

「국가 CCS 종합추진계획」 이행점검 및 개선과제 도출 연구

조가비[†] · 조하영 · 박노언

한국과학기술기획평가원 사업조정본부 거대공공사업실

A Study on Implementation and Deriving Future Tasks of 「The Korean National CCS Master Action Plan」

Cho, GaBi[†], Cho, Hayoung and Park, Noeon

Big Science R&D Coordination Division Office of National R&D Coordination Green Tech,
Korea Institute of S&T Evaluation and Planning (KISTEP), Seoul, Korea

ABSTRACT

Global warming caused by greenhouse gases is one of the foremost challenges in the international community. As an alternative to solve this problem, the importance of CCS (Carbon Capture and Storage) technology is increasing. However, due to the delay of European financial crisis recovery, some large-scale CCS projects were postponed. In turn, large-scale CCS projects in South Korea have not been launched as originally planned. Given these situations, it is important to review the latest R&D activities related to CCS in South Korea, and then adjust relevant national policy accordingly. The purpose of this study is to identify policy issues for the effective promotion of CCS technology in South Korea. Following the analysis of recent global trend on CCS policy, we evaluated the results and achievements from national CCS projects, which had been listed under the 「Korean National CCS Master Action Plan (2010)」. Especially, we tried to review the attainability for the original goal of each project. Through the present study, we identified the current status of CCS technology in South Korea and suggested efficient ways to be taken in order to increase efficiency in implementing national CCS policy in the future.

Key words: CCS (Carbon Capture and Storage), Korean National CCS Master Action Plan

1. 서 론

다른 국가들과 마찬가지로 우리나라도 최근 이상고온 현상과 더불어 여름철에는 가뭄, 겨울철에는 폭설 및 강설이 강우로 바뀌는 등의 이상 기후 조짐이 보이고 있다. 이러한 이상 기후의 주요 원인은 인위적인 온실가스의 배출로 인한 지구온난화이다. 지구온난화 가속화로 인한 기후변화 문제에 대응하기 위해서 2015년 12월 프랑스에서 개최된 제 21차 기후변화협약 당사국총회(COP21)에서는 신기후체제 합의문인 “파리 협정”을 채택하였다. 본 협정에서는 특히 기후변화를 완화하기 위해서 세계 모든 국가가 자발적으로 온실가스를 감축하기로 한 신기후체제를 채택하였으며, 각국은 2030년까지 감축해야 할 자발적 국가 온실가스 감축량(INDCs)를 제출하였다

(Table 1). 우리나라도 2015년 6월 신기후체제 대응을 위해 2030년까지 온실가스배출전망치(BAU, 8억 5천 100만 톤) 대비 37%를 감축하겠다고 발표하였다.

세계 각국은 온실가스 감축목표를 달성하기 위해 다양한 온실가스 저감 기술을 개발하고 있다. 하지만 온실가스 감축의 신기술개발에는 시간적, 경제적, 기술적 제약이 있다(Chae and Kwon, 2012). 이러한 제약을 극복하기 위한 현실적인 방법으로 CCS(Carbon Capture Storage)가 각광을 받고 있다. CCS 기술은 발전소 및 제철소 등에서 배출되는 이산화탄소를 포집·수송하여 육상이나 해양의 지중에 안전하게 저장하거나, 전환 또는 활용하는 기술이다. CCS 기술은 온실가스 저감의 현실적인 방법인 만큼 그 중요성이 증대되고 있으며, 체계적인 개발이 요구되고 있다. 그러나 유럽의 재정위기 회복 지연

[†] Corresponding author: ecoenv@kistep.re.kr

Received April 22, 2016 / Revised June 20, 2016(1st), July 13, 2016(2nd) / Accepted July 29, 2016

Table 1. An overview of INDCs in major countries (Won DG, 2015)

Nation	Goal year	Standard year	Reduction goal	Submission Date	International market
EU (28 nations)	2030	1990	40% reduction	2015. 3. 6	×
USA	2025	2005	26~28% reduction	2015. 3. 31	×
Canada	2030	2005	30% reduction	2015. 5. 15	○
China	2030	2005	60~65% reduction (Standard exhaust quantity/GDP)	2015. 6. 30	-
South Korea	2030	BAU	37% reduction	2015. 6. 30	○
Japan	2030	2013	26% reduction	2015. 7. 17	○

※ INDC (Intended Nationally Determined Contribution).

으로 대규모 통합 실증 CCS 플랜트 추진이 다소 지연되고 있고 이러한 외부 환경변화와 맞물려 우리나라의 CCS 대형 플랜트 저장 사업 또한 계획대비 지연되고 있는 실정이다. 이외에 국내의 CCS 기술은 미래창조과학부, 산업통상자원부, 해양수산부, 환경부 등에서 개별적으로 추진됨에 따라 유기적 연계가 미흡하다는 지적을 자주 받아왔다. 이러한 국내·외 현실을 종합적으로 감안할 때 CCS 분야 R&D 정책방향의 재설정 이 필요한 시점이다.

본 연구의 목적은 국내 CCS R&D 추진 현황을 진단하고 효율적인 추진을 위한 개선이슈를 발굴하는 것이다. 이를 위해 주요 선진국과 우리나라의 CCS 정책동향을 살펴보고, 계층화 분석법(Analytic Hierarchy Process, AHP)을 이용하여 현시점(2015)과 목표시점(2020)의 정책과제별 우선순위를 도출하였다. 또한 CCS 분야 최상위 계획인 「국가 CCS 종합추진계획(2010)」에 제시된 추진과제별 성과 및 현시점(2015)과 목표시점(2020)의 정책 과제 달성 가능성을 점검하여 개선방안을 도출하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 주요국의 CCS 정책동향

2.1.1 미국의 CCS 정책동향

미국은 오바마 정부 이후 온실가스 감축과 관련된 청정에너지 기술개발에 투자를 집중하고 있으며, CCS 기술도 중요 분야의 하나로 포함되어 있다(Lee, 2009). CCS 기술개발을 담당하는 주요 부처는 에너지부(Department of Energy, DOE), 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)이며, 이외 재무부, 법무부, 노동부, 교통부 및 과학기술 정책실 등에

서도 CCS 범부처 대책위원회(Interagency Task Force)에 참여하고 있다. 미국은 최근 개최된 COP21에서 다른 19개국과 함께 향후 5년 동안 청정에너지 연구개발 투자에 대한 정부 및 공공투자규모를 2배 이상 확대하겠다는 미션 이노베이션(Mission Innovation)을 채택하였다. 2014년 1월에는 환경청에서 대기오염방지법(Clean Air Act)에 기반한 탄소오염원 배출 규제안(New Source Performance Standards, NSPS)을 마련하였다. 100 MW급 이상 대규모 천연가스 발전소는 현재 NGCC(Natural Gas Combined-Cycle power)기술로 달성할 수 있는 1,000 lbCO₂/MWh 이하의 기준을 적용하기로 하였고, 소규모 천연가스 발전소는 1,100 lbCO₂/MWh 이하 기준을 적용하기로 하였다. 또한 초초임계압 및 IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle)를 포함한 석탄가스발전소는 운행시점부터 12개월간 평균 1,100 lbCO₂/MWh 이하 또는 운행시점부터 7년간 평균 1,000~1,050 lbCO₂/MWh 이하 기준을 적용 예정이며, 이는 약 40% 가량의 CO₂ 포집이 있어야 가능한 수준이다. 신규발전소 배출 규제안은 CCS 기술개발 및 활성화에 영향을 미칠 것으로 예상된다(Lee and Lee, 2015). 다음으로 R&D 투자현황을 살펴보면, CCS 기술개발은 미국 에너지부(DOE) 내 화석연료국(Office of Fossil Energy) 중심으로 이루어진다. 환경 친화적 에너지 개발을 목적으로 고등 CCS 기술의 개발 및 실증화 등을 지원하며, 대표적으로는 미국 경제 회복 및 재투자법(American Recovery and Reinvestment Act, ARRA)하에서 지원되는 대규모 CCS 실증 프로그램이 있다(DOE, 2013~2015). 2017년 이산화탄소 포집 분야는 약 17억 300만 달러, 저장 분야는 약 9억 900만 달러 예산을 요청하였다. 포집 분야에는 연소 전·후 압축 기술을 집중 개발하며, 대규모 연소 전 파일럿에 투자할 전망이다. 저장 분야에는 저장관리, 주입, 리스크와 통합 관리에 투자할 전망이다(DOE, 2016).

2.1.2 유럽의 CCS 정책동향

유럽연합(EU)은 이산화탄소 지중저장의 법적 프레임을 구축하기 위해 2009년 EU CCS 지침(EU CCS Directive)을 마련하였고, 이 지침 안에는 CCS와 관련된 기술을 바탕으로 전 주기를 관리하는 관련 법률을 2011년 6월 25일까지 EU 회원국의 자국법에 적용하기로 하였다. 이를 위해 EC(Europe Community)는 information exchange group(정보교환그룹)을 구성하여 자국법 적용 시 발생하는 문제들을 해결하고자 하였고, 전환과정을 도왔다. 특히 이산화탄소 저장위험관리 프레임워크, 저장부지 특성화, 이산화탄소 스트림 구성, 모니터링 및 시정조치, 책임이전의 고려사항 등에 관한 가이드라인을 제공하였다. 그럼에도 불구하고 스페인만이 EU CCS 지침으로 전환하였고, 독일은 CCS 기술에 대한 국민의 불신으로 어려움을 겪었으며, 영국은 부처 간, 연방 정부 및 주정부 간에 의견 조율의 어려움을 겪었다(Chae and Kwon, 2012). 이러한 유럽의 CCS 기술 상용화의 어려움을 극복하기 위해 2030 기후·에너지정책 프레임워크(2030 Framework for Climate & Energy, 2014)를 기반으로 2030년까지 1990년 대비 40%의 온실가스 감축목표를 세웠고, 신기후체제를 위한 기후변화 대응 문제 해결에 다시 노력을 가하고 있다. 특히 향후 10년간 R&D를 강화하여 상용화에 박차를 가하고 있다. 다음으로 R&D 투자 현황을 살펴보면, 탄소저감프로젝트인 NER300(New Entrant Reserve)을 설립하여 CCS 관련 사업을 지원하려고 하였다. 하지만 금융보증에 관한 자격요건 기준이 까다로운 문제점으로 인해 2014년까지 과제 지원을 원활히 받지 못하였다. 이에 지원체계 유연성 보안을 통해 후속 지원자금인 NER400을 마련하여 CCS 분야에 4억 톤의 배출권에 해당하는 9억 유로를 투입하는 방안을 검토 중에 있다.

2.1.3 일본의 CCS 정책동향

일본은 지역 특성상 내륙의 저장 공간이 충분치 않아 CCS 사업추진 초반부터 해양지중저장에 초점을 두었다. 이에 해양지중저장과 관련된 런던협약96의정서 개정(2006년)에 발맞춰 “해양오염 및 해양재해 방지에 관한 법률”을 개정(2007년)하였고, 관련 CCS 사업을 환경성(Ministry of Environment, MOE)이 관리하고 있다. 환경부 장관의 허가를 받은 경우만 이산화탄소 주입이 가능하며, 사후 모니터링, 관리, 영향평가 등에 대해서는 엄격하게 승인서를 제출하여야 하며, 허가 기간 5년이 만료될 경우, 반드시 재취득 절차를 거쳐야 한다(Chae and Kwon, 2012). 이와 더불어 「4차 에너지기본계획(2014)」은 CCS 기술상용화를 위한 대규모 실증프로젝트를 지원하며, 2020년

까지 연간 100만톤 이상의 이산화탄소의 해양지중저장을 목표로 하고 있다. 지난 2008년 나가오카 프로젝트를 통해 10,405톤의 CO₂ 저장을 성공리에 완료하였고, 2012년에는 홋카이도의 토마코마이 지역에 약 10만 톤 규모의 포집-저장 연계실증 프로젝트에 착수하였다. R&D 투자현황을 살펴보면, 일본의 경제산업성(Ministry of Economy, Trade and Industry, METI)은 CCS R&D에 113억 엔(2014)을 투자하여 기술 상용화를 위해 힘쓰고 있고, 이 중 85억 엔은 일본의 CCS의 주요 실증 프로젝트인 토마코마이 실증프로젝트에 투입되었다. 환경성은 2050년까지 CCS 분야에 12.5억 엔을 배정하였고, 주로 해양지중저장을 위한 저장소 탐색과 수송시스템 등에 지원되고 있다. 또한 2014년부터 경제산업성과 환경성이 협력관계를 형성하여 CCS 기술 상용화를 위한 중점 투자가 이루어지고 있다.

2.1.4 우리나라의 CCS 정책동향

2009년 교토의정서 이후 우리나라 또한 온실가스 감축을 위한 다양한 노력을 기울이고 있으며, 그 일환으로 CCS 기술 실용화를 촉진하기 위해서 2010년 당시 녹색성장위원회 주도로 하여 범부처가 참여하여 「국가 CCS 종합추진계획(2010)」을 채택한 바 있다. 동 계획은 CCS 분야 최상위 계획으로 ‘세계 CCS 기술 강국 도약’의 비전아래 2020년까지 플랜트 상용화 및 국제 기술경쟁력 확보라는 목표를 제시하고 있으며, 더 세부적으로 100만 톤급 포집-수송-저장 통합 실증완료와 \$ 30/tCO₂ 이하 처리비용 달성을 위한 원천기술 확보라는 2가지 세부 목표를 설정하였다. 다음으로 R&D 선진화, 상용화 촉진, 환경관리 및 기반구축 등 3개 분야 16개 정책과제를 제시하였다. R&D 선진화 과제는 CO₂ 포집 및 저장 원천기술개발과 1만 톤급 포집-저장 통합 실증 등이 포함되어 있으며, 상용화 촉진 과제에는 대규모(100~300 MW) 실증, 수송(선박, 파이프라인) 기술 개발, 저장소 선정 등이 포함되며, 환경관리 및 기반 구축에는 법·제도 정비, 상용화 지원, 인력 양성, 사회적 인식 제고 등이 포함되어 있다. 마지막으로 교육과학기술부, 기획재정부, 지식경제부, 환경부, 국토해양부, 녹색성장위원회 등 6개 부처와 위원회가 참여하여 역할분담 및 협력체계를 제시하였다. 녹색성장위원회와 기획재정부는 CCS 기술에 필요한 예산 관련 작업 및 총괄협의체 운영을 담당하며, 교육과학기술부(現 미래창조과학부, 미래부), 지식경제부(現 산업통상자원부, 산업부), 국토해양부(現 해양수산부/국토교통부, 해수부), 환경부는 각 분야별 CCS 기술개발을 담당하였다. 좀 더 상세화하면 CCS 원천기술개발은 미래창조과학부, 통합-실증 중심으로 상용화는 산업통상자원부, CO₂ 저장 및 수송은 해

양수산부, CO₂ 환경관리는 환경부, 기반구축은 범부처 차원에서 진행되고 있다(Interagency Task Force on CCS, 2010). 우리나라의 CCS R&D 투자현황은 미래창조과학부, 산업통상자원부, 해양수산부를 중심으로 투자되고 있으며, 2014년부터는 환경부에서 투자가 이루어지면서 2015년에는 총 563억 원이 투자되었다(Table 2). 현재, 원천기술개발을 담당하는 미래창조과학부는 꾸준히 R&D 투자가 증가하였고, 앞으로 상용화를 준비하는 시점에서 원천기술을 바탕으로 한 대규모 포집설치 및 포집연계 수송저장 통합실증의 투자가 증가할 것으로 전망된다.

3. 연구방법

3.1 계층화 분석(Alytic Hierarchy Process, AHP)

계층화 분석(Alytic Hierarchy Process, AHP)은 정량적 또는 정성적 기준들을 다루기 위한 측정이론으로 의사결정자들이 사용하는 데이터만큼 사람들의 경험과 지식도 가치가 있는데 기반한다. 적용절차는 크게 계층구조설계와 평가로 이루어진다. 일반적으로 계층구조는 최상위 계층에 의사결정목표가 놓이고, 최하위 계층에는 대안들이 위치하게 된다. 중간계층에는 의사결정에 영향을 미치는 속성인 평가기준들로 구성된다. 계층구조가 설계되면, 요소들 가운데 중요도 또는 가중치를 고려하는 것은 어렵기 때문에, 두 요소씩 쌍대 비교함으로써 각 요소들 간의 중요도 또는 가중치를 구할 수 있다. 정부는 2009년 이후 500억 원 이상의 대규모 개발 사업에 대해서 예비타당성 조사를 수행하도록 의무화한바 있고, 이 조사에서 AHP 기법의 활용을 제안하고 있어, 이에 대한 실증연구도 점차 증가하고 있다(Im, 2009). 또한 정책 수립 시 정책 대안의 우선순위를 설정하는데 활용된다. 그런 ICT 정책 도입 후, 효

율을 최대화하기 위해 고려해야 할 목표의 우선순위 전략도출에도 AHP 방법론을 활용하였고(Shim *et al.*, 2011), 우주 R&D 효율화 방안의 중점 추진전략을 수립하는데 활용하였다.

본 연구에서는 국가 CCS 종합추진계획의 정책과제별 우선순위를 도출하는데 정량적으로 측정할 수 있는 평가지표가 미흡하므로, 정성적 변수를 서로 비교하여 우선순위를 도출하는데 널리 활용되는 AHP 방법을 사용하였다.

3.2 정책이행점검

정책평가제도는 국무총리실, 행정자치부를 주관으로 정책 목표 달성정도 및 영향도를 분석하여 집행이 완료된 후, 평가와 더불어 정책 내용이나 수행과정 등을 평가하여 환류기능을 통해, 향후 정책수립에 유용한 정보를 제공하는 것이다. 추진체계로는 정부업무평가위원회와 부처자체평가위원회로 운영된다. 부처자체평가위원회는 정부업무평가시행계획에 따라 자체평가계획을 수립하여 주요 정책, 재정사업, 기관역량 등을 평가한다. 평가 시 시행계획에 제시된 성과지표 달성도(목표 달성비율%), 추진일정의 적절성 등의 성과지표와 객관적·정량적 평가지표를 활용한다. 환경부에서는 수질오염총량관리제의 이행평가를 통해 추후 계획수립에 환류될 수 있도록 하였다. 오염총량관리계획을 수립 시행하는 시행청의 오염원 및 오염물질의 발생, 삭감, 배출량을 산정하여 이루어진다. 수질오염총량관리제는 오염 총량 관리계획에 미리 계획된 목표치가 있으므로 평가기준이 명확하고 평가하기 용이하다는 장점이 있다. 또한 국가기후변화적응대책 이행점검에서는 평가지표를 대책이행도(세부시행계획 충실도, 이행 충실도, 확산소통 노력도, 환류 수정도)와 성과달성도(계획대비 실적달성 정도)로 구성하였으며, 가중치는 지표중요도에 따라 전문가들의 협의를 통해 이루어졌다. 평정방법으로는 평가 내용에 따라

Table 2. National CCS R&D investments by department

(Unit : million won, %)

Classification	2011	2012	2013	2014	2015	Sum	Average annual growth rate (2011~2015) (%)
Ministry of Science ICT&Future Planning	50	150	230	225	230	885	46.5
Ministry of Trade, Industry and Energy	288	291	302	258	191	1,330	△9.8
Ministry of Maritime Affairs and Fisheries	55	100	98	86	96	435	14.9
Ministry of Environmental	0	0	0	20	46	66	
Sum	393	541	630	589	563	2,716	9.4

* Major departments R&D projects budget in CCS fields.

매우 우수, 우수, 보통, 미흡, 매우 미흡에 대한 5점 척도로 평가하였다(Chae *et al.*, 2013). 이외에 한국여성정책연구원에서 수행한 2014년도 다문화가족정책 이행점검 및 성과평가 연구에서는 이행점검을 위해 다문화가족정책기본계획을 바탕으로 세부추진과제 도출, 성과지표, 정책목표를 문헌 및 자료 분석을 통해 설정하였다. 그리고 전문가 자문을 통해서 이행점검 결과 및 개선방안을 논의하여 2015년 시행 계획을 세우는데 반영하였다.

본 연구에서는 선행연구를 바탕으로 국가 CCS 종합추진계획 이행점검을 위해 세부정책과제를 도출하였고, 이를 평가하기 위한 평가지표 및 목표달성도를 전문가 정성평가를 통해 실시하였다(Jang *et al.*, 2015).

4. 「국가 CCS 종합추진계획」 이행점검 분석평가

4.1 「국가 CCS 종합추진계획」 이행점검을 위한 평가 지표 설정

본 연구의 목적인 「국가 CCS 종합추진계획」 이행점검을 위해 평가지표 설정은 다음과 같다. 당초 「국가 CCS 종합추진계획」에서 제시된 16개 세부정책과제 중 유사 내용은 통합하여 12개 정책과제를 도출하였다. 이외에 국가계획의 종합적 이행 점검을 위해 CCS 종합추진계획의 추진체계 및 부처 간 역할 분담, 투자목표를 포함시켜 최종적으로 총 14개 정책과제로 재설정하였다(Table 3). 「국가 CCS 종합추진계획」의 추진전략을 토대로 14개 정책과제별 평가지표와 목표를 설정하였다. 정책과제별 이행을 점검을 위해 총 5단계로 나누어 전문가 평가를 실시하였으며, 3점(만점)이 목표시점에 도달한 단계이다. 본 과제에서 설정한 14개 정책 과제 중 2개 과제(혁신적 CO₂ 포집 원천기술개발, 투자확대)만 국가 CCS 종합추진 상에 정량적인 목표가 제시되었다. 기술단계를 평가해야 함에도 불구하고, 나머지 12개 정책과제는 「국가 CCS 종합추진계획」에서 제시된 시점을 중심으로 정성적인 목표를 제시해야 하는 한계점이 있었다.

4.2 「국가 CCS 종합추진계획」 정책과제별 가중치 설정

14개 정책과제 중 현시점(2015), 목표시점(2020)을 기준으로 우선순위 과제를 도출하기 위해 계층화 분석(Analytic Hierarchy Process, AHP)방법론을 적용하였다. 산업계, 학계, 연구계 등 CCS 분야 전문가 3명씩 총 9명(박사학위 소지자)을 대

상으로 설문조사를 실시하였다. 일관성 비율은 현시점(2015) 0.00~0.03, 목표시점(2020) 0.02~0.1로 모두 0.1 이하의 값을 나타내고 있어 일관성 있게 나타났다(Song and Lee, 2013). AHP 분석모형은 총 3가지 단계로 구성하였으며, 평가기준(기술개발 경쟁력, 과급효과), 대안 1(R&D 선진화, 상용화 촉진, 환경관리 및 기반구축), 대안 2(혁신적 CO₂ 포집원천기술개발 외 13개)로 구성하였다(Fig. 1). AHP 결과인 정책과제별 우선순위는 다음과 같다. 현시점(2015년)에는 CCS 기술의 원천 기술 확보가 중요한 만큼 혁신적 CO₂ 포집원천기술개발, 포집-저장 소규모 통합실증 등의 정책과제가 우선순위가 높게 나타났다. 목표시점(2020)에는 개발된 원천기술을 활용한 100만 톤급 대용량 포집 실증 및 포집연계 수송저장 통합실증 과제의 우선순위가 높게 나타났다(Fig. 2).

4.3 「국가 CCS 종합추진계획」 정책과제별 추진성과 및 평가

14개 정책과제별 추진성과 및 자체평가 의견을 소관부처(미래부, 산업부, 해수부, 환경부) 연구관리 전담기관으로부터 조사하였고, 그것을 바탕으로 CCS 분야(포집·저장·전환·환경관리) 전문가들로부터 현시점(2015)과 목표시점(2020)의 이행을 메타평가를 실시하였다.

첫째, 혁신적 CO₂ 포집 원천기술개발 정책과제의 주요 성과는 상용급 MEA 흡수제 대비 30% 이상 성능 개선된 혁신적 신규 습식 흡수제 및 13% 이상 에너지 절감 가능한 신공정 개발, 3단식 에너지 교환형 CO₂ 흡수장치인 bench-scale 공정 설치 및 운전(60 Nm³/hr)을 수행한 것이다. 또한 분리막 두께가 5 nm 이하인 초박막 그래핀 옥사이드 기반의 분리막 신소재 개발, 3단식 에너지 교환형 CO₂ 흡수장치인 bench-scale 공정 설치 및 운전(60 Nm³/hr)을 수행한 것이다. 또한 분리막 두께가 5 nm 이하인 초박막 그래핀 옥사이드 기반의 분리막 신소재를 최초로 개발하였고, 제올라이트 기반의 신개념 분리막 원천기술을 확보하였으며, 투과증발 및 증기투과용 제올라이트 분리막 제조기술을 ㈜파인텍에 1억 원에 스펀오프 기술로 이전하였다. 2015년 기준으로 SCI 논문 107건, 특허출원 72건 및 특허등록 38건을 발표하였다. 국가 계획상 목표 대비 이행을 점수는 현시점(2015) 2점, 목표시점(2020) 2점이며, 평가결과는 분리막 신소재 세계 최초 개발 등 포집 분야에 있어 일부 혁신적인 연구 성과를 도출하였으나, 목표인 \$ 20/tCO₂ 달성은 다소 어려울 것으로 판단되므로 정책목표 재설정 필요하였다. 또한 목표인 \$ 20/tCO₂의 산출근거가 불명확하며, 현시점(2015) 대비 목표가 과도하게 설정됨에 따라 국내외 동향을 반영하여 달성 가능한 정량적인 목표 설정 필요성이 대두되었다.

둘째, 전환이용(생물학적, 화학적)기술개발 정책과제의 주요 성과는 이산화탄소를 활용한 생분해성 폴리카보네이트 및

Table 3. Evaluation indicators for examining the implementation of Korean National CCS policy

Policy issues in the Korean National CCS Master Action Plan	Evaluation indicators	Goal
(1) Innovative CO ₂ capture original technology development	1. Number of low cost CO ₂ capture original technology	More than 4 CO ₂ capture original technologies (20 \$/tCO ₂)
(2) CO ₂ conversion technology (chemical, biological) development	2. Attainability of advanced concept CO ₂ conversion technology	Stage 3 (Securing of target technique by 2020)
(3) Integration of CO ₂ capture-storage (10,000 ton)	3. Attainability of major CCS original technology	Stage 3 (Securing of target technique by 2016)
(4) Commercial technology development and integration	4. Attainability of commercial and integration technology with verification	Stage 3 (Securing of target technique by 2020)
(5) CO ₂ capture technology pilot test (10~30 MW)	5. Progress of pilot test in CO ₂ capture field comparing CCS plan	Stage 3 (Securing of target technique by target period)
(6) CO ₂ transport (ship, pipeline) technology development	6. Attainability of CO ₂ transport technology	Stage 3 (Securing of target technique by 2020)
(7) Evaluation of CO ₂ storage potential capacity (ocean/geological) and storage site selection	7. Attainability of large-scale CO ₂ storage site	Stage 3 (Securing of target technique by target period)
(8) Large-scale (100~300 MW) capture verification and integration of transport-storage linked with capture	8. Progress of large-scale integration of CO ₂ capture-transport-storage	Stage 3 (Securing of target technique by target period)
(9) Legal system, modification (onshore/offshore), increase public acceptance, support of commercialization (system, tax, finance etc)	9. Degree of completion of establishing foundation for CCS accelerating commercialization	Stage 3 (Securing of target technique by target period)
(10) Environmental protection technology development (ocean/geological)	10. Attainability of environmental protection technology when transporting and storing CO ₂	Stage 3 (Securing of target technique by 2020)
(11) Human resource training	11. Degree of completion of fostering talented people program	Stage 3 (Securing of professional manpower by 2020)
(12) Reinforcing international collaboration	12. Degree of completion of developing international strategies and substantial cooperation foundation	Stage 3 (Securing of international strategies and network by 2020)
(13) Implementation of role assigned to ministries and operation of inter-ministerial council	13. Implementation and cooperation rate of role-division by ministry	Stage 3 (Securing of network by ministry by 2020)
(14) Increase in investment	14. Attainability of investment target	- Total scale investment (government 1.2 trillion won/non-government 1.1 trillion won) - Investment scale by fields (next generation technology: 240 billion won/verification research: 1.92 trillion/management of environment and establishing foundation: 140 billion won)

Table 4. Stages for evaluating the implementation rate

Stage	Conception
1	All goals cannot be achieved by the designated time frame
2	Some goals can be partially achieved by the designated time frame
3	Goals can be achieved by the designated time frame
4	Some goals can be partially achieved prior to the designated time frame
5	All goals can be achieved prior to the designated time frame

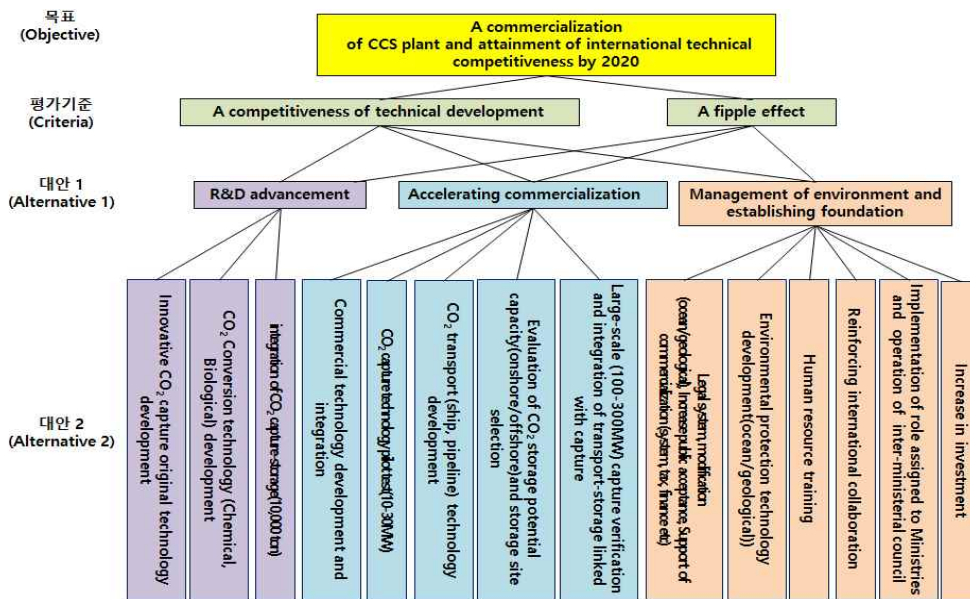


Fig. 1. The AHP analysis model for examining the implementation of Korean National CCS Master Action Plan.

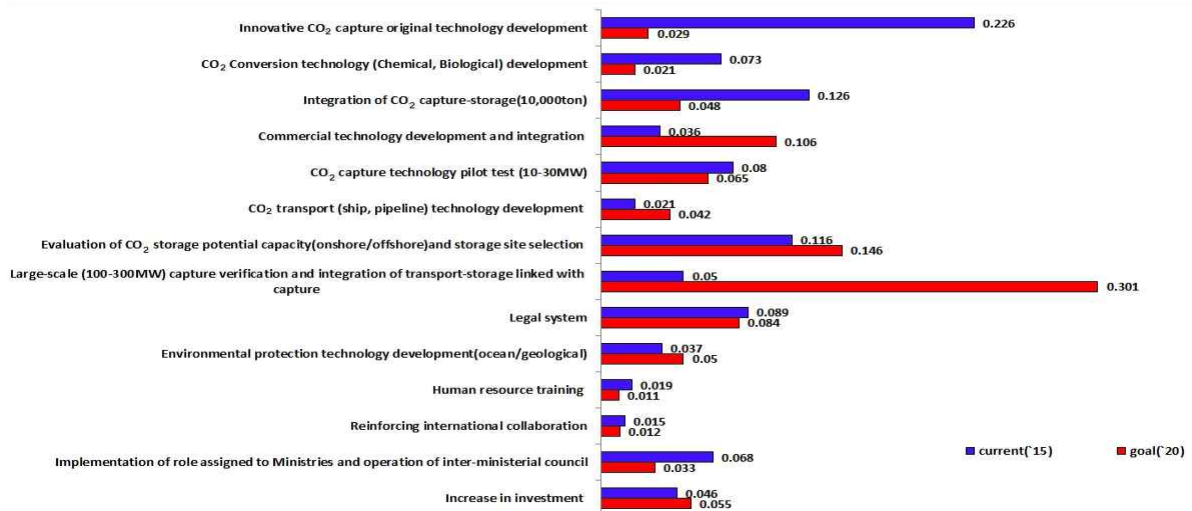


Fig. 2. The results of The AHP analysis to identify the current & goal priorities of policy issues under the national CCS master plan.

폴리카보네이트-폴리올 신물질(생분해 플라스틱) 원천기술 확보 및 롯데케미칼로의 기술이전이 있으며, 미세조류를 활용한 광 배양을 통해 고부가가치 유용물질인 아스타잔틴을 생산할 수 있는 광반응기 및 고속스크리닝 기술을 개발하여 한국지역 난방공사에 기술 이전한 것이다. 또한 전기화학적 전환을 통해 고품질의 탄산칼슘 제조기술을 확보하였다. 2015년 기준 SCI 논문 181편, 특허출원 88건 및 특허등록 11건을 발표하였다. 국가 계획상 목표대비 이행률 점수는 현시점(2015) 2점, 목표시점(2020) 2점이며, 평가결과는 기술이전 및 국내외 특허 확보 등 가시적인 성과는 있었으나, 목표에 제시한 새로운 개념의 한계 돌파형 원천기술 개발과의 정합성에 대해서 검토가 필요하며, 제시된 정책이 예산 및 성과와 연계되고, 다시 정책으로 환류될 수 있도록 정책목표는 구체적이며 명확한 설정이 필요하였다.

셋째, 포집-저장 통합 실증(1만 톤급) 정책과제의 주요 성과는 경상, 포항, 태백, 음성, 장기 등 국내 5개 분지에 대해 탐사, 조사 추진을 통해 저장 분지 적합 후보지로 장기분지가 선정되었으며, 세계 최초로 초미량 CO₂ 검출 및 모니터링이 가능한 수직 커플링된 증력계 센서를 개발한 것이다. 2015년 기준 SCI 논문 34편, 특허출원 10건, 특허등록 8건을 발표하였다. 국가 계획상 목표 대비 이행률 점수는 현시점(2015) 2점, 목표시점(2020) 2점이며, 평가결과는 1만 톤급 육상 저장후보지는 도출하였으나, 당초 2016년 목표 대비 대중수용성(Public Acceptance, PA)까지 고려한 최적의 저장소 선정 및 파일럿 규모 저장 실증과 관련하여 약 1년 정도 지연될 것으로 전망된다. 또한 대규모 통합실증 관련 원천기술을 확보하기 위한 소규모 통합실증보다는 주입시험을 통한 저장 관련 기술개발에 다소 집중되어 있으므로 당초 목적에 기여할 수 있도록 역할 검토가 필요하다.

넷째, 실증과 연계한 상용화 기술개발 정책과제의 주요 성과는 미세조류를 이용한 이산화탄소의 고부가가치 상품전환 공정실증, 이산화탄소 전환 CO₂ 기반 초산 제조 실증시스템 개발, 포집된 CO₂를 활용한 고부가 화학제품 기존 생산 공정 혁신기술 개발, 발전 배출가스 직접반응을 통한 CO₂ 포집 및 대량 활용 저장기술 개발 등이다. 또한 10 MW급 연소 후 습식 및 건식 실증을 통해 관련 기술을 확보하였으며, 포항 분지에서도 대규모 저장 잠재용량을 확인하였다. 국가 계획상 목표 대비 이행률 점수는 현시점(2015) 2점, 목표시점(2020) 2점이며, 평가결과는 성과를 도출하였으나, 개발된 기술이 상용화될 수 있도록 관련 부처 간 연계강화가 필요하며, 체계적이고 구체적인 기술 확보 전략 수립이 필요하다.

다섯째, CO₂ 포집기술 파일럿 실증(10~30 MW) 정책과제

의 주요 성과는 연소 후 10 MW급 건식/습식 포집, 연소 전 1 MW 포집, 연소 중 0.7 MW 포집 등 일부 기술을 확보하였으며, 특히 10 MW급 연소 후 건식포집기술은 CO₂ 제거율 80% 이상으로 세계 최대 규모로 획득한 것이다. 국가 계획상 목표 대비 이행률 점수는 현시점(2015) 3점, 목표시점(2020) 3점이며, 평가결과는 연소 전 포집기술의 경우 계획된 목표 대비 진척도가 다소 늦으므로 기술개발에 힘써야 하며, 10만 톤급 포집실증 결과를 100만 톤급 포집플랜트 실증계획과 연계할 수 있도록 전략적 고민이 필요하다.

여섯 번째, CO₂ 수송(선박, 파이프라인) 기술개발 정책과제의 주요 성과는 CO₂ 수송기술에 대한 시나리오 구축, 수송인프라(선박, 임시저장소 등) 개념 설계 및 엔지니어링 도면 작성 등을 추진하였으며, CO₂ 해양지중저장 수송 공정 안전기술개발, 산업계 간담회, 민간투자설명회를 통해 대규모 실증사업 수송 분야 민간기업 참여를 유도한 것이다. 또한 100만 톤급 실증사업 대비 CO₂ 수송·주입 Pre-FEED package를 작성 중에 있다. 국가 계획상 목표 대비 이행률 점수는 현시점(2015) 3점, 목표시점(2020) 2점이며, 평가결과는 포집 및 저장소 확보 일정이 다소 지연됨에 따라 수송 분야의 인프라 구축이 일부 지연되고 있는 상황을 고려하여 100만 톤급 대규모 CCS 실증사업이 조기에 확정될 수 있도록 사업계획의 체계성 및 구체성이 확보되도록 노력해야 한다.

일곱 번째, CO₂ 저장 잠재용량 평가(해상/육상) 및 저장소 선정 정책과제의 주요 성과는 기존 국내 지질탐사자료 분석 및 추가 탐사를 통하여 해역별(서해/남해/동해) 저장 후보지 DB 구축을 완료하였으며, 후보지의 저장 용량을 평가한 것이다. 국가 계획상 목표 대비 이행률 점수는 현시점(2015) 2점, 목표시점(2020) 2점이며, 평가결과는 저장소 확보를 위한 시추 준비 및 시추 데이터 분석기간이 다소 과소 선정되어 저장소 확보 시점이 당초 목표대비 지연되었고, 관련부처 간 협력 강화 및 연구 성과 공유가 확대되어야 하며, 2030년 이후 대규모 보급을 위한 대용량 저장소 확보 등의 고민이 필요하다.

여덟 번째, 대규모(100~300 MW) 포집 실증 및 포집 연계 수송-저장 통합실증 정책과제의 주요 성과는 최적의 100만 톤급 해양 CCS 실증 수송 시나리오(보령/하동 포집원 연계 선박-허브터미널-파이프라인-울릉분지)를 확보하였으며, 수송·주입·저장 통합 Pre-FEED Package 작성한 것이다. 또한 100만 톤급 CO₂ 해양지중저장 실증사업 기획을 완료하고, 예비타당성조사를 수행 중이다. 국가 계획상 목표 대비 이행률 점수는 현시점(2015) 2점, 목표시점(2020) 2점이며, 평가결과는 연간 100만 톤 포집실증 사업 추진과 연계되지 않은 저장실증 목표는 구체성이 결여되어 있으며, 관련 부처 간 협력이 다소

부족하므로 협력강화를 통해 포집·수송·저장이 일체화되는 체계적인 전략마련이 필요하다. 또한 CCS 보급 로드맵 및 관련 기술개발 추진전략을 구체화하여 일정조정이 요구된다.

아홉 번째, 법·제도 정비(해양/육상), 사회적 인식제고, 상용화 지원(제도, 조세, 금융 등) 마련 정책과제의 주요 성과는 CO₂ 포집, 수송 및 저장의 법제화 연구 추진, CO₂ 스트림의 해양 수송·저장 및 관리에 대한 법률마련, CCS 관련 기술개발 및 정책동향 분석, 대국민 홍보, 국제기구 전문가 활동 등을 통해 기반 구축을 위해 노력한 것이다. 국가 계획상 목표 대비 이행률 점수는 현시점(2015) 1점, 목표시점(2020) 3점이며, 평가결과는 가시적인 성과는 있었으나, CCS 상용화를 위한 기반 구축의 완성도가 다소 미흡하므로 범부처 차원의 법·제도 마련 및 대국민 인식 제고 등을 위한 협력시스템 구축이 필요하다.

열 번째, 환경보호기술개발(해양/육상) 정책과제의 주요 성과는 CO₂ 누출농도에 따른 생물/생태계 영향 DB 구축, 해양 지중저장 환경 관리방안 제시 등 관련 기술 확보를 위해 노력한 것이다. 국가 계획상 목표 대비 이행률 점수는 현시점(2015) 2점, 목표시점(2020) 3점이며, 평가결과는 소규모·대규모 통합 실증이 당초 계획 대비 지연됨에 따라 관련 기술개발 및 현장 적용성 평가가 지연되고 있다. CO₂ 수송·저장 분야 안전 문제에 대해서도 연구가 필요하며, ECO₂와 같은 외국 프로젝트와 연계하여 관련 기술 확보가 필요하다.

열한 번째, 인력양성 정책과제의 주요 성과는 CCS 관련 전문 산업인력 양성 교육을 하였으며, CCS 전문서적 발간 및 서울대학교 내 CCS 관련 강좌를 개설한 것이다. 또한 해수부의 CO₂ 해양지중저장기술개발 과제를 통해 29명의 석·박사를 배출하였다. 국가 계획상 목표 대비 이행률 점수는 현시점(2015) 3점, 목표시점(2020) 4점이며, 평가결과는 인력양성 프로그램과 R&D 연구과제 수행을 통해 필요 인력을 양성 중이며, 수급전망을 고려하여 인력양성 로드맵 수립이 필요하다.

열두 번째, 국제협력 체계구축 및 강화 정책과제의 주요 성과는 2015년 2월에 Korea-EU Technical Workshop을 개최하여 Twining Collaboration 추진에 합의하였고, 호주 Otway(2010~2015), 캐나다 Weyburn(2011~2014) 프로젝트와 같은 해외 CCS 프로젝트에 공동 참여한 것이다. 이외에 국제 포럼 참석 등 국제협력체계 및 네트워크 확보를 위해 노력 중에 있다. 국가 계획상 목표 대비 이행률 점수는 현시점(2015) 4점, 목표시점(2020) 3점이며, 평가결과는 CCS 기술 확보 후 개도국과의 국제협력을 활성화하여 협력지원을 강화할 필요가 있으며, 단기적인 기술협력보다는 국제협력의 성과가 실질적인 기술개발로 도출될 수 있도록 체계화가 필요하다.

열세 번째, 부처 별 역할 분담 이행 및 총괄협의 운영 정책과제의 주요 성과는 최근 미래부-환경부 간 현장 공동 활용을 협의하였으며, 범부처 간담회 개최를 추진하고 있는 것이다. 국가 계획상 목표 대비 이행률 점수는 현시점(2015) 1점, 목표시점(2020) 3점이며, 평가결과는 「국가 CCS 종합추진계획」의 부처 간 역할 분담이 명확하지 않다는 외부지적이 빈번히 제기되고 있어, 부처 간 협력 및 연계 강화를 위해 컨트롤 타워 기능 강화 및 역할 분담의 명확화가 필요하다.

마지막으로, 투자확대 정책과제의 주요 성과는 미래창조과학부의 2020년까지 차세대기술 연구에 1,727억 원 투자계획, 산업통상자원부의 2020년까지 정부 R&D에 2,605억 원, 민간 R&D에 1,300억 원 투자계획, 해양수산부의 2015년까지 정부 R&D 435억 원 투자 및 100만 톤급 실증사업 예비타당성 조사 진행, 환경부의 2015년까지 정부 R&D 66억 원 투자 및 2021년까지 413억 원 투자 계획 등이다. 국가 계획상 목표 대비 이행률 점수는 현시점(2015) 1점, 목표시점(2020) 2점이며, 평가결과는 당초 대비 투입될 예산규모가 작으며, 환경부 사업의 경우, 착수시기가 늦어져 연구개발 단계도 늦어진 상황이다. 국가재정여건 또한 과거보다 어려우므로 선택과 집중을 통한 투자효율성 제고 및 민간기업 투자유인 노력이 필요하다.

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 「국가 CCS종합추진계획」을 바탕으로 14개 정책과제별 이행점검을 실시하였다. 이를 바탕으로 국내 CCS 기술의 현주소를 점검하고, 개선방안을 마련하였다. CCS 종합추진계획 이행점검 결과, 현시점(2015) 및 목표시점(2020) 모두 당초 제시된 계획을 달성하기 어려운 것으로 나타났다. 그 원인을 분석한 결과, 당초 계획의 목표가 다소 과다하게 설정되어 정책과제들의 진척도가 일부 지연되었으며, 또한 기술개발을 위해 뒷받침되어야 할 환경기반구축 분야에 문제점이 발견되었다. CCS 법·제도정비가 시급하며, 자주 제기되는 부처 간 역할분담 문제를 해결해야 한다. 이외에 기술개발, 플랜트건설, 기반구축 등에 많은 예산이 필요함에도 불구하고, 정부지원이 미흡한 측면 또한 있다. 특히, 현재 지연되고 있는 대규모 포집 및 수송·저장 통합 실증 추진 프로젝트의 가속화를 위한 지원이 필요하다. 이산화탄소 포집·저장분야는 CCS 기술 비용의 약 90%를 차지하므로, 기술적 우위를 선점하기 위해 정부의 지원이 시급함에도 불구하고, 투자가 제대로 이루어지지 않고 있다.

본격적 상용화가 이루어지지 않은 CCS 분야는 기술 및 정책 개발이 매우 밀접하게 연결되어 있으므로, CCS 기술상용

Table 5. The current status of policy issue of Korean National CCS Master Action Plan

Classification	Policy issue Issue name	Results of implementation review Current state	Stage	
			Current	Goal
1	Innovative CO ₂ capture original technology development	• Some innovative CO ₂ capture technologies were developed, but achieving the goal (\$ 20/tCO ₂) was unlikely	2	2
2	CO ₂ conversion technology (chemical, biological) development	• Results such as technology transfer and patent, were achieved, goal and compatibility need to be reviewed	2	2
3	Integration of CO ₂ capture-storage (10,000 ton)	• 10,000ton potential sites for CO ₂ geological storage were found, but with a 1-year delay	2	2
4	Commercial technology development and integration	• CO ₂ conversion technologies such as utilization of micro algae were developed, but commercial scale technology and the network among Ministries were insufficient	2	2
5	CO ₂ capture technology pilot test (10~30 MW)	• A verification research on post-combustion 10 MW adsorption/absorption capture was performed	3	3
6	CO ₂ transport (ship, pipeline) technology development	• Due to the delay of capture and storage site attainments, transport technology development was also delayed	3	2
7	Evaluation of CO ₂ storage potential capacity (onshore/offshore) and storage site selection	• Due to the delay of preparation of drilling and analysis of drilling data, attainments of storage was also delayed.	2	2
8	Large-scale (100~300 MW) capture verification and integration of transport-storage linked with capture	• The goals were delayed, and large-scale marine geological storage is currently undergoing feasibility study	2	2
9	Legal system, modification (onshore/offshore), increase public acceptance, support of commercialization (system, tax, finance etc)	• The CCS legislative systems are insufficient for CCS commercialization	1	3
10	Environmental protection technology development (onshore/offshore)	• Due to the delay of small & large scale integration project, related technology developments were delayed, too	2	3
11	Human resource training	• Training activities are underway through Programs and R&D project	3	4
12	Reinforcing international collaboration	• Technical workshop and international cooperation programs are underway ※ ex) Korea-EU Technical Workshop, Australia Otway etc	4	3
13	Implementation of roles assigned to ministries and operation of inter-ministerial council	• Networks among related Ministries are still insufficient	1	3
14	Increase in investment	• Investments are insufficient compared to the CCS plan	1	2

화에 매우 중요하며, 정부의 R&D 지원은 포집·저장기술의 실증과 비용·리스크 절감을 위해 필수불가결하다. 우리나라의 보다 효율적인 CCS 기술 개발 지원을 위해 정책개발 및 정부 지원을 중심으로 크게 3가지 개선방안을 제안한다.

먼저, 앞서 언급했던 구체적이지 않은 목표 및 과다 설정된 목표의 문제점 해결을 위해 제 2차 CCS 계획 수립 시 현주소를 잘 반영하여 달성 가능한 정책목표 제시 및 구체적이며 명확한 목표설정이 필요하다. 이에 따라 정기적으로 정책과제

이행 여부를 점검하고, 환류될 수 있는 시스템을 구축해야 할 것이다. 또한 CCS 기술 주요 선진국은 2050년까지 장기 온실가스 감축목표를 설정하여 중장기 CCS 기술개발 전략을 수립하고 있는 반면에, 우리나라는 2020년 이후 중장기 목표 및 기술개발전략이 부재하여 2차 종합계획 수립 시 이를 반영하는 작업이 필요하다.

다음으로, 매번 문제 제기되는 미래부, 산업부, 해수부, 환경부 등 부처 간 협력 및 연계강화를 위해 컨트롤타워기능을 강화하여 부처별 역할 분담을 조율하고, 서로 간 소통을 위해 노력해야 할 것이다.

마지막으로 국가 재정여건의 지속적 악화로 당초계획 대비 투입되지 못하는 현실을 반영하여 선택과 집중을 통해 효율적인 투자가 이루어져야 하며, 개발된 기술을 바탕으로 민간 기업의 투자 유동 등의 투자 촉진 방안이 필요하다.

6. 사 사

본 논문은 한국과학기술기획평가원(KISTEP) 연구과제(정부 R&D 중기 투자 포트폴리오 수립 프레임 개발 및 시범적용 연구) 지원을 받아 수행된 연구 성과입니다.

REFERENCES

- Chae SY, Kwon SJ. 2012. A study on domestic policy framework for application of carbon dioxide capture and storage (CCS). pp. 617-625.
- Chae YR, Kwon YH, Song YI, Lee SJ, Cho KW, Myoung SJ, Jung BC, Cho HJ, Kim HJ, Lee HM Yun KR. 2013. Inspection and Implementation of National Climate Change Adaptation Measures and Reflex Institutionalized Support System Research. pp. 95-229.
- DOE. 2013. FY 2014 Congressional Budget Request.
- DOE. 2014. FY 2015 Congressional Budget Request.
- DOE. 2015. FY 2016 Congressional Budget Request.
- DOE. 2016. FY 2017 Congressional Budget Request.
- Im ES. 2009. AHP(Analytic Hierarchy Process)- Reasonably Determine from the Selected Group. pp. 1-8.
- Interagency Task Force on CCS. 2010. Korean National CCS Master Action Plan. pp. 1-28.
- Jang HK, Kim YR, Kwak CK, Kim PS. 2015. 2014 Multicultural family policy implementation and inspection performance evaluation.
- Lee JH. 2009. Successfeul elemnets of the climate change legislation focusing on the U.S Federal Legislative Bills. pp. 175-200.
- Lee HJ, Lee EH. 2015. KCRC Issue report. Expected increase in global fossil fuel and the urgency of introducing CCS Technology. pp. 9-12.
- Shim YH, Byun GS, Lee BG. 2011. Deriving strategic priorities of Green ICT Policy using AHP and ANP. pp. 85-98.
- Song KW, Lee Y. 2013 Re-scaling for improving the consistency of the AHP method. pp. 271-288.
- Won DG. 2015. KEMRI special reprot. Regional analysis of greenhouse gas reduction plan for the post 2020 climate change response. pp. 1-7.