

ハイテク・ セラミックス工学

—エンジニアリングセラミックスの

企画・設計・試作・評価・製造・品質管理—

加藤 誠 軌
水谷 惟 恭
植松 敬 三
木 枝 暢 夫
共 訳



内田 老鶴 圃
UCHIDA ROKAKUHO

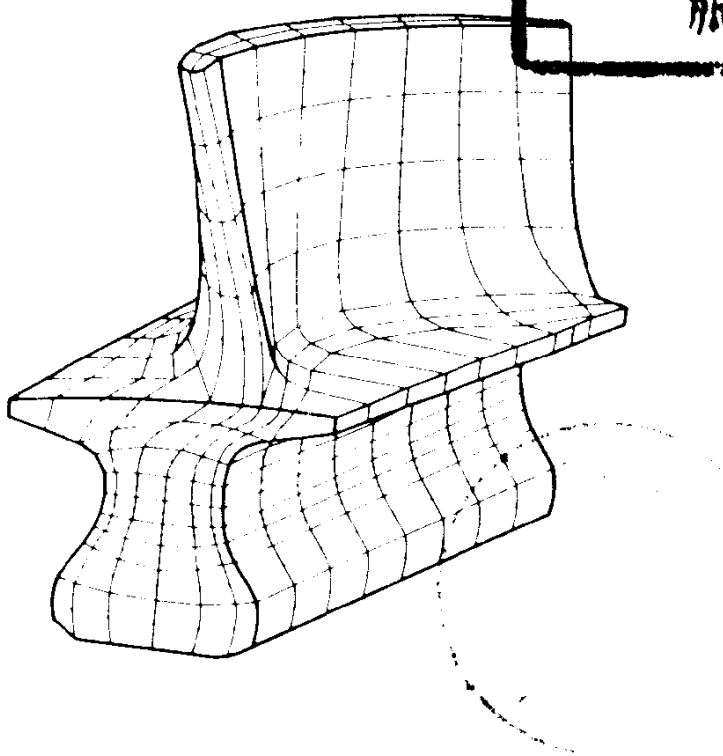
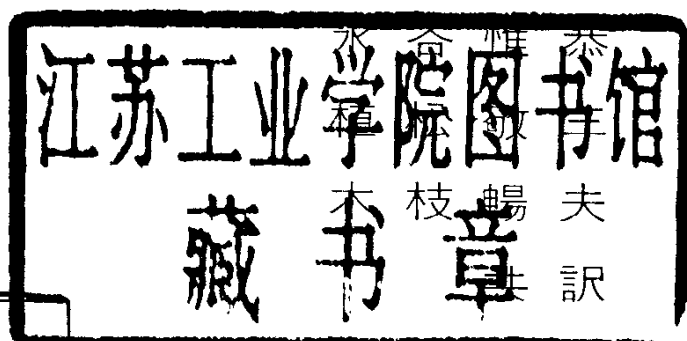
D. W. Richerson

ハイテク・セラミックス工学

— エンジニアリングセラミックスの

企画・設計・試作・評価・製造・品質管理 —

加 藤 誠 軌



内 田 老 鶴 圃
UCHIDA ROKAKUHO

MODERN CERAMIC ENGINEERING

-Properties, Processing, and Use in Design-
by David W. Richerson

Copyright © 1982 by MARCEL DEKKER, INC.

All rights reserved

Japanese translation rights arranged with
MARCEL DEKKER, INC.

through Japan UNI Agency, Inc.

本書の内容の一部あるいは全部を無断で複写複製（コピー）することは、法律で認められた場合を除き、著作者および出版者の権利の侵害となりますので、その場合は予め小社あて許諾を求めて下さい。

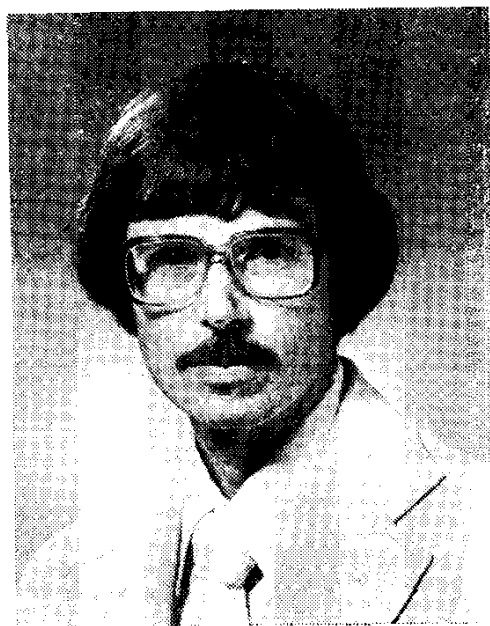
MODERN CERAMIC ENGINEERING

Properties, Processing, and Use in Design

David W. Richerson
Garrett Turbine Engine Company
Phoenix, Arizona

MARCEL DEKKER, INC.

New York and Basel



Dave Rickerson

日本語版への序文

私は Modern Ceramic Engineering を翻訳したいという加藤教授の手紙を受け取ったときには、驚きと喜びを感じると同時にその仕事に感謝したいと思いました。特に私が喜んでいるのはファインセラミックスの分野で急速に世界のリーダーになりつつある日本で本書が受け入れられたということです。日本におけるファインセラミックスの進歩は、原料、製造工程、部品の設計、システムの設計、および応用に関するいろいろな問題を解決するため、各方面からの研究が行われたからであると信じています。このことは日本ファインセラミックス協会の会員が化学会社から製鉄会社そして窯業会社と広い範囲に亘っていることから明らかです。日本では従来はセラミックスと無関係であった会社がファインセラミックスを活潑に研究している例が沢山あります。たとえば、ある鉄鋼会社はセラミックス用の熱間静水圧プレス(HIP)を、別の製鉄会社はセラミックス用の射出成形機を開発しており、しかも両社はそれらの装置

ii 日本語版への序文

を使って窒化珪素など新しい材料の研究を進めています。もちろん、伝統的な窯業会社でもセラミックエンジンを設計・試作しており、エンジンの材質に対する設計上の要求を理解し、市場を開発するための努力をしています。

私は本書が日本の読者に大いに役に立つものと信じています。日本のプロジェクトでは、技術者、科学者、プロジェクトマネージャーおよび事務担当者間で緊密な共同作業が行われます。この場合、セラミックスの教育を受けていない人もファインセラミックスの技術についての基礎的知識を要求されますし、セラミックスの専門家にとっては応用する際の設計面についての知識が必要です。本書はこのような要求に応えるために書かれた本で、特に機械技術者、設計技術者および品質管理技術者が自分達に関係のあるセラミックスについて理解するのに有用であると考えています。

1984年 9月

David W. Richerson

訳者の言葉

新素材としてのセラミックスの重要性が認められて、それらに関する記事がマスコミの紙上を飾るようになって数年が経過し、それまでセラミックスとは何の縁も無かった企業まで続々とこの分野の競争に参入してきました。ニューセラミックス、ファインセラミックス、ハイレクセラミックスなどいろいろの名前で呼ばれる新しいセラミックスの生産額は急速に増加しており、まもなく伝統的セラミックスの売上高を追い越すことは確実です。

ハイレクセラミックスの製造技術は伝統的なセラミックスの経験を基礎にしてはいますが、これに数多くの技術革新が加えられた結果今日の技術水準に到達したものです。新しいセラミックスの実際的な製造技術の概要を正確に把握することのできる優れた成書はこれまでほとんど出版されておられません。本書は高温構造材料として期待されているエンジニアリングセラミックスに焦点をあてて、企画、設計、試作、評価、量産、品質管理、応用の各段階について実例を挙げて平易に解説しており、専門の違う技術者にも容易に理解できるよう配慮している点が特に優れています。

原著者は1967年にユタ大学のセラミック工学科を卒業し、1969年にペンシルバニア州立大学大学院のセラミック科学修士課程を修了しました。1969年から1973年の間はマサチューセッツのNorton社で窒化珪素について研究し、1973年からGarrettタービンエンジン社に移ってセラミックエンジンの開発研究に従事して、現在は同社のセラミック部門の主席研究員の地位にあります。彼には以下に掲載した約40報の研究報文と5件の特許があり、1971年にはNorchester Engineering SocietyからAdmiral Earle賞を受けている新進気鋭の研究者です。

原著を私達の研究室で輪講に使った関係でこの訳書を出版することになった

ものです。具体的な翻訳作業としては植松が訳して加藤が書き直した原稿を回覧して内容と表現について検討しました。印刷原稿の校正と索引の作成には研究室の職員と学生が全面的に手伝ってくれました。訳書は内容が正確で読み易いものをと心掛けたつもりで、局所的には原著に忠実でない個所がいくつかあることをお断りしておきます。

特に無機材料工学科機能性セラミックス講座の松尾陽太郎助教授は訳書の大部分を通読して術語を訂正して下さいました。また機械物理工学科振動学講座の青木繁助教授には第12章の内容についてご教示いただきました。

本書の出版にあたっては内田老鶴圃の内田悟社長と中村俊邦氏に大変お世話になりました。

以上の方々に心からお礼申し上げます。

1985年4月

加藤 誠 軌

原著者の研究業績

原著者は1969年から1973年の間 Norton 社で窒化珪素材料の開発に従事して NC-132 ホットプレス Si_3N_4 を商品化しました。この材料は従来の製品に比べて3倍の高温強度と5倍以上の耐酸化性を備えています。彼はこれ以外にも、耐摩耗材料、セラミックスと有機物との複合材料、金属強化セラミックス、セラミック装甲板、セラミック押出し型などの開発を担当しました。

1973年には Garrett タービンエンジン社に移って、DARPA/Navy のセラミックエンジン実証計画、AFML/APL のタービンエンジン用セラミック部品計画、NASA/DOE の高度ガスタービンエンジン計画、NASA/DOE の市販セラミック材料の耐久試験、EPRI のセラミック熱交換器の開発、DOE のセラミック技術準備計画、および AFML の分割燃焼室計画に参加して主導的役割りを果しました。

DAPRA/Navy の計画では、102 個のセラミック部品を含むガスタービンエンジンを最高温度 1370°F 、回転数 41 730 rpm で運転して 930 Hp の出力を得ました。これは従来の金属エンジンの出力 715 Hp に比べて大幅な進歩であり、セラミック動翼を備えたガスタービンエンジンが金属エンジンに比べて優れていることを始めて立証したものです。この計画の遂行過程で、セラミックスの設計、複雑な形状の部品の一体成形、仕上げ機械加工、非破壊検査、破壊解析などの分野で大きな進歩があり、酸化や腐食の機構と接触応力に関する知見が大幅に増加しました。

彼の研究業績のリストを以下に示します。

特 許

1. No. 3836 374: Hot Pressed Si_3N_4 , September 1974 (Patent for NC-132 Si_3N_4).
2. No. 3890 350: Hot Pressed Silicon Nitride Containing Finely Dispersed Silicon Carbide or Silicon Aluminum Oxynitride, June 1974.
3. No. 3895 219: Composite Ceramic Heating Element, July 1975.
4. No. 3911 188: High Strength Composite Ceramic Structure.
5. Additional patent on ceramic mold material for Ti alloy casting.

研究報文(共著を含む)

1. "Testing and Selection of Wear Resistant Materials," Materials Engineering, January 1972.
2. "Hot Pressed Silicon Nitride for Gas Turbine Applications," ASME Publication 72-GT-19.
3. "Synthesis and Thermal Expansion of Polycrystalline Cesium Minerals," *J. Amer. Ceram. Soc.*, Vol.55, No.5.
4. "High Hot Strength Ceramics for Metalworking Tools," ASM Metalworking Forum, May 23-24, 1972.
5. Silicon Nitride and Silicon Carbide for High Temperature Engineering Applications," *British Ceramic Soc. Convention*, July 4-6, 1972.
6. "Properties of Hot Pressed Silicon Nitride," Proceedings of the Eleventh Symposium on Electromagnetic Windows, August 2-4, 1972.
7. "Fracture Engergy of Silicon Nitrides," *Ceramic Bulletin*, Vol.51, No.11, 1972.
8. "The Effects of Impurities on the High Temperature Properties of Hot Pressed Silicon Nitride," *Ceramic Bulletin*, Vol.52, No.7, 1973.
9. "Inclusion Effects on the Strength of Hot Pressed Si_3N_4 ," *Fracture Mechanics of Ceramics*, Vol.1, Plenum Press, 1974.
10. "High Temperature Properties of Silicon Carbide and Silicon Nitride," Symposium on High Temperature Materials in Gas Turbines," March 12-13, 1973.
11. "Work-of-Fracture and Apparent Yield Correlation in Si_3N_4 ," *J. Amer. Ceram. Soc.*, Vol.57, No.4, April 1974.
12. "Slow Crack Growth in Ceramic Materials at Elevated Temperature," *Met. Trans.*, Vol.6A, April 1975.
13. "ARPA/Navy Ceramic Engine Materials and Process Development Summary," in *Ceramics for High Performance Applications-II*, March 1977.
14. "Environmental Effects on the Strengihs of Silicon Nitride Materials," from MCIC Report No. MCIC-7-836(1978), 247-71.
15. "Properties of Silicon Nitride Rotor Blade Materials," from MCIC Report No. MCIC-78-36(1978), 193-217.
16. "NDE Approach, Philosophy and Standards for the ARPA/NAVSEA Ceramic Turbine Program, from MCIC Report No. MCIC-78-36(1978), 381-402.
17. "Strength of Reaction-Bonded Silicon Nitride," from MCIC Report No. MCIC-78-36(1978) 219-233.
18. "Turbine Component Machining Development," Proceedings of the International Conference on Ceramic Machining and Surface Finishing II

- (1978).
19. "Contact Stress and Coefficient of Friction Effects on Ceramic Interfaces," in *Materials Science Research*, Vol.14-Surfaces and Interfaces in Ceramic and Ceramic-Metal Systems, J. Pask and A. Evans, eds., Plenum Press, 1981, pp.661-676.
 20. "Ceramic Design Requirements for Long-Life Heat Engines and Heat Exchangers," in the proceedings of the Workshop on Time Dependent Fracture of Materials, February 15, 1979, Germantown, MD, DOE Conf. 790236, June 1979.
 21. "Silicon Nitride Turbine Blade Development," in proceedings of the AGARD Conference on Ceramics for Turbine Engine Application, AGARD-CP-276, March 1980.
 22. "Ceramic Components for Turbine Engines, " Phase II Technical Report, February 29, 1980, prepared for Air Force Contract F33615-77-C-5171.
 23. "3500-Hour Durability Testing of Commercial Ceramic Materials," July 1980, DOE/NASA/0027-8-/1, NASA CR-159785.
 24. "Analytical and Experimental Evaluation of Biaxial Contact Stress," in *Fracture Mechanics*, Vol.5, ed. by Bradt et al., 1983.
 25. "Contact Stress Effects on Si_3N_4 and SiC Interfaces," in *Ceramic Engineering And Science Proceedings*, July-August, 1981, pp.578-88.
 26. "Material Design and Test Aspects of Ceramic Component Development," ASME Paper 81-GT-179.
 27. "Ceramic Gas Turbine Engine Demonstration Program," Final Report, January 1976 to May 1981, prepared for DARPA/Navy Contract N00024-76-C-5352, May 1982.
 28. "Ceramic Component Development for Limited Life Propulsion Engines," AIAA Paper AIAA-82-1050, presented at the AIAA/SAE/ASME 18th Joint Propulsion Conference, June 21-23, 1982.
 29. "Cyclic Rig and Engine Testing of Ceramic Turbine Components," *Ceramic Engineering and Science Proc.*, September-October, 1982, pp.620-629.
 30. "Oxidation Stability of Advanced Reaction-Bonded Si_3N_4 Materials," *Ceramic Bulletin*, Vol.61, No.5, 1982.
 31. "Ceramic Technology Requirements for 2600°F Uncooled Power Generation Application," in *Ceramics for High Performance Applications III-Reliability*, ed. by E.M. Lenoe, R.N. Katz and J.J. Burke, Plenum Press, N.Y. (1983), 217-34.
 32. "Combustor Rig Durability Testing of Ceramics," in *Ceramics for High Performance Applications III-Reliability*, ed. by E.M. Lenoe, R.N. Katz and J.J. Burke, Plenum Press, N.Y. (1983), 571-96

33. "Contact Stress at Ceramic Interfaces," *Progress in Nitrogen Ceramics*, ed. by F.L. Riley, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague (1983), 657-66.
34. "What are Ceramics?" *Chem. Engineering*, Sept. 20, 1982, pp.123-126.
35. "Modern Ceramic Engineering," *Mech. Engr.*, Dec. 1982, pp.25-33.
36. "Contact Damage in Ceramic Turbine Components-High Temperature Studies of Interface Friction and Contact Stress," in proceedings of the ONR/NBS Workshop on Contact Damage in Ceramic Materials at Elevated Temperatures, ed. by Sheldon M. Wiederhorn, NBS, April 1, 1982.
37. "Ceramic Interface Considerations," in the Summary of the Workshop on Ceramic Attachments for Industrial Heat Exchangers and Heat Engine Applications, ed. by J.A. Carpetner, ORNL, Fall 1982.
38. "High Temperature Dynamic Contact Behavior of a SIC," presented at the 7th Conf. on Ceramics and Advanced Materials, Cocoa Beach, Florida, January 16, 1983 and to be published in Ceramic Engineering and Science Proceedings.
39. "Material Improvement Through Iterative Process Development," presented at the 7th Conf. on Ceramics and Advanced Materials, Cocoa Beach, FL, January 16, 1983 and to be published in Ceramic Engineering and Science Proceedings.
40. "Oxidation Protection for Carbon-Carbon Composites," *Environmental Resistance of Carbon-Carbon Composites in Gas Turbine Engines*, IDA Record document D-14, ed. by T.F. Kearns, August 1983, pp.89-125.
41. "Properties of Isostatically Hot-Pressed Silicon Nitride", *Comm. Amer. Ceramic Society*, C-173, Sept. 1983.

序 文

セラミック材料は新しい産業用，そして消費者用の技術にとってますます重要になってきましたが，大多数の技術者はセラミックスについての訓練をほとんど受けていないので，セラミックスの独特な性質を十分に使いこなすことができない状況にあります．本書の目的は技術者，学生，教師そして技能者にファインセラミックスの構造，性質，製造法，設計概念および応用を説明することです．すなわち，セラミックスが何故に金属や有機材料と違っているかを説明した後，これを基礎として最適の材料選択ができることを強調しました．この方針に沿ってファインセラミックスについての多くの用途，たとえば熱機関用部品，装甲板，永久磁石，蛍光体，点火器，コンデンサー用誘電体，断熱コーティング，酸素センサーなどについて説明しました．

本書を書き始めた当初の目的は専門外の工科系学生にセラミックスを理解させるための教科書をつくることでしたが，最終的にはセラミックスを専門とする人にもそうでない人達にも向く教科書ないしは参考書という形になってしまいました．

本書は三つの部分から成り，それらは互に関連していますがそれぞれを独立に読むこともできます．

第Ⅰ編は「構造と性質」で，セラミックスが独特の物理的，熱的，機械的，電氣的，磁氣的，および光学的諸性質を示す原因を金属や有機物の場合と比較して説明しました．そして種々の応用に対して最適の性質を備えたセラミック材料について応用の限界を検討しました．

第Ⅱ編は「セラミックスの製造工程」で，セラミック部品を造るための製造工程について解説しました．すなわち，それぞれの工程で材料の性質を決める欠陥を生じ易い製造段階について検討し，それらの欠陥を検出して除去する手

段と方法について説明しました。

第Ⅲ編は「セラミックスの設計」で、第Ⅰ編と第Ⅱ編で学んだ性質、製造方法および検査法の原理をハイテク・セラミック部品の設計に応用しました。

セラミック材料とその技術を幅広く取扱う新しい教科書や参考書が必要であることは、著者がアリゾナ州立大学で1学期に3時間の講義をもち、アメリカ金属学会で半日および3日間の講義を担当したことからはっきりしました。

アリゾナ州立大学での講義は、機械工学科および他の工学科の学生やセラミックス以外の技術者に、セラミック材料の独特な性質や製造法そして設計の要求を理解させることを目的として1957年に開始しました。講義には毎回違った教科書すなわち、Kingery, Bowen, Uhlmannの *Introduction to Ceramics*, Van Vlackの *Physical Ceramics for Engineers*, および Burke, Lenoe, Katz編の *Ceramics for High Performans Applications* 等を使用しました。これらの本は何れも優れた本ですが講義の目的には適していないことがわかりました。*Introduction to Ceramics*は非常に詳しくて解析的ですが、製造法や製造法が性質に及ぼす影響、機械加工、非破壊検査、破壊の解析、そしてセラミックスの設計法については述べていません。*Physical Ceramics for Engineers*はより工学的な傾向をもっていますが講義で必要な範囲を網羅してはいません。*Ceramics for High Performance Applications*はガスタービン熱機関への応用を主眼点として書かれており対象とする範囲が狭すぎます。というわけでアリゾナ州立大学での講義の大部分は沢山の文献や個人的経験による講義ノートを使って行いました。

「高強度セラミックスの工学的応用」および「現代技術に及ぼすセラミックスのインパクト」という題でアメリカ金属学会で行った2回の3日間コースの講義と、「高温構造材料」という題で行った半日の講義は様々な専門分野の技術者や技能者を対象としたものでしたが、アリゾナ州立大学の場合と同様に適当な教科書や参考書がありませんでした。これらの講義用のノートでは特に構造や製造法と、性質、設計法、破壊解析、そして特殊な応用の検討との関係について拡張しました。

アリゾナ州立大学やアメリカ金属学会での講義から、セラミック材料と技術について広く取扱っていて、技術者、技能者、学生、および教師が理解し満足する教科書もしくは参考書の必要なことが明らかとなりました。その結果として生れた本書は執筆に2年を要し、講義ノートを基にして多くの文献調査が追加されています。

この努力に対して多くの機関と個人からの援助がありました。私はこの機会に非常に多数の方々に感謝します。すなわち、アリゾナ州立大学とアメリカ金属学会(特に Nick Jessen)にはセラミックスの講義への資金および援助を、Defense Advanced Research Project Agency, 空軍材料研究所および空軍ジェット推進研究所には多くの例や写真を作成するための資金援助を、Garrett タービンエンジン社には技術的データ、写真および原稿作成の援助をいただきました。Greg Brigham には大部分の製図を、Floyd Brown には原稿作成時の励ましと援助を、Dr. Nelson, W. Hope および Denise B. Birnbaum には参考文献とデータ源の収集についての援助を、Dr. Robert Shane には忍耐と励ましおよび専門上ならびに編集上の助言をいただきました。特に Christy F. Johnson, Judith A. Martindale, Angie F. Peter および Michael Anne Richerson には初期の原稿から最終原稿までの膨大なワープロ作業をお願いしたことなどに対してです。

David W. Richerson

緒 言

本書の目的はハイテクノロジーセラミックスの製造技術と実際の応用を易しく解説することにあります。この本は数学を使わないで基本的な材料と性質の概念に重点を置いて説明しており、読者がより高度な問題を処理する際に必要な知識が得られるように配慮しました。本書は次の3編から成っています。

第Ⅰ編 構造と性質。

第Ⅱ編 セラミックスの製造工程。

第Ⅲ編 セラミックスの設計。

第Ⅰ編では、セラミックスの物理的性質、熱的性質および機械的性質と、原子間距離や結晶構造との間の関係について検討しました。金属や有機材料との比較を強調したのでセラミックスの設計概念が次第に明確になるはずです。

第Ⅱ編では、セラミックスの製造法について原料の選択から成形そして品質管理までのそれぞれの段階について詳しく説明しました。それぞれの製造段階について最終製品の性能や品質との関係を考察しましたが、製造方法を理解することは応用面における問題を解決するのに必要です。

第Ⅲ編では、第Ⅰ編および第Ⅱ編で行った説明をセラミックスの設計に応用して、セラミックスで必要な設計法を金属やプラスチックの場合と比較しながらそれらの違いについて強調しました。また、破壊の解析の重要性やその手法についても説明しました。最後の章では特定の応用に対する材料選択について考察しました。

セラミックスは実際にあらゆる産業や日常生活で使われており、「セラミックスとは何ですか」とか、「セラミックスを使って何ができるのですか」ということを理解することは、技術者や学者の守備範囲や効率を著しく向上させるはずです。

以下に示した例からセラミック材料の工学的応用の多様性が理解できます。本書を読む前に読者は、以下に示したそれぞれの用途に最も適したセラミック材料を従来の経験から選んで、その理由を考えて下さい。

1. サンドブラストノズル。
2. 耐火物。
3. 摺動材料。
4. 陶磁器。
5. 高温熱交換器。
6. 装甲板。
7. 磁性材料。
8. 熱源から熱をできるだけ速く除去するための冷却ブロック。
9. スペースシャトルなど再使用する宇宙船に必要な断熱保護材料。
10. 等方性の透明材料。
11. 熱膨張が一方向にだけ大きい材料。
12. 生(green)の状態です必要な形状に成形可能で、緻密化や焼成の工程で寸法が変らない材料。
13. ボールミル用の耐摩耗材料。
14. 有機材料と複合して建材に使え安価な繊維材料。
15. 熔融粒子のスプレー法によるコーティングで、高温にさらされた際にも基板の温度を低く保つことのできる材料。
16. 鋳込み成形用の安価な鋳型材料。
17. 熱電対用の絶縁保護材料。
18. 著しい熱衝撃に耐える材料。
19. 電子機器用基板。
20. ダイオードやその他の電子素子のドーピングに用いる高温拡散炉の材料。
21. コンデンサーの電荷蓄積能力を 1600 倍にするセラミックス。
22. 高温炉断熱材料用の超軽量材料。