

J A E R I - M
92-092

新素材で高速回転体を構成する場合の
技術的問題に関する調査

1992年6月

阿部 哲也・村上 義夫・平林 武雄*
大澤 晴繁*・引田 和雄*・白石 成之*
秦 聰*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura,
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1992
編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

新素材で高速回転体を構成する場合の技術的問題に関する調査

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

阿部 哲也 • 村上 義夫 • 平林 武雄* • 大澤 晴繁*
引田 和雄* • 白石 成之* • 秦 聰*

(1992年6月1日受理)

ターボ型真空ポンプの高速回転体をファインセラミックスや新複合材料等の新素材で構成する場合の技術的な問題と限界を従来の金属材料で構成する場合のそれと比較して調査した。

これに基づき、核融合炉用の大型ポンプに使用することを前提に新素材の回転体への適用性を検討した。

A Survey on Technical Problems in Designing High-speed Rotors
with Developing Materials

Tetsuya ABE, Yoshio MURAKAMI, Takeo HIRABAYASHI^{*}
Harushige OHSAWA^{*}, Kazuo HIKIDA^{*}, Shigeyuki SHIRAISHI^{*}
and Satoshi HATA^{*}

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 1, 1992)

A survey was made on technical problems and limitations in designing high-speed rotors of turbo vacuum pumps using developing materials (fine ceramics, new composite materials, etc.) as well as conventional metals. Based on the surveyed results, the applicability of the developing materials to the rotors has been evaluated assuming the use in large-size pumps for fusion reactors.

Keywords: High-speed Rotors, New Materials, Survey, Evaluation

* Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

目 次

1.はじめに	1
2.調査・検討項目	1
3.高速回転体の構造・仕様	2
4.実用金属材料の検討	2
4.1 使用できる材料の種類と一般用途例	2
4.2 高速回転体への適用	2
4.3 性能の解析評価と問題点の検討	3
5.新素材の検討	8
5.1 新素材の分類	8
5.2 新素材の特性	8
5.3 高速回転体への適用可能性	8
5.4 性能の解析評価と問題点の検討	9
6.まとめ	10
謝 辞	10
参考文献	11

Contents

1. Introduction	1
2. Items of Investigation	1
3. Structure and Specifications of High-speed Rotors	2
4. Consideration on Conventional Metal Rotors	2
4.1 Possible Candidate Materials and Their General Uses	2
4.2 Application to High-speed Rotors	2
4.3 Performance Analyses and Technical Limitations	3
5. Investigation on New Materials	8
5.1 Classification of New Materials	8
5.2 Characteristics of New Materials	8
5.3 Applicability to High-speed Rotors	8
5.4 Performance Analyses and Technical Limitations	9
6. Conclusions	10
Acknowledgements	10
References	11

1. はじめに

磁気閉じ込め方式の核融合炉における真空ポンプの役割は、重水素（D）－トリチウム（T）核融合反応により生成されるヘリウム（He）を未反応の燃料（D、T）とともに炉心から排出し、1気圧程度にまで昇圧して燃料再生系へ移送することである。そのため、真空ポンプに要求される性能としては、（1）強い磁場中でも運転できること（耐磁場性）、（2）放射性物質であるトリチウムを排気でき、かつトリチウムの滞留が少ないとこと、（3）放射線照射に耐えること（耐放射線性）、（4）全体で毎秒数 $1\text{ }0\text{ }0\text{ m}^3$ の排気速度を有し排気気体を1気圧まで昇圧できること、などである¹⁾。これらの要求性能は、現在稼働中の核融合装置で使用されている一般汎用型真空ポンプでは、到底想定したこともない極めて過酷なものである。

例えば、現在の核融合装置で多用されているターボ分子ポンプ（TMP）等の回転部が電気良導体である金属製の真空ポンプでは、数十G（ガウス）以上の磁場中で動作させると回転部に発生する渦電流の作用で回転数が低下してポンプ作用をなさなくなったり、さらには発熱のためポンプ動作の継続が不可能となってしまうなどの問題が生じている²⁻⁴⁾。

真空ポンプを含めた排気系の最適設計という観点からは、真空ポンプをトーラス真空容器の近傍（磁場強度が数KG程度）に設置した方が、排気効率が向上し、その結果として真空排気系の小型・合理化が可能になる。しかし金属製の回転式真空ポンプの場合には、耐磁場性等からくる制約のため、やむなくポンプをトーラス真空容器から遠方に離して設置している。したがって、核融合炉で用いられる真空ポンプは、現在の一般汎用型ポンプが有する性能の他に、前述したような核融合炉特有の要求性能をも満足させることが必要である。

上述のような核融合炉特有の要求性能をも全て満たす核融合用真空ポンプを実現するためには、従来使用されている材料だけでポンプを構成したのでは材料特性等の点で、どうしてもポンプ性能に限界があるので、用いる構造材料の探索および気体分子運動論や流体力学理論に立脚した新たなポンプ機構・構造の設計等、総合的観点からの検討が必要となる。

本稿では、これらのうちの高速回転式ポンプの構造材料に重点をおき、新素材等も含めた各種材料で核融合炉用ターボ分子ポンプを構成した場合の技術的問題点およびその将来性について調査・検討した結果について述べる。なお、ターボ分子ポンプは、典型的な高速回転式ポンプであり、現在稼働中の核融合装置で最も多用されているポンプの一つである。

2. 調査・検討項目

次の各項目について調査・検討した。

本稿では、高速回転式ポンプのことを高速回転体と総称する。高速回転体とは、回転体が軸受で支持され、高速回転する動翼と、静翼で構成される翼列により真空排気作用をもつ回転機械のことである。

（1） 現在実用化されている金属材料で高速回転体を設計・製作した場合の技術的問題点を調査・検討する。

1. はじめに

磁気閉じ込め方式の核融合炉における真空ポンプの役割は、重水素（D）－トリチウム（T）核融合反応により生成されるヘリウム（He）を未反応の燃料（D、T）とともに炉心から排出し、1気圧程度にまで昇圧して燃料再生系へ移送することである。そのため、真空ポンプに要求される性能としては、（1）強い磁場中でも運転できること（耐磁場性）、（2）放射性物質であるトリチウムを排気でき、かつトリチウムの滞留が少ないと、（3）放射線照射に耐えること（耐放射線性）、（4）全体で毎秒数 $1\text{ }0\text{ }0\text{ m}^3$ の排気速度を有し排気気体を1気圧まで昇圧できること、などである¹⁾。これらの要求性能は、現在稼働中の核融合装置で使用されている一般汎用型真空ポンプでは、到底想定したこともない極めて過酷なものである。

例えば、現在の核融合装置で多用されているターボ分子ポンプ（TMP）等の回転部が電気良導体である金属製の真空ポンプでは、数十G（ガウス）以上の磁場中で動作させると回転部に発生する渦電流の作用で回転数が低下してポンプ作用をなさなくなったり、さらには発熱のためポンプ動作の継続が不可能となってしまうなどの問題が生じている²⁻⁴⁾。

真空ポンプを含めた排気系の最適設計という観点からは、真空ポンプをトーラス真空容器の近傍（磁場強度が数KG程度）に設置した方が、排気効率が向上し、その結果として真空排気系の小型・合理化が可能になる。しかし金属製の回転式真空ポンプの場合には、耐磁場性等からくる制約のため、やむなくポンプをトーラス真空容器から遠方に離して設置している。したがって、核融合炉で用いられる真空ポンプは、現在の一般汎用型ポンプが有する性能の他に、前述したような核融合炉特有の要求性能をも満足させることが必要である。

上述のような核融合炉特有の要求性能をも全て満たす核融合用真空ポンプを実現するためには、従来使用されている材料だけでポンプを構成したのでは材料特性等の点で、どうしてもポンプ性能に限界があるので、用いる構造材料の探索および気体分子運動論や流体力学理論に立脚した新たなポンプ機構・構造の設計等、総合的観点からの検討が必要となる。

本稿では、これらのうちの高速回転式ポンプの構造材料に重点をおき、新素材等も含めた各種材料で核融合炉用ターボ分子ポンプを構成した場合の技術的問題点およびその将来性について調査・検討した結果について述べる。なお、ターボ分子ポンプは、典型的な高速回転式ポンプであり、現在稼働中の核融合装置で最も多用されているポンプの一つである。

2. 調査・検討項目

次の各項目について調査・検討した。

本稿では、高速回転式ポンプのことを高速回転体と総称する。高速回転体とは、回転体が軸受で支持され、高速回転する動翼と、静翼で構成される翼列により真空排気作用をもつ回転機械のことである。

(1) 現在実用化されている金属材料で高速回転体を設計・製作した場合の技術的問題点を調査・検討する。

- (2) 複合セラミックスなどの各種新材料で高速回転体を構成した場合の技術的問題点を調査
・検討する。

3. 高速回転体の構造・仕様

表3.1に高速回転体の構造、構成要素、要求事項との対応及び関連技術をまとめて示す。
本調査では、主として回転強度、排気性能及び軸受系について技術検討を行う。

4. 実用金属材料の検討

4.1 使用できる材料の種類と一般用途例

実用化されている金属材料の例を表4.1.1に示す⁵⁾。

比重、熱伝導度、耐食性、加工性、真空脱ガス、耐放射線性などに優れた高力アルミニウム合金、並びに鋼にCrやNiを添加して耐食性と耐熱性を改善した各種ステンレス鋼あるいは耐熱鋼が、各種一般回転機械に良く使用されている。

その他、特に強い韌性を必要とする歯車、クランク軸、タービン翼、強力ボルト用として使用されるSCM、SNCM等の構造用合金鋼や比重4.5とアルミニウムに次いで軽く、鉄鋼材料と同程度の強度を有し、最近では航空機部品、海底探索装置等に使用されはじめたチタン合金などがある。

また、高強度鋼としては極低炭素マルテンサイトを時効析出により強じん化させたマルエージ鋼があり、18Ni系マルエージ鋼は航空宇宙産業、圧力容器他に使用されている。既に、245kgf/mm²級が実用化され、350kgf/mm²級も試作中であり、限界は430kgf/mm²級と推定されている。また、マルエージ型ステンレス鋼MA164、MA367なども開発されている。

4.2 高速回転体への適用

一般のTMP用材料としては、比強度、耐食性などの性能的な面と取扱いやすさ、コスト等の市販性の面などから材料の選定がなされ、通常は、回転部はアルミニウム合金及びステンレス鋼を主体に構成されている。

また、特殊用途として、チタン合金製の回転翼も試作されている。

マルエージ鋼は、比強度は非常に大きいが、環境感受性が強いため現在市販されている真空ポンプへの採用例は見当たらない。

モータ及び磁気軸受用として珪素鋼板、軸受及び危急軸受用として軸受鋼やステンレス鋼、静翼及びケーシング用としてアルミニウム合金やステンレス鋼などが各々の用途に応じ適切な表面処理を施して使用されている。

- (2) 複合セラミックスなどの各種新材料で高速回転体を構成した場合の技術的問題点を調査
・検討する。

3. 高速回転体の構造・仕様

表3.1に高速回転体の構造、構成要素、要求事項との対応及び関連技術をまとめて示す。
本調査では、主として回転強度、排気性能及び軸受系について技術検討を行う。

4. 実用金属材料の検討

4.1 使用できる材料の種類と一般用途例

実用化されている金属材料の例を表4.1.1に示す⁵⁾。

比重、熱伝導度、耐食性、加工性、真空脱ガス、耐放射線性などに優れた高力アルミニウム合金、並びに鋼にCrやNiを添加して耐食性と耐熱性を改善した各種ステンレス鋼あるいは耐熱鋼が、各種一般回転機械に良く使用されている。

その他、特に強い韌性を必要とする歯車、クランク軸、タービン翼、強力ボルト用として使用されるSCM、SNCM等の構造用合金鋼や比重4.5とアルミニウムに次いで軽く、鉄鋼材料と同程度の強度を有し、最近では航空機部品、海底探索装置等に使用されはじめたチタン合金などがある。

また、高強度鋼としては極低炭素マルテンサイトを時効析出により強じん化させたマルエージ鋼があり、18Ni系マルエージ鋼は航空宇宙産業、圧力容器他に使用されている。既に、245kgf/mm²級が実用化され、350kgf/mm²級も試作中であり、限界は430kgf/mm²級と推定されている。また、マルエージ型ステンレス鋼MA164、MA367なども開発されている。

4.2 高速回転体への適用

一般のTMP用材料としては、比強度、耐食性などの性能的な面と取扱いやすさ、コスト等の市販性の面などから材料の選定がなされ、通常は、回転部はアルミニウム合金及びステンレス鋼を主体に構成されている。

また、特殊用途として、チタン合金製の回転翼も試作されている。

マルエージ鋼は、比強度は非常に大きいが、環境感受性が強いため現在市販されている真空ポンプへの採用例は見当たらない。

モータ及び磁気軸受用として珪素鋼板、軸受及び危急軸受用として軸受鋼やステンレス鋼、静翼及びケーシング用としてアルミニウム合金やステンレス鋼などが各々の用途に応じ適切な表面処理を施して使用されている。

- (2) 複合セラミックスなどの各種新材料で高速回転体を構成した場合の技術的問題点を調査
・検討する。

3. 高速回転体の構造・仕様

表3.1に高速回転体の構造、構成要素、要求事項との対応及び関連技術をまとめて示す。
本調査では、主として回転強度、排気性能及び軸受系について技術検討を行う。

4. 実用金属材料の検討

4.1 使用できる材料の種類と一般用途例

実用化されている金属材料の例を表4.1.1に示す⁵⁾。

比重、熱伝導度、耐食性、加工性、真空脱ガス、耐放射線性などに優れた高力アルミニウム合金、並びに鋼にCrやNiを添加して耐食性と耐熱性を改善した各種ステンレス鋼あるいは耐熱鋼が、各種一般回転機械に良く使用されている。

その他、特に強い靱性を必要とする歯車、クランク軸、タービン翼、強力ボルト用として使用されるSCM、SNCM等の構造用合金鋼や比重4.5とアルミニウムに次いで軽く、鉄鋼材料と同程度の強度を有し、最近では航空機部品、海底探索装置等に使用されはじめたチタン合金などがある。

また、高強度鋼としては極低炭素マルテンサイトを時効析出により強じん化させたマルエージ鋼があり、18Ni系マルエージ鋼は航空宇宙産業、圧力容器他に使用されている。既に、245kgf/mm⁻²級が実用化され、350kgf/mm⁻²級も試作中であり、限界は430kgf/mm⁻²級と推定されている。また、マルエージ型ステンレス鋼MA164、MA367なども開発されている。

4.2 高速回転体への適用

一般のTMP用材料としては、比強度、耐食性などの性能的な面と取扱いやすさ、コスト等の市販性の面などから材料の選定がなされ、通常は、回転部はアルミニウム合金及びステンレス鋼を主体に構成されている。

また、特殊用途として、チタン合金製の回転翼も試作されている。

マルエージ鋼は、比強度は非常に大きいが、環境感受性が強いため現在市販されている真空ポンプへの採用例は見当たらない。

モータ及び磁気軸受用として珪素鋼板、軸受及び危急軸受用として軸受鋼やステンレス鋼、静翼及びケーシング用としてアルミニウム合金やステンレス鋼などが各々の用途に応じ適切な表面処理を施して使用されている。

4.3 性能の解析評価と問題点の検討

4.3.1 排気性能及び回転速度

T M P の排気性能は、翼の形状、寸法及び回転速度によって決まり、最大排気速度 S_{\max} と最大圧縮比 $(P_n/P_1)_{\max}$ は次の式で与えられる。

$$S_{\max} = (1/4) \eta_{\max} A V_s = \eta_{\max} A (RT/2\pi M)^{1/2} \quad (4.1)$$

$$\eta_{\max} = \Sigma_{1n} - (\varepsilon_{n-1}/\varepsilon_1) \Sigma_{n1} \quad (4.2)$$

$$(P_n/P_1)_{\max} = (\varepsilon_{1n}/\varepsilon_{n-1}) (\Sigma_{1n}/\Sigma_{n-1}) \quad (4.3)$$

ここで

添字 1 : 吸気口側

添文 n : n 段の翼列を経たのちの背圧側

Σ : 入射した気体分子が翼の反対側へ通り抜ける確率

ε : 翼列の環状面積のうちで有効に排気に寄与しうる面積の割合

η_{\max} : 最大排気効率

A : 回転翼の開口面の面積

T : 気体の絶対温度

M : 分子量

回転翼の開口面積 A は回転翼直径 D の 2 乗に比例するとみなせる。

また、図 4.3.1⁶⁾ より最大排気効率 η_{\max} は、市販の真空ポンプ並の翼速度比（[翼速度] / [気体分子の最大確率速度]）1.2程度までは、ほぼ翼速度比に比例するとみなすことができる。

そこで、

$$A \approx a D^2 \quad (4.4)$$

$$\eta_{\max} \approx bDN / (2RT/M)^{1/2} \quad (4.5)$$

とおき、式 (4.1) に代入すると、

$$S_{\max} \approx CD^3 N \quad (4.6)$$

となり、排気速度は分子量によらず、回転翼の直径と回転数で決定されることがわかる。

一方、回転体の周速は、

$$DN = d (\sigma_y / \gamma)^{1/2} \quad (4.7)$$

によって材料強度上制限される。

これより、

$$S_{max} \doteq \alpha (\sigma_y / \gamma)^{1/2} D^2 \quad (4.8)$$

$$S_{max} \doteq \beta (\sigma_y / \gamma)^{3/2} / N^2 \quad (4.9)$$

が得られる。

ここで、D、N、 σ_y 、 γ はそれぞれ動翼外径、回転数、材料の耐力、比重であり、a、b、c、d、 α 、 β は定数である。

また、図4.3.2⁶⁾ より、最大圧縮比の対数も翼速度比が1.2 程度までの範囲では翼速度比に比例することから

$$\log (P_n / P_1)_{max} \doteq f DN / (2RT / M)^{1/2} = g M^{1/2} DN \quad (4.10)$$

となり、 $M^{1/2}$ 、DN及び翼形状・段数係数g に比例することがわかる。f は定数である。

分子量、回転数に対する最大圧縮比の関係について図 4.3.3⁷⁾ に解析結果が紹介されている。

さらに、式(4.1)、(4.4)、(4.5)、(4.10) より

$$S_{max} / \log (P_n / P_1)_{max} \doteq h A = j D^2 \quad (4.11)$$

なる関係も推察される。h, j は定数である。

各メーカーのTMP諸元をまとめた図4.3.4 ~図4.3.6 より⁸⁾、排気速度S は、 $S \propto D^{(2 \sim 2.5)}$ 、 $S \propto N^{-(2 \sim 2.5)}$ 、水素 (H₂) の排気速度と圧縮比の比は、 $S_{H_2} / \log(P_n / P_1)_{H_2} \propto D^{(2 \sim 2.5)}$ 程度となっており、上記の概算と良く一致することがわかる。

以上の図、式より、次の知見が得られる。

- 1) 排気速度を大きくするには大径化する必要がある。
- 2) 材料の比強度を上げることで、排気速度、圧縮比共に高性能化ができる。
- 3) 回転翼周速を大きくし、N₂の最大確率速度(0°C; 403 m sec⁻¹)を越え、H₂の最大確率速度(0°C; 1501 m sec⁻¹)に近づければ、N₂の排気速度、圧縮比は頭打ちとなるが、軽ガスの排気速度、圧縮比はさらに向かう。

核融合炉用真空ポンプとして考える場合、比強度が高い実用金属としてあげられるチタン合金はトリチウムの蓄積や渦電流損、マルエージ鋼は環境感受性や磁性、SUS440C は磁性の面で各々不具合があり、後述するモータ、軸受などの限界と合わせて、上記2)、3) の実現は制限される。

また、横磁場中での回転体に発生する渦電流損 P は動翼径のべき乗に比例するため、大排気速度機になる程増大する。アルミニウム合金製動翼 TMP の場合は、排気速度 500 l sec^{-1} 級でも数 $10G$ の横定常磁場で $100W$ (ワット) を超える渦電流損が発生し、発熱による回転体材料強度上の温度限界、回転体の膨張、回転数低下等の問題が生じる⁴⁾。

4.3.2 軸受及びモータ

次に、軸受型式と性能の関係を図4.3.7⁹⁾、図4.3.8⁹⁾に示す。

完全オイルフリー機としては潤滑油を用いる玉軸受は不適格であり、気体軸受及び磁気軸受に絞られるが、使用可能な周速限界及び損失の面より、一般的には磁気軸受の方が有利である。

磁気軸受の負荷容量 F_B は

$$F_B \propto B_g^2 S \propto (\text{Energy}) S / (S \delta_B) \propto D_B^3 / \delta_B \quad (4.12)$$

ここで

- B_g : 磁束密度
- S : 対向部面積
- δ_B : 対向部ギャップ
- Energy : 発生エネルギー
- D_B : 磁気軸受外径

であり、通常は $3 \sim 5 \text{ kgfcm}^{-2}$ の面圧で設計される。

ロータの重量は動翼外径 D の 3 乗に比例するとみなせるので、ポンプの大排気容量化を図る場合、これに合わせて F_B の増加を図る必要があるが、 D_B は強度、ポンプ構造及び上記使用可能限界よりむやみに大きくできず、動翼外径 D に比例して大きくするのが精一杯である。また、 δ_B は製作、組立、発熱膨張、回転体の許容振幅上、機械の大型化と共に大きくする必要があり、ここで設計上の限界が生じる。

実用的な磁気軸受の設計事例を表4.3.1¹⁰⁾、表4.3.2¹⁰⁾に示す。

次に、モータの出力 W は、モータの形状比を一定とすれば、

$$W \propto D_M^3 N / \delta_M \quad (4.13)$$

ここで

- D_M : モータ外径
- δ_M : モータ間ギャップ
- N : 回転数

であり、通常、周速 100 m sec^{-1} 以下、単位体積当たりの出力 $\approx 0.1 \text{ W cm}^{-3}$ が目安値となる。

これに対し、回転体の極慣性モーメントは動翼外径 D の 5 乗に比例するとみなせるので、ポンプの大排気容量化に対し磁気軸受と同様の限界が生じる。

また、大気突入時の高速回転部の耐力についても検討する必要がある。大気突入時に動翼に加わる揚力はほぼ動翼外径 D の 2 乗に比例すると考えられるので、これに耐えられるように構造材料の選定、軸受、危急軸受、動翼、静翼、各部ギャップ等の諸元を定める必要がある。その他、ポンプの大容量化に当たっては、各構成部品ごとに、使用できる材料の種類および構造形状が限定されるので、具体的かつ詳細な設計検討が必要となる。

4.3.3 排気速度の上限

例として、スラスト磁気軸受の負荷容量の面から限界値を試算してみる。

まず、表 4.3.2¹⁰⁾ より、現実的な磁気軸受設計では、負荷容量 F と回転数 N の積は一定となる。

$$NF \approx 2 \times 10^6 \text{ kgf sec}^{-1} \quad (F: \text{kgf}, N: \text{rps}) \quad (4.14)$$

また、回転体の重量は動翼外径の 3 乗に比例し、概略、次のようになる。

$$W \approx 10^{-3} D^3 \text{ kgf} \quad (D: \text{cm}) \quad (4.15)$$

スラスト磁気軸受は少なくとも、この重量を支えられねばならないので、 $F = W$ とおき、

$$ND^3 \approx 2 \times 10^9 \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1} \quad (4.16)$$

一方、動翼の外周速 ND は材料強度上一定となるので、ここで最大径が決まる。

4.3.4 核融合炉用 TMP の必要性能とそのための技術的問題

- 1) 高速回転させる動翼を構成する材料の比強度は、できるだけ大きくなければならない。そのため、現在のところ動翼を構成する材料としては、比強度に優れているアルミニウム合金が主流であり、実用金属の中でこれに匹敵する比強度を有する材料は、限られた特殊用途の材料を除いてほとんど見あたらない。
一方、核融合炉用 TMP として要求される耐磁場性能は、約1000G であるが、現在のアルミニウム合金製 TMP が有する耐磁場性能は、約30 G¹⁾ 程度である。したがって、電気抵抗値の大きい材料で動翼を構成し、発生渦電流を減らして耐磁場性能を高めようすると、動翼に使用する材料の電気抵抗値は、アルミニウム合金の(1000/30)² ≈ 1000倍以上であることが必要となり¹⁾、このような電気抵抗値を有する実用金属材料は、現在知られていない。従って、一般的に金属製 TMP を磁場環境で使用する場合には、磁気遮蔽等の必要な対策を講ずることが不可欠となる。
- 2) また、TMP を大径化することにより大容量、大排気速度化は可能と考えられるが、軸受、回転駆動源、危急軸受等の各種要素部品は性能・構造面で制約を受ける。そのため、大気突入時の耐力、耐振性等の安全工学的な性能が低下する恐れが有り、適正な設計が必要である。
- 3) さらに、完全オイルフリー TMP の中容量機は市販されているが、粗引きポンプについては完全オイルフリーで大容量排気可能なものは見当たらない。核融合炉の排気系を完全オイルフリーのシステムで構成する上で、粗引きポンプの開発は不可欠と考えられる。

5. 新素材の検討

ここでいう新素材とは、新しい製造技術、商品化技術を用いて作られ、従来にない価値を生み出すものであり、以下に示す特性を有するものである。

- 1) 商品特性 ; 多種類性、高付加価値性、複合作用性
- 2) 需要特性 ; 市場ニーズが多い、需要規模が小さい、ライフサイクルが短い。
- 3) 生産特性 ; 技術集約型、生産規模が比較的小さい。

5.1 新素材の分類

表5.1.1¹¹⁾に新材料の材質と機能分類及び用途例をまとめて示す。

材質は、ファインセラミックス、高機能性高分子材料、新金属材料、複合材料に分類され、さらに、複合材料は、高分子系(FRP)、金属系(FRM)、セラミックス系(FRC)に分けられる。

機能的には、機械的、熱的、化学・生体的、電気・電子的、磁気的、光学的、放射線機能に分類され、本調査においては、主として機械的、熱的、磁気的、放射線機能について検討を行う。

5.2 新素材の特性

(1) ファインセラミックス

表5.2.1¹²⁾に示すように代表的なものとしてアルミナ、部分安定化ジルコニア、窒化珪素があり、図5.2.1¹³⁾と図5.2.2¹⁴⁾に示すような特徴を有している。高速回転体の要求事項である高温での高強度を有する材料としては窒化珪素や炭化珪素が考えられる。

また、表5.2.2～表5.2.11¹⁵⁻¹⁷⁾にファインセラミックスの応用分野、材料特性詳細及び耐食性についてまとめて示している。

(2) 複合材料

高速回転体用材料としての特性比較するためにFRP、FRMおよびFRCの比強度、比弾性を図5.2.3¹⁸⁾に示す。従来金属に比較して各種複合材料とも優れた特性を有するが、高温での比強度があるものとしてはFRCが考えられる。但し、ファインセラミックスと比較すると韌性値は大きくなるものの、比強度の大幅な向上は難しいと判断される。

表5.2.12～表5.2.16¹⁹⁻²⁰⁾にFRPの応用分野、材料特性詳細及び特徴比較について、表5.2.17²¹⁾にFRMの特性詳細をまとめて示している。さらに、表面処理材として各種セラミックスコーティングの特徴とその応用例を表5.2.18¹⁷⁾に示している。

5.3 高速回転体への適用可能性

前項でまとめた各種新素材の特性、応用分野、適用例を考慮して、高速回転体の各構成要素への適用が期待される新素材の材質とその効果予測をまとめて、表 5.3.1 に示す。

高速回転体が耐磁場性、耐熱性を有するために、各構成要素にはファインセラミックスやセラミックス系複合材料を用いる必要があり、特に回転部分には高強度を有し且つ強度のバラツキが小さく、信頼性の高い材料を適用しなければならない。

5.4 性能の解析評価と問題点の検討

ここでは、前項において適用新素材として検討したファインセラミックスを高速回転体の代表であるターボ分子ポンプの動翼に用いた場合について、その回転強度及び排気性能に関して解析・評価を行う。

図5.4.1にセラミックス強度特性と高速回転体の動翼形状及び水素ガスに対する排気速度解析値の関係を示す。

□これまでに、完全オイルフリーのセラミックス製ターボ分子ポンプについては、回転数30,000 rpm、動翼外径 ϕ 120mm、排気速度 80 l sec^{-1} の小型機と回転数25,000rpm、動翼外径 ϕ 210mm、排気速度 500 l sec^{-1} の中型機が開発され、実用段階にある。

これらの高速回転体には、曲げ強度 90 kgf mm^{-2} 、ワイブル係数14程度の材料特性を有する従来セラミックスが使用されている。この従来セラミックスを用いて、現状の製作可能最大寸法である ϕ 400mmまで動翼を大型化した場合、排気速度は $5,000\text{ l sec}^{-1}$ から $7,000\text{ l sec}^{-1}$ 程度となる。この値は、現在の金属製ターボ分子ポンプの大型機に相当する。

さらに、現在、開発中である曲げ強度 130 kgf mm^{-2} 程度の高強度セラミックスを適用し、回転強度を向上させて高周速化し、さらに動翼外径を ϕ 400mmまで大型化するならば、排気速度は約 $10,000\text{ l sec}^{-1}$ になると考えられる。

しかし、単機で排気速度を数万 l sec^{-1} とするためには、さらに、曲げ強度 150 kgf mm^{-2} 以上の超高強度化及び動翼外径 ϕ 700mm以上の超大型化を図る必要がある。

特に、回転強度解析においては、セラミックス材料特有の強度のバラツキ、内部及び表面亀裂等の影響を考慮した確率論的強度評価方法を用いる必要がある。

図5.4.2に示す回転強度解析結果によると、曲げ強度を 200 kgf mm^{-2} 以上にしても許容回転数はあまり高くならず、安全余裕を考慮すると高周速化は難しく、排気速度をさらに大きくするには、動翼外径の大型化が不可欠であることがわかる。

また、粗引用完全オイルフリー・セラミックス製真空ポンプは開発段階にあり、排気速度 3000 l min^{-1} 級のものが製作され、上述と同様、大径化、高周速化を図ることにより、数千 l min^{-1} から1万 l min^{-1} 級に大容量化できる可能性がある。

ファインセラミックスや複合材料の開発計画については、表5.4.1～表5.4.4^{21)～23)}に示すような例があるが、高速回転体に用いる材料としては、これらの強度目標値より、さらに高い値を有するものを必要としている。

大型セラミックス部材の製作加工技術については、図5.4.3²⁴⁾に示されるような各製作工程段階での製造技術の一層の向上が必要であり、さらには、より効率的に大型化を図るための図5.4.4²⁵⁾、表5.4.5²⁶⁾および表5.4.6²⁷⁾に示すようなセラミックス接合法の開発も必要となる。

また、高速回転体の信頼性を向上するために 図5.4.5²⁸⁾に示すような非破壊検査技術も並行

して開発する必要がある。

6. ま と め

核融合炉用真空ポンプの開発に資することを目的として、複合セラミックスなどの各種新材料で高速回転体を構成した場合の技術的問題点を調査・評価した。すなわち、大容量・大排気速度を有する完全オイルフリーのターボ型真空ポンプを、現在実用化されている金属材料および複合セラミックスなどの新素材を用いて設計した場合の技術的問題点を調査・検討した。

その結果は次のとおりである。

(1) 実用金属材料について

- a) 超高真空用完全オイルフリー・ターボ分子ポンプ（TMP）として、アルミニウム合金を主体に構成した回転体を制御型磁気軸受で支持した排気速度 2000 l sec^{-1} 級のものが市販されているが、最大許容磁場は数10G程度である。
- b) 大容量・大排気速度化を図る場合には、回転翼径の大径化が必要となるが、そのためには軸受部の発熱膨張及び危急軸受部の耐力等に関して詳細な技術的検討が必要である。
- c) 最大動作圧力が大気圧（1気圧）の完全オイルフリーのターボ型粗引ポンプは、未だ実現されていないが、これは風損に起因する発熱による熱膨張等の技術的問題によるものと推察される。

(2) 新素材について

- a) 超高真空用完全オイルフリー TMP として開発された窒化珪素製回転体を気体軸受で支持した 500 l sec^{-1} セラミック TMP は、設計値で5T（テスラ）（50,000G）以上の強磁场中で運転できるというので、実用化が期待されている。
- b) セラミック TMP の大容量化を図るために大型回転翼の成形・焼結、材料強度向上及び大型気体軸受などの関連要素技術開発が必要である。
- c) 最大動作圧力が1気圧の粗引き用の完全オイルフリーのターボ型真空ポンプとして、上記と同様の構成をなす 3000 l min^{-1} 級セラミックターボ型真空ポンプが開発段階にあり、今後数千～1万 l min^{-1} 級の大容量化の可能性がある。
- d) 新材料として種々の高強度セラミックス、FRP、FRM、FRC 等が開発されている。現時点では、まだ発展段階のため、機械加工性等の点で金属材に比較して種々の改良すべき課題を擁しているが、この分野は、急速に開発が進展しているため、将来、高速回転体の各構成要素への適用材料として期待される。

謝 辞

本調査を行うにあたり、核融合工学部・島本 進部長には終始有益な御指導を戴いた。深く感謝致します。また、文献の収集等で御協力戴いた三菱重工業株式会社・広島製作所・原動機・原子力部の関係者各位に深く感謝致します。

して開発する必要がある。

6. ま と め

核融合炉用真空ポンプの開発に資することを目的として、複合セラミックスなどの各種新材料で高速回転体を構成した場合の技術的問題点を調査・評価した。すなわち、大容量・大排気速度を有する完全オイルフリーのターボ型真空ポンプを、現在実用化されている金属材料および複合セラミックスなどの新素材を用いて設計した場合の技術的問題点を調査・検討した。

その結果は次のとおりである。

(1) 実用金属材料について

- a) 超高真空用完全オイルフリー・ターボ分子ポンプ（T M P）として、アルミニウム合金を主体に構成した回転体を制御型磁気軸受で支持した排気速度 2000 l sec^{-1} 級のものが市販されているが、最大許容磁場は数10G程度である。
- b) 大容量・大排気速度化を図る場合には、回転翼径の大径化が必要となるが、そのためには軸受部の発熱膨張及び危急軸受部の耐力等に関して詳細な技術的検討が必要である。
- c) 最大動作圧力が大気圧（1気圧）の完全オイルフリーのターボ型粗引ポンプは、未だ実現されていないが、これは風損に起因する発熱による熱膨張等の技術的問題によるものと推察される。

(2) 新素材について

- a) 超高真空用完全オイルフリー T M P として開発された窒化珪素製回転体を気体軸受で支持した 500 l sec^{-1} セラミック T M P は、設計値で5T（テスラ）（50,000G）以上の強磁場中で運転できるというので、実用化が期待されている。
- b) セラミック T M P の大容量化を図るために大型回転翼の成形・焼結、材料強度向上及び大型気体軸受などの関連要素技術開発が必要である。
- c) 最大動作圧力が1気圧の粗引き用の完全オイルフリーのターボ型真空ポンプとして、上記と同様の構成をなす 3000 l min^{-1} 級セラミックターボ型真空ポンプが開発段階にあり、今後数千～1万 l min^{-1} 級の大容量化の可能性がある。
- d) 新材料として種々の高強度セラミックス、F R P、F R M、F R C 等が開発されている。現時点では、まだ発展段階のため、機械加工性等の点で金属材に比較して種々の改良すべき課題を擁しているが、この分野は、急速に開発が進展しているため、将来、高速回転体の各構成要素への適用材料として期待される。

謝 辞

本調査を行うにあたり、核融合工学部・島本 進部長には終始有益な御指導を戴いた。深く感謝致します。また、文献の収集等で御協力戴いた三菱重工業株式会社・広島製作所・原動機・原子力部の関係者各位に深く感謝致します。

して開発する必要がある。

6. ま と め

核融合炉用真空ポンプの開発に資することを目的として、複合セラミックスなどの各種新材料で高速回転体を構成した場合の技術的問題点を調査・評価した。すなわち、大容量・大排気速度を有する完全オイルフリーのターボ型真空ポンプを、現在実用化されている金属材料および複合セラミックスなどの新素材を用いて設計した場合の技術的問題点を調査・検討した。

その結果は次のとおりである。

- (1) 実用金属材料について
 - a) 超高真空用完全オイルフリー・ターボ分子ポンプ (TMP) として、アルミニウム合金を主体に構成した回転体を制御型磁気軸受で支持した排気速度 2000 l sec^{-1} 級のものが市販されているが、最大許容磁場は数10G程度である。
 - b) 大容量・大排気速度化を図る場合には、回転翼径の大径化が必要となるが、そのためには軸受部の発熱膨張及び危急軸受部の耐力等に関して詳細な技術的検討が必要である。
 - c) 最大動作圧力が大気圧 (1気圧) の完全オイルフリーのターボ型粗引ポンプは、未だ実現されていないが、これは風損に起因する発熱による熱膨張等の技術的問題によるものと推察される。
- (2) 新素材について
 - a) 超高真空用完全オイルフリー TMP として開発された窒化珪素製回転体を気体軸受で支持した 500 l sec^{-1} セラミック TMP は、設計値で 5T (テスラ) (50,000G) 以上の強磁場中で運転できるというので、実用化が期待されている。
 - b) セラミック TMP の大容量化を図るために大型回転翼の成形・焼結、材料強度向上及び大型気体軸受などの関連要素技術開発が必要である。
 - c) 最大動作圧力が 1 気圧の粗引き用の完全オイルフリーのターボ型真空ポンプとして、上記と同様の構成をなす 3000 l min^{-1} 級セラミックターボ型真空ポンプが開発段階にあり、今後数千～1万 l min^{-1} 級の大容量化の可能性がある。
 - d) 新材料として種々の高強度セラミックス、FRP、FRM、FRC 等が開発されている。現時点では、まだ発展段階のため、機械加工性等の点で金属材に比較して種々の改良すべき課題を擁しているが、この分野は、急速に開発が進展しているため、将来、高速回転体の各構成要素への適用材料として期待される。

謝 辞

本調査を行うにあたり、核融合工学部・島本 進部長には終始有益な御指導を戴いた。深く感謝致します。また、文献の収集等で御協力戴いた三菱重工業株式会社・広島製作所・原動機・原子力部の関係者各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 阿部哲也：日本原子力学会誌，31, 1106(1989).
- 2) Bieger W., etal : "Proc. 7th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research", IEEE, 976(1977).
- 3) Becker W. and Henning J. : J. Vac. Sci. Technol., 15[2], 768(1978).
- 4) 橋本祥一, 他: 真空, 30, 226(1987).
- 5) 例えれば、日本規格協会編：“J I S ハンドブック”，日本規格協会，東京，(1976).
- 6) 吉岡潤一郎, 他: エバラ時報, No. 138, p2(1987-9).
- 7) 林, 他：“真空技術”，共立出版，東京，262(1987).
- 8) 真空ポンプ各社のカタログ値.
- 9) 松村文夫, 他: システムと制御, 26[4], 209(1982).
- 10) 日本磁気ベアリング株式会社のカタログ.
- 11) 春日 登: 配管と装置, p58(1986-2).
- 12) 旭 本生: 建設の機械化, p14(1986-1).
- 13) 日本ファインセラミックス協会：“ファインセラミックス産業対策調査（材料別問題別調査研究）委託調査結果報告書”，(1986-3).
- 14) 阿部 弘：“エンジニアリングセラミックス”，技報堂出版，東京.
- 15) 一ノ瀬 昇: 機能性セラミックス, (1989-3).
- 16) 米屋勝利, 西田勝利: 防食技術, 35[11], 646(1986).
- 17) 奥田 博: 原子力工業, 32[1], 36(1986).
- 18) 日根野 穣: 日本機械学会誌, 93[854], 52(1990).
- 19) 井口信洋: 機械の研究, 38[3], 435(1986).
- 20) 伊保内 賢: 機械設計, 32[12], 78(1988-9).
- 21) 古田敏康: 機械の研究, 33[8], 906(1981).
- 22) 小林和夫: 材料フォーラム1号, (1985-10).
- 23) 日本ファインセラミックス協会：“ファインセラミックスの標準化に関する調査研究報告書”，(1985-3).
- 24) 島田昌彦: 日本機械学会誌, 93[854], 75(1990).
- 25) 日本ファインセラミックス協会：“セラミックガスタービン調査研究報告書”(1985-3).
- 26) 高塙治男: 日本金属学会会報, 24[2], 113(1985).
- 27) 駿河省平: 溶接技術, 36[11], 122(1988).
- 28) 和田重孝: 非破壊検査, 35[10], 729(1986).

表3.1 高速回転体の構造・仕様と関連技術

表4.1.1 従来金属材料の種類及び特性

(出典: JISハンドブック44)																									
材 种	JIS記号	密度 (kg/m ³) ×10 ⁻³	比熱 (cal/g°C) [cal/(g°C)]	熱伝導率 (cal/m°C) [cal/(m°C)]	機械的性質 (E) [×10 ¹⁰ kgf/mm ²]	機械的性質 (G) [×10 ¹⁰ kgf/mm ²]	ボアン比 (ν)	引張強さ σ _y [kgf/mm ²]	引張強さ σ _b [kgf/mm ²]	伸び ε (%)	引張強さ σ _y [kgf/mm ²] ×10 ⁶ [mm]	引張強さ σ _b [kgf/mm ²] ×10 ⁶ [mm]	伸び ε (%)	引張強さ σ _y [kgf/mm ²] ×10 ⁶ [mm]	引張強さ σ _b [kgf/mm ²] ×10 ⁶ [mm]	伸び ε (%)	引張強さ σ _y [kgf/mm ²] ×10 ⁶ [mm]	引張強さ σ _b [kgf/mm ²] ×10 ⁶ [mm]	伸び ε (%)						
高力アルミニウム 合金	A204FD -T6	2.80 (20°C)	0.23 (100°C)	133 (25°C)	23.0 (20~100°C)	23.6 (20~200°C)	0.74 (24°C)	0.27	0.33	44E上	38以上	—	—	13.6	2.64	—	—	—	—	—	—	—	—		
	A1075D -T6	2.80 (100°C)	0.23 (20°C)	104 (25°C)	23.6 (20~100°C)	24.3 (20~100°C)	0.74	0.27	0.33	49E上	42E上	10以上	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	A2017-T4	2.79 (20°C)	—	104 (25°C)	23.6 (20~100°C)	—	0.70 (24°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	A5633-0	2.76 (20°C)	0.22 (20°C)	101 (25°C)	23.8 (20~100°C)	—	0.72 (24°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
SUS404 (4.3Cr14Ni5)	SUS404 (4.3Cr14Ni5)	8.03 (20~100°C)	0.12 (20~100°C)	13.9 (100°C)	17.3 (0~100°C)	—	1.99 (20°C)	0.80 (20°C)	0.25	53E上	21E上	40E上	60以上	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	SUS403 (4.3Cr14Ni5)	7.75 (20~100°C)	0.11 (20~100°C)	21.4 (100°C)	10.4 (0~100°C)	—	—	—	—	60E上	40E上	25以上	55以上	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	SUS410 (4.3Cr14Ni5)	7.78 (20~100°C)	0.11 (20~100°C)	21.4 (100°C)	10.4 (0~100°C)	—	2.08 (20°C)	0.88 (20°C)	0.25	55E上	35E上	25以上	55以上	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	SUS40C (4.3Cr14Ni5)	7.68 (20°C)	—	—	10.1 (0~100°C)	—	2.04 (20°C)	—	—	200	190	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
SUS300 (10Cr17系) 折出し鋼系	SUS300 (10Cr17系)	7.78 (20°C)	0.12 (20~100°C)	15.5 (100°C)	10.8 (0~100°C)	—	2.02 (20°C)	0.81 (20°C)処理	—	100以上	88以上	13E上	45E上	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	SUS460 (耐候性 鋼)	7.94 (20°C)	0.11 (20~100°C)	—	16.0 (0~100°C)	—	2.03 (20°C)	—	0.33	92E上	60E上	15以上	18E上	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
チタン 材 (Ti-6Al-4V)	—	4.43 (100°C)	0.135 (100°C)	12.3 (100°C)	8.8 (0~100°C)	9.0 (0~200°C)	1.155	0.45	0.315	91~106	84~102	20E上	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
クロムモリブデン 鋼	SCM440 (HSCH40)	7.83 (20°C)	0.113 (20~100°C)	36.4 (20°C)	11.9 (20~100°C)	—	SCM35 (20°C)	SCM35 (20°C)	0.279	88E上	100E上	12E上	45E上	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ニッケルクロム モリブデン 鋼	SiCM439 (HSNC439)	7.86 (20°C)	0.115 (20~100°C)	32.8 (20°C)	12.3 (20~100°C)	—	2.16 (20°C)	(10°C)	0.25	90E上	100E上	16E上	15以上	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
マルエージ鋼 (18Ni)	—	8.1	—	—	—	11.3	—	2.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
軸受鋼	SUJ-2	7.78	—	—	12.5	—	2.12	—	—	246	240	12	50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.72

表4.3.1 ラジアル磁気軸受の設計事例

標準ラジアルベアリング	回転数 (回転数 (rpm))	許容回転数 (rpm)	許容荷重 (kgf/mm)	寸法 (mm)	寸法 (mm)	寸法 (mm)	寸法 (mm)
標準ラジアル ベアリングNo.	Ω_{max}	Ω	F	a	D	B	C
P1 25	180 000	0.8	15	25	15	0.2	8.5
P1 36	120 000	1.1	20	36	21	0.25	10.2
P1 46	90 000	1.4	25	46	27	0.3	11.5
P1 60	48 000	3.2	50	60	60	0.5	17.2
P1 95	40 000	3.6	50	95	68	0.5	20.0
P1 110	35 000	4.0	60	110	89	0.5	20.9
P1 130	30 000	5.0	60	130	100	0.5	22.4
P1 150	26 000	6.0	60	150	110	0.5	25.9
P1 170	23 000	7.0	60	170	130	0.5	28.9
P1 190	20 000	8.0	70	190	150	0.5	31.0
P1 240	16 000	10	70	240	195	0.5	36.0
P1 310	12 000	13	70	310	250	0.5	44.0
P1 360	10 000	14.5	80	360	310	0.6	54.0
P1 460	8 000	20	80	460	360	0.7	64.0
P1 540	7 000	25	80	540	460	0.8	75.0
P1 640	6 000	29	80	640	540	0.8	87.0

図と表の説明(適正な標準ベアリングの選び方)

Ω : ローターの回転数 (rpm)
 P : ベアリングにかかる最大荷重 (kgf)
 -項目の中から必要な回転速度以上の許容速度を持つベアリングを選びます。
 -二番目の欄に1mm当たりのベアリングの荷重 (F)が示されています。
 -次の式を使って求めたベアリングの有利長さを計算します。

$$\text{長さ (mm)} = \frac{P}{F} + a$$

a (は引の三番目の欄に示されています)。
 -その他の寸法 (D, B, e, G) はそれぞれの欄に示された通りです。

注: 一般に $\frac{L}{D}$ (は1) に近い程、理想的とされます。
 - L/D の値が小さ過ぎる場合はそれより直徑の小さな標準ベアリングを選び直して同じ作業を繰返してください。

表4.3.2 スラスト磁気軸受の設計事例

標準型スラスト ベアリングNo.	Ω_{max} rpm	F kgf	ϵ mm	D_b mm	B mm	t, min.
PA 43	180 000	7	0.2	43	26	12 3
PA 63	120 000	30	0.25	63	37	18 5
PA 82	90 000	70	0.3	82	47	24 6
PA 100	67 000	200	0.4	100	50	38 9
PA 125	53 000	400	0.4	125	62.5	44 14
PA 160	42 000	700	0.5	160	80	53 18
PA 200	33 000	1300	0.5	200	100	62 25
PA 250	26 000	2100	0.5	250	125	74 33
PA 320	20 000	2600	0.6	320	160	60 20
PA 400	16 000	4600	0.7	400	200	70 25
PA 500	13 000	7700	0.8	500	250	83 33
PA 630	10 000	13 000	0.9	630	315	100 44
PA 800	8 000	18 000	1.0	800	400	93 35

標準スラストベアリング
図と表の説明(適正な標準ベアリングの選び方)
 Ω : ローターの回転速度 (rpm)
 P : ベアリングの最大荷重 (kgf)
 項目の中から
 必要な回転速度以上の許容速度を持つベアリング
 ベアリングの最大荷重(P)を上回る許容荷重(F)
 を選びます。
 他の場合はベアリングの各寸法を示したもので
 す。
 注: ひとつつのベアリングで速度、荷重の両バラ
 イターを同時に満たせない場合は、シ
 ャフト上に二つのベアリングを並べて置く
 ことになります。

表5.1.1 新素材の材質分類と機能分類用途例

材質	材質例	分類	用途例	機能				分類		備考
				No.	機能	No.	特性	No.	機能	
強化ケイ素、炭化ケイ素	ガスチャーピン、デイゼルエンジン			1	強度	1	强度	9	機械・伝熱性	
アルミニウム、炭化ホウ素、ダイヤモンド	バッテリ、オーディオ用、モータ用			2	比強度	4	電気・電子的機能	10	温度応答変化	
石墨、炭化ケイ素、酸化カーボン	MHD発電陽極板、耐熱性板、遮熱用板			3	硬度			11	应力応答変化	
ファインセラミックス	アルミニウム、酸化ケイ素、酸化チタン酸鉄、ニオブ酸リチウム	多層構造基板、エレベーター、IC基板		4	耐振			12	電気化学	
セラミック	水晶、シリコン酸チタン酸鉄、ニオブ酸リチウム	着火素子、圧電素子		5	超弾性			1	電気エネルギー損失	
酸化物	マンガン、酸化鉄、酸化ハリウム	フェライト鉱石、磁気テープ、記憶素子		6	形状記憶			2	透磁率	
酸化ケイ素	アルミニウム、酸化ヒトリウム、酸化マグネシウム	ナトリウムランプ、高溫化ランプ		7	超塑性			3	角形B日燃性	
アルミニウム、アバタイト	光通信ファイバー、骨カメラ、光センサー			8	摩擦	5	磁気的機能	4	磁性流体	
ポリエチレン、ポリアミド	人工歯、人工骨			9	耐食			5	電気バブル	
高分子ウイスカ	各種構造材							6	磁気抵抗性	
ポリイミド、シリコン樹脂	スピーカーコーン部材					1	高温強非性	7	ホール効果	
ポリアセチレン	耐熱構造材料			2	熱的機能	3	蓄熱	1	ルミネッサンス	
高分子材料	ポリメチルメタクリル酸、ポリカーボネート	バッテリー、電池		4	発熱			2	レーザー発光	
光硬化性樹脂	光ファイバー、プラスチックレンズ			5	断熱			3	螢光	
液 品	印刷材料、フォトマスク			1	イオン交換			4	感光	
	ディスプレイ			2	ガス吸・脱離			5	フォトクロミック	
ポリエチレンテレフタレート、シリコンボリマー	人工歯根、人工歯器			3	液体遮光透過	6	光学的機能	6	透光	
耐熱セルロース系、芳香族ポリアミド系	気体分離膜、逆浸透膜			4	液体遮光透過			7	光遮光透過	
微細結合金、單結合金	航空宇宙機器			5	生体適合・機能			8	偏光	
相間性アルミニウム合金	航空機			6	生体適合・ガス透過性			9	光学的異方性	
ニッケル基合金、コバルト基合金	ガスター・ビン、熱ハイブ			7	抗血栓			10	2次電子放出	
ゴム・ゴム・ゴム・ゴム	接合部材、磁気学上列車			8	生体内分解			11	光導導	
鉄-チタン系、マグネシウム-ニッケル系	水素通路、水素自動車、飛行機			1	光遮換			12	磁気光学効果	
鉄系、ニッケル-チタン系、鋼-亜鉛系	パイプ接着手、人工筋肉、人工膝節			2	発電			1	耐放射線	耐熱性
高分子系	母材 2種構造・多孔開閉など			3	熱変換			2	耐放射線	耐熱性
金属材料	強化材 放電加工機、アーチ放電機、セラミック、繊維、ガラス、セメント			4	電気・電子的機能	7	放射線照射能	3	放射線シンセシス	
複合材料	母材 フラミング、繊維、ガラス、セメント、天然繊維	原子力制御機器、ガスター・ビン、宇宙航空材料		5	熱電子放熱			4	中性子減速	
セラミック系	セラミック強化材 かね、窒化ケイ素、炭化ケイ素	ガスター・ビン、内燃機関、ロケット、原子力制御機器		6	導電・耐アーチ性			5	中性子吸收	
複合材料	強化材 セラミック強化材、金属強化材			7	超伝導性			8	半導性	

表5.2.1 主なエンジニアリングセラミックスの特性

(常圧焼結品)

材 料 特 性	アルミナ (Al ₂ O ₃)	部分安定化 ジルコニア (ZrO ₂)	チッ化 ケイ素 (Si ₃ N ₄)	炭化ケイ素 (SiC)
密 度 (g/cm ³)	3.98	6.05	3.21	3.10
ビツカース硬度(室温) (Kg/mm ²)	1,900	1,300	1,500	2,800
曲げ強さ(室温, 3点) (Kg/mm ²)	35	120	85	56
ヤング率(室温) (×10 ⁴ Kg/mm ²)	4.0	2.1	2.8	4.2
破壊靭性 K _{IC} (室温) (MPa m ^{1/2})	3~5	8~9	6~7	4~5
熱膨張係数 (室温~1,000°C) (×10 ⁻⁶ /°C)	8.6	10.5	3.4	4.1
熱伝導率(室温) (cal/cm · sec · °C)	0.05	0.007	0.05	0.30
熱衝撃抵抗 (水中急冷 ΔT _c (°C))	200 ~ 250	350 ~ 400	800 ~ 900	300 ~ 350
主な特徴	耐摩耗性	高韧性 低熱伝導率 高強度	耐熱衝撃性	耐摩耗性 耐熱性 耐食性 高熱伝導率

表5.2.2 セラミックスの機能と応用関連表

機能大分類	酸化物セラミックス			非酸化物セラミックス		
	機能	材料	応用	機能	材料	応用
電磁気的機能	絶縁性	Al ₂ O ₃ , BeO	基板	絶縁性	C, SiC	基板
	誘電性	BaTiO	キャパシタ	導電性	SiC, MoSi ₂	発熱体
	圧電性	Pb(Zrx,Ti _{1-x})O ₃	発振子、着火素子、表面弹性波遡延素子	半導性	SiC	バリスタ、避電器
		ZnO, SiO ₂	発振子	電子放射性	LaB ₆	電子銃用熱陰極
機械的機能	磁性	Zn _{1-x} Mn _x Fe ₂ O ₄	記憶・演算素子、磁心			
	半導性	SnO ₂ , ZnO-Bi ₂ O ₃	ガスセンサ、バリスター、抵抗素子			
	イオン導電性	β -Al ₂ O ₃ , 安定化ZrO ₂	Na S電池、酸素センサ			
光学的機能	耐摩耗性	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂	研磨材、砥石、切削工具	耐摩耗性	B ₄ C, ダイヤモンド, c-BN	耐摩耗材、砥石、切削工具
	切削性			切削性	TiC, WC, TiN	エンジン、耐熱
				強度機能	Si ₃ N ₄ , SiC	耐食材料、工具材
				潤滑機能	サイアロン, C, MoSi ₂ , h-BN	固体潤滑材、離型材
熱的機能	蛍光性	Y ₂ O ₃ :Eu	蛍光体	透光性	AlON, N含有ガラス	光材
	透光性	Al ₂ O ₃	ナトリウムランプ	光反射性	TiN	集密材
	偏光性	PLZT	外とう管			
	導光性	SiO ₂ , 多成分系ガラス	光学偏光素子			
原子力関連機能	耐熱性	Al ₂ O ₃	耐熱構造材	耐熱性	SiC, Si ₃ N ₄ , h-BN, C	各種耐熱材
	断熱性	K ₂ O·nTiO ₂ , CaO·nSiO ₂ , ZrO ₂	断熱材	断熱性	SiC	各種断熱材
	伝熱性	BeO	基板	伝熱性	C, SiC	基板
生化学的機能	原子炉材	UO ₂	核燃料	原子炉材	UC	核燃料
		BeO	減速材		C, SiC	同上被覆材
	歯骨材	Al ₂ O ₃ , Ca ₅ (F, Cl)	人工歯骨	耐食性	C	減速材
	担体性	P ₂ O ₅ ·SiO ₂ , Al ₂ O ₃	触媒担体		B ₄ C	制御材

表5.2.3 構造材料としてのファインセラミックスの応用分野

機 器	品 名	材 料
工 具 類	切削工具 定盤, Vプロック, I型ストレッチ線引き 及び伸縮用ダイス, 穴ゲージ ガイドローラー	Al_2O_3 , Si_3N_4 , TiC Al_2O_3 PSZ PSZ
摺動部品	メカニカルシール, 伸線用ロール, 糸道, 製紙機用滑板 セラミックスクレーバー 釣具	Al_2O_3 , SiC Al_2O_3 , Al_2O_3 , Al_2O_3 , SiC
耐摩耗部品	粉碎機のボール及び部品 ノズル 軸受 ライナー	Al_2O_3 , PSZ Al_2O_3 , PSZ, Si_3N_4 Al_2O_3 , Si_3N_4 Al_2O_3
産業機械	シャフト 軸受部品 押出機, 射出成形機部品, ダイキャストマシン部品 粉末成形機用型	Al_2O_3 , Al_2O_3 , PSZ, Si_3N_4 Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiC Al_2O_3
科学機器	バルブ ポンプ 攪拌機, シャフト 噴射ノルズ	Al_2O_3 Al_2O_3 , PSZ, Si_3N_4 Al_2O_3 Al_2O_3
ガスタービン	動翼 静翼 シュラウド 燃焼器	Si_3N_4 , SiC Si_3N_4 , SiC Si_3N_4 , SiC Si_3N_4 , SiC
ディーゼルエンジン	ピストンヘッド シリンドーライナ バルブ ロッカーム 燃焼副室 ターボチャージャ グロウプラグ	Si_3N_4 Si_3N_4 Si_3N_4 Si_3N_4 Si_3N_4 Si_3N_4 Si_3N_4
製鋼用	熱交換器 スキットボタン 連鉄用部品	SiC Si_3N_4 Si_3N_4
高温機器	バーナ 高温ファン翼 耐熱治具	Si_3N_4 , SiC SiC Si_3N_4 , SiC
その他	はさみ, ナイフ チェンコンベア サーボモータ軸	PSZ, Al_2O_3 Al_2O_3 Al_2O_3

表5.2.4 代表的なセラミックスの特性

項目 材料(略号)	見かけ密度 g/cm ³	機械的性質		導電率 K _c ($\times 10^4$ S/m ²)	熱導率 kcal/(m ² ·s·°C) ($\times 1.26$ W/C)	熱伝導率 kcal/(m ² ·s·°C) ($\times 1.26$ W/C)	比熱 kcal/(kg·°C) ($\times 10^4$ kcal/kg·°C)	断熱性 E _T	特徴	用途	出典		
		引張強さ kgf/mm ²	曲げ強さ kgf/mm ²										
A l ₂ O ₃	2.4	—	6.5	—	—	—	—	—	—	—	京セラ㈱カタログ		
出 収 質 (抵抗度)	3.6	1350	32	(10)	2.7	(4.5)	7.5	14.0	—	(200)	同上		
出 収 質 (耐熱度)	3.9	1650	32	(20)	3.8	14.5	7.8	25.2	0.19	200	同上		
部分焼成ZrO ₂ (P S Z)	5.76	1400	90	50	35	1.9	27.1	10.3	2.16	0.13	2700	日本精工㈱カタログ	
常圧焼結 [Si ₃ N ₄]	3.1	1500	60	40	3.0	17.1	3.4	16.6	(0.2)	750~800	1900 (分解)	船井子鉄カタログ	
4.7ナトリウム [Na ₂ Si ₃ N ₄]	3.26	(1600)	95	112	3.2	18.1	2.4	25.2	0.3 (1000°C)	(800)	1900 (分解)	東芝㈱カタログ	
反応焼結 [Fe ₂ Si ₃ N ₄]	2.75	1000 (3.7)	29	31 (1200°C)	1.6	11.6	2.8	12.2	0.2	600	1900 (分解)	日本精工㈱カタログ	
常圧焼結 [Si ₃ C]	3.16	2800 (3.7)	45	50	4.2	7.8	4.3	79.2	0.21	(600)	2700 (分解)	Carbonundum カタログ	
SiC 4.7ナトリウム [Na ₂ SiC]	3.2	(3500)	86	88 (1200°C)	4.5	14.2	4.3	72.0	0.2	(600)	2700 (分解)	ガストーピン ローネカルシール カタログ	
反応焼結 [Fe ₂ SiC]	3.1	2500 ~3500	50	50	4.2	14.8	4.3	72.0	(0.2)	(500)	2700 (分解)	BFR Refel SiCカタログ	
S i a l o n	3.25	(1500)	88	70	2.9	25.6	3.4	(18.0)	0.15	900	1900 (分解)	日立製作所 カタログ	
SUS304 (2)	(7.93)	(160~ 180)	38	(40)	(15) (800°C)	(1.97)	630	(18.7) (20~482°C)	(16.2)	(0.13)	—	(1400)	—
Stainless Steel 丸なまし	(7.8)	(120~ 140)	55	38	(17) (700°C)	(2.18)	600	(11.2) (20~482°C)	(39.0)	—	(1500)	—	—
												Hulal Handbook	

備考1. 表中の値は平均的な値である。
 2. セラミックスの引張強さははく離法が確立されているため、文献などにより推定して示したもの。
 3. セラミックスの引張強さははく離法で測定しているが、曲げ強さで表わしているが、必ずしも JIS の曲线法に準拠しているとは限らないので注意する必要がある。
 なお、比較のため示した金属材料の値は、引張強さの値である。
 3. セラミックスのコストは、形、加工性、生産量によって大きく左右され、材料ごとの表示が困難のため省略した。

表5.2.5 潤滑性、加工性に勝れたマシナブルセラミックス

物性 Si ₃ N ₄	デンカボロントライ F						シリコンカーバイド						シリコンファインセラミックス						シリコン ガラス 複合 材質 (ガラス化 度)							
	グレード R	HC	S	VA-1	VA-2	標準	高強度 品	A ₂ N 複合(10)	A ₂ N ₄ 複合(10)	Si ₃ N ₄ 複合(10)	BN	KA	KC	KD	KS1-60	72-A	シリコン ガラス 複合 材質 (ガラス化 度)	シリコン ガラス 複合 材質 (ガラス化 度)	シリコン ガラス 複合 材質 (ガラス化 度)							
密度 ρ (g/cm ³)	3.1	1.9以上	1.7 以上	1.8	1.9以上	2.1以上	1.95	2.1	3.0	2.8	4.4	2.25	2.05	1.92以上	1.9以上	1.7 以上	2.35	2.5	2.55	2.64	1.92	4.5				
硬度 H _s %	HRC ₂ 91	30	19	37	45	53	20	50				50	40			100 以上	8.2	H _v 90	90	110						
気孔率 %	0.1	吸湿性 (%) 0.8-3.2	0.01- 0.08	0.05- 0.20	0.08	0.02- 0.05						10	20 吸湿性 度3.0	2.0	1.5	16.2	0	0	0	0						
曲げ強さ σ_b (kgf/mm ²)	50	4.0-8.2	2.4- 4.5	1.8- 6.9	3.0- 7.2	4.0-8.5	10	20	21.4	8.2	10.2	32.6	12.2	7	4	1.5	17以上	10	30	14	10 80-100					
引張強さ σ_u (kgf/mm ²)	13.8-17	3.3- 5.7	10- 41.2	13.1-20	15-30									7	24.2	35	110	50	30							
ヤング率 E (kgf/mm ²)	3.0× 10 ⁴														2.65×10 ⁴	6.7×10 ³	1.63× 10 ⁴	6.4× 10 ³	1.7× 10 ⁴	1.1× 10 ⁴						
衝撃強度 (kgf-mm) △ (C)	1.0-1.1	0.9- 1.0	1.3	1.4	1.8										2.17	1.7 (7741)	3.5 N/mm ²	3.5 N/mm ²		400						
熱伝導率 λ (cal/ cm ² ·s· °C)	0.03	0.04	0.136	0.019	0.02	0.015	0.07	0.048	0.24	0.04	0.01	0.015	0.043 (萬性 度)	0.05	0.06	0.09	0.07	0.004	0.24	0.005	0.06					
熱膨脹係数 α (10^{-6}) $\times 10^6$	3.7	6.4-9.2	-0.7	6.2	4.3	4.5						3.4	3.2	1.8	=0	2.0	1.4	9.0	4.4	9.7	5.0	8.5				
ItA Cr _(cal) (kg/mm ²)																	0.18	0.18	0.28	0.13						
固有性																	中性子 吸収率 EBS	240±5°C 210±5°C 吸収率 EBS								
成分		BN 92% B ₂ O ₃ (61.8%)	BN 90% CaO, SiO ₂ , B ₂ O ₃	BN 60% Al ₂ O ₃ , SiO ₂	BN 60% Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , B ₂ O ₃	BN 10% Si ₃ N ₄	BN 10% Si ₃ N ₄	BN 10% Si ₃ N ₄	BN 92% Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , B ₂ O ₃	BN 92% Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , B ₂ O ₃	BN 92% Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , B ₂ O ₃	BN 40% Si ₃ N ₄	BN 40% Si ₃ N ₄	BN 40% Si ₃ N ₄	SiO ₂ 40% Al ₂ O ₃ 17% CaO 0.17%	SiO ₂ 10% Al ₂ O ₃ 7% CaO 0.17%	SiO ₂ 10% Al ₂ O ₃ 4% CaO 0.17%	SiO ₂ 10% Al ₂ O ₃ 4% CaO 0.17%	SiO ₂ 10% Al ₂ O ₃ 4% CaO 0.17%	SiO ₂ 10% Al ₂ O ₃ 4% CaO 0.17%	SiO ₂ 10% Al ₂ O ₃ 4% CaO 0.17%	SiO ₂ 10% Al ₂ O ₃ 4% CaO 0.17%	SiO ₂ 10% Al ₂ O ₃ 4% CaO 0.17%	SiO ₂ 10% Al ₂ O ₃ 4% CaO 0.17%	SiO ₂ 10% Al ₂ O ₃ 4% CaO 0.17%	SiO ₂ 10% Al ₂ O ₃ 4% CaO 0.17%
備考		焼成工具 に付属																								
候補材 候補材 可否															○	○										

表5.2.6 セラミックスの各種環境下における耐食性

種類	酸及び酸性ガス	アルカリ液体及びガス	溶融金属
Al_2O_3	良い	やや良い	良い
MgO	悪い	良い	良い
BeO	可	悪い	良い
ZrO_2	やや良い	良い	良い
ThO_2	悪い	良い	良い
TiO_2	良い	悪い	可
Cr_2O_3	悪い	悪い	悪い
SnO_2	可	悪い	悪い
SiO_2	良い	悪い	可
SiC	良い	可	可
Si_3N_4	良い	可	良い
BN	可	良い	良い
B_4C	良い	可	-
TiC	悪い	悪い	-
TiN	可	可	-

表5.2.7 金属および非金属に対するセラミックスの耐食性

セラミックス 元 素	Si_3N_4	SiC	反応焼結 SiC	Al_2O_3	安定化 ZrO_2
L i	C400(Ar)	A815	C400(Ar)	C700	C400
N a	C500(Ar)	B815	C500(Ar)	A300, B600	B500
K				B M	B
C s		B1800		A V	B V
B e				A1600, B1800	A1800
M g	B750			B900	C 900
C a		B		B	B
S r				A1150(真空中)	B
B a				A1150(真空中)	B
B				B1300	
A l	A900	A M	B800(Ar)	A1000, B1500	A1000
G a				A1000	A300, B600
C	B1050	A > 2000		B1600	B1300
S i	A M	A M		A1450, B1800	A1450(He)
G e				A1100(真空中)	
S n	A300		A600(Ar)	A1830(N ₂)	
P b	A400	A M	A600(Ar)	A1100(N ₂)	A
P				A M	
A s				A M	
S b				A M	
B i		C1000	A600	A1400	A1000
記 号 : A 表面温度(℃)まで耐食性あり					
B " " である程度反応する					
C " " でかなり反応する					
M 溶融状態の元素で試験					
V 気体 " "					
() 内は実験雰囲気					

表5.2.8 金属および非金属に対するセラミックスの耐食性

セラミックス 元 素	Si_3N_4	SiC	反応焼結 SiC	Al_2O_3	安 定 化 ZrO_2
S		C > 1100		A	
Se				A	
Te				A	
Ti	B			B 1800	BM
V	B			A 1700	
Sr	B	C		A	A
Mn				A 1250	A
Fe	B 1450	B > 810		A 1850 (H_2-N_2)	A 1550 (H_2-N_2)
Co				A 1550 (H_2)	A 1550 (H_2)
Ni				A 1470 (H_2)	A 1470 (H_2)
Cu	C 1150	AM	A	A 1843 (H_2)	
Zn	A 550	AM	A 600	A	AM
Zr	B			B 1800	A 1800
Nb	B			A 1800	A 1800
Mo				A 1900	A 1800
Rh				A	AM
Ag	AM			AM	
Cd		AM			
Ta	B			A 1700	A 1600
W	B			A 1900	A 1600
Pt	B 1000	B 1000	C 1100 (空気中)	AM	AM
Au	AM				
Hg			A 20	A 300	A 300
U				A 1200	

記 号 : A 表面温度 (°C) まで耐食性あり
 B " " である程度反応する
 C " " でかなり反応する
 M 溶融状態の元素で試験
 V 気体 " "
 () 内は実験雰囲気

表5.2.9 溶融塩および低融点酸化物に対するセラミックスの耐食性

セラミックス 反応物質	反応機結 Si_3N_4	ホットプレス Si_3N_4	SiC	Al_2O_3	安定化 ZrO_2
酸性スラグ				A	A
塩基性スラグ	C900 (空気中)	C900 (空気中)		B	A
Na_2CO_3				A900	C900
NaNO_2	A350				
KNO_2					
NaNO_3	A 350				
KNO_3	A 400		A 400	A 400	
Cu_2S				A 1350 (H ₂)	
Na_2SO_4	C1000 (空気中)	A1000 (空気中)	C1000 (空気中)	A1000	A1000
K_2SO_4			C	A1140	A1140
KHSO_4	A 500		A 500	C 500	C 500
LiBO_2					
$\text{Na}_2\text{B}_1\text{O}_7$	A1000 (空気中)	B	B1000 (空気中)	C1000	C1000
NaVO_3		C 800 (空気中)	C 800 (空気中)	B 800	A 800
Na_2O_2	C 500	B	C750	B 500	C 500
PbO	C1000 (空気中)	C1000 (空気中)	C1000 (空気中)	B1000	A1000
PbO_2	C		C900		
V_2O_5	C 800 (空気中)	C 800 (空気中)	C 800 (空気中)	C 800	C 800

記号: A 表示温度 (C) まで耐食性あり
 B " " である程度反応する
 C " " でかなり反応する
 () 内は実験した雰囲気

表5.2.10 酸およびアルカリに対するセラミックスの耐食性

酸、アルカリ	濃度	温度(℃)	時間	反応焼結 Si ₃ N ₄	ホットプレス Si ₃ N ₄	ガラス結合 サイアロソ	反応焼結 SiC	A1 ₂ O ₃ (99.7%)	安定化 ZrO ₂
HCl	35%	沸騰	30分	A	A		A	A	
HCl	20%	"	3日		A	C7	A	A	C7
HNO ₃	70%	"	30分	A	A		A	A	
HNO ₃	35%	"	3日				A	A	
H ₂ SO ₄	98%	"	30分	A	A		A	A	
H ₂ SO ₄	10%	"	3日				A	A	
H ₃ PO ₄	90%	"	30分	A	B0.5		B0.3	B0.2	B
H ₃ PO ₄	9%	"	3日					A	
HF	60%	20	24時間	C	C		A	C	C
HF/HNO ₃	1:1	20	7日		C ₅		C26		
KOH溶液	10%	80	7日	A	A		C30	A	A
KOH溶液	10%	沸騰	3日		A	A			
溶融KOH	—	500	24時間	C	C		C	C12	B0.4
溶融NaOH	—	500	24時間	C	C		C	B0.8	
溶融Na ₂ CO ₃	—	900	24時間	C	C		C	B0.2	A

記号: A 耐食性あり
 B ある程度反応
 C かなり反応

(数字はおよその重量減(mg/cm²))

表5.2.11 ガスに対するセラミックスの耐食性

JAERI-M 92-092

ガス	セラミックス	Si ₃ N ₄	純SiC	反応焼結 SiC	A1zO ₃	安定化 ZrO ₂
真空	A900	A1700, C2150			A1700	
H ₂		A<1430, C>1430	A1000		A1700	C
C含有雰囲気					B2200	
N ₂	A1800	A1100, B1400		A1700		
O ₂		B1150		A	A	
ハロゲン					B	
A _r			A2000	A2320	A1700	
S含有雰囲気	A	C>1200		A	B	
空気	B1000	B>1150	A1000	A1700	A	
水蒸気	A800	B>1150	A1100	A1700	C1800	
NH ₃		A		A	C>1200	
HF				B		
H ₂ S	A1000			B		
HCl		A1200		A	A	
CO		B1300		A1700	A1400	
CO ₂		A	A1000	A1200	A1200	
SO ₂		A870	A1050	A	A	

記号：A 表示温度(°C)まで耐食性あり
 B “ “ “ “ である程度反応する
 C “ “ “ “ でかなり反応する

表5.2.12 エンジニアリングプラスティックの種類と特徴

種類	樹脂名	特徴	用途例
熱可塑性	ポリアミド (PA)	高じん性, 耐摩耗性	歯車, プロペラファン, ホース
	ポリアセタール (POM)	耐クリーブ性	板ばね, ロール, 歯車, ねじ類
	ポリカーボネート (PC)	透明, 耐衝撃性	各種カバー類, コンパクトディスク
	ポリブチレンテレフタレート (PBTP)	耐熱, 高剛性	エンジンカバー, パネル類
熱硬化性	ポリエチレンテレフタレート (PETP)	耐熱, 高剛性	ビデオテープ, 飲料容器
	聚成ポリフエニレンオキサイド (PPO)	易成形性	ファン, カバー類, ホイルチャップ
	ふっ素系樹脂 (PTFE, PCTFE等)	耐熱・柔軟性, 潤滑性	摺動部コーティング, 耐食ライニング
	ポリフエニレンサルファイド (PPSU)	耐熱, 刚性	気化器, 電気絶縁材(ロール)
塑性	ポリエーテルスルホン (PES)	透明, 耐クリープ	(エンジンオイルセッサ)
	ポリスルホン (PSF)	耐熱水性, 透明	医療器具
	ポリアリレート (PAR)	耐熱, 刚性	自動車用エンジン部品
	ポリエーテルエーテルケトン (PEEK)	耐疲労性, 耐熱性	(熱水ポンプ部品), (歯車)
熱硬化性	ポリアミドイミド (PAI)	耐熱性, 高剛性	(ピストンリング), (軸受)
	フェノール樹脂 (P)	高圧縮強度	気化器, 歯車, 配線用端子板
	エボキン樹脂 (EP)	接着性, 電気絶縁性	FRP用樹脂, 着色剤, 電気絶縁剤
	不飽和ポリエステル樹脂 (UP)	易成形性, 耐熱性	FRP用樹脂, ヘルメット, 浴槽
熱硬化性	ポリイミド (PI)	耐熱性, 高剛性	(ペアリング), (バルブ類)

表5.2.13 高分子系複合材料の構造指數としての材料メリット比較

材質 特性項目	比重	弾性率	引張強さ	比強度	剛性・座屈		
	(ρ g/cm^3)	(E kg/mm^2)	(σ_u kg/mm^2)	σ_u / ρ	柱の座屈 E/ρ	円筒座屈 $E^{1/2}/\rho$	板の座屈 $E^{1/3}/\rho$
FRP	1.6	1,700	25	15.5	1,064	26	7.5
GFRP (ガラスファイバージャンク)	2.0	7,000	140	70.0	3,500	42	9.6
CFRP (一方向強化)	1.5	13,000	150	100.0	8,666	76	15.7
Ti-Mn合金	4.5	10,500	100	22.4	2,330	23	4.9
普通ジュラルミン	2.8	7,000	45	16.1	2,500	30	6.9
超々ジュラルミン	2.8	7,000	64	19.3	2,500	30	6.9
軟鋼	7.9	21,000	42	5.31	2,650	18	3.5
Cr-Mo鋼	7.9	21,000	90	11.40	2,650	18	3.5
備考	出典：強化プラスチック協会誌 1,1 (1955)						

表5.2.14 各種エンジニアリングプラスチックの特性

材 料 特 性	PFT	PBT	ポリエチレン (PPO)	ポリアセタール (POM)	ポリカーボネート (PC)	ポリエチレン (PA)	ナイロン6 (PAI)	ポリアミド (PA)	ポリイミド (PI)	PPS	ABS 樹脂 耐中衝撃	PE高密度 ポリチレン
成形温度 ℃	244～ 300	260	236～333	194～243	257～ 361	244～ 292	350～384	367	347～ 389	222～ 292	167～333	
比重	—	1.31～ 1.38	1.06～1.10	1.42	1.2	1.12～ 1.14	1.41	1.43	1.34	1.03～ 1.06	0.94～0.96	
引張強さ kgf/mm ²	6.4	5.5	5.4～6.7	7.2	5.6～ 6.6	7.0～ 8.3	1.35	12.0	7.03	4.5～ 5.2	2.18～3.87	
伸び %	50～ 300	200 以上	50～60	65	100～ 130	200～ 300	2.5	10	3.76	5～25	2.0～1300	
引張弹性係数 kgf/mm ²	197	230	250～267	366	211～ 246	290	513	132	376	211～ 316	4.22～127	
ヤイツト衝撃値 kgf·cm/cm	6.0～ 10	4.2	1.7	7.6～12.5	65～ 98	5.4～ 16.3	5.4	3.81	1.63	5.4～ 13.1	2.72～100	
熱変形温度 ℃	67～ 103	60	118～147	124	147～ 158	86.4	300	150～ 156	154	(アセトガ) 117*126	61.1～72.3	
体積抵抗率 Ωcm	10 ¹³ ～ 10 ¹⁶	10 ¹⁶ ～ 10 ¹⁷	10 ¹⁵	2×10 ¹⁶	10 ¹⁶	8×10 ¹⁴	10 ¹⁶	10 ¹⁶	10 ¹⁶	2.7× 10 ¹⁶	10 ¹⁶ 以上	
吸水率 %	0.08～ 0.09	0.1	0.066	-0.00	0.15～ 0.18	1.3～ 1.9	0.28	0.3	0.2	0.2× 0.45	0.01 以下	
耐薬品性	—	—	な し	—	—	—	—	—	—	な し	—	
備 考	出典：山口章三郎 設計製図 Vol.19, No.114 (1984) p.296 山口章三郎編 「プラスチック材料選択のポイント」 日本規格協会 (1970)											

表5.2.15 高性能エンジニアリングプラスチックの性質

種類	PESF	PEEK	PEI	LCP
ガラス強化材料 (%)	0	30	0	30
比重	1.37	1.6	1.5	1.27
引張強さ (Kgf/cm ²)	860	1430	990	1760
引張伸び (%)	60	3	80	4
曲げ弾性率 (10 ⁴ Kgf/cm ²)	2.6	8.5	3.8	10
衝撃強さ (アイシングル)	9	8	9	10
硬度 (H _{RC})	—	88	98	104
熱変形温度 (18.6kgf/cm ²) (°C)	200	216	152	280 以上
商品名	ピレーナ 4100G	ピレーナ 4101G1.3	ピレーナ 450G	ピレーナ 450GL1.3 A950 A130
備考				

表5.2.16 エンジニアリングプラスチックスの特徴比較一覧表

特性項目	PA6	PA66	POM	PC	変性 PPE	PBT	GF-PET	PPS	PAR	PSF	PESF	PEEK	PEI	PAI
軽量性	○	○	△	○	◎	△	△	○	△	△	△	△	△	△
成形性	○	△	○	△	○	○	△	△	△	△	×	×	×	×
成形収縮率	○	○	○	○	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○
吸水性	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△
耐煮沸水性	—	△	○	○	○	×	×	○	○	○	○	○	○	○
低温物性	○	○	○	○	△	○	○	△	○	○	○	○	○	○
強靭性	◎	○	○	○	○	○	△	△	○	○	○	○	○	○
耐クリープ性	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
耐溶剤性	◎	◎	○	×	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○
耐候性	△	△	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
耐燃性	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
電気特性	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
耐摩耗性	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
容積コスト	◎	○	○	○	○	○	○	△	△	△	×	×	×	×
備考	記号説明 ◎:特にすぐれる、○:すぐれる、△:あまり良好でない、×:劣る													

表5.2.17 金属系複合材料の特性

繊維	Alumina ¹⁾	SiC ²⁾	Carbon ³⁾	Fiber FP ⁴⁾
F R M	A F RM	S F RM	C F RM	F F RM
比重 (g/cc)	3.3	2.5	1.7	3.9
引張強度 (Kg/mm ²)	160	250	250	220
弾性率 (t/mm ²)	25	18	23	39
繊維直径 (μm)	9	10	7	19
表面処理	なし	なし	有	有
比重 (g/cc)	2.9	2.6	2.3	3.3
引張強度 (Kg/mm ²)	90	90	80	65
弾性率 (t/mm ²)	13	10	12	22
曲げ強度 (Kg/mm ²)	110	120	105	105
圧縮強度 (Kg/mm ²)	210	—	—	—

1) : 住友化学工業㈱ 2) : 日本カーボン㈱ 3) : 東邦ベスロング㈱ 4) : デュポン

表5.2.18 各種セラミックコーティングの特徴とその応用例

項目	塗装	複合メッキ	溶射	C	V	D	P	V	D
方法	無機質ゾルなどを常温で塗布し、300°Cで硬化する。はうろこ状では、1200°Cに焼成して硬質被膜を形成する。	Ni塩等を含む次亜リン酸塩の液にSiC等の微粉を分散させ、無電解法により被膜を形成する。	セラミックス成分となる元素を～1500°Cでガス化し、基体に吹付け被膜を形成する。	セラミックス成分となる元素を～300°Cで溶融し、液滴を形成する。	セラミックス成分となる元素を、800°Cによってイオン化して基板上に凝縮硬化する。	セラミックス成分となる元素を、800°Cによってイオン化して基板上に凝縮硬化する。	セラミックス成分となる元素を、800°Cによってイオン化して基板上に凝縮硬化する。	セラミックス成分となる元素を、800°Cによってイオン化して基板上に凝縮硬化する。	セラミックス成分となる元素を、800°Cによってイオン化して基板上に凝縮硬化する。
被膜の種類	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , ZrO ₂ , TiO ₂ , SiC はうろこ等	Al ₂ O ₃ , SiC, BN	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , サーメット	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , TiO ₂ , TiC, TiN	Al ₂ O ₃ , SiC, Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃ , TiC, TiN	Al ₂ O ₃ , TiC, TiN 等	Al ₂ O ₃ , TiC, TiN	Al ₂ O ₃ , TiC, TiN
被膜の厚さ	0.1～数mm	50～200 μm	～500 μm	一般に20～100 μm	500 μm も可能	一般に数 10 μm 迄	一般に数 10 μm 迄	一般に数 10 μm 迄	一般に数 10 μm 迄
密着性	一般には低いが、特殊品では高いものあり。	良 好	やや良好	優れている	優れている	優れている	優れている	優れている	優れている
被膜密度	一般には低いが、特殊な処理をすると高くなるものあり。	良 好	良 好	優れている	優れている	優れている	優れている	優れている	優れている
利用特性	耐食性、耐熱性、断熱性	耐摩耗性	耐摩耗性	耐熱性、遮熱性、耐摩耗性	耐熱性、高硬度	耐食性、耐摩耗性	耐熱性、高硬度	耐熱性、耐食性、高硬度	耐熱性、耐食性、高硬度
応用例	建材、化学反応装置、熱交換器、タービンプロペラード、シエラウード、ポンプ部品、石油ストーム、屋根材など	各種シリコンダーロッド、ビストローリング、ロッド、静翼、産業機械用ローラー、押出し機械部品、シート、電気絶縁被膜、シート及びミサイルの金型、シャフトなど	ジェット機の燃焼器及び静翼、産業機械用ローラー、静翼、産業機械用ローラー、シート、電気絶縁被膜、シート及びミサイルの燃焼室、シリンダー、カバーなど	切削工具、化学反応部品、ダイス、自動車用部品、核融合炉、瓦等、リチウム、核燃料、その他機械部品	光学機器、切削工具、装飾、滑動部材、押出し機、シリンドラー、ボルト等	光学会、自動車用部品、核燃料、その他機械部品	光学会、自動車用部品、核燃料、その他機械部品	光学会、自動車用部品、核燃料、その他機械部品	光学会、自動車用部品、核燃料、その他機械部品

表5.3.1 高速回転体の構成要素への新素材適用とその効果

表5.4.1 機械構造用ファインセラミックス部材の実用化見通し及び
ファインセラミックス関係重要技術の工業化見通し

年 代	(短 期)	(中 期)	(長 期)
	1985年	1990年	
実用化特性・機能	硬質耐摩耗性 耐食性 耐侵食性 高温強度性		
実用化される具体的部材名(例)	<ul style="list-style-type: none"> ・熱交換器 (1000°Cまでの清浄ガス) ・メカニカルシール ・各種ノズル ・ペアリング ・研削材 ・粉碎・混合装置部材 ・切削工具・試験検査機器治具 ・ガス点火器 ・バルブ ・線引用ダイス ・押出用ダイス ・マンドレル ・アルミダイキャストマシン部材 	<ul style="list-style-type: none"> ・熱交換器 (1200°Cまでの腐食性ガス) ・ターボチャージャー ・無冷却ディーゼルエンジン部品 ・ピストンライナー、ピストンキャップ、バルブシート 排気管コーティング ヘッドプレート 副燃焼室 ・ターピン静的部品 燃焼器 (シュラウド) ・ターピンロータ ・スラリーポンプ ・チューブバーナー ・ヒーター ・地熱井掘削装置部材 	<ul style="list-style-type: none"> ・最小摩擦・断熱ディーゼルエンジン ・ピストン ペアリング 燃焼率 排気システム ・ガスターピンエンジン ・ステーター ローター 復熱器 ・航空機推進エンジン ・MHD発電部材 ・核融合炉第1炉壁 ・スターリングエンジン ・鉄ダイカストマシン部材
工業化される具体的技術名(例)	(略)	<ul style="list-style-type: none"> ・高純度、易焼結性原料粉末製造技術 ・低コストHIP技術 ・セラミックスの精密切削加工技術 ・非破壊検査技術の確立 ・セラミックスの接合技術 ・セラミックスファイバー製造技術 ・セラミックスファイバー使用の複合材料製造技術 ・セラミックス複合材料加工技術 	<ul style="list-style-type: none"> ・高密度焼結体の無加圧焼結技術 ・材料寿命予測法の確立 ・セラミックス設計手法の確立 ・高韌性セラミックス製造技術 ・セラミックス複合材料接合技術 ・高温度強度セラミックス製造技術 ・高温高耐酸化性セラミックス製造技術

表5.4.2 次世代産業基盤技術「ファインセラミックス」の研究開発目標値

分野	項目	標準値
高強度材料	(1) 大気中、1,200°C以上の高温環境下に1,000時間置いた後、同環境において、次の性能値を満足すること。 ① 信頼性(ワイルク係数) $m : 20$ 以上 ② 強度(平均引張強度) $\sigma : 30\text{kgf/mm}^2$ 以上	
	(2) 大気中、1,200°C以上の高温環境下、1,000時間のクリープ試験において、次の性能値を満足すること。 耐久性(クリープ強度) $\sigma : 10\text{kgf/mm}^2$ 以上	
高耐食性材料	大気中、1,200°C以上の高温環境下、1,000時間置いた後、同環境下において、次の性能値を満足すること。 ① 信頼性(ワイルク係数) $m : 20$ 以上 ② 対腐食性(酸化增量) 1mg/cm^2 ③ 強度(平均引張強度) $\sigma : 20\text{kgf/mm}^2$ 以上	
高耐摩耗材	(1) 大気中、800°Cで1,000時間置いた後、同環境下において、次の性能値を満足すること。 ① 信頼性(ワイルク係数) $m : 22$ 以上 ② 強度(平均引張強度) $\sigma : 50\text{kgf/mm}^2$ 以上	
	(2) 以下の項目は、常温で試験し、次の性能値を満足すること。 ① 耐摩耗性(比摩耗量) $10^{-6}\text{mm}^3/\text{kg} \cdot \text{mm}$ 以下 ② 精密性(表面平滑度) $R_{\text{max}} : 2\mu\text{m}$ 以下	

表5.4.3 応用分野と要求特性（エネルギー関係）

応用分野	部品等	要求機能・特性
高温ガス炉	熱交換器および断熱材	入口温度 1,000°C ヘリウムガス中のH ₂ , H ₂ O, COなどに対する耐食性
核融合発電	融合炉真空第一壁	1,000°C~1,500°C 耐熱衝撃性, 耐スパッタリング性, 高熱伝導率
地熱発電 人工熱水系発電 バイナリーサイクル 地熱発電	掘削装置および熱交換器, 低圧タービン	300°C~400°C H ₂ S, H ₂ SO ₄ などに対する耐食性
MHD複合サイクル発電	発電チャンネル絶縁壁 電極, 热交換器	1,000°C~2,000°C カリウムガスに対する耐食性
ガスタービン複合サイクル発電	高効率ガスタービン	最高1,500°C Na, SO _x , H ₂ Sなどのガスに対する耐食性
高速増殖炉	炉心, 热交換器	500°C~600°C ナトリウムに対する耐食性
太陽熱発電	太陽炉	約3,000°C
大型波力発電 (空気タービン式)	空気タービン	耐食, 耐摩耗性
燃料電池発電 (高温固体電解質型)	多孔質基体管	約1,000°C固体電解質
石炭の高カロリーガス化	メタン合成装置用耐熱材料	約1,400°C以上
使用済燃料再処理	フィルタ	プルトニウムに対する耐食性

出所：ファインセラミックス協会「ファインセラミックスの標準化に関する調査研究報告書」

表5.4.4 先端複合材の発展の過程

年代	第1世代 (GFRP) →			→ 第2世代 (BFRP) →			→ 第3世代 (FRM) →		
	1940	1950	1960	1970	1980	1990			
FRP	GFRP								
	BFRP								
	CFRP								
	KFRP		●						
	SFRP			●					
	AFRP			●					
FRM	BFRM								
	SFRM								
	AFRM								
繊維	A : アルミナ	B : ボロシリコーン	C : カーボン	G : ガラス					
	S : シリコンカーバイド	T : ケブラー							
マトリックス	プラスチック	エポキシ, ポリエスチル, フェノール,	ポリイミド,	ポリサルホン					
	金属	アルミニウム, マグネシウム, 鋼, チタン							

表5.4.5 各種接合方法

	接 合 方 法	接 合 対 象
固相 - 気相系	<ul style="list-style-type: none"> ○蒸着法 ○イオンプレーティング法 ○スパッタ法 ○CVD法 	<ul style="list-style-type: none"> { セラミックス - 金属 セラミックス - セラミックス}
固相 - 液相系	<ul style="list-style-type: none"> ○めっき法 ○有機接着剤法 <ul style="list-style-type: none"> (1) エポキシ系接着剤 (2) 酸性ビニル系接着剤 (3) その他の ○無機接着剤法(狭義の無機接着剤) <ul style="list-style-type: none"> (1) ケイ酸アルカリ系接着剤 (2) リン酸塩系接着剤 (3) その他の ○酸化物ソルダー法 <ul style="list-style-type: none"> (1) 非結晶性ソルダー (2) 結晶性ソルダー ○金属ソルダー法 <ul style="list-style-type: none"> (1) インジウムおよびインジウム合金 (2) アルミニウム (3) Pb-Sn-Zn-Sb系合金 (4) Ti-Ni, Ti-Cu, Zr-Niなど:活性金属法 (5) TiH₂-Ni, TiH₂-Cu, ZrH₂-Niなど:水素化合物法 ○高融点金属法 <ul style="list-style-type: none"> (1) Mo-Mn法 (2) Mo法 (3) その他の ○硝化銅と炭酸銀を使用する方法 ○還元法 ○直接接触させ接合する方法 <ul style="list-style-type: none"> (1) 加熱炉およびバーナー加熱などにより接合する方法 (2) 溶射 	<ul style="list-style-type: none"> セラミックス - 金属 { セラミックス - 金属 セラミックス - 有機材料 セラミックス - セラミックス} { セラミックス - セラミックス セラミックス - 金属}
固相 - 固相系	<ul style="list-style-type: none"> ○直流電圧印加法 ○圧着法 ○高溫加熱法 <ul style="list-style-type: none"> (1) 粉末成形後接触させ焼結・接合する方法 (2) 直接接触させ接合する方法 	<ul style="list-style-type: none"> セラミックス - 金属 { セラミックス - 金属 セラミックス - セラミックス セラミックス - 金属} { セラミックス - セラミックス セラミックス - 金属}

表5.4.6 セラミックス／金属接合体の常温接合強さ

セラミックス	金属	接合方法	接合条件	接合強さ
Al_2O_3	Pt	S	(1973K, 36ks, 1.96MPa)	(B220MPa)
	Fe	H	(1983K, 1.8ks, 100-300MPa)	(Te76MPa)
	Cu	B	(Cu _x Ti _{1-x}) (1373K, 3.6ks)	(Sh138MPa)
	Al (A1050)	M	{Al-4% Cu} (1373K, 3.6ks) + {BA4004} (883K, 180s)	(Sh75MPa)
	Nb	S	(1873K, 3.6ks, 8.8 MPa)	(Te125MPa)
	Ti SUS316L	S	(1173K, 3.6ks, 3.1 MPa + 820K, 7.2ks) (Ti + Mo) (1273K, 10.8ks, 9.4 MPa)	(Te13MPa) (Te47MPa)
	Kovar SUS410S	B*	{Cu + Cu ₂ O + Ag - Cu-Ti} (1113K, 600s) (Cu + Cu ₂ O + Ag - Cu-Ti) (1113K, 600s)	(Sh53MPa) (Sh65MPa)
	SUS321	S	(Ti-C折出処理後, 1200K, 3.6ks, 7.4 MPa)	(Te22MPa)
ZrO_2	Ni	S	(1173K, 900s, 30MPa, in Air)	(Sh90MPa)
	SUS405	S	{Ti} (1273K, 900s, 100MPa)	(FB260MPa)
	Al-Mg (A5052) Al (A1050)	S	(773K, 1.2ks, 4.9 MPa) (773K, 7.2ks, 0.98 MPa)	(Te59MPa) (Te39MPa)
MgO	Ni	S	(1673K, 900s, in Air) (+1473-1673K, 7.2-144ks)	(TB34MPa)
	Al-Mg (A5052)	S	(823K, 1.2ks, 0.98 MPa)	(Te18MPa)
	Cu	M	{Ag ₂ CO ₃ + Ba ₂ } (1223K)	(Te35MPa)
Si_3N_4	Invar, Super Invar Kovar, Cu, Fe, SUS304	B	(50Ti-50Cu) (1273K, 300s)	(Sh98MPa) (Sh196MPa) (Sh39MPa) (Sh20MPa) (Sh137Pa) (Sh88MPa)
	SCM435	B*	{(Al-10%Si)-(Al)-(Al-10%Si)-CLAD} <Kovar (t=0.1-5.0mm)> (883K, 1.8ks, 9.8MPa)	(FB90MPa (0.1mm)) (FB150MPa (0.5mm)) (FB180MPa (1.5mm)) (FB200MPa (3.0mm)) (FB200MPa (5.0mm))
	Kovar	B*	{(Al-10%Si)-(Al)-(Al-10%Si)-CLAD} (883K, 1.8ks, 9.8MPa)	(FB170MPa)
	SUS304	M*	Cr子偏析 (1273K, 9-90ks, vacuum) (Al) (873K, 0.9ks, in Air)	(Te66.9MPa) (Te229MPa)
	Fe-45%Ni	S	{SiC powder} (1473K, 0.6ks, 3MPa) (SiC powder + Ni) (1523K, 0.3ks, 0.3MPa)	(Te94MPa) (Te4MPa)
	Al	S	摩擦圧接 (2600rpm, 2-60s, 2-40MPa)	(Te172MPa)
	Steel (S45C)	B*	{2.23Ti-Ag-Cu-} <Cu (t=0.1-1.0mm)> (1103K, 300s)	(FB320MPa (0.1mm)) (FB330MPa (0.2mm)) (FB280MPa (1.3mm)) (FB220MPa (3.5mm)) (FB200MPa (0.7mm)) (FB150MPa (1.0mm))
	Mo	M*	Metallizing: {Ni-20%Cr} (1573K, 720s) Bonding: {Ag-Cu} (1123K, 300s)	(Sh103MPa)
SiC	Nimonic80A	S	{Ni-20%Cr} (1073-1273K, 7.2ks, 54MPa in vacuum)	(Te163MPa)
	Cu	B	(Cu _x Ti _{1-x}) (1273K, 1.8ks)	(Sh64MPa)
	SUS316	B	RB: {59Ag-23Cu-18Ti} (1223K, 300s) PLS: {70.9Ag-27.5Cu-1.5Ti} (1223K, 300s)	(Sh45MPa) (Sh65MPa)

S: 固相接合
 B: ろう付け
 M: メタライジング
 H: HIP、その埋漬結
 () : インサート金属
 < > : 中間層
 () : 接合条件
 () : 接合強さ
 FB: 引張強さ
 Sh: せん断強さ
 B: 曲げ強さ
 TR: 3点曲げ強さ
 FB: 4点曲げ強さ
 : ソフトメタル法

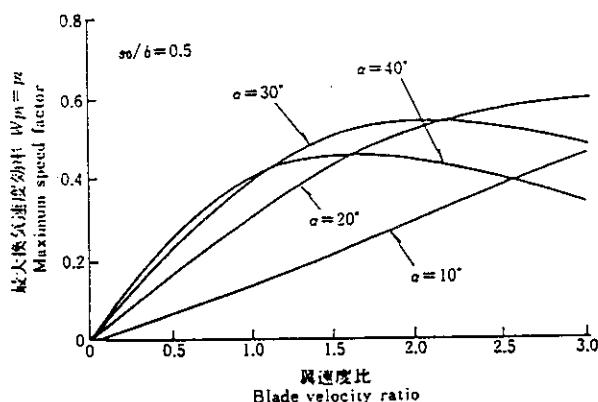


図4.3.1 最大排気速度効率

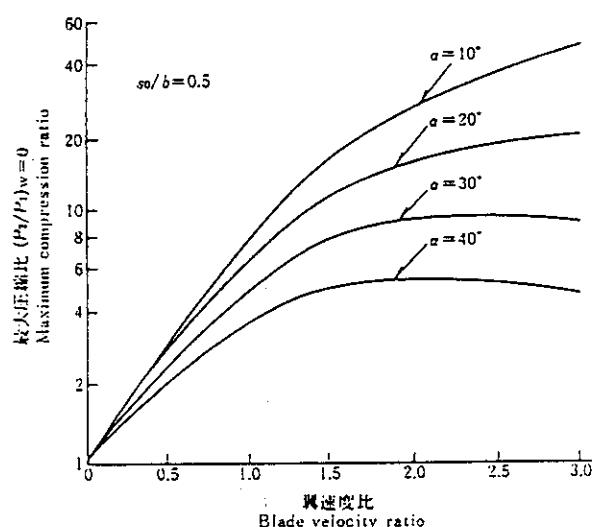
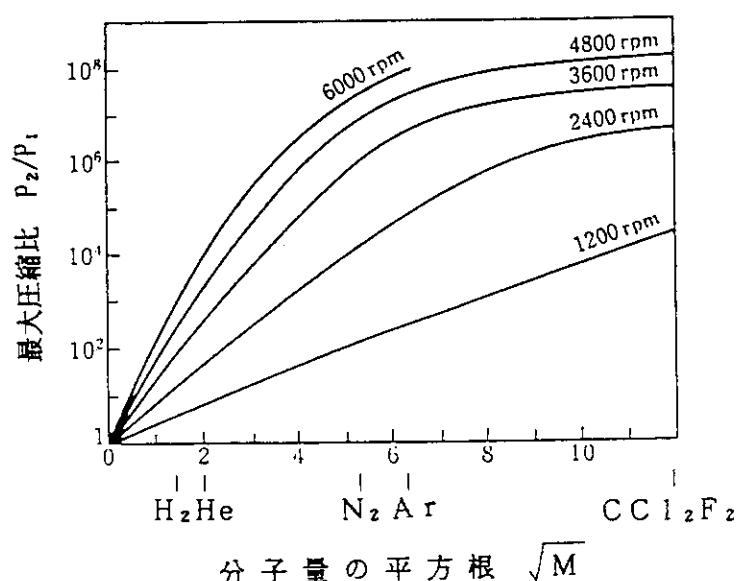


図4.3.2 最大圧縮比

図4.3.3 ターボ分子ポンプの最大圧縮比の気体の種類への依存性
(パラメータは回転翼の回転数)

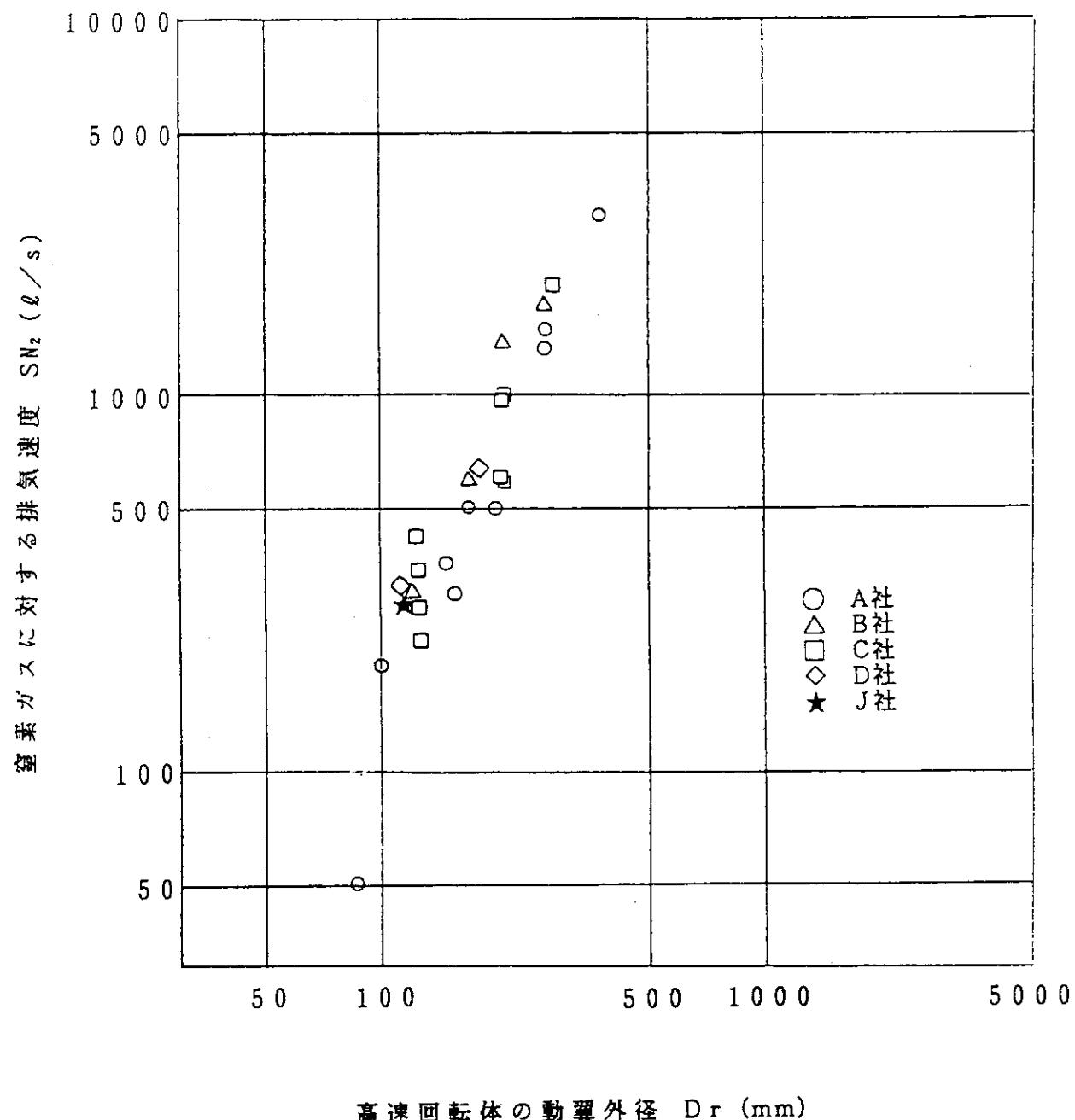
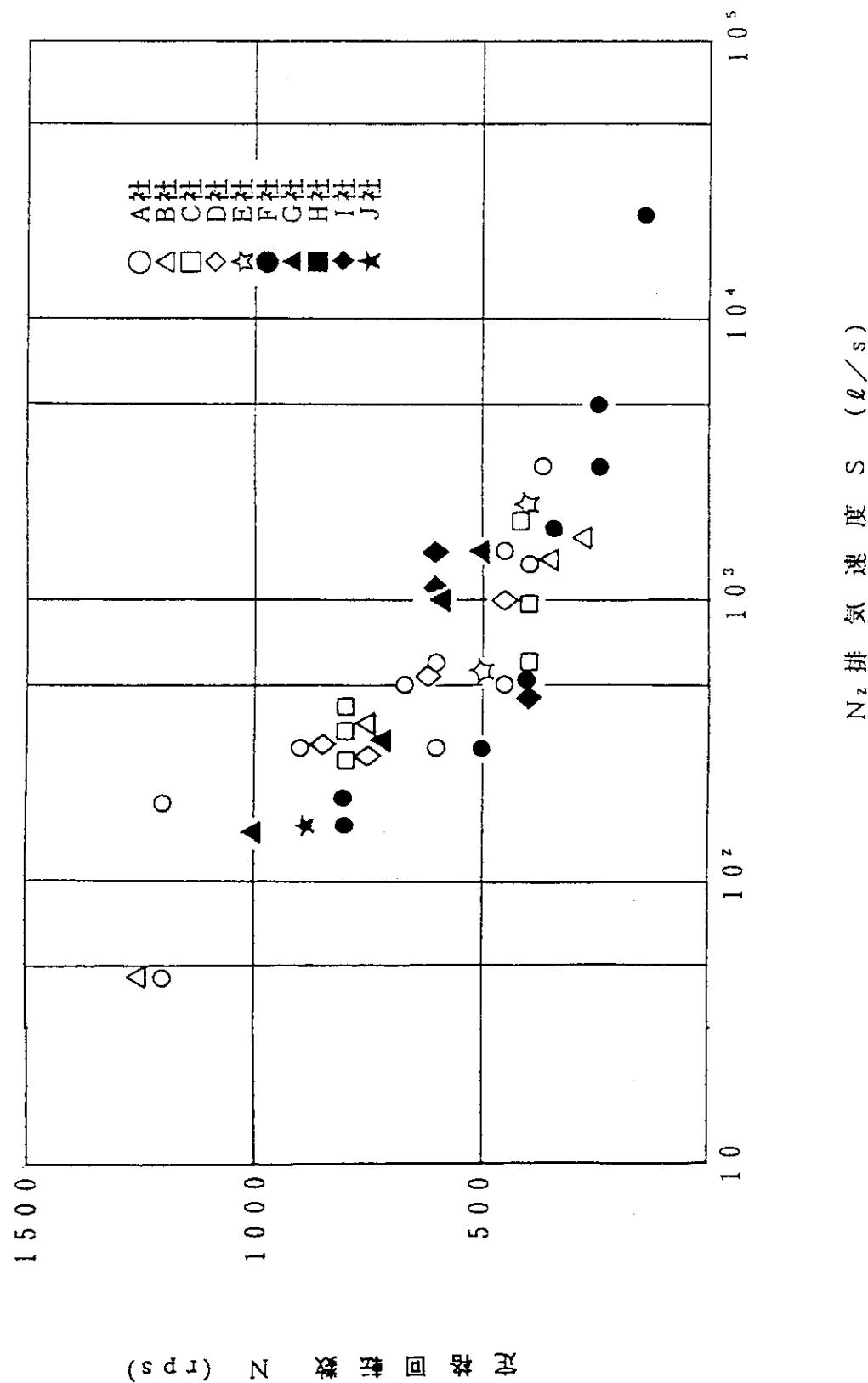


図4.3.4 従来金属材料を用いた場合の高速回転体の動翼外径と排気速度の関係

図4.3.5 従来金属材料における N_2 排気速度と定格回転数の関係

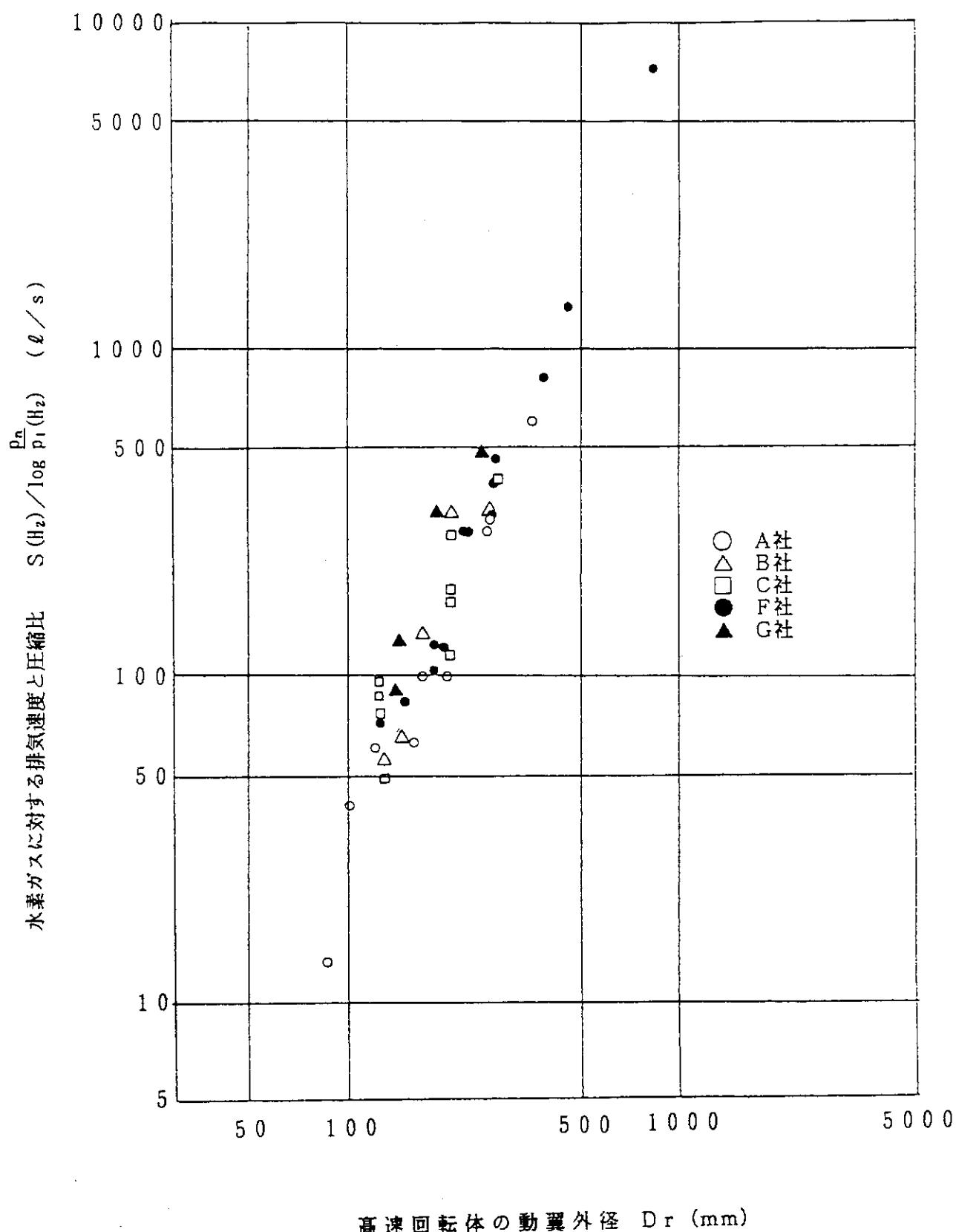


図4.3.6 従来金属材料を用いた場合の高速回転体の動翼外径と排気速度／圧縮比の関係

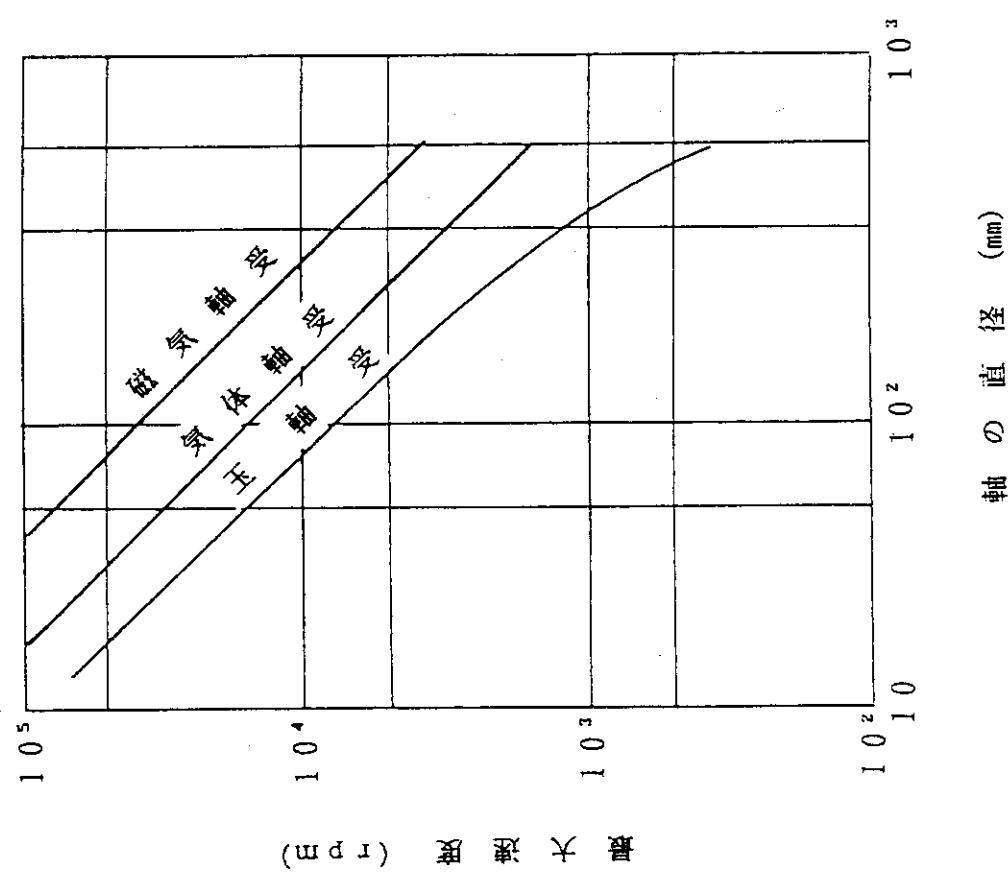


図4.3.7 軸の直径と最大速度

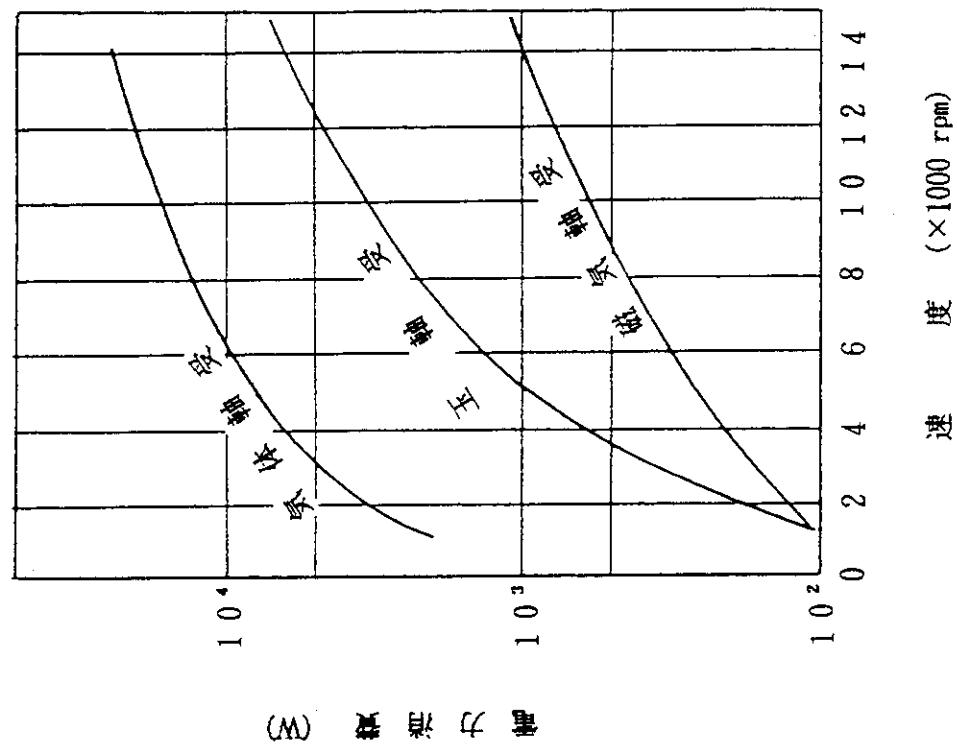


図4.3.8 回転速度と電力消費

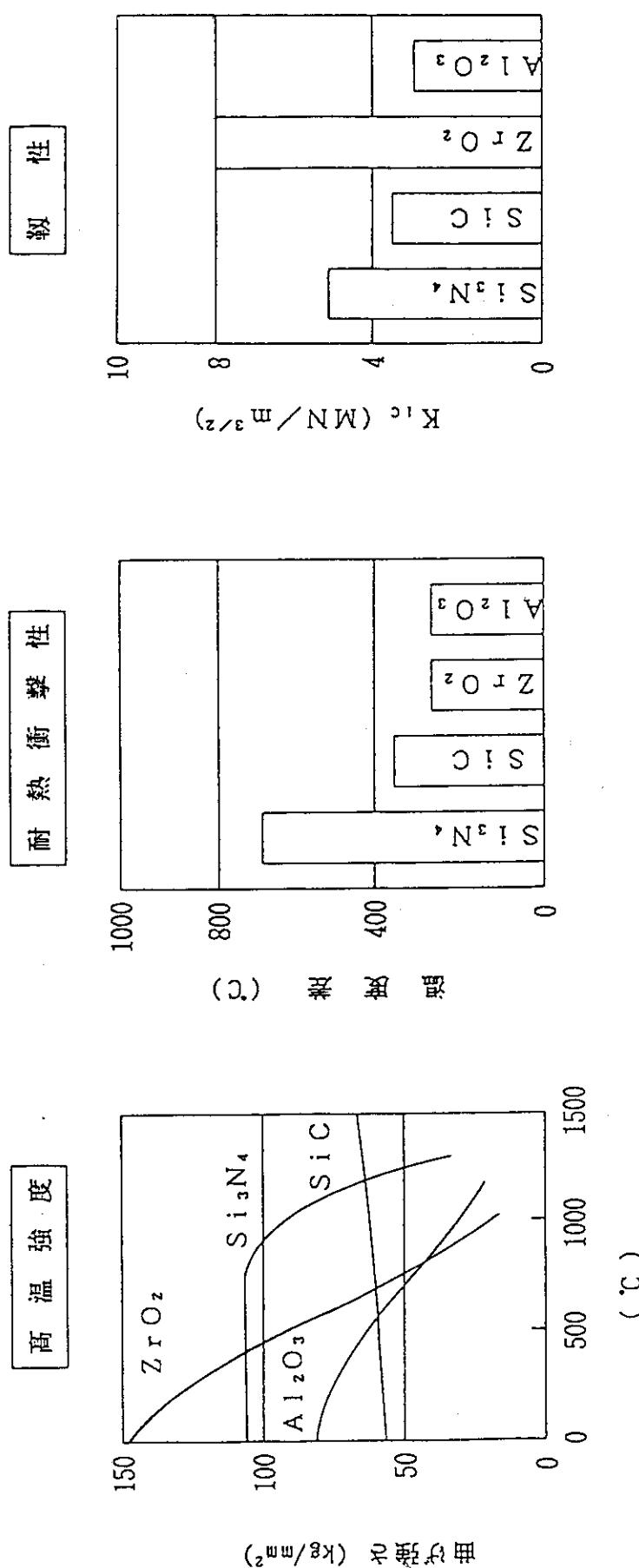


図5.2.1 構造用ファインセラミックスの材料特性

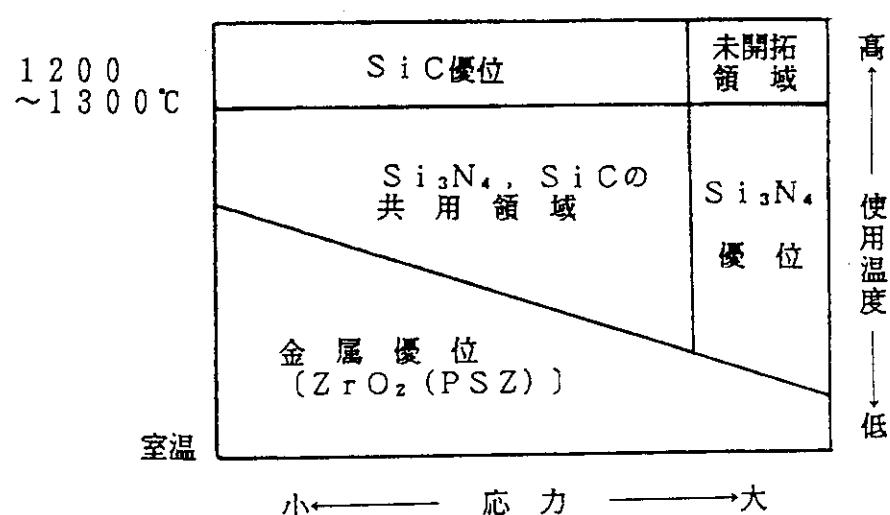


図5.2.2 ファインセラミックスの使用領域

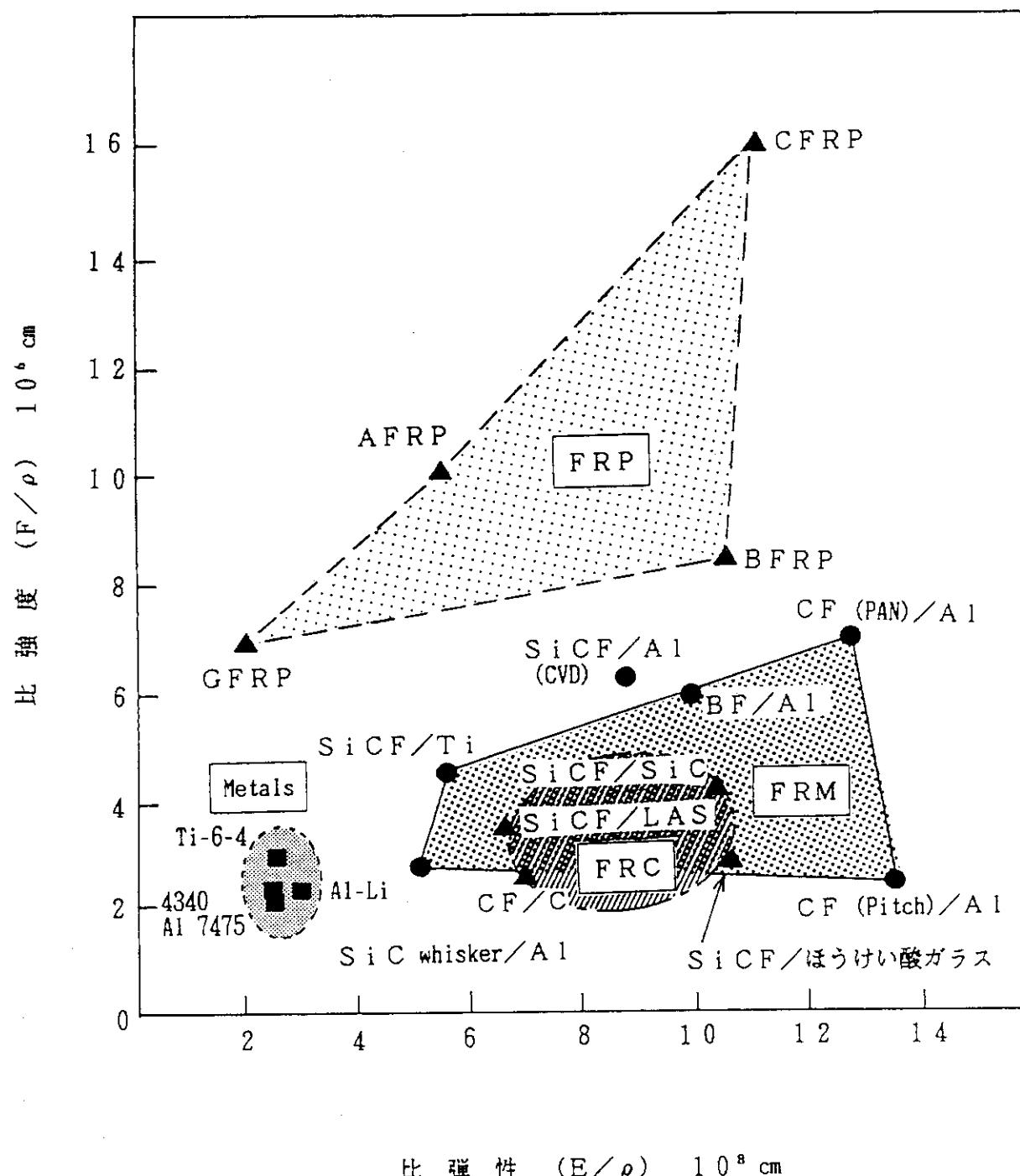


図5.2.3 複合材料の比強度と比弾性

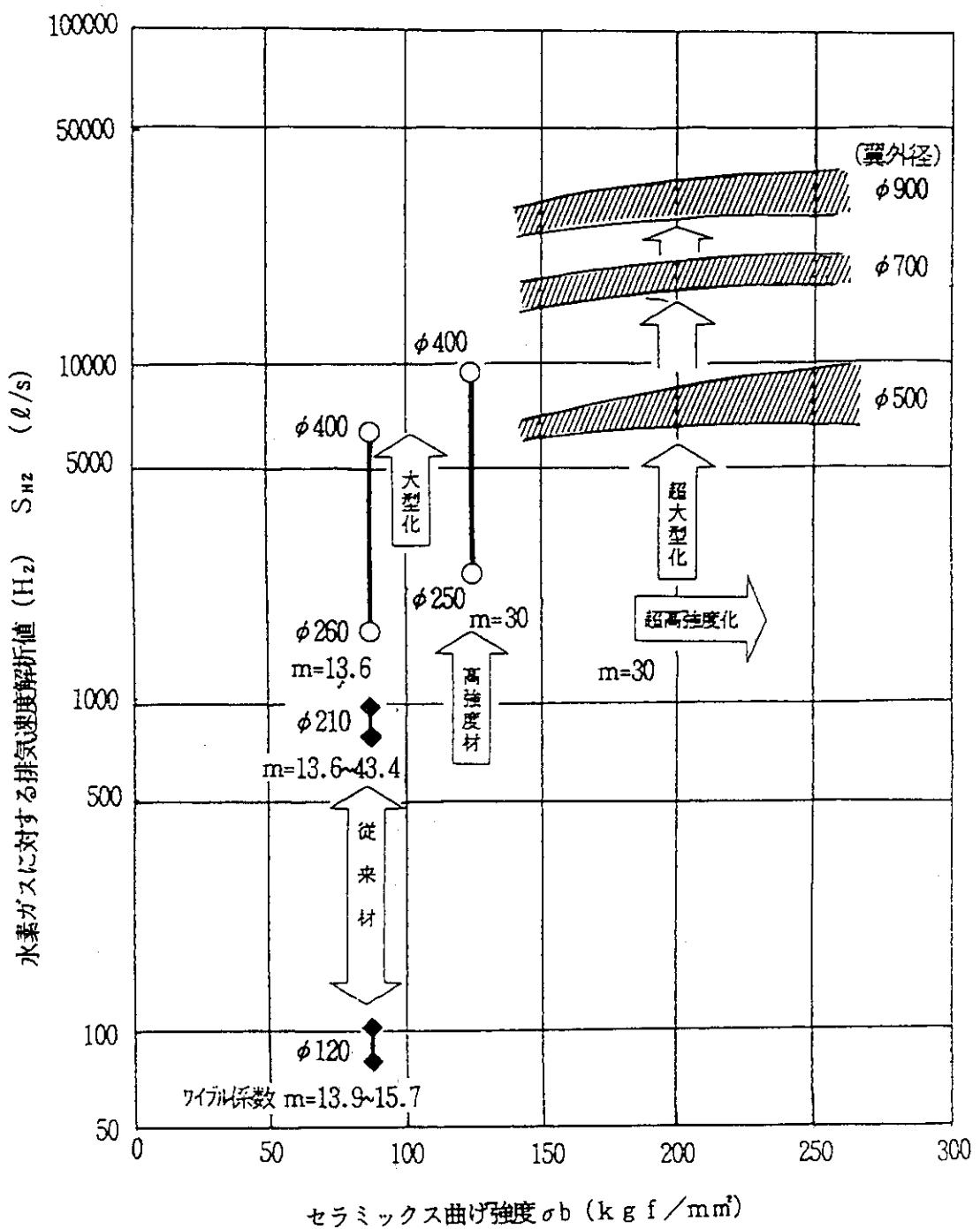


図5.4.1 セラミックス強度特性と高速回転体の形状及び排気速度の関係

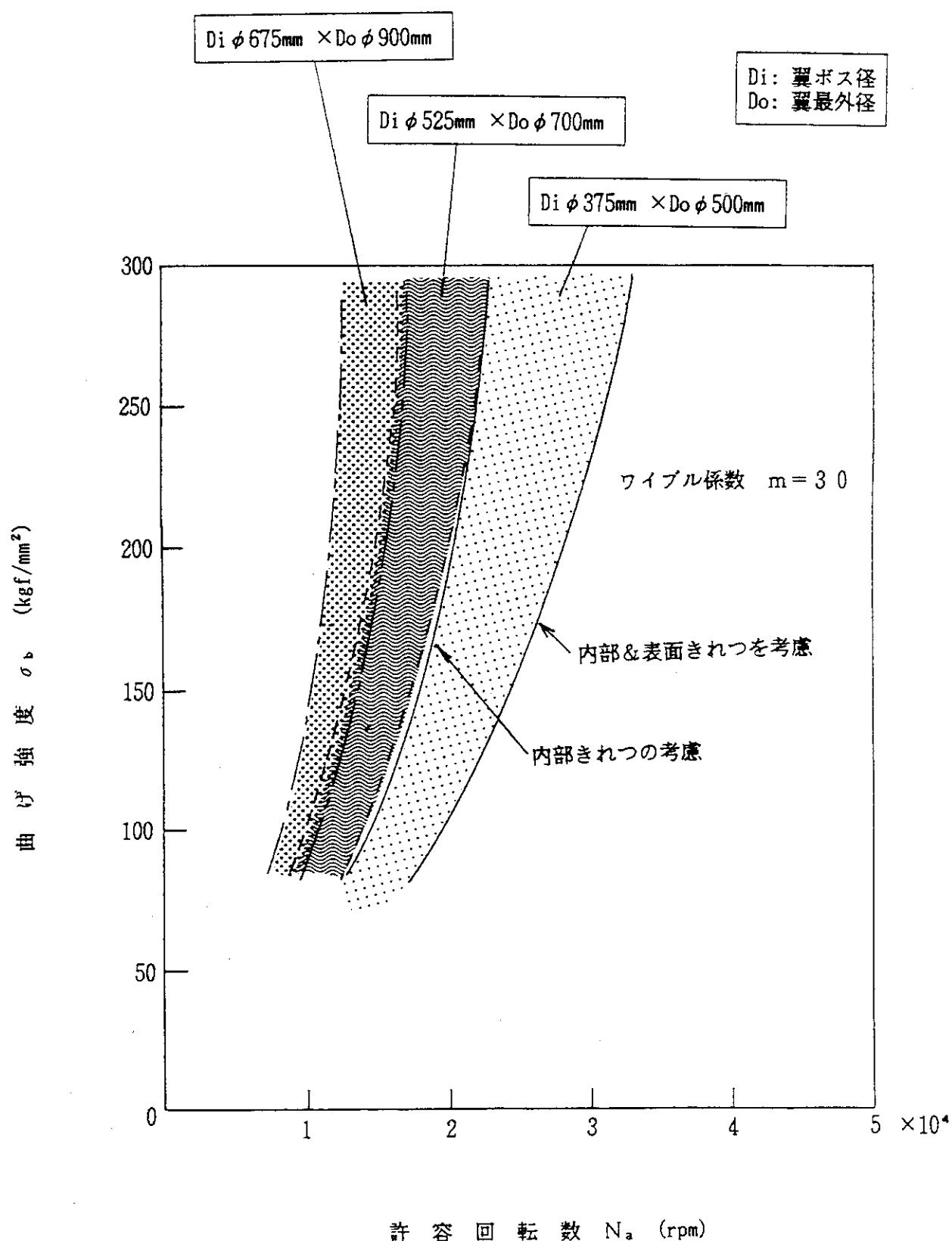


図5.4.2 超大型化した場合のセラミックス材料曲げ強度と許容回転数の関係

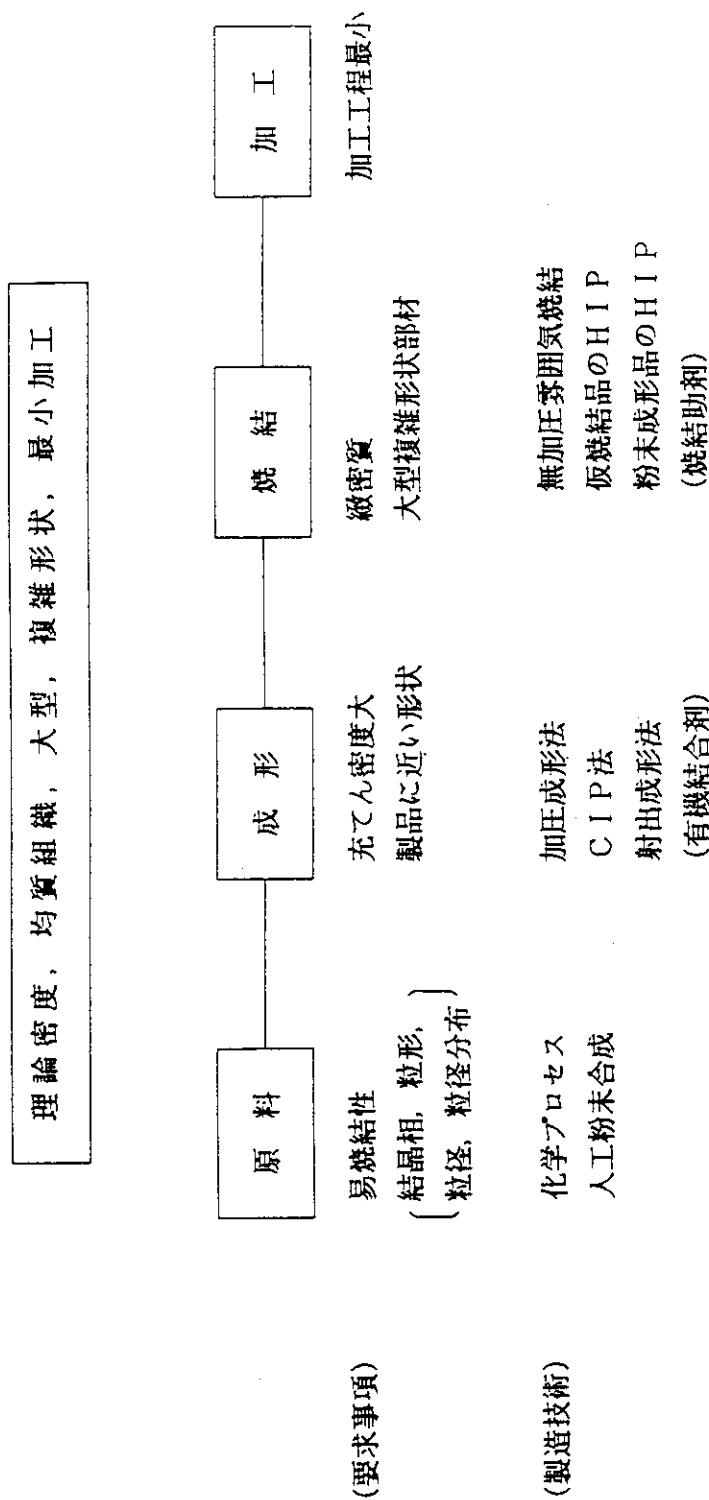


図5.4.3 セラミックス材料製造工程と各工程の要求事項と製造技術の一例

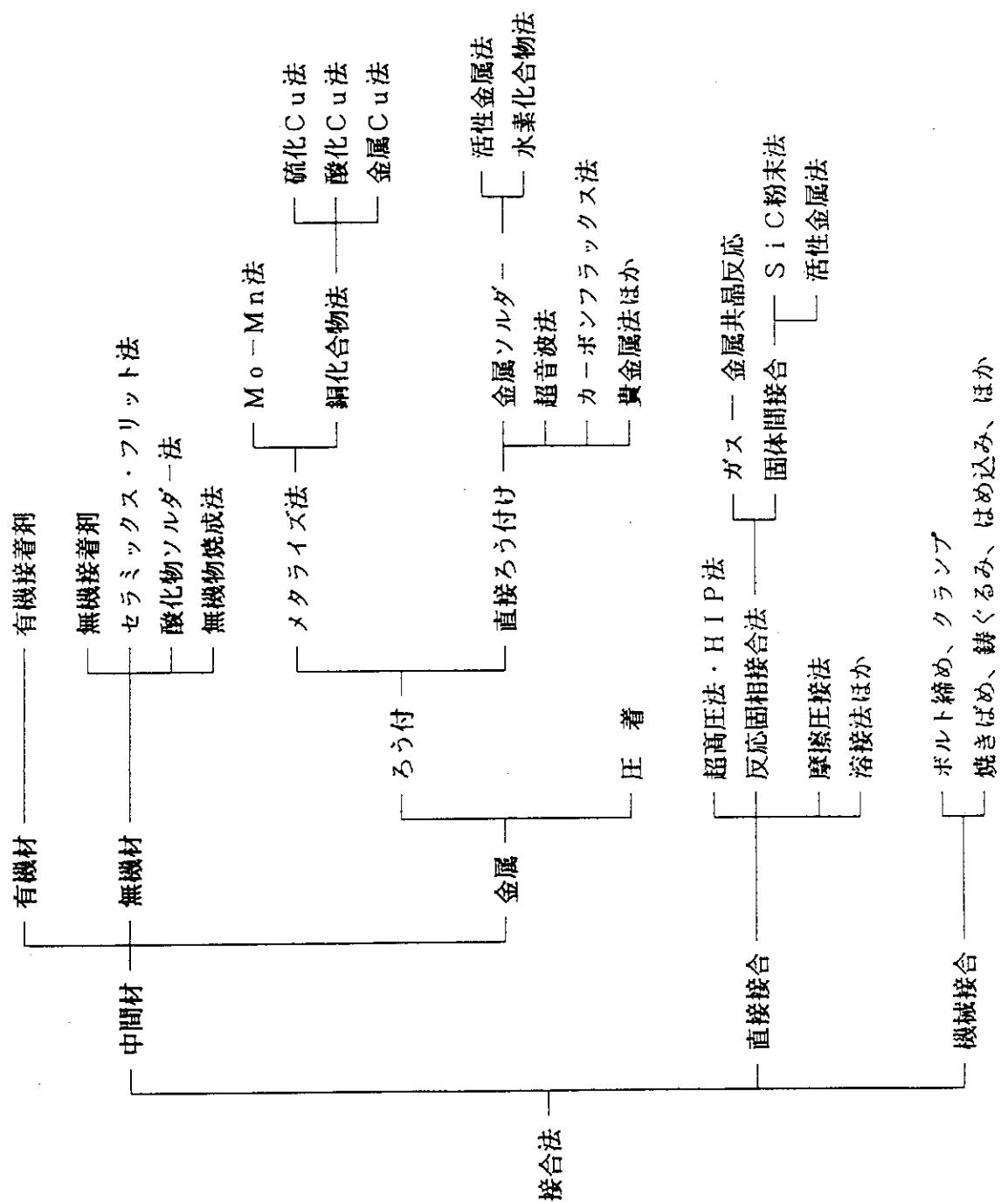


図5.4.4 セラミックス部品の接合方法の分類

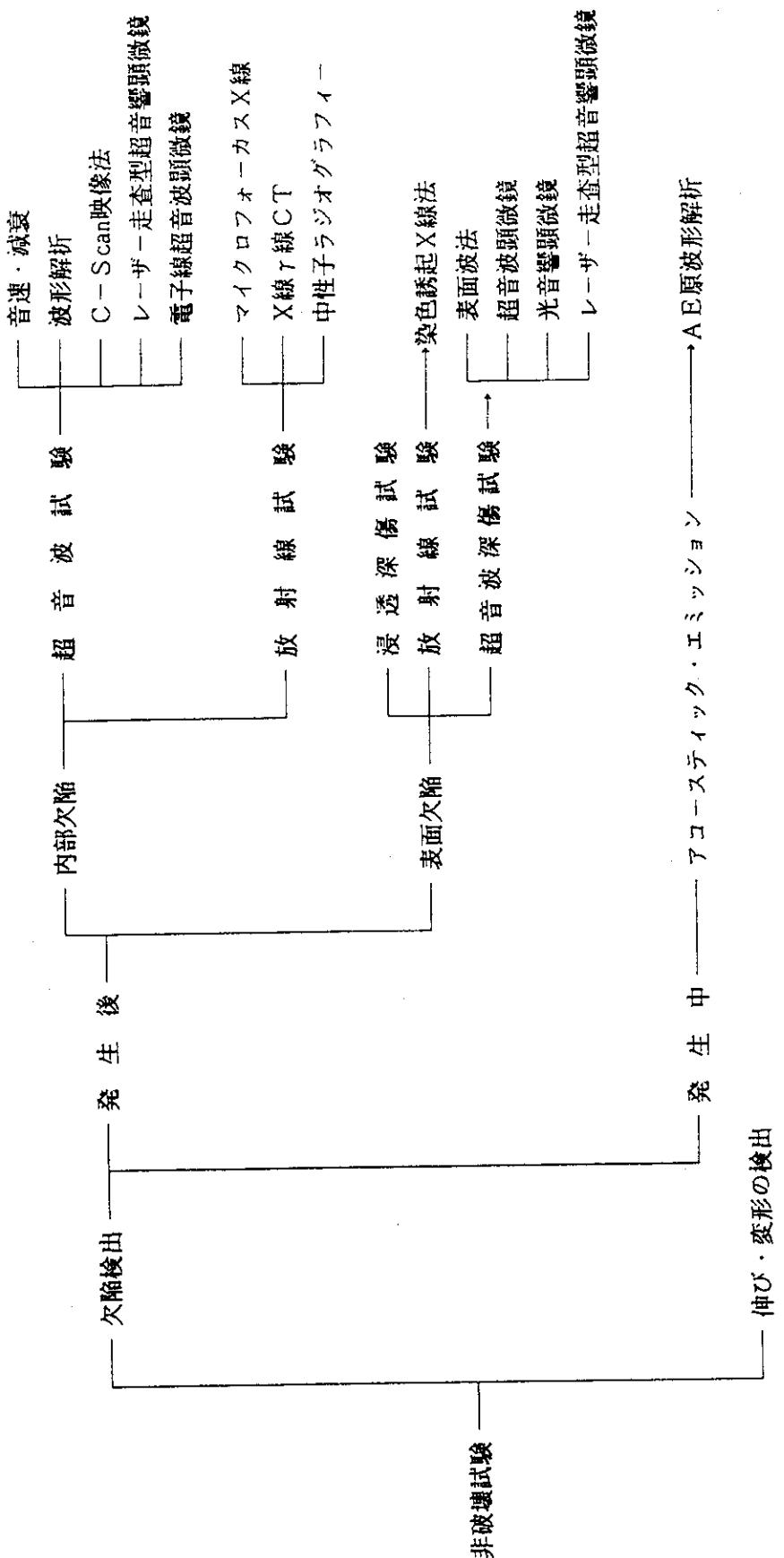


図5.4.5 セラミックスに適用が考えられる非破壊試験法