

대기 중 온실가스 농도 관측의 신뢰도 확보: 국립기상과학원 온실가스 중앙실험실의 역할

이수정^{*†} · 이해영^{**} · 이선란^{***} · 최홍우^{***} · 정석한^{***} · 김수민^{****} · 김상백^{****}

^{*}국립기상과학원 지구대기감시연구과 기상연구사,

^{**}Atmospheric Measurement Scientist, Tropospheric Chemistry Group, National Institute of Water and Atmospheric Research,

^{***}국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구원, ^{****}국립기상과학원 지구대기감시연구과 기상연구관

Ensuring compatibility and data quality in the atmospheric greenhouse gas observations network: The role of a central laboratory of National Institute of Meteorological Sciences

Lee, Soojeong^{*†} · Lee, Haeyoung^{**} · Lee, Sunran^{***} · Choi, Hongwoo^{***} · Jeong, Seokhan^{***} · Kim, Sumin^{****} and Kim, Sang Baek^{****}

^{*}Research Scientist, Global Atmospheric Watch and Research Division,
National Institute of Meteorological Sciences (NIMS), Jeju, Korea

^{**}Atmospheric Measurement Scientist, Tropospheric Chemistry, National Institute of Water and Atmospheric Research,
Wellington, New Zealand

^{***}Researcher, Global Atmospheric Watch and Research Division, NIMS, Jeju, Korea

^{****}Senior Research Scientist, Global Atmospheric Watch and Research Division, NIMS, Jeju, Korea

ABSTRACT

Accurate and traceable greenhouse gas (GHG) observations are critical for understanding climate change and supporting global mitigation policies. Data compatibility across observation networks requires robust calibration protocols and sustained quality assurance. This study assesses the calibration infrastructure of the Central Laboratory of the National Institute of Meteorological Sciences (NIMS), which disseminates World Meteorological Organization (WMO) reference scales across Korea's GHG observation network under the Global Atmosphere Watch (GAW) framework. Calibration performance was validated through audits by the WMO World Calibration Centre (WCC), WMO/IAEA and JMA round-robin intercomparisons, and domestic comparison campaigns. The NIMS calibration standards and our calibration strategies consistently met WMO compatibility goal ($\pm 0.1 \text{ mmol mol}^{-1}$ for CO_2 and $\pm 2 \text{ nmol mol}^{-1}$ for CH_4), demonstrating robust traceability and analytical accuracy. The NIMS system includes traceable standard gas production, interlaboratory comparisons, and uncertainty verification, providing a scalable model for national-level calibration infrastructure. This enhances the integrity of domestic observations while strengthening regional QA/QC capacity under WMO/GAW.

Key words : Traceability, Compatibility, Calibration, Standard, Greenhouse Gas

1. 서론

기후위기 대응을 위한 국제적 합의인 파리협정 이후에도 전 지구 온실가스 농도는 지속적으로 증가하고 있다.

대표적 온실가스인 이산화탄소(CO_2)의 대기 중 농도는 산업화 이전 $278.3 \text{ } \mu\text{mol mol}^{-1}$ 에서 2023년 $420 \pm 0.1 \text{ } \mu\text{mol mol}^{-1}$ 로 약 51% 증가하였으며(WMO, 2024c), 2024년은 지구 평균기온 상승폭이 산업화 이전 대비 1.5°C 를 초과

[†]Corresponding author : soojeonglee@korea.kr (33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju, 63568, Korea. Tel. +82-64-780-6649)

ORCID 이수정 0000-0002-6249-0282
이해영 0000-0002-0121-8525
이선란 0000-0001-6789-0229
최홍우 0009-0007-0161-154X

정석한 0009-0009-8622-8658
김수민 0009-0001-3673-1150
김상백 0009-0008-8593-7818

Received: April 25, 2025 / Revised: May 26, 2025 1st, June 9, 2025 2nd / Accepted: June 23, 2025

한 첫 해로 보고되었다(WMO, 2025), 우리나라 또한 2050 탄소중립 및 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)를 수립했음에도 불구하고 CO₂, 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O) 등 주요 온실가스 농도는 여전히 증가 추세를 보이고 있으며, 특히 안면도 지구대기감시소의 대기 중 CO₂ 농도는 2023년 427.3 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 로 전 지구 평균을 상회하고 있다(NIMS, 2023).

온실가스는 대기 중 체류시간이 수십 년에서 천 년 이상으로 길어(IPCC, 2021), 단기적인 감축노력만으로는 기후변화에 미치는 영향을 즉각적으로 파악하기 어렵다. 이에 따라, 정밀하고 장기적으로 운영되는 온실가스 농도 감시 체계는 배출량의 정량화와 감축 정책 효과의 과학적 평가를 위한 핵심 수단으로 부각되고 있다. 전통적인 활동자료 기반의 상향식(bottom-up) 배출량 산정 방법은 불확실성과 시의성 부족의 한계가 지적되어 왔으며(Henne et al., 2016; IPCC, 2019; Liu et al., 2015), 이를 보완하기 위한 방법으로 온실가스 관측자료 기반의 하향식(top-down) 추정 방법론이 도입되었다(IPCC, 2019). 이러한 방법론적 변화는 관측자료의 품질 및 국제적 정합성 확보의 중요성을 부각시키고 있다. 세계기상기구(World Meteorological Organization; WMO)는 정밀한 배출량 추정을 위해 수치 모델링과 대기 관측 자료를 통합한 IG³IS(Integrated Global Greenhouse Gas Information System) 개발을 채택하였고(WMO, 2019), 이를 확장한 G3W(Global Greenhouse Gas Watch)를 통해 전 지구 1°×1° 격자 단위의 배출량을 준 실시간으로 제공하는 것을 목표로 하고 있다(WMO, 2022, 2023a, 2024a). 이러한 변화에 대응하기 위해, 국가 온실가스 관측망은 단순한 농도 추세 분석을 넘어 역모델링 및 플럭스 추정이 가능한 고정밀 관측자료 생산 체계를 갖추어야 한다. 온실가스 관측자료가 국내 정책 수립은 물론, 전 지구적 온실가스 배출량 추정 및 기후변화 연구에 활용되기 위해서는 전 지구 관측망과의 소급성을 확보해야 하며, 이를 위해서는 국제 표준 척도와 연계된 교정 체계 구축이 필수적이다. 아울러, 체계적 품질관리, 장비운영의 안정성 확보 및 숙련된 관측 인력 운용이 요구되며(Schibig et al., 2018), 특히 관측 네트워크 내에서 표준화된 품질관리 체계를 유지하여 관측자료의 호환성과 장기적인 일관성을 보장하는 것이 필수적이다. 본 연구는 WMO/GAW 체계와 연계된 국립기상과학원 온실가스 중앙실험실의 교정 및 품질관리 체계를 분석하고, 적합성 평가 및 국내외 비교실험 결과를 통해 관측자료의 소급성과 품질을 검토하

였다. 이를 바탕으로 향후 국가 온실가스 관측망의 신뢰도 향상을 위한 개선방안을 제시하고자 한다.

2. 국제 온실가스 관측망과 국립기상과학원 온실가스 품질관리 체계

2.1. 국제 온실가스 관측망과 품질관리 체계

대표적인 전 지구 온실가스 관측망인 WMO의 지구대기감시(Global Atmosphere Watch; GAW) 프로그램은 전 세계 약 530개의 관측소를 포함하며(GAWSIS, 2025), 중앙교정실험실(Central Calibration Laboratory, CCL), 세계/지역표준센터(World/ Regional Calibration Centre, WCC/RCC), 세계자료센터(World Data Centre, WDC) 등 핵심 기관이 상호 연계된 품질보증(Quality assurance, QA) 체계를 구성한다(WMO, 2024b)(Fig. 1). GAW는 CCL을 통해 관측표준을 전파함으로써 전 지구 온실가스 관측자료의 소급성을 확보하고, 관측소 간 자료의 비교가능성을 유지한다. WCC는 각 관측소의 환경, 시스템, 인력 등에서 발생 가능한 불확도를 관리하며, 적합성 평가와 국제 순차순환 비교실험을 통해 소급성과 관측정확도를 검증한다. 관측요소 별로 CO₂는 미국해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)과 스위스 연방 재료과학기술연구소(Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Empa)가 담당하고, CH₄는 Empa와 일본기상청(Japan Meteorological Administration, JMA)이 지역별로 분담하며, 육불화황(SF₆)의 경우 한국 기상청 WCC를 담당하고 있다. 각 관측소의 자료는 WDC에 매년 정기적으로 제출되어 통합 관리되며, WMO/GAW의 수십 년간의 장기 연속 관측자료는 IPCC 평가보고서 등 주요 기후변화 정책문서의 기반 자료로 활용된다.

유럽의 ICOS(Integrated Carbon Observation System) 네트워크는 생물권, 대기, 해양 관측을 통합적으로 운영하며, 표준가스의 공급, 자료검증, 품질관리를 모두 중앙 분석 실험실(Central Analytical Laboratories)이 수행한다(ICOS RI, 2024; Yver et al., 2021). 관측소는 ICOS 라벨링 시스템을 통해 검증을 거쳐야만 공식 자료 생산 자격을 얻으며, 표준화된 운영 절차와 정량적 QA 지표를 기반으로 주기적 평가를 받는다(Hazan et al., 2016; ICOS RI, 2024; Yver et al., 2021). 이러한 구조는 관측자료의 생산, 검증, 활용 전 과정의 일관성을 보장하며, 유럽 내 탄소

를 교정하는데 활용된다(Fig. 2).

온실가스 중앙실험실은 CCL로부터 공급받은 3차 표준 가스를 실험실 표준(laboratory standards)으로 활용하여 표준가스를 생산하고, 국내 주요 관측소에 운용 표준가스를 보급하고 있다. 이 표준가스는 안면도, 고산, 울릉도를 포함한 주요 GAW 관측소뿐 아니라 선박, 항공, 고층타워 등 다양한 플랫폼에서 활용되며, 기상청뿐 아니라 극지연구소 등 다양한 유관 기관에도 공급되고 있다. 또한, 국내 순차순환비교실험과 기술 지원을 통해 해당 표준가스를 활용하여 측정된 관측자료의 소급성과 일관성을 주기적으로 검증하고 있으며, 연간 수급계획과 데이터베이스 기반의 관리시스템을 통해 표준가스의 제조, 인증, 보급 과정을 체계적으로 운영하고 있다.

표준가스 제조에는 흡착성 및 반응성이 적은 알루미늄 재질의 실린더를 사용하며(Leuenberger et al., 2015; Schibig et al., 2018; WMO, 2024b), 실린더는 시료 포집 전 고온 탈착(60℃), 질소 플러싱(flushing), 고진공(5~10 Torr) 배출 등의 전처리를 거쳐 대기시료를 포집한다. 건조된 대기 시료는 알루미늄 실린더에 압축 포집되며, 농도 조절을 위해 목적하는 온실가스 요소가 들어있지 않은 가스인 제로가스(pure air)와 원료가스(spiking gas)를 혼합하여 다양한 농도대의 표준가스를 제조한다(H Lee et al., 2021). 안면도 지구대기감시소에서 건조대기시료를 포집하며, 포집된 대기시료는 온실가스 중앙실험실(제주

서귀포)에서 분석되며, 4개 농도대의 실험실 표준을 사용한 4점 교정을 통해 각 실린더의 농도를 인증한다. 분석장비는 CO₂와 CH₄ 측정을 위한 공동감쇠분광기(CRDS, Picarro G2401), N₂O와 CO 측정을 위한 공진출력분광기(OA-ICOS, Los Gatos Research GLA351-N2OCM), SF₆ 측정을 위한 가스크로마토그래프-전자포획 검출기(GC-ECD, Agilent 8890A)가 사용된다.

표준가스의 안정성과 호환성은 정기적인 재측정과 비교실험을 통해 확인된다. CCL로부터 2014년에 인증받은 실험실 표준의 2021년 재분석 결과는 CO₂ $\pm 0.06 \mu\text{mol mol}^{-1}$, CH₄ $\pm 0.24 \text{ nmol mol}^{-1}$, N₂O $\pm 0.24 \text{ nmol mol}^{-1}$, SF₆ $\pm 0.01 \text{ pmol mol}^{-1}$ 차이로 WMO 호환성 목표 이내의 안정성을 유지하였다. 또한, 약 1개월 주기로 감시용 표준가스(surveillance tank)를 반복 측정하여 분석기기의 성능을 평가하며, 재현성(repeatability)은 CO₂ $\pm 0.01 \mu\text{mol mol}^{-1}$, CH₄ $\pm 0.07 \text{ nmol mol}^{-1}$, N₂O $\pm 0.25 \text{ pmol mol}^{-1}$ 로 보고되었다. 이는 WMO 호환성 목표 또는 확장 호환성 목표 범위 내에서 유지되고 있음을 나타낸다. 표준가스 실린더는 사용 중 최소 잔압 20 bar 이상을 유지해야 하며(Kitzis, 2017; Schibig et al., 2018; WMO, 2022), 사용이 완료된 후 재분석을 통해 초기 농도와 차이를 확인하고 그 차이가 호환성 목표 범위를 초과하는 경우, 실린더 사용 기간 동안의 농도 변화 경향을 기반으로 선형 보정 계수를 적용하여 드리프트 보정을 수행한다.

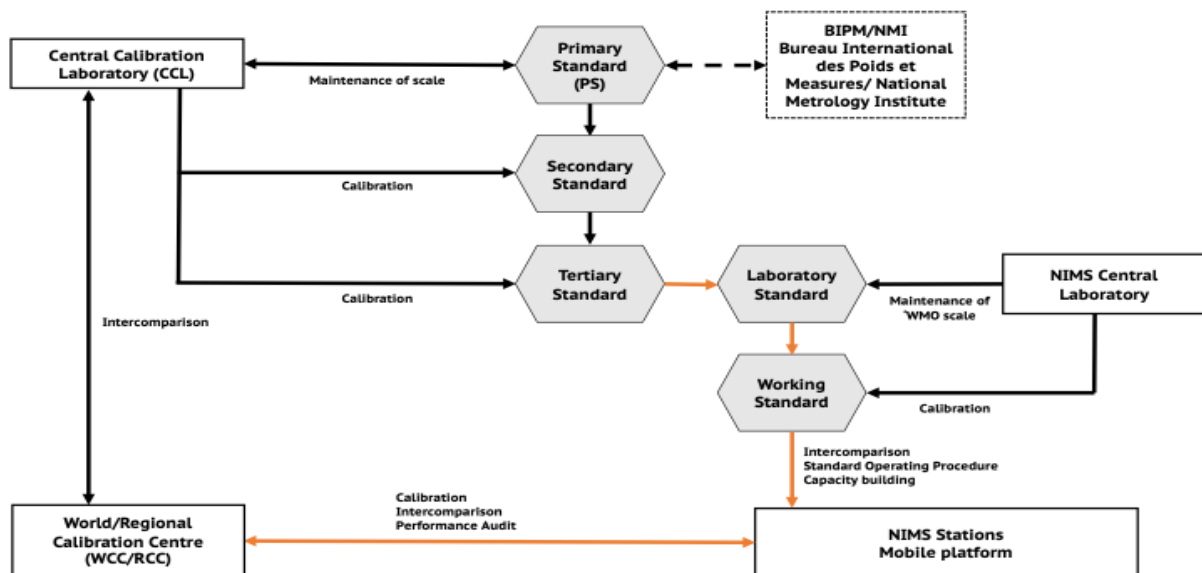


Fig. 2. Calibration gas hierarchy and quality assurance framework for greenhouse gas (GHG) observation network of National Institute of Meteorological Sciences (NIMS)

2.3. WMO/GAW 관측소 품질관리를 위한 WCC 적합성 평가 체계

WMO/GAW의 온실가스 관측소는 WMO 온실가스 관측지침에 따라, WMO WCC 또는 RCC가 주관하는 적합성 평가를 통해 관측 환경 및 자료 품질을 점검한다(WMO, 2024b). 적합성 평가는 각 관측소가 생산하는 자료의 소급성과 정밀도를 확인하고, 필요 시 기술 개선 사항을 제시하는 절차로 구성된다. 평가는 관측 현장 평가와 자료 분석을 포함하며, 이는 각 관측소가 국제 기준에 맞춰 운영하고, 지속적으로 유지 개선하는데 핵심적인 역할을 한다. 우리나라의 GAW 지역급 관측소인 안면도(AMY)와 고산(GSN) 지구대기감시소는 각각 2014, 2017, 2022년(AMY)과 2017, 2022년(GSN)에 WCC-Empa로부터 CO₂, CH₄, N₂O에 대한 적합성 평가를 받았다(WMO, 2023b, 2023c; Zellweger et al., 2013, 2017a, 2017b). 평가 결과는 각 관측소의 자료 품질을 객관적으로 검증하는 동시에, 이후 관측망 운영 전략 및 품질관리 개선의 기초 자료로 활용되었다. 특히 2017년까지는 AMY와 GSN의 모든 온실가스 관측장비의 검교정에 WMO CCL의 3차 표준가스를 직접 사용하였으나, 2018년 이후부터는 국립기상과학원 온실가스 중앙실험실에서 WMO 3차 표준가스를 기반으로 자체 제조·인증한 표준가스를 사용하고 있다. 이 변화는 국제 기준을 준수하면서도 국가 기반 교정체계의 실효성과 운영 자율성을 강화한 사례로 평가된다.

2.4. 국제 순차순환 비교실험을 통한 소급성 검증

WMO/GAW 관측망은 전 세계 500여개 이상의 관측소로 구성되어 있으며, 이들 간의 관측자료가 상호 비교 가능성을 갖기 위해서는 통일된 표준 척도와 엄격한 품질관리 절차가 필수적이다(WMO, 2017). 이러한 자료간 정합성과 소급성을 검증하는 대표적인 방법이 비교실험이며, 그 중 WMO/IAEA 국제 순차순환 비교실험(WMO/IAEA Round-Robin Intercomparison)은 대표적인 사례이다. 이 비교실험은 WMO CCL에서 주관하며, 세계 각국의 교정기관이 참여하여 자국 교정체계의 정확성과 WMO 표준과의 소급성을 검증한다. 1984~1985년 제1차 실험을 시작으로 현재까지 총 7차례 실시되었으며, 한국 기상청은 제4차 실험(2002~2007년)부터 지속적으로 참여하였다(NOAA/GML, 2025). 비교실험은 미지 시료(표준가스) 실린더를 참여 실험실에 순차적으로 전달하고, 각 실험실은 일정 기간(1~2개월) 내에 CO₂, CH₄, N₂O, CO, SF₆, $\delta^{13}\text{C}$,

$\delta^{18}\text{C}$, H₂ 등 다양한 성분을 분석한 후 그 결과를 CCL에 보고한다. 이후, CCL은 각 실험실의 분석값과 기준값(reference value)과의 편차를 비교하여 공표하며, 이를 통해 각 실험실의 표준가스 척도, 분석 정확도, 정밀도, 장비 성능을 종합적으로 평가할 수 있다. 이러한 국제 비교실험은 WMO 기준에 대한 교정 체계의 소급성과 관측 자료의 국제적 정합성을 검증하는 데 있어 핵심적인 도구이며, 각국 관측망의 자료 신뢰성과 비교가능성을 확보하는데 기여하고 있다.

2.5. 국내 순차순환 비교실험을 통한 소급성 확보 노력

국립기상과학원은 국내 온실가스 관측망의 정합성과 소급성을 점검하기 위한 국내 순차순환 비교실험을 정기적으로 수행하고 있다. 이 비교실험은 온실가스 중앙실험실에서 인증한 운송 표준가스(traveling standard)를 각 관측소에 순차적으로 전달하고, 각 관측소가 이를 분석한 후 중앙실험실의 기준값과 비교하는 방식으로 진행된다(SJ Lee et al., 2021). 해당 실험은 AMY, GSN, 울릉도독도(ULD)의 지상관측망뿐만 아니라 롯데월드타워(LWT), 항공기(NARA) 등 국립기상과학원이 운영하는 입체 관측망 전반을 포함하며, 요청 시 외부기관의 주요 온실가스 관측소도 참여하여 WMO 표준과의 소급성을 검토하고 있다. 실험은 저농도 및 고농도 표준가스 각 1병을 사용하며, 지금까지 제1차(2016년: AMY, GSN, ULD), 제2차(2020년: AMY, GSN, ULD, 한국환경공단 고성관측소), 제3차(2024년: AMY, GSN, ULD, NARA, LWT, 서울시 보건환경연구원 관악산 및 남산 관측소) 비교실험이 수행되었으며, 이를 통해 국가 온실가스 관측망의 품질 검증과 국제 표준과의 소급성 확보가 이루어지고 있다(SJ Lee et al., 2021).

3. 온실가스 관측망의 소급성 및 품질 검증 결과

3.1. 국내 관측소 WCC의 적합성 평가 결과 분석

2022년까지 세 차례(2014, 2017, 2022)의 WCC-Empa 적합성 평가 결과(Fig. 3)를 통해, 국립기상과학원 중앙실험실의 교정 체계가 국내 온실가스 품질 개선에 기여했음을 확인하였다. AMY의 CH₄ 측정 결과는 세 차례 평가에서 모두 WMO/GAW 호환성 목표($\pm 2 \text{ nmol mol}^{-1}$)를 안정적으로 충족하였으며, 특히 2022년에는 $\pm 1 \text{ nmol mol}^{-1}$ 이내의 편차로 측정 정밀도가 향상되었다(WMO, 2023b;

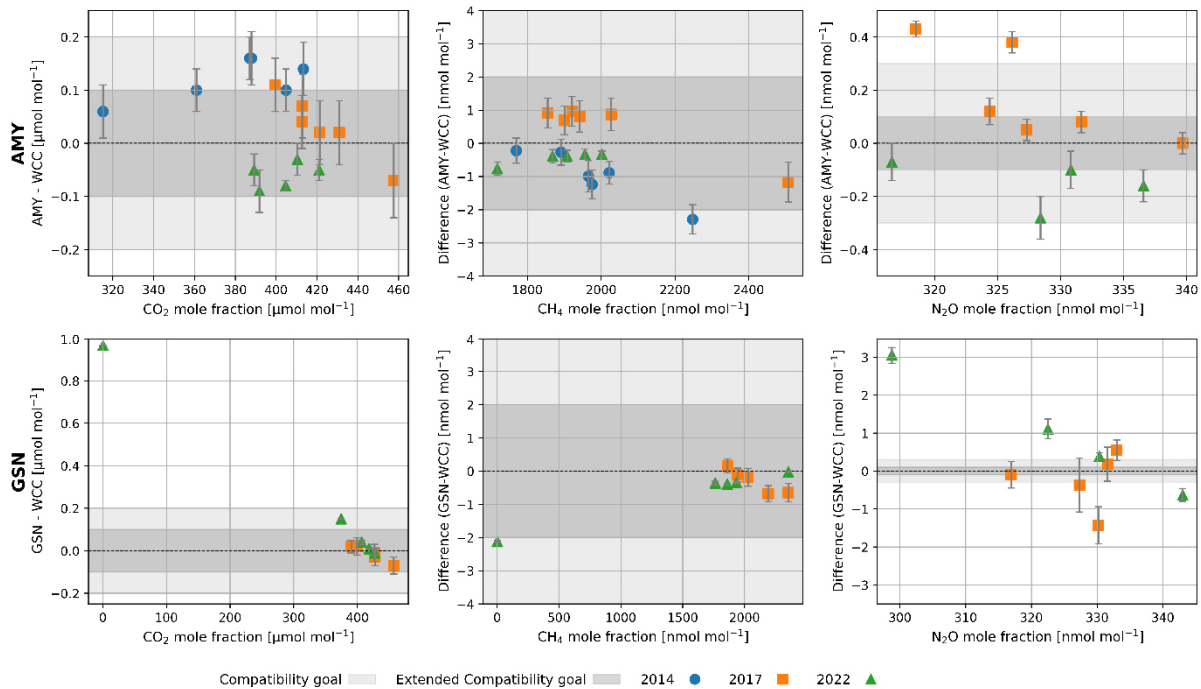


Fig. 3. Performance audit results for CO₂, CH₄, and N₂O at Anmyeondo (AMY, top) and Gosan (GSN, bottom) WMO/GAW regional atmospheric monitoring stations from WCC-Empa audits in 2014, 2017, and 2022. Error bars represent the standard deviation (1 σ) associated with each station's comparison gas cylinder's measurement

Zellweger et al., 2013, 2017a). CO₂의 경우, 2014년과 2017년에는 일부 측정값에서 $\pm 0.1 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 의 기준을 초과했으나, 2022년에는 전 범위에서 기준을 만족하였다. 이는 2018년 이후 운영하고 있는 온실가스 중앙실험실 중심의 표준 체계가 WMO 표준과 높은 소급성을 유지하고 있음을 시사한다.

반면, GSN은 CO₂ 및 CH₄ 모두에서 저농도 구간에서 상대적으로 큰 편차가 분석되었다. 2022년 실험결과에 따르면, CH₄는 $1700 \text{ nmol mol}^{-1}$ 이상 구간에서는 $\pm 1 \text{ nmol mol}^{-1}$ 이내로 안정적이었으나, 저농도(0점대) 구간에서는 $\pm 2 \text{ nmol mol}^{-1}$ 을 초과하였다. CO₂도 $390 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 이하에서 $0.1 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 이상의 편차를 보였다. 이는 GSN가 검교정에 사용하는 운용 표준가스의 농도 범위(CO₂: $390.49\text{--}452.56 \mu\text{mol mol}^{-1}$, CH₄: $1786.16\text{--}2182.46 \text{ nmol mol}^{-1}$)가 비교실험의 저농도 영역을 충분히 포함하지 못했기 때문으로 분석된다. 이에 따라 장비의 선형성 검증 및 저농도 범위 대의 표준가스를 보완하는 것이 권고되었다(WMO, 2023c).

또한 N₂O의 경우, 두 관측소 모두에서 호환성 목표 범위($\pm 0.1 \text{ nmol mol}^{-1}$)를 초과하는 경향이 나타났다. 이는

GC-ECD 장비 특유의 비선형성과 단일 농도 기준에 의존한 교정 방식에서 기인한 것으로, 이러한 문제는 2014년 이후 지속적으로 지적되어 왔다(Lee et al., 2020; Lee et al., 2021b). 이를 해결하기 위해 GC- μ ECD와 OA-ICOS를 이용한 N₂O 관측 비교실험을 수행하였고, OA-ICOS 장비가 관측정확도와 정밀도 측면에서 GC- μ ECD보다 우수한 성능을 보였으며, 이에 따라 광학 기반 장비로의 단계적 전환을 추진하고 있다(Lee et al., 2020; S. J. Lee et al., 2021).

3.2. 국제 순차순환 비교실험 결과

국립기상과학원은 WMO/IAEA 국제 순차순환 비교실험에 지속적으로 참여하면서, 국내 온실가스 관측자료의 정확도 및 WMO 표준과의 소급성을 지속적으로 검증하고 있다. Fig. 4는 CO₂ 및 CH₄에 대해 제4차부터 제6차 실험까지 국립기상과학원의 분석값과 WMO CCL 기준값 간의 차이를 농도 수준별로 비교한 결과를 나타낸다. CH₄의 경우, 모든 회차에서 WMO/GAW의 호환성 목표(± 2

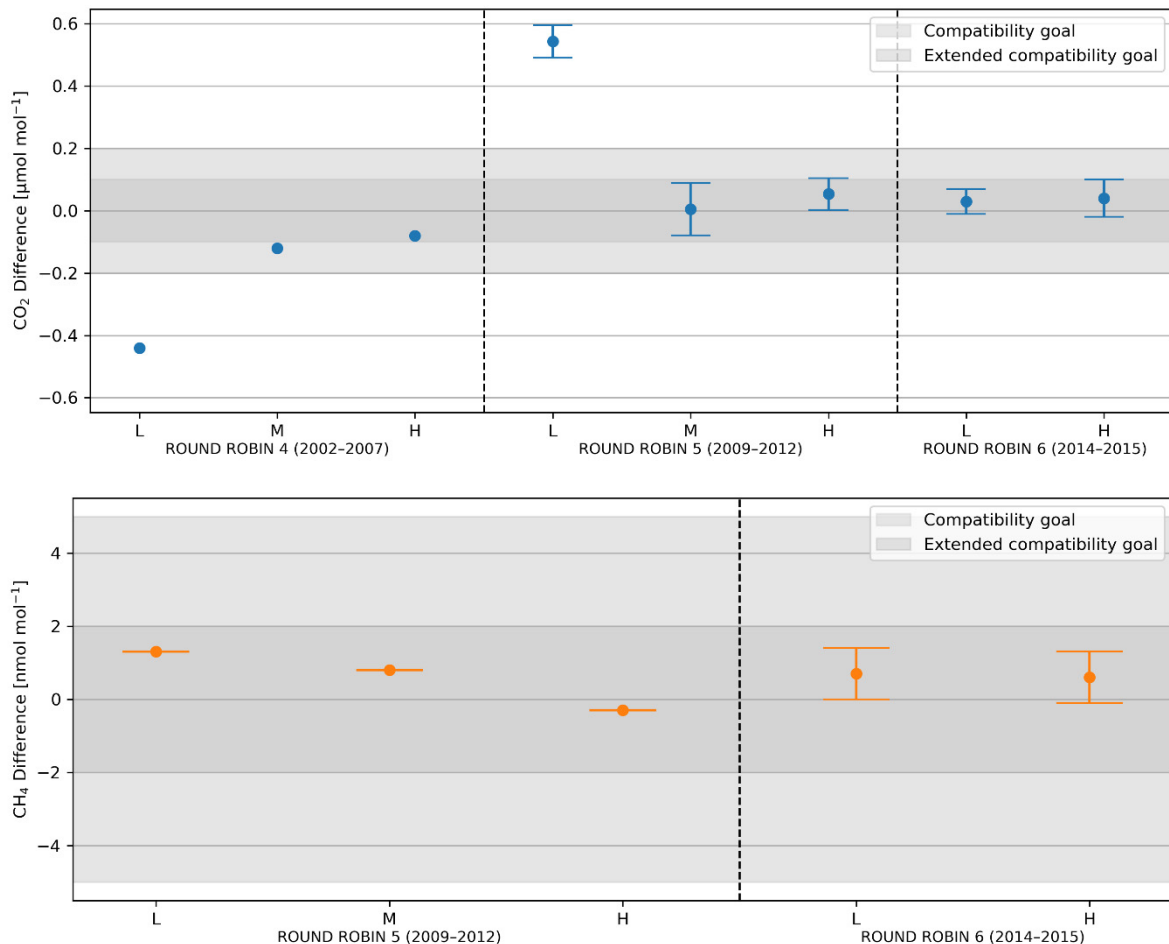


Fig. 4. Differences in CO₂ (top) and CH₄ (bottom) mole fractions measured by National Institute of Meteorological Sciences (NIMS) from the WMO Central Calibration Laboratory (CCL) reference values during the 4th to 7th WMO/IAEA round robin experiments. Error bars represent uncertainties derived from measurement reproducibility. L, M, and H denote low, medium, and high mole fraction cylinders used in each round

nmol mol⁻¹)를 만족하였으며, 특히 제6차 실험에서는 모든 농도 구간에서 ± 1 nmol mol⁻¹ 이내의 편차를 기록하며 높은 정확도를 보였다. CO₂의 경우, 제4차 및 제5차 실험에서 저농도 구간에서 호환성 목표(± 0.1 μmol mol⁻¹)를 초과한 사례가 있었으나, 제6차 실험에서는 전 농도 구간에서도 목표 이내 안정화되었다. 실험 회차가 거듭될수록 두 기체 모두 측정 오차 범위가 점진적으로 감소하는 경향을 보였으며, 특히 CO₂의 경우 제6차 실험에서 모든 농도 수준에서 호환성 목표 및 확장 목표 이내의 측정 정확도와 재현성을 보였다.

한편, 아시아 지역에서 CH₄에 대한 WMO WCC 역할

을 수행하는 JMA는 2001년부터 국제 메탄 순차순환 비교실험을 주관해오고 있으며, 국립기상과학원은 제1차 실험(2001 ~ 2005년)부터 모든 회차에 지속적으로 참여하고 있다(WCC-JMA, 2025; WMO, 2021a, 2021b). Fig. 5는 제1차부터 제7차(2020-2022년) 실험의 국립기상과학원 CH₄ 분석값과 WCC-JMA 기준값의 차이를 정리한 결과이다. 제1차 실험에서는 ± 20 nmol mol⁻¹ 이상의 큰 편차가 발생했으며, 제2~3차 실험에서도 고농도 구간에서 호환성 목표 범위(± 2 nmol mol⁻¹)를 초과하는 결과가 나타났다. 이는 당시 사용된 표준척도(CMDL, KRISS)와 JMA 기준척도 간의 불일치 및 교정 방법의 안정성 부족에 기인한

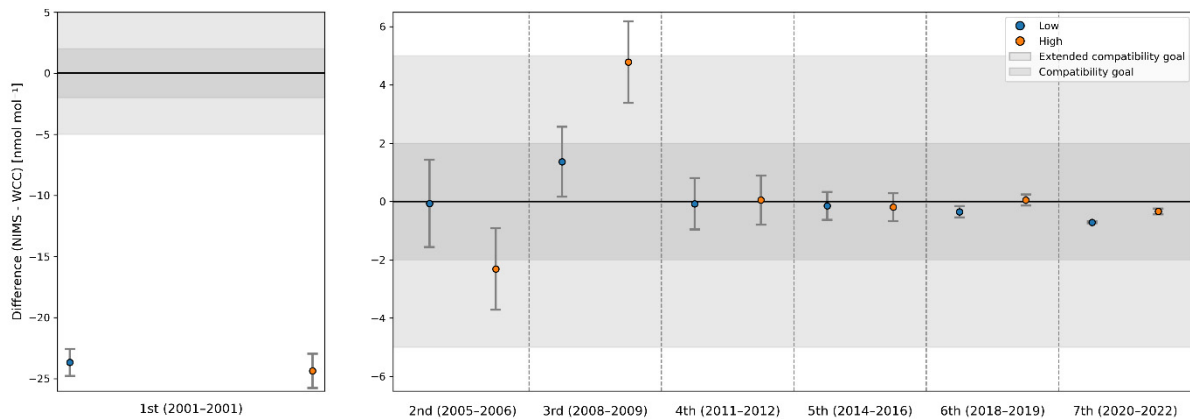


Fig. 5. Differences in CH_4 mole fractions between NIMS and WCC-JMA reference values during the 1st-7th methane reference gas inter-comparison experiment for Asia. JMA applied the NOAA-2004 scale (1st-4th round) and the WMO-X2004A (5th-7th round); NIMS used CMDL (1st round), KRISS (2nd-3rd round), NOAA-2004 (4th round) and WMO-X2004A (5th-7th rounds)

것으로 해석된다(Dlugokencky et al., 2005). 그러나 제4차 실험 이후 NOAA-X2004 및 WMO-X2004A 기준으로 표준척도를 일관되게 적용하면서, 모든 회차에서 호환성 목표를 만족하게 되었고, 특히 제6차, 제7차 실험에서는 전 농도구간에서 $1 \pm 0.1 \text{ nmol mol}^{-1}$ 이내의 편차를 기록하였다. 이러한 국제 비교실험의 결과는 국립기상과학원의 표준 및 분석 체계가 국제 기준에 부합함을 입증하며, 표준 척도 통일과 교정체계 개선의 효과를 확인하는 주요 근거

로 작용한다.

3.3. 국내 순차순환 비교실험 결과

제1차(2016년)와 제2차(2020년) 국내 순차순환 비교실험에서 CO_2 , CH_4 모두에서 대부분의 관측소가 WMO/GAW 호환성 목표 이내의 편차를 나타냈다(Fig. 6). 특히 GSN은 제2차 실험에서 4점 교정을 도입하면서 CH_4

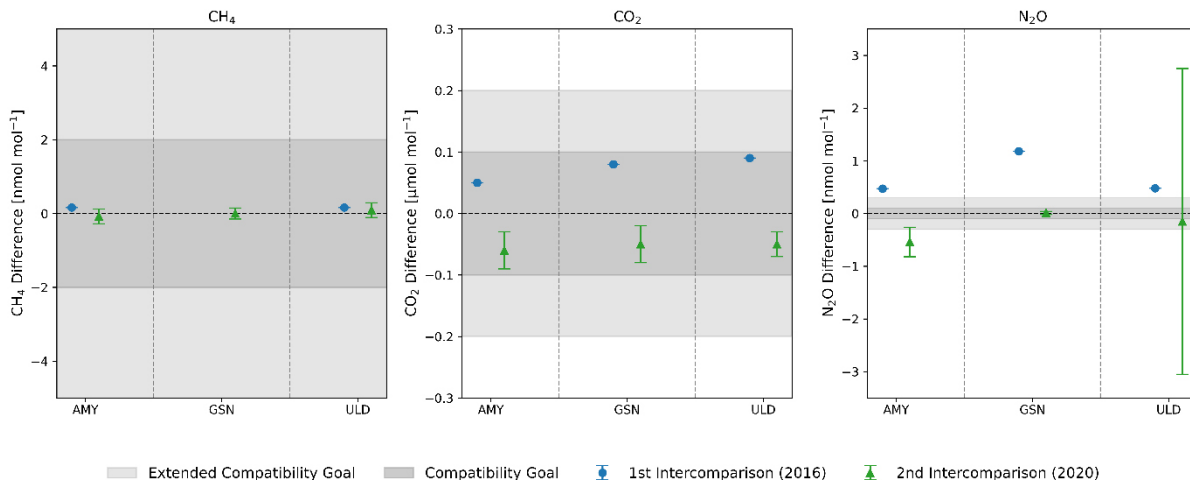


Fig. 6. Differences in mole fractions of CO_2 , CH_4 , and N_2O between each station (AMY, GSN, and ULD) and the central laboratory during the 1st (2016) and 2nd (2020) rounds of the domestic intercomparison experiment

의 정확도가 유의미하게 개선되었다(SJ Lee et al., 2021). 이 실험 결과는 각 관측소에서 사용된 검교정 방법, 표준가스 범위, 그리고 측정 장비의 변화가 관측자료의 품질에 미치는 영향을 정량적으로 보여준다. N_2O 의 경우, 제1차 실험에서는 모든 관측소가 호환성 목표를 초과하였으나, 제2차 실험에서는 GSN, ULD가 각각 호환성 및 확장 호환성 목표 이내의 측정값을 보고하여 개선된 품질을 나타냈다. AMY, GSN, ULD 세 관측소 모두 CO_2 와 CH_4 에 대해 실험 회차가 진행될수록 편차가 감소하는 뚜렷한 품질 개선 경향을 보였다. 이는 최신 기기의 도입, 안정적인 운영, 주입 시간의 최적화, 그리고 다점 교정의 도입 등이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 특히 CH_4 의 경우 제1차 실험에 비해 제2차 실험에서 최대 $\pm 0.1 \text{ nmol mol}^{-1}$ 까지 편차가 감소하여 높은 수준의 측정 정확도를 입증하였다(SJ Lee et al., 2021).

4. 결론 및 토의

본 연구는 국립기상과학원 온실가스 중앙실험실이 구축한 온실가스 품질관리 및 교정체계의 유효성과 국제 적합성을 다각도로 검증하고자 하였다. 이를 위해, 다양한 국내외 온실가스 관측망의 운영 사례를 비교·분석하고, WCC의 적합성 평가 사례, 국내외 비교실험 자료를 활용하여 체계의 정량적 신뢰도를 평가하였다. AMY와 GSN은 WCC 적합성 평가에서 주요 온실가스 관측 항목(CO_2 , CH_4)에 대해 WMO/GAW 호환성 목표를 만족하였으며, 특히 2022년 평가에서는 정밀도와 정확도의 뚜렷한 개선이 확인되었다. WMO/IAEA국제 순차순환 비교실험에서도 실험 회차가 거듭될수록 측정 오차가 감소하였으며, 제6차 실험에서는 CO_2 와 CH_4 모두 전 농도 구간에서 호환성 목표 범위 이내의 결과를 보였다. JMA 주관 CH_4 순차순환 비교실험에서도 최근 회차에서 $\pm 1 \text{ nmol mol}^{-1}$ 수준의 정확도를 확보하였다. 이러한 분석 결과는 국립기상과학원이 구축한 품질관리 및 교정 체계가 WMO CCL 표준에 소급성을 가지며, 국제적으로 요구되는 정확도를 확보하고 있음을 보여준다. 또한, 표준가스의 안정적인 공급, 검교정 체계의 확립, 정기적인 비교실험 운영 등 핵심 활동들이 유기적으로 작동하여, 자체적인 품질관리체계가 성공적으로 유지되고 있음을 확인할 수 있다. 다만, 일부 관측소에서는 저농도 구간에서의 반복적 편차, N_2O 분석기기의 비선형성 문제가 지속적으로 나타났으며, 이는 향후 다점 교정 체계 도입, 표준가스 농도 범위의 확대, 장비의

선형성 확보, 신규 장비로의 교체 등의 개선사항을 도출하였다.

향후 국립기상과학원은 본 연구의 결과를 바탕으로, 온실가스 중앙실험실의 품질관리 체계를 지속적으로 고도화하고, 국내 관측소에 대한 정기적 비교실험 체계의 제도화 및 표준화를 통해 국가 온실가스 관측망의 신뢰성과 국제 표준에 대한 소급성 확보를 더욱 강화할 것이다. 이와 같은 체계는 역모델링 기반 온실가스 배출량 산정, 위성 자료 검증, 국가 온실가스 감축 정책의 효과 분석 등 다양한 분야에서 활용가능한 온실가스 관측 자료를 생산 및 제공하는 핵심 인프라로 기능할 것이다. 더불어 본 성과는 향후 아시아 지역의 WMO/GAW 품질관리 협력 및 공동 체계 구축을 위한 기술적 기반으로 활용될 수 있다.

사사

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술 개발연구」 “기후변화 입체감시 기술개발(KMA2018-00324)”의 지원으로 수행되었습니다.

Reference

- AGAGE. 2025. [accessed 2025 Jun 1]. <https://www-air.larc.nasa.gov/missions/agage/global-network>
- Andrews AE, Kofler JD, Trudeau ME, Williams JC, Neff DH, Masarie KA, Chao DY, Kitzis DR, Novelli PC, Zhao CL, Dlugokencky EJ, Lang PM, Crotwell MJ, Fischer ML, Parker MJ, Lee JT, Baumann DD, Desai AR, Stanier CO, De Wekker SFJ, Wolfe DE, Munger JW, Tans PP. 2014. CO_2 , CO, and CH_4 measurements from tall towers in the NOAA Earth System Research Laboratory's Global Greenhouse Gas Reference Network: Instrumentation, uncertainty analysis, and recommendations for future high-accuracy greenhouse gas monitoring efforts. *Atmos Meas Tech* 7(2): 647-687. doi: 10.5194/amt-7-647-2014
- Dlugokencky EJ, Myers RC, Lang PM, Masarie KA, Crotwell AM, Thoning KW, Hall BD, Elkins JW, Steele LP. 2005. Conversion of NOAA atmospheric dry air CH_4 mole fractions to a gravimetrically

- prepared standard scale. *J Geophys Res* 110: D18306. doi: 10.1029/2005JD006035
- GAWSIS. 2025. [accessed 2025 Apr 22]. <https://gawsis.meteoswiss.ch/GAWSIS/index.html>
- Hazan L, Tarniewicz J, Ramonet M, Laurent O, Abbaris A. 2016. Automatic processing of atmospheric CO₂ and CH₄ mole fractions at the ICOS Atmosphere Thematic Centre. *Atmos Meas Tech* 9(9): 4719-4736.
- Henne S, Brunner D, Oney B, Leuenberger M, Eugster W, Bamberger I, Meinhardt F, Steinbacher M, Emmenegger L. 2016. Validation of the Swiss methane emission inventory by atmospheric observations and inverse modelling. *Atmos Chem Phys* 16(6): 3683-3710.
- Integrated Carbon Observation System Research Infrastructure (ICOS RI). 2024. ICOS handbook 2024: The Integrated Carbon Observation System research infrastructure handbook; [accessed 2025 Apr 25]. <https://meta.icos-cp.eu/objects/QuJ-5TV3QKoUzZ9voMaEc5Wj>
- IPCC. 2019. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Vol. 1. Chapter 6: Quality assurance and quality control; [accessed 2025 Apr 22]. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1_Volume1/V1_6_Ch6_QA_QC.pdf
- IPCC. 2021. Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; [accessed 2025 Apr 22]. <https://www.ipcc.ch/>
- Kitzis D. 2017. Preparation and stability of standard reference air mixtures; [accessed 2025 Apr 22]. <https://gml.noaa.gov/ccl/airstandard.html>
- Lee H, Ko M, Kim S, Seo W, Park Y-S. 2020. Comparison of GC- μ ECD and OA-ICOS methods for high-precision measurements of atmospheric nitrous oxide (N₂O) at a Korean GAW station. *Atmosphere* 11(9): 948. doi: 10.3390/atmos11090948
- Lee H, Lee J, Hall B, Dlugokencky E, Kim S, Kim Y. 2021. Inter-comparison activities of the WMO/GAW World Calibration Centre for SF₆: A strategy for high-precision atmospheric measurements (In Korean with English abstract). *J Korean Soc Atmos Environ* 37(3): 512-522. doi: 10.5572/KOSAE.2021.37.3.512
- Lee SJ, Lee H, Kim S, Kim Y. 2021. Inter-comparison experiment for Korea GAW network to improve the GHGs measurement quality (In Korean with English abstract). *J Korean Soc Atmos Environ* 37(5): 790-802. doi: 10.5572/KOSAE.2021.37.5.790
- Leuenberger MC, Schibig MF, Nyfeler P. Gas adsorption and desorption effects on cylinders and their importance for long-term gas records. *Atmos Meas Tech* 8(12): 5289-5299. doi: 10.5194/amt-8-5289-2015
- Liu Z, Guan D, Wei W, Davis SJ, Ciais P, Bai J, Peng S, Zhang Q, Hubacek K, Marland G, Andres RJ, Crawford-Brown D, Lin J, Zhao H, Hong C, Boden TA, Feng K, Peters GP, Xi F, Liu J, Li Y, Zhao Y, Zeng N, He K. 2015. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustions and cement production in China. *Nature* 524: 335-338. doi: 10.1038/nature14677
- Montzka SA, Dutton GS, Yu P, Ray E, Portmann RW, Daniel JS, Kuijpers L, Hall BD, Mondeel D, Siso C, Nance JD, Rigby M, Manning AJ, Hu L, Moore F, Miller BR, Elkins JW. 2018. An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-depleting CFC-11. *Nature* 557(7705): 413-417. doi: 10.1038/s41586-018-0106-2
- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS). 2023. Report of global atmosphere watch 2022. Jeju, Korea: NIMS.
- NOAA/GML. 2025. WMO/IAEA Round Robin Comparison Experiment; [accessed 2025 Apr 24]. <https://gml.noaa.gov/ccgg/wmor/index.html>
- Park S, Western LM, Saito T, Redington AL, Henne S, Fang X, Prinn RG, Manning AJ, Montzka SA, Fraser PJ, Ganesan AL, Harth CM, Kim J, Krummel PB, Liang Q, Muhle J, O'Doherty S, Park H, Park M-K, Reimann S, Salameh PK, Weiss RF, Rigby M. 2021.

- A decline in emissions of CFC-11 and related chemicals from eastern China. *Nature* 590: 433-437. doi: 10.1038/s41586-021-03277-w
- Prinn RG, Weiss RF, Arduini J, Arnold T, DeWitt HL, Fraser PJ, Ganesan AL, Gasore J, Harth CM, Hermansen O, Kim J, Krummel PB, Li S, Loh ZM, Lunder CR, Maione M, Manning AJ, Miller BR, Mitrevski B, Mühle J, O'Doherty S, Park S, Reimann S, Rigby M, Saito T, Salameh PK, Schmidt R, Simmonds PG, Steele LP, Vollmer MK, Wang RH, Yao B, Yokouchi Y, Young D, Zhou L. 2018. History of chemically and radiatively important atmospheric gases from the Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE). *Earth Syst Sci Data* 10(2): 985-1018. doi: 10.5194/essd-10-985-2018
- Schibig MF, Brunner D, Henne S, Emmenegger L, Leuenberger M, Wenger A. 2018. Experiments with CO₂-in-air reference gases in high-pressure aluminum cylinders. *Atmos Meas Tech* 11(5): 3089-3098. doi: 10.5194/amt-11-3089-2018
- WCC-JMA. 2025. [accessed 2025 Apr 25]. https://www.data.jma.go.jp/wcc/ch4/com_annex2.html
- World Meteorological Organization (WMO). 2017. WMO Global Atmosphere Watch (GAW) implementation plan: 2016-2023. Geneva, Switzerland: WMO. GAW Report No. 228. Switzerland: WMO. <https://library.wmo.int/idurl/4/55442>
- World Meteorological Organization (WMO). 2019. An integrated global greenhouse gas information system (IG³IS) science implementation plan. Geneva, Switzerland: WMO. GAW Report No. 245. <https://library.wmo.int/idurl/4/56863>.
- World Meteorological Organization (WMO). 2021a. Report of the fifth methane reference gas inter-comparison experiment for the South-West Pacific from 2020-2022. Geneva, Switzerland: WMO. GAW Report No. 309. <https://library.wmo.int/idurl/4/69185>
- World Meteorological Organization (WMO). 2021b. Report of the sixth methane reference gas inter-comparison experiment for Asia from 2018-2019. Geneva, Switzerland: WMO. GAW Report No. 264. <https://library.wmo.int/idurl/4/57480>
- World Meteorological Organization (WMO). 2022. IG3IS urban greenhouse gas emission observation and monitoring good research practice guidelines. Geneva, Switzerland: WMO. GAW Report No. 275. <https://library.wmo.int/idurl/4/58055>
- World Meteorological Organization (WMO). 2023a. Greenhouse gas bulletin: No. 19 - The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2022. Geneva, Switzerland: WMO. <https://library.wmo.int/idurl/4/68532>
- World Meteorological Organization (WMO). 2023b. System and performance audit of surface ozone, carbon monoxide, methane, carbon dioxide and nitrous oxide at the Regional GAW Station, Anmyeon-do, Republic of Korea, June 2022. Switzerland: WCC-Empa. GAW Report No. 285; WCC-Empa Report No. 22/2.
- World Meteorological Organization (WMO). 2023c. System and performance audit of surface ozone, carbon monoxide, methane, carbon dioxide and nitrous oxide at the Regional GAW Station, Jeju Gosan, Republic of Korea, June 2022. Switzerland: WCC-Empa. GAW Report No. 288; WCC-Empa Report No. 22/1.
- World Meteorological Organization (WMO). 2024a. Global Greenhouse Gas Watch (G3W): the implementation plan. Geneva, Switzerland: WMO; [accessed 2025 Apr 22]. https://filecloud.wmo.int/share/s/T4e_wCW0TbyY8v2quDL1vQ
- World Meteorological Organization (WMO). 2024b. Twenty-first WMO/IAEA meeting on carbon dioxide, other greenhouse gases and related tracers measurement techniques (GGMT-2022). Geneva, Switzerland: WMO. GAW Report No. 292. <https://library.wmo.int/idurl/68925>
- World Meteorological Organization (WMO). 2024c. WMO greenhouse gas bulletin: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2023. Geneva, Switzerland: WMO. WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 20.

- World Meteorological Organization (WMO). 2025. State of the global climate 2024. Geneva, Switzerland: WMO. WMO Report No. 1368.
- Yver C, Philoppon C, Bergamaschi P, Biermann T, Calzolari F, Chen H, Conil S, Cristofanelli P, Delmotte M, Hatakka J, Heliasz M, Hermansen O, Komínková K, Kubistin D, Kumps N, Laurent O, Laurila T, Lehner I, Levula J, Lindauer M, Lopez M, Mammarella I, Manca G, Marklund P, Metzger J, Mölder M, Platt SM, Ramonet M, Rivier L, Scheeren B, Sha MK, Smith P, Steinbacher M, Vitková G, Wyss S. 2021. Evaluation and optimization of ICOS atmosphere station data as part of the labeling process. *Atmos Meas Tech* 14: 89-116. doi: 10.5194/amt-14-89-2021
- Zellweger C, Steinbacher M, Buchmann B. 2014. System and performance audit of methane and carbon dioxide at the Regional GAW Station Anmyeon-do, Republic of Korea, October 2014. Switzerland: WCC-Empa. WCC-Empa Report No.14/2.
- Zellweger C, Steinbacher M, Buchmann B, Steinbrecher R. 2017a. System and performance audit of surface ozone, carbon monoxide, methane, carbon dioxide and nitrous oxide at the Regional GAW Station Anmyeon-do Republic of Korea, June 2017. Switzerland: WCC-Empa. WCC-Empa Report No. 17/1.
- Zellweger C, Steinbacher M, Buchmann B, Steinbrecher R. 2017b. System and performance audit of surface ozone, carbon monoxide, methane, carbon dioxide and nitrous oxide at the Regional GAW Station Jeju Gosan Republic of Korea, June 2017. Switzerland: WCC-Empa. WCC-Empa Report No. 17/2.