

IEEJ

아웃룩 2018

— 2050년을 향한 전망과 과제 —

개요

에너지 · 환경 · 경제

(Translated by Kim Dongmin)

The Institute of Energy Economics, Japan © 2017

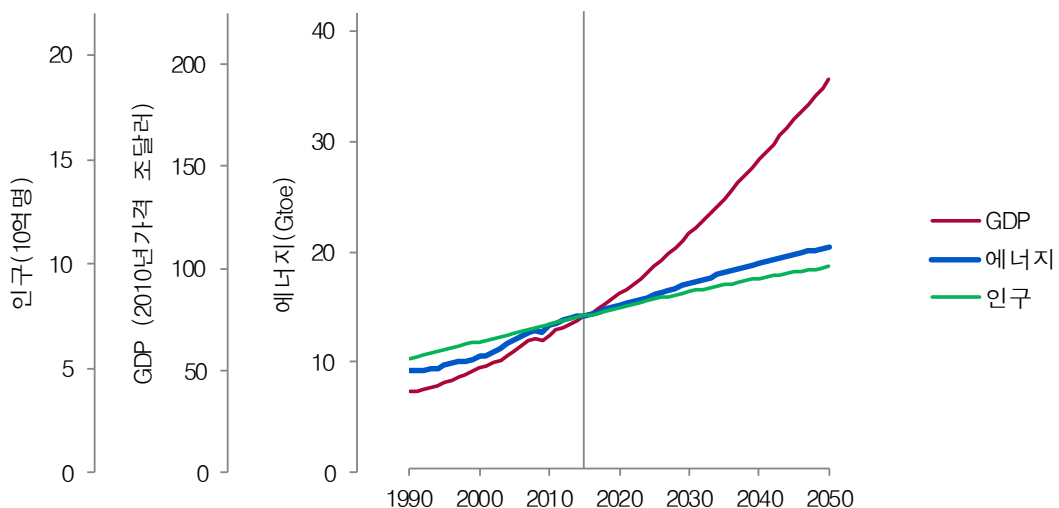
실행·요약

세계 에너지 수급전망

수요

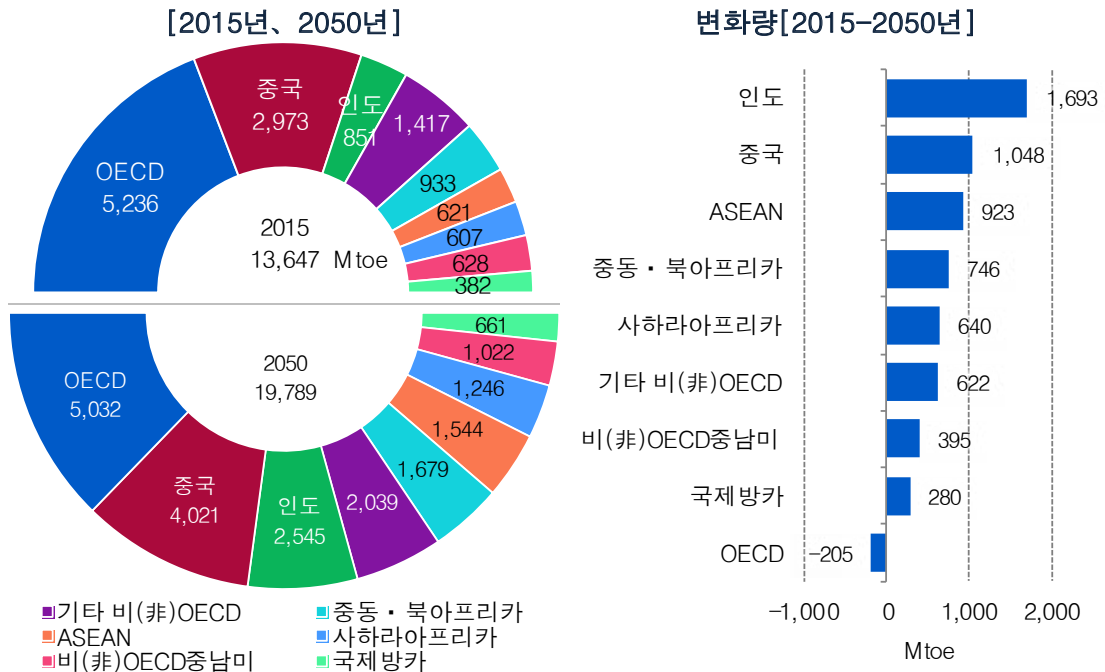
현재까지 에너지·환경 등을 배경으로, 과거의 추세가 계속되는 "레퍼런스 시나리오"에서는 2050년까지 세계의 인구는 1.3배, 경제는 2.5배, 에너지 소비는 1.5배로 확대된다(그림1). 국내 총생산(GDP)을 한단위 창출하는데 필요한 에너지는 에너지 절약의 진전에 따라 연 1.6%로 낮아지고, 2050년에는 현재의 절반정도(56%)가 된다. 경제 성장에 따라 에너지 소비의 증가는 지속되고, 양자의 확대 속도에는 현저한 차이가 나타난다. 그래도 그간의 에너지 소비의 증가량 —석유 환산 6,142백만t(Mtoe)—은 결코 작은 양이 아니라, 매년 영국 1개 국가의 새로운 수요가 생기는 양에 해당되는 양으로 볼 수 있다.

그림1 | 세계인구, 실질GDP, 1차에너지 소비



경제성장과 에너지 소비의 관계는 반드시 국가별로 동일한 것은 아니다. 경제협력 개발기구(OECD) 회원국의 35년 후 에너지 소비는 경제 성장에도 불구하고 현재보다 오히려 작아진다.(그림2). 다시말하면, 향후 에너지 소비의 증가는 모두 OECD에 가입하지 않은 국가에서 발생된다고 볼 수 있다. 비(非)OECD중에서도 아시아 —인도, 중국, 동남아 국가 연합(ASEAN)—의 에너지 소비는 현저하게 증가하고 있으며, 또한 중동·북 아프리카와 사하라 이남 아프리카도 급속한 인구 증가와 경제 성장을 바탕으로 에너지 소비를 크게 늘리고 있다. 비(非)OECD의 에너지 소비는 2005년에 OECD를 넘어선 뒤 현재는 세계의 59%까지 확대되고 있다. 그 비율은 2050년에는 71%에 이른다. 바꿔말하면, 만일 아시아를 비롯한 비(非)OECD가 사회 및 경제 정세의 변화 등으로 에너지 소비의 증가를 둔화시키면, 세계 에너지 수급상은 크게 달라질 수도 있다.

그림2 | 1차에너지 소비, 변화량(지역별)



비(非)화석 에너지에 대한 기대는 크지만, 새로 발생되는 방대한 에너지 수요를 충족시키는 것은 주로 화석 연료라는 것이 앞으로도 변하지 않는다.(그림3) 전망 기간 동안, 비(非)화석 에너지가 1toe증가하는 동안 화석 연료는 2.7toe증가한다. 비(非)화석 에너지를 모두 합쳐도, 화석 연료 중 2050년 시점에서 가장 적은 석탄에 아직 미치지 못한다. 비(非)화석 에너지는 점유율을 19% 이상 확대시키더라도, 그 규모는 지금의 21%에 불과하다.

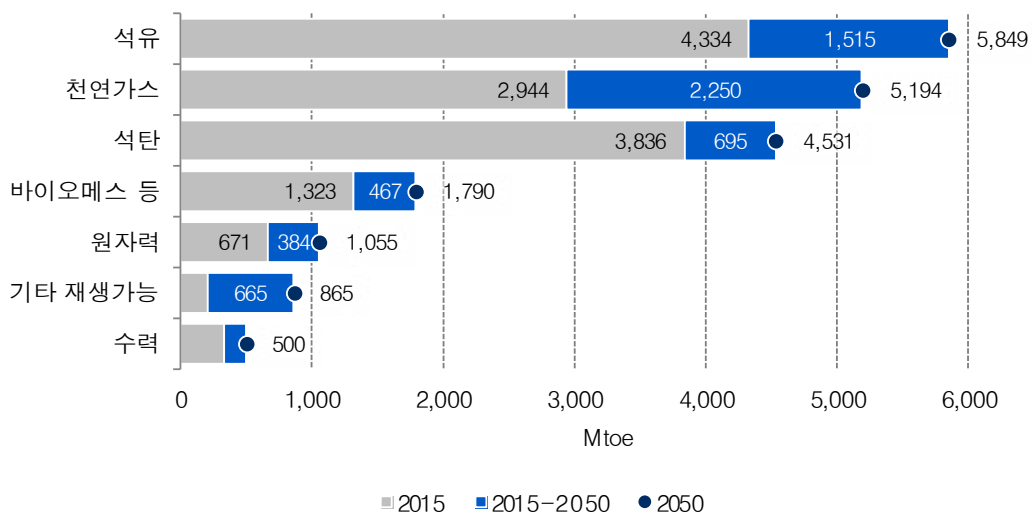
석유는 2050년에서도 최대의 에너지원으로 전 세계 에너지 수요의 30%를 차지한다. 무엇보다도, OECD에서 석유소비의 피크는 10년 전에 넘어섰고, 향후에도 연 0.7%로 감소해 가고있다. 세계의 석유 소비를 현재 하루 90백만배럴(Mb/d)에서 122Mb/d까지 올리는 것은 비(非)OECD 및 국제 병커(bunker)에서의 많은 소비에 기인한다. 중국은 앞으로 10년 정도 후 미국을 능가하고 세계 최대 소비 국가가 된다. 다만 2040년대 중반까지 석유소비가 절정에 달한 후, 감소세로 돌아선다. 인도는 2050년이 되기전에 미국과 함께 제2의 소비 국가가 된다. 게다가 최대 인구를 가진 인도는 2050년대 중반에 중국을 넘는 최대 소비국이 될 것으로 예상된다

천연가스는 소비량의 증가가 다른 어떤 에너지원보다 크고, 2040년까지 석탄을 제치고 제2의 에너지원이 된다. 발전용, 기타 모두 1,000 Mtoe이상 증가에 기여한다. IEEJ아웃룩에서 세계를 표장(表彰)하는 42의 나라·지역 중, 2050년의 소비가 현재를 밀도는 것은 일본, 영국, 이탈리아, 독일의 4개국뿐이다. 미국에서는 2030년경, 유럽 연합(EU)에서는 2040년경에 천연 가스가 석유를 넘어서는 등, 가장 새로운 화석 연료가 최대의 에너지원인 국가 및 지역은

현재의 10(에너지 커버율로 13%)에서 2050년에는 전체의 절반인 21(에너지 커버율 36%)까지 증가한다.

석탄은, 금세기 초 10년간, 세계 에너지 소비 증가의 절반을 조달(공급)할 정도로 크게 성장했다. 그러나 그 기세는 급속히 둔화했으며, 이러한 경향(추세)은 앞으로 총체적으로는 이어진다. 다만, 개별적인 양상은 지역마다 상당히 다르다. OECD에서는 계속 감소하고, 석탄 소비를 2000년부터 2015년까지 3배로 확대한 중국은 2040년까지 약간 증가한 후에 감소세로 돌아선다. 한편, 인도, ASEAN에서는 석탄이 활발한 에너지 수요의 대부분을 조달하여, 2050년의 석탄 의존도는 현재와 비슷하거나 오히려 높아진다. 석탄은 빼놓을 수 없는 에너지이므로 고효율, 깨끗한 활용 기술이 매우 필요하다.

그림3 | 세계 1차 에너지소비(에너지원별)



엔드유저(end-user)가 실제로 소비하는 에너지를 나타내는 최종 에너지 소비는 민생 外 수송, 산업, 비(非)에너지 소비 등 모든 부문에서 증가하여, 2050년에는 현재보다 46% 늘어난 13,675Mtoe에 달한다(그림4). 여기서도 1차에너지 소비와 마찬가지로 그 증가는 모두 비(非)OECD의 최종 에너지 소비와 국제 병커(bunker)에 기인한다.

다만, 최종 소비 중 전력은 향후에도 각국·지역의 경제 발전 단계를 불문하고 증가가 계속된다.(그림5) 세계의 최종 에너지 소비에서 차지하는 전력의 점유율은, 현재의 19%에서 2050년에는 24%까지 상승한다. 전력 소비의 증가가 두드러지게 나타나는 것은 비(非)OECD의 소득이 중상(中上)의 국가들에 기인한다. 이것과 4배 이상 증가할 중하(中下)·저소득국을 합친 비(非)OECD의 증가량은 15조 7,000억kWh로 현재 OECD의 소비 9조 3,000억kWh를 훨씬 넘는다.

전력소비의 상승에 따라, 세계의 전력 공급(발전 전력량)도 급속히 증가한다. 발전용으로 사용되는 에너지는 2000년에는 1차 에너지 소비 전체량의 34%였지만, 발전 효율의 지속적인 향상에도 불구하고, 2050년에는 41%가

발전용으로 사용된다. 그 비율을 보면 전력화가 더 진행되고 있는 OECD에서는 44%에 달한다.

그림4 |
최종에너지소비의변화량[‘15-‘50년]

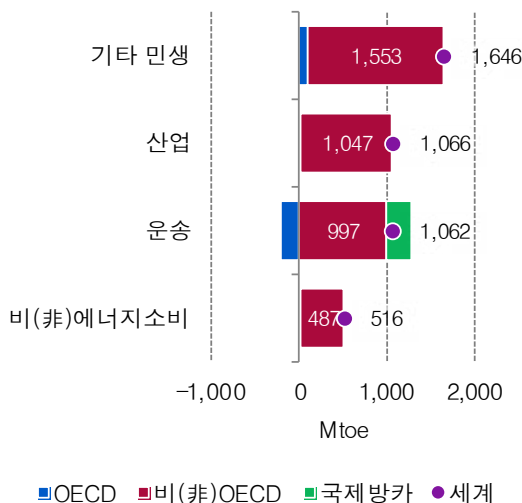
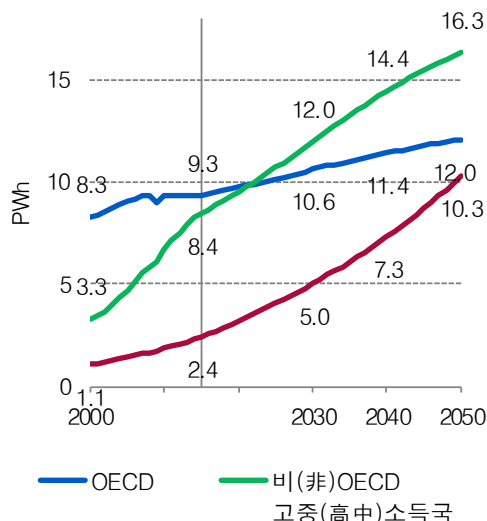


그림5 | 전력최종소비



주: 중저·저소득국은 2015년시점의 1인당
명목GDP가 \$4,000이하의 국가·지역이다.

공급

OPEC, 비(非)OPEC 모두, 석유수요의 증가에 맞추어 석유의 공급량을 증가시킨다(그림6). 2050년까지 생산 증가분의 80% 넘게는 중동 OPEC, 북미 및 중남미에 의한다. 북미에서는 완만한 유가 회복 —2030년 \$95/bbl, 2050년 \$125/bbl(2016년 실질)—하면서 탐사·개발 부문으로의 투자가 회복되고, 셰일 오일이나 오일 샌드와 같은 비(非)재래형 석유가 증산을 견인한다. 브라질·프레솔트 개발로 대표되는 중남미에서의 증산도, 비(非)OPEC공급량의 증가의 중심이 된다. 다만 비(非)OPEC의 생산 점유율은 아시아가 감소하는 것이나 유럽·유라시아도 2030년경에 피크아웃(peak out) 됨으로써 2015년 58%에서 2050년에는 53%로 점차 줄어든다.

석유 수요는 증가해 가지만, 현재의 기술·경제성으로 생산 가능한 자원 —확인(가채)매장량— 으로 금세기 중반까지의 필요량을 조달할 수 있다.(그림7) 이 밖에 기술의 진보 등에 따른 매장량의 증가나 미확인 자원의 발견도 있기 때문에 세계 전체적으로 자원 고갈로 공급 제약 발생 가능성은 작다. 우려되는 것은 유가의 심한 등락과 환경 제약 등으로 과도한 리스크 회피 자세가 적절한 공급 투자를 가로막는 것 등이다.

그림6 | 주요지역의 원유생산

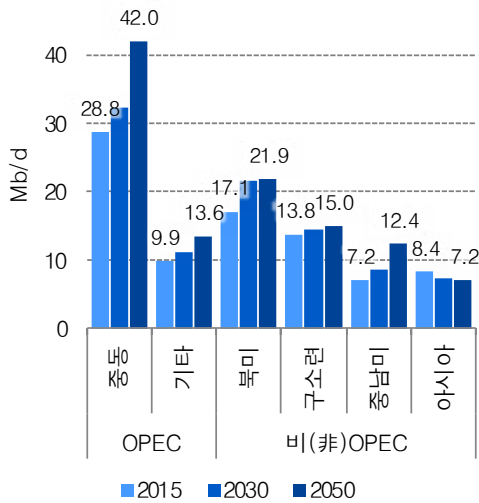
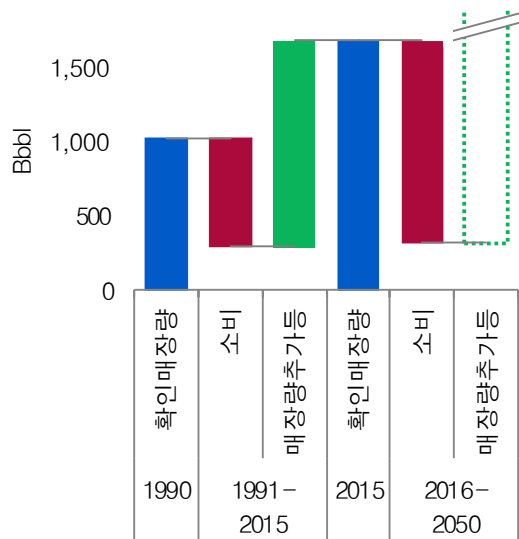
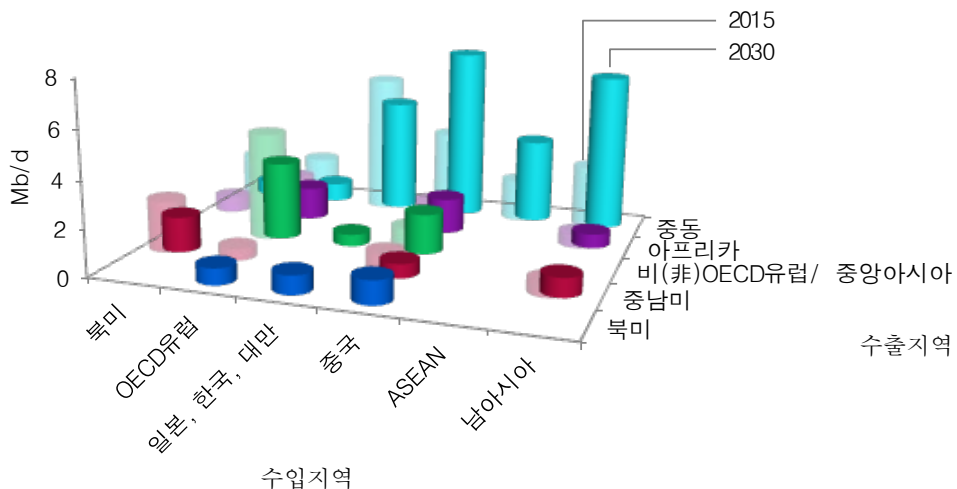


그림7 | 세계 원유확인매장량과 누적생산량



주요 지역간의 원유 무역은, 2030년에는 43Mb/d까지 증가한다.(그림8) OECD에서의 수요 감소 또는 북미에서의 생산 증가에 따른 수입이 감소하지만, 아시아 신흥국의 수입 증가가 전체의 무역량을 끌어올린다. 아시아에서는 어느 정도의 공급원 다각화가 시도되었지만, 중동 및 아프리카로 부터의 공급량은 2030년 시점에서 80%를 점유한다. 북미의 수입은 중남미 또는 중동으로 부터 계속되지만, 큰 폭으로 감소한다. 유럽에서도 수입은 감소되는 가운데 비(非)OECD유럽/중앙 아시아, 아프리카, 중동이 경합한다. 비(非)OECD 유럽/중앙 아시아 및 중동은 수요가 증가하고 있는 아시아 수출지 이전(shift)을 강화하고, 특히 중동과 아시아의 원유 무역에 있어서의 상호 의존 관계는 한층 깊어진다.

그림8 | 주요지역간 원유무역[2015년, 2030년]



세계 천연가스 생산량은 2015년부터 2050년에 걸쳐 80%증가한다(그림9). 증산량이 가장 큰 지역은 중동이다, 그 양은 589십억m3(Bcm)에 이른다. 세계 최대의 확인 매장량을 가진 이란이, 2030년 이후, 석유 화학 원료, 주변국에 대한 파이프 라인 가스 수출 등에 의해서 지역 최대 생산국의 지위를 계속해서 유지한다. 미국은 앞으로도 천연가스 개발에 관한 경험(지식)을 축적하고, 멕시코 걸프만으로 부터 액화 천연가스(LNG)의 수출이 확대되는 가운데 증산이 진행된다. 이 다음으로는 구 소련이며, 특히 러시아에서 현재 개발이 진행되고 있는 야말 반도에 이어 추가로 2030년 이후는 동시베리아와 사할린 등도 증산에 기여한다. 아시아에서는 수요가 확대되는 중국이나 인도에서 국내 개발이 진행된다. 특히 중국에서는 천연 가스 이용을 더욱 촉진할 수 있도록, 국내 셰일 가스 개발에 대한 투자가 본격화되고 있다. 아프리카에서는, 모잠비크, 탄자니아, 세네갈 등에서 가스전의 발견이 잇따르고 있으며, 2030년 이후에 천연가스의 증산이 본격화된다.

2016년 시점에서 세계 주요지역 간의 천연가스의 무역량은 544Bcm이다. 그 대부분이 송유관 무역이었고, 특히 러시아에서 유럽으로 수출되는 파이프 라인 수출 물량이 대부분을 점유한다. 이후에는 주로 LNG아시아의 수입 증가와 북미 수출 증가로 계속 확대되고, 2030년 시점에는 825Bcm까지 증가한다. 수출 지역으로 가장 크게 증가하는 것이 오세아니아와 북미로 각각 2020년부터 2025년에 걸쳐 많은 LNG프로젝트의 가동 개시가 계획되고 있다. 한편 천연가스를 가장 많이 수입하는 국가는 중국이고, 특히 러시아·중앙 아시아에서 총 108Bcm를 수입한다.

그림9 | 주요국·지역의 천연가스 생산

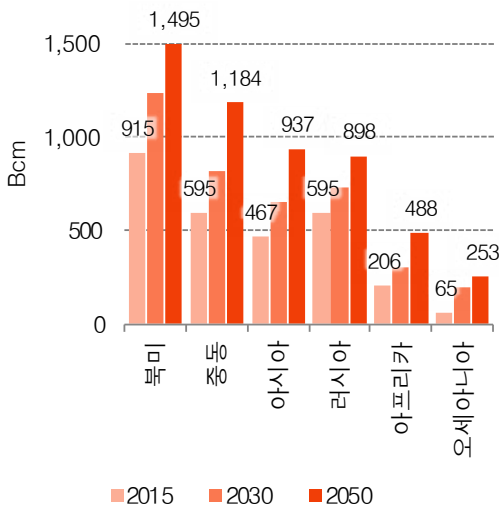
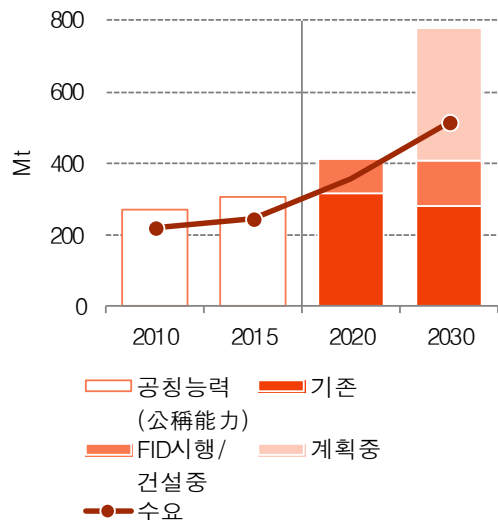


그림10 | 세계 LNG공급능력과 수요



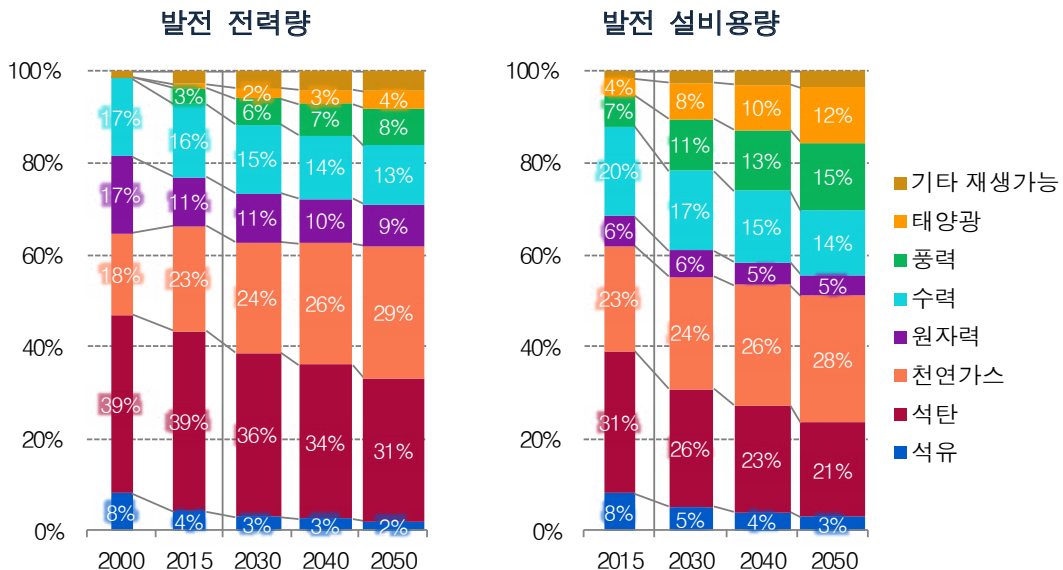
천연 가스 이용의 양적·지역적 확대에 따라, LNG의 수요는 천연가스 전체보다도 급속히 증가한다. 그 공급 밸런스는, 지금 완화된 상태에 있지만, 향후 공급 능력의 추가가 최종 투자로 결정(FID)된 것/건설중인 것만 본다면, 2020년대 중반에도 400백만t(Mt)정도로 균형에 도달한다.(그림10) 한편, 현 시점에서 약

370Mt분의 안전이 계획 중이며, 이들(일부)이 시행되면, 공급 부족에 빠지는 일은 없다. 충분한 투자를 유도하는 환경의 정비가 중요하다.

석탄 생산량은 아시아를 중심으로 중남미, 아프리카 등 비(非)OECD에서의 수요 증가에 따라, 2015년 7,727Mt에서 2050년에는 9,283Mt까지 증가한다. 일반 목탄은 주로 전력용 수요 증가에 따라 2015년 5,835Mt에서 2050년에 7,710Mt으로 1.32배 늘어난다. 연료탄은 조강(粗鋼) 생산의 감소에 따라 2015년 1,081Mt에서 2050년에 1,004Mt까지 감소하고, 갈탄은 전력용 수요 감소에 따라 2015년 811Mt에서 2050년에 570Mt까지 감소한다.

발전에서는 재생가능 에너지가 주목을 받고 있지만, 전원 구성에서 큰 틀에서는 화력이 중심임에는 변화가 없다.(그림11) 다만 화력으로 점유율을 확대하는 것은 발전 효율이 높고, 이산화탄소(CO₂)배출이 적은 부하(負荷) 추종성(追從性)이 뛰어난 천연 가스 뿐이다. 석탄은 최대의 전원으로 계속 되지만, 구미에서 감소하는 것 등에서 점유율이 8%-p 줄어든 31%까지 낮아진다.

그림11 | 세계의 발전구성



주: 막대의 폭은 총발전량에 비례

주: 막대의 폭은 총발전용량에 비례

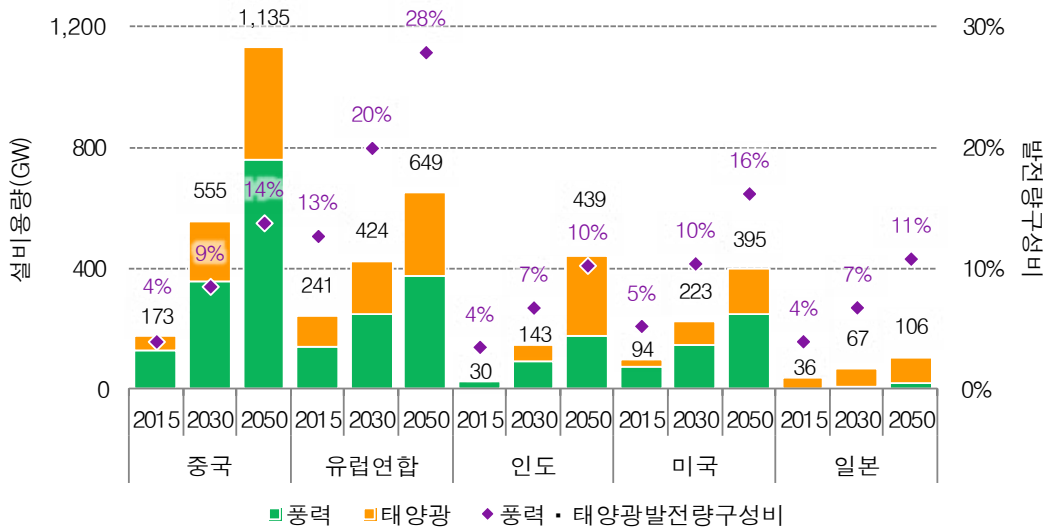
원자력은 2015년 2,571TWh에서 2050년에는 4,047TWh까지 증가하지만, 총 발전량 만큼 급속하게 성장하지 않고, 점유율로는 2%-p 축소된다. 설비 용량은 2020년대에 정지되는 독일을 시작으로, 일본 등 9개국·지역에서 감소한다. 한편 12개국이 신규 도입하고, 20개국이 증설·증강함으로써 세계의 설비 용량은 2016년 406GW에서 2050년에는 577GW까지 확대한다.

풍력·태양광 등의 발전량은 2015년 1,111TWh에서 정책 지원이나 기술 개발에 따라 2030년에는 2.5배인 2,778TWh, 그 후 20년 사이에 2배인 5,637TWh로 급속히 확대된다. 2050년에는 총 발전량의 13%를 점유하기에 이른다. 이를 위해 필요한 설비 용량은 풍력이 현재의 4.5배인 1,865GW, 태양광이 6.8배인 1,519

GW이며, 이와 더불어 총 발전 용량 12,547 GW의 27% —발전량 점유율의 2배 이상— 나 점유하게 된다.

풍력·태양광 등의 주요 도입 지역을 보면 현재는 중국, 유럽, 미국이지만, 향후 여기에 인도가 추가된다.(그림12) 도입은 발전 비용의 저하가 현저한 지역만큼 확대된다. 비용 절감의 배경으로 시스템 가격과 공사비의 저하, 설비 이용률을 결정하는 풍부한 일사 조건이나 바람의 환경, 토지 취득 및 환경영향 평가 등에 관한 낮은 장벽 등 다양한 요인이 있다. 시스템 가격과 공사비가 높은 나라에서는 문제해결을 위한 대처가 요구된다.

그림12 | 주요국·지역의 풍력·태양광 발전설비 용량과 발전량 구성비



석유수요 피크 Case

수요

석유 소비는 자동차용으로 인해 2050년까지 지속적으로 증가한다.(그림13) 그러나 전통적 에너지인 가솔린·경유 자동차에서 전기 자동차 등으로의 이행을 목표로 하는 움직임이 대기오염(환경오염) 대책에 따라 최근 활발하게 진행되고 있다.(표1) 기후 변화 문제에 대한 대처도 있고, 자원 제약이 아니라 수요 측의 요인으로 석유 소비가 곧 절정(peak)에 도달한다는 일부의 시각도 있다.

그림13 | 세계의 석유소비

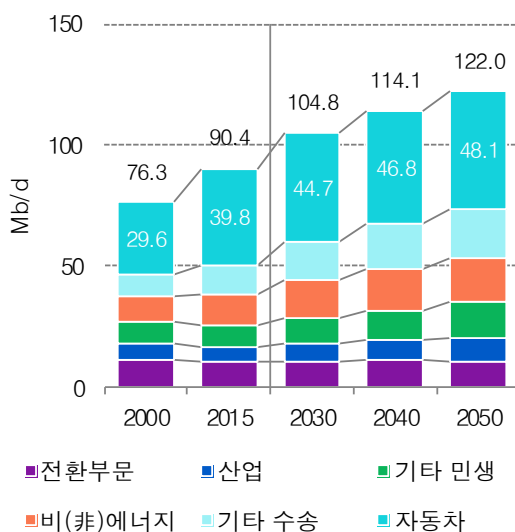


표1 | 자동차 전기화로의 주요 움직임

독일	2030년까지 EU에서 종래형(기존) 자동차 판매를 금지하는 결의안을 연방 참의원이 통과(2016)
노르웨이	2025년까지 종래형 자동차의 폐지를 여야가 제안(2016)
프랑스	2040년까지 종래형 자동차의 판매를 금지하는 내용을 정부가 발표 (2017)
영국	2040년까지 종래형 자동차의 판매를 금지하는 내용을 정부가 발표 (2017)
인도	2030년 이후 신(新)자동차 판매를 모두 전기자동차로 하는 것으로 정부 대신이 발언(2017)
중국	종래형자동차의 판매금지에 관한 연구를 검토중 이라고 정부 부대신인 언급(2017)

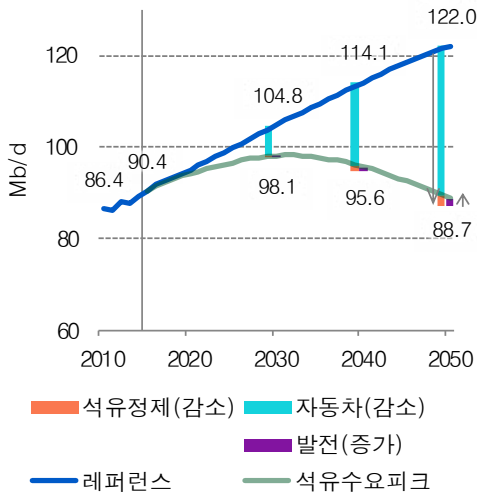
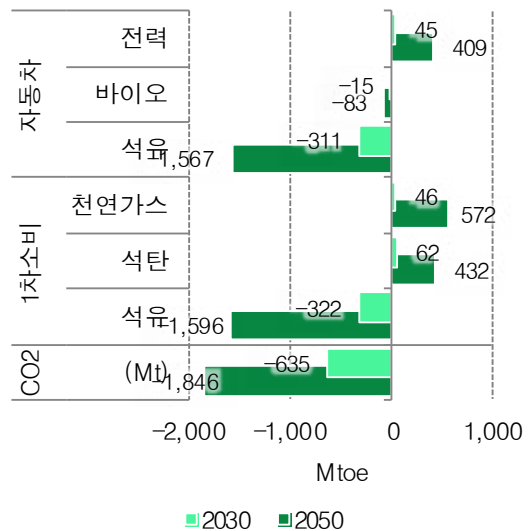
만일 2050년에 세계의 신차(승용·화물) 판매가 모두 무공해 차량(ZEV)¹이 될 경우 미래상(未來像)은 레퍼런스 시나리오와는 다른 것이 된다. "석유 수요 피크 Case"에서는 석유 소비는 2030년경 98Mb/d를 정점으로 이후 감소하는 것으로 바뀐다.(그림14) 레퍼런스 시나리오에서의 감소량은 2030년에 7Mb/d, 2050년에는 33Mb/d까지 확대된다.

ZEV에 따른 전력 수요 증가의 영향도 무시할 수 없다.(그림15) 2050년에 자동차용 전력 소비는 레퍼런스 시나리오 대비 409Mtoe가 증가하며, 전력 최종 소비를 12% 끌어올린다. 증가하는 발전량을 화력으로 충당(조달)하면 천연가스, 석탄의 일차 소비가 발전용으로 각각 572Mtoe, 432Mtoe증가함으로써 천연가스, 석탄이 2030년대 말에는 석유를 넘어, 이후 천연 가스가 최대의 에너지원이 된다. 자동차용 바이오연료는 내연기관을 동력원으로 하는 자동차 보유 대수의 축소에 따라 감소한다.

CO₂배출은 2050년에 레퍼런스 시나리오 대비 1.8Gt, 2010년 총 배출량비 5.9% 삭감된다. 이 중 감소율이 가장 높아지는 곳은 뉴질랜드, 캐나다, 라틴 아메리카 등 풍부한 수력을 바탕으로 낮은 전력(電力) 탄소원(炭素原) 단위(單位)를 보유한 국가·지역이다. 반면 이라크의 CO₂배출은 오히려 7%증가된다.

¹본 아웃룩에서는, 배터리식 전기자동차, 전기자동차, 연료전지자동차

그림14 | 세계의 석유소비와 변화기여

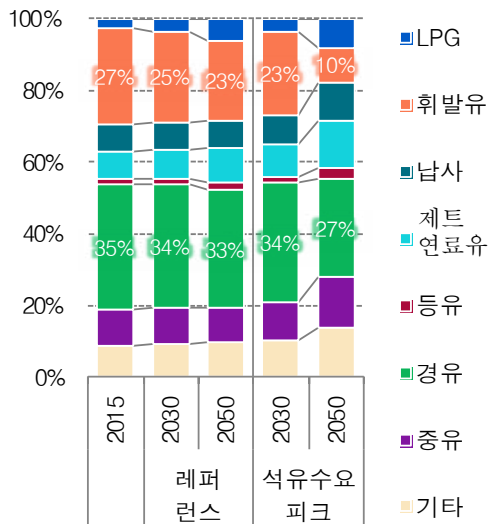
그림15 | 세계에너지소비증감
(레퍼런스시나리오비) [석유수요 피크Case]

공급

이런 변화는 석유 제품별 수급에도 영향을 미친다.(그림16) 휘발유의 석유 제품 소비 점유율은 2050년에는 불과 10% 낮아진다. 경유는 산업 등에서도 활용되는 부문부터 그 점유율은 휘발유 만큼 저하되지는 않지만, 레퍼런스 시나리오 대비 6%-p 축소된다. 이러한 상황에 직면하는 석유 정제업은 이익률을 극적으로 혁신시킬 필요가 있다. 바꾸어보면, 2차 정제 설비의 차이에 의한 경쟁력이나, 원유에 대한 중·경질유 가격 차이에도 변화가 생길 수 있다.

석유 소비의 감소는 원유 생산에도 큰 영향을 미친다.(그림17) 지금까지의 유가 전제가 미래의 세계 석유 수요는 계속 증가하면서, 보다 공급 비용이 높은 석유가 필요하다고 생각했던 것으로 보아, 세계 석유 수요의 피크 아웃(peak out)은 일종의 게임 체인저(game changer 役者注 ; 새로운 이론 또는 선견지명이 지금까지 당연하다고 생각했던 개념 또는 상황을 뒤집어 버리는 것)가 되어, 수급의 완화 압력과 시장의 인식 변화를 배경으로서 유가는 하락하고 —레퍼런스 시나리오에서 2030년 \$95/bbl, 2050년 \$125/bbl에 2030년 \$65/bbl, 2050년 \$50/bbl(2016년 실질가격). 이 대폭적인 가격 저하를 상정하면 비용이 저렴한 지역의 우위성이 높아지면서 2050년의 생산이 현재 상태를 웃도는 것은 중동뿐이다. OPEC의 생산 점유율은 2015년 42%에서 2030년에는 46%로 증가하고, 그 이후에도 계속 확대된다. 북미 생산은 2050년에 레퍼런스 시나리오 대비 40% 감소된 13Mb/d이다.

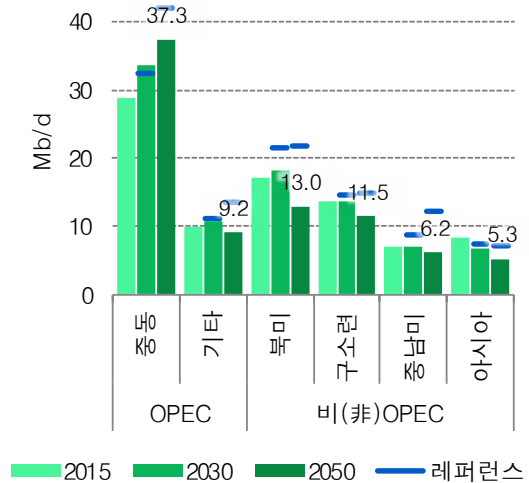
그림16 | 세계의 석유제품 소비구성



주: 자가소비는 제외

그림17 | 주요지역의 원유생산

[석유수요 피크Case]



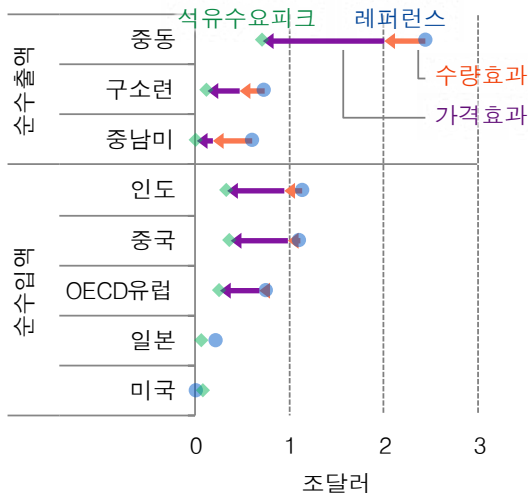
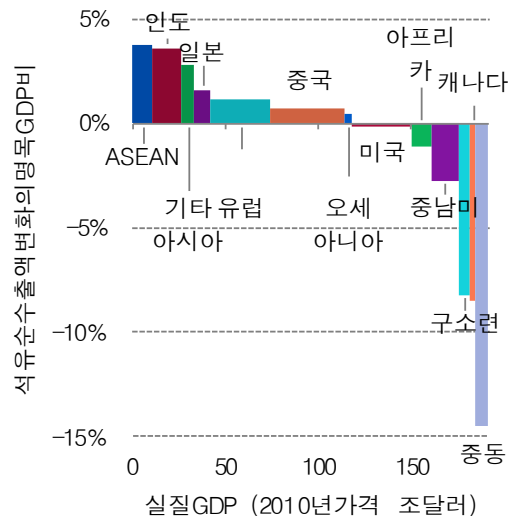
경제·대기환경 보전·에너지 안전보장에의 영향

다만, 경제의 하향세는 원유 생산 점유율을 떨어뜨리는 국가·지역뿐 아니라 중동 산유국에도 작용한다.(그림18). 중동의 석유 순수출액의 감소는 2050년에 1조 6,000억달러, 명목 GDP대비 13%에 이른다. 산유국에서는 석유에만 의지하지 않는 경제 다각화에 대한 대비가 필요하며, 그러한 움직임은 사우디아라비아의 "Saudi Vision 2030"의 책정 등을 볼 때 알 수 있다(인지할 수 있다). 반대로, 석유 순수입 절감액에서 가장 이득을 보는 나라는 제2의 석유 소비국이 되지만 국내 자원이 풍부하지 않은 인도, 다음으로 세계 최대의 자동차 보유국인 중국이다.

선진국에서는 자동차용 가솔린·경유에 소비세가 부과되면서 수요 저하로 세수 감소에 따른 재정(財政)에의 영향도 있다. 그 세액은 OECD 추계로 현재 3,700억달러 정도로 추산되지만, 세율 등이 현 상태의 경우라면 석유 수요 피크의 경우 2050년에 5분의 1인 약 800억달러까지 급감한다. 한편 현재의 구조로는 전기 중 자동차에 사용된 부분을 다른 용도 부분과 구별해서 과세하는 것은 거의 불가능하다. ZEV 보급 촉진기에 있어서의 재원 조성과 함께, 재원이 큰 문제가 될 가능성이 있다.

그림18 | 석유 순수출입액[석유수요 피크사례, 2050년]

주요국·지역의 석유 순수출입액

석유 순수출입액 변화에 대한
명목GDP대비(레퍼런스 시나리오비)

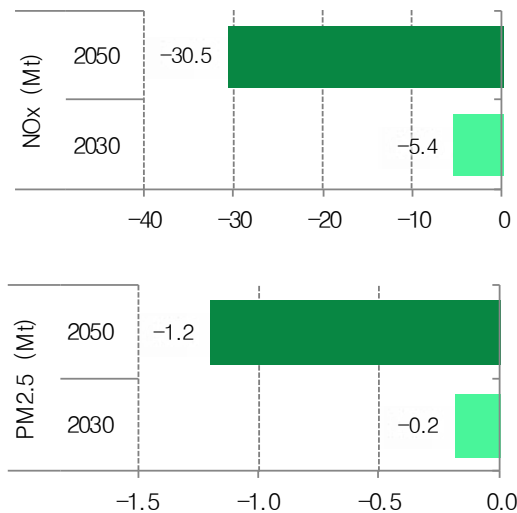
주: 유럽은 구소련을 제외함

ZEV추진의 큰 드라이브가 되고 있는 대기 오염 물질의 배출은 기존 자동차의 배출 억제 성능의 향상 효과를 제외하면, 질소산화물(NO_x)이 레퍼런스 시나리오 대비 30Mt, 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)는 1.2Mt(2010년 총 배출량비에서는 각각 27%, 3%)로 삭감된다(그림19)². 도시의 대기환경 보전에 일정한(어느정도) 공헌이 기대된다.

석유 순수입 국가·지역의 석유 자급률은 소비의 감소에도 불구하고, 레퍼런스 시나리오보다 악화되는 경우가 있다(그림20). 이는 위에서 살펴봤듯이 유가 하락이 이들 고비용 지역에서의 원유 생산에 역풍이 되기 때문이다.

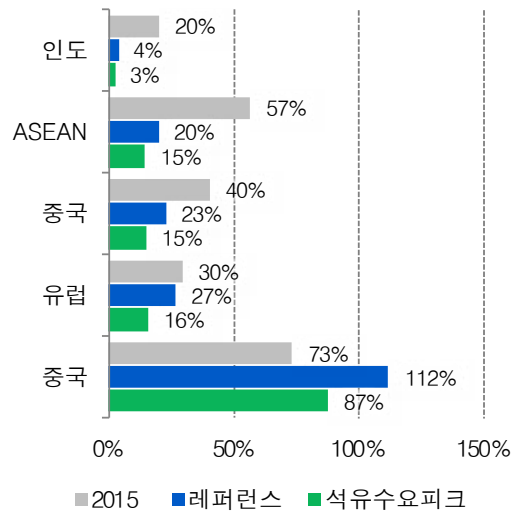
² ZEV용 전력수요는 발전에 의한 대기오염 물질을 증가시킬 수 있다. 그러나 발전소에서 배출대책은 자동차보다 용이하다. 배출 증가를 초래하지 않도록 적절한 관리가 중요하다.

그림19 | 세계자동차NO_x, PM_{2.5}배출증감
(레퍼런스시나리오비) [석유수요 피크사례]



주: 자동차 배출억제성능의 향상효과를 포함하지 않음

그림20 | 석유자급률[2050년]



주: 유럽은 구조편을 제외

급속한 탈화석연료의 진단을 어떻게 인식하는가

석유 수요 피크의 경우는 상황에 따라 석유 소비가 곧 감소로 돌아설 수 있음을 나타내고 있다. 그러나 이 경우의 실현 가능성은 ZEV의 보급 상황이 보텀업(bottom up) 방식으로, 선진 기술의 적극적인 도입을 전망(분석)한 후술의 "기술 진전 시나리오"의 그것을 훨씬 웃도는 것을 볼 때 매우 도전적인 것이다. 오히려 석유 소비는 쉽게 감소하지 않을 가능성을 암시하고 있다고도 풀이된다. 또한 석유 수요 피크의 경우는 2050년에도 석유가 오늘과 다를 바 없는 규모에서 요구되는 것을 간과해서는 안된다. 공급 관점에서 수요 절정기를 걱정(염려)하는 것은 자연스럽고 그것에 대비하는 것이 필요하다. 그러나 장래를 지나치게 비관해서 공급 투자가 소홀히 되면 석유공급 위기를 —에너지 안보를 위협하면서— 유발시킬 수 있다.

중동 원유 의존도의 증대는 안정 공급에 대한 지정학적 리스크를 상승시키게 된다. 사우디아라비아와 이란의 대립, 카타르 국교 단절, "이슬람 국가" 공략 및 다른 한편으로 테러 확산 가능성 등, 중동 정세는 유동적이며 단기적으로 안정될 조짐은 보이지 않는다. 중동 산유국들은 본 사례(Case)로 상정(想定)되는 저유가로는 재정 균형이 어렵다. 재정 적자 절감을 위한 공공 투자 억제와 보조금 삭감과 같은 노력은 합리적이지만, 사회 불안을 키우고, 산유국뿐만 아니라 중동 정세를 더욱 악화시킬 가능성도 매우 높다.

기후변화 문제에 대한 대처

기술진전 시나리오

"기술 진전 시나리오"에서는 에너지 공급의 안정성 확보 및 기후 변화 대책을 위해 에너지 절약·저탄소화 기술이 세계 모든 나라에 적용되는 기회 및 수용성을 기초로(감안하여) 최대한으로 전개(진전)되는 것을 전망한다. 이 시나리오에서는 에너지 소비는 2050년에 레퍼런스 시나리오 대비 2,570Mtoe, 13% 절감되고, 향후 증가분은 동일하게 42%억제된다.(그림21)

“레퍼런스 시나리오”에서 “기술진전 시나리오”로의 이행에 필요한 2050년의 에너지 절감량 중 23%는 OECD 35개국에 의한 것이지만, 중국, 인도는 각각 24%, 15%의 기여도를 보이고 있다.(그림22) 선진국뿐 아니라 기술발전(전개)의 잠재력(potential)이 뛰어난 개발 도상국에서의 광범위한 에너지 절약·저탄소화의 성패가 세계의 미래를 좌우한다.

그림21 | 세계의 1차에너지 소비

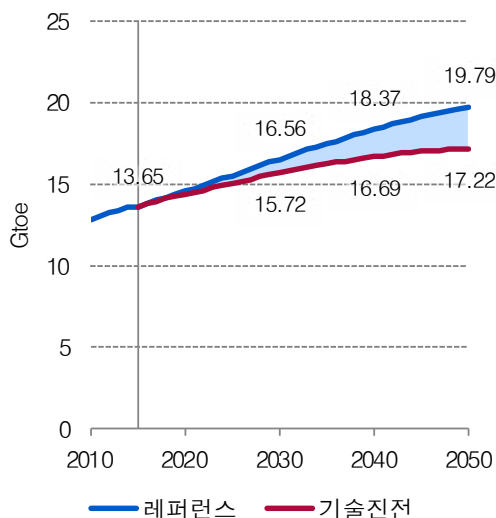
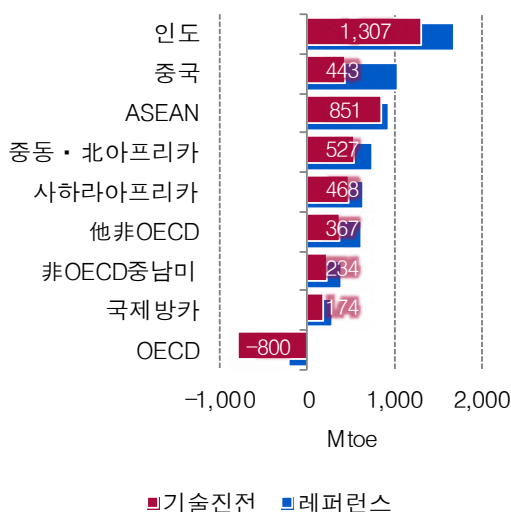
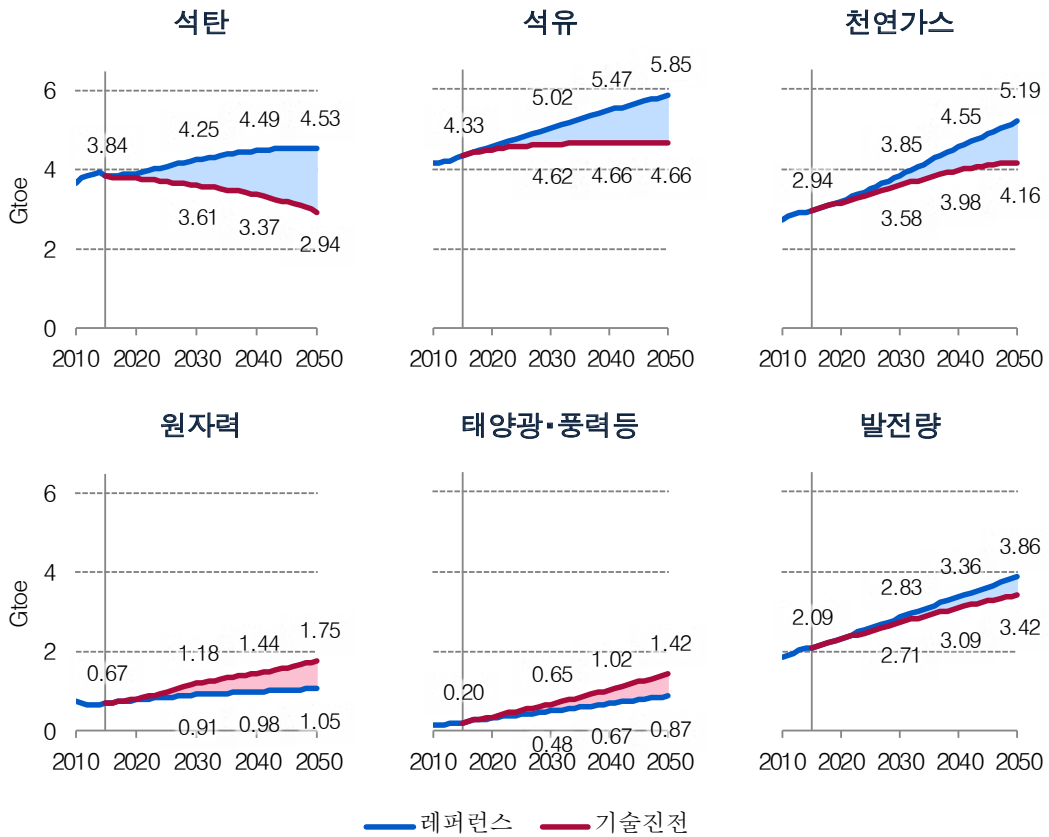
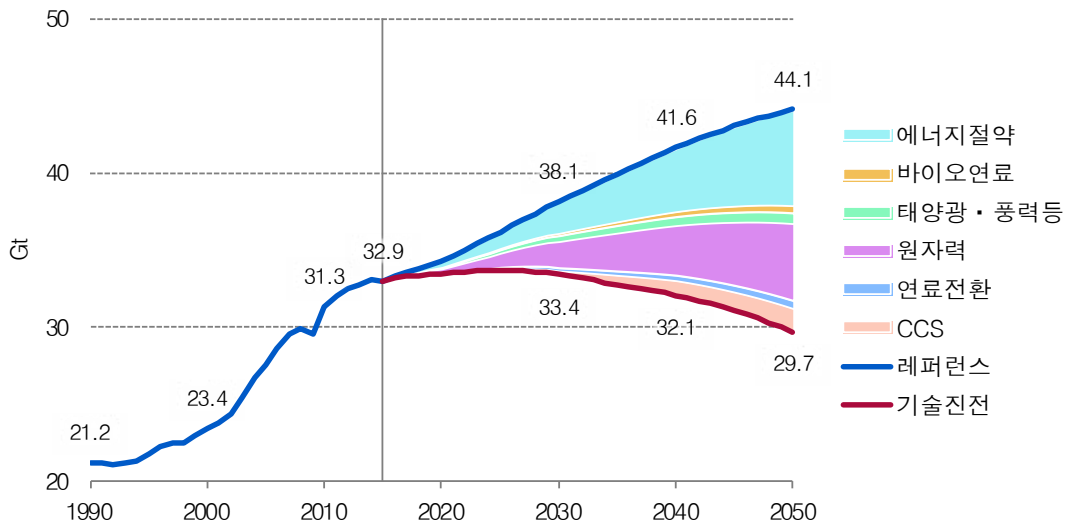


그림22 | 1차에너지소비 변화량
[2015-2050년]



가장 큰 변화가 나타나는 에너지원은 전력 소비의 억제, 발전효율의 향상, 다른 에너지로의 대체 영향 등에 따라, 주로 발전용이 감소하는 석탄이다.(그림23) 석유는 2040년경 정점에 도달하고 2050년에는 레퍼런스 시나리오를 1,193Mtoe 밀돈다. 한편, 천연 가스는 석탄이나 석유와 상이하게, 기술 진전 시나리오에서도 증가되는데 향후 35년간 계속된다. 화석 연료가 레퍼런스 시나리오에서 3,825Mtoe 감소하는 반면에, 원자력은 699Mtoe, 재생가능 에너지는 풍력, 태양광을 중심으로 555Mtoe 증가한다. 이러한 결과, 화석 연료의 점유율은 2015년 81%에서 2050년에는 68%까지 낮아진다.

그림23 | 세계 1차에너지 소비와 발전량

그림24 | 세계의 에너지원별 CO₂배출과 삭감기여

세계의 에너지원별 CO₂배출량은 2025년경을 정점으로 완만한 감소세로 돌아서고, 2050년에는 2010년 대비 1.6Gt, 5%감소로 29.7Gt가 된다.(그림24) 2015년 G7 엘마우·정상회담에서 지지된 "(온실효과 가스[GHG]를)2050년까지 2010년보다 최신의 기후 변화에 관한 정부 간 패널(IPCC)제안에서 도출된 40%에서 70%로의 대폭 삭감한다." 내용은 사실상 달성이 어려울 수 있다. 하지만 레퍼런스 시나리오의 감소량 14.4Gt은 세계 2010년 배출량의 46%에 해당하며, 2050년까지의 누적 감소량 227Gt은 세계의 현 배출량의 7.2년치에 해당하는 등 결코 작은 효과는 아니다. 지역별로 OECD는 2050년에서 2010년의 절반이 된다. 이에 대한 비(非)OECD는 2040년경 정점으로 감소하지만 2010년 대비 23% 늘어난다.

파리협정의 이행초안

파리 협정의 약속 초안³(INDC)을 바탕으로 추산된 세계의 GHG배출량은 2030년 45.2GtCO₂이며, 기존보다 증가한다.(그림25) 과거의 트렌드보다는 억제되지만 최근 몇년의 배출을 둔화시키는 것으로 추이하고 있어, 레퍼런스 시나리오의 배출량과 큰 차이가 없다. 상술한 2050년에 40%에서 70%로 감소, 혹은 파리협정의 장기 목표 —가능한 한 조기에 피크 아웃하는 금세기 후반에 실질적으로 0이 되는 것—과 사뭇 괴리가 되는 미래상이 있다.(표2) 장기 목표에 접근하기 위해서는 적어도 각국이 기술진전 시나리오 정도까지 배출을 억제하는 노력이 필요하다. 개발 도상국의 저탄소 기술의 개발(전개)이 특히 중요하다.

그림25 | 세계의 GHG배출

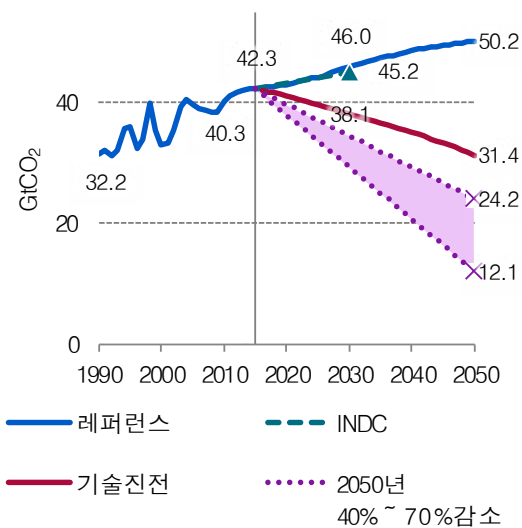


표2 | 파리협정의 장기목표

Holding the increase in the global average temperature to well below 2°C above pre-industrial levels and pursuing efforts to limit the temperature increase to 1.5°C above pre-industrial levels, recognizing that this would significantly reduce the risks and impacts of climate change. – Article 2

In order to achieve the long-term temperature goal set out in Article 2, Parties aim to reach global peaking of greenhouse gas emissions as soon as possible, recognizing that peaking will take longer for developing country Parties, and to undertake rapid reductions thereafter in accordance with best available science, so as to achieve a balance between anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases in the second half of this century, on the basis of equity, and in the context of sustainable development and efforts to eradicate poverty. – Article 4

주: G20파리 협정에서 INDC를 기초로 작성

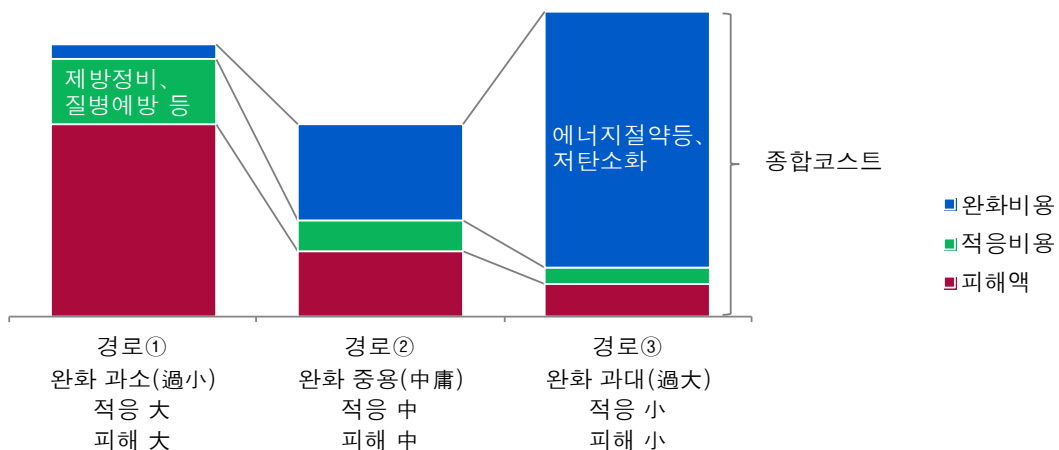
출처: 국제연합(UN)

³ 미국은 2017년 8월 4일 유엔에 파리 협정에서 탈퇴한다는 통지를 제출했지만 가장 빨리 미국이 파리 협정을 탈퇴할 수 있는 것은 2020년 11월 4일이기 때문에 분석에 포함하고 있다.

초장기 기후변화 대책 패스

기후 변화의 문제는 광범위한 영역(분야)에 영향을 미치고, 몇세대 동안 풀어야 할 장기 과제이다. 언제, 어떻게, 어느 정도의 대책을 강구하고 가야 할지 곰곰이 음미할 필요가 있다. 균형과 지속 가능하다는 관점에 따르면 소비에 의해서 규정되는 효용을 키워 —즉 완화 비용, 적응 비용, 피해액의 합계인 종합 비용을 줄일 수 있는 종합적인 평가를 하는 것(그림26의 패스②) \$100의 피해를 방지하기 위해서 \$1,000의 비용을 투자하고 배출을 삭감하는 제방을 쌓는 것— 그런 것을 장기간 계속하는 건 상당히 어렵다, 어떤 곳에서든 무너질 위험을 부인할 수 없기 때문이다.

그림26 | 완화, 적응, 피해의 종합비용에 대한 이미지



누적 종합 코스트(비용)를 줄이는 "최소 비용 경로"는 2050년에 에너지원별 CO2를 기술 진전 시나리오처럼 절감하게 되지만, GHG배출을 현재보다 반감시켜야 하는 것은 아니다.(그림27) GHG배출은 2050년 이후에도 완만하게 감소되면서, 2100년의 상황 대비 52%감소 된다. 대기 중 GHG농도⁴는 2100년경까지 완만하게 상승하다가 2150년에는 550ppm까지 낮아진다. 기온은 19세기 후반과 비교 2100년에 2.4°C, 2150년에 2.6°C상승한다. 다시말하면, 최소 비용 경로는 매우 도전적인 파리 협정의 장기 목표 달성의 미래 경로와는 다른 모습이다.

무엇보다 이들은 조건에 따라서 상황이 바뀔 수도 있다. 예를 들면, 기후 감도⁵가 3.0°C가 아니라 1.9°C인 경우, 최소 비용 경로에서는 완화 대책이 지연되지만 기온 상승은 2°C정도로 수용된다. 단순 계산해도 기후 감도 1°C의 차이로 2200년의 기온에 0.5°C정도의 차이가 생긴다. 또 할인율로 2300년까지의 기간 평균 2.5%가 아니라 1.1%를 채택할 경우⁶, 미래에

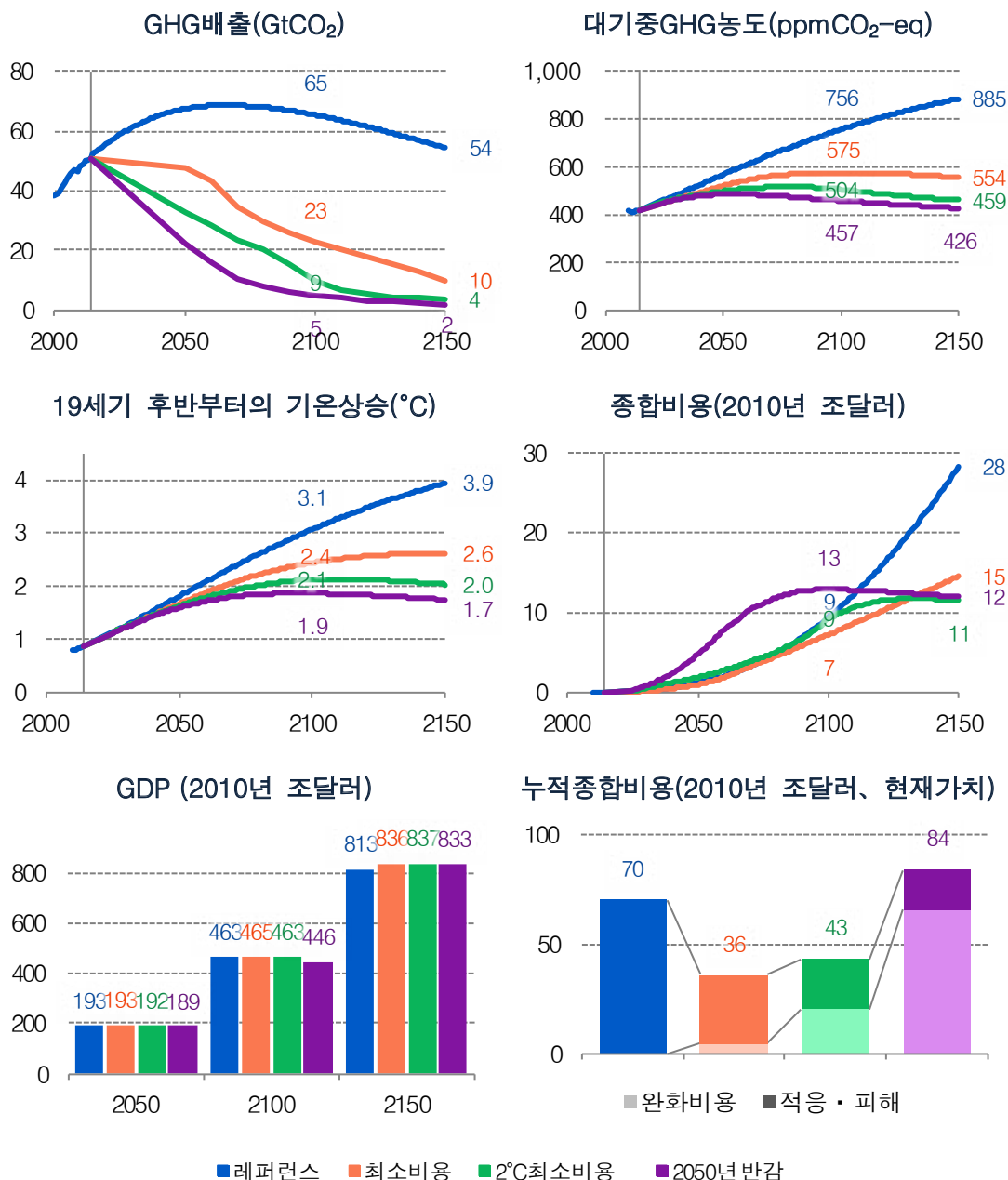
⁴ CO₂환산. 에어로졸 등을 포함.

⁵ 대기중 GHG의 CO₂환산농도가 배가하는 경우의 평균기온의 상승폭(°C)

⁶ 기간평균 2.5%는 램지·롤에 따라 시간선호율 $\delta = 0.5\%$ 、한계효과대 소비탄력성 $\eta = 2$ 에 상당. 기간평균 1.1%는 $\delta = 0.1\%$ 、 $\eta = 1$ 에 상당.

발생하는 비용이 더 높게 평가되기 때문에 신속히 완화하는 경로가 최적이라고 평가된다. 기온은 2100년경에 2°C까지 상승한 뒤 떨어져간다. 단순 계산하면 할인을 1%-p 차이로 2200년의 기온에 0.5°C정도의 차이가 생긴다.

그림27 | 초장기 경로



주: 대기중 GHG농도는 에어로졸(aerosol) 등을 포함. 누적종합 코스트(cost)는 2015년~2500년

한편 국제정치·협상의 장에서의 "2°C목표"에 대한 존중을 감안하면, 기온 상승 억제에의 최소 비용 경로보다 강력하게 대처하는 경로의 검토도 필요(유익)하다.

예를 들면, 누적 종합 비용을 가능한 한 줄이는 원칙을 견지하면서 2150년의 기온 상승 폭을 2°C로 억제하기 위해서는 최소 비용 경로보다 추가적인 감축이 필요하다. 이 "2°C최소 비용 경로"하에서의 GHG배출은 2050년에 2010년 대비 31%, 2100년에 80%감소 된다.

2°C최소 비용 경로의 실현에는 혁신적 기술의 개발·보급이 필수 불가결하다. 기술 진전 시나리오에서 2°C 최소 비용 경로로의 이행에 필요한 에너지원별 CO₂의 삭감(2050년에 11.1Gt)을 예컨대 수소의 활용으로 실현하려면 전 세계적으로 3,000GW의 수소 발전과 10억대의 연료전지 자동차의 도입이 필요하다는 계산이다.(표3) 기타 옵션도 포함된 혁신적 기술이 모두 현실 기술적, 사회의 수용성 등에서 과제를 안고 있으며, 그 극복을 위해서는 개별 기술 개발과 동시에 국제 협력도 중요하다

표3 | 2°C최소비용 패스로의 이행에 필요한 혁신적 기술 도입의 사례

[1] Zero Emission기술: 발전부문에서의 CO₂감축(10.4 Gt)에 필요한 도입량

2050년에 CCS미설치 화력발전 재고 약2,800 GW의 대체

CCS부착화력발전 (대수층저류)	약2,800 GW (CO ₂ 회수율90%로 가정하면, 삭감량은 최대9.4 Gt) CO ₂ 저류 포텐셜(potential)은 확정 7,000 Gt이상	연젠가
수소발전 (CO ₂ free 수소)	약3,000 GW ≒ 1 GW터빈(turbine) × 약3,000기분 소요수소량: 650 Mt/년(현재 LNG수요의 3배에 상당)	
우주태양광	약3,000 GW ≒ 1.3 GW설비(2 km사방) × 약2,300기분	
고온가스로(爐)	약2,400 GW ≒ 0.275 GW로(爐) × 약8,700기분	
핵융합	약2,200 GW ≒ 0.5 GW로(爐)(ITER상당) × 약4,500기분	

[2] Zero Emission기술: 발전부문의 CO₂감축(남은 0.7 Gt)에 필요한 도입량

제조업CCS	철강, 시멘트, 화학, 종이펄프, 석유정제, GTL/CTL의 제조설비·플랜트(plant) 16%에 CCS부설	연젠가
연료전지 자동차 (CO ₂ free 수소)	약10억대(2050년의 총보유대수는 약26억대) 소요수소량: 150 Mt/년(현재 LNG수요의60%에 상당)	

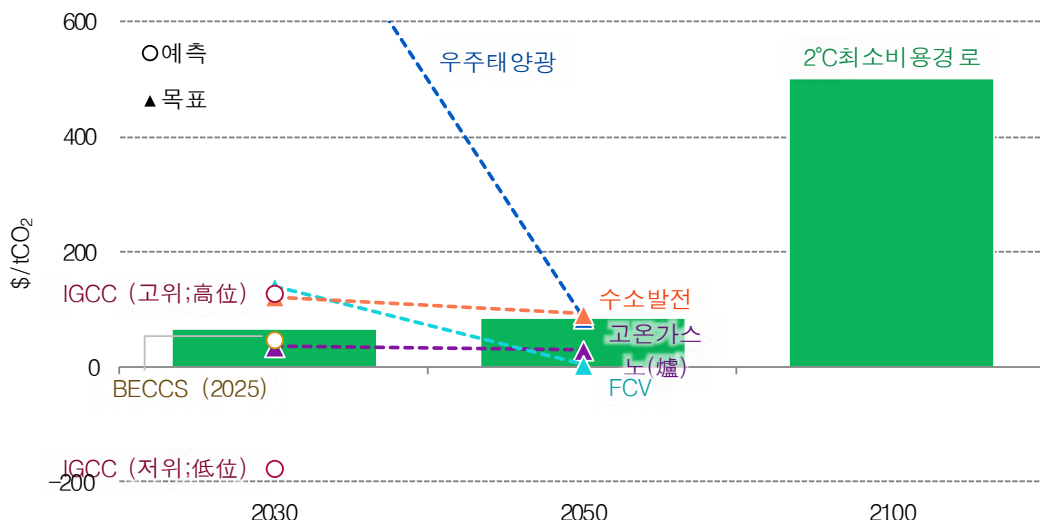
[3] 네거티브Emission기술: 발전부문에서의 CO₂감축(11.1 Gt)에 필요한 도입량

CCS부착바이오 메스발전(BECC S)	약1,400 GW ≒ 0.5 GW터빈(turbine) × 약 2,800기분 소요 바이오매스량: 2,000 Mtoe/년. 공급에 아르헨티나(278만km ²)보다 큰 285만km ² 상당의 토지가 필요
-----------------------------	--

주: 2050년 시점의 재고량, 이용량. 기술진전 시나리오로 부터의 추가분. [1]、[2]각각으로 부터의 한개씩, 또는 [3]에 의한 11.1 Gt의 삭감에 상당.

또한 이들 기술은 충분히 저가화되어 있어야 한다. 2°C최소 비용 경로에서 암묵적인 CO₂감축 비용(2010년 실질)의 최고치는 2050년에 \$85/tCO₂, 2100년에 \$503/tCO₂이다.(그림28) 누적 종합 비용(원가)을 줄이는 원칙이 규정하는 최소 비용 경로에서는 적어도 기술의 비용이 이 CO₂감축 비용을

밀돌지 않으면 그 기술은 도입되지 않는다. 또 다른 경쟁 기술보다 너무 낮지 않으면 경쟁 기술의 도입 잠재성(potential)에 제약이 없는 한 경제성 및 합리성으로 선택될 수 없다. 혁신적 기술에 혁신적인 비용 절감도 요구된다. BECCS, 수소 발전, FCV, 고온 가스로, 우주 태양 광선 등의 혁신적 기술의 목표 원가(비용)는 상기 CO₂감축 비용의 대략적인 범위 내에 있어 2°C목표는 이들 기술을 활용할 수 있다면 충분히 달성 가능하다.

그림28 | CO₂감축 비용

주: 2°C 최소비용 경로는, 동 경로의 각시점에서 채용된 기술 중 가장 높은 것의 비용(탄소가격)에서, 2010년 실적. 목표·전망의 전제조건·가능성 정도는 각 기술에서 상이하다. 계산의 주요전제:

[고온가스로(爐)] 원자력 과학기술 위원회 "고온 가스로 기술 개발에 관련된 향후 연구 개발 추진에 대해서(안)"을 참고로 30만 kW발전 원자로의 건설비 약 5억달러로 상정.

[석탄가스화 복합발전(IGCC)] OECD/NEA "Projected Costs of Generating Electricity 2015 Edition"을 참고로, 건설비 \$1,200/kW - \$2,900/kW, 발전효율 50%-52%로 상정.

[연료전지 자동차(FCV)] 수소·연료전지 전략협의회 「수소·연료전지 전략 로드맵」을 참고로, 2050년 차량가격 \$25,000 (기존의 차량과 동등), 연비 115 km/kg (가솔린 환산연비 31 km/L), 수소 소매가격 \$0.5/Nm³로 상정.

[수소발전] 수소·연료전지 전략 협의회 「수소·연료전지 전략 로드맵」、IEA "Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells"을 참고로, 2050년 수소공장 인도 가격 \$0.15/Nm³, 건설비 \$1,200/kW, 발전효율 57%로 상정.

[우주태양광] 우주시스템 개발이용 추진기구 「발송전 일체형 우주 태양광 발전 시스템2006모델 연구 개발 로드맵 2016년 개정판」을 참고로, 2050년의 발전단가 목표로 \$100/MWh를 사용.

[CCS부착 바이오매스 발전(BECCS)] IRENA "Renewable Power Generation Costs in 2014"에서, 바이오매스 발전단가 \$130/MWh, IPCC "Special Report on CCS"에서 CO₂회수 저류 비용 \$70/tCO₂를 기초로 추계