

低濃度PCB廃棄物処理に伴う 労働者と周辺住民の安全性評価

浦野 紘平

表1 産業界調べの微量PCB汚染電気機器の種類と大きさ別台数等

低濃度廃棄物の種類	低濃度PCB 廃棄物量	設定充填密 度 $\rho(t/m^3)$	平均 PCB濃度 X(mg/kg)	PCB量 (kg)	設定取扱 場所仮定数 N(ヶ所)
全微量PCB汚染電気機器	1,519千台 絶縁油323,000t	絶縁油 0.9	22.7	7,340	絶縁油は 20～100
うち7t超の大型 微量PCB汚染電気機器	34千台 絶縁油191,500t	絶縁油 0.9	22.7	4,730	絶縁油は 20～100
うち50mg/kg以下の抜油後 微量PCB汚染電気機器	1,450千台	—	7.4	97	10～40
微量PCB汚染 OFケーブル	1,400km 絶縁油3,240t	絶縁油 0.9	4.0	13	3～10
JESCO発生廃活性炭	4,410t	1.0	190	840	20～100
JESCO発生廃プラ等	1,010t	0.3	560	570	
JESCO発生廃液	1,200t	0.9	1,900	2,280	
保管届出ウエス	270t	0.3	2,500	680	20～100
保管届出感圧複写紙	530t	0.8	850	450	
保管届出汚泥	18,900t	1.0	300	5,670	
保管届出その他汚染物	6,900t	1.0	1,090	7,520	
道路橋塗膜関連廃棄物	37,200t	1.0	430	16,040	10～50

表2 微量PCB汚染廃電気機器の濃度別台数と絶縁油量の推算

濃度区分 (mg/kg)	0.5～1.0	1.0～2.0	2.0～5.0	5.0～10	10～50	50～100	100～ 1,000	1,000～
検出台数 (台)	2,693	2,375	2,400	1,538	2,866	246	262	42
台数割合 (%)	21.7	19.1	19.3	12.4	23.1	2.0	2.1	0.3
累積台数割合 (%)	21.7	40.8	60.1	72.5	95.6	97.6	99.7	100.0
推算台数 (万台)	34.6	30.5	30.8	19.7	36.8	3.2	3.4	0.5
累積推算台数 (万台)	34.6	65.1	95.9	115.6	152.4	155.6	159.0	159.5
推算絶縁油量 (t)	76,020	67,040	67,740	43,410	80,900	6,940	7,400	1,190
累積推算絶縁油量 (t)	76,020	143,060	210,800	254,210	335,110	342,050	349,450	350,640

表3 JESCOからの低濃度PCB廃棄物のPCB濃度の推算

低濃度廃棄物	実証試験 延べ施設数	各施設試験平均 濃度の最低濃度 (mg/kg)	各施設試験平均濃 度の最高濃度 (mg/kg)	各施設試験平 均濃度の平均 (mg/kg)
廃活性炭	10	49	490	190
廃プラスチック等	57	1.6	9,800	560
廃液	5	67	4,300	1,900

微量PCB汚染絶縁油を移し替えした場合の飽和ガス放出による 作業環境中PCB濃度の推算方法

体積 $V(\text{m}^3)$ 、奥行き $L_R(\text{m})$ 、換気率 $a(1/\text{h})$ または風速 $u(\text{m}/\text{s})$ の場所で、絶縁油中PCB濃度 $X(\text{mg}/\text{kg})$ の電気機器あるいは容器から絶縁油をドラム缶やタンクへ移し替える際の絶縁油の移し替えの速度を $f(\text{L}/\text{min})$ とし、油と同体積の $0.06f(=60 f/10^3) \text{ m}^3/\text{h}$ の飽和ガスが無処理で放出されるとすると、作業環境空气中PCB濃度 $C_d(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ は(2), (3)式で推算される。ここで、 H_G は絶縁油中PCBの気液平衡定数で $C_E(\mu\text{g}/\text{m}^3)/X(\text{mg}/\text{kg})$ である。

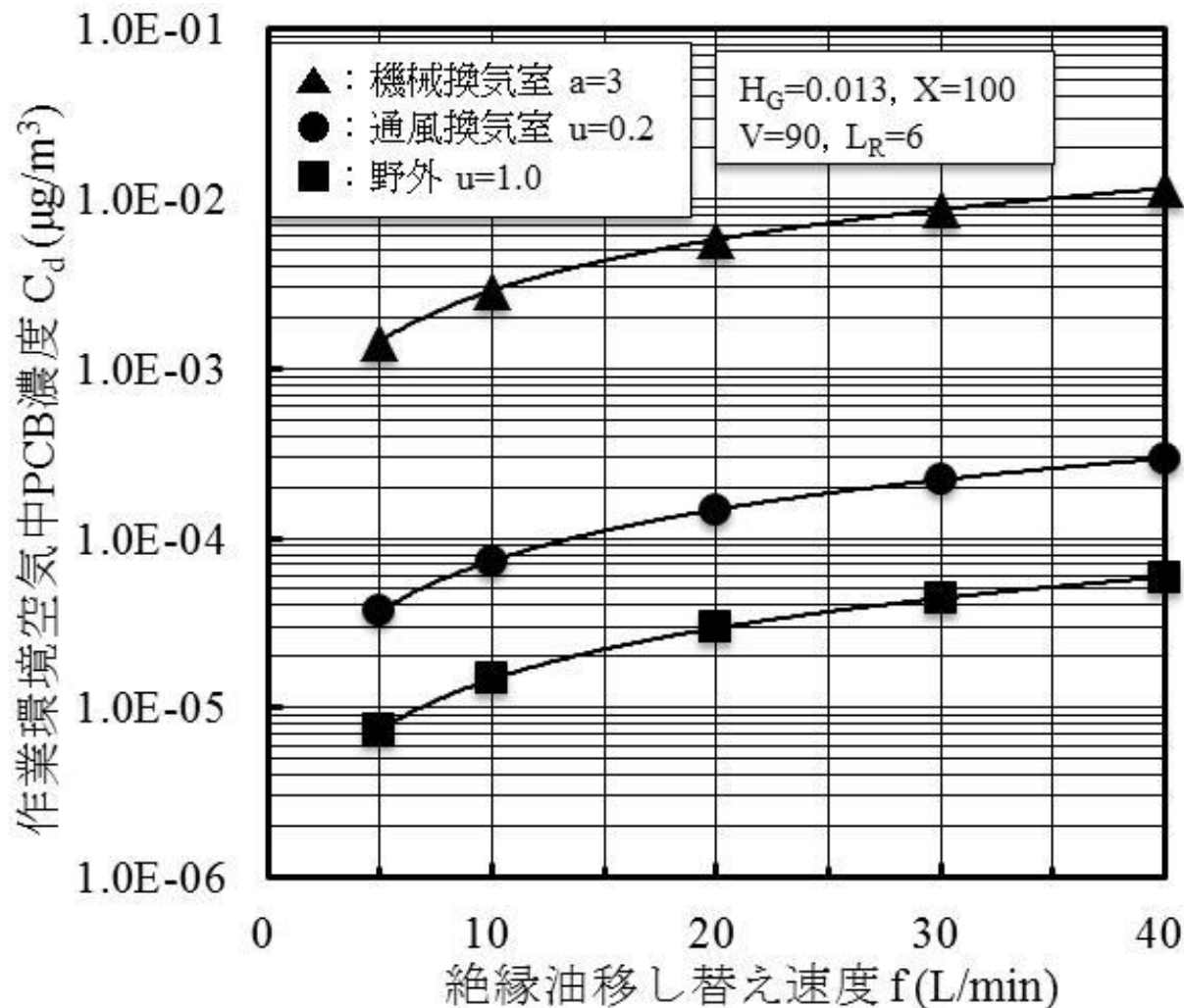
機械換気室内の場合：

$$C_d = 0.06f \cdot C_E / a \cdot V = 0.06f \cdot H_G \cdot X / a \cdot V \quad (2)$$

風換気下の場合：

$$C_d = 0.06f \cdot C_E \cdot L_R / 3,600u \cdot V = 1.7 \times 10^{-5} f \cdot H_G \cdot X \cdot L_R / u \cdot V \quad (3)$$

微量PCB汚染絶縁油を移し替えた場合の飽和ガス放出による 作業環境空气中PCB濃度の例



いずれの場合も作業環境管理濃度 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ をより著しく低い。

低濃度PCB廃棄物を移し換えた場合の容器内の飽和ガス放出による作業環境中PCB濃度の推算方法

JESCOからの二次廃棄物のうちの廃プラスチック類等、および保管届出されているウエスには、 10^6mg/kg (100%)近いPCBが部分的に付着している可能性がある。また、JESCOからの廃液類、および保管届出されている感圧複写紙や汚泥、および塗膜関連廃棄物と平衡になったガスのPCB濃度に関する情報はないが、同濃度の絶縁油の場合と同じ平衡濃度になるとし、体積 $V(\text{m}^3)$ の場所で1時間に 0.4m^3 (200Lのドラム缶2個分)の低濃度廃棄物が開封されて移し替えが行われるとした場合の作業環境空气中濃度 $C_d(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ は、(4)、(5)式で推算される。

機械換気室内の場合：

$$C_d = 0.4C_E / a \cdot V = 0.4H_G \cdot X / a \cdot V \quad (4)$$

風換気下の場合：

$$C_d = 0.4C_E \cdot L_R / 3,600u \cdot V = 1.1 \times 10^{-4}H_G \cdot X \cdot L_R / u \cdot V \quad (5)$$

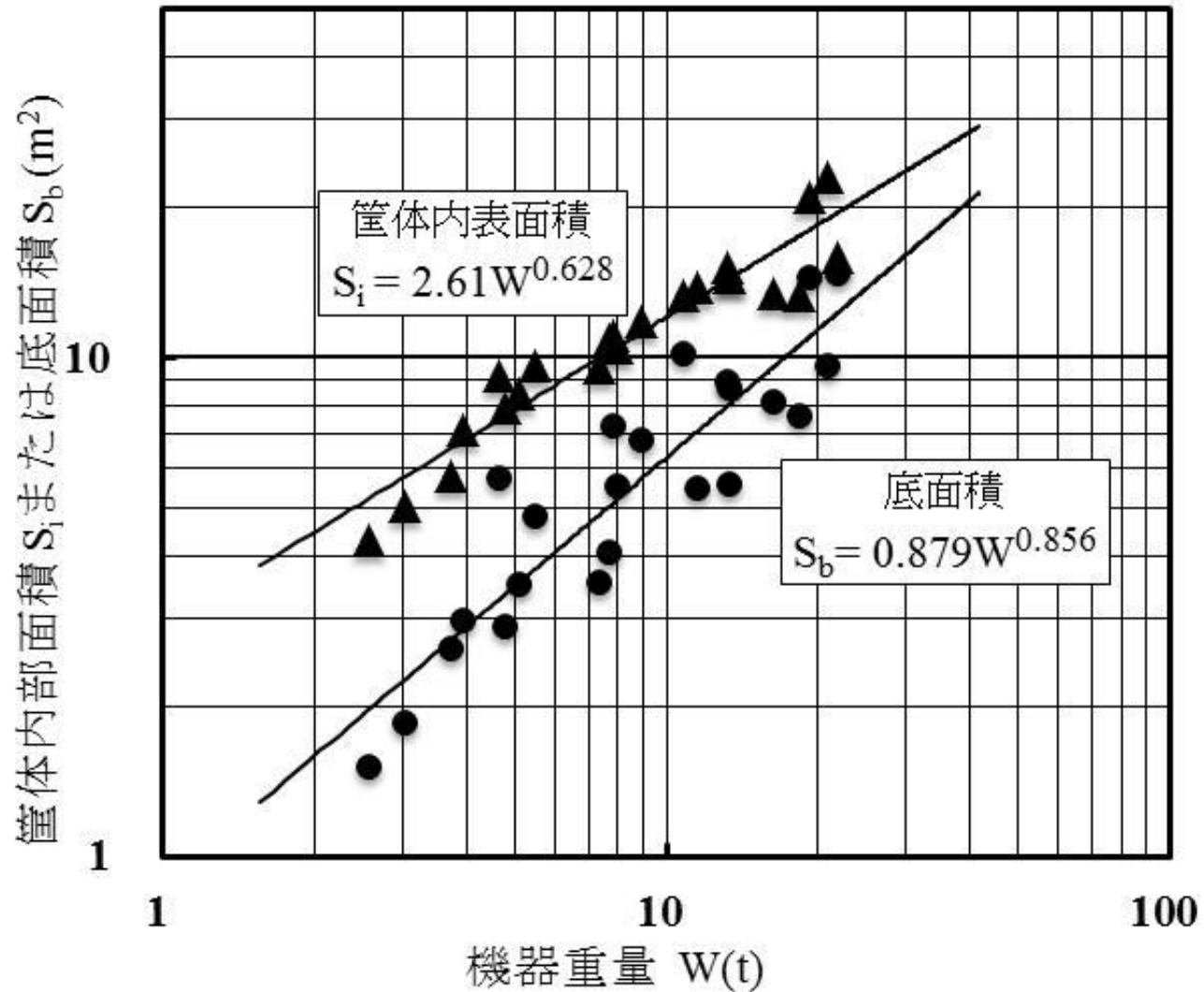
**低濃度PCB廃棄物を移し替えした場合の容器内飽和ガス放出による
 厳しい条件での作業環境空气中PCB濃度の例**
 ($H_G=0.013$, $V=60$, $L_R=6$)

廃棄物の種類	最高PCB濃度 (mg/kg)	機械換気室内 a=3の場合	通風換気室内 u=0.2の場合	野外 u=1.0の場合
OFケーブル	100	1.9E-03	4.8E-05	9.5E-06
JESCO廃プラスチック等 保管届出ウエス	1,000,000	1.9E+01	4.8E-01	9.5E-02
JESCO廃液 保管届出感圧複写紙 保管届出汚泥 保管届出その他汚染物 塗膜関連廃棄物	5,000	9.6E-02	2.4E-03	4.8E-04

注) 廃活性炭については、 C_E が著しく小さく、室内濃度も非常に低くなるので省略。

JESCOからのプラスチック廃棄物や保管届出ウエス等を室内で移し換えする場合以外は、移し換え作業をしても作業環境管理濃度 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ を越えない。

微量PCB汚染電気機器の重量と筐体内面積，底面積との関係



微量PCB汚染電気機器の抜油後筐体等を開放保管した場合の 作業環境中PCB濃度の推算方法

電気機器1個当たりの揮発面積 S_v を筐体内部表面積の2倍の $2S_i$ とし、体積 $V(\text{m}^3)$ 、高さ $H_R(\text{m})$ 、床面積 $V/H_R(\text{m}^2)$ の保管場所で、機器1個あたり、幅を $S_b^{0.5}(\text{m})$ 、搬入・搬出の通路等を含めた奥行きが $S_b^{0.5} + 2(\text{m})$ を要すると仮定すると、最大 $V/\{H_R \cdot S_b^{0.5}(S_b^{0.5} + 2)\}$ 個が保管され、揮発面積 S_v は $2S_i \cdot V/\{H_R \cdot (S_b + 2S_b^{0.5})\}$ となり、機器重量 W と S_i との関係から、最大の $C_v(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ は(11)式で推算される。

一方、風速 $u(\text{m}/\text{s})$ の風換気下で保管された場合には、 $10C_E \cdot S_i \cdot V/\{H_R \cdot (S_b + 2S_b^{0.5})\} (\mu\text{g}/\text{h})$ が $3,600u \cdot V/L_R(\text{m}^3/\text{h})$ の空気で希釈されることになるので、 W と S_i との関係から、最大の $C_v(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ は(12)式で推算される。

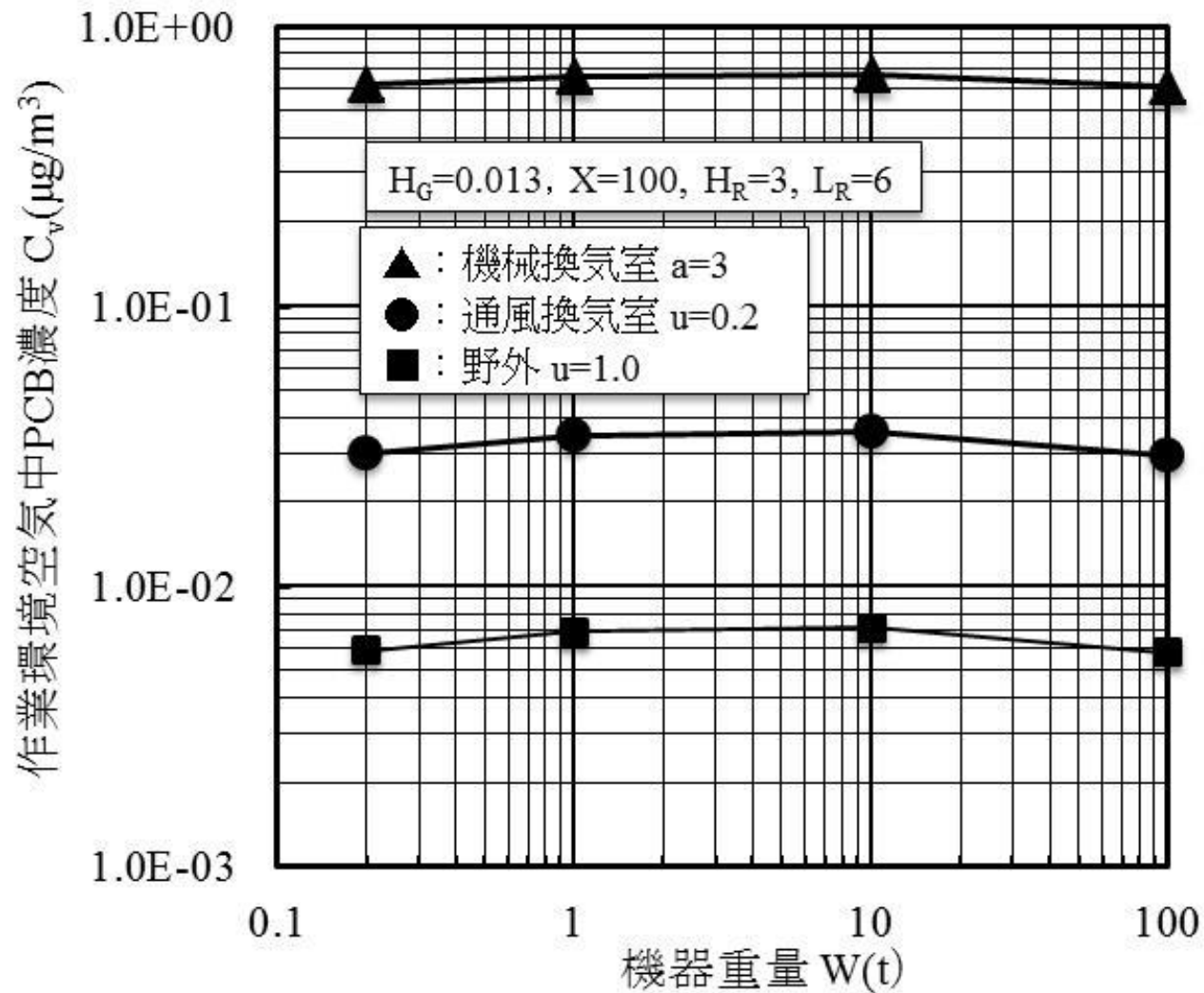
機械換気室内の場合：

$$C_v = H_G \cdot X / \{1 + a \cdot H_R (0.034W^{0.228} + 0.072/W^{0.200})\} \quad (11)$$

風換気下の場合：

$$C_v = 7.3 \times 10^{-3} H_G \cdot X \cdot L_R \cdot W^{0.628} / \{H_R \cdot u (0.879W^{0.856} + 1.88W^{0.428})\} \quad (12)$$

微量PCB汚染電気機器抜油後筐体等を開放保管した場合の 作業環境空气中PCB濃度の例



いずれの場合も作業環境管理濃度 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ より著しく低い。

その他の低濃度PCB廃棄物を開放保管した場合の 作業環境中PCB濃度の推算方法

微量PCB汚染電気機器以外の低濃度廃棄物の揮発面積は不明であるが、保管容器の開口面積 S_d (m^2)から揮発するとし、微量PCB汚染電気機器の場合と同様の仮定をすると、体積 V (m^3)、高さ H_R (m)の保管場所には、最大 $V/\{H_R \cdot (S_d + 2S_d^{0.5})\}$ 個が保管され、揮発面積 S_v は $S_d \cdot V/\{H_R(S_d + 2S_d^{0.5})\} = V/\{H_R(1 + 2/S_d^{0.5})\}$ となり、 C_v ($\mu g/m^3$)は(13)式で推算される。

一方、風換気下で、平均換気風速が u (m/s)とした場合には、 C_v ($\mu g/m^3$)は(14)式で推算される。

$$\text{機械換気室内の場合} : C_v = H_G \cdot X / \{1 + 0.2a \cdot H_R(1 + 2/S_d^{0.5})\} \quad (13)$$

$$\text{風換気下の場合} : C_v = 1.4 \times 10^{-3} H_G \cdot X \cdot L_R / \{H_R \cdot u(1 + 2/S_d^{0.5})\} \quad (14)$$

その他の低濃度PCB廃棄物を開放保管した場合の 作業環境空气中PCB濃度の例

廃棄物の種類	最高PCB濃度 (mg/kg)	機械換気室内 a=3の場合	通風換気室内 u=0.2の場合	野外 u=1.0の場合
OFケーブル	100	1.3E-01	3.6E-03	7.3E-04
JESCO廃プラスチック等 保管届出ウエス	1,000,000	1.3E+03	3.6E+01	7.3E+00
JESCO廃液 保管届出感圧複写紙 保管届出汚泥 保管届出その他汚染物 塗膜関連廃棄物	5,000	6.5E+00	1.8E-01	3.6E-02
注) 廃活性炭については C_E が著しく小さく、室内濃度も非常に低くなることから省略。				

JESCOからのプラスチック廃棄物や保管届出ウエス等以外は、
開放保管しても作業環境管理濃度 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ を越えない。

微量汚染電気機器のバーナー切断時の揮発による 作業環境中PCB濃度の推算方法

抜油拭き取り後の絶縁油の厚さをD(mm)、PCBの揮発率を α とし、電気機器周辺に幅2mの作業空間を設けるとして、作業場所の体積Vが $H_R(S_b^{0.5}+4)^2$ と仮定すると、機械換気室(仮設テントを含む)では、 $a \cdot H_R(S_b^{0.5}+4)^2$ (m³/h)で希釈されることになる。

一方、風換気下では、奥行き L_R を $S_b^{0.5}+4$ (m)と仮定すると、 $3,600u \cdot H_R(S_b^{0.5}+4)$ (m³/h)で希釈されることになる。

したがって、バーナー切断時の作業環境空气中PCB濃度 C_c ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)はそれぞれ(15), (16)式で推算される。

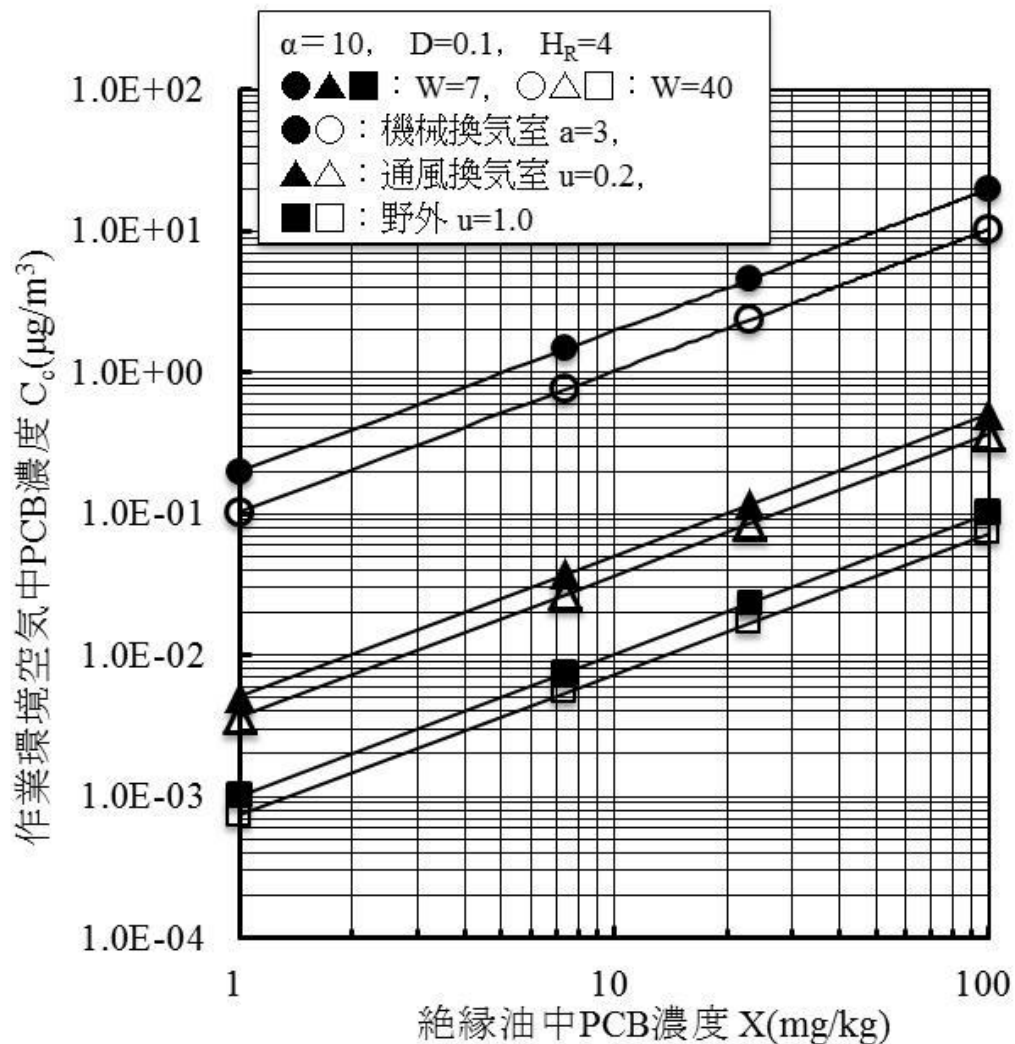
機械換気室内の場合：

$$C_c = 90\alpha \cdot D \cdot X / \{a \cdot H_R(0.879W^{0.856} + 7.50W^{0.428} + 16)\} \quad (15)$$

風換気下の場合：

$$C_c = 0.025\alpha \cdot D \cdot X / \{u \cdot H_R(0.938W^{0.428} + 4)\} \quad (16)$$

バーナー切断時の作業環境空气中PCB濃度の例



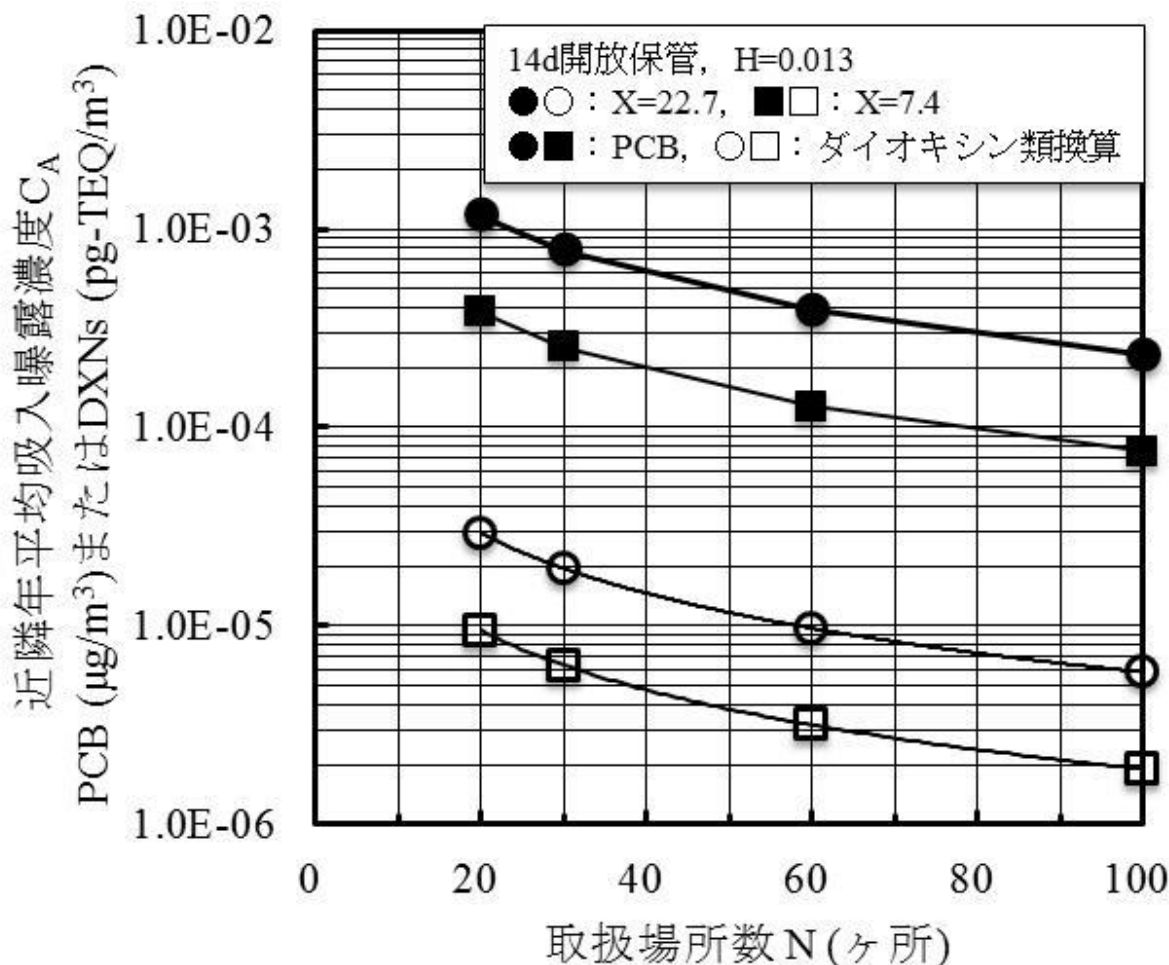
高濃度の機器を換気率の小さい室内で切断しなければ作業環境管理濃度 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下となる。

取扱施設風下近隣住民の年平均PCB吸入曝露濃度の推算方法

PCB排出速度 Q (g/s)で、年平均の風速 U を日本の平均風速の3.0m/s、気象状態が弱い逶減状態で、発生源高さ H_e を建屋の換気扇位置で3.0m、曝露高さ z を人の高さで1.5m、排出場所から最も近い住民までの距離 R を30mとすると、PCB吸入曝露濃度 C_A ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)は、プルームの拡散式とサットン式から、(18)式で推算できる。

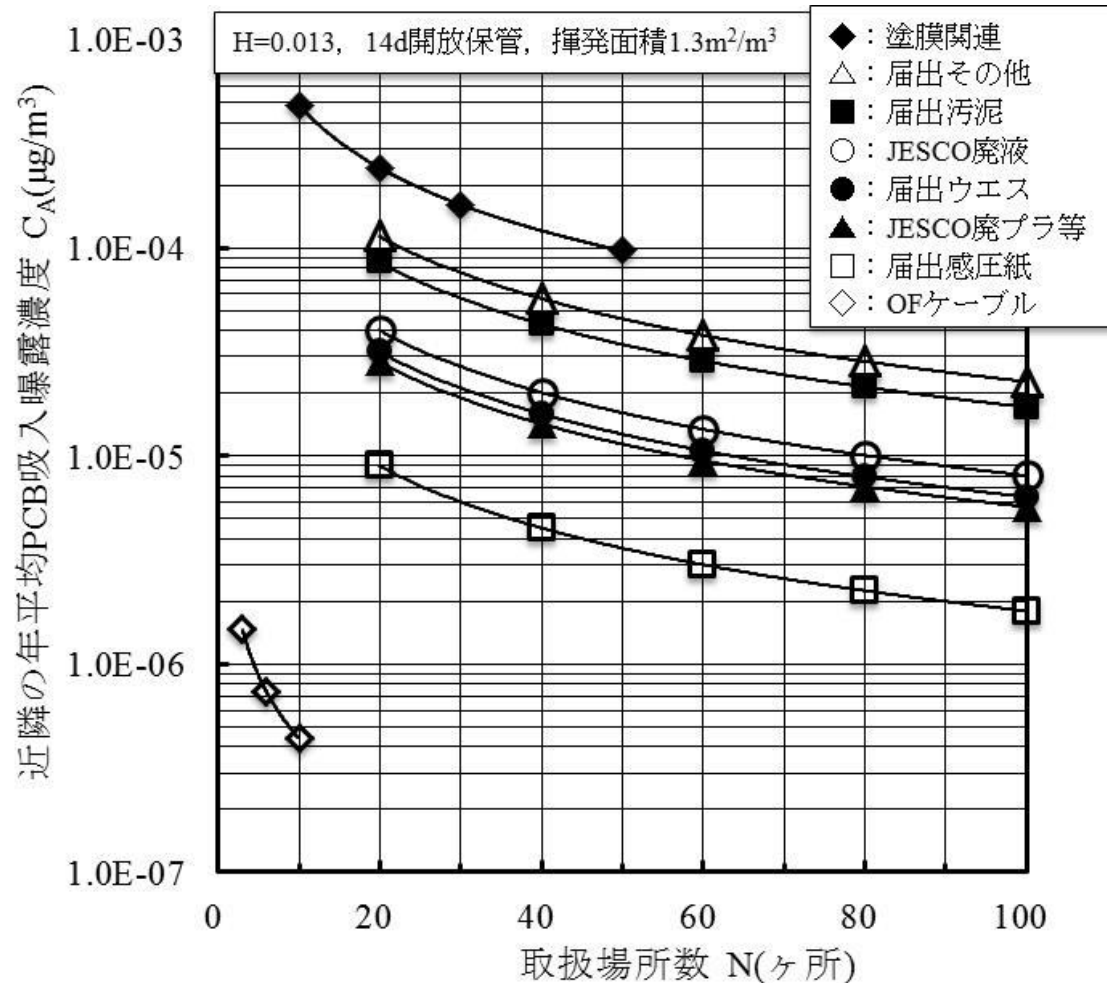
$$\begin{aligned} C_A &= 10^6 Q [\exp\{-(z-H_e)^2/2\sigma_z^2\} + \exp\{-(z+H_e)^2/2\sigma_z^2\}] / \\ &\quad \{(2\pi)^{0.5}(\pi/8)R \cdot \sigma_z \cdot U\} \\ &= 4.0 \times 10^6 Q \{\exp(-156/R^{1.75}) + \exp(-1,405/R^{1.75})\} / R^{1.875} \\ &= 4.7 \times 10^3 Q \end{aligned} \tag{18}$$

仮に微量PCB汚染電気機器を開放保管した施設の風下近隣住民の PCB吸入曝露濃度とダイオキシン類換算濃度の例



仮に、微量汚染電気機器を開放保管した施設でも、近隣住民の吸入曝露濃度はPCBの暫定大気環境許容濃度 $0.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ やダイオキシン類の大気環境基準 $0.6\text{pg-TEQ}/\text{m}^3$ より著しく低濃度になる。

仮に低濃度PCB廃棄物を開放保管した施設の風下近隣住民の PCB吸入曝露濃度の例



仮に、各種低濃度廃棄物を開放保管した施設でも、近隣住民の吸入曝露濃度はPCBの暫定大気環境許容濃度 $0.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ やダイオキシン類の大気環境基準 $0.6\text{pg-TEQ}/\text{m}^3$ より著しく低濃度になる。

低濃度PCB廃棄物焼却施設排ガスの最大着地点住民の 年平均PCB吸入曝露濃度の推算方法

風速 U (m/s)のサットン式から弱い逓減状態での1時間平均の最大着地濃度 C_A ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)は、有効煙突高さを H_e (m)とすると、(19)式で推算される。

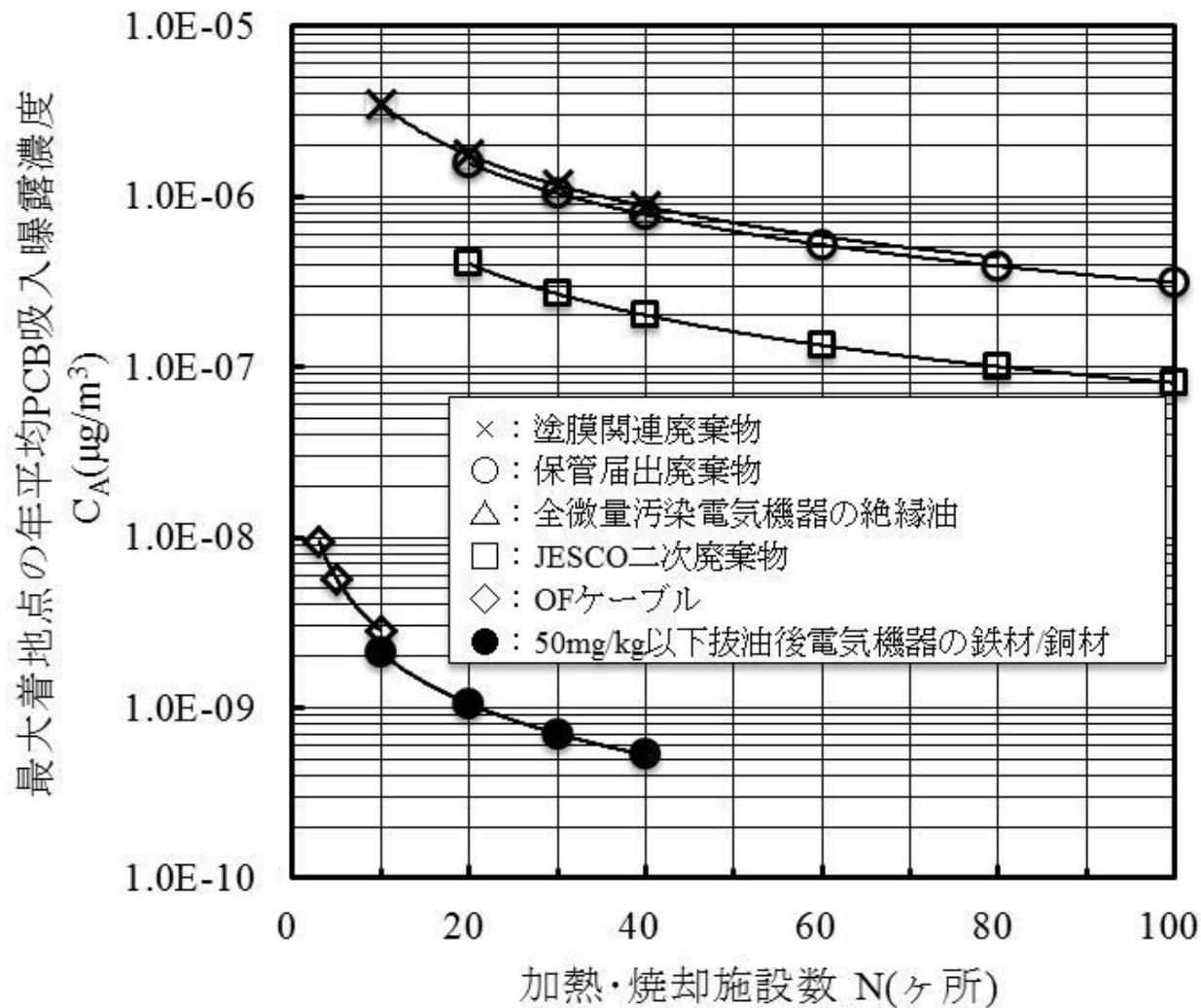
$$C_A = 0.15 \times 2 \times 10^6 Q / e \cdot \pi \cdot H_e^2 \cdot U = 3.5 \times 10^4 Q / H_e^2 \cdot U \quad (19)$$

低濃度PCB廃棄物の加熱・焼却によるPCB処理率は、論文および認定施設の実績から、少なくとも0.9999(99.99%)以上になると考えられるので、排出率は0.0001以下と考えられる。

したがって、各低濃度PCB廃棄物の年間必要処理PCB量 Z (kg/y)を N ヶ所の施設で焼却した際のPCBの年平均排出速度 Q (g/s)は、 $3.2 \times 10^{-9} Z / N (= 0.0001 \times 10^3 Z / (365 \times 24 \times 3,600 \times N))$ 以下となり、最大着地点での年平均吸入曝露濃度 C_A ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)の最大値は(20)式で推算される。

$$C_A = 1.1 \times 10^{-4} Z / H_e^2 \cdot N \cdot U \quad (20)$$

低濃度PCB廃棄物焼却施設排ガスの最大着地点住民の 年平均PCB吸入曝露濃度の例



低濃度PCB廃棄物の焼却施設排ガスの最大着地地点でも、近隣住民の吸入曝露濃度はPCBの暫定大気環境許容濃度 $0.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ より著しく低濃度になる。

微量PCB含有絶縁油の室内漏洩事故時の 空气中PCB濃度の推算方法と推算結果

取扱い室の高さ H_R を3m, 奥行き L_R を6m, 漏洩面積 S_V を床面積 S の1/3とし, H_G を0.013, 換気回数 a を最小の3/h, X を100mg/kgとした場合でも機械換気室のPCB濃度 C_V は約 $0.20\mu\text{g}/\text{m}^3$ となり, 作業環境管理濃度 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ の約1/50と推算された。

また, 風速 $0.2\text{m}/\text{s}$ の通風換気室の C_V は約 $0.0060\mu\text{g}/\text{m}^3$ となり, 作業環境管理濃度 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ の1/1,700の極低濃度になると推算された。

したがって, 万一の漏洩事故時でも、防毒マスクなどの着用は必要ないと考えられる。

なお, 絶縁油の漏洩によるPCBの排出は稀な一時的排出であり, 排出濃度も低いので, 周辺住民への影響は極めて小さいと考えられる。

微量PCB含有絶縁油の室外漏洩事故時の 水中PCB汚染濃度の推算方法と推算結果

万一漏洩事故があっても、PCBは表層土壤に吸着しやすいので地下水や周辺河川等に流入しにくいと考えられるが、仮に、PCB濃度 X (mg/kg)の絶縁油が水と十分に接触して溶解平衡に達した場合の水中濃度 C_w (mg/L)が、絶縁油と水とのPCB分配係数がオクタノール-水分配係数 P_{ow} の $10^{6.29}$ に等しいとすると、 C_w は(22)式で推算される。

$$C_w = X / 10^{6.29} \quad (22)$$

ここで、 X を100mg/kgとしても、 C_w は0.000051mg/Lとなり、水質環境基準の検出されない濃度とされている0.0005mg/Lの約1/10となる。

したがって、万一、やや多量の漏洩事故があって、仮に、長時間気付かずに地下水や河川水等に溶解するようなことがあったとしても、PCBによる水質汚染濃度は検出限界以下になると考えられる。

ただし、油自体が水中に流出すると水環境基準を超える可能性があるもので、法令に則った流出防止等の安全対策と定期的な防災訓練等を行うことは必要である。

参考文献

浦野紘平, 浦野真弥, 低濃度PCB廃棄物処理に伴う労働者と
周辺住民の安全性評価, 環境科学会誌, 28巻, 5号, 369-382
(2015).

浦野真弥, 浦野紘平, 各種低濃度PCB廃棄物の量とそれらの
PCB量の推算, 環境科学会誌, 28巻, 5号, 359-368(2015).

浦野紘平, 微量PCB含有廃電気機器等の取扱施設において
空气中PCBに対する安全対策はどの程度必要か, 日中環境産業,
49巻, 4号, 55-64 (2013).

浦野紘平, 低濃度PCB廃棄物取扱施設において空气中PCBに
対する安全対策はどの程度必要か, 化学物質と環境(エコ
ケミストリー研究会), 120号, 16-19 (2013).