

2 段反応焼結法による SiC セラミックスの摩耗特性 Wear Characteristics of SiC Ceramics Produced by Two-step Reaction Sintering Method



技術開発センター
商品・生産技術開発班主任
花田 喜嗣
Yoshitsugu Hanada

技術開発センター
事業化開発班班長
吉永 宏
Hiroshi Yoshinaga

技術開発センター
基盤技術開発班課長
藤田 和憲
Kazunori Fujita

要 旨

当社は、ニアネットシェイプ型の 2 段反応焼結法による炭化ケイ素 (SiC) セラミックスを用い、高耐摩耗かつ軽量であるセラミックス複合化材料の開発を行っている。これまで強度および耐摩耗性の向上を目指した SiC セラミックスの製造技術の開発を主に取組んできた。本稿ではそのセラミックス製造法と摩耗特性について報告する。開発品の SiC セラミックス単体の性能評価として滑りおよび衝突摩耗試験により、他の耐摩耗材料との比較を行った。その結果、いずれの摩耗形態に対しても当社の SiC セラミックスは良好な性能を示した。これにより既存材よりも優位性の高いセラミックス複合材料として、新規展開できることが期待される。

Synopsis:

FUJICO has developing the manufacturing technology of SiC ceramics composites with higher hardness and lower specific density than the conventional wear resistance materials. Here, the SiC ceramics was manufactured by using the two-step sintering method that enables near-net-shape forming process. Mainly, the manufacturing technology of SiC ceramics has been developing to improve considerably the failure strength and wear resistance. In this study, we report the manufacturing method of SiC ceramics and the evaluation results for wear resistance. The developed SiC ceramics was evaluated by the abrasive and collision wear test, and its wear characteristics were compared with the other abrasion resistance materials. As a result, it was confirmed that the wear resistance of the new developed SiC ceramics was higher than that of the other materials. Therefore, it can be expected to offer competitive performance for new ceramics composite materials.

1. 緒言

現在、製鉄、電力業界および環境分野等に使用されている破砕機、粉砕機、輸送機などの部材、あるいは粉体を伴う通気設備およびダクト内面などには、摩耗や劣化を防止するため、耐摩耗性や耐腐食性を有する材料が使用されている。実に多くの表面処理法および

耐摩耗材料があり、使用環境に合った手法を選定することで設備の長寿命化を図っている。前報^{1,2)}に代表的な設備例を紹介しているが、特に滑り摩耗や衝突摩耗に対しては高マンガン鋼や高クロム铸铁材が広く用いられている。当社が独自技術で開発した铸造複合ライナー製品 (EST-1、EST-2) も広く使用されて

いる³⁾。

本研究では、一般鉄系の耐摩耗材料よりも硬質、かつ軽量であるセラミックスを用いた新規複合材料を提案する。耐摩耗材料用セラミックスとしてアルミナが普及しているが、熱衝撃に弱く適応箇所は限られている。また、金属との複合化においては、無機・有機系接着剤を用いた中間材密着法やボルト締め・溶接止めによる機械的接合法などがある。しかし、高温・高衝撃の環境下での使用は剥がれや欠落の恐れがあるため、適応が難しく、未だに鉄基系複合化ライナーが主流である。

この現状を打破することを目指し、セラミックス材料として炭化ケイ素 (SiC) を用いた複合材料の開発を行っている。炭化ケイ素はアルミナよりも耐摩耗性、耐熱性、耐熱衝撃性に優れ、また耐食性、低熱膨張、高熱伝導などの特性を持つ。既に炭化ケイ素は耐摩耗部材や高温構造部材として広く用いられている⁴⁾。このように炭化ケイ素は多くの優れた特性を持つことから、厳しい使用環境下でも適応可能なセラミックス複合材料として新しい展開に期待ができる。

本研究では、特に一般鉄系基材の半分以上の軽量化、ニーズに合わせた複雑形状加工、かつ低コストで提供できる SiC セラミックス複合ライナーの製造方法の確立を目指している。新分野への進展を図る上では使用環境の摩耗形態に対して、十分な耐用特性を持つセラミックスが必須となる。本報では、このセラミックス基材に着目し、現在取組んでいる独自の製造法による高強度高耐摩耗性セラミックスの開発状況について報告する。

2. セラミックス製造法

SiC セラミックスの製造方法としては焼結助剤を用いた常圧・加圧焼結やホットプレス焼結があり、一般的に 2000℃前後の高い温度で焼結する。これに対して反応焼結法では、1400℃程度の温度での焼結で、比較的緻密なセラミックスの製造が可能であるが、他の製造法に比べ強度が若干低い面がある。このように SiC セラミックスの製造は様々で多くのメーカーで取組まれ、機械部品など多種多様な製品が存在する⁵⁾。

本研究における SiC セラミックスの製造工程の流れを Fig. 1 に示す。まず主原料として SiC 粉末を用い、その他焼結に必要な原材料を混練し、プレスによって成形する。その後、2度の焼結を行うことで SiC セラミックス形成させる。

この製法原理は数年前に産業技術総合研究所から技術提供された技術であり、大学・研究機関の支援のもと開発を進めてきた。大きな特徴としては、通常の焼結法に比べ焼結温度が低く、また焼結助剤を用いないため低コスト化が実現できる。さらには1次焼結後は切削性が良好で、また1次から2次焼結での形状変

化が1%以下と小さくニアネットシェイプ焼結となる。そのため、要求形状に合わせた造型を可能にし、仕上げ加工工程を大幅に短縮できる。一般的に、セラミックスは難切削性材料であり、形状加工は容易でないため、原料成形あるいは焼結時に必要な形状に成形される。そのため、必要に応じた金型を用意しなければならない。少ロット向けの生産はコストがかかり不向きである。また、製鉄所や発電所内で耐摩耗材料製品を必要とする箇所は必ずしも同一形状ではなく、かつ部分的な補修も要求される。

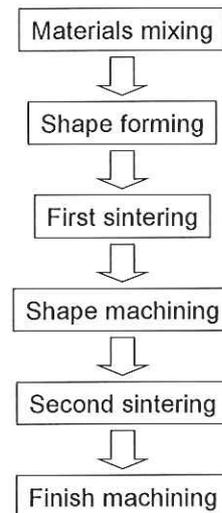


Fig.1 Making process of SiC ceramics

したがって、本製法では都度金型を必要とせず1次焼結後に形状加工することにより、最終形状に近い寸法で SiC セラミックスの製造が可能であるため、加工・材料コストを抑えつつ必要な形状に必要な数量だけ供給が可能であることが特徴である。

3. 性能評価試験

本研究の取組みでは、まずセラミックス単体での耐摩耗特性・靱性の向上に努めた。本研究では、滑り摩耗および衝突摩耗の2種類の摩耗形態と見なして作製した試験片の評価を行った。また、SiC 粒径が耐摩耗性に及ぼす影響調査についても行った。

3.1 評価試験方法

3.1.1 耐滑り摩耗性

Fig.2 に示すエンドレスエメリー紙を用いたアブレーション摩耗試験により、耐滑り摩耗性の評価を行った。試験条件を Table1 に示す。試験時間は 2hrs で試験片の減重量を測定し、試験片の比重と試験条件から比摩耗量を算出した。

3.1.2 耐衝突摩耗性

次に、Fig.3 に示すショットブラスト機を用いてブラストエロージョン試験を行い、耐衝突摩耗性の評価

を行った。ブラスト材はマルテンシット#80を用い、1回の投射量を20kgとして連続5回の投射を行った。投射角度は45°および90°とし、投射角度による影響を調査した。この試験については試験後の減重量を測定し比重から体積摩耗量を算出し、5回の総摩耗量で評価した。

Table 1 Conditions of abrasive wear test

Load (kgf)	3.1
Speed (m/min)	470
Belt roughness	#40
Test time (hr)	2
Size of test piece (mm)	50×50×10

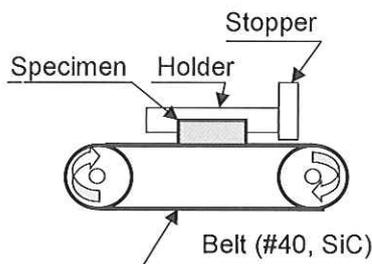


Fig.2 Schematic diagram of abrasive wear test

Table 2 Conditions of collision wear test

Abrasives	Martensite grid #80
Angle of injection(°)	45, 90
Air pressure(kgf/cm ²)	7.0
Quantity of projected materials(kg)	20
Number of tests(cycle)	5

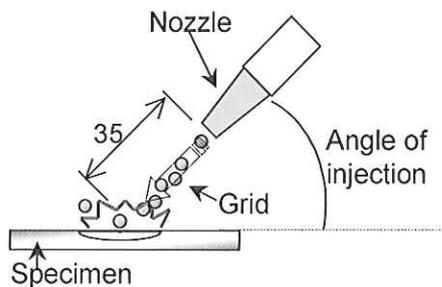


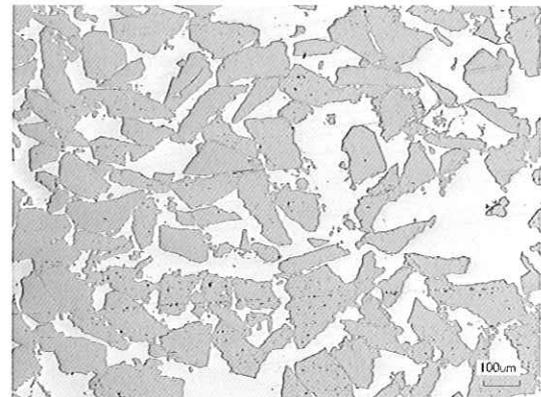
Fig.3 Schematic diagram of collision wear test

3.2 SiC 粒径の影響

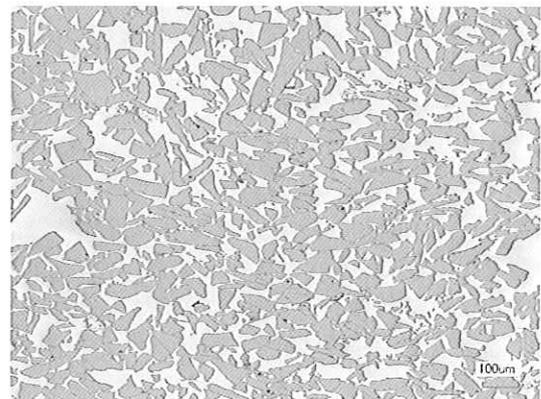
原料として投入するSiCの粒径が耐摩耗性に及ぼす影響を調査した。使用したSiCの粒径をTable 3に示す。使用したSiCは150μm, 50μm, 5μmの3種類とし、それぞれの試験片について組織の観察を行った。

Table 3 List of SiC particle size

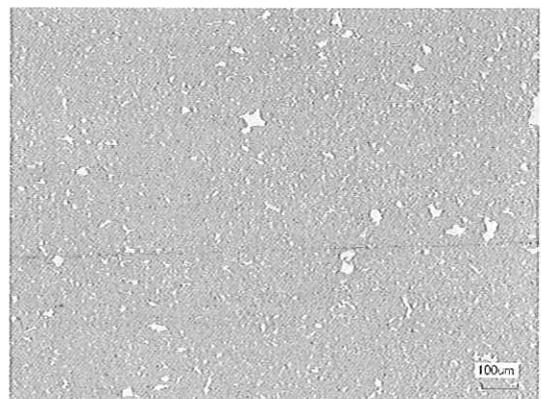
Name	Particle size(μm)
SiC-A	150
SiC-B	50
SiC-C	5



SiC-A



SiC-B



SiC-C

Fig.4 Micro-structures showing specimens of three type size of SiC particle

Fig.4 に作製したSiCセラミックス試験片の断面状態を示す。灰色部が原料投入したSiCである。投入したSiCの大半がそのまま組織として現れており、SiC粒径が小さいほど組織が密になっていることがよくわかる。SiC粒の面積率をTable 4に示す。粒径が小さいほどSiC粒の面積率も高くなっていることから

SiC の粒子間が密接になりより緻密な組織であることがわかる。

Table 4 Area ratio of SiC particle and matrix (%)

Sample	SiC particles	Matrix
SiC-A	62	38
SiC-B	71	29
SiC-C	77	23

次に Fig.5 に滑り摩耗試験、Fig.6 に衝突摩耗試験結果を示し、SiC 粒径が耐摩耗性に及ぼす影響を評価した。比較材として高クロム鋳鉄材（表記 HCR）を示してある。滑り摩耗についてはいずれの SiC の粒径においても比摩耗量は $0.2\text{mm}^3/\text{Nm}$ となり、粒径の影響は認められなかった。高クロム鋳鉄材と比較すると約 10 倍の耐滑り摩耗性を有することがわかった。

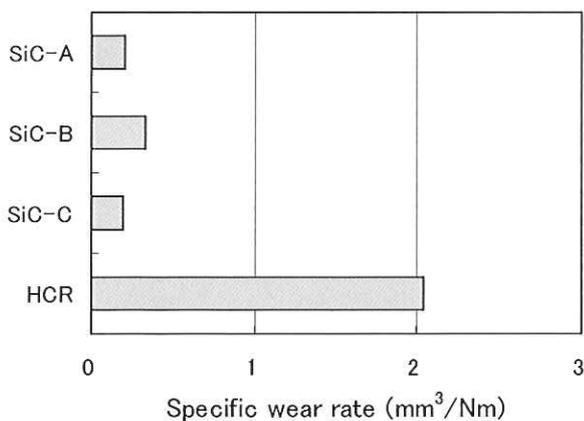


Fig.5 Effect of SiC particle size on specific wear rate

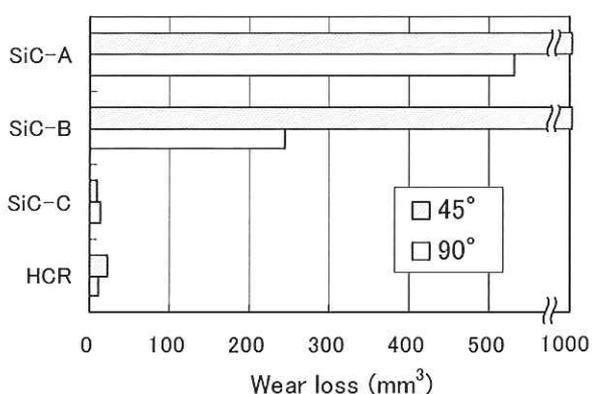


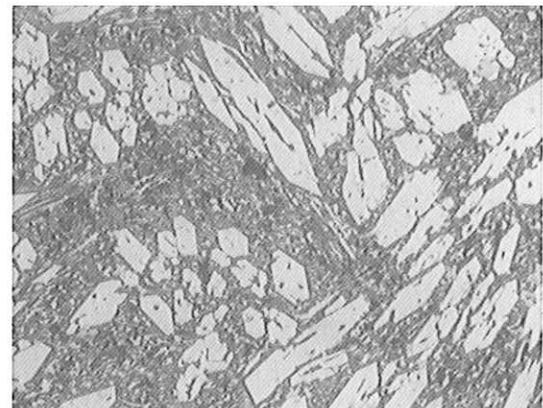
Fig.6 Effect of SiC particle size on collision wear

続いて、衝突摩耗では滑り摩耗試験結果とは傾向が異なり、粒径が小さくなるほど耐摩耗性が向上した。SiC-A の 45° , 90° および SiC-B の 45° については 5 回の試験回数に満たずに試験片自体の破損や貫通により、試験が継続不可能になった。これらの結果から SiC 粒や基地部が大きく広い面積で存在すると衝突

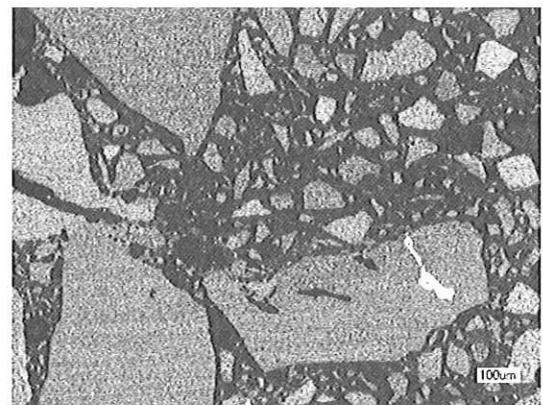
摩耗に弱いことがわかり、組織を緻密にさせるだけで飛躍的に耐摩耗性を向上させることができる。高クロム鋳鉄材と比較とすると、SiC-A および B はいずれの投射角度においても対象にならないほど耐摩耗性は乏しく、SiC-C の製造条件で高クロム鋳鉄材と同等の性能があることがわかった。

3.3 耐摩耗材料との比較

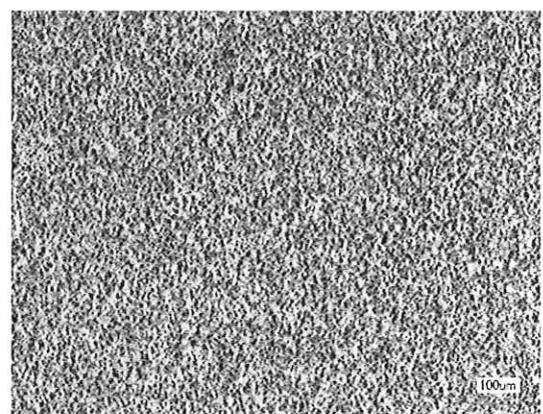
続いて本研究の SiC セラミックス材と他の耐摩耗材料との比較を行った。



a) HCR



b) SiC(other)



c) Alumina

Fig.7 Micro-structures of wear resisting hard materials: a)HCR, b)SiC(other), c) Alumina.

Table 5 List of specimens.

Name	Material
SiC(FUJICO)	Developed SiC(SiC·C)
HCR	Hi·Cr cast iron
SiC(other)	Conventional SiC
Alumina	Al ₂ O ₃

Table 6 Hardness of specimens

Name	Hardness(HV)
SiC(FUJICO)	2200
HCR	900
SiC(other)	3000
Alumina	1300

本節では、開発 SiC 材として前節において最も性能の良かった SiC·C 材を対象にしている。前節では高クロム鋳鉄材を取り上げたが、ここでは加えて他社製セラミックス材を比較対象とした。Table 5 に試験片の名称および種類を示し、Fig.7 にそれぞれの断面組織を示す。HCR は高クロム鋳鉄材で当社のライナー製品である。

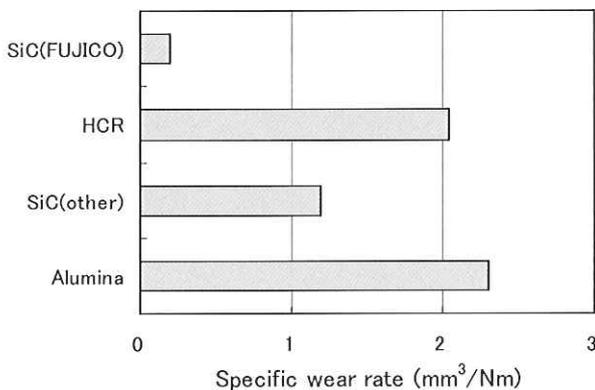


Fig.8 Comparison of specific wear rates on another materials for wear resistic

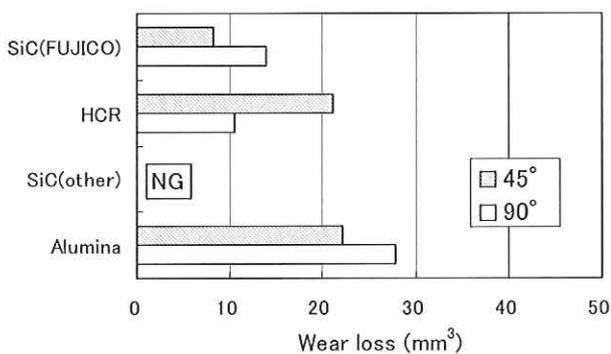
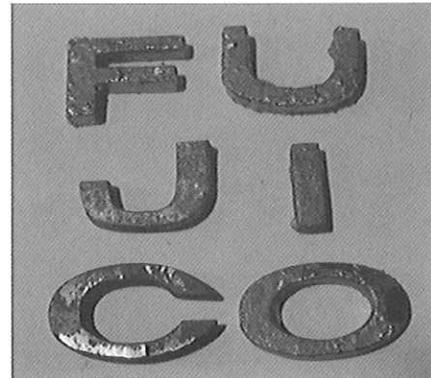


Fig.9 Comparison of collision wears on another materials for wear resistic

セラミックス材として SiC(other)は他社 SiC 系材、Alumina はアルミナ材である。他社 SiC 材の組織は大小さまざまな SiC 粒があると同時に、かつ気孔がかなり多く存在している。アルミナ材の組織は全体的に一様な状態であるが、気孔も存在している。

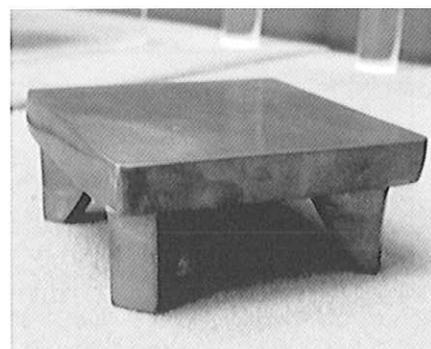
次に、当社 SiC 材および各比較材の硬度を Table 6 に示す。HCR のみ鉄基であるため他のセラミックス材よりも硬度は低い。本研究で作製した SiC 材の硬度は他社の SiC 材より低く、アルミナ材よりも高くなっている。



a) FUJICO name parts.



b) Name and logo.



c) Table.

Fig.10 Photos showing various shapes of samples

これらの試験片について滑り摩耗および衝突摩耗試験を行った。それぞれ Fig.8、Fig.9 に両試験の結果を示す。滑り摩耗については、当社 SiC 材が他の材質よりも非常に耐摩耗性が高いことがわかる。高クロム鋳鉄材(HCR)に比べ 10 倍、他社の SiC (other) 材で

は 6 倍の性能差があることがわかった。アルミナ (Alumina) は最も性能が悪かった。アルミナは耐熱衝撃性が弱く、摩擦熱による衝撃破損のために SiC 材よりも摩耗量が多かったと考えられる。

衝突摩耗についても、当社 SiC 開発材の方が比較的性能が良く、高クロム鋳鉄材と同等の耐衝突摩耗性であることが確認できた。他社 SiC 材については 1 回目の試験で破損し継続不能となった。表には NG と表記している。比較材の結果から、セラミックス材は比較的脆く割れやすいため、衝突による摩耗には弱い傾向が現われている。しかし、その中において、SiC 開発材は衝突にも強いことが確認された。

以上のことから、SiC 開発材は耐滑り摩耗および耐衝突摩耗に対しても、優れた特性を示していることが確認できた。

4. 複雑形状品の成形

最後に、様々な形状で作成した SiC 試験片を紹介する。セラミックスは難切削材であるため、複雑形状の加工には一般鋼材に比べ非常に高い加工コストがかかるが、本研究の製法では成形が容易で、複雑な形状を作製しやすいのが利点である。Fig.10 にその加工例を示す。平面的な加工だけでなく立体的な形状加工も可能であり、試作により確認している。

今回開発した製法はニーズに応じて必要な形状を作製できるため、例えば現地施工での加工の手間を省略できたり、コ型・T型などを一体物で提供することも可能となる。

5. 結言

本報では、ニアネットシェイプ型 SiC セラミックス材の開発状況を紹介し、その耐摩耗特性の評価を行った。以下に得られた結果を示す。

- 1) SiC セラミックス組織の緻密性および均一性は原料投入する SiC 粉の粒径サイズによって大きく影響され、SiC 粒径が小さいほど優れた組織特性を示した。
- 2) SiC 粉の影響は耐滑り摩耗性に関しては大きな差は見られないが、耐衝突摩耗性に対しては小径のほど性能が大きく向上する。
- 3) 当社の SiC セラミックス材と他社耐摩耗材の摩耗特性を比較すると、耐滑り摩耗性については高クロム鋳鉄の 10 倍、他社 SiC 材の 6 倍優れる結果を示した。また、耐衝突摩耗性については高クロム鋳鉄材と同等の性能が確認できた。
- 4) 複雑形状の加工の容易さについては、様々な形状を実際に作製することで実証できた。

当社では今後、高温・高衝撃環境下といったより厳しい使用環境条件を設定し、より高性能なセラミックス材の開発はもちろん、並行してセラミックと金属の複合ライナーの製品開発にも取り組んでいる。設備の長寿命化のため、既製の耐摩耗製品よりも軽量かつ利便性の高いライナーを提案できるよう引き続き開発を進めていく。

参考文献

- 1) 大野 京一郎, 吉永 宏, 嵩 純孝: フジコー技報 No.15, 2007, 47-52
- 2) 大野 京一郎, 野村 大志郎: フジコー技報 No.13, 2005, 60-64
- 3) 宮崎 裕之: フジコー技報 No.8, 2000, 43-51
- 4) 通商産業省ファイナセラミックス室: ファインセラミックスハンドブック(1986), 31
- 5) 多々見 純一: セラミックス 43(2008), 840-844
- 6) 千田 鉄也 他: セラミックス 37(2002), 22-26