KCF KOREA CARBON FORUM 대한민국탄소포럼

대한민국탄소포럼 2026

AI 시대의 기후위기 대응과 에너지·산업의 미래

세미나 8 반도체 산업의 탈탄소 전략 및 제언

KRISS Korea Research Institute of Standards and Science

반도체 공정 탄소전주기 모니터링 고도화 전략기술 및 탄소장벽 대응방안 고찰



AX — GX

AX와 GX의 공통 기반, **측정 기반 LCI**

2026. 11. 23. (월) 16:00-17:30 · 대한상공회의소 중회의실 B

임정식

한국표준과학연구원
기후표준전략기술연구단 단장

감축수단은 이미 달성 가능한 상한에 근접
다음 감축과 탄소장벽 대응의 출발점은 측정으로 입증된 감축

01

슬라이드 3-11

환경분석

규제와 탄소장벽 모두 검증 가능한 배출 데이터를 요구

- 2035 NDC와 4차 할당 BM
- 국내외 배출 추이와 Scope 1·2
- 탄소장벽과 글로벌 팹 동향

02

슬라이드 12-14

핵심 이슈 도출

현재 기술의 상한에 근접한 감축수단

- NDC 감축수단과 잔여배출
- 세 시나리오의 공통 병목
- 산정과 실제 배출량의 차이

03

슬라이드 15-23

전략기술과 추진체계

측정 목적에 맞춘 모니터링과 원자료의 추적성

- 목적별 2계층 모니터링 구조
- 전략기술 1-4와 공정 LCA
- LCI와 AX 기반 GX, 통합 로드맵

04

슬라이드 24-26

제언

직접 측정과 측정 기반 LCI로 AX-GX 연동

- Tier 4 수준 직접 측정 체계
- LCI를 매개로 한 AX-GX 연동
- 결론

01 환경분석
02 핵심 이슈 도출
03 전략기술과 추진체계
04 제언

PART 01

환경분석

규제와 탄소장벽 모두 검증 가능한 배출 데이터를 요구

03 국가 목표가 업종 이행조건으로 구체화되는 단계
04 국내외 배출 추이와 2026년 전망
05 배출구조: 투입량과 배출량의 분리
06 Scope 1과 Scope 2의 측정·산정 차이
07 4차 할당 BM 계수와 처리성능 입증 부담
08 탄소장벽: 공급망 데이터 요구와 PCF 규칙
09 글로벌 팹의 감축수단 병행
10 imec SSTS: 국제 벤치마크와 협력 대상
11 imec SSTS의 작동 방식

2035 NDC 확정 이후 업종별 경로, 할당, 지원사업의 순차적 구체화

국가 감축목표 (2018년 대비)

53-61%

목표배출량 348.9-289.5 백만 tCO_2eq [D01]

산업부문 감축률 (2018년 대비)

24.3-31.0%

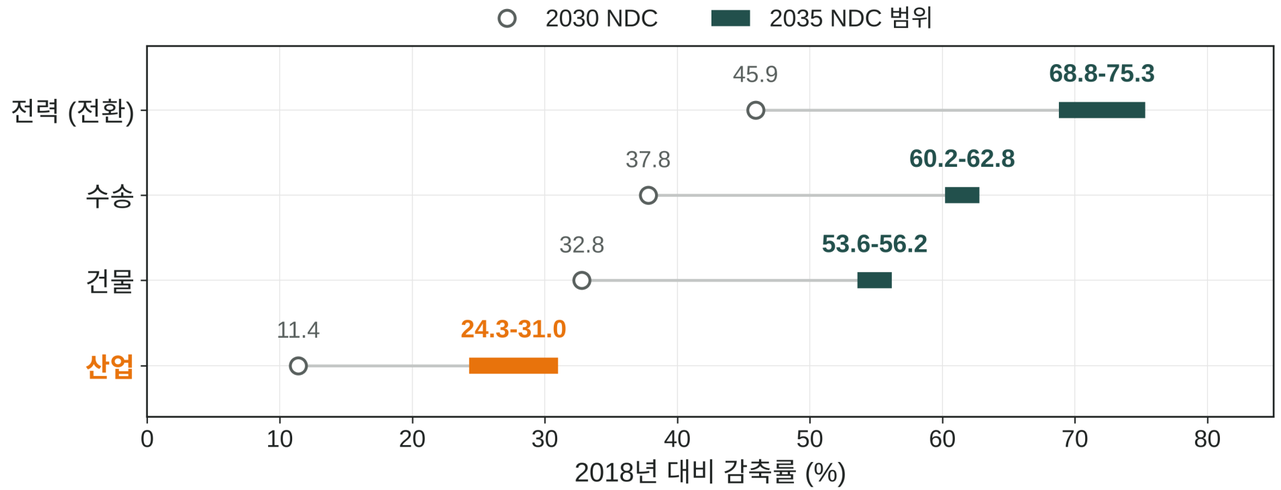
2030 NDC 11.4%에서 2배 이상 상향

추가 감축 필요량

42-60 백만 tCO_2eq

2024년 배출량 대비, 국회예산정책처 (2026)

부문별 감축률: 2030 NDC에서 2035 NDC로 보고서 표 2-8



2025년 잠정 통계 [D02] 반도체 생산지수는 12.9% 늘었지만 배출은 1.3% 증가에 그침. 별도 항목인 냉매용 HFCs 등 불소계 온실가스는 3,628만 톤으로 3.9% 증가

2025.11 2035 NDC 확정 **2026.10** K-GX 전략 발표 **이후** 업종별 세부 로드맵

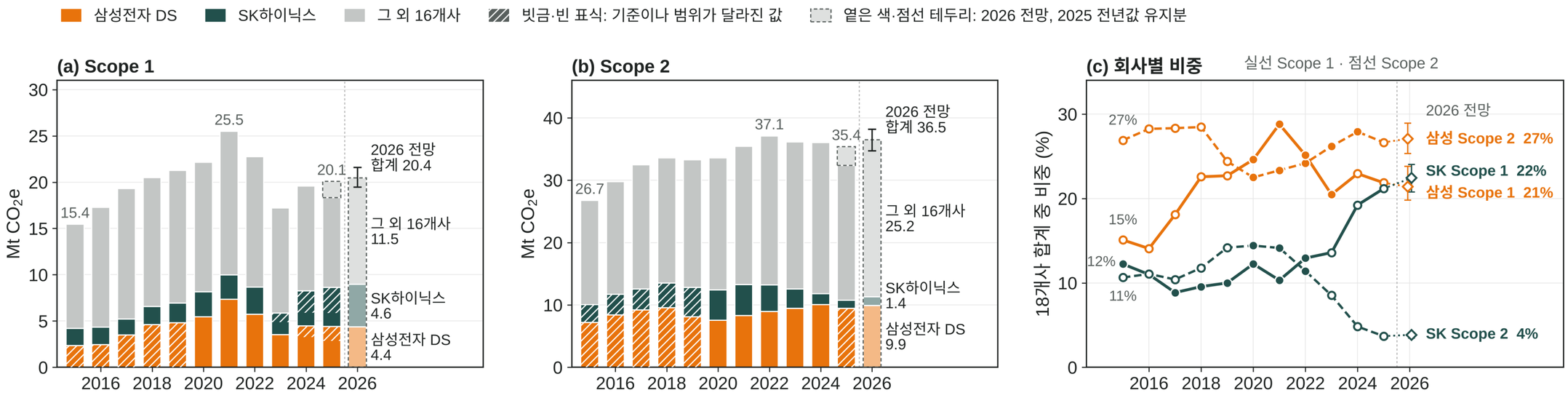
자료: [D01] 대한민국 정부, 2035 NDC (2025.12); 국회예산정책처, 경제현안분석 제108호 (2026); [D02] 온실가스종합정보센터 (2026.9). 생산지수 증가율은 발표자 계산

보고서 인용 p.3 요약 · p.5-6 1.1 · p.38-39 7.2, 표 2-8

국내 2개사 비중은 Scope 1 43%, Scope 2 30% (2025). 2026년은 메모리 증산으로 증가 전망

공개 보고 기준 Scope 1과 Scope 2: 2015-2025년 보고값과 2026년 전망 (삼성전자 DS, SK하이닉스, 그 외 16개사)

기업 지속가능경영보고서 집계



Scope 1

- 18개사: 2025년 20.1 Mt, 2026년 전망 20.4 Mt (19.5-21.6)
- 2025년 삼성전자 DS 4.4 Mt (2% 감소), SK하이닉스 4.3 Mt (13% 증가). 증가는 주로 LNG 자가발전 CO_2: 2022년 0.2에서 3.0 Mt [D19]

Scope 2

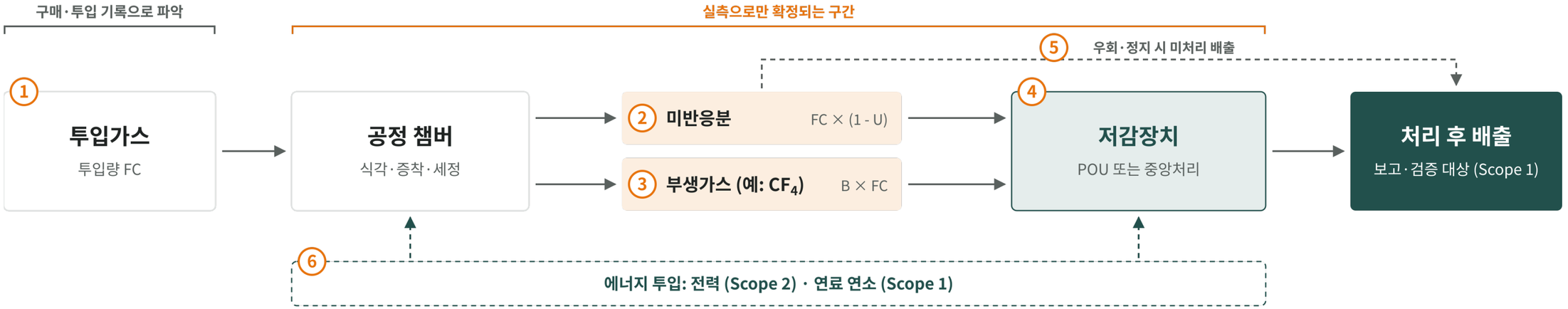
- 18개사: 2025년 35.4 Mt, 2026년 전망 36.5 Mt (34.7-38.2)
- 2025년 삼성전자 DS 9.4 Mt: 전력 사용 5% 증가, 새 전력배출계수 적용으로 6% 감소 [D11]. SK하이닉스 1.3 Mt, 전력 사용 9% 증가

2026년 전망의 가정

- 2025년 보고값 × 전력 사용 증가율: 삼성전자 DS 6% (3-9), SK하이닉스 9% (6-12). 배출계수는 2025년 값 유지
- 근거: 반도체 생산능력지수 9% 증가 (2026.9), M15X 가동, 같은 용량에 웨이퍼가 DDR5의 약 3배 드는 HBM 확대

자료: [D18] Semiconductor Emission Explorer (2015-2024); 2025년은 [D11], [D19] 등 10개사의 2026년 보고서, 나머지 8개사는 전년값; 국가데이터처 (2026.10); TrendForce (2025.12). 합계, 비중, 2026년 전망은 발표자 계산
빗금·빈 표식: 삼성전자 DS 2015-2019 추정, SK하이닉스 Scope 2 2015-2019 지역기준, 삼성전자 NF_3 포함 (2024-)과 2025년 새 전력배출계수, SK하이닉스 LNG 자가발전 (2023-). 그 외 16개사 2026년은 최근 2년 평균 증감률 (±5%)

저GWP 가스 전환 정보만으로는 처리 후 전체 배출의 같은 비율 감소를 판단할 수 없음



① 투입량: 구매·MFC 기록으로 파악
② 이용률 (U): 레시피·장비별로 다름
③ 부생가스 (B): 플라즈마에서 새로 생성
④ DRE: 가스별 처리효율, 부하에 따라 변동
⑤ 우회·정지: 가동률이 연간 유효성능을 결정
⑥ 에너지: 저감은 전력·연료를 소비

배출 변화 요인 5개

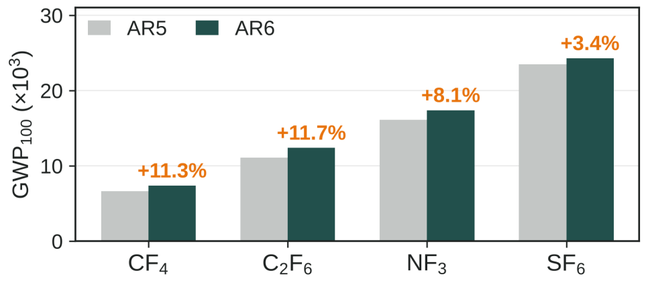
보고서 표 2-2

요인	생산·제품 구성	가스 사용·대체	공정 변환	처리·운전	산정 기준
기준자료	웨이퍼·노드·공정단계별 활동량	물질·혼합비·레시피별 사용량	미반응분·부생가스·회수 자료	가스별 성능·가동·우회 기록	GWP·전력계수·조직경계
구분할 내용	생산 변동과 기술개선	투입 감소와 물질 변화	투입물질과 실제 배출가스	시험성능과 연간 유효성능	방법 변경과 물리적 감축

주황 열 (그림의 2-5번): 이 발표의 측정기술이 실측으로 채우는 칸

GWP 버전별 환산량 [D05]

AR5 · AR6



자료: IPCC 2019 Refinement Vol.3 Ch.6; [D05] IPCC AR5 WG1 Ch.8, AR6 WG1 Table 7.SM.7. 상승률은 발표자 계산

보고서 인용 p.8 2.1 · p.11-12 2.5, 표 2-2 · p.16 3.4

Scope 1은 공정가스 실측, Scope 2는 전력 모니터링. 두 범위 모두 팹 운영자의 감축 대상

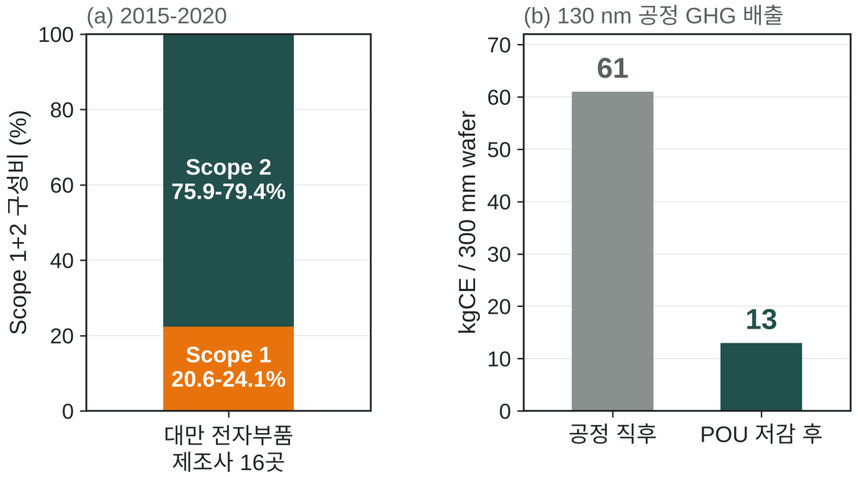
GHG Protocol 기준 구분과 팹에서의 의미

	Scope 1 직접배출	Scope 2 간접배출
정의	보유·관리하는 배출원의 직접배출	구입 에너지 (주로 전력) 생산에 따른 간접배출
팹의 주요 배출원	F-gas·N_2O 공정배출, 부생가스, 저감장치 등의 연료 연소	공정장비, 서브팹 (펌프·칠러·저감장치), 클린룸 공조 등 시설 전력
산정 방식	투입량, 이용률, 부생가스 계수, DRE로 산정	전력 사용량 × 배출계수
불확실성 요인	레시피별 이용률, 부생가스 생성, 실효 DRE와 가동률	배출계수 선택, 인증서 처리, 공정·제품 배분
모니터링 수단	연속측정과 정밀측정 캠페인	장비·공정 단위 전력 계량 (공정·유휴 모드 구분)



Scope 구성비와 저감의 효과

(a) Roussilhe 2024, (b) Krishnan 2008



Scope 2도 팹 운영자가 공정효율화로 감축 가능

배출계수는 전력 조달이, 사용량은 팹 운영이 결정. 사용량 절감의 전제는 장비·공정 단위 전력 모니터링

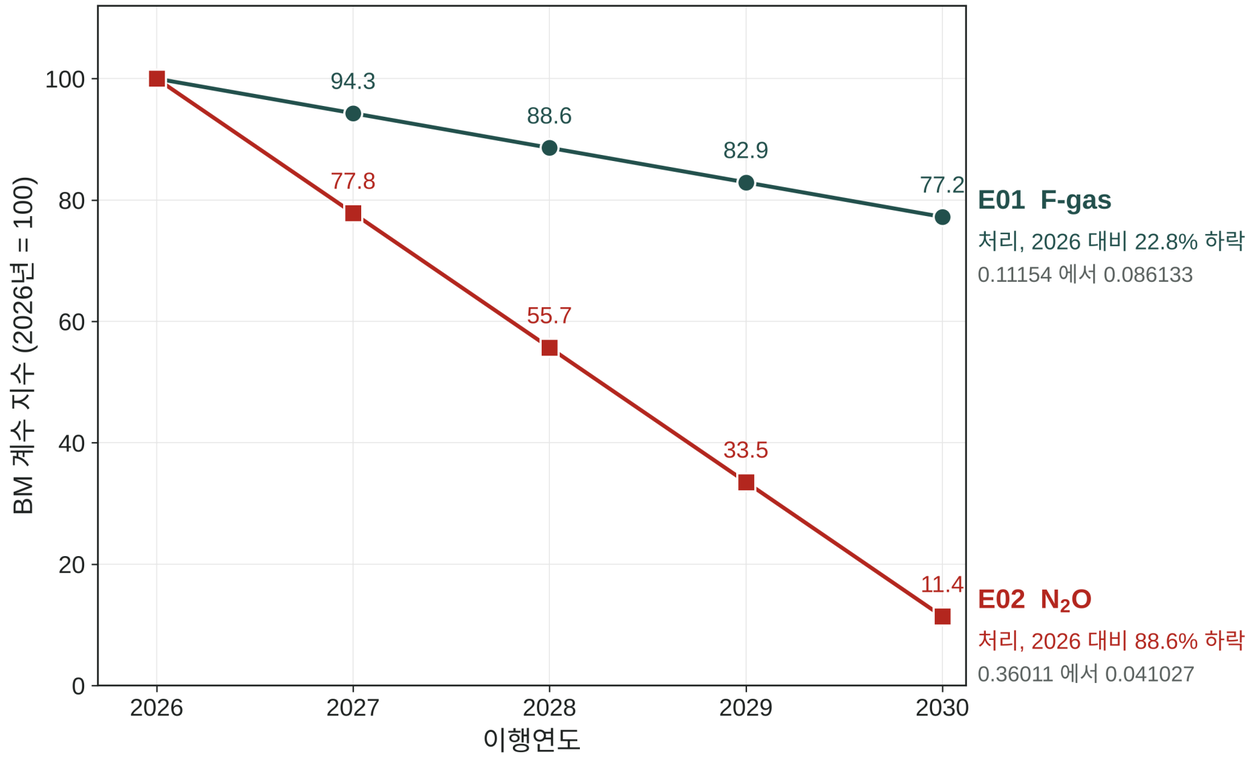
- TSMC 2015-2020: Scope 2 72% 증가, Scope 1 37% 증가. 팹 에너지 중 전력 비중 55-97%
- 저감장치는 Scope 1을 줄이지만 연료·전력을 소비. 순저감효율 (NRE)로 함께 평가

자료: Roussilhe et al., J. Ind. Ecol. 28, 1212 (2024); Krishnan et al., Environ. Sci. Technol. 42, 3069 (2008); Pirson et al., IEEE Trans. Semicond. Manuf. 36, 56 (2023). kgCE는 탄소 환산 kg

BM 계수*는 2030년까지 매년 하락. N_2O 처리시설의 처리성능과 자료를 우선 점검

반도체 공정가스 처리 BM 계수 추이 (발표자 계산)

보고서 표 3-1



* **BM (벤치마크) 계수:** 배출효율기준 할당에서 단위 활동자료에 대해 인정하는 온실가스 배출량 (지침상 용어는 배출효율계수)
할당량은 활동자료량 × BM 계수에 조정계수 등을 반영해 산정. **여기서 활동자료는 처리 전 배출량 (F-gas는 부생가스 포함)**
예: 2026년 E01 계수 0.11154는 처리 전 배출량 1 tCO_2eq당 할당 기준 0.11154 tCO_2eq. 장치별 DRE나 최종 할당량과는 다른 값

측정결과의 지위

시험기관의 처리 전후 측정결과가 법정 인정자료를 자동으로 대체하지 않음

할당 개념 구분

무상할당 비율과 실제 할당량은 다른 개념

적용 제외

2021-2023 연평균 처리 전 배출량 3,000 tCO_2eq 미만 사업장

비교: 미국 Subpart I [D09]

팹별 기판 면적, 공정 유형별 가스 소비량, 저감장치 가동시간까지 보고 항목으로 둠

자료: 기후에너지환경부, 제4차 계획기간 국가 배출권 할당계획 (2025), 온실가스 배출권의 할당 및 취소에 관한 지침 제10조; [D09] U.S. EPA, GHGRP Subpart I 점검표 (2024.7)

보고서 인용 p.14-15 3.2 · p.17 3.6, 표 3-1 · p.18 3.6-3.7

탄소장벽의 실체는 관세보다 검증 가능한 배출 데이터 요구

EU

- CBAM은 대상 품목 기준. 모든 칩에 같은 의무가 적용되지 않음
- F-gas 규정 (EU 2024/573)은 물질·용도별 조항

미국

- GHGRP Subpart I는 보고·산정 제도이며 연방 ETS가 아님
- EPA가 2025.9 Subpart I 삭제를 제안. 2026.10 현재 미확정, 현행 규정 유지

중국

- 전국 ETS 통지 대상에 반도체 직접 규정 없음
- 제품 탄소발자국 규칙: 2027년 약 100개, 2030년 200개 목표

일본

- GX-ETS 대상 판단은 직접 CO_2 배출 기준
- F-gas 범위와는 다름

규제보다 먼저 오는 공급망의 데이터 요구

100%

Apple

2030년까지 공급사의 Apple 생산분 재생전력, Scope 1·2 보고

40%

삼성디스플레이 [D15]

Scope 3 중 공급사 배출 비중. 고객사가 패널당 탄소배출량을 요구

50곳 이상

TSMC [D13]

GREEN 협약 공급사. 공급망 배출의 약 90%

2025.3

환경부 [D16]

반도체 업종 Scope 3 배출량 산정 안내서 발간

같은 원자료도 GWP 버전, 조직경계, 전력 산정, 배분규칙에 따라 결과가 달라짐. 출발점은 공통 원자료의 신뢰성

자료: U.S. EPA 90 FR 44591 (2025); 중국 MEE 등, 탄소발자국 관리체계 실시방안 (2024); Apple Environmental Progress Report (2024); [D13] TSMC (2025); [D15] 헤럴드경제 (2026); [D16] 환경부 (2025)

보고서 인용 p.15-16 3.3 · p.16 3.4 · p.16-17 3.5

신규 기술은 시험과 신뢰성 확인을 거쳐 단계적으로 확대. 공개 실적, 계획, 설계 기대효과의 구분 필요

주요 반도체 기업의 대응과 도입 현황

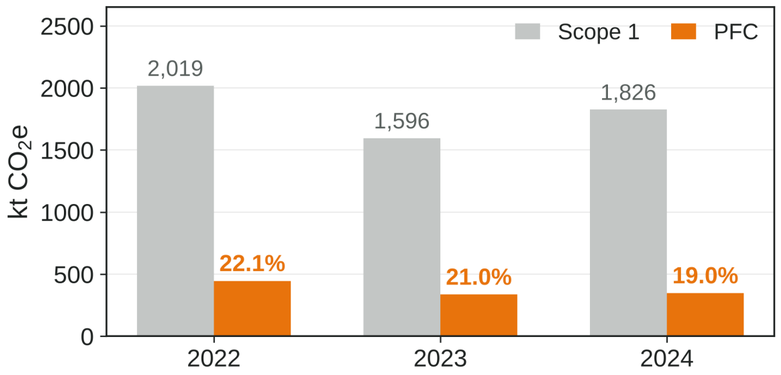
보고서 표 4-1, 4.1-4.5절 재구성

기업·자료	가스 사용·공정 최적화	가스 대체	배출가스 처리	에너지·연료	공급망·협력	적용·추진 범위
삼성전자 2026 보고서	● 개별 공정 개선	● 저GWP 대체가스	● RCS 확대, 통합 처리시설	● 연료 절감		실적 회사가 보고한 DS부문 대응
SK하이닉스 2026 보고서	● NF_3 사용시간·사용량 최적화	● 일부 공정 F_2 전환	● 처리설비 병행			실적 보고된 공정 범위의 개선
TSMC 2025 실적 보고서		● 가스 대체	● 처리효율 개선	● 에너지 관리	● 협력사 설비 개선 지원	실적 회사의 공시 경계 내 활동
Intel 2025-26 보고서	● 공정 최적화	● 화학물질 대체	● 배출저감	● 에너지 절약, 재생·대체 전력		계획 회사가 제시한 이행 경로
Micron 2026 보고서			● 중앙 배출가스 처리시스템			실적 기대효과 싱가포르 한 시설에 설치
GlobalFoundries 2026 보고서			● 중앙 처리와 POU 병행		● 공동 연구	실적 계획 기대효과 1단계 설치, 연말 완료 예상

● 점은 보고서가 소개한 주요 대응, 선은 수단의 병행. 빈칸은 미기재이며 미시행이 아님

TSMC Scope 1과 PFC 비중 [D12]

비중은 발표자 계산



55대 삼성전자 DS, RCS 운영 대수 (2025년 3대 추가) [D11]

67% LG디스플레이 온실가스 배출 감축, 2018년 대비 [D14]

17% 삼성디스플레이 Scope 1·2 감소, 2022년 대비 [D15]

자료: [D11] 삼성전자 (2026); [D12] TSMC ESG Data Hub; [D14] LG디스플레이 (2026); [D15] 헤럴드경제 (2026). 각 사 공시 경계와 산정 기준이 달라 직접 비교하지 않음

보고서 인용 p.20-23 4.1-4.6, 표 4-1

SSTS의 기반은 측정 인프라. 국내 인증체계도 측정 기반 위에서 강화하고 국제협력으로 연결

2021
프로그램 출범

28
파트너사 (2025년)

반도체 제조사 | **장비·재료 공급사** | **시스템 기업**

세 연구 축

Assess + Improve + Disrupt

평가 모델

imec.netzero

- 300mm 연구 팹 자료 기반 가상 팹 평가
- 영향이 큰 공정 선별

300mm 연구 팹 | 가상 팹

실험 대상 선별 →

← 모델 입력 보완

측정 인프라

GEM

- R&D FAB, subFAB 장비의 공정배출과 처리효율 평가

분석장비 3대

FTIR | FTIR | QMS

배출·부생가스 정량 ↔

후보가스 평가

GAPS

- 300mm 식각 챔버 지정
- 배출·부생가스는 GEM으로 정량

2025년 첫 분자 시험

40%

hard-mask-open 단계
Scope 1 직접배출 감소

해석 유의

해당 공정단계와 비교조건의 결과이며, 팹 전체 감소를 뜻하지 않음

국내 인증체계 구성안과 국제 연결은 22번 슬라이드

자료: imec, Annual and sustainability report 2025 (2026)

보고서 인용 p.24 5.1 · p.24-25 5.2 · p.25 5.3 · p.26 5.4 · p.26-27 5.5 · p.27 5.6

가상 팹은 장비·공정 자료를 LCA로 연결. 공정가스 배출은 계수 기반, 측정으로 보완 중

1 자료원과 참여사 역할

참여사는 프로그램 페이지 명단에서 발췌

imec 300 mm 연구 팹 1차 자료 제공
공정장비, 레시피, 공정흐름과 단계별 전력·가스·화학물질·물 사용

장비·소재 공급사 장비·공정 자료 제공
ASML, Tokyo Electron, Applied Materials, Lam Research, ASM, SCREEN, Edwards, Kurita, Air Liquide, Merck

파운드리·IDM 양산 자료로 모델 검증
TSMC, 삼성전자, GlobalFoundries, Intel, Micron, Rapidus

시스템 기업 공급망·제품 탄소중립 수요
Apple, Microsoft, Amazon, Google, Meta

- 공개 명단 27개사 중 국내 기업은 삼성전자 1개사 (2026.11 확인)

2 가상 팹 imec.netzero

공정 단계별 자원 사용과 배출을 합산하는 상향식 LCA 모델

경계	팹 내부: 1차 자료 원료 단계: 2차 자료 추가
기능단위	웨이퍼당, 마스크 층당, 양품 다이당
대상 기술	로직 N28-A14, DRAM·NAND 패키징·RF 추가
공개 범위	공개판 (2023.11): 현재 기술, Scope 1·2 파트너판: 미래 기술, 세부 분석

공정·장비 자료 → LCI → 영향 지표

3 산출과 활용

지표: 온실가스 · 전력 · 물 · 광물

14 nm — **데이터 격차 해소**
기존 LCI DB는 14 nm 이후 로직과 3D NAND 미수록

3.46배 — **경로 탐색 (PPAC+E)**
28 nm 대비 2 nm 웨이퍼당 전력. 온실가스는 2.5배

45% — **핫스팟 식별**
3 nm 로직 Scope 1·2 중 리소그래피와 식각의 비중

공정가스 배출 산정

계수에서 측정으로

모델 2020-2022 발표

이용률과 저감효율로 산정. 저감은 IPCC 2019 Tier 2c 방식. NF_3 저감효율 가정 (95%, 99%)에 따라 결과가 달라짐

측정 보완 2025

GEM 가동: FTIR 2대와 QMS 1대. 연구 팹 장비의 공정배출과 처리효율을 측정해 가상 팹 모델에 반영

남은 공백 발표자 평가

진공 영역과 in-situ의 정량 측정, 양산 팹의 연속 모니터링. 3부 전략기술의 대상

자료: imec SSTS 프로그램 페이지 (2026.11 확인), 2025 연차보고서; Rolin, SEMICON Europa (2022); Garcia Bardon et al., IEDM (2020); Boakes et al., IEDM (2023)
SEDEX 2026 발표자료를 출처 확인 후 재구성. 남은 공백은 발표자 평가

보고서 인용 p.25 5.3 · p.26 5.4

01 환경분석
02 핵심 이슈 도출
03 전략기술과 추진체계
04 제언

PART 02

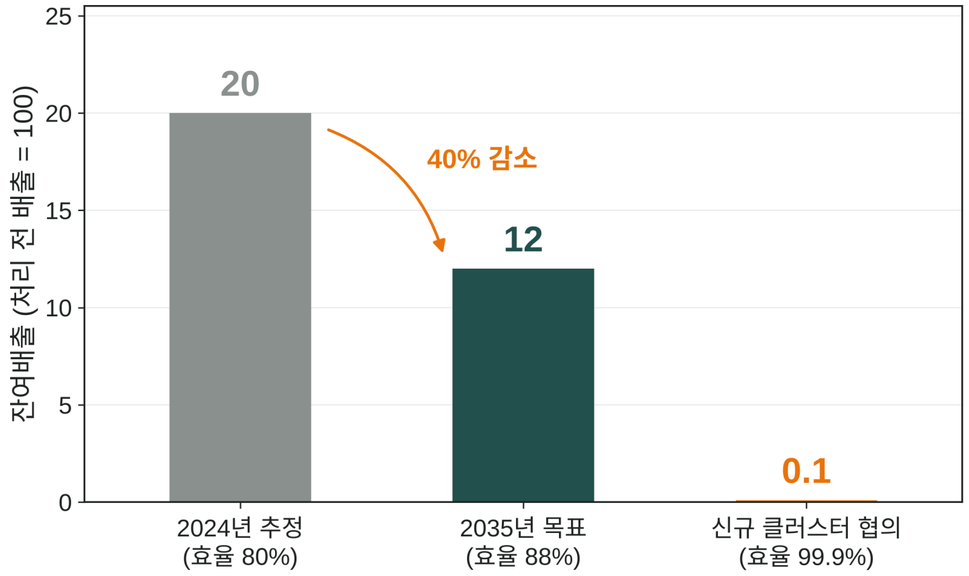
핵심 이슈 도출

현재 기술의 상한에 근접한 감축수단

12 NDC 감축수단의 목표 수준과 잔여배출
13 세 시나리오의 공통 병목: 실효율 입증과 신기술 검증
14 산정 배출량과 실제 배출량의 차이

효율 8%p 상승은 잔여배출 기준 2/5 감축. 두 수단 모두 현재 기술의 상한에 맞춘 목표

저감장치 효율별 잔여배출 (발표자 계산)



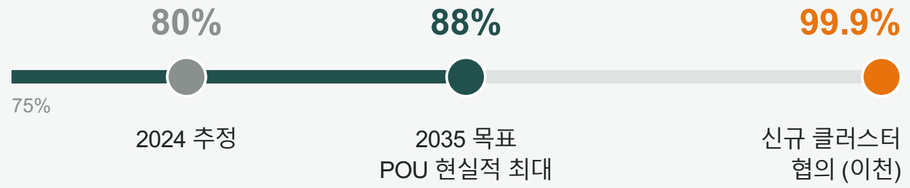
40%

(20 - 12) / 20 = 0.4
효율은 8%p 오르지만 남는 배출은 2/5 감소

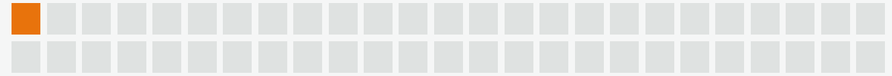
두 감축수단의 2035 목표 수준

보고서 7.2절

저감장치 평균효율



저GWP 가스 대체 (PFC 사용량 기준)



2% 1칸 = 2%. 2035 목표는 50칸 중 1칸. 상징적 수준이며 대체가스의 TRL은 낮음

정부 통계 [D02] 2025년 반도체 배출 증가 억제의 원인을 공정 저감효율 개선으로 분석

패널 비교 [D14] LG디스플레이 SF_6·CF_4 저감효율 목표 90%에서 95%

자료: [D02] 온실가스종합정보센터 (2026); [D14] LG디스플레이 (2026)

보고서 인용 p.39 7.2 · p.40 7.2 각주 3

정책 강도와 생산 전망이 달라도 기업에 요구되는 역량은 동일

S1 현행 제도 이행

80% → 88% 저감장치 효율

기업 부담

효율 80%에서 88%로 상승,
감축 산정에서 목표 부합 입증

필요 역량

가스 사용량, 처리장치 연결,
레시피, 가동자료 대조

S2 생산 확대·조기 가동

배출 목표 고정 | 생산 증가

기업 부담

배출 목표는 고정,
AI 수요로 생산은 증가

필요 역량

베이형·통합형 스크러버 추가와
저GWP 가스 도입 검토

S3 감축 강도 상승

현재 수단은 최대 수준

기업 부담

현재 수단은 이미 최대 수준

필요 역량

혁신 기술개발과 양산 적용 지원,
ETS 기후기금 활용

공통 병목

1 처리성능의 실효율 입증

저감장치가 실제 운전에서 얼마나 처리하는지 입증

2 신규 가스·설비의 공정·배출 동시 검증

공정성능과 배출 양쪽에서 함께 검증

두 병목이 3부 전략기술의 출발점

보고서 인용 p.38 7.1 · p.40-41 7.2 · p.41 7.3 · p.42 7.4

산정 기준의 실측 기반 갱신은 목표 상향에 대응하는 필수 과제

산정값과 실제 배출이 달라지는 이유

산정 배출량 · 계수 기반

- 기본 이용률
- 기본 부생가스 계수
- 기본 DRE
- GWP 버전

실제 배출량 · 운전 기반

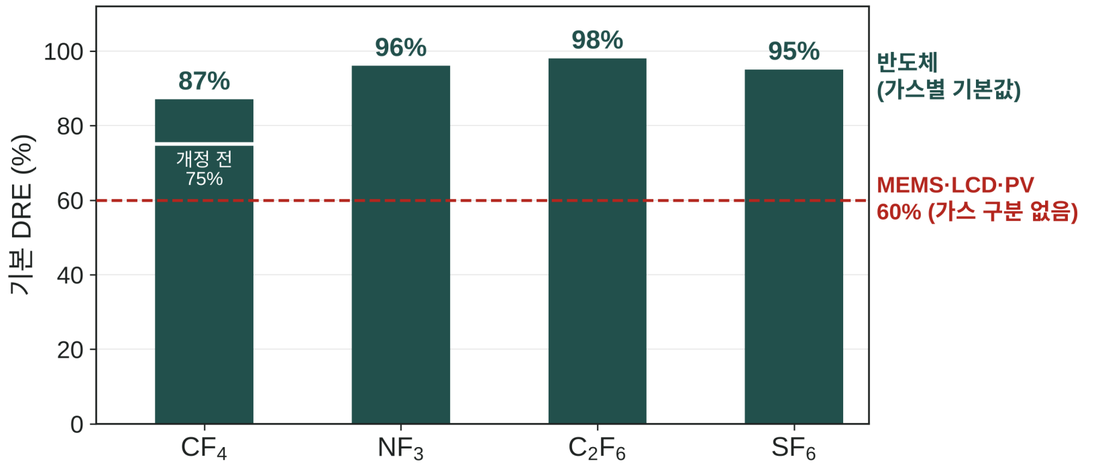
- 레시피별 이용률
- 실제 부생가스 생성
- 가동·대기·우회·정비
- 부하 변동

차이의 방향과 크기는 사업장 실측으로만 확정

참고: 국내 점검시험 연구 (Woo 2024)는 IPCC 기본값이 고도화 설비를 반영하지 못할 가능성을, Raoux (2023)는 업계 평균 계수 기반 산정이 배출을 과소평가할 가능성을 제시해 결론이 일치하지 않음

미국 EPA 기본 DRE [D08]

40 CFR 98 Subpart I, Table I-16



기본값은 고정값이 아님. CF_4 기본 DRE는 식각 75%에서 공정 구분 없는 87%로 개정 (2024). 근거는 사업장이 제출한 측정 자료

IPCC 2019 Table 6.3 [D06]
대상: 이용률 (1-U), 부생가스 계수 (B), DRE

Tier 1	→	Tier 2a·2b·2c	→	Tier 3a·3b	- - →	Tier 4
기본값 (D)		가스·공정 유형별 세분화		사업장 실측값 (Me)		**연속측정 기반 직접 산정**

국내 지침의 등급
IPCC 전자산업 지침에는 없음

자료: [D08] U.S. EPA 40 CFR 98 Subpart I, Table I-16; [D06] IPCC 2019 Refinement Vol.3 Ch.6, Table 6.3; Woo et al., Atmosphere 15, 1446 (2024); Raoux, Carbon Manag. 14, 2179941 (2023)

보고서 인용 p.10 2.4 · p.43 7.5

01 환경분석
02 핵심 이슈 도출
03 전략기술과 추진체계
04 제언

PART 03

전략기술과 추진체계

측정 목적에 맞춘 모니터링과 원자료의 추적성

15 목적별 2계층 모니터링 구조
16 전략기술 1: 연속측정 공정시험기준과 소급성
17 전략기술 2: 신규 저GWP 가스 정량 기반
18 전략기술 3: 공정 표준 반응지도
19 반도체 공정 LCA의 명시적 처리
20 전략기술 4: 탄소전주기 LCI와 글로벌 인증
21 AX 기반 GX와 측정 기반 LCI
22 국내 인증체계 구성안과 국제 연결
23 통합 로드맵

측정 목적을 먼저 정한 뒤 목적에 맞는 시간해상도와 정확도로 장비 선정

2층 · 캠페인

정밀측정

가스별 정량 · 고정확도



목적 가스별 배출특성, DRE, 산정계수 확정

사례 [D10] EPA DRE 프로토콜: 희석 보정과 추적가스로 전체 유량 확인

확정된 계수 · DRE

가동률 · 이상 기록

관계 검증

관계 검증 전에는 상시감시값을 법정 보고자료로 대체하지 않음

1층 · 운영

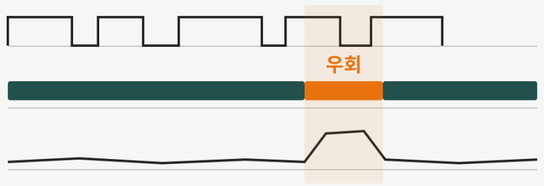
상시감시

연속 기록 · 전 장비

FDC/EES 로그
MFC 유량 · RF on-time · 레시피 ID

저감장치 기록
가동 · 알람 · 우회

선택 성분 센서
출구 농도 추이



Tier 4 수준 지향

국내 지침의 연속측정 등급

목적 이상 감지와 가동률 확보

사례 [D09] 미국 Subpart I: 저감장치 가동시간을 분 단위로 기록·보고

Tier 4 **관계 검증을 거친 연속측정은 국내 지침의 Tier 4 수준**

IPCC 전자산업 지침은 Tier 3a (공정별 실측 계수)와 3b (배기구 시험)까지. Tier 4 구분 없음

모니터링 목적별 측정 구성

보고서 표 6-1

관리 목적	우선 확인할 요소	조합 구성
공정·처리 이상 감지	반응시간, 경보 기준, 오경보	선택 성분 분석·운전 센서
가스별 배출 특성	정량 범위, 간섭, 부산물	다성분 분석과 보완 분석
처리 전후 평가	동기화, 유량, 희석, 시험부하	입·출구 분석과 유량 검증
연간 배출량	시간 대표성, 가동자료, 산정식	측정·활동자료·이력의 연결
보고·검증	원자료·변경기록·승인 절차	자료관리와 품질관리 체계

자료: [D10] U.S. EPA, DRE 측정 프로토콜 v1 (2010); [D09] U.S. EPA, GHGRP Subpart I 점검표 (2024); IPCC 2019 Refinement Vol.3 Ch.6; Raoux, Carbon Manag. 14, 2179941 (2023). Tier 4 표기는 국내 배출량 보고 지침 기준

보고서 인용 p.32 6.1-6.2 · p.33 표 6-1 · p.34 6.4 · p.36-37 6.8

[수행 연구] 반도체 공정 TMS 연계형 배출가스 연속 측정 레이저 센서 개발

목표	반도체 공정 F-gas 배출의 TMS 연계형 연속 측정 레이저 센서 개발
산정 수준	Tier 4 (연속측정 기반 직접 산정)
국제표준	ISO 19694-7:2024 연계
소급성	표준가스 및 국가유량측정테스트베드

[연구 그림 삽입]
실측 DRE 시계열 또는 장치 개념도

1 농도·유량의 기준상태 일치와 수분 기준

몰분율·질량농도, 표준상태, 수분 기준, 검출한계를 맞춘 뒤 농도 × 유량 × 시간으로 적산

보고서 p.33-34 6.3

2 TMS 연계 활용

기존 TMS 측정가스 이외에 배출단 F-gas 동시 측정이 가능한 연속광 레이저 센서로 개발

개발 목표

3 이송지연, 평균화 시간, 시각 동기화

시료 이송지연, 분석기 평균화 시간, 로그 시각 기준을 맞춘 뒤 농도와 유량을 결합

보고서 p.36 6.7

4 결측의 원인별 구분

분석기 점검, 통신 중단, 공정 정지, 처리장치 우회를 구분하고 영향이 큰 구간부터 보완

보고서 p.36 6.7

핵심 지표 **DRE와 함께 에너지·부생가스를 반영한 순저감효율 (NRE)을 병기**

자료: ISO 19694-7:2024; Ko et al., IEEE Trans. Semicond. Manuf. 27, 456 (2014)

보고서 인용 p.26 5.4 · p.33-34 6.3 · p.34 6.5 · p.35 표 6-2 · p.36 6.7

후보가스 평가의 병목은 기준 스펙트럼 부족. 확보 없이는 공정시험의 배출 정량이 불확실

문제

신규 후보가스 (예: $C_4H_2F_6$ 이성질체, $C_2H_2F_4$)와 부생가스는 HITRAN 선 목록 (55개 분자)에 없고, 흡수단면적 자료도 없거나 조건이 제한적

공정 조건에 맞는 기준 스펙트럼이 없으면 FTIR 정량과 배출·처리효율 평가의 불확도가 커짐

연결: 후보가스 평가

GAPS형 후보가스 평가에서 배출·부생가스 정량의 전제 조건

정량 대상: 후보가스 배출, 부생가스 식별, 처리효율 (DRE)

[수행 연구] 제일원리 기반 분자 선강도 계산 파이프라인

1 **분광 DB 검토**
ExoMol, HITRAN, HITEMP

2 **ab initio 퍼텐셜 에너지면·쌍극자 모멘트면**
CCSD(T)-F12

3 **실험 에너지 준위 보정**
MARVEL

4 **변분 계산과 Einstein A 계수**
TROVE, Duo, GAIN-MPI

5 **실험 검증과 FTIR 정량모델 반영**
현장의 배출·처리효율 정량

보고서도 가스별 정량 가능성, 간섭, 분석모형 확인을 요구

자료: Choi et al., J. Manuf. Mater. Process. 9, 42 (2025); Kim et al., Sci. Rep. 15, 40517 (2025); Gordon et al., J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 277, 107949 (2022)

보고서 인용 p.9 2.3 · p.12-13 2.6 · p.26-27 5.5 · p.32 6.2

투입가스가 공정에서 남는 양과 새로 생기는 부생가스를 측정으로 확정하는 체계

[KRISS 전략과제 기획] 반도체 공정 표준 반응지도 기반 온실가스 전과정 정밀평가

공정	1 투입가스	2 공정 내 반응 경로	3 미반응분	4 부생가스	5 처리 후 배출
측정 확정값	**투입량**	**반응·분해 경로**	**이용률 (U)**	**생성계수 (B)**	**가스별 DRE**
식각	CF_4, CHF_3, C_4F_8 등	플라즈마 분해·재결합	**레시피·장비별 실측**	CF_4, C_2F_6 등	**처리장치별 실측**
증착	N_2O 등	열·플라즈마 분해		해당 시 실측	
챔버 세정	NF_3, C_2F_6 등	원격·원위치 플라즈마		CF_4 등	

산정 구조 (IPCC 산정식의 단순화)

$$E_i = \mathrm{FC}_i(1-U_i)(1-\mathrm{DRE}_i), \qquad E_k = B_{k,i}\mathrm{FC}_i(1-\mathrm{DRE}_k)$$

E 처리 후 배출 (가스별 질량), FC 투입량, U 이용률, B 부생가스 생성계수, DRE 처리효율 (i 투입가스, k 부생가스). 용기 잔량과 저감장치 연결 비율은 생략

활용 1 **산정**

기본 이용률·부생가스 계수를 실측값으로 대체

활용 2 **할당**

처리 전 배출량 (BM 활동자료)의 정확도 향상

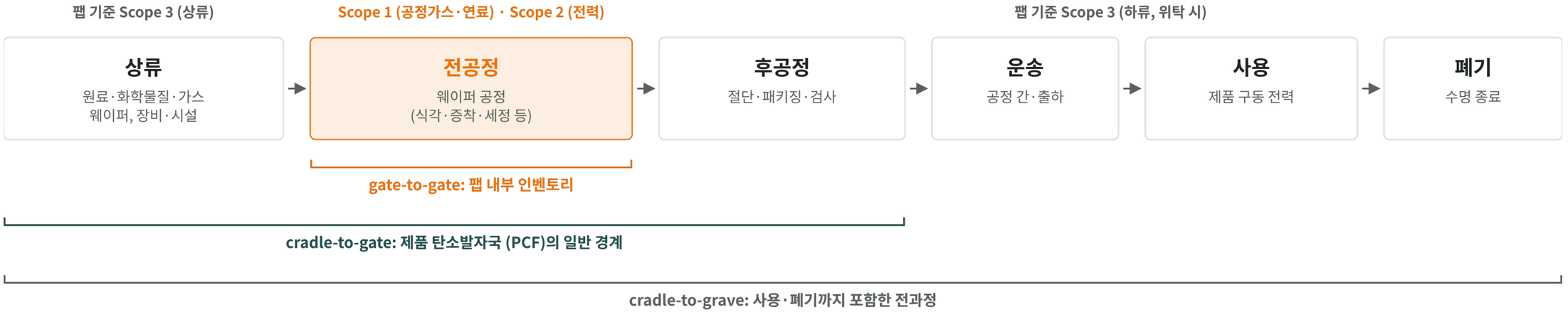
활용 3 **기술 선택**

대체가스 적용 시 부생가스 변화 예측

식 구조: IPCC 2019 Refinement Vol.3 Ch.6 전자산업 산정식의 단순화. 예시 가스는 공정별 대표 사례

보고서 인용 p.8 2.1 · p.11-12 2.5, 표 2-2 · p.17 3.6

LCA 결과는 기능단위, 시스템 경계, 데이터 계층의 선택에 좌우



LCA 보고에서 명시할 네 항목

1 기능단위

- 300 mm 웨이퍼 (Krishnan 2008)
- 칩 1개, 웨이퍼, MIPS (Boyd 2009)
- 웨이퍼 단위면적 (Huang 2016)
- 선택에 따라 추세 해석이 달라짐

2 시스템 경계

- 전공정 (Huang 2016, IC PCR)
- 상류 포함, 웨이퍼 완성까지 (Krishnan 2008)
- 패키징·운송·사용 포함 (Boyd 2009)

3 데이터 계층

- 단위공정의 투입과 배출
- 서브팹 POU 설비 (펌프, 칠러, 저감장치)
- 시설 인프라 (공조, 배기·폐수 처리)

4 인벤토리 자료의 출처

- 공정 투입, 챔버 배출, POU 후 배출의 FTIR·질량분석 측정 (Boyd 2010)
- 상류는 공정 기반과 투입산출 자료의 결합

자료: Krishnan et al., Environ. Sci. Technol. 42, 3069 (2008); Boyd et al., Environ. Sci. Technol. 43, 7303 (2009); Boyd et al., Environ. Res. Lett. 5, 014011 (2010); Huang et al., Int. J. Environ. Sci. Technol. 13, 275 (2016)

글로벌 인증체계의 경쟁력은 계산 규칙이 아니라 그 아래 원자료의 추적성

흐름별 연속모니터링 중요도

F-gas 직접배출

결정적

실효율, 가동률, 부생가스

전력·유틸리티

중요

공정·제품 배분 정확도, 유휴 모드

화학물질·소재

상대적으로 낮음

구매 기반 물질수지로 대부분 충분

데이터 구조: 원자료 위의 규칙과 보고자료

보고자료

PCF, 인증, 고객 요구 대응

원자료와 보고자료 분리 보존

산정·배분 규칙 제품 탄소발자국 규칙이 고정할 요소

1. 기능단위 (cm^2 웨이퍼, 양품 다이)와 수율
2. 실측·가동률 가중 DRE
3. Scope 2의 인증서와 전력계수 처리
4. 서브팹·시설 부하

계산 버전 고정

원자료 인증 경쟁력의 근거: 추적성

농도 시계열, 유량, 공정 이벤트, 교정 이력

공통 식별자 시험, 물질, 공정, 웨이퍼·패턴, 처리장치, 측정 세트

기능단위 사례

규칙마다 다른 단위

TSMC

$MTCO_2e$ / 12인치 환산 웨이퍼 마스크층 [D13]

미국 Subpart I

팹별 기판 면적 (m^2) [D09]

패널 고객사

패널당 탄소배출량 요구 [D15]

원자료가 측정 기반이어야 어느 기능단위로도 다시 계산 가능

자료: Boyd et al., Environ. Sci. Technol. 43, 7303 (2009); Pirson et al., IEEE Trans. Semicond. Manuf. 36, 56 (2023); Krishnan et al., Environ. Sci. Technol. 42, 3069 (2008); [D13] TSMC (2025); [D09] U.S. EPA; [D15] 헤럴드경제 (2026)

보고서 인용 p.16 3.4 · p.29-30 5.10 · p.34 6.5

강하게 연동된 AX와 GX의 공통 기반은 학습과 검증의 근거가 되는 측정 기반 LCI

측정·모니터링
현장 자료
- 입·출구 가스 분석
- 장비·공정 단위 전력 계량
- 저감장치 가동·우회 기록

원자료

LCI
전과정 목록
- 공통 식별자로 연결한 원자료
- 투입, 배출, 전력, 가동
- 불확도와 계산 버전 명시

필수 요건

학습·검증 자료

국내 반도체·디스플레이 산업의 AX와 GX: 강한 상호 연동

AX
AI 전환
- 공정·레시피 최적화
- 이상 감지와 배출 예측
- 디지털 트윈

상호 연동

GX
녹색전환
- 검증된 감축
- 제품 탄소발자국과 인증
- 기후금융·제도 연계

AI 확산은 고객사의 무탄소 전력 요구를 키우고 [D11], AX 기반 설비 최적화는 감축 수단이 됨 [D14]

LCI가 없을 때
같은 AX 투자의 귀결

실측 학습 자료의 부재 → 기본계수를 재현하는 예측 → 검증할 수 없는 감축 주장

AI 모델의 품질은 입력 자료의 품질을 넘지 못함. 감축의 인정 여부는 모델이 아니라 그 아래 자료의 추적성이 결정

1 학습 자료
AI 모델은 실측 자료로 학습해야 공정별 배출 차이를 구분

2 검증 근거
AI가 제안한 레시피·운전 조건의 감축효과는 실측 LCI로 확인

3 제도·금융 연계
K-GX는 2026-2035년 재정·기후금융 약 1,000조 원 지원. 인정받는 감축의 근거가 LCI

자료: 관계부처 합동, 한국형 녹색대전환 (K-GX) 전략 (2026.10.7); [D11] 삼성전자 (2026); [D14] LG디스플레이 (2026). 측정, LCI, AX, GX의 연결 구조는 발표자 구성

측정표준, 시험·검증, 인증을 잇는 국내 인증체계 강화. 국제 상호인정과 협력으로 연결

측정표준·소급성	**한국표준과학연구원** 측정표준, 표준물질, 소급성, 공정시험기준	**소급성의 출발점** 표준가스, 유량, 공정시험기준으로 시험·검증·인증의 측정값을 국가측정표준에 연결	
시험·검증·인증	**한국화학융합시험연구원** KTR · 현장 측정 캠페인, 처리설비 성능시험	**한국기계전기전자시험연구원** KTC · 저감·분석장비 시험평가, 인증	
실증·기술 지원	**나노종합기술원** 공정 테스트베드, 후보가스 패턴 웨이퍼 시험	**한국화학연구원** 저GWP 후보물질 합성·물성, 부생가스 해석	**한국생산기술연구원** 청정생산 공정, 저감장비 개선과 실증
수요·정책 연계	**한국반도체산업협회** 회원사 공통 수요 취합, 정책·지원과제 건의	**한국디스플레이산업협회** 디스플레이 수요 취합, 공통 시험항목 조정	**한국방송통신대학교** 정책지원, 제도 개선 연구
지역 실증·정책	**강원테크노파크** 강원권 반도체 테스트베드 연계, 지역 기업 실증 지원	**충남연구원** 충남 클러스터 지역 연계, 지자체 정책·실증 부지 협력	

기능별 국제 연결

측정표준·소급성	**CIPM MRA** 국가측정표준과 교정 성적서의 상호인정. KRISS는 1999년부터 참여
시험·검증·인증	**Global ACI MRA** KOLAS 공인 성적서와 인증의 상호인정. ILAC·IAF가 2026.1 통합
산정·측정 방법	**ISO 19694-7:2024** 반도체·디스플레이 온실가스 산정 국제표준
반도체 업계 협력	**WSC · JSTC** 6개 지역 반도체협회 (한국 KSIA). JSTC에서 PFC 감축 등 ESH 의제 논의
디스플레이 업계 협력	**WDICC** 한·일·대만 디스플레이협회 (한국 KDIA). 2001년부터 PFC 자율감축
공동연구·측정 비교	**imec SSTS** 연구 팹, GEM, GAPS와 측정 비교

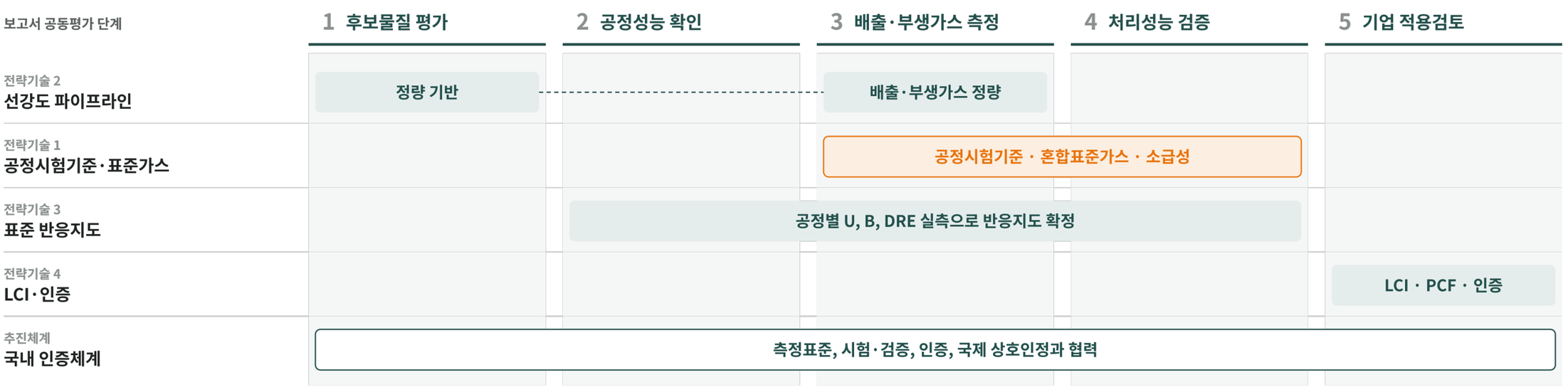
주황 바탕은 측정 기준기관. 기관별 역할은 참여기관 협의로 확정. 공동 LCI 운영은 25번 슬라이드

자료: BIPM, CIPM MRA 참여 현황; Global ACI (2026.1); ISO 19694-7:2024; WSC 공동성명 (2026.6); JEITA, WLICC·WDICC 자료. 기관별 역할과 연결 구조는 발표자 구성안

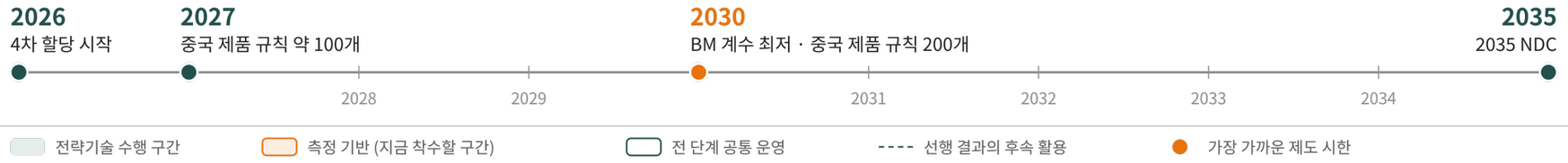
보고서 인용 p.28 5.8 · p.30-31 5.11 · p.44 8.1-8.2

2030년 BM 계수와 중국 제품 규칙, 2035 NDC 일정을 고려하면 지금이 측정 기반을 구축할 시점

평가 단계별 전략기술 배치



제도 일정



중국 제품 규칙 목표: 중국 MEE 등, 탄소발자국 관리체계 실시방안 (2024)

보고서 인용 p.3-4 요약 · p.17 표 3-1 · p.29 5.9 · p.39 7.2

01 환경분석
02 핵심 이슈 도출
03 전략기술과 추진체계
04 제언

PART 04

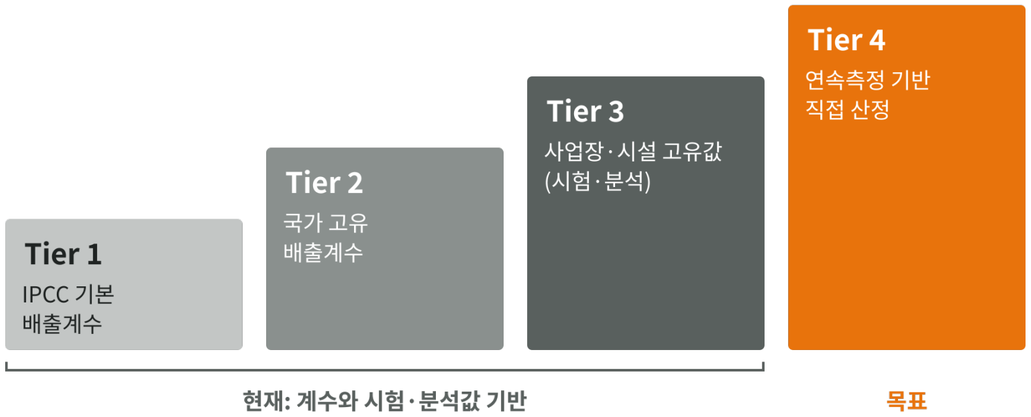
제언

직접 측정과 측정 기반 LCI로 AX-GX 연동

24 정책 제언: Tier 4 수준 직접 측정 체계
25 측정 기반 LCI를 매개로 한 AX-GX 연동
26 결론

국내 지침의 Tier 4 (연속측정)를 F-gas 공정배출로 확장하는 시범 사업부터 착수

Tier 구분은 국내 배출량 보고 지침 기준 (IPCC 전자산업 Tier 1, 2a, 2b, 2c, 3a, 3b 체계와 다름)



선례와 근거

[D06] IPCC	상위 Tier일수록 DRE·부생가스 계수에 실측값 사용
[D09] 미국 EPA	배기구 직접 측정법과 측정 절차 규정 (2025.9 삭제 제안, 미확정)
[D17] 국내 연구	발전·소각·시멘트 시설에서 Tier 4 실측값이 Tier 3 계산값보다 대체로 높음
[D08] 미국 EPA	측정 자료로 기본 DRE 개정 (CF_4 75%에서 87%)

제언

1 F-gas 공정배출 Tier 4 연속측정 산정 경로 시범 도입, 실측·가동률 가중 DRE 인정 기준 마련

2 국가 F-gas 측정 소급체계 (표준물질, 교정, 숙련도시험) 구축

3 신규 가스 분광·물성 국가 DB 구축

4 ETS 기후기금을 재원으로 한국형 GEM·GAPS 공동실증 인프라 구축

자료: [D06] IPCC 2019 Refinement Table 6.3; [D09] U.S. EPA 40 CFR 98 Subpart I; [D17] 한국기후변화학회지 (2012); [D08] EPA Table I-16

보고서 인용 p.17-18 3.6 · p.33 6.3 · p.34 6.4 · p.42 7.4 · p.43 7.5

AX와 GX를 잇는 매개는 공동 운영하는 측정 기반 LCI. 원천기술 개발과 인증이 그 신뢰를 뒷받침

AX

AI 공정·설비 최적화의 학습 자료이자
감축효과 검증의 기준으로 LCI 활용

측정 기반 LCI

원자료, 공통 식별자, 계산 버전을
업계가 공동으로 운영

GX

감축 실적, 제품 탄소발자국,
탄소장벽 대응의 근거로 LCI 활용

공동 LCI 운영 원칙

보고서의 국내 공동사업 설계 제안을 적용. 신뢰 보증은 인증체계 (22번 슬라이드)

1 공통 데이터 양식

- 가스명, 농도·유량 단위
- 기준상태, 수분 기준
- 검출한계, 시간 기준
- 측정 위치

2 기밀관리

- 레시피·생산정보는 제한
- 공통 시험조건과 요약 결과는 공유
- 산정절차와 불확실성 공유 범위 사전 합의

3 단계별 통과 기준

기초 특성

기준 공정

패턴·품질

처리계통 적합성

공정성능과 배출을 함께 확인

4 성과지표

- 검증된 가스-공정 조합 수
- 재현 가능한 처리 전후 측정
- 반복시험 편차
- 승인 단계별 소요기간

감축량이 아니라 검증 완료 범위로 관리

원천기술 개발의 필요성: 측정 기반 LCI의 전제

발표자 평가

연속 측정 센서·측정표준

양산 팹의 F-gas 연속 측정과 소급체계 미확립.
LCI 원자료와 Tier 4 산정의 전제

전략기술 1 · 16번 슬라이드

기준 스펙트럼

후보가스·부생가스의 기준 스펙트럼 부족.
정량 없이는 LCI에 반영 불가

전략기술 2 · 17번 슬라이드

공정 반응지도

기존 LCI DB 공백: 14 nm 이후 로직, 3D NAND.
공정별 실측 계수로 LCI 보완

전략기술 3 · 18번 슬라이드

측정 기반 LCI

AX와 GX의 공통 기반

자료: AX와 GX의 연동 구조는 21번 슬라이드. 기존 LCI DB의 수록 범위는 imec (11번 슬라이드)
실측 배출로 구성한 LCI의 선례는 Boyd et al., Environ. Res. Lett. 5, 014011 (2010)

보고서 인용 p.28 5.8 · p.29-30 5.10 · p.30-31 5.11 · p.44-45 8.2 · p.45-46 8.3-8.4

결론

Conclusion

1 2035 NDC의 반도체 감축수단은 현재 기술의 상한에 맞춘 목표

2 다음 감축과 탄소장벽 대응의 출발점은 **측정 기반 LCI** 구축과 **원천기술 개발**의 병행

3 **Tier 4 수준 직접 측정**은 실제 감축을 산정·할당·인증에 반영하는 기반

4 측정 기반 LCI를 매개로 **AX와 GX**를 함께 추진하고, **인증체계**로 국제 통용성 확보

Q&A

임정식 · 한국표준과학연구원 기후표준전략기술연구단

KRISS Korea Research Institute of Standards and Science

- 첨부 보고서: 산업공정 탄소중립 시나리오: 감축목표와 이행정책 구체화에 따른 반도체 업계 대응전략 (2026.10.24)
- Government of the Republic of Korea (2025) The Republic of Korea's 2035 NDC
- 국회예산정책처 (2026) 2035 NDC 주요 부문 감축경로 점검, 경제현안분석 제108호
- 기후에너지환경부 (2025) 제4차 계획기간 국가 배출권 할당계획; 온실가스 배출권의 할당 및 취소에 관한 지침 (2026.11 확인)
- 관계부처 합동 (2026.10.7) 한국형 녹색대전환 (K-GX) 전략
- 온실가스종합정보센터 (2026) 2025년도 국가 온실가스 잠정배출량 보도자료
- 환경부 (2025) 반도체 업종을 위한 Scope 3 배출량 산정 안내서
- IPCC (2019) 2019 Refinement, Vol.3 Ch.6 Electronics Industry Emissions
- IPCC (2021) AR6 WG1 Chapter 7, Table 7.SM.7
- WMO (2026) Greenhouse Gas Bulletin No.22
- U.S. EPA (2010) Protocol for measuring DRE of fluorinated GHG abatement equipment in electronics manufacturing
- U.S. EPA, 40 CFR Part 98 Subpart I, Table I-16; Subpart I Monitoring Checklist (2024); 90 FR 44591 (2025)
- European Parliament and Council, Regulation (EU) 2023/956, 2024/573, 2025/2083
- 중국 MEE 등 (2024) 탄소발자국 관리체계 실시방안; MIIT 등 (2026) 제로탄소공장 지도의견
- ISO 19694-7:2024
- 국가데이터처 (2026.10) 2026년 9월 산업활동동향; TrendForce (2025.12.18) HBM과 DDR5의 웨이퍼 소요 비율
- imec, SSTS 프로그램 페이지 (2026.11 확인); imec.netzero 공개판 발표 (2023.11)
- Rolin (2022.11) The environmental footprint of Si chip manufacturing, SEMICON Europa
- imec (2026) Annual and sustainability report 2025
- BIPM, CIPM MRA 참여 현황 (2026.11 확인); Global ACI 출범 발표 (2026.1)
- 삼성전자 (2026), SK하이닉스 (2026), TSMC (2025), LG디스플레이 (2026) 지속가능경영보고서 및 ESG 공시
- snv-berlin, Semiconductor Emission Explorer, CSR dataset (GitHub)
- 헤럴드경제 (2026) 삼성디스플레이 인터뷰
- Apple Environmental Progress Report (2024); Microsoft Supplier Code of Conduct sec. 6.11
- Boyd et al., Environ. Sci. Technol. 43, 7303 (2009)
- Boyd et al., Environ. Res. Lett. 5, 014011 (2010)
- Garcia Bardon et al., IEEE IEDM (2020), doi:10.1109/IEDM13553.2020.9372004
- Boakes et al., IEEE IEDM (2023), doi:10.1109/IEDM45741.2023.10413725
- Huang et al., Int. J. Environ. Sci. Technol. 13, 275 (2016)
- Roussilhe et al., J. Ind. Ecol. 28, 1212 (2024)
- Raoux, Carbon Manag. 14, 2179941 (2023)
- Lee et al., Appl. Sci. 13, 8834 (2023)
- Krishnan et al., Environ. Sci. Technol. 42, 3069 (2008)
- Pirson et al., IEEE Trans. Semicond. Manuf. 36, 56 (2023)
- Choi et al., J. Manuf. Mater. Process. 9, 42 (2025)
- Kim et al., Sci. Rep. 15, 40517 (2025)
- Woo et al., Atmosphere 15, 1446 (2024)
- Ko et al., IEEE Trans. Semicond. Manuf. 27, 456 (2014)
- Gordon et al., J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 277, 107949 (2022)
- Kim et al., 한국기후변화학회지 3, 195 (2012)

ID	발행 기관	문서 (원문 링크)	슬라이드에 쓴 값
D01	대한민국 정부 (UNFCCC 제출)	The Republic of Korea's 2035 NDC (2025.12)	2018년 순배출량 742.3 $MtCO_2eq$ 대비 53-61% 감축, 53%는 2050 탄소중립 선형경로 값
D02	온실가스종합정보센터	2025년도 국가 온실가스 잠정배출량 보도자료 (2026.9)	총 6억 8,571만 톤, 산업 2억 4,293만 톤, 반도체 생산지수 160.1에서 180.7, 배출 1.3% 증가. 냉매용 HFCs 등 불소계 3,628만 톤은 별도 항목
D03	온실가스종합정보센터	가스별 국가 온실가스 인벤토리 배출량 (공공데이터포털)	1990년 이후 가스별 배출량 시계열 원자료 (PFCs, SF_6, NF_3 파일은 확인 필요)
D04	온실가스종합정보센터	2024년 국가 온실가스 인벤토리 보고서 (NIR)	전자산업 배출 시계열과 산정방법 (Tier) 기술 부분
D05	IPCC	AR6 WG1 Ch.7 Table 7.SM.7, AR5 WG1 Ch.8	GWP100 (AR5/AR6): CF_4 6,630/7,380, C_2F_6 11,100/12,400, NF_3 16,100/17,400, SF_6 23,500/24,300
D06	IPCC	2019 Refinement Vol.3 Ch.6, Table 6.3	Tier별 부생가스 계수와 DRE의 기본값 (D)·실측값 (Me) 구분
D07	WMO	Greenhouse Gas Bulletin No.22 (2026.10)	SF_6 2025년 12.24 ppt, 2025년 증가폭 0.48 ppt (관측 이래 최고), 대기 수명 1,000년 이상
D08	미국 EPA	40 CFR 98 Subpart I, Table I-16	기본 DRE: 반도체 CF_4 87%, C_2F_6 98%, NF_3 96%, SF_6 95% / MEMS·LCD·PV 60%
D09	미국 EPA	GHGRP Subpart I 점검표 (2024.7)	팹별 기판 면적, 공정 유형별 가스 소비량, 용기 재고, 저감장치 가동시간, 배기구 측정법. 2025.9 Subpart I 삭제 제안 (미확정)
D10	미국 EPA	DRE 측정 프로토콜 v1 (2010.3)	희석 보정, 추적가스로 전체 유량 확인
D11	삼성전자	지속가능경영보고서 2026	DS부문 2025년 Scope 1 4,390천 톤, Scope 2 9,424천 톤 (2025.12 공표 전력배출계수 적용), 전력 30,426 GWh. RCS 55대 운영. NF_3는 2024년 값부터 공개
D12	TSMC	ESG Data Hub, SASB Index	Scope 1 (2022-2024): 2,018,789 / 1,596,031 / 1,825,872 t, PFC: 445,191 / 335,714 / 347,206 t
D13	TSMC	2025 Sustainability Report	원단위 $MTCO_2e$/12인치 환산 웨이퍼 마스크층. GREEN 협약 50곳 이상 (공급망 배출의 약 90%), 2030년 RE85 (대만)·RE100 (해외)
D14	LG디스플레이	ESG 보고서 2026, 기후변화 대응	온실가스 배출 2018년 대비 67% 감축 (AX 기반 설비 운영 최적화 등), 플라즈마 스크러버 90% 이상, SF_6·CF_4 95% 장비 개발
D15	삼성디스플레이	헤럴드경제 인터뷰 (2026)	Scope 1·2 2022년 대비 17% 감소, Scope 3 380.1만 톤 중 40% 공급사, 패널당 탄소배출량 요구
D16	환경부	반도체 업종 Scope 3 배출량 산정 안내서 (2025.3)	GHG Protocol Scope 3 표준 기반 업종 안내서
D17	한국기후변화학회지	국내 산업 부문 온실가스 배출량 산정 방법 결과 비교 (2012)	발전·소각·시멘트 7개 시설에서 Tier 4 실측값이 Tier 3 계산값보다 대체로 높음
D18	snv-berlin (GitHub)	Semiconductor Emission Explorer, CSR dataset	18개사 Scope 1·2 (2015-2024). 삼성전자 DS 2015-2019는 추정값. 2025년 값은 각사 2026년 보고서 (TSMC, Micron, SMIC, Intel, UMC, TI, onsemi, GlobalFoundries)
D19	SK하이닉스	지속가능경영보고서 2026	2025년 Scope 1 4,250,526톤 (CO_2 2,968,321톤, LNG 자가발전 포함), 시장기준 Scope 1·2 5,555,285톤. 전력 13,706 GWh. 2026년 목표 599만 톤