

温暖化対策の 自主的取り組み

日本企業はどう行動したか

杉山大志／
若林雅代 [編著]

Voluntary Actions for
Mitigating Climate Change

エネルギー・フォーラム



第3章

半導体産業による PFC 排出削減の自主的取り組み

若林雅代

本章の要約

半導体産業は、1999年に温室効果ガスの1つであるPFC（パーフルオロ化合物）削減の共通目標を掲げ、排出削減に向けた多国間連携での自主的な取り組みを展開している。米国・日本・欧州・韓国・台湾によってスタートした民間主体の取り組みは、2010年以降は中国を加え、世界の半導体生産地域の9割以上をカバーする（注：生産能力に基づくシェア）。本章では、文献および業界関係者へのインタビュー調査に基づき、半導体産業におけるPFC対策の背景、各国の対応や今後の展開等を分析する。

本事例において注目すべき点は、次の通りである。

- 1) 半導体産業では、各企業が温暖化対策として決して安価とは言えない費用の負担を自主的な枠組みの下で受容し、PFCの排出抑制に成功した。
- 2) 世界共通の削減数値目標と、それを実現するための様々な技術情報の交換等の具体的、かつ積極的な活動により、2010年に1995年比で米国が35%削減、欧州が41%削減、日本では50.6%削減というように、いずれの国・地域においても当初目標の10%を大幅に上回る削減を達成した。
- 3) 総量目標では日本をはじめ技術的限界に近づく国・地域がある中で、民間部門を中心に2010年以降の対策における共通目標が協議され、「新規工場に対するベストプラクティスの導入」という内容で2011年5月に合意した。これは、対策ベースでの目標設定によって、地域的な取り組みの差異を減らし、公平性と世界規模での効率性の両立を図るものと解釈でき、今後の温暖化対策の国際協調のあり方の1つを提示するものといえよう。

1. はじめに

フッ素化合物は、冷媒、産業洗浄剤、発泡剤、半導体・液晶製造、電力機器の絶縁、消火剤など幅広い産業分野で使用されている。このうち、オゾン層の破壊を引き起こすクロロフルオロカーボン、ハイドロクロロフルオロカーボン等の物質は、1987年のモントリオール議定書において使用

が規制され、代替物質としてハイドロフルオロカーボン、パーフルオロカーボン、SF₆の代替フロン等3ガスの利用が進んだ。しかし、これら3ガスには地球温暖化に大きな影響を及ぼす温室効果があることから、1997年の京都議定書によってCO₂、CH₄、N₂Oとともに規制の対象となった。日本やEUなど、京都議定書を批准した先進国には、これら6つの温室効果ガスの2008～12年の排出量合計について、1990年を基準とする国別の削減数値目標が義務づけられている。このうち、パーフルオロカーボンの排出量はCO₂換算でCO₂の1%に満たないが^{*31}、大気中での寿命が極端に長いため、地球温暖化係数（global warming potential, GWP）はCO₂の5000～1万2000倍と高い。

半導体産業にとって、PFC（パーフルオロ化合物）^{*32}はシリコンウェハーのエッチングと成膜装置のチャンバーの洗浄に使用する、製造工程上不可欠な化学物質であり、京都議定書の対象に指定された1997年当時には削減が困難と考えられていた。そうした中、欧州、日本、韓国、米国、台湾の半導体業界が参加する世界半導体会議（World Semiconductor Council, WSC）は、1999年に「PFCの大気排出量を2010年までにそれぞれの基準レベルより10%以上削減する」という共通の数値目標を掲げ、業界の自主的取り組みとして、排出削減のための情報交換などを積極的に行ってきた。こうした活動の結果、WSCは、2011年の共同声明において、欧州、日本、韓国、米国、台湾の合計で、目標を大幅に上回る32%の削減に成功したことを報告した（WSC、2011）。なお、2010年までの取り組みには直接参加しなかったものの、2006年には中国が加盟し、WSCの活動は世界の半導体生産能力の9割以上をカバーする規模になっている。^{*33}

大半の温暖化対策の取り組みが国ごとの削減対策を講じる中で、半導体産業では地球レベルの自主的取り組みを展開し、大きな削減を実現した。本章では、文献および業界関係者へのインタビュー調査に基づき、半導体産業においてこのような対応が可能であった背景、各国の対応や今後の展開等を分析し、温暖化対策への示唆を得る。インタビュー調査は、半導体

産業を活動分野の一部とする業界団体、一般社団法人電子情報技術産業協会（JEITA：Japan Electronics and Information Technology Industries Association）の会員企業関係者に対して実施した。本章の構成は以下の通りである。まず半導体産業における PFC 対策の特徴をまとめ、続いて PFC 対策に向けた世界的な取り組みを整理する。次いで特に日本における取り組みを詳細にみる。そして最後に、この半導体の事例を通した温暖化対策についての国際協調への示唆をまとめる。

2. 温暖化問題と半導体産業

本節では、半導体産業における PFC 対策に関わる基礎的な情報を整理する。具体的には、文献調査等により、半導体製造過程において PFC が排出される仕組みや、現時点で利用が可能な主要削減対策、およびその費用について述べる。PFC 削減の対策費用は、実際には工場ごとの様々な事情や製造工程に依存し、一般化は困難である。このため、本書では文献調査で得られた米国での代表的な対策技術についての試算例、および欧州での検討事例と、インタビュー調査で得られた日本の事情を紹介する。

2.1. 半導体産業から排出される温室効果ガス

半導体製造工程では、シリコンウェハーのエッチングと成膜装置のチャンバーの洗浄で PFC を分解して発生させたフッ素を使用しており、このとき分解しなかった PFC が排出される。半導体産業から排出される温室効果ガスのほぼ半分が PFC である。^{*34} 1970 年から 2000 年までのおよそ 30 年間にわたり、世界の半導体市場は年平均 14% の高い成長を遂げてきた。その中で、PFC 使用量は、製造技術の微細化や複雑化によって 1990 年代には生産規模を上回る速度で増加した。^{*35} 現在の製造技術では、PFC は半導体の製造工程に不可欠なガスであり、1990 年代終わり頃には、このまま推移すれば 2010 年頃には 1995 年の排出水準の 7～8 倍に達することが

見込まれた。^{*36} このため、PFC の排出を抑制する、何らかの措置が必要と考えられた。

2.2. 削減対策オプション

半導体製造工程における PFC の主な削減方法は、1) 製造工程の最適化、2) 低 GWP の代替ガスの使用、3) 除害装置の設置と 4) 回収・再利用の4つである。^{*37}

1) 製造工程の最適化（ガス使用量の削減）

例えば成膜時の洗浄における PFC の噴射時間短縮など、無駄を極力省くことで製造工程での PFC の使用量を削減する対策が挙げられる。大きな設備投資を必要としないほか、場合によってはガス使用量削減による費用削減も期待できる、費用対効果に優れた対策であるが、生産量の増加に比例して使用量が増えることは不可避なため、総量削減にはつながらないという限界がある。さらに、洗浄の精度を落とさないために最低限必要なガス使用量を判定するなどの製造工程での調整が必要となること、PFC の使用量は発生するフッ素ガスの濃度に影響し、フッ素ガスの濃度が低くなれば洗浄の長時間化によって生産性へも影響が出ることなどがデメリットとなる。また、日本国内ではこうした対策はほとんどやり尽くされており、技術的な限界にあると考えられている。^{*38}

2) 低 GWP ガスへの代替

GWP のより低いガスへ代替を進めることにより、CO₂ 換算での排出量を減らす対策である。同じ PFC でも C₂F₆ から、より GWP の低い C₃F₈、C₄F₈、COF₂ や、PFC 以外の F₂ ガスなどへの代替が進められている。こうした代替ガスの探索や洗浄プロセス技術の開発には多くの研究費用と時間が必要とされ、一部の研究開発は国の支援による国家プロジェクトとして進められてきた（本章 4.4 節を参照）。とくに、PFC 以外のガスへの代

替は、同じ PFC ガスによる代替に比べ削減効果が大きい半面、製品への影響や安全性の確認を慎重に行う必要がある。代替ガスの安全性や洗浄の基本性能が確認された場合でも、導入の際には既存の装置を改造したり、新たな配管を敷設したりする費用に加え、実際の生産ラインを止めて製品への影響を実験・評価する必要があることから、生産ラインへの影響が問題となる。

3) 除害装置の設置

PFC を分解する専用装置を設置する対策である。PFC の分解を「除害」と呼ぶことから、こうした装置は「除害装置」と呼ばれる。製造工程で排出された PFC を高い効率で取り除くことができ、削減効果が大きい半面、小型装置でも一台約 1500 万円といわれる除害装置本体に加え、除害装置から排出されるフッ素を含んだ排水の処理施設、工場内の配管、排気ダクトなどの設置費用、およびこれらの設備の設置スペース確保の問題がある。設置スペースは、とくに既存の旧式ラインへの設置において大きな制約条件となっている（本章 2.3 節を参照）。

4) 回収・再利用

PFC の分解には追加的なエネルギー投入が必要となるため、省エネ化を進めるために半導体製造装置で分解されずに排出される PFC をそのまま回収してリサイクルする取り組みも始まっている。しかし、回収された PFC は純度が低く、微細な加工を伴う半導体製造工程での再利用には不向きである。このため、工場外での活用先が必要となる。現在、装置メーカーを中心に再利用を視野に入れたビジネスモデルの提案が行われているものの、このようなシステムを効率的に運営するには社会的なインフラ整備が不可欠であり、企業単独での対応には限界があると考えられる。

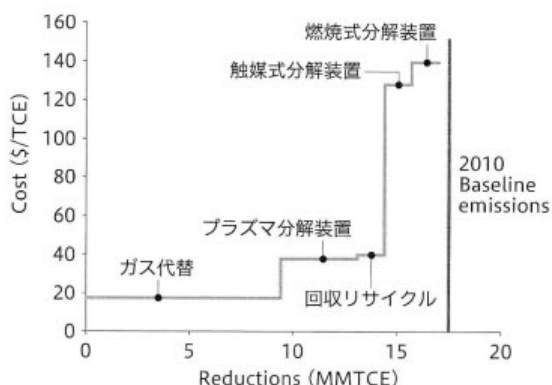
2.3. 対策費用

1) 欧米における検討事例

以下では参考として米国で推計された半導体製造業の PFC 削減限界費用を示す。ただし、複雑なチップ構造や採用される製造技術を反映して、使用される PFC の種類は工場や製造工程によって様々である。また、対策費用は工場のスペースや法規制などによる安全面の制約などの諸条件にも左右される。このため、費用評価の一般化は困難であることに留意する必要がある。

図 14 は、CVD 洗浄の際に使用する代表的なガスである C_2F_6 の排出削減に用いられる、①低 GWP ガスへの代替 (C_2F_6 から NF_3 への代替)、②除害装置の設置〔a〕プラズマ分解装置、〔b〕燃焼式分解装置、〔c〕触媒式分解装置)、および③ PFC の回収・再利用の限界費用 (2001 年時点で 2010 年の費用を推計したもので、いずれも割引率 4% で評価した値) を示

図 14 半導体製造業における PFC 削減限界費用 (米国、2010 年)



TCE：炭素換算トン、MMTCE：100 万炭素換算トン

○低 GWP ガスへの代替は比較的低コストだが、除害装置と呼ばれる PFC の分解装置を設置する方法では、t-CO₂ あたりの削減費用が 140 ドルほどと推計されている。なお、複雑なチップ構造や採用される製造技術のため、製造工程で使用される PFC ガスの種類は様々であるほか、対策費用は工場のスペースや法規制などによる安全面での制約などの諸条件にも左右される。このため、一般的な費用の推計は困難であり、上記はあくまで米国の代表的な生産プロセスでの試算値であることに留意が必要である。

出典：US EPA (2001) Exhibit 6.4 Emissions Reduction and Cost in 2010 に基づき著者作成

している。

欧州でも、各分野における PFC 対策の費用対効果が検討されている。例えば Harnisch and Gluckman (2001) は、既存施設の改造等を伴う対策のほとんどが製造ラインによる製品への影響評価や生産ラインの停止などの取引費用のために経済性に乏しく、また単にスペースの問題から導入が不可能な場合も多いことを指摘している。また、Illuzzi and Thewissen (2010) は、半導体分野ではすでに NF_3 へのガス代替や排ガスの PFC 分解処理などの対策が広く普及しているものの、これらの対策は、他の産業部門と比べ相対的に費用が高いと指摘している。

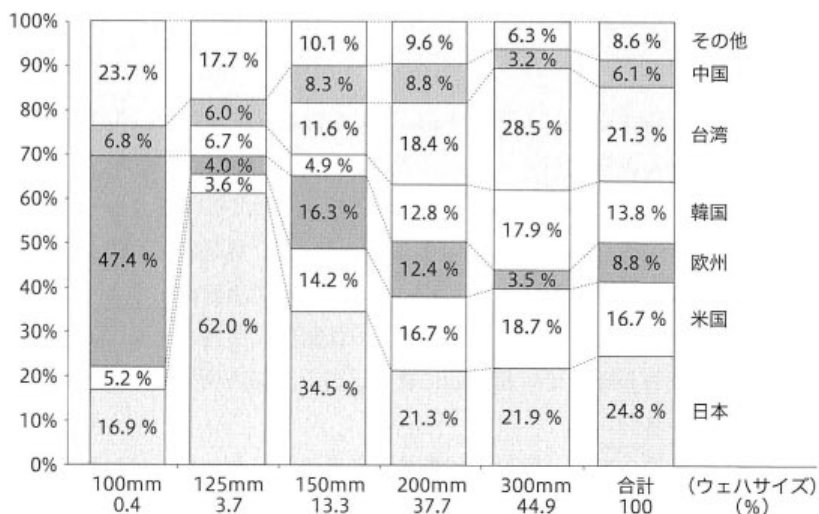
2) 日本の事情

日本は、米国や欧州と並んで半導体産業の立ち上がり時期が早く、1990 年頃には日本のメーカーが世界市場シェアの半分近くを占める黄金期を迎えた。当時は口径の小さなウェハ^{*12}の製造ラインが中心であった。その後、半導体産業が世界的に生産量を拡大していく過程で、米国は生産拠点を海外に移し、国内では開発を中心に行うようになり、欧州でも国内生産と同時に海外へも生産を移していった。他方で、日本は国内での生産量を増やしていった。

日本より後発の海外工場の多くが収益率の高い大口径生産ラインを導入していったのに対し、日本は設備償却が終了した古い世代の工場も継続して使ってきたことから、国内には 1990 年代に建設された旧世代の小口径ウェハ^{*13}工場が多く存在する (図 15)。後述するように、国内半導体産業における PFC 対策では、除害装置の設置が大きな効果を示してきた。しかし、国内に多い旧式工場は PFC が問題になっていなかった 1990 年代に建設され、もともと PFC 対策設備の設置スペース等が確保されていなかったために、除害装置の設置や排水処理により多くの投資が必要となる。このような事情のため、日本では除害装置の設置が難しく、相対的に対策費用が高くなっている。

図 15 ウェハサイズ別生産能力の地域構成 (2009/07 現在)

(生産能力シェア)



○日本国内には 1990 年代に建設された旧世代の小口径ウェハ工場が多く存在する。こうした旧式工場では、PFC 対策のための十分なスペースが確保されておらず、除害装置の設置や排水処理に多額の投資が必要なため、日本での対策費用は、相対的に高くなる傾向がある (本文参照)。

出典: The 2009 edition of the Global Wafer Capacity Analysis & Forecast, IC Insights

工場ごとの差異はあるが、日本での除害装置設置費用は、比較的設置が容易な場合で 5 ～ 10 万円 /t-CO₂ 程度といわれている^{*14}。しかも、国内各社は設置できる工場・施設には既に導入を進めているので、今なお未設置の施設に除害装置をつける場合には、少なく見積もっても従来の 5 ～ 10 倍の設置費用がかかるという。なお、現在のクレジットの相場を考えると、5 万円 /t-CO₂ は法外な価格との印象があるが、1990 年代当時にはそのような相場観が存在せず、またクレジットを買ってくるという発想もなかったため、一般的な公害対策の観点から投資できる範囲と認識されていたとのことであった。

こうした経済的な負担に加え、旧来の工場規模ではフッ素排水処理設備の設置に必要な広大なスペースの確保ができないことなどの物理的な制約

も大きく、^{*15}いかに費用をかけようとも物理的に設置が不可能な工場も存在する。

2.4. 小括

本節では半導体産業における PFC 対策の背景を整理した。半導体産業から排出される温室効果ガスのはほぼ半量が PFC であることから、PFC の排出抑制は CO₂ 対策と並ぶ重要な課題である。ただし、省エネ・高効率化のメリットが得られる CO₂ 対策とは異なり、PFC 対策は副次的なメリットのない純粋な支出となる。そして、欧米での検討事例が示すように、ガスの代替や除害装置の設置など、現時点で技術的に実施可能な半導体分野の対策は、他の分野と比べ相対的に費用が高く、経済性の観点からは実施困難なものが多い。

しかも、半導体産業は厳しい国際競争に直面しており、直接の利益にならない PFC 対策は企業体力の消耗につながりかねない。それゆえ、世界市場で競合する各国メーカーが歩調を合わせ、協調して取り組むような枠組みなしに、一国だけで PFC 対策を継続していくことは困難である。実際、半導体分野での対策は、WSC による世界的な排出削減への取り組みへと発展した。次節では、PFC 削減に向けた世界的な取り組みと、それがどのように発展していったのかをみていくことにする。

3. PFC 削減の民間部門を中心とした国際的な取り組み

本節では半導体分野での PFC 削減に向けた各国の動向を時間軸に沿って整理する。そこでは民間セクターが重要な役割を果たし、排出削減活動の国際的な展開が図られた。こうした動きは、先に米国が取り組み、その後の日米半導体分野における協調によって、日本において数値目標を伴う業界の自主宣言が行われ、さらには欧州・韓国を巻き込む国際的な取り組みへと発展していった。^{*16}本節ではこの全体の流れとともに、米国・欧州で

の政策動向を概観する。なお、日本における産業の取り組みと施策は次節でより詳細に述べる。

3.1. 米国における取り組み（1996 年～）

米国では、温暖化防止対策の一環として、1996 年に半導体産業による PFC 排出削減の自主的な取り組みである Climate Partnership が開始された。本取り組みは、EPA と米国業界団体 Semiconductor Industry Association (SIA) の間で交わした覚え書き（Memorandum of Understanding (MOU)）に基づき、参加企業に対して、①費用効果的な排出抑制対策の実施、② IPCC の定める方法での毎年の PFC 排出量の推計と第三者検証、および EPA への報告を求めるものである。同時に、EPA は技術情報の提供などを行い、企業の取り組みを後方支援する。Climate Partnership の下で、米国における半導体分野の PFC 排出量は、1995 年比で 35% 以上、排出量が最も多かった 1999 年比では 50% 以上減少した。^{*47}

なお、Climate Partnership は事業者の自主的な排出量の報告を求めていたが、EPA による義務的な GHG 報告制度の開始を受け、一定規模の半導体製造工場からの PFC 排出量についてはプロセスごとに実測値の報告が義務付けられることとなった。^{*48}これを踏まえて、EPA は 2009 年に計測ルールを提案したが、産業界の費用負担が重すぎるとする指摘を受け、2011 年の改定で利用可能な最良のモニタリング方法（best available monitoring method, BAMB）^{*49}を認めるようにルールを見直した。^{*50}

3.2. 日米の政府間協調と民間の取り組みの後押し（1996 ～ 1998 年）

米国 Climate Partnership のより重要な側面は取り組みの国際的な展開であり、それは日米間の協調から始まった。まず 1996 年に、日米政府の間で PFC 排出削減の方策を議論する会合（“Pathfinder Meeting” on PFC emissions）が発足した。この会議を踏まえて、日本では、当時の社団法人日本電子機械工業会（EIAJ、後の JEITA）が、傘下の国内半導体メー

カーの PFC 削減対策を取りまとめ、業界全体の PFC 削減の自主宣言を通産省に提出した。^{*51} UNFCCC (1999) によれば、産業として具体的な数値目標を定めた世界初の事例だった。

日米政府はその後、1998 年 4 月に PFC 排出抑制に関する初めての国際会議を米国モンレーで開催した。会議に先立ち、両国政府は民間セクターが進める PFC 排出削減の自主的行動を「効率的かつ技術的に柔軟な方法」として歓迎した上で、①本問題がグローバルな課題であり、主要半導体生産国の間で共通の目標を定めるべきであること、②共通の目標、および鍵を握る対策を盛り込んだ世界レベルでの自主的行動は、適切なフレームワークの下で検討されるべきであることを確認し、③日米を含む半導体生産国政府が、民間セクターの行動をサポートすべきであることについて合意した。^{*52}

3.3.WSC の設立 (1997 年) と自主宣言 (1999 年)

日米政府の動きと並行して、民間主導による PFC 排出削減の動きも始まった。この背景には、日米半導体摩擦とその対策としての日米半導体協定があった。^{*53} 当時、第二次協定が 1996 年 7 月末に期限切れを迎えることから、その後のレジーム構築のための協議が行われ、日本側は民間による協議と多国間での議論を求めていた。1996 年 6 月に、日本電子機械工業会 (EIAJ) は今後の民間協力の枠組みとして、日米欧による世界半導体会議 (WSC) の創設を提案した。大矢根 (2002) によれば、実際には当時の通産省がこれを誘導しており、この頃の民間協議には政府の関与も大きかった。半導体協定は WSC と主要国政府間協議 (GGF, Global Government Forum)^{*54} による新たなレジームの構築に発展し、WSC は欧州・韓国が加わって 1997 年 4 月に設立した。^{*55}

このように、民間主体の WSC は、通商交渉の延長で、従来の二国間交渉ではなく、WTO に即した新たな枠組みとして、多国間での政府会合と共に創設された。そして、それまでの政府間協定に代わり、各国・地域のメー

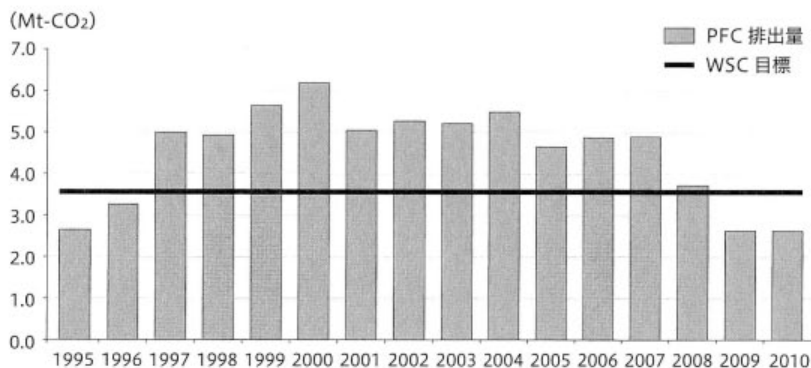
カーで構成する民間の業界団体が主体となってダンピング防止の枠組みを決め、加盟メーカーの自主参加を求めることで合意した。以来、WSC は毎年、国際会議を開催して、環境、市場分析、知財保護、社会貢献や関税・投資制限の撤廃などの政府への要望を話し合ってきた。WSC における話し合いの結果は、各国・地域の半導体産業を所管する政府関係者で構成される政府・当局会合（GAMS、Governments/Authorities Meeting on Semiconductors）への提言として提出し、各国・地域あるいは国際的な制度・政策面での（業界にとっての）改善に生かされている。WSC は、創立時メンバーである日本、米国、欧州、韓国の4カ国に、1999年に台湾、2006年に中国が加わり、現在では世界の半導体生産能力の9割以上をカバーする規模となっている。

PFC 対策は WSC によって環境対策の最重要課題に位置づけられ、1997年9月に環境安全タスクフォースが組織され各国が自主的な削減計画の作成に着手した。そして1999年に、「2010年までに PFC 排出量をそれぞれの基準レベル^{*56}より10%以上削減する」という共通の数値目標を掲げ、各国が団結して取り組むことを宣言した。

WSC の自主宣言は、日本、米国、欧州、韓国、台湾の5カ国・地域による取り組みとしてスタートした。WSC では、PFC の排出量を把握し、報告する制度を設けるとともに、年2回のワーキンググループ会議を開催し、各国の PFC 削減プログラムに関する情報の共有化を図っている^{*57}。また、毎年開催する国際半導体環境安全会議（International Semiconductor Environment, Safety and Health, ISESH）^{*58}では、PFC 削減に関する技術情報などを積極的に交換してきた。2011年5月に開催された会議でも、各国の政策動向や業界の PFC 排出状況の報告、PFC 対策を含む様々な環境技術に関する数多くの発表があった^{*59}。WSC は2011年の共同声明で、こうした活動の成果によって、2010年までの10年間に当初の目標を大幅に上回る、基準年比32%の削減を達成したことを報告した（図16）。

世界半導体市場統計（WSTS）によれば、2010年の半導体の世界出荷

図 16 WSC メンバーにおける PFC 排出量の推移



※日本、米国、欧州、韓国、台湾の排出量。ただし 1995、96 年は韓国を除く。

○WSC が公表した会員企業の PFC 排出量。目標水準を上回る 32%の削減を達成したと公表された。ただし、この図には当時の取り組みに参加していなかった中国の排出量が含まれず、世界全体での半導体部門の排出量は把握できない点には留意が必要である。

出典：WSC、2011

額は 2,983 億ドルであり、1995 年の 1,444 億ドルの 2 倍以上に拡大した。中でも日本・米国を除くアジア太平洋地域の成長が著しく、1995 年の 295 億ドルから 2010 年の 1,600 億ドルへと 5 倍以上に拡大した。この中には、中国など 2010 年までの WSC の自主宣言に参加しない地域が含まれ、世界の半導体産業全体からの PFC 排出量は把握できない点に留意が必要である。

3.4. 自主的取り組みの欧州への波及

EU では半導体部門に対して具体的な規制はないが、包括的な数値目標として 2020 年までに温室効果ガスの排出量を 1990 年比 20%削減すること、再生可能エネルギーのシェアを 20%にまで高めること、およびエネルギー消費を 20%削減することを謳った EU の 20-20-20 ターゲットが存在し、排出削減の取り組みは活発である。^{*60} 代替フロン等 3 ガスに関しては、主に固定式機器（冷凍冷蔵・空調機器など）とモバイル型空調機器（カー^{*61}