

## 글로벌 과학난제 도전연구프로젝트 분석을 통한 우리나라 지질자원기술에의 바람직한 제언

김성용<sup>1\*</sup> · 성창모<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 미래전략연구센터, <sup>2</sup>한국과학기술한림원 정책연구소, <sup>3</sup>고려대학교 KU-KIST 에너지환경대학원

## Desirable Suggestions for Korean Geo-technology R&D through Analysis of the Global Grand Challenges and Moonshot Projects

Seong-Yong Kim<sup>1\*</sup> and Changmo Sung<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Future Geo-Technology Strategy Research Center, The Korea Institute Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

<sup>2</sup>Policy Research Institute, The Korean Academy of Science and Technology (KAST)

<sup>3</sup>KU-KIST Graduate School of Energy and Environment (Green School), Korea University

(Received: 30 December 2019 / Revised: 30 January 2020 / Accepted: 01 February 2020)

Remarkable scientific and technological achievements are mainly shown in the ‘super-convergence’ or ‘convergence of convergence’ among cross- disciplinary fields, and advanced countries are promoting the ‘high-risk, high-return research’ ecosystem. Google LLC is carrying out numerous new challenges in terms of a non-failure perspective. Innovative research by the US Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) has produced such breakthroughs as the Internet, GPS, semiconductors, the computer mouse, autonomous vehicles, and drones. China is pioneering a ‘Moon Village’ and planning the world’s largest nuclear fusion energy and ultra-large particle accelerator project. Japan has also launched ‘the moonshot technology development research system’ to promote disruptive innovation. In Korea, the government is preparing a new research program to tackle the global scientific challenges. Therefore, it is necessary to determine the reasonable geoscientific challenges to be addressed and to conduct a preliminary study on these topics. For this purpose, it is necessary to conduct long-term creative research projects centered on young researchers, select outstanding principal investigators, extract innovative topics without prior research or reference, simplify research proposal procedures, innovate the selection solely based on key ideas, and evaluate results by collective intelligence in the form of conferences.

**Key words :** scientific challenges, geoscientific, super-convergence, DARPA, moonshot

폭발할만한 과학기술성적은 이종분야간 초융합 또는 융합의 융합에서 주로 나타나고 있으며, 기술경쟁국들은 고위험 고수익 연구생태계를 추진하고 있다. 구글은 실패를 두려워하지 않는 관점에서 수많은 새로운 도전을 수행하고 있고, 미국 고등연구계획국(DARPA)의 혁신적인 연구추진은 지금까지 인터넷, GPS, 반도체, 마우스, 자율주행차, 드론 등과 같은 획기적인 성과를 만들었다. 중국은 달기지 개척, 세계 최대 규모의 핵융합 에너지와 초대형 입자가속기 프로젝트를 추진 중이며, 일본도 ‘문샷형 기술개발연구제도’를 착수하여 파괴적 혁신창출을 추진하려 한다. 우리나라도 글로벌 과학난제의 도전과 해결을 위해 신규 연구프로그램을 준비하고 있다. 따라서 지질자원기술 연구자가 중심이 되어 도전하고 해결하며 공감할 수 있는 과학난제의 주제 발굴과 이들 주제에 관한 사전연구 등이 필요하다. 이를 위해서는 신진연구자 중심의 장기 창의연구사업, 우수한 과제책임자 선정, 선행연구나 참고문헌도 없는 획기적 주제 도출, 과제제안 절차 간소화, 아이디어 중점 선정시스템 혁신, 컨퍼런스 형태의 집단지성에 의한 결과평가 등이 필요하다고 사료된다.

**주요어 :** 과학난제, 지질자원기술, 초융합, 고등연구계획국(DARPA), 문샷

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

\*Corresponding author: [ksy@kigam.re.kr](mailto:ksy@kigam.re.kr)

## 1. 서 론

우리가 문명사회를 이루면서 지속적으로 고민해오던 해결이 필요한 과학난제 도전과제(Grand Challenge)와 문샷(Moonshot)형 연구는 ‘기술적 측면에서 잠재적인 위험 및 이익에 대한 충분한 검증가능한 방법이 없고 단기간의 수익성이나 이익의 기대 없이, 야심차고 탐험적이며, 다소 무모하지만, 획기적인 연구’ 등을 의미한다(Goole X(2010); as cited in Whatis.com, 2019). 1969년 미국의 아폴로 달탐사 프로그램(Apollo Program, 아폴로 11호 달 착륙) 성공 이후, 문샷형 프로젝트는 달관측이 아니라, 달에 도착하려는 시도, 불가능한 일을 성취하기 위한 대담한 노력을 상징적으로 의미하게 되었다. 미국 오바마 정부(2016.12)때의 압정복 문샷 이니셔티브(National Cancer Moonshot Initiative, Cancer Moonshot 2020)로 암 정복을 위한 사업을 야심차게 추진하면서, 기존 의학·바이오편야는 물론 IT·이종공학분야와도 초융합(Super-convergence), 융합의 융합(Convergence of convergence) 연구를 수행중이다. 이처럼 기술선진국들은 최근의 괄목할만한 과학기술 성과 창출을 위해 이종분야간 초융합 또는 융합의 융합을 더욱 강화하고 있으며, 최초이자 최고의 ‘고위험, 고수익(High-Risk, High-Payoff) 연구’ 생태계를 추진하고 있다.

문샷 씽킹(Moonshot Thinking) 및 실행(Act)을 추구하는 대표적 모델은 미국 방위고등연구계획국(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)의 연구 프로그램이며, DARPA는 고위험 고수익 연구, 세상을 바꿀만한 첨단 혁신을 위해 도전적인 연구를 지속적으로 추구하고 있다. 문샷 씽킹은 10% 개선보다는 오히려 10배 혁신(10x Not 10%)을 추구하자는 생각을 의미하고, 실패를 위한 실패(fail to fail)를 한다는 관점으로 무모하게 도전하는 의지이다.

ICT 융합의 4차 산업혁명 도래로, 과학기술과 인문사회 등 다양한 분야의 초융합, 융합의 융합에 의한 난제 해결 기대가 증가하고 있다. 이제는 과학기술의 중요성이 모든 영역에서 커지는 시대가 된 것이다. 우리나라 R&D 투자(2017)는 GDP 대비 세계 최고 수준(4.55%)이며 총량으로도 697억 달러로서 미국(5,432억달러), 중국(2,605억달러), 일본(1,561억달러), 독일(1,122억달러)에 이어 세계 5위 수준으로 프랑스(565억달러), 영국(439억달러)에도 앞서고 있으나(KISTEP, 2019), 그간의 두 번의 정부 R&D 혁신을 위한 노력에도 불구하고 근본적 혁신이 미흡하다고 평가하면서 정부 R&D를 선도형으로 혁신하기 위한 노력이 지속되어

야 한다고 진단하였다(MSIT, 2018a).

이제 우리나라도 퍼스트 무버(First Mover)로서 기술선도국들과 경쟁에서 살아남으려면 파괴적 혁신을 일으키는 R&D를 중점 추진하고 신산업·일자리 창출을 가속화하며, 삶의 질 향상과 국가·사회 문제해결에 기여를 확대해야 한다. 그간의 안정적 연구목표 설정과 무난한 달성은 무의미하다. 새로운 과학기술 난제 도전형 R&D 프로그램으로 ‘리스크 회피 문화’를 극복하고, 기존 기술의 연장이 아닌 대담한 발상에 근거한 도전적 연구개발 추진이 되어야 한다. 이러한 기조를 국가 R&D 혁신방안에 담아, 최근 정부는 고위험 혁신형 R&D 프로그램을 확대하려 한다. 과학난제 극복, 미래 신시장창출, 국민생활문제 해결 등의 전략분야를 중심으로 고위험 고수익형 연구 프로그램을 강화하고자 한다(MSIT, 2018b).

따라서, 본 연구에서는 정부의 도전적 혁신연구개발 추진 활성화 시책에 부합하여, 지금의 보수적인 연구 풍토를 벗어나서 바람직한 도전적 미래유망 지질자원 기술분야 중심의 과학난제 해결 연구방안을 제안하고자 한다.

## 2. 우리나라 정부 R&D에서의 도전적 난제 프로그램 고찰

우리나라는 이미 구글 X-프로젝트를 벤치마킹하여, 2015년에 도전과제 탐색연구 지원을 한국연구재단의 X 프로젝트사업으로 추진하였다. 우리나라 한국연구재단의 X 프로젝트 개념은 새로운 시각에서 새로운 난제들을 발굴하고, 이러한 난제해결에 새로운 방식으로 과감히 도전하는 분위기를 조성하며, 다양한 시각에서 참신한 문제, ‘세상을 바꾸는 위대한 질문’들을 발굴하고자 하였다. 연구자와 국민들에게 질문하는 마인드와 분위기를 확산하고 기존과는 다른 새로운 시각에서 창의적인 방법으로 난제해결에 과감히 도전하도록 하는 것이었다(NRF, 2015).

우리나라는 X 프로젝트를 시작하면서, X문제에 대해 일반 국민, 연구자, 창의적 학생 등을 대상으로 다양한 시각에서 참신한 질문들을 발굴하여 문제 풀을 구성하였고, 현재와 미래에 절실한 문제, 아직까지 생각해 보지 못했던 새로운 문제를 기준으로 문제선별 및 문제간 융합·재구성을 통해 X문제를 선정하였다. 문제 발굴 플랫폼을 구축하고, 다양한 질문을 생각하고 제시하는 분위기를 조성하여 우리사회 X문제를 지속적으로 발굴하고자 하였다. 지원과제로 선정된 X 프

로젝트는 X문제 해결을 위한 창의적·도전적 아이디어가 있는 연구과제를 공모하고, 해결 가능성이 보이는 연구과제를 선정하여 연구 활동을 지원하며, 각 문제별로 문제해결에 도전하기 위해 제시한 방법론이 타당한 경우에는 차별화된 복수의 연구과제를 선정·지원하여 다양한 시각에서 문제해결에 도전하고자 0.5~1 억원 규모로 1년(+1년)을 지원하였다(MSIP, 2015). 한국연구재단의 X 프로젝트는 2016년도에 76신청과제 중에서 ‘머신러닝을 이용한 개인맞춤형 뇌노화 예측시스템 개발’ 등 11과제를 X 프로젝트로 선정·지원하였으며, 2017년도에 227개 신청과제 중에서 ‘해수에 포함된 리튬자원의 고순도 정제를 통한 리튬자원 공급문제 해결에 관한 기술개발’ 등 35개 과제를 X 프로젝트로 선정·지원하였다(NRF, 2017a & b). 그러나 기존의 국민생활연구분야, 사회문제해결형 과제 등과의 중복성 논란이 있으므로, 한국연구재단(NRF, 2017a)은 외부 정책연구 용역을 거쳐, 다른 정부과제들과의 차별성을 확보하고자 하였다. 현재 해결이 어려운 중요한 난제를 해결할 수 있거나 차세대 씨앗 과학기술이 될 수 있는 도전적이고 창의적인 연구프로젝트로 개편되어야 한다는 쪽으로 개선방안을 도출하였다.

산업기술개발분야를 전담하는 산업통상자원부(MOTIE, 2019)는 성공 가능성이 낮지만 미래세대를 위한 산업의 난제에 도전하는 고난도 기술개발 과제 관점에서, 성공 시에는 경제 파급효과가 매우 큰 획기적인 기술개발을 위해 알키미스트 프로젝트를 2019년도에 중점적으로 신규 착수하였다. 국가 기간사업인 자동차, 로봇, 첨단장비, 신재생에너지, 에너지효율향상 등 5개 분야에서 성공을 담보로 하는 기존 연구개발들을 벗어나 파괴적인 잠재력을 가진 도전적 기술 확보를 위해 중장기, 대규모로 지원하는 기술개발 과제 성격이며, 기존 시장의 체계(패러다임)를 바꾸거나 새로운 시장을 창출하는 와해성 기술, 현재의 기술적 한계를 극복하여 산업의 획기적인 도약을 견인하는 돌파형 기술 등이 지원 대상이다. 산업계 난제를 해결하기 위해, 알키미스트 프로젝트는 중장기 기술개발에 집중하고자 한다.

### 3. 선진국, 경쟁국 및 글로벌 선도기업의 도전적 연구개발 고찰

#### 3.1. 파괴적 기술(Disruptive Technology) 동향

미국 MIT(2019)는 테크놀로지 리뷰에서 해결해야 할 10대 지구적 난제들을 발표하였다. 이산화탄소 포집·

격리, 그리드 규모의 에너지 저장, 범용 독감백신, 치매 치료, 해양 청소, 에너지 효율적 해수담수화, 안전한 무인 자동차(safe driverless car), 내장형 인공지능(embodied AI), 뇌 신경망 해독(brain decoding), 지진 예측(earthquake prediction)이 해당된다. 특히 지진 예측은 지질자원이 중심이 되는 난제이다. 지진은 얼마 기간만 미리 신뢰성 있게 지진을 예측한다면 관계당국이 대비책을 강구할 수 있으며, 최소한 몇 시간 전 사전경고를 할 수 있다면 수백만 명의 생명을 구할 수 있을 것이다.

비즈니스 컨설턴트를 주로 하는 디스럽션 허브(Disruption Hub)는 매년 파괴적 기술 동향(Disruptive Technology Trends)을 발표하고 있다. 2018년도에는 18개의 파괴적 기술동향(Disruption Hub, 2018)을 제시하였다. 이들은 모바일-First 에서 AI-First, 개인화 및 고객화, 고기없는 고기, 개인데이터 가치플랫폼, 만물서비스화 모델의 거대성장(huge growth in the as-a-service model), 지속가능성, 유비쿼터스 음성기반 가상 도우미, 인더스트리 4.0과 미래공장 단계, 블록체인 시대 도래, 예측분석으로 향상된 의사결정(improved decision making with prescriptive analytics), CRISPR (clustered regularly interspaced short palindromic repeats, 박테리아와 고세균과 같은 원핵생물 유기체 게놈에서 발견되는 DNA 서열), 이종산업간 융합, 상업용 드론/무인항공기, 중요회의 안전으로서의 다양성, 디지털 트윈(CPS) 관심 증가, 현실세계를 증강하는 공간 컴퓨팅, 전환점 부근의 신재생·청정에너지, 증가하는 영역간의 혁신 등이다(Table 1). 연이어 Disruption Hub는 2019년도에 9개의 파괴적 기술동향을 발표하였다(Disruption Hub, 2019). Web 3.0(사물인터넷), 시물레이션과 디지털 트윈, 하나의 시장(the market of one), 엣지 컴퓨팅(edge computing), 음성경제(the voice economy), 전략적 자동화(strategic automation), 유비쿼터스 인공지능, 공간 컴퓨팅 (spatial computing), 양자 컴퓨팅 등이다(Table 2).

#### 3.2. 미국의 도전적 연구개발 활동

미 국립과학재단(NSF)(2017a & b)는 미래세대를 선도할 담대한 아젠더인 미래 유망 영역으로서 10 Big Ideas를 제시하였는데, 기존 과학기술 영역을 넘어서는 모험적 연구, 글로벌 환경에서 미국 리더십과 경제적 경쟁력 및 안보향상 유도, 다양한 주체들 간의 협업 필요와 미래사회를 주도할 수 있는 기술영역으로서, ① 데이터 혁명의 활용, ②인간-첨단기술간 업무 미래, ③

**Table 1.** 18 Disruptive Technology Trends For 2018

| Disruptive Technology Trends For 2018                                |
|--|
| • Mobile-first to AI-first   |
| • Personalisation & Customisation                                    |
| • Meatless meats   |
| • Personal data value platforms                                      |
| • Huge growth in the as-a-service model                              |
| • Sustainability becomes a major feature in innovation               |
| • Voice based virtual assistants become ubiquitous                   |
| • Steps towards Industry 4.0 and the factory of the future           |
| • Blockchain comes of age  |
| • Improved decision making with Prescriptive Analytics               |
| • CRISPR (clustered regularly interspaced short palindromic repeats) |
| • Convergence  |
| • Commercial drones and UAVs (unmanned aerial vehicle)               |
| • Diversity becomes a major boardroom issues                         |
| • Growing interest in digital twins                                  |
| • Spatial Computing augments the real world                          |
| • Renewables and Clean Energy near tipping point                     |
| • Increased cross sector innovation                                  |

※ Source: Disruption Hub (2018), <https://disruptionhub.com/2018-disruptive-trends/>

다목적 메신저 친체물리측정 장비 시대, ④차세대 양자혁명, ⑤생명규칙에 대한 이해, ⑥신 북극지역탐사, ⑦NSF-다양성을 통한 과학·공학강화, ⑧융합 연구 확대, ⑨중규모 연구인프라, ⑩NSF 2026 통합기반연구 펀드(NSF 2026 Fund) 등이었다.

미국은 그간 고등연구계획국(DARPA) 프로젝트를 통해서, 시대를 앞선 선도적 연구를 주도하며 점진적 발전보다는 혁신적 변화를 추구하였고, 획기적인 성과물을 창출한 바 있다. DARPA는 미국 국방부에 소속된 미군 관련 기술 연구개발 기관이며, 직접 R&D를 수행

하기 보다는 관련 방위산업체나 연구기관들의 경쟁을 통한 R&D활동 지원을 통해 창출된 성과물 중에서 가장 적합한 것을 선택하고 있다. 연간예산은 연 31억 달러 정도이며, 100명 정도의 연구책임자를 포함한 200여명으로 구성되어 있다. 주로 군대·국방 시스템, 데이터, 생물학 및 프론티어 확장 분야에 전략적 투자를 집중하고 있으며, 실패에 대한 비용 및 시간 리스크가 높긴 하지만 성공할 경우 기존 군사력의 역할과 임무를 획기적으로 발전시킬 수 있는 연구와 기술 프로젝트를 추진하는 역할을 하고 있다(DARPA, 2019a; Jang, 2011). 지금까지 알려진 DARPA의 대표 연구성과로는 최초의 인터넷 탄생(ARPANET), 슈퍼컴퓨터를 포함한 초대형 컴퓨터, 패킷 통신기술, 유비쿼터스 컴퓨팅과 관련해서 군사용 웨어러블 컴퓨팅 개발, 인간의 사지(四肢)를 재생하는 연구개발, 적의 전파를 역추적하는 수동형 레이더, 현재 활용 중인 프레데터(미국의 무인정찰 및 공격기)의 원형인 무인기, F-35 기반기술인 단거리 이륙 및 수직착륙이 가능한 초음속 전투기 개발 등이 있다. DARPA R&D 특징으로는 시대를 앞선 선구자적인 연구를 지원함으로써 점진적 발전보다는 혁신적 변화를 추구하는 것을 목표로 설정하고 있으며, Proposers days 및 워크숍·심포지엄 등을 통한 다양한 분야 아이디어 토론의 장을 운영하고 있다. 과제 선정시에는 고위험, 고보상 연구 활성화를 위해 '하일마이어 캐트키즘(Heilmeyer Catechism)' 문답서를 적용하고 있다. 문답 문항으로는 ①당신은 무엇을 하려고 하나?(전문용어 사용없이, 명확한 목표 제시), ②현재 수준과 현재의 한계·걸림돌은 무엇인가?, ③당신의 접근 방법에서 새로운 것과 왜 그것이 성공할 것이라 생각하는가?, ④누가 신경을 쓰는가? 당신이 성공하면 무엇이 달라지나요?, ⑤위험은 무엇인가?, ⑥비용은 얼마인

**Table 2.** 9 Disruptive Technology Trends For 2019

| Disruptive Technology Trends For 2019   |
|---|
| • Web 3.0 (Web 3.0 will use Artificial Intelligence to make search smarter.)  |
| • Simulation and digital twins (as a useful way to digitally represent physical assets)   |
| • The Market of One (the use of personal data to answer the specific requirements of specific customers)  |
| • Edge computing (edge computing involves a shake up to the traditional topology of a computer network)   |
| • The voice economy (an entirely new ecosystem of marketing, branding and consumer engagement with the voice)   |
| • Strategic automation (the combination of automation and artificial intelligence to automate business processes and drive efficiency in organisations) |
| • Ubiquitous AI (the presence of artificial intelligence in all of our machines, applications and processes)  |
| • Spatial computing (technology into the real world using augmented, mixed, and virtual reality)  |
| • Quantum computing (the unparalleled levels of computing power offered by quantum)   |

※ Source: Disruption Hub (2019), <https://disruptionhub.com/disruption-trends-9-for-2019/>

**Table 3.** Grand Challenges and Moonshot R&D Programmes, by Country

| Country | Grand Challenges & Moonshot R&D Programme   |
|---------|---|
| USA     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) Programme</li> <li>• NSF 10 Big Ideas Projects</li> <li>• NIH Common Fund (CF)</li> <li>• SBIR (Small Business Innovation Research) Projects</li> <li>• ARPA-E(Advanced Research Projects Agency-Energy) Projects</li> </ul> |
| EU      | • EIC, European Innovation Council Pilot Programme (Horizon 2020 – FET(Future and Emerging Technologies))   |
| China   | • Moonshot Future Projects (the Large Hadron Collider, Limitless Energy from Nuclear Fusion, the World’s First Mission to the Surface of the Moon’s far Side, Third Space Station by 2022)  |
| Japan   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• The Moonshot Research and Development (R&amp;D) Program</li> <li>• ImPACT (Impulsing paradigm Change through Disruptive Technologies Program)</li> <li>• FIRST (Funding Program for World-Leading Innovative R&amp;D on Science and Technology)</li> </ul>                     |
| Korea   | • X-project of NRF  |

가?, ⑦수행기간은 어느 정도인가?, ⑧성공을 확인하기 위해 중간평가나 최종시험은 무엇인가? 등이다(DARPA, 2019b)(Table 4).

지질자원 관련 DARPA 난제도전 경진대회(Prize Challenges) 사례로는 근접지하탐색 난제해결(Subterranean Challenge)가 있다(DARPA, 2017). 지하시설탐색(Sub-T) 챌린지는 미지영역을 접근 가능하도록 신기술과 개념 개발을 촉진하는 것으로, 인공터널 시스템, 도심 하 인프라, 천연동굴 네트워크를 비롯한 복잡한 지하 환경의 신속하고 원격 매핑, 탐색 및 검색 가능한 혁신적인 솔루션을 개발하려는 것이다. 기술발전 도모와 지하 환경에 대한 현재의 수작업 매핑과 탐색 방법을 크게 개선하고 비구조화 된 복잡 환경의 탐사를 위한 혁신 투자를 촉진하고, 실질적으로는 북한과 같은 적성국과의 땅굴전을 대비한 지하시설 탐색훈련 성격도 내포하고 있다.

미국 국립보건원(National Institutes of Health,

**Table 4.** The Heilmeyer Catechism

| The Heilmeyer Catechism   |
|---|
| • What are you trying to do? Articulate your objectives using absolutely no jargon. |
| • How is it done today, and what are the limits of current practice?                |
| • What is new in your approach and why do you think it will be successful?          |
| • Who cares? If you are successful, what difference will it make?                   |
| • What are the risks?   |
| • How much will it cost?  |
| • How long will it take?  |
| • What are the mid-term and final “exams” to check for success?                     |

※ Source: Heilmeyer (1975), as cited in DARPA (2019b).

NIH)은 NIH 공동기금(Common Fund, CF) 프로그램을 지원하고 있다(NIH, 2019). CF는 지식 격차영역에서의 미래유망과학기술 기회, 공중보건 난제, 특별히 강조할 가치가 있는 연구, NIH 연구센터간 전략적 조정과 기획을 통한 이익도출 연구, 5-10년 내에 구체적, 파급효과가 큰 목표설계 연구 등을 중점적으로 지원하고 있다. 많은 CF 프로그램들에서 주요 공공 보건의료 이슈 해결, 건강과 질병에 대한 새로운 이해 기초연구, 건강향상 임상연구, 미래를 위한 의생명과학 연구인력 육성 등에 우선적으로 지원되었다(Table 3).

미국 에너지부(Department of Energy, DOE)는 2009 년도에 DARPA를 벤치마킹하여 Advanced Research Projects Agency-Energy(ARPA-E) 프로그램을 착수하였다(ARPA-E, 2019). 미국 에너지 혁신 프로젝트(ARPA-E) 프로그램은 2009년부터 2018년까지 660개 프로젝트에 18억 달러를 투입하였고, 71개 프로젝트의 신규 창업과 109개 프로젝트가 정부기관과 파트너 제휴로 후속 개발성과를 달성하였다. DARPA 프로젝트와 달리 ARPA-E 프로젝트는 현재 존재하지 않는 기술이면서 단순한 점증적 기술이 아니며, 현재의 기술을 낡은 기술로 만들어 버릴 수 있는 혁신적인 기술을 지향하였다(KIER, 2015) (Table 3).

이에 앞서, 미국 과학한림원(National Academy of Sciences, NAS)의 지구과학 신규 연구유망주제위원회는 다소 도전적인 성격으로 향후 10년 동안에 급격한 발전에의 대응을 위한 지질과학분야의 다학제적 접근에 의한 유망주제들로 ①초기 지구연구, ②열-화학적 내부 동력학 및 휘발성분 분포, ③단층작용과 변형과정, ④기후, 지표변화, 판구조, 심부지구과정의 상호작용, ⑤생명, 환경 및 기후의 공동 진화, ⑥자연과 인위적 변화에 동조화된 수리지형-생태계 반응, ⑦육상환경

과 글로벌 변화영향에서 생화학 및 물순환 등을 도출하였다(Kim *et al.*, 2016; NAS, 2011).

미국립 과학재단은 NSF 2026 아이디어 머신 웹사이트(NSF 2019)를 구축하여, 과학과 공학의 기초연구에 대한 미국의 아젠더를 설정하는데 도움이 되는 아이디어 경진대회를 운영하고 있다. 아이디어 초기 적합성 선정기준은 과학적 신뢰가능성, 큰 아이디어로 간주할 만한 야심찬 생각, 개별프로젝트가 아니라 연구주제, 기존의 과학적 경계를 넘어서는지 여부 등이었으며, 최종 경진대회 참가 아이디어는 난제의 잠재적인 사회적·과학적 영향, 난제에 의해 파생되는 효과, 기관간 파트너십, 독창성, 적시성 등으로 선별되었다. 미국 애리조나주립대학(ASU)에서 제안한 지구모방연구(Geomimicry) 등을 비롯하여 재활용, 재생가능에너지(Repurposing, Recycling, Renewable Energy), 공공 탄소포집격리(Public CCS), 해양청소(Imagine a Life with Clean Oceans), 테라포밍 지구(타 행성의 지구화), 폐기물없는 세상(A World without Waste) 등 최종 33개 난제후보가 발표되었다(NSF, 2019).

### 3.3. 유럽의 도전적 연구개발 활동

EU(2019)에 의한 Horizon 2020은 EU 최대의 연구혁신 프로그램이며, 7년동안(2014-2020) 약 800억 유로를 투자하여 실험실에서 마켓으로 큰 아이디어를 실현하여 획기적이며 세계최초의 성과를 창출하는 것이다. 3대 중점목표(3 Pillars)중 Horizon 2020 사회적 난제(societal challenges)은 현재 직면하고 있는 사회문제 해결, 학문적 통섭을 통한 지식 축적, 기초연구에서부터 상업화에 이르는 전반적인 과정과 혁신 활동 등을 목적으로 추진 중이다. 이의 6대주제로는 ①건강과 인구변화, ②웰빙, 미래 식량안보를 위한 혁신, 바이오 경제 ③안정적이고 깨끗한 에너지 ④저탄소 고효율 수송 ⑤기후변화와 자원효율 ⑥안전한 사회 구현이 있다. Horizon 2020 과학적 탁월성 과제(excellent science)에서는 미래유망기술(Future and Emerging Technologies, FET)이 신설되었는데, 현재 연구자가 거의 없는 초기단계에서 아이디어를 제시하는 오픈(FET-Open)부문은 인공근육, 광합성 유기체, MEMS 등의 주제가 있고, 새로운 유망테마를 육성하기 위한 프로액티브(FET-Proactive) 부문은 양자공학, 고성능컴퓨터 등 연구주제가 있으며, 과학적 도전과제를 향후 10년 간 수행하는 플래그십(FET-Flagship)에서는 그래픽, 인간 뇌 프로젝트 등의 주제가 도출되었다(Table 3).

### 3.4. 중국의 도전적 연구개발 활동

최근 중국 과학굴기인 ‘문샷프로젝트’는 문빌리지(Moon village)를 개척하고 세계 최초 유인 화성탐사선, 최대 규모의 핵융합 에너지와 초대형 입자가속기 프로젝트를 추진중이다. 중국은 2016년동 제13차 과학기술 5개년 계획(2016~2020)을 수립하였다. 외국기술의 모방에서 벗어나 선도적 위상을 차지하기 위한 국가적 차원의 체계적 혁신정책을 본격적으로 제시하고자 하였다. 신규 6대 중대과학기술 프로젝트로 항공엔진·가스터빈, 심해연구기지 건설, 양자 통신·컴퓨팅, 뇌 연구, 국가 사이버보안, 심우주탐사·우주선 유지보수 시스템을 설정하였고, 9대 중대공정으로는 종자개발, 석탄정정 고효율이용, 스마트 그리드, 우주-지구 일체화 정보망, 빅데이터, 지능형로봇, 중점신소재 연구개발·응용, 북경-천진-허베이-지역환경 정부, 질병예방 등이 있다(KISTEP, 2016) (Table 3).

China Matters(2017)에 따르면, 중국은 5대 Moonshot 미래기술 프로젝트 추진 중이다. 첫째, 중국은 2020년까지 세계 최대규모 50~100 km 사이의 입자충돌가속기 건설 중이며, 둘째, 중국은 2016년도에 수소 플라즈마 생성에 의해, 태양의 중심보다 더 뜨거운 온도를 기록했던바 향후 50년 이내에 핵융합에너지를 이용하려고 연구 중이다. 셋째, 2030년에 AI 분야에서 세계 선도하기 위해 국가투자사업에 수십억 달러를 착수하고, 넷째 중국과 유럽항공우주국이 달기지(Moon base) 공동 건설 및 Moon village를 추진하며, 다섯째, 2030년에 화성에 유인우주선을 보낼 예정으로 2020년에 태양계 기원과 진화를 연구 중이다.

### 3.5. 일본의 도전적 연구개발 활동

일본은 2018년 말부터 ‘문샷형 기술개발연구제도’를 신설하여, 태풍 진로 조작기술개발 등과 같은 파괴적 혁신창출 목표로 실패가 허용되는 도전을 하도록 하고 있다. 일본의 R&D 예산의 80%이상은 기업에 의한 투자이며, 속성상 기술혁신이 아니라 기업의 이윤 창출을 목표로 하고 있기에, 경쟁국에 비해서 원천기술 혁신 동력이 상대적으로 약할 수도 있었다. 2018년도에 종료되는 혁신적 연구개발 추진 프로그램(ImPACT)을 개선·강화하여 독창적이고 야심찬 연구개발을 집중적·중점적으로 추진하는 문샷형 R&D를 검토하였다(Table 3). 일본이 추구하는 문샷형 R&D 목표는 미래사회를 전망하고, 어렵지만 실현되면 큰 임팩트가 기대되는 사회적 과제의 추진이며, 내각 종합과학기술이노베이션회

의(Council for Science, Technology and Innovation of Japan, CSTI)를 중심으로 관계부처가 합동으로 추진하는 방식이다. 문부과학성과 경제산업성이 도전적 연구개발 추진분야와 연구영역을 정하여 추진하고, 과학기술진흥기구(Japan Science and Technology Agency, JST)와 신에너지산업기술종합 개발기구(New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO)가 해당 연구과제를 지원하는 방식이다. 문샷형 연구개발 재원은 2019년도 약 1,000억 엔을 확보(문부과학성 800억 엔 + 경제산업성 200억 엔 등)하고자 하였다. 기획단계에서 논의된 R&D 주제 예시는 태풍진로 조작기술, 중증환자에 필요한 치료기술이 개발될 때까지 동면기술, VR로 고인의 뇌와 대화하는 기계개발, 질소와 메탄을 모아 공기로부터 연료추출 방법 등이었다(CSTI, 2018; CSTI, 2019). 이미 종료된 일본 혁신적 연구개발프로그램(Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies Program, ImPACT)은 미국 DARPA를 벤치마킹하여 파괴적 혁신창조 및 혁신적 창조를 위한 실행모델을 제시하고자 하였으며, 자동차 구조재 등 플라스틱 가공품으로 대체하는 폴리머 분자설계기술 개발, IoT 로봇분야의 7억개 진료정보·데이터를 처리·분석하는 초 빅데이터처리시스템 개발, 재해방지·재해대응 분야에서 피해상황을 즉각적으로 관측할 수 있는 합성개구 레이더(Synthetic aperture radar) 위성개발 등의 성과를 보였다(Cabinet Office of Japan, 2018; KISTEP, 2018).

**3.6. 글로벌 선도기업의 도전적 연구개발 활동**

글로벌 기업 구글(Google LLC)은 초기에는 문샷 연구를 ‘Google X’로 명명했으며, ‘the Moonshot Factory’로 변경하였다. 달나라로 가기 위한 생각, 문샷생킹(MoonShot Thinking)은 10% 개선목표 보다는 10배 혁신(진화, 성장)하게 하는 담대한 구상을 말하며, 현재 R&D의 목표를 안정적으로 10% 이상 설정하는 것보다는 도전적 목표인 와해성 기술개발을 위해 10배 이상 혁신에 도전하는 것으로 하고 있다. 문샷생킹은 거대 문제인식(huge problem), 근본적/본질적 솔루션(a radical solution), 획기적인 기술혁신(the breakthrough

technology)이라는 특성을 갖고 있다. 그간 Google X의 도전적 연구성과는 구글 글래스(google glass), 프로젝트 Loon(풍선기반 인터넷 서비스 프로젝트), 운전자 없는 자율주행 자동차(self-driving car), 프로젝트 Calico(수명 500세 연장 프로젝트), 프로젝트 Verily(병이 나기 전에 치료한다), Makani(구글의 풍력비행 발전기), Dandelion(지열을 이용한 냉난방 시스템) 등이 있다(KAST, 2019; X-the Moonshot Factory, 2019) (Table 5).

삼성그룹 역시 삼성미래기술육성재단을 통한 연구지원사업을 추진하고 있다. 세계유일·세계최고의 독창적인 프론티어연구, 실패를 두려워하지 않고 과감히 도전하는 연구, 인문·사회·예술·공학·자연과학 등 분야간 경계없는 창의적 융합연구가 대상이다. 4대 기초과학 분야인 수리과학, 물리, 화학, 생명과학과 이를 기반으로 한 융복합분야에서 창의적이고 도전적인 연구과제를 폭넓게 발굴하여 장기적 지원으로 하며, 2018년 하반기까지 6년 간 총466개 과제 선정, 5,942억원 지원(7,300여명 연구참여)이 이뤄졌다. 466과제는 기초과학 164, 소재기술 144, ICT 158과제 등 이었다(SSTF, 2019) (Table 5).

Alibaba는 DAMO(Discovery, Adventure, Momentum, and Outlook) 프로그램을 통해, 알리바바 그룹의 글로벌 연구를 수행하고 있다. 첨단기술개발 및 국가간 기술격차를 줄여 포괄적인 세상을 만들고자 세계 각국에 기술연구소를 개설하고 유망한 과학자 및 연구원들을 모집하여, 3년간(2018-2020) R&D부문에 약 150억 달러(17조100억원 상당) 이상 투자하고자 하는데, 데이터(data intelligence), IoT, 핀테크, 양자컴퓨팅, 인간-컴퓨터 상호작용(HCI) 등 근본적이며 혁신적인 기술 집중. 머신러닝, 네트워크 보안, 비주얼 컴퓨팅, 자연어처리 등의 분야를 집중탐구하고 있다(Alibaba, 2019) (Table 5).

**4. 지금까지 우리나라 지질자원 관련 난제연구 노력**

우리나라 한국연구재단의 X 프로젝트에서 2016년도

**Table 5.** Grand Challenges and Moonshot R&D Programmes, by Company

| Company | Grand Challenges & Moonshot R&D Programme                     |
|---------|---|
| Google  | Google X, The Google Moonshot Factory                         |
| Samsung | Samsung Science & Technology Foundation (SSTF) Funds Projects |
| Alibaba | DAMO Program (The Alibaba Research Fellowship)                |

에 도출되었던 X 문제에서 지질자원기술 관련분야 예시를 보면, '바닷물에 녹아 있는 유용한 광물자원을 경제적으로 추출할 수 있을까?', '기존에 알려진 재료들의 물성을 뛰어넘는 새로운 개념의 메타물질을 만들 수 있을까?', '나무뿌리처럼 물을 저장해줄 인공 나무를 만들 수 있을까?', '황사, (초)미세먼지 등의 대기오염 물질을 친환경적이면서 효율적으로 정화할 수 있을까?', '국지성 폭우를 신속히 예측하여 피해를 줄일 수 있을까?' 등이 있다(NRE, 2017b).

산업통상자원부(MOTIE, 2019)의 알키미스트 프로젝트는 시급한 기술개발이 주된 목적으로서, 성공 가능성이 낮지만 미래세대를 위한 산업의 난제에 도전하는 고난도 기술개발 중심이기에 지질과학의 적합한 주제 도출에는 다소 한계가 있다고 할 수 있다. 지금까지 알키미스트 프로젝트는 산업기술 등 5개 분야에서의 산업의 획기적인 도약을 견인하는 돌파형 기술 등이 지원 대상이다.

한국과학기술한림원의 정책기획연구(KAST, 2019)에서는 2년에 걸친 정책기획연구를 통해서 다수의 과학난제 후보를 이미 도출하였고, 이를 한국형 과학난제 융합도전연구 성격으로 추진을 건의하고 있다. 1차년도에는 정책결정권자와 예산당국의 손쉬운 이해와 접근이 가능한 우선 난제관련 주제를 추진하는 것이 급선무이나, 2차년도 이후에는 불특정 다수 국민의 집단 지성 아이디어를 활용하여 적정난제 후보를 발굴하는 것이 바람직한 방향이기에 한국과학기술한림원의 난제 발굴협력지원단 조직을 활용하려 한다.

지질자원 관련 학회와 연구기관 등에서 지속적으로 '지질자원분야가 중심이 되어 도전해야할 난제해결주제는 무엇이고, 어떻게 해야 하나?'에 대한 고민과 적극적인 공론화를 해주어야만, 정부정책에서도 이를 근거로 활용하여 난제후보 채택이나 검토가 가능할 것으로 보인다. 지금까지 막연히 몇몇 연구자들끼리만 토의하고 더 이상 확산이 되지 않는다면, 불특정 다수의 집단지성에 의한 지질자원 관련 난제후보 또는 난제스러운 주제의 발굴은 요원할 것이다. 더불어 현재의 일천한 지질자원분야 연구자 역량과 인프라 여건으로는 글로벌 과학난제 도전연구는 다소 요원하다고 사료된다. 난제 연구를 도전할 여건조성이 급선무일수도 있다. 지금의 현실은 다소 경직되어 있다고 할 수 있다. 지질자원 연구자의 상당수는 국가연구개발사업에서 지속적으로 안정적인 소규모의 개인연구비 확보를 보장받기 위해서, 실패가능성이 큰 도전연구보다는 목표달성이 용이한 과제를 택할 수밖에 없다. 이를 해소할 방안을 개별 연구

자가 아닌 연구지원기관, 국책연구기관 또는 학술단체 등에서 각각 고민을 해줘야 한다. 그래야만 지질자원분야가 과학난제다운 주제 중에서 지진예측 등과 같은 영역은 글로벌 기술선도국과 경쟁하며 과감하게 도전해 보는 것이 필요하다고 사료된다(Kim & Lee, 2019).

## 5. 결론 및 시사점

동남권 지진발생과 공기의 질 저하 등에 따라, 우리나라도 지질자원분야에 요구되는 국가사회문제해결 수요가 과거에 비해 최근에 크게 증가하였다. 지질자원분야가 중심이 되어 이종기술간 융합연구를 기반으로 사회경제적으로 파급효과가 큰 글로벌 과학난제 발굴과 도전적 접근으로 해결한다면, 국민과 국가로부터 지질자원기술 분야의 신뢰성을 더욱 향상시킬 수 있을 것이다. 지질자원분야 대학연구자는 자발적으로 연구주제 목표를 도전적으로 설정하고 장기적인 기초연구실 육성으로 그에 부합하는 인력양성을 해야 하며, 연구지원기관은 도전적 연구비 확충으로 이를 뒷받침해 주어야 한다. 아울러 국책연구기관이 도전적 미래 우수연구인력을 적극적으로 수용하고 이들의 지속적인 성장을 위한 토양을 구축해서 우수성으로 국민에게 응답하는 선순환이 시급하다. 이에 지질자원분야 중심의 과학난제 도전연구와 해결을 위해, 국책연구기관 등에서 선제적으로 추진이 필요한 도전적 연구 여건과 환경 조성의 정책제언을 다음과 같이 제시하고자 한다.

첫째, 지질자원분야의 신진연구자 중심의 장기 창의 연구 활동을 전략적으로 활성화해야 한다. 새로운 영역의 개척, 평생연구주제 탐색, 고위험·도전적 연구, 다학제적 집단연구수행과 미래세상을 뒤바꿀 새로운 기술·제품개발, 미래·미지 뉴프론티어 영역도전 등의 창의형 연구수행으로 창의적 시장 선도자(first-mover) 및 탈추격형(post catch-up) 연구 활성화를 도모해야 할 것이다. 과학난제 해결을 위한 창의연구를 위해서는 현재 분야에서 관련 주제에 대한 연구가 거의 시도되지 않은 새로운 분야영역의 개척이 되어야 하고, 수많은 실패와 잠재적 위험을 돌파할 경우 전에 없는 막대한 성과와 영향력, 경제적 이익 등을 창출하거나 과학적 난제를 해결하는 평생 연구주제로서 다학제간 집단연구이어야 할 것이다.

둘째, 과제책임자만 우선 선발하고 과제책임자에게는 연구진 구성권한을 제한적으로 일부만 부여해야 한다. 연구책임자가 산학연의 요소기술을 보유한 이종분야 연구자들에게 기술정보요구서(RFI)와 참여의향서(ROI)를

공개모집하여 연구조직을 구성토록 해야 한다. 즉, ICT, BT 등 이종분야 연구자들과의 융합연구가 용이하도록 연구책임자를 제어해야 한다.

셋째, 이제는 선진국 사례를 벤치마킹하면서 따라가는 연구패턴은 지양해야 한다. ‘그들도 못했기 때문에 우리가 최초로 해야 한다’는 사고를 가져야 한다. 선행 연구나 과거 선례가 없으며 참고문헌도 없는 참신한 주제이어야만 글로벌 퍼스트 무버의 성과창출이 가능할 것이다. 기존의 평이한 연구를 답습하는 방식에서 벗어나, 도전연구 영역으로 들어가야 한다.

넷째, 전지구적 지구시스템 순환(cycle) 관점의 연구를 강화하여야 한다. 가장 민감한 삶의질 향상 영역인 미세먼지, 탄소, 물순환 등에 대해서 전지구적 시스템 관점에서 대륙, 해양, 대기, 극지 분야 등이 함께 하며 ICT 융합연구를 활성화해야 한다. 지금까지의 지권, 기권, 수권 등의 개별 권역 각각의 연구관점이나 연구패턴 등으로는 이제 거대 지질자원분야 과학난제를 해결하는 것이 거의 불가능하므로, 적극적인 지구순환 연구를 위한 인프라 및 미래인재 양성 추진도 수반되어야 할 것이다.

다섯째, 과제제안 시스템은 간소화해야 한다. 미래관점의 2-3쪽의 핵심사항에 관한 아이디어 제안서만 제출하도록 하여야 한다. 제안주제, 관련이슈나 현안, 현재수준, 한계 및 걸림들, 접근방법 참신성, 성공가능성 진단, 연구수혜자, 기대성과, 연구 리스크, 연구기간, 소요예산, 예상되는 최종성과 만을 간략하게 기술하는 수준이어야 한다.

여섯째, 신규 난제극복해결 프로젝트 선정평가시스템 혁신이 선행되어야 한다. 아이디어 제안자와 평가패널이 함께하는 워크숍 형태의 심층 선정평가에 의해 검증과 가능성 여부를 판단하는 것이 바람직하다. 선정평가항목은 DARPA 프로젝트 선정기준 적용인 하일마이어 캐트키즘(George H. Heilmeier, 1975)을 적용하는 것이 바람직하다. ①당신은 무엇을 하려고 하나?(전문용어 사용없이, 명확한 목표제시 필요), ②현재수준과 현재의 한계·걸림들은 무엇인가?, ③당신의 접근 방법에서 새로운 것과 왜 그것이 성공할 것이라 생각하는가?, ④누가 신경을 쓰는가? 당신이 성공하면 무엇이 달라지나요?, ⑤위험은 무엇인가?, ⑥비용은 얼마인가?, ⑦수행기간은 어느 정도인가?, ⑧성공을 확인하기 위해 중간평가나 최종시험은 무엇인가? 등이 주요 평가항목에 해당한다.

일곱째, 과학난제 해결극복 도전과제의 최종결과평가 역시, 기존의 방식을 벗어난 컨퍼런스 형태의 집단

지성에 의한 결과평가가 바람직하다고 사료된다. 국내 우수학회 학술대회 등에서의 과제별 특별세션이나 별도로 주최하는 컨퍼런스를 개설하여, 연구책임자 등의 발표·토의를 통한, 일정규모의 불특정 다수가 참여하는 컨퍼런스 형태의 토론평가가 적절하다고 여겨진다. 컨퍼런스 내용 녹화 및 필요시 SNS로 공개하고, 학회 학술대회 특별세션 불가 시, 외부인 다수가 참여하는 별도의 워크숍으로 추진하며, 평가 결과는 정량화하지 않고 정성적인 코멘트 등으로만 하는 것이 필요하다고 사료된다.

이러한 지질자원분야 국책연구기관의 선제적 미래창의융합연구 추진은 우리나라 지질자원분야의 도전적 연구를 더욱 활성화할 것이며, 대학연구자 참여 등에 의해 미래우수 인력양성에도 기여할 것이다. 결국은 지질자원분야 전반에 파급되어, 한국형 지질자원분야 난제해결을 위한 도전적 융합연구과제의 적극적 발굴과 관련 국가 R&D 과제 선정 및 채택 등으로 파급될 수 있을 것으로 사료된다.

미국 NSF(2019)의 2026 아이디어 머신 웹사이트에서 공개된 미국 애리조나주립대학(ASU)에서 제안한 지구모방연구(Geomimicry) 등의 주제가 우리에게도 시사하는 바가 크다. 우리나라는 광상성인연구와 ICT 융합연구를 통한 지구생성과정 및 변화과정 모방재현연구 등에 대한 필요성 등의 공감대가 이미 형성되어 있다. 이리하듯, 우리나라는 신진연구자 중심의 학회활동 활성화를 위해서도 자발적인 창의적이고 도전적인 지질자원관련 난제후보 발굴 시스템 구축도 필요하다. 학회 홈페이지를 활용하여 지질자원분야 미래 난제후보 아이디어 경진대회를 지속적으로 추진하는 것이 필요하다. 이렇게 학계에서 논의된 주제들이 지질자원분야 관련 산학연을 두루 망라한 집단지성에 의해 적절히 정제된다면, 이 주제들을 한국연구재단을 비롯한 연구정책수립 당국과 연구예산 당국이 지원대상 우선 난제후보로 설정하는데 도움이 될 것이다.

## 사 사

이 논문은 한국지질자원연구원 미래전략연구센터 주요사업(20-3120-1) 지원을 받아 수행된 연구입니다.

## References

Alibaba (2019) DAMO(Discovery, Adventure, Momentum, and Outlook) Program, Damo Academy, <https://damo.alibaba.com/>

- Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E) (2019) ARPA-E: Changing what's possible, apply for Funding, <https://arpa-e.energy.gov/>.
- Cabinet Office of Japan (2018) the ImPACT System Verification Report (in Japanese), [https://www8.cao.go.jp/cstp/sentan/kakushintekikenkyu/yusikisha\\_37/siryol.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/sentan/kakushintekikenkyu/yusikisha_37/siryol.pdf).
- China Matters (2017) 5 Future Tech Projects from China(China's Moonshot Projects) [https://www.youtube.com/watch?v=5qZSYa\\_G-w0](https://www.youtube.com/watch?v=5qZSYa_G-w0).
- Council for Science, Technology and Innovation of Japan (CSTI) (2018) Establishment of moonshot research and development system(in Japanese), 8p.
- Council for Science, Technology and Innovation of Japan (CSTI) (2019) Announcement of the Visionary Committee related to the Moonshot Research and Development System (in Japanese), <https://www8.cao.go.jp/cstp/kaisaiannai/2018/20190315moonshot1.html>.
- Defense Advanced Research Projects Agency(DARPA) (2019a) About DARPA, <https://www.darpa.mil/about-us/about-darpa>.
- Defense Advanced Research Projects Agency(DARPA) (2019b) Questions about Proposed Research Projects, The Heilmeier Catechism, <https://www.darpa.mil/work-with-us/heilmeier-catechism>.
- Defense Advanced Research Projects Agency(DARPA) (2017) DARPA Subterranean Challenge Aims to Revolutionize Underground Capabilities, Newest challenge invites teams to develop breakthrough technologies that would augment operations underground, News And Events, <https://www.darpa.mil/news-events/2017-12-21>.
- Disruption Hub (2019) 9 Disruptive Technology Trends For 2019, <https://disruptionhub.com/disruption-trends-9-for-2019/>.
- Disruption Hub (2018) 18 Disruptive Technology Trends For 2018, <https://disruptionhub.com/2018-disruptive-trends/>.
- European Union(EC) (2019) Horizon 2020, European Commission, Funding programmes, <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en>.
- Google X (2019), Google X-the Moonshot Factory <https://www.x.company/moonshot/>.
- Heilmeier, G.H (1975) Heilmeier Catechism, "Questions about proposed research projects.", <https://www.darpa.mil/work-with-us/heilmeier-catechism>.
- Jang, Y. S (2011) ARPA, DARPA, ARPA-E: Creative R&D Models, Science and Technology Policy(S&T Policy), V. 21, No.3, p.105-125.
- Kim, S.-Y. and Lee, J.-W. (2019) What should be the challenge and moonshot project in geological science of Korea?, Proceedings of 2019 Fall Joint Conference of the Geological Sciences, p.350(October 24, 2019).
- Kim, S.-Y., Ahn, E.-Y., Bae, J.-H. and Lee, J.-W. (2016) Analysis on New Research Opportunities and Strategies for Earth Sciences in the United States, Jour. of Economy and Environmental Geology, v.49, p.43-52.
- Korea Academy of Science and Technology (KAST) (2019) Planning Research on revitalizing convergent R&D to overcome Global Challenge, KAST S&T Policy Research Report. 109p.
- Korea Institute of S&T Evaluation and Planning (KISTEP) (2019) 100 Main Science and Technology Indicators of Korea, KISTEP Report, V. 2019-1. 47p.
- Korea Institute of S&T Evaluation and Planning (KISTEP) (2018) Analysis on Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies Program (ImPACT) Outcome, Science and Technology and ICT Policy Trends, V. 114 (March 16, 2018).
- Korea Institute of S&T Evaluation and Planning (KISTEP) (2016) Analsis on 13th Five-Year National Science and Technology Innovation Plan of China, KISTEP Issue Paper, Vol. 2016-20. 45p.
- Korea Institute of Energy Research (KIER) (2015) US ARPA-E Program Trends, KIER S&T Policy Focus, V.9, No.3 (June, 2015).
- Ministry of Science and ICT (MSIT) (2018a) Korea's Science and Technology Basic Plan of 2018-2022, 128p.
- Ministry of Science and ICT (MSIT) (2018b) Korea's R&D Innovation Plan, 38p.
- Ministry of Science, ICT and Future Planning (MSIP, 2015) Program Announcement of X-project Research Team (MSIP Announcement No. 2015-420).
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (2019) To challenge the biggest challenge in the industry, 'Alchemist project' started, MOTIE Press release (April 27, 2019).
- MIT Technological Review (2019) Ten big global challenges technology could solve, <https://www.technologyreview.com> (February 27, 2019).
- National Academy of Sciences (NAS) (2011) New Research Opportunities in the Earth Sciences at the National Science Foundation, Committee on New Research Opportunities in the Earth Sciences at the National Science Foundation; Board on Earth Sciences and Resources, Division on Earth and Life Studies, National Research Council of the National Academy, p.173.
- National Institutes of Health (NIH) (2019) NIH Common Fund, <https://commonfund.nih.gov/>.
- National Research Foundation of Korea (NRF) (2017a) Research on Future Directions of Highly-Creative, Highly-Challenging Basic Research-Oriented X-Projects, NRF Policy Research No. 2016-26.
- National Research Foundation of Korea (NRF) (2017b) X theme list in Korea, <https://www.nrf.re.kr>.
- National Research Foundation of Korea(NRF) (2015) Program Announcement of X Project, <https://www.nrf.re.kr>.
- National Science Foundation (NSF) (2019) Geomimicry, the NSF 2026 Idea Machine, <https://nsf2026imgallery.skild.com/entries/geomimicry>.
- National Science Foundation (NSF) (2017a) 10 Big Ideas, Growing Convergence Research @ NSF, For NSB Suzi Iacono, Head, OIA(May 9, 2017), <https://www.nsf.gov/>.
- National Science Foundation (NSF) (2017b) NSF's Big Ideas, National Science Foundation, Jim Ulvestad, Acting Assistant Director, <https://www.nsf.gov/>.
- Samsung Science & Technology Foundation (SSTF) (2019) SSTF funds projects Program Overview, <http://www.samsungstf.or.kr/>.
- Whatis.com (2019) What is moonshot?-Definition, <https://whatis.techtarget.com/definition/moonshot>.