

技術解説

廃棄物処理プラント技術の高度化と 環境材料研究の動向

State-of-Art on Advanced Waste Treatment Plant
Technology and Environmental Materials Research

東京都立大学大学院工学研究科
機械工学専攻
教授

吉葉 正行
Masayuki Yoshiba



1. はじめに

廃棄物をめぐる社会システムは現在、大きな転換期を迎えており、これを支える廃棄物処理プラント技術においても変革が進められている。究極の目標は、社会問題として深刻化しているダイオキシン類（以下、DXNsと略記）をはじめとする環境（健康）リスク物質等からの脅威に対する安全・安心社会の構築であり、同時にリユース・リサイクル化はもとより廃棄物から高度マテリアル・サーマルリカバリーを達成できる資源循環型社会の構築である。これの早期実現のためには、廃棄物処理の技術的側面（ハードウェア）の発展のみならず、これと循環型社会形成推進基本法を中核とした具体的法整備や国民のコンセンサスづくりを中心とするソフトウェアとが車の両輪のように調和を保って回転・前進することが不可欠であるが、景気低迷などの悪条件が重なっている現状では残念ながらこれら両輪がうまく回転しているとは言いがたい。しかし、産学公連携により現在精力的に展開されている3R（Reduce-Reuse-Recycle）から廃棄物処理までを見通した多くの動・静脈産業分野にまたがる環境技術研究開発は、今世紀前半におけるインフラ整備に大きく貢献できるポテンシャルを有するのみならず、エネルギー資源-地球環境-経済成長からなるグローバル・トリレンマ問題解決の切り札的存在にも十分なり得る。

さて、我が国の一般廃棄物（都市ごみ）総排出量は、1991年以降約5,000万t/yでほぼ横這い状態にあり、ドイツの約2倍以上が排出されている¹⁾。この中には有価物も相当多量に含まれており、この内6割以上を占める容器包装物に対してリサイクル法が2000年4月に全面施行されたことは当然の帰結といえよう。一方、東京などの大都市圏では1990年頃から減少傾向が続いており、とりわけ東京ではごみ急増問題が表面化した1985年当時のレベル以下にまで減量化が進んでいる。これにはリサイクルマインドの浸透や長引く景気低迷などが強く影響しているが特に東京では事業系廃棄物回収の有料化(1996)や容器包装リサイクル法に関する東京ルール(1997)、さらには新聞雑誌類や瓶・缶等の特定資源ごみ回収・資源化制度の施行(1999)など、独自の厳しい制度や事業の導入が奏功したものとみられる。しかし、これら一般廃棄物の大半（約78%）を焼却処理している現行システムではDXNs発生危険性と焼却灰の最終処分場確保の問題は根本的に解消されな

い。さらに産業廃棄物に至っては一般廃棄物の8倍以上の年間4億t強が我が国で排出されており、これに関連した環境汚染問題の深刻化やリサイクル技術の高度化に対する強い要請などがあることは周知の通りである。

このような観点からみれば、現行の廃棄物焼却処理技術は依然として多くの問題を抱えており²⁾、制度上の問題とも関連して大きな転換期を迎えているといえるが、最近になってDXNs発生抑制の高度化技術やサーマルリカバリー面での効率向上などにおいて成果が得られるようになってきた^{3) 5)}。一方、次世代型廃棄物処理システムとして導入普及が進んでいる廃棄物熱分解ガス化溶融プロセスによれば、原理的にDXNs発生抑制はもとより灰の再利用をも含めた多段階のマテリアル・サーマルリカバリーが期待でき、しかも最終処分場確保の問題も同時に解決できるため、現在20以上の環境関連企業で技術研究開発が精力的に展開され、実際に稼働中あるいは建設中のプラントも既に50箇所以上にのぼる^{6) 8)}。しかし、主にヨーロッパに端を発した当該技術の我が国への導入以来、日がまだ浅いために技術的には発展途上段階を越えていない部分も多く、特に耐久性と信頼性およびリサイクル効率の向上などクリティカルな性能面で今後早急に解決すべき課題が多く残されている⁹⁾。

本稿では、現行の廃棄物焼却処理におけるDXNsを中心とした環境負荷低減技術、および廃棄物からのマテリアル・サーマルリカバリー高度化技術の動向と今後の課題などについて、その中でもキーテクノロジーと位置付けられている環境材料研究開発動向と関連づけて紹介する。なお最近では、溶射等によるコーティング技術の当該分野への適用性に関する検討も進んでおり、これに関する研究例についても一部紹介する。

2. 廃棄物処理技術における環境負荷問題と対策

廃棄物処理関連のプラント技術は種々の面で現在、大きな転換期を迎えているといえるが、基本的には以下の3項目に集約できる。

(1) DXNsを中心とする有害物質の排出規制が1997年以降格段に強化され、新設の大型焼却施設では従来のガイドラインに比べて2桁以上厳しい0.1ng-TEQ/Nm³のDXNs濃度規制値をクリアできる性能が要求されている。既設炉に対する新規規制値も2002年12月以降、完全施行さ

れた。

(2) 上述のDXNs対策や最終処分場確保の問題とも絡んで、灰の適正処理に加え、再利用を可能にする資源化指向の処理技術の確立が喫緊の課題となっている。

(3) 廃棄物処理過程で得られる廃熱の高度カスケード利用への強い要請から、そのトッピングサイクルとして過熱蒸気条件（従来の300℃クラスから400～500℃クラスへ）の改善に基づく廃棄物発電の高効率化（発電端効率15%以下から20～30%以上へ）が精力的に推進されている。

上記の第(2)、(3)項に関しては第3章で詳述する。

さて、我が国におけるDXNs排出量の発生源別リスト（インベントリー）によれば^{10) 11)}、DXNs排出量の約90%が常に廃棄物焼却施設からであり、世界の焼却率により廃棄物環境問題解決の先進国であるはずの日本がかえってDXNs汚染という別の深刻な環境問題に直面しているといった皮肉な状況にある。これには、中間処理としての廃棄物燃焼が適正条件下で実施されていないことが根本原因になっており、このような調査結果に基づいて、燃焼温度を低く抑えざるを得ず、しかも間欠的燃焼によりDXNsの大量発生を招来しやすい旧式の小型炉やバッチ炉、簡易焼却炉などの使用が1998年以降禁止されたため、同年の廃棄物焼却全施設におけるDXNs排出量は1997年（約7000g）の半分以下にまで激減した経緯がある。一般廃棄物焼却施設からのDXNs排出量は1998年度以降も着実に減少傾向にあり、DXNs対策特別措置法に基づいて政府が策定した2002年度末の目標値310g（1997年度からの削減率約94%）

もほぼ達成できたようで、ドイツの排出レベルに並んだとみてよい。しかし一方では、1997年12月に制定された廃棄物焼却炉におけるDXNs排出規制値⁴⁾によれば、今後新設されるプラントに対しても焼却炉規模によって規制値が異なり、ドイツなどヨーロッパの環境先進国と同等に厳しい0.1ng-TEQ/Nm³が適用されるのは人口約10万人以上の主要都市が所有可能な焼却能力4 t/h（96 t/d）以上の大型全連続炉に限定される。これに対して、我が国で大多数を占める中小規模の焼却施設では、焼却炉部材の高温損傷回避のために燃焼温度を低く抑制せざるを得ないという性能上の理由から相当緩和された規制値が依然適用される。しかしDXNsは、コープラナPCBやDDT等とともに、いわゆる環境ホルモン（内分泌攪乱化学物質）作用も強いことが指摘されており、この観点からの健康リスクを考慮してDXNsの排出抑制をさらに進めるために現在、中小規模の焼却施設を統合大型化し、廃棄物収集の広域化と大型全連続炉による完全燃焼が推奨されている。

さて、廃棄物焼却プラントにおいて高温完全燃焼が安定に持続できる限りDXNsやその前駆物質（ベンゼン環など）の熱分解が可能なので、DXNs発生は十分抑止できる。しかしながら、DXNsの発生プロセスを模式化して図1^{2) 4)}に示すように焼却炉内で不完全燃焼が生じたり、あるいはボイラ部位以降の500～250℃程度の排ガス温度域で前駆物質がダスト中の金属あるいは金属系酸・塩化物による触媒作用を受ける場合にはDXNs生成が問題となる。

廃棄物焼却プラント内でのDXNs生成の抑止あるいは分

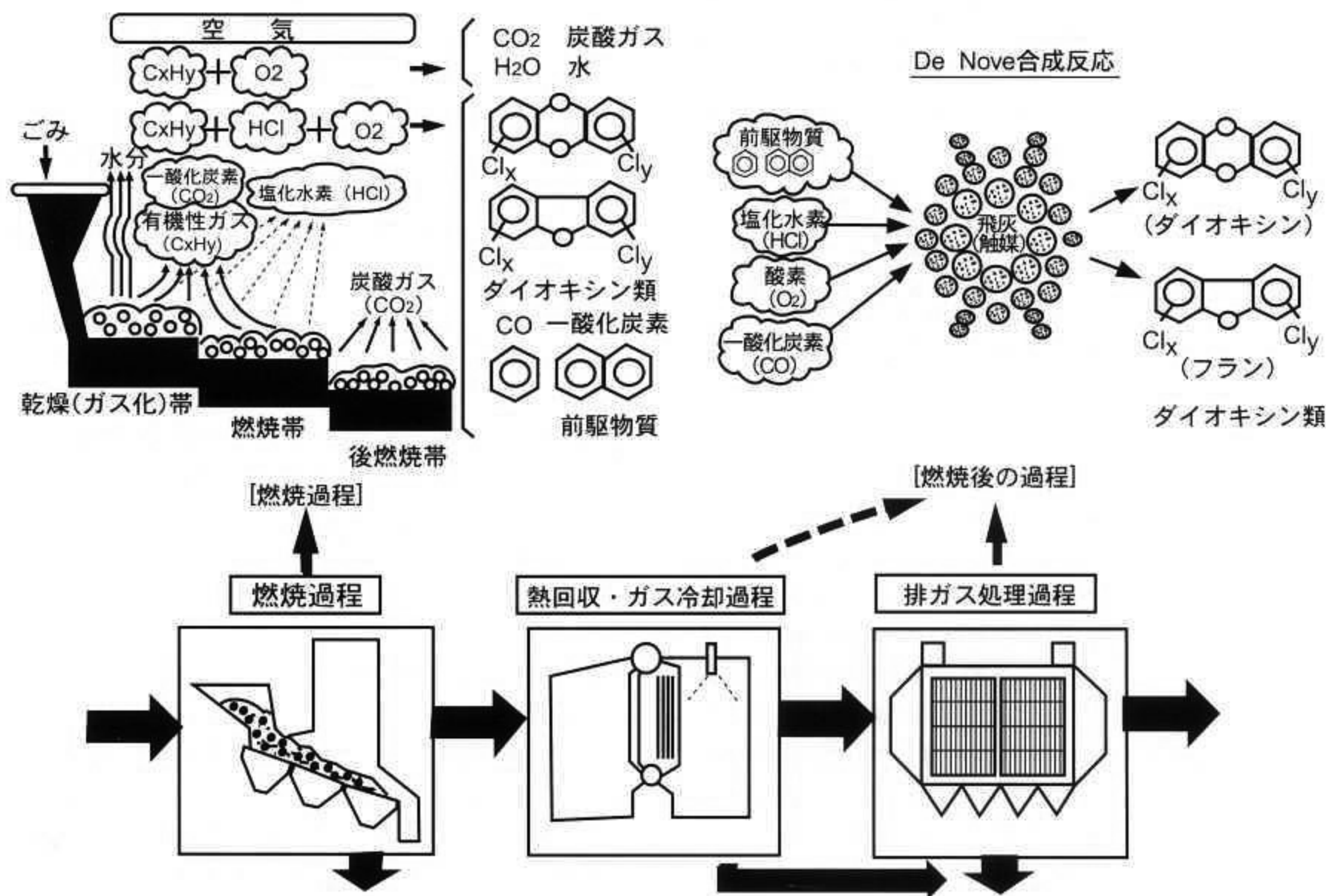
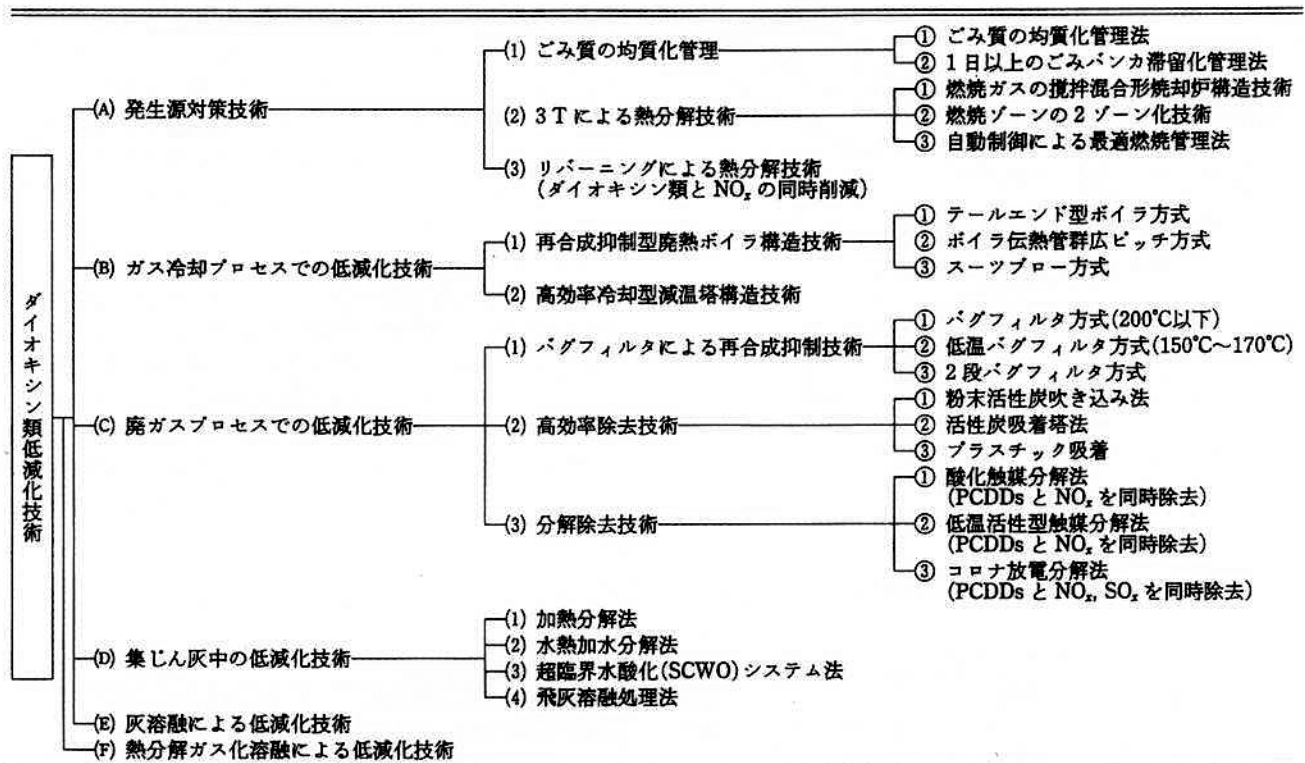


図1 廃棄物プラントにおけるダイオキシン類の生成プロセス

表1 ダイオキシン類低減化技術



解・低減化は技術的にそれほど困難ではなく、表1に集約したように様々な技術がこれまでに提案・導入されている^{4) 13)}。このうち基本的には、廃棄物の燃焼過程で完全燃焼が保証できるようにいわゆる3T (Temperature-Time-Turbulence)条件を満たすことが重要である。すなわち新ガイドラインによれば、大型の全連続炉では燃焼温度850℃以上(900℃以上が望ましい、ただし小型炉では800℃以上)で滞留時間2s以上、しかも炉形状の改善(例えばノーズの設置など)や二次空気の供給(二次燃焼)などにより燃焼ガスの十分な攪拌と未燃成分の完全燃焼によりCO濃度ピーク値100ppm以下が達成できるよう規定されている。ただし燃焼温度に関するヨーロッパの基準はさらに厳しく、900℃が最低ラインである。このような完全燃焼の要求は一方でThermal NO_xの発生を促進するので、焼却炉構造設計や燃焼方式(例えば、低空気比燃焼)の改善、あるいは有効な脱硝プロセスと合わせて排ガス管理を適正化する必要がある。

一方、燃焼後の排ガス冷却過程におけるDXNs生成反応は、いわゆるデノボ合成(De Novo Synthesis)により、燃焼室で分解されなかった前駆物質がHCl、CO、O₂等との共存下で飛灰中の金属系触媒によってDXNsに変化する。この再合成反応は300℃前後で最も活発化するため、従来型プラントのボイラ過熱器(以下、SHと略記)~電気集塵機の領域が最も危険な温度域に当たる。したがって、ボイラ管表面へのダストの付着堆積を最少限に抑えるためのボイラ構造の改良(例えばテールエンド型ボイラの採用など)や適当なダスト除去システム(例えばスートブローやハンマリングなど)の設置などがDXNs対策上重要である。また最近では、従来の電気集塵機に代わってバグフィルタの採用により、約200℃以下の低温排ガスの高効率濾過

によるDXNs再合成抑止と同時に、HClやSO_x等の酸性ガスの効率的除去を図ったプラント、あるいはこれと活性炭吸着とを組み合わせた複合型排ガス浄化システムが定着しつつある。

DXNsを高濃度含有する危険性の高い捕集飛灰や集塵灰からDXNsを効率的に分解除去する方法としては、表1(D)に示したように灰熔融固化、加熱分解(脱塩素化)、超臨界水酸化による分解などがある。このうち灰熔融処理は、DXNsの完全分解と熔融固化によるスラグの再資源化が可能のため、主要焼却施設への付設が進んでおり、今後新設される焼却プラントでは灰熔融炉の付設が義務づけられている。しかしここでは、約1250℃以上の高温灰熔融に必要となるアーク炉やプラズマアーク炉等の運転のために大容量の外部電源が必要であり、バランスシートの面で問題が生じる。

3. 廃棄物処理プラント部材における高温腐食問題と対策

3.1 概要

上述のようなDXNs対策に関わる部材の高温腐食問題を考えると、まず焼却炉燃焼室では、例えば前述のような二次燃焼方式によるDXNs排出抑制を図った燃焼制御に起因して、燃焼室を構成する普通鋼製の水冷壁管(以下、水管と略記)群の二次燃焼に伴う急激な温度変動と高温化傾向により、水管の急速な腐食減肉が表面化する危険性が増大している。ここで、水管表面におけるスケール損傷劣化は、例えば図2のようなプロセスで進行するものと考えられる¹⁴⁾。すなわち、二次燃焼に伴う熱応力によってFe₂O₃を主体とするFe系酸化物スケール中にクラックが発生し、これを容易侵入経路としてHClなどの腐食性ガス成分がスケール/鋼界面まで侵入できるため、スケールの密着性低

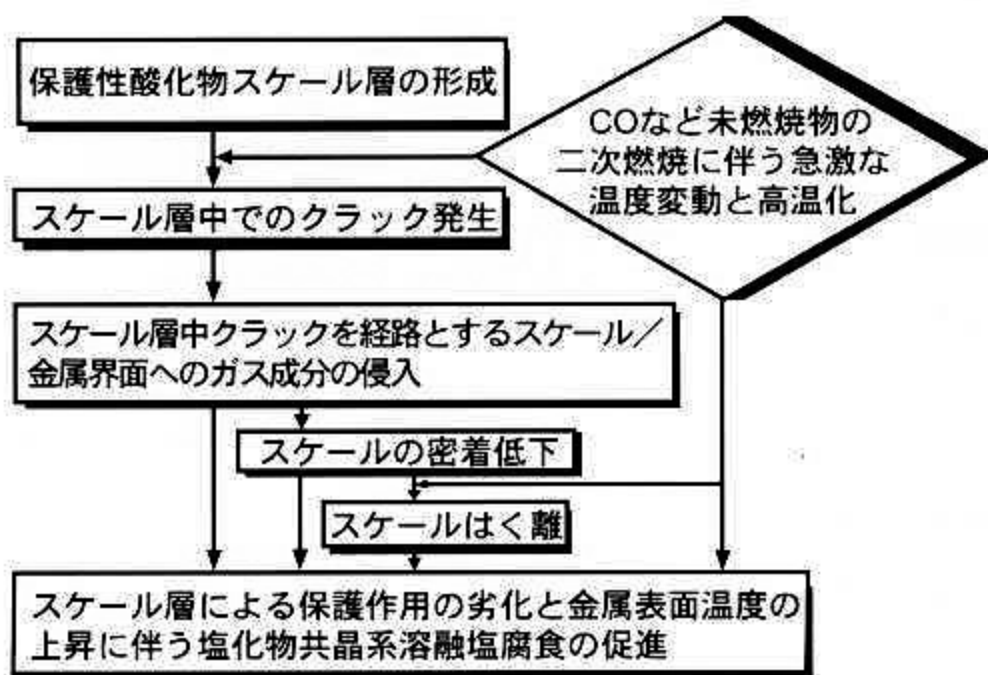


図2 廃棄物焼却炉燃焼室での二次燃焼に伴うスケール破壊と異常腐食機構

一方、DXNs再合成が問題となるボイラ領域においては、従来よりも高温の過熱蒸気利用による廃棄物発電の高効率化傾向とも相俟って、SH材料を中心とする高温腐食問題がクローズアップされている^{3) 4)}。後述するように、現在導入が進んでいる400~450℃クラス過熱蒸気利用による高温高効率廃棄物発電用ボイラでは、高温腐食抑制のために650℃程度以下の排ガス利用により熱交換されており、このうち約500℃以下のガス温度域ではDXNs再合成が問題となる。

ここでの高温腐食抑制策とDXNs再合成抑止策には本質的に多くの点で共通性があり、基本的にDXNsの中核を構成するHClなど塩化物系燃焼ガス成分の効率的除去または安定化をはじめとして、SH管表面への灰付着堆積の防止、あるいは付着灰の適切な除去が必須要件である。すなわち、付着灰中に存在する低融点の塩化物共晶系化合物が急速な溶融塩腐食発生の主因とみられ³⁾、また付着灰中あるいは飛灰中に存在するCu、Fe、Znなどの金属系酸・塩化物が

表2 廃棄物焼却プラント主要部位における腐食損傷事例の概要と対策

部位	温度・環境の特徴	適用材料	腐食損傷の概要	対策例
燃焼室火格子	火格子表面温度：約380~650℃ ごみの燃焼状況により火格子表面では急激な温度変動を伴う	鋳鋼 鋳鉄	溶融塩とガスによる複合腐食 (塩化-酸化-硫化、酸化-還元)	・高Cr耐熱鋳鋼の使用 ・鋼中Ni含有量の適正化
燃焼室水冷壁管	燃焼ガス温度：800~1200℃ 金属表面温度：230~300℃ 二次燃焼により急激な温度変動を伴う	炭素鋼 ステンレス系複合材料	酸化-還元ならびに熱サイクルによるスケール崩壊と複合腐食の助長	・高酸素濃度での安定燃焼 ・二次燃焼域での耐火物の打設 ・肉盛、溶射などによる耐食合金コーティング
ボイラ [過熱器管ガス側]	ガス温度：600~750℃ 金属表面温度：300~550℃	炭素鋼・合金鋼 ステンレス鋼 Ni基合金	塩化物-硫酸塩系溶融塩とガスによる複合腐食 (塩化-酸化-硫化)	・ボイラ設計の改善 ・排ガスの温度-流速等の低減 ・安定な固相硫酸塩生成による腐食環境の緩和 ・高耐食性合金システムの導入
ボイラ [過熱器管蒸気側]	過熱蒸気温度：250~500℃	炭素鋼・合金鋼 ステンレス鋼 Ni基合金	アルカリ腐食(孔食)	・ボイラ負荷(温度)の安定化 ・リン酸塩処理に基づくボイラ水管理の適正化
排ガス処理設備 (HCl、SO ₂ 等)	排ガス処理温度：(180~280)℃→70℃ 中和反応による排ガスの冷却吸収	構造用鋼 ステンレス鋼 Ti	酸(HCl、H ₂ SO ₄ 等)ならびにアルカリ(NaOH等)による溶液腐食	・急冷管内面へのFRP被覆またはテフロンシート施工
煙突 (RC外筒-保温型鋼製煙突)	排ガス温度(煙突入口)：180~280℃ 鋼板表面温度：50~80℃ 炉の起動停止に伴う熱変動と排ガス成分の凝縮	構造用鋼 コンクリート	温度変動下での酸腐食 露点腐食 すきま腐食	・煙突下部でのドレーン抜き ・SUS316L以上の高耐食性鋼板の使用 ・耐酸性樹脂コーティング

下や、堆積灰(クリンカ)中に存在する低融点塩化物共晶系化合物の侵入による溶融塩腐食の可能性が増大する。このような異常減肉の対策として、耐熱セラミックタイルやキャスト打設の広域化による温度変動の緩和と高温化の抑制¹⁵⁾、あるいは水管表面へのNi-20Cr合金や高耐食性Ni基合金の肉盛または溶射コーティング施工などによる防食策が施され¹⁶⁾、それぞれ効果を上げている。

また火格子燃焼方式の場合、DXNs生成抑止のために最近導入されている低空気比燃焼-酸素富化高温(二次)燃焼による過酷な温度条件において優れた耐久性を与えるべく、水冷火格子を採用する技術開発¹⁷⁾、あるいは火格子材として多用される耐熱鋳鋼の高温耐環境性をさらに改善させるための材料研究開発も進んでいる¹⁸⁾。

再合成反応において強い触媒作用を果たすと考えられているので、後述するように灰付着が最少限に抑えられるようなテールエンド型ボイラ構造が推奨される¹⁹⁾。一方、付着灰除去を目的に行う頻繁なスートブローは、従来型の低温ボイラにおける高温腐食防止に有効であったが、最近の高温化ボイラでは相当多量の付着灰成分が溶融して灰が固着質になっているため、これのみをはく離除去させることが難しく、同時に保護性酸化スケールのはく離をも誘発する危険性が增大している。このため、スートブローを受けるSH部位で腐食減肉がかえって促進されるという事例が数件報告されている²⁰⁾。したがってここでは例えばハンマリングや機械的ラッピング等のようにスートブローに代わる有効な灰除去システムの採用をはじめ、SH表面への灰付着

を防止するためのプロテクタの広域設置²⁰⁾、あるいは密着性に優れた保護性スケールが生成ならびに再生可能なNiリッチの高耐食性合金の適用などが検討されている。

このように、廃棄物焼却プラント各部位において多種多様な腐食損傷事例が近年多く報告されているが、主要部位における腐食損傷と対策例を要約すると表2のようになる⁴⁾。

3.2 廃棄物発電の高効率化技術と高温腐食問題

(1) 背景

廃棄物焼却余熱を利用した高度サーマルリカバリーの一

焼却処理施設に一般廃棄物が持ち込まれるために発電に有効利用されていない廃棄物量がまだ約50%を占めており、それゆえ燃焼によるエネルギー利用可能な産業廃棄物(約1億6千万t)をも含め、これらの未利用廃棄物が発電に利用されると仮定した場合の潜在的な発電出力としては、現状の発電効率15%に基づいて控えめに見積もっても10,000~15,000MWに達すると試算されており^{24) 25)}、さらに廃棄物発電とコジェネレーションシステムの双方により化石燃料ベースで最大11%の省エネルギー効果が期待できるという試算もある²⁶⁾。これまで展開されてきた廃棄物発

表3 新たな新エネルギー導入目標

		1999年度実績		2010年度見通し/目標				2010/1999年度
		原油換算 (万kl)	設備容量 (万kW)	現行対策維持ケース		目標ケース		
				原油換算 (万kl)	設備容量 (万kW)	原油換算 (万kl)	設備容量 (万kW)	
発電分野	太陽光発電	5.3	20.9	62	254	118	482	約23倍
	風力発電	3.5	8.3	32	78	134	300	約38倍
	廃棄物発電(産廃を含む)	115	90	208	175	552	417	約5倍
	バイオマス発電	5.4	8.0	13	16	34	33	約6倍
熱利用分野	太陽熱利用	98	—	72	—	439	—	約4倍
	未利用エネルギー (雪氷冷熱を含む)	4.1	—	9.3	—	58	—	約14倍
	廃棄物熱利用	4.4	—	4.4	—	14	—	約3倍
	バイオマス熱利用	—	—	—	—	67	—	—
	黒液・廃材等	457	—	479	—	494	—	約1.1倍
新エネルギー供給計 (一次エネルギー総供給/構成比)		693 (1.2%)	—	878 (1.4%)	—	1910 (3%程度)	—	約3倍
一次エネルギー総供給		約5.9億kl		約6.2億kl		約6.0億kl 程度		

出典：新エネルギー一部会報告書(総合資源エネルギー調査会 新エネルギー部会(2001年6月))

環として廃棄物発電の高効率化を目指した技術研究開発が1990年以降活発に展開され、相当の成果を挙げてきた³⁾。通産省(当時)のデータによれば、廃棄物発電における出力規模(発電容量)は1994年度以降急増傾向にあり、1997年度実績では一般廃棄物と産業廃棄物でそれぞれ749.7MWと204.3MW、合計954.0MWの発電が可能であり^{21) 22)}、現在既に1,000MWを越えて火力、原子力、水力に次ぐ第4の電力供給源となっている。一方、政府の新エネルギー導入大綱(1994)やCOP 3京都会議(1997)でのCO₂排出削減削減方針などを受け、総合資源エネルギー調査会が2001年に改訂した新たな新エネルギー導入目標は表3のように要約できるが²³⁾、リサイクル型新エネルギーとしての廃棄物発電に対し2010年度で4,170MWの電力供給目標を掲げており、バイオマス発電と合わせて合計4,500MWが期待されている。これらの数値はさらに最近行われた新エネルギー利用促進のための法改正を受けて、現在見直しが進められている。

しかるに、後述するように、発電設備を持たない中小の

電技術開発は、発電効率をさらに25~30%レベルに、また未利用の小規模施設においても約20%以上にまで向上させ、環境調和型地域分散電源として安定供給の確立を図ったものである。

このような廃棄物発電の高効率化を実現するうえでのキーテクノロジーの一つに高温高圧型ボイラ過熱器管用の高耐食性耐熱合金の開発導入がある。1990年以降精力的に進められてきた焼却プラントメーカー各社独自の設計ならびに材料を中心とした技術開発により、これまで過熱器管の高温腐食損傷回避のために300℃-2.9MPa (30ata)以下に抑えられていた蒸気条件が400℃-3.9MPa (40ata)クラスにまで向上し、これにより発電端効率20%以上の高温高効率型廃棄物発電プラントの建設計画が進み、すでに埼玉県東部清掃組合(1995)や帯広地区(くりりんセンター、1996)などの新設プラントでは電力会社への売電実績も上がっている。さらにNEDOや東京都のプロジェクト研究においてもそれぞれ500℃-9.8MPa (100ata)、450℃-(5.9~6.9)MPa (60~70 ata)クラス蒸気により、25~30%程度の発電効率

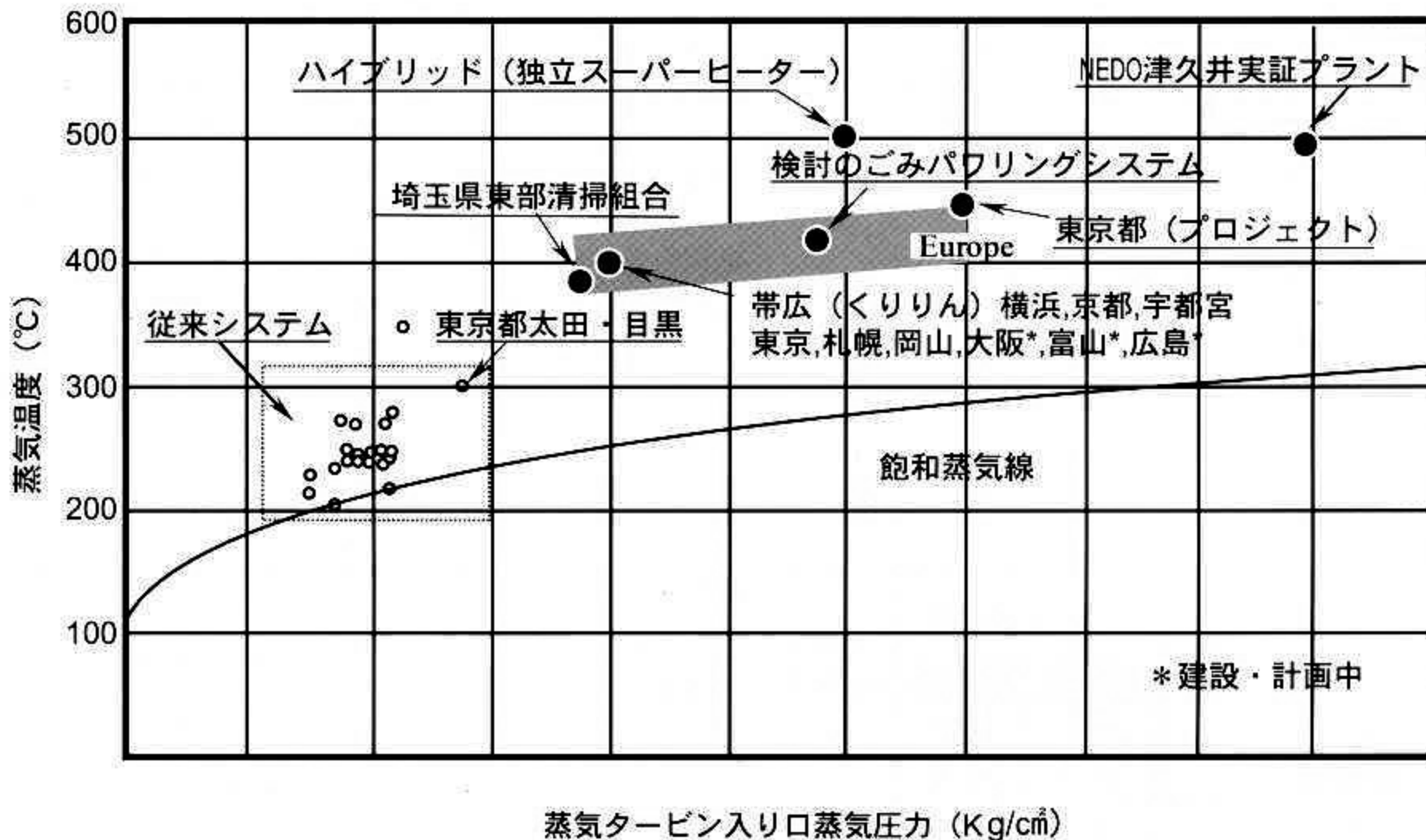


図3 日本の廃棄物発電における蒸気温度と蒸気圧力の動向

達成を目指した材料研究が展開され、我が国の廃棄物発電における蒸気条件は現在、図3に示すように欧米を凌ぐレベルにまで向上しつつある。

通常の化石燃料プラントの場合と同様、廃棄物発電の効率向上を図るうえで過熱蒸気の温度-圧力条件の向上が最も効果的であるが、現在進められている主要な蒸気条件向上技術として以下の3種類を挙げることができ、その一部は既に実用化されている²⁾¹⁾。

- 1) ボイラ過熱器高温高压型
- 2) 外部独立過熱器高温高压型
- 3) ガスタービン複合型

まず1)の高温高压型は、従来型よりも高温高压の過熱蒸気をボイラで得た後、全量を蒸気タービンに導入して電力供給に利用し、その後、所内外での熱供給など多目的用途にカスケード利用を図る方式である。NEDOが1991~2000年度にわたり展開してきた「高効率廃棄物発電技術開発」プロジェクトでは、最も基本的な本方式による高効率型プラントを開発し、前述のような500°C-9.8MPaの過熱蒸気により30%相当の発電端効率を目指してきた。本プロジェクトの基本的成果に基づいて神奈川県津久井郡に建設された50t/d規模の実証プラントにおいて1997年から高耐食性過熱器材料の開発と性能評価をはじめ、環境評価技術や経済性をも考慮した最適トータルシステムなどの評価研究が実施されてきた³⁾。また東京都でも、「清掃工場高効率発電材料検討」プロジェクト(1995-1998)において、400~450°Cクラス蒸気条件による高効率発電に耐え得る高耐食性過熱器材料の開発評価が進められてきており、後述するような材料開発の具体的成果とともに、今後の高温高効率型発電プラント設計に対して有効な環境制御ガイドラインも得られている¹⁾³⁾。

2)の外部独立過熱器方式は、焼却炉ボイラから得た高压蒸気をさらに外部式過熱器により追い焚きし、高温高压化を図るハイブリッド方式のもので、現状で400°C-3.9MPaクラス、発電効率約20%以上のシステムが提案されている。本方式ではLNG等の外部燃料が必要となるために経済性(燃料費)の面で問題があり、実用化導入は進んでいないが、高温腐食問題は大幅に軽減できるので、将来に向けてさらに(450~500)°C-(4.9~5.9)MPa程度まで過熱蒸気の高温高压化を目指した技術研究開発が残されている。

3)のガスタービン複合型は、ガスタービン(GT)による発電と廃棄物焼却ボイラ蒸気利用の蒸気タービン(ST)による発電のコンバインドシステム化を図ったもので、特にGTの高温排ガスを利用して廃熱ボイラ蒸気を追い焚きすることにより蒸気条件の改善(リパワリング)が可能である。本方式による複合発電プラントとしては、いわゆる「スーパーごみ発電」の先陣を切って群馬県高崎地区(高浜クリーンセンター)、堺市、北九州市など数カ所の中核都市で発電実績が上がっている。これらに設置された複合型発電プラントではそれぞれ、GTとSTによる発電規模の比率が相当異なるため、発電効率や経済性(特にGTにおける燃料費やLNGパイプライン等のインフラ整備費)などのバランスシートを統一的に評価することが難しいが、例えば堺のプラントのように非常用電源として設置してある小規模GTを常用化する方法も合理性が高いと考えられる。しかしながら、これまでのスーパーごみ発電プラントにおいては廃熱ボイラ過熱蒸気(リパワリング前)が300°C-2.9MPa以下に抑えられており、従来型ボイラの性能を越えていない。したがって発電効率と経済性双方の向上を図るためには、やはりボイラ過熱蒸気の高温高压化が必須である。

(2) 高温腐食の特徴と対策

高温高効率型廃棄物発電用ボイラ過熱器管の耐用寿命を支配する特性要因として当該温度域での強度特性と耐食性の双方が重要であることは他の化石燃料による発電プラントの場合と変わらないが、とりわけ後者の重要性が化石燃料プラントに比べて格段に大きく、腐食減肉速度が部材寿命を決定する場合が多いという特徴がある。廃棄物焼却プラント環境における炭素鋼伝熱管の腐食速度

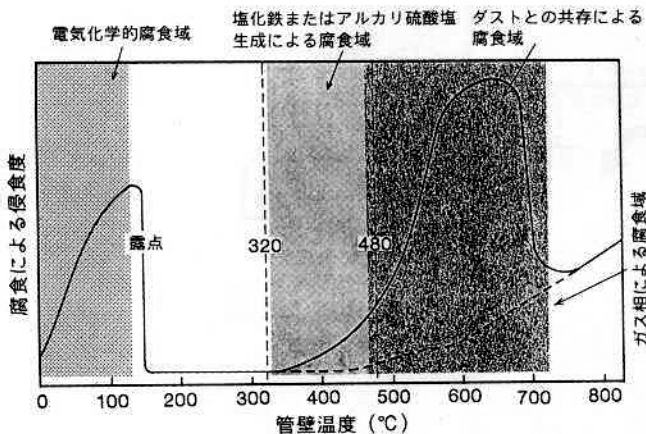


図4 廃棄物焼却プラント環境における炭素鋼の腐食速度の温度依存性

の温度依存性は図4²⁷⁾のようになり、従来型プラントのように管壁温度が320°C程度以下に抑えられていれば炭素鋼クラスであっても高温腐食は基本的に問題ないが、約350°C以上になると管壁への飛灰成分の付着堆積に起因した熔融塩腐食が温度上昇に伴って急激に深刻化する。廃棄物焼却プラントにおける熔融塩腐食もまたガスタービン環境におけるhot corrosionと同様、釣り鐘型の温度依存性を示すが、腐食が激化するしきい温度は廃棄物プラントの方が300°C程度低い。これは、廃棄物燃焼生成物特有の低融点の塩化物共晶系化合物が当該温度域から熔融状態で腐食に強く関与するためである。当該プラント環境で問題と

表4 各種塩化物共晶系化合物と融点

共晶系化合物 (mol%)	融点 (°C)
25NaCl-75FeCl ₃	156
37PbCl ₂ -63FeCl ₃	175
60SnCl ₂ -40KCl	176
70SnCl ₂ -30NaCl	183
70ZnCl ₂ -30FeCl ₃	200
20ZnCl ₂ -80SnCl ₂	204
55ZnCl ₂ -45KCl	230
70ZnCl ₂ -30NaCl	262
60KCl-40FeCl ₂	355
58NaCl-42FeCl ₂	370
70PbCl ₂ -30NaCl	410
52PbCl ₂ -48KCl	411
72PbCl ₂ -28FeCl ₂	421
90PbCl ₂ -10MgCl ₂	460
80PbCl ₂ -20CaCl ₂	475
49NaCl-50CaCl ₂	500

なり得る各種塩化物共晶系化合物の融点を表4に示す。一方、焼却処分されるごみ質やプラントの性能・規模、燃焼条件などによっては燃焼ガス中に500~1000ppm程度の高濃度HClを含むために腐食性が相当強く、それゆえ高温化ボイラ過熱器管では熔融塩と流動燃焼ガスとの競合による複合腐食が深刻な問題となり、これに耐え得る高耐食性材料の導入が不可欠の状況にある。

廃棄物発電プラントにおけるボイラ管表面の堆積灰の性状調査や、構築される腐食環境の解析研究はこれまでも相当数にのぼるが、とりわけボイラ管表面の堆積灰中で生じる化学反応とこれに起因した鋼材の腐食反応メカニズムについては、普通鋼を対象としたKrauseらの研究が有名である^{28) 29)}。すなわち廃棄物焼却プラント実機では、搬入される多種多様な廃棄物質の燃焼に起因した塩化物系と硫酸塩系化合物による複合腐食が問題となり、しかも当該環境独特の不均一性あるいは“時空間的ゆらぎ”³¹⁾のために、塩化-硫化-酸化を基本とする多様な反応素過程が関わった複雑な腐食の様相を呈することが特徴的である。ここでの各反応過程の相対的重要性は、堆積灰の組成と量、燃焼ガス組成および温度などの環境諸因子に依存して大きく変化するが、堆積灰に関するこれまでのキャラクター化の結果、以下のような腐食環境が形成されているものと推測できる³¹⁾。

(1) Al、Si、Feの大部分は主に酸化物として固相状態で安定に存在するとみられるが、FeはFeCl₂、FeCl₃のような塩化物としても存在し得る。とくにFeCl₃は蒸気圧が高いので、オキシクロリネーション反応に基づくFeCl₃生成に伴い腐食速度は急増する。

(2) Na、K、Ca等のアルカリ・アルカリ土類金属は、塩化物または硫酸塩として同定されることが多いが、場合によってはさらに複雑な錯化合物を形成したり、Si化合物と反応して珪酸塩を生成し、これが非晶質状態で腐食に関与している可能性もある。

(3) Pb、Zn、Sn等の重金属類は酸化物、塩化物、硫酸塩のいずれの化合物状態でも存在し得るが、いずれも微量かつ熱化学的に不安定なために存在形態の特定は困難を極める。また、これら重金属類は偏在化傾向が強く、腐食の初期段階あるいは局部腐食過程でこれらが保護皮膜の崩壊に直接関与している可能性が高い。

堆積灰成分のうち一般に融点が500°C以下にある低融点共晶化合物の多くはアルカリ金属塩化物とZn、Pb等の重金属塩化物との共晶系で構成されており、これらが熔融状態で激しい腐食作用をもたらす可能性が高い^{30) 32)}。これに対して約500°C以上の高温域では、例えば(Na、K)Cl-(Na、K)₂SO₄系化合物(共晶温度518°C)のような塩化物-硫酸塩共晶系が熔融するようになり³³⁾、多くの硫酸塩を交えた熔融塩腐食が問題となる。ただし、例えば金属温度で550°C程度の高温域においても堆積灰が完全熔融しているわけではなく、酸化物系の大部分は固相状態で存在する一方、低融点共晶化合物がわずかに20%以下の体積率で局部熔融する特徴的状況を呈するものと推測される³⁴⁾。また、一般に灰の溶融量が多い場合、ガス温度と管壁温度の差が大きいほど灰の付着堆積量は増加し、同一管壁温度であっても腐食が激化する傾向にある³⁴⁾。また、高温域で灰の溶融量が著しく増大すると堆積灰中の通気度がかえって低

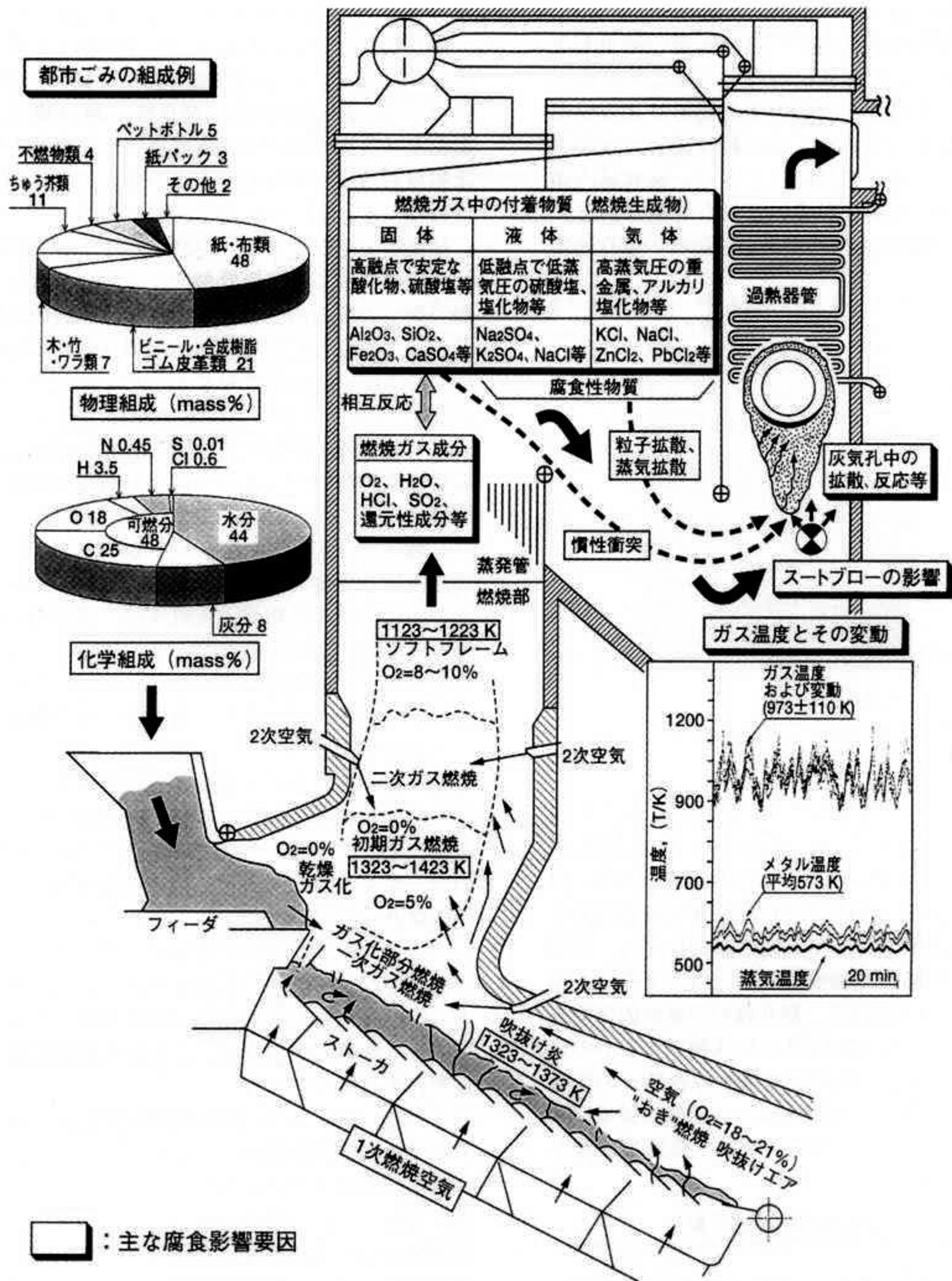


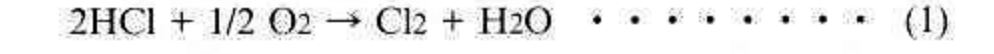
図5 廃棄物焼却プラント主要部位における複合腐食環境形成機構と腐食要因

下するため、腐食損傷がガス雰囲気の影響を受けにくくなることなども明らかになっている^{3.3) 3.4)}。

一方、燃焼ガスの組成もまた変動幅が大きく、とりわけ燃焼室での完全燃焼の可否や二次燃焼、NO_x除去対策(脱硝)の有無などによっても著しい影響を受ける。廃棄物発電プラントのガス雰囲気条件が他の化石燃料プラントと著しく異なる点は、排ガス中のHCl濃度(~1000ppm)と水分(~20%)が格段に高いことであり、これらが腐食反応に及ぼす影響が無視できなくなる³⁾。とくに我が国では、欧米に比べてHCl濃度が全般的に高く、1,000ppmを超える測定データも珍しくない。それゆえ、高温腐食におけるHClまたはCl₂による塩化反応の果たす役割を解明することが腐食機構を究明する上で最も重要である^{3.5)}。

ガス雰囲気成分として飛来または堆積灰中に存在するHClは、堆積灰~スケール中を通過して金属表面に到達す

るまでにFe₂O₃, CuO等の金属酸化物、あるいはFeCl₂, (Na, K)Cl等の塩化物を主体とする触媒作用下で酸化され、次式に示すいわゆるDeacon反応^{2.8) 3.6)}により腐食性の強いCl₂に変化する可能性が強く、これが廃棄物発電プラントでの激しい腐食反応に関与している可能性が指摘されている^{3.7) 3.8)}。



上述のように、燃焼ガス中には高濃度の水蒸気が含まれているために、(1)式の右向きの反応は起こり得ないとの見解も示されているが、Cl₂への転換量が極微量であっても重大な腐食作用をもたらす可能性が十分あることに加え^{3.9)}、前述のような環境条件の時空間的ゆらぎを考慮すれば、Cl₂生成反応が局所的にも起こらないと断定することは危険なように思われる。また、必ずしもDeacon反応によらなくても、FeCl₂やFeCl₃の酸化に伴ってCl₂の生成は十分

可能であることが多くの研究において指摘されている^{3,5)}。

以上のような高温化ボイラ設置域の環境解析と各種合金の腐食損傷解析などに基づいて、高温腐食のメカニズムと各種影響因子に関して図5に示すような総括的模式図が川原⁴⁰⁾により提案されている。また、過熱器管表面で起こる灰の付着堆積状況と高温腐食挙動のシナリオを時系列的に表すと図6のように表すことができる³⁾。燃焼灰の付着堆積が軽微な初期段階では、過熱器合金表面に不働態皮膜あるいは保護性酸化皮膜が生成可能なため、腐食をほとんど受けない潜伏期間が存在したり、腐食反応が生じても放物線則に従う。しかし付着堆積灰の量が増加するにつれて、溶融成分の腐食作用により保護皮膜の溶解・劣化が促進され、孔食状の腐食過程を経て次第に合金内部への侵食が顕在化するとともに、選択的反応により消耗したCrを中心とした高耐食性合金元素の欠乏域が発達する。結晶粒界の腐食感受性が高い場合には当然、粒界侵食が問題となる。したがって良好な耐食性を保証するためには、初期の不働態皮膜や保護酸化皮膜の形成能と再生能（自己修復機能）に優れ、しかも腐食の進展過程においても腐食性成分の侵入を抑制できるような合金組成・組織制御が重要と考えられる。しかし、高耐食性合金といえども腐食進展過程では堆積灰中を通過して侵入するガス成分や溶融塩の作用下で保護皮膜の損傷劣化・修復・再生が頻繁に繰り返されるので、厳密な意味での放物線則には従わず、むしろ図6の曲線Iで示すように擬放物線則に従った腐食挙動をとると考えた方が合理的である。一方耐食性に乏しい合金では、Cr欠乏域の発達により腐食速度は初期よりも相当増大する可能性があり、見掛け上曲線IIIのように加速的な経時変化を示す場合もある⁴¹⁾。

上述のように極めて過酷な複合腐食環境のため、当面

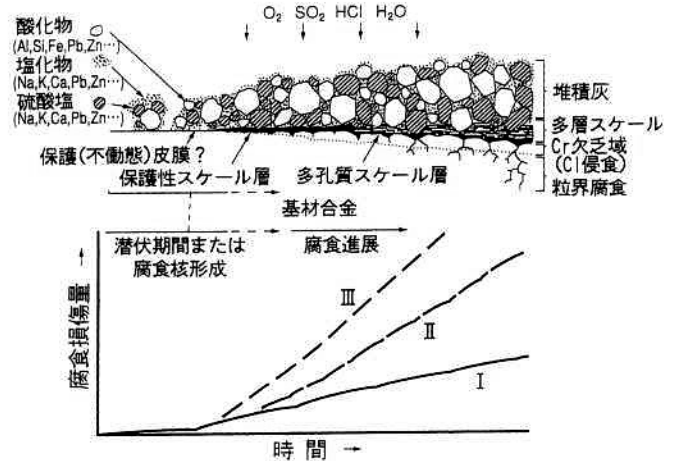


図6 過熱器管表面への灰付着堆積状況と予想される高温腐食シナリオ

の目標である過熱蒸気温度500℃程度までの高温高効率廃棄物発電に対しても高耐食性材料の開発のみで問題が解決できるほど容易ではない。高温腐食問題解決のためには、従来の化石燃料プラント等での腐食から得られた教訓（失敗学）なども援用して環境側と材料側双方からのアプローチにより総合的な腐食抑止策を講ずることが重要である。これまでの検討結果から、400～500℃クラスのボイラにおいて有効と考えられる腐食軽減策と具体的なガイドラインを列挙すると以下ようになる^{5) 3) 5) 41)}。これらの対策はまたDXNs抑止策からみても好条件を与える。

- (1) ボイラ構造設計の改善による腐食環境の緩和
—特に灰付着堆積の抑止—

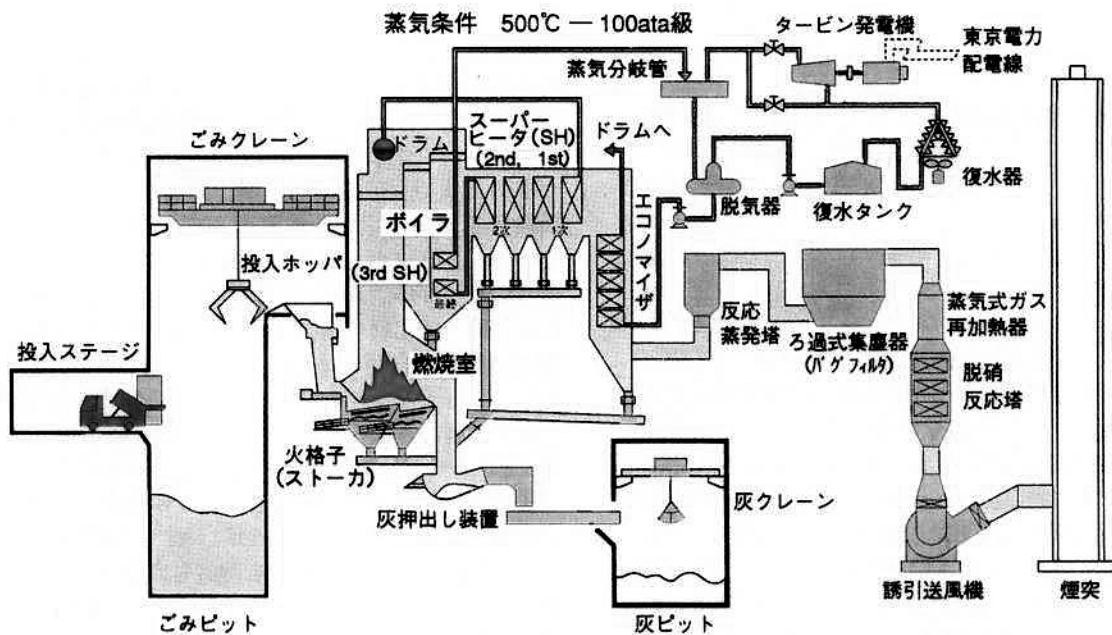


図7 500℃—9.8MPa級請高効率廃棄物発電プラントのシステムフロー（NEDO実証プラントの例）津久井

- ・ 燃焼ガス流の水平化と吊下式過熱器管（テールエンド型ボイラー）の採用：図7の1次2次SH
- ・ 燃焼ガスー過熱蒸気の平行流化
- ・ 大口径煙道による燃焼ガス流速低減：約3～5 m/s以下
- ・ 燃焼ガス温度の低減：約620～650℃以下
- ・ 燃焼ガス流の整流化：整流板の設置など
- ・ 堆積灰除去システムの最適化：プロテクタの設置、機械的ラッピング^{3,5)} など

(2) 燃焼制御によるガス雰囲気改善

- ー特にS分圧の増加ー
- ・ 熱化学的に安定な固相硫酸塩の生成：塩化物誘起腐食の抑止^{2,9), 4,2)}

(3) 高耐環境性材料システムの設計開発評価

(3) 耐環境性材料システム開発

上記対策のうち特に(3)の材料システム技術に関しては、ボイラSH合金を中心とした研究開発における進歩1995年以降目覚ましく、厳しい腐食環境で適用可能な材料の提案が相次いでいる。高効率廃棄物発電の当面の目標である500℃程度の蒸気温度域では当然、設計上の配慮などにより環境の腐食性が相当軽減できたとしてもNiとCrを中心とする高合金化が不可避の状況にある。厚生省(当時)系のプロジェクト研究W1 21CP^{4,3)}の一環として筆者らが実施した実缶灰塗布による“実炉ガス中腐食試験”(平均ガス温度660℃、試験時間96h)から得られた各種実用合金の最大侵食深さ(MDA)データ(最大粒界侵食深さ(MDIA)も含める)をFe-Ni-Cr三元系の650℃等温状態図上にプロットして等侵食深さ線図を作成すると図8^{4,4)}のようになる。これによれば、当該高温域で優れた耐食性を発揮し得る耐熱合金の設計指針として一応、Cr含有量が20～40%の範囲にあるNi-rich側の γ 単相合金(図中の空白領域)とみなすことができる。この評価は金属表面温度660℃という一つの極限高温環境におけるものであり、問題とすべき堆積灰～金属表面の温度が低減できれば最適組成範囲は当然拡大する。

また、ここで特筆すべき事実として、高純度Crや酸化性雰囲気中で最高レベルの耐食性を発揮できる50Ni-50Cr合金も660℃程度以上の高温域では相当激しい腐食損傷を受けることが明らかになっている。これは、塩素を含んだ酸化性雰囲気中ではCr₂O₃がオキシクロリネーション反応により、例えば揮発性の高いCrO₂Cl₂に変化し、保護皮膜機能が劣化するためと考えられる^{4,5)}。二相系の50Ni-50Cr合金に対して高温腐食はむしろCr-richの α' [Cr]相に沿ってオキシクロリネーション反応に基づく選択的侵食の様相を呈するため³⁾、これよりも低Crの γ 相(Ni-Cr固溶体)はもとより通常のNi基合金と比較しても侵食深さがかえって増大する傾向にある。高純度Crでもこれと同じ理由により、腐食損傷量は高温域で増加する。したがってFe基合金とNi基合金の双方とも、Crを中心とする有効な合金元素添加によって耐食性を保証することが必須であるが、高温側になるほどCr系酸化皮膜(Cr₂O₃)形成のみによる単純な耐食性向上策では腐食リスクが増大する。ここに合金設計の妙味がある。

またFe-Ni-Cr系を基本組成として、これに添加すべき第

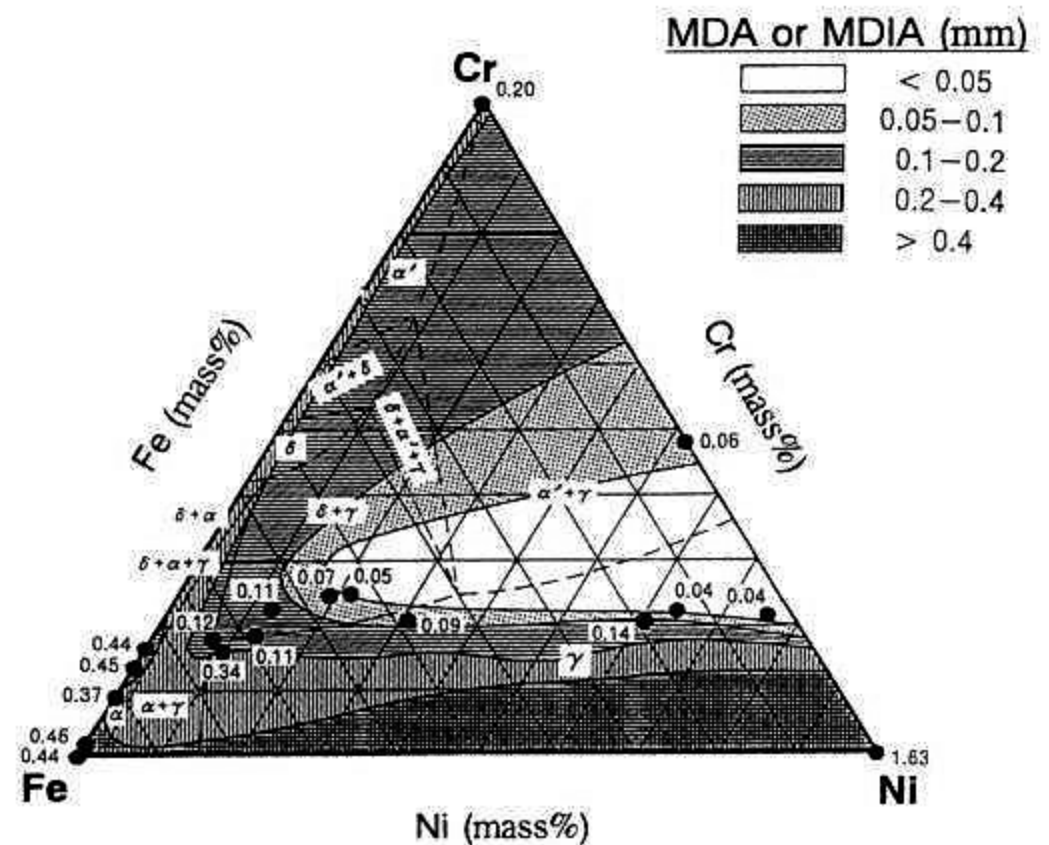


図8 実炉ガス中腐食試験データに基づく等侵食深さ線図(平均ガス温度660℃)

4以下の合金元素を考えるとMoやSiなどが候補に挙げられる。このような合金元素の効果に関しては腐食防食メカニズムとも密接に関連し、各元素ごとに果たす役割が本質的に大きく異なるとみられるので、反応界面での局所的熱平衡なども考慮して微視的観点からの究明が現在進められている。これらの高合金化はまた、組織安定性や溶接・加工性をはじめ、特にオーステナイト系ステンレス鋼では結晶粒界の鋭敏化などにも強く関連するので、組成・組織条件の最適化を図る必要がある。このためのアプローチは耐環境性材料研究に関する新分野開拓の可能性を秘めている。

以上のような種々の検討結果を踏まえて、400～500℃クラス過熱蒸気耐用の高効率廃棄物発電ボイラSH材として開発・実用化導入が最近進んでいる耐熱鋼・耐熱合金を列挙すると表5のようになり、日本発信の材料提案が相次いでいる^{3), 4,6), 4,8)}。一方、SHへの適用を目指した肉盛溶接や溶射等のコーティングの応用研究もNEDOプロジェクトを中心に展開され^{1,9), 4,9)}。二重管の採用と併せて今後の実用化が期待される。とりわけ、溶射コーティングにおけるプロセッシングや後熱処理条件などに依存したコーティング層の性状や欠陥等の相違が、耐食性やコーティングの損傷劣化挙動に重大な影響を及ぼすことが明らかにされている³⁾。例えば、溶射コーティング層内に貫通き裂のような巨視的欠陥がなくても、コーティング内に取り込まれている酸化物や気孔(pore)をチャンネルとして塩化物先導型の侵食が容易にコーティング/基材合金界面に到達し、コーティングの防食効果を減退させると同時に、はく離の誘因にもなる。したがって、例えば減圧プラズマ溶射(LPPS)やHVOFのように緻密なコーティング層を形成できるコーティングプロセッシングの適用と微視組織制御が必須である。図9は、HVOF、APS、LPPSによりAlloy 625(表5の組成参照)粉末を溶射した304ステンレス鋼試験片における実缶灰塗布による550℃-200h腐食試験後の腐食損傷形態(反射電子(BSE)像である^{4,9), 5,0)}。このうちHVOFとAPSでは後熱処理が施され、コーティング組織の均質化が図られており、これから以下のような知見が得られている。

表5 400～500℃蒸気耐用の
高耐食性過熱器合金の開発状況

[400～450℃級蒸気耐用合金]

合金名	主要合金組成 (mass%)
SUS 310	Fe-25Cr-20Ni
HR 3C (SUS 310J1)*	Fe-25Cr-20Ni-0.4Nb-N
NF 709R (SUS 310J2)*	Fe-22Cr-25Ni-1.5Mo-0.15Nb-N-low C
QSX 5*	Fe-25Cr-23Ni-3Si-1.2Mo-Nb-N-low C
QSX 3*	Fe-25Cr-23Ni-3Si-Nb-N-low C
YUS 170 (SUS 309J1)*	Fe-25Cr-13Ni-1Mo-N-low C
HR 2M (SUS 309J2)*	Fe-22Cr-14Ni-1.5Mo-N-low C
HR 30M*	Fe-28.5Cr-30Ni-1Mo-N-low C
HR 11N*	Fe-28.5Cr-40Ni-1Mo-N-low C
Alloy 825	Fe-22Cr-42Ni-3Mo-3Cu-0.8Ti

[500℃級蒸気耐用合金]

合金名	主要合金組成 (mass%)
Alloy 625	Ni-21Cr-9Mo-4Nb-3.5Fe
Alloy C22	Ni-22Cr-13Mo-3W-2.5Co-4Fe
JHN 24*	Ni-20Cr-18Mo-0.7Nb-2.5Fe
MAC-N*	Ni-26Cr-3.5Si-0.3Nb-11Fe
MAC-F*	Fe-38Ni-23Cr-3.8Si-0.3Nb

* 日本で開発された合金

(1) HVOFによるコーティング層は酸化物を多少取り込んでいるものの、酸化の程度は軽微で欠陥密度も低く、かつ緻密質のため、適切な後熱処理との組合せにより最も優れた防食効果を発揮し得る。

(2) APSによるコーティング層は本質的に多孔質で、高密度の欠陥が内在するため、いかなる後熱処理を施しても塩化物等の短絡侵入経路を排除することが難しく、局部腐食先導型の侵食を受けやすい。

(3) LPPSは本来、現場施工性に乏しいため当該環境への適用性は低い。うえ、コーティング層が比較的多孔質な場合に

は、気孔等を短絡経路とした局部侵食を誘発する危険性も高く、熱処理条件などを適正化する必要がある。

このように、最近の研究から次第にHVOFの有効性が実証されつつあるが^{5,1)}、コーティングシステムの信頼性保証のためには今後、さらに実機に近い環境条件下で長時間の耐久性評価を進める必要がある。

また当該温度域では、DXNs再合成防止策として採用されている頻繁な蒸気のストローにより無被覆材の腐食減肉やコーティング材のはく離等の損傷がかえって助長されるリスクが増大するため、プロテクタ等の適正配の必要性なども指摘されている⁵⁾。溶接構造部材としてのSHはまた、溶接部での選択的腐食発生リスクも増大するので^{5,2)}、環境制御とともに溶接部の適正配置など設計面からの配慮が重要である。

一方、このような廃棄物発電プラント環境特有の固液相共存状態の付着堆積灰による高温腐食環境を的確にシミュレーションできる材料の耐食性評価用ラボ試験法として「埋没試験法」が、NEDOプロジェクト研究成果の一つとして提案され^{5,3)}、水蒸気酸化試験、高温ガス腐食試験、塩塗布試験、電気化学的試験など一連の高温腐食試験法と並び、塩浸せき試験法の一部としてJIS化に向けた標準化整備が現在進んでいる^{5,4)}。

3.3 廃棄物処理プラント技術の将来動向と材料問題

従来のような燃焼方式によらず、廃棄物からの高度なマテリアル・サーマルリカバリーを可能にする次世代型廃棄物処理技術の中核として「熱分解ガス化溶融」システムがすでに台頭してきており、これの成熟化に向けた技術研究開発が各企業で現在活発に展開されている一方、既に50箇所以上ののぼる地方の中核都市部への導入設置も進んでいる^{3) 5) 8)}。この方式によれば、従来の焼却処理では避けられなかった残灰処理が不要になるばかりでなく、熱分解過程で得られる金属やガレキ類から灰の燃焼溶融過程で生ずるスラグの再利用も含め、廃棄物から最大限のマテリアル・サーマルリカバリーが可能となり、同時にDXNs問題も

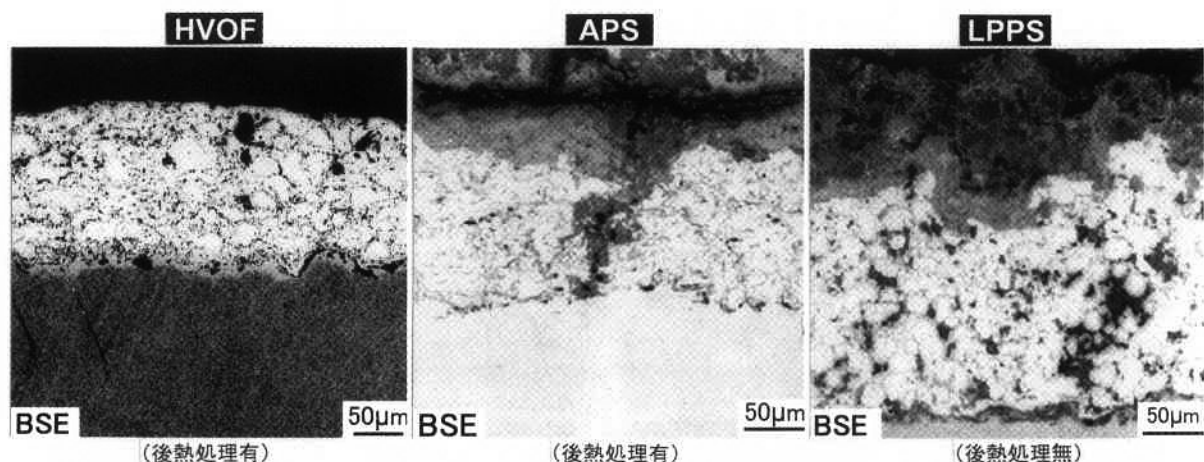


図9 各種熱溶射プロセスによる625合金コーティング層の腐食損傷形態
(実缶灰塗布による550℃-200h腐食試験)

基本的に解決できる合理的システムであり、実用化促進のメリットは非常に大きい。現在までに地方自治体や産業廃棄物処理施設への導入が進んでいる主要なガス化溶融システムとして、高炉方式による直接ガス化溶融システム、ロータリーキルン方式あるいは流動床方式による熱分解ガス化溶融システムの3種類が挙げられる⁶⁾。これらに共通して、1300℃程度に達する灰溶融炉ガスの高温熱源等を利用して高効率廃棄物発電が可能であるなど、多くのメリットがある^{4) 7)}。

しかしながら、廃棄物熱分解ガス化溶融プラントに関する我が国での研究開発は次第に軌道に乗りつつあるものの、材料の高温耐環境性を中心とした耐久性、プラントの長期連続操業において求められる安定性・安全性やエネルギー変換効率のさらなる向上など多くの面で今後早急にクリアすべき技術課題も山積している^{4) 9)}。例えば、灰溶融炉出口付近の1000℃程度の高温排ガスを利用した普通鋼製熱交水管（蒸発管）において重金属類の塩化物が関与したとみられる急速な腐食減肉の問題^{4) 6)}など、腐食環境軽減のためのシステム設計改善と材料対策との連携の必要性も表面化しつつある。一方、高温腐食のリスクを最小限に抑えて高温過熱蒸気を得る方法として、例えば高温バグフィルタの利用によりばいじんやHClの濃度を十分低減させた熱分解ガスを直接燃焼して500℃以上の過熱蒸気を得る方法^{5) 5)}、あるいはセラミックスや耐熱鋳鋼製のバヨネット式（二重管式）熱交換器により加熱した高温空気を利用して400℃程度の過熱蒸気を500℃まで間接加熱する方法^{5) 6)}など、多様な過熱蒸気改善策が最近提案・実証され、それぞれ実用化段階を迎えている。ここでもまた、例えば高耐

酸化性Ni基合金の開発など、優れた耐環境性を有する耐熱材料の選定導入が重要検討課題になっている。

なお、灰溶融炉においては耐火材の溶融スラグとの高温反応もプラント耐久性の面から重大な腐食問題といえるが、例えばAl₂O₃-Cr₂O₃系耐火物レンガとスラグとの反応における六価クロム(Cr⁶⁺)生成の問題とその対策など^{5) 7) 5) 8)}、新たな環境リスク問題も存在するので、耐火物材質の見直しも必要である。

さて、DXNs対策や廃棄物発電の高効率化促進など種々の観点から、廃棄物処理ブロックの広域化とプラント設備の大型化・連続運転（全連続炉）化が現在推進されている。1990年代に展開された前述のNEDO高効率廃棄物発電技術開発プロジェクトは、マスバーン方式によるストーカ

表6 廃棄物処理能力別広域化ブロック数と適正処理－発電方式案

広域化当たりのごみ処理能力 (t/d)	≤ 50	50 < ≤ 100	100 < ≤ 200	200 < ≤ 300	300 < ≤ 600	600 <	計	
広域化ブロック数	24	49	122	70	93	58	416	
内訳	1つ以上の廃棄物発電設備を持つブロック	1	2	4	12	43	48	110
	廃棄物発電設備の無いブロック	23	47	118	58	50	10	306
適正処理方式 (案)								

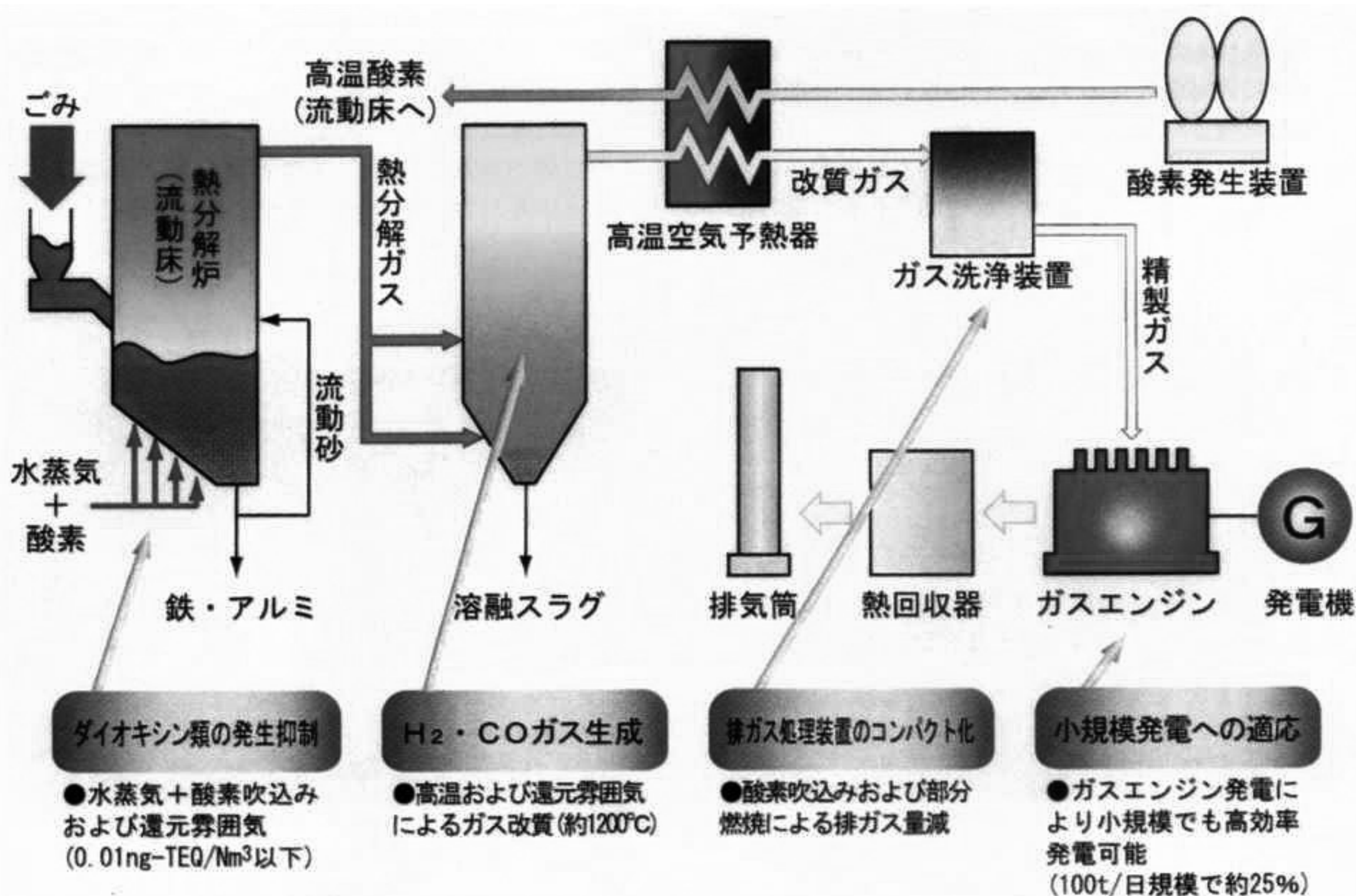


図10 廃棄物ガス変換発電システムフローの例（流動床方式のケース）

(火格子)型の大規模焼却プラントを主対象としたもので、その成果は大都市圏においては十分有効であるが、システム効率の損失などリスクが増大する中小規模のプラントでは同様の方式が必ずしも有利とはいえない。しかるに表6^{5,9)}に示したように、我が国の廃棄物処理施設の大半を占める約300t/d以下の中小プラントでは現在、その大部分が発電設備を保有せず、それゆえこれら中小規模の廃棄物処理施設において高効率発電(当面の目標となる発電端効率20%以上)を可能にするプラントのシステムならびに要素技術の実用化促進が急務といえる。表6に併示したように、廃棄物熱分解ガスあるいは灰熔融炉出口ガスの改質・精製によりグレードアップさせた改質ガスを燃料としてガスエンジンを作動させるガス変換発電システムは、流動床炉の場合を例として図10^{6,10)}にシステムフローを示したように、導入設置が現在進んでいる熱分解ガス化熔融プラントよりもさらに小規模のブロック(すなわち小規模の廃棄物処理プラント)において威力を発揮するシステムであり、現在これの実用化に向けた技術研究開発が展開されている^{5,9)}。ここでもまた、ガス改質・精製部位を中心とした高温反応機器用材料の腐食防食がキーテクノロジーの一つと位置づけられている。

4. おわりに

筆者の生来の冗長文のために貴重な誌面を大幅に割いていただいたことをお詫びしたい。

一つの極限環境ともいうべき当該分野の極めて複雑怪奇なプラント環境技術の問題解決のためには、先ず的確な環境把握が最重要との認識から、プラント部材の腐食損傷解析を通して環境解析(「材料側から環境を見る」)を展開してきた。「行動する(防食策を講ずる)前に、先ず敵(環境)を知れ」が肝要である。本稿はその最新のドキュメントと位置づけたい。

このように、従来手法とは異なる多面的なアプローチにより、しかも常に設計、熱、燃焼、化学、分析、計測制御、環境、生物など多くの科学工学分野の技術者・研究者との緊密な連携が図られている限り、廃棄物処理プラント環境に起因した材料の損傷劣化問題の解決もそれほど悲観的ではない段階を迎えているといえよう。

ただ今後は、従来のような廃棄物を適正かつ効率的に処理すればよいとする「対症療法」に終始するばかりでなく、廃棄物を出さないための「予防工学」にシフトさせていくことが重要である。このようなアプローチを具現化するために、「ライフサイクル設計」、「インパース・マニュファクチャリング」等の設計・製造プロセス研究が製造技術分野ですでに展開されている。しかし、それでも「廃棄物」をゼロにすることは不可能であり、現在開発中の先進型廃棄物処理プラント技術は、ここで排出される真の「廃棄物」から高度なマテリアル・サーマルリカバリーを実現させるためのフォローアップ技術として機能させるべきである。廃棄物問題は、たとえ技術論が進化したとしても、日本人一人一人が認識を改めない限り(少なくとも昭和の高度経済成長時代以前の意識にまで回帰しない限り)、根本的に解決できない。

筆者の私見も交え、我田引水的な概説に終始した感がしないでもないが、廃棄物処理問題に関わる多くの分野の技

術者・研究者との連携により環境・資源エネルギー関連問題解決に向けたアクションプランの策定などにおいて、本稿が何らかのお役に立てれば幸いである。

参考文献

- 1) 吉葉正行: 廃棄物学会誌, 13(2002), 38.
- 2) 平岡正勝: 廃棄物学会誌, 8(1997), 265.
- 3) 吉葉正行: 日本金属学会会報「まてりあ」, 38(1999), 203.
- 4) 吉葉正行: 日本金属学会会報「まてりあ」, 39(2000), 336.
- 5) 吉葉正行: 学振123委研究報告, 41(2000), 329.
- 6) 谷川 昇: 廃棄物学会誌, 9(1998), 470.
- 7) 石川禎昭: プラスピア, No. 102(1998), 33.
- 8) 日本粉体工業技術協会 流動化分科会: 第31回流動化分科会ガス化熔融炉事例シンポジウム講演論文集, (2003-5).
- 9) 石川禎昭: プラスピア, No. 103(1998), 21.
- 10) 環境省環境管理局: 都市と廃棄物, 32(2002), No. 3, 34. (著者一部修正).
- 11) 吉葉正行: 高温学会誌, 28(2002), 188.
- 12) <http://www.env.go.jp/chemi/dioxin/> (2002-7).
- 13) 石川禎昭: ごみ焼却施設ダイオキシンの法規制と対策 オーム社, (1999), 10. (著者一部加筆).
- 14) 基 昭夫, 占部武生, 吉葉正行: 材料と環境, 47(1998), 512.
- 15) 原 智彦, 山岸 徹: ニチアス技報, No. 312 (1999), No. 2, 1.
- 16) Y. Kawahara and M. Kira: Corrosion, 53(1997), 241.
- 17) 安藤真一郎, 遠山一廣, 吉田直弘, 杉原幸司: 日立造船技報, 62(2001), No. 2, 2-9.
- 18) 高橋英徳, 他6名: 腐食防食協会 第139回腐食防食シンポジウム資料, (2003), 21.
- 19) NEDO: 高効率廃棄物発電技術開発 平成10年度報告書(第1分冊), (1999), 175, 289.
- 20) 横野光憲, 松本昭成, 野口 学, 八鍬 浩, 宮坂松甫, 三好 慶, 小坂勝治, 福田祐治: 第10回廃棄物学会研究発表会講演論文集, (1999), 757.
- 21) NEDO: 廃棄物発電導入基本マニュアル, (1996), 2, 5.
- 22) 通産省資源エネルギー庁公益事業部電力技術課資料, (1998).
- 23) 柏木孝夫: 第1回高効率廃棄物発電技術に関するセミナー予稿集, NEDO-IAE, (2001), 4.
- 24) 例えば, 通産省資源エネルギー庁公益事業部発電課: 21世紀に向けた発電技術懇談会廃棄物発電部会報告書, (1997), 25.
- 25) 平岡正勝: 第1回高効率廃棄物発電技術に関するセミナー予稿集, NEDO-IAE, (2001), 41.
- 26) 柏木孝夫, 秋澤 淳: 日本機械学会 第10回環境工学総合シンポジウム2000講演論文集, (2000), 1.
- 27) V. K. Fassler, H. Leib and H. Spahn: Mitteilungen er VGB, 48(1968), 126.
- 28) D. A. Vaughan, H. H. Krause and W. K. Boyd: Ash Deposits and Corrosion due to Impurities in Combustion Gases, ed. by R. W. Bryers, Hemisphere Publ., (1978), 473.

- 29) H. H. Krause: High Temperature Corrosion in Energy Systems, ed. by M. F. Rothman, TMS-AIME, (1985), 83.
- 30) P. I. Daniel et al.: Corrosion/87, Paper No. 400, NACE, (1987).
- 31) H. H. Krause: Corrosion/87, Paper No. 401, NACE, (1987).
- 32) G. Y. Lai: High-Temperature Corrosion of Engineering Alloys, ASM Int'l., (1990), 158.
- 33) 川原雄三, 吉良雅治: 材料と環境, 46(1997), 8.; Quoted from E. K. Akopov and A. G. Bergman: Zhur. Neorg. Khim., 4(1959), 1655.
- 34) 川原雄三: 腐食防食協会 第42回腐食防食討論会講演集, (1995), 125.
- 35) G. Sorell: Mat. at High Temperatures, 14(1997), 137.
- 36) 笠岡成光, 阪田祐作, 白田真久: 日本化学会誌, No. 11 (1977), 1728.
- 37) 高橋幸男, 塚上八十治: 学振123委研究報告, 36(1995), 49.
- 38) N. Otsuka et al.: Corrosion/95, Paper No. 565, NACE, (1995).
- 39) 高橋幸男, 塚上八十治: 腐食防食協会 第41回腐食防食討論会講演集, (1994), 297.
- 40) 川原雄三: 材料, 49(2000), 955.
- 41) M. Yoshiba, H. Notani, S. Uno and N. Hirayama: Proc. 13th Int'l. Corrosion Conf., ACA, (1996), 1384.
- 42) 原田良夫, 石橋康正: 日本材料学会 腐食防食部門委員会資料, 35(1996), No. 191, Part 2, 27.
- 43) 廃棄物研究財団: 焼却処理施設におけるエネルギー転換推進研究(WI 21CP) 平成4年度報告書, (1993), 52.
- 44) 吉葉正行, 高杉信也, 基 昭夫, 占部武生: CAMP-ISIJ, 7(1994), 698.
- 45) 榑 孝, 伊原義尚: 日本材料学会腐食防食1部門委員会資料, 37(1998), No. 207, Part 6, 19.
- 46) 吉葉正行: 腐食防食協会 第48回材料と環境討論会講演集, (2001), 419.
- 47) Y. Kawahara et al.: Corrosion 2001, Paper No. 01173, NACE, (2001).
- 48) 原田良夫: 高温学会誌, 26(2000), 226.
- 49) 吉葉正行, 島田健吾, 清水 勉: 腐食防食協会 第45回材料と環境討論会講演集, (1998), 29.
- 50) M. Yoshiba, A. Mikami, K. Shimada and T. Shimizu: J. Cor. Sci. Eng., Submitted.
- 51) M. Spiegel, R. Warnecke and E. Strauch: Proc. Int'l. Symposium on Cor. Sci. in 21st Century, (2003), CD-ROM.
- 52) 庄 篤史, 磯本辰郎, 遠山一廣, 占部武生, 吉葉正行: 日本金属学会誌, 66(2002), 554.
- 53) NEDO: 高効率廃棄物発電技術開発 平成8年度報告書, (1997), 43, 212.
- 54) 吉葉正行, 谷口滋次, 大谷隆一: CAMP-ISIJ, 14(2001), 543.
- 55) 山岡敏浩, 太田 彰, 深海庸孝, 河上 勇: 第12回廃棄物学会研究発表会講演論文集, (2001), 610.
- 56) 松岡 慶, 野口 学: 日本機械学会第11回環境工学総合シンポジウム2001講演論文集, (2001), 210.
- 57) 遠山一廣, 佐野順一, 原 智彦, 山岸 徹: 学振123委研究報告, 42(2001), 251.
- 58) 山口明良: 廃棄物学会誌, 13(2002), 47.
- 59) 小川紀一郎: 第1回高効率廃棄物発電技術に関するセミナー予稿集, NEDO-IAE, (2001), 75.
- 60) NEDO: 高効率廃棄物発電技術開発・高効率廃棄物ガス変換発電技術開発資料, (2001), 5.