

一橋大学 GCOE プログラム
「日本企業のイノベーション—実証経営学の教育研究拠点」
大河内賞ケース研究プロジェクト

荏原製作所
内部循環型流動層技術の開発

青島矢一
大倉健

2009 年 6 月

CASE#09-02

本ケースは、一橋大学グローバル COE プログラム「日本企業のイノベーション—実証経営学の教育研究拠点」から経費の支給を受けて進められている、「大河内賞ケース研究プロジェクト」の研究成果のひとつである。このプロジェクトは、大河内賞を受賞した業績について事例分析を行うもので、(財)大河内記念会と受賞企業のご協力をえながら、技術革新の概要やその開発過程、事業化の経緯や成果などを分析している。事例研究を積み重ねて、日本の主要なイノベーションのケース・データを蓄積するとともに、ケース横断的な比較分析を行い、日本企業のイノベーション活動の特徴や課題を探り出すことを目指している。本プロジェクトを進めるに際して、(財)大河内記念会より多大なご支援・ご協力をいただいていることに、心よりお礼を申し上げたい。
(プロジェクト活動の詳細については [http://www.iir.hit-u.ac.jp/iir-w3/reserch/GCOEokochiprize\(A\).html](http://www.iir.hit-u.ac.jp/iir-w3/reserch/GCOEokochiprize(A).html) を参照のこと)。

※本ケースの著作権は、筆者もしくは一橋大学イノベーション研究センターに帰属しています。本ケースに含まれる情報を、個人利用の範囲を超えて転載、もしくはコピーを行う場合には、一橋大学イノベーション研究センターによる事前の承諾が必要となりますので、以下までご連絡ください。

【連絡先】 一橋大学イノベーション研究センター研究支援室

TEL:042-580-8423 e-mail:chosa@iir.hit-u.ac.jp

株式会社荏原製作所
「内部循環型流動層技術の開発」¹

2009年6月

一橋大学イノベーション研究センター 青島矢一
一橋大学大学院商学研究科博士課程 大倉健

¹ 本ケースは、一橋大学グローバル COE プログラム「日本企業のイノベーション：実証的経営学の教育研究拠点」からの経費を受けて進められている、「大河内賞ケース研究プロジェクト」の研究成果の1つである。ケースの作成にあたっては、以下の方々から多大なご支援をいただいた。心から感謝を申し上げたい。

(株)荏原総合研究所 代表取締役社長 大下孝裕氏

(株)荏原製作所 環境プラント事業本部

プロジェクト統轄部 インフラサブプロジェクト室長 理事 永東秀一氏

エンジニアリング統括部 副統括部長 小杉茂氏

エンジニアリング統括部 第二計画室長 三好敬久氏

1. はじめに

1982年、株式会社荏原製作所(以下、荏原)の技術者は、流動層技術を応用した画期的な廃棄物焼却技術である「内部循環型流動層技術(TIF)」の開発に成功した。同技術は、廃棄物焼却の1つの方式である流動層技術の限界を独創的な発想によって克服したものであり、環境設備業界における荏原の地位を一躍引き上げるとともに、その後の業界の発展に多大な影響を与えた。

流動層技術とは、炉内に充填した砂を炉底から空気を入れて流動させ、そこに廃棄物を投入して焼却させる技術のことである。荏原は1970年代末にこの流動層技術を導入して焼却炉市場へと参入した。しかし、当時の流動層技術では、炉を大規模化することが原理的に不可能とであるといわれ、破砕機をつけることなしでは稼働できなかった。こうした技術的な限界ゆえに、流動層炉の市場は極めて限られていた。

こうした状況に対して荏原の技術陣は、砂の横方向流動を活用した独自の「内部循環型流動層技術」を開発した。この技術によって荏原は、流動層炉の大型化に対する制約を克服し、都市ごみのみならず一般廃棄物や産業廃棄物向けの焼却炉においても無破砕かつ大型化を実現することに成功した。

さらに荏原は、この内部循環型流動層技術を応用して、80年代後半から2000年にかけて、内部循環型流動層ボイラ(ICFB)、内部循環型ガス化炉(TIFG)、ケミカルリサイクル用加圧ガス化炉(PTIFG)と次々と新しい技術を導入した²。これら4つの技術が「内部循環型流動層技術の開発」として、第54回大河内記念賞を受賞した。以下本ケースではこれら4つの技術の開発と事業化の経緯を記述する。

2. 環境設備事業参入の経緯

2.1 参入の背景³

荏原製作所は1912年に大型ポンプの国産化を目的とした「みのくち式機械事務所」として創業した⁴。明治末から大正にかけての日本では、東京を初めとして大都市におけるインフラ整備が発達しつつあり、当時の世界最高水準の技術を用いた灌漑用・水道用ポンプが海外から輸入されていた。そうしたなかにあつて、創業者畠山一清は、恩師の東京大

² 後述するように、これら4つの技術につづいて、既に5つ目の新技術が開発されているが、それは大河内賞の受賞対象ではないため本ケースでは扱わない。ただし5番目の技術である内部循環型ガス化炉(ICFG)もまた大河内記念賞評価委員会からの将来の発展性を高く評価されている。

³ 以下の同社沿革についての記述は『ポケット社史 荏原一環境の総合エンジニアリング企業を目指して』(1996)を参考としている。

⁴ その後1920年に現在の株式会社荏原製作所として発足する。

学井口在屋博士が生み出した「渦巻ポンプ」という、世界でも類をみない独自の揚水ポンプ技術に注目し、苦心の末、初の国産ポンプの事業化に成功した。それ以後、荏原は、大型化に対応した軸流ポンプの開発を成功させるなど、国産ポンプのトップメーカーとしてその地歩を固めていった。一方で創業当時より、ポンプの基礎技術である流体力学に関連した送風機事業への進出も行い、工場や鉱山用送風機、さらにデパートなどのビル用送風機を導入した。

このように荏原は、「風水力事業」という形で事業基盤を築き、戦前期からトップメーカーとしての地位を確立した。戦後の経済復興期には国内経済の成長に伴うインフラ整備に歩みを併せて順調な成長を遂げ、1950年代末からは小型ポンプも手掛けるようになった。また海外市場への進出も果たし、1960年代にかけて同社の事業は飛躍的な成長を遂げることとなった。

しかし1970年代の初頭になると、風力関連市場が成熟化し、荏原の成長も鈍化し始めた。一般的にインフラ関連の事業は、需要が一通り満たされると買換需要が発生するまでに十数年を要するという性格をもっている。また設備投資は同時期に集中する傾向にあるため、需要に大きな波が生じることになる。風水力事業を基盤としていた荏原製作所は、インフラ事業のこうした性格ゆえに不安定な収益構造を抱えるようになっていた⁵。

そこで荏原は1970年代に入ると新規事業の開発を活発化し始めた。その1つが焼却炉を中心とする環境設備事業であった。1970年初頭は、産業廃棄物の処理問題や都市ごみ用埋め立て地の不足が社会的にも大きく注目され、環境設備事業に大きな成長性が見込まれていた時期であったからである。

2.2 準備段階

1972年、荏原の化工機事業部のなかに「環境開発部」が発足し、環境設備事業の基盤作りがスタートした⁶。環境開発部のメンバーは、高い成長が見込まれるとともに、既存の顧客に関連する事業を探索した。そうして選ばれたのが、汚泥処理と廃棄物焼却炉の2つの事業であった。前者については、当時、田子の浦や東京湾におけるヘドロの公害問題が引き金となって、汚泥の脱水・焼却処理に関する設備需要が生じていた。そこで荏原製作所は、まず汚泥の脱水機を開発した。しかし脱水効率の低さがネックとなり、数台を納入しただけでこの事業からの撤退を余儀なくされた⁷。

⁵ 鉄鋼や化学プラントといった他の分野も同様の問題を抱えている。

⁶ 正確には、荏原は既に環境設備事業への参入を果たしていた。1956年、水処理事業への参入のためにアメリカのインフィルコ社との折半出資による合弁会社、荏原インフィルコ社を設立しており、同社は都市ごみ焼却炉事業への参入も果たしていた。ただし、荏原インフィルコ社は独立企業であり、荏原が環境設備事業に参入した後も、両社の合併が実現する1994年までは、両社のゴミ焼却炉事業はそれぞれ独立に運営されていた（『ポケット社史ー』より）。

⁷ 石原秀郎、「高い志と大きな夢：旋回流型流動床焼却炉の歴史」、荏原製作所社内資料、2004年3月。以下の参入初期の経緯についての記述は同資料を参考とした。

そこで残ったのが、後者の廃棄物用焼却炉である。焼却の対象としては大きく、汚泥を始めとする産業廃棄物と都市ごみがある。なかでも都市ごみ用焼却炉の市場は、とくに有望であると考えられた。その当時、全国の自治体で埋立地不足が深刻化し、その対処策として自治体による焼却炉の整備が拡充されていたからである。回収した都市ごみをそのまま埋め立てるのではなく、焼却によって容積を減らし(減容化)、埋め立て処分量を極力減らすことは政策的にも推奨されていた。とくに 1960 年代からは、焼却炉設置が国庫補助の対象となり、全国の自治体で焼却炉の整備が大規模に進められるようになった。1970 年代初頭の焼却炉市場の規模は年間 1,000 億円を超えるほどになると予測されていた。これは環境設備の分野では群を抜いて大きな市場であった。

焼却炉の需要者である事業者や自治体は、風水力事業を手掛けてきた荏原にとって馴染みのある客筋であった。しかし技術的な面からみれば、焼却炉は全く未経験の分野であった。こうした中、1972 年 5 月、営業部隊 8 人と技術陣 3 人によって焼却炉の事業化に関する調査が開始された。

3. 参入初期:SDP 炉の開発(1972 年-)

3.1 焼却炉業界の既存メーカーと既存技術

当時の焼却炉業界では、1960 年代初頭に大手の造船・プラントメーカーが導入した「ストーカ式」と呼ばれる焼却炉技術が主流であった。ストーカ炉は大型化が容易であり、年々増大する日本の都市ごみを大量焼却処理することに適した性格を備えていた。ストーカ炉の内部には金属の格子板が階段状に並べられ、下方から燃焼用の空気が供給されるようになっている。段々になった格子板にごみが載せられると、格子板が小刻みに動きながらごみを下方に向かって移動させ、順次ごみを燃焼させてゆく仕組みである。「Stoker(蒸気機関に炭をくべる火夫)」という呼称は、次々とごみが炉に投入され、連続的に焼却される様子に由来している。

このストーカ炉導入の担い手である三菱重工、日立造船、NKK、川崎重工、およびタクマの 5 社は、大都市向けの大型都市ごみ焼却炉を中心として、市場の 7 割近いシェアを掌握していた。残りの市場は中小自治体向けの小型焼却炉が中心で、荏原インフィルコ、クボタ、三機工業などのメーカーが実績を上げていた。

新規参入を考える荏原製作所としては、こうした寡占市場に同じ技術で後から参入しても到底勝ち目はなかった。また、すでに参入していた関連会社である荏原インフィルコとの直接競合避けるべきだ、という配慮もあり、ストーカ炉での参入は考慮の対象から除外された。

そこで荏原の技術者が注目したのが、流動層技術であった。ストーカ式の他にもいくつかの代替的な技術があるなかで、とくに流動層技術に注目したきっかけは、開発者の一人

が数年前に手掛けたブドウ糖製造プラントの改良経験にあった。その開発者は、粉末ブドウ糖を冷却するプロセスで生じたトラブルを解決するために、流動する砂糖に空気をブローして冷却する流動層クーラー方式を導入して問題を解決した経験があった。そこで流動層技術が、構造が比較的シンプルで、かつ燃焼効率が高い特性をもつことがわかっていたのである。

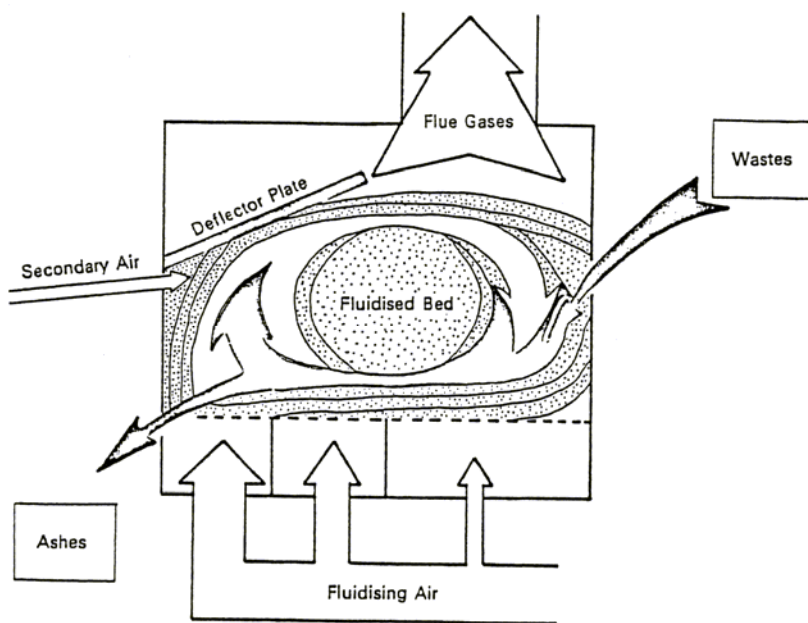
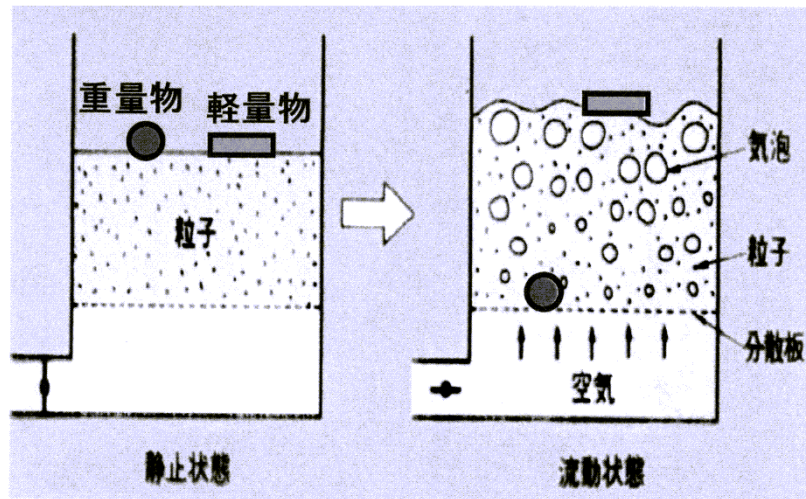
3.2 SDP 炉の開発

1972年の10月、開発チームは、営業部を通じて、伊藤忠商事の化学機械部紙パルプ機械課から英国のSDP社(Sterile Disposal Plant Ltd.)のもつ流動層技術についての情報を入手した。それは製品として完成された技術ではなかったが、非常にユニークなものであった。

流動層焼却炉⁸の基本的な仕組みとは、炉内に1mm以下の砂を充填し、炉底から熱風を送ってそれらの砂を上下に攪拌(バブリング)し、この中にごみを投じて燃焼させるというものである。これを「バブリング型」といい、流動層燃焼炉の原型となる。SDP社の流動層技術とは、単純に砂が上下動する仕組みから一歩進めて、流動砂を回転させることで層内の負荷を増し、より高い燃焼効率を図るというものであった。これを「旋回流型」流動層焼却炉という(図1参照)。荏原製作所が導入した旋回流型流動層焼却炉は、SDP社の名にちなんで「SDP」と呼ばれるようになった。

⁸ fluidized-bed の訳。「流動床」とも訳す。一般的に流動層技術を用いた焼却炉は「流動床炉」と呼ぶことが多く、専門文献でも2つの語を併用するケースが多いが、本稿では読者の混乱を避けて「流動層」の訳語に統一する。

図 1: バブリング型流動層炉(上)とSDP(下)



出所: 荏原製作所内部資料

1973 年末に SDP 社とライセンス契約を締結した荏原は、翌 1974 年から実験プラントの設計を開始した。1975 年 1 月には川崎市の協力を得て、同社の旧川崎工場に近い加瀬下水処理場に、実験炉を設置した。実験炉では下水に含まれる汚泥や、ボイラダスト、プラスチックなどの焼却実験が連日繰り返された。

実験炉で得たデータは営業活動においても大きな支えとなった。実験炉の所在からもほど近い同じ川崎市の東亜石油への納入話が持ち上がると、開発チームは同社の川崎

製油所から排出される汚泥サンプルを貰い受け、実験炉での焼却を繰り返し実験した。その結果、1975年10月に東亜石油から初の受注を獲得し、1976年8月に第一号を納入することができた。この第一号機が無事操業し始めると、続けて他の企業からも3件の受注を得ることができた。いずれも工場内で排出される汚泥処理用のもので、パルプ・製紙メーカー、化学メーカーからの発注であった。

こうして汚泥用焼却炉が無事に製品化する頃、1977年からは、当初からの主眼である都市ごみ焼却炉市場への参入が開始された。

「都市ごみ焼却炉といえばストーカ炉」という状況のなか、新たな技術を市場に導入するための最初の課題は、厚生省から技術的な認可を得ることであった。自治体が焼却炉を建設するにあたり、国からスムーズに国庫補助金を受けるためには、建設する焼却炉が厚生省の定める焼却設備に関するガイドライン（「構造指針」と呼ばれる）に沿ったものでなければならない。この構造指針は、当然ながら当時の主流であるストーカ方式を想定して作られたものであったため、そこに新たに流動層型焼却炉を組み入れてもらう必要があった。

厚生省（内の当時の生活環境審議会）の審査をクリアするためには、操業データによって定格能力があることを示さなければならない。そのために開発チームは、実験炉で都市ごみの焼却実験を繰り返し、ごみ質の季節変動や、自治体の規模によって異なる操業時間⁹などの操業条件に合わせたデータを蓄積していった。こうした努力の末、1977年には技術審査を通過することができた。

次の課題は実機化であった。自治体の処理現場における日常の操業条件は、実験炉の操業条件とはさまざまな点で大きく異なる。例えば、実験炉には比較的等質なゴミが投入されるが、実際の現場で処理されるごみの性状は、都市によっても、また日によっても異なる。こうした相違ゆえに、実験段階では想定されなかった多くの問題が発生し、実機の納入後も開発陣はその改良に腐心することになった。都市ごみ用焼却炉の第1号の受注は1977年の石川県珠洲市からの25t/16h炉¹⁰であったが、ここではごみを投入する前工程の破碎機の刃の破損、給じん装置の詰まり現象、燃焼の安定性などのトラブルが納入後に頻発した。そこで設計者の一人が運転要員となり、納入後の約1年もの間、現地に滞在して改善を図るという方策がとられた。

⁹ 焼却炉は操業時間によってタイプ分けがなされる。大都市ほど処理されるごみの量が多いので操業時間も長くなる。最長のものが全連続炉（24時間連続運転）、中小規模の市町村に多いのが準連続炉（16時間、8時間連続運転）であり、より処理量が少ないとバッチ炉（間欠運転）が採用される。

¹⁰ 焼却炉の規模は通常、1日に処理するごみの重量（t/d：トン/日）で表わす。大規模炉は100t/dから200t/d以上に及ぶものがある。前注で延べた操業時間によるタイプ分けと処理量は比例する。たとえば珠洲市の場合、ごみの量が大都市ほど多くないので、一日16時間だけ運転する「準連続」の25トン炉（25t/16h）を発注した。

3.3 市場からの反応

こうして改良が加えられていった荏原の流動層炉は、他の方式の小型焼却炉に比して高い燃焼性能を示した。主流のストーカ炉は、もともと大都市における大量のごみを処理するように開発されており、少量のごみを処理するには適していなかった。処理量に合わせて炉の規模を小さくすると、十分な燃焼効率を発揮することができず、灰の中に未燃物が残留することが多かったのである。それに対してSDP炉は、小規模の割に高い燃焼性を実現し、中小の自治体向けの需要に適っていた。

珠洲市に続き、福岡県宇土の富合清掃センター組合や室蘭市からの受注が決まって実績を上げ始めると、各地の自治体がSDP炉に興味を示し始めた。1979年から1981年の3年間で、都市ごみ用焼却炉11件、汚泥用焼却炉3件の計14件の受注を得ることができた。

こうして焼却炉市場への参入にはひとまず成功したものの、受注は地方向けの中小型焼却炉に限られたものだった。平均的な大型焼却炉の受注額は百億円を超え、政令指定都市クラスになると数百億円規模になるのに対し、中小の自治体向けの中小型焼却炉の受注金額はせいぜい数億から十数億円程度にとどまる。焼却炉事業を成長させるためには、大型焼却炉市場への拡大が必須であった。

4. 第1ステップ:TIF炉の開発(1978年-)

4.1 大型化への技術的制約

しかし、SDPによって大型焼却炉市場へと進出することには大きな障害があった。流動層技術では、原理的に、炉を大型化することが難しかったのである。

第1に、流動層炉では、重量のある大型の廃棄物を燃焼させることができなかった。流動層のなかに重量のある廃棄物を投入すると、廃棄物が炉底に沈んで堆積する。廃棄物と砂が炉底に堆積すると、局部過熱を起こして廃棄物と砂が溶けて固まってしまう¹¹。その結果、層内の流動が阻害されて運転不能になる危険性がある。それゆえ、流動層炉では、廃棄物をあらかじめ小さく破碎する前処理が必要であった。しかしごみを破碎すると騒音や異臭が発生し、作業環境が悪化するだけでなく、近隣に住宅がある場合には公害問題を引き起こす恐れがあった。また破碎機の電力消費が非常に大きかったために、ランニングコストを押し上げる要因にもなっていた。

第2に、炉を大型化することによって廃棄物の攪拌が阻害されるという問題があった。流動層炉は、砂を下から吹き上げて上下方向に動かしながら投入物を攪拌する。一方、投入物を横方向に攪拌する力が弱いのが原理的な問題であった。炉を大型化すると、この横方向の攪拌が決定的に不足して、炉内(流動層内)で熱が拡散されずに動作不良を

¹¹ これをアグロメレーションという。

起こしてしまう。それゆえ、50t/d の規模（焼却炉では中規模）が流動層炉の限界であるというのが当時の常識的な見解であった。

大型焼却炉市場に参入するためには、これら 2 つの技術的課題、すなわち(1)ごみの無破碎化と(2)横方向の攪拌を実現する必要があった。しかしこれらの問題を克服することは不可能であるという見方が強かった。たとえ市場規模が限られおり、破碎に付随する問題を抱えていようとも、SDP に特化して事業を展開するべきであるという考え方が社内では支配的であった¹²。

4.2 内部循環型流動層技術と TIF 炉の開発

「無破碎型ごみ焼却炉」の開発は 1979 年、開発課長の石原秀郎、主任技術者の大下孝裕、斉藤晴光のわずか 3 人によるチームでスタートした。

その年に 5 件の SDP 炉の受注を抱えていた事業部門は、無破碎型ゴミ焼却炉には全く関心を示さなかった。それゆえ開発チームは、ラインから外れた化工機部（事業部）の部長直轄の別部隊としての活動を余儀なくされた。社内的には現行の SDP 炉を支持する声は圧倒的に強かった。無破碎型ゴミ焼却炉の開発を支持してくれたのは、業務部門の担当者 1 名のみという状況であった¹³。

大下らが挑んだ技術的な課題は、(1)無破碎で投入した重量物の沈降を防ぐこと、(2)層内の横方向の流動を確保すること、であった。

課題解決の最初のヒントは、再び、SDP 炉の発明者の一人であったアリソン・D・ミッチェルが考案したアイデアにあった。それは流動層炉の中央に仕切壁を設け、炉内に 2 つの循環流を生じさせて層内の燃焼物を移動させるというものであった。これは TIF（Twin Interchanging Fluidized-bed）と呼ばれる技術である。荏原では、ミッチェルのこの特許技術を検討し、前向きに展開できるようであれば買い取るということで開発を進めた。

しかし、実際にミッチェルの仕切壁付 TIF を実験¹⁴してみると、重量の軽いものが流動層の表面に浮かんだまま沈降しないという結果が得られた。可燃物が表面に浮いたままだと、燃焼熱が層内に拡散せず層内の温度維持が不安定になる恐れがある。そこでいくつかの試行錯誤を続けるうちに、仕切壁をとることで層内の動きに大きな変化が見られることがわかった。仕切壁が無い場合、表面に浮かんだごみは速い速度で沈降し、その後ふたたび両脇の流動層に戻って上昇する。また重量のあるものは沈降せず、両脇に横滑りして移動することがわかった。

¹²一橋大学イノベーション研究センター大河内賞ケース研究プロジェクト講演会における大下氏の発言による。2008 年 11 月 7 日、一橋大学イノベーション研究センターにて。

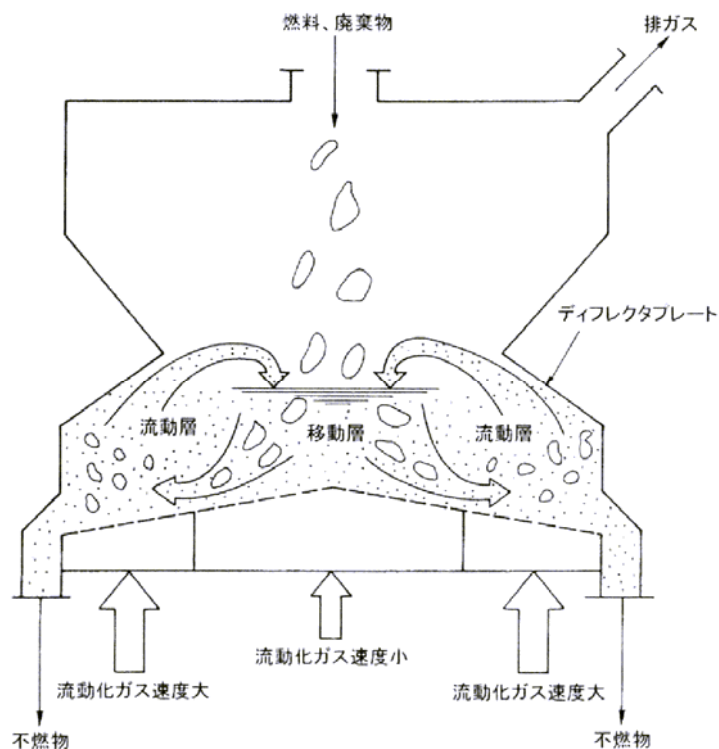
¹³ 前掲、講演会における大下氏の発言による。

¹⁴ 流動層炉の開発では、最初に純粋に流体の動きだけを観察するために、燃焼炉ではなく「コールドモデル」と呼ばれる実験用のモデルに疑似ごみを投入してその挙動をみる。次に焼却炉、すなわち「ホットモデル」で燃焼性等の実験を行う。

こうした発見に基づいて開発された「内部循環型」流動層の原理とは、次のようなものであった。まず構造的には、(1)炉底部が山型になっており、(2)炉底の両脇(すなわち山の両裾)からは強い流速で、中央部分からは弱い流速でガスが吹き上げられるようになっており、(3)炉の両サイドには上昇してきた流動層をはじき返すディフレクタープレートが付けられている、という特徴がある(図2参照)。

この構造のもとでは次のような循環が生じる。流動速度の速い両脇では上昇流が生じ、吹き上げられた砂はディフレクタープレートに跳ね返され、中央部に向けて移動していく。中央部の流動速度は両脇よりも遅いため、そこでは下降流が生じる。これによって、両脇から砂が上昇して中央で下降するという2つの循環流が生じる。真上からごみが投入されると、ごみはまず下降流に沿って沈降しつつ、両脇に向かって横方向に移動する。このとき、炉底部が山型になっていることがその移動を助けるように作用する。こうして、軽量物も重量物も炉床に沈降することなく層内で循環する。一方、大きな不燃物は、左右の不燃物排出口に寄せ集められて取り出される。

図2: 内部循環型流動層の機構概念図



出所: 荏原製作所内部資料

こうした機構によれば、横方向の流動が熱の拡散を促進するため層内温度は安定する。同時に重量物が一カ所に堆積して動作不良を起こすこともない。こうして開発チームは、ミ

ツチェル型 TIF 炉を破棄し、仕切壁を除いた独自の TIF 炉で無破碎型大型焼却炉の実用化を目指すことになった。

実験炉でのテストが終了し、営業活動を開始しようとした頃、社内では一つの問題が持ち上がった。化工機部における TIF 炉の開発と並行して、荏原総合研究所（以下、総研）においても別の技術を使った大型炉の開発が進められていたため、総研側が TIF 炉の実用化を一旦ストップするよう働きかけてきたのである。この問題に関しては、総研側と化工機部双方の開発者、さらに同じ化工機部の営業担当者が加わって会合が設けられた。それぞれの優劣が論じられた後、最終的に営業部から、構造的にシンプルでコストも安い TIF 炉を売りたいという意見が述べられ、この問題は決着をみた¹⁵。

4.3 TIF 炉の市場導入

TIF 炉の第 1 号機は、1981 年に神奈川県藤沢市石名坂清掃センターから受注した案件で納入された（130t/d×3 基）。この案件の検討が始まった 1980 年 6 月頃の段階では、まだ TIF 炉の開発は完了しておらず、営業は SDP 炉によって対応していた。しかし受注に成功したのと相前後して TIF 炉の開発が完了したことから、開発陣は TIF 炉の導入を促すべく、トップを含む社内関係者と藤沢市の担当者の説得にあたった。実験炉のデータを支えに熱心な説得を繰り返した結果、条件付きで TIF 炉の導入が了承されることとなった。その条件とは、破碎機を設置することだった。

顧客と社内関係者の説得においてネックとなったのは、無破碎型焼却炉が背負うリスクである。都市ごみには事前に想定されない雑多なものが混入される恐れがある。とくに当時は、今ほど廃棄物処理に対する規制が厳しくなかったため、ずさんな民間の廃棄物処理業者により、本来焼却炉に投入すべきではないタイヤや電化製品などといった、難燃性、不燃性の廃棄物が持ち込まれることもしばしばあった。こうした不適当な投入物が直接混入すると、炉内でトラブルが生じる確率が高くなる。もしも炉が運転不能状態に陥った場合、自治体全体の清掃業務そのものが麻痺する危険がある。それゆえ、自治体も社内の営業担当者も、多少の不適当な投入物が混入したとしても頑健な、実績のある設備を選ぶ傾向が強かった。

開発チームには無破碎型に自信があったものの、こうした顧客と営業のもつ懸念を減らすために、安全策として破碎機を設置することを提案することにした。これは「炉は新型でも良いが、粉碎機は外してはならぬ」というトップから指令によるものであった¹⁶。

また開発チームは、新技術に対する社内外での抵抗感を和らげるための工夫として、TIF 炉の開発当初は「TIF」という呼称を使わず、「SDP-2 型」という呼称を用いていた。そこには、TIF 炉はあくまでも SDP 炉の延長線上にある改良技術であり「それほど難しい技

¹⁵ 石原秀郎（2004）「高い志と大きな夢：旋回流型流動床焼却炉の歴史」（荏原製作所社内資料）より。

¹⁶ 大下孝裕「心に火を付けて」『粉体工学会誌』43 巻 6 号，p. 425.

術ではない」という印象をもたせる意図があった¹⁷。

破砕機をつけない完全な無破砕型 TIF 炉は、藤沢市と同じ頃に受注した和歌山県海南市の案件で実現した(75t/d×2 基)。このときも、社内では無破砕型に対する懐疑の念が強かった。しかし今回は営業と業務からの協力を得ることができた。顧客からは「従来炉(SDP)では問題があり技術評価で落ちる¹⁸と思っていた。これ(TIF)ならよい¹⁹」という前向きな意見を得ることができた。とくに顧客側の担当者が技術者出身で、TIF 炉の性能を高く評価したことが追い風となった。開発チームにも「ここで妥協をしたら(破砕機をつけたら)先に進むことができない²⁰」という強い思いがあった。その結果、海南市には初めて無破砕型の TIF 炉が納入されることとなった。

1984 年に竣工²¹した藤沢市と海南市の両施設は、最終的な試運転ではトラブルもなく、無事操業を開始した。新たな TIF 炉は開発チームの予想を超えた性能を発揮した。たとえば、流動層炉では不可能といわれていたタイヤを丸ごと投入しても、問題なく処理することができた。実際に運転する過程で開発チームは旋回流のもつ潜在能力を発見していった。

2 つの案件を無事成功させたことにより、荏原製作所は大型炉にも対応可能な流動層焼却炉メーカーとしての地位を得ることになった。自治体が焼却炉の導入を検討する際には、新しい焼却炉を導入した自治体に現場担当者や議員などからなる行政視察団を派遣し、実際の運転現場を視察させることが一般的である。荏原製作所の無破砕型流動層炉はその新規性ゆえに全国の自治体から注目され、藤沢市と海南市の両施設にはひっきりなしに行政視察が訪れるようになった。

図 3 には、荏原における、1984 年から 1998 年までの TIF 炉の納入実績の推移が示されている。1980 年代後半における施設の処理量を年平均でみた場合、既存の大手メーカーが 600-1,000t/d 程度であったのに対して、荏原は 460t/d 程度となっており、大手メーカーに迫る大きなプレゼンスを占めるようになったことがわかる。しかも、それらの案件のうち約 1/3 は全連続の大型炉であった。それは荏原が大型炉メーカーとしての地位を確立したことを意味していた。

とりわけ 1983 年に納入した新潟市の案件(360t/d(120t/d×3 基))は、TIF の大型炉市場への普及に大きな意味をもっていたと推察される。新潟市はその当時日本に 12 市しか

¹⁷ 前掲講演会における大下氏の発言より。

¹⁸ 最終的には数社による競争入札によって受注は決定されるが、その前段階として、一定の技術的要件が満たされているという評価が自治体から得られない限り、メーカーは入札に参加することができない。したがって自治体への営業活動の目的は、この入札の前段階でのプロセス、すなわち設備建設に関する自社の提案書を提出し、適格であることを認定してもらうことにある。ここで自治体によってふるいをかけられた後に競争入札に入る。

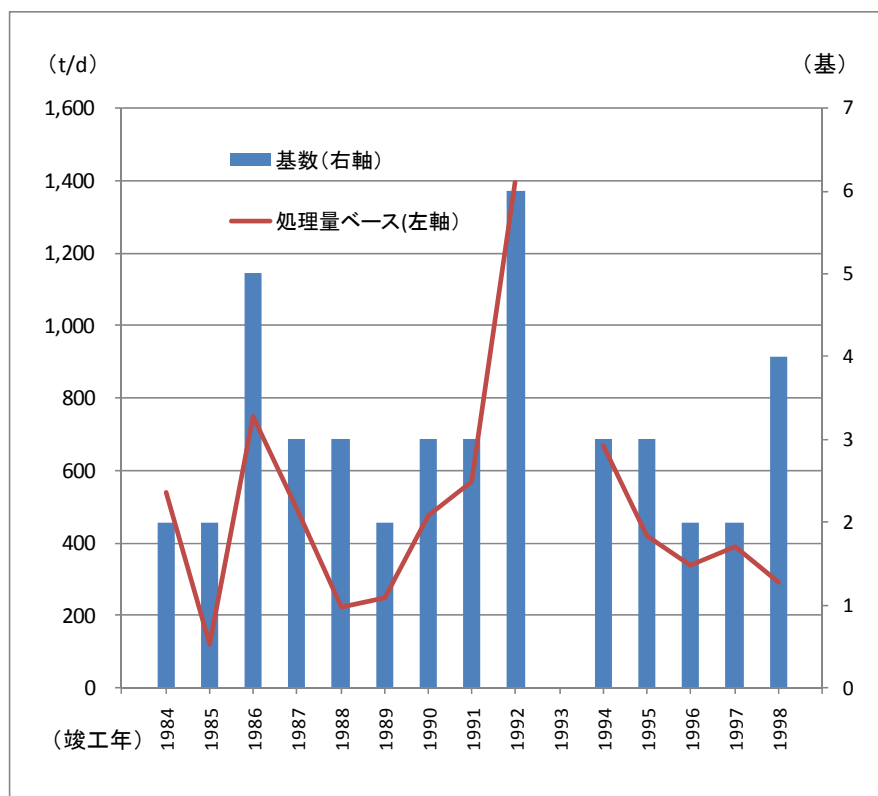
¹⁹ 大下孝裕「心に火を付けて」『粉体工学会誌』43 巻 6 号, p. 425.

²⁰ 前掲、講演会における大下氏の発言より。

²¹ 焼却炉を含めたごみ処理場の建設は通常 2 年から 3 年程度かかる。

認定されていない政令指定都市のひとつであった。人口 50 万人以上の大都市である政令指定都市は都道府県に準じる存在であり、その政策決定は他の自治体にも大きな影響を及ぼす。政令指定都市によって採用されたことは、TIF 炉が全国のいかなる規模の自治体にも導入され得る十分な資格をもっているという評価が示されたに等しかった。

図 3: TIF 炉の納入実績



出所: 荏原製作所内部資料

1970年代以降、日本全体のごみ排出量は急速に増大した。その処理に頭を悩ませる各地の自治体は、焼却後の最終処分量がより少なくなるような、より燃焼性の高い新型の焼却炉を模索していた。政府も新型焼却炉の整備を積極的に推奨し、1963年から進めてきた「廃棄物処理施設整備計画」の予算規模を拡大した(表1参照)。こうした背景にあつて、内部循環型流動層炉の完成は時宜を得たものであつたといえる。

表1: 廃棄物関連政府予算の推移

	単位: 億円					
	1972-1977 第三次 S47-S50	1976-1980 第四次 S51-S55	1981-1985 第五次 S56-S60	1986-1999 第六次 S61-H2	1991-1995 第七次 H3-H7	1996-2000 第八次 H8-H12
予算計画合計:	4,020	11,300	17,600	19,100	28,300	50,500
うち都市ごみ処理施設関連:	2,530	7,740	12,300	11,390	19,324	21,272

出所: 八木真一(2004)より転載

1984年の納入以降 2008年現在にいたるまで、荏原は合計で154基のTIF炉を納入した(施設数は89施設)。その内訳は国内122基、海外32基となっている。国内では一般廃棄物用が96基47施設、産業廃棄物用が15基13施設、その他、下水汚泥処理用などが11基という内訳である。海外施設に関しては基本的に技術供与の形をとっている。

5. 第2ステップ:ICFB(内部循環型流動層ボイラ)の開発(1984-)

5.1 熱回収型焼却炉の要請

TIF炉の納入が一段落した1984年頃、大下を含む3名に「次の開発をせよ」という指令が下つた。当初3人は、ラインから外れた部長直轄の立場で開発をスタートし、1年後に正式の開発チームとなった。「あまり期待されていなかったと思う」と大下が述べているように、全社的な支持を得て始まった開発というわけではなかった。開発チームは、大下をリーダーとして、チーム員である永東秀一、課員である小杉茂と三好敬久の4人で構成された²²。

当時世界では、オイルショック以降の省エネルギー化の流れの中で、低質の微粉炭を燃焼することによる発電技術が注目を集めていた。流動層技術はその1つの技術として既に利用されていた。

²² その後1986年に化工機部が環境プラント事業部へと組織替えしたことに伴って、開発チームも環境プラント事業部環境開発部に所属することになった。さらに実機化のために1986年12月にCP8601プロジェクトチームが設けられた。

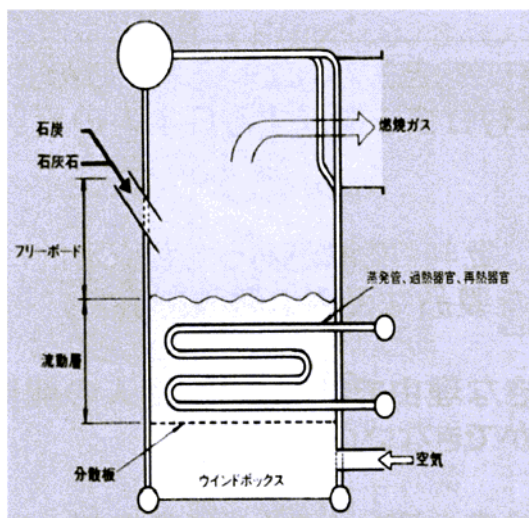
一方、SDP 炉や TIF 炉を販売する営業サイドからは熱回収型の焼却炉の要請がきていた。廃棄物の発熱量が高くなると、流動層の層温度が高くなりすぎるため(800℃)、せっかくのエネルギーに水をかけて層温度を制御していた。廃棄物からのエネルギー回収という時代背景の中、余剰熱を回収する必要性が生じていた。

このように、省エネルギー型発電において流動層技術が注目されるという背景のもと、熱回収型に対する営業からの直接的な要望があり、開発チームは内部循環型流動層ボイラ(ICFB: Internally Circulating Fluidized-bed Boiler)の開発に取り組むことになった。

5.1 熱回収室の分離

従来型の石炭燃焼用の流動層ボイラは、前述(p. 5)のバブリング型流動層をベースにしたものである(図4参照)。バブリング型流動層ボイラでは、ボイラの蒸気を通る伝熱管が流動層の中に挿し込まれたような形となっており、流動層の中で燃える石炭の燃焼熱が直接伝熱管から回収されるような仕組みになっていた。砂の流動によって石炭は速やかに乾燥・着火し、層内に均一に分散され、砂と空気と混合しながら層内で長い時間滞留することによって、効率良く燃焼がなされる。

図 4: バブリング型流動層ボイラ



出所: 荏原製作所内部資料

バブリング型流動層ボイラには、低質燃料でも燃焼できるという利点があったが²³、一方でこの機構には 2 つの構造的問題があった。第 1 は、ボイラの伝熱管が流動層の中にあるため、砂の流動によって伝熱管が摩耗して穴が空いてしまうという問題である。小さな

²³ 日本粉体工業技術協会編『流動層ハンドブック』, 1999 年.

穴が空くとそこから水蒸気が一気に吹き出して、炉内の砂を巻き込み、いわゆるサンドブラストを引き起こし、それが周りの水管を破壊してしまうという問題を引き起こす危険性がある。

第 2 は、流動層から伝熱管へと伝達される熱量を制御することが難しいという問題である。投入する燃焼物によって発熱量が異なるため、炉内の燃焼温度を安定させるためには、熱回収量を制御する必要があるのだが、バブリング型流動層ボイラではそれが難しかった。熱回収量を制御できないと投入物が限定されてしまい、廃棄物を燃料としたボイラとしては実用化できない。また、ボイラとしては蒸気量の制御ができない。そこで当時から、熱回収量を制御するために流動層の一部を固定層にしてしまうとか、一時的に砂を取り除いて流動層の高さを変化させるなどのアイデアはあったものの、どれも現実的な解決法ではなかった。

これら2つの問題に対して荏原の開発チームは、燃焼室と熱回収室を分離するという独自の解決法を考え出した。大下によれば「流動層ボイラの案は、ある時突然ひらめいた」²⁴という。実は既に事業部門では別の案でボイラを実現することが決定していたのだが、大下には「それでは駄目だ」という直感があった。最終的に大下の案と当初の事業部門の案が比較検討され、大下の案が採用されることになった。TIF 炉を SDP 炉の改良型と位置づけ関係者を説得したように、大下は、この ICFB 炉も TIF 炉の改良型 (TIF-2 型) と位置づけることによって、新規な試みに対する組織内の抵抗を緩和した。

大下が考え出した解決法では、燃焼用の流動層の中に直接伝熱管を挿し込むのではなく、流動層炉の左右に設けられた熱回収室に伝熱管を設置する(図 5 参照)。燃焼室内では激しい流動によって投入物が燃焼されるが、熱回収室ではディフレクターで反転する一部の砂が流入し、伝熱管の間をゆっくりと沈降していく。一般に、伝熱管の磨耗量は砂の流動化速度の 3 乗に比例する。熱回収室内における流動化速度は燃焼室における速度の 1/3 程度であるため、摩耗は 1/27 にまで軽減されることになる。

熱回収量の制御は、熱回収室の下方から吹き上げる空気量を調整して、流動化速度を変化させることによって可能となる。伝熱管への熱伝達係数(総括熱伝達係数=一定伝熱面あたりの伝熱量)は一般に砂の流動化速度が $3U/U_m$ を超えると一定となる。つまり $3U/U_m$ を超えると流動化速度の変化によって熱伝達量を制御することができなくなる。ところがバブリング型では、安定な流動層を形成するために $3U/U_m$ 以上の流動化速度が必要となる。バブリング型で熱伝達量を制御できない理由はここにある。

それに対して荏原の内部循環型流動層ボイラでは、流動化速度が $2U/U_m$ 以下である熱回収室で熱の伝達が行われるために、砂の流動速度を変化させることによって熱回収量を制御することができる。これによって投入物の種類に合わせて負荷を制御することができるようになる。あるいは必要に応じて蒸気流量を制御することができる。その結果、一

²⁴ 筆者による大下氏の対するインタビューより。2008年11月26日。荏原製作所羽田事業所にて。

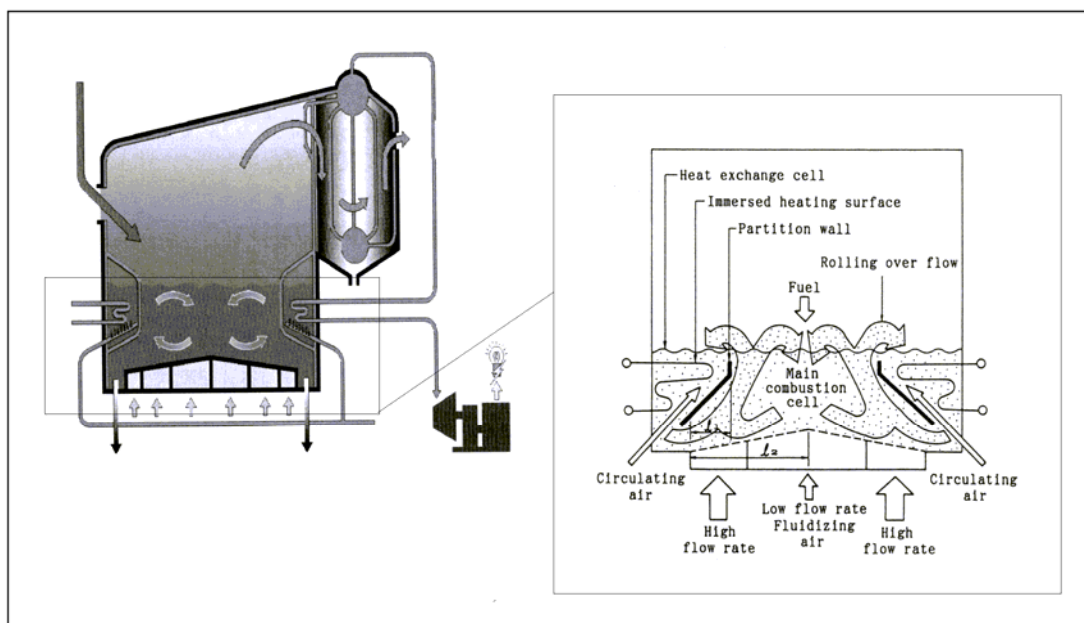
般廃棄物から産業廃棄物，石炭にいたるあらゆる投入物を燃料として使用できるようになった。

熱回収室での熱伝達制御の問題は開発チームが最も苦勞したことの1つであった。流動層に関しては多くの研究が蓄積されていたものの，砂がゆっくりと沈降している移動層に関しては活かせる既存の知見がほとんどなかった。この開発を担当した小杉茂は次のように述べている。

熱伝達率など移動層の特性がほとんどわからない。熱を供給するための砂の循環量もわからない。参考になるものが全くない。そこで実機大のコールドモデルを作って循環量を測定することから始めた。熱伝達に関しては 1/2 のホットモデルをつくった²⁵。

このように，開発チームは，実験を繰り返すことによって，砂の循環量を確保する因子や，移動層部分における空気量と熱伝達係数の関係をゼロから明らかにしていった。その結果，多様な投入物に耐えられる独自の流動層ボイラの開発に成功した。

図 5: 内部循環型流動層ボイラ



出所：荏原製作所内部資料

²⁵ 筆者による小杉氏に対するインタビューより，2008年11月26日江波R製作所羽田事業所にて。

5.2 ICFB の市場導入

ICFBは主として産業廃棄物向けに事業化されることになった。構造上は一般廃棄物でも問題ないのだが、一般廃棄物の焼却では発熱量が2000kcal/kg程度しかなく、熱回収をすると逆に層温度が下がりすぎてしまう。また、ゴミ発電によって2000KW以上の発電を行うと、6600ボルト以上の送電線を装備しなければならないという規制の存在も、一般廃棄物向けの高効率ボイラの普及を妨げていた。

それに対して、例えば、産業廃棄物のタイヤの焼却であれば8000Kcal/kgの熱が発生するので、熱回収の必要があるし、その熱を発電に利用するのが経済的である。産廃であれば発電した電気を自社で使用するため送電線の規制の問題もクリアできる。こうしたことから、ICFBは産業廃棄物向けの法人需要に特化した事業となった。

実機化において大下は、プロジェクトリーダーであった上司から技術関係をすべてまかされた。顧客から、「荏原はボイラメーカーではないから不安」と言う声もあったが、大下は、この画期的な技術の良さを信じて、実機化に注力した。その結果、1989年6月には第1号機の竣工にこぎつけることができた。ただし、「上司には大変苦勞をかけた」と大下が述懐するように、様々なトラブルに悩まされることになった。

ICFBの第1号機は製紙会社に納入された。古紙を回収する時にでる太い針金の束を破砕して投入した。第2号機は大手自動車メーカーに納入された。廃プラスチック、塗装粕、汚泥などを原料とする廃棄物発電プラントであった。この自動車メーカーへの導入では大きなトラブルが発生した。層内伝熱管の固定方法の甘さから、穴が空き、そこから吹き出た過熱蒸気によってサンドブラストが発生して周囲の蒸気管を破損してしまったのである。こうした問題の修復や改良に技術者は大変な時間を費やすことになった。

開発陣はボイラに関して素人であったがゆえにこうしたトラブルが発生したのであるが、逆に素人であったからこそ、ICFBを実現できたという面もある。大下は「ボイラの構造体としての難しさを知っていたら、(ICFB)はできなかったかもしれない。我々は知らなかったから(できたのだと思う)」²⁶と述べている。ボイラの難しさを知らなかったことが、かえってICFBの実用化を妨げる力を抑制していたと考えられる。

自動車メーカーへの納入後も、様々な企業での産廃向けにICFBは導入された。例えば大手タイヤメーカーに納入されたICFBではタイヤを焼却して発電している。タイヤメーカーは、企業秘密を守るために、実験したタイヤをすべて自社内で焼却処分する必要がある。この施設では、タイヤを丸ごと投入しても問題なく操業できることが確認されている。

これらの施設を含め、2008年現在までに、ICFBは21施設に納入された。産業廃棄物に特化して事業展開したため、TIF炉に比べるとおのずと市場は限られているが、技術的にはきわめて画期的なものであった。現在、ドイツのヘキスト工業団地で建設が進められている施設が完成して操業を始めれば、日本独自の技術として世界的な評価を得る可能

²⁶ 前掲、筆者による大下氏に対するインタビューより。

性がある²⁷。

6. 第3ステップ:TIFG(内部循環型ガス化溶融炉)の開発(1994年-)

6.1 ダイオキシン問題と灰溶融

ゴミ焼却施設の集じん灰からダイオキシンが検出されたという1983年秋の報告に端を発して、80年代中盤以降、廃棄物処理に伴うダイオキシン問題が大きな関心と呼ぶことになった。特に、世界で最も焼却処理比率の高い日本では、この問題がきわめて深刻に受け止められた。世論のあおりを受けた厚生省は、1990年、ゴミ焼却炉に対する「ダイオキシン類発生防止等ガイドライン」を通知し、適正処理のひとつとして焼却灰の高温溶融による無害化処理の方法を指定した。

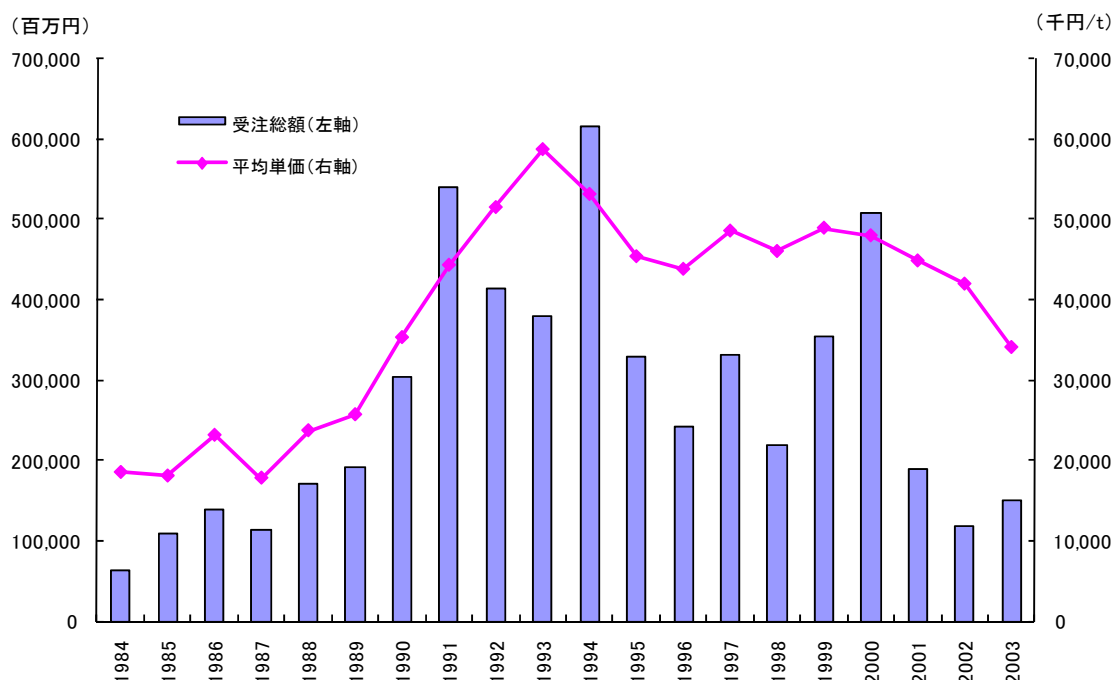
この結果、焼却炉から排出される灰を高温溶融する付帯設備として「灰溶融炉」が盛んに導入されることになった。灰溶融炉とは、プラズマなどを用いて、排煙に含まれる煤塵および焼却灰に含まれる重金属類やダイオキシン類を高温溶融し、無害化、減容化する設備である。

灰溶融炉の登場当初は、専門メーカーがその製作を担当し、大手の焼却炉メーカーに供給するという体制が一般的な形であったが、やがて焼却炉メーカーが自ら灰溶融炉を開発、生産するようになった。焼却炉メーカーの多くは、操業上のエネルギーコストを抑えるために、熱回収による自家発電設備を備えた「焼却炉+灰溶融炉」方式を普及させるようになった。旺盛な公共投資にも支えられてゴミ処理施設の受注総額は急拡大し、1989年に業界全体で2千億円規模であった市場は1994年には3倍の6千億円にまで拡大した。

こうして灰溶融炉の普及は進んだが、全ての自治体が灰溶融炉を設置したわけではなかった。灰溶融炉の建設コストと操業コストが高かったからである。焼却設備の建設費の推移をみると、1980年代を通じて2,500万円程度であった1t/dあたりの平均単価は、灰溶融炉方式が登場した1989年頃から急激に上昇し、1993年には5,800万円になっている(図6参照)。自治体の中には、焼却炉をセットで更新せず、灰溶融炉のみを後付けで建設する自治体も多かったが、それでも灰溶融炉単体で1t/dあたり1,200万円程度の建設費が必要であった。また操業コストという点からみると、施設が1つ別に増えることになるので、それだけ人件費・修繕費がかかり、さらに施設の敷地面積も拡張しなければならなかった。

²⁷ ただしこの案件は、赤字で受注しており、2008年度3月期決算における百数十億の特別損失の大きな原因となった。

図 6: ごみ処理施設の受注総額と平均単価



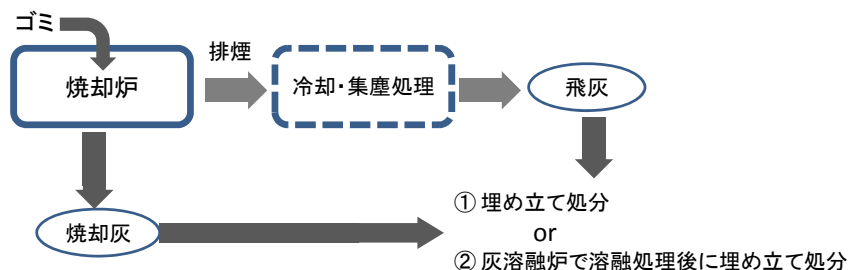
出所: 『環境施設』第48号,1992年,pp.2-13, 第56号,1994年,pp.32-41, 第88号,2002年,pp.50-58, 第96号, 2004年,pp.44-48.

6.2 ガス化溶融炉への注目

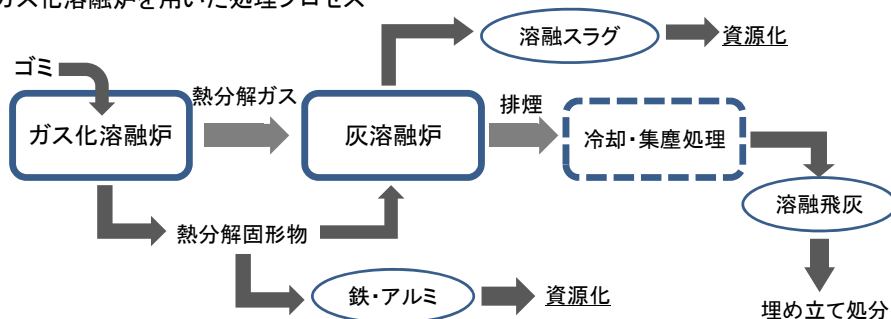
灰溶融炉の高コストが普及を抑制する中で、有力な代替技術として注目されるようになったのがガス化溶融炉技術である。ガス化溶融炉は、ごみを熱分解してガス化し、その熱分解ガスを1,300度以上の高温で燃焼し、残渣を溶融するという仕組みをもっている(図7参照)。ごみの熱分解で得たガスを溶融の熱源にするため、外部エネルギーを抑制でき、コスト削減につながる。また、焼却設備と溶融設備が一体化しているため、施設拡張の問題も抑制することができる。

図 7 ガス化溶融炉の処理プロセスと「焼却炉＋灰溶融炉」処理プロセスとの違い

A. 従来型の「焼却炉＋灰溶融炉」処理プロセス



B. ガス化溶融炉を用いた処理プロセス



筆者作成

90年代に入ると欧州企業数社がガス化溶融炉技術を発表し、日本では、中堅メーカーの三井造船が、1991年、他社に先駆けてシーメンス社のキルン式ガス化溶融炉の技術導入をおこなった。本業の造船事業が低迷する三井造船は、技術転換の機に乗じて、焼却炉市場シェアの拡大を図ろうと意図していた²⁸。1994年には24t/dの実証炉を横浜市に建設、そこで2年間の実証試験をおこない、1996年4月には厚生省の外郭団体である廃棄物研究財団からガス化溶融炉の技術評価認定を受けた。三井造船がこの準公的な技術評価認定を獲得したのは、ガス化溶融炉という実績のない新規技術を導入しようとする自治体が、国庫補助金支出を受けやすくなるようにするための方策だった。

この動きに対して、他社もガス化溶融炉の開発を積極化するようになった。三井造船が技術評価書を取得した96年の11月、廃棄物研究財団の内部に「次世代型ごみ焼却処理施設の開発研究委員会」が発足され、業界全体でガス化溶融炉の開発競争がスタートした。この研究委員会には三井造船のほかに、三菱重工業、川崎重工業、NKK、タクマ、石川島播磨重工業、栗本鉄工所、神戸製鋼所、三機工業、住友重機械工業、月島

²⁸ 「激戦ごみリサイクル（上）焼却炉5強時代に風穴（新時代の環境ビジネス）」『日経産業新聞』、1996年6月12日、p. 12。

機械、東レエンジニアリング、バブコック日立、日立製作所、ユニチカ、そして荏原製作所もまた参加していた。各社はここで、開発上の共通の問題について共同研究や意見交換を行いつつガス化溶融炉の開発と実証試験を進め、技術評価の取得を目指すことを急いだ。

このようなガス化溶融炉への関心の高まりと相前後して、1997年1月には厚生省から「ごみ処理にかかるダイオキシン類発生防止等ガイドライン」(通称「新ガイドライン」)が通知された。これはごみ処理施設から排出されるダイオキシンの排出量規制値を定めたものであった。それによれば、(1)現在操作中の炉については、その排出上限を80ng-TEQ/Nm³とし、(2)それを超えるものについては緊急の対策を講じること、(3)今後新設する炉については0.1ng-TEQ/Nm³を上限値とする、というものであった。また(4)80ng-TEQ/Nm³以内におさまっている施設についても、向こう5年以内に0.1ng-TEQ/Nm³の規制値をクリアするものに整備しなければならないと定められた。この通知によって、これまでコストの問題から溶融設備の建設を回避してきた自治体もまた、既存の設備を更新する必要に迫られることになった。

焼却炉メーカー各社にとってみれば、この通知は以後の5年以内に大規模なリプレイス需要が発生するということを意味していた。その主役となるのが、新たに登場したガス化溶融炉になるのか、それとも灰溶融炉方式になるのかということについては、メーカーの技術者間や専門の研究者間でも意見が分かれていた。

6.3 ガス化溶融炉の種類

ガス化溶融炉技術は大別すると3つの系統に分かれている(図8参照)。まず、溶鉱炉技術を利用した「直接溶融方式」がある。これは、(ガス化するのではなく)コークスを使って廃棄物を直接溶融するので、正しくはガス化溶融炉に分類されないが、廃棄物を高温溶融してスラグを資源回収する²⁹という点ではガス化溶融炉と同一の市場にある。この技術は高炉メーカーである新日鉄が1970年代に開発したものであり、すでに1990年代初頭から優れた実績を上げていた。同じ高炉メーカーであるNKKもまたガス化溶融炉ブームに乗ってこの技術を手がけるようになった。

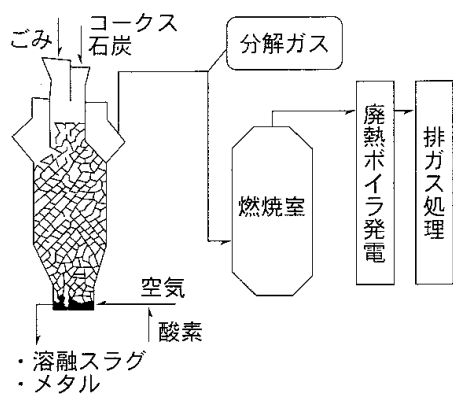
第2は、間接ガス化溶融と呼ばれる方式で、三井造船が導入したキルン式ガス化溶融炉はこれにあたる。「キルン」とは円筒形の横型の回転炉のことを意味する。直径3メートル、長さ30メートルの長大なキルンの中には数10本の過熱パイプが入っており、これが回転しながら内部でごみを熱分解する。そして残渣のカーボン類がタテ型旋回溶融炉に送られ、前段で発生した熱分解ガスを熱源にして溶融を行う。三井造船を筆頭に、タクマ、IHI、クボタといったメーカーがキルン式ガス化溶融炉の開発を行った。

²⁹ スラグとは、溶融した焼却灰等を冷却固化して作るガラス状の物質であり、二酸化ケイ素、酸化アルミニウム、酸化カルシウムを主成分とする。廃棄物を溶融したスラグは、リサイクル資源として路盤材や骨材などの素材に用いられる。

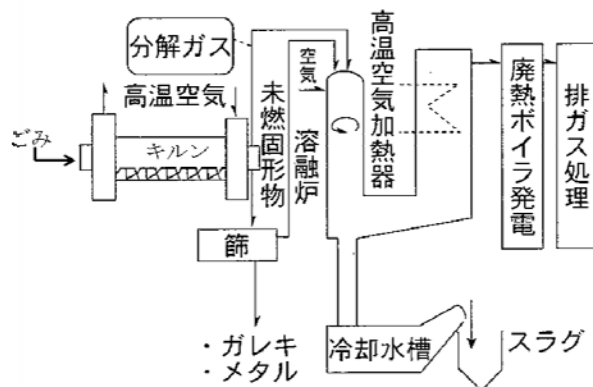
間接ガス化溶融方式には、スイスのサーモセレクト社によるプッシャー式ガス化溶融炉もあった。これは NKK(当時)と川崎製鉄(当時)が 1997 年に導入したものであり、熱分解ガスを工業用に利用するという機構をもっていた。

図 8. ガス化溶融炉の各方式

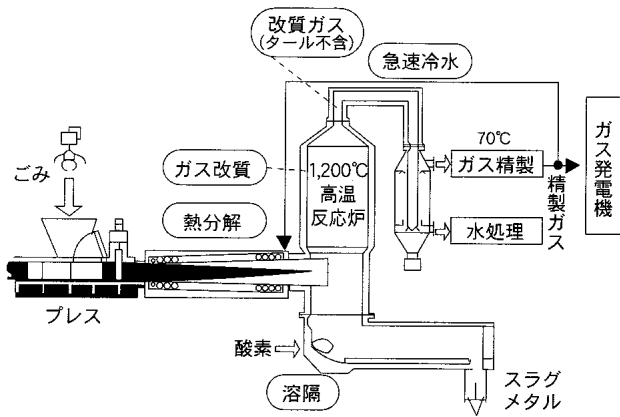
A. 直接溶融方式



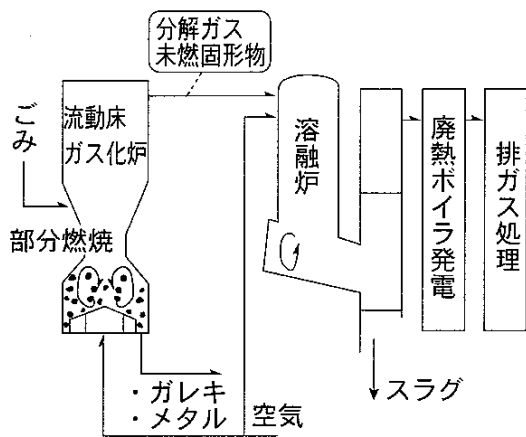
B-1. 間接ガス化溶融(キルン式ガス化溶融炉)



B-2. 間接ガス化溶融方式(サーモセレクト)



C. 直接ガス化溶融方式(流動層型)



石川禎昭編(2001)より一部修正して転載

第3は、直接ガス化溶融と呼ばれるもので、それには流動層型とストーカ型がある。荏原が選択したのは、社内に蓄積された流動層技術を利用した流動層型のガス化溶融炉である。ガス化溶融炉を導入した26社の内、半数の13社がこの方式を選択した³⁰。

6.4 荏原におけるガス化溶融炉の開発

荏原におけるガス化溶融炉の開発は1994年にスタートした。三井造船がSiemensの技

³⁰ ただし各社の採用した流動層技術には相違があった。神戸製鋼所の循環型流動層は、荏原の内部循環型とは逆方向に循環するものであった。一方、日立造船は当初荏原の技術に類似した内部循環型流動層を採用していたが、のちに神戸製鋼から技術導入することになった。また、ガス化溶融炉開発にそれほど積極的でなかった三菱重工業はSDP炉と似た流動層炉を選択した。

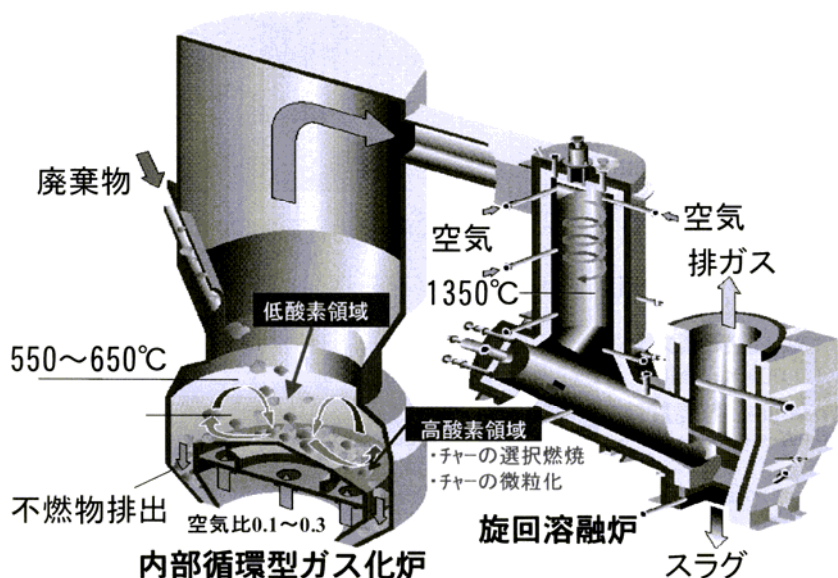
術を導入してキルン式の高ス化溶解炉を華々しく発表したことがきっかけとなった。三井造船の発表に対して営業サイドがすぐに反応し始めた。また、大下も、ダイオキシン問題の解決に関して、「これからはこれだ」と即座に思ったという。当時、欧州では高ス化溶解炉への動きが既に活発化しており、日本ではダイオキシン問題が社会問題として注目を集めていた。それゆえ、高ス化溶解炉の開発に反対するような意見は社内に存在しなかった。

1994年には高ス化溶解炉の開発を目的として、新たに、事業本部内に環境開発センターが設置され、その環境エネルギー開発部において部長の大下のもとで開発が進められた。事業本部長も社長もこの技術開発を強く支持した。第2ステップまでの開発とは異なり、この開発は、当初から全社的な公認のもとで始まった

既述したように、1996年には厚生省の外郭団体に「次世代型ごみ焼却処理施設の開発研究委員会」が発足し、18社にのぼる企業の参加のもと、国全体で高ス化溶解炉の開発競争が激化した。荏原もまたこの熾烈な競争に巻き込まれることになった。

荏原の高ス化溶解炉は、他社の流動層型高ス化溶解炉と同様に、空気比を下げた低温で高ス化する内部循環型高ス化炉と、可燃性の高スを熱源として灰を溶解する旋回溶解炉から構成されている(図9参照)。旋回溶解炉で溶解された灰はスラグとして取り出され、高温の高スは熱回収を行うボイラに送られる。続いて、熱回収によって発電された電気が取り出され、高スは冷却、洗浄されて、外部に排出される。荏原の高ス化溶解炉の特徴はTIF炉から続く、内部循環型流動層を高ス化炉に採用しているところである。日本で高ス化溶解炉を導入した26社の内、8社は欧米からの技術導入であったが、荏原を含むその他の企業は独自技術で開発を行った。

図9: 荏原の流動層型高ス化溶解炉



出所: 荏原製作所内部資料

6.5 TIFG 炉の市場導入

第 1 号機は、2000 年 3 月、青森 PER(株)にシュレッダーダスト(廃車ガラを細かく粉砕したもの)焼却用の施設として納入された。この 1 号機では竣工後も頻発するトラブルに開発陣は悩まされ続けた。シュレッダーダストは最も処理の難しい種類の廃棄物である。都市ごみと比べると 100 倍以上の銅や亜鉛を含んでおり、それらが廃棄物中に含まれる塩素と結合し、様々な金属化合物をつくりだす³¹。問題はそれらの金属化合物が、熱回収を行う伝熱面に付着してしまうことである。伝熱面に金属化合物が付着するとガスの流れが妨げられ、熱回収ができなくなる。また、ガスの流路が閉塞する。そうなると、処理量を減らすか、炉を止めるしかなくなる。

荏原では 1996 年から 20t/d の実験炉を使って開発をおこなってきたが、2000 年に竣工した第 1 号機は、225t/d(×2 基)という極めて大規模な炉であった。こうした極端なスケールアップのために、実験データからは把握できない様々な問題に直面することになった。青森の 1 号機では、結局、竣工から 2 年間、トラブル対応のために技術者が常駐することになった。最終的にはボイラを大幅に改良して、付着した固形物を落とせるように構造を工夫することによって対応した。

こうした初期トラブルを経験したのは荏原だけではなく、他のほとんどのメーカーが同様の経験をしている³²。三井造船が技術導入したシーメンスのキルン式ガス化溶解炉についても、開発したシーメンス自身が 1998 年に大きなトラブルを起こして事業撤退している。ガス化溶解炉は非常に不確実性が高い技術であった。しかし、溶解機能の整備を 5 年以内に設定した新ガイドライン(1997 年)の施行にともなう「駆け込み特需」を享受すべく、各社はガス化溶解炉の受注を急いだのであった。

そうした流れの中で荏原は、青森の 1 号機以降も、次々と受注を進めた。1 号機の竣工からわずか 3 年で、8 施設 18 基のガス化溶解炉を納入した。2008 年に至るまでには合計で 12 施設に 27 基の炉を納入した。そこには、環境事業を主軸とした事業転換を行うという荏原の企業ドメインの設定が強く関わっていた。しかし未成熟な技術のこうした急速な展開は様々なトラブルを引き起こすことになった。荏原のガス化溶解炉は技術的には先進的なものであったが、その一方で、2000 年代初頭から中盤の荏原の経営悪化の主たる要因となっていた。

³¹ 塩化銅の融点は 500℃、塩化亜鉛の融点は 313℃であり、どちらも焼却後の廃熱ボイラ等で冷却されると伝熱管表面で付着・固化してしまう。

³² これらの詳細については、津川敬(2004)『検証：ガス化溶解炉』、緑風出版。

7. 第 4 ステップ:内部循環型ケミカルリサイクル用ガス化炉 (PTIFG) の開発

7.1 トップの指令

90 年代中盤以降,「ゼロエMISSIONの伝道師」と呼ばれた藤村宏幸会長(当時)のもと,荏原は,循環型社会の実現に向けた環境関連事業の展開を積極化していった. そうした中, TIFG の受注が次々と進む一方, 1997 年にはトップから「ゴミからアンモニアをつくれ」という新たな研究テーマが大下に与えられた.

1991 年に米国政府が, 2000 年までに硫黄酸化物(SO_x)を半減する方針を打ち出したことによって, 火力発電所や工場の排煙から, 酸性雨の原因である硫黄酸化物(SO_x)と窒素酸化物(NO_x)を取り除く, 排脱硫・排煙脱硝装置が脚光を浴びるようになった. 荏原も, 後発ながら, EBA 法という電子線ビームを利用した独自技術によってこれら装置の開発を進め, 2000 年には中国の石炭火力発電所向けに第 1 号機を納入している³³. 90 年代後半は, 中国における酸性雨が強く問題視された時期である. 中国ではまだ, 排煙脱硫・脱硝装置が設置された施設がほとんど存在していなかったため, 将来の市場拡大が望まれていた³⁴. 荏原はこの事業機会をとらえるべく装置開発を進めていた.

荏原の開発したEBA法では, 排煙粒子を捕集して冷却し, 電子ビームを照射することで硫酸や硝酸を生成し, それらをアンモニアと反応させることによって硫安や硝安といった肥料を作り出す. しかし中国にはアンモニアの供給源が乏しい. もしゴミ焼却を通じてアンモニアが生成できれば好都合である. 「ゴミからアンモニア」というトップダウンテーマの背景にはこうした状況があった.

しかし, エンジニアリング事業本部環境開発センター長としてトップの命を受けた大下は, 「ゴミからアンモニア」という発想には, どうしても賛同できなかった. エネルギーの少ない一般ゴミからエネルギーの高いアンモニアを生成するということは, 外部から追加エネルギーを供給することを意味する. エネルギーを加えてアンモニアを作るのであればなにもゴミ焼却炉をつかう必要はない.

そこで, 大下は, エネルギーの高いプラスチックゴミを利用することにした. しかし, この技術開発には多くの困難が伴うと予測され, 荏原 1 社では実現できないと考えられた. そこで, 石炭からアンモニア生成を行う技術を持っている宇部興産と共同して, NEDO の補助事業として開発を進めることとなった. 共同開発の成果は加圧二段ガス化プロセスと呼ばれ, それには内部循環型流動層技術が応用された. 第 1 号機は宇部興産の化学工場敷地内に設置された. 運営は, 2000 年 6 月に両社折半の出資で設立された「イーユーピー」に移管された.

³³「荏原, 中国に電子ビーム排煙脱硫脱硝システム 1 号機を納入」『日刊工業新聞』2000 年 11 月 6 日, 12 ページ

³⁴「対中環境 ODA で何をすべきかー最新現地報告「中国の環境汚染」」『週刊東洋経済』1999 年 1 月 16 日号, 108~111 ページ

7.2 加圧二段ガス化プロセス

廃プラスチックのケミカルリサイクル³⁵を行う内部循環型ケミカルリサイクル用ガス化炉は、前述の内部循環型流動層ボイラ(ICFB)を加圧技術によって改良した PICFB (Pressurized-ICFB)と、さらにそれにガス化の技術を組み合わせて発展させた石炭燃料用の PICFG (PICFB-Gasfier)の延長線上に生まれた技術であった。CO₂削減が叫ばれる時代にあつて、この分野で事業を拡大することは難しかった。そのため、まずは廃棄物処理技術として利用することが考えられるようになった。

その当時、アンモニア精製などに使われる主流の石炭ガス化技術では、噴流層方式という技術が採用されていたが、この噴流層方式では投入する石炭を微粉砕するかスラリー化(固体と液体との混合状態のこと)する必要があつた。一般に、廃棄物を精密に加工して微粉砕あるいはスラリー化することは困難であるが、流動層を用いれば、前処理や選別をすることなく廃棄物を投入することができた。

宇部興産との提携によって作られた加圧二段ガス化プロセスは、低温ガス化炉と高温ガス化炉の2つを段階的に組み合わせたものだった(図10参照)。投入された廃棄物はまず低温ガス化炉でガス化され、さらにそのガスが高温ガス化炉で改質され、洗浄プロセスへと移動する。荏原製作所は流動層技術を利用した低温ガス化炉の製作を受け持ち、宇部興産が高温ガス化炉の製作を担った。また、このシステムでは高温ガス化炉で1,300以上になったガスが冷え、ダイオキシンの発生しやすい300℃～500℃付近になることを抑制するため、高温ガス化炉から排出される水素や一酸化炭素ガスは直接水と接触して急冷却されるようになっている。精製された高濃度のガスは、直結された配管を通じて隣の宇部アンモニア工業(株)に移送され、そこでアンモニアが生成されている。

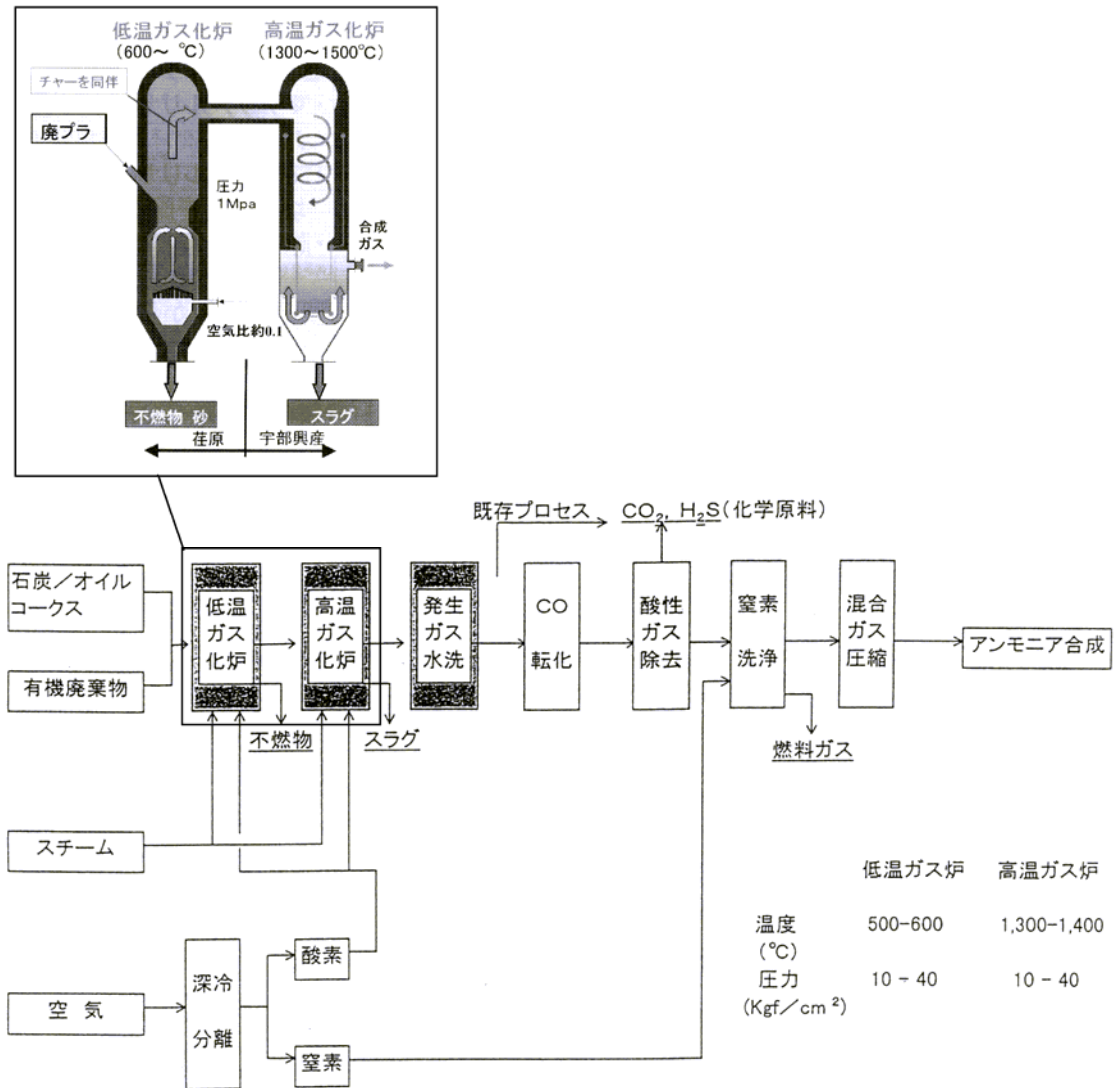
昭和電工の川崎事業所もこのシステムを導入し、2003年、国内最大級のケミカルリサイクルプラントを稼働させた。昭和電工はアンモニアの原料としているナフサが高騰している時期において、廃プラスチックから原料を賄うことにより、アンモニア事業の安定化を図っている。またこれを機に、川崎事業所で製造するアンモニア製品を「エコアン」として商標登録して、環境に優しい製品としての営業展開を行っている³⁶。

しかしながら、現行の容器リサイクル法ではケミカルリサイクルよりもマテリアルリサイクルの方が優先されているため、往々にして十分な廃プラスチックが確保できない状況でもある。

³⁵ 廃棄物を化学反応により組成変換してリサイクルすることをケミカルリサイクル、原料として利用することをマテリアルリサイクル、焼却してその熱エネルギーを利用することをサーマルリサイクルという。

³⁶ 「昭和電工・川崎事業所、使用済みプラ・ケミカルリサイクル軌道に」『化学工業日報』2004年5月19日、12ページ

図 10: ケミカルリサイクル用ガス化炉



出所: 第 3 回流動層シンポジウム, 1997 年より

7.3 直面した課題

ケミカルリサイクル用ガス化炉の開発では様々な技術的な問題に直面した。問題の原因の多くは、このガス化炉が、高圧、高温で稼働し、さらにそこに HCL ガスが存在することにあつた。高圧状態 (10 気圧) では、温度が 130 度まで下がると HCL ガスが結露して、塩酸となる。こうなると炉の内部が一気に腐食してしまう。そこで、圧力容器表面にヒーターを巻いて温度が低下しないように工夫しなければならなかつた。一方、圧力容器の温度が 350°C を超えると、今度は、強度の問題が生じる。それゆえ、安全を考えると、圧力容器の温度を常に 180°C から 350°C 以下に制御しなければならない。

また 10 気圧を保持したまま原料を投入することも開発陣の頭を悩ませる問題であつた。

気圧を保持するために投入口は二重扉の構造をもっているが、投入物を投入する度に気圧調整のために大量の窒素を使用しなければならない。その費用がかなりのレベルとなった。

さらに、荏原の流動層炉開発の歴史の中で、はじめて原料を加工して RDF 化しなければならなかったことも、開発陣にとっては残念なことであった。荏原の内部循環型流動層炉開発は破砕機をはずすことから始まっている。種類を選ばず様々なモノを投入できるところに特徴があった。この基本的な信条をこのケミカルリサイクルガス化炉では曲げなければならなかった。

こうした技術上の課題とともに、荏原は、事業運営上も壁に直面することになった。「イーユーピー」は荏原と宇部興産の折半出資会社ではあったものの、事業モデル的には、宇部興産のアンモニア生成事業の一部であった。ガス化炉は宇部興産の化学プラント内に建設され、それは宇部アンモニア工業のアンモニア生成施設に直結されていた。それゆえ荏原が事業運営を主導できる立場にはなかった。

また容器包装リサイクル法でのプラスチック容器包装の商品化において、ケミカルリサイクルに対してマテリアルリサイクルを優先されていることから原料となる廃プラスチックの確保が困難となったことも、イーユーピーの運営を難しくした。マテリアルリサイクルが優先される状況下では、たとえ入札価格でマテリアルがケミカルを上回っても、マテリアルが落札できるようになっている³⁷。こうした状況からイーユーピーが黒字化されることはなく、2007年9月に荏原は出資を引き上げ、イーユーピーは宇部興産の100%子会社となった。さらに2008年3月には宇部興産に統合されてイーユーピーは解散することになった³⁸

8. おわりに:技術開発と事業化

8.1 焼却炉開発の組織プロセス

1987年、荏原の開発陣は、流動層炉では大型化が不可能であるという当時の常識を覆し、破砕機を必要としない内部循環型流動層炉(TIF)を実現した。社内においてさえほとんど支持を得られない中、技術者の強い信念は独自技術の開発を実現した。TIFの成功は、荏原がポンプメーカーから総合環境エンジニアリング企業へと大きく転身する重要なきっかけとなった。

続く内部循環型流動層ボイラでも、開発陣は社内で十分な支援を得られたわけではなかった。しかし、開発陣は再び強い思いをもって、あえてボイラという未知の領域に進んだ。その結果、多くのトラブルに悩まされはしたものの、タイヤをそのまま投入できるほどの能力

³⁷ 「溶り廃プラ再商品化、ケミカルリサイクル存続の危機」『化学工業日報』2007年6月14日、10ページ

³⁸ しかし、装置は現在も運転されている。

をもった流動層ボイラの開発に成功した。

開発陣が社内で十分な支持を得られるようになったのは第 3 ステップ以降であった。1990 年代中盤になるとダイオキシンの発生が社会問題となり、時代に要請される形でガス化溶融炉の開発は自然と正当化された。ただしそこでも、他社の多くは海外企業からの技術移転を受ける形で事業化したのに対し、荏原の開発陣は流動層技術をもとにあくまでも自社開発を貫いた。

第 4 ステップの開発に入る頃には、荏原は環境事業を企業の中核に据えて、積極的な事業拡大を進めるようになった。そうした中で進められた加圧ガス化炉の開発は、それまでの開発とは異なって、トップからの指令によって始動されたものだった。ガス化溶融炉と加圧ガス化炉の開発では、開発活動に対しての支援を得ることへの苦労はなかった代わりに、トップからの強力な期待と難題を与えられた。その結果、多くの技術的な課題に直面することになったが、TIF の開発から延々と続いてきたゴミ焼却炉開発を牽引してきた大下を中心とする開発陣は、こうした課題を1つ1つ解決しながら、流動層技術を新たな用途へと展開してきた。その流れはいまだ止まっていない。既に焼却炉の開発は、第 5 ステップの内部循環型ガス化炉 (IDFG) へと進んでいる。それは、低発熱量可燃物から経済的に有価ガスを抽出して、高効率発電やクリーンガス燃料の生成を可能にする、高い環境性能をもつ技術である。

大河内記念賞の受賞対象は、第 1 ステップの TIF 炉から第 4 ステップの加圧ガス化炉までの技術である。これら4つの技術開発は、その新規性と独自性から、以下の表 2 に示されるように、大河内記念賞以外にも数々の賞を受賞している。そのことは、環境問題がますます深刻化する中、荏原が開発してきた環境技術が、社会で高く評価されていることを示している。

表 2: 荏原のゴミ焼却炉技術の受賞歴

機種	No.	年度	受賞名
内部循環型 流動層燃焼炉 (TIF)	1	1984	日本機械学会「昭和59年度日本機械学会賞 技術賞」
	2	1984	機械振興協会「第19回機会振興協会賞」
	3	1985	科学技術庁「第27回科学技術庁長官賞」
	4	1990	発明協会「平成2年度恩賜発明賞」
内部循環型 流動層ボイラ (ICFB)	5	1991	日本機械学会「平成3年度日本機械学会賞 技術賞」
	6	1992	化学工学会「平成4年度化学工学会 技術賞」
	7	1995	日本エネルギー学会「平成7年度日本エネルギー学会賞」
	8	1998	日本機械学会「昭和59年度日本機械学会賞 技術賞」
	9	2005	新エネルギー財団「第9回新エネ大賞 優秀商品部門会長賞」
内部循環型 ガス化溶融炉 (TIFG)	10	1998	ウエステック大賞「'98特別賞」
	11	1999	日本産業機械工業会「第25回優秀環境装置 日本産業機械工業会会長賞」
	12	1999	第1回流動層シンポジウム賞
	13	1999	第2回太平洋経済評議会 環境賞」
内部循環型 ケミカルリサイク ル用ガス化炉 (PTIFG=EUP)	14	2001	日本経済新聞社「第11回日経地球環境技術賞」
	15	2001	化学工学会「平成13年度化学工学会技術賞」
	16	2001	日刊工業新聞社「第31回日本産業技術大賞」
	17	2003	3R推進協議会「平成15年度3R推進功労者賞/3R推進協会会長賞」
	18	2005	文部科学大臣表彰 科学技術賞
	19	2005	愛知万博 愛・地球賞
	20	2007	日本化学工業協会「第39回日化協技術賞 環境技術賞」

出所: 荏原製作所内部資料

8.2 事業化上の課題

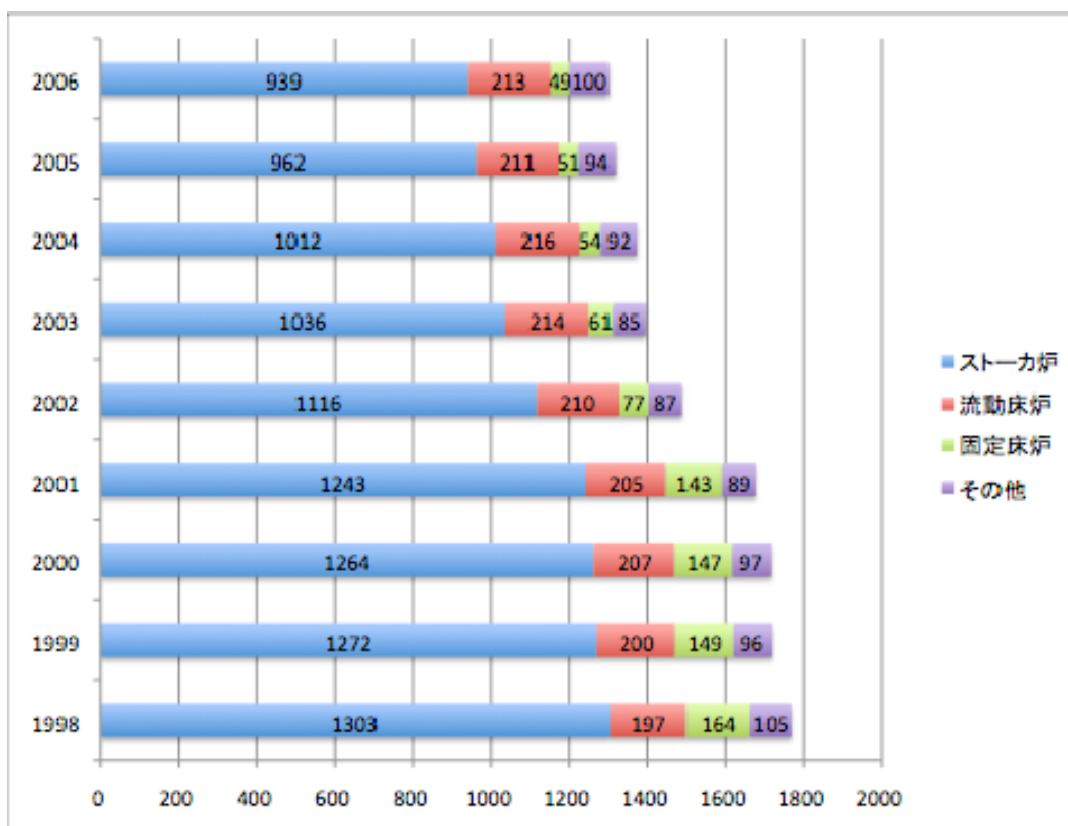
こうした技術開発上の偉業に対して、荏原の廃棄物焼却炉事業に対する評価は意見の分かれるところである。表 3 に示されるように、第 1 ステップの TIF 炉は、既に 154 基 (89 施設) が市場導入されている。図 11 には国内の一般廃棄物用焼却施設数の推移が示されている。2006 年時点では流動層炉 213 施設の内、69 施設が荏原による施設であり、国内流動層炉では十数社の中で 3 割以上のシェアを占めていることがわかる。この 69 施設の内、7 割弱にあたる 47 施設が第 1 ステップの TIF 炉であり、TIF 炉の貢献の大きさがわかる。

表 3: 各炉の導入数 (2008 年現在)

	TIF 炉	ICFB 炉	TIFG 炉	PTIFG 炉
導入数	154 基 (89 施設)	27 基 (21 施設)	28 基 (11 施設)	4 基 (2 施設)

注: 一般廃棄物用に限ると、TIF 炉が 47 施設、ICFB 炉 2 施設、TIFG 炉 7 施設となっている
またその他に SDP 炉が 13 施設存在する。

図 11:方式別一般廃棄物焼却施設数の推移



出所:『日本の廃棄物処理 平成 18 年度版』

第 2 ステップの ICFB 炉は産廃に特化したことから自ずと市場が限られている。これまでに 27 基が 21 施設に導入されているが、民間向け施設の場合には納入後のメンテナンス収入が見込めない³⁹ため、大きな収益源とはなっていないと考えられる。

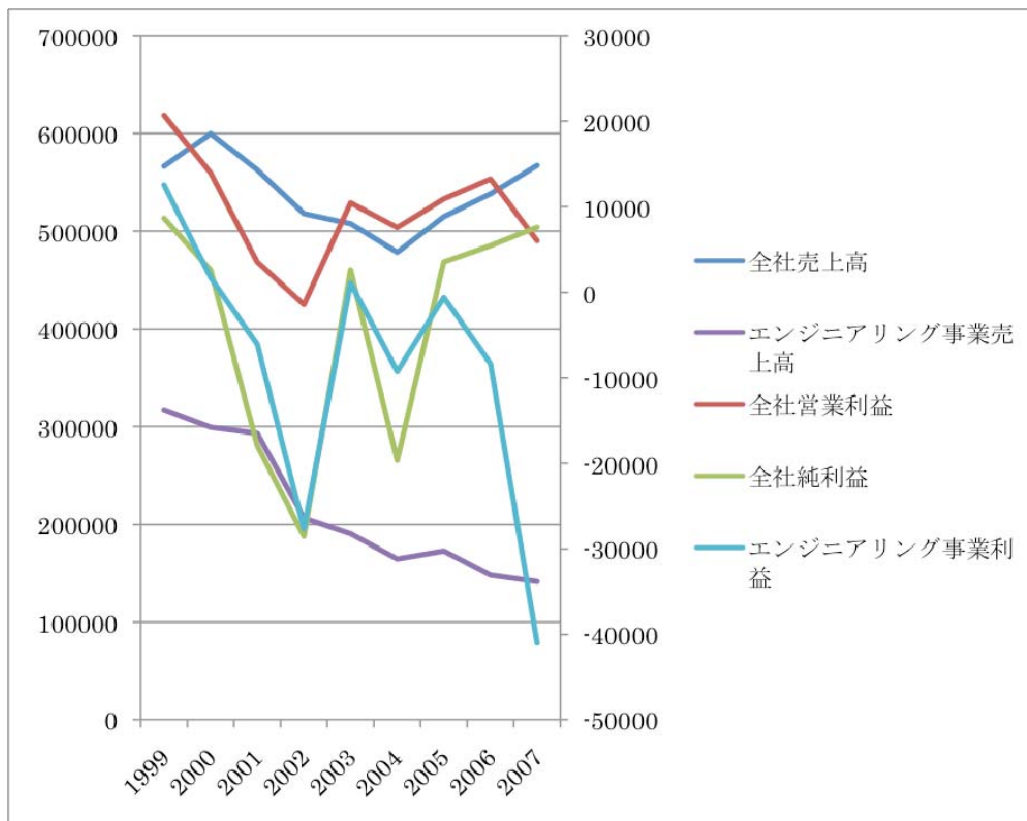
第 3 ステップのガス化熔融炉以降は、納入後のトラブル対応に多大なコストを要したと思われる多大な損失を計上している。図 12 には荏原の企業全体の業績と廃棄物焼却炉プラント事業を含むエンジニアリング事業の業績推移が示されている。エンジニア事業の利益に関しては、営業利益(損失)と特別損失(特定完成工事補償損失, プロジェクト中止に伴う損失, 完成工事損失引当金繰入損を含む)を合算したデータを示しており、事業セグメントの営業利益(損失)とは異なっている。有価証券報告書の記載によれば、これらの特別損失は廃棄物焼却炉プラント事業に関わるものと見られる。

図 12 からわかるように、ガス化熔融炉の受注が加速化した 2001 年以降、荏原の業績は急速に悪化している。全社の純損失のほとんどがエンジニアリング事業に関する特別損失計上によるものとなっている。2007 年には 700 億円を超える固定資産売却益によって全

³⁹ 自治体とは異なり、民間事業者は、自社の生産プロセスを構成するプラントの操業には当然ながら十分な技術的知識を有している。

社としてかろうじて黒字を計上しているものの、ドイツで受注した廃棄物処理施設に関する特別損失が大きく足を引っ張っている。また、2001年以降一貫してエンジニアリング事業の売上高が低下していることから、第3ステップ以降の技術が事業に十分に貢献できていない様子が見えてくる。

図 12: 荏原製作所 全社(連結)とエンジニアリング事業の業績推移



出所: 有価証券報告書より筆者作成

注: グラフ中の年は年度を示す。例えば1999年は2000年3月決算情報を示している。

技術開発の輝かしい成果と低迷する業績。この対比は、優れた技術の開発が必ずしも事業成果に結びつかないという、イノベーションの難しさを象徴しているのかもしれない。

参考文献

- ・石川禎昭編(2001)『最先端のごみ処理溶融技術:熱分解ガス化溶融技術と焼却残渣溶融技術』, 日報出版.
- ・大下孝裕(2006)「心に火を付けて」『粉体工学会誌』43 卷 6 号, p.425.
- ・環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部(2006)『日本の廃棄物処理 平成 18 年度版』.
- ・経済界「ポケット社史」編集委員会(1996)『ポケット社史 荏原—環境の総合エンジニアリング企業を目指して』, 経済界.
- ・津川敬(2004)『検証:ガス化溶融炉』, 緑風出版
- ・日本粉体工業技術協会編(1999)『流動層ハンドブック』, 培風館.
- ・八木真一(2004)『廃棄物の行政システム』, 有斐閣.

雑誌記事

- ・『週刊東洋経済』「対中環境ODAで何をすべきか—最新現地報告「中国の環境汚染」」1999 年 1 月 16 日号, 108~111 ページ.
- ・『化学工業日報』「昭和電工・川崎事業所, 使用済みプラ・ケミカルリサイクル軌道に」2004 年 5 月 19 日, 12 ページ.
- ・『化学工業日報』「溶り廃プラ再商品化, ケミカルリサイクル存続の危機」, 2007 年 6 月 14 日, 10 ページ.
- ・『日経産業新聞』「激戦ごみリサイクル(上)焼却炉5強時代に風穴(新時代の環境ビジネス)」, 1996 年 6 月 12 日, p. 12.
- ・『日刊工業新聞』「荏原, 中国に電子ビーム排煙脱硫脱硝システム1号機を納入」, 2000 年 11 月 6 日, 12 ページ.

IIR ケース・スタディ 一覧表／2004-2009

NO.	著 者	タ イ ト ル	発行年月
CASE#04-01	坂本雅明	「東芝のニッケル水素二次電池開発」	2003 年 2 月
CASE#04-02	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(1): 自動販売機—自動販売機業界での成功要因」	2004 年 3 月
CASE#04-03	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(2): 自動販売機—新たなる課題への挑戦」	2004 年 3 月
CASE#04-04	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(3): 自動販売機—飲料自販機ビジネスの実態」	2004 年 3 月
CASE#04-05	伊東幸子 青島矢一	「ハウス食品: 玉葱催涙因子合成酵素の発見と研究成果の事業化」	2004 年 3 月
CASE#04-06	青島矢一	「オリンパス光学工業: デジタルカメラの事業化プロセスと業績 V 字回復への改革」	2004 年 3 月
CASE#04-07	堀川裕司	「東レ・ダウコーニング・シリコン: 半導体パッケージング用フィルム状シリコン接着剤の開発」	2004 年 3 月
CASE#04-08	田路則子	「日本開閉器工業: モノづくりから市場創造へ「インテリジェントスイッチ」」	2004 年 3 月
CASE#04-09	高永才	「京セラ: 温度補償水晶発振器市場における競争優位」	2004 年 3 月
CASE#04-10	坂本雅明	「二次電池業界: 有望市場をめぐる三洋、松下、東芝、ソニーの争い」	2004 年 3 月
CASE#04-11	三木朋乃	「前田建設工業: バルコニー手摺一体型ソーラー利用集合住宅換気空調システムの商品化」	2004 年 3 月
CASE#04-12	伊諒重 武石彰	「東洋製罐: タルク缶の開発」	2004 年 3 月
CASE#04-13	藤原雅俊 武石彰	「花王: 酵素入りコンパクト洗剤「アタック」の開発」	2004 年 10 月
CASE#04-14	軽部大 井森美穂	「オリンパス: 超音波内視鏡の構想・開発・事業化」	2004 年 10 月
CASE#04-15	軽部大 小林敦	「三菱電機: ポキポキモータ 新型鉄心構造と高速高密度巻線による高性能モーター製造法の開発」	2004 年 11 月

CASE#05-01	青島矢一 宮本圭介	「テルモ(1): 組織風土の改革プロセス」	2005年2月
CASE#05-02	青島矢一 宮本圭介	「テルモ(2): カテーテル事業の躍進と今後の課題」	2005年2月
CASE#05-03	青島矢一 河西壮夫	「東レ(1): 東レ炭素繊維複合材料“トレカ”の技術開発」	2005年2月
CASE#05-04	青島矢一 河西壮夫	「東レ(2): 東レ炭素繊維複合材料“トレカ”の事業戦略」	2005年2月
CASE#05-05	兒玉公一郎	「ヤマハ(1): 電子音源に関する技術蓄積」	2005年2月
CASE#05-06	兒玉公一郎	「ヤマハ(2): 携帯電話着信メロディ・ビジネスの技術開発、ビジネスモデル構築」	2005年2月
CASE#05-07	坂本雅明	「二次電池業界(改訂): 技術変革期における新規企業と既存企業の攻防」	2005年2月
CASE#05-08	高永才	「京セラ(改訂): 温度補償水晶発振器市場における競争優位」	2005年2月
CASE#05-10	坂本雅明	「東北パイオニア: 有機ELの開発と事業化」	2005年3月
CASE#05-11	名藤大樹	「ハイビジョンプラズマディスプレイの実用化 プラズマディスプレイ開発協議会の活動を中心に」	2005年7月
CASE#05-12	武石彰 金山維史 水野達哉	「セイコーエプソン: 自動巻きクォーツ・ウォッチの開発」	2005年7月
CASE#05-13	北澤謙 井上匡史 青島矢一	「トレセンティテクノロジーズによる新半導体生産システムの開発 —300mm ウェハ対応新半導体生産システムの開発と実用化—」	2005年10月
CASE#06-01	武石彰 高永才 古川健一 神津英明	「松下電子工業・電子総合研究所: 移動体通信端末用 GaAs パワーモジュールの開発」	2006年3月
CASE#06-02	平野創 軽部大	「川崎製鉄・川鉄マシナリー・山九: 革新的な大型高炉改修技術による超短期改修の実現 大ブロックリング工法の開発」	2006年8月

CASE#07-01	武石彰 宮原諄二 三木朋乃	「富士写真フイルム： デジタル式 X 線画像診断システムの開発」	2007 年 7 月
CASE#07-02	青島矢一 鈴木修	「ソニー： フェリカ(A)：事業の立ち上げと技術課題の克服」	2007 年 7 月
CASE#07-03	青島矢一 鈴木修	「ソニー： フェリカ(B)：事業モデルの開発」	2007 年 7 月
CASE#07-04	武石彰 伊藤誠悟	「東芝： 自動車エンジン制御用マイコンの開発」	2007 年 8 月
CASE#07-05	青島矢一 朱晋偉 吳淑儀	「無錫小天鵝株式会社： 中国家電企業の成長と落とし穴」	2007 年 8 月
CASE#07-06	青島矢一	「日立製作所： LSI オンチップ配線直接形成システムの開発」	2007 年 9 月
CASE#07-07	坂本雅明	「NEC： 大容量 DRAM 用 HSG-Si キャパシタの開発と実用化」	2007 年 9 月
CASE#08-01	小阪玄次郎 武石彰	「TDK： 積層セラミックコンデンサの開発」	2008 年 1 月
CASE#08-02	福島英史	「東京電力・日本ガイシ： 電力貯蔵用ナトリウム—硫黄電池の開発と事業化」	2008 年 3 月
CASE#08-03	青島矢一 北村真琴	「セイコーエプソン： 高精細インクジェット・プリンタの開発」	2008 年 5 月
CASE#08-04	高梨千賀子 武石彰 神津英明	「NEC： 砒化ガリウム電界効果トランジスタの開発」	2008 年 9 月
CASE#08-05	小阪玄次郎 武石彰	「伊勢電子工業： 蛍光表示管の開発・事業化」	2008 年 9 月
CASE#09-02	青島矢一 大倉健	「荏原製作所： 内部循環型流動層技術の開発」	2009 年 6 月

CASE#09-03	藤原雅俊 積田淳史	「木村鑄造所： IT を基軸とした革新的フルモールド鑄造システムの開発」	2009 年 7 月
------------	--------------	---	------------