

# 지질자원 미래 트렌드와 대응 기술개발 방안

안은영\*

## 논문 요약

본 연구에서는 4차 산업혁명에 대한 선제적 대응 및 2050년 환경변화 대응 이슈 도출, 미래사회 지질자원분야 역할 재조명을 위해 2050 미래상 및 지질자원 기술의 위치와 역할에 대한 연구를 실시하였다. 거시환경 분석을 위해 사회, 기술, 경제, 환경, 정치 부문(STEEP)을 분석하였다. 미래사회 변화 및 트렌드를 분석하여 지질자원 분야와 관련이 되는 주요 이슈를 4차 산업혁명, 우주·지구, 에너지, 광물자원·재료, 기후환경, 지질환경, 삶의 터전으로 제시하였다. 지질자원 분야 키워드와 미래 이슈 연관 분석, 미래사회 해결 이슈(기술 수요) 구체화, 요구하는 서비스 속성 도출, 지질자원 분야 서비스/제품을 구성하여 지속가능·풍부한 자원 미래 실현의 4개 미래기술, 예측(조정)되는 자연환경 관리의 3개 미래기술, 제한 없이 확대된 삶의 터전 구축의 3개 미래기술을 제시하였다.

**Keyword :** 미래예측, 지질자원기술, 미래기술, 유망기술

\* 한국지질자원연구원 기술정책실장, 042-868-3062, eyahn@kigam.re.kr

## I. 서론

본 연구에서는 4차 산업혁명에 대한 선제적 대응 및 2050년 환경변화 대응 이슈 도출, 미래사회 지질자원분야 역할 재조명을 위해 2050 미래상 및 지질자원 기술의 위치와 역할에 대한 연구를 실시하였다. 관계 정부부처 합동(2016)의 제4차 산업혁명에 대응한 지능정보사회 중장기 종합대책에 따르면, 산업 구조 및 고용 구조의 변화와 함께 가정기기의 로봇화, 질병 진단·치료 정확도 향상, 언어장벽 해소, 보안·교통 향상, 맞춤형 교육 등에 따라 삶의 모습·환경 변화를 제시하고 있다. 또한 지능정보사회의 바람직한 미래상으로 자유롭게 경쟁하는 고부가가치 경제, 누구나 기회를 갖는 복지사회, 안전하고 행복한 삶을 제시한다. 지능정보 경쟁력 확보 및 산업생태계 활성화로 새로운 경제효과 창출을 통한 지속가능한 성장이 가능하다. 창의·감성적 업무 등 인간 본연의 정신적·지적 역할이 강화되고 사회안전망이 확충되어 생활이 안정되고, 사회 각 분야에 지능정보기술이 활용되어 질병 예방·생활환경 개선·사고 감소 등 GDP로 계산되지 않는 소비자 후생이 증대될 것이라고 예상된다.

우리나라는 과학기술기본법 13조 ‘정부는 주기적으로 과학기술의 발전 추세와 그에 따른 미래사회의 변화를 예측하여 그 결과를 과학기술정책에 반영하여야 한다’에 따라 1994년을 시작으로 5년 마다 1999년, 2004년, 2011년, 2016년에 과학기술예측조사를 시행하고 있다. 한국은 이승룡(2016b), 이승룡(2017)과 같이 한국과학기술기획평가원(KISTEP)에서 제5회 과학기술예측조사(2016-2040)를 실시하였다. 일본의 경우는 일본 문부과학성 과학기술·학술정책연구소(NISTEP)에서 1971년 공표된 제1회 기술예측조사 이후로 제10회 과학기술예측조사를 실시하였다. 최근에 발간된 일본 과학기술·학술정책연구소(2015)의 제10회 일본 과학기술예측조사는 예측기간을 향후 30년으로 2045년까지 해당되나, 분석 결과 2050년까지의 모습도 담고 있다. 일본 과학기술·학술정책연구소(2015)는 당시 급격한 정보통신기술(ICT) 발전으로 데이터 사이언스, 네트워크·서비스 관점을 새로 도입하였다고 한다. 한국과 일본의 과학기술예측조사 현황에서 제시한 바와 같이, 한국과 일본은 2040년까지 대상으로 미래기술을 제시하고 있다.

최근에도 지속되는 대기 환경질 저하 등 지역적, 전지구적 환경문제 및 유엔 지속가능발전목표(UN SDGs) 등의 국제적인 노력, 지능정보기술을 기반으로 한 4차 산업혁명의 추진 등에 따라 미래에 대한 정책 및 새로운 기술개발의 중요성, 불확실성이 더욱 높아지고 있다. 따라서 단순히 2020년, 2030년의 모습을 보는 것이 아니라, 장기적인 관점에서 미래기술에 대한 연구가 필요하다. 또한 지역적, 전지구적 환경문제 등 지질자원 분야의 역할도 약화되지는 않을 것으로 보이므로 30년 이상의 장기적 관점에서 2050년 지질자원 분야의 미래기술을 탐색하는 연구가 필요하다

다.

## II. 지질자원 미래 트렌드(미래상)

### 1. 연구 방법

2050년 환경변화 이슈 및 미래상 도출을 위해서 거시환경 분석인 STEEP(Social, Technology, Economy, Ecological, Political) 분석을 실시한다. 이는 기술적 관점뿐만 아니라, 사회, 생활, 사고양식의 변화를 고려한 분석방법으로, 미래사회 트렌드를 분석하여 지질자원 분야와 관련이 되는 미래사회 전망 및 주요한 이슈에 대하여 지질자원 분야 핵심 키워드와 연계하였다. 2050년 환경변화 이슈 및 미래상 도출을 위한 중심이슈는 4차 산업혁명, 우주·지구, 에너지, 광물자원·재료, 기후환경, 지질환경, 삶의 터전으로 도출되었다.

해당 중심이슈별 2050년 미래상 도출방법은 국내외 미래사회 예측 관련 문헌 및 기존 미래사회 도출 모델을 분석하고, 이에 기반을 두어 지질자원분야에 맞는 중심이슈 및 미래상을 도출하였다. 이때 미래사회 변화 트렌드 관련 자료는 국제기구, 연구기관, 컨설팅업체, 시장조사업체 등에서 발표한 국내 및 국외 문헌과 미래사회 및 미래기술 분석과 관련된 다양한 웹뉴스를 수집하여 지질자원 분야와 연관성을 분석하였다. 그 이후 인문사회 및 지질자원 분야 전문가 의견 수렴을 통해서 미래사회 해결 이슈의 타당성을 검증하였다(인문사회 전문가 10명, 지질자원 전문가 10명, ICT 등 타 기술 전문가 4명). 마지막으로 도출한 미래이슈의 객관성과 신뢰성을 위하여, 일반인과 지질자원 분야 지식 및 관여가 높은 층의 2,300 여명을 대상으로 지질자원 미래이슈의 중요도에 대한 폭넓은 설문조사를 실시하였다. 일반인 503명, 전문가 215명의 총 718개 응답지를 분석하여, 연구진이 도출한 미래이슈의 적절성을 확보하였다.

미래사회 변화 흐름 및 해결 이슈에 따라, 4차 산업혁명, 우주·지구, 에너지, 광물자원·재료, 기후환경, 지질환경, 삶의 터전을 중심 이슈로 2050년 지질자원 미래상을 제시하였다(그림 1). 4차 산업혁명 분야에서는 지능정보기술 진화(인공지능, CPS, 로봇), 신소재·생물기반 기술 발전이 제시되었으며, 우주·지구 분야에서 우주자원 개발(우주선, 행성개발), 우주·지구 기원 연구·탐사(심부, 해저, 극지), 에너지 분야에서 에너지 수요 증가, 에너지믹스 변화, 광물자원·재료 분야에서 천연자원 지속 이용(광물자원, 재료로서의 에너지자원), 천연자원 대체 원료 개발이 제시되었다. 기후환경 분야에서 재생자원 영속성 강화, 기후변화 지속(기온, 강수량, 해수면), 생태계 교란, 이산화탄소 저감 노력 강화, 지질환경 분야에서 환경질 저하(대기·토양·수자원), 지구물리학적 재난 확대(지진·화산, 산사태·지반침하), 방사성폐기물 고도처리, 마지막으로 삶의 터전에서 도시화 확대, 우주/해저·해중도시 개발, 도시 재생

(북한 포함)이 제시되었다.



(그림 1) 2050년 지질자원 트렌트(미래상)

## 2. 2050 지질자원 미래 트렌트(미래상) 내용

4차 산업혁명 중심이슈는 지능정보기술 진화와 신소재·생물기반 기술 발전으로 제시된다. 홍형득(2017)에 따르면 2016년 세계경제포럼(다보스포럼)에서 클라우스 슈밥 (Klaus Schwab)이 발표한 4차 산업혁명이란 디지털 정보화인 3차 산업혁명을 기반으로 모든 것이 연결되고, 보다 지능적인 사회로 변화하는 융복합 기술혁명이다. 이재홍(2017)은 자동화, 지능화, 연결화의 4차 산업혁명의 특징을 제시하였다. 이는 일방향에서 양방향의 능동성, 스스로 판단하는 지능성, 데이터 영역 확대의 연계성, 실시간 처리의 민첩성, 이상 상황을 예측하는 신뢰성 특성을 가진다. 미래창조과학부 미래준비위원회 외(2017)은 앞으로 사람과 사물 간의 연결, 사물과 사물 간의 연결이 증가됨을 예상하였다. 실제 세계에서 수집한 다양한 정보를 가상공간에 축적, 활용할 수 있게 됨에 따라, 실제와 가상 세계 사이를 매개하는 사이버-물리 시스템(CPS)이 중요함을 제시한다. 사이버-물리 시스템(CPS)에서 데이터의 수집·축적·해석을 위해서는 빅데이터, 인공지능의 정보기술이 필수적이며, 이후 실제 공간에 작동기(actuator)로 피드백 하는 순환적 관계를 가진다.

신소재·생물기반 기술 발전에 대해서는 박동(2017)은 클라우스 슈밥(2016)의 내용을 정리하여 물리학 기술과 디지털 기술, 생물학 기술의 융합을 제시하였다. 물리적

세계는 센서에 기반을 둔 무인운송수단·3D 프린팅·첨단 로봇공학·신소재 기술이 적용이 된다. 그리고 사이버 세계에서 사물인터넷·빅데이터·인공지능의 디지털 기술, 인간과 사물·인공지능과의 연결을 위한 유전공학·합성 생물학 기술이 필요하다. 첨단 로봇공학, 신소재, 생물학 기술의 발전에 대해 박영숙과 제롬 글렌(2017a)은 인공지능 로봇은 제조 및 소매·호텔 서비스, 치안·보안, 수술·간호 등 다양한 기능을 수행하며, 자체복원이 가능한 나노봇(Nanobot), 재료 직물(Shape-shifting Fabric), 나노 찰흙(Nano Clay)이 광범위하게 적용될 것이라 하였다. 그리고 유전자 데이터, 3D 바이오 프린터, 스마트 의수족 등으로 인간의 기능 향상과 능력 확대가 가속화된다고 하였다.

우주·지구 중심이슈는 우주자원 개발과 우주·지구 기원연구/탐사로 제시된다. 일본 과학기술·학술정책연구소(2015)는 과학 관측, 자원 이용 등을 목적으로 달 또는 화성에서 항구적인 유인 활동 거점이 구축되는 것을 2040년으로 예상한다. Monighan(2016)의 삼성 영국법인의 퓨처 리빙 리포트(SmartThings Future Living Report)에서도 생활공간이 지구와 유사한 행성이나 달, 화성으로 확대될 것으로 전망한다. 정부 기관뿐만 아니라 구글, 스페이스X, 버진갤럭틱, 블루오리진 등 민간 기업의 우주개발 가속화되고 있다. 박건형(2017)에 따르면, 구글은 우주개발을 목표로 하는 루나X 프라이즈를 통해 2017년, 달 표면에서 로버(rover) 주행 및 고해상도 영상을 지구로 전송할 계획이다. 김은정(2016)에 따르면 2009년에 설립된 최초 우주자원 채굴기업인 미국 플래네티리 리소시스(Planetary Resources)는 2025년까지 소행성으로부터 수자원과 희귀광물 자원 채굴 착수 목표를 제시하였다.

우주·지구 기원연구/탐사에 대해서는 이승룡(2016)은 2050년까지 천문학이 우주에 다른 생명체가 어디서 얼마나 존재하는지 확인할 수 있으며 지구 생명 기원에 해답을 줄 것으로 전망하였다. 박영숙과 제롬 글렌(2017a)은 2012년 세계미래회의 자료를 인용하여 2100년 인류 생존을 위한 위대한 도전으로 지구 핵 탐사를 제시하였다. 지구 핵 탐사를 위해 화강암과 같은 단단한 물질을 낮은 에너지를 사용하여 물리적 손상이나 폭발을 야기하지 않고 분자 단위로 쪼개는 기술의 적용 가능성 제시하였다. 현재 지구 육상에 최대 심도의 연구는 Popov et al.(1999)의 러시아에서 12.26km이다. 해저의 경우 Xinying(2016)에서 중국이 무인잠수정으로 11km 심도를 잠수하였다. 심부시추를 위한 국제사업이 수행되고 있지만, 맨틀을 직접 접해보지 못하고 있다. 박영숙과 제롬 글렌(2017a)이 인용한 노르웨이 과학산업기술연구재단(SINTEF)에 따르면, 엑손모빌 및 노르웨이의 기업들은 지하 5.5~10km 개발 계획이 있다고 한다. 현재 극지보존협약으로 남극의 개발은 불가하며 북극은 영토 범위에서 맥킨지 데이터, 러시아의 LNG프로젝트 등의 제한적인 시행 중이다. NOAA(2014)에 따르면, 인류는 지구 해양의 약 5%를 탐사하였다. 해양이 지구의 70%를 차지하므로, 지구의 많은 영역을 모르고 있다는 것이다.

에너지 중심이슈는 에너지 수요 증가와 에너지믹스 변화로 제시된다. 국제에너지기구(IEA)(2016b)는 각 국가가 석탄의 채굴량을 줄이고 화석연료 보조금을 삭감한

다는 가정 하에, 2040년까지 에너지 수요가 2014년 대비 30% 이상 증가할 것으로 전망하였다. 미국 에너지정보국(EIA)(2016) 역시 2040년까지 비 OECD국가를 중심으로 전 세계 에너지 소비가 2012년 대비 약 48% 증가할 것으로 예상하였다. 일본 에너지경제연구원(IEEJ)(2016)에 따르면, 전 세계 에너지 소비량은 2040년 18,904 Mtoe로 2014년 대비 5,205 Mtoe 증가할 것으로 전망했는데, 이는 세계 1, 2위 소비국가인 미국과 중국의 현재 소비량을 합친 것에 맞먹는 막대한 양으로 추정된다. 1990년부터 2040년까지 50년 동안 전 세계 에너지 소비량은 2배 이상 팽창하게 될 것으로 전망되었다.

일본 과학기술·학술정책연구소(2015)는 우주에서 태양광 발전 후 전력을 지상에 전송하는 우주 태양광 발전의 실제 실현을 2040년경으로, 핵융합 발전은 2050년 실제 실현되는 것으로 예측하였다. WEC(2013)가 전망하는 2050년 에너지믹스는 화석연료(석탄, 석유, 천연가스)가 59~77%로 주 에너지원이며, 신재생에너지가 20~30%, 원자력 에너지가 4~11%이다. Shell(2009)에서는 ‘국가 공조 청사진 시나리오’보다 ‘심각한 에너지 위기 시나리오’에서 2050년의 신재생에너지 사용량이 40% 많으며, 에너지 사용량도 증가하는 것으로 추정된다. 토니 세바(2015)는 2020년 태양광은 원유에 비해 원가를 1만 2,000배 개선하여 석유가 고갈되지 않더라도 사람들은 석유보다 태양광을 선호하게 될 것으로 예상하였다. WWF(2016)는 ‘에코피스 시나리오’를 통해 오늘날 세계가 에너지를 생산하고 소비하는 방식은 지속가능하지 않으며, 따라서 재생에너지로의 완전한 전환은 단지 최선의 선택이 아니라 인류에게 남겨진 유일한 대안이라고 강조하였다. 화석연료가 신재생에너지로 대체되는 미래가 실현되더라도 화석연료자원은 산업원료로도 활용되므로 미래에도 지속적인 활용이 예상된다.

광물자원·재료 중심이슈는 천연자원 지속 이용, 천연자원 대체 원료 개발, 재생자원 영속성 강화로 제시된다. 세계경제포럼(WEF)(2015)은 ‘2050년 지속가능한 세계에서 광업 및 금속자원에 대한 보고서’에서 미래 천연자원의 유용성에 관한 새로운 패러다임을 제시하는 3가지 시나리오를 발표하였다. 그 중, 풍부한 자원(Resource Abundance) 시나리오에서는 새로운 기술개발로 저렴한 가격의 다목적 금속 및 금속 대체재 개발, 소행성 자원이 개발되어, 천연자원의 지속가능성 및 재사용에 대한 고려가 필요 없게 된다. LG경제연구원의 김경연과 이광우(2016)는 전기차, 태양광, 풍력, 2차전지 등 4차 산업혁명·녹색시장의 급속 성장으로 리튬 등 녹색광물자원의 중요성을 제시하였다. 한국개발연구원(2014)은 한국 광업의 대부분을 차지하는 5대 비금속(총 광산물 생산액의 88.2%)인 석회석, 규석, 규사, 고령토, 납석의 용도와 시장 전망 제시하였다. 자동차 경량화/고강도를 위한 플라스틱과 충전재, 구리전선을 대체한 통신용 글라스파이버, 각종 모터나 터빈 부품용 세라믹 소재 등 금속대체 소재로서의 비금속 광물소재 또는 화학소재 용도는 꾸준히 증가할 것으로 보인다. 석유를 대체한 바이오 플라스틱이나 해조류, 화석연료를 사용하지 않는 선박·비행기 개발이 2035년 실현 예측되어 혼한 재료/친환경 재료 대체되거나 리사이클링 또는

업사이클링을 통한 폐기물/쓰레기 제로화가 된다. WEF(2015)은 기존의 천연자원인 신생자원(Virgin Resource)과 재생자원(Reuse and Recycle Resource)을 중요 자원으로 제시하였다. 광물자원별 최종생산물의 재활용률이 40~80% 수준이나, 2050년의 바람직한 상황에서는 80~100%로 예상되었다.

기후환경 중심이슈는 기후변화 지속, 생태계 교란, 이산화탄소 저감 노력 강화로 제시된다. 기후변화는 폭염 스트레스, 폭우, 내륙·연안 범람, 산사태, 대기오염, 가뭄과 물 부족, 해수면 상승 및 폭풍 해일 등을 통해 도시 지역의 주민, 자산, 경제 및 생태계에 위협을 초래한다. IPCC는 현재 추세로 온실가스를 배출한다면 2065년과 2100년 지구 평균기온은 2.0℃, 3.7℃ 상승, 평균해수면은 30cm, 63cm 상승할 것으로 전망하였다. IPCC(2014), 기후변화에 관한 정부간 협의체(2015)는 온난화 속도, 해양 산성화 정도·속도, 해수면 상승 등의 상호 작용으로 생태계, 생물다양성, 생태계 재화, 생태계 기능 및 서비스 손실 위험을 제시하였다. 그리고 기후변화의 영향에 가장 민감한 비 도시 지역 부문으로 수자원 가용성·공급, 식량 안보, 기반시설, 농촌 수익을 제시하였다. CSIRO IMPACT SCIENCE(2015)은 에너지-식량-수자원 복합문제를 기반으로 2050년 시나리오를 구성하였다. 박영숙과 제롬 클렌(2017a)은 지구에 존재하는 종의 30%가 해수면 상승, 급격한 기후변화와 서식지 손실·소멸로 21세기 후반에 멸종될 것으로 예상하였다.

IPCC(2014), 기후변화에 관한 정부간 협의체(2015)는 이산화탄소제거(CDR) 및 태양복사관리(SRM)의 지구공학(Geo-engineering)을 제시하였다. 지구공학은 기후 시스템을 계획적으로 변형시키는 것으로 대기 중에서 직접 이산화탄소 제거(성층권에어로졸 주입, 구름 표백 등)을 포함한다. IEA(2016a)의 2050년 CO2 감축 분담 예측 결과, 신재생 에너지 30%, 최종 사용자 효율 향상 38%, CCS 13%, 원자력 에너지 8%로 제시하였다. 일본은 지구온난화의 원인인 이산화탄소를 효과적으로 분리, 포집, 사용을 하고자 하는 기술 발전 계획. 미국은 석유회수증진(EOR) 기술 이용 이산화탄소 저장 계획. EU는 SET-Plan과 Horizon 2020 프로그램을 통해 이산화탄소 저감 기술 개발할 계획이다.

지질환경 중심이슈는 환경질 저하, 지구물리학적 재난, 방사성폐기물 고도처리로 제시된다. WEF(2016)과 WEF(2017)의 글로벌 리스크 보고서에서는 대기, 토양, 지하수 등 환경질 저하를 장기적인 트렌드로 제시하였다. OECD(2012)의 2050년 환경전망보고서에 따르면 의약품, 화장품, 세제, 향미생물 잔류물 등의 미세 오염원에 의한 수중 생태계와 인간의 건강에 미치는 영향이 점점 더 커질 것으로 예상된다. 이러한 물질들은 암과 기형아 출산 및 기타 발달장애를 유발하는 내분비계(호르몬) 교란을 통해 인간을 포함한 유기체에 부정적인 영향을 미친다. 기후변화에 의해 유발되는 기상이변의 빈도와 강도의 증가로 침적물에 저장된 오염물질들의 재이동이 가능하다. 이수형(2016)은 유엔 지속가능발전목표(SDGs)와 같이 유독 화학물질, 대기·수질·토양오염 및 환경오염으로 인한 우리나라의 질병·사망 경감 목표·지표 보완 필요성을 제시하였다. Earthzine(2012)의 European Geosciences Union(EGU)의 연

구결과에 따르면, 식량 생산과 에너지 사용이 현재 수준에서 계속된다면 대기질이 2050년에도 악화될 것이라고 예상하였다. 이산화질소, 이산화황 및 PM2.5와 같은 미립자 물질과 오염 물질의 수준은 2050년에도 동아시아에서 지속되며, 북부 인도와 페르시아 만에서는 높은 수준의 오존이 발생한다. Raoa et al.(2017)의 화석연료 사용 시나리오에서 아시아에서는 2050년에도 현재 OECD 수준보다 높게 대기오염 물질이 배출된다. 박영숙과 제롬 글렌(2017b)은 유럽 농약 사용량이 2090년에는 1990년의 2배로 증가하여, 농토의 산성화 및 농약 오염 토지가 전체 40% 수준으로 예상하였다.

WEF(2017)의 Global Risks 2017에 의하면 지진, 화산활동, 산사태, 쓰나미나 지자기 폭풍 등 지구물리학적 재난에 의한 인명손실 및 재산, 인프라, 환경 피해를 글로벌 리스크로 제시하였다. 지진·화산, 산사태·지반침하 등 지구물리학적 재난에 의한 피해 취약성·규모 증가가 예상된다. 고준위 방사성 폐기물 처분 또한 2050년 미래사회에 해결해야 할 우리나라의 중요 이슈이다. 방사성 폐기물 처리를 위해 심부처분이 필요하며, 김유홍(2017)은 2053년까지 지질자원 분야에서 대응할 고준위 방사성 폐기물 지층처분 기술개발로드맵을 제시하였다.

삶의 터전 중심이슈는 도시화 확대, 우주/해저·해중도시 개발, 도시재생으로 제시된다. UN Department of Economic and Social Affairs Population Division(2014)은 1950년 전 세계 인구의 30%가 도시에서 거주하고 있었으나 2014년 54%로 상승했으며, 2050년 인류 66%가 도시에 거주할 것으로 예측하였다. 급속한 도시화와 함께, 인구 1천만 명 이상의 메가시티가 2014년 28개에서 2030년 41개로 증가한다. UN Department of Economic and Social Affairs Population Division(2015)은 인구증가율은 감소하지만 세계 인구가 2015년 중반 73.5억 명에서 2050년 97억 명, 2100년 112억 명으로 증가할 것으로 예측하였다. 정보통신산업진흥원(2015)은 고령화 및 출산율 감소에 따른 경제인구 부족 문제가 대두되고 있지만, 전 세계적으로 보면 여전히 인구의 급격한 증가와 도시에 인구가 집중되는 현상이 나타나며, 도시 인프라의 지속적 정비, 강화 필요성을 제시하였다.

도시 공간부족으로 스마트에코시티, 구름위로 치솟는 초고층 빌딩인 슈퍼마천루(Super-skyscraper), 지하도시 및 지하 마천루(Earth-scraper)가 실현된다. Schilling(2014), Crockett(2016)에서 멕시코 BNKR 건축의 어스스크래퍼(Earthscraper)라는 초고층건물(Skyscraper)에 대비되는 지하건축물인 지하마천루(Earthscraper) 개념이 등장하였다. 한국건설기술연구원(2015)은 미래 융복합 연구사업인 X-프로젝트로, 2040년 실용화를 목표로 하는 Earthscrepaer 2020을 제안한 바 있다. Monighan(2016), 최은수(2016)는 2116년의 미래 건축은 정보를 입력받은 모바일 로봇 팔과 드론이 공사를 하므로 구름 위로 올라가는 슈퍼마천루(Super-Skyscraper)의 개념을 제시하였다. 그리고 편리성 극대화를 위해 스마트에코시티, 인공도시 현실화. 도시간 연결을 위한 심부 이용이 증가된다. 미래창조과학부/한국과학기술평가연구원(2015)에 의하면, 미국은 센서 네트워크, 브로드밴드 인프라



라 스트럭처에 대한 사이버 보안 투자, 지능형 수송시스템 등의 기술개발 투자를 강화하는 스마트시티(Smart Cities) 연구개발 계획 발표하였다. 프로스트 앤 설리반(2013)은 2025년까지 세계적인 스마트시티 26개 지역이 조성될 것으로 예상하였다. 마티아스 호르크스(2014)는 2045년 실질적 그리노믹스(Greenomics, 녹색경제) 실현을 예상하였다. 구글은 사이드워크 랩(SideWalk Labs)로 환경적 영향을 강조한 스마트시티를 제시하였다. PGH(2012), Monks(2015)에 따르면, 차세대 기술을 실용화를 위한 인공도시 등 고연결성의 미래도시가 나타나고 있음. 또한 하이퍼루프 등 도시간 연결을 위한 심부이용이 확대될 것으로 전망하였다.

재해(해수면상승)·이상기온, 행성개발 등 이슈로 내륙 신도시, 해중/해저도시, 행성 도시(달/화성) 등의 도시이동 및 도시재생 수요가 도출된다. 이명현(2017)에 의하면, 중동 아랍에미리트 연방이 화성에 60만 명이 거주할 수 있는 도시를 건설하는 화성 2117 프로젝트를 발표하고 첫 나노위성을 성공적으로 발사하였다고 한다. 천문학자 칼 세이건은 1961년 금성의 환경을 지구처럼 만드는 작업인 테라포밍 개념을 제시하고 1973년에는 화성 테라포밍에 대해 발표했으며, 이후 NASA는 1) 화성 대기 조성, 2) 물 만들기, 3) 기온 높이기, 4) 식물 심기, 5) 정착촌 건설 단계의 약 480년 기간, 4조 달러 소요 예상되는 화성 테라포밍 연구를 발표하였다. 이원영(2015)에 의하면, 일본 시미즈건설은 지진 등 자연재해와 지구온난화로 인한 해수면 상승에 대한 대안, CO2처리 등을 위해, 28조 원대 규모의 5,000명이 거주 가능한 해저 도시 오션스파이럴(Ocean Spirals)을 구상하였다. 이원영(2015)의 보도는 2030년 실현 가능성을 타진하였으나, FutureTimeline (2017)에서는 2100년에 실현될 것으로 예상하였다.

기후변화 등 재해(해수면상승)·이상기온, 행성자원개발 등의 이슈로 도시 이동이 발생할 수 있으므로, 버려진 지역의 재개발/재생 이슈 부각된다. 도시·사회적 재난, 국가간 분쟁·인공재난(핵전쟁/테러) 대응이 필요하다. 이승룡(2016)은 급속한 도시화로 인한 재난재해 취약성 증가, 피해규모 증가 등의 도시재난, 사회적 재난을 중요 항목으로 제시하였다. 또한 도시화 확대에 의한 지방 쇠퇴, 사회인프라 노후화로 인한 대형 재난 발생 가능성, 노후된 대형 건축물 처리 문제 제시. 지역재생, 폐자원 활용의 이슈를 제시하였다. 그리고 국제질서의 다극화가 계속됨에 따라 지역의 갈등 심화, 민족 간 분쟁으로 인한 국지전의 증가, 서구와 이슬람의 대결 심화 등 세계적 갈등과 분쟁의 지속화는 앞으로도 계속 중요한 사회문제로 대두될 것으로 전망하였다. Franklin and Andrews(2012)는 무인정찰기 증가에 따른 로봇전쟁이 시작되고 국소적인 핵전쟁 위험이 증가할 것으로 예상하였다. 이승룡(2016)이 제시한 통일 역시 우리나라의 도시개발 및 지역계획에서 특수한 성격의 중요 이슈이다.

도출한 미래이슈의 객관성과 신뢰성을 위하여, 일반인과 지질자원 분야 지식 및 관심이 높은 층의 2,300 여명을 대상으로 지질자원 미래이슈의 중요도에 대한 폭넓은 설문조사를 실시한 결과 기후환경과 지질환경, 광물자원·재료, 에너지, 삶의 터전에 대해서 중요도 순위가 높아 적절하게 중심이슈가 선택된 것으로 볼 수 있다. 우

주·지구탐구와 4차 산업혁명에 대해서는 중요도 순위가 낮아, 아래의 2050 지질자원 기술 도출에서는 기반 내용으로 작성되었다.

### Ⅲ. 지질자원 기술의 대응방안

#### 1. 연구 방법

지질자원과 관련한 2050년 미래상의 이슈를 바탕으로 미래 기술 수요를 구체화하고, 미래의 문제 해결을 위해 요구하는 기술 수요의 서비스 속성을 도출한다. 지질자원 분야의 현 서비스 및 제품에 대한 국내외 자료 조사 및 키워드 분석에 따라, 미래 수요를 충족시켜 줄 지질자원 분야의 서비스 또는 제품을 구성한다. 미래 사회 해결 이슈 구체화 및 요구하는 기술 수요의 서비스 속성을 도출을 위해, 앞서 제시한 2050년 지질자원 미래상에서의 이슈별로 지질자원기술 및 한국지질자원연구원(KIGAM)을 기준으로 SWOT 분석을 실시하였다. SWOT 분석 및 국내외 미래기술 관련 추가 문헌 분석을 실시하고 경제사회 분야 및 지질자원 분야 전문가 의견 수렴을 통해 지질자원기술의 위치와 역할의 타당성을 검증하였다. 미래기술 관련 자료는 국제기구, 연구기관, 컨설팅업체, 시장조사업체 등에서 발표한 국내 및 국외 문헌과 미래기술과 관련된 다양한 웹뉴스를 수집하였다. 그 이후 인문사회 및 지질자원 분야 전문가 의견 수렴을 통해서 미래사회 해결 이슈의 타당성을 검증하였다(인문사회 전문가 10명, 지질자원 전문가 10명, ICT 등 타 기술 전문가 4명). 마지막으로 도출한 미래기술의 객관성과 신뢰성을 위하여, 일반인과 지질자원 분야 지식 및 관여가 높은 층의 2,300 여명을 대상으로 지질자원 미래기술의 중요도와 시급성에 대한 폭넓은 설문조사를 실시하였다. 일반인 503명, 전문가 215명의 총 718개 응답지를 분석하여, 연구진이 도출한 미래기술의 적절성을 검증하였다.

#### 2. 2050 지질자원 대응 기술 내용

우리나라의 제조업 중심의 산업구조로 4차 산업혁명 기술을 적용한 산업의 부가가치 상승 여력이 높다. 기존의 지질자원 관련 다양한 빅데이터를 활용한 새로운 가치 창출이 가능하다. 현재와 같은 인공지능의 형태가 아니더라도, 지능정보기술은 자원개발산업에서 데이터 시각화, 생산제어·최적화, 예측·시뮬레이션을 위한 도구로 20년 이상 사용되어 왔다. 그리고 지질자원기술 분야 및 한국지질자원연구원(KIGAM)은 자원개발·활용, 지질환경 분야에서 바이오키칭, 오염복원 등 바이오기술을 적용한 경험을 보유하고 있다. 산사태 등 지질재해 분야의 사물인터넷(IoT) 등을 활용한 모니터링 등 강력한 IT 기술을 바탕으로, 인공지능 및 사이버-물리 시스

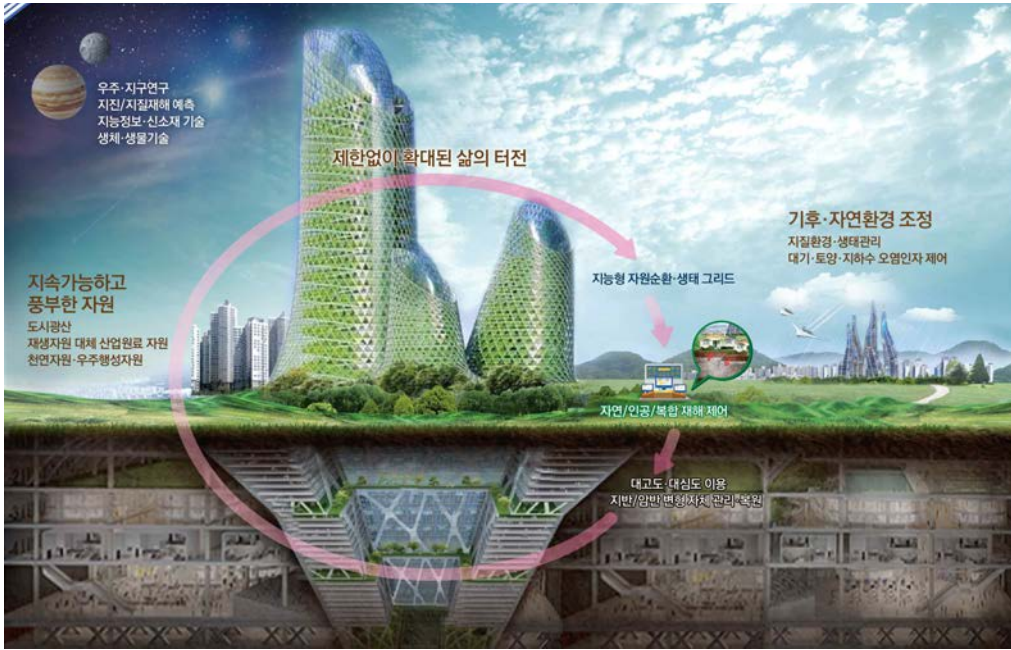
탐(CPS) 등 4차 산업혁명 기반기술의 선도적 적용이 가능하다. 또한 지질자원기술 분야에서도 원자·분자 연구, 지구기원 연구 및 광물자원의 기원에 대한 연구주제가 제시되어, 지구모방기술의 적용한 지질자원 분야의 확대가 가능하다.

생태계 교란, 기후변화와 함께 환경질저하(대기·토양·수자원), 지구물리학적 재난(지진·화산, 산사태·지반침하), 지구화학적 재난(토양·지하수오염)로 인한 지질환경에 대한 관심이 증가하고 있으며, 우주·지구의 기원연구 및 조사·탐사는 미지의 분야로 심부, 해저/극지를 포함하여 연구할 영역 및 새롭게 다시 연구할 영역이 많이 존재한다. 4차 산업혁명의 사물인터넷(IoT)/센서, 인공지능 등 지능정보기술 발달에 따라, 지진 및 지질재해 자료 수집, 시뮬레이션 및 발생 예측 능력이 확대된다. 물질과학 및 원자·분자 연구의 진보로 자체복원재료 등 인프라·지반분야 연구개발의 범위가 확대된다. 그리고 향후 수퍼마천루, 지하마천루, 지하이용 도시연결(하이퍼루프), 방사성 폐기물 처리 등 대고도·대심도 이용 전망 및 통일 후 북한 개발, 방사성 폐기물 처리를 위한 연구개발 수요가 예상된다. 기술발전에 따른 핵전쟁, 테러 등 인공재난 및 영토 경계 등 국가간 분쟁 가능성 확대로 기술적 대비 필요성이 강조된다. 우주/해저·해중도시의 건설 가능성에 따라 해당 환경에 적합한 기술개발 수요도 예상된다.

이러한 SWOT 분석 및 문헌분석, 전문가 의견수렴의 결과로, 2050년 지질자원기술 위치에 대해 지속가능하고 풍부한 자원 미래 실현, 예측(조정)되는 자연환경 관리, 제한없이 확대된 삶의 터전 구축으로 도출하고 세부기술을 제시하였다. 기존의 전통 지질자원기술 뿐만 아니라, 우주·지구연구, 지능정보기술, 신소재기술, 생체·생물기술 기반으로 한 2050년 지질자원 기술 비전을 제시한다.



(그림 2) 2050 지질자원기술의 미래 비전



(그림 3) 2050 지질자원기술이 적용된 미래모습

지속가능하고 풍부한 자원 미래 실현 분야의 2050 지질자원기술은 저비용, 친환경/안전 천연자원 개발·처리 및 지질자원 기반 에너지공급, 도시광산/재생자원 개발, 지구모방 기반 천연/인공자원 원료 및 천연자원 대체 산업원료 개발, 개발 불가능한 프론티어 지역 및 우주행성 자원 개발로 세부 내용은 다음과 같다.

(그림 4) 지속가능·풍부한 자원 미래 분야 지질자원기술의 위치와 역할

- 저비용, 친환경/안전 천연자원 개발·처리 및 지질자원 기반 에너지공급
  - 인지 컴퓨팅은 미래 자원산업에 결정적 영향을 주며, 자원사업 역량이 획기적으로 확충
  - 태양광 이용 포함 저비용, 친환경/안전 천연자원 개발 및 지질자원 기반 해상풍력 입지, 지열자원 공급, 에너지저장 등 에너지생산·공급
- 도시광산/재생자원 개발
  - 폐기물 최소화 및 환경 친화적인 방식으로의 폐기물 재사용, 도시광산 /재생자원 기술의 확산으로 천연자원의 재활용률 제고
- 지구모방 기반 천연/인공자원 원료 및 천연자원 대체 산업원료 개발
  - 지구모방 기술 등 분자/원자 차원 재료 설계, 저비용 다목적 금속 및 금속 대체재 개발 등 광물자원과 화석연료자원을 대체하는 소재 창출
- 개발 불가능한 프론티어 지역 및 우주행성 자원 개발
  - 발전하는 지능정보 기술 등을 이용하여 오지, 심해, 극지 등 프론티어 개발, 달·화성, 소행성 자원 개발 실현

예측되고 조정가능한 자연환경 관리 분야의 2050 지질자원기술은 지구공학기술 이용 기후시스템 조정 등 CO2 저감/처리, CPS/위성 활용 지질환경/생태 관리(감사·예측·조정), 대기·토양·지하수 오염인자 정밀제어(재해 방지·복원)로 세부 내용은 다음과 같다.



(그림 5) 예측(조정)되는 자연환경 분야 지질자원기술의 위치와 역할



- 지구공학기술 이용 기후시스템 조정 등 CO2 저감/처리
  - 이산화탄소 제거 및 태양복사 관리를 위한 시스템 기술분야인 지구공학 (Geo-engineering) 기술 기반 연구
  - 바이오·나노기술과 융합한 탄소자원화 및 타 산업 연계 산업재료 개발
- CPS/위성 활용 지질환경/생태 관리(감시·예측·조정)
  - 인공지능, 사이버물리시스템(CPS) 기술을 활용한 수자원, 기상재해 조정·대응 기술 개발
  - 재해위험 관리, 구조·물리적 서비스를 위한 생태계/지질환경 취약성 모델링/재해 예측
- 대기·토양·지하수 오염인자 정밀제어(재해 방지·복원)
  - 미세 플라스틱, 내분비계 교란물질 등 인공·자연 오염물질의 퇴적층 탐지·제어
  - 지하수 용존 극미량 물질(항생제/환경호르몬/방사성 물질) 초정밀 측정·제어
  - 대기·토양·지하수 연계 오염물질 및 토양·지하수 생태계 건강성 평가·제어

제한 없이 확대된 삶의 터전 구축 분야의 2050 지질자원기술은 지능형 자원순환 및 지질환경·생태 그리드 기반 지속가능한 생활환경 구현, 대고도·대심도 이용을 위한 심부굴착 및 지반/암반 변형 자체관리·복원, 지진/지질재해 발생 예측 기반 국토해양 자연/인공/복합재해 대응으로 세부 내용은 다음과 같다.



(그림 6) 제한 없이 확대된 인류생활 분야 지질자원기술의 위치와 역할

- 지능형 자원순환 및 지질환경·생태 그리드 기반 지속가능한 생활환경 구현
  - 도시농업 등 건물 안에서 모든 활동이 가능한 ‘자족 도시(스마트에코시티)’를 위한 자원순환 기반 무공해 주거환경 구현
  - 지하수 고갈, 염수화, 오염의 3대 지하수 위기에 대처하는 지하수 인공함양 등 지능형·분산형 물관리 인프라 구축
- 대고도·대심도 이용을 위한 심부굴착 및 지반/암반 변형 자체관리·복원
  - 대고도, 대심도의 수퍼 마천루(Super-skyscraper)와 지하 마천루(Earth-scraper) 대비를 위한 심부 굴착 및 암반/지반 기초 및 변형 관리/조정
  - 안정 물질 센서, 나노 로봇 등의 지능정보기술과 신소재·생물기술을 이용한 자체복원 재료 개발·적용
- 지진/지질재해 발생 예측 기반 국토해양 자연/인공/복합재해 대응
  - 단층면 변형·응력·물질과학/분자이동 연구에 의한 지진 발생 예측. 이에 기반을 둔 초연결 SOC 관리 및 자연/인공/복합재해 대비

도출한 2050 지질자원 미래기술의 객관성과 신뢰성을 위하여, 일반인과 지질자원 분야 지식 및 관여가 높은 층의 2,300 여명을 대상으로 지질자원 미래기술의 중요도에 대한 폭넓은 설문조사를 실시한 결과는 다음과 같다. 저비용, 친환경/안전 천연자원 개발·처리 및 지질자원 기반의 에너지공급, 지진/지질재해 발생 예측 기반 국토 해양 자연/인공/복합재해 대응, 대기·토양·지하수 오염인자 정밀제어, 지구공학 기술 이용 기후시스템 조정 등 CO2 저감/처리, 지구모방 기반 천연/인공자원 원료 및 천연자원 대체 산업 원료 개발, 도시광산/재생자원 개발이 중요도가 높게 나타났다. 개발 불가능한 프론티어 지역 및 우주행성 자원 개발, 지능형 자원순환 및 지질환경·생태 그리드 기반 지속가능한 생활환경 구현, CPS/위성 활용 지질환경/생태 관리(감시·예측·조정), 대고도·대심도 이용을 위한 심부굴착 및 지반/암반 변형 자체 관리·복원의 경우 중요도가 낮게 나타났다. 이러한 기술은 시급도도 낮게 나타나 30년 이상의 미래 관점에서 해당 기술의 경우 현재 일반인과 전문가 집단에서 상대적으로 받아들이기 어려워하는 것을 알 수 있다.

## 참 고 문 헌

- 관계 정부부처 합동 (2016), “제4차 산업혁명에 대응한 지능정보사회 중장기 종합대책”.
- 기후변화에 관한 정부간 협의체 (2015), 「IPCC 제5차 평가 종합보고서」, 기상청(번역본).
- 김경연과 이광우 (2016), “그린에너지 시대의 새로운 자원 전쟁”, LGERI 리포트, LG Business Insight. 2016년 10월 12월호.
- 김유홍 (2017), 「고준위방사성 폐기물 관리 기본계획 세부추진전략 기획」, 한국지질자원연구원.
- 김은정 (2016), 우주자원탐사 기업 현황, 한국항공우주연구원 e-정보정책센터.
- 마티아스 호르크스 (2014), ‘실질적인 그리노믹스’. 「메가 트렌드 2045」.
- 미래창조과학부 미래준비위원회, KISTEP, KAIST(2017), “10년 후 대한민국: 4차 산업혁명 시대의 생산과 소비”.
- 미래창조과학부/한국과학기술평가연구원 (2015), 이슈분석: 주요국의 스마트시티 정책, 과학기술 & ICT 정책·기술동향  
[http://www.now.go.kr/ur/poliIssue/viewUrPoliIssue.do?poliIssueId=ISUE\\_000000000000777&pageType=OVER&currentHeadMenu=2&currentMenu=21](http://www.now.go.kr/ur/poliIssue/viewUrPoliIssue.do?poliIssueId=ISUE_000000000000777&pageType=OVER&currentHeadMenu=2&currentMenu=21).
- 박견형 (2017), 350억원 걸린 달 탐사 대회: 자원채취 나선다, 조선비즈,  
[http://biz.chosun.com/site/data/html\\_dir/2017/01/25/2017012503423.html](http://biz.chosun.com/site/data/html_dir/2017/01/25/2017012503423.html).
- 박동 (2017), “4차 산업혁명 선도 인재 양성 전략”, 2017 한국인적자원개발학회 춘계학술대회 논문집, pp.9-23.
- 박영숙과 체롬 글렌 (2017a), 「세계미래보고서 2020-2050」, 교보문고.
- 박영숙과 체롬 글렌 (2017b), 「세계미래보고서 2055」, 비즈니스북스
- 이명현 (2017), “인류 최후의 날을 대비하다: 화성 테라포밍”, 지질·자원·사람, 2017 제157권 3/4월호, pp.6~9.
- 이승룡 (2016), 「제5회 과학기술예측조사 1차년도 연구」, 한국과학기술기획평가원.
- 이승룡 (2017), 「제5회 과학기술예측조사 2016-2040」, 한국과학기술기획평가원.
- 이원영 (2015), 2030년 해저 도시 실제로 등장할까, 전자신문,  
<http://www.etnews.com/20150121000005>.
- 이재홍 (2017), “4차 산업혁명과 대한민국의 기회”, 대한민국 제4차 산업혁명 시대의 과학기술과 정부출연 연구기관의 역할 발표자료.
- 일본 과학기술·학술정책연구소 (2015), 「10차 과학기술예측조사」.
- 정보통신산업진흥원 (2015), 최신 ICT 뉴스: 구글 사이트워크: 스마트시티 넘어선 근원적 도시개발 지향.
- 최은수 (2016), 미래 과학자들이 내다본 100년 뒤 삶은?, 매일경제,  
<http://news.mk.co.kr/newsRead.php?year=2016&no=142713>.
- 클라우드 슈밥 (2016), 「클라우드 슈밥의 제4차 산업혁명」.
- 토니 세바 (2015), 에너지 혁명 2030」, 교보문고.
- 프로스트 앤 설리반 (2013),



- <http://www.frost.com/prod/servlet/analyst-briefing-detail.pag? mode=open&sid=28067895>  
3.
- 한국개발연구원 (2014), “남북한 광물자원 개발기술의 실상과 미래”, KDI 북한경제리뷰, 2014년 8월호, pp.65-82.
- 한국건설기술연구원 (2015), 미래전략발표회 자료(내부자료).
- 홍형득 (2017), “4차 산업혁명과 과학기술 거버넌스”, 대한민국 제4차 산업혁명 시대의 과학기술과 정부출연 연구기관의 역할 발표자료.
- Crockett, L. (2016), Can't Build Up? Why Not Build Down? The Case For Subterranean Architecture, *arch daily*, <http://www.archdaily.com/794320/cant-build-up-why-not-build-down-the-case-for-subterranean-architecture>.
- CSIRO IMPACT SCIENCE (2015), 「Australian National Outlook 2015: Economic activity, resource use, environmental performance and living standards」, 1970 - 2050.
- Earthzine (2012), Study Shows Overall Air Quality to Worsen by 2050, <https://earthzine.org/2012/08/18/study-shows-overall-air-quality-to-worsen-by-2050>.
- EIA (2016), 「International Energy Outlook 2016」.
- Franklin, D. and Andrews, J. (2012), Megachange: The The Economist.
- FutureTimeline (2017), <http://www.futuretimeline.net/22ndcentury/2100-2149.htm#.WRVcTWnyhhE>.
- IEA (2016a), 「20 Years of Carbon Capture and Storage: Accelerating Future Deployment」.
- IEA (2016b), 「World Energy Outlook 2016」.
- IEEJ (2016), 「ASIA/WORLD ENERGY OUTLOOK 2016」.
- IPCC (2014), 「Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change」. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Monighan (2016), 「SmartThings Future Living Report」, Samsung SmartThings.
- Monks, K. (2015), CITE: The \$1 billion city that nobody calls home, CNN, <http://edition.cnn.com/2015/10/06/business/test-city/>.
- NOAA (2014), How much of the ocean have we explored?, <http://oceanservice.noaa.gov/facts/exploration.html>.
- OECD (2012), 「2050년 환경전망보고서」, OECD출판부(한국 환경부 번역).
- PGH (2012), <http://www.pegasusglobalholdings.com/test-center.html>.
- Popov, Y.A., Pevzner, S.L., Pimenov, V.P., Romushkevich, R.A. (1999), “New geothermal data from the Kola superdeep well SG-3”, *Tectonophysics* 306, pp. 345-366.
- Raoa, S., Klimonta, Z., Smithc, S.J., Dingenene, R.V., Dentenere, F. (2017), “Future air pollution in the Shared Socio-economic Pathways”, *Global Environmental Change*, Vol. 42, pp.346 - 358.

- Schilling, D. R. (2014), World's First Earthscraper: 75 Story "Inverted Pyramid" In Mexico City. <http://www.industrytap.com/worlds-first-earthscraper-75-story-inverted-pyramid-mexico-city/22909>.
- Shell International BV (2009), 「Shell energy scenarios to 2050」 .
- UN Department of Economic and Social Affairs Population Division (2014), 「2014 세계 도시화 전망(The 2014 Revision of World Urbanization Prospects)」 , UN.
- UN Department of Economic and Social Affairs Population Division (2015), 「2015 세계 인구 전망(The 2015 Revision of World Population Prospects)」 , UN.
- WEC(World Energy Council) (2013), 「World Energy Scenarios Composing energy futures to 2050」 .
- WEF(World Economic Forum) (2015), 「Mining & Metals in a Sustainable World 2050」 .
- WEF(World Economic Forum) (2016), 「Global Risks 2016」 .
- WEF(World Economic Forum) (2017), 「Global Risks 2017」 .
- WWF (2016), 「The Energy Report: 100% Renewable Energy by 2050」 .
- Xinying, Z. (2016), Nitrogen experiment among breakthroughs, China Daily Asia, [http://www.chinadailyasia.com/nation/2016-08/23/content\\_15483551.html](http://www.chinadailyasia.com/nation/2016-08/23/content_15483551.html).