



탈석탄 사회로의 전환

파리협정에 따른 한국의 과학 기반 탈석탄 경로

2020년 2월

탈석탄 사회로의 전환

파리협정에 따른 한국의 과학 기반 탈석탄 경로

저자

파올라 파라(Paola Yanguas Parra) 우르술라 허트필터(Ursula Fuentes Hutfilter)
거라브 간티(Gaurav Ganti) 매튜 기든(Matthew Gidden)
라이언 윌슨(Ryan Wilson) 데보라 라말로페(Deborah Ramalope)

감사의 말

이 연구의 토대가 되는 데이터를 제공해준 글로벌 에너지 모니터(Global Energy Monitor)와 IPCC 모델링팀의 노고에 감사한다.

이 보고서가 나오기까지 많은 분들의 도움이 있었다. 데이터베이스 관리와 그래픽 디자인을 맡아준 안드레아스 가이게스(Andreas Geiges)와 매트 비어(Matt Beer)에게 각별한 감사의 말을 전한다. 아낌없는 코멘트와 제안을 해준 기후솔루션(Solutions for Our Climate) 팀에도 감사드린다. 단, 보고서 내용에 대한 모든 책임은 저자들에게 있다.

보고서의 전체 또는 일부를 Climate Analytics의 허가 없이도 교육 혹은 비영리적 목적으로 사용할 수 있지만 감사의 말 또는 참고문헌에 출처를 명확히 언급해야 한다.

Climate Analytics의 사전 서면허가 없이는 이 보고서를 상업적 목적으로 판매 또는 사용할 수 없다. 이 보고서에 모든 오류나 누락은 저자들의 의도가 아님을 밝힌다.

이 문헌은 아래와 같이 인용할 수 있다.

Climate Analytics (2020). Transitioning towards a coal-free society: science based coal-phase out pathway for South Korea under the Paris Agreement.

이 보고서는 아래 링크에서 다운로드 가능하다.

www.climateanalytics.org/publications

이 보고서는 유럽기후재단(ECF)의 재정 지원을 받아 작성하였다.

표지 사진 : 한국 하동 석탄화력발전소 / 기후솔루션 제공

In collaboration with



목차

머리말	1
핵심 요약	2
서론	4
한국의 전원 믹스에서 석탄의 역할 변화	6
석탄발전의 파리협정 준수 경로	11
석탄화력발전소의 배출량 격차	14
국가 목표의 타당성	16
에너지와 전력 목표	16
기후 목표	20
결론과 정책 권고안	21
행동을 위한 기회	22
부록 I - SIAMESE 모형	24
부록 II - 석탄화력발전소의 이산화탄소 배출량 추정	24
참고문헌	27

머리말

이 보고서는 파리협정이 한국 석탄발전에 대해 제시하는 바를 분석하고 기후-에너지 분야 국가 계획 및 목표를 파리협정을 준수하는 배출 시나리오와 비교한다.

우리의 기존 연구는 파리협정의 목표를 달성하려면 전 세계는 2040 년, OECD 국가는 2030 년까지 발전 부문의 탈석탄을 달성해야 함을 보여준다. OECD 가입국인 한국이 산업화 이전을 기준으로 지구 온도 상승을 1.5°C 로 제한하는 파리협정 준수를 위해 제 역할을 하려면 2030 년까지 석탄으로부터 탄소 배출 제로를 달성해야 한다.

Climate Analytics 는 'IPCC 지구온난화 1.5°C 특별보고서(IPCC SR1.5)'에 기반해 파리협정 1.5°C 목표에 상응하는 에너지 전환 경로가 석탄화력발전에 미치는 영향을 최초로 분석한 보고서를 2019 년 9 월 발표하였다. 보고서는 IPCC SR1.5 가 살펴본 다섯 개 지역에 대해 석탄발전 감축을 위한 기준(benchmarks)을 각각 제시하였다(Climate Analytics, 2019c).

기존 문헌들과 마찬가지로(Climate Analytics, 2017a, 2018b, 2018a, 2019a), 이 보고서는 이러한 세계적, 지역적 기준을 바탕으로 개별 국가 수준에서 의미있는 정책 권고안과 분석 결과를 도출하는 것을 목적으로 한다. 다시 말해, 이 연구는 향후 석탄의 역할 축소와 파리협정에 따른 탄소배출 감축을 위해 가장 효과적인 전략을 수립할 수 있도록 과학에 기반한 통찰을 제공함으로써 관련 논의에 도움을 주고자 한다.

한국은 '제 5 차 국가환경종합계획(2020-2040)'의 지침 이행을 위한 구체적인 로드맵을 작성하는 것은 물론 파리협정에 의거한 국가결정기여(Nationally Determined Contribution)의 수정 및 개선하고, 장기 저탄소발전전략(Low Emissions Development Strategy)을 반드시 올해 안에 제시해야 한다.

이 연구의 최종 보고서는 2020 년 4 월에 발간할 예정이다. 그러나 한국 정부가 발전 부문의 석탄사용 감축 방안 등 미세먼지 감축을 위한 새로운 정책 논의가 진행되고 있고, 상반기 중에 새로운 정책이 발표될 것이라는 예측에 따라 연구진은 석탄발전에 초점을 맞춘 중간보고서를 내기로 결정하였다.

최종 보고서에서는 파리협정에 상응하는 한국 경제 전반의 탄소감축량을 분석하고, 국가결정기여 수정과 개선 과정에서 이러한 감축 경로가 갖는 의미에 관하여 살펴보도록 한다.

핵심 요약

- 한국은 2020 년에 파리협정에 따라 국가감축 목표를 수정 및 개선하여 제출해야 한다. 한국이 이러한 국가감축 목표를 달성하기 위해서는 발전 부문의 탈석탄화를 빠르게 이뤄내야 한다. 석탄 퇴출과 재생에너지 비중 확대를 목표로 하는 체계적이고 과감한 계획을 명확히 제시해야만 속도감 있는 탈석탄화를 실현할 수 있다. 한국의 기후와 에너지 정책은 이러한 계획 수립에 역점을 두어야 한다.
- 석탄 없는 전력믹스로의 전환을 알리는 징후들이 나타나기 시작했지만, 한국은 탈석탄화를 앞당길 수 있는 국가 차원의 구체적인 약속과 로드맵, 정책 수단, 그리고 전력믹스의 순조로운 방향 전환을 위한 체계적인 프레임워크가 부재한 실정이다.
- 파리협정을 준수하는 발전 부문 배출 경로에 따르면, 한국 석탄화력발전소의 탄소배출량은 향후 급격히 감소해야 한다. 2017 년을 기준으로 배출량은 2025 년까지 58% 줄어야 하고, 2029 년까지는 탈석탄을 이루어야 한다. 재생에너지의 비중은 2030 년까지 전체 발전량의 절반 이상으로 늘어나야 한다.
- 한국의 석탄화력발전소 퇴출 속도가 현 수준으로 유지할 경우, 파리협정을 준수할 수 있는 수준의 발전 부문 탄소예산의 두 배 이상을(247%) 배출하게 될 것이다. 현재 건설 중인 석탄화력 발전설비가 가동되면, 예정된 배출량과 파리협정 준수를 위한 배출경로 사이의 격차는 317%로 벌어질 것이다.

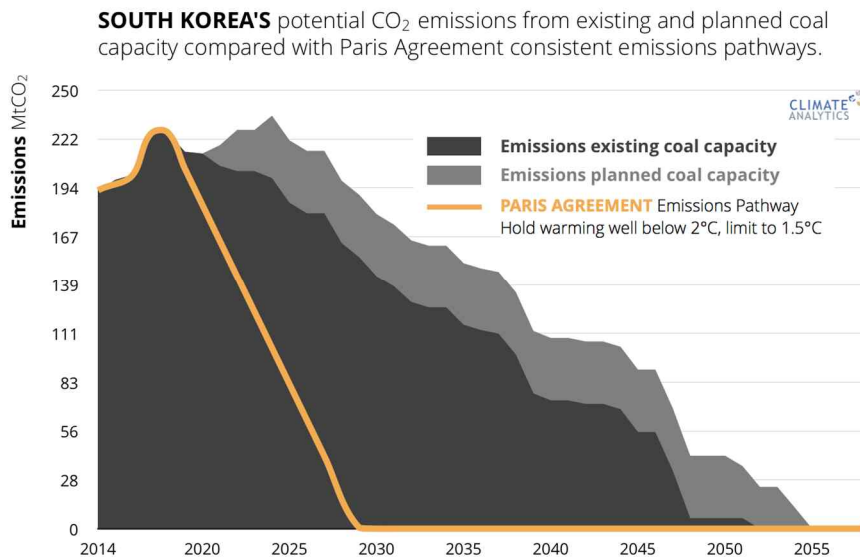


그림 1 - 한국 석탄화력 부문 탄소배출량. 가동 중인 석탄발전 설비의 배출량은 수명(30년), 과거 이용률(81%), 연소 기술 및 석탄 유형에 따른 탄소 집약도(carbon intensity)를 이용하여 계산하였다. 한국의 파리협정 준수 경로는 SIAMESE 모델을 이용하여 국제에너지기구(IEA) 에너지기술전망(ETP)의 B2DS 시나리오에 근거하여 OECD 자료를 한국에 상세화(downscaling)하여 얻은 결과이다.

- 한국은 파리협정에 따라 현재 가동 중인 화력발전소를 현재 수명인 30 년보다 더 일찍 폐쇄하거나 이용률을 현저히 낮출 필요가 있다. 신규 석탄화력발전소가 건설되면 한국의 배출량과 파리협정 준수를 위한 배출 경로 사이에 이미 벌어진 격차가 더욱 커질 수밖에 없고, 수십 년의 탄소잠김(locked-in emissions) 효과와 좌초 자산(stranded assets) 위험 증가가 나타날 것이다.
- 체계적인 탈석탄화 계획을 수립하고 명확한 정책 신호를 준다면 한국의 국민과 산업, 전력 부문은 큰 이득을 볼 것이다. 석탄 관련 기업과 노동자, 소유주, 투자자를 지원하고 기회를 창출할 계획이 마련되어 탈석탄사회로의 이행이 순탄해질 것이다. 건전하고 공정하게 탈석탄화 과정을 관리해 나갈 수 있을 뿐만 아니라 기후변화 완화 외에도 대기질 향상, 재생에너지 분야 투자 활성화를 통한 일자리 창출, 에너지 수입의존도 감소 등 많은 추가적인 이득과 기회가 주어질 것이다.
- 전기화가 핵심적인 역할을 하는 다른 모든 분야에서 탄소배출량을 줄이기 위해서는 발전 부문의 완전한 탈탄소화(decarbonization)를 위한 발 빠른 행동이 전제되어야 한다. 전 세계와 한국이 석탄 사용을 지속할수록 그 비용은 증가하며, 지구온난화를 안전한 수준으로 억제하기 위한 파리협정 목표를 달성할 가능성도 낮아진다. 천연가스 등 화석연료 인프라에 대한 추가적인 투자는 남아있는 좌초자산의 위험을 높이고 파리협정 배출 경로 도달을 어렵게 만든다.
- 한국이 다른 국가의 석탄 의존성 확대에 일조하고 있다는 사실은 지금까지 간과되어 왔다. 한국은 해외 석탄발전 사업에 자금을 조달할 뿐만 아니라 한국에 석탄을 수출하는 국가에 미래 석탄 사용에 대해 엇갈린 신호를 보내고 있다. 한국은 세계적인 에너지 전환에 역할을 다해야 하며 파리협정의 목표를 달성하기 위한 책임을 다하는 것은 물론 전세계적으로 석탄에 관한 전략 변경에 대한 분명한 신호를 보낼 필요가 있다. 이 같은 노력은 한국의 탈석탄사회 전환 계획에 있어 아주 중요한 부분이다.

서론

파리협정은 금세기 지구 평균 온도 상승 폭을 산업화 이전 수준 대비 2°C 보다 훨씬 낮은 수준으로 유지하고, 산업화 이전 대비 온도 상승 폭을 1.5°C 미만으로 제한함으로써 기후 변화로 인한 피해와 위협을 줄이기 위한 세계적 대응을 강화하기 위한 공동 행동 합의이다(UNFCCC, 2015). 대부분의 국가는 2015 년에 국가결정기여(NDC)를 처음으로 설정하며 파리협정 목표 달성을 위한 자발적 기여 목표를 발표했다. 이러한 각국의 기여를 한데 모아도 아직 파리협정에 상응하는 세계 배출량 감축 경로에 도달하기에는 역부족인 점을 감안하면(Climate Action Tracker, 2019b; UNEP, 2019), 새로 개선된 NDC 와 장기저탄소발전전략(LT-LEDS)의 제출 기한(2020 년)까지 기후 행동과 의지가 대폭 강화되어야 할 필요가 있다.

파리협정이 수립한 1.5°C 목표 달성을 위해서는 에너지 시스템의 신속한 전환이 필수적이다. 전례 없는 규모의 변화가 전 세계적으로 전 분야에서 일어나야만 이뤄질 수 있는 전환이다(IPCC, 2018a).

석탄이 기후변화에 미치는 영향이 큰 만큼 석탄 퇴출 및 재생에너지로의 대체는 기후변화에 의한 위험성을 줄이기 위해 필요한 배출량 감축 속도와 규모를 충족할 수 있는 가장 중요하면서도 유일한 수단으로 거론되어 왔다(Climate Analytics, 2016b, 2019c; Kuramochi et al., 2018; Steckel et al., 2017)(Climate Analytics, 2016b, 2019c; Kuramochi et al., 2018; Steckel et al., 2017). IPCC 지구온난화 1.5°C 특별보고서(IPCC SR1.5)가 검토하고 최신 연구를 근거로 수립된 배출 경로(pathway)는 탄소 포집 및 저장 장치(CCS) 없이 이루어지는 석탄 발전이 2010 년에 비해 2030 년까지 세계적으로 80% 감소되어야 하며 2040 년 전에 (많은 국가에서 훨씬 더 빨리) 폐지되어야 하지만, 파리협정 목표의 달성 가능성을 남겨둘 수 있다(Climate Analytics, 2019c).

석탄화력발전은 국가별로 매우 다른 실정에 놓여있다. 일부는 이미 석탄 없이 발전을 하고 있고, 일부는 석탄에 대한 의존도를 줄이려 노력 중이지만, 신규 석탄발전소 건설을 추진 중인 국가들도 있다. 이렇게 중요한 세계적인 목표가 국가 수준 정책에 대해 제안하는 바를 이해하기 위해서는 세계 및 지역 경로를 각국의 서로 다른 사정을 고려한 국가 차원의 경로로 재해석하는 것이 필수적이다.

이를 위해 본 보고서는 기존 및 계획된 석탄발전 설비에서 발생하는 배출량, 현재 국가 계획상의 국가 전원 믹스 목표를 에너지-경제 연계 모형상의 배출 경로 기준과 비교함으로써 파리협정이 한국의 석탄화력발전에 미치는 영향을 분석한다. 이 보고서는 다음의 세 가지 이유에서 석탄화력발전에 초점을 맞추고 있다.

1. 한국은 파리협정을 이행해야 한다. 그러나 현 정책을 유지한다면 2030년까지 2017년 배출량 대비 24.4% (BAU 배출량의 37%) 줄이겠다는 한국의 목표를 달성하기 어렵다.¹ 뿐만 아니라 한국의 목표치는 아직도 1.5°C 시나리오에 상응하는 경로와 괴리가 있으며 파리협정 하의 국가결정기여를 재설정할 수 있는 첫 기회인 2020년에 보완 되어야만 한다.

에너지 및 배출량 모델링 결과는 파리협정 목표에 상응하는 급격한 배출량 감축을 위해서는 탈석탄이 가장 중요한 조치임을 보여준다. 이 모형들은 전기화가 핵심적인 역할을 하는 다른 모든 분야에서 탄소배출량을 줄이기 위해서는 발전부문의 완전한 탈탄소화(decarbonization)를 위한 발 빠른 행동이 전제 되어야함을 시사한다. 만약 전원 믹스의 탈석탄화를 시급히 달성하지 못한다면 온실가스 배출량 감축 비용과 실현 가능성은 큰 타격을 입을 것이다.

한국이 국가 배출량 감축 목표(2020년 수정·개선될 예정)를 달성하고 파리협정 목표에 상응하는 배출량 감축을 성공시키려면 반드시 빠른 시일내 발전 부문에서 석탄을 퇴출해야 한다. 이는 역동적인 기술 개발의 기회를 활용하는 것은 물론, 재생에너지와 저장기술 비용을 낮추어 신재생에너지로의 전환을 가속화하기 위해서도 중요한 과제이다.

2. 2019년 12월 국무회의에서 의결된 국가환경종합계획(Plan for National Environment)을 통해 한국은 2020년에서 2040년까지 정부 행동에 지침이 될 3대 전략을 다음과 같이 확정했다.

- 대기질 향상을 이끌어내는 탈석탄 사회로의 전환
- 전 지구적 기후 위기상황에 대응하기 위한 배출량 감축 수단 및 목표의 강화
- 포용적이며 공정한 환경정책 수립

석탄이 국가 전원 믹스에서 차지하는 비중과 전력생산 비용에 반영되지는 않지만 석탄으로 인한 건강 및 환경 피해를 고려할 때 위와 같은 정책목표를 달성하려면 탈석탄은 필수적이다. 석탄화력발전소는 국가 전체 전력의 42%를 생산하고 있으며, 석탄 화력 특유의 높은 탄소 집약도(carbon intensity)로 인해 국가 이산화탄소 배출량의 30%, 초미세먼지(PM2.5) 배출량의 11%를 차지할 정도로 기후변화와 대기오염에 가장 큰 기여를 하고 있다(National Council on Climate and Air Quality, 2019)(Government of South Korea, 2018).

신속하고 체계적으로 탈석탄화를 이룬다면 온실가스 배출량 감축을 넘어 경제, 환경, 보건 등 다양한 측면에서 공편익(co-benefits)을 얻을 수 있으며 이는 한국에서 공정하고 원활한 에너지 전환 추진의 기초가 될 것이다.

¹ 한국 정보는 2019. 12. 온실가스 감축 목표를 2017년 배출량 대비 24.4%로 개정하였는데, 이는 2030년 BAU 대비 37%와 동일한 수준이다.

3. 파리협정을 준수하는 탈석탄 계획은 한국의 기후 정책지침과 목표, 그리고 정책이행 노력 간의 간극을 줄이는 결정적인 수단이다.

현 정부는 2017년 출범한 후로 계속 석탄 사용 축소를 우선순위로 삼아 왔고 국가 석탄사용량 축소 로드맵을 2020년 내에 수립할 것을 계획 중이다. 위험한 수준의 대기오염을 해소하기 위해 석탄발전을 제한하는 정부의 임시 대책은 탈석탄이 다양한 정책 목표에 잠재적으로 큰 기여를 할 수 있다는 점을 입증했다. 파리협정에 부합하는 배출 경로는 또한 온실가스 감축뿐만 아니라 기타 다양한 공편익을 수반하며, 정부가 이러한 배출경로를 택할 이유는 이것만으로도 충분하다.

그러나 국가 계획과 정책은 아직 전반적인 정책 목표와 비교했을 때 일관성이 부족하다. 일례로, 8차 전력수급기본계획(BPE8) 상 2030년 전월 믹스에서 석탄은 지속적으로 가장 큰 비중(36%)을 차지할 것으로 예상된다. 신규 석탄발전소 7기 역시 몇 년 안에 가동될 예정이며 이에 따라 좌초자산(stranded assets) 위험은 증가할 것이다. 이에 더해 한국은 전 세계 석탄발전 확산을 가장 많이 지원하는 국가 중 하나다.

이 보고서는 에너지 부문에서 파리협정을 준수하는 석탄발전으로부터의 배출 경로를 제공함으로써 정책 간의 일관성을 향상시키고 국가 기후 정책과 이행 수준 간의 격차를 좁히기 위하여 단기간에 도입 가능한 석탄 사용에 관한 정책 권고안을 제시한다. 현재 이루어지고 있는 국가 차원의 정책 논의와 석탄 사용량 감소에 대한 사회적 압력에 따라 정부는 2020년 획기적인 전략을 수립할 결정적인 기회를 갖게 되었다. 이러한 획기적 전략을 통해 파리협정 목표 달성에 필요한 규모와 속도를 갖춘 정책을 만들어낼 수 있다.

한국의 전원 믹스에서 석탄의 역할 변화를 위한 동력

한국의 전력 시스템은 중앙 통제하에 있고 탄소집약적인 석탄화력발전이 주를 이루며, 사용되는 연료의 대부분은 수입산 흑탄이다. 그러나 석탄 없는 전원 믹스로의 전환 움직임이 일어나고 있다는 신호가 곳곳에서 발견된다. 석탄이 미래 에너지 믹스 내에서 석탄이 담당하는 역할에 대한 사회적이고 정치적인 인식이 달라지고 있다. 문재인 대통령은 현 행정부의 목표 중 하나가 석탄화력발전에 대한 의존을 줄이는 것이라고 선언한 바 있고 위험 수준의 대기오염에 대한 우려로 인해 석탄발전에 대한 새로운 규제가 도입되기도 했다. 지방 정부와 비정부 조직들은 석탄에 대한 의존을 끝내기 위한 진취적인 대책을 내놓고 있다. 일례로 전국 석탄발전소의 거의 절반이 위치해 있는 충청남도는 OECD 회원국에서의 CCS 없는 석탄발전을 2030년까지 근절할 것을 약속하는 글로벌 동맹에 가입했다.

2018 년 한국 전체 발전량의 42% 정도를 석탄이 차지했다. 현재 12 개소의 석탄발전소가 계통에 연계되어² 있으며 평균 용량가중연령 15 년의 발전기 60 개로 구성되어 있다. 석탄발전을 포함한 전력생산의 대부분은 국영발전사인 한국전력공사(KEPCO)와 발전 자회사가 담당한다.

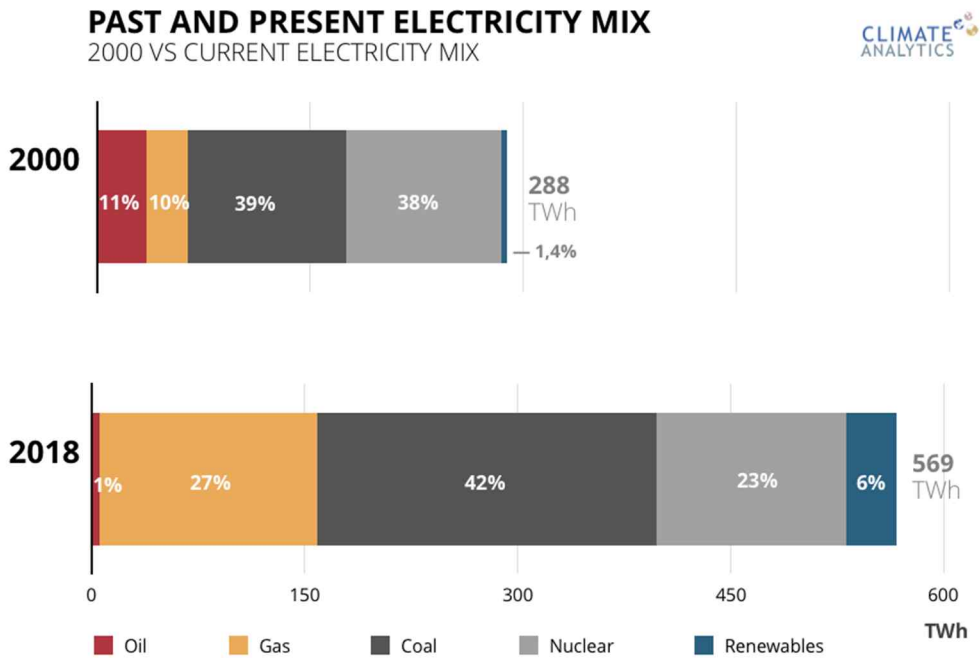


그림 2 - 전원에 따라 나눈 전력 발전 비중(2000 년 & 2018 년). 출처: 아시아-태평양 에너지연구센터(APERC) 2019 에너지 전망 및 한국전력 2019 년 통계에 기초하여 직접 작성

석탄발전은 국가 이산화탄소 배출량의 30% 가량을 차지하며, 지난 20 년간 배출량 증가의 주요 원인이었다. 2000 년도 발전량의 39%를 차지하던 석탄발전의 비중이 2018 년에는 42%로 증가했는데, 이에 따라 같은 기간 동안 발전량은 두 배 이상 증가했다(그림 2, 3 참조).

² 석탄기반 전력 발전에 대한 포괄적인 그림 제시를 위해 배출량 계산에 총 가동 용량 1,563MW 의 소규모 열병합발전소(CHP) 역시 포함했다.

PAST AND PRESENT EMISSIONS
CHANGES IN ENERGY RELATED EMISSIONS 2000 - 2016

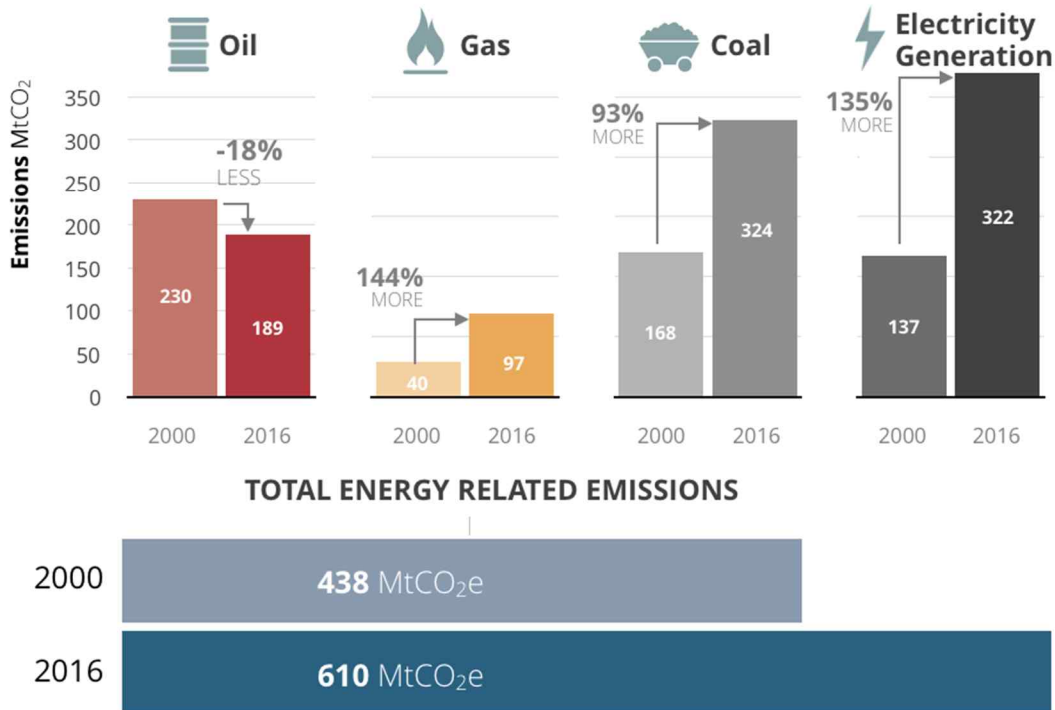


그림 3 - 에너지 부문 발전원별 온실가스 배출량 (2000 년 & 2016 년). 출처: 아시아-태평양 에너지연구센터(APERC) Energy Outlook 2019 통계에 기초하여 직접 작성. 국가 인벤토리에 공식 보고된 에너지 관련 배출량 수치는 이보다 약간 낮은데(2000 년 411 MtCO₂, 2016 년 605 MtCO₂e), 이는 두 정보원의 분류 방식이 다르기 때문이다.

전세계에서 한국은 현재 최고 가용기술이라 할 수 있는 초초임계압(ultra-super critical) 석탄발전소 비율이 가장 높은 국가 중 하나이지만 2018 년 미세먼지 오염에서 석탄발전이 차지하는 비율이 11%로, 대기오염에 대한 그 기여도가 매우 높다.

과거 이명박 행정부는 6 차 전력수급기본계획(BPE6)을 발표하며 2013 년에서 2027 년 사이 27 기의 석탄발전소 신설을 통해 석탄발전 용량을 두 배로 늘릴 것을 계획했다(MOTIE, 2013). 그러나 2017 년 5 월 문재인 행정부가 들어서면서 한국은 에너지 전략의 변화를 선언했고, 석탄과 원전의 비중을 줄이고 재생 에너지의 기여도를 높이는 데 우선 순위를 두겠다고 발표했다.

지방정부 역시 서서히 전력 생산을 위한 석탄 사용을 줄이기 위해 진보적인 조치를 취하고 있다. 국내 석탄화력발전소의 절반 정도가 집중된 충청남도의 경우 2017 년 탈석탄동맹(Powering Past Coal Alliance, PPCA)에 가입하며 한국은 물론 동아시아 지역에서의 첫 회원이 되었다. 탈석탄동맹은 중앙정부, 지방정부, 민간기업 및 기관 등이 함께세계 기후 목표를 달성하기 위해 OECD 회원국에서 2030 년까지 탈석탄화 달성이 필요하다는 인식하에 CCS 없는 석탄발전을 근절하고 청정 에너지로 전환하도록 힘을 모으기 위한 연합체다(Powering past coal Alliance, 2017).

기후변화 완화 효과뿐만이 아니라 사회적 인식 개선과 대기오염, 그리고 이로 인한 공중보건 문제 해결에 대한 필요성이 대두되면서 석탄발전에 대한 새로운 접근 도입이 힘을 받고 있다.

황산화물(SO_x), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x), 지상 오존(O₃), 미세먼지(PM-10, PM-2.5), 납, 벤젠에 대하여 한국은 환경 기준을 정하고 시행 중이다. 그러나 대기오염은 아직도 심각한 문제이며 다수의 도시에서 위험한 수준의 대기오염이 나타나고 있다. 7 개 도시의 초미세먼지(PM-2.5) 농도가 전례 없이 높은 수치를 기록한 후인 2019 년 3 월, 한국 정부는 대기오염을 “사회적 재앙”이라 명명했다(Reuters, 2019).

대기오염 완화를 목적으로 한국 정부는 최근 몇 년간 석탄화력발전이 영향을 미치는 다수의 조치를 시행했다³.

- 2017 년 6 월 정부는 석탄화력발전소 10 기를 폐지하고 현재 허가가 이루어진 발전소 이외에 더 이상 신규 발전소를 건설하지 않겠다고 선언했다. 이에 더해 문재인 대통령은 30 년 이상 노후한 석탄발전소를 임기(2017-2022) 동안 모두 영구 폐쇄하겠다고 발표했다.
- 2018 년 정부는 PM2.5 에 대한 일평균 환경기준을 m³당 50 μg에서 35 μg으로, 연평균 환경기준을 현행 m³당 25 μg에서 15 μg으로 각각 강화했다.
2019 년 5 월 대기환경보전법이 개정되어 화력발전소를 포함한 모든 설비에 대한 배출허용기준이 강화되었다.
- 2019 년 9 월 국가기후환경회의(National Council on Climate and Air Quality)가 미세먼지 계절관리제를 발표하며 배출기준 강화, 석탄발전소 가동 제한, 고농도 시기(일반적으로 12 월~3 월) 중 노후 디젤 차량 운행 제한 등의 대책을 내놓았다.
- 2019 년 11 월 정부는 6 개 노후 석탄화력발전소 폐쇄를 2021 년까지 앞당겼다. 이는 기존보다 1 년 가량 앞당겨진 일정이며, 이 결정에 따라 온실가스 배출량이 6 - 12MtCO₂ 줄어든 것이다.

이렇게 위험 수준의 대기오염을 해소하기 위해 정부가 마련한 일시적 석탄발전 제한 대책은 발전 부문에서의 노력이 정책 목표 달성에 잠재적으로 크게 기여할 수 있음을 이미 보여주었다. 일례로, 2019 년 12 월 석탄발전소의 미세먼지 배출량은 전년 동기 대비 36% 정도 감소했다(MOTIE, 2019b). 한국 정부는 전력 시장에서의 석탄사용량 감축 등과 같이 미세먼지 배출을 통제하기 위한 새로운 일련의 대책에 대한 검토를 진행 중이다.

석탄 없는 전원 믹스로의 전환 움직임에 관한 긍정적인 신호가 나타나고는 있지만, 한국은 탈석탄을 가속화하기 위한 구체적인 약속, 로드맵 또는 정책 대안은 물론이고, 석탄 없는 사회로의 원활한 전환을 위한 체계적인 프레임워크 역시 제시하지 못하고 있다.

³ 대기환경 기준 강화는 두가지 측면에서 석탄발전이 영향을 미친다. 우선 노후 발전설비의 경우 성능 및 설비개선이 요구되어 가동비 상승이 필요할 뿐만 아니라 폐쇄 결정에까지 이를 수 있다. 기준을 충족하는 설비라 하더라도 총량기준 규제가 부가되면 궁극적으로 이용률을 축소해야하며, 이는 설비 수익성에 영향을 미친다.

Box 1 – 한국이 세계에 남긴 ‘석탄’ 발자국

석탄화력발전에 대한 한국의 접근법은 국제적 영향력을 가지며, 세계 에너지 전환과 파리협정 목표 달성에 대해 한국이 기여할 수 있는 가능성을 논할 때뿐만 아니라 기후행동의 필요성 및 관련 책임을 논할 때 참작되어야 한다.

한국은 여전히 전세계 석탄발전 확산에 가장 많이 투자하는 국가 중 하나다. G20 국가들의 해외 석탄화력발전소 프로젝트에 대한 공적금융지원 규모를 바탕으로 평가한 결과 한국은 3 위를 기록하였으며, 한국무역보험공사(K-SURE), 한국수출입은행(KEXIM), 한국산업은행(KDB) 등의 공적 금융기관(PFAs)이 연간 10억 달러 이상을 해외 석탄발전소 프로젝트에 투자하고 있는 것으로 나타났다(Farrow, Anhäuser, Myllyvirta, & Son, 2019).

2013년 1월부터 2019년 8월 사이 한국 공적 금융기관은 7 GW 용량에 해당하는 총 22 개의 석탄 화력발전소에 무려 57 억 달러에 달하는 금액을 투자했고 잠재적으로 4.5 GW 용량에 달하는 신규 석탄발전소에 투자하는 방안을 검토했다(Farrow et al., 2019). 해당 시기의 공적 투자는 대부분 동남아시아에 집중되었는데, 베트남(72%), 인도네시아(22%)의 비중이 컸으며 방글라데시와 칠레 등의 국가에는 이보다 적은 비중의 투자를 진행했다. 다수의 투자 검토 대상 사업은 국내 석탄화력발전소와 비교했을 때 훨씬 느슨한 배출기준을 적용 받는 아임계(sub-critical) 및 초임계(super-critical) 석탄 전력 발전소들로, 해당 기술들은 가용한 최적의 기술은 아니다(idem).

한국 석탄화력발전 산업의 주 원료는 수입산 석탄이다. 한국에 석탄을 수출하는 국가 중에는 심지어 인도네시아나 호주와 같이 기후변화로 인한 악영향에 취약한 국가들도 포함되는데, 화석연료 채굴 산업체들이 기후행동을 미루기 위한 막대한 정치적 영향력을 발휘하기 때문이다. 석탄 채굴 산업이 지역 사회 및 환경에 지대한 영향을 미치는 남아프리카공화국과 콜롬비아 같은 국가 역시 포함된다(Statista, 2018). 한국에서 향후 석탄 수입에 대한 뚜렷한 정책 신호가 존재하지 않음으로 인하여 이러한 국가들에서 채굴 산업 수요 전망에 간접적으로 기여하고 있으며, 이는 해당 국가들에서 석탄 채굴을 지속하고 확장하는 근거로 이용된다. 결국 해당 국가에서의 에너지 전환은 어려워지고, 관련 비용도 늘어나게 된다.

한국 내에서 탈석탄 사회로의 전환에 대한 정치적 논의가 가속화되고 있으며 공감대도 넓어진 것은 사실이다. 그러나 타 국가의 석탄 의존도를 높이는데 한국이 일조하고 있으며 한국이 대외 석탄 전략을 바꿀 경우 글로벌 에너지 전환을 도모하고 파리협정 목표를 달성하는 데 기여할 수 있다는 점은 충분히 주목하고 있지 못하다.

일련의 국가 차원의 정책 논의가 진행되고 있고 석탄사용 축소에 대한 사회적 압력이 커진 만큼 2020 년은 현정부에게 과감한 기후와 에너지 정책 로드맵, 목표, 약속을 발표할 절호의 기회다. 명확한 정책 신호에 더해 체계적인 탈석탄화 계획을 갖춘다면 한국 국민은 물론 발전 사업 역시 다양한 편익을 보게 될 것이다. 뿐만 아니라 석탄 관련 기업과 근로자, 투자자에 대한 지원과 기회 창출 계획을 마련함으로써 탈석탄사회로의 순조로운 이행을 도모할 수 있을 것이다.

이하에서는 파리협정을 준수하는 석탄부문 배출 경로를 제공하고, 현 정책하의 배출량 전망치 간의 차이를 산출하며, 현행 국가 에너지 및 전력 목표치가 타당한지 살펴보고자 한다. 결론적으로 정책 일관성을 향상시키고 국가 기후 정책과 이행 수준간의 격차를 줄일 수 있는 단기적으로 시행가능한 석탄 사용 관련 정책 권고안을 구체적으로 소개한다.

석탄발전의 파리협정 준수 경로

2016 년 Climate Analytics 는 CCS⁴ 가 없는 석탄발전소의 배출량이 전세계적으로는 2050 년까지, 중국에서는 2040 년까지, OECD 와 유럽연합(EU)에서는 2030 년까지 사라져야만 파리협정의 1.5°C 온도 목표 달성이 가능하다고 결론지었다(Climate Analytics, 2016a).⁵ 해당 결과는 당시의 통합평가모형(IAM)에서 도출된 에너지-경제 연계 시나리오에 근거한 평가를 통해 도출된 것이었다. 이러한 선행 연구에 기초하여 Climate Analytics 는 EU 회원국, 일본, 독일, 호주 등을 대상으로 한 탈석탄 연구를 진행하였다(Climate Analytics, 2017b)(Climate Analytics, 2018a) (Climate Analytics, 2018b)(Climate Analytics, 2019b).

IPCC SR1.5 는 1.5°C 목표에 부합하는 더 다양하고 많은 시나리오에 대한 검토를 통해 과학적 근거를 확장시켰다(IPCC, 2018b). **Climate Analytics 는 IPCC SR 1.5 에 제시된 시나리오에 대한 분석을 통해 전세계가 파리협정 목표에 맞는 배출경로에 올라서려면, 2040 년까지 석탄 발전을 중단해야 한다는 결론을 도출하였다**(Climate Analytics, 2019c). 이는 기존의 연구에서 추산한 것보다 약 10 년 정도가 당겨진 것이다.

IPCC SR1.5 의 근간이 되는 시나리오들은 국가 차원의 데이터를 제공하지는 않으며 대신 다양한 지역에 초점을 맞춘다(예: OECD). 이 보고서는 국제에너지기구(IEA)의 에너지기술전망(Energy Technology Perspectives, ETP) Beyond 2°C scenario (B2DS)⁶를 활용하여 한국의 배출량 및 에너지 시나리오에 대한 결론을 도출하고자 했다(IEA, 2017). 우리는 이미 독일과 호주의 탈석탄화를 위해 파리협정에 기초한

⁴ 탄소 포집 및 저장 장치

⁵ 이 연구는 배출량이 2010 년도 수준의 90% 이하로 떨어졌을 때 석탄화력발전소가 퇴출되었다고 가정한다.

⁶ IEA 보고서에는 이 보고서와는 연관이 없는 두가지 시나리오가 추가로 등장한다. 하나는 기준 기술 시나리오(RTS) 또는 기준 시나리오라고 불리며 현재의 기후변화 완화 공약(NDC 및 기타 공약)이 이행될 거라 가정한다. 나머지는 2°C 시나리오(2DS)로서 추가적인 완화 조치가 취해져서 2100 년까지 산업화 이전보다 인간에 의한 지구 온난화를 2°C 이내로 제한하는데 성공할 확률이 50%될 것이라 가정한다.

지침을 제공하기 위한 기존의 연구에서 비슷한 접근법을 취한 바 있다(Climate Analytics, 2018a)(Climate Analytics, 2019b).

ETP B2DS 시나리오는 IPCC SR1.5 시나리오들 중에서 1.5°C 목표 달성을 위한 전세계 발전 부문 배출경로와 매우 유사하면서도, OECD 국가들과 같은 주요 국가와 지역의 전력 시스템에 관한 데이터를 담고 있다.

지역 차원의 결과로 상세화(downscaling)를 진행하고자 할 때 IPCC 데이터베이스에 제시된 시나리오가 아닌 IEA ETP 를 사용했을 때 얻을 수 있는 한가지 이점은 바로 이 시나리오가 한국을 비 OECD 아시아 국가가 아닌 OECD 회원국으로 올바르게 인식하고 있는 유일한 시나리오라는 점이다(실제로 한국은 1996 년 OECD 에 가입했다).

B2DS 시나리오는 OECD 가 발전 부문에서 탈석탄을 완료해야하는 시점을 IPCC SR1.5 시나리오들의 중간값인 2030 년 보다 5 년 뒤인 2035 년으로 보고 있다. IEA B2DS 시나리오의 OECD 석탄 발전(CCS 미사용) 배출경로는 SR1.5 에서 평가된 1.5°C 경로의 중간값을 상회한다. 이 점을 감안하면 B2DS 시나리오의 2035 년도 탈석탄 시점은 OECD 지역 1.5°C 준수 경로 중에서는 보수적인 추정으로 보인다.

한국의 배출량과 에너지 시나리오에 대한 결론을 도출하기 위해서는 OECD 의 석탄사용 경로를 국가 차원 경로로 만들기 위한 상세화 과정을 거쳐야 한다. 이 보고서는 Climate Analytics 의 SIAMESE(Simplified Integrated Assessment Model with Energy System Emulator) 모형을 통해 OECD 해당 결과를 한국에 맞게 상세화했다. 이는 세계 및 지역 에너지 모델이 각국에 제시하는 바를 평가한 이전의 연구에서 취한 접근법과 동일한 것이다(Climate Analytics, 2016c, 2017b, 2018b, 2018a; Sferra, Schaeffer, & Torres, 2018).

SIAMESE 모형을 사용하면 지역 전체(이 경우 OECD 전체)에 대한 결과를 기반으로 한 지역 내 모든 국가에 대한 최적의 전원 믹스와 배출 경로를 결정할 수 있다. 이러한 과정에 적용되는 후생극대화 원칙은 배출량 감소를 통해 궁극적으로 해당 지역의 총 배출량 감축을 보장한다. 상세화 방법론과 모형의 가정에 대한 자세한 내용은 <부록 I - SIAMESE 모형>에 기술하였다.

지역 감축률을 한 국가의 과거 자료에 적용해 보는 등 기타 상세화 기법보다 SIAMESE 모형을 활용하는 것은 두가지 점에서 장점이 있다. 첫째, SIAMESE 모형은 B2DS 시나리오의 원천인 IEA ETP 모형과 같은 에너지-경제 연계 모형의 구조를 모방하고, 역내 국가들의 실제 에너지 소비량, 에너지 믹스의 구성, GDP, 인구 정보 등을 모두 고려하여, 온난화 완화 노력을 다수 국가와 부문에서 분담하도록 한다. 둘째, SIAMESE 모형은 국가별로 시행 중인 (재생에너지 보급 목표와 같은) 정책과 (탈원전 시기 등) 예상 에너지 트렌드를 고려할 수 있어 국가 정책 논의에 보다 적합한 연구 결과를 도출한다.

일례로 이 보고서에서는 한국의 정책 논의에 부합하는 보다 견고한 결과를 제시하기 위해 특정 전원에 대한 할당량이 정부 설정 목표치를 넘어가는 경우가 없도록 모형을 조정했다. 예를 들면 원자력과 LNG 전력 발전은 각각 2030년 23.9%와 18.8%의 에너지 믹스 비중을 차지하도록 제한했으며 이는 정부가 발표한 BPE8 상의 목표치에 부합한다. 또한, 정부가 선언한 목표에 발 맞추기 위해 탈원전이 점진적으로 일어나 현재 건설 중인 원전 외에는 추가 신설이 발생하지 않는다 가정했다. 2020년대 초로 폐지시점이 계획되어 있는 원전의 기대수명을 참작하여 원전의 수명을 40년으로 가정했다.

정부의 2030 원자력과 가스발전 목표치는 이러한 발전 기술의 보급 확대에 관한 정치·경제적 현실을 반영하고 있다. 가스 발전소가 단기간에 크게 증가할 경우 좌초자산의 위험이 상당 수준 가중될 것이다. 장기간 지속적으로 가스 발전을 하면서 발생하는 온실가스 배출량은 파리협정이 요구하는 감축 목표 달성을 어렵게 할 것이기 때문이다. 추가 원전 신설을 통해 원전 용량을 늘리는 것 역시 비현실적이다. 한국 국민의 대다수가 원자력에 대한 의존도를 줄여나가기로 기대하고(Lim, 2019), 정부도 진행 중인 발전소 건설 공사가 끝나면 서서히 탈원전을 추진하기로 약속했기 때문이다.

IEA B2DS 시나리오가 연구 결과를 조정하기 위해 사용한 최신의 실적 데이터가 2014년도 정보인 점을 감안하면, 파리협정을 준수하는 석탄발전 배출 경로를 도출하기 위해서는 최근 배출 추세를 정확하게 반영하기 위한 2단계 접근 방식이 요구된다.

- 첫째, 이 보고서는 SIAMESE 모형을 통해 OECD 지역의 에너지 믹스에 상세화 기법을 적용하여 한국의 실정에 맞는 에너지 믹스를 제시한다. 한국전력이 공식 발표한 발전량 데이터 중 2014년까지의 데이터를 기반으로 해당 모형을 조정하였는데, 이는 B2DS 시나리오가 최종적으로 고려한 실적 데이터가 2014년⁷이기 때문이다. 한국 정부가 발표한 배출량 데이터를 사용해 계산한 배출계수에 기반하여, 파리협정을 준수하면서 해당 에너지 믹스에 맞는 배출 경로를⁸ 도출하고, 석탄화력발전의 배출 예산(2014~2050년 배출량 총합)을 계산했다.
- 둘째, 2015년부터 2018년까지 한국의 석탄 발전량은 한국이 파리협정 달성에 적합한 경로를 2014년(B2DS 시나리오 경로에서 다룬 마지막 해)부터 밟았다고 상정한 경우를 상회한다. 우리는 배출 경로를 조정하여 원래의 배출 경로(2014년부터)를 기반으로 산출된 총 배출 예산을 초과하지 않도록 했다. 2014년에서 2018년까지 원 배출 경로를 초과한 배출량을 상쇄하려면 한국은 2018년부터 석탄화력발전에서의 배출량 감축을 가속화해야 하고 2029년에 이르러서는 완전한 감축을 이루어야 할 것이다. 이는 OECD 지역에서 IPCC 시나리오 중 1.5°C 로의 제한 경로에서 OECD 지역에 제한한 탈석탄 경로의 중간값보다도 더 이른 시기에 해당한다.

⁷ 본 보고서는 한국전력이 보고한 자가발전이 2014년 에너지 믹스에서 차지하는 부분이 IEA World Energy Balance 에 기록된 자가 소비용 전력 생산자가 발전한 전력의 양과 비례한다고 가정한다. 한국전력 통계에 보고된 “집단”의 발전량을 연료에 따라 분배하기도 했다.

⁸ IEA 및 SIAMESE 모형은 2014년을 시작점으로 삼고 2025년과 2030년에 대한 결과를 제공한다. 시작점과 이들 데이터 포인트 사이의 값은 선형 보간 처리했다.

SIAMESE 모델을 통해 도출한 파리협정을 준수하는 배출 경로는 한국의 석탄화력 부문 배출량이 향후 몇년간 가파르게 줄어들어 2025년까지 2017년 수준에서 58%를 감축하고 2029년까지는 탈석탄해야함을 시사한다.⁹ 다음 장에서는 현행 정책하에서 석탄화력 부문의 배출 전망과 파리협정 기준을 만족하는 배출 경로의 배출량을 비교한다.

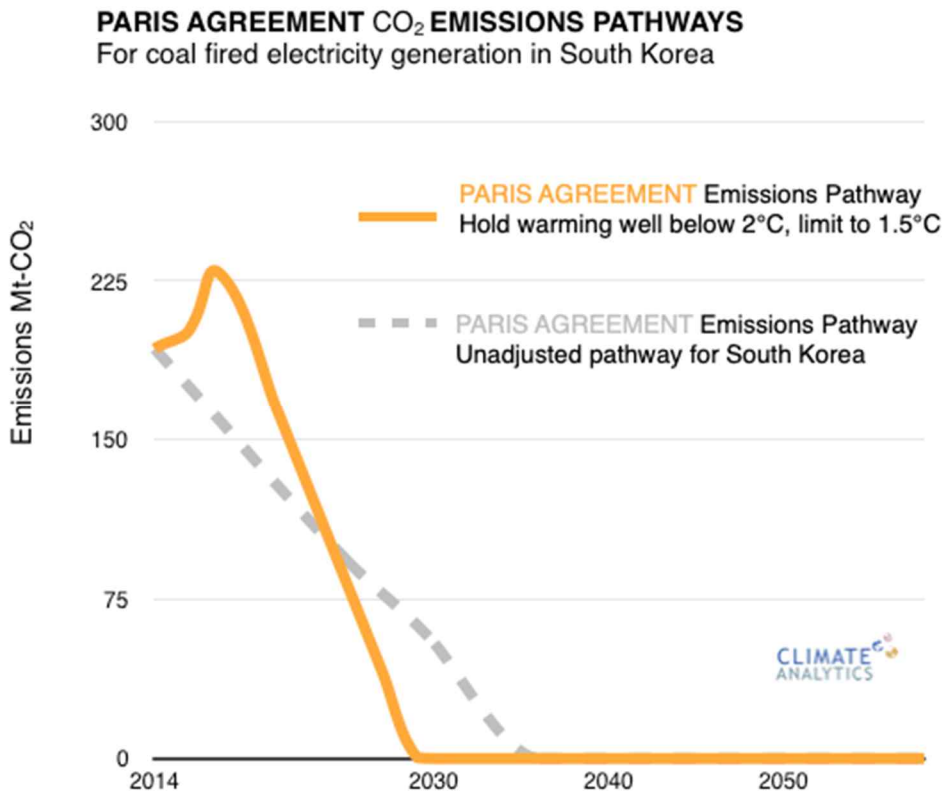


그림 4— 파리협정 준수를 위한 한국의 석탄발전 배출 경로. 조정되기 전 (unadjusted)한국의 파리협정 부합 경로는 IEA ETP B2DS의 OECD 부문 결과를 SIAMESE 모델을 사용하여 한국의 실정에 맞게 상세화한 결과물이다. 조정된(adjusted) 배출 경로는 동일한 탄소예산을 유지하면서 2018년까지의 배출량 실적 데이터를 반영한 결과이다.

석탄화력발전소의 배출량 격차

한국은 파리협정에 따른 장기 온도상승 제한과 탄소제로 사회 건설이라는 자체적인 목표와 상반되게 아직도 추후 4년간 총 용량 7.27 GW에 달하는 신규 석탄발전설비 7기의 가동을 계획하고 있다. 2025년까지 총 용량 5.24 GW 상당의 석탄발전소 11기가 폐쇄 또는 연료전환될 예정이므로, 이는 총 가동 용량 기준 약 1 GW가 증가할 것임을 의미한다. 신규 발전소 계획과 기존에 가동 중인 시설의

⁹ 본 보고서에서 2010년도 수준의 90% 이하로 떨어졌을 때 석탄화력발전소가 퇴출되었다("Coal Phase-out")고 가정하므로, 2029년 시점에 석탄화력 부문 배출량은 14 MtCO₂이 남아 있게 된다.

연식을 고려하면, 모든 발전소가 설계 수명인 30 년 동안 가동될 경우 석탄은 앞으로 수십년 간 전원 믹스의 일부로 유지되며 2055 년이 되어서야 탈석탄이 이루어질 것이다.

이 보고서에서는 기존 및 계획된 석탄 발전 인프라, 국가 목표치, 그리고 파리협정을 준수하는 배출 경로 간의 배출량 격차를 평가하기 위해 한국의 기존 및 계획된 석탄발전소에서의 배출량을 계산한다. 미래 배출량을 추정하기 위한 주요 가정은 발전소 수명과 사용률 계수인데, 이는 미래 불확실성이 매우 높은 영역이다.

정해진 폐쇄 일자가 없는 발전소에 대해서는 임기 중 30 년 이상된 발전소를 모두 폐쇄하는 것을 목표로 한다는 문재인 대통령의 발표와 폐쇄 및 전환 년도가 정해진 발전소의 평균 폐쇄 수명을 고려하여 30 년의 수명을 가정하였다. 이러한 발전소 수명에 대한 가정은 전세계 평균인 40 년과 과거 한국의 석탄발전소 실제 폐쇄 수명인 38 년 보다 낮다는 것에 주목할 필요가 있다. 이는 이 보고서의 누적 배출량 산정이 보수적인 수준이며, 가동 30 년이 지난 후 발전소가 폐쇄되지 않을 경우 실제 배출량은 더 많을 수 있다는 것을 의미한다.

본 연구는 81%를 평균 이용률 계수로 가정하였으며, 이는 발전설비 단위별 발전량 수치 통계에 기초한 2017 년 평균 이용률 계수와 일치한다. 마지막으로, 원단위 배출량은 연소 기술과 석탄 종류에 따른 표준 보고 값을 기반으로 산정하며, 여기에는 불확실성이 매우 낮다. 본 보고서에 포함된 것 이외에 석탄발전 설비의 추가 계획은 없다고 가정한다.

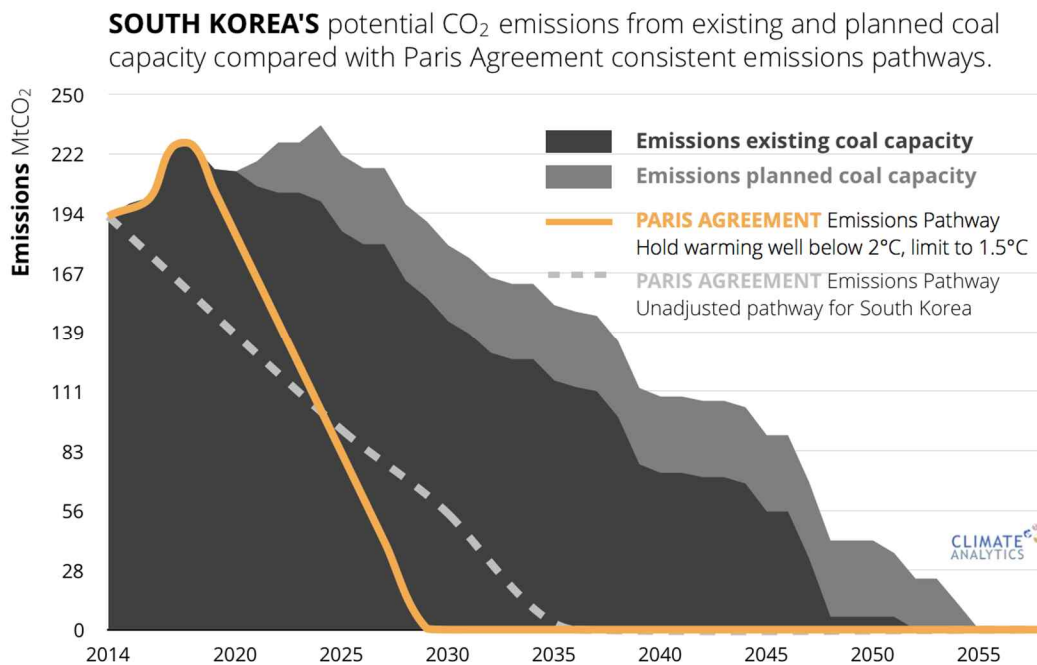


그림 5 - 한국의 석탄발전소 배출량 경로. 배출량은 제안된 폐쇄 수명(30 년)과 과거 사용률(평균 81%), 그리고 연소 기술과 석탄 종류에 따라 보고된 원단위 배출량에 기반하여 계산됨. 파리협정을 준수하는 한국의 배출 경로는 IEA ETP B2D 시나리오의 OECD 결과를 SIAMESE 모형을 이용하여 상세화하고 2018 년까지의 과거 데이터를 고려한 결과물임.

분석 방법론은 <부록 II - 석탄화력발전소의 이산화탄소 배출량 추정>에 상세히 기술하였다.

본 연구의 산정에 따르면, 다른 정책이 추가되지 않을 경우, 석탄과 관련된 전력 부문 이산화탄소 배출은 단기적으로는 증가할 것으로 전망된다. 이는 신규 발전소가 공급 라인에 추가되기 때문이며, 배출은 2025 년에 최대치에 이른 후, 석탄 발전 시설의 노후화와 계획에 따른 폐쇄, 그리고 연료 전환이 이루어지면서 추후 몇십년 간은 지속적으로 감소할 것으로 예상된다. 그러나 석탄발전소의 폐쇄 일정을 현 계획대로 유지한다면 현재 가동 중인 한국의 석탄발전소는 파리협정에 부합하는 전력 부문 탄소예산 중 석탄에 배정된 예산의 2.5 배에(247%) 달하는 양을 배출하게 된다. 이는 그림 5 의 상세화된 배출량 경로에 기반한 누적 배출량을 계산하여 추정한 것이다. 나아가 계획대로 신규 석탄발전소가 추가된다면 확정된 배출량과 파리협정에 부합하는 배출경로의 차이는 317%에 이를 것이다. 석탄발전소의 수명이 본 보고서의 가정치를 초과하여 연장될 경우 탄소 예산과의 격차는 더욱 큰 폭으로 커질 것이다.

본 연구의 결과에 따르면, 파리협정의 장기 온도 목표를 달성하기 위해서는 **한국이 가동 중인 발전소를 현재의 계획 수명(30 년)보다 훨씬 더 조기에 폐쇄해야 하거나 이들 발전소의 이용률을 현격하게 줄여야 할 것이다.** 신규 석탄발전소가 추가될 때마다 한국의 배출량과 파리협정 경로간의 격차는 더욱더 커질 것이다. 전력 부문의 배출량 감축이 시급하다는 것을 고려할 때, 명확한 정책 신호와 체계적인 탈석탄화 계획이 필요하다.

전세계와 한국이 현재 계획대로 석탄 사용을 지속할수록 위험한 수준의 기후변화를 막기 위한 파리협정의 장기 온도 목표 달성을 위한 비용은 높아지고, 목표 달성의 가능성은 낮아지게 될 것이다.

국가 목표의 타당성

에너지와 전력 목표

에너지 및 전력에 대한 한국의 주요 정책지침은 2017 년 발표된 8 차 전력수급기본계획(BPE8)과 2040 년까지의 계획을 담은 2019 년의 제 3 차 에너지기본계획(EMP3)이다(MOTIE, 2017, 2019a, 2019c). BPE8 에서 한국은 석탄발전설비를 더 이상 추가하지 않고 석탄발전량을 점차 줄이기로 확정하였다. 그러나 이들 계획에서의 2030 년 전원믹스 목표는 원자력 23.9%, 석탄 36.1%, 천연가스 18.8%, 재생에너지 20%의 구성으로, 여전히 석탄발전이 주요한 역할을 유지할 것으로 전망하고 있다.

PRESENT AND FUTURE ELECTRICITY MIX 2018 MIX VS CURRENT 2030 NATIONAL TARGETS

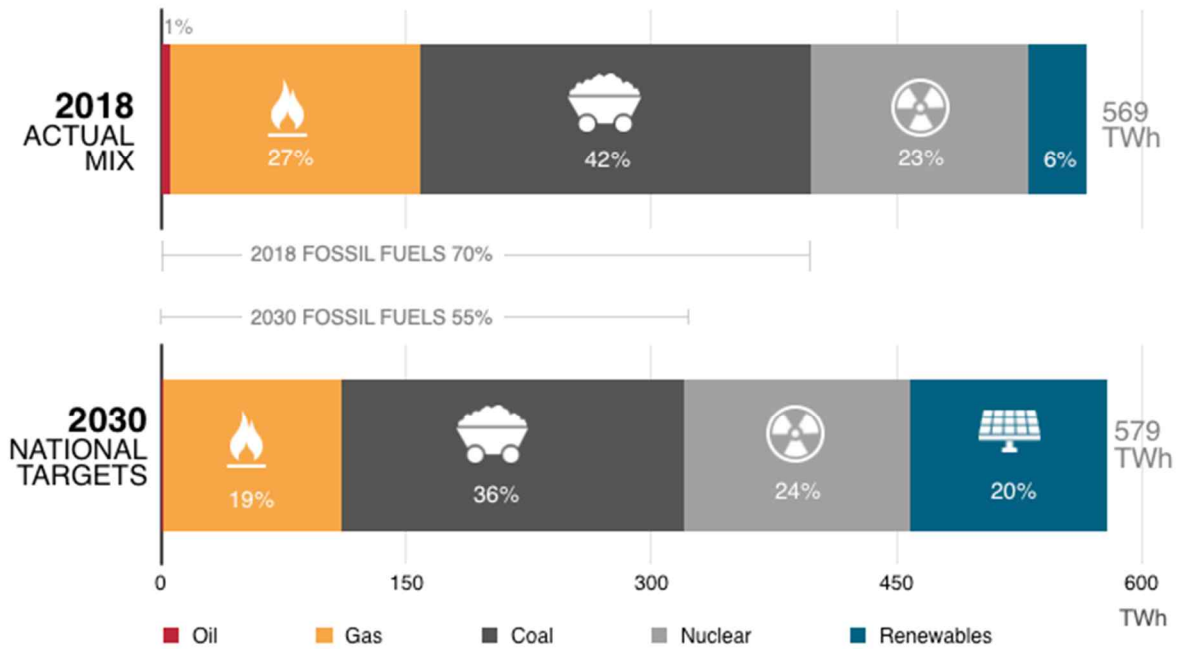


그림 6 - 2018 년 및 2030 년 목표 에너지원별 발전 비중. 출처: 한국전력공사 2019 년 통계 및 BPE8 에 기초하여 직접 작성.

또한 EMP3 는 재생에너지 비중을 2017 년 3%에서 2040 년까지 30-35%로 늘리는 것을 목표로 하고 있지만, 다른 발전원에 대해서는 같은 시점에 별다른 목표를 제시하지 않고 있다. EMP3 는 발전 부문의 탈석탄화에 관한 별다른 계획을 제시하지 않고 있으며, 7 기의 신규 석탄화력발전소 건설 계획이 진행될 것을 전제하고 있다. 그러나 이는 수십 년간의 탄소잠김(locked-in emissions) 효과와 좌초자산(stranded assets) 위험 증가를 초래할 것이다.

표 1 - 각 시나리오에 따른 한국의 에너지원별 2030년 전원 믹스

전원 믹스에서의 에너지원별 비율*				
발전원	2018	2030		
	실제 비중	8차 전력수급 기본계획 (BPE8)	아시아-태평양 에너지연구센터(APE RC) 2019 에너지 전망-현 정책 시나리오	파리협정에 따른 SIAMESE 전원 믹스 ¹⁰
원자력	23%	24%	24%	24%
재생가능 발전원**	6%	20%	7%	48%
석탄	42%	36%	38%	0%
탄소포집저장(CCS) 적용	N/A	N/A	0%	7.6%
석유	>1%	>1%	>1%	1%
가스	27%	19%	30%	19%
탄소포집저장(CCS) 적용	N/A	N/A	0%	0.3%

* 반올림으로 인해 전체 숫자의 합이 100%가 아닐 수 있음; **바이오에너지 포함.

한국의 감축목표치와 현행 정책을 파리협정에 부합하는 배출경로와 비교하면, 한국의 2030년 목표가 기온상승을 1.5°C로 제한하기 위한 전략에 부합하지 않는다는 사실이 명백하다. 이는 한국의 현행 정책이 2030년이 훨씬 지난 이후에도 석탄 발전을 허용하고 있을 뿐만 아니라, 재생에너지 목표치를 매우 보수적으로 설정하고 있기 때문이다.

이 연구에 사용된 모형에 따르면 원자력 에너지의 비중이 증가하고 (1%) 탄소포집저장(CCS) 기술을 적용한 화석연료의 역할도 존재할 것이라고 보고 있으나 (7.9%) 이와 같은 선택지는 재생에너지의 비중을 늘리는 것이 비해 실현가능성이 낮을 것으로 판단된다. 재생에너지와 에너지 저장 기술의 비용은 낮아지는 반면, 원자력 에너지와 탄소포집저장(CCS)의 비용은 낮아지지 않았기 때문이다. 게다가, 탄소포집이 불완전하게 이루어질 경우 대기 중 이산화탄소를 추가로 제거함으로써 이를 보상해야 할 수 있으며, 이 경우 더 많은 비용이 소요될 수 있기 때문이다(아래 Box 2 참조).

상세화 기법을 이용해 도출한 2030년 전체 발전량은 645.6 TWh로 BPE8 상의 기준수요 전망(667 TWh)과 목표수요 (579.5 TWh) 사이에 있다는 점에 주목해야 한다. 전체 발전량은 본 연구에 사용된 에너지 모형에 내재되어 있는 변수로, UN 인구 전망(2014년부터 0.25%로 증가하다가 2035년 이후 감소)과 IPCC 데이터베이스의 공통사회경제경로(SSP2)와 일치하는 GDP 성장률(2014년부터 2040년 사이 연평균 2.9%)을 반영해 가정한 1인당 GDP 성장률에 의해 결정된다. 실제 전력 수요가 더 낮은 인구성장(2031년까지 0.1%로 증가하다가 이후 감소)과 경제성장(2017~2040년 사이 연간 2%) 가정을

¹⁰ 2014-2018 기간 동안의 배출량을 산입한 결과 탈석탄 연도가 2029년으로 당겨진 점을 반영하기 위해 SIAMESE 모형 실행 시 2030년 탄소저감 미적용 석탄발전의 비중을 0으로 제약하고 전원 믹스를 산정하였음.

사용한 정부 시나리오에 근접할 경우, 재생에너지 비중을 늘리는 것이 상대적으로 더 쉬워지며, BPE8 대비 원자력과 가스의 비중 증가는 불필요해질 가능성이 크다.

위와 같은 두 가지 중요한 단서에 비추어 분석 결과를 살펴보면, 한국은 2030년 50% 이상의 재생에너지 비중을 목표로 삼아야 한다. 2050년에 재생에너지 발전 비중을 100%까지 높일 수 있다는 연구를 비롯해 한국이 높은 재생에너지 비중을 달성할 수 있다는 점을 부각하는 다수의 연구가 발표된 바 있다(Jacobson et al., 2017; Teske, Meinshausen, & Dooley, 2019). 이는 발전 부문의 국가 결정 목표치와 한국의 실제 능력 간에 큰 간극이 있음을 보여준다.

한국은 2030년 국가 전력 목표치를 시급히 수정하여 정부가 우선 과제로 명시한 기후변화 대응, 대기오염 억제, 에너지 자립 등 여러 정책적 목표와 전력 목표 간의 정합성을 하루빨리 개선해야 한다. 에너지 전환 이행에 핵심적인 역할을 담당하는 발전사, 투자자 및 소비자에게 올바른 신호를 보내기 위해서는 국가 목표치 조정이라는 첫걸음을 떼야 한다.

APEC Energy Demand and Supply Outlook (APERC, 2013)이 제시한 바와 같이, 아시아태평양 에너지연구센터(APERC)가 현 정책을 기준으로 추정한 전망치에 의하면, 한국은 BPE8에서 제시한 전원 믹스라는 불충분한 국가 목표치에 근접하지도 못하고 있으며, 특히 재생에너지 분야의 성적이 심각하게 저조하다. 스스로 설정한 국가 목표치 달성에 대한 신뢰도를 높이고 정책과 투자 간의 일관성을 높이려면 전원 믹스에서 석탄을 빠르게 퇴출할 수 있는 정책을 조속히 시행하고 발전 부문에 대한 저탄소 및 탄소 중립 기술 적용을 서둘러야 한다.

Climate Analytics의 시나리오 분석 결과에 의하면, 2030년 이후에는 석탄과 마찬가지로 탄소저감 없는 화석연료(탄소포집저장 기술을 적용하지 않은 석유와 가스 발전 등)를 한국 전원 믹스에서 급속하게 퇴출해야 하며, 재생에너지원의 비중은 2018년 전체 발전의 6%에서 2040년까지 절반 이상으로 빠르게 늘어나야 한다. 이러한 분석 결과는 탈석탄 사회로 이행하는 과정에서 한국이 인식하고 있는 가스의 역할에 관하여 의문을 제기한다(예컨대, 상당수 석탄화력발전소는 LNG로 연료전환을 추진하고 있다). 파리협정에 부합하는 감축 경로에 따르면 “가교 연료”(bridge fuel)로서 가스의 역할은 극히 제한적이어서, 저감장치를 갖추지 않은 가스는 2030년 이후 서서히 감소하다가 2050년까지 5% 미만으로 감소해야 한다. 그러나 한국 정부는 에너지 믹스에서 가스가 ‘앞으로 더 큰 역할’을 해야한다고 인식하고 있는 것으로 보인다(MOTIE, 2019c). 가스 인프라의 과도한 확대는 좌초자산의 위험을 증폭시키고, 청정 에너지원으로 집중되어야 할 자금흐름을 분산시킬 위험이 있다. 대신 한국 정부는 수소 경제 전략(IPHE, 2019)을 강화하여 재생에너지 활용 잠재력이 높은 국가로부터 청정 수소를 확보하는 것에 집중하고 그로 인한 비용 절감의 효과를 누리는 방안을 고려할 수 있을 것이다(IRENA, 2019).

Box 2 – 탄소 포집 및 저장(Carbon Capture and Storage, CCS) 기술

IPCC SR1.5 가 제시한 배출 경로를 산정하기 위해 사용한 에너지 모형은 여러 배출 감축 기술을 활용한다. 이러한 기술 중에서도 발전소의 탄소 포집 및 저장 (CCS) 기술은 대부분의 모델에 포함되어 있다. B2DS 시나리오를 도출한 국제에너지기구(IEA)의 에너지기술전망(ETP) 모형은 석탄, 가스, 바이오매스 발전소에 대한 CCS 기술 적용을 전제하며, 한국에 대해 상세화 기법(downscaling)을 적용한 경로 또한 CCS 적용을 전제하고 있다.

이 보고서의 핵심 분석 지표는 현재 가동 중이거나 건설 계획에 있는 석탄화력발전소의 예정된 배출량과 파리협정에 따른 석탄발전 배출 경로를 비교하는 것이다. 이와 같은 지표 산정과 정책 권고안 도출을 위해 이 연구에서는 CCS 기술을 사용하지 않은 석탄발전에 중점을 둔다. CCS 를 사용한 석탄발전을 주요 분석에 포함하지 않은 이유는 다음과 같다.

- ETP 모형을 비롯한 에너지 모형에서는 대부분 CCS 설비를 갖춘 화석연료 화력발전소가 이산화탄소를 전혀 배출하지 않거나 소량만 배출하는 것으로 가정한다. 그러나 실제로는 CCS 설비를 갖춘 발전소라도 CCS 설비가 없는 발전소의 평균 배출량 대비 10% 이상을 배출한다(World Nuclear Association, 2018) (Wuppertal Institute for Climate Environment and Energy, 2008)(MIT, 2016). 따라서 CCS 를 발전 부문의 탄소 제로 대안(zero carbon alternative)으로 보기 어렵다.
- CCS 기술은 전 세계에서 몇 개 시범 사업이 진행되고 있지만 발전 효율 감소와 고비용이라는 한계로 인해 화석연료 화력발전소에 광범위하게 적용될 가능성은 낮다. 게다가 탄소 제로 대안들의 비용은 급격히 떨어지고 있다. 지금까지 진행된 화력발전소 CCS 적용 시범 사업의 경제적 및 기술적 성과 역시 이러한 평가를 뒷받침한다.
- CCS 기술을 범국가적 차원에서 대규모로 적용하는 데에는 물리적, 지질학적 제약이 존재하며, 본 연구가 사용한 상세화 기법에는 이러한 제약이 반영되지 않는다. 전 세계 화석연료 화력발전소 중 일부는 CCS 기술 채택이 가능할 수도 있지만, 적용 여부는 개별 사례에 따라 비용, 사회 수용성, 지질공학적 제약 등 제반 환경을 고려하여 결정되어야 한다.

한국의 경우, 만일 CCS 기술 채용이 실현 가능하고 적절하다고 평가되는 경우라도 온실가스 배출 산정(emissions accounting perspective)과 지질학적 제약의 관점에서는 화석연료 화력발전소보다는 바이오매스(biomass) 발전소에 적용될 가능성이 훨씬 더 높다. 따라서 CCS 를 사용한 석탄과 가스의 파리협정 경로 분석 결과는 매우 신중히 해석할 필요가 있다. 화석연료 화력발전소에 대한 CCS 적용이 제한적이라는 현실적인 시나리오를 가정할 경우, 이 모형이 가정하는 CCS 적용 화석연료 발전 비중은 재생 에너지를 이용한 탄소 제로 발전으로 대체되어야 한다.

기후 목표

한국이 파리협정에 따라 제출한 국가결정기여(Nationally Determined Contribution 또는 NDC)는 2030년까지 BAU 수준의 37%로 온실가스(GHG) 배출을 줄이는 것이다. 한국의 NDC는 경제 전반에서 배출되는 모든 종류의 온실가스에 대한 목표치이며, 한국은 국내 배출량 감축과 국제 시장 메커니즘을 통한 탄소 크레딧을 통해 이를 달성할 예정이다(Republic of Korea, 2015). 2018년 7월 한국 정부는 탄소배출량이 2020년 전후로 정점에 도달하며 2030년 국내 감축량은 기존의 NDC인 25.7%보다 더 높은 32.5%로 한다는 내용의 개선된 배출 목표치를 발표하였다(ICAP, 2018; Ministry of Environment, 2018).

Climate Action Tracker에 독립적인 평가에 의하면 한국의 NDC는 2030년까지 2010년 배출량 기준 20% 감축에 해당한다 (토지이용 및 토지용도 변경과 산림(LULUCF) 분야는 제외¹¹)(Climate Action Tracker, 2019a). Climate Action Tracker는 이러한 목표가 파리협정의 목표 달성에 필요한 감축 수준과 비교해 '매우 불충분(highly insufficient)'하다고 평가한다.

국내 감축량 목표 향상은 바람직한 조치이며, 한국 정부가 더 강력한 기후 행동을 취할 의지가 있음을 보여주는 긍정적 신호이다. 그러나 현재 시행되고 있는 정책과 지속적으로 높은 석탄의존도를 예정하고 있는 전력믹스에 대한 최신 계획에 따를 때 정부의 감축 목표 달성이 요원한 상황이다(APERC, 2019).

한국은 파리협정에 따라 2020년까지 NDC를 향상하고 장기 전략을 마련해야 한다. 여기에 더해 올해 안에 석탄발전 감축을 위한 로드맵 개발이 예정되어 있음을 고려하면, 2020년 한국은 파리협정 1.5°C 목표에 부합하는 탈석탄화 로드맵 개발과 NDC 목표 개선, 경제 전반에 대한 장기 전략 수립을 위한 중요한 시기적 기회이다.

결론과 정책 권고안

한국 정부는 대기질 향상을 위한 탈석탄사회로의 전환, 전 지구적 기후위기 대응을 위한 온실가스 감축 방안 및 목표 강화, 포용적이고 공정한 환경정책 수립을 정책적 우선순위로 내세우고 있다. 파리협정은 한국의 석탄발전소에 적용할 명백한 경로를 제시하고 있으며, 이를 따른다면 이러한 정책 목표를 동시에 달성할 수 있다.

한국 정부는 체계적인 탈석탄화를 위한 국가 계획을 빠른 시일 내에 수립해야 한다. 이 계획에는 본 보고서가 제시하는 파리협정 준수 경로에 따라 신규 석탄화력발전소 7기의 건설 백지화 또는 연료 전환과 2029년까지 현재 운영 중인 석탄화력발전소의 단계적 폐쇄 방안이 고려되어야 한다.

이러한 계획은 이해당사자에게 확실성을 제공하여 탈석탄사회로의 이행을 용이하게 한다. 투자자에게 재생에너지 발전에 대한 긍정적 신호를 주어 재생에너지 발전 비중을 국가 목표보다 높이고 석탄발전을

¹¹ 국가결정기여(NDC)에 의하면, 토지이용 및 토지용도 변경과 산림(LULUCF) 분야의 포함 여부와 이와 관련한 산정 규칙은 “이후 단계”에서 결정될 예정이다. 이 분야의 산정 방식에 대한 상세한 내용이 바뀌게 되면 2030년 목표배출량 추정치도 바뀔 수 있다.

대체하도록 하며, 지속가능하지 않은 자산과 화석연료 관련 인프라(건설 예정인 석탄화력발전소, LNG 터미널, 가스발전소 등)에 대한 지속적인 투자 흐름을 막는 데 도움을 줄 것이다. 또한 한국이 탄소 집약적 경로(carbon intensive pathway)에 갇히지 않고 좌초자산의 위험을 낮추면서도 국가 감축 목표 달성을 위한 비용과 복잡성을 줄이게 해준다. 한국의 장기전략은 2050년까지 발전 부문의 완전한 탈탄소 달성을 목표로 해야 하며, 이는 전기화가 중추적 역할을 하는 모든 분야의 배출량 감축을 위한 초석이 될 것이다. 한국은 그린 수소(green hydrogen)에 집중함으로써 수소 경제를 활성화하겠다는 목표를 강화할 수 있다.

석탄발전은 기후변화 문제를 악화시킬 뿐 아니라 대기 및 수질 오염 등 여러 가지 부정적 효과를 초래한다. 이러한 사실은 심각한 대기 오염을 겪고 있는 한국에 특히 중요하다. 신속한 탈석탄은 파리협정 부합 배출경로에 가장 비용-효율적으로 도달할 수 있는 핵심적인 요소일 뿐 아니라 보건상의 공편익(co-benefits)을 증가시키고 재생에너지 분야 투자 증대와 에너지 수입의존도 감소에 의한 일자리를 창출하는 등 다양한 이득과 기회를 가져올 것이다. 또한, 체계적인 탈석탄 계획의 이행은 재생에너지 분야 투자 확대를 통해 화석연료 산업을 대체하는 등 충분한 일자리를 창출하는 정의로운 전환을 위한 토대가 될 수 있다.

탈석탄 사회로의 전환을 위한 국내적 계획 수립 및 시행에 더해 한국은 해외 석탄 사업의 주요 투자국이자 주요 석탄수입국으로서 석탄과 관련된 국제 전략을 재고해야 한다. 다른 국가의 석탄 의존성 확대에 일조하는 것이 아니라, 재생에너지를 중심으로 한 탈탄소화와 파리협정 목표 달성을 위한 전 지구적 에너지 전환 촉진에 기여하는 방향으로 국제 협력과 투자를 집중시켜야 한다.

한국과 전 세계가 석탄발전을 지속할수록 파리협정의 장기 온도 목표 달성의 비용이 높아지고, 가능성은 낮아질 것이다. 한국과 전 세계가 석탄을 포함한 화석연료를 에너지 체계에서 신속하게 줄여나가지 못한다면 과학적 연구를 통해 예견되고 있는 1.5°C 이상의 기온 상승이 가져올 전례 없는 환경적, 사회적, 경제적 피해가 현실화될 가능성이 현저히 커진다.

행동을 위한 기회

- 2020 년은 더욱 과감한 감축 목표 설정에 매우 중요한 해이다. 각국 정부는 더욱 야심찬 2030 년 목표를 포함하여 NDC 개선안을 제출해야 하고, 파리협정의 장기 온도 상승 목표를 달성하기 위한 공동노력의 기반이 될 장기저탄소발전전략(LT-LEDS)을 마련해야 한다. 기존의 에너지 및 전력 수급 계획을 따른다면, 한국의 전원 믹스는 앞으로도 화석연료 화력발전소에 크게 의존할 것이고, 이는 파리협정 준수 경로에 부합하지 않는다. 2020 년에는 국가 목표의 수정과 개선이 대폭 이뤄져야 하며, 발전 부문뿐만 아니라 전기화가 중요한 최종사용 분야(end-use sector)의 완전한 탈탄소화 달성을 위한 장기저탄소발전전략(LT-LEDS)을 수립해야 한다. 한국은 그린

수소(green hydrogen)를 중심으로 한 수소 경제 활성화 방안을 마련하여 해당 분야의 입지를 강화할 수 있다.

- 기후변화 대응-그리고 그에 따른 대폭적인 대기질 향상-은 2020년 4월에 예정된 총선 기간 주요 관심사가 될 가능성이 높다. 기후 변화 문제의 시급성을 고려할 때 선거 기간 동안 기후변화 대응을 위한 과감한 조치가 제안된다면 유의미한 정치적 논의를 촉발할 수 있을 것이다. 정부는 미세먼지 배출 감소를 위해 발전 부문의 석탄발전 감축을 포함한 일련의 정책 방안을 2020년 상반기에 내놓을 예정이며 이는 정치적 논의 활성화를 위한 첫 단추가 될 수 있을 것이다. 이 방안에서 각 석탄화력발전소의 폐쇄 일정을 설정하는 것이 가장 이상적이며, 이를 통해 건강 및 기후에 대한 영향 평가와 기존 발전설비 대체를 위한 투자 지원방안을 검토한다면, 깨끗하고 안정적인 전력 확보가 가능할 것이다.
- 한국 석탄화력발전소의 절반 정도가 위치한 충청남도는 2017년 한국뿐 아니라 동아시아 지역에서 최초로 탈석탄동맹(Powering Past Coal Alliance)에 가입하였다. 유엔기후변화협약 당사국총회(COP26) 이전에 한국 정부가 국제적 리더십을 발휘하여 탈석탄동맹에 지자체의 과감한 리더십에 지지를 보내면서 기후 정책 시행에 박차를 가하겠다는 강력한 신호를 국내외에 보낼 수 있을 것이다. 또한, 탈석탄화 이행 전략과 주요 관련 이슈 - 전환 방안과 과정, 파리협정에 부합하는 투자와 자금 흐름, 재생에너지 비중 확대를 위한 모범 사례 - 에 대한 교류와 지식공유의 장에도 참여할 수 있게 될 것이다.
- 최근 한국 정부는 신남방정책을 추진하며 아세안 국가들과의 협력 강화를 위해 상당한 노력을 기울였다. 한국은 신남방정책을 통해 아세안 국가의 기반시설 확충과 경제발전 지원을 약속하고 있다. 그러나 다른 한편으로는 인도네시아와 베트남의 석탄화력발전소를 비롯한 동남아시아 지역의 탄소 집약적 사업에 투자하고 있으며, 이는 파리협정과 지속가능개발목표(SDGs)에 반한다. 해외의 탄소 집약적 사업에 대한 투자는 다른 국가들의 화석연료 의존도를 높이고, 국내 및 국제적 기후 목표 달성의 걸림돌이 되며, 한국과 투자대상국의 좌초자산 위험을 높인다. 신남방정책을 포함한 한국의 아시아태평양지역 협력 정책은 국제 공조를 위한 노력과 자금 흐름의 방향을 재조정함으로써 세계적 에너지 전환을 가속화하고 파트너 국가의 지속 가능한 발전과 파리협정 목표 달성을 촉진할 수 있는 기회가 될 수 있다.

부록 I – SIAMESE 모형

에너지 시스템 에뮬레이터를 사용한 단순통합평가모형(Simplified Integrated Assessment Model with Energy System Emulator, SIAMESE)은 전지구적 온도 목표에 부합하는 비용-효과적인 시나리오를 생산하여 특정 통합평가모형(IAM)의 에너지 체계상 특성을 국가 수준으로 상세화(downscale)할 수 있게 해준다. 또한 에너지 트렌드 예측(원자력 발전 제한 등)과 특정 정책도 국가별로 고려할 수 있다. 이에 따라 시행 중인 정책과 파리협정의 장기목표에 부합하는 약속에 대한 현실적 개선 방안을 고심하는 정책입안자에게 통찰력을 제공할 수 있다.

이 연구는 국제에너지기구(IEA) 에너지기술전망(ETP) 모형의 OECD 전력생산 결과를 한국에 상세화한다. 2014 년도를 기준 년도로 설정하고, 2014 년의 실제 관측된(observed) 발전량, GDP, 인구 데이터에 기반해 모형 조정(calibration)을 수행하였다. 이러한 조정 과정에서 특정 에너지 믹스 구성에 대한 선호도가 생긴다고 볼 수 있다. 엄밀히 말하자면, SIAMESE 는 복리 최대화를 위한 에너지의 한계효용 균등화를 통해 발전량을 할당한다. 에너지 가격은 내생변수로 취급하며¹², 에너지의 한계효용과 일치한다.

모형의 기반이 되는 방정식의 경우, SIAMESE 모형은 대체탄력성이 일정한 CES 생산함수를 이용하여, 경제 생산(GDP)이 자본, 노동, 에너지 소비의 함수로 나타나는 IAM 의 구조를 모방(mimic)하도록 설계되어 있다.

이러한 SIAMESE 모형은 IEA ETP 모형이 다루는 OECD 국가의 발전 부문 상세화에 초점을 맞춘다. 온실가스의 경우, SIAMESE 는 (LULUCF 분야를 제외한) 이산화탄소 배출만을 추정하며, 다른 온실가스(메탄, 아산화질소 등)를 고려하지 않는다. 다른 온실가스 배출량은 단순 (비례) 상세화 기법이나 한계저감비용곡선 등 여러 다른 방법을 통해 상세화가 가능하다.

부록 II - 석탄화력발전소의 이산화탄소 배출량 추정

현재 가동 중이거나 건설 계획 중인 석탄화력발전소의 탄소배출량을 추정하기 위해 모든 석탄화력발전소의 위치, 설비 상태, 투자자, 설비 용량, 연소기술¹³, 연료, 가동 개시 연도, 폐쇄 예정 연도 등의 정보를 제공하는 Global Coal Plant Tracker(GCPT)의 데이터베이스를 이용하였다. 분석에 사용한 자료는 2019 년 7 월 기준의 GCPT 데이터베이스이다. 아직 개발·평가 단계에 있는 발전 설비의 상태 관련 최신 목록과 각 발전소의 배출량을 정확히 추정하기 위한 부하율과 연료 사용량 등 설비

¹² SIAMESE 모형은 IEA 가 사용한 ETP 모형의 에너지 소비 수준에 따라 각 연료별 에너지 가격을 결정한다

¹³ 해당 데이터베이스는 발전소의 연소 기술을 CCS 적용 여부와 관계 없이 효율이 낮은 순서부터 아임계, 초임계, 초초임계로 구분한다. 이 연구는 그 이상으로 CCS 기술을 적용한 석탄화력발전소를 별도로 분석하지 않는다.

특성을 반영한 자료를 활용하기 위해 2019년 12월 기준 한국전력공사(KEPCO)의 국가 데이터베이스 자료의 석탄발전소 정보와 GCPT 데이터를 결합(merge)하였다.

이 연구가 사용한 데이터에는 각 발전소별로 국가, 발전 용량, 설비 상태, 연소 기술 등 상세 정보가 포함되어 있으며, 아래 수식을 이용하여 이산화탄소 배출량을 추정하였다.

연간 배출량:

$$Emi_t = Cap_i * \frac{1}{eff_i} * lf_t * ef_i * \phi$$

Emi_t : 특정 연도 *t*에서 설비 *i*의 연간 배출량(Mt CO₂)

Cap_i : 설비 *i*의 발전 용량(MWe). MWe는 발전 설비의 전기출력 단위이다. 석탄화력발전소가 사용하는 연료에 포함된 에너지 중 (연소 기술에 따라 다르지만) 3분의 2 정도가 전기로 변환되는 과정에서 손실된다. 이 과정에서 방출되는 열에너지는 더 사용하지 않으며 냉각탑이나 하천을 통해 제거한다.

eff_i : 발전 설비의 변환 효율. 연료(석탄)에 들어있는 에너지 중 얼마만큼이 전기로 변환되는지를 나타낸다. 일반적으로 한국 석탄화력발전의 대부분을 차지하고 있는 현대식 발전소의 효율이 높게 나타난다.

lf_t : 특정 연도 *t*의 발전 설비 부하율. 부하율은 이론적으로 가능한 최대 출력 대비 실제 발전소 출력의 비율이며, 보통 연간 기준으로 계산한다. 최대 출력은 1년 365일 24시간 동안 명목 용량으로 발전소를 가동한다고 가정하여 계산한다. 예를 들어, 100MW의 용량을 갖춘 발전 설비의 최대 출력은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$100 \text{ MWe} * 10 \frac{\text{hours}}{\text{day}} * \text{ayr} \frac{\text{days}}{\text{year}} = 876.000 \text{ MWh.}$$

특정 연도의 실제 출력은 최대 출력보다 낮는데, 이는 수요 변동 등으로 인해 발전소가 항상 최대로 가동하지는 않고, 정비 시 가동을 중단해야 하기 때문이다. 한국 석탄화력발전소의 미래 이용률(utilisation rate)에 대한 불확실성이 존재하지만 본 보고서는 기준 시나리오 하에서 2017년 실제 이용률인 81%를 추정 기간 동안 적용하였다.

ef_i : 일정량의 석탄을 연소시킬 때 방출되는 이산화탄소량을 나타내는 배출 계수이다. 단위는 kg CO₂/TJ이며, 고등급 석탄은 연소 과정에서 이산화탄소로 변환되는 탄소의 비중이 높다. 이 연구에서 분석에 사용한 계수는 IPCC의 2006년 자료를 참고하였다(IPCC, 2006). 단, 해당 자료는 순수 석탄류의 배출 계수만을 포함하고 있으므로 등급이 다른 두 종류의 석탄(예를 들어, 역청탄과 아역청탄)을 사용하는 발전소에 대해서는 50 대 50의 비율을 적용하였다.

ϕ : 단위를 맞추기 위한 변환 계수이다. (Mt CO₂/yr).

발전소의 가동수명 총 배출량:

$$Lifetime\ Emission = \sum_{2017}^T Emission_t$$

여기서 T는 설비가 가동한 마지막 연도이다.

분석의 편의를 위해 발전 설비의 폐쇄 시점을 각각 연도의 12월 31일로 가정한다. T는 가동개시연도 + Lifetime으로 계산한다. 여기서 핵심적인 변수는 lifetime 이고, 아직 가동을 시작하지 않은 발전소의 경우는 가동 개시 연도(the opening year)이다. 발전소의 평균 수명은 30년으로 가정하였고, 이는 문재인 대통령이 재임 기간 내에 30년 이상 된 노후 발전소를 모두 폐쇄하겠다고 밝힌 점과, 폐쇄 또는 연료전환이 예정된 발전소의 평균 수명과 일관성이 있는 것으로 판단된다. 가동 미개시 설비는 한국전력공사의 데이터베이스에 근거해 가동개시 예정일을 이용하였다.

참고문헌

- APERC. (2019). *APEC Energy Demand and Supply Outlook – 7th edition (Vol II)*. Retrieved from http://aperc.ieej.or.jp/file/2010/9/24/Outlook_Volume_II_4E.pdf
- Climate Action Tracker. (2019a). Country Assessment - South Korea.
- Climate Action Tracker. (2019b). *Governments still showing little sign of acting on climate crisis*.
- Climate Analytics. (2016a). *Implications of the Paris Agreement for coal use in the power sector*. Retrieved from Climate Analytics website: http://climateanalytics.org/files/climateanalytics-coalreport_nov2016_1.pdf
- Climate Analytics. (2016b). *Implications of the Paris Agreement for Coal Use in the Power Sector*. Retrieved from https://climateanalytics.org/media/climateanalytics-coalreport_nov2016_1.pdf
- Climate Analytics. (2016c). *Implications of the Paris Agreement for Coal Use in the Power Sector*. Retrieved from <http://climateanalytics.org/publications/2016/implications-of-the-paris-agreement-for-coal-use-in-the-power-sector.html>
- Climate Analytics. (2017a). *A stress test for coal in Europe under the Paris Agreement*. Retrieved from http://climateanalytics.org/files/eu_coal_stress_test_report_2017.pdf
- Climate Analytics. (2017b). *A Stress Test for Coal in Europe under the Paris Agreement*.
- Climate Analytics. (2018a). *Science based coal phase-out pathway for Germany in line with the Paris Agreement 1.5°C warming limit*. (October). Retrieved from https://climateanalytics.org/media/germany_coalphaseout_report_climateanalytics_final.pdf
- Climate Analytics. (2018b). *Science Based Coal Phase - Out Timeline for Japan Implications for Policymakers and Investors*. (May).
- Climate Analytics. (2019a). *Decarbonising South and South East Asia*. (May).
- Climate Analytics. (2019b). *FOR CLIMATE ' S SAKE: COAL-FREE BY 2030 Rationale and timing of coal phase-out in Australia under the Paris Agreement*. (November).
- Climate Analytics. (2019c). *Global and regional coal phase-out requirements of the Paris Agreement: Insights from the IPCC Special Report on 1.5°C*. Retrieved from https://climateanalytics.org/media/report_coal_phase_out_2019.pdf
- Farrow, A., Anhäuser, A., Myllyvirta, L., & Son, M. *A DEADLY DOUBLE STANDARD: South Korea's Financing of Highly Polluting Overseas Coal Plants Endangers Public Health*. , (2019).
- Government of South Korea. (2018). *National GHG Inventory of South Korea*.
- ICAP. (2018). Republic of Korea approves 2030 GHG roadmap and 2nd phase ETS allocation plan. Retrieved November 3, 2019, from <https://icapcarbonaction.com/ko/news-archive/567-republic-of-korea-approves-2030-ghg-roadmap-and-2nd-phase-ets-allocation-plan>
- IPCC. (2006). Stationary Combustion. In H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe (Eds.), *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.

- IPCC. (2018a). *Global Warming of 1.5°C: Summary for Policymakers*. Retrieved from http://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf
- IPCC. (2018b). *Global Warming of 1.5°C. Summary for Policymakers*. (October 2018).
- IPHE. (2019). *International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy - South Korea*.
- IRENA. (2019). Hydrogen: A renewable energy perspective. In */publications/2019/Sep/Hydrogen-A-renewable-energy-perspective*.
- Jacobson, M. Z., Delucchi, M. A., Bauer, Z. A. F., Goodman, S. C., Chapman, W. E., Cameron, M. A., ... Yachanin, A. S. (2017). 100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-Sector Energy Roadmaps for 139 Countries of the World. *Joule*, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.005>
- Kuramochi, T., Höhne, N., Schaeffer, M., Cantzler, J., Hare, B., Deng, Y., ... Blok, K. (2018). Ten key short-term sectoral benchmarks to limit warming to 1.5°C. *Climate Policy*, 18(3), 287–305. <https://doi.org/10.1080/14693062.2017.1397495>
- Lim, E. (2019). South Korea's Nuclear Dilemmas. *Journal for Peace and Nuclear Disarmament*, 2(1), 297–318. <https://doi.org/10.1080/25751654.2019.1585585>
- Ministry of Environment. (2018). *National Greenhouse Gas Reduction Target by 2030: Amended baseline roadmap roadmap for achieving achievement*. Retrieved from Ministry of Environment, Republic of Korea website: <http://energytransitionkorea.org/sites/default/files/2018-11/18.072030-%EC%A0%9C%BC%20%28%29.pdf>
- MIT. (2016). *Carbon Capture and Sequestration Technologies Program at MIT*.
- MOTIE. (2013). *Sixth Basic Plan for Long-term Electricity Supply and Demand*.
- MOTIE. (2017). Announcement of the 8th Basic Electricity Supply and Demand Plan (2017-2031). Ministry of Trade, Industry and Energy Announcement 2017-611. In Korean. Retrieved April 12, 2018, from http://www.motie.go.kr/motie/ne/announcement2/bbs/bbsView.do?bbs_cd_n=6&biz_an_c_yn_c=Y&bbs_seq_n=64603
- MOTIE. (2019a). *3rd Energy Master Plan (“제3차 에너지기본계획”)*. In Korean. Retrieved from Ministry of Trade, Energy and Industry, Republic of Korea website: http://www.motie.go.kr/common/download.do?fid=bbs&bbs_cd_n=81&bbs_seq_n=161753&file_seq_n=1
- MOTIE. (2019b). *Press release from the morning of December 31, 2019 on the comparison of Fine Dust Emissions of Coal Power Generation in December*. 2019.
- MOTIE. (2019c). *Third Energy Master Plan*.
- National Council on Climate and Air Quality. (2019). *National policy proposal to solve the fine dust problem*.
- Powering past coal Alliance. (2017). *POWERING PAST COAL ALLIANCE: DECLARATION*. Retrieved from https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/660041/powering-past-coal-alliance.pdf

- Republic of Korea. (2015). *Submission by the Republic of Korea Intended Nationally Determined Contribution* (pp. 1–4). pp. 1–4. Retrieved from <http://www4.unfccc.int/submissions/INDC/Published Documents/Republic of Korea/1/INDC Submission by the Republic of Korea on June 30.pdf>
- Reuters. (2019). *South Korea steps up fight against pollution, says problem is "social disaster."*
- Sferra, F., Krapp, M., Roming, N., Schaeffer, M., Malik, A., & Hare, W. (2018). Towards optimal 1.5°and 2°C emission pathways for individual countries: a Finland case study. *Energy Policy in Review, submitted.*
- Sferra, F., Schaeffer, M., & Torres, M. (2018). *Report on Implications of 1.5°C Versus 2°C for Global Transformation Pathways.* Retrieved from https://www.cop21ripples.eu/wp-content/uploads/2018/06/RIPPLES-Deliverable-2-3_2018_06_04_FINALc.pdf
- Statista. (2018). Distribution of coals imported into South Korea in 2017, by country of origin.
- Steckel, J. C., Garg, A., Burton, J., Friedmann, J., Jotzo, F., Luderer, G., ... Yanguas Parra, P. (2017). *UNEP Emissions GAP Report 2017- Chapter 5.*
- Teske, S., Meinshausen, M., & Dooley, K. (2019). *Achieving the Paris Climate Agreement Goals.*
- UN DESA. (2019). World Population Prospects 2019. Retrieved August 13, 2019, from <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>
- UNEP. (2019). *Emissions gap report 2019.* <https://doi.org/10.18356/ff6d1a84-en>
- UNFCCC. (2015). Paris Agreement. *Conference of the Parties on Its Twenty-First Session,* Vol. 21932, p. 32. <https://doi.org/FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1>
- World Nuclear Association. (2018). *"Clean Coal" Technologies, Carbon Capture & Sequestration.* 1–12.
- Wuppertal Institute for Climate Environment and Energy. (2008). *Ecological, Economic and Structural Comparison of Renewable Energy Technologies with Carbon Capture and Storage.*