

21세기 유망 환경기술의 개발동향과 전망<2>

기초학/ 이학박사 · 현대환경연구소 수석연구원

목 차

- | | | | |
|--------------|--------------|-------------|---------------|
| 1. 서론 | 2. VOCs 제거기술 | 3. NOx 제거기술 | 4. 이산화탄소 저감기술 |
| 5. 다이옥신 제거기술 | 6. 가스 용해기술 | 7. 기타 유망기술 | 8. 결론 |

3. NOx 제거기술

NOx(질소산화물)는 산업현장에서 연료를 연소하는 공정이나 자동차와 같은 이동배출원으로부터 배출되는 대표적인 대기오염물질의 하나로서 광화학오염을 일으키는 주요인이 되며, 천식 같은 호흡기계통의 장애를 일으키는 원인이 되는 것으로 알려져 있다.

또한, NOx는 SOx와 함께 산성비의 원인물질로 추정되고 있기 때문에 선진국가를 중심으로 1960년대부터 배기가스 규제기준을 마련해 적용하고 있다. 특히, 일본의 경우에는 고정발생원에 적용한 엄격한 규제로 인해 배연탈질설비의 기술력이 뛰어나 현재 제거능력을 85% 정도까지 높은 기술이 상용화 되고 있다.

환경규제를 통해 고정오염원을 꾸준히 관리하여 왔음에도 불구하고 대기 중의 NOx 농도는 거의 일정한 상태를 유지하면서 개선되는 경향을 보이지 않고 있다. 이러한 이유 중의 하나로서 자동차를 비롯한 이동발생원으로부터의 NOx 배출량 증가가 지적되고 있으며, 최근 들어서는 미국 캘리포니아주의 「ULEV」¹⁾나 유럽의 「유로Ⅲ」²⁾와 같

이 자동차 배기가스에 대한 규제를 한층 더 강화하는 추세이다.

(1) 기술개발 동향

연소에 의해 생성되는 NOx는 연료 중의 질소성분이 연소함에 따라 생성되는 fuel NOx와 공기에 포함된 질소(N₂)가 고온에서 산화되어 생성되는 thermal NOx로 분류된다. Fuel NOx의 생성을 억제하기 위해서는 연료로부터 질소성분을 제거하고 유기질소화합물의 함유율이 낮은 연료를 사용해야 한다.

그리고 고정발생원에는 후단에 NOx 제거설비를 장착해 제거해야 한다. 한편, thermal NOx를 억제하는 방법으로는, 연소구역에서 산소 농도를 낮게 유지하는 것, 고온구역에서 연소가스 체류시간을 단축하는 것, 연소온도를 낮게 하고 특히 국소적으로 생성되는 고온영역을 없애는 것 등이 고려되고 있으며, 이를 위한 대처기술로 2단연소법이나 저NOx버너 등이 개발되고 있다. 그러나, 이러한 방법들에 의해서도 thermal NOx를 완전하게 제거하는 것은 불가능하므로 최종적으로는 연소 배기가스로부터

1) Ultra Low Emission Vehicle의 약자로서 초저공해차를 의미하고 미국 캘리포니아주의 ULEV 배출기준은 탄화수소 0.04 g/mile, 일산화탄소 1.7 g/mile, 질소산화물 0.2 g/mile 등임

2) 2000년부터 적용되는 유럽의 자동차 배출가스 규제안으로서 기준은 탄화수소 0.2 g/mile, 일산화탄소 2.3 g/mile, 질소산화물 0.15 g/mile 등임

NOx를 제거해야 한다.

배기가스 중의 NOx를 제거하기 위해서 고정발생원에 서는 암모니아를 환원제로 하는 선택적촉환원법이, 이동 발생원인 자동차의 경우에는 3원촉매가 주로 이용되고 있다. 그러나, 암모니아에 의한 선택적촉환원법은 설비에 상당한 비용이 소요되기 때문에 대부분의 개발도상국가에서 배연탈질설비 수요는 크지 않다.

이러한 기술들 외에 전자빔이나 저온플라즈마를 이용해, 발생한 NOx를 분해·제거하는 기술이나 광촉매를 이용해 대기 중에 방출된 NOx를 제거하는 기술개발 등이 진행되고 있다 <표 6>.

<표 6> 주요 NOx 제거기술

분류	대책 기술
연소시 발생억제	<ul style="list-style-type: none"> • 2단연소방식 • 농담(농도가 진하고 묽음)분리 버너 • 자기재순환형 버너 • 분할화염형 버너 • 연료로내 직접분사 • 고온공기연소 • 완전예비혼합방식 • 매체순환형 연소시스템
배연탈질	<ul style="list-style-type: none"> • 암모니아 접촉산화법 • 전자 beam 법 • 저온 플라즈마 분해 • 미세조류 이용
자동차 배기가스 대책	<ul style="list-style-type: none"> • 2단연소 • 배가스재순환 • 신축매 • 전해제거법
대기 중 NOx 제거	<ul style="list-style-type: none"> • 광촉매

가. 연소제어에 의한 NOx 발생억제

연소과정에서 발생하는 NOx의 경우에는, 연소시 온도를 낮게 제어하거나 연소시의 산소량을 적게 제어하는 등 두 가지로 접근하여 기술개발을 진행하고 있다. 연소시의 온도를 낮추는 방법으로는 화염과 공기가 접하는 표면적을 넓힌 분할화염형버너를 이용하거나 완전예비 혼합방식 등이 있고, 연소시의 산소량을 적게 하는 방법으로는 고온 공기 연소, 재연소 방식, 완전예비 혼합방식, 자기 재순환형 버너 등을 들 수 있다<표 7>.

<표 7> 연소제어에 의한 고정발생원 NOx 제거기술

기술방식	저온연소	저산소연소	개요
분할화염형 버너	○		네 개의 노즐로부터 화염을 방출함으로써 화염이 공기와 접촉하는 표면적을 넓혀 저온에서 연소시키는 기술
농담분리 버너		○	화염의 농도가 높고 낮은 것을 분리하여 연소할 수 있는 버너를 사용함으로써 공기비를 크게 하여 산소량을 저감시키는 기술
자기재순환형 버너	○	○	보일러 내에서 연소된 후의 공기를 재차 버너에 흡입하여 연소하는 기술로서 연소한 공기는 산소농도가 낮고 저온에서 연소
재연소방식		○	석탄연소로의 상단에 천연가스를 공급하는 재연소로를 설치하고 산소 부족상태를 유지하여 연소로에서 배출된 NOx의 산소분자와 천연가스가 결합할 수 있도록 재연소함으로써 질소만 배출되게 하는 기술
고온공기연소		○	공업로나 보일러 안으로 1000℃ 이상의 고온 공기를 고속으로 보내어 그 기류 안에 연료를 투입하는 기술로서 공기에 약 25% 포함되어 있는 산소량을 10% 이하로 감소시켜 연소함으로써 NOx의 발생을 저감
완전예비 혼합방식	○	○	순간적으로 공기뿐만 연소시켜 산소의 공급량을 최소화하는 기술로서 불꽃을 작게 함과 동시에 불꽃의 온도를 1300℃로 낮추고, 2차공기를 이용하지 않는 특성을 보이며 산소의 공급량을 더욱 줄이면 배출가스의 NOx도 비례해서 감소

한편, 이들과는 전혀 다른 접근방법으로 저공해형 연소 시스템을 실현하고자 하는 매체순환형 연소시스템에 대한 연구도 진행되고 있다. 매체순환형 연소시스템은 1980년대에 독일에서 실용화 가능성을 보여준 신연소 시스템으로서 연소반응을 산화공정과 환원공정의 두 가지로 분리한 뒤 금속입자를 순환시킨다.

산화공정에는 공기를, 환원공정에는 연료를 투입함으로써 산화공정에 유입된 금속을 금속산화물로 산화시키고 이를 다시 환원공정으로 보내 연료를 이용하여 금속으로 환원시키는 방식이다. 공기와 연료를 혼합시키지 않기에 연료를 태울 때 금속산화물이 환원되면서 배기가스

중의 오염원을 물과 이산화탄소로 분해해 배출하므로 기타 다른 유해물질이 배출되지 않는다. 또한 배기가스를 냉각하는 것만으로도 이산화탄소를 회수할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 이 시스템의 성공 여부는 효율성 높은 금속입자의 개발에 달려 있으며, 이러한 금속입자의 개발에 관심이 집중되고 있다.

나. 자동차 배기가스 대책기술

자동차 배기가스 중의 NOx를 저감하는 기술은 제거효율이 높은 촉매의 개발에 집중되고 있다. 이와 함께 지구온난화 문제를 해결하기 위한 방안으로 자동차의 연비 향상이 큰 과제가 되고 있다. 단기적으로는 공기가 과잉으로 유입된 상태에서 연료를 연소시키는 「린번」방식이 주요하게 적용될 것으로 보이며, 이에 따라 「린번」연소방식에 적절한 촉매도 개발되었다.

또한, 엔진 시동시 낮은 온도에서도 반응을 시작하는 촉매의 개발이 진행되어 왔으며, 점차 실용화 되기 시작하고 있다. 새로운 가능성을 가진 기술로는 산화세륨계 세라믹과 3원기능 촉매를 결합하여 고체 전해질형 반응기를 구성하고 여기에 전류를 흐르게 하는 방식이 개발되고 있다.

이 방식에서는 배기가스 중의 NOx가 제거되는 것과 동시에 수증기가 전기분해 되면서 발생한 수소가 추가로 NOx를 질소로 환원시키는 현상도 확인되었으며, 이 두 가지 효과로 거의 100%에 가까운 NOx 제거를 실현할 수 있는 가능성을 갖는다고 말하고 있다.

다. 배기가스처리 관련 신기술

종래에 적용되고 있는 암모니아 접촉환원법 이외에 개발되고 있는 새로운 배기가스 NOx 처리기술로는 전자빔(Electron Beam)을 이용하는 기술, 미세 해초류를 이용하는 기술, 저온 플라즈마를 이용하는 기술 등이 있다.

전자빔 배기가스 처리기술은 전자빔을 배기가스에 조사하여 SOx, NOx를 황산암모니아와 질산암모니아로 변환시키는 기술로서 현재 주로 이용되고 있는 습식탈황과 건

식탈황배연 처리기술에 비하여 폐수처리가 필요 없고 탈황 탈질도 동시에 이루어지며 부산물을 질소비료로 이용할 수 있는 장점을 갖고 있다. 이밖에도 운영비용을 기존 설비에 비해 10~20% 절감할 수 있다. 현재 기술개발 단계를 넘어 상용화 단계에 이르고 있다.

방전 플라즈마를 활용하여 고에너지의 전자를 배기가스에 조사하여 NOx를 거의 완전히 분해하는 특성을 갖는 기술로서 저온 플라즈마 처리기술이 개발되고 있다. 전극의 한쪽 방향은 슬형태로 하고 반대방향에는 rod 전극에 유전체로서 소다유리를 부착한다. 대기압 상태에서 공기 플라즈마를 발생시키면서 질소산화물이 함유된 배기가스를 유입하여 처리를 하는데 가스의 분해율이 매우 높은 특성을 보인다. 현재 기초연구단계를 넘어 상용화를 위한 연구과정에 있다.

생물이용 배기가스 처리기술은 미세조류(해초류)를 배양하는 시스템으로 개발된 수직형의 반응기에다 조류를 배양한다. 조류의 활동을 배가하기 위해 백색광을 조사하고 배기가스를 반응기에 통과시킬 때, 조류가 배기가스 중의 NOx를 광합성에 활용도록 해 NOx를 제거하는 방식이다. 아직은 기초연구단계에 머무르고 있으나 설비비 및 운영비용을 혁신적으로 낮출 수 있기 때문에 주목을 받고 있다.

(2) 향후 전망

산성화 및 광화학오염의 주요인인 NOx를 저감하기 위해 지금까지 수행된 NOx 대책은 규모가 큰 고정발생원을 대상으로 배연탈질설비를 장착하는 방식이었다. 그러나, 고정발생원 대책 중심의 정책으로는 NOx 농도의 개선효과가 크게 나타나지 않고 있는 상황을 고려할 때 향후에는 이동발생원(가솔린차, 디젤차, 선박 등)에 대한 규제가 강화될 것으로 예상된다. 그러므로 이동발생원에 설치가 가능하도록 설비를 콤팩트하게 디자인 하는 것이 필요하다. 또한 이동발생원의 경우 환경규제를 만족할 수 없다면 제품의 판매가 거의 불가능해지므로 이를 위한 적절한 환경기술 개발의 중요성은 크게 증대될 것

로 보인다.

또한, 고정발생원에 적용 가능한 배연탈질설비를 위한 고효율 촉매개발을 위한 경쟁과 연소상황에 따른 최적연소제어기술의 개발을 위한 노력들이 계속 진행될 것이다.

4. 이산화탄소 저감기술

지구온난화 문제에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데 1997년 12월에는 교토에서 기후변화협약 3차 당사국회의가 개최되었고, EU 8%, 미국 7%, 일본 6% 등 온실효과를 일으키는 이산화탄소, 메탄, 염화불화탄소류 등의 가스 감축율을 정한 의정서가 채택되었다.

지구온난화 문제는 일상의 국민생활, 경제활동으로부터 불가피하게 발생하는 문제이다. 향후 인구증가와 에너지 소비증대, 선진국 생활형태로의 변화 등을 고려하면 더욱 심각해질 것으로 예상된다.

이러한 지구환경 문제 해결에는 전지구적인 규모의 대응이 요구되고 국제적 합의에 바탕한 세계 수준의 사회, 경제적인 정책 실행이 필요하다. 더불어 혁신적인 기술개발에 의한 방지기술의 도입도 불가결한 것으로 보인다.

(1) 기술개발 동향

탄소세의 도입이나 CO₂ 배출비율이 낮은 천연가스로 연료자원을 새로 바꾸는 등 정책면에서의 대책이 검토되는 한편, 기술면에서는 CO₂를 3,700 m 이상의 심해에 액체 상태로 투기하여 수용하는 화학공학적인 방법, 광합성을 촉진시켜 식물로 고정시키는 생화학적인 방법 그리고 수소화하여 유용한 화합물로 재생시키는 촉매화학적인 방법 등이 구체적으로 연구되고 있다.

에너지 사용에 따라 야기되는 CO₂ 배출을 억제하기 위해서는 첫째, 1차에너지 투입량을 가능한 한 줄여 나가는 것과 둘째, 투입되는 에너지의 종류를 가능한 한 CO₂ 배출량이 적은 에너지로 전환해 가는 것이 필요하다. 그 때문에 에너지 변환·이용효율을 높이는 에너지절약 방안의

추진과 함께 석유·석탄을 대신하는 대체에너지 기술과 이의 원활한 보급을 위한 기술개발이 요구된다. 그러나 현재 탄소성분이 적은 천연가스의 가용 자원량은 100조 m³에 지나지 않고, 만약 이로써 석탄을 대체하게 되면 천연가스 자원은 2015년경에는 고갈될 것으로 추정된다. 그러므로 이 방안에 의해서는 지구온난화 문제가 근본적으로 해결될 수 없다.

CO₂ 배출을 억제할 수 있는 또 하나의 방법으로서 발생한 CO₂를 회수하는 방법이 고려되고 있다. CO₂를 가역적으로 회수하는 기술은 비교적 용이한 기술이다. 그러나, 회수시스템을 적용할 때 최대의 문제점은 회수한 CO₂의 처리문제이다.

회수한 CO₂가 단기간에 환경으로 재방출되면 지구온난화 대책으로는 무의미한 것이 되므로 적어도 신에너지로의 전환기까지 반세기 정도는 보존할 수 있어야 한다. 이러한 이유로 향후 기대되는 기술로서는 CO₂ 회수, 고정, 이용기술을 꼽을 수 있다.

가. CO₂ 분리·회수기술

CO₂의 분리·회수 기술 중 화학흡수법, 물리흡수법, 흡착법, 막분리법, 산소연소법 등이 주요하게 추진되고 있는 CO₂ 기술부문이다.

화학흡수법은 CO₂를 상압, 30~50 °C에서 알칼리 아민 용액에 화학적으로 흡수시킨 뒤 흡수액을 100~120 °C로 가열하여 CO₂를 분리하는 기술이다. 이 방법은 상압조건 하에서 적용할 수 있고 대용량화가 비교적 용이하고 H₂S, CO 등 산성가스의 제거도 가능한 장점을 갖고 있다. 하지만 흡수액의 부식성이 높고 재생시 다량의 열에너지가 소요되며 산화물에 의해 흡수액이 노화되기 때문에 정밀탈황이 필요하다.

이밖에도 흡수액이 비교적 고가인 점도 단점에 포함되거나 천연가스 정제에 이미 적용되는 등 실용화 단계에 이르고 있다.

고압, 저온에서 메탄올과 폴리에틸렌글리콜 흡수액에 CO₂를 물리적으로 흡수(용해) 시킨 뒤 감압 가열에 의해

CO₂를 분리시켜, 흡수액을 재생하는 물리흡수법은 가압, 저온조건 하에서 CO₂를 흡수하는데 적합하다. 이는 비교적 용이하게 대용량화 할 수 있으며 H₂S, CO 등 산성가스의 제거도 가능하다. 또한 아민법에 비하여 소요 열량이 적고 흡수액의 부식성이 낮을 뿐만 아니라 황산화물에 의한 흡수액 노화현상 역시 느리게 진행되는 특징을 보인다.

흡착법은 제올라이트와 활성탄(분자 시브) 미세공의 선택흡착성을 이용하여 CO₂를 물리화학적으로 흡착시키는 기술이다. CO₂를 탈착시키는 방법에는 압력을 변화시키는 PSA(Pressure Swing Adsorption)법, 온도를 변화시키는 TSA(Temperature Swing Adsorption) 법 및 양쪽을 조합한 PTSA법이 있다. 흡착법의 특징으로는 조작, 보수가 용이하고 고순도 CO₂를 얻을 수 있고 이미 대용량을 요하는 실증플랜트에 적용된 사례가 적지 않은 것들을 들 수 있다. 하지만 회수율이 낮기 때문에 2단 이상으로 흡착해야 하며 탈황, 탈질, 탈수 등에 관한 전처리가 필요하다. TSA법의 경우에는 열전달에 시간이 많이 소요되기도 한다.

셀룰로스 아세테이트, 폴리술폰 등의 고분자막에 대해 CO₂의 용해확산 속도가 큰 것을 이용하여 CO₂를 선택적으로 분리하는 막분리법은 공정이 비교적 간단한 장점이 있으나 배기가스를, 상온에서 압력을 17~135 기압까지 높여 처리해야 한다.

그리고 아직 대용량에 적용한 사례가 적고 회수율이 낮기 때문에 2단 이상으로 공정을 확장해야 한다. 내구성도 막 재료에 따라 차이가 나고 분리막이 매우 비싼 것도 단점이 되고 있다. 불순물이 많이 함유된 배기가스를 처리할 수 있는 분리막 재료를 개발하기 위한 노력이 진행되고 있다.

산소연소법은 기존의 공기연소 대신 순산소를 이용하여 연소함으로써 배기가스로부터 고농도의 CO₂를 그대로 회수하는 방법이다. CO₂가 함유된 배기가스의 일부는 미분

탄반송용 가스 및 산소회석용 가스로 재순환하여 O₂/CO₂ 분위기에서 재연소시켜 CO₂의 농도를 높인다. 배기가스 내의 황산화합물 불순물의 영향을 고려할 필요가 없기 때문에 석탄을 연료로 하는 보일러에 적용 할 수 있고 용량을 비교적 용이하게 높일 수 있다. NO_x 발생량이 크게 줄어들고 2차연소에 의해 배기가스 배출량이 적어지므로 보일러의 효율이 향상되며 또한 배기가스량 저감으로 인해 보일러 배연처리설비를 소형화할 수 있고 처리동력의 저감도 가능한 특성을 보인다. 그렇지만 산소를 제조하는데 큰 동력이 필요하고 아직은 새로운 연소시스템이기 때문에 신뢰성 및 안전성에 대해서 보다 추가적인 검토가 필요한 상태이다.

나. CO₂ 저장기술

분리, 회수된 CO₂의 저장기술에는 해양처리 및 지중처리가 연구되고 있다. 해양처리는 해수에 고농도의 CO₂를 직접 방류하는 방법 혹은 드라이아이스로서 투기하는 방법, 수화물로서 투기하는 방법 등이 검토되고 있다. 또한, 지중처리는 기존의 가스전이나 유전에 CO₂를 가스상태로 압력을 가해 투입하는 방법이 연구되고 있다. 가능한 저장고 중에서 해양저장이 가장 용량이 크지만 단기간 내의 효용성은 가스전이나 유전이 더 뛰어난 것으로 알려지고 있다.

그러나 우리 나라의 경우에는 가스전이나 유정과 같은 저장고가 없는 상태이므로 저장능력이 1,400~27,000 GtC⁽³⁾에 이르는 해양투기나 90~2,700 GtC⁽³⁾으로 추정되는 대수층 저장방안을 고려할 필요가 있다. <표 8>.

최근에는 일본, 미국, 캐나다와 ABB 등이 주체가 되어 심해에 투기하는 방안이 구체화되고 있으며 올해에는 파일롯 플랜트가 하와이 근처 해안에 설치될 예정으로 있다. 하지만 이러한 저장기술들은 실용화에 이르기까지에는 상당한 시간이 필요할 것이다.

(주)3 : Giga Ton Carbon의 약자로서 탄소량 기준으로 10억톤을 의미

〈표 8〉 이산화탄소 저장고별 저장능력

저장소	저장능력(GtC)	인간의 활동에 의한 연간 CO ₂ 배출량(GtC/y)
심해	1,400-27,000	5.6 - 8.6
대수층	90-2,700	
채굴 끝난 가스전	140-300	
채굴 끝난 유정	40-200	

자료 : IPCC, 1996; Freund, 1998

다. CO₂ 유효이용기술

분리, 회수된 CO₂를 저장하지 않고 자원으로써 유효하게 이용하는 방법도 연구되고 있다. 〈표 9〉에 연구 중에 있는 유효이용방법을 나타내었지만 대부분 기초연구단계에 머물고 있으며 처리 가능량이 제한되어 있기 때문에 실제 CO₂를 저장하는 효과는 크지 않을 것으로 보인다. 하지만 폐기물을 새로운 자원으로 재이용한다는 측면에서는 바람직한 방안으로 평가된다.

(2) 향후 전망

CO₂를 저장하는 최첨단 기술을 살펴보면 실용화까지 극복해야 하는 많은 과제를 안고 있다. 더구나 연구가 진전됨에 따라, 앞에서 말한 개별기술뿐 아니라, 다양한 분야의 기술이 종합적으로 적용되어야 하는 특성을 갖고 있다.

현재 국제연구기관, 각국 정부연구기관, 대학 등의 공공 연구 기관이 중심이 되어 여러 분야에서 연구를 진행하고 있고, 에너지 관련 기업(석유, 가스, 전력)이나 대규모 플랜트 메이커 등도 장래를 대비한 CO₂ 대책 기술개발에 나서기 시작했다. 2010년경에는 제1세대의 CO₂ 회수·고정기술이 실용화 될 수 있을 것으로 보고 있다.

기후변화협약에 따라 2008년부터 2012년에 걸쳐 CO₂를 감축해야 하는 의무감축국이 유연성체제(Flexibility Mechanism)에 의한 감축분을 제외하고 실질적으로 감축해야 하는 CO₂량은 0.4 GtC으로 추정되며 이의 처리비용은(Herzog, 1997)은 500억 달러에까지 이를 것으로 전망된다. 이는 이산화탄소 저장기술을 개발해야 하는 당위성을 말해주는 자료이다.

결국 이산화탄소 분리·회수 및 저장기술을 개발함으로써 우리는 21세기 초반에 불어닥칠 기후변화협약에 따른 산업성장의 장애요인을 회피할 수 있는 수동적인 선택과 함께 능동적으로 새로운 시장을 적극 개척해 나아갈 수 있는 기회를 얻을 수 있을 것이다.

〈표 9〉 연구 중인 CO₂ 유효이용기술

CO ₂ 유효이용 기술	공정	비고
접촉 수소화	상온 200~400 ℃, 상압~100 atm 정도의 조건 하에서 촉매로 CO ₂ 와 H ₂ 를 반응시켜, 알코올과 탄화수소 같은 유용한 물질로 전환한다.	• Cu/Zn 촉매에 의한 메탄올 합성은 에너지 손실이 적기 때문에 유망함 • 안정한 가격의 수소 확보가 필요
전기 화학 환원	전기분해에 의해 용액으로 용해된 CO ₂ 를 알코올, 탄화수소 등으로 변환한다. 루테튬 전극에 메탄올 등이 선택적으로 생성된다는 점에서 연구성과가 나타나고 있다.	• 고효율로 선택성이 있는 좋은 전극 재료의 개발이 필요 • 소비전력의 저감 불가
광전기 화학환원	전기화학적 환원과 동시에 반응이 일어나지만 전극으로 GaP, SiC 등의 반도체를 사용하여 이 반도체 전극에 빛을 조사하여 발생하는 광기전력에 의해 CO ₂ 의 변환을 일으키는 변환반응에 대해 연구가 진행되고 있다.	• 전환효율이 비이상적으로 작음
광학고정	광촉매와 광증감제에 의해 광 에너지를 흡수하여 에너지 레벨이 높은 전자상태를 만들어 이 전자를 이용, CO ₂ 를 환원하여 탄화수소류를 합성한다.	• 전환효율이 비이상적으로 작음
인공 광합성	미생물의 광합성에 의해 CO ₂ 로부터 알코올, 탄화수소, 당, 유기산, 단백질 등을 합성한다.	• 고효율로 선택성이 높은 미생물 연구가 필요
화학합성 고정	촉매를 활용하여 CO ₂ 를 원료로 고분자화학물질을 합성한다. CO ₂ 를 모노머의 하나로 활용해 카보네이트를 합성하는 기술은 실현되고 있다.	• 대량의 CO ₂ 처리는 곤란
CO ₂ 분해	산소가 부족한 마그네사이트 촉매를 이용하여 수소와 반응시켜 CO ₂ 를 탄소로 환원하는 접촉분해법과 전자선, 선열 조사하여 CO ₂ 를 분해하는 고에너지법 등이 연구되고 있다.	• 기초연구 단계 • 대량의 CO ₂ 를 처리하지 못함