

流動層中のステンレス鋼の摩耗特性の評価

園家 啓嗣*・島崎 宗治*²

Assessment about Erosion Properties of the Stainless Steels in Fluidized Bed

Keiji SONOYA and Muneharu SHIMAZAKI

Synopsis : The erosion tests were carried out in the MITI SUS310J1TB material used to be utility boiler, and erosion properties were considered by simulating the temperature gradient profile between bed material and specimen surface. The results obtained are as follows.

- (1) The erosion tester that enables temperature gradient between bed material and specimen surface was developed.
- (2) There is a maximum erosion wastage at intermediate temperature in both case of the specimen with temperature gradient and the one without temperature gradient.
- (3) Cooling method change the erosion wastage curve (erosion wastage vs temperature) and lowers the peak temperature at maximum wastage.

Key words : erosion tester ; erosion properties ; temperature gradient ; MITI SUS310J1TB ; cooling effect ; fluidized bed.

1. 緒言

従来、わが国における石炭専焼火力発電プロセスの主流は微粉炭燃焼ボイラであった。しかしながら、蒸気温度等、さまざまな規制を受ける中での稼働のため、微粉炭燃焼ボイラでの効率は最大でも40%程度のものであった。また、地球環境の問題でも二酸化炭素の発生等の課題があった。上記課題の対策の一つとして、熱効率の向上によって二酸化炭素を削減することが期待されており、例えば、加圧流動層燃焼ボイラが研究開発されている¹⁻⁴⁾。

燃焼ボイラの中で主要耐圧部の寿命を左右する重要な部材の一つとして、層内管(流動層内に配置される伝熱管)材料がある。層内管は、長期にわたる高温条件での運転により、流動層内でベッド材に含まれるSiO₂、Al₂O₃などの硬く細かい粒子群の衝突によるエロージョン損傷が問題となる⁵⁾。しかし、このエロージョン現象のメカニズムは、まだ未明な点が多いのが現状である。

これまで、流動層式摩耗試験(以下、摩耗試験と略す)は試験機の構造上、試験片表面温度とベッド材温度を等温にして摩耗試験を行っていた⁶⁾。そこで、より実機に近い状態を模擬するため、試験片とベッド材との間に温度勾配をつけることができる試験装置を開発した。

本研究では、開発した試験装置を用いて、代表的なボイラ部材である火SUS310J1TBについて摩耗試験を行い、実験室的に実機を模擬した摩耗特性を評価した。

2. 流動層式摩耗試験装置の開発

本試験で開発した流動層式摩耗試験装置(以下、摩耗試験装置と略す)の概略図をFig. 1に示す。摩耗試験装置は、大きく分別して回転軸シャフトを含んだ駆動系と、ベッド材を底部の加圧空気により流動させる(流動層)炉体から成り立っている。試験片は回転軸シャフトの下部両端の水平方

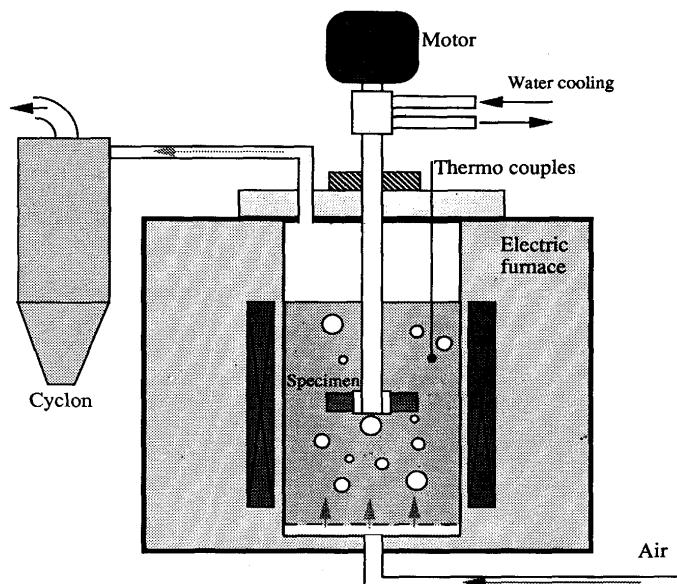


Fig. 1. Schematic diagram of fluidized-bed erosion tester.

平成9年4月11日受付 平成9年6月24日受理 (Received on Apr. 11, 1997; Accepted on June 24, 1997)

* 石川島播磨重工業(株)技術研究所 (Research Institute, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., 3-1-15, Toyosu Koto-ku Tokyo 135)

* 2 (株)アミル技術研究開発部 (Technical Research and Development Department, AMIL Co., Ltd.)

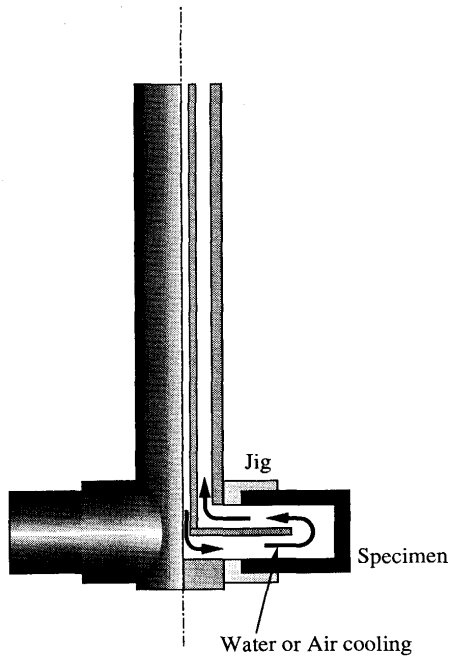


Fig. 2. Schematic drawing of cooled rotor.

向にそれぞれ一つずつ取り付けてあり、シャフトを流動層内で回転させることによりベッド材粒子が試験片に衝突するようになっている⁷⁾。新しく開発した回転軸シャフトの断面図をFig. 2に示す。この回転軸シャフトは、シャフト内部に水あるいは空気を供給することにより、ベッド材と試験片の間に可変的に温度勾配をつけることができる構造になっている。

3. 試験方法

3.1 供試材および試験片

供試材は、火力発電ボイラ用材料である火SUS310J1TBで、外径36.5mm、内径27.8mmの伝熱管である。その化学組成をTable. 1に示す。この供試材からFig. 3に示した形状に機械加工したものを試験片として用いた。また、炉内で流動させるベッド材には、 Al_2O_3 (平均粒径: $190\mu m$, 純度99.9%)、鹿島シリカサンド (平均粒径: $200\mu m$, 化学組成: 85.50% SiO_2 , 4.27% Al_2O_3 , 1.05% FeO , 0.01% MgO , 0.37% NaO)を用いた。

3.2 摩耗試験および評価

試験は、ベッド材温度を573K~773K、試験片の表面温度を383K~732Kまで変化させて行った。試験片表面温度は、熱電対(PR線)を試験片表面にスポット溶接して測定した。試験片は、流動層内を回転速度2.5m/sで20時間回転させた。なお、試験雰囲気は大気である。

評価は、摩耗試験後の試験片について、真円度測定装置により摩耗量を測定し、走査型電子顕微鏡(SEM)により表面および断面の摩耗形態を、電子プローブ微小部分分析法(EPMA)により表面皮膜の性状を調べた。

Table 1. Chemical composition of steel used. (mass%)

steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb	N
MITI SUS310J1TB	0.05	0.38	1.24	0.015	0.001	20.06	25.18	0.46	0.23

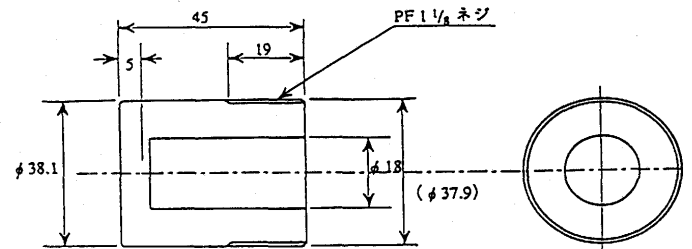


Fig. 3. Schematic diagram of specimen.

4. 試験結果および考察

4.1 摩耗形態

Fig. 4に摩耗試験後の試験片の表面形態を示す。半円周上の斜線部分で顕著な摩耗が生じている。これは、試験時の回転方向に対して正面となる部所に対応している。その摩耗領域では、試験片の外端に向かうほど摩耗幅は広くなり、摩耗量も増加する傾向⁸⁾が認められた。さらに、試験片上端からの角度を θ とした場合(Fig. 5参照)のベッド材粒子の衝突角度と摩耗量の関係をFig. 6に示す。図より、ベッド材の粒子形状、種類にかかわらず、 $\theta=30^\circ$ 付近で摩耗量は最大となることが明らかとなった。

摩耗量と衝突角度の関係については、G.P.Tillyらによって下記の(1)式のように提唱されている⁹⁾。本研究の摩耗試験結果においても摩耗量と衝突角度の関係は、(1)式にほぼあてはまることが確認された。

$$E(\theta) = Kf(\theta)V(\theta, U)^n \sin \theta (0^\circ < \theta < 90^\circ) \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 E は摩耗速度、 K は材料の密度と粒子の流動に依存する係数、 V は局所的な粒子の衝突速度、 n は管材の摩耗に対する速度指数、 θ は粒子衝突角度、 U は流動媒体中を試験片が通過する速度である。

4.2 ベッド材温度の影響

ベッド材温度を573K、773Kで摩耗試験をした場合の試験片表面温度と摩耗量の関係をFig. 7に示す。ベッド材温度およびベッド材の種類にかかわらず、中間温度付近で摩耗量は極大となる傾向を示していることがわかる。ベッド材温度が573Kの時は、試験片表面温度が470K付近で摩耗量が最大となる。一方、ベッド材温度が773Kの時は、摩耗量が最大となる温度がベッド材温度が573Kの時に比べ、高温側に約110Kシフトすることがわかった。

Fig. 8は試験片表面温度と摩耗量の関係を模式的に示したものである。摩耗形態の違いにより、温度域は領域I、領

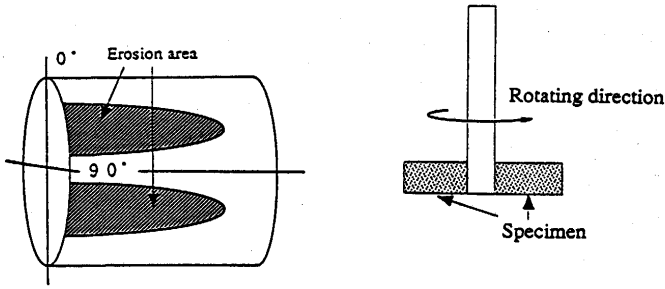


Fig. 4. Schematic diagram illustrating the erosion morphology in the surface of specimen.

領域IIに区分できる。領域Iは、温度上昇に伴って摩耗量が増加しており、ベッド材粒子による一般的な母材の摩耗現象であると考えられる¹⁰⁾。一方、領域IIは、温度上昇に伴って摩耗量が減少する傾向にあるが、これは保護的な酸化スケールの形成およびベッド材粒子の付着が起因しているものと考えられる¹¹⁻¹³⁾。

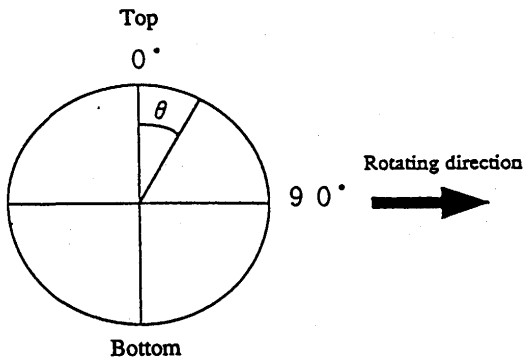


Fig. 5. Description of the apparent impact angle θ on the test specimen.

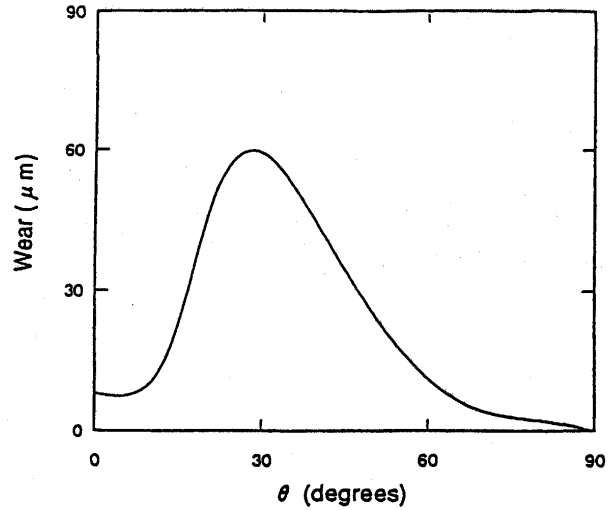


Fig. 6. The relation between erosion wastage and apparent impact angle of MITI SUS310J1TB.

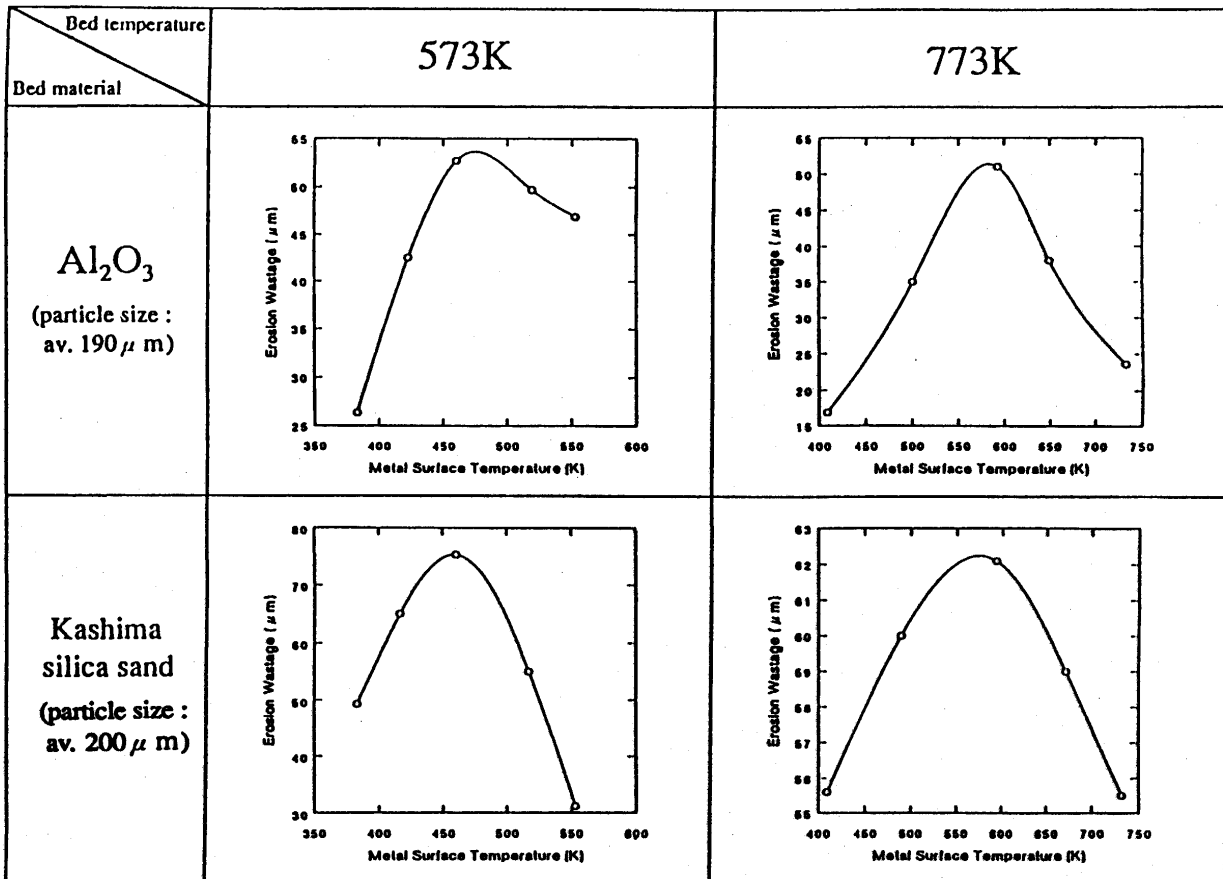


Fig. 7. Schematic diagram for the relation between erosion wastage and metal surface temperature of MITI SUS310J1TB on two kinds of bed temperatures for impact velocity at 2.5 ms⁻¹.

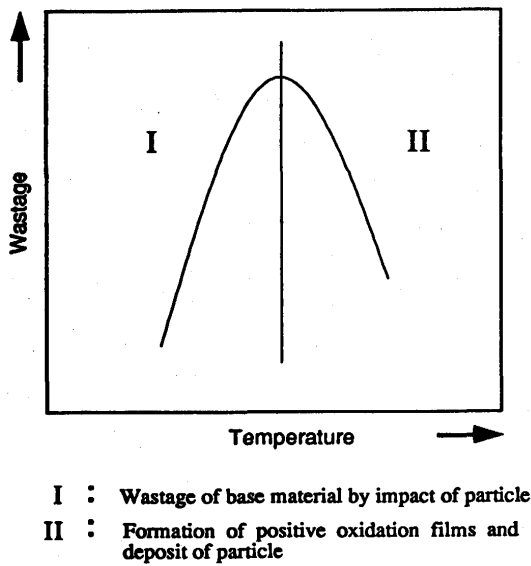


Fig. 8. Schematic diagram of the relation between erosion wastage and metal surface temperature.

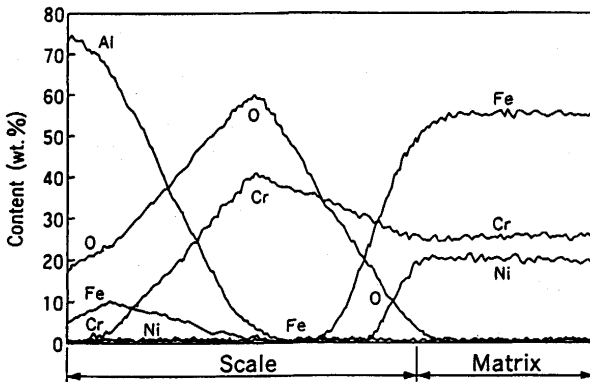


Fig. 9. EPMA results of erosion area on the tested specimen (MITI SUS310J1TB).

摩耗試験後の試験片表面(摩耗部分)のEPMAによる分析結果をFig. 9に示す。試験片表面に形成されているスケールの外層にはAl, Feが検出され、内層にはCr, Oが認められた。このことより、酸化スケールの形態はFig.10に示すごとく、外層にはベッド材を巻き込んだ硬いFe₂O₃が存在し、内層にはCr₃O₄等のクロム酸化物が形成されているものと推定される。

4・3 ベッド材粒子の影響

ベッド材温度773Kで摩耗試験を行った後の試験片表面温度と摩耗量の関係をFig.11に示す。ベッド材にAl₂O₃を用いた場合は鹿島シリカサンドを用いた場合に比べ、摩耗量が10~39μm減少している。また、Al₂O₃を用いた場合は、試験片表面温度が低温および高温側での摩耗減少が鹿島シリカサンドに比べ大きかった。

摩耗試験後(ベッド材温度：773K)の試験片表面についてのSEM観察結果をFig.12に示す。両ベッド材を用いた試験片とも表面にはベッド材粒子の衝突によるくぼみが多数観

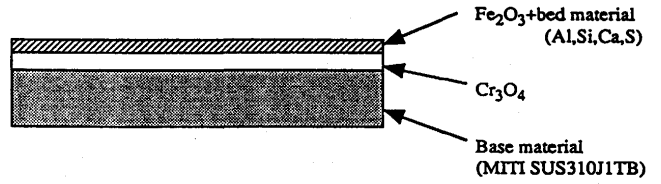


Fig. 10. Schematic diagram illustrating of oxidation and deposit films on the specimen surface.

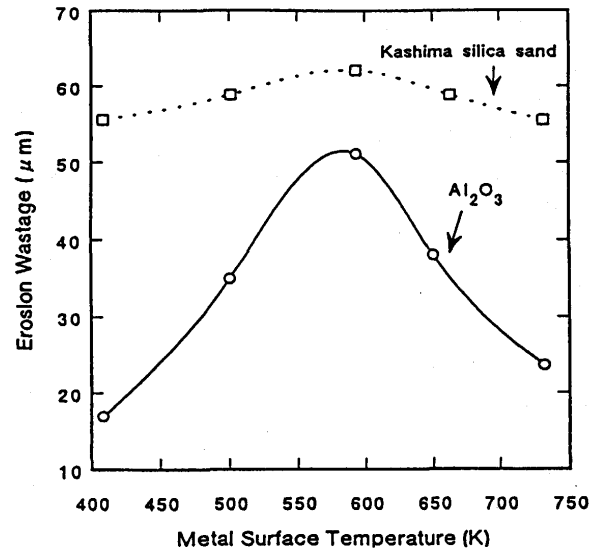


Fig. 11. Average erosion wastage against metal surface temperature at a bed temperature of 773K for an impact velocity at 2.5 ms⁻¹.

察された。また、ベッド材にAl₂O₃を用いた場合の試験片表面ではFig. 9からも明らかなようにAl₂O₃粒子の堆積が認められた。Fig.13にベッド材粒子の形状を示す。Al₂O₃粒子の方が鹿島シリカサンド粒子より全体的に角ばった形状であった。

一般的に、粉末のエロージョンに及ぼす主要な因子として、硬さ、粒子サイズ、粒子形状等があげられる。本摩耗試験に用いたAl₂O₃と鹿島シリカサンドを上記の因子について検討してみると、硬さについては、Al₂O₃がビッカース硬さ(HV)で約1000であるのに対し、鹿島シリカサンドはHV約600であり、Al₂O₃の方が硬い。粒子サイズについては、Al₂O₃が平均粒径190μm程度であるのに対し、鹿島シリカサンドの平均粒径は200μm程度であり、粒子サイズにはほとんど差がないと考えられる。粒子形状については、アスペクト比(短軸/長軸：b/l)であらわすとAl₂O₃が0.45、鹿島シリカサンドが0.77であり、アスペクト比が小さいAl₂O₃粒子の方が角ばった形状となる¹⁴⁾。

以上のことから判断すると、ベッド材にAl₂O₃を用いた方が摩耗量が大きくなると予想されるが、実測値ではFig.11に示すごとく、ベッド材に鹿島シリカサンドを用いた方が摩耗量は大きかった。これは、Al₂O₃の場合、粒子が試験片表面に衝突圧砕した際に粒子の試験片表面上への付着量が多

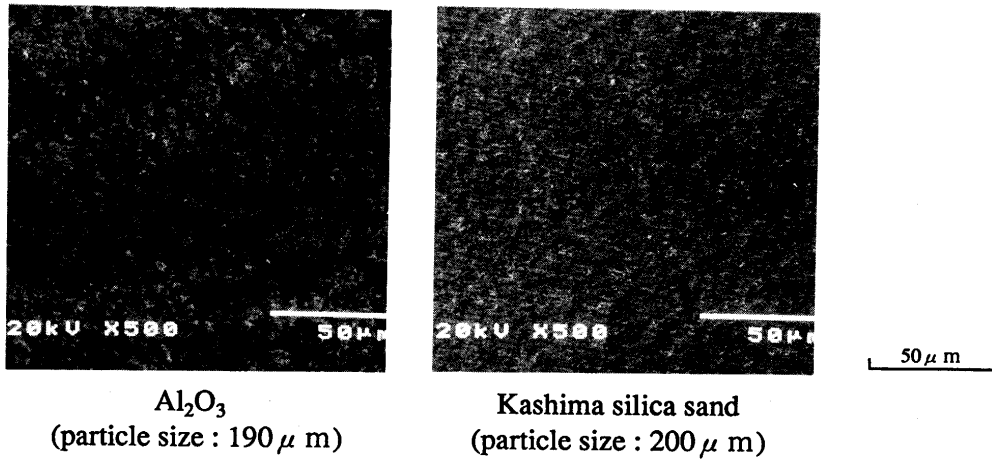


Fig. 12. Scanning electron micrographs of specimen surface after erosion test in the bed materials of Al_2O_3 and Kashima silica sand.

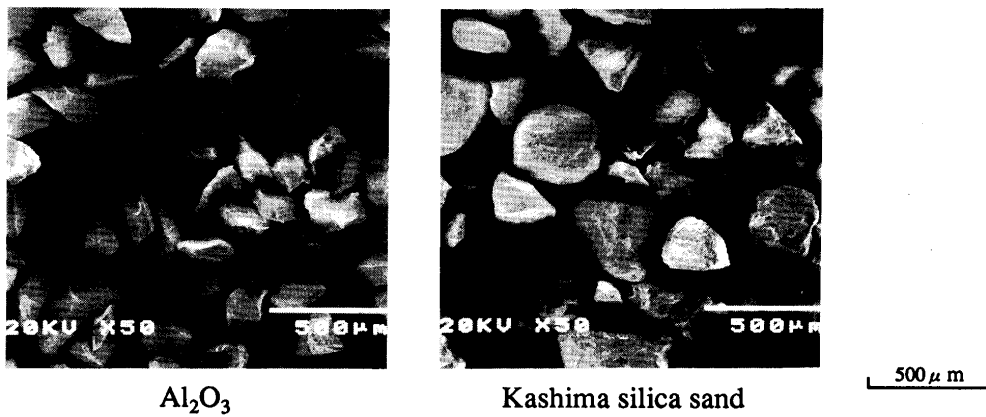


Fig. 13. Scanning electron micrographs of bed material particle.

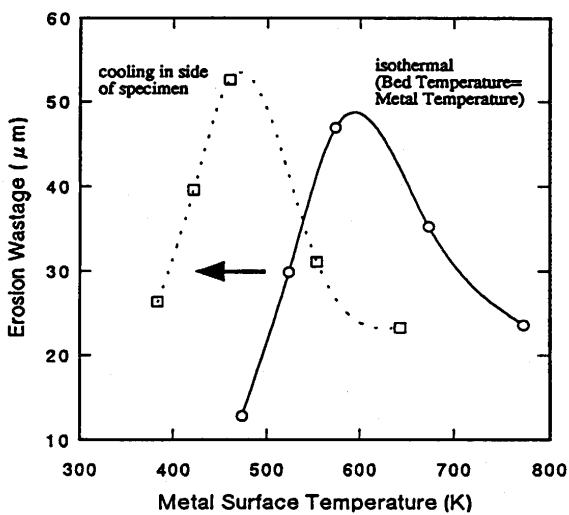


Fig. 14. Schematic diagram showing the effect of cooling on an isothermal temperature-wastage curve for the bed material of Al_2O_3 .

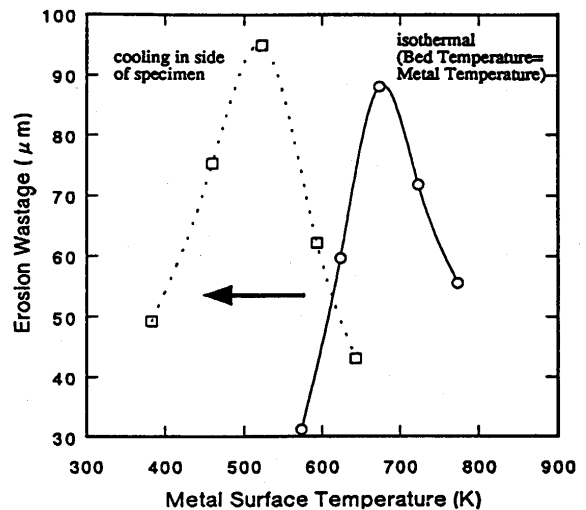


Fig. 15. Schematic diagram showing the effect of cooling on an isothermal temperature-wastage curve for the bed material of Kashima silica sand.

くなり、エロージョンに対して保護的な役割を果たすためであると考えられる^{10,15)}。 Al_2O_3 粒子の摩耗界面における付着量が多くなる理由としては、 Al_2O_3 が絶縁物質であるため、

摩耗界面上で摩擦電磁気現象^{16,17)}が生じ、その摩耗界面環境が Al_2O_3 粒子の摩耗界面上への付着を促すためであろう。一方、鹿島シリカサンド粒子は、導電体であるため摩擦電

磁気現象は微弱となり、粒子の付着量が少なくなると推定される。

4.4 試験片とベッド材との間に生じる温度勾配の影響

試験片内部を冷却して、ベッド材と試験片表面の間に温度勾配をつけた時の摩耗挙動の変化をFig.14, Fig.15に示す。Fig.14はベッド材に Al_2O_3 を用いた結果であるが、ベッド材温度と試験片温度が等温の時に600K付近で摩耗量が最大となっているのに対し、試験片の内部を冷却したものは470K付近で摩耗量が最大となり、そのピークが低温側に約170Kシフトすることが明らかになった。

Fig.15はベッド材に鹿島シリカサンドを用いた結果であり、等温の時は690K付近で摩耗量が最大となる。それに対し、試験片内部を冷却したものでは摩耗量が最大となる温度は520K付近であり、そのピークは Al_2O_3 の場合と同様に約170K低温側にシフトしていた¹¹⁾。

このように、両ベッド材とも摩耗量曲線のピークが低温側に170Kシフトする理由は、試験片とベッド材との間に温度勾配が生じたため、熱の移動が多くなり局部的な温度上昇が起こったため酸化スケールの形成やベッド材粒子の試験片表面に付着する量が増加したためであると推測される^{8,12)}。

5. 結言

火力発電ボイラ用材料である火SUS310J1TBについて、新しく開発した摩耗試験装置を用いて摩耗試験を行い、ベッド材と試験片表面に温度勾配を付けた場合の摩耗特性について実験的に評価し、以下の結論を得た。

(1) 試験片とベッド材との間に実機を模擬して温度勾配をつけることができる試験装置を開発した。

(2) 摩耗試験後の試験片において、試験片上端からの角度を θ とした場合、摩耗量は $\theta=30^\circ$ 付近で最大値を示す。

(3) ベッド材温度に関係なく、試験片表面温度が中間温度付近で摩耗量が極大となる傾向を示す。

(4) 試験片表面温度と摩耗量の関係を摩耗量の極大ピー

ク値を境にして低温側と高温側に分別した場合、低温側では、温度上昇に伴って摩耗量は増加するベッド材粒子による母材の摩耗現象が生じている。一方、高温側では、温度上昇に伴い摩耗量は減少する。これは、摩耗試験中に試験片表面に保護的な酸化スケールの形成およびベッド材粒子の付着が生じるためであると考えられる。

(5) ベッド材に Al_2O_3 を用いたものは鹿島シリカサンドより摩耗量が減少している。これは、試験片表面への Al_2O_3 粒子の付着量が多く保護的效果を果たすためと考えられる。

(6) 試験片内部を冷却し、ベッド材との間に温度勾配を付けた場合、摩耗量曲線の極大値は試験片表面温度とベッド材温度が等温のものよりも低温側へシフトすることを明らかにした。

文 献

- 1) 陳 勇, 岡島輝行, 森 滋勝: 日本エネルギー学会誌, **76** (1997), 29.
- 2) 園家啓嗣, 木原重光: 鉄と鋼, **83** (1997), 78.
- 3) 石本礼二, 小俣幸司, 下田博巳, 藤井 衛, 安藤 栄, 中村 忍, 古越博文, 中島邦浩: 石川島播磨技報, **31** (1992), 301.
- 4) 中森正治, 佐田哲郎, 兼平真吾: 耐熱金属材料第123委員会研究報告, **32** (1991), 383.
- 5) 菊地勝実, 馬木秀雄, 甲斐勝巳, 鈴木利昭, 水野智夫, 松田 豊, 千品裕嗣, 富松宏明, 中島玉雄: 石川島播磨技報, **35** (1996), 42.
- 6) J.A.Little, I.M.Hutchings and M.J.Entwisle: Proc. of 3rd Berkeley conf. on Elevated Temperature Corrosion-Erosion-Wear of Materials, California, ed. A.V. Levy, NACE, (1987), 324.
- 7) 園家啓嗣, 難波一夫, 木原重光: 石川島播磨技報, **36** (1996), 1.
- 8) P.M.Rogers, T.E.Howes, I.M.Hutchings and J.A.Little: Wear, **186-187** (1995), 306.
- 9) G.P.Tilly: Wear, **14** (1969), 63.
- 10) Alan V. Levy and Greg Hickey: Wear, **108** (1986), 61.
- 11) Alan V.Levy and Young-Fa Man: Wear, **131** (1989), 53.
- 12) T.E.Howes, P.M.Rogers, J.A.Little and I.M.Hutchings: Wear, **186-187** (1995), 316.
- 13) D.M.Rishel, F.S.Pettit and N.Birks: Corros. Sci., **35** (1993), 1007.
- 14) 橋本健次: 粉流体による摩耗, 産業技術センター編, 東京, (1974), 88.
- 15) S.Amada and K.Ichimura: J.Ceram. Soc. Jap., **105** (1997), 141.
- 16) 梅田一徳, 津谷裕子: セラミックス, **32** (1997), 4.
- 17) 中山景次: セラミックス, **32** (1997), 9.