

平成 2 3 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「耐摩耗性・耐熱性の向上に資する鋳造技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成 2 4 年 3 月

委託者 北海道経済産業局

委託先 佐藤鋳工株式会社

## 目 次

### 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	1
1 - 2	研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	3
1 - 3	成果概要	5
1 - 4	当該研究開発の連絡窓口	6

### 第 2 章 本論

2 - 1	高温環境下での耐熱・耐摩耗鋳鋼材料の摩耗メカニズムの解析	7
2 - 2	耐熱・耐摩耗鋳鋼材料の化学成分の確立	7
2 - 3	耐熱・耐摩耗鋳鋼材料のエロージョン耐摩耗性評価	8
2 - 4	スガ式摩耗試験によるすべり摩耗特性評価	8
2 - 5	10%Co 含有多合金系白鋳鉄の製造	8
2 - 6	10%Co 含有多合金系白鋳鉄のエロージョン摩耗特性	14
2 - 7	耐熱・耐摩耗性鋳鉄の新規材料選定および製造	14
2 - 8	難削材の加工条件の確立	17
2 - 9	レアアースレスなどの材料配合の検討	20

### 第 3 章 全体総括

3 - 1	複数年の研究開発成果	24
3 - 2	研究開発後の課題・事業化展開	25

## 第1章 研究開発の概要

断熱材用グラスウール製造ラインにおけるローター材料や、製鉄プラントの配管設備部品材料などは、常時高温環境下において使用されるため、使用材料の耐熱性、耐摩耗性が不可欠である。しかし、耐熱性と耐摩耗性の両面に優れる材料はほとんど無く、材料の開発が急務である。

本研究では、硬質な炭化物を微細にしかも粒状としてマトリックス状に分散した600 を超える温度にも耐えうる耐熱・耐摩耗鋳鋼の製造技術の確立を目的とする。

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### 1-1-1 研究開発の背景

近年、地球環境保全の観点から、省エネルギー、省資源の達成は社会的な急務となっている。このため、鉄鋼材料においても、高強度化、耐久性の向上など新たな課題解決が強く要請されるようになってきている。例えば、断熱材を製造するメーカーでは、高温の原料(スラグ)を高速回転するローターに衝突させて断熱材を製造しているが、そのローター表面のエロージョン摩耗による損傷が問題となっている。同様に、鉄鋼プラント業界でも溶融還元設備などで、高温の配管への溶銑、微粉炭、鉄鉱石などの粉粒体の衝突のため、エロージョン摩耗による損傷が問題となっている。

鋳造分野において、高強度鋳鋼材料の開発の歴史は古く、様々な強化機構が考案・実用化されているが、「耐摩耗性」及び「耐熱性」という両面の特性に優れる材料はこれまでほとんど無い。「耐摩耗性」に優れる高クロム鋳鉄は、500 を超えると強度が著しく低下し、高温状態での摩耗に耐えられないことがある。「耐熱性」に優れる高クロムニッケル合金は耐摩耗性に劣ることが知られている。

#### 1-1-2 研究目的及び目標

近年、環境問題やエネルギー問題の観点から、製織工場において、従来の断熱材用グラスウール製織ラインより高効率な生産が求められている。その中、断熱材用グラスウール製造ラインの効率を向上させるために、製織機械におけるローターの高速回転が有効な手段となっている。しかしながら、ローターの回転速度を向上させると、ローターの摩耗が激しくなり、寿命が著しく短縮されるため、ローター材の耐熱性・耐摩耗性を向上させることは、極めて重要である。

一方、耐熱性、耐食性、特に高温耐摩耗性、及び高強度、高硬度などに優れた高温材料の開発が可能になりつつある。しかしながら、上記の高温環境下では、800 のスラグがローターに繰り返し衝突することにより材料が損傷、除去されるエロージョン摩耗が問題となっている。

そこで本研究では、下記に2つの観点から研究を展開した。

1つ目は、高温摩耗、特に高温域におけるエロージョン摩耗を着目し、新規製作した高

温エロージョン摩耗試験機を用い、これまでのローター材料について試験を行い、それらの高温摩耗特性及び摩耗メカニズムを解明した。

まず、高温エロージョン摩耗における実験手法を確立した。次に、常温エロージョン摩耗との相違点を視野に入れて、高温度環境下での鉄鋼材料の耐エロージョン摩耗特性を評価し、実験結果を踏まえて、エロージョン摩耗寿命の評価、推定に応用しようとするものである。

2つ目は、上記を踏まえて、耐摩耗性及び耐熱性の両面に優れた材料を製造する鑄造技術の開発を目的とした。

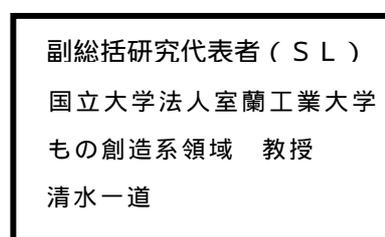
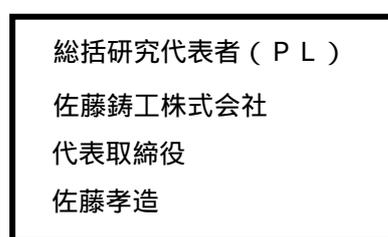
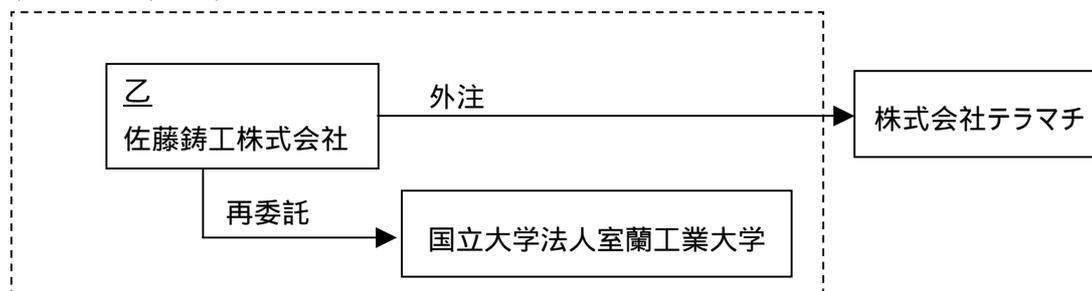
断熱材用グラスウール製造ラインにおけるローター材料や、製鉄プラントの配管設備部品材料などは、常時高温環境下において使用されるため、使用材料の耐熱性、耐摩耗性が不可欠である。これまでのローター材料の中では、耐熱性と耐摩耗性の両面に優れる材料はほとんど無く、材料の開発が急務である。

本研究では、硬質な炭化物を微細化かつ粒状としてマトリックス中に分散させた 600 を超える温度にも耐えうる耐熱・耐摩耗鑄鋼の製造技術の確立を試みる。

## 1-2 研究体制

### 1-2-1 研究組織及び管理体制

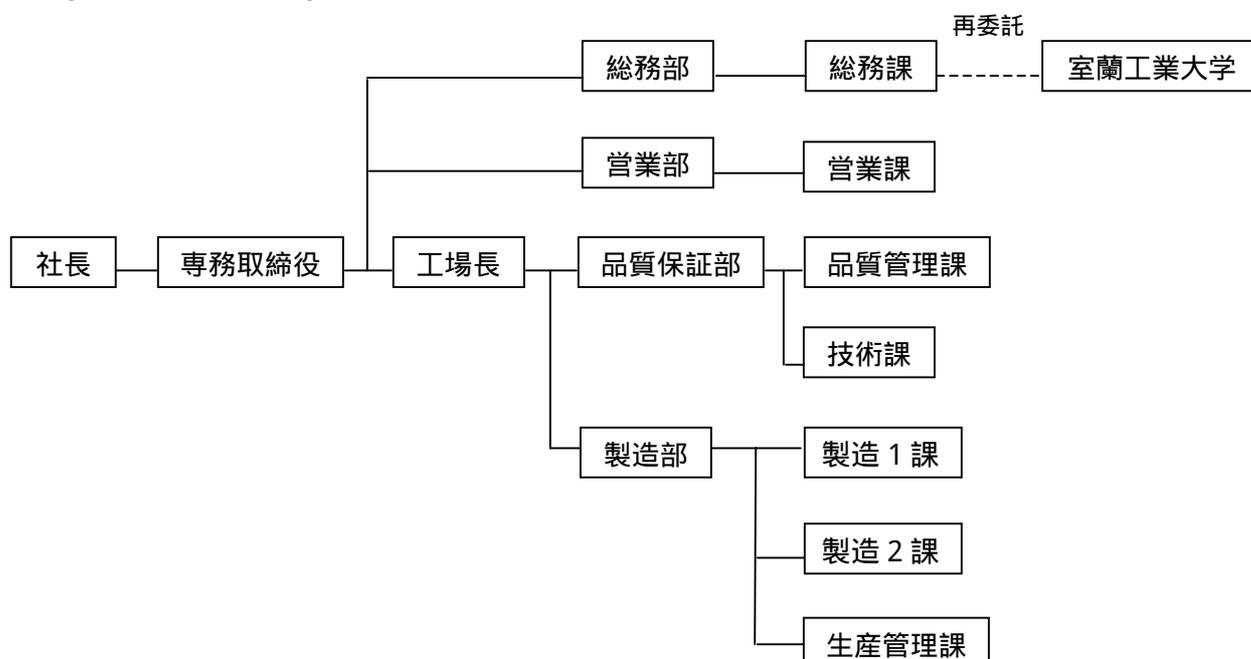
#### 1) 研究組織(全体)



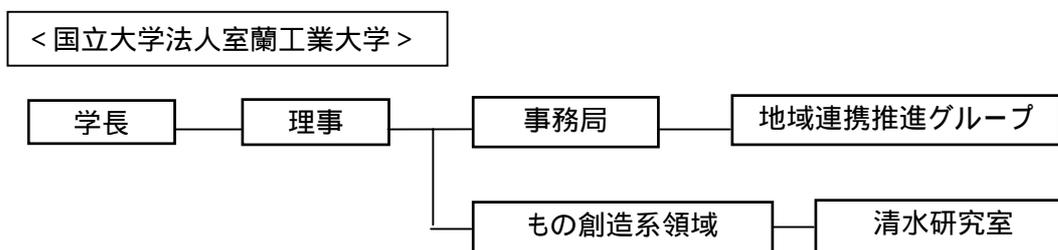
#### 2) 管理体制

事業管理者

[佐藤鑄工株式会社]



(再委託先)



### 1-2-2 管理員及び研究員

【事業管理者】 佐藤鑄工株式会社

#### 管理員

氏名	所属・役職
佐藤 孝造	代表取締役
佐橋 信明	総務部 総務部 部長
馬場 慎也	総務部 総務課 課員

#### 研究員

氏名	所属・役職
佐藤 孝造(再掲)	代表取締役
杉坂 哲也	工場長
八谷 和夫	社長付特命部長
清水 孝幸	製造部次長
川村 政信	品質保証部 技術課(模型担当) 課長
中道 邦弘	品質保証部 技術課(CAD担当) 課長
三浦 孝幸	品質保証部 品質管理課 課長
菊野 幸男	製造部 製造2課 課長
池川 勝	製造部 製造1課 鑄造1Gr 主任
原 幸雄	製造部 製造1課 鑄造1Gr
栗中 一	製造部 製造1課 鑄造1Gr
小向 敏晴	製造部 製造1課 鑄造1Gr
吉田 明	製造部 製造1課 鑄造1Gr 主任

【再委託先】 国立大学法人 室蘭工業大学

氏名	所属・役職
清水 一道	もの創造系領域 教授
伊藤 幸	ものづくり基盤センター 事務補佐員

### 1-2-3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

佐藤鋳工株式会社

(経理担当者)	総務部	総務部	部長	佐橋 信明
(業務管理者)	社長付特命部長			八谷 和夫

(再委託先)

国立大学法人 室蘭工業大学

(経理担当者)	地域連携推進課	課長	川岸 斉
(業務管理者)	もの創造系領域	教授	清水 一道

### 1-3 成果概要

#### 1-3-1 高温度環境下での耐熱・耐摩耗鋳鋼材料の摩耗メカニズムの解析

- 1)新規高温エロージョン摩耗試験機を製作し実験条件の確立を行い、既存の耐熱・耐摩耗材料(高クロム鋳鉄、高クロムニッケル合金など)について800~900 高温域におけるエロージョン摩耗特性について調査した。
- 2)エロージョン摩耗因子の中から被衝突材料の機械的性質に着目して、高温度域における材料の機械的性質からの耐高温エロージョン摩耗特性の推定の可否について、引張試験および硬さ試験、エロージョン摩耗試験の結果から相関関係を考察した。

#### 1-3-2 耐熱・耐摩耗鋳鋼材料の化学成分の確立

- 1)基本合金組成として、Cr,Mo,W,V,C 量を一定とし、Co 量を変化させた多成分系白鋳鉄を選び、凝固組織とCo 量の材料の耐熱性・耐摩耗性に及ぼす影響を調査した。
- 2)組織成分層の種類及び形態を明らかにするため、晶出炭化物の合金濃度測定、炭化物の同定を行い、さらに基地のオーステナイト量をも測定した。

#### 1-3-3 耐熱・耐摩耗鋳鋼材料のエロージョン耐摩耗性評価

- 1)Co 量を変化させた多合金系白鋳鉄について、常温エロージョン摩耗試験及び高温エロージョン摩耗試験を行い、それぞれの耐摩耗特性について評価した。

#### 1-3-4 スガ式摩耗試験によるすべり摩耗特性評価

- 1)C 量は約2%に、合金元素として、Cr, Mo, W, 及び V 量を約5%の一定とし、Co 量を0~10%に変化させた多合金系白鋳鉄を作成し、Co 量と乾式すべり摩耗特性との関係を検討した。

#### 1-3-5 10%Co 含有多合金系白鋳鉄の製造

- 1)10%Co 鋳鋼品製作で作成した丸棒 250×200 に切削加工を施し、ローター部品用のサンプル製造を行った。

#### 1-3-6 10%Co 含有多合金系白鋳鉄のエロージョン摩耗特性

1)ラボ試験により耐摩耗性が一番すぐれていた 10%Co の多合金系白鑄鉄を選択し、製造方法をスケールアップし製作を試みた。製造された 10%Co 鑄鉄の機械的性質を評価した。

#### 1-3-7 耐熱・耐摩耗性鑄鉄の新規材料選定および製造

1)新規耐熱・耐摩耗材料として、Mo を含む 26%Cr 鑄鉄の成分配合を行い材料の製造を行った。また、ガラス破碎機用の破碎刃等 6 種類のサンプル製造を行った。

#### 1-3-8 難削材の加工条件の確立

1)切込量・切込量・切削油材などが工具・被削材に与える影響を検討し、最適な加工条件を確立した。

#### 1-3-9 レアアースレスなどの材料配合の検討

1)代替材料を用いた予備試験を行い、レアアース代替材料の評価を行った。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

##### (1) 事業管理者

氏名：佐橋信明

所属組織名：佐藤鑄工株式会社

所属役職：総務部長

住所：〒079-0502 北海道雨竜郡妹背牛町 356 番地

TEL：0164-32-2130 FAX：0164-32-2267

E-mail：n\_sahashi@satochuko.co.jp

##### (2) プロジェクトリーダー（PL）

氏名：佐藤孝造

所属組織名：佐藤鑄工株式会社

所属役職：代表取締役社長

住所：〒079-0502 北海道雨竜郡妹背牛町 356 番地

TEL：0164-32-2130 FAX：0164-32-2267

E-mail：k\_sato@satochuko.co.jp

##### (3) サブプロジェクトリーダー（SL）

氏名：清水一道

所属組織名：学校法人室蘭工業大学

所属役職：もの創造系領域 材料工学ユニット 教授

住所：〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1

TEL：0143-46-5651 FAX：0143-46-5651

E-mail：shimizu@mmm.muroran-it.ac.jp

## 第2章 本論

### 2-1 高温度環境下での耐熱・耐摩耗鋳鋼材料の摩耗メカニズムの解析

本研究では、高温度環境下におけるエロージョン摩耗に着目し、新規高温エロージョン摩耗試験機を製作し、実験条件の確立を行い、従来供試材について 800~900 高温域におけるエロージョン摩耗特性について調査した。また、エロージョン摩耗因子の中から被衝突材料の機械的性質に着目して、高温度域における材料の機械的性質からの耐高温エロージョン摩耗特性の推定の可否について、引張試験及び硬さ試験、エロージョン摩耗試験に結果から相関関係を考察した。その成果を以下に示す。

- (1) 新規高温エロージョン摩耗試験機の製作に成功し、実際の現場での高温度域の摩耗を再現できた。高温エロージョン摩耗において、高温により材料が軟化し、切削摩耗が顕著に現れる特徴を示す。
- (2) SUS403 及び SUS630 の温度上昇による硬さの低下割合、各温度の 90deg. における損傷速度の上昇幅は同程度である。90deg. におけるエロージョン摩耗は、変形摩耗が支配的であるため、硬さの低下割合と損傷速度には比例関係があると推察できた。
- (3) 900 の 30deg. において、試料間の損傷速度に約 2 倍の差が見られた原因は、伸びの違いであると考えられる。低角度側でのエロージョン摩耗では突起部の伸展作用が働き、伸びの高い材料はエロージョン摩耗により形成される突起部が伸展しやすくなると考えられる。そのため、低角度側でのエロージョン摩耗試験結果に、伸びの違いが損傷速度の差として、顕著に表れたと考えられる。
- (4) 従来供試材では、ある程度耐高温摩耗性が得られたが、今後の課題として、鋭角での耐高温エロージョン摩耗を向上させることであり、更なる耐摩耗・耐熱性が求められている。新たな合金設計による新材料の開発が急務であると言える。

### 2-2 耐熱・耐摩耗鋳鋼材料の化学成分の確立

C量は約2%に、合金元素として、Cr, Mo, W, 及びV量を約5%の一定とし、Co量を0~10%に変化させた多合金系白鋳鉄を作製し、Co量と耐摩耗性・耐食性との関係を研究した結果、次のことが明らかになった。

- (1) 多合金系白鋳鉄において、Co量の増加に伴い、硬さが上昇する。
- (2) 多合金系白鋳鉄の耐摩耗性は、Co量の増加に伴い良好になり、黒鉛を含有するNi-hard 鋳鉄及び高クロム鋳鉄より摩耗を抑えることがわかった。
- (3) 多合金系白鋳鉄の高温酸化実験では、973Kでは酸化量はわずかだったが、温度上昇に伴い酸化が増加する傾向であり、1273Kでは、Co量に関係なく酸化が著しく増加する。以上の結果より、多合金系白鋳鉄の開発にあたり、晶出炭化物の種類や形態十分に把握した上、耐熱性、耐食性を向上させるため、合金の添加割合の調整、熱処理条件の決定、などを考慮し、新たな合金設計を試みる必要がある。

### 2-3 耐熱・耐摩耗鋳鋼材料のエロージョン耐摩耗性評価

本研究では、Co 量を変化させた多合金系白鋳鉄について、常温エロージョン摩耗試験及び高温エロージョン摩耗試験を行い、それぞれの耐摩耗特性について評価した。その結果を下記に示す。

- (1) 常温エロージョン摩耗試験において、Co の増加により耐摩耗性が向上した。その理由として、熱処理による 2 次硬化により、基地組織の硬度が上昇していた点、及びエロージョン摩耗試験後の加工硬化により硬さが上昇し、加工硬化後の硬さが大きいためと考えられる。
- (2) 常温エロージョン摩耗試験において、多合金系白鋳鉄に晶出した炭化物は、粉粒体の衝突による塑性流動を抑制し、耐摩耗性向上に大きく寄与していると考えられる。
- (3) 高温エロージョン摩耗試験において、損傷速度は低角度側で高い値を示した。これは、材料の軟化により、低角度側では、切削摩耗により塑性流動した組織の脱落、除去が進行するが、高角度側では変形摩耗のため、脱落、除去に至りにくいことが考えられる。
- (4) 高温エロージョン摩耗試験において、多合金系白鋳鉄は、Co の添加により耐摩耗性は向上した。しかしながら、酸化量が多いと考えられる。そのため損傷速度が最も低い値を示した衝突角度 90deg. でマイナスの値を示したと考えられる。

### 2-4 スガ式摩耗試験によるすべり摩耗特性評価

C 量は約 2% に、合金元素として、Cr, Mo, W, 及び V 量を約 5% の一定とし、Co 量を 0 ~ 10% に変化させた多合金系白鋳鉄を作製し、Co 量と乾式すべり摩耗特性との関係を検討した結果を下記に示す。

- (1) 多合金白鋳鉄において、Co 量の増加に伴い、耐摩耗性は良好となり、ステンレス鋼である SUS304 より約 50% 摩耗を抑え、良好な耐摩耗性を示すことが知られている球状バナジウム炭化物鋳鉄と同等またはそれ以上の耐摩耗特性を有する。
- (2) 多合金白鋳鉄は、Co 含有量の増加につれ、基地組織の二次硬化により、硬度が上昇したことが、耐摩耗性に寄与したと推察できる。

### 2-5 10%Co 含有多合金系白鋳鉄の製造

#### (1) 10%Co 鋳鋼品製作

本実験では、Table 2.5.1 に示すように、サイズが  $\phi 250 \times 200$  の丸棒を 2 本、 $30t \times 300 \times 400$  の板状のものを 2 枚、または B 型 Y-block 10 個を作成するため、Table 2.5.2 に示す原料を用意し、Table 2.5.3 に示した Cr, Mo, W, V は概ね 5%、Co は約 10% になるような目標成分になるよう、調整を行った。

Table 2.5.1 Specimens being manufactured

丸棒 φ250×200 (75kg) 2本	300 kg
板 30t×300×400 (27kg) 2枚	108 kg
Yブロック 10個	100 kg
計	508 kg

Table 2.5.2 List of raw materials

スクラップ鉄	適量
銑鉄	適量
Fe-Cr	200 kg
Fe-Mo	50 kg
Fe-W	50 kg
Fe-V	60 kg
Co	100 kg

Table 2.5.3 Expected chemical composition of multi-component white cast iron with 10%Co

C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Co	Hv
1.98	0.52	0.47	4.89	5.08	5.08	4.96	9.80	980

### 地金の溶解

地金の溶解には、0.5t高周波誘導炉を使用する。まず、Fig. 2.5.1に示すように用意したスクラップ鉄、銑鉄及び各種フェロ合金（Fe-V、Fe-Cr、Fe-Mo、Fe-W、Co）を予め計算した配合で、溶解炉に投入し溶解する。

地金が完全に溶解した後、るつぼへ出湯する。出湯温度は、1595<sup>o</sup>Cである。また、出湯時に成分分析を行う。Table 1に出湯時の成分分析結果を示す。溶解と同時に、型製作を行う。丸棒（φ250×200）、板（30t×300×400）及びYブロック（Fig. 6.2に参照）の三種類型を作製した。型作製完了後、塗型を行い、注湯する。

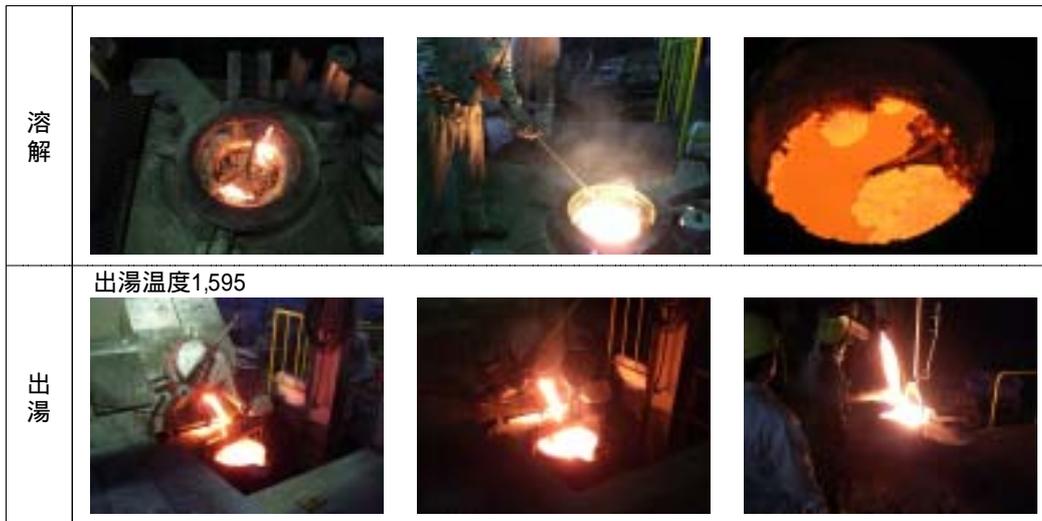


Fig. 2.5.1 Metal melting and tapping

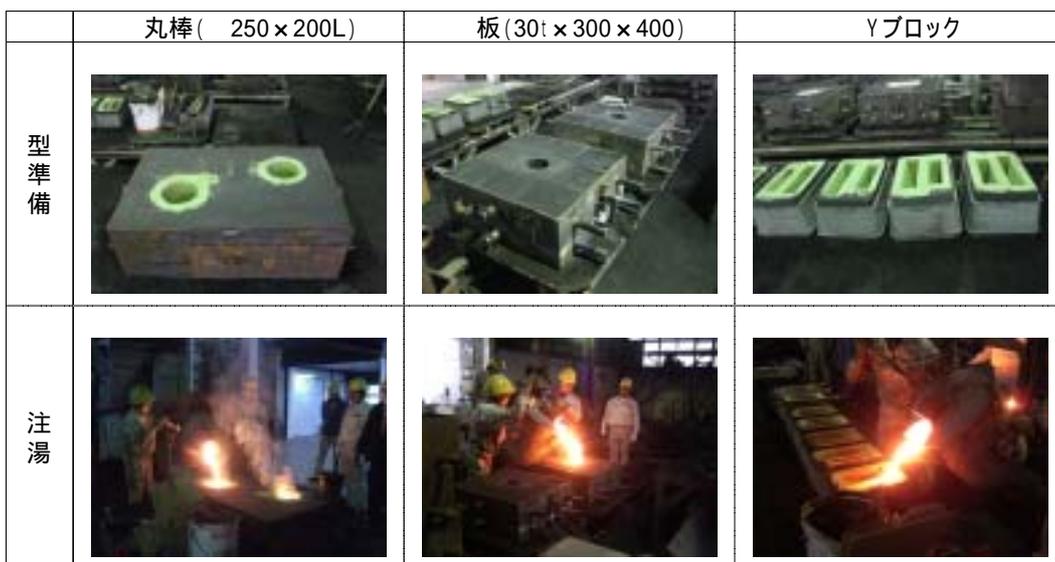


Fig. 2.5.2 Model making and pouring

注湯後，ゆっくりと冷却し，型ばらし，ショットによる砂落としを行った．Fig. 2.5.3 は，その様子である．



Fig. 2.5.3 Shake-out and shot blast

また，出湯時に測定した最終化学成分を Table 2.5.4 に示す．最初の目標数値と比べ，Mo，W 及び V の量はやや高くなっていることが分かる．

Table 2.5.4 出湯時の最終化学成分

Fe	Cr	Mo	W	V	Co	C	Si	B	Mn	P	S
61.139	4.920	7.400	6.200	6.330	10.180	1.930	0.440	>0.03	0.390	0.240	0.025

試作された Y ブロック試験片から，常温エロージョン摩耗試験，高温エロージョン摩耗試験，乾式アブレシブ摩耗試験用の試験片を切出し，スケールアップした材料の機械的性質を評価する． Y ブロックの図面を Fig. 2.5.4 に示す．

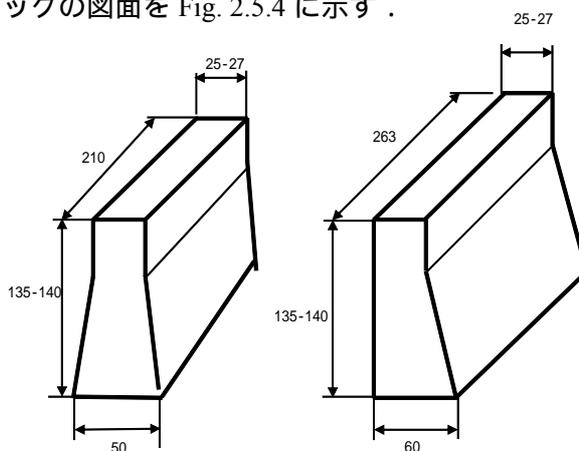


Fig. 2.5.4 Y-block test piece

## (2)熱処理

次に,10%Co の多合金系白鑄鉄の硬さを向上させるため,焼入れ,焼戻しを行った。Fig. 2.5.5 に熱処理条件を示す。

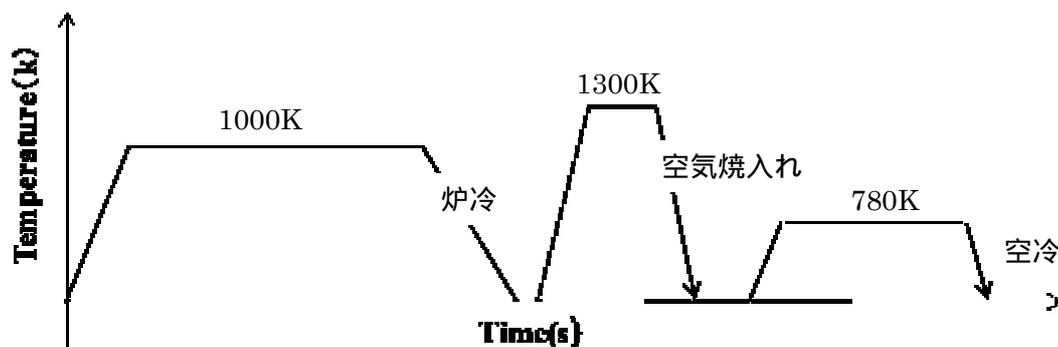


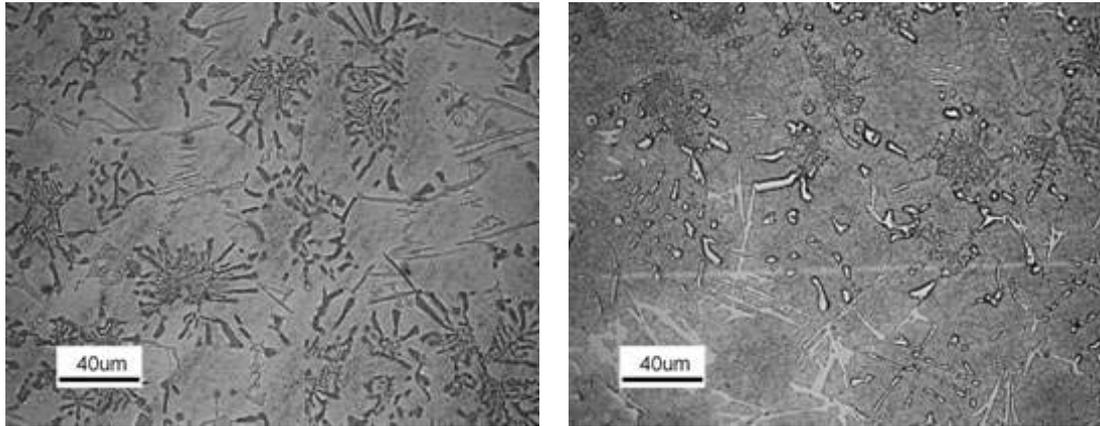
Fig. 2.5.5 熱処理条件

## (3)組織、硬さ測定

マイクロビッカース硬度計を用いて, 10%Co の多合金系白鑄鉄の焼入れ (10%Co Q) および焼入れ焼き戻し (10%Co QT) の硬さ測定を行った。焼入れ, 焼入れ・焼戻し材ともに, 850HV 以上の高い数値が得られた。また, ミクロ組織写真 Fig.2.5.6 に示す。いずれも, 粒状の MC 炭化物及び棒状の  $M_7C_3$  炭化物が晶出していることがわかる。

Table2.5.5 硬さ測定結果

10%Co Q	858.5
10%Co QT	891.2



10%Co (Q)

10%Co (QT)

Fig.2.5.6 microstructure of multi-component white cast irons

#### (4)10%Co サンプル品の製造

(1) : 10%Co 鋳鋼品製作で作成した丸棒 φ250×200 に切削加工を施し、Fig2.5.7 に示すローター部品用のサンプル製造を行った。今後、サンプル品を用いた実機における耐熱・耐磨耗材料の評価を行い、事業化に向けた検討を継続し行う。



Fig. 2.5.7 グラスウール製造ローター部品

## 2-6 10%Co 含有多合金系白鑄鉄のエロージョン摩耗特性

2-5：10%Co含有多合金系白鑄鉄の製造にて、ラボ試験により耐摩耗性が一番優れていた10%Coの多合金系白鑄鉄を選択し、製造方法をスケールアップし製作を試みた。製造された10%Co鑄鉄の機械的性質を評価した結果を下記に示す。

- (1) 製造方法をスケールアップさせた場合においてもラボ試験と同等の材料が得られ、常温エロージョン摩耗においては、焼入れ材(10%Co\_Q)、焼入れ焼き戻し材(10%Co\_QT)共に、良好な耐摩耗性を示すことが知られている球状バナジウム炭化物鑄鉄と同等、高温エロージョン摩耗では、それ以上の耐摩耗特性を有することが判明した。
- (2) 乾式アブレシブ摩耗でも同様に、焼入れ材(10%Co\_Q)、焼入れ焼き戻し材(10%Co\_QT)が最も高い耐摩耗性を有していることが判明した。
- (3) 製造法をスケールアップさせた場合においても、ラボ試験で製造した材料と遜色ない耐摩耗性を有することが判明した。

## 2-7 耐熱・耐摩耗性鑄鉄の新規材料選定および製造

2-5：10%Co 含有多合金系白鑄鉄の製造試験では、耐熱性を高めるために Co 含有量を変化させ、Co 量を 10%とした組み合わせにおいて、600 度以上においても強度（耐摩耗性）低下がみられず顕著な耐摩耗特性能が得られた。成分配合が確立された新材料においては、十分な耐摩耗性（高硬度）が得られたことにより、湯口切断などの加工が困難であった。そこで本年度は硬度を意図的に落とし良加工性の材料として成分配合を見直した。

### (1)合金組成の選定

クロムを 12~30%を含む高クロム鑄鉄は、優れた耐アブレシブ摩耗特性を有し、通常の白鑄鉄より靱性が高いため、建設機械、セメント、鋳物や鉄鋼メーカーなどの部品として広範囲に使われている。これらの材料については、そのコストパフォーマンスを考慮しつつ、耐摩耗性及び高靱性を向上させる研究開発が進んでいる。凝固工程では、オーステナイト基地と炭化物が晶出するが、その炭化物の種類と形状は、含有成分の C、Cr 及びそのほかの添加合金によって変化する。一方では、基地組織は、熱処理によって制御できる。従って、耐アブレシブ摩耗特性と機械的性質は基地組織と炭化物によって決定させると考えられる。

また、Mo の添加は、As-cast 時のパーライトの形成を防ぎ、熱処理中の焼入れ性を向上させるためである。Mo は、高硬度の  $Mo_2C$  又は  $M_2C$  タイプの炭化物を形成する傾向がある。また、Mo はオーステナイト基地に分散し、モリブデン炭化物の晶出による二次硬化及び  $M_7C_3$  炭化物に分散し炭化物自体の硬さを向上させる

また、 $M_2C$  の晶出することによって、材料のアブレシブ摩耗特性が増加することも報告されている。また、基地中の残留オーステナイトは、加工誘起変態によってマルテンサイト化するため、耐アブレシブ摩耗性及び靱性の向上に寄与できると考えられている。

しかしながら、As-cast 状態での大量の残留オーステナイトは、剥離摩耗を悪化させ、

材料の耐摩耗性を低下させる。従って、高クロム鋳鉄に対し、適切な熱処理を施し、硬さと残留オーステナイト含有量のバランスを調整する必要がある。

Mo を含む高クロム鋳鉄の一般的な熱処理についての研究は、進んでおるが、応力除去熱処理については、ほとんど研究がなされておらず、特に保持時間については、明らかになっていない。高クロム鋳鉄の耐摩耗性について多くの研究がなされており、最近では、Mo が亜共晶高クロム鋳鉄の熱処理挙動に及ぼす影響について研究が盛んに行い、その耐摩耗性との関連性を検討している。

そこで、新規耐熱・耐摩耗材料として、Mo を含む 26%Cr 鋳鉄の成分配合を行い、材料の製造を行った。

下記に、配合条件および熱処理条件、また、各種熱処理条件における摩耗量を示す。

Table2.7.1 Chemical composition of test specimens (mass%)

Specimen	Element(wt%)				
	C	Cr	Si	Mn	Mo
Test sample	2.7	25.9	0.5	0.5	3.0

Table2.7.1 Wear rate (Rw) of test specimens with different heat

Specimen	Heat treatment condition	Wear rate (Rw), mg/m
26Cr 3%Mo	As-H	0.37
	L-H <sub>Tmax</sub>	0.38
	H <sub>Tmax</sub>	0.35
	H-H <sub>Tmax</sub>	0.41

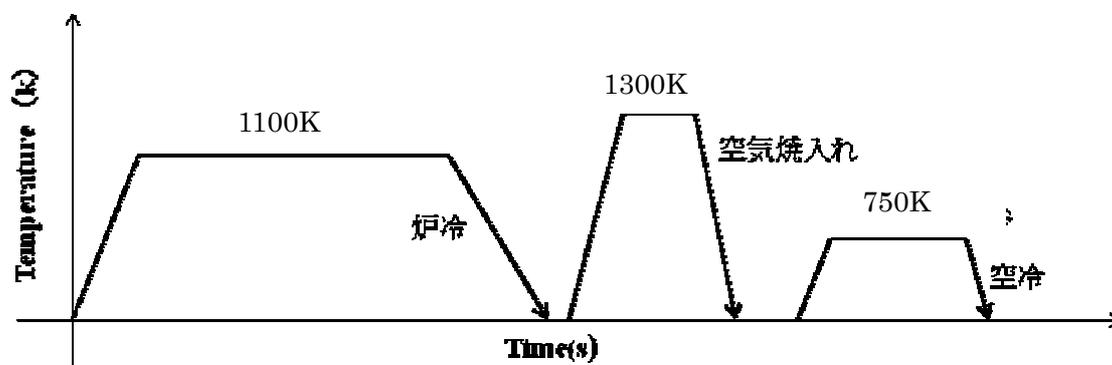


Fig. 2.7.1 Heat treatment condition

(2)26%Cr-3%Mo 鋳鉄品モデル部品の製造

本実験では、ガラス破砕機の破砕刃等 6 種類のサンプル製造を行った。サンプル品製造には、500kg 高周波誘導炉を使用し溶解。出湯温度は 1612 である。出湯時に成分分析を行う。Table 2.7.3 に成分分析結果を示す。



Fig.2.7.2 Metal melting and tapping

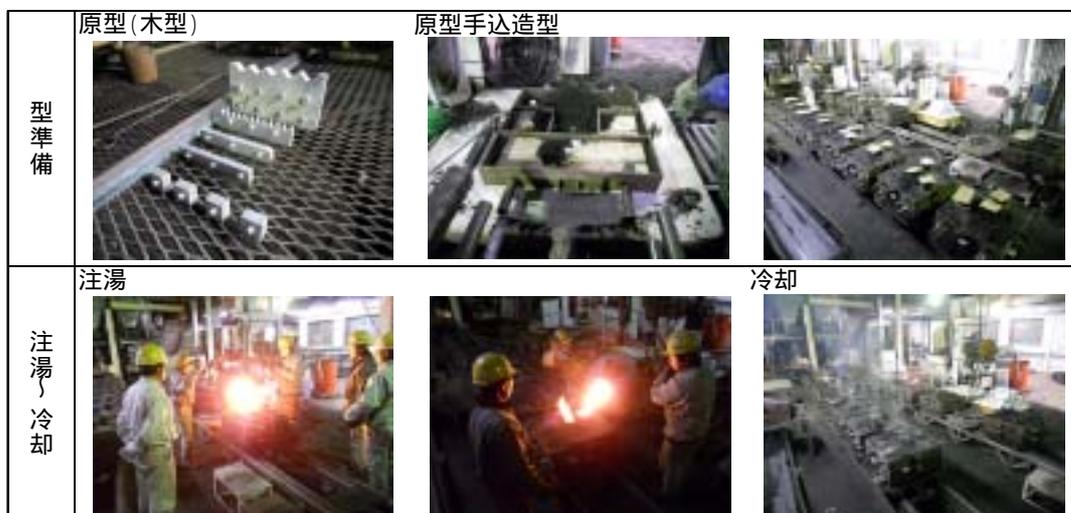


Fig.2.7.3 Model making and pouring



Fig.2.7.4 Shake-out and shot blast

Table.2.7.3 出湯時の化学成分

	C	Cr	Si	Mn	Mo
目標値	2.66	25.98	0.47	0.53	2.96
測定値	2.66	23.80	1.22	0.44	2.82

また、できあがった鑄放し品は、(株)テラマチへ送付し、熱処理及び切削加工を行った。今後、サンプル品を用いた実機における耐熱・耐磨耗材料の評価を行い、事業化に向けた検討を継続し行う。

## 2-8 難削材の加工条件の確立

耐熱・耐磨耗素材は難削材であるため加工が非常に困難であり、工具寿命が短い。一般に切削温度が上がらない低・中速切削では高靱性のM種超硬合金が使用可能であり、高速切削では切削温度が高くなるため、耐熱性の高いTiC添加のアルミナセラミック工具やCBN工具が使用される。工具形状は、中低速では切削抵抗を少なくするためのプラスのすくい角が望ましく、高速域では切削抵抗も下がるため、マイナスのすくい角でも使用可能であると言われている。切込量・送り量・切削油剤などが工具・被削材に与える影響を検討し、最適な加工条件を見出す。

また、通常の切断加工法意外にも超高压水を利用したウォータージェット切断機による切断方法などについても検討する。

これら、切削条件や加工方法等を検討するとともに、加工工具の改良を行い、切削加工の高度化による切削加工技術を確立する。

### (1)ウォータージェット切断機による耐熱・耐磨耗材料の切断

6章で製造を行った耐熱・耐磨耗材料を用いて、ウォータージェット切断機による切断試験を行った。大型鑄物などの湯口、堰などは、60mm以上あり通常では、ディスクグラインダーなどを用いて切断する。通常でも、切断に要する時間は3分以上掛かり、グラインダーの振動や重筋作業となり作業者への負荷が問題となっている。今回製造された耐熱・耐磨耗材料は、高硬度であるため従来のディスクグラインダーを用いても、グラインダーの刃が摩耗しほとんど切断できないものであった。ウォータージェット切断機は、高压水をノズルより吐出することで、対象物を切断する装置であり、今回切断に用いることで、高硬度である耐熱・耐磨耗材料が切断可能であれば、切削加工技術の一つとして使用可能であることを目的として行った。

次に、試験方法および切断時の写真を示す。

対象ワーク...	湯口	
	材質	・・・ 耐熱耐磨耗材料 (Co含有)
	切断部形状	・・・ φ88 mm
	切断スピード	・・・ 6 mm/min

切断結果・・・ 切断可能

ウォータージェット条件

- ・ 高圧水吐出圧力 …… 300MPa
- ・ 高圧水吐出流量 …… 3.0 l/min
- ・ 供給砥粒 …… ガーネット 80
- ・ 供給砥粒量 …… 100 g/min



Fig. 2.8.1 高圧水吐出 切断部



Fig. 2.8.2 切断面

以上の結果から，ウォータージェット切断機を用いての，耐熱・耐摩耗材料の湯口などの肉厚部の切断が可能であることが示された．

(2)難削材の加工条件についての検討

製造された耐熱・耐摩耗材料の切削試験は，ボールエンドミル加工を主体に行い，試験の評価は 3 分力のうち最も数値の大きい背分力（エンドミルの軸方向負荷）で行った．送り速度を変えた場合の 3 分力の変化を測定した．

使用したマシニングセンターは，送りに対するオーバーライド機能は標準装備されているが，主軸回転数に対するオーバーライド機能がないため，フィードバックした値は，送り速度のオーバーライドを変えることで加工の最適化を図ることとした．

Fig. 2.8.3 は，φ6 超硬ボールエンドミルの寿命限界に近い摩耗状態で荒加工したときに，オーバーライドを 100%から 50%まで 10%刻みで変化させたときの，3 分力の計測値を示した．Fig. 2.8.3 より， $F_z$ （背分力）は，100%の 780N に対し，50%の 770N であり，送りのオーバーライドを変化させても殆ど変わらないことがわかる． $F_x$ （送り分力）は，100%のとき - 240N に対し，50%のとき - 200N となり， $F_y$ （主分力）は，100%のとき 220N に対し，50%のとき 180N となっており，いずれも約 20%近く下がっている．

従って、ボールエンドミルによる加工では、フィードバック値として背分力でなく主分力、又は送り分力を使用するのが好ましい。

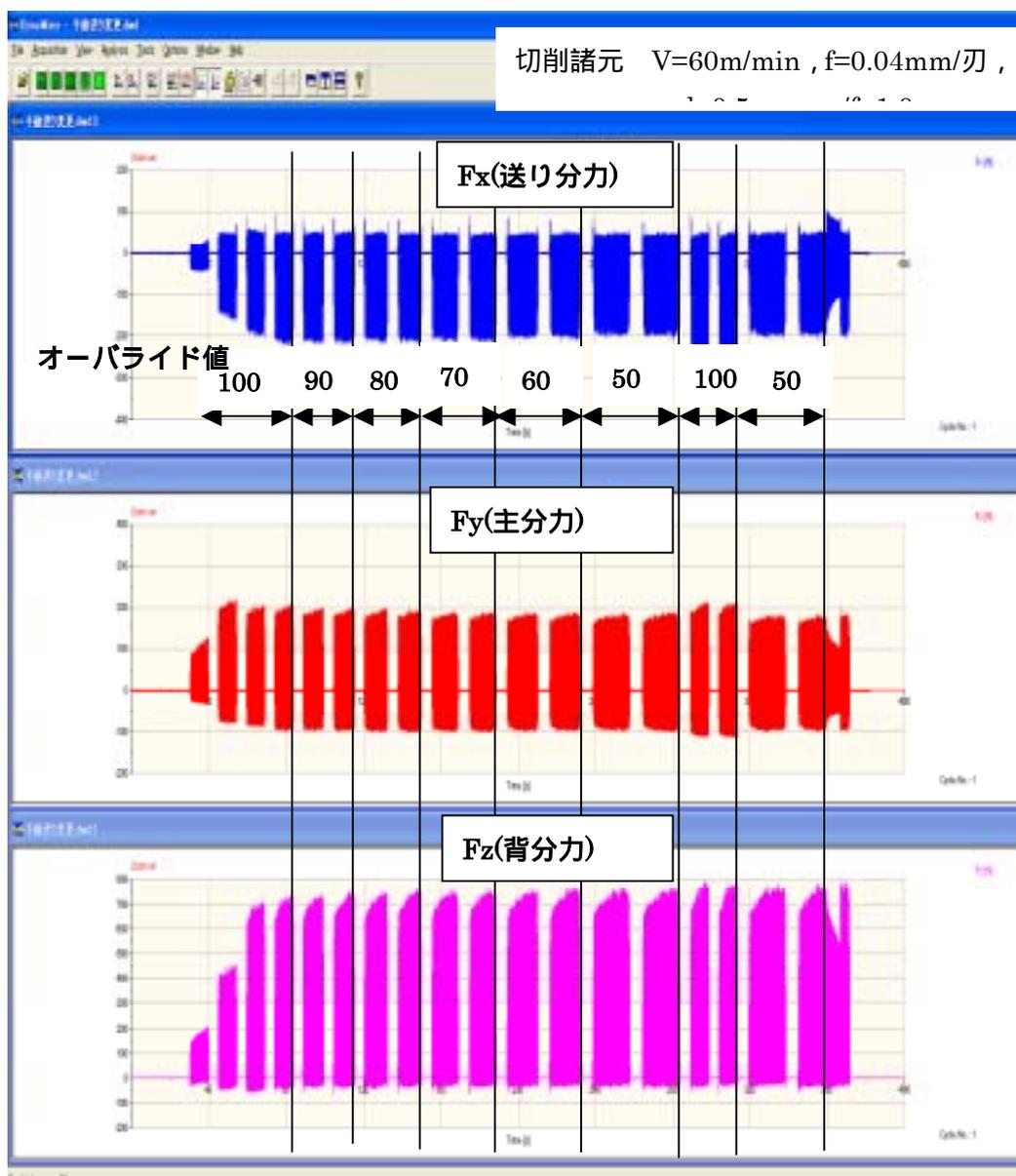


Fig. 2.8.3 送り速度と切削抵抗

#### 工具の傾斜方向と背分力

工具を傾斜させる（被削材を傾斜）加工が、寿命延長に効果があり、現実的な型彫り加工においては、刃先は3次元の動きをするため、工具傾斜を同一に保つことは困難である。ここでは、工具傾斜の方向が寿命（背分力）に対して影響するかを確認した。

Fig. 2.8.4 に、工具傾斜角の方向と背分力について測定した結果を示した。

加工はダウンカットで、傾斜は工具中心が被削材に接触しない方向に傾けた。

結果によれば、傾斜方向の違いによる背分力の差は、殆どなかった。傾斜角度は 10°の方が良い結果となった。

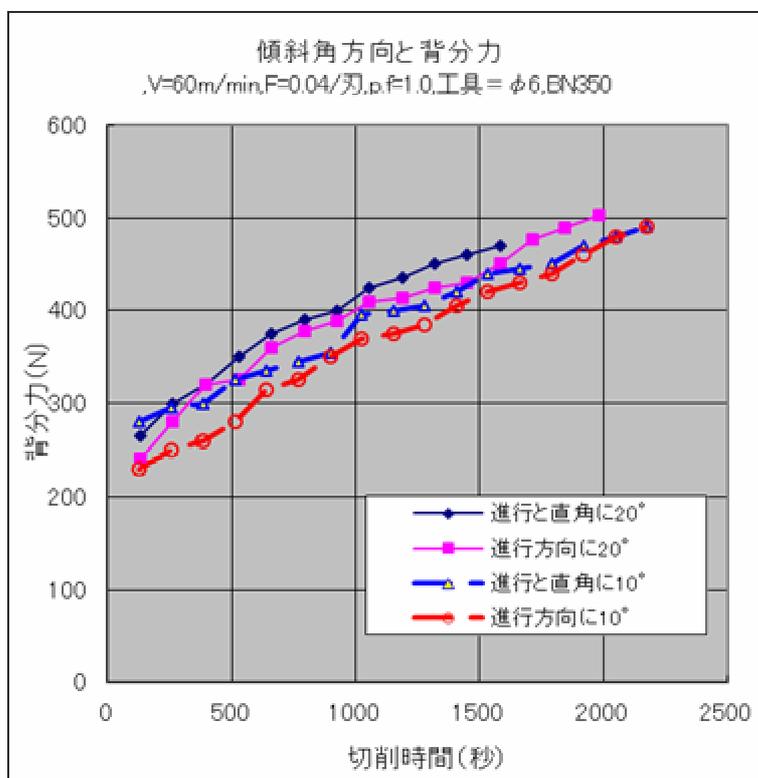


Fig. 2.8.4 傾斜角方向と背分力

難削材といわれる耐熱・耐摩耗材料の切削加工は、十分に可能であることが分かった。加工に際して、工具傾斜角は 10°前後が望ましいということが、判明した。

## 2-9 レアアースレスなどの材料配合の検討

レアアースの輸出規制による国内の需給逼迫など、レアアースの安定供給問題が根本的解決に至っていないことから、鑄造業界としてレアアース代替・削減策の開発が急務となっている。耐熱・耐摩耗性材料にもレアアースが配合されており、代替材料への転換や、使用量の低減などの検討を行った。

### (1) レアアース代替材料による製造試験

レアアースレスおよびレアアース代替材料を耐熱・耐摩耗材料の製造に用いるにあたり、予備試験としてレアアース代替接種剤を用いて球状黒鉛鑄鉄の試験製造を行った。

試験は、幅 50mm、長さ 75mm、肉厚 3mm、4mm、5mm、6mm、7mm、8mm の階段状試験片を生砂型で、Table 2.9.1 に示す 2 種類の球状化剤を使用し製造を行った。レアアース球状化剤を使用するときは、両者を 50% ずつ使用し、2 種類の階段状試験片を作製した後、

両者の試験片の組織観察を行った。

Table 2.9.2 に 2 種類の試験片の化学組成を示す。両者の間に微量元素濃度の差はほとんど見られない。Fig. 2.9.1 に組織写真を示す。レアースレス球状化剤の組織は、同じ肉厚のレアース球状化剤の組織に比べて球状化率が低い。レアース球状化剤の球状化率は、どの肉厚においても 90%前後であるのに対し、レアースレス球状化剤の球状化率は、80%前後であった。これは、球状化剤に含まれるレアースが黒鉛の球状化に大きく影響することを示す。肉厚 3mm のレアースレス球状化剤の組織には、一部領域にチルが見られた。しかし、レアース球状化剤には、チルは見られない。レアースがチル抑制効果を有するものと考えられる。黒鉛粒数には、ほとんど差が見られない。黒鉛粒数は、肉厚にもほとんど差が見られない。

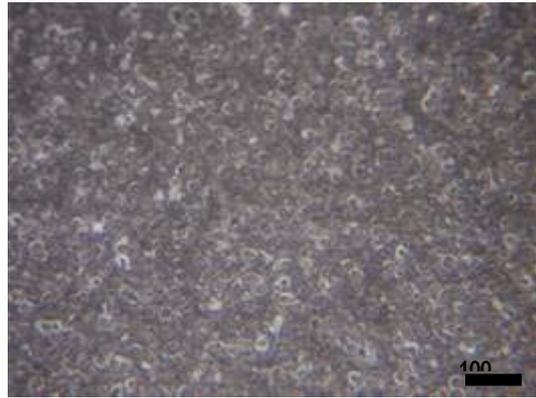
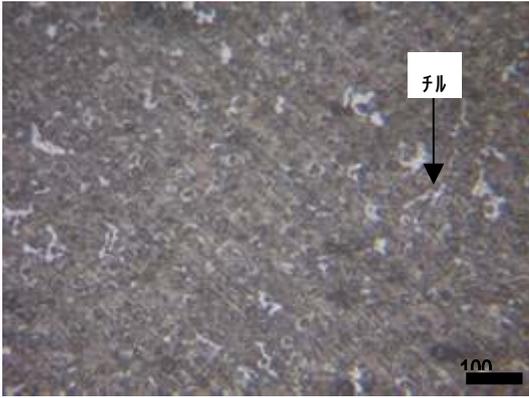
この試験結果より、現行方法で球状化剤をレアースに変えただけでは、良質な球状化黒鉛鋳鉄を製作できない。薄肉球状化黒鉛鋳鉄を製作する場合でも、現状ではレアースが必要である。よって、現時点で耐熱・耐摩耗材料の開発に、レアースレスおよびレアース代替材を用いることは難しく、今後の課題として接種方法の改善が必要であることが判明した。

Table 2.9.1 球状化処理剤の組成 (mass%)

	Si	Mg	Ca	Al	RE
レアースレス 球状化処理剤	45.72	3.82	1.67	0.76	-
レアース 球状化処理剤	45.46	4.16	1.71	0.39	1.79
	46.01	4.39	1.63	-	1.57

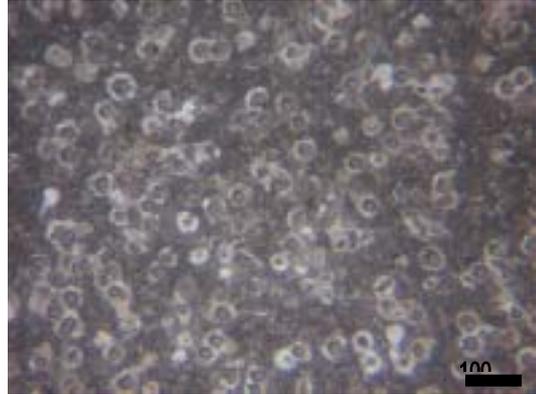
Table 2.9.2 階段状試験片の化学組成 (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mg	Ce	La	Ca	Sn
レアースレス 球状化処理剤	3.70	2.65	0.53	0.012	0.020	0.032	0.119	0.028	0.007	0.002	0.005	0.003
レアース 球状化処理剤	3.68	2.53	0.56	0.012	0.013	0.034	0.119	0.036	0.008	0.004	0.005	0.001



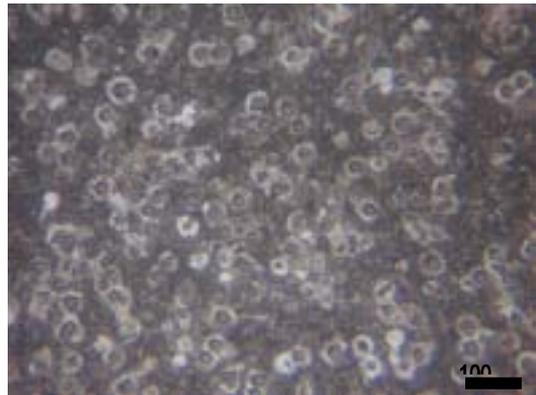
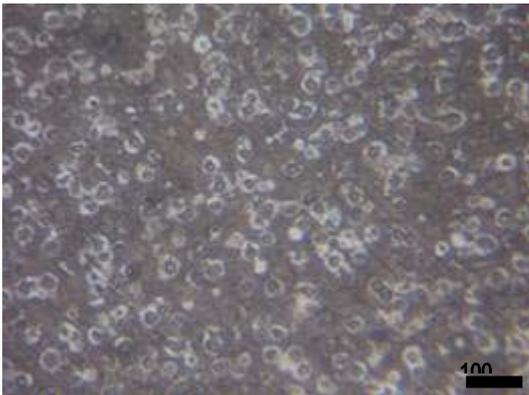
レアアースレス球化剤処理 肉厚 3mm

レアアース球化剤処理 肉厚 3mm



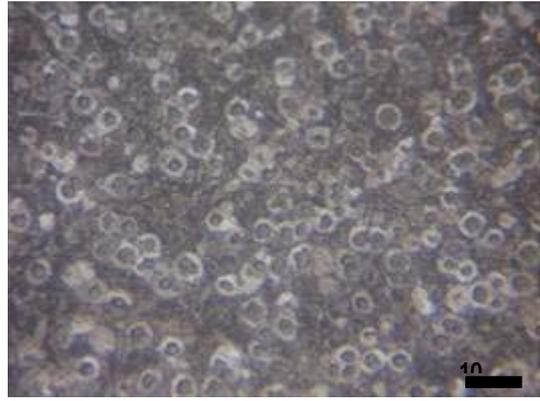
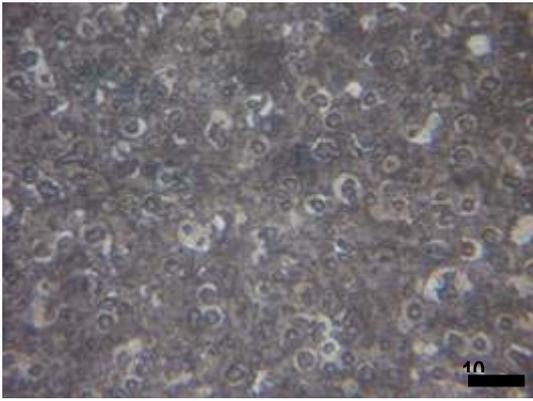
レアアースレス球化剤処理 肉厚 4mm

レアアース球化剤処理 肉厚 4mm



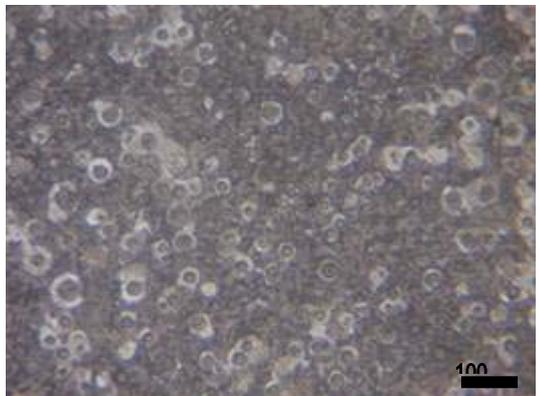
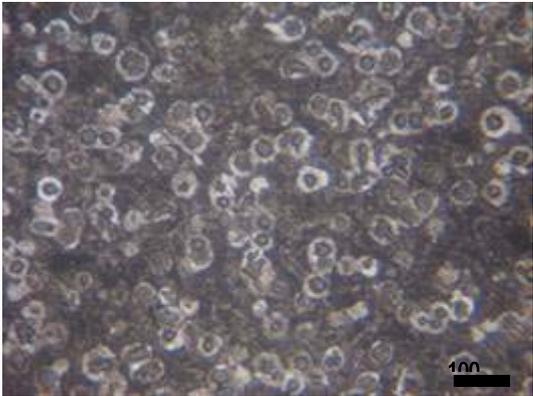
レアアースレス球化剤処理 肉厚 5mm

レアアース球化剤処理 肉厚 5mm



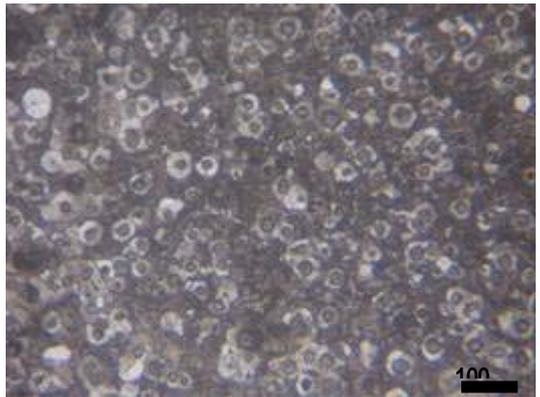
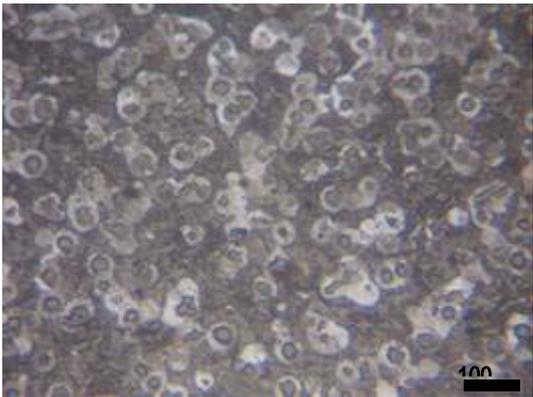
レアースレス球化剤処理 肉厚 6mm

レアース球化剤処理 肉厚 6mm



レアースレス球化剤処理 肉厚 7mm

レアース球化剤処理 肉厚 7mm



レアースレス球化剤処理 肉厚 8mm

レアース球化剤処理 肉厚 8mm

Fig. 2.9.1 階段状試験片の組織，左：レアースレス球状化剤処理，右：レアース球状化剤処理

## 第3章 全体総括

### 3-1 複数年の研究開発成果

#### 3-1-1 耐熱・耐摩耗性に優れる鋳鋼・鋳鉄の製造方法の確立

##### (1) 耐熱・耐摩耗鋳鋼材料の化学成分の確立

C量は約2%に、合金元素として、Cr、Mo、W、及びV量を約5%の一定とし、Co量を0~10%に変化させた多合金系白鋳鉄を作製し、Co量と耐摩耗性・耐食性との関係を研究した結果、次のことが明らかになった。

- 1) 多合金系白鋳鉄において、Co量の増加に伴い、硬さが上昇する。
- 2) 多合金系白鋳鉄の耐摩耗性は、Co量の増加に伴い良好になり、黒鉛を含有するNi-hard鋳鉄及び高クロム鋳鉄より摩耗を抑えることがわかった。
- 3) 多合金系白鋳鉄の高温酸化実験では、973Kでは酸化量はわずかだったが、温度上昇に伴い、酸化が増加する傾向であり、1273Kでは、Co量に関係なく酸化が著しく増加する。

##### (2) 耐熱・耐摩耗性鋳鉄の新規材料選定および製造

Co量を変化させた多合金系白鋳鉄の耐熱・耐摩耗材料の成分配合が確立されたが、十分な耐摩耗性（高硬度）が得られたことにより、湯口切断などの加工が困難であった。そこで、新規耐熱・耐摩耗材料として、Moを含む26%Cr鋳鉄の成分配合を行い、材料及びモデル部品の製造を行った。

#### 3-1-2 難削加工条件の確立

耐熱・耐摩耗素材は難削材であるため加工が非常に困難であり、工具寿命が短い。そこで切込量・送り量・切削油剤などが工具・被削材に与える影響を検討し、最適な加工条件を確立した。

- (1) 工具中心が被削材に接触しない方向に工具を傾斜させることによって、傾斜角度が10°の条件のとき、最も良い切削効率および工具寿命を示し、難削材の加工条件が確立された。
- (2) ウォータージェット切断機により高圧水をノズルより吐出することで、高硬度である耐熱・耐摩耗材料が切断が可能であった。切削加工技術の一つとして使用可能であることが判明した。

#### 3-1-3 耐熱・耐摩耗性材料を利用したモデル部品の製造および性能評価

耐摩耗性が一番優れていた10%Coの多合金系白鋳鉄を選択し、スケールアップした製造方法によりモデル部品および各種摩耗試験用試験片を作製し、材料の性能評価を行った。

- (1)製造方法をスケールアップさせた場合においてもラボ試験と同等の材料が得られ、常温エロージョン摩耗においては、焼入れ材（10%Co\_Q）、焼入れ焼き戻し材（10%Co\_QT）共に、良好な耐摩耗性を示すことが知られている球状バナジウム炭化物鋳鉄と同等、高温エロージョン摩耗では、それ以上の耐摩耗特性を有することが判明した。
- (2) 乾式アプレシブ摩耗でも同様に、焼入れ材（10%Co\_Q）、焼入れ焼き戻し材（10%Co\_QT）が最も高い耐摩耗性を有していることが判明した。
- (3) 製造法をスケールアップさせた場合においても、ラボ試験で製造した材料と遜色ない耐摩耗性を有することが判明した

#### 3-1-4 レアアースレスなどの材料配合の検討

鋳造業界としてレアアース代替・削減策の開発が急務となっている。耐熱・耐摩耗性材料にもレアアースが配合されているため、レアアース代替材料の検討として、従来の球状黒鉛鋳鉄によるレアアース代替材料を用いた予備試験を行い、レアアース代替材料の評価を行った。この試験結果より、現行方法で球状化剤をレアアースに変えただけでは、良質な球状化黒鉛鋳鉄を製作できず、薄肉球状化黒鉛鋳鉄を製作する場合でも、現状ではレアアースが必要である。よって、現時点で耐熱・耐摩耗材料の開発に、レアアースレスおよびレアアース代替材を用いることは難しく、今後の課題として接種方法の改善が必要であることが判明した。

#### 3-2 研究開発後の課題・事業化展開

ローター部品用試作品は、実機における耐熱・耐摩耗の評価中。ガラス粉砕機用破砕刃等試作品は熱処理加工、切削加工を行いサンプル品が完成したが、一部材質に不安があるため対応検討中。生産過程の条件確認中。評価結果により、事業化へむけた取組みを実施する。ガラス粉砕機用破砕刃等試作品は生産条件の補完研究を続行する。

一方、十分な耐熱・耐摩耗性能を有する鋳鋼材料の化学成分を確立し試験製造を行い材料の評価がえられているが、配合元素に非常に高価なものが多く、安価な材料製造のため、新たな化学成分を検討し、材料評価を行う補完研究を進めている。