

石炭火力発電所における耐摩耗材料について

On the Wear and Abrasion Resistant Materials for Coal used Power Stations

川 島 誠 一*

Seiichi Kawashima

1. まえがき

最近のエネルギー資源の推移を見ると、石油資源の涸渇に始まる世界的な省エネルギーの気運、石油価格の高騰、あるいは原子力など代替エネルギー開発の停滞などを背景に石油に替るエネルギー源として石炭の利用拡大が計られるようになり、電力をはじめ窯業、製鉄など基幹産業で石炭転換が真剣に取り組まれるようになって来た。

例えば、表1¹⁾に示す我国の火力発電における今後の石炭、石油の利用率を見ても、エネルギー源としての石油は横這いであるが石炭は5年次毎に倍増の利用計画が見込まれている。

このためにはNO_x、集塵、灰処理など環境対策、あるいはCOM、液化など新燃焼方式の確立と種々の問題が山積するが、石炭利用の拡大は必須の情勢であり、これに伴いより優れた耐熱材料、耐摩耗材料の開発が急務となっている。

さて、火力発電における耐摩耗部材を考えた場合、揚炭、運炭、廃棄設備に使われるライナー、パイプ、ポンプ類と種々あるが、本稿では微粉炭粉碎ミルを概

説し一般のアブレーション摩耗に適用される各種耐摩耗材料について述べることにする。

2. 微粉炭粉碎機の種類

現在わが国の火力発電所で使われている主な粉碎ミルの種類、特長と、使われている耐摩耗材料の適用例を表2に概略図を図1に示す。

3. 耐摩耗材料の選定と材質の特長

摩耗現象には 1) 金属同志の接触、焼付による Adhesive Wear 2) 相手材の削り取りや擦過による Abrasive Wear 3) 表層部の応力的な疲労による Surface Fatigue, Pitting, Flaking または Spalling、或いは 4) 化学的な腐食による Corrosive Wear があるが、鉱物の破碎、粉碎下の摩耗はアブレーション摩耗が主体となる。一般に金属材料のアブレーション摩耗下での耐用性は、材料の硬度が相手材(被碎物)より高硬度であるほど耐摩耗性が優れてくる。そのためCやCr、Mo、Niなど合金元素を増加させて表3^{2~4)}に示すような炭化物あるいはマルテンサイトといった硬質な相を析出、変態させ、耐用寿命の向上が計

表1 火力発電年度末電源構成¹⁾

単位：万kw

エネルギー源	S. 53年度末		S. 60年度末		S. 65年度末		S. 70年度末	
		構成比%		構成比%		構成比%		構成比%
石 炭	440	5.6	1000	9.1	2200~2300	17.9	3300~3600	25.5
LNG. LPG	1335	17.0	3650	33.3	4690~4950	38.2	5200	38.4
石 油	6085	77.4	6450~6140	57.5	5950~5100	43.9	5450~4300	36.1

* (株)栗本鉄工所 鋳物事業部 技師長

表2 微粉炭粉碎ミルの種類と特長

特長	リングボールミル (Eミル)	ローラーミル (レイモンド、バウル、ロッシュェ、MP5、MBFミル)	チューブミル
型式	縦型	縦型	横型
粉碎機構	ボールベアリング状の、上下リングの間に多数(10~11個)のボールを挟み、上リングを一定圧で押えながら下リングを中速度で回転させ、ボール、リング間ですり潰す。	数個(2~4個)のローラーで、一定圧で平板又は鉢型皿を押え、受皿を中速度で回転させ、ローラー、受皿間ですり潰す。	逆い速度で回転する横置き式の大形ドラムの中に小鉄球を多数入れ、ドラムの回転による鉄球の落下衝撃と鉄球間の摩擦によりすり潰す。
粉碎能力	ボールの摩耗が一樣に進行するので、粉碎能力の低下はほとんどない。	構造上、偏摩耗を起し易い場合があり、摩耗とともに粉碎能力は低下する。	運転中でも鉄球の補充が可能なので、粉碎能力の低下をカバーする。
摩耗機構	ボールが石炭(鉱物)とリング(金属)に交互に接触するので、摩耗は均一に進行し、摩耗原単位は小さい。 100 (寿命指数)	ローラーと受皿が直接接ししないので、摩耗は小さいが偏摩耗を生じる時には摩耗原単位は大きい。 30 ~ 40	鉄球の落下衝撃があるため摩耗応力が大きく、均一な摩耗であるが摩耗原単位は大きい。 15 ~ 20
適用材	ボール: Cr-Mo 鋼 Ni-Cr-Mo 鋼 高Cr 鋳鉄 リング: 高Cr 鋳鉄 ニハード 鋳鉄	ローラータイヤ: 高Cr 鋳鉄 ニハード 鋳鉄 テーブルライナー: 高Cr 鋳鉄 ニハード 鋳鉄	鉄球: 合金 鋳鉄 低合金 鋳鋼 鍛造 鋼 ライナー: Cr-Mo 鋼 高Mn 鋳鋼 高Cr 鋳鉄 ニハード 鋳鉄

石炭利用・発電プラント技術総合資料集：フジテクノシステム(1980)抜萃

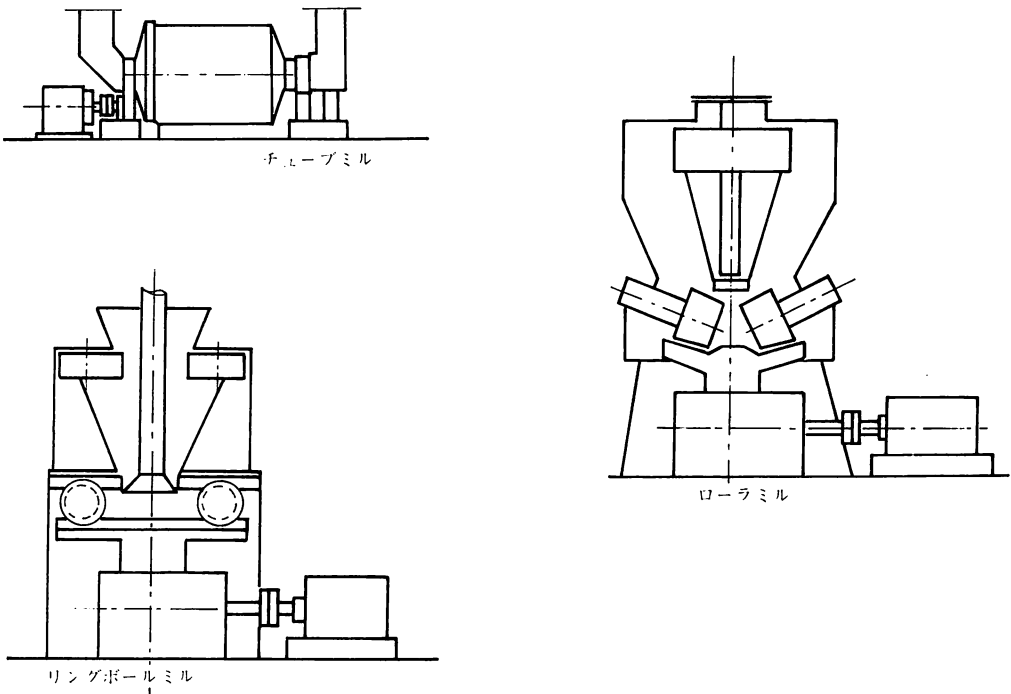


図-1 主な微粉炭粉碎機
(石炭利用発電プラント技術総合資料による)

表3 顕微鏡組織中の各相の硬度^{2~4)}

(マイクロビッカース硬度HmV)

組 織	硬 さ	組 織	硬 さ	組 織	硬 さ
Fe ₃ C	930~1000	(Cr, Fe) ₂₃ C ₆	950~1000	ベイナイト	500~600
(Fe, Cr) ₃ C	1000~1230	オーステナイト	200~250	トルースタイト	270~350
(Fe, Cr) ₇ C ₃	960~1440	マルテンサイト	650~720	パーライト	250~330
(Cr, Fe) ₇ C ₃	1300~1800	焼戻しマルテンサイト	(350)~620	フェライト	120~150

られている。

しかし鑄造材における現技術段階では、高硬度材になるにつれて靱性が低下し、耐用強度の劣化だけでなく適用個所によっては硬質相の剥離、欠け落ちといった問題が生じる傾向が増すことは避けられない。したがって材料の選定に当っては、摩耗条件に応じて合金元素を調整し、又適当な熱処理を行ない適性な強度、靱性、硬さを持った材料を選択しなければならない。次に代表的な材料の特性について述べる。

3・1 高マンガン鑄鋼

C1.2%、Mn14%で変形抵抗を増すためCr、Vを若干添加した高Mn鑄鋼は、1888年Hadfieldにより開発された古くからの代表的な汎用耐摩耗材である。本材は熱処理によってオーステナイト単相としているため本来は軟質(Hs28~30)で非常に大きな靱性を有する材料であるが、衝撃や曲げなどの外力による塑性変形を受けるとその歪によって表層部が硬くなり、Hs60~80に達する硬化層が形成される(加工硬化現象)という特異な挙動を示す。

したがって摩耗に伴う応力が苛酷なほど表層は加工硬化され、到達硬度が高く硬化深さも大きくなって優れた耐摩耗性を発揮し、かつ内部の高い靱性はそのまま維持されるので破損することなく肉厚が薄くなっても耐用できて耐摩耗部品としてのスクラップ率が非常に低い。

しかし引掻摩耗を主とするような加工硬化性の少ない低応力下で使用される場合には、他の硬質材が有利であることが多く、現石炭粉砕機の耐摩耗部材ではあまり用いられない。

3・2 Cr-Mo 鋼

Cr-Mo系鋼の主体はCrで、Cr/C比を10/1の比率にしたものが中心である。このCrを1.25%から2~3%、5%、13%、18%、28%へと増加させ、それと共にCを増せば13%付近から白鑄鉄の分野(高Cr鑄鉄)へ移行して行く。一般に適用されるCr-Mo鋼はC<0.4%、Cr0.5~3%、Mo0.2~0.4%で熱処

理によって金属組織を硬質なマルテンサイト~ベイナイト基地とする。強度、靱性、硬さが高いため摩耗又は高温強度を必要とする分野に用いられる。又、空気冷却のみで他の鋼の水、又は油焼入したものと同様に硬化するので複雑な形状の鑄物に適用出来る利点があり用途が広い。

又、C0.3~0.6%、Cr3~5%と増加させ特に耐摩耗性に優れたものや、Siを約2%として、強靱性、耐摩耗性に優れた材料が2~3のメーカー⁵⁾で開発されている。このほか、硬さは高くないが強靱な低Mn-Cr鋼、低Mn-Mo鋼、低Mn-Cr-Mo鋼、Ni-Cr-Mo鋼も用いられることがあるが、耐摩耗性に劣るのでハードフェイシング肉盛して2~3回繰返し使われることが多い。

3・3 ニハード鑄鉄

白鉄にNi4%、Cr2%を加えたNi-Hard鑄鉄(Type1, 2)は米国で発達したもので、3%前後のCで黒鉛を晶出することなく鑄造のままでも硬質な網目状のレーデブライト・セメントタイトとマルテンサイト組織となり、白鉄に比べ硬さも高く強度も強いので過去には耐アブレーション材として欧米で広く使われて来た。

しかし高Cr鑄鉄に比べると、引張強さや衝撃強度が約2/3にとどまるためわが国ではあまり伸びず、最近では米国でも使われることが少なくなって来ている。ただ10年ほど前に、それを改善するためNi6%、Cr9%とし、Siを増して網目状のセメントタイトを粒状に共晶分布させたNi-Hard4がINCO社から発表され高Cr鑄鉄に近い強度と硬さが得られるようになってからは、石炭粉砕機にも使われるようになった。

3・4 高クロム鑄鉄

戦前からドイツを中心に発達した25~30%Cr鑄鉄は、始めは耐食用、耐熱用であったが米国およびわが国では耐摩耗用として大幅な用途拡大を遂げた。その引張強さは40~70kg/cm²、no notch シャルピー値0.3~1.0kg-m/cm²が普通で、C1.5~2%程度の亜共

晶の強靱型からC 2.5 ~ 3 %の共晶に近い高硬度型まで用途によって使い分けられる。Ni, Mo, V, W, N, Ti, Bなどを加えて表3に示したような硬質な(Cr, Fe)₇C₃炭化物を微細に晶出させる。この炭化物は次項の15Cr-3Mo鑄鉄の(Fe, Cr)₇C₃炭化物よりも相当硬度が高い。さらに種々の熱処理によって、マルテンサイト、ベイナイト基地とし、(Cr, Fe)₂₃C₆炭化物も2次析出させて耐摩耗性が優れたものとしている。

又、鑄放しかまたはその歪取り焼鈍の状態でも、C過飽和のオーステナイトが優れた強靱性と加工硬化性を有するのでかなりの良い耐摩耗性を示し、高い摩耗応力下でも適用でき石炭粉砕機用以外にも用途が広い。

3・5 高クロム・モリブデン鑄鉄

Climax. Mo. CoのT. E. Normanが開発した15Cr-3Mo鑄鉄⁶⁾は前項の高Cr鑄鉄系材にMo, Cu, Niを各数%添加したもので、鑄物の肉厚が大きく冷却速度が遅い場合でもASTM A532に見られるようにオーステナイト、マルテンサイト基地を維持している。

この鑄鉄の焼入時の基地の硬さは25~30%の高Cr鑄鉄より硬くなるが、炭化物硬度は低くなり、とくに共晶炭化物が高Cr鑄鉄より粗大で機械的性質が低下しているため高C型(C>3.1)では割れる危険が多く、かつコストが高くなるきらいがある。又、肉厚100mm以上の場合、十分な焼入硬さが得られないため20Cr-2Mo-1Cu(Ni)鑄鉄が使用される。この鑄鉄は15Cr-3Moと比べて耐摩耗性は若干低い破壊靱性は高⁷⁾い傾向にある。最近ではこの材質で肉厚400mmのローラーミルのライナーが製造されており、熱処理によって表面から中心部まで均一な硬度(Hs 82~87)が得られている⁸⁾。但し前者と同様コスト高の傾向は避けられない。

3・6 耐摩耗材料の化学成分、機械的性質

耐摩耗用の各種鑄造材の化学成分と機械的性質については次の規格を参照されたい。合金鑄鉄についてはJISには規定がない。

- 高マンガン鑄鋼: JIS G5131
- Cr-Mo鋼(Ni): JIS G5111
- ニハード鑄鉄: ASTM A532-75 a
- 高Cr, 高Cr-Mo鑄鉄: ASTM A532-75 a

4. 耐摩耗材料の組織、硬さと摩耗挙動

以上概説した耐摩耗鑄造材の乾式摩耗下における摩耗挙動は、組織別に分類するとそれぞれ硬さとの相関

関係が明確になる。すなわち同系統組織であれば硬さの高いものほど摩耗比(Wear Ratio)が小となる。

図2⁹⁾は対珪砂引掻摩耗試験、図3⁹⁾は対石英斑岩

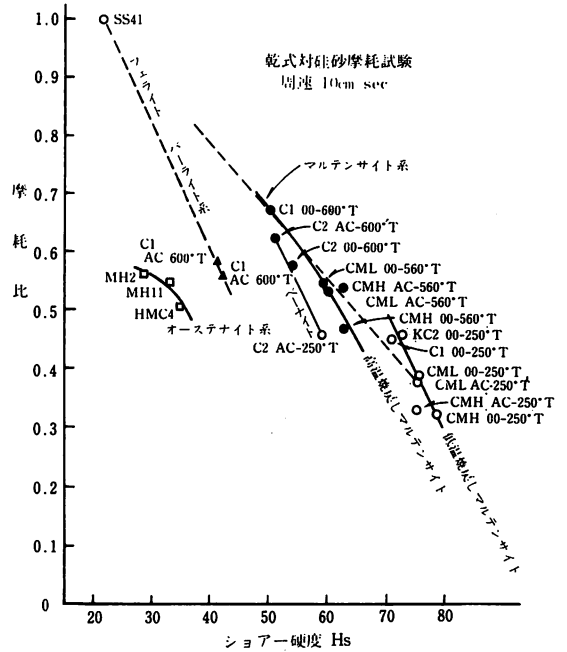


図-2 耐摩耗鑄鋼の硬さと摩耗比の関係⁹⁾

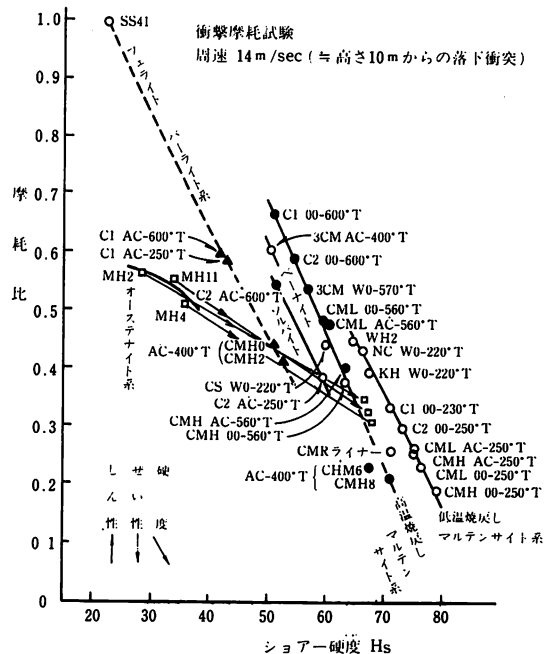


図-3 耐摩耗鑄鋼の硬さと摩耗比の関係⁹⁾

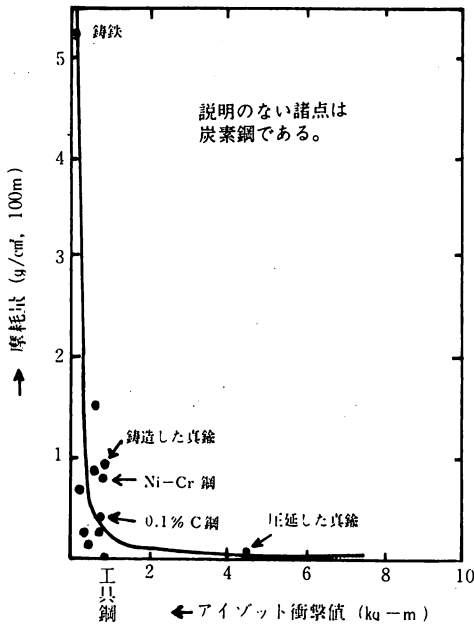


図-4 種々の材料の機械的破壊摩耗¹⁰⁾とアイゾット衝撃値との関係

衝撃摩耗試験の結果を組織、硬度別に整理したもので、図中のCMはCr-Mo鋼、L、Hは炭素量の高低を表す。

引掻摩耗においても高Mn鑄鋼は同硬度のフェライト+パーライト鋼や焼戻しマルテンサイト鋼より常に耐摩耗性が良いが、これは一般に高Mn鑄鋼の難削性として知られる如く、オーステナイト特有の粘靱性に基づくものと考えられ、図4¹⁰⁾の文献にも見られるように、衝撃値の高い金属ほど摩耗が少ない現象によると考えられる。

さらに衝撃摩耗下では、高Mn鑄鋼は右方へ加工硬化するので摩耗比は減少する。しかし加工硬化した表面は一部マルテンサイト化するので、低温焼戻しマルテンサイト系のものに接近し難削率もかなり縮小している。

尚、マルテンサイト系材料を低温、高温焼戻しに分類したのは、同一硬度でも結晶ひずみの多いマルテンサイトほど摩耗し易いと見られるからであり¹¹⁾、この両図からもそれはだいたい成立するように思われる。

図5⁹⁾は鑄鉄系の珪砂に対する、図6⁹⁾は摩耗作用の弱い焼結鉄鉱石に対する引掻摩耗試験結果を示す。図6は見やすいように摩耗比の逆数である耐摩耗性(Relative Wear Resistance)で示した。

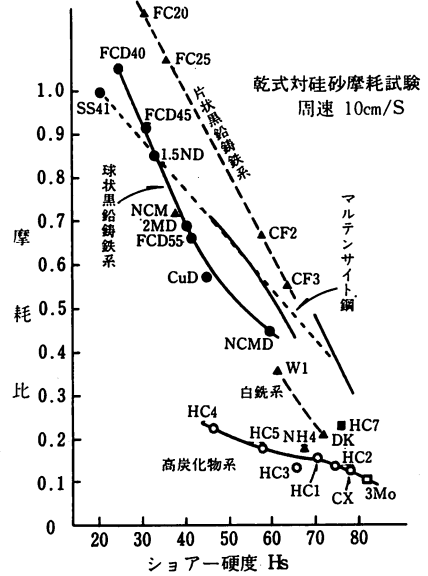


図-5 耐摩耗鑄鉄の硬度と摩耗比⁹⁾

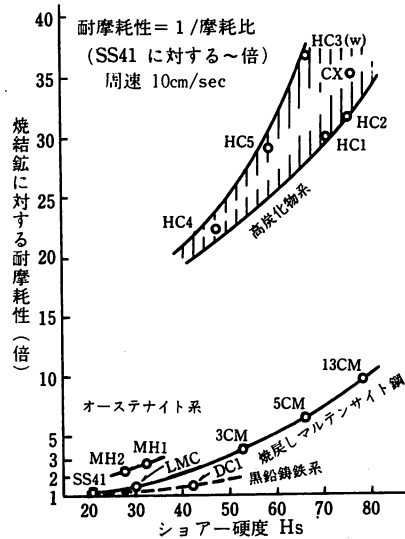


図-6 焼結鉄鉱石に対する乾式引掻摩耗試験⁹⁾

ここでもオーステナイト鋼の難削性がうかがえる。ここで特に強調したいのは高炭化物系(高Cr鑄鉄系)が、マルテンサイト鋼系や黒鉛鑄鉄系よりもはるかに耐摩耗性がよいことである。このことは高Cr鑄鉄の $(Cr, Fe)_7C_3$ 或は $(Cr, Fe)_{23}C_6$ の高硬度の炭化物が岩石の鋭い削込み作用に抵抗して、耐摩耗性の向上

に非常に効果があることを如実に物語っていると考えられる。

5. 石炭粉砕機の摩耗部品の耐摩耗寿命と炭質

前項で金属材料の耐摩耗性は、材料の系統（マルテンサイト系、オーステナイト系、高炭化物系）とか摩耗条件（摩耗応力の大小）によってそれぞれ個々の耐摩耗挙動を示すことを述べたが、石炭粉砕における材料の耐摩耗性は、この他にも石炭の性状によって大きな影響を受ける。

特に石炭摩耗で主因子と考えられているのは、石炭の粉砕性(H. G. I), 石炭に含まれるズリ(主としてSiO₂)の量, および石炭の硬度と粒度の3因子である。

ここで粉砕性(Grindability)は石炭を微粉化する場合の難易度を示すもので、H. G. I(Hardgrove Index)で表わすが、50を標準として数の大きいものほど粉砕し易く、当然耐摩耗性に関与して来る。次にSiO₂は硬度が石炭に比べて非常に高く(SiO₂:モース硬さ7, ヌープ硬さ840~985, 石炭:モース硬さ1~1.5, ヌープ硬さ20~40)かつ産出場所によって含有量が変化するため(国内炭5~25%, 米国炭5%)摩耗寿命に大きく影響をおよぼす。例えばレイモンドまたはバウルミルにおけるロール、リングのSiO₂含有量の多小による耐用寿命の差異を図7¹²⁾に示すが、図に明らかなように指数函数状の大きな変化となって現われている。

又、石炭の硬さは炭化度の高低によって差異を生じる。杉村秀彦の報告によれば図8にみられるようにC80%で極大、90%で極小となり、やはり耐摩耗性に影響をおよぼす。さらに石炭のサイズについても、例えば米国のデータ¹³⁾によると洗炭を使用する場合は耐用

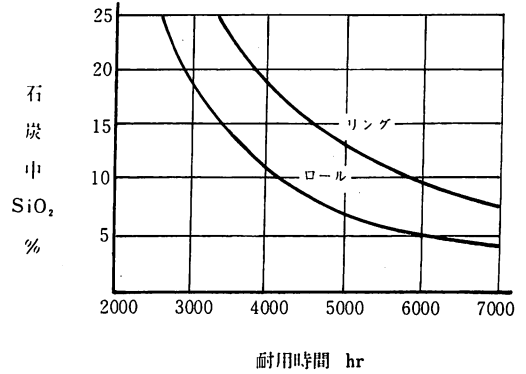


図-7 SiO₂ と耐用時間¹²⁾

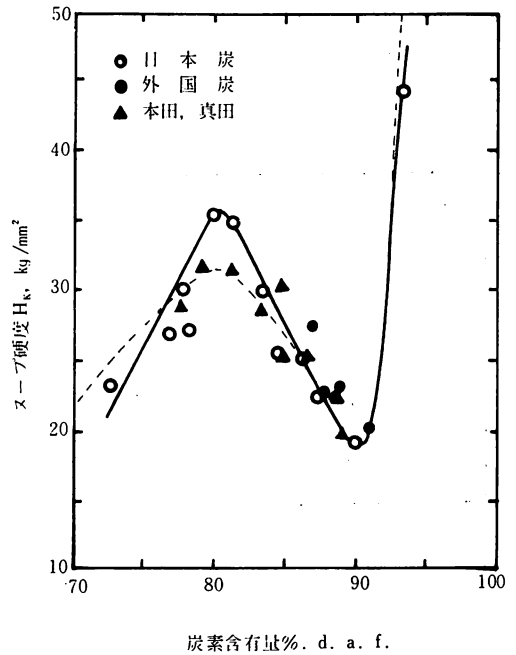


図-8 石炭化度とヌープ硬度との関係

表4 8.5 E ミル部材の摩耗寿命¹⁴⁾

部材	材 質	調査台数	硬さ Hs	耐 用 時 間		摩 耗 速 度	
				耐用時間* hr	耐用時間比	摩耗量mm/100hr	耐 摩 耗 比
リ ン グ	ニハド鋳鉄(T1)	2	70~75	7500~7800	1.00	0.67	1.00
	Ni-Cr-Mo鋼	2	55~60	6000~6900	0.83	1.10	0.61
	高Cr鋳鉄	16	65~72	10000~18000	1.55	0.41	1.63
ボ ー (中 空 ル)	Ni-Cr-Mo鋼	12	48~58	—	—	1.39	1.00
	Cr-Mo鋼	22	60~70	9000~12500	—	0.88	1.58

* リングの耐用時間は加工後の再使用を含まない。

時間が長く、かつ石炭中に $1\frac{1}{2}'' \sim 1\frac{1}{4}''$ の粗粒が混入した方が破碎効率が向上し、或いはミルの修繕費の点から見ても H. G. 1.55 の洗炭した高揮発分の石炭は、H. G. 1.85 以上の水洗いしない低揮発炭よりも修繕費が少なかったというデータも出されている。

この他にも石炭中の水分とか、給鉱量或は粉碎時の加圧力の違いなども耐摩耗性に影響をおよぼすと考えられるので、材質間の性能を比較する際には出来るだけこれらの条件が一定になるよう、同一箇所、同一ミル、同一炭質となるよう注意しなければならない。

次に石炭粉碎機で測定された 2, 3 の材料の耐用寿命の比較を示す。

5・1 B&W型8.5Eミルにおける実績(国内発電所)¹⁴⁾
 運転条件：回転数40r.p.m (レース面速度4.5m/sec)
 給炭16mm以下

粉碎 200 mesh 70%以上

性能比較：表4に示す。

5・2 B&W型ELT-70Eミルにおける実績(国内発電所)¹⁴⁾

運転条件：回転数90r.p.m (レース面速度8.4m/sec)

給炭10mm以下

粉碎 200 mesh 70%以上

性能比較：表5に示す。

5・3 レイモンドバウルミルにおける実績(国内発電所)¹²⁾

運転条件：詳細不明

性能比較：表6に示す。

5・4 ロールクラッシャーロールにおける実績(ソ連発電所)¹⁵⁾

運転条件：詳細不明 外径950φ 内径784φ

キエフ火力発電所

性能比較：表7に示す。

表5 ELT-70型Eミル部材の摩耗寿命¹⁴⁾

部材	発電所	材 質	調査台数	硬さ Hs	耐 用 時 間		摩 耗 速 度	
					耐用時間* hr	耐用時間比	摩耗量mm/100hr	耐摩耗比
リ ン グ	A	ニハド铸铁(T1)	21	67~71	3200~5900	1.00	1.39	1.00
		高Cr铸铁	7	65~72	8000~8500	1.59	0.85	1.63
	B	ニハド铸铁(T1)	10	68~73	5200~7200	1.00	0.80	1.00
		高Cr铸铁	11	65~72	9000~9600	1.29	0.60	1.33
ボ ー ル (中 実)	B	高Cr铸铁	55ヶ	65~75	8000~9000	—	1.34**	—

* リングの耐用時間は加工後の再使用を含まない。

** 表12, 13のボールは球径が異なるため直接比較することは出来ない。
 単位処理屯数当りの摩耗体積は高Cr铸铁 1.38cm³/ton
 Cr-Mo鋼 2.67cm³/ton となり高Cr铸铁が約2倍の耐摩耗性を示す。

表6 レイモンドバウルミル部材の摩耗寿命¹²⁾

部材	材 質	化 学 成 分 %					硬さ Hs	摩 耗 速 度	
		C	Cr	Ni	Mo	Mn		摩耗量mm / 1000t	耐摩耗比
ロ ー ラ イ ヤ	Cr-Mo鋼	0.9	2.0	—	<0.3	—	90	3.23	1.00
	Ni-Cr-Mo鋼	0.7	1.4	0.75	0.34	—	78	2.32	1.39
	白 鑄 鉄	3.4	0.8	—	0.22	—	75~82	2.02	1.60
	ニハド铸铁	1.9	2.4	4.0	0.7	—	80	0.68	4.75
テ ー ラ イ ナ ー	Cr-Mo鋼	0.5	3.0	—	0.3	—	45	2.20	1.00
	Ni-Cr-Mo鋼	0.7	1.4	0.75	0.34	—	78	2.20	1.00
	高Mn鑄鋼	1.10	—	—	—	12.7	25~32	2.50~1.90	0.88~1.16
	ニハド铸铁	1.9	2.4	4.0	0.7	—	80	0.35	6.29

表7 ロールクラッシャーのロールの摩耗寿命¹⁵⁾

部材	材 質	化 学 成 分 %				熱 処 理	硬 さ Hs	摩 耗 速 度	
		C	Cr	Ni	Mo			平 均	最 大
ロ ー ル	ニハード鑄鉄	3.7	1.75	3.80	0.65	275℃ 焼戻し	77~81	1.00 (0.41mm/100hr)	1.00 (0.68mm/100hr)
	高Cr-Mo鑄鉄	3.1	13.0	—	0.70	950℃空冷 250℃焼戻し	80~85	1.50 (0.27mm/100hr)	1.65 (0.41mm/100hr)

6. あとがき

各種耐摩耗材料について概説し、粉碎ミルにおける実績を2, 3示したが、火力発電所の石炭微粉碎ミルに適用される耐摩耗材料としては、今後はニハード鑄鉄、高Cr鑄鉄、高Cr-Mo鑄鉄などの合金鑄鉄が主流になると見られる。このうちNi-Hard 4, 20Cr-2Mo-1Cuなどはわが国においては比較的新らしい材料であるが、これらの鑄物の製造技術もすでに硬立されており^{8, 16)}、発電所および機械メーカーの需要に応じられる体制となっている。

しかしいずれの合金鑄鉄でも、粉碎機の種類とその運転条件により摩耗の形態、耐用時間が大きく変動するため、耐摩耗部材の選定に当っては使用条件、各材料の特質、過去の使用実績、石炭の質などを考慮し総合的に判断することが肝要である。

又、材料の価格も、Mo, Niは高騰する傾向にあるため、これらを含む合金鑄鉄は価格変動が大きいのに対し、Crは比較的安定しており、かつ日本では粉碎機以外にも多用されていることから、高Cr鑄鉄は價格的に有利となることなども材料選定に当って配慮しなければならない。

一方最高の耐摩耗性を重要視する余り、鑄物の強度を軽視し、使用中の機械的応力に耐えず割れなどの事故を発生する危険を忘れてはならない。材料の時間当り、または処理量当りの摩耗量のみならず、不均一摩耗による粉碎効率の低下、鑄物の最終寿命に伴うスクラップ率などについても考慮が払われるべきである。

これら耐摩耗鑄物の性能は、使用上の条件のほかにも勿論設計形状の要因も重要であり、最終使用者、機械設計者と鑄物製造者との密接な協力により絶えず使用結果を調査し、研究、開発の実績を積み上げれば、最高の安定した材料を見出すことが出来るものと考えられる。

文 献

- 1) 電気事業審議会需給部会報告 54.12.7
- 2) G. W. Samsonov: Wisnik Akad. Nauk, Ukrain, R. S. R. 6 (1959) 27
- 3) H. J. Goldschmidt: Interstitial Alloys, 1967. Butterworth, 88
- 4) 大出卓, 大平五郎: 鑄物47 (1975) No. 8, 567
- 5) 株栗本鉄工所, 川崎重工業株等材質規格
- 6) T. E. Norman: Modern Casting 1959. No. 4
- 7) Climax Molybdenum Co. Report L-212 - 144, L-212 - 121
- 8) 株栗本鉄工所技術報告書 No. 4994
- 9) 株栗本鉄工所技術報告書 No. 3539
- 10) 飯高一郎: 合金学新論, 1953, 岩波 239
- 11) 丹羽良平, 花畑忠夫: 鑄物49 (1977) No. 4, 234
- 12) 水野恒男: 火力発電 1961. No. 7
- 13) Power. Eng. 1958. No. 5
- 14) 株栗本鉄工所技術報告書 No. 4877
- 15) Tsypsin, I. O et al.: Wear Resisting Milling Element for Medium Speed Coal-Crushing Mills, Russian Casting Production, (1970) No. 2. 65~66
- 16) 株栗本鉄工所技術報告書 No. 4548

