

에너지의 미래와 원자력과 신재생에너지의 연계

한국원자력학회 2017년도 원자력 엘리트스쿨
2017년 6월 30일

카이스트 원자력 및 양자공학과
임만성

순서

- 에너지 사용의 현황과 미래 전망
- 원자력의 문제와 가능성
- 에너지 사용과 대중 수용성
- 원자력과 신재생 에너지의 연계

Top 10 Global Problems for next 50 years (2003)

1. **Energy**
2. Water
3. Food
4. **Environment**
5. Poverty
6. Terrorism & war
7. Disease
8. Education
9. Democracy
10. Population



에너지 산업의 규모



Energy Market by Key Sector*

(Billion USD)

	Global	Korea (1.6% GDP share)
 Oil	6,845	54.8 (0.8%)
 Gas	2,955	12.3 (0.4%)
 Coal	432	0.3 (0.07%)
 Electricity	1,448	32.5 (2.2%)

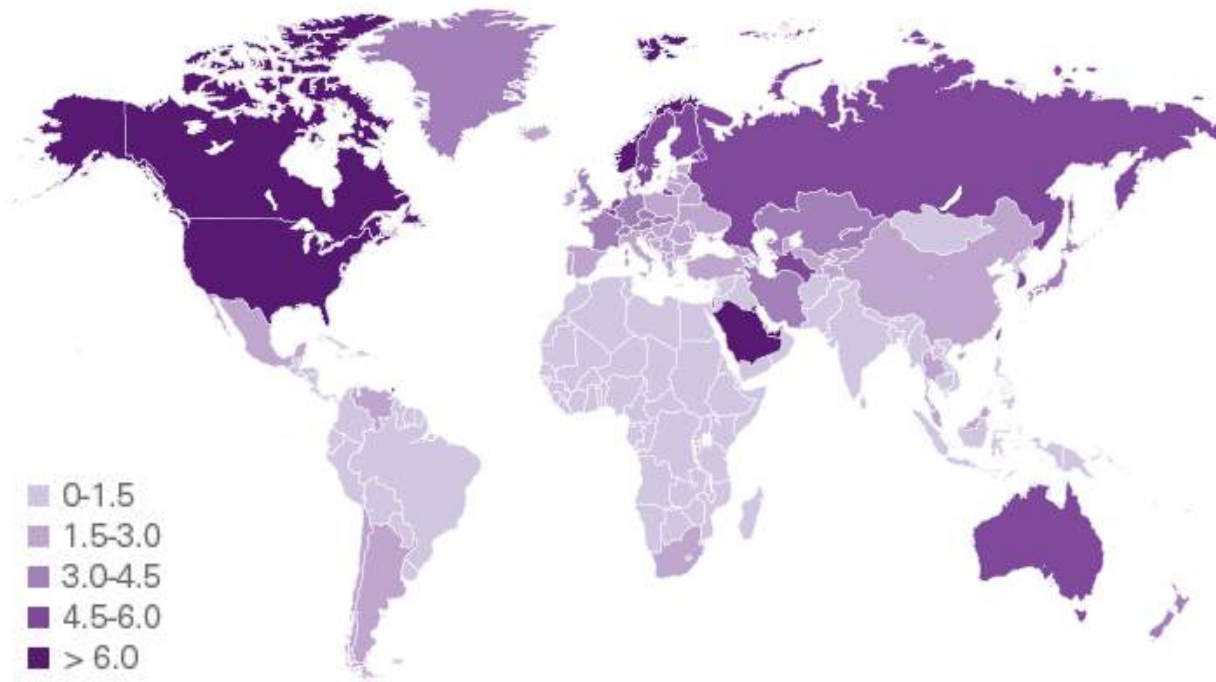
*Source: DataMonitor Research, 2009 Korea National Statistical Office

Copyright © 2012 Accenture. All rights reserved.

인구 일인당 에너지 사용량

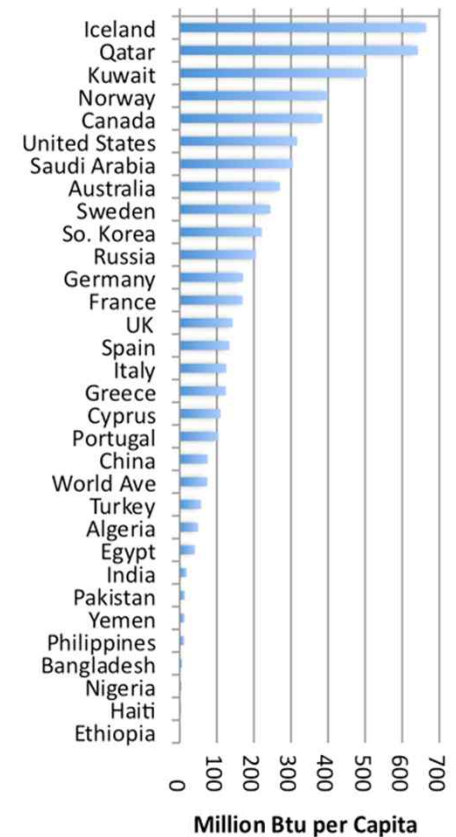
Primary energy consumption per capita 2013

Tonnes oil equivalent



BP Statistical Review of World Energy 2014

Per Capita Energy Use for Selected Countries



국가별로 매우 차이가 크다

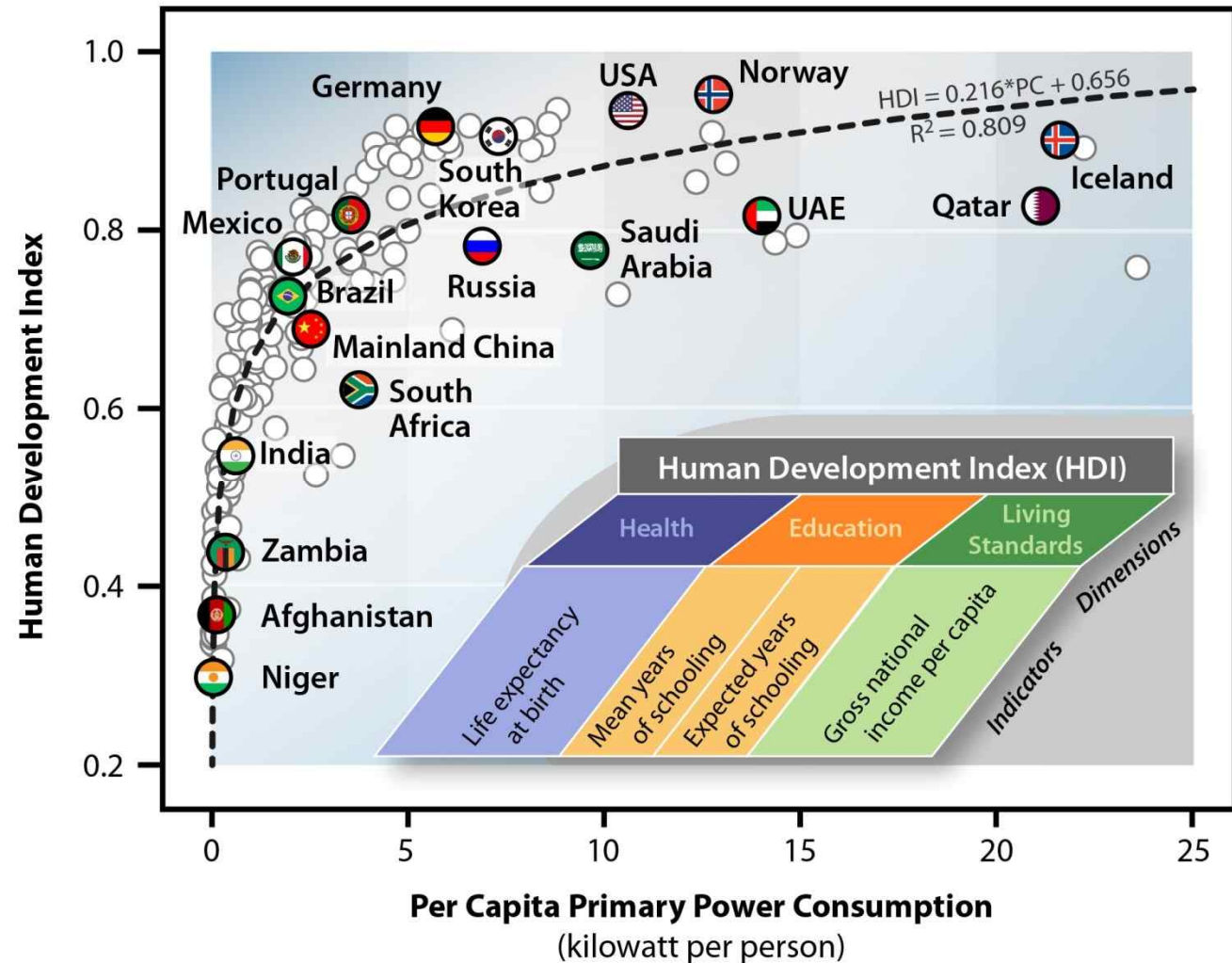
에너지사용 => 삶의 질

80%

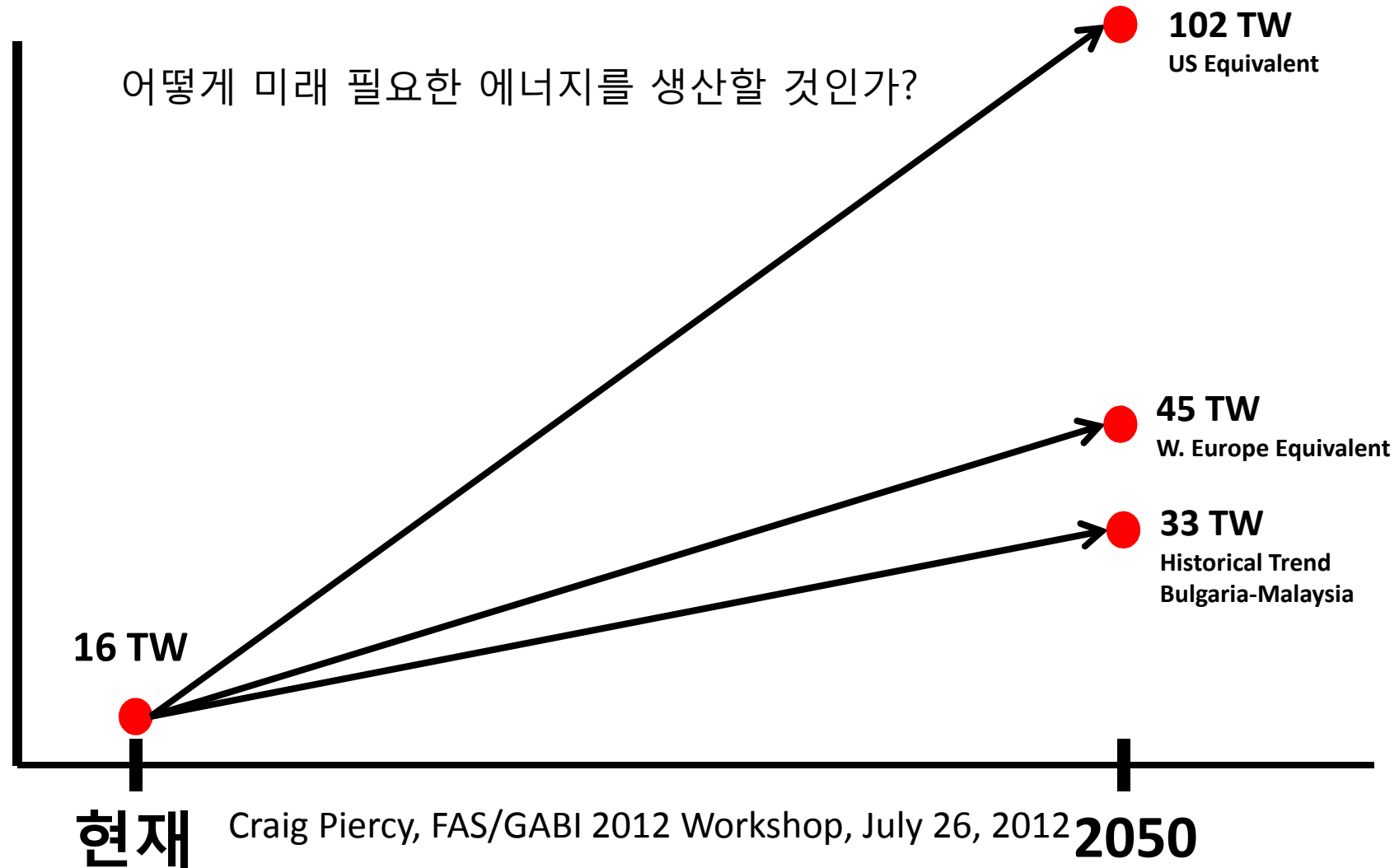
세계인구 80%가

유엔의 Human
Development
Index (HDI)

0.8 이하 수준

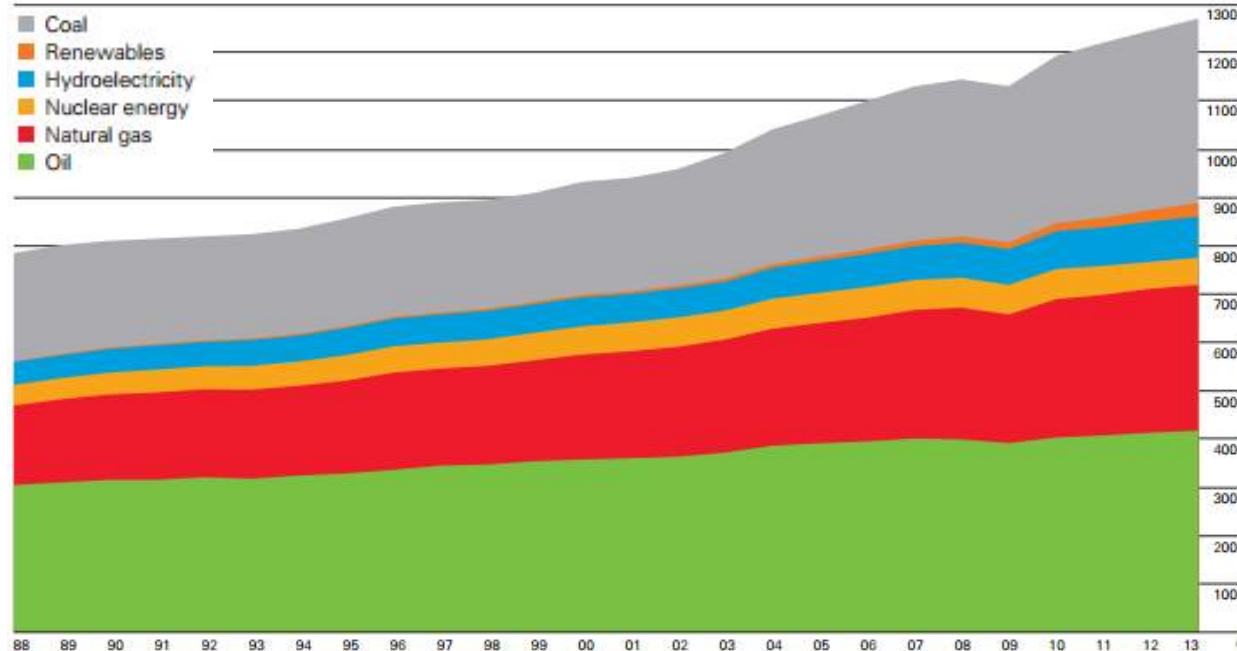


미래 에너지 사용의 전망



에너지원 사용 총량 비교

World consumption
Million tonnes oil equivalent



석유: 32.9%

석탄: 30.1%

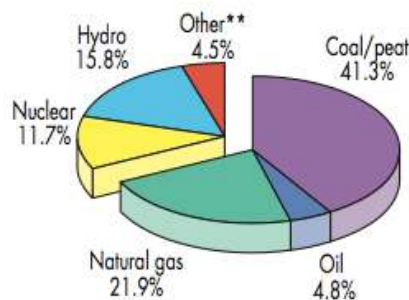
천연가스: 23.7%

수력: 6.7%

원자력: 4.4%

재생: 2.2%

2011년 에너지원별 전기생산량



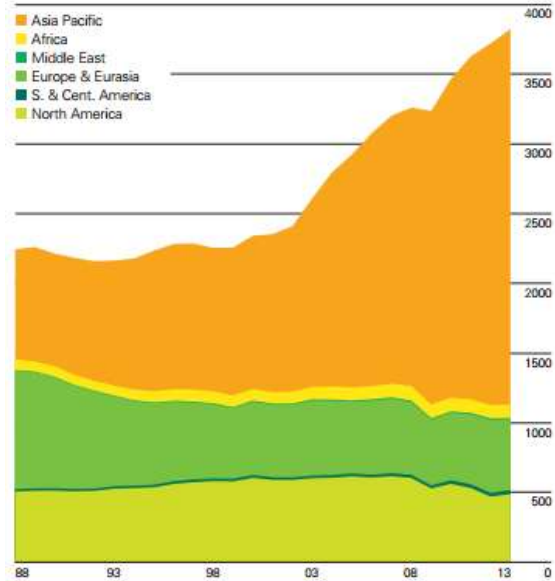
석탄: 41.3%
천연가스: 21.9%
수력: 15.8%
원자력: 11.7%
석유: 4.8%
기타: 4.5%

현재 주로 사용되는 에너지원은 화석연료

에너지 사용의 지역별 비교 - 최근 동향 (화석연료사용 증가, 신재생사용급증)

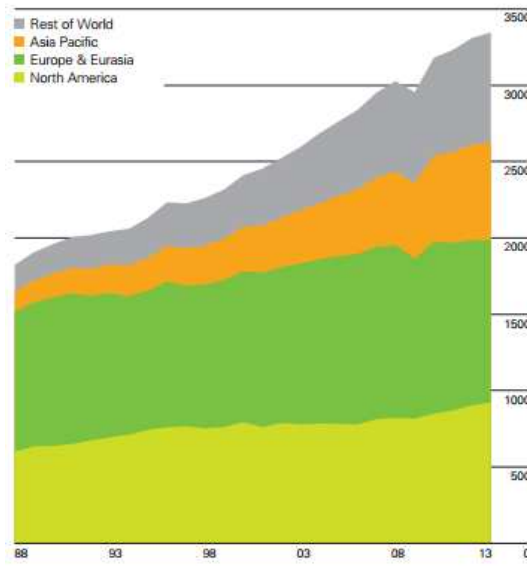
Consumption by region
Million tonnes oil equivalent

Coal



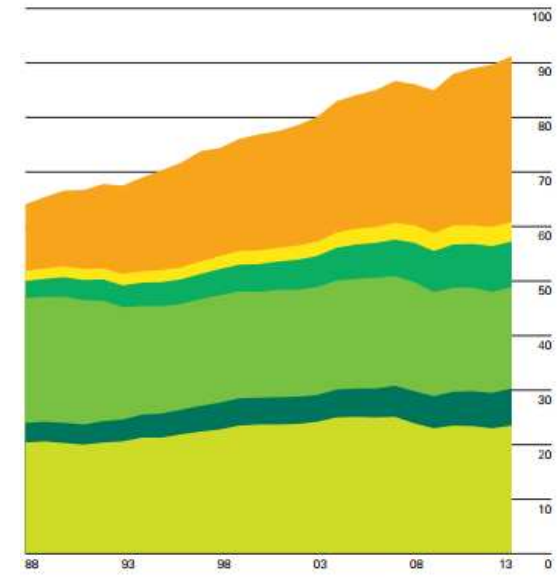
Consumption by region
Billion cubic metres

Nat gas

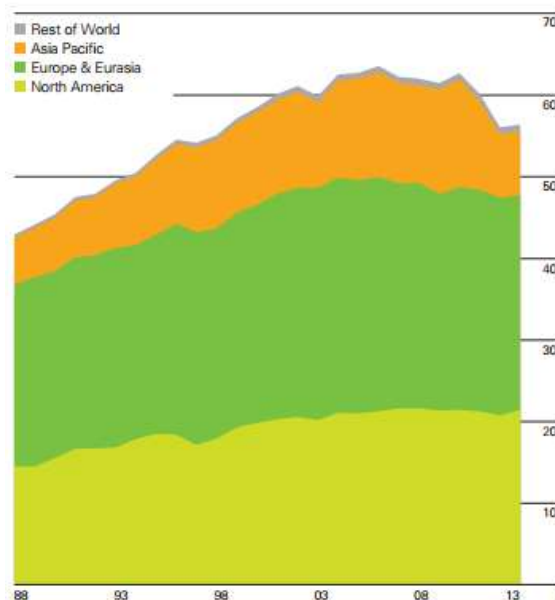


Consumption by region
Million barrels daily

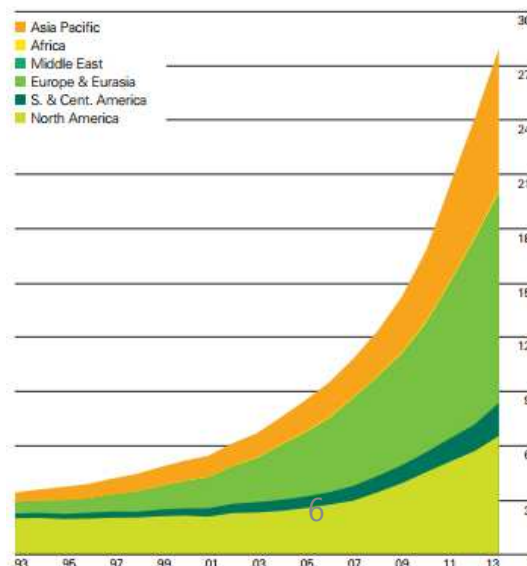
Oil



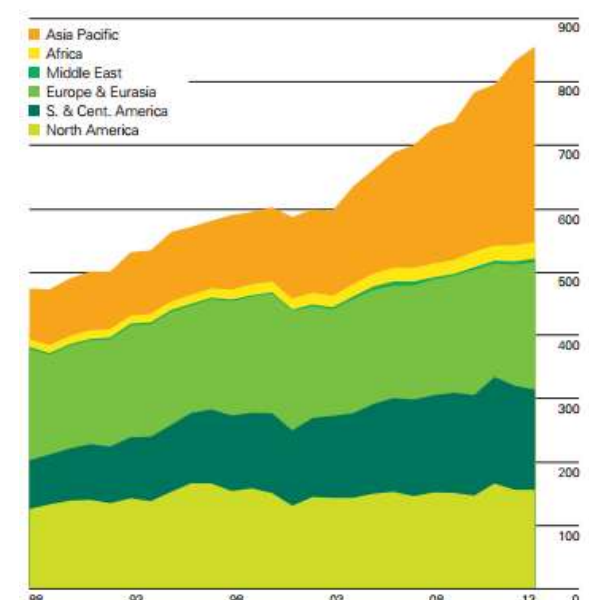
Nuclear energy consumption by region
Million tonnes oil equivalent



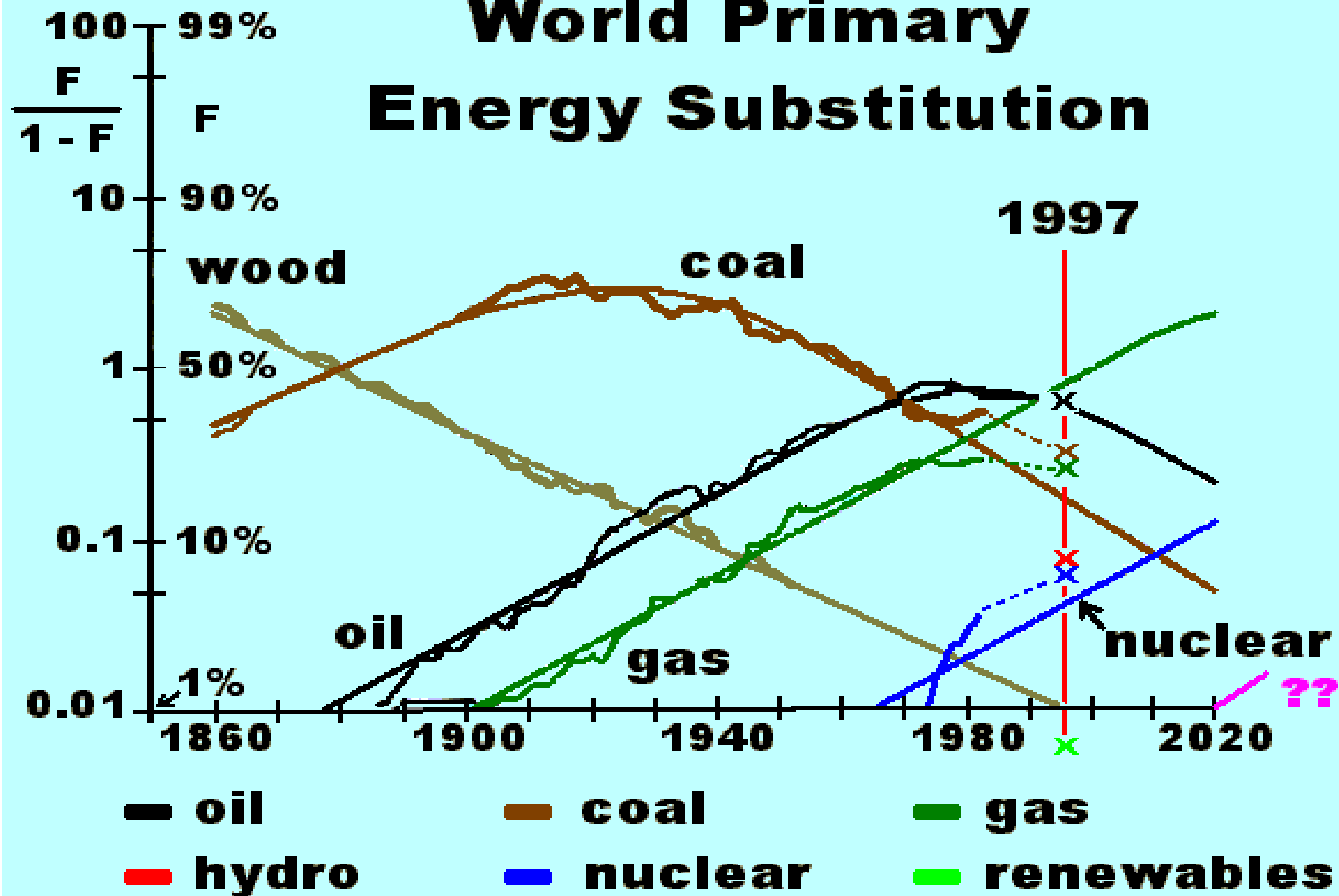
Other renewables consumption by region
Million tonnes oil equivalent



Hydroelectricity consumption by region
Million tonnes oil equivalent



World Primary Energy Substitution



천연가스

- 낮은 가격
- 풍부하다
- 화석연료 중 오염물질 배출이 가장 적다
- 발전 효율이 높다
- 건설 기간이 짧다

천연가스 관련 문제점

- 폭발 사고 가능성 (시설 노후화 경우)
- CO₂, NO_x 방출
- 가스 배기 누출
- 가격 변동성
- 라돈 방출 (천연가스 내 농도 10-520 pCi/L)

Summary of energy-related severe accidents and related fatalities (1969-2000)

Energy chain	OECD			Non-OECD		
	Accidents	Fatalities	Fatalities/ GWe _y	Accidents	Fatalities	Fatalities/ GWe _y
Coal	75	2 259	0.157	1 044	18 017	0.597
Coal (data for China 1994-1999)				819	11 334	6.169
Coal (without China)				102	4831	0.597
Oil	165	3 713	0.132	232	16 505	0.897
Natural Gas	90	1 043	0.085	45	1 000	0.111
LPG	59	1 905	1.957	46	2 016	14.896
Hydro	1	14	0.003	10	29 924	10.285
Nuclear	0	0	–	1	31*	0.048
Total	390	8 934		1 480	72 324	

Note: * These are immediate fatalities only.

Comparing Nuclear Accident Risks with Those from Other Energy Sources, NEA No. 6861, OECD, 2010

풍력

- 지속 가능한 에너지 공급
- 직접적인 공해 물질 방출 없음
- 직접적인 온실가스 방출 없음
- 풍력단지의 관광자원화가 가능
- 가격 경쟁력 우수

풍력 관련 문제점

- Intermittency and variability of the wind
 - Require additional reserves of “conventional” capacity to compensate.
 - Only limited forecasting is possible for wind power.
 - It becomes expensive if expansion of the high-voltage and extra high-voltage grid infrastructure is required.
 - Expansion of wind power makes the grid more unstable.
- Wind turbine towers have adverse environmental impacts.
 - Destructive impact of construction/Land-use
 - The spinning blades kill birds and bats
- Others
 - Concerns about jobs, tax benefits, and property values
 - Concern over the flicker of reflected light and shadow.
 - Lighting at night.
 - Ice buildup on blades
 - Dripping and flinging off of motor oil
 - Damage by fire, lightning, malfunction

태양광

- 지속가능한 풍부한 에너지원
- 직접적인 공해 물질 방출 없음
- 직접적인 온실가스 방출 없음
- 태양전지 장수명
- 유지 관리 용이

원자력

- 높은 에너지 밀도
- 풍부한 에너지 공급이 가능케 된다
 - 자원부족문제 극복
 - 화석연료 해외수입의존도를 줄인다
 - 에너지원의 다양화
- 고급기술의 습득효과
 - 국가적 자긍심고취
- 신속한 국가 산업, 경제, 과학, 기술개발의 열망에 대한 자극제
- 온실가스배출 경감

에너지기술의 환경영향 비용평가 (euro-cents/kwh)

환경영향	석탄	갈탄 (Lignite)	가스 CC	원자력	태양광 PV	풍력	수력
인체 영향	0.8	1.0	0.3	0.2	0.4	0.05	0.04
작물 손실	-0.03	-0.03	-0.01	0.0008	-0.003	0.0005	0.0004
재료 손상	0.02	0.02	0.007	0.002	0.01	0.0001	0.0007
소음						0.0006	
산성화/ 부(과다)영양화	0.2	0.8	0.04	0	0.04	0	0
지구온난화	1.6	2	0.8	0.03	0.3	0.03	0.03
합계	2.6	3.8	1.1	0.2	0.8	0.09	0.07

Estimated Levelized Cost of New Electric Generation, 2018

Report of the Energy Information Agency (US DOE), January 2013

		U.S. Average Levelized Cost for Plants Entering Service in 2017 (2010 USD/MWh)				
Plant Type	Capacity Factor (%)	Levelized Capital Cost	Fixed O&M	Variable O&M (including fuel)	Transmission Investment	Total System Levelized Cost
Conventional Coal	85	65.7	4.1	29.2	1.2	100.1
Advanced Coal	85	84.4	6.8	30.7	1.2	123.0
Advanced Coal with CCS	85	88.4	8.8	37.2	1.2	135.5
Natural Gas Fired						
NG: Conventional Combined Cycle	87	15.8	1.7	48.4	1.2	67.1
NG: Advanced Combined Cycle	87	17.4	2.0	45.0	1.2	65.6
NG: Advanced CC with CCS	87	34.0	4.1	54.1	1.2	93.4
NG: Conventional Combustion Turbine	30	44.2	2.7	80.0	3.4	130.3
NG: Advanced Combustion Turbine	30	30.4	2.6	68.2	3.4	104.6
Advanced Nuclear	90	83.4	11.6	12.3	1.1	108.4
Geothermal	92	76.2	12.0	0.0	1.4	89.6
Biomass	83	53.2	14.3	42.3	1.2	111.0
Wind ¹	34	83.3	13.1	0.0	3.2	86.6
Wind-Offshore ¹	37	70.3	22.4	0.0	5.7	221.5
Solar PV ^{1,2}	25	130.4	9.9	0.0	4.0	144.3
Solar Thermal ¹	20	214.2	41.4	0.0	5.9	261.5
Hydro ¹	52	78.1	4.1	6.1	2.0	90.3

¹Non-dispatchable (Hydro is dispatchable within a season, but nondispatchable overall-limited by site and season)

²Costs are expressed in terms of net AC power available to the grid for the installed capacity

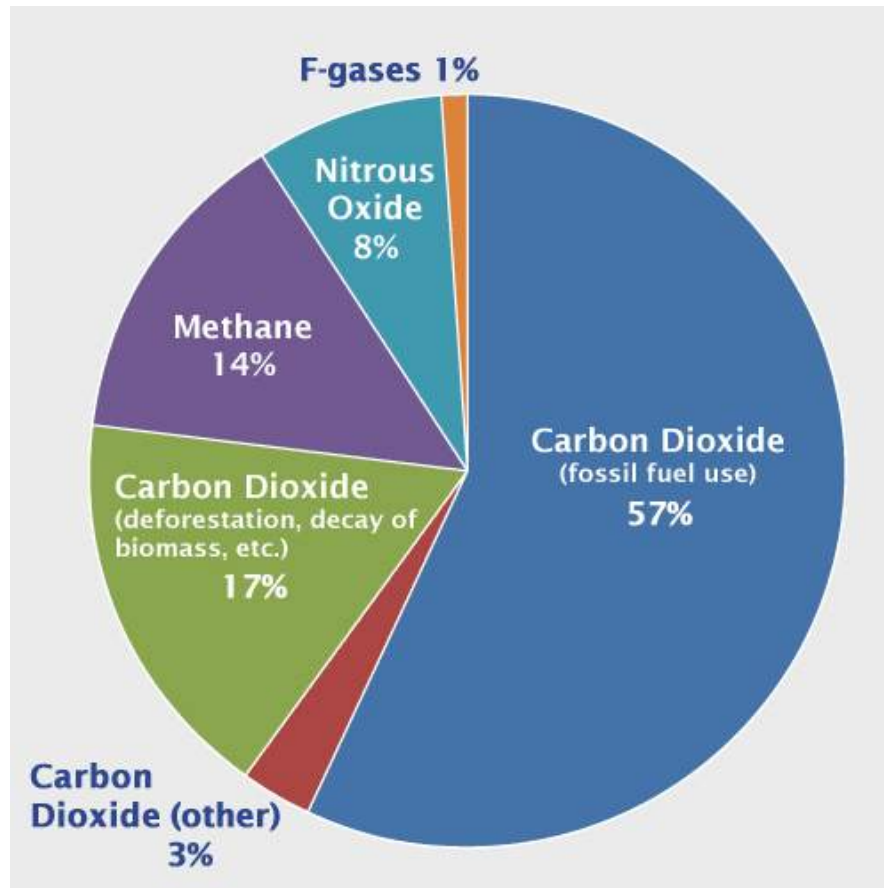
UK energy costs for different generation technologies

Technology	Cost range (£/MWh)
Biomass	60–120
Coal with CO ₂ capture	100–155
Natural gas turbine, no CO ₂ capture	55–110
Natural gas turbines with CO ₂ capture	60–130
New nuclear	80–105
Offshore wind	150–210
Onshore wind	80–110
Solar farms	125–180
Tidal power	155–390

UK levelised generation costs, Parsons Brinckerhof, 2010

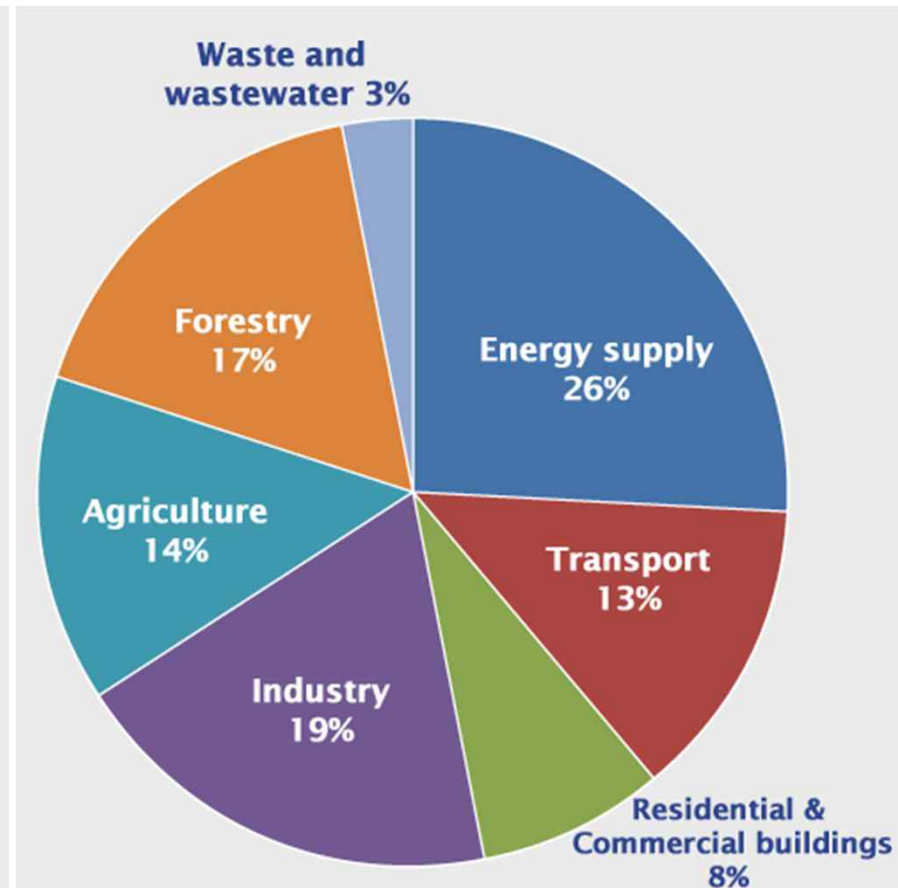
온실가스 주요 방출원

Global Greenhouse Gas Emissions by Gas
[IPCC 2007]



이산화탄소가 가장 주된 요인

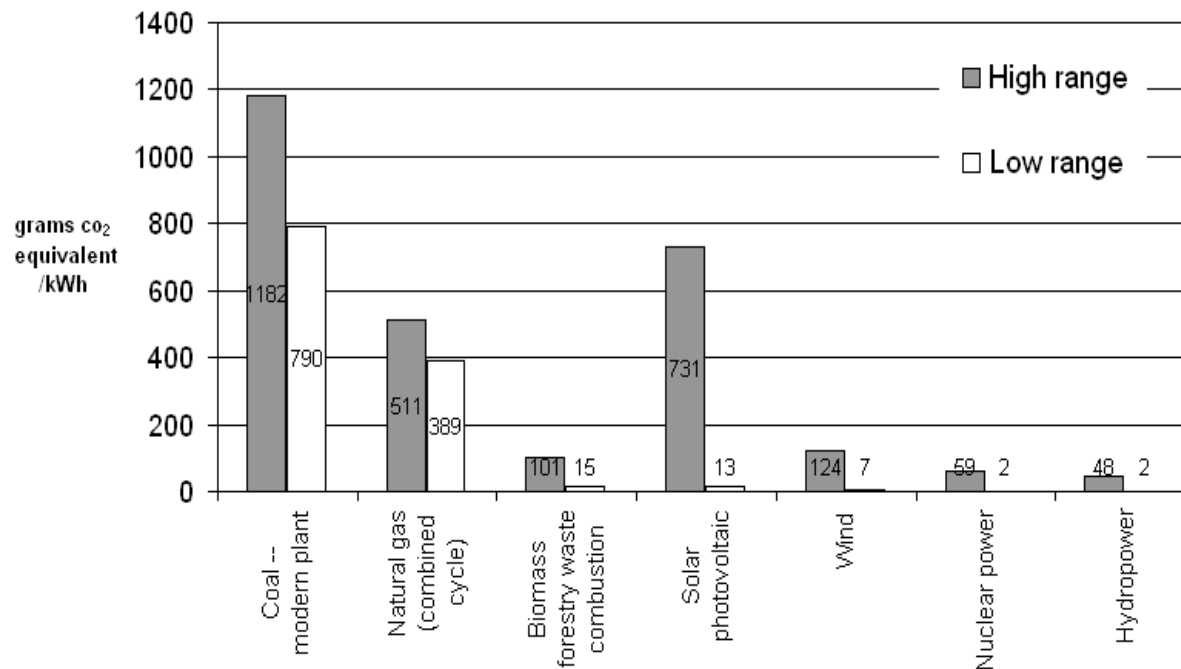
Global Greenhouse Gas Emissions by Source
[IPCC 2007]



에너지생산 (26%), 산업계 (19%),
교통수단 (13%), 건물 (8%) – 총 66%

에너지원별 온실가스배출

Greenhouse Gas Emissions from Electricity Production



Source: IEA 2000

에너지원	Lifecycle CO ₂ 배출 [g / kWh]
석탄	790-1,182
석유	~800
천연가스	390-510
바이오매스	15-101
태양열	13-730
풍력	7-124
원자력	2-59
수력	2-48

Effect of CO2 Emission Costs

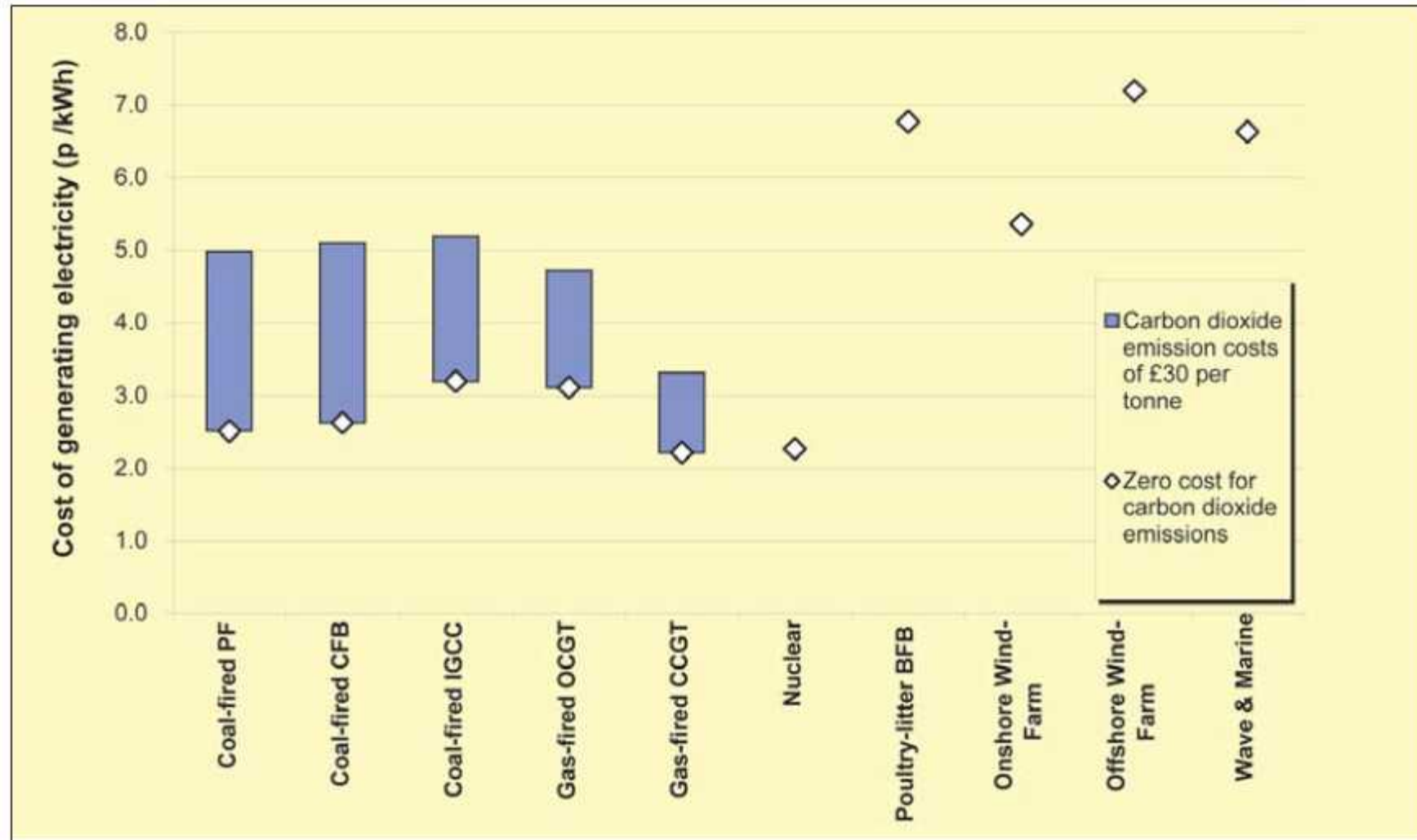


Figure 3 Cost of generating electricity with respect to carbon dioxide emission costs. (Zero to £30 per tonne)
The Cost of Generating Electricity, Commentary, UK Royal Academy of Engineering, 2004

원자력 관련 문제점

- 방사성물질 생성
 - 원전 사고 가능성
 - 방사성 폐기물
- 핵무기개발과의 연계성
- 대중의 안전성에 대한 우려
- 성장, 소비, 하이테크, 중앙집권적 통제와 개발의 상징

Radioactivity in Nature and NPPs

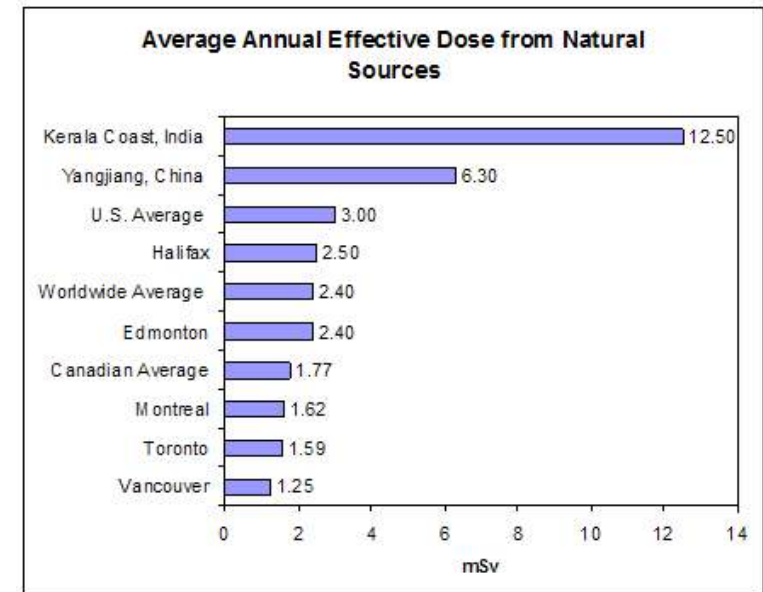
- In nature, ~1300 nuclides are present. About 1/5 (275 nuclides) are stable. The remainder are unstable.
- All nuclides with Z greater than 83 (Z=83, Bi) are radioactive.
- Natural radioactivity:
 - Earth's crust: $\sim 1.68 \times 10^{14}$ Ci (Inside of earth, 1.68×10^{16} Ci (?))
 - Ocean: 4.16×10^{11} Ci
- Radioactivity in nuclear reactor:
 - 1.5×10^{10} Ci in a 1000-MWe PWR
- Release from nuclear power plants:
 - 1.4×10^8 Ci (5200 PBq) Chernobyl
 - 2.7×10^7 Ci (<1000 PBq) Fukushima
 - $< 7 \times 10^3$ Ci (per year) in a 1000-MWe PWR (85-90% atmospheric release)

Radiation Exposure

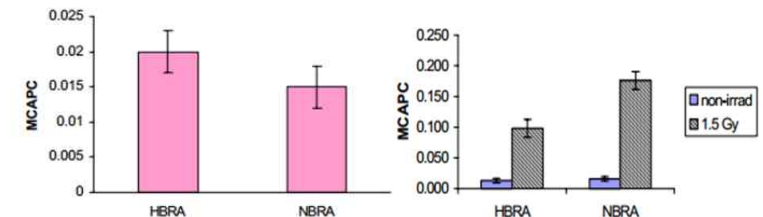
- Background radiation exposure
 - 22×10^6 person-Sv per year (natural and man-made include)
 - 17×10^6 person-Sv per year (Natural)
- During an operating license period of 1 nuclear reactor
 - ~ 20 person-Sv (over 100 years)
 - ~ 80 person-Sv (over all time)
- TMI accident (1979.3.28)
 - Total of 20 person-Sv
 - 1/800 per reactor-years accident frequency
- Chernobyl accident (1986.4.26)
 - $0.6\text{--}2.4 \times 10^6$ person-Sv
 - 1/3,300 per reactor-years accident frequency
 - 1992-2000, ~ 4000 thyroid cancers in Belarus, Russia, and Ukraine (0-18yr; Average thyroid dose among evacuees 490 mSv)
- Fukushima accident (2011.3.11)
 - Total amount of I-131 and Cs-137 released $\sim$ slightly over 10% of what was released from Chernobyl
 - 1/4,830 per reactor year accident frequency
 - Average radiation dose among Fukushima area residents: expected to be less than 10 mSv
 - Children's average thyroid dose in the region: 4.2 mSv (max 23 mSv)
 - Adults' average thyroid dose in the region: 3.5 mSv (max 33 mSv)

Regions of high background radiation

- India: The coastal belt of Karunagappally, Kerala
 - Known for high background radiation from thorium-containing monazite sand.
 - Residents receive 1,300–1,500 mrem (13–15 mSv) per yr.
 - Some dose rates are as high as 3,000 mrem/yr (30 mSv).
 - The excess relative risk of cancer excluding leukemia was estimated to be: -0.13 Gy^{-1} (95% CI: -0.58, 0.46); Leukemia was not significantly related to HBR.
- China: The Guangdong province
 - Annual effective dose: 1.25 – 3.08 (2.13, mean) mSv/y
 - Relative risk of all cancers in high background areas: 0.9959
- Iran: Ramsar's Talesh Mahalleh district
 - The most radioactive inhabited area known in the world, due to nearby hot springs and building materials originating from them.
 - A combined population of 2000 residents from this district and other high background radiation area (HBRA) receive an average radiation dose of 10 mGy per year,



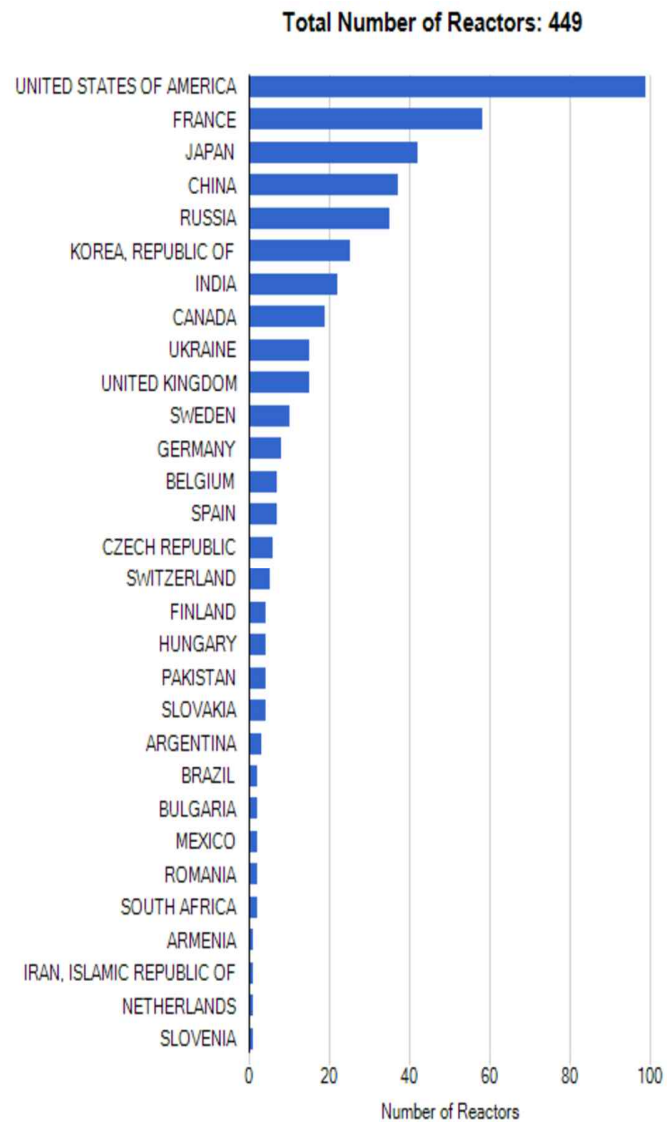
Mean chromosome aberration per cell among residents in HBRA (Ramsar) and NBRA in Iran



Nuclear Power: Its Social Connection

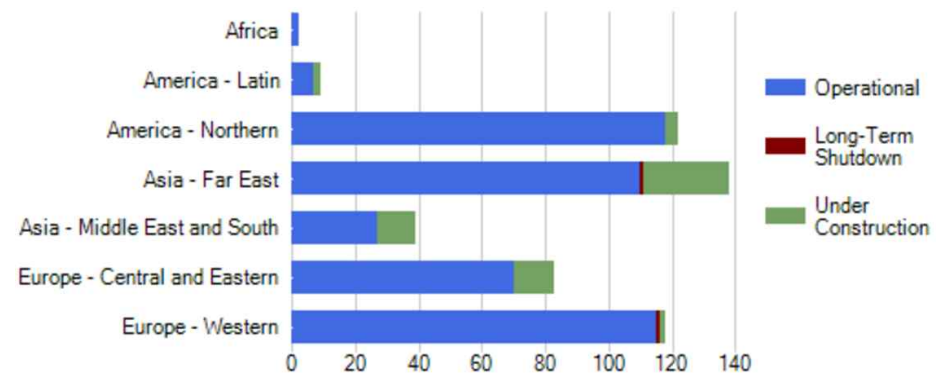
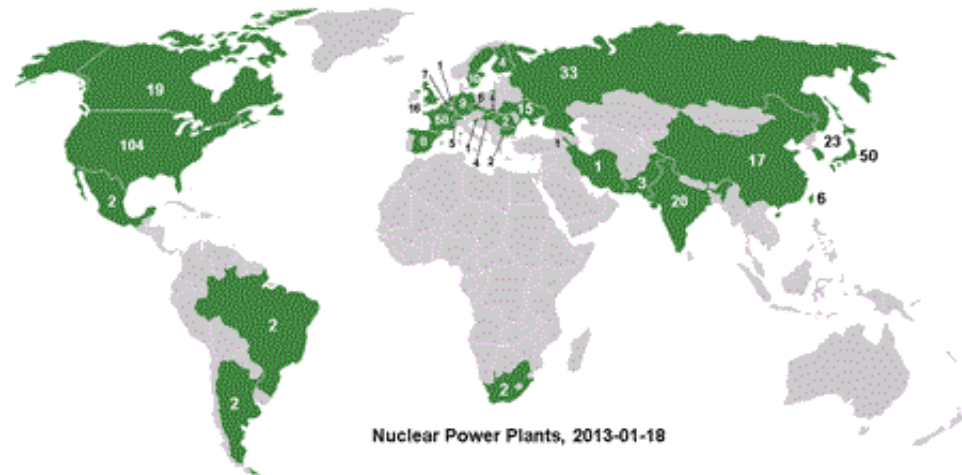
- Key for energy security for some countries
- Highly resource intensive
- National political support - prerequisite
- Considered a symbol of commitment to growth, consumption, high technology, and centralized control and development
- Potential for rapid social transformation
- Potential for catastrophe
- Public perception and attitude
- Concern over nuclear waste
- International concern over nuclear proliferation
- Impact on neighboring countries and international relations

Nuclear Power Plants in the World

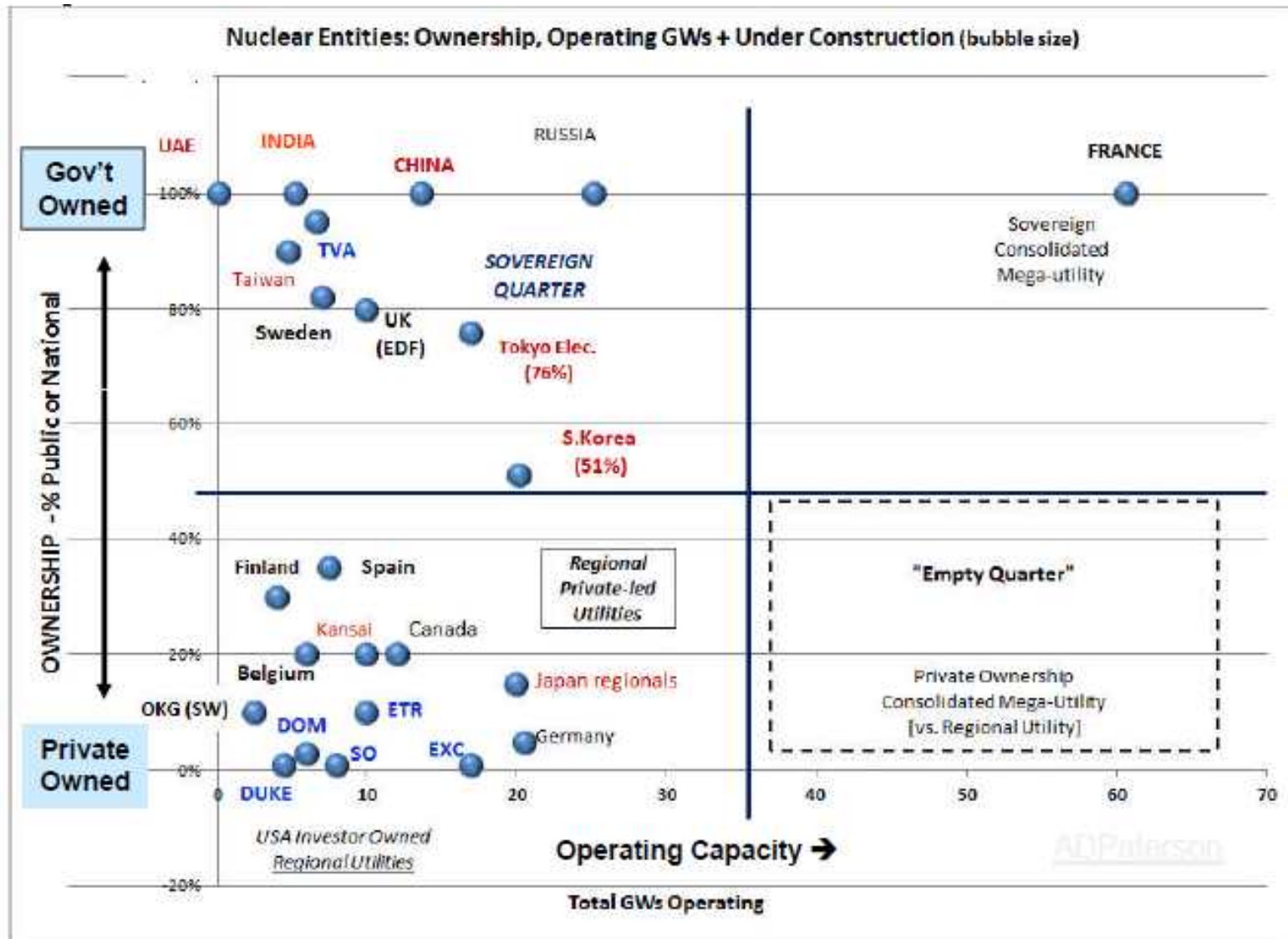


In operation	449
Under construction	60
Net capacity (Mwe)	392,116
Reactor-yr operation	17,152

※ IAEA PRIS (2017.6.6)

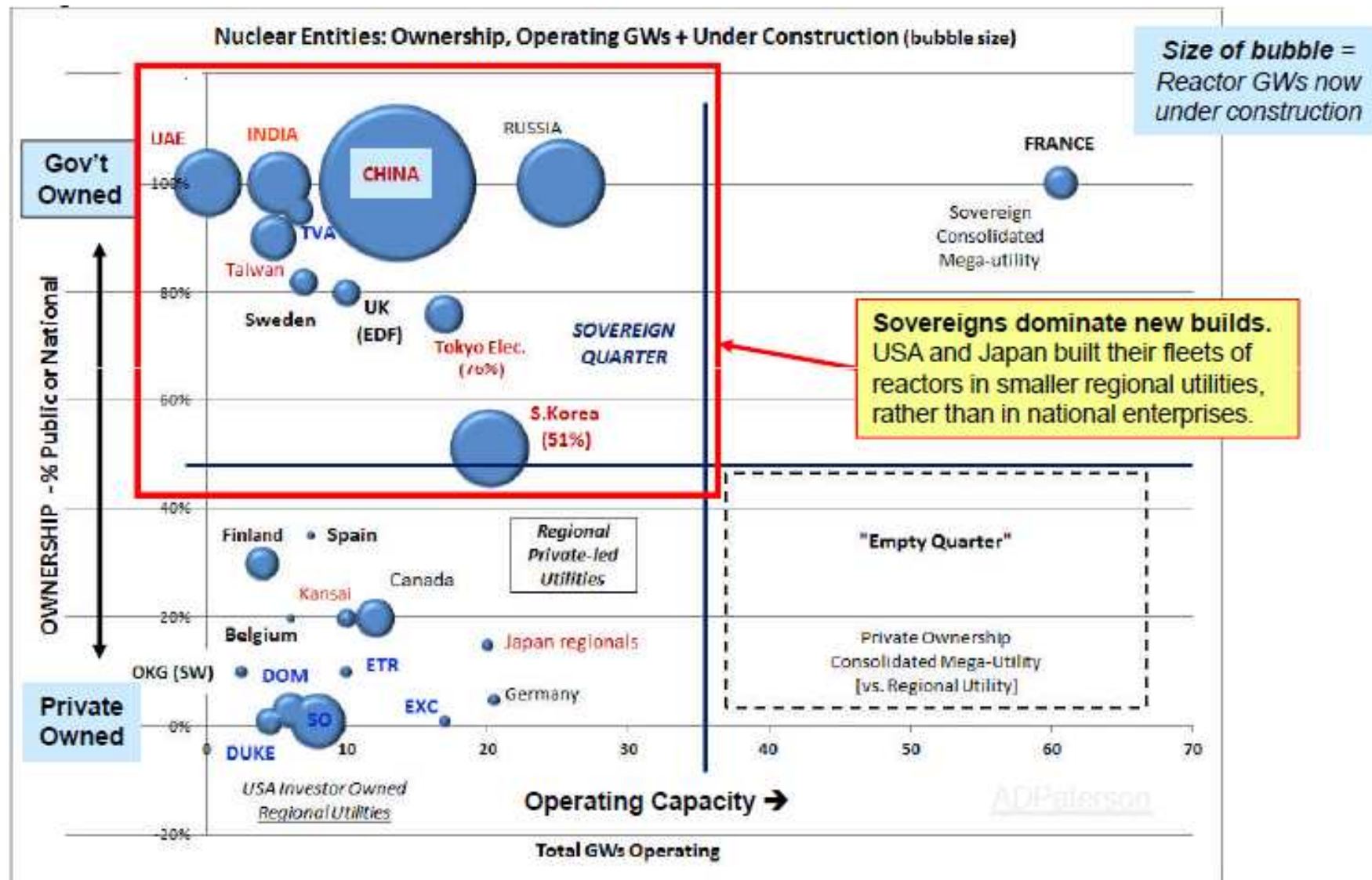


Current Reactors: Ownership & Operating Capacity



New Reactors: Where's the Growth?...

Asia, MidEast



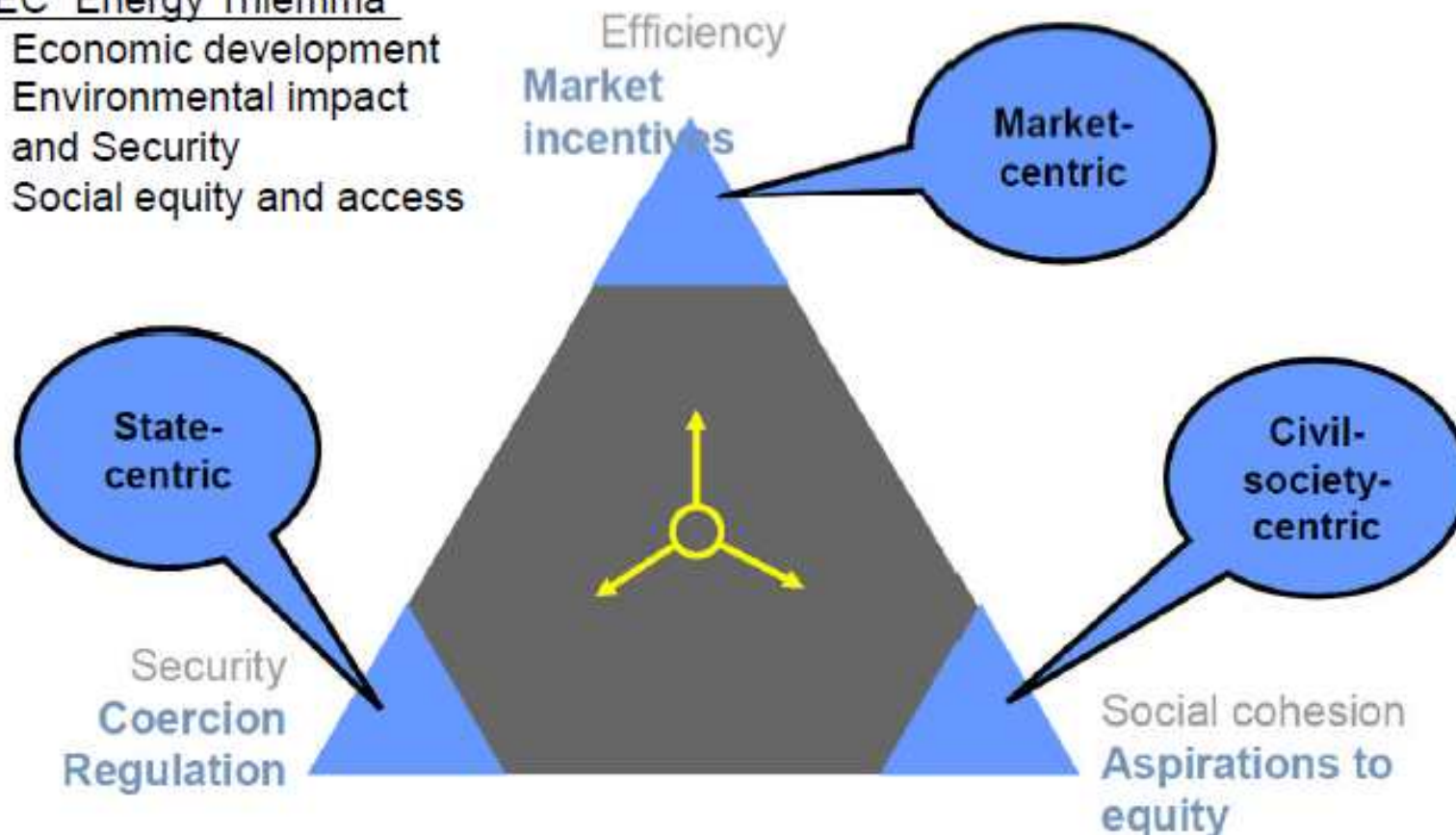
Nuclear Energy: Market, Political, Social elements

National or regional decisions about nuclear energy are not based solely on market economics. They entail high level political decision-making and societal level commitment.

WEC "Energy Trilemma"

- Economic development
- Environmental impact and Security
- Social equity and access

From Shell Scenarios, 2005



Global nuclear expansion (post-Fukushima)

	Americas	Western Europe	Eastern Europe	Central & South Asia	East Asia & Oceania	Middle East	Africa
Nuclear power states	Argentina Brazil Canada Mexico United States	Finland France Netherlands Spain Sweden United Kingdom Switzerland Belgium Germany	Armenia Czech Rep. Hungary Romania Russia Slovakia Slovenia Ukraine Bulgaria	India Pakistan	China South Korea Japan Taiwan	Iran UAE	South Africa
Aspiring nuclear power states (nuclear newcomers)	Chile Dominican Rep. Haiti Peru Uruguay Venezuela Bolivia Jamaica El Salvador	Italy	Belarus Poland Estonia Latvia Lithuania Albania Croatia	Bangladesh Georgia Kazakhstan Mongolia Sri Lanka	Indonesia Malaysia Philippines Thailand Vietnam Myanmar North Korea Singapore	Egypt Jordan Saudi Arabia Turkey Kuwait Syria Yemen Israel Qatar	Algeria Ghana Kenya Morocco Namibia Niger Nigeria Sudan Uganda Libya Senegal Tanzania Tunisia

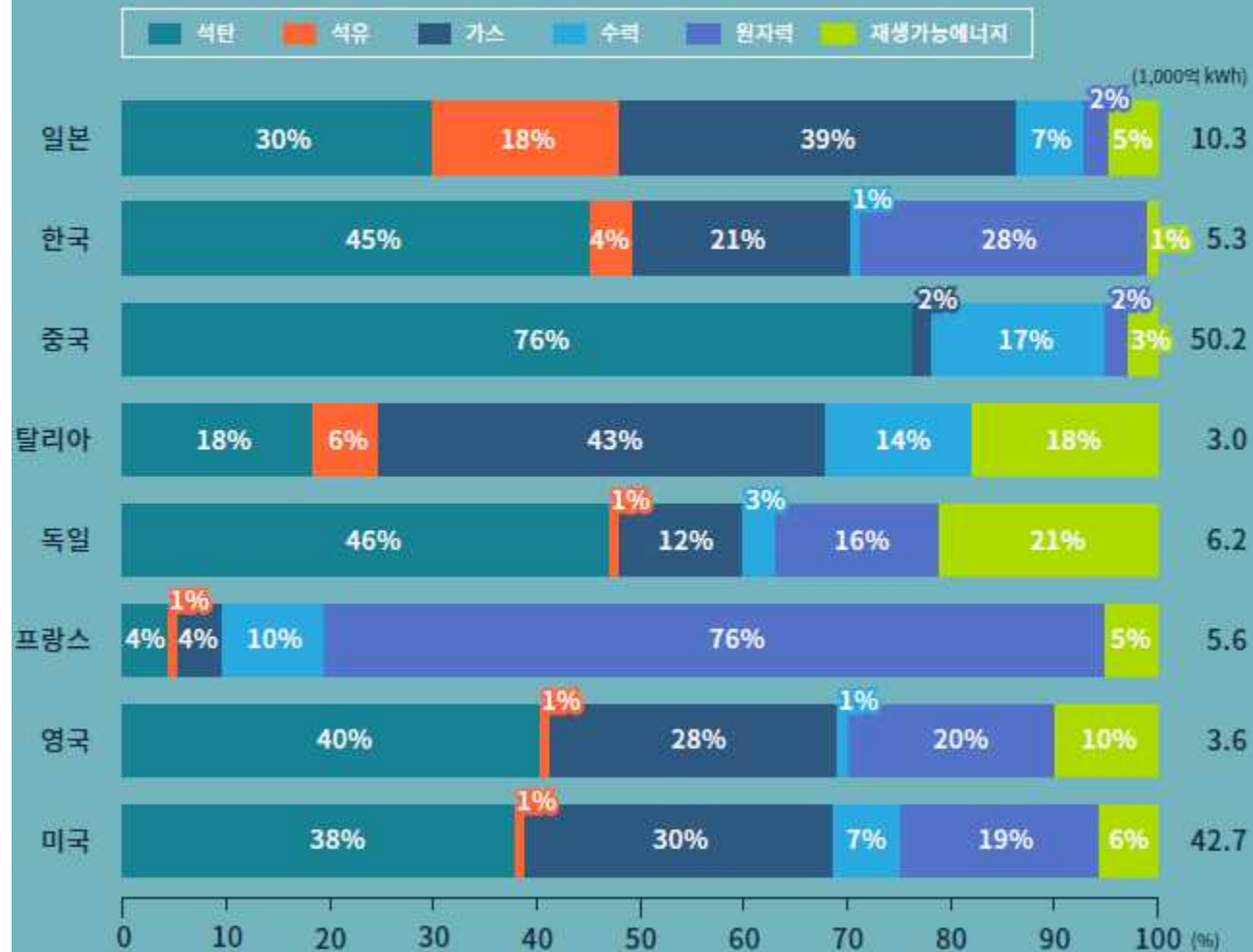
Red: Cancelling plans; Green: Continuing with plans; Black: No evidence; Orange: Ongoing debates that have produced a delay or uncertainty about plans

Updated from S. Sagan (2014), Nuclear Power: Expansion vs. Spread
Post-Fukushima 2013, NEREC Conference on Nuclear Nonproliferation

주요국 발전원 비교

주요국의 발전전력량에서 점하는 각 발전원의 비율(2012년)

[출처] IEA(Energy Balances of OECD Countries 2014), (Energy Balances of Non-OECD Countries 2014)을 근거로 작성



※단수처리를 위해 비율의 합계는 100%가 되지 않는 경우가 있습니다.

탈핵/반핵의 역사

- 미국
- 독일
- 스웨덴
- 스위스
- 이태리
- 벨기에
- 일본

에너지기술의 6가지 리스크 요소에 대한 비교

요소	석탄화력	수력	대용량 풍력	소용량 풍력	원자력	에너지 절약
일반인 사망 (Public deaths)	80	10	20	5	10	5
직업적 사망 (Occupational deaths)	30	20	10	30	5	10
질병 (Morbidity)	20	20	40	50	10	40
무지 리스크 (Unknown risk)	70	60	90	50	80	40
공포 리스크 (Dread risk)	50	50	40	20	90	10

Baruch Fischhoff, et al., "Defining Risk" *Policy Sciences*, 17, 123-139, 1984.

여러 리스크 요소들의 상대적 가중치

요소	가중치 세트 A	가중치 세트 B	가중치 세트 C	가중치 세트 D
일반인 사망 (Public deaths)	0.33	0.40	0.20	0.08
직업적 사망 (Occupational deaths)	0.33	0.20	0.05	0.04
질병 (Morbidity)	0.33	0.20	0.05	0.40
무지 리스크 (Unknown risk)	0	0.10	0.30	0.24
공포 리스크 (Dread risk)	0	0.10	0.40	0.24
합계	1	1	1	1

Baruch Fischhoff, et al., "Defining Risk" *Policy Sciences*, 17, 123-139, 1984.

리스크 요소들의 가중치를 고려한 에너지기술 순위 비교

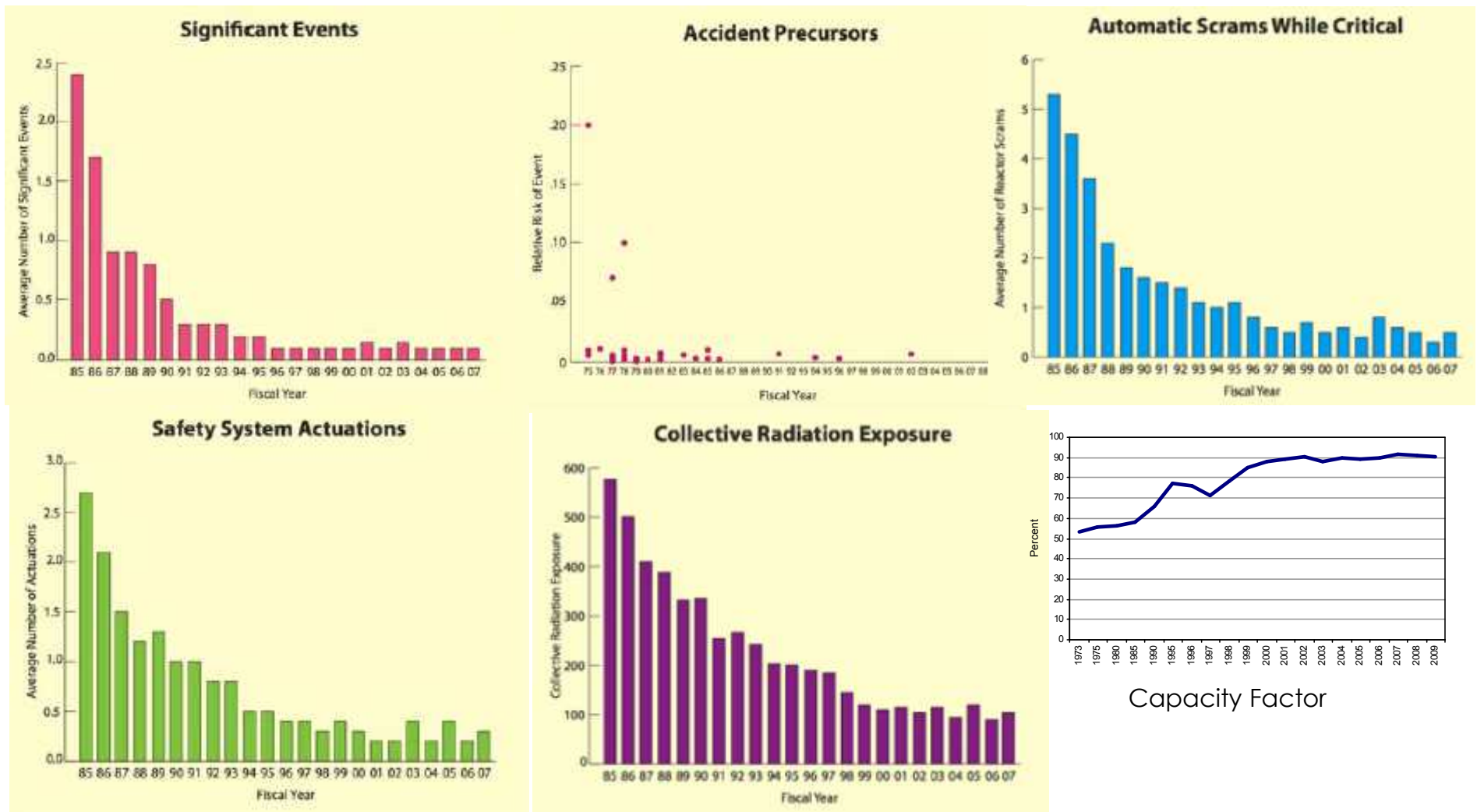
랭킹	순위	가중치 세트 A	가중치 세트 B	가중치 세트 C	가중치 세트 D
가장 좋음	1	원자력	에너지절약	에너지절약	에너지절약
	2	수력	수력	소용량풍력	수력
	3	에너지절약	원자력	수력	소용량 풍력
	4	대용량 풍력	소용량 풍력	대용량 풍력	석탄화력
	5	소용량 풍력	대용량 풍력	석탄화력	원자력
가장 나쁨	6	석탄화력	석탄화력	원자력	대용량 풍력

Baruch Fischhoff, et al., "Defining Risk" *Policy Sciences*, 17, 123-139, 1984.

원자력 안전

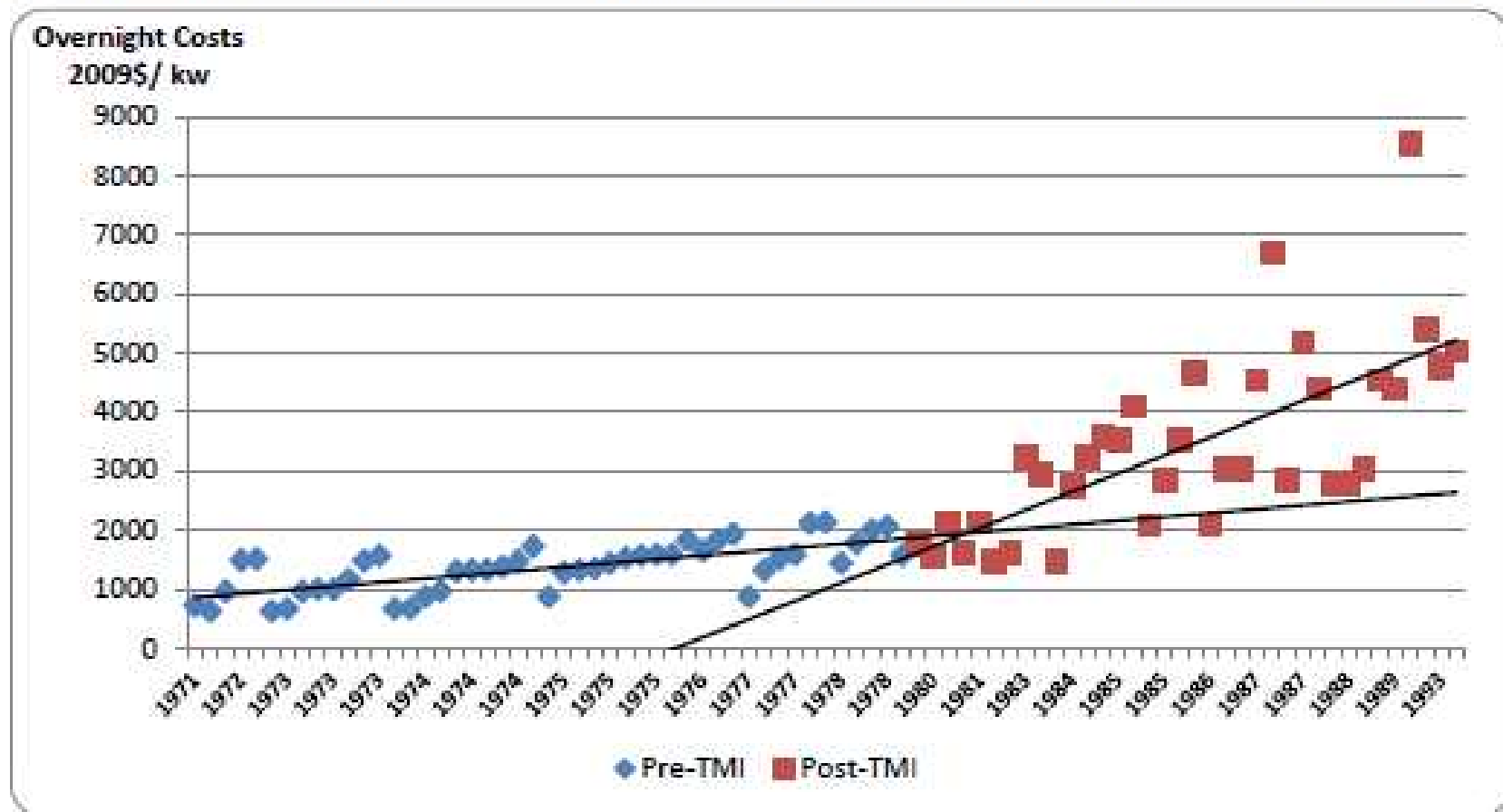
- 원자력 안전의 역사
 - Enrico Fermi's nuclear reactor (1942)
 - “Siting and Containment” (1940s)
 - Use of engineered safeguards, under ***Defense-in-depth*** (1950s - 70s)
 - Importance of human error and operator training (1980s)
 - Importance of ***safety culture*** (1990s)
 - Beyond Design Basis Accident and Severe Accident Management (2011 -)

Safety Performance of US NPPs



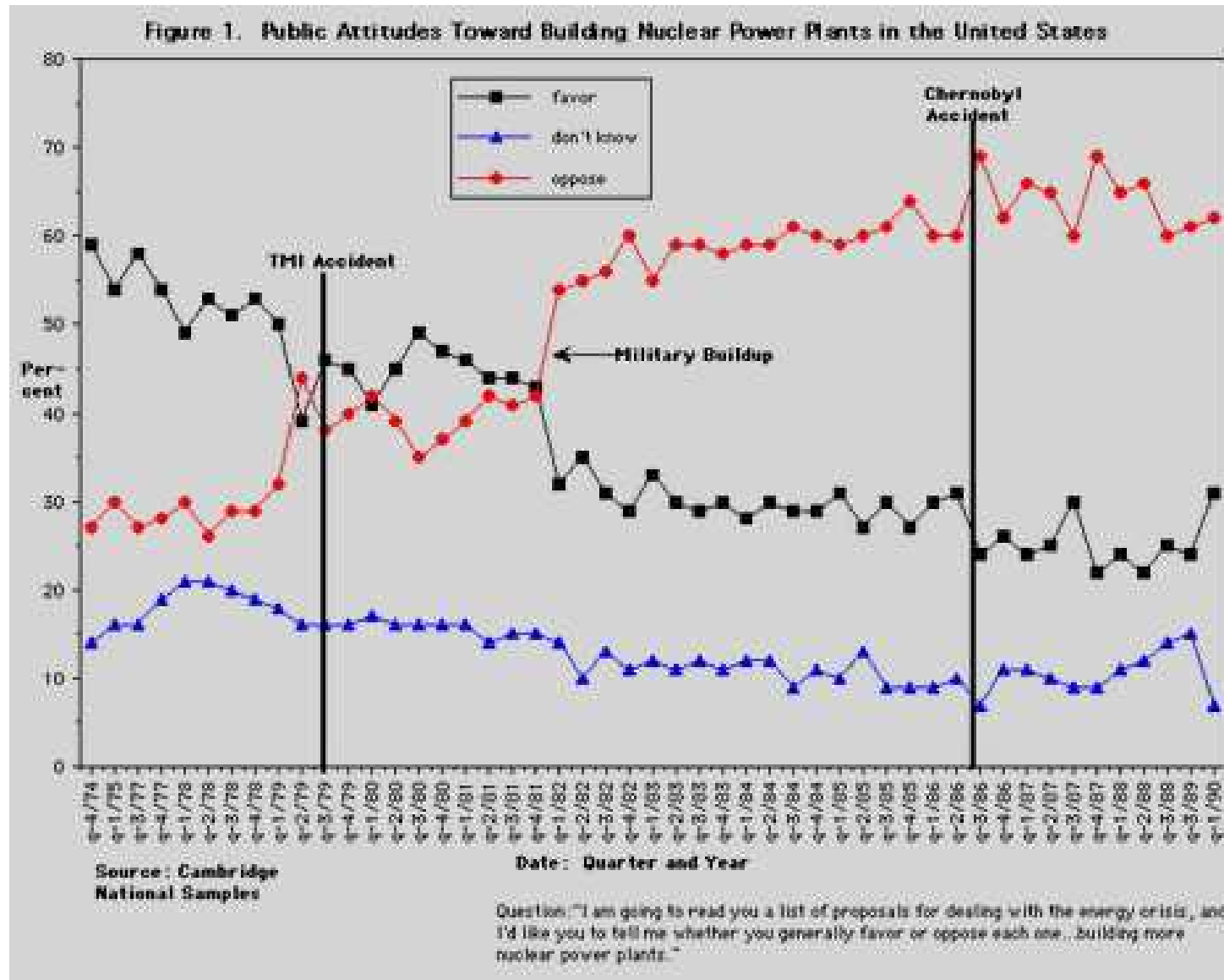
NPP Construction Cost

EXHIBIT 1: NUCLEAR CONSTRUCTION COST ESCALATION: REACTORS COMPLETED BEFORE AND AFTER TMI



Source: Mark Cooper, Policy Challenges of Nuclear Reactor Construction: Cost Escalation and Crowding Out Alternatives, Institute for Energy and the Environment, Vermont Law School, September, 2010

Public Attitude toward Nuclear Power in the US



Public Acceptance of Nuclear Power, E. Rosa, 2001

리스크

- 3가지 형태:
 - True Risk
 - Estimated Risk
 - Perceived Risk
- Human Dimensions on Risk
 - Based on “Perceived Risk” rather than “Estimated Risk”
- 리스크 관리
 - Political processes control the implementation of risk management decision making
 - Political decisions are reflections of the public’s risk perception

리스크원에 대한 두려움은 갈수록 증가한다.

- Greater potential for catastrophe than it was in the past, due to the complexity, potency, and interconnectedness of technological systems.
- 기술로 부터의 혜택은 종종 당연한 것으로 여긴다.
- 사람들은 부자가 되고 가진것이 많아질 수록 잃을 것이 많아지므로 리스크를 더욱 더 받아들이기 힘들어한다.

"The richest, longest-lived, best-protected, most resourceful civilization, with the highest degree of insight into its own technology, is on its way to becoming the most frightened." [Wildavsky, 1979].

얼마나 안전한 것이 “안전”인가?

- 안전에 대한 판단은 2부로 나뉘어 이루어진다:
 - Assessing risk, that is predicting the probabilities and consequences of events (scientific pursuit)
 - Judging safety, that is judging the acceptability of that risk.
 - Social acceptability can be informed, but not decided, by science and technology.
 - Social acceptability is personal and social value judgments.
- “Failure to appreciate how safety determinations resolve into two discrete activities is at the root of many misunderstandings.”
- “과학자들이 스스로 안전을 평가하고 판단할 수 있다고 생각함은 착각이다.” “Scientists cannot measure whether something is safe, because the methods of the physical and biological sciences can assess only the probabilities and consequences of events, not their value to people.”
- *“Scientists are prepared principally to measure risks. Deciding whether people, with all their peculiarities of need, taste, tolerance, and adventurousness, might be or should be willing to bear the estimated risk is a value judgment that scientists are little better qualified to make than anyone else.”*

대중의 리스크 이해

- 리스크를 문화적으로 이해한다.
- 대중의 태도를 결정하는 윤리적 기준
 - 공리주의: to provide the greatest social welfare/safety
 - 평등주의: to provide equal protection, equal opportunity, and equal access to due process
- 대중이 리스크를 인식하는 방법
 - People simplify
 - Once people's minds are made up, it is difficult to change them.
 - People remember what they see.
 - People cannot detect omissions in the risk information they receive.
 - People disagree more about what is risk than about its magnitude.
 - People find it hard to evaluate expertise.
- 사회적 리스크증폭과 비대칭성

A systematic Classification of Risk Perspectives

Ortwin Renn, 1992

Risk Method	Realist Methods			Social Constructivist Methods			
	Actuarial Approach	Toxicology / Epidemiology	Probabilistic Risk Analysis	Economics of Risk	Psychology of Risk	Social Theories of Risk	Cultural Theory of Risk
Base Unit	Expected Value	Modelled Expected Value	Synthesized Expected Value	Expected Utility	Subjective Expected Utility	Perceived Fairness and Social Context	Shared Values
Predominant Method	Extrapolation	Experiments / Population Studies	Event & Fault Tree Analysis	Risk-Benefit Balancing	Psychometrics	Surveys / Structural Analysis	Grid-Group Analysis
Scope of Risk Concept & Risk Dimensions	Universal	Health & Env	Safety	Universal	Individual Perception	Social Interests	Cultural Clusters
	One	One	One	One	Multiple	Multiple	Multiple
Basic Function	Averaging over Space, Time, Context			Preference Aggregation		Social Relativism	
Limitations	Predictive Power	Relevance to Humans / Background Noise	Common Mode Failures	Common Denominator	Social Relevance	Complexity	Communicability
Major Applications	Insurance	Health / Env. Protection	Safety Engineering	Decision Making	Policy Making and Regulation		
					Risk Communication		
					Conflict Resolution		
Instrumental Function	Risk Sharing	Early Hazard Warning		Resource Allocation	Individual Acceptance	Equity, Fairness, Political Acceptance	Cultural Identity
		Standard Setting	Improving Systems				
Social Function	Assessment	Risk Reduction and Policy Selection (Coping with Uncertainty)					Political Application

문화적 합리성

(Cultural Rationality)

- 인간존재의 기본요소는 자신을 표현하고자 하는 욕구이다.
- 비슷한 문제에 대해서 사람들은 다른 방식으로 대응한다.
- 문화적인 모델은 전문가나 일반인이나 각자의 리스크 문제에 대한 접근방식이 나름대로 논리적이고 조리가 있다고 인정한다.
- The cultural model and technical model may exhibit differences in
 - 문제를 어떻게 구체적으로 표현할 것인가
 - 어떤 요인들이 분석에 적합한가
 - 누가 전문가인가
 - 결정과정에서 누구를 믿을 것인가

기술적 합리성 vs. 문화적 합리성

- 과학적 방법, 설명, 증거를 중시한다.
- 권위자, 전문가, 전문가동료 집단에게 의뢰한다
- 분석의 경계가 좁게 정해진다.
- 리스크는 비개인화된다.
- 통계적 변화와 확률이 강조된다.
- 일관성과 보편성이 중요하다
- 의견이 일치되지 않으면 전문적 권위의 수준에 따라 해결한다.
- 구체적으로 표현할 수 없는 리스크에 따른 영향은 다룰 필요가 없다.
- 정치적 문화와 민주적 과정을 중시한다.
- 전래되는 교훈과 전통에 의뢰한다.
- 분석의 경계가 넓다.
- 리스크는 개인적으로 받아들여진다.
- 리스크가 내 가족 및 마을에 미치는 영향이 강조된다
- 일관성보다 특이한 것이 강조된다
- 과학적인 견해에 차이가 나더라도 전문가의 권위적 수준이나 명성을 따르지 않는다
- 구체적으로 예견되거나 표현될 수 없는 리스크의 영향도 다루어져야 한다.

“Rank the risks from the following activities (from most risky to least risky)”

- Alcohol, commercial aviation, construction, contraceptives, fire fighting, food preservatives, handguns, motor vehicles, motorcycles, electric power, nuclear power, pesticides, police work, private aviation, smoking, spray cans, surgery.

College Students [Slovic, 1987]

- 1. nuclear power
- 2. handguns
- 3. smoking
- 4. pesticides
- 5. motor vehicles
- 6. motorcycles
- 7. alcohol
- 8. police work
- 9. contraceptives
- 10. fire fighting
- 11. surgery
- 12. preservatives
- 13. spray cans
- 14. construction
- 15. private aviation
- 16. commercial aviation
- 17. electric power

Experts [Slovic, 1987]

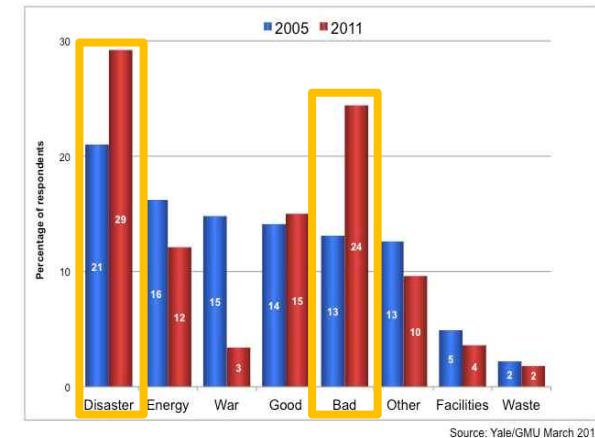
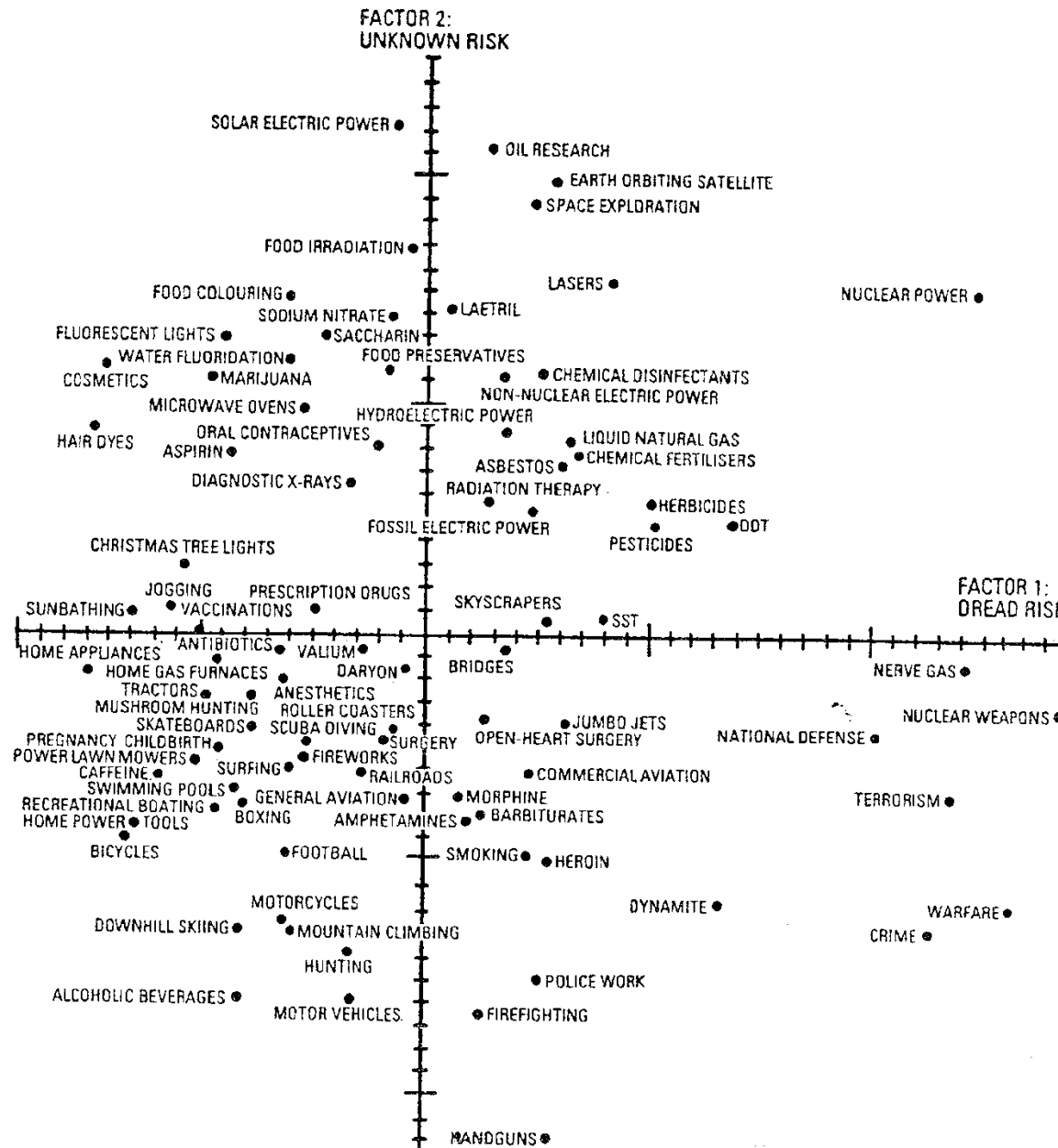
- 1. motor vehicles
- 2. smoking
- 3. alcohol
- 4. handguns
- 5. surgery
- 6. motorcycles
- 7. X-rays
- 8. pesticides
- 9. electric power
- 10. swimming
- 11. contraceptives
- 12. private aviation
- 13. construction
- 14. preservatives
- 15. bicycles
- 16. commercial aviation
- 17. nuclear power

Ordering of Perceived Risk

[P. Slovic, Perception of Risk, V.236 Science, 1987]

Activity or technology	League of Women Voters	College students	Active club members	Experts
Nuclear power	1	1	8	20
Motor vehicles	2	5	3	1
Handguns	3	2	1	4
Smoking	4	3	4	2
Motorcycles	5	6	2	6
Alcoholic beverages	6	7	5	3
General (private) aviation	7	15	11	12
Police work	8	8	7	17
Pesticides	9	4	15	8
Surgery	10	11	9	5
Fire fighting	11	10	6	18
Large construction	12	14	13	13
Hunting	13	18	10	23
Spray cans	14	13	23	26
Mountain climbing	15	22	12	29
Bicycles	16	24	14	15
Commercial aviation	17	16	18	16
Electric power (non- nuclear)	18	19	19	9
Swimming	19	30	17	10
Contraceptives	20	9	22	11
Skiing	21	25	16	30
X-rays	22	17	24	7
High school and college football	23	26	21	27
Railroads	24	23	29	19
Food preservatives	25	12	28	14
Food coloring	26	20	30	21
Power mowers	27	28	25	28
Prescription antibiotics	28	21	26	24
Home appliances	29	27	27	22
Vaccinations	30	29	29	25

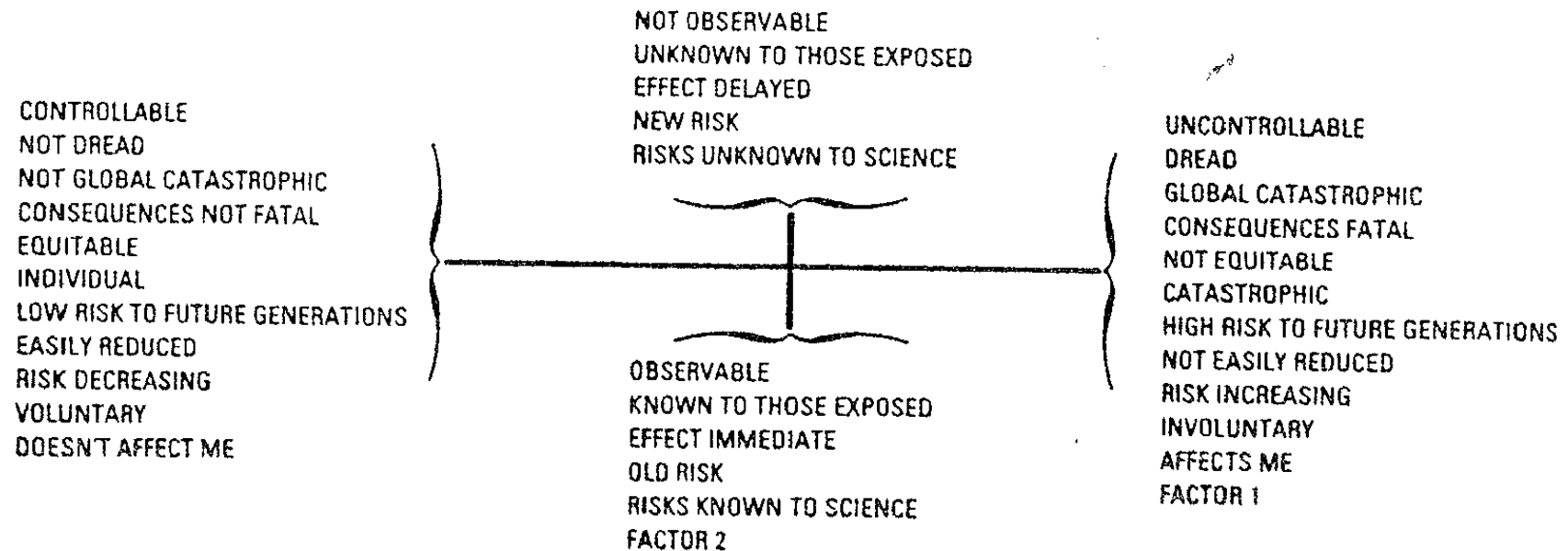
Perceived Risk Characteristics of Various Sources of Risk (with respect to Factor 1 (Dread Risk) and Factor 2 (Unknown Risk))



→ First word comes to your mind
When you think about nuclear power

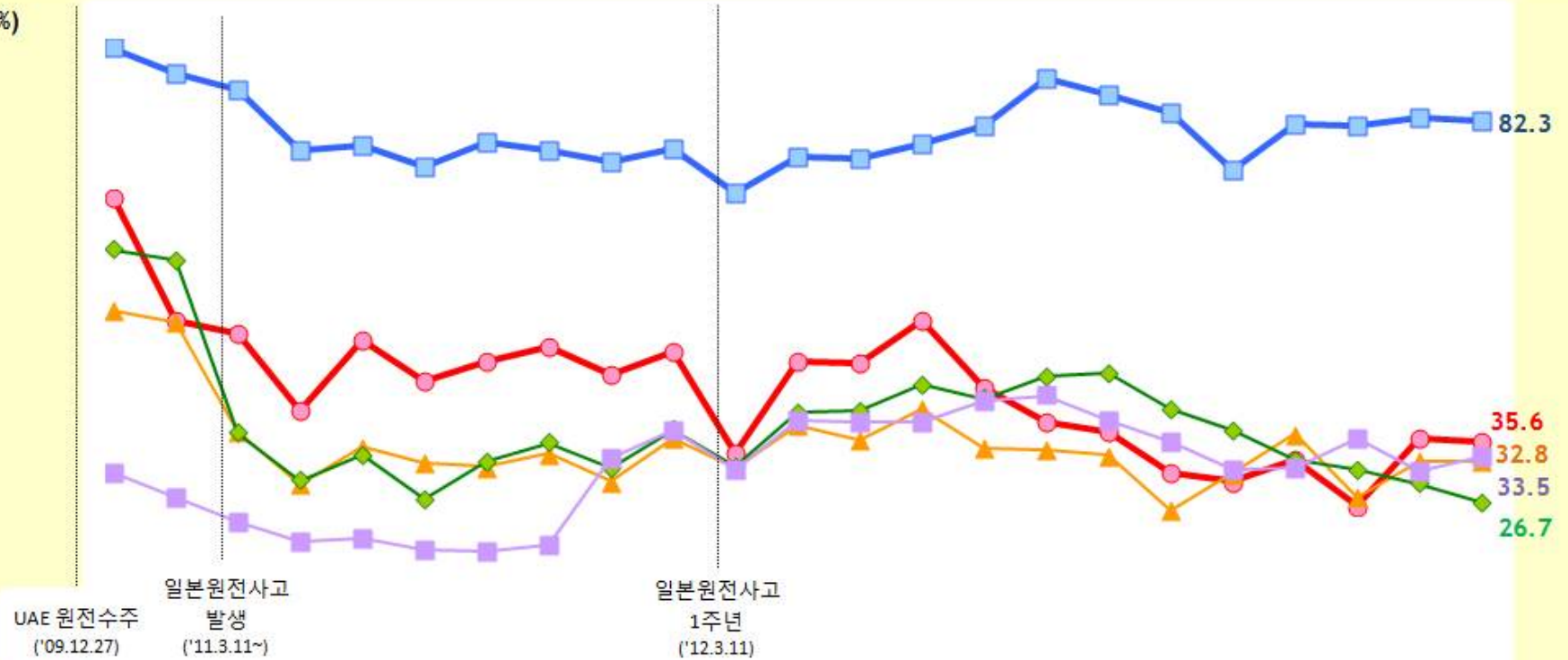
"Disaster", "Bad"

Perceived Risk Characteristics: Factor 1 (Dread Risk) and Factor 2 (Unknown Risk)



원자력 국민인식도 조사

(긍정평가, %)



	'10년 1월	12월	'11년 3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	'12년 3월	5월	7월	9월	'13년 3월	7월	8월	10월	'14년 5월	8월	11월	15년 7월	9월
필요성	93.0	89.4	86.9	78.2	78.9	75.8	79.3	78.0	76.4	78.3	71.8	77.1	76.8	79.0	81.6	88.5	86.2	83.5	75.3	81.9	81.7	82.9	82.3
안전성	71.1	53.3	51.4	40.1	50.4	44.5	47.3	49.5	45.4	48.8	34.0	47.4	47.1	53.3	43.6	38.5	37.0	31.2	29.8	33.0	26.2	36.2	35.6
방폐안전	54.7	53.1	37.1	29.5	34.8	32.6	32.0	33.9	29.8	36.1	31.8	38.0	35.9	40.4	34.7	34.5	33.6	25.6	31.0	36.7	27.6	32.8	32.8
원전중설	63.6	62.1	36.9	30.0	33.6	27.3	32.8	35.5	31.7	37.4	32.0	39.9	40.2	43.9	41.9	45.2	45.7	40.3	37.3	32.9	31.5	29.5	26.7
거주지수용	31.0	27.5	24.0	21.0	21.5	19.8	19.6	20.5	33.2	37.2	31.5	38.7	38.5	38.5	41.6	42.4	38.8	35.7	31.5	31.8	36.0	31.3	33.5

원자력문화재단



How to Affect Public Risk Perception

- How to address “Unknown”
 - Certainty
 - Observability
- How to address “Fear”
 - Reducing fear appeal
 - Information sharing
 - Controllability
 - Consequence mitigation
 - Trust building

Pathways to a strong future for Nuclear Power

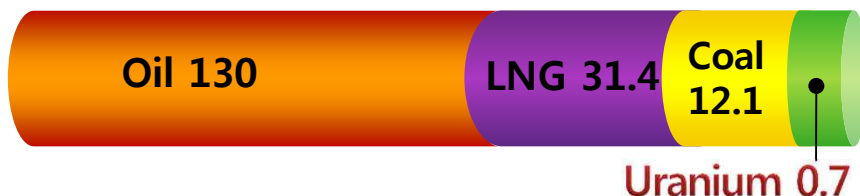
- Passive Safety
- New Emergency Capabilities
- Small Modular Reactors (SMR)
- Integration of renewable and nuclear power
- National path forward on nuclear waste
- Fukushima and nuclear safety
- Advanced reactors
- Strong university programs

Pete Lyons, “Achieving Wider Global Acceptance of Nuclear Power in Climate Change Mitigation”, KAIST, October 7, 2016.

대한민국 에너지 수입 및 소비 현황

에너지 수입

- Cost for Total Import : 526 B\$ in 2014
 - Cost for Energy Import: 174 B\$(33.1% of Total Import)



에너지 수입 의존도 (96.5%)

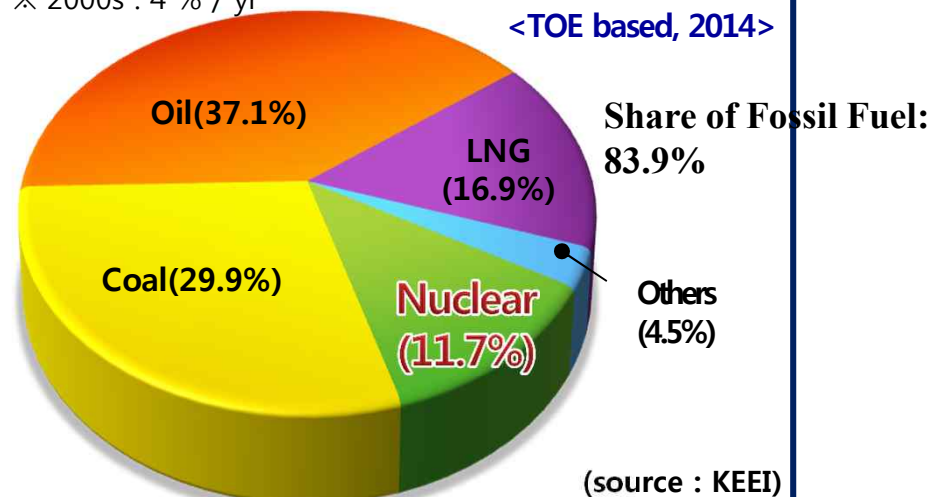
	석유	석탄	가스
rank	Top 5	Top 3	Top 9

- ▶ Oil : USA>China>Japan>India>Korea ...
- ▶ Coal : Japan>China>Korea>India>Taiwan ...
- ▶ LNG : USA>Japan>Germany> ... >Korea

Consumption of Primary Energy

— Annual Growth Rate of Energy Consumption

- ※ 1980s : 11 % / yr
- ※ 1990s : 10 % / yr
- ※ 2000s : 4 % / yr

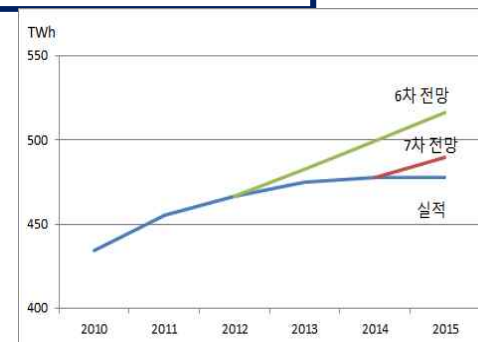


에너지 원별 소비 비중 변화 (1980 -> 1990 -> 2012 %)

- 석유: 61.1 -> 53.8 -> 38.2
- 석탄: 30.1 -> 26.2 -> 29.2
- LNG: 0 -> 3.2 -> 18.1
- 원자력: 2.0 -> 14.2 -> 11.4

전력 수요 동향

- 2000년 이후 연평균 5% 증가에서 2010년 이후 연평균 1.9% 증가
- 2015년 전력소비량은 478TWh로 6차 전력수급계획의 예측 516TWh의 92.5%에 불과
- 7차 전력수급계획 2016 전력수요 예측 증가율 4.6%, 2월까지 1.1% 증가
- 경제성장 실적은 최근 4년간 2.8%에 그침 (6,7차 전력수급계획은 '15년까지 4%대의 경제성장을 전제)



대한민국 에너지 소비 및 CO₂ 배출

총 에너지 소비량

Year: 2013 Unit: Mtoe Highest ten ▾

China	3,013
United States	2,187
India	819
Russia	730
Japan	455
Germany	323
Brazil	293
South Korea	267
Canada	254
France	253

총 전기 소비량

Year: 2013 Unit: TWh Highest ten ▾

China	4,600
United States	3,819
Japan	923
India	857
Russia	856
Canada	559
Germany	525
Brazil	509
South Korea	503
France	464

총 유류 소비량

Year: 2013 Unit: Mt Highest ten ▾

United States	759
China	456
Japan	189
India	166
Russia	149
Brazil	119
Germany	98
Saudi Arabia	95
Canada	92
South Korea	90

총 석탄 소비량

Year: 2013 Unit: Mt Highest ten ▾

China	3,588
United States	845
India	828
Germany	252
Russia	211
Japan	186
South Africa	182
Poland	137
Australia	135
South Korea	127

Total CO₂ 배출량

Year: 2013 Unit: MtCO₂ Highest ten ▾

China	8,502
United States	5,101
India	2,011
Russia	1,661
Japan	1,186
Germany	764
South Korea	584
Iran	561
Canada	519
Saudi Arabia	516

● 우리나라 온실가스 배출량 추이와 감축목표

총배출량 급격히 증가: 296(1990)→688백만 tCO₂-eq.(2012)

연평균 3.9% 증가

연간 배출량 세계7위, 누적배출량(1900년~) 세계 16위

2013년 1인당 온실가스 배출량은 12.5톤(세계 평균 5톤)

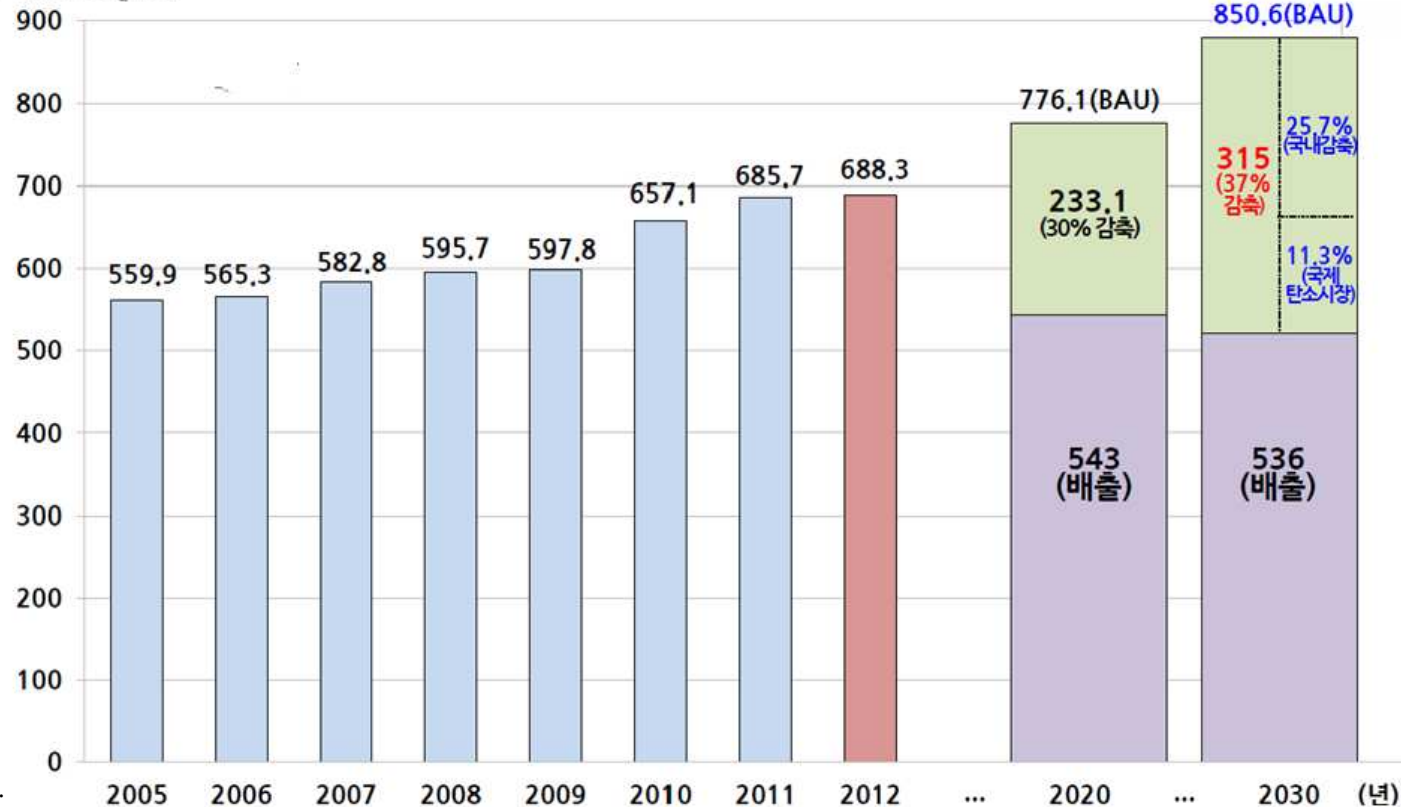
산업부문: 연평균 5.2%의 높은 증가

124(비중 42%,1990)→374백만 tCO₂-eq.(54%, 2012)

발전부문: 연평균 9.1% 증가

낮은 전기요금, 전기화의 영향, 석탄발전 연평균 11.5% 증가

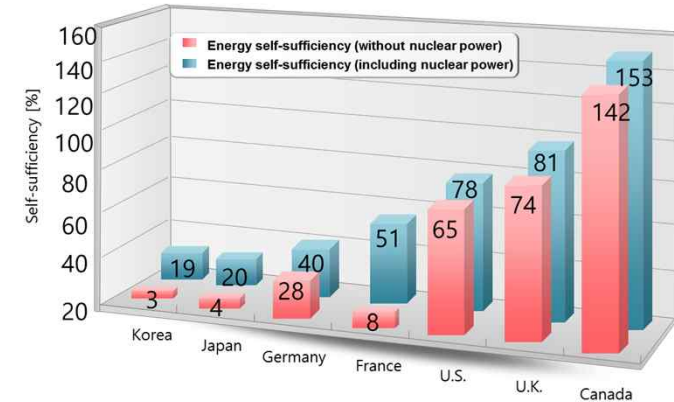
(단위: 백만톤CO₂eq.)



자료: 한화진(2016).

문제점

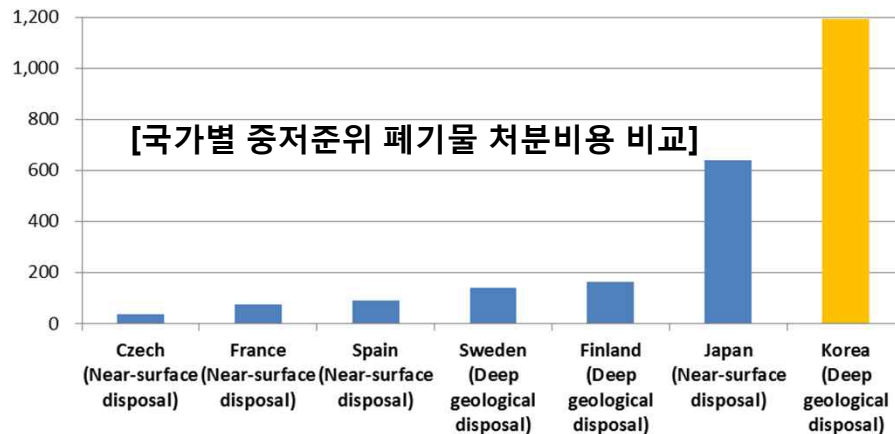
- 취약한 에너지 안보
 - 낮은 에너지 자급율
 - 화석에너지의 편재성
 - 산유국 지역에서의 전쟁 위험
 - 에너지 보유국의 에너지 수급조정 및 무기화
- 에너지 고소비
- 온실가스 고배출
- 에너지 소비효율 낮음
- 에너지 설비 관련 사회적 갈등의 심화



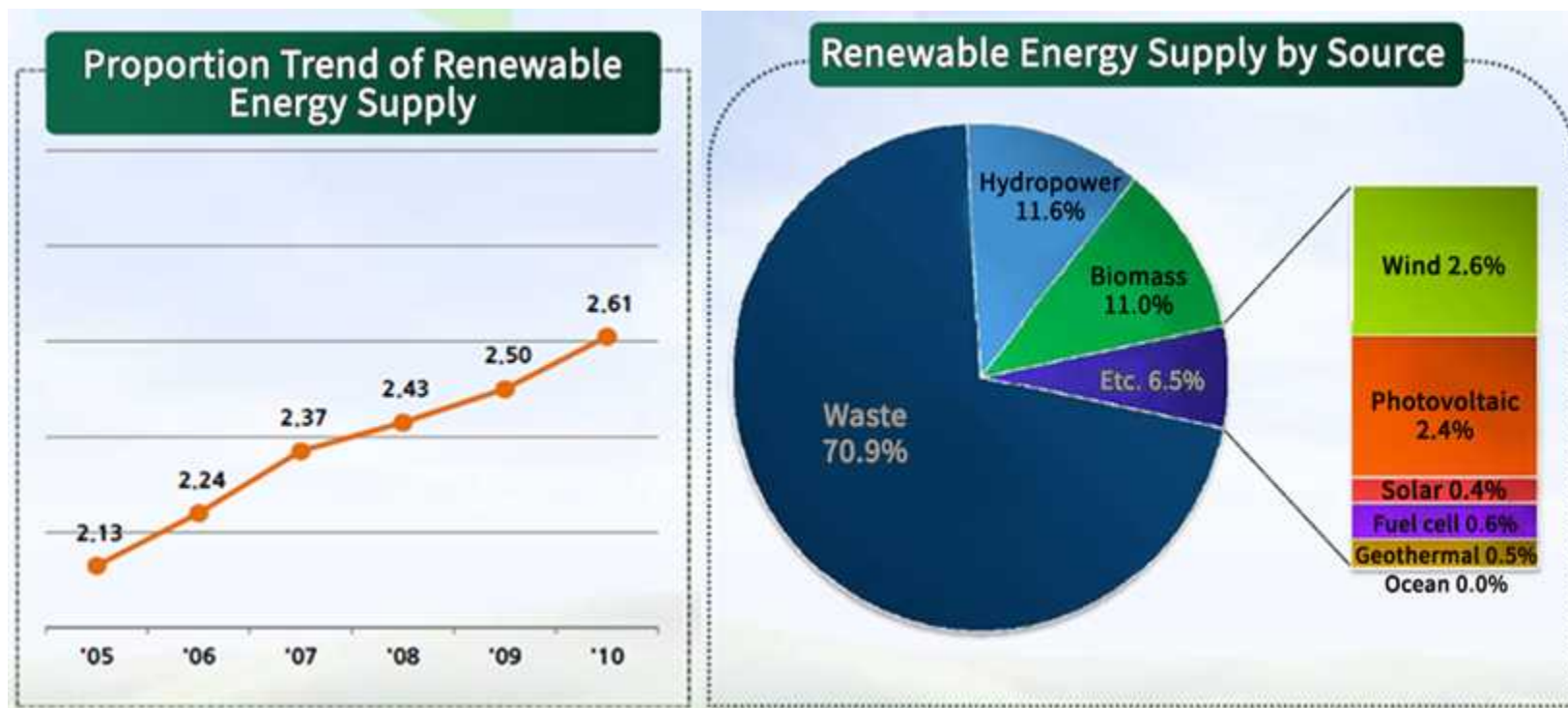
* IEA, Energy balance of OECD countries 2011

	Energy/GDP (TOE/천달러, PPP)
France	0.09
Germany	0.08
Japan	0.08
Korea	0.22
UK	0.07
USA	0.14
OECD	0.11

(Unit : 10,000 KRW/drum)



대한민국 신재생에너지 비중



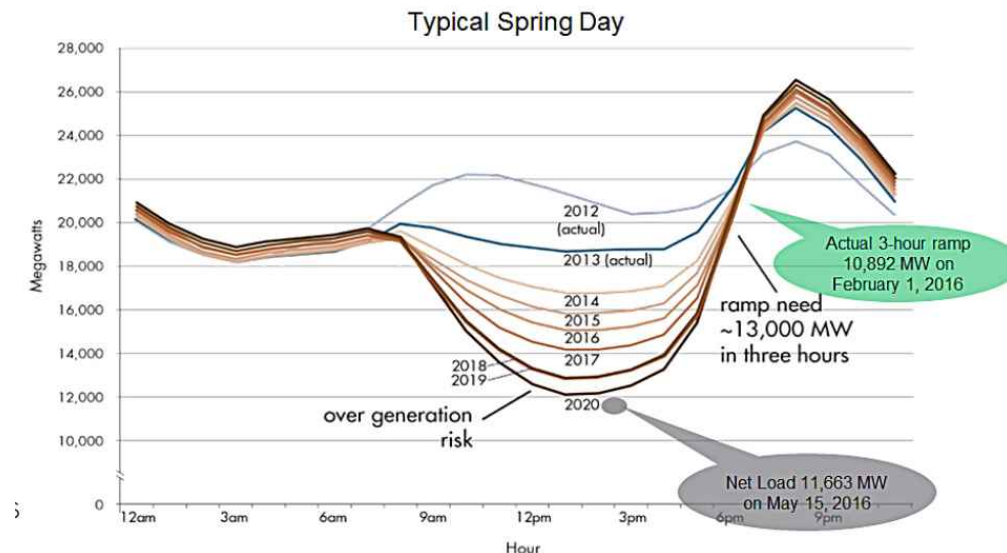
신재생에너지 목표달성률

(%)	2008	2009	2010	2011	2020	2030
목표 공급 비중 (A)	2.58	2.73	2.98	3.24	6.08	11.0
실적 (B)	2.43	2.50	2.61	2.75	-	-
(A-B)	0.15	0.23	0.37	0.49		

자료: 제3차 신재생에너지 기술개발 및 이용보급 기본계획 (2009~2030), 지식경제부

신재생에너지 확대의 제약

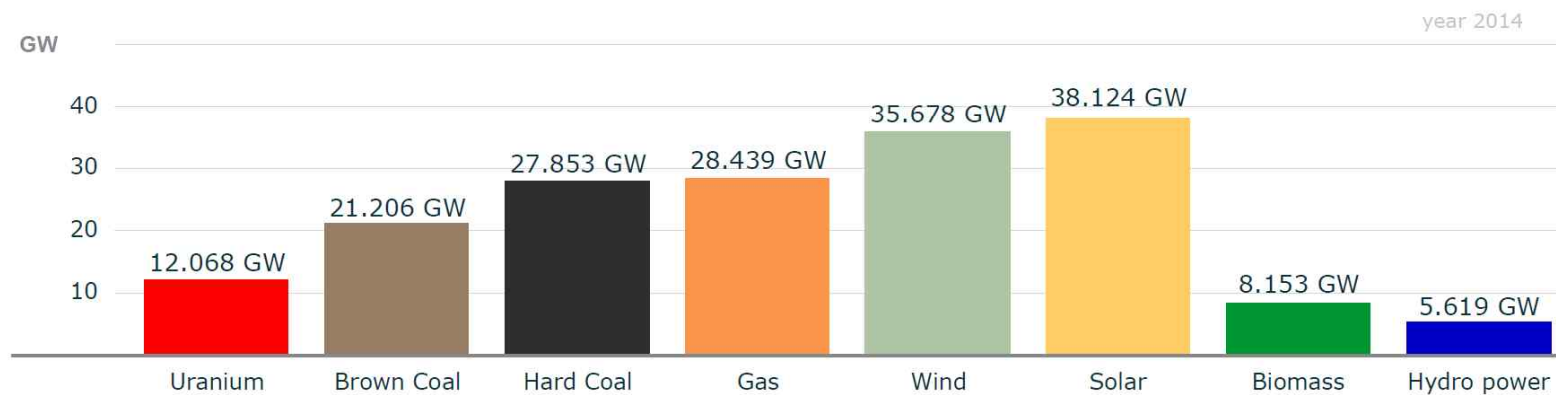
- 경제성
- 부지 마련의 어려움
- 간헐적 전기 생산으로 인한 전력 공급 안정성의 어려움
 - 다른 발전원의 출력 변동성이 높아지는 균형효과 발생
 - 다른 발전원의 이용효율 변동 효과 발생
 - 전력 시스템의 주파수 변동 저항능력 약화
- 백업 발전원 및 에너지 저장 설비 필요



독일 전력 생산 (예)

Installed power at October 29, 2014

Net installed capacity rating



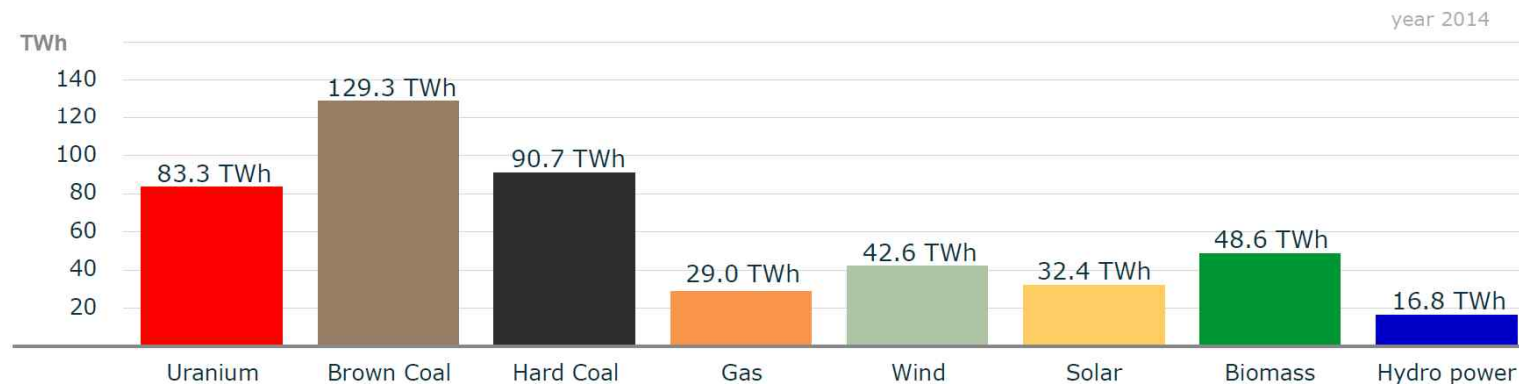
■ wind power: 35.062 GW onshore; 616 MW offshore

Graph: B. Burger, Fraunhofer ISE; data: Bundesnetzagentur and AGEE (Biomass, Hydropower)

독일 전력 생산 (예)

Electricity production First eleven months 2014

Electricity production: first eleven months 2014



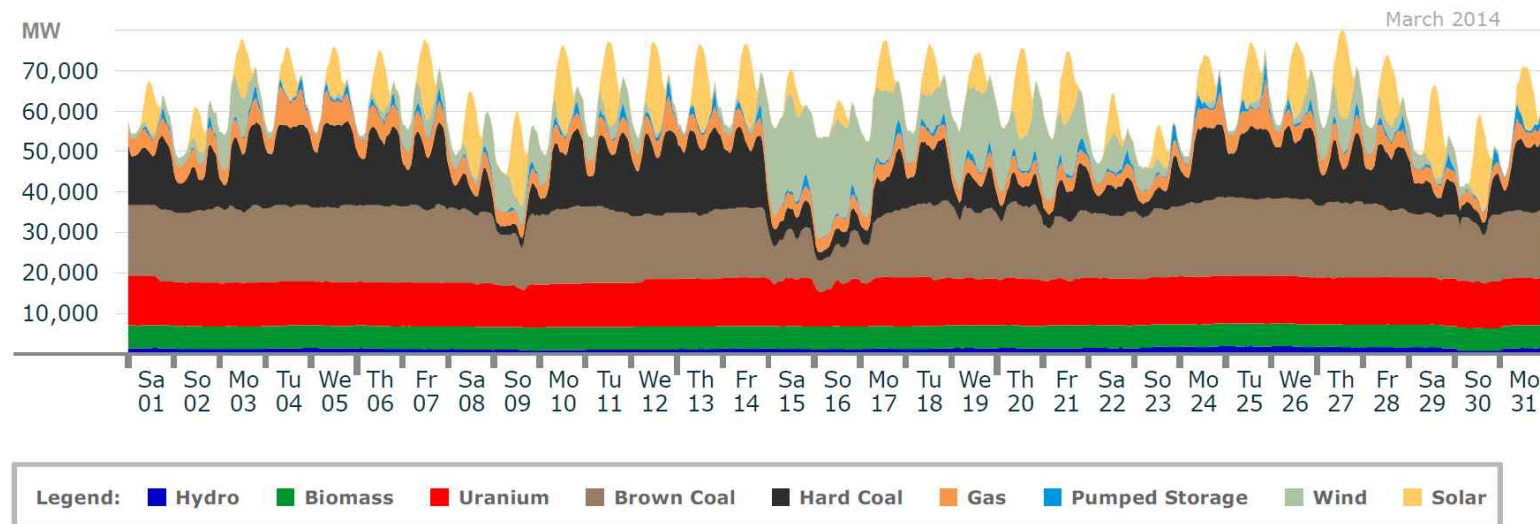
<http://www.ise.fraunhofer.de/en/downloads-englisch/pdf-files-englisch/news/electricity-production-from-solar-and-wind-in-germany-in-2013.pdf>

Graph: B. Burger, Fraunhofer ISE; data: European Stock Exchange EEX, energetic corrected values

독일 전력 생산 (예)

Detailed Electricity Production March 2014

Actual production

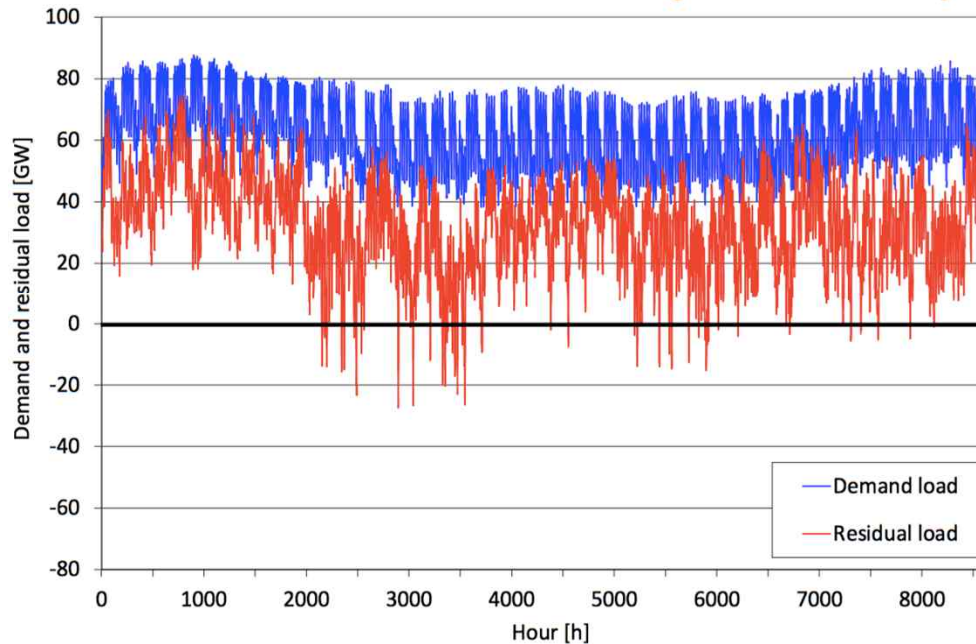


	Hyd	Bio	Uran	BC	HC	Gas	PSt	Wind	Solar
min. power (GW)	0.8		8.5	7.7	2.1	2.3	0	0	0
max. power (GW)	2.0		12.1	19.4	20.9	12.5	5.0	24.8	23.0
weekly energy (TWh)	1.0	4.1	8.4	12.4	8.5	3.0	0.6	4.6	3.3

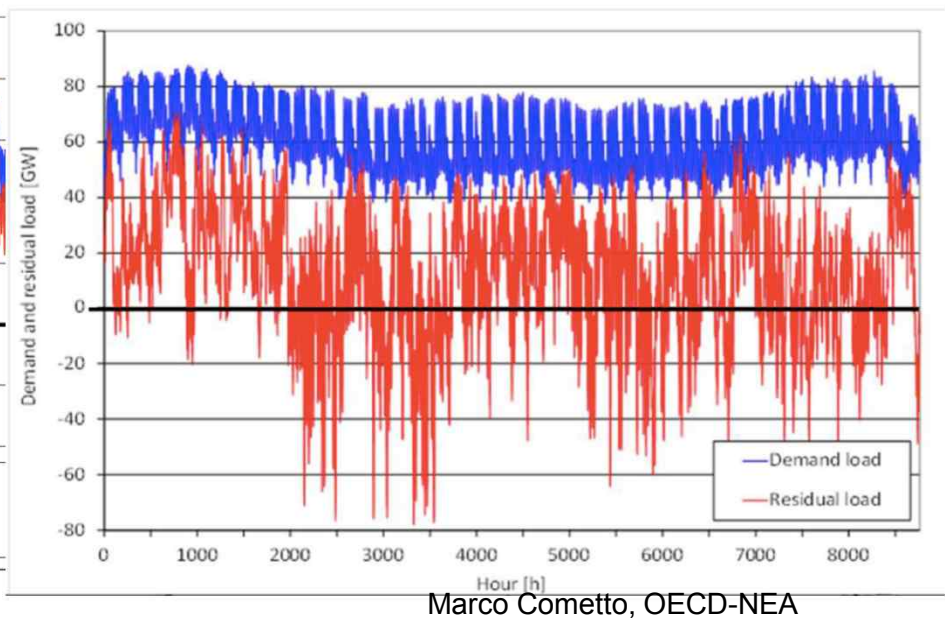
Graph: Bruno Burger, Fraunhofer ISE; Data: EEX Transparency Platform and German Federal Statistical Office

순부하(residual load)에 미치는 신재생에너지의 영향

50% Renewables scenario (35% of VRE)



80% Renewables scenario (62% of VRE)



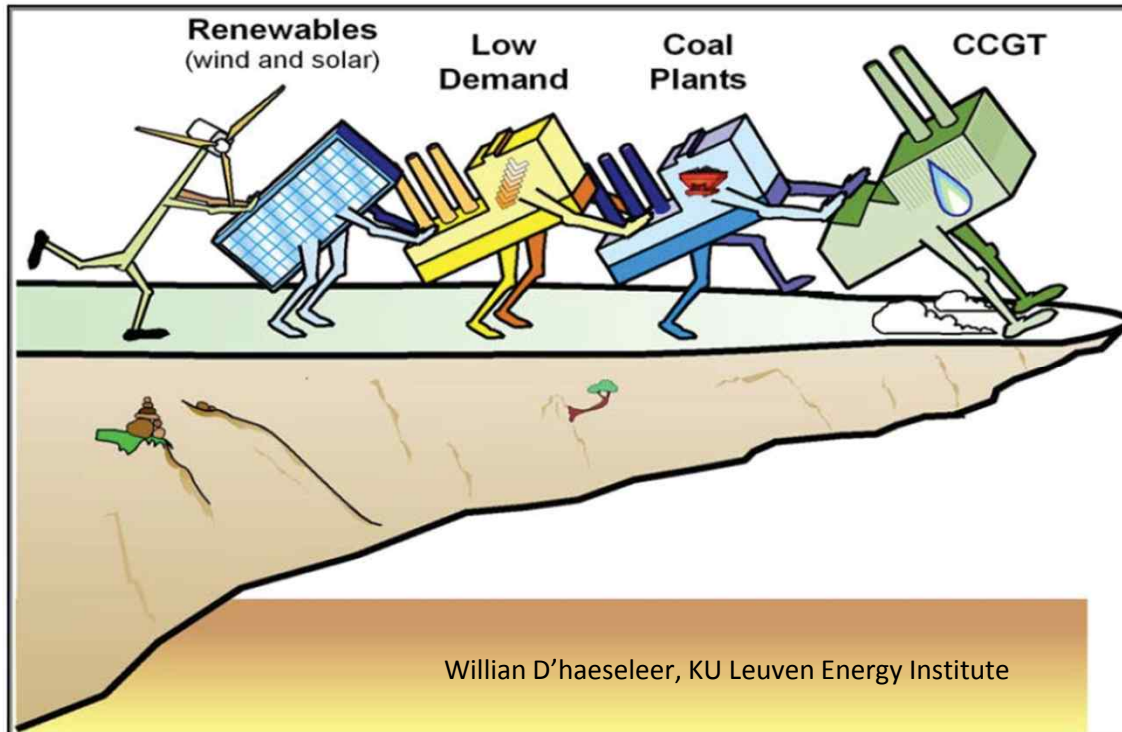
Quantitative analysis performed by IER Stuttgart based on modelling of the German electricity system

50% 신재생 (35% 변동성 신재생에너지) 시나리오
최대 27 GW 초과 생산(minus peak) / 250 GWh
의 저장용량 필요

80% 신재생 (62% 변동성 신재생에너지) 시나리오
최대 78 GW 초과 생산 / 6,4 TWh 저장용량 필요

EU에서 새롭게 떠오르는 이용률 문제

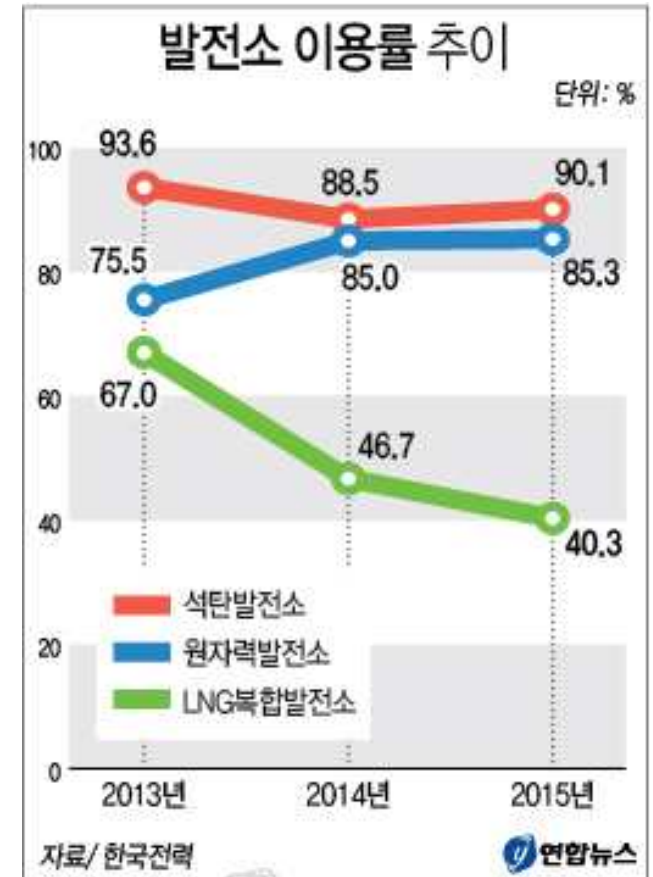
-최종 전력소비의 28.8 %를 신재생에너지에서 얻지만...(2015년도 기준, 출처 eurostat)



단기효과: 0의 한계생산비용을 가지는 신재생에너지가 상대적으로 비싼 발전원(석탄,복합화력발전)을 대체*

장기효과: 1) 신재생 에너지원의 변동성에 대처할 수 있는 유연한 발전원 감소
2) 망의 안정성 유지를 위해 기술비용 증가 (에너지 저장장치 등)*

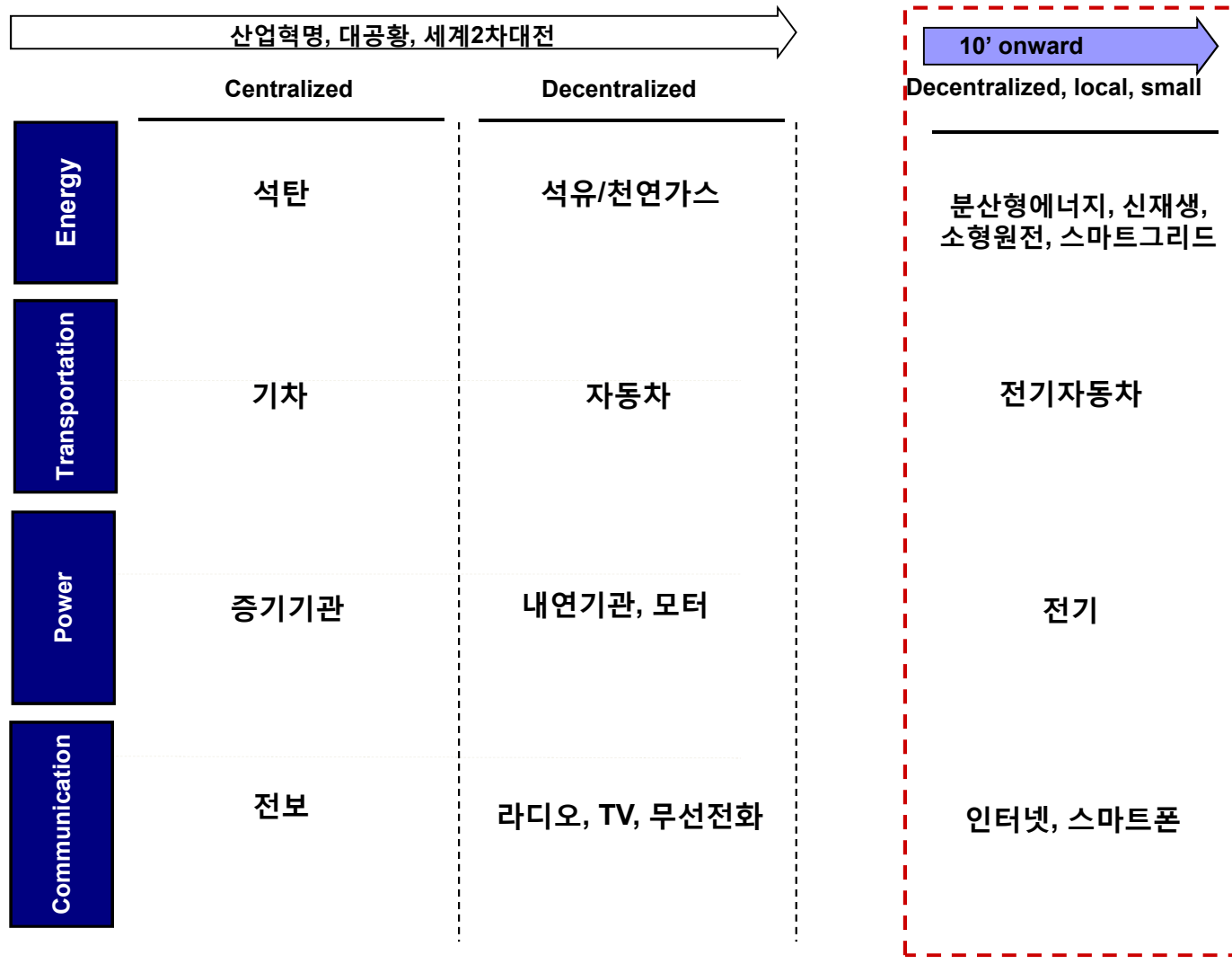
*출처 System Effects in Low-Carbon Electricity Systems, Marco Cometto, OECD-NEA



에너지 사용의 미래

- 인간이 더 나은 질의 삶을 원하는 한 에너지의 수요는 증가한다.
- 모든 에너지원은 장점과 단점을 갖고 있다.
- 지구환경의 미래는 국가들의 에너지정책에 의해 크게 영향을 받고 있다. 회복 불가능한 변화가 일어날 수도 있다.
- 에너지 환경문제를 극복하지 못하면 성장의 한계에 도달한다.
- 에너지는 국가안보의 근간이다.
 - “국방을 제외하고, 주권국가의 안보에 있어서 에너지 안보 보다 더 중요한 것은 없다” (헨리 키신저)
- 사회가 민주화되면서 에너지사용의 선택은 대중의 선택에 크게 영향을 받는다.
- 대중의 에너지 선택은 객관적인 수치보다 다음에 의해 크게 영향을 받는다.
 - 내게 얼마나 편리한가?
 - 내가 느끼는 리스크는 어느 정도인가?
 - 관리주체에 대한 신뢰는 어느 정도인가?
 - 내가 옳다고 믿는 것은 무엇인가?
- 미래 에너지기술의 선택에서 환경영향, 안전성, 대중 수용성, 지속가능성, 경제성, 에너지안보 등이 균형적으로 고려되어야 한다.
- 즉 국가의 미래 에너지 전략은 에너지 안보 확보, 지속가능한 발전, 기후 변화 대응이라는 목표하에 사회적 공감대를 이루면서 지속적으로 추진되어야 한다.

사회적 기반 기술 패러다임의 전환



Future Energy System, N.S. Ahn, 2013

전력시스템 운용의 목표

- Short-run efficiency (5 - 60 분)
 - 전력품질 및 시스템 신뢰도 제약조건 하에,
현재 가동가능한 발전원 중 최소 가동비용 조합으로 발전계획
 - 실시간 수요에 따른 공급 균형조정 (real-time balancing)
- Long-run efficiency (4 - 20 년)
 - 발전원별 합리적 설비용량 및 안정적 전원믹스 구축
 - 최대부하(peak) 와 설비용량 사이의 적절한 조절



예비력(back-up) 을 갖춘 발전원의 필요성

원자력: 국가전원믹스 (power mix)에서 신재생에너지 수용을 도움*



*(*Synergies between Nuclear & Renewable Energy Sources
,Françoise Touboul, CEA France)*

원자력 에너지의 유연성을 높일 필요성

전력시스템에서의 방대한 “간헐성”을 어떻게 다룰 것인가? (EU의 예)

Intermittency: defined as “variable” and “partly unpredictable”

주요 ‘그리드-유연성’ 확보 솔루션:

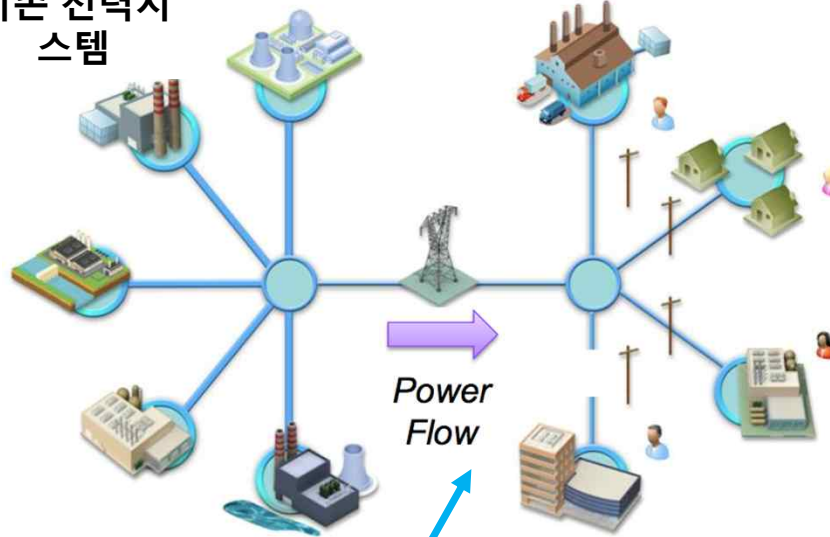
- 급전가능하고 유연한 발전원으로 부터 백업예비력 확보 (+ & -)
- 전기 저장장치 (대규모 전기 저장 장치는 비용&효율성 문제로 한계)
- 송전망의 확대
 - 스페인-포르투갈 전력망 연계로 풍력발전 변동성 분산시킴
 - 한계: 강한 바람이 부는 경우 북독일 지역 인근 폴란드, 체코, 오스트리아에 이동하는 전력 50% 증가 → 불안정성 증가 요인
- 적극적 수요반응제도(*demand response*) 장려
- 불필요한 신재생에너지 생산량 줄이기 (혹은 보조금 삭감)

(출처: 유럽에너지 규제 협력청, ACER)

William D’haeseleer(KU Leuven Energy Institute), INL workshop, 2016

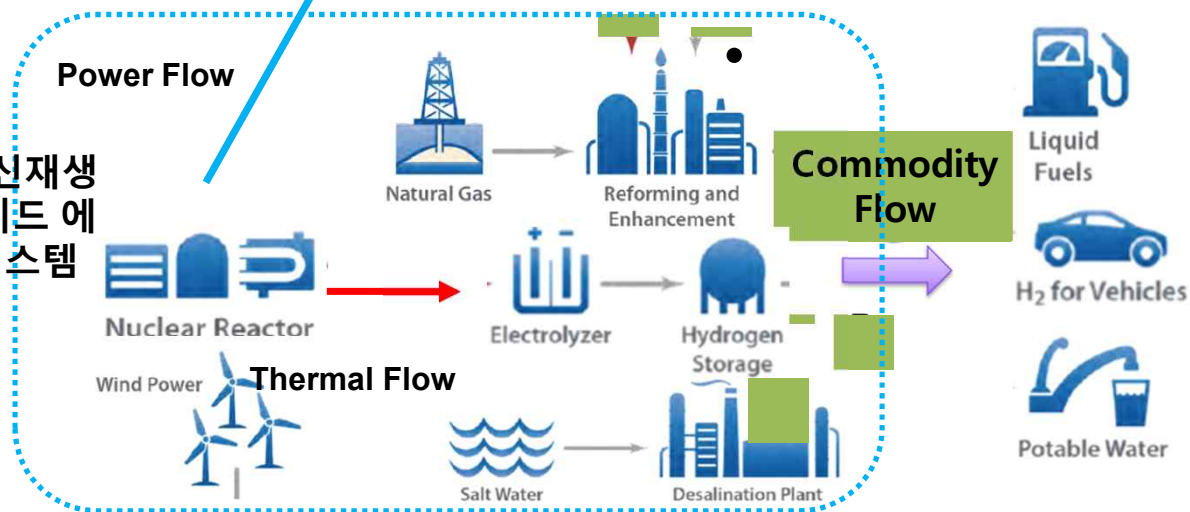
원자력-신재생 연계 기본 개념

기존 전력시스템



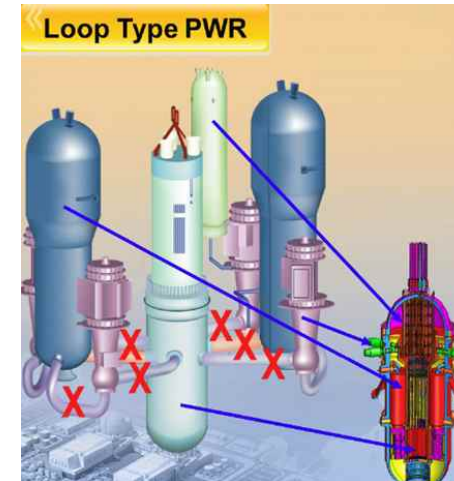
- 원자력-신재생 시스템 연계는 소유주 (owner) 뿐만 아니라 전체 전력망의 효용 (utility)을 현재보다 증대시켜야 함
- 소형원자로(SMR)로 연계 시스템 구성시:
 - 분산형 에너지시스템의 구축
 - 도서지역 혹은 에너지 다소비 지역에 열과 전력공급
 - 산업공정에 필요한 열 공급
 - 기존 화석연료 보일러 대체

원자력-신재생 하이브리드 에너지 시스템

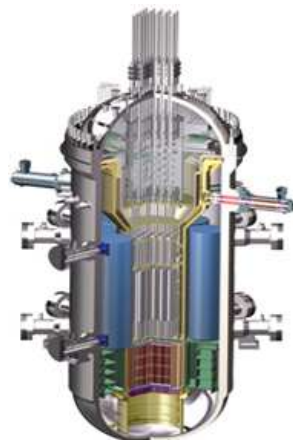
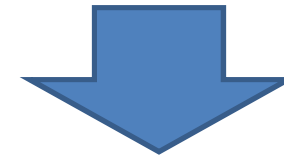


미래형 소형 원자로

- 전기출력 300MWe 이하급 소형 원자로
- 장점
 - 열 발생률이 낮다.
 - 후쿠시마형 중대 사고가 원천적으로 불가능
 - 낮은 초기 투자비, 빠른 건설, 빠른 Pay-back, 공장 제작 가능성
 - 대형 발전소 뿐만 아니라 분산형 전력망에도 적용 용이
 - 출력변동 운전 용이
 - 수자원이 풍부하지 않아도 설치할 수 있다.
 - 설치와 작동이 쉽고 오작동 가능성이 낮다.
 - 다목적 용도로 이용 가능 (해수담수화, 지역난방 등)
 - 연료 충전과 유지 보수를 몇 년에 한 번씩만 하면 된다.
- 단점
 - 복잡한 연료 재장전 & 유지보수, 고유한 연료 관리
 - 규모의 경제성에서 불리



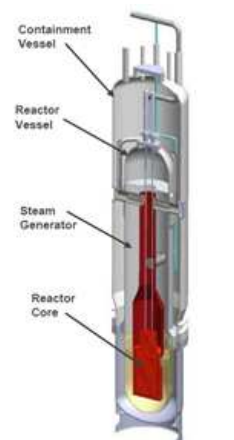
기존 원전 - 가압 경수로



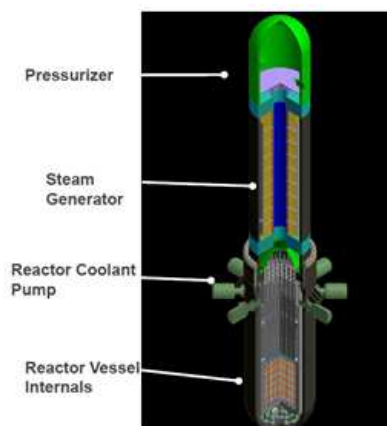
SMART



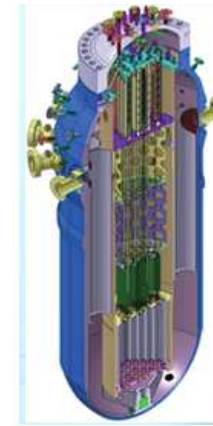
mPower (Babcock & Wilcox)
125 MWe



NuScale (NuScale)
45 MWe



Westinghouse SMR



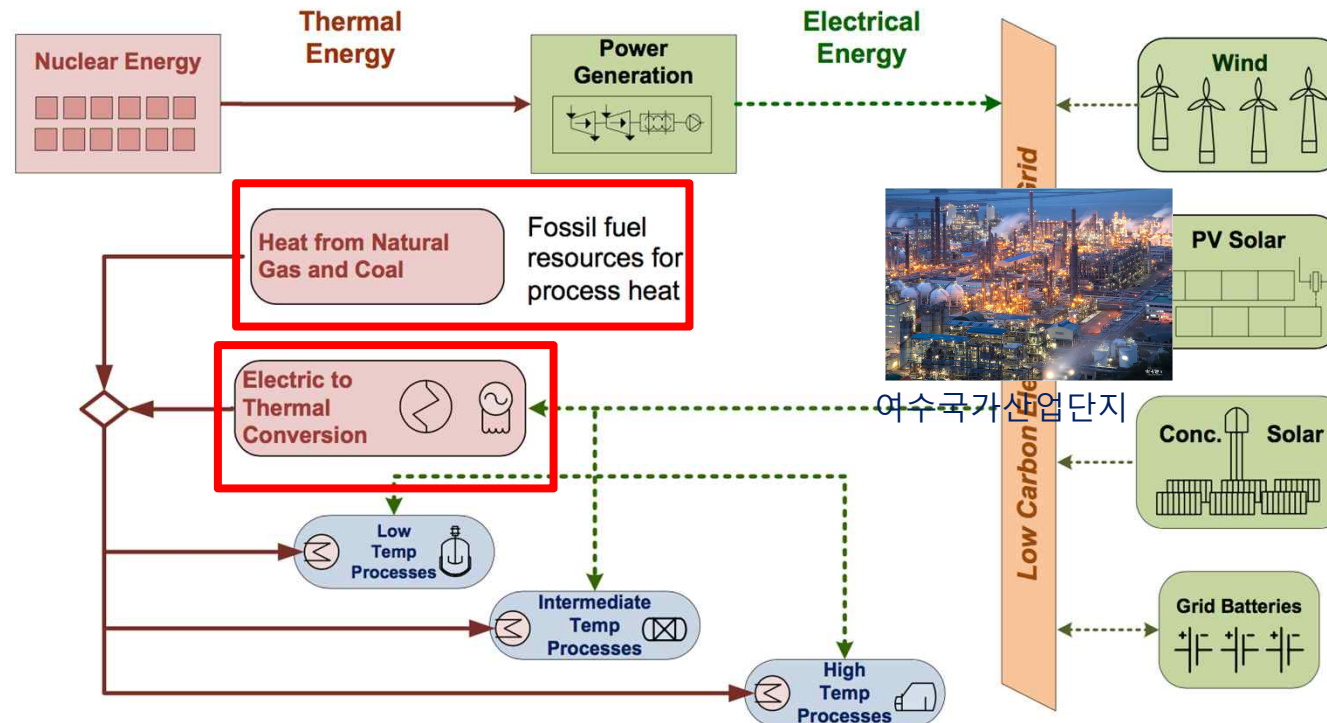
CAREM

원자력 신재생에너지 연계의 장점

- 에너지 변환효율(Energy Conversion Efficiency)의 증대로 그리드 스케일에서의 운전과 자원활용의 최적화, 안정성, 수익성 증가
- 전력공급의 높아진 안정성과 전력품질(전압, 주파수 관점)
- 그리드 스케일에서 에너지 저장과 재이용이 수월해지므로 신재생에너지의 점유를 늘릴수 있음 (망의 안정성, 전력품질 관점에서 기존에는 신재생에너지 점유를 늘리는데 한계가 있었음)
- 줄어든 화석연료 사용과 CO2 배출(하이브리드 시스템의 부산물인수소와 바이오 연료로 저탄소 전기차 보급 증대를 꾀할 수 있음)
- 급파가능하고 탄소발생이 없는 전력망 유연성을 부여하는 전력 생산
- 동기 관성을 제공 (synchronous electromechanical grid inertia) 함으로써 전력품질관리 향상
- 산업부문의 탄소발자국(carbon footprint : 개인 또는 단체가 직접 및 간접적으로 발생시키는 온실 기체의 총량) 감소
- 에너지 생산비용의 균등화 및 감소
- 열방출률 감소, 담수화로 유발되는 수자원에 미치는 영향 감소

기존 전력망의 구성 형태

→ 아주 느슨한 결합 (very loosely-coupled)

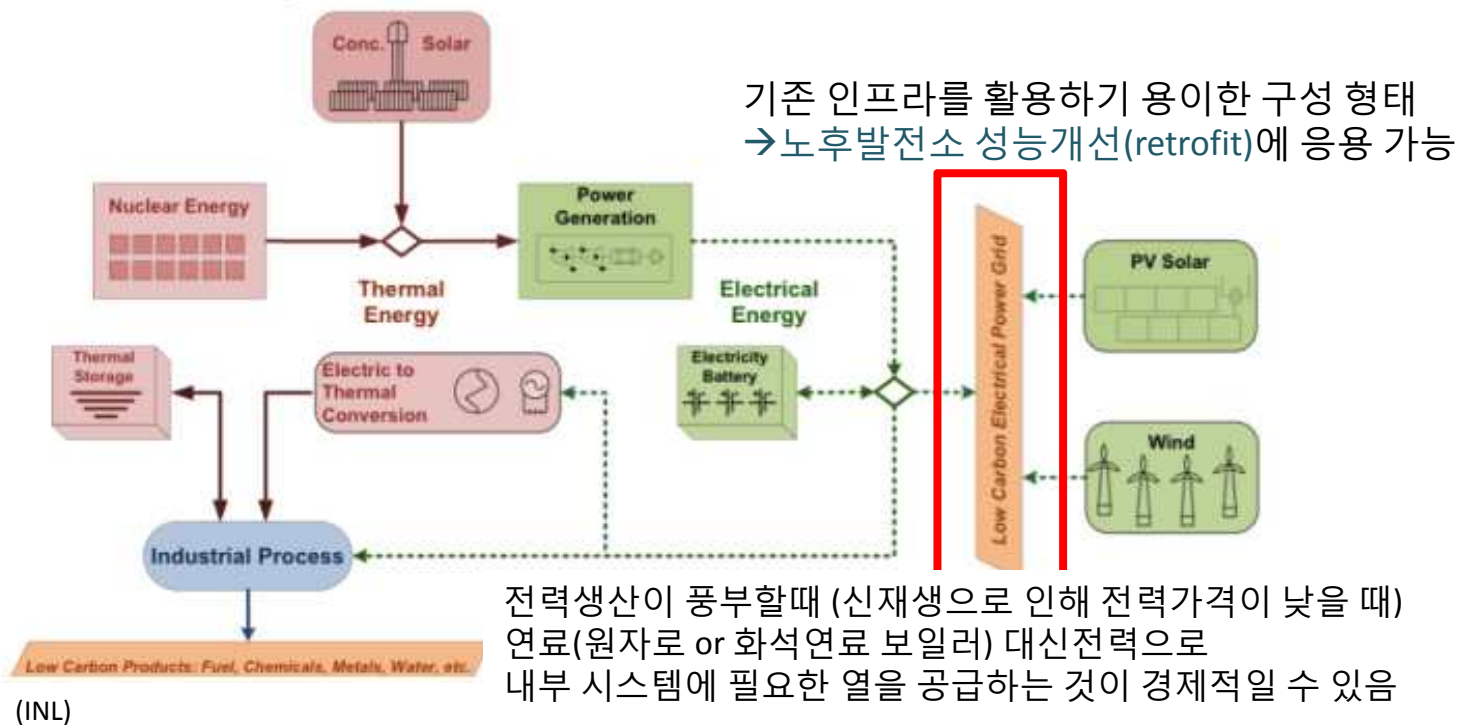


(INL)

다양한 에너지 자원(multiple-inputs) 기용하여 열&전기 수요를 충족
 각 발전원은 개별적으로 전력망에 연결됨: 망의 안정성 측면에서 상호 의존적일 수 밖에 없음

전체 전력망의 안정성/효율성 관점에서 운영 →
 개별 발전 플랜트 수준에서 운영 최적화는 미흡

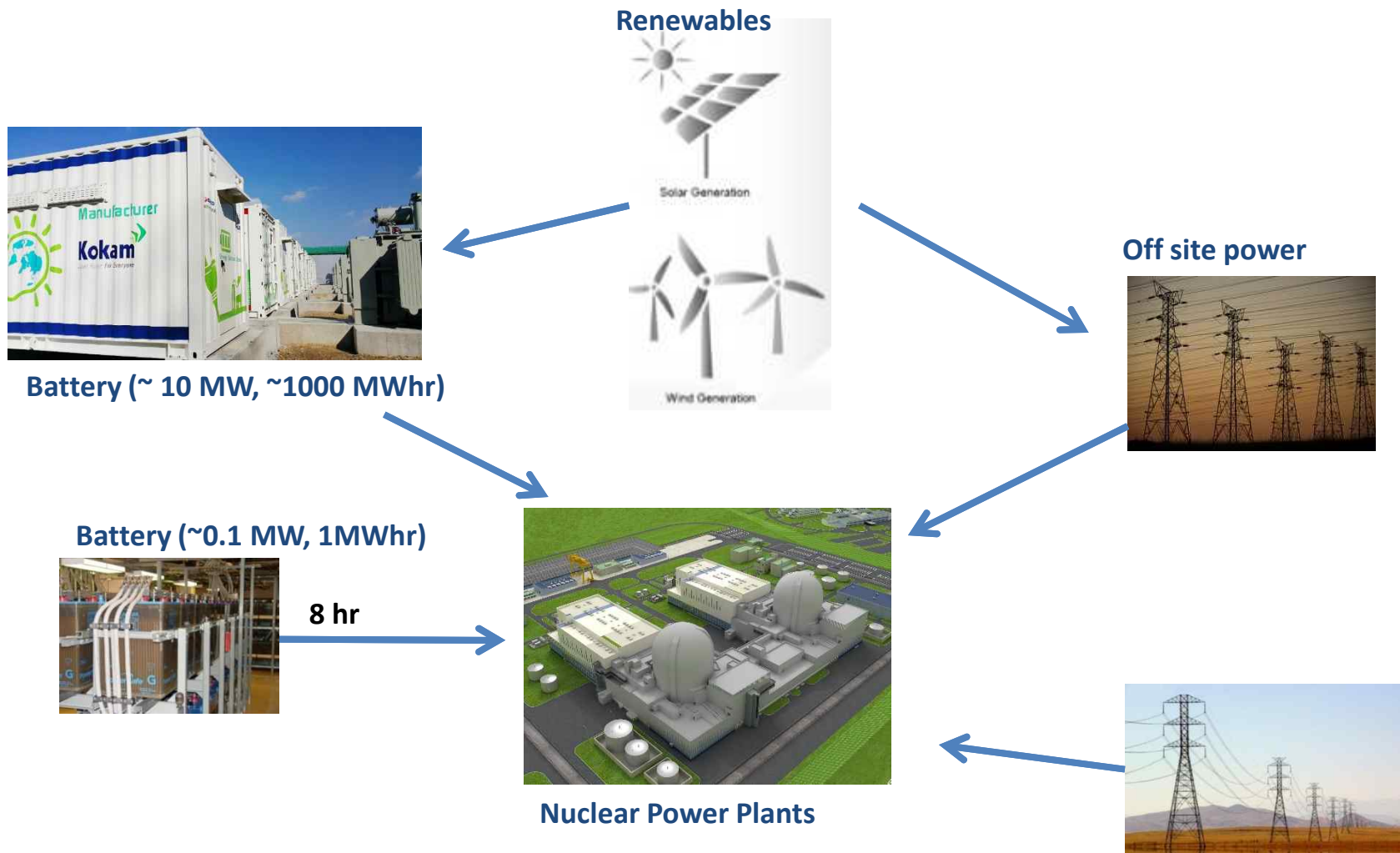
약결합(Loosely-Coupled) 시스템



- 신재생에너지 개별적으로 전력망에 연결; 내부 통합시스템에서 생산된 전기를 전력망에 송전하기 전 우선적으로 시스템 내에서 관리 가능
- 열에너지의 내부 플랜트 시설간의 이동이 없고, 오직 전기적 결합으로 연결 및 제어 됨
→ 안전규제 측면에서 보다 유리할 것으로 예상

신재생+ESS+원자력

정용훈, 2017. 5.30



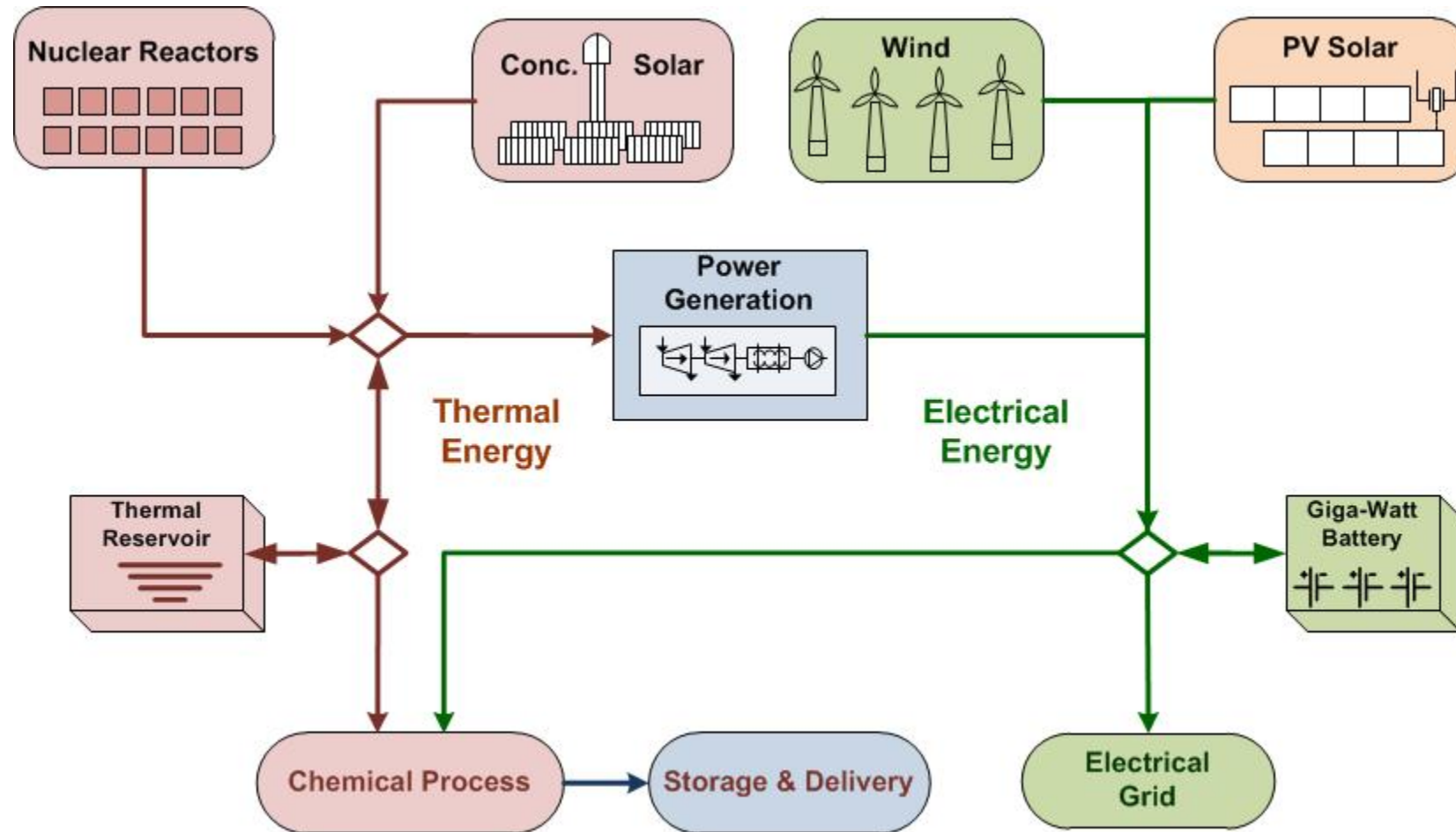
국내 원자력-신재생 공생 연구 현황

- 오직 **전기적으로만 결합**
- 원전인근의 **유휴부지**를 활용하는 공간적결합 측면
- 기존 송배전시설 활용 (주민반발 최소화)



Kim Seokwoo, Korea Institute of Energy Research, 2016

밀접 결합(Tightly-Coupled) 시스템



- 원자력, 신재생, 산업공정이 전력망 이면(behind)에서 서로 밀접 결합
- 외부 전력망의 수요에 대응하면서 내부적으로 통합시스템의 열과 전기 수요 충족

전력생산, 그이상의 원자력의 응용범위

고온수증기전기분해*
(HTSE) 및 석탄가스화
*수소생산 공정

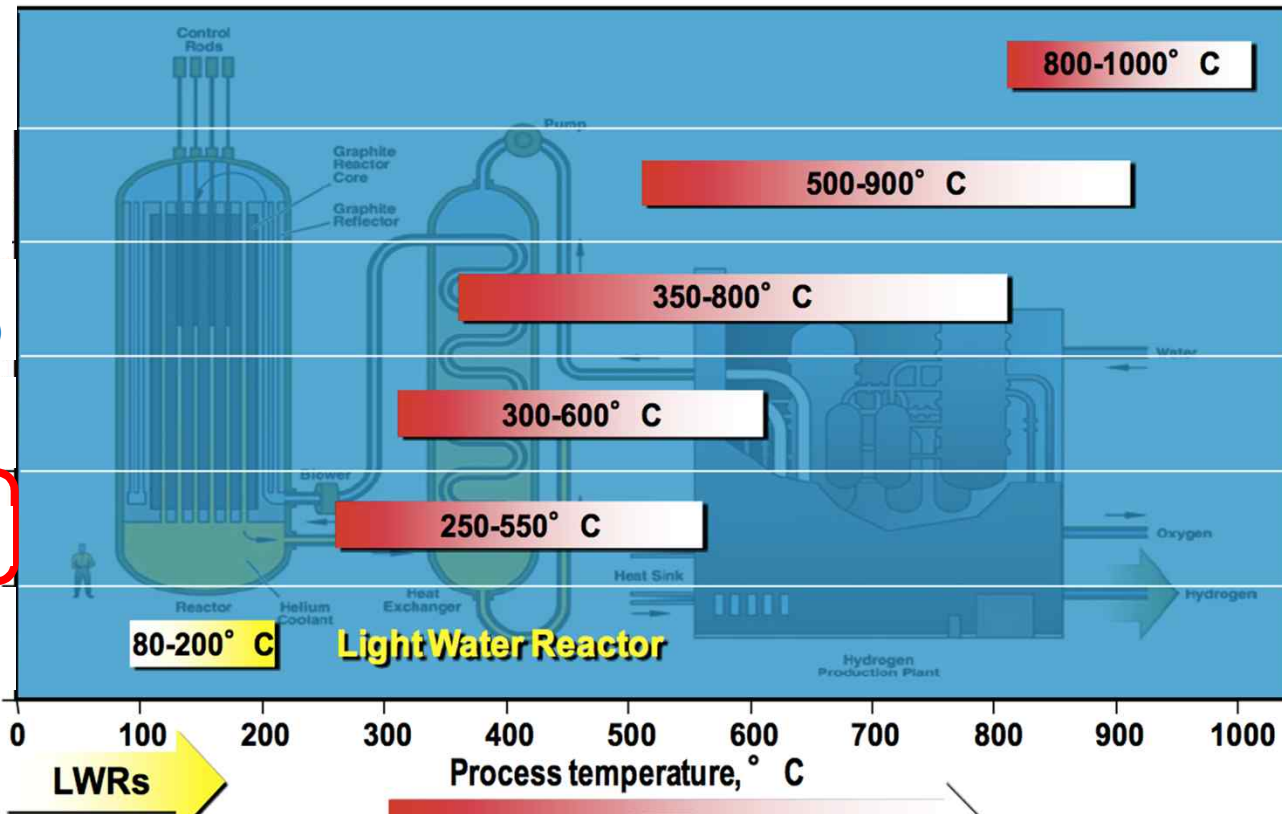
천연가스 수증기 개질*
(steam reforming)
*수소생산 공정

열병합발전
(전기 및 증기 생산)

세일오일 및
오일샌드 공정

석유 정제

지역 난방, 해양담수화



**Lower temperature reactors can support these applications via heat recuperation and topping.

(INL)

열의 가치는 각 사용시간에 매순간 변화하므로 하이브리드 시스템은 이에 대응하여 운영전략을 매순간 최적화

열병합은 '하이브리드' 시스템의 가장 단순한 형태

열역학적 효율:

원자로는 여러 목적(난방, 산업)을 위한 "열생산기계" 역할을 수행

경제적 효율

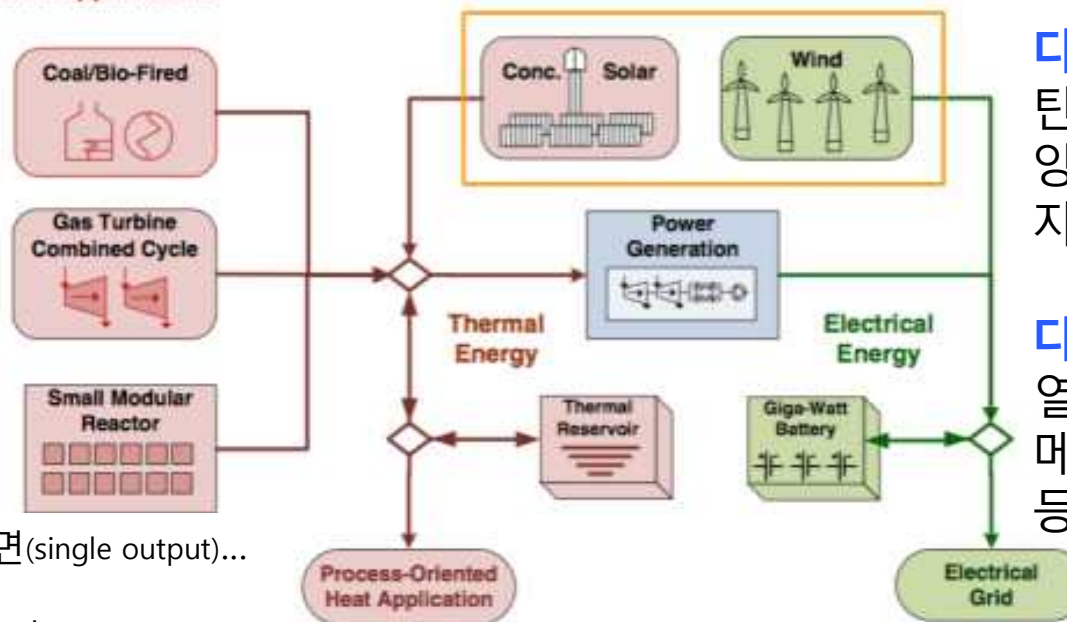
Capacity Factor (실제산출량을 이론적 최대값으로 나눈 비) 및 열의 시간가치를 고려
→ 경제적 편익 극대화

Co-Generation
Process Heat Applications

Hybrid Systems

단일 투입
원:
화석연료

생산물:
열과 전기



다양한 투입원:

탄소연료공급, 태양열/광, 풍력, 원자력 등

다양한 생산물:

열에너지, H₂, 메탄올, 해양담수 등

예) 오직 전기만 생산한다면(single output)...

→ 전력망 상황에 따라

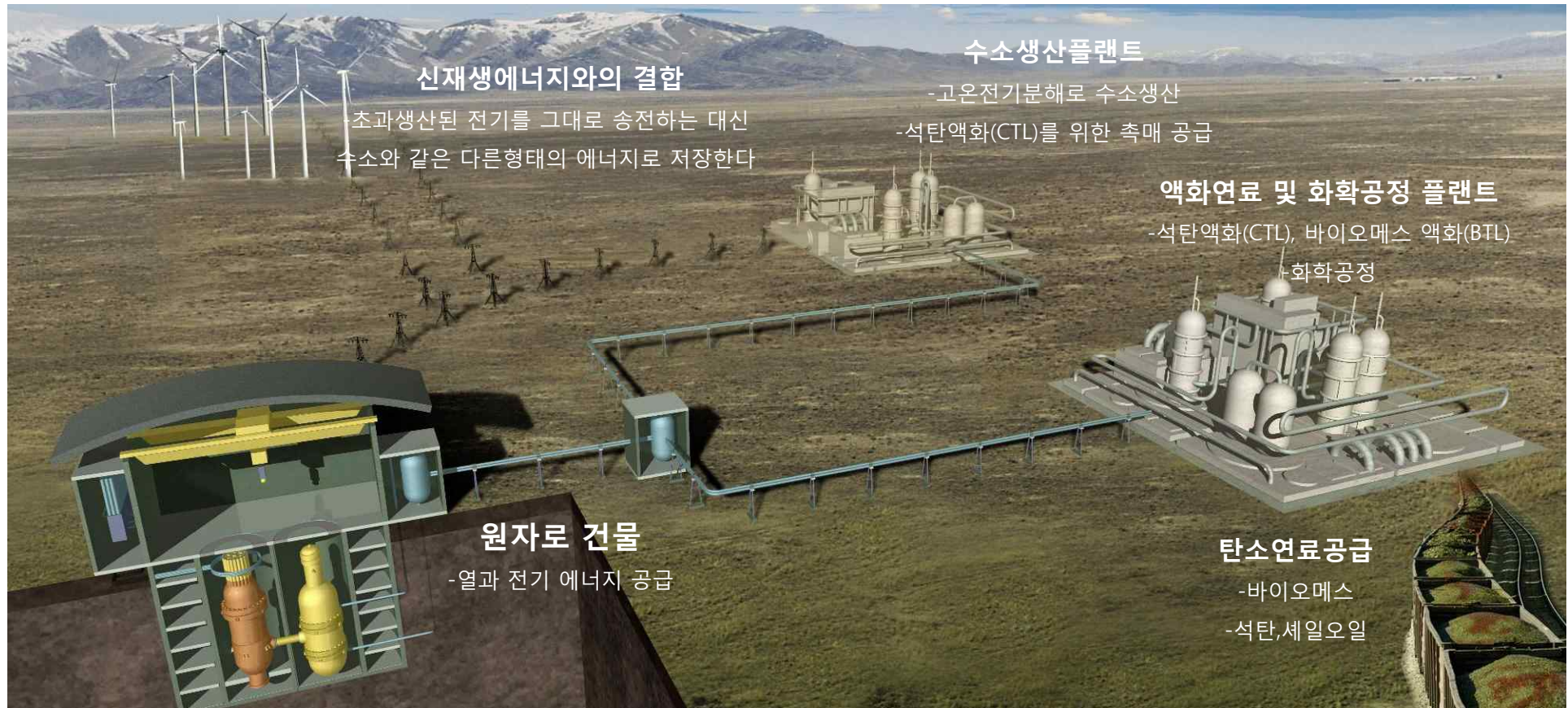
부하추종(load-following) 운전

→ 플랜트 가동률(capacity factor) 감소

→ 투자 자본의 수익 감소

Nuclear Renewable Hybrid Energy System (NRHES)

Example



다양한 탄소자원을 그냥 태우는 대신 → 원자력-신재생 하이브리드 시스템 → 전략적 에너지 파크 조성

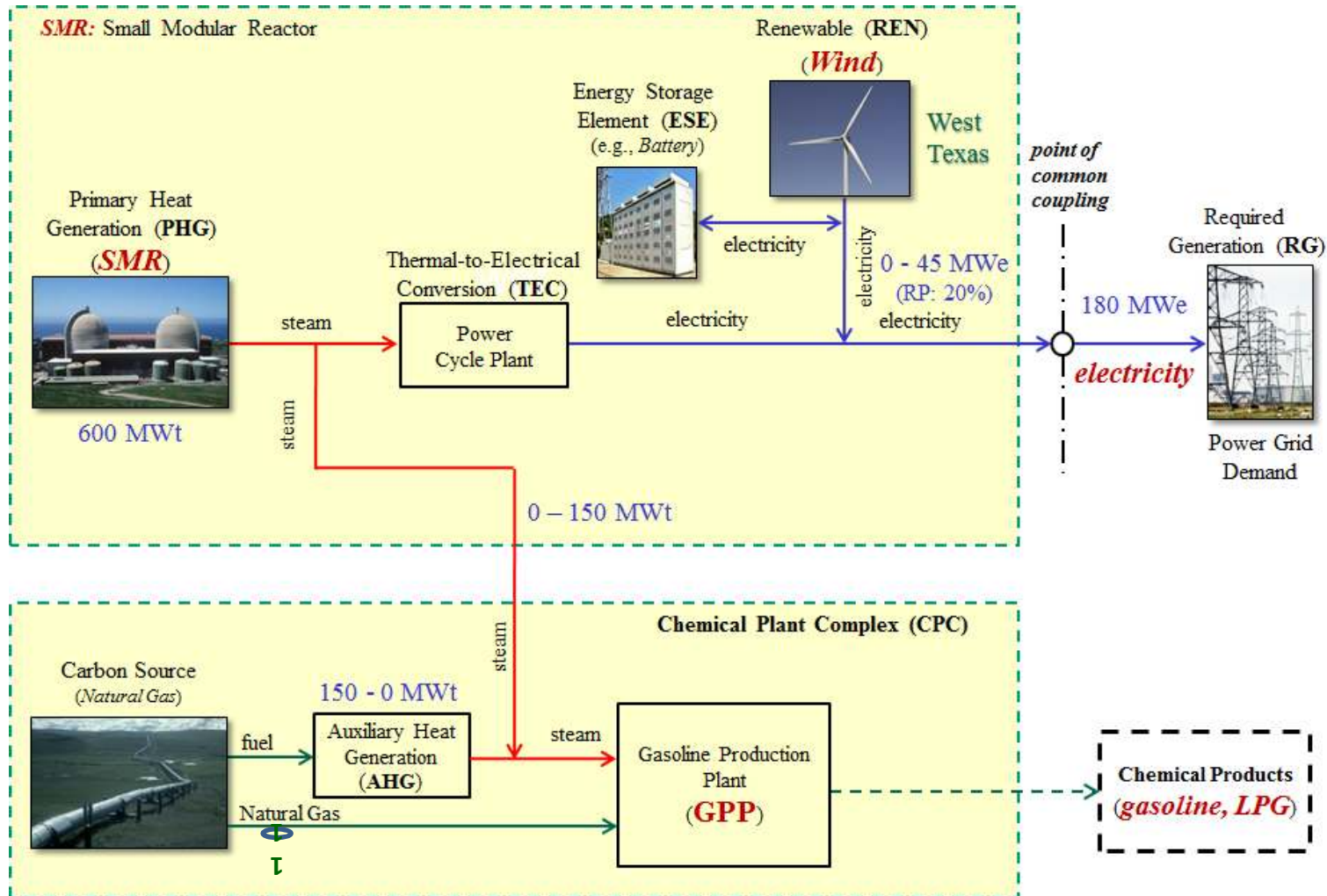
= 외부 충격에 다양하게 대처 가능 & 안정적 에너지 생산공급

U.S Navy, 전시때 선로(船路)를 이용한 연료 보급차질에 대비하여, 공기 및 해양에서 CO₂ 추출,
물에서 H₂ 추출 → 액화연료 (가솔린, 디젤, 메탄올) 생산 가능성 검토중*

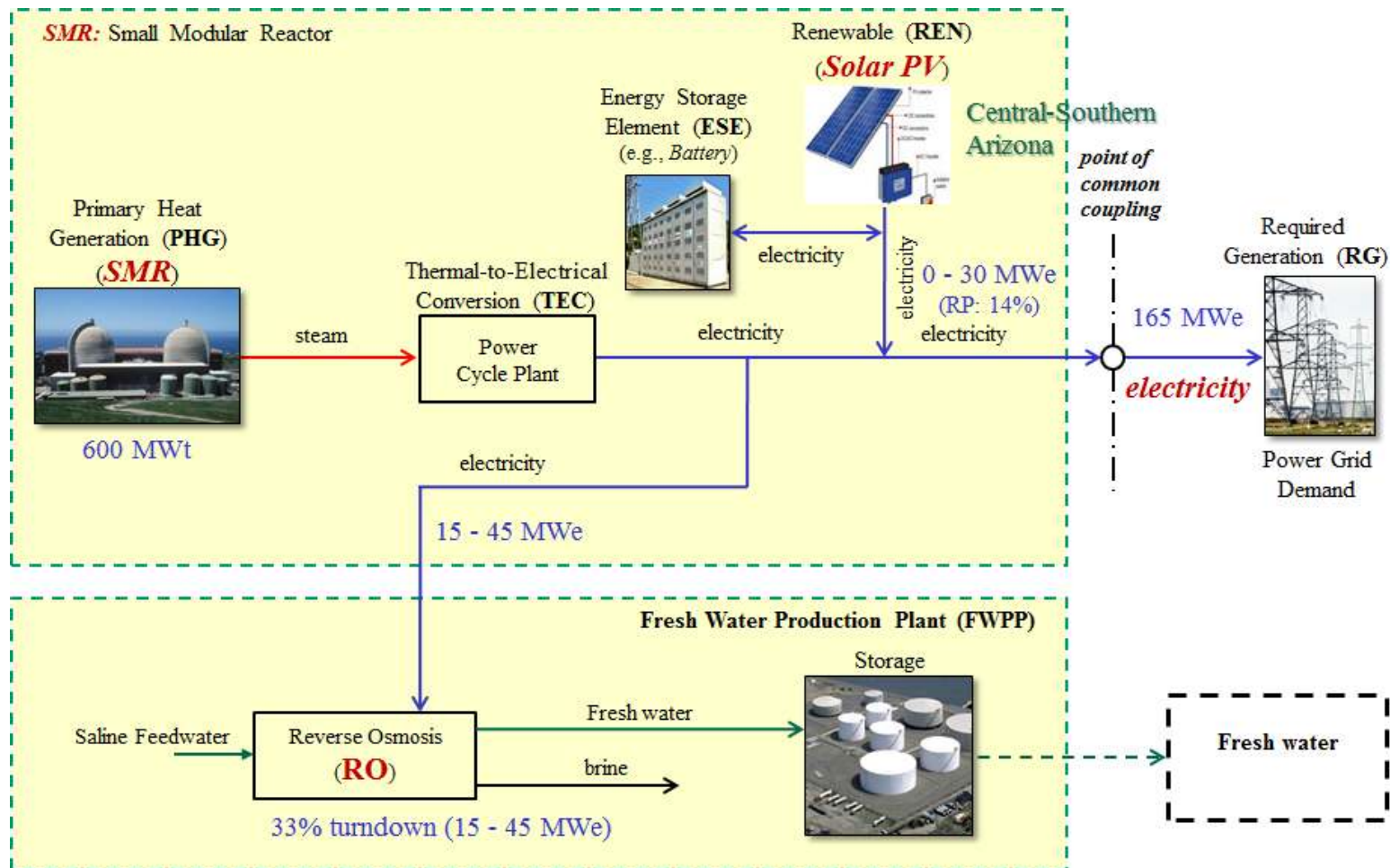
(*Nuclear-Renewable Hybrid System Economic Basis for Electricity, Fuel, and Hydrogen,

Forsberg, Aumeier, ICAPP 2014

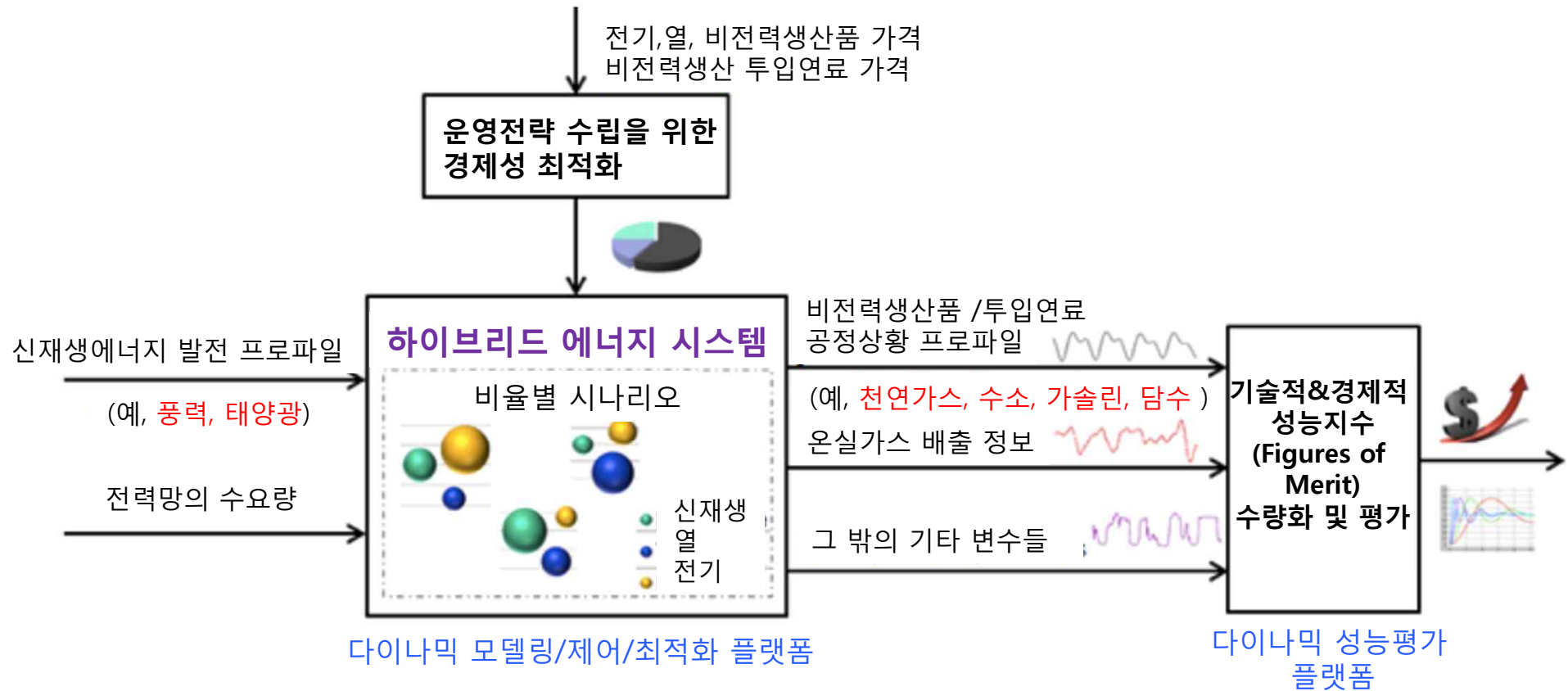
Hybrid Example: Gas-to-Chemicals/Fuels



Hybrid Example: Desalination



다이나믹 분석 정보 흐름도



다이나믹 분석: 중요 성능평가지수 도출

기술적 성능평가지수

- 전력주파수 안정성
- 국내 신재생에너지 최대 수용 가능한계
- 하이브리드 시스템이 커버 가능한
신재생에너지의 최대 변동성
- 최소 에너지 저장장치 요구량
- 반응시간 및 감발속도(ramp-rate)
- 부하추종 반응
- 운전예비력
- 통합시스템의 최소 turndown 비율

*turn-down:안정적이며 지속적으로
운전하기 위한 최소 시스템 열출력

- 시스템 가동/중지 시간

경제적 성능평가지수

- 세전매출총이익
- 순현재가(NPV)
- 투자회수기간
- 내부수익율(IRR)

향후 평가 및 연구대상

- 최소 온실가스 배출 시나리오
- 외부 충격회복성
- 국가 에너지 안보 기여도 평가

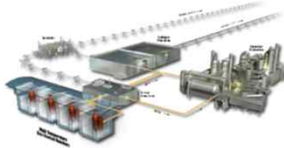
美 에너지부 원자력국(DOE-NE)의 연구 현황

Nuclear Hybrid Energy Systems - Regional Studies: West Texas & Northeastern Arizona

Project# 32133, 29412

Humberto E. Garcia
Jun Chen
Jong S. Kim
Michael G. McKellar
Wesley R. Deason
Richard B. Vilim
Shannon M. Bragg-Sitton
Richard D. Boardman

April 2015



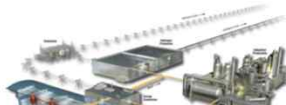
INL/EXT-16-38165

Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems: 2016 Technology Development Program Plan

Idaho National Laboratory
Shannon M. Bragg-Sitton, Richard Boardman,
Cristian Rabiti, Jong Suk Kim,
Michael McKellar, Piyush Sabharwall, Jun Chen

Oak Ridge National Laboratory
M. Sacit Cetiner, T. Jay Harrison, A. Lou Qualls

March 2016



2016년 까지의 현황

- 텍사스, 애리조나 대상, 통합 하이브리드 시스템 다이나믹 분석 수행
- 하이브리드 에너지 시스템 모델링, 시뮬레이션 및 갭분석 연구 수행
- '탄소 제로' 전력망을 위해 다뤄져야할 주요 현안 및 기술적 요구사항 연구 수행

현재 수행중인 연구

- 하이브리드 시스템 프로젝트 전개하기 위한 여러 경로 도출 및 평가
- 사업 시행/중단을 위한 타당성 평가
- 민간산업부문의 투자를 이끌기 위한 기술성능 및 경제성 분석
- 하위시스템 검증을 위한 테스트베드 인프라 구축 시작

하이브리드 시스템 입지선정 및 에너지 자원의 통합



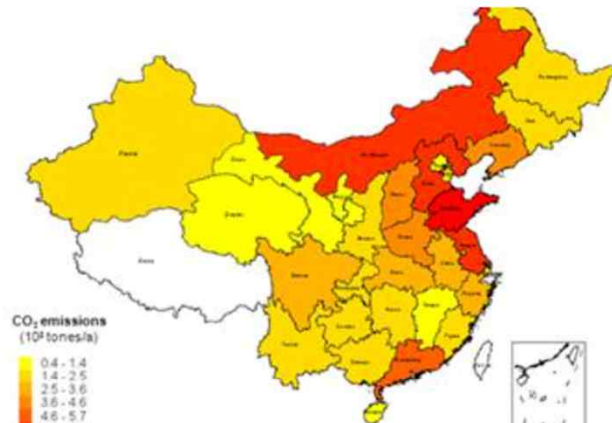
- GIS 기반 대형 혹은 소형 원전에 적합한 후보지를 선정 (송전선, 인구밀도, 지역 단층활성도, 지하수, 진동 및 파이프라인 같은 외부 위협요소와의 근접성 등)
- 미국 국토 면적의 약 13%만이 대형 원전부지로 적합한 반면, 소형원자로로는 약 24%에 이르렀음* *ORNL
→ 소형원자로 채택시 다양한 BM 도출 가능
- 신재생에너지 자원지도를 여기에 Overlap 함으로써 하이브리드 시스템 부지 도출가능 (인근 산업단지의 종류, 특성도 추후 고려 사항에 포함)

중국의 원자력-신재생 연계 검토 현황

→ 풍부한 석탄자원을 바탕으로 한 석탄액화(CTL)

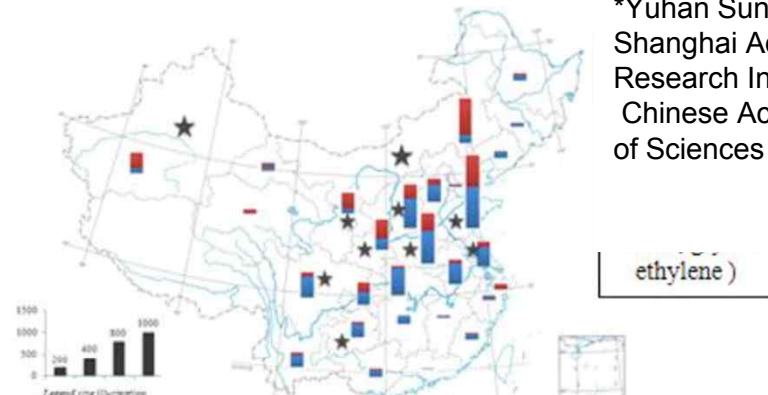
→ 온실가스 미세먼지 대응 전략으로 화석연료 대체 방안 구상 중*

*Yuhan Sun,
Shanghai Advanced
Research Institute,
Chinese Academy
of Sciences



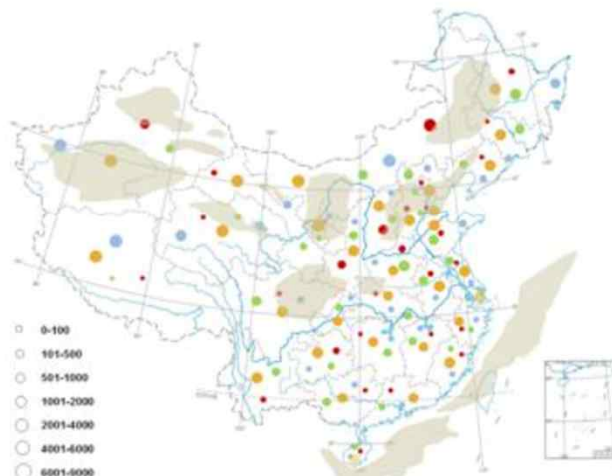
1. 주요 CO₂배출지역(=공업지대) 도출

a. Geographical distribution of China Carbon Emission.



3. 중국의 주요 석탄화학생산 분포 파악

c. Geographical distribution of coal chemical production sites.



2. 중국의 주요 에너지 자원 분포 파악

b. Geographical distribution of China major energy resources.



4. 지리정보적 에너지자원 분포 기반,
구현 가능한 하이브리드 시스템 구성안

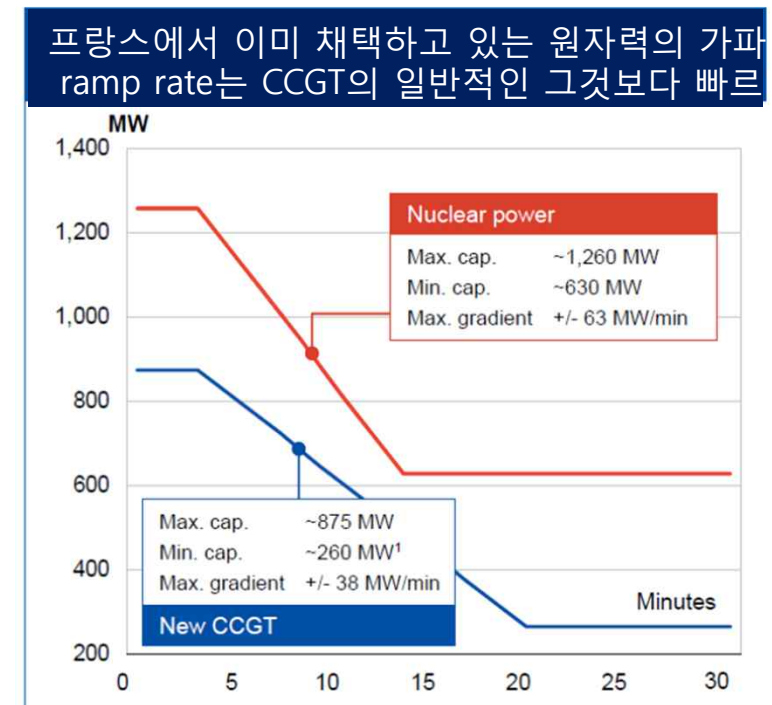
geographical distribution of energy resources.

원자력 신재생에너지 연계의 문제점

- 원자력-신재생 하이브리드 시스템의 대중수용성
 - 원전 안전에 대한 우려
 - 지역 사회에 새롭게 전개되는 시설이 제공하는 '인지된' 긍정/부정 효과에 영향을 받음. (신규 창출된 일자리 수, 원자력-신재생 연계 프로젝트에 의한 지역 GDP 증가)
- Control tower 및 리더십, 규제 문제 (원자력, 신재생, 산업을 유기적으로 엮는 문제이므로 이를 관장하는 정책적 리더십과 규제에 대한 고찰이 필요)
- 전력 수요를 예측, 모니터링해서 Non-electric application으로 빠르게 전환가능하게 만드는 기술적 문제
- SMR을 기저부하(base load)로 이용시 낮아지는 경제성문제
- 신재생에너지 점유율이 하이브리드 시스템이 가져다 주는 그리드 안정성으로 더욱 늘어날 때, 야기되는 변화에 대한 고찰
- 상업적 준비도(readiness)
- 표준화 문제 (제공 가능한 열과 전기 출력이 표준화되어야 기업 입장에서 비즈니스 모델을 설계 시장에 참여할 수 있음)
- 기존 대형원전 문제의 활용/호환에 대한 고민이 동반되어야 함
- 하이브리드 시스템에 기반한 에너지 시스템 간의 더욱 유기적인 연결에 따른 리스크-매니지먼트 (기존에는 개별적인 플랜트, 산업에 대한 이산적인 위험이었지만, 하이브리드 시스템에서는 그리드 시스템 전체로의 리스크로 확산될 수 있는 가능성 존재)
 - 시스템 연계 및 통합으로 개선되는 자원활용의 효율성과 통합으로 인해 새로이 유발되는 위험요소 간의 편익 비교
 - 비즈니스모델; 비용 및 자금조달; 위험/수익 약정(agreement); 시장 및 정책변화의 위험; 설비가동률-자본이용률 문제(capacity factors ,capital utilization)
- **인·허가:** 환경영향평가; 규제가 철폐된/ 규제를 받고 있는 에너지 시장; 원자로, 신재생, 공정 플랜트가 부지를 공유할 때, 통합시스템을 구성할 때 인허가 문제; 원자력-신재생, 원자력-공정플랜트와 같이 향후 발생할 수 있는 하위시스템간의 '인터페이스'에서 다양한 규제기관의 개입

NRHES -주요 기술적 과제

- 발전 프로세스와 관련된 주요 기술 파라미터를 식별하는 것이 중요
- 하위 시스템간에 호환이 되는(타 계통에 무리를 주지 않는) **출력 감발속도(Ramp rate)**; 원자로 뿐만 아니라 이들 열을 사용하는 비전력-생산부문도 외부 전력망 상황에 따라 유연한 운전이 가능 해야함 (안정적 시스템 운영을 위한 향상된 계측&제어)
- 신속히 발전시스템과 열을 사용해 자원을 생산하는 비전력-생산부문 사이에서 열 할당량을 조절하는 **다이나믹 열교환기(heat exchanger)**
- 열에너지 저장장치는 급격한 열수력 시스템에 transition이 가해질 때, 이를 완화 시킬 목적으로 필요
- 전반적 **다이나믹 행태 분석** (계측 및 제어, 최적화)
- 통합된 시스템의 안전문제



William D'haeseleer(KU Leuven Energy Institute), INL Workshop, 2016

국내 지리적+산업적 시너지 가능성

-세계적 수준의 공업도시

연안에 다수 포진, 동시에 엄청난 양의 **화석연료 소비**

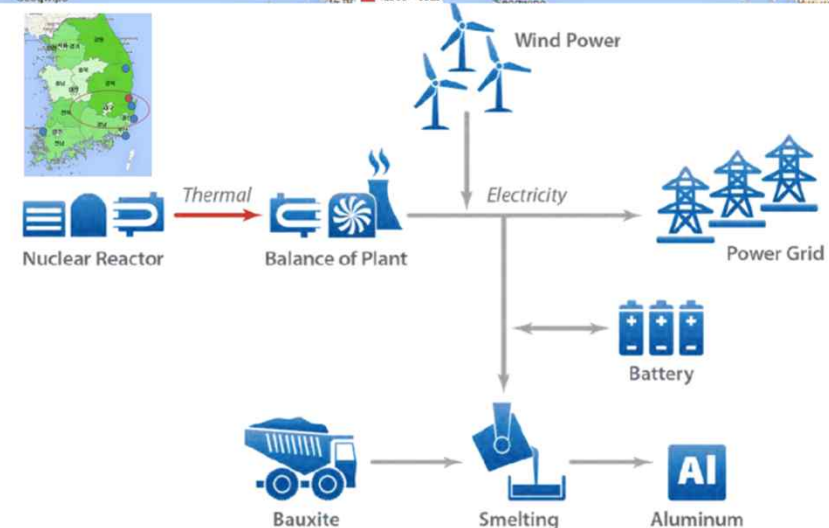
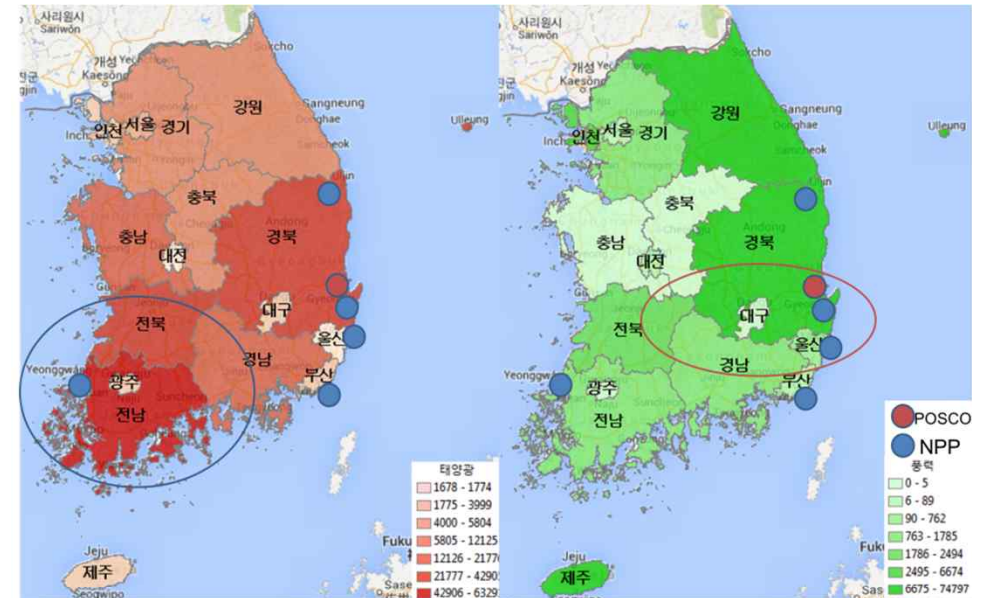
-상당량의 **신재생 에너지 자원***

(*경북,전남→태양광, 강원,제주→ 풍력)

-시스템 간 연계를 더욱 용이하게 만드는 **에너지 관련 인프라***

(*ESS, 송전케이블, 정보통신, 중공업)

-우수 연구 인력 및 선진 R&D 기관



마무리

- 원자력은 미래 친환경 전원믹스에서 중요한 역할을 할 수 있음
 - 후쿠시마 사고에도 불구하고, **여전히 많은 국가들이 원자력 사용**
 - 日 간사이전력 원전 재가동 *17/06/20, 英 2035년까지 총11기, 신규원전계획 *한전입찰참여, 스웨덴 신규 원전 10기 건설 美 수명연장허가 및 신규원전건설
中 58 GWe by 2020-21, up to 150 GWe by 2030
 - 원자력은 제 4세대(gen IV) 기술을 통해 훨씬 '업그레이드' 될 예정
- **기후 변화에 대처하기 위한** 혁신적인 기술을 개발하고 배치하는 것이 시급
- 미래 신재생에너지 R&D는 신재생에너지 보급을 저해하는 기술적, 경제적 장벽을 제거하는 방향으로 진행될 것
- 원자력과 신재생에너지의 연계는 **상보적(complementary)**
 - 미래의 원자력은 **지속적 안전 성능 개선을 통해**, 신재생 에너지와 시너지를 발휘하면서 글로벌 에너지 믹스에 기여할 수 있다
 - 정부의 리더십과 민간산업 부문과의 효과적인 연계가 절실히 필요

기타 제언

- 장기 국가 에너지 믹스에 대한 성찰
- 발전원별 경제성을 따지는 기존 방향에서 기후정책과 산업정책을 아우르는 통합적인 전원별 구성 정책이 필요
- 민간기업 참여가 늘고 있는 신재생에너지 발전과 국가 주도 사업인 원자력발전 사이의 산업체 간의 조율 (주체들 간의 의견조율이 가시화되지 않거나 장애를 겪을 때 이해당사자들의 협력관계가 지속되도록 하는 역할 수행)
- 하이브리드 시스템 특성한 다양한 기술적 가능성 (원자로 타입, 짝지음의 강도, 산업공정의 생산물)이 가능하도록 하기 위해 각 기술적 가능성에 대한 균등한 기회 보장

ROK Economic Development (GDP Changes) vs. Installed Nuclear Generating Capacity

