

平成 25 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「接合界面活性化と同時鋳込みによる超耐熱耐摩耗複合鋳造材の開発」

## 研究開発成果等報告書

平成 26 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 公益財団法人栃木県産業振興センター

## 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	4
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 超耐摩耗性複合鑄造材「ブレード」の開発	7
2-1-1 接合界面活性化法の開発	7
2-1-1-1 実験1・2	7
2-1-2 同時鑄込み法の開発	13
2-1-2-1 実験1・2	13
2-1-2-2 摩耗試験結果1	16
2-1-2-3 摩耗試験結果2	18
2-1-3 接合界面評価技術の開発	20
2-1-3-1 実験1	20
2-1-3-2 実験2	23
2-2 超耐摩耗性複合鑄造材「ハンマー」の開発	26
2-3 超耐熱性複合鑄造材「ロストル」の開発	33
2-3-1 実験1	33
2-3-2 実験2	36

### 最終章

1 技術的目標値と達成度	40
2 超耐熱耐摩耗性複合鑄造材開発モデル	41
3 研究開発中に得られた新技術・課題・知見を踏まえた補完研究と商品化計画	42

## 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

自動車業界では、自動車用研掃部品で偏摩耗が著しくこの防止対策が喫緊の課題となっており、特に一体成型等新たな鑄造法による耐摩耗・偏摩耗対策部品（硬さ HV1200）開発への要望が強い。

また、環境機器・石灰業界では、安全性、機能性向上や環境・省エネ対策上から、劣悪環境下での使用に耐える耐摩耗性（硬さ HV1200）及び耐熱性（1300℃）を向上させた部品の開発が課題となっている。

上述の課題に対して、従来は切削加工、溶接、鑄造加工後、熱処理・表面処理をして耐摩耗性、耐久性を向上させていた。更に、高度な機能が要求される場合には、超硬合金やセラミックスを別な工程すなわち真空、不活性ガス中で製造後、機械接合、加圧接合することにより、川下企業ユーザーニーズのスペックを満足させてきたが、いずれも複雑な工程を経なければならず、コストダウンできていない。

このため高機能性複合材料に関する研究に多くの企業、研究機関が取り組んで来たが、真空あるいは高価な機械設備による加圧・機械加工工程と厳しい制御条件下での作業が要求されるため、目的を達成できない状況にある。

そこで、本研究目的（硬さ HV1200）を達成するためには、耐摩耗性、耐熱性に優れた異種材料の複合化が課題解決の一つの方法と考える。

しかし、現実的には複合化すべき異種材料の諸物性値が母材となる鑄造材と大きく相違することから、複合化を可能とする接合界面活性化と同時鑄込み法などの新鑄造法を開発し、新材料開発を実現することが必須となっている。

複合化を可能とする接合界面活性化と同時鑄込み法などの新鑄造法を実現するために解決すべき課題は、以下の3点である。

1. 接合界面活性化法の開発
2. 同時鑄込み法の開発
3. 接合界面評価技術の開発

本各課題解決のための目標値は、以下のとおり。

#### （1）接合界面活性化法の開発の目標について

接合界面活性化法における主たる技術課題は2点で、1点目は「物理的接合技術の開発」、2点目は「複合化素材成形用精密金型の開発」である。

前者に対しては複合化素材成形と接合界面活性化技術を究明し解決する計画である。複合化素材に残留する応力が物理的接合を阻害する可能性が高いため、サーボプレスにより応力を緩和しながら短時間にしかも 1 工程で成形することを目指す。

後者に対しては金型機構と制御法を開発して解決する。精密金型となっても 1 工程で成形できる金型とする。また、高品質成形とし、成形割れ無くかつ肉厚変形も 20% 以内で開発する。

## (2) 同時鑄込み法の開発の目標について

同時鑄込み法における主たる技術課題は 2 点で、1 点目は「化学的接合技術の開発」、2 点目は「同時鑄込み条件の確立」である。

前者には接合材の選択と化学・拡散接合技術を究明し解決する。

複合化素材の接合状況は、化学的接合だけでなく Cr、C 等の相互拡散現象を利用した拡散接合も加速促進する条件を究明する。

後者に対しては同時鑄込み条件と複合鑄造材の物性値との相関を確認しながら繰り返し実験により確立する。

なお、複合化素材が金属系（マルテンサイト系 SUS）の場合はプラズマ窒化により化合物層  $\epsilon$  相 ( $\text{Fe}_2\text{N}$ 、 $\text{Fe}_3\text{N}$ )、 $\gamma$  相 ( $\text{Fe}_4\text{N}$ )、CrN 等と拡散層を形成させ、硬さ HV1200 以上とする。超硬合金系は同時鑄込みにより複合鑄造材化させ硬さ HV1200 以上とする。セラミック系は同じく同時鑄込みにより複合鑄造材化させ耐熱性 1300°C 以上とする。

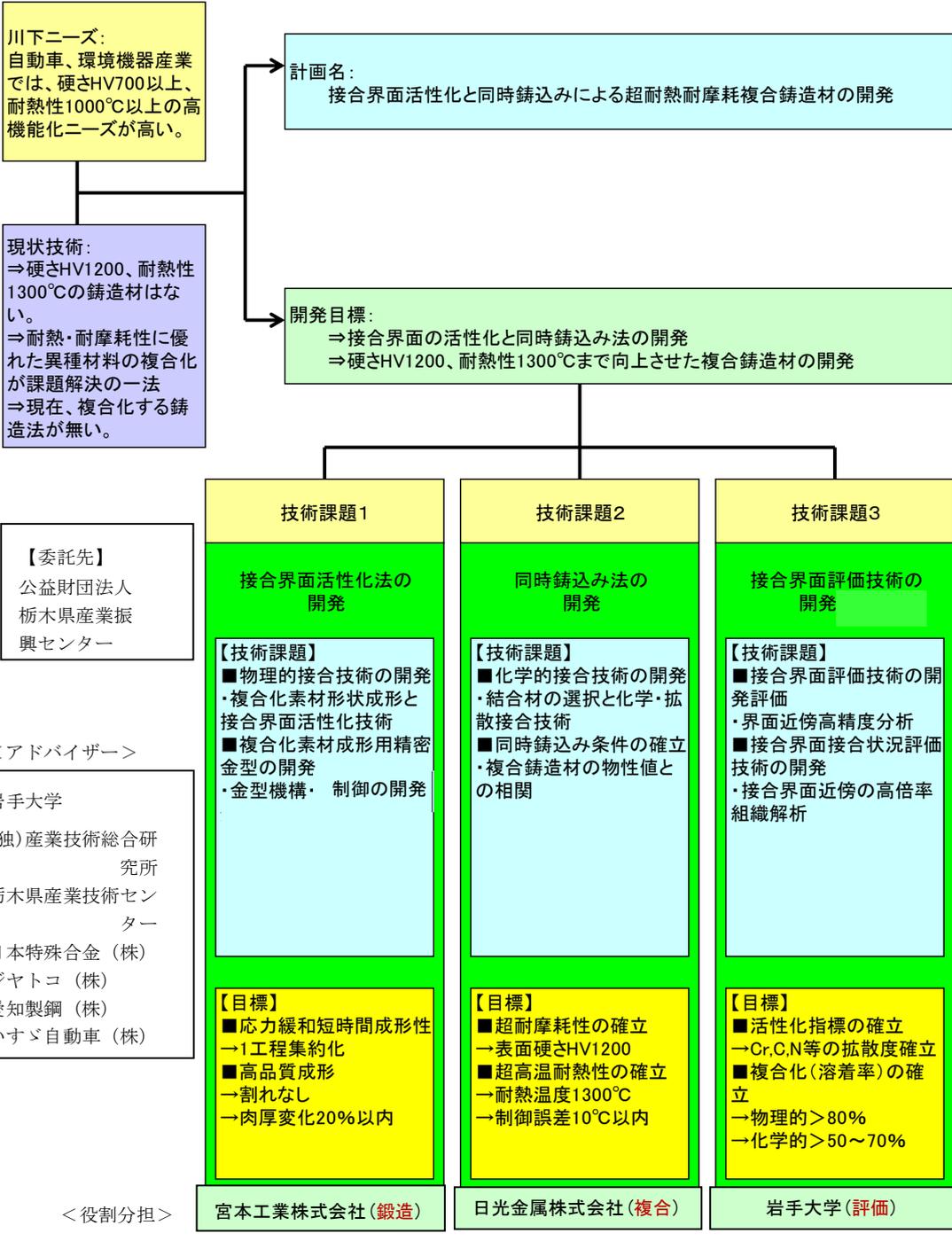
## (3) 接合界面評価技術の開発の目標について

接合界面評価技術の開発における主たる技術課題は 2 点で、1 点目は「接合界面活性化評価技術の開発」、2 点目は「接合界面接合状況評価技術の開発」である。

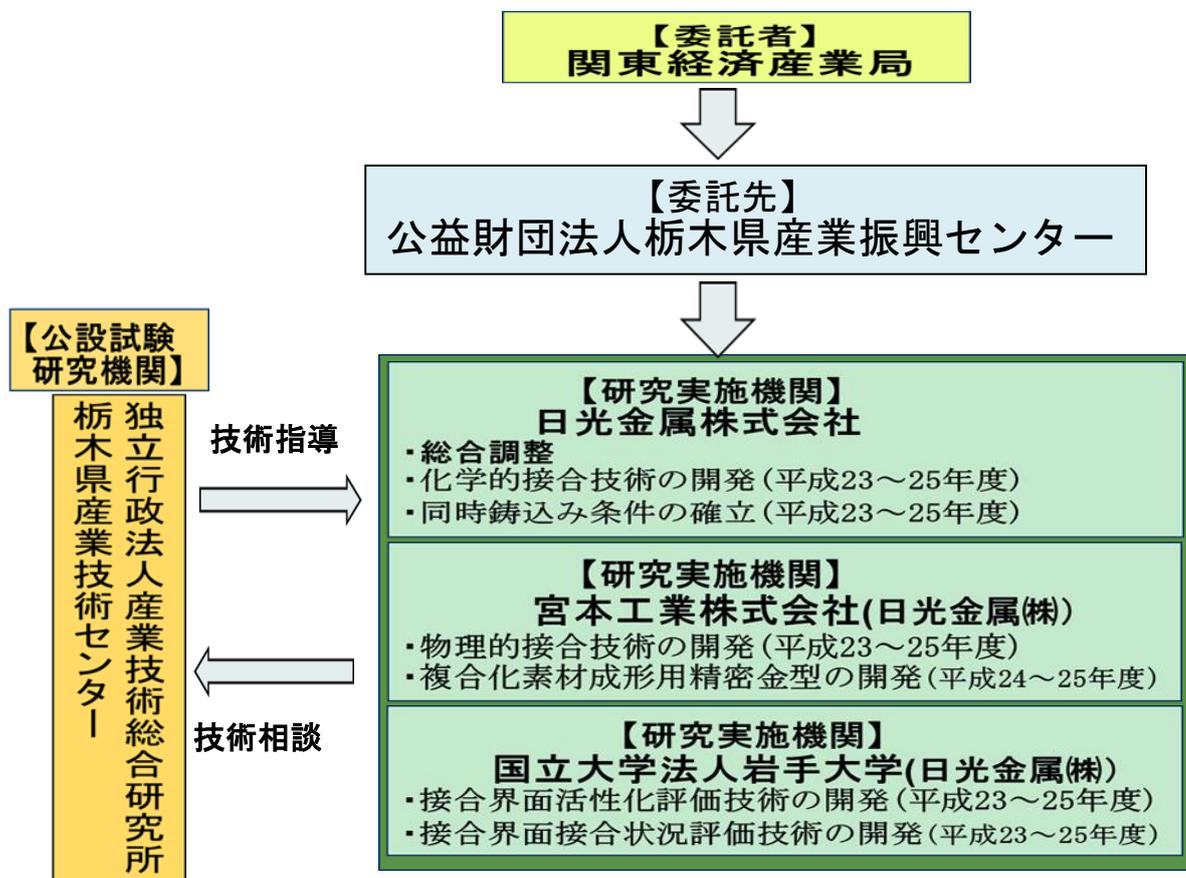
前者には接合界面近傍を XMA・デジタル組織解析装置で、線分析、面分析、定量分析し Cr、C、N 等の多寡で活性化度合いを定量化する。

後者にはマイクロ스코プ、SEM 等で接合界面近傍の組織を観察し溶着率の物理的定量化等を実施する。

## 【研究開発の目標】



## 1-2 研究体制



### 管理員及び研究員

**【事業管理機関】** 公益財団法人栃木県産業振興センター

総合支援部長 清水 勇、研究交流課長 宮間浩一  
研究交流課主任 吉原正臣

**【再委託先】** (研究員)

○日光金属株式会社

代表取締役 佐藤英俊 (PL)、技術顧問 石島健治 (SL)、  
製造グループ GL 佐藤正太郎、新製品研究開発チーム TL 甲斐朝暁  
製造グループ工程 TL 田代晴美、製造グループ見積・設備チーム TL 佐藤義之、  
製造グループ品質・技術チーム TL 郡司泰行、製造グループ造型製鋼チーム TL 渡邊真広、  
製造グループ仕上げチーム TL 近 祐介、製造グループ溶接チーム TL 赤羽根武

○宮本工業株式会社

代表取締役 宮本尚明、営業管理本部参事 内城昭二、技術本部技師 神原和夫

○国立大学法人岩手大学

工学部マテリアル工学科 教授 平塚貞人

### 1-3 成果概要

本開発研究は、川下企業ユーザーニーズである安全性、機能性向上や環境・省エネ対策上から、劣悪環境下での使用に耐える耐摩耗性（硬さ HV1200）及び耐熱性（耐熱温度 1300℃）を向上させた部品の開発研究である。

本研究では硬さ HV1200 を達成するために、耐摩耗性・耐熱性に優れた異種材料の複合化が課題解決の一つの方法と考えた。

本複合化を可能とする接合界面活性化と同時鋳込み法などの新鋳造法を実現するために解決すべき課題は、以下の3点である。

1. 接合界面活性化法の開発
2. 同時鋳込み法の開発
3. 接合界面評価技術の開発

この解決すべき課題に対する成果の概要は以下のとおりである。

#### (1) 接合界面活性化法の開発

複合化素材に残留する応力が物理的接合を阻害する可能性が高いため、サーボプレスにより応力を緩和しながら短時間にしかも 1 工程で成形するための 1 工程集約化に取り組んだ。

常温から 1000℃の加熱範囲での鍛造性試験と SIM(塑性シミュレーション)により繰返し継続的に究明した結果、複合化素材 SUS440C を 630 t サーボプレスで複合化素材と金型を 800℃に加熱し、かつ、加圧速度を適正に制御した 800℃温間鍛造で、1 工程集約化成形を達成した。

これまで 18 種類の複合化素材成形を実施し、商品化に向けた開発を推進している。

#### (2) 同時鋳込み法の開発

複合化素材に金属系（マルテンサイト系 SUS440C 板材）を用い同時鋳込み法により 27CrFC(鋳鉄)との複合化に成功し、耐摩耗性に優れた複合鋳造材を試作することが出来た。また、複合鋳造材をプラズマ窒化することにより、技術的目標値である硬さ HV1200 を凌ぐ HV1400 以上を達成し超耐摩耗性を有する複合鋳造材となった。更に、同時鋳込み法で鋳込む鋳鉄の温度制御を < 10℃で制御可能となりそれぞれ目標値を達成することができた。

また、往復摩耗試験装置では、市販部品「ブレード」に比して開発した超耐摩耗性複合鋳造材「ブレード」は約 3 倍の耐摩耗性を有し、更に試作した実証摩耗試験装置でも約 2 倍の耐摩耗性を有することを確認できた。

一方、超硬合金 WC と耐摩耗鋼 SCMnH11 との同時鋳込みにより、耐摩耗性（硬さ HV1200 以上）に優れた複合鋳造材を創成した。

加えて、セラミックと耐熱鋼 SCH2 との同時鋳込みにより耐熱性（耐熱温度 1300℃

以上)に優れた複合鑄造材を創成した。

### (3) 接合界面評価技術の開発

接合界面近傍を XMA・デジタル組織解析装置で線分析、面分析、半定量分析し CrK $\alpha$ 、CK $\alpha$ 、FeK $\alpha$ 、MnK $\alpha$ 、SiK $\alpha$ 、NK $\alpha$ 、OK $\alpha$ 等の多寡で活性化度合いを定量化できた。溶着率はマイクロ스코プ、SEM等で接合界面近傍の組織を観察し溶着率の物理的定量化等を図った。この結果、CrK $\alpha$ 、FeK $\alpha$ 、CK $\alpha$ 、MnK $\alpha$ 、SiK $\alpha$ 等の相互拡散度が確認され、かつ、物理的溶着率は略100%で、物理的溶着率>80%、化学的(ミクロ組織・相互拡散)溶着率>50~70%の目標値を達成することができた。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人栃木県産業振興センター 総合支援部 研究交流課 主任 吉原正臣  
〒321-3226 栃木県宇都宮市ゆいの杜1丁目5番40号  
Tel ; 028-670-2602 Fax ; 028-670-2616 E-mail ; yosihara@tochigi-iin.or.jp

## 第2章 本論

### 2-1 超耐摩耗性複合鋳造材「ブレード」の開発

早期の商品化を図るため、具体的な開発ターゲットは自動車部品の研掃に多用されている図1の「ブレード」とした。

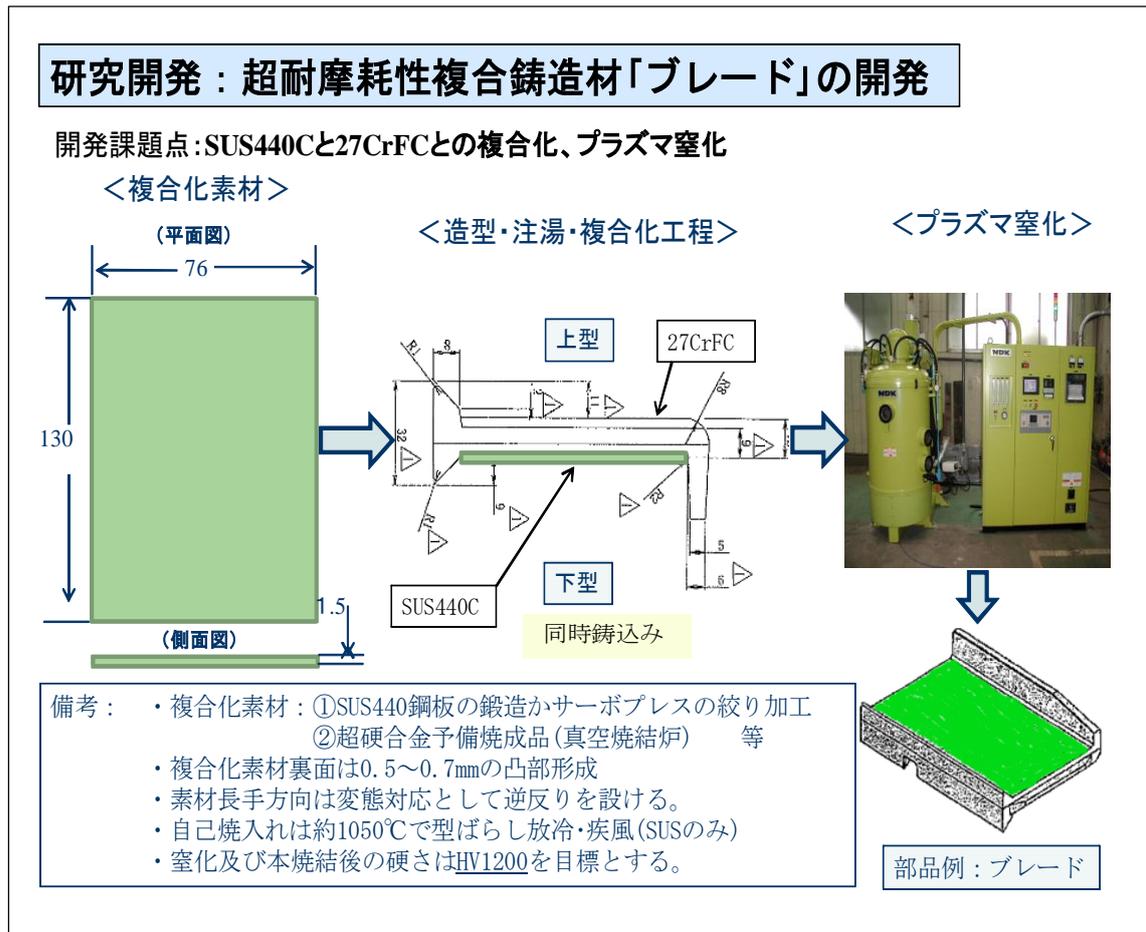


図1 自動車部品研掃用超耐摩耗性複合鋳造材ブレードの開発

#### 2-1-1 接合界面活性化法の開発

##### 2-1-1-1 実験1・2

複合化素材 SUS440C と母材である27CrFC との溶着率を高めるため、複合化素材の物理的形狀に関して検討・究明した。SUS440C を最小体積から徐々に体積を増加する形状に変化させた。

一方、複合化素材の1工程成形の課題を解決するため、複合化素材の加圧面積を低下させる形状も併せて検討した。

市販 SUS440C の最低板厚は2.3mmであったため、省エネとコストダウンとなる低温鋳込み可能なよ

うに、実験では MC で加工し 130L×80W×1.5tのサイズを複合化素材の外形寸法とした。

具体的な複合化素材の形状は図2のとおりで、5種類 H～L の形状に関して試験した。

つまり、コストダウンに必須な複合化素材の 1 工程集約化成形加工が可能なように、溝個数を20個から10個まで漸次低減し、サーボプレス機による加圧時の荷重を低下させる形状 H、形状 I 及び形状 J とした。図2で複合化素材形状成形 H は、SUS440C1.5t を MC で加工し、各円を 0.12t に溝加工し複合化する肉厚を 1.38t とした。同様に、複合化素材形状成形 I は、円溝数を16個に減らし、SUS440C1.5t を MC で加工し、各円を 0.5t に溝加工し複合化する肉厚を 1.0t とした。複合化素材形状成形 J は、円溝数を10個に更に減らし、SUS440C1.5t を MC で加工し、各円を 0.5t に溝加工し複合化する肉厚を 1.0t とした。

また、更に加圧力と金型の損耗を低減する目的で、鋸刃状の形状も取り入れた。図2で複合化素材形状成形 K は、SUS440C1.5t を MC で加工し、鋸刃状 XY 方向各溝を 1.0t に溝加工し複合化する肉厚を 0.5t とした。同様に、複合化素材形状成形 L は、鋸刃状 XY 方向各溝を 0.5t に溝加工し複合化する肉厚を 1.0t とした。

上記複合化素材成形品の同時鋳込み後は、各形状各部における溶着率等を調べるため、供試材の9箇所から検鏡試料を精密切断機で採取し、試料埋込装置及び試料研磨機で鏡面に仕上げ後、マイクロ스코プ、光学顕微鏡、デジタル組織解析装置及び XMA で観察し考察した。

なお、ペネトレーション対策としてセラミックファイバーを用いて、同時期込みを実施した。

接合界面活性化法の開発<「物理的接合技術の開発」実験 2 >

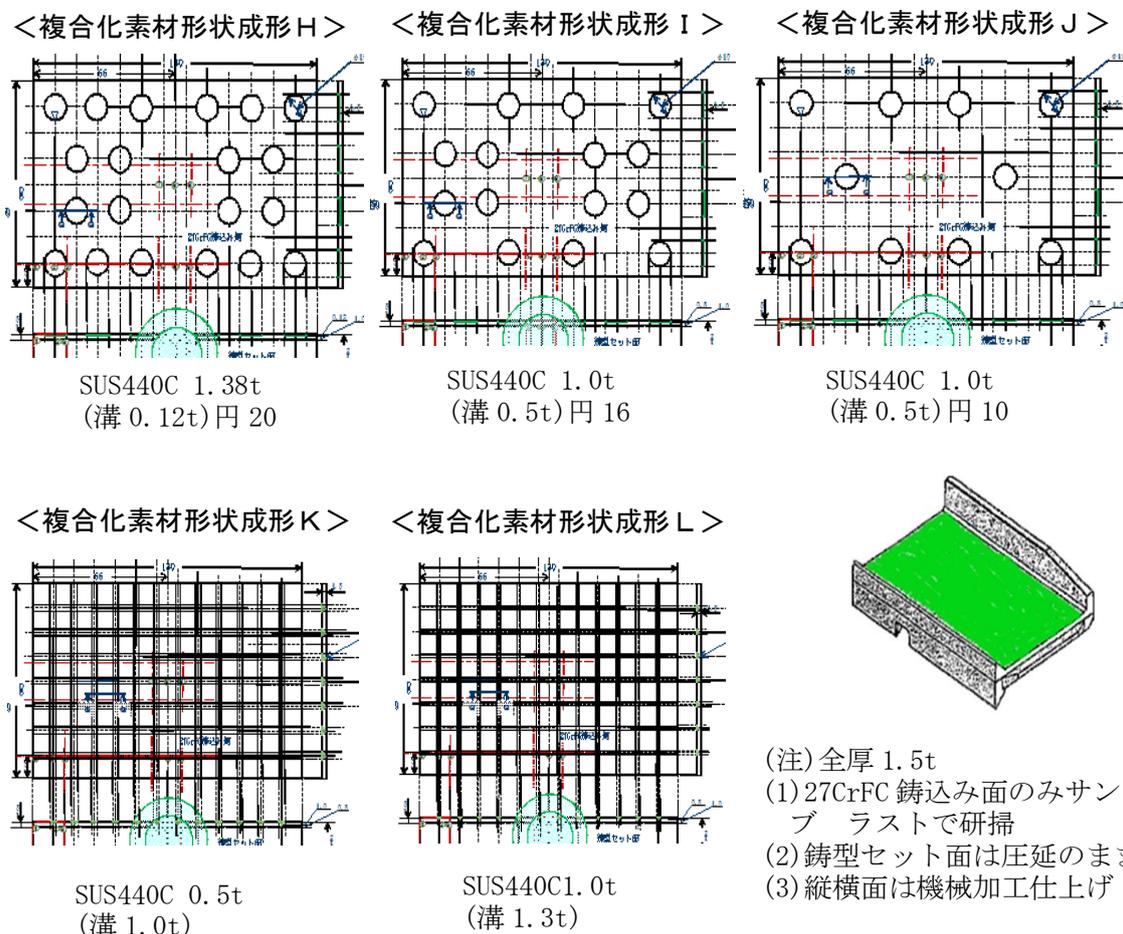


図2 複合化素材形状成形 H、I、J、K、L

なお、最終的にはコストダウンを図る必要があるため、鍛造による生産性向上の可能性についても併せて究明した。

すなわち、SUS440C の材料試験と SIM(塑性シミュレーション)による考察を実施した。

自由圧縮試験による鍛造性の確認試験で、SUS440C においては温感800℃による塑性加工が望ましいことが解った。

つまり、冷間開放プレスよりも温間プレス(800℃)自由開放の方が応力の低減と流動化が促進され好ましいことが解った。

SUS440 材の鍛造は、SS400 材に比べ高い成形荷重となり、金型 (パンチ) の耐圧強度が限界を超

えて変形してしまった。そのため、押込み深さが狙い寸法に達しなかった。

この原因としては、SUS440C 自体がマルテンサイト系ステンレスであるため、冷間鍛造・プレスでは加工困難で、800℃での温間鍛造による方法によらない 1 工程集約化成形が出来ない。実際、その加工深さも 120 μm と充分でなかった。

このため、この改善策として、複合化素材形状を H、I、J、K 及び L と、加圧面積を大幅に低減し、1 工程集約化成形を可能な形状に変更した。この中で最も可能性の高いと思われる複合化素材形状 L を取り上げ、金型及び制御機構を設計・加工し、1 工程集約化成形の試験を以下の通り実施した。

ここでの課題は、以下のような点である。

- ・課題：①鍛造形状の見直し（金型に集中応力を発生させない形状）
- ②鍛造時の最適温度の維持

上記課題に対し、それぞれ以下の対策を講じた。

- ① 複合化素材形状を t y p e L とし、鍛造形状はそれを縮小化した溝形状とし、金型は過大な応力が発生しないような構造とした。つまり、複合化素材の形状を鋸刃状とした。
- ② 鍛造時の温度低下を防ぐ目的で金型は加熱、保温装置付構造とした(図3参照)。

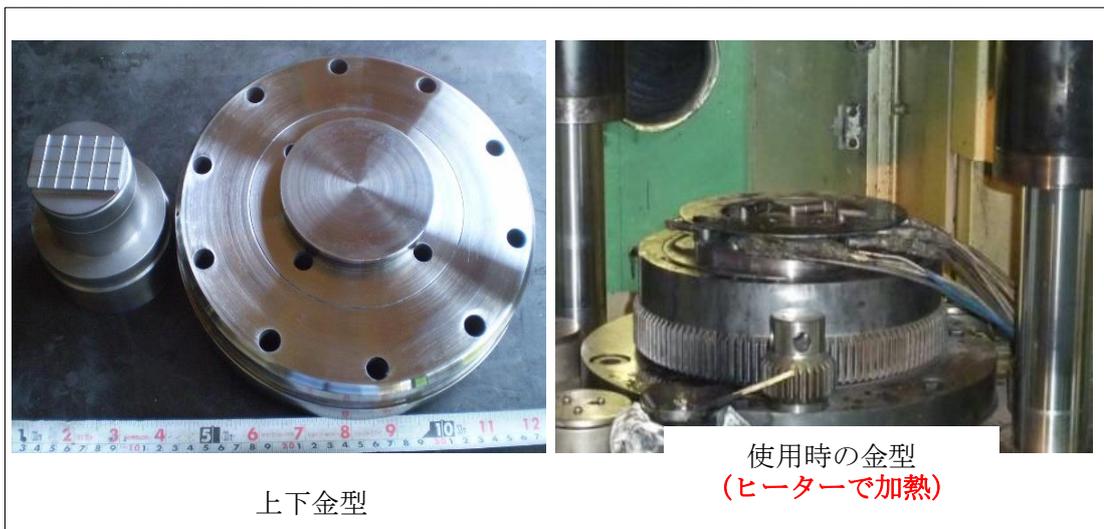


図3 加熱装置付金型

### <試験条件と試験結果>

- 試験材料と硬さ(下表参照)

表 試験材と硬さ

材 料	形 状(mm)	硬 さ			備 考
		HRC	HRB	HRF	
SS400	(65×45)×1.5	不可	49	85	比較材料
SUS440C	(65×45)×1.5	20	100	不可	複合化素材

○ 設備と条件

2-1 金型 溝付パンチ、加熱装置付ダイス

2-2 プレス 630tサーボプレス (図4・図5参照)

2-3 温度

・金型は300℃保持、

・素材は、SS400は室温、

SUS440Cは800℃狙いでガス加熱 右図参照

2-4 潤滑 無潤滑



図4 630tサーボプレス

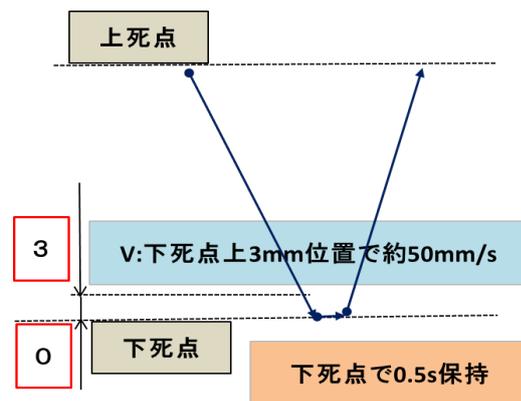


図5 成形モーショ

○ 実施結果

630tサーボプレスでの鍛造結果を図6に示す。また、加圧後の溝深さの測定結果を図7と表1に示す。

図6、図7及び表1から、SUS440Cを溝深さ0.5mmの鍛造品とすることができた。鍛造温度は800℃を狙ったが、鍛造時に実体温度は500~600℃と推測される。鍛造品には、一部に僅かにソリのあるものもあり、今後は製品化に向け更に検討する必要がある。

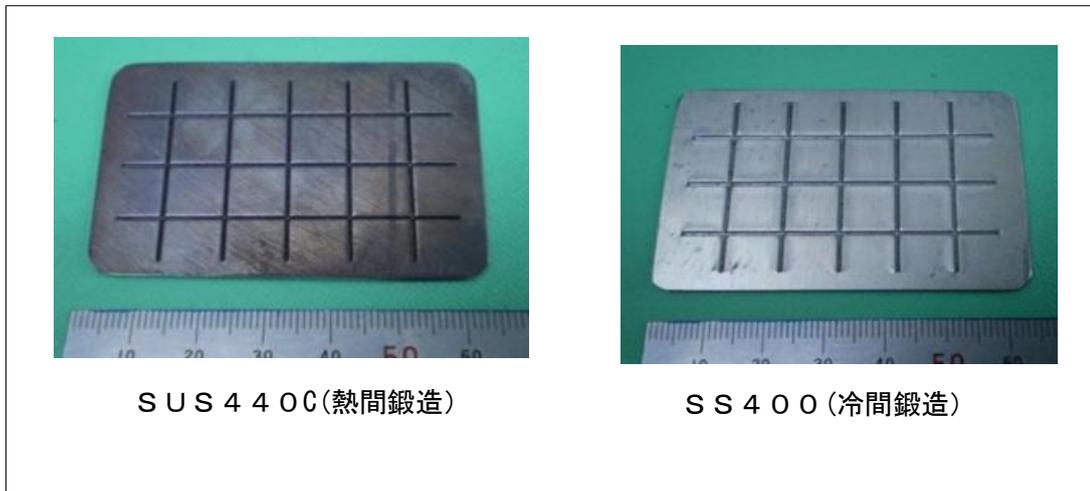


図 6 鍛造品

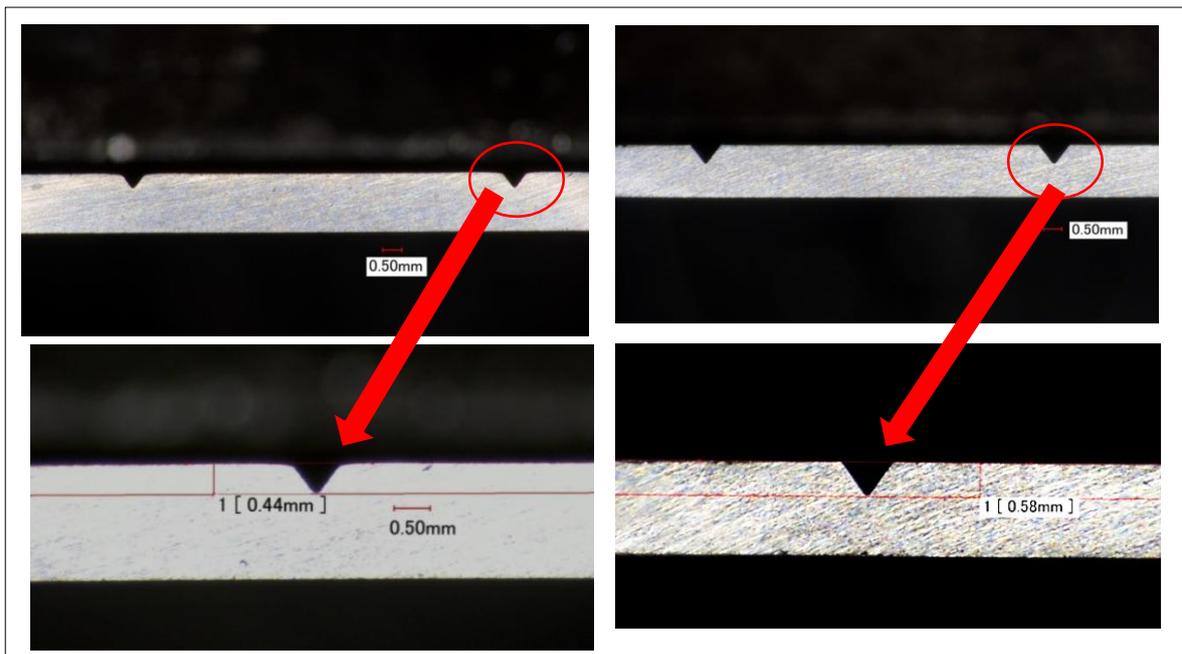
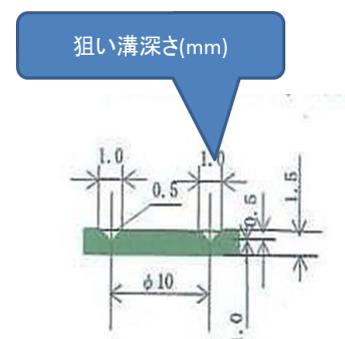


図 7 鍛造品の溝深さ

表1 測定条件と溝測定結果

材料	素材温度(°C)	荷重(kN)	溝深さ(mm) (狙い値=0.5)
SUS440	(500~600)	600	0.44
SS400C	室温	360	0.58



## 2-1-2 同時鑄込み法の開発

### 2-1-2-1 実験1・2

同時鑄込み後の超耐摩耗性複合鑄造材ブレードの界面活性化状況の検鏡と硬さ推移曲線の作成、更にはデジタル組織解析装置、XMA による複合化近傍の接合界面組織、硬さ変化、各元素の拡散状況を把握するため、表2の5因子3水準の実験計画を企画し実施した。

すなわち、複合化素材形状を鍛造加圧し易いよう前述(図2)した形状 H、I、J、K、L とし、鑄込み条件も省エネ化を意図して 1450°Cの低温条件も含めた。

また、同時鑄込み後は図8のプラズマ窒化条件で表面を窒化した。

<プラズマ窒化処理条件>

- ・ 処理ガス比  $N_2:H_2:X_2 = 2 : 1 : 1$
- ・ 流量 4 l/min
- ・ 処理圧力 5 Torr (666Pa)

○各複合化素材形状成形品と溶解鑄込み条件

表2 5因子3水準

因子	1水準	2水準	3水準
形状H	1450°C	1500°C	1550°C
形状I	1450°C	1500°C	1550°C
形状J	1450°C	1500°C	1550°C
形状K	1450°C	1500°C	1550°C
形状L	1450°C	1500°C	1550°C

○各複合化素材形状成形品とプラズマ窒化条件

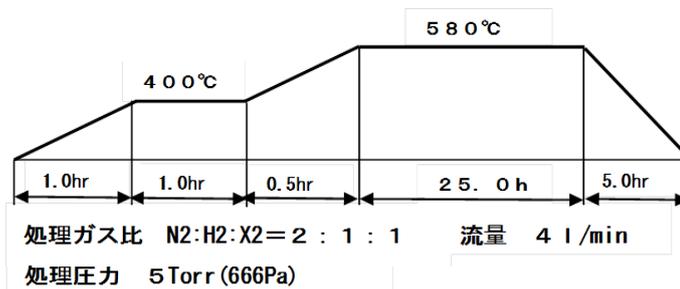


図8 複合化素材形状成形 H、I、J、K、L のプラズマ窒化処理条件

同時鋳込みした溶湯の化学成分を表3に示す。

表3 化学成分

溶湯材質	成分 (wt.%)									備考
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	
27CrFC	2.53	0.78	0.45	0.028	0.009	26.07	0.85	0.01	0.01	

○複合化素材の MC による加工と表面活性化

各複合化素材形状成形は、SUS440C 鋼材を MC で図7のとおり形状 H、I、J、K、L に加工した。

つまり、複合化素材形状成形 H は、SUS440C1.5t を MC で加工し、各円を 0.12t に溝加工し複合化する肉厚を 1.38t とした。同様に、複合化素材形状成形 I は、円溝数を16個に減らし、SUS440C1.5t を MC で加工し、各円を 0.5t に溝加工し複合化する肉厚を 1.0t とした。複合化素材形状成形 J は、円溝数を10個に更に減らし、SUS440C1.5t を MC で加工し、各円を 0.5t に溝加工し複合化する肉厚を 1.0t とした。

また、更に加圧力と金型の損耗を低減する目的で、鋸刃状の形状も取り入れた。図2で複合化素材形状成形 K は、SUS440C1.5t を MC で加工し、鋸刃状 XY 方向各溝を 1.0t に溝加工し複合化する肉厚を 0.5t とした。同様に、複合化素材形状成形 L は、鋸刃状 XY 方向各溝を 0.5t に溝加工し複合化する肉厚を 1.0t とした。

各加工品は、同時鋳込み時に複合化が容易になるようブラスト処理装置で表面を活性化した。

○ ペネトレーション防止対策

ペネトレーションの発生を防止する目的で、SUS440C 表面に耐熱性を有するセラミックファイバーを接合して、同時鋳込みする。

ペネトレーション防止のための耐熱保温材セラミックファイバーの SEI 像及び面分析をした結果、AlK $\alpha$ 、SiK $\alpha$ 、MgK $\alpha$  及び OK $\alpha$  が分析された。つまり、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub> と MgO の繊維からなる耐熱保温材であることが判る。

○ 複合化素材同時鋳込み用鋳型の成型工程

4 個取り木型で有機自硬性砂により上型と下型を成型後、複合化素材形状と同サイズのセ

ラミックファイバーを下型にセットし、耐熱性接着剤で各複合化素材形状に成形された SUS440C と接合してから、最後に上型を型合わせして同時鋳込み用の鋳型とした。

○ 溶解、出湯、同時鋳込み状況

ペネトレーション防止対策をセラミックファイバーでした鋳型に、1570℃に溶解した 27CrFC を 1550℃、1500℃及び 1450℃の注湯温度に制御・測温後、同時鋳込みした。

○ SUS440C と 27CrFC 同時鋳込み複合化後プラズマ窒化した表面近傍の硬さ推移曲線

複合化後徐冷しプラズマ窒化した試料の硬さ推移曲線は、図9の右図のような硬さ推移曲線となり、技術的目標値 HV1200 以上となっている。一方、複合化素材 SUS440C を 27CrFC と同時鋳込み後、抜型時間を短縮し下型を開放すると、図9の左図のように複合化素材 SUS440C が焼入れされ、SUS440C 単体を油冷焼入れした硬さに近付くことがわかる。

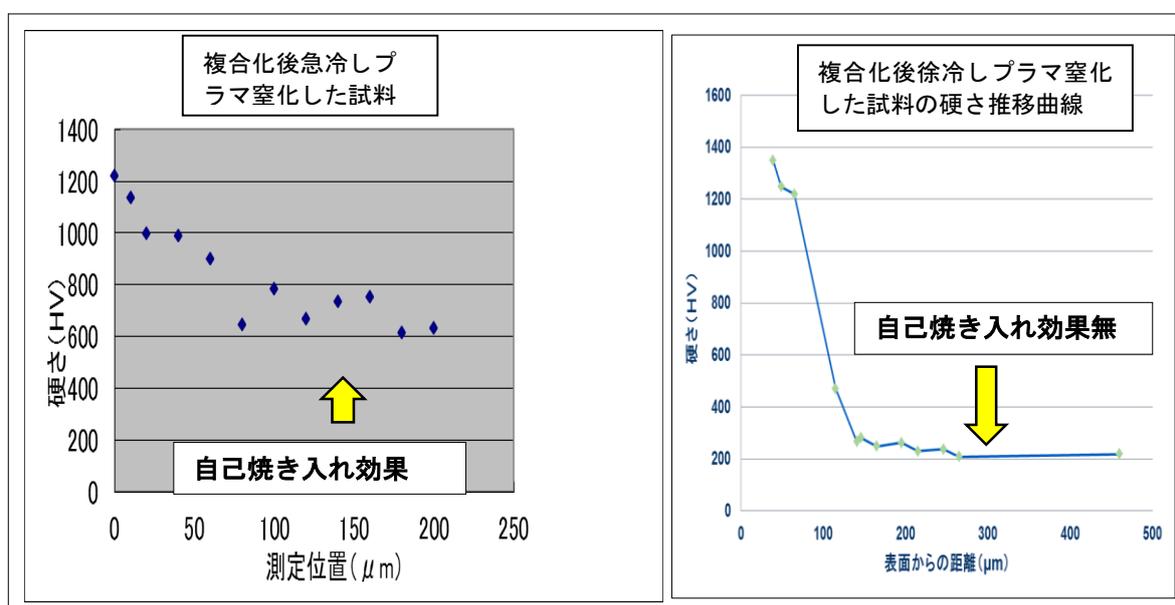


図9 同時鋳込み後徐冷と直ちに抜型してプラズマ窒化した表面近傍の硬さ推移曲線

### 2-1-2-2 摩耗試験結果1(往復摩耗試験)

同時鑄込み後、重複窒化したブレードの往復摩耗試験を実施し、耐摩耗性を評価した。

前回同様、垂直荷重を 1000gfとして、移動速度 1500mm/min、移動距離 30mm、移動回数往復 1000 回の各条件で、現在出荷しているブレードと今回開発した複合鑄造材「ブレード」との比較を実施した。

なお、圧子は5mmR アルミナを使用した。本圧子は Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 主体の圧子である。

各複合鑄造材摩耗試験片の往復摩耗試験前後の状況を図10に示す。

各種複合鑄造材の往復摩耗試験結果を図11に示す。

また、市販ブレードの摩耗試験結果と同時鑄込みした複合鑄造材ブレードの摩耗試験との比較結果を、図12に示す。

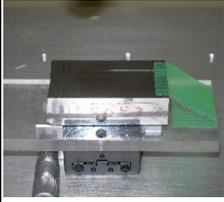
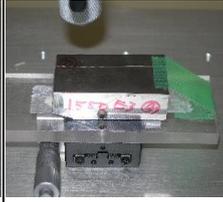
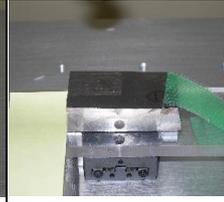
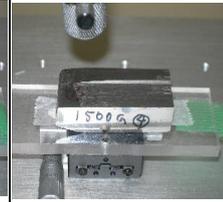
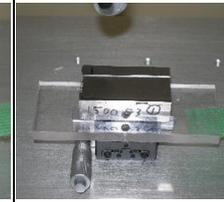
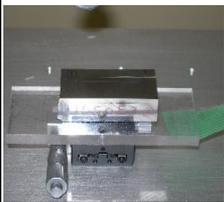
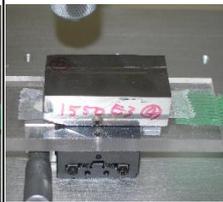
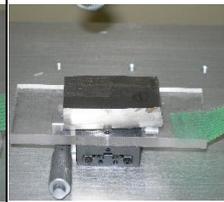
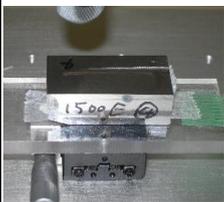
	1550E3①	1550E3④	1500G3①	1500G3④	1500E3①
試験前					
試験後					
試験前	1500E3④ 				
試験後					
			【試験機名】 摩耗試験機(往復式)	【移動速度】 1500mm/min	
			【垂直荷重】 1000gf	【移動距離】 30mm	
			【圧子】 5mmRアルミナ	【往復回数】 1000回	

図 1 0 各摩耗試験片の摩耗試験前後の状況 2

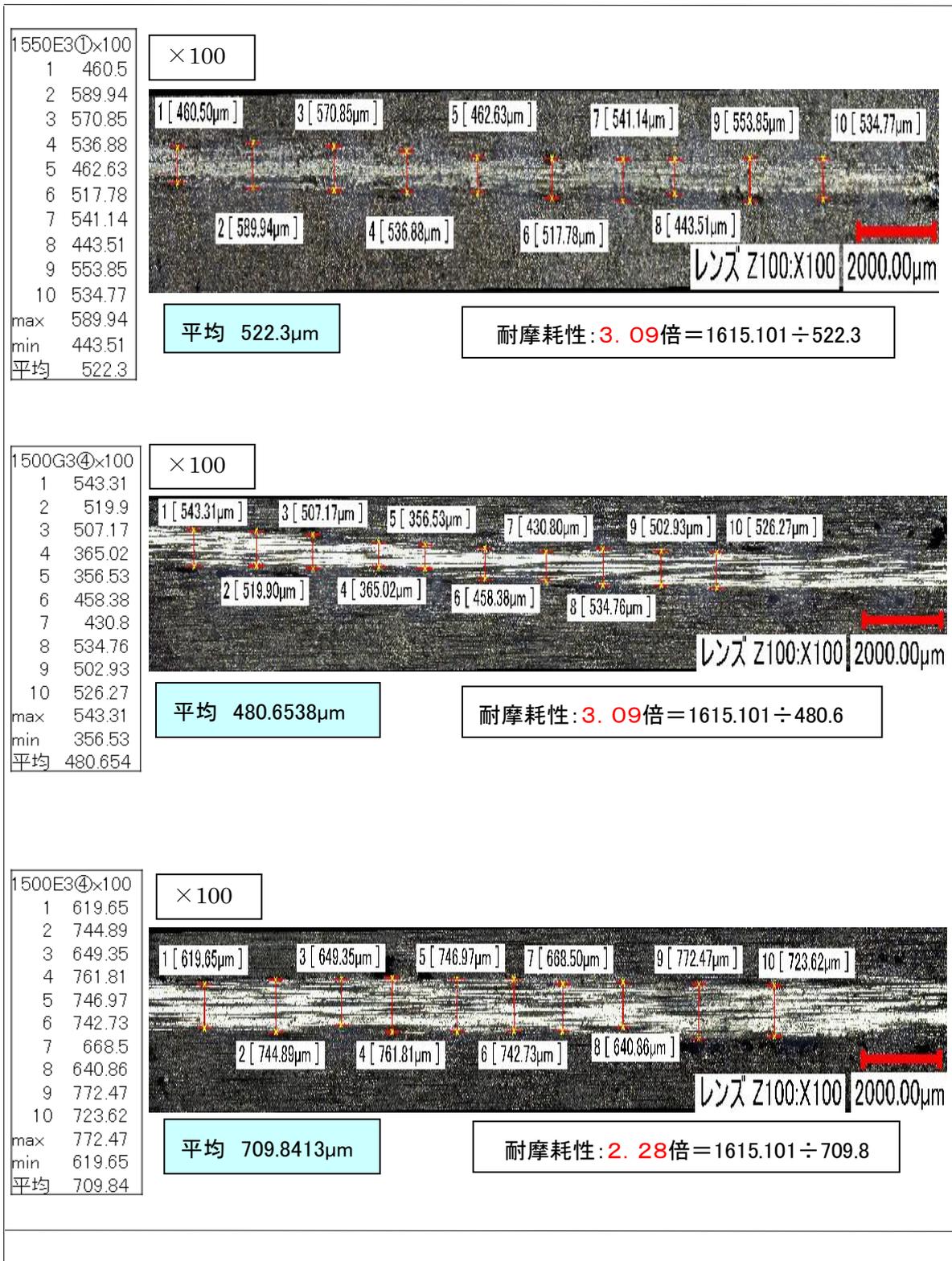


図 1 1 重複窒化複合鋳造材の往復摩耗試験結果

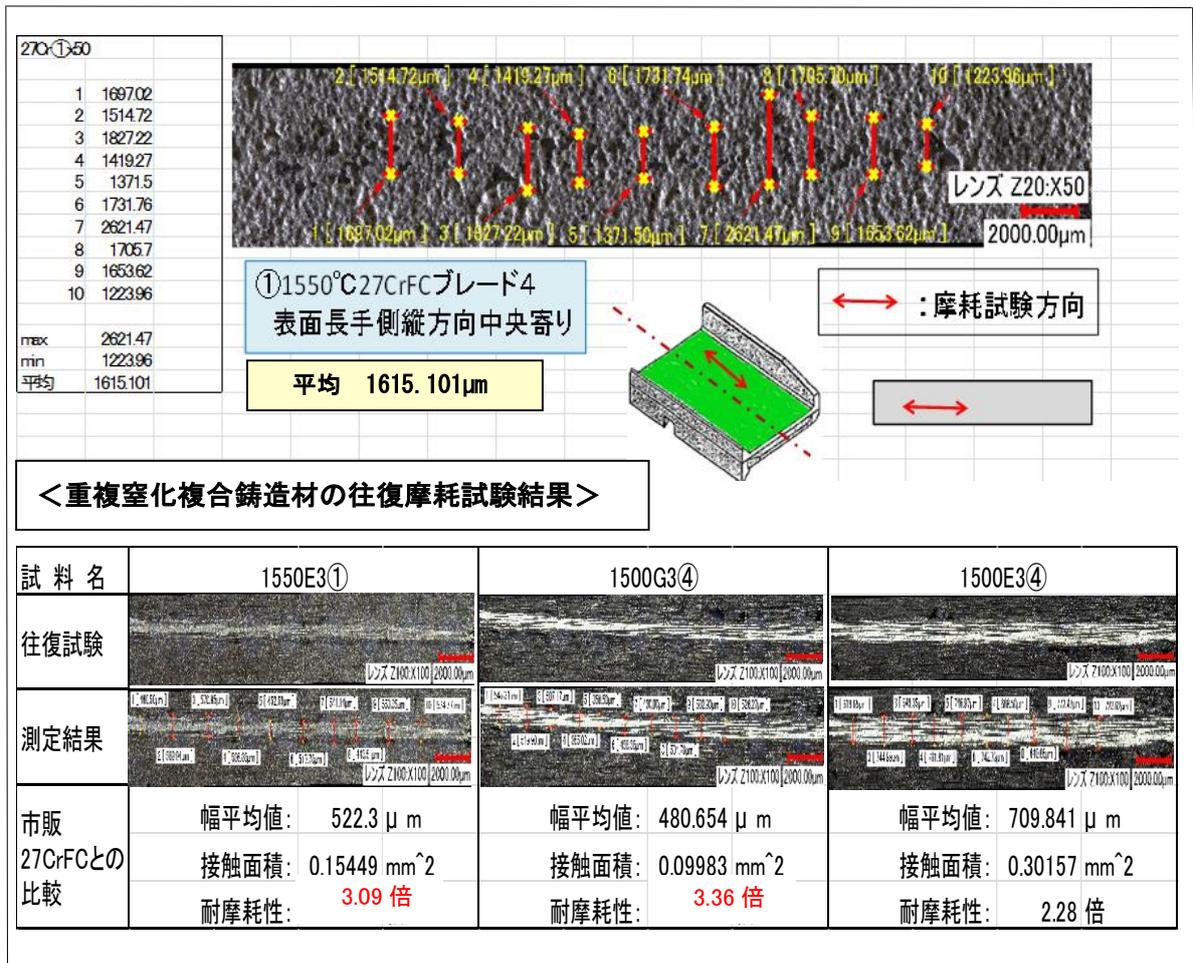


図 1 2 市販品と重複窒化複合鋳造材の比較

これらの結果から、複合鋳造材はいずれの摩耗試験片においても市販鋳造品の約 3 倍程度の耐摩耗性を有することが判る。

### 2-1-2-3 摩耗試験結果2(実証摩耗試験)

同時鋳込み後、重複窒化したブレードの試作摩耗試験装置で実証摩耗試験を実施し、耐摩耗性を評価した。

< 投射条件 >

- ・投射力 5kgf/cm<sup>2</sup>
- ・投射距離 200mm
- ・投射角度 50° or 60°
- ・ショット粒 市販鋼球

試作実証摩耗試験装置により市販鋳造品「ブレード」とプラズマ窒化した複合鋳造材「ブレード」の摩耗試験結果を図 1 3 に示す。

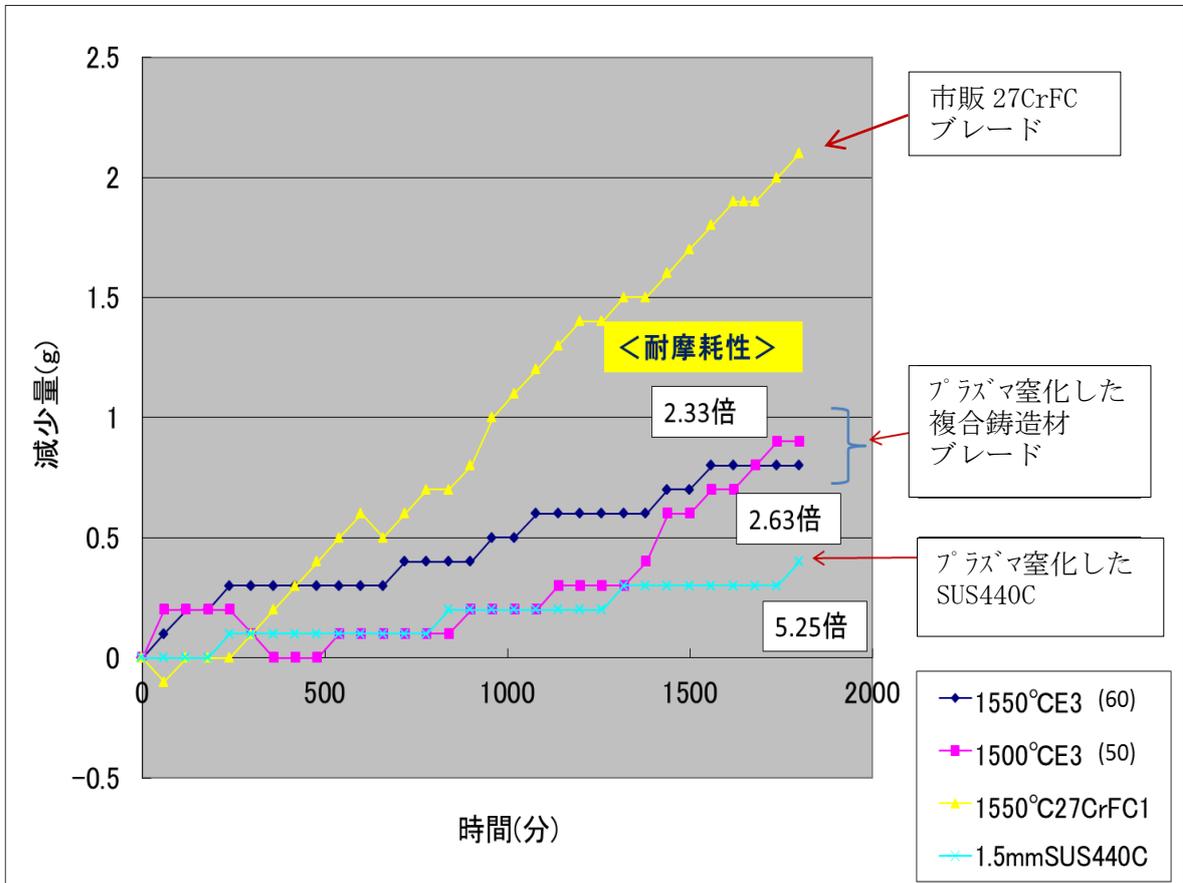


図 1.3 試作実証摩耗試験装置による市販品と複合鋳造材の比較(「ブレード」)

このことから、プラズマ窒化した複合鋳造材「ブレード」は、市販 27CrFC 製「ブレード」よりも実証摩耗試験装置での摩耗試験結果比較では、約 2 倍程度耐摩耗性に優れていることが判る。

この原因は、図 1.4 の表面近傍の SEI 像及び面分析結果から明らかである。つまり、プラズマ窒化した複合鋳造材ブレードの表面近傍には、極めて硬さの高い(HV>1200) ε 層(Fe<sub>2-3</sub>N)、γ' 層(Fe<sub>4</sub>N)及び Cr 化合物(CrN)が生成していることにより超耐摩耗性複合鋳造材となっている。

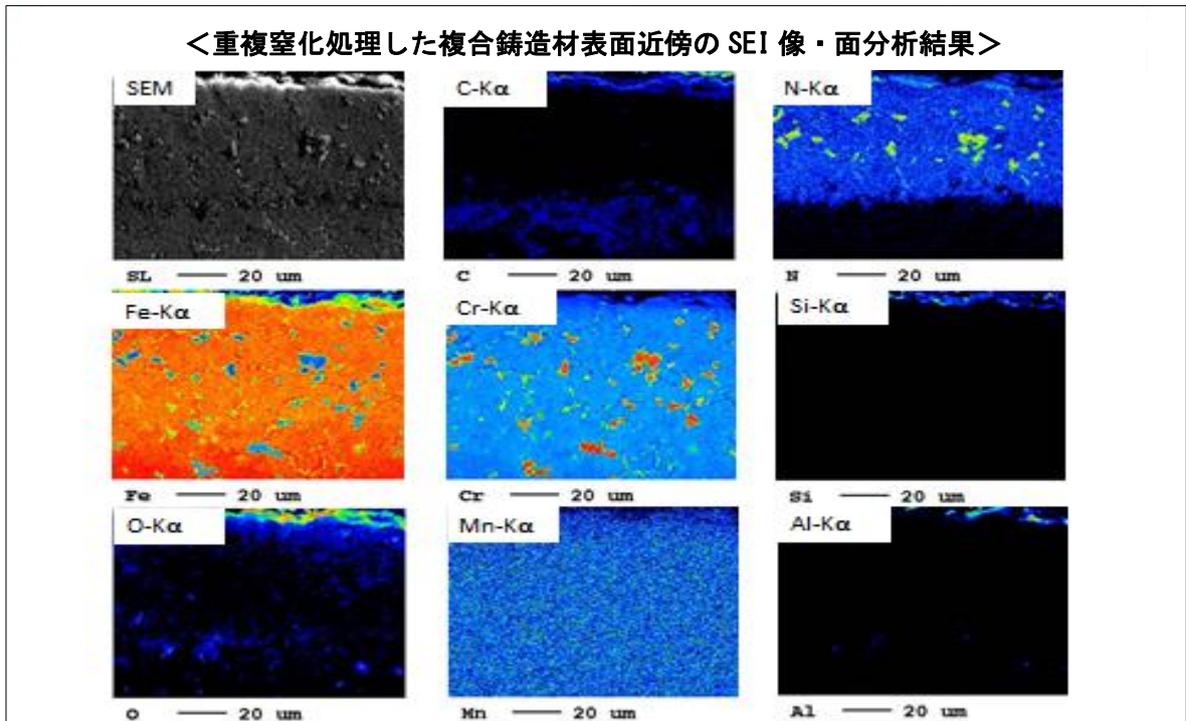


図 1.4 重複窒化処理した複合鋳造材表面近傍の SEI 像・面分析結果

### 2-1-3 接合界面評価技術

#### 2-1-3-1 実験1

鋳型から取り出された超耐摩耗性複合鋳造材ブレードについて精密切断機を用い複合化素材形状成形 H~L のおのこの箇所で切断し、断面接合界面と窒化層を観察した。

複合化素材形状成形品の詳細形状は前述した図2のとおりである。

次いで、同時鋳込みで複合化されたブレードの複合化素材形状成形 H~L の所定の9箇所の各ブロックで切断し、その断面の詳細な物理的溶着率%を測定した。

複合化素材 H~L の各検鏡試料の物理的溶着率(溶着長さ/全体長さ)を測定し、一覧表に整理したものが表3である。物理的にはほぼ100%溶着していることが解る。

表3 接合界面近傍接合状況評価結果

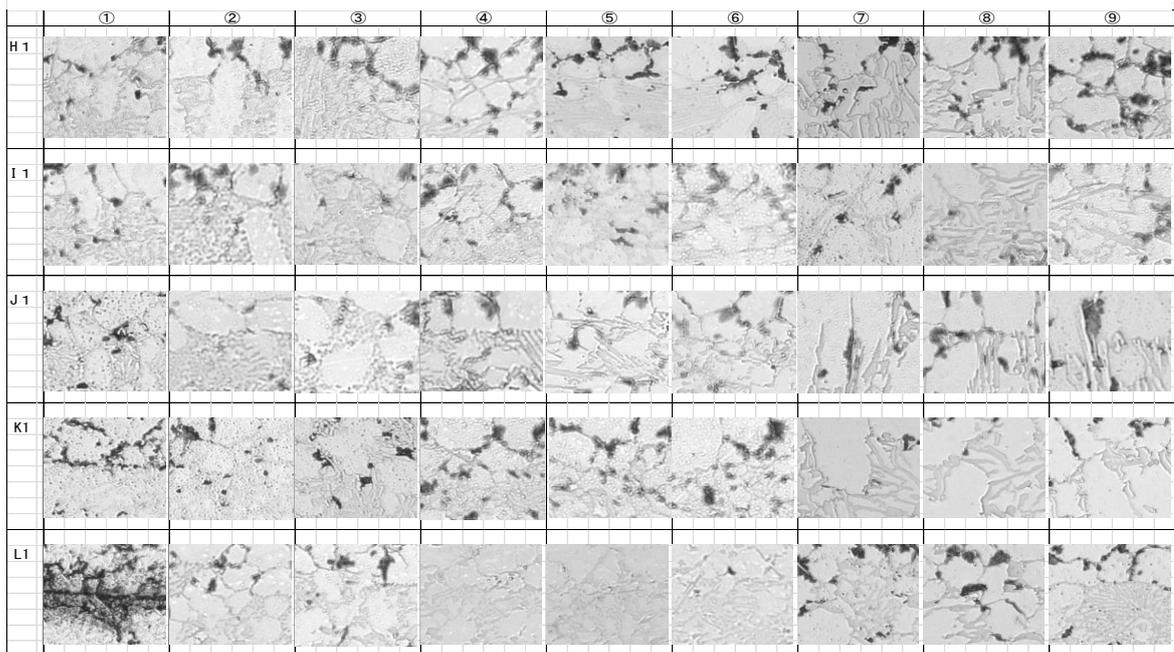
鑄込み 温度(°C)	形状H (SUS440C)	形状I (SUS440C)	形状J (SUS440C)	形状K (SUS440C)	形状L (SUS440C)
1450°C	1450H-1 ②、③、⑧	1450I-1 ②、③、⑧	1450J-1 ②、③、⑧	1450K-1 ②、③、⑧	1450L-1 ②、③、⑧
外観検査	② H1-1 100%	② I1-1 100%	② J1-1 100%	② K1-1 否 50%	② L1-1 100%
	③ H1-2 100%	③ I1-2 100%	③ J1-2 100%	③ K1-2 100%	③ L1-2 100%
	⑧ H1-3 100%	⑧ I1-3 100%	⑧ J1-3 100%	⑧ K1-3 100%	⑧ L1-3 100%
1500°C	1500H-1 ②、③、⑧	1500I-1 ②、③、⑧	1500J-1 ②、③、⑧	1500K-1 ②、③、⑧	1500L-1 ②、③、⑧
外観検査	② H1-1 100%	② I1-1 100%	② J1-1 100%	② K1-1 100%	② L1-1 100%
	③ H1-2 100%	③ I1-2 100%	③ J1-2 100%	③ K1-2 100%	③ L1-2 100%
	⑧ H1-3 100%	⑧ I1-3 100%	⑧ J1-3 100%	⑧ K1-3 100%	⑧ L1-3 100%
1550°C	1550H-1 ②、③、⑧	1550I-1 ②、③、⑧	1550J-1 ②、③、⑧	1550K-1 ②、③、⑧	1550L-1 ②、③、⑧
外観検査	② H1-1 100%	② I1-1 100%	② J1-1 100%	② K1-1 否 80%	② L1-1 100%
	③ H1-2 100%	③ I1-2 100%	③ J1-2 100%	③ K1-2 100%	③ L1-2 100%
	⑧ H1-3 100%	⑧ I1-3 100%	⑧ J1-3 100%	⑧ K1-3 100%	⑧ L1-3 100%

これらの供試材から精密切断機で切り出された試験片を樹脂粉末に埋め込み研磨後、腐食液を用い腐食させ、金属顕微鏡で接合界面接合状況について組織評価整理した結果を、表4に示す。

この倍率×500のマイクロ組織は、物理的溶着率100%を裏付ける結果となっている。複合化部全面(ブレード試験片9採取箇所)で、良く複合化が進行していることが判る。

表4 接合界面近傍のマイクロ組織一覧表

×500



更に、溶着部及び窒化層の原子拡散状況を評価するため、デジタル組織解析装置、XMA でCrK $\alpha$ 、FeK $\alpha$ 、MnK $\alpha$ 、SiK $\alpha$ 、CK $\alpha$ 、NK $\alpha$ 、OK $\alpha$ 、について、面分析を行なった結果を、図15及び図16に示す。

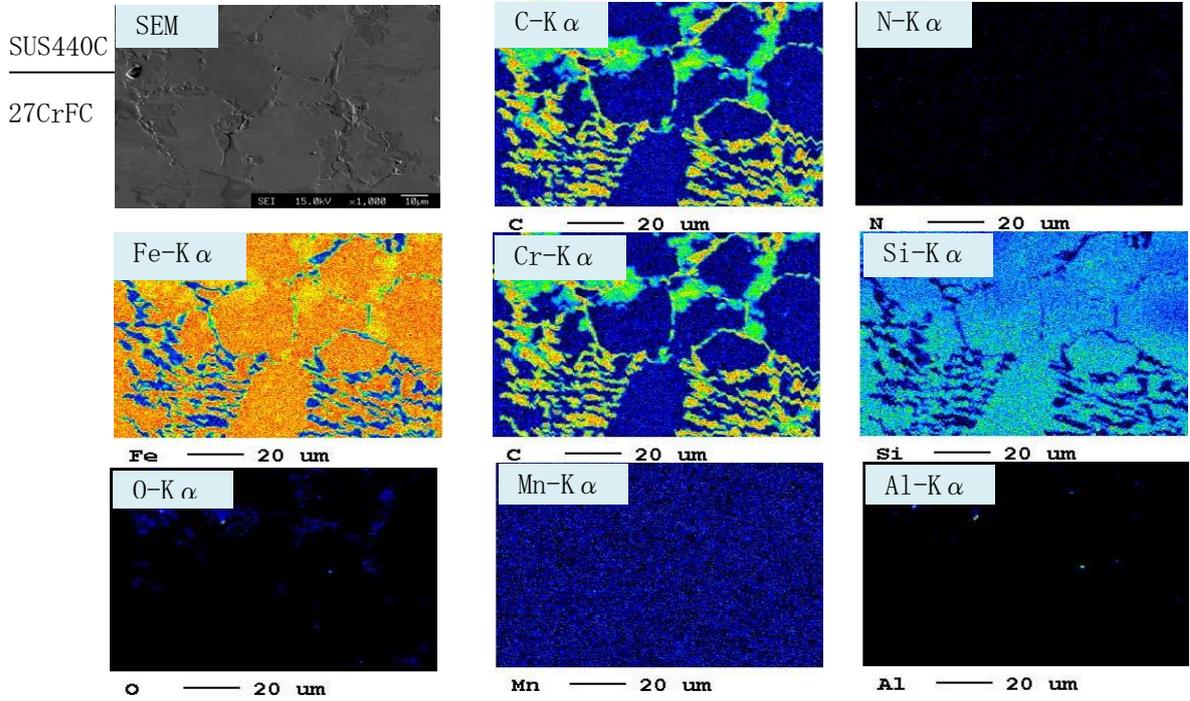


図 1 5 複合鋳造材複合化部面分析結果（形状 H）

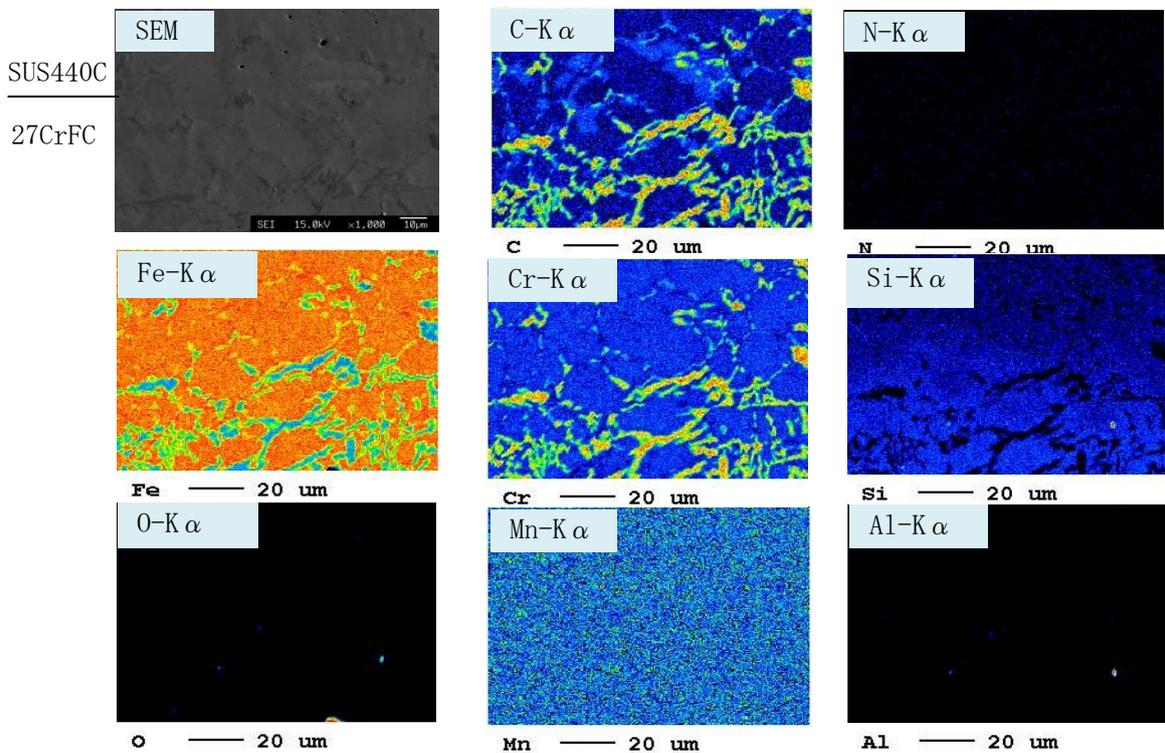


図 1 6 複合鋳造材複合化部面分析結果（形状 L）

複合化素材丸溝形状 H と複合化素材鋸刃形状 L 共に、CrK $\alpha$ 、FeK $\alpha$ 、MnK $\alpha$ 、SiK $\alpha$ 、CK $\alpha$  が相互に拡散し、拡散接合が良く進行していることが判る。

更に、これらの線分析結果を、図17に示す。面分析結果同様、良く拡散接合されている。

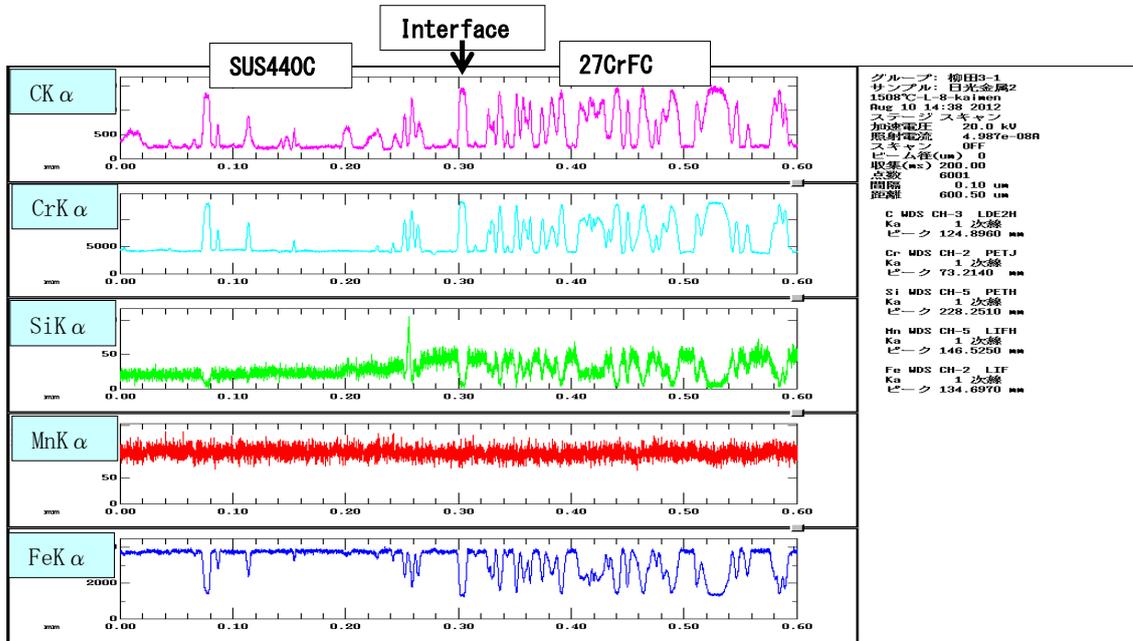


図 1 7 複合鋳造材複合化部線分析結果 (形状 L)

### 2-1-3-2 実験2

最高硬さの安定化と耐摩耗性の向上を目的に、同時鋳込み後は図8(前出)のプラズマ窒化条件で窒化した複合鋳造材の表面近傍と複合化部の SEI 像を図18に、面分析結果を図19に示す。

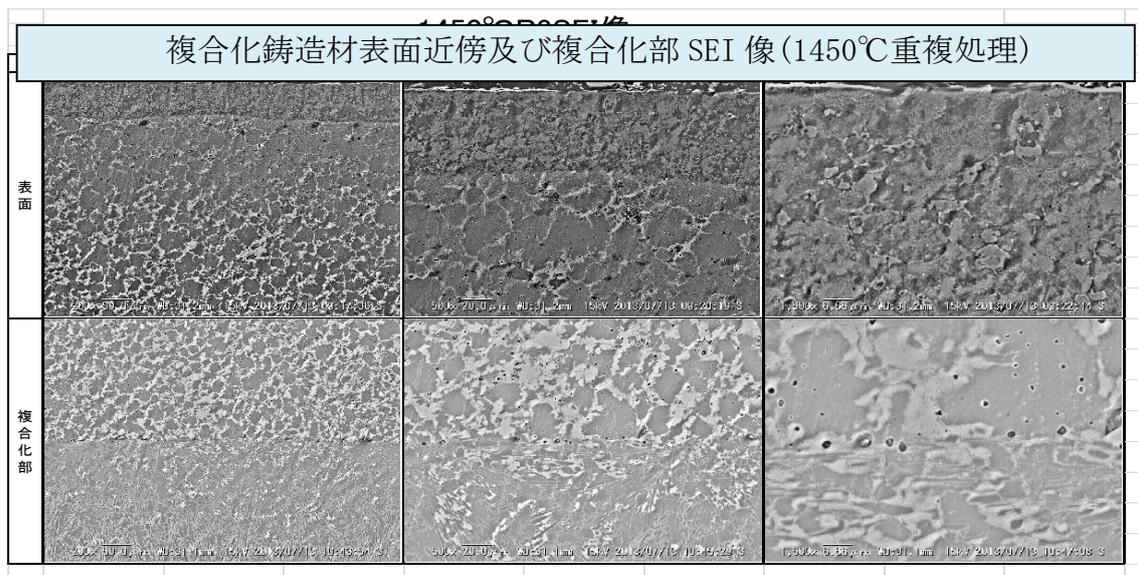


図 1 8 複合化鋳造材表面近傍及び複合化部 SEI 像

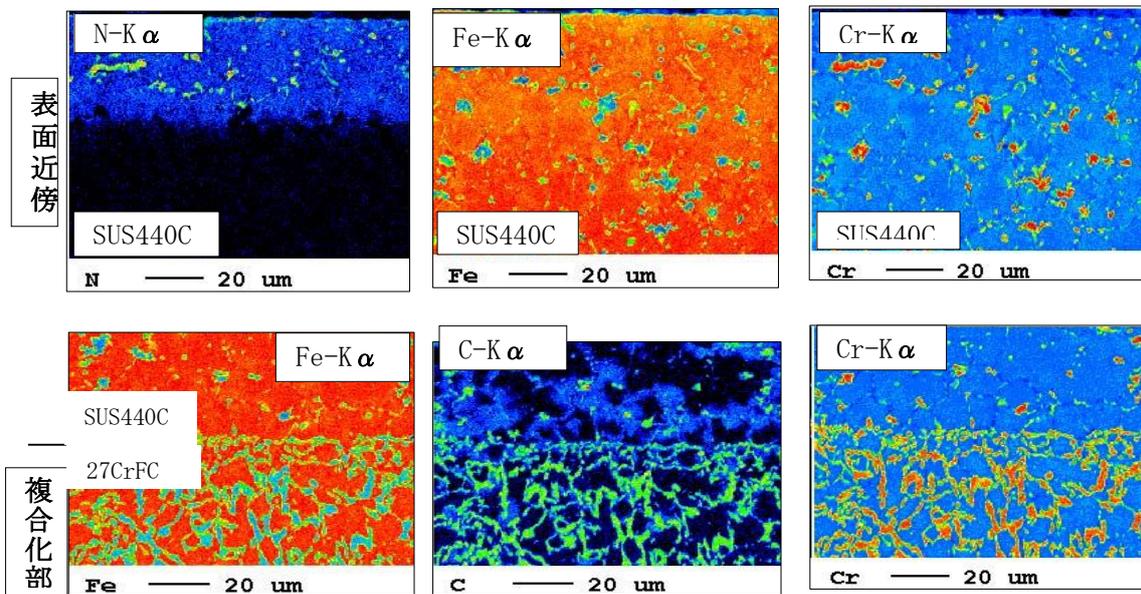


図19 複合化鋳造材表面近傍及び複合化部面分析結果(1450°C)

SEI像及び面分析結果から、複合鋳造材の表面近傍には、NKαが50~60μmまで良く拡散している。従って、表面近傍にはε相(Fe<sub>2-3</sub>N)及びγ'相(Fe<sub>4</sub>N)の非常に硬い化合物が生成していることが判る。また、省エネとなる低温溶解、1450°低温同時鋳込みでも十分ではないが各原子の拡散が進行し、複合化が進行している。

高温溶解、高温同時鋳込みした表面近傍及び複合化部の面分析結果を、図20に示す。

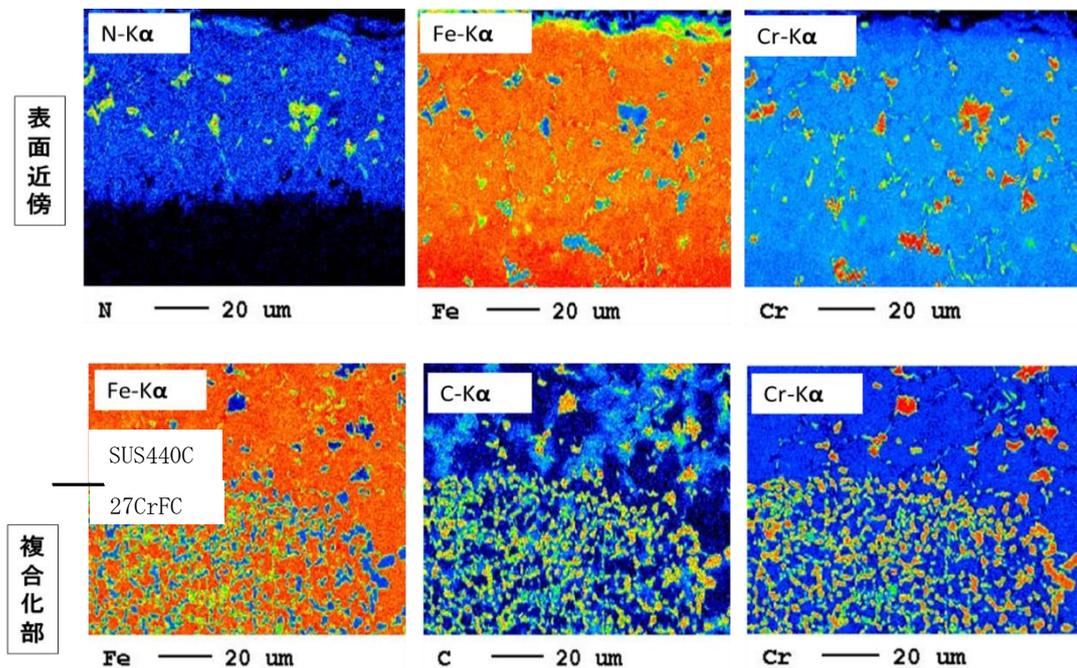


図20 複合化鋳造材表面近傍及び複合化部面分析結果(1550°C)

高温同時鋳込みにより複合化はさらに進行し、CrK $\alpha$ 、FeK $\alpha$ 、MnK $\alpha$ 、SiK $\alpha$  及び、CK $\alpha$  の相互拡散が激しく進行し、強固に結合した複合鋳造材となっていることが判る。

また、表面近傍には、NK $\alpha$  60~80 $\mu$ m まで良く拡散している。従って、低温同時鋳込みと同様、表面近傍には  $\epsilon$  相(Fe<sub>2-3</sub>N)及び  $\gamma'$  相(Fe<sub>4</sub>N)の非常に硬い化合物が生成していることが判る。

なお、川下企業ニーズである硬さ HV1200 の達成度を評価するため、窒化層近傍をマイクロビッカース硬さ試験機を用い硬さ試験を行った。この結果を図21に示す。

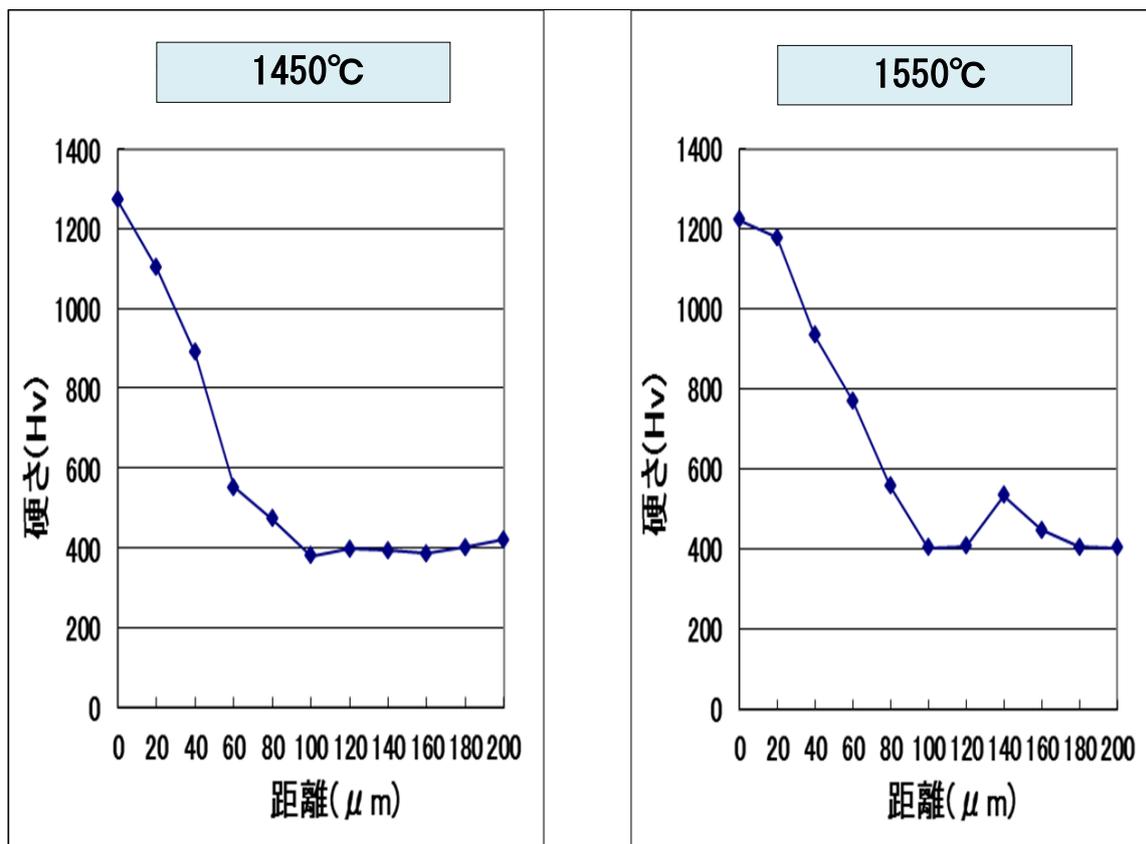


図 2 1 複合化鋳造材表面近傍の硬さ推移曲線(1450°C、1550°C)

SEI 像及び面分析結果と良く一致し、HV1200 以上の高硬度となっている。前述した往復摩耗試験結果及び実証摩耗試験結果とも良く符合している。

## 2-2 超耐摩耗性複合鑄造材「ハンマー」の開発

早期の商品化を図るため、具体的な開発ターゲットは環境機器・石灰業界等で多用されている図22の「ハンマー」とした。

### 研究開発：超耐摩耗性複合鑄造材「ハンマー」の開発

#### 同時鑄込み法の開発

開発課題点：鑄鋼品と超硬合金WCチップとの複合化

#### <複合化素材>

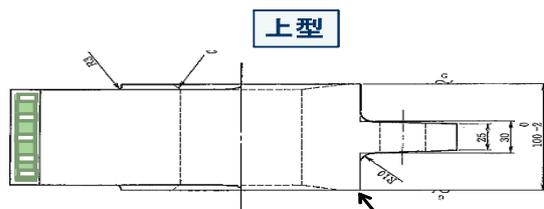
(平面図)



(側面図)

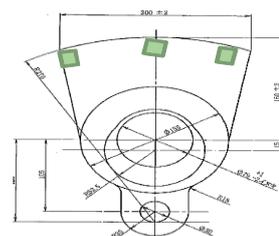
■：超硬合金・サーメット系スローアウェチップ磨材

#### <造型・同時鑄込み工程>



母材：SCMnH11  
SCNcrM2 等

#### <複合化後の製品>



製品例：  
シュレッダーハンマー

備考：・複合化素材(超硬合金(WC-Co)・サーメット(TiC、TiCN)スローアウェチップ磨材)は特殊治具で固定+インサート等付加(仮)  
・超硬合金・サーメット粉体は塗布法：(WC-Co、TiC、TiCN)+無機溶剤、層状(細粒・粗粒複層)多層塗布



84

図22 環境部品用超耐摩耗性複合鑄造材ハンマーの開発

### 2-2-1 実験1(WCチップの複合化)

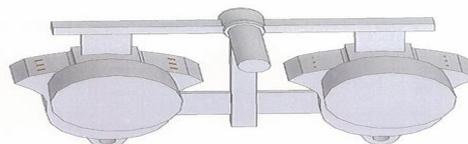
#### ○超硬合金チップ(WC)の同時鑄込み法

超硬合金チップ(WC)形状Aと形状Bを鑄型にセット後、以下の鑄込み温度で耐摩耗鋼SCMnH11及び低合金鑄鋼SCNcrM2を同時鑄込みした。方案は以下のとおり。

#### <造型・鑄込み>

WC-Co 超硬チップ鑄型に固定				
鑄込み温度(°C)	チップ形状A	チップ形状B	備考	
1550°C	1500-A-1	1500-B-1	1:OM,2:テジ	
	1500-A-2	1500-B-2		
1600°C	1550-A-1	1550-B-1	1:OM,2:テジ	
	1550-A-2	1550-B-2		
チップ个数	個(6個/型)			
同時鑄込み造形数	4型 2枠			小計:24個 2枠

#### <方案>



○複合化用溶湯注湯型の造型

実際の造型状況を図23に示す。ハンマーの下型・上型を有機自硬性鑄型で造型後、超硬合金 WC を耐摩耗性の要求されるコーナー部にセットし、両型を型合わせして鑄型とする。



図23 環境部品用超耐摩耗性複合鑄造材ハンマーの開発

○複合化素材(WC 超硬チップ)への注湯(SCMnH11)

高周波電気炉で耐摩耗鋼 SCMnH11 及び低合金鑄鋼 SCNCrM2 を溶製後、鑄込み温度を 1550℃ と 1600℃ に調整し同時鑄込みした。その状況を図24に示す。



図24 環境部品用超耐摩耗性複合鑄造材ハンマーの同時鑄込み状況

○超硬チップ(WC)の同時鋳込み後の外観

超硬チップ(WC)を耐摩耗鋼 SCMnH11 と低合金鋳鋼 SCNCrM2 で同時鋳込み後型バラシした外観状況例を図 2 5 に、WJ による切断後の断面状況を図 2 6 に示す。



図25 超耐摩耗性複合鋳造材ハンマー同時鋳込み後の外観

○超硬チップ(WC)のSCMnH11及びSCNCrM2同時鋳込み製品外観及びWJ切断状況

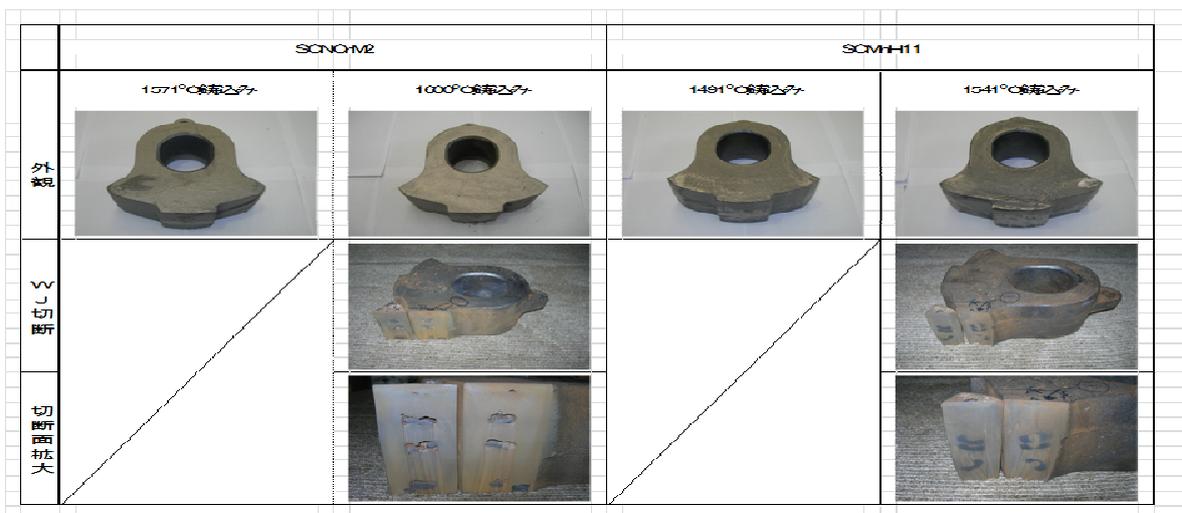


図26 超耐摩耗性複合鋳造材ハンマー同時鋳込み製品と切断面外観

○同時鑄込みにより「WC-Co 超硬チップ」と複合化した鑄鋼製ハンマーの組織

「WC-Co 超硬チップ」を同時鑄込みにより複合化した鑄鋼製ハンマーの SCMnH11 及び SCNCrM2 の組織を図 27 に示す。

耐摩耗鋼 SCMnH11 は、多少のヘアクラックは観察されるが超合金 WC-Co と大半が複合化されている。一方、低合金鑄鋼品 SCNCrM2 には、キラワレが発生し現状のままでは実用化の可能性はない。

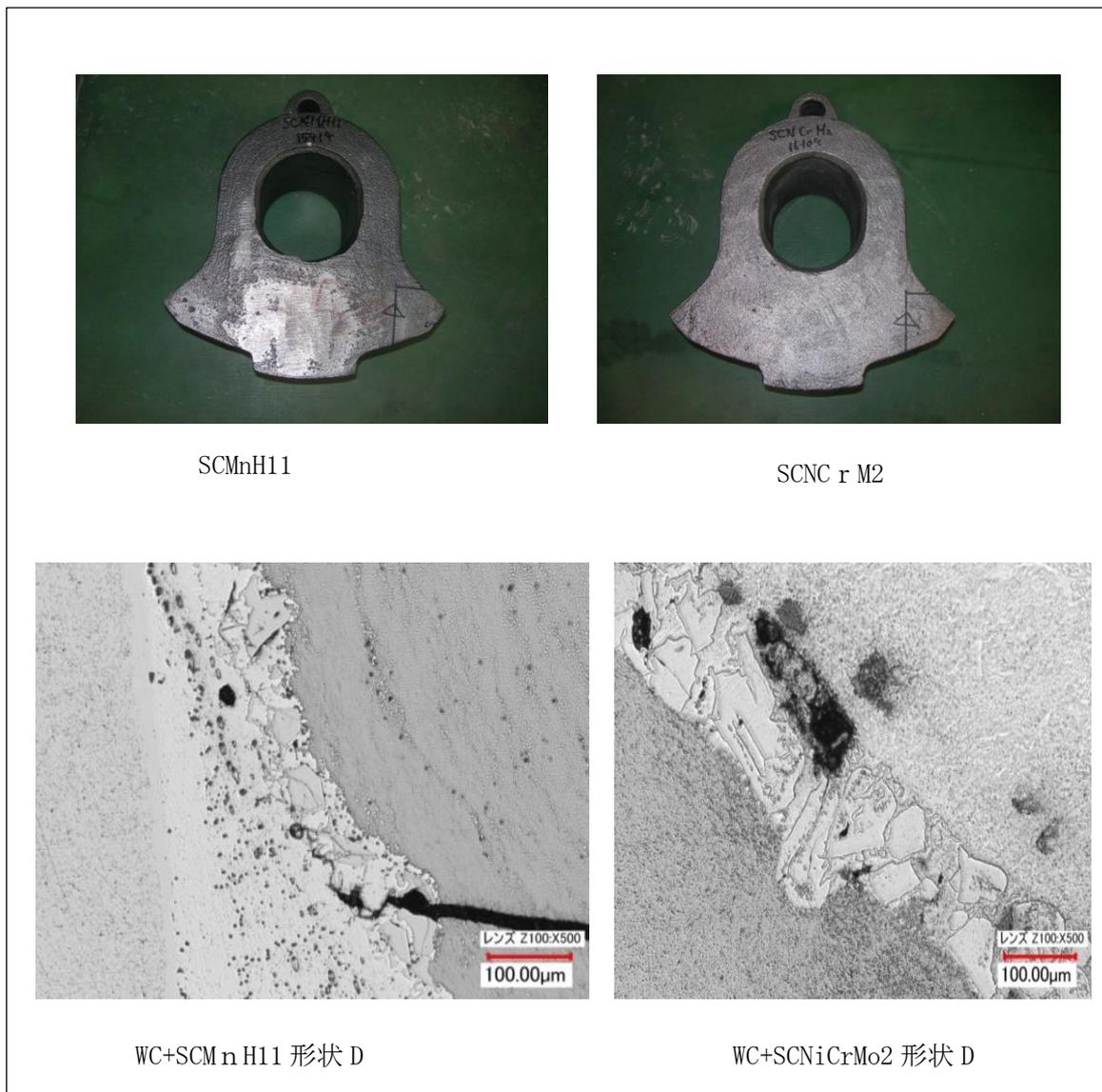


図27 超耐摩耗性複合鑄造材ハンマー同時鑄込み製品の切断面組織

○ 超耐摩耗性複合鑄造材ハンマー同時鑄込み製品切断面の物性値(硬さ)

同時鑄込みして複合化した超耐摩耗性複合鑄造材ハンマー製品切断面の硬さの推移曲線を図28に示す。

最高硬さはMHV1500と正に超硬合金WCの硬さに近い。

この原因を探るため、ハンマーをWJ(ウォータージェット)で切断し切断面をマイクロスコープで観察(図29参照)した。この結果、WCチップとSCMnH11は相互に拡散(図30参照)し複合化していることが判明した。しかし、前述したように、一部にはヘアクラックが観察される。

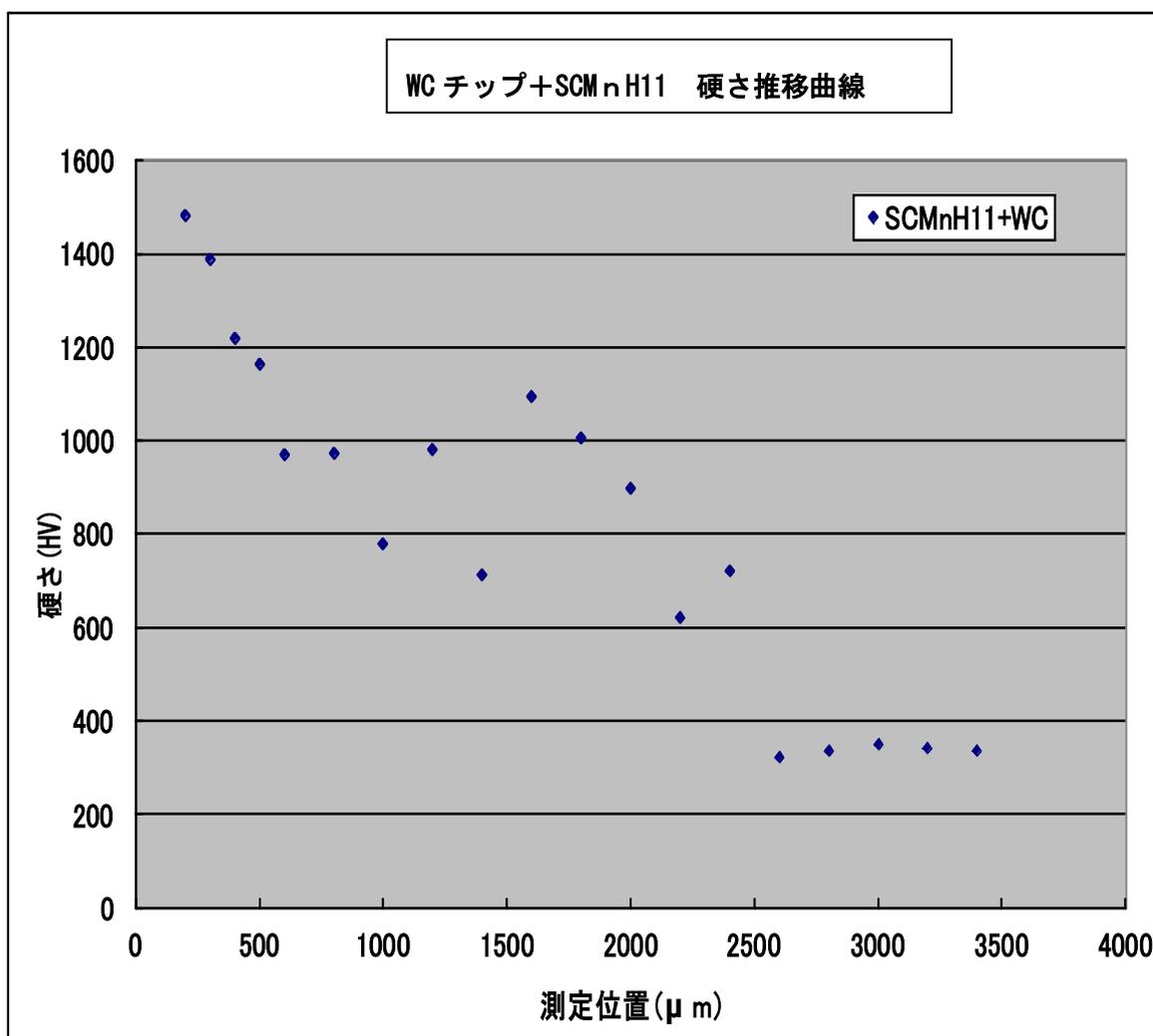


図28 超耐摩耗性複合鑄造材ハンマー同時鑄込み製品切断面の硬さ推移曲線

○ WC チップ+SCMnH11 接合界面組織観察結果線

同時鋳込みして複合化した超耐摩耗性複合鋳造材ハンマー製品切断面接合界面をマイクロスコープで観察した結果を図 7 0 に示す。また、複合化近傍のデジタル組織解析装置による  $WLa$ 、 $MnKa$ 、 $FeKa$  等の特性 X 線による面分析・線分析結果を図 3 0・図 3 1 に示す。

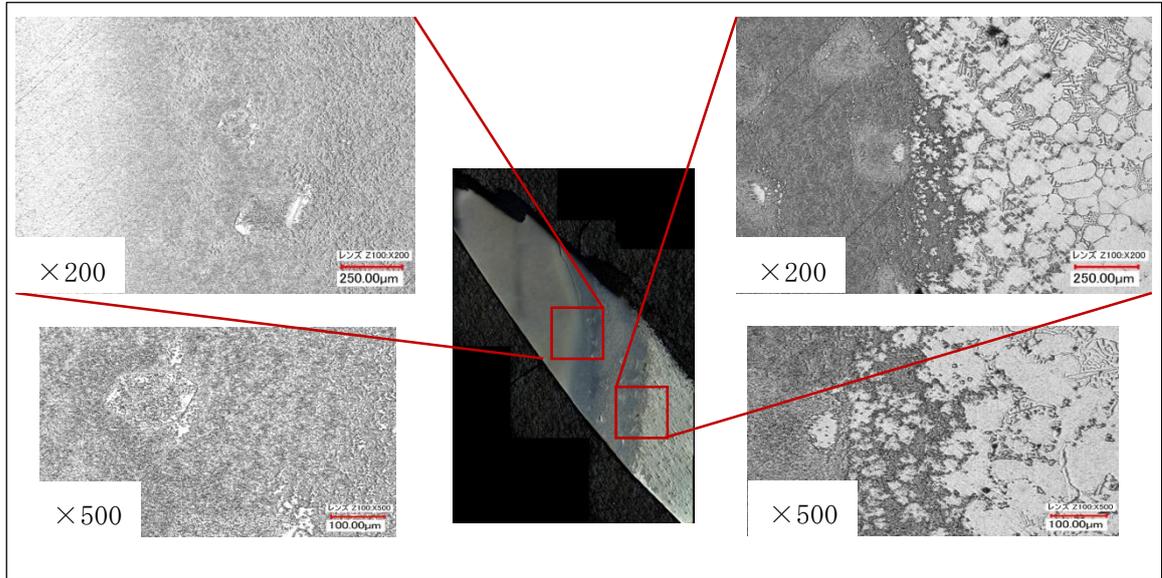


図 2 9 超耐摩耗性複合鋳造材ハンマー同時鋳込み製品切断面の組織

WC+SCMnH11複合化近傍面分析結果

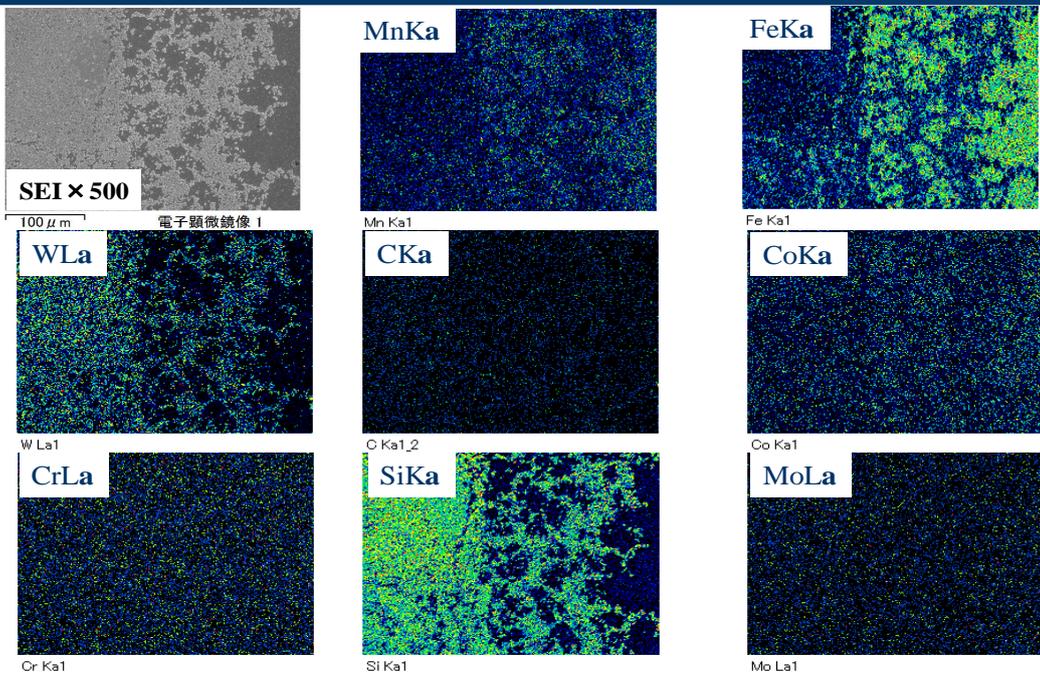
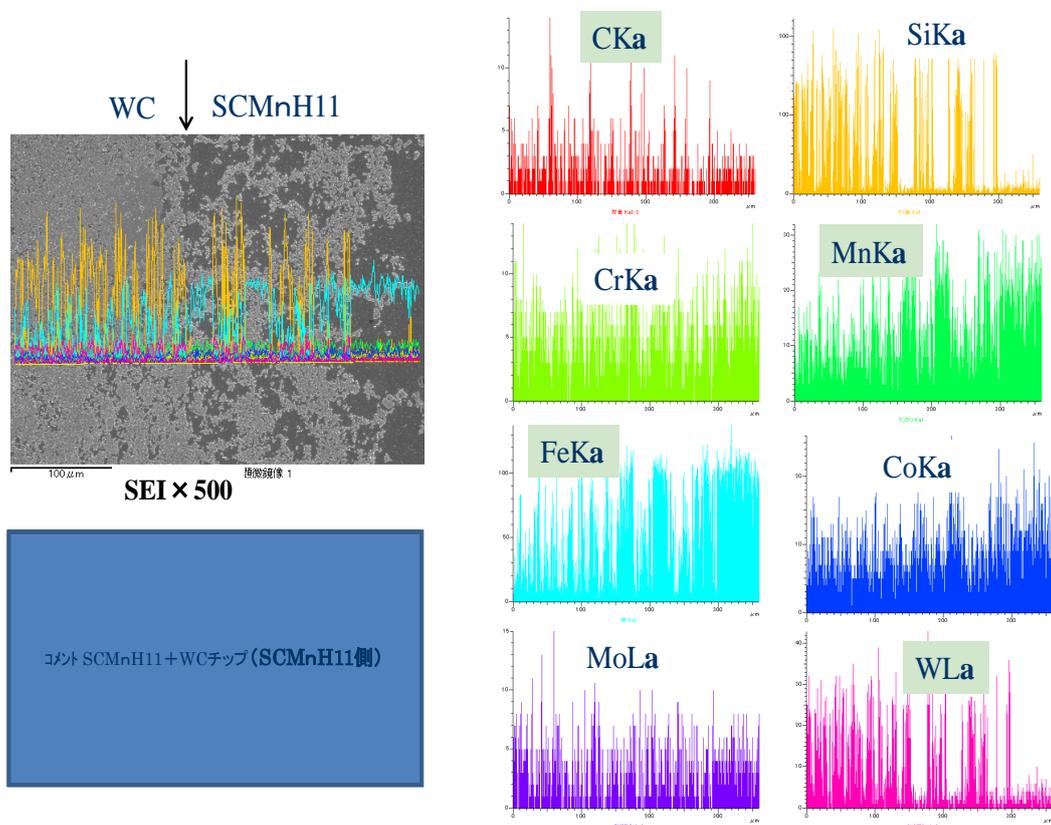


図 3 0 WC チップ+SCMnH11 接合界面面分析結果

## WC+SCMnH11複合化近傍線分析結果



95

図 3.1 WC チップ+SCMnH11 接合界面線分析結果

線分析結果は、面分析結果と併せて考察すると、以下のようなことが解る。

超硬合金 WC 側は、当然 W がリッチであるから特性 X 線  $WLa$  は高濃度で、耐摩耗鋼 SCMnH11 側近傍に近付くに連れ濃度が低下している。

一方、耐摩耗鋼 SCMnH11 側では主成分が Fe であることから、 $FeKa$  が高濃度で、超硬合金側近傍に近付くに連れ濃度が低下している。また、耐摩耗鋼側では Mn が 1.3% 程度含有していることから、耐摩耗鋼側では  $MnKa$  が高濃度となっており、超硬合金 WC 側近傍に近付くに連れ濃度が低下している。

前述したように、面分析結果もほぼ同様の分析結果となっていることから、超硬合金 WC と耐摩耗鋼 SCMnH11 とは、複合鋳造材ブレードの開発で観察された SUS440C プラズマ窒化表面及び複合化部の相互拡散程ではないが、同様の拡散現象が観察された。

すなわち、十分ではないが用途に応じては耐摩耗性に優れた新たな複合鋳造材の創成の可能性もある。

## 2-3 超耐熱性複合鋳造材「ロストル」の開発

早期の商品化を図るため、具体的な開発ターゲットは環境機器業界等で多用されている図32の「ロストル」とした。

### 研究開発：超耐熱性複合鋳造材「ロストル」の開発

#### 同時鋳込み法の開発

開発課題点：耐熱鋼とフレキシブルセラミックとの複合化

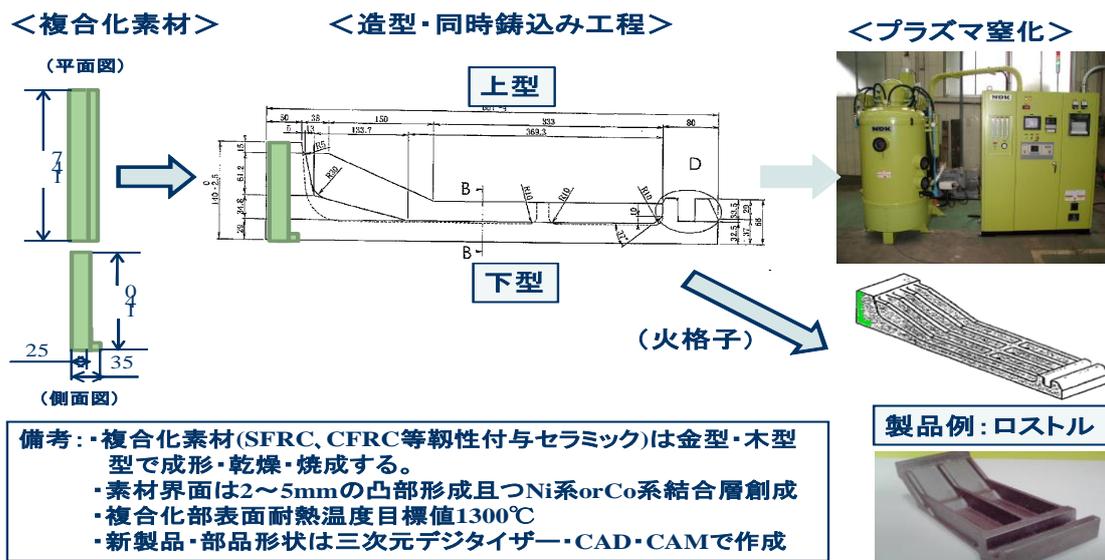


図32 環境部品用超耐熱性複合鋳造材ロストルーの開発

### 2-3-1 実験1

#### ○ セラミックと耐熱鋼 SCH2 との複合化

セラミックと耐熱鋼 SCH2 との複合化の手法としては、以下のような方法が考えられる。

#### I. 「物理的な接合」(主として複雑形状設計)

- ①複合化素材一体成形→同時鋳込み
- ②複合化素材分割成形→複数素材特殊治具固定  
→同時鋳込み

#### II. 「結合材による複合化」

- ①複合化素材→C o-C r-A l-Y→同時鋳込み
- ②複合化素材→N i-C r-A l-Y→同時鋳込み

### III. 「インサートによる複合化」

- ①複合化素材→FCC系金属(Ni、Cu、Al、Ca等)  
→同時鑄込み

### IV. 「溶射(ダイヤモンドジェットプロセス)による複合化」

- ①複合化素材→ $\gamma$ 系ステンレス溶射(単相・2層)  
→同時鑄込み

### V. 「無電解めっきによる複合化」

- ①複合化素材→FCC系無電解めっき  
→同時鑄込み

### VI. 「その他による複合化」

- ①複合化素材→その他  
→同時鑄込み

現在、多用されているのは、溶射による表面処理、多層盛した複合化である。

例えば、溶射(ダイヤモンドプロセスHV0F、プラズマ等)とロボットを組み合わせた処理で、Al2O3、ZrO2-Y2O3、Cr2O3、MgO、Cr23C6、(NiCrAlY)等を多層コーティング(加熱)し、耐熱性付与している。しかし、このような手法は、装置自体が効果で、かつ、ランニングコストも高価となることから、高付加価値、高機能を要求される部品に限定されている。

本研究で開発しようとしている焼却炉部品である「ロストル」は、単価が安いことから、これらの手法は不向きである。

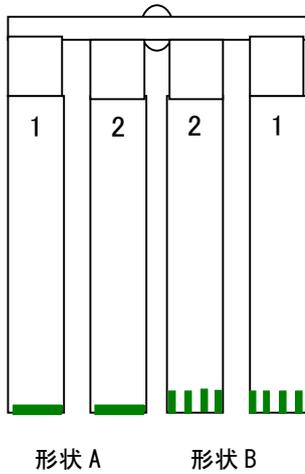
このため、今回の開発では、主としてI.の「物理的な接合」(主として複雑形状設計)とII.の「結合材による複合化」に取り込むこととした。

### ○ 実験計画

**表1 3因子5水準**

因子		水分(%)					(wt.%)
		水準1	水準2	水準3	水準4	水準5	
シリカ粉末	100 $\mu$ m	42%	21%	16%	10.5%	0%	
	500 $\mu$ m	0%	10.5%	10%	10.5%	0%	
	1000 $\mu$ m	0%	10.5%	16%	21%	42%	
ベントナイト		21%					
SUS304		11%					
水		26%					

○ 複合化素材形状(A, B)



○ 予備焼成

ステップ	温度	時間	計
1	300	0:50	0:50
2	700	2:10	2:00
3	700	0:10	2:10
4	1000	1:00	3:10
5	1000	0:10	3:20
6	炉冷		

○ 複合化素材フレキシブルセラミックの作成(形状図 3 3 参照)

酸性系  $\text{SiO}_2$  セラミック粉末  $100 \mu\text{m} 16\%$ 、 $500 \mu\text{m} 10\%$ 、 $1000 \mu\text{m} 16\%$ 、ベントナイト 21%、SUS304 短繊維 ( $\phi 0.7\text{mm} \times 10\text{mm}$ ) 11%、水 26%を混合・混練し後、自然乾燥と上記予備焼成をした。

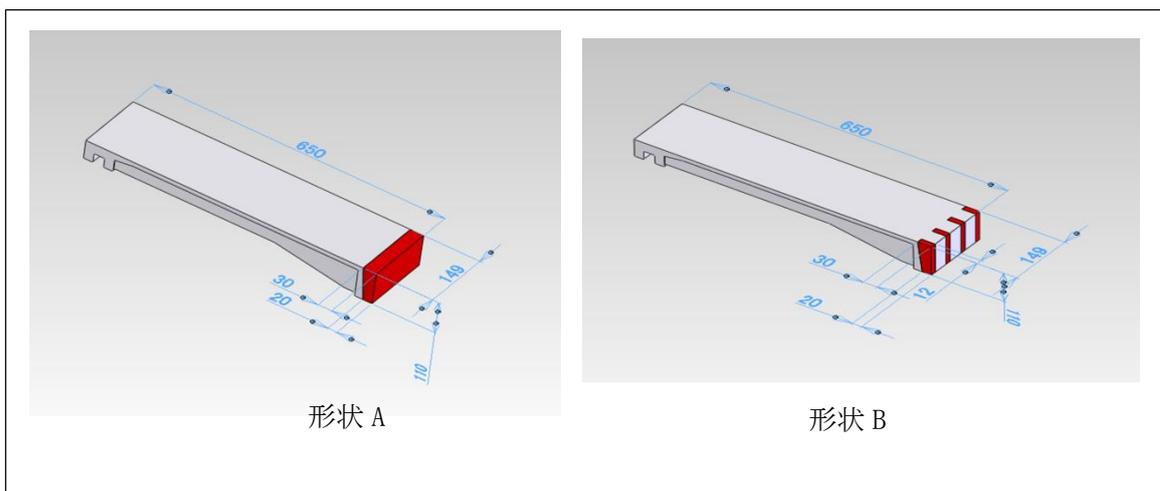


図 3 3 ロストル及びフレキシブルセラミックの三次元形状外観(長方体、柵形状)

## 2-3-2 実験2

### ○ セラミックと耐熱鋼 SCH2 との複合化

高粘度用混練機と乾燥器を導入したので、これらを用いた実験を行った。セラミックと耐熱鋼 SCH2 との複合化の手法は、実験 1 の同じである。

高粘度用混練機による混練条件、セラミックの各水準の配合等を以下に示す。

#### <混練条件>

- 粉体投入順序: SiO<sub>2</sub>→Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>→ベントナイト→H<sub>2</sub>O
- 攪拌速度: 公転 17.9rpm、自転 50rpm
- 攪拌時間: 20min
- 真空度: 50KPa
- 攪拌時温度: 投入 5℃→終了 10℃

#### <セラミック素材の各水準の配合>

原料粉体等	水準1		原料粉体等	水準2		原料粉体等	水準3	
二酸化珪素500μm	705.90g	14%	二酸化珪素500μm	0%		二酸化珪素500μm	0%	
二酸化珪素100μm	705.90g	14%	二酸化珪素100μm	1882.40g	38%	二酸化珪素100μm	0%	
アルミナ500μm	470.60g	9%	アルミナ500μm	0%		アルミナ500μm	0%	
アルミナ10μm	470.60g	9%	アルミナ10μm	470.60g	9%	アルミナ10μm	0%	
シリカフラワー		0%	シリカフラワー	0%		シリカフラワー	1882.40g	38%
活性アルミナ0.51μm		0%	活性アルミナ0.51μm	0%		活性アルミナ0.51μm	470.60g	9%
ベントナイト	1176.50g	24%	ベントナイト	1176.50g	24%	ベントナイト	1176.50g	24%
精製水	1470.60g	29%	精製水	1470.60g	29%	精製水	1470.60g	29%
合計	5000.10g	100%	合計	5000.10g	100%	合計	5000.10g	100%

### ○ ロストルの造型・複合化素材セラミックの挿入・型合わせ

予備焼成した複合化素材のフレキシブルセラミックを、上型及び下型を造型後セット固定し、次いで型合わせして同時鋳込み用鋳型とする。

### ○ セラミックと耐熱鋼 SCH2 との同時鋳込みと複合化

セラミックをセットしたロストル鋳型への耐熱鋼 SCH2 の同時鋳込みと複合化状況を図 3 4 に示す。型バラシ仕上げ後の製品外観を図 3 5 に示す。



図34 セラミックと耐熱鋼 SCH2 との同時鑄込みと複合化状況

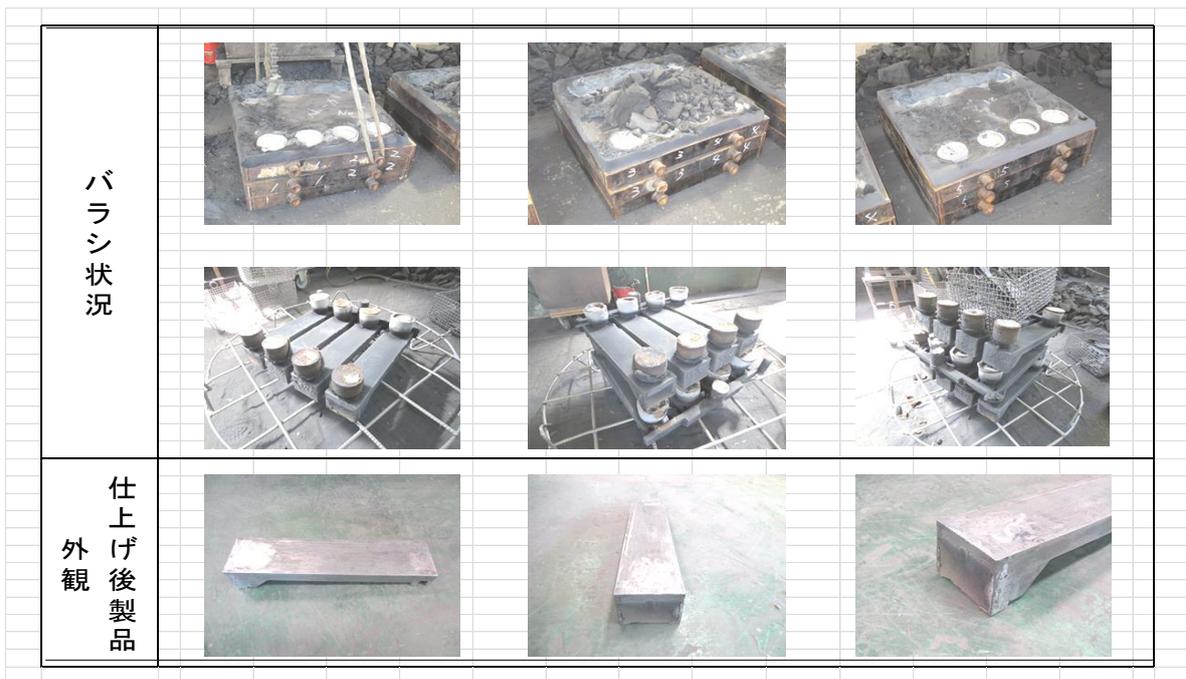


図35 複合鑄造材「ロストル」型バラシ・仕上げ後製品外観

○ 複合鑄造材「ロストル」耐熱性試験

複合鑄造材「ロストル」の耐熱性試験状況を図36に示す。耐熱性試験結果は、図37及び図38のとおり。熱画像計測装置による耐熱性試験法について検討し超耐熱性複合鑄造材「ロストル」(フレキシブルセラミック+耐熱鋼 SCH2)のフレキシブルセラミック部の温度分布を熱画像計測装置で面全体と PR 熱電対(9点)で各点の温度を測定した。この結果、技術的目標値 1300℃を達成することができた。

超耐熱生複合鋳造材「ロストル」(セラミックス+耐熱鋼)の開発

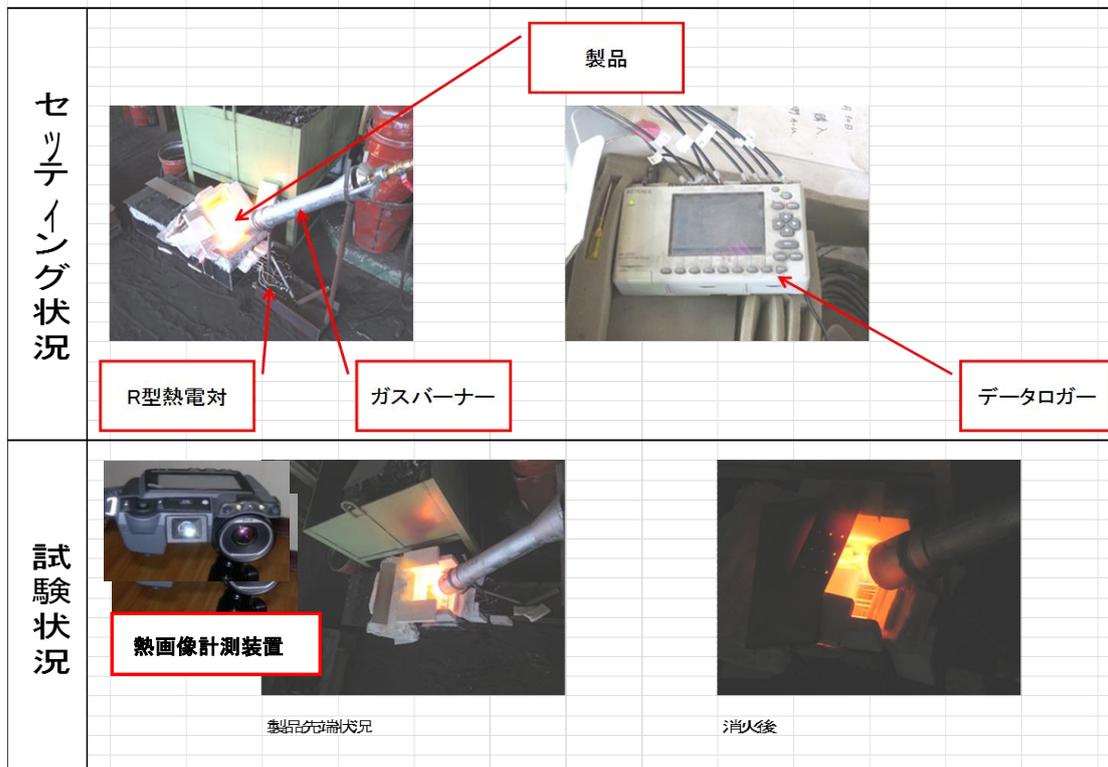


図 3 6 複合鋳造材「ロストル」の耐熱性試験状況

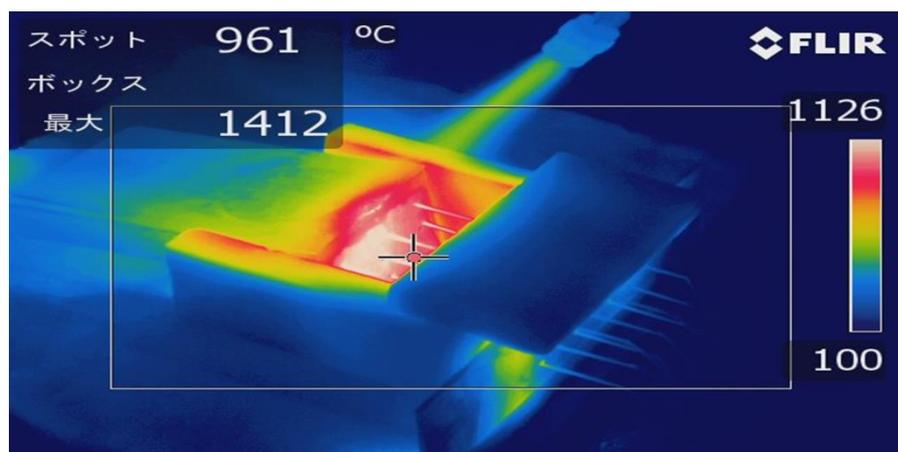


図 3 7 熱画像計測装置による複合鋳造材「ロストル」の耐熱性試験結果

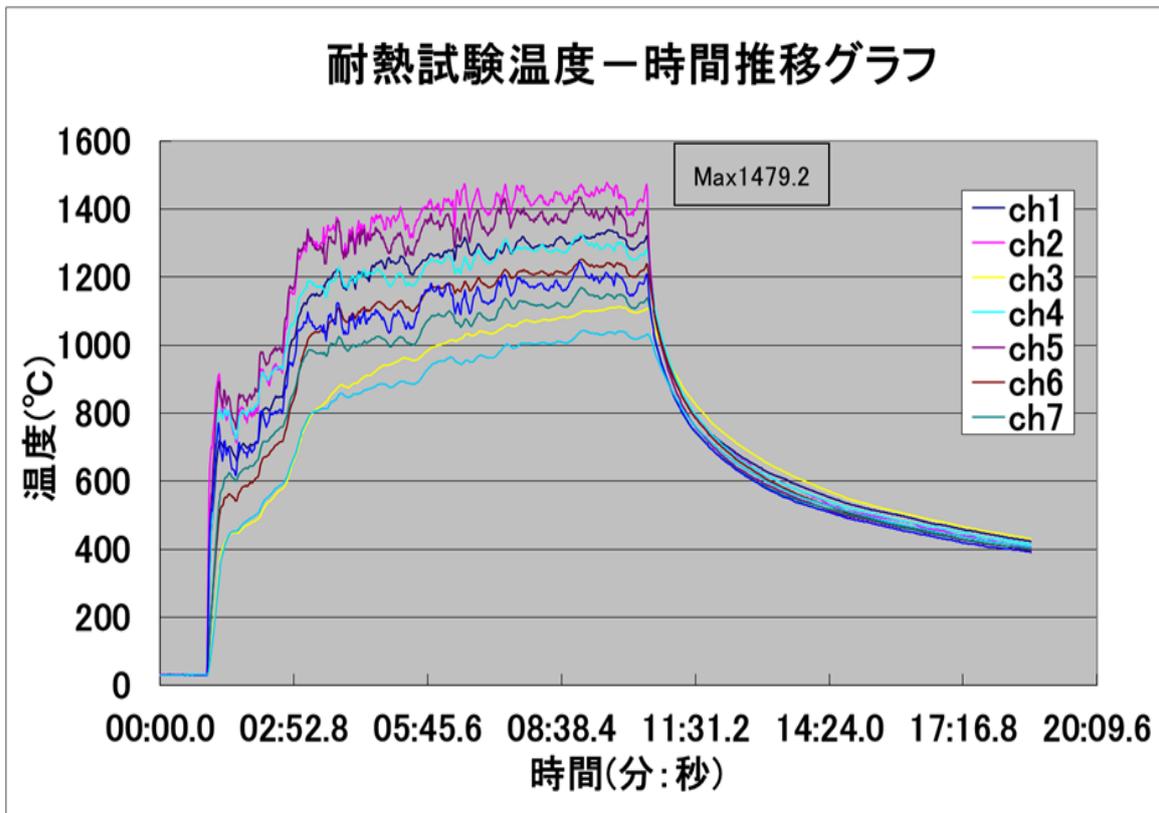


図 3 8 R 型熱電対による複合鋳造材「ロストル」の耐熱性試験結果

## 最終章

### 1 技術的目標値と達成度

3年間の高度化目標と成果(達成度)を以下に示す。

技術的目標に対しては、いずれも目標値以上となり、達成することが出来た。

#### 高度化目標

#### <高度化目標と成果(達成度)>

##### 1. 超耐摩耗性複合鑄造材「ブレード」の開発：(H23～25)

27CrFCとSUS440Cを同時鑄込みにより複合化し、耐摩耗性に優れた複合鑄造材を開発する。

SUS440C→接合界面活性化(形状、衝撃、熱等)→鍛造(7°)→同時鑄込み(熱等)→自己焼入れ→プラズマ窒化→複合鑄造材の開発

目標—表面硬さ HV1200、制御誤差 <10°C、Cr、C、N等拡散度確認、物理的溶着率 >80%、化学的溶着率 >50～70%、1工程集約化(割れなし →肉厚変化 20%以内)

例：偏摩耗し難い「ブレード」の技術的目標値達成、商品化

##### 2. 超耐摩耗性複合鑄造材「ハンマー」の開発：(H24～25年度)

鑄鋼品と超硬合金を同時鑄込みにより複合化し、耐摩耗性に優れた複合鑄造材を開発する。

目標—表面硬さ HV1200、制御誤差 <10°C

例：初期摩耗に強く長寿命なシュレッダー・破砕機用「ハンマー」の技術的目標値達成、商品化

##### 3. 超耐熱性複合鑄造材「ロストル」の開発：(H24～25年度)

セラミックと耐熱鋼を同時鑄込みにより複合化し、超高温耐熱性に優れた複合鑄造材を開発する。

目標：耐熱温度 > 1300°C 例：超高温耐熱性に優れた「ロストル」の技術的目標値達成、商品化

#### 【研究の達成状況】

##### <本年度の技術的目標値>

##### 1. 超耐摩耗性複合鑄造材「ブレード」の開発

- ① 【同時鑄込み法の開発】表面硬さ HV1200、制御誤差 <10°C
- ② 【接合界面評価技術の開発】  
Cr、C、N等拡散度確認、物理的溶着率 >80%、化学的溶着率 >50～70%
- ③ 【接合界面活性化法の開発】1工程集約化

##### 2. 超耐摩耗性複合鑄造材「ハンマー」の開発 表面硬さ HV1200、制御誤差 <10°C

##### 3. 超耐熱性複合鑄造材「ロストル」の開発 耐熱温度 1300°C

#### 成果

##### <本年度の達成状況>

##### 1. 超耐摩耗性複合鑄造材の開発

- ① 双方達成、耐摩耗性 2～3倍
- ② 各元素拡散確認、溶着率達成

##### ③ 1工程集約化(分割実験)

##### 2. 表面硬さ HV1200、<10°C達成

##### 3. 耐熱温度 1300°C達成

## 2 超耐摩耗性複合鑄造材「ブレード」・「ハンマー」及び超耐熱性複合鑄造材「ロストル」開発モデル

本研究開発で得られた成果をモデル化すると次のようになる。

「ブレード」及び「ハンマー」は、技術的目標値である硬さHV1200以上を達成し、超耐摩耗性を付与することができ、商品化の可能性を見出した。

また、「ロストル」は、技術的目標値である耐熱温度1300℃以上を達成し、超耐熱性を付与することができ、商品化の可能性を見出した。

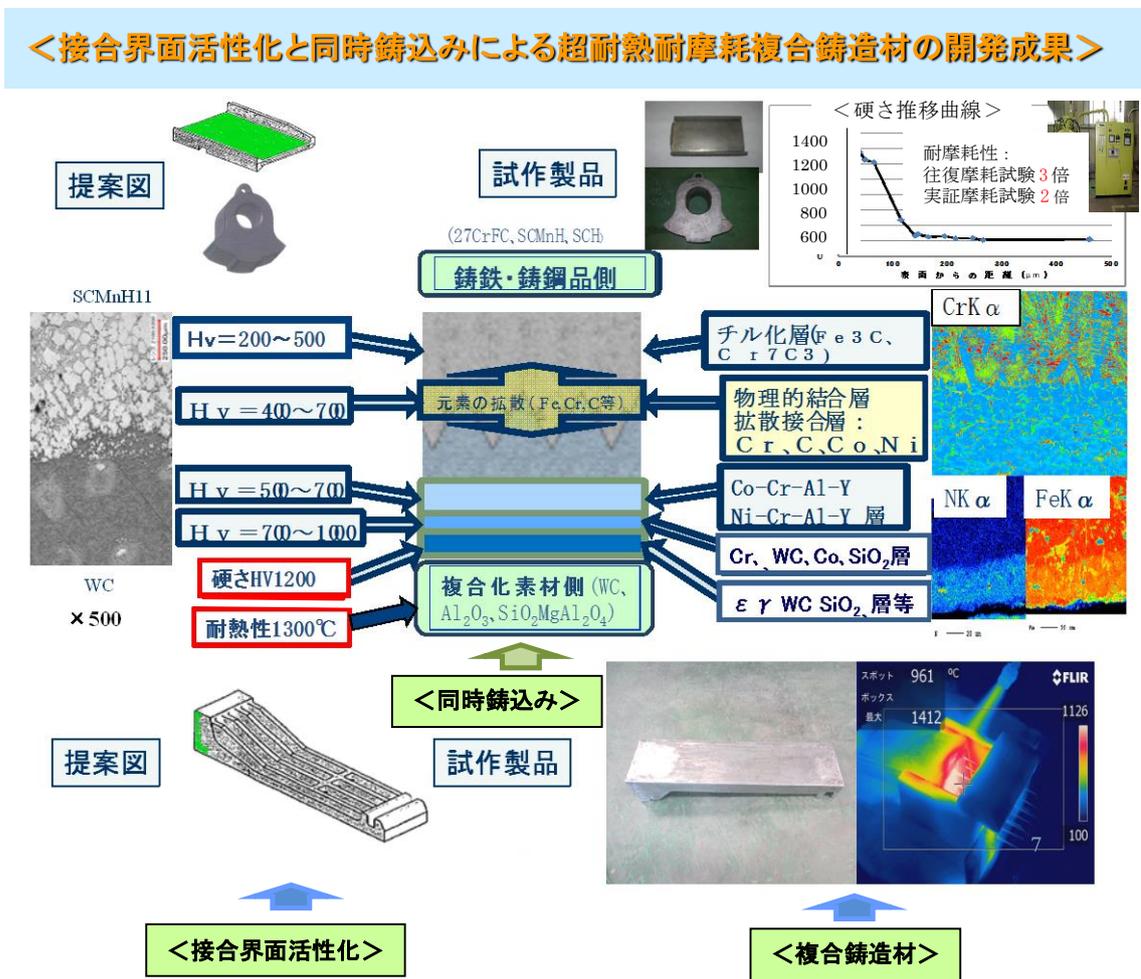


図8.7 本研究開発の成果概要モデル

### 3 研究開発中に得られた新技術・課題・知見を踏まえた補完研究と商品化計画

本年度の研究開発中に得られた新技術・課題・知見の整理結果は、表 9 の通りである。

これらを踏まえた補完研究と商品化計画は、以下のとおりである。

なお、提案時の研究開発テーマは、①、④及び⑥である。

- ① 超耐摩耗性複合鋳造材「ブレード」の開発-SUS440C+27CrFC+プラズマ窒化-
- ② 超耐摩耗性複合鋳造材「ブレード」の開発  
-SUS440C+(塗型)+27CrFC+プラズマ窒化-
- ③ 超耐摩耗性複合鋳造材「ブレード」の開発  
-鋳鉄製冷やし金+27CrFC(むくり上げ) -
- ④ 超耐摩耗性複合鋳造材「ハンマー」の開発  
-破砕超硬合金 WC チップ(3.0~4.5) (SUS304・316) + SCM n H11
- ⑤ 超耐摩耗性複合鋳造材「ハンマー」の開発-SKD+SCMnH11-
- ⑥ 超耐熱性複合鋳造材「ロストル」の開発-セラミック+結合材 CoNiCrAlY+耐熱鋼 SCH2-
- ⑦ 超耐熱性複合鋳造材「ロストル」の開発  
-SS・SUS304+耐熱性無機接着剤<sup>ア</sup>セラミック(DC)+耐熱鋼 SCH2-
- ⑧ 超耐熱性複合鋳造材「ロストル」の開発  
-セラミック+耐熱性無機接着剤<sup>ア</sup>セラミック(DC)+耐熱鋼 SCH2-

表5 新たに発見された技術・知見及び課題への補完研究による対応策

No.	新技術・知見・課題	補完研究と商品化計画	備考
1	複合化素材が大容量の場合、製品自体は超耐摩耗性を有する一方向凝固組織となる。	安価で超耐摩耗性に優れた製品を製造できる可能性が高いため、補完研究に追加し、商品化を図る。	新技術 新知見 1
2	同時鑄込みと複合化手法を工夫すると WC-Co と耐摩耗鋼 SCM n H11 は比較的容易に複合化する。しかし、一部にヘアクラックが発生する。	ヘアクラック対策として、適切なサイズに粉砕した WC-Co と耐摩耗鋼 SCM n H11 との複合化を補完研究で究明し、商品化を目指す。	新技術 新知見 2
3	複合化素材セラミックは無機系紛体 (SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 等)、ベントナイト等と適量の水で混合・混練可能。自然乾燥で固化し、予備焼成後同時鑄込みで本焼成状態となる。耐熱性は有するが、強度不足である。	亀裂のない複合化素材としてのセラミックの成形・予備焼成法(本焼成化)を見出だし、使用に耐える商品化を目指す。	新技術 新知見 3
4	同時鑄込み・複合化時のペネトレーション	ペネトレーション対策は、造型・鑄込み手法と塗型等により、略、達成した。方案全体及び鑄型等を改善し、バラツキ無く、再現性ある商品化を目指す。	課題と 対応
5	4個込め方案で湯口より離れた製品の溶着率低下	方案、注湯手法及び鑄込み温度等で解決し、商品化に繋げる。	課題と 対応
6	低温同時鑄込み時の溶着不良	複合化素材形状と成形法並びに発熱材、耐熱性無機接着剤、結合材、保温材等の採用で解決する。	課題と 対応
7	同時鑄込み・複合化後の SUS440C の自己焼入れ	型ばらし法だけでも、焼入れ硬さ程度になることが判明した。	課題と 対応
8	プラズマ窒化時の母材焼戻し効果	プラズマ窒化条件の変更で解決する。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・処理温度：580°C or 520°C</li> <li>・短時間化：4～6hr</li> <li>・ガス種及び比改善： N<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>:X<sub>2</sub>(N<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>:CO) = 1 : 1 : 1</li> <li>・真空度変更 4～6Torr</li> <li>・ガス流量変更：2～6l/min</li> </ul>	課題と 対応