



2021년도 UN기후과학합동보고서





이 보고서는 UN 사무총장을 대신하여 세계기상기구(WMO) 주도로 최신의 기후과학 관련 업데이트 정보를 한데 모아 작성된 것으로 이 작업에 주요 파트너 조직들인 WMO, 전지구탄소프로젝트(GCP), 기후변화에관한정부간협의체(IPCC), UN환경프로그램(UNEP), 세계보건기구(WHO), 영국기상청, WMO-IOC-ISC 공동 후원 조직인 세계기후프로그램(WCRP) 등의 참여하였다. 각 장의 내용은 해당 주체에 각각 귀속된다.

이 보고서의 전자 파일은 다음 링크로부터 내려받을 수 있다: public.wmo.int/en/resources/united_in_science

표지 사진: 독일 코블렌츠에 있는 도이치 에크라는 곳에 폭우가 내린 후 난 홍수. 이 곳은 모젤강과 라인강이 합류하는 지점이다. Adobe stock/EKH-Pictures.

주 저자 및 기여 저자:

총괄 조정 및 편집 주관 (WMO): Jürg Luterbacher, Laura Paterson, Rosa von Borries, Kate Solazzo, Rose Devillier and Sylvie Castonguay (편집자).

대기 중 온실가스 농도 (WMO Global Atmosphere Watch): Oksana Tarasova (WMO), Alex Vermeulen (Carbon Portal, Lund University, Sweden), Claus Zehner (European Space Agency, Italy), Zoe Loh (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia)

전세계 온실가스 배출량과 배출허용총량 (GCP): Josep G Canadell (CSIRO, Australia), Robbie Andrew (Centre for International Climate and Environmental Research (CICERO), Norway), Philippe Ciais (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), France), Eric Davidson (University of Maryland Center for Environmental Science, USA), Steven Davis (University of California, Irvine (UCI), USA), Pierre Friedlingstein (University of Exeter, UK, and WCRP Joint Scientific Committee), Robert B. Jackson (Stanford University, USA), Corinne Le Quéré (University of East Anglia, UK), Glen Peters (CICERO, Norway), Rona Thompson (Norwegian Institute for Air Research (NILU), Hanqin Tian (Auburn University, USA), Zhu Liu (Tsinghua University, China)

2017~2021년 지구 기후 (WMO): John Kennedy (Met Office, UK), Atsushi Goto (Japan Meteorological Agency (JMA)), Stephan Rösner (DWD, Germany's National Meteorological Service), Peter Bissolli (DWD), Omar Baddour (WMO), Cyrille Honoré (WMO)

IPCC 6차 평가 보고서(AR6) 요점: 과학적 기초(IPCC): Valérie Masson-Delmotte (IPCC Working Group I (WGI) co-chair)

폭염·산불·대기오염: 폭염, 산불, 대기오염 : 건강에 위협한 복합적·연쇄적 재난 발생 (WHO/WMO): Rosa von Borries (WMO), Diarmid Campbell-Lendrum (WHO), Robert Stefanski (WMO)

해수면 고도 및 연안에 미치는 영향 (WMO/IOC/ISC): Robert J. Nicholls (University of East Anglia, UK, and WCRP), Sarah Grimes (WMO), Michael Sparrow (WCRP - WMO/IOC/ISC)

2021~2025년 지구 기후 (WMO 전 지구 1~10년 기후 업데이트 - Met Office (UK), WCRP, WMO): Adam Scaife (Met Office, UK), Leon Hermanson (Met Office, UK), Doug Smith (Met Office, UK)

배출량 갭(목표-현실 간 격차)(UNEP): Anne Olhoff (UNEP DTU (Technical University of Denmark) Partnership), John Christensen (CONCITO (Denmark's Climate Thinktank), Joeri Rogelj (Imperial College London, UK; International Institute for Applied Systems Analysis, Austria), Maarten Kappelle (UNEP), Jian Liu (UNEP).

발간사: UN사무총장 안토니오 구테흐스

올해는 기후 행동에 있어 중요한 해입니다. 유엔과 세계 과학 파트너 조직들이 함께 작성한 이 보고서는 가장 최근의 기후 과학에 대한 전체적인 평가를 제공합니다. 그 결과는 우리가 진로에서 얼마나 멀리 떨어져 있는지에 대한 평가인데 경각심을 자아내는 수준입니다.

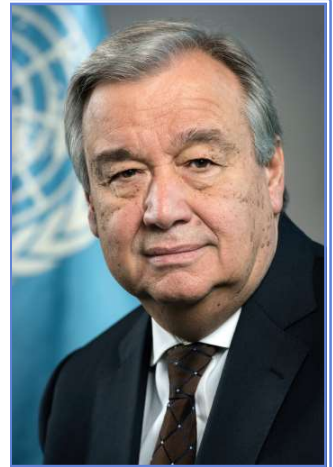
우리는 파리협정의 목표 달성을 위해 정해놓은 일정 표대로 가지 못하고 거기서 여전히 한참 벗어난 상태입니다. 올해 화석연료 배출량은 다시 예전 수준으로 회귀하였고, 온실가스 농도는 계속 상승 중이며, 인간 때문에 생긴 극심한 기상변이가 지구촌 여기저기 발생하여 우리의 건강과 삶, 생계에 영향을 미쳤습니다. 온실가스 배출량을 지금 당장이라도 신속하게 대규모로 감축하지 않으면, 지구온난화를 1.5°C로 제한한다는 것은 불가능하며, 그 결과 우리 인류를 비롯해 우리가 터 잡고 사는 이 지구가 재앙을 맞게 될 것입니다.

이 보고서는 명확합니다. 시간이 촉박합니다. 2021년 글래스고 유엔기후변화당사국회의(COP26)가 전환점이 되려면, 모든 국가가 2050년까지 배출 순 제로를 약속할 필요가 있습니다. 이를 위해서는 확실한 장기 전략을 비롯하여 2030년까지 전 세계 온실가스 배출 총량을 2010년 수준 대비 45% 감축하자는 강화된

국가온실가스감축목표(NDC)가 뒷받침되어야 합니다.

우리는 사람들과 그들의 생계를 보호하기 위한 돌파구가 필요한데, 이를 위해서는 모든 공적 기후재정의 최소 절반을 복원력 구축과 사람들의 기후 적응을 돕는데 투입해야 합니다.

아울러 우리는 개발도상국들이 기후 행동을 취할 수 있도록 돕겠다는 오랜 기후 재정지원 공약을 전면 이행하는 것을 포함하여 훨씬 더 큰 연대가 필요합니다. 우리가 모두를 위해 더 안전하고 더욱 지속 가능한 번영된 미래를 이루려면 이것 말고는 대안이 없습니다.



A. Guterres, Secretary-General UN

발간사: WMO 사무총장 페트리 탈라스

코로나19 팬데믹 기간 동안 우리가 들은 것은 "더 나은 재건이어야 한다"는 것입니다. 이는 바로 인류를 보다 지속 가능한 길로 인도하고 기후변화가 사회와 경제에 끼치는 영향이 최악으로 치달는 것을 피하기 위한 것입니다. 이 보고서는 2021년 현재까지 우리가 올바른 방향으로 가고 있지 않다는 것을 보여줍니다.

이미 300만 년 만에 최고 수준에 도달한 온실가스 농도는 계속 증가하여 올해 사상 최고치를 기록했습니다. 많은 부문의 화석연료 배출량은 팬데믹 이전과 같거나 심지어 더 높은 수준으로 회귀하였습니다. 2017~2021년의 지구 기온은 기상 관측 이래 가장 따뜻한 기간 중 하나이며, 해빙, 빙하 녹음, 해수면 상승 등과 같은 많은 기후 지표에서는 온난화가 뚜렷합니다.

'United in Science 2021'은 기후 변화와 관련된 최신의 과학 데이터와 연구결과를 제시하고 정책 및 의사 결정권자에게 정보를 제공합니다. 그것이 발간의 목적입니다. 이 작업은 과학자와 연구기관들 간에 형성된 글로벌 네트워크, 그리고 오늘날 우리가 마주한 도전을 해결하기 위해 우리가 지원받아야 할 중요한 기초관측, 모델링, 연구 인프라 등이 있었기에 가능했습니다.

이 보고서 작성에 참여한 많은 전문가 집단, 특히 전지구탄소프로젝트(GCP), 기후변화에관한정부간 협의체(IPCC), 세계보건기구(WHO), UN 환경프로그램(UNEP), 세계기후연구프로그램(WCRP), 영국기상청에 감사드립니다. 이들의 협력이 있었기에 기후과학공동체가 하나가 되어 이 같은 전례 없는 엄중한 시기에 최신의 필수적인 정보를 제공할 수 있게 된 것입니다.



Prof. P. Taalas, Secretary-General WMO

핵심점(Key Points)

대기 중 온실가스 농도 - WMO GAW

- 주요 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O) 농도가 2020년 한해와 2021년 상반기 동안 계속 증가
- 2020년 배출량의 전반적 감소가 대기 중 체류 기간이 긴 온실가스의 연간 증가량 감소를 일으킨 원인일 수는 있으나, 그 효과는 미미해서 자연 변동과 구분될 정도는 아니었음.

- 대기 중 메테인의 단기적 감소가 파리협정의 목표 달성에 도움이 될 수는 있음. 그렇다고 CO₂ 및 기타 온실가스에 대한 강력하고 신속하고 지속적인 감소의 필요성을 줄인 것은 아님.



전세계 온실가스 배출량과 배출허용총량(Budgets) - GCP

- 화석연료에 의한 CO₂ 배출 (석탄, 석유, 천연가스, 시멘트) : 2019년에 36.6 GtCO₂(기가이산화탄소톤)로 배출정점을 찍었는데, 곧 이어 2020년에는 코로나19로 인해 이례적으로 1.98 GtCO₂(5.6%) 하락했음.
- 이러한 하락은 일시적인 것이며, 이는 예비 추정값에 근거한 것인데, 2021년 1월부터 7월까지 전력 및 산업부문의 전 세계 배출량은 2019년 동기간보다 같거나 더 높은 수준을 보이고 있음. 도로수송 부문으로부터 나오는 배출은 약 5% 낮게 유지되었음.
- CO₂, CH₄에 이어 세 번째로 중요한 온실가스인 N₂O의 최근 배출 추세는 온실가스 배출에 따른 미래 기후변화 전망시 사용되는 공통사회경제경로(SSP) 중 가장 강한 수준의 경로마저 넘어섬.

전 지구 기후변화 (2017~2021) - WMO

- 2017~2021년 기간 동안의 지구 평균 기온은 기록상 가장 높으며, 이는 산업화 시대(1850~1900) 수준 대비 1.06~1.26℃ 높은 것으로 추산됨.
- 2017년부터 2021년까지 북극 해빙 범위의 여름철 평균 최저값과 겨울철 평균 최대값 모두 1981~2010년 간의 해당 장기 평균값 미만임.
- 2021년도에는 극한 수준의 대형 기상기후 사건들이 기록됨. 인간이 야기한 기후변화의 상징적 사건이라 할 수 있는 기상이변인 극한 폭염과 대홍수가 북미와 서유럽에서 각각 발생함.

핵심점(Key Points)

AR6의 하이라이트: 과학적 근거 - IPCC

- 인간의 영향이 대기 해양 육지를 온난화시킨 것이 분명한. 대기·해양·빙권에서 광범위하고 신속한 변화가 일어남.
- 기후시스템 전반에 걸쳐 일어난 최근 변화의 규모와 기후시스템 여러 측면의 현 상태가 수 세기 내지 수 천 년 동안 전례가 없었음.
- 인간이 유발한 기후변화는 이미 전 세계 모든 지역에서 예외 없이 수많은 기상·기후 이변의 빈도와 강도를 높이고 있음.

폭염, 산불, 대기오염: 건강에 대한 복합적이고 연쇄반응식의 기후 재난 - WHO/WMO

- 기온 상승은 온열질환 사망률 및 노동 손실률의 증가와 직결되어 있음. 2019년에 전 지구적으로 1,100억 시간이 넘는 노동시간 손실이 있었는데, 2000년에는 이 정도는 아니었음.
- 코로나19 감염병과 폭염·산불·대기오염과 같은 기후 관련 재난이 결합되어 전 세계 인류의 건강을 위협하고 있음. 특히 취약계층의 사람들을 위험에 빠트리고 있음.
- 코로나19로부터의 회복 노력은 복합적이고 연쇄반응식의 기후재난으로부터 리스크를 줄이고 건강상의 공동 편익을 얻고자 하는 국가 차원의 기후변화 및 대기질 전략과 맥을 같이해야 함.

해수면고도 상승 및 연안 피해 - WCRP (WMO/IOC/ISC)

- 전지구 평균 해수면 고도가 1900년부터 2018년까지 20 cm 상승하였고 2006년부터 2018년까지는 그 상승속도가 0.37+0.5 mm/yr로 빨라짐.
- 지구온난화 수준을 2°C보다 훨씬 낮게 제한해도, 전지구 평균 해수면 고도는 1995~2014년의 그것에 비해 2100년까지 0.3~0.6 m 상승할 가능성이 높으며 2300년까지는 0.3~3.1 m까지 상승할 수 있음.
- 온실가스 배출이 꺾이지 않고 계속 이어질 경우, 전지구 평균 해수면고도는 1995~2014년 평균 대비 2100년까지 0.6~1.0 m 상승할 가능성이 높으며, 신뢰수준이 조금 낮긴 하지만 2300년까지 전지구 평균해수면 고도가 1.7~6.8 m 범위로 상승하고 그 이후로도 계속적인 거대 상승이 있을 수 있음.
- 기후가 안정된다손 치더라도 이러한 점진적 상승에 적응하는 것이 반드시 필요. 특히 적응 전략이 절실히 필요한 대상은 해발고도가 낮은 연안지역, 소도시, 삼각주, 해안도시 등임.

2021~2025년 지구기후 - WMO 1년~10년 기후 업데이트 - 영국기상청/WMO/WCRP

- 지표면 부근의 지구 연평균 기온은 향후 5년 동안 매년 산업화 이전 수준(1850~1900년 평균으로 정의됨)보다 최소 1°C 더 높을 가능성이 높으며 그 범위는 0.9°C에서 1.8°C일 가능성이 매우 높음.
- 향후 5년 중 한 해의 지구 평균온도가 산업화 이전 수준보다 적어도 1.5°C 더 높게 나타날 가능성은 40%이지만 2021~2025년 기간 전체에 대한 5년 평균온도가 산업화 이전 수준보다 1.5°C 더 높을 가능성은 매우 낮음(~10%).
- 2021~2025년 동안 고위도 지역과 사헬 지역은 최근보다 더 습할 가능성이 있음.

배출량 갭(목표-현실 간 격차)(UNEP)

- 파리협정 채택 5년 후, 배출 목표와 현실 간의 격차가 역대 최대로 벌어짐: 전 세계 온실가스 배출량은 2°C 온난화를 목표로 할 경우, 현재 국가들이 제출한 무조건부 국가온실가스감축목표(NDC) 보다 15 GtCO₂e 더 낮아야 하며, 1.5°C 온난화를 목표로 할 경우는 32 GtCO₂e 더 낮아야 함.
- 코로나19 위기는 전 세계 배출량의 단기적 감소에만 기여. 국가들이 경제 회복 시 강력한 탈탄소 정책을 추진하지 않는 한, 2030년까지 배출량이 크게 줄어들지 않을 것임.
- 배출 순 제로 목표를 공약하는 국가의 수가 증가하는 것은 고무적임. 현재 전 세계 배출량의 약 63%가 그러한 목표에 의해 감축이 이뤄질 것임. 그러나 그것이 실현 가능하고 믿을 수 있는 목표가 되려면, 그것을 2030년까지 이어지는 단기 정책을 비롯하여 NDC에 훨씬 더 과감하게 반영시킬 필요가 있음.

대기 중 온실가스 수준

대기 중 이산화탄소(CO₂), 메테인(CH₄), 아산화질소(N₂O)의 농도가 계속 상승하고 있다. WMO 지구대기감시기(GAW) 온실가스(GHG) 관측 네트워크로부터 얻은 데이터의 예비 분석 결과, 북반구의 CO₂ 농도¹⁾가 2020년 대부분 기간 410 ppm을 초과했으며 2021년 상반기에는 415 ppm을 초과한 것으로 나타났다.

3개의 주요 GHG(그림 1)에 대한 전체 분석 결과 CO₂의 전지구 평균 농도는 410.5±0.2 ppm, CH₄는 1877±2 ppm(ppb), N₂O는 332.0±0.1 ppb(1750년 산업화 이전 수준 대비 각각 148%, 260%, 123%)로 나타났다. CO₂와 CH₄의 연간 증가율은 10년 평균 증가율보다 큰 반면, N₂O의 연간 증가율은 10년 평균 증가율보다 약간 낮았다(WMO, 2020).

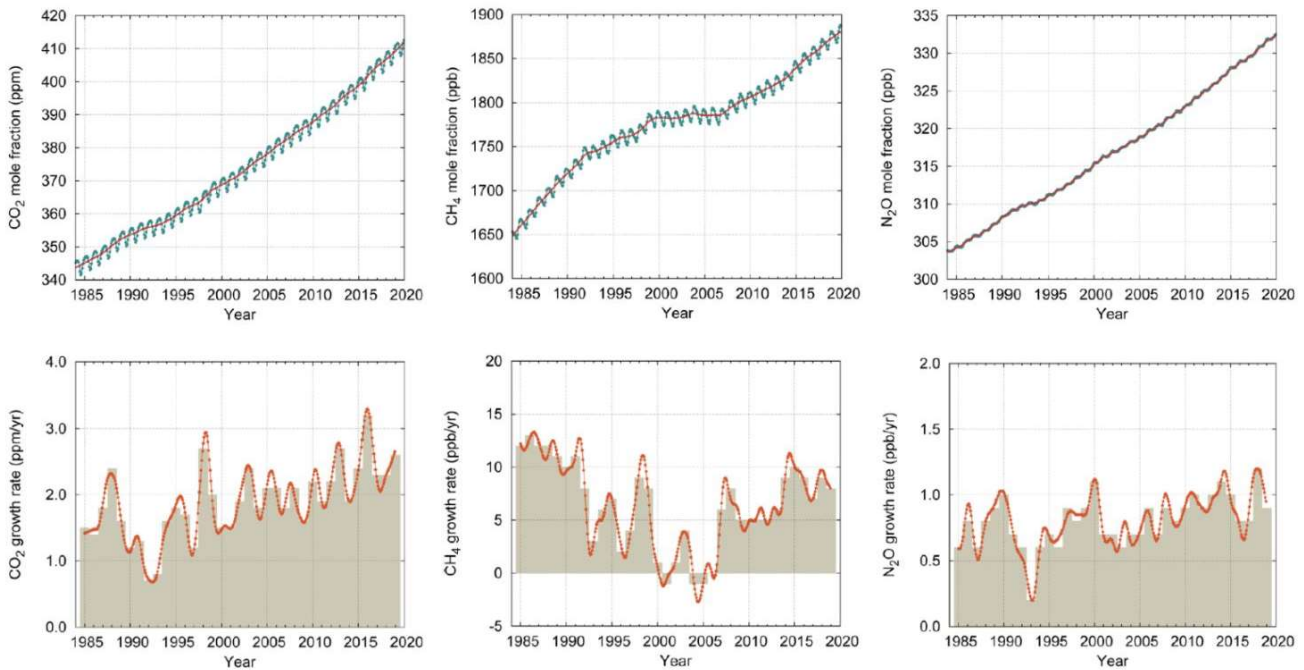


그림 1. 1984년부터 2019년까지 CO₂, CH₄ 및 N₂O 물분율(단위: CO₂는 ppm, CH₄와 N₂O는 ppb)의 전 지구 평균(상행)과 각각의 증가율(하행). 하행의 그림의 음영 처리된 막대는 연평균을 나타내며 조금씩 증가하고 있음을 보여줌. 상행의 빨간색 선은 계절 변동이 제거된 월평균이고 파란색 점과 선은 월별 평균을 나타냄.

2020년의 지구 평균 농도에 대한 최종 데이터는 2021년 하반기에 공개되지만, 대표 관측소들을 포함한 모든 지구급 관측소 데이터를 보면 CO₂, CH₄, N₂O 수준이 2020년과 2021년에 계속 증가하였다(그림 2와 3). 2021년 7월 마우나로아(미국 하와이)와 케이프그림(호주 타스마니아)의 CO₂ 농도는 각각 416.96 ppm과 412.1 ppm이었는데, 참고로 2020년 7월에는 각각 414.62 ppm과 410.03 ppm이었다.

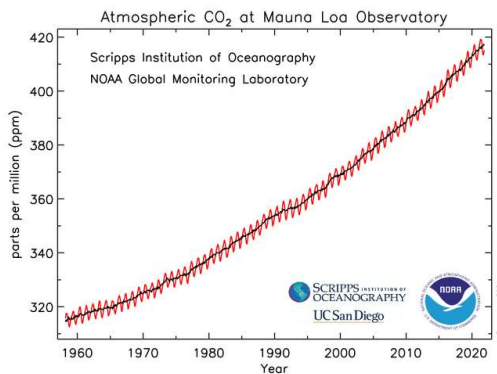


그림 2. 마우나로아 관측소에서 측정된 1958년 3월부터 2021년 7월까지의 ppm 단위 월평균 CO₂ 물분율. 붉은색 점선은 매월 15일의 월평균값. 검은색 실선은 동일한 것을 나타내지만 여기서 평균 계절 변동은 통계처리에 의해 제거됨. 출처: www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/mlo.html

1) 이 섹션에서 대기 중의 기체량과 관련된 물리적 양(건조 물 분율)을 “농도”라고 한다.

온실가스 농도 변동과 코로나19 전염병

전지구탄소프로젝트(Friedlingstein 등, 2020)의 추정 에 따르면 2010~2019년의 총 배출이 대기(44%), 해양(23%), 토지(29%)로 구분되며, 4%는 출처가 모호한 수치 불균형 분이다. 대기 중 GHG 농도의 증가는 인간의 배출에 의한 것이지만, 대기 중 CO₂ 증가율의 연간 변화는 흡수원, 특히 육상에 기반한 생물권의 변동에 의해 조절된다. 최근 10년간 CO₂ 증가율은 연간 2~3 ppm이었고 그중 엘니뇨가 강했던 해인 2016년도가 가장 높은 증가율인 3.2 ppm을 보였다(WMO, 2016). 엘니뇨는 일반적으로 육지 표면에 가뭄 발생 범위를 넓히므로 흡수원인 식생이 대기로부터 CO₂를 취하는 양이 감소한다(Betts 등, 2016).

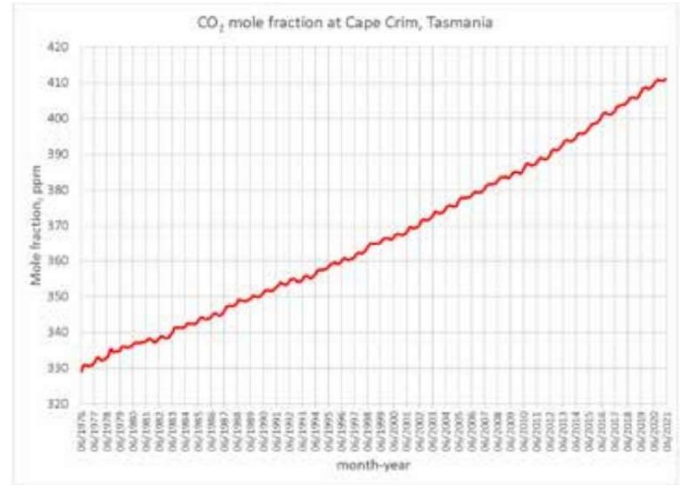


그림 3. 케이프그림 관측소의 1976년 5월부터 2021년 7월까지의 월 평균 CO₂ 몰분율(ppm단위) (<https://www.csiro.au/greenhouse-gases/>)

코로나19 위기로 인한 CO₂ 배출 감소(-5.6%, "전세계 GHG 배출량과 배출허용총량(Budgets) - GCP" 섹션 참조)는 생물권의 흡수가 주도하는 연간 증가율의 변화를 가져왔는데 최종적으로 1 ppm에 훨씬 못 미치는 0.2 ppm 미만으로 연간 증가율이 떨어질 것으로 보인다. 이 차이는 0.1 ppm 이상의 정확도를 목표로 하는 GAW 네트워크에서 확인할 수 있는데, 이 정도를 검출해 내려면 1년 이상의 측정 기간이 필요하다.

파리협정에서 합의한 온도 목표 달성을 뒷받침하기 위한 메테인 모니터링

메테인(CH₄)은 여러 수명 긴 온실가스에 의한 복사강제력의 약 16%를 차지하며, 그러다 보니 CH₄는 두 번째로 중요한 온실가스이다. 메테인의 약 40%는 습지와 흰개미와 같은 자연 배출원에 의해 그리고 약 60%는 반추동물, 비농사, 화석연료 채굴, 매립지 및 바이오매스 연소와 같은 인위적 배출원에 의해 대기로 배출된다(Sauniois 등, 2020). CH₄ 배출은 또한 대류권 오존 생성을 통해 인간의 건강과 농업 생산성에 간접적으로 영향을 미친다(UNEP, 2021). 지구온난화를 제한하려면 CO₂, CH₄ 및 기타 온실가스의 강력하고 신속하며 지속적인 감축이 필요하다(IPCC, 2021).

2019년의 전세계 CH₄ 농도 증가치는 8 ppb(WMO, 2020)으로 지난 10년 동안 5~10 ppb(ppb/yr)이라는 연간 증가 추세를 이어가고 있다. 미국해양대기처(NOAA)가 운영하는 관측망 데이터를 기반으로 한 예비 분석에 따르면 메테인 농도가 2020에 15 ppb 증가했으며, 이는 지난 37년(1984년~2020년) 기록 중 최대치이다(https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_CH4/).

CH₄ 안정 동위원소 관측자료는 대기 중 CH₄ 배출원을 식별하는데 활용된다(Nisbet 등, 2016). 관측에 기반한 13C-CH₄는 자연 미생물 및 인위적 미생물 모두와 화석연료로 인한 배출량을 모두 결합한 값인데 그 추세는 증가 방향으로 가고 있다(WMO, 2020).

CH4 배출 문제를 다룰 때는 먼저 배출 유무를 점검·확인하고, 그 양을 산정하는 것으로 시작한다(Nisbet 등, 2020). 위성 데이터는 예를 들어 가스 및 석유 생산 현장에서 이전에는 알려지지 않았던 대규모의 CH4 배출원(핫스팟) 위치를 찾는 데 중요한 역할을 한다. 위성의 TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI)는 지구 표면에 대한 높은 감도를 가진 CH4 컬럼 농도를 제공한다. TROPOMI는 우수한 시공간 커버리지와 배출·흡수원의 역 모델링을 용이하게 할 수 있는 만큼 충분한 정확도를 갖고 있다. TROPOMI 데이터는 배출 핫스팟 지역을 식별하는데 사용되었는데(그림 4), 이를 통해 메테인의 슈퍼 배출체를 다루기 위해서는 어떤 조치를 해야 하는지를 안내해준다.



그림 4. 이 이미지는 Sentinel-5P에 의해 측정된 2019년의 비정상 메탄 농도 상황을 보여준다. 원의 크기와 색상은 감지된 플룸의 크기와 강도를 나타낸다. 색깔이 붉을수록 메탄 플룸의 농도는 더 높아진다. 이 이미지에는 Kayross가 처리한 수정된 코페르니쿠스 센티넬 데이터(2019)가 포함되어 있다.

지상에서의 정확한 측정이 필수적인 위성 유도 배출 추정치를 개선하기 위해서는 여전히 상당한 방법론적 개발이 필요하다. 그러나 현재 역량으로도 지역 배출 모니터링에 중요한 새로운 기여를 할 수 있다. 센티넬-5P와 센티넬2 메테인 측정값을 조합하면 유망한 배출을 결과를 도출해낼 수 있다(그림 5 참조).

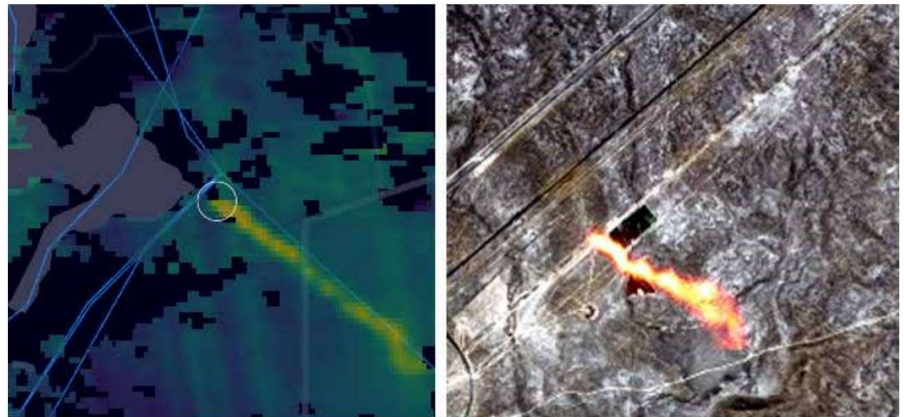


그림 5: 센티넬-5P(왼쪽) 및 센티넬2(오른쪽) 미션에 의해 감지된 카자흐스탄 가스관 위의 메탄 배출 핫스팟. 이 이미지에는 Kayross가 처리한 수정된 코페르니쿠스 센티넬 데이터(2019)가 포함되어 있음.

몇몇 연구에서 CH4 배출의 완화가 가져올 단기적인 기후 편익과 비용효과에 대해 지적인 바 있다. 이 내용은 2021년 UNEP 메테인 평가에 잘 설명되어 있다. 현재 국제사회에서 메테인 배출을 제한하자는 강력한 요구가 있으며 이와 연관된 국제 메테인 관리 10년 계획이 제76차 유엔 총회에 제안될 예정이다.

참고문헌

Betts, R. A., et al. 2016: El Niño and a Record CO2 Rise, Nature Climate Change 6 (9), 806-10. doi:10.1038/nclimate3063, <https://www.nature.com/articles/nature06591>

Friedlingstein, P., et al. 2020: Global Carbon Budget 2020. Earth Syst. Sci. Data, 12, 3269-3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>

Nisbet, E.G., E.J. Dlugokencky, E. J., et al. 2016: Rising atmospheric methane: 2007-2014 growth and isotopic shift. Glob. Biogeochem. Cycl. 30, 1356-1370, <https://doi.org/10.1002/2016GB005406>

Nisbet, E. G., et al. 2020: Methane mitigation: methods to reduce emissions, on the path to the Paris agreement. Rev. Geophys.58, <https://doi.org/10.1029/2019RG000675>

Ocko, IB, et al. 2021: Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming. Environ. Res. Lett. 16 054042, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abf9c8/pdf>

Saunois, M., et al. 2020: The Global Methane Budget 2000-2017. Earth Syst. Sci. Data, 12, 1561-1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>.

United Nations Environment Programme (UNEP) and Climate and Clean Air Coalition, 2021: Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions. Nairobi: United Nations Environment Programme. ISBN: 978-92-807-3854-4

WMO, 2020: WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 16: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2019. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10437

전세계 GHG 배출량과 배출허용총량(Budgets) - 전지구탄소프로젝트(GCP)



2019년도에 화석연료 연소와 토지 사용 변화로 인해 세계 CO₂ 배출량은 1990년대 초 국제 기후협상이 시작되었을 때의 수준보다 56% 높은 43기가톤(10억 톤)으로 최고치를 경신했다. 전체 CO₂ 배출(2010~2019)의 약 85%를 차지하는 화석 CO₂ 배출(석탄, 석유, 가스 및 시멘트)은 2019년에 36.6 GtCO₂로 정점을 찍은 후 2020년에 1.9 GtCO₂(5.6%) 만큼 크게 감소했다(Friedlingstein 등, 2020, 그림 1). 배출량 감소는 주로 코로나19로 인한 1차 봉쇄 파동 기간 벌어진 세계 경제의 침체와 에너지 수요 감소 때문이었다. 수송 부문, 특히 도로 수송 부문이 배출 하락에 가장 크게 기여했다. 항공은 2020년 봉공항봉쇄가 절정에 달했을 때 75% 감소했지만, 이 부문은 전 세계 연간 총배출량 평균의 약 2.8%만을 차지한다는 점에서 기여도가 더 작았다(Le Quere 등, 2020).

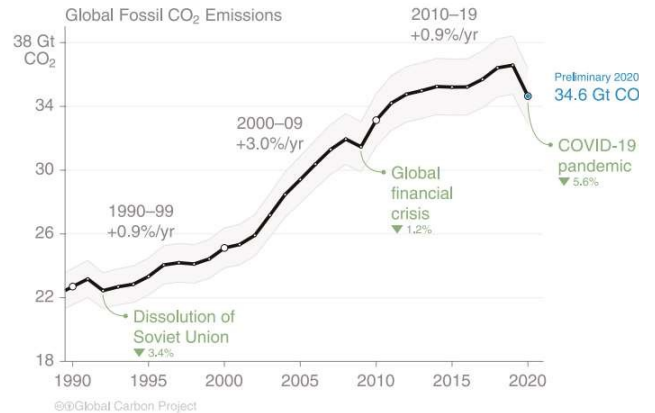


그림 1. 석탄, 석유, 천연가스, 시멘트 생산으로 인한 전지구 화석 CO₂ 배출량. Friedlingstein 등(2020)으로부터 업데이트된 자료에 근거.

2020년 배출량 감소폭은 2008년 글로벌 금융위기 당시(전년 대비 1.5%)에 비해 거의 4배에 달하며, 절대값으로 봐도 그 연간 감소폭(1.9 GtCO₂, 그림 2)은 역대 최대였다. 팬데믹 이후 회복을 둘러싼 불확실성은 존재하지만 이와 같은 감소는 일시적이며, 2021년 초기 추정치가 보여주는 강한 배출량 회복세로 1~2년 내에 코로나19 이전 수준으로 복귀할 가능성이 있다(그림 3).

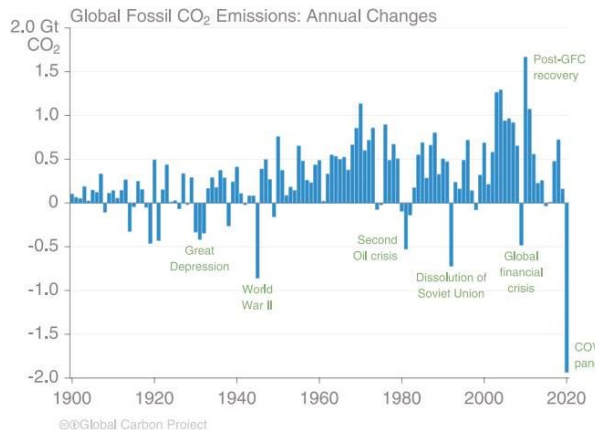


그림 2. 전 지구 화석 CO₂ 배출의 연변화. Friedlingstein 등(2020)으로부터 업데이트된 자료에 근거함.

예비 추정치를 기반으로 한 2021년 1~7월간의 전력 및 산업 분야의 전 세계 배출량은 코로나19 대유행 이전인 2019년 같은 기간과 비교했을 때 같거나 더 많았으며, 반면 도로 수송 배출량은 약 5% 낮은 수준을 유지했다. 항공과 해상 운송을 제외하고, 그 7개월간을 평균한 전 세계 배출량은 2019년과 거의 같은 수준이었다.

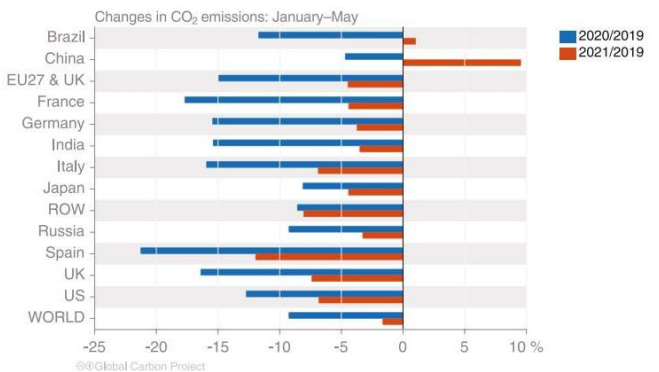


그림 3. 전 세계 및 선별된 국가 그룹에 대한 화석연료 CO₂ 배출의 2020과 2021년 1~5월간의 변화와 2019년의 동기간 변화 비교 (Carbon Monitor)

2021년에도 배출량 증가율은 높을 것으로 예상되지만, 중기 전망에 따르면 금세기 초와 비교해 둔화될 것이라고 한다. 사실상 증가율 둔화는 전염병 대유행 이전에 이미 시작되었다. 지난 10년 동안의 연평균 증가율은 1%로 하락하였는데, 앞선 10년(2000-2009) 동안은 3%였다. 대유행 직전인 2019년의 배출량 증가율은 제로에 가까웠다. 전염병 이전 5년 동안 150개국에 화석 CO₂ 배출량을 증가시켜왔다는 점을 감안해도 언제 최대 CO₂ 배출량에 도달할지는 확실하지 않다. 다만 조금씩 진전이 있는 것은 64개국에 CO₂ 배출을 줄여나가고 있다는 점이다(Le Quere 등, 2021).

2019년도에 토지 이용 변화(삼림 벌채, 파괴, 재녹화)의 순 영향으로 인해 CO₂가 대기 중으로 6.6±2.5 Gt이

흡수 대형 산불로 인해 나온 것으로 지난 10년

전세계 GHG 배출량과 배출허용총량(Budgets) - 전지구탄소프로젝트(GCP)

(2010~2019) 평균인 5.8 GtCO₂를 상회한다(Friedlingstein 등, 2020). 전 세계 탄소 수지에서 처음으로 순 토지 사용 변화 배출량을 구성하는 기여 총 유량에 대한 추정치를 제공하고 토지 개간, 이동 경작 및 이탄 배수와 같은 총 배출량이 순 플렉스(2010-2019년 평균)보다 약 2~3배 더 크다는 것을 보여준다. 그러나 추정치를 서로 비교해보면 지난 10년 동안의 토지 이용 배출량 추이가 일관성을 보이지 않는데 이는 산림 손실 지역의 추정치가 서로 다르기 때문이다. 이러한 배출은 농작물 폐기 후 재녹화 및 초목 재생과 같은 인공적인 흡수원에 의해 부분적으로 상쇄된다.

육상 및 해양 흡수원은 모든 인공 CO₂ 배출량의 거의 절반을 제거했고, 특히 2019년과 2020년 해양 흡수원의 처리수준은 10년 평균(2000~2009)에 가깝게 유지되었다. 육상 흡수원의 처리 수준은 평균보다 약간 낮았는데, 여기에 호주 등지의 산불과 같은 여러 이상기후 현상이 반영되었기 때문이다.

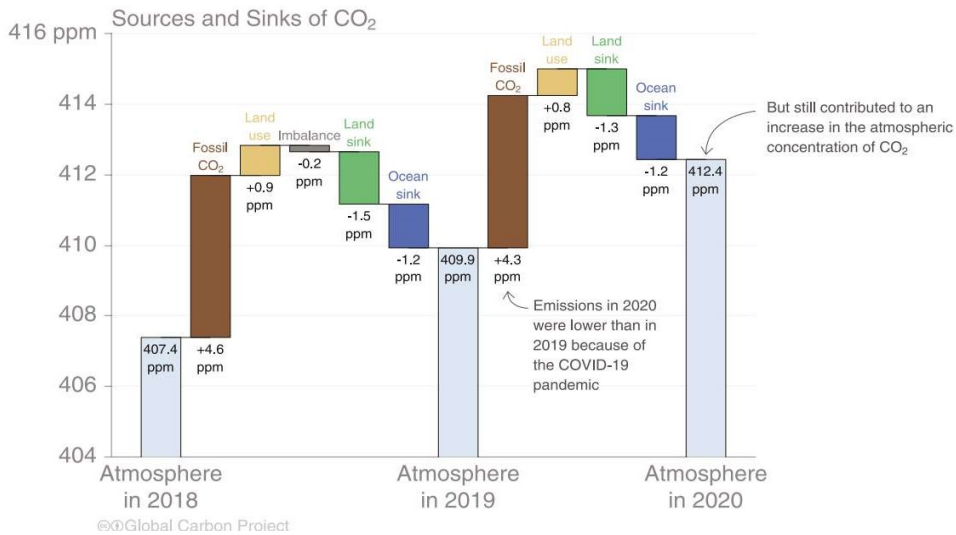


그림 4. 대기 중 CO₂ 농도 변화(ppm, parts ppm)는 주요 배출원의 화석연료 및 시멘트 생산과 결부되어 있음. Friedlingstein 등(2020)의 데이터를 근거로 함. 대기 중 농도는 NOAA/ESRL 네트워크의 데이터에서 산정한 것이므로 WMO 글로벌 네트워크에 기반한 값과 정확히 같지는 않다. 후자는 전지구 탄소 수지 현황을 출판용으로 제출시 택하게 되는 데이터임.

아산화질소 배출의 중요성

아산화질소(N₂O)는 이산화탄소(CO₂)와 메테인(CH₄)에 이어 온난화에 기여하는 세 번째로 중요한 온실가스이다. 3위라서 주목을 덜 받기도 하지만, N₂O는 단위 질량당 열을 가두는 데 있어서 (100년 기준으로 봤을 때) CO₂보다 298배나 높은 효과를 가진다. 일단 배출된 N₂O는 대기 중에 116±9년 동안 머무르는데, CO₂보다 수명이 짧지만, CH₄보다는 훨씬 길다.

N₂O의 인위적 배출량은 100년이 넘는 기간 동안 계속 늘고 있으며, 지난 30년 동안에는 30% 증가하였다. 농업의 경우 질소 비료와 거름을 사용하는데, 모든 인위적 N₂O 배출의 70%를 기여한다(Tian 등, 2020). 환경에 남아 있는 과잉 질소는 1900년부터 2016년까지 전세계 하천의 N₂O 배출량을 4배 증가시켰고, 그중 지난 10년이 정점이었다(Yao 등, 2020). 최근 발간된 "Global N₂O Budget"(그림 5)은 대기 중 N₂O의 축적을 결정하는 모든 인공 자연 공급원과 흡수원을 추정했다.

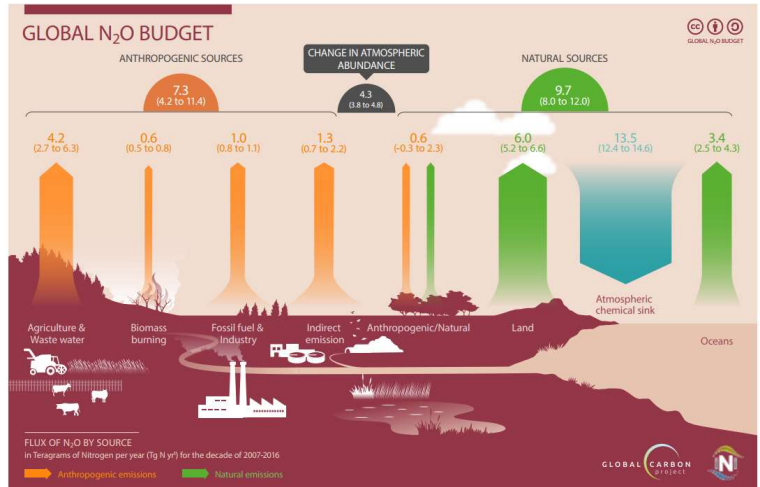


그림 5. 2007-2016년 10년간 모든 주요 인공 및 자연 배출원 및 흡수원에 대한 전지구 평균 N₂O 수지(Tian 등, 2020년 개정).

전세계 GHG 배출량과 배출허용총량(Budgets) - 전지구탄소프로젝트(GCP)

N₂O 배출의 최근 추세는 지구상의 기후 관련 공동체가 사용하는 공통사회경제경로(SSP)의 수준을 초과하며, 파리 협정 목표를 상정한 시나리오에서 빠르게 이탈하는 궤적을 보여준다(그림 6). 이러한 증가 추세에도 불구하고, 일부 지역(예: 유럽)에서는 배출이 진정되고 있는데, 이는 종종 (배출 방지 기술을 통한) 산업부문의 배출 감소와 농업의 질소 사용 효율의 증가에 기인한다(Thompson 등, 2019). 이러한 기술 및 효율 개선은 예를 들어 북미와 같은 일부 지역의 농업 활동 증가로 인한 N₂O 배출량 증가를 상쇄하는 데에도 중요하다.

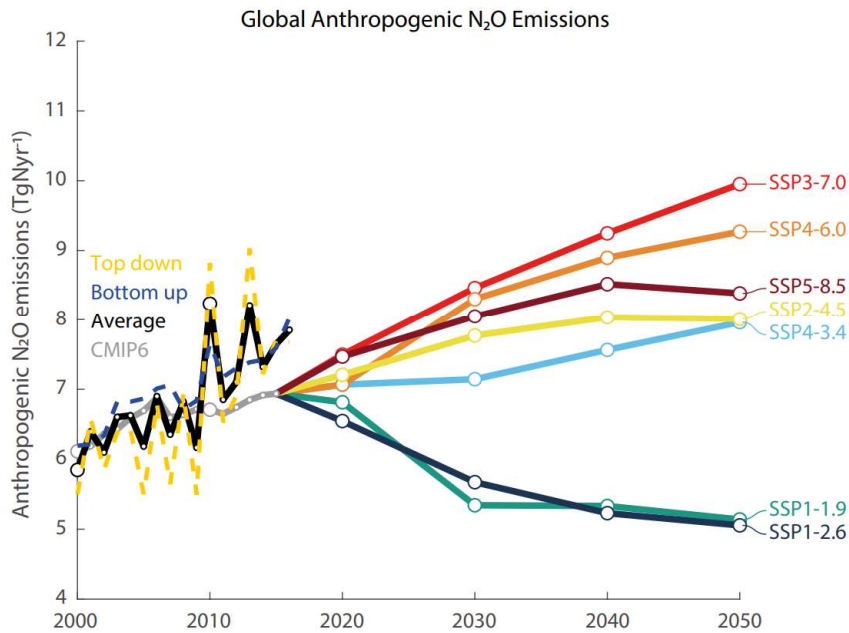


그림 6. IPCC AR6에 사용된 마커 공통사회경제경로 시나리오에 따른 전 지구 N₂O 배출량의 역사와 전망(Tian 등, 2020).

참고문헌

- Carbon Monitor: <https://carbonmonitor.org/>
- Friedlingstein, P. et al. 2020: Global Carbon Budget 2020. Earth Sys. Sci. Data, 12, 3269-3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020> Global Carbon Project, 2021: An annual update of the global carbon budget and trends. <https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget>
- Le Quere, C. et al. 2020: Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. Nat. Clim. Chang., 10, 647-653, <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>
- Le Quere, C. et al. 2021: Fossil CO₂ emissions in the post-COVID-19 era. Nat. Clim. Chang., 11, 197-199, <https://www.nature.com/articles/s41558-021-01001-0>
- Thompson, R.L. et al. 2019: Acceleration of global N₂O emissions seen from two decades of atmospheric inversion. Nat. Clim. Chang., 9, 993-998, <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0613-7>
- Tian, H. et al. 2020: A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. Nature, 586, 248-256, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>
- Yao, Y. et al. 2020: Increased global nitrous oxide emissions from streams and rivers in the Anthropocene. Nat. Clim. Chang. 10, 138-142, <https://www.nature.com/articles/s41558-019-0665-8>

2017~2021년 지구 기후 현황 - WMO



본 섹션은 지난 5년(2017~2021) 동안의 두 가지 중요한 기후 지표(Trewin 등, 2021)인 기온과 해빙의 변화 현황에 대한 요약이다. 2017~2021년의 지구 평균 기온(2021년에 대한 것은 데이터세트에 따라 1~5월 혹은 1~6월의 평균임)은 기록상 역대 어느 5년 기간 평균보다 높다(그림 1). 사용되는 데이터세트에 따라 조금씩 차이가 있긴 하지만 산업화 이전(1850~1900) 수준보다 1.06~1.26°C 높을 것으로 추정된다.

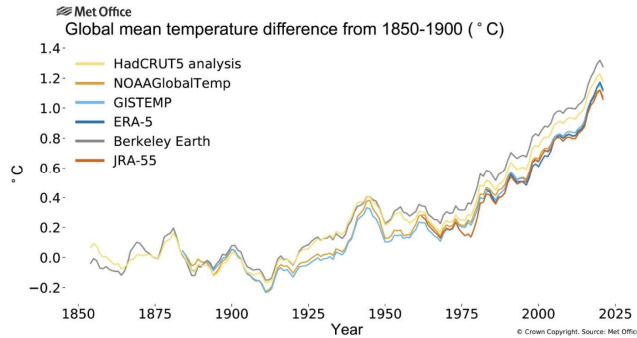


그림 1. 1854년부터 2021년까지 5년 단위의 지구 기온의 산업화 이전 대비 편차. 사용된 데이터세트는 6종으로 HadCRUT5.0.1.0, NOAA GlobalTemp v5, GISTEMP v4, Berkeley Earth, ERA5, JRA-55임. 2020년부터 2021년 6월까지의 데이터는 HadCRUT5, 7월까지는 NOAA GlobalTemp, GISTEMP, Berkeley Earth, ERA5 및 JRA-55임.

2017~2021년 지구 평균 기온은 2016~2020년의 그것보다 약간 낮아졌다. 이는 주로 2016년 엘니뇨 현상 때 지구 기온이 상승했지만(WMO, 2016년), 반면에 2021년 초 라니냐 현상으로 인해 지구 연평균 기온이 소폭 하락했기 때문이다. 2017~2021년의 5년 평균 기온은 북아프리카, 중동, 동아시아, 미국 동부, 중미 일부, 남미 전역에서 기록상 가장 높을 것으로 보인다. 오로지 몇몇 육상 영역에서만 1981~2010년 평균에 가깝거나 약간 낮았는데, 그림 2에서 볼 수 있듯이 북미의 한 군데가 특히 그러하다(그림 2).

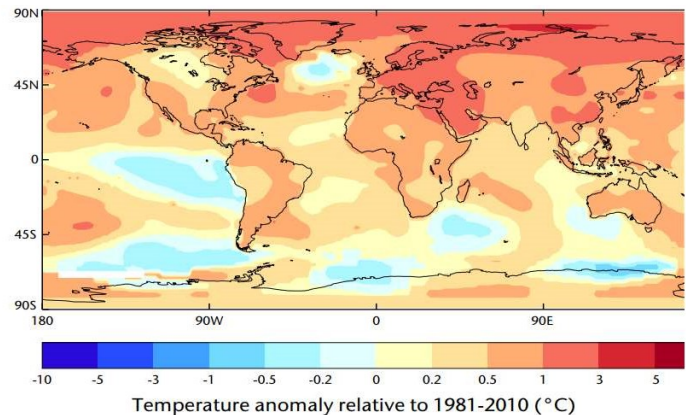


그림 2. 1981~2010년 평균 기온 대비 2017~2021년 5년 평균 기온 편차. 데이터는 NASA GISTEMP v4에서 가져온 것으로 2021년 7월 현재까지로 업데이트된 것임.

해빙(Sea ice)

북극 해빙은 위성 시대(1979년~현재)가 열린 후 지금까지 매월 보여지듯이 오랜 기간에 걸쳐 감소해 왔으며, 해마다 늦여름에 가장 큰 상대적 손실이 발생했다. 그림 3은 늦여름인 9월 무렵에 연간 최저치를 보여준다. 2016~2020년 동안의 9월 평균 북극 해빙 면적은 1981~2010년 평균보다 28% 작았고, 3월 평균 해빙 범위는 1981~2010년 평균보다 약 6% 작았다.

2017년부터 2021년까지 매년 북극 빙하의 여름 평균 최소면적과 겨울 평균 최대면적 각각은 1981~2010년 장기 평균 최대·최소 면적 미만이었다. 2020년 9월 북극 해빙 면적은 역사상 두 번째로 최저치를 기록했다.

얼음은 오래될수록 두꺼운 게 보통인데, 이 같은 두꺼운 얼음의 비율 역시 눈에 띄게 줄었다. 연중 해빙 면적이 최대인 3월에 1년 넘게 오래된 얼음의 비율이 1985년 약 60%에서 2021년 약 27%로 감소했다. 4년이 넘은 얼음의 비율은 1985년 30%에서 2021년 5% 미만으로 감소했다.

남극의 해빙 면적은 위성 시대가 시작된 이후 2015년경까지 서서히 증가했다. 그러나 2015년 이후 3년 동안 해빙 면적이 급격히 감소하였다(그림 3). 이러한 감소는 해양 온난화와 관련이 있으며, 이에 더해 봄철 따뜻한 공기의 유입과 비정상적인 중위도 편서풍의 약화도 한몫했다. 이후 해빙 면적은 장기 평균에 가까운 수준으로 돌아왔다.

2017~2021년 지구 기후 현황 - WMO

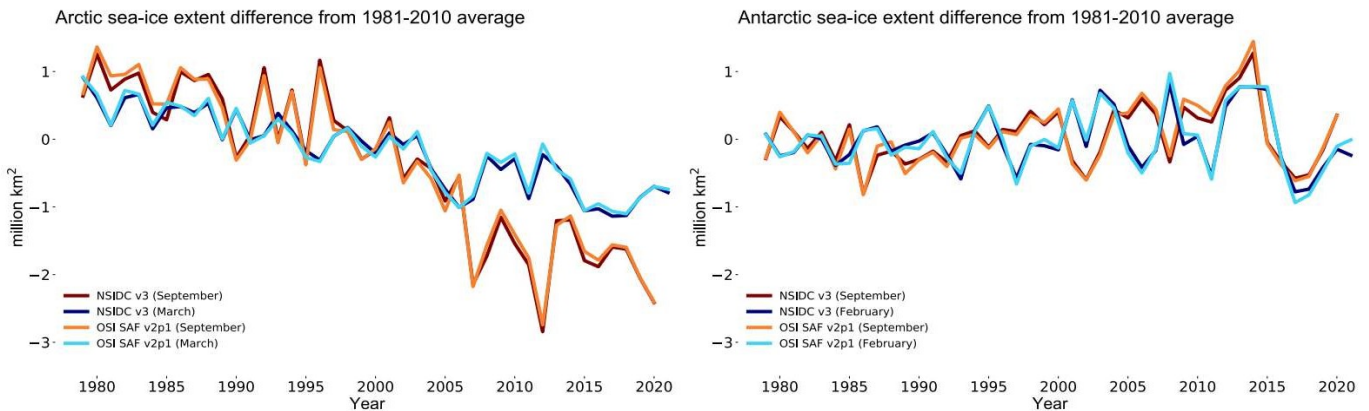


그림 3. 1979-2021년 기간동안: (왼쪽 패널) 1981-2010년 평균 대비 각 9월과 3월의 북극 해빙 면적 편차, (오른쪽 패널) 1981-2010년 평균 대비 각 2월과 9월 남극 해빙 면적 편차(출처: 미국빙설데이터센터(NSIDC) 및 EUMETSAT 해양해빙 위성 응용 시설(OSI SAF))

이례적이고 위험한 폭염이 6월/7월 미국 북서부와 캐나다 서부 황폐화시켜

캐나다에서 역대 최고기온 기록이 세워졌는데, 그것은 바로 2021년 6월 29일 브리티시컬럼비아주의 리튼에서 기록한 49.6°C이다. 세계날씨원인규명(WWA) 팀은 동류검토 방법(van Oldenborgh 등, 2021)을 사용하여, 이러한 극한의 폭염의 가능성과 강도에 대해 인간이 초래한 기후변화의 역할을 조사했다. 북위 45~52도, 서경 119~123도 구역에서 일 최고기온으로 역대 최고를 기록할 정도의 폭염이 발생한 것은 인간이 초래한 기후변화 없이는 사실상 불가능했다(WWW; Philip 등, 2021). 기온이 너무 극단적이어서 역사적으로 관측된 기온 범위를 훨씬 뛰어넘었다. 이로 말미암아 이러한 사건이 역사적으로 얼마나 드물게 나타나는지 자신 있게 계량하기는 어렵다. 가장 현실적인 통계 분석에 따르면, 이러한 현상은 오늘날의 기후에서 천 년에 한 번꼴로 나타난다고 추정된다. 북미 북서부 지역의 2021년 폭염과 같은 현상은 오늘날 기후에서 여전히 드물거나 극히 드물게 나타나는데, 인간이 일으킨 기후변화가 없다면 사실상 불가능할 것이다. 온난화가 계속 이어지면, 그러한 현상은 그리 희귀하지 않을 것이다(Philip 등, 2021).

독일과 그 인근 국가에서 발생한 대홍수

독일과 그 인근 국가에서 2021년 7월 12일부터 7월 15일까지 저기압 '베른트'의 영향으로 매우 극심한 폭우가 내렸다. 특히 노르트라인-베스트팔렌주와 라인란트-팔츠주에서 심각한 홍수로 이어졌다. 홍수로 인해 많은 사상자(186명 사망, 26명 실종)가 발생했으며 보험사들 추정으로 약 50억 유로(미화 59억 달러) 상당의 큰 인프라 손실이 발생했다. 홍수는 이미 많은 비로 포화상태에 이른 땅과 암석으로 이뤄진 지하에 오랜 기간 폭우가 내려 축발되었다. 광범위한 지역에 걸쳐 12~72시간 내에 1평방 미터당 100리터(l)의 비가 내렸으며, 일부 지역에서는 12~24시간 내에 1평방 미터당 무려 150리터의 비가 내렸다(그림 4). 현재의 기후 조건에서는 앞서 언급된 영역보다 더 넓은 알프스산맥 북쪽에서 네덜란드에 이르는 지역에 평균 400년에 한 번씩 이러한 현상이 발생할 것으로 예상된다(Kreienkamp 등, 2021).

WWA 이니셔티브는, 최근 홍수가 가장 심했던 두 개의 작은 지역(독일 아흐르-에르프트 지역, 벨기에 뫼즈 지역)과 그 보다 넓은 독일, 벨기에, 네덜란드를 포함한 지역에서 지난 여름 시즌(4~9월) 동안 역대 최대의 1일 강우 혹은 2일 강우가 있었는데, 이러한 현상에 대해 인간이 초래한 기후 변화가 어느 정도 영향을 미쳤는지를 분석했다(Kreienkamp 등, 2021년).

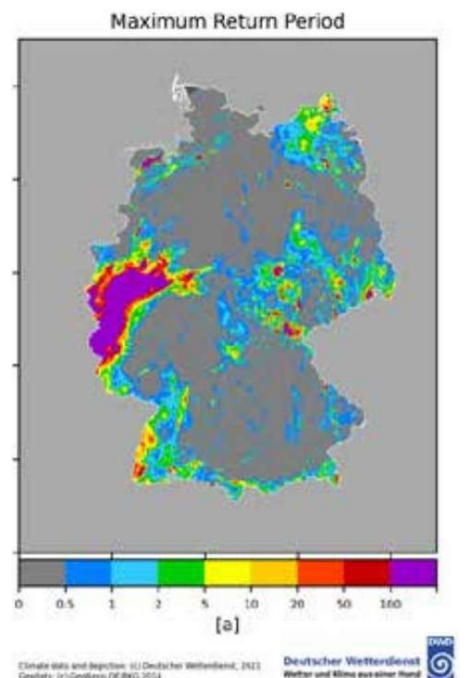


그림 4. 독일기상청의 강수량 측정용 레이더 관측망의 자료를 기반으로 작성된 그림으로 2021.07.12. 05:50 UTC부터 2021.07.19. 05:50 UTC까지의 기간 중 내린 72시간 기준 강수량 최대치가 다시 나타날 최대 연수.

물리적 이해, 기상 관측과 이에 더해 다양한 지역 기후 모델까지 동원한 모든 가용 증거를 고려했을 때, 인간이 유발한 기후변화가 그러한 사건의 발생 가능성과 강도를 증가시켰으며, 이러한 변화는 빠른 속도로 온난화되는 기후 조건 가운데 계속될 것이라는 것이 가장 신뢰도 높은 결론이라고 할 수 있다(Kreienkemp 등, 2021). 기후변화의 추이를 봤을 때 시간이 갈수록 그러한 사건들은 더 자주 발생할 것이다.

50년 재해 데이터로 본 날씨, 기후, 물 관련 재난

WMO가 최근 발간한 *The Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes* (WMO-No. 1267)에 따르면, 1970~2019년간 전 세계적으로 22,326건의 재해가 발생했고, 그중 11,000여 건이 기상·기후·물 관련 재난이었다. 이로 인한 사망자는 2.06백만 명에 달했고 경제적 손실은 미화 3.64조 달러였다. 재해의 원인으로 봤을 때 약 44%는 홍수(하천 범람 24%, 일반 홍수 14%)였고, 17%는 열대저기압이었다(그림 5). 인명손실을 가장 많이 일으킨 재난은 열대저기압과 가뭄으로 전체 중 각각 38%와 34%를 차지했다. 경제적 손실 규모로 봤을 때 38%는 열대저기압과 관련되어 있고, 그 다음은 여러 유형의 홍수가 31%, 하천 범람이 20%, 일반 홍수가 8%, 돌발 홍수가 3% 순이다(WMO, 2021).

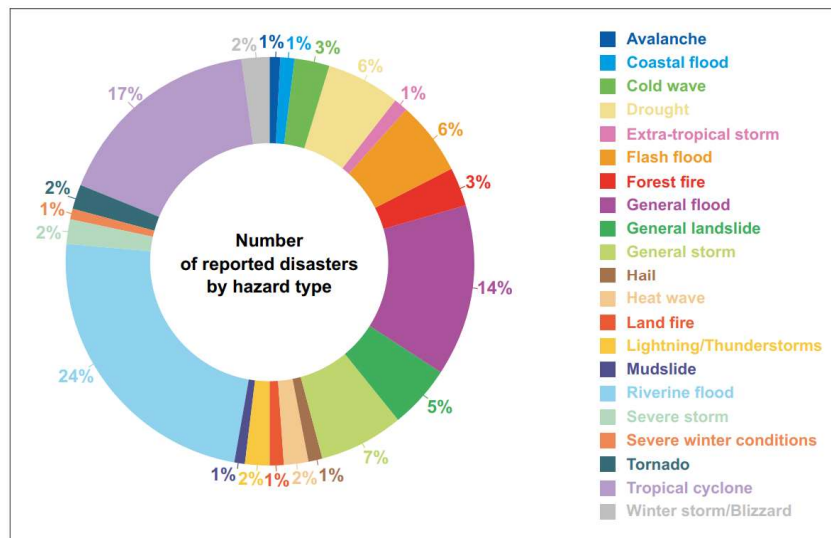


그림 5. 1970-2019년간 전 지구 재해별 건수 분포 (WMO, 2021)

이 기간에 재난의 건수가 5배 증가했지만 사망자 수는 거의 3배 감소했다. 이는 부분적으로 다중 위험 조기 경보 시스템을 개선시킨 덕에 재해 예방, 대비 및 대응 조치가 종전보다 나아졌기 때문이다.

참고문헌

Trewin, B. et al. 2021: Headline Indicators for Global Climate Monitoring. Bull. Amer. Met. Sci., <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0196.1>

WMO, 2021: Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes covering the past 50 years. WMO Report 1267.

WMO Statement on the Status of the Global Climate in 2016, WMO-No. 1189, 2017

Philip, S.Y. et al. 2021: Rapid attribution analysis of the extraordinary heatwave on the Pacific Coast of the US and Canada June 2021. World Weather Attribution. <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/NW-US-extreme-heat-2021-scientific-report-WWA.pdf>, accessed 25 August 2021

van Oldenborgh, G.J. et al. 2021: Pathways and pitfalls in extreme event attribution. Clim. Change, 166, 13, <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03071-7>

Kreienkamp, F. et al. 2021: Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. World Weather Attribution: <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf>, accessed 25 August 2021

인간의 영향이 대기과 바다, 육지를 온난화시켰다는 것은 명백하다. 대기, 해양, 빙권, 생물권에 광범위하고 빠른 변화가 일어나고 있다.

1750년 경 이후부터 여러 온실가스의 종합 농도의 증가는 명백히 인간의 활동에 의해 야기된 것이다. 온실가스의 대기 중 농도는 계속 증가하고 있다. 육지와 바다는 지난 60년간 인간 활동으로 인한 CO₂ 배출량 중 비록 지역 차이는 있지만 거의 일정한 비율(전 세계적으로 연간 약 56%)을 처리해오고 있다.

1750년에 비해 2019년에 2.72[1.96-3.48] W m⁻²의 인간 유발 복사강제력은 기후 시스템을 온난화시켰다. 이 온난화는 주로 GHG 농도 증가에 기인하며, 그나마 에어로졸 농도의 증가로 인한 냉각 효과가 온난화를 부분적으로 상쇄시켰다. 복사강제력은 이전 IPCC 보고서(AR5 - 2013년)에 실린 값에 비해 0.43 W m⁻²(19%) 증가했으며, 그중 0.34 W m⁻²는 2011년 이후의 온실가스 농도 증가 분으로 인한 것이다. 나머지는 과학적 이해가 향상되고 에어로졸 강제력이 변해서 증가한 값인데, 특히 에어로졸 농도 감소와 계산 능력의 향상도 복사강제력 증가 원인으로 꼽힌다.

지난 40년 동안 매 10년 평균기온이 1850년 이후의 그 어느 10년보다 더 높은 수준을 보이며 꾸준히 상승하였다. 21세기(2001~2020년)의 처음 20년 동안의 지상 기온은 1850~1900년 시기보다 0.99[0.84~1.10]°C 높았다. 2011~2020년의 지상 기온은 1850~1900년의 그것보다 1.09[0.95~1.20]°C 올랐는데, 육지(1.59[1.34~1.83]°C)가 해양(0.88[0.68~1.01]°C)보다 더 크게 상승했다.

원인규명 연구가 가능해진 기간 동안, 관측 데이터에 따르면 1850~1900년 기간부터 2010~2019년 기간까지의 기온 상승치는 1.06[0.88~1.21]°C이고, 인간이 야기한 온난화에 따른 총체적인 최상의 기온상승 추정치는 1.07°C이며, 그 가능 범위는 0.8~1.3°C이다. 온실가스(GHG)는 1.0~2.0°C의 온난화에 이바지했고, 여타 인간 유발 요인(주로 에어로졸)은 0.0~0.8°C의 냉각에 기여했으며, 자연 요인은 지상기온을 -0.1~0.1°C 범위에서 변화를 일으켰고, 내적 변동성은 기온을 -0.2~0.2°C 변화시켰다(그림 1).

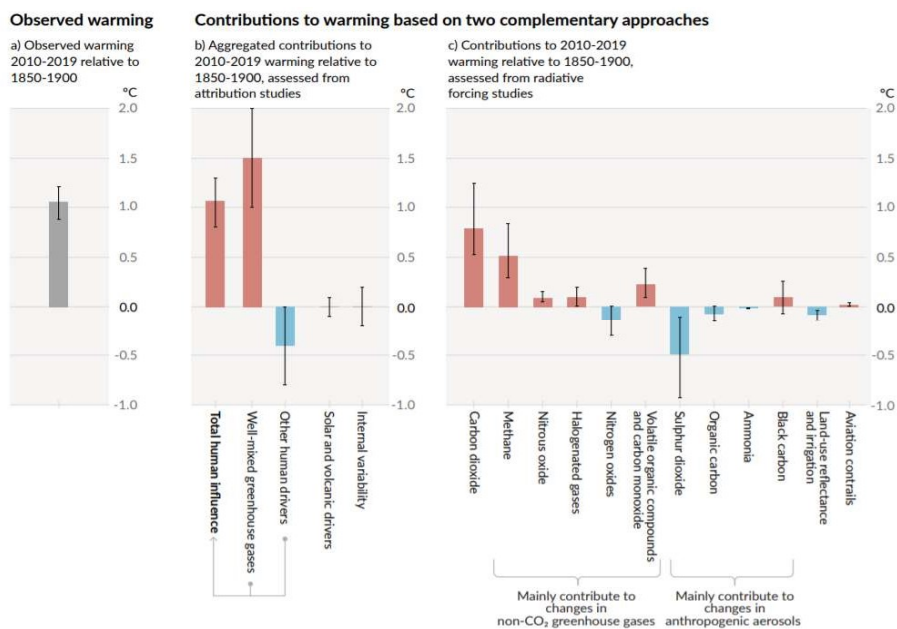


그림 1. IPCC AR6 WG1 Figure SPM.2에서 발췌. 1850-1900년 대비 2010-2019년의 관측으로 확인된 온난화에 대한 평가 기여도. 패널 a): 관측 기반의 지구 온난화(지구 표면 기온 상승) 및 그 가능성이 매우 높은 범위. 패널 b): 원인규명 연구로부터 나온 증거로 기후 모델과 관측으로부터의 정보를 종합한 것임. 이 패널은 인간의 총 영향, 잘 섞인 온실가스 농도의 변화, 에어로졸, 오존 및 토지 이용 변화(토지이용 차이에 따른 반사율 변화)로 인한 인적 요인, 태양 및 화산 관련 요인, 내적 기후 변동성 등에 관해 보여준다. 각 막대의 가운데 실선은 가능 범위를 나타냄(3.3.1). 패널 c): 복사 강제력 및 기후 민감도 평가로부터 나온 증거. 이 패널은 온실가스, 에어로졸 및 그 전조물질 등의 배출을 포함한 인간 영향의 개별 성분의 온도 변화, 토지이용 변화(토지이용 차이에 따른 반사율과 관계 변화), 비행운 등을 보여준다. 각 막대의 가운데 실선은 매우 가능성이 높은 범위를 나타낸다. 추정치는 대기로 직접 배출하는 것과 그것이 여타 기후 요인에 끼치는 영향 모두에 대한 것이다. 에어로졸의 경우 직접(복사를 통한) 및 간접(구름과의 상호작용을 통한) 영향이 모두 고려된다(6.4.4, 7.3).

IPCC 기후변화 2021 하이라이트, 기후 현황의 물리과학적 근거



기후시스템을 이루는 육지, 해양, 빙권, 생물권 같은 성분 외의 다른 부분에서 관측된 변화와 인간의 영향에 대한 자세한 사항은 정책입안자용 요약(SPM)과 기술요약(TS)을 보면 된다(IPCC, 2021).

기후 시스템 전반에 걸친 최근 변화의 규모와 기후 시스템의 여러 측면에서 본 현재 상태는 수세기 내지 수천 년에 걸쳐 전례가 없을 정도이다.

2019년 대기 중 CO₂ 농도는 최소 200만 년 동안 그 어느 때보다도 높았고 CH₄와 N₂O 농도는 최소 80만 년 동안 그 어느 때보다도 높았다.

1970년 이후 지구 표면 온도는 지난 2000년 동안 다른 어떤 50년 단위 기간보다 빠르게 증가하였다(그림 2). 최근 10년(2011~2020)간의 평균기온은 이전 수백 년 온난기로서 가장 최근이라 할 수 있는 약 6500년 전 즈음의 기온을 넘어섰다[1850~1900년 대비 0.2~1°C]. 그다음 최근 온난기는 약 125,000년 전 즈음으로, 1850~1900년 대비 0.5~1.5 °C 높았는데 가장 최근의 관측치와 일부 겹치는 수준이다.

Changes in global surface temperature relative to 1850-1900

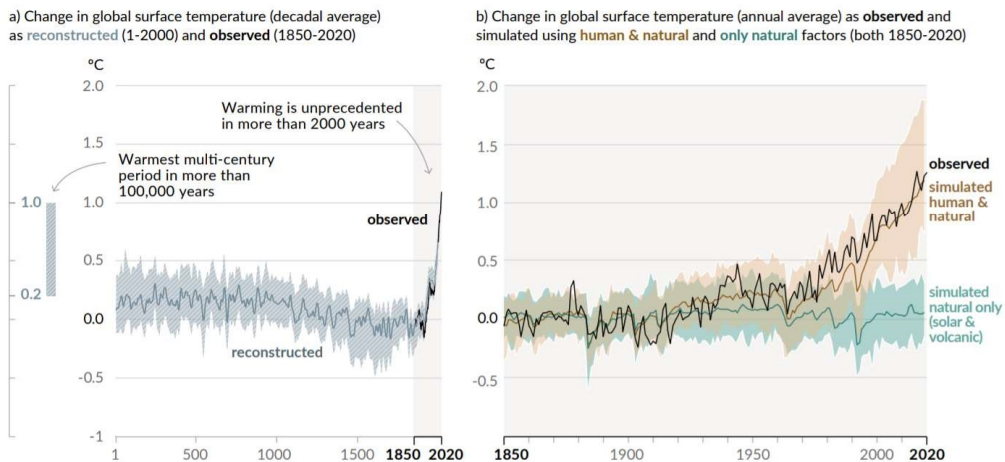


그림 2. IPCC AR6 WG1 SPM.1에서 발췌. 지구 기온 변화의 역사와 최근 온난화의 원인. 패널 a): 지구 표면 기온의 변화로서 고기후 아카이브(회선 실선, 1~2000년)와 직접 관측한 자료로부터 재구성한 것임. 둘 모두 비교 기준은 1850~1900년이며 10년 간격으로 평균한 것임. 왼쪽의 수직 막대는 적어도 지난 10만년 동안 가장 따뜻한 수세기 동안의 추정 기온(매우 가능성이 높은 범위)을 나타내는데, 이는 약 6500년 전 즈음에 해당 하는 것으로 현 간빙기(홀로세) 기간 중 발생한 것이다. 이보다 기온이 높았던 시기로 약 125,000년 전 즈음에 있었던 직전 마지막 간빙기를 꼽는다. 이같은 과거 온난기는 변화 진폭이 매우 느린 가운데 수백만년 단위로 발생했다. 흰색 대각선이 중첩되어 있는 회색 음영 영역은 기온 재구성의 가능성이 매우 높은 범위를 나타낸다. 패널 b): 1850-1900년 대비 지난 170년 동안의 지구 표면 기온의 변화(검은색 선)와 CMIP6 기후 모델 시뮬레이션과 비교한 연평균 변화

북극 해빙 면적은 늦여름이 최소인데 2011~2020년간 보인 평균면적은 적어도 과거 1000년간 그 어느 때보다 작았다. 1950년대 이후 전 세계 거의 모든 빙하가 동시에 후퇴하고 있는데 이러한 세계적 후퇴 현상은 적어도 지난 2000년 동안 전례가 없다.

지구 평균 해수면은 1900년 이후 적어도 지난 3000년 동안 이전의 어떤 세기보다 빠르게 상승했다. 지구 해양은 지난 세기에 걸쳐 빠르게 온난화되었는데, 그 속도는 마지막 퇴빙기 전환 끝 무렵(11,000년 전 즈음) 이후 지금까지 보였던 그 어느 것보다 빠르다.

인간이 유발한 기후 변화는 이미 전 세계 모든 지역에 많은 기상 및 기후 극한 현상을 발생시키고 있다. 관측으로 확인된 증거에 따르면 폭염, 집중호우, 가뭄, 열대저기압, 특히 인간의 영향으로 규명된 현상들이 앞서 2013년에 발표된 IPCC 보고서(AR5) 이후 계속 강화되어왔다.



1950년대 이후 육상 지역 대부분에 걸쳐 극 고온 현상(폭염 포함)이 더 빈번해지고 강렬해진 반면, 극 저온 현상(한파 포함)은 덜 빈번해지고 덜 심해진 것이 거의 확실한데, 인간이 초래한 기후변화가 이러한 변화를 일으킨 주범이라는 사실에 대한 신뢰수준이 높다. 지난 10년 동안 관측된 극 고온 현상은 기후 시스템에 끼친 인간의 영향이 없었다면 발생 가능성이 극히 낮았을 것이다. 해양 이상고온 현상은 1980년대 이후 빈도가 약 두 배 증가했으며, 적어도 2006년 이후 인간의 영향이 대부분의 해양 이상고온 발생에 기여했을 가능성이 매우 크다.



1950년대 이후 추세 분석하기에 충분한 만큼의 관측데이터가 있는 대부분의 육상 영역을 보면 폭우 발생 빈도와 강도가 증가했으며, 인간이 초래한 기후 변화가 주요 원인일 가능성이 높다. 인간이 유발한 기후 변화는 토지 증발산 증가를 일으켜 일부 지역에서 농업 및 생태 가뭄의 증가에 기여했다.



1950년대에서 1980년대까지의 전지구적 육상 몬순 강수량의 감소는 부분적으로 인간이 초래한 북반구 에어로졸 배출에 기인하지만, 그 이후의 증가는 GHG 농도 상승과 십 년 내지 수십 년 단위의 내부 변동성에 기인한다. 남아시아, 동아시아, 서아프리카에서의 온실가스 배출로 인한 온난화가 몬순 강수량을 증가시켰고, 그 반대 현상으로서 20세기에 걸쳐 인간이 야기한 에어로졸 배출 증가로 인해 냉각효과가 발생하여 몬순 강수량의 감소가 일어났다. 1980년대 이후 서아프리카의 몬순 강수량이 증가한 이유는 부분적으로 GHG의 영향력이 커지고 유럽과 북미에서 인간이 만들어 낸 에어로졸 배출로 인한 냉각 효과가 줄었기 때문이다.



지난 40년 동안 전 지구적으로 대형(카테고리 3~5) 열대 저기압의 발생 비율이 증가했으며, 북서 태평양에서 열대저기압 강도가 최고조에 도달하는 위도가 북상했을 가능성이 있으며, 이러한 변화는 내부 변동성만으로 설명할 수 없다. 모든 카테고리의 열대저기압의 발생 빈도에 대한 장기(수십 년에서 수백 년) 추세의 신뢰수준은 낮다. 현상 원인 규명 연구와 물리적 이해에 따르면 인간이 유발한 기후변화가 열대저기압 시 폭우 가능성을 증가시키지만 전 지구 규모의 데이터가 가진 한계로 말미암아 과거의 추세를 명확하게 파악하기는 어렵다.



인간의 영향은 1950년대 이후 동시 다발성 기상이변의 가능성을 증가시켰다. 지구 규모의 폭염과 가뭄의 동시 발생 빈도 증가, 인간이 거주하는 대륙의 일부 지역에서 산불나기 쉬운 날씨 증가, 일부 지방에서 나타나는 다발성 홍수 증가 등이 그러한 예이다.

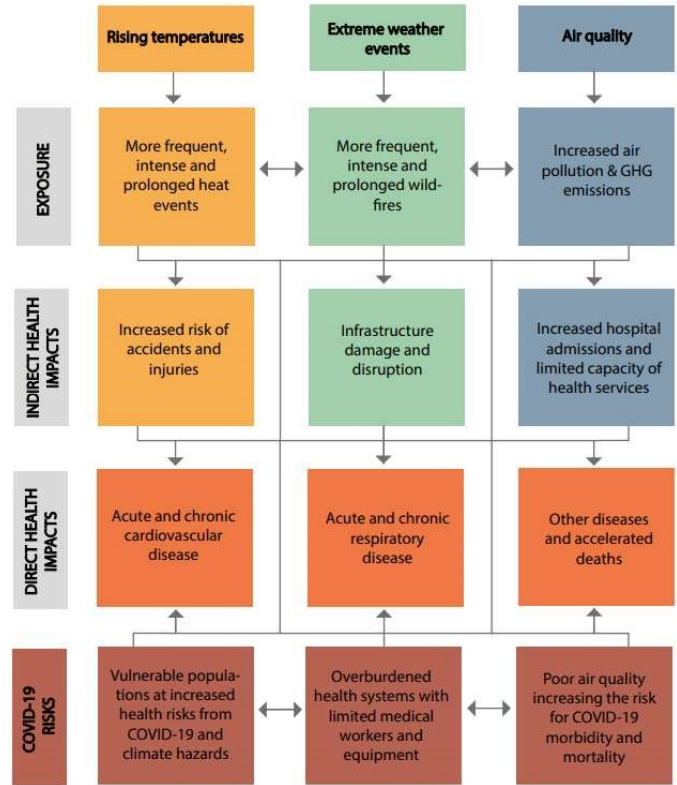
지금까지는 관측된 기후변화와 그 속성에 관해 알아보았고, 다음은 보고서의 주요 내용이다.

- 기후 프로세스, 고기후 증거, 복사강제력 증가에 따른 기후시스템의 반응 등에 관한 지식이 향상된 덕분에 최선으로 제시되는 평형기후민감도(ECS)의 추정치는 AR5에 비해 더 좁은 범위를 가진 3°C이다.
- 지구 기온은 모든 배출 시나리오 하에서 적어도 금세기 중반까지 계속 상승할 것이다. 향후 수십 년 동안 CO₂ 및 기타 온실가스 배출을 크게 줄이지 않는 한, 21세기 중 지구 온난화 수준은 1.5°C와 2°C를 초과할 것이다.
- 기후 시스템에 많은 변화가 발생하고 있는데 지구 온난화의 심화와 직접 결부되어 더욱 확대되고 있다. 그 결과로 극 고온, 해양 고수온, 폭우, 일부 지역의 농업 및 생태학적 가뭄, 대형 열대저기압 비율 등의 빈도와 강도가 커지고 있으며, 북극 해빙, 눈 덮임, 영구 동토층의 감소현상이 발생하고 있다.
- 계속되는 지구온난화로 말미암아 지구 물 순환에도 변화가 일어날 것으로 전망되는데, 그 변동성이 강해지고, 전지구 몬순 강우량이 늘며, 습기와 건기 간의 양극화가 심화될 것이다. CO₂ 배출 증가 시나리오 하에서, 대기 중 CO₂ 축적을 제한해도 해양과 육지 흡수원이 갖는 효과는 점점 약화될 것으로 전망된다.
- 온실가스의 과거 배출과 미래 배출로 인한 많은 변화는 수세기 내지 수천년 동안 되돌릴 수 없다. 특히 해양, 빙상, 전지구 해수면 고도의 변화가 그렇다.
- 자연적 요인과 내부 변동성은 특히 지역 규모에서 그리고 근간에 인간이 일으킨 변화를 조절할 것이다. 다만 100년동안 진행된 지구온난화에는 거의 영향을 미치지 못할 것이다. 이같은 조절을 파악하게 되면 기획할 때 모든 가능한 변화범위를 고려할 수 있기 때문에 중요하다.
- 지구 온난화가 계속되면, 모든 지역은 기후좌우요인에 있어서 점점 더 많은 동시 다발적인 변화를 경험할 것으로 전망된다. 몇몇 기후좌우요인의 변화는 지구 온난화 1.5°C에 비해 2°C에서 더욱 광범위하게 일어날 것이며, 그보다 더 높은 수준의 온난화가 이뤄질 경우는 훨씬 더 넓고 확연한 변화가 일어날 것이다.
- 가능성이 낮은 하지만 빙상 붕괴, 해양순환의 갑작스런 변화, 일부 복합적 기상이변 발생, 미래의 매우 높은 가능성을 가진 온난화 범위보다 훨씬 큰 온난화가 이뤄질 경우를 배제할 수 없으며, 부분적이거나 그 위험성을 평가대상으로 삼아야 한다.
- 물리 과학적 관점에서 인간이 초래하는 지구 온난화를 특정 수준으로 제한하려면 누적 CO₂ 배출량을 제한해야 하며, 다른 온실가스 배출량의 대폭 감축과 함께 적어도 CO₂ 배출 순제로에 도달해야 한다. CH₄ 배출량을 강력하고 빠르고 지속적으로 감소시키면 에어로졸 오염이 낮아짐에 따라 온난화 효과도 제한될 것이며 대기 질도 개선될 것이다.
- 온실가스 배출이 매우 낮음 혹은 낮음으로 설정한 시나리오 하에서는 온실가스 배출이 높음과 매우 높음으로 설정한 시나리오에 비해 수년 내에 온실가스 및 에어로졸 농도에서 확연한 효과가 나타날 것이다. 이와 같은 대조적인 시나리오 하에서는 지구 기온 추세에 있어서 약 20년 내에 자연변동과 구분되는 둘 간의 확연한 차이가 드러나기 시작할 것이며, 다른 많은 기후좌우요인의 경우는 더 오랜 기간이 소요된 후 나타날 것이다.

폭염, 산불, 대기오염 : 코로나19 전염병의 세계적 창궐 와중에 건강에 위대한 복합적·연쇄적 재난 발생



코로나19가 끼치는 장단기적 악영향은 이미 기후 문제로 인간의 건강이 위협받고 있어 이를 해결하기 위해 고심하고 있는 지구 공동체에 추가적인 부담이 되고 있다. 코로나19에 감염된데다가 폭염, 산불 또는 대기오염과 같은 기후 관련 재난까지 겹친 상황에 있는 사람들은 개별 재난 한 가지의 위험에만 노출된 경우보다 건강과 관련하여 훨씬 더 심각한 결과를 경험하는 처지에 놓이게 된다. 게다가 한가지 기후재난과 코로나19 영향이 겹쳐 나타나는 상황마다 가뜰이나 여타의 여러 기후 재난과 코로나19 사태가 동시에 닥쳐 어려움에 봉착해 있는 공중 보건 시스템의 가동을 방해하고 복잡하게 만들어 의료 품질 및 역량에 스트레스를 가할 수 있다. 폭염과 산불 노출이 있는 상황에서 코로나19 확산까지 겹치다 보니 의료 서비스와 관련 인프라의 수용력이 떨어지고 있는데 입원 환자 수는 급격히 늘면서 의료시설의 한계를 노출시켰고 의료 인력마저 부족하게 되면서 보건 설비가 기능을 제대로 발휘하지 못하게 만들었다(그림 1). 기후 재난과 코로나19 영향은 의료서비스의 실질적이고 일상적인 개입이 효과를 발휘하지 못하게 하고 더 많은 난관과 더 많은 위험 상황에 처하게 할 수 있다.



더위 영향: 메커니즘과 취약성

더위는 여러 가지 방법으로 인간 건강에 영향을 끼칠 수 있다. 직접적인 영향으로는 열 스트레스, 열사병, 심혈관·호흡기·뇌혈관 질환의 악화로 인한 질병 및 사망률 증가가 있다(그림2). 건강에 대한 간접적인 영향으로 더위는 인간의 행동(예: 육체·정신적 활동), 보건 서비스 제공, 대기질, 중요 인프라 등이 제대로 작동하지 못하게 할 수 있다. 일부 인구 집단은 더위에 특별히 취약한데, 65세 이상의 노령층, 유아, 어린이, 장애를 갖고 있거나 기저질환자, 야외근로자, 낮은 사회경제적 지위에 있는 사람들이 그 집단에 속한다. 도시지역의 경우, 건물 밀집과 바쁘게 움직이는 인간 활동으로 인해 기온이 높아지면서 도시열섬 효과가 생겨, 열대야 현상이 나타날 수 있다.

최근 수년 동안 나타난 더위와 건강 위협

최근 수년에 걸쳐 기온 상승과 함께 폭염이 더욱 자주, 더 길게 그리고 지속적으로 나타나면서 인간의 건강을 위협하고 있다. 온열질환 사망자가 늘고 있고 일의 능률을 떨어뜨리고 있다. 지구 전체적으로 65세 이상 되는 온열질환 사망자 수가 2000~2004년에 비해 2014~2018년에

그림 1. 복합적·연쇄적 성격을 보이는 기후재난 및 코로나19가 가져오는 건강상의 직·간접적 영향

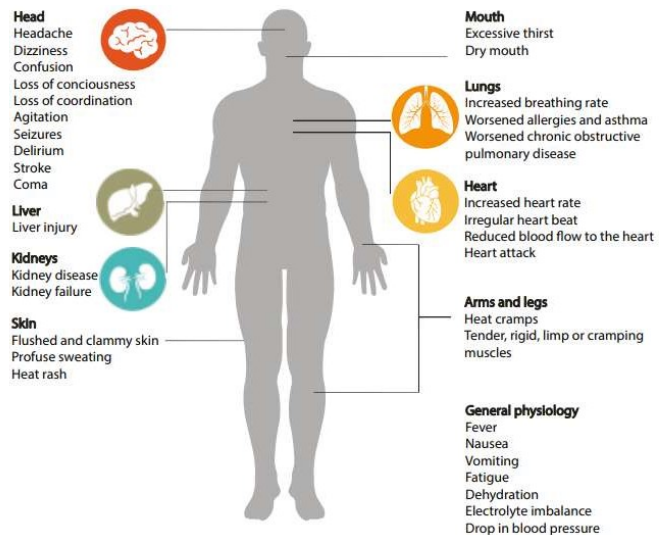


그림 2. 열에 노출되었을 때의 증상. 신체 여러 기관에 악영향을 줌. Symptoms of heat exposure affecting different organ systems. Dahl 등(2019) 논문 참조

폭염, 산불, 대기오염 : 코로나19 전염병의 세계적 창궐 와중에 건강에 위대한 복합적·연쇄적 재난 발생



53.7% 많아졌다. 2018년에 사망자 수가 296,000명에 달했으며 주로 일본, 동중국, 북인도, 중유럽에서 사망자가 나타났다. 온열질환 사망자의 37%는 인간이 유발한 온난화 때문으로 보고 있다. 이는 1991~2018년 43개국의 데이터를 분석한 결과에서 나온 수치이다(Vicedo-Cabrera 등, 2021). 기온 상승은 또한 노동시간 손실을 야기했는데 전 지구적으로 2000년 때보다 2019년에 1,030억 시간 넘게 잠재적 노동시간 손실을 일으켰다(Watts 등, 2020).

코로나19와 더위가 복합되어 나타나는 위험

코로나19에 쉽게 감염되는 사람은 더위에도 상당히 민감하다. 이러한 허약한 사람들에게는 이 감염병과 더위 두 가지가 한꺼번에 오는 경우 여러 가지 증상이 복합적으로 그리고 연쇄적으로 일어나면서 건강이 악화될 위험성을 더욱 높인다. 노인들과 기저질환이 있는 사람들은 코로나19로 인한 사망률이 더 높은 것으로 나타났다. 코로나19 감염의 심각도가 커지면서 흔히 나타나는 질환으로는 호흡기 및 심혈관 질환, 고혈압, 당뇨병, 만성 폐쇄성 폐질환, 악성 및 만성 신장질환이 있는데, 이 모두는 더위 관련 합병증을 일으키는 위험 요인이기도 하다(Emami 등, 2020).

산불 연기 영향: 메커니즘과 취약성

지구 기온 상승과 폭염은 산불 발생 가능성을 높이고, 이것은 다시 CO2 배출을 증가시킴으로써 지구온난화를 더욱 가속시킨다. 산불 연기는 여러 입자가 혼합되어 있고 공기의 질을 크게 떨어뜨린다. 산불 연기는 공기의 질을 악화시켜 폐를 자극하고, 염증을 일으키고, 면역체계에 악영향을 주며, 폐 감염의 위험을 증가시킬 수 있다. 미세먼지(PM2.5)는 특히 폐 깊숙이 침투해 인간 건강을 위협에 빠지게 한다. 여기에 취약한 사람들은 주로 노인들과 사회경제적 혜택을 받지 못하는 두 가지 이상의 질환을 앓고 있는 사람들 그리고 야외 노동자들이다. 이들 모두는 더위와 코로나19에도 취약하다. 한편, 산불 연기가 건강에 영향을 끼치는 방식이 다르다는 사실을 이해할 필요가 있는데, 연기의 화학 성분이 다른 소스에서 나오는 대기오염물질과는 달라 건강에 영향을 끼치는 방식도 다를 수 있기 때문이다.

최근 수년간의 산불, 대기오염, 건강 위협

114개국에서는 2001~2004년과 비교하여 2016~2019년에 사람들이 산불로 인해 매우 높은 또는 극히 높은 위험에 노출된 날 수가 증가하였고, 128개국에서는 산불 노출 인구가 증가한 것으로 나타났다(그림 3, Watts 등). 산불 발생이 늘게 되면 호흡기 질환뿐만 아니라 모든 심혈관으로 인한 사망을 일으키는 주요 요인을 제공하는 대기오염 농도가 최고조에 이른다(Karanasiou 등, 2021).

최근 수년간의 코로나19, 산불, 대기오염

대기오염에 장기간 노출되면 천식, 만성 폐쇄성 폐질환, 폐암, 심장병, 신경계 영향, 당뇨병 등과 같은 만성질환에 시달릴 가능성이 커진다. 심혈관 및 호흡기 질환, 당뇨병, 고혈압, 암 등은 SARS-CoV-2 바이러스 감염자의 부정적 예후와 관련이 있다고 한다(Wu 등, 2020). 코로나19 환자 중 상당 비율이 심장, 폐 및 기타 기관에 장기적 손상을 입게 되며, 대기오염에 노출될 경우 그 상태가 더 악화될 수 있다(Brunekreef 등, 2021). 정량화는 어렵지만, 대기오염과 코로나19의 복합 효과가 코로나19로 인한 사망률을 높일 수 있다는 증거가 속속 드러나고 있다. 미국에서는 PM2.5가 1 µg/m³ 증가하면 코로나19 사망률이 통계적으로 유의한 수준인 11% 증가한다고 밝혔다(Wu 등, 2020). 또한 입자 물질에 대한 장기 노출이 전 세계 코로나19로 인한 사망률의 약 15%에 기여하는 것으로 추정되었다(Pozzer 등, 2020).

폭염, 산불, 대기오염 : 코로나19 전염병의 세계적 창궐 와중에 건강에 위대한 복합적·연쇄적 재난 발생

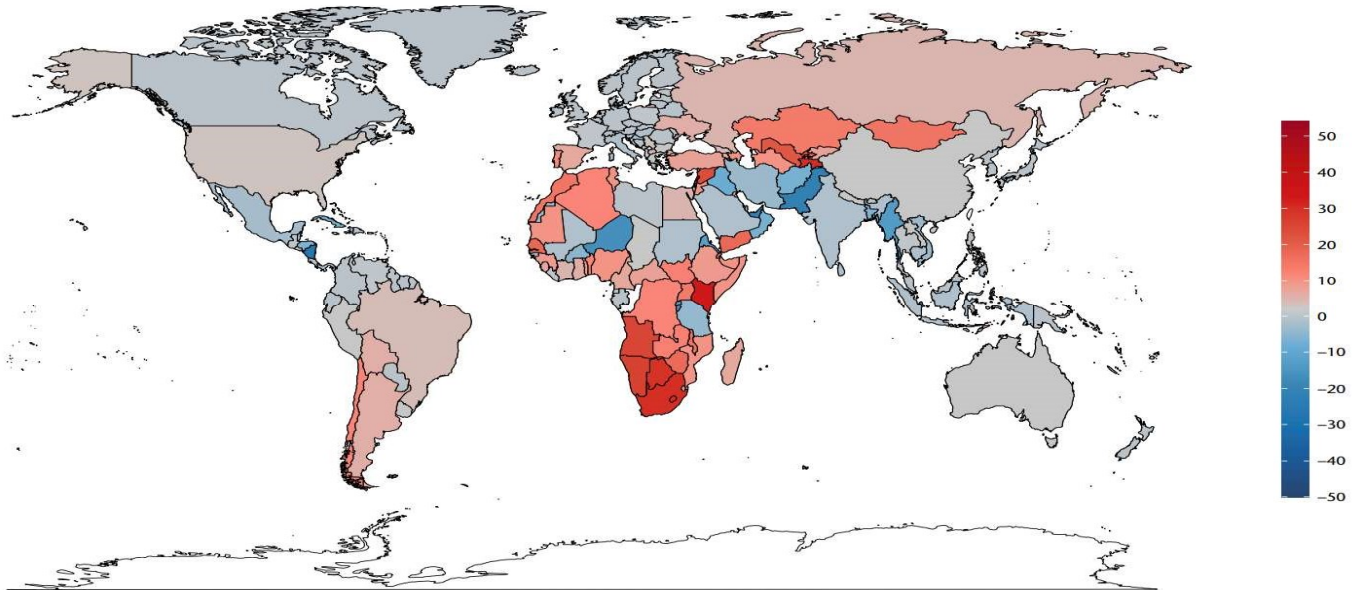


그림 3. 매우 높거나 극히 높은 산불 위험에 1인당 노출된 2016-2019년의 평균 일수가 2001-2004년에 비해 보인 변화. Watts 등(2020) 논문 참조

향후 기후재난 및 건강 피해의 증가 대한 전략적 대응

코로나19로 인한 보건, 경제, 사회적 와해를 겪은 지역사회를 보호하고 재건하기 위한 노력은 지속되어야 하며 국가 차원의 기후변화 대응 전략과 맥을 같이 해야 한다. 현재까지는 이런 일이 벌어지지 않고 있다. 코로나19 시작 이후, 에너지 생산 및 소비자 활동에 대한 G20 국가의 경기부양 지출의 절반 가까이가 석탄, 석유, 가스에 쓰였다. 효과적인 완화 및 적응이 없는 경우, 과학자들이 기후변화로 인해 향후 몇 년 동안 극 고온과 산불 사건의 빈도, 기간, 규모가 증가할 것으로 예상하듯 기후재난의 복합적이고 연쇄적인 영향에 노출되는 인구는 계속 증가할 것이다. 기후재난 하나 하나의 영향을 처리하는 것 외에도 공중보건 연구자들과 의사결정자들은 종합적인 기후 영향을 분석하고 이를 건강 적응 계획 및 전망에 통합해야 하며, 취약 인구그룹 보호를 목표로 삼아야 하고, 코로나19 복구 투자 촉진을 통해 인간의 건강 보호와 환경 및 기후 영향 완화 모두를 이뤄야 한다(WHO, 2020).

참고문헌

Brunekreef, B. et al. 2021: Air pollution and COVID-19. Including elements of air pollution in rural areas, indoor air pollution and vulnerability and resilience aspects of our society against respiratory disease, social inequality stemming from air pollution, study for the committee on Environment, Public Health and Food Safety, Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies, European Parliament, Luxembourg.

Dahl, K. et al. 2019: Killer Heat in the United States: Climate Choices and the Future of Dangerously Hot Days. Cambridge, MA: Union of Concerned Scientists. <https://www.ucsusa.org/resources/killer-heat-united-states-0>

Emami, A. et al. 2020: Prevalence of Underlying Diseases in Hospitalized Patients with COVID-19: a Systematic Review and Meta-Analysis. Arch. Acad. Emerg. Med., 8, e35, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7096724/>

Karanasiou, A. et al. 2021: Short-term health effects from outdoor exposure to biomass burning emissions: A review. Sci. of the Tot. Environ., 781, 146739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146739>

Pozzer, A. et al. 2020: Regional and global contributions of air pollution to risk of death from COVID-19. Cardiovasc. Res., 116, 2247-2253. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvaa288>

Vicedo-Cabrera, A.M. et al. 2021: The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. Nat. Clim. Chang. 11, 492-500, <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01058-x>

Watts, N. et al. 2020. The 2020 report of The Lancet Countdown on health and climate change: responding to converging crises. The Lancet, 397, P129-170, [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)32290-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)32290-X)

WHO, 2020: Manifesto for a health recovery from COVID-19. <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/who-manifesto-for-a-healthy-recovery-from-covid-19>.

Wu, X. et al. 2020: Air pollution and COVID-19 mortality in the United States: Strengths and limitations of an ecological regression analysis. Sci. Adv., 6, eabd4049, DOI: 10.1126/sciadv.abd4049

해수면 고도 및 연안에 미치는 영향 - WCRP (WMO/IOC/ISC)



지구 평균 해수면은 1900~2018년 동안 20 cm 상승하였고, 2006년부터 2018년까지는 3.7 ± 0.5 mm/yr의 가속률을 보였다(IPCC, 2021). 이것은 인간이 초래한 지구온난화로 인해 바닷물이 열적으로 팽창하고 육지 얼음이 녹았기 때문이다. 그린란드와 남극대륙의 빙상 손실률은 1992~1999년과 2010~2019년 사이에 4배 증가하여 2006년부터 2018년까지의 해수면 상승에 있어 빙상 및 빙하 질량 손실이 주요 원인이 되었다. IPCC 6차 평가 보고서(IPCC, 2021)는 온실가스 배출량이 줄어들지 않고 계속 증가할 경우(예: SSP1-8.5 배출경로), 2100년까지 지구 평균 해수면이 1995~2014년의 그것에 비해 0.6~1.0 m 상승할 가능성이 높고, 이보다 신뢰 수준은 좀 낮지만 2300년까지 1.7~6 m(아마도 그 이상) 상승할 것이며, 이 경향은 그 이후에도 이어질 것으로 전망하고 있다. 2300년까지 해수면이 대거 상승한 것은 남극 대륙과 그린란드의 거대 빙상이 녹아 바다로 흘러 들어간 것 때문이라고 보는 것이 대체적 전망이다. 미래의 온실가스 배출량을 획기적으로 줄이면 지구 해수면 고도 상승폭도 상당히 줄어들 것이다. 지구온난화를 "2°C(SSP1-2.6 배출경로)"보다 훨씬 낮은 수준으로 제한한다는 파리협정 목표대로 배출량을 줄인다 해도, 지구 평균 해수면은

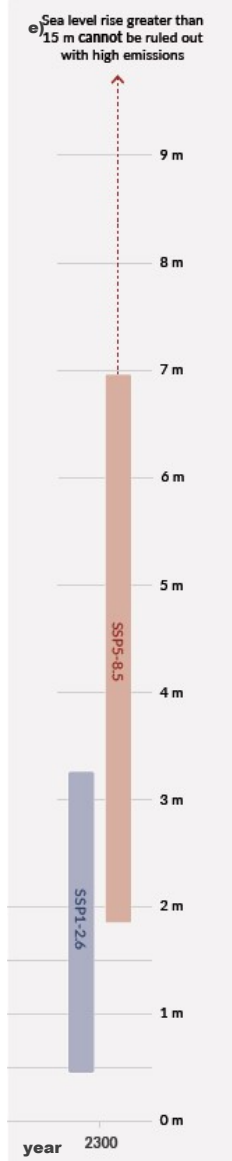
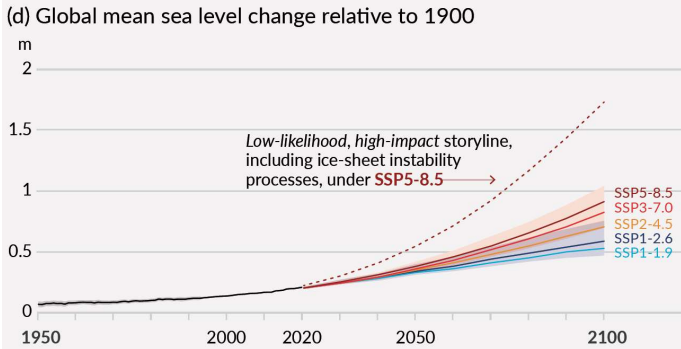


그림 1. 패널 d)와 e)는 IPCC 제1실무그룹 6차평가 보고서의 정책입안자용 요약(PCC, 2021)의 그림 SPM.8에서 발췌한 것임. 패널 d)는 1900년 대비 지구 평균 해수면 고도(m) 변화. 그 고도의 시간에 따른 변화가 관측되었는데, 1992년 이전에는 조수계로, 이 이후는 고도계를 이용하여 관측하였으며 미래의 변화에 대해서는 CMIP, 빙상 및 빙하 모델의 에뮬레이션에 기초한 관측 제약조건과 일관되게 평가가 이뤄졌다. SSP1-2.6 및 SSP3-7.0에 대해서는 가능한 범위로 표시되었는데, 이는 프로세스의 분포가 매우 불확실하여 이를 산정하는 데 어려움이 있기 때문이다. 점선은 이러한 매우 불확실한 프로세스의 잠재적 영향을 나타낸다. 이는 SSP5-8.5 전망의 83번째 백분위수를 나타내며, 여기에는 가능성은 낮지만 영향이 큰 빙상 프로세스가 포함된다. 이러한 프로세스 예측에 대한 신뢰수준이 낮기 때문에 이 곡선은 가능 범위의 일부를 구성하지 않는다. 1900년 대비 변화는 1995년~2014년 대비 시뮬레이션 변화 및 관측된 변화에 0.158m(1900년으로부터 1995~2014년까지의 상승폭)를 더하여 계산한다. 다양한 배출 시나리오 하에서 1900년부터 2100년까지의 전지구 해수면 고도 전망. 패널 e): 1900년 대비 2300년 지구 평균해수면 고도. SSP1-2.6 및 SSP5-8.5에서만 2300에 대해 전망하며, 다른 시나리오의 경우 2100년 너머까지 확장해서 수행하는 시뮬레이션 수가 강력한 결과를 얻기에는 너무 적다. 17-83번째 백분위수 범위는 음영 처리되어 있다. 점선 화살표는 SSP5-8.5 전망 중 83번째 백분위수를 나타내며, 여기에는 가능성은 낮되 그렇다고 무시할 수는 없는 영향력 큰 빙상 과정이 포함되어 있다.

2100년까지 (1995~2014년 대비) 0.3~0.6 m 상승할 가능성이 여전히 높으며, 이보다 신뢰수준은 좀 낮지만 2300년까지 0.3~3.1 m 상승할 가능성이 있다. 그러나 현시점에서 미래의 배출 경로가 어떻게 될지 모르고, 주어진 온도 상승에 대한 빙상 반응도 매우 불확실하긴 하지만, 향후 해수면 고도는 지금의 전망보다 상당히 더 큰 폭으로 상승할 수도 있다(IPCC, 2021).

해수면 고도 상승은 다음과 같은 생태물리학적 영향과 변화를 일으켜 전 세계 해안 지역을 위협한다(Oppenheimer 등, 2019).

- 평균 해수면 상승과 높은 조수에 의한 육지의 영구적 침수
- 더 빈번하고 더 깊어진 연안 범람
- 심화된 해안 침식
- 연안 생태계의 열악화, 변화, 손실
- 토양, 지하수, 지표수의 염화
- 배수 악화 및 시설침수

이러한 생태물리학적 영향은 결과적으로 건물과 기반시설에 직접적인 손상을 일으키고 경제활동을 붕괴시키는

해수면 고도 및 연안에 미치는 영향 - WCRP (WMO/IOC/ISC)



등 연안거주자들과 그들의 생계에 사회경제적 영향을 미치게 된다. 2020년 현재 추산하건대 2억 6천 7백만 명(세계 인구의 약 4%)이 해발고도 2m 이내에 살고 있다. 이 숫자는 점점 커지고 있는데, 이는 해수면 고도가 상승하면서 대상 인원도 늘고 인구도 증가하는 추세이기 때문이다. 군소 도서, 삼각주, 해안 도시는 높은 노출도 및/또는 취약성으로 인해 해수면 고도 상승에 특별히 위협받고 있다.

해수면 고도 상승의 영향을 고찰할 때, 그 관련 사건 대부분은 평균 해수면 고도 상승으로 인해 증가하게 되는 조수, 폭풍해일, 파도가 결합되어 해수면 고도가 극단적으로 상승되는 사건의 증가로 인해 발생한다는 점에 주목해야 한다. 추가적인 영향은 전지구 평균 해수면 상승보다는 국지적인 상대적 해수면 상승에 의한 것으로, 주요 원인은 지역 및 국지 차원의 기후학적 성분의 변화(해양 순환, 얼음 용해로 인한 국지 수문계 및 중력 등의 변화)와 비기후학적 성분의 변화(육지 용기/침강)인데 이 모두가 국지적 해수면 상승을 일으킨다(그림 2). 따라서 미래 영향과 적응 필요성에 관해 평가할 경우 전지구 대신 국지차원의 변화를 들여다볼 필요가 있다. 예를 들어 알래스카와 스칸디나비아 북부와 같이 오늘날 육지가 크게 상승하고 있는 해안 지역에서는 해수면 상승이 약해지거나 심지어 낮아질 수도 있다. 반대로, 인구가 밀집해있는 해안의 퇴적 평야에서 지하수 유출 및 관련 과정으로 인해 땅이 내려앉아 그 지역의 해수면 고도가 상대적으로 크게 상승하는 일이 벌어지고 있다.

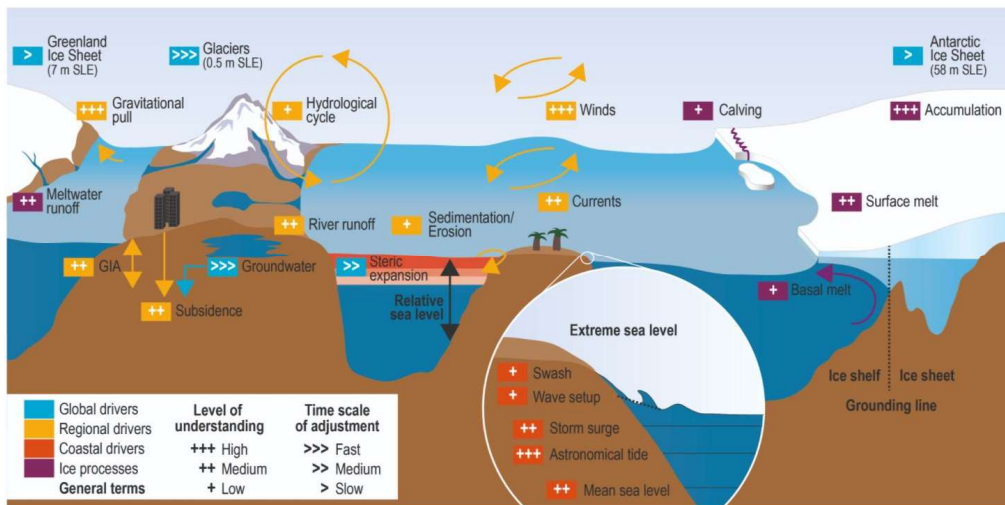


그림 2. 해안을 따라 발생하는 전지구적, 지역적(녹색), 상대적, 극단적 해수면 고도 상승 관련 사건(빨간색)에 영향을 미칠 수 있는 기후 및 비기후 프로세스의 체계도. 주요 얼음 프로세스는 보라색이고 일반프로세스는 검은색. SLE는 Sea Level Equivalent의 약자로서 해당 얼음덩어리가 완전히 녹아서 바다에 추가될 경우, 이를 GMSL의 증가에 반영. [Oppenheimer 등 (2019)의 그림 4.4 재현] (GMSL - Global Mean Sea Level; GIA - Global Isostatic Adjustment)

로 인해 땅이 내려앉아 그 지역의 해수면 고도가 상대적으로 크게 상승하는 일이 벌어지고 있다. 자카르타의 경우를 보면 보통 1 cm/yr를 넘으며 최대 10 cm/yr까지 기록하기도 한다. 전 세계적으로 대부분 가라앉는 역안 지역에 인구가 밀집해 살기 때문에 이러한 침하는 전 지구 차원에서 중요하다(Nicholls 등, 2021). 아시아대륙 연안은 특히 이러한 과정에 취약한데 이는 지질학적으로 흔히 삼각주와 퇴적 평야로 구성되어있는 해안에 도시(예: 자카르타, 방콕, 상하이)가 형성되어 있고 그곳 인구가 계속 성장하고 있는 상황이기 때문이다.

해수면 고도 상승에 대한 적응은 다음과 같은 다양한 상호 상반된 방법들을 이용하여 수행될 수 있다 (Openheimer 등, 2019)

- 연안 피해 가능성을 줄임으로써 보호하는 것인데 그 이행 방법으로, (i) 제방, 방파제, 해일 장벽과 같은 단단한 공학적 구조물과 (ii) 해변 및 해안과 모래사장 언덕 같은 퇴적지를 통해 피해를 줄이는 것이다. 또한 보호는 그 대상 기준을 초과하는 극단적인 사건들로 인해 항상 위험의 여지를 남긴다는 것에 유념해야 한다. 그 사례가 홍수인데 그 피해를 반드시 완전히 예방할 수는 없다.
- 구조물을 아예 바다 쪽에 고도를 높여 축조함으로써 새로운 땅을 만들거나 기존의 홍수 피해에 취약한

해수면 고도 및 연안에 미치는 영향 - WCRP (WMO/IOC/ISC)



땅의 고도를 높인다. 방법은 해수면 높이 위로 개간 및 간척을 하고 저지대에 제방을 쌓아 새로운 땅으로 둔갑시키는 것이다. 이 경우는 땅이 부족하며 고가이고 향후 해수면 고도 상승을 충분히 고려해야 하는 해안 도시를 중심으로 널리 행해지고 있다.

- 숙박시설은 홍수가 와도 끄떡없도록 고도를 높여 축조하고 홍수 시 조기경보시스템이 가동되도록 한다. 이 방법이 해안 피해를 완전히 막아 주지는 않지만, 홍수로 인한 해안 거주민, 인프라, 각종 활동의 취약성을 감소시켜준다.
- 계획 또는 관리 정책에 따라 연안 범람에 취약한 해안선으로부터 사람들을 뒤로 물러나 살게 하고 인프라를 이동시키며 인간 활동도 그와 함께 물러나 이뤄지게 하거나, 처음부터 해안 범람원에 개발이 이뤄지지 못하도록 막는다.
- 때에 따라 해수면 고도 상승 및/또는 극한 현상으로 인한 강제 이주도 있을 수 있다.

생태계 기반 또는 자연 기반 적응에 대한 관심이 점점 높아지고 있는데, 그것은 과거에는 종종 무시되었던 연안 생태계가 제공하는 이점이 천연 보호장치 역할을 하기 때문이다. 산호초와 굴 양초, 맹그로브 숲, 습지, 해초 초원은 피해 보호를 위한 완충 역할을 하는데 극한의 수위 상승(해일, 파도)을 약화시키고, 침식 속도를 줄이며, 퇴적물을 가두고 유기물과 찌꺼기를 축적하여 바닥을 높이거나 새로운 땅을 만들 수 있다.

이러한 물리적 적응식 대응이 효과를 발휘하려면 계획과 제도적 조치가 필요하다. 그러한 방안을 통해 제방 높이, 범람원에 대한 건축 법규 및/또는 후퇴, 위험관리 인센티브, 재난대비 및 조기경보 시스템 등에 대한 표준을 정한다. 미래 해수면 고도에 대한 불확실성이 높다는 점에서, 오늘날 적응 관련 결정을 내리는 효과적인 방편으로 해안 지역을 대상으로 적응 방안이 갈수록 많이 모색되고 있다(Haasnoot 등, 2019). 그러나 이러한 자연 시스템에 대해서는 공학적 접근 방식에 비해 이해도가 그리 높지 않기 때문에 이것이 미래를 위해 더욱 광범위하고 자신 있는 적용과 확산이 이뤄질 수 있도록 하기 위해서는 추가적인 연구, 개발, 학습이 필요하다.

기후변화로 인한 해수면 고도 상승이 제기하는 도전은 특히 2100년 이후에는 방대하고 심히 불확실하다. 이러한 도전을 해결하기 위해 WMO, 국제해양학위원회(IOC), 국제과학위원회(ISC)가 공동 후원하는 세계기후연구프로그램(WCRP)은 전지구·지역·연안 규모를 아우르는 통합 해수면 고도 연구 의제를 이끌고 있다.

다음 세기에 해수위가 수 미터씩 상승하여 전 세계의 모든 해안이 위협받게 되는 상황을 피하기 위해서는 지금 당장 강력한 완화 노력이 필요하다. 그런데 그러한 노력이 있다 해도 해수면 고도는 앞으로 수십 년 내지 수백 년 동안 느리지만 계속 상승할 것이다. 따라서 해안 적응책은 미래 어느 때이건 필수적이지만 엄격한 완화와 결합하면 성공할 가능성이 더 높다. 장기 적응전략 수립이 아직 시작되지 않았다면 지금이라도 모색하기 시작할 필요가 있다. 이러한 노력은 보다 광범위한 해안 관리·개발 목표와 연결되어야 한다. 군소 도서, 삼각주, 해안 도시가 이러한 행동의 주요 대상이다. 아울러, 해수위 상승에 더해 연안 범람을 일으키는 복합 원인을 고려하여 연안조기경보시스템, 특히 다중위험조기경보시스템의 구축이 중요하다. WMO의 연안침수예측이니셔티브(CIFI)는 연안 적응방안을 목표로 하는 UN의 여러 사업 중 하나로 재난이 닥쳐올 때 취약한 지역사회가 재빠르게 대응하고 행동할 수 있도록 조기경보시스템을 설치해 나가는 사업이다.

참고문헌

- Haasnoot, M. et al. 2019: Generic adaptation pathways for coastal archetypes under uncertain sea-level rise. *Environ. Res. Comm.* 1 071006, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7620/ab1871>
- Hooijer, A., and Vermimmen, R. 2021: Global LiDAR land elevation data reveal greatest sea-level rise vulnerability in the tropics. *Nat. Comm.* 12, 3592, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23810-9>
- IPCC (2019) Technical Summary [Pörtner, H.-O. et al., (eds.)]. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.- O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)].
- Nicholls, R.J., et al. 2021: A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure. *Nat. Clim. Chang* 11, 338-342, <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00993-z>
- Oppenheimer, M. et al. 2019: Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.- O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)].
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, et al. (eds.)]. Cambridge University Press. In Press

2021~2025년에 대한 기후 예측

WMO의 1년~10년 기후예측 선도센터는 향후 5년 동안에 대한 예측 요약을 생산한다(Hermanson 등, 2021). 이 예측은 WMO 지정 글로벌 생산 센터와 비지정 기여 센터의 세계 최고의 10년 예측 시스템을 기반으로 하기 때문에 근래 기후 예측에 관한 한 최고의 추정정보이다. 여기에는 계절 예측에 사용되는 유형의 관측기반 초기조건과 장기 기후 예측에 사용되는 유형의 경계 강제력 모두를 적용한 총 100가지의 구현 결과를 포함하고 있다. 예측에는 코로나19 봉쇄로 인한 것과 같은 소규모의 배출물 변화의 영향 정도는 포함되지 않으며, 예측 대상 기간 동안 대형 화산 폭발이 일어나지 않는다고 가정한다.

예측에 따르면, 2021~2025년의 기온 패턴은 거의 모든 곳에서 1981~2010년 평균을 웃도는 기온을 보일 가능성이 높으며, 주로 북반구 고위도에서 그리고 바다보다는 육지에서 그 경향이 크게 나타날 가능성이 높다(그림 1). 북극(60°N 이북)의 1981~2010년 대비 편차는 지구 평균의 그것보다 두 배 이상 크다.

그림 2는 1981~2010년 대비 2021~2025년(5년) 동안의 전 지구 연평균기온 변화에 대한 예측이다. 예측되는 전 지구 평균 기온은 산업화(1850~1900) 이전의 그것보다 0.9~1.8°C 높은 범위가 될 것이다. 상기 5년 중 한 해라도 연평균기온이 산업화 이전 수준보다 1.5°C를 넘을 확률은 40%이며, 5년 전체 평균이 이 수준을 초과할 확률은 낮다(10%). 이는 파리 협정에서 합의한 장기 평균 온도 제한 폭인 1.5°C 수준을 초과한다는 의미가 아니라는 점을 주목하는 것이 중요하다. 대신 이 지표는 지구의 기후가 온난해짐에 따라 파리 협정의 목표 수준인 1.5°C를 일시적으로 초과할 가능성을 커짐을 보여준다. 지구 평균 기온 예측의 신뢰 수준은 높다. 그림 2의 오른쪽 패널은 Skill score를 보여준다. 코로나19의 세계적 대유행으로 온실가스 배출량이 변했지만(에어로졸 배출량 변화는 예측 모델에 반영되지 않음), 이 정도의 변화가 온실가스 전반 수준에 미치는 영향은 미미하다(WMO, 2021년).

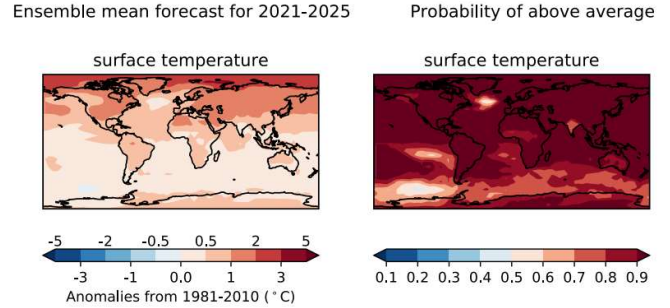


그림 1. 1981-2010년 대비 2021-2025년 지표면 기온 편차. 앙상블 평균(왼쪽) 및 평균 상회 확률(오른쪽). 이는 두 가지 범주 예측이므로 평균 미만일 확률은 오른쪽에 표시된 확률을 1 빼 것임(WMO, 2021; Hermanson 등, 2021).

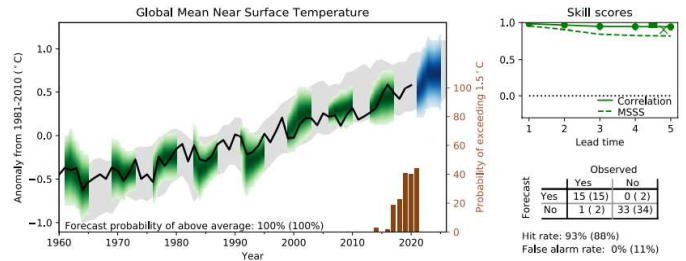


그림 2. 1981-2010년 대비 지구 연평균 기온에 대한 다년 예측. 연평균 관측치는 검은색, 예측치는 파란색, 하인드캐스트는 녹색, 초기화시키지 않은 시뮬레이션은 회색으로 표시. 음영부분은 90% 신뢰 범위를 나타냄. 예측치의 5년 평균에서 평균 이상일 확률은 주 패널 맨 하단에 제시되어 있다(괄호 값은 첫 해 평균 이상일 확률). 주 패널의 오른쪽 축은 해당 연도로부터 5년 동안 적어도 1년이 산업화 이전 대비 전지구 기온이 1.5°C를 초과할 확률(Smith 등, 2018). 기온 관측치는 세 가지의 관측 데이터 세트(한센 등, 2010; 카를 등, 2015; Morice 등)의 값을 평균한 값. 모델 예측 기온값은 지표면 부근에 대한 것임(WMO, 2021; Hermanson 등, 2021). 오른쪽 상위 패널은 예측 값에서 연평균에 대한 상관 관계 및 MSS(Mean Square Skill Score)에 대한 것임. 하위 패널은 확률 스킬에 대한 것임.

2021~2025년 지구 기후 - WMO 전 지구 1~10년 기후 업데이트



2021-2025년의 강수량 예측(그림 3)은 두 반구 고위도 지역과 사헬 지역 전체에서 평균보다 습한 기후 조건이 나타날 것으로 시사하고 있다. 기준 기간인 1981~2010년에 비해 열대와 중위도 지역의 강수량은 증가하고 아열대 지역의 강수량이 감소하는 패턴은 기후가 온난해짐에 따라 수문학적 순환 주기가 커질 것으로 예상되는 것과 일관된다. 사헬, 그린란드, 북유럽과 유라시아에 대해서는 상관관계 스킬이 중간 정도이나 유의할만한 수준(Hermanson 등, 2021)이고, 이들 지역에서 강수확률이 증가할 것이라는 예측은 중간 신뢰도를 갖는다.

이 작업은 세계기후연구프로그램(WCRP)과 협력하여 수행되며 기후 서비스의 개발을 지원한다. 여러 국가기상수문당국들과 범세계 연구프로젝트에서 이 예측결과가 활용되고 있다.

이들 예측결과는 조만간 WMO 지정 지역기후센터들이 기후 재난의 영향을 최소화하기 위한 사전 경고를 제공하는데 활용할 것이다.

Ensemble mean forecast for 2021-2025

Probability of above average

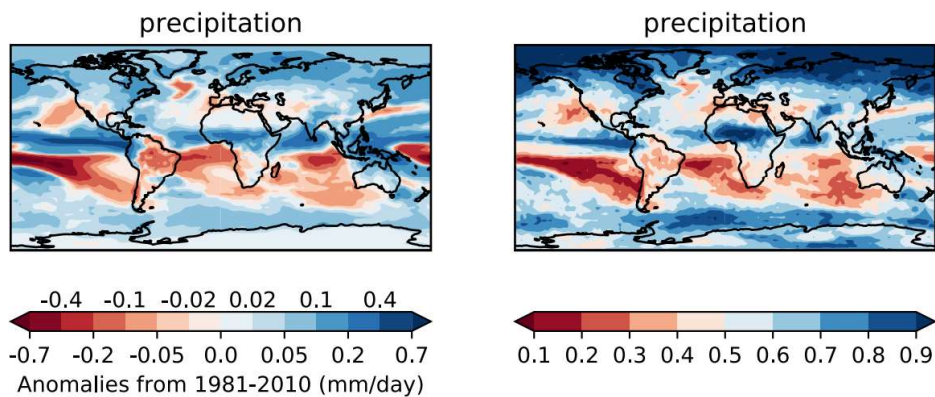


그림 3. 1981~2010년 대비 2021-2025년 강수량 편차 예측. 앙상블 평균(왼쪽)과 평균을 상회할 확률(오른쪽). 이는 두 가지 범주의 예측이므로 평균 미만일 확률은 1에서 오른쪽 그림에 표기된 확률을 뺀 값임(WMO, 2021; Hermanson 등, 2021).

고기후와 역사적 증거를 기초로 할 때, 21세기에 적어도 한 번은 대규모의 화산 분출이 일어날 가능성이 있다. 이러한 분출은 1~3년 동안 특히 지구 표면의 육지에서 기온 하강과 강수량 감소를 일으키고, 지구 몬순 순환을 바꿔놓으며, 극한 강수 발생 패턴과 많은 기후영향인자(CID)를 변화시킨다(중간 신뢰도). 그러한 분출이 발생하면, 인간이 초래한 기후 변화를 일시적으로 부분적으로 가리게 될 것이다(IPCC, WG1, 2021).

참고문헌

Hansen, J. et al. 2010: Global surface temperature change. Rev. Geophys., 48, RG4004. <https://doi.org/10.1029/2010RG000345> Hermanson, L. et al. 2021: WMO Global Annual to Decadal Climate Update: A prediction for 2021-2025, Bull. Amer. Met. Soc. in review.

Karl, T. R. et al. 2015: Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus. Science, 348, 1469- 1472. <https://doi.org/10.1126/science.aaa5632>

Morice, C. P. et al. 2021: An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 data set. J. Geophys. Res. Atmos., 126, e2019JD032361. <https://doi.org/10.1029/2019JD032361>.

Smith, D. M. et al. 2018: Predicted chance that global warming will temporarily exceed 1.5°C. Geophys. Res. Lett., 45, 11895- 11903. <https://doi.org/10.1029/2018GL079362> WMO, 2020: The State of the Global Climate 2020: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>

파리협정 채택 이후 배출량 갭(목표-현실 간 격차)이 가장 크게 벌어져

그림 1을 보면 배출량 격차는 좁혀진 적이 없다. 여기에 코로나19의 영향이 반영되어 있지는 않다. 2030년까지 연간 배출량은 2°C를 목표로 한 현재의 무조건부 국가온실가스감축목표(NDC)보다 15 GtCO₂e(12~19 GtCO₂e 범위)를 감축할 필요가 있고, 1.5°C 목표를 위해서는 3 GtCO₂e(29~36 GtCO₂e 범위) 만큼 줄여야 한다. 무조건 및 조건부 NDC 모두를 완전히 구현하면 이들 배출량 갭 각각이 3 GtCO₂e 정도 줄어든 것이다. 전체적으로 현 정책은 무조건부 NDC의 완전한 구현과 관련된 수준을 충족하기에는 3 GtCO₂e 부족하다.

2030년 배출량 갭은 다양한 가능성 수준을 갖고 지구 온난화를 2°C, 1.8°C 또는 1.5°C로 유지하게 하는 최소 비용 시나리오에 입각한 전지구 총 온실가스 배출량과 NDC를 완전히 실현한 배출량 간의 차이이다.

2020년 11월 중순에 가장 최근의 배출 격차 보고서가 발표되었는데, 주요 배출 국가 중 어느 국가도 2030년을 향한 더 강력한 목표의 신규 또는 보완된 NDC를 제출하지 않았다. 보고서에 따르면, 2019년에 제출된 NDC 목표로는 2030년까지 총 배출량을 1% 정도 줄이는데 그칠 것이다.

2020년 11월 중순 현재 NDC는 파리 협정의 기후 목표를 달성하기에 적합한 수준이 전혀 아니며, 이대로 가면 세기말까지 최소 3°C의 기온 상승이 있을 것이다. 각 국가는 2°C 목표 달성을 위해서는 NDC 목표를 3배로, 1.5°C 목표를 달성하기 위해 5배 넘는 수준으로 높여야 한다.

미국, EU27, 영국 등이 2021년 첫 6개월 동안 제출한 NDC 목표 업데이트와 캐나다, 중국, 일본이 구두 통보한 목표에 기반한 예비 추정치에 따르면 무조건부 NDC 시나리오 하에서 전망되는 배출량은 2020년 판 배출량 갭 보고서의 전망에 비해 12~15% 감소했다. 그러나 이것은 여전히 2030년의 배출량 갭을 메우기에는 한참 부족하다. 2021년 판 보고서에서는 현행화된 NDC 목표의 배출량 및 온난화 관련성에 관한 평가를 모두 제공할 것이다.

코로나19 위기는 전 세계 온실가스 배출량의 단기적 감소에만 기여할 듯

코로나19 억제조치는 2020년에 전 세계 GHG 배출량을 크게 줄였다(그림 2). CO₂ 배출량은 2019년 수준에 비해 약 7% 감소했으며, 비 CO₂는 영향을 더 적게 받았기 때문에 GHG 배출량 감소 기여는 더욱 적었다(2020 배출량 갭 보고서). 그러나 억제조치 후 저탄소 전환을 지원하는 경제 복구 조치가 뒤따르지 않는다고 가정했을 때, 이 정도의 GHG 배출량 감소는 2050년까지 지구 온난화를 0.01°C 미만 떨어뜨리는데 그칠 것으로 추정되어 1.5°C 목표는 물 건너간 상태가 될 것으로 예상된다(Forster 등, 2020)

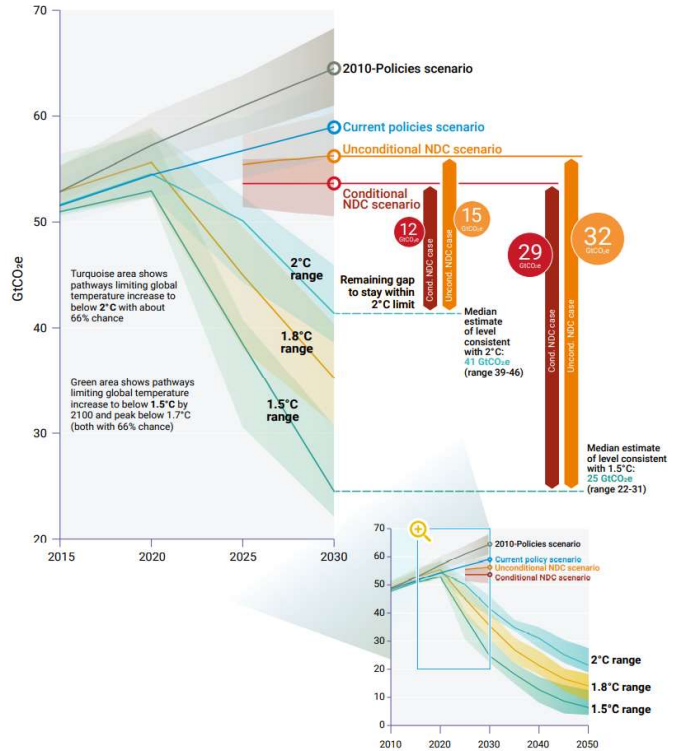


그림 1. 시나리오별 전지구 온실가스 배출량 및 2030년 배출량 갭 (중앙값 및 10~90번째 백분위수 범위, 코로나19 상황이 없을 때 설정한 현 정책 시나리오), UNEP Emissions Gap report 2020

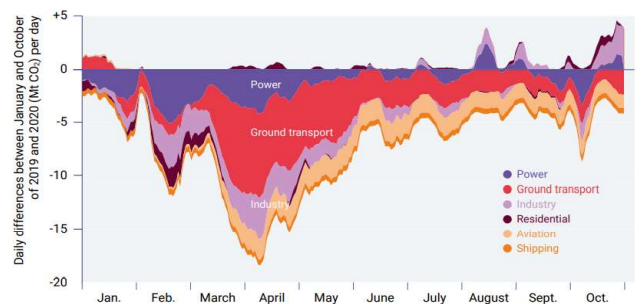


그림 2. 코로나19 상황으로 인한 2019년 수준 대비 2020년 배출량 감소(UNEP Emissions Gap Report 2020)

배출량 갭(목표-현실 간 격차) - UNEP

현재까지 나온 연구 결과에 기초한 전망에 따르면 코로나19 이후의 경제회복을 강력한 탈탄소화 추구의 시발점으로 삼는다면, 2030년까지 전 세계 온실가스 배출이 크게 감소한다(그림 3, IEA 지속 가능한 복구 시나리오). 이렇게 되면 2030년까지 전 세계 온실가스 배출량은 44 GtCO₂e가 될 수 있으며, 코로나19 이전/현 정책 시나리오에 비해 2030년까지 15 GtCO₂e(25% 약간 초과) 감소할 수 있으며, 이 정도는 2015년의 전 세계 배출량을 크게 밑도는 수준이다.

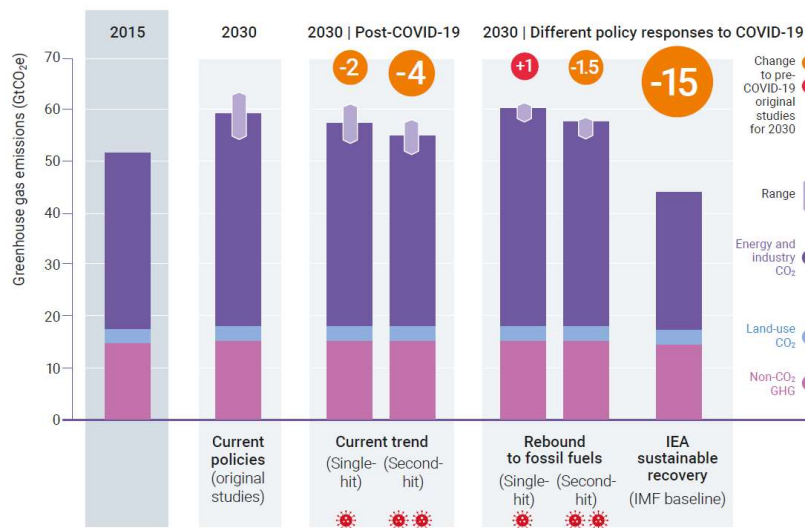


그림 3. 코로나19가 있기 이전의 연구에 기반한 현 정책 시나리오와 (코로나19 이후의) 실험적 계산을 이용한 다양한 "what if" 시나리오 하의 2030년의 전 지구 총 온실가스 배출량(중양값 및 10~90번째 백분위수 범위), 2020년 UNEP 배출량 갭 보고서.

지금까지 코로나 후 재정적 구조 및 복구 조치에서 저탄소 전환을 크게 고려치 않아

각국 정부의 코로나19 관련 재정 지출은 전례없는 규모로서, 2020년 10월 현재 전 세계적으로 약 12조 달러, 즉 2020년 세계 GDP의 12%에 달한다.

지금까지 G20 국가의 코로나19 재정 지출은 전지구적 현상인 고탄소 경제 생산을 지원하는데 주로 집중되었는데, 온실가스 배출에 미치는 영향은 중립적이었다(그림 4). 모든 G20 국가들은 코로나19 대유행에 대응하여 몇 가지 즉각적인 구조 조치를 단행했다. 이러한 조치들은 온실가스 배출에 끼친 영향 측면에서는 중립 수준이었다거나(예: 의료 관련 지출) 또는 저탄소 전환 조건 없는 고탄소 산업 지원을 위한 것이었다고 평가된다. 2020년 11월 기준으로 G20 국가들 중 4분의 1 정도만이 재정지출 패키지의 일정부분을 명시적으로 저탄소 조치에 할당했다(GDP의 최대 3%). 대부분의 G20 국가들은 자국의 고탄소 경제를 지원하는 조치와 패키지를 내놓거나 심지어 고탄소 경제를 위한 신규 투자를 장려하고 있다. 온실가스 배출 감축에 긍정적인 영향을 미치는 정책은 구제 조치보다는 재정 회복 조치에서 약간 더 우세했다. 이는 코로나19 재정 개입의 다음 단계에서 자본의 더 많은 부분이 회복 조치로 이동 투입될 가능성이 있어 저탄소 조치의 시행이 많아질 소지가 있음을 시사하기 때문에 주목할 만하다.

배출량 갭(목표-현실 간 격차) - UNEP

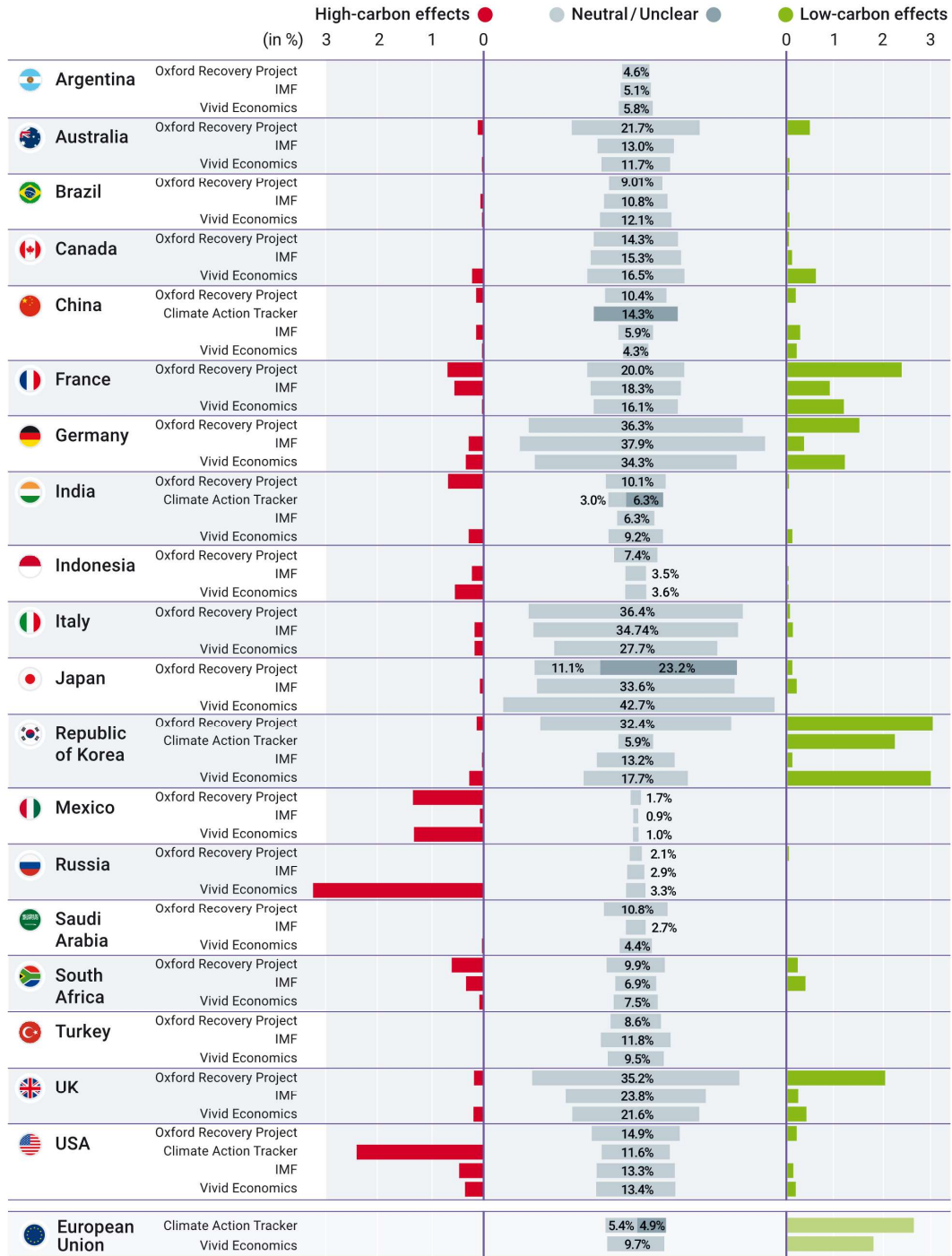


그림 4. G20 국가들의 2019년 GDP에서 재정적 구조 및 복구 조치가 고탄소, 중립 및 저탄소에 끼치는 효과에 대한 총괄 개요(2020년 UNEP 배출량 개 보고서)

코로나19 대유행에 대한 전 세계적 경제 구조·복구 대책이 장기적으로 전 지구 온실가스 배출량 감소 또는 증가로 이어질지는 여전히 정책 입안자들의 손에 달려 있다.

배출 순제로 목표는 고무적이지만 강력한 단기 정책으로 전환되어 NDC에 반영되어야 해

전 세계 기후정책에 있어서 2020년 들어 가장 중대하고 고무적인 움직임은 금세기 중반까지 순제로 배출을 달성하겠다고 약속한 국가들이 늘고 있다는 것이다. 전 지구 차원에서 이러한 약속이 제대로 이행된다면 파리협정의 온도 목표를 유사한 수준으로 달성하게 된다.

2020년 배출량 갭 보고서를 완성할 당시 전 세계 온실가스 배출량의 51%를 차지하는 126개국은, 공식 채택했건 또는 발표했거나 검토 중이건, 순제로 목표를 천명하고 있었다. 미국이 2050년까지 GHG 배출 순제로를 목표로 채택함에 따라 이 비율은 63%로 증가했다.

최근 여러 국가의 배출 순제로 목표 천명은 매우 고무적이지만, 그것을 통해 배출 순제로를 달성하기 위해 필요한 포부와 2030년까지 달성하기로 한 NDC 사이에는 큰 간극이 있음을 확인할 수 있다.

2030년까지 파리협정의 장기적인 온도 목표를 달성하기 위해서는 두 가지 단계가 시급하다. 첫째, 더 많은 국가가 파리협정에 부합하는 장기 전략을 개발하고, 둘째, 순제로 약속을 강력한 단기 정책과 행동으로 전환해 2030년 NDC에 반영해야 한다. 이러한 맥락에서 코로나19 복구 계획을 어떻게 설계하고 실행할 수 있는지를 결정하는 것은 매우 중요하다.

참고문헌

Forster, P.M. et al. 2020: Current and future global climate impacts resulting from COVID-19. Nat. Clim. Chang. 10, 1-7. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0883-0>. United Nations Environment Programme, 2020: Emissions Gap Report 2020. Nairobi.



United in Science 2021

A multi-organization high-level compilation of the latest climate science information





This report has been compiled by the World Meteorological Organization (WMO) on behalf of the United Nations Secretary-General to bring together the latest climate science related updates from a group of key global partner organizations: WMO, Global Carbon Project (GCP), Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), United Nations Environment Programme (UNEP), World Health Organization (WHO), the Met Office (United Kingdom, UK) and the jointly sponsored WMO/Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) of UNESCO/International Science Council (ISC) and World Climate Research Programme (WCRP). The content of each chapter is attributable to each respective entity.

The report is available electronically at: public.wmo.int/en/resources/united_in_science

Cover Illustration: Flooding after heavy rainfall in Koblenz, Deutsches Eck, a headland where the river Mosel joins the Rhine river. Adobe stock/EKH-Pictures.

Lead authors and contributors:

Overall coordination and editing by WMO: Jürg Luterbacher, Laura Paterson, Rosa von Borries, Kate Solazzo, Rose Devillier and Sylvie Castonguay (Editor).

Greenhouse Gas Concentrations in the Atmosphere (WMO Global Atmosphere Watch): Oksana Tarasova (WMO), Alex Vermeulen (Carbon Portal, Lund University, Sweden), Claus Zehner (European Space Agency, Italy), Zoe Loh (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia)

Global GHG Emissions and Budgets (GCP): Josep G Canadell (CSIRO, Australia), Robbie Andrew (Centre for International Climate and Environmental Research (CICERO), Norway), Philippe Ciais (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), France), Eric Davidson (University of Maryland Center for Environmental Science, USA), Steven Davis (University of California, Irvine (UCI), USA), Pierre Friedlingstein (University of Exeter, UK, and WCRP Joint Scientific Committee), Robert B. Jackson (Stanford University, USA), Corinne Le Quéré (University of East Anglia, UK), Glen Peters (CICERO, Norway), Rona Thompson (Norwegian Institute for Air Research (NILU), Hanqin Tian (Auburn University, USA), Zhu Liu (Tsinghua University, China)

Global Climate in 2017-2021 (WMO): John Kennedy (Met Office, UK), Atsushi Goto (Japan Meteorological Agency (JMA)), Stephan Rösner (DWD, Germany's National Meteorological Service), Peter Bissolli (DWD), Omar Baddour (WMO), Cyrille Honoré (WMO)

Highlights of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6): The Physical Science Basis (IPCC): Valérie Masson-Delmotte (IPCC Working Group I (WGI) co-chair)

Heatwaves, Wildfires and Air Pollution: Compounding and Cascading Climate Hazards to Health (WHO/WMO): Rosa von Borries (WMO), Diarmid Campbell-Lendrum (WHO), Robert Stefanski (WMO)

Sea-level and Coastal Impacts (WMO/IOC/ISC): Robert J. Nicholls (University of East Anglia, UK, and WCRP), Sarah Grimes (WMO), Michael Sparrow (WCRP – WMO/IOC/ISC)

Global Climate in 2021–2025 (WMO Global Annual to Decadal Climate Update - Met Office (UK), WCRP, WMO): Adam Scaife (Met Office, UK), Leon Hermanson (Met Office, UK), Doug Smith (Met Office, UK)

Emissions Gap (UNEP): Anne Olhoff (UNEP DTU (Technical University of Denmark) Partnership), John Christensen (CONCITO (Denmark's Climate Thinktank), Joeri Rogelj (Imperial College London, UK; International Institute for Applied Systems Analysis, Austria), Maarten Kappelle (UNEP), Jian Liu (UNEP).

Foreword by Antonio Guterres, Secretary-General of the United Nations

This is a critical year for climate action. This report by the United Nations and global scientific partner organizations provides a holistic assessment of the most recent climate science. The result is an alarming appraisal of just how far off course we are.

We are still significantly off-schedule to meet the goals of the Paris Agreement. This year has seen fossil fuel emissions bounce back, greenhouse gas concentrations continuing to rise and severe human-enhanced weather events that have affected health, lives and livelihoods on every continent. Unless there are immediate, rapid and large-scale reductions in greenhouse gas emissions, limiting warming to 1.5°C will be impossible, with catastrophic consequences for people and the planet on which we depend.

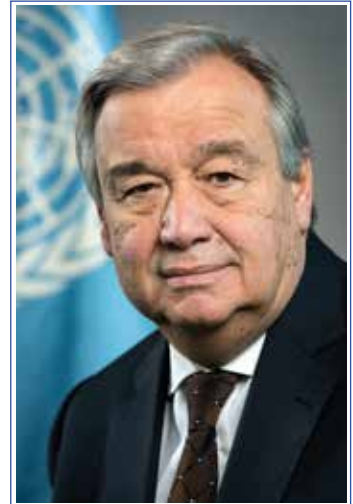
This report is clear. Time is running out. For the 2021 United Nations Climate Change Conference in Glasgow, known as COP26, to be a turning point, we need all countries to commit to net zero emissions by 2050, backed up by concrete long-term strategies, and enhanced Nationally Determined Contributions (NDCs)

which collectively cut global emissions by 45 per cent by 2030, compared to 2010 levels.

We need a breakthrough on protecting people and their livelihoods, with at least half of all public climate finance committed to building resilience and helping people adapt. And we need much greater solidarity, including full delivery of the long-standing climate finance pledge to help developing countries take climate action. There is no alternative if we are to achieve a safer, more sustainable and prosperous future for all.



A. Guterres, Secretary-General UN



Foreword by Prof. Petteri Taalas, Secretary-General of the World Meteorological Organization

Throughout the pandemic we have heard that we must “build back better” to set humanity on a more sustainable path, and to avoid the worst impacts of climate change on society and economies. This report shows that so far in 2021, we are not going in the right direction.

Greenhouse gas concentrations – which are already at their highest levels in three million years – have continued to rise, reaching new record highs this year. Fossil fuel emissions in many sectors are back at the same or at even higher levels than before the pandemic. Global temperatures in 2017–2021 are among the warmest of any equivalent period since meteorological measurements, with warming evident in many climate indicators such as sea ice, glacier melt and sea-level rise.

United in Science 2021 delivers on its mission, to present the very latest scientific data and findings related to climate change, to inform policy and decision-makers. This work depends on a global network of scientists and institutions, and on the critical underpinning observation, modelling and research infrastructure, which we must be supported to meet the demands of today’s challenges.

I would like to thank the many expert teams involved in creating this report – most notably from Global Carbon Project, the Intergovernmental Panel on Climate Change, World Health Organization, UN Environment, the World Climate Research Programme, and the Met Office (UK) – for their collaboration, uniting the climate science community to deliver the latest essential information, in these unprecedented times.



Prof. P. Taalas, Secretary-General WMO



Key Points

Greenhouse Gas Concentrations in the Atmosphere – WMO GAW

- Concentrations of the major greenhouse gases – CO₂, CH₄, and N₂O – continued to increase in 2020 and the first half of 2021.
- Overall emissions reductions in 2020 likely reduced the annual increase of the atmospheric concentrations of long-lived greenhouse gases, but this effect was too small to be distinguished from natural variability.

- Reducing atmospheric methane (CH₄) in the short term could support the achievement of the Paris Agreement. This does not reduce the need for strong, rapid and sustained reductions in CO₂ and other greenhouse gases.



Global GHG Emissions and Budgets – GCP

- Fossil CO₂ emissions – coal, oil, gas and cement – peaked at 36.6 GtCO₂ in 2019, followed by an extraordinary drop of 1.98 GtCO₂ (5.6%) in 2020 due to the COVID-19 pandemic.
- The drop in CO₂ emissions is temporary, and based on preliminary estimates, from January–July 2021 global emissions in the power and industry sectors were already at the same level or higher than in the same period in 2019. Emissions from road transport remained about 5% lower.
- Recent emissions trends of N₂O, the third most important greenhouse gas after CO₂ and CH₄, exceed the most greenhouse gases intense socioeconomic pathways used to explore future climate change.

Global Climate in 2017–2021 – WMO

- The global average mean surface temperature for the period from 2017–2021 is among the warmest on record, estimated at 1.06 °C to 1.26 °C above pre-industrial (1850–1900) levels.
- In every year from 2017 to 2021, the Arctic average summer minimum and average winter maximum sea-ice extent were below the 1981–2010 long term average. In September 2020, the Arctic sea-ice extent reached its second lowest minimum on record.
- 2021 recorded devastating extreme weather and climate events – a signature of human-caused climate change has been identified in the extraordinary North American extreme heat and west European floods.

Key Points

Highlights of AR6: The Physical Science Basis – IPCC

- It is unequivocal that human influence has warmed the atmosphere, ocean and land. Widespread and rapid changes in the atmosphere, ocean, cryosphere and biosphere have occurred.
- The scale of recent changes across the climate system as a whole and the present state of many aspects of the climate system are unprecedented over many centuries to many thousands of years.
- Human-induced climate change is already increasing the frequency and intensity of many weather and climate extremes in every region across the globe.

Heatwaves, Wildfires, and Air Pollution: Compounding and Cascading Climate Hazards to Health – WHO/WMO

- Rising temperatures are linked to increased heat-related mortality and work impairment, with an excess of 103 billion potential work hours lost globally in 2019 compared with those lost in 2000.
- COVID-19 infections and climate hazards such as heatwaves, wildfires and poor air quality combine to threaten human health worldwide, putting vulnerable populations at particular risk.
- COVID-19 recovery efforts should be aligned with national climate change and air quality strategies to reduce risks from compounding and cascading climate hazards, and gain health co-benefits.

Sea-level Rise and Coastal Impacts – WCRP (WMO/IOC/ISC)

- Global mean sea levels rose 20 cm from 1900 to 2018 and at an accelerated rate of 3.7±0.5 mm/yr from 2006 to 2018.
- Even if emissions are reduced to limit warming to well below 2 °C, global mean sea level would likely rise 0.3–0.6 m by 2100 and could rise by 0.3–3.1 m by 2300 (relative to 1995–2014).
- If greenhouse emission continue to rise unabated global mean sea level will likely rise 0.6–1.0 by 2100 (relative to 1995–2014) and, with less confidence, range from 1.7–6.8 m (perhaps more) by 2300 with further large rises continuing beyond.
- Even with climate stabilization, adaptation to this residual rise will be essential – adaptation strategies are needed where they do not exist – especially in low-lying coasts, small islands, deltas and coastal cities.

Global Climate in 2021–2025 – WMO Global Annual to Decadal Climate Update – Met Office/WMO/WCRP

- Annual global mean near-surface temperature is likely to be at least 1 °C warmer than pre-industrial levels (defined as the 1850–1900 average) in each of the coming five years and is very likely to be within the range 0.9 °C to 1.8 °C.
- There is a 40% chance that average global temperature in one of the next five years will be at least 1.5 °C warmer than pre-industrial levels but it is very unlikely (~10%) that the 5-year mean temperature for 2021–2025 will be 1.5 °C warmer than pre-industrial levels.
- Over 2021–2025, high latitude regions and the Sahel are likely to be wetter than the recent past.

Emissions Gap – UNEP

- Five years after the adoption of the Paris Agreement, the emissions gap is as large as ever: global emissions need to be 15 GtCO₂e lower than current unconditional Nationally Determined Contributions (NDCs) imply for a 2 °C goal, and 32 GtCO₂e lower for the 1.5 °C goal.
- The COVID-19 crisis offers only a short-term reduction in global emissions. It will not significantly reduce emissions by 2030 unless countries pursue an economic recovery that incorporates strong decarbonization.
- The increasing number of countries committing to net-zero emission goals is encouraging, with about 63% of global emissions now covered by such goals. However, to remain feasible and credible, these goals urgently need to be reflected in near-term policy and in significantly more ambitious NDCs for the period to 2030.

Greenhouse Gas Concentrations in the Atmosphere – WMO Global Atmosphere Watch



Levels of Greenhouse Gases in the Atmosphere

Levels of atmospheric carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) continue to rise. Preliminary analysis of the data – from a subset of the WMO Global Atmosphere Watch (GAW) greenhouse gas (GHG) observational network – demonstrated that CO₂ concentrations¹ in the Northern Hemisphere exceeded 410 parts per million (ppm) for most of 2020 and exceeded 415 ppm in the first half of 2021.

A full analysis of the three main GHGs (Figure 1) shows the globally averaged atmospheric concentrations of CO₂ at 410.5 ± 0.2 ppm, CH₄ at 1877 ± 2 parts per billion (ppb) and N₂O at 332.0 ± 0.1 ppb for 2019 (respectively 148%, 260% and 123% of pre-industrial levels in 1750). The annual increases of CO₂ and CH₄ were larger in 2019 than the 10-year averaged rate of increase, while the N₂O annual increase was slightly less than the 10-year average growth rate (WMO, 2020).

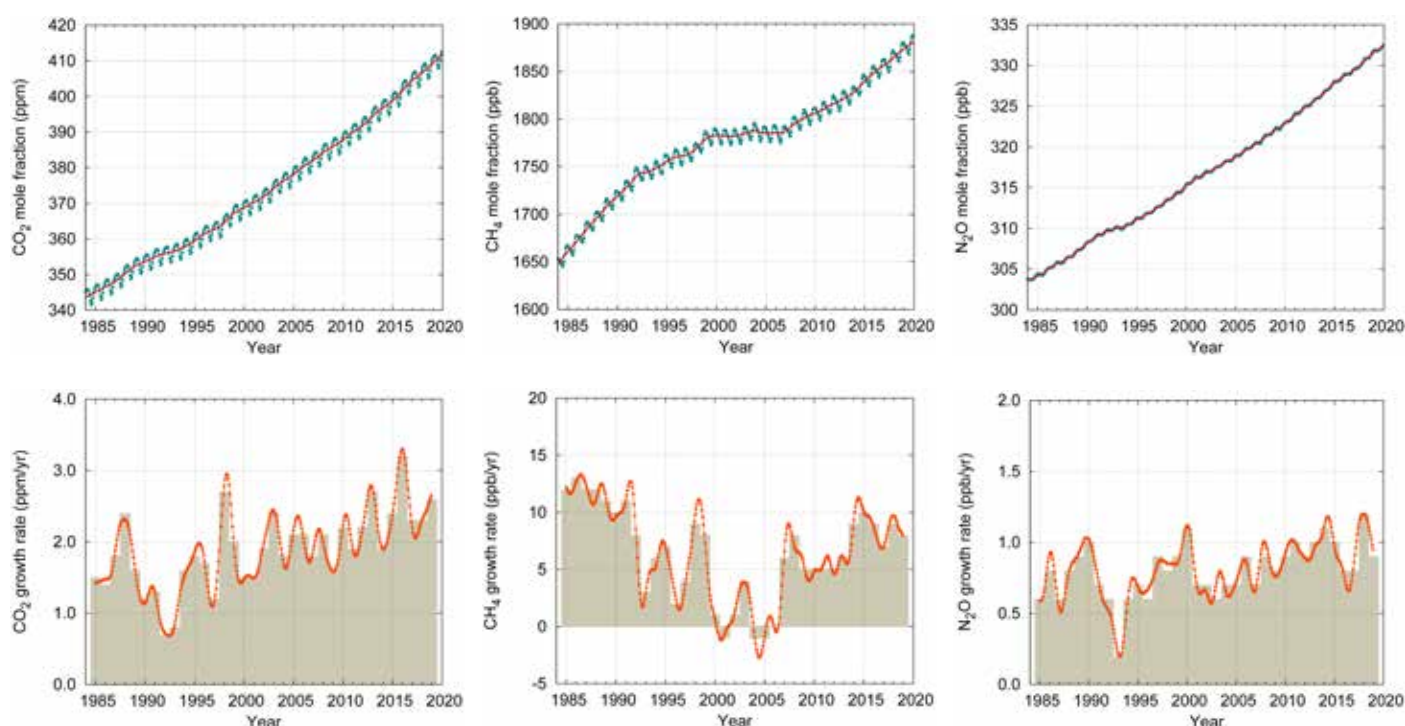


Figure 1. (upper row) Globally averaged CO₂, CH₄ and N₂O mole fraction in ppm (CO₂) and ppb (CH₄; N₂O, respectively) and its growth rates (bottom row) from 1984 to 2019. Increases in successive annual means are shown as the shaded columns in the bottom row. The red line in the upper row is the monthly mean with the seasonal variation removed; the blue dots and line depict the monthly averages

Final global average concentration data figures for 2020 will not be available until the second half of 2021, but data from all global locations, including flagship observatories, indicate that levels of CO₂, CH₄ and N₂O continued to increase in 2020 and 2021 (Figures 2 and 3). In July 2021, CO₂ concentration at Mauna Loa (Hawaii, US) and Cape Grim (Tasmania, Australia) reached 416.96 ppm and 412.1 ppm, respectively, in comparison with 414.62 ppm, and 410.03 ppm in July 2020.

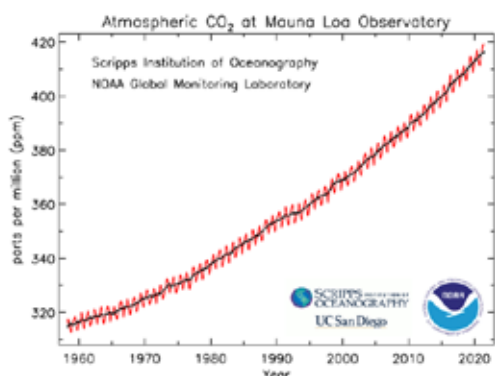


Figure 2. Monthly mean CO₂ mole fraction in ppm at Mauna Loa observatory from March 1958 to July 2021. The dashed red line represents the monthly mean values, centred on the middle of each month. The black line represents the same, but here the average seasonal cycle has been removed by a statistical treatment. Source: www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/mlo.html

¹In this section, the physical quantity related to the amount of gases in the atmosphere (dry mole fraction) is referred to as "concentration"

Concentration variability and COVID-19

The Global Carbon Project (Friedlingstein et al., 2020) estimated that total emissions from 2010–2019 were partitioned into the atmosphere (44%), ocean (23%) and land (29%) with an unattributed budget imbalance (4%). While the increase of GHG concentrations in the atmosphere is driven by human emissions, the interannual changes in the atmospheric CO₂ increase rates are modulated by the variability of the sinks, and especially of the land-based biosphere. The CO₂ growth rate was between 2 ppm and 3 ppm per year within the last 10 years, with the highest increase rate of 3.2 ppm observed in 2016, during the strong El Niño (WMO, 2016). El Niño typically reduces the uptake of CO₂ from the atmosphere by vegetation, due to the increased extent of droughts over land surfaces (Betts et al., 2016).

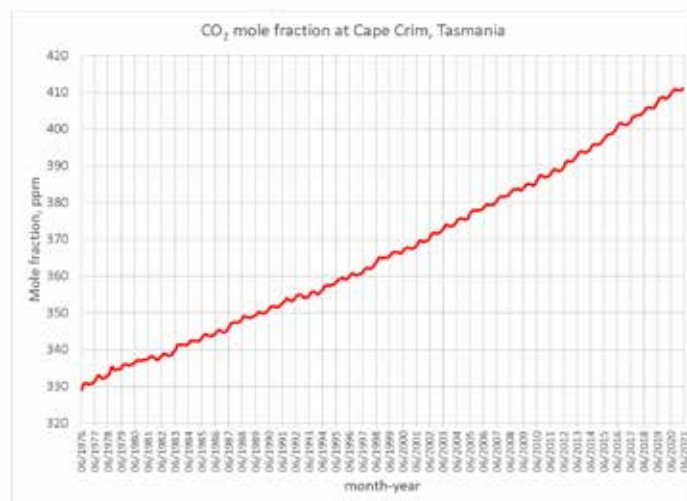


Figure 3. Monthly mean CO₂ mole fraction in ppm from May 1976 to July 2021 at Cape Grim observatory (<https://www.csiro.au/greenhouse-gases/>)

The decline of CO₂ emissions due to the COVID-19 crisis (-5.6%, see section “Global Emissions and Budgets – GCP”) would result in a final change of the annual growth rate of less than 0.2 ppm – well within the 1 ppm – driven by the uptake of the biosphere. This difference can be detected by the GAW network, which has a precision goal that is better than 0.1 ppm, but its detection will require longer than one year of measurements.

The WMO Integrated Global Greenhouse Gas Information System IG³IS (www.ig3is.wmo.int) uses atmospheric observation and analysis tools to improve knowledge of greenhouse gas sources and sinks at national and smaller scales. To achieve its objectives, WMO IG³IS is developing good-practice guidelines for producing observation-based emissions estimates for nations, as well as guidelines for estimating emissions from cities and states, and works toward broadening the use of this methodology.

Methane monitoring in support of the temperature target of the Paris Agreement

Methane accounts for about 16% of radiative forcing by long-lived greenhouse gases, making CH₄ the second most important anthropogenic GHG. Approximately 40% of methane is emitted into the atmosphere by natural sources, for example, wetlands and termites, and about 60% comes from anthropogenic sources such as ruminants, rice agriculture, fossil fuel exploitation, landfills and biomass burning (Saunois et al., 2020). CH₄ emissions also indirectly affect human health and agricultural productivity through the production of tropospheric ozone (UNEP, 2021). To limit global warming, strong, rapid, and sustained reductions in CO₂, CH₄, and other greenhouse gases are necessary (IPCC, 2021).

The global CH₄ increase of 8 ppb in 2019 (WMO, 2020) continues the trend of the past decade, which experienced increases of 5–10 ppb per year (ppb/yr). Preliminary analysis from the US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) network demonstrates an increase of CH₄ concentration in 2020 of 15 ppb, which is the largest increase within the 37-year (from 1984 to 2020) record (https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_CH4/).

Observations of CH₄ stable isotopes are used to identify sources of atmospheric CH₄ (Nisbet et al., 2016). The observed trend in ¹³C-CH₄ is explained by a combined increase in microbial (both natural and anthropogenic) and fossil emissions (WMO, 2020).

Greenhouse Gas Concentrations in the Atmosphere – WMO Global Atmosphere Watch



Addressing CH₄ emissions starts with finding, identifying and quantifying emissions (Nisbet et al., 2020). Satellite data play an important role in locating previously unknown large CH₄ emission sources (hotspots), for example, from gas and oil production sites. The satellite TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) provides CH₄ column concentrations with high sensitivity at the Earth's surface, a good spatiotemporal coverage and sufficient accuracy to facilitate inverse modelling of sources and sinks. Data from TROPOMI were used to identify emission hotspots (Figure 4) and can guide action to address methane super-emitters.



Figure 4. This image shows a sample of abnormal methane concentrations over 2019 as measured by Sentinel-5P. The size and colour of the circles indicate the size and intensity of the plume detected. The redder the colour, the higher the concentration of the methane plume. This image contains modified Copernicus Sentinel data (2019), processed by Kayros.

Substantial methodological development is still needed to improve satellite-derived emission estimates, for which accurate measurements on the ground are indispensable. However, with the current capabilities, an important new contribution to regional emission monitoring can already be made. The combination of Sentinel-5P and Sentinel2 Methane measurements show promising results in deriving emission rates (see Figure 5).

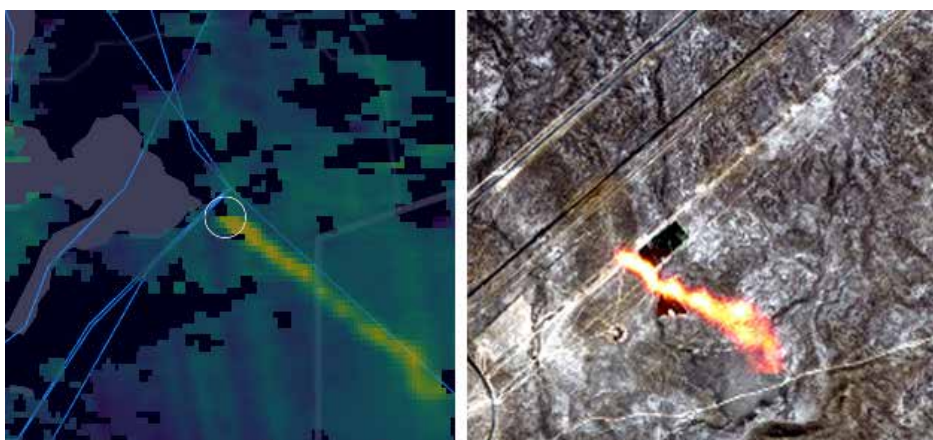


Figure 5: Methane emission hotspots over a gas pipeline in Kazakhstan detected by Sentinel-5P (left) and Sentinel2 (right) missions. This image contains modified Copernicus Sentinel data (2019), processed by Kayros

Several studies have pointed to the short-term climate benefits and cost-effectiveness of mitigating CH₄ emissions, which are well described in the UNEP methane assessment of 2021. There is a strong call to upscale action on CH₄ emissions and there are indicative plans for an International Decade for Methane Management to be proposed at the 76th Session of the United Nations General Assembly.

References

- Betts, R. A., et al. 2016: El Niño and a Record CO₂ Rise, *Nature Climate Change* 6 (9), 806–10. doi:10.1038/nclimate3063, <https://www.nature.com/articles/nature06591>
- Friedlingstein, P., et al. 2020: Global Carbon Budget 2020. *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 3269–3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- Nisbet, E.G., E.J. Dlugokencky, E. J., et al. 2016: Rising atmospheric methane: 2007–2014 growth and isotopic shift. *Glob. Biogeochem. Cycl.* 30, 1356–1370, <https://doi.org/10.1002/2016GB005406>
- Nisbet, E. G., et al. 2020: Methane mitigation: methods to reduce emissions, on the path to the Paris agreement. *Rev. Geophys.* 58, <https://doi.org/10.1029/2019RG000675>
- Ocko, IB. et al. 2021: Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming. *Environ. Res. Lett.* 16 054042, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abf9c8/pdf>
- Saunio, M., et al. 2020: The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 1561–1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>.
- United Nations Environment Programme (UNEP) and Climate and Clean Air Coalition, 2021: *Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions*. Nairobi: United Nations Environment Programme. ISBN: 978-92-807-3854-4
- WMO, 2020: WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 16: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2019. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10437

Global GHG Emissions and Budgets – Global Carbon Project (GCP)

Global CO₂ emissions from the combustion of fossil fuels and land use change in 2019 reached a new high of 43 Gigatonnes of CO₂ (Gt, billion metric tonnes), 56% above the level when international climate negotiations started early in the 1990s. Fossil CO₂ emissions (coal, oil, gas and cement), which account for about 85% of all CO₂ emissions (2010–2019), peaked at 36.6 GtCO₂ in 2019, followed by an extraordinary drop of 1.9 GtCO₂ (5.6%) in 2020 (updated from Friedlingstein et al., 2020, Figure 1). The drop in emissions was mainly due to the slowdown of the global economy and lower energy demands during the COVID-19 pandemic, especially during the first wave of confinements. The transport sector, particularly road transport, contributed the most to the decline. Although aviation dropped by 75% at the peak of the lockdown in spring 2020, its contribution was smaller given that the sector only accounts for about 2.8% of the total mean annual global emissions (Le Quéré et al., 2020).

The emissions drop in 2020 was almost four times the size of the one during the Global Financial Crisis in 2008 (1.5%, compared to the previous year), and was the largest annual drop ever recorded in absolute values (1.9 Gt CO₂, Figure 2). Although there is uncertainty about the global post-pandemic recovery, the drop is temporary and initial estimates for 2021 show a strong recovery in emissions with a possible return to pre-COVID levels within a year or two (Figure 3).

Based on preliminary estimates, global emissions in the power and industry sectors were already at the same level or higher in January–July 2021 than in the same period in 2019, before the pandemic, while emissions from road transport remained about 5% lower. Excluding aviation and sea transport, global emissions were at about the same levels as in 2019, averaged across those 7 months.

Despite the expected high growth rates in 2021, the medium-term outlook is for slower emissions growth than seen earlier in this century. In fact, slowing growth rates already began before the pandemic, with an average of 1% per year during the last decade, down from 3% in the previous decade (2000–2009). The emissions growth in 2019, just before the pandemic, was near zero. There is no certainty as to when peak CO₂ emission will be reached, given that 150 countries had increasing fossil CO₂ emissions during the five years prior to the pandemic, but progress is occurring, with 64 countries recording declining emissions (Le Quéré et al., 2021).

Additional 6.6 ± 2.5 Gt CO₂ were added to the atmosphere in 2019 from the net impact of land-use change – that is, deforestation, degradation, reforestation. These emissions are above the average from the past decade (2010–2019) of 5.8 Gt CO₂ due to large land-clearing fires in the Amazon and Indonesia (Friedlingstein et al., 2020). For the first time in the global carbon budget, we provide estimates for the contributing gross fluxes that make up net land-use change emissions and show that gross emissions, such as land clearing, shifting cultivation and peat draining, are about 2–3 times larger (16 ± 2.6 Gt CO₂) than the net flux (average for 2010–2019). However, the trends for land use emissions in the last decade are inconsistent between estimates because of divergent estimates of forest loss areas. These emissions are only partially offset by anthropogenic sinks such as reforestation and vegetation regrowth after crop abandonment.

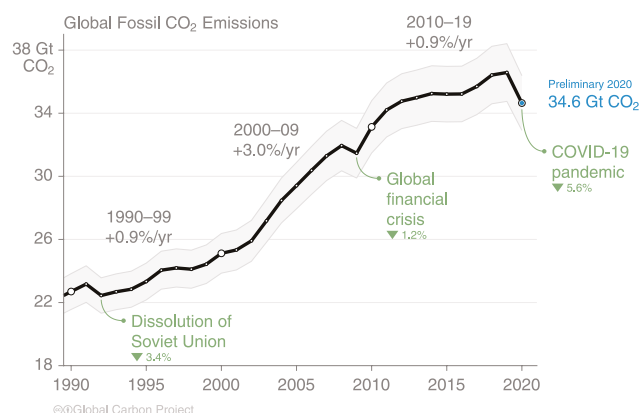


Figure 1. Global fossil CO₂ emissions which include coal, oil, gas and cement production. Data updated from Friedlingstein et al. (2020)

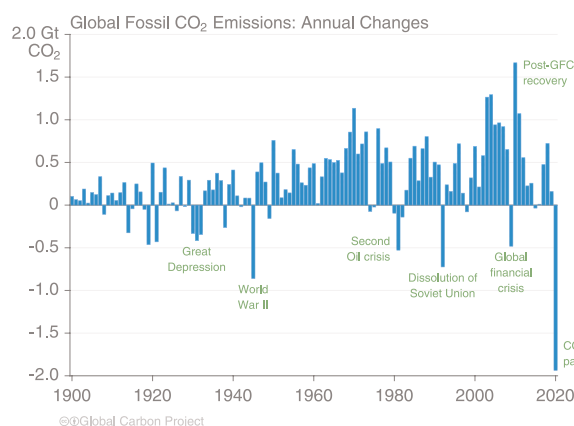


Figure 2. Annual changes in global fossil CO₂ emissions. Data updated from Friedlingstein et al. (2020)

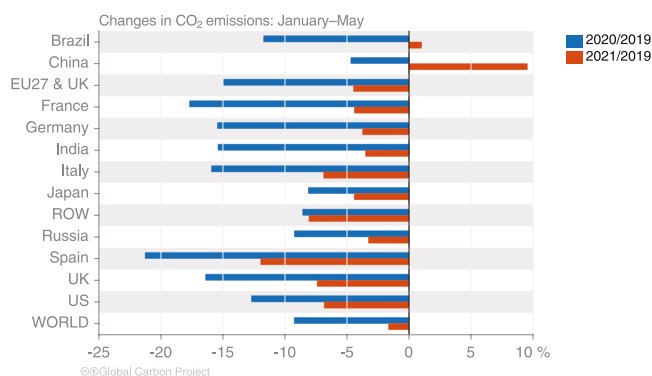


Figure 3. Changes in fossil fuel CO₂ emissions for the world and a selected group of countries for January–May in 2020 and 2021 compared with the same period in 2019 (Carbon Monitor).

Global GHG Emissions and Budgets – Global Carbon Project (GCP)

The land and oceans sinks removed almost half of all anthropogenic CO₂ emissions, with oceans sinks remaining close to the decadal average (2000–2009) in 2019 and 2020. Land sinks were slightly below their average, reflecting several climate anomalies such as wildfires in Australia and elsewhere.

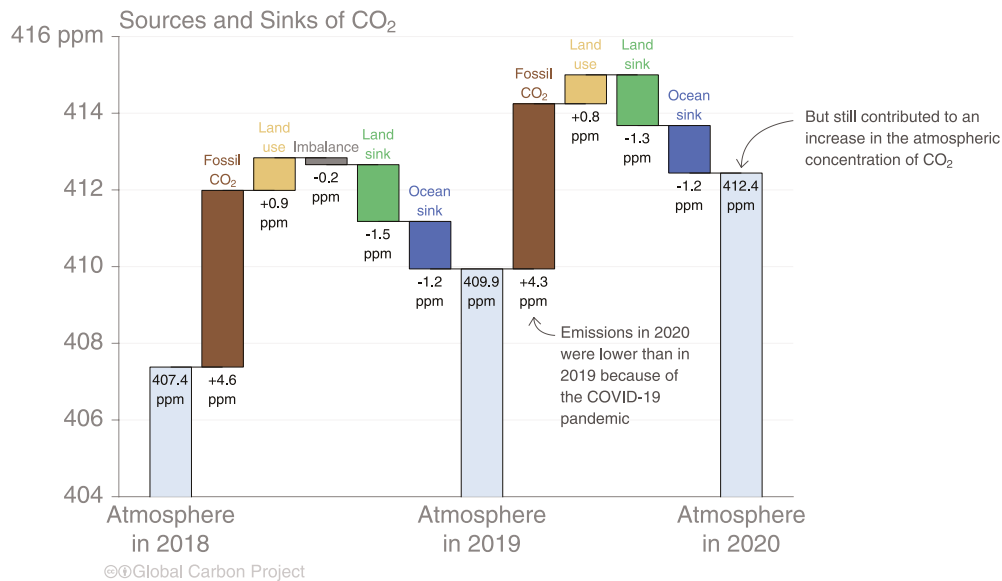


Figure 4. Attribution of changes in atmospheric CO₂ concentrations (parts per million, ppm) to main sources of fossil fuels and cement production. Data from Friedlingstein et al. (2020). Note that atmospheric concentrations are estimated from the NOAA/ESRL network and therefore are not exactly the same as the ones based on the WMO global network; this choice is determined by data availability at the time of submission of the Global Carbon Budget for publication.

The importance of nitrous oxide (N₂O) emissions

Nitrous oxide (N₂O) is the third most important greenhouse gas contributing to human induced warming, after CO₂ and methane (CH₄). Its third place often results in its receiving less attention, although N₂O is 298 times more effective at trapping heat per unit mass than CO₂ (on a 100-y time scale). Once emitted, N₂O remains in the atmosphere for 116 ± 9 years, a shorter lifetime than CO₂ but much longer than CH₄.

Anthropogenic emissions of N₂O have been growing for over 100 years, with a 30% increase in the past three decades. Agriculture, owing to the use of nitrogen fertilizers and manure, contributes 70% of all anthropogenic N₂O emissions (Tian et al., 2020). Excess nitrogen in the environment has led to a four-fold increase in global riverine N₂O emissions in the period from 1900 to 2016 with emissions peaking over the past decade (Yao et al., 2020).

The recently published Global N₂O Budget (Figure 5) estimated all anthropogenic and natural sources and sinks that determine the accumulation of atmospheric N₂O.

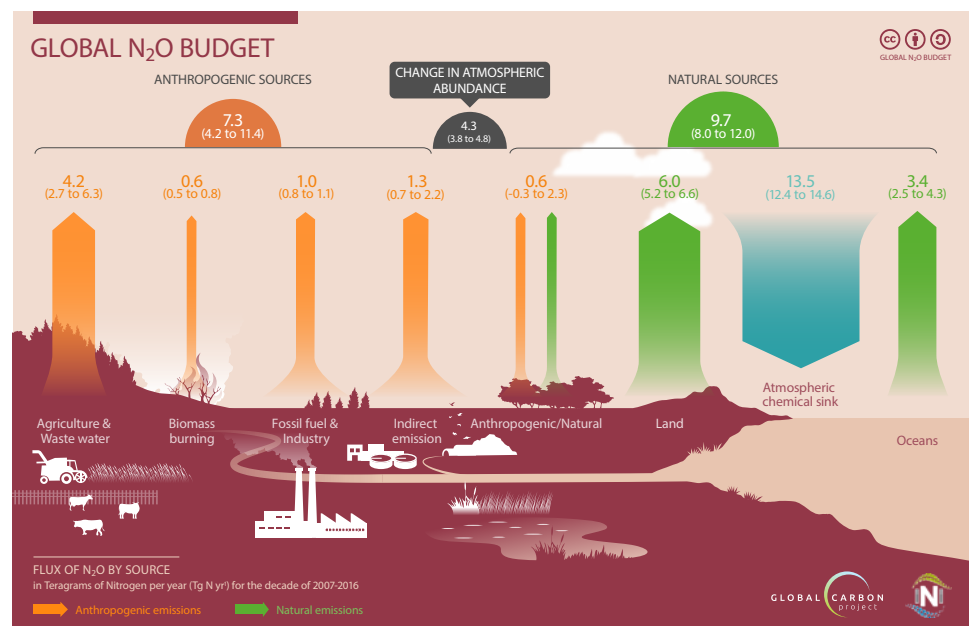


Figure 5. Mean global N₂O budget for all major anthropogenic and natural sources and sinks for the decade 2007–2016 (redrawn from Tian et al., 2020).

Recent trends in N_2O emissions exceed the illustrative socioeconomic pathways used by the global climate community, and show a rapidly departing trajectory from scenarios that are consistent with the Paris Agreement targets (Figure 6). Despite this growth, some regions (for example, Europe) have stable emissions, often resulting from reductions in industrial emissions (through emission abatement technologies) and increased nitrogen use efficiency in agriculture (Thompson et al., 2019). These technological and efficiency improvements are important also in offsetting a growth in N_2O emissions from increases in, for example, agricultural activity in some regions, such as North America.

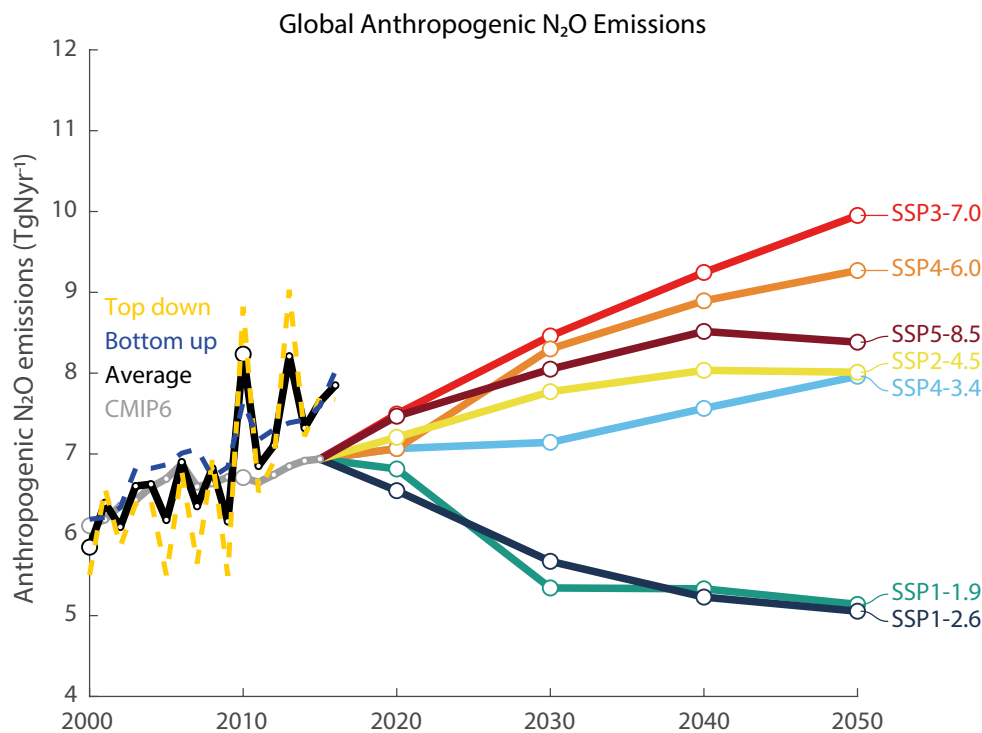


Figure 6. Historical and projected global N_2O emissions used in the marker socioeconomic pathway scenarios used in the IPCC AR6 (Tian et al., 2020).

References

- Carbon Monitor: <https://carbonmonitor.org/>
- Friedlingstein, P. et al. 2020: Global Carbon Budget 2020. *Earth Sys. Sci. Data*, 12, 3269–3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- Global Carbon Project, 2021: An annual update of the global carbon budget and trends. <https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget>
- Le Quéré, C. et al. 2020: Temporary reduction in daily global CO_2 emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nat. Clim. Chang.*, 10, 647–653, <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>
- Le Quéré, C. et al. 2021: Fossil CO_2 emissions in the post-COVID-19 era. *Nat. Clim. Chang.*, 11, 197–199, <https://www.nature.com/articles/s41558-021-01001-0>
- Thompson, R.L. et al. 2019: Acceleration of global N_2O emissions seen from two decades of atmospheric inversion. *Nat. Clim. Chang.*, 9, 993–998, <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0613-7>
- Tian, H. et al. 2020: A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, 586, 248–256, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>
- Yao, Y. et al. 2020: Increased global nitrous oxide emissions from streams and rivers in the Anthropocene. *Nat. Clim. Chang.* 10, 138–142, <https://www.nature.com/articles/s41558-019-0665-8>

This section provides a summary on the state of change of two important climate indicators (Trewin et al., 2021) – temperature and sea ice – in the five-year period from 2017–2021. The global average mean surface temperature for 2017–2021 (2021 data are based on averages for January to May or June, depending on the data set) is among the warmest of any equivalent period on record (Figure 1). It is estimated to be 1.06 °C to 1.26 °C above pre-industrial (1850–1900) levels, depending on the data set used.

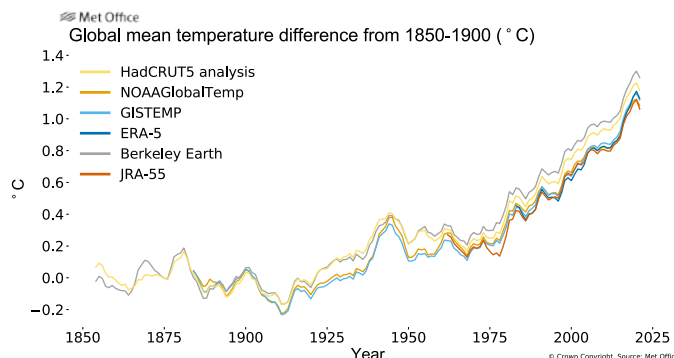


Figure 1. Five-year running average of global temperature anomalies (relative to pre-industrial) from 1854 to 2021 for six data sets: HadCRUT5.0.1.0, NOAA GlobalTemp v5, GISTEMP v4, Berkeley Earth, ERA5, and JRA-55. Data for 2020 to June 2021 for HadCRUT5 and July for NOAA GlobalTemp, GISTEMP, Berkeley Earth, ERA5 and JRA-55.

The 2017–2021 average global temperature dropped slightly from the record high for 2016–2020. This is mainly due to the El Niño conditions in 2016 which boosted global temperatures (WMO, 2016) and the La Niña conditions in early 2021 that contributed to a slight drop of the global annual temperatures. The 2017–2021 five-year average temperature is likely to be the highest on record for large areas of North Africa, the Middle East, Eastern Asia, eastern parts of the US, parts of Central America, and areas of South America. Only a few land areas were close to or slightly cooler than the 1981–2010 average, most notably an area of North America (Figure 2).

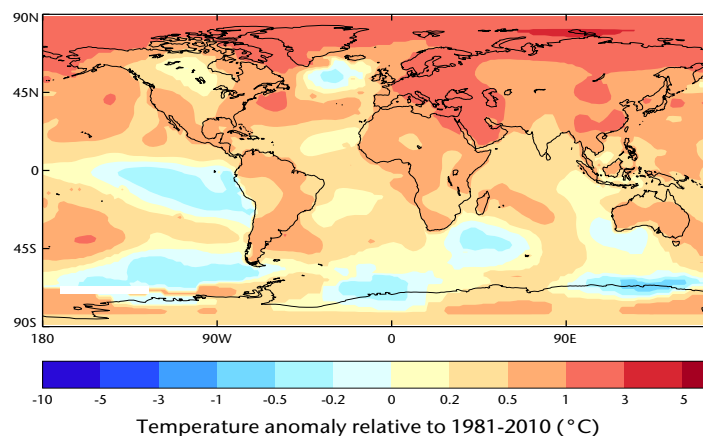


Figure 2. 2017-2021 five-year average temperature anomalies relative to the 1981-2010 average. Data is from NASA GISTEMP v4. Date updated to July 2021

Sea ice

Arctic sea ice has seen a long-term decline every month since the beginning of the satellite era (1979–present), with the largest relative losses in late summer, around the time of the annual minimum in September (Figure 3), albeit with regional variations. For the 2016–2020 period, the average arctic sea-ice extent in September was 28% below the 1981–2010 average while the average March maximum was around 6% below the 1981–2010 average.

In every year from 2017 to 2021, the Arctic average summer minimum and average winter maximum sea-ice extent were below the 1981–2010 long term average. In September 2020, the Arctic sea-ice extent reached its second lowest minimum on record.

There has also been a marked decline in the fraction of older, usually thicker, ice. At the time of the March maximum, the fraction of ice older than one year has declined from around 60% in 1985 to around 27% in 2021.¹ The fraction of ice older than four years has declined from 30% in 1985 to less than 5% in 2021.

Antarctic sea-ice extent increased slowly from the start of the satellite era to around 2015. However, in the three years following 2015, ice extent dropped rapidly (Figure 3). The drop was associated with ocean warming, combined with incursions of warm air during the spring and an unusual weakening of the mid-latitude westerly winds.² Since then, ice extent has returned close to the long-term average.

¹ <http://nsidc.org/arcticseaicenews/2021/05/>

² <https://www.nature.com/articles/s41561-021-00768-3>

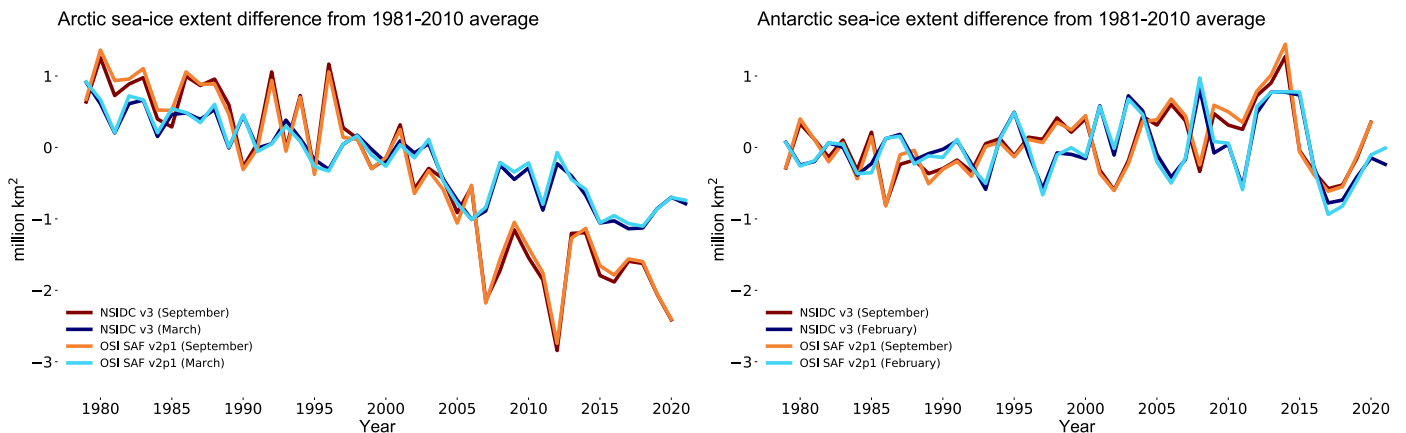


Figure 3. For 1979–2021: (left) monthly September and March Arctic sea-ice extent anomalies relative to the 1981–2010 average; (right) monthly February and September Antarctic sea-ice extent anomalies relative to the 1981–2010 average (Sources: US National Snow and Ice Data Center (NSIDC) and EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility (OSI SAF))

An exceptional and dangerous heatwave devastated the US northwest and Western Canada in June /July

The all-time Canadian heat record was broken when Lytton, British Columbia, recorded a high of 49.6 °C on 29 June 2021. Using published peer-reviewed methods (van Oldenborgh et al., 2021), the World Weather Attribution (WWA) initiative investigated the role of human-induced climate change in the likelihood and intensity of this extreme heatwave. The occurrence of a heatwave with the high maximum daily temperatures observed in the area 45–52 °N, 119–123 °W, was virtually impossible without human-caused climate change (World Weather Attribution; Philip et al., 2021). The temperatures were so extreme that they were far beyond the range of historically observed temperatures. This makes it hard to quantify with confidence how rare the event was. In the most realistic statistical analysis, the event is estimated to be a 1 in 1000 year event in today's climate. An event such as the Pacific Northwest 2021 heatwave is still rare or extremely rare in today's climate, yet would be virtually impossible without human-caused climate change. As warming continues, it will become a lot less rare (Philip et al., 2021). human-caused climate change. As warming continues, it will become a lot less rare (Philip et al., 2021).

Severe Flooding Event in Germany and neighbouring countries

Very pronounced heavy rainfall occurred in Germany and neighbouring countries in connection with the low-pressure system “Bernd”, especially in the period from 12–15 July 2021. This led to severe flooding, particularly in North Rhine-Westphalia and Rhineland-Palatinate. The flooding resulted in a high number of fatalities (186 deaths and 26 missing) and considerable infrastructure damage – estimated around € 5 billion (US\$ 5.9 billion) by insurers. The flooding was triggered by long-lasting heavy precipitation that fell on already saturated ground and, in many parts, rocky underground. Wide areas experienced 100 litre (l) /m² within 12 to 72 hours, some areas even 150 l/m² within 12 to 24 hours (Figure 4). In the current climate, for a given location within the larger area north of the Alps to the Netherlands on average it is expected one such event every 400 years (Kreienkamp et al., 2021).

The World Weather Attribution (WWA) initiative analyzed how human-induced climate change affected maximum 1-day and 2-day rainfall events in the summer season (April–September) in two small regions where recent flooding has been most severe (Ahr-Erft region, Germany; and the Meuse, Belgium) as well as anywhere over a larger region including Germany, Belgium and the Netherlands (Kreienkamp et al., 2021).

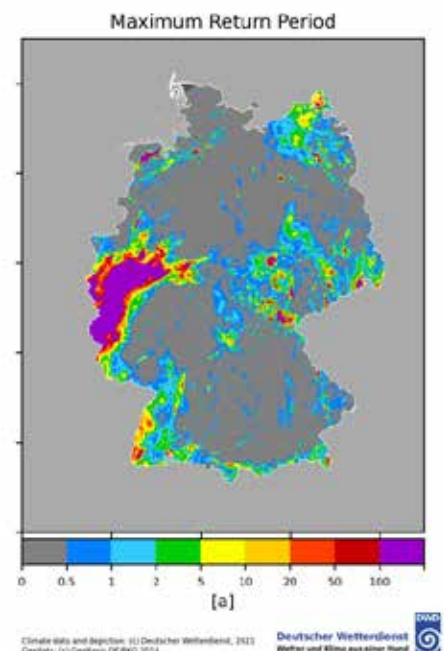


Figure 4. Maximum return period (years) of rainfall with durations between 1 and 72 hours from 12.07.2021 05:50 UTC to 19.07.21 05:50 UTC based on an hourly precipitation sum from the Deutscher Wetterdienst (DWD, Germany's National Meteorological Service) radar network adjusted to rain gauge observations.

All available evidence taken into consideration, including physical understanding, meteorological observations as well as different regional climate models, give high confidence that human-induced climate change has increased the likelihood and intensity of such an event to occur and these changes will continue in a rapidly warming climate (Kreienkamp et al., 2021). Under future climate change, such events will occur more frequently.

Weather, climate and water in 50-year disaster data

The recent *WMO Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes* (WMO-No. 1267) shows that of the 22 326 disasters recorded worldwide from 1970 to 2019 over 11 000 were attributed to weather, climate and water-related hazards. Those disasters resulted in 2.06 million deaths and US\$ 3.64 trillion in losses. Some 44% of the disasters were associated with floods (riverine floods 24%, general floods 14%) and 17% with tropical cyclones (Figure 5). Tropical cyclones and droughts were the most prevalent hazards with respect to human losses, accounting for 38% and 34% of disaster related deaths respectively. In terms of economic losses, 38% were associated with tropical cyclones, while different types of floods account for 31%, riverine floods (20%), general floods (8%) and flash floods (3%) (WMO, 2021).

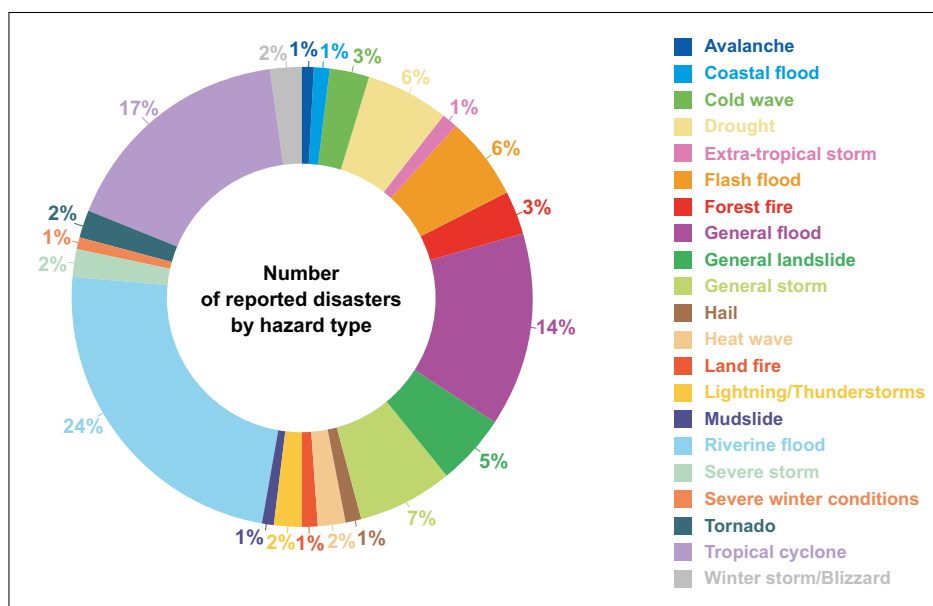


Figure 5. Distribution of number of disasters globally covering the period 1970–2019 (WMO, 2021)

Although the number of recorded disasters rose by a factor of five over the period the number of deaths decreased almost three-fold. This is due, in part, to better multi-hazard early warning systems, which are improving prevention, preparedness and response.

References

- Trewin, B. et al. 2021: Headline Indicators for Global Climate Monitoring. *Bull. Amer. Met. Sci.*, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0196.1>
- WMO, 2021: Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes covering the past 50 years. WMO Report 1267.
- WMO Statement on the Status of the Global Climate in 2016, WMO-No. 1189, 2017
- Philip, S.Y. et al. 2021: Rapid attribution analysis of the extraordinary heatwave on the Pacific Coast of the US and Canada June 2021. World Weather Attribution. <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/NW-US-extreme-heat-2021-scientific-report-WWA.pdf>, accessed 25 August 2021
- van Oldenborgh, G.J. et al. 2021: Pathways and pitfalls in extreme event attribution. *Clim. Change*, 166, 13, <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03071-7>
- Kreienkamp, F. et al. 2021: Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. World Weather Attribution: <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf>, accessed 25 August 2021

It is unequivocal that human influence has warmed the atmosphere, ocean and land. Widespread and rapid changes in the atmosphere, ocean, cryosphere and biosphere have occurred.

Observed increases in well-mixed greenhouse gas (GHG) concentrations since around 1750 are unequivocally caused by human activities. Their concentrations have continued to increase in the atmosphere. Land and ocean have taken up a near-constant proportion (globally about 56% per year) of CO₂ emissions from human activities over the past six decades, with regional differences.

Human-caused radiative forcing of 2.72 [1.96–3.48] W m⁻² in 2019 relative to 1750 has warmed the climate system. This warming is mainly due to increased GHG concentrations, partly reduced by cooling due to increased aerosol concentrations. The radiative forcing has increased by 0.43 W m⁻² (19%) relative to the previous IPCC report (AR5, published in 2013), of which 0.34 W m⁻² is due to the increase in GHG concentrations since 2011. The remainder is due to improved scientific understanding and changes in the assessment of aerosol forcing, which include decreases in concentration and improvement in its calculation.

Each of the last four decades has been successively warmer than any decade that preceded it since 1850. Global surface temperature in the first two decades of the twenty-first century (2001–2020) was 0.99 [0.84–1.10] °C higher than 1850–1900. Global surface temperature was 1.09 [0.95–1.20] °C higher in 2011–2020 than 1850–1900, with larger increases over land (1.59 [1.34–1.83] °C) than over the ocean (0.88 [0.68–1.01] °C).

For the period when attribution studies are available, the observed warming from 1850–1900 to 2010–2019 is 1.06 [0.88–1.21] °C, and the best estimate of total human-caused warming is 1.07 °C, with a likely range of 0.8–1.3 °C. It is likely that well-mixed GHGs contributed a warming of 1.0–2.0 °C, other human drivers (principally aerosols) contributed a cooling of 0.0–0.8 °C, natural drivers changed global surface temperature by -0.1–0.1 °C, and internal variability changed it by -0.2–0.2 °C (Figure 1).

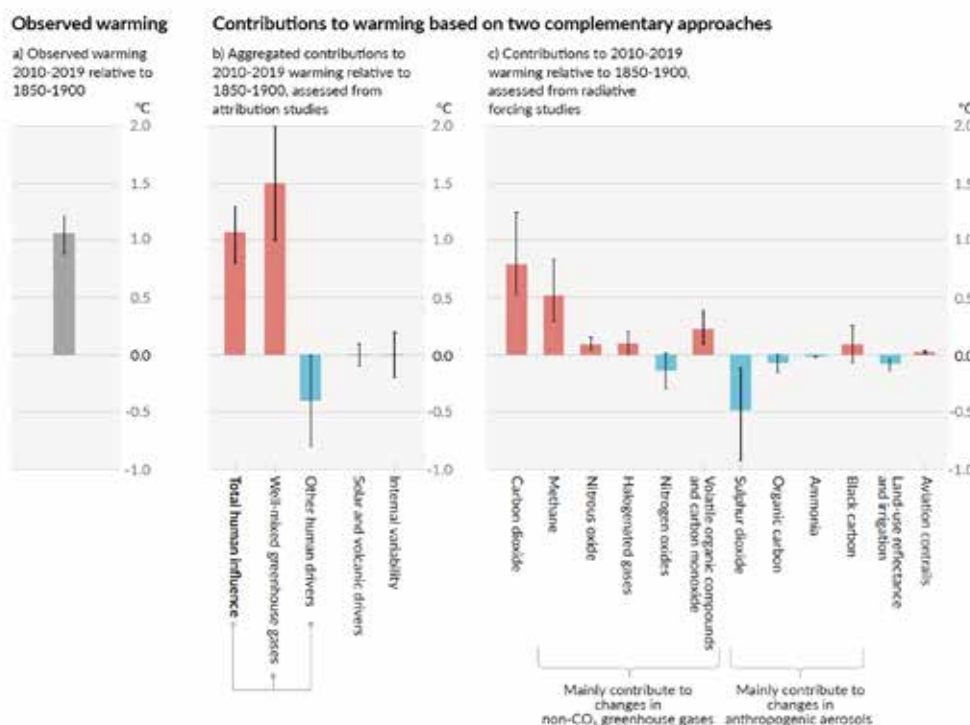


Figure 1. Taken from IPCC AR6 WG1 Figure SPM.2: Assessed contributions to observed warming in 2010–2019 relative to 1850–1900. Panel a): Observed global warming (increase in global surface temperature) and its very likely range Panel b): Evidence from attribution studies, which synthesize information from climate models and observations. The panel shows temperature change attributed to total human influence, changes in well-mixed greenhouse gas concentrations, other human drivers due to aerosols, ozone and land-use change (land-use reflectance), solar and volcanic drivers, and internal climate variability. Whiskers show likely ranges {3.3.1}. Panel c): Evidence from the assessment of radiative forcing and climate sensitivity. The panel shows temperature changes from individual components of human influence, including emissions of greenhouse gases, aerosols and their precursors; land-use changes (land-use reflectance and irrigation); and aviation contrails. Whiskers show very likely ranges. Estimates account for both direct emissions into the atmosphere and their effect, if any, on other climate drivers. For aerosols, both direct (through radiation) and indirect (through interactions with clouds) effects are considered.{6.4.2, 7.3}

Highlights of IPCC Climate Change 2021, The Physical Science Basis for the current state of climate

Details of observed changes in other parts of the climate system, such as the land, oceans, cryosphere and biosphere, and their attribution to human influence, can be found in the Summary for Policy Makers and the Technical Summary (IPCC, 2021).

The scale of recent changes across the climate system as a whole and the present state of many aspects of the climate system are unprecedented over many centuries to many thousands of years.

In 2019, atmospheric CO₂ concentrations were higher than at any time in at least 2 million years and concentrations of CH₄ and N₂O were higher than at any time in at least 800 000 years.

Global surface temperature has increased faster since 1970 than in any other 50-year period over at least the last 2000 years (Figure 2). Temperatures during the most recent decade (2011–2020) exceed those of the most recent multi-century warm period, around 6500 years ago [0.2–1 °C relative to 1850–1900]. Prior to that, the next most recent warm period was about 125 000 years ago when the multi-century temperature [0.5 °C–1.5 °C relative to 1850–1900] overlaps the observations of the most recent decade.

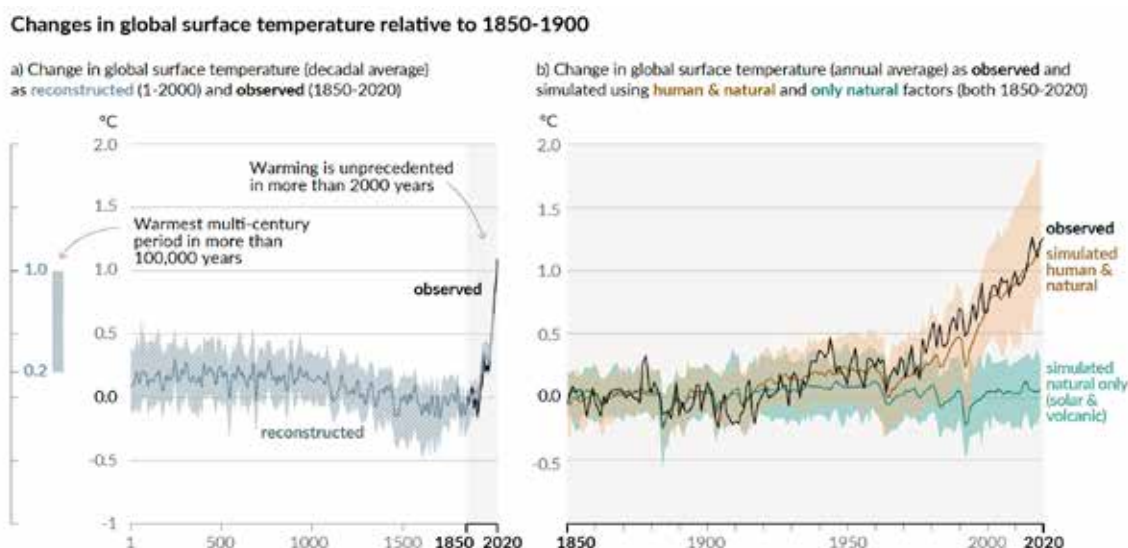


Figure 2. Taken from IPCC AR6 WG1 SPM.1: History of global temperature change and causes of recent warming. Panel a): Changes in global surface temperature reconstructed from paleoclimate archives (solid grey line, 1–2000) and from direct observations (solid black line, 1850–2020), both relative to 1850–1900 and decadal averaged. The vertical bar on the left shows the estimated temperature (very likely range) during the warmest multi-century period in at least the last 100 000 years, which occurred around 6 500 years ago during the current interglacial period (Holocene). The Last Interglacial, around 125 000 years ago, is the next most recent candidate for a period of higher temperature. These past warm periods were caused by slow (multi-millennial) orbital variations. The grey shading with white diagonal lines shows the very likely ranges for the temperature reconstructions. Panel b): Changes in global surface temperature over the past 170 years (black line) relative to 1850–1900 and annually averaged, compared to CMIP6 climate model simulations

In 2011–2020, late summer Arctic sea-ice area was smaller than at any time in at least the past 1000 years). The global nature of glacier retreat, with almost all of the world's glaciers retreating synchronously, since the 1950s is unprecedented in at least the last 2000 years.

Global mean sea level has risen faster since 1900 than over any preceding century in at least the last 3000 years. The global ocean has warmed faster over the past century than since the end of the last deglacial transition (around 11 000 years ago).

Human-induced climate change is already affecting many weather and climate extremes in every region around the globe. Evidence of observed changes in extremes – such as heatwaves, heavy precipitation, droughts, and tropical cyclones – and, in particular, their attribution to human influence has strengthened since the publication of the previous IPCC report (AR5) in 2013.



It is virtually certain that hot extremes (including heatwaves) have become more frequent and more intense across most land regions since the 1950s, while cold extremes (including cold waves) have become less frequent and less severe, with *high confidence* that human-induced climate change is the main driver of these changes. Some recent hot extremes observed over the past decade would have been extremely unlikely to occur without human influence on the climate system. Marine heatwaves have approximately doubled in frequency since the 1980s, and human influence has very likely contributed to most of them since at least 2006.



The frequency and intensity of heavy precipitation events have increased since the 1950s over most land area for which observational data are sufficient for trend analysis, and human-induced climate change is likely the main driver. Human-induced climate change has contributed to increases in agricultural and ecological droughts in some regions due to increased land evapotranspiration.



Decreases in global land monsoon precipitation from the 1950s to the 1980s are partly attributed to human-caused Northern Hemisphere aerosol emissions but increases since then have resulted from rising GHG concentrations and decadal to multi-decadal internal variability. Over South Asia, East Asia and West Africa increases in monsoon precipitation due to warming from GHG emissions were counteracted by decreases in monsoon precipitation due to cooling from human-caused aerosol emissions over the twentieth century. Increases in West African monsoon precipitation since the 1980s are partly due to the growing influence of GHGs and reductions in the cooling effect of human-caused aerosol emissions over Europe and North America.



It is likely that the global proportion of major (Category 3–5) tropical cyclone occurrence has increased over the last four decades, and the latitude where tropical cyclones in the western North Pacific reach their peak intensity has shifted northward; these changes cannot be explained by internal variability alone. There is low confidence in long-term (multi-decadal to centennial) trends in the frequency of all-category tropical cyclones. Event attribution studies and physical understanding indicate that human-induced climate change increases heavy precipitation associated with tropical cyclones but data limitations inhibit clear detection of past trends on the global scale.



Human influence has likely increased the chance of compound extreme events since the 1950s. This includes increases in the frequency of concurrent heatwaves and droughts on the global scale; fire weather in some regions of all inhabited continents; and compound flooding in some locations.

Highlights of IPCC Climate Change 2021, The Physical Science Basis for the current state of climate



In addition to this state of knowledge regarding observed climate change, and its attribution, these are the headline statements from the report:

- Improved knowledge of climate processes, paleoclimate evidence and the response of the climate system to increasing radiative forcing gives a best estimate of equilibrium climate sensitivity of 3 °C with a narrower range compared to AR5.
- Global surface temperature will continue to increase until at least the mid-century under all emissions scenarios considered. Global warming of 1.5 °C and 2 °C will be exceeded during the twenty-first century unless deep reductions in CO₂ and other greenhouse gas emissions occur in the coming decades.
- Many changes in the climate system become larger in direct relation to increasing global warming. They include increases in the frequency and intensity of hot extremes, marine heatwaves, and heavy precipitation, agricultural and ecological droughts in some regions, and proportion of intense tropical cyclones, as well as reductions in Arctic sea ice, snow cover and permafrost.
- Continued global warming is projected to further intensify the global water cycle, including its variability, global monsoon precipitation and the severity of wet and dry events. Under scenarios with increasing CO₂ emissions, the ocean and land carbon sinks are projected to be less effective at slowing the accumulation of CO₂ in the atmosphere.
- Many changes due to past and future greenhouse gas emissions are irreversible for centuries to millennia, especially changes in the ocean, ice sheets and global sea level.
- Natural drivers and internal variability will modulate human-caused changes, especially at regional scales and in the near term, with little effect on centennial global warming. These modulations are important to consider in planning for the full range of possible changes.
- With further global warming, every region is projected to increasingly experience concurrent and multiple changes in climatic impact-drivers. Changes in several climatic impact-drivers would be more widespread at 2 °C compared to 1.5 °C global warming and even more widespread and/or pronounced for higher warming levels.
- Low-likelihood outcomes, such as ice sheet collapse, abrupt ocean circulation changes, some compound extreme events and warming substantially larger than the assessed very likely range of future warming cannot be ruled out and are part of risk assessment.
- From a physical science perspective, limiting human-induced global warming to a specific level requires limiting cumulative CO₂ emissions, reaching at least net zero CO₂ emissions, along with strong reductions in other greenhouse gas emissions. Strong, rapid and sustained reductions in CH₄ emissions would also limit the warming effect resulting from declining aerosol pollution and would improve air quality.
- Scenarios with very low or low GHG emissions lead within years to discernible effects on greenhouse gas and aerosol concentrations and on air quality relative to high and very high GHG emissions scenarios. Under these contrasting scenarios, discernible differences in trends of global surface temperature would begin to emerge from natural variability within around 20 years, and over longer time periods for many other climatic impact-drivers.

References

- Arias, P.A., 2021: Technical Summary. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, et al. (eds.)]. Cambridge University Press. In Press
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, et al. (eds.)]. Cambridge University Press. In Press

Heatwaves, Wildfires and Air Pollution: Compounding and Cascading Climate Hazards to Health during the COVID-19 Pandemic – WHO/WMO

The severe short- and long-term impacts of COVID-19 are an additional burden for communities worldwide already dealing with the existing climate threats to health. Individuals infected with COVID-19 and exposed to climate hazards such as heat, wildfires or air pollution are at risk of experiencing more severe health outcomes compared to the risks from individual hazards. In addition, each individual climate hazard and COVID-19 impact can undermine and complicate public health responses to other climate hazards and COVID-19 impacts, compounding the stresses on health care quality and capacity. Heat and wildfire exposure combined with COVID-19 dynamics may lead to significant increases in hospital admissions whilst reducing health care services and infrastructural capacities – medical equipment is limited, medical staff may be affected and health care facilities may be impaired (Figure 1). Climate hazards and COVID-19 impacts could also interact to make specific and routine interventions less effective, more challenging or more risky.

Heat impacts: Mechanisms and vulnerabilities

Heat can affect human health in several ways. Direct impacts include increased morbidity and mortality due to heat stress, heatstroke and exacerbations of cardiovascular, respiratory and cerebrovascular diseases (Figure 2). Heat can also impair human behaviour (e.g., physical and mental activities), health service delivery, air quality and critical infrastructure, leading to indirect health effects. Some population groups are particularly vulnerable: people over the age of 65, infants and children, individuals with disabilities or pre-existing medical conditions, outdoor workers and people with low socioeconomic status. In urban areas, the dense concentrations of structures and the beehive of human activities can produce higher temperatures – the urban heat island effect – which may, for example, alter and deprive people of sleep at night.

Heat and health threats in recent years

Rising temperatures and more frequent, longer and persistent heatwaves in recent years are affecting human health, increasing heat-related mortality and impairment of capacity to work. Global heat-related mortality in people older than 65 years increased by 53.7% from 2000–2004 to 2014–2018, reaching 296 000 deaths in 2018, with the majority occurring in Japan, eastern China, northern India and central Europe. 37% of heat-related deaths can be attributed to human-induced warming, according to a global analysis including

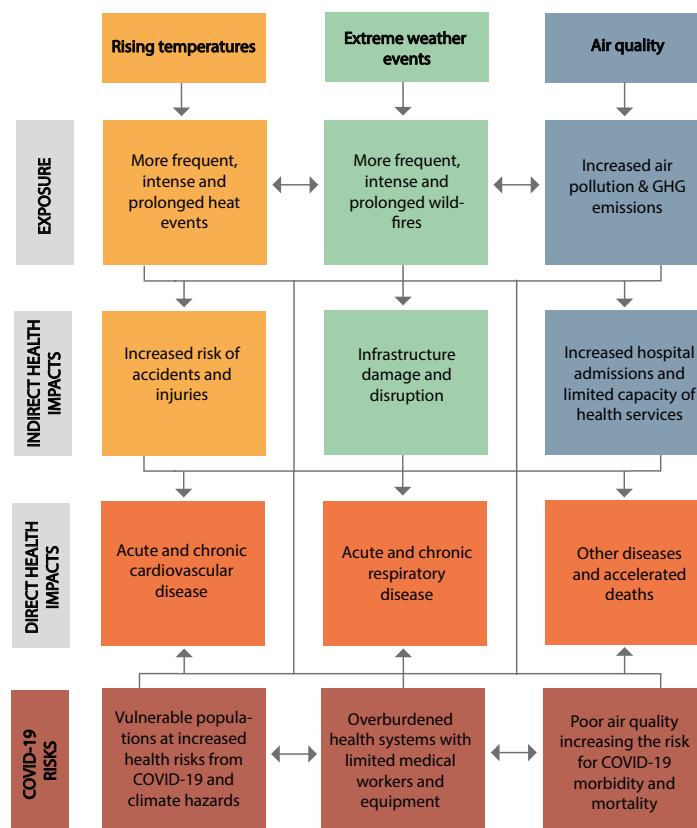


Figure 1. Direct and indirect health impacts of climate hazards and COVID-19 risks representing compounding and cascading factors.

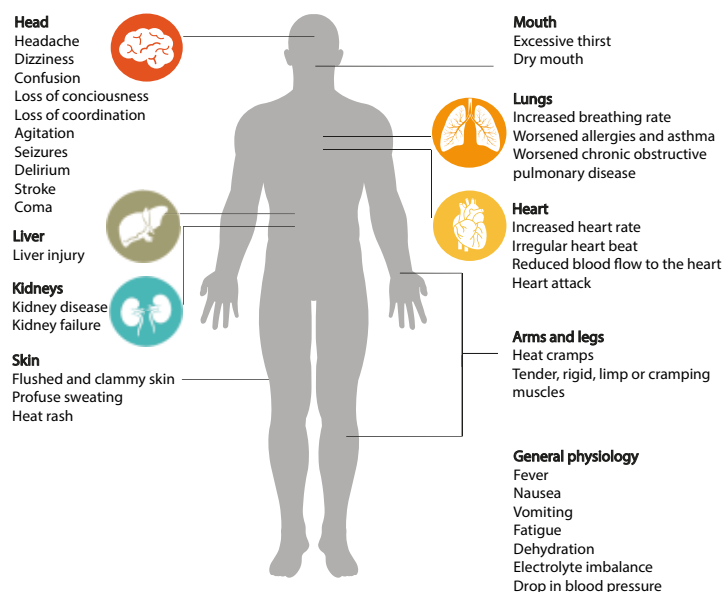


Figure 2. Symptoms of heat exposure affecting different organ systems. Adapted from Dahl et al., 2019.

Heatwaves, Wildfires and Air Pollution: Compounding and Cascading Climate Hazards to Health during the COVID-19 Pandemic – WHO/WMO



data from 43 countries between 1991–2018 (Vicedo-Cabrera et al., 2021). In addition, rising temperatures were responsible for an excess of 103 billion potential work hours lost globally in 2019 compared with those lost in 2000 (Watts et al., 2020).

Combined risks of COVID-19 and heat

Susceptibility to COVID-19 overlaps significantly with susceptibility to heat, exacerbating the risks of compounding and cascading negative effects on health for vulnerable populations. Higher COVID-19 mortality rates were found among the elderly and individuals with underlying chronic conditions. Prevalent co-morbidities associated with increased COVID-19 severity include respiratory and cardiovascular diseases, hypertension, diabetes, chronic obstructive pulmonary disease, malignancy and chronic kidney disease, which are also risk factors for heat-related complications (Emami et al., 2020).

Wildfire smoke impacts: Mechanisms and vulnerabilities

Rising global temperatures and heatwaves increase the likelihood of wildfires, which in turn drive further global warming by increasing CO₂ emissions. Wildfire smoke contains a complex mixture of particles and significantly reduces air quality. Wildfire smoke can compromise air quality, which can irritate the lungs, cause inflammation, affect the immune system and increase the risk of lung infections. Fine particulate matter (PM_{2.5}), specifically, can penetrate deep into the lungs, where they pose a particular risk to human health. Vulnerable population groups include the elderly, socioeconomically disadvantaged individuals, people with co-morbidities and outdoor workers – all of whom are also vulnerable to heat and COVID-19. The specific health impacts of wildfire smoke still need to be better understood, given that the chemical composition might differ from air pollutants from other sources, potentially affecting health in different ways.

Wildfire, air pollution and health threats in recent years

In 114 countries, there was an increase in the number of days people were exposed to very high or extremely high risk of danger from fire in 2016–2019 compared with 2001–2004, translating into an increase in population exposure to wildfires in 128 countries (Figure 3, Watts et al., 2020). The increased occurrence of wildfires leads to peaks in air pollution concentrations that represent not only a risk factor for respiratory diseases but also a significant factor associated to all-cause and cardiovascular mortality (Karanasiou et al., 2021).

Combined risks of COVID-19, wildfires and air pollution in recent years

Long-term exposure to air pollution is linked to chronic diseases such as asthma, chronic obstructive pulmonary disease, lung cancer, heart diseases, effects on the nervous system and diabetes. Cardiovascular and respiratory diseases, diabetes, hypertension and cancer have been suggested to be associated with adverse prognosis in SARS-CoV-2 infected people (Wu et al., 2020). A significant fraction of COVID-19 infections lead to adverse long-term conditions affecting the heart, lungs and other organ systems, which could be worsened by air pollution exposure (Brunekreef et al., 2021). While quantification is difficult, emerging evidence suggests that the compound effects of air pollution and COVID-19 may lead to increased COVID-19 mortality. In the US, an increase of 1 µg/m³ in the long-term PM_{2.5} was associated with a statistically significant 11% increase in the COVID-19 mortality rate (Wu et al., 2020). In addition, long-term exposure to particulate matter was estimated to contribute to approximately 15% of COVID-19 mortality worldwide (Pozzer et al., 2020).

Heatwaves, Wildfires and Air Pollution: Compounding and Cascading Climate Hazards to Health during the COVID-19 Pandemic – WHO/WMO

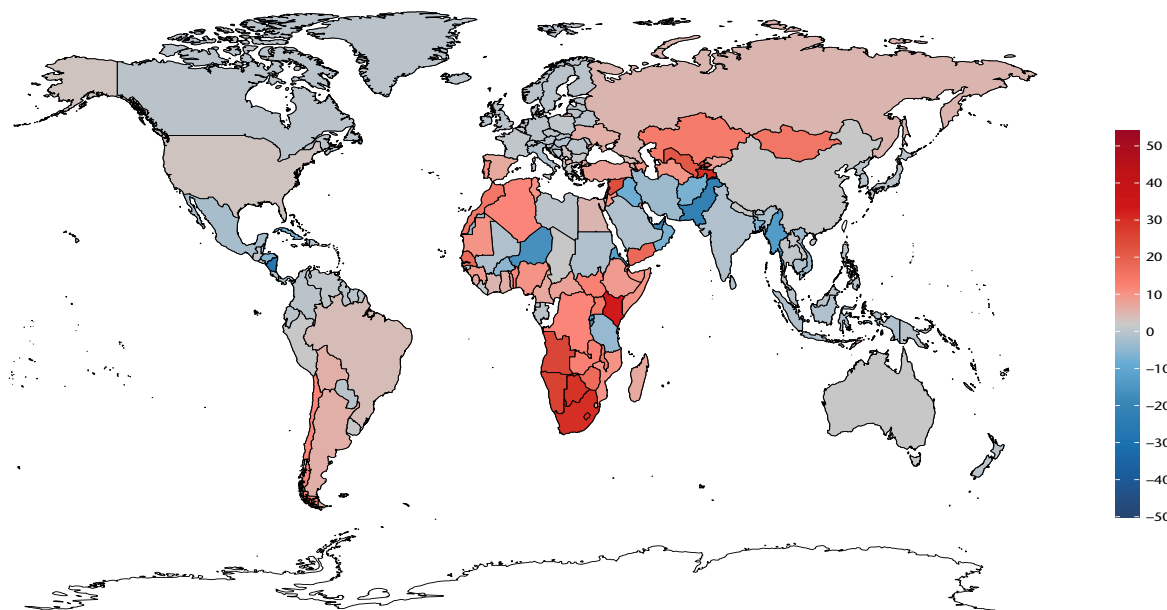


Figure 3. Change in the average number of days per year each person was exposed to very high or extremely high wildfire risk in 2016–2019 compared to 2001–2004. Adapted from Watts et al. 2020.

Strategic response to future increases in climate hazards and health impacts

Efforts to protect and rebuild local communities from public health, economic and societal consequences of COVID-19 will need to be sustained and aligned with national climate change strategies. This is not currently happening. Since the start of the pandemic, close to half of stimulus spending by G20 countries on energy-producing and consumer activities has gone to coal, oil and gas. In the absence of effective mitigation and adaptation, population exposure to compounding and cascading effects of climate hazards will continue to grow as scientists expect extreme temperature and wildfire events to occur with increased frequency, duration and magnitude in coming years due to climate change. Besides addressing impacts of individual climate hazards, public health researchers and decision-makers need to analyze and integrate health risks of compounding climate impacts into health adaptation plans and projections, target actions to protect vulnerable population groups, and promote COVID-19 recovery investments that both protect human health and reduce environmental and climate impacts (WHO, 2020).

References

- Brunekreef, B. et al. 2021: Air pollution and COVID-19. Including elements of air pollution in rural areas, indoor air pollution and vulnerability and resilience aspects of our society against respiratory disease, social inequality stemming from air pollution, study for the committee on Environment, Public Health and Food Safety, Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies, European Parliament, Luxembourg.
- Dahl, K. et al. 2019: Killer Heat in the United States: Climate Choices and the Future of Dangerously Hot Days. Cambridge, MA: Union of Concerned Scientists. <https://www.ucsusa.org/resources/killer-heat-united-states-0>
- Emami, A. et al. 2020: Prevalence of Underlying Diseases in Hospitalized Patients with COVID-19: a Systematic Review and Meta-Analysis. Arch. Acad. Emerg. Med., 8, e35, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7096724/>
- Karanasiou, A. et al. 2021: Short-term health effects from outdoor exposure to biomass burning emissions: A review. Sci. of the Tot. Environ., 781, 146739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146739>
- Pozzer, A. et al. 2020: Regional and global contributions of air pollution to risk of death from COVID-19. Cardiovasc. Res., 116, 2247–2253. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvaa288>
- Vicedo-Cabrera, A.M. et al. 2021: The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. Nat. Clim. Chang. 11, 492–500, <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01058-x>
- Watts, N. et al. 2020. The 2020 report of The Lancet Countdown on health and climate change: responding to converging crises. The Lancet, 397, P129-170, [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)32290-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)32290-X)
- WHO, 2020: Manifesto for a health recovery from COVID-19. <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/who-manifesto-for-a-healthy-recovery-from-covid-19>.
- Wu, X. et al. 2020: Air pollution and COVID-19 mortality in the United States: Strengths and limitations of an ecological regression analysis. Sci. Adv., 6, eabd4049, DOI: 10.1126/sciadv.abd4049

Sea Level and Coastal Impacts – WCRP (WMO/IOC/ISC)

Global mean sea levels rose 20 cm from 1900 to 2018 at an accelerating rate of 3.7 ± 0.5 mm/yr from 2006 to 2018 (IPCC, 2021). This is due to human-induced global warming which is causing thermal expansion of ocean water and melting land-based ice. The rate of ice sheet loss in Greenland and Antarctica increased by a factor of four between 1992-1999 and 2010-2019, so that ice sheet and glacier mass loss were the dominant contributors to sea level rise from 2006 to 2018. The IPCC Sixth Assessment Report (IPCC, 2021) projects that if greenhouse gas emissions continue to rise unabated (i.e., a SSP1-8.5 8.5 emission pathway), global mean sea level will likely rise 0.6–1.0 metres by 2100 (relative to 1995–2014) and, with less confidence, range from 1.7–6.8 m (perhaps more) by 2300 (Figure 1), with continued large changes beyond. The large increases in sea level by 2300 would be mostly attributable to significant inputs from the melting of the large ice sheets of Antarctica and Greenland. A substantial reduction in future greenhouse gas emissions would substantially reduce global sea-level rise. If emissions are reduced to meet the Paris Agreement goal of limiting global warming to “well below 2 °C” (i.e., an SSP1-2.6 emissions pathway), global mean sea level would still likely rise 0.3–0.6 m by 2100 (relative to 1995–2014) and with less confidence range from 0.3–3.1 m by 2300. This is a lower rise; but since the

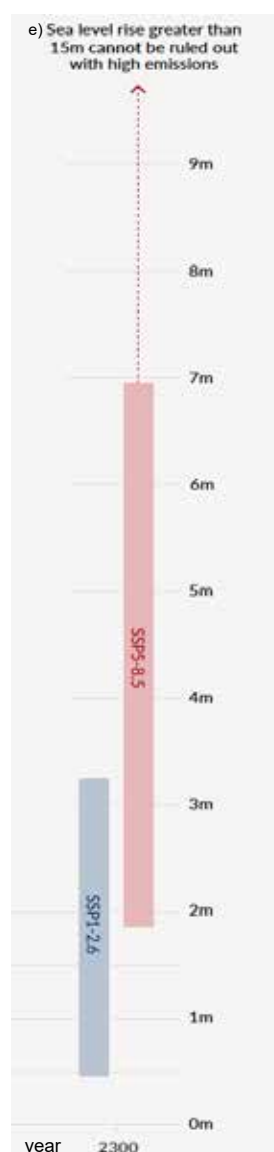
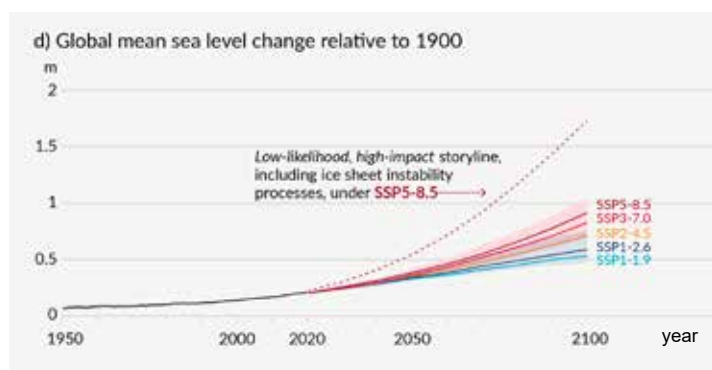


Figure 1. Panels d) and e) from Figure SPM.8 in IPCC AR6 Working Group 1 Summary for Policy Makers (IPCC, 2021). Panel d) Global mean sea level change in meters relative to 1900. The historical changes are observed (from tide gauges before 1992 and altimeters afterwards), and the future changes are assessed consistently with observational constraints based on emulation of CMIP, ice sheet, and glacier models. Likely ranges are shown for SSP1-2.6 and SSP3-7.0. Only likely ranges are assessed for sea level changes due to difficulties in estimating the distribution of deeply uncertain processes. The dashed curve indicates the potential impact of these deeply uncertain processes. It shows the 83rd percentile of SSP5-8.5 projections that include low-likelihood, high-impact ice sheet processes that cannot be ruled out; because of low confidence in projections of these processes, this curve does not constitute part of a likely range. Changes relative to 1900 are calculated by adding 0.158 m (observed global mean sea level rise from 1900 to 1995–2014) to simulated and observed changes relative to 1995–2014. Projected sea-level rise 1900 to 2100 for a range of emission scenarios. Panel e): Global mean sea level change at 2300 in meters relative to 1900. Only SSP1-2.6 and SSP5-8.5 are projected at 2300, as simulations that extend beyond 2100 for the other scenarios are too few for robust results. The 17th–83rd percentile ranges are shaded. The dashed arrow illustrates the 83rd percentile of SSP5-8.5 projections that include low-likelihood, high-impact ice sheet processes that cannot be ruled out.

future emissions pathway is unknown at this point, and the ice sheet response to a given temperature rise is also highly uncertain, future sea-level rise might be substantially higher (IPCC, 2021).

Sea-level rise threatens the world’s coastal areas through a range of biophysical impacts and changes (Oppenheimer et al., 2019) which include:

- permanent submergence of land by rising mean sea levels and high tides
- more frequent and deeper coastal flooding
- enhanced coastal erosion
- degradation, change and loss of coastal ecosystems
- salinization of soils and of ground and surface water
- impeded drainage and waterlogging.

These biophysical impacts will in turn have socioeconomic impacts on coastal residents and their livelihoods, such as direct damage to buildings and infrastructure and disruption of economic activities. In 2020, an estimated 267 million people (or about 4% of the

Sea Level and Coastal Impacts – WCRP (WMO/IOC/ISC)

world's population) were living within 2 m above sea level (Hooijer and Vernimmen, 2021). This number is growing due to both sea-level rise and demographic trends. It has long been recognized that small islands, deltas and coastal cities are especially threatened due to their high exposure and/or vulnerability.

When considering the impacts of sea-level rise, it is important to note that most of these occur because of increases in extreme sea-level events produced by combinations of tides, storm surges and waves that rise with mean sea level. Further impacts are due to local relative sea-level change rather than global mean sea-level rise because of both regional and local climatic – oceanic circulation changes, local hydrology, gravitational changes linked to ice melting, etc – and non-climatic components – land uplift/subsidence – which also contribute to local sea levels (Figure 2). Hence, global changes need to be downscaled when evaluating future impacts and adaptation needs. In coastal areas where land is rising significantly today, for example, Alaska and northern Scandinavia, relative sea-level rise is reduced or may even be falling. In contrast, human-induced land subsidence in densely

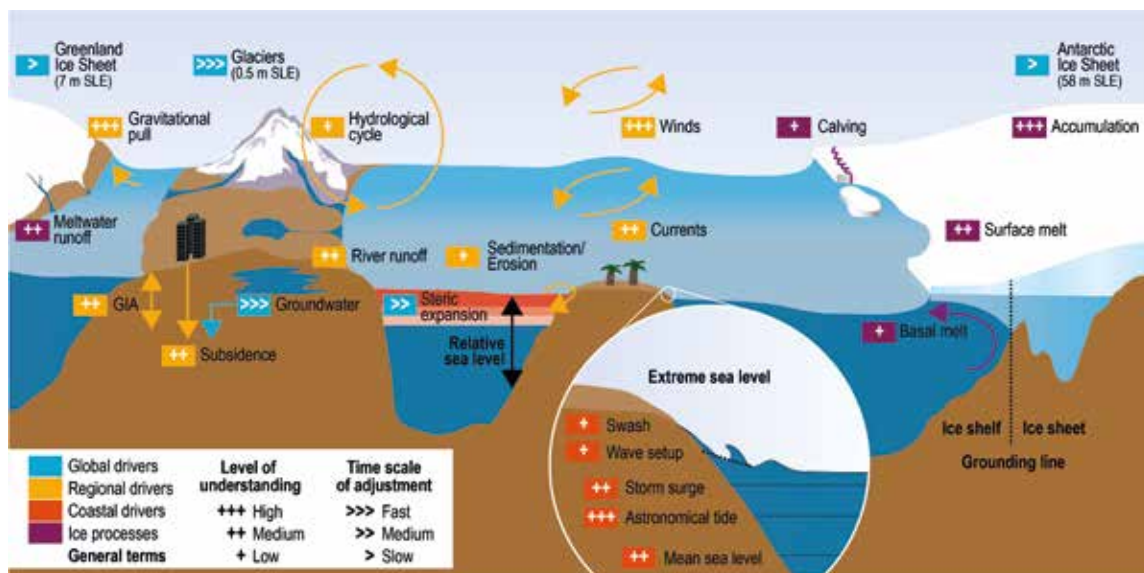


Figure 2. Scheme of the climate and non-climate driven processes that can influence global, regional (green colours), relative and extreme sea-level events (red colours) along coasts. Major ice processes are shown in purple and general terms in black. SLE stands for Sea Level Equivalent and reflects the increase in GMSL if the mentioned ice mass is melted completely and added to the ocean. [reproduction of Figure 4.4 in Oppenheimer et al., 2019] (GMSL – Global Mean Sea Level; GIA – Glacial Isostatic Adjustment.)

populated sedimentary coastal plains due to groundwater withdrawal and related processes is causing local substantial relative sea-level rise – for example, sometimes exceeding 1 cm/yr and up to 10 cm/yr in Jakarta. Due to the concentration of people in subsiding coastal areas, such subsidence is of global significance (Nicholls et al., 2021). The Asian coast is particularly prone to this process reflecting its geological heritage (often comprising deltas and alluvial plains) and associated high and growing urban populations (e.g., Jakarta, Bangkok, Shanghai).

Adaptation to sea-level rise can be conducted using a range of contrasting methods, (Oppenheimer et al., 2019) including:

- Protection which reduces the likelihood of coastal impacts and can be implemented with (i) hard engineered structures such as dikes, seawalls, breakwaters and surge barriers, and (ii) sediment-based (or soft) protection such as beach and shore nourishment and dunes. It is also important to note that protection always leaves a residual risk—due to extreme events that exceed protection standards – and hence flood damage cannot necessarily be completely prevented.
- Advance creates new land by building seaward and upward or raises existing floodprone land. It can be achieved through land reclamation above sea levels and polderization, the gain of new low land enclosed by dikes. Advance is widely practiced around coastal cities where land is scarce and valuable and needs to take full account of sea-level rise in the future.

- Accommodation involves floodproofing and elevating buildings and infrastructure and is supported by early warning systems for floods. It does not entirely prevent coastal impacts but reduces the vulnerability of coastal residents, infrastructure, and associated activities.
- Planned or managed retreat reduces exposure to coastal impacts by moving people, infrastructure and human activities out of the exposed area – or by avoiding development of the coastal floodplain in the first place.
- Forced migration due to sea-level rise and/or extreme events may also occur.

Ecosystem-based or nature-based adaptation is of growing interest as these solutions recognize the natural protection provided by coastal ecosystems, an advantage that was often ignored in the past. Coral and oyster reefs, mangroves, marshes and seagrass meadows act as protective buffers that attenuate extreme water levels (surges, waves), reduce rates of erosion and can raise elevation or create new land by trapping sediments and building up organic matter and detritus.

Effective use of these physical adaptation responses requires planning and institutional arrangements. Such plans might define standards for dike heights, building codes and/or setbacks for the flood plain, incentives for risk management, and disaster preparedness and early warning systems. Given the high uncertainties about future sea levels, adaptation pathways are being increasingly explored in coastal areas as an effective way of making adaptation decisions today (Haasnoot et al., 2019). However, these natural systems are poorly understood compared to engineered approaches so further research, development and learning is required to support wider and more confident application and promulgation for the future.

The challenge posed by climate-induced sea-level rise is massive and deeply uncertain, especially beyond 2100. To meet this challenge, the World Climate Research Programme (WCRP), which is jointly sponsored by WMO, the Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) of UNESCO and the International Science Council (ISC), leads an integrated sea level research agenda reaching from the global down to the regional and coastal scales.

Strong mitigation efforts are needed now to avoid the multiple metres of sea-level rise over the next centuries that threatens all the coastal regions of the world. But even with such efforts, sea levels will continue to slowly rise for decades and centuries to come. Thus, coastal adaptation is essential in any future, but it will be easier and more likely to be successful when combined with stringent mitigation. There is a need to start exploring long-term adaptive strategies now if they are not already initiated. Such efforts should be linked to wider coastal management and development objectives. Small islands, deltas and coastal cities are key targets for such action. In addition, the establishment of coastal early warning systems, especially multi-hazard ones, is crucial, considering the multiple sources of coastal flooding in addition to sea-level rise. The WMO Coastal Inundation Forecasting Initiative (CIFI), which establishes early warning systems to enable vulnerable communities to respond and act fast when hazards threaten, is one of many UN activities aimed at coastal adaptation.

References

- Haasnoot, M. et al. 2019: Generic adaptation pathways for coastal archetypes under uncertain sea-level rise. *Environ. Res. Comm.* 1 071006, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7620/ab1871>
- Hooijer, A., and Vernimmen, R. 2021: Global LiDAR land elevation data reveal greatest sea-level rise vulnerability in the tropics. *Nat. Comm.* 12, 3592, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23810-9>
- IPCC (2019) Technical Summary [Pörtner, H.-O. et al., (eds.)]. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.- O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)].
- Nicholls, R.J., et al. 2021: A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure. *Nat. Clim. Chang* 11, 338–342, <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00993-z>
- Oppenheimer, M. et al. 2019: Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.- O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)].
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, et al. (eds.)]. Cambridge University Press. In Press

Climate Predictions for 2021–2025

The WMO Lead Centre for Annual to Decadal Climate Prediction produces a summary of predictions for the coming five years (Hermanson et al., 2021). These predictions are the best estimate of the near-term climate as they are based on the world’s leading decadal prediction systems from WMO designated Global Producing Centres and non-designated contributing centres. They include multiple realizations (100 in total) with both observed initial conditions, of the type used in seasonal prediction, and boundary forcing, of the type used to drive long-term climate projections. The predictions do not include the small effects of changes in emissions – such as those due to the COVID-19 lockdowns – and they assume that no major volcanic eruptions occur in the period covered.

Predicted temperature patterns for 2021–2025 show a high probability for temperatures above the 1981–2010 average almost everywhere, with enhanced warming at high northern latitudes and over land compared to the ocean (Figure 1). The Arctic (north of 60 °N) anomaly is more than twice as large as the global mean anomaly.

Figure 2 shows the predicted annual mean global near surface temperature for the five-year period 2021–2025 relative to 1981–2010. The global mean near surface temperature is predicted to be between 0.9 °C and 1.8 °C above pre-industrial conditions (taken as the average over the period 1850 to 1900). The chance of at least one year exceeding 1.5 °C above pre-industrial levels is 40%, with a small chance (10%) of the five-year mean exceeding this level. It is important to note, that this is not the same as surpassing the Paris Agreement 1.5 °C level, which refers to the climatological condition over a long-term average. Instead this metric shows the increasing likelihood of a temporary exceedance of the 1.5 °C temperature level as the climate warms, which is likely to occur as Earth’s climate draws closer to the Paris level. Confidence in forecasts of global mean temperature is high. Skill scores are shown in the right panels of Figure 2. Although the global coronavirus pandemic caused changes in emissions of greenhouse gases – and aerosols were not included in the forecast models – the impact of these changes on greenhouse gas levels is small (WMO, 2021).

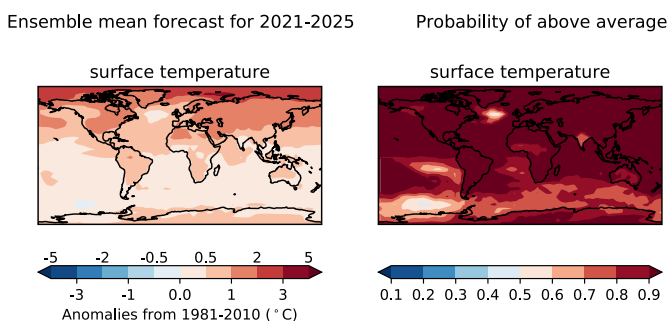


Figure 1. Predictions for 2021–2025 near surface temperature anomalies relative to 1981–2010. Ensemble mean (left) and probability of above average (right). As this is a two-category forecast, the probability for below average is one minus the probability shown on the right (WMO, 2021; Hermanson et al., 2021)

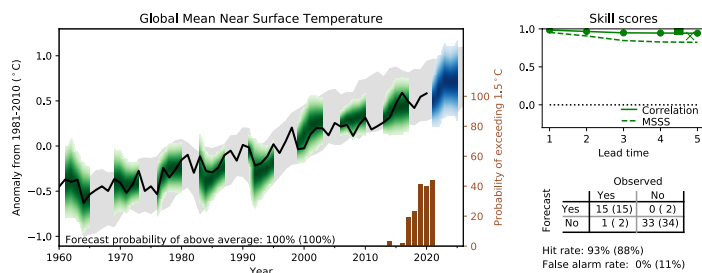


Figure 2. Multi-annual predictions of annual global mean near surface temperature relative to 1981–2010. Annual mean observations in black, forecast in blue, hindcasts in green and uninitialized simulations in grey. The shading indicates the 90% confidence range. The probability for above average in the five-year mean of the forecast is given at the bottom of the main panel (in brackets the probability for above average in the first year). The inset in the main panel, referring to the right axis, is the probability of global temperature exceeding 1.5 °C above pre-industrial levels for at least one year during the five years starting in the indicated year (Smith et al. 2018). Observed temperatures are an average of three observational data sets (Hansen et al., 2010, updated; Karl et al., 2015, updated; Morice et al., 2021, updated), they are near surface (1.5 m) over land and surface temperatures over the ocean. Model temperatures are near surface throughout (WMO, 2021; Hermanson et al., 2021). Correlation and Mean Squared Skill Score (MSSS) for annual means in the forecast are shown in the upper right panel. A contingency table for the probabilistic skill is shown in the lower right.

Precipitation forecasts for 2021–2025 (Figure 3) suggest wetter than average conditions are likely to occur at high latitudes in both hemispheres and across the Sahel. The pattern of increased precipitation in the tropics and midlatitudes and reduced precipitation in the subtropics compared to the 1981–2010 reference period is consistent with an increased hydrological cycle that is expected as the climate warms. There is moderate but significant correlation skill over the Sahel, Greenland and across northern Europe and Eurasia (Hermanson et al, 2021), giving medium confidence in the forecast for an increased chance of precipitation in these regions.

This work is done in collaboration with the World Climate Research Program (WCRP) and supports the development of climate services. These forecasts are used by several National Meteorological and Hydrological Services and in research projects worldwide.

They will soon be used by WMO Regional Climate Centres to provide advance warnings to minimize the impact of climate hazards.

Ensemble mean forecast for 2021-2025

Probability of above average

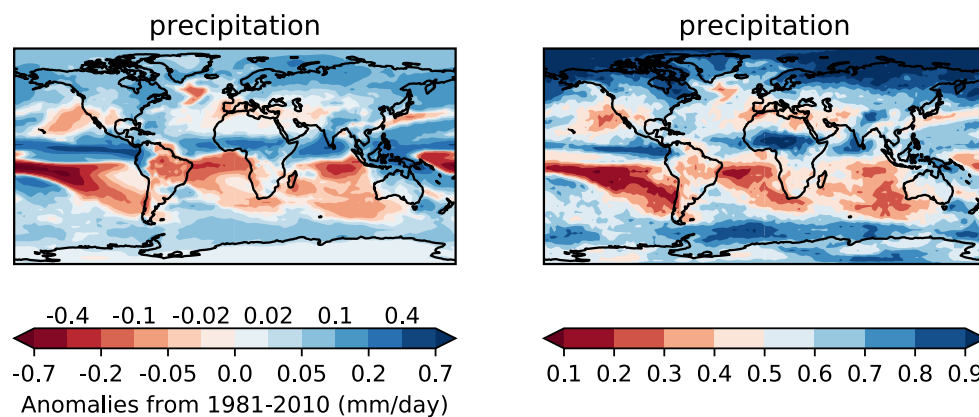


Figure 3. Predictions for 2021–2025 precipitation anomalies relative to 1981–2010. Ensemble mean (left) and probability of above average (right). As this is a two-category forecast, the probability for below average is one minus the probability shown in the right column (WMO, 2021; Hermanson et al., 2021)

Based on paleoclimate and historical evidence, it is likely that at least one large explosive volcanic eruption would occur during the twenty-first century. Such an eruption would reduce global surface temperature and precipitation, especially over land, for one to three years, alter the global monsoon circulation, modify extreme precipitation and change many CIDs (medium confidence). If such an eruption occurs, this would therefore temporarily and partially mask human-caused climate change (IPCC, WG1, 2021)

References

- Hansen, J. et al. 2010: Global surface temperature change. *Rev. Geophys.*, 48, RG4004. <https://doi.org/10.1029/2010RG000345>
- Hermanson, L. et al. 2021: WMO Global Annual to Decadal Climate Update: A prediction for 2021–2025. *Bull. Amer. Met. Soc.* In revision.
- Karl, T. R. et al. 2015: Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus. *Science*, 348, 1469– 1472. <https://doi.org/10.1126/science.aaa5632>
- Morice, C. P. et al. 2021: An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 data set. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126, e2019JD032361. <https://doi.org/10.1029/2019JD032361>.
- Smith, D. M. et al. 2018: Predicted chance that global warming will temporarily exceed 1.5 °C. *Geophys. Res. Lett.*, 45, 11895– 11903. <https://doi.org/10.1029/2018GL079362>
- WMO, 2020: The State of the Global Climate 2020: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>

Five years after the adoption of the Paris Agreement, the emissions gap is as large as ever

The emissions gap has not been narrowed and is, as yet, unaffected by COVID-19 (Figure 1). By 2030, annual emissions need to be 15 GtCO₂e (range: 12–19 GtCO₂e) lower than current unconditional National Determined Contributions (NDCs) imply for a 2 °C goal, and 32 GtCO₂e (range: 29–36 GtCO₂e) lower for the 1.5 °C goal. Full implementation of both unconditional and conditional NDCs would reduce each of these gaps by around 3 GtCO₂e. Collectively, current policies fall 3 GtCO₂e short of meeting the level associated with full implementation of the unconditional NDCs.

The emissions gap for 2030 is defined as the difference between global total GHG emissions from least-cost scenarios that keep global warming to 2 °C, 1.8 °C or 1.5 °C with varying levels of likelihood and the estimated global total GHG emissions resulting from a full implementation of the NDCs.

As of mid-November 2020, when the latest Emissions Gap Report was published, none of the major emitters had submitted new or updated NDCs with stronger targets for 2030 and NDC target updates from 2019 were projected to reduce total emissions by less than 1% by 2030.

NDCs as at mid-November 2020 remained blatantly inadequate to achieve the climate goals of the Paris Agreement and would lead to a temperature increase of at least 3 °C by the end of the century. Countries must collectively increase their NDC ambitions threefold to get on track to a 2 °C goal and more than fivefold to get on track to the 1.5 °C goal.

Preliminary estimates of the impact of NDC target updates during the first six months of 2021, including by the US, the EU27 and the United Kingdom, and the announcements of Canada, China and Japan, indicate that emissions projections under the unconditional NDC scenario could be reduced by 12%–15% compared with the projection in the 2020 edition of the Emissions Gap Report. However, this is still far from sufficient to bridge the emissions gap in 2030. The 2021 edition of the Emissions Gap Report will provide a full assessment of the emissions and warming implications of the updated NDC targets.

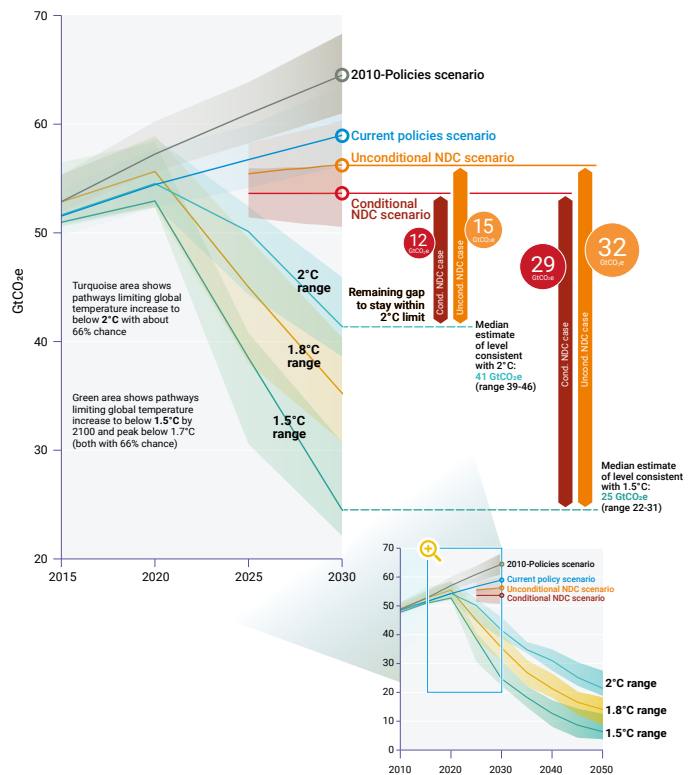


Figure 1. Global GHG emissions under different scenarios and the emissions gap in 2030 (median and 10th to 90th percentile range; based on the pre-COVID-19 current policies scenario), UNEP Emissions Gap report 2020

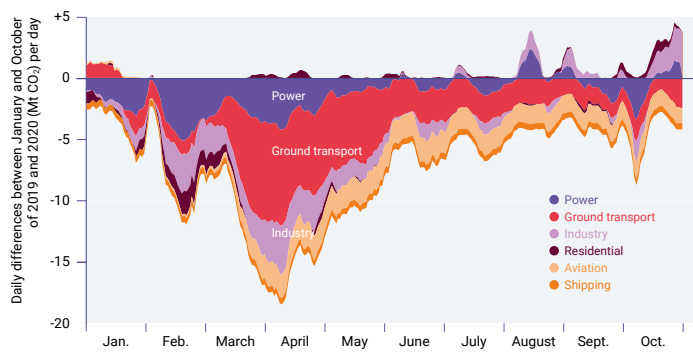


Figure 2. Reduction in emissions in 2020 relative to 2019 levels due to COVID-19 lockdowns, (UNEP Emissions Gap Report 2020)

The COVID-19 crisis likely only offers a short-term reduction in global emissions

COVID-19 containment measures significantly reduced global GHG emissions in 2020 (Figure 2). CO₂ emissions decreased by about 7% compared with 2019 emission levels, with a smaller drop in GHG emissions, as non-CO₂ is less affected (Emissions Gap Report, 2020). However, unless the containment measures are followed by economic rescue and recovery measures that support a low-carbon transition, this dip in global GHG emissions is estimated to result in no more than a 0.01 °C reduction of global warming by 2050, which by then is expected to have exceeded 1.5 °C (Forster et al., 2020).

Explorative projections based on available studies indicate that global GHG emissions are only significantly reduced by 2030 if COVID-19 economic recovery is used as an opening to pursue strong decarbonization (Figure 3, IEA sustainable recovery scenario). This could result in global GHG emissions of 44 GtCO₂e by 2030, a reduction of 15 GtCO₂e (just over 25%) by 2030 compared with the pre-COVID-19/current policies scenario, and considerably below global emissions in 2015.

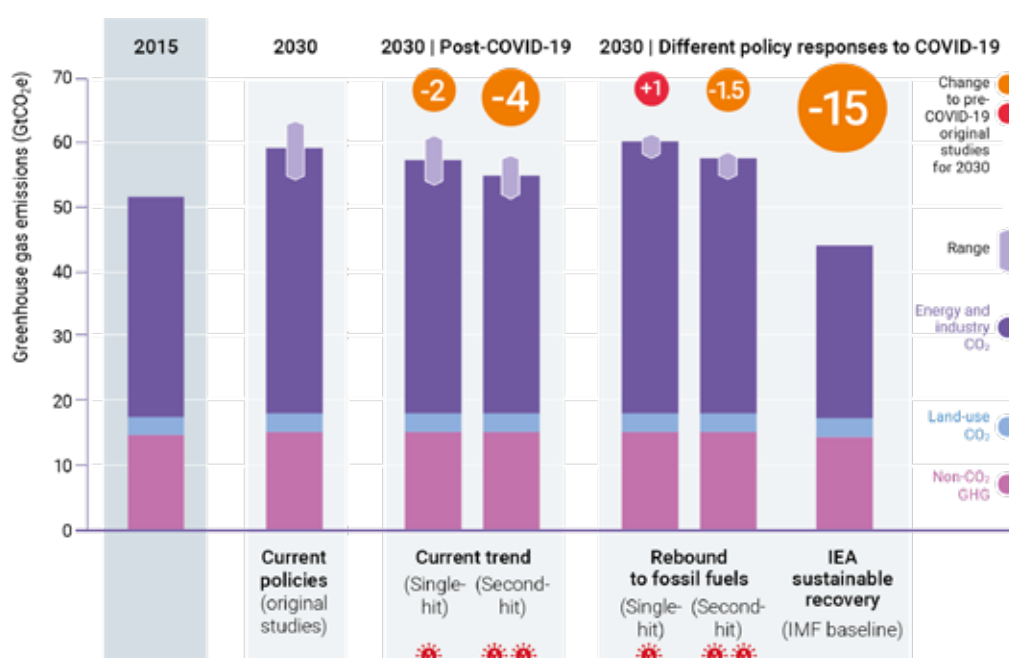


Figure 3. Global total GHG emissions by 2030 under a current policies scenario based on pre-COVID-19 studies and various “what if” scenarios using explorative calculations (post-COVID-19) (median and 10th to 90th percentile range), UNEP Emissions Gap Report 2020

So far, fiscal rescue and recovery measures have not accelerated a low-carbon transition

COVID-19-related fiscal spending by governments is of unprecedented scale, amounting to roughly US\$ 12 trillion globally as at October 2020, or 12% of global gross domestic product (GDP) in 2020.

So far, the COVID-19 fiscal spending of G20 members has primarily supported the global status quo of high-carbon economic production or had neutral effects on GHG emissions (Figure 4). All G20 members have implemented several immediate rescue measures in response to the COVID-19 pandemic. These are mostly assessed neutral in terms of GHG emissions impact (for example, health-care-related spending) or supporting high-carbon industries without conditions for a low-carbon transition attached. As at November 2020, only around a quarter of G20 members had dedicated shares of their packages (accounting for up to 3% of GDP) explicitly to low-carbon measures. Most G20 members have brought forward measures and packages supporting a high-carbon status quo of their economies or are even fostering new high-carbon investments. Policies with positive impacts on reducing GHG emissions have been slightly more prevalent in fiscal recovery measures than rescue measures. This is noteworthy, as the next stages of COVID-19 fiscal interventions are likely to shift a greater proportion of capital towards recovery measures, indicating that there is potential for increased implementation of low-carbon measures.

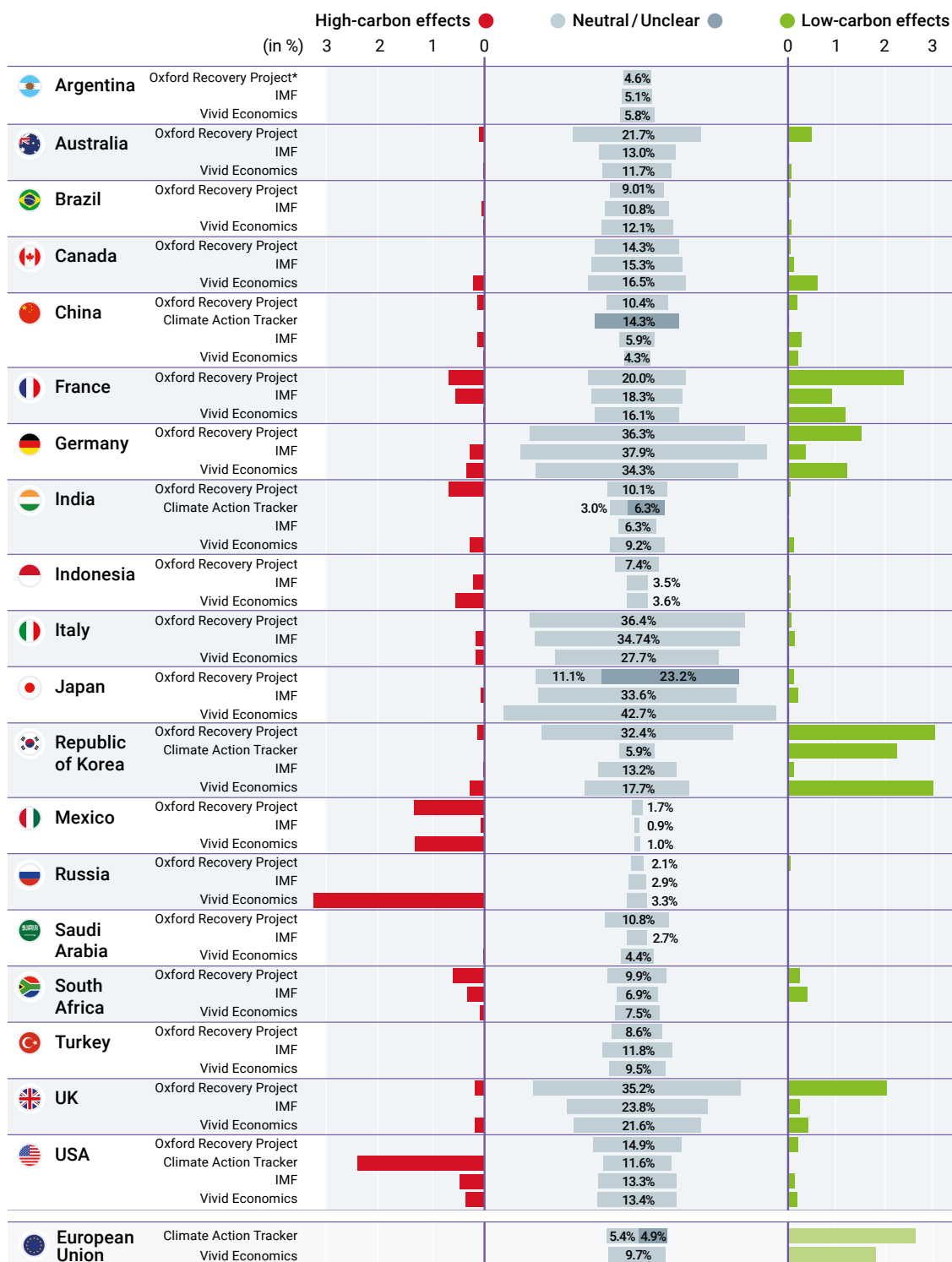


Figure 4. Non-exhaustive overview of total fiscal rescue and recovery measures of G20 members with high-carbon, neutral and low-carbon effects as a share of 2019 GDP (UNEP Emissions Gap Report 2020)

It is still in the hands of policymakers whether global economic rescue and recovery responses to the COVID-19 pandemic will lead to decreased or increased global GHG emissions in the longer term.

Net-zero emissions goals are encouraging but must be translated into strong near-term policies and reflected in the NDCs

One of the most significant and encouraging climate policy developments of 2020 is the growing number of countries that committed to achieving net-zero emissions by around mid-century. These commitments are broadly consistent with the Paris Agreement temperature goal, provided they are achieved globally.

At the time of completing the Emissions Gap Report 2020, 126 countries covering 51% of global GHG emissions had net-zero goals that were either formally adopted, announced or under consideration. With the adoption of a net-zero GHG target by 2050 by the United States of America, this share increased to around 63%.

Although the recent announcements of net-zero emissions goals are very encouraging, they highlight the vast discrepancy between the ambitiousness of these goals and the inadequate level of ambition in the NDCs for 2030.

To make significant progress towards achieving the long-term temperature goal of the Paris Agreement by 2030, two steps are urgently required. First, more countries need to develop long-term strategies that are consistent with the Paris Agreement, and second, the net-zero commitments need to be translated into strong near-term policies and action, and reflected in the NDCs for 2030. How countries choose to design and implement COVID-19 recovery packages is likely to be crucial in this context.

References

- Forster, P.M. et al. 2020: Current and future global climate impacts resulting from COVID-19. *Nat. Clim. Chang.* 10, 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0883-0>.
United Nations Environment Programme, 2020: Emissions Gap Report 2020. Nairobi.

This work was originally published by the World Meteorological Organization, Geneva, and is translated by permission.

Copyright © 2021. World Meteorological Organization.

Translation by Sewon Kim, Expert Advisor, APEC Climate Center, copyright © 2021

For copyright reasons this edition is not available outside the Republic of Korea.

The presentation of material therein does not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the WMO concerning the legal status of any country, area or territory or of its authorities, or concerning the delimitation of its borders.

The responsibility for opinions expressed in signed articles, publications, studies and other contributions rests solely with their authors, and their publication does not constitute an endorsement by the WMO of the opinion expressed in them.

Reference to names of firms and commercial products and process does not imply their endorsement by the WMO, and any failure to mention a firm, commercial product or process is not a sign of disapproval.

This publication is a translation undertaken by Sewon Kim with permission from WMO, the publisher of the original text in English. WMO does not guarantee the accuracy of the translation for which Sewon Kim takes sole responsibility.

번역 : APEC 기후센터 전문위원 김세원



For more information please visit:
public.wmo.int/en/resources/united_in_science

