

平成29年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「大型特殊鋳物用メソスコピック耐熱耐摩耗多合金鋳鉄材料の開発」

研究開発成果等報告書

平成30年3月

担当局	北海道経済産業局
補助事業者	国立大学法人室蘭工業大学 岩見沢鋳物株式会社 株式会社北海道特殊鋳鋼

目次

第1章 研究開発の概要.....	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標.....	1
1-2 研究体制.....	2
1-3 成果概要.....	3
1-4 当該研究開発の連絡窓口.....	4
第2章 本論.....	5
2-1 耐熱・耐摩耗性に優れるメソスコピック多合金鋳鉄の制御技術の確立.....	5
2-1-1 はじめに.....	5
2-1-2 これまでの取り組み.....	5
2-1-3 新規材料開発.....	6
2-1-4 供試材の製造.....	7
2-1-5 摩耗評価試験.....	9
2-2 小型製造モデルから大型製造モデルへのスケールアップ技術の確立.....	15
2-2-1 はじめに.....	15
2-2-2 大型ブロックの製造.....	15
2-2-3 大型ブロック切断試験結果.....	16
2-3 実環境下における摩耗評価技術の確立.....	18
2-3-1 はじめに.....	18
2-3-2 対象製品の選定.....	18
2-3-3 対象製品の試作.....	19
2-3-4 実機環境を再現した落下試験.....	21
第3章 総括.....	23

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

鉄鋼業は巨大な装置産業であり、設備技術は鉄鋼製造設備の建設から保全、さらに寿命延長と鉄作りの基礎を支えてきた。今日、設備技術には従来分野にとどまらず、歩留り、品質の向上、商品の幅広い品質保証と多岐にわたる分野での貢献が要求されてきている。

近年の合理的な生産体制などの操業変化により、製鉄設備の負荷が増加し、損傷が大きくなっている。設備損傷は作業人員の安全性のほか、操業停止に依る品質の低下、川下企業（自動車メーカー等）への供給停止など多くの問題を発生する。

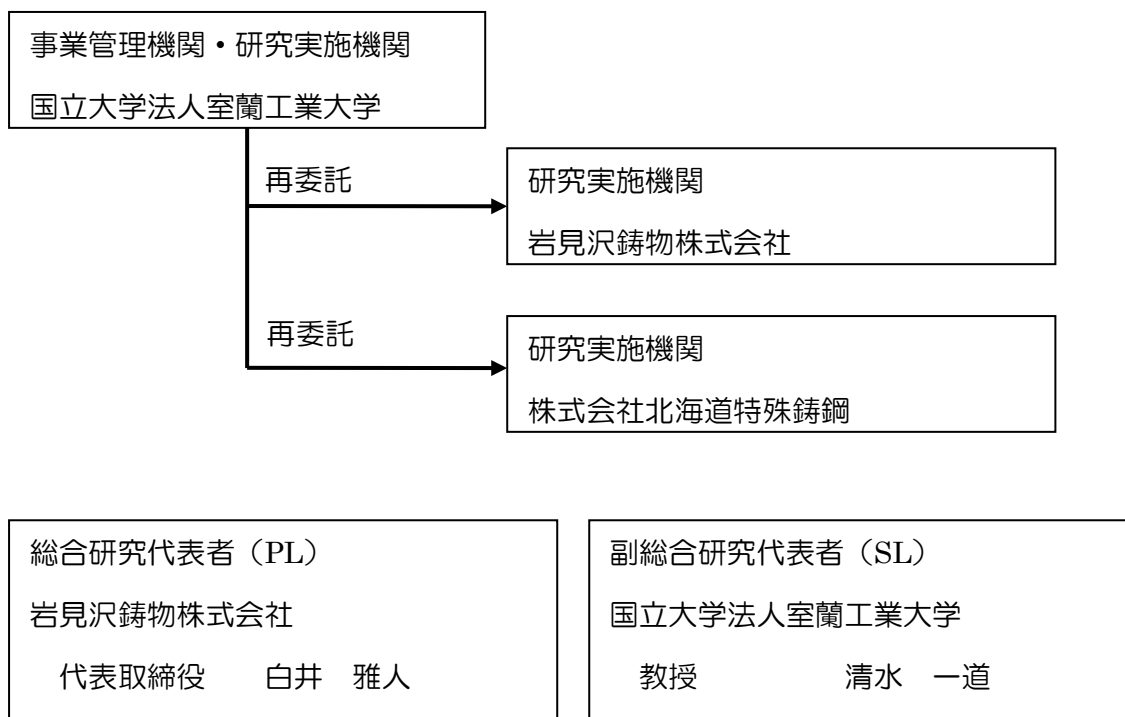
製鉄所では設備部門が研究所と密接し製鉄設備に用いるロールをはじめとする主要部品や、粉体流れにさらされる各種部材において、摩耗や熱亀裂、腐食などの損耗が激しく、機能保持やコストが長年の課題となっている。こうした損耗の対策として、腐食に対しては、耐食鋼やチタンの適用、摩耗に対しては耐摩耗材料、セラミックスなどのバルク材も適用を進め、長寿命化を果たしてきた。耐摩耗材料の寿命は使用環境にもよるが、数ヶ月程度から数年となっており、定期的な交換が必要とされている。近年の生産合理化において、操業条件が厳しくなる中、年に数回の操業停止は企業経営に影響が多く、高温、高圧、高負荷などが非定常にかかる過酷な製鉄設備の環境に対応する従来品以上に長寿命化した材料を必要としている。

本研究開発は、中小ものづくり高度化法及び中小ものづくり高度化指針における「立体造形に係る技術に関する事項」に該当し、立体造形に係る技術において達成すべき高度化目標における川下製造業者等の共通の課題及びニーズである長寿命化に対し、長寿命化に資する技術の向上を高度化目標とし、その特定研究開発等の実施方法として、耐摩耗性の向上、耐熱性及び耐焼付き性の向上に沿った高機能化に対応した技術開発を方向性とする。

メカニカルアロイング技術を用いたメソスコピック耐熱耐摩耗多合金白鑄鉄を開発し部材の長寿命化を図ることを目的とし事業を実施した。

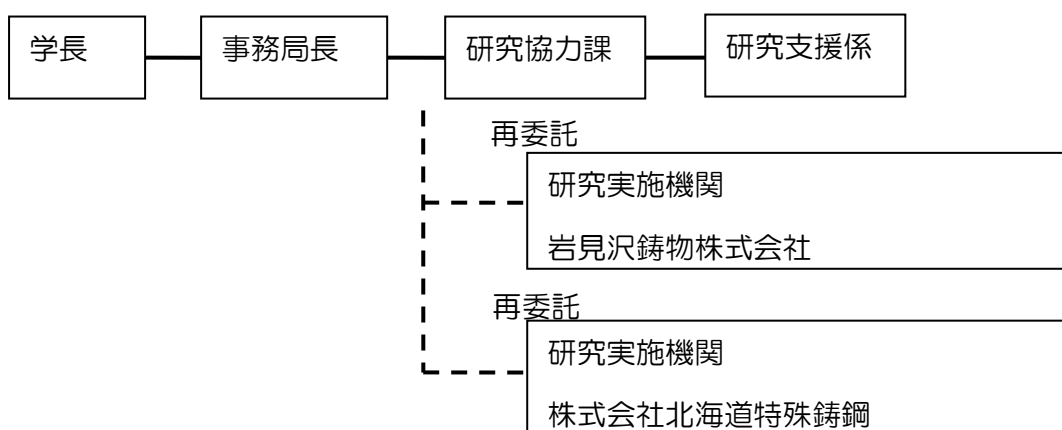
1-2 研究体制

1) 研究組織全体



2) 管理体制

国立大学法人室蘭工業大学



3) 研究者氏名

国立大学法人室蘭工業大学（〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1）

氏名	所属・役職	備考
清水 一道 八重樫 暢子	もの創造系領域 教授 研究補助員	

岩見沢鋳物株式会社（〒068-0111 北海道岩見沢市栗沢町由良497-3）

氏名	所属・役職	備考
白井 雅人 白井 寿一 河村 正規 芳賀 裕貴 山岸 琢司郎 米沢 義行 桑原 崇史	代表取締役 営業部 製造部 工場長 製造部 製造部 製造部 製造部	

株式会社北海道特殊鋳鋼（〒068-0111 北海道岩見沢市栗沢町由良497-3）

氏名	所属・役職	備考
伊藤 淳 伊藤 幸 原 宏哉	代表取締役 製造部 営業部 課長	

4) 協力者（委嘱委員・アドバイザー）

氏名	所属・役職	備考
堀江 皓 野口 徹	岩手大学特任教授 北海道大学名誉教授	

1-3 成果概要

1. 耐熱・耐摩耗性に優れるメソスコピック多合金鋳鉄の制御技術の確立

第1章では、多合金鋳鉄の配合について検討する。開発材料の化学成分としては、クロム炭化物（CrC）、バナジウム炭化物（VC）およびニオブ炭化物（NbC）など硬質物がマトリックス中に分散晶出した鋳造材料の組織を確立できる材料配合を検討する。従来の耐熱・耐摩耗材は2~3ヶ月程度しかなかった材料寿命を、本研究においては、2~3倍の摩耗寿命を延ばし、部品交換頻度を6ヶ月位に延命化する材料の開発を目標とする。マトリックス（基地組織）中に硬質層が分散した複相組織になっており、両相の種類、組成、配合量、大きさ、分布などをメソスコピックレベルで適正に制御する技術を確立することを目的とし

て実施した，その結果，耐摩耗性や高温耐性など複数の配合条件が確立され，耐摩耗性を有し製品寿命が試験環境下で従来品の約2.5倍延命した材料が得られた．配合や熱処理条件等の変更により，耐熱・耐摩耗性に優れる多合金鋳鉄の組織制御が確立された．

2. 小型製造モデルから大型製造モデルへのスケールアップ技術の確立

第1章で実施したラボレベルでの製造が，実製品サイズである大型化した場合，ラボレベルと同様の組織制御や機械的性質などが得られるか，冷却速度がどのように影響しているか，川下企業から求められている大型特殊鋳物へのスケールアップを行った際の組織制御技術や鋳造方案の確立などを目的として進めてきた．その結果，大型ブロックを製造した場合でも，外周部や中心部で組織や機械的性質に変化が確認されなかったため，ラボレベルからのスケールアップ技術が確立された．

3. 実環境下における摩耗評価技術の確立

第1章で材料配合を検討し，第2章で試験製造した大型特殊鋳物が，実環境下においてラボレベルと同様の耐熱耐摩耗性を有しているかを判断するため，実機と同様の製品を製造し，川下企業において実機環境での評価を実施した．実環境下を再現した試験機による評価でも遜色ない成果を上げており，また実製品は川下企業へ試作品として提示し，実機評価を実施されており，実環境下における摩耗評価技術が確立された．

1-4 当該研究開発の連絡窓口

国立大学法人室蘭工業大学

〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1

担当：研究協力課研究支援係 小田島 美鶴

電話：0143-46-5023

メール：renkei@mmm.muroran-it.ac.jp

第2章 本論

2-1 耐熱・耐摩耗性に優れたメソスコピック多合金鑄鉄の制御技術の確立

2-1-1 はじめに

本研究の開発材料の化学成分としては、クロム炭化物(CrFe)₇C₃、バナジウム(V)やニオブ(Nb)を添加して高硬度のMC型炭化物(M: Metal, C: Carbonが1:1で結合した炭化物)などの硬質物がマトリックス(基地組織)中に分散晶出した鑄造材料の組織を確立できる材料配合とする。従来の耐熱・耐摩耗材料は2~3ヶ月程度しかなかった材料寿命を、本研究では、従来材料の3~4倍に摩耗寿命を延ばし、部品交換頻度を6ヶ月位に延命化する材料の開発を目標とする。開発する合金の基地組織中に硬質炭化物が分散した組織になっており、合金配合量、炭化物の大きさや種類、分布などをメソスコピックレベルで適正に制御する技術を確立することを目的とした。

2-1-2 これまでの取り組み

摩耗は主に凝着摩耗、腐食摩耗、アブレシブ摩耗の3種類に分けられる。さらに副次的にエロージョン摩耗、キャピテーションエロージョン摩耗、電食摩耗の3種類がある。この中のエロージョン摩耗とは粉流体の衝突により材料表面が損傷、除去される現象のことを言う。この現象は、固体と気体の二つが混ざり合う粉粒体の固気二相流による輸送系でのパイプバンド部やバルブ、ベルホッパー、ライナー、タービンブレード、ヘリコプターのブレード、ファン等で大きな問題となっている。本事業の川下企業である製鉄業・鉄鋼業においては、高炉における微粉炭吹込み装置や各種輸送系施設での摩耗問題が挙げられる。輸送系配管内などで生じる、粉体によるエロージョン摩耗は多くの摩耗、損傷が生じているにもかかわらず、配管の内部で起こる現象であるため、外観からでは状況の把握が難しい。配管系内部において摩耗損傷により穴が開くようなことがあれば、ガス及び粉粒体の噴出で重大な事故を招く恐れがある。現在は定期的なメンテナンスでの部品交換や減肉部分の肉盛り溶接を施すことにより事故を未然に防いでいるが、安全性の向上及びメンテナンス費低減のためにも余寿命の推定及び耐エロージョン摩耗材料の開発はエンジニアリング上、解決すべき課題である。

摩耗についての研究や現場での技術的な対応における困難性はエロージョン摩耗に及ぼす影響因子の多さにある。粉体によるエロージョン摩耗では、衝突角度及び衝突速度、衝突粒子の性状や対象材料の機械的性質の組み合わせが極めて多岐にわたる。そのため、これらの

組み合わせに伴い損傷速度やエロージョン摩耗特性が多様に変化する。これまでの研究からエロージョン摩耗には材料によって得手不得手な角度が存在することが明らかになっている。脆性的な材料では衝突角度が摩耗面に対し垂直に近い角度で摩耗量が多く、延性的な材料では衝突角度が摩耗面に対し、平行に近い角度で摩耗量が増加する傾向がある。この衝突角度依存性に有効な耐摩耗材として、白鑄鉄及び高マンガン系鑄鉄に 10%以上の V を添加した球状炭化物鑄鉄 (Spheroidal Carbide Cast Iron: SCI) が開発されている。この SCI は高クロム鑄鉄 (Hi-Cr) と比較して約 2 倍の耐エロージョン摩耗特性を示す。

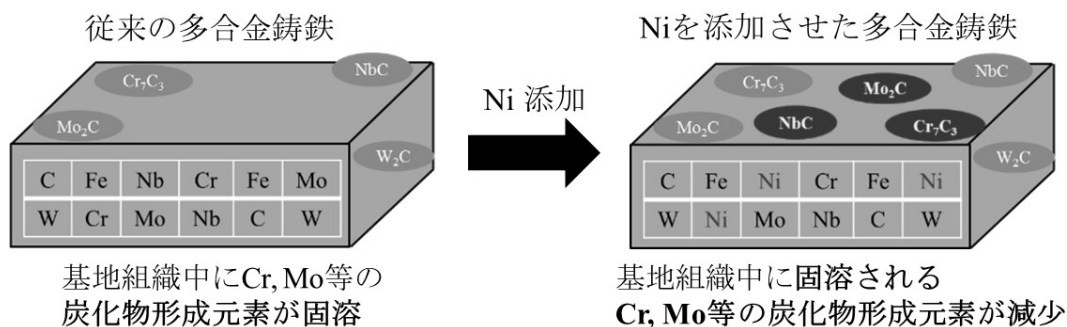
しかし、SCI は VC の偏析が生じる可能性があり、炭化物の偏析によって耐エロージョン摩耗特性を低下させる。この問題点を改善するため、種々の元素を添加することで、高硬度な炭化物を組織全体に分散させる多合金白鑄鉄を開発した。

多合金白鑄鉄は炭化物形成元素であるクロム(Cr)、モリブデン(Mo)、タングステン(W)、V、Nb など、種々の元素を添加することで凝固時に MC、M₂C 及び M₇C₃ 炭化物などの高硬度な共晶炭化物が基地組織全体に分布する。また、その後の熱処理により二次炭化物が析出することで基地組織の硬度が上昇し、衝突角度依存性が少なく、一般的な Hi-Cr などと比べ、多合金白鑄鉄は優れた耐エロージョン摩耗特性を示す。多合金白鑄鉄の炭化物の分布状況及び微視観察結果を図 2 に示す。基地組織中の共晶炭化物及び二次炭化物は粒子が衝突する際に生じる材料表面の塑性変形を抑制する。そのため、共晶炭化物量及び二次炭化物量を増加させることで更なる耐エロージョン摩耗の向上が望める。

2-1-3 新規材料開発

材料表面の塑性変形を抑制することが耐エロージョン摩耗特性向上に有効である。主な金属材料の強化方法として、合金元素添加による固溶強化、熱処理等による析出強化、異種材料の組合せによる複合化及び溶射等による表面処理が挙げられる。これらの強化方法を用いて、本研究では、これまで開発を進めてきた多合金鑄鉄の更なる耐熱性及び耐摩耗性向上を目指して、基本となる配合 (Fe-2C-5Cr-5Mo-5W 系多合金鑄鉄) をベースに合金元素の配合調整並びに新たな元素の添加を行った。多合金鑄鉄において共晶炭化物量及び二次炭化物量を増加させ、多合金鑄鉄の優れた耐摩耗性をさらに向上させる。更に、耐熱性向上に繋がる条件として、合金元素であるニッケル(Ni)に着目した。Ni は炭化物形成元素ではないため、炭化物を形成せず、Ni は優先的に基地組織に固溶する性質があるため Cr、Mo、Nb などの炭化物形成元素が基地組織に固溶する量を抑制できる。そのため基地組織中の共晶炭

化物の晶出量及び二次炭化物の析出量を増加させることが期待できる。



多合金白鋳鉄

- ・ 鋳造時に高硬度の炭化物を晶出する。
- ・ 熱処理によって二次炭化物が析出し、二次硬化する。
- ・ Nbを含有させることにより、高温酸化を抑制し、摩耗特性が向上する。

Ni, Coの利点

- ・ Niを添加させることで、晶出炭化物量が増加し硬さが上昇。
- ・ Coを添加させることで、二次炭化物量が増加し硬さが上昇。
- ・ 耐食性を向上させるため、高温酸化を抑制する。

多合金白鋳鉄のNi, Co含有量を変化させ、炭化物量及び酸化特性に着目し、高温エロージョン摩耗特性に及ぼす影響を調査する。

Fig. 1 Ni-Co系多合金白鋳鉄開発イメージ

2-1-4 供試材の製造

供試材として、これまでの研究で良好な耐摩耗性を示した Cr, Mo, W, Nb, Co を 5 mass% (以下%と略す) ずつ添加した多合金鋳鉄において炭化物の晶出量を増やし、耐摩耗性の向上が期待できる Ni を 0, 3, 5% 添加した計 3 種類の供試材 (以下 ONi, 3Ni, 5Ni と略す) を用いた。供試材の製造においては、北海道特殊鋳鋼が所有するタイチク製小型高周波溶解炉 (100kg 70kW 2000Hz) を利用した。原材料には、銑鉄、スクラップ鉄、フェロクロム (Cr:クロム含有率 67%), フェロモリブデン (Mo:モリブデン含有率 61%), フェロタングステン (W:タングステン含有率 76%), フェロニオブ (Nb:ニオブ含有率 65%), フェロマンガ (Mn:マンガ含有率 75%), コバルト合金 (Co:コバルト含有率 100%), ニッケル合金 (Ni:ニッケル含有率 100%), 加炭材, 接種材 (キャスロン 75) を用いた。溶製手順として、形成させる炭化物構成元素の順 (Mo→W

→Nb→Mn→Cr→Co→Ni) に合金元素を投入し溶解した。Ni 添加量を 0%, 3%, 5%と変化させるため、注湯毎に Ni を添加し、温度調節を行っている。合金元素の装填から溶解終了まで約 2 時間とし、溶解温度は 1700℃で、出湯温度は 1750℃とした。出湯に際して、事前製作した Yブロック鋳型を用いた。Yブロックは、押し湯部と実体部からなり、実体部は 55mm×55mm×125mm の形状である。1 個重量が約 6kg であり、1 成分あたり Yブロック 5 個作成した。鋳型は、有機フラン樹脂の自硬性鋳型を用いた。金型 1 枠あたり、8 個の Yブロックを注湯することが可能である。

Table.1 開発材料の目標とする化学組成 (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Co	Nb	Ni	W
3Ni-0Co	1.80-2.10	0.30-0.70	0.30-0.70	≦0.05	≦0.05	4.50-5.50	4.50-5.50	0	4.50-5.50	2.50-3.50	4.50-5.50
5Ni-0Co	1.80-2.10	0.30-0.70	0.30-0.70	≦0.05	≦0.05	4.50-5.50	4.50-5.50	0	4.50-5.50	4.50-5.50	4.50-5.50
3Ni-5Co	1.80-2.10	0.30-0.70	0.30-0.70	≦0.05	≦0.05	4.50-5.50	4.50-5.50	4.50-5.50	4.50-5.50	2.50-3.50	4.50-5.50
5Ni-0Co	1.80-2.10	0.30-0.70	0.30-0.70	≦0.05	≦0.05	4.50-5.50	4.50-5.50	4.50-5.50	4.50-5.50	4.50-5.50	4.50-5.50

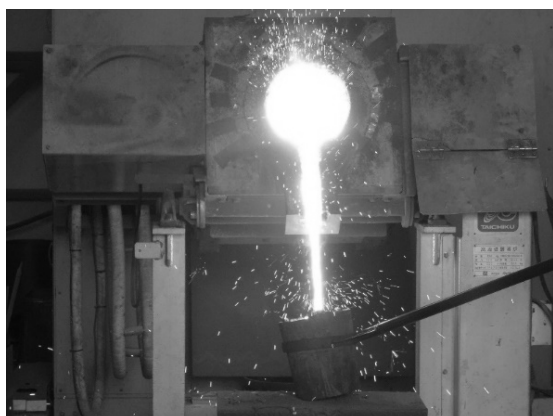


Fig.2 供試材の溶製



Fig.3 供試材の注湯

2-1-5 機械的性質の評価

製作した供試材の組織写真 400 倍の SEM 画像 2000 倍の SEM 画像を示す。0Co 供試材では Ni の含有量で比較すると炭化物面積率は 5%以上上昇することが確認され、二次炭化物は 7%以上も上昇することがわかった。また 5Co 供試材では Ni の含有量で比較すると炭化物面積率は 7%以上上昇することが確認され、二次炭化物は 8%以上も上昇することが

わかった。以上のようなことから Ni 添加による炭化物量は増大した。高温環境下におけるエロージョン摩耗では高温ビッカース硬さが損傷速度に大きな影響を与えた。そこで、本研究でも硬さが原因で損傷速度が大きくなったのではないかと推測し、高温ビッカース硬さを調査するため高温ビッカース硬さ試験を行った。母材における室温と 1173K の高温ビッカース硬度を示す。5Nb-0Ni-0Co, では 212HV10, 5Nb-3Ni-0Co, では 187HV10, 5Nb-5Ni-5Co では 175HV10 この 4 つの供試材の硬度には大きな差異はなかった。このことから、高温ビッカース硬さは、この硬度の差のみが損傷速度及び界面の損傷に大きな影響を及ぼしたとは考え難い。そのため、硬さ以外にも損傷速度を上昇させる原因があると推測される。

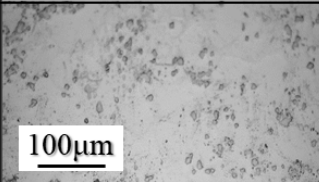
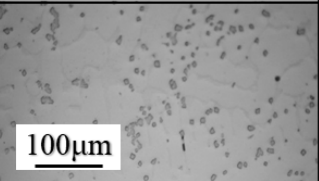
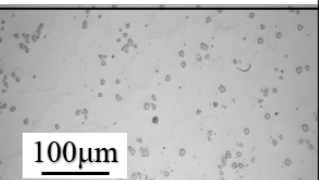
材料名	5Nb-3Ni-0Co	5Nb-5Ni-0Co
組織写真		
ビッカース硬度	665HV10	623HV10
高温ビッカース硬度	187HV10	-
炭化物面積率	26.08%	24.90%
材料名	5Nb-3Ni-5Co	5Nb-5Ni-5Co
組織写真		
ビッカース硬度	794HV10	683HV
高温ビッカース硬度	174HV10	175HV10
炭化物面積率	25.45%	26.40%

Fig.4 各供試材の組織写真および硬度（常温・高温）、炭化物の面積率

2-1-5 摩耗評価試験

摩耗評価には、これまでの材料開発と同様にエロージョン摩耗試験機による評価を行った。エロージョン摩耗では、常温環境下と高温環境下の 2 種の条件で実施し、開発された耐摩耗材料の評価とする。

(1) 常温エロージョン摩耗評価試験

エロージョン摩耗試験には、市販の吸引式ブラストマシンを使用した。常温エロージョン摩耗評価試験方法を図に示す。この装置は圧縮された空気によって衝突粒子を噴射し、供試材表面をブラストする機能を有するものである。市販の吸引式ブラストマシンを使用することの利点は、装置の規格を統一化することで異なる実験者の実験結果を比較するような場合に起こり得る装置の差による実験データの変動を低くすることができる点である。エロージョン摩耗は非常に多くの未知の要因によって支配されデータの変動する可能性があるため、実験装置の規格統一化は、研究する上で重要な要素である。

エロージョン摩耗では粒子が供試材に衝突する角度が重要となる。そこで 0deg. から 90deg. まで 10deg. ごとに角度を変えられる試験台を用いた。

ノズルの噴射口と試験片中央点との距離を 50mm とし、角度を変化させてもこの距離が一定となる構造となっている。用いた吸引式ブラストマシンの空気圧は 5kg/cm²、また、ノズル直径は 6mm である。ノズル口から供試材に衝突するまでの噴出粒子の開き角は約 6deg. である。また、衝突粒子として平均粒径 770 μ m、硬さ 810HV1 の鉄を主成分とする不定形のスチールグリッドを使用した。

エロージョン摩耗試験は全て常温で行い、衝突粒子を実験ごとに新しいものと交換し、粒子速度を約 20m/s、粒子噴射量約 20.0g/s、粒子投入量 2kg、衝突角度を 30、60、及び 90deg.の 3 水準とし、1 回の試験時間を 3600sec. とし、エロージョン摩耗試験を行った。一定時間ごとに試験片の質量を電子天秤(0.1mg)で測定し、重量損傷を調べ、損傷速度により摩耗特性評価を行った。

密度の異なる材料の耐エロージョン性を比較する場合、材料の摩耗損傷評価には損傷速度を用いることが重要となる。損傷速度とは、衝突する粉流体の単位衝突粒子量あたりの摩耗体積量で評価する手法となっている。摩耗量を単位粒子あたりの損傷した重量減少量で評価すると、使用する供試材の密度が異なれば、同等条件での摩耗量評価ができない。下記に示すように、粉流体単位衝突粒子量あたりの、供試材体積損傷量で評価することにより、密度の違う供試材を比較する際、その評価を同等条件で行うことができる。したがって本研究においても、供試材の摩耗量の評価には、損傷速度(Erosion rate ; cm³/kg)を用いて評価を行った。

$$\text{損傷速度}[\text{cm}^3/\text{kg}] = \frac{\text{摩耗減少量}(\text{g})/\text{供試材の密度}(\text{g}/\text{cm}^3)}{\text{単位衝突粒子量}(\text{g}/\text{s}) \times \text{実験時間}(\text{s})}$$

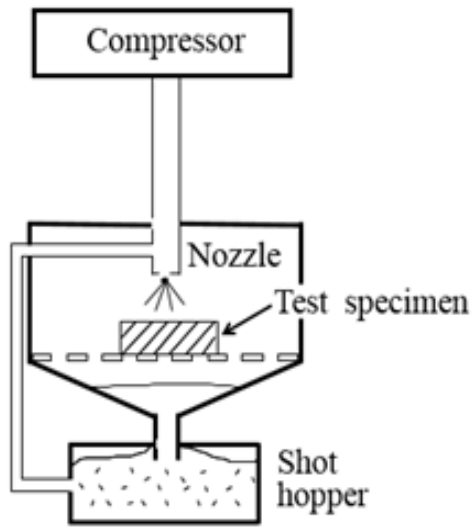
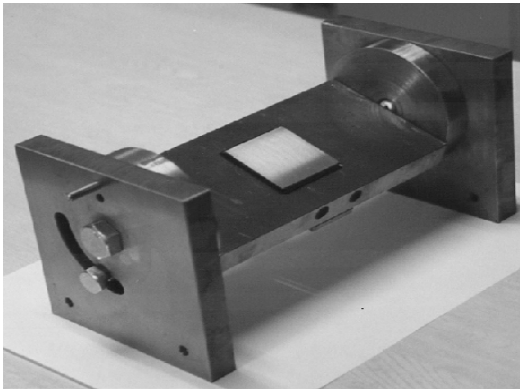
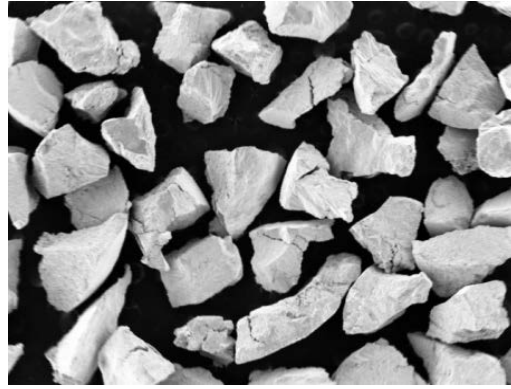


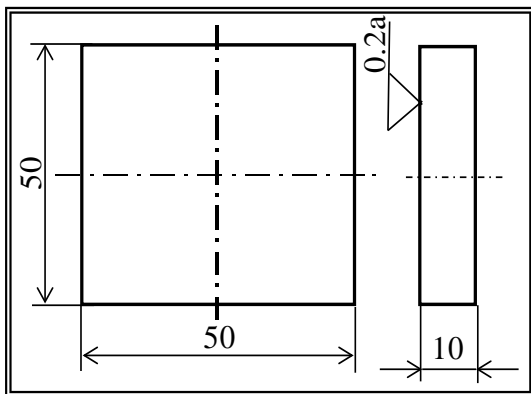
Fig.5 常温エロージョン摩耗評価試験機



衝突角度変更用試験台



衝突粒子



試験片形状

試験時間	3.6(ks)
衝突角度	30,60,90(deg.)
単位衝突粒子量	20.0(g/s)
空気流速	100(m/s)
粒子量	2(kg)
粒子の硬度	810(HV)
平均粒径	770(μm)

試験条件

Fig.6 常温エロージョン摩耗試験の概要

(2) 高温エロージョン摩耗評価試験

試験には高温エロージョン摩耗試験機を使用した。高温エロージョン摩耗試験機の概要を図に示す。この試験機は 3 種類の加熱炉により、粉粒体、供試材、圧縮空気を加熱することができるため、巡回シュートの高温環境下を忠実に再現することができる。実験条件は供試材温度を 900℃、粉粒体温度を 800℃、熱風温度を 500℃として試験を行った。粉粒体には平均粒径が 1.16mm のアルミナボールまたは、アルミナグリッドを使用した。アルミナは融点が 2072℃と高く、高温環境下においても硬さの低下がほとんどみられないことから、本研究の粉粒体に採用した。一度に噴射できる粉粒体の量は 800g であり、衝突を 10 回繰り返す、計 8000g の粉粒体を噴射した。この際の粉粒体の速度は 30m/s とした。

試験機には高温ビッカース硬さ試験機 AVK-HF を用いた。試験片の寸法は 7.0×7.0×5.0(mm)とした。試験温度は室温、300℃、600℃及び 900℃とした。供試材の昇温速度は 10℃/min とし、試験温度に達してから 5 分間保持し、試験を行った。試験面の酸化を極力抑えるため、試験はアルゴン雰囲気中で行った。圧子にはダイヤモンド圧子を用いた。試験荷重は 98N とし、荷重保持時間は 10 秒とした。圧痕の対角線の長さを 0.5 μm 単位まで読み取り、直交する対角線の長さとの平均値を用いて、硬さを算出した。以上の条件で各温度において 7 点の硬さを測定し、最大値と最小値を省いた 5 点の平均値を各供試材の硬さとした。

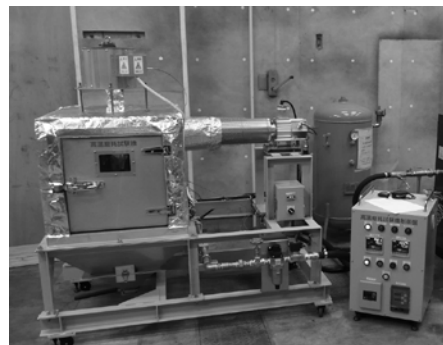
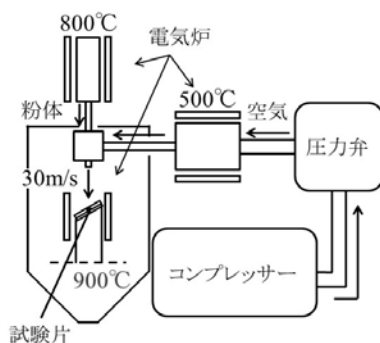
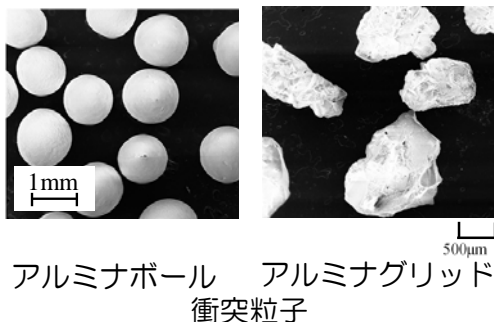


Fig.7 高温エロージョン摩耗試験機



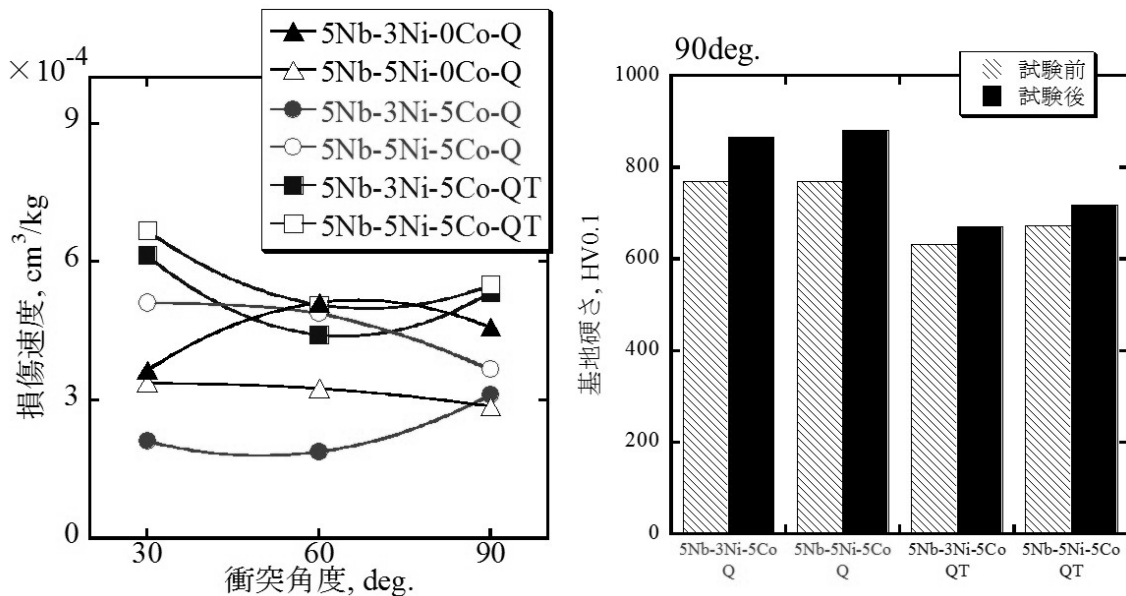
供試材温度, °C	900
粉体温度, °C	800
熱風温度, °C	500
衝突角度, deg.	30,60,90
粉体総重量, kg	8
粉体速度, m/s	30

Fig.8 高温エロージョン摩耗試験の概要

(3) 常温エロージョン摩耗評価試験結果

各供試材のエロージョン摩耗試験結果を図に示す。Ni を 3mass%添加した供試材の損傷速度は 3Ni-5Co-Q, 3Ni-0Co-Q, 3Ni-5Co-QT の順に小さく, 3Ni-5Co-Q が良好な耐エロージョン摩耗特性を示した。この結果から, Ni を 3mass%添加した供試材においては Co を添加することで良好な耐エロージョン摩耗特性を示した。Ni を 5mass%添加した供試材の損傷速度は 5Ni-0Co-Q, 5Ni-5Co-Q, 5Ni-5Co-QT の順に小さく, 5Ni-0Co-Q が良好な耐エロージョン摩耗特性を示した。また, 3Ni-5Co 及び 5Ni5Co の焼入れ供試材は焼戻し供試材と比較して, 優れた耐エロージョン摩耗特性を示した。特に 3Ni-5Co-Q は各供試材において最も優れた耐エロージョン摩耗特性を示した。

焼入れ供試材が優れたエロージョン摩耗特性を示した要因を明らかにするために, エロージョン摩耗試験前後における摩耗面近傍の断面硬度測定を行った。硬度測定の結果を図 39(b)に示す。各供試材におけるエロージョン摩耗試験後に硬さが上昇したが, 焼入れ材は焼入れ焼戻し材より基地硬さが上昇している。これは加工誘起変態によって基地硬さが上昇し, 材料表面の塑性変形を抑制したため, 焼入れ材が優れた耐エロージョン摩耗特性を示した。



(a) エロージョン摩耗試験結果

(b) 摩耗試験前後の硬さ

Fig.9 エロージョン摩耗試験結果及び摩耗試験前後における摩耗面近傍の硬さ結果

(4) 高温エロージョン摩耗評価試験結果

30deg. における摩耗表面には 5Nb-5Ni-0Co, 5Nb-3Ni-5Co に低角度特有の摩耗が見られ, 平均摩耗深さもそれに伴い増加している傾向を示した。60deg.において, 5Nb-3Ni-0Co, 5Nb-0Ni-5Co は高い平均摩耗深さが確認された。90deg.において 5Nb-0Ni-0Co が高い平均摩耗深さを示したが大きな差異は見られなかった。

平均摩耗深さのみの観点から評価する。30, 60, 90deg.の平均を算出すると, 5Nb-5Ni-5Co が最も少ない平均摩耗深さとなった。また Ni の添加量増加とともに平均摩耗深さは低下する傾向を示し, Co を添加することによりさらに低減させることが明らかとなった。

これまでの研究で高温硬さが同程度であるにも関わらず, 損傷速度の低下する傾向が確認され, 高温環境下においては炭化物だけではなく高温酸化特性の向上も重要であることが明らかとなっている。そこで, 硬さだけではなく高温酸化特性による影響も考えられると推測し, 実験を行った。各供試材の高温酸化試験の結果を示す。5Nb-0Ni-5Co が最も良好な高温酸化特性を優れていると明らかとなった。しかしながら, 5Nb-0Ni-0Co, 5Nb-3Ni-0Co, 5Nb-5Ni-0Co, 5Nb-0Ni-5Co, 5Nb-5Ni-5Co, の酸化重量に差異は見られなかった。以上のような結果から Ni, Co の添加によらず同程度の高温酸化特性を示すことが明らかとなり, 耐熱・耐摩耗性に優れた新規開発材料における多合金鋳鉄の制御技術の確立された

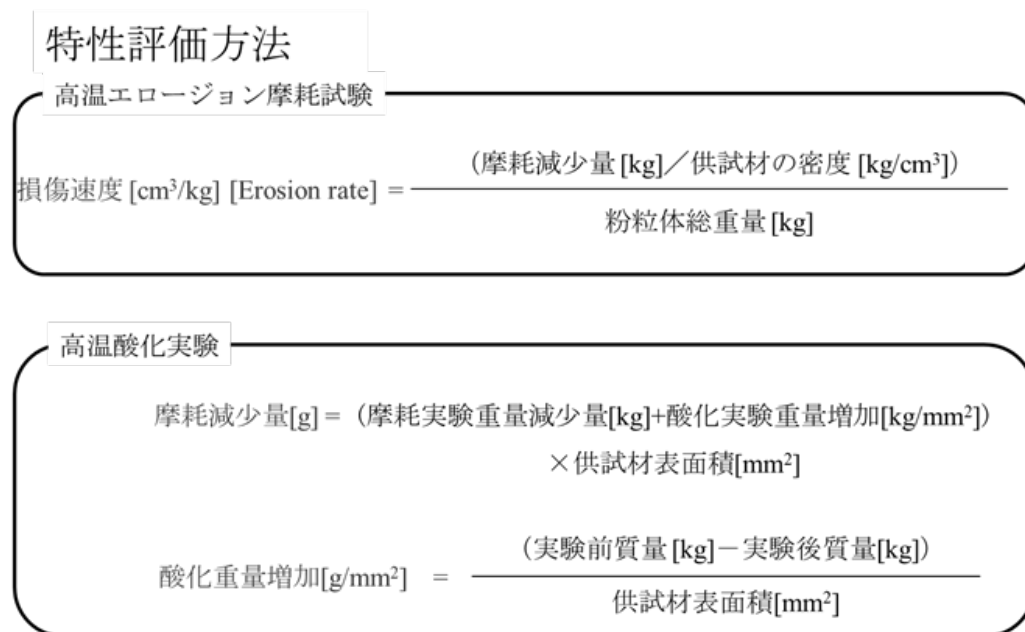


Fig.10 高温環境下でのエロージョン摩耗特性評価方法

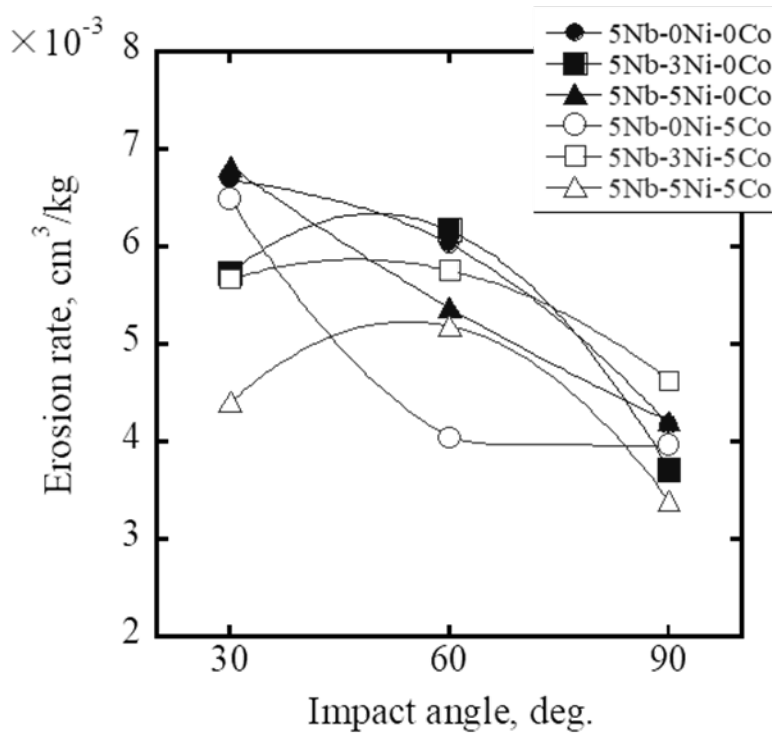


Fig.1 1 高温環境下でのエロージョン摩耗結果

2-2 小型製造モデルから大型製造モデルへのスケールアップ技術の確立

2-2-1 はじめに

川下企業である製鉄工場等は大型のライナー部品などを多く使用しており、一部加工が必要な製品もある。大型製品は、小型製品と比較して肉厚であるため冷却速度が遅い（内部に熱を保持しやすい）。そのため端部と中心部で組織が変化し、硬度や組織が均一ではなくなる可能性がある。これは、金属凝固時における冷却速度に差がでる（中央部に熱が残りやすい）ことにより、ゆっくり冷却された中央部では、焼入れ処理が不足している可能性があり、炭化物の晶出が少なく、硬度が小さく（軟らかくなる）可能性があるためである。

今回、ワイヤー放電加工機で切断できる大型ブロックを製造し、切断試験を実施し端部、中央部と硬度、組織、引け巣などの casting defects の有無を確認した。

2-2-2 大型ブロックの製造

今回製造する大型ブロックの成分は、多合金白鑄鉄 5Nb3Ni5Co とした。炭化物形成元素は、タングステン (W)、ニオブ (Nb)、クロム (Mo)、コバルト (Co) などであり添加した炭素 (C) と結合することによって高硬度の炭化物 (WC, NbC, Cr7C3 など、硬度

1300HV 等) を形成し基地組織 (鑄鉄の母材) 中に晶出する。また、熱処理を施すことにより、微細な二次炭化物を析出する。一次炭化物および二次炭化物により硬度が得られ耐摩耗性が高まる。大型ブロックのサイズは、200mm*200mm*200mm とし、人力で積載可能な重量 (100kg) とした。製造方法は、2-1-4 の供試材と同様の製造方法とする。

Table.2 切断試験用多合金白鑄鉄の化学組成 (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Co	Nb	Ni	W
3Ni-5Co	1.80-2.10	0.30-0.70	0.30-0.70	≤0.02	≤0.05	4.50-5.50	4.50-5.50	4.50-5.50	4.50-5.50	2.50-3.50	4.50-5.50

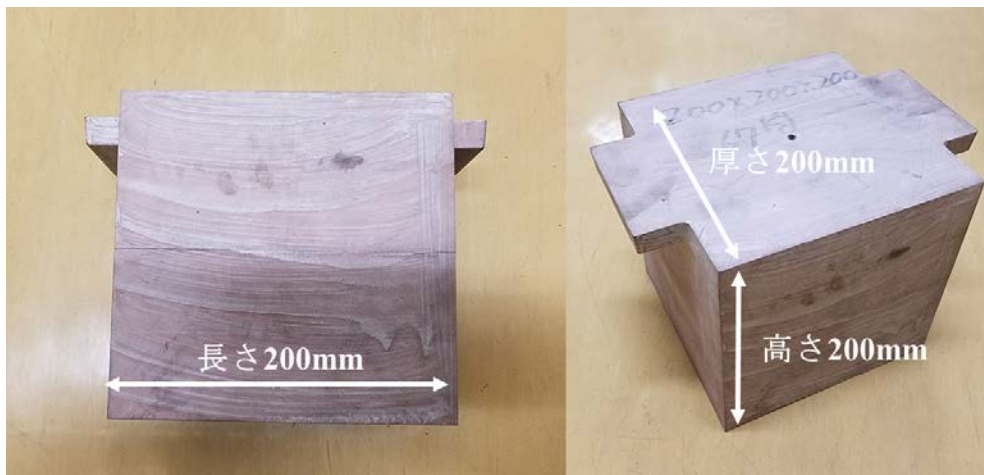


Fig.12 切断試験用大型ブロック木型

2-2-3 大型ブロック切断試験結果

大型ブロックの切断を実施した。大型ブロックの組織観察を実施するために、輪切りとする必要があり、大型ブロックの中央部を 200mm*200mm*10mm となるように 2 回切断した。下記に切断した大型ブロックの写真を示す。

切断した大型ブロックを用いて、製造された大型ブロックの冷却速度の影響があるか室蘭工業大学にて調査した。輪切りに切断したサンプルより、図に示す上部、中心部、下部の組織観察 (マクロ観察, SEM 観察) および、硬度測定を実施した。



Fig.13 大型ブロック切断

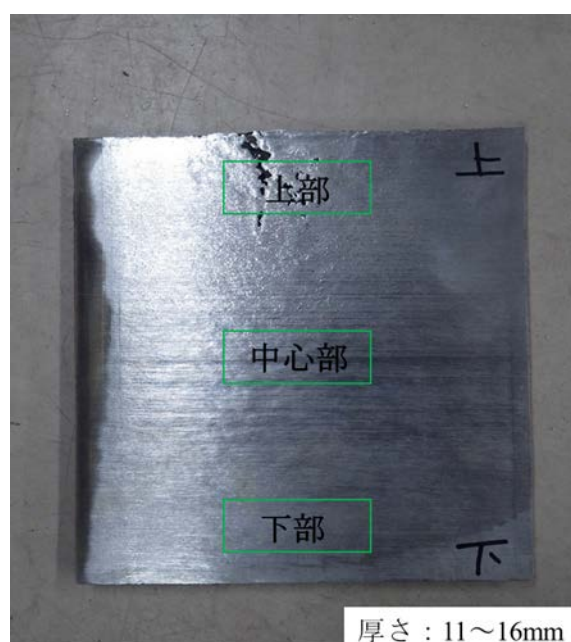


Fig.14 大型ブロック切断面

上部、中央部、下部と観察した結果、組織においては、いずれの箇所においても、オーステナイト・ベイナイト系の基地組織中に高硬度の炭化物が分散していることが判明した。また SEM 観察において基地組織中に微細な二次炭化物も析出されていることが確認できた。硬度においては、上部で 810HV、中央部で 801HV、下部で 806HV といずれの箇所においても変化はなかった。厚肉化した大型ブロックにおいても全体的な冷却速度の変化はないと言える。これは、熱処理段階での急速冷却が有効に機能していることと示唆される。これにより小型製造モデルから大型製造モデルへスケールアップしても製品上問題ないことが確立された。

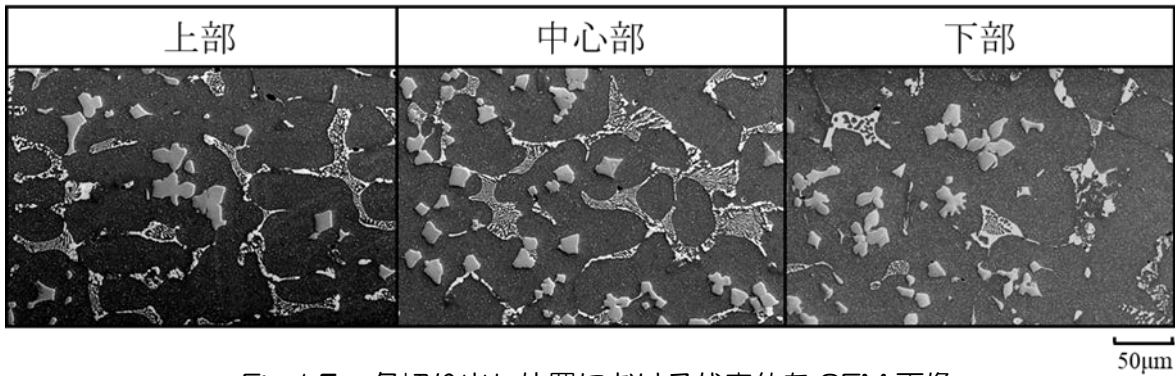


Fig.15 各切り出し位置における代表的な SEM 画像

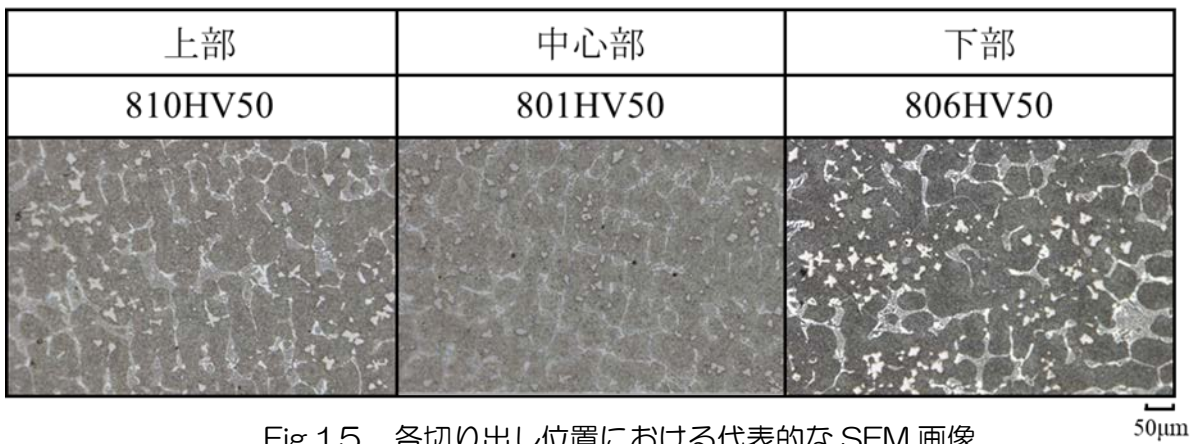


Fig.15 各切り出し位置における代表的な SEM 画像

2-3 実環境下における摩耗評価技術の確立

2-3-1 はじめに

試験製造した大型特殊鋳物が、実環境下においてラボレベルと同様の耐熱耐摩耗性を有しているかを判断するため、実環境の再現性を有した試験評価機を用いて材料の試験評価を行う。

2-3-2 対象製品の選定

実機評価試験を実施するにあたり、対象となる製品を試作した。対象製品として、巡回シュートライナーを用いた。巡回シュートは炉体内に鉱石やコークスなどの原料を装入する炉頂装入装置内において、巡回・傾動する機構により炉体内に適切な原料の装入分布を形成する装置である。巡回シュート内壁は原料の衝突により著しく摩耗する問題があり、特に摩耗の進行が早い箇所には耐摩耗性に優れたライナーが設置されているが、抜本的な解決には

至っていない。このことより、メンテナンスに伴う操業停止時間、コスト削減の観点から、耐摩耗材料の開発によるライナーの長寿命化が望まれている。

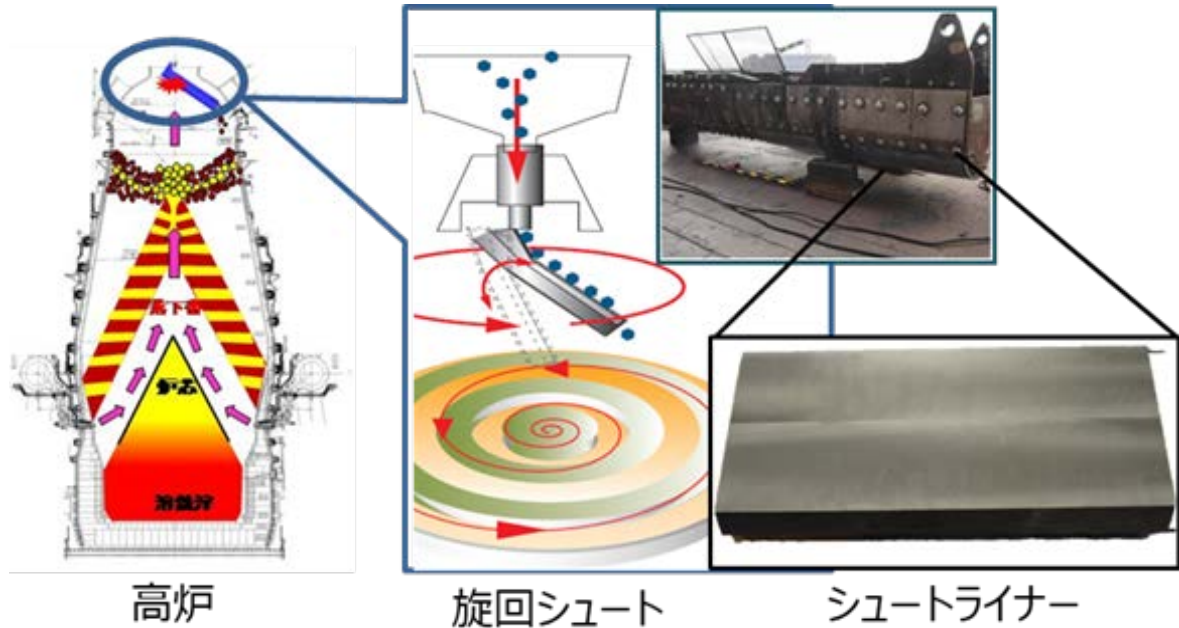


Fig.16 高炉頭頂部の回転シュートおよびライナー

回転シュートライナーは、耐摩耗化を目指すために鑄ぐるみ鑄造法により耐摩耗試験片を製作、耐摩耗特性の評価がなされてきた。鑄ぐるみ鑄造法とは、鑄型に他の機能を持つ材料をあらかじめ固定し、溶湯を鑄型に流し込み一体化させる複合材料加工法の一つである。この鑄ぐるみ鑄造法により、材料表面近傍に超硬(WC-Co)を複合化することで、材料の耐摩耗性を向上させてきた。その結果、摩耗表面に占める WC 面積率の増加に従い、耐エロージョン摩耗特性が向上することが明らかとなった。しかし、WC の接合不良や引け巣等の欠陥が確認され、これらの欠陥による強度低下が懸念された。鑄ぐるみ鑄造法では、心材の形状や配置、溶湯との濡れ性や体積比によって心材の接合状態が左右される。このため、欠陥が発生しやすく、これらの欠陥の防止は鑄ぐるみ耐摩耗材料の開発において重要な課題である。そこで、実機用の複合化させたシュートライナーを製造し、実機環境下での試験を実施した。

2-3-3 対象製品の試作

従来の方案として、ライナー外周部から溶湯が回るようにセキを切り、湯口を1箇所、発熱スリーブを使用した押し湯を2箇所とした方案を立て鑄造等を実施した(コの字セキ)。しかし、タングステンカーバイト(超硬:WC)を複合化させるために、鑄型内に配置する

ため、コの字セキでは溶湯が、WC の横から回り込めず、欠陥の発生原因等となった。そこで、湯口を製造するライナー上部一面とし、セキを上部からライナー側へ複数落とす鑄造方を検討した。

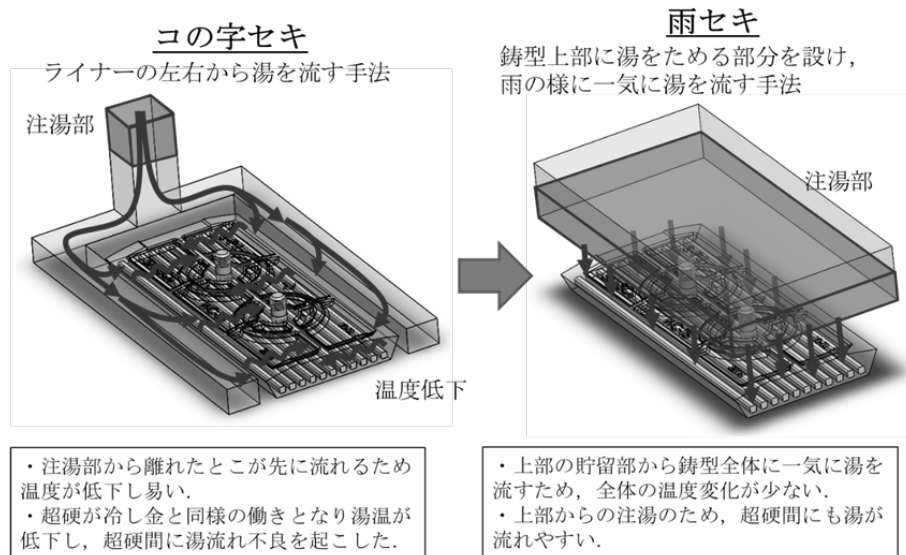


Fig.17 旋回シュートライナー用鑄造方案



Fig.18 旋回シュートライナー製品

2-3-4 実機環境を再現した落下試験

(1) 供試材

WC 鑄ぐるみライナーの母材には、2-1 で開発された 5Ni-5Co と同じ化学組成の多合金白鑄鉄を用いた。心材として鑄ぐるむ超硬は WC-10Co とし、形状は台形(R2 有)とした。

ライナーの寸法は、手前側を $184.5 \times 45\text{mm}$ 、奥側を $186.8 \times 40\text{mm}$ 及び長さ 453mm の実機と同様の大きさとした。鑄ぐるむ超硬棒数は 11 本とし、研削後の完成品において表面から 5mm の位置となるように、鑄込み時は表面から 10mm の位置に鑄ぐるみ鑄造を施した。鋼球落下試験前のライナーには、4 つのき裂が生じていた。それぞれのき裂長さを計測した結果、①では 18mm 、②では 23mm 、③では 9mm 、④では 25mm であった。

(2) 試験方法

試験には旋回シュート同様の落下試験が可能な実機環境を再現した鋼球落下試験機を開発し使用した。ライナーを設置する架台は 20deg. から 70deg. まで 10deg. ごとに可変する。架台に設置後のライナーの様子を示す。本試験機では、バケットに乗せた鋼球をチェーンコンベアによりライナーより上方 1880mm へ持ち上げ、シュートへ装入する。鋼球はシュート通過時にカウンターによりカウントされ、シュートを通過した鋼球はガイドホッパーにより拳動を安定させライナーへと落下する。本試験で用いる鋼球を示す。鋼球寸法は、実際の旋回シュートで装入されているコークス粒径と同等の $\phi 50\text{mm}$ 、鋼球の質量は平均 530g とした。ライナーへの衝突速度を 10m/s 、落下高さを 1880mm 、衝突角度を 40deg. 及び総衝突球数は 1000 球とした。この鋼球を 200 球衝突させるごとにライナー表面の外観観察及び側面におけるき裂長さを測定した。

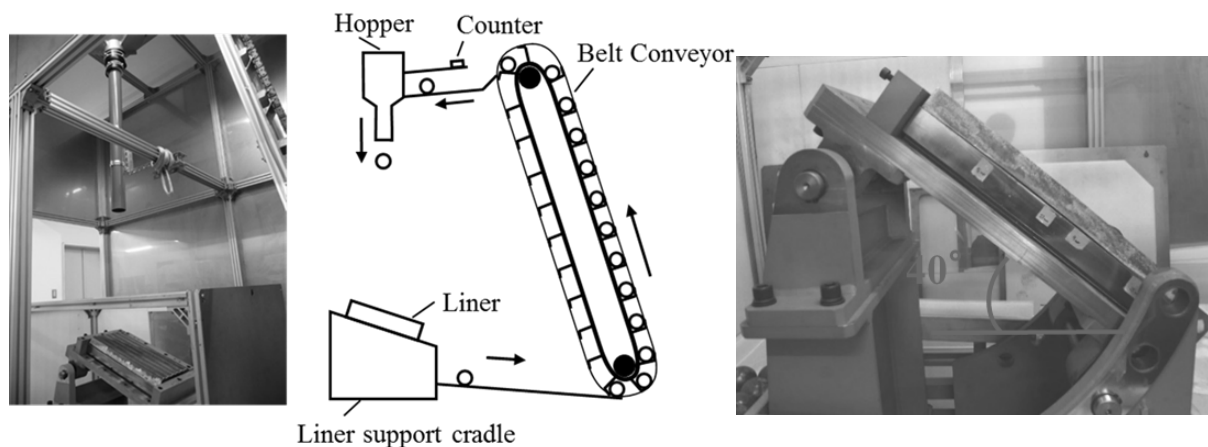


Fig.19 鋼球落下試験機



Steel ball diameter	50mm
Steel ball weight	530g
Drop speed	10m/s
Drop of distance	1880mm
Liner degree	40deg.
Drop of number	1000times

Fig.20 鋼球落下試験機 試験条件

(3) 試験結果

試験前に比べ、衝突球数が増えるごとにライナー表面において圧痕数の増加が確認できる。き裂長さの測定結果より、試験後のライナーの全てのき裂において伸展が確認された。圧痕部から伸びるように新たなき裂⑤及び⑥が発生した。き裂⑤に関しては衝突球数 600 球での計測時に生じており、き裂①から枝分かれしたような状態となっていた。き裂⑥に関しては、衝突球数 400 球での計測時に生じており、圧痕集中部からき裂が伸展していた。既存のき裂においてはき裂③で最も伸展し、12mm 伸展した。新たに生じたき裂においてはき裂⑥で 26mm 伸展した。衝突球数ごとのき裂の伸展長さに着目すると、既存のき裂では初めの 200 球衝突させたときに一気にき裂が伸展し、その後はほぼ伸展しなかった。この要因として、圧痕集中部より伸展した新たなき裂に応力が集中したためと考えられる。再現性の高い実環境を模した試験機により、製品の評価試験が可能となった。

これらの結果をもとに、試作品を川下企業に導入し実環境下での実機試験を進行している。

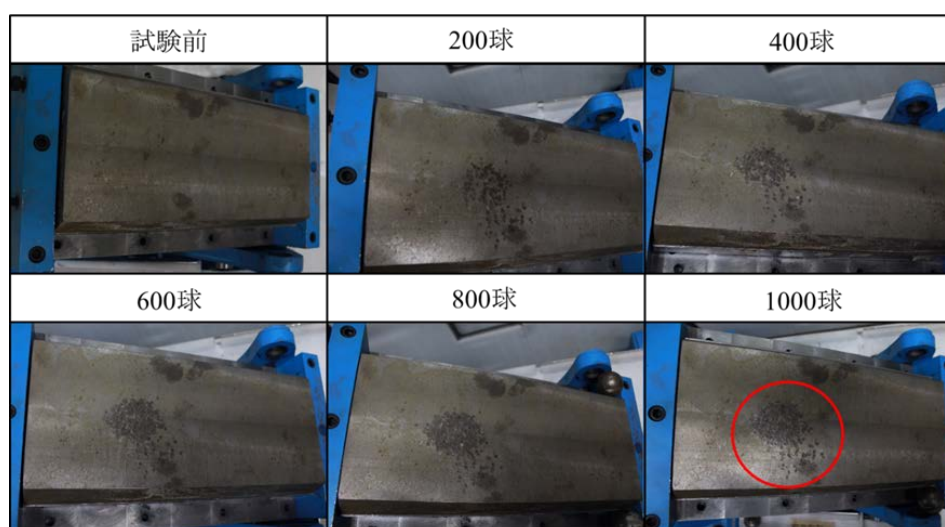


Fig.21 各回数落下試験での試験片表面

第3章 総括

本事業でターゲットの一つとしている高炉製鉄所では、近年の合理的な生産体制などの操業変化により、設備の負荷が増加し、高炉設備を保護する部品や粉体にさらされる各種部材において、摩耗や熱亀裂、腐食などの損耗が激しく、機能保持やコスト削減が長年の課題となっている。

耐摩耗材料の寿命は使用環境にもよるが、数ヶ月程度から数年となっており、定期的な交換が必要とされるが、操業条件が厳しくなる中、年に数回の操業停止によるコストを削減するため、従来品以上に長寿命化した耐熱耐摩耗部品が必要とされている。

本研究では、従来製品よりも長寿命化された鋳鉄材料の開発を実施し、それを元に求められている大型製品の製造および製品の評価について、材料配合や各種手法の確立を実施するものである。

① 耐熱・耐摩耗性に優れるメソスコピック多合金白鋳鉄の制御技術の確立

課題として、耐熱・耐摩耗性両面を持った最適配合が未確立であり、最適の組合せ（配合比率）および熱処理条件を確定することが必要であった。それに対して、多合金白鋳鉄を基礎として、耐熱性を有したニッケル（Ni）添加系合金の開発に成功した。

② 小型製造モデルから大型製造モデルへのスケールアップ技術の確立

課題として、大型製品でも小型品と同等の組織状態・硬さが再現可能か大型製品を製造する鋳造技術の確立が必要であった。それに対して、シミュレーションと大型試験片から、大型化した場合でも組織制御が可能であることが示された。

③ 実環境下における摩耗評価技術の確立

課題として、実環境下において耐摩耗性が発揮するか不確定であり、環境再現性のある条件下で評価が必要であった。それに対して、実機同様の製品試作を実施し、鋼球落下試験や、川下企業での試験など実施解決策を検討した。

④ 事業化計画の検討

共同実行者である岩見沢鋳物、北海道特殊鋳鋼を主たる企業とし、室蘭工業大学を品質評価および研究開発対応として、優れた技術力を有する複数の中小鋳造業が地域を越えて連携することにより受注能力を強化し、大手企業からの大型案件への対応を可能とする中小企業からなる「特殊鋳物協同組合」を設立させ、技術の平準化をもって、川下企業からの耐熱・耐摩耗特殊鋳物の大型および大量生産化に対応する計画を進めている。