

[総 説]

ごみ焼却炉ボイラ管の高温腐食について

Fire-side Corrosion of Tubes in Refuse-fired Boilers

持田 武信* 田中 一幸* 藤吉 秀昭*

Takenobu MOCHIDA, Kazuyuki TANAKA and Hideaki FUJIYOSHI

1. はじめに

1965年に大阪市西淀工場でごみ焼却発電プラント（ごみ発電）の第1号が産声をあげてから30有余年を経過し、その間1995年度までに148の発電プラントが稼動にはいり、現在更に約50のプラントが建設中である。1994年には総合エネルギー対策推進閣僚会議で「新エネルギー導入大綱」が策定され、エネルギー源として「ごみ」がその一翼を担うこととなった。この計画によれば2000年に2000MW、2010年に4000MWへと急速な発電能力の増強が見込まれているが、これを見成するのは容易ではなく、建設規模、プラント数のみならず、発電効率の飛躍的向上が欠くべからざる要件となっている。

この要請を反映して、30年の長きに亘って低圧低温に甘んじてきた我が国のごみ発電も、漸く、そして急速に欧米ないしは輸出プラントのレベルに近づこうとしている。我が国のごみ発電が低圧低温から脱却し切れずに来た理由は、我が国特有のごみ質、即ち高塩素分（ちゅう芥およびプラスチック）による高温腐食を回避するためとされてきた。この急速な変化の背景として、この条件が緩和される方向が確認されつつあるとか、それともこの条件に克つ新技術が登場したとかいうことがあるのだろうか。ごみ質の変化についての将来予測は難しいが、現状で見る限り、高カロリー化とプラスチックによる重金属含有量の増加などにより、むしろ条件は厳しくなっていると言えるし、一方、炉内脱塩等の技術を具体的に織り込んだ高効率発電が現実のプロジェクトに提案されるに至っているわけでもない。

このような中で大切なことは、

- 既に発生している「事実」を総括し、これに

基づいて

- 現状なし得る最善の「的確な」対応策を講ずること

である。一方、この種の高温腐食に関する研究の多くが、どちらかといえば過熱器管を中心になされているために、過熱器に比べて遙かに複雑な腐食環境に置かれている火炉水冷壁管を対象とした系統的研究が乏しい現状にある。そこで、現在既に発表されている諸研究の中から炭素鋼管の腐食速度に関するものを集め、ごみ焼却炉ボイラにおける伝熱管の高温腐食について総括してみようと思う。

2. ごみ発電ボイラにおける高温腐食発生の状況

1. 腐食発生率の推移

ごみ発電ボイラチューブの障害例は、個別事例として種々見ることができるが¹⁾、そのバックデータが多くの場合明らかでなく、また系統的でないために、現象の「再現性」を予測する具体的手段に必ずしもなり得ていない。

そこで、先ずこの問題を巨視的に捉えるのに有益な報告書として国内110余りのごみ発電ボイラに関する腐食状況調査結果²⁾があるので、これからボイラチューブの障害として高温腐食の発生率を求め、その推移を示したのが図1である。同図にはボイラ管の腐食と相關のある蒸気条件（圧力・温度）の推移を併記してある。【A】はボイラ圧力と火炉水冷壁管の腐食の発生率、【B】は蒸気温度と過熱器管の腐食の発生率の推移である。

個々の腐食の状況・程度の詳細については明らかでないが、「腐食有り」の件数を「回答全数」で除した値を単純に「発生率」として表し、稼働開始年度にプロットしたもので稼働開始年度と発生年次に直接の関係はないが、発生現状の推移を見るのに一つの指標となるものと思う。実際には中小の障害は報告から漏れている可能性が高いと考えられるから、実態はこれ以上の発生率を見るべきであろう。

* 勤 日本環境衛生センター東日本支局環境工学部

Department of Environmental Engineering, East Branch, Japan Environmental Sanitation Center

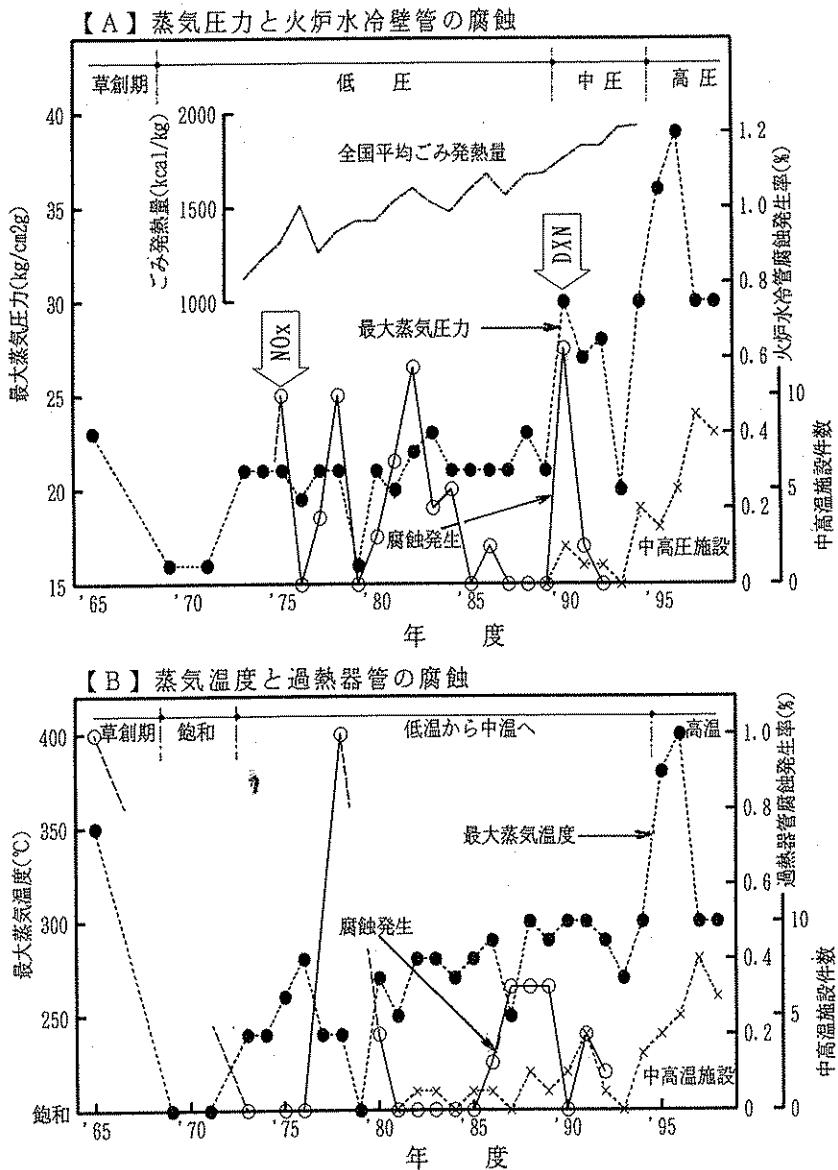


図1 ごみ発電ボイラの蒸気条件と腐食発生の推移

(1) 火炉水冷壁管の腐食

火炉水冷壁管については1例を除き蒸気圧力が20 kg/cm²未満であった'73年までは腐食障害事例の報告がなく、'74～'89年の低圧(21 kg/cm²前後)時代には2～3件に1件の割合で発生を繰り返している。この間ごみ発生量の全国平均は約1,200 kcal/kgから1,700 kcal/kgへと大幅に上昇しているが、特に腐食発生との直接的相関は見られず、'75年のNOx排出規制に伴う炉内燃焼抑制の影響がわずかに相関として見られるかという程度である。'90年にはいると中圧(30 kg/cm²級)時代を迎え、機をして発生率が上昇した後間もなく鎮静化しているが、図1の調査期間が'92年迄であるので

その後の状況は不明であり、'95年以降の高圧(40 kg/cm²級)化時代を迎えての追跡調査が是非必要である。

(2) 過熱器管の腐食

'65年に発生した単純ではあるが厳しい腐食障害の教訓を受けて、'72年までは過熱器は採用されずその後も250°C級の低温蒸気時代が続き、様子を見ながら徐々に温度の上昇を図りつつ、'87年に至って漸く中温(300°C級)時代を迎えた。この間温度をわずか高める毎に腐食障害発生を繰り返しながら'95年になって高温(400°C級)時代に突入した訳で、この調査期間も'92年までであることから過熱器管の障害防止のためにもその後の追

跡調査の実施が望ましい。

2. 腐食発生率と蒸気条件

前出図1に示した調査結果からボイラ管高温腐食発生率と蒸気条件の相関を求めて図2に示す。【A】は火炉水冷壁管におけるボイラ圧力との関係、【B】は過熱器管における蒸気温度との関係である。いずれも蒸気条件の上昇に伴って発生率が上昇、これに対応して対策を講ずることにより発生を抑制してきた様子がうかがえる。

火炉水冷壁管では、当初 20 kg/cm² 前後から腐食の発生が認められ、無対策のままでは 30 ~ 40 kg/cm² 級で過半のボイラに腐食が発生していた可能性がある。(図【A】の点線)。実際にはオーバーファイアエアの最適化による燃焼の改善や、キャスタブルライニング施工等の対策を講ずることによって発生率を抑制してきているが、未だその対応が完璧とは言い難い。

過熱器管では、炭素鋼管で蒸気温度 350 °C における焼損事故にひきつづき 300 °C 未満でも腐食障害事例が報告されており、過熱器入口ガス温度の低下、高温ガス放射の遮断、伝熱管内外熱伝達係数比の適正化等、当初からなさるべき打ち手によってメタル温度を低下させることで改善してきているようである。このように過熱器では設計上の改善余地が大きいので、図2【B】に示すように蒸気温度 300 °C 級でも発生率を抑えることが容易である。更に改善の余地として、ガス偏流の防止、材質の向上、ストップロウの改良等多くの選択肢が残されているので、余程条件の悪いごみが長期間継続供給されない限り、障害の発生を未然に防止することは難し

くないものと考えてよい。

3. 高圧高温化の阻害要因

ボイラ管腐食の事例に関する発表は欧米に多くを見ることができるが¹⁾、高圧高温の事例に限られている。欧州では、石炭火力ボイラの設計をそのまま適用することからごみ発電にはいり、多数のドラスティックな腐食事故の経験を通して圧力・温度を下げてきたのに対し、米国では、その障害に学び低圧・低温から限界を追及するかたちで圧力・温度を上げてきた結果、両者の設計条件が同程度に落ちつく結果となっただ。

これに対して、我が国では第1号ごみ発電のボイラ高温障害発生以降、欧米に比し高塩素のため腐食性に富むとの認識が定着したことが、高圧高温化を遅らせた最大の要因であるように思われる。腐食に影響を及ぼすガスである HCl、SO₂ の排ガス中濃度 (ppm) の例³⁾として、ドイツ (HCl 400 ~ 700, SO₂ 60 ~ 80)、アメリカ (HCl 200 ~ 600, SO₂ 60 ~ 200) に比べ、我が国の値 (HCl 400 ~ 1,500, SO₂ 30 ~ 80) が HCl では約 2倍近く高く、一方、高温腐食の抑制要因ともなりうると言われる SO₂ では半分程度と低い数字もある。しかし高圧高温化の阻害要因は、

- (1) 腐食支配因子の定量的評価が困難なために限界設計に躊躇があったこと
 - (2) エネルギーとしてのごみの位置づけが低かったこと
 - (3) 障害発生時の経済的損失評価へのウェイトが大きかったこと
- などにあったのが実態と考えられる。

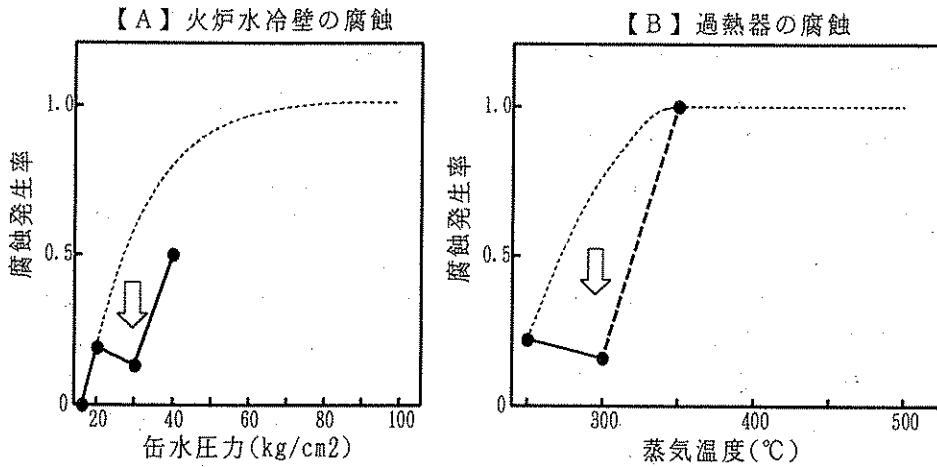


図2 蒸気条件とボイラ管高温腐食発生率

3. 高温腐食に影響を及ぼす諸因子と腐食機構

1. 腐食の形態

ごみ発電ボイラにおける管障害には次のタイプがあるとされる⁴⁾。

- (1) 火炉下部の火格子上方に沿って発生するエロージョンアシテッドコロージョン(酸化皮膜の消滅と強力な還元雰囲気におけるガスによる腐食)
- (2) 水冷壁および過熱器に発生する溶融塩腐食(低融点の金属塩化物と硫酸塩の共晶)
- (3) HCl ガスによる腐食
- (4) ストーブロウまたは飛灰によるエロージョンアシテッドコロージョン

ここで、(1)、(4)は局部的発生であり対策も明確であるのでここでは取り上げないこととする。(2)、(3)は通常同時に発生するもので、ごみ焼却灰が共存する高温腐食の説明に用いられる図3の説明図⁵⁾に模式的に表れている。

2. 高温腐食に影響を及ぼす諸因子

ごみ焼却炉排ガス中で高温腐食に影響を及ぼす因子は多く、またそれらが相互に複雑に作用し合っている。このためもあって、これら各因子についてのデータが、試験・計測・分析等その方法も含めて研究者によって区々である上、すべての因子が揃っている例は殆どないと言つてよい。例えば、従来種々研究・発表されてきた炭素鋼の腐食速度に関する試験結果の代表例を、メタル温度(伝熱管の表面温度)を変数として換算の上1枚の図に表すと図4の通りである^{1) 3) 6) ~12)}。

図中に記載したように、各々の研究の試験条件、分析項目およびその方法等に統一性は見られず、これが腐食速度の解析を困難にしている一要因と

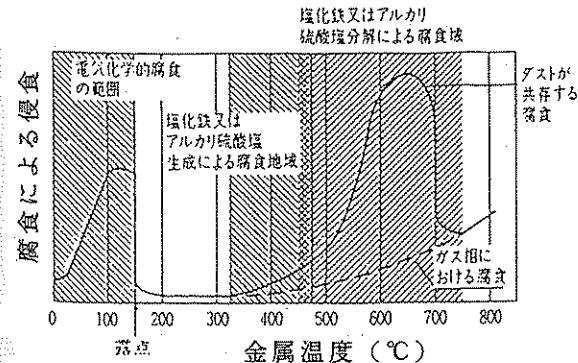


図3 ごみ焼却灰による腐食

もなっている。図4から腐食速度は直接的因素であるメタル温度を一定に固定した場合でも3~4桁の広範囲に分散しており、メタル温度以外にも多くの因子が強い影響を及ぼしていることがわかる。先ず基本的試験条件を合わせるために図中の()内に記載してある曝露時間に着目する必要がある。これは実際のプラント運転管理上考慮する必要のない因子であるが、腐食に関する各種試験結果を適正に評価するために、他の因子と性格を異なる「修正項」として最初に取り上げておくべき項目である。

(1) 曝露時間の影響

図4に示したように、諸研究における試験時間は小は10時間から大は数年に及ぶものまで広範囲に亘っている。図5は鋼のごみ燃焼ガス中の腐食速度と曝露時間の関係を表したもので、試験条件の差によりばらつきはあるものの、腐食速度は曝露時間のほぼ平方根に逆比例していると見ることができる。

図中には炭素鋼^{1) 8) 10) 13)}のほかにステンレス管の試験結果^{9) 12)}も記載してあるが両者同様の傾向と言えそうである。

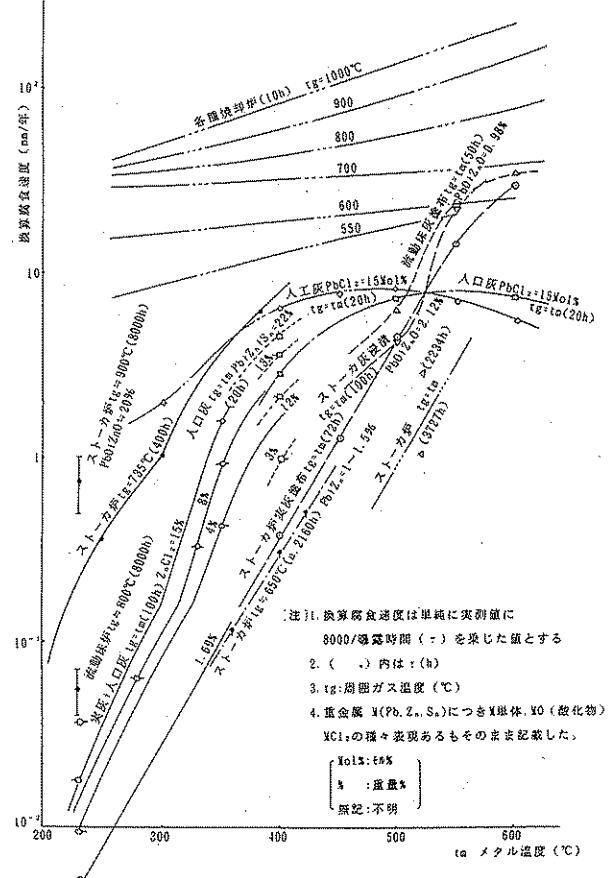
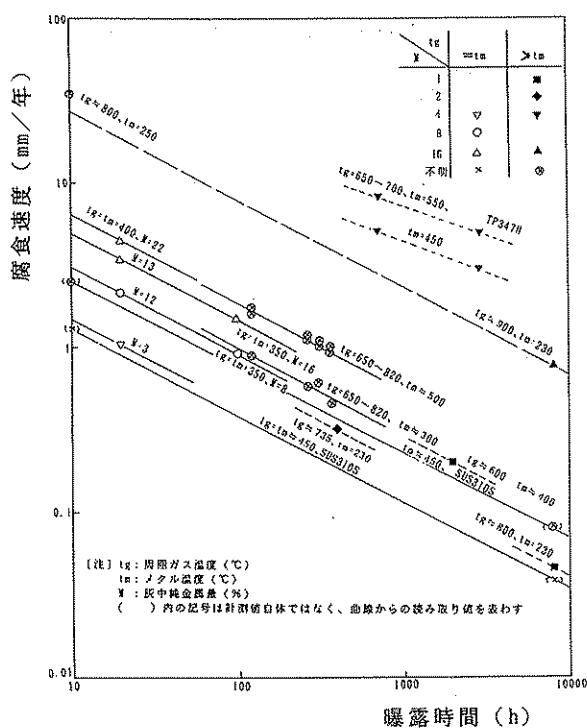


図4 炭素鋼の高温腐食速度

図5 炭素鋼の腐食速度と曝露時間の関係¹⁾

伝熱面上の付着灰層の厚い方が腐食を助長するとの報告もあるが⁷⁾、一方では、酸化皮膜による保護層の形成と並んで、付着灰は高温ガスからの保護層としても作用するから、灰層が厚くなる程、即ち曝露時間が長ほど、腐食速度が低下する傾向を示すものと考えられる。

(2) メタル温度(伝熱面表面温度)

メタル温度は腐食に対する直接の影響因子であり、図3、4に見るとおり炭素鋼では300～350°Cにおいて急激に腐食が進行する。これは表1に示すように、金属塩化物の共晶やアルカリ金属の硫酸塩が低融点を有するため、メタル温度が灰の融点を超える時に著しい腐食が発生するためである(後出(4)、(5)項参照)。図4では腐食速度がメタル温度以外に、曝露時間、周囲ガス温度、付着灰組成等の影響を同時に受けた結果として示されているから、メタル温度単独の影響を把え難いが、炭素鋼の場合高温で腐食速度が飽和していく傾向が見られる。この理由としては、HClは蒸気圧が高いからメタル温度が一定温度を超えると金属表面近くに安定し難くなることや、SO₂の反応が優勢となるための腐食抑制効果によると考えられている。

腐食防止のためにメタル温度を低下させるに

は、管内・管外の流体温度を下げるか、または管内外の熱伝達係数比を高めるかのいずれかである。このほか一般的には、不均一な流体の流速と温度の分布をできる限り平準化しておくことが好ましいので、偏流の防止が間接的対策として有効である。しかし、火炉水冷壁では管内の温度も熱伝達率もボイラ圧力で決まってしまうため、ボイラの高压化に伴ってメタル温度の上昇が不可避であるから、この僅かなメタル温度の上昇が、ごみ質の変化や運転条件によっては水冷壁の構造次第で伝熱面の腐食を加速する場合がある。高温腐食防止に際しメタル温度への配慮が重要視される所以である。

(3) 周囲ガス温度

周囲ガス温度は加熱流体としてメタル温度を決定する主因子の一つであるが、これにとどまらず腐食速度に直接強力な因子として作用する。図4からも明らかなように、周囲ガス温度がメタル温度より高い(冷却伝熱管)の場合では、メタル温度が周囲温度と等しい(無冷却試験片の)場合に比し、同一のメタル温度でも著しく腐食速度が大きくなる。管壁に付着した灰層の熱伝導率は小さいから、この極薄い灰層の温度が高温ガス雰囲気下ではメタル温度より上昇していること、また高温ガス下では金属塩化物の蒸気圧が上昇するために塩化物の蒸気圧が上昇するために塩化物の伝熱面への付着が増進することなどがその原因として推定されるが定説はない。加えて、ガス温度は高いほどその変動幅

表1 塩化物の共品の融点

共晶、モル%	融点
25 NaCl - 75 FeCl ₃	156
37 PbCl ₂ - 63 FeCl ₃	175
60 SnCl ₂ - 40 KCl	176
70 SnCl ₂ - 30 NaCl	183
70 ZnCl ₂ - 30 FeCl ₃	200
20 ZnCl ₂ - 80 SnCl ₂	204
55 ZnCl ₂ - 45 KCl	230
70 ZnCl ₂ - 30 NaCl	262
60 KCl - 40 FeCl ₂	355
58 NaCl - 42 FeCl ₂	370
70 PbCl ₂ - 30 NaCl	410
52 PbCl ₂ - 48 KCl	411
72 PbCl ₂ - 28 FeCl ₂	421
90 PbCl ₂ - 10 MgCl ₂	460
80 PbCl ₂ - 20 CaCl ₂	475
49 NaCl - 51 CaCl ₂	500

も大きく、その変動により管表面上の灰の付着・剥離を促すから、これに伴う影響も無視できないが、この定量的評価は難しい。

(4) ごみ中の塩素

ごみ中の塩素は焼却によって大部分が排ガス中に HCl として存在するほか、伝熱面表面近くでは酸化して Cl_2 となって一層激しい腐食性を示し、また付着灰中で金属の塩化物となって腐食を加速する。金属の塩化物の蒸気圧は高いから塩素は低温である伝熱面に濃縮されることになり、図 6⁶⁾（メタル温度が低下する程塩化物濃度が高くなる）や図 7¹³⁾（灰層温度が低い所ほど塩素濃度が高くなる）にこの現象が表れている。

図 8 にごみ中塩素濃度の炭素鋼の腐食に及ぼす影響の 1 例を示す⁶⁾。通常のボイラ伝熱管の条件である 900 F (約 480 °C) 以下のメタル温度では、腐食速度は塩素濃度 1% 近くまでほぼ比例的に増大するが、それ以上の塩素濃度では一定となっている。但し、この試験結果は非冷

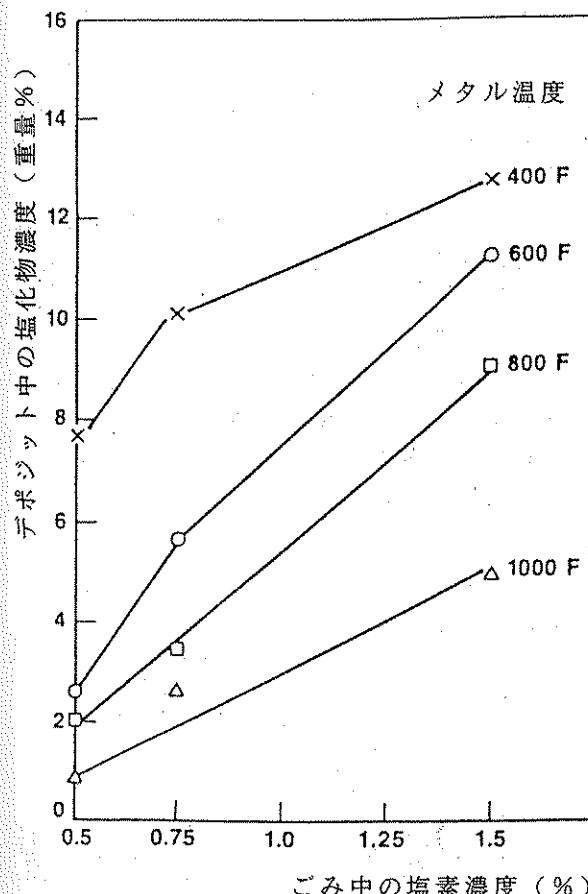


図 6 付着灰中の塩化物濃度に及ぼすごみ中塩素濃度の影響 (10 h)

却試験片を用いた（周囲ガス温度とメタル温度が等しい）10 時間の短時間の試験結果であり、そのまま実炉における腐食速度を表すものではないことに留意しておくことが肝要である。

鋼の腐食に及ぼす塩素濃度の作用は、後出(5)項「付着灰の性状」および(6)項「ごみ中硫黄分」の作用とも密接に関係しており、この鋼管表面上における腐食メカニズムを説明するものとして図 9 のモデル¹⁴⁾が屢々用いられる。簡

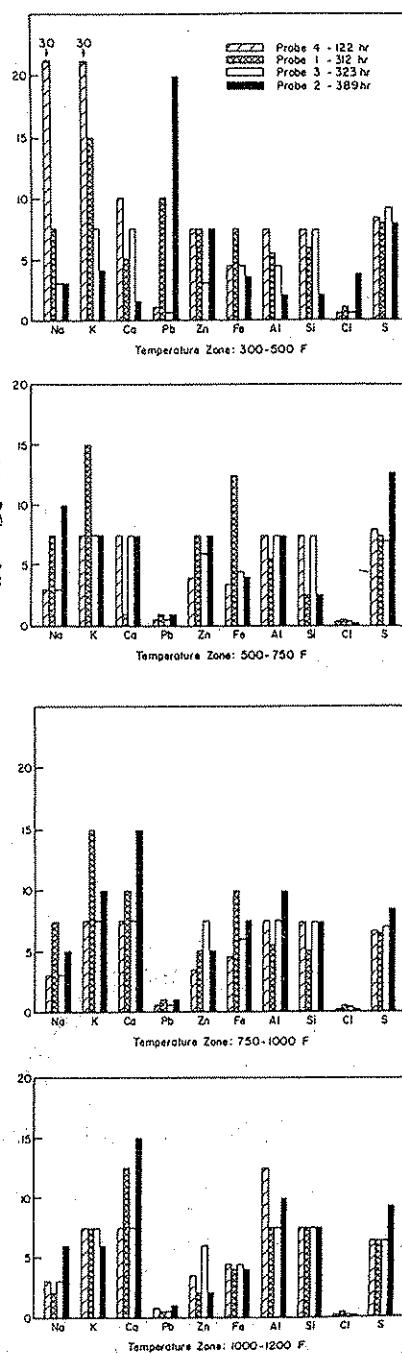


図 7 腐食管付着スケールの成分分布

単にいえば図の左半分は塩素による鋼の塩化・酸化反応を、右半分は硫黄による硫化・酸化反応を示したものである。即ち、燃焼ガスおよびアルカリ金属の塩化物・硫酸塩に由来する Cl_2 、 HCl および SO_2 、 SO_3 を主役とするクローズドサイクル反応が、伝熱面近傍の層内で次々に持続し、塩化・酸化、硫化・酸化が進行するというものである。

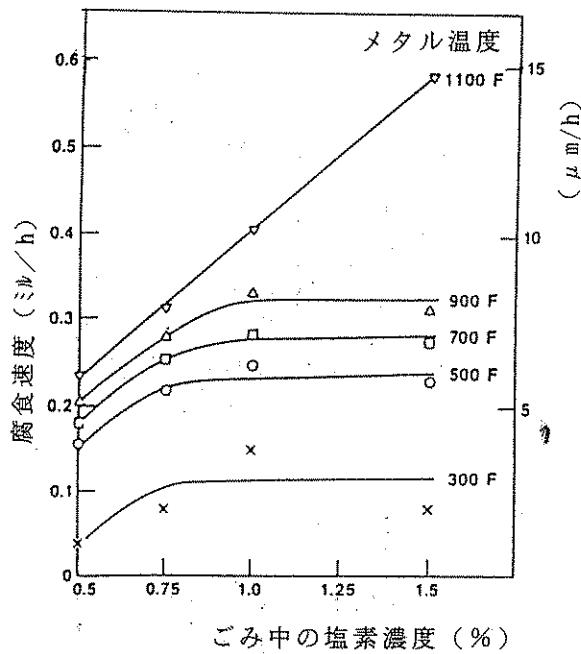


図 8 炭素鋼の腐食速度に及ぼすごみ中塩素濃度の影響 (10 h)

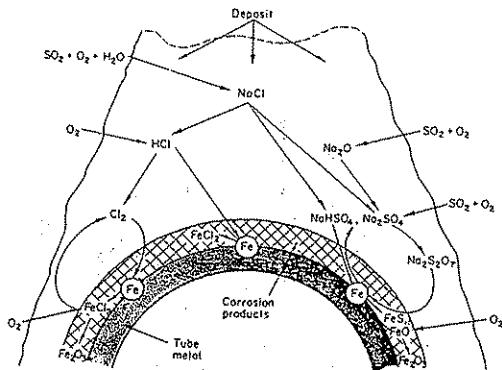


図 9 鋼管表面上の腐食反応機構

このように、ごみ焼却排ガス中の鋼の高温腐食を支配する主要因子は、物理的条件としてのメタル温度および周囲ガス温度と並んで、化学的条件としては塩素が主役と考えられるが、実際のごみ発電ボイラにおける腐食障害事例において、直接ごみ中塩素濃度との関係を明確に

した報告はない。この理由としては、ごみ質の変動幅が大きいことや、サンプリングを含めた分析が煩雑なために塩素の定量分析が実施されていない場合が多いこと、また実際のプラントでは塩素以外の他の化学的因子の影響を受けるために、必ずしも塩素濃度が腐食速度の律速要因となっていないと見られることも一因ではないかと考えられる。塩素以外の因子として化学的に重要な役割を果たすのが付着灰の性状である。

(5) 付着灰の性状 (含有金属量)

付着灰中の重金属 (Pb 、 Zn 、 Sn) およびアルカリ金属 (Na 、 K) の塩化物は、相互に、又は鉄の塩化物と共に晶を作り極めて低い融点を示すほか、アルカリ金属の硫酸塩にも低融点のものがあることは前にも触れたが (KHSO_4 210 °C、 NaHSO_4 315 °C、 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$ 300 °C)、これらの金属の含有量が多くなると付着灰の融点が低下し、低温域においても激しい溶融塩腐食が発生することになる。アルカリ土類金属の塩化物も共晶となって融点を下げるが、表 1 のように 500 °C 前後と比較的高温の融点を有するものが多く、実際に腐食障害に寄与していないと見られる。又アルミニウムや珪素等は融点を高める効果を有するから、溶融塩腐食の抑制因子として作用するとする報告がある¹⁵⁾。

この他に、 HCl の酸化による Cl_2 の生成に触媒作用を有する金属の酸化物として CuO の効果の顕著なことが知られている¹⁵⁾。図 10 に示すように、還元雰囲気 (6.5% H_2 、20% H_2O 、0.2% HCl 、残 N_2)、酸化雰囲気 (7.5% O_2 、20% H_2O 、0.1% HCl 、残 N_2) のいずれでも、 CuO による腐食速度へのインパクトが PbO 、 ZnO に比べて極めて大きいことがわかる。

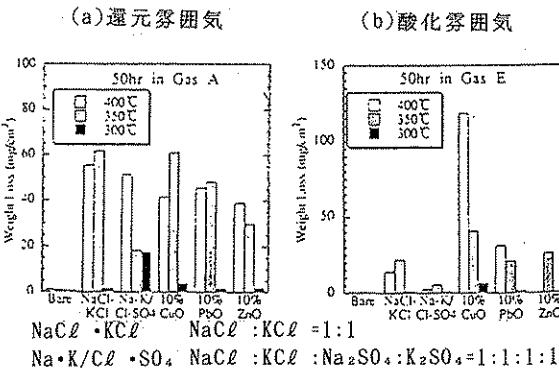


図 10 雰囲気の差による炭素鋼の腐食量の変化

一般に重金属類のごみ中の含有量は通常の都市ごみであれば大幅には変動せず、付着灰中に2%程度含まれるものと思われるが、破碎ごみなどで多量のプラスチックが含まれる場合等では20%近くに増大することがあるようである。このような場合は腐食速度は重金属の含有量によって律速されることも考えられるが、通常ごみおよび飛灰乃至付着灰中の重金属が定量されていないため、実際のプラントではこの因果関係を求めるのが難しい。これら塩化物となって低融点共晶を作る重金属類については、灰中の定量分析がなされている場合でも、飛灰と付着灰とでは含有量は異なるし、また図4の記載例でもわかるとおり分析値が金属自体の重量分率、塩化物の重量分率／モル分率、酸化物の重量分率、アルカリ金属塩化物のモル分率等、その表現が統一されていないことなど、希少な実験結果を有効に整理比較し難いのが実情である。

(6) ごみ中の硫黄

ごみ中の硫黄から発生する SO_2 、 SO_3 およびこれから生成するアルカリ金属の硫酸塩は、図9にも示されているとおり鋼の硫化・酸化に寄与するほか、ピロ硫酸塩等低融点物質の生成による溶融塩腐食を助長するものとして、図11の実験室試験結果が示すような Na_2SO_4 添加による腐食促進例も報告されている¹³⁾。

一方、硫黄が塩化腐食を抑制する説も古くから有力であり、KRAUSEは1.5%の硫黄の添加により腐食が無視し得る程度にまで抑制できたとして、ごみ発電ボイラの高温腐食防止の一策として高硫黄燃料の混焼を提唱している¹⁴⁾。

図12は SO_2/HCl 比と腐食速度の関係で SO_2 による腐食の抑制効果を示している¹⁶⁾。

また前出の図10ではアルカリ金属の硫酸塩の添加が、酸化雰囲気では腐食に寄与していないが、還元雰囲気では大きな影響を及ぼすことを示しており、以上に見てきた因子が複雑に絡み合っていることを物語っている。

(7) 過剰酸素

燃焼のための過剰空気の不足 (COガスまたは炭素粒子の生成) が腐食を助長する傾向のあることが知られている。ごみ発熱量の増加はそ

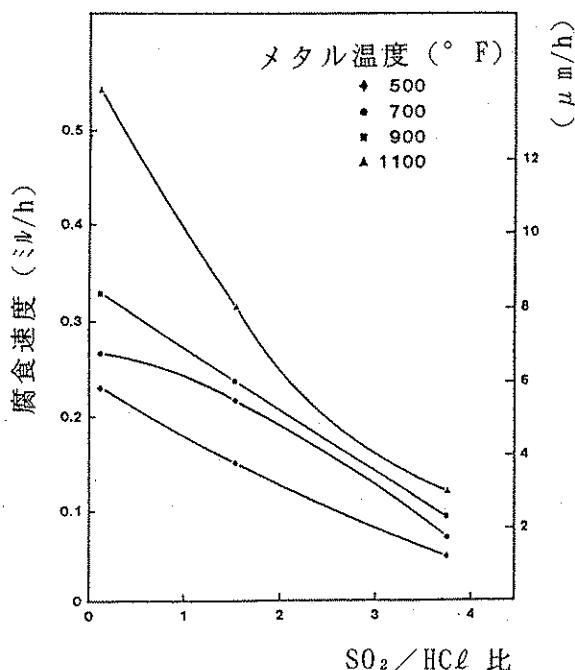


図12 炭素鋼の腐食速度に及ぼす燃焼ガス組成の影響

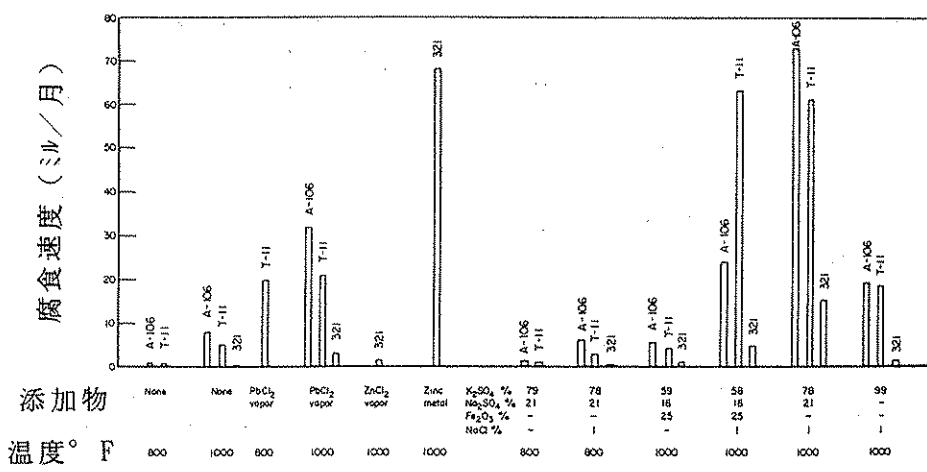


図11 人工排ガス・飛灰下における腐食速度
空気 80%、 CO_2 10%、 H_2O 10%、 SO_2 250 ppm (ミル = 0.0254 mm)

れ自身よりも空気過剰率の不足やガス温度の上昇として作用し、間接的に腐食を助長している可能性が高い。火炎の衝突（フレイムインピュージメント）が水冷壁の腐食を助長するとの表現が度々用いられるが、これは還元雰囲気に近づくために発生する炭素粒子の増加による火炎放射率の上昇や、火炎の充満度の増加による放射の上昇および輝炎厚さ（ビームレンジス）の増加が、水冷壁への熱負荷を高めることとして或程度説明できるものの、主因は雰囲気ガスによる化学的要因によるものと考えられる。

排ガス中の過剰酸素（空気過剰率）の低下が

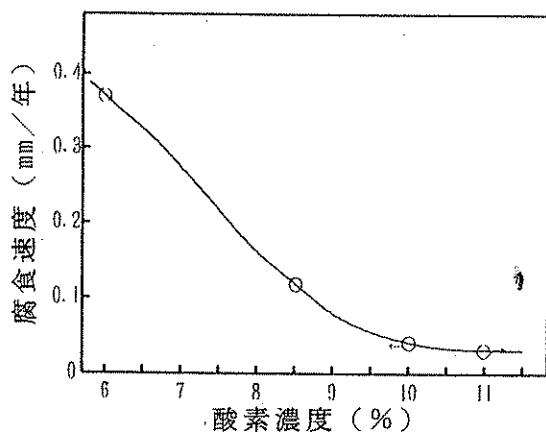


図13 炭素鋼の腐食に及ぼす過剰酸素濃度の影響

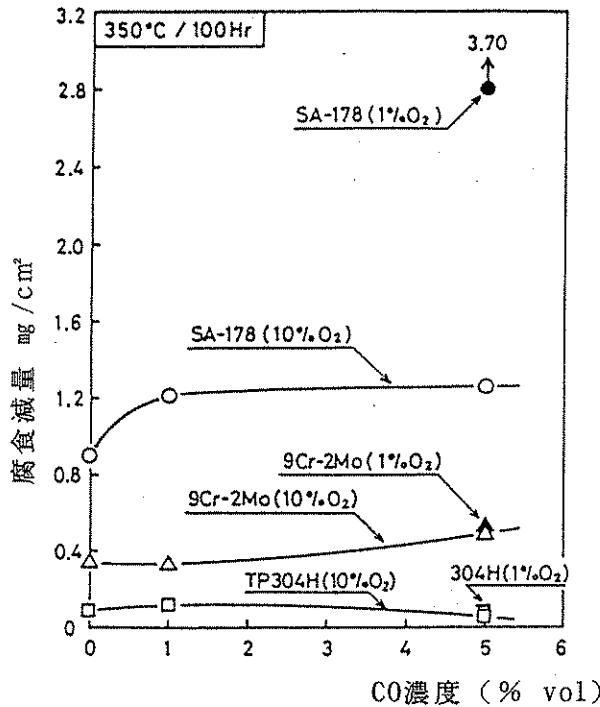


図14 燃却炉排ガス中における腐食減量に及ぼす O₂、CO ガス濃度の影響

鋼の高温腐食を助長するとする報告の一例を図13に示す。本図は1977年から1988年迄の10年間にNOx対策として過剰酸素を低下させた時期に火炉水冷壁管の腐食が助長されたとする報告¹⁷⁾をもとに、これを見易くする為に年率腐食速度に換算した概算値をプロットしたものである。このほか腐食速度とCO、O₂との関係を表すものとして図14⁸⁾があり、5%COの条件下で350°C、100時間の試験の結果、10%O₂の時1.2g/cm²の炭素鋼の腐食が、1%O₂の時には3.6g/cm²に増大したとしている。

これに対して、図15に示す実験室試験結果¹⁵⁾(350°C、50時間)によると、通常の実炉運転条件と考えられる1,300 ppm HCl以下で、腐食速度はむしろ還元雰囲気において抑制されることを示している。

このように過剰酸素の影響についても判断に苦しむ相反する報告があるが、実炉での報告では概ね還元雰囲気下において腐食が助長されるとしているので、低O₂運転時の火炉水冷壁の腐食には特別の監視が必要であると考えられる。他の腐食因子と異なり、過剰酸素は運転調整によって自由に条件設定が可能であるだけに、運転管理上の配慮が特に重要である。

(8) その他の因子

以上の鋼の高温腐食因子はいずれも重要なものばかりであるが、夫々単独の影響を定量的に把握するのが難しい。その他の因子として、排ガス中の水分、ごみ発熱量および運転負荷率等が指摘されているが、水分については実際のプラント毎に大差はないことと、発熱量や運転負荷については直接的要因ではなく、メタル温度、ガス温度、過剰酸素等今まで見てきた各因子を通じて間接的に影響を及ぼすものと考えてよい。

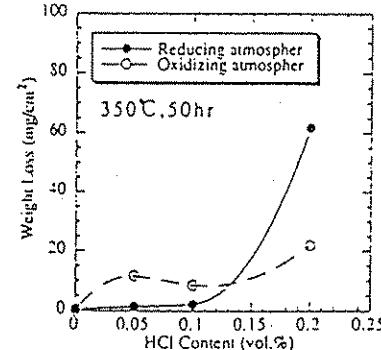


図15 NaCl、HCl共存下での炭素鋼の腐食量と HCl の関係

4. ごみ発電ボイラ伝熱面高温腐食の予測

1. 腐食速度予測上の課題

以上に見てきたとおり、ごみ焼却ガス中におけるボイラ伝熱管の高温腐食は、相互に複雑に作用しあう多くの因子の影響を受けるためのみならず、これら因子に関する実プラントにおける分析データが少なく、また系統的に採取されていないために、これを事前に「定量的な予測」に活用する試みがなされたことはなかった。

ごみ性状の変動が避けられない上に、これら影響因子のうち主たるものだけでも、塩素、重金属類、アルカリ金属類等分析を必要とする項目が多く、腐食速度の予測に対する取り組みが滞っていることは否めない。一方、ごみ発電の効率向上の手段としてボイラ発生蒸気の高圧高温化および低O₂化への対応が強く求められている現在、巧遅を待たず拙速でも何らかの簡便な腐食速度に関する定量的予測法の考案が待たれるところである。このためには図4に示したような諸試験結果の集約を更に充実すると同時に、その結果をもとに、例えば図16のような腐食促進因子毎の影響を定量化するのがひとつ的方法である。ここでごみ質における腐食因子として何をとるのが最適か、他の因子の代用機能となる因子は何か、またそのインパクトを如何に評価できるか等課題は多い。図16

ではこれらの因子として、物理的条件はメタル温度と周囲ガス温度を、また化学的条件は付着灰（乃至飛灰）中重金属含有量を（ごみ中の塩素等他の化学的因子の代用機能とすることを含めて）採用することが出来るという仮説に立って定性的に作成した場合の例である。実用上は事前に付着灰中の重金属量を知ることは難しいので、ごみ中の重金属量と付着灰中のそれの相関を求めておき、ごみの分析結果から予測するなどの方法がとられることになるものと考えられる。

2. 火炉水冷壁伝熱管に対する腐食速度の検討例

鋼の高温腐食促進要因が図16のように整理できれば、伝熱計算により伝熱面のメタル温度を計算で求めることによって、腐食速度を予測することが可能である。図17に火炉水冷壁伝熱管のメタル温度の概算とこれに基づく腐食速度推定の概念を示す。火炉内は高温の輝炎放射の下に置かれるため、伝熱管の表面の伝熱は複雑な現象を呈している。蒸発管内の熱伝達率は桁違いに大きいから、管壁温度は殆ど管内缶水の飽和温度に近く保たれているが、伝熱面表層のメタル温度（スキン温度）はこれより高いと考えられ、フィンの付け根からチューブクラウン（図中のθ=90°の位置）に向って表層メタル温度が上昇する筈である。これはチューブクラウンに向けて放射熱の入射角度の範囲が増加するためで、図中に示した代表的火炉水冷壁管の断面写真⁸⁾からも明らかなように、管肉厚の減少が確度θとともにほぼ比例して増大していることからも裏づけられる。管表面の正確な表面温度分布は計算では容易に求め難いので、図中に示した温度分布は定性的概念として表し、一方フィンについては、フィン効率によるメタル温度上昇が支配的であるからこれを概算して図の左下に表してある。

図の右下は図16に示した腐食速度とメタル温度の関係を炉内ガス温度を一定とし、付着灰中の重金属含有量が通常値（「中」程度）に対して増減した場合の腐食速度の変化を図4から推定できるとした場合の概念図である。図の右上には伝熱管の材質として炭素鋼を基準としつつ、これから他の鋼種を使用する場合の修正の概念図である。

これから図の左上の伝熱管表面に沿った腐食速度の分布が概略見当づけられる。同図は、例1乃至4に示すように、伝熱管自体の腐食に限らず高圧化に伴いフィンの腐食にも留意する必要がある

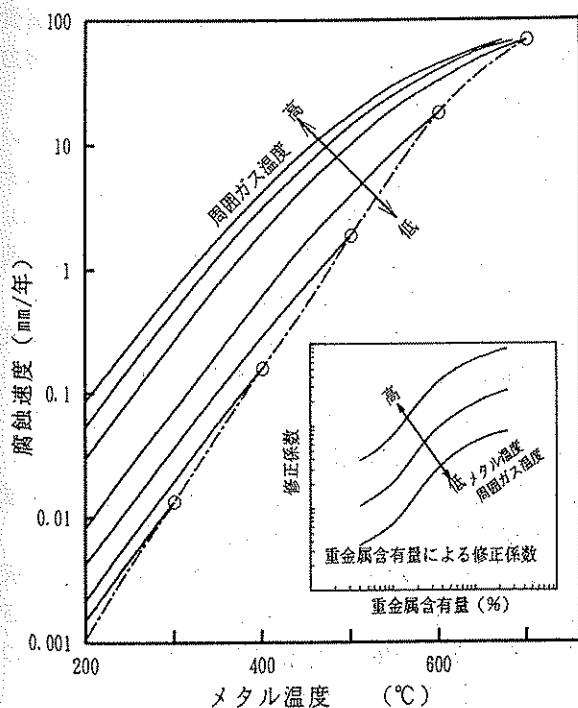


図16 炭素鋼の高温腐食速度

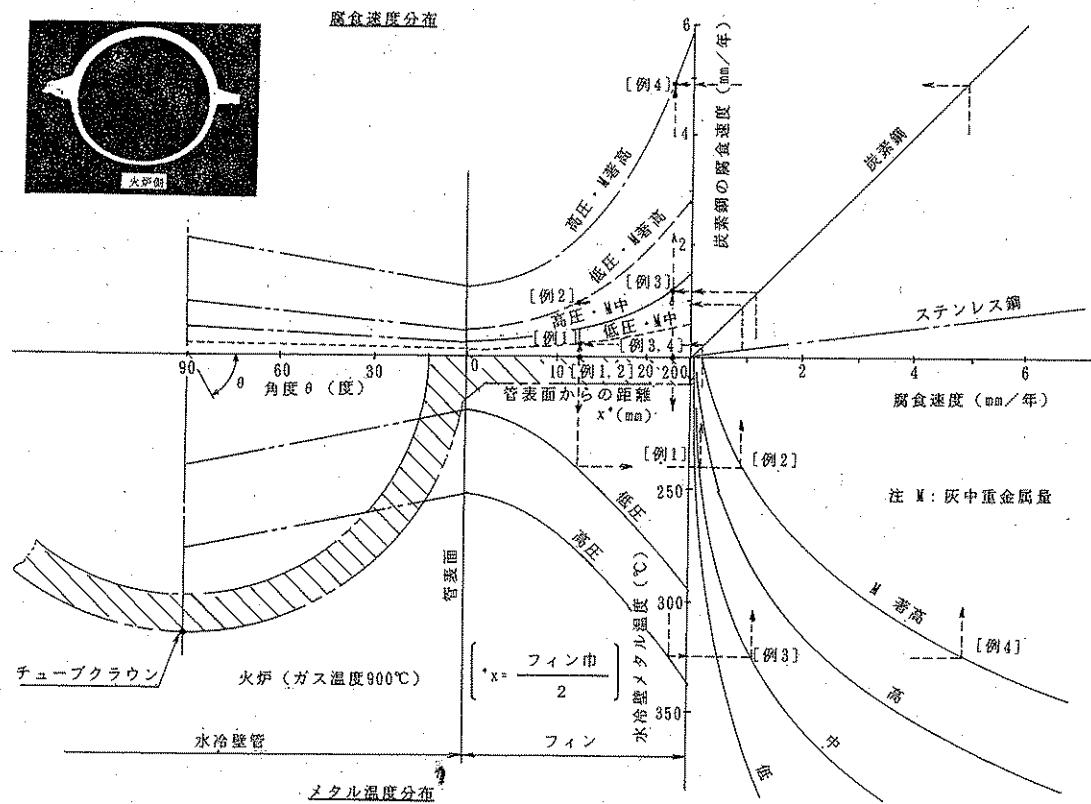


図17 火炉水冷壁管の腐食速度分布概念図

ことを物語っている。即ち、25mm程度のフィン幅 ($x = 12.5\text{mm}$) の低圧ボイラで付着灰中の重金属量が通常値であれば腐食速度は極めて小さいが（例1）、重金属量が著しく高い場合（例2）や重金属量が通常値でも高圧ボイラでフィン幅が45mm ($x = 22.5\text{mm}$) 程度と大きい場合（例3）では腐食速度が年率1mm前後にもなり得るし、例4のような極端に苛酷な条件は一般に考え難いとはいえる、腐食速度を支配する化学物質としてごみ中の元素の影響によっては、異常な腐食が発生しうることを予見させるものであって、腐食促進因子の影響を定量的に評価することの重要性を示唆している。

5. むすび

ごみ焼却排ガスによる鋼の高温腐食の解明には、今まで多くの努力が払われその防止対策がとられてきたが、未だ腐食速度を事前に定量予測するまでには技術的に体系化されていない。数多くの、且つ相互に複雑に作用し合って進行する反応に加え、腐食性成分やその他の諸条件の変動幅も大きく、それ故に腐食促進因子に関する諸データの採

取・整備は容易ではないが、体系的データの整備が望まれる。同時に研究成果の一層の有効活用を促進するために、従来区々であった分析項目、分析方法、試験条件（人工灰・人工霧囲気の設定条件を含む）、計測項目等、更には腐食量乃至腐食速度の単位の統一も含めて、標準化に向けた努力が期待される。

漸く幕を開けた我が国ごみ発電の高圧高温化の本格的展開を迎え、或いはまたガス化溶融システムに代表される次世代型処理技術における低O₂高温燃焼下での高圧蒸気発生技術の実用化を目前に控えて、研究・開発に携わる立場のみならず、施設の企画・管理・保守の立場からも、この腐食の問題を的確に理解し、これに対処することが益々重要となっている。本稿では、ごみ発電ボイラにおける高温腐食について、従来どちらかといえば過熱器に比べ系統的研究が少ない火炉水冷壁を対象に4分の1世紀間の諸研究結果を総括し、併せて今後の課題について述べた。多くの研究成果がより容易に、より正確に、より適切に活用され得るように今後の研究が方向づけられるための一助となれば幸いである。

最後に、本紙執筆の契機となる貴重な調査結果を提供して頂いた財団法人エネルギー総合工学研究所はじめ、文献提供に御協力頂いた諸賢に深甚の感謝を表す次第です。

参考文献

- 1) 例えば Krause H. H.: Historical perspective of fireside corrosion problems in refuse-fired boilers, Corrosion 93, Paper №200, 1-11 (1992)
- 2) 財団法人エネルギー総合工学研究所: 高効率廃棄物発電技術開発最適トータルシステムの研究、成果報告書(その2)、140-161 (1993)
- 3) 深堀武生、築井山信義、神山栄六、寺島正春、山本昇三: 高温・高圧・高効率ごみ発電ボイラの建設、日本機械学会環境工学部総合シンポジウム 93 講演論文集、171~174 (1993)
- 4) Wright I. G., Krause H. H., Dooley R. B.: A review of materials problems and solutions in U. S. waste-fired steam boilers, Corrosion 95, Paper №562, 1-11 (1995)
- 5) Fasler V. K., Leib H., Spahn H.: Corrosion in refuse incineration plants, Mitteilungen der VGB, Vol. 48, Apr., 126-139 (1968)
- 6) Krause H. H.: Chlorine corrosion in waste incineration, Corrosion 87, Paper 401, 1-11 (1987)
- 7) Kawahara Y. et al: An evaluation of corrosion resistant alloys by field corrosion test in Japanese refuse incineration plants, Corrosion 95, Paper №564, 1-17 (1995)
- 8) Kawahara Y., Kira M.: Corrosion factors of waterwall tube and protection by field metal spraying in municipal refuse incineration plant, Corrosion 95, Paper №563, 1-13 (1995)
- 9) 竹村誠洋、有賀紀夫、正村克身、坪井晴人、神谷敏克: 日本機械学会環境工学部総合シンポジウム 96 講演論文集、161-164 (1996)
- 10) 大塚伸夫、工藤赳夫: ごみ焼却炉ボイラチューブ材の高温腐食、CAMP-ISIJ, Vol. 7, 674-677 (1994)
- 11) 大塚伸夫ほか: 小型評価試験による既存合金の耐食性評価、CAMP-ISIJ, Vol. 7, 690-693 (1994)
- 12) 静間 誠、斎藤政昭、小坂勝治、三好 麗: ごみ焼却施設における新発電方式、日本機械学会環境工学総合シンポジウム 96 講演論文集、173~176 (1996)
- 13) Miller P. O., Krause H. H.: Factors influencing the corrosion of boiler steels in municipal incinerators, Corrosion Vol. 27, №1 (1971)
- 14) Miller P. O., Krause H. H.: Corrosion of carbon and stainless steels in flue gases from municipal incinerators, Proceedings of 1972, National Incinerator Conference, ASME, 300-309 (1972)
- 15) 松永康夫、中川精和、磯崎壬一: ごみ焼却炉火炉壁チューブの還元ガス雰囲気中での腐食挙動について、CAMP-ISIJ, Vol. 7, 686-690 (1994)
- 16) Krause H. H.: Effects of flue-gas temperature and composition on corrosion from refuse firing, Corrosion 91, Paper №242, 1-6 (1991)
- 17) 占部武生、基 昭夫、本田 正、杉山文武: 平成2年度東京都清掃研究所研究報告 (1990)