(사)해양산업통합클러스터

2024 MacNet 전략세미나 II

탄소중립 핵심수단
CCUS 기술개발 현황과 한계는 어디인가?

2024. 11. 06. (수) 14:00~17:30

서울대학교 호암교수회관 무궁화홀

주 최 (사)해양산업통합클러스터(MacNet)

지 원 부산광역시 BUSAN METROPOLITAN CITY

KR KOREAN REGISTER

인 사 말

전 세계 해운업계는 2050년까지 완전한 탈탄소 Net-Zero를 달성하기 위해
탄소 배출 저감을 위한 다양한 방안을 모색하고 있습니다.
그중 CCUS는 탄소를 포집하고 저장한 탄소를 다시 유용한 자원으로 활용하는 기술로
CCUS의 기술 개발은 Net-Zero를 위한 핵심수단이 될 것으로 전망됩니다.
미래의 녹색 해운업계를 이끌어갈 CCUS의 경제성 확보와 광범위한 상용화를 위해
유관의 기업 및 기관에서는 관련 기술의 연구 개발에 박차를 가하고 있습니다.

이번 세미나는 현재까지 CCUS 기술 개발 현황 및 기술적 어려움의 극복 전략과
CCUS의 기술적 도약을 위한 협업 방안을 도모하는 자리가 될 것입니다.

여러분의 많은 참여와 성원을 부탁드립니다.

(사)해양산업통합클러스터·한국선급 회장 이형철

CONTENTS

제1주제 :: 국내외 CCUS 프로젝트 현황 및 동해 가스전 활용 CCUS 실증사업 추진 전략 07
한국 CCS추진단 이호섭 단장

제2주제 :: 해운에서의 국경 통과 CCS 국제법적 전략 19
한국선급 김중헌 선임 검사원

제3주제 :: 탄소중립 이행을 위한 국외 탄소저장소 확보 전략 29
에너지경제연구원 추다해 박사

제4주제 :: 선상 탄소 포집 및 저장(OCCS)온실가스 감축효과 및 경제성 분석 41
서울대학교 임영섭 교수

주제발표 1

국내외 CCUS 프로젝트 현황 및 동해 가스전 활용 CCUS 실증사업 추진 전략

한국CCS추진단 이호섭 단장

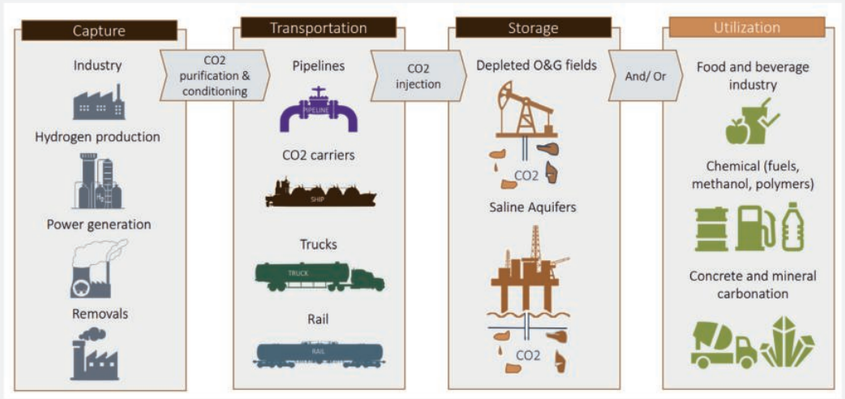
국내외 CCUS 프로젝트 현황 및 동해가스전 활용 CCS실증사업 추진 전략

이 호 섭
한국CCUS 추진단장

2024. 11. 06

한국 CCUS 추진단
Korea Carbon Capture Utilization and Storage Association

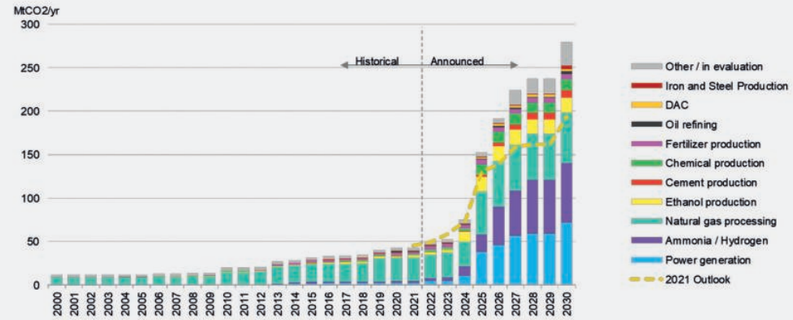
CCUS Value Chain



Source : Rystad Energy research & analysis

이산화탄소 포집 규모 전망

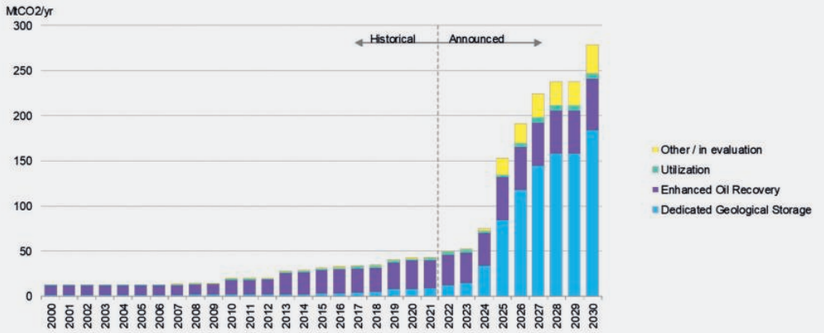
▪ 기존 Natural Gas Processing 공정에서 전력/수소/암모니아 생산공정에 대한 포집규모가 확대될 전망



Source : Bloomberg NEF

포집 이산화탄소 사용 전망

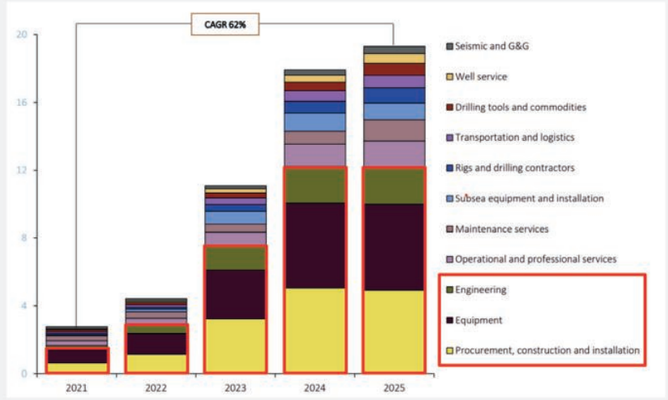
▪ 기존 원유회수증진(EOR)에서 영구 격리하기 위해 지중에 저장되는 양이 급격히 증가할 것으로 전망



Source : Bloomberg NEF

CCS 시장 규모 전망

- CCS 글로벌 시장규모가 2025년까지 50억불 규모로 예상되고 절반이상이 EPCI 비용임



※ 발표된 상용 프로젝트 기준(pilot 및 실증 프로젝트 제외)
(Source : Rystad Energy research & analysis)

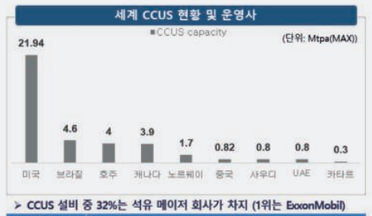
해외 CCS사업 추진 현황

- 세계적으로 CCUS 관련 지원과 투자가 증가하는 추세임(미국의 운영 및 투자 규모가 큼)
- CCUS 설비의 대부분은 석유 회사가 운영

CCUS 관련 국가별 지원 및 투자

국가	내용
미국	• **IRA** : CO_2 저장 시 EOR의 경우 톤당 60불과 지중저장하는 경우 톤당 85불의 세금 경감 • **The California Low Carbon Fuel Standard** : 수송 연료를 CCUS로 처리시 추가 세금 경감
캐나다	• **Greenhouse Gas Pollution Pricing** : 수송 및 난방 연료에 2019년부터 톤당 20불에서 매년 10불 씩 올려 2022년까지 톤당 50불 세금 부과 • **Industrial Energy Efficiency and CCUS Grant Program** : 비용의 최대 75% 혹은 2천만 불 보장
EU	• **European Green deal, London Protocol** : 펀딩으로 개발 증진
영국	• **White Paper** : 2030년까지 연간 천만 톤의 CO_2 포집을 위해 CCUS에 10억 파운드 투자
싱가포르	• CCUS를 통한 저탄소 배출 계획 발표 (2020년 4월)
호주	• CCUS 개발과 수소 수출 허브 설립에 20억불 펀딩 계획
중국	• 2060년까지 탄소 중립 선언하면서 CCUS 연급
일본	• 환경혁신전략(2020년 1월)에 CCUS 도입

세계 CCUS 현황 및 운영사



➢ CCUS 설비 중 32%는 석유 메이저 회사가 차지 (1위는 ExxonMobil)

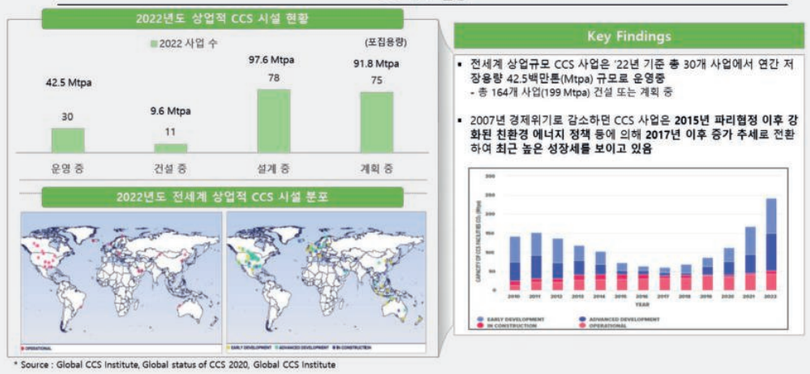
기업	내용
ExxonMobil	• 연간 9백만 톤 CO_2 포집 능력, 20개 추가 CCS사업 가능 • 21년부터 25년까지 30억 달러 이상 투자 예정
	• 수소와 CCUS 조기 선점을 노림 • 연간 5억달러 저탄소 활동에 지원, 2억 달러 저탄소 사업개발에 투자
	• CCUS를 탈탄소에서 가장 중요하게 고려해 연간 백만달러 투자 예정 • CCUS로 2035년까지 연간 2천만 톤 저장, 30년까지 연간 3천만 톤 처리

* Source : KNOC 내부자료 / Global Status of CCS 2020

해외 CCS사업 추진 현황

- 전세계 상업규모 CCS 사업은 '22년 기준 총 30개 사업에서 연간 저장용량 42.5백만톤 규모로 운영 중이며, 총 164개 사업이 건설 또는 계획 중임

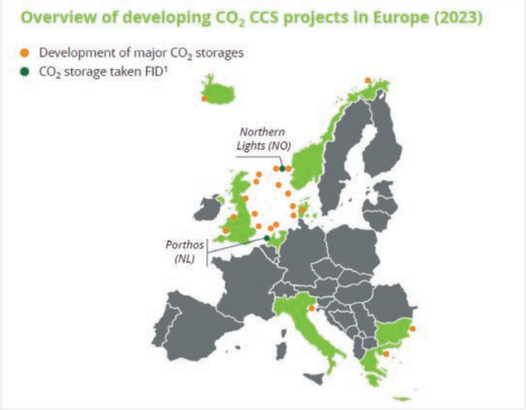
CCS 운영 현황



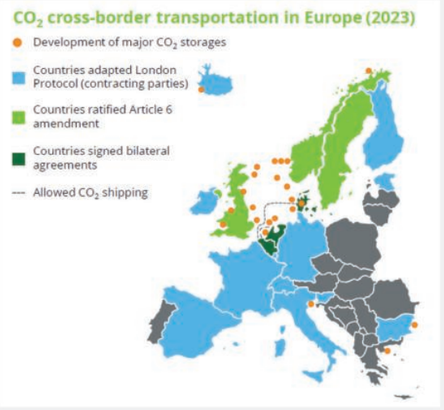
* Source : Global CCS Institute, Global status of CCS 2020, Global CCS Institute

유럽 CCS사업 추진 현황

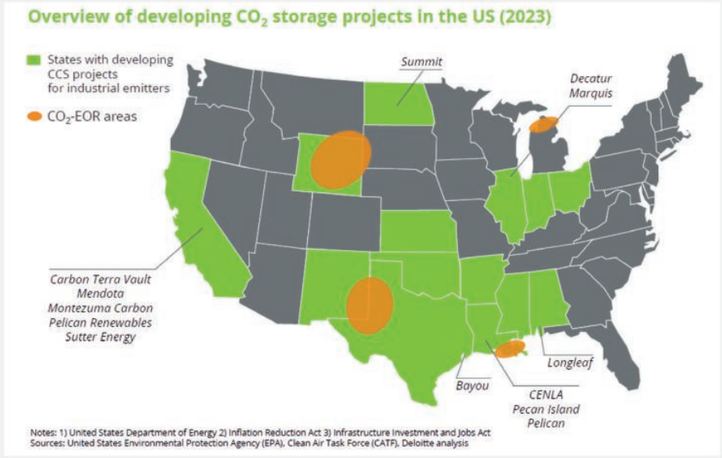
Overview of developing CO_2 CCS projects in Europe (2023)



CO_2 cross-border transportation in Europe (2023)

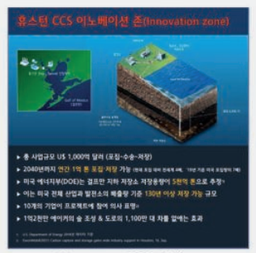


미국 CCS사업 추진 현황



CCS의 흐름 : Hub & Cluster

- **CCS 사업성 확보를 위해 이산화탄소 배출 밀집 산업지역을 중심으로 Hub and Cluster 구축**



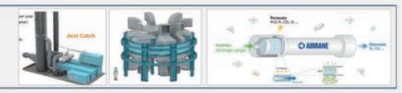
Houston CCS Hub

Porthos Project

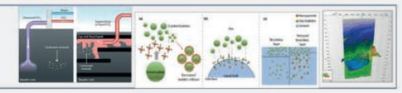
Longship Project

CCUS 기술개발 동향

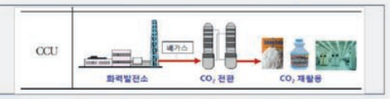
Capture techs move towards **'big-to-small'**
- Compact/Dynamic unit
- High selectivity and permeable membrane or ultrathin film
- Dry rotary with adsorbent



Storage techs move for **storage efficiency and safety**
- In-situ mineralization
- Injectivity enhancement
- AI&Big data driven monitoring



Utilization techs competing
- CO2-EOR/EGR
- eFuel, Bio-plastic, etc
- Building material



Innovations are coming along
- Black carbon
- Bio fuel(algae)
- Metal-CO2 Battery System

국가 탄소중립 시나리오 : CCUS 목표

[2030 탄소중립 중간목표]

(단위: 백만톤CO_2e, 괄호는 '18년 대비 감축률)

구분	부문	2018	2030 목표	
			기존 NDC ('21.10)	수정 NDC ('23.3)
배출량 합계		727.6	436.6 (40.0%)	436.6 (40.0%)
배출	전 환	269.6	149.9 (44.4%)	145.9 (45.9%)
	산 업	260.5	222.6 (14.5%)	230.7 (11.4%)
	건 물	52.1	35.0 (32.8%)	35.0 (32.8%)
	수 송	98.1	61.0 (37.8%)	61.0 (37.8%)
	농축수산	24.7	18.0 (27.1%)	18.0 (27.1%)
	폐기물	17.1	9.1 (46.8%)	9.1 (46.8%)
	수 소	(-)	7.6	8.4
	탈루 등	5.6	3.9	3.9
흡수·제거	흡수원	(-41.3)	-26.7	-26.7
	CCUS	(-)	-10.3	-11.2
	국제감축	(-)	-33.5	-37.5

※ 노란색 음영 : 기존 NDC 대비 수정된 부분

대통령직속 2050 탄소중립 녹색성장 위원회

2050 탄소중립시나리오 종합표

(단위: 백만톤CO2e)

구분	부문	'18년	최종분 A안	최종분 B안	비고
배출량		600.1 (순배출량)	0	0	
배출	전환	269.6	0	20.7	·(A안) 유연발전 전면중단 ·(B안) 유연발전 중 LNG 일부 전환 가정
	산업	260.5	51.1	51.1	
	건물	52.1	6.2	6.2	
	수송	98.1	2.8	9.2	·(A안) 도로부문 전기·수소차 등으로 전면 전환 ·(B안) 도로부문 내연기관차의 대체연료(e-fuel 등) 사용 가정
	농축수산	24.7	15.4	15.4	
	폐기물	17.1	4.4	4.4	
	수소	-	0	9	·(A안) 국내생산수소 전량 수전해 수소(그린 수소)로 공급 ·(B안) 국내생산수소 일부 부생·추출 수소로 공급
	탈루	5.6	0.5	1.3	
흡수 및 제거	흡수원	-41.3	-25.3	-25.3	
	이산화탄소 포집 및 활용·저장 (CCUS)	-	-55.2	-98.8	B안 : CCS(국내 30백만톤 + 국외 30백만톤) CCU(24.6백만톤)
	직접공기포집 (DAC)	-	-	-7.4	·포집한 수소는 저탄원료 대체연료로 활용 가정

2030년 CCS 목표 : 연간 480만톤
CCU 목표 : 연간 640만톤

2050년 CCS 목표 : 연간 6,000만톤
CCU 목표 : 연간 2,460만톤

동해가스전 개요 선정 배경

- 탐사-개발-생산 전 과정을 자체적으로 수행
  - ➔ 베트남, 美 멕시코만 등 해외 개발사업 진출을 위한 기술적 발판 마련
- 우리나라가 95번째 산유국으로 등극 / 총 1.4조원 순회수 (회수 2.6조 – 투자 1.2조)

위 치	울산 남동쪽 해상 58Km 지점
생 산 기 간	'04.7월 ~ '21년 (18년)
누 적 생 산 량	4,544만 boe [울산시 전체가구 20년간 천연가스 사용량]
순 회 수 액	총 1.4조원 (회수액 2.6조 – 투자비 1.2조원) [현대자동차 220만대 판매 효과]

('98. 7월) 동해-1 가스전 발견 → ('04. 7월) 동해-1 생산 개시 → ('16. 7월) 동해-2 생산 개시 → ('21. 12월) 생산 종료 → 탄소중립 복합단지로 재활용 (해상풍력,CCS)

국내 CCS 통합실증 선정 배경

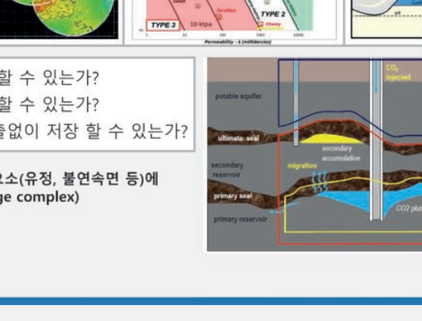
정책적 배경	• 국가 NDC 목표 달성을 위한 CCS 통합실증사업 수행 시급 (NDC : 국가온실가스 감축 목표)
기술적 배경	**안전성** Storage Containment • 국내 유일 고갈가스전으로 저장층 규명 完 • 고갈가스층 활용 밀폐성 확보, 누출 위험 低 • 기존 시추 및 생산 중 지진 유발 문제 無 • 기존 가스전을 활용 주민수용성 용이 **경제성** Economic benefit • 시설투자비(CAPEX) 절감 가능 (기존 플랫폼, 생산시설 및 해저배관 재활용) • 기존 시설 활용 시 개발 기간 단축 가능 **기술력** Concordance E&P Tech. • 공사 독자적인 탐사/개발/생산 경험 有 • 가스전 해상플랫폼의 안전한 운영 경험 有 • 석유E&P사업과 유사한 CCS 기술 조건 • 공사 E&P사업에서 확보한 기술 활용 가능 **확장 가능성** Extensibility • 국내 CCS 사업의 초석이 될 프로젝트 • 이산화탄소 자중저장 허브터미널 모델 추진 • 2030년 NDC 목표 달성 기여(400백만톤/년) • CCS-수소-풍력과의 연계를 통한 Value-chain
환경적 배경	• 동해가스전은 육상에서 약 60 km 떨어져 민원 등으로부터 상대적으로 자유로움 • 울산지역은 대규모 화학단지가 산재하여 CO_2 포집원 확보가 용이

➔ **정책적, 기술적, 환경적 측면에서 동해가스전은 국내 CCS 통합실증 추진의 최적의 부지**

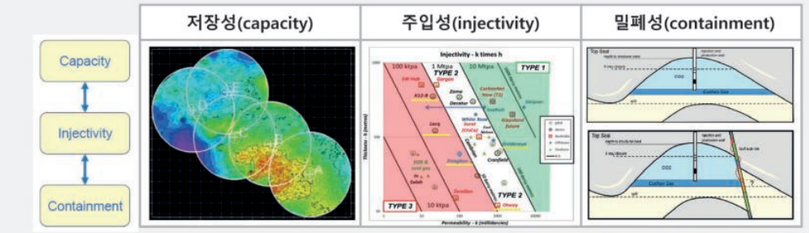
동해가스전 활용 CCS 통합실증 개요

포 집	수 송	저 장	모니터링
• 산업/발전소 포집원 대상 • 향후 동해가스전 확장 시 복수의 포집원 수용 가능	• 허브터미널 설치 • 해상 파이프라인 수송 • 향후 선박 수송 확장 고려	• 고갈 동해가스전에 CO_2 주입·저장 • 동해가스전 인근 대염수층 주입 확장	• 저장 기밀성, 누출, 환경 위해성 확인 • 전주기 모니터링 시스템 구축 및 사후관리 예정

- **산업체/발전소 포집원 대상** (CO_2 120만톤/년)
- **고갈 동해가스전 저장 및 추가 저장소 확장**
- **R&D와 실증 인프라 구축으로 구성**
- **일정**
  - 가스전 종료 ('21.12)
  - 건설 (~'28)
  - CO_2 주입 ('28)
  - 운영 ('28~'30년 운영)

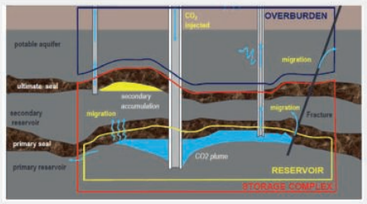


저장소 평가시 고려사항



- **저장성:** 얼마나 많이 저장 할 수 있는가?
- **주입성:** 얼마나 쉽게 주입 할 수 있는가?
- **밀폐성:** 주입된 CO2를 누출없이 저장 할 수 있는가?

※ 누출 가능성이 있는 다양한 요소(유정, 불연속면 등)에 대한 위험성 평가 요구(storage complex)

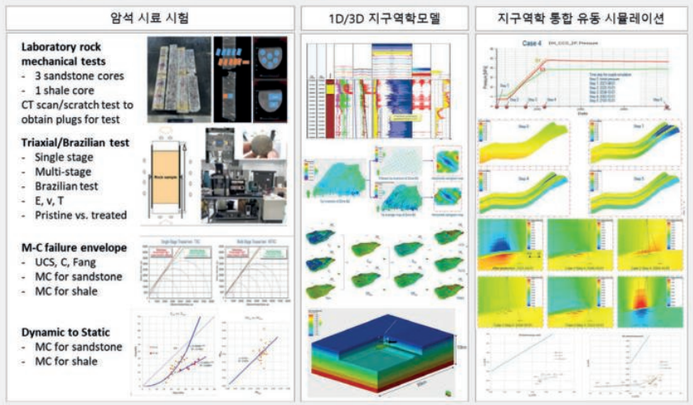


동해가스전 주입 및 저장 용량 평가

- 동해가스전 저장 용량 평가 결과, 약 12백만톤 주입 가능

동해가스전 주입에 따른 밀폐성 및 덮개암 안정성 검토

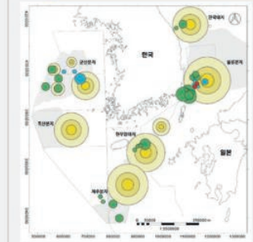
- 시추공 암석시료 실험 및 지구역학모델과 결합된 주입 시뮬레이션을 통해 주입된 CO2 유출 및 덮개암 안전성 검증



국내 저장소 현황 및 향후 추진 방향

● 현재 저장가능한 용량은 동해가스전(12백만톤)이 유일, 국가 목표달성을 위해서는 최소한 10억톤 규모의 국내 저장소 확보 필요

국내저장소 평가 현황 및 탐사 계획



해역	3단계 (유망구조)			4단계 (사업부지)		
	최소	중간	최대	최소	중간	최대
서해	1.5	5.4	15.7			
남해	1.5	5.4	15.7	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
동해		1.93			0.14	
	-	1.93	-	-	0.14	-
	-	7.33	-	-	0.14	-

프로젝트		2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
국내 사업	동해가스전 심층사업	에너신청	FEED		시설구축		CO_2 주입 운영		
	추가 저장소 개발		유망구조 평가		평가정 시추	개발계획 수립	FEED & EPC		CO_2 주입
	대규모 저장소 탐사 사업			물리탐사 및 탐사시추		유망구조 도출	탐사시추 8공		사업소재보

향후 추진 계획

추진계획

- 동해가스전 실증사업 연계 동해 울릉분지 내 저장 후보지 우선탐사
  ① 동해가스전 상하부 염대수층 저장대상 평가 : ~2024년
  ② 동해가스전 인근 신규 저장소 확보 : 2026
- 대규모 기반조성 사업을 통한 권역별 CCS 종합탐사
  ① 권역별(동해/서해/남해) 물리탐사 수행 : 2042~2027년
  ② 저장소 확인을 위한 탐사 시추 수행 : 2028~2030년

국내 저장소 확보를 위한 대규모 종합 탐사

❍ **(필요성)** CCS저장소는 석유가스저류층과 달리 비석유구조(대염수층 등)에도 존재할 수 있기 때문에 한반도 인접해역에 대한 종합 탐사사업이 필요

❍ **(평가단계)** 유망구조 도출 후 이산화탄소를 최종 주입하기까지 7~9년의 사업기간이 소요됨

* 탐사작업의 선행을 통해 막대한 예산이 요구되는 시추작업 성공가능성 제고

절 차	주요 수행내용	소요기간※
탐사단계	기존 물리탐사자료 전산재처리(필요시) → **광역 물리탐사 실시 및 해석** → **유망 저장소 후보지 도출** → 시추대상 구조 선정→ 탐사저장자원량 산출	약 2~3년
시추단계	탐사 시추 설계 → 시추 결과 평가 → 발견잠재저장자원량 산출 → CCS 저장소 선정	약 2~3년
개발단계	경제성 평가(CO_2 공급원 반영) → 개발계획 수립(주입공 및 관측공 포함) → 사업 인허가 → 개발착수 및 시공 → 시험운영	약 3년
운영단계	최적의 운용조건 도출을 통한 비용 절감 추진	-

* 동해가스전 중규모 실증사업은 탐사/시추단계 생략으로 4~6년의 개발기간을 단축하는 효과 발생

해외 CCS사업 추진 전략 및 계획

● 국내 배출원 규모 대비 국내 저장소 용량 한계로 해외저장사업 병행 추진은 불가피

아태지역 주요 CCS 후보지

향후 추진 계획

추진계획

- 포집원/저장소 확보 및 권역별 특성에 맞는 사업모델 도출

① 국내 저장소 연계 해외저장사업 : 동남권 CCS사업
- 동해가스전 CCS사업 일정 연계 시너지를 통한 사업성 개선 효과

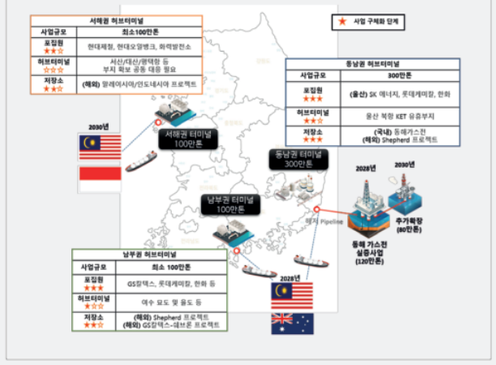
② 해외저장사업 선행 사업 : 남해권/서해권 CCS사업
- 서해 대규모 저장소 평가 연계 방안 모색

- 해외저장사업 사업관련 정부간 협약 체결
- 해외저장물량 감축량 인증관련 기준 및 제도 수립

허브클러스터 구축 전략 및 계획

● 사업성 강화를 위한 포집된 CO2를 집화, 압축, 액화, 저장, 송출하는 허브터미널/수송이 연계된 클러스터 구축 필요

국내 클러스터 구축 계획



향후 추진 계획

- 권역별 클러스터 구축을 통한 국가 CCUS 인프라 구축 및 CCUS Value Chain 창출
  ① 대규모 배출원 및 저장소 접근성
  ② 확장성, 수용성, 경제성 및 공공성 고려
- 대규모 배출원이 산재한 국가 산업단지(공공성) 인근의 항만시설과 충분한 부지 확보가 가능한 동남권, 남부권, 서해권을 우선 후부지로 선정하여 사업 추진

주제발표 2

해운에서의 국경 통과 CCS 국제법적 전략

한국선급 김중헌 선임 검사원

KOREAN REGISTER

탄소중립 핵심수단 CCUS 기술개발 현황과 한계

해운에서의 국경 통과 CCS 국제법적 전략

2024년 11월 5일 한국선급 김중헌

Copyright KR All rights reserved

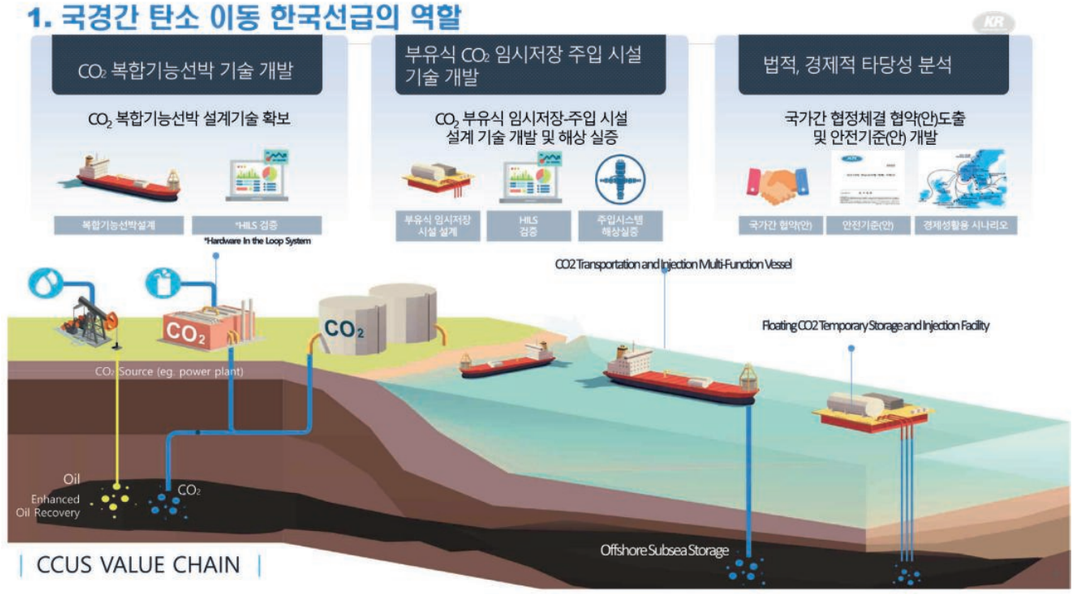
Contents

1. 국경간 탄소 이동 연구
2. 국경간 탄소 이동 관련 국제 규제
3. 국가간 CCS 협정문
4. 기대효과

1

국경간 탄소 이동 연구

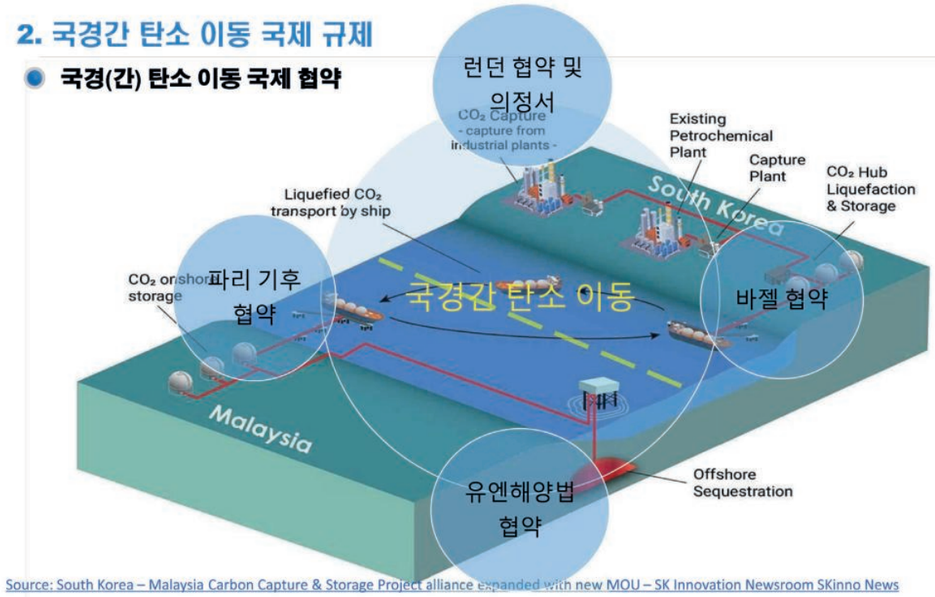
1. 국경간 탄소 이동 한국선급의 역할



2
국경간 탄소 이동 관련 국제 규제

2. 국경간 탄소 이동 국제 규제

국경(간) 탄소 이동 국제 협약



Source: South Korea – Malaysia Carbon Capture & Storage Project alliance expanded with new MOU – SK Innovation Newsroom SKinno News

2. 국경간 탄소 이동 국제 규제

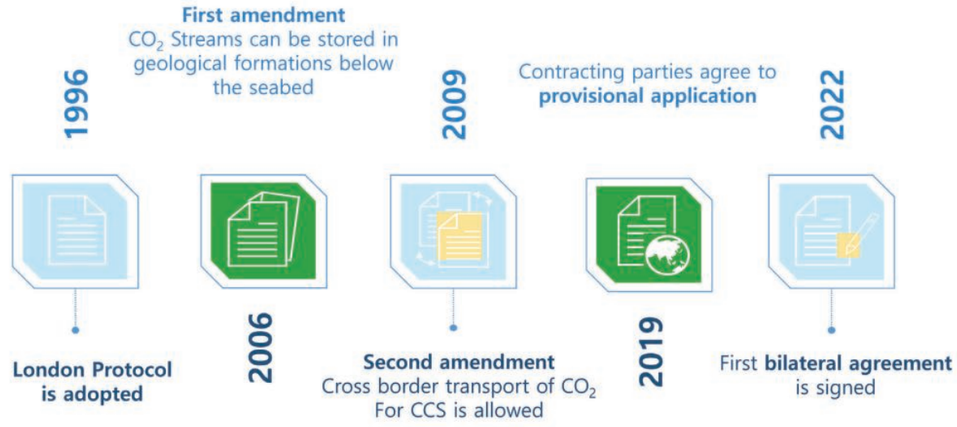
대한민국이 가입한 국경(간) 탄소 이동 관련 국제 협약

<파리 기후 협약> <런던 협약 & 의정서> <유엔해양법 협약> <바젤 협약>

2. 국경간 탄소 이동 국제 규제

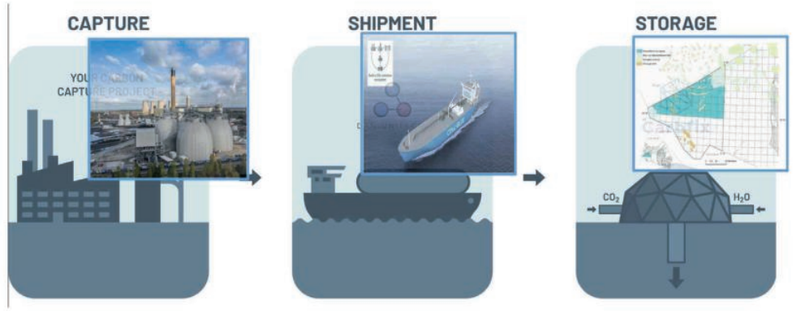
런던 의정서 (London Protocol) - 폐기물 및 기타 물질의 투기로 인한 해양 오염 방지에 관한 런던 협약

1996 Protocol To The Convention On The Prevention Of Marine Pollution By Dumping Of Wastes And Other Matter, 1972



2. 국경간 탄소 이동 국제 규제

● **런던 의정서 – 최초의 국경 간 탄소 이동 협정문 (덴마크-벨기에-플란데르 CO2 운송 및 저장 협정)**



수출국 이득

NDC 달성

산업계 이득

Dan-Unity CO2,
국제 시장 진입

수입국 이득

최대 220억 톤
> 400 x 덴마크 1 년 CO2

Source : www.offshore-energy.biz Mitsubishi Shipbuilding and TotalEnergies study liquefied CO2 carrier | gasworld
CCUS: Where is carbon capture working? – Energy Monitor

3
협정(안) 개발

2. 협정(안) 개발

● **런던 의정서를 기반으로 한 협정(안) 개발의 필요성**

LP 3(4) 비준국 (11 국)

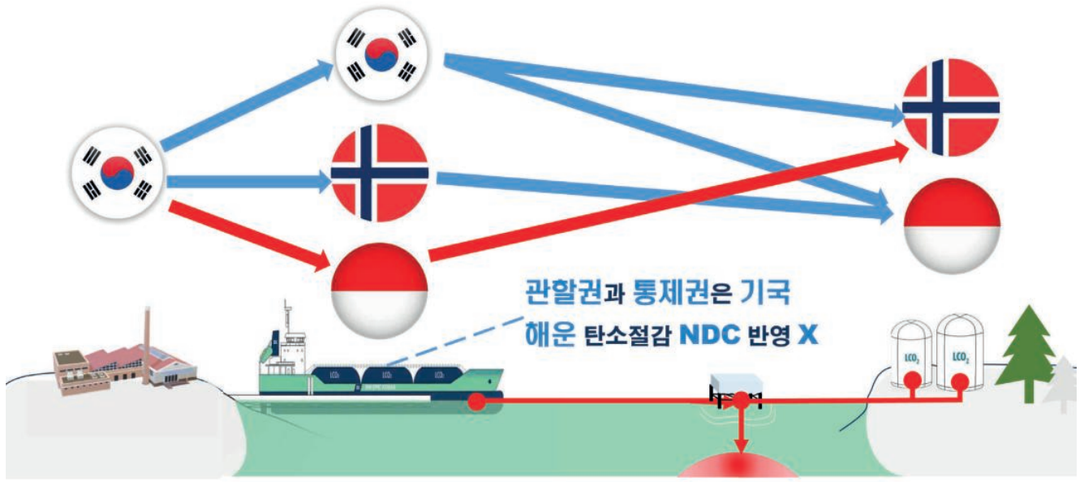
노르웨이, 영국, 네덜란드, 이란, 핀란드, 에스토니아, **스웨덴, 벨기에, 덴마크, 스위즐랜드, 대한민국**

*** 볼드체는 LP 5(14) 비준국**

이산화탄소 스트림의 처분을 위한 수출, **국가 간에 합의 또는 협정이 체결**된 경우 **국경 간 이산화탄소 이송 가능**

2. 국경간 탄소 이동 국제 규제

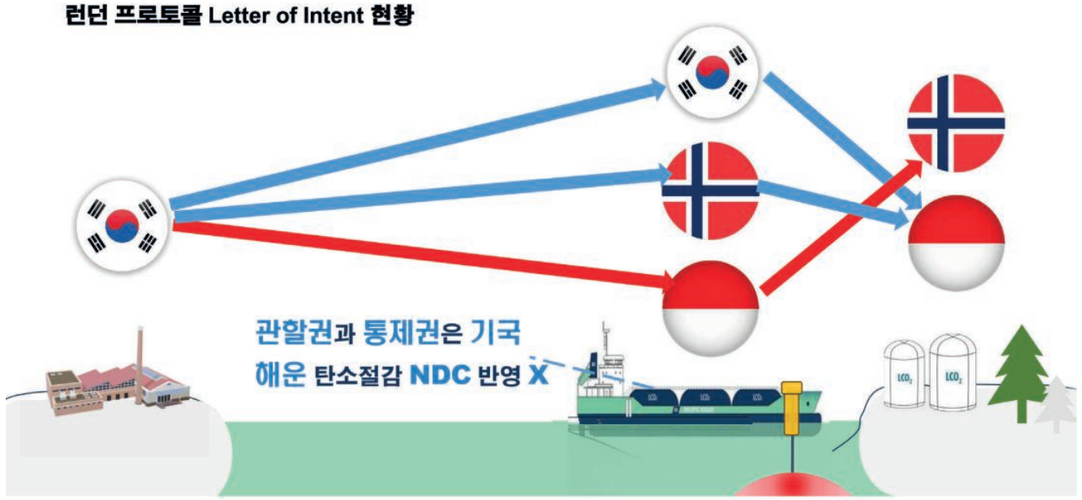
● **협정(안) 개발을 위한 경우의 수**



2. 국경간 탄소 이동 국제 규제

● **협정(안) 개발을 위한 경우의 수**

런던 프로토콜 Letter of Intent 현황



4
기대효과

4. 기대 효과

● **비당사국 고려한 협정 개발**

지리적 확장성

비당사국들도 탄소 배출원 또는 저장 장소로 적합, 비당사국 협정 시 장거리 CO_2 운송 및 다국적 협력 가능

규제의 유연성

런던 프로토콜의 규제에서 자유로움, 각국 상황에 맞춘 협정으로 경제적, 신속한 인프라 확장 가능

기술적 다양성 도입

비당사국들이 CCS 기술 개발을 선도, 고급 기술 활용으로 프로젝트 비용 절감 및 효율성 증대

● **기국 선택지 확장을 활용한 CCS 운송의 이점**

운송 옵션 다양화

비당사국 선박 포함 시 더 넓은 선택지 제공, 특수 설비 보유 선박 선택으로 CO_2 이송의 효율성 및 안전성 향상

운송 비용 절감, 운송 경로 및 일정 최적화

비용 경쟁력 강화로 저가 서비스 확보 가능, 예산 최적화로 프로젝트 경제성 증대, 유연한 경로 설정 가능, 일정 준수 및 리스크 관리에 유리

특화된 기술 활용

최신 기술 보유 비당사국 선박은 저온·고압 CO_2 유지 가능, 해양 환경 보호 및 프로젝트 신뢰성 증대

Thanks

주제발표 3

탄소중립 이행을 위한 국외 탄소저장소 확보 전략

에너지경제연구원 추다해 박사

탄소중립 이행을 위한 국외 탄소저장소 확보 전략:

ASEAN과 인도네시아를 중심으로

2024. 11. 6.

추다해 연구위원

에너지경제연구원 기후변화정책연구실

목 차

CONTENTS

01 ... 국외 탄소저장 필요성

02 ... ASEAN 역내의 CCS

03 ... 인도네시아와 CCS

04 ... 국외 탄소저장소 활용 확대를 위한 과제

01

국외 탄소저장소 필요성

탄소저장 필요성

세계적인 친환경 흐름에 있어 CCUS는 탄소중립 실현을 위한 핵심 탄소저감기술로 인식

- 에너지 부문 뿐 아니라 농업 및 산업공정에서의 난감축 부문 존재로 인해 CCUS 기술 확대가 필수적
  - 화석연료 사용과정에서 나온 이산화탄소를 대기로 확산되기 전에 포집하여 친환경성을 높이는 동시에 지속가능성 증대
- 최근 국제사회는 CCS를 넷제로 달성을 위한 필수적인 탄소저감기술로 인식, 관련 논의를 가속화

IEA(2021) Net Zero by 2050 – 넷제로 시나리오를 달성하기 위한 주요 감축 전략

- 2020-2030년: 태양광 및 풍력과 같은 재생에너지 사용, 에너지효율 개선 통해 온실가스 감축
- 2030-2050년: 탄소저감기술 발전에 따라 전기화, CCUS, 수소 등이 주요 온실가스 감축 수단

2023년 두바이에서 개최된 제28차 유엔기후변화협약 당사국회의

- 제1차 전지구적 이행점검에서 파리협정의 1.5도 목표를 위한 온실가스 감축 수단으로 CCUS 필요성 인지

(e) Accelerating zero- and low-emission technologies, including, inter alia, renewables, nuclear, abatement and removal technologies such as carbon capture and utilization and storage, particularly in hard-to-abate sectors, and low-carbon hydrogen production;

※ 본 발표자료에 담긴 내용은 에너지경제연구원의 공식 입장이 아니며, 발표자의 동의없이 무단복제 또는 배포를 삼가주시기 바랍니다.

에너지경제연구원 Korea Energy Economics Institute

탄소중립 이행 과정에의 CCUS

탄소중립녹색성장 제1차 국가 기본계획

- 중장기 국가 온실가스 감축 목표 달성을 위한 부문별 감축목표와 각 부문의 연도별 감축목표 설정 및 이행 대책 수립
  - 국내 CCS 잠재량 반영(0.8백만톤), CCU 실증경과 통한 확대 (0.1백만톤), 블루수소 +10.5만톤 – 온실가스 0.8백만톤 상향
  - 상호보완형 CCS – 해외 CCS 저장소 공동활용 프로젝트, CCS 플랜트 엔지니어링 기술, 대규모 가스전 보유여부

2050 탄소중립 시나리오

- A안 55.1백만 톤, B안 84.6백만톤(+ DAC 7.4백만톤, 수송)의 CCUS 활용을 통한 2050 탄소중립 목표 제시
  - (CCS) 국내외 약 20억톤 규모 CCS 저장소 확보 및 CCS 저장용량은 최대 2080년까지 운영 전제
  - 국내 대상: 대륙붕 저장소 6억톤, 한계령 저장소 2억톤, 저장량 증진 2억톤
  - 해외 대상: 한중일 공동수역 저장소, 해외 저장소(호주, 동남아, EU, 북미) 등 10억 톤

(단위: 백만톤CO_2e, 괄호는 '18년 대비 감축률)

구분	부문	2018 실적	2030 목표	
			기존 NDC ('21.10)	수정 NDC ('23.3)
배출량(합계)		727.6	436.6 (40.0%)	436.6 (40.0%)
흡수 및 제거	CCUS	(-)	-10.3	-11.2[3]
	국제감축	(-)	-33.5	-37.5[4]

흡수 및 제거	이산화탄소 포집 및 활용·저장 (CCUS)	-	-95	-85	-57.9	-55.1	-84.6	
	직접공기포집 (DAC)	-	-	-	-	-	-7.4	• 포집 탄소는 저장용 대체 연료로 활용 가정

※ 기준연도('18) 배출량은 총배출량 / '30년 배출량은 순배출량 (총배출량 – 흡수·제거량)

※ 본 발표자료에 담긴 내용은 에너지경제연구원의 공식 입장이 아니며, 발표자의 동의없이 무단복제 또는 배포를 삼가주시기 바랍니다.

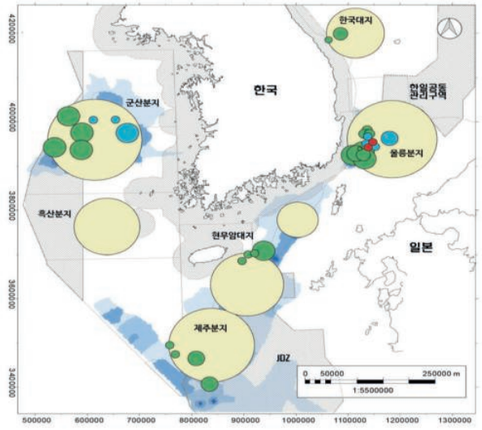
에너지경제연구원 Korea Energy Economics Institute

국내 탄소저장 잠재력

'한국 CO2 저장소 유망구조 및 저장용량 종합평가'

- (이산화탄소 저장 유망구조) 약 7.3억톤 규모의 이산화탄소 저장 유망 구조가 확인되었으며, 추가 탐사, 시추 및 기술 개발로 최대 11.6억톤(연 3,870만톤) 저장이 가능할 전망
  - 서해 군산분지 5.4억톤, 동해 울릉분지 1.93억을 포함한 총 7.33억톤
- (이산화탄소 사업부지) 그러나, 유망구조 중 실제 사업성까지 검토된 확정적 저장소는 동해 울릉분지 0.14억톤에 불과

국내 자체적 탄소저장으로 중장기 감축 이행은 매우 도전적인 과제 → 국외 탄소저장소 활용



※ 본 발표자료에 담긴 내용은 에너지경제연구원의 공식 입장이 아니며, 발표자의 동의없이 무단복제 또는 배포를 삼가주시기 바랍니다.

에너지경제연구원 Korea Energy Economics Institute

글로벌 잠재 탄소저장소 잠재량

탄소저장소로 빠른 전환이 용이한 고갈유가스전의 분포는 특정 지역에 집중

- 북미, 유럽, 동남아, 중동 등 전통적인 석유, 가스전 보유 국가를 중심으로 CCS 프로젝트 개발이 활발하게 진행

- CO2의 지질학적 저장은 석유 또는 가스 추출의 가역 과정과 유사 → 유·가스전은 가장 활용 가능성이 높은 탄소저장소 후보에 해당

GCCSI(2020) GLOBAL STATUS OF CCS 2020

※ 본 발표자료에 담긴 내용은 에너지경제연구원의 공식 입장이 아니며, 발표자의 동의없이 무단복제 또는 배포를 삼가주시기 바랍니다.

에너지경제연구원 Korea Energy Economics Institute

국외 탄소저장을 위한 제약 사항과 협력대상국

국외에 존재하는 탄소저장소를 활용하기 위해서는 우리나라 뿐만 아니라 상대국의 여건에 따른 제약

- (탄소저장 잠재력) 자국의 CCS 감축 요구량을 충족시키는 것에 추가적으로 국외에 탄소저장을 공급이 가능
- (국내 탄소중립 이행 보조) CCS 프로젝트 개발 및 계획 기반으로 2030내에 탄소저장 개시가 가능
- (탄소스트림의 해양수송) 국외 탄소저장소 활용을 위해 탄소스트림의 해양 수송이 필수

국경이동 CCS 프로젝트의 협력 대상국 최대 동남아시아와 오세아니아 지역으로 한정

- 이외의 권역으로 탄소스트림을 수출하는 것은 경제성이 매우 낮아 현실적으로 어려운 상황
  - 추가적인 수소 가치사슬과의 연계를 통해 경제성 확보하여 중동 등과의 협력 가능성
  - 현재 국내 기업이 진행 중인 다국적 CCS 프로젝트는 호주, 말레이시아, 인도네시아와 더불어 미국에 일부 존재하는 것으로 파악

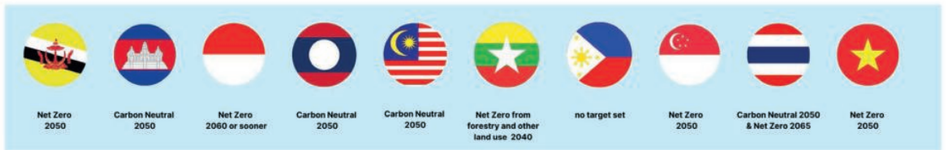
※ 본 발표자료에 담긴 내용은 에너지경제연구원의 공식 입장이 아니며, 발표자의 동의없이 무단복제 또는 배포를 삼가주시기 바랍니다.

02
ASEAN 역내의 CCS

ASEAN 역내의 온실가스 감축과 CCS

ASEAN 국가는 각국의 여건에 따라 각기 다른 시점에 넷제로 달성을 서약

- ASEAN은 역내 아세안 에너지 협력 행동 계획(APAEC)을 수립, 2단계 계획(2021-2025년)에서 역내 에너지 연결성, 접근성, 경제성 및 지속 가능성을 향상시키기 위한 공통의 목표를 수립
  - APAEC 2단계에는 역내 에너지 전환과 저탄소 경제를 촉진하기 위해 CCS/CCUS를 배포하는 전략이 포함
- ASEAN은 싱가포르, 인도네시아, 말레이시아 등 아태지역 내 CCS 허브로 기능할 수 있는 잠재력을 파악하는 데 집중
  - 아세안 국가 간 이산화탄소 이동과 CCS 상용화를 위한 관련 정책 지원을 개선하는 방안 제시
  - 탄소포집 관련 자금 조달 관련 구체적 지침 역시 아세안 텍소노미 지속가능금융를 통해 구체화



※ 본 발표자료에 담긴 내용은 에너지경제연구원의 공식 입장이 아니며, 발표자의 동의없이 무단복제 또는 배포를 삼가주시기 바랍니다.

ASEAN의 탄소중립 목표와 CCS 현황

	인도네시아	말레이시아	태국	베트남
국제 기후 변화 서약	○	○	○	○
넷제로 목표	○	○	○	○
런던 의정서 당사국	×	×	×	×
CCS 관련 내부 정책/인센티브	○	○	○	×
계획/개발 CCS 프로젝트	○	○	○	×
CCS 관련 법/규제 프레임워크	○	사라왁 주	×	×
기존 법률 CCS 적용 가능	○	○	○	○

ACE(2024) Opportunities and Challenges for CO2 Cross-Border Transporation in ASEAN to Advance CCS Towards a Zero Future, p.15.

※ 본 발표자료에 담긴 내용은 에너지경제연구원의 공식 입장이 아니며, 발표자의 동의없이 무단복제 또는 배포를 삼가주시기 바랍니다.

ASEAN 내의 저장소 및 허브 개발 현황

ASEAN은 총 143개의 유·가스전이 존재하며 2030년 3.5Gt의 잠재적 저장용량을 보유

- 아태지역은 최소 24개의 CCS 프로젝트가 진행 중이며, 인도네시아 19개의 프로젝트를 추진 중인 선도국(연9.84Mt 규모)
- 아세안 내에서도 인도네시아와 말레이시아는 탄소저장소 허브 역할을 수행하기 위한 프로젝트 개발이 빠르게 추진 중

	인도네시아	말레이시아	싱가포르	태국	베트남
총 프로젝트 수	19	2	1	1	1
프로젝트 유형	저장 9, 풀체인 9, 포집 1	풀체인	풀체인	풀체인·저장	유가스전
예상 용량	9.84MtCO2/yr	3.3MtCO2/yr	2.5MtCO2/yr		7.1GtCO2
발표	2018-2024	2020-2022	2024		
FID	2024-2025	2022			
탄소 최종 처리	저장특화 9, EOR 5, 미정 4	저장 특화	저장(미정)		EOR

ACE(2024) ASEAN CCS Deployment Framework and Roadmap. P.11. Table 2.1

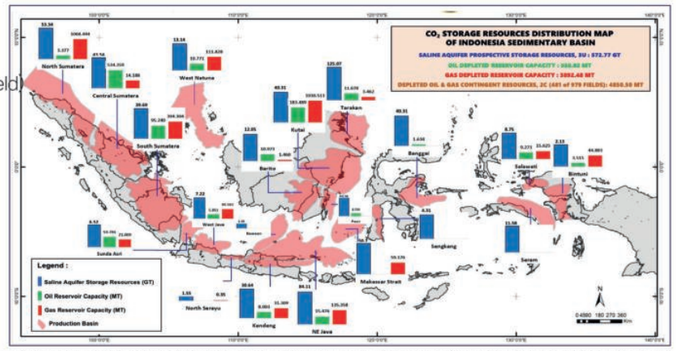
※ 본 발표자료에 담긴 내용은 에너지경제연구원의 공식 입장이 아니며, 발표자의 동의없이 무단복제 또는 배포를 삼가주시기 바랍니다.

03
인도네시아의 CCS

인도네시아 잠재 저장용량 및 CCS 프로젝트 현황

인도네시아의 이산화탄소 잠재 저장용량

- **대염수층 572GtCO2(20개 분지)와 유·가스전 4.85GtCO2(481 유·가스전 등을 활용한 막대한 저장 잠재력 보유**
- **주요 CCS 프로젝트**
  - Repsol (Sakakemang Field)
  - Pertamina – JOGMEC (Jatibarang Field)
- **석탄화력발전 개조에 집중**
  - CCS-EOR 구현 비용을 89-103 USD/tCO2 로 추정
  - CCS 개조(retrofit)로 인한 전력 비용 증가는 0.1 USD/kWH 미만 추정



ACE(2024) Opportunities and Challenges for CO2 Cross-Border Transporation in ASEAN to Advance CCS Towards a Zero Future, p.24.

※ 본 발표자료에 담긴 내용은 에너지경제연구원의 공식 입장이 아니며, 발표자의 동의없이 무단복제 또는 배포를 삼가주시기 바랍니다.

인도네시아의 온실가스 감축 목표와 CCS현황

국가 온실가스 감축 목표와 CCS

- **온실가스 배출 목표: 2030까지 1) BAU(Business-As-Usual) 대비 무조건부 31.89% 감축, 2) 국제사회 지원이 있는 경우 조건부 42.3% 감축로 설정, 2060년까지 넷제로 달성**
  - UNFCCC에 제출된 NDC에서 명시적인 CC(U)S 계획은 존재하지 않지만, 석유화학(특히 암모니아 생산) 및 철강 부문에서 이산화탄소 포집 활용 계획을 언급
- **인도네시아 에너지광물자원부(MEMR)은 2060년까지 넷제로 달성을 위해 로드맵을 발표하여 장기 감축 전략을 수립**
  - **(CCS 관련 인센티브)** 대통령 규정(PR) 14/2024를 통해 CCS에 대한 세제 및 비과세 인센티브 제공
  - **(CCS 관련 법률 및 규제)** MEMR 2/2023, PR14/2024를 통해 해양 석유 및 가스 사업 활동, 타산업 및 CO2 국경 이송을 지원
  - 인도네시아는 ASEAN 국가 중 가장 선도적인 CCS 관련 규정을 구축한 국가로 아세안 내 CCS 허브 역할을 목표

※ 본 발표자료에 담긴 내용은 에너지경제연구원의 공식 입장이 아니며, 발표자의 동의없이 무단복제 또는 배포를 삼가주시기 바랍니다.

인도네시아 CCS 프레임워크 비교

	MEMR 2/2023	PR 14/2024
부문	O&G 내 CCUS로 제한	O&G 외에서 CCS 가능
사업 주체	상류 O&G 비즈니스 메커니즘(생산 분배 계약 및 총액 분할)에 의해 O&G 계약자에 의해서만 수행	(1) O&G 작업 지역 내 CCS 협력 계약, (2) 탄소 저장 허가 지역 내 CCS 탐사 허가 및 저장 운영 허가 제도를 통해 투자 개방
탄소 출처	외부 업스트림 O&G 외 CO2 원에 대해 개방(CCUS)	다른 산업의 CO2 원으로 확장, **국경 간 CCS 허용**
이행 행동 계획	CCS 이행은 작업 지역에서 K3S(O&G 계약자)에 의해 협력 계약을 통해 수행 • K3S는 MEMR(에너지광물자원부)에서 개발 계획(POD)이 승인된 후, 다른 K3S 또는 다른 산업에서 탄소를 받을 수 있도록 자사의 석유 운영 시설 및 주입 대상 구역(고갈된 저장소 또는 염수 대수층)을 활용 가능 • CCS 이행은 저장 서비스(저장 요금)를 통해 수익화될 수 있으며, 저장 요금은 상류 석유 및 가스 사업 활동에 관한 세금 규정을 기반으로 적용	CCS 이행은 탄소 저장 허가 지역에서 탐사 허가 및 저장 운영 허가 제도를 통해 법인 사업체에 의해 수행 • 정부는 탄소 저장 허가 지역을 준비하며(법인 사업체 제안이나 데이터 처리에 기반), 해당 지역을 기업에 경매 및 제한된 선택을 통해 제공 • CCS 이행은 저장 서비스를 통해 수익화가 가능하며, 정부는 저장 요금(fee)에 대한 로열티를 받음.

ACE(2024) Opportunities and Challenges for CO2 Cross-Border Transporation in ASEAN to Advance CCS Towards a Zero Future, p.21.

※ 본 발표자료에 담긴 내용은 에너지경제연구원의 공식 입장이 아니며, 발표자의 동의없이 무단복제 또는 배포를 삼가주시기 바랍니다.

인도네시아 CCS 프레임워크 (2) PR 14/2024

CCUS의 적용 범위를 석유 및 가스 외의 분야로 확장

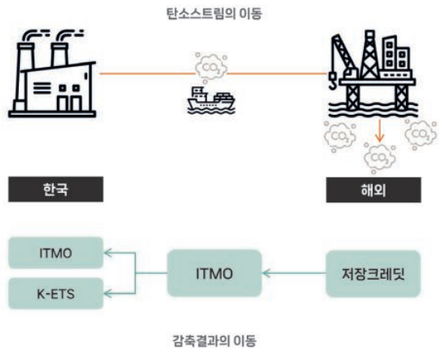
- **국가 간 탄소 운송을 위한 메커니즘**
  - 양 간 협력 협정은 국경이동 운송에 필요한 권고 또는 허가를 발급하기 위한 지침으로 사용, 기후 변화 협력과 관련된 국제 규정 고려
  - 운송된 탄소는 최초 수입 시 수입업자가 등록, 수입된 탄소는 안전, 산업 보건 및, 환경 보호를 보장하는 엔지니어링 표준 및 관행 준수
  - 계약자 및 "저장소 운영 허가증" 소지자는 총 탄소 저장 용량의 70%를 국내용으로 할당 – 인도네시아에 투자하거나 투자에 관련된 탄소 생산업체가 수행하는 경우에만 **총 탄소 저장 용량의 30%를 국외용으로 할당**
- **이산화탄소 누출**
  - 인도네시아 국경을 통과하는 운송 중에 발생하는 **CO2 누출은 인도네시아의 온실가스 인벤토리에 미포함**
  - 각 CCS 가치사슬 내의 CO2 측정은 인도 지점에 설치된 보정된 측정 장치를 사용
  - 관련 당사자의 권리와 의무는 관련 법률 및 규정 준수, 배출자와 허가증 소지자 및/또는 계약자 간에 체결된 계약에 따라 결정

※ 본 발표자료에 담긴 내용은 에너지경제연구원의 공식 입장이 아니며, 발표자의 동의없이 무단복제 또는 배포를 삼가주시기 바랍니다.

04
국외 탄소저장소 활용 확대를 위한 과제

국외 탄소저장소 활용을 위한 과제

호주, 동남아시아 국가를 중심으로 다국적 CCS 프로젝트 개발 중이나 정책적 과제는 상존



- (이산화탄소 수송) 국제해사기구에서 발효된 런던의정서의 당사국은 이산화탄소를 해양으로 수출 조건을 충족할 필요
- (온실가스 감축 실적) 이산화탄소 저장에서 발생하는 온실가스 감축 실적에 대한 분배 문제
- (온실가스 감축 인증) 온실가스 감축 결과에 대한 객관적인 인증체계를 양국의 합의를 기반으로 구축
- 국외저장소에 탄소를 저장하기 위해서는 탄소가 바다를 건너 이동하여 저장 할 수 있는 요건에 대한 선결이 필요

※ 본 발표자료에 담긴 내용은 에너지경제연구원의 공식 입장이 아니며, 발표자의 동의없이 무단복제 또는 배포를 삼가주시기 바랍니다.

탄소저장소 공동개발을 위한 과제

규제 정렬(Alignment) 및 양자 협정 체결

- **인도네시아의 CCS 규제 프레임워크는 완비, 성공적인 협력을 위해서는 법적 구속력이 있는 양자 협정 체결이 필요**
  - CO2 누출 시 책임 문제, 책임 할당, 런던 의정서 및 바젤 협약과 같은 국제 규정을 준수하는 내용이 포함 필요
- **국경 이동 CCS 프로젝트를 위한 환경 안전, 모니터링 및 보고 요건에 대한 규제 체계를 일치시킬 필요**
  - PR 14/2024는 국경 간 CO2 운송에 대한 양자 협정이 필요함을 명시하고 있으며, 구체적인 조건이 합의 되어야 함
  - 국경을 초월한 CCS는 특히 CO2 운송 측면에서 복잡한 물류 체인이 필요하며, 인도네시아의 규정은 파이프라인, 선박, 기타 방법을 통한 CO2 운송에 대해 다른 허가 요건을 명시

인도네시아 내의 국내 용량 우선 할당과 국내 이산화탄소 저장 용량 확보를 위한 투자 필요

- **PR 14/2024에 따르면, CO2 저장 용량의 70%가 국내 배출원에 할당되며 해외 할당은 30%**
  - 이는 한국이 인도네시아의 저장 잠재력을 충분히 활용하는 데 제약, 국제 저장 허가는 인도네시아 내 투자를 요구
  - 인도네시아의 저장 잠재력을 활용하고자 하는 잠재적 저장 수요처와의 경쟁 환경 역시 고려되어야 함

※ 본 발표자료에 담긴 내용은 에너지경제연구원의 공식 입장이 아니며, 발표자의 동의없이 무단복제 또는 배포를 삼가주시기 바랍니다.

탄소저장의 경제학

상품성의 부재 – 이산화탄소는 상품(goods)가 아닌 폐기물(wastes)

- **이산화탄소는 상품성이 거의 부재하기 때문에, 이산화탄소는 쓰레기와 마찬가지로 폐기물 처리를 위한 비용(fee)이 필요**
  - 소수 상품으로 전환을 제외하고 이산화탄소 활용처가 많지 않아, 이산화탄소의 상품성을 기반으로한 비즈니스 모델을 구현하는 것은 사실상 불가능
  - 오히려 이산화탄소는 격리 및 제거되어야 하는 폐기물 – CCS 산업은 이산화탄소라는 폐기물을 처리하기 위한 비용을 청구
- **1톤의 이산화탄소 포집-수송-저장과 관련된 전주기에서 발생하는 비용이 CCS 프로젝트 활성화의 관건**
  - CCS 사업 자생의 전제조건: **포집-수송-저장 전주기에 소요되는 1톤의 탄소처리가격이 현실화**
  - 현재 인도네시아의 규제 환경에서는 CCS 개발을 위한 구체적인 인센티브가 제공되지 않으므로, 프로젝트의 경제적 매력도가 제한될 수 있는 상황임
  - 한국은 인도네시아와 협력하여 CCS 프로젝트에 대한 상호 이익이 되는 재정적 지원 체계를 마련할 필요
  - 양국은 대규모 CCS 프로젝트를 지원하기 위한 공동 CCS 펀드 또는 재정 메커니즘을 마련하고, 위험과 이익을 공유하는 방안을 고려

※ 본 발표자료에 담긴 내용은 에너지경제연구원의 공식 입장이 아니며, 발표자의 동의없이 무단복제 또는 배포를 삼가주시기 바랍니다.

추다해(dhchoo@keei.re.kr)

감 사 합 니 다

주제발표 4

선상 탄소 포집 및 저장(OCCS) 온실가스 감축효과 및 경제성 분석

서울대학교 임영섭 교수

2024 MacNet 전략 세미나II

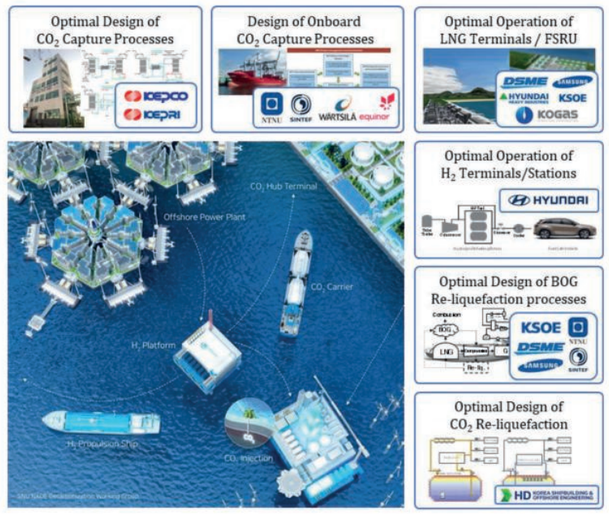
선상 탄소 포집 및 저장(OCCS) 온실가스 감축효과 및 경제성 분석

서울대 조선해양공학과
임영섭 교수

본 자료는 저작권법에 의하여 보호되며, 저작권자의 동의없이 자료 및 영상 전부 또는 일부를 복제, 공연, 공중송신, 전시, 배포, 대여할 수 없습니다.
*잘못된 내용이 있으면 알려주시면 감사하겠습니다: s98thesb@snu.ac.kr

소개: 임영섭

- 약력
  - 2014-현재: 교수, 서울대 조선해양공학과
  - 2013: PostDoc., MIT 화공과
  - 2012: 박사후 연구원, 서울대ICP
  - 2011: 박사, 서울대 화학생물공학부
- 저서
  - 임영섭. (2023). 친환경선박의 이해. 성안당.
  - 임영섭. (2021). 친절한 공학 열역학. 성안당.
  - 임영섭. (2020). 친환경선박 잡학지식. 지성사.



선박 온실가스 규제 이력

IMO MARPOL

- **IMO MEPC (Marine Environment Protection Committee)**
- **MARPOL:** International convention for the prevention of **MAR**ine **POL**lution from Ships
  - **Combination of MARPOL convention in 1973 and MARPOL protocol in 1978**
  - **Has Annexes regulating different harmful substance pollutant**
  - **In 1997, Annex VI (Prevention of Air Pollution) was added.** (Applied from 2005)
    - **Regulation for NOx, SOx, VOCs, ozone depleting substances**
  - **In 2011, Annex VI was modified to include CO2 regulations.** (Applied from 2013)

IMO MARPOL 73/78

Entered into force 2005, Updated in 2011

Annex I	Annex II	Annex III	Annex IV	Annex V	Annex VI
Regulations for the Prevention of Pollution by Oil	Regulations for the Control of Pollution by Noxious Liquid Substances in Bulk	Prevention of Pollution by Harmful Substances Carried by Sea in Packaged Form	Prevention of Pollution by Sewage from Ships	Prevention of Pollution by Garbage from Ships	Prevention of Air Pollution from Ships

선박 온실가스 규제 이력

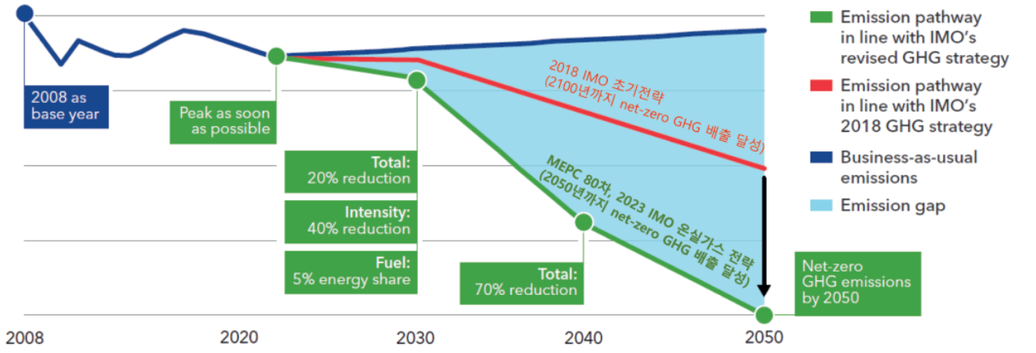
- 2000, 2009: IMO(국제해사기구) 1st, 2nd GHG study 보고서
- 2011: 62th MEPC, 이산화탄소 배출 규제 추가
  - » MARPOL 부속서 6(Annex VI) 개정, 신조선 대상으로 하는 이산화탄소 배출량 규제를 2013년부터 시작, 탄소집약도 규제 위한 EEDI 등 도입됨.
- 2014: IMO 3rd GHG study 보고서
- 2018: IMO GHG 감축 초기전략 (initial IMO GHG strategy) 채택
- 2020: IMO 4th GHG study 보고서
- 2021: 76th MEPC, 2023년부터 현존선에 대한 온실가스 규제 도입
  - » 현존선 대상 탄소집약도 규제인 EEXI, CII 등 도입, 2023년부터 적용
- 2023.07: 80th MEPC, 2023 IMO 온실가스 전략(2023 IMO GHG Strategy) 채택
- 2024.03: 81th MEPC
  - » 전과정 평가 지침 개발을 위한 전문가 그룹 결성(GESAMP)
  - » OCCS 회기간 실무 작업반 개설에 합의함 (CG)
- 2024.09: 82th MEPC
  - » GHG배출감축 중기대책 논의(기술적/경제적 방법), 단기대책 검토
  - » LCA가이드라인 개정판 채택 (GESAMP-LCAWG신설, 연료배출계수 디폴트 값 검토예정)
  - » 5차 IMO GHG Study 검토 시작
- 현재 진행형.

2018 IMO 초기전략 → 2023 IMO GHG 전략

- 2023년 MEPC 80차에서 2023 IMO온실가스 전략 채택
  - » 기존 목표인 2100년에서 2050년까지 온실가스 순배출 제로 (net-zero GHG) 목표 상향

Outline of ambitions and minimum indicative checkpoints in the revised IMO GHG strategy (DNV, Maritime forecast to 2050)

Units: GHG emissions



2023 IMO GHG strategy, what is changed?

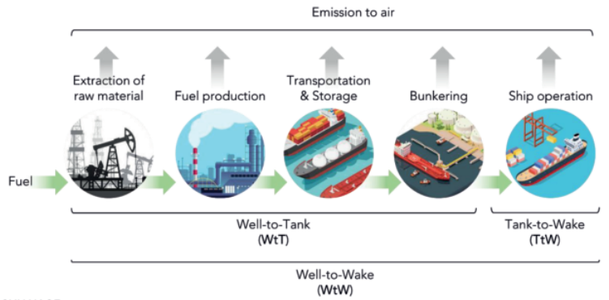
- Key features

	Before 2023	2023 IMO GHG strategy
Goal	GHG emission 50% reduction by 2050 Net-zero by 2100	**Net-zero by or around 2050**
Target substance	Estimation of CO2 emissions	**Estimation of GHG emissions**
Target process	TtW (Tank-to-Wake) emissions (in combustion stage)	**WtW (Well-to-Wake) (from production to combustion)**

- Another key point in MEPC 80th
  - » The interim guidance on the use of biofuels was approved.
    - Biofuels must provide a WtW GHG emissions reduction of at least 65%, compared to the WtW GHG emissions of fossil fuel of 94 gCO2eq/MJ.

Enlarged range

- WtW (Well-to-Wake) GHG emissions should be considered
  - » Previous regulation is based on the CO2 emissions in combustion stage (TtW, Tank-to-Wake), but from now WtW GHG emissions from the production to use based on LCA (LifeCycle Assessment), should be considered



Fuels	Emissions (g_{CO2eq}/MJ)		
	WtT	TtW	WtW
HFO*	13.5	78.2	91.7
LNG	18.5	57.6~70.7	76.1~89.2
Hydrogen	132.0	0	132.0
Ammonia	121.0	0**	121.0

Based on FuelEU Maritime
*HFO (ISO 8217 Grades RME to RMK)
** N_2O is not reflected

IMO. (2021). *Guidelines on life cycle GHG intensity of marine fuels (LCA Guidelines).*

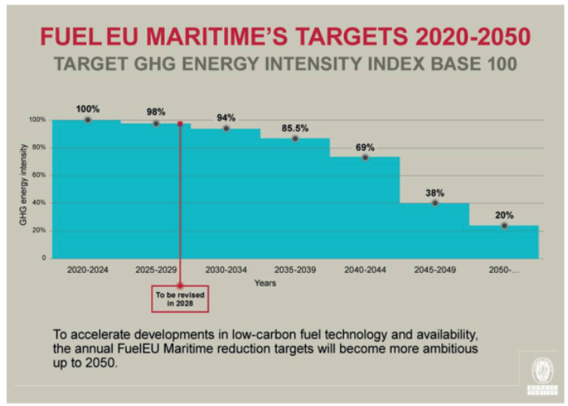
Expanded GHG

- CO2 only → GHGs
  - Previous regulation is based on the CO2 emissions only, but from now CO2 equivalent GHG emissions should be considered.
  - For the exhaust gas from a ship engine, CH_4 and N_2O could be considered.
  - 2023 MEPC 80차 결과 향후 이산화탄소 등가 배출량으로 온실가스 배출 집약도 평가 예상
    - 1 g_{CO2eq}/(tonne·nm)

	GWP100			
	IPCC 4th report (AR4, 2007)	IPCC 5th report (AR5, 2014)	IPCC 6th report (AR6, 2022)	Used value in REDII /FuelEUMaritime
CO_2	1	1	1	1
CH_4	25	28, 34	29.8 (fossil) 27.2 (non-fossil)	25
N_2O	298	265, 298	273	298

Fuel EU Maritime 탈탄소 목표

- EU 탈탄소 위한 Fit for 55 패키지의 일부로 2021년부터 발표
- 2050년까지 탄소집약도 80%저감
  - 화석연료의 온실가스 배출량 기준 (100%): 91.16 g_{CO2eq}/(t·nm)
    - IMO의 경우 94 g_{CO2eq}/(t·nm)
  - 2028년 개정 예정, 보다 더 강화될 것으로 예상.



BV, https://marine-offshore.bureauveritas.com/sustainability/fit-for-55/fueleu-maritime

선박 온실가스 규제 지수/지표

EEDI, EEXI, CII

EEDI, EEXI, CII

- EEDI (Energy Efficiency Design Index)
  - An index to estimate the carbon intensity of a ship based on the document.
    - The mass of CO2 to transport 1 tonne of cargo for 1 nm (g_{CO2}/t·nm)
    - Adopted in 2011, applied from 2013
    - EEDI is applied to a new-built ship above 400 GT
- In 2018 72th MEPC, EEXI and CII are adopted.
  - Entered into force from 2023.
  - EEXI (Energy Efficiency Existing Index)
    - Same concept with EEDI, but for the existing ships of 400 GT and above (gCO2/t·nm).
  - CII (Carbon Intensity Indicator)
    - CO_2 emissions calculated based on the actual operation data of a ship (gCO2/t·nm)
    - Applied to ships of 5,000 GT and above

(Lim, 2023)

CII (Carbon Intensity Indicator)

- **CII, Carbon Intensity Indicator**
  - CO2 emission to transport 1 tonne of cargo for 1 nautical mile, based on the actual operating data.
  - For ships that achieve a D rating for three consecutive years or an E rating in a single year, a corrective action plan needs to be developed and approved.
- **Two types of indicators are used now.**
  - EEOI (Energy Efficiency Operational Indicator)
    - CO2 emission to transport 1 tonne of cargo for 1 nautical mile, based on the actual operating data.

$$\text{Attained CII} = \frac{\sum \text{FC} \cdot C_{\text{f}}}{\text{CAP (t)} \cdot \text{Distance(nm)}}$$

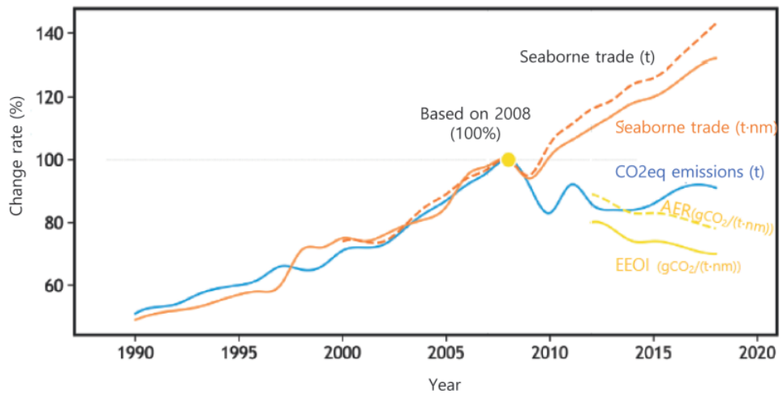
- **AER (Annual Efficiency Ratio)**
  - To calculate EEOI, the data of actual cargo weight required. However, now there are ships that do not have the data system about the cargo weight.
  - For AER, the weight of cargo is based on DWT of the ship, not the real weight of cargo.

$$\text{Attained CII} = \frac{\sum \text{FC} \cdot C_{\text{f}}}{\text{DWT (t)} \cdot \text{Distance(nm)}}$$

EEOI/AER

	EEOI ($gCO_2/(t \cdot nm)$)				AER ($gCO_2/(DWT \cdot nm)$)			
	Vessel-based		Voyage-based		Vessel-based		Voyage-based	
	EEOI	%	EEOI	%	AER	%	AER	%
2008	17.10	-	15.16	-	8.08	-	7.40	
2012	13.16	-23.1%	12.19	-19.6%	7.06	-12.7%	6.61	-10.7%
2018	11.67	-31.8%	10.70	-29.4%	6.31	-22.0%	5.84	-21.0%

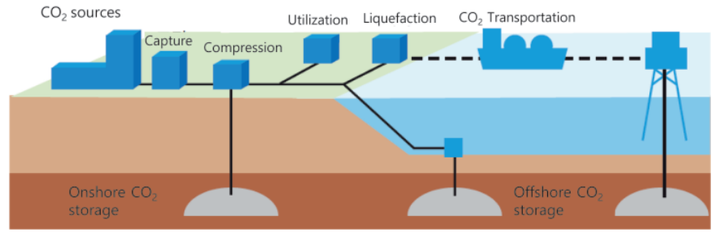
- **4th IMO GHG study (2020)**



OCCS 개요

CCUS

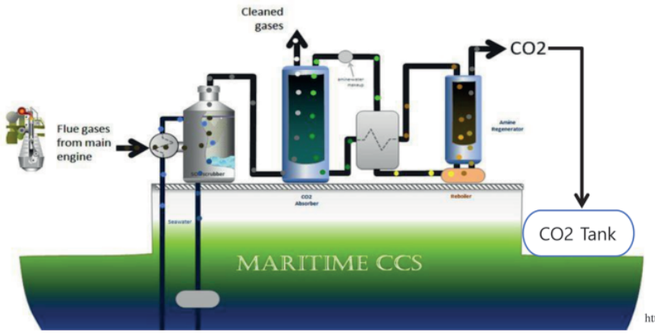
- **CCUS: CCS + CU**
  - **CCS: Carbon Capture and Storage**
    - Technology groups that capture CO2 from emission sources, and store it in sequestrated locations where is no atmospheric emissions.
  - **CU: Carbon Utilization**
    - Technology groups that convert CO2 into another product



Lim. 2023

OCCS란

- **OCCS (Onboard Carbon Capture and Storage)란**
  - 선박 운항 등의 과정을 통하여 선박에서 배출되는 이산화탄소를 포집 및 선상 저장한 뒤, 기존 CCS 공급망에 하역하여 선박의 온실가스 배출을 감축하고자 하는 선상 이산화탄소 포집 및 저장 시스템.



*OCCS를 Onboard Carbon Capture Systems의 약자로 사용하는 경우도 있으나, 현재 IMO CG (Correspondence Group, 회기간 실무작업반) 논의상 OCCS는 "Onboard Carbon Capture and Storage"로 규정하며, 이때의 저장은 선상 임시 저장(onboard temporary storage)으로 고려하는 것으로 협의되고 있음.

*Systems를 붙이는 경우 "OCCS systems"으로 지칭하도록.

https://gcaptain.com/dnv-unveils-concept-design-for-shipboard-carbon-capture-system/

OCCS 주목의 이유

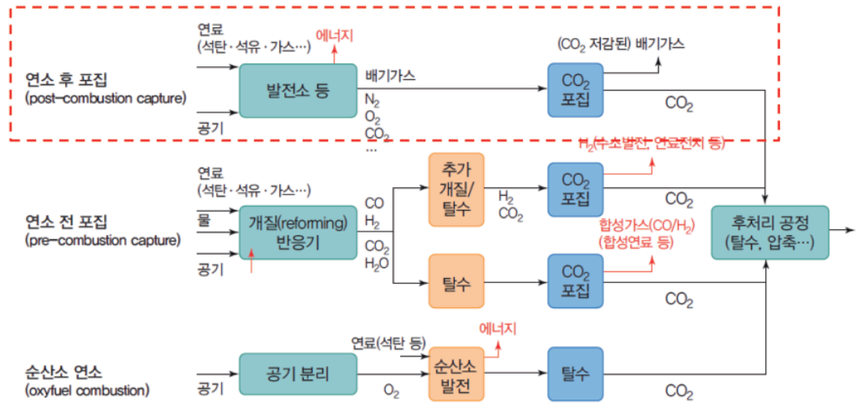
- **1) 선박 온실가스 규제의 강화**
  - 대체연료 공급 어려움
    - 2011: 62th MEPC, 이산화탄소 배출 규제 추가를 시작으로 빠르게 규제가 강화되고 있음.
    - 높은 발열량(수천~수만kW)을 요구하는 대형 선박 특성상, 모든 신조선에 대한 대체연료 공급이 쉽지 않은 상황
  - 현존선에 대한 수명연장 문제
    - 선박 수명은 약 25-35+년으로, 현존선 다수가 단계적으로 강화되는 온실가스 배출 규제에서 자유롭지 못함.
- **2) CCUS공급망 완성을 위한 대용량 이산화탄소 수송선의 필요성**
  - Net-zero달성을 위한 이산화탄소 수송선이 온실가스를 배출하면서 항해해도 괜찮은가?

OCCS 요소 기술

선상 포집과 선상 저장

선상 CO2 포집

- **기존 엔진체계 접목 위해 일반적으로 연소 후 포집이 고려되고 있음.**



| 그림 4-64 | 이산화탄소 포집 방법론의 분류

임영섭, **친환경선박의 이해**, 성안당, 2023

선상 연소 후 포집 적용 가능 기술

- 현재 고려되는 대부분의 선상 포집 기술은 흡수(absorption) 기반
  - 흡수 (Absorption)
    - 대상 물질이 특정 액체(혹은 고체) 흡수제와 물리적 결합 혹은 화학적 반응하여 흡수제에 용해되는 것을 이용하는 분리기술
    - 대표 흡수제: 아민 수용액 (MEA, DEA, MDEA...), 암모니아, AMP 외 다수
- 그 외 고려 가능 기술
  - 흡착 (Adsorption)
    - 대상 물질이 특정 고체(혹은 액체) 흡착제와 물리적 결합 혹은 화학적 반응하여 흡착제의 표면에 고착화되는 것을 이용하는 분리기술
  - 분리막(Membrane)
    - 분자 크기에 따라 다른 투과율을 가지는 막을 이용하여 분리하는 기술
  - 저온(low temperature) 분리 / 증류
    - 물질에 따른 상변화 온도차를 이용하여 분리하는 기술

*흡수/흡착 메커니즘은 동시에 발생하는 경우가 많아서 흡수/흡착 매커니즘을 구별하는 대신 매체가 액체인지 고체인지에 따라 습식/건식 포집법으로 구별하여 칭하기도 함.

기울임(tilting)과 움직임(motion)

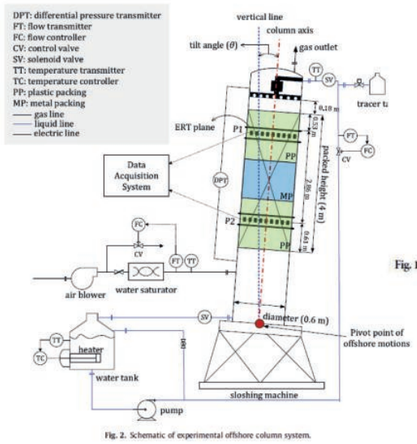


Fig. 2. Schematic of experimental offshore column system.

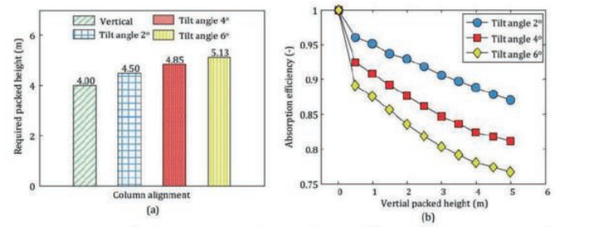


Fig. 10. Effects of tilt angle on packed height. (a) Required packed height under tilted conditions, and (b) absorption efficiency with an increment of a packed height.

Yongho Son, Junhyung Park, Jisook Lee, Kyungtae Park, Wangyun Won*, "Networked column compartment model for a tilted packed column with structured packing," Korean Journal of Chemical Engineering, 36, 789-799, 2019.
Yongho Son, Wangyun Won*, "Liquid holdup and pressure drop in packed column with structured packing under offshore conditions," Chemical Engineering Science, 195, 894-903, 2019.

흡수기반 포집

- 장점
  - 오랜 기간에 걸쳐 검증이 완료된 기술
  - 1차 아민(MEA)→2차아민(DEA)→3차아민(MDEA), 첨가제(PZ)와 같이 개선된 흡수제 및 아민 외에도 다양한 물리적, 화학적 흡수제들이 개발되어서 상업적으로 사용되어옴.
- 난점
  - 전통적인 아민 흡수법은 CO_2 1톤 포집위해 약 3-4GJ_{th} (0.8-1.1 MWh)의 에너지 필요. 이는 에너지 사용에 따른 온실가스 배출을 유발, 탄소 포집 효율을 저하
    - 최신 흡수제들은 랩스케일-실증스케일에서 ~2.5 GJ_{th}/ton 수준의 성능 개선을 보고하고 있음
  - CO_2가 상압의 기체로 포집. 이를 어떻게 저장할 것인가에 따라서 다시 저장용 CO2를 만드는 공정이 필요. 예를 들어서 액체CO2로 저장하려면 흡수공정에 이어서 액화공정이 추가되어야 함. 이는 추가적인 에너지 소비가 필요함을 의미
  - 설비의 크기 제약, 운동 영향, 부식 이슈...

Target vessel	
Lwl	118.5 m
B	16 m
D	9.9 m
T	7.3 m
DWT	8000 tonnes
Design speed	13 knots
Main engine	3000 kW

CO2 capture Equipment (MEA)	
Absorber	D1.5m, H10m
Stripper	D0.8m, H14m
Condenser	D0.2m, L6m
HX	D1.2m, L6m
Cooler	D0.3m, L6m
Pumps	

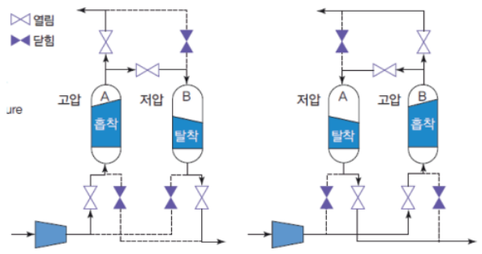
- Van Den Akker, J.T. Carbon Capture Onboard LNG-Fueled Vessels : A Feasibility Study, Master of Science Thesis, TU Delft

-Y. Lim, et al., Modeling, Simulation and Validation of CO2 Capture for Coal-based Power Plant using MEA, *Energy Procedia*, 37, 1855-1862, 2013-
-J. Jung et al., New Configuration of the CO2 Capture Process Using Aqueous Monoethanolamine for Coal-Fired Power Plants, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 54 (15), pp 3865-3878, 2015.04

흡착 기반 포집

- 이산화탄소를 흡착할 수 있는 흡착제를 사용
  - 흡착 성능차를 이용하여 압력차(PSA)/온도차(TSA)를 이용하여 이산화탄소를 흡/탈착
- 선박 적용시 난점
  - 크기 및 무게
  - 압축 위한 에너지 소모량
  - 배가스 불순물 처리(전처리) 문제

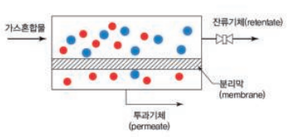
| 그림 4-68 | 흡착의 원리



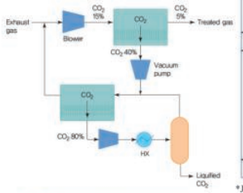
임영섭. **친환경선박의 이해**. 성안당, 2023

분리막 기반 포집

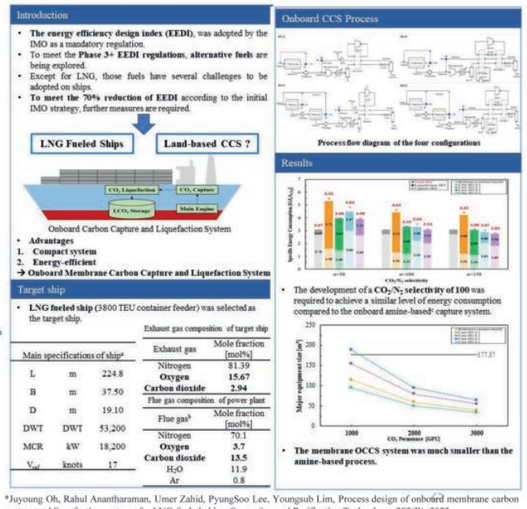
- 특정 분자는 쉽게 확산(통과)하지만 특정 분자는 확산이 어려운 분리막 성질을 이용
  - 컴팩트한 구성이 가능
- 선박 적용시 난점
  - 압축/진공을 위한 에너지 소모량 큼.
  - 포집원의 CO2 농도에 따라 효율편차가 큼
  - 배가스 내 불순물 처리(전처리) 문제



| 그림 4-70 | 분리막 공정의 원리



| 그림 4-71 | 이산화탄소 포집의 다단 분리막 공정 개념도

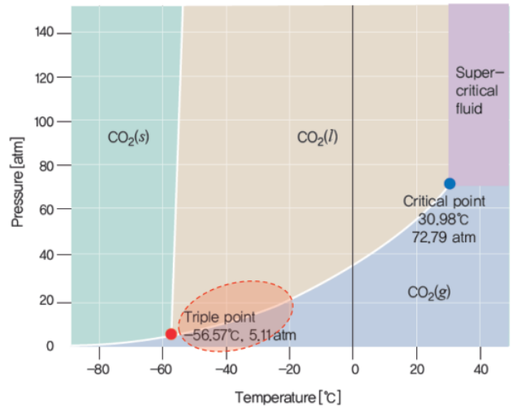


*Juyoung Oh, Rahul Anantharaman, Umer Zahid, PyungSoo Lee, Youngsub Lim, Process design of onboard membrane carbon capture and liquefaction systems for LNG-fueled ships, Separation and Purification Technology, 282(B), 2022

임영섭. **친환경선박의 이해**. 성안당, 2023

CO_2 액화

- Pure CO_2 triple point ~-57°C, 5.1 atm
- LCO_2 conditions
  - Medium P(10~20bar), Low T (-40~-25 °C)
    - Conventional small carrier storage conditions
  - Low P (7~10bar), Low T (~-50 °C)
    - For large scale storage tank, research and demonstration are ongoing.
  - High P (35~45bar), Room T(0~20 °C)
    - Energy for liquefaction is reduced, but high pressure tank is required.
- Solid CO_2?
  - How about transport solid CO2 at atmospheric temperature? (dry ice)
  - A solid is hard to load and unload large amounts continuously.



| 그림 4-75 | 순수한 이산화탄소의 PT선도

CO_2 선상 저장

https://rbnenergy.com/the-air-that-i-breathe-part-3-the-uss-existing-and-planned-co2-pipeline-networks

- via ship
  - Liquefied CO2
    - CO2 carrier, operated in 30+years
    - Limited in small scale (~1000 m^3), for drinks
  - Issues
    - If light components (e.g. N2) is included, the required T for liquefaction becomes lower.
      - → High purity CO2 is required.
    - Solid formation: dry ice, hydrate (with H_2O) formation with too low temperature

https://www.larvik-shipping.no/fleet/

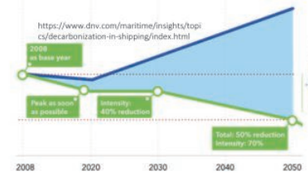
동향 및 전망

Current issues

- 규정 미비 (논의중)
  - 현재 CCUS기술을 이용한 선박 이산화탄소 포집을 정량적으로 인정할 수 있는 구체적인 방법론 및 IMO 규정이 부재
  - MEPC에서 현재 논의 본격화.
    - 2024.03 MEPC 81차에서 메탄/아산화질소 배출량의 측정 및 검증 그리고 선상탄소포집시스템(OCCS) 다루는 회기간 실무 작업반 개설에 합의함 (CG) .
    - 회기간 실무작업반에서는 제/개정이 필요한 규제체계 식별, OCCS 시험/조사/인증 가이드라인 개발, OCCS 온실가스 감축 잠재량 추산 검토, OCCS 추가 에너지 소모량 검토, 육상CO2가치사실과 연결 등 논의.
  - 경제성의 문제
- 포집한 이산화탄소를 최종적으로 어떻게 할 것인가?
  - 격리 저장 혹은 활용의 문제
  - 인프라 구축의 문제

포집연구 사례 CCShip (CCS for a ship)

Why: With Paris Agreement, IMO targets 50% reduction of greenhouse gases by 2050. Ships using fossil fuel must have a solution. Onboard CCS(carbon capture and storage) can be a temporary solution for existing ships before zero-carbon fuels become viable.

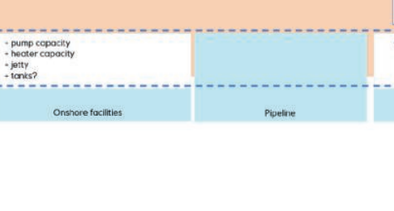


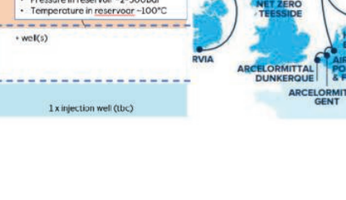
Target vessel	
Lwl	118.5 m
B	16 m
D	9.9 m
T	7.3 m
DWT	8000 t
Design speed	13 knots
Main engine	3000 kW

CO2 capture Equipment (MEA)	
Absorber	D1.5m, H10m
Stripper	D0.8m, H14m
Condenser	D0.2m, L6m
HX	D1.2m, L6m
Cooler	D0.3m, L6m

van den Akker, Carbon capture onboard LNG-fueled vessels, TU Delft, 2017

Objective: to develop cost-effective solutions for CCS from ships. With solvent-based CO2 capture as a base case, different CO2 capture solutions will be investigated to identify their potential (in term of weight, compactness, integration, efficiency, and cost) for different ship types and transport applications (size, fuel type, voyage distance), considering both new building and retrofit-ting of vessels.





도입을 위한 준비

- IMO와 EU모두 OCCS도입을 검토 준비 중

*IMO, Resolution MEPC.376(80); Guidelines on life cycle GHG intensity of marine fuels (LCA GUIDELINES), 2023

5.2 The TtW GHG emission factors should be calculated using Equation (2):

Equation (2)

$$GHG_{TtW} = \frac{1}{LCV}\left(\left(1-\frac{1}{100}\left(C_{slip_ship}+C_{fug}\right)\right)\times\left(C_{fCO_2}\times GWP_{CO_2}+C_{fCH_4}\times GWP_{CH_4}+C_{fN_2O}\times GWP_{N_2O}\right)+\left(\frac{1}{100}\left(C_{slip_ship}+C_{fug}\right)\times C_{sfx}\times GWP_{fuelx}\right)-S_{Fc}\times e_c-S_{Fccu}\times e_{ccu}-e_{OCCS}\right)$$

Note: terms S_{Fccu}, e_{ccu} and e_{occs} are pending further methodological guidance to be developed by the Organization. For more details refer to footnotes 11 to 13.

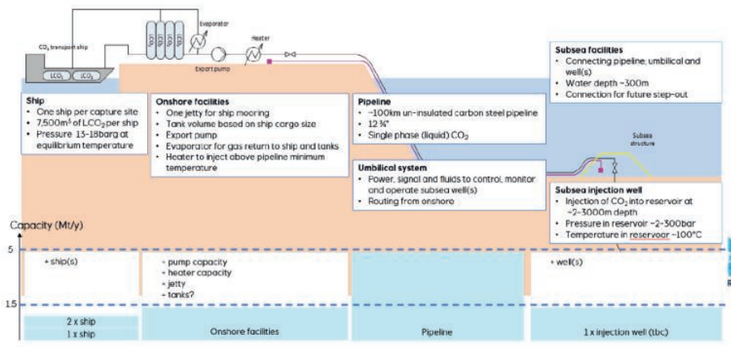
European Commission, REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC, 2023.

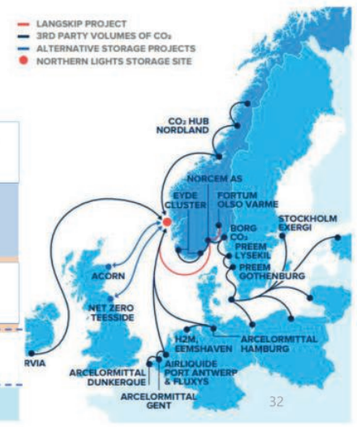
(33) In the event of technological progress concerning new GHG abatement technologies, such as onboard carbon capture, the Commission should assess the possibility to reflect, in the GHG intensity and compliance balance formulas set out in Annexes I and IV respectively, the contribution of such technologies to lowering the GHG direct emissions on board ships.

사례: Northern Light project

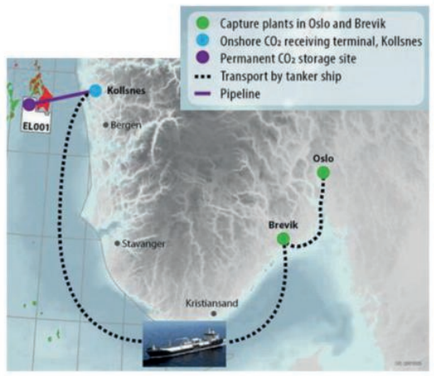
- 북해 CO2 저장 네트워크 구축
  - 세계최초 cross-border 허브 구축 목표
  - Equinor, Shell, TotalEnergies
  - 2024년 시운전 목표

https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Global-Status-of-CCS-Report-English.pdf





Northern Light project



SNU NAOE
Youngsub Lim

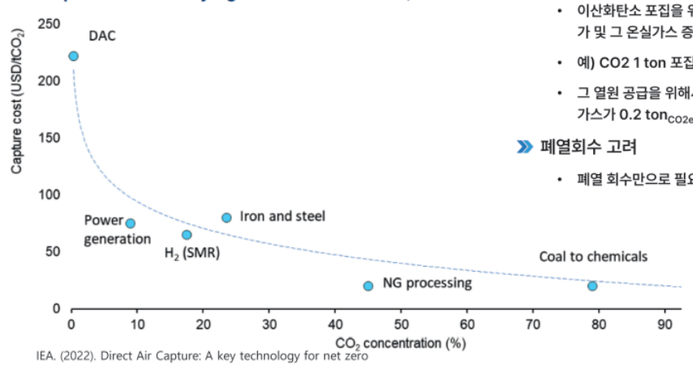
https://norlights.com/what-we-do/

CO_2 receiving terminal in the municipality of Øygarden in western Norway. The facilities are under construction and will be ready for operations in 2024.

비용 문제

- 이산화탄소 포집 비용은 포집원의 이산화탄소 농도에 크게 영향을 받음.
  - 선박 배출 이산화탄소의 농도는 통상 3%전후

CO_2 capture cost at varying CO_2 concentrations, 2020



IEA. (2022). Direct Air Capture: A key technology for net zero

- "포집비용" 아닌 배출 "회피비용" 평가 필요
  - CO2포집비용
    - 이산화탄소 포집에만 소요되는 비용
  - 온실가스 배출 회피 비용
    - 이산화탄소 포집을 위해서 에너지 공급이 늘어날 때 이로 인한 연료증가 및 그 온실가스 증가분을 고려한 비용
    - 예) CO2 1 ton 포집 위해서 $100을 소모: $100/ton$_{CO2\ capture}$
    - 그 열원 공급을 위해서 보일러에서 MGO를 연소하는 과정에서 온실가스가 0.2 ton$_{CO2eq}$ 발생: $100/0.8=$125/ton$_{CO2eq\ avoided}$
  - 폐열회수 고려
    - 폐열 회수만으로 필요 열원 모두 충당 어려움.

SNU NAOE
Youngsub

34

비용 문제

Chemical Engineering Journal 483 (2024) 149136
Contents lists available at ScienceDirect
Chemical Engineering Journal
journal homepage: www.elsevier.com/locate/cej

Optimal capacity design of amine-based onboard CO_2 capture systems under variable marine engine loads

Juyoung Oh[a], Donghoi Kim[b,*], Simon Roussanaly[b], Rahul Anantharaman[b], Youngsub Lim[a,*]
[a] Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea
[b] SINTEF Energy Research, Trondheim, Norway

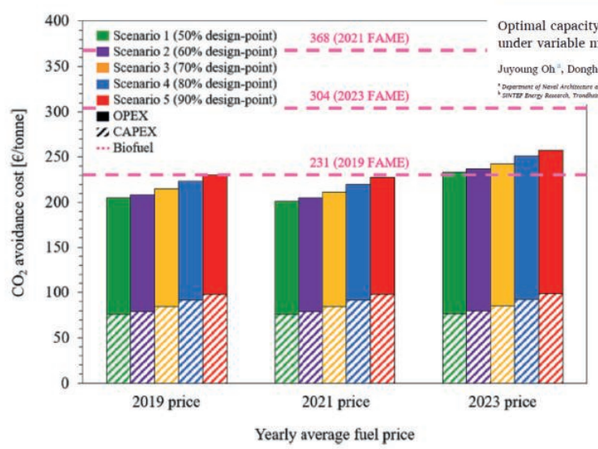


Fig. 13. CO_2 avoidance cost of the onboard carbon capture system compared to the alternative decarbonization strategy.

Oh, J., Kim, D., Roussanaly, S., Anantharaman, R., & Lim, Y. (2024). Optimal capacity design of amine-based onboard CO2 capture systems under variable marine engine loads. *Chemical Engineering Journal, 483*, 149136.

35

비용문제

The role of onboard carbon capture in maritime decarbonization

Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping

A case study of the largest shipping segments, main carbon-based fuels, and full and partial application as part of a newbuild or retrofit

September 2022

Table 3: CO_2 abatement cost calculation (VLCC).

[1]Assumptions: Vessel Lifetime: 20 years, Interest Rate: 5%, Debt Finance: 60%, Cost of Equity: 10%, LSFO Price: $500/ton, LNG Price: $400/ton, CO2 Storage Cost: $25/ton, Sailing 250 days/year

[2]CO_2 avoidance is reduced by the well-to-tank, 100-year GWP, emissions associated with the additional energy consumption (LSFO: 13.2 gCO_2/MJ, LNG: 19.6 gCO_2eq/MJ; LCV for LSFO: 41.2 MJ/kg, LNG: 48 MJ/kg) and onboard methane slip from diesel generators (3.1%)

[3]Additional fuel consumption for methanol vessel assumes genset using fuel oil

	LSFO	LNG	Methanol
Total CO_2 avoidance (tons/year)	40,700	31,300	37,700[3]
CAPEX ($M/year)	4.4	3.2	3.9
OPEX ($M/year)	5.0	1.8	3.9
CO_2 Storage ($M/year)	1.0	0.8	0.9
Total Cost ($M/year)	10.4	5.8	8.8
Abatement Cost – TTW ($/ton CO_2)[2]	250-260	180-190	230-240
Corrected CO_2 avoidance (tons/year)[2]	36,700	26,100	34,400
Abatement Cost – WTW ($/ton CO_2)	280-290	220-230	250-260

IS CARBON CAPTURE ON SHIPS FEASIBLE?

OIL AND GAS CLIMATE INITIATIVE

Stena Bulk

A REPORT FROM THE OIL AND GAS CLIMATE INITIATIVE
NOVEMBER 2021

Table 4: Running costs and returns if aiming for a 25–30% avoidance rate to meet IMO's 2030 target

	If capture system is always used when sailing	If used 50% of the time when sailing	50% usage until 2025, increasing to 100% by 2030
TOTAL CO_2 (MT/Y)			
CO_2 produced	35,540	35,540	35,540
Emitted/vented	24,891	30,216	28,299
Captured	10,649	5,325	7,241
% captured (avg. over lifetime)	30%	15%	20%
Total investment over lifetime (12 years)	**$18.5m**	**$17m**	**$17.6m**
CHANGES TO RUNNING COSTS ($/D)			
Total extra running costs	4,727	4,151	4,358
- of which due to fixed costs	4,232	3,903	4,022
- of which due to variable costs	495	248	337
- of which due to sequestration	438	219	298
$/$tCO_2$	**175**	**297**	**232**
OVER 20 YEARS LIFETIME			
Total extra running costs $/d	4,101	3,524	3,732
$/$tCO_2$	153	254	201

온실가스 배출 저감 한계

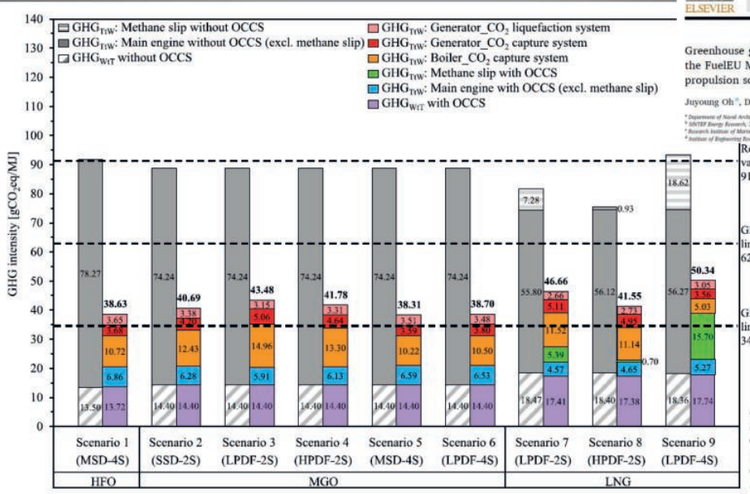


Fig. 2. GHG intensity for each ship propulsion scenario with OCCS systems.

Chemical Engineering Journal 490 (2024) 155407
Contents lists available at ScienceDirect
Chemical Engineering Journal
journal homepage: www.elsevier.com/locate/cej

Greenhouse gas emissions of shipping with onboard carbon capture under the FuelEU Maritime regulation: A well-to-wake evaluation of different propulsion scenarios

Juyoung Oh, Donghoi Kim, Simon Roussanaly, Youngsub Lim

Reference value: 91.16

GHG intensity limit (2040–44): 62.90 (31%저감)

GHG intensity limit (2045–49): 34.64 (62%저감)

Oh, J., Kim, D., Roussanaly, S., & Lim, Y. (2024). Greenhouse gas emissions of shipping with onboard carbon capture under the FuelEU Maritime regulation: A well-to-wake evaluation of different propulsion scenarios. *Chemical Engineering Journal*, *498*, 155407.

결론

문의: 임영섭 (s98thesb@snu.ac.kr)

- 선박 온실가스 배출 규제는 빠른 속도로 강화되고 있음.
  - 2023 IMO온실가스 전략 수립과 함께 목표(2050 net zero)와 방법(WtW GHG 집약도 평가)이 모두 강화되고 있음
- OCCS (Onboard Carbon Capture and Storage)
  - 현존선 수명 연장 및 CCUS공급망 완성을 위한 요소로 기대받고 있으나, 현실화되기 위해서는 넘어야 할 이슈 존재
    - 규제 제도화(현재 IMO 논의중)
    - 포집의 경우 에너지 소모량이 높고, 간접 온실가스 배출이 고려되어야 함.
    - 선상 저장의 경우 무게, 부피, 배치, 안정성 고려되어야 함.
    - 하역시설 및 CCUS공급망에 연결된 배관망 등 인프라 필요 (northern lights등 실증연구사례 증가 중)
    - 비용과 GHG배출 감축한계 고려 필요

Maritime Cluster Networking in Korea

www.macnetkorea.com