

순산소 연소기술

CO₂ 포집기술은 크게 연소 후 포집(Post-Combustion Capture), 연소 중 포집기술인 순산소 연소(Oxy-Fuel Combustion) 및 연소 전 포집(Pre-Combustion)으로 구분되며, 이 글에서는 기존의 공기연소 대신에 산소만으로 연소하여 배가스 중의 수분을 응축 제거함으로써 CO₂를 포집하는 순산소 기술의 국내·외 개발현황 등을 소개한다.

김 성 철 한전 전력연구원 수화력발전연구소, 책임연구원

e-mail : sckim@kepri.re.kr

1992년 6월 브라질의 리우환경회의에서 지구온난화에 따른 이상기후 현상 예방을 목적으로 유엔 기후 변화 협약이 채택되어 국제적인 공동대응이 시작되었고, 1997년 12월 제3차 당사국 총회에서 교토의정서가 채택됨으로써 1차 이행기간인 2008년부터 2012년까지 1990년 대비 평균 5.2%의 온실가스를 감축하기로 결의한 바 있다. 우리나라는 이산화탄소 의무감축 당사국으로 지정되지 않아 1차 공약기간 동안은 개도국의 지위를 유지할 수 있으나, 2차 공약기간이 시작하는 2013년에는 OECD 회원국이면서 온실가스 배출량이 세계 9위이고 세계13위의 경제규모를 가진 우리나라도 온실가스 배출 감축에 대한 압력을 받을 것으로 예견되었고, 지난 2009년 11월 17일 BAU(별도의 감축노력 없을 경우의 온실가스 배출량) 대비 30% 감축한다는 안을 확정하였으며 이것은 2005년과 대비하여 4%의 온실가스를 감축하는 수준이다. 이와 같은 목표달성을 위한 감축 수단으로 정부는 전기차, 연료전지차등 크린카 보급과 최첨단 고효율제품 확대보급 및 CCS(Carbon Capture & Storage)기술 도입을 강화하는 감축수단을 제시한 바 있으며, 이를 통해 정부는 국제적으로 기후변화에 대응하는 우리나라 정부의 적극적인 의지를 표명한 바 있다. IEA에서는 발전 및 산업분야에 CCS 기술을 적용함으로써 전체 이산화탄소 감축을 약 19% 달성 가능 할 것으로 예상하였다.

국내에서 발생하는 이산화탄소 총 배출의 약 25%가 석탄화력 발전에서 기인하고 있어, 발전분야에서의 이산화탄소 배출저감은 국가적인 차원에서 초점이 맞추어질 것으로 전망된다. 온실가스의 배출을 저감하기 위한 기본 방향은 IPCC Working Group 3에서 다루고 있는데, Working Group 3은 2007년 5월 SPM(Summary for Policymakers)를 발표한 바가 있다. 핵심적인 내용은 기후변화에 의한 중대한 위험을 피하기 위해서는 대기의 온실가스 농도를 445~650ppm 사이에서 안정화 시킬 필요가 있으며, 개발도상국의 경제개발에 의한 압력으로 안정화하고자 하는 온실가스의 저위 농도한계는 올라갈 것이라는 점이다. 또한 대기 중 온실가스의 농도를 445~535ppm 사이에 안정화시키기 위해서는 전 세계 GDP의 약 3%의 비용이 소요될 것으로 예측하고 있다.

대용량의 CO₂ 배출원에 적용하기 유리한 CO₂의 포집, 저장(CCS: CO₂ Capture and Storage)은 CCS의 비용에 대한 부담이 걸림돌로 작용하고 있다. 그럼에도 불구하고 비교적 짧은 기간에 대용량의 CO₂ 배출을 저감하기 위해서는 에너지산업분야와 같은 대규모 CO₂ 배출원에 대한 CCS의 적용이 시급한 과제로 인식되고 있다. 구체적이고, 효과적인 온실가스 배출을 저감하기 위해서는 온실가스의 배출량을 먼저 검토해 볼 필요가 있다. 그림 1은 범지구적 온실가스 배출량의

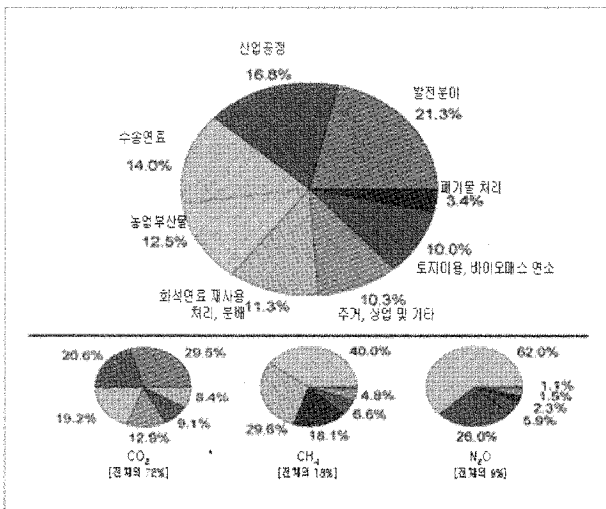


그림 1 온실가스의 지구적 배출량 구성

구성을 보여주고 있다. 온실가스별로는 CO₂(72%), CH₄(18%) 및 N₂O(9%)의 구성을 보여주고 있으며(모두 CO₂ 상당량으로 전환되었음), 각 온실가스의 산업별 배출량 구성을 보여주고 있다. 현재 전 세계적으로는 약 260억 톤의 온실가스가 배출되고 있으며, 약 110억 톤 정도만이 자연적으로 재순환될 수 있어서 배출되는 온실가스의 50% 이상이 대기에 축적되고 있다.

전력분야의 CO₂ 배출 저감 방안

전력부문은 온실가스인 CO₂의 최대 배출원이며, 우리나라에서는 2004년 기준으로 연간 5.9억 톤에 상당하는 온실가스를 배출하였으며, 이 가운데 5.1억 톤 가량이 CO₂로 배출되었다. 전력분야에서 배출되는 CO₂는 연간 1.5억 톤 수준으로 화석연료로 사용하는 화력발전소에서 배출되고 있다. 연료별 CO₂ 배출량은 석탄화력이 절대적으로 우세하여 전체 발전회사들의 CO₂ 배출량이 약 78%를 차지하는 1.15억 톤으로서 50여기의 석탄 화력발전소에서 배출되고 있는 실정이다.

전력분야의 CO₂ 포집기술은 그림 2와 같이 크게 연소 후 포집(Post-Combustion Capture), 연소 중 포집 기술인 순산소연소(Oxy-Fuel Combustion) 및 연소 전 포집(Pre-Combustion)으로 구분될 수 있으며, 순산소 연소기술은 대부분의 화력발전소에 용이하게 적용이 가능한 기술이다. 이 글에서는 2020년 이전에 상용화의 가능성이 높은 순산소 석탄화력 CO₂ 포집 기술을 소개하고자 한다. 이 기술은 대체로 10~12%의 발전효율의 감소를 초래할 수 있는 것으로 알려져 있다. 현재의 CO₂ 포집기술 중 연소 중 CO₂ 포집기술인 순산소 연소기술에 관한 기술특성과 기술 개발 현황 및 향후 개발해야 할 CO₂ 포집과제를 이 글에서 소개하고자 한다.

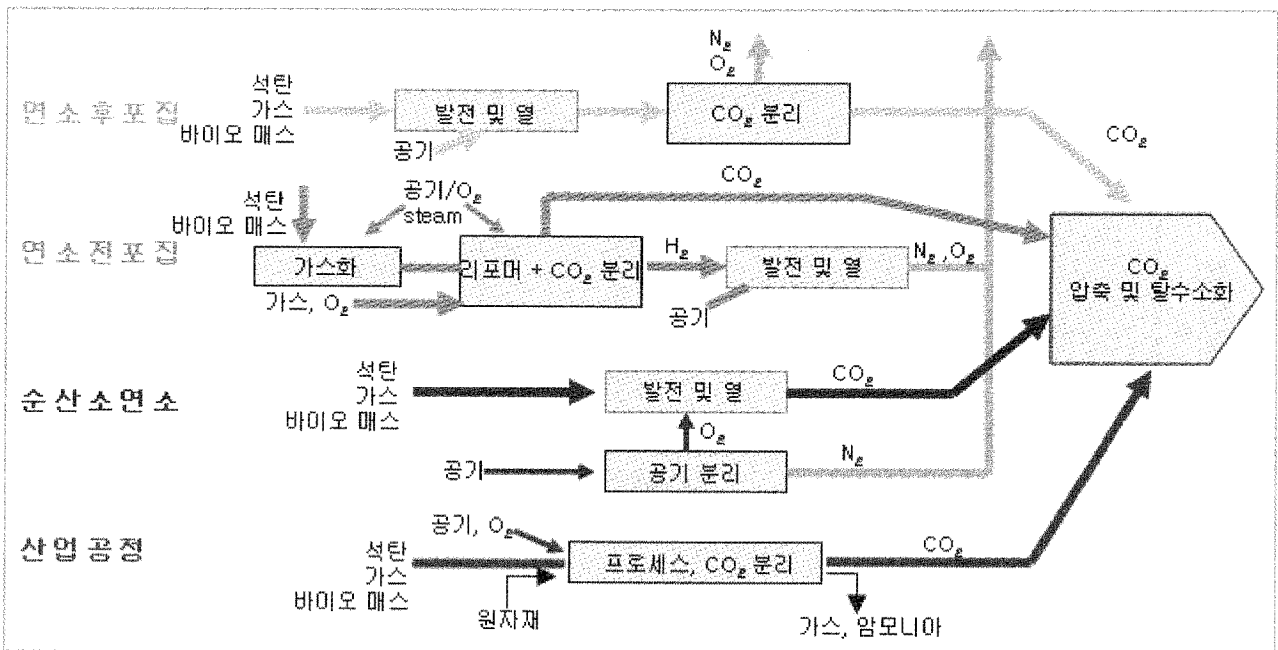


그림 2 CO₂ 포집기술 개념

순산소 연소기술 원리

공기 중의 질소 및 다른 성분을 제거하지 않고 보일러에 주입하는 기존의 공기연소 방식과는 달리, 공기 중에 약 79%를 점하는 질소분을 제거한 후 순산소를 기존의 연소용 공기 대신 주입하여 보일러에서 연소시킨 후 CO₂ 포집을 쉽게 하는 기술이 순산소 연소기술이다. 순산소 연소기술이 석탄화력발전에 적용되는

개념은 그림 3에 제시되어 있다. 순산소 연소를 채택하여 CO₂를 포집하는 기술에서는 먼저 석탄화력 발전설비에서 산화제인 공기 대신에 순도 95% 이상의 고농도 산소를 이용하여 미분탄을 연소시켜 열을 발생시킨다. 순산소 연소를 통해서 발생하는 배가스의 대부분은 CO₂와 수증기로 구성되어 있으며, 발생한 배가스의 약 70~80%를 다시 보일러로 재순환시켜 기존 공기 연소시의 열적 특성에 적절한 연소가 가능하도록 통합시킴

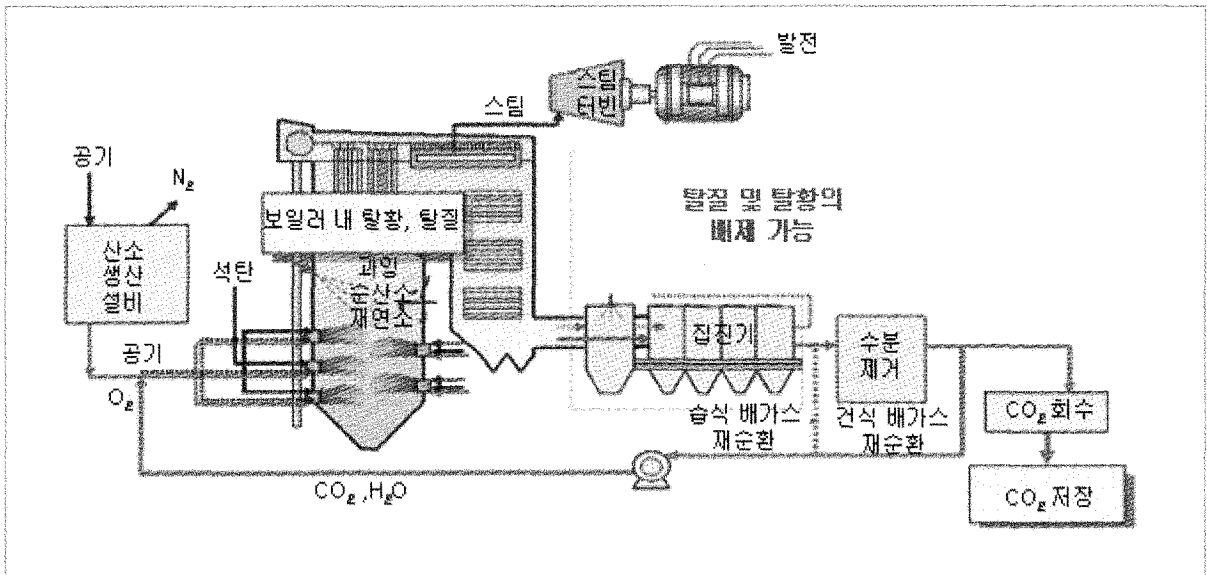


그림 3 순산소 연소기술 개념도

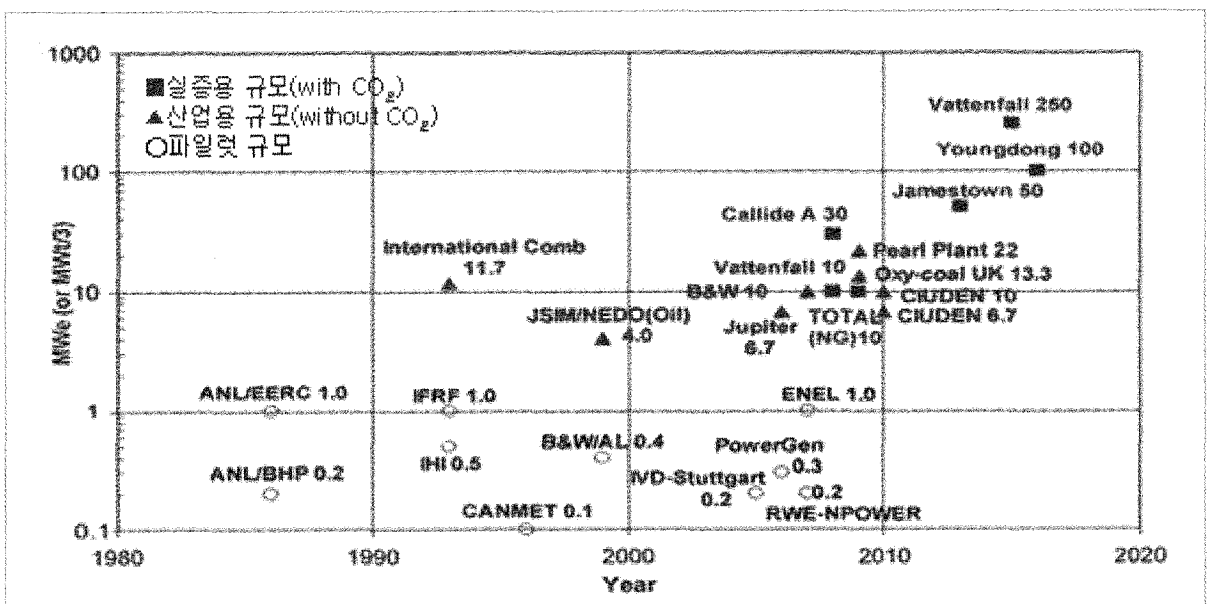


그림 4 순산소 연소 기술개발 동향

과 동시에 배가스의 주성분 가운데 수증기를 응축시킬 경우 CO₂ 농도를 80% 이상으로 농축된다. 따라서 배출되는 배가스 거의 전량을 CO₂로 포집할 수 있으며, 포집된 CO₂를 저장시켜서 CO₂ 무배출을 구현하는 기술이다.

순산소 연소 기술개발 동향

국외기술 개발 동향

순산소 연소기술 개발은 유럽과 일본을 중심으로 이루어지고 있고, 이들 나라를 중심으로 현재까지 알려진 국외 순산소 연소 석탄화력 발전기술과 관련된 연구개발 및 실증 동향을 연도별, 용량별로 그림 4에 요약하였다. 순산소 연소기술 연구는 1980년대 말 미국의 Argonne National Laboratories에서 최초로 시작되었으며, 1990년대에 들어서 유럽의 IFRF (International Flame Research Foundation)와 MBEL이 주축이 된 EU 컨소시엄, 캐나다의 CANMET 및 NEDO의 지원을 받은 일본의 J-Power, IHI 컨소시엄이 연구개발을 수행한 바가 있다. 주로 0.3MW에서 3MW 규모의 석탄보일러에서 순산소 연소에 의한 화염 및 보일러의 열적, 환경적 특성 등에 대한 연구가 수행되었다. 2000년대 들어서면서 순산소 연소기술은 연구개발의 수준을 넘어서 30MW급 파일럿 규모의 실증사업이 착수되기 시작하였고, 가장 대표적인 파일럿 규모 사업이 독일의 Vattenfall에서 추진하는 30MWth 규모 실증사업과 일본-호주가 공동으로 추진 중인 30MWe 규모 사업이다.

일본의 J-Power, IHI와 호주의 CS-Energy

로 구성된 일본-호주 컨소시엄은 호주 Queensland에 위치한 CS-Energy 사의 Callide A(4호기)를 순산소 연소 보일러로 개조(Retrofit)하고 있다. 반면 독일의 Vattenfall은 석탄화력발전소의 개조는 상대적으로 효율이 낮을 뿐만 아니라, 설비개조에 소요되는 비용이 비싸므로, 신규 발전설비를 대상으로 순산소 연소기술을 도입하려는 접근방법을 시도하고 있다. 독일의 Vattenfall은 2020년 상용화를 목표로 순산소 연소 석탄화력발전 기술을 실증할 목표를 세우고 있다. 2006년 독일의 메르켈 수상이 참석한 가운데 착공한 30MWth급의 파일럿 규모의 설비가 2008년 9월부터 시운전을 시작하였으며 관련된 연구가 2011년에 종료되면 2015년까지 300MWth급의 실증 플랜트를 건설할 예정이다.

이와 같은 2단계의 실증사업을 통해서 2020년에는 1,000MWth급의 순산소 석탄화력발전소를 건설하여 CCS기술의 상용화에 진입하는 것을 목표로 하고 있다. 표 1은 국외에서 진행 중인 대표적인 순산소 파일럿 사업 현황이다.

국내 기술개발 현황

순산소 연소기술은 가열로 등 산업용 연소로 분야에 적용될 수 있는 고전적인 고온 순산소 연소기술과 이산화탄소 포집을 목적으로 하는 석탄화력 발전에 적용될 수 있는 배가스 재순환형 순산소 연소기술로 구분될 수 있다.

고온 순산소 연소기술과 관련된 중요한 연구개발동향은 과학기술부에서 지원하는 21세기 Frontier 연구개발사업단인 '이산화탄소저감 및 처리기술개발사업단' (CDRS : Carbon Dioxide Reduction and Sequestration R&D Center)에서 지원하고 있는 고온 순산소 가열로 기술과제이다. 철강업계 등에 적용을 목적으로 100톤/일 연속식 가열로를 개발하기 위한 연구개발사업이 수행되었으며, 이를 위해서 저 NO_x 순산소 연소기술, PSA (Pressure Swing Adsorption)

표 1 1 순산소연소 CO₂ 포집기술 파일럿 사업

Project (국가) / Site	주관전력사/설비사	규모/시기	비고
Vattenfall (스웨덴)/Schwarze-Pumpe (독일)	Vattenfall/Alstom	30MWth : 2008 300MWth : 2015 1000MWth : 2020	신규 건설
CS-Energy-IHI (호주, 일본)/Callide-A (호주)	CS-Energy (호)/J-Power (일), IHI(일)	30MWe : 2011	개조
Jupiter Oxygen (미국)/Orrville Utility (미국)	Orrville Utility/Doosan-Babcock	25MWe : 2008	개조

기술기반 소규모 산소 생산기술 및 순산소 연소 철강 가열로 개발에 대한 R&D가 2002년부터 수행된 바 있다. 한국전력공사 전력연구원에서는 실증규모의 순산소 연소 석탄화력발전소의 개념설계 및 시스템 최적화를 위하여 2007년 10월부터 지식경제부의 에너지·자원 기술개발사업으로 '청정화력발전기술과 연계한 온실가스 처리시스템 구축' 연구개발 프로젝트를 수행 중에 있으며, 총 8년간 3단계에 걸쳐 수행예정인 프로젝트에서는 순산소 연소플랜트의 설계 평가 및 최적 운용 기술을 개발하여 국내 최초로 대용량 순산소 발전시스템을 실증화 할 계획이다.

순산소 CO₂ 포집기술의 과제

현재 기술로 석탄화력발전에서 CO₂ 포집을 적용할 경우 연소 전·중·후의 모든 기술이 전력생산량의 약 1/4~1/5 정도의 손실이 발생할 것으로 예측되고 있다. 따라서 CO₂ 포집비용 및 전력생산설비의 추가건설을 최소화하기 위한 기술 개발이 차세대 CO₂포집기술의 핵심이며, 순산소 연소기술에서는 현재 약 10% 이상의 발전효율 감소를 유발하고 있으나, 차세대 순산소 CO₂포집기술은 약 2~4%의 발전효율 감소를 목표로 하고 있다. 이와 같은 차세대 CO₂ 포집기술이 초초 임계압과 같은 고효율 석탄화력 발전설비와 연계될 경우 송전단의 발전효율 40% 이상을 구현할 수 있을 것으로 예측할 수 있다. 차세대 순산소 CO₂ 포집기술에서 가장 중요한 역할을 수행할 수 있는 기술이 분리막 기술이다. CO₂ 포집기술에 적용될 수 있는 분리막 기술로는 산소생산을 위한 Oxygen Ion Transfer Membrane(ITM 또는 OTM), IGCC의 Water-Gas Shift 반응 및 CO₂ 분리에 적용될 수 있는 Membrane Reactor 등도 포함될 수 있을 것이다.

CO₂포집용 Membrane 기술 가운데에서 상용화에 가장 근접한 기술이 OTM 산소생산기술이다. OTM 산소생산은 기존의 심냉식 공기분리기술을 이용한 ASU(Air Separation Unit)보다 설비비 및 생산비를 약 50% 이상 줄일 수 있을 것으로 예측되고 있으며, 순산소 석탄화력 및 IGCC에 모두 적용될 수 있다. 그

러나 현재 OTM에 의한 산소생산 기술의 수준은 약 5톤/일의 실험실 규모에 머물고 있어서 발전설비 적용을 위한 최소 2,000톤/일로 스케일 업이 필요한 상황이다. 일반적으로 Membrane 기술은 파급효과가 매우 크지만 기술적 난이도도 그에 상응하게 높아서 가까운 장래에 CO₂ 포집공정에 적용될 수 있을지의 여부는 아직 불투명하다고 할 수 있다.

맺음말

지금까지 연소 중 CO₂ 포집기술인 순산소 연소 기술의 개요를 간단하게 요약하여 소개하였다. 이 글에서 강조하고자 하는 바는 기후변화에 대한 올바른 대응을 위해서는 산업사회의 에너지 공급 및 소비 형태를 근본적으로 바꾸는 매우 광범위하고 심도 높은 사회의 구조를 개혁하는 작업을 동반하여야 하며, 이러한 노력이 제대로 된 결실을 맺기 위해서는 에너지의 공급과 소비 그리고 온실가스 배출원의 특성을 제대로 고려한 전략적인 방법이 도입되어야 한다. 특히 전력산업분야에서 경쟁력이 있는 CCS기술을 확보할 경우, 해외 발전설비 시장의 진출을 통해서 CO₂ 배출저감 비용의 상당부분을 회수할 수 있을 것이며, 이산화탄소 포집 기술을 겸비한 발전설비를 수출함으로써 양질의 고용기회를 창출함과 동시에 국가 성장 동력화 및 계층적 균형발전에 기여할 수 있는 기술이다. 이와 같은 관점에서 전력분야 특히 석탄화력 발전분야에 대한 CCS기술 중에서 순산소 기술의 개발은 녹색성장을 위한 전략적인 과제로 정부의 지속적인 예산 및 정책적 지원이 요구된다. 또 다른 대규모 CO₂ 배출원인 제철산업 및 석유화학산업은 배출원의 규모 및 종류에 있어서 다양하게 분포되어 있는 특징이 있으므로, 경제적으로 적용이 가능한 CO₂ 포집기술은 높은 단계의 기술적 통합이 요구되고 있으며, CO₂ 포집기술의 실용화를 앞당기기 위해서는 범정부 차원의 지원 또한 필요하고, 또 실증설비 기업에게는 세계상의 혜택 또는 초기 설치비 지원 등 제도적 지원이 집중적으로 이뤄질 때 순산소 기술에 의한 CO₂ 포집 기술개발은 앞당겨질 것으로 기대된다.