

탄소중립을 지향하는 에너지믹스

2021. 4

노 동 석

에너지믹스 특별위원회

에너지전환 정책은 '로드맵' 그대로



원전축소로 감소되는 발전
량을 태양광·풍력 등 청정에
너지를 확대해 공급 . . .
에너지전환로드맵(2017)

탈석탄·탈원전, 재생에너지,
그린수소 중심사회로 빠르
게 전환해야 . . .
민주당 탄소중립특위
지방정부추진단(2021.4)



→ 정부·여당의 탈원전 정책 추진은 강고하다.

에너지전환 빠르게 추진 중

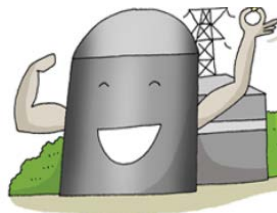
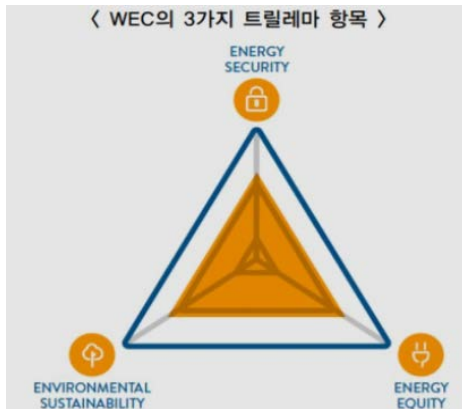
- 탈핵선포(2017.6)
- 에너지전환 로드맵(2017.10)
- 재생에너지 3020 이행 계획(2017.12)
- 제8차 전력수급기본계획(2017.12)
- 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 기본 로드맵 수정(2018.7)
- 수소 경제시대 선언(2019.1)
- 제3차 에너지기본계획(2019.6)
- 한국판 그린뉴딜(2020.7)과 2050 탄소중립 지향 선언(2020.10)
- 제9차 전력수급기본계획(2020.12)
- 2030 국가온실가스감축목표(NDC)와
2050 장기저탄소발전전략(LEDs) 유엔 제출(2020.12)
- * NDC(Nationally Determined Contribution)
- * LEDS(Long-term low greenhouse gas Emission Development Strategy)



에너지전환 정책의 문제점은 에너지원 선택의 제한

■ 에너지원 선택을 정치가 독점

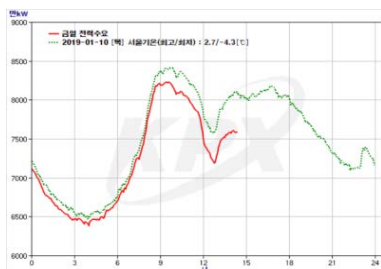
- 에너지믹스 정책수립에 과학적, 전문적 분석이 제한, 원자력, 석탄 등 특정 에너지원이 배제되었음.
- 반면, 장기 에너지계획에 태양광·풍력의 재생에너지와 가스발전만 신규전원에 반영됨으로써 전원들의 특성, 장·단점이 고려되지 못하고 에너지안보를 위협할 수 있는 특정에너지원 편중 현상을 초래



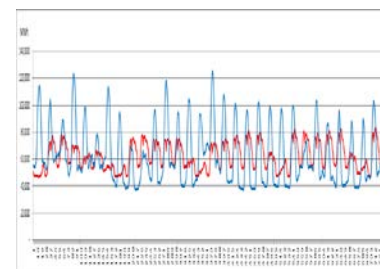
학회 에너지믹스 특별위원회 운영

- 한국원자력학회에서는 다양한 전문가들로 구성된 에너지믹스 특별위원회를 2020년 10월 부터 2021년 7월 까지 운영.
 - 2050년까지의 장기 에너지믹스 시나리오를 구성하고 온실가스배출, 경제적 영향 등을 분석하고 결과를 제시
 - 국내외 에너지 환경과 여건변화를 반영하여 중장기 에너지믹스에 대한 합리적 시나리오 설정과 그 파급영향을 분석, 제시함으로써 에너지정책 수립에 활용될 수 있도록 함.

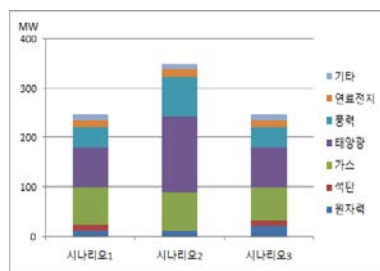
에너지믹스 분석 Flow



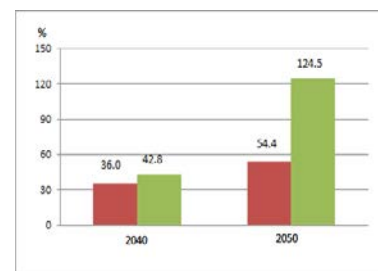
3차 예기본, 9차 전력수급계획 참조
시간대별 전력수요 추정



Case별 시간대별 과잉
발전량 추정



Case별 전원구성,
발전량구성



재생에너지 LCOE,
과잉발전대응비용,
재생에너지 계통통합비용 추정,
발전비용계산
전기요금 영향 계산

에너지믹스 분석 Case

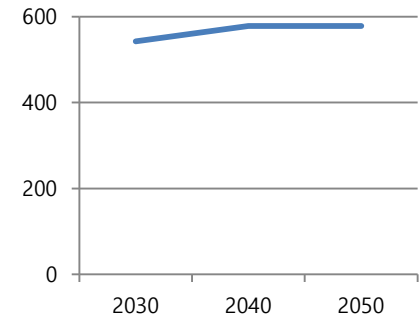
- 2030년 : 9차 전력수급계획, 재생에너지 3020
- 2040년 : 3차 에너지기본계획, 2040년 재생에너지발전비중 35% 가정
- 발전원별 전제
 - 원자력 : 신규고려 vs. 불고려, 계속운전 불고려
 - 석탄 : 수명기간 40년 vs. 2040년까지만 운영
 - 가스 : 피크기여도 예비율 22%가 되도록 신규설비 조정
 - 재생에너지 : 2050년 50% vs. 80%, 수소연료전지 2040년 8GW, 2050년 15GW
- CASE별 개요

		재생에너지 비중			
		2030	2040	2050	
				50%	80%
원전	탈원전	20%	35%	CASE1	CASE2
	신규건설			CASE3 석탄○, 원전6기	-
				CASE4 석탄x, 원전13기	-

전력수요

○ 전력수요 적용치

구 분	2030(9차)	2040	2050
전력수요(TWh)	542.3	577.9	
발전량(TWh)	585.0	627.2	
최대전력(GW)	100.4	107.7	
부하율(%)	66.5	66.5	



○ 전력수요전망 전제

구 분	9차 계획	3차 에기본
	~ '34년	~ '40년
인구	0.0	0.1
경제성장률(%)	2.06	2.0
산업구조	전기,전자 및 정밀기기(2.78%), 서비스업(2.51%) 중심	서비스업(2.29%), 조립금속(1.88%) 중심
기온	기상청 장기 기후변화 시나리오	-

○ 전력수요 실적과 전망 비교 : 과소수요예측 우려

구분	2018	2019	2020
전망치(기본계획)	87.2GW(8차)	88.5GW(8차)	89.1GW(9차)
실적치(공급예비율)	92.5GW (7.7%)	90.3GW (6.7%)	90.6GW (9.5%)

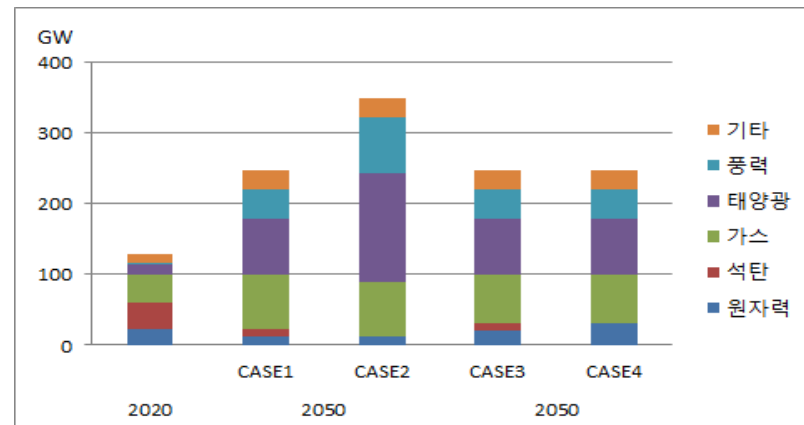
설비구성

- 전력수요는 동일하지만 발전설비는 250GW~350GW 필요
 - 재생에너지의 낮은 피크기여도 때문, 재생비중이 확대될 수록 총용량은 대폭 증가

○ CASE별 2050년 설비구성

구 분		원자력	석탄	가스	양수	신재생				기타	합계
						태양광	풍력	연료 전지	기타 신재생		
정격 설비 용량 (GW,%)	2020	23.3 (18.2)	35.9 (28.1)	41.3 (32.3)	4.7 (3.7)	14.3 (11.2)	1.8 (1.4)	0.6 (0.5)	3.4 (2.7)	2.5 (2.0)	127.9 (100)
	Case1	12.4 (5.0)	10.5 (4.2)	76.8 (31.0)	6.5 (2.6)	79.7 (32.2)	41.5 (16.8)	15 (6.1)	3.8 (1.5)	1.2 (0.5)	247.5 (100)
	Case2	12.4 (3.5)	0	75.8 (21.7)	6.5 (1.9)	154.4 (44.2)	80.3 (23.0)	15 (4.3)	3.8 (1.1)	1.2 (0.3)	349.4 (100)
	Case3	20.8 (8.4)	10.5 (4.2)	68.4 (27.6)	6.5 (2.6)	79.7 (32.2)	41.5 (16.8)	15 (6.1)	3.8 (1.5)	1.2 (0.5)	247.5 (100)
	Case4	30.6 (12.4)	0	69.2 (28.0)	6.5 (2.6)	79.7 (32.2)	41.5 (16.8)	15 (6.1)	3.8 (1.5)	1.2 (0.5)	247.5 (100)

- CASE2에서 태양광, 풍력용량은 150GW, 80GW로 확대되어야 함
- 가스발전 70GW 내외로 확대



발전량 구성

○ 발전량 계산

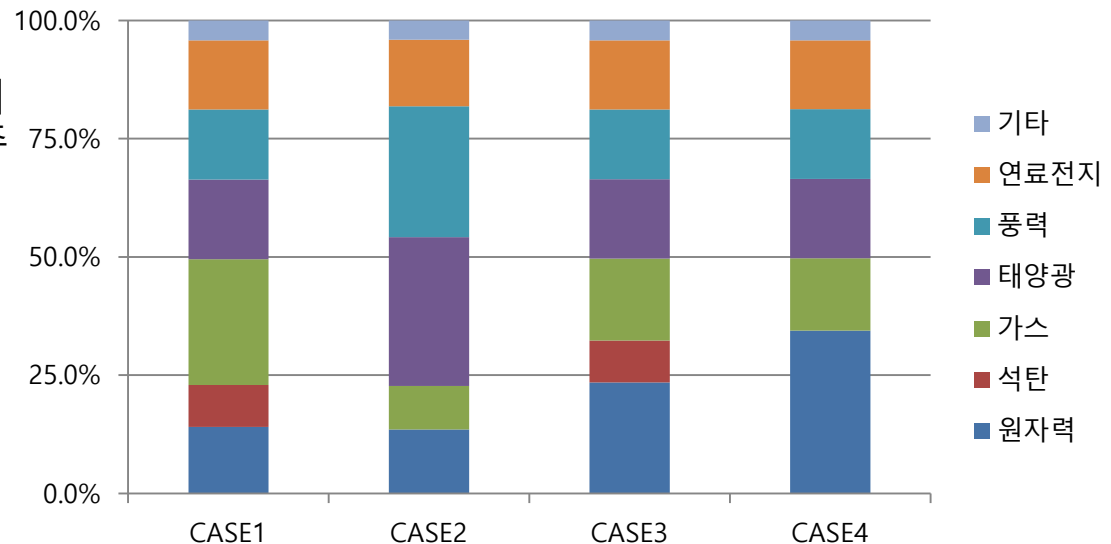
- 신재생 발전 : 9차 전력수급계획의 재생에너지 원별 발전비중과 증가율 감안, CASE별 발전량 배분
- 일반 발전기 : 원전 81.8%, 석탄 61.2% 이용률(9차) 적용, 가스발전은 수급조절 (swing producer) 역할

	원자력	석탄	가스	양수	태양광	풍력	연료전지	기타 신재생	기타	합계
CASE1	14.0	8.9	26.6	0.8	16.8	14.8	14.6	3.2	0.3	100.0
CASE2	13.5	0.0	9.2	0.8	31.4	27.7	14.1	3.0	0.2	100.0
CASE3	23.4	8.9	17.3	0.8	16.8	14.8	14.6	3.1	0.3	100.0
CASE4	34.4	0.0	15.3	0.8	16.8	14.8	14.6	3.1	0.3	100.0

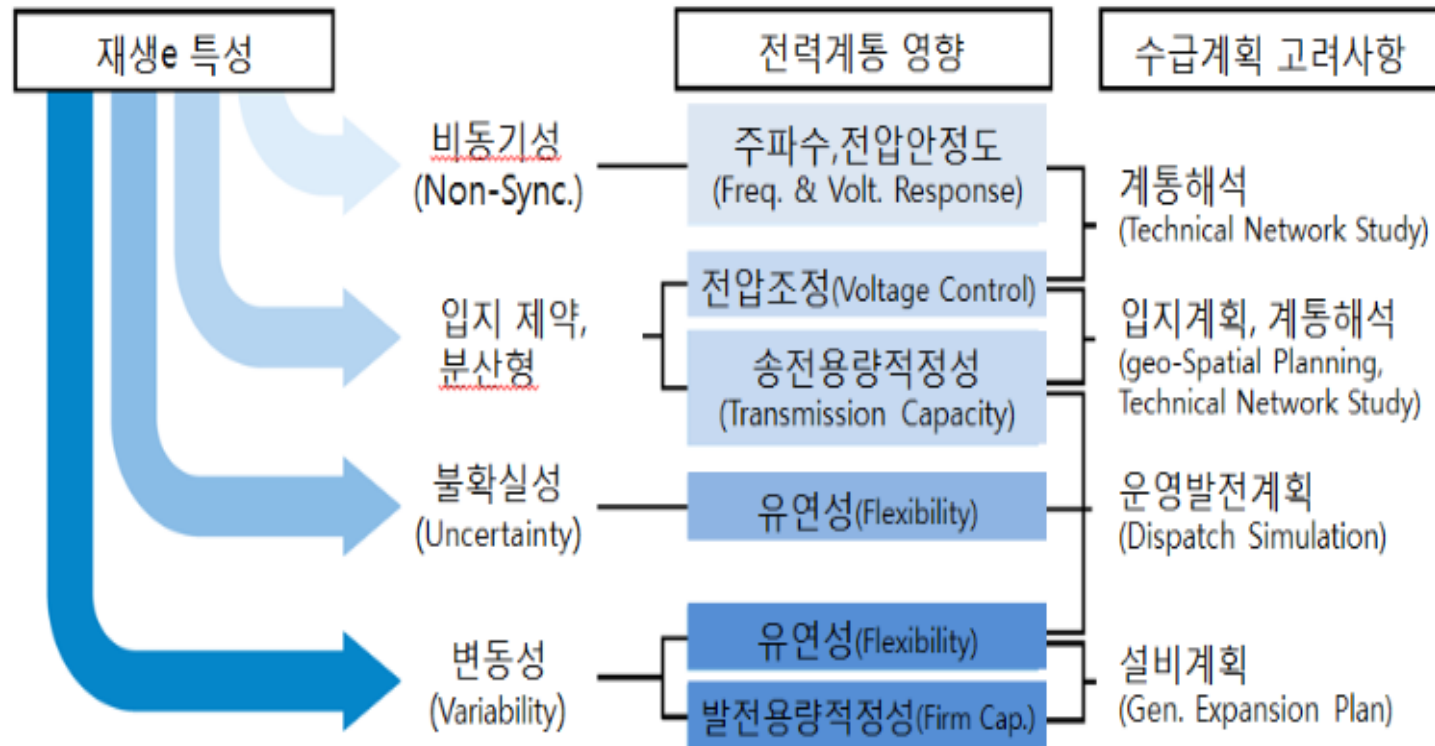
○ 원자력의 발전비중

CASE별로 10~30% 내외

○ 가스발전은 백업역할, 주 파수 조절 등 중요 역할 수행



재생에너지 확대는 전력계통 운영에 있어서 여러 측면의 문제를 발생시킴



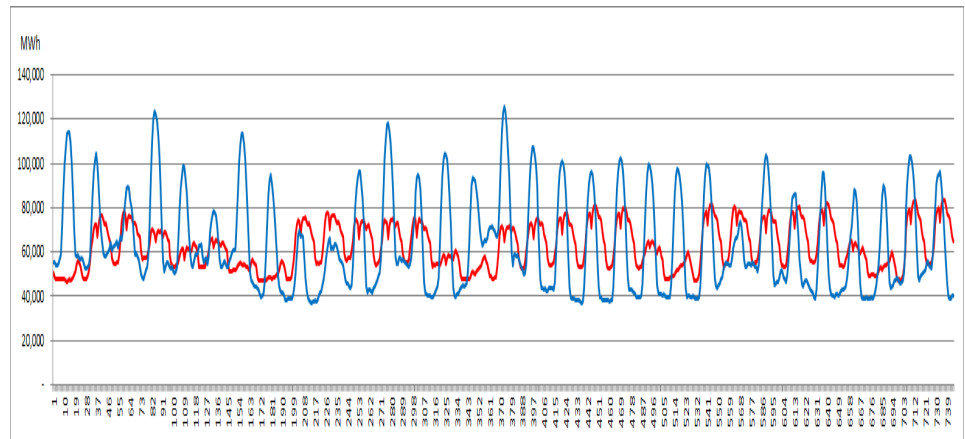
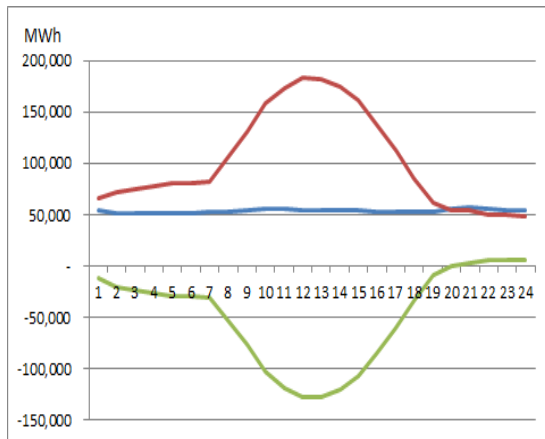
전력거래소, 제9차 전력수급기본계획의 현안 및 주요 변화

과잉발전량 발생

○ 전력수요/공급의 불균형

- 발전설비는 250GW~350GW, 최대전력은 108GW에 불과, 재생발전의 간헐성으로 시간대별 수요와 공급의 불균형 심각
- 과잉발전에도 일반발전기들이 가동을 중지하지 않는 이유는 가동중지 후 재가동시 경우 더 많은 비용이 소요되거나 열공급 우선 열병합발전소 같이 불가피한 상황 때문
- 재생에너지발전이 많은 국가(ex.독일)에서 빈번하게 발생하며, 계통운영자는 수출, ESS 활용, 출력제어(curtailment) 등의 수단을 동원하여 수급을 조절
- 국내에서도 발생(2020년 제주풍력 77회 신한울 3,4호기, 2021년 제주 태양광, 신안 가좌태양광 출력제한 사례 발생)

○ 과잉발전 발생사례(일, 월)



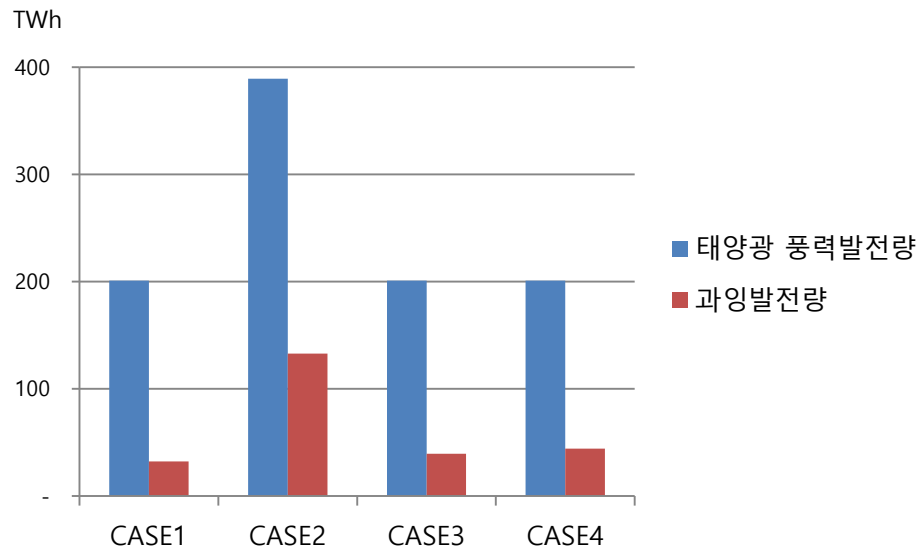
과잉발전량 계산

○ 과잉발전량 추정 전제

- 재생발전량 시간대별 발전패턴 : 2016년 실적자료 활용
- 일반발전기 최소출력 가정 : 원자력 70%, 석탄 50%, 가스 30%

※ 타연구 발표자료와 비교하여 추정값의 적정성 판단

	과잉발전 발생시간수	시간비율	과잉발전량 (GWh)	태양광+풍력 발전량 중 비율
CASE1	1,919	21.9%	32,398	16.1%
CASE2	3,877	44.3%	133,013	34.2%
CASE3	2,366	27.0%	39,567	19.7%
CASE4	2,617	29.9%	44,167	22.0%



CO2 배출량

○ 온실가스 배출 원단위

- 1,400MW급 원전 2기가 석탄발전을 대체하는 경우 연간 1,620만톤, 가스발전을 대체한다면 710만톤 저감

구 분	석탄	가스
배출계수(tC/TJ)	27.404	15.312
발열량(kcal/kg)	5499	13061
열소비율(kcal/kWh)	1963	1540
배출계수(CO2-g/kWh)	825.8	362.0

주 : 1kgC = 44/12 kgCO2

자료: 2019국가온실가스통계산정 검증지침(제9차제정),p.15.

○ CASE별 온실가스 배출량(백만 CO2톤)

- 2019년 2.15억톤(추정치)에서 0.6~0.7억톤으로 감소
- 발전부문 탄소제로 달성 불가.

2030 9차계획	2040		2050			
	Case1,2	Case3,4	Case1	Case2	Case3	Case4
189.6	178	163.8	141.3	55.6	120.1	68.9

비용의 추정 – 재생에너지 발전비용

○ 재생에너지 발전비용(원/kWh)

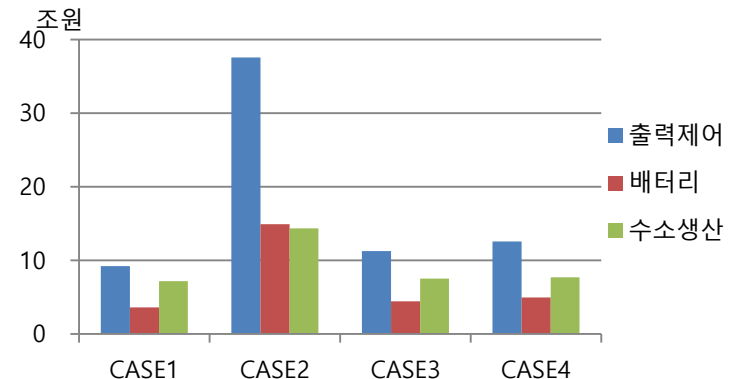
	태양광	육상풍력	해상풍력	연료전지
2020	139.6	138.0	274.5	240.0
2030	72.2	136.1	245.8	225.8
2040	65.8	125.1	218.6	212.5
2050	60.0	115.0	194.4	200.0

- 재생에너지 발전비용(원/kWh)은 장기적으로 하락이 예상되지만
 - 재생에너지원 구성비의 변화, 해상풍력의 상대적으로 빠른 비중 증대로 가중평균 발전비용은 2040년까지 하락하지 않음.
 - 가중평균 발전비용(원/kWh)은 2030년 173원, 2040년 175원, 2050년 165원으로 추정

비용의 추정 - 과잉발전 대응비용

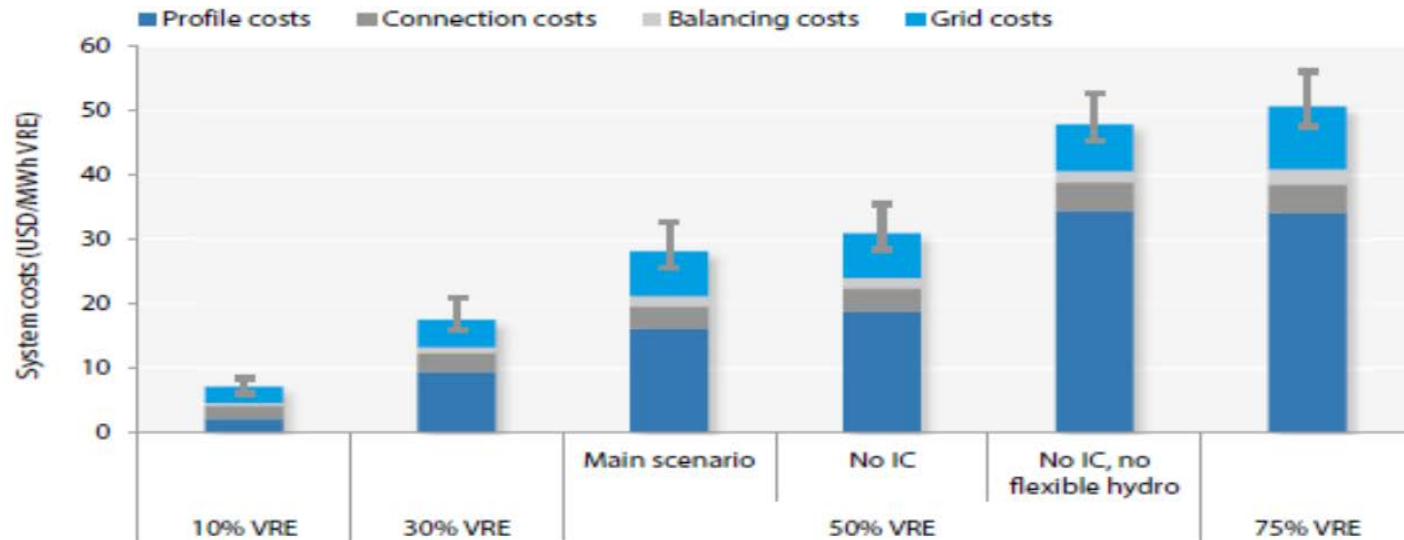
- 과잉발전 대응 방법으로 출력제어, 배터리, 수소생산 고려
 - 출력제어 : 재생에너지 가중평균 발전비용(2050년 165.3원/kWh) 보상, 출력제어로 미공급된 전력의 생산(백업발전) 비용으로서(118.7원/kWh) 고려
 - 배터리 : 리튬이온 배터리의 2025년 전망단가, 충방전 효율 등을 고려하여 배터리 비용으로서 111.9원/kWh 반영
 - 수소생산 : 과잉발전량, 최대과잉량, 수전해설비 투자비 등을 고려하여 CASE별로 108원~222원/kWh 적용
- 과잉발전 대응 비용으로서 총 3.6조~37.5조 소요
 - 출력제어를 보상하지 않을 경우 소요액은 대폭 감소
 - 대체적으로 과잉발전 물량이 많아질 수록 수소생산이, 적어지면 배터리 저장이 유리해 짐.
 - 과잉발전 대응수단별 소요액(2050년, 조원)

	출력제어	배터리	수소생산
CASE1	9.2	3.6	7.2
CASE2	37.5	14.9	14.3
CASE3	11.2	4.4	7.5
CASE4	12.5	4.9	7.7



비용의 추정 – 재생에너지 계통통합비용

- 프로파일 비용 : 신재생발전의 변동성을 이에 전력계통이 유연하게 대응하기 위해 추가로 확보해야 하는 발전설비(백업) 비용
- 밸런싱 비용 : 신재생 발전의 불확실(날씨예보 등) 때문에 발생. 불확실한 재생에너지 발전은 다른 발전기의 대기, 주파수 조정을 위한 운영계획의 변경으로 비용을 발생
- 그리드비용 : 재생에너지의 송배전망 접속비용, 계통보강비를 말함. 그리드비용은 일반발전기도 해당
- OECD/NEA(2019)는 재생에너지 비중증가는 단위 발전량당 통합비용 증가, 국가간 계통연계 여부, 수력비중에 따라 통합비용이 증가할 수 있다는 연구결과 제시
- 계통통합비용으로 2030년 \$7/MWh_{-VRE}, 2040년 \$17, 2050년 \$30 적용



비용의 계산 – 발전비용

○ 일반발전기 : 2019년 정산단가 불변 적용(원/kWh)

	원자력	석탄	가스	양수	평균
정산단가	58.31	86.03	118.66	121.25	89.38

○ 재생에너지 가중평균단가(원/kWh)

기간	재생 발전량 (TWh)	발전비용 (조원)	가중평균 발전비용(원/kWh)
2020	22.8	3.6	157.3
2020-2030	713.5	123.2	172.7
2020-2040	2,222.3	388.8	174.9
2020-2050	4,702.6	777.5	165.3

비용의 계산 – 발전비용의 변화

○ 발전비용(조원)

- 재생비중에 따라 2050년 발전비용은 2019년 대비 연간 50조~100조원 증가

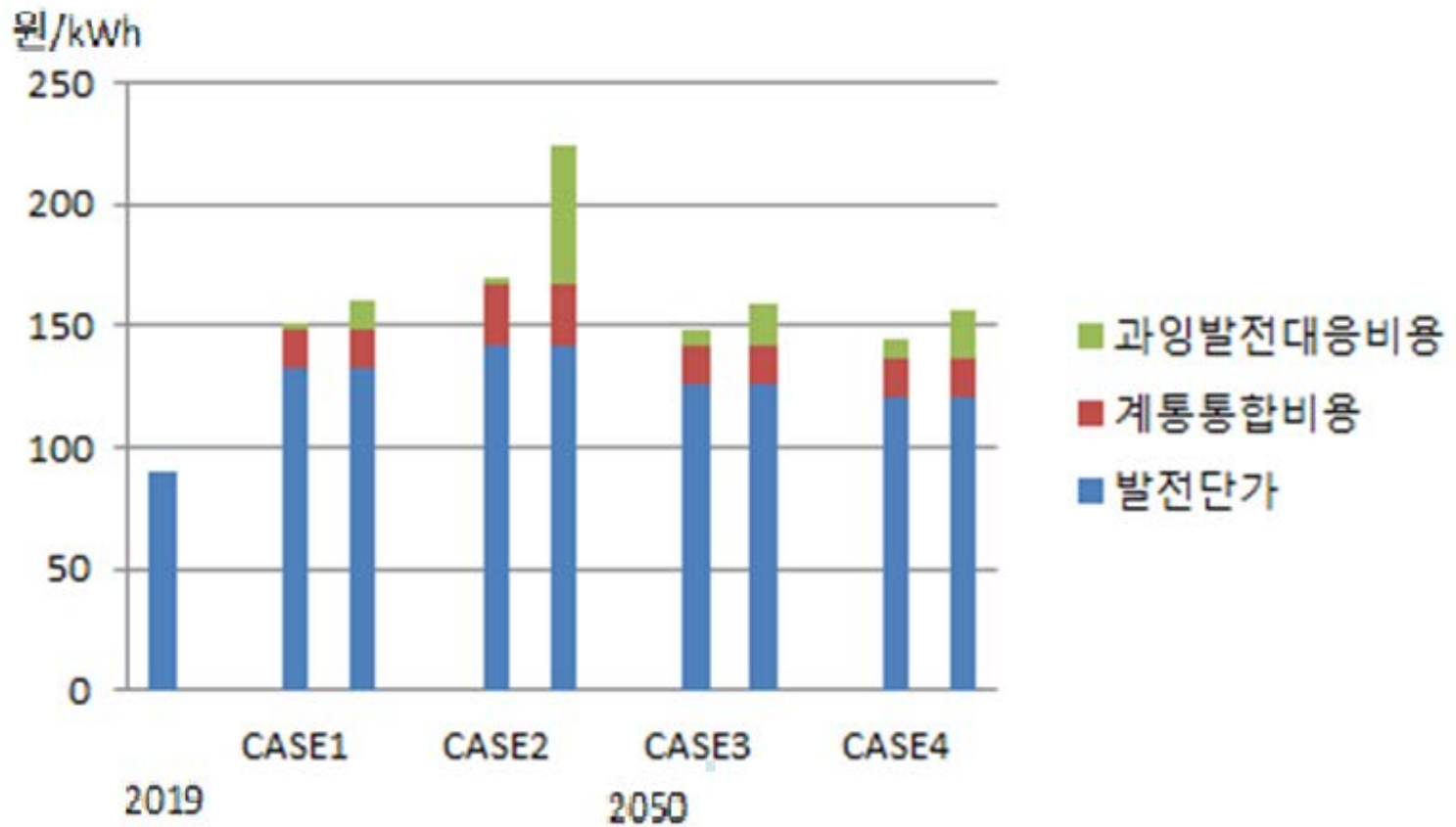
	발전비용	계통통합 비용	과잉발전 대응비용		계	
			최소	최대	최소	최대
2019	50.7	-	-	-	50.7	
CASE1	83.4	10.1	3.6	9.2	97.2	102.8
CASE2	92.9	16.6	14.3	37.5	123.8	147.1
CASE3	80.0	10.1	4.4	11.2	94.6	101.4
CASE4	76.9	10.1	4.9	12.5	91.9	99.5

○ 발전단가(원/kWh)

- 2050년 발전단가는 최대 223원/kWh까지 증가

	발전비용	계통통합 비용	과잉발전비용		계	
			최소	최대	최소	최대
2019	90.1	-	-	-	90.1	
CASE1	131.4	16.0	5.7	14.5	153.1	161.9
CASE2	141.1	25.3	21.8	57.0	188.1	223.3
CASE3	125.7	15.9	7.0	17.7	148.6	159.3
CASE4	120.6	15.9	7.8	19.7	144.2	156.1

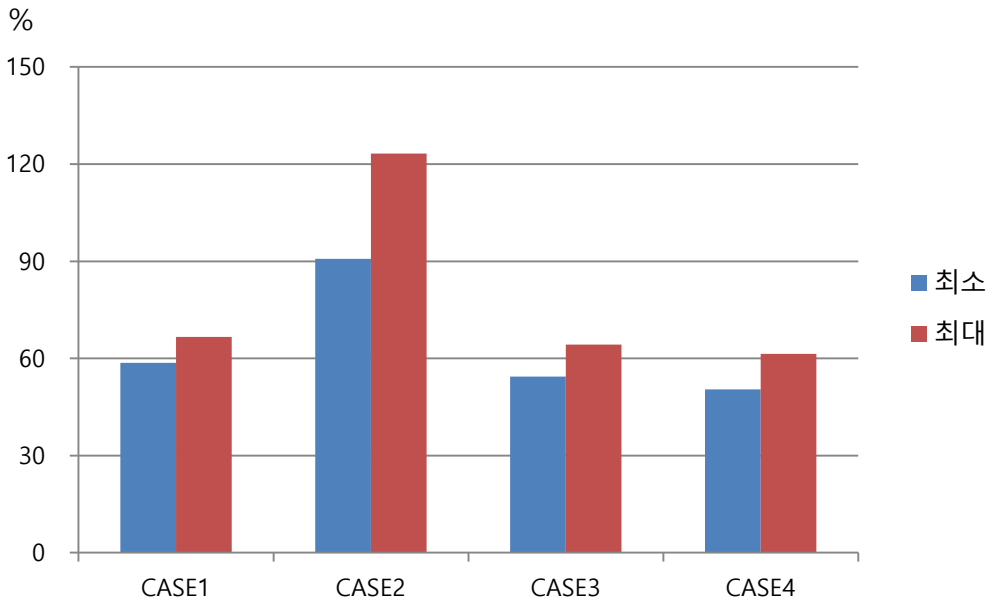
발전단가 변화(2050년) 추정



전기요금 영향(2050년)

○ 전기요금은 50%~123%의 인상요인 발생(2019년 대비 2050년)

	발전단가		한전 비용	계		2019 판매단가	전기요금 인상율(%)	
	최소	최대		최소	최대		최소	최대
CASE1	153.1	161.9	19.3	172.4	181.2	108.7	58.6	66.7
CASE2	188.1	223.3		207.4	242.6		90.8	123.2
CASE3	148.6	159.3		167.9	178.6		54.4	64.3
CASE4	144.2	156.1		163.5	175.4		50.4	61.4

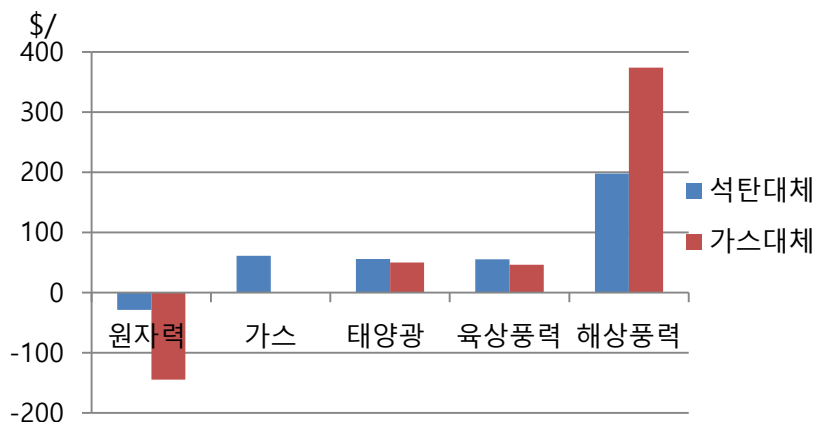


전원별 탄소저감 비용

○ 현재 발전비용 기준 전원별 탄소저감 비용

- EU ETS carbon market price : 40유로/CO2톤(2021.4)
- 한국거래소 탄소배출권 거래가격 : 14,000원/CO2톤(2021.4)

		원자력	석탄	가스	태양광	육상풍력	해상풍력
배출량	g/kWh	-	825.8	362	-	-	-
단가	원/kWh	58.3	86.0	118.7	139.6	138.0	274.5
저감비용 (\$/CO2톤)	석탄대체	-29	-	61	56	55	198
	가스대체	-145	-	-	50	46	374



○ 계통통합비용, 과잉발전대응 비용 포함시 대폭 증가

2050 탄소중립 선언

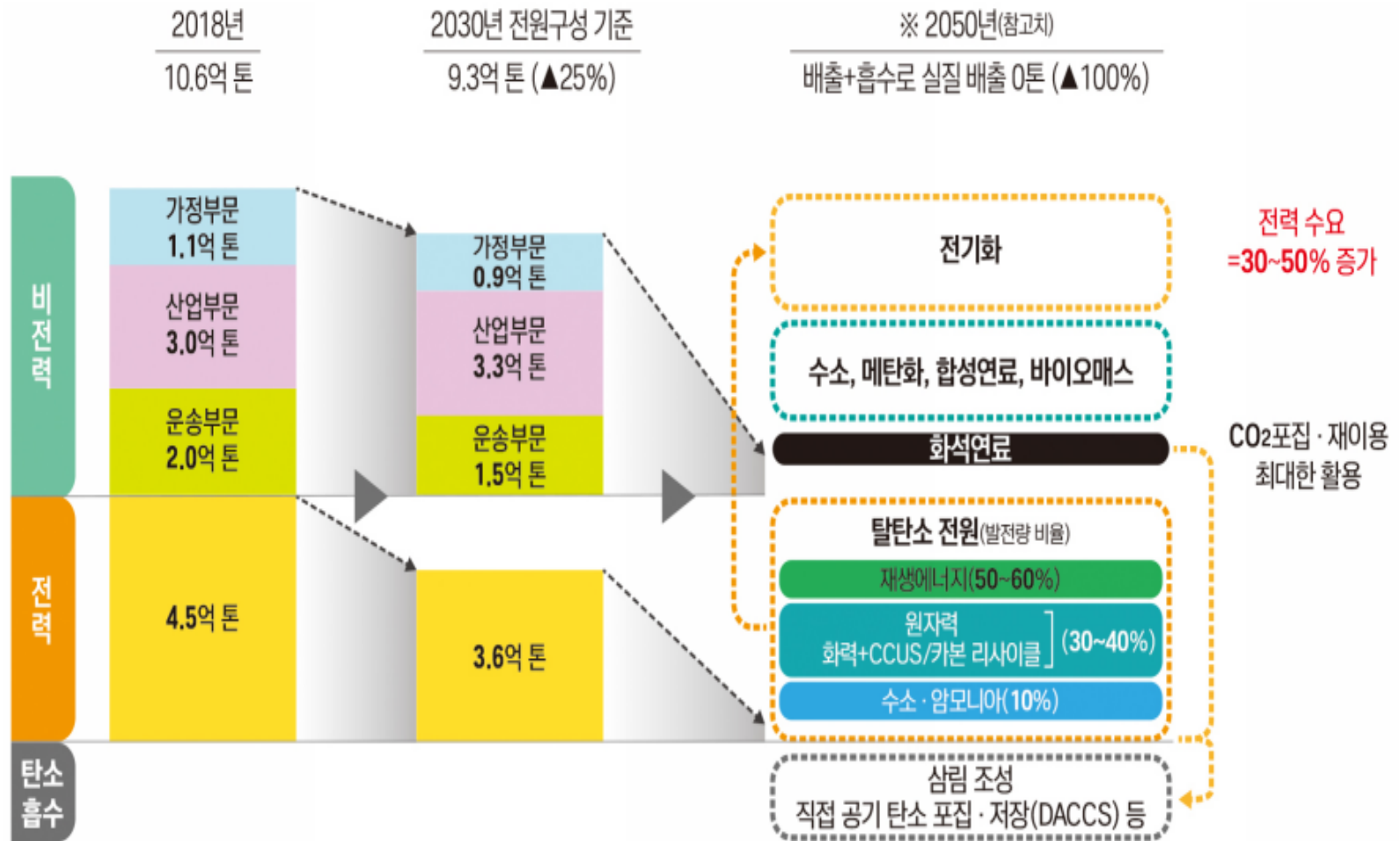
- 세계 각국은 2050 탄소중립을 선언하고 에너지정책을 수립하는 중
대부분 국가들은 선언에 그치고 있으나 구체화 작업 중
- 미 프린스턴 대학 연구
 - 2030년까지 탄소중립을 위해 2.5조달러(2,733조원)의 천문학적 자금 소요
 - 재생에너지 발전비용의 현저한 감소 필요
 - 수천 km의 전력망 건설
 - 가동원전 50%의 80년 계속운전, 250 GW의 신규 원전(1GW 250기 혹은 SMR 3,800기) 건설 필요
 - 전기차 50% 확대, 전기난방 대폭 확대 등 강조
 - 탄소중립이 되려면 수송, 열생산, 산업·건물 · 가정부문 에너지소비의 대부분이 전력화되어야 함
 - 원자력이나 CCS를 활용하면 탈탄소에 따른 비용을 줄일 수 있음

주요국 탄소중립 에너지정책

- 대부분 국가는 활용가능한 자국내 무탄소 에너지자원, 기술력을 최대한 활용하는 정책 선택

	목표년도	주요수단
미국	2050	<ul style="list-style-type: none"> - 차세대 원자력 : 소형 모듈형 원자로(SMR) - 재생에너지 → 수소생산 - 2035년까지 발전부문 넷제로 시현
영국	2050	<ul style="list-style-type: none"> - 해상풍력 - 원자력 : 대형원전, 소형 모듈형 원자로 Advanced Modular Reactor → 수소생산
독일	2050	<ul style="list-style-type: none"> - 재생에너지 → 수소생산 - 천연가스의 한시적 이용, 2022년 탈원전, 2038년 탈석탄
프랑스	2050	<ul style="list-style-type: none"> - 2022년 탈석탄, 2030년 재생에너지 비중 50% - 원전 발전비중 75% → 2035년 50%
일본	2050	<ul style="list-style-type: none"> - 재생에너지, 원자력
중국	2060	<ul style="list-style-type: none"> - 2025년 대비 2060년 원자력 4.8배, 풍력 4.5배, 태양광 6.9배
한국	2050	<ul style="list-style-type: none"> - 태양광, 풍력, 수소경제 등

(일본) 탄소중립 달성을 위한 배출량 전망(경산성 등)



• 수치는 에너지에서 발생한 CO₂ 임.

우리의 경우

- 최근 한 기관이 제시한 2050 탄소제로 전략은 최종에너지 소비를 현재의 50%로 줄이고 그 중 80%를 재생에너지로 공급한다는 구상
- 최종에너지 중 전력비중이 약 20%이므로 위의 전략이라면 전력소비량은 최소 두배로, 만일 최종에너지 소비량이 현재 수준으로 유지된다면 전력수요가 4배로 증가해야 함.
- 전력수요 2배, 재생비율 80%을 본 검토에 단순히 적용하면 태양광 300GW, 풍력 160GW의 용량을 필요로 함
- 계산상으로는 가능하겠지만 계통운영 측면의 어려움과 막대한 비용이 소요된다는 점에서 현실성은 극히 낮음.
- 다른 나라들의 경우 자국내 자원과 가용한 기술을 최대한 활용하는 전략을 수립하고 있음.
- 다른 국가들에 비해 재생에너지 자원도 좋은 상황이 아닌 우리의 경우 원전 기술력뿐만 아니라 최고 수준의 공급망도 가지고 있음. 서방국가들은 우리의 공급망을 활용하고 있음(ex. 두중)
- 원자력을 배제하는 우리의 탄소중립 전략은 무모한 것임.

(참고) IEA의 장기에너지 전망(WEO 2020)

- 선언정책 시나리오(STEPS, stated policies scenario) : 파리기후변화협약(2015)에서 약속한 NDC안에 따른 에너지수요
- 지속가능개발 시나리오(SDS, sustainable development scenario) : 지구적 협력관계 속에서 지구온도 상승을 2°C 이내로 억제
→ SDS는 NZE(탄소중립)을 지향하는 경로
- 세계에너지 수요전망 (WEO 2020)

	실적	STEPS		SDS	
	2019	2030	2040	2030	2040
TPD(MToe) CAAGR(%)	14,406	15,755	17,085 (0.8)	13,378	13,020 (-0.5)
전력(TWh) CAAGR(%)	26,942	32,818	40,094 (1.9)	31,465	38,774 (1.7)
원자력(TWh) CAAGR(%)	2,789	3,081	3,439 (1.0)	3,435	4,320 (2.1)

TPD(total primary demand), CAAGR(compounded average annual growth rate)

- IEA는 원자력을 미래에도 중요한 에너지 공급 대안으로 인식함.

결론 – 확인된 내용과 제안의 말

- 재생에너지에 의존하는 전력공급시스템은 이론적, 계산적으로는 가능할 수 있으나, 상시적인 전력수급 불안과 막대한 비용을 유발할 것임
 - 태양광, 풍력과 같은 간헐성 전원의 확대는 낮은 피크기여도 로 인해 총설비용량을 대폭 증가시킴.
 - 간헐성 전원은 과잉발전을 유발하며 이를 대응하기 위한 비용을 수반함.
 - 태양광, 풍력은 분산형 전원으로 인식되고 있음에도 불구하고 전력계통의 고립, 수력자원의 부족한 우리 전력계통에서 높은 통합비용을 유발하게 됨.
- 에너지전환 정책이 지속될 경우 2050년 발전비용은 매년 대략100조원이 증가하고, 전기요금은 100% 이상 인상되어야 함.
- 그럼에도 불구하고 발전부문의 탄소제로는 달성되지 못함.
- 2050 탄소제로 전략은 비전력 에너지의 전력화를 전제하며 전력수요는 최소 2배 이상으로 증가할 것임.
- 증가되는 전력을 전적으로 재생에너지에 의존하여 공급하는 것은 불가능할 것임.
- 탄소제로를 위해서는 가용한 자원과 기술력을 최대한 활용해야 함.
- 에너지믹스 정책의 전면적 재논의가 필요함.

감사합니다.

010-8938-2278
dash3742@gmail.com