
*On Continuous Monitoring of Dioxins in Flue Gas from Municipal Waste Incinerators

**Yuji Horie グリーンプルー(株)

はじめに

ダイオキシン汚染が大きな社会問題になり排出規制や法整備も進んできたが、我が国のダイオキシン類の排出量は依然欧米先進国の中で最大であり、一人あたりの排出量でも欧米諸国の2~10倍と高く突出している。ダイオキシン類による環境汚染は他の環境汚染物質と違って知覚するすべがないため看過しがちだが、その毒性は発ガン性、生殖毒性、免疫毒性と多岐にわたり、次世代への影響や知能低下などの研究報告も多数ある。このように我々の生物機能や知能に重大な影響を与えるダイオキシンに対する発生源対策は欧米に比べてほぼ10年遅れて始まり、ダイオキシン類対策特別措置法が2001年1月に施行されてから1年を経過しようやくその効果が現われはじめたところである。

高濃度のダイオキシンを排出する焼却施設は廃止に追い込まれたりバグフィルター設置などの高価な改修工事をして、平成9年から5年間の経過措置が満了する今年12月1日からの排出基準の強化(80 ng-TEQ/ m³ から既設炉は1 ng-TEQ/ m³、新設炉は0.1 ng-TEQ/ m³ 等)に対応しようとしている。このような動きは、一見ダイオキシン問題が解決されているようにも見えるが、1施設からのダイオキシン排出量を考えると廃棄物処理施設の広域化やプラスチック混焼、除去装置の管理不備などにより排出増加も懸念される。

我が国の廃棄物焼却処理の特徴は、一般廃棄物(家庭ゴミ)と産業廃棄物(事業系ゴミ)の峻別、自治体による清掃工場運営、都市域内に密集する清掃工場の存在にある。人口密集地にこれだけの清掃工場があるのは恐らく我が国だけである。廃棄物行政の広域化と自治体の合併が同時進行的に起こっているため、一部の合併された市町村などでは清掃工場が新しく生まれた市の中心に位置するなどの奇妙な現象も起きている。何れにしても、都市域内に位置する清掃工場は必要な施設ではあるが、非常に多数の人々にダイオキシンへの曝露を促す危険な施設と位置付けるべきであろう。

このような清掃工場から排出されるダイオキシンを常時監視することにより、ダイオキシンへの曝露などから引き起こされる健康リスクについて適確なリスクコミュニケーション手段を確保し、安全で経済的な施設管理を実現する方策について考察する。

ダイオキシン排出目録(インベントリー)の問題点:

廃棄物行政を取り仕切っていた旧厚生省は、平成 9 年より 5 年間でダイオキシンの排出量を 90%削減する目標を発表した。廃棄物行政を引き継いだ環境省も、この方針に従って排出基準の経過措置の完了する今年末までに 90%削減を達成するように行政指導を行っている。削減目標が予定通り達成されるかは、環境省の発表する全国ダイオキシンインベントリーの報告書を検討すればほぼ予測がつくはずである。平成 13 年 12 月 18 日発表のダイオキシン類の排出インベントリーによれば、ダイオキシン類の排出量は平成 9 年度に比べて平成 12 年度には概ね 7 割の削減がなされている（環境省 2001）。図 1 に示すように、目標年度の平成 14 年度には 9 割削減され、平成 9 年度の 7600 g-TEQ から 760 g-TEQ になることが予測されている（g-TEQ は全てのダイオキシンとコブラナ PCB を一番毒性の強い 2,3,7,8-TCDD に換算したグラム排出量）。

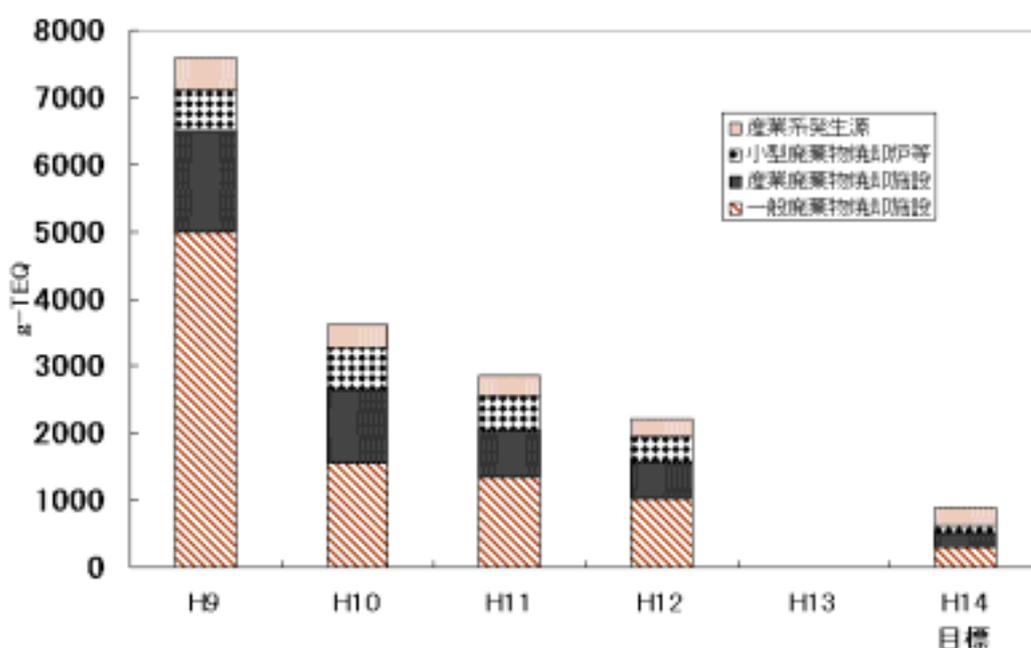


図 1 . 我が国のダイオキシン排出量の推移（環境省、平成 13 年 12 月 18 日発表資料）

図 1 から言えることはダイオキシンの排出量が急速に減少していることと、全体の排出量における一般廃棄物焼却施設（清掃工場）の割合が半分以上を占めていることである。ダイオキシン排出量の減少傾向は、多くの焼却施設にダイオキシン排出抑制のための除去装置を設置したり旧式な施設の廃止などが急速に起こったことから、事実をかなり反映させていると思われる。しかしながら、平成 12 年度の実排出量から平成 14 年度の目標排出量への到達は簡単に達成されそうもない。達成困難と思われる理由は 2 つある。

第 1 の理由は、平成 9 年から平成 12 年で 7 割減少した大半が平成 9 年から 10 年に起こっており、それ以後の減少は年率 15%から 20%にとどまっていることである。平成 12 年

度の7割達成から平成14年度の9割削減を実現させるには、2割の削減ではなく平成12年レベルから更に67% (= (0.3-0.1)/0.3) の削減を実現しなければならない。ダイオキシン排出量の減少に貢献したと思われるバグフィルターなどの集塵装置による粒子状物質の除去は、一般環境大気中のSPM(ほぼ10ミクロン以下の大気中浮遊粒子)濃度の30%低下(1997年-1999年)としても観測されている。しかしながら、2000年(平成12)、2001年(平成13)には1999年と同レベル又は微増に推移している(高橋ら、2002)。

第2の理由は、排出量の計算に用いたダイオキシン濃度データにある。火葬場を除いた焼却施設での排ガス中のダイオキシン濃度は、始動時や燃焼終了時を除いた安定燃焼時に採取した試料をダイオキシン分析して求められる。安定燃焼時のダイオキシン濃度は始動時や燃焼終了時よりも低いので(Hiraoka et al. 1997)、焼却施設からの排出量推定はおのずと低目となる。また、使用した濃度データには焼却施設が法規制のために年1回測定したデータが多数含まれている。これらのデータは排出基準を超えるような場合には、燃焼にことさら注意したり消石灰や活性炭などのダイオキシン吸着剤を普通より多く投入したりして基準値以下のダイオキシン濃度を得るように努力しがちである。万一基準値を超える濃度が観測されれば、再測定を試みる事業所も多い。結果として、実際の排出濃度より低目のデータを使用することになる。

これらの自明の理由以外に、我が国のダイオキシンインベントリーの信憑性を疑う全く別の視点がある。焼却施設からのダイオキシン排出抑制は、燃焼方法や条件を改善してダイオキシンの発生量を低減し、発生したダイオキシンを排ガス洗浄やダスト除去装置を用いて排出するダイオキシン量を削減することにより行われている。清掃工場などのダイオキシン抑制への行政指導は前者の燃焼管理に集中しているが、実際のダイオキシン排出量を削減しているのは後者の除去装置により発生したダイオキシンの70%~99.9%が除去されるからである。最終的に煙突から排出されるのは、発生したダイオキシンの30%~0.1%だけである。従って、ダイオキシン排出量を問題にする際には、この除去装置がどれだけの時間作動しているか、また規格どおりの効率で作動しているかである。ダイオキシンインベントリーに用いられるダイオキシン濃度データは、当然除去装置がフル作動している状態で採取された排ガス試料から得られている。

ベルギーでは1997年に0.1 ng-TEQ/m³の排出基準が施行され同年11月に5つの清掃工場に操業停止命令が出された。これを機に、1997-12-29より1998-4-6にわたって大掛かりな長期排ガス測定調査がなされた(De Fre and Wevers 1998)。表1に示すように、この期間に合計6回の2週間長期連続サンプリングと1回の4日間連続サンプリングが行われ、2回の欧州標準排ガステスト(6時間サンプリング)が行われた。長期連続サンプリングにはAMESAと言うドイツ製の採取装置が使用された。

公定法の 6 時間サンプリングが施設の代表的なダイオキシン濃度を測定していれば、当然長期間の平均濃度は 6 時間サンプリングで得られる複数の濃度値の中間に落ち着くはずである。ところが表 1 の結果は、長期連続サンプリングの測定濃度が常に高い値を示していた。驚くべきことに、約 1 ヶ月間に採取された 2 回の 2 週間採取試料と 1 回の 4 日間試料の平均濃度は、公定法に従って 6 時間サンプリングにより採取された試料濃度の 30 倍から 50 倍も高い結果が得られた。煙道の清掃や除去装置のメンテを行った後に、更に 4 回の長期連続サンプリングが行われた。保守作業によりダイオキシン濃度は大幅に減少したが、公定法で得られた結果と比べるとやはり長期連続サンプリングの濃度が 3 倍から 18 倍高かった。

表 1 . ベルギーにおける長期連続サンプリングと公定法による排ガステスト結果の比較

濃度： ng-TEQ/ m³

採取開始年月日	採取期間	長期連続サンプリング平均濃度	6 時間サンプリング平均濃度	長期連続/公定法との濃度比
前期調査				
1997-12-29	14 日	13.4		54
1998-1-12	14 日	8.2	0.25	33
1998-1-26	4 日	12.6		50
煙道及び除去装置の清掃とメンテ				
後期調査				
1998-2-9	14 日	2.1		18
1998-2-23	14 日	0.44		4
1998-3-9	14 日	0.33	0.12	3
1998-3-23	14 日	0.80		7

この調査に使われた焼却施設の除去装置は、消石灰吹きこみ、活性炭吹きこみを行ってからバグフィルターで除塵をし、最後にウエットスクラバーで洗煙して煙突から排煙する方式であった。施設は 130 トン/日の炉を 2 基持つ中規模の清掃工場である。調査後の検討で、長期間平均濃度が短期間濃度より高くなる理由として以下の仮説が提案されている。

吹き込みに使用された消石灰や活性炭が、最終段にあるウエットスクラバーからの湿気によりダイオキシンを大量に吸着した状態で煙道内に蓄積し、何らかの拍子に排出される。殊に、吹きこみに使用された活性炭がバグフィルターに付着しガスの流れをブロックして、一時的にはダイオキシン濃度を引き下げるが何かの拍子で放出されるため長期監視すると高い濃度が観測される。

上記の仮説はもっともらしいところもあるが、どの施設でも同様の現象が起きるとは考えにくい。また高濃度が生じる瞬間を実測したデータがないので、あくまでも 1 つの仮説にすぎない。何れにしても、我が国のダイオキシンインベントリーが上記の現象と先に述べ

た 2 つの理由から、かなり大幅に過少評価していることは明らかであろう。従って、目標年度の平成 14 年或いはそれ以後も 1000 g-TEQ 以上のダイオキシン排出量を持つことになろう。このレベルは我が国と同程度の国土面積を持つ欧州諸国の 1995 年時点の排出量の 2 ~ 5 倍である (UNEP 1999)。

特別措置法と常時監視の必要性：

2001 年 1 月より施行されたダイオキシン類対策特別措置法 (以下、特措法) は 3 段階の焼却能力に対して排出基準 (表 2 参照) を設けており、この基準値は常に守られていなければならないとしている。しかし実際には、年 1 回の公定法 (JISK0311) による 4 時間の排ガステストを行うだけで良しとしている。

表 2 . 排ガス中のダイオキシン類濃度の基準

燃焼室の処理能力	新設施設 (H9-12-1 以降の竣工)	既設施設 (H12-12-1 より適用)
4 トン/時以上	0.1 ng-TEQ/ m ³	1 ng-TEQ/ m ³
2 ~ 4 トン/時	1 ng-TEQ/ m ³	5 ng-TEQ/ m ³
2 トン/時未満	5 ng-TEQ/ m ³	10 ng-TEQ/ m ³

前節で述べたように、公定法による排ガステストが施設の代表的なダイオキシン排出濃度を示すのであれば、年一回の測定でも特措法の要求する排出データとして許容できるものであろう。しかしながら、年 1 回の測定データが燃焼管理も除去装置も最良に作動している理想状況下のものであって、通常の日々の運転状況下でのダイオキシン濃度を反映していないのならば問題である。

年 1 回の公定法による排出濃度の測定にはどのような問題点があるのか整理してみる。特措法は、最低年 1 回以上の測定をして施設が排出基準を常に満足していることを確認することを要求している。これに対して公定法による 4 時間の排ガステストでは以下の問題が生じる。

- ・ 公定法による測定結果は、排ガステスト中の運転状況や除去装置の作動性能により大きく変わるため、施設のダイオキシン排出特性を客観的に評価したことになる。炉の運転や除去装置の操作で測定結果を恣意的に作れる。
- ・ 公定法による年 1 回程度の測定では除去装置の稼働率や除去性能の変化を測定結果に反映させられない。実際のダイオキシン排出量を常に過少評価する傾向がある。
- ・ 短時間の測定では施設の運転管理や除去装置の使用とダイオキシン濃度抑制効果との関係を知ることができない。最適な施設の運転管理に使用できるデータとなりえない。
- ・ 公定法による測定データでは、施設の安全管理や周辺住民に対するリスクコミュニケ-

ションを行うことが出来ない。 住民同意を得る有効な手段にならない。

- ・ 運転管理と公定法による年 1 回程度の測定では施設のダイオキシン排出削減につながらない。 運転管理が実質的なダイオキシン排出抑制に貢献しているか確認できない。

上記の緒欠陥は施設からのダイオキシン排出濃度を常時監視することにより概ね解決することができる。問題は常時監視する有効な手段がなかったことである。排出施設からのダイオキシン濃度を常時監視した例は、日米安全保証条約での地位協定から在日米国海軍厚木基地周辺にあった産業廃棄物焼却施設に対して 1999 年 7 月から 2001 年 12 月 14 日まで周辺 3 地点で環境大気を連続的に測定したのが唯一である（環境省 2002）。この連続監視では年間 1 億円を超える費用がかかった。

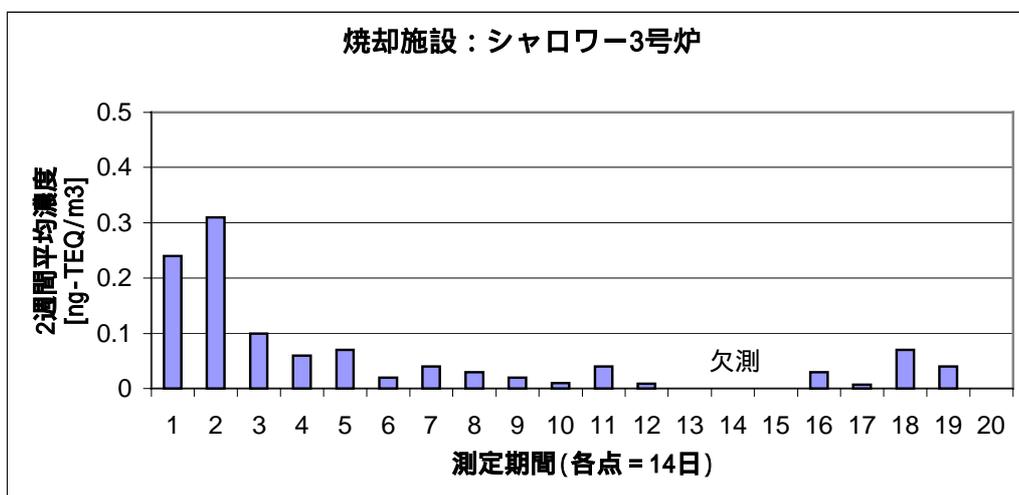
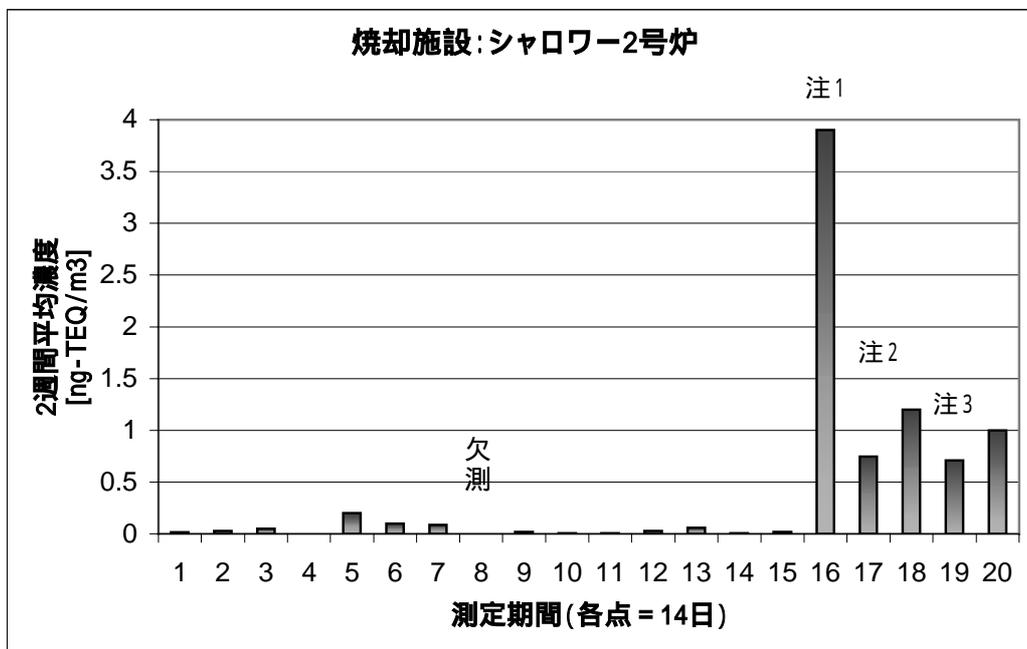
これに対してベルギーの調査で用いた AMESA 長期連続採取装置は、最長 1 ヶ月間の連続採取が可能であり、年間 12 回のダイオキシン分析を行うことで長期平均濃度と言う形ではあるが、施設からのダイオキシン排出濃度を常時監視することができる。従って装置の初期コストを除けば、年間 200 ~ 300 万円の分析コストと保守管理費用で常時監視を継続的に行うことができる。類似の長期連続採取装置（DMS, Dioxin Monitoring Systems）も既に現れてきている。

ベルギーでは 2001 年 1 月より全ての清掃工場からの排出ガス中ダイオキシン濃度の常時監視を義務付けている。同国の一部の地方では常時監視の結果をインターネットで公開している。図 2 にインターネットから取りこんだデータと現地の情報を基に作成した、約 10 ヶ月の測定例を示す。この図では各点が 2 週間の平均濃度を表しており、2 号炉では最初の 7 ヶ月ほどは何の問題もなく稼動していたのに、第 16 回目（約 8 ヶ月後）の測定で急激に濃度の上昇が観測された。3 号炉は逆に最初の 2 ~ 3 の測定で基準値を超える濃度が観測されたが、煙道の清掃などをして基準値以下の濃度に引き下げること成功している。

2 号炉については、当該地域の環境保全課が調査指令を出し、公定法による 6 時間測定を行って排出基準が満足しているか確認を行っている。高濃度が出現してから 2 ヶ月近く基準値を大幅に超える高濃度が継続し、その間事業者はバグフィルターでの問題点やフィルターバイパス通路に問題を見つけ修復を試みた。しかし継続して高濃度が観測されたため、2 号炉を 1 時停止させてバグフィルターの交換を行っている。

著者がデータを取得できたのは 4 施設 11 炉だけであるが、約 10 ヶ月間の常時監視で問題が生じなかった炉或いは問題を早急に解決して運転を継続したのが 7 炉である。残りの 4 炉は高濃度が継続して観測され、排出基準が守れなかったとして 1 時停止命令を受け炉の操業停止や除去装置の改善などを行っている。これら全ての焼却炉が欧州公定法による排

ガステストを合格していた事実からすると、ダイオキシンの常時監視により約 4 割の焼却炉が 1 年以内に排出基準を守れていないことを曝露したことになる。



- 注1： バグフィルターのガス通路ブロック判明
- 注2： バイパス路のシーリング不全判明
- 注3： 一時閉鎖。新しいバグフィルター導入決定

図2. 長期連続採取装置を用いたダイオキシン常時監視の測定例

視点をかえて、常時監視によりどれだけのダイオキシン排出量が削減できたかを算出して

みた。全データ数は 172 で全体の平均濃度は 0.27 ng-TEQ/ m³ であった。その内、排出基準の 0.1 ng-TEQ/ m³ を超えた濃度データは 30 あり、その平均濃度は 0.96 ng-TEQ/ m³ であった。排出ガスを各施設同じと仮定してダイオキシンの総排出量をもとめ、その内の排出基準を超えた排出量の割合を算出したら 63% であった。これは操業停止や廃止された施設からの事後排出量を無視しても、全期間の総排出量の 6 割はたまたま起こる高濃度イベントにより生じられたことになる。また我が国のダイオキシンインベントリーの作成方法に従えば、平均濃度は排出基準の 0.1 ng-TEQ/ m³ 以下になることから平均濃度を基準値と同じとすると、常時監視データ全体の平均値 0.27 ng-TEQ/ m³ と比べて少なくとも 170% の排出量を常時監視により発見し削減することができることになる。従って清掃工場の常時監視をすることは、新設炉を建設したりするよりはるかに実質排出量の削減効果を発揮できる方法と言える。

JIS 法と AMESA の整合性：

排ガス中のダイオキシン測定における我が国の公定法は日本工業規格 JIS K0311 である。ダイオキシン長期連続採取装置の AMESA が JIS 法に従った採取装置と比べてどのような測定データをだすか検証する必要がある。この検証には、JIS 法が 4 時間を大きく超えて採取を継続出来ないことから、比較は短時間サンプリングにおける性能比較に限られる。JIS 法と連続採取装置の直接比較は未だなされていないが、連続装置と欧州標準法 (EU 法) の比較及び JIS 法と EU 法との比較は既に行われている。後者の比較は平成 11 年に行われた (社) 日本環境測定分析協会及びダイオキシン類測定分析技術研究会の共同実験でなされている。結果は表 3 に示されているように、非常に良い一致が見られた。

表 3 . JIS 法と EU 法の比較実験結果 (祐川ら 2001)

		毒性当量濃度 (ng-TEQ/m ³)
1 回目	JIS 法	1.4
	EU 法	1.5
2 回目	JIS 法	2.3
	EU 法	2.3

AMESA は EU 法と同様に冷却プローブ法 (Cooled Probe Method) を採用しているが、吸着剤には EU 法がポリウレタンフォーム (PUF) を使用しているのに対して石英ウールと XAD-2 樹脂を用いている。また採取部分も EU 法は大型の装置であるのに対して一体型のコンパクトな採取カートリッジにまとめられている。この両者の性能比較は AMESA の製品認証を第 3 者機関のテュフ (TUV) から受ける際に、検証試験の一つとして 1997 年に行われた。その比較実験の結果を図 3 に示す。

AMESA と EU 法の比較実験は 3 つの異なる焼却炉を用いて合計 15 回の並行試験が行われた。図 3 から幾分のバラツキは見られるものの、測定濃度は 1 対 1 の関係が得られており、全ての比較データ点は認証機関が設定した許容範囲内に収まっている。

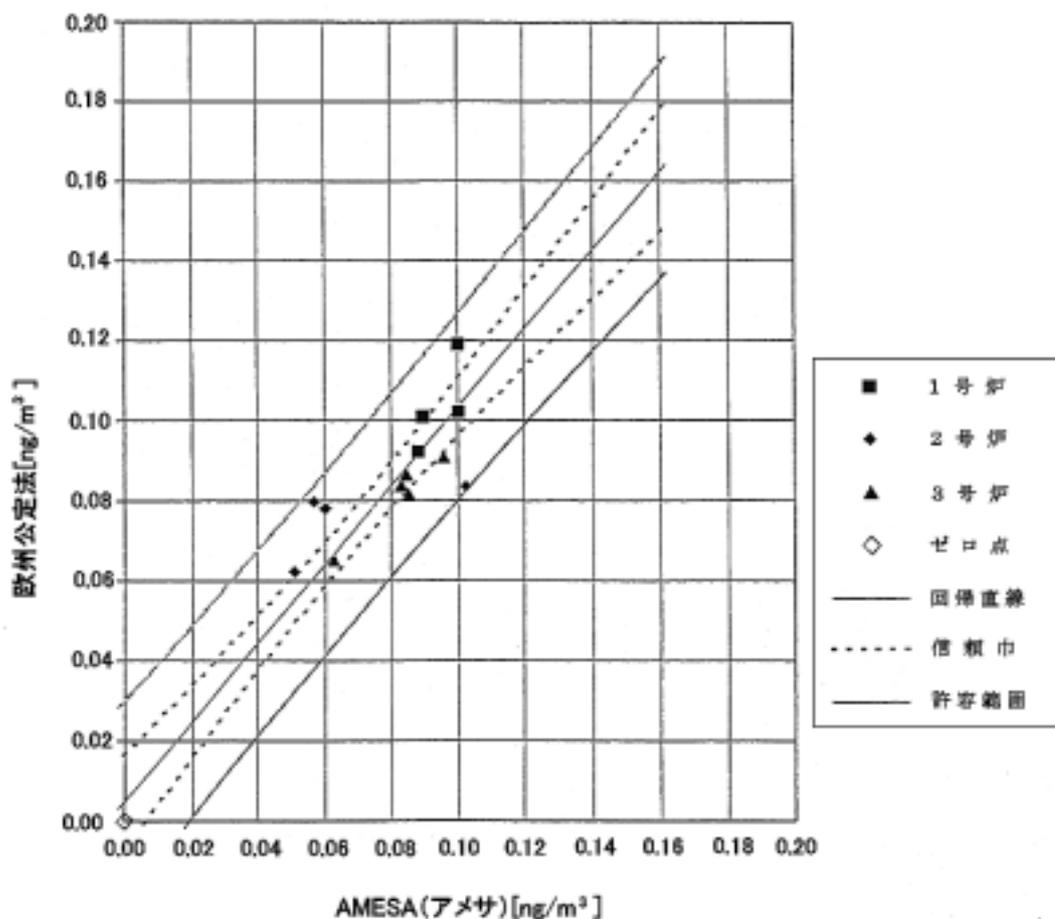


図 3 . 連続採取装置 AMESA と欧州規格 EU 法との並行試験結果 (TUV 1997)

以上の検証試験から、連続採取装置と JIS 法との間にも良い整合性が存在することが期待できる。実際の検証試験は、連続採取装置を我が国に導入する過程で行われる必要がある。

図 4 に連続採取装置の概要を示す。排ガスの流速をピトー管で 3 秒ごとに計測して試料ガスを等速吸引条件で自動的に連続採取する。試料採取期間中は、30 分ごとに積算採取時間、採取排ガス量、排ガス水分、排ガス温度・流速、残存酸素量など最高 16 項目までデータカードに取りこみ記録する。採取期間中の排ガス状態及び施設稼動状況は、モデムを用いて遠隔地からでも確認することができ、試料採取はサンプルカートリッジを取りかえるだけで良い。ダイオキシン濃度は通常の分析試験所でダイオキシン分析により定量されるた

め公定法と同様の分析結果が得られる。

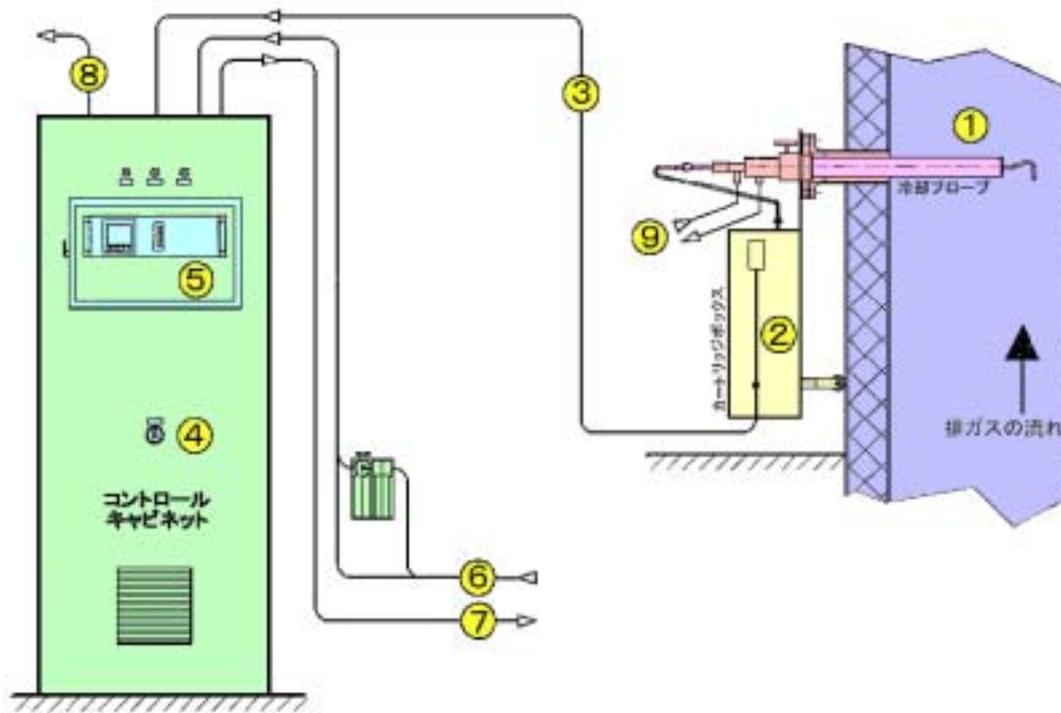


図4. 長期連続採取装置 AMESA の構造概要 (1.チタン製採取管、2.試料採取カートリッジ、3.排ガスライン、4.コントロールキャビネット、5.表示及びコントロールパネル、6.圧縮空気(ピト管自動洗浄用)、7.凝縮水、8.遠隔監視用信号出力、9.冷却水の出入り口)

このような連続採取装置を我が国にも導入して、廃棄物焼却施設特に市街地にある清掃工場のダイオキシン排出管理に活用すべきであろう。ゴミ行政の広域化、清掃工場の集中管理化が進行する中で、プラスチックを含む都市ゴミ焼却に伴って発生するダイオキシンを常時監視するには適切な装置と思われる。また特措法もその精神として、清掃工場のような公的施設にはダイオキシンの常時監視を求めているように思われる。

参考文献：

1. R. DeFre, and M. Wevers, "Underestimation in dioxin emission inventories", Organohalogen Compound, Vol. 36 (1998), pp. 17-20.
2. M. Hiraoka, S. Sakai, T. Sakagawa, and Y. Hata, "New Guideline for Controlling Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans (PCDDs/DFs) in MSW Management in Japan", Organohalogen Compound, Vol. 31 (1997), pp. 446-449.
3. TUV Rheinland, "Report on the pilot performance test of the AMESA long-term

sampling equipment of Becker GmbH and Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH", Report of the Technical Control Board (TUV) 936/805017A, October 1997.

4. United Nations Environmental Program (UNEP), Dioxins and Furan Inventories, National and Regional Emission of PCDD/PCDF, May 1999.

5. 環境省、ダイオキシン類の排出量の目録（排出インベントリー）平成 13 年 12 月.

6. 高橋、箕浦、舟橋、庄司、東京都心のビル屋上における SPM 調査 - 微粒子中の元素状炭素および塩素イオン濃度の推移について -、第 43 回大気環境学会年会発表予定論文要旨、2002/9/11-13.

7. 祐川、山田、橋場、畑沢、山本、排ガス中のダイオキシン類採取方法に係る共同実験 - JIS 法と EU 法の比較 -、第 12 回廃棄物学会研究発表会議講演論文集(2001) P2C8-11, pp. 795-797.

追伸: 1 年ほど前に行った並行試験の結果です。

