

450℃超ボイラーの実現に向けた実機ばく露試験

Exposure Testing on an Actual Boiler for the Development of Boilers Operating Above 450℃



今井 大樹* 萩田 諭*

Daiki IMAI

Satoshi HAGITA

【要旨】 一般廃棄物処理施設における高効率発電を目的としたボイラーの高温高圧化が進められているが、大きな課題として過熱管の腐食速度の増大があげられる。既報¹⁾では、稼働中の廃棄物発電ボイラーに供試材（管材）を設置し、管内壁温度 350℃～450℃における過熱管の腐食状況を調査した結果について報告した。本稿ではさらなる蒸気高温化を見据えて管内壁温度 360℃～510℃の範囲で制御して腐食状況を調査した結果を報告する。

SUS310S 系鋼管の減肉量は、管内壁および排ガス温度の両方に依存して増加する傾向が確認された。また、SUS310S 系鋼管と高 Cr,Mo 系 Ni 基肉盛溶接管の比較では、すべての温度条件において高 Cr,Mo 系 Ni 基肉盛溶接管の減肉量の方が大幅に小さい結果が得られた。

キーワード：廃棄物発電ボイラー、過熱管、高効率化、高温腐食、肉盛溶接

Abstract

Efforts are being made to increase boiler temperature and pressure in municipal solid waste treatment facilities to achieve power generation with efficiency improvement. However, increased corrosion of superheater tubes remains a major challenge. In the previous report¹⁾, corrosion behavior in superheater tubes was investigated at tube wall temperatures of 350℃ to 450℃ by installing test material (tubes) in an operating boiler for waste incineration power generation. This article reports the results of investigating corrosion behavior at tube wall temperatures of between 360℃ and 510℃ with the aim of further increasing the steam temperature.

We confirmed that wall thinning of SUS310S steel tubes due to corrosion increased as both tube wall temperature and exhaust gas temperature rose. In addition, a comparison between a SUS310S steel tube and a high Cr and Mo Ni-based overlay welded tube showed that the latter's wall thinning was significantly smaller under all temperature conditions.

Keywords: boiler for waste incineration power generation, superheater tube, efficiency improvement, high-temperature corrosion, overlay welding

* 環境技術 1 部
Environmental Engineering Dept. 1

1. はじめに

一般廃棄物発電施設は、従来捨てられていた一般廃棄物が持つエネルギーを有効活用して発電をおこなう施設であり、地球温暖化対策に寄与している。また近年では、地域のエネルギー拠点としても重要な施設となりつつある。

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が中心となり、1990年代に取り組みされた蒸気条件9.8 MPa×500℃を目標とした「高効率廃棄物発電技術開発」プロジェクト、さらに内閣府が設置した地球温暖化対策推進本部にて2002年3月に決定された「地球温暖化対策推進大綱」²⁾を契機に、一般廃棄物処理施設では高効率発電を目的としたボイラーの高温高压化が進められてきた。数年前までは蒸気条件4 MPa×400℃までの施設が主流であったが、現在では蒸気条件6 MPa×450℃の施設も竣工している。

しかし、廃棄物発電ボイラーの高温高压化の大きな課題として、過熱管の腐食速度が増大することがあげられる。過熱管の腐食は、ごみに含まれる塩化物、硫化物系の化合物による高温腐食が原因と考えられている³⁾。そのため、蒸気条件のさらなる高温高压化により、高温腐食がより助長され、過熱管の短寿命化を招く恐れがある。

既報¹⁾では、高温高压化による過熱管の腐食耐久性の知見を得るため、稼働中の廃棄物発電ボイラーに供試材（管材）を設置し、腐食状況を調査した結果を報告している。当該試験では管内に冷却空気を流すことで管内壁温度を350℃～450℃に制御した管材を4か月間ばく露した。

今回は蒸気温度450℃超のさらなる高温化を見据え、既報と同じ施設で管内壁温度を既報よりも高い360℃～510℃の範囲で制御し、ばく露試験を実施した。本稿では、2024年11月～2025年3月の5か月間実施した試験内容及び結果を報告する。

2. 試験概要

表1に試験を実施した施設の概要を示す。供試材はそれぞれ3次過熱器（以下、3次SHと記す）入口部、出口部に設置した。排ガス温度はそれぞれ3次SH入口部で約730℃、3次SH出口部で約650℃で

表1 施設概要

処理規模	240 t/日×2炉
処理対象物	一般廃棄物
	リサイクル残渣
処理方式	ストーカ式
ボイラー形式	縦型自然循環式
排ガス温度	3次SH入口：約730℃
	3次SH出口：約650℃
灰除去装置	蒸気式ストブロー

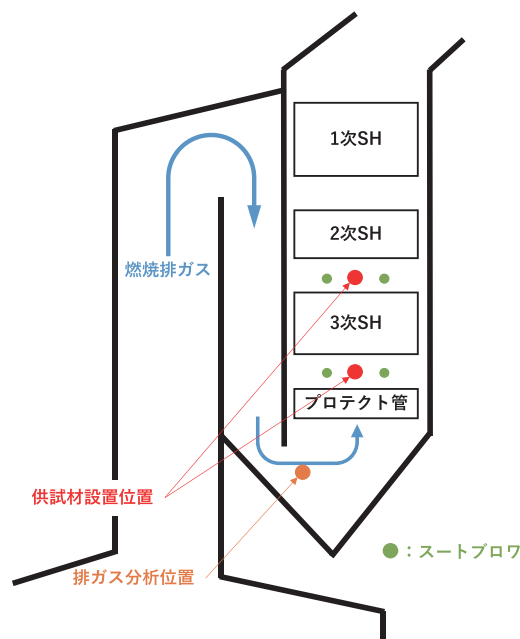


図1 ボイラー断面概略図

あった。

また、供試材は図1に示すように蒸気式ストブローの噴霧蒸気が管に与える影響も考慮して噴霧蒸気の影響を受ける位置に設置した。

2.1 供試材

供試材は25Cr-20Ni オーステナイト系ステンレス鋼管（以下、SUS310S系鋼管と記す）と、SUS310S系鋼管に高Cr,Mo系Ni基材料を肉盛溶接した鋼管（以下、高Cr,Mo系Ni基肉盛溶接管と記す）の2種類を設置した。

2.2 試験方法

図2に試験装置の概略図を示す。装置は供試材、流量計、調整弁、温調ファン、熱電対、制御盤、配管類より構成されている。

図3に供試材の概略図、図4に実際の供試材の外観を示す。

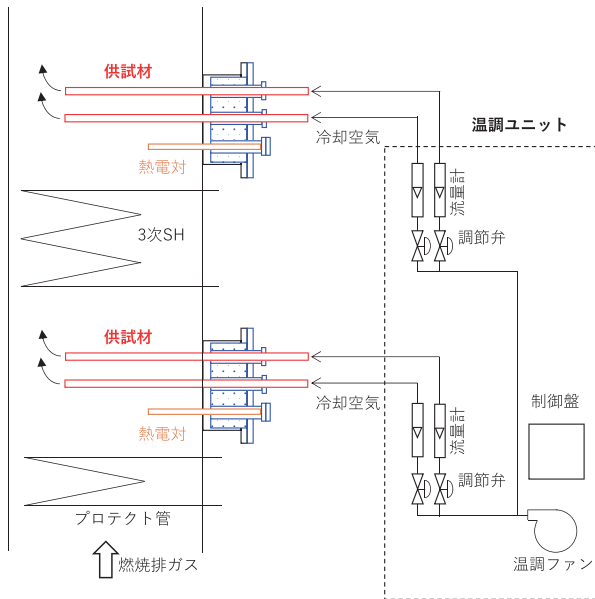


図2 試験装置概略図

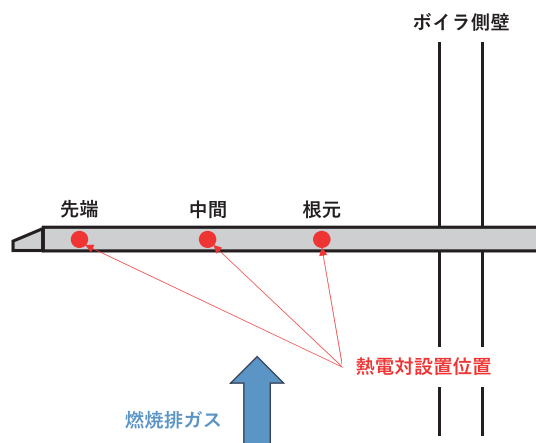


図3 供試材概略図



図4 供試材外観

供試材の管内側の先端、中間、根元の3点にK型熱電対を取付けて常時管内壁温度を測定し、最も高温となる管先端の熱電対の温度が一定となるよう

に冷却空気量を調節弁で制御した。また、排ガス温度は、供試材近傍に設置したK型熱電対で連続測定した。

上記の試験設備にて5か月間のばく露を実施し、供試材のばく露前後の肉厚を比較し減肉量を算出した。

また、腐食雰囲気を確認するため、3次SH入口部の排ガスを適時採取して組成分析をおこなうとともに、供試材表面に付着した灰（以下、付着灰と記す）についても、腐食への影響を確認するため、管表面に近い供試材側と管表面から遠い排ガス側に分けてそれぞれ採取し、蛍光X線元素分析法による組成分析と熱重量・示差熱分析をおこなった。加えて、管内壁温度の違いによる付着灰の性状の違いを調べるため、供試材側の付着灰は供試材の先端付近と中間付近の灰を採取し、分析をおこなった。

3. 試験結果

3.1 管内壁温度

図5に、3次SH入口部、出口部に設置した供試材の管内壁温度を示す。図示した期間は試験期間内の10日間の抜粋である。

冷却空気量の自動制御により、3次SH入口部、出口部ともにほぼ目標とした管内壁温度に制御することができた。図中に見られる短周期の温度変化はストブロー（2回/日の運転）の影響である。

3.2 排ガスの組成

排ガスは、図1に示すプロテクト管下部の排ガス分析位置の管台から採取し、HCl、SO_x、H₂O、O₂濃度を分析した。HClおよびSO_xはイオンクロマトグラフ法で分析した。結果を表2に示す。

2回の分析でHClが340、250 volppm-dry、SO_xが0.4、1.2 volppm-dry（いずれも酸素12%換算前の生値）であった。既報では4回の分析でHClが370~610 volppm-dry、SO_xが1.0 volppm-dry未満であり、HClについては既報よりも低下している傾向が見られた。

3.3 付着灰の性状

3次SH入口部（排ガス温度約730℃）と3次SH出口部（排ガス温度約650℃）に設置した供試材表面

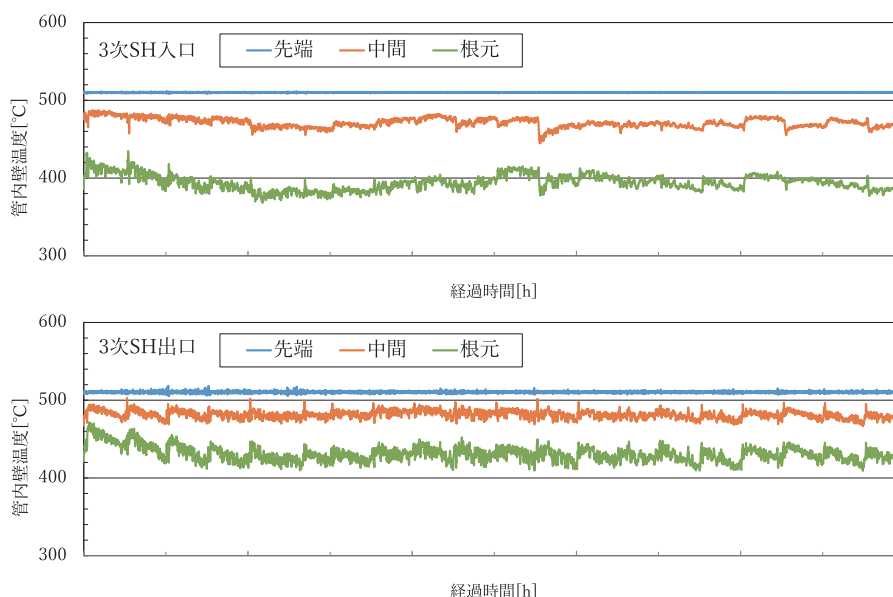


図5 3次SH入口，出口部の管内壁温度

表2 排ガス分析結果

		1回目	2回目
O ₂	vol%-dry	5.4	4.7
H ₂ O	vol%	21.3	17.7
HCl	volppm-dry	340	250
HCl (酸素12%換算)	volppm-dry	190	130
SO _x	volppm-dry	0.4	1.2
SO _x (酸素12%換算)	volppm-dry	0.2	0.6

表3 付着灰の組成分析結果 (mass%)

	3次SH入口側			3次SH出口側		
	供試材側		排ガス側	供試材側		排ガス側
	先端	中間		先端	中間	
O	28.5	10.4	31.6	5.6	19.1	28.3
Ca	28.0	23.2	28.6	23.9	29.2	27.6
Si	3.2	1.1	3.9	0.4	2.2	3.0
Al	2.8	0.9	3.4	0.2	2.0	2.5
Cl	16.9	40.1	13.8	48.5	26.8	18.4
S	4.4	1.7	4.3	1.1	2.7	3.6
Na	5.1	4.5	3.5	1.5	4.3	5.8
K	4.7	14.6	3.7	16.2	8.4	3.9
P	0.7	0.2	0.8	0.1	0.5	0.6
Mg	1.1	0.4	1.3	0.1	0.7	1.1
Ti	1.3	0.6	1.4	0.2	1.2	1.3
Cu	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1
Fe	0.9	0.5	1.1	0.5	1.0	0.9
Zn	0.7	0.5	0.8	0.6	0.8	0.7

の付着灰を採取し，分析をおこなった。蛍光X線による組成分析結果を表3に示す。

各組成の割合は，Cl: 13.8~48.5%，S: 1.1~4.4%，Na,K: 合計7.2~19.1%，Zn: 1%未満であり，既報

と同様に以下の傾向が見られた。

- ・供試材側と排ガス側で付着灰の成分を比較すると，供試材側の方がK，Cl濃度が高い傾向にあった。
- ・ClとNa，Caの割合に相関はなかった。
- ・Znは1%以下であり，1%前後であった既報と同程度であった。

既報と異なる傾向としては以下の傾向が見られた。

- ・既報のサンプルのCl濃度が14~24%であったのに対して，今回は40%を超える非常に高いCl濃度のサンプルが存在した。

3次SH入口部と出口部では，排ガス温度で約80℃の差があったが，灰の組成には大きな違いはなかった。

また，組成分析と同じ灰サンプルにおいて熱重量・示差熱分析をおこなった結果では，すべての灰において520~550℃の温度域に吸熱ピークが見られた。これは既報の吸熱ピークの範囲である530~560℃とほぼ同等である。また，本試験において一部の灰では600℃台の温度域にて重量減少をとまわらない吸熱ピーク，800℃超の温度域にて重量減少をとまわらぬ吸熱ピークが見られた。

3.4 減肉傾向

供試材のばく露前とばく露後の肉厚を測定し，減

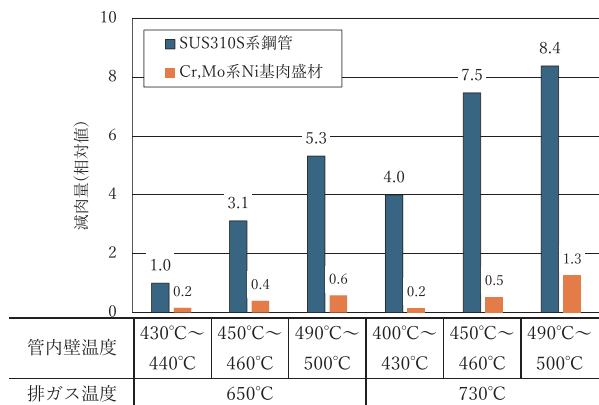


図6 SUS310S系鋼管と高Cr, Mo系Ni基肉盛溶接管の管内壁温度、排ガス温度による減肉量(相対値)

肉傾向を評価した。図6に供試材の各位置の管内壁温度および排ガス温度による減肉量の比較を示す。

排ガス温度 650°C・管内壁温度 430°C~440°CのSUS310S系鋼管の減肉量を1.0として、そのほかの温度条件でばく露した供試材の減肉量(相対値)を示した。なお、管内壁温度については各供試材で若干差があったため、温度に幅を持たせて記載している。

まずSUS310S系鋼管に注目すると、既報と同様に、管内壁温度に依存して減肉量が増加する傾向が確認された。

本試験ではこれに加えて、排ガス温度に依存して減肉量が増加する傾向も確認された。排ガス温度 650°Cと730°Cの減肉量を比較すると、管内壁温度 450°C~460°C域では約2.4倍、管内壁温度 490°C~500°C域では約1.6倍の差があった。

次に高Cr, Mo系Ni基肉盛溶接管に注目する。SUS310S系鋼管と比較して、各供試材のすべてのばく露条件において、減肉量が抑えられていることを確認した。例えば、排ガス温度 650°C・管内壁温度 490°C~500°C域の条件では、高Cr, Mo系Ni基肉盛溶接管の減肉量はSUS310S系鋼管の約0.1倍であった。

4. 考 察

まず、付着灰の分析結果に関する考察を述べる。川原らの発表論文によると、共晶塩に含まれる塩素濃度が高くなるほど灰の融点が低下する傾向が報告されており⁴⁾、本試験の付着灰分析でCl濃度が40%を超えるサンプルにおいては灰の融点の低下

が想定された。しかし、示差熱分析の結果では、すべての灰において520~550°Cの温度域に吸熱ピークが見られ、Cl濃度に関わらず吸熱ピークの温度は同程度であった。したがって、灰の性状から見た溶融塩腐食の生じやすさについては既報と大きく変わらないと考えられる。また、600°C台の温度域の吸熱ピークに関しては、重量減少をとまなわないことからアルカリ金属(Na, K)の塩化物の融点であり、一方で800°C超の温度域の吸熱ピークは、重量減少をとまなうことから塩化物の揮発によるものと考えられる。600°C台、800°C台いずれの吸熱ピークも管内壁温度の制御域とは異なる温度域であるため、本試験での腐食には影響していないものと推察される。なお、200~400°C台に吸熱ピークがなかったことから、Zn, Pb等の重金属に起因する溶融塩腐食はなかったと推察される。

次に減肉傾向に関する考察を述べる。

SUS310S系鋼管では、既報と同様に、管内壁温度に依存して減肉量が増加する傾向が見られたが、その要因として、灰付着速度の増加が考えられる。川原の発表論文によると、管表面温度の上昇により灰成分の一部が溶融し、その結果、固体粒子の接着・捕捉が促進され、灰付着速度が増加し、それによって、腐食性物質の供給速度が増加することで、腐食速度が高まるとされている⁵⁾。本試験では、灰の付着速度を直接確認することはできなかったものの、管内壁温度の上昇にとまなない減肉量が増加する傾向は認められ、灰付着速度の増加が影響している可能性が示唆される。

本試験における先端の管内壁温度は既報の450°Cよりも高い510°Cで制御していた。そのため、管表面温度が520°Cに近いと推測される管先端付近では、520°C付近に融点を持つ塩による溶融塩腐食が進行し、管内壁温度の上昇にとまなない加速度的に減肉量が増加する可能性も考えられた。しかし、SUS310S系鋼管の減肉傾向を見ると、排ガス温度約650°Cにおいて、管内壁温度430°C~440°C域から管内壁温度450°C~460°C域で減肉量が約3.1倍の増加、管内壁温度450°C~460°C域から管内壁温度490°C~500°C域では約1.7倍の増加となり、減肉量は増加してはいるものの、加速度的に増加しているとはまな言えず、今回の付着灰における溶融塩腐食に切り替わる温度域は、試験温度域よりもさらに高い温

度域にあると推察される。

本試験では排ガス温度に依存して減肉量が増加する傾向についても確認された。水野らの発表論文によると、SUS310S系鋼管で同じ試料温度において、雰囲気温度の上昇にともなう腐食量の増大が確認されている⁶⁾ことから、本試験においても排ガスと管表面との間の温度差が過熱管の減肉量の増大に影響を与えている可能性が示唆される。

SUS310S系鋼管と高Cr,Mo系Ni基肉盛溶接管の比較では、すべての温度条件において高Cr,Mo基Ni型肉盛溶接管の減肉量の方が大幅に小さい結果となった。高Cr,Mo系Ni基合金については、既に450℃以上の蒸気条件において優れた耐食性を示すことが確認されており⁷⁾、本試験においても高Cr,Mo系Ni基合金の優れた耐食性を実機において確認できる結果となった。

5. ま と め

本試験において、以下の結果を得た。

- 1) 既報同様、SUS310S系鋼管において、管内壁温度に依存して減肉量が増加する傾向が確認された。
- 2) 同じ管内壁温度において、排ガス温度に依存して減肉量が増加する傾向も確認された。SUS310S系鋼管における排ガス温度650℃と730℃の減肉量を比較すると、管内壁温度450℃～460℃域では約2.4倍、管内壁温度490℃～500℃域では約1.6倍の差があった。
- 3) 高Cr,Mo基Ni型肉盛溶接管とSUS310S系鋼管の減肉量を比較した結果、排ガス温度650℃以上・管内壁温度450℃～460℃域、490℃～500℃域いずれの条件においても、肉盛溶接管SUS310S系鋼管に比べて高Cr,Mo基Ni型肉盛溶接管の減肉量の方が大幅に小さい結果となった。

当社では、現在本稿で報告した試験に続いて新たな供試材を設置した試験を実施している。

また、今回発表した過熱管の減肉量の測定による定量的な評価に加え、腐食を定性的に評価する断面解析等も進めており、過熱管の腐食速度予測および腐食機構に関する知見のさらなる拡充を進め、廃棄物発電ボイラーの高温高压化、および長寿命化を追求していく所存である。

謝 辞

本試験の実施にあたり、多大なるご協力を頂きました自治体様をはじめ、関係各位に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 中本明信，巽 圭司，高橋広光，柴田 清：廃棄物発電ボイラーの高温蒸気化への取り組み，タクマ技報，Vol. 26, No. 1, pp. 44-52 (2018)
- 2) 地球温暖化対策推進本部：地球温暖化対策推進大綱，2002年3月19日
<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/taiko/all.pdf> (2026年3月6日)
- 3) 吉葉正行：先進型廃棄物発電プラント環境における耐熱合金システムの複合型高温腐食損傷と対策，日本金属学会会報「まてりあ」，Vol. 38, No. 3, pp. 203-211 (1999)
- 4) 川原雄三，吉良雅治：廃棄物燃焼環境における合金の高温腐食挙動に及ぼす熔融燃焼灰の物理的性質の影響，腐食防食学会「材料と環境」，Vol. 46, No. 1, pp. 8-15 (1997)
- 5) 川原雄三：廃棄物燃焼環境における腐食性燃焼灰付着の電気化学的 in-situ 計測，日本金属学会誌，Vol. 66, No. 6, pp. 583-589 (2002)
- 6) 水野真悟，林 重成，古垣孝志：模擬灰埋没試験におけるオーステナイト系耐熱鋼の高温腐食に及ぼす灰中の温度勾配の影響，日本金属学会2021年秋期講演（第169回）大会，p. 99 (2021)
- 7) 川原雄三，折田寛彦，高橋和義，中川裕二：高効率廃棄物発電ボイラ用新耐食合金管の実証試験，日本鉄鋼協会「鉄と鋼」，Vol. 87, No. 8, pp. 24-31 (2001)