

2.E.1 半導体製造 (Semiconductor) (HFCs, PFCs, SF₆, NF₃)

1. 排出・吸収源の概要

1.1 排出・吸収源の対象、及び温室効果ガス排出メカニズム

半導体製造プロセスでは、フッ素化合物が (i) シリコン含有材料のプラズマエッチング、(ii) シリコンが析出する化学蒸着室の洗浄、の 2 つの工程で使用されており、それに伴い HFC-23、PFCs (CF₄ (PFC-14)、C₂F₆ (PFC-116)、C₃F₈ (PFC-218) 及び c-C₄F₈ (PFC-c318))、SF₆ 及び NF₃ が排出される。これらの排出の大部分は、エッチング工程中または洗浄工程中でのフッ素化合物の先駆物質の使用効率 (例えば消費) が低いことから発生する。この他、生産工程で使われるフッ素化合物の一部は CF₄ 及び C₂F₆ に変化する。

1.2 排出・吸収トレンド及びその要因

「2.E.1 半導体製造」からの HFC-23 排出量は、1992～1995 年にかけてガス購入量の増加により大きく増加したが、2008 年以降は減少傾向となっている。1999 年までの排出量の変化は、主に HFC-23 購入量の推移を反映している。一方、2000 年以降は、業界団体の自主行動計画における削減目標の下で除害装置の設置が進められており、2011 年～2013 年にかけての排出量の減少は除害装置設置率の上昇が要因である。2014～2015 年にかけても除害装置設置率は上昇したが、HFC-23 購入量が増加したことから、排出量は微増となっている。2017 年は、HFC-23 購入量が増加した。

「2.E.1 半導体製造」からの PFCs 排出量は、1990～2000 年にかけて増加傾向であったが、2001 年以降は減少傾向となっている。なお、「2.E.1 半導体製造」からの PFCs 排出量は、秘匿扱いとなっている後述の「2.E.3 PV (光電池) 製造」からの PFCs 排出量を含んでいる。1990～2000 年の排出量の増加は、CF₄ 及び C₂F₆ の購入量の増加が要因である。2001 年以降の排出量の減少は、①2000 年以降 HFC-23 と同様に、業界団体の自主行動計画における削減目標の下で除害装置設置率が上昇傾向であること、②業界団体の自主行動計画における削減目標の下で、C₂F₆ (GWP : 12,200) から C₃F₈ (GWP : 8,830) や c-C₄F₈ (GWP : 10,300) への移行が進められていること、③2004 年以降 PFCs ガス購入量自体が減少していること、が要因である。2017 年は、PFCs 購入量が増加した。

「2.E.1 半導体製造」からの SF₆ 排出量は、1990～2000 年にかけて増加傾向であったが、2005 年以降は減少傾向となっている。1990～2000 年の排出量の増加は、SF₆ 購入量の増加が要因である。2001 年以降の排出量の減少は、2004 年以降 SF₆ 購入量が減少していることに加えて、2000 年以降 HFC-23 と同様に、業界団体の自主行動計画における削減目標の下で除害装置設置率が上昇傾向であることが要因である。2017 年は、SF₆ 購入量が増加した。

「2.E.1 半導体製造」からの NF₃ 排出量は、1990～2007 年にかけて、増加と減少を繰り返しながらも増加傾向であったが、2008～2013 年にかけては減少傾向となっている。1990～2013 年の NF₃ 購入量は増加傾向であったが、2000 年以降 HFC-23 と同様に、業界団体の自主行動計画における削減目標の下で除害装置設置率が上昇傾向であり、NF₃ 購入量の増加に比べて排出量の増加は抑えられている。2014 年以降は NF₃ 購入量が大きく増加したため、排出量も増加している。NF₃ に

は毒性があるために我が国では各社安全上の理由で除害装置を設置している¹。2017 年は、ガス購入量が増加した。

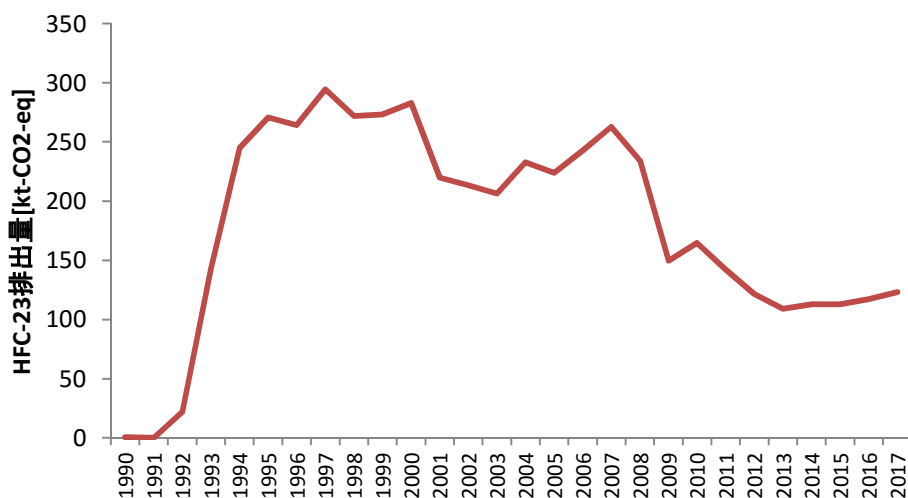


図 1 「2.E.1 半導体製造」からの HFC-23 排出量の推移

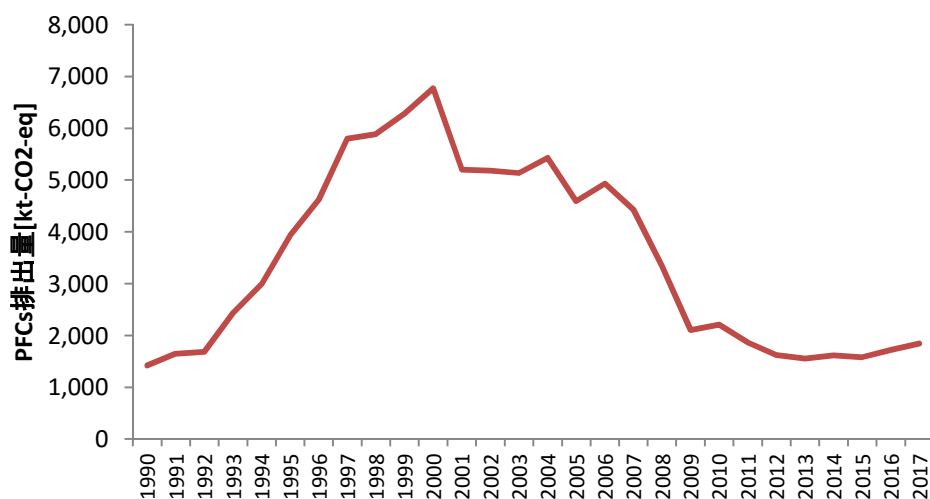


図 2 「2.E.1 半導体製造」からの PFCs 排出量の推移

¹ 経済産業省産業構造審議会製造産業分科会化学物質政策小委員会フロン類等対策ワーキンググループ第 7 回資料 1-3

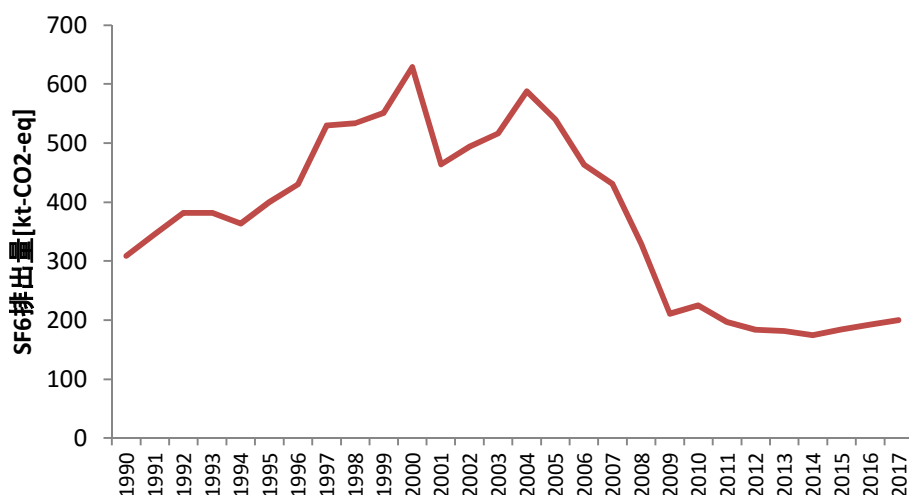


図 3 「2.E.1 半導体製造」からの SF₆ 排出量の推移

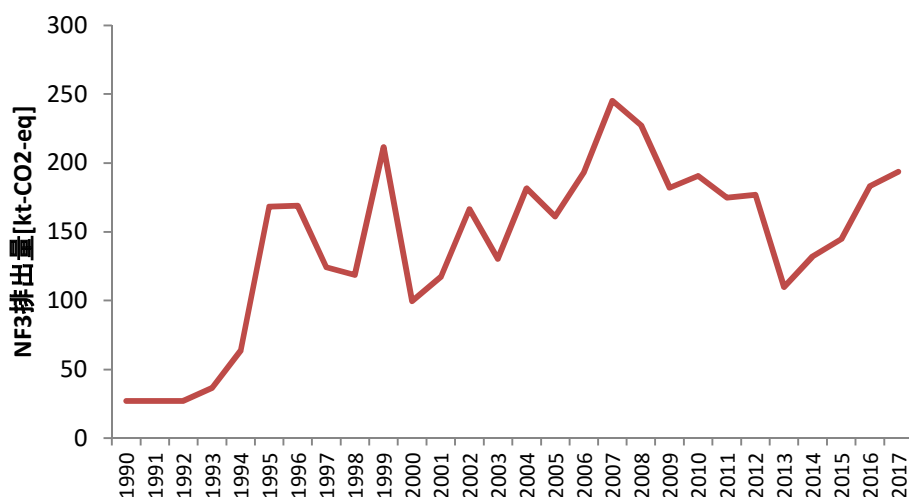


図 4 「2.E.1 半導体製造」からの NF₃ 排出量の推移

2. 排出・吸収量算定方法

2.1 排出・吸収量算定式

(1) 1990～1994 年

1990～1994 年の HFC-23、PFCs、SF₆ 及び NF₃ 排出量は、排出量の算定に必要なデータが不足しているため、1995 年の排出量を、それぞれ HFCs、PFCs 及び SF₆ 国内出荷量²、NF₃ 国内生産量³で外挿して算定している⁴。

² 平成 9 年第 1 回化学品審議会リスク管理部会温室効果化学物質分科会 通商産業省作成資料

³ 経済産業省提供値（1992 年以降）

※1990、1991 年の NF₃ 生産量については、1992 年と等しいとみなしている。

⁴ NF₃ については 1990～1994 年の国内出荷量のデータが得られていないため、国内生産量を用いている。

(2) 1995 年以降

「経済産業省産業構造審議会製造産業分科会化学物質政策小委員会フロン類等対策ワーキンググループ資料」で把握された HFC-23、PFCs、SF₆ 及び NF₃ 排出量を計上している⁵。

半導体製造に伴う排出量の算定方法は、2006 年 IPCC ガイドラインの Tier2a 法に則っている。

HFC-23、PFCs、SF₆ 及び NF₃ 排出量は、半導体製造に使用している各ガスの購入量、プロセス供給率、反応消費率、除害装置設置率及び除害効率を用いて算定している。

副生 CF₄ 及び C₂F₆ 排出量は、半導体製造に使用している各ガスの購入量、副生成物発生率、プロセス供給率、除害装置設置率及び除害効率を用いて算定している。

また、除害装置についても、その有無や除害方法に応じた除害効率の設定を行い算定している。

なお、PFCs の排出量については、ガス種別ではなく合計値を報告している。

排出量 (t) = HFC-23、PFCs、SF₆ 及び NF₃ 排出量 (t) + 副生 CF₄、C₂F₆ 排出量 (t)

HFC-23、PFCs、SF₆ 及び NF₃ 排出量 (t)

$$= \text{ガス購入量 (t)} \times \text{プロセス供給率 (\%)} \times (1 - \text{反応消費率 (\%)}) \\ \times (1 - \text{除害装置設置率 (\%)} \times \text{除害効率 (\%)})$$

副生 CF₄ 及び C₂F₆ 等排出量 (t)

$$= \text{ガス購入量 (t)} \times \text{副生成物発生率 (\%)} \times \text{プロセス供給率 (\%)} \\ \times (1 - \text{除害装置設置率 (\%)} \times \text{除害効率 (\%)})$$

2.2 排出係数

(1) 1990～1994 年

排出係数は設定していない。

(2) 1995 年以降

反応消費率、除害効率及び副生成物発生率は、2006 年 IPCC ガイドラインの Tier2a 法のデフォルト値を全年共通で使用している。また、プロセス供給率については、年ごとに「経済産業省産業構造審議会製造産業分科会化学物質政策小委員会フロン類等対策ワーキンググループ資料」に示された値を使用している。なお、除害装置設置率については、秘匿情報のため掲載していない。

⁵ HFCs、PFCs、SF₆ 排出量については、2009 年提出インベントリにおいて変更した算定方法に基づき、新たに明らかとなった排出量を加えている。

表 1 反応消費率、除害効率、副生成物発生率

パラメータ	CF ₄ (PFC-14)	C ₂ F ₆ (PFC-116)	HFC-23	C ₃ F ₈ (PFC-218)	c-C ₄ F ₈ (PFC-c318)	SF ₆	NF ₃	NF ₃ Remote ⁶
反応消費率(%)	10	40	60	60	90	80	80	98
除害効率(%)	90	90	90	90	90	90	95	95
副生 CF ₄ 発生率(%)	—	20	7	10	10	—	9	2
副生 CF ₄ 除害効率(%)	—	90	90	90	90	—	90	90
副生 C ₂ F ₆ 発生率(%)	—	—	—	—	10	—	—	—
副生 C ₂ F ₆ 除害効率(%)	—	—	—	—	90	—	—	—

(出典) IPCC, “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, Volume 3, Chapter 6, p.6.17, table 6.3

表 2 プロセス供給率の推移

		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
プロセス供給率	%						90%	90%	90%	90%	90%
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
プロセス供給率	%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017		
プロセス供給率	%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%		

(出典) 経済産業省産業構造審議会製造産業分科会化学物質政策小委員会フロン類等対策ワーキンググループ資料

2.3 活動量

(1) 1990～1994 年

活動量は設定していない。

(2) 1995 年以降

HFC-23、PFCs、SF₆、NF₃ 購入量は、一般社団法人電子情報技術産業協会から収集した基礎データに基づいて把握された値を使用している。

なお、NF₃ 購入量の NF₃ (Remote) と NF₃ の内訳比率は、秘匿情報のため掲載していない（内訳比率のデータが断続的であるため、データがある年にはそれぞれを分けて計算し、データがない年は、安全率を見込んですべて NF₃ としている⁷⁾。

プロセス供給率 (90%) の残存分 10% の取り扱いについては、容器に 90% を再充填して出荷される場合は本排出源で排出量が計上される。また、残存分の 10% を破壊処理して容器を洗浄する場合や、そのまま残存分が大気中に放出される場合は、ガスメーカーにおける排出量として「2.B.9.-

⁶ NF₃ は、半導体等の製造に用いられる CVD (化学蒸着) 装置内に堆積した不純物を除去するクリーニングガスとして用いられる。クリーニング方法の一つとして、NF₃ を含有するクリーニングガスの存在下でプラズマ放電させることにより、活性な F ラジカルを発生させ、堆積物を揮発性の高い物質へと変換し、反応チャンバー外へと排出させるプラズマクリーニング法がある。プラズマクリーニングにおけるプラズマ発生方法は 2 種類に大別される。一方は平行平板型のプラズマ発生装置など、反応チャンバー内でプラズマ放電を発生させる方式のものであり、もう一方は反応チャンバー外でプラズマ放電させたガスを反応チャンバー内に導入させる方式のもので、リモートプラズマクリーニング法と呼ばれている。後者の NF₃ ガスを「NF₃ Remote」と呼ぶ。両者は、装置の仕様等に応じて適宜最適な方式が選択されており、特にリモートプラズマクリーニング法は、チャンバー内でプラズマ放電を発生させることが不可能な場合や、あるいは平行平板型のプラズマ発生装置において、クリーニングガス成分によるプラズマ放電時のイオン衝撃により、電極基板へのダメージが懸念される場合に用いられている。

⁷ NF₃ (Remote) よりも NF₃ の方が反応消費率が低く、副生 CF₄ 発生率が高いことから (表 1 参照)、NF₃ 及び副生 CF₄ 排出量がより大きくなるため。

製造時の漏出」で計上されている。

表 3 活動量（HFC-23、PFCs、SF₆及びNF₃購入量）の推移

		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
HFC-23 購入量	t						47.8	48.3	53.7	49.3	49.7
PFC-14購入量	t						313.0	299.6	280.7	279.0	282.6
PFC-116購入量	t						209.5	316.4	463.9	467.6	514.5
PFC-218購入量	t						0.0	0.0	0.0	0.0	3.5
PFC-c318購入量	t						0.6	3.4	4.6	5.9	9.3
SF ₆ 購入量	t						90.8	96.3	115.0	114.8	116.6
NF ₃ 購入量	t						54.4	54.6	40.1	38.3	68.3
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
HFC-23 購入量	t	49.4	40.3	42.6	37.9	41.9	42.1	48.6	62.1	73.7	53.8
PFC-14購入量	t	299.9	215.1	224.2	228.2	235.4	231.5	232.9	277.5	276.9	208.9
PFC-116購入量	t	561.2	449.2	447.4	449.3	434.5	393.2	355.6	321.0	284.9	171.5
PFC-218購入量	t	9.9	28.7	80.6	126.5	159.2	181.8	189.2	195.1	181.0	129.5
PFC-c318購入量	t	38.6	14.9	12.6	15.0	21.8	24.8	28.3	33.4	40.2	33.3
SF ₆ 購入量	t	131.9	93.8	95.0	94.8	104.6	96.8	85.8	82.9	79.1	60.2
NF ₃ 購入量	t	106.3	174.7	204.7	251.5	327.7	406.7	600.1	730.7	821.8	724.8
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017		
HFC-23 購入量	t	67.1	68.4	66.7	66.7	77.2	86.2	83.2	84.3		
PFC-14購入量	t	265.3	248.3	222.4	218.1	253.6	285.5	317.1	365.1		
PFC-116購入量	t	194.3	159.9	139.4	117.8	105.5	96.4	102.3	126.1		
PFC-218購入量	t	167.0	137.0	115.5	106.1	117.2	110.9	107.6	130.1		
PFC-c318購入量	t	35.8	36.8	39.7	42.2	52.6	63.3	70.4	106.6		
SF ₆ 購入量	t	76.7	65.2	63.7	57.6	64.9	68.0	73.4	86.5		
NF ₃ 購入量	t	860.7	834.5	880.5	905.4	1,055.3	1,232.1	1,310.1	1,597.4		

（出典）経済産業省産業構造審議会製造産業分科会化学物質政策小委員会フロン類等対策ワーキンググループ資料

3. 算定方法の時系列変更・改善経緯

（1）初期割当量報告書における算定方法

1) 排出・吸収量算定式

1995 年以降の HFC-23、PFCs 及び SF₆ 排出量は、半導体製造に使用している各ガスの購入量、プロセス供給率、反応消費率、除害装置設置率及び除害効率を用いて算定していた。

1995 年以降の副生 CF₄ 排出量は、半導体製造に使用している各ガスの購入量、副生成物発生率、プロセス供給率、除害装置設置率及び除害効率を用いて算定していた。

なお、1990～1994 年の排出量は未推計（NE）として報告していた。また、NF₃ 及び副生 C₂F₆ 排出量は算定していなかった。

排出量（t）＝HFC-23、PFCs 及び SF₆ 排出量（t）＋ 副生 CF₄ 排出量（t）

HFC-23、PFCs 及び SF₆ 排出量（t）

＝ ガス購入量（t）×プロセス供給率（％）×（1－反応消費率（％））
×（1－除害装置設置率（％）×除害効率（％））

副生 CF₄ 排出量（t）＝ ガス購入量（t）×副生成物発生率（％）×プロセス供給率（％）

×（1－除害装置設置率（％）×除害効率（％））

2) 排出係数

反応消費率は 1996 年改訂 IPCC ガイドラインのデフォルト値（表 4 の変更前の値参照）を全年共通で使用していた。また、除害効率、副生成物発生率、プロセス供給率は、「産業構造審議会化学・バイオ部会地球温暖化防止小委員会（現：経済産業省産業構造審議会製造産業分科会化学物質政策小委員会フロン類等対策ワーキンググループ）資料」で把握された値（表 5 の変更前の値参照）を使用していた。なお、除害装置設置率については、秘匿情報のため掲載していない。

3) 活動量

1995 年以降の HFC-23、PFCs 及び SF₆ 購入量は、「産業構造審議会化学・バイオ部会地球温暖化防止小委員会資料」で把握された値を使用していた。

(2) 2009 年提出インベントリにおける算定方法

1) 排出・吸収量算定式

HFCs、PFCs 及び SF₆ 排出量について、温室効果ガス算定・報告・公表制度により報告された排出源のうち、新たに明らかとなった排出事業者分を対象に加え、排出量の算定を行うように変更した。

2) 排出係数

初期割当量報告書における排出係数と同様。

3) 活動量

初期割当量報告書における活動量と同様。

(3) 2014 年提出インベントリにおける算定方法

1) 排出・吸収量算定式

1990～1994 年の排出量も算定を行い、報告することとした。1990～1994 年の HFC-23、PFCs 及び SF₆ 排出量については、排出量の算定に必要なデータが不足しているため、1995 年の排出量を、それぞれ HFCs、PFCs 及び SF₆ 国内出荷量で外挿して算定していた。

1995 年以降については、2009 年提出インベントリと同様。

2) 排出係数

1990～1994 年については、排出係数は設定していない。

1995 年以降については、初期割当量報告書における排出係数と同様。

3) 活動量

1990～1994 年については、活動量は設定していない。

1995 年以降については、初期割当量報告書における活動量と同様。

(4) 2015 年提出インベントリにおける算定方法

1) 排出・吸収量算定式

改訂 UNFCCC インベントリ報告ガイドラインで新たに対象となった NF₃ 排出量を計上することとした。また、2006 年 IPCC ガイドラインの適用に伴い算定式の見直しを行い、副生排出量として C₂F₆ の排出を考慮することとした（現行の算定方法と同様）。

1990～1994 年の HFC-23、PFCs、SF₆ 及び NF₃ 排出量については、排出量の算定に必要なデータが不足しているため、1995 年の排出量を、それぞれ HFCs、PFCs 及び SF₆ 国内出荷量、NF₃ 国内生産量で外挿して算定していた。

1995 年以降については、半導体製造に伴う排出量は、2006 年 IPCC ガイドラインの Tier2a 法に則って算定していた。

HFC-23、PFCs、SF₆ 及び NF₃ 排出量は、半導体製造に使用している各ガスの購入量、プロセス供給率、反応消費率、除害装置設置率及び除害効率を用いて算定していた。

副生 CF₄ 及び C₂F₆ 排出量は、半導体製造に使用している各ガスの購入量、副生成物発生率、プロセス供給率、除害装置設置率及び除害効率を用いて算定していた。

排出量 (t) = HFC-23、PFCs、SF₆ 及び NF₃ 排出量 (t) + 副生 CF₄、C₂F₆ 排出量 (t)

HFC-23、PFCs、SF₆ 及び NF₃ 排出量 (t)

$$= \text{ガス購入量 (t)} \times \text{プロセス供給率 (\%)} \times (1 - \text{反応消費率 (\%)}) \\ \times (1 - \text{除害装置設置率 (\%)} \times \text{除害効率 (\%)})$$

副生 CF₄ 及び C₂F₆ 等排出量 (t)

$$= \text{ガス購入量 (t)} \times \text{副生成物発生率 (\%)} \times \text{プロセス供給率 (\%)} \\ \times (1 - \text{除害装置設置率 (\%)} \times \text{除害効率 (\%)})$$

2) 排出係数

2006 年 IPCC ガイドラインの適用に伴い、適用する反応消費率のデフォルト値を見直した（現行の排出係数と同様）。

表 4 変更前後の反応消費率

			CF ₄ (PFC-14)	C ₂ F ₆ (PFC-116)	CHF ₃ (HFC-23)	C ₃ F ₈ (PFC-218)	c-C ₄ F ₈ (PFC-c318)	SF ₆	NF ₃	NF ₃ Remote
反応 消費率	%	変更前	20	30	70	60	70	50	—	—
		変更後	10	40	60	60	90	80	80	98

（出典）変更前：IPCC, “Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories”, 2000, Chapter 3, p.3.74, table 3.15

変更後：IPCC, “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, Volume 3, Chapter 6, p.6.17, table 6.3

表 5 変更前後の除害効率、副生成物発生率及びプロセス供給率

			CF ₄ (PFC-14)	C ₂ F ₆ (PFC-116)	CHF ₃ (HFC-23)	C ₃ F ₈ (PFC-218)	c-C ₄ F ₈ (PFC-c318)	SF ₆	NF ₃	NF ₃ Remote
除害効率	%	変更前	90	90	90	90	90	90	—	—
		変更後	90	90	90	90	90	90	95	95
副生 CF ₄ 発生率	%	変更前	—	10	—	20	—	—	—	—
		変更後	—	20	7	10	10	—	9	2
副生 CF ₄ 除害効率	%	変更前	—	90	—	90	—	—	—	—
		変更後	—	90	90	90	90	—	90	90
副生 C ₂ F ₆ 発生率	%	変更前	—	—	—	—	—	—	—	—
		変更後	—	—	—	—	10	—	—	—
副生 C ₂ F ₆ 除害効率	%	変更前	—	—	—	—	—	—	—	—
		変更後	—	—	—	—	90	—	—	—
プロセス 供給率	%	変更前	90%							
		変更後	90%							

(出典) 変更前、変更後（プロセス供給率）：経済産業省産業構造審議会製造産業分科会化学物質政策小委員会フロン類等対策ワーキンググループ（旧：産業構造審議会化学・バイオ部会地球温暖化防止小委員会）資料
変更後（除害効率及び副生成物発生率）：IPCC, “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, Volume 3, Chapter 6, p.6.17, table 6.3

3) 活動量

1995 年以降の HFC-23、PFCs、SF₆ 及び NF₃ 購入量は、「経済産業省産業構造審議会製造産業分科会化学物質政策小委員会フロン類等対策ワーキンググループ資料」で把握された値を使用することとした（現行の活動量と同様）。

（５）2017 年提出インベントリにおける算定方法

1) 報告方法（注釈記号）の変更

「半導体製造に伴う HFCs、PFCs、SF₆、NF₃ の排出（2.E.1）」では、HFCs 及び PFCs の合計排出量、SF₆、NF₃ の排出量を計上している。HFCs 及び PFCs については、ガス種別の排出量は計上せず、HFC-23、PFC-14（CF₄）、PFC-116（C₂F₆）、C₃F₈、C₄F₁₀、c-C₄F₈、C₅F₁₂、C₆F₁₄ の排出については「IE：他の箇所で計上」、その他の HFCs 及び PFCs は「NO：ガスの排出に結びつく活動が存在しない」としていたが、カテゴリー全体が共通の活動となるカテゴリーであり、「NO」としている箇所に矛盾が生じているため、適切な注釈記号について検討する必要があった。

同排出源の報告方法について検討した結果、半導体製造はカテゴリー全体が共通の活動と考えられ、かつ、2006 年 IPCC ガイドラインには「半導体製造では CF₄、C₂F₆、C₃F₈ が副生物として生成される。」との記載があり、その他の HFCs、PFCs も副生ガスの発生を否定できないカテゴリーであるが、2006 年 IPCC ガイドラインには PFC-14（CF₄）、PFC-116（C₂F₆）、C₃F₈ 以外のガス種の副生ガスとしての排出に関する算定方法の記載がなく、かつ、現時点までに国内で HFC-23、CF₄、C₂F₆、C₃F₈、c-C₄F₈、SF₆ 及び NF₃ 以外のガス種が排出されているとの報告がないことから、「IE」及び「NO」としていたその他の HFCs 及び PFCs については、「NA：活動自体は存在するが、特定の温室効果ガスの排出が起こらない」として報告することとした。