

# 탄소중립을 위한 대한민국 전력산업의 전환 로드맵

**Seungwan Kim, Ph.D.**

Dept. of Electrical Engineering

Chungnam National University

Disclaimer:

본 자료는 발표자 개인의 의견이며 발표자가 소속된 기관 및 위원회의 의견을 대표하지 않음을 밝힙니다.

## 발제자 프로필

### ▪ 경력

- 조교수, 충남대학교 전기공학과 (2018.9 ~ )
- 박사후연수 연구원, University of Cambridge 에너지정책연구소 (2018.3 ~ 2018.8)

### ▪ 활동

- 대표, **사단법인 넥스트** (NEXT Group; 비영리 에너지환경정책 싱크탱크) ('20.9 ~ )
- 위원 (과학기술분과 간사), 대통령 직속 2050 **탄소중립위원회** ('21.5 ~ )
- 비상임이사, **한국에너지공단** ('20.11 ~ )
- 위원, 국무총리실 산하 **수소경제위원회** ('20.7 ~ )
- 전문위원, 대통령 직속 **국가기후환경회의** 저감위원회 ('19.11 ~ '21.3)
- 전문위원, 산업통상자원부 **제1차 분산에너지활성화 로드맵** 워킹그룹 ('20.3 ~ '20.12)
- Associate Editor, Journal of Electrical Engineering & Technology [SCI Journal] (2020.2 ~ )

# 탄소중립을 향한 여정의 시작 - 대통령의 탄소중립 선언

사회 환경

## 문 대통령 “2050년 탄소중립 선언…석탄발전, 재생에너지로 대체”



국회 시정연설…툰베리 “행동하라”는 호소에 문대통령 응답



문재인 대통령이 28일 오전 서울 여의도 국회에서 2021년도 예산안 시정연설을 하고 있다. 연합뉴스

한국 정부가 2050년 탄소중립(넷제로)을 이루겠다고 선언했다. 이미 같은 선언을 한 세계 수십 개 국가와 기후위기 문제 대응 인식을 같이 하게 됐다.

## 2050 탄소중립 어떻게 달성해야 할까?

## 탄소중립을 향한 여정의 시작 - 대통령의 탄소중립 선언 그 이후

### ▪ 대통령의 탄소중립 선언 이후 정책 Timeline

- 2021.5.29 - 대통령 직속 2050 탄소중립위원회 출범
- 2021.6.9 - 제1차 탄소중립위원회 총괄기획회의 (정부 기술작업반의 탄소중립 시나리오 1, 2안 첫 보고)
- 2021.7 마지막 주 - 탄중위 자체 안 포함 1, 2, 3안 위원회 내 확정
- 2021.8.5 - 탄소중립 시나리오 초안에 대한 탄중위 윤순진 위원장 공식 발표(예정)
- 2021.8.7 - 탄소중립 시나리오 숙의과정을 위한 "탄소중립시민회의(국민정책참여단)" 출범
- 2021.8 - 2030 NDC 정부부처 협의안 탄중위 보고 및 논의 예정 -> 숙의진행
  - (기존) 2017년 대비 24.4% 감축 -> (상향) 2017년 대비 30 ~ 40% 감축안 중 택일
- 2021.10 - 2050 탄소중립 시나리오 및 2030 NDC 상향 목표 발표

[차기 대선]

- 2022.3 - 차기 대선 및 인수위 출범
- 2022.12 - 제10차 전력수급기본계획 발표(예정)

## 탄소중립을 향한 여정의 시작 - 대통령의 탄소중립 선언 그 이후

### ■ 대통령의 탄소중립 선언 이후 정책 Timeline

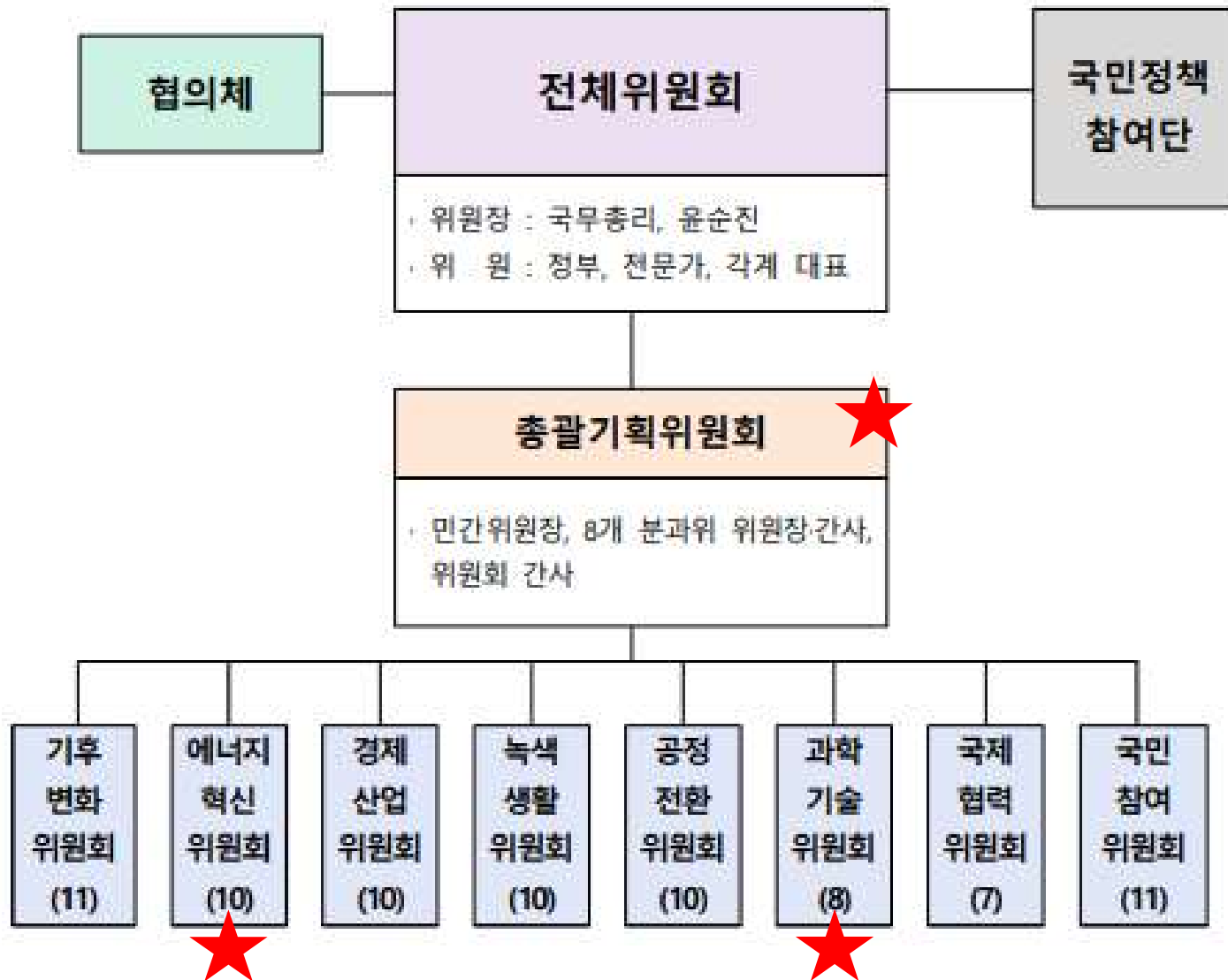
- 2021.5.29 - 대통령 직속 2050 탄소중립위원회 출범
- 2021.6.9 - 제1차 탄소중립위원회 총괄기획회의 (정부 기술작업반의 탄소중립 시나리오 1, 2안 첫 보고)
- 2021.7 마지막 주 - 탄중위 자체 안 포함 1, 2, 3안 위원회 내 확정
- 2021.8.5 - 탄소중립 시나리오 초안에 대한 탄중위 윤순진 위원장 공식 발표(예정)
- 2021.8.7 - 탄소중립 시나리오 숙의과정을 위한 "탄소중립시민회의(국민정책참여단)" 출범
- 2021.8 - 2030 NDC 정부부처 협의안 탄중위 보고 및 논의 예정 -> 숙의진행
  - (기존) 2017년 대비 24.4% 감축 -> (상향) 2017년 대비 30 ~ 40% 감축안 중 택일
- 2021.10 - 2050 탄소중립 시나리오 및 2030 NDC 상향 목표 발표

[차기 대선]

- 2022.3 - 차기 대선 및 인수위 출범
- 2022.12 - 제10차 전력수급기본계획 발표(예정)

# 탄소중립을 향한 여정의 시작 - 대통령의 탄소중립 선언 그 이후

## 탄소중립위원회 구성



## 해외 주요국의 2050 탄소중립 목표 및 2030 NDC 상향 현황

국가명	기준년도	기존 NDC (UNFCCC 제출일)	신규 NDC (UNFCCC 제출일 or 대외적 선언일)	배출량 피크	LEDS 목표 (UNFCCC 제출일)	2050 목표	법제화 여부	비고
미국	2005	32.5~35% (*16.3.9)	50~52% (*21.4.22)	2000	74~86% (*16.11.16)	NZ	X (추진 중)	
캐나다	2005	30% (*16.10.5)	40~45% (*21.7.12)	2007	80% (*16.11.17)	NZ	O	
EU	1990	40% (*16.10.5)	55% (*20.12.18)	1990	CN (*20.3.6)	CN	O	
영국	1990	53%	68% (*20.12.12)	1990	80% (*18.4.17)	NZ	O	
독일	1990	40%	65% (*21.5.5)	1990	80~95% (*17.4.5)	NZ (2045년)	O	
일본	2013	26% (*16.11.8)	46% (*21.4.22)	2013	80% (*19.6.26)	NZ	X	
한국	2017	24.4% (*20.12.30)	10월 초 상향 예정	2018 (잠정)	NZ (*20.12.30)	NZ	X (추진 중)	

※ 해당 수치는 2005~2025년까지 감축률을 그대로 적용했을 때 2030년에 예상되는 감축률임(기존 NDC의 기준연도가 2025년이기 때문에 2030년으로 환산)

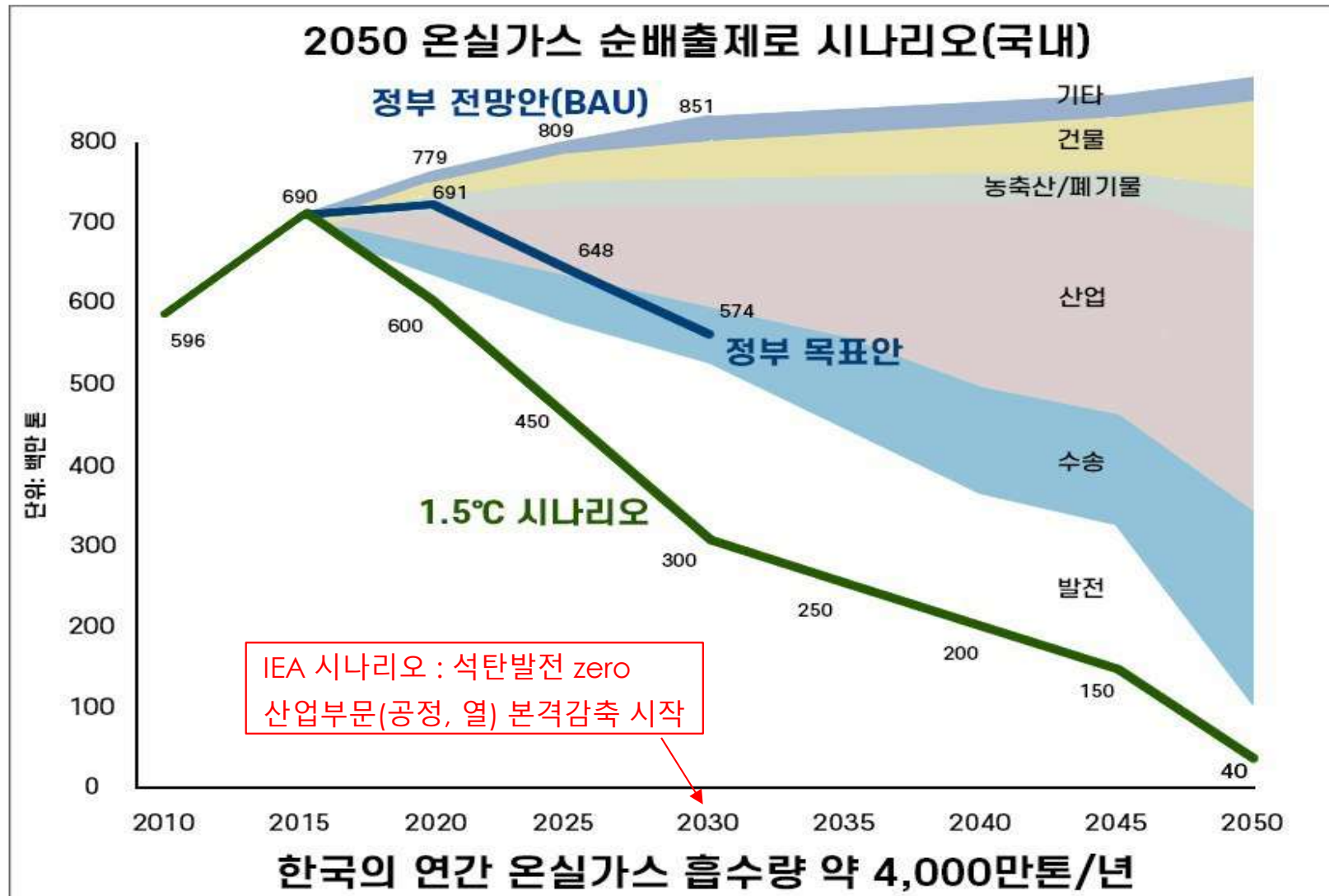
※ CN : Climate Neutrality

※ 일본은 공식적으로 UNFCCC 미제출 상태임

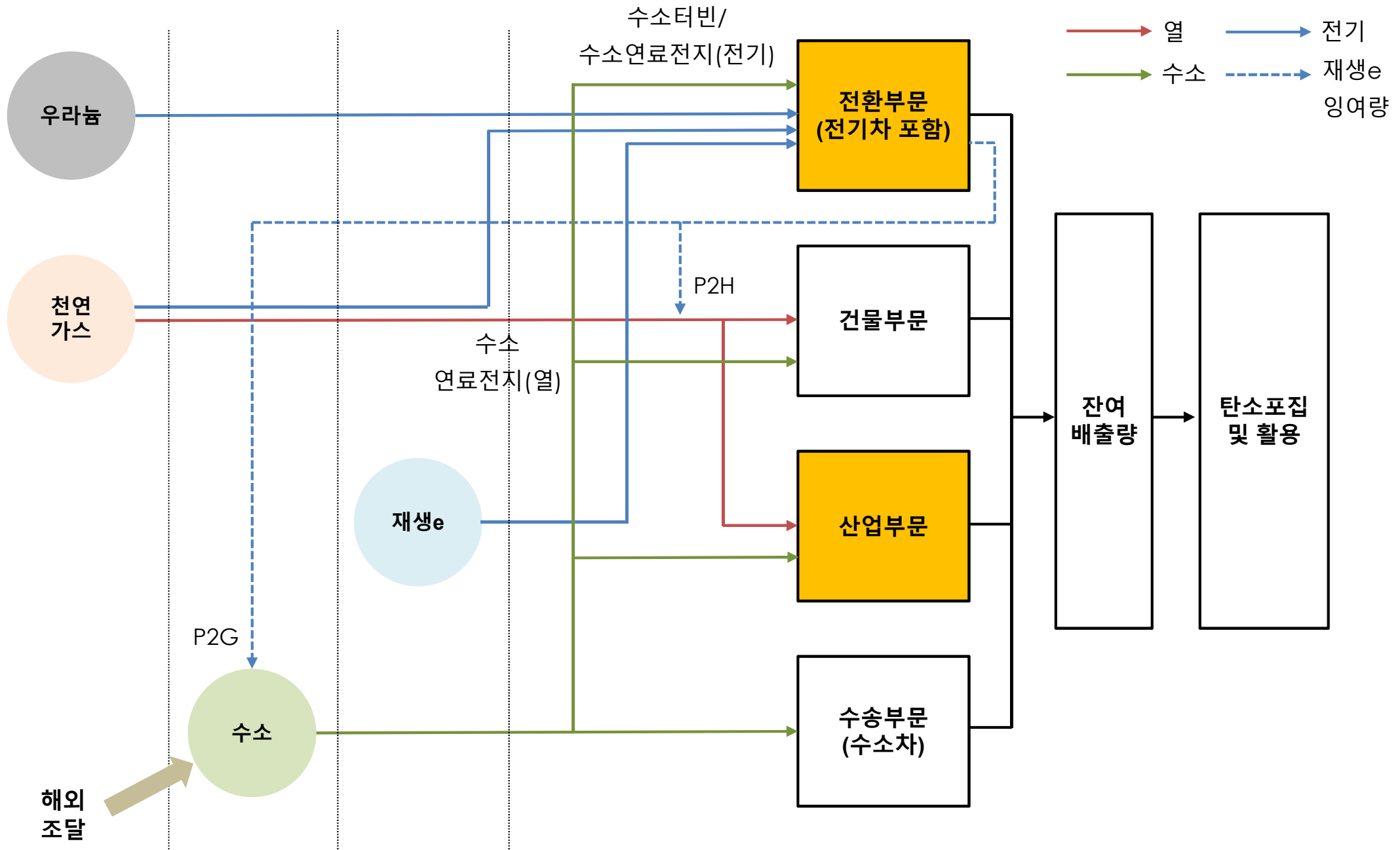
※ 한국은 공식적으로 UNFCCC 미제출 상태임

## 2050 탄소중립 선언의 의미

- 과거 온실가스 감축목표와는 차원이 다른 강도의 대전환 시작



# 2050 탄소중립 어떻게?



## 2050 탄소중립 어떻게? - 전환부문 관점

### 1. 에너지수요 전망 (참고: 2020년 연간 발전량 약 574TWh)

- 전력수요 : 산업 / 수송 / 건물 / 농축수산 / 수소생산 / CCUS (1200~1300TWh 수준 전망)
  - 발전필요량 : 전력수요 + 송배전손실 + 재생에너지 출력삭감 + 저장손실
- 수소수요 : 발전 / 산업(공정) / 수송 / 농축수산 (약 30백만Th2 수준 전망)
- 총 에너지수요는 현재보다 아주 약간 감소하는 가정
  
- 쟁점1: 계속 성장하는 사회를 유지할 것인가?
- 쟁점2: 에너지수요 성장과 경제성장의 Decoupling이 가능한가?
- 쟁점3: 에너지효율 향상에 대한 가정이 적절한가? (현재 일부 반영)
- 쟁점4: 한국의 인구추이를 적절히 고려한 것인가? (2030년 5193만 -> 2050년 4774만<sup>1)</sup>)

## 2050 탄소중립 어떻게? - 전환부문 관점

### 2. 수요의 전기화 비중

- 배출량을 줄이기 위해서는 전기화(Electrification)가 유리
  - 전력수요 증가로 인한 송배전네트워크 투자유발
- 쟁점1: 수요의 전기화 비중은 몇 %가 최적인가?
- 쟁점2: 정전이 발생했을 때 수요 측 에너지 포트폴리오 다양성 부족은 문제가 될 수 있음
- 쟁점3: 열 수요의 전기화가 과연 효율적인가? 어느 정도 규모부터 효율적인가?
  - 고온 열 (산업공정 수요): 재생e -> 전극보일러 -> Heatpump + 축열조 / 바이오매스 열병합 / 수소 열병합
- 쟁점4: 피크부하는 얼마가 될 것인가? - 약 182GW ~ 197GW 예상 (충남대 추정)
  - 전국 업종별 전력수요 패턴 + 탄중위 2050 수요전망 종합

## 2050 탄소중립 어떻게? - 전환부문 관점

### 3. 원자력의 역할?

- 약 1000TWh를 신규원전으로만 충당하려면? - 이용율 80% 가정 시 약 142GW 원전 신설 필요
  - 수급계획 관점에서 오히려 불확실한 솔루션 (지역수용성 문제)
  - 신규원전은 초고압송전선로의 대규모 증설을 유발 (단위용량이 가장 큰 전원)
- 일부 재생에너지 목표치 부담을 경감해줄 수는 있음 (다른 문제는 여전히 존재)
- 핵융합 : 탄소중립 시점 이후에도 상용화가 될지?
- SMR : 상용화 시점이 올지? 300MW 가능 시에도 분산에너지 편익 X (분산에너지 기준 : 40MW)
- 탄중위 : 기존 원전들만 수명대로 활용하는 방안 가정

## 2050 탄소중립 어떻게? - 전환부문 관점

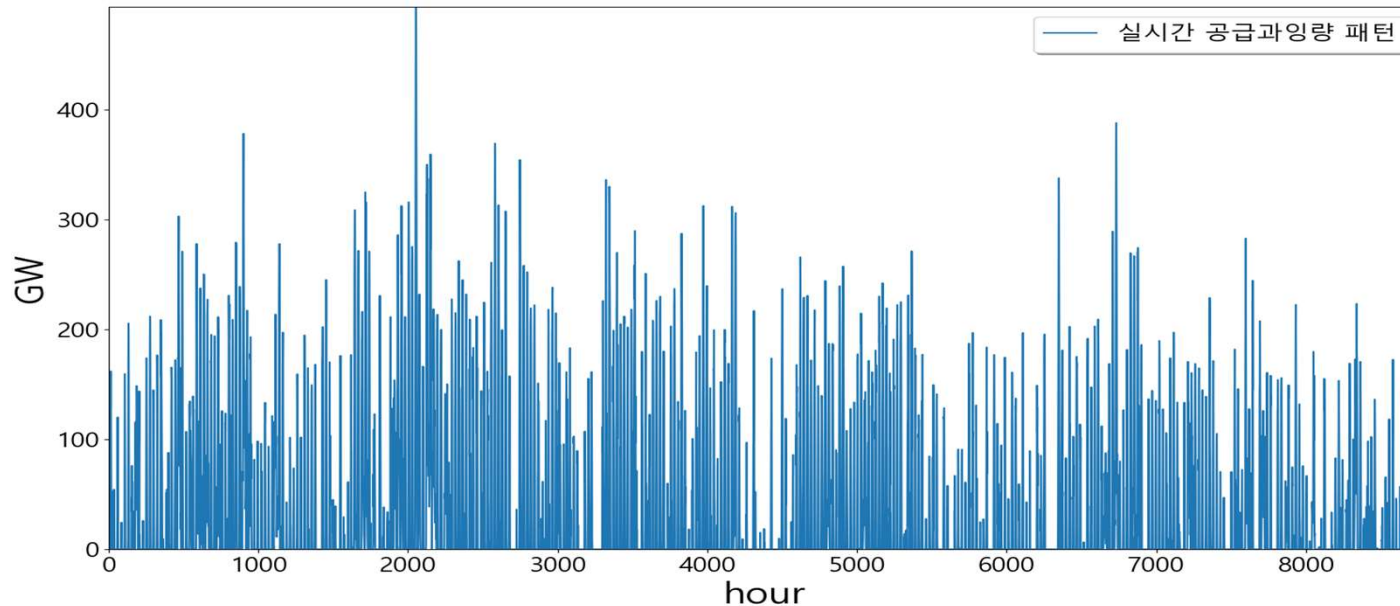
### 4. 재생에너지 목표치와 잠재량

- 재생에너지 잠재량 개념 : 국내 전 지역에 걸친 해당 자원 총량을 가늠하기 위한 자료
- 이론잠재량 : 현재의 과학적 지식 하에서 어떠한 제약도 존재하지 않을 때 활용 가능한 양
- 기술잠재량 : 지리적·기술적 영향 요인을 반영할 때 활용 가능한 양
- 시장잠재량 : 경제적·정책적 영향 요인까지 적용할 때 실질적으로 활용 가능한 양 (이격거리 규제 및 경제성 등 반영)
  
- 탄소중립 위해선 2020년의 시장 잠재량을 뛰어넘는 수준의 재생에너지 필요
  
- 정부 (RE60): 태양광 480 GW / 풍력 42 GW
- 탄중위 (RE80): 태양광 412 GW / 풍력 245.7 GW

## 2050 탄소중립 어떻게? - 전환부문 관점

### 5. 전력수급 안정성

- 2050년 RE80 시 실시간 공급과잉량 예상패턴 -> 엄청난 양의 저장장치 필요

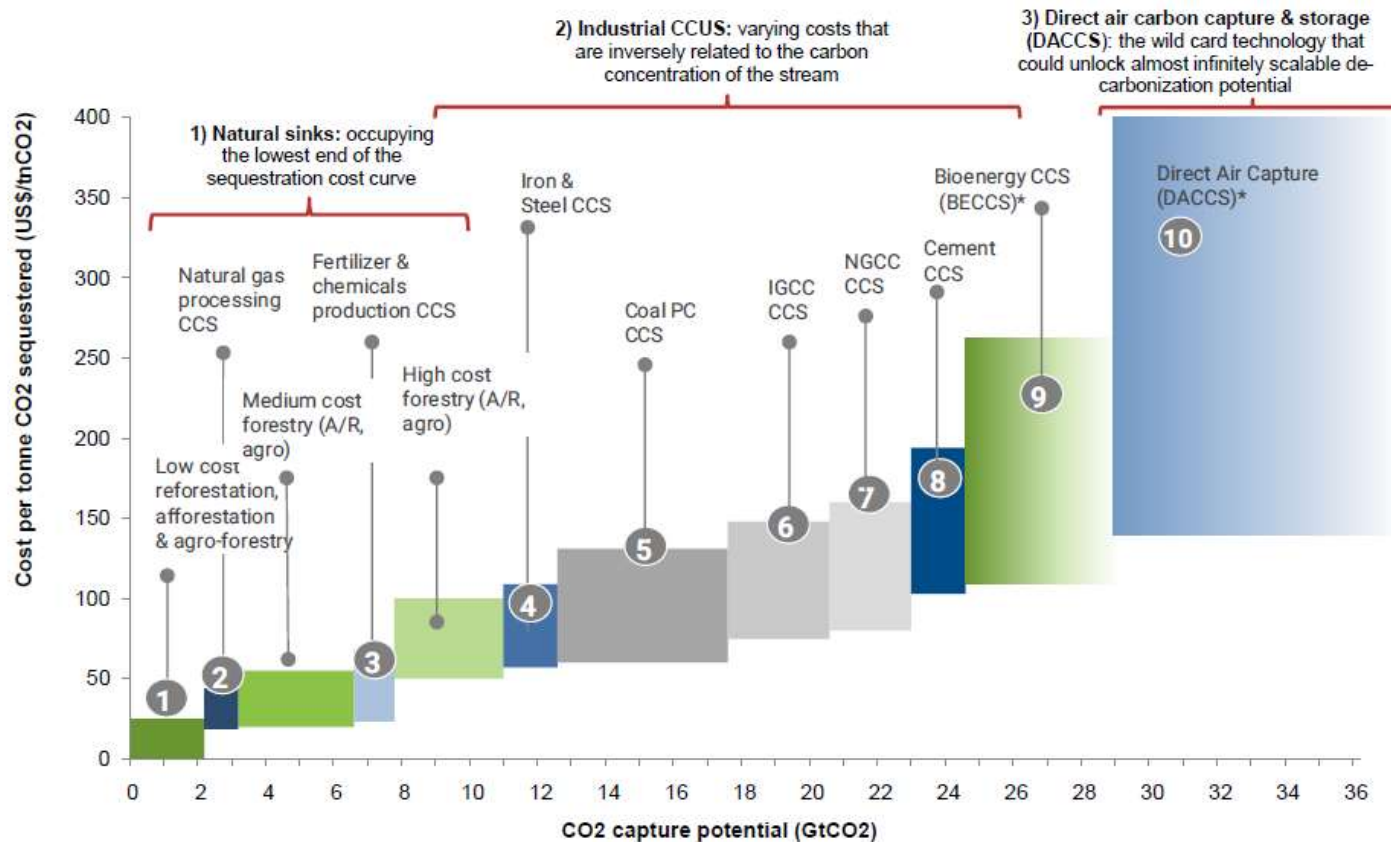


- 쟁점1: 재생에너지 간헐성, 변동성 극복가능한가? -> 저장장치가 답
- 쟁점2: 이상기후가 심각할 때의 전략적 자원은? -> 수소저장 통한 비축자원 필요
- 쟁점3: 그린수소로 저장가능한가?
  - 계절 간 저장을 통해 비축가능 / 국내 그린수소 수요량 충당은 불가능

## 2050 탄소중립 어떻게? – 전환부문 관점

### 6. CCUS의 역할 – 필요하지만 언제부터, 얼마나 써야하는지?

- CCS: 탄소포집 후 저장기술 / CCU: 탄소포집 후 자원화 기술
- 탄중위 CCUS 잠재량 (81.8백만톤 추정 – 해외 잠재량 일부 포함)
- 화석연료 발전 + CCUS? : 재생에너지에 경제성으로 이기기 어려움
- 대규모 화석연료 plant가 사라질 수록 탄소포집 효율은 감소



## 2030 NDC 상향 어떻게? - 전환부문 관점

- 제9차 전력수급기본계획 기준 발전mix (기존 2030 NDC 목표 - 2017년 대비 24.4% 감축)
  - 전환부문 배출량 목표치: 약 192.6백만톤

구분	단위	원자력	석탄	LNG	신+재생	합계 (기타포함)
발전용량	GW	20.4	32.6	55.5	58.0	173.0
발전비중	%	25.0	29.9	23.3	20.8	100.0
이용율(추정)	%	81.9	61.3	28.1	-	-
온실가스 배출계수	tCO2/MW h	-	0.8319	0.3436	-	-

- 2017년 대비 40% 감축으로 목표상향 시 약 100백만톤 수준 감축필요
  - 산업/수송부문의 감축여력이 크지 않다고 생각하고 준비해야...

## 2030 NDC 상향 어떻게? - 전환부문 관점

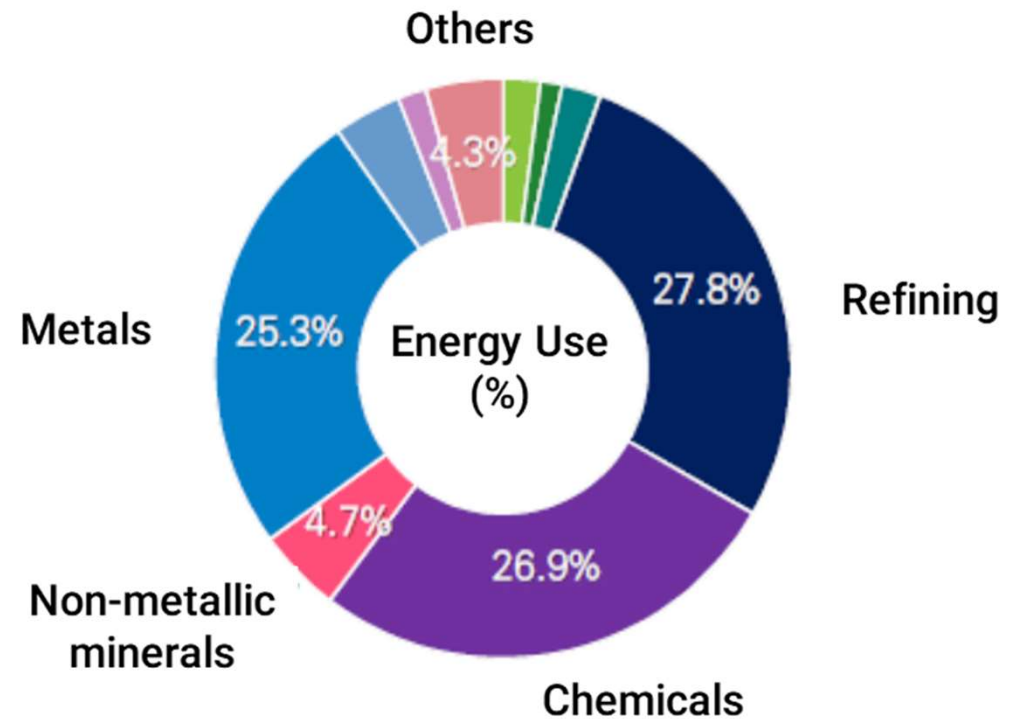
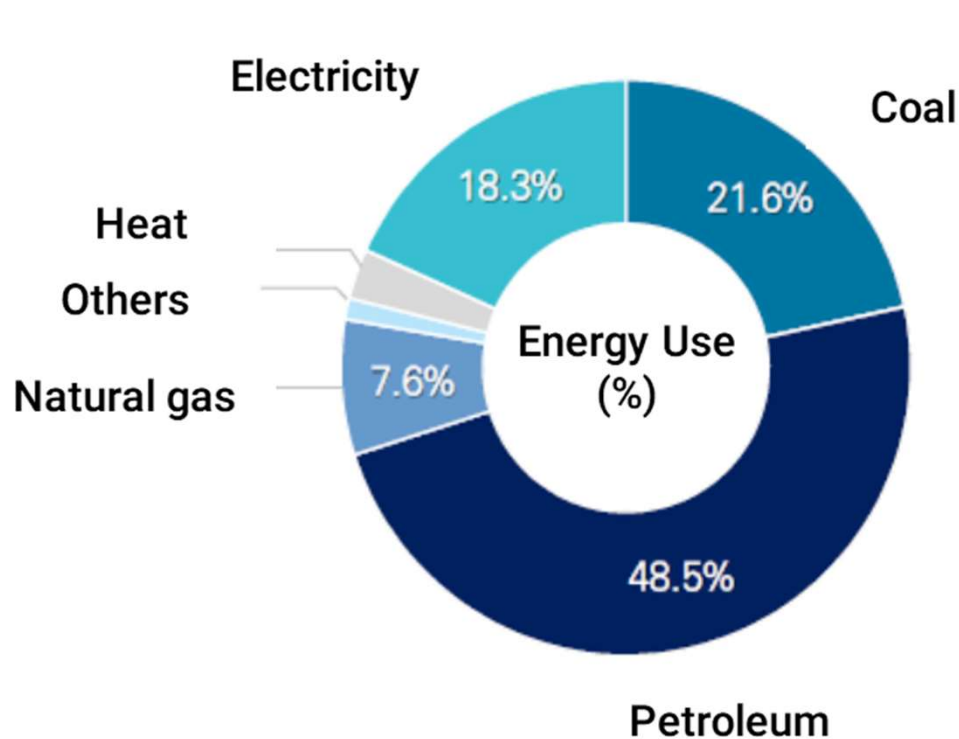
### ■ 석탄발전 비중 축소 시 전환부문 감축잠재량?

대체 발전량 비중		전환부문 감축량 [백만톤CO2]		
LNG	재생	석탄 20%	석탄 15%	석탄 10%
100%	0%	28.3	42.6	56.9
75%	25%	33.3	50.1	66.9
50%	50%	38.3	57.6	76.9
25%	75%	43.3	65.1	87.0
0%	100%	48.2	72.6	97.0

- 석탄 10% 수준으로 감축 후 대체 발전량을 모두 재생에너지로 충당하려면 2030 재생에너지 목표치는 약 40% 수준이 되어야 함 (설비용량 대략 120GW / 2021년 우리나라 총 태양광설비용량은 17.5GW로 추정)
- **향후 10년 간 자가소비형 태양광 증가량 + 해상풍력 증가량이 관건**

## 참고: 대한민국 산업부문 현황

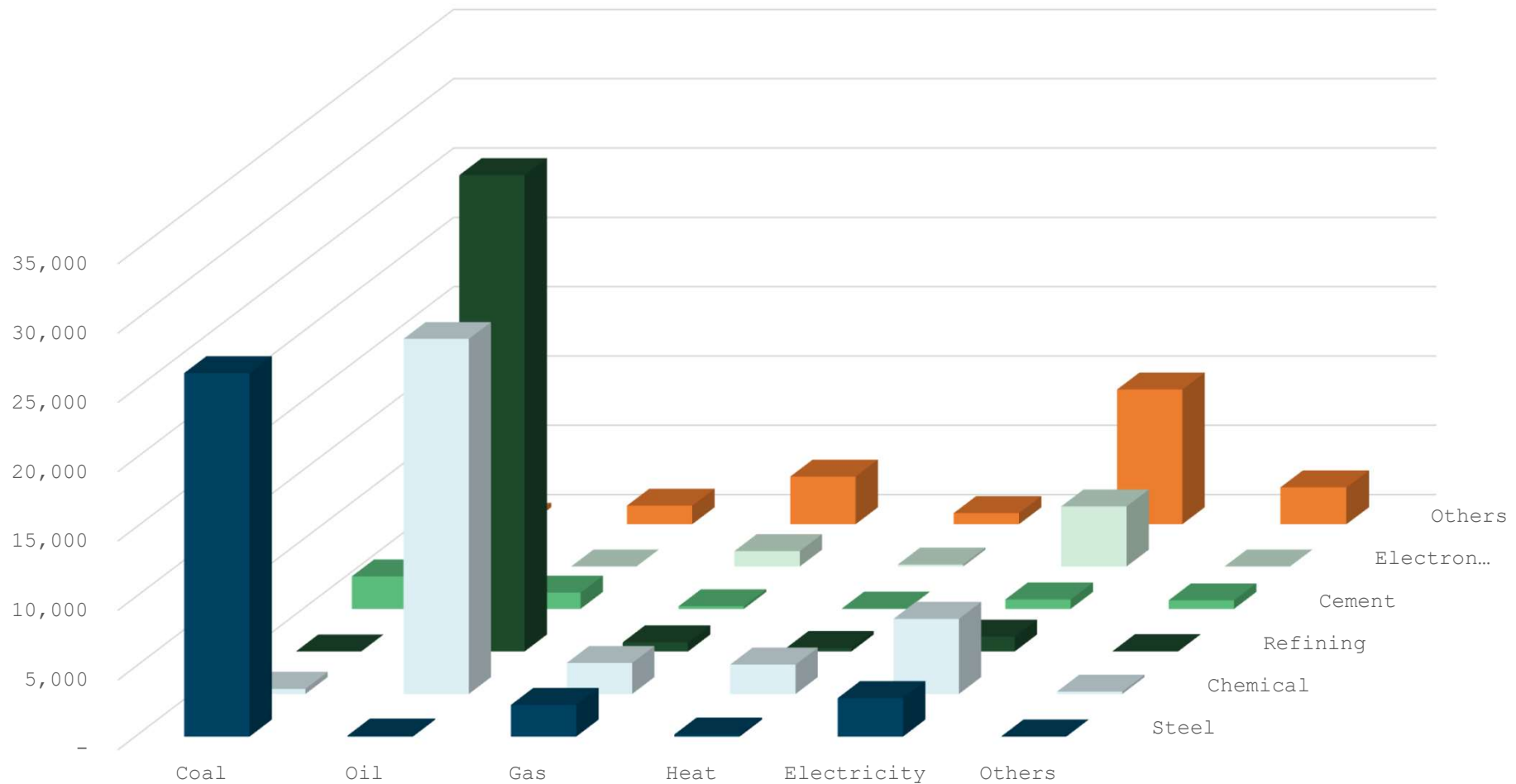
- 에너지 집약적 (석유, 석탄 수요 高)
  - 산업부문 에너지원별 소비 비중(좌)
  - 업종별 에너지 사용 비중(우)



## 참고: 대한민국 산업부문 현황

- 에너지 집약적 (석유, 석탄 수요 高)

2019 Energy consumption by focus sector

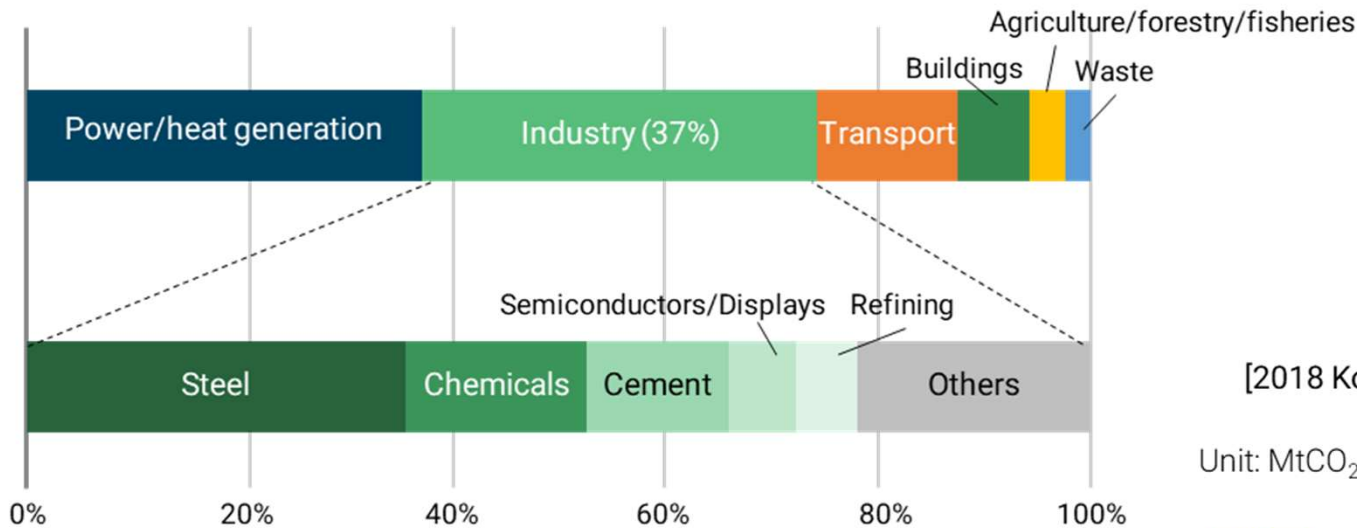


## 참고: 대한민국 산업부문 현황

### ▪ 국가 온실가스 배출량 중 가장 중요한 부분

- 산업공정 부분 배출량이 우리나라 배출량의 37%
- 상위 5개 업종이 산업 전체 배출의 80% 차지

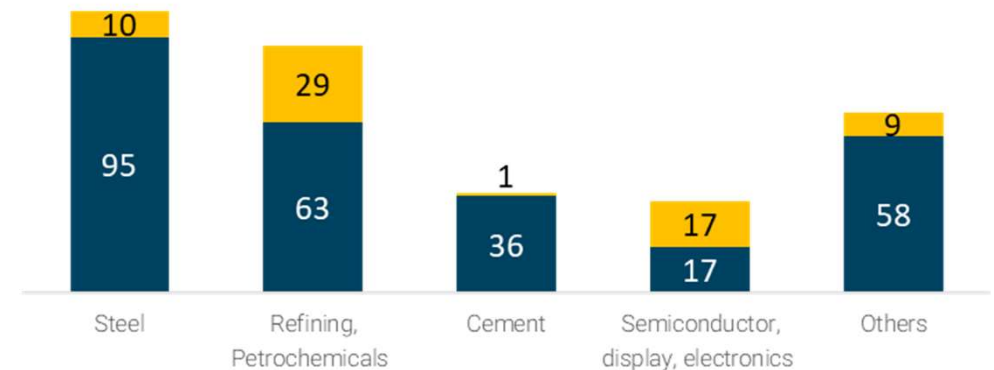
[2018 Korea's GHG Emissions Breakdown(%)]



[2018 Korea's Industrial Emissions Breakdown by Scope]

Unit: MtCO<sub>2</sub>

■ Scope 1 ■ Scope 2



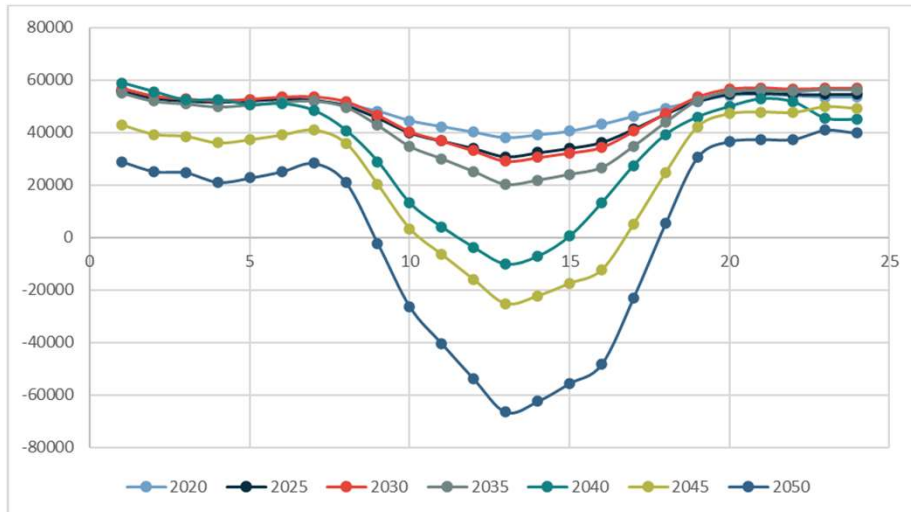
# 석탄발전 감축 - 과연 온실가스 감축의 비용효율적 솔루션인가?

출처: 카본트래커, 충남대학교, 기후솔루션, “탈석탄, 이제는 결정의 시간“, 2021.4

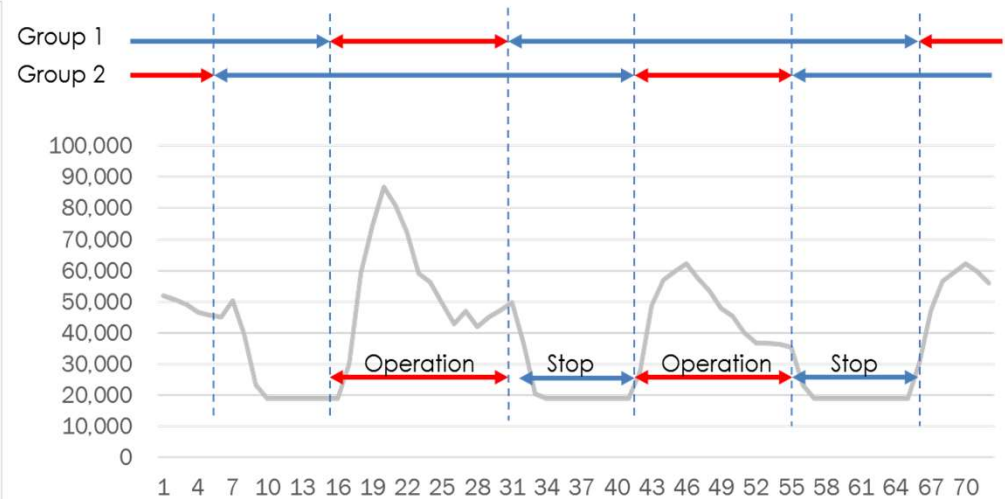
## ■ 다른 대안은 없는가?

- 신규 가동가능 원전(확정) : 신한울 1, 2호기 + 신고리 5, 6호기
- 나머지는 재생에너지가 대부분 충당해야 함 (개질 수소연료전지는 배출량 有, 비용高)

## ■ 재생에너지가 늘어나면 석탄발전의 이용율은 어차피 감소



[그림] 주요 연도별 재생E 비중 증가에 따른 봄철 Duck Curve 전망



[그림] Duck Curve 심화 시 석탄의 2교대 운전 개념도

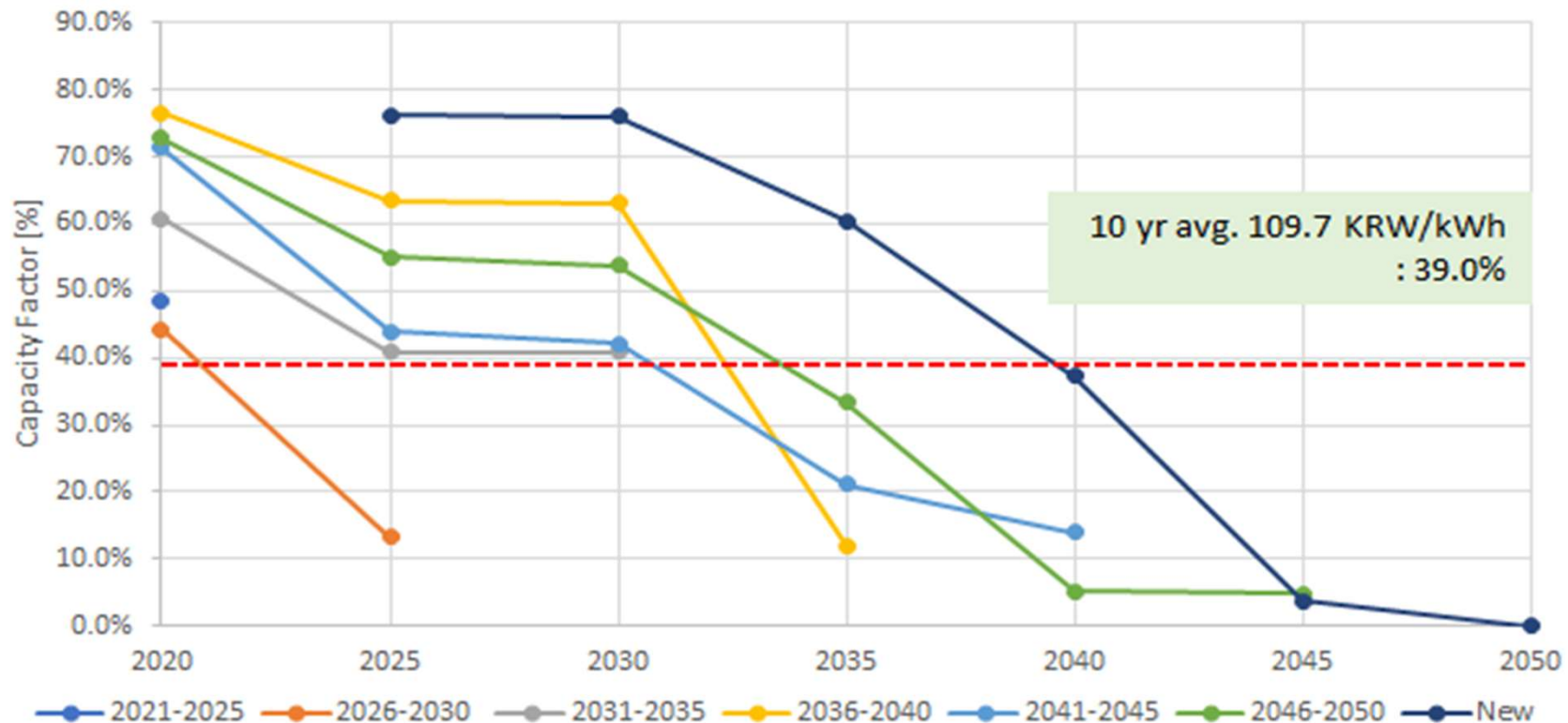
[표] Ramping capability, minimum up/down time, and minimum generation of coal power plants

Technical Specifications		Ramping capability [MW/min]	Minimum up time [hours]	Minimum down time [hours]	Minimum generation [% of nominal capacity]
Coal	Range	0 ~ 31.5	5.5 ~ 12.5	12 ~ 20.8	47% ~ 69%

## 석탄발전 감축 - 과연 온실가스 감축의 비용효율적 솔루션인가?

### ■ 재생에너지가 늘어나면 석탄발전의 이용율은 어차피 감소

- 석탄상한제 + 재생E 증가로 인해 미래 이용율은 지속적으로 하락
- SMP를 충분히 높은 값을 가정해도 이용율이 40% 이하로 떨어지는 상황이 되면 시장에서 자본비용을 회수할 수 없음 (석탄의 생존선이 존재함 - SMP 109.7원/kWh 가정)
- 석탄 CCS 투자나 ESS 연계 등은 좌초좌산의 크기만 늘리는 투자, **경제성 없음**

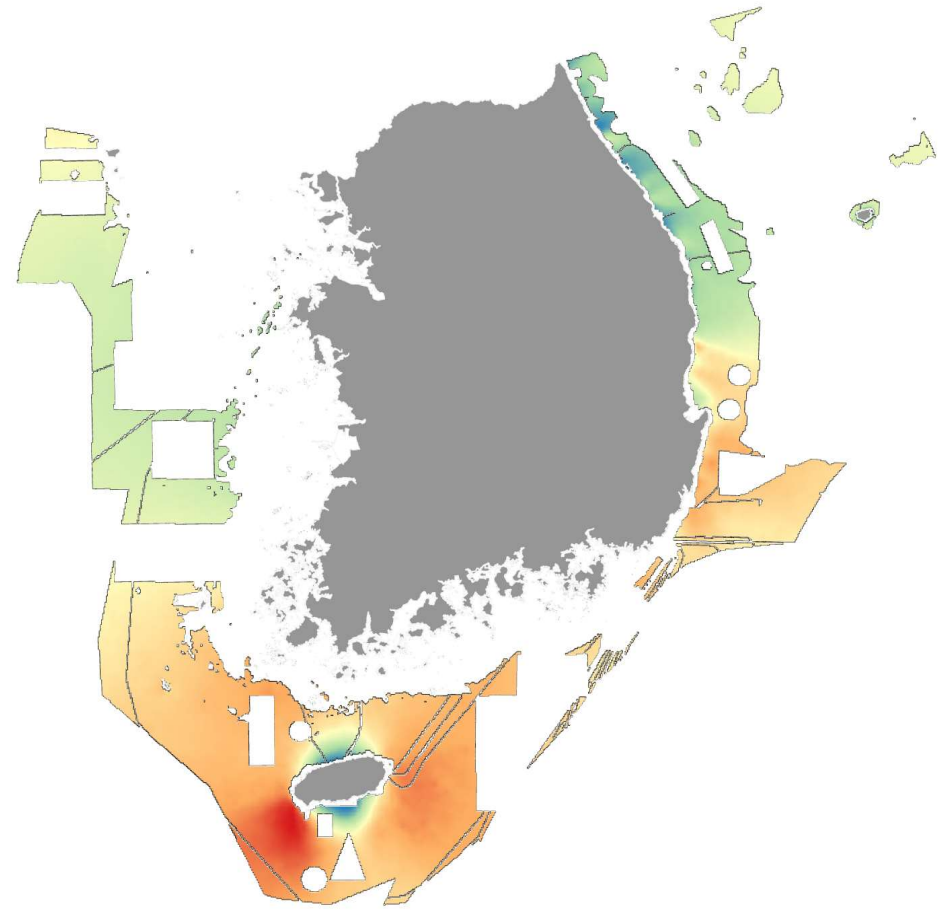


# 무엇을 준비해야 하는가?

## ▪ Game Changer는 부유식 해상풍력

- 사단법인 넥스트 분석결과 4.2MW 터빈 기준 기술잠재량 695TWh 전망
  - 설비용량 환산 시 약 277GW 수준

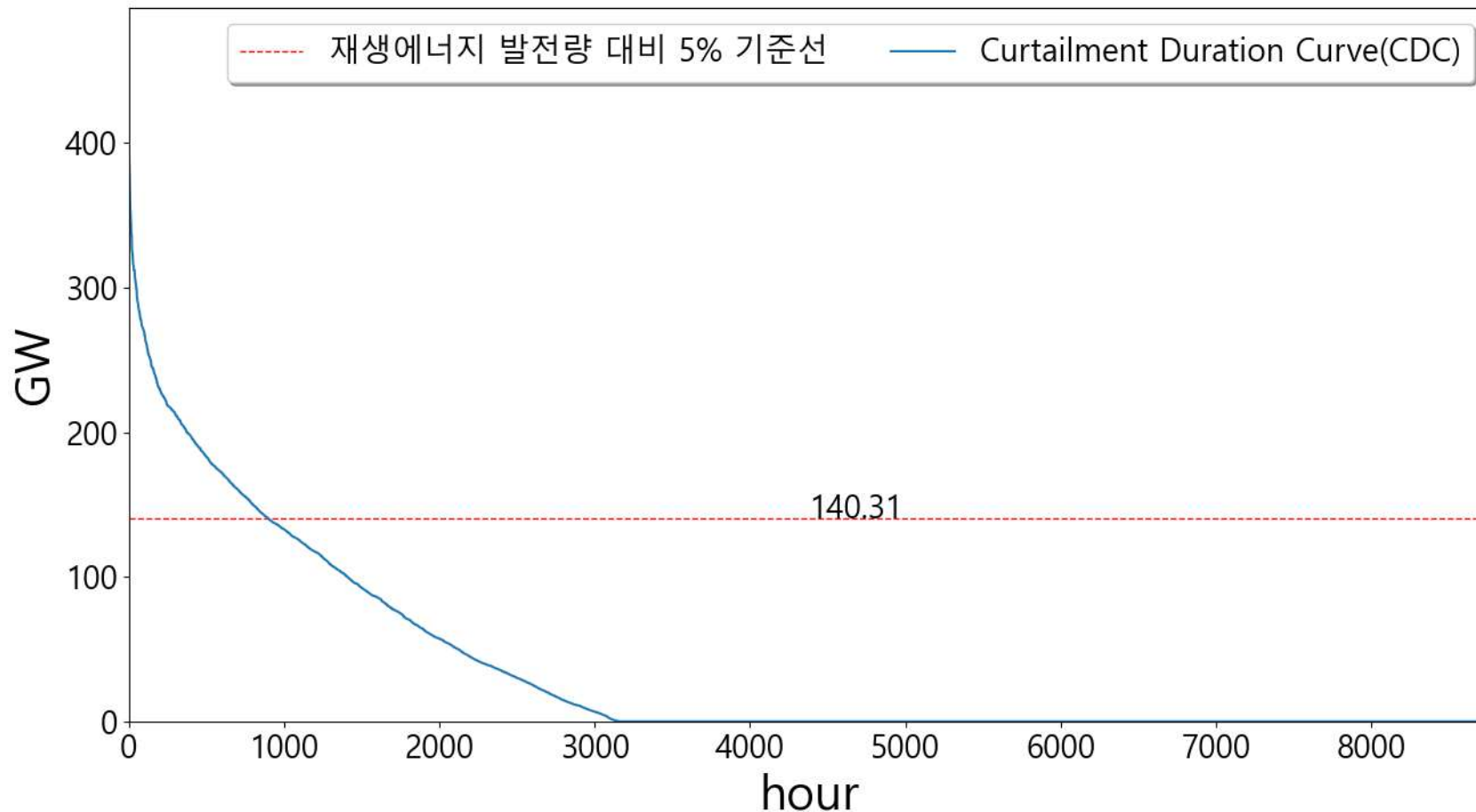
분석 가정		
분석 솔루션		QGIS & Python (Geopandas)
데이터	지리	EEZ 지역 전체 포함 (marineregions.org)
	풍속	Global Wind Atlas (1km 격자)
	제약	수심 60m ~ 1km 이하
		내륙으로부터 200km
		항만 지역 제외
		자연공원 및 보호구역 제외
		양식업 등 어업지역 제외
		사격훈련지역 제외
한중, 한일 중첩구역 제외		
터빈		4.2MW / 지름 117m (VESTAS)



## 무엇을 준비해야 하는가?

### ▪ Storage Mix를 준비해야

- 총 재생에너지 발전량의 5% 정도는 출력삭감할 경우
  - 실시간 공급과잉량이 140GW를 넘어갈 경우 출력삭감 시행 필요
  - 140GW 미만의 공급과잉량은 저장장치로 해결 필요!



# 무엇을 준비해야 하는가?

## Storage Mix를 준비해야

- 어떤 평가지표로 Portfolio를 마련해야 하나?
- (전제) 에너지 변환 효율?

변환前	전력*						수소		NH <sub>3</sub>		수소/ NH <sub>3</sub>	
변환後	양수	배터리			수소	열	NH <sub>3</sub> , LOHC	연료전지		연료 전지	수소	가스 터빈
		리튬 이온	플로 우	재활 용**				전력	전력+ 열			
변환효율	78.7	90	70	63	70	95	70	50	85	50	84.5	60

- (전제) 자가손실율?

	양수	배터리			액화 수소	NH <sub>3</sub> ·LOHC	축열* (TES)
		리튬이온	플로우	재활용			
1일당	0%	0.1%	0.2%	0.1%	1.0%	0%	0.2%
90일당	0%	8.6%	16.5%	8.6%	59.5%	0%	14%

# 무엇을 준비해야 하는가?

## Storage Mix를 준비해야

- 운영효율성 측면, 변환단계가 많은 저장 및 활용수단은 비경제적
- 수소, NH3, 열 등으로 변환 후에는 직접 활용이 유리 (수요지 인근에서)

	非저장	저장믹스 : 저장 후 전력으로 활용										Sector Coupling : 非전력 활용			
	전력 사용	양수 저장	배터리 저장			액화수소 저장			LOHC·NH3 저장			액화 수소	NH <sub>3</sub> ·LOHC		축열
			리튬 이온	플로 우	재활 용	연료전지		수소 터빈	연료전지		수소 터빈	수소 활용	암모 니아 활용	수소 추출	지역 난방
					전기	전기 + 열		전기	전기 + 열						
당일 (만원)	100 (1080)	78.7 (852)	90 (975)	70 (758)	63 (682)	35 (379)	59.5 (644)	42 (455)	20.7 (224)	35.2 (381)	29.4 (318)	70 (480)	49 (247)	41.4 (336)	95 (561)
90일 후 (만원)	-	78.7 (852)	82.3 (891)	58.5 (633)	57.6 (623)	14.2 (153)	24.1 (261)	17.0 (184)	20.7 (224)	35.2 (389)	29.4 (318)	28.3 (194)	49 (247)	41.4 (336)	81.6 (482)

# 무엇을 준비해야 하는가?

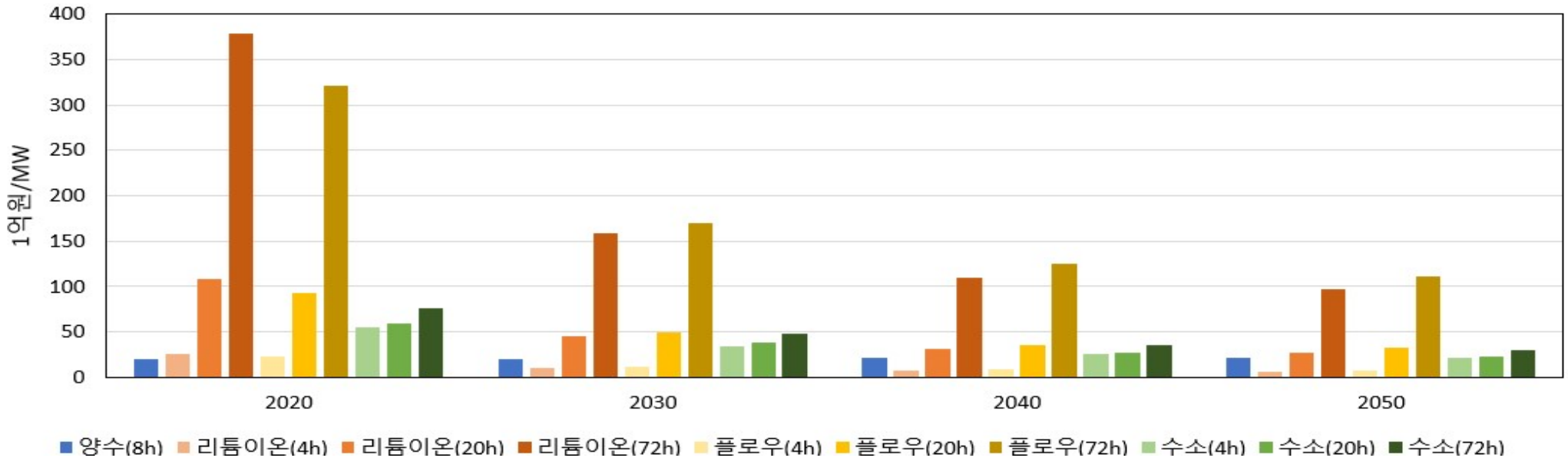
## Storage Mix를 준비해야

➤ 대용량 저장 측면, 설비투자비 증분비용이 작은 저장수단이 유리

- 대용량은 수소저장이 유리 → 에너지효율 측면의 분석과는 상이한 결과

\* 저장/변환비용(배) : (양수) 0.57, (Li-ion) 4h 4.73 → 72h 85.2, (수소) 4h 0.02 → 72h 0.41

➤ 저장수단·가능시간별 투자비단가 전망



## 무엇을 준비해야 하는가?

- 계통관성 확보를 위한 설비투자 (발전사업자 의무 증가 예상)
  - 동기조상기 (Synchronous Condenser)



HOME → OFFERINGS → MOTORS AND GENERATORS → SYNCHRONOUS CONDENSERS → RISE OF RENEWABLES LEADS TO SYNCHRONO

### Rise of renewables leads to synchronous condenser revival

An old technology provides answers to challenges posed by the increasing penetration of renewables in the energy mix. Synchronous condensers, verging on the obsolete, are being used to stabilize the intermittent and variable power from renewables.



## 무엇을 준비해야 하는가?

- 계통관성 확보를 위한 설비투자 (발전사업자 의무 증가 예상)
  - Grid Forming Inverter 확보 의무화 (제5차 신재생에너지기본계획 수록)

**GE's 'grid-forming' inverter  
aims to make solar, wind look  
like traditional generators**

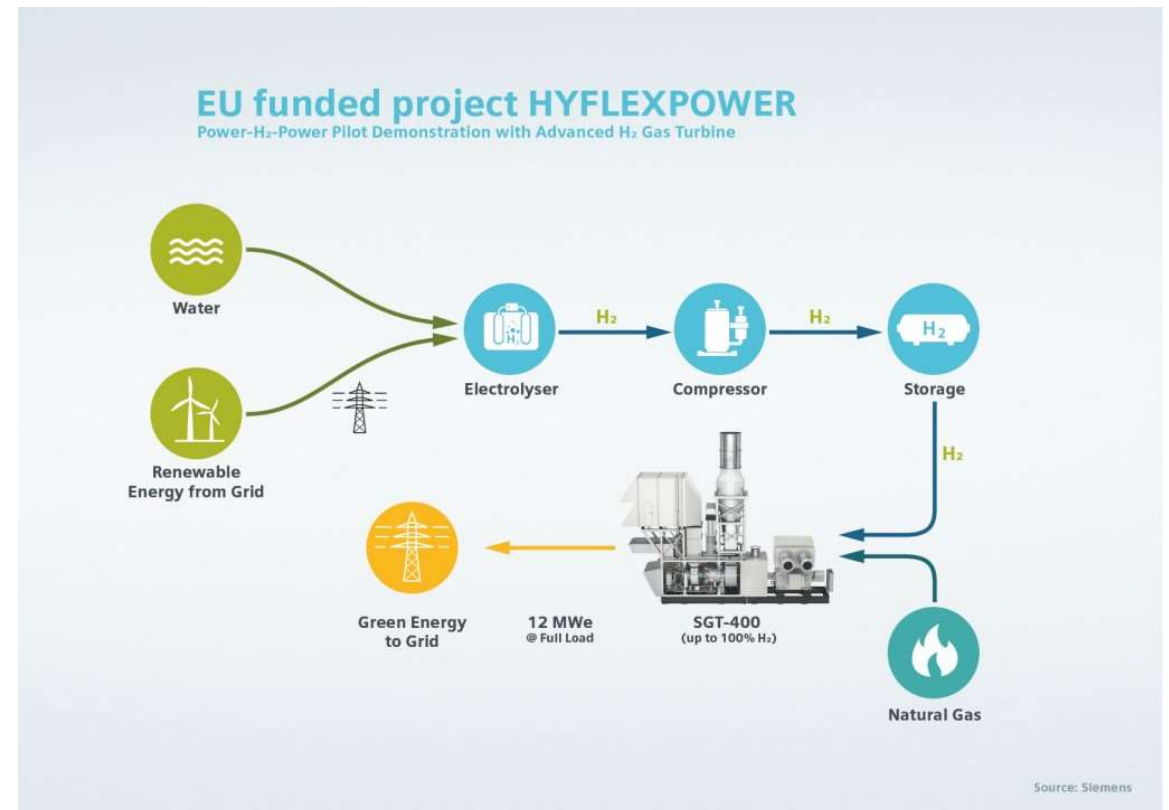


## 무엇을 준비해야 하는가?

- 계통관성 확보를 위한 설비투자 (발전사업자 의무 증가 예상)
  - 수소터빈 상용화 (혼소에서 100% 전소로)

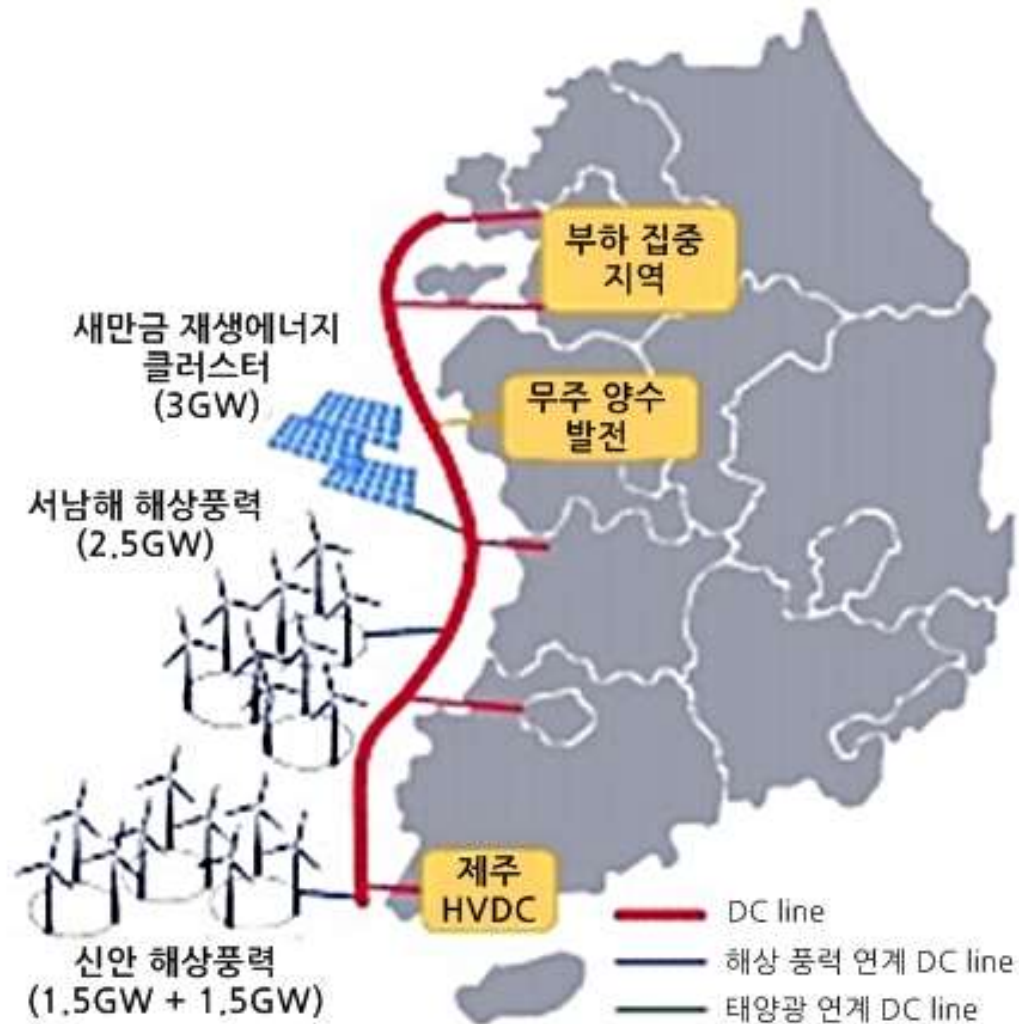
## HYFLEXPOWER: The world's first integrated power-to-X-to-power hydrogen gas turbine demonstrator

- Green hydrogen project launched in May 2020
- Decarbonizing a paper factory by modernizing an existing combined heat and power plant in France

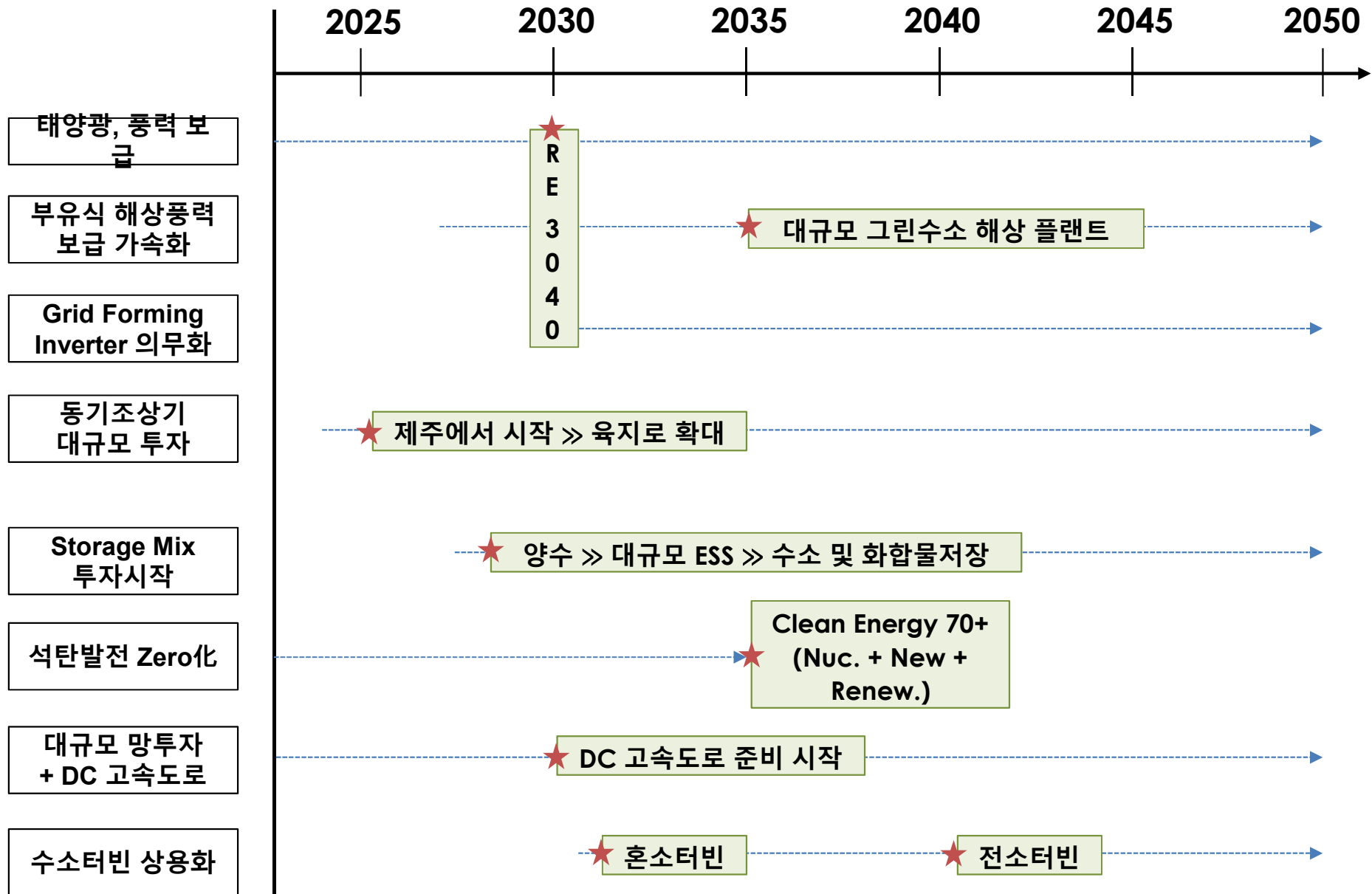


## 무엇을 준비해야 하는가?

- 대규모 재생에너지 단지의 계통연계를 위한 발상의 전환: 서해안 DC 고속도로



# 전력산업의 Transition Roadmap (안)



경청해 주셔서  
감사합니다.