

着設備では、総水銀として平均70%以上除去でき、 $\text{Hg}^0$  除去率が高く、 $\text{Hg}^{2+}$  除去率が低い傾向であった。施設2009-Cの活性炭吸着設備は、ダイオキシン類除去を想定したものであることや、一般的に、ダイオキシン類よりも水銀の方が破過しやすいという報告もあることから<sup>14)</sup>、<sup>15)</sup>、必ずしも効率的に除去できていない可能性があったが、例えば1回目には、非常に高い水銀濃度が、活性炭吸着装置に流入しているケースでも、活性炭吸着装置の出口では濃度は低く、高度除去がなされていると言え、現在は、吸着破過に達していないと考えられた。

#### (4) まとめ

以上の検討をまとめ、総水銀濃度としての排ガス処理の各プロセスにおける除去率をまとめたものを、表C.3.4に示す。水銀は、触媒装置、あるいは活性炭吸着設備にて70%以上の除去率が見込めることが明らかとなった。一方、バグフィルターにおいては、フィルターに堆積した集じん灰層、あるいはその組成により水銀が除去されるケースと、除去されない、もしくは増加するケースがみられ、安定性に欠けることが示唆された。したがって、火葬場における排ガス中の水銀を除去するためには、バグフィルターの後段に、触媒装置、あるいは活性炭吸着設備を設置することが望ましいと考えられる。ただし、触媒装置の場合は、ダイオキシン類の分解、脱硝を目的とするものであり、水銀を吸着除去することにより、触媒の活性が低下することが懸念されるため、水銀の除去としては、活性炭吸着設備が最も望ましいと考えられた。

表 C.1.4 各排ガス処理設備での水銀の形態別除去率(%)

|        | バグフィルター       |                  |      | 触媒装置<br>活性炭吸着設備 |                  |     |
|--------|---------------|------------------|------|-----------------|------------------|-----|
|        | $\text{Hg}^0$ | $\text{Hg}^{2+}$ | 総水銀  | $\text{Hg}^0$   | $\text{Hg}^{2+}$ | 総水銀 |
| 2009-A | -24           | 100              | 52   | -               | -                | -   |
| 2009-B | 72            | 65               | 67   | 90              | 85               | 96  |
| 2009-C | -630          | -64              | -340 | 78              | 14               | 72  |

※  $\text{Hg}^{2+}$ の流入濃度が低いことによる濃度の逆転現象は考慮していない。

### 3.2 排ガス中水銀の排出濃度とその形態、および高濃度ピーク

排ガス処理各プロセスにおける水銀の除去効率を調査するために実施した連続分析結果を、各火葬の時間、および御遺体の年齢・性別ともに、表C.3.5にまとめて示す。これらの調査は合計で57体の火葬について実施し(表中には重複あり)、御遺体の年齢分布は32歳～102歳(これに加えて、死産児:0歳1件)であり、男性31検体、女性25検体のデータが得られた。連続分析計のデータは負の値をすべて0に直し、補正した。

表 C.3.5 排ガス中水銀の形態別連続分析測定結果(2009 調査)

| 施設       | 日      | 性別  | 火葬時間<br>(分) | 年齢<br>(歳) | Hg <sup>0</sup> 濃度<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Hg <sup>2+</sup> 濃度<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 総水銀濃度<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Hg <sup>0</sup> の割合<br>(%) | O <sub>2</sub> 濃度<br>(vol%) | O <sub>2</sub> 12%換算 総水銀濃度<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|----------|--------|-----|-------------|-----------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------|
| A-BF前-1  | 9月8日   | 女性  | 65          | 97        | 0.1                                                | 0.9                                                 | 1.0                                   | 9                          | 19.2                        | 3.1                                                        |
| A-BF前-2  | 9月11日  | 女性  | 66          | 71        | 0.1                                                | 0.2                                                 | 0.2                                   | 27                         | 19.2                        | 0.8                                                        |
| A-BF前-3  | 9月15日  | 男性  | 70          | 81        | 1.7                                                | 0.1                                                 | 1.7                                   | 95                         | 19.2                        | 5.4                                                        |
| A-BF前-4  | 9月17日  | 女性  | 55          | 65        | 0.4                                                | 0.4                                                 | 0.8                                   | 46                         | 19.2                        | 2.4                                                        |
| B-BF前-1  | 11月12日 | 女性  | 44          | 86        | 5.7                                                | 0.1                                                 | 5.7                                   | 99                         | 14.8                        | 8.3                                                        |
| B-BF前-2  | 11月12日 | 女性  | 46          | 58        | 3.3                                                | 0.1                                                 | 3.4                                   | 97                         | 16.2                        | 6.3                                                        |
| B-BF前-3  | 11月13日 | 男性  | 57          | 44        | 12.6                                               | 2.0                                                 | 14.5                                  | 86                         | 15.7                        | 24.7                                                       |
| B-BF前-4  | 11月14日 | 男性  | 54          | 78        | 4.0                                                | 4.8                                                 | 8.8                                   | 45                         | 14.7                        | 12.6                                                       |
| B-BF前-5  | 11月14日 | 女性  | 51          | 92        | 4.9                                                | 1.9                                                 | 6.8                                   | 72                         | 12.2                        | 6.9                                                        |
| B-BF前-6  | 11月15日 | 女性  | 53          | 92        | 2.6                                                | 1.5                                                 | 4.2                                   | 63                         | 14.4                        | 5.7                                                        |
| B-BF前-7  | 11月15日 | 女性  | 60          | 40        | 3.8                                                | 1.5                                                 | 5.3                                   | 72                         | 15.6                        | 8.9                                                        |
| B-BF前-8  | 11月15日 | 男性  | 61          | 64        | 4.3                                                | 0.3                                                 | 4.6                                   | 93                         | 15.5                        | 7.5                                                        |
| B-BF前-9  | 11月16日 | 男性  | 52          | 72        | 7.5                                                | 1.0                                                 | 8.5                                   | 88                         | 13.3                        | 10.0                                                       |
| B-BF前-10 | 11月17日 | 男性  | 64          | 92        | 6.2                                                | 1.2                                                 | 7.4                                   | 84                         | 12.8                        | 8.1                                                        |
| B-BF前-11 | 11月17日 | 女性  | 50          | 67        | 18.1                                               | 2.1                                                 | 20.2                                  | 89                         | 14.5                        | 28.0                                                       |
| C-BF前-1  | 12月4日  | 男性  | 86          | 52        | 0.5                                                | 0.4                                                 | 0.9                                   | 57                         | 19.4                        | 5.3                                                        |
| C-BF前-2  | 12月4日  | 男性  | 63          | 69        | 0.7                                                | 0.8                                                 | 1.5                                   | 45                         | 19.4                        | 8.2                                                        |
| C-BF前-3  | 12月5日  | 男性  | 57          | 76        | 0.5                                                | 0.7                                                 | 1.3                                   | 43                         | 19.4                        | 7.1                                                        |
| C-BF前-4  | 12月5日  | 女性  | 49          | 99        | 0.6                                                | 0.6                                                 | 1.2                                   | 51                         | 19.4                        | 6.6                                                        |
| C-BF前-5  | 12月6日  | 女性  | 53          | 74        | 0.6                                                | 0.6                                                 | 1.3                                   | 50                         | 19.4                        | 7.2                                                        |
| C-BF前-6  | 12月7日  | 男性  | 60          | 71        | 21.2                                               | 0.6                                                 | 21.8                                  | 97                         | 19.4                        | 122.5                                                      |
| C-BF前-7  | 12月7日  | 男性  | 53          | 79        | 0.3                                                | 0.5                                                 | 0.8                                   | 35                         | 19.4                        | 4.7                                                        |
| C-BF前-8  | 12月8日  | 女性  | 60          | 77        | 2.7                                                | 0.5                                                 | 3.2                                   | 85                         | 19.4                        | 17.9                                                       |
| A-BF後-1  | 9月8日   | 女性  | 65          | 97        | 0.1                                                | 0.0                                                 | 0.1                                   | 100                        | 19.2                        | 0.7                                                        |
| A-BF後-2  | 9月11日  | 女性  | 66          | 71        | 0.1                                                | 0.0                                                 | 0.1                                   | 100                        | 19.2                        | 0.4                                                        |
| A-BF後-3  | 9月15日  | 男性  | 70          | 81        | 1.7                                                | 0.0                                                 | 1.7                                   | 100                        | 19.2                        | 8.6                                                        |
| A-BF後-4  | 9月17日  | 女性  | 55          | 65        | 19.9                                               | 0.2                                                 | 20.1                                  | 99                         | 19.2                        | 100.7                                                      |
| A-BF後-5  | 9月18日  | 男性  | 60          | 102       | 0.2                                                | 0.0                                                 | 0.2                                   | 100                        | 19.2                        | 0.8                                                        |
| A-BF後-6  | 9月20日  | 男性  | 71          | 90        | 21.2                                               | 0.2                                                 | 21.4                                  | 99                         | 19.2                        | 106.9                                                      |
| A-BF後-7  | 9月21日  | 女性  | 56          | 93        | 1.2                                                | 0.0                                                 | 1.2                                   | 98                         | 19.2                        | 6.0                                                        |
| A-BF後-8  | 9月22日  | 男性  | 55          | 81        | 0.2                                                | 0.0                                                 | 0.2                                   | 100                        | 19.2                        | 1.1                                                        |
| A-BF後-9  | 9月23日  | 男性  | 60          | 94        | 0.1                                                | 0.0                                                 | 0.1                                   | 100                        | 19.2                        | 0.4                                                        |
| A-BF後-10 | 9月24日  | 男性  | 53          | 84        | 0.1                                                | 0.0                                                 | 0.1                                   | 97                         | 19.2                        | 0.6                                                        |
| A-BF後-11 | 9月24日  | 女性  | 67          | 69        | 0.1                                                | 0.0                                                 | 0.1                                   | 83                         | 19.2                        | 0.6                                                        |
| A-BF後-12 | 9月25日  | 男性  | 60          | 82        | 1.4                                                | 0.0                                                 | 1.4                                   | 98                         | 19.2                        | 7.2                                                        |
| A-BF後-13 | 9月26日  | 女性  | 57          | 85        | 64.2                                               | 0.8                                                 | 65.1                                  | 99                         | 19.2                        | 325.3                                                      |
| A-BF後-14 | 9月27日  | 死産児 | 48          | 0         | 0.2                                                | 0.1                                                 | 0.3                                   | 70                         | 19.2                        | 1.5                                                        |
| A-BF後-15 | 9月27日  | 女性  | 58          | 76        | 3.9                                                | 0.1                                                 | 4.0                                   | 98                         | 19.2                        | 19.9                                                       |
| A-BF後-16 | 9月28日  | 女性  | 67          | 84        | 0.5                                                | 0.1                                                 | 0.6                                   | 90                         | 19.2                        | 2.8                                                        |
| A-BF後-17 | 9月29日  | 男性  | 63          | 85        | 0.3                                                | 0.0                                                 | 0.3                                   | 97                         | 19.2                        | 1.4                                                        |
| A-BF後-18 | 9月30日  | 男性  | 65          | 32        | 22.7                                               | 0.4                                                 | 23.1                                  | 98                         | 19.2                        | 115.7                                                      |
| A-BF後-19 | 9月30日  | 男性  | 68          | 78        | 0.2                                                | 0.0                                                 | 0.2                                   | 93                         | 19.2                        | 1.0                                                        |
| A-BF後-20 | 10月1日  | 男性  | 55          | 84        | 0.3                                                | 0.0                                                 | 0.3                                   | 93                         | 19.2                        | 1.7                                                        |
| B-BF後-1  | 11月12日 | 女性  | 44          | 86        | 0.4                                                | 0.2                                                 | 0.6                                   | 64                         | 14.8                        | 0.8                                                        |
| B-BF後-2  | 11月12日 | 女性  | 46          | 58        | 0.5                                                | 0.3                                                 | 0.8                                   | 63                         | 16.2                        | 1.5                                                        |
| B-BF後-3  | 11月13日 | 男性  | 57          | 44        | 7.3                                                | 0.4                                                 | 7.7                                   | 94                         | 15.7                        | 13.1                                                       |
| B-BF後-4  | 11月14日 | 男性  | 54          | 78        | 0.6                                                | 0.5                                                 | 1.2                                   | 55                         | 14.7                        | 1.7                                                        |
| B-BF後-5  | 11月14日 | 女性  | 51          | 92        | 0.5                                                | 0.8                                                 | 1.3                                   | 38                         | 12.2                        | 1.3                                                        |
| B-BF後-6  | 11月15日 | 女性  | 53          | 92        | 1.9                                                | 0.8                                                 | 2.7                                   | 71                         | 14.4                        | 3.7                                                        |
| B-BF後-7  | 11月15日 | 女性  | 60          | 40        | 0.7                                                | 0.6                                                 | 1.3                                   | 53                         | 15.6                        | 2.1                                                        |
| B-BF後-8  | 11月15日 | 男性  | 61          | 64        | 0.3                                                | 0.6                                                 | 0.9                                   | 32                         | 15.5                        | 1.4                                                        |
| B-BF後-9  | 11月16日 | 男性  | 52          | 72        | 2.6                                                | 0.6                                                 | 3.2                                   | 81                         | 13.3                        | 3.8                                                        |
| B-BF後-10 | 11月17日 | 男性  | 64          | 92        | 1.2                                                | 0.3                                                 | 1.6                                   | 78                         | 12.8                        | 1.7                                                        |
| B-BF後-11 | 11月17日 | 女性  | 50          | 67        | 8.7                                                | 0.5                                                 | 9.2                                   | 95                         | 14.5                        | 12.7                                                       |
| B-BF後-12 | 11月24日 | 男性  | 48          | 74        | 6.4                                                | 1.1                                                 | 7.6                                   | 85                         | 14.7                        | 10.8                                                       |
| B-BF後-13 | 11月25日 | 男性  | 64          | 46        | 3.9                                                | 0.1                                                 | 4.0                                   | 98                         | 14.6                        | 5.6                                                        |
| B-BF後-14 | 11月25日 | 男性  | 62          | 65        | 0.7                                                | 0.2                                                 | 0.9                                   | 79                         | 14.7                        | 1.2                                                        |
| B-BF後-15 | 11月26日 | 男性  | 62          | 76        | 1.4                                                | 0.1                                                 | 1.5                                   | 91                         | 15.1                        | 2.3                                                        |
| C-BF後-1  | 12月4日  | 男性  | 86          | 52        | 7.2                                                | 0.4                                                 | 7.6                                   | 94                         | 19.6                        | 49.1                                                       |
| C-BF後-2  | 12月4日  | 男性  | 63          | 69        | 3.7                                                | 1.4                                                 | 5.1                                   | 73                         | 19.6                        | 32.9                                                       |
| C-BF後-3  | 12月5日  | 男性  | 57          | 76        | 2.8                                                | 1.0                                                 | 3.8                                   | 73                         | 19.6                        | 24.7                                                       |
| C-BF後-4  | 12月5日  | 女性  | 49          | 99        | 4.0                                                | 0.9                                                 | 4.8                                   | 82                         | 19.6                        | 31.0                                                       |
| C-BF後-5  | 12月6日  | 女性  | 53          | 74        | 2.7                                                | 0.8                                                 | 3.6                                   | 77                         | 19.6                        | 23.1                                                       |
| C-BF後-6  | 12月7日  | 男性  | 60          | 71        | 33.9                                               | 0.7                                                 | 34.6                                  | 98                         | 19.6                        | 222.5                                                      |
| C-BF後-7  | 12月7日  | 男性  | 53          | 79        | 3.4                                                | 0.7                                                 | 4.1                                   | 84                         | 19.6                        | 26.4                                                       |
| C-BF後-8  | 12月8日  | 女性  | 60          | 77        | 7.9                                                | 1.0                                                 | 8.8                                   | 89                         | 19.6                        | 56.8                                                       |
| C-BF後-9  | 12月10日 | 女性  | 62          | 88        | 10.6                                               | 0.9                                                 | 11.5                                  | 92                         | 19.6                        | 74.2                                                       |
| C-BF後-10 | 12月11日 | 男性  | 68          | 89        | 5.9                                                | 0.5                                                 | 6.4                                   | 92                         | 19.6                        | 41.0                                                       |
| C-BF後-11 | 12月11日 | 女性  | 54          | 58        | 75.6                                               | 0.7                                                 | 76.3                                  | 99                         | 19.6                        | 490.2                                                      |
| C-BF後-12 | 12月12日 | 女性  | 55          | 77        | 11.8                                               | 0.5                                                 | 12.3                                  | 96                         | 19.6                        | 79.1                                                       |
| C-BF後-13 | 12月13日 | 女性  | 61          | 80        | 2.7                                                | 0.5                                                 | 3.1                                   | 85                         | 19.6                        | 20.1                                                       |
| C-BF後-14 | 12月13日 | 女性  | 56          | 82        | 9.7                                                | 0.5                                                 | 10.3                                  | 95                         | 19.6                        | 66.2                                                       |
| C-BF後-15 | 12月14日 | 女性  | 56          | 90        | 3.9                                                | 0.5                                                 | 4.4                                   | 88                         | 19.6                        | 28.5                                                       |
| B-SCR後-1 | 11月24日 | 男性  | 48          | 74        | 0.1                                                | 0.2                                                 | 0.3                                   | 40                         | 14.7                        | 0.4                                                        |
| B-SCR後-2 | 11月25日 | 男性  | 64          | 46        | 0.2                                                | 0.5                                                 | 0.7                                   | 31                         | 14.6                        | 0.9                                                        |
| B-SCR後-3 | 11月25日 | 男性  | 62          | 65        | 0.1                                                | 0.6                                                 | 0.7                                   | 14                         | 14.7                        | 1.0                                                        |
| B-SCR後-4 | 11月26日 | 男性  | 62          | 76        | 0.2                                                | 0.4                                                 | 0.6                                   | 36                         | 15.1                        | 0.9                                                        |
| C-AC後-1  | 12月11日 | 女性  | 54          | 58        | 1.1                                                | 0.3                                                 | 1.4                                   | 79                         | 19.5                        | 8.4                                                        |
| C-AC後-2  | 12月12日 | 女性  | 55          | 77        | 1.0                                                | 0.4                                                 | 1.4                                   | 74                         | 19.5                        | 7.9                                                        |
| C-AC後-3  | 12月13日 | 女性  | 61          | 80        | 0.8                                                | 0.6                                                 | 1.4                                   | 60                         | 19.5                        | 8.2                                                        |
| C-AC後-4  | 12月13日 | 女性  | 56          | 82        | 2.8                                                | 0.5                                                 | 3.4                                   | 85                         | 19.5                        | 19.5                                                       |
| C-AC後-5  | 12月14日 | 女性  | 56          | 90        | 2.0                                                | 0.8                                                 | 2.8                                   | 73                         | 19.5                        | 16.2                                                       |
| C-AC後-6  | 12月16日 | 男性  | 68          | 63        | 1.4                                                | 0.5                                                 | 1.9                                   | 72                         | 19.5                        | 10.9                                                       |
| C-AC後-7  | 12月16日 | 女性  | 51          | 70        | 3.4                                                | 1.5                                                 | 4.8                                   | 69                         | 19.5                        | 28.0                                                       |
| C-AC後-8  | 12月17日 | 男性  | 65          | 43        | 2.3                                                | 0.0                                                 | 2.3                                   | 100                        | 19.5                        | 13.1                                                       |
| C-AC後-9  | 12月18日 | 男性  | 59          | 87        | 2.1                                                | 0.2                                                 | 2.2                                   | 92                         | 19.5                        | 12.9                                                       |
| C-AC後-10 | 12月18日 | 男性  | 51          | 65        | 1.7                                                | 0.0                                                 | 1.8                                   | 98                         | 19.5                        | 10.4                                                       |
| C-AC後-11 | 12月20日 | 女性  | 58          | 75        | 1.4                                                | 0.1                                                 | 1.5                                   | 95                         | 19.5                        | 8.7                                                        |
| C-AC後-12 | 12月20日 | 男性  | 64          | 83        | 2.9                                                | 0.1                                                 | 3.0                                   | 97                         | 19.5                        | 17.3                                                       |
| 算術平均     |        |     | 58          | 74        | 5.5                                                | 0.6                                                 | 6.0                                   | 78                         | 18                          | 28                                                         |
| 最大値      |        |     | 86          | 102       | 76                                                 | 5                                                   | 76                                    | 100                        | 20                          | 490                                                        |
| 最小値      |        |     | 44          | 0         | 0.1                                                | 0.0                                                 | 0.1                                   | 9                          | 12                          | 0.4                                                        |
| 標準偏差     |        |     | 8           | 17        | 12                                                 | 1                                                   | 12                                    | 23                         | 2                           | 7.6                                                        |
| 中央値      |        |     | 58          | 76        | 2                                                  | 0.5                                                 | 2                                     | 85                         | 19                          | 9.5                                                        |

※水銀濃度は実測値、BF: バグフィルター、AC: 活性炭吸着設備、SCR: 触媒装置

### (1) 水銀の排出濃度

対象とした施設 2009-A ~ 2009-C について、表 C.3.5 における実質的な大気への放出のデータは、施設 2009-B における触媒装置 (SCR) 後と施設 2009-C における活性炭吸着設備 (AC) 後となる、この部分での総水銀濃度は、施設 2009-B においては、 $O_2$ 12% 換算で、 $0.4 \sim 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$  (平均: $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ ) であり、施設 2009-C においては  $8.2 \sim 28.0 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$  (平均: $13.5 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ ) であった。この値は、都市ごみ焼却炉煙突排ガスと比べると同程度か、やや高い値であるといえる<sup>17)</sup>。前述した 2008 年の調査においては、54 検体の調査で、総水銀濃度は  $O_2$ 12% 換算値として平均  $11.5 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$  であり、2005 調査<sup>9)</sup> では  $29.2 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$  であった。施設 2009-B ではこれらに比較して、非常に低く保たれており、施設 2009-C においては、2008 年調査とほぼ同様であり、2005 調査の 1/3 程度となった。イギリスでは 3 箇所の火葬炉において 22 検体の火葬排ガス中水銀の実測値が報告されており、3 箇所それぞれの排ガス中水銀濃度の平均値は  $O_2$ 11% 換算で、 $690 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 、 $880 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 、 $430 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$  であって<sup>23)</sup>、非常に高い。また Hogland はスウェーデン、ルンドにおける火葬炉からの水銀濃度を調査し、排ガス流量は日本の 1/20 程度であるが、最大濃度は  $60,000 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$  にも達することが報告されており<sup>18)</sup>、同様に高い。したがって日本人の平均水銀保有量は、諸外国に比較して低いと推測される。

施設 2009-B においては、触媒装置 (SCR) 前、およびバグフィルター前の総水銀濃度は、それぞれ  $0.8 \sim 13.1 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 、 $5.7 \sim 28.0 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$  であり、排ガス処理上流側での濃度も比較的 low に抑えられていた。

施設 2009-C においては、活性炭吸着設備 (AC) 前、およびバグフィルター前の総水銀濃度は、それぞれ  $20.1 \sim 490.1 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 、 $4.7 \sim 122.5 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$  で、その多くが、歯科アマルガムに由来するような高濃度のピーク、もしくは、バグフィルターでの集じん灰層からの水銀の脱着により、都市ごみ焼却炉の自主目標値を大きく上回るケースが見られた。しかし、これらは活性炭吸着設備により、低濃度に抑えられており、この観点からも、火葬場における排ガス経路での水銀の排出抑制には、活性炭吸着設備の設置が効果的であると考えられる。

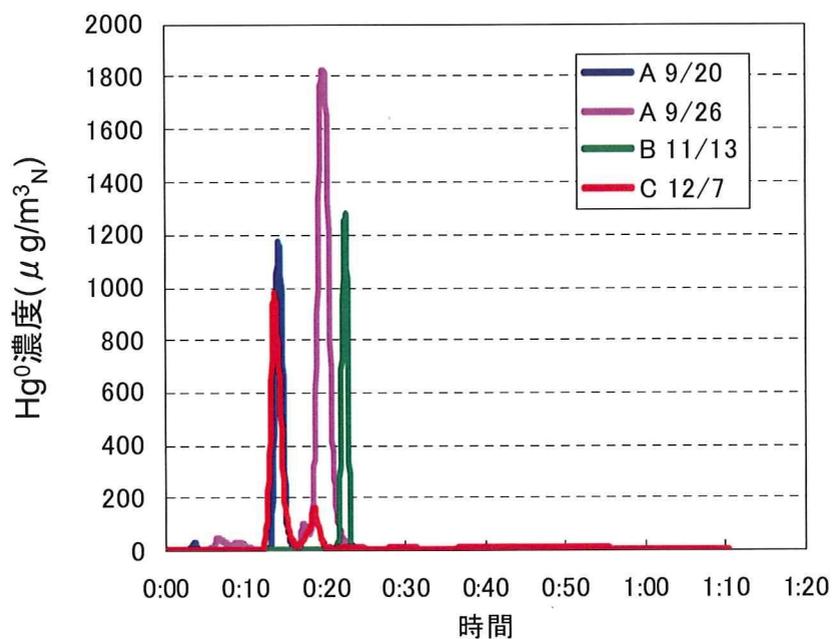
施設 2009-A においては、バグフィルターの後段に触媒装置が設置されているが、本調査で得られたデータは、バグフィルター前後のみのデータであり、特にバグフィルター後の総水銀濃度は、 $O_2$ 12% 換算で、 $0.4 \sim 325.3 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$  であり、特に 9 月 17 日、20 日、26 日、30 日におけるデータは、歯科アマルガムに由来する高濃度ピークが見られ、この場合の総水銀濃度は、 $O_2$ 12% 換算で、 $100.7 \sim 325.3 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$  であり非常に高い濃度を示した。ここで、仮に後段の触媒装置で、施設 2009-B と同レベル (表 C.3.3 における触媒装置でのアマルガムピーク時の  $\text{Hg}^0$  除去率、 $\text{Hg}^{2+}$  除去率を使用) で水銀が除去できたと仮定すると、施設 2009-A からの総水銀排出濃度は、 $1.41 \sim 4.97 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$  程度まで抑えられることが予想された。

## (2) 水銀の高濃度ピーク

本調査においても歯科アマルガムに由来するとされる、 $\text{Hg}^0$ の高濃度ピーク<sup>18)、19)</sup>が、いくつかの検体で見られた、水銀の高濃度ピーク例として、施設2009-Aにおいて9/20と9/26、施設2009-Bにおいて11/13、および施設2009-Cにおいて12/7(1回目)の $\text{Hg}^0$ のトレンドデータを図C.3.2に示した。この4例に関しては、総水銀濃度の $\text{O}_2$ 12%換算値として、13.1～325.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であり、施設2009-B-11/13のデータを除けば、国内の都市ごみ焼却炉で、各自治体が独自に設定する自主目標値や現実的な要求値としての30～50  $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ を大きく上回っていた。

これらのうち、2例については、水銀連続分析計の上限(1,000  $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ )を振り切っていた時間があり、その間についてはガウス関数によって補正し、データとした。図より、ピーク時の $\text{Hg}^0$ 濃度は、施設2009-A-9/26では最大約1,800  $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ まで、施設2009-A-9/20、および施設2009-B-11/13では最大約1,200  $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ まで達していたと推測された。

表C.3.5でのデータのうち、施設2009-A～2009-Cにおけるバグフィルター後の50検体のデータについて、このような特徴的な変化を示したものは、17検体/50検体であった。前述した2008年の調査では、19検体/54検体であり、ほぼ同様の頻度であった。歯科アマルガムを有する火葬対象者は、将来的な死亡者増加とともに2020年頃にピークを迎える予測があり<sup>9)</sup>、今後、このような高濃度の水銀排出が増加することが想定されるため、留意する必要があるだろう。



図C.3.2 排ガス中 $\text{Hg}^0$ の連続分析測定結果  
(2009調査：バグフィルター出口)

### (3) 水銀の形態

火葬排ガス中水銀の形態として、 $\text{Hg}^0$ 濃度、 $\text{Hg}^{2+}$ 濃度、総水銀濃度に占める $\text{Hg}^0$ 濃度の割合を求めた結果を表C.3.5に示す。いくつかのデータについては平均濃度が $0.1\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 未満(検出下限値未満)であったため、計算上は $0.1\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ とした。サンプリングポイントに係らず、全てのデータを対象とした場合、0価水銀の平均濃度は $5.5\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 、2価水銀の平均濃度は $0.6\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であった。それぞれの平均濃度を比較すると0価の割合は90%を超えるが、これは歯科アマルガムに由来する高濃度水銀のデータの影響が極めて大きいことによる。しかし、それらを除いた場合の、総水銀に占める0価水銀の平均割合は14～100%でばらつき、算術平均で79%であったことから、上記2つのデータがなくとも平均的に水銀の形態は0価の水銀が主であることがわかった。過去の研究事例でもこの割合はかなりばらついているが<sup>9)</sup>、歯科アマルガム由来と考えられる大きなピークが認められる場合は、例えば、表C.3.5における施設2009-A-9/20、施設2009-A-9/26、施設2009-B-11/13、および施設2009-C-12/7(1回目)のデータから0価水銀の占める割合が圧倒的に大きいことが明らかであり、問題となるような高濃度排出である場合は0価水銀が主たる形態であるといえる。これらの点は、前述した2008年の調査と同様の傾向であった。

## 3.3 各施設における水銀の排出原単位

### (1) 2009年調査における水銀の排出原単位

水銀実測濃度に燃焼時間中の排ガス流量と火葬時間を乗じることによって、火葬1体あたりに排出される総水銀量(排出原単位)を算定した。排ガス流量は、後述する排ガス中クロムの調査時に分析した乾ガス流量を用いた。この結果を、表C.3.6に示す。

表C.3.6における実質的な大気への放出のデータは、施設2009-Bにおける触媒装置(SCR)後と施設2009-Cにおける活性炭吸着設備(AC)後となる、この部分での水銀排出原単位は、この部分での総水銀濃度は、施設2009-Bにおいては、 $0.6\sim 1.9\text{mg}/\text{体}$ (平均: $1.5\text{mg}/\text{体}$ )であり、施設2009-Cにおいては $22\sim 73\text{mg}/\text{体}$ (平均: $40\text{mg}/\text{体}$ )であった。2005調査では、水銀排出量は $51.8\text{mg}/\text{体}$ <sup>9)</sup>、前述した2008年の調査では、 $19.4\text{mg}/\text{体}$ と推定されたことから、施設2009-Bに関しては、大幅に低減されており、施設2009-Cに関しては、ほぼこれまでの調査と合致していると考えられる。イギリスでは火葬場からの水銀排出量が規制されようとしているが、規制値案は水銀排出量 $150\text{mg}/4\text{体}$ ( $37.5\text{mg}/\text{体}$ )である<sup>10)</sup>。今回測定したケースでは、施設2009-Bはこの基準を大幅に下回っていたが、施設2009-Cでは、測定した12検体中、7検体がこの基準を上回っていた。

施設2009-Bにおいては、触媒装置(SCR)前、およびバグフィルター前の総水銀の排出原単位は、それぞれ $1.1\sim 20.2\text{mg}/\text{体}$ (平均: $7.0\text{mg}/\text{体}$ )、 $6.8\sim 44\text{mg}/\text{体}$ (平均: $19\text{mg}/\text{体}$ )であ

表 C.3.6 水銀の排出原単位算出結果

| 施設       | 日      | 性別  | 火葬時間<br>(min/体) | 年齢<br>(歳) | 総水銀濃度<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 排ガス量<br>( $\text{m}^3/\text{h}$ ) | 排出原単位<br>( $\text{mg}/\text{体}$ ) |
|----------|--------|-----|-----------------|-----------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| A-BF前-1  | 9月8日   | 女性  | 65              | 97        | 1.0                                   | 7835                              | 8.5                               |
| A-BF前-2  | 9月11日  | 女性  | 66              | 71        | 0.2                                   | 7835                              | 2.1                               |
| A-BF前-3  | 9月15日  | 男性  | 70              | 81        | 1.7                                   | 7835                              | 16                                |
| A-BF前-4  | 9月17日  | 女性  | 55              | 65        | 0.8                                   | 7835                              | 5.8                               |
| B-BF前-1  | 11月12日 | 女性  | 44              | 86        | 5.7                                   | 2633                              | 11                                |
| B-BF前-2  | 11月12日 | 女性  | 46              | 58        | 3.4                                   | 2633                              | 6.8                               |
| B-BF前-3  | 11月13日 | 男性  | 57              | 44        | 14.5                                  | 2633                              | 36                                |
| B-BF前-4  | 11月14日 | 男性  | 54              | 78        | 8.8                                   | 2633                              | 21                                |
| B-BF前-5  | 11月14日 | 女性  | 51              | 92        | 6.8                                   | 2633                              | 15                                |
| B-BF前-6  | 11月15日 | 女性  | 53              | 92        | 4.2                                   | 2633                              | 10                                |
| B-BF前-7  | 11月15日 | 女性  | 60              | 40        | 5.3                                   | 2633                              | 14                                |
| B-BF前-8  | 11月15日 | 男性  | 61              | 64        | 4.6                                   | 2633                              | 12                                |
| B-BF前-9  | 11月16日 | 男性  | 52              | 72        | 8.5                                   | 2633                              | 20                                |
| B-BF前-10 | 11月17日 | 男性  | 64              | 92        | 7.4                                   | 2633                              | 21                                |
| B-BF前-11 | 11月17日 | 女性  | 50              | 67        | 20.2                                  | 2633                              | 44                                |
| C-BF前-1  | 12月4日  | 男性  | 86              | 52        | 0.9                                   | 17750                             | 24                                |
| C-BF前-2  | 12月4日  | 男性  | 63              | 69        | 1.5                                   | 17750                             | 27                                |
| C-BF前-3  | 12月5日  | 男性  | 57              | 76        | 1.3                                   | 17750                             | 21                                |
| C-BF前-4  | 12月5日  | 女性  | 49              | 99        | 1.2                                   | 17750                             | 17                                |
| C-BF前-5  | 12月6日  | 女性  | 53              | 74        | 1.3                                   | 17750                             | 20                                |
| C-BF前-6  | 12月7日  | 男性  | 60              | 71        | 21.8                                  | 17750                             | 387                               |
| C-BF前-7  | 12月7日  | 男性  | 53              | 79        | 0.8                                   | 17750                             | 13                                |
| C-BF前-8  | 12月8日  | 女性  | 60              | 77        | 3.2                                   | 17750                             | 56                                |
| A-BF後-1  | 9月8日   | 女性  | 65              | 97        | 0.1                                   | 7835                              | 1                                 |
| A-BF後-2  | 9月11日  | 女性  | 66              | 71        | 0.1                                   | 7835                              | 1                                 |
| A-BF後-3  | 9月15日  | 男性  | 70              | 81        | 1.7                                   | 7835                              | 16                                |
| A-BF後-4  | 9月17日  | 女性  | 55              | 65        | 20.1                                  | 7835                              | 145                               |
| A-BF後-5  | 9月18日  | 男性  | 60              | 102       | 0.2                                   | 7835                              | 1                                 |
| A-BF後-6  | 9月20日  | 男性  | 71              | 90        | 21.4                                  | 7835                              | 198                               |
| A-BF後-7  | 9月21日  | 女性  | 56              | 93        | 1.2                                   | 7835                              | 9                                 |
| A-BF後-8  | 9月22日  | 男性  | 55              | 81        | 0.2                                   | 7835                              | 2                                 |
| A-BF後-9  | 9月23日  | 男性  | 60              | 94        | 0.1                                   | 7835                              | 1                                 |
| A-BF後-10 | 9月24日  | 男性  | 53              | 84        | 0.1                                   | 7835                              | 1                                 |
| A-BF後-11 | 9月24日  | 女性  | 67              | 69        | 0.1                                   | 7835                              | 1                                 |
| A-BF後-12 | 9月25日  | 男性  | 60              | 82        | 1.4                                   | 7835                              | 11                                |
| A-BF後-13 | 9月26日  | 女性  | 57              | 85        | 65.1                                  | 7835                              | 484                               |
| A-BF後-14 | 9月27日  | 死産児 | 48              | 0         | 0.3                                   | 7835                              | 2                                 |
| A-BF後-15 | 9月27日  | 女性  | 58              | 76        | 4.0                                   | 7835                              | 30                                |
| A-BF後-16 | 9月28日  | 女性  | 67              | 84        | 0.6                                   | 7835                              | 5                                 |
| A-BF後-17 | 9月29日  | 男性  | 63              | 85        | 0.3                                   | 7835                              | 2                                 |
| A-BF後-18 | 9月30日  | 男性  | 65              | 32        | 23.1                                  | 7835                              | 196                               |
| A-BF後-19 | 9月30日  | 男性  | 68              | 78        | 0.2                                   | 7835                              | 2                                 |
| A-BF後-20 | 10月1日  | 男性  | 55              | 84        | 0.3                                   | 7835                              | 2                                 |
| B-BF後-1  | 11月12日 | 女性  | 44              | 86        | 0.6                                   | 2633                              | 1                                 |
| B-BF後-2  | 11月12日 | 女性  | 46              | 58        | 0.8                                   | 2633                              | 2                                 |
| B-BF後-3  | 11月13日 | 男性  | 57              | 44        | 7.7                                   | 2633                              | 19                                |
| B-BF後-4  | 11月14日 | 男性  | 54              | 78        | 1.2                                   | 2633                              | 3                                 |
| B-BF後-5  | 11月14日 | 女性  | 51              | 92        | 1.3                                   | 2633                              | 3                                 |
| B-BF後-6  | 11月15日 | 女性  | 53              | 92        | 2.7                                   | 2633                              | 6                                 |
| B-BF後-7  | 11月15日 | 女性  | 60              | 40        | 1.3                                   | 2633                              | 3                                 |
| B-BF後-8  | 11月15日 | 男性  | 61              | 64        | 0.8                                   | 2633                              | 2                                 |
| B-BF後-9  | 11月16日 | 男性  | 52              | 72        | 3.2                                   | 2633                              | 7                                 |
| B-BF後-10 | 11月17日 | 男性  | 64              | 92        | 1.6                                   | 2633                              | 4                                 |
| B-BF後-11 | 11月17日 | 女性  | 50              | 67        | 9.2                                   | 2633                              | 20                                |
| B-BF後-12 | 11月24日 | 男性  | 48              | 74        | 7.6                                   | 2633                              | 16                                |
| B-BF後-13 | 11月25日 | 男性  | 64              | 46        | 4.0                                   | 2633                              | 11                                |
| B-BF後-14 | 11月25日 | 男性  | 62              | 65        | 0.9                                   | 2633                              | 2                                 |
| B-BF後-15 | 11月26日 | 男性  | 62              | 76        | 1.5                                   | 2633                              | 4                                 |
| C-BF後-1  | 12月4日  | 男性  | 86              | 52        | 7.6                                   | 17750                             | 194                               |
| C-BF後-2  | 12月4日  | 男性  | 63              | 69        | 5.1                                   | 17750                             | 95                                |
| C-BF後-3  | 12月5日  | 男性  | 57              | 76        | 3.8                                   | 17750                             | 65                                |
| C-BF後-4  | 12月5日  | 女性  | 49              | 99        | 4.8                                   | 17750                             | 70                                |
| C-BF後-5  | 12月6日  | 女性  | 53              | 74        | 3.6                                   | 17750                             | 56                                |
| C-BF後-6  | 12月7日  | 男性  | 60              | 71        | 34.6                                  | 17750                             | 614                               |
| C-BF後-7  | 12月7日  | 男性  | 53              | 79        | 4.1                                   | 17750                             | 64                                |
| C-BF後-8  | 12月8日  | 女性  | 60              | 77        | 8.8                                   | 17750                             | 157                               |
| C-BF後-9  | 12月10日 | 女性  | 62              | 88        | 11.5                                  | 17750                             | 212                               |
| C-BF後-10 | 12月11日 | 男性  | 68              | 89        | 6.4                                   | 17750                             | 128                               |
| C-BF後-11 | 12月11日 | 女性  | 54              | 58        | 76.3                                  | 17750                             | 1218                              |
| C-BF後-12 | 12月12日 | 女性  | 55              | 77        | 12.3                                  | 17750                             | 200                               |
| C-BF後-13 | 12月13日 | 女性  | 61              | 80        | 3.1                                   | 17750                             | 56                                |
| C-BF後-14 | 12月13日 | 女性  | 56              | 82        | 10.3                                  | 17750                             | 170                               |
| C-BF後-15 | 12月14日 | 女性  | 56              | 90        | 4.4                                   | 17750                             | 74                                |
| B-SCR後-1 | 11月24日 | 男性  | 48              | 74        | 0.3                                   | 2633                              | 0.6                               |
| B-SCR後-2 | 11月25日 | 男性  | 64              | 46        | 0.7                                   | 2633                              | 1.9                               |
| B-SCR後-3 | 11月25日 | 男性  | 62              | 65        | 0.7                                   | 2633                              | 1.9                               |
| B-SCR後-4 | 11月26日 | 男性  | 62              | 76        | 0.6                                   | 2633                              | 1.7                               |
| C-AC後-1  | 12月11日 | 女性  | 54              | 58        | 1.4                                   | 17750                             | 23                                |
| C-AC後-2  | 12月12日 | 女性  | 55              | 77        | 1.4                                   | 17750                             | 22                                |
| C-AC後-3  | 12月13日 | 女性  | 61              | 80        | 1.4                                   | 17750                             | 25                                |
| C-AC後-4  | 12月13日 | 女性  | 56              | 82        | 3.4                                   | 17750                             | 56                                |
| C-AC後-5  | 12月14日 | 女性  | 56              | 90        | 2.8                                   | 17750                             | 46                                |
| C-AC後-6  | 12月16日 | 男性  | 68              | 63        | 1.9                                   | 17750                             | 38                                |
| C-AC後-7  | 12月16日 | 女性  | 51              | 70        | 4.8                                   | 17750                             | 73                                |
| C-AC後-8  | 12月17日 | 男性  | 65              | 43        | 2.3                                   | 17750                             | 43                                |
| C-AC後-9  | 12月18日 | 男性  | 59              | 87        | 2.2                                   | 17750                             | 39                                |
| C-AC後-10 | 12月18日 | 男性  | 51              | 65        | 1.8                                   | 17750                             | 27                                |
| C-AC後-11 | 12月20日 | 女性  | 58              | 75        | 1.5                                   | 17750                             | 26                                |
| C-AC後-12 | 12月20日 | 男性  | 64              | 83        | 3.0                                   | 17750                             | 56                                |
| 算術平均     |        |     | 58              | 74        | 6.0                                   | 9981                              | 59                                |
| 最大値      |        |     | 86              | 102       | 76                                    | 17750                             | 1940                              |
| 最小値      |        |     | 44              | 0         | 0.1                                   | 2633                              | 0.14                              |
| 標準偏差     |        |     | 8               | 17        | 12                                    | 6608                              | 10                                |
| 中央値      |        |     | 58              | 76        | 2                                     | 7835                              | 17                                |

※水銀濃度は実測値、BF: バグフィルター、AC: 活性炭吸着設備、SCR: 触媒装置

り、排ガス処理上流側での排出原単位も比較的強く抑えられていた。バグフィルター前の排出原単位は、2008年での調査とほぼ同じ程度のレベルであったが、施設2009-Bでは、バグフィルター、触媒装置で水銀が67%以上除去されていることから、最終的な大気放出に関する原単位は、非常に強く抑えられているといえる。

施設2009-Cにおいては、活性炭吸着設備(AC)前、およびバグフィルター前の総水銀の排出原単位は、それぞれ56～1,218 mg/体(平均:225mg/体)、17～387 mg/体(平均:70mg/体)で、バグフィルター前では、歯科アマルガムに由来するような高濃度のピーク、活性炭吸着設備(AC)前では、その多くが、バグフィルターでの集じん灰層からの水銀の脱着により、イギリスにおける規制値をオーバーするとともに、これまでの国内での調査結果も大きく上回る傾向にあった。しかし、前述したように、最終的な大気への排出原単位は、活性炭吸着装置により、従来の調査結果と同レベルまで抑えられており、この観点からは、活性炭吸着装置の意義は重要であるといえる。

施設2009-Cでは、前述したように、水銀の排出濃度としては、これまでの調査と同レベルであった。しかし、排出原単位としては、活性炭吸着装置を導入しながらも、イギリスでの規制値案をオーバーするようなケースが12検体中7検体あった。その内訳としては、歯科アマルガムに由来するような高濃度ピークを完全に除去しきれなかったことによるものが2検体、バグフィルターでの集じん灰層からのHg<sup>0</sup>の脱着を除去しきれなかったものが5検体存在した。イギリスの規制値案を日本における火葬場に適用することは疑義があるものの、一つの基準として見た場合には、さらに水銀排出濃度を低減することが求められよう。

そのためには、まず、歯科アマルガムに由来する水銀の高濃度ピークに関しては、今後、歯科アマルガムを多く有する世代の火葬が増加してくることが予想されており<sup>9)</sup>、施設2009-Cのみに限定されないが、現在主に用いられているダイオキシン類除去用の活性炭に、水銀除去用の活性炭を加えることや、活性炭層のSVを下げること等、活性炭吸着設備による水銀除去能を高めることが必要であると考えられる。また、活性炭の吸着破過状況を適宜モニタリングし、必要時には、活性炭を交換するなど適切な管理が求められる。

また、バグフィルターでの集じん灰層からの水銀の脱着に関しては、これまでの調査では見られなかったケースであり、この場合は、集じん灰中の水銀濃度が高い場合に生じることが施設2009-Cの結果から推測された。したがって、バグフィルターの定期的な清掃頻度を高め、集じん灰層を適宜取り除くことが重要であると考えられる。

## (2) 水銀排出原単位と検体との関係と、これまでのまとめ

上記で算出した水銀排出原単位と検体の年齢、性別との関連性を評価した。

まず、検体が有する本来の水銀量との関連性をみるため、排ガス処理による影響を排して考察する。すなわち、表 C.3.6 の水銀排出原単位のうち、施設 2009-B、2009-C では、バグフィルター前の値を用い、施設 2009-A では、バグフィルターではほとんど水銀が除去されないこと、データ数が多いことからバグフィルター後の値を用いた。水銀排出原単位と、検体の性別・年齢との関係を施設 2008-H での調査結果(44 検体)、2005 調査結果<sup>9)</sup>と比較する形で、表 C.3.7 に示す。

データ数は十分とはいえないが、まず施設 2008-H での結果は、2005 調査と同様に、65～69 歳で男女とも最大の値を示した。性別における排出量の違いについては、男性が 5.6mg/体、女性が 22.1mg/体と大きな差があったが、表 C.2.2 における 2008-H-25(女性)のデータを除くと、女性平均は 4.8 mg/体に減少し、2005 調査と同様に男女間の差はあまり見られなかった。極端に大きな水銀排出量が見られた 2008-H-25 においては、御遺体の年齢が 66 歳であった。これは、歯科アマルガムの治療歴からの推測では、45～70 歳くらいまでの年代がもっともアマルガムを保持していると考えられる<sup>9)</sup>ことと合致していた。

年代別の排出量を個別にみると、2005 調査結果と比較して、65～69 歳以外は、施設 2008-H での調査結果が全体的に低い傾向を示した。65～69 歳の火葬のみ排ガスサンプリングラインでの損失が存在したとは考えにくく、測定に問題はないと考えられ、本研究結果での水銀排出量が少なかった要因としては、施設 2008-H の管轄自治体における御遺体中のアマルガム量が少なかったことに由来するのではないかと推測された。また、2009 年の 3 施設での結果をみると、85～89 歳の 1 名の非常に大きな排出原単位に影響されている部分を除けば、65～69、70～74 歳の部分が男女ともに最大の値を示した。2005 年調査、および施設 2008-H では、65～69 歳で男女とも最大の値を示し、これは、歯科アマルガムの治療歴

表 C.3.7 年齢、性別ごとの水銀排出量 (mg/体)

| 年齢    | 2005調査(n=34) |       |       | 2008調査(n=44) 施設2008-H |      |      | 2009調査:(n=38) 施設2009-A～C |      |      |
|-------|--------------|-------|-------|-----------------------|------|------|--------------------------|------|------|
|       | 男性           | 女性    | 全体    | 男性                    | 女性   | 全体   | 男性                       | 女性   | 全体   |
| -59   | 35.8         | —     | 35.8  | —                     | 0.9  | 0.9  | 85.6                     | 10.4 | 55.5 |
| 60-64 | 68.7         | —     | 68.7  | 4.0                   | 25.5 | 14.7 | 12.3                     | —    | 12.3 |
| 65-69 | 146.0        | 132.0 | 142.0 | 12.4                  | 35.0 | 18.1 | 27.3                     | 63.3 | 54.3 |
| 70-74 | 79.5         | 18.6  | 64.3  | 4.5                   | 4.0  | 4.3  | 20.3                     | 10.3 | 10.7 |
| 75-79 | 22.0         | 20.2  | 21.3  | 12.2                  | 9.4  | 11.7 | 14.2                     | 43.3 | 23.9 |
| 80-84 | 42.1         | 24.7  | 37.7  | 4.9                   | 3.2  | 4.2  | 6.4                      | 4.9  | 6.1  |
| 85-89 | —            | —     | —     | 2.8                   | 0.2  | 2.5  | 24.8                     | 2.3  | 16.6 |
| 90-94 | 19.0         | 67.8  | 43.4  | 2.0                   | 3.6  | 3.3  | 73.2                     | 11.2 | 42.2 |
| 95-   | 64.6         | 48.5  | 58.2  | 5.1                   | 9.4  | 7.3  | 1.3                      | 9.1  | 6.5  |
| 全体    | 54.9         | 45.7  | 51.8  | 5.6                   | 22.1 | 13.3 | 48.3                     | 51.2 | 49.6 |

からの推測では、45～70歳くらいまでの年代がもっともアマルガムを保持していると考えられることと合致しているとされていたが<sup>9)</sup>、特に、2005調査は、4年前の調査結果であり、現在では、50～75歳に相当する年代が、もっともアマルガムを保持していると考えられ、70～74歳の部分が高くなっても矛盾はないと考えられた。

性別における排出量の違いについては、男性が48.3mg/体、女性が51.2mg/体となり、2005調査と同様に男女間の差はあまり見られなかった。排出量をみると、2005調査結果、2009年の調査結果はほぼ同等の排出量であった。

表 C.3.7 の全ての結果に、施設 2008-A～2008-D、施設 2008-G の排出量を加え、計 126 体の水銀排出量について総平均をとると、本研究で得られた排出量としては、36.9mg/体と算出された。また、2009年の結果を、触媒装置や、活性炭吸着設備後の値に変更し、103体の正味の排出ベース（高度排ガス処理の影響を考慮して）での水銀排出原単位として総平均をとると、31.4mg/体と算出された。したがって、本研究で、火葬から大気への最新の水銀排出原単位としては、31.4～36.9mg/体と算出された。

### (3) 火葬灰への水銀の排出原単位

排ガス中水銀測定における連続分析法では、ばいじん中の水銀濃度は対象としておらず、ガス状の水銀のみを対象としている。特に、2009年の調査では、ばいじん濃度および、後述する表C.6.1にて、集じん灰中水銀濃度をそれぞれ測定していることから、特にバグフィルターにおいて、どの程度集じん灰へ移行しているかを推測した。

まず、施設 2009-A～2009-Cにおけるバグフィルター前のばいじん濃度を  $C_{in}$  (mg/m<sup>3</sup><sub>N</sub>) とし、バグフィルター出口のばいじん濃度を  $C_{out}$  (mg/m<sup>3</sup><sub>N</sub>) とし、排ガス量(O<sub>2</sub>12%換算):  $V$  (m<sup>3</sup><sub>N</sub>/h) と火葬時間  $t$  (h) を用いて、火葬1件あたりの集じん灰量  $D$  (mg/体) を (C.3.1) 式によって求めた。

$$D = (C_{in} - C_{out}) \cdot V \cdot t \quad (C.3.1)$$

(C.3.1) 式からは、火葬1件あたりの集じん灰の発生量は、施設 2009-Aにおいて138～146g/体、施設 2009-Bについて99～183 g/体、施設 2009-Cについて、73～138 g/体と算出された、これらの値に、後述する集じん灰中の水銀測定値(表 C.6.1)の値を乗じ、1体あたり集じん灰に移行する水銀量を算出すると、施設 2009-Aでは集じん灰を測定していないため算出できなかったが、施設 2009-B、および施設 2009-Cではそれぞれ0.38～0.70mg/体、0.8～1.52mg/体と計算され、排ガスとして排出される水銀量は、前述したように、施設 2009-Bにおいては、0.6～1.9 mg/体(平均:1.5 mg/体)であり、施設 2009-Cにおいては22～73 mg/体(平均:40 mg/体)であった。

これらの結果から、施設2009-Bでは、量としては低いものの、大気排出量の約半分に相当する量が灰として排出され、施設2009-Cでは、約1/50に相当する量が灰として排出されている結果となった。

マスバランスに関しては検討したが、火葬と、それにより発生する灰が必ずしも対応していないことや、施設2009-Cではバグフィルターに蓄積した集じん灰からの $\text{Hg}^0$ の放出があったことから、マスバランスの整合性は低かった。

#### 4. パイロット式活性炭吸着実験装置による水銀除去実験

表C.4.1に、パイロット式活性炭吸着実験装置による水銀除去実験結果を示す。

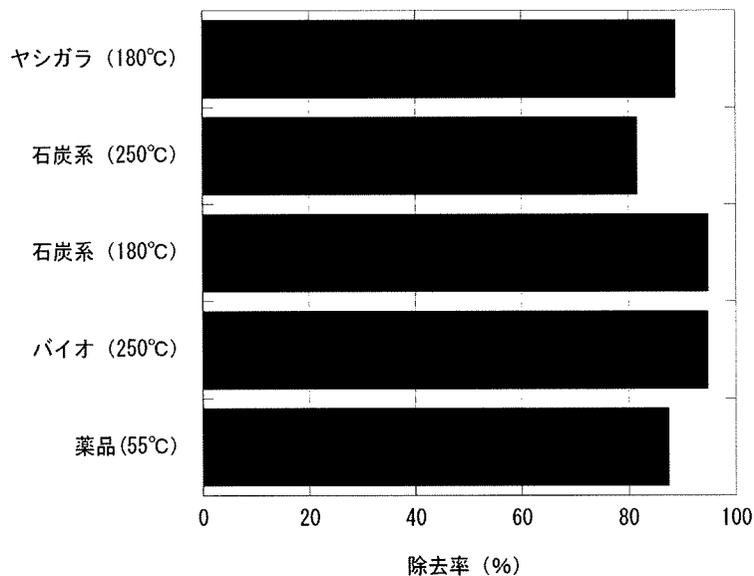
まず、活性炭吸着塔後の水銀濃度は極めて低く、総水銀濃度では $0.0 \sim 0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ の範囲であった。入口側が極めて高かった排ガス条件に対しても総水銀濃度は $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であり、

表C.4.1 火葬炉排気筒出口および活性炭吸着塔出口の水銀濃度および除去率

|       | 排気筒出口(活性炭吸着塔入口)                                          |                                                             |                                               |                       | 活性炭吸着塔出口                                                 |                                                             |                                               |                       | 除去率 (%) |
|-------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|---------|
|       | $\text{Hg}^0$ 濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ ) | $\text{Hg}^{2+}$ 濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ ) | 総水銀濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ ) | $\text{Hg}^0$ の割合 (%) | $\text{Hg}^0$ 濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ ) | $\text{Hg}^{2+}$ 濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ ) | 総水銀濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ ) | $\text{Hg}^0$ の割合 (%) |         |
| 3月5日  | 5.4                                                      | 0.4                                                         | 5.7                                           | 94                    | 0.1                                                      | 0.4                                                         | 0.5                                           | 21                    | 91      |
| 3月7日  | 0.8                                                      | 0.6                                                         | 1.4                                           | 59                    | 0.0                                                      | 0.2                                                         | 0.2                                           | 18                    | 84      |
| 3月9日  | 0.7                                                      | 0.6                                                         | 1.3                                           | 53                    | 0.0                                                      | 0.1                                                         | 0.1                                           | 0                     | 90      |
| 3月10日 | 0.3                                                      | 2.3                                                         | 2.6                                           | 10                    | 0.0                                                      | 0.1                                                         | 0.1                                           | 0                     | 97      |
| 3月11日 | 0.1                                                      | 2.7                                                         | 2.8                                           | 3                     | 0.0                                                      | 0.1                                                         | 0.1                                           | 0                     | 98      |
| 3月13日 | 0.0                                                      | 1.3                                                         | 1.3                                           | 1                     | 0.0                                                      | 0.1                                                         | 0.1                                           | 25                    | 94      |
| 3月14日 | 0.0                                                      | 1.6                                                         | 1.6                                           | 0                     | 0.0                                                      | 0.1                                                         | 0.1                                           | 0                     | 97      |
| 3月16日 | 0.0                                                      | 0.4                                                         | 0.4                                           | 0                     | 0.0                                                      | 0.1                                                         | 0.1                                           | 0                     | 83      |
| 3月17日 | 0.1                                                      | 0.1                                                         | 0.1                                           | 66                    | 0.0                                                      | 0.1                                                         | 0.1                                           | 0                     | 52      |
| 3月18日 | 0.0                                                      | 0.1                                                         | 0.1                                           | 6                     | 0.1                                                      | 0.1                                                         | 0.2                                           | 43                    | -296    |
| 3月19日 | 0.2                                                      | 0.1                                                         | 0.3                                           | 74                    | 0.0                                                      | 0.1                                                         | 0.1                                           | 13                    | 74      |
| 3月20日 | 0.2                                                      | 0.0                                                         | 0.2                                           | 79                    | 0.0                                                      | 0.2                                                         | 0.2                                           | 0                     | 5       |
| 3月21日 | 0.8                                                      | 0.0                                                         | 0.8                                           | 100                   | 0.0                                                      | 0.0                                                         | 0.0                                           | 0                     | 100     |
| 3月22日 | 81.2                                                     | 1.5                                                         | 82.7                                          | 98                    | 0.0                                                      | 0.1                                                         | 0.1                                           | 0                     | 100     |
| 3月23日 | 0.7                                                      | 0.1                                                         | 0.8                                           | 90                    | 0.1                                                      | 0.0                                                         | 0.2                                           | 87                    | 81      |
| 3月24日 | 0.1                                                      | 0.0                                                         | 0.2                                           | 73                    | 0.0                                                      | 0.0                                                         | 0.0                                           | 43                    | 77      |
| 3月25日 | 1.0                                                      | 0.2                                                         | 1.1                                           | 87                    | 0.3                                                      | 0.1                                                         | 0.4                                           | 74                    | 63      |
| 3月28日 | 1.4                                                      | 0.1                                                         | 1.5                                           | 97                    | 0.1                                                      | 0.0                                                         | 0.1                                           | 85                    | 91      |
| 3月29日 | 0.8                                                      | 0.0                                                         | 0.8                                           | 100                   | 0.1                                                      | 0.0                                                         | 0.1                                           | 80                    | 87      |
| 3月30日 | 0.0                                                      | 0.0                                                         | 0.0                                           | 100                   | 0.0                                                      | 0.0                                                         | 0.0                                           | 100                   | 75      |
| 3月31日 | 0.4                                                      | 0.1                                                         | 0.4                                           | 88                    | 0.2                                                      | 0.1                                                         | 0.2                                           | 74                    | 47      |
| 4月1日  | 0.1                                                      | 0.1                                                         | 0.1                                           | 43                    | 0.0                                                      | 0.0                                                         | 0.0                                           | 100                   | 97      |
| 4月2日  | 0.4                                                      | 0.0                                                         | 0.4                                           | 92                    | 0.0                                                      | 0.0                                                         | 0.0                                           | 100                   | 99      |
| 4月5日  | 1.3                                                      | 0.3                                                         | 1.6                                           | 80                    | 0.2                                                      | 0.0                                                         | 0.2                                           | 77                    | 88      |
| 4月6日  | 0.9                                                      | 0.4                                                         | 1.3                                           | 69                    | 0.2                                                      | 0.0                                                         | 0.2                                           | 81                    | 85      |
| 4月10日 | 0.7                                                      | 0.8                                                         | 1.5                                           | 46                    | 0.0                                                      | 0.0                                                         | 0.1                                           | 77                    | 96      |
| 4月11日 | 0.6                                                      | 0.1                                                         | 0.7                                           | 80                    | 0.0                                                      | 0.0                                                         | 0.1                                           | 60                    | 93      |
| 4月12日 | 0.1                                                      | 0.0                                                         | 0.1                                           | 77                    | 0.1                                                      | 0.0                                                         | 0.1                                           | 100                   | -23     |
| 4月13日 | 0.4                                                      | 0.1                                                         | 0.5                                           | 76                    | 0.1                                                      | 0.1                                                         | 0.1                                           | 45                    | 78      |
| 4月14日 | 0.2                                                      | 0.1                                                         | 0.3                                           | 77                    | 0.0                                                      | 0.0                                                         | 0.0                                           | 100                   | 85      |
| 4月15日 | 0.1                                                      | 0.0                                                         | 0.1                                           | 75                    | 0.1                                                      | 0.0                                                         | 0.1                                           | 100                   | 18      |
| 4月16日 | 1.4                                                      | 0.0                                                         | 1.4                                           | 100                   | 0.0                                                      | 0.0                                                         | 0.0                                           | 0                     | 100     |
| 4月17日 | 1.9                                                      | 0.2                                                         | 2.1                                           | 91                    | 0.1                                                      | 0.1                                                         | 0.2                                           | 69                    | 92      |
| 平均    | 2.5                                                      | 0.4                                                         | 3.0                                           | 65.8                  | 0.1                                                      | 0.1                                                         | 0.1                                           | 47.6                  | 66.6    |

極めて高度に水銀が活性炭吸着塔で除去されていることがわかった。また、活性炭吸着塔出口では、0価水銀の平均濃度は $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 、2価水銀の平均濃度は $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であり、各火葬における総水銀に占める0価水銀の平均割合は47.6%であった。水銀濃度が極めて小さいため評価が難しいが、この結果より0価、2価ともにほぼ同量存在しているといえる。

活性炭吸着塔における水銀除去率としては、平均除去率は66.6%となった。3/18、4/12において除去率がマイナスになっているが、これは排気筒出口（活性炭吸着塔入口）濃度が $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ しかなく、濃度が逆転したことによる。 $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ は定量下限付近であるため、経路への付着している水銀の影響などにより除去率が逆転する場合は他の事例でも認められる。したがって、活性炭吸着塔入口濃度が $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 以上ある場合（20検体）についてかぎってみると90.2%となり、極めて高度に除去されていることがわかった。この20検体について、活性炭種類および活性炭壁面温度別に分けたものを図C.4.1に示す。



図C.4.1 活性炭種類および活性炭壁面温度別水銀除去率

この結果より、最も除去率の高かった条件は石炭系活性炭を活性炭壁面温度 $180^{\circ}\text{C}$ で運転した場合で、94.9%（検体数6）の除去率であった。同じ条件のヤシガラ活性炭では、やや除去率が低く88.9%（検体数3）であった。実際の活性炭層温度はそれぞれ $79.6^{\circ}\text{C}$ 、 $79.2^{\circ}\text{C}$ であった。また、石炭系活性炭については活性炭壁面温度を $250^{\circ}\text{C}$ で運転した場合の除去率は81.8%（検体数4）と約13%減少した。実際の活性炭層温度は $112.9^{\circ}\text{C}$ へ上昇しており、温度上昇に伴い吸着安定しにくくなったものと考えられた。バイオ炭については $250^{\circ}\text{C}$ で運転した場合の除去率は94.8%（検体数3）であり、同温度での石炭系活性炭より除去率が高かった。しかしながら、実際の活性炭層温度は $98.4^{\circ}\text{C}$ までしか上がっていなかった。薬品処理炭については、87.5%（検体数2）の除去率であった。

水銀の除去率には、活性炭の種類や温度だけでなく、入口水銀濃度や活性炭に含まれる不純物も影響される。したがって、一概にどの活性炭が良いとはいえないが、本調査結果からは、すべての活性炭で高度な除去が期待できること、活性炭の発火などの観点を考慮すると石炭系活性炭が望ましいと考えられた。

## 5. 排ガス中クロムの排出濃度、および挙動調査

表 C.5.1 に、施設 2009-A ～ 2009-C の各サンプリングポイントで、排ガス中のクロムを調査した結果を、排ガス温度、排ガス量、ばいじん濃度、酸素濃度とともに示す。

また、表 C.5.2、表 C.5.3 においては、各排ガス処理プロセスにおけるばいじん、クロムの除去率を示した。

表 C.5.1 排ガス中クロム、および関連項目の測定結果(2009 調査)

| 項目 | 火葬時間     | 排ガス温度 | 排ガス流量                          |                                | ばいじん                          | クロム                            | O <sub>2</sub> |      |
|----|----------|-------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------|------|
|    |          |       | 湿り                             | 乾き                             |                               |                                |                |      |
| 単位 | 分        | °C    | m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /h | m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /h | g/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> | mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> | %              |      |
| A  | A-1-BF前  | 62    | 180                            | 9,480                          | 9,060                         | 0.090                          | 0.20           | 19.2 |
|    | A-1-BF後  |       | 162                            | 21,200                         | 20,400                        | <0.005                         | <0.05          | 19.2 |
|    | A-1-SCR後 |       | 125                            | 6,960                          | 6,610                         | <0.005                         | <0.05          | 19.0 |
| B  | B-1-再燃後  | 45    | 825                            | 3,000                          | 2,600                         | 0.055                          | 0.08           | 9.7  |
|    | B-1-BF前  |       | 196                            | 1,150                          | 1,070                         | 0.099                          | 0.37           | 15.9 |
|    | B-1-BF後  |       | 134                            | 2,650                          | 2,470                         | <0.002                         | <0.02          | 16.2 |
|    | B-1-SCR後 |       | 103                            | 2,930                          | 2,730                         | <0.002                         | <0.02          | 16.5 |
|    | B-2-再燃後  | 45    | 780                            | 3,120                          | 2,730                         | 0.054                          | 0.05           | 10.9 |
|    | B-2-BF前  |       | 199                            | 1,150                          | 1,080                         | 0.180                          | 0.81           | 16.8 |
| C  | C-1-再燃後  | 85    | 635                            | —                              | —                             | 0.090                          | 0.03           | 12.9 |
|    | C-1-BF前  |       | 151                            | 6,290                          | 5,980                         | 0.110                          | <0.06          | 19.3 |
|    | C-1-BF後  |       | 130                            | —                              | —                             | 0.023                          | <0.06          | 19.4 |
|    | C-1-SCR後 |       | 88                             | 16,900                         | 16,300                        | 0.032                          | <0.06          | 19.3 |
|    | C-2-再燃後  | 61    | 526                            | —                              | —                             | 0.087                          | 0.05           | 15.5 |
|    | C-2-BF前  |       | 164                            | 7,600                          | 7,430                         | 0.072                          | <0.06          | 19.5 |
|    | C-2-BF後  |       | 142                            | —                              | —                             | <0.008                         | <0.08          | 19.8 |
|    | C-2-SCR後 |       | 130                            | 19,800                         | 19,200                        | <0.007                         | <0.07          | 19.6 |

※ばいじん、クロムについてはO<sub>2</sub>12%換算値

※BF：バグフィルター、AC：活性炭吸着設備、SCR：触媒装置

まず、表 C.5.1 において、各サンプリングポイントでのクロム濃度を見ると、多くの箇所で、定量下限以下となり、触媒装置、および活性炭吸着設備前後でのクロムの挙動は、非常に微量であるため把握できなかった。バグフィルター前後での濃度変化としては、施

表C.5.2 各排ガス処理プロセスでのばいじん除去率(%)

|     | 排ガス冷却器 | バグフィルター | 触媒装置<br>活性炭吸着設備 |
|-----|--------|---------|-----------------|
| A   |        | 94<     | —               |
| B-1 | -80    | 98<     | —               |
| B-2 | -233   |         |                 |
| C-1 | -22    | 79      | -39             |
| C-2 | 17     | 90<     | —               |

表C.5.3 各排ガス処理プロセスでのクロム除去率(%)

|     | 排ガス冷却器 | バグフィルター | 触媒装置<br>活性炭吸着設備 |
|-----|--------|---------|-----------------|
| A   |        | 75<     | —               |
| B-1 | -363   | 95<     | —               |
| B-2 | -1520  |         |                 |
| C-1 | —      | —       | —               |
| C-2 | —      | —       | —               |

“—”は、定量下限値の関係で、除去率が算出できない場合を指す。

斜線部分は前後のばいじんを測定していないため、除去率が算出できない場合を指す。

設2009-Aにおいて、 $0.20\text{mg/m}_N^3$ が、 $0.05\text{mg/m}_N^3$ 未満まで除去されており、表C.5.3から、少なくとも75%以上除去されていることが示された。施設2009-Bでは、 $0.37\text{mg/m}_N^3$ が、 $0.02\text{mg/m}_N^3$ 未満まで除去されており、少なくとも95%以上除去されているといえる。施設2009-Cにおいては、バグフィルター前のクロム濃度は $0.03\sim 0.05\text{mg/m}_N^3$ と低く、定量下限の関係から除去率は求められなかったが、施設2009-A、施設2009-Bと同様に高度に除去されているものと考えられる。

クロムに関しては、表C.5.1に示す、バグフィルター前後の温度域 $130\sim 196^\circ\text{C}$ において、そのほとんどが固体で存在すると推定されるため<sup>24)</sup>、ばいじんに含まれていると考えられる。そのため、バグフィルターでは、ばいじんとともに高度除去されていることが示唆された。

また、施設2009-Bにおいては、排ガス冷却器として熱交換器が採用されており、その前後における排ガス中のクロムを測定したが、再燃焼炉後のクロム濃度は、 $0.05\sim 0.08\text{mg/m}_N^3$ であり、バグフィルター前では、 $0.37\sim 0.81\text{mg/m}_N^3$ まで増加した。表C.5.3からこの部分の除去率は、1回目で-363%、2回目で-1520%であり、熱交換器部分でクロムが増加していることが示された。表C.5.2において、この部分でのばいじんの除去率をみると、-233～-80%となり、ばいじんも増加しており、再燃焼炉出口では約 $800^\circ\text{C}$ の状態、気体で存在していたNa等の元素が、温度低下に伴ってばいじん上に凝縮し増加した、あるいは過去の火葬で、熱交換器部分に堆積したばいじんが、飛散し熱交換器後段にオーバーフローしていることが推測された。

この場合、ばいじん中のクロム濃度が堆積分についても一定であると仮定すると、ばいじんの増加割合に比べ、クロムの増加割合は小さくなるか、ほぼ同じ値となるはずである。しかし現実には、熱交換器部分でのクロムの増加割合の方が高くなっていた。火葬炉における熱交換器の材質としては、主燃焼炉における棺桶を支持する架台と同様に、耐熱性に優れたステンレス鋼が主に使用されている。ステンレスには、12%以上のクロムが含まれることが知られている<sup>25)</sup>。

ここで、表 C.5.1 の施設 2009-B における、再燃後の排ガス中ばいじん濃度、クロム濃度から、このポイントでのばいじん中のクロム濃度を求めると、926～1,455mg/kg と算出され、バグフィルター前についても計算すると、バグフィルター前でのばいじん中のクロム濃度は、3,737～4,500mg/kg と算出された。後述する表 C.6.1 における、施設 2009-B の残骨灰中クロム濃度、集じん灰中クロム濃度は、1,301mg/kg、3,789mg/kg であり、これらそれぞれが、再燃後のばいじんと、バグフィルター前のばいじんのクロム濃度にほぼ一致し、ばいじんの由来からも、残骨灰≒再燃前のばいじん、集じん灰≒バグフィルター前のばいじんと考えて問題ないと考えられる。さらに、バグフィルター前では再燃後に比較し、排ガス中のばいじん濃度、クロム濃度は増加しており、その差にあたるばいじん増分中のクロム濃度が計算でき、それらは 6,000～6,600mg/kg と算出された。この値は、残骨灰や集じん灰よりも高い濃度である。したがって、熱交換器部分でのクロム増加は、過去に堆積したばいじんが飛散していることに加え、熱交換器部分材質のステンレス表面の一部が剥離し、排ガス処理後段に飛散し、集じん灰のクロム源の一部となっている可能性が示唆された。

第 2 章でも述べたように、熱交換器は、その導入により排ガス処理が省スペースとなるが、多くの場合、ダイオキシン類が熱交換器部分で再合成されることがわかっている。それに加え、本研究にて、熱交換器が集じん灰へのクロムの供給源となっている可能性が示されたため、熱交換器の導入には注意する必要がある。

## 6. 残骨灰、集じん灰中の重金属、フッ素、ホウ素

残骨灰、もしくは集じん灰は、施設 2008-D、2008-H 以外の施設全てにおいて採取し、評価試料とした。以下に各元素の溶出量、含有量試験結果について述べる。特に施設 2009-A～2009-C では、残骨灰中の水銀に関しては測定しなかった。なお、土壤汚染対策法に基づいた環境省告示 19 号にて規定される I. 含有量試験、II. 含有量、III. 含有量基準は、それぞれ 1N 塩酸、あるいはアルカリ緩衝液による抽出試験、抽出試験による抽出量、抽出量に対する基準として定められているが、特に II. 含有量に関しては本来の全含有量とは異なり混同を避けるため、以下では 19 号含有量と記載する。

### 6.1 火葬灰のキャラクタリゼーション

#### (1) 元素分析

まず、火葬灰のキャラクタリゼーションとして、蛍光 X 線分析、ICP 発光分析、Hg の加熱気化分析の結果を、表 C.6.1 に示す。

表より残骨灰の主成分は、Ca、P、Na、Fe、Si、Al、Mg 等であった。基本的には骨の成分は主成分がヒドロキシアパタイト ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ )<sup>26)</sup> であることから、Ca、P の濃度

がそれぞれ13～35%、6～12%と高濃度に含まれていた。

また、集じん灰の主成分としては、Na、K等のアルカリ金属、S、Cl等、低沸点の塩類が多く含まれていた。また、Zn、Pb、Cd等の重金属は、残骨灰よりも集じん灰に多く含まれていた。

Crに関しては、施設2009-A～2009-Cの残骨灰で順に、646、1301、297mg/kgであり、施設2009-B、2009-Cの集じん灰で順に、3789mg/kg、1142mg/kgとなり集じん灰に多く含まれる傾向であった。Hgに関しては、残骨灰には0.44～1.17mg/kgであり低濃度であったが、集

表 C.6.1 火葬灰の分析結果:2009 調査 (mg/kg)

|    | 施設A    |      | 施設B    |        | 施設C    |        | 測定方法    |
|----|--------|------|--------|--------|--------|--------|---------|
|    | 残骨灰    | 集じん灰 | 残骨灰    | 集じん灰   | 残骨灰    | 集じん灰   |         |
| O  | 478338 | N.A. | 432906 | 340236 | 439805 | 387187 | XRF     |
| Ca | 139860 | N.A. | 269860 | 5401   | 347114 | 22636  | XRF     |
| Al | 125687 | N.A. | 73291  | 2106   | 1439   | 9924   | XRF     |
| Si | 80625  | N.A. | 8695   | 4490   | 6392   | 128719 | XRF     |
| P  | 63431  | N.A. | 116312 | 8555   | 121333 | 7017   | XRF     |
| Na | 33030  | N.A. | 30221  | 134260 | 23209  | 77138  | XRF     |
| C  | 19194  | N.A. | 23269  | 37136  | 24411  | 46469  | XRF     |
| Mg | 18753  | N.A. | 9014   | 785    | 4898   | 5511   | XRF     |
| K  | 14610  | N.A. | 15966  | 169934 | 7480   | 117780 | XRF     |
| Fe | 11342  | N.A. | 10187  | 102917 | 2142   | 7464   | ICP-AES |
| Ti | 6830   | N.A. | 4341   | 1585   | 1791   | 4121   | XRF     |
| F  | 1947   | N.A. | 1579   | N.D.   | N.D.   | N.D.   | XRF     |
| S  | 1771   | N.A. | 1668   | 60130  | 904    | 31373  | XRF     |
| Ni | 977    | N.A. | 2024   | 2308   | 503    | 215    | ICP-AES |
| Cr | 646    | N.A. | 1301   | 3789   | 297    | 1142   | ICP-AES |
| Ba | 641    | N.A. | 423    | N.D.   | N.D.   | N.D.   | XRF     |
| Sr | 511    | N.A. | 158    | 36     | 127    | 113    | XRF     |
| Cl | 423    | N.A. | 592    | 196431 | 825    | 145510 | XRF     |
| Mn | 238    | N.A. | 240    | 1112   | 66     | 297    | ICP-AES |
| Zn | 87     | N.A. | 355    | 11396  | 152    | 5519   | ICP-AES |
| Cu | 54     | N.A. | 726    | 652    | 122    | 227    | ICP-AES |
| Pb | <10    | N.A. | 47     | 1090   | <10    | 283    | ICP-AES |
| Cd | <10    | N.A. | <10    | 137    | <10    | 68     | ICP-AES |
| Ag | N.D.   | N.A. | N.D.   | 483    | N.D.   | 276    | XRF     |
| Br | N.D.   | N.A. | N.D.   | 479    | N.D.   | 532    | XRF     |
| Mo | N.D.   | N.A. | N.D.   | 214    | N.D.   | 32     | XRF     |
| Rb | N.D.   | N.A. | N.D.   | 229    | N.D.   | 174    | XRF     |
| Sb | N.D.   | N.A. | N.D.   | 742    | N.D.   | 343    | XRF     |
| Hg | 0.44   | N.A. | 0.74   | 3.81   | 1.17   | 11     | 加熱気化    |

じん灰では、3.81～11mg/kgと残骨灰の10倍程度高く、特に施設2009-Cでは高い傾向にあった。

## (2) XAFSによる火葬灰中クロム化合物の推定

図C.6.1にXAFS解析に用いた11種のクロム化合物のK-edge XANES標準スペクトルを示した。化合物名の後半の括弧内の数値はクロムの価数である。四面体配位のCr化合物は、スペクトルのプレエッジ領域(5,985～6,000eV)に、強いピークを有することが知られており<sup>27)</sup>、四面体配位であるCr(VI)化合物：CrO<sub>3</sub>、CaCrO<sub>4</sub>のスペクトルはこのようなピークを有していた。また、本研究で標準試料としたCr(V)化合物：Ca<sub>5</sub>Cr<sub>3</sub>O<sub>12</sub>、Ca<sub>3</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>8</sub>についても四面体配位であり、同様にプレエッジピークが見られた。Cr(III)化合物：Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、CrCl<sub>3</sub>、Cr<sub>2</sub>S<sub>3</sub>、FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>は八面体配位であり、そのスペクトルにはプレエッジピークは見られず、CrCl<sub>2</sub>、Cr(Metal)についても同様であった。

次に、実火葬灰中クロムのK-edge XANESスペクトルを示した。5種の火葬灰のうち、C-残骨灰を除いた全ての灰で、Cr(VI)、あるいはCr(V)に由来するプレエッジピークが認められた。したがって火葬灰中にCr(VI)が含まれる可能性が示唆された。また、C-残骨灰については、図C.6.1における標準スペクトルと目視により比較すると、Cr(Metal)に類似したスペクトルとなった。

図C.6.1におけるCr標準スペクトルを用い、図C.6.2の各火葬灰のCrスペクトルをパターンフィッティング処理し、火葬灰に含まれるクロム化合物の割合を推定した値と、表C.6.1

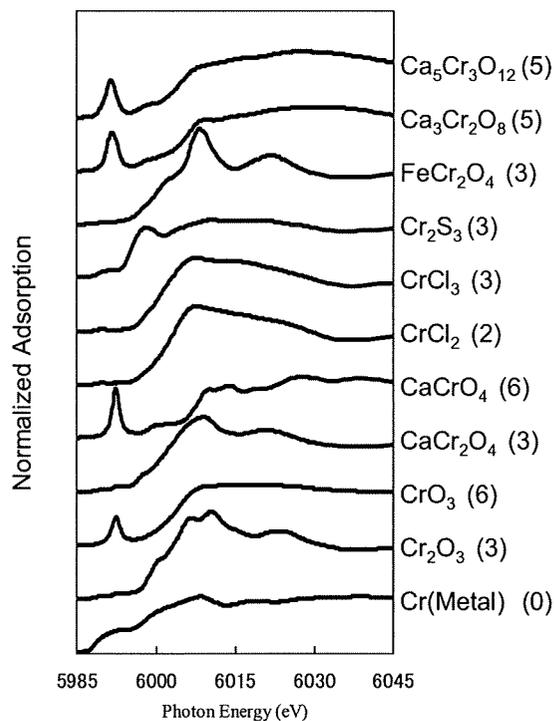


図 C.6.1 クロム標準化合物のCr K-edge XANESスペクトル

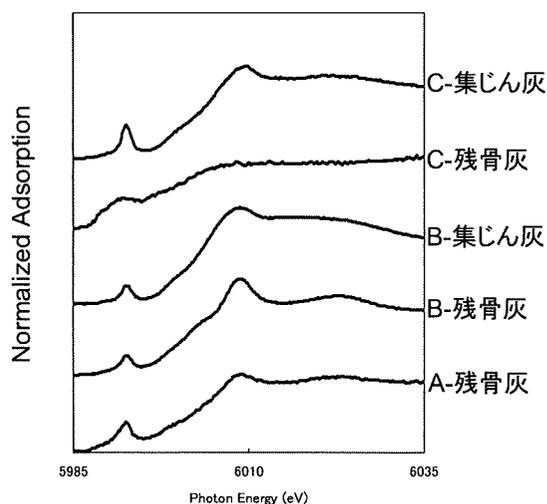
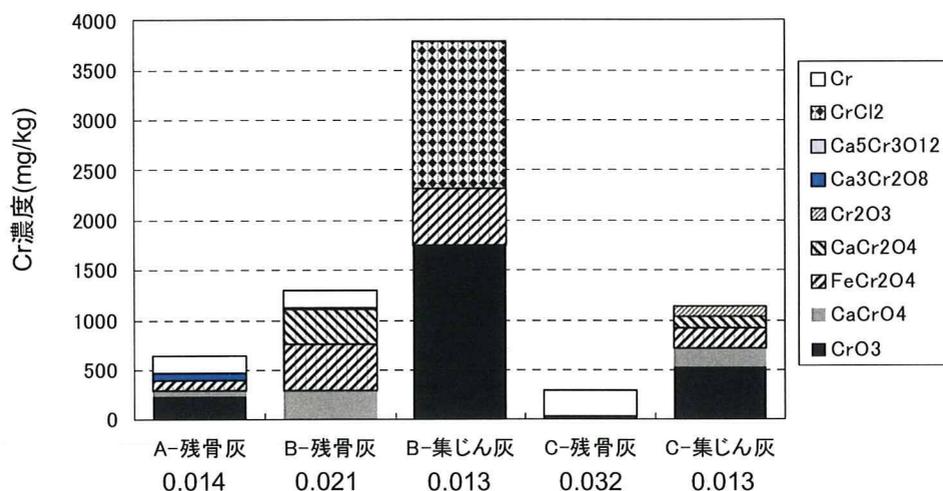


図 C.6.2 火葬灰中クロムのCr K-edge XANESスペクトル



図C.6.3 各火葬灰中クロムのパターンフィッティングによる化合物量推定結果  
項目ラベルの下の数字はR値：小さいほどスペクトルが一致していることを示す。

に示された、ICP-AESによる火葬灰中のCr全含有量の測定値を用いて、火葬灰中のCr化合物含有量の推定値を求めた結果を図C.6.3に示す。

図C.6.3より、まず全ての残骨灰には、Cr(Metal)が170～270mg/kg程度含まれ、特に2009-C残骨灰は、Cr全含有量のほとんどがCr(Metal)であると推定された。2009-A残骨灰に関しては、Crの全含有量は比較的低いが、その半分以上が、CrO<sub>3</sub>、およびCaCrO<sub>4</sub>であり、六価クロム化合物であった。2009-B残骨灰に関しては、六価クロムとして、CaCrO<sub>4</sub>が20%程度含まれており、Cr(Metal)が10%程度、三価クロムとしてFeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、CaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>がそれぞれ35%、25%含まれていると推定された。2009-B集じん灰は最も濃度が高く、約半分が六価クロムのCrO<sub>3</sub>であった。2009-C集じん灰についても半分以上が六価クロム(CrO<sub>3</sub>、CaCrO<sub>4</sub>)であると推定された。

## 6.2 水銀

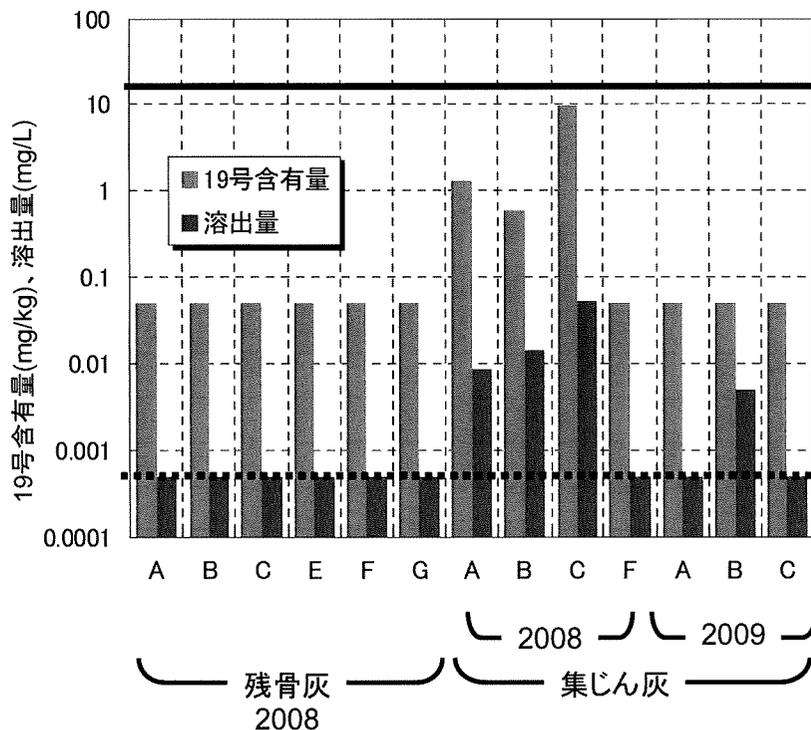
表C.6.2、および図C.6.4にそれぞれのサンプルについて、水銀の溶出量、含有量試験の結果を示した。まず、残骨灰中の水銀の19号含有量は、2008年の調査結果よりすべて0.05mg/kg未満であった。ただし、この含有量は土壌汚染対策法で規定されている方法によるもので1N塩酸により溶出する量を示している。集じん灰中の水銀の19号含有量は、2008-F集じん灰、2009-A～C集じん灰では、0.05mg/kg未満であったが、2008-A～C集じん灰においては0.57～9.7mg/kgであった。土壌汚染対策法における水銀の含有量基準は15mg/kgであることから、残骨灰については全く問題ない。集じん灰については基準値以下であったが、施設によっては超える場合もありうる濃度であった。

溶出量についても、2008年の調査結果から、残骨灰はすべて0.0005mg/L未満であり、土壌対策法に基づく溶出量基準(0.0005mg/L)を下回っていたが、2008-A~C集じん灰、および2009-B集じん灰において、0.005~0.053mg/Lであり、溶出量基準を上回っていた。特に2008-C集じん灰については最も溶出量が高く基準の100倍以上であった。これは2008-C集じん

表 C.6.2 残骨灰、集じん灰中水銀の19号含有量、溶出量試験結果

|        | 19号含有量(mg/kg) |       | 溶出量(mg/L) |         |
|--------|---------------|-------|-----------|---------|
|        | 残骨灰           | 集じん灰  | 残骨灰       | 集じん灰    |
| 2008-A | <0.05         | 1.3   | <0.0005   | 0.0085  |
| 2008-B | <0.05         | 0.57  | <0.0005   | 0.014   |
| 2008-C | <0.05         | 9.7   | <0.0005   | 0.053   |
| 2008-D | —             | —     | —         | —       |
| 2008-E | <0.05         | —     | <0.0005   | —       |
| 2008-F | <0.05         | <0.05 | <0.0005   | <0.0005 |
| 2008-G | <0.05         | —     | <0.0005   | —       |
| 2009-A | —             | <0.05 | —         | <0.0005 |
| 2009-B | —             | <0.05 | —         | 0.005   |
| 2009-C | —             | <0.05 | —         | <0.0005 |

※「土壌汚染対策法施行規則」環境省令第29号(平成14年)による水銀の含有量基準：15mg/kg、溶出量基準：0.0005mg/L



※定量下限値以下の値は、定量下限値として図示。

※実線：19号含有量基準値、破線：溶出量基準値

図 C.6.4 残骨灰、集じん灰中水銀の19号含有量、溶出量試験結果

灰の水銀の19号含有量が最も高かったことから容易に推測できることであるが、2008-A~B集じん灰、および2009-B集じん灰についてはこの傾向は見られず、19号含有量と溶出量の間には必ずしも比例関係があるわけではなかった。

以上の傾向は、2007調査において、残骨灰計4検体、集じん灰計2検体について調査した結果<sup>7)</sup>と同様の結果であり、特に、集じん灰中水銀の溶出量が基準を大きく超えることがあり、注意が必要であることが確認された。

### 6.3 六価クロム

表C.6.3、および図C.6.5にそれぞれのサンプルについて、六価クロムの溶出量、19号含有量試験の結果を示した。まず、19号含有量に関しては16検体中、2008-B残骨灰、2008-B集じん灰、2008-G残骨灰、2009-C残骨灰の4サンプルにおいて、19号含有量基準(250mg/kg)を超過するケースが見られた。また全体として、施設により大きく濃度は異なるが、同じ施設においては集じん灰の方が高くなる傾向が見られた。

溶出量に関しては、2009-A残骨灰を除く全ての残骨灰、集じん灰において、土壤汚染対策法により規定されている溶出量基準(0.05mg/L)の1.4~1,900倍の濃度が検出された。2009-A残骨灰のみ溶出量基準を満たしていたが、その原因については、19号含有量との関係を含め後段にて考察する。

以上の傾向は、2007調査において、残骨灰4検体、集じん灰2検体について調査した結果<sup>7)</sup>と同様の結果であり、六価クロムの観点からは、残骨灰、集じん灰について、その取扱に注意する必要があり、地下水汚染等を考慮すると、最終処分時においても留意しなけ

表 C.6.3 残骨灰、集じん灰中六価クロムの19号含有量、溶出量試験結果

|        | 19号含有量(mg/kg) |      | 溶出量 (mg/L) |      |
|--------|---------------|------|------------|------|
|        | 残骨灰           | 集じん灰 | 残骨灰        | 集じん灰 |
| 2008-A | 26            | 66   | 3          | 2.7  |
| 2008-B | 580           | 880  | 60         | 96   |
| 2008-C | 70            | 210  | 7.2        | 19   |
| 2008-D | —             | —    | —          | —    |
| 2008-E | 140           | —    | 7.1        | —    |
| 2008-F | 5.7           | 230  | 0.58       | 16   |
| 2008-G | 670           | —    | 5.9        | —    |
| 2009-A | 31            | 80   | <0.02      | 6    |
| 2009-B | 110           | 150  | 0.07       | 15   |
| 2009-C | 6.5           | 280  | 0.23       | 31   |

※「土壤汚染対策法施行規則」環境省令第29号(平成14年)による  
六価クロムの19号含有量基準:250mg/kg、溶出量基準:0.05mg/L

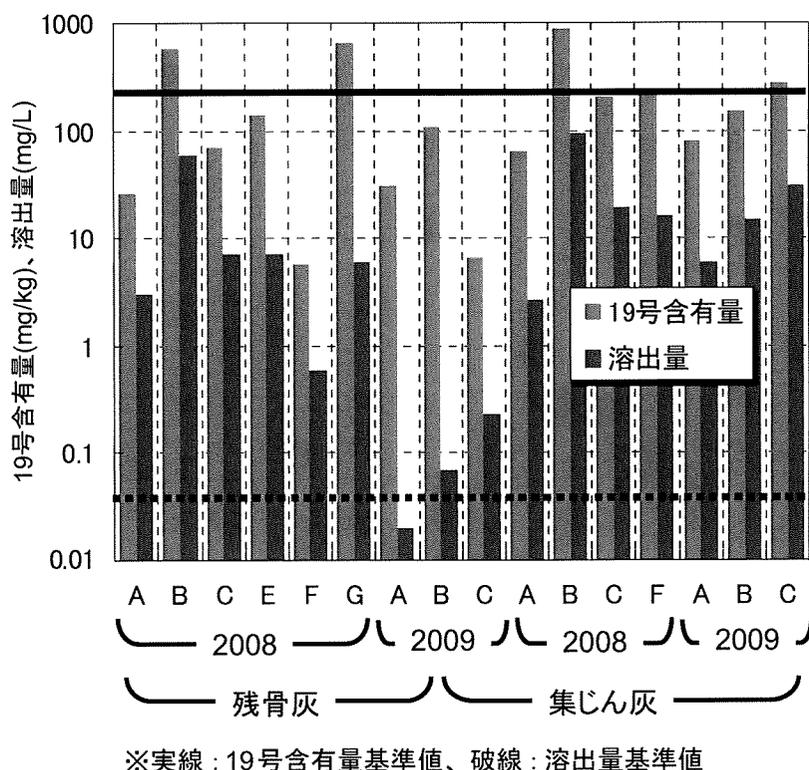


図 C.6.5 残骨灰、集じん灰中六価クロムの 19 号含有量、溶出量試験結果

ればならないことが確認された。また、2009の6つのサンプルで、溶出試験後の溶出液について pH を測定したが、残骨灰で 12~12.7、集じん灰で、5.9~11 の範囲であった。

#### (1) 六価クロムの溶出量と 19 号含有量との関係、および XAFS 結果との対応

図 C.6.6 に、本研究での調査結果、および 2007 調査結果<sup>7)</sup>における、各灰の六価クロムの 19 号含有量と溶出量との関係を示した。図より 4 つほどの残骨灰に関しては例外があるものの、六価クロムの 19 号含有量と溶出量については、残骨灰、集じん灰に関わらず、一定の相関関係が認められた。このことは、アルカリ緩衝液(5mM 炭酸ナトリウム+10mM 炭酸水素ナトリウム溶液)による抽出量と、蒸留水による溶出量との関係を意味している。土壤汚染対策法に基づく環境省告示 18 号で規定される溶出量試験では、溶出条件として溶媒体積：試料重量が 10:1 で規定されていることから、六価クロム溶出量の値を、サンプルの灰重量あたりの値に換算し、19 号含有量と比較したものを表 C.6.4 に示した。また溶出率は、19 号含有量のうち溶出量換算値として溶出した六価クロムの割合を示す。

表より、ほとんどのサンプルについて、19 号含有量と溶出量換算値から求めた溶出率はほぼ 100% 程度となり、含有量として生成された六価クロムはそのほとんどが水溶性成分として存在し、溶出量として定量されていることが示唆された。すなわち、図 C.6.6 に認