

---

# **에너지믹스 특위 보고서(요약)**

---

**2021. 7**

**원자력학회 에너지믹스 특별위원회  
서울대학교 원자력정책센터**

# 에너지믹스 분석 결과 요약

## 1. 에너지믹스 분석 목적

- 탈원전, 재생에너지 확대 중심의 에너지전환 정책으로 인한 문제점 점검
- 에너지믹스 시나리오별 온실가스 배출, 전력시스템 영향, 비용 등을 분석하여 결과 제시
- 차기정부 에너지정책 수립을 위한 참고 자료로 활용

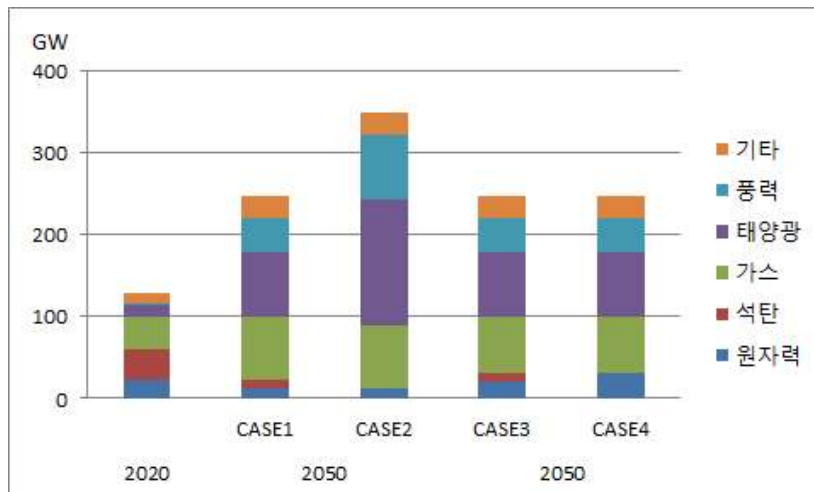
## 2. 세계 에너지 정책 동향

- 기후변화 대응 필요성 증대
  - 파리협정 체결('15), 신기후체제 출범('21)
  - '50 장기저탄소발전전략(LEDs)으로 국제적인 탄소중립 선언 합류
  - 장기적인 전력수요 급증 예상(탄소중립 선언국 증가)
- '50년 탄소중립을 위해 에너지 믹스 구성
  - 미국, 유럽연합, 중국, 일본 등 대부분의 국가들이 원자력을 주요한 무탄소 전원으로 활용
  - IEA 탄소중립 보고서('21.5월)는 탄소중립의 비용효과적 달성을 위해 원전을 현재의 2배 이상 증가시키는 것으로 분석
  - \* 기존 원전의 효율적 활용(계속운전)이 중요하고, 신규 원전의 건설과 미래 원자로 기술개발을 주요 과제로 언급

## 3. 미래에너지 믹스 시나리오와 결과

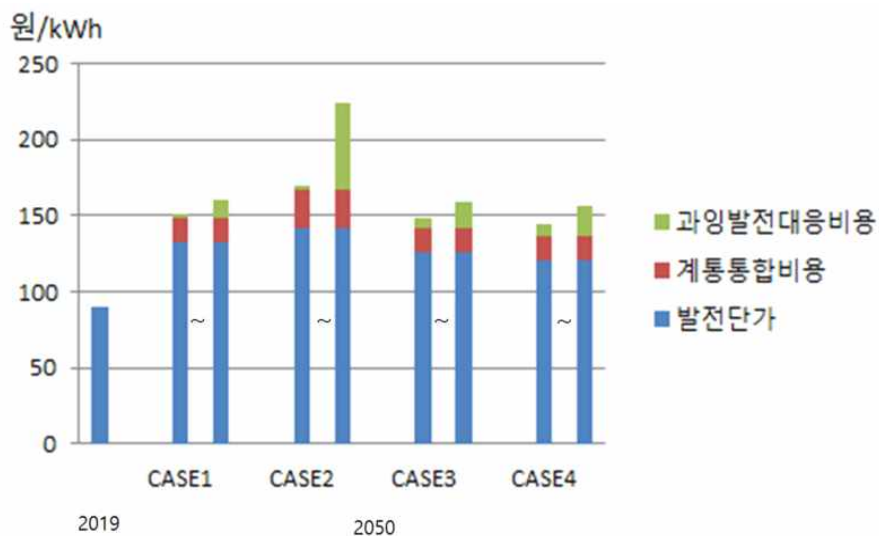
- '50년까지 탈원전(에너지전환)이 지속되는 경우와 신규 원전 건설 case로 구분
  - 2030년 : 9차 전력수급계획 반영(재생에너지 3020 유지)
  - 2040년 : 3차 에기본의 에너지수요와 믹스('40년 재생에너지 비중 35%)
  - 2050년 에너지믹스 구성
    - Case1: 재생 50%, 석탄 40년간 운영, 탈원전 정책
    - Case2: 재생 80%, 석탄 '40년까지 운영, 탈원전 정책
    - Case3: 재생 50%, 석탄 40년간 운영, 신규원전 6기 건설
    - Case4: 재생 50%, 석탄 '40년까지 운영, 신규원전 13기 건설

○ Case별 '50년 정격 설비용량 구성



○ Case별 발전비용 분석 결과 현재 대비 44~123% 증가 예상

- 발전단가(2050)



○ 온실가스 배출량

구 분	2030 9차계획	2040		2050			
		Case1.2	Case3,4	Case1	Case2	Case3	Case4
백만 CO2톤	189.6	178.0	163.8	141.3	55.6	120.1	68.9

- '40년의 석탄용량을 원전으로 대체하는 경우(case4)는 Case1(탈원전 지속) 대비 72백만톤 감축 가능
- 재생에너지를 80%로 증가시켜도(case2) 발전부문의 탄소중립은 불가능하며 CO2 배출저감 비용만 과다하게 발생(\$262~615/CO2톤)

#### 4. 결론(미래 에너지믹스 검토 방향)

- 전력시스템비용과 탄소배출량 측면에서 원자력 확대가 재생에너지 확대에 비해 합리적임
  - 재생에너지 비중을 고정(50% 또는 80%)한 경우 원자력 비중 증가가 탄소배출과 발전비용 감소 효과 발생
  - IEA는 '50 탄소중립을 위해 원전 용량과 발전량을 증가시켜야 하는 것으로 평가
  - 원전의 부하추종운전, iSMR 개발 등 기술발전 고려 시 탄소배출 저감비용 추가 감소 가능
- '50년 재생에너지 비중을 80%로 확대해도 가스발전의 백업 필요성으로 탄소중립 불가
  - 탄소중립을 위해서는 '30년 이후 가스발전의 대폭 축소 필요(IEA '21)
- 재생에너지 확대는 막대한 비용증가를 수반하여 전기요금의 대폭적인 인상 초래
  - 간헐성 대응비용(과잉발전 대응을 위한 대체발전, ESS, 수소생산 등) 급증, 수급 불안 위험 상시 존재
  - '50년 전기소비자는 현재('19년 97.9만원)보다 인구 1인당 약 85~200만원의 추가 부담 발생, 재생비중 80%(case2)에서 요금 인상률 91~123% 추정
    - \* 주택용 전액 부과시(ex. 독일) 현재 대비 7~9배 인상 필요
- 탄소중립의 경우 전력소비가 현재 분석전제의 2~3배로 증가하므로 경제적 효과(전기요금 인상)은 더욱 증가 예상
  - 원전이 배제된 탄소중립 에너지믹스는 성립 불가 예상
    - \* 추후 상세한 탄소중립 시나리오 분석이 필요함

# 요약 보고서

## 1. 에너지믹스 분석 목적

- 재생에너지, 가스 중심 에너지전환 정책의 문제점, 탄소중립을 지향하는 에너지믹스 정책 점검
- 예상되는 문제점을 사전에 파악하고 대비할 수 있는 에너지믹스 대안을 분석하여 차기정부의 에너지정책 수립시 참고자료로 활용

## 2. 에너지전환정책 평가

### □ 에너지전환정책 개요

- 재생에너지 확대, 탈원전 · 탈석탄 추진
  - 에너지전환로드맵, 재생에너지 3020, 제8 · 9차 전력수급기본계획, 제3차 에너지기본계획, 한국판 그린뉴딜, 탄소중립선언 등
- 수요관리 강화 및 에너지소비 효율 개선
- 재생에너지, 수소산업 등 에너지신산업 육성

### □ 에너지전환 정책의 문제점

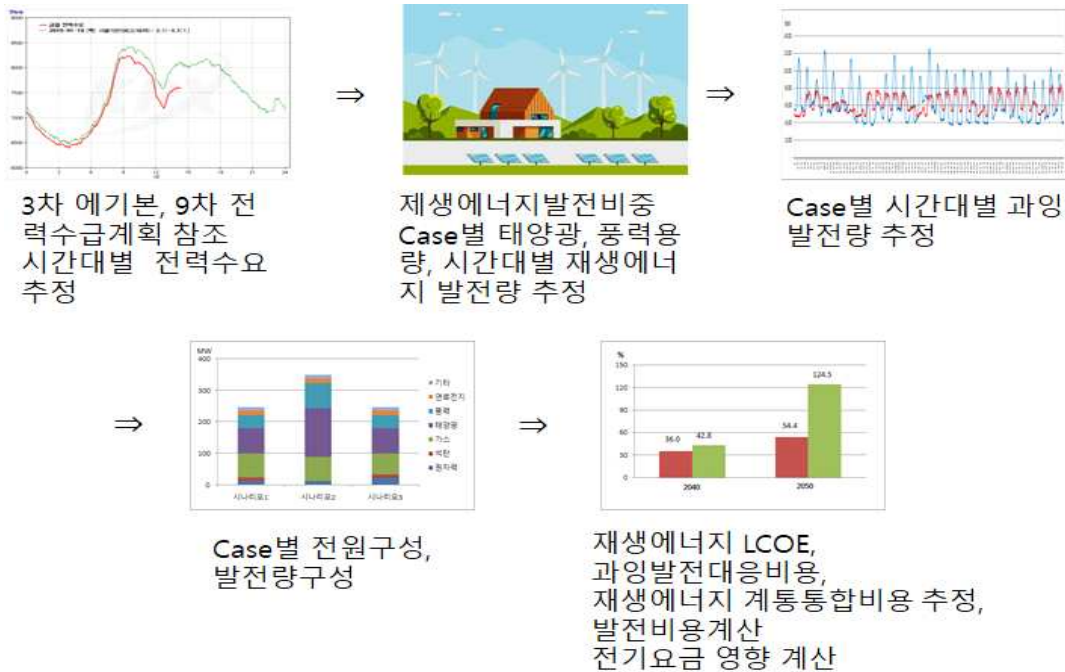
- 탈원전 정책에 대한 부정평가 증가
  - \* 조사기관 : 한국리서치(1차), 한국갤럽(2차), 한국리서치(3차), 엠브레인(4차)
- 에너지전환 정책의 법적 근거, 절차적 정당성 미흡
  - 월성1호기 조기폐쇄 결정, 신한울 3,4호기 건설 중단 이의 제기 등
- 에너지수급의 안정성 · 에너지안보 위험 증가, 전기요금 인상요인 누적, 원전산업 공급망 붕괴 우려 등
  - 원전 감축에 따라 발생한 비용이 전기소비자에 전가(전력산업기반기금)
- 에너지정책에 대한 정치 개입 강화
  - 특정 에너지원에 대한 고려 배제로 에너지 정책 수립에 과학 · 전문적 분석 제한
  - 에너지 믹스의 편중 현상 가속화

### 3. 에너지정책 여건변화

- 코로나19와 post 코로나
  - '20년 전력수요 2.2% 감소, '23~'25년경 수요 증가세 회복 예상(IEA)
- 기후변화 대응 필요성 증대
  - 파리협정 체결('15), 신기후체제 출범('21)
  - 2050 장기저탄소발전전략(LEDs)으로 국제적인 탄소중립 선언 합류
  - 장기적으로 전력수요 급증 예상(탄소중립 선언국 증가)
- 미세먼지 대책과 탄소저감을 위한 석탄발전 조기 감축
  - '45년 또는 그 이전까지 0(Zero)으로 감축(국가기후환경회의)
  - IEA '30년까지 석탄발전 퇴출 권고(선진국)

### 4. 미래 에너지믹스 분석

#### □ 에너지믹스 분석 Flow



#### □ 분석 CASE 개요

- 특징
  - 분석 대상기간 2050년으로 연장
  - 탈원전 지속과 원전산업 유지를 case에 반영하고 경제, 환경, 계통운영 등에 미치는 영향 분석

- 재생에너지 간헐성에 따른 과잉발전량과 대응비용, 재생에너지 계통 통합 비용 고려
- 탄소중립 case는 분석 유보(향후 검토과제)

#### ○ Case 개요

- 2030년 : 9차 전력수급계획, 재생에너지 3020
- 2040년 : 3차 예기본 에너지수요와 믹스('40년 재생에너지 발전비중 35%)
- 2050년 에너지믹스 구성
  - Case1: 재생 비중 50%, 석탄 40년간 운영('50년 10.5GW), 탈원전 정책
  - Case2: 재생 비중 80%, 석탄 '40년까지 운영, 탈원전 정책
  - Case3: 재생 비중 50%, 석탄 40년간 운영('50년 10.5GW), 신규원전 6기 건설
  - Case4: 재생 비중 50%, 석탄 '40년까지 운영, 석탄 용량(10.5GW)는 원전 7기 (1400MW x 7) 건설로 대응, 총 13기(6+7) 신규 건설
- \* 가스 : 전력수급계획의 석탄 대체건설 반영, 예비율 22% 확보되도록 신규 설비 건설

#### ○ Case별 개요

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

#### □ 전력수요

- 9차 전력수급계획과 3차 예기본의 전력수요 적용, '50년 전력수요는 '40년과 동일 가정

	2030 (9차 전력수급계획)	2050 (3차 예기본)
전력수요(TWh)	542.3	577.9
발전량(TWh)	585.0	627.2
최대전력(GW)	100.4	107.7
부하율(%)	66.5	66.5

## □ 분석 결과

### ○ Case별 '50년 정격설비용량과 비중

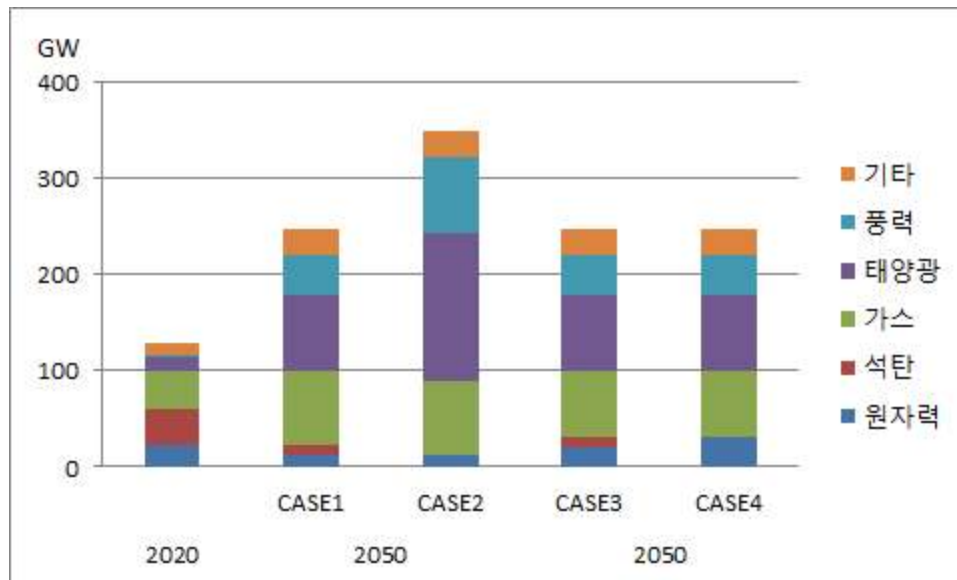
단위: GW

구 분		원자력	석탄	가스	양수	신재생				기타	합계
						태양광	풍력	연료 전지	기타 신재생		
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)
2050 정격 설비 용량 (비중,%)	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)

- 예비율 22% 기준 실효 설비용량은 131GW임(최대전력 108GW)
- 재생에너지 비율이 높아지면 정격용량은 크게 증가(낮은 피크기여도)
  - \* '50년 용량 : 재생에너지 비율 30%p. 확대시 전체용량 약 100GW 더 필요(재생에너지 비율 50% 248GW, 80% 349GW).
- Case4 원전용량은 30.6GW로서 Case1,2(탈원전)에 비해 18GW 많고, 7차 전력수급계획의 2030년 38.3GW에 비해 8GW 적음
  - \* 기존원전의 계속운전 여부에 따라 신규 건설기수 변동, 계속운전 불고려시 신고리 6호기 준공 예정년도 '24년 이후 매2년 신규원전 1기 건설 전제



○ 설비구성(2050)



○ Case별 '50년 발전량(TWh) 및 비중(%)

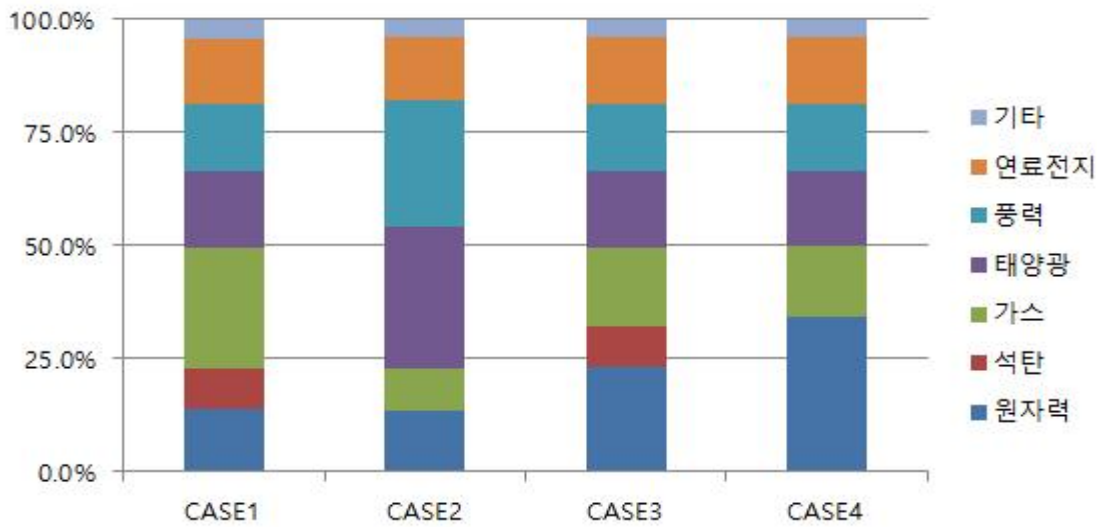
		원자력	석탄	가스	양수	신재생				기타	합계
						태양광	풍력	연료 전지	기타 신재생		
2020		160.2 (29.0)	196.5 (35.6)	146.0 (26.4)	3.2 (0.6)	16.6 (3.0)	3.1 (0.6)	4.0 (0.7)	14.2 (2.6)	8.4 (1.5)	552.2
2050	Case1	89.0 (14.0)	56.4 (8.9)	168.9 (26.6)	5.1 (0.8)	106.8 (16.8)	94.2 (14.8)	92.8 (14.6)	20.0 (3.2)	1.6 (0.3)	634.8
	Case2	89.0 (13.5)	0.0	60.8 (9.2)	5.1 (0.8)	206.9 (31.4)	182.2 (27.7)	92.8 (14.1)	20.0 (3.0)	1.6 (0.2)	658.4
	Case3	149.2 (23.4)	56.4 (8.9)	110.3 (17.3)	5.1 (0.8)	106.8 (16.8)	94.2 (14.8)	92.8 (14.6)	20.0 (3.1)	1.6 (0.3)	636.5
	Case4	219.5 (34.4)	0.0	97.5 (15.3)	5.1 (0.8)	106.8 (16.8)	94.2 (14.8)	92.8 (14.6)	20.0 (3.1)	1.6 (0.3)	637.6

- 재생에너지 비중 전제와 9차 전력수급계획의 원자력과 석탄 평균이용률을 적용하여 발전량 믹스 추정

\* 이용률 원전 81.8%, 석탄 61.2% 적용, 가스발전 수급조절 역할(swing producer)

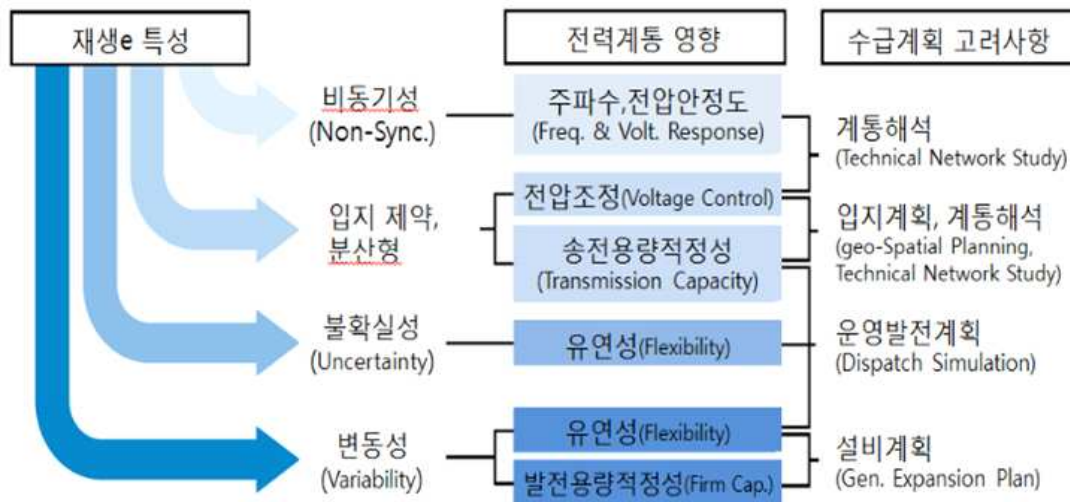
- 가스발전은 재생에너지 간헐성을 보완하는 수급조절, 주파수 조정 등 백업 역할 수행

○ 발전량 구성(2050)



○ 과잉 발전량 추정

- 재생에너지 확대는 전력계통 운영에 다양한 문제를 유발



자료: 전력거래소, 전력수급기본계획 현안 및 주요변화

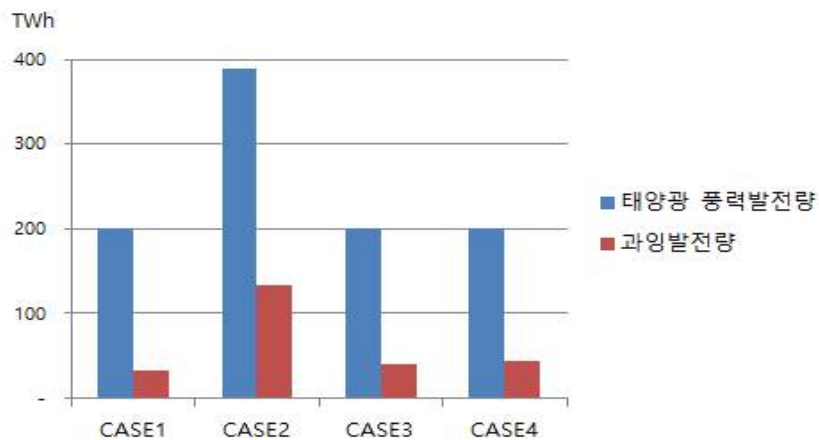
- 재생에너지 비중 증대는 전력수요와 공급의 불일치 시간을 확대시켜 과잉발전을 유발, 재생발전 비중 증가시 과잉발전량 대폭 증가
  - \* 과잉발전량은 출력제어, 배터리 저장, 수소생산 등으로 보완 가정
- 재생에너지 비중 50%시 과잉발전량은 32.4TWh로 재생(태양광+풍력) 발전량의 16.1% 발생, 비중이 80%로 증가하면 133TWh, 34.0%로 급증

○ 과잉발전량 추정 결과(2050)

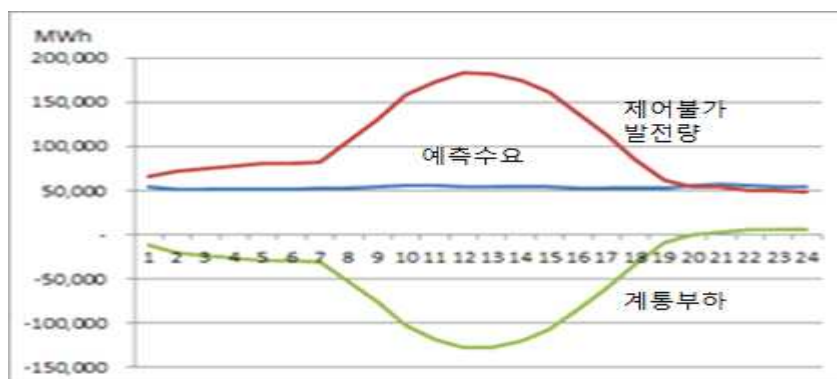
구 분	발생시간수 (시간)	시간비율(%)	과잉발전량 (GWh)	재생(태양광, 풍력) 발전량 중 비율(%)
Case1	1,919	21.9	32,398	16.1
Case2	3,877	44.3	133,014	34.2
Case3	2,366	27.0	39,567	19.7
Case4	2,617	29.9	44,167	22.0

- 재생비율이 높을 경우(80%) 전력수요가 낮은 봄철, 주말에는 하루 중 대부분 시간(19시간) 동안 과잉전력 발생 가능

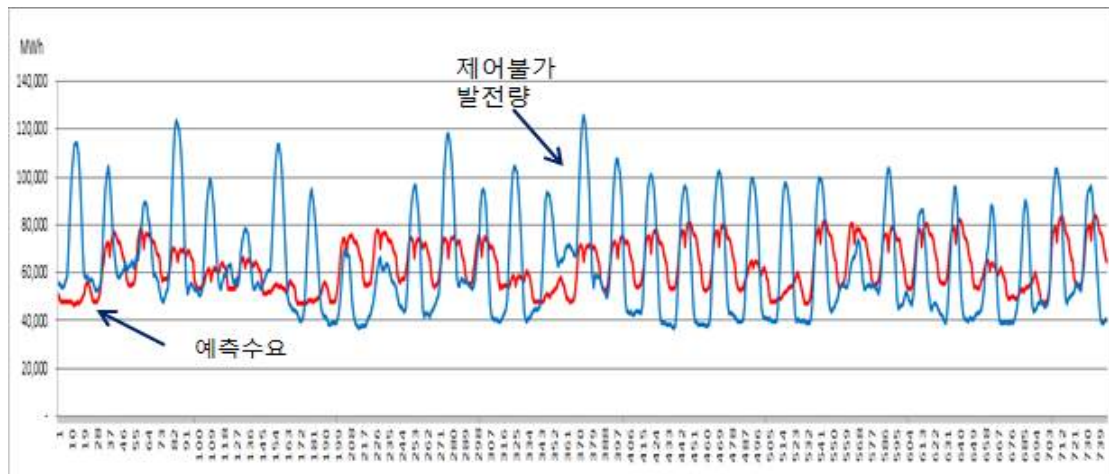
○ 과잉발전량(2050년)



○ 과잉발전 발생 예시(일 부하)



○ 과잉발전 발생 예시(월 부하)

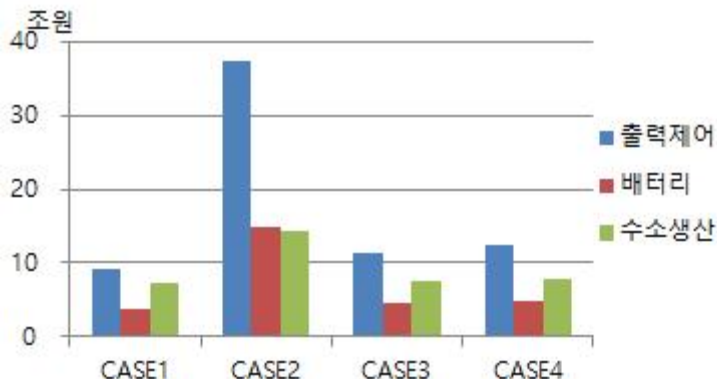


- 과잉발전 대응 수단으로 출력제어(curtailment), 배터리 저장, 수소생산 등의 대안 검토
- 재생에너지 비중이 80%로 증가할 경우 과잉 발전량 대응 비용이 연간 14.3조원(수소생산) ~ 37.8조원(출력제어) 발생 예상
- \* 출력제어시 제어발전량에 대해 미보상시 대응비용 감소 가능

○ 과잉발전 대응 추가비용

구분	과잉발전량 (TWh)	발전비용 (원/kWh)	출력제어(조원)			배터리 (조원)	수소생산 (조원)
			보상액	백업발전비	계		
Case1	32.4	165.3	5.4	3.8	9.2	5.7	7.2
Case2	133.0	163.6	21.8	15.8	37.6	23.3	14.3
Case3	39.6	165.3	6.5	4.7	11.2	6.9	7.5
Case4	44.2	165.3	7.3	5.2	12.5	7.7	7.7

○ 과잉발전 수단별 비용



○ 발전비용 분석

- 발전비용 추정시 정산단가와 균등화 발전비용, 재생에너지 계통통합비용, 과잉발전량 대응비용 고려

\* 원자력, 석탄, 가스발전 '19년 정산단가, 재생에너지 LCOE 하락 추세 반영

○ 재생에너지 발전비용 추정 결과

구 분			태양광	육상풍력	해상풍력	연료전지
단가 (원/kWh)	'20		139.6	138.0	274.5	240.0
	'50		60.0	115.0	194.4	200.0
구간 가중평균 (원/kWh)	'20-'50	CASE1,3,4	93.3	132.2	241.0	213.5
		CASE2	90.6	130.0	234.2	213.5

○ 리튬이온 배터리 비용

구 분	2018	2025
투자비(\$/kW)	1,876	1,446
배터리비용(\$/kWh)	469	362
왕복효율 85% 고려(원/kWh)	226.6	174.9

주:  $362\$/kWh \times 1150\text{원}/\$ \div 3500 \div 0.8 \div 0.85 = 174.9\text{원}/kWh$

자료: U.S. DOE, "Energy Storage Technology and Cost Characterization Report" 2019.7

○ 과잉발전량의 수소생산시 비용

구 분	2030		2040		2050			
	case1,2	case3,4	case1,2	case3,4	case1	case2	case3	case4
과잉발전량(TWh)	11.8	13.5	22.3	26.9	11.9	133.0	39.6	146.7
최대과잉량(GW)	35.3	36.3	56.5	58.7	71.1	141.9	74.5	145.3
설비이용률(%)	3.8	4.3	4.5	5.2	5.2	10.7	6.1	11.5
수전해설비 투자비(조원)	34.6	35.6	55.4	57.5	69.7	139.1	73.0	142.4
생산단가(원/kg_H2)	15,109	13,532	12,775	11,030	11,083	5,387	9,509	5,002
전기비 불포함 생산단가 (원/kg_H2)	12,088	10,826	10,220	8,824	8,866	4,310	7,607	4,002

주 : 저장, 수송비용 불포함

- 재생에너지 계통통합비용으로 NEA(2019) \$30/MWh<sub>VRE</sub> 적용('50)

\* 계통통합비용은 백업(프로파일)비용, 밸런싱비용, 그리드비용 등

- '50년 전기소비자는 매년 41조원 내지 96조원의 추가 부담 발생

\* 인구 1인당<sup>1)</sup> 발전비용 : '19년 97.9만원 → '50년 192.1~307.3만원

#### ○ 발전비용 추정 결과

		발전비용(조) 발전단가(원/kWh)	계통통합 비용(조)	과잉발전 대응비용(조)	계 (조, 원/kWh)
2019		50.7 (90.1)	-	-	50.7 (90.1)
2050	Case1	83.4 (131.4)	10.1	5.7~9.2	99.3~102.8 (156.4~161.9)
	Case2	92.9 (141.1)	16.6	14.3~37.5	123.8~147.1 (188.1~223.3)
	Case3	80.0 (125.7)	10.1	6.9~11.2	97.0~101.4 (152.4~159.3)
	Case4	76.9 (120.6)	10.1	7.7~12.5	94.7~99.5 (148.5~156.1)

주 : ( )는 단가(원/kWh)

#### ○ 발전비용(2050)



#### ○ 전기요금 영향

- 재생에너지 비중 50% 경우 현재 대비 50~ 67%, 80% 경우 91~123% 인상  
요인 발생(현요금 수준 대비 최대 2.23배 증가)

1) '19년 51,781(천명)에서 '50년 47,745(천명)으로 감소 전망(통계청(2019), 『장래인구추계 2017-2067년』)

단위: 원/kWh

구 분	발전단가	한전비용	계	2019 판매단가	전기요금영향 (%)
Case1	156.4~161.9	19.3	175.7~181.2	108.7	61.6~66.7
Case2	188.1~223.3		207.4~242.6		90.8~123.2
Case3	152.4~159.3		171.7~178.6		58.0~64.3
Case4	148.5~156.1		167.8~175.4		54.4~61.4

### ○ 온실가스 배출량

구 분	2030 9차계획	2040		2050			
		Case1,2	Case3,4	Case1	Case2	Case3	Case4
백만 CO2톤	189.6	178.0	163.8	141.3	55.6	120.1	68.9

- 신규원전 6기를 고려하는 case3의 탄소배출 저감량은 case1 대비 21백만 톤 추가 감축(원전 1기당 3.5백만톤)
- '40년 이후 잔여 석탄발전을 원전으로 대체하는 경우(case4)는 case1 대비 72백만톤 감축
- 재생에너지 비중을 80%(case2)로 늘여도 발전부문의 탄소중립 달성 불가능, 반면, CO2 배출저감 비용은 과다 발생(\$262~615/CO2톤)
- 원자력 비중을 상대적으로 확대하는 case4의 CO2 저감비용이 가장 낮음

### ○ CO2 저감비용 추정

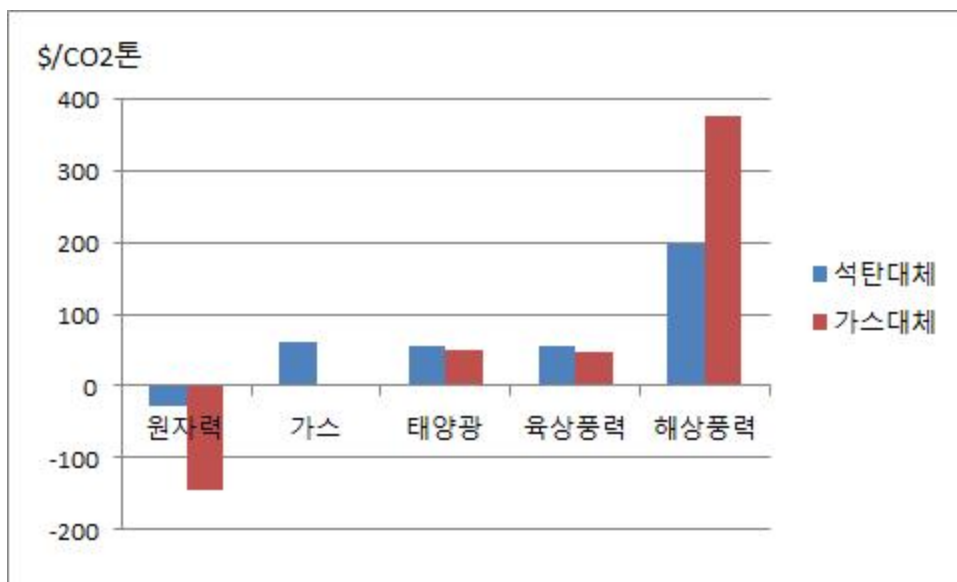
		2019 추정	2030 9차계획	2050			
				case1	case2	case3	case4
배출량(백만톤)		215.0	189.6	141.3	55.6	120.1	68.9
발전비용 (조원)		50.7	63.5	97.2~102.8	123.8~147.1	94.6~101.4	91.9~99.5
톤당저감 비용	만원	-	50.4	63.1~70.7	45.9~60.5	46.3~53.4	28.2~33.4
	\$	-	438	549~615	399~526	402~465	245~290

○ 발전대체에 의한 전원별 탄소저감 비용

- 1400MW급 원전1기가 이용률 80%로 가동되는 경우 동 발전량이 석탄발전을 대체할 경우 연간 810만톤, 가스발전을 대체할 경우 355만톤의 CO2를 감축 가능
- 전원별 탄소톤당 감축비용은 원전이 가스발전을 대체하면 톤당 \$145 편익, 해상풍력이 대체하면 톤당 \$400의 비용 발생
- 이 비용은 직접비용만 계산에 포함한 것임(재생에너지 계통통합비용, 과잉발전 대응비용 등 제외)

		원자력	가스	태양광	육상풍력	해상풍력
발전단가(원/kWh)		58.3	118.7	139.6	138	274.5
톤당 감축비용 (\$/CO2톤)	석탄대체	-29	61	56	55	198
	가스대체	-145	-	50	46	374

전원별 탄소저감비용(2020년 기준)





□ 탈원전(case2)과 원전유지(case4) 결과 비교

	Case2	Case4
Case 개요	탈원전, 재생비중 80%	원전유지(신규 13기), 재생비중 50%
'50 전력수요(TWh, GW)	577.9, 107.7	
정격용량 계(GW)	349.4	247.5
원자력	12.4	30.6
태양광	154.4	79.7
풍력	80.3	41.5
발전량(TWh), 비중(%)	원자력 89.0 (13.5) 태양광 206.9 (31.4) 풍력 182.2 (27.7)	원자력 219.5 (34.4) 태양광 106.8 (16.8) 풍력 94.2 (14.8)
과잉발전 시간수(시간)	3,877	2,617
비율(%)	(44.3)	(29.9)
과잉발전량, 태양광 · 풍력 발전량 중 비중(GWh, %)	133,014 (34.2)	44,167 (22.0)
과잉발전 대응비용(조원)	14.3~37.5	7.7~12.5
계통통합비용(조원)	16.6	10.1
발전비용(조원)	123.8~147.1	91.9~99.5
전기요금 영향(%)	90.8~123.2	50.4~61.4
온실가스 배출(백만 CO2톤)	55.6	68.9
배출저감 비용(\$/CO2톤)	399~526	245~290

## 5. 탄소중립 CASE

□ 세계 각국은 2050 탄소중립을 선언하고 에너지정책을 수립하는 중

- 미국 : 바이든 행정부는 2050 탄소중립을 목표로 원자력과 재생에너지를 활용하는 전략 추진
  - 바이든 대통령은 취임 후 파리협약 재가입, 온실가스 배출 감축에 대한 인센티브 등을 추진
  - 2050년 재생에너지 비중 42% 확대, 원전 발전량 유지 정책 추진
  - 원자력전략 비전을 통해 기존원전 가동기간 연장, 차세대원자로 개발, 원전산업생태계 재건 계획 발표
- 중국 : 2060년 탄소중립 달성을 위해 화석에너지 발전비중을 80%('25년)에서 13%('60년)로 축소
  - 원전 비중 3.1%('25년)에서 18.7%('60년)로 5배 이상 확대 계획
- 영국 : 2050년 탄소중립은 에너지소비의 전기화로 '19년 대비 2배의

전력수요 예상, 재생에너지와 원전 최대 활용

- '50년 에너지믹스 재생에너지 57%, 원자력과 CCUS 38%, 수소 5%
- 원전용량은 9GW('20년)에서 31GW('40년)로 대폭 확대

○ 일본의 탄소중립 계획 개요(경산성 2020.12 발표)

- '18년 CO2 배출 10.6억톤, 이중 4.5억톤(40%) 발전부문에서 발생
- 재생에너지는 최대한 도입 '50년 발전량의 50%~60% 공급
  - \* 재생에너지의 간헐성으로 출력조정 문제, 송전망 추가 확보 필요 및 비용 절감 한계로 재생에너지 100% 공급은 현실적으로 불가
- 수소·암모니아 연료 발전 약 10%, 원자력과 CO2 포집을 전제한 화력 발전 비중을 30~40%로 설정
- 비발전 부문은 전기화(electrification)의 대응 전략이 중심, 전력수요 현재보다 30~50% 증가 예측
- 에너지효율 관련 산업을 성장 분야로 육성

□ IEA NZE 2050 보고서 발표('21.5)

○ 분석 전제

- 2050년 세계경제 규모는 현재의 2배 이상, 20억 이상의 인구 증가
- 에너지수요는 현재보다 약 8% 감소

○ NZE의 에너지수급

- 현재 4/5의 에너지를 공급하는 화석연료는 '50년 1/5로 축소
- 총에너지의 2/3가 풍력, 태양광, 바이오, 지열 및 수력으로 공급
  - \* 태양광 현재의 20배, 풍력 11배 증가 필요

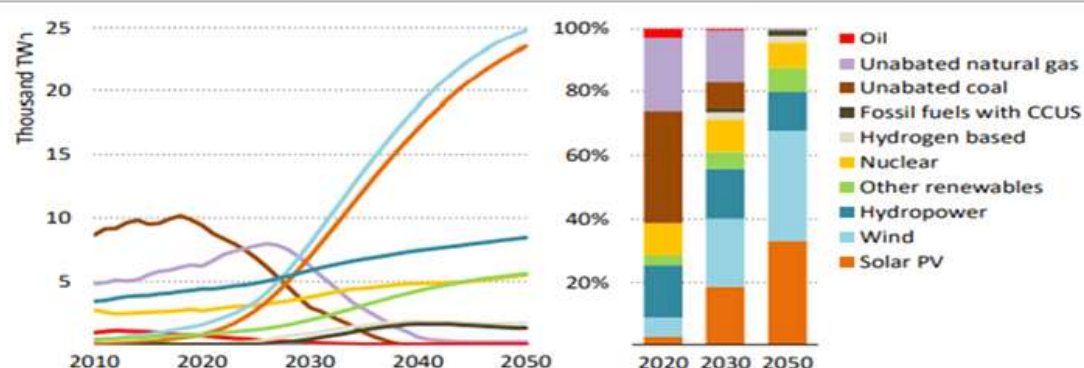
○ 전력

- '50년 에너지소비의 50% 차지, 2.5배로 증가(선진국 2배, 개도국 3배)
- '50년 발전량의 90%는 재생에너지, 8%는 원자력(현재의 2배)

○ 배터리, 수소, CCUS 등이 활용

- \* '30년 이후의 적용기술은 미개발 상태임

## Global electricity generation by source in the NZE



IEA. All rights reserved.

## Key Milestones in Transforming Global Electricity Generation

Category	
Decarbonisation of electricity sector	<ul style="list-style-type: none"><li>Advanced economies in aggregate: 2035.</li><li>Emerging market and developing economies: 2040.</li></ul>
Hydrogen-based fuels	<ul style="list-style-type: none"><li>Start retrofitting coal-fired power plants to co-fire with ammonia and gas turbines to co-fire with hydrogen by 2025.</li></ul>
Unabated fossil fuel	<ul style="list-style-type: none"><li>Phase out all subcritical coal-fired power plants by 2030 (870 GW existing plants and 14 GW under construction).</li><li>Phase out all unabated coal-fired plants by 2040.</li><li>Phase out large oil-fired power plants in the 2030s.</li><li>Unabated natural gas-fired generation peaks by 2030 and is 90% lower by 2040.</li></ul>

Category	2020	2030	2050
Total electricity generation (TWh)	26 800	37 300	71 200
Renewables			
Installed capacity (GW)	2 990	10 300	26 600
Share in total generation	29%	61%	88%
Share of solar PV and wind in total generation	9%	40%	68%
Carbon capture, utilisation and storage (CCUS) generation (TWh)			
Coal and gas plants equipped with CCUS	4	460	1 330
Bioenergy plants with CCUS	0	130	840
Hydrogen and ammonia			
Average blending in global coal-fired generation (without CCUS)	0%	3%	100%
Average blending in global gas-fired generation (without CCUS)	0%	9%	85%
Unabated fossil fuels			
Share of unabated coal in total electricity generation	35%	8%	0.0%
Share of unabated natural gas in total electricity generation	23%	17%	0.4%
Nuclear power			
Average annual capacity additions (GW)	2016-20 7	2021-30 17	2031-50 24
Infrastructure			
Electricity networks investment in USD billion (2019)	260	820	800
Substations capacity (GVA)	55 900	113 000	290 400
Battery storage (GW)	18	590	3 100
Public EV charging (GW)	46	1 780	12 400

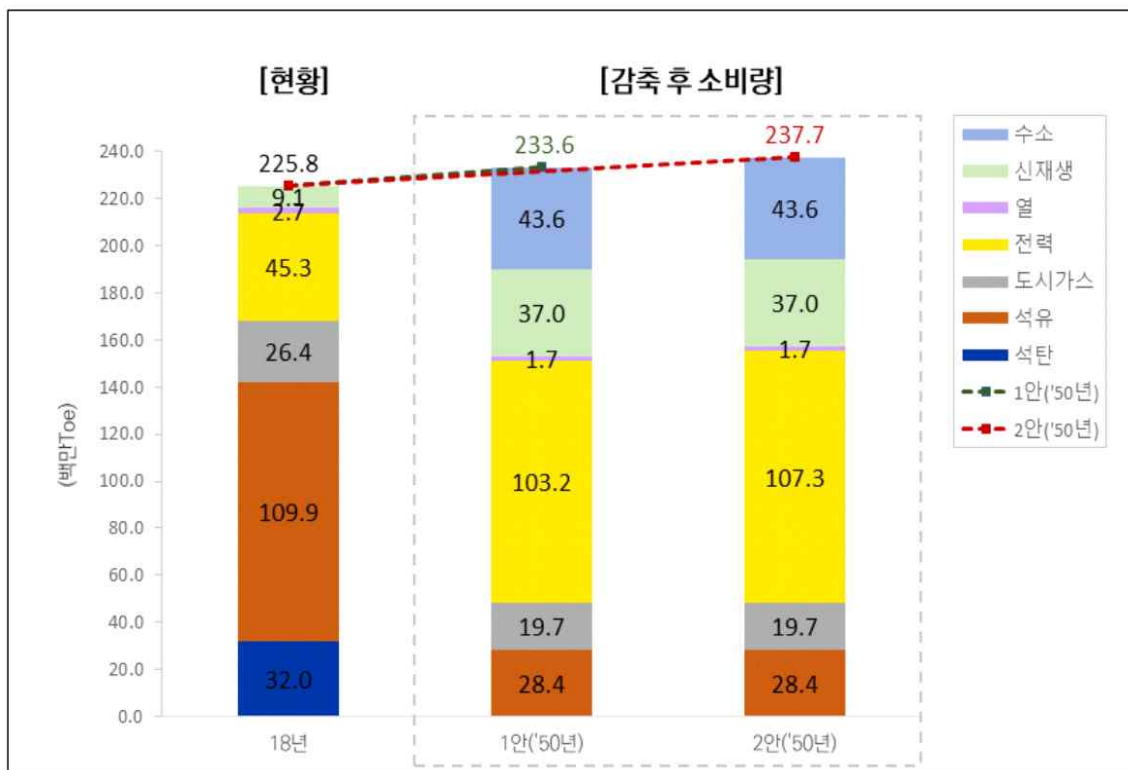
Note: GW = gigawatts; GVA = gigavolt amperes.

## □ 2050년 탄소제로 시나리오안

### ○ 에너지 소비 '18년 대비 3.5% 증가

- 수요관리 강화에도 불구하고 산업부문 성장과 CCUS 처리, 수소생산에 따른 전력수요 증가 등으로 인해 총에너지 소비 증가
- 에너지원별로는 온실가스를 야기하는 석탄·석유·도시가스 소비는 대폭 감소하나, 전력 및 신재생에너지 수요가 크게 증가

### 최종에너지 소비



자료 : 탄소중립 시나리오안

- 비발전부문 신재생(16%)은 자가용태양광, 가정용·건물용 연료전지 등으로 설명되지만 대부분 전기로 소비될 것을 판단됨(태양광으로 환산시 290GW)
- 전체에너지 소비의 18.7%를 차지하는 수소수요 2,047만톤 중 75%를 해외 수입에 의존, 수입대상국(호주, 중동, 러시아, 북아프리카 등)과 협의내용 없음.

○ 전력수요 2.3배 증가

- 각 부문별로 잔여 화석연료를 전력화(비전력 에너지소비의 전력화)해야 하므로 전력수요는 2018년 대비 228.1~237.0%로 대폭 증가
- 에너지원별로는 온실가스를 발생시키는 석탄·석유·도시가스 소비는 대폭 감소하지만, 전력 및 신재생에너지 수요 크게 증가

발전구성

	원자력	석탄	LNG	재생E	연료전지	동북아 그리드	무탄소 신전원	양수 기타	합계
TWh	86.9	0.0	92.1	769.3	121.4	33.1	132.0	9.0	1243.8
비중(%)	7.0	0.0	7.4	61.9	9.8	2.7	10.6	0.7	100.0

- 재생에너지 범위에 수소연료전지, 무탄소신전원(수소터빈, 암모니아)를 포함할 경우 발전비중은 82.3%임.
- 국토면적의 6.1%에 태양광을 설치하는 것은 입지 등 물리적인 제약을 심각하게 점검해야 함.
- 동북아의 정치적상황과 에너지안보를 고려할 때 그리드(중국 2.4GW, 러시아 3.0GW)를 통해 전력공급의 2.7%를 의존하는 계획은 우려되는 사항임. 전력망 연계국, 수입대상국 등과 협의된 바 없음.
- \* 상시 수입을 전제(망이용률 70%)하는 전력망 연계는 일반적인 국가간 전력거래와 크게 상이함.

○ 검토결과

- 재생에너지에만 의존하는 탄소중립 시나리오안은 비현실적임.
- 백업발전으로서 신규 가스발전 불가피
- 재생에너지 발전의 변동성 불고려
- 비용, 전기요금 등에 대한 분석 없음.
- 대안 계획의 필요성 증대

## 6. 결론(한계점)

- '50년 재생에너지 발전비중을 80%로 확대해도 발전부문의 탄소제로 달성 불가
  - 재생에너지 80%(case2)의 '50년 태양광 용량 154GW, 풍력 80GW로 현 재용량의 10배 이상, 40배 이상 확대 필요
    - \* IEA는 2050 탄소중립을 위한 원전용량을 현재의 2배 이상으로 평가
- 우리의 여건에서 재생에너지 발전비중 80% 확대 가능성은 매우 낮음
  - 재생에너지 비중을 높일수록 전력수요 증가에 비해 과도한 설비증가 필요
  - 간헐성으로 인한 비용이(급전가능 발전원으로서 가스발전 확대 필요, 과잉발전량의 저장 비용 등) 급증하고, 수급 불안 위험 상시 존재
  - 재생에너지와 수소의 조합은 과잉발전량에 의해 수소설비의 이용률이 결정되므로 경제적인 대안이 될 수 없음.
  - '50년 전기소비자는 매년 41조원 내지 96조원의 추가 부담 발생, 재생 비중 80%(case2)에서 전기요금 91~123% 인상 추정
  - 재생에너지의 간헐성 보완을 위해 가스발전 확대가 계획되고 있으나 탄소중립을 위해서는 '30년 이후 가스발전의 대폭 축소 필요(IEA)
- 가장 경제적, 안정적 탄소저감 방안은 원자력의 비중을 높이는 것임
  - 재생에너지 비중을 고정한 경우 원자력 비중 증가가 탄소배출과 발전비용 감소 효과 발생
  - 원전의 부하추종운전, iSMR 개발 등 기술발전 고려시 탄소배출 저감비용은 더 감소하게 됨
- 탄소중립 에너지믹스 분석은 추후 검토 과제임
  - 우리의 경우 에너지소비 1/2 축소, 이 중 80%를 전력으로 소비(전력화), 전력의 80% 이상을 무탄소 전원으로 공급해야 함.
    - \* 원전 필요성 현저히 증가
  - 수송부문, 열생산, 산업 부문 에너지 소비의 상당부분을 전력이 대체해야 할 뿐아니라 수전해 수소생산을 위한 무탄소 발전의 증대 필요
- 본 검토의 수행과 관련한 한계점은 다음과 같음
  - 과잉발전량은 급전가능 발전원의 최소출력을 전제로 산출한 것으로 최소치로 볼 수 있음
  - 풍력과 태양광의 발전비중이 높은 전력시스템에서는 에너지 저장을 고려하더라도 상당한 양의 부하차단이 필요한데 부하차단으로 이 발전원들의

실제 이용률이 하락하게 되고 발전단가는 상승할 것이지만 고려하지 않았음

- 과잉발전의 대응비용으로 배터리, 수소 등 에너지 저장비용 추정치를 적용했으나 상당한 불확실성이 존재함
- 이밖에 제한된 자료의 이용에 따른 가정 또는 전제, case 설정의 한계 등은 향후 관련연구에서 보완되어야 할 사항임