

## 2.G.2.- 加速器（Accelerators）（SF<sub>6</sub>）

### 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

大学・研究施設及び産業用・医療用（がん治療）の粒子加速器<sup>1</sup>の絶縁用の充填ガスとして SF<sub>6</sub> が使用されており、機器の保守時に、充填ガスである SF<sub>6</sub> が貯蔵タンクに移される際に SF<sub>6</sub> が排出される。

#### 1.2 排出・吸収トレンド及びその要因

「2.G.2.- 加速器」からの SF<sub>6</sub> 排出量は増加と減少を繰り返しながらも、全体としては増加傾向である。これは主に、SF<sub>6</sub> 充填量が多いため排出寄与割合が高い産業用粒子加速器の稼働台数の推移を反映している。ただし、1998～2001 年にかけての排出量減少は、主に大学・研究施設における粒子加速器の稼働台数の減少によるものである。

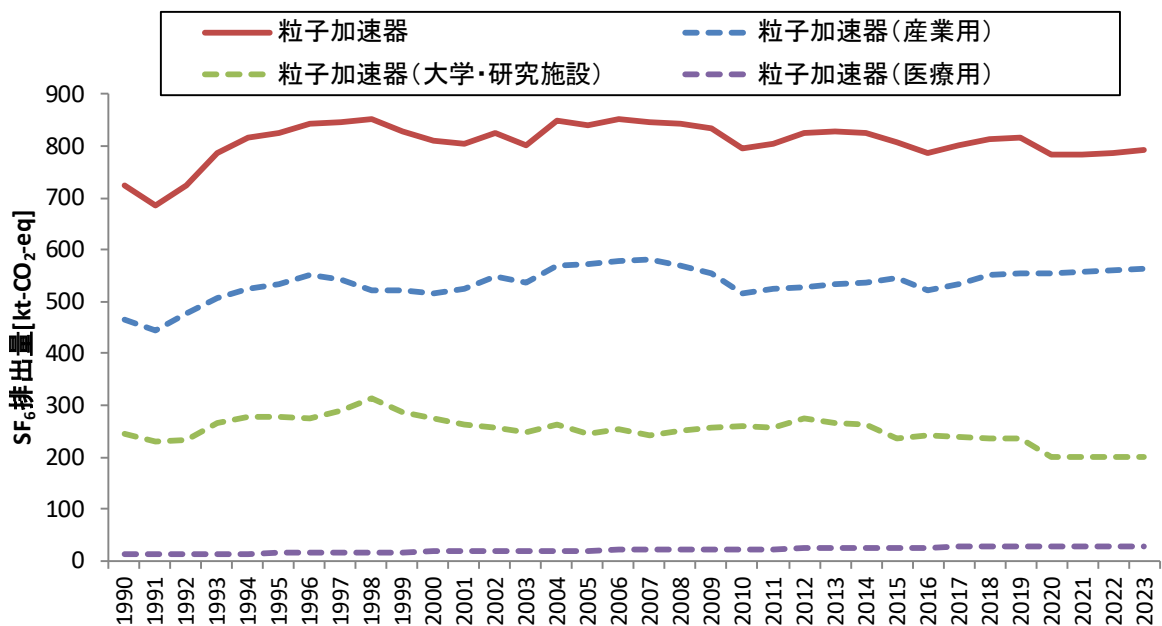


図 1 「2.G.2.- 加速器」からの SF<sub>6</sub> 排出量の推移

### 2. 排出・吸収量算定方法

#### 2.1 排出・吸収量算定式

粒子加速器からの SF<sub>6</sub> 排出量については、2006 年 IPCC ガイドラインの Tier 1 法に従い、加速器の稼働台数に、SF<sub>6</sub> 使用率、SF<sub>6</sub> 充填量及び SF<sub>6</sub> 排出率を乗じて SF<sub>6</sub> 排出量を算定している。ここで、SF<sub>6</sub> 使用率とは、粒子加速器のうち SF<sub>6</sub> を使用している機器の割合 (%) であり、SF<sub>6</sub> 充填量と

<sup>1</sup> 粒子加速器とは、電子や陽子のような素粒子やヘリウムからウランに至る様々な原子核を、電気を使い高速に加速することで、様々な量子ビーム（粒子線）を供給する装置である。

は、SF<sub>6</sub>を使用している機器における1台当たりのSF<sub>6</sub>充填量(kg/台)であり、SF<sub>6</sub>排出率とは、SF<sub>6</sub>充填量に対する年間のSF<sub>6</sub>排出率(%)である。なお、本排出源の算定結果については、使用時のSF<sub>6</sub>排出量に計上し、製造時及び廃棄時は「NE：未推計」として報告している。

$$\text{SF}_6\text{排出量} = (\text{加速器の稼働台数}) \times (\text{SF}_6\text{使用率}) \times (\text{SF}_6\text{充填量}) \times (\text{SF}_6\text{排出率})$$

## 2.2 排出係数

SF<sub>6</sub>使用率、SF<sub>6</sub>充填量及びSF<sub>6</sub>排出率については、国内の粒子加速器メーカーに対するヒアリング調査結果及び2006年IPCCガイドラインのデフォルト値を用いて設定している(表2参照)。

## 2.3 活動量

粒子加速器(放射線発生装置)の稼働台数については、「放射線利用統計(日本アイソトープ協会)」で把握されている年度別の使用許可台数<sup>2</sup>(発生装置種類別・機関別)を当該年の加速器の稼働台数とみなして用いている。

また、「放射線利用統計」の把握対象外となる定格出力1MeV未満の電子加速器の稼働台数については、「原子力年鑑(日本原子力産業協会)」の設置台数より、加速器の寿命(20年：粒子加速器メーカーへのヒアリング結果を踏まえて設定)を考慮して推計している。なお、1993年及び1994年の設置台数は「原子力年鑑」で把握できないため、「放射線と産業 No.69, 1996(放射線利用振興協会)」より得ている。「原子力年鑑」の1MeV未満の電子加速器設置台数は、上記を除き1971～2004年について把握されているため、1971年から使用が開始されたものとみなし、20年が経過したもののから順に廃棄されると仮定して(1991年から廃棄開始。)、稼働台数を推計している。

2005年以降の設置台数については、放射線装置室等の設置届の件数<sup>3</sup>に、1MeV未満の電子加速器の設置台数に対する放射線装置室等の設置届の件数の比(2005年比)を乗じて推計している。ただし、既存統計により把握可能な1MeV未満の電子加速器の累積設置台数は2004年までとなることから、2005年の設置台数を2000～2004年の平均設置台数(9台/年)で設定し、2005年の設置台数に対する2005年の設置届件数の比を求めることとする。

<sup>2</sup> 各年度末断面のものであるが、全て年値として扱う。

<sup>3</sup> 労働安全衛生法の「放射線装置」の届出情報(労働安全衛生規則の建設物機械等設置移転変更届(様式第二十号))については、放射線障害防止法の対象となる「放射線発生装置」及び同法の対象外となる「1MeV未満の電子加速器」の設置届と考えられることから、2005年以降の設置台数の活動指標として妥当な指標と考えられる。また、本情報は厚生労働省労働基準局安全衛生部労働衛生課電離放射線労働者健康対策室より提供を受けている。

表 1 活動量（粒子加速器の稼働台数）の推移

|                               |   | 1990  | 1991  | 1992  | 1993  | 1994  | 1995  | 1996  | 1997  | 1998  | 1999  |
|-------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 粒子加速器数（大学・研究施設）               | 台 | 188   | 176   | 180   | 204   | 213   | 214   | 211   | 222   | 240   | 221   |
| 粒子加速器数（産業用（放射線発生装置））          | 台 | 143   | 134   | 144   | 156   | 161   | 164   | 168   | 160   | 148   | 148   |
| 粒子加速器数（産業用（定格出力1MeV未満の電子加速器）） | 台 | 243   | 239   | 256   | 264   | 272   | 276   | 294   | 303   | 312   | 313   |
| 粒子加速器数（医療用）                   | 台 | 531   | 552   | 576   | 595   | 610   | 641   | 656   | 681   | 707   | 741   |
|                               |   | 2000  | 2001  | 2002  | 2003  | 2004  | 2005  | 2006  | 2007  | 2008  | 2009  |
| 粒子加速器数（大学・研究施設）               | 台 | 212   | 201   | 198   | 190   | 201   | 209   | 216   | 207   | 214   | 219   |
| 粒子加速器数（産業用（放射線発生装置））          | 台 | 145   | 147   | 159   | 157   | 176   | 181   | 184   | 187   | 186   | 181   |
| 粒子加速器数（産業用（定格出力1MeV未満の電子加速器）） | 台 | 314   | 318   | 318   | 305   | 291   | 282   | 280   | 276   | 263   | 255   |
| 粒子加速器数（医療用）                   | 台 | 754   | 781   | 791   | 802   | 838   | 857   | 874   | 905   | 922   | 936   |
|                               |   | 2010  | 2011  | 2012  | 2013  | 2014  | 2015  | 2016  | 2017  | 2018  | 2019  |
| 粒子加速器数（大学・研究施設）               | 台 | 218   | 216   | 231   | 225   | 222   | 241   | 245   | 242   | 239   | 239   |
| 粒子加速器数（産業用（放射線発生装置））          | 台 | 174   | 179   | 184   | 188   | 190   | 193   | 183   | 191   | 198   | 198   |
| 粒子加速器数（産業用（定格出力1MeV未満の電子加速器）） | 台 | 218   | 215   | 203   | 201   | 197   | 201   | 196   | 192   | 196   | 198   |
| 粒子加速器数（医療用）                   | 台 | 926   | 986   | 1,028 | 1,068 | 1,081 | 1,108 | 1,114 | 1,146 | 1,132 | 1,132 |
|                               |   | 2020  | 2021  | 2022  | 2023  |       |       |       |       |       |       |
| 粒子加速器数（大学・研究施設）               | 台 | 239   | 239   | 239   | 239   |       |       |       |       |       |       |
| 粒子加速器数（産業用（放射線発生装置））          | 台 | 198   | 198   | 198   | 198   |       |       |       |       |       |       |
| 粒子加速器数（産業用（定格出力1MeV未満の電子加速器）） | 台 | 200   | 202   | 206   | 213   |       |       |       |       |       |       |
| 粒子加速器数（医療用）                   | 台 | 1,132 | 1,132 | 1,132 | 1,132 |       |       |       |       |       |       |

（出典）定格出力 1 MeV 未満の電子加速器の稼働台数（1990～1992 年、1995～2004 年）：「原子力年鑑（日本原子力産業会議（現 日本原子力産業協会）」）の設置台数より、加速器の寿命（20 年：メーカーヒアリング）を考慮して推計

定格出力 1 MeV 未満の電子加速器の稼働台数（1993 年、1994 年）：「放射線と産業 No.69, 1996（放射線利用振興協会）」の設置台数より、加速器の寿命を考慮して推計

定格出力 1 MeV 未満の電子加速器の稼働台数（2005 年以降）：放射線装置室等の設置届の件数に、1 MeV 未満の電子加速器の設置台数に対する放射線装置室等の設置届の件数の比（2005 年比）を乗じて推計した設置台数より、加速器の寿命を考慮して推計

放射線発生装置の稼働台数：「放射線利用統計（日本アイソトープ協会）」（2005 年及び 2008 年の使用許可台数については、「放射線利用統計」で未把握となっているため、前後年の使用許可台数の平均である。また、2018 年 4 月の国連報告時点では、2016 年については、「放射線利用統計」が未発行であったため、2015 年の値としている。）

※医療用加速器は、SF<sub>6</sub>を使用していないサイクロトロン及びシンクロトロンを除いた台数である。

表 2 粒子加速器からの SF<sub>6</sub>排出量算定における稼働台数及び各パラメータの設定

| 用途            |                      | 稼働台数                | SF <sub>6</sub> 使用率                             |                               | SF <sub>6</sub> 充填量                                         | SF <sub>6</sub> 排出率                               |
|---------------|----------------------|---------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 大学・研究施設の粒子加速器 | 放射線利用統計<br>(放射線発生装置) | 研究機関及び教育機関の使用許可台数   | 2006IPCCGL<br>デフォルト値<br>33%                     |                               | 2006IPCCGL<br>デフォルト値<br>2,400 (kg/台)                        | 国内施設での<br>SF <sub>6</sub> 損失量より設定<br>(表 3 を参照)    |
| 医療用の粒子加速器     |                      | 医療機関の使用許可台数         | シンクロサイクロトロン、直線加速装置、ベータトロン                       | 100% <sup>注</sup>             | 2006IPCCGL<br>のデフォルト値<br>0.5 (kg/台)                         | 2006IPCCGL<br>のデフォルト値<br>200%                     |
|               |                      |                     | サイクロトロン、シンクロトロン                                 | ヒアリング調査結果<br>0%               |                                                             |                                                   |
|               |                      |                     | ファン・デ・グラフ加速装置、コッククロフト・ワルトン加速装置、変圧器加速装置、プラズマ発生装置 | 国内での使用許可実績なし<br>(1990~2016 年) |                                                             |                                                   |
| 産業用の粒子加速器     |                      | 民間企業及びその他の機関の使用許可台数 | プラズマ発生装置以外の放射線発生装置（サイクロトロン等）                    | 100% <sup>注</sup>             | 2006IPCCGL<br>高電圧<br>(0.3-23 MV)<br>のデフォルト値<br>1,300 (kg/台) | 2006IPCCGL<br>高電圧<br>(0.3-23 MV)<br>のデフォルト値<br>7% |
|               | プラズマ発生装置             |                     | 国内での使用許可実績なし<br>(1990~2016 年)                   |                               |                                                             |                                                   |
|               |                      | 原子力年鑑               | 1 MeV 未満の電子加速器の設置台数より寿命を考慮し推計                   | 100% <sup>注</sup>             |                                                             | メーカーへの<br>ヒアリング結果<br>400 (kg/台)                   |

※SF<sub>6</sub>の使用率が具体的に把握できなかったため、100%（全て SF<sub>6</sub>使用）としている。

【参考 1】2006 年 IPCC ガイドラインの産業用の低電圧 (<0.3MV) のデフォルト値は、SF<sub>6</sub>充填量 115 (kg/台)、SF<sub>6</sub>排出率 1.3%となっている。

【参考 2】1 MeV 未満の電子加速器の SF<sub>6</sub>充填量については、メーカーへのヒアリングの結果、電圧レベル別の回答が得られたが、安全側として最大値を用いている。

表 3 大学・研究施設設置の粒子加速器の SF<sub>6</sub>排出率

| 項目                  | 1990～2004   | 2005～2009   | 2010～2014   | 2015～2019   | 2020～2025   |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| SF <sub>6</sub> 排出率 | 0.070 kg/kg | 0.063 kg/kg | 0.063 kg/kg | 0.052 kg/kg | 0.045 kg/kg |

(出典) JAEA-Technology 2010-023 「タンデム加速器高圧ガス製造施設の運転管理」、及び日本原子力研究開発機構 環境報告書を基に算出

### 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

|               | 2015 年提出                                                      | 2016 年提出                         | 2020 年提出                                     |
|---------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------|
| 排出・吸収量<br>算定式 | 2006 年 IPCC ガイドライン<br>の適用に伴い、新たに対象と<br>なった本排出源の排出量を<br>算定、計上。 | —                                | —                                            |
| 排出係数          | —                                                             | —                                | 大学・研究施設設置の粒子加<br>速器の SF <sub>6</sub> 排出率の変更。 |
| 活動量           | —                                                             | 1 MeV 未満の電子加速器の<br>稼働台数の把握方法の変更。 | —                                            |

#### （１）初期割当量報告書における算定方法

2006 年 IPCC ガイドラインから新たに追加された排出源であり、初期割当量報告書では算定していなかった。

#### （２）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 ガイドラインにおいて、本排出源が新規排出源として追加されたため、算定方法を検討し、現在の算定方法を確立した（現行の算定方法と同様。）。

粒子加速器からの SF<sub>6</sub> 排出量については、2006 年 IPCC ガイドラインの Tier 1 法に従い、加速器の稼働台数に、SF<sub>6</sub> 使用率、SF<sub>6</sub> 充填量及び SF<sub>6</sub> 排出率を乗じて SF<sub>6</sub> 排出量を算定していた。なお、本排出源の算定結果については、使用時の SF<sub>6</sub> 排出量に計上し、製造時及び廃棄時は「NE：未推計」として報告した。

$$\text{SF}_6 \text{ 排出量} = (\text{加速器の稼働台数}) \times (\text{SF}_6 \text{ 使用率}) \times (\text{SF}_6 \text{ 充填量}) \times (\text{SF}_6 \text{ 排出率})$$

##### 2) 排出係数

SF<sub>6</sub> 使用率、SF<sub>6</sub> 充填量及び SF<sub>6</sub> 排出率については、国内の粒子加速器メーカーに対するヒアリング調査結果及び 2006 年 IPCC ガイドラインのデフォルト値を用いて設定した（現行の排出係数と同様。）。

##### 3) 活動量

粒子加速器（放射線発生装置）の稼働台数については、「放射線利用統計」より把握していた（現行の活動量と同様。）。「放射線利用統計」の把握対象外となる定格出力 1 MeV 未満の電子加速器の稼働台数については、「原子力年鑑」の設置台数より、加速器の寿命（20 年：メーカーヒアリング）を考慮して稼働台数を推計した。ここで、「原子力年鑑」で設置台数が把握できない 2005 年以降の稼働台数については、2004 年の稼働台数に産業用粒子加速器（放射線発生装置）の使用許可台数の伸び率（2004 年比）を乗じて算出した（表 5 の改訂前の値）。

### (3) 2016 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

2015 年提出インベントリと同様（現行の算定方法と同様。）。

#### 2) 排出係数

2015 年提出インベントリと同様（現行の排出係数と同様。）。

#### 3) 活動量

「放射線利用統計」の把握対象外となる定格出力 1 MeV 未満の電子加速器の稼働台数については、「原子力年鑑」の設置台数より、加速器の寿命を考慮して稼働台数を推計していたが、「原子力年鑑」では 2005 年以降の設置台数が把握できないことから、労働安全衛生法の「放射線装置」の届出情報（労働安全衛生規則の建設物機械等設置移転変更届（様式第二十号））を基に、2005 年以降の稼働台数の推計方法を改訂した。

具体的には、2005 年以降の稼働台数は、放射線装置室等の設置届の件数に、定格出力 1 MeV 未満の電子加速器の設置台数に対する放射線装置室等の設置届の件数の比（2005 年比）を乗じて推計することとした。ただし、既存統計により把握可能な 1 MeV 未満の電子加速器の累積設置台数は 2004 年までとなることから、2005 年の設置台数を 2000～2004 年の平均設置台数（9 台/年）で設定し、2005 年の設置台数に対する 2005 年の設置届件数の比を求めることとした（現行の活動量と同様。）。

改訂前後の稼働台数を比較した結果は表 5 のとおりである。従来の推計方法では、2004 年の稼働台数を基に「産業用粒子加速器の使用許可台数」で外挿して直接稼働台数を推計した結果であるため、廃止台数は考慮されていない。改定後の推計方法では、設置届により推計した設置台数を求めた上で、廃止台数を考慮して稼働台数を求めている。このため、従来の推計方法では、稼働台数が過大であったと考えられる。

表 5 定格出力 1 MeV 未満の電子加速器の累積設置台数及び稼働台数（改訂前後の比較）

|             | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 累積設置台数(台/年) | 243  | 256  | 278  | 289  | 303  | 310  | 326  | 342  | 351  | 361  |
| 稼働台数(台/年)   | 243  | 239  | 256  | 264  | 272  | 276  | 294  | 303  | 312  | 313  |

|             | 2000   | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
|-------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 累積設置台数(台/年) | 371    | 382  | 391  | 397  | 406  | 415  | 424  | 434  | 443  | 451  |
| 稼働台数(台/年)   | 前<br>後 | 314  | 318  | 318  | 305  | 299  | 304  | 309  | 308  | 299  |
|             |        |      |      |      |      | 282  | 280  | 276  | 263  | 255  |

|             |   | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|-------------|---|------|------|------|------|------|
| 累積設置台数(台/年) |   | 461  | 471  | 481  | 490  | 500  |
| 稼働台数(台/年)   | 前 | 288  | 296  | 304  | 311  | 288  |
|             | 後 | 218  | 215  | 203  | 201  | 197  |

※稼働台数の「前」は、改訂前の推計方法による稼働台数、「後」は改訂後の推計方法の稼働台数である。

※改訂前の推計方法では、2004 年の稼働台数を基に産業用粒子加速器の使用許可台数で外挿して求めている。

#### (4) 2020 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

2015 年提出インベントリと同様（現行の算定方法と同様。）。

##### 2) 排出係数

大学・研究施設設置の粒子加速器については、原子力科学研究所のタンデム加速器高圧ガス製造施設における SF<sub>6</sub> ガス排出管理情報として、2002～2018 年までの年間 SF<sub>6</sub> 損失量のデータが得られたことから、同データを用いて、我が国独自の SF<sub>6</sub> 排出率を設定した。

大学・研究施設における SF<sub>6</sub> 損失については、どの加速器とも同様に、日々の運転サイクルや SF<sub>6</sub> の回収・充填の過程で生じていること、また、損失量データが得られた原子力科学研究所の高圧ガス製造施設は国内最大級の加速器であり、リークされる量は小規模の施設に比べても大きく、排出量の過小評価にはならないと考えられることから、把握された損失量データより、2002～2018 年までの累積平均値を求め、データのばらつきや対策効果の反映を考慮して、一定期間（2005～2009 年、2010～2014 年、2015～2018 年）ごとに累積平均した SF<sub>6</sub> 排出率 (kg/kg) を排出係数として設定することとした。2004 年以前はこれまでと同様に 2006 年 IPCC ガイドラインのデフォルト値 (0.07 kg/kg) を設定した。

表 6 大学・研究施設設置の粒子加速器の SF<sub>6</sub> 排出率（再掲）

| 項目                  | 1990～2004   | 2005～2009   | 2010～2014   | 2015～2019   |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| SF <sub>6</sub> 排出率 | 0.070 kg/kg | 0.063 kg/kg | 0.063 kg/kg | 0.052 kg/kg |

（出典）JAEA-Technology 2010-023 「タンデム加速器高圧ガス製造施設の運転管理」、及び日本原子力研究開発機構 環境報告書を基に算出

他の排出係数については 2015 年提出インベントリと同様（現行の排出係数と同様。）。

##### 3) 活動量

2016 年提出インベントリと同様（現行の活動量と同様。）。