

CCUS 기술에서의 LCA의 역할

최지나

한국화학연구원

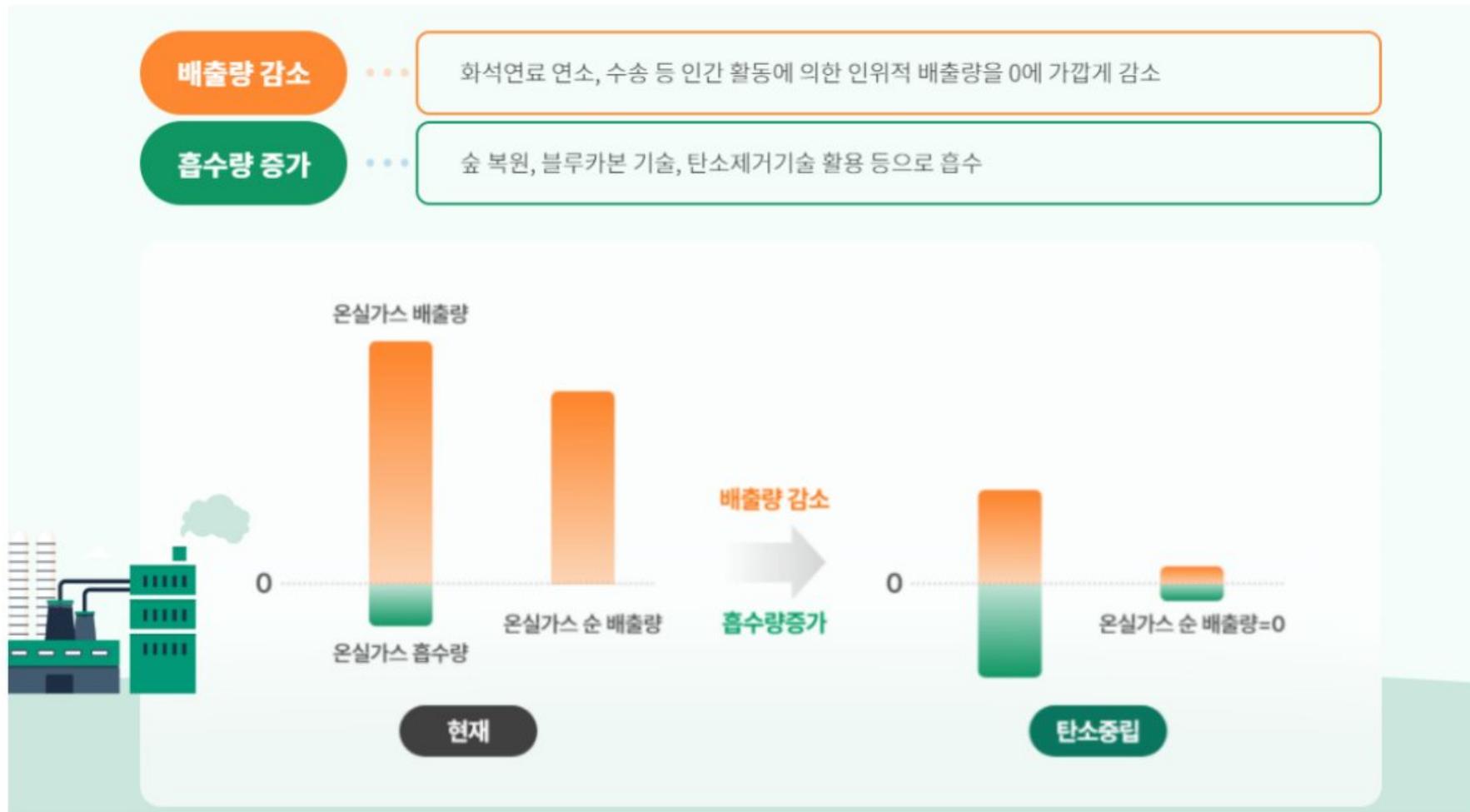
2024. 07. 05

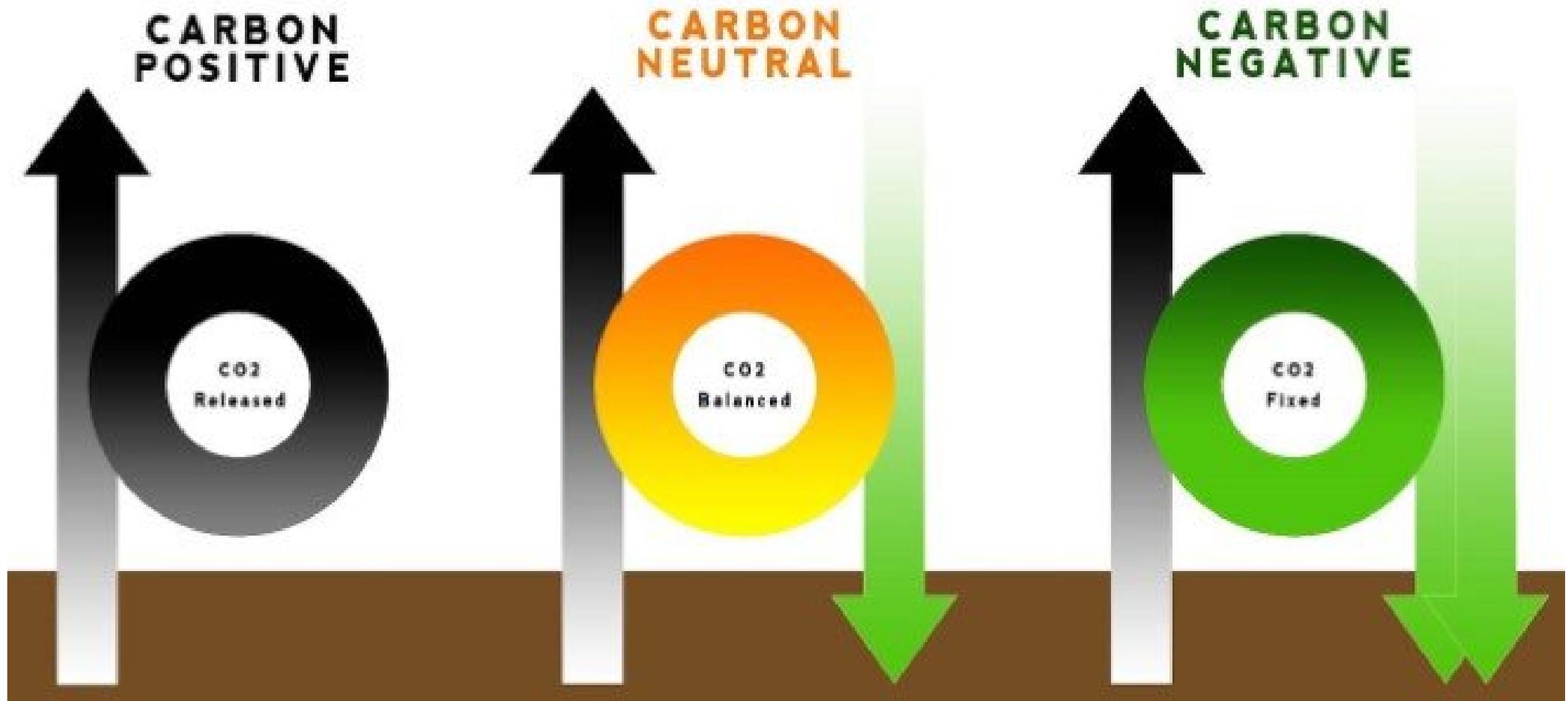
GCCUS 학술대회



탄소중립 (Net-Zero, Carbon Neutrality)

- 대기 중 온실가스 농도 증가를 막기 위해 인간활동에 의한 배출량을 감소시키고, 흡수량을 증대하여 순 배출량이 '0'이 되는 것을 의미
- 우리나라는 탄소중립 2050년 목표를 수립하고, 관련 정책 시행 중





탄소제거 (Carbon Dioxide Removal, CDR)



Definition of “Carbon Dioxide Removal”

Anthropogenic activities removing carbon dioxide (CO_2) from the atmosphere and durably storing it in geological, terrestrial, or ocean reservoirs, or in products.

It includes existing and potential anthropogenic enhancement of biological or geochemical CO_2 sinks and direct air carbon dioxide capture and storage (DACCS), but excludes natural CO_2 uptake not directly caused by human activities.

Carbon capture and storage (CCS), which alone does not remove CO_2 from the atmosphere, can help reduce atmospheric CO_2 from industrial and energy-related sources if it is combined with bioenergy production (BECCS), or if CO_2 is captured from the air directly and stored (DACCS).

※ IPCC SPM에서는 CCS는 배출되는 이산화탄소에 대한 저감 조치(화석연료 인프라 등으로부터 배출되는 이산화탄소를 포집하는 설비로 한정)로, CDR은 이미 배출되어 대기 중에 존재하는 이산화탄소를 제거하는 방법으로 구분

탄소 제거 수단 (CDR Method)

출처 : IPCC AR6 WGIII: CDR Factsheet

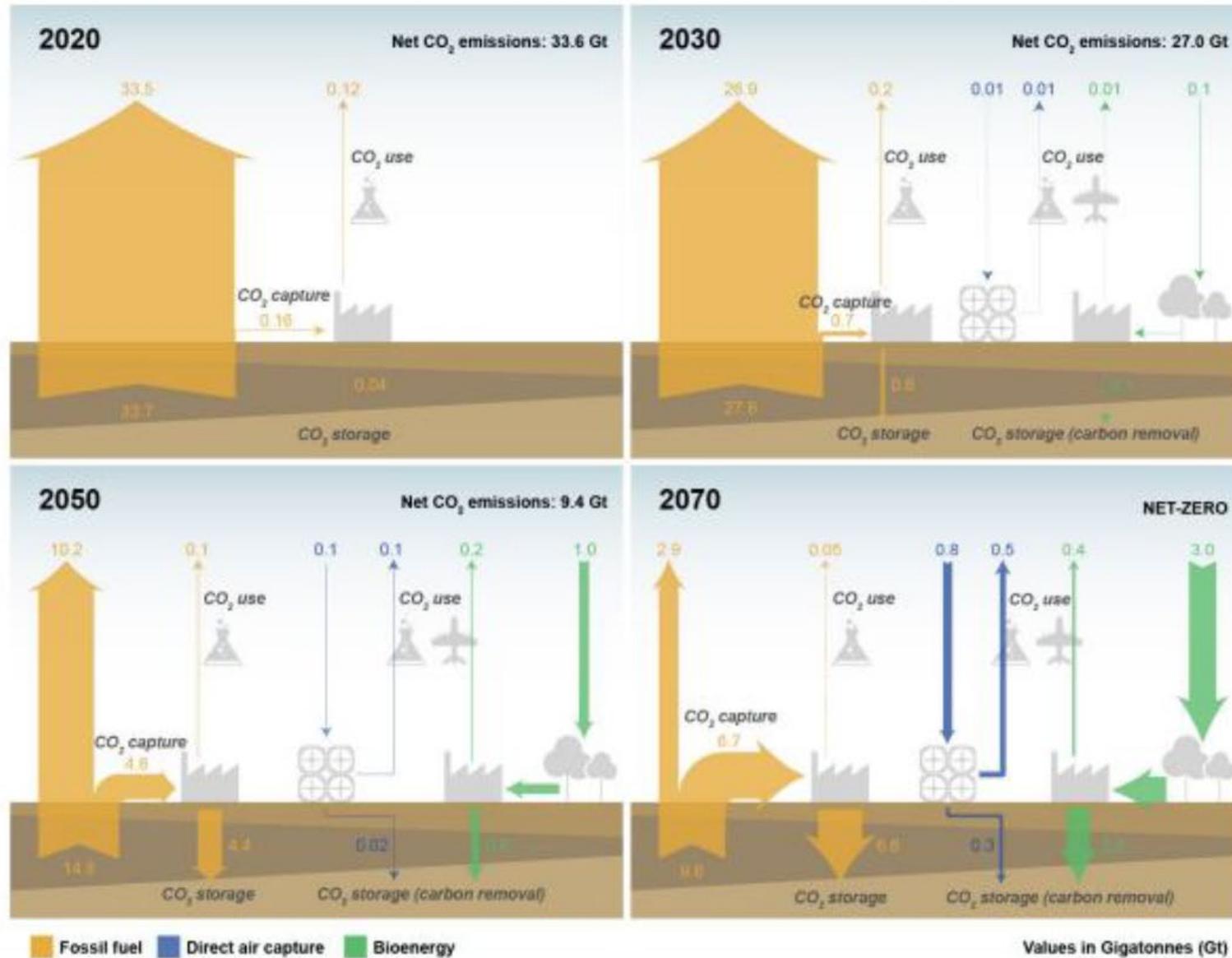
CDR METHOD	Afforestation, Reforestation, Improved Forest Management		Soil carbon sequestration	Biochar	Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS)	Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS)	Enhanced rock weathering	Peatland and wetland restoration
IMPLEMENTATION OPTIONS	Agroforestry; tree planting, silviculture; timber in construction; bio-based products		Agricultural practices; pasture management	Cropping and forestry residues; urban and industrial organic waste; purpose-grown biomass crops		Solid sorbent; liquid solvent	Spreading crushed silicate rock	Rewetting; revegetation
STORAGE TIMESCALE	Decades to centuries <i>(in vegetation, buildings, soils)</i>		Decades to centuries <i>(in soils, sediments)</i>	Centuries to millennia <i>(in soils and sediments)</i>	10,000+ years <i>(in geological formations)</i>	10,000+ years <i>(in geological formations)</i>	10,000+ years <i>(in minerals)</i>	Decades to centuries <i>(in vegetation, soils, sediments)</i>
FINANCIAL COST (\$ per tonne of CO ₂)	Afforestation/ reforestation: \$0-\$240	Agroforestry and forest management: <i>not enough data</i>	-\$45-\$100	\$10-\$345	\$50-\$200	\$100-\$300	\$50-\$200	<i>Not enough data</i>
TRADE-OFFS and RISKS	Afforestation/ reforestation: Inappropriate deployment at large scales can increase competition for land (limiting land for biodiversity conservation and food)	<ul style="list-style-type: none"> • Agroforestry: limited impacts on agricultural crop production • Forest management: if fertiliser use and introduced species are involved, risks include: reduced biodiversity, increased eutrophication, and upstream GHG emissions 	<ul style="list-style-type: none"> • Increasing carbon sequestration can occur at the expense of production • Sequestration contribution per hectare is small and hard to monitor 	<ul style="list-style-type: none"> • Negative impacts from dust • Competition for biomass 	Growing energy crops increases competition for land (limiting land for biodiversity conservation and food)	High energy requirement could lead to growing competition for low-carbon energy or increased GHG emissions. Some DACCS processes require water.	<ul style="list-style-type: none"> • Dust emissions • Potential for increased GHG emissions from energy generation 	Some peatlands are used for food production, so could result in competition for land

CDR METHOD	Blue carbon management	Ocean alkalinity enhancement	Ocean fertilisation
IMPLEMENTATION OPTIONS	Rewetting; coastal revegetation (e.g. mangroves, seagrass, saltmarsh)	Adding alkaline materials such as carbonate or silicate rock	Iron fertilisation; nitrogen and phosphorus fertilisation; enhanced upwelling
STORAGE TIMESCALE	Decades to centuries <i>(in vegetation, soils, sediments)</i>	10,000+ years <i>(in minerals)</i>	Centuries to millennia <i>(in marine sediment)</i>
FINANCIAL COST (\$ per tonne of CO ₂)	<i>Not enough data</i>	\$40-\$260	\$50-\$500
TRADE-OFFS and RISKS	<ul style="list-style-type: none"> • If subsequently degraded or destroyed, these ecosystems are likely to release carbon back to the atmosphere. • Maximum benefits will require many years to be achieved 	Potential for increased GHG emissions from mining, transport and deployment	<ul style="list-style-type: none"> • Ocean acidification and deoxygenation • Altered supply of ocean macronutrients • Fundamental changes to food webs and biodiversity

cf. CDR encompasses a wide array of approaches that capture the CO₂ that has accumulated in the atmosphere and then store it in geological, biobased and ocean reservoirs or value-added products like low-carbon concrete (DOE, 2022)

IPCC 탄소중립 시나리오 (SDS)

Figure 2.2 CO₂ emissions, capture and removal in the Sustainable Development Scenario



국내 탄소제거 관련 정책

< 2050 탄소중립 시나리오 최종(안) 총괄표 >

(단위 : 백만톤CO₂eq)

구분	부문	'18년	초안			최종본		비고
			1안	2안	3안	A안	B안	
배출량		686.3	25.4	18.7	0	0	0	
배출	전환	269.6	46.2	31.2	0	0	20.7	· (A안) 화력발전 전면중단 · (B안) 화력발전 중 LNG 일부 전환 가정
	산업	260.5	53.1	53.1	53.1	51.1	51.1	
	건물	52.1	7.1	7.1	6.2	6.2	6.2	
	수송	98.1	11.2 (-9.4)	11.2 (-9.4)	2.8	2.8	9.2	· (A안) 도로부문 전기수송차 등으로 전면 전환 · (B안) 도로부문 내연기관차의 대체연료(e-fuel 등) 사용 가정
	농축수산	24.7	17.1	15.4	15.4	15.4	15.4	
	폐기물	17.1	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	
	수소	-	13.6	13.6	0	0	9	· (A안) 국내수소전량수준해 수소(그린 수소)로 공급 · (B안) 국내생산수소 일부 부생 추출 수소로 공급
	탈루	5.6	1.2	1.2	0.7	0.5	1.3	
흡수 및 제거	흡수원	-41.3	-24.1	-24.1	-24.7	-25.3	-25.3	
	이산화탄소 포집 및 활용·저장 (CCUS)	-	-95	-85	-57.9	-55.1	-84.6	
	직접공기포집 (DAC)	-	-	-	-	-	-7.4	· 포집 탄소는 차량용 대체 연료로 활용 가정

* 시나리오 간 내용이 상이한 부문은 파란색으로 표시

출처 : 2050 탄소중립 시나리오안 (21)

<표 3-1> CDR 접근법의 방법론 유형과 세부 접근법

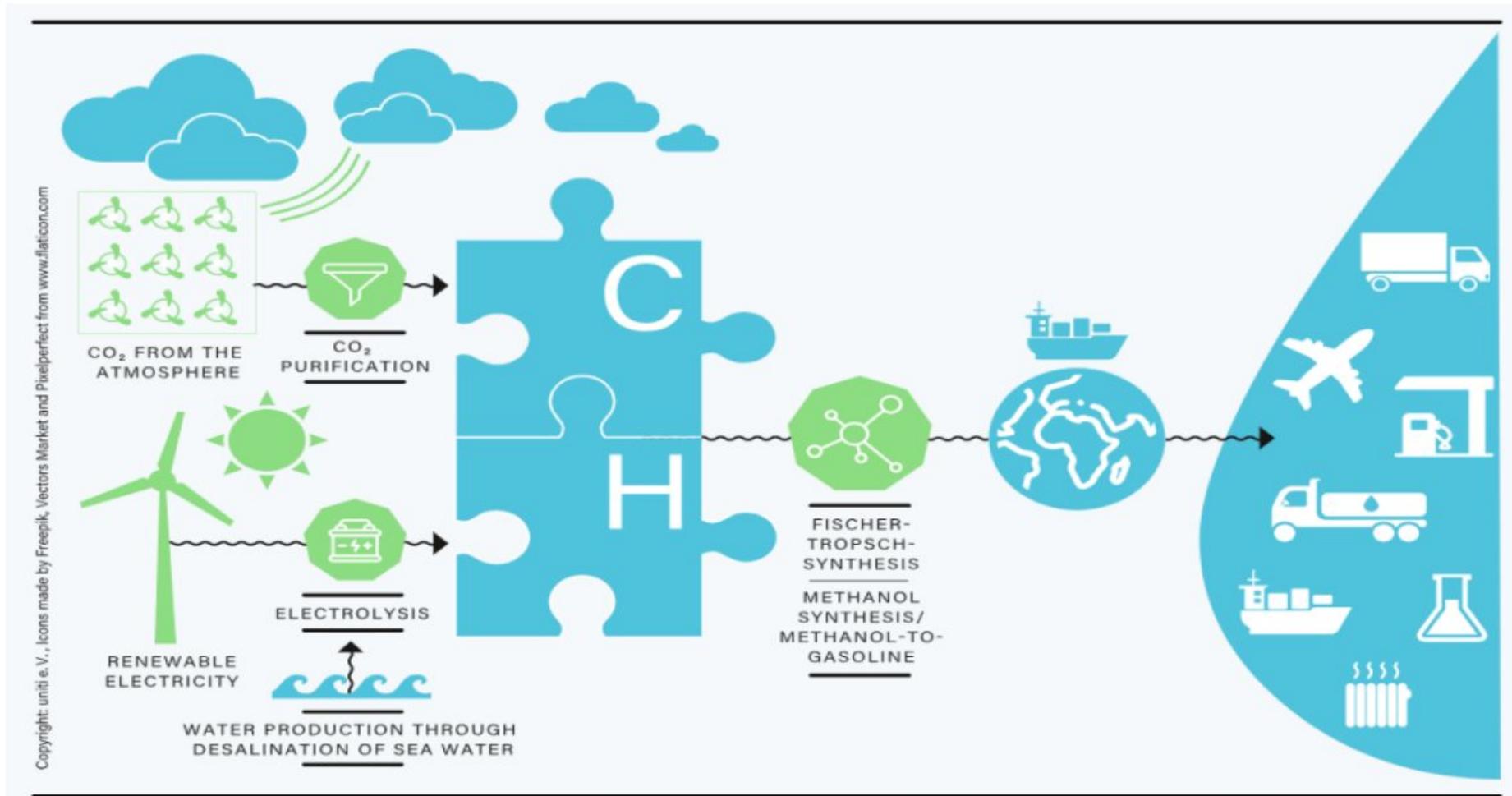
유형	세부 접근법
생태학적 CDR	<육상 생태학적 CDR 접근법> - (조림/재조림) 수목을 심고 관리하여 대기 중 이산화탄소를 흡수하여 수목 내부, 토양, 혹은 벌목 후 목조건물 등에 탄소를 저장하는 과정을 통틀어 의미하는 접근법 - (토양탄소격리) 토양관리 및 토지이용변화를 통해 토양 유기물의 탄소량을 늘리는 접근법 - (바이오차(bio-char)) 바이오매스로 만든 숯을 흙에 묻어 토지기능을 강화하고 바이오매스 온실가스를 토양 안에 오래 격리할 수 있는 접근법 - (바이오에너지탄소포집저장(BECCS, Bioenergy with carbon capture & storage)) 바이오매스로 화력발전을 한 후, 배출되는 이산화탄소를 CCS를 이용해 다시 포집하여 격리하는 방법
	<해양 생태학적 CDR 접근법> - (블루카본(blue carbon) 관리) 감조습지(tidal marsh), 맹그로브, 해초 등 연안 지역의 식생 관리를 통해 해저의 토양 및 침전물에 탄소를 격리하는 방법 - (해양 비육화) 대기 중의 이산화탄소를 흡수할 수 있는 해양생태계(예: 식물성 플랑크톤)를 강화할 목적으로 그 영양분(예: 질소, 철)을 해수면에 인위적으로 공급하는 방법
지구화학적 CDR	- (강화된 풍화 / 해양 알칼리도 증진) 이 두 가지 접근법은 대기 중 이산화탄소와 쉽게 반응하는 알칼리성 광물(예: 규산염 및 탄산염)을 분쇄하여 대기와의 접촉면적을 늘린 후 살포하여 대기 중 이산화탄소를 제거한다는 점에서 본질적으로 원리가 같음. 광물을 토양에 살포하느냐 해상에 살포하느냐의 차이임
화학적 CDR	- (직접대기포집저장(DACCS) 기술) 화학적 방법으로 대기 중의 이산화탄소를 직접 포집(DAC)하여 지중저장소 등의 저장시설에 영구적으로 저장하는 방법 - (직접대기포집활용(DACCU) 기술) DAC를 통해 대기 중에서 포집한 이산화탄소를 활용하여 유용한 제품을 만들어 제품 안에 이산화탄소를 저장하는 방법

출처: IPCC (2022)의 Annex I을 참고하여 저자 정리

출처: IPCC 6차 평가보고서를 기반으로 한 기후기술 정책 대응 연구 (NIGT, 2022)

탄소중립 연료, e-Fuel

- 전기기반 연료의 줄임말로, 그린수소로 부터 합성된 탄소중립 연료를 의미
 - ① 그린수소 및 포집 CO₂로 부터 생산된 합성연료 개념 (FT 연료, 메탄올, DME 등 다양한 탄화수소계 연료)
 - ② 재생에너지를 물질 형태로 저장하는 에너지 캐리어 (그린수소, 그린 암모니아)
- 국내에서는 e-Fuel, 탄소중립연료, 재생합성연료 등으로 사용되고 있으며, 2050시나리오에서는 직접공기포집(DAC)와 결합된 연료를 의미



e-Fuel & Life Cycle Assessment

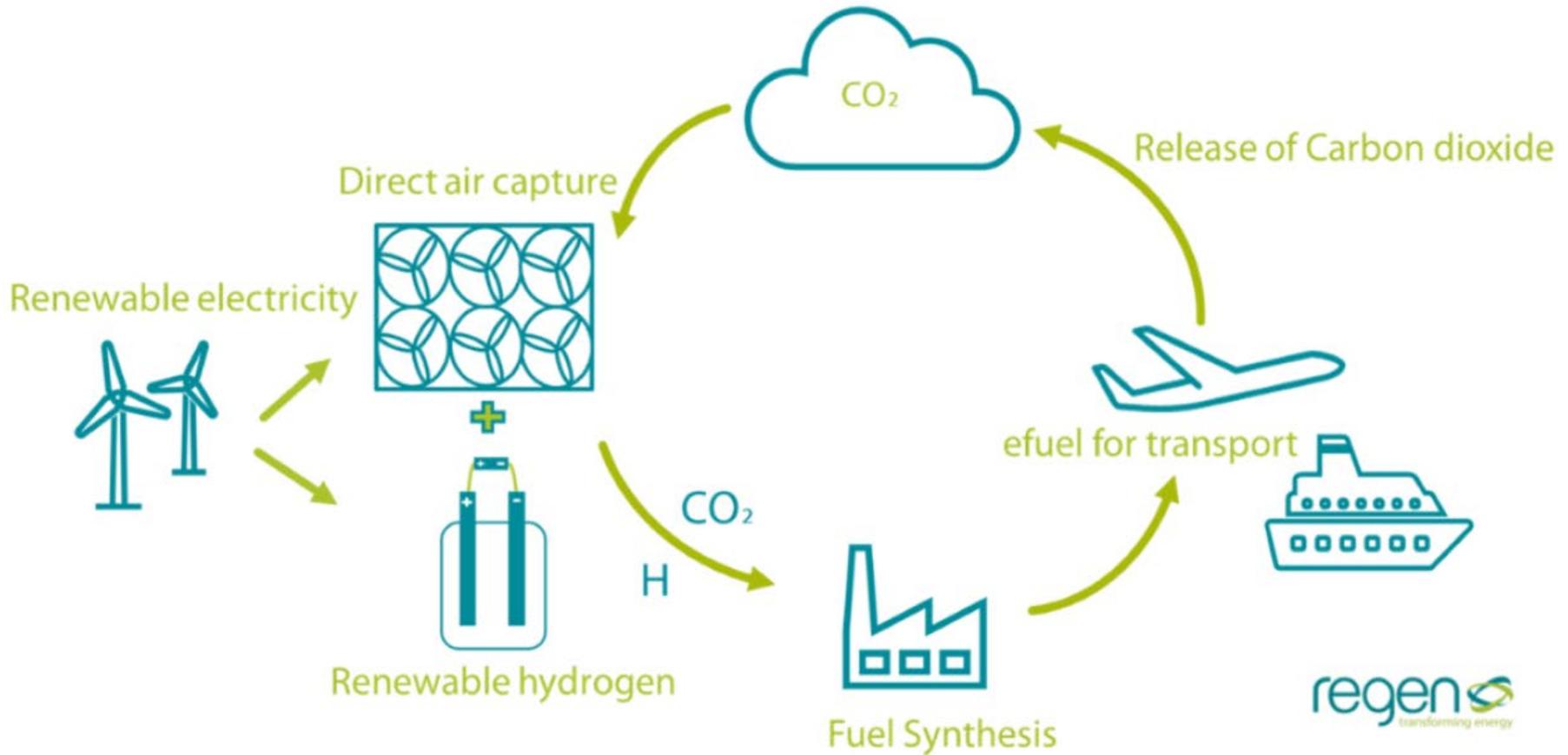
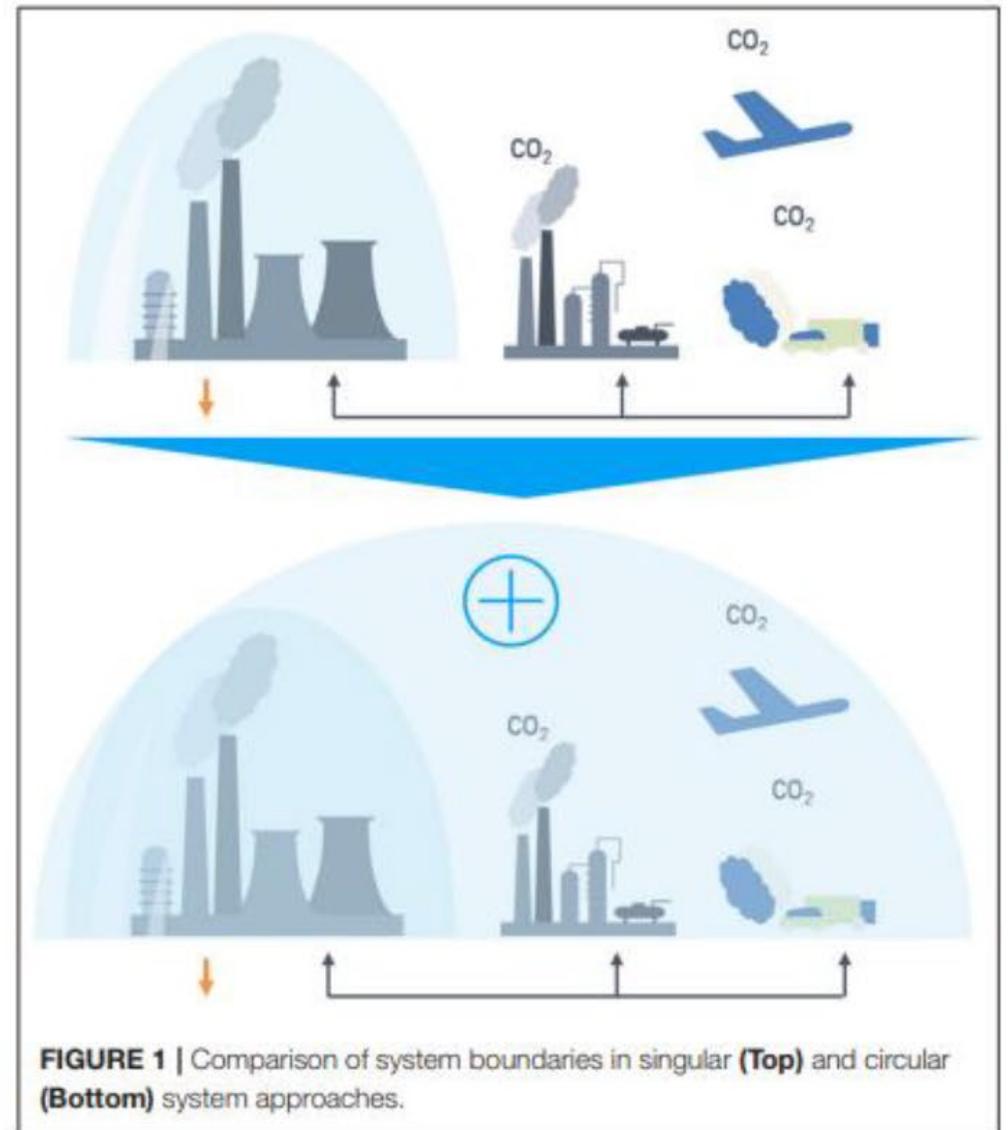
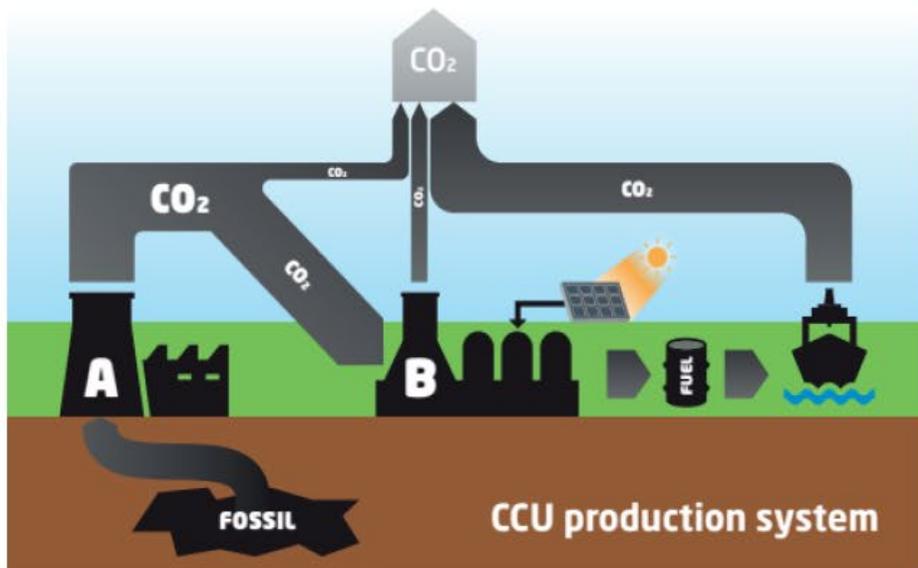
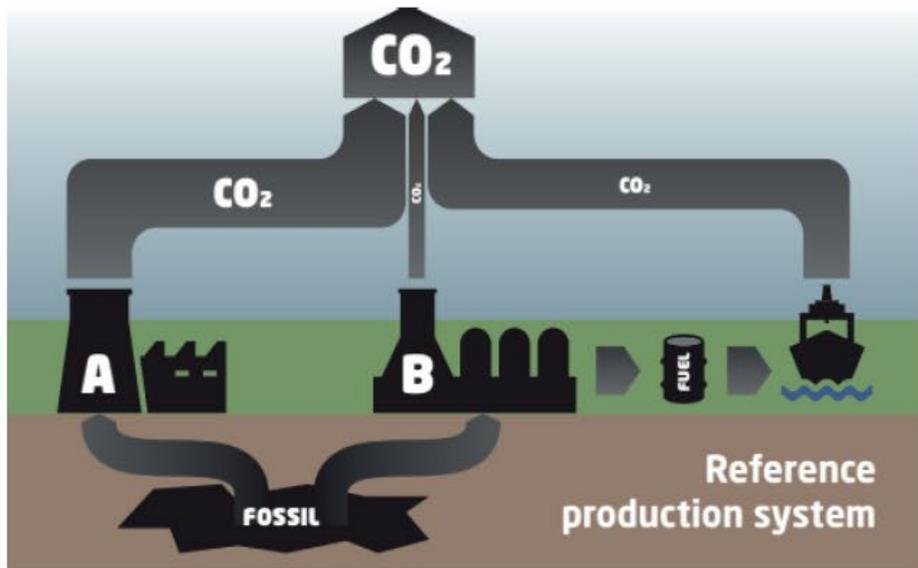


Figure 1: efuel lifecycle

LCA for CCU Production System



탄소 감축, 탄소중립, 탄소 제거 기술로써의 CCUS

탄소감축

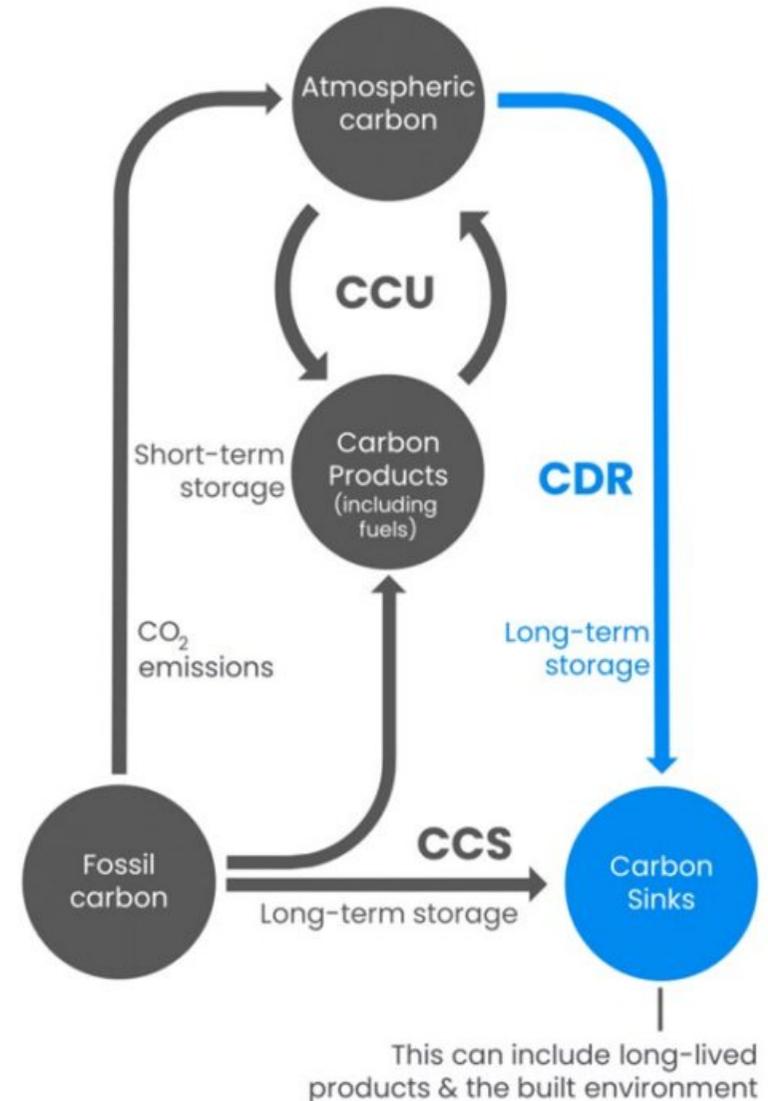
- 기존제품 대체생산을 통한 상대적 감축 (++++)
- 발전/산업에서 배출되는 CO₂를 저장하거나 (CCS) 제품으로 활용하는 대부분의 기술 (++)

탄소중립

- 대기 중 CO₂를 직접 포집 · 처리하는 기술 (-)
- 연료와 같이 사용단계에서 재배출되는 CCU기술 (+)

탄소제거

- 대기 중 CO₂를 직접 포집 · 처리 기술 (-)
- CCS 또는 제품 내 장기간 저장되는 CCU 기술 (0)



전과정평가 (Life Cycle Assessment)

- 제품의 전과정(원료채취, 가공, 조립, 수송, 사용, 폐기)에 걸쳐 에너지 및 자원의 사용과 이로 인한 환경 영향을 정량화하여 이들이 환경에 미치는 잠재적 영향을 평가·규명·개선하는 수단
 - 국제표준화기구(ISO)에서 전과정평가 수행에 대한 일반 절차 및 고려 요건 등에 대한 표준화 완료
 - 국내에서는 환경성적표지(탄소발자국, 저탄소제품 인증) 제도에서 전과정평가 활용 중
 - EU에서는 EPD, PEF 등 전과정평가 기반 제도 활성화

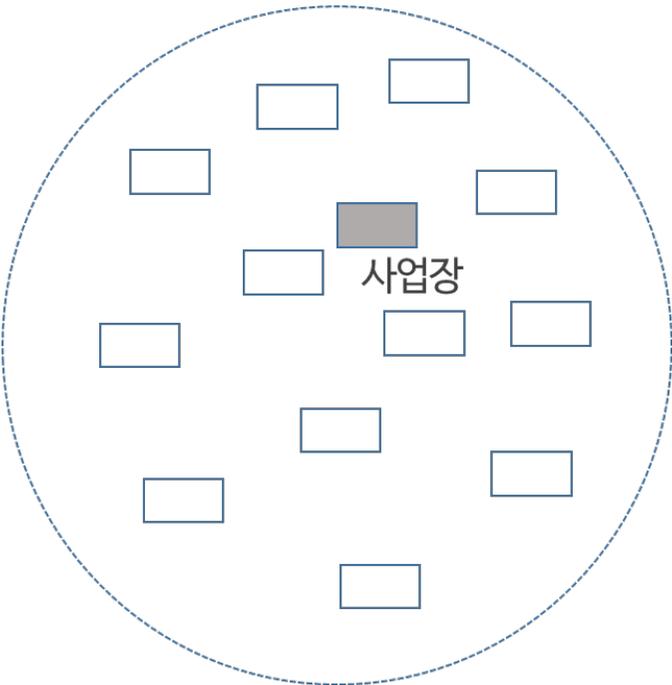


온실가스 관리 기준 및 범위

- 기후변화 대응을 위한 온실가스 관리 체계가 기존 사업장(Site) 배출 중심에서 제품 전과정(Life Cycle) 배출 중심으로 변화
- 전과정 제품 환경영향 저감 추진분야가 전업종으로 확대 및 전과정평가 관련 국제 규제 지속 증가

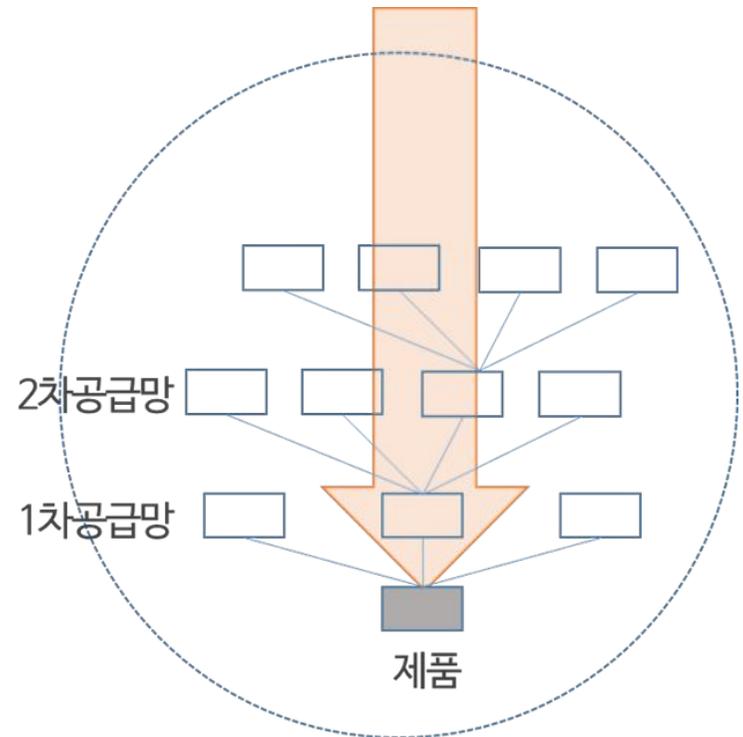
사업장(Site) 중심 온실가스 관리

- 온실가스 배출 사업장을 중심
- 탄소누출 및 관리 누락의 한계 존재



제품(Product) 중심 온실가스 관리

- 제품 중심의 공급망 온실가스 관리
- 탄소누출 방지, 보다 넓은 범주의 온실가스 관리 가능



전주기 관점이 반영된 환경 정책 동향

EU 탄소국경조정(CBAM)

6개 대상품목(철강, 알루미늄, 시멘트, 비료, 전력, 수소)의 EU 수입업자는 각 품목에 내제된 탄소배출량 신고 및 인증서 구매
※ 전환기간(~2025) 이후 품목 확대 예상 / 직접 및 간접 배출을 포함

ISSB 지속가능성 공시 기준

기업의 ESG 공시를 위한 글로벌 공시 기준에 Scope 3 (소유 자산을 제외한 기타 간접배출:협력업체 등의 공급망 포함) 배출량 포함

EU 배터리 지침

LCA에 기반한 배터리제품의 탄소발자국 신고 의무화 및 이에 등급 설정
→ 탄소발자국이 일정수준 이상 도달할 경우 해당 제품의 EU 역내 시장 판매를 제한

미국 45Q Tax Credit

CCUS 상용화 촉진을 위한 세제혜택 제도로, CCU 사업의 경우 LCA 분석에 기반한 실질적인 감축량만을 크레딧으로 인정

청정수소 및 재생연료 인증

(국내) LCA에 기반하여 수소 생산·수입 과정에서의 온실가스 배출량을 정량화하고, 일정 수준 이하인 경우 청정수소로 인증
(EU) 온실가스 및 부생가스 전환 연료의 경우, 화석연료 대비 탄소감축율을 산정하여 재생연료로 인증

전기차, 생산 단계서 온실가스 배출 많아



LCA가 도입되면 가장 큰 영향을 받는 차종은 최근 판매량이 급증하고 있는 전기차다. 전기차는 운행시 온실가스 배출이 없어 친환경차로 알려져 있다. 하지만 전력을 생산하거나 배터리를 제조하는 과정에서 탄소가 배출되는 등 전과정 관점에서는 이산화탄소가 발생한다.

유럽집행위원회(EC)가 차종별로 수명 주기에서 발생하는 환경 영향을 비교 분석한 결과, 가솔린 차량의 온실가스 배출이 가장 높았으며 디젤 차량은 가솔린 차량의 85% 수준, 배터리 전기차는 45% 수준으로 온실가스를 배출하는 것으로 나타났다. 특히, 전기차는 운행 단계에서 온실가스 배출은 없으나 차량 생산 단계에서 배출량이 내연기관 차량보다도 큰 것으로 확인됐다.

어떤 국가에서 전기차를 제조하느냐도 온실가스 배출량에 큰 영향을 미친다. 국제청정교통위원회(ICCT)가 국가별 온실가스 배출량에 대한 LCA 평가를 진행한 결과, 가솔린 차량 대비 전기차 배출량이 유럽은 66~69%가량 낮았지만, 인도는 19%~34%가량 낮아 상대적으로 큰 차이를 보이지 않았다. 한국을 포함해 중국·인도처럼 석탄 발전 비중이 큰 나라가 유럽 등 신재생에너지 전력 체계를 갖춘 나라보다 온실가스 발생량이 훨씬 크다는 뜻이다.

전과정평가시, CCU 탄소배출량 산정 범위

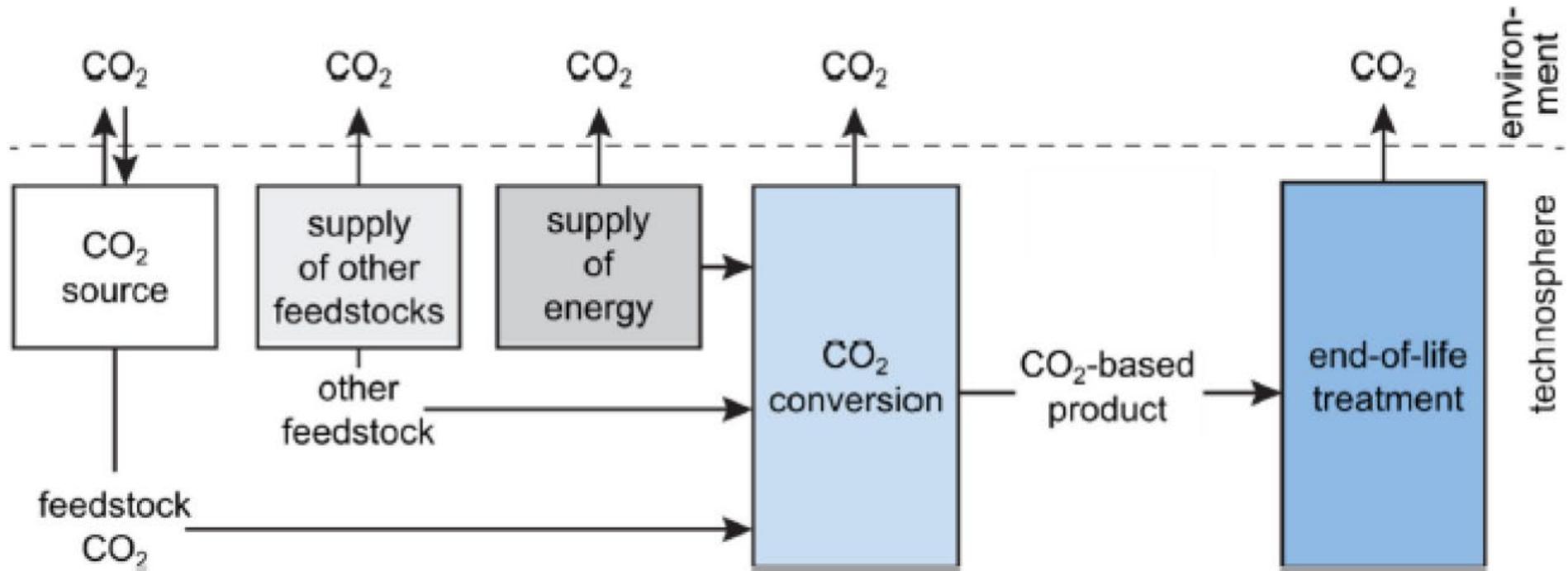
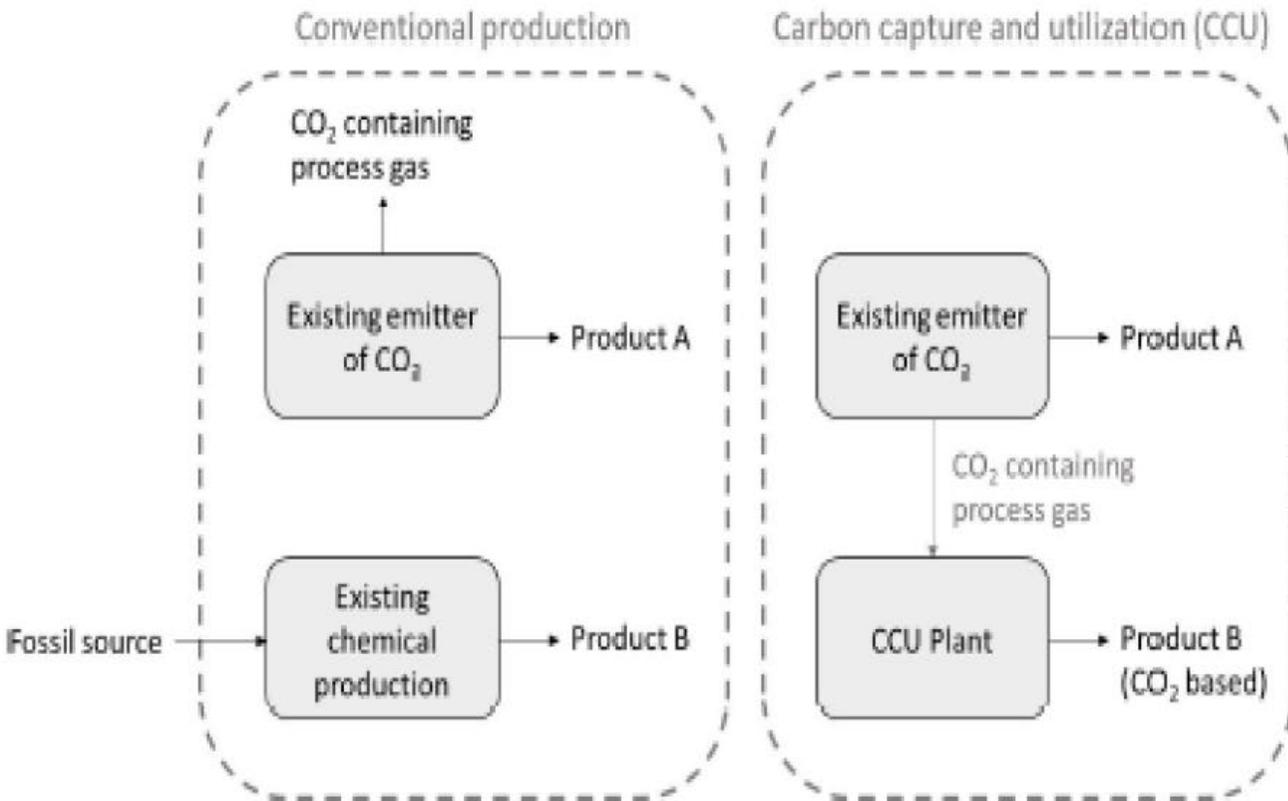


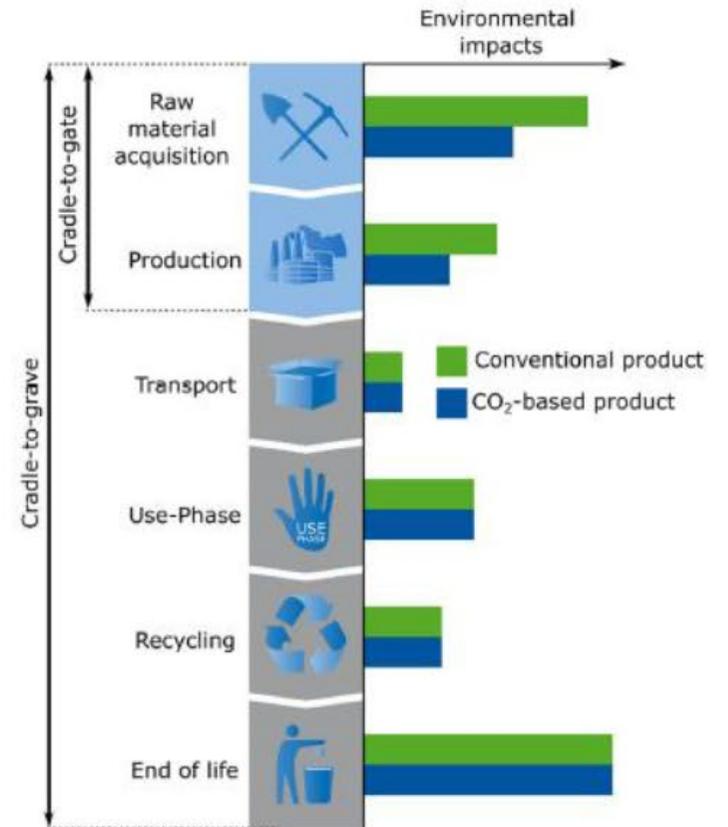
FIGURE 6 | Schematic life cycle of CCU technologies span from the CO₂ source, supply other feedstocks and energy to the end of life treatment. In all life cycle stages, environmental impacts should be considered. Adopted from von der Assen et al. (2013).

전과정평가가시, CCU 탄소배출량 산정 범위

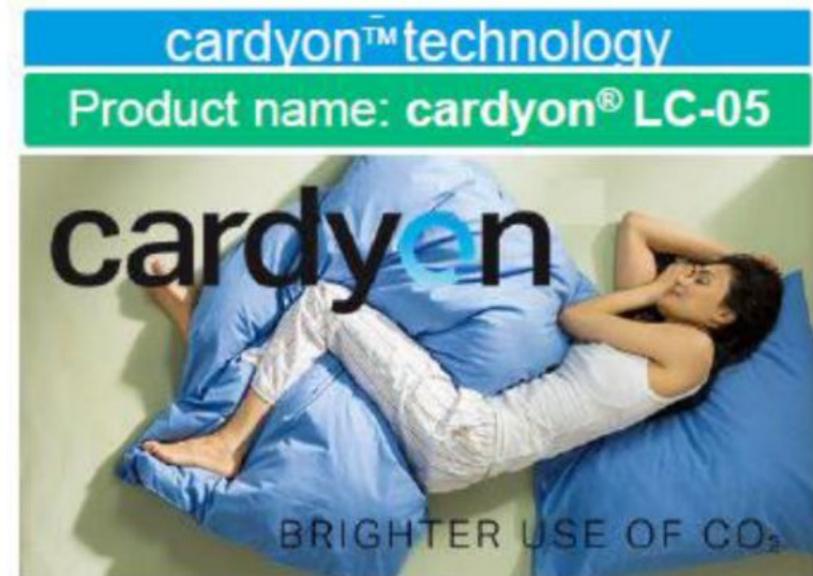
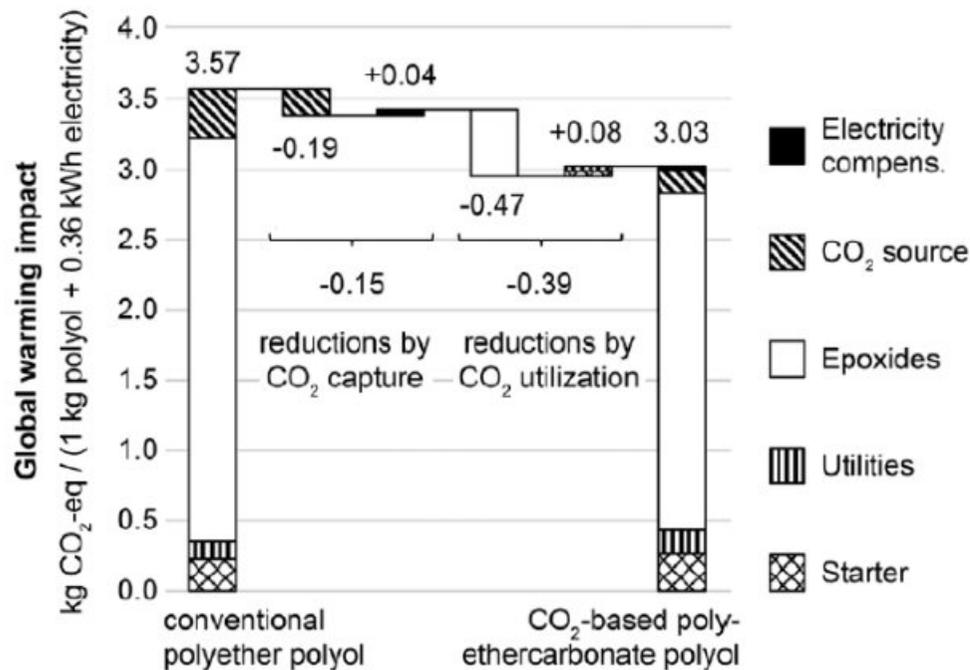
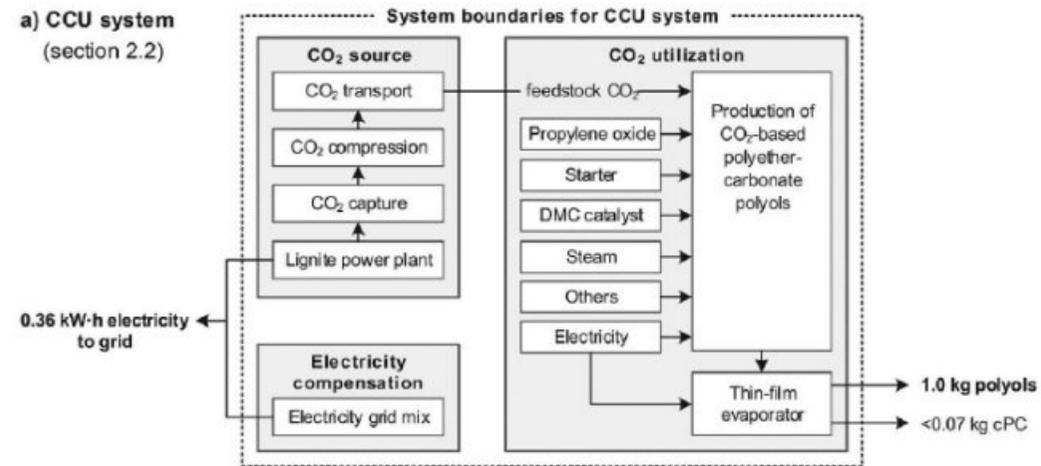
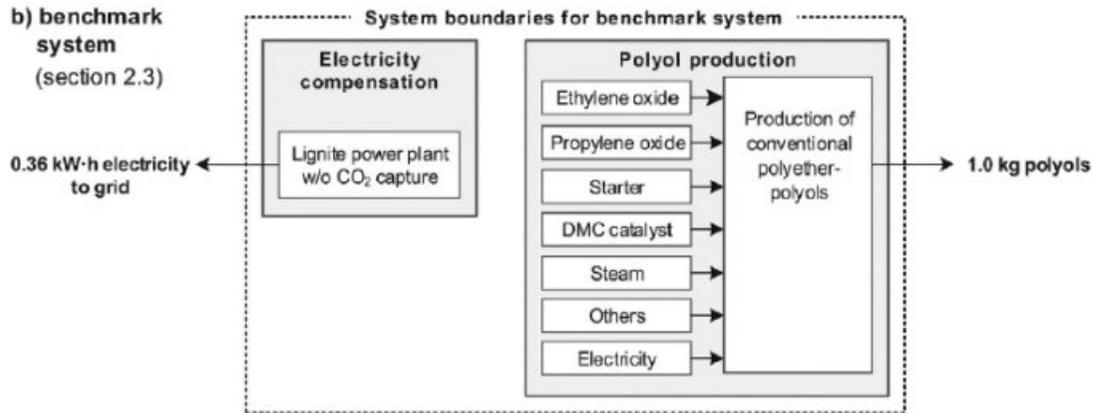
상용 시스템 vs CCU 시스템 배출량 비교



배출량 산정 경계



활용사례(1) 감축효과 분석



활용사례(2) 기여도 분석

화학산업 내 CCU 기술경로(또는 제품) 비교 및 각 제품별 주요 배출 기여인자 분석

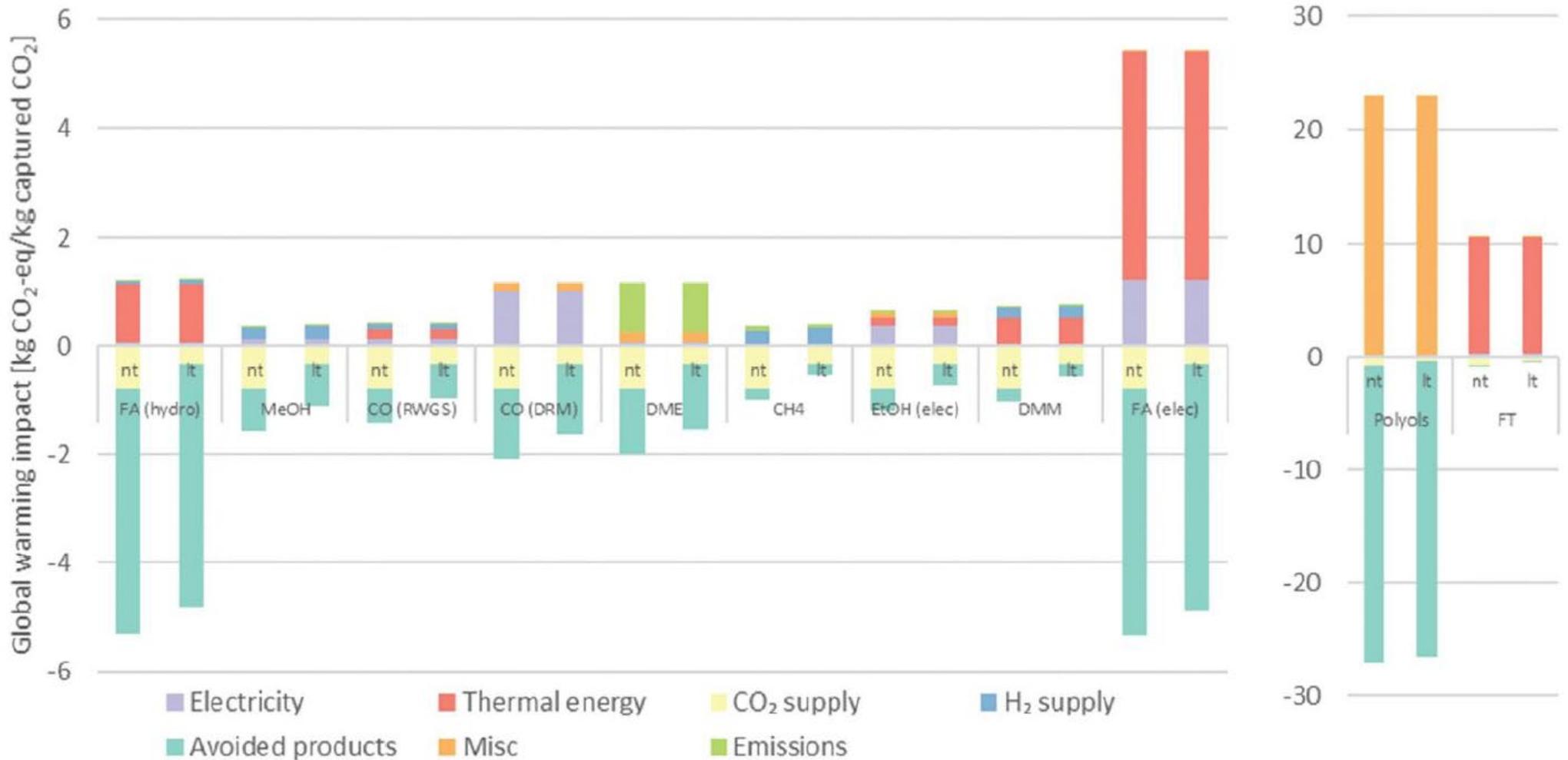


Fig. 4 Contribution analysis for the global warming impact of CO₂-conversion technologies (divided into two graphs due to different scales).

활용사례(3) 포집소재 환경성 비교

nature energy

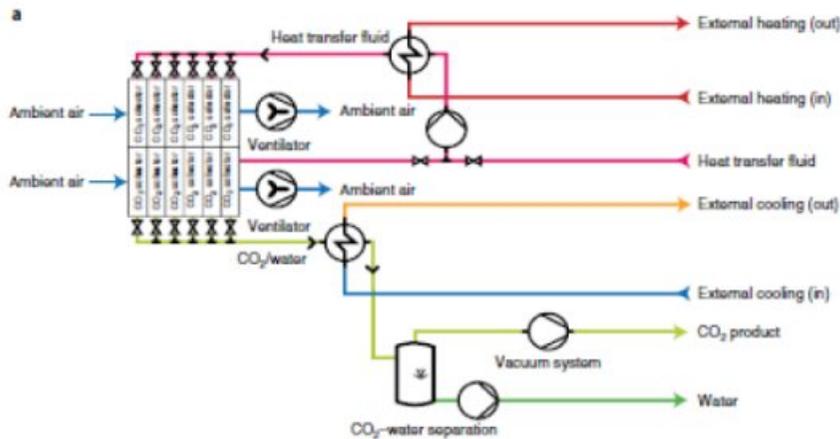
ARTICLES

<https://doi.org/10.1038/s41560-020-00771-9>

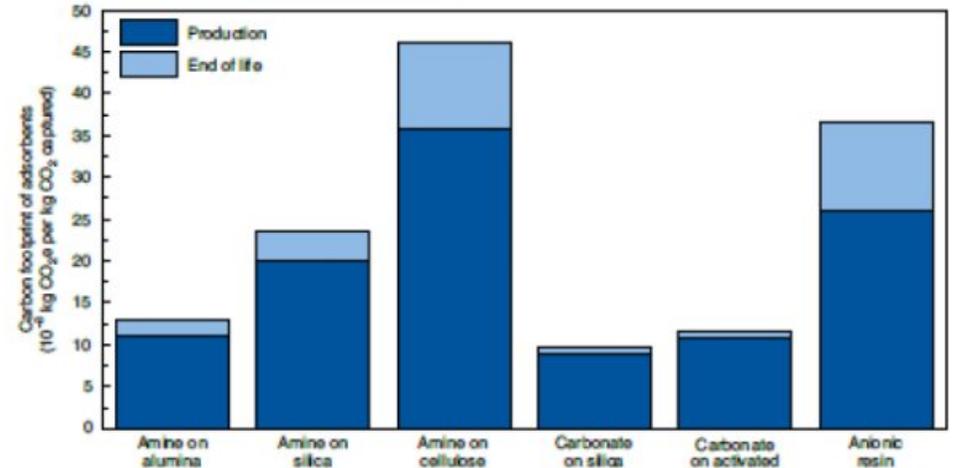
Check for updates

Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature-vacuum swing adsorption

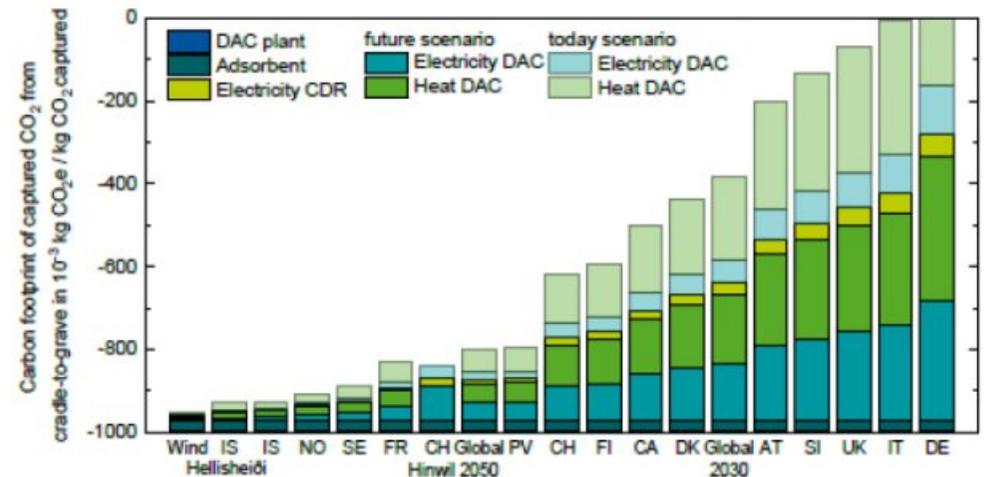
Sarah Deutz¹ and André Bardow^{1,2,3}



포집소재 비교

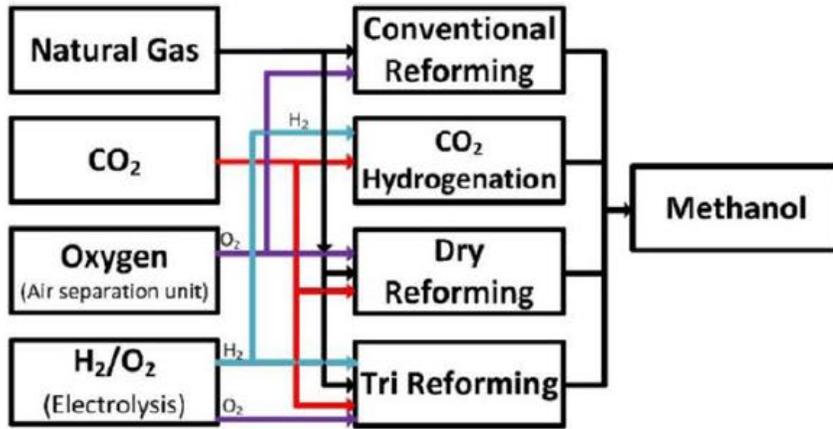


기여도 분석 및 국가별 에너지원 고려

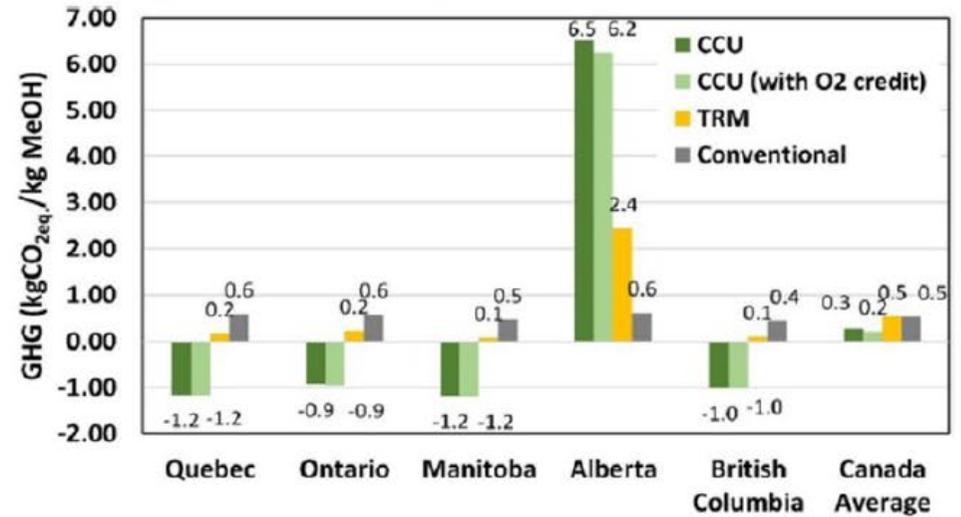


활용사례(4) 경로 및 활용수단 비교

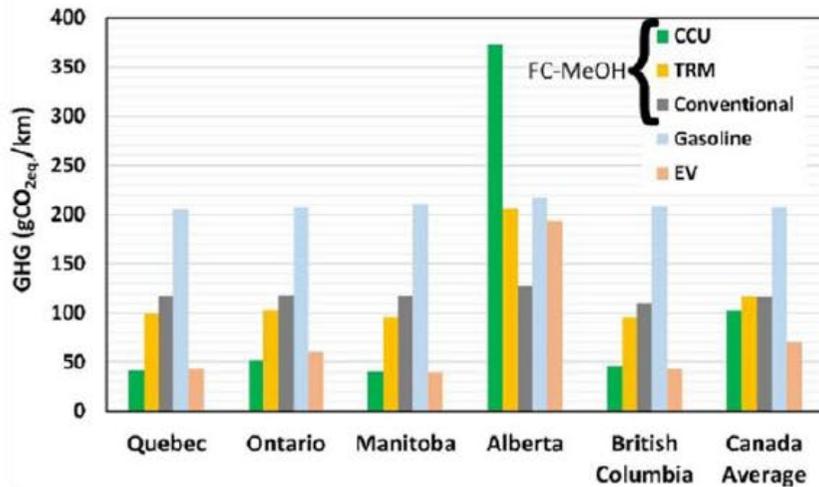
경로 비교



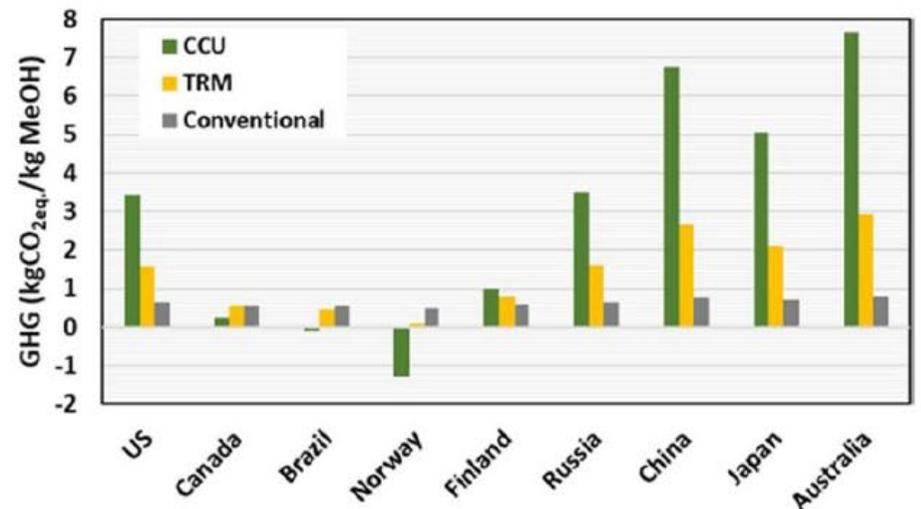
감축효과



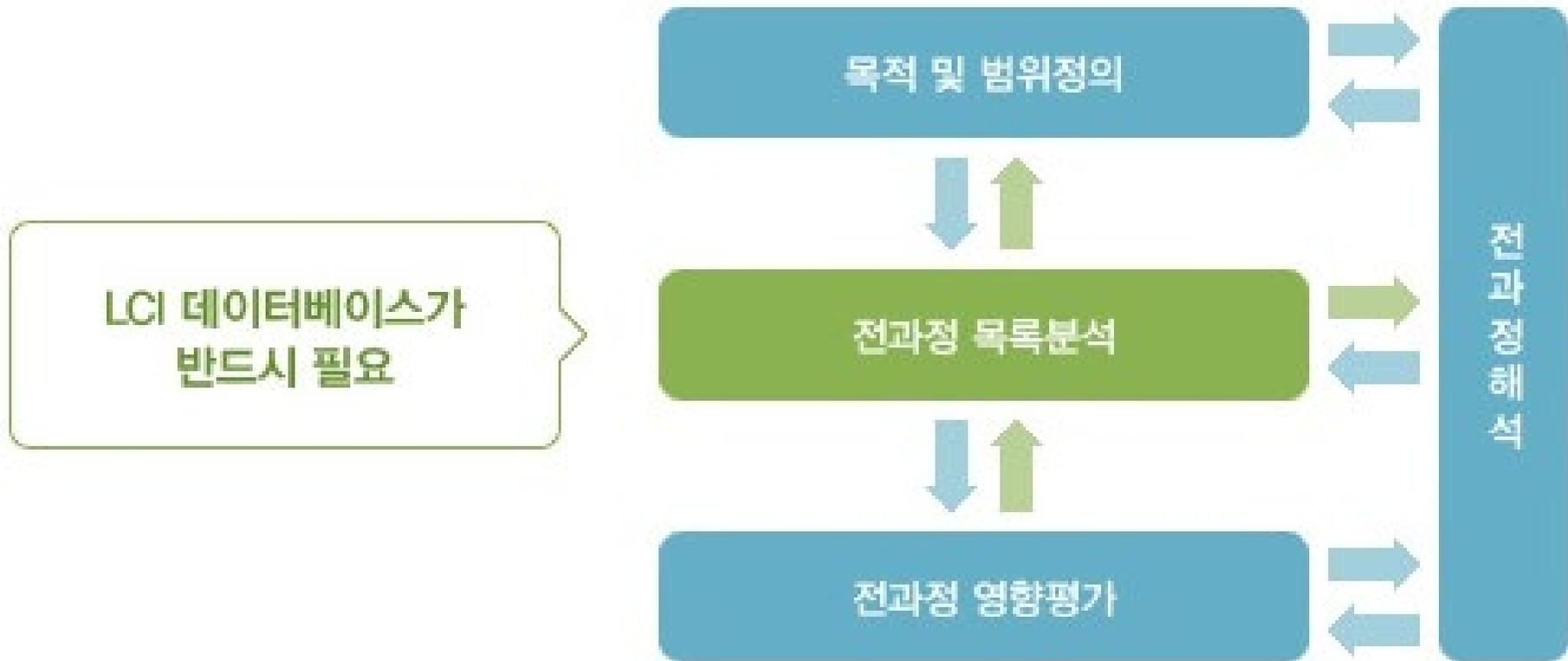
수송연료 사용 고려



국가별 비교



전과정평가 수행 절차 (ISO14040)



전과정 영향평가 항목

- 국내 환경성적표지에서는 7개의 영향범주에 대한 평가를 시행
- EU 제품환경발자국(Product Environmental Footprint, PEF) 제도에서는 16개 영향범주 평가

환경성적표지 영향범주

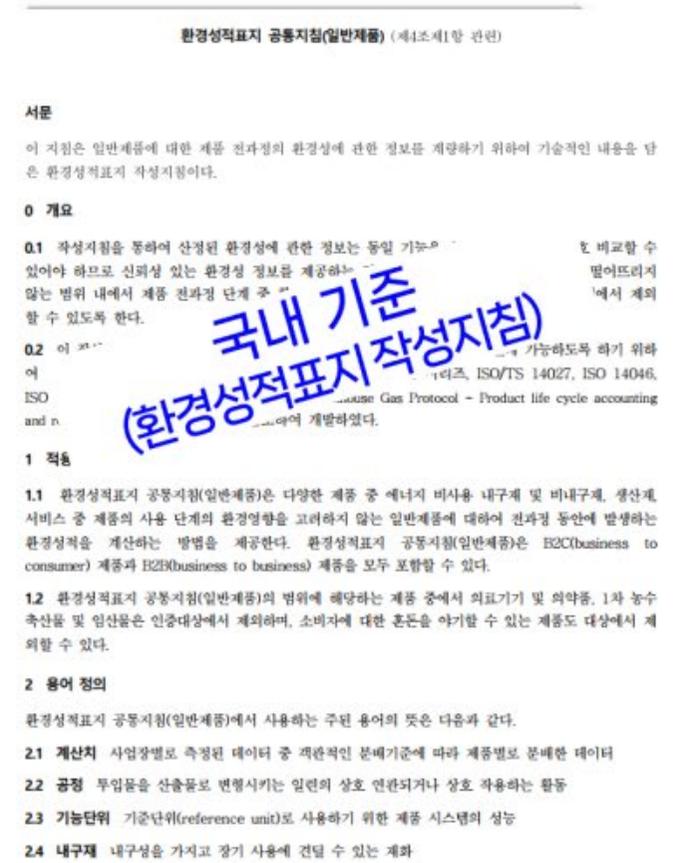
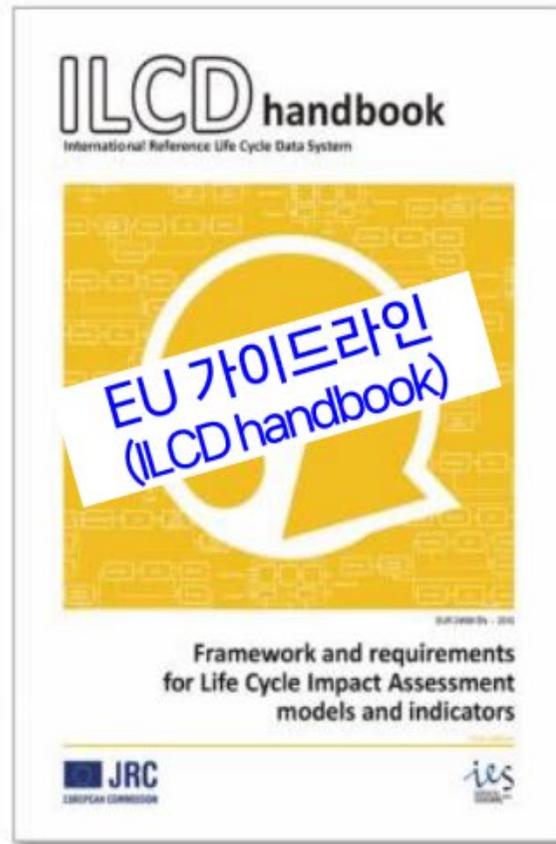
자원발자국 (Resource Footprint)	
탄소발자국 (Carbon Footprint)	
오존층영향 (Ozone Depletion)	
산성비 (Acidification)	
부영양화 (Eutrophication)	
광화학 스모그 (Photochemical Smog)	
물발자국 (Water Footprint)	

EU PEF Impact Categories

			
global warming	water scarcity	land use	acidification
			
ozone depletion	human toxicity (non cancerous effects)	marine eutrophication	eco-toxicity freshwater
			
terrestrial eutrophication	particulate matter	resource use (mineral)	fossils energy resource use
			
aquatic freshwater eutrophication	human toxicity (cancerous effects)	ionising radiation	photo-chemicals ozone formation

전과정평가 수행 지침 (방법론)

- 일반지침은 국제표준 및 국내 기준 존재
- CCUS 기술 또는 CCU 제품과 관련한 전과정평가 표준 또는 국가 공인 수행지침 등은 부재



평가 · 데이터 플랫폼화

GREET (Argonne National Lab)

R&D Greet: Argonne R&D GREET Model	+
40BSAF-GREET	+
45VH2-GREET	+
California Low-Carbon Fuel Standard (LCFS) GREET	+
International Civil Aviation Organization's (ICAO) Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSA)	+

<https://www.energy.gov/eere/greet>

45Q LCA Toolkit (NETL)

The 45Q LCA Toolkit (NETL) grid contains the following resources:

- HIG ABROAD: FROM TIME TO TIME LCA TO LCA TO LCA** (High Abroad: From Time to Time: LCA to LCA to LCA)
- NETL CASE LCA DOCUMENTATION APPROACH** (Netl Case Lca Documentation Approach)
- PRELIMINARY ASSESSMENT** (Preliminary Assessment)
- NETL CASE OPERATIONAL LCA DATABASE VERSION 2.0** (Netl Case Operational Lca Database Version 2.0)
- LCA Life Cycle Analysis** (Central logo)
- ADDITIONAL GUIDANCE** (Additional Guidance)
- NETL ABROAD: DOCUMENTATION** (Netl Abroad: Documentation)
- OPERATIONAL CONTRIBUTION TOOL** (Operational Contribution Tool)
- NETL 45Q LCA REPORT TEMPLATE** (Netl 45q Lca Report Template)

<https://netl.doe.gov/LCA/CO2U/45Q>

TEA/LCA Tool (Global CO₂ Initiative)

The screenshot shows a spreadsheet titled "Techno-Economic and Life Cycle Assessment Template". It includes an "ABOUT" section with the following details:

- Author:** This template was created in 2021 by Grant Faber for the Global CO₂ Initiative at the University of Michigan. It is based on Version 1.1 of the Techno-Economic Assessment & Life Cycle Assessment Guidelines for CO₂ Utilization found at this link.
- Purpose:** The goal of this example template is to help streamline the process of conducting techno-economic and life cycle assessments of emerging direct air capture technologies in a consistent and comparable manner based on the Global CO₂ Initiative's existing guidelines.
- How to Use:** Users should fill out the information on the Goal and Scope worksheets to guide the rest of the study. Then, relevant data points should be filled in on the inventory worksheet. The indicators, impact assessment, and integration worksheets can then be structured and written depending on the study.
- Intended Audiences:** Anyone conducting a TEA or an LCA for technologies in Technology Readiness Levels (TRLs) 1 through 6 (from idea to pilot trial) may find value in this template. Specific groups may include technology developers, assessment practitioners, entrepreneurs, researchers, investors, and others.
- Tips:** Listing sources as comments on cells helps others find this information again in the future. Writing explanations in the notes area helps others understand data and calculations. Avoiding formulas in the inventory worksheet eases the process of updating parameters in the future.

CCU LCA methodology

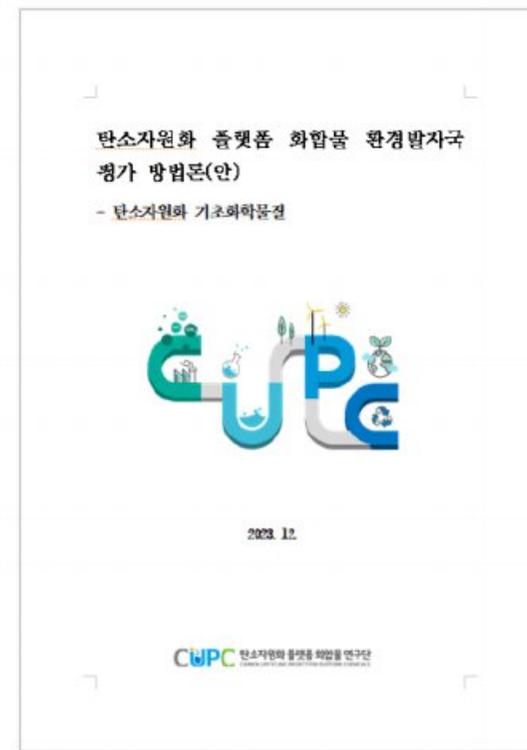
The image shows two book covers related to CCU LCA methodology:

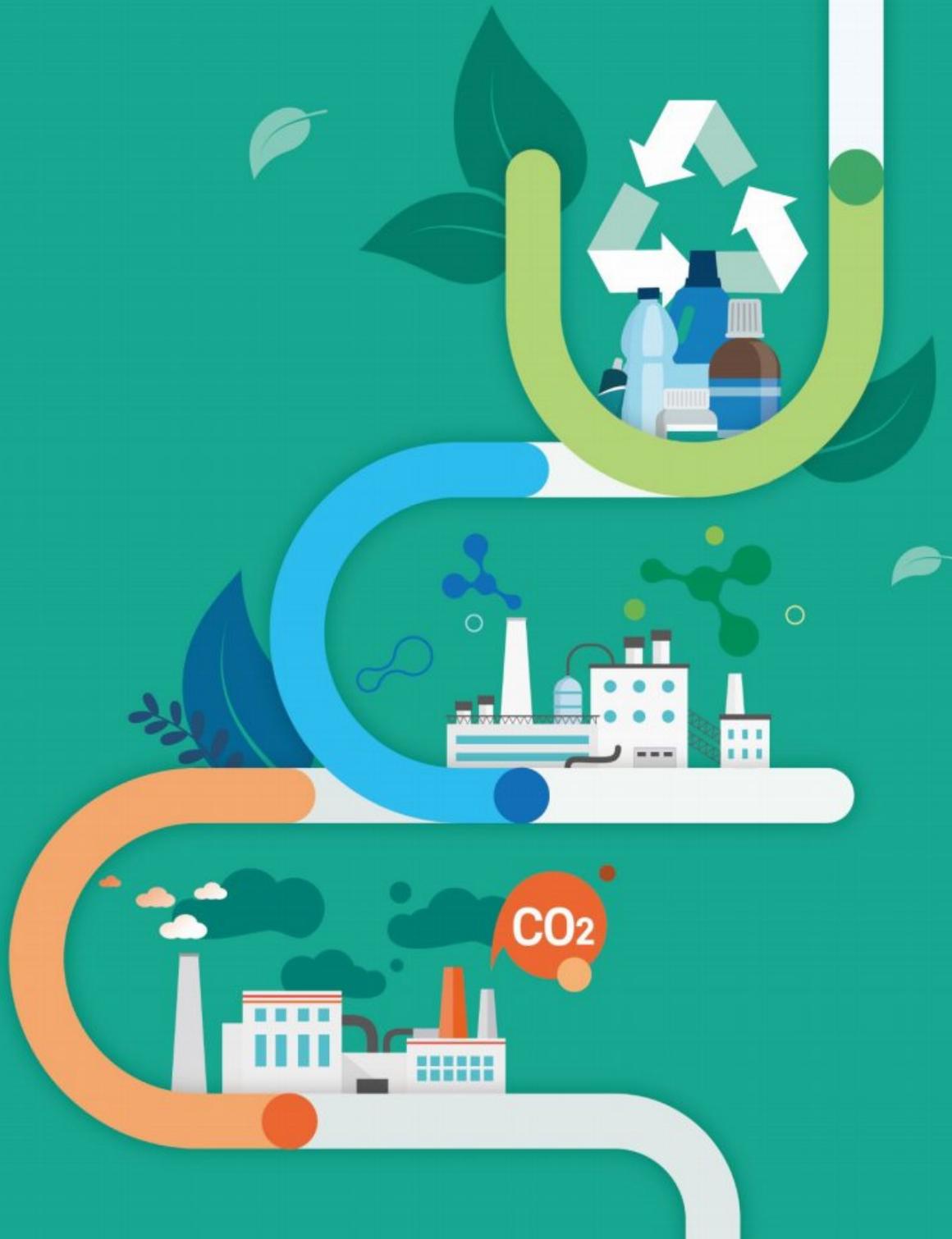
- Techno-Economic Assessment & Life Cycle Assessment Guidelines for CO₂ Utilization (Version 2)** (Cover 1)
- CARBON DIOXIDE UTILIZATION LIFE CYCLE ANALYSIS GUIDANCE FOR THE U.S. DOE OFFICE OF FOSSIL ENERGY AND CARBON MANAGEMENT** (Cover 2)

Both covers feature logos for NETL (National Technology Laboratory) and LCA (Life Cycle Analysis).

한국화학연구원 LCA 연구

- CCUS 개별 프로젝트에 대한 전과정평가 사례 연구
- CCU 전과정평가를 위한 국내 가이드라인, CCU 제품 환경발자국(탄소발자국) 산정 지침 개발
- CCU 핵심 공정/물질 데이터베이스 개발
- R&D 단계의 다양한 CCUS 기술에 대한 사전평가가 가능한 감축량 산정 툴 개발
- 국내 CCU 기술제품 탄소배출량 산정 관련 표준 개발, 플랫폼 구축 및 인증제도 연계 등





THE END
감사합니다

최지나

jchoi@kriict.re.kr

042-860-7396