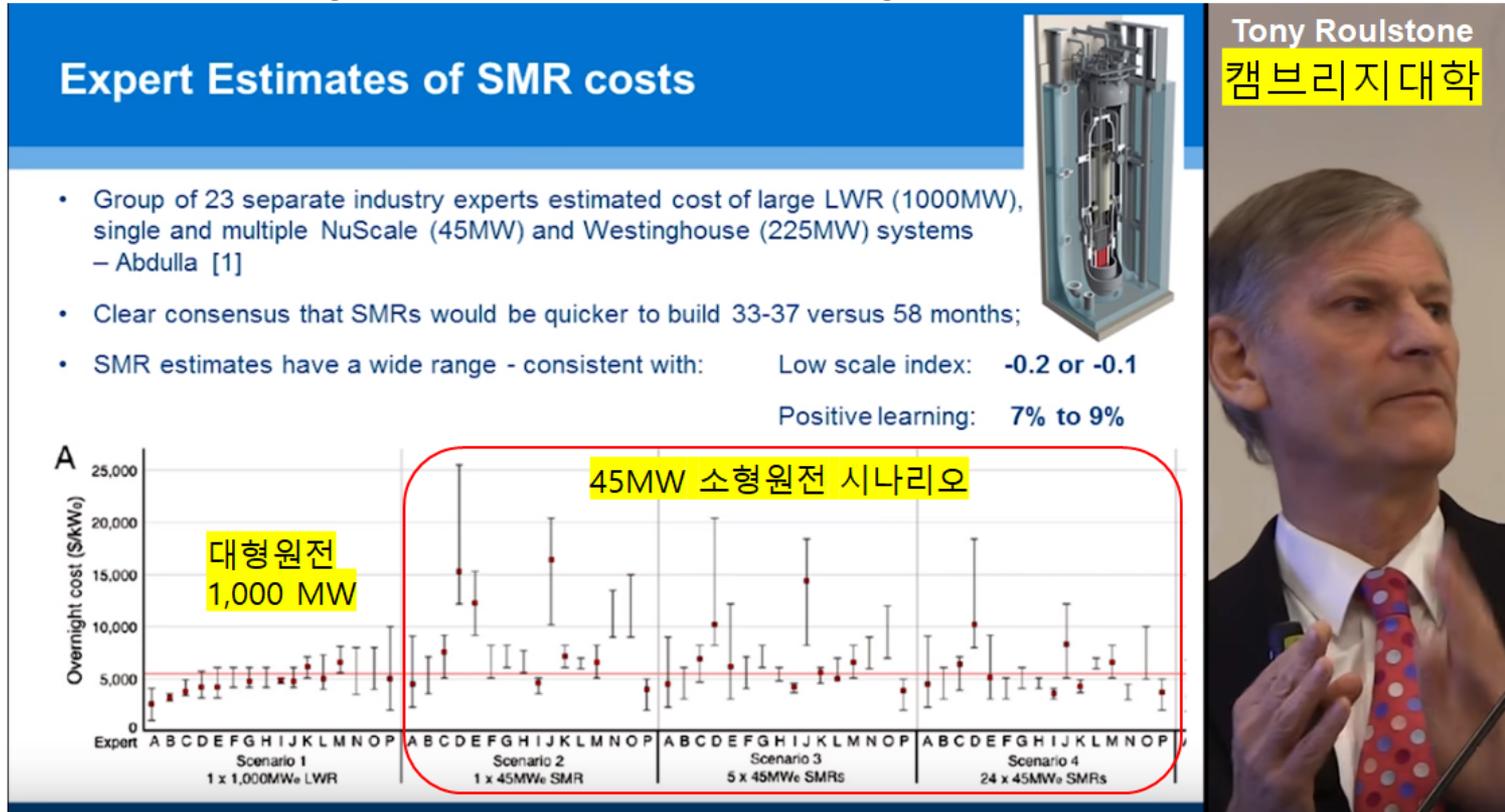
Large: One single 1340 MWe plant

- 대형로: 1340 MWe 급, 소형로 335 MWe 4기기준
 - 다른 조건이 같고 출력만 감소시, 소형로가 70% 비싸다.
 - 다른 유리한 조건에 따른 비용 감소 효과를 고려해도 5% 비싸다.

소형원자로(SMR) 경제성

- 불확실성 크고, 대형원전 대비 평균적으로 경제성 2~3배 불리함.

Tony Roulstone - Nuclear's Economy of Scale vs Volume, 2015



해상 원전 (부유식 소형 원전)

- 새로운 기술 아니다. 원자력선, 핵잠수함 원자로를 발전용으로 사용, 러시아 로사 톰 (Rosatom)은 전세계 국가에 맞춤형 부유식 원전 판매 희망 (수단 등 아프리카)
 - 러시아, Akademik Lomonosov 비용이 얼마인지 말하지 않았지만 추가 건설에 따라 가격 하락 주장. 2016년, 이 부유식 원전 비용은 약 215억 루블 (2억7천6만 파운드) 예상
- 미국 이미 상용화 실패: 1960년대와 70년대 뉴저지, 파나마 운하 지역의 바지선에 소형 원자로 배치 계획은 몇 세대에 걸쳐 계획되었지만 모두 취소
- 서방국은 무관심, 러시아, 중국, 한국(?)이 관심. 러시아/중국은 결국 자국 세력 확장 의도

취소된 뉴저지주 해상 원전개념도, 1970s



Artists' renderings of Offshore Power Systems' proposed nuclear power plant for the New Jersey coast. (Smithsonian/PSEG)

<https://www.smithsonianmag.com/history/the-american-plan-to-build-nuclear-power-plants-in-the-ocean-27801262/>

<https://timeline.com/floating-nuclear-power-plants-c808bfe707aa>

Anna Kireeva of Bellona said the organisation had closely followed the development of the Akademik Lomonosov. Russian experts may safely be able to operate a floating nuclear power plant, she said, but plans to license out the technology raised much larger concerns.



▲ The Akademik Lomonosov is towed out of St Petersburg bound for Murmansk in April 2018. Photograph: Nicolai Gontar/Greenpeace/Reuters

"Our real concern is the reason why they're making this floating plant - they want to sell this technology to countries like Sudan," she said in a telephone interview.



Guardian graphic

Fears of 'Chernobyl on ice' as Russia prepares floating nuclear plant, Aug. 4, 2019

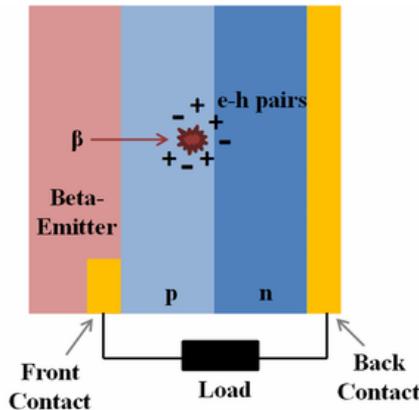
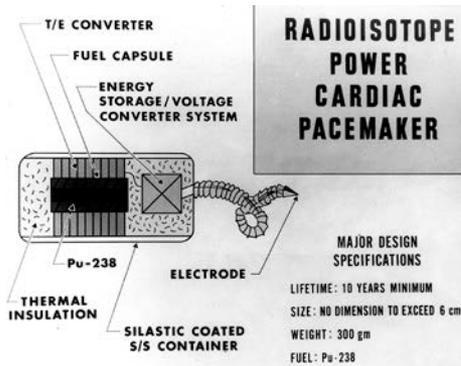
해상 원전 (부유식 소형 원전) 위험성

- 바다 위의 후쿠시마: 쓰나미보다는 폭격 등에 의해 모든 것이 즉시 그리고 직접 바다로 간다 – 러시아, 중국 모두 부정
- 미국만 인정: Selfridge wrote in 1975 (even before Three Mile Island) about the difference between an accident on land and one in the ocean:
 - “A similar accident at sea, however, would have a far more devastating effect. A meltdown at sea would not create its own glazed insulation chamber. **The poisonous reactor core would melt through the barge and descend into the hydrosphere where the radioactive core would contaminate thousands of cubic miles of ocean.** Some radiation would be released to the atmosphere, the rest would enter the marine food chain. Radioactive contamination of the entire northwest Atlantic food chain for hundreds of years from one meltdown is a conceivable scenario.”

<https://www.smithsonianmag.com/history/the-american-plan-to-build-nuclear-power-plants-in-the-ocean-27801262/>

핵전지 nuclear battery, radioisotope generator

- 방사성동위원소를 이용, 솔라셀 같은 광전효과나 베타 입자선(beta voltaic)에 의한 약전 발생. 1913부터 개발한 낡은 개념
- 일반적으로 효율이 매우 낮아 (10% 이하), 매우 고가, 그러나 긴 수명 (20-30년) 목적의 우주, 의료의 심장박동 조절기, 원격 수중탐사, 등 (수요나 산업적 효과 미미) 적용 가능
- 최근, 저렴하고, 긴 수명 저출력 고에너지 밀도 혁신 추구. 미주리 대학교에서 스마트폰 등 일상 전자기기 배터리 평생 사용 가능성 제기, 방사성 붕괴로 출력 점진적 감소, 전자기기 손상 유발, 안전성 문제, 일반대중 거부감으로 인해, 산업적 파급 예상되지 않음



Betavoltaic Devices, Sara Harrison, March 20, 2013
Stanford University, Winter 2013

EXTREME TECH Search Extremetech
Computing Phones Cars Gaming Science Space Deep

Make it with Creative Cloud
시선, 디자인, 동영상, 음악, 이미지
최적화된 템플릿 ₩11,000부터

HOME > COMPUTING > THE NUCLEAR BATTERY COULD POWER YOUR SMARTPHONE FOREVER - AS LONG AS YOU DON'T VALUE YOUR LIFE OR SPERM COUNT TOO HIGHLY

This nuclear battery could power your smartphone forever – as long as you don't value your life or sperm count too highly

By Sebastian Anthony on September 19, 2014 at 11:38 am 122 Comments

f t+ G+ Y P

원전 해체



Nuclear Decommissioning serv...
corecut.co.uk



Pages - IDN
nucleus.iaea.org



ELINDER: new initiative to trai...
ec.europa.eu



Trojan Nuclear Power Plant De...
bluegrassbit.com



Ready, Aim, Fire! Handheld La...
industrytap.com



Meeting the Challenge of Futur...
iaea.org



Decommissioning - Nuvia Can...
nuvia-canada.com



Nuclear decommissioning era ...
theecologist.org



DEMCO Demolition - Radioacti...
demcoinc.com



Nuclear Decommissioning serv...
corecut.co.uk



Trump's tweets raise specter of...
reviewjournal.com



e-a.hu - Kulcsfontosságú szak...
e-a.hu

원전 해체~ 원전 해체가 산업?

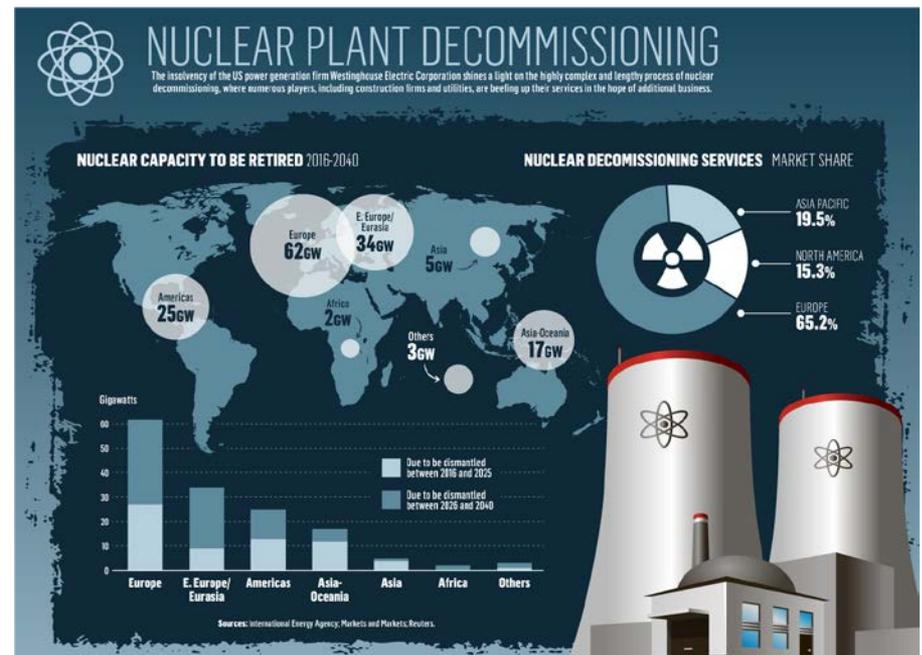
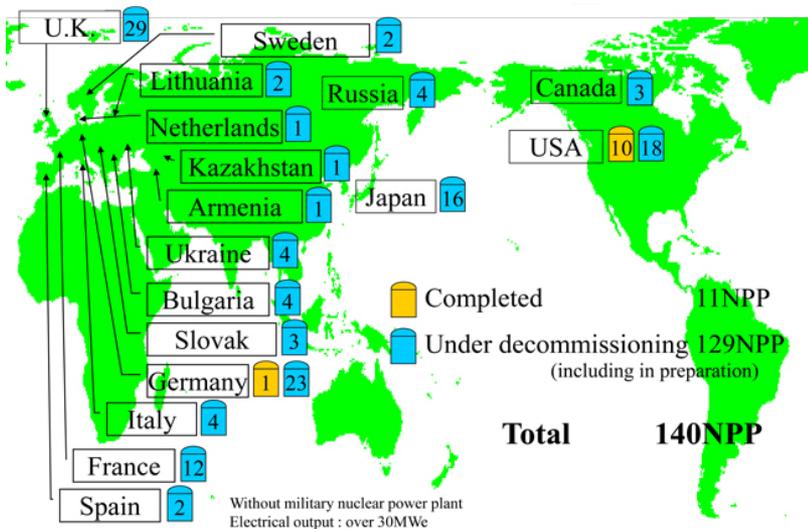


원전 해체가 대형 마켓?

- 2016년 12월 현재 전세계 원전 129기 이미 해체중, 추가로 2040년까지 150 GW 해체 예상: **총 280여기는 이미 해체 계획 수립단계**, 이들 물량은 이미 한 국이 진출 불가
 - 2016~2025에 60~70 GW, 2026~2040에 80~90 GW 정도
- 고리 1호기 해체는 2030년 초반 완료 예정이라 경험 1회

2040년까지 150 GW 해체 예상

2016년 12월 129기 해체중



원전 해체

• 보도 경향 변화



산업 부동산 증권 테크 금융 정책 오피니언 **피플**

피플 최대 1000조원 시장 '원전 해체 사업' 떠올라

조선일보 | 김승범 기자

입력 2016.11.07 03:05

2050년까지 해체대상 400여기

원전 해체 시장이 원전 산업에서 새로운 관심사로 떠오르고 있다. 1960년대 들어선 원전을 시작으로 수명이 끝나는 원전이 속속 나오기 때문이다. 원전을 해체하는 사업이 '블루오션'(성장 잠재력이 큰 새로운 시장)으로 자리 잡고 있는 셈이다. 세계원자력협회 등에 따르면 현재 가동 중인 원전 44기 가운데 영구 정지된 건 157기. 이 중 해체 작업까지 끝난 원전은 9월 말 기준 19기에 불과하다. 앞으로 수명이 끝나는 원전까지 합하면 2050년까지 400여기 원전이 해체 대상에 들어간다는 얘기가 나온다.

chosun.com 오피니언

지면보기 구독신청 로그인 회원가입

뉴스룸 **오피니언** 정치 사회 경제 국제 스포츠 연예 전국 문화 라이프 영상포토 **세** 령킹뉴스

사설 [사설] 차 회사 없애고 폐차장으로 먹거리 대신하겠다는 황당한 발상

조선일보



입력 2019.04.18 03:20

정부 주장은 탈원전으로 원전 건설·운영 분야에서 일자리와 산업 생태계가 사라지더라도 이를 원전 해체 분야 육성으로 만회할 수 있다고 말하는 것처럼 들린다. 이는 마치 현대기아차를 없애고 대신 번듯한 폐차장을 차려 자동차 산업의 일자리와 수출 능력 등을 대체하겠다는 것처럼 허무맹랑한 이야기로 대국민 사기에 가깝다. 정부는 원전 해체가 무슨 대단한 부가가치를 창출해낼 수 있는 것처럼 포장하고 있지만 지금까지 국제 경험을 보면 원전 한 기 해체에 5000억~1조원 정도 든다. 앞으로 해체 경험이 축적되면 비용은 훨씬 싸질 것이다. 미국 시카고의 자이언 원전 두 기의 해체 프로젝트가 2013년부터 진행 중인데 여기서 일하는 인력은 450명밖에 안 된다. 또 원전 해체는 설비의 방사선량이 충분히 떨어지도록 기다리면서 진행하기 때문에 굉장히 오랜 시간이 걸린다. 국내 원전 25기를 1차 수명 때까지만 가동하고 폐로한다 하더라도 최종 해체 완료까지는 80년 이상 걸릴 것이다. 22조원이면 얼핏 많아 보이지만 연간으로 따져 수천억원 수준이다.

원전 해체 - 바른 시각

- 원전 해체는 대규모 철거를 동반하는 대형 방사성폐기물 관리이며, 산업이라 볼 수 없는 일. 산업화하기에는 비정기적이고, 수조원대 사업이라 해도 기간이 길어 매출이 작고 대부분 노임과 사용후핵연료 보관시설 건립 등 해체 폐기물 처분 비용이다.
- 원전 철거, 결코 생산적인 일 아니며, 장기간이라 경제적 효과 미미
- 1기 건설에 6-7조 하는 원전 건설과 1조원에도 못미치고 3D 작업이 주를 이루는 원전 철거를 산업이라고 하는 것은 넌센스. 공정관리 외의 실제작업은 모두 위험한 3D 작업.
- 기존의 많은 전문업체 Solution 업체 존재, 고도의 기술 전문사 아니면, 다른 나라에 해체를 맡기지 않는다. 막연한 해외 원전 해체기대 접어라.

원전 해체 - 현재 전문업체

- 해체 및 /사용후핵연료 취급 전문사
 - HDI/CDI (Holtec/SNC 자회사) 등



사용후핵연료 - 처분장 주민 반응

• NIMYBY (Not in My and Your BackYards!)

NEWEUROPE EU AFFAIRS

IAEA는 너무 뒤늦은 조언

IAEA, Nuclear Newcomers Tackle Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste Management, 2019. 8. 26, from June 2019 Bulletin edition on Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors.

원전의 모든 방사성폐기물은 최종 폐기까지 수십년이 걸린다
신생 원전국(방글라데시, 벨로루시, 터키 및 UAE 등)의 사용후
핵연료/방사성폐기물 처리방안 미비 지적 -> 신규 원전 도입 전,
사용후연료/방사성 폐기물 관리 인프라 완전 구축 필요

France debates what to do with its nuclear waste

Nuclear waste disposal, Bure, Meuse, France



Interior view into the maintenance room for containers with highly radioactive in the interim storage site Gorleben, Ger



OUR WORLD

Leading minds reflect on the state of our societies, and examine the challenges that lie ahead. An edition dedicated to generating ideas that will help form a new vision for our world.

with The New York Times World Review

PUBLISHED 17:23 APRIL 23, 2019

UPDATED 17:23 APRIL 23, 2019

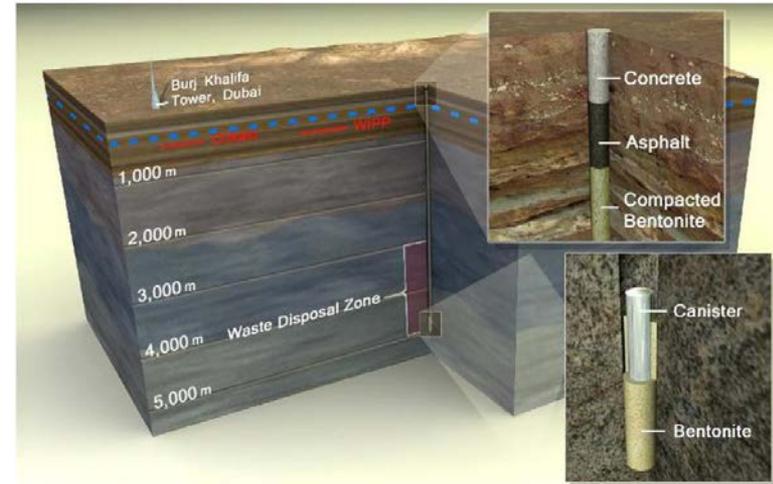
France debates what to do with its nuclear waste



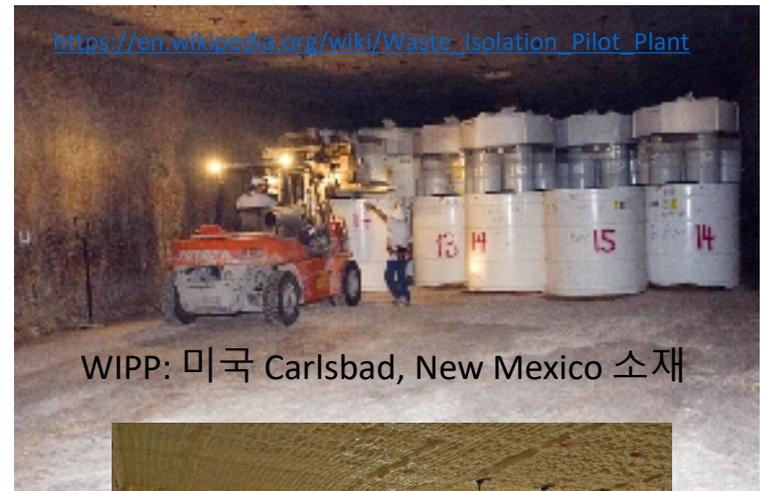
Rallies are held to oppose plans to store highly radioactive waste underground: the expensive and dangerous long-term by-product of France's nuclear energy programme.

사용후핵연료 - 기술?

- 기술보다 수용성이다. 사막이 많은 미국에서도 유카마운틴이 네바다 주 반대로 진행이 안된다. **이제, Deep bore hole이나 WIPP(Waste Isolation Pilot Plant) 같은 기존 군사핵폐기장 활용 이야기도 나온다 (현재 공간 증설 중)**
- 한국, 적합 부지도 없거나 확인된 바 없다. 비전문가들이 모여 토론회해도 해결책 없다. **대안이 없는 공론화는 무의미, 타운홀미팅이나 브레인스토밍으로는 실패**
- 전 세계 어디도 파이로프로세싱이나 고속로를 옵션으로 보지 않는다. 고속로에는 20% 이상 농축우라늄이 필요, 한국은 농축 불가. 어디에 건설?
- 사용후핵연료처리에 고농축 원자로를 이용하는 것은 발전용원자로를 고속로로 대체하는 꼴.



<https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2015/03/05/cant-we-just-throw-our-nuclear-waste-down-a-deep-hole/>



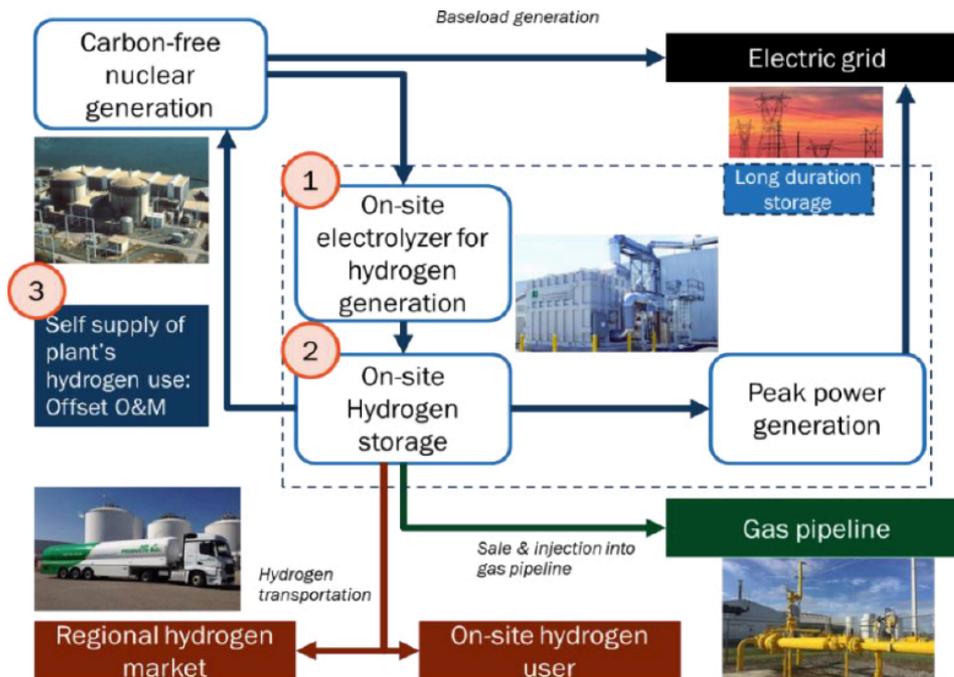
WIPP: 미국 Carlsbad, New Mexico 소재



https://www.santafenewmexican.com/news/local_news/wipp-will-get-more-space/article_24edb2c2-ded8-5bdf-97fa-8fe34fad7f08.html

가동원전 이용 수소생산(전기분해)

- 원전이 전기 외에 생산품 다변화가 목적, 제4세대 초고온가스로가 아닌 기존 가동 원전 생산 전기를 이용한 전기분해 (천연가스 개질과 달리 간단, 이산화탄소 미배출)
- 사례: DOE 지원의 시범 프로젝트: FirstEnergy Solutions Davis-Besse plant in Ohio, APS' Palo Verde plant in Arizona, 엑셀론 nuclear plant in Minnesota
 - 퍼스트에너지사, 2020 년에 전기 분해로 시설을 건설, Davis-Besse 원전의 전기 중 일부 이용
 - 엑셀론 사, 수소 생산, 저장, 수송 등 이용 타당성 시험 프로젝트



- 미국 엑셀론과 Nel사 합작, 여러 연구소 합작
- 종합 수소, 생산, 저장, 수송 타당성 시험 프로젝트

요약

- 석탄발전 증가, 에너지전환 기후변화 기여도 아직 미미, 원전에 의존하는 탈원전 명분 없다. 경제성에 따른 자연 감소(미국)와 인위적인 탈원전은 분명 차이
- 원자력 발전 전반적 경쟁력 저하 이유, 기술/비용 혁신 실패, 사용후핵연료 대책 미비, 대형 사고 후 안전성 강화 비용 급증
- 그럼에도, 10대 원전국들 온실가스 저감 명분으로 원전 유지 내지 확대 정책, 미소 보유국 탈원전 파급효과 미미
- 신규원전 취소에 따른 기존 산업 축소로 수지 악화 빠르는데, 단기 산업형성 안되거나 불투명하고 시간이 오래걸리는 전시성, 소모성 미래 R&D 투자는 대책 아님
- 원전 수출, 선택과 집중 전략 없는 전방위 해외 원전 입찰 참여는 투자가 아닌 비효율적인 자원 낭비
- 원전 해체는 해체 후 신규 건설 아니면 순수 대형 방사성폐기물 관리로 생산적 산업 아니다. 대부분 노무/폐기물 처리비용, 장기사업 경제적 효과 미미,
- 사용후핵연료 처리/처분 방안 난망하여, 절대 다수가 동의하는 처리 처분 방안이 정립되지 못함, 심층 연구 부지도 시설도 부재, 주민 수용성 미확보가 블랙홀, 추가 공론화도 실패 예상
- 전문성 부족 원안위 행정조직화, 권한만 있고 원전 사고 책임 부재, 비현실적 안전강화대책과 형식적인 공청회 개선 필요

향후 방향 제안

- 에너지, 급진적 정책 전환은 무리가 따른다. 인위적/감성적 에너지 전환보다, 자원, 기술, 안전과 환경, 가격 경쟁력이 고려된 **과학적인 예측과 시장 논리에 따라 가야 한다.**
- 재생에너지가 원전의 대안이 아니고 원전도 재생에너지의 대안이 아니다. 서로 **독립적이면서도 보완적으로** 나아가야 한다. **실질적으로 안전성이 확보되고, 사용후핵연료 문제가 해결된다면, 원전의 일정 비율 유지가 기후대책에 유리하다.**
- 원전 수출 조급증 탈피하고, **전략적 선택과 집중하여 해당국에 지속 투자 없이는 난망.** 국내 한빛 원전 같은 사태를 방지하는 안전 관리가 더 중요
- 비핵신성, 산업화 불투명 소모적 미래 연구개발 지양, ‘너도나도 소형로’라는 **2030 원자력 연구는 수정보완 필요. 기존 원전을 이용한 수소생산 등 재생에너지 결합 프로젝트 시도 필요**
- 원전 해체의 산업적 기대나 불필요한 장비 개발 R&D 투자, 과도한 미래 비전 제시는 **지양**해야 함. 필요시 전문기관과 공동 수행 혹은 장비 리스도 방안. ‘대형 방사성 폐기물 안전 처리/관리 사업’으로 접근 필요
- 원안위원 전문성 확보를 위해, 원안위원에 **원자력 분야 전문가 일정 비율 유지 법제화**, 사고시 사업자만이 아니라 규제자도 일정 책임을 지는 **규제 책임제 도입 제안.** 전문가 조직인 원자력안전기술원을 원안위 영향권에서 벗어나 소신 있는 전문규제 방안 모색