

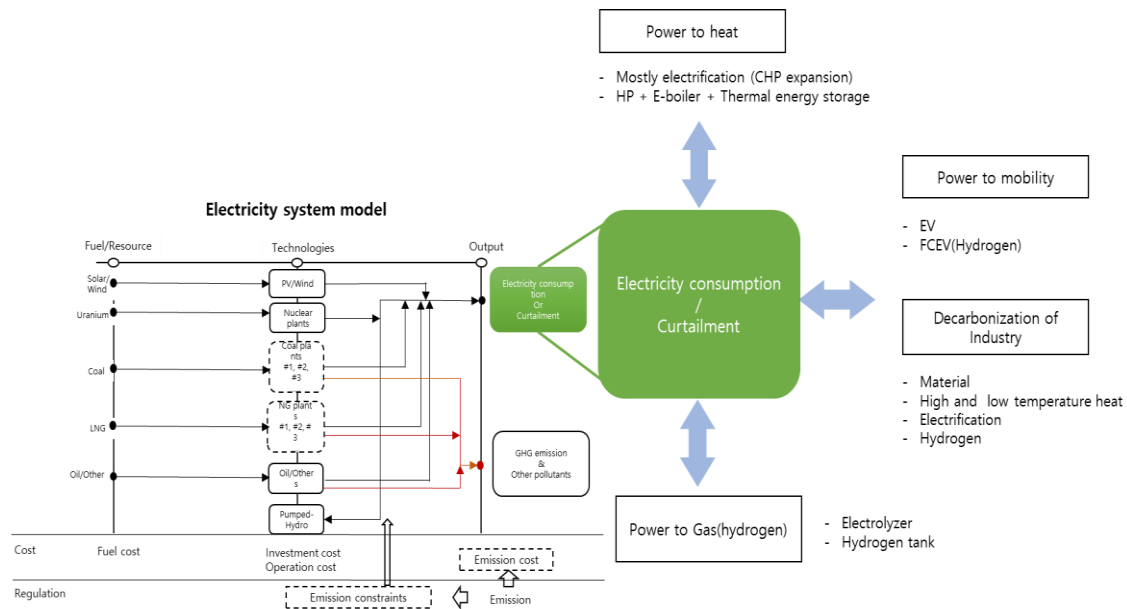
2050년 탄소중립 시나리오

녹색에너지전략연구소 권필석

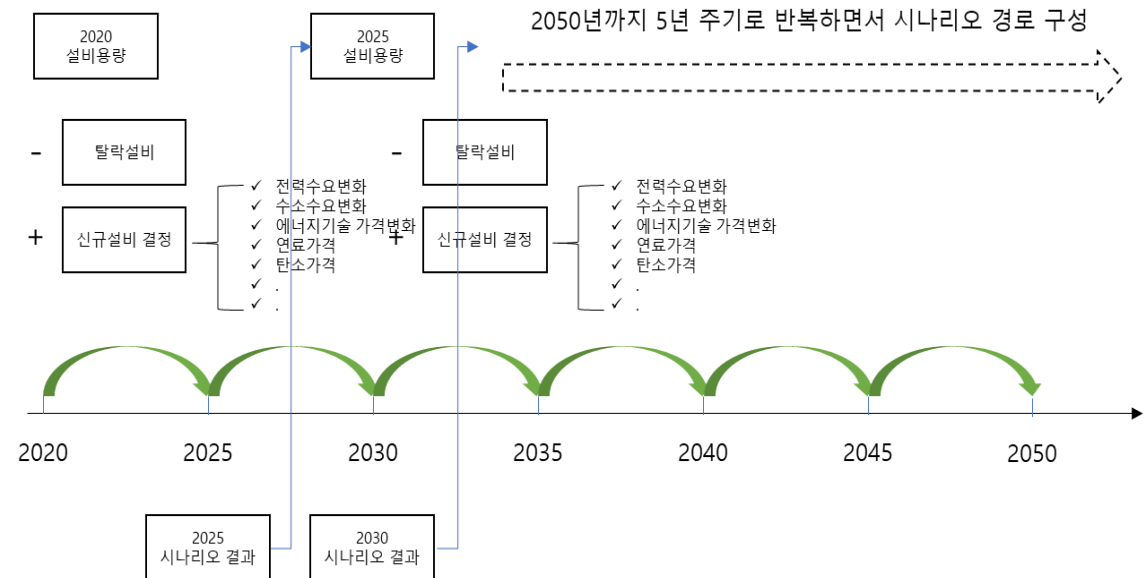


- 연구 목적 : 2050년 우리나라 에너지시스템의 탄소중립 가능성을 분석
- 주요 내용 : 섹터커플링을 적용한 시나리오 분석, 탄소 중립을 위한 경로 탐색 및 시사점 도출

• 분석 모형

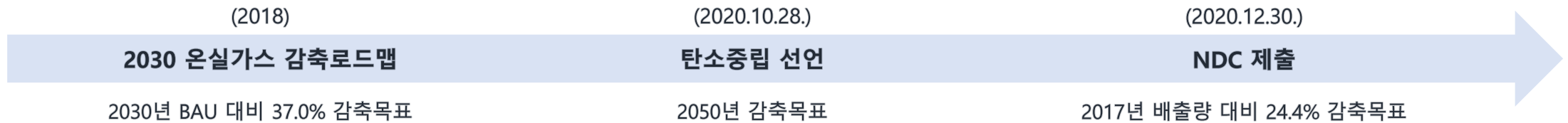


• 분석 방법 : 에너지 수요 전망(자료) -> 에너지 시스템 결정(모형)

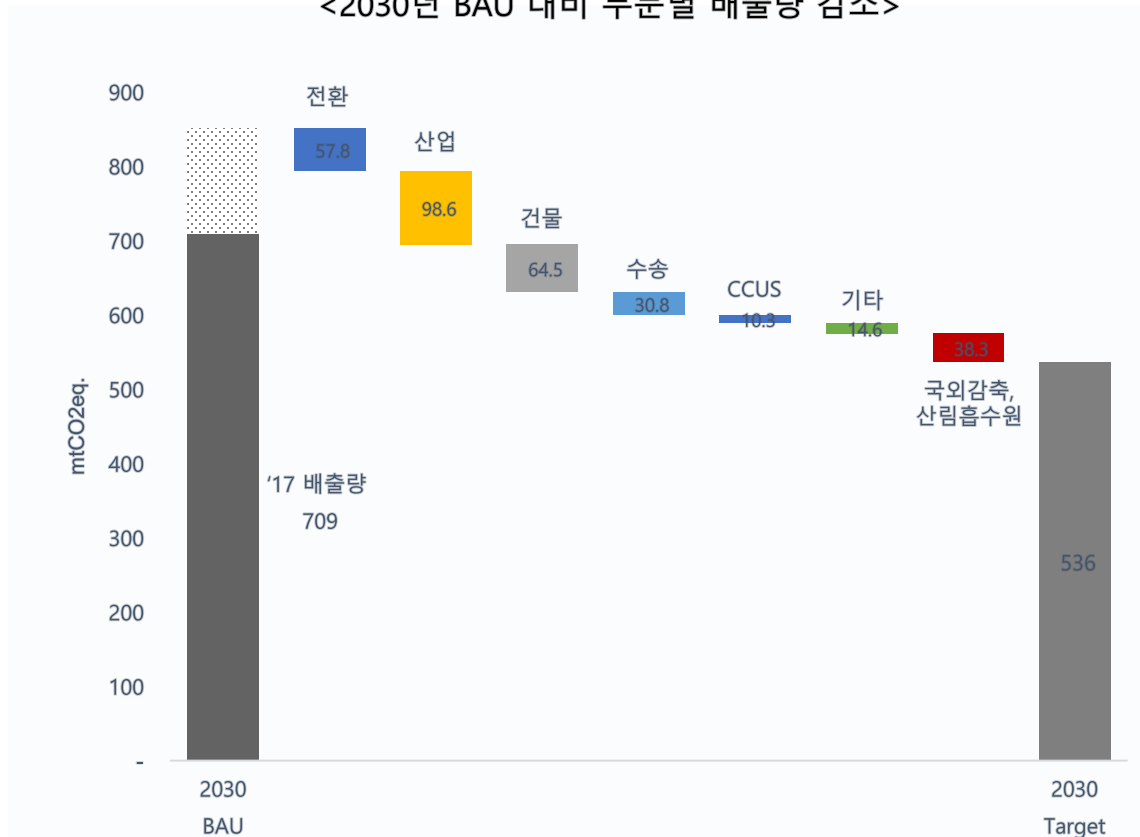


▶ 섹터커플링:

- 전환부문-건물부문-산업부문-수송부문을 연계(coupling)하고 전력과 열, 그 밖에 수소와 같은 에너지 캐리어를 최대한 효율적으로 이용하여 에너지시스템의 탄소중립을 달성하는 개념을 의미



<2030년 BAU 대비 부문별 배출량 감소>



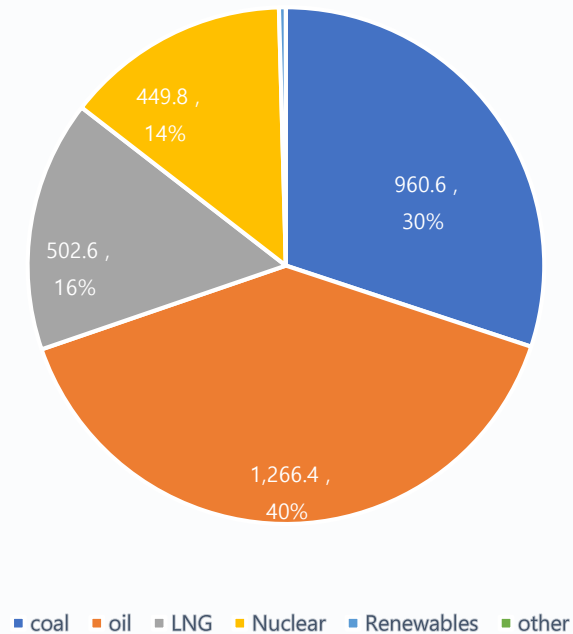
▶ 감축로드맵과 NDC의 2030년 목표배출량은 수치상으로 동일

- 2025년 NDC 제출 시 강화된 감축목표 제출할 것을 명시
- 하지만, 5년 남은 기간 동안 강화된 감축목표가 실효성이 있을지 의문
- 강화된 감축목표를 설정한 이후 이에 맞는 세부 전략을 수립하는 것이 적절한 순서
- 빠른 시일 내에 2030년 배출량 목표 재설정 필요

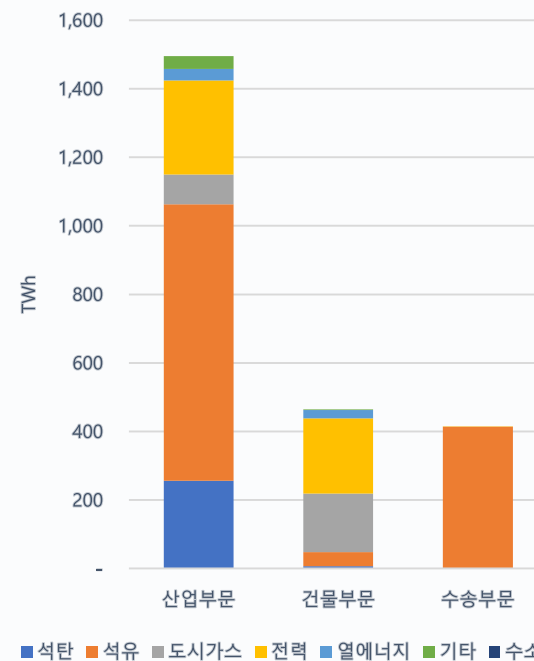
한국 에너지 소비 특징

- ▶ 국내 에너지 소비에서는 아직까지 화석연료에 대한 의존도가 높음
- ▶ 온실가스 배출은 현재도 증가하는 추세
- ▶ 최종 에너지 수요는 2,374TWh로 산업, 건물, 수송부문의 순으로 각각 63.0%, 19.6%, 17.5%를 차지
- ▶ 에너지원별로 석유, 석탄, 도시가스 등 화석연료가 전체 소비의 75.1%를 차지하고, 전력은 20.8%의 비중

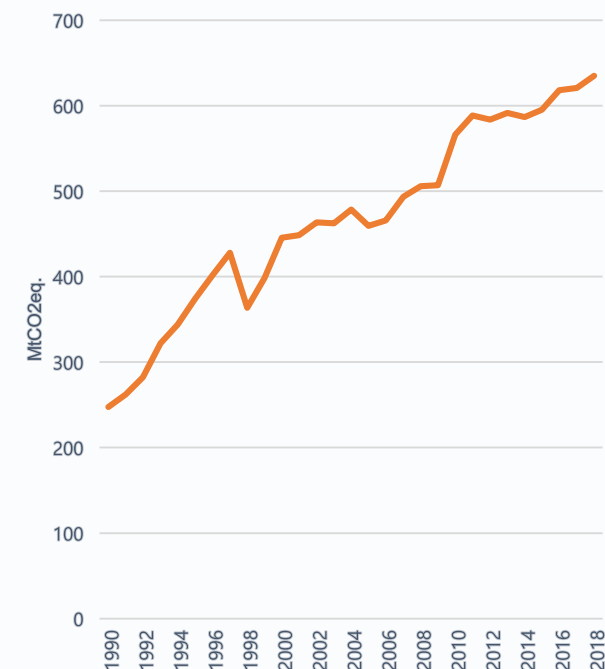
<1차 에너지 소비>



<부문별 최종 에너지 소비>



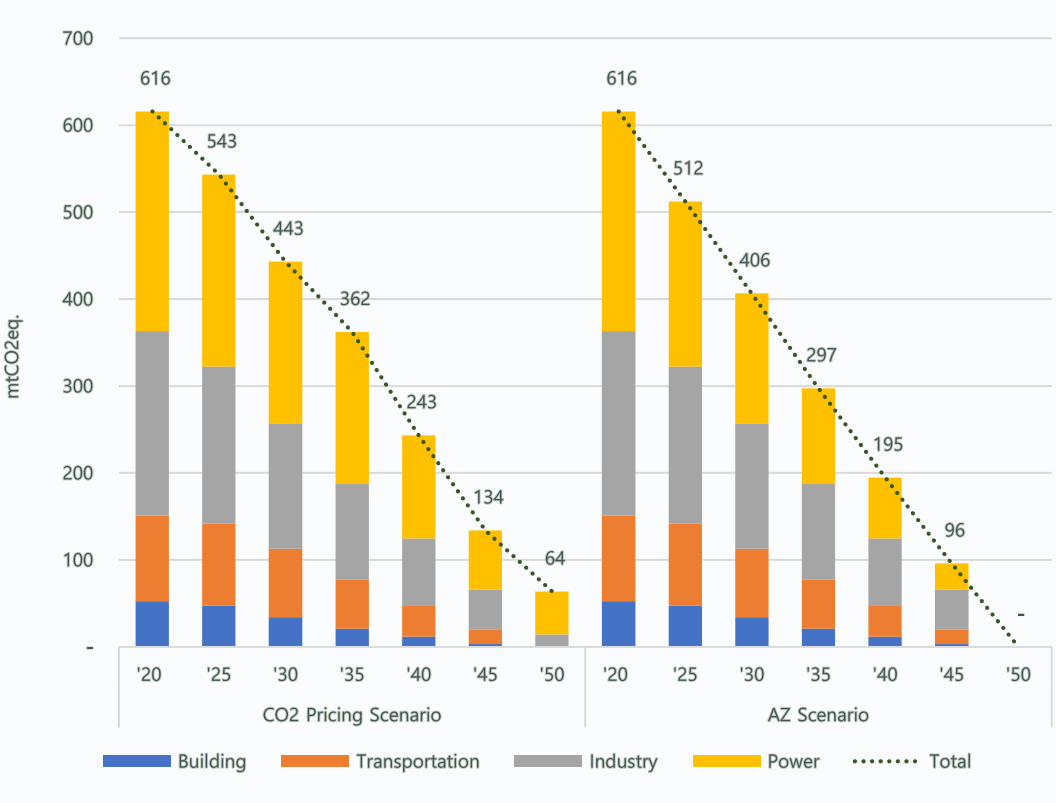
<에너지 소비관련 CO2 배출량>



시나리오의 구성

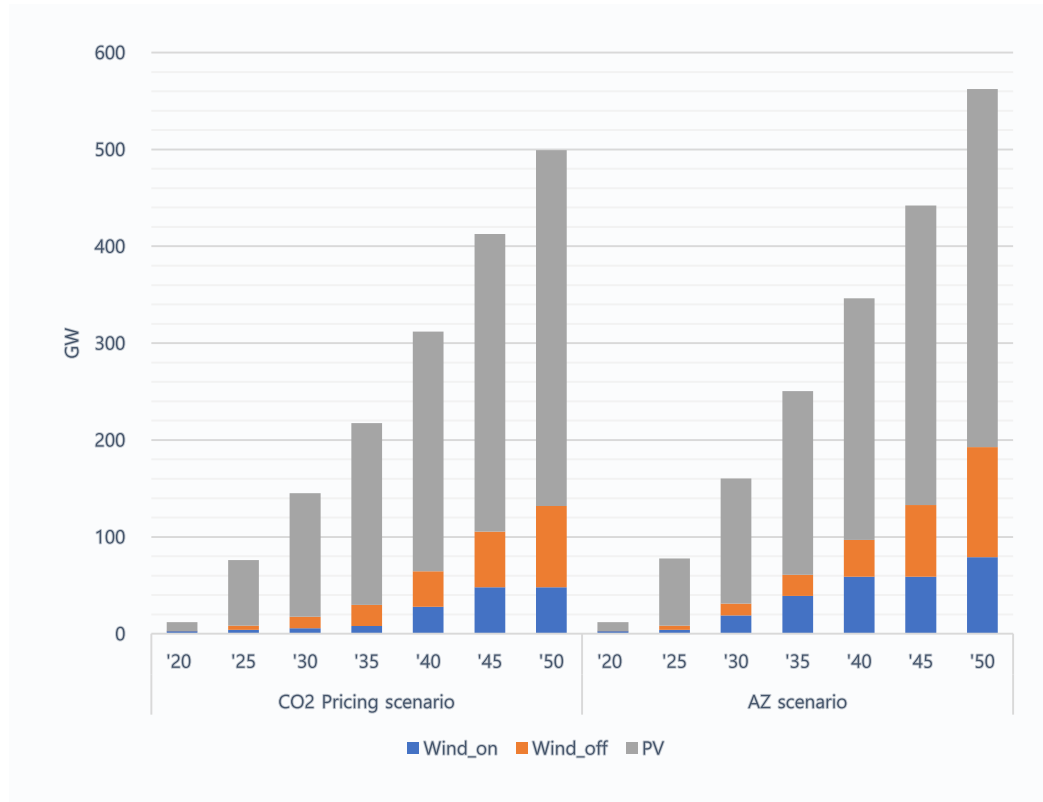
CO2 pricing 시나리오와 동일한 가정시 O

시나리오	Co2 pricing scenario	Absolute zero scenario	H+ scenario
CO2 가격	2050년에 150 유로/tCO2eq	O	O
GHG 배출 제한	없음	2050년 배출제로 경로를 위해 조정	O
에너지기술가격	기술에 따라 가격 감소 가정	O	O
재생에너지확대	태양광(12GW), 육상풍력(4GW), 해상풍력(8GW) 연간 재생에너지 확대 cap	O	O
석탄발전	2040년에 퇴출	O	O
원자력 발전	정부 계획에 따라 감소(2050년 8GW)	O	O
수소 수요	전력화가 어려운 수요에 대해 적용	O	정부수소경제활성화계획 적용
전력수요	전력화로 인한 전력수요 증가 가정	CO2 pricing scenario와 동일하지만 산업부문에서의 전력화 비중이 더 높음	O
열 수요	단열 강화, 지역난방 확대, 개별난방 전력화, 유연성확대를 위해 열저장소 설치, 2045년에 100% 전력화	O	CO2 pricing scenario 에 비해 건물부문에서 연료 전지의 역할 부여
수송 수요	전기차, 수소차 확대, 2040년 내연기관차 판매금지	O	CO2 pricing scenario 에 비해 수소차의 비중이 더 높음

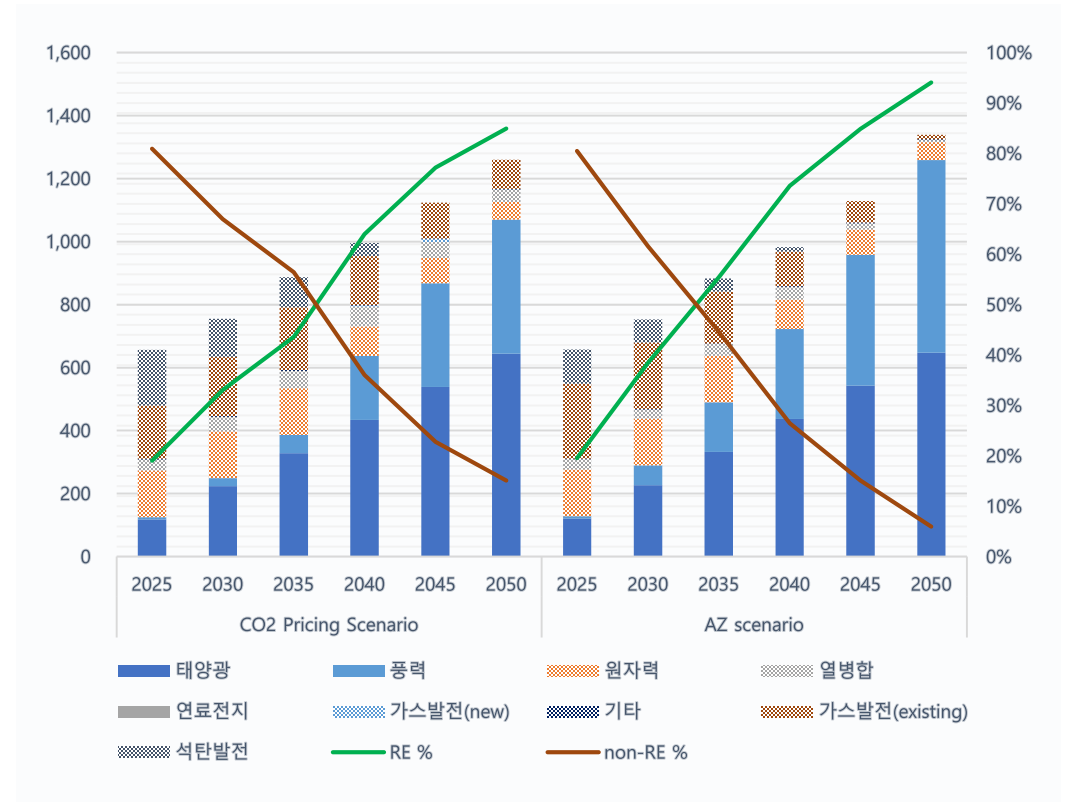


탈탄소화 전략 1> 재생에너지 설비용량 & 발전량

- ▶ 태양광 설비용량은 거의 유사한 추세로 증가
- ▶ 풍력발전은 CO2 Pricing 시나리오의 경우 2040년부터 급격히 보급이 확대되며, 배출 제약이 적용된 AZ 시나리오에는 전 기간 꾸준히 증가

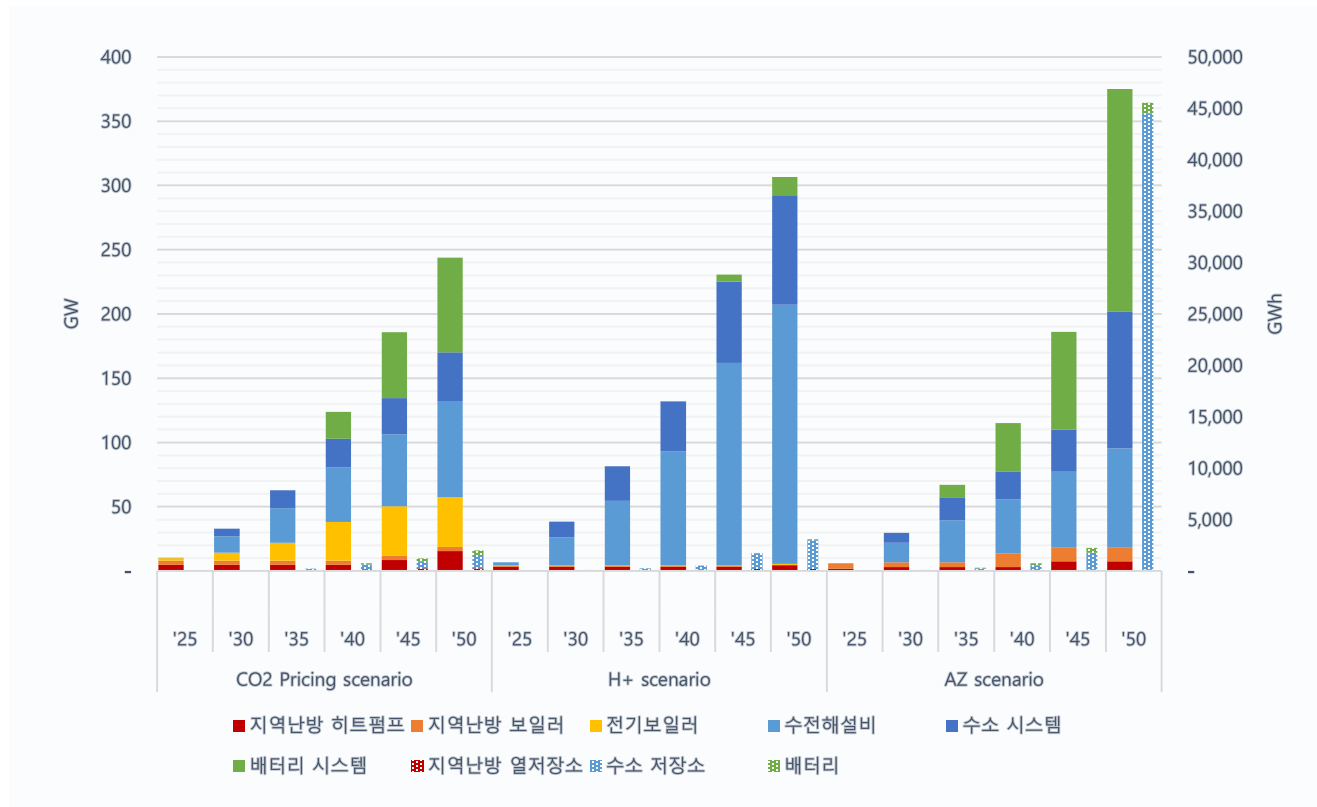


- ▶ CO2 Pricing 시나리오에서 재생에너지 발전량은 '35~'40년 사이 화석연료 발전량을 초월
- ▶ AZ 시나리오에서는 역전 시점이 5년 정도 앞당겨짐('30~'35년)



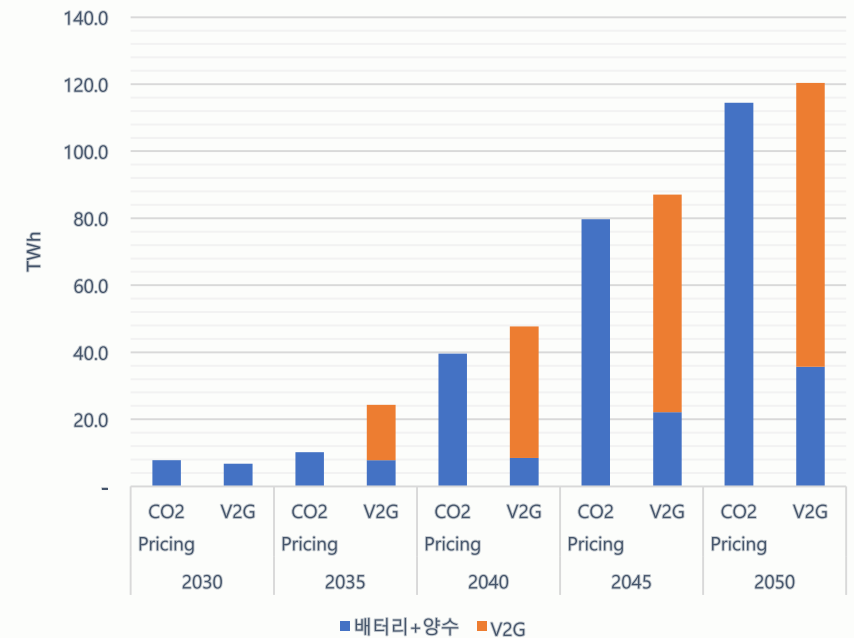
탈탄소화 전략2> 유연성 기술

- ▶ 유연성 기술은 재생에너지의 변동성을 보완하기 위한 설비로 전력 운영시스템(배터리시스템 및 양수발전)과 P2X가 핵심 기술
 - Power to Heat : 히트펌프, 전기보일러, 열저장설비
 - Power to Gas(Hydrogen) : 수전해설비, 수소 시스템(인터페이스,저장설비)
- ▶ 에너지 생산설비 중 변동성 전원의 비중 증가에 따라 유연성 자원의 중요도 증가



▶ V2G 시나리오 분석 결과 中:

- V2G 기술 적용을 통해 유연성 설비 확대의 부담 완화 및 시스템의 효율 강화
- V2G 적용 효과 : 2050년 V2G를 통해 전기차가 그리드에 공급한 전력은 배터리와 양수발전이 공급한 전력의 2배 이상을 나타냄

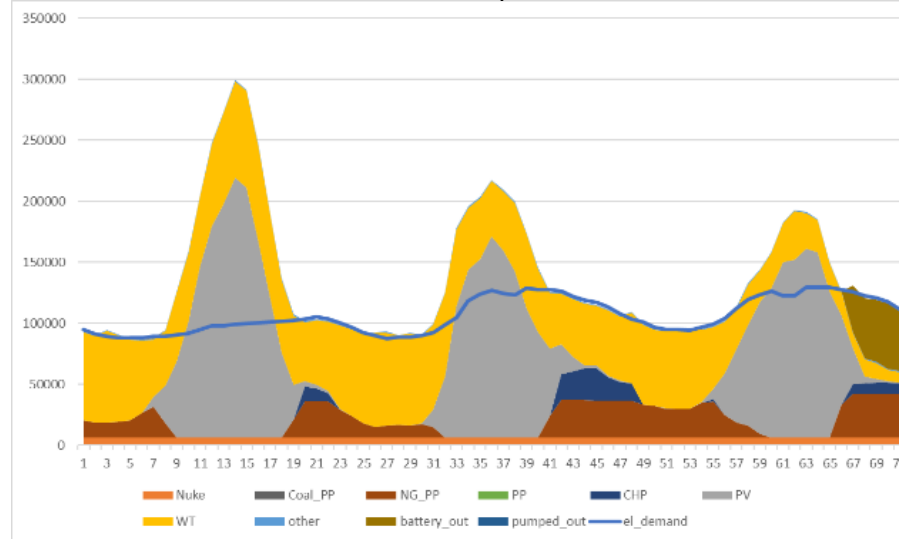


탈탄소화 전략2> 유연성 기술의 전력망에서의 역할

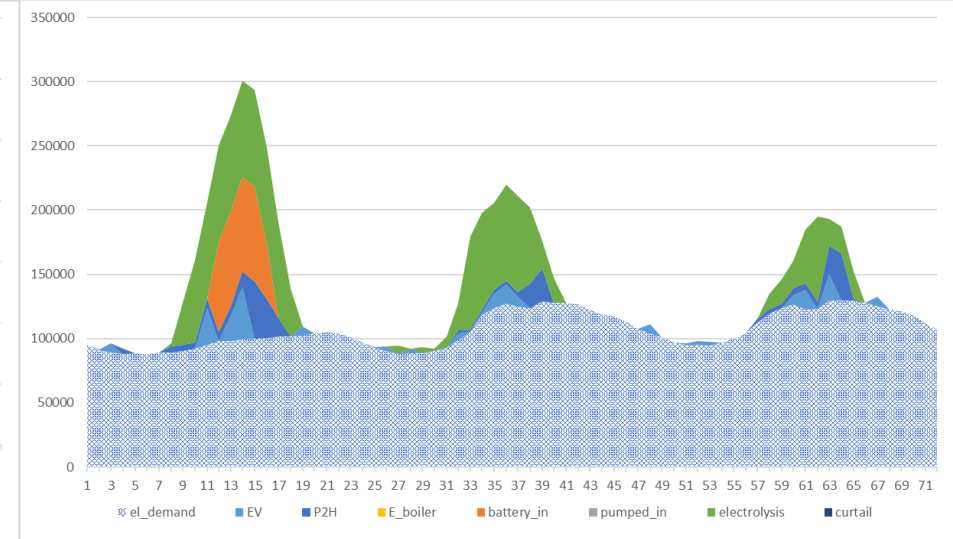
여름 전력망 수급 현황

- 재생에너지의 공급이 수요를 넘을 경우 전기차 충전, 열생산, 배터리, 수전해 등의 유연성 기술들의 운영을 통해 전력 수급 해결
- 재생에너지출력보다 수요가 적을 시 수소연료를 사용한 발전소와 배터리 출력을 사용

공급측면

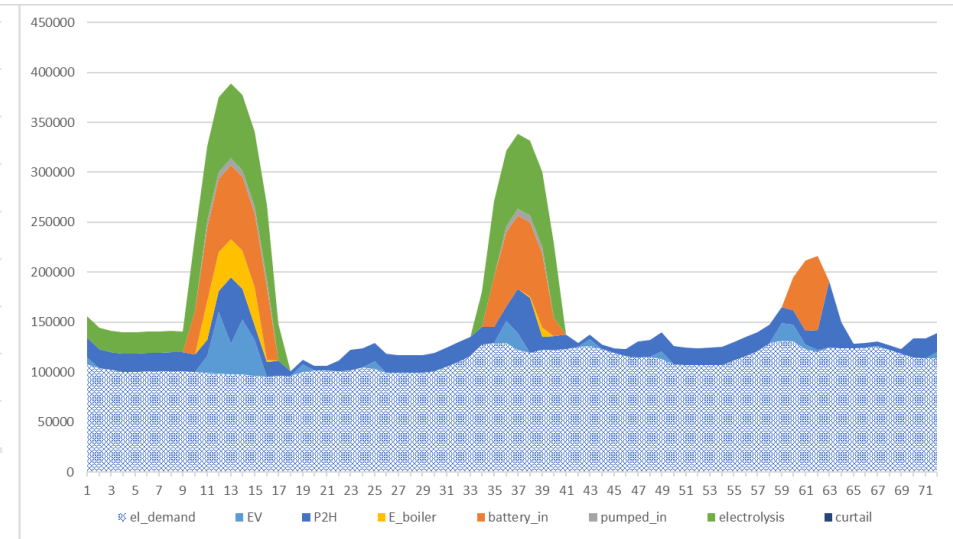
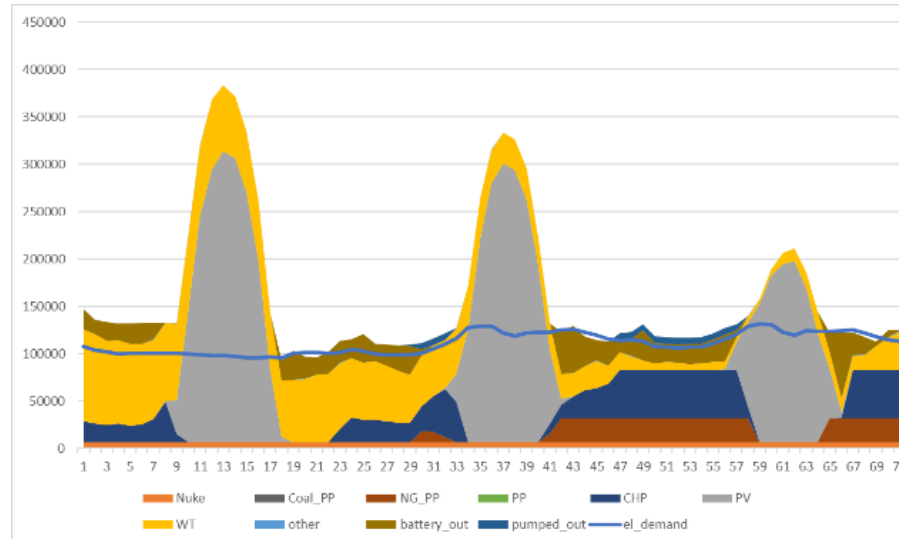


수요측면



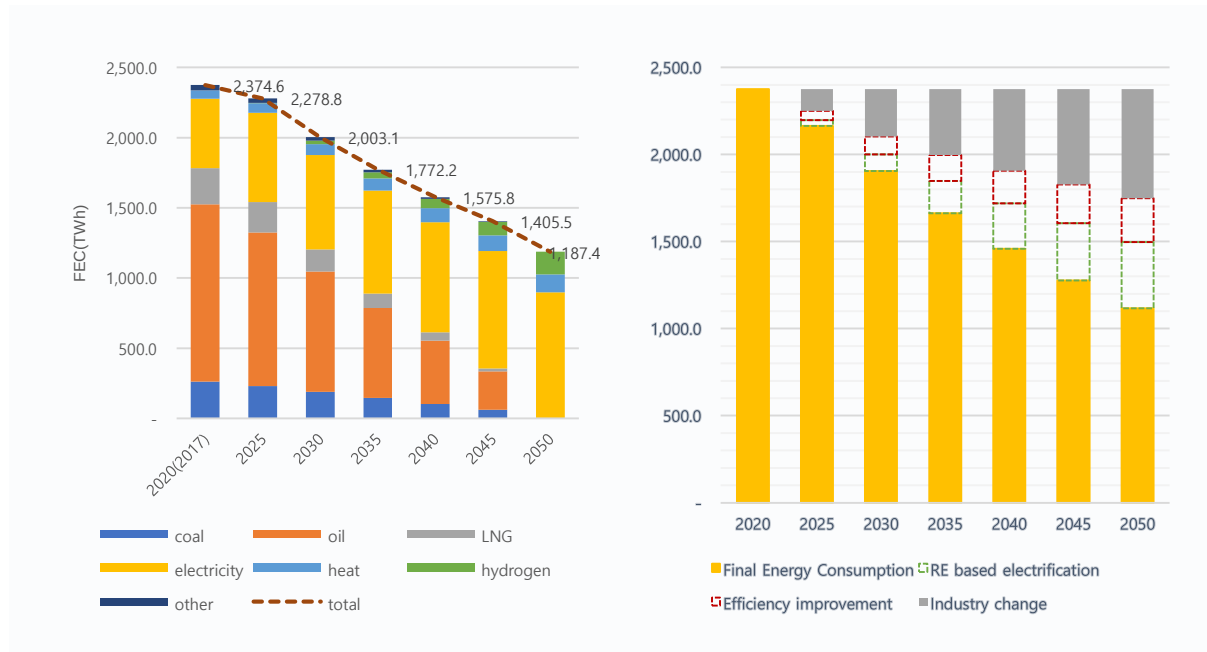
겨울 전력망 수급 현황

- 여름에 비해 히트펌프와 전기보일러 등의 열부문과 전력부문의 연계부문의 활성화

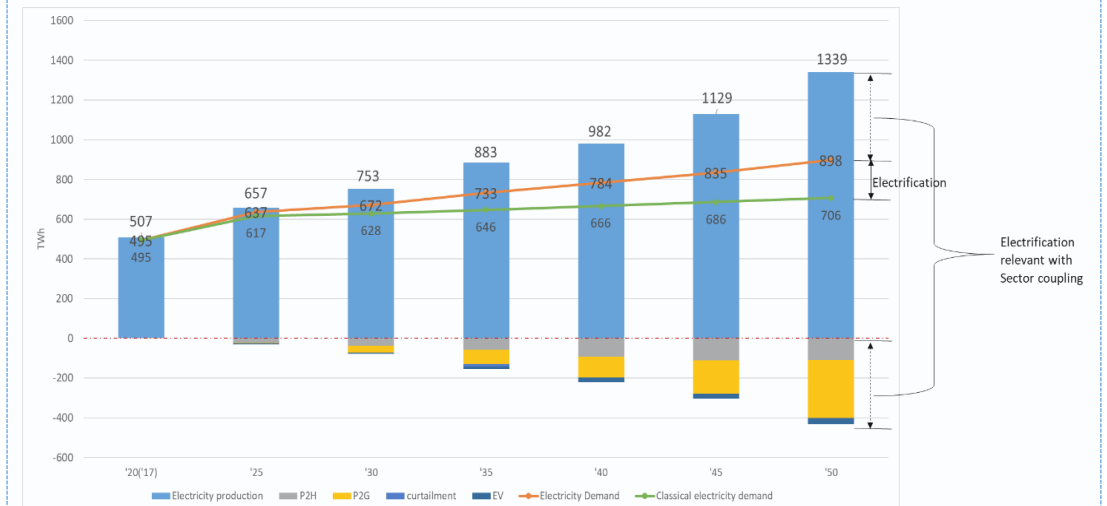


탈탄소화 전략3> 전력화 & 에너지 효율 향상

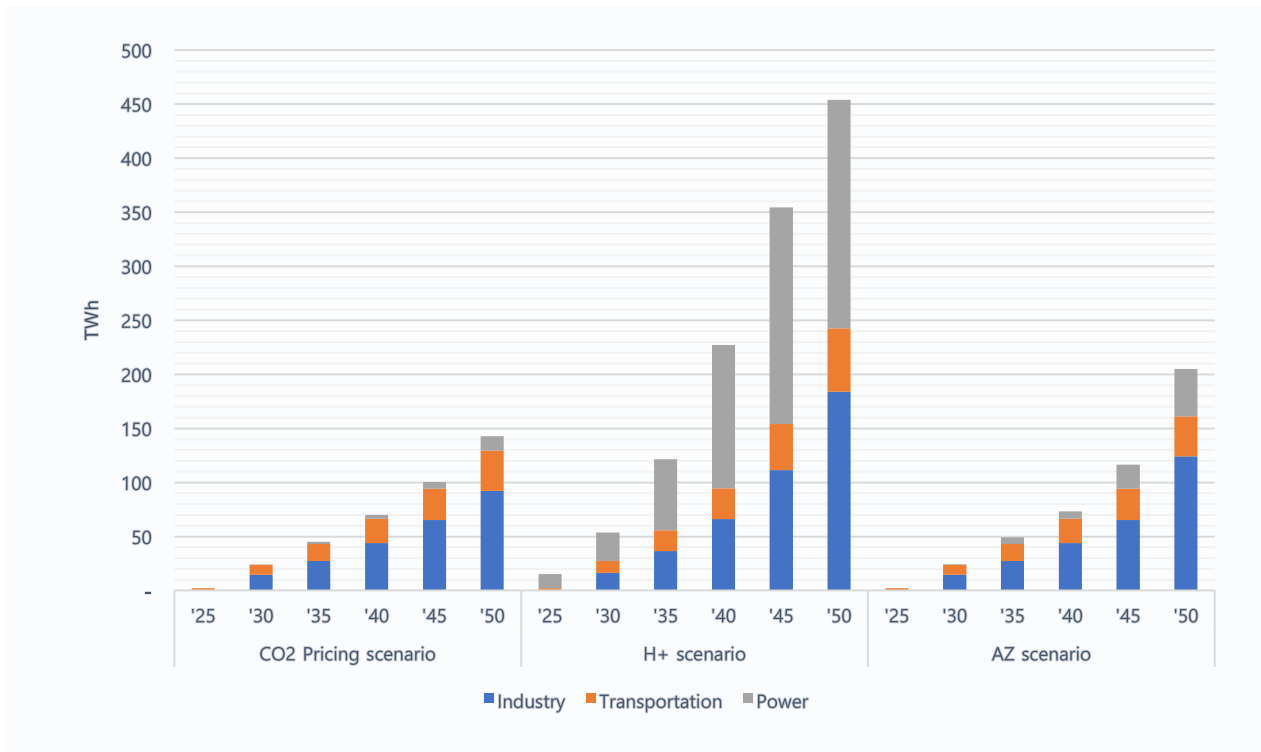
- ▶ 2050년 최종에너지 수요는 2020년 대비 약 50% 감소 – 에너지 효율향상, 재생에너지 전력화, 산업부문 수요 변화 등 3가지 요인
 - 에너지 효율향상은 에너지최종소비를 줄임
 - 전력화를 통한 효율향상
 - 재생에너지에서 생산된 전력은 기존의 화석연료발전소에서 발생하는 변환효율이 없어서 시스템 효율을 향상시킬 수 있음



- ▶ 풍부한 전력 생산을 기반으로 한 전력화는 부문간 연계를 활성화하고, 전체 시스템의 효율을 강화



- ▶ 탄소 중립을 위한 수소의 역할
 - 전력화를 통해 탈탄소가 이뤄지기 어려운 부분에 사용 (수송:중장비, 산업고온열공정, 수소환원공정)
 - CO2 Pricing 시나리오에 비해 AZ 시나리오에서의 수소 수요가 증가
- ▶ 과도한 수소 보급목표는 시스템의 비효율 초래



▶ H+ 시나리오 분석 결과 中:

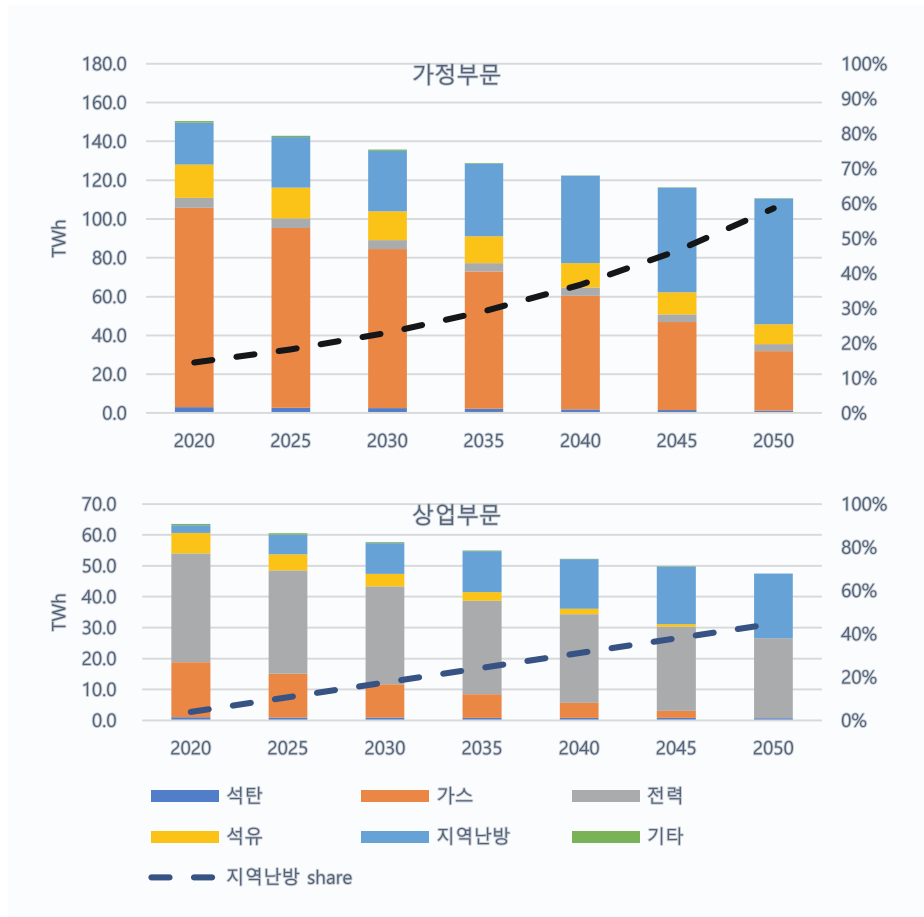
- H+ 시나리오에서는 수소 생산을 위한 발전설비의 추가 보급이 발생
- 효율이 낮은 전력->수소->전력 의 변환 과정 최소화 필요



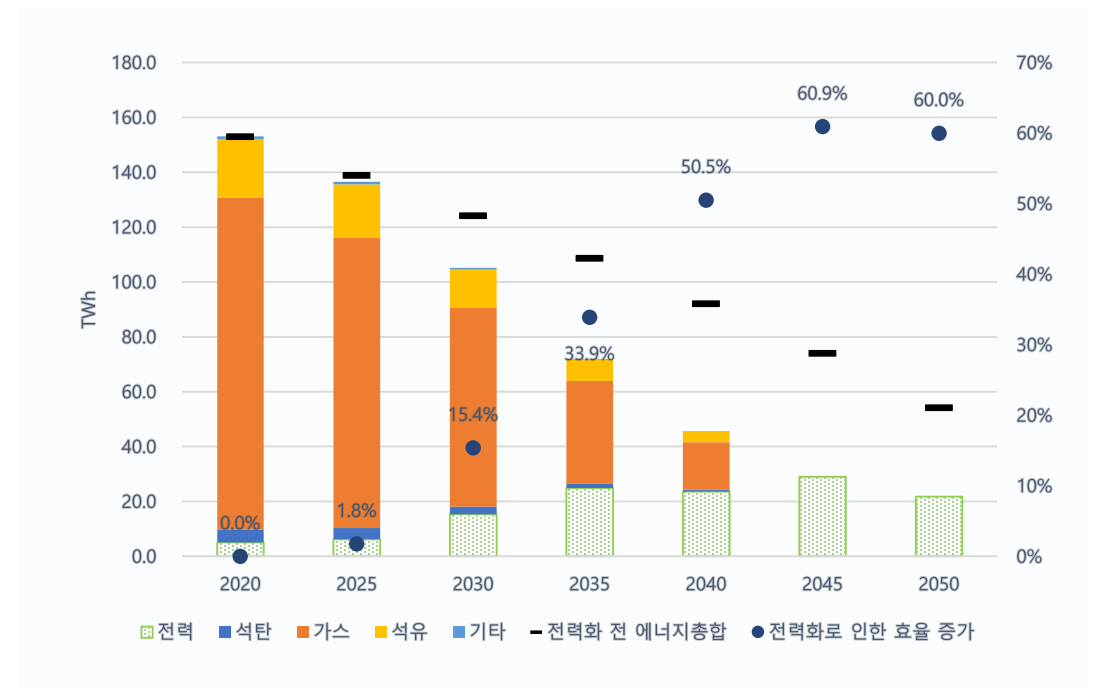
섹터별 시나리오 (건물)

1 지역난방 비중 증가

- 가정('17년 14.4%, '50년 58.6%), 상업('17년 4.5%, '50년 44.5%)

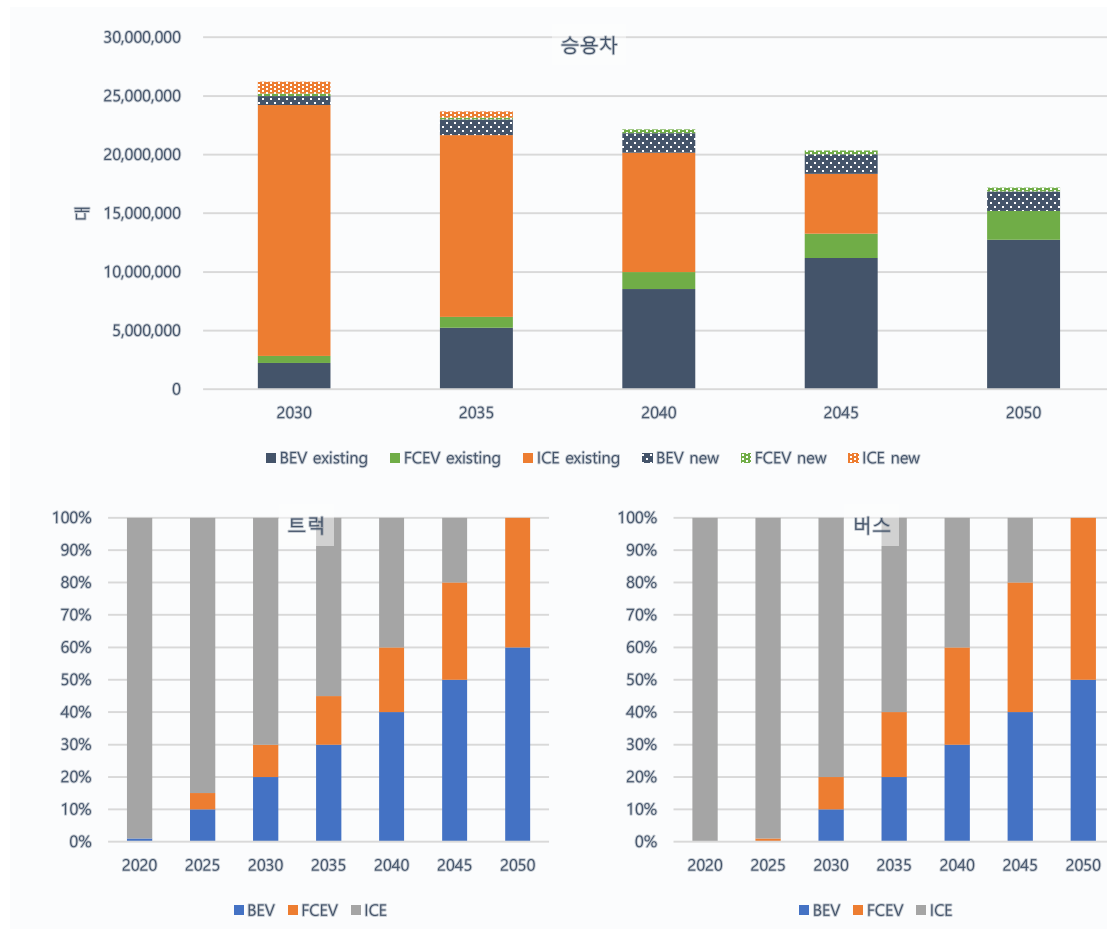


2 개별난방 수요 감소 및 전력화 확대

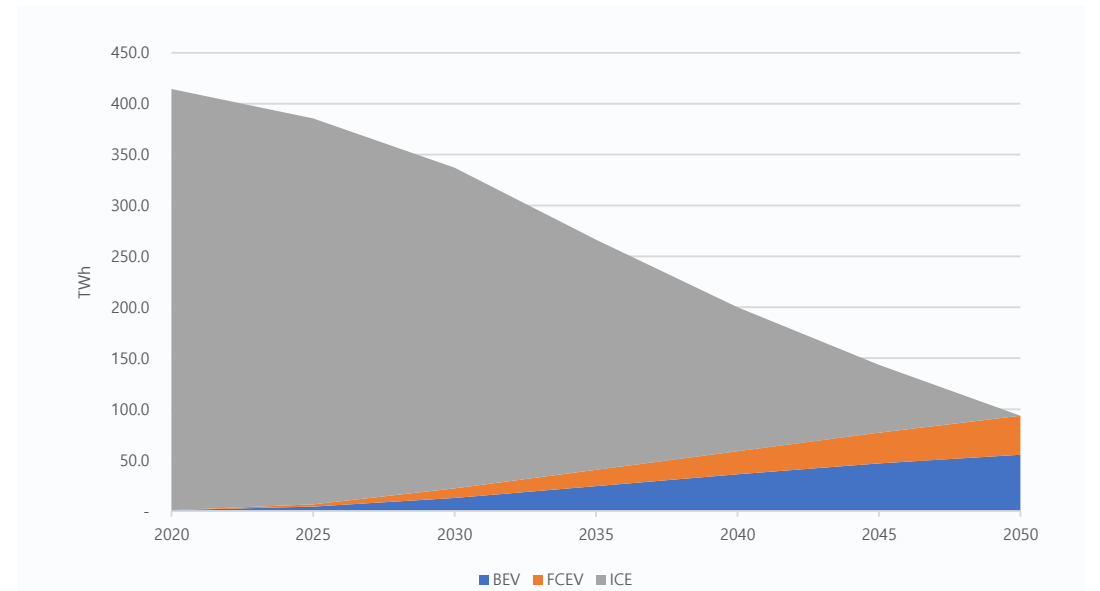


섹터별 시나리오 (수송)

- ▶ 내연기관차 감소와 전기차, 수소차의 증가
 - 전기차 대비 상대 효율은 수소차(67.4%) 내연기관차(13.7%)



- ▶ 수송부문의 에너지원별 소비량 변화



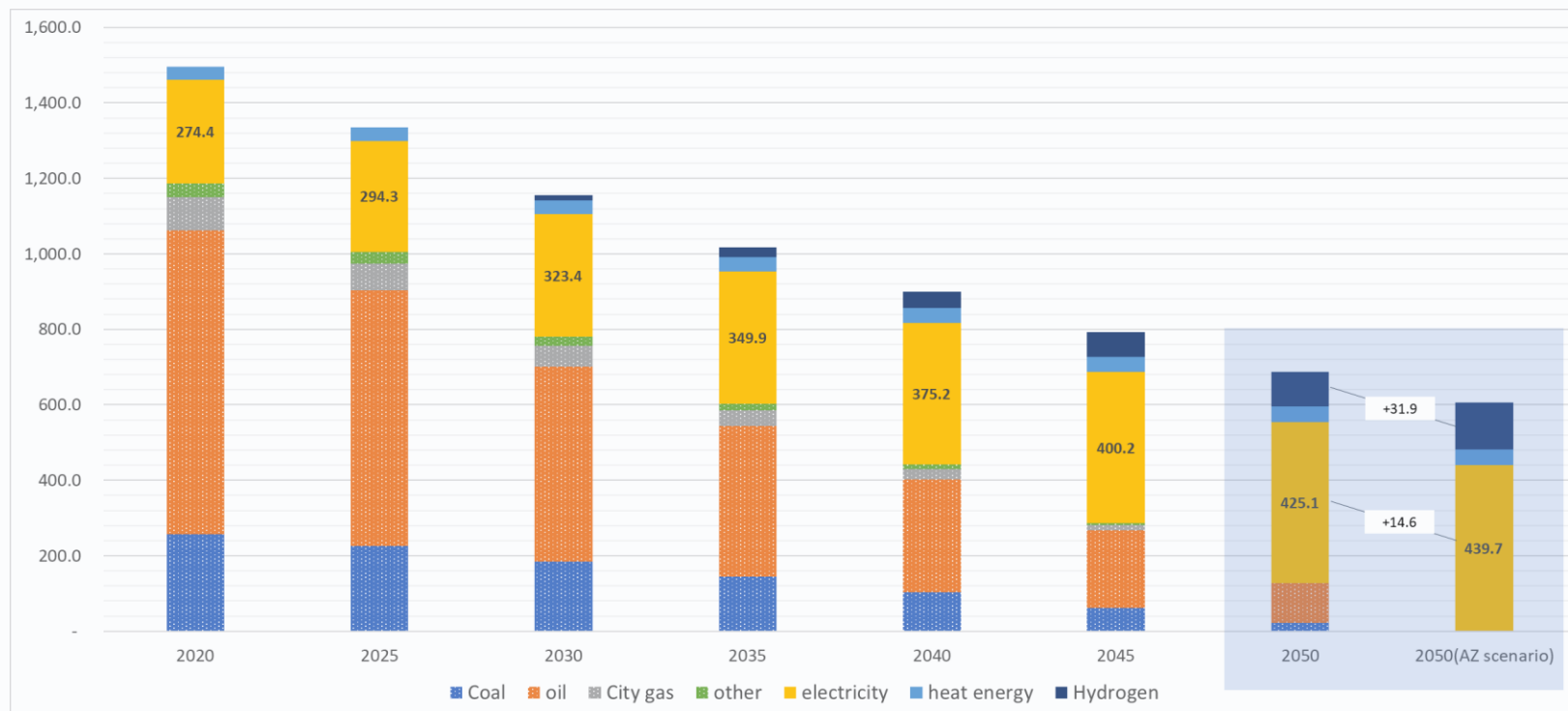
- ▶ 2020년 수송부문 에너지 소비량은 약 410TWh로 99% 이상이 화석연료로 구성되었으나, 2040년 탈내연기관을 통해 2050년 수송부문 최종에너지 소비량은 93.6TWh로 감소
- ▶ 2020년 수송부문에서의 최종 에너지 수요는 총 에너지 수요의 17.4%를 차지하였으나 2050년 총 에너지 수요에서 수송부문이 차지하는 비중은 8.3%로 감소

1 연료 사용의 탈탄소화(산업 전체 업종)

- 효율향상: 전년대비 1%의 향상('50년 '20년 대비 26.5%)
- 열전환(저온열): 100°C이하 열 직접사용
- 전력화: 화석연료의 전력화

2 원료 사용의 탈탄소화(철강,석유,시멘트 업종)

- 철강 : 전기로 비중 증가, 수소 사용 확대
- 정유 : 석유제품 수요감소에 따른 국내 원유 정제량 감소(2050년 0)
- 석유화학 : 석유제품의 화학적 재활용 및 대체원료 사용 증가(수소 및 바이오 원료)
- 시멘트 : 석탄 사용의 퇴출 및 온실가스 무배출 광물 대체



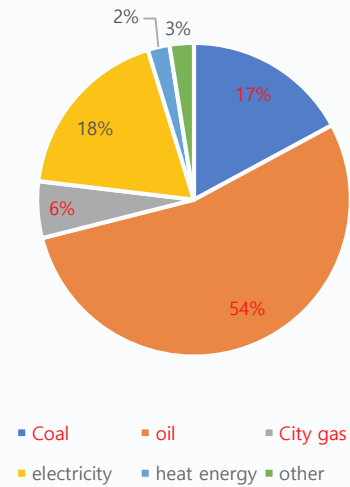
섹터별 시나리오 (산업)

▶ 산업부문 탈탄소 전략

- 연료 및 원료 사용으로 구분하여 접근
- 연료 사용은 산업 전부분에 적용
- 원료 사용은 화석연료의 소비량이 많은 철강, 정유 및 석유화학, 시멘트산업에 대하여 적용

용도별/에너지원별 사용량(2017, TWh)

	원료	연료	계
Coal	167.8	88.3	256.1
oil	765.1	41.7	806.8
LNG	0.3	87.0	87.3
electricity	-	274.4	274.4
heat	-	33.7	33.7
other	0.0	37.5	37.5
total	933.2	562.6	1,495.9



업종별 온실가스 배출량(2017, ktCO₂eq.)

구분	합계	석탄류	석유류	도시가스	기타연료	열에너지	전력
산업부문전체	349,791.4	113,825.9	66,998.6	21,708.2	5,486.9	11,551.9	130,219.9
광업	673.6	129.6	91.1	5.1	0.1	-	447.7
제조업	349,117.8	113,696.3	66,907.5	21,703.1	5,486.8	11,551.9	129,772.2
정유	38,019.2	2.2	32,201.3	734.3	102.6	887.7	4,091.1
화학	66,362.8	1,565.8	23,903.4	4,544.4	345.4	6,673.2	29,330.7
철강	133,665.3	103,435.7	1,867.1	5,699.5	289.3	517.6	21,856.1
시멘트	23,863.6	8,503.1	5,222.2	1,623.4	2,033.5	97.1	6,384.3
기타	87,206.9	189.5	3,713.5	9,101.5	2,716.0	3,376.3	68,110.0

- 전력은 간접 배출로서 배출계수 0.46 tCO₂/MWh를 적용
- 나프타는 IPCC에서 권고한 탄소물입를 적용(원료용 사용량의 1/4에서 CO₂ 배출)

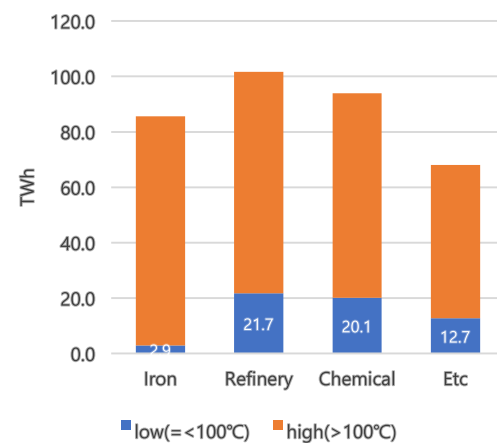
1 연료 소비의 탈탄소화

- ▶ 1) 에너지 효율 향상: 매년 전년 대비 1% 효율 개선

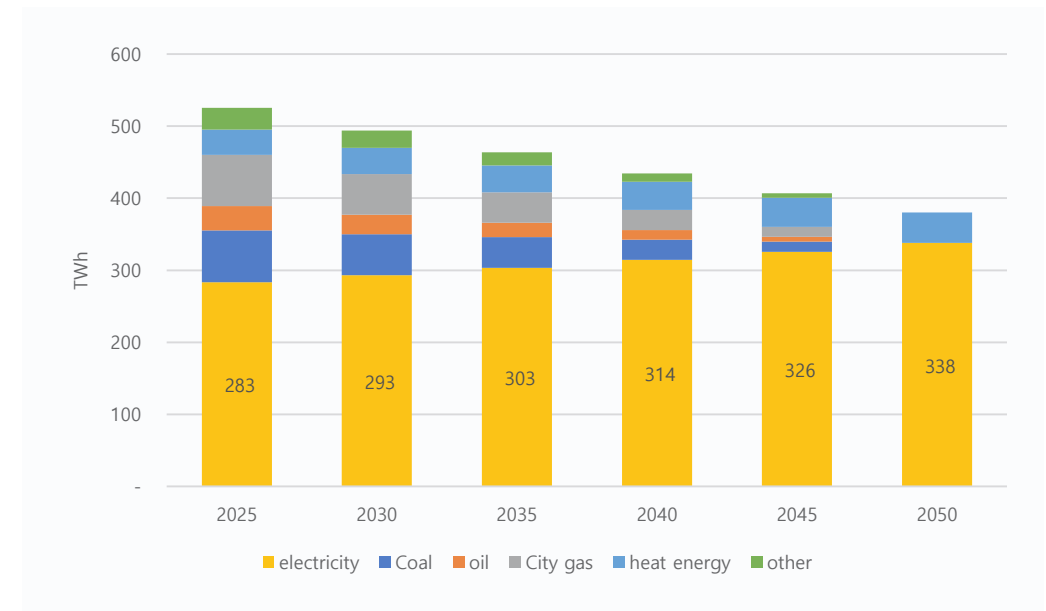
	2025	2030	2035	2040	2045	2050
효율향상(2020대비)	5%	9.8%	14.3%	18.5%	22.6%	26.5%

- ▶ 2) 연료 사용의 탈탄소화(저온열 직접사용)
- 열 생산을 위한 연료 사용량 추정(전력/열)
 - 저온 열(100°C이하) 사용량 추정

	전력	열
Coal	-	88.3
oil	2.2	39.5
LNG	7.9	79.1
electricity	196.2	78.2
heat	1.4	32.3
other	5.7	31.8
	213.4	349.2



- ▶ 3) 연료 사용의 탈탄소화(전력화)

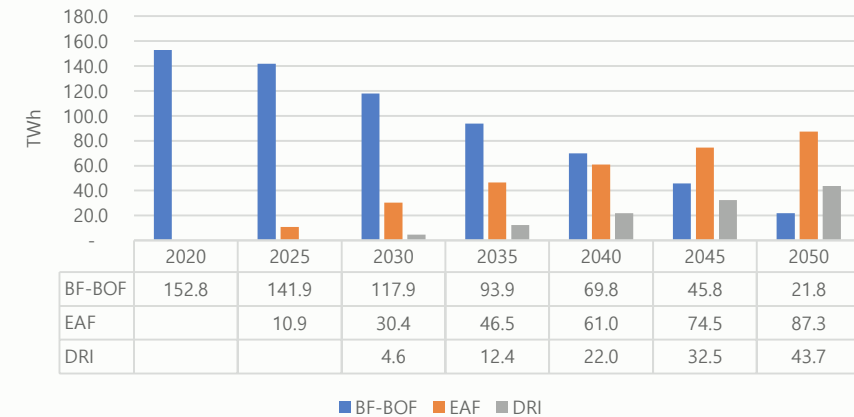


2 원료 사용의 탈탄소화(석탄)

- 철강산업 : 전기로 비중 증가 및 수소환원제철 활용
- 시멘트산업 : 석탄 사용의 점진적 퇴출

▶ 철강산업

- 2020년 현황: 고로에서 생산되는 철강의 비중은 70%, 고로에서 소비되는 석탄(코크스)는 152.8TWh
- 2050년 변화 내용:
 - 철강 생산에 필요한 원료 에너지의 총량은 2050년까지 유지된다고 가정
 - 전기로의 철강 생산 비중은 2020년 30%에서 2050년 60%까지 매년 1%씩 증가
 - 수소는 2030년 생산공정에 도입된 후, 2050년까지 매년 1.2%씩 수요 증가('50년 30%)
 - 전기와 수소 사용량의 증가만큼 석탄(코크스)의 사용량 감소



▶ 시멘트산업

- 2020년 현황: 석탄 사용량은 15.0TWh
- 2050년 변화 내용:
 - 2050년까지 시멘트 산업에서의 석탄 사용의 퇴출 및 온실가스 무배출 광물 사용으로 대체

2 원료 사용의 탈탄소화(석유)

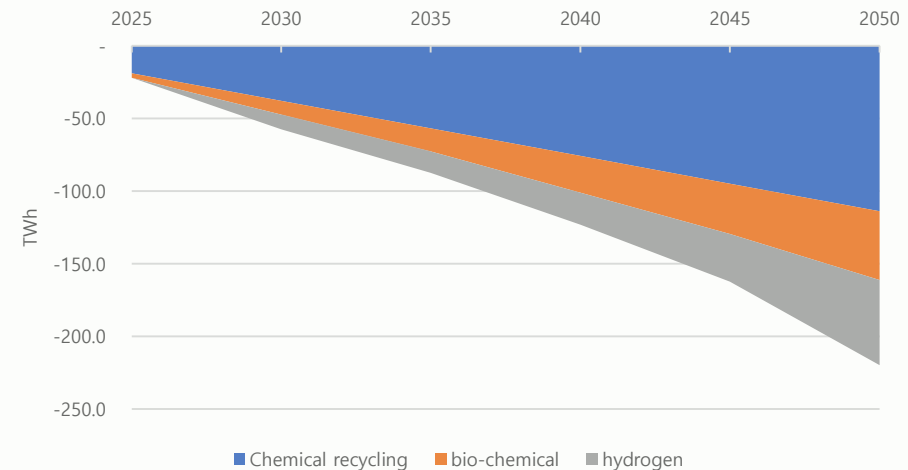
- 정유산업 : 석유제품 수요 감소 반영 - (수송)탈내연기관, (석유화학)나프타 수요 감소
- 석유화학 : 화학적 재활용, 바이오 및 수소 원료 사용 증가

▶ 정유산업

- 석유 소비를 산업부분과 산업외부분으로 구분
- 산업외부분의 석유제품 수요 변화를 반영
 - 수송부분의 수요가 산업외부분을 대표한다고 가정 <산업(60.5%), 수송(32.4%), 가정상업(4.9%), 공공기타(1.1%), 에너지산업(1.1%)>
- 산업부분의 나프타 수요 반영
 - 석유화학산업에서의 감축 반영; 석유제품 재활용, 대체원료 사용 등
- 원유의 종류 변경과 국내 생산/해외 수입의 비중 변화 적용
 - 나프타 함량: '20, 30%, -> '40, 70%
 - 나프타 수입비중: '20, 40% -> '50, 100%

▶ 석유화학산업

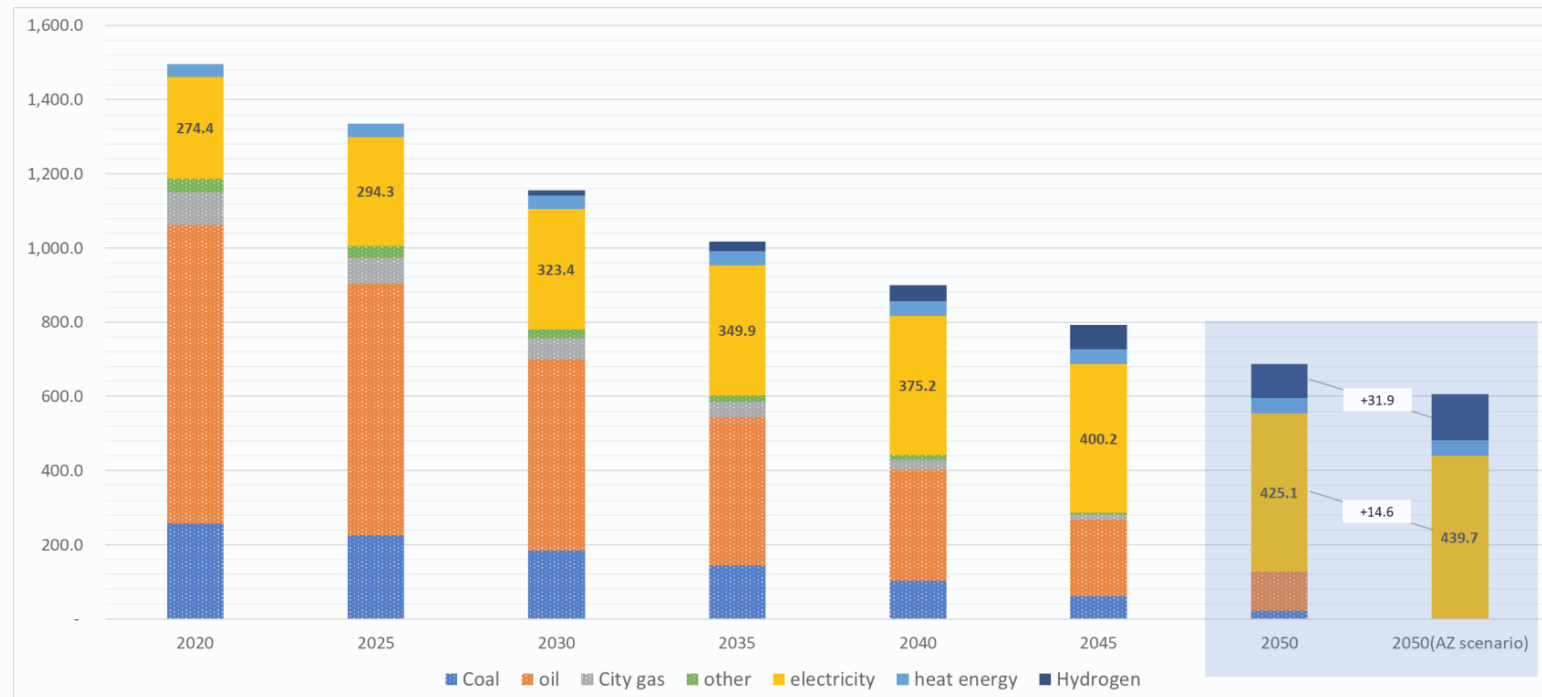
- 2020년 현황: 정유산업에서 석유(원유)수요는 449TWh, 석유화학산업에서 석유(나프타)수요는 316TWh
- 2050년 변화 내용:
 - 더 이상 국내에서 원유를 정제하여 석유제품을 생산하지 않고, 석유화학산업에서 필요한 석유제품을 직접 수입하여 사용(2050년 석유(나프타) 수요 106TWh)
 - 화학적 재활용 비중이 2050년 36%까지 매년 1.2%씩 증가
 - 바이오 원료 사용이 2025년 도입 이후, 2050년 15%에 도달



3 산업부문 수요 변화 전망

- 전력화 비중 증가(2020: 18.3% -> 2050: 61.8%)
- 화석연료 의존도 감소(2020: 79.4% -> 2050: 18.6%)
- 수소 활용 증가(2050: 13.4%),
- 산업부문의 완전한 탄소 제로를 달성하기 위해서는 전력 및 수소 활용의 강화 등 추가적인 노력이 필요

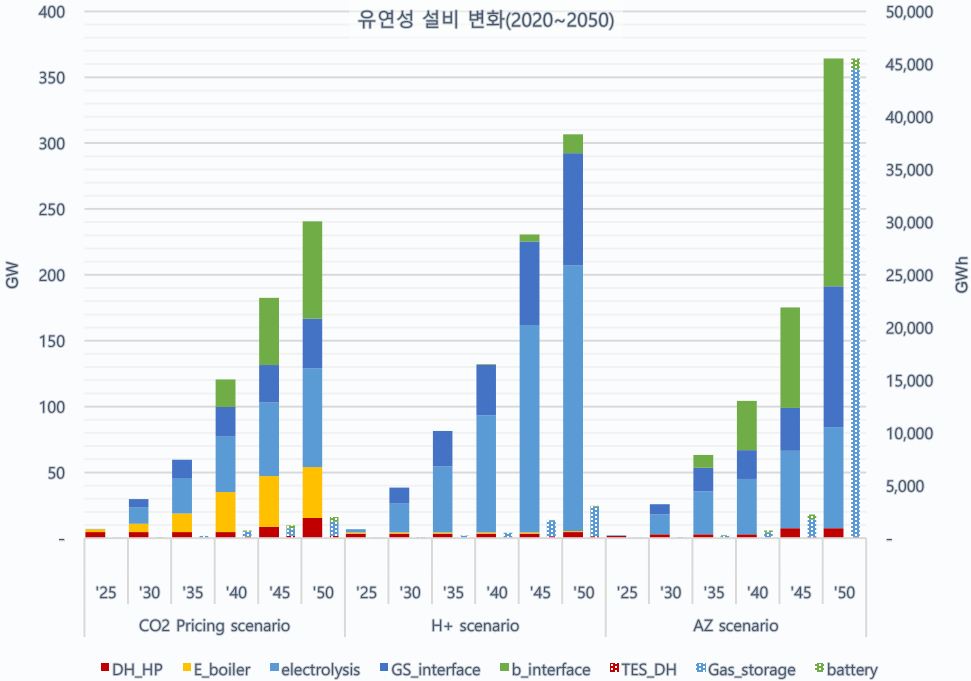
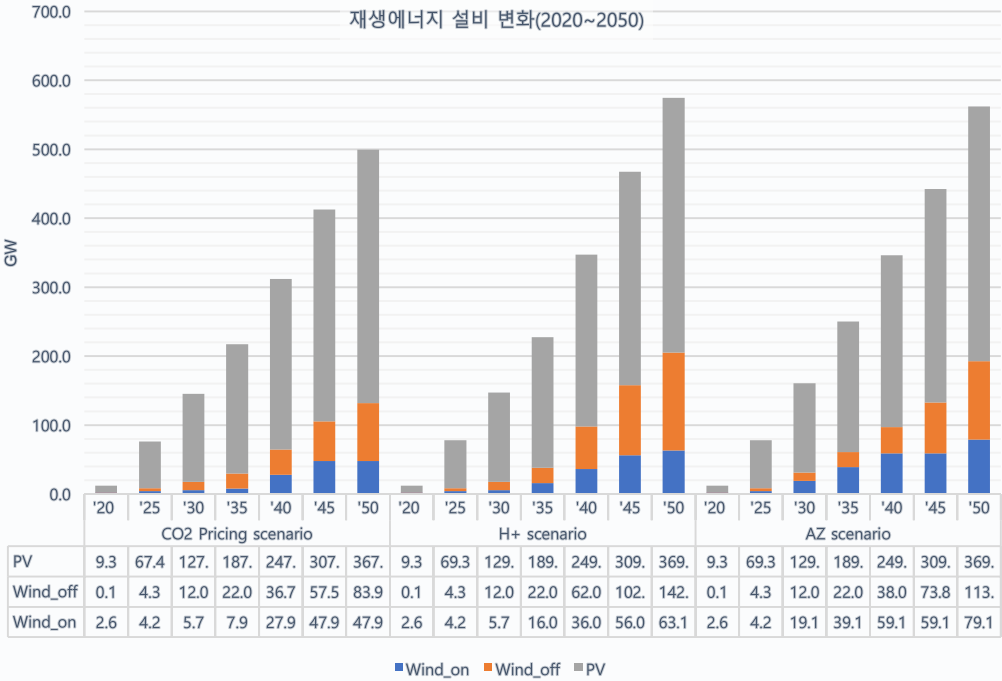
*참고: AZ 시나리오 전력화 비중(2050: 72.6%), 수소 비중(2050: 20.5%)



시나리오 주요 결과 비교 - 재생에너지&유연성 설비

- ▶ 재생에너지 설비 활용을 효율적으로 하기 위해 유연성 설비의 보급도 맞춰서 증가하며, 일정수준의 재생에너지 설비 확보 후에는 유연성 설비의 보급이 더욱 중요함
- ▶ 유연성 설비의 비중은 AZ 시나리오에서 약 10% 가량 높음

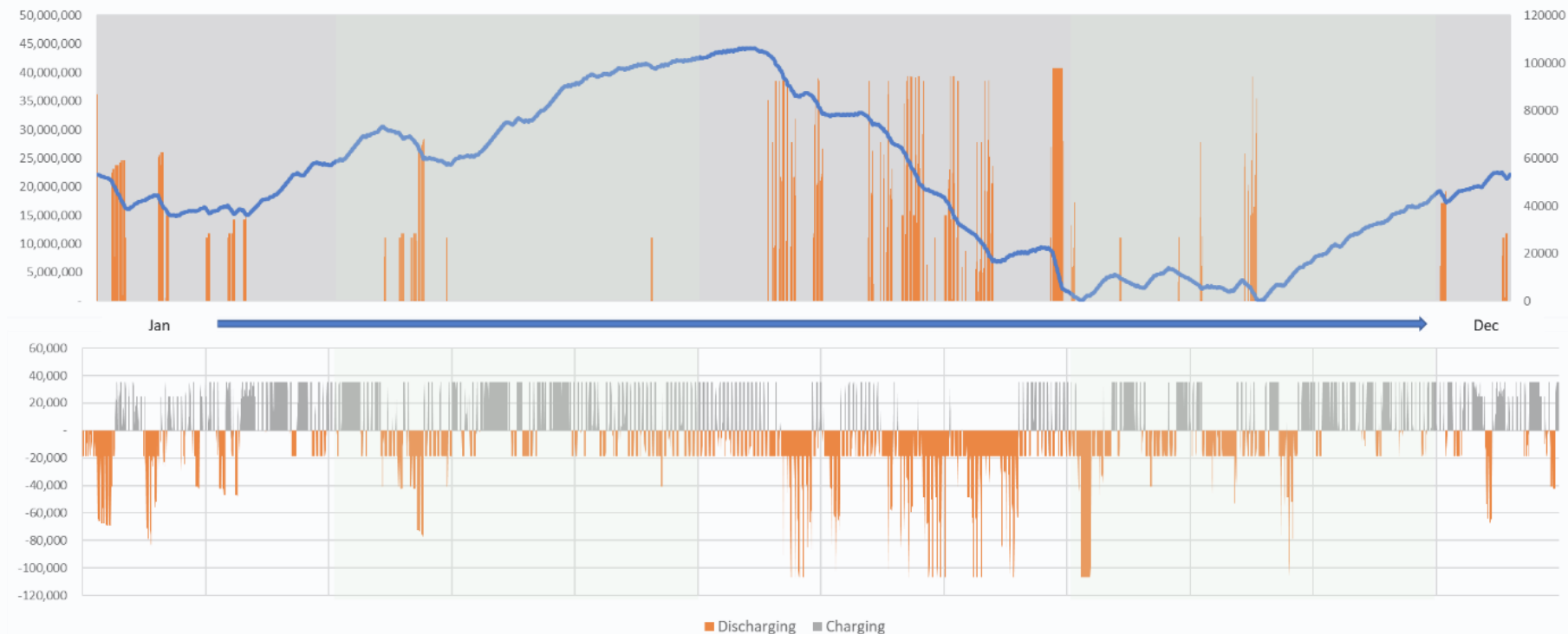
	CO2 Pricing	H+	AZ
Storage Capacity (GWh)	2,008	3,085	45,541
Production Capacity (GW)	606.0	674.8	647.9
Flexible Capacity (GW)	243.8	306.6	375.0
Flexibie Capacity ratio (%)	27.7	31.2	36.7



시나리오 주요 결과 비교 - AZ 시나리오 특징

- ▶ 완전한 탄소 중립을 위해서는 대규모의 에너지 저장설비를 마련해야 함
- ▶ 장마 등 계절적 요인에 따라 재생에너지 이용률이 특정 기간 낮아지기 때문
- ▶ 증가된 저장 용량은 3개월 분량의 수소를 미리 확보하는 것임

<AZ 시나리오의 수소 저장설비 운영>



- ✓ 2050년 기후중립은 가능하지만 상당한 수준의 재생에너지 확대 필요. 재생에너지 확대에 속도를 내야함.
 - 2050년까지 최소 500GW의 재생에너지 (태양광 367 GW 이상, 풍력 132GW) 설치가 필요
 - 2050년까지 연간 17기가 이상의 재생에너지 설치 필요 (현재 재생에너지 확대 속도 2019년 3.5기가, 2020년 3.4기가 (3사분기까지 집계))
 - 재생에너지를 위한 전력망 인프라 확대 필요
- ✓ 에너지 효율향상 및 전력화를 통해서 현재 수준의 에너지 소비를 절반 혹은 그 이상으로 줄여야 함.
 - 건물부문의 단열강화와 히트펌프
 - 수송부문에서 전기차, 수소차 변환을 통한 수송부문 에너지 수요 감축
- ✓ 재생에너지 변동성 대응을 위해 유연성 기술 필요
 - 수전해, 배터리, 수소저장, 열저장소, 히트펌프, 전기자동차 등 유연성 기술에 대한 연구개발 및 설치 계획
- ✓ 수소는 필수적인 자원이지만, 과도한 목표는 오히려 시스템의 효율성 저하 등의 부작용을 초래
 - 전력->수소->전력 의 사이클에서 상당한 에너지 손실 발생
- ✓ 전력화 및 수소인프라 확대 계획은 재생에너지 확대 일정에 맞춰야 함