

Vol. 8, No.1

2014. 4.

KIER

기술정책 Focus

본 연구 내용을 인용시 출처를 밝혀야 하며, 본문에서 제시된 내용 및 주장은
KIER의 공식 입장이 아닌 연구자의 개인의견임을 밝힙니다.

편집자주

1 개요

가. ARPA-E 개요

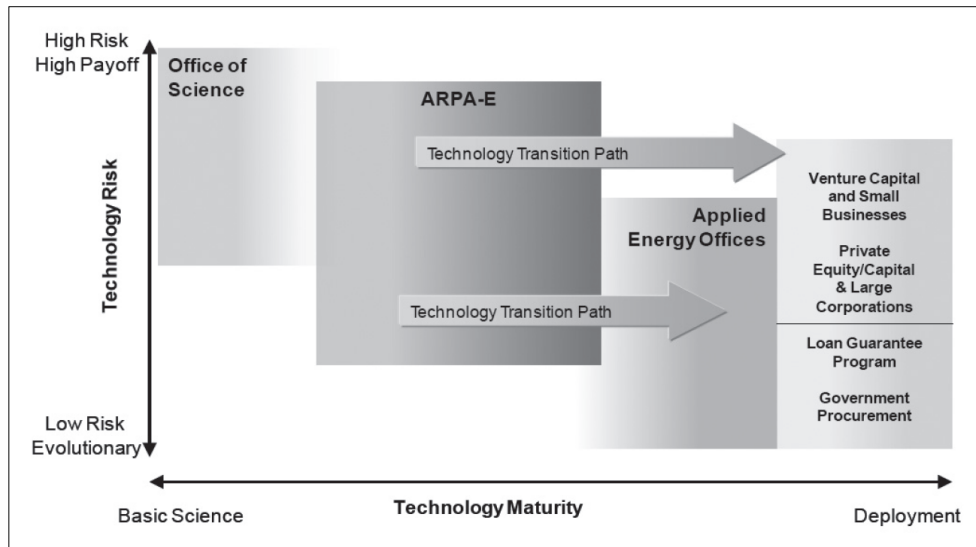
- 2005년 미국의회는 GPS, 스텔스 전투기, 컴퓨터 네트워킹 등을 성공적으로 개발한 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency)를 모델로 하여 DOE(Department of Energy)에 ARPA-E(Advanced Research Projects Agency-Energy)를 설립할 것을 권고
- 2007년 'The America Competes Act'에 의거하여 공식 설립된 ARPA-E는 석유소비 세계 1위 국가 미국의 외국산 에너지의 수입을 10년 동안 20%까지 감소시키기 위한 '파괴적이고 혁신적 (Disruptive & Innovative)'인 에너지기술과 정책 개발을 목적으로 추진
 - 해외 에너지 수입 의존을 줄일 수 있는 기술, 온실가스 배출을 감축기술, 에너지효율 향상기술, 미국의 리더십을 유지하는 첨단 에너지 기술개발 등 변환적 에너지 기술(Transformational Energy Technologies) 개발을 임무로 추진
- ARPA-E는 관련 연구 시설을 직접 보유하거나 운영하지는 않지만 해당 프로그램을 총지휘할 수 있는 우수 인재를 영입하고 각종 프로그램을 기획하여 대학, 연구소, 기업의 R&D에 지원하고 있으며 ARPA-E에서 지향하는 가치는 크게 4가지로 분류

〈표 1〉 ARPA-E에서 지향하는 가치 분류

구 분	내 용
① Breakthrough Technology	▶ 현재 존재하지 않거나 현재 존재하지만 융합과 통섭을 통해 신기술로 거듭날 수 있는 혁신적 기술 지원
② People	▶ 호기심이 왕성하고 연구의욕이 충만한 최고의 인재를 유입하여 창조적이며 변환적인 에너지 기술 연구를 추진
③ Additionality	▶ 추가 지원을 통해 큰 진전이 기대되고 미래의 성공에 초점을 맞춘 분야에 대해 지원
④ Impact	▶ 성공할 경우 국가에 많은 이득을 가져다 줄 수 있고, 대규모 상업화가 가능한 분야에 집중

□ ARPA-E는 학계와 산업계의 가교역할 수행

- DOE 과학국(Office of Science)은 에너지 분야의 기초연구를 가장 많이 지원하고 있으며 EER E¹⁾ 등 타 부서들은 에너지 응용연구 및 상용화 개발을 담당. ARPA-E는 이러한 기초연구와 응용개발을 중·단기적으로 연결시켜주는 역할 담당



[그림 1] DOE 내의 부서 관계도

- ARPA-E는 상업화를 거쳐 시장에서 활용 가능한 연구를 지원하며 이를 위해 프로그램을 기획하거나 운영하는 과정에서 기업들과의 협력을 확대할 수 있도록 지원
- ARPA-E는 2009년 1차 FOA²⁾를 시작으로 '11년 1억 8천만 달러를 에너지 기술개발에 지원하였고 혁신적인 에너지 기술개발에 대한 투자를 지속적으로 증가시키고 있는 추세

〈표 2〉 ARPA-E Program 연도별 예산

예산 (\$ Thousands) ³⁾		2011	2012	2013	2014 ⁴⁾
ARPA-E Program	Transportation Systems	60,610	142,887	184,325	196,587
	Stationary Power Systems	100,000	104,000	130,000	148,303
	SBIR/STTR ⁵⁾	5,030	8,113	10,675	
Program Direction		14,000	22,000	25,000	34,110
Total		179,640	275,000	350,000	379,000

1) EERE: Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 미국 에너지 효율 및 재생에너지국

2) FOA: Funding of Announcement, 자금 지원 발표안

- ARPA-E는 19개의 특정(Focused) 프로그램*과 2개의 Open 프로그램**을 통해 362개 프로젝트에 9억 달러 투자('14년 2월 집행 기준)
- * ADEPT, AMPED, BEEST, BEETIT, Electofuels, FOCUS, GENI, GRIDS, HEATS, IMPACCT, METALS, MOVE, PETRO, RANGE, REACT, REMOTE, SBIR/STTR 2012, Solar ADEPT, SWITCHE
- ** OPEN 2009, OPEN 2012
- 프로젝트는 벤처 · 중소기업 38%, 학교 35%, 대기업 19%, National labs 6%, 비영리 단체 3%를 대상으로 지원하고 있으며 이러한 분포는 ARPA-E가 혁신적 기술개발과 조속한 기술실용화를 목표로 하고 있다는 것을 시사
- 즉, ARPA-E는 민간에서 수행하기 어려운 고위험 · 고수익(High Risk & High Reward) 프로젝트의 기술개발 초기 자금(Seed Money)을 지원하고 이후 민간 기업의 추가 투자나 기술사업화를 유도
- 성공사례로 손톱 크기의 1MW SiC 트랜지스터, 수소와 이산화탄소를 이용하여 액체 연료를 만드는 미생물, 유사 등은 압축 공기 에너지 저장 시스템 개발 등의 프로젝트들이 민간 부분의 후속 투자를 지원받거나 회사 창립에 성공

나. ARPA-E 조직구성

- ARPA-E는 Program Directors, Fellow, Technology-to-Market Team, Legal Team, 그리고 Budget & Strategic Outreach로 구성
- 15명의 PD(Program Directors)는 하나 또는 그 이상의 에너지 기술 분야 리더로서 적절한 기술 및 시장 분석을 통해 프로그램 개념을 정립하고 FOA 개발, 평가 등 프로그램 개발의 모든 단계를 리드
- 또한, PD는 Technical Milestones, 지적재산권, 상용화 전략 등 PD의 프로그램 내에 있는 모든 프로젝트 관리를 담당

3) Fiscal Year 2013 Budget Request

4) Fiscal Year 2014 Budget Request

5) SBIR/STTR: Small Business Innovation Research/Small Business Technology Transfer Research

- 2년 임기의 Fellows는 전문가들과의 브레인 스토밍, 기술적 · 경제적 분석 등을 통해 혁신적 에너지 기술개발을 돕고 PD와 함께 신규 프로그램 기획 및 개발을 지원하며 진행 중인 프로젝트들을 지원
- 2012년에 신설된 Technology-to-Market팀은 ARPA-E 총책임자, PD, 그리고 Advisors로 구성. Advisors는 Financial Analysis, Business Development/Technical Marketing, Supply Chains과 같은 분야의 전문적 지식을 가지고 기술실용화 조기 달성을 위해 R&D 프로그램 개발 및 수행을 지원

2

ARPA-E 운영방식 및 프로그램 개발체계

가. ARPA-E 운영방식

□ ARPA-E의 프로그램은 크게 Focused program과 Open solicitations로 구분

- Focused program : PD에 의해 기획 및 개발되며 특정한 에너지 분야의 기술개발을 추구하는 목표 지향적 프로그램
- Open solicitations : 에너지기술 전 분야에 대해 높은 잠재력을 지닌 아이디어 제안

〈표 3〉 ARPA-E에서 지원하는 프로그램 특징

구 분	내 용
① High Risk & High Reward	▶ 성공할 경우 획기적인 수혜를 기대할 수 있지만 기술적인 실패의 위험도가 큰 연구
② Out of the Box	▶ 공정 혁신, 기능 전환과 같은 부분적인 변화가 아니라 기존 개념을 초월할 수 있는 발군의 혁신성을 지닌 연구
③ HUB	▶ 기초연구와 산업 혁신 간의 간극(gap)을 좁힐 수 있는 가교적 연구

□ ARPA-E의 핵심 중 하나로 여겨지는 PD는 에너지 분야의 최고 인재로서 학계, 산업계, 정부기관 등 다양한 배경을 바탕으로 3~4년의 임기 보장

- PD는 이론뿐만 아니라 실증적 기술연구와 제품 구현을 추진할 수 있는 역량 보유와 새로운 기술의 제품개발 및 사업화에 대해서도 풍부한 경험 보유
- 임기동안 PD는 DOE나 정부 부처 등 조직 내외의 간섭에 구애 받지 않고 연구의 창의성과 혁신성을 최대한 보장받을 수 있도록 폭 넓은 재량권 부여
- ARPA-E는 프로그램의 구성, 프로젝트 선정, 관련 예산의 집행 등 전반적인 프로그램 관리를 PD가 수행할 수 있도록 유연하고 과감한 운영을 지향

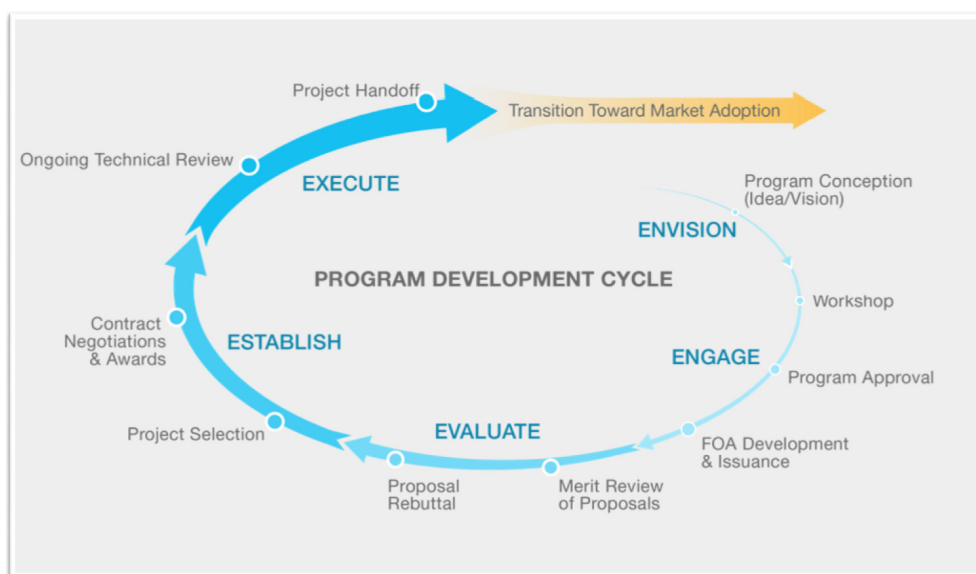
□ ARPA-E의 또 다른 핵심 요소로 손꼽히는 Technical-to-Market(T2M)팀의 Advisors는 비즈니스 통찰력을 가지고 기술실용화를 위한 다양한 전략을 제안

- T2M 프로그램은 프로젝트 성공을 위해 시장의 니즈를 명확히 분석하고 중요한 비즈니스 정보와 교육 등을 제공
- 프로젝트들은 T2M plan을 제안하고 Advisors와 긴밀한 관계를 통해 전략을 개발하며 원활한 시장진입을 위해 투자자, 정부 기관, 대기업, 중소·중견기업 등 다른 조직들과의 Networking 기회도 제공

나. ARPA-E 프로그램 개발체계

□ ARPA-E 프로그램은 5E 단계를 통해 개발

- Step1(Envision, 구상단계) : 프로그램의 개념(idea/vision) 정립
- Step2(Engage, 정립단계) : 워크숍, FOA 개발 등을 통해 개념을 더욱 정밀화
- Step3(Evaluate, 평가단계) : 정식제안, 반박 토론 등
- Step4(Establish, 확정단계) : 프로젝트 선정 및 계약협상 등
- Step5(Execute, 집행단계) : 최종집행



[그림 2] ARPA-E 프로그램 개발 과정

- 구상(Envision), 정립(Engage), 그리고 확정(Establish) 단계에서는 PD들이 핵심 역할을 수행하고 평가(Evaluate) 단계에서는 Fellow들이 중요 역할 담당
 - 프로젝트들은 명확한 목표(Technical and Commercial Milestones)를 제안하고 프로그램의 성공을 위해 PD들은 집행(Execution)단계에서 정기 미팅과 현장 방문을 통해 프로젝트별 Milestones달성을 관리하며 프로그램의 최종목표(Goals)에 도달하지 못할 경우 지원 중단
- ARPA-E 프로그램과 프로젝트의 성공여부는 시장(Marketplace)에 끼친 영향력을 통해 평가받게 되며 다양한 지표를 통해 현존하지 않는 변환적 에너지 기술의 시장 도입 정도를 측정하고자 노력
- 기본적으로 특허, 논문, 간행물 등의 통계와 함께 분기별 검토를 통해 Milestones 도달 여부를 평가
 - 프로젝트의 성공여부를 판단할 때, 민간 또는 공공 협력관계를 통한 추가투자 확보 또는 회사 창업과 같은 사업이전(Project Handoffs)을 가장 중요한 지표로 설정



3 ARPA-E 프로그램 구성

가. ARPA-E 프로그램 선정배경

□ 미국은 국가적, 경제적, 환경적 보안을 위한 에너지 혁신 기술개발에 투자

- 2009년 청정에너지 자원사용의 효율화, 에너지 실효성 극대화, 지구 온난화 오염 최소화, 청정 에너지 경제로의 전환 등을 도모하기 위한 청정에너지 안보 법안(America Clean Energy & Security Act)을 발표
- DOE는 에너지 기술개발을 통해 석유자원을 대체할 에너지 자원 확보, 에너지 효율 극대화, 온실가스 감축 등을 도모하고 미국에너지 산업 경쟁력강화를 통해 경기회복과 일자리를 창출하고자 노력

□ ARPA-E 프로그램은 미국 에너지정책 방향과 긴밀한 연계를 가지고 추진

- 2009년 미국 복구 및 재투자 법(American Recovery and Reinvestment act)에 의해 시작된 ARPA-E는 경기회복을 위해 에너지 효율향상, 스마트 그리드, CCS, 에너지저장, 전기자동차, 바이오 연료 등의 에너지관련 기초·응용·실증 연구에 집중투자
- 2009년 OPEN 2009에 3,700개의 기술 제안서가 제안되었고, 위험부담이 크더라도 확실한 변화를 이끌어 낼 수 있는 37개의 연구를 최종 선정하여 충분한 자금(평균 400만 달러)을 투자하는 선택과 집중형 투자 실시

□ ARPA-E는 부족해지는 에너지 자원의 대안을 마련하고 클린 에너지 분야에서 미국의 경쟁력을 획기적으로 향상시키기 위해 희토류 대체물질, 열저장, 그리드 컨트롤, 바이오 연료, 태양광 발전 등의 연구지원에 중점 추진

- ※ 2011년 DOE의 예산안 전략적 우선순위: ①직면한 에너지 문제를 해결할 수 있는 과학, 발견을 위한 기술 혁신에 투자, ②깨끗하고 안전한 에너지 제공과 에너지 효율성을 통해 경제적 번영 증진, ③핵 및 방사능 물질의 보호와 핵 억지력 유지

- 2011년 ARPA-E는 미국 내 풍부한 매장량을 자랑하는 셰일가스를 포함한 천연가스를 이용한 액체 연료 생산 기술 개발에 투자
 - ※ 2012년 DOE의 전략적 우선순위: ①변형적 에너지(Transformational Energy), ②경제적 번영(Economic Prosperity), ③원자력 안보(Nuclear Security)
- 2013년 오바마 대통령은 향후 10년 내에 플러그인 전기자동차를 가솔린 자동차와 같이 이용하기 편리하게 만들겠다고 선포
 - ※ DOE는 5년 후에 전기자동차 충전 가능한 기업 수를 현재 대비 10배로 늘리는 Workplace Charging Challenge 프로젝트를 지원하고 EV Everywhere Grand Challenge Blueprint를 발표
 - 2013년 Tesla는 미국 도로 교통 안전국(National Highway Traffic Safety Administration)에서 가장 높은 안전성을 평가받으며 캘리포니아 럭셔리 자동차 시장 석권
 - 전기자동차의 성장 가속화를 위해 ARPA-E는 RANGE 프로그램을 신설하여 셀 에너지밀도 향상보다 전체 배터리 시스템 설계 및 아키텍처를 재조정하고 배터리 시스템의 경량화를 통해 주행 효율성 향상에 주력
 - 또한, 미국 내 천연가스 활용 및 온실가스 감축을 위한 REMOTE 프로그램을 신설하고 낮은 비용과 높은 효율성을 지닌 태양에너지 기술개발 지원하는 FOCUS 프로그램을 통해 태양광산업의 지속적 성장 추진

나. ARPA-E 프로그램 구성

- ARPA-E는 석유를 대체할 수 있는 비식용 작물 개발 연구(PETRO), 축열기술 연구(HEATS), 화력 발전소에서 배출되는 탄소 제거기술 연구(IMPACCT)와 같은 19개의 특정 프로그램과 분야에 크게 제한되지 않은 2개의 OPEN 프로그램 지원

〈표 4〉 ARPA-E 지원 프로그램

프로그램	FY	예산 (\$ Million)	연구 내용
OPEN 2009 Open Funding Solicitation	2009	176	▶ ARPA-E 최초 자금으로 에너지 전분야 기술개발 지원
OPEN 2012 Open Funding Solicitation	2012	130	▶ 11개 분야*에 대한 지원 * Advanced fuels, Advanced vehicle design and materials, Building efficiency, Carbon capture, Grid modernization, Renewable power, Stationary energy storage, Stationary generation, Thermal energy storage, Transportation energy storage and others
ADEPT Agile Delivery of Electrical Power Technology	2010	38	▶ 회로, 트랜지스터, 변압기, 커패시터 등 전력 그리드, 전 기차, 전자제품 등의 에너지 효율적인 전력변환 방법 연구
AMPED Advanced Management and Protection of Energy Storage Devices	2012	30	▶ 상용화를 위해 배터리 시스템의 성능, 안전성, 수명 향상 및 배터리 제어(센서, 전력관리 등) 기술개발
BEEST Batteries for Electrical Energy Storage in Transportation	2010	30	▶ 합리적 가격, 고성능의 EV/PHEV 공급을 위한 배터리 및 에너지저장 시스템 개발
BEETIT Building Energy Efficiency Through Innovative Thermodevices	2010	34	▶ 건물 에너지효율 향상과 CO ₂ 감축을 위한 건물 냉방기술 개발
Electrofuels Microorganisms Liquid Transportation Fuel	2010	48	▶ 현재 바이오연료 생산기술보다 10배 이상 효율이 높은 미생물을 활용한 액체 자동차 연료 생산기술 개발 ▶ 미국에서 유일하게 Electrofuels 연구 지원
FOCUS Full spectrum Optimized Collection & Utilization of Sunlight	2013	30	▶ 태양이 없을 때에도 저비용, 고효율의 전력공급이 가능한 하이브리드 태양에너지 기술개발
GENI Green Electricity Network Integration	2011	39	▶ 효율적 전기그리드 컨트롤 소프트웨어 및 하드웨어 대체
GRIDS Grid-Scale Rampable Intermittent Dispatchable Storage	2011	39	▶ \$100/kWh 미만 투자비용으로 그리드 어디서나 사용가능한 신재생에너지 저장기술 개발
HEATS High Energy Advanced Thermal Storage	2011	38	▶ 비용대비 효과적이고 혁신적인 열저장 방법 연구
IMPACCT Innovative Materials and Processes for Advanced Carbon Capture Technologies	2010	40	▶ 화력발전소의 CO ₂ 제거 비용 최소화를 위한 소재, 재료 및 공정 개발

프로그램	FY	예산 (\$ Million)	연구 내용
METALS Modern Electro/Thermochemical Advances in Light Metals Systems	2013	60	▶ 알루미늄, 마그네슘, 티타늄 등의 비용 효율적인 처리 및 재활용을 위한 혁신적 기술개발
MOVE Methane Opportunities for Vehicular Energy	2012	30	▶ 천연가스 차량 이용을 위한 저장 물질, 탱크 및 인프라 구축을 위한 기술개발
PETRO Plants Engineered to Replace Oil	2011	37	▶ 연료생산 분야 및 직접에너지 연료전환 공정 연구 ▶ 담배나 소나무와 같은 비식용, 내수 자원으로부터 바이오 연료 생산 목표
RANGE Robust Affordable Next Generation Energy Storage Systems	2013	36	▶ 전기자동차 배터리 시스템 기술개발을 통해 주행거리 증가 및 비용 저가화 목표
REACT Rare Earth Alternatives in Critical Technologies	2011	28	▶ 연료전지 기술 등 희토류 광물 수요증가에 따라 대체물질 개발
REMOTE Reducing Emissions using Methanotrophic Organisms for Transportation Energy	2013	34	▶ 천연가스를 운송수단의 액체 연료로 전환하기 위한 생체 촉매 기술개발 ▶ 저비용으로 미국 내 천연 가스 활용, 기존 가솔린 차량 대비 가스 배출량 감소, 액화 비용 감소를 목표
SBIR/STTR 2012 Small Business Innovation Research/Small Business Technology Transfer Research	2012	13	▶ 가정, 상업, 수송에서 이용 가능한 에너지 저장장치를 위한 소재, 시스템 디자인 개발
Solar ADEPT Solar Agile Delivery of Electrical Power Technology	2011	14	▶ 유틸리티 전기 변환율 50% 비용절감 및 가정용 태양광 전기 변환율 80% 비용절감
SWITCHES Strategies for Wide Bandgap, Inexpensive Transistors for Controlling High-Efficiency Systems	2013	27	▶ 고효율 시스템 제어 및 변환이 가능한 차세대 전력변환 장치 기술개발



4 ARPA-E Project 성공사례

가. 개 요

- 2009년 DOE의 장관이었던 스티브 추 박사는 ARPA-E의 지원을 받는 기술들 중 대부분은 아마도 실패할 것이며 소수만이 변혁을 이끄는 영향력을 지닐 것이고, 이러한 극소수의 상용화를 통해 에너지 위기의 해결책을 제시할 수 있다면 미국의 에너지 안보 구축 등 돈으로 환산할 수 없는 이익을 얻게 될 것이라 언급
 - ARPA-E 자금 지원 프로그램의 성공여부는 향후 석유 소비 감소량, 이산화탄소 배출 감소량, 태양에너지 발전의 효율 향상 정도, 배터리 에너지밀도 증가율 등에 의해 평가될 것이나, ARPA-E의 지원금은 후속 민간 투자를 유도하는 초기 자본이므로 프로젝트의 실질적인 성패 여부를 판단하기 위해서는 10년 이상의 시간 필요
 - 스텔스 전투기, 컴퓨터 네트워킹 등 경제적·사회적 혁신을 일으킨 프로젝트를 성공시킨 DARPA는 펜타곤이라는 내부고객을 확보하고 있었으나, ARPA-E가 지원하는 프로젝트는 치열한 시장경쟁을 통해 기술실용화를 달성해야 하는 어려움내재
 - ARPA-E를 통해 한층 창의적인 연구가 활성화되면서 점진적으로 대기업, 벤처 자본가 등 여러 투자자들이 ARPA-E의 프로젝트에 투자
- ARPA-E 프로젝트의 성공적인 기술실용화의 조기달성을 위해 신규 ARPA-E 프로젝트들은 Technology-to-Market(T2M) Milestones과 로드맵이 포함된 T2M plan 제출
 - ※ T2M plan은 프로젝트 종료 시 도달할 기술상용화 수준(CRL, Commercial Readiness Level)⁶⁾을 포함

6) CRL(Commercial Readiness Level) : 시장진입에 제한이 있거나 실증이 부족한 1단계부터 실제 생산 및 판매 등이 이루어지는 9단계로 구분(별첨 참조)

- 각 프로젝트 내에서 기술에 대한 이해도가 높고 프로젝트의 전반적인 상황을 파악하고 있으며 개발하는 기술의 상용화에 관심이 많은 구성원 1명을 T2M Lead로 선정
- ARPA-E 조직 내의 T2M Advisors들은 초기 T2M plan을 바탕으로 더 나은 기술실용화 방안을 제안하고 각 프로젝트 내의 T2M Lead와 기술개발 상황을 리뷰하여 변화를 프로젝트에 반영할 수 있도록 지원
 - ※ 각 프로젝트는 ARPA-E 내의 Technology Transfer and Outreach(TT&O) 활동에 프로젝트 총 예산의 5%를 사용

- ARPA-E 지원 후, 후속연구를 위한 추가자금 지원 및 기술이전, 회사설립 등의 기술사업화는 태양광, 풍력, 바이오 연료, 에너지저장, 전기자동차, 배터리 분야에서 활발히 추진
 - ARPA-E를 통해 400만 달러를 지원받은 1366 Technologies는 태양전지 패널 핵심부품인 결정질 실리콘 페이퍼의 저가화를 위한 연구에 3,340만 달러의 민간 추가 투자를 확보
 - ARPA-E를 통해 400만 달러를 지원받고 있는 Alveo Energy는 Stanford 대학 Post-Doc.과 사업가 Colin Wessels가 설립한 신생회사로써 고성능, 장수명, 저가의 배터리 기술개발이 목표
 - Envia는 Argonne National Laboratory(아르곤 국립연구소)와 함께 세계 최고 에너지 밀도의 리튬이온전지를 개발을 하고 있으며 400만 달러의 ARPA-E 지원 이후 1,700만 달러의 자금을 민간으로부터 지원 확보

나. 유형별 성공사례

【Private-Sector Investment】

- ARPA-E 자금지원을 통해 9,500만 달러를 지원받은 22개의 프로젝트들이 6억 2,500만 달러의 민간투자를 유치하는 데 성공

〈표 5〉 Private-Sector Investment

프로젝트명	연구기관	예산 (\$ Millions)	연구 내용
ENGINEERING ENZYMES IN ENERGY CROPS (OPEN 2009)	Agrivida	6.6	▶ 화석연료 대체, 온실 가스 감축, 연료 국산화를 위해 Biofuels 생산기술 개발 필요 ▶ 바이오 연료생산 과정에서 필요한 효소를 이미 포함하고 있는 작물을 생산하여 비용 절감과 바이오 연료 생산량 향상 도모 ▶ 미국 바이오 연료생산 비용의 20% 감축 기대
LONG-RANGE ELECTRIC VEHICLE BATTERIES (OPEN 2009)	Envia Systems	4.0	▶ 가솔린 자동차와 가격경쟁력을 가지기 위해 현재 대비 30%의 가격으로 2배의 에너지를 저장하는 자동차 배터리 개발 필요 ▶ Envia systems는 실리콘 기반의 음극 재료 개발 진행 중이며 성공할 경우 현재보다 2~3배의 에너지밀도를 가지는 EV용 배터리 생산 가능
MIXER-EJECTOR WIND TURBINE (OPEN 2009)	FloDesign Wind Turbine	8.3	▶ 제트엔진의 디자인에서 영향을 받은 FloDesign 풍력 터빈의 독특한 덮개 디자인(shrouded design)은 같은 직경의 풍력 터빈 대비 300% 이상의 전력을 공급 ▶ 대형 풍력터빈 설치가 어려웠던 지역에 중간 규모의 풍력 터빈 설치 확대가 가능
ELECTROVILLE: GRID-SCALE BATTERIES (OPEN 2009)	Massachusetts Institute of Technology (MIT)	6.9	▶ 지속적이고 안정적인 전력 공급을 위해 초과 에너지를 저장하는 전기 그리드 개발 필요 ▶ MIT 연구팀은 알루미늄 제련과정에서 영감을 받은 새로운 물질과 배터리 디자인을 사용하여 community-scale의 전력저장장치를 개발 중 ▶ 대형 스케일의 배터리 기술개발을 통해 태양광, 풍력 등 신재생에너지의 동반 성장이 가능
IMPROVED THERMOELECTRIC DEVICES (OPEN 2009)	Phononic Devices	3.0	▶ 미국내 매년 전원에서의 열 손실은 50%에 달함. 폐열 캡처를 통해 수십억 달러의 에너지 절약 효과 가능 ▶ Phononic Devices에서는 기존 제품 대비 30%이상 효율이 향상되고 가격이 저렴한 열전 소자 개발 중
ENERGY FROM WATER AND SUNLIGHT (OPEN 2009)	Sun Catalytix	4.1	▶ Sun Catalytix는 신재생 연료로써 햇빛과 물을 변환할 수 있는 무선 에너지 저장 디바이스를 개발 중 ▶ 나뭇잎 기능을 모방한 디바이스는 촉매로 코팅된 실리콘 태양전지로써 태양광으로부터 에너지를 저장함. 이 셀을 이용하여 물을 전기로 변환시키는 기술을 개발
COST-EFFECTIVE SILICON WAFERS FOR SOLAR CELLS (OPEN 2009)	1366 Technologies	4.0	▶ 결정질 실리콘 웨이퍼는 태양전지패널 생산비용의 가장 큰 부분을 차지함. 1366 Technologies는 2020년까지 0.15 kW/h를 0.07 kW/h로 최대 50% 감소를 목표 ▶ 1366의 프로세스는 가장 많은 비용이 소요되는 slicing 단계 대신 molten silicon에서 바로 얇은 웨이퍼를 생산하고 있으며, 현재 1366의 웨이퍼는 시장 경쟁력을 충분히 갖추고 있다고 판단

프로젝트명	연구기관	예산 (\$ Millions)	연구 내용
METACAPACITORS FOR LED LIGHTING (ADEPT)	City University of New York (CUNY) Energy Institute	1.6	▶ 향후 20년 이내에 현재의 비효율적인 전력 변환기를 통해 미국에서 사용되는 전력의 80%가 공급될 것으로 전망함. 전력 변환기의 효율향상 연구가 필요 ▶ 에너지 효율성이 뛰어난 LED 조명을 이용하기 위해서 CUNY에서는 새로운 나노 소재로 만든 커패시터를 이용해 정교한 전력 변환기를 개발 중
TRANSISTORS FOR ELECTRIC MOTOR DRIVES (ADEPT)	Transphorm, Inc.	3.0	▶ Transphorm 회사는 응용처가 다양하고 저가에 고효율인 전력 변환기를 만들기 위해 GaN 반도체를 이용한 트랜지스터를 개발하고 있음. 고효율을 위해 GaN을 사용하지만, 저가화를 위해 실리콘도 함께 사용 ▶ 기술개발 성공 시, Transphorm 회사의 트랜지스터를 사용한 전기 모터의 효율은 2~8% 향상될 것으로 기대
LITHIUM-SULFUR BATTERIES (BEEST)	Sion Power	5.0	▶ Sion Power는 리튬이온 대비 가격경쟁력이 있고, 파운드 당 400% 에너지 저장에 가능한 Li-S 배터리를 개발 ▶ Sion Power는 분리막으로 둘러싼 리튬전극과 황전극을 샌드위치 형태로 쌓아서 음극과 분리함. 이러한 디자인은 충방전 사이클 수를 기존대비 10배 이상(500 cycles) 증가시키고 리튬배터리 대비 에너지 용량을 400% 이상 향상 ▶ 배터리 개발 성공 시, 한 번의 충전으로 시카고에서 세인트 루이스(300마일)까지 이동 가능
THE ALL-ELECTRON BATTERY (BEEST)	Stanford University	1.5	▶ Stanford 대학에서는 기존의 개념을 완전히 벗어나는 전자(electron) 배터리를 개발하고 있으며, 이온보다 이온 충전 캐리어보다 훨씬 가볍고 빠른 전자를 이용하고 특별한 배터리 구조 디자인을 통해 배터리 저장능력과 수명 향상 기술 개발 중 ▶ 기술이 성공하게 되면 현재 충전식 배터리 제조분야에서 낮은 비율을 차지하고 있는 미국이 우위를 선점하게 될 것으로 기대
SEMI-SOLID FLOWABLE BATTERY ELECTRODES (BEEST)	24M Technologies	6.0	▶ 24M Technologies는 semi-solid flow 배터리 개발을 위해 리튬이온 배터리와 연료전지를 결합 ▶ 기본적으로 리튬이온 배터리의 화학구성을 사용하지만 에너지 저장물질은 외부 탱크를 통해 공급되므로 저장용량을 전지 크기에 의해 제한되지 않음
ENGINEERING BACTERIA FOR EFFICIENT FUEL PRODUCTION (Electrofuels)	OPX Biotechnologies, Inc.	6.0	▶ 수소와 이산화탄소로부터 바이오 디젤을 만드는 미생물 유전자 변형 기술개발 ▶ 가솔린 대비 가격경쟁력이 있고 기존의 바이오 연료보다 10배 효율적인 액체 수송 연료 생산이 가능할 것으로 기대

프로젝트명	연구기관	예산 (\$ Millions)	연구 내용
INTEGRATION OF RENEWABLES VIA DEMAND MANAGEMENT (GENI)	AutoGrid Systems	3.5	▶ AutoGrid Systems는 로렌스 버클리 국립 연구소(LBNL)와 Columbia 대학과 함께 전기 그리드를 통해 실시간 에너지 요구를 관리할 수 있는 자동화된 제어프로그램을 설계 ▶ Demand Response Optimization and Management System-Real-Time(DROMS-RT) S/W는 그리드 사업자에게 수요와 공급의 변동을 관리하는데 도움을 주어 발전 공급자와 소비자 모두에서 효율적인 발전 프로세스를 운영하는 데 도움을 줌
DISTRIBUTED POWER FLOW CONTROL (GENI)	Smart Wire Grid	4.0	▶ 현재 미국 내 30만 마일의 고압송전선의 효율은 전송 용량의 50% 수준 ▶ Smart Wire Grid는 전체적인 전송 용량을 보다 효율적으로 관리하고 전력흐름을 컨트롤할 수 있도록 송전선에 분산형 전력흐름 제어 장치 구축
DYNAMIC POWER FLOW CONTROLLER (GENI)	Varentec	4.0	▶ Varentec은 전력흐름을 제어하기 위해 소형의 저가 전송 전력 컨트롤러를 포함, 전력망에 대한 디지털 전력 센서 및 제어 기술을 개발
HIGH-POWER ZINC-AIR ENERGY STORAGE (GRIDS)	Fluidic Energy	3.0	▶ 전기 그리드 저장 배터리로 사용이 가능한 저가의 고효율, 고회율 아연-공기(Zinc-Air) 배터리 기술 개발 중 ▶ 기술개발 성공 시, 배터리 총방전 사이클이 5,000사이클 이상인 아연-공기 배터리 사용 가능
FUEL-FREE COMPRESSED-AIR ENERGY STORAGE (GRIDS)	General Compression	0.75	▶ 저가의 그리드 스토리지를 제공하고 일시적으로 공급되는 신재생 전력(태양광, 풍력 등)도 상시 송전 가능한 연료가 필요 없는 압축 공기 에너지 저장기술 개발 ▶ 이미 기술 완성되어 현재 테스트 중
ADVANCED FLOW BATTERY ELECTRODES (GRIDS)	Primus Power	2.0	▶ 기존 배터리보다 저비용, 고효율의 아연 기반의 액체 흐름 전지(Liquid Flow Battery) 개발 ▶ 전극은 배터리에서 가장 비싼 구성요소 중 하나로서 배터리 저가화 달성을 위해 Primus Power는 혼합메탈물질을 사용하여 내구성이 뛰어난 전극을 개발
BIOFUELS FROM SORGHUM (PETRO)	Chromatin	7.3	▶ 기존의 바이오디젤 작물보다 더 많은 수확량을 내기 위해 사탕수수의 유전자를 변형하는 연구 수행 ▶ 식물체 건조 중량의 약 20%를 연료로 축적 가능한 새로운 생합성 과정 개발 진행
EFFICIENT, HIGH-TORQUE ELECTRIC VEHICLE MOTOR (REACT)	QM Power	3.0	▶ 희토류를 사용하지 않은 미래형 전기모터 개발 ▶ 현재 EV 모터의 대부분은 희토류 자석을 사용하고 있음. QM Power는 희토류 광물을 사용하지 않고 더 가볍고 효율성이 뛰어나며 저렴한 자석 개발 중

프로젝트명	연구기관	예산 (\$ Millions)	연구 내용
BIOREACTOR DESIGNS FOR RAPID FERMENTATION (REMOTE)	Calysta Energy, Inc.	0.8	▶ Methanotrophic 유기체를 사용하여 메탄의 효율적인 생물학적 변환이 가능한 생물 반응기 기술개발 ▶ 생촉매 개발을 통해 GTL 변환 비용 감소화 기대

【New Company Formation】

- 그리드, 에너지 효율, 전기배터리, 태양광, 탄소 저감, 천연가스, 바이오 연료 등 기술 분야에서 23개의 프로젝트들이 신규 회사 창립

〈표 6〉 New Company Formation

프로젝트명	연구기관	예산 (\$ Millions)	연구 내용
ELECTROVILLE: GRID-SCALE BATTERIES (OPEN 2009)	Massachusetts Institute of Technology (MIT)	6.9	▶ 지속적이고 안정적인 전력 공급을 위해 초과 에너지를 저장하는 전기 그리드 개발 필요 ▶ MIT 연구팀은 알루미늄 제련과정에서 영감을 받은 새로운 물질과 배터리 디자인을 사용하여 community-scale의 전력저장장치를 개발 중 ▶ 대형 스케일의 배터리 기술개발을 통해 태양광, 풍력 등 신재생에너지의 동반 성장이 가능
SHOCKWAVE ENGINE (OPEN 2009)	Michigan State University (MSU)	3.0	▶ 연료 폐기물을 감소하고 엔진 효율을 향상할 수 있는 하이브리드 자동차용 엔진 개발 ▶ 30% 가벼운 엔진을 장착하고 60%의 연료를 사용하는 차량 개발 기대
BEHAVIORAL INITIATIVES FOR ENERGY EFFICIENCY (OPEN 2009)	Stanford University	8.2	▶ 페이스북, 트위터 등에서 사용한 전기 데이터를 수집하는 웹 기반의 플랫폼 구축 ▶ 에너지 사용 데이터를 기반으로 경제성 분석 등을 통해 변환할 수 있는 방식 개발
PRUSSIAN BLUE DYE BATTERIES (OPEN 2012)	Alveo Energy	4.0	▶ 배터리 내에 활물질로써 Prussian Blue 염료를 사용한 그리드 스케일의 저장 배터리 개발 ▶ 저가의 Prussian Blue 염료 사용으로 가격 경쟁력 확보 가능

프로젝트명	연구기관	예산 (\$ Millions)	연구 내용
SLIPPERY COATINGS TO REDUCE FRICTION AND ENERGY LOSS (OPEN 2012)	Harvard University	2.0	▶ 수도 파이프라인, 하수 처리 시스템, 태양광 패널 등 다양한 분야에서 응용 가능한 slippery 코팅 개발 ▶ 액상기반의 코팅 기술은 맞춤형으로 분사를 통해 완전히 매끄러운 표면을 형성하고 긁히거나 손상된 경우 쉽게 복구 될 수 있는 장점을 가짐
BACKPACK-MOUNTED BUILDING EFFICIENCY MODELING (OPEN 2012)	Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)	2.1	▶ 실내 온도를 측정하고 실제 건물 지도를 생성하는 휴대용 시스템 (센서, 하드웨어) 개발 ▶ 카메라와 레이저 스캐너를 사용하여 건물을 3D 시각화하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 건물이 사용할 에너지를 예측 ▶ 저렴한 비용으로 신속하고 정확한 데이터 수집이 가능하며 건물 에너지 사용을 줄이는 전략 개발에 기여
SMALL MIRRORS FOR SOLAR POWER TOWER PLANTS (OPEN 2012)	Otherlab	1.9	▶ 저비용으로 태양빛을 태양 에너지 발전소로 반사시키는 small mirror 시스템 개발 ▶ 구성요소 단가를 절감하고 외부위험(강풍)에 강하며 관리가 쉬운 mirror 설계 ▶ 기존 태양광 발전소에 비해 저렴한 구성요소 비용과 유지 보수 비용의 감소로 태양광 발전 비용 절감 효과 기대
EFFICIENT COLLECTION OF CONCENTRATED SOLAR (OPEN 2012)	University of California Santa Cruz (UC Santa Cruz)	1.6	▶ UC Santa Cruz는 광섬유를 이용하여 태양광에너지를 효율적으로 집광할 수 있는 optical device 개발 ▶ 열저장, 태양광 변환, 태양광 조명 등과 같은 기술에 응용 가능
SEMI-SOLID FLOWABLE BATTERY ELECTRODES (BEEST)	24M Technologies	6.0	▶ 24M Technologies는 semi-solid flow 배터리 개발을 위해 리튬이온 배터리와 연료전지를 결합 ▶ 기본적으로 리튬이온 배터리의 화학구성을 사용하지만 에너지 저장물질은 외부 탱크를 통해 공급되므로 저장용량을 전지 크기에 의해 제한되지 않음
HIGH-EFFICIENCY ADSORPTION CHILLERS (BEETIT)	Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)	3.0	▶ 흡착냉각 장치는 천연 가스 연소 시 발생하는 열이나 폐기물 열 등에 의해 구동되는 에어컨의 일종으로 PNNL은 유기 금속 heat carriers를 사용한 효율적인 흡착냉각 장치 설계 ▶ 현재보다 3배 높은 냉매 능력을 가진 흡착 물질을 개발하여 기존 냉각 장치 대비 2배의 에너지 효율 개선과 저가화 달성 ▶ Department of the Navy로부터 연료감소 달성에 대한 공로로 220만 달러 포상
ELASTIC METAL ALLOY REFRIGERANTS (BEETIT)	University of Maryland (UMD)	3.3	▶ 환경오염을 일으키는 물질 중 하나인 합성 냉매를 사용하지 않는 고효율의 냉각 시스템 개발 ▶ 열을 흡수하거나 방출하는 고체상 변환에서 탄성 형상 기억합금을 사용하는 Thermoelastic cooling system은 동일한 방식의 냉각 장치와 비교할 때 훨씬 적은 에너지를 사용

프로젝트명	연구기관	예산 (\$ Millions)	연구 내용
LIQUID FUEL FROM RENEWABLE ELECTRICITY AND BACTERIA (Electrofuels)	University of California Los Angeles (UCLA)	4.2	▶ UCLA는 <i>Ralstonia eutropha</i> 박테리아의 액체연료(부탄올) 변환 프로세스에 필요한 전기로 신재생 전력 사용 ▶ 신재생 전력을 활용한 UCLA의 electricity-to-fuel system은 액체 연료의 에너지 밀도를 고려할 때 배터리와 같은 에너지 저장 물질보다 효율성이 높을 것으로 기대
FLOW-ASSISTED ALKALINE BATTERY (GRIDS)	City University of New York (CUNY) Energy Institute	3.5	▶ CUNY는 grid-scale 에너지 저장이 가능할 수 있도록 망간(Mn)의 수명을 향상할 수 있는 Zn-Mn Dioxide 배터리 기술 개발 ▶ 배터리 내의 fluid를 펌핑시키는 방법을 통해 망간의 수명 단축의 원인으로 알려진 아연의 dendrite 생성 억제 가능
SOLAR THERMOCHEMICAL FUEL PRODUCTION (HEATS)	University of Florida	3.0	▶ Syngas에 태양열에너지를 사용하여 가솔린을 생산할 수 있는 고온 화학 반응기 개발 ▶ 태양열을 활용하여 합성 탄화수소 연료의 생산 비용 저가화 기대
STIMULI-RESPONSIVE METAL ORGANIC FRAMEWORKS (IMPACCT)	Texas A&M University	1.0	▶ 작은 온도변화로 CO₂의 캡처와 저장을 조절할 수 있는 유기 금속 프레임워크(metal organic frameworks, MOF) 개발 ▶ 석탄 화력발전소 굴뚝의 높은 온도에서는 안정적인 구조를 유지하되 CO₂의 결합·방출과 관련하여서는 작은 온도변화에 민감한 MOF를 개발 ▶ CO₂ 캡처·저장에 필요한 에너지 사용 절감 기대
PHASE-CHANGING IONIC LIQUIDS (IMPACCT)	University of Notre Dame	2.6	▶ 석탄 화력발전소의 가스에서 CO₂를 제거하기 위해 특수 이온성 액체(ionic liquids, ILs)를 사용하는 CO₂ 포집공정 개발 ▶ 보통 상온에서는 액체 상태인 이온성 액체와 달리, Notre Dame에서 개발한 상변화 이온성 액체는 상온에서는 고체이고, CO₂와 결합할 때 액체로 변화 ▶ 화력발전소의 배기가스로부터 CO₂를 캡처하는데 필요한 에너지 절감 기대
SORBENT-BASED NATURAL GAS TANK (MOVE)	Blackpak, Inc.	5.5	▶ 차량 탱크의 천연가스 압력을 줄이면서 더 가볍고 더 작은 사이즈의 천연가스 저장 장치 개발을 위해 표면적이 넓고 고강도의 탄소를 사용한 sorbent-based 천연가스 탱크 개발
GAS-COMPRESSING ENGINE (MOVE)	Oregon State University (OSU)	1.0	▶ OSU는 천연가스 압축이 가능한 단일 실린더를 가진 엔진 개발 ▶ 차량에 전원을 공급하고 효율적인 천연가스 저장이 가능하도록 천연가스 압축기능을 가지는 엔진 사용 시 6개월 분 연료절감효과 기대

프로젝트명	연구기관	예산 (\$ Millions)	연구 내용
INTESTINAL NATURAL GAS STORAGE (MOVE)	Otherlab	3.5	▶ 작은 반경에 고압 튜브로 구성되어 있으며 차량 형태에 최적화된 천연가스 저장탱크 개발 ▶ 사람의 장 형태를 본뜬 관모양의 space-filling 디자인은 최대 저장용량을 확보하며 기존의 자동차 제조 공정에서 사용 가능
FUEL FROM TOBACCO AND ARUNDO DONAX (PETRO)	Texas A&M Agrilife Research	4.9	▶ 바이오 연료로 변환할 수 있는 고에너지 분자인 terpenes 를 생성하는 새로운 방법을 연구하여 광합성의 효율성을 향상시키는 기술 개발 ▶ 담배잎 연구가 성공한다면 고농축 연료생산 작물인 Arundo donax에 적용 예정
CARBON-BASED MAGNETS (REACT)	Virginia Commonwealth University (VCU)	2.2	▶ 희토류 광물을 사용하지 않는 재생 발전기와 EV 모터에 적용하기 위한 자석 개발 ▶ carbon-based 물질을 사용한 자석을 prototype의 전기 모터에 demonstration하는 것을 목표
IRON FLOW BATTERY (SBIR/STTR)	Energy Storage Systems (ESS)	1.7	▶ 현재 flow 배터리는 시스템 비용 문제로 grid-scale 에너지 저장 시장의 1% 이하를 차지 ▶ iron을 사용하여 비용 효과적인 전해질을 사용하고 전력 밀도 증가와 비용 저가화가 가능한 혁신적인 배터리 하드웨어 디자인 개발
DOUBLE ENERGY DENSITY FOR LITHIUM-ION BATTERIES (SBIR/STTR)	Sila Nanotechnologies, Inc.	3.0	▶ 리튬이온 EV 전지용 고용량 나노구조물질 합성기술 개발 ▶ 전지 동작 중, 최소한의 부피변화를 보여주는 양극 물질 개발, 배터리 수명 증가, 안정성 확보, 충전률 개선 등 목표 ▶ 현재 배터리 비용의 1/2 절감 기대

【Government Partnerships】

- 전기 배터리, 그리드, 에너지 효율(건물, 냉각장치 등), 이산화탄소 포집 등의 분야에서 16개의 프로젝트들이 후속연구를 위해 정부기관으로부터 추가 지원 유치 성공

〈표 7〉 Government Partnerships

프로젝트명	연구기관	예산 (\$ Millions)	연구 내용
ELECTROVILLE: GRID-SCALE BATTERIES (OPEN 2009)	Massachusetts Institute of Technology (MIT)	6.9	▶ 지속적이고 안정적인 전력 공급을 위해 초과 에너지를 저장하는 전기 그리드 개발 필요 ▶ MIT 연구팀은 알루미늄 제련과정에서 영감을 받은 새로운 물질과 배터리 디자인을 사용하여 community-scale의 전력저장장치를 개발 중 ▶ 대형 스케일의 배터리 기술개발을 통해 태양광, 풍력 등 신재생에너지의 동반 성장이 가능
LASER- MECHANICAL DRILLING FOR GEOTHERMAL ENERGY (OPEN 2009)	Foro Energy	9.1	▶ Foro Energy는 광섬유 케이블을 이용해 장거리 고효율 레이저 전송이 가능한 하드웨어 시스템 개발 ▶ 기존 시스템 대비 Foro Energy의 레이저를 이용한 드릴은 최대 10배의 경제성을 기대
UTILITY-SCALE SILICON CARBIDE POWER TRANSISTORS (ADEPT)	Cree, Inc.	5.6	▶ SiC 트랜지스터는 기존 전력 트랜지스터 대비 효율성이 50% 이상이며 Cree는 최대 15,000V에서 작동하는 SiC 트랜지스터 개발 ▶ Cree는 1,200V에서 작동할 수 있는 트랜지스터 상용화 성공
RECHARGEABLE LITHIUM-AIR BATTERIES (BEEST)	PolyPlus Battery Company	5.4	▶ PolyPlus는 세계최초로 상용화 가능한 충전시기 리튬-공기 배터리 기술 개발 ▶ 기존 리튬이온 배터리 대비 700% 이상 고에너지 저장 가능한 리튬-공기 배터리 개발을 위해 멤브레인 연구 진행
LITHIUM-SULFUR BATTERIES (BEEST)	Sion Power	5.0	▶ Sion Power는 리튬이온 대비 가격경쟁력이 있고, 파운드 당 400% 에너지 저장이 가능한 Li-S 배터리를 개발 ▶ Sion Power는 분리막으로 둘러싼 리튬전극과 황전극을 샌드위치 형태로 쌓아서 음극과 분리함. 이러한 디자인은 충전 사이클 수를 기존대비 10배 이상(500 cycles) 증가시키고 리튬배터리 대비 에너지 용량을 400% 이상 향상 ▶ 배터리 개발 성공 시, 한 번의 충전으로 시카고에서 세인트 루이스(300마일)까지 이동 가능

프로젝트명	연구기관	예산 (\$ Millions)	연구 내용
MEMBRANE DEHUMIDIFIER (BEETIT)	ADMA Products	3.4	▶ ADMA는 습기를 효율적으로 제거하는 포일같은 멤브레인 개발 ▶ 개발된 멤브레인은 선택적 투과율이 높고, 적은 에너지를 사용 ▶ Department of the Navy로부터 연료감소 달성에 대한 공로로 46만 달러 포상
DEHUMIDIFYING AIR FOR COOLING & REFRIGERATION (BEETIT)	Dais Analytic Corporation	0.7	▶ Dais는 에어컨보다 효율적으로 건물 내 제습이 가능한 NanoAir 시스템 개발 ▶ 선택성이 높은 멤브레인의 사용으로 제습 시 사용되는 에너지 소비 감소 ▶ 상용화를 위해 industry-standard installation technique 사용 ▶ Department of the Navy로부터 연료감소 달성에 대한 공로로 80만 달러 포상
INNOVATIVE MINIATURIZED HEAT PUMPS FOR BUILDINGS (BEETIT)	Georgia Tech Research Corporation	2.4	▶ Georgia Tech은 새로운 타입의 히트 펌프 부품 및 시스템 설계 ▶ 새로운 히트 펌프는 온실가스 배출이 없는 냉매를 사용하고 폐열이나 태양열, 연소 에너지 등에서 사용가능 ▶ Department of the Navy로부터 연료감소 달성에 대한 공로로 231만 달러 포상
HIGH-EFFICIENCY STIRLING AIR CONDITIONER (BEETIT)	Infinia	3.0	▶ Infinia는 유해한 냉매를 사용하지 않고 효율성이 높은 냉장고 개발 ▶ Infinia 냉장고는 헬륨가스를 냉매로 사용하여 친환경적이고, 비용 효율적인 대량 생산이 가능 ▶ Department of the Navy로부터 연료감소 달성에 대한 공로로 177만 달러 포상
HIGH-EFFICIENCY ADSORPTION CHILLERS (BEETIT)	Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)	3.0	▶ 흡착냉각 장치는 천연 가스 연소 시 발생하는 열이나 폐기물 열 등에 의해 구동되는 에어컨의 일종으로 PNNL은 유기금속 heat carriers를 사용한 효율적인 흡착냉각 장치 설계 ▶ 현재보다 3배 높은 냉매 능력을 가진 흡착 물질을 개발하여 기존 냉각 장치 대비 2배의 에너지 효율 개선과 저가화 달성 ▶ Department of the Navy로부터 연료감소 달성에 대한 공로로 220만 달러 포상
DISTRIBUTED POWER FLOW CONTROL (GENI)	Smart Wire Grid	4.0	▶ 현재 미국 내 30만 마일의 고압송전선의 효율은 전송 용량의 50% 수준 ▶ Smart Wire Grid는 전체적인 전송 용량을 보다 효율적으로 관리하고 전력흐름을 컨트롤할 수 있도록 송전선에 분산형 전력흐름 제어 장치 구축

프로젝트명	연구기관	예산 (\$ Millions)	연구 내용
MAGNETIC ENERGY STORAGE SYSTEM (GRIDS)	ABB	4.6	▶ ABB는 초전도 자석을 이용한 에너지 저장 시스템 개발 ▶ 태양광 풍력 등 재생에너지의 광범위한 사용을 지원해 줄 수 있는 충분한 저장 용량을 가지는 초전도 자기 에너지 저장 시스템을 사용할 경우 전력 그리드 가격의 저가화 가능
ADVANCED FLOW BATTERY ELECTRODES (GRIDS)	Primus Power	2.0	▶ 기존 배터리보다 저비용, 고효율의 아연 기반의 액체 흐름 전지(Liquid Flow Battery) 개발 ▶ 전극은 배터리에서 가장 비싼 구성요소 중 하나로서 배터리 저가화 달성을 위해 Primus Power는 혼합메탈물질을 사용하여 내구성이 뛰어난 전극을 개발
SUPERSONIC TECHNOLOGY FOR CO ₂ CAPTURE (IMPACCT)	Alliant Techsystems (ATK)	2.7	▶ aerospace wind-tunnel 기술을 적용한 이산화탄소의 포집 및 고체화 기술 개발 ▶ 기계적으로 간단하고 화학적 폐기물이 없으며 쉽게 기존 장비에 적용가능
CO ₂ CAPTURE WITH LIQUID-TO-SOLID ABSORBENTS (IMPACCT)	GE Global Research	3.7	▶ CO₂와 결합 시 고체로 상변화를 일으키는 액체 흡수제 개발 ▶ 고체화된 물질에 열을 가열하여 CO₂를 분리한 후, 액체 흡수제 재사용 가능 ▶ 물과 같은 용매를 제거하기 위한 heating process가 필요하지 않는 고효율 CO₂ 포집방법
CO ₂ CAPTURE AND REGENERATION AT LOW TEMPERATURES (IMPACCT)	Research Triangle Institute (RTI)	2.5	▶ 포집한 CO₂와 용매를 분리하기 위한 온도를 감소할 수 있는 용매 및 방법 개발 ▶ RTI의 용매는 수계 용매보다 CO₂ 흡수율이 높고 낮은 온도에서 분리·재생 가능 ▶ 기존에 사용할 수 없었던 산업열을 사용하여 비용 절감 가능

5 시사점

- ARPA-E는 미래사회를 위한 혁신적인 기술개발을 추구하지만 지원하는 상당수의 프로젝트가 실패할 확률이 높음을 인지
 - ARPA-E의 PD는 에너지 관련 하나 또는 그 이상의 분야에서 최고의 인재가 선정되며 실패를 인정하는 시스템 아래에서 자신의 프로그램을 개발하고 프로젝트들을 선정하는데 큰 재량권과 책임을 부여
 - 국내에서는 정부부처와 연구재단 등에서 PD* 와 PM** 제도를 구축하여 운영
 - * PD제도는 신규과제 기획, 중간·최종 평가 및 관리, 성과관리·확산 등 R&D 전 과정을 기술분야별 전문가(임기 2년, 연임가능)가 책임지고 상시 전담하는 제도
 - ** PM제도는 각 연구분야에서 10년 이상의 전문성을 확보한 연구자에게 동향파악 및 사업기획, 선정과 평가까지의 전 과정에 대한 책임을 맡기는 제도
 - 그러나 국내의 PD나 PM은 ARPA-E PD에 비해 지원인력 규모, 예산의 가용성 등에서 큰 차이를 가지고 있으며 프로젝트 선정이나 진행 등 역할의 제약이 많은 상태

※ 혁신적 아이디어를 가지고 있는 최고의 인재를 PD로 선정하고, 실현 가능성이 없어 보이지만 실현된다면 파괴적인 영향력을 가질 수 있는 High-Risk 과제 선정에 대한 최종결정 권한을 포함한 최대한의 자율권과 재량권을 PD에게 부여하는 것이 필요

※ PD의 이해관계에 따른 연구윤리 문제제기를 해결하기 위해 철저한 사후 회계감사를 통한 투명성 확보 필요

※ 혁신적인 연구에는 수많은 실패가 뒤따른다는 것을 인지하고 실패를 폭넓게 수용할 수 있는 연구문화 확립 필요

□ ARPA-E 지원 프로그램은 백악관, 의회, 정부 부처 등에 프로그램의 혁신 가능성을 제시하고 미국 에너지정책과 긴밀한 관계를 유지

- 성공할 경우의 미국 사회 전반에 걸쳐 일어날 파급력을 인지시키고 학계, 산업계, 정부 부처 등 다양한 Networking 활동을 통해 예산확대와 같은 국가적 지지와 국민의 이해 획득에 주력

※ 중장기적 관점에서 에너지기술 개발의 필요성에 대한 정책 결정자 및 지도층의 인식 전환 및 국민적 이해 획득 필요

□ ARPA-E는 2011년 6개의 과제가 민간투자를 추가 유치한 이후 점진적으로 민간기업의 자금을 성공적으로 유치하거나 회사 창립 등의 사례가 증가하고 있는 추세

- 현재까지 22개의 ARPA-E 프로젝트가 민간으로부터 6억 2,500만 달러의 추가 지원을 받고 있음. 23개의 ARPA-E 프로젝트 팀이 새로운 회사를 형성하였고 16개의 ARPA-E 프로젝트가 정부기관과 공동연구를 진행
- ARPA-E 프로젝트는 Technology-to-Market팀과 더불어 Milestones와 로드맵을 포함한 T2M plan을 계획하고 T2M Advisors의 지원 아래 수행
 - ※ T2M advisors는 각 프로젝트의 T2M Lead와 지속적으로 프로젝트 리뷰를 진행하고 시장 동향파악, 고객니즈 분석 등을 프로젝트에 반영할 수 있도록 지원

※ R&D가 시장에 진입할 때 가장 중요한 문제인 지속적 자금투자를 위해 프로젝트는 기술개발과 더불어 해당 프로젝트에 최적화된 비즈니스 모델(BM, Business Model) 확보 필요

※ 새로운 기술을 기반으로 시장분석을 통한 전략과 함께 목표고객, 판매전략, 유통, 마케팅 등 최적화된 BM을 확보할 때 기술실용화의 조기 달성 가능

[별첨] Commercial Readiness Level Scale

CRL	Description
1	▶ 사용사례, 응용가능성, 시장 요구사항 등이 아직까지 없거나 제한적인 상태
2	▶ 새로운 기술을 기반으로 제품 아이디어는 존재하지만 검증되지 않은 상태
3	▶ 새로운 기술을 기반으로 응용 프로그램, 기술사용 사례, 시장의 요구사항, 경쟁 기술과 제품에 대한 유사도 등 제품화를 위한 기초적인 고려가 진행된 상태
4	▶ Technology-product-market 분석과 잠재 고객의 feedback을 기반으로 제품화 전략 정립 ▶ Basic cost-performance 모델 수립 및 경쟁력(competitive) 분석 수행 ▶ 초기 가치사슬(value-chain) 분석을 통해 잠재적 공급업체, 파트너, 고객 등에 대한 수요가 조사된 상태
5	▶ 명확한 타겟 시장과 적용방안을 가지고 기술기반 제품의 이미지를 뚜렷하게 정의 ▶ 제품설계의 trade-offs를 고려한 포괄적인 비용 대비 효과 비율(cost-performance) 모델 정립 ▶ 단기 또는 장기매출, 비용, 수익 등에 대한 초기 예측을 포함한 기본적 재무모델 보유
6	▶ 시장과 제품의 요구사항을 반영하고 가격과 성능의 trade-offs를 고려한 제품 디자인 최적화 수행
7	▶ 제품 디자인 완료 상태. 규격화된 제품 생산 및 인증. 종합적인 재무모델 정립 및 예측 수행
8	▶ 초기 제품들이 제조되고 판매되는 상태. 대규모 생산 및 판매를 위한 상용화 준비 진행
9	▶ 다방면에서 기술이 적용되고 있는 상태