

향후 30년의 장기적 관점으로 한국과 일본의 미래 지질자원기술 분석

안은영*

한국지질자원연구원 미래정책연구실

Analysis of Future Geoscience and Mineral Resources Technologies in Korea and Japan over the Next 30 Years

Eun-Young Ahn*

Policy Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, 34132, Korea

(Received: 31 August 2017 / Accepted: 23 October 2017)

This study focuses on the sustainable development and intelligence information society, analyzing the results of science and technology forecasts from Korea and Japan for 2040–2050. Future geological environment and disaster technologies are presented, such as base geology, geophysical geological disaster, weather adjustment, CO₂ reduction, environmental disaster, and smart ecocity developments. For the future technologies in energy and resources technology, space resources development and nuclear fusion will be realized by 2040 and 2050. Moreover, new material and resource technologies will be applied to replace existing energy and mineral resources by 2040. Japan has introduced intelligent information viewpoints and presented new technologies.

Key words : future forecast, science and technology foresight, emerging technology, research and development (R&D)

본 연구는 지속가능발전과 지능정보사회의 미래트렌드에 주목하여 2040~2050년 지질자원기술 관련 분야를 예측할 수 있는 한국과 일본의 과학기술예측조사 결과를 분석하였다. 지질자원기술 관련 분야로 지질환경·재해 기술과 에너지·자원 기술 분야로 구분하여 분석하였다. 한국과 일본의 지질환경·재해 분야 미래기술은 기반지질, 지구물리학적 지질재해, 기상조정·CO₂ 저감, 환경재해(방사성 폐기물 처분 포함), 스마트에코시티(자급자족 도시)로 제시된다. 에너지·자원 기술 분야 미래기술은 핵융합 발전이 2050년 정도에 실현되며, 2040년 정도에는 소행성 등 우주자원 개발 및 우주유인기지 구축이 실현될 것으로 보였다. 또한 2040년에는 신재료·신자원기술이 적용되어 기존의 에너지자원과 광물자원을 대체할 것으로 보인다. 일본은 지능정보사회 관점을 대대적으로 도입하여, 지질자원 분야 관련 분야에서도 새로운 관점의 기술들을 제시하고 있다.

주요어 : 미래 예측, 과학기술 예측, 미래 유망기술, 연구개발

1. 서 론

Lee(2016a)와 UN지원SDGs한국협회 ASD(2017)에 따르면, 유엔과 국제사회의 공동목표로 2000-2015년 밀레니엄개발목표(MDGs)를 종료하고 2016-2030년 지

속가능발전목표(UN SDGs)를 새로 시작한다. 지속가능발전목표(UN SDGs)는 인류의 보편적 문제(빈곤, 질병, 교육, 여성, 아동, 난민, 분쟁 등)와 지구 환경문제(기후변화, 에너지, 환경오염, 수자원, 생물다양성 등), 경제사회문제(기술, 주거, 노사, 고용, 생산 소비, 사회구

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: eyahn@kigam.re.kr

조, 법, 대내외 경제)를 포함한다. WEF(2015)는 2050년 지속가능한 사회에서 광업과 금속자원에 대한 보고서를 발표했다. WEF(2015)에 따르면, 유엔 지속가능발전목표에 의해 2050년 미래사회는 1) 환경·기후 보호, 2) 공정한 가치·개발(책임성있는 자원개발), 3) 투명성과 인권, 4) 건강과 삶의 질에 대한 기본적인 원칙을 가진다. 호주 연방과학산업연구원(CSIRO)은 에너지, 광업, 재료, 제조, 환경, 식품·복지, 교통, 천문·우주 분야를 연구하는 종합연구소로, 해당 기관에서는 CSIRO IMPACT SCIENCE(2015)으로 2050년 경제활동, 자원사용, 환경성과와 생활양식에 대한 보고서를 발표하였다. CSIRO IMPACT SCIENCE(2015)는 에너지·식량·수자원 복합문제와 글로벌 시나리오(전력, 세계경제, 기후변화), 국내 시나리오(에너지, 경제, 국토이용, 생물다양성, 재료, 수자원)에 의해 2050년을 예측하였다. CSIRO IMPACT SCIENCE(2015)는 새로운 국토이용 시장을 CO₂, 생물다양성 관점으로 제시하였다.

WEF(2015)은 2050년 광업 및 금속자원에서 기존의 천연자원인 신생자원(virgin resource)과 함께 재생자원(reuse and recycle resource)을 중요 자원으로 보고 있다. 신생자원(virgin resource)은 매장량 감소 및 품위 저하, 환경 영향으로 생산비용이 증가하고 있으며, 2050년 이내로 해저 및 소행성 자원개발이 경제적으로 가능할 것으로 예측하였다. 사업 환경의 재정립으로 신생자원(virgin resource)보다 재생자원(reuse and recycle resource)이 이윤창출과 지속가능성에 유리할 것으로 보였다. 현재 광물자원별 최종생산물의 재활용률이 40~80% 수준이나, 2050년의 바람직한 상황에서는 천연자원 최종생산물의 재활용률이 80~100%일 것으로 예상하였다.

관계 정부부처 합동으로 발표한 제4차 산업혁명에 대응한 지능정보사회 중장기 종합대책인 Interagency association(2016)에 따르면, 가정기기의 로봇화, 질병 진단·치료 정확도 향상, 언어장벽 해소, 보안·교통 향상, 맞춤형 교육 등의 산업·고용 구조, 삶의 모습, 환경 변화를 제시하고 있다. 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. 지능정보사회의 바람직한 미래상으로 자유롭게 경쟁하는 고부가가치 경제, 누구나 기회를 갖는 복

지사회, 안전하고 행복한 삶을 제시한다.

Ghose(2009)의 지속가능한 광업을 위한 2050년 기술 비전, IBM Corporation(2016)의 자원산업에서 인공지능에 대한 연구가 실시되었다. 자원산업에서 데이터 마이닝, 신경회로망/머지 모형 등으로 데이터시각화, 생산제어·최적화, 예측·시뮬레이션으로 인공지능이 20년 이상 사용되어 왔으나, 인공지능은 미래 자원산업에 결정적 영향을 주며 자원개발의 역량이 획기적으로 확충될 것으로 보고 있다. Lee and Choi(2016)에 따르면, ICT는 SNS, IoT, 지능형 CCTV, 무인로봇 등 여러 가지 기술과 복합적으로 적용된다. 그리고 특히 재난안전 분야는 대형 피해 저감을 위한 상시 모니터링과 예보·제보 및 피해 발생 시 위험 최소화가 매우 중요하므로 ICT가 기반기술로 활동된다. Lee and Choi(2016)는 호주 CSIRO, 미국 항공우주국 등은 슈퍼컴퓨터를 이용한 홍수, 지진해일 등의 재난의 경보 뿐 아니라, 미국 군용로봇 Packbot의 일본 후쿠시마 원전 투입 및 유럽 공동연구프로그램(FP)의 무인항공기와 무인차량을 이용한 구조기술을 개발하는 ICARUS와 Sherpa 프로젝트 등을 제시하고 있다.

본 연구에서는 최근의 환경변화를 반영하여 4차 산업혁명 등에 대한 지질자원 분야의 선제적 대응 및 미래사회에서 지질자원 분야 역할 연구를 위해, 한국 및 일본의 향후 30년의 장기적 관점으로 지질자원 분야 과학기술예측조사 결과를 분석하고자 한다. Lee(2016b), Lee(2017)와 같이 한국과학기술기획평가원(KISTEP)에서 제5회 과학기술예측조사(2016-2040)를 실시하였다. 일본은 NISTEP(2015)와 같이 문부과학성 과학기술·학술정책연구소(NISTEP)에서 제10회 일본 과학기술예측조사를 실시하였다. NISTEP(2015)는 예측기간을 향후 30년으로 2045년까지 해당되나, 분석 결과 2050년까지의 모습도 담고 있다.

2. 한국과 일본의 과학기술예측조사 현황

2.1. 한국 과학기술예측조사 현황

Lee(2017)의 제5회 과학기술예측조사(2016-2040)에 의하면, 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. 1994년 처음의 경우 예측기간을 향후 20년으로 실시하였으나, 이후 25년 동안을 대상으로 예측 시

기를 설정하였다. 그리고 1994년, 1999년의 경우 과학 기술 전문가 중심의 브레인스토밍과 델파이조사를 실시하였으나, 2004년 3회부터 인문사회 전문가를 포함하여 환경스캐닝, 시나리오 분석 등의 미래사회의 전망 및 니즈를 고려하여 미래기술을 도출하고 있다.

Lee(2017)의 제5회 과학기술예측조사(2016-2040)는 1) 휴먼 임파워먼트(인공지능과 자동화, 새로운 소재, 우주 시대 등), 2) 초연결에 의한 혁신, 3) 환경 리스크 심화(에너지 수급 불균형, 물 스트레스 심화, 자연 재난 증가, 생태계 파괴 심화 등), 4) 사회복잡성의 진화(사회적 재난 증가, 건강 위협요인 증가, 통일 이슈 증가 등), 5) 경제시스템의 재편(도시화 확대, 중국의 국제적 영향력 증대, 그리노믹스의 활성화, 제조업 패러다임 변화 등) 등의 미래 트렌드를 제시한다. 리스크, 복잡성, 경제 재편의 에너지·환경·재난 문제와 함께 4차 산업혁명과 관련한 휴먼 임파워먼트, 초연결 혁신을 제시하고 있다.

제5회 과학기술예측조사(2016-2040)에서는 미래 트렌드에 따른 주요 이슈 그룹을 사회인프라, 생태계·친환경, 운송·로봇, 의료·생명, 제조·융합, 정보·통신으로 구분하여 해당 미래기술(총 267개)을 제시하였다. 사회인프라에서는 공공안전 인프라에 대한 사회적 관심 고조, 원자력 안전성, 남북한 격차의 지속적 심화, 도시 집중화·거대화 문제, 재해 피해 최소화를 위한 대응, 사회인프라 노후화로 인한 대형 재난 발생 가능성이 주요 이슈로 제시되었다. 생태계·친환경에서는 새로운 비전통 자원 탐색, 기후 변화 대응을 위한 물관리 고도화, 자원의 무기화, 친환경 산업구조로 재편, 기후 변화로 인한 생태계 변화 등이 제시되었다. 운송·로봇에서는 우주 항공 산업 성장 등, 제조·융합에서는 신소재/나노물질 등의 안정성 문제 등을 주요 이슈로 제시하였다.

2.2. 일본 과학기술예측조사 현황

일본 NISTEP(2015)에 의하면 일본 과학기술·학술정책연구소(NISTEP)는 1971년 공표된 제1회 기술예측조사 이후로 제10회 과학기술예측조사를 실시하였다. 일본의 과학기술예측조사는 미래 사회에서 중요할 것으로 예상되는 과학기술에 관해서 전문가의 의견을 수집하고 과학기술의 혁신에 대한 시사점을 얻기 위해 실시되고 있다. 제10회 과학기술예측조사는 향후 30년의 미래 사회의 모습을 전망하고, 중요할 것으로 예상되는 과학기술 주제별로 각각의 중요도, 국제 경쟁력, 실현 가능성, 추진 방안에 관한 전문가의 의견을 수집

하였다.

제10회 과학기술예측조사는 4차 산업혁명, 서비스화·정보화의 새로운 트렌드로 인해 빅데이터 등 데이터 사이언스의 시점을 각 분야에서 도입하고, 서비스화 사회를 새로운 분야로 제시하였다. 그 결과 NISTEP(2015)은 다음과 같은 8개 분야를 제시하고 총 932개의 과학기술 주제의 중요도, 실현 가능성, 추진 방안 등을 설문조사하였다. 8개 분야는 1) ICT·분석학, 2) 건강·의료·생명과학, 3) 농림수산·식품·바이오기술, 4) 우주·해양·지구·기반 과학, 5) 환경·자원·에너지, 6) 재료·디바이스·프로세스, 7) 사회 기반, 8) 서비스화 사회이다.

NISTEP(2015)의 ICT·분석학 분야는 인공지능, 영상·언어처리, 디지털 미디어 DB, 하드웨어 아키텍처, 네트워크, 소프트웨어, 슈퍼컴퓨터(HPC), 사이버 보안, 빅데이터·CPS-IoT, ICT와 사회 등의 세부항목을 가진다. 건강·의료·생명과학 분야는 신종·재래 감염증, 재생의료를 포함하며, 농림수산·식품·바이오기술 분야는 바이오매스 이용, 환경보전 등의 분야를 포함한다. 우주·해양·지구·기반 과학 분야는 우주, 해양, 지구, 지구관측·예측, 가속기·소립자·원자핵, 빔응용(중성자·뮤온·하전입자 등), 계산과학·시뮬레이션, 수리과학·빅 데이터, 계측 기반으로 구성된다. 환경·자원·에너지 분야는 에너지생산, 에너지소비, 에너지유통·변환·저장·수송, 자원, 재사용·재활용, 수자원, 지구온난화, 환경보전, 환경해석·예측, 리스크 매니지먼트 등으로 구성된다. 재료·디바이스·프로세스 분야는 신물질·재료·기능개발, 모델링·시뮬레이션, 응용기기·시스템(ICT·나노기술, 환경·에너지, 인프라) 등으로 구성된다. 사회 기반 분야는 국토개발·보전, 도시·건축·환경, 방재·감제정보 등으로 구성된다. 마지막으로 서비스화 사회는 경영·정책, 지식관리, 제품서비스시스템, 사회설계·시뮬레이션, 서비스 설계·디자인, 서비스 로봇 등으로 구성된다.

3. 2040~2050년 대상 과학기술예측조사 결과 분석

3.1. 연구 방법

한국과 일본의 과학기술예측조사 현황에서 제시한 바와 같이, 한국은 한국과학기술기획평가원(KISTEP)에서 제5회 과학기술예측조사(2016-2040)로, 일본은 과학기술·학술정책연구소(NISTEP)에서 제10회 과학기술예측조사로 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 이슈로 지질자원 기술의 역할이 더욱 강화될 것으로 보이므로 장기적 관점에서 지질자원 분야의 미래기술을 탐색하는 연구가 필요하다.

앞서 제시한 Lee(2017)의 제5회 과학기술예측조사(2016-2040)와 일본 NISTEP(2015)의 제10회 과학기술예측조사의 미래기술 분야의 분류는 다음과 같이 제시할 수 있다(Table 1). Lee(2017)는 미래기술 분야를 사회인프라, 생태계·친환경, 운송·로봇, 의료·생명, 제조·융합, 정보·통신으로 6개 분야로 제시하였으며, 일본 NISTEP(2015)은 8개 분야로 제시하였다. 일본은 한국의 분류와 달리 우주·해양·지구·기반 과학, 환경·자원·에너지, 서비스화 사회 분야를 제시하고, 건강·의료·생명과학, 농림수산·식품·바이오기술로 생명과학과 생명공학 분야를 다른 분야로 제시하는 등 세부적으로 구분하였다.

본 연구에서는 지질자원기술 관련 분야로 지질환경·재해 기술과 에너지·자원 기술 분야를 제시한다(Fig. 1). 지질환경·재해 기술은 일본의 경우 우주·해양·지구·기반 과학, 환경·자원·에너지 분야에서 주로 찾아볼 수 있으며, 한국의 경우 생태계·친환경, 사회기반 분야에서 제시하고 있다. 한국과 일본의 사회인프라 부문의 미래기술도 같이 분석하여, 해당 지질환경·재해 미래기술이 실현된 2040~2050년의 도시 등 삶의 터전 모습을 살펴 본다.

에너지·자원 기술은 한국의 경우 생태계·친환경에서 주로 제시하고 있으며, 일본은 우주, 해양, 지구, 과학기반, 환경·자원·에너지 분야와 재료·디바이스·프로세스 분야에서 찾아볼 수 있다. 한국의 의료·생명, 제조·융합 그룹, 정보·통신 분야는 지질자원과 관련된 타 분야로 세부 기술을 살펴 본다.

3.2. 지질환경·재해 기술 분야 미래기술

일본 NISTEP(2015)에 의하면 2015년에 수행된 제 10회 과학기술예측조사에서는 기존의 우주, 해양, 지구 관련 과학기술 분야를 빔 응용, 계산과학·시뮬레이션, 수리과학·빅데이터, 표준·분석 등 기반과학 분야를 새롭게 포함하여 우주, 해양, 지구, 과학 기반 분야로 설

Table 1. Future technology classification of Korea and Japan

Lee(2017), 5th Science and Technology Foresight	NISTEP(2015), 10th Science and Technology Foresight
1. Social infrastructure	1. ICT-Analytics
2. Ecosystem·Eco-friendly	2. Health, Medical science and Bio-science
3. Transportation·Robots	3. Agriculture, Forestry, Fisheries, Food, Bio-technology
4. Medical care·Life	4. Space, Ocean, Earth and Based science
5. Manufacturing	5. Environment, Resources and Energy
6. Information·Communication	6. Materials, Devices, Processes
	7. Social Infrastructure
	8. Service Society

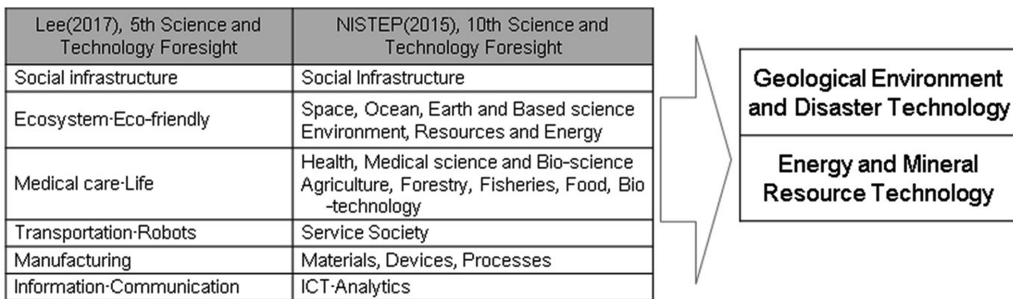


Fig. 1. Classification to analyze future technologies

정하였다. 설문조사 결과, 화산, 지진, 홍수 등 재해 예측 시뮬레이션 기술의 중요도 및 일본 국제 경쟁력이 높게 평가되었다. 지진 발생 예측기술의 경우 불확실성이 높아, 기술적·사회적 실현이 안된다고 응답한 비율도 높았다. 중요도가 높지만 일본 국제 경쟁력이 상대적으로 낮게 평가된 기술은 해양관측·탐사, 안전·저비용 우주 이용, 대량 데이터 이용 기술 등으로 나타났다. 그리고 NISTEP(2015)는 분석·해석기술의 발전과 함께 대량의 비구조화 데이터의 활용, 데이터베이스 구축 및 데이터 통합 등의 기반 구축, 모델링·시뮬레이션 기술, 데이터 저장·전송 기술, 고성능 컴퓨팅의 발전이 요구된다고 하였다.

일본 NISTEP(2015)의 우주, 해양, 지구, 과학 기반 분야의 미래기술을 세부적으로 살펴보면, 지구 내부에서 발생하는 중성미자를 이용한 지구 내부 탐사 기술, 레이저 지형 측량 등 지질조사/지표 관측과 뮤오그라피(Muography, 지구로 쏟아지는 우주선의 주요 구성요소인 소립자 뮤온(Muon)의 밀도 측정 기법)를 통한 활화산의 폭발가능성 평가 등의 새로운 기반연구에 기반한 미래기술이 2025년 기술적 실현, 2030년 사회적 실현으로 제시하고 있다. 그리고 지진에 대해서 살펴보면, 슈퍼컴퓨터 등을 통한 지진동 해일의 구조물 파괴/화재/액상화/표류물을 포함한 광역 복합재해 예측시스템, 고정밀 GPS망을 이용하여 지표면 분자 이동으로 지진 예측 등 규모 7 이상 지진발생시기(1년 이내)/규모/발생지역/피해 예측기술, 물질과학 연구에 의한 광물·암석 물질의 장기 변화 연구 등 지각 변형 분포와 지진 이력 분석으로 규모 8 이상 대규모 지진 발생 예측 기술이 기술적/사회적으로 2030년 정도에 실현되는 것으로 예상된다. 또한 지질환경 측면에서 미래기술을 살펴보면, 생태계·환경 대규모 시스템 모델링과 물 순환 변동 및 물·토사 재해 예측, 재생가능에너지/식량/수자원 문제를 1km 같은 초고해상도로 나타내는 시스템, 위성·지상관측에 기반하여 인간 활동을 고려한 육지면 물 순환 시뮬레이션 및 시간에서 일 단위의 전세계 홍수나 가뭄 예측이 기술적/사회적으로 2030년 이전에 실현되는 것으로 예상된다.

NISTEP(2015)는 제10회 과학기술예측조사의 환경·자원·에너지 분야에서 온난화와 대기오염의 조합에 따른 극심한 기상재해(이상 기상) 발생 매커니즘 해명, 염해 농경지 토양 간이·신속 복구 기술 개발, 물·토양의 방사성 물질을 확실하게 제염하는 기술 또한 기술적/사회적으로 2030년 이전에 실현되는 것으로 예상된다. 사면 붕괴, 산사태, 성토의 불안정을 사전에 알리

는 매립형 센서 기술과 경보·피난 지원 시스템의 사회적 실현을 2025년으로 예상하고 있다. 2029년에는 1시간 정도의 재해 사전 예측에 따라 경보·피난·규제가 가능하도록 전국적 관심 지역 및 수권, 지진 관측 시스템이 사회적으로 실현될 것으로 예상된다. 처분지 장기적인 안전성 포함 체계적인 평가 기술, 지하수 흐름 제어 등 폐기물 처분장의 지하 수맥 차단 기술 및 주변의 방사선학적 환경(대기, 토양, 수계)의 상세 실시간 모니터링 제어 기술을 포함한 100만Kw급 원자로 폐로 기술·방사성 폐기물 처분 기술은 기술적 실현 2029년, 사회적 실현 2035년으로 제시하고 있다.

Lee(2017)의 제5회 과학기술예측조사(2016-2040)에서 지진 관련 미래기술로 통합관측기반 시설물 관리 조건별 지진조기경보 시스템(강진동 도달 전 알림, 국내 기술적 실현 2024년), 단층지질기반 연계 지진피해 예측 시스템(국내 기술적 실현 2028년), 지진·안보상황 선제대응 초연결 뉴미디어 시스템(국내 기술적 실현 2025년)으로 제시하고 있다. Lee(2017)에서 사회문제의 해결 및 공익 측면에선 중요도가 가장 높은 기술로 통합관측기반 시설물 관리 조건별 지진조기경보 시스템, 단층지질기반 연계 지진피해 예측 시스템이 3위로 나타났다. 중요도는 높으나 기술경쟁력이 낮아 선택과 집중을 통한 투자가 필요한 상위 20개 기술로 단층지질기반 연계 지진피해 예측 시스템, 지진·안보상황 선제대응 초연결 뉴미디어 시스템이 포함되었다.

생태계·친환경 분야 제5회 과학기술예측조사(2016-2040)의 미래기술은 물 수요·공급량 예측기반 수자원 통합 관리 스마트위터그리드 시스템, 인공위성 등 원격탐사를 활용한 실시간 연속 지구수질감시·관리 시스템, 극지/심해저 지구 자원 분포 등 생태계 기반 자원 통합 평가·감시 시스템 등으로, 해당 기술들은 2030년 이내에 국내에서 기술적으로 실현되는 것으로 예상된다. 일본은 기상 예측기술만 제시하고 있으나, 한국에서는 황사·(초)미세먼지 등 대기오염으로부터 대기질 조절, 적외선 레이저를 이용하여 전자 분리를 통한 구름 형성과 인공강우 기술, 최적 지구환경 조절을 위한 지구공학기술 등 생태계 조절용 강우 제어 시스템이 2030년 이내 기술적으로 실현되는 것으로 보고 있다. 또한 일본 과학기술예측조사에서는 단순히 정수기술로 제시하였으나, 한국에서는 전기 화학적 이온 전도막을 이용한 해수담수화 기술, 항생제·방사성 물질·환경호르몬·안티몬 등 고효율 다중·신종 수정 오염물질 제거·제어기술이 2025년에 국내에 기술적으로 실현되는 것으로 예상된다. 또한 오염물질 처리용 생체모방형 신

소재, 폴리머 생산·미세조류 배양·콘트리트 양생·탈탄산광물화·재생메탄올 생산 등 포집된 CO₂를 활용한 제품 생산 및 공정 원료 대체 등 탄소자원화 기술, 대기 중 CO₂ 직접포집 인공나무, 저비용의 이산화탄소 포집 저장 시스템 등이 2030년 이내에 국내에 기술적으로 실현될 것으로 제시하였다.

Lee(2017)는 위성 관련한 지질환경 분야 미래기술로 고고도(10 km 이상) 광역 자연환경 및 시설물의 통합 감시 시스템(국내 기술적 실현 2028년), 다중 위성의 원격탐사 정보를 활용한 실시간 연속 재해 모니터링 기술(지구온난화/해수면상승/해양산성화/토양오염 등 대상, 국내 기술적 실현 2026년), 환경/감염병/재해 등 전 지구적 이슈를 상호 연계·분석하는 통합 모델링 및 시뮬레이션 소프트웨어(기상/해양/환경/생태계/전염병/경제/사람의 움직임 대상, 국내 기술적 실현 2030년)를 제시하고 있다. 제5회 과학기술예측조사(2016-2040)에서 중요도는 높으나 기술경쟁력이 낮아 선택과 집중을 통한 투자가 필요한 상위 20개 기술로 고고도 광역 자연환경 및 시설물의 통합 감시 시스템, 생태계 기반 자원 통합 평가·감시 시스템, 저비용의 이산화탄소 포집 저장 시스템이 포함되었다.

제5회 과학기술예측조사(2016-2040)의 사회기반 분야에서는 무인항공기 및 드론을 통한 재난정보 자동수집·전송 기술(산사태/산불/방사능 및 유해물질 측정 등 대상), 다중자료융합 도심지 및 시설영역 지반침하/함몰 예측관리 시스템, 안개를 열게 하거나 태풍을 약화 시스템으로 피해를 최소화하는 등 주변 환경영향을 최소화하는 국부적 기상재해 경감기술, 자가 진단이 가능한 시설물 손상·열화 계측용 스마트 도로 및 재료, 고신뢰성 심지층 고준위 폐기물 영구처분기술(지하 500 m 이상의 심지층 처분) 등이 2030년 경에 국내에 기술적으로 실현될 것으로 예상된다.

또한 제5회 과학기술예측조사(2016-2040)의 사회기반 분야에서도 생태계·친환경 기술을 제시한다. Zero-Waste 도시 구현을 위한 생활폐기물 수집·이송·분류 시스템 및 자원화·에너지화 공정 개발, 거대 공간 기후조절 기술 및 태양열·지열 등 자연에너지 이용 기술 포함 에너지 자급자족용 메가 빌딩 설계·시공기술, 재생에너지 및 다중 취수원을 활용한 물 자립형 도시 구축 기술, 인구 10만 명 이상을 수용할 수 있는 도시 규모의 에너지 자급형 메가 빌딩 건축을 위한 설계 및 시공기술 등이 2030년 이내에 국내에 기술적으로 실현될 것으로 예상된다.

일본 NISTEP(2015)의 제10회 과학기술예측조사 또

한 자연 재해 대응 도시 정비를 포함한 소도시(인구 10만 명 미만)의 100% 재생에너지 스마트시티 실현, 토지활용 최적화 및 자원 공급 시스템을 포함한 소도시(인구 10만 명 미만)의 에너지 자급자족, 완전 자원순환의 클로즈드 사이클 실현(연료전지, 자연에너지, 빛물 등), 물질·에너지 흐름의 실시간 모니터링 기술 및 빅데이터 분석 기술, 물질·에너지 흐름 및 리스크 평가에 근거한 스마트 도시 시스템 설계가 기술적/사회적으로 2030년 이내 실현될 것으로 예상하고 있다.

3.3. 에너지·자원 기술 분야 미래기술

Lee(2017)의 제5회 과학기술예측조사(2016-2040)에서는 생태계·친환경 그룹에서 에너지·자원 분야 기술 일부를 제시하고 있다. 비전통 자원 및 해저 열수광물 자원 개발, 고심도 저품질 비철금속 광물자원 개발, 저탄소 에너지 산업 필수 금속 생산·회수, 친환경 고효율 해수용존 자원 추출, 희유금속 바이오리칭 등의 자원개발·활용기술은 2030년 훨씬 이전 및 2030년 내외에서 국내 실현되는 것으로 본다. 수중/지하공간 등의 초저온/진공/초고압/고열 등 상황을 극복하는 지능형 오지탐사 로봇 및 자율 합체·분리형 로봇, 통신 네트워크 기반 광산개발 생산성 향상, 스마트 에너지그리드 기술, 석유정제를 대신하여 화합물·화학제품과 대체제를 제조하는 친환경 바이오 리파이너리 기술 등도 비슷한 시기에 실현되는 것으로 본다. 또한 지구 궤도 상공에 거대 태양전지판의 인공위성 등 우주 공간에서 태양광을 이용하여 발전을 하고 전력을 지상에 무선 전송하는 시스템인 우주태양광 발전이 국내 2034년, 국외 2031년에 기술적으로 실현되는 것으로 예상하였다. 핵융합에 대해서는 실증용 핵융합 실험로 건설 및 운영기술이 국내 2039년, 국외 2037년에 기술적으로 실현되는 것으로 보았다.

Lee(2017)는 정보·통신 분야로 제시된 우주거대구조 분석 기반 우주의 초기 조건 및 암흑물질/암흑에너지 정체 규명과 함께, 운송·로봇 분야에서 다음과 같은 우주자원 관련 기술을 제시하고 있다. 우주 여행객의 편의를 위한 우주 휴게소, 우주선의 무중력/좁은 환경이나 우주환경의 토양·중력에서 재배가능한 작물 개발, 우주자원 개발/우주관광/우주관측 등을 목적으로 달 및 화성의 유인기지 구축, 달 및 소행성에서 경제적 가치를 가지는 광물을 채굴하여 지구로 가져오거나 경제적 가치가 있는 소행성을 광물채굴이 용이하게 포획하는 기술이 2040년 이내 국내에 기술적으로 실현되는 것으로 예상된다.

일본 NISTEP(2015)의 제10회 과학기술예측조사 또한 우주, 해양, 지구, 과학 기반 분야에서 과학 관측, 자원 이용 등을 목적으로 지구 밖 천체(달 또는 화성)에서 항구적인 유인 활동 거점이 구축되는 것을 2040년으로 보고 있다. 환경·자원·에너지 분야에서 우주 태양열 발전 시스템이 실제 실현되는 것을 2040년 정도로, 핵융합 발전은 2050년으로 예측하고 있다. 지구 심부물질을 오염 없이 취득하기 위한 대심도 과학 굴착 기술, 인공위성 및 해양수중센서로 지하자원·해양자원 발견을 위한 관측 데이터 처리 시스템, 빙해용 자립형 무인 잠수정(AUV)와 무인항공기 등을 활용한 빙해 지역(빙해 아래 포함) 해양환경 관측 및 해저탐사(석유, 천연가스, 광물자원) 기술 또한 2030년 이내 기술적/사회적 실현될 것으로 제시하였다.

일본 NISTEP(2015)은 환경·자원·에너지 분야에서 전국 온천지에 지열 발전 보급과 바이너리 발전/히트펌프 1MW급 중저온 지열자원 이용, 환경오염이 없는 세일가스 채굴 기술, 메탄 하이드레이트 채굴·이용 기술, 대심도 희토류 희소금속 탐사·시추 기술, 현재 비용의 50% 이하 티타늄 제련 기술, 구리 광산의 비소 처리·보존 기술, 폐기물 선별·분리 시스템 향상을 위한 선별 센서 기술, 소형전자기기/폐기물·하수 오니/소각회에서 희소금속을 합리적으로 회수·이용하는 기술, 대부분의 희유금속에 대해 필요 자원량 50% 이상 도시 광산에서 공급하는 기술이 기술적/사회적으로 2030년 이전에 실현될 것으로 보았다. 그리고 심도 15 km, 온도 400°C 초심도 굴착 기술, 해수 중에서 경제적으로 우라늄 등 희소 금속을 회수하는 기술, 열수 광상 심해저 금속 자원의 경제적 채취 기술, 공기에서 효과적으로 헬륨을 회수하는 기술은 2040년 이전에 기술적/사회적으로 실현되는 것으로 제시하였다.

일본 NISTEP(2015)는 재료·디바이스·프로세스 분야에서 생물·생체 모방 등에 의한 자기 조직화에 의한 고분자와 무기 하이브리드 재료의 사회적 실현을 2025년으로 예측하고 있으며, 상온에서 구리와 동등한 전기 전도도 및 내환경성을 갖는 고분자 재료의 사회적 실현을 2030년으로 예상하고 있다. 또한 분자 원자 차원에서 재료 설계 시뮬레이션 기술, 광물자원과 화석 에너지자원 대체소재 기술, 생물자원 소재 변환 기술과 복합합성 기술 개발 등을 통해 대부분 재료(개발 대상이 되는 재료 90%)에서 요구 특성에 적합한 재료의 사회적 실현은 2035년으로 예측하고 있다. 화석연료를 사용하지 않는 선박·비행기(바이오연료 등 활용)의 사회적 실현은 2035년으로 예측하고 있다.

4. 결 론

본 연구는 지속가능발전과 지능정보사회의 미래트렌드에 주목하여 2040~2050년 지질자원기술 관련 분야를 예측할 수 있는 한국과 일본의 과학기술예측조사 결과를 분석하였다. 지질환경·재해 기술은 한국과 일본에서 단순히 지질분야의 개별 기술 개발 뿐만 아니라, 토지활용 최적화 및 자원 공급 시스템을 포함한 자금자족 소도시 설계, 재생에너지 및 다중 취수원을 활용한 물 자립형 도시 구축 기술, 환경/감염병/재해 등 전지구적 이슈를 상호 연계·분석, 자연환경 및 시설물의 통합 감시 시스템 등 사회인프라 및 도시환경 등 삶의 터전과 밀접한 모습으로 제시되는 것을 알 수 있다. 이는 자금자족 기능의 지능정보기술이 적용된 것으로 스마트에코시티 기술로 제시할 수 있다. 일본의 미래 기술은 기반지질, 지구물리학적 지질재해, 기상·환경재해(방사성 폐기물 처분 포함), 스마트에코시티(자금자족 도시)로 제시된다. 한국의 미래기술 또한 지질재해, 지질환경(방사성 폐기물 처분 포함), 기상조성·CO₂ 저감, 스마트에코시티(자금자족 도시)로 정리할 수 있다.

에너지·자원 기술 분야 미래기술은 핵융합 발전이 2050년 정도에 실현되며, 2040년 정도에는 소행성 등 우주자원 개발 및 우주유인기지 구축이 실현될 것으로 보았다. 또한 2040년에는 신재료·신자원기술이 적용되어 기존의 에너지자원과 광물자원을 대체할 것으로 보인다. 일본은 지능정보사회 관점을 대대적으로 도입하여, 중성미자를 이용한 지구 내부 탐사, 지표면 분자 이동으로 지진 예측, 물질과학 연구에 의한 광물·암석 물성의 장기 변화 연구, 생물 모방(생체 모방) 등에 의한 광물자원과 화석에너지자원 대체소재 개발 등 지질자원 분야 관련 분야에서도 새로운 관점의 기술들을 제시하고 있다.

사 사

이 논문은 한국지질자원연구원 주요연구사업 ‘지질자원 표본·기초학술연구와 탈추격 R&D 정책개발(GP2017-004)’에 의해 지원되었습니다.

References

ASD (Korean Association for Supporting the SDGs for the UN), <http://asdun.org/>.
CSIRO IMPACT SCIENCE (2015) Australian National Outlook 2015: Economic activity, resource use, environmental performance and living standards, 1970-2050.

- Ghose, A.K. (2009) Technology vision 2050 for sustainable mining, *Procedia Earth and Planetary Science*, v.1, p.2-6.
- IBM Corporation (2016) A new natural resource: Your cognitive future in the oil and gas industry.
- Interagency association (2016) Long-Term Plan of the Intelligent Information Society in response to the fourth industrial revolution, <http://www.korea.kr/archive/expDocView.do?docId=37384>.
- Lee, K.M. and Choi, S.L. (2016) ICT convergent disaster & safety R&D in the era of the 4th industrial revolution, *KISTEP ISSUE PAPER 2016-06*, p.38.
- Lee, S.H. (2016a) Implementation strategy of the Sustainable Development Goals (SDGs) of the UN : Focusing on health care, *Health and Welfare Forum (2016.12.)*, pp.96-114.
- Lee, S.L. (2016b) The 5th Science and Technology Foresight: 1st Year Research, *KISTEP*, p.309.
- Lee, S.L. (2017) The 5th Science and Technology Foresight (2016-2040), *KISTEP*, p.453.
- NISTEP (National Institute of Science and Technology Policy, Japan) (2015) The 10th Science and Technology Foresight: Future Perspectives on Science and Technology by Field, *Research Material No. 240*, Japan Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan (MEXT), 60p.
- WEF(World Economic Forum) (2015) *Mining & Metals in a Sustainable World 2050*.