

製鉄プロセスにおける最近のダイオキシン類関連研究

—我が国の共同研究プロジェクト成果を中心に—

Recent Researches on Dioxin Emissions from Ironmaking Process

—Mainly from the Results of Collaborative Research Projects in Japan—

葛西栄輝

東北大学 多元物質科学研究所 助教授

Eiki Kasai

はじめに

我が国におけるダイオキシン類*1の排出規制は「ダイオキシン類対策特別措置法」(1999年7月成立、2000年1月施行)とその関連政令によって行われている。これらは文字通りダイオキシン類に特化した世界に類を見ない法律である。関連政令において排ガス、排水に濃度規制を行う特定施設を指定しており、排水に関しては2001年11月と2002年7月の改正により、クロロベンゼン製造施設など7施設が追加された。また、さらに水系低質(河川や海岸の堆積土壌や泥など)の環境基準が制定されるなど、現在も種々の検討が進められている。鉄鋼業に関連する施設は主に排ガスの大気排出系であり、直接的には「鉄鋼業焼結施設」と「製鋼用電気炉」である。なお、「亜鉛回収施設」も製鋼用電気炉ダストに含まれる亜鉛を回収、精製するためのものであり、関連性は深い。

Table 1に我が国のダイオキシン類発生源および発生量の推移を抜粋して示す(政府資料)。比較的信頼性の高い統計

値が存在する1997年を基準にすると、総毒性排出量は現在の最新統計値である2000年までの3年間で1/3以下に低減されている。これは主に一般廃棄物焼却施設における発生量低減によるものである。産業廃棄物焼却炉や他の産業系施設での低減も少なくはないが、例えば「鉄鋼業焼結施設」と「製鋼用電気炉」の合計が全排出量に占める割合は、1997年の約4.9%から2000年の約9.1%へ、ほぼ倍増する結果となっている。廃棄物焼却施設からの発生量低減は、小型施設の廃炉、操業の連続化、高温安定燃焼や高度排ガス処理設備の新設などによるものである。ただし、Table 1に併せて示した2002年の排出量目標値(2000年に政府が設定したものと比較すると、廃棄物焼却施設では更に一層の削減が必要であり、産業系の特定施設においても一部目標値レベルに達していないものも存在する。Fig. 1からは排出目標値の達成が楽観できないことがわかる。2002年12月には、これまで移行措置として設定されてきた暫定排出基準が廃止され、一層厳しい基準が適用されており、各施設には安定した排出濃度

Table 1 日本のダイオキシン類排出量推計値 (g-TEQ/年, WHO-TEF (1998))

発生源	1997	1998	1999	2000	2002 (目標値)
一般廃棄物焼却施設	5000	1550	1350	1019	310
産業廃棄物焼却施設	1300	1100	690	555	200
未規制小型廃棄物焼却炉	368-619	368-619	307-509	353-370	66-112
製鋼用電気炉	228	139.9	141.5	131.1	130
鉄鋼業焼結工程	135.0	113.8	101.3	69.8	93.2
亜鉛回収業	47.4	25.4	21.8	26.5	13.8
アルミニウム合金製造業	21.3	19.4	13.6	12.8	11.8
セメント製造施設	4.0	3.5	3.4	3.4	
鋳鋼製造施設	2.0	2.0	1.5	1.4	
伸銅品製造施設	3.2	3.2	1.2	1.3	
火力発電所	1.6	1.6	1.6	1.7	
火葬場	2.1-4.6	2.2-4.8	2.2-4.9	2.2-4.9	
自動車排出ガス	1.6	1.6	1.6	1.6	
合計	7300-7600	3400-3600	2700-2900	2200	843-891

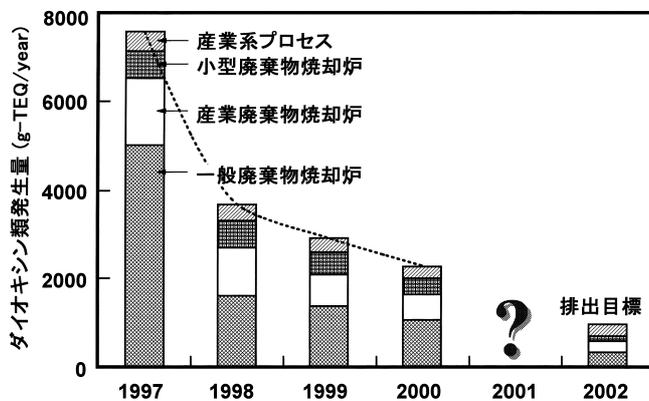


Fig. 1 我が国におけるダイオキシン類排出量の推移

*1 ダイオキシン類：ポリ塩化ジベンゾ-p-ジオキシン (PCDDs) とポリ塩化ジベンゾフラン (PCDFs) の総称であり、塩素数とその結合位置により210種の異性体(厳密には塩素数が異なるため適切な表現ではないが、一般的表現として用いる)が存在する。特別措置法では、これらに加えて同様な毒性を持つコプラナーPCB (co-planar PCBs) を含めている。

管理が望まれている。また、排ガス処理設備の高度化はエネルギー効率の低下や大幅なコスト上昇を生む場合もあり、新たな環境負荷を低減するためにもプロセス内でのダイオキシン類生成を直接的に抑制する革新的な技術開発が望まれている。

一方、ダイオキシン類対策特別措置法におけるTDI (Tolerable Daily Intake：耐容一日摂取量) は1日あたり4 pg-TEQ/kg-bodyと設定されているが、現在WHOにおいてTDIを1 pg-TEQ/kg-bodyに改訂する動きがあり、我が国の中央環境審議会においても審議中とされる。TDIの見直しは長期的に環境基準や排出基準の見直しにもつながるものであり、このような意味からもダイオキシン類の排出抑制努力の継続が望まれる。

本稿では製鋼用電気炉および鉄鉱石焼結過程における最近のダイオキシン類関連研究の概要を紹介するとともに、「焼結ダイオキシン類低減研究会 (SDD研究会)」の研究活動経験にもとづき、複数の産と学が参画する共同研究プロジェクトの問題点についても少し述べてみたい。

2 我が国における製鉄関連ダイオキシン類研究の概要

我が国におけるダイオキシン類発生低減技術に関する研究は、電気炉製鋼プロセス関連が早く、1991～1999年の新製鋼フォーラム活動が端緒であると考えられる。これはNEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) の補助を受けて、JRCM ((財) 金属系材料研究開発センター) に設置されたものである。さらに1996年、当時の厚生省研究班がTDIとして10 pg-TEQ/(kg・d)を報告するなど、ダイオキシン類への一般的関心が強まる中、1997年にNEDOの補助を受け、「電気炉排ガス研究委員会」が(社)日本鉄鋼連盟に設置され、直接ダイオキシン類を対象とした研究活動が始まった。これは、電気炉製鋼メーカーおよび電気炉を有する高炉メーカーの計59社が参画する共同研究委員会であり、1999年度まで3年間の活動成果が本協会の講演大会において報告されている¹⁻⁴⁾。

一方、鉄鉱石焼結に関しては、1997年に高炉7社と3大学の研究・技術者よりなる産学共同研究会 (SDD研究会) が設立され、2001年までの4年余の研究活動が行われた。これは、これは、(財)鉄鋼業環境保全技術開発基金の大規模研究プロジェクトへの助成プログラムとして、(社)産業環境管理協会に設置されたものである。

このように製鉄関連のダイオキシン類に関する研究は単独的なものは少なく、組織的に行われてきた。このようなことは海外でも同様であり、これは次のような理由によると思われる。

られる。

- 1) 毒性の高いダイオキシン類の取扱い、サンプリング、分析等が難しく、また、必要コストが大きい。
- 2) 対象プロセスサイズがいずれも大きく、実験室規模へのブレークダウンが難しい。
- 3) 当時、取得可能な関連情報が諸外国を含め極めて少なく、研究の手がかりを得るのが難しい。

例えば、当時は排ガス中のダイオキシン類分析に関する標準法が定められておらず、その後、1999年に設定されたJIS K 0311においては3～4時間の定常状態サンプリングが必要とされている。ダイオキシン類の発生現象を検討するための個別の小規模実験を行う際には、適正なサンプリングおよび分析方法を確立するためだけでも大きなコストを要する可能性があり、単独での研究を躊躇せざるを得ない状況にあった。また当然、各社による探索的および試験的な研究や実機測定等は行われていたものと推測されるが、ダイオキシン類に関する当時の社会的状況がその積極的な公表を困難にしていたことも考えられる。

以上のように、現時点で公表されている製鉄関連ダイオキシン類研究は、基礎的な検討を含め、多くが産あるいは産学の共同研究プロジェクトとして進められてきた。

3 共同研究プロジェクトの成果概要

3.1 製鋼用電気炉

電気炉製鋼の主要原料である鉄スクラップには塩素を含有するプラスチックや切削油が混入している。また、補助燃料として炭材、灯油、一部廃プラスチックなど炭素材が使用されている。電気炉はバッチ操業を基本としており、炉内のガス組成や温度は操業進行に伴って大きく変動する⁵⁾。例えば、電気炉出口の排ガス温度は200～1400℃、酸素濃度は2～21%であり、変動が極めて大きい。一方、溶鋼の酸化を防止するためには炉内の還元雰囲気は不可欠であり、排ガスのCO濃度が15%を超える場合もある。したがって、廃棄物焼却炉に対する操業ガイドラインの直接適用は根本的に難しく、基本的には排ガス処理に頼らざるを得ない。

電気炉排ガス研究委員会では、電炉プロセス全体でのダイオキシン類の挙動を把握すると共に、スクラップ予熱炉 (SPH)¹⁾ や集塵機⁴⁾ 内でのダイオキシン類の挙動を詳細に検討し、排ガス中ダイオキシン類の効率的分解を目的とした2次燃焼塔、再合成防止を目的とした急冷スプレー塔、吸着除去を目的としたバグハウスの各効果等についてテストプラントにより検討した²⁾。主な結果は次のようにまとめられている。

- 1) 原料スクラップ中の塩素濃度低下はダイオキシン類生

成抑制に顕著な効果があり、混入する塩化ビニル除去や切削油中の塩素含有量低減が望まれる。

- 2) 電気炉排ガスの2次燃焼温度が700℃の条件ではダイオキシン類分解率は約97%であるが、900℃まで上昇すると分解率は99.9%に達する。
- 3) 排ガス急冷スプレー塔の出口ガス温度を250℃以下にすることにより、排ガス冷却過程でのダイオキシン類濃度上昇を抑制できる。
- 4) スクラップ予熱炉の使用により、電気炉排ガス中の有機化合物濃度は極めて高くなるが、バグハウス入口温度十分に低くすることにより、出口ガスのダイオキシン類濃度は規制値以下に制御できる。
- 5) バグハウス入口温度の低下は、排ガス中ダイオキシン類の補足率増加に顕著な効果がある。110℃以上の温度条件では、逆に排ガス出口側でのダイオキシン類濃度が増加する可能性もある。

さらに、上記5)の現象を詳しく検討するために、予め有機物を除去した電気炉ダスト充填層にクロロベンゼン(CBz)やクロロフェノール(CPh)蒸気を流通する基礎的な実験を行っている³⁾。これによると、CPhを流通させた方がダイオキシン類生成量が多く、また、80および150℃という比較的低温でも無視できない量のダイオキシン類が生成する。

以上、製鋼用電気炉においてはバッチ式という電気炉操業の宿命から、排ガス温度や組成を一貫して制御することが難しいため、2次燃焼塔による排ガス中未燃成分の完全燃焼、高温排ガスの急冷、排ガス集塵温度制御など、排ガス処理プロセスの高度化が必要になると考えられる。また、ダスト中の各金属成分の触媒効果、ならびに安価なダイオキシン類発生低減技術の開発を今後の課題に挙げている⁴⁾。

3.2 鉄鉱石焼結プロセス

焼結鉱の主たる原料は鉄鉱石と石灰石、燃料はコークス粉であり、いずれも数mm程度以下の粉粒体である。また、高炉に装入できない返鉱と呼ばれる細粒焼結鉱、焼結機自身の集塵ダスト、高炉ダスト、圧延スケールなども使用される。このように、焼結工程は製鉄所内で発生するダスト類をリサイクルする重要な役割を担っている。また、焼結機(Dwight-Lloyd型)は定常プロセスであり、各ウィンドボックスのガス組成、温度は時間変化しないものの、その位置によって大きな相違がある。しかしながら通常はこれらの異なる排ガスを合流処理している。合流後の排ガス温度は110℃前後であり、ダイオキシン類の生成温度とされる300℃程度とは大きな差がある。1次集塵装置としては製鋼用電気炉の場合と異なり、電気集塵機が採用されている。

SDD研究会では、焼結工程におけるダイオキシン類のマ

クロ的挙動を、排ガス処理設備が相違する2つの実焼結機において測定することによって明らかにした^{6,7)}。塩素源については、一部の鉱石や石炭で含有量が高い可能性があるものの、一般的な原・燃料の塩素濃度は低いとされる。しかし、これらの輸送や保管の過程で海風などに運ばれた塩類が付着する可能性も否定できず、また、焼結機集塵ダストを含めリサイクル原料には塩素の比較的高いものが存在する。原料中塩素の一部は焼成中にHCl、Cl₂およびKCl、NaCl、Cu_xCl_y等の金属塩素化合物の形で揮発し、さらにそれらの一部は排ガスに移行し、集塵機ダストに含有する形で工程内を循環する。Fig. 2に焼結機における塩素の流れを示す。原料に含有して持ち込まれる塩素量と、焼結鉱に残留したり、排出ガスやダスト類の処理過程において系外に持ち出される量がバランスしている。本図より、焼結工程を循環して系内に滞留する塩素量は、排ガス処理法によって大きな影響を受ける可能性を指摘できる。すなわち、集塵強化によって排ガス中塩素の補足率が上昇し、集塵機ダストとしてリサイクルされる量が増加する結果、配合原料中の塩素濃度が上昇する懸念がある。配合原料中の塩素濃度とダイオキシン類生成量については、正の相関関係が報告されており⁸⁾留意すべき事項である。

また、SDD研究会においては上記の実機測定と並行し、12シリーズ(全119回)に及ぶ焼結鍋試験を行い、原・燃料や焼成条件の影響を検討した。さらに焼成途中で純窒素ガスを逆流させることによって焼結反応を停止する中断鍋実験を4シリーズ行い、焼結層内でのダイオキシン類および関連物質の挙動を詳細に調査している。

主な結果は以下のようにまとめられている。

- 1) 焼結機の排ガス中ダイオキシン類濃度は、排ガス温度がピークを示すウィンドボックスの直前で最高となり、SO_xの濃度パターンに類似する。
- 2) マクロ的には配合原料中のダイオキシン類量と電気集塵機入口におけるダイオキシン類量はバランスしており、焼成中の正味の生成量は少ない。しかし実際は、配合原料中のダイオキシン類のほとんどが分解され、ほぼ等量が新たに発生すると推定される。
- 3) 配合原料中の塩素濃度と排ガス中のダイオキシン類濃

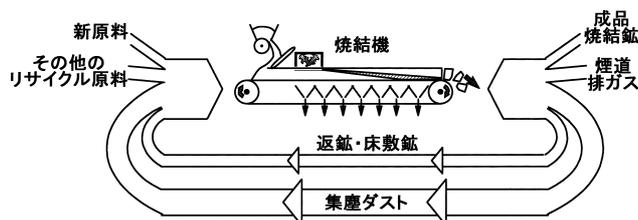


Fig. 2 焼結工程における塩素の循環

度にはほぼ比例と言える関係があり、無機、有機など原料中塩素の形態の影響は小さい。例えば、塩化ビニル、KCl、NaCl、CaCl₂などの形で塩素を添加しても、塩化物種の影響はあまり顕著ではない。

- 4) 燃料であるコークスの種類の差は大きく、灰分、揮発分、塩素濃度、表面付着物質などの影響が示唆される。また、不活性雰囲気における予熱処理によってダイオキシン類発生量が大きく低下する場合がある。
- 5) 配合原料中の銅濃度は通常微量であるが、その変化の影響は極めて大きい。特に、酸化銅など試薬による配合に比較して、鉍石中の銅成分の影響が大きい。
- 6) 尿素やアミン類など、加熱中に分解し、活性窒素を放出する物質の添加は、ダイオキシン類発生量を著しく低下させる。

さらに、焼結中断鍋試験により以下のような結果が得られている。

- 7) 焼結層内では、塩素、アルカリ、銅の各成分が揮発、移動しており、それらの一部は仮焼帯と呼ばれるゾーンに補足されて濃縮する。ダイオキシン類も同様に仮焼帯付近に濃縮する。

また、焼結層と火格子の間に置かれる床敷という焼結鉍のみを充填した層において、焼結層に匹敵する量のダイオキシン類が発生すること⁹⁾、および塩素化合物の配合を上中下各層間で変化させる偏析装入を行った鍋試験において、上層に多く偏析した場合にダイオキシン類発生量が高い結果が得られたことなどから、焼結層内で発生した未燃炭素粒子「すす」がダイオキシン類生成の直接的な原因物質である可能性が高いことが指摘されている。

以上、鉄鉍石焼結プロセスにおいては、排ガス処理過程の高度制御や配合原料の塩素含有量低下の他に、焼結層内でのダイオキシン類の生成抑制や分解促進を行う技術的余地が残されていると考えられる。これを具体化し、またその限界を明らかにするために、焼結層内で移動し、濃縮する関連成分(未燃炭素(炭化水素)、塩素化合物、銅化合物など)やダイオキシン類生成抑制作用を持つと考えられる活性窒素(アンモニアなど)の挙動の定量的把握とこれら成分の複合体からのダイオキシン類発生挙動定量化の必要が指摘できる。

Table 2に製鋼用電気炉と鉄鉍石焼結プロセスにおけるダイオキシン類関連事項を比較する。

Table 2 製鋼用電気炉と鉄鉍石焼結プロセスにおけるダイオキシン類関連事項の比較

	製鋼用電気炉		鉄鉍石焼結プロセス
	新設	0.5 ng-TEQ/Nm ³	0.1 ng-TEQ/Nm ³ *
排ガス濃度 規制値	既設	5 ng-TEQ/Nm ³ *	1 ng-TEQ/Nm ³ *
		20 ng-TEQ/Nm ³ **	2 ng-TEQ/Nm ³ **
操業の特徴	基本的にバッチプロセスであり、時間変動が大きい		2次元定常プロセスであり、通常、変動は小さい
排ガス組成・温度	操業進行と共に組成や温度は大きく変化する		ウィンドボックス間差は大きい、時間変化は小さい
塩素源	スクラップに混入したプラスチック(PVC)や切削油		1次原料中塩化物(一般的には低濃度)、リサイクルダスト
ダイオキシン類の 主な生成個所	スクラップ予熱炉内、電気炉内、排ガス冷却過程		焼結層乾燥帯、床敷層、比較的 高温のwindbox内

*2002年12月1日から適用,**2002年11月30日まで適用

4 今後の主要研究課題

高温プロセスにおけるダイオキシン類生成は、非意図的に進行する極めて多くの有機化合物生成反応の付随的反応と考えられ、現時点でその詳細を全て明らかにすることは不可能と考えられる。しかし、このような有機化合物の中には、極微量の摂取で人間や生態系に影響することが懸念されている内分泌攪乱化学物質(環境ホルモン)も存在し、それらの排出量低減は大きな課題と位置付けられる。このような見地から、廃棄物焼却炉、産業系特定施設など、ダイオキシン類排出が現在規制されているプロセスではもちろん、比較的高温のプロセスが多い他の金属製錬においても、十分な注意が必要と考えられる。特に循環型社会構築に向けて金属素材のリサイクルを推進する際の懸案である、塩化ビニルなど有機塩素化合物が混入した金属スクラップやKCl、NaClなど無機塩化物を多く含む廃棄物の焼却あるいはガス化後の残渣利用の際には、更なる注意が必要である。したがって、各プロセスにおける原料や集塵ダストからの塩素を中心としたハロゲン元素の効率的除去技術、有効利用技術の確立は極めて重要な課題に位置付けられる。

ダイオキシン類に議論を絞ると、生成メカニズムの詳細把握が現状での最大の課題と言える。各種燃焼プロセスにおけるダイオキシン類主要生成ルートとして、

- 1) 前駆体からの生成反応: CBzやCPhなどダイオキシン類の骨格となる分子構造を持つ物質からの生成
- 2) *de novo*^{*2}合成反応: 炭素材の低温酸化時に付随して起こる有機塩素化合物の生成

を挙げて議論される場合が多い。

上述した電気炉排ガス研究委員会では、電気炉ダスト粒子をダイオキシン類生成触媒と位置付け、前駆物質からのダイオキシン類生成について検討している。廃棄物焼却炉を対象

*2 *de novo*合成: *de novo*は「新たな」という意味のラテン語に由来する言葉であり、ダイオキシン類とは構造的に直接関係のないグラファイトやマクロ構造を持つ有機化合物の部分酸化過程で生成する反応を表す。

とした研究においても上記のような主要生成ルートの議論が絶えない。しかし、これを決定づける根拠となる情報は少なく、今後の基礎研究を含めた進展に待つしかないのが現状である。一方、鉄鉱石焼結プロセスにおいては上述したように塩素化合物の焼結層上層への偏析装入によるダイオキシン類発生量の増加¹⁰⁾、炭素源がほとんど存在しない床敷層内でのダイオキシン類生成⁹⁾、原料に前駆物質を添加してもダイオキシン類発生量に顕著な影響が認められない¹¹⁾ という実験結果が得られている。これらは、焼結層内を揮散・トラップを繰り返して下降する未燃炭素を含む粒子がダイオキシン類の直接的な生成源であることを示唆する現象である。また、ガス化溶融炉の飛灰を用いた *de novo* 合成実験においては、含有する未燃炭素をできるだけ除去した飛灰試料においても無視できないダイオキシン類生成量を報告している例¹²⁾ もある。

以上のことは、未燃炭素系物質からのダイオキシン類生成ルートにおいては、炭素の量よりも性質が大きく影響することを示している。特に、高温排ガスの冷却過程では、未燃有機化合物の凝集と共に、種々の金属および金属化合物の凝集も進行し、種々の成分が複合化した微粒子が生成する可能性が高い。著者らは、焼結機ダストおよび廃棄物焼却炉飛灰中の未燃炭素系粒子の構造解析を進めており、炭素、塩素、アルカリ金属が複合化されたサブミクロン粒子の存在を確認している。実際、このような複合物質は単独粒子の他に、ダストや飛灰の主要成分であるシリカ、アルミナ、酸化鉄等の混合物および混合酸化物からなる微粒子表面に薄く蒸着された形態で存在していることも考えられる。このような複合物質からのダイオキシン類生成に関する定量的な検討は、*de novo* 合成反応による生成寄与を明確にするだけでなく、効率的な生成抑制技術開発のための重要な情報を与えるものと期待される。

上記の2つのルートによるダイオキシン類生成は共に触媒反応であるため、特に触媒かつ塩素源として機能する金属塩素化合物の挙動把握が重要である。酸素存在下におけるいわゆるオキシクロライドとしての各種金属の挙動に関する情報は、平衡論、速度論共に不足している。廃棄物ガス化溶融炉だけでなく、製鋼用電気炉、高炉内における塩素の挙動にも関連する事項であり、今後の研究の進展が待たれる。塩化水素や塩素分子発生の見地からは、塩素と化合して安定した塩を作るカリウム、ナトリウム、カルシウムなどアルカリやアルカリ土類金属の挙動も重要である。これらの元素は高温でシリカと結合して珪酸塩を形成しやすいが、硫黄の存在下では1000℃以下の比較的低温において硫酸塩も安定である¹³⁾。このことは、アルカリやアルカリ土類金属が低温で塩素を放出しながら硫酸塩となり、高温でSO_xを放出しながら珪酸

塩となる2段階反応を考慮する必要性を示唆し、プロセスによってはダイオキシン類生成の塩素源を検討する上で大きな影響を与える。

5 産学共同研究プロジェクトへの一考

ここでは、SDD研究会における活動において経験した若干の事項を紹介しながら、今後の産学共同研究プロジェクトについても考えてみたい。

上述したように、本課題は製鉄プロセスに関連する従来の産学共同研究とは若干異なり、いわば手探り状態で始まった。政府においてダイオキシン類対策特別措置法が検討されているタイミングであるにも関わらず、焼結プロセスとダイオキシン類関連研究・技術の両方に精通する研究者、技術者がほぼ皆無で、海外においても焼結プロセスに関する研究、技術報告は少ない状態であった。これは他の特定施設の場合も同様の状況であったと考えられる。したがって、必然的に実機測定によるダイオキシン類のマクロ的挙動の把握が研究開始点となった。一連の実機測定には莫大な費用を要したが、巨大プロセスの中で研究の狙いを絞り込むための重要な基礎データを得るためには不可欠なものであった。また、小型試験機による検討には、試験条件やサンプリング法の基準化と妥当性の検証から始める必要があった。当然、コストと時間を要するダイオキシン類や関連微量物質を簡便かつ精度良くサンプリングし、分析するための手法確立が大きな課題であったが、同時に、従来あまり考慮されることがない原燃料中の塩素、銅、有機物などの微量成分の定量方法確立についても多くの検討を要した。重要課題を絞り込み、学側メンバーがいくつかの基礎研究へ的確にブレークダウンできるようになるためには、上記の大半をクリアすることが必要であり、これによって焼結過程のダイオキシン類の生成、移動、分解などのメカニズムについての本格的議論が可能となった。したがって、学側においては4年余の研究期間前半の約半分を実験手法および基本的研究計画の策定に要する結果となった。しかしながら、未知の事象を徐々に明らかにし、派生するあるいはさらに細部の課題を探索し、挑戦することの「楽しさ」が大きな駆動力となり、時に連続9時間に及ぶ研究会議においても産学一体となり、白熱したディスカッションが続けられたものとする。すなわち、研究会発足の時点から研究対象に関する情報や理解度の委員間差が小さく、「研究進展と委員間のディスカッションによって全員の理解が深まり、さらに興味も増す」という良いサイクルができていたように思われる。各研究者の所属組織に関わらず、強い知的興味をもたらす魅力的な研究テーマ設定が重要であることは論

を待たない。

一方、当時、廃棄物焼却炉に係るダイオキシン類に関するニュースが毎日のようにマスコミを賑わしており、関連研究の社会的インパクトが大きすぎるにより、研究内容を迅速に公開することが難しい状況であった。このようなことは、博士課程を含む学生を主要な戦力として抱える大学にとっては致命的になることも考えられる。すなわち、学位論文は公開が原則であり、重要な研究結果を公表できないと論文として成立しない場合が懸念される。同様なケースは環境問題に限らず、特許など知的財産に関連しても想定される。SDD研究会では参加企業、学側委員間で研究協力協定を交わし、これに基づいてある程度、情報公開事項をコントロールした。もちろん、このような状況は社会状況と共に変化し、研究の進展に伴い積極的公開が可能な成果も増加してきた。製錬は鉄鋼プロセス全体の上工程に位置付けられ、関連する産学プロジェクトは従来、不文律のないゆるい紳士協定によって機能してきたとも考えられる。実際、現在もこれが十分に機能し、大きな成果をあげているプロジェクトが多い。しかし、産学協同研究が今後益々重要となり、国公立大学の独立行政法人化等がそれを加速していくとすれば、やはり明文化された研究協定が必要となる場合が多くなるものとする。研究協定による保障がなくては、重要な研究情報開示や産学共同研究そのものを躊躇する企業が増える可能性が指摘できる。

最後に、産学共同研究において、今後も問題となるであろう事項を挙げてみる。

1) 研究目的に対する企業間温度差

産学共同研究テーマは当然社会的要請の強いテーマではあるものの、複数の企業が参加する場合は当然ながら当該研究への姿勢や期待が相違することが想定される。実験や解析など実務分担を行う時には厄介な問題となる。これは学側でも同様のはずであるが、基本的には個人として参加する形態が多いため、質的に異なる。いずれにしても、「不公平感」は共同研究への意欲を大きく低下させる可能性がある。研究費配分を含め、各委員（各社）の努力と時には強力なリーダーシップが必要と考える。

2) 学側への配慮

当然ながら企業側と学側メンバーには経験やセンスに大きな差異がある。しかし、これは産学共同研究を行う理由でもある。どちらかの土俵へ一方的に引きずり込むことは、共同研究の意義を失うことになりかねない。ただし、関連する背景や研究目的などを含めて当該プロセスを学側へ詳細に翻訳するのは、必要不可欠なステップである。今後もナノテクノロジーや環境など分野の異なるメンバーで構成される研究会が増加すると思われるが、このような場合は特に重要なステップとなるであろう。

一方、学側にはブレイクダウンされた基礎研究結果を具体的な実プロセス現象へ翻訳することが求められる。

3) 知識共有と十分なディスカッション

研究会で得られた知見の確実な共有は、研究会運営を効率的に行う上で極めて重要である。昨今は、職務として参加する企業側委員の交代も多く、期間の長い共同研究においては頭の痛い問題である。現在は電子メールを活用して常に情報を交換することができ、研究組織独自のホームページ作成なども可能である。これらはうまく活用すべきであるが、未だ苦手な方、煩わしさを感じる方もいると思われる。次元は全く異なるが、研究組織としての息抜き（時にはガス抜き）も必要であり、懇親会や研究会開催場所の工夫なども大切である。

4) 基幹メンバー

組織がある程度以上大きくなると、リーダーと幹事メンバーが共同研究を運営していく形態となる。個々のメンバーおよび研究状況を把握し、的確に運営する努力をすることはもちろんであるが、このような基幹メンバーの興味やセンスが研究会の雰囲気大いに影響する。魅力的なメンバー構成も研究会成功への鍵というのは言い過ぎであろうか。

5) 有能な事務局

研究組織が大きくなれば、メンバーへの連絡などの雑務もかなり大きな負担となる。日程調整や資料整理など研究以外の事務的作業も共同研究の円滑な運営に欠くことはできない。やはり、気持ちよく事務的作業を引き受けてくれる方に負担をかけざるを得ないのではあるが、ここでも電子メールは力強いツールである。

6) 強固な信念と思いやり

異なる組織の人と真剣に議論する楽しさ、研究テーマの斬新さや社会的、経済的インパクトなど、産学共同研究への魅力は大きい。しかし、長い研究期間においては研究の行き詰まりや他の業務の影響などによって研究が中々進展しない事態も想定される。ブレイクスルーの鍵は一般研究と同様に当該研究に対する信念であろうと思われる。ただし、最終的には各メンバーの個人的努力に負うことが多く、研究組織全体としては色々な意味での各メンバーに対する配慮が大事と考える。最後に、どのような共同研究においても研究である限り、明確な成果が出ないリスクが存在する。テーマ設定やメンバー構成など根本的なところで問題がある可能性もある。責任問題は悩ましい問題であるが、多くはない研究能力資源を有効に配分していくためには、「勇気ある撤退」も最終手段として残しておきたいと考える。

6 おわりに

以上、製鉄プロセスでのダイオキシン類関連研究の概要に加え、産学共同研究活動の課題についても私見を述べた。

製鋼用電気炉、鉄鋼業焼結施設に関連する共同研究会は、いずれも組織的な研究活動を終了し、その研究成果を考慮しつつ各現場が2002年12月の正規排出基準の本格適用に向けて最大限の努力を行ってきた。今後、さらに安定かつ効率的な排出濃度管理を行うためには、本文で述べた主要現象を理解するための基礎研究の進展が必要である。産学共同研究プロジェクトに関する記述においては、かなり不適切な表現や内容もあり、さらには全く反対の経験や意見を持つ方もおられるかもしれない。これらはあくまでも個人的意見であり、多少でも参考になれば幸いである。

最後に、SDD研究会委員の方々、特に事務局役も同時にお引き受け頂いた(財)鉄鋼業環境保全技術開発基金 青野照彦氏に謝意を表す。また、電気炉関連研究についてご教示頂いた大同特殊鋼(株)松岡滋樹氏、愛知製鋼(株)笹本博彦氏に感謝する。

参考文献

- 1) 山川 洋, 笹本博彦, 岡崎照夫, 飯盛康一, 松岡滋樹: CAMP-ISIJ, 13 (2000), 996.
- 2) 山川 洋, 松岡滋樹, 笹本博彦, 岡崎照夫, 飯盛康一: CAMP-ISIJ, 13 (2000), 997.
- 3) 山川 洋, 松岡滋樹, 岡崎照夫, 飯盛康一, 笹本博彦: CAMP-ISIJ, 13 (2000), 998.
- 4) 山川 洋, 松岡滋樹, 笹本博彦, 飯盛康一, 岡崎照夫: CAMP-ISIJ, 13 (2000), 999.
- 5) 公害防止の技術と法規編集委員会編: 公害防止の技術と法規 ダイオキシン類編, (社)産業環境管理協会, (2001), 118.
- 6) E. Kasai, T. Aono, Y. Tomita, M. Takasaki, N. Shiraiishi and S. Kitano: ISIJ Int., 41 (2001), 86.
- 7) 葛西栄輝, 青野照彦: 鉄と鋼, 87 (2001), 228.
- 8) 川口尊三, 松村 勝, 池田純治: CAMP-ISIJ, 13 (2000), 794.
- 9) 川口尊三, 松村 勝, 細谷陽三: CAMP-ISIJ, 14 (2001), 115.
- 10) E. Kasai, T. Kawaguchi, T. Aono, Y. Hosotani, Y. Tomita and H. Noda: Proc. of 6th International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, Porto, Portugal, Vol.1, (2001), 245.
- 11) 青野照彦, 葛西栄輝, 細谷陽三, 川口尊三: CAMP-ISIJ, 13 (2000), 70.
- 12) 川本克也, 鈴木和将: 廃棄物学会講演論文集, 11 (2000), 712.
- 13) 岩沢こころ, 山口 周, 岡部 徹, 前田正史: 資源・素材2001 (C) (D) 講演概要集, D5-4, 261.

(2002年8月19日受付)