

5. 생물학적 CO₂ 전환기술(I)

연소배가스 중 포함되어 있는 이산화탄소를 유용한 자원으로 전환시키는 생물학적 전환기술은 이산화탄소와 관련된 타 연구 분야와는 달리 이산화탄소를 감축시키는 수단 외에 에너지를 얻을 수 있는 측면을 동시에 고려해야만 한다. 특히 우리나라와 같이 대부분의 에너지원을 수입하는 현실에서는 그 중요성이 더욱더 커질 수 밖에 없다.

우리나라는 석유 부존자원이 없으며 대부분 수입에 의존하고 있으므로 (2010년 수입량 : 약 8억7천만배럴, 에너지통계연보 2011, 에너지경제연구원) 국제 정치 환경변화 등 수급 상황에 따라 에너지 안보가 크게 위협받고 있어 국내 기술 및 자본을 이용한 에너지 자원 확보가 절실한 상황이다. 2010년 기준 우리나라 원유 도입액은 44조억원 달하고 있으며 매년 가파르게 상승하여 국가 경제에 심대한 타격을 주고 있다. 원유 도입액의 증가는 원유 도입량의 증가보다는 유가 상승에 기인한 것으로 두바이유가 연평균 10% 상승하면 경제성장률은 0.35% 하락하고 소비자물가는 0.23% 상승하며 20억달러의 무역수지 적자요인이 발생한다는 전망치가 나온 바 있다 (삼성경제연구원, 2007년 12월). 고유가와 화석연료의 고갈에 대비하여 에너지 효율화 기술 및 태양, 풍력 등 재생에너지에 투자가 확대되고 있으나 수송용 부분과 석유화학 연료 생산 부문에서는 석유 대체가 어렵다는 한계가 있다. 2010년 기준 수송부문에서 사용되는 유류는 전체 석유사용량 중 33%인 2억6천만배럴이다. 따라서 고유가 대비와 함께 수송용 에너지로도 사용이 가능하며 개발 성공 시 보급에 문제가 없는 석유 대체 연료원의 개발이 절실히 요구된다 (오유관, 조류 이용 바이오연료 생산 요소기술 개발, 한국에너지기술연구원).

세계 대부분의 나라 역시 유사한 형태의 에너지 소비 형태를 보이고 있다. 2008년 세계의 1차 에너지 소비는 약 112억 TOE로 화석연료의 전체의 88%를 차지하고 있다. 화석연료 사용을 세분화하면 석유 35%, 석탄 29%, 천연가스 24%로 대부분을 차지하고 있으며, 원자력 5%, 수력 6%가 나머지를 구성하고 있다 (BP, Statical Review of World Energy:2009). 화석연료의 사용은 불가피하게 온실가스를 배출하여 전 세계적으로 2006년 약 29G톤의 온실가스를 배출하였다. 따라서 최근 들어 바이오연료를 이용한 수송용 연료 개발에 많은 지원이 이루어지고 있으며 이를 통하여 각국은 온실가스 저감과 에너지 안보를 확충하는 두 가지 효과를 얻고자 노력하고 있다.

이산화탄소의 생물학적 전환에 관한 가장 많은 연구개발을 수행하고 있는 나라는 미국이다. 본 고에서는 미국의 생물학적 이산화탄소 처리 프로그램에 대하여 살펴보

졌다. DOE 에너지 기술 개발 프로그램은 현재까지 연구 개발된 기술을 격상시키는 IEP(Innovation for Existing Plants)프로그램과 변혁기술 개발을 위한 ARPA-E(Advanced Research Projects Agency-Energy)프로그램을 운영하고 있다. (※ 우리나라와 비교할 경우 IEP 프로그램은 지경부, ARPA-E 프로그램은 교과부 연구개발 프로젝트와 유사한 성격을 띠고 있음.) ARPA-E 프로그램은 미국 국방성 (Department of Defence)에서 기존에 존재하지 않았던 새로운 개념을 접목시켜 스텔스 전투기인 F-22와 같은 신무기 개발을 통해 50여년간 전 세계를 주도했던 DARPA 프로그램을 벤치마킹하여 도입된 프로그램이다. ARPA-E 프로그램은 에너지 생산, 저장, 사용에 관련된 기존 방법을 완전히 변혁하는 “Thinking outside-the-box”개념의 연구를 모토로 하고 있으며, 다음과 같은 세 가지 목적을 달성하는데 있다.

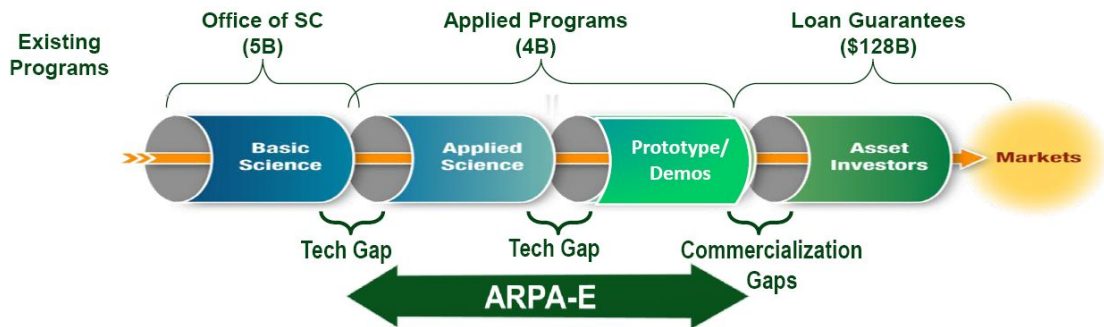
- Energy dependence
- Greenhouse gas emissions and climate change
- Maintaining U.S. technological leadership



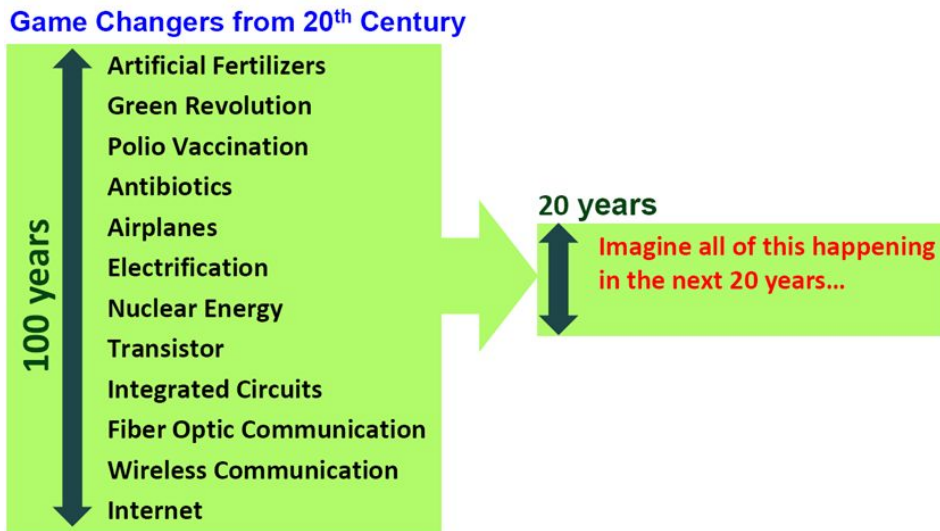
[그림 5-1] ARPA-E's Mission.

목표를 달성하기 위한 수단으로써 high-risk, high-impact한 프로젝트에 자금을 지원하여 기초기술을 혁신적으로 진보시키며, 현재 존재하지 않는 새로운 기술을 탄생시키는 과학적 발견과 cutting-edge 발명을 기술적 혁신으로 전환시키는데 있다. Energy innovation pipeline란 기초연구부터 시장에 진입하기까지의 각 기술의 흐름을 나타낸 것이며 현재 각 부분별 지원이 이루어지고 있으나 기술간의 격차를 해소하는 연구지원은 미흡한 것으로 판단하여 이를 극복하기 위하여 ARPA-E 프로그램을 발족하였다. 따라서 ARPA-E 프로그램은 기초 학문을 연구하는 것이 아니라 기술간

격차 (Technology Gap)을 해소하는 bridge technology program 이다.



[그림 5-2] Energy pipeline에서 ARPA-E의 역할



[그림 5-3] 20세기 game-changing 기술.

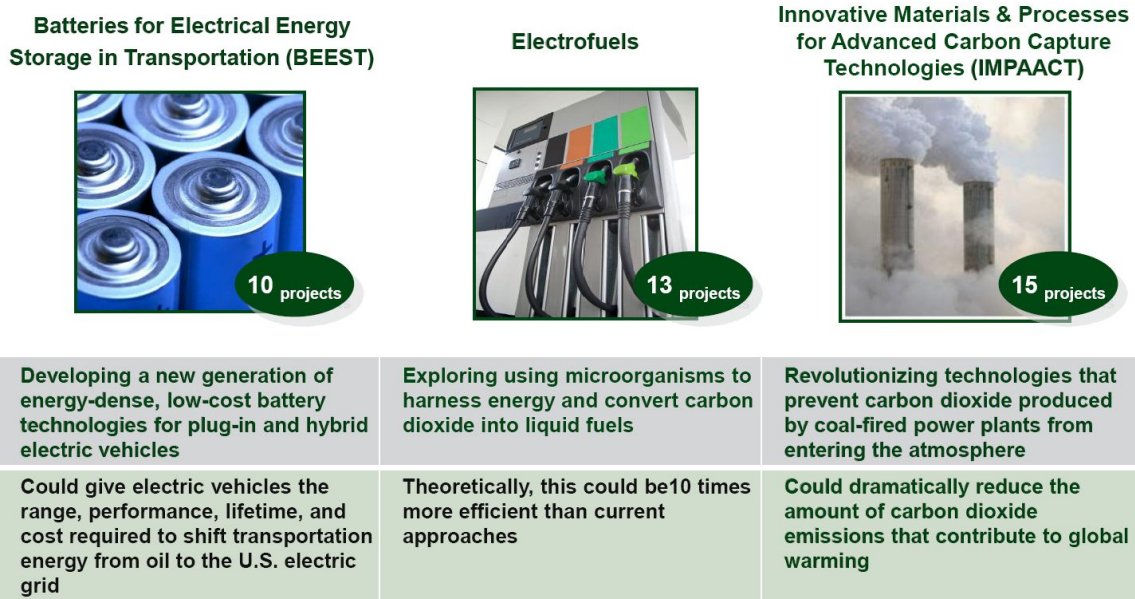
DOE의 ARPA-E 프로그램에서는 에너지기술에서 중요한 영역을 다음의 6가지로 분류하여 지원하고 있다. 이중 IMPACCT 프로그램은 이산화탄소 포집에 관한 원천기술을 개발하는 것이며 Electrofuels 프로그램은 이산화탄소의 생물학적 전환을 이용하여 수송용 연료를 개발하는 프로그램이다.

- BEEST(Batteries for Electrical Energy Storage in Transportation)
- IMPACCT(Innovation Materials & Processes for Advanced Carbon Capture Technologies)
- GRIDS(Grid-Scale Renewable Intermittent Dispatchable Storage)
- ADEPT(Agile Delivery of Electrical Power Technology)

■ **Electrofuels**

- BEETIT(Buildign Energy Efficiency Through Innovative Thermodevices)

특이하게 이산화탄소의 화학적 전환에 관한 지원을 이루어지지 않고 있다. 과제의 지원은 1, 2차에 걸쳐 이루어 졌으며 2차 지원인 FOA-2에서는 3개 프로그램에 대한 지원이 이루어 졌고, IMPACCT 프로그램에는 총 15개, Eelectrofuels 프로그램에서는 총 13개의 과제가 선정되어 지원되고 있다.



[그림 5-4] 이산화탄소 관련 ARPA-E 지원 프로그램.

이산화탄소를 이용하여 수송용 연료를 생산하는 Electrofuels 분야의 세부과제와 수행기관을 보면 다음과 같다.

<표 5-1> Electrofuels 프로그램 지원 CO2의 생물학적 전환기술

프로젝트 및 수행기관	연구내용
Biofuels from CO2 using ammonia-oxidizing bacteria in a reverse microbial fuel cell (Columbia University)	○ Nitrosomonas europea 박테리아를 사용하여 이산화탄소와 암모니아를 수송용 액체연료로 전환하는 연구
Development of an integrated microbial-electrocatalytic(MEC) system for liquid biofuel production from CO2 (Lawrence Berkeley National Lab.)	○ 미생물과 전기화학적 촉매를 이용하여 수소와 이산화탄소를 바이오연료로 전환하는 연구 수행

Bioprocess and Microbe engineering for total carbon utilization in biofuel production (MIT)	○ 1차반응에서 수소와 이산화탄소를 아세트이트와 같은 유기물로 전환시키고 이를 바이오연료를 만드는 호기성 미생물의 원료로 사용
Engineering a bacterial reverse fuel cell (Harvard Medical School - Wyss Institute)	○ 전자를 받아들여 바이오연료 형태의 화학적 에너지(특히 옥탄올)로 전환하는 박테이라 개발
Engineering ralstonia eutropha for production of isobutanol(IBT) motor fuel from CO ₂ , H ₂ , O ₂ (MIT)	○ 수소와 이산화탄소를 부탄올과 같은 바이오연료로 전환하는 미생물과 바이오 반응시스템 개발
Electroalcoholgenesis-bioelectrochemical reduction of CO ₂ to biobutanol (Medical University of South Carolina)	○ 태양광과 같은 전기에너지를 이용하여 전지셀을 구동시키는 미생물을 개발하여 이산화탄소를 부탄올, 에탄올과 같은 연료로 전환
Hydrogen-dependent conversion of carbon dioxide to liquid electrofuels by extremely thermophilic archaea (North Carolina State University)	○ 75°C 근처의 극한 조건에서 생존하는 효소를 개발하며, 수소를 매개체로 사용하여 이산화탄소를 바이오연료의 원료로 사용되는 C ₂ -C ₄ 화합물로 전환
Novel biological conversion of hydrogen and carbon dioxide directly into biodiesel (OPX Biotechnologies Inc.)	○ 수소와 이산화탄소를 이용하여 항공유와 같은 바이오연료를 생산하는 연구를 수행하여 \$2.50/gallon을 목표로 함
Bioconversion of carbon dioxide to biofuels by facultatively autotrophic hydrogen bacteria (The Ohio State University)	○ 유전자조작을 통한 미생물을 이용하여 이산화탄소를 부탄올로 전환하는 공정 개발
Development of rhodobacter as a versatile platform for fuels production (Pennsylvania State Univ)	○ 오일을 생산할 수 있는 조류로부터 추출하여 유전자변형한 미생물을 이용하여 이산화탄소를 오일로 전환하는 공정 개발
Electro-Autotrophic synthesis of higher alcohols (Regents of the University of California, Los Angeles)	○ 합성학과 대사공학을 이용하여 태양광 대신 전기를 사용하여 이산화탄소를 연료로 전환할 수 있는 미생물 개발
Electrofuels via direct electron transfer from electrodes to microbes (University of Massachusetts Amherst)	○ 태양광같은 전기에너지를 물과 이산화탄소로 전환한 후 이를 바이오연료로 전환하는 반응시스템 개발

또한 DOE 에서는 산업체에서 발생하는 이산화탄소로부터 연료, 플라스틱, 시멘트, 비료와 같은 유용한 물질을 생산하는 6개의 프로젝트를 2010년 6월 발족하였다. 특이한 점은 6개의 프로젝트 모두를 산업체에서 수행한다는 것이다. 이는 이산화탄소 전환 기술이 학교 중심에서 산업체로 이전될 만큼 기술적인 진보가 이루어졌음을 의미하는 것으로 판단된다. 6개의 프로젝트의 개략적인 내용은 다음과 같다.

<표 5-2> DOE 지원 기업체 CO₂ 전환 과제 현황

연구내용	수행기관

<ul style="list-style-type: none"> ○ 효소가 고정화된 in-duct 시스템을 이용하여 연소배가스 중 이산화탄소를 bicarbonate/carbonate이온으로 전환시키는 pilot plant 공정 개발 ○ bicarbonate/carbonate이온은 알루미늄 광산의 부산물인 alkaline clay와 반응시켜 건자재, 토양보충재 등의 광물로 전환시킴 	Alcoa Inc.
<ul style="list-style-type: none"> ○ 이산화탄소를 에폭시와 반응시켜 플라스틱을 만드는 공정 중 반응활성이 우수한 촉매를 개발 ○ 생성된 플라스틱은 이산화탄소를 50wt.%이상 포함 	Nover Inc.
<ul style="list-style-type: none"> ○ Open pond에서 미세조류를 이용하여 연소배가스 중 포함된 이산화탄소를 60%이상 포집하는 공정개발 ○ Pond 표면에 도포되어 pond의 온도유지, 휘발방지, 이물질유입 방지를 위한 신 상변이 물질 개발 ○ 수확된 미세조류를 이용한 연료개발과 잔재물을 이용한 메탄개발 	Touchstone Research Lab. Ltd.
<ul style="list-style-type: none"> ○ 이산화탄소를 포집한 미세조류를 이용한 바이오연료 개발을 위한 통합 공정 개발 	Phycal, LLC
<ul style="list-style-type: none"> ○ 기존 습식 스크러버 공정을 변환하여 이산화탄소를 광물화하는 SkyMine 공정 개발 ○ 이산화탄소외에 황산화물, 질소산화물, 수은 포집 가능 	Skyonic Corporation
<ul style="list-style-type: none"> ○ 연소배가스 중 포함된 이산화탄소를 직접 광물화하는 공정 개발 	Calera Corporation

우리나라에서 이산화탄소의 생물학적 고정화 연구는 1998년 과학기술부의 중점사업의 지원으로 한국에너지기술연구원(이진석)의 이산화탄소의 생물학적 처리기술로부터 시작되었다. 이후 교육과학기술부의 지원을 받은 21세기 프론티어연구개발사업의 일환인 이산화탄소저감 및 처리기술개발사업('02~'12, 박상도)의 지원을 받아 한국생명공학연구원(오희목), 고려대학교(심상준) 연구팀에서 '생물학적 전환에 의한 이산화탄소 고부가 생물제품 기술개발' 연구를 진행 중이다. 미세조류로부터 바이오연료의 연구개발에 대한 관심이 높아지면서 지식경제부 신재생에너지기술개발사업, 전력산업 연구개발사업과 국토해양부, 농림수산식품부 등에서도 관련된 연구를 수행하고 있다. 또한 2011년부터 9년동안 지원되는 KOREA CCS2020 사업에서는 고려대, 서울대, 한양대 등에서 '생물학적 이산화탄소 고속전환 유기 자원화 기술'과제를 진행하고 있다.