2.C.3 アルミニウム製造（Aluminum Production）（PFCs）

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

アルミニウムの精錬では、氷晶石等のフッ化物を溶かした電解浴を使用するため、陽極効果[1]が生じた際に、溶融した氷晶石と陽極の炭素が反応することで PFCs（PFC-14（CF_4）、PFC-116（C_2F_6））が生成、排出される。

1.2 排出・吸収トレンド及びその要因

「2.C.3. アルミニウム製造」からの PFCs 排出量は、1990～1992 年は、アルミニウム生産量が減少したことで排出量も減少し、1993～1994 年は、生産量が横ばいであったため排出量も横ばいであった。1994～1995 年は PFC-14 発生係数（kg-PFC-14/t-Al）が上昇したことで排出量が増加した。1995～2001 年は、生産量の減少に加えて、電流効率の向上及び陽極効果の頻度削減と時間の短縮により[2]、PFC-14 発生係数（kg-PFC-14/t-Al）が低下したことで排出量が減少した。2001～2008 年は生産量が横ばいであったため排出量も横ばいであり、2009 年は生産量減少により排出量も減少、2010～2012 年は生産量が横ばいであったため排出量も横ばいであり、2013 年以降は生産量が減少したことで排出量も減少した。なお、我が国でアルミニウム製錬を実施しているのは、1987 年以降 1 社のみという状況であったが、その 1 社も 2015 年 3 月末時点で操業を終了[3]しており、現在我が国ではアルミニウム製錬は行われておらず、2015 年以降排出量は 0 となっている。

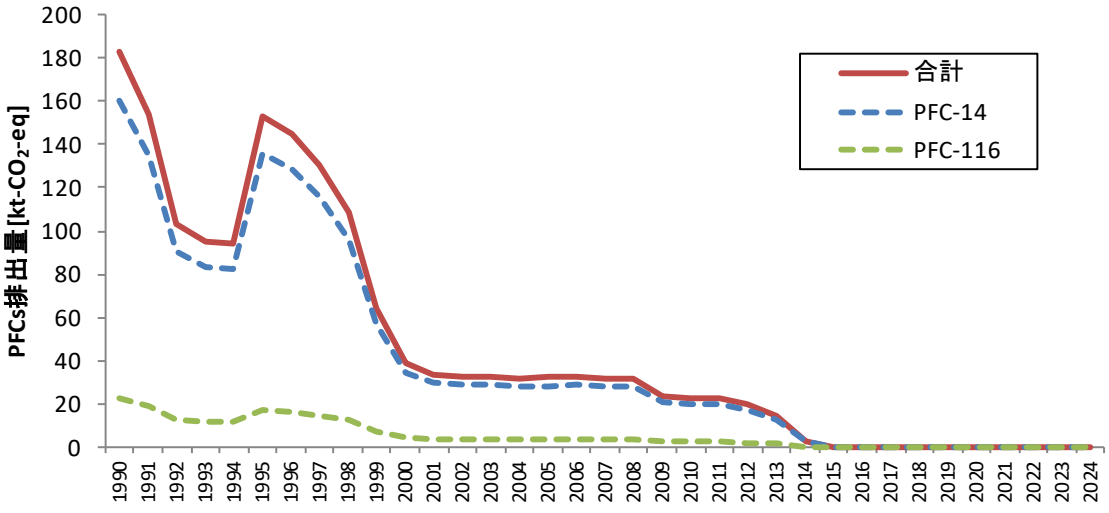


図 1　「2.C.3. アルミニウム製造」からの PFCs 排出量の推移

1 フッ化物系の溶融塩電解で炭素陽極に生じる異常現象で、電流が急に減少し電圧が異常に上昇する。

2 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 1 回資料 3－3

3 日本軽金属株式会社報道発表資料「アルミニウム電解事業の終了について（平成 26 年 3 月 14 日）」<http://www.nikkeikin.co.jp/news/common/pdf/p2014031401.pdf>

2．排出・吸収量算定方法

2.1 排出・吸収量算定式

アルミニウムの一次精錬による生産量に、2006 年 IPCC ガイドライン Tier 2 法に規定された算定式に基づいて算出された我が国独自の PFC-14 発生係数を乗じて PFC-14 排出量を算定し、その PFC-14 排出量に PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率を乗じることで PFC-116 排出量を算定している。

PFC-14 排出量［kg-PFC-14］＝ アルミニウム生産量［t-Al］× PFC-14 発生係数［kg-PFC-14/t-Al］

※PFC-14 発生係数［kg-PFC-14/t-Al］＝ PFC-14 スロープ係数［(kg-PFC-14/t-Al)/(分/セル・日)）
× セル・日当たりの陽極効果時間［分/セル・日］

PFC-116 排出量［kg-PFC-116］＝ PFC-14 排出量［kg-PFC-14］
× PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率［kg-PFC-116/kg-PFC-14］

※1995 年以降の算定のみ使用する算定式

2.2 排出係数

（1）1990～1994 年

1990～1994 年の PFC-14 発生係数については、設定に必要なデータが不足しているため、1995 年の PFC-14 発生係数（1.181 kg-PFC-14/t-Al）を使用している。なお、PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率については、2006 年 IPCC ガイドラインに示されたテクノロジーHSS[4]に対する値（0.077）を全年共通で使用している。

（2）1995 年以降

PFC-14 スロープ係数及び PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率については、2019 年改良 IPCC ガイドラインに示されたテクノロジーHSS に対する値（PFC-14 スロープ係数 ＝ 0.165、PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率 ＝ 0.077）を全年共通で使用している。

---

4 アルミニウムの電解炉は、その陽極形式でプリベイク（prebake）式とゼーダーベルグ（söderberg）式の 2 つの方式に大別される。ゼーダーベルグ式陽極は、良質のコークスをバインダーであるピッチで捏合したペーストを電解炉の陽極ケーシングへ定期的に投入して、電解炉の熱でペーストを焼成しカーボン電極として使用する型式であり、電気の導体が陽極の横にあるか上にあるかによって、それぞれ HSS 及び VSS と呼ばれる。プリベイク式陽極は、ペーストをあらかじめ成型して、焼成炉で 1000～1200℃の温度で焼成し、生成したカーボンブロックを電極として使用する型式である（参考「井内 俊明，新井 一正（1975）：省エネルギー時代のアルミニウム電解技術，軽金属，**25**(7), 267-277」）。

表 1　PFC-14 スロープ係数及び PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率

テクノロジー	PFC-14 スロープ係数［(kg_{PFC}/t_{Al})/(AE-Mins/cell-day)］	PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率［-］
SWPB	0.233	0.280
VSS	0.058	0.086
HSS	0.165	0.077

（出典）IPCC, “2019 Refinement to the 2016 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, Vol. 3, Chapter 4, p.4.55, Table 4.16

※Side Worked Prebake (SWPB), Vertical Stud Søderberg (VSS), Horizontal Stud Søderberg (HSS).

表 2　排出係数（PFC-14 発生係数）の推移

		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
PFC-14 発生係数	kg-PFC-14/t-Al						1.181	1.125	1.045	0.964	0.884
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
PFC-14 発生係数	kg-PFC-14/t-Al	0.804	0.678	0.685	0.678	0.668	0.663	0.654	0.647	0.647	0.651
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
PFC-14 発生係数	kg-PFC-14/t-Al	0.647	0.646	0.644	0.643	0.643	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		2020	2021	2022	2023	2024					
PFC-14 発生係数	kg-PFC-14/t-Al	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000					

（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

※PFC-14 発生係数＝ PFC-14 スロープ係数（0.165）× セル・日当たりの陽極効果時間

2.3 活動量

アルミニウム生産量については、1990～1997 年は「資源統計年報（経済産業省）」、1998 年以降は「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」に示された値を使用している。

表 3　活動量（アルミニウム生産量）の推移

		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
アルミニウム生産量	t	34,100	28,618	19,182	17,668	17,627	17,338	17,198	16,709	15,045	9,676
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
アルミニウム生産量	t	6,500	6,675	6,300	6,466	6,432	6,490	6,600	6,610	6,600	4,930
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
アルミニウム生産量	t	4,670	4,670	4,075	2,950	588	0	0	0	0	0
		2020	2021	2022	2023	2024					
アルミニウム生産量	t	0	0	0	0	0					

（出典）1990～1997 年：資源統計年報（経済産業省）

1998 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

3．算定方法の時系列変更・改善経緯

表 4　初期割当量報告書（2006 年提出）以降の算定方法等の改訂経緯概要

	2014 年提出	2015 年提出	2017 年提出
排出・吸収量算定式	1990～1994 年の排出量を算定、報告。	2006 年 IPCC ガイドラインの適用に伴い算定式を見直し。	「アルミニウム製造に伴う PFCs、SF_6 の排出」の注釈記号の見直し（NE 及び NO→NA）。
排出係数	－	－	－
活動量	－	－	－

	2021 年提出	2022 年提出
排出・吸収量算定式	－	2019 年改良 IPCC ガイドラインで追加された排出源の検討。
排出係数	2019 年改良 IPCC ガイドラインを基に排出係数を変更。	－
活動量	－	－

（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

1996 年改訂 IPCC ガイドラインで規定された算定式に基づいて、1995 年以降の PFCs 排出量を算定していた（なお、1990～1994 年の排出量は「NE：未推計」として報告していた。）。具体的には、アルミニウム生産量に PFC-14 発生係数を乗じることで PFC-14 排出量を算定し、PFC-14 排出量に PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率を乗じることで PFC-116 排出量を算定していた。

PFC-14 排出量［kg-PFC-14］＝ アルミニウム生産量［t-Al］
× PFC-14 発生係数［kg-PFC-14/t-Al］

PFC-116 排出量［kg-PFC-116］＝ PFC-14 排出量［kg-PFC-14］
× PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率［kg-PFC-116/kg-PFC-14］

2）排出係数

PFC-14 発生係数は、年ごとに「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」で把握された値を使用していた（表 5 の変更前の値参照）。PFC-116 及び PFC-14 排出量の重量比率は、1996 年改訂 IPCC ガイドラインのデフォルト値（0.1）を全年共通で使用していた（表 6 の変更前の値参照）。

3）活動量

1995 年以降のアルミニウム生産量は、「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（現行の活動量と同様。）。

（2）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

初期割当量報告書における算定式と同様。ただし、1990～1994 年の排出量も算定を行い、報告

することとした。

2）排出係数

1990～1994 年については、設定に必要なデータが不足しているため、1995 年の PFC-14 発生係数（0.542）を使用していた。また、PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率については、1995 年以降と同様に 1996 年改訂 IPCC ガイドラインのデフォルト値（0.1）を使用していた。

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

1990～1997 年のアルミニウム生産量については、「資源統計年報」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。）。

1998 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（現行の活動量と同様。）。

（3）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

2006 年 IPCC ガイドラインの適用に伴い算定式の見直しを行った。具体的には、アルミニウム生産量に 2006 年 IPCC ガイドライン Tier 2 法に規定された算定式に基づいて算出された我が国独自の PFC-14 発生係数を乗じて PFC-14 排出量を算定し、PFC-14 排出量に PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率を乗じることで PFC-116 排出量を算定することとした（現行の算定方法と同様。）。

PFC-14 排出量［kg-PFC-14］＝ アルミニウム生産量［t-Al］
× PFC-14 発生係数［kg-PFC-14/t-Al］

※PFC-14 発生係数［kg-PFC-14/t-Al］＝ PFC-14 スロープ係数［(kg-PFC-14/t-Al)/(分/セル・日)］
× セル・日当たりの陽極効果時間［分/セル・日］

PFC-116 排出量［kg-PFC-116］＝ PFC-14 排出量［kg-PFC-14］
× PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率［kg-PFC-116/kg-PFC-14］

※1995 年以降の算定のみ使用する算定式

2）排出係数

1990～1994 年の PFC-14 発生係数については、設定に必要なデータが不足していたため、1995 年の PFC-14 発生係数（0.709 kg-PFC-14/t-Al）を使用することとした。なお、PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率については、1995 年以降と同様に 2006 年 IPCC ガイドラインのデフォルト値（0.085）とした（現行の排出係数と同様。）。

1995 年以降の PFC-14 スロープ係数及び PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率については、2006 年 IPCC ガイドラインのテクノロジーHSS に対するパラメータ（PFC-14 スロープ係数 ＝ 0.099、PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率 ＝ 0.085）を全年共通で使用した。

表 5　変更前後の PFC-14 発生係数

		1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
PFC-14 発生係数（変更前）	kg-PFC-14/t-Al	0.542	0.517	0.480	0.443	0.406	0.369	0.317	0.317	0.315	0.310
PFC-14 発生係数（変更後）	kg-PFC-14/t-Al	0.709	0.675	0.627	0.579	0.530	0.482	0.407	0.411	0.407	0.401

		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
PFC-14 発生係数（変更前）	kg-PFC-14/t-Al	0.307	0.303	0.300	0.300	0.301	0.300	0.299	0.298
PFC-14 発生係数（変更後）	kg-PFC-14/t-Al	0.398	0.392	0.388	0.388	0.390	0.388	0.387	0.386

（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（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

※PFC-14 発生係数（変更後）＝ PFC-14 スロープ係数（0.099）× セル・日当たりの陽極効果時間

表 6　変更前後の PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率

	PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率［-］
変更前	0.1
変更後（HSS）	0.085

（出典）変更前：IPCC, “Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, Vol. 3 (Reference Manual), Chapter 2, p.2.37
変更後：IPCC, “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, Vol. 3, Chapter 4, p.4.54, Table 4.16

3）活動量

2014 年提出インベントリと同様（現行の活動量と同様。）。

（4）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

「2.C.3. アルミニウム製造」では、PFC-14（CF_4）及び PFC-116（C_2F_6）の排出量を計上し、C_3F_8、C_4F_{10}、c-C_4F_8、C_5F_{12}、C_6F_{14} の排出量については「NE：未推計」、$C_{10}F_{18}$、c-C_3F_6、SF_6 の排出量については「NO：ガスの排出に結びつく活動が存在しない」と報告していたため、これらの排出源の算定方法あるいは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、アルミニウム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「アルミニウム製造では PFC-14（CF_4）及び PFC-116（C_2F_6）が副生物として生成される。マグネシウムとの合金生成時に SF_6 が極めて少量排出される場合がある。」との記載があり、その他の PFCs 及び SF_6 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（CF_4）及び PFC-116（C_2F_6）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 PFC-14（CF_4）及び PFC-116（C_2F_6）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、「NE」及び「NO」としていたその他の PFCs 及び SF_6 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。

（5）2021 年提出インベントリにおける算定方法

1）排出係数

1995 年以降の PFC-14 スロープ係数及び PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率については、2019 年改良 IPCC ガイドラインにて、テクノロジーHSS に対するパラメータ（PFC-14 スロープ係数 ＝ 0.165、PFC-116 と PFC-14 排出量の重量比率 ＝ 0.077）が更新されたため、更新されたパラメータを全年共通で使用した。

（6）2022 年提出インベントリにおける算定方法

1）新規排出源の検討

アルミニウム製造の排出については、これまで一次アルミニウム精錬における高電圧の陽極効果により生成・排出される PFCs 排出量のみを算定対象としていたが、2019 年改良 IPCC ガイドラインにて、新たに低電圧の陽極効果により生成・排出される PFCs 排出量も算定対象に追加されたため、同排出源の排出量の計上を検討した。国内の過去からの製造実績を確認したところ、アルミナ精製プロセスは高電圧のみであり、低電圧によるアルミニウム精錬の実態はないことが確認できたことから、「NO：排出活動は行われていない」と報告することとした。