

無煙炭だきボイラ用高性能 MRS チューブミルの開発

Development of High Performance MRS Tube Mill
for Anthracite-Fired Boilers

技術本部 吉田博久*¹ 山本次男*²
原動機事業本部 丸田得志*³
長崎造船所 木下正昭*⁴ 飯田豊*⁵

無煙炭だきボイラで使用されることが多いチューブミルは縦(たて)型ミルに比較し高微粉碎域での容量低下と動力増加が非常に大きいという欠点を有していた。本研究ではこの欠点を解消するために、ミル構造を最適化するとともに MRS (Mitsubishi Rotary Separator) を採用した低動力高性能チューブミルの開発に取り組み、3種類の無煙炭を含む5炭種について性能試験を実施した。結果は非常に良好で、従来型チューブミルに比較して粉碎容量と動力特性が大幅に向上し、縦型ミルと同レベルの高性能化に成功した。

Conventional tube mills often used in anthracite-fired boilers have such disadvantages as capacity decrease and power consumption increase at the region of highly fine grinding as compared with vertical roll mills. In this study to overcome these disadvantages the authors optimized the design of the mill configuration in order to develop a high performance tube mill with lower power consumption rate. Tube mill with the MRS (Mitsubishi Rotary Separator) was tested using different five kinds of coal including anthracite. The test results were completely satisfactory. The capacity and power consumption characteristics could be greatly improved in comparison with those of a conventional tube mill. They are comparable to the values of a vertical mill.

1. ま え が き

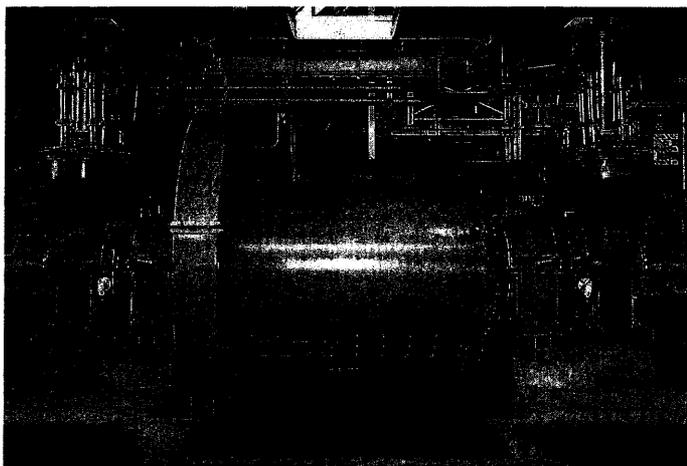
最近の石炭だきボイラでは、省エネ省スペースに優れる縦(たて)型ローラミルが使用される場合が多く、筆者らも高性能 MV (Mitsubishi Vertical) ミルを開発し⁽¹⁾⁽²⁾、ユーザに大変好評を博し多数の納入実績を有している。しかし、無煙炭粉碎の場合には依然としてチューブミルを使用することが多い。これは無煙炭の摩擦係数がれき青炭や褐炭に比較して著しく低く、ロールへの石炭のかみ込み性が悪いため縦型ミルでは粉碎容量不足となることに大きな原因がある⁽³⁾。チューブミルは衝撃型粉碎機であるために摩擦係数の低い無煙炭でも容量面での心配はないが、粉碎動力が縦型ローラミルよりも1.5~2倍も大きいという欠点がある。無煙炭は、揮発分が低く燃え難いため200メッシュパス

90%以上の粉碎が要求されるが、この高微粉碎域では動力増加の傾向が著しくなる。

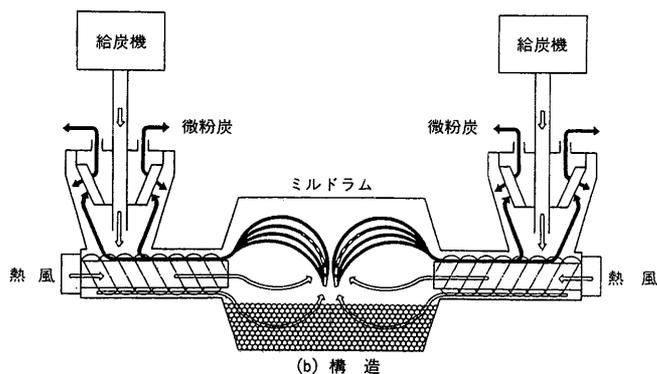
筆者らは、縦型ミル並みの動力で高微粉碎可能なチューブミルはできないものかと研究に取組んだ。最初にミル内のボールと石炭の挙動把握から始め、これに基づく構造の最適化を図り、縦型ミルで高い分級性能実績を持つMRS (Mitsubishi Rotary Separator) を採用することにより、低動力高分級性能のチューブミル開発に成功したので報告する。

2. 構造と分級原理

図1に外観と内部構造を示すが、左右完全対象構造とし両端にはMRS [図2(a)] を取付けている。原炭は両端から回転しているミルドラム内に供給されて粉碎される。粉碎炭は熱風により乾



(a) 外観



(b) 構造

図1 MRS チューブミル外観と構造
View and structure of MRS tube mill

*1 長崎研究所火力プラント研究推進室主務

*2 長崎研究所第二実験課

*3 原動機技術統括室ボイラ技術部ボイラ技術一課

*4 火力プラント設計部燃焼技術課長

*5 火力プラント設計部燃焼技術課

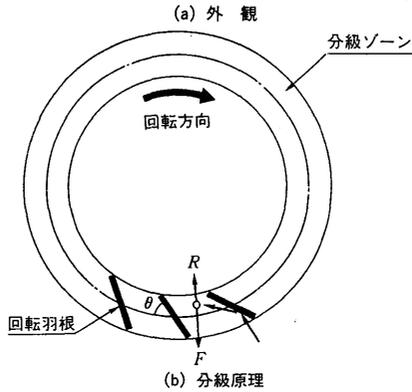
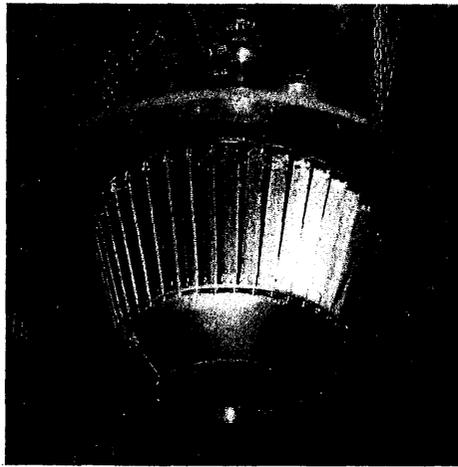


図2 MRS 外観と分級原理 分級原理は粒子に作用する遠心力 F と向心力 R のバランスに基づいている。
View and separating principle of MRS

燥されながら MRS に搬送され、ここで細粒子のみが回転羽根を通して微粉炭としてミル外へ搬送されボイラへ送られる。一方、MRS で分級された粗粒子は下部に落下して原炭と共にミルドラムに送られて再粉碎される。

MRS の分級原理は図 2(b) に示すように基本的には回転羽根による遠心力 F と搬送気流による向心力 R のバランスに基づいている。すなわち、分級ゾーン内の粒子で $F > R$ となる粗粒子は外へ飛ばされ、 $F < R$ となる細粒子は回転羽根を通過して粉碎製品となる。 F と R は式(1)、(2)で示され、式(2)の C_D は抵抗係数でレイノルズ数 Re の関数となる。 C_D がストークスの法則に従う場合には分級限界粒径 d_c は式(1)、(2)から式(3)で示される。式(3)から明らかのように d_c 、すなわち粉碎炭粒度は回転羽根周速度 V_θ を変化させることにより、任意に調整可能となる。

$$F = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho - \rho_a) \frac{V_\theta^2}{r} \quad (1)$$

$$R = C_D \frac{\pi}{4} d^2 \rho_a \frac{V_r^2}{2} \quad (2)$$

$$d_c = \frac{K}{V_\theta} \sqrt{\frac{18 \mu_a r V_r}{\rho - \rho_a}} \quad (3)$$

ここで、

d : 粒子直径 (m)

ρ, ρ_a : 粒子と空気の密度 (kg/m³)

V_θ : 回転羽根周速度 (m/s)

V_r : 空気の半径方向速度 (m/s)

r : 回転半径 (m)

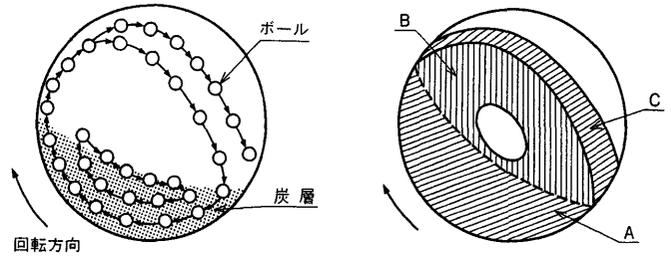


図3 チューブミル内のボールの運転パターン ボールはミル底部で転動するAと放物線運動するB、Cに大別される。
Ball pattern in tube mill

K : 実験定数

3. 試験結果

3.1 ボール挙動

ミル内のボール挙動を把握するために可視化チューブミルによる試験を実施した。その結果、図3に示すようにチューブミル内のボールは次の3種類の動きに大別されることが明らかになった。

転動ボール群A : 炭層中で転動しているボール

落下ボール群B : 炭層上に落下するボール

落下ボール群C : 炭層から外れ、ミル内壁に落下するボール

ボール群Aは摩砕に、ボール群Bは衝撃粉砕に寄与し、ボール群Cは粉砕に寄与していないと推定されたので以下に示すパラメータ α, β, γ を定義した。

$$\text{摩砕確率 } \alpha = \frac{\text{ボール群A}}{\text{ボール群(A+B+C)}}$$

$$\text{衝撃確率 } \beta = \frac{\text{ボール群B}}{\text{ボール群(A+B+C)}}$$

$$\text{空打確率 } \gamma = \frac{\text{ボール群C}}{\text{ボール群(A+B+C)}}$$

その後、実施した粉碎試験で上記 α, β, γ は粉碎特性をよく表す非常に重要なパラメータであることが分かった。例えば α が大きくなり過ぎると $10\mu\text{m}$ 以下の微粒生成割合が増加し、 γ の増加は動力増加と容量低下をもたらす⁽²⁾、平均粒径数 $10\mu\text{m}$ 程度の粉碎を行うチューブミルでは β を最大とするボール挙動が適切であることが明らかになった。また、 α を大きくすると超微粉砕には非常に効果的であり、100% 摩砕型の高性能超微粒ミル(三菱UFミル)の開発⁽⁴⁾⁽⁵⁾もこのボール挙動を利用したものである。

3.2 試験炭

今回の粉碎試験では3種類の無煙炭、1種類の半無煙炭、1種類のれき青炭を利用した。それらの基礎性状を表1に示す。なお、無煙炭A、B、Cは縦型ミルで粉碎したところ、前述したようにロールへのかみ込みが悪く、著しく容量不足を招いた炭種である。

表1 試験炭基礎性状
Test coal properties

性状	炭種	無煙炭 A	無煙炭 B	無煙炭 C	半無煙炭 D	れき青炭 E
粉碎性指数 HGI(-)		50.8	51.4	67.4	96.7	55.0
内部摩擦係数比 (-)		0.78	0.65	0.73	0.76	1.0
固有水分 (%)		2.2	2.0	2.7	1.6	3.5
固定炭素 (%)		87.0	79.0	54.9	72.6	51.3
揮発分 (%)		6.0	5.2	8.6	15.4	34.0

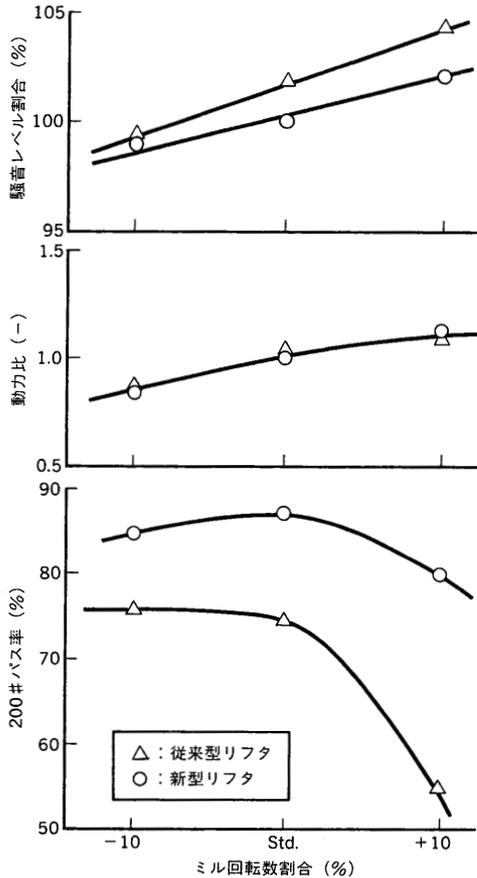


図4 ミル回転数とリフタの影響 ミル回転数を増減させたときの性能変化を示す図。高い回転数は良くない。
Affects of mill drum speed and lifter height

3.3 試験ミル

下記に示す3種類のミルにより性能比較試験を実施した。ミルはサイズの影響をなくするために同一規模とした。

MRS チューブミル：今回開発のチューブミル

従来型チューブミル：サイクロン型分級機を取付けたチューブミル

MV ミル：MRS 内蔵の縦型ローラミル

3.4 試験結果及び考察

3.4.1 ミル回転数とリフタの影響

3.1節で述べたようにボール挙動はチューブミル性能に対する大きな影響因子であり、そのボール挙動はミル回転数とボールをかき上げるリフタの形状（特に高さ）に大きく左右されるために、最初に本試験を実施した。結果を図4に示すが、ミル回転数の増加とともに騒音レベルと動力は増加し、逆に微粉度（200メッシュパス率）は減少した。特に高さの高い従来型リフタの場合にはこの傾向が強く、通常回転数より10%回転数を高くすると微粉度が大きく低下した。これはボールが跳ね上り過ぎて3.1節で示した空打確率が大きくなったためと推定され、実際に騒音レベルも最大となった。以上により、リフタは適正な形状にするとともにミル回転数は標準値からその-10%域が適正と判断された。

3.4.2 MRSの分級性能

MRS チューブミルとサイクロン型分級機を取付けた従来型ミルとの分級性能比較試験結果を図5に示す。これから明らかなように同一200メッシュパス率で比較するとMRS チューブミルの100メッシュ残率は従来型ミルの1/3以下に低減しており、非常

炭種	チューブミル	
	従来型	MRS型
れき青炭 E	○	●
無煙炭 A	△	▲
無煙炭 B		■
無煙炭 C		◆
半無煙炭 D		◇

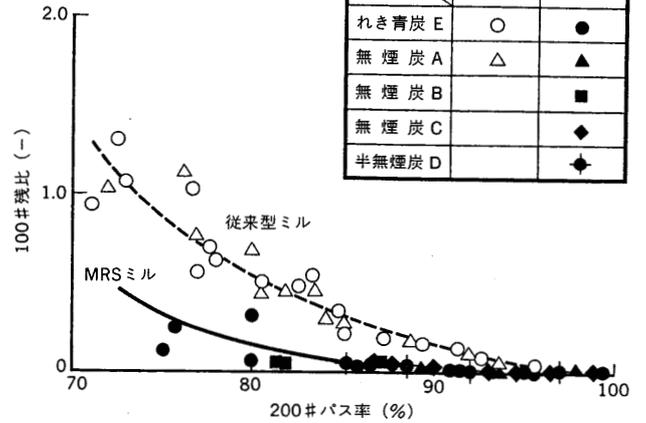


図5 200 #パス率と100 #残率の関係 今回開発のMRS型ミルと従来ミルとの粗粒（100 #残率）に対する分級性能を示す。
Fineness characteristics

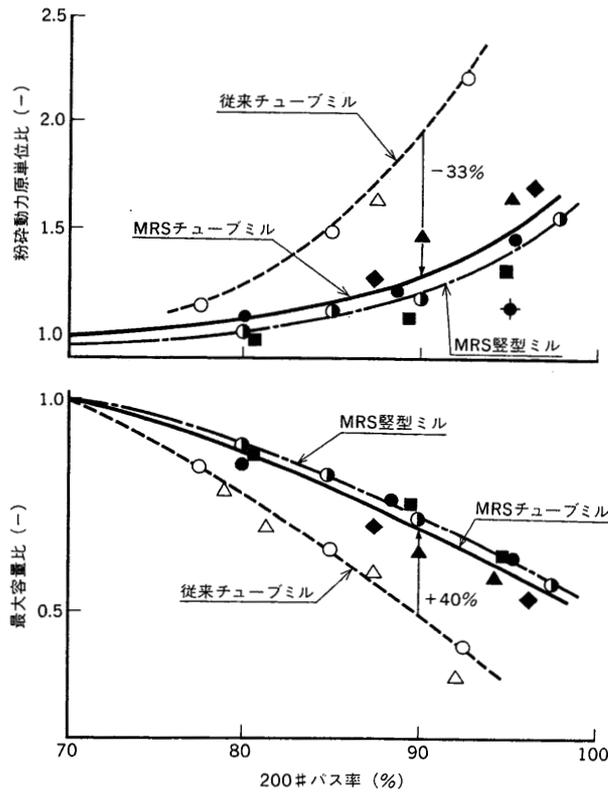


図6 容量と動力の特性 従来型チューブミルに対してMRS型チューブミルの容量と動力特性が大幅に向上し、またMRS縦型ミルとほとんど同等性能となったことを示す。
Characteristics of capacity and power consumption

に高い分級効率（粗粒子カット効率）を有していることが分かる。なお、この100メッシュ残率はボイラの燃焼性、特に灰中未燃分の重要影響因子であり、低いほど燃焼性が向上する。またMRSは粒度調整が容易であり、MRS回転数を変化させることにより、200メッシュパス率を通常粉碎の80%から高微粉碎の100%まで何ら問題なく調整可能である。

3.4.3 容量と動力特性

はじめに述べたように動力原単位 [(kW・h)/t] が高く、高微粉碎域で容量低下が大きいことがチューブミルの大きな欠点であった。実際に図6に示すように200メッシュパス率を70%から

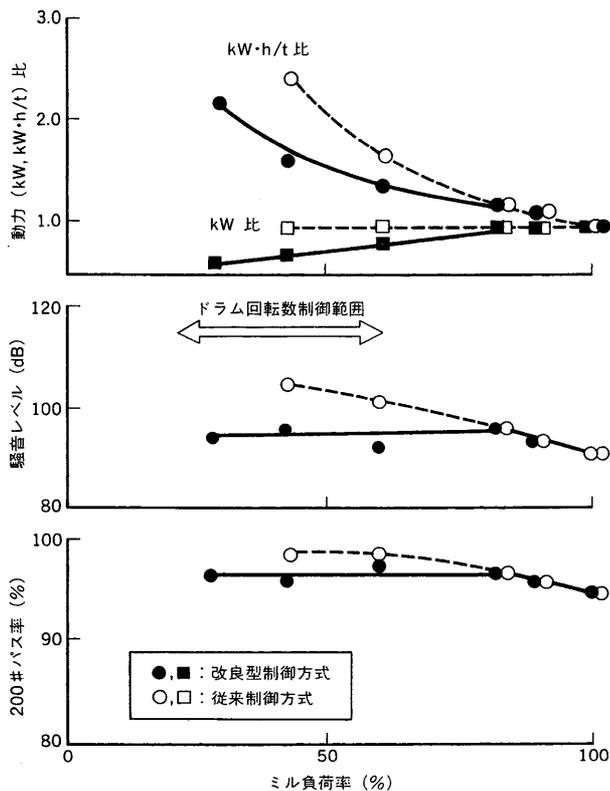


図7 改良型制御方式 MRS チューブミルのターンダウン特性
ドラム回転数制御方式によりターンダウン特性が格段に向上したことを示す。
Turn down characteristics of MRS tube mill with advanced control system

90%に増加させると従来型チューブミルでは動力原単位が約2倍に増加し、最大容量は約1/2に低下している。

これに対してMRSチューブミルは200メッシュパス率90%と比較すると従来型ミルよりも動力原単位が33%低減し、最大容量が40%増加することが確認された。この容量と動力特性の大幅な向上はMRSの高分級効率により容量低下と動力増加の原因となる必要以上の過粉碎（微粒子の生成増加）を防止して循環量が低減できたため実現できたものと推定している。その結果、MRSチューブミルは図6に示すように省動力型のMRS 縦型ミル（MVミル）とほとんど同等の優れた容量と動力特性を持つことが明らかになった。

3.4.4 ターンダウン特性

チューブミルは低負荷運転時に動力原単位が増加し、またミル内炭層レベルが低下するために騒音レベルが増加するという欠点があった。今回ミル回転数を負荷率に応じて可変とするミル回転数制御方法を採用したところ、ターンダウン時の動力増加が大幅に改善され、騒音レベルも通常負荷時並みで運転可能となった(図7)。

4. む す び

チューブミルは運転・保守が容易で、かつ幅広い炭種に適用できるという長所を持っており、古くから使われているミルである。しかし、最近の高性能型ミルと比較して消費動力が格段に大きく、高微粉碎運転時に容量低下が大きいという欠点を有していた。一方、型ミルはロールへのかみ込み性が悪い無煙炭への適用は困難であり、無煙炭だきボイラでは効率の悪い従来型チューブミルを使わざるを得ないのが実状であった。

今回開発したMRSチューブミルはチューブミルの長所はそのまま維持し、大きな欠点であった容量と動力特性を型ミル並みに改善したことに最大の特徴がある。特に高微粉碎域になるほど、この特徴が顕著となることから、200メッシュパス率90%以上の高微粉碎が要求される無煙炭だきボイラ用として最適なミルが開発できたものと確信する。開発に際してチューブミルの最近の文献を調査したが意外と少なく、やや技術進歩が停滞気味のミルという感じがした。しかし、古いものにも最近の技術で見直せば最新と言われるものに負けない大幅な性能改善が可能であることを今回の研究開発を通じて痛感した。

参 考 文 献

- (1) 國本武志ほか、高性能微粉炭機の開発、日本機械学会誌 Vol.93 No.858 (1990) p.20
- (2) 吉田博久、高微粉碎用型ミルの開発、第9回石炭利用技術研究発表会講演論文集 (1987-5) p.75
- (3) Yoshida, H. et al., Development of High Performance Tube Mill for Anthracite, JSME-ASME International Conference Power Engineering - '93 講演論文集 Vol. 2 (1993-9) p.573
- (4) 吉田博久ほか、連続大容量超微粉碎機、化学装置 (1990-9) p.50
- (5) 吉田博久ほか、“UFミル” (横型サンドミル)、第16回PSEセミナー講演論文集 (1993-4) p.133