

# 탄소포집, 이용 및 저장 기술(CCUS) 현황 및 문제점

—  
윤세종 기후솔루션 변호사

오동재 기후솔루션 연구원



SFOC Coal Issue Brief

# 03 / 탄소포집, 이용 및 저장 기술(CCUS) 현황 및 문제점

2021년 10월 20일

<b>목차</b>	<b>1 CCS 개요 및 문제의 소재</b> .....	02
	<b>2 기술의 높은 불확실성으로 인한 사업 리스크 확대</b> .....	03
	<b>3 경제성 미확보로 천문학적인 비용 수반 예정</b> .....	04
	<b>4 CCUS로 포집된 온실가스, 대부분 화석연료 재생산에 활용</b> .....	05
	<b>5 CCUS에 대한 과도한 의존으로 석유·가스 개발 지속 우려</b> .....	05
	<b>6 CCS 활용을 한다 해도 막대한 온실가스가 배출될 수밖에 없음</b> .....	06
	<b>7 국제 시민단체들의 우려 가중</b> .....	07
	<b>[별지 1] CCUS 기술 개요</b> .....	08
	<b>[별지 2] 주요 CCS 사업 내역 및 현황</b> .....	13
	<b>[별지 3] 현재 운영 중인 CCUS 사업 목록</b> .....	19

## 1 CCS 개요 및 문제의 소재

탄소포집 및 저장(CCS) 기술은 최근 주목받고 있는 온실가스 감축 수단으로, 가스전, 화력 발전, 산업에서 배출되는 온실가스를 포집해 파이프라인 등으로 이동시킨 후 이를 이용하거나 지층 깊숙이 저장하는 단계로 이뤄짐. 최근에는 포집한 탄소를 유전에 주입해 원유 생산량을 늘리는 “원유회수증진” 사업을 탄소포집 및 이용(CCU)로 포함하고 이를 탄소포집 이용 및 저장(CCUS)이라고 통칭하기도 함.

이론적으로는 전세계 폐석유·가스전이나 지층 내에 막대한 양의 이산화탄소를 저장할 수 있는 잠재력이 있다고 추산되고 있으나, CCUS 산업은 천문학적 비용과 기술적 한계로 인해 현재까지 범용 단계로 확산되지 못하고 있음. 2020년 현재 전 세계에서 운영 중인 CCUS 사업 규모는 약 4천만톤 수준이며, 이 가운데 탄소저장을 목적으로 하는 순수한 CCS 사업은 1천만 톤 규모에 불과함. 이는 전세계 온실가스 배출량의 0.1% 이하로, IPCC 등에서 예측했던 것보다 CCUS 이용이 훨씬 느리게 진행되고 있음을 의미하며, 앞으로 대규모 CCUS가 성공적으로 이루어질 수 있을지에 대해서는 여전히 상당한 기술적/경제적 장애가 존재함.

최근 국내 석유·가스업계에서 CCUS 적용을 천연가스 개발 사업을 추진하는 근거로 제시하면서,

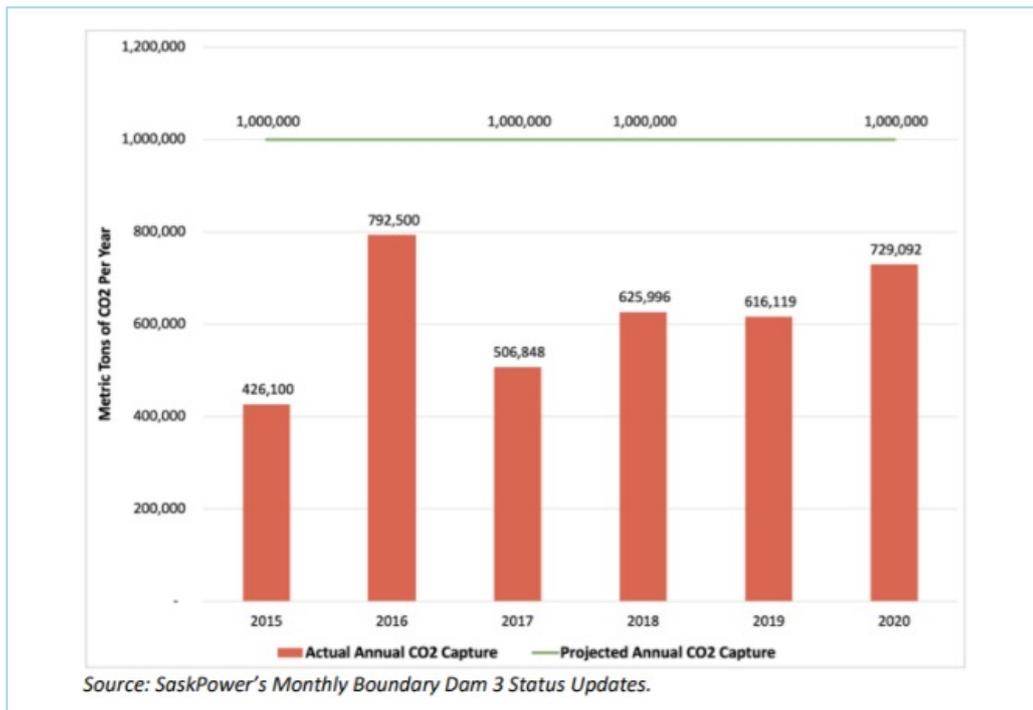
아직 불확실성이 남아있는 CCUS 기술이 되려 온실가스 다배출 산업의 전환을 늦추고 기후위기 대응을 저해하다는 비판이 일고 있음.

- 향후 탄소중립 달성을 위한 CCUS 기술의 역할을 부정할 순 없지만, 이는 단기간 내 대체 기술 확보가 어려운 일부 산업에 한해 활용돼야 함. 그 외 현재 재생에너지로 대체 가능한 석탄-천연가스 산업의 경우 CCUS를 이유로 한 신규 사업 추진이나 수명 연장이 이루어질 경우 온실가스 감축에 기여하기 어려울 것으로 지적됨.

## 2 기술의 높은 불확실성으로 인한 사업 리스크 확대

- 현재 석유-가스 기업들 위주로 추진되고 있는 CCS 사업은 기술적인 불확실성이 높아 대규모 확장이 어려운 상황임. 온실가스 포집량이 애당초 예상보다 현저히 떨어진다는 것이 가장 큰 문제이며, 깊은 땅속에서 온실가스의 저장이 이뤄진다는 기술 특성 상 실제 이산화탄소 저장이 이뤄졌을 때의 지반 압력 문제, 저장 가스 유출 문제에 대한 우려도 여전히 남아있음.

- 대표적인 예로, 미국 Boundary Dam 석탄발전소 일부에 2014년부터 탄소 포집 설비를 부착해 저장 중이지만, 실제 포집량은 목표 포집량의 40-80% 수준에 머무르고 있음.



[그림 1] Boundary Dam 3호기 CCS의 목표 포집량 대비 실제 포집량(IEEFA, 2021)<sup>1</sup>

1 [http://ieefa.org/wp-content/uploads/2021/04/Boundary-Dam-3-Coal-Plant-Achieves-CO2-Capture-Goal-Two-Years-Late\\_April-2021.pdf](http://ieefa.org/wp-content/uploads/2021/04/Boundary-Dam-3-Coal-Plant-Achieves-CO2-Capture-Goal-Two-Years-Late_April-2021.pdf)

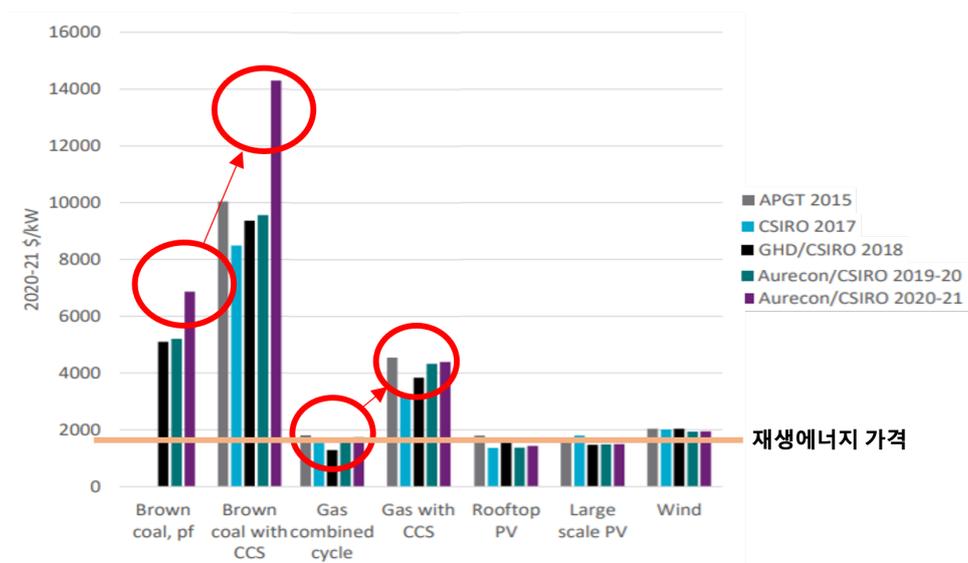
- 또한 최근 미국 셰브론(Chevron)사가 호주 서부 고르곤(Gorgon) 가스전에서 진행한 초대형 CCS 프로젝트 역시 약 3조 4천억 원(\$3.1bn)을 들여 매년 4백만 톤의 온실가스를 포집한다는 계획이었으나 갖은 기술적인 문제로 가동이 3년 연기되었을 뿐 아니라 2019년 가동 후에도 지층 압력 문제로 현재까지 목표량의 1/3 수준으로만 포집·저장이 이뤄지고 있음. 결국 호주 정부에 약속한 이산화탄소 저장량에 미치지 못하자, 이를 벌충하는 방안을 논의 중에 있음.

- 이와 같이 현재까지 대규모 CCS가 안정적으로 실증된 사례가 없는 상황에서 CCS의 성공을 전제로 대규모 자원개발 사업을 진행하는 것은 온실가스 대량 배출로 이어질 위험성이 크며, 결국 투자자와 사업자의 재무적 위험으로 발전할 가능성 역시 매우 큼.

### 3 경제성 미확보로 천문학적인 비용 수반 예정

- CCS 사업을 위해서는 이산화탄소의 포집, 수송, 저장을 위한 대규모 인프라가 필요하며, 이를 구축하기 위해서는 막대한 투자금이 소요됨. CCS사업 비용을 고려하면 기존 화석연료 관련 사업의 경제성은 지금보다 현저하게 떨어짐(CSIRO, 2021).

- 재생에너지 가격 하락을 고려하면 현 시점에서 CCS와 결합한 신규 석유·가스 개발사업이나 석탄·가스 화력발전 등의 수명 연장은 비용 경쟁력을 갖기 어려우며, 재생에너지로 빠르게 전환하는 것이 사회 전체의 비용 면에서 가장 유리할 것으로 지적됨.



[그림 2] CCS 도입에 따른 발전원별 발전 비용 차이(CSIRO, 2021)<sup>2</sup>

2 <https://www.csiro.au/-/media/News-releases/2020/renewables-cheapest/GenCost2020-21.pdf>

## 4 CCUS로 포집된 온실가스, 대부분 화석연료 재생산에 활용

- 2020년 기준 전세계에 설치된 4천만 톤 규모의 CCUS 설비 대부분(75%)은 포집된 이산화탄소를 지층으로 밀어넣은 압력을 활용해 지층 속 원유를 뽑아내는 원유회수증진(Enhanced Oil Recovery, EOR) 사업임. 포집된 이산화탄소를 지층 내에 주입하고, 이를 통해 기존에 채굴이 어려웠던 지형 내 석유·천연가스를 뽑아냄으로서 추가 수익을 얻을 수 있기 때문에 단순 CCS 사업보다 수익성 개선 효과가 있기 때문임.
- 추가 생산된 화석연료가 소비되면서 막대한 온실가스를 배출하기 때문에, 원유회수증진(EOR) 형태의 CCUS는 실질적으로 온실가스 저감 사업보단 화석연료 개발 사업에 더 가까우며, CCUS가 아니었다면 생산되지 않았을 화석연료 생산·소비를 추가하면서 온실가스 감축에 기여하지 못한다는 문제가 있음.
- 뿐만 아니라 유가의 가격 변동에 따라 EOR 사업의 수익성이 떨어질 경우, 사업이 중단되기도 함. 미국 텍사스주 W.A Parish 혼합화력발전단지의 8호기 석탄화력발전소에서 시행된 Petra Nova CCS 사업은 EOR 사업으로 진행됐으나, 2020년 코로나-19에 따른 유가 급락으로 수익성이 떨어져 가동을 무기한 중단함.

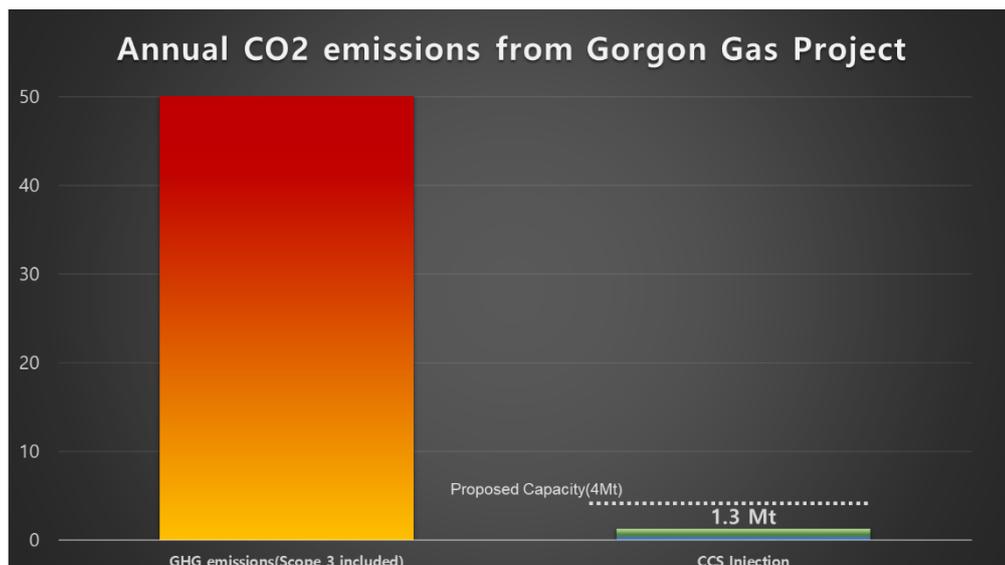
## 5 CCUS에 대한 과도한 의존으로 석유·가스 개발 지속 우려

- CCUS 기술은 과거부터 온실가스 저감에 큰 역할을 할 것으로 기대되었으나 실제 기술의 발전속도가 기대를 따라가지 못하고 있는 것으로 평가됨. 2020년 현재 전세계에서 운영되고 있는 CCS 설비 (EOR 제외)는 총 6곳(연간 온실가스 1천만 톤 저장)으로, 이들의 연간 온실가스 흡수량은 전세계 온실가스 배출량의 0.03%에도 미치지 못함. 2005년에 IPCC가 '2020년 CCS 설비 규모'를 최대 연간 49억톤으로 전망했다는 점을 고려하면 현재 CCUS 기술의 발전 속도는 기대에 크게 못 미치는 상황임. 그 사이 전세계 이산화탄소 배출량은 290억톤(2005년)에서 360억톤(2019년)으로 급증함.
- 지금도 국제에너지기구(IEA) 등은 CCS 기술에 대한 낙관적인 전망을 바탕으로 2050년 연간 60억톤의 이산화탄소를 저장 가능할 것으로 예상하고 있음. 그러나 2050년 탄소중립 달성을 위해 급격히 온실가스 배출을 줄여가야 하는 현 시점에서 CCS 기술에 대한 과도한 낙관은 결국 온실가스 배출을

늘리는 결과를 초래할 수 있음.

## 6 CCS 활용을 한다 해도 막대한 온실가스가 배출될 수밖에 없음

- 화석연료 사용으로 인한 온실가스 배출은 생산 단계, 정제와 운반 단계, 최종 연소 단계 등 가치사슬 전 과정에서 발생하지만, 현재 추진·운영되는 CCS 사업은 그 중 일부 단계의 온실가스만을 포집해서 저장하고 있음. 결국 CCS 사업을 이유로 신규 화석연료 사업을 추진하거나 기존 사업의 수명을 연장한다면 막대한 온실가스가 대기 중으로 배출될 것으로 우려됨.
- 세계 최대 규모의 CCS 사업인 호주 서부의 Gorgon 가스전의 경우, 매년 LNG 1,560만 톤을 생산 및 정제하는 과정에서 발생하는 온실가스(830만톤)와 생산된 LNG를 소비할 때 발생하는 온실가스(4,200만톤)를 합하면 최소 5,030만 톤의 온실가스를 배출함. 그러나 Gorgon CCS 사업은 그 중에서 생산·정제 과정에서 발생하는 이산화탄소 중 400만 톤을 포집하는 것이 계획이었고, 그마저도 실제 저장량은 130만톤에 불과하여 결국 이 사업에서 발생하는 온실가스의 3% 만을 포집·저장하고 있음.



[그림 3] Gorgon 가스전 사업으로 인한 연간 온실가스 배출과 실제 CCS 저장량 비교

- 현재 SK E&S가 추진 중인 호주 바로사(Barossa) 가스전 사업도 매년 연간 350만 톤의 LNG를 생산 및 정제·운송하는 과정에서 약 390만 톤, LNG 연소 과정에서 960만톤의 온실가스가 배출될 것으로 예상됨. SK E&S의 CCS 계획 역시 천연가스 생산·정제 과정에서 분리되는 이산화탄소 210만톤을 포집해 저장하겠다는 계획으로, 이는 바로사 가스전 사업 추진으로 인해 배출되는 전체 온실가스 배출량의 16%에 불과함.

- 국제에너지기구(IEA)는 향후 CCUS의 활용이 크게 증가해야 한다고 인정하면서도 지난 5월 발간한 보고서에서 2050년 탄소중립 달성을 위해선 2021년부터 신규 석유/천연가스전 개발 사업이 진행되어서는 안 된다고 밝혔음.

## 7 국제 시민단체들의 우려 가중

- CCS 기술이 온실가스 감축보다는 기존 화석연료 산업의 수명 연장 수단으로 활용되는 것에 대한 문제의식이 늘어남에 따라, 국제 시민사회의 비판도 늘어나고 있음. 지난 7월 약 500여개 국제 시민단체들은 미국/캐나다 정부에 CCS 관련 인프라 사업에 대한 정부 보조금을 중단할 것을 요구하는 서한을 보냈음.<sup>3</sup>

**[별지 1] CCUS 기술 개요**

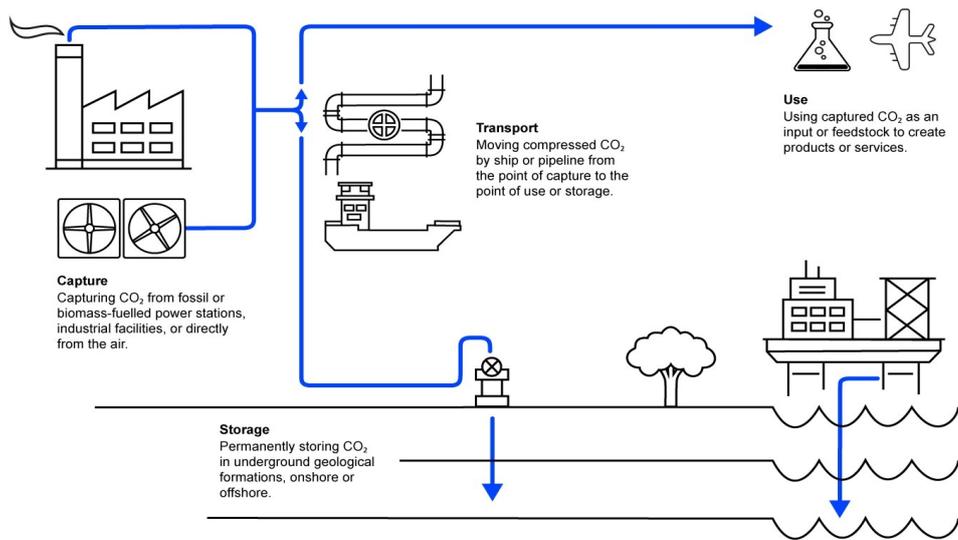
**[별지 2] 주요 CCS 사업 내역 및 현황**

**[별지 3] 현재 운영 중인 CCS 사업 목록**

**문의** / 윤세종 기후솔루션 변호사 010 9253 6181 sejong.youn@forourclimate.org  
오동재 기후솔루션 연구원 010 8994 2698 dongjae.oh@forourclimate.org

<sup>3</sup> <https://www.ciel.org/issue/carbon-capture-and-storage/>

## 1. 기술 개요



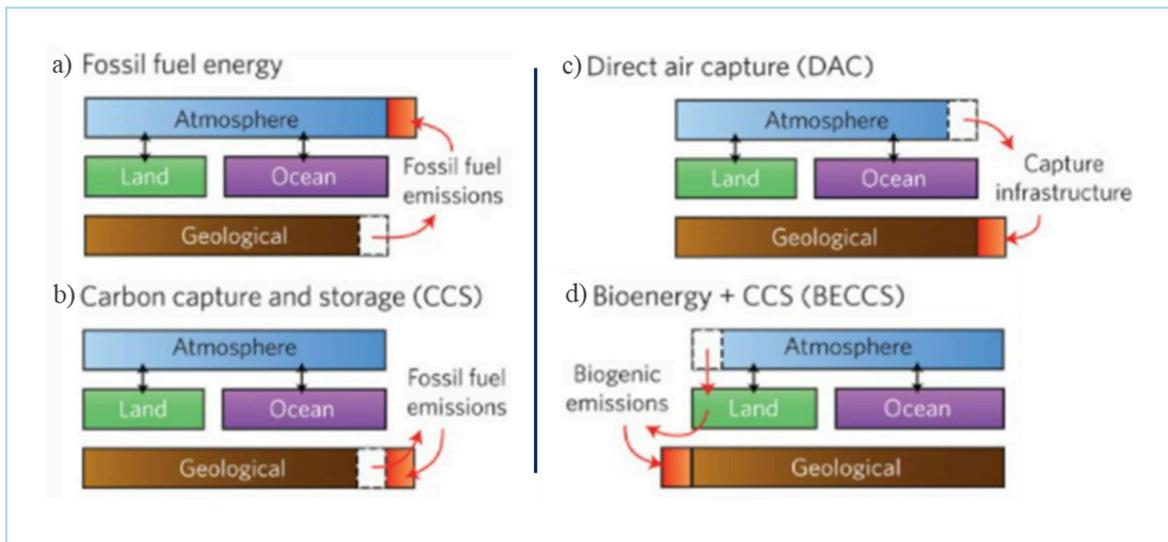
[그림 4] 이산화탄소 포집, 이용 및 저장 과정 흐름도 (IEA)

• 탄소포집, 이용 및 저장(CCUS) 사업은 대기 중으로 배출된 온실가스를 포집하여 이용하거나 저장해 온실가스 배출을 저감하는 기술로, 온실가스 다배출원인 석유가스전, 화력발전소, 석유화학 공정 등에서 발생하는 온실가스의 포집, 파이프라인이나 선박을 이용해 이동시킨 후 이를 이용하거나 지층 깊숙이 저장하는 단계로 이뤄짐.

- **포집(Capture)** : 배출원에서 이산화탄소를 분리해서 포획하는 단계로, CCS사업의 총 비용 중 70% 이상을 차지함(가격 경쟁력을 갖춘 3세대 기술은 2035년 상용화 전망).<sup>4</sup> 대표적으로 아민계 액상 흡수제를 이용한 습식 포집, 고체 흡수제를 이용한 건식 포집, 이산화탄소를 선택적으로 투과시켜 분리해 내는 분리막 포집 등이 있음.
- **이동** : 포집된 이산화탄소는 압축되어 파이프라인이나 선박을 통해 이용 및 저장이 이뤄지는 장소로 이동함.
- **이용(Use)** : 포집된 이산화탄소는 작물 수확량 향상, 식음료 생산 등에 활용되기도 하며, 화학작용을 거쳐 메탄올-가솔린과 같은 연료나 화학물질, 건축자재로 전환되어 활용될 수도 있음. 이산화탄소를 유전에 주입해 원유 생산에 활용하는 원유 회수 증진(EOR) 기법도 CCU에 해당함.

4 Miller D.C. et al., 2016. Toward Transformational Carbon Capture Systems, AIChE Journal, vol. 62, pp. 2-10.

- **저장(Storage)** : 포집된 이산화탄소를 지층 깊이 집어넣어 보관하는 단계로, 주로 폐유전 및 가스전, 대염수층 등에 보관된다.
- 공기 중 직접 포집(DAC, Direct Air Capture)과 바이오에너지 결합 CCS(BECCS)도 CCS로 분류됨. 다만 온실가스 배출원에서 배출되는 온실가스를 지층에 저장함으로써 배출량을 “0”으로 만드는 일반적인 CCS와는 달리, DAC와 BECCS는 온실가스 흡수원으로 기능하기 때문에, 전세계적인 탄소중립 시점 이후 온실가스의 음(-)의 배출 확대에 기여할 것으로 기대되고 있음.
- **공기 중 직접 포집(DAC)** : 대기 중에 함유되어 있는 이산화탄소를 걸러내 응축하여 지층에 저장하는 CCS 유형으로, 아직 실증 단계의 기술임. 최근 가동시작한 아이슬란드의 연간 4천 톤 규모의 오르카 (Orca) CCS 가 대표적인 사례.<sup>5</sup>
- **바이오에너지 결합 CCS(BECCS)** : 바이오 연료를 에너지로 연소할 때 발생한 온실가스를 포집해 지층에 저장한다는 개념. 바이오 연료 생산과정에서 대기 중 이산화탄소가 흡수되기 때문에 결과적으로는 대기 중 온실가스가 감소하는 효과가 있음.



[그림 5] 이산화탄소 포집, 이용 및 저장 과정 흐름도 (IEA)<sup>6</sup>

좌측 상단부터 ‘화석연료 연료했을 때의 온실가스 배출(a)’, ‘배출된 온실가스를 CCS로 포집했을 때(b)’, ‘DAC를 통해 대기 중 온실가스를 직접 포집하는 경우(c)’, ‘대기 중 온실가스를 흡수한 바이오 원료를 연소 하면서 발생한 온실가스를 저장한 경우(d)’로 구분됨.

5 <https://www.hani.co.kr/arti/society/environment/1011014.html>

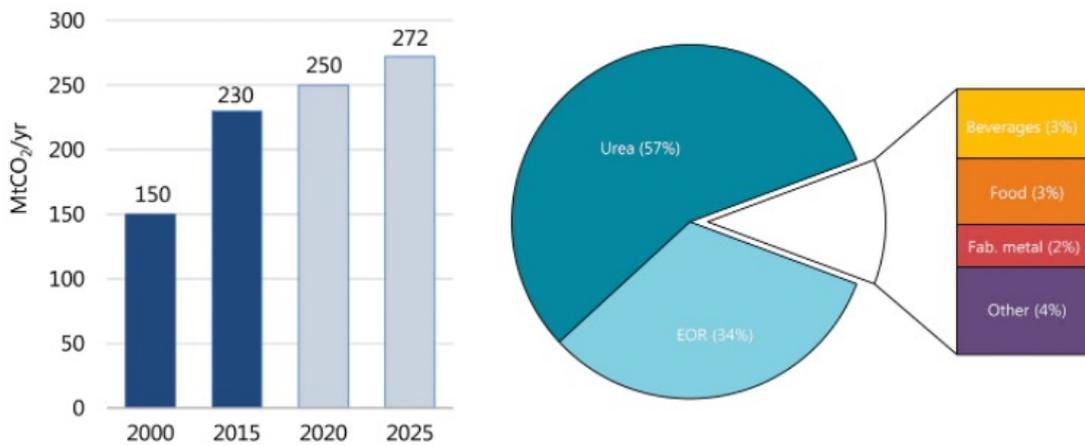
6 Smith et al. Biophysical and economic limits to negative CO2 emissions, 2016

## 2. CCUS 산업 현황 및 전망

### 산업 현황

- CCUS 기술은 2000년대 초반부터 본격적으로 부각되어 왔지만 현재까지 뚜렷하게 확산세에 이르지 못하고 있음. 2020년 현재 전 세계적으로 대규모 사업으로는 총 28개, 연간 포집·저장량 기준 4천만 톤 규모의 CCUS 사업이 진행 중인 것으로 집계됨. 이 중 탄소포집·저장만을 목적으로 하는 순수한 의미의 CCS 사업은 총 6개, 1천만 톤 규모에 불과함.

- 포집한 이산화탄소를 이용하는 CCU 사업이 CCS 사업보다 규모가 크나, CO2 이용 시장의 규모 자체가 크지 않기 때문에 CCS로 포집된 이산화탄소는 대부분 원유회수증진(EOR)에 활용되고 있고, 그 외 일부 농작물 비료로 활용되는 요소 생산에 쓰이고 있음.



[그림 6] IEA 추산 이산화탄소 수요 증가 전망(좌) 및 2015년 세부 부문별 수요 비중(우)(IEA)<sup>7</sup>

7 <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use>

### 이산화탄소 저장 잠재량

• 일반적으로 포집된 이산화탄소는 폐가스전·폐유전이나 지층 깊이 위치한 대염수층, 가용 중인 유전(원유회수증진)에 저장됨. Global CCS Institute는 전세계 주요 석유/가스전에 이론적으로 최대 3,100억 톤의 이산화탄소를 저장할 수 있다고 추산하고 있으며, 대염수층 저장 잠재량까지 포함하면 더 커질 수 있을 것으로 전망함.<sup>8</sup>



[그림 7] 전세계 주요 가스전 및 유전의 이산화탄소 저장 잠재량(Global CCS Institute, 2021)

- 탄소중립위원회는 국내에서 대륙붕 내 저장을 포함해 이산화탄소 저장 잠재량을 총 10억 톤 가량으로 추산한 바 있음.<sup>9</sup>
- 결국 이론적인 저장 잠재량 자체는 크더라도 실제로 경제적, 기술적으로 활용할 수 있는 저장소와 저장기술에 한계가 있는 것이 현재 CCUS와 관련된 주요 장애 요소로 평가됨.

### CCUS 산업 전망

• CCUS 기술의 실제 활용도는 전망에 비해 크게 낮은 수준에 머무르고 있음. IPCC는 지난 2005년 발간한 특별 보고서에서 2020년까지 CCS를 통해 26-49억톤의 온실가스를 저감할 수 있을 것이라 전망했으나<sup>10</sup>, 현재 CCUS 총 용량은 4천만 톤 수준에 불과함. 국제에너지기구(IEA, 2020)도 2050년까지 CCS기술을 통해 연간 66억톤의 이산화탄소를 포집하게 될 것으로 전망하고 있으나 실현 방식과 가능성에 대해서

8 <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>

9 탄소중립위원회에 따르면 국내 CCS 저장잠재량 10억 톤은 국내 대륙붕(3억~6억 톤), 한계형 저장용량(2억톤), 저장효율 향상 25%를 감안해 산정되었음.

10 [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs\\_wholereport-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf)

는 불확실성이 존재함.<sup>11</sup>

- 대통령 직속 탄소중립위원회도 한국의 2050년 탄소중립 경로에서 CCUS 기술 활용을 적극 검토하고 있음. 지난 8월 발표된 탄소중립 시나리오 3개 안에 따르면 CCUS를 통해 현 국내 온실가스 배출량의 최대 13%(95백만 톤)를 흡수하는 계획을 논의 중임.

(단위 : 백만톤 CO<sub>2</sub>eq)

구분	2018년	2050년 배출량		
		1안	2안	3안
합계(순배출량)*	727.6 (686.3)	25.4	18.7	Net-Zero
전환	269.6	46.2	31.2	0.0
산업	260.5	53.1	53.1	53.1
수송	98.1	11.2 (-9.4)	11.2 (-9.4)	2.8
건물	52.1	7.1	7.1	6.2
농축수산	24.7	17.1	15.4	15.4
폐기물	17.1	4.4	4.4	4.4
탈루 등	5.6	1.2	1.2	0.7
흡수원	-41.3	-24.1	-24.1	-24.7
CCUS	-	-95.0	-85.0	-57.9
수소	-	13.6	13.6	0.0

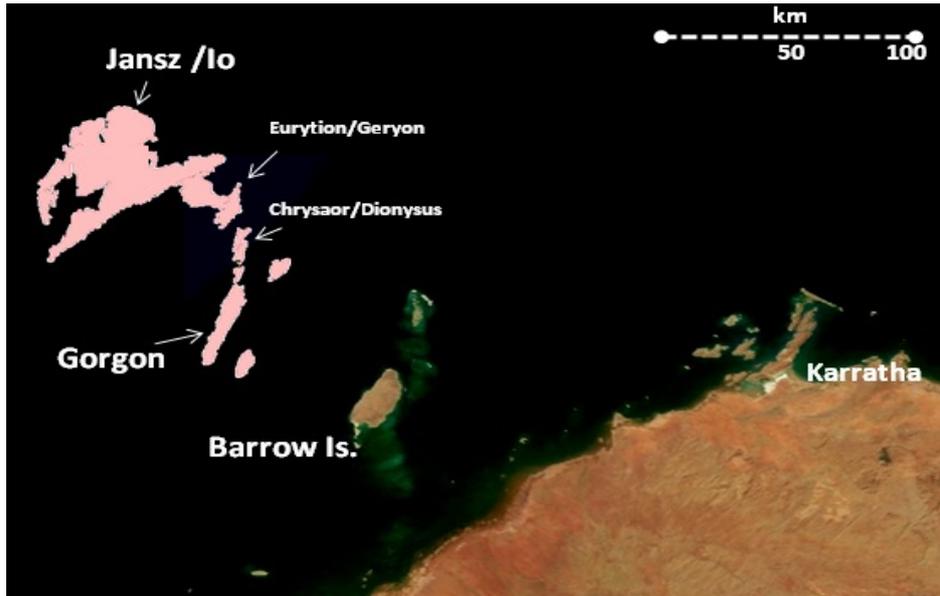
[표 1] 탄소중립위원회가 지난 8월 발표한 탄소중립 시나리오 3개 안

- 하지만 CCS기술 활용을 이유로 온실가스 다배출 산업이 전환을 늦추고 기후위기 대응을 오히려 저해한다는 비판이 일고 있음. 뿐만 아니라 탄소중립 시점 이후 이번 세기 말까지 CCS를 통한 과도한 음(-)의 온실가스 배출에 의존함에 따라 2050년 탄소중립 도달까지 파리협정의 1.5°C 목표를 지키기 위한 탄소예산을 초과해서 배출하는 오버슈팅(overshoot) 문제도 지적되고 있음.

- 향후 탄소중립 달성과 기후위기 대응을 위해 CCUS 기술의 발전과 경제성 확보는 반드시 필요할 것임. 특히 이는 철강이나 시멘트 등 단기간 내 대체 기술 확보가 어려운 일부 산업에서는 CCUS를 통한 저감이 반드시 필요할 것으로 지적되고 있음. 그러나 그 외 현재 재생에너지로 대체 가능한 석탄-천연가스 산업의 경우 신규 사업 추진이나 수명 연장의 구실로 CCUS가 이용될 경우 온실가스 감축에 큰 장애 요소로 작용할 위험이 매우 높음.

11 <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/ccus-in-the-transition-to-net-zero-emissions#abstract>

## 1. Gorgon LNG CCS 사업



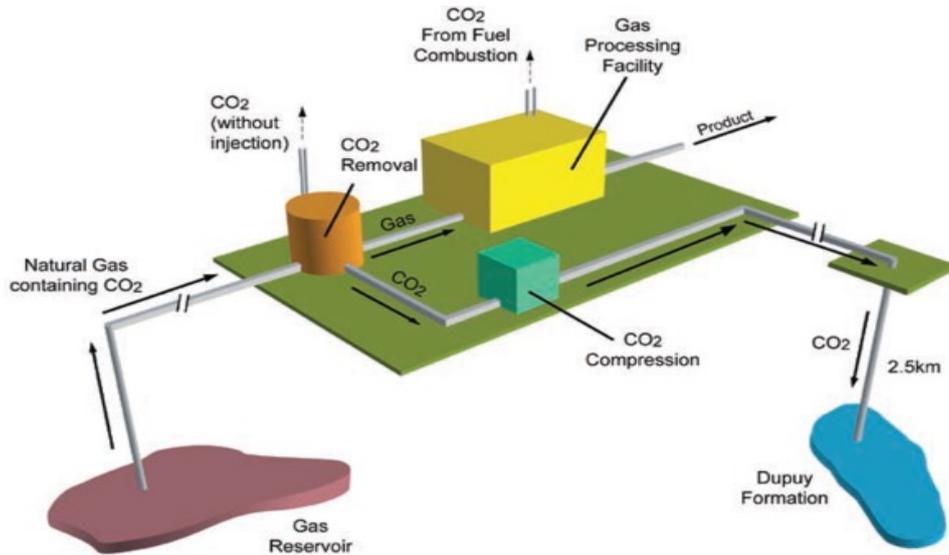
[그림 8] 고르곤 LNG 사업 부지

### Gorgon LNG 사업개요

- 사업명 : Gorgon LNG 개발 사업
- 생산량 : 연간 LNG 1,560만 톤 생산  
호주 내 천연가스 25%(8억 1,400만 톤) 매장 추정)
- 사업주 : Chevron Australia(47.3%), Exxon Mobil(25%), Shell(25%), 오사카 가스(1.25%), 도쿄가스(1%)
- 주요 고객 : SK LNG 트레이딩(연간 415만 톤), GS 칼텍스(연간 25만 톤)
- 총 사업비 : USD 540억 달러(CCS 설치 비용 USD 31억 달러 별도)

### 사업추진 일정

- 2009. Gorgon LNG 사업 허가
- 2016. 7. Gorgon LNG 가동 시작
- 2019. 8. Gorgon CCS에 이산화탄소 주입 시작
- 2021. 1. WA주 광물산업안전부(DMIRS), CCS 연간 저장 한도 1/3 제한 명령
- 2021. 7. Gorgon CCS, 지난 5년간의 목표 이산화탄소 저장량 미달.
- 주요 고객 : SK LNG 트레이딩(연간 415만 톤), GS 칼텍스(연간 25만 톤)
- 총 사업비 : USD 540억 달러(CCS 설치 비용 USD 31억 달러 별도)



[그림 9] 고르곤 LNG 개발 사업 및 CCS 사업 계획 모형도

### Gorgon CCS 사업 주요 내용 및 문제

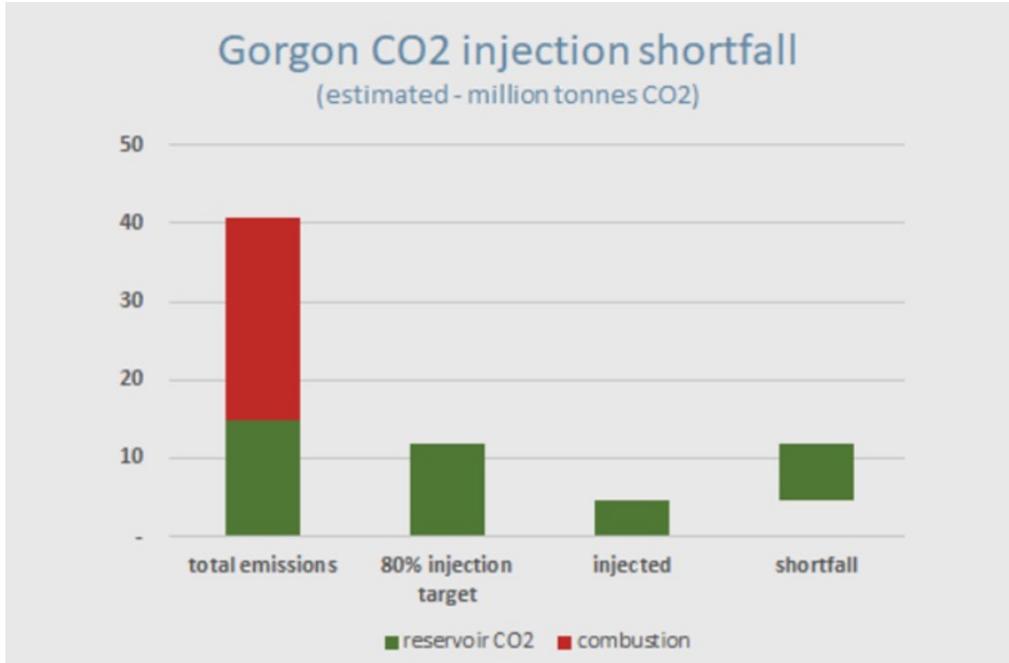
- 호주 웨스턴오스트레일리아(WA)주 환경부는 가스처리 과정에서 대기 중으로 배출되는 이산화탄소를 포집해 저장하는 것을 조건으로 Gorgon 가스전 개발을 허가함.<sup>12</sup>
- WA 주 승인 명령에 따라 Gorgon LNG 가동 이후 5년간 가스 처리 과정에서 분리한 이산화탄소의 최소 80%를 지하에 저장하는 것을 조건으로 Gorgon LNG 사업 허가가 이뤄짐. 사업자들은 Gorgon LNG 인근 Barrow 섬에서 천연가스 처리 후 포집된 이산화탄소를 섬 지하의 Dupuy 염수층에 저장한다는 계획을 세웠음.<sup>13</sup> 하지만 파이프라인 부식 등 공사 과정에서 여러 문제점들이 제기되며 Gorgon CCS는 LNG 생산이 시작된 2016년 이후 3년간 운영되지 못하다 지난 2019년에 이르러서야 온실가스 저장을 개시함.
- 운영이 시작된 후에도 염수층 내 지하수를 추출하는 파이프라인이 진흙에 막힌 상황에서 이산화탄소가 계속 주입되며 염수층의 압력 문제가 제기되었고, 결국 목표 포집량이었던 400만 톤의 1/3 수준인 130만 톤만 주입하게 되었음.<sup>14</sup>
- 결국 가스 생산 과정에서 분리된 약 1,500만 톤의 이산화탄소의 80%를 저장한다는 당초 계획과 달리

<sup>12</sup> Statement No. 800, EPA Ministerial Statement, Government of Western Australia, 8/10/09 (<https://www.epa.wa.gov.au/sites/default/files/1MINSTAT/Ministerial%20Statement%20800.pdf>)

<sup>13</sup> 이 때 호주 정부도 700억(USD 60 백만 달러)가량을 지원하기도 했음.

<sup>14</sup> <https://www.boilingcold.com.au/regulator-limits-chevrons-troubled-gorgon-co2-injection-to-one-third-capacity/>

30%인 5백만 톤을 주입하는데 그쳤고, 호주 규제 당국에 약속한 이산화탄소 포집 및 저장 목표치(80%)를 달성하지 못한 사업자는 당국과 부족분에 대한 벌칙 방안을 논의하는 중임.



[그림 10 고르곤 사업의 온실가스 배출 및 포집된 이산화탄소의 양(BoilingCold, 2021)<sup>15</sup>

## 2. Petra Nova CCS 사업

### 1) Petra Nova CCS 사업 개요

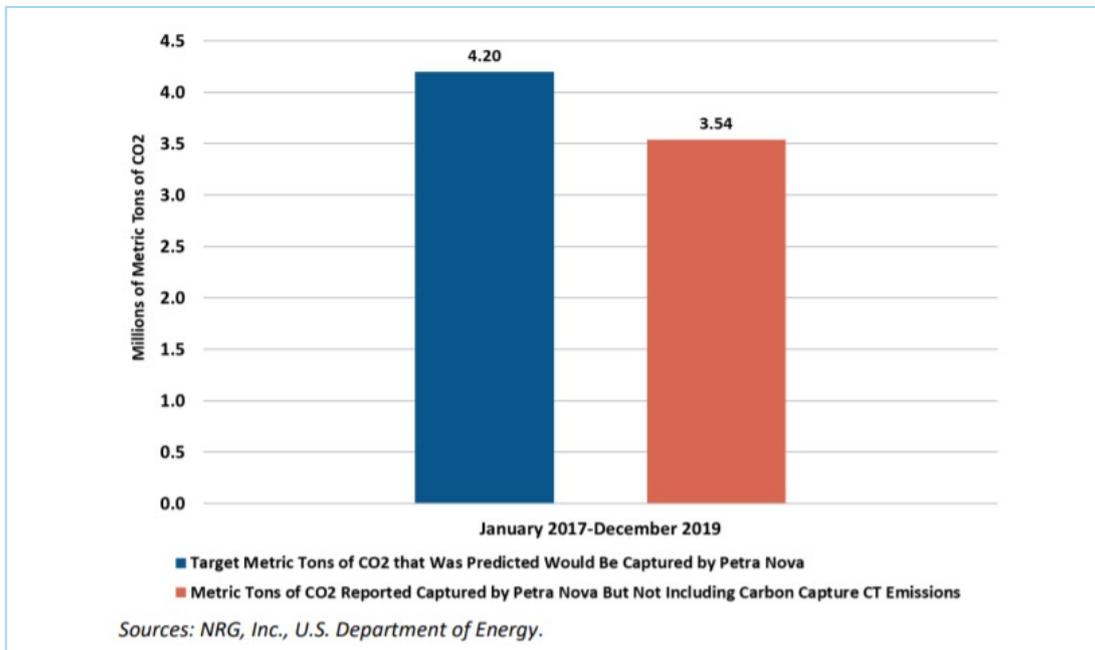
- 미국 텍사스 주 톰슨스(Thompsons) 소재 W.A. Parish 석탄화력발전소 CCS 사업
- 사업주 : NRG energy
- 610MW 석탄화력 1기에 240MW 규모 연도가스(flue gas) 포집 및 저장장치 설치
- CCUS 유형 : 원유회수증진(EOR) 기법
- 사업주 : NRG Energy(50%)  
JX Nippon Oil&Gas Exploration Corp(50%)
- 총 사업비 : USD 10억 달러 (미국 에너지부 USD 167 백만 달러 지원)
- 포집량 : 연간 1.4Mt CO2

<sup>15</sup> <https://www.boilingcold.com.au/times-up-on-gorgons-five-years-of-carbon-storage-failure/>

- Petra Nova CCS사업추진 일정
  - 2010      CCS 기본설계(FEED) 작업 시작
  - 2014. 07. 프로젝트 건설 개시
  - 2017. 01. 상업 운영 시작
  - 2019. 12. 누적 3.9Mt CO2 포집 완료
  - 2020. 05. 유가 하락으로 운영 중단.
  - 2021. 01. 무기한 운영 중단 선언

**2) Petra Nova CCS 사업 주요 내용 및 문제**

- Petra Nova CCS 사업은 미국 텍사스 주 소재 W.A. Parish 혼합 화력발전사업 단지 중 610MW 규모 8호기 석탄화력발전소에 240MW 규모의 포집 장치를 설치 후 이산화탄소를 포집해 130km 가량 떨어진 유전(West Ranch Oil Field)에 집어넣고 원유를 생산하는 원유회수증진(EOR) 형태의 CCUS 사업임.
- 막대한 자금이 사업에 투입되었으나, Petra Nova CCS를 통해 포집 가능한 이산화탄소는 W.A. Parish의 8호기 석탄화력발전소에서 배출되는 전체 온실가스의 33%에 불과했으며<sup>16</sup>, 그마저도 Petra Nova CCS가 3년간 운영되며 포집한 이산화탄소는 당초 목표의 84%에 그쳤음.<sup>17</sup>

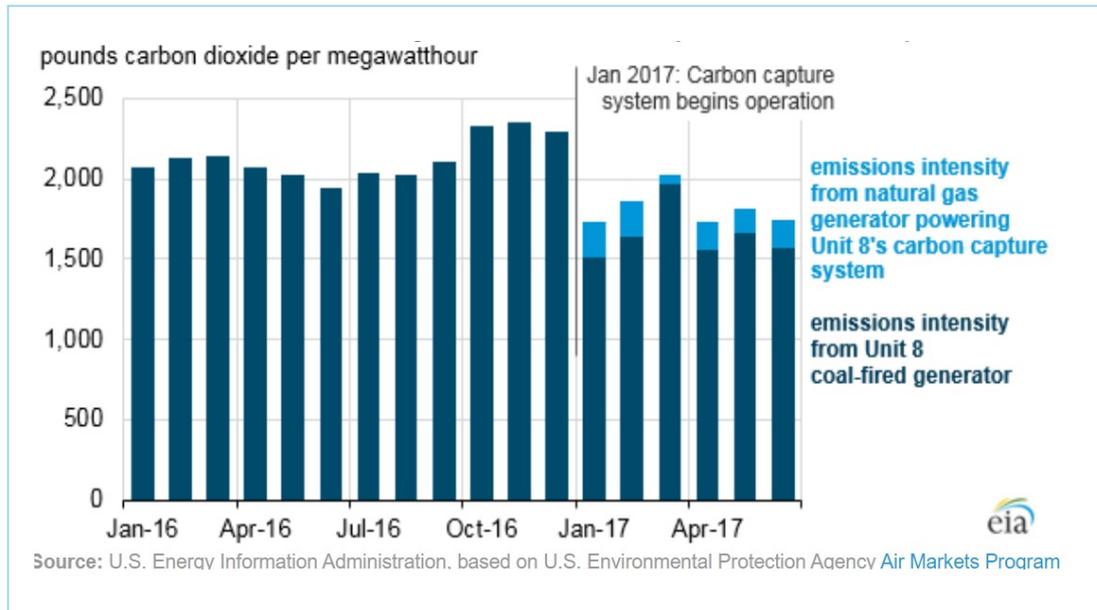


[그림 11] Petra Nova CCS의 목표 포집량 대비 실제 포집량(2017-2019)(IEEFA, 2020)

16 <https://www.nrg.com/case-studies/petra-nova.html>

17 [https://ieefa.org/wp-content/uploads/2020/08/Petra-Nova-Mothballing-Post-Mortem\\_August-2020.pdf](https://ieefa.org/wp-content/uploads/2020/08/Petra-Nova-Mothballing-Post-Mortem_August-2020.pdf)

- 특히 이산화탄소 포집 장치의 에너지 공급을 위해 천연가스 발전을 사용하였고, 이를 통해 배출되는 온실가스를 고려하면 Petra Nova CCS 사업으로 실질적으로 온실가스 감축 효과는 크지 않은 것으로 평가되었음.



[그림 12] Petra Nova CCS 설치 전후 W.A Parish 8호기의 온실가스 배출집약도(EIA, 2017) <sup>18</sup>

### 3. Boundary Dam CCS사업

#### 1) Boundary Dam 석탄화력 발전사업 및 CCS 사업 개요

- 824MW 규모 석탄화력발전소(1-6호기)
- 캐나다 사스카추완(Saskatchewan) 주 에스테반(Estevan) 소재
- 사업주 : SaskPower
- CCS 사업 : Boundary Dam 3호기(110MW) 성능개선 및 CCS 설치 사업  
전세계 최초 석탄화력발전 CCS 사업
- 유형 : 원유회수증진(EOR)
- 총 사업비 : CCS설비(USD 12 억 달러), 성능개선(USD 354 백만 달러)
- 포집량 : 연간 1Mt CO<sub>2</sub>(배출량의 90%)
- CCUS 유형 : 원유회수증진(EOR) 기법
- Boundary Dam CCS사업추진 일정

2010. 12. 3호기 성능개선 및 CCS 사업 최종 추진 결정

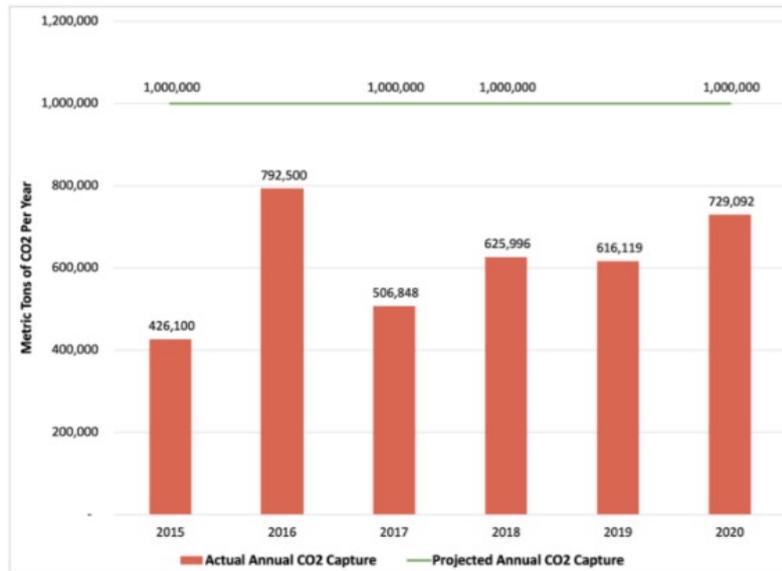
2014. 10. Boundary Dam CCS 상업운전 시작

<sup>18</sup> <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=33552>

- 2018. 07. 4, 5호기 CCS 추진 대신 폐쇄 결정
- 2018. 10. 당초 4Mt 누적 포집 목표 시기
- 2021. 03. 실제 누적 포집량 4Mt 달성일

**2) Boundary Dam CCS 사업 주요 내용 및 문제**

- 캐나다 정부는 1975년 이전 설치된 석탄화력발전소는 2020년까지, 그리고 2030년까지 모든 석탄화력발전소를 중단한다는 계획을 세우면서 이 때 CCS 설비가 부착된 석탄화력발전소는 예외 규정으로 둠.
- Boundary Dam CCS 사업은 Boundary Dam 석탄화력발전 단지 중 1968년 가동 시작해 2013년 폐쇄 예정이었던 3호기(139MW) 발전소를 110MW 출력으로 성능개선(retrofit)하면서 CCS설비를 부착하는 수명연장 사업임. 포집된 이산화탄소는 66km가량 떨어진 유전에서 원유회수증진(EOR) 사업에 활용됨.
- 하지만 2014년 가동이 시작된 후, Boundary Dam CCS 사업의 실제 연간 포집량은 목표 이산화탄소 포집량(1백만 톤)의 40-80% 수준에만 머무르고 있음. 결국 Boundary Dam CCS 운영 4년째였던 2018년 10월까지 달성하려 했던 누적 포집량 4백만 톤 목표를 2년 6개월이 지난 2021년 3월에야 달성.<sup>19</sup>



Source: SaskPower's Monthly Boundary Dam 3 Status Updates.

[그림 13] Boundary Dam 3호기 CCS의 목표 포집량 대비 실제 포집량(IEEFA, 2021)

- 사업주인 SaskPower측은 4, 5호기 석탄화력발전사업에 대해서도 CCS 사업으로 수명을 연장하려 했으나 지난 2018년 7월 경제성을 이유로 발전소의 폐쇄를 선택하였음.<sup>20</sup>

<sup>19</sup> [http://ieefa.org/wp-content/uploads/2021/04/Boundary-Dam-3-Coal-Plant-Achieves-CO2-Capture-Goal-Two-Years-Late\\_April-2021.pdf](http://ieefa.org/wp-content/uploads/2021/04/Boundary-Dam-3-Coal-Plant-Achieves-CO2-Capture-Goal-Two-Years-Late_April-2021.pdf)

<sup>20</sup> <https://www.cbc.ca/news/canada/saskatoon/saskpower-abandons-carbon-capture-at-boundary-dam-4-and-5-1.4739107>

### [별지 3] 현재 운영중인 CCS 사업 목록

\* EOR(Enhanced Oil recovery) : 이산화탄소를 저장해 원유를 추출하는 원유회수증진 사업

\*\* Dedicated : 포집된 이산화탄소를 지층 내에 저장하는 것을 목적으로 하는 CCS 사업

프로젝트명	유형	국가	가동시기	산업유형	저장용량(Mtpa)
Terrell Natural Gas processing Plant	EOR	USA	1972	Natural Gas processing	0.40
Enld fertilizer	EOR	USA	1982	Fertiliser production	0.20
Shute Creek Gas Processing Plant	EOR	USA	1986	Natural Gas processing	7.00
Sleipner CO2 Storage	Dedicated	Norway	1996	Natural Gas processing	1.00
Great Plains Synfuels Plant and Weyburn-Midale	EOR	USA	2000	Synthetic natural gas	3.00
Core Energy CO2-EOR	EOR	USA	2003	Natural Gas processing	0.35
Sinopec Zhongyuan CCUS	EOR	China	2006	Chemical production	0.12
Snøhvit CO2 Storage	Dedicated	Norway	2008	Natural Gas processing	0.70
Arkalon CO2 compression Facility	EOR	USA	2009	Ethanol production	0.29
Century Plant	EOR& Dedicated	USA	2010	Natural Gas processing	5.00
Bonanza BloEnergy CCUS EOR	EOR	USA	2012	Ethanol production	0.10
PCS Nitrogen	EOR	USA	2013	Fertiliser production	0.30
Petrobras Santos Basin Pre-Salt Oil Field CCS	EOR	Brazil	2013	Natural Gas processing	4.60
Lost Cabin Gas Plant	EOR	USA	2013	Natural Gas processing	0.90

### [별지 3] 현재 운영중인 CCS 사업 목록

Coffeyville Gasification Plant	EOR	USA	2013	Fertiliser production	1.00
Air Products Steam Methane Reformer	EOR	USA	2013	hydrogen production	1.00
Boundary Dam Carbon Capture and Storage	EOR	Canada	2014	power generation	1.00
Uthmaniyah CO2-EOR	EOR	Saudi Arabia	2015	Natural Gas processing	0.80
Quest	Dedicated	Canada	2015	hydrogen production oil sands upgrading	1.20
Karamay Dunhua Oil Technology CCUS EOR	EOR	China	2015	chemical production methanol	0.10
Abu Dhabi CCS	EOR	UAE	2016	iron and steel production	0.80
Petranova CCS	EOR	USA	2017	power generation	1.40
Illinois industrial CCS	Dedicated	USA	2017	Ethanol production-ethanol plant	1.00
CNPC Jilin Oil field EOR	EOR	China	2018	Natural Gas processing	0.60
Gorgon CO2 injection	Dedicated	Australia	2019	Natural Gas processing	4.00
Qatar LNG CCS	Dedicated	Qatar	2019	Natural Gas processing	2.10
Alberta Carbon trunk line with Nutrien CO2 stream	EOR	Canada	2020	Fertiliser production	0.30
ACTL with North West Redwater Partnership's Sturgeon Refinery CO2 stream	EOR	Canada	2020	oil refining	1.40