

無機高分子を前駆体とする機能材料 の開発と応用(2)

—無機高分子合成技術、セラミックスへの転換技術、分析・評価技術—

株式会社 アート科学
研究開発部

III メタロキサン系無機高分子

1. ポリチタノキサン
2. ポリアルミノキサン
3. ポリシロキサン
4. その他のポリメタロキサン

ポリメタロキサンとは

メタロキサンとはメタル原子と酸素原子の結合、すなわちM-O結合のことで、ポリメタロキサンといえば、このM-O結合の繰り返しを主鎖骨格とする高分子化合物のことである。

金属アルコキシドを用いるゾル-ゲル法による酸化物セラミックスの合成過程におけるゾル、ゲルが、このポリメタロキサンである。もともと酸化物ガラスを低温で合成できる可能性から精力的に研究がおこなわれてきた。しかし、この方法で大きな金属酸化物ガラスを作成することは意外と難しく、未だに大きな透明な酸化物ガラスは合成されていない。

しかし、酸化物繊維ではいくつか成功例があり、光触媒繊維としてのチタニアなどは完全に透明な繊維として得られている。



TEOS由来のポリシロキサンの透明ゲルブ
ロック(このまま焼結させられればよい…)



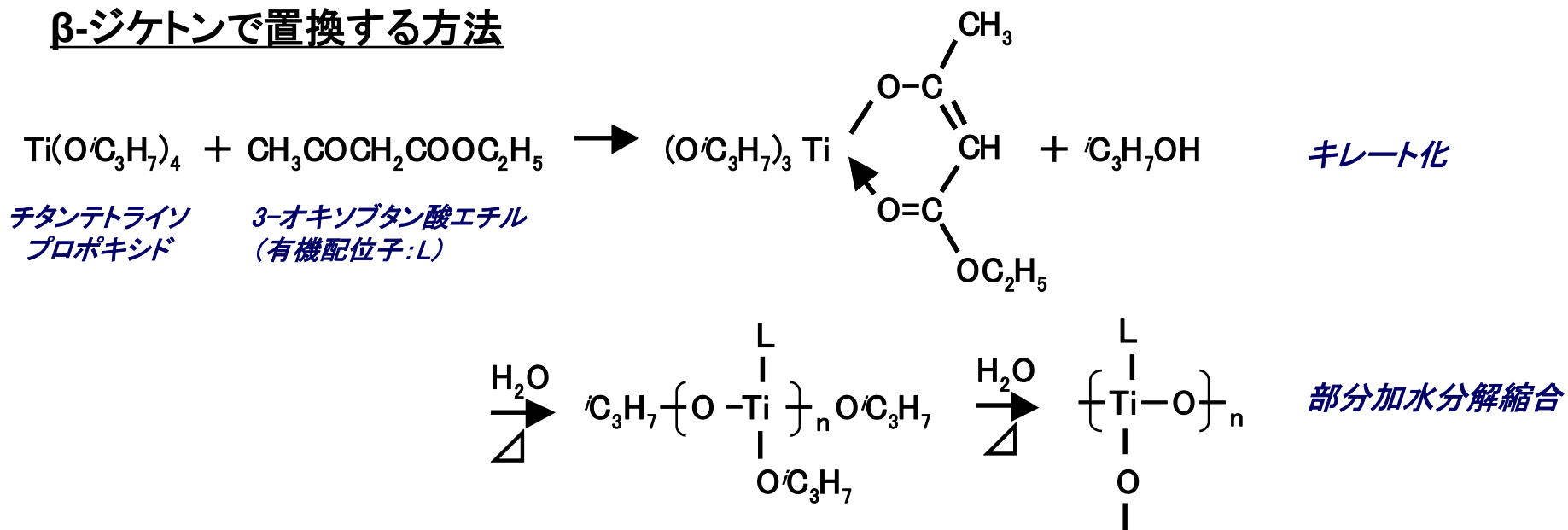
チタンアルコキシド由来のポリチタノキサンから
得られた透明なチタニア繊維(窒素ドーピング型)

1. ポリチタノキサン

1.1 合成方法

ポリチタノキサンはTi-O結合を主鎖骨格とする無機高分子である。合成は、チタンのアルコキシド(一般的にはテトライソプロポキシド)を原料に用い、塩酸などの酸触媒を用いて加水分解速度を制御しながら縮合させ、高分子化する。この時、さらに制御された反応系では、チタンテトライソプロポキシドのアルコキシ基の一部をβ-ジケトン(たとえば3-オキソブタン酸エチル)やブトキシ基で置換し、イソプロポキシ基のみを選択的に部分加水分解する方法で鎖状ポリチタノキサンを合成する。

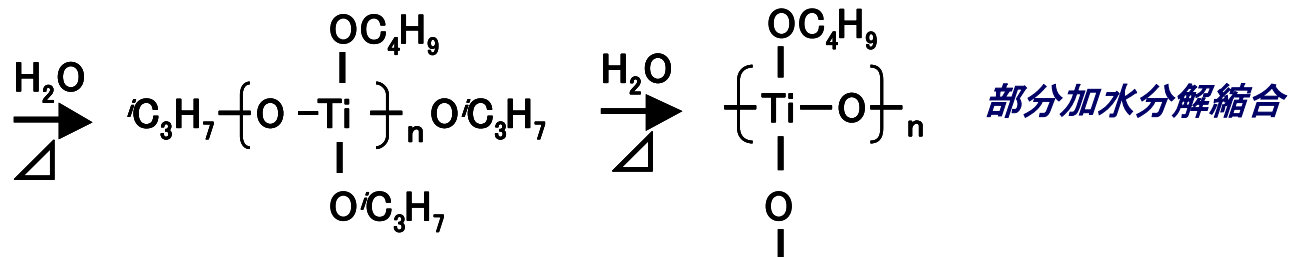
β-ジケトンで置換する方法



ブトキシ基で置換する方法



チタンテトライソ
プロポキシド 1-ブタノール



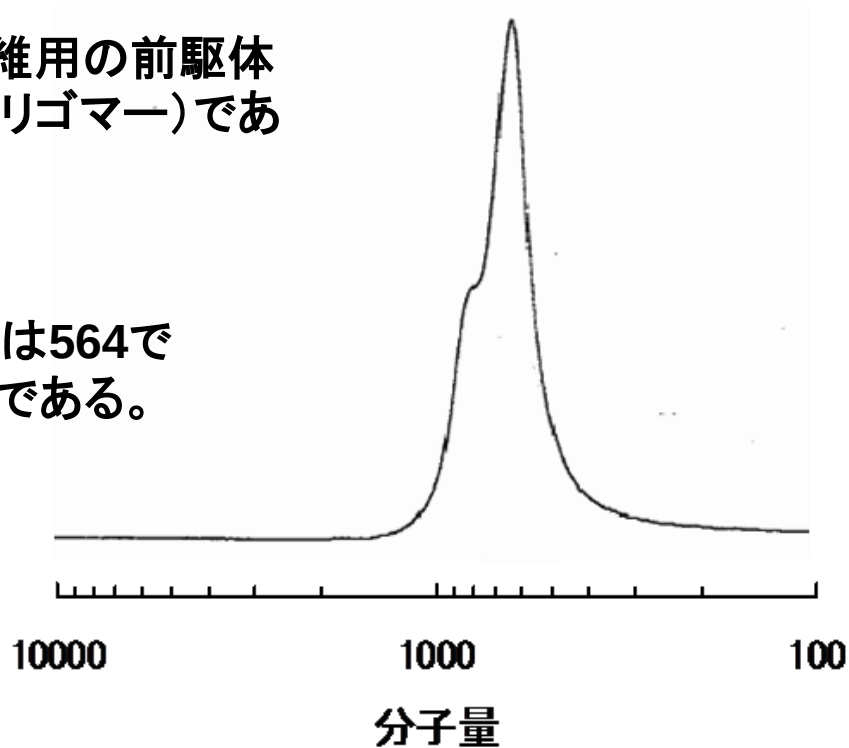
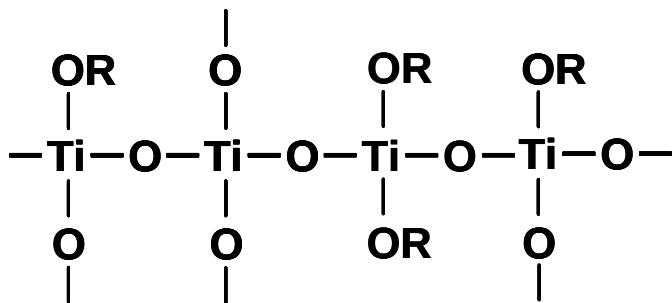
1.2 構造

分子量分布

分子量分布の測定は比較的難しいが、繊維用の前駆体は、GPCによる測定で、500～1000程度(オリゴマー)であることが確認された。

推定分子構造

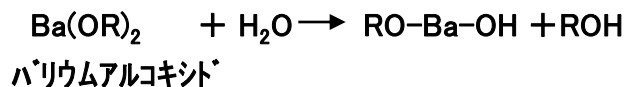
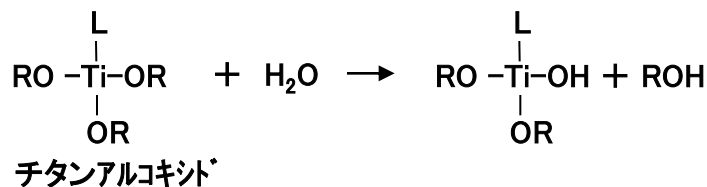
ORがブトキシ基として、この構造で分子量は564であるので、分子の大きさはせいぜいこの2倍である。



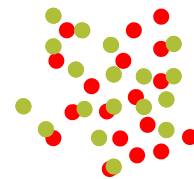
1.3 ゲル化過程・熱分解過程

チタン酸バリウムナノシート生成過程におけるゲル化

チタン酸バリウム(混合酸化物)ナノシート生成過程は、原料アルコキシドからのポリマー生成、ゲル化によるナノシート化まで、加水分解縮合の繰り返しであることがわかる。



部分加水分解



縮合

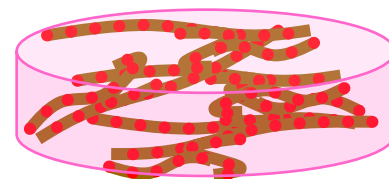


二次元架橋



三次元架橋

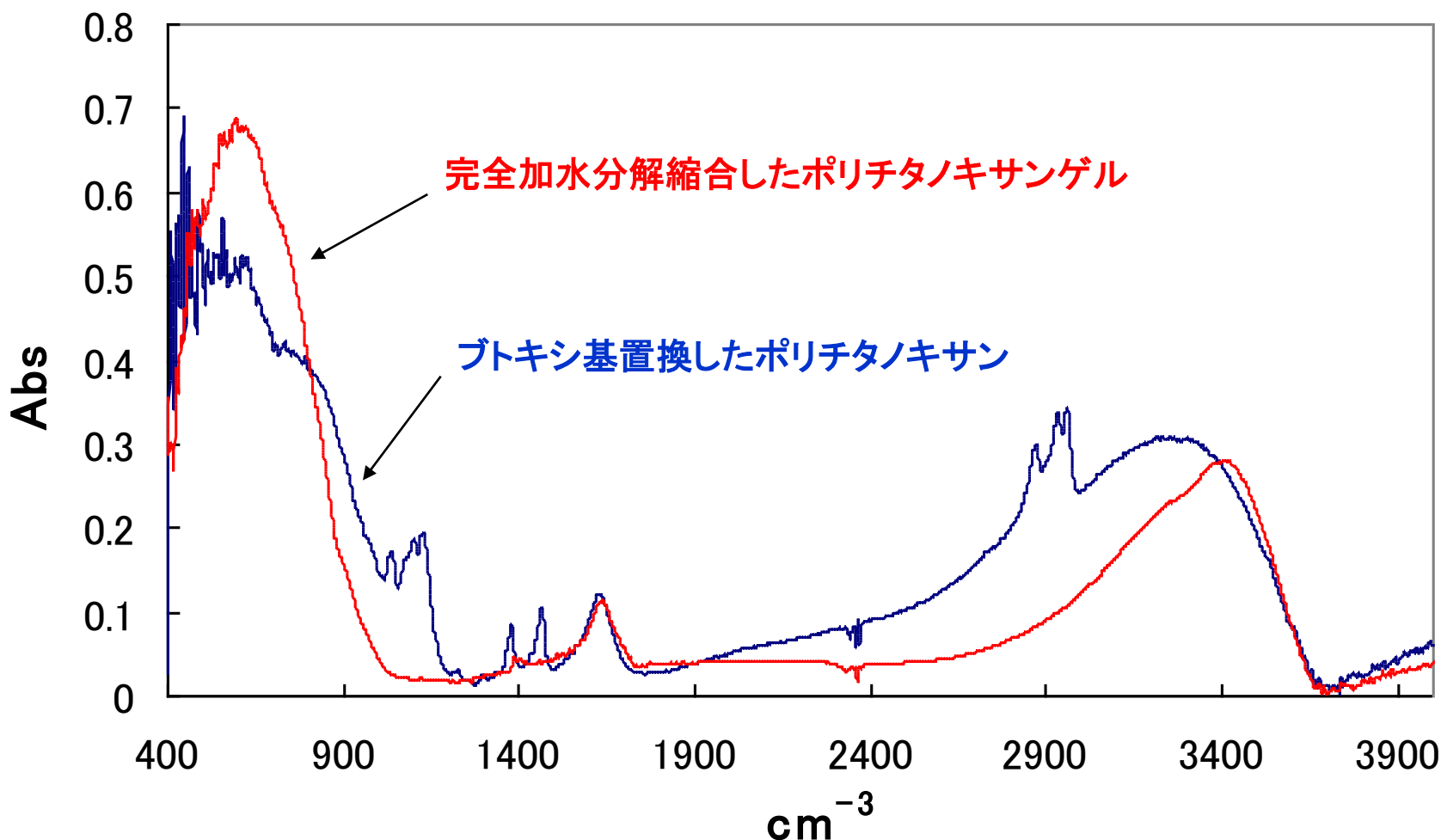
ゲル化



前駆体

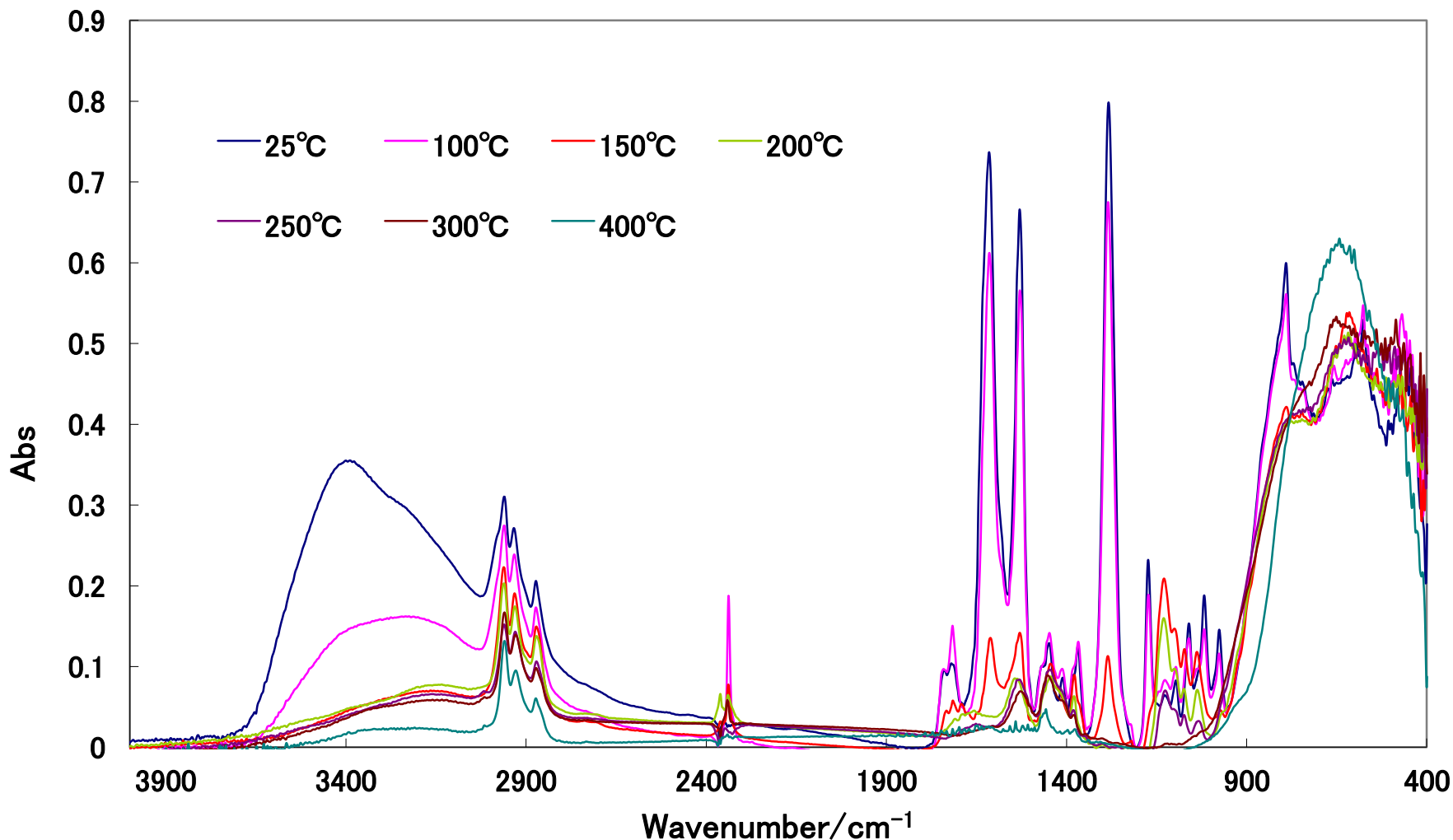
ポリチタノキサン^①のゲル化過程の構造変化

FT-IRによれば、完全加水分解縮合によりポリチタノキサンをゲル化すると、 $1650\text{--}1750\text{cm}^{-3}$ と $3000\text{--}3500\text{cm}^{-3}$ のO-Hによる吸収と、 625cm^{-3} を中心とするTi-Oによる吸収ピークのみになる。 2900cm^{-3} 付近と $1020\text{--}1500\text{cm}^{-3}$ に確認できる有機物由来のピークは消滅している。



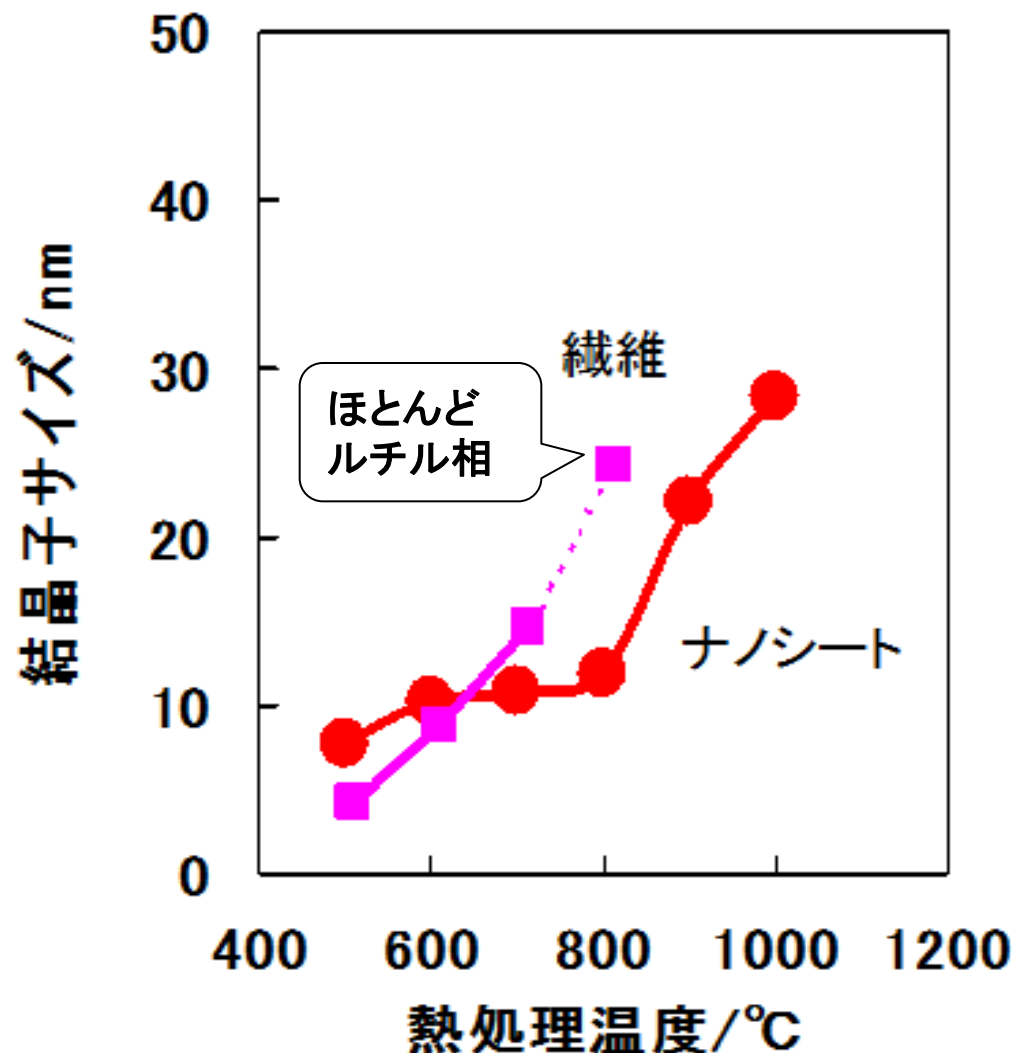
ポリチタノキサン^①の熱分解過程

ポリチタノキサン(イソプロポキシ基の一部を3-オキソブタン酸エチルで置換したもの)をFT-IR測定用KBrディスクに成型し、大気中で熱処理しながら、赤外吸収スペクトルの温度変化を測定し、熱分解過程での特性吸収の変化を連続的に追跡した結果が下図である。まず、キレート化した3-オキソブタン酸エチルが熱分解によりはずれるとともに、Ti-OHの脱水縮合が起こる。その後、有機基は急速に減少するが、400℃でも幾分有機成分が残存していることがわかる。



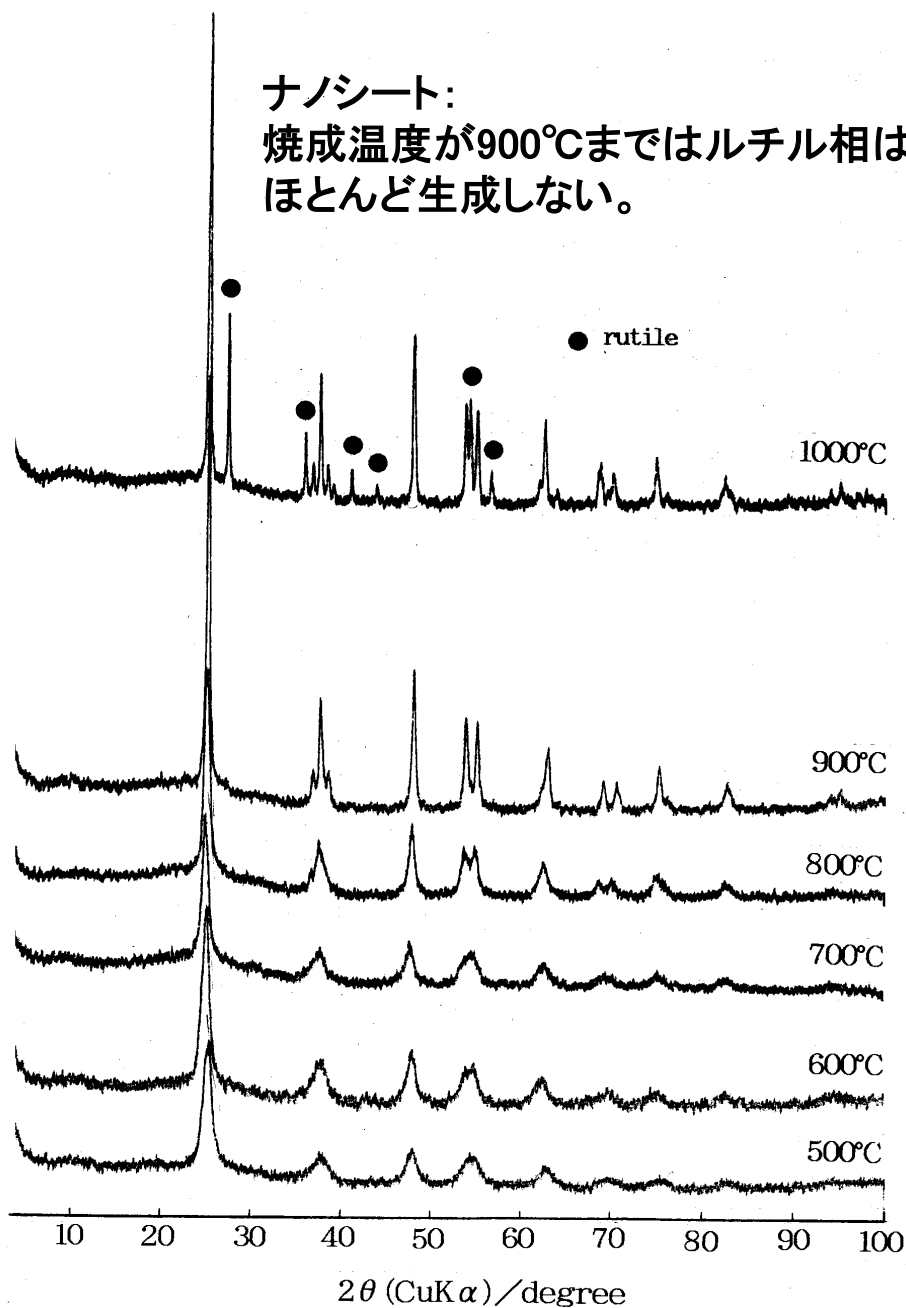
1.4 熱分解で得られるセラミックス

ポリタノキサンから得られる代表的なセラミックスは、チタニアである。大気中あるいは酸素中の熱分解で、ほぼ400°Cで炭素成分はなくなり、まずアナターゼ型結晶構造を有するチタニアを生成し、その後温度の上昇とともにルチル型へと変わる。その温度は、形態、たとえば、ナノシートの場合では、膜厚に依存し、薄いほど、高温側にシフトする。しかし、バルキーな場合、たとえば、直径が十数 μm の繊維や数十～数百 μm の球状多孔質体では、600°C程度でルチル型への転換が起こる。また、シリカとのハイブリッドでは、チタニアの結晶化が遅れる。

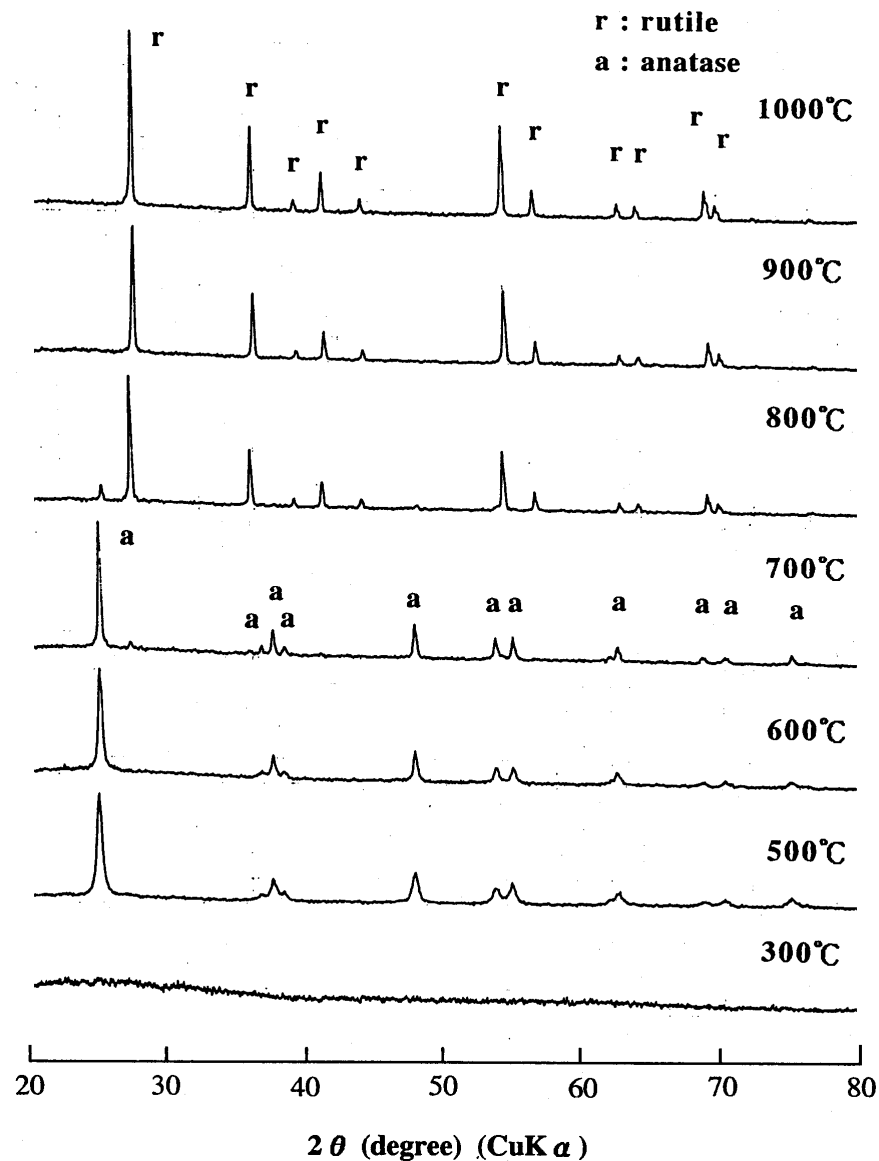


薄い(～100nm)チタニアナノシートと繊維(～20μ mφ)の焼成温度とXRD

ナノシート:
焼成温度が900℃まではルチル相は
ほとんど生成しない。

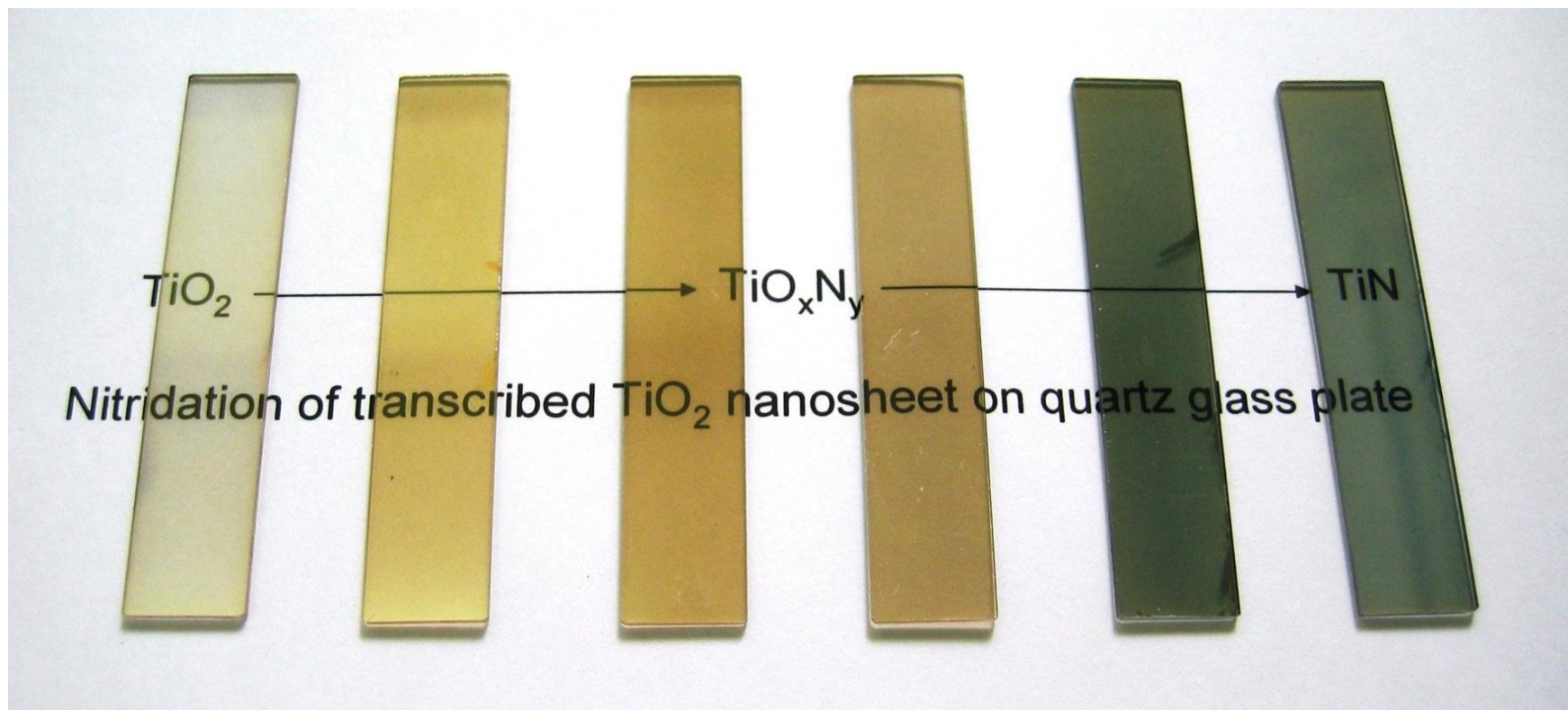


繊維:
焼成温度が700℃を超えるとルチル相に変換



チタニアゲルナノシート転写膜の窒化

石英ガラス上に転写したチタニアゲルナノシートをアンモニアガス中で焼成すると徐々にナノシート中の窒素含有量が増加し、最終的にはTiN薄膜が生成する。写真は400℃から900℃での窒化に相当し、色が劇的に変化する。



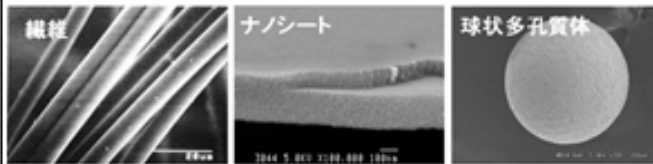
1.5 ポリチタノキサンから得られるセラミックスの応用

(1) TiO_2 光触媒

光触媒として応用が検討され、製品化が最も期待されているものは、球状多孔質体であり、種々の形態の TiO_2 の構造と特性の関係の精査から高性能化の研究も進行している。

光触媒材料

セラミックス前駆体無機ポリマーの分子設計



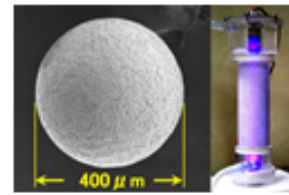
ND-プーやiMATERIA、JRR-3などによる
構造解析



低価格高性能光触媒の開発

(可視光応答型) 高性能光触媒

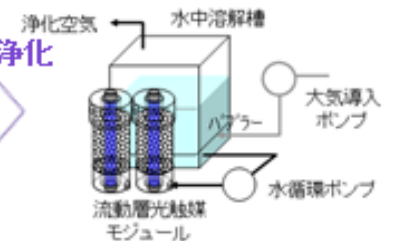
光触媒利用技術



流動層型光触媒 モジュール

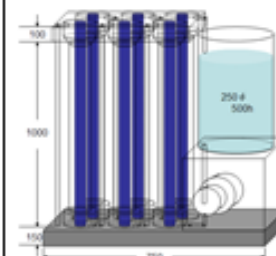
空気浄化

水質浄化



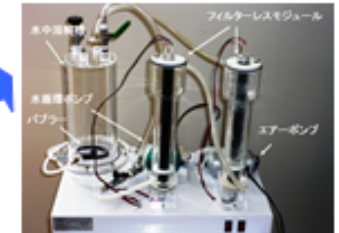
空気浄化システムの概念

高効率浄化システムの開発



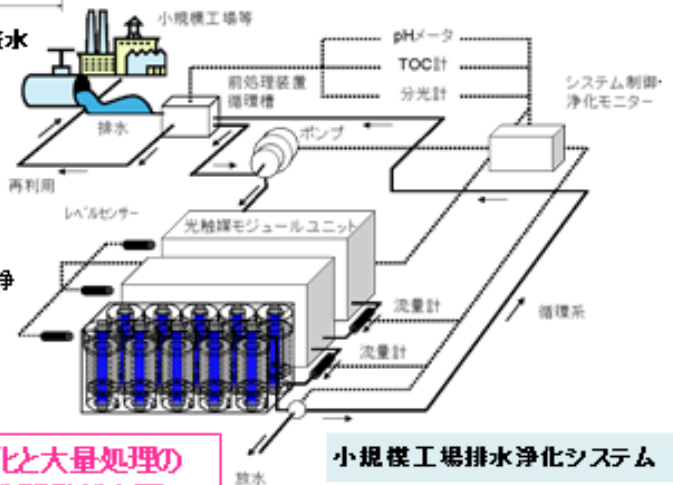
モジュール集排水
処理システム

プロトタイプ:
局所空気清浄機



フィールド試験:

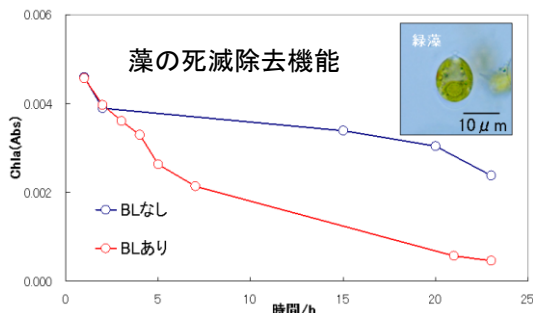
メッキ工場の洗
水の高度処理



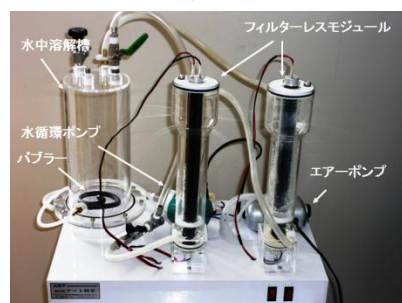
小規模工場排水浄化システム

目標達成には光触媒の活性化と大量処理の
課題をブレイクスルーする技術開発が必要

製品化が期待される機能



プロトタイプ空気清浄機
(アート科学)



実証用めっき最終洗浄水超清浄化装置

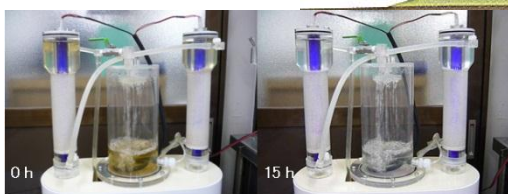
局所処理
少量処理

実証試験中

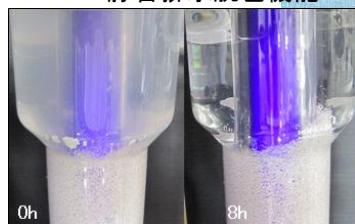
大量・広域処理用の新しい光触媒の概念と利用方法の開発が必要

提案: 窒素酸化物除去システムとのハイブリッドによる新しい大量・広域処理用環境浄化システムの開発

提案: 吸着・光分解・生物分解を利用する新しい環境浄化材料、大量・広域処理用システムの開発



豚舎排水脱色機能



パーラー排水浄化機能

高性能化の研究

光触媒の高性能化に関する研究開発

1. 高活性光触媒の開発 → 紫外-可視光応答型高活性光触媒
2. 低価格化
3. 高効率システムの開発



研究テーマ

- (1) 最適結晶構造の解明
- (2) N、Cなどのドーピングによる(可視光型)光触媒の構造の解明
- (3) 水中、大気中などの反応場における光触媒のナノ-マイクロ構造と活性の関係の解明

構造解析からのアプローチ

①ミクロスケール($\text{\AA}$ ~ nm)における結晶構造(電子状態)の制御による活性(機構)の最適化

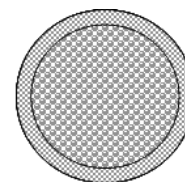
⇒ 広角回折の利用

②微結晶を構成単位としてメソスケール(nm ~ μm)の構造変化に伴う触媒効率(例: 比表面積)の向上

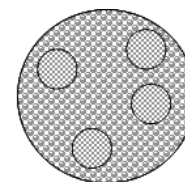
⇒ 小角散乱、表面反射率の利用、TEM

③Ti原子の周囲の局所構造の制御(例: 窒素の存在形態)による活性の向上

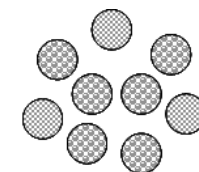
⇒ 分光学的手法(XAFS/XPS/IR/UV etc.)



コア-シェル構造



海-島構造



物理的混合

● : アナターゼ ● : ルチル

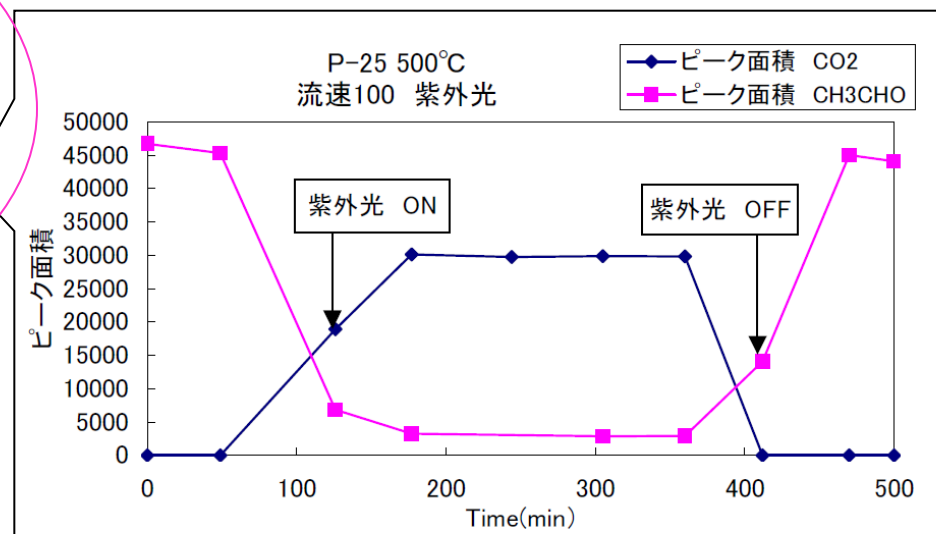
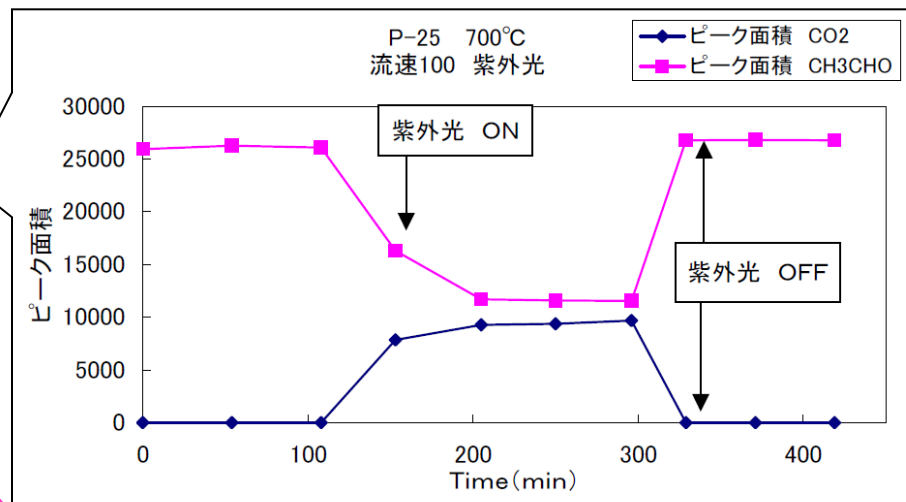
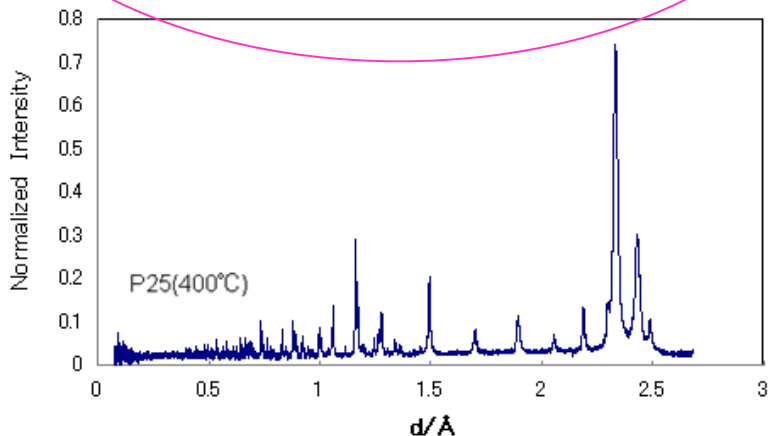
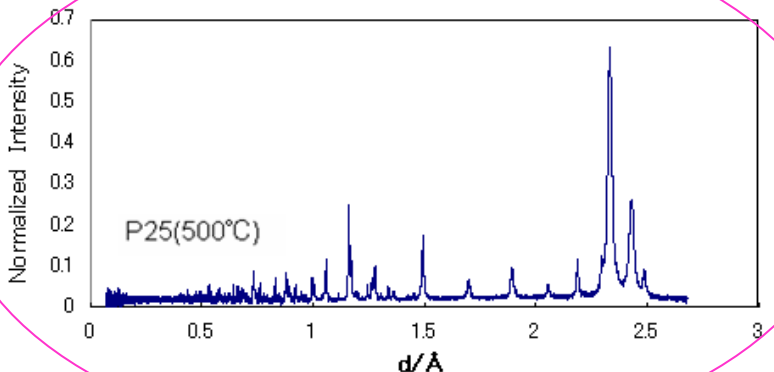
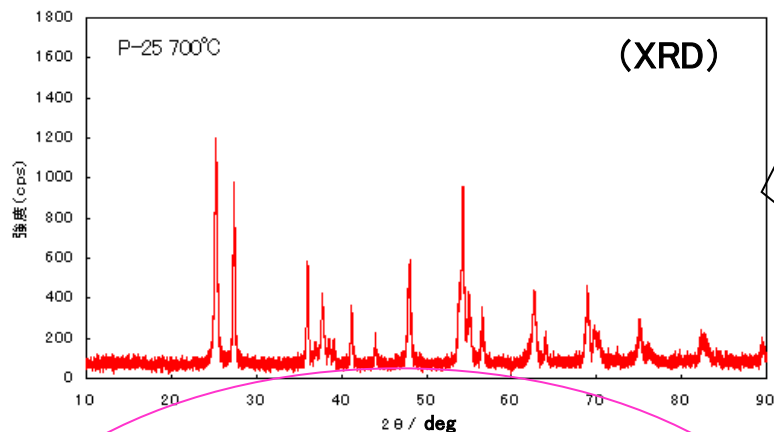
P-25に対して提案されている結晶構造

▶ AEROXIDE® TiO₂ P 25

高温加水分解法金属酸化物

AEROXIDE® TiO₂ P 25 は、AEROSIL®プロセスによって製造される高分散二酸化チタンです。アナターゼ結晶(80%)とルチル結晶(20%)の混合物です。

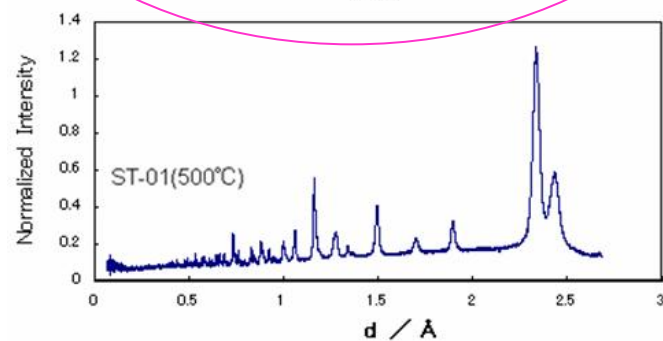
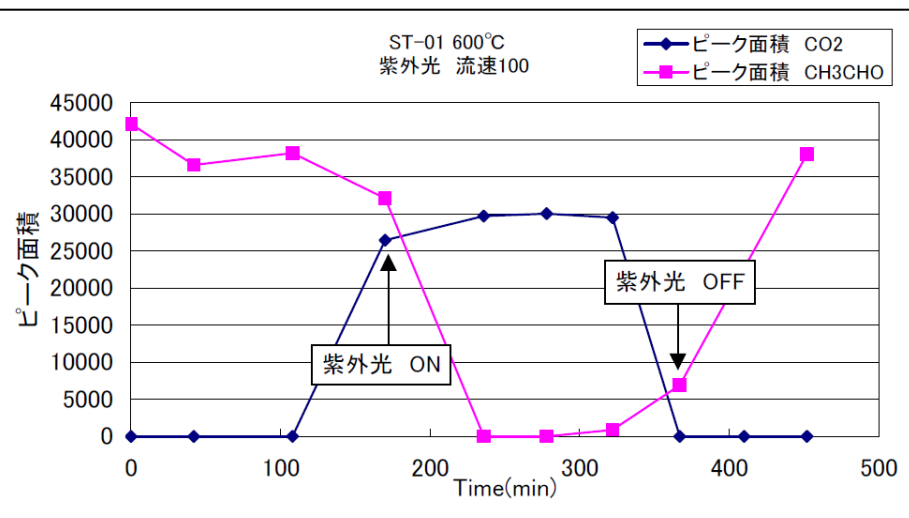
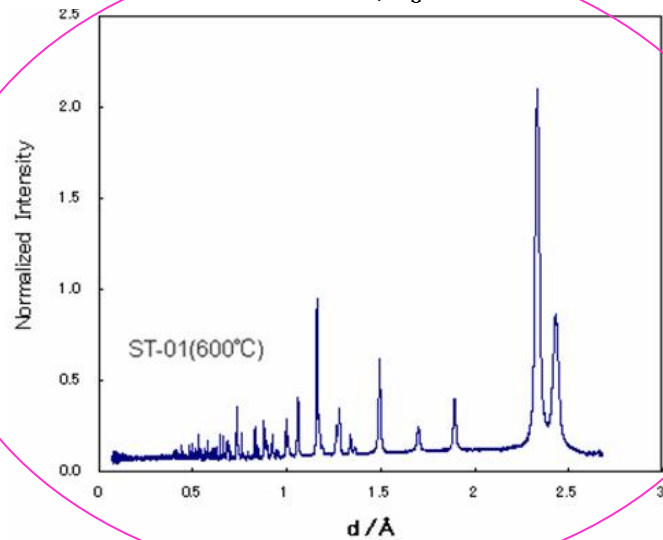
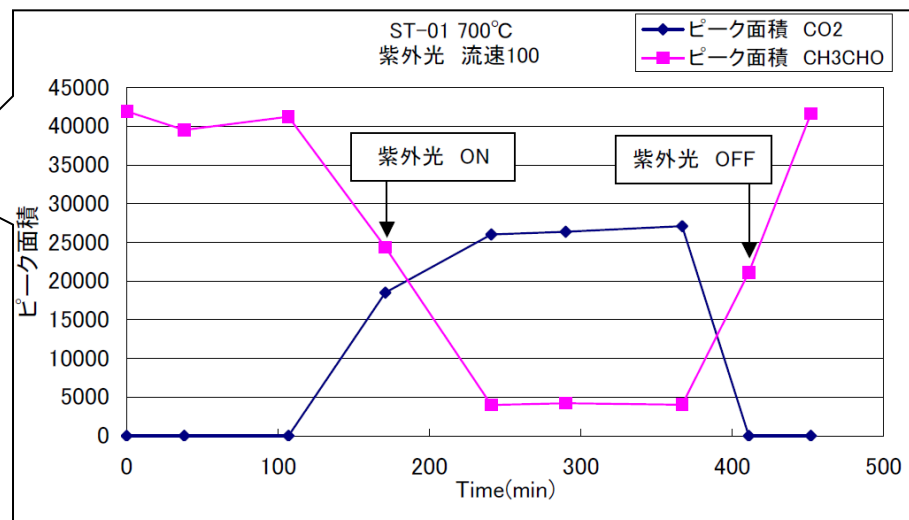
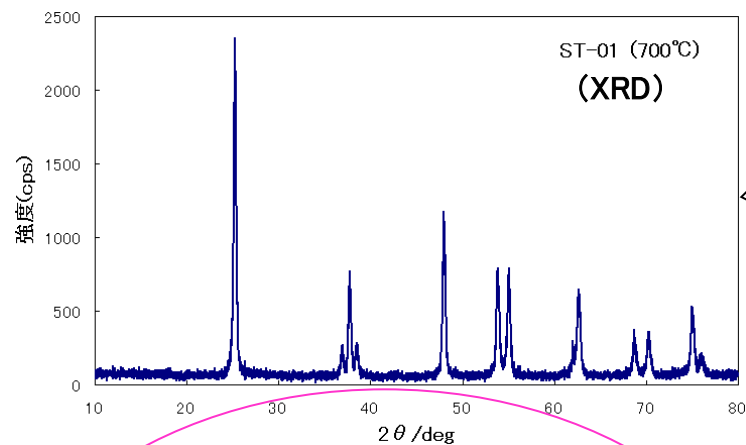
中性子回折を利用したP-25で最も活性が高い結晶構造の特定



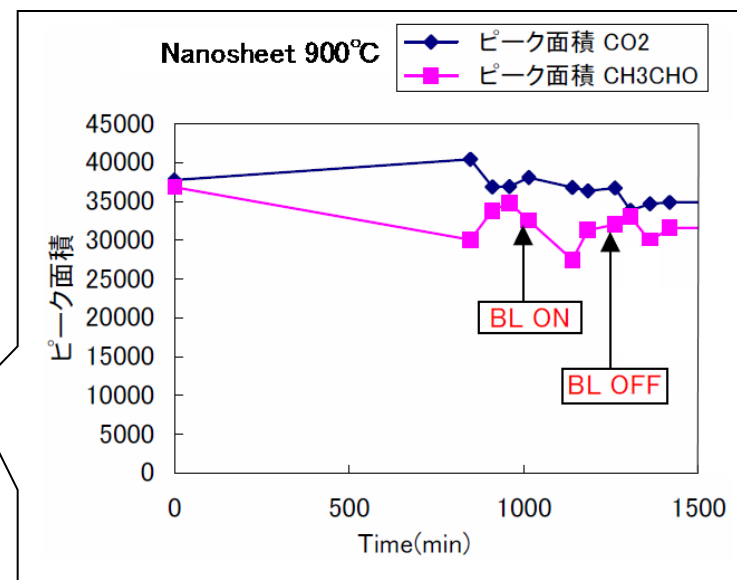
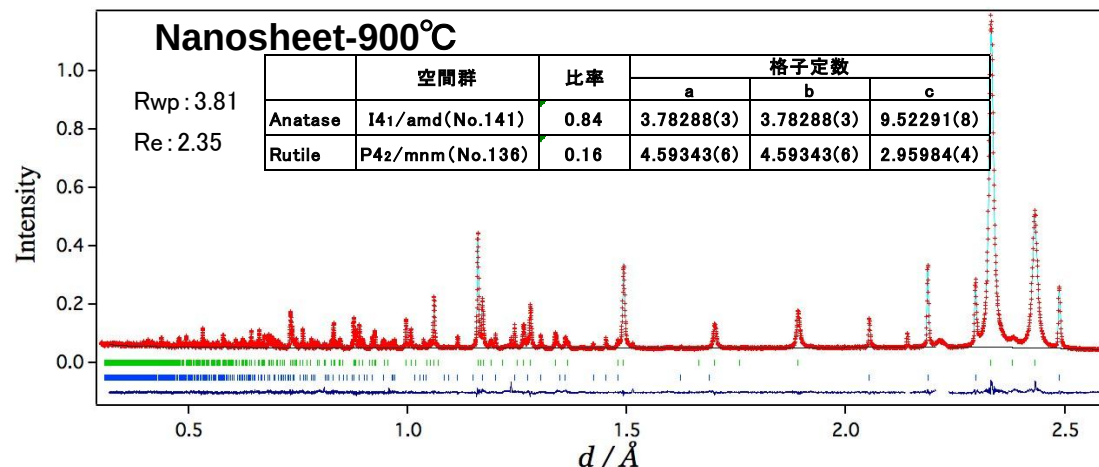
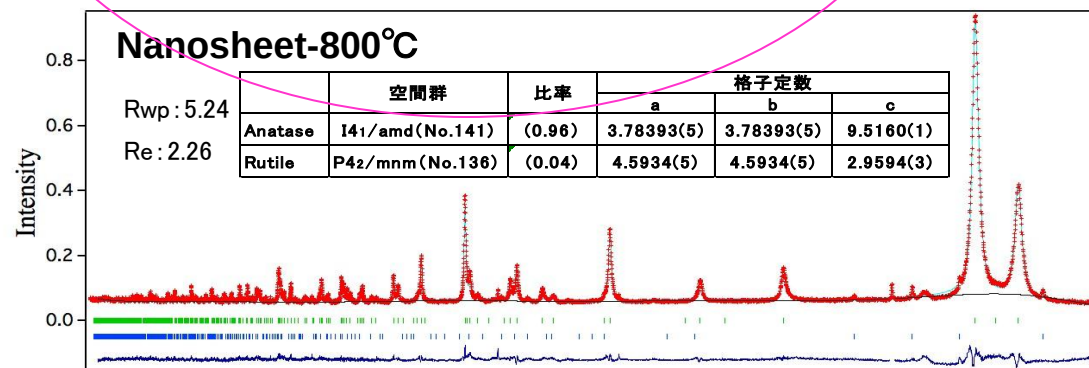
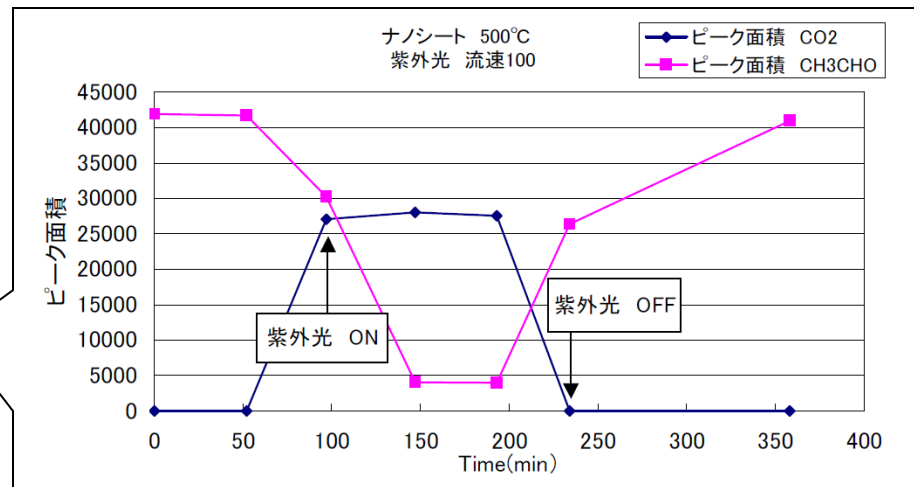
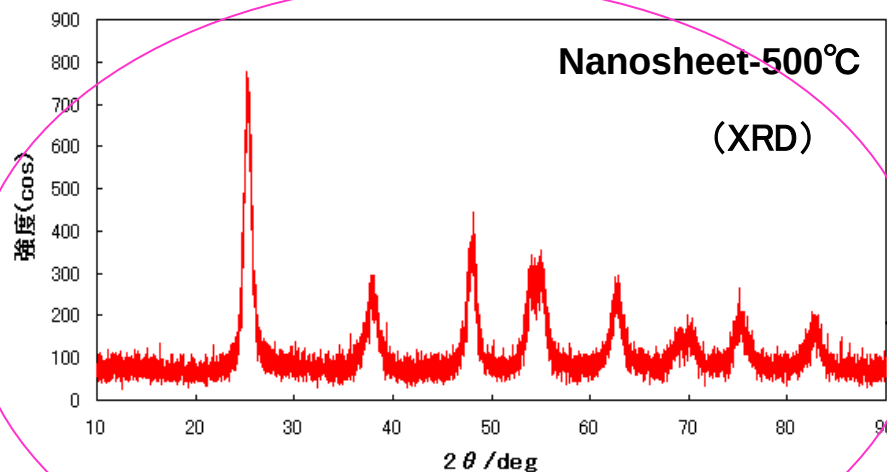
活性評価方法: JIS R 1701に準拠

光触媒活性は100ppmのアセトアルデヒドを100mL/min⁻¹でセル中の50×50mmの石英ガラス基盤上に塗布した光触媒上を流しながら分解とCO₂の発生量で評価した。必要により流速を変えた。

ST-01で最も活性が高い結晶構造

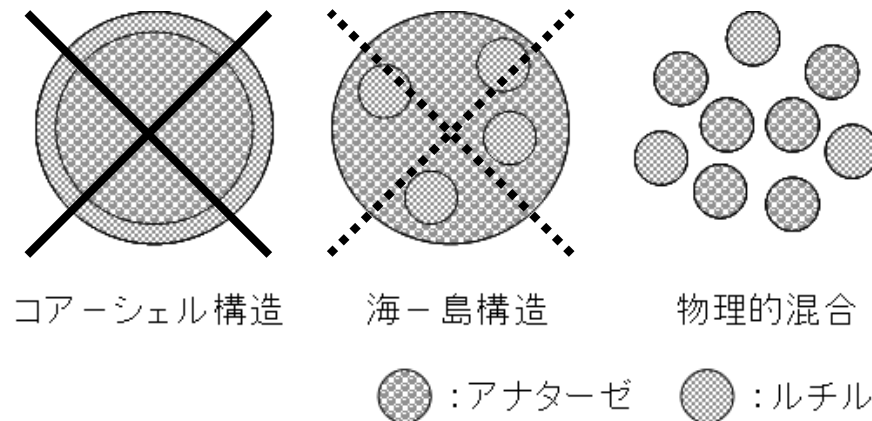


TiO₂ナノシートで最も活性が高い結晶構造



結晶構造解析からの最適構造の推定

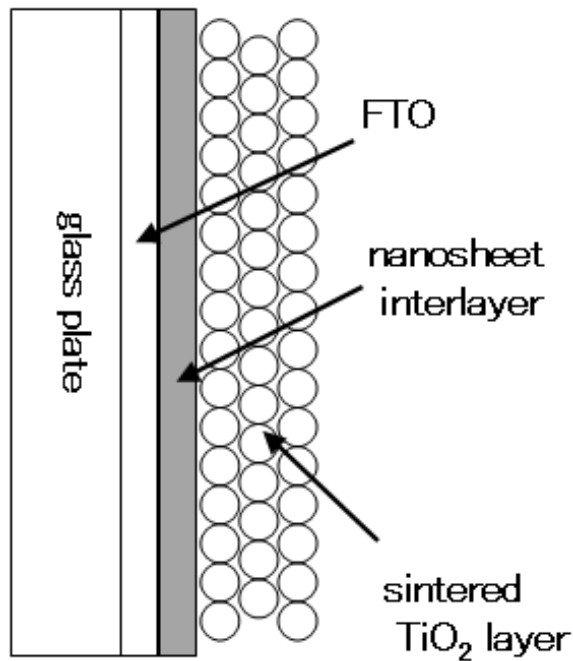
- ・ アナターゼ結晶相の結晶子サイズは小さい方がよい。
→ 微結晶化による界面の増大。
- ・ アナターゼとルチル相の相互作用の形跡はない。→ ルチル相は必要ない。
- ・ 中性子回折が示唆する表面構造(水分吸着性)の差は、化合物に対する吸着特性の差や環境の異なる反応場と密接に関連していると推量される。



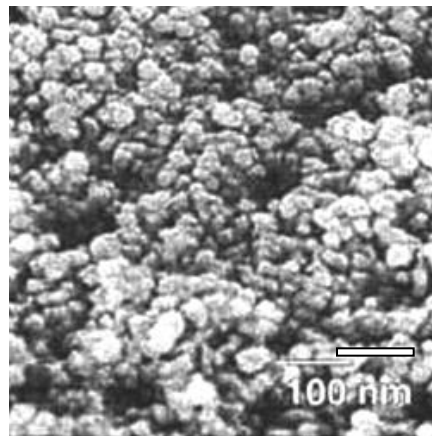
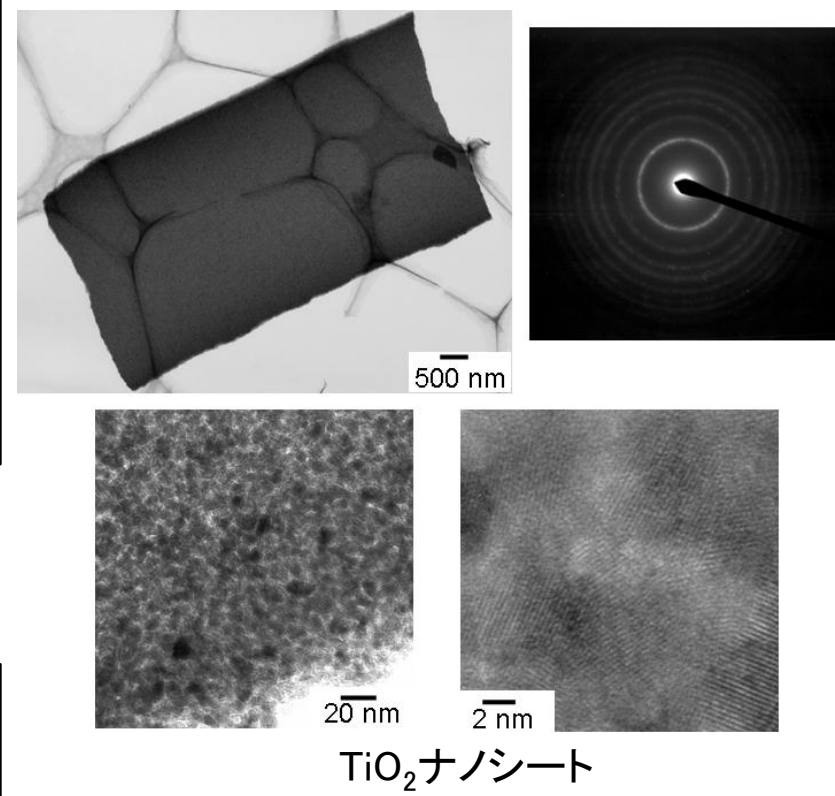
P-25に対して推定される結晶構造

(2) 色素増感太陽電池

流動界面ゾルーゲル法で合成される厚さが50～500nmで制御されたTiO₂ナノシート転写膜のFTOガラスへの強固な接着性と、P-25焼結膜とのハイブリッドにより、高光電変換効率を有する多孔性チタニア電極が得られる可能性がある。



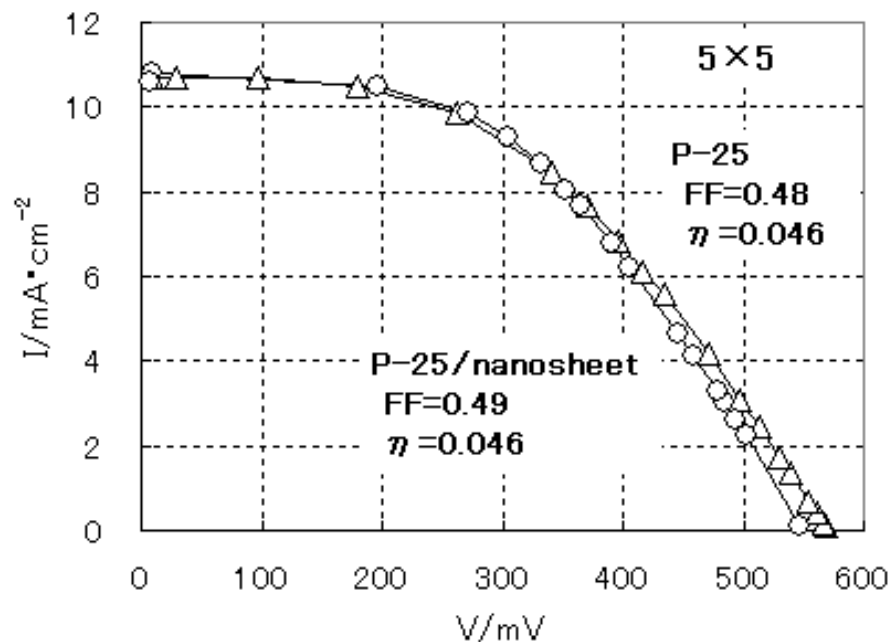
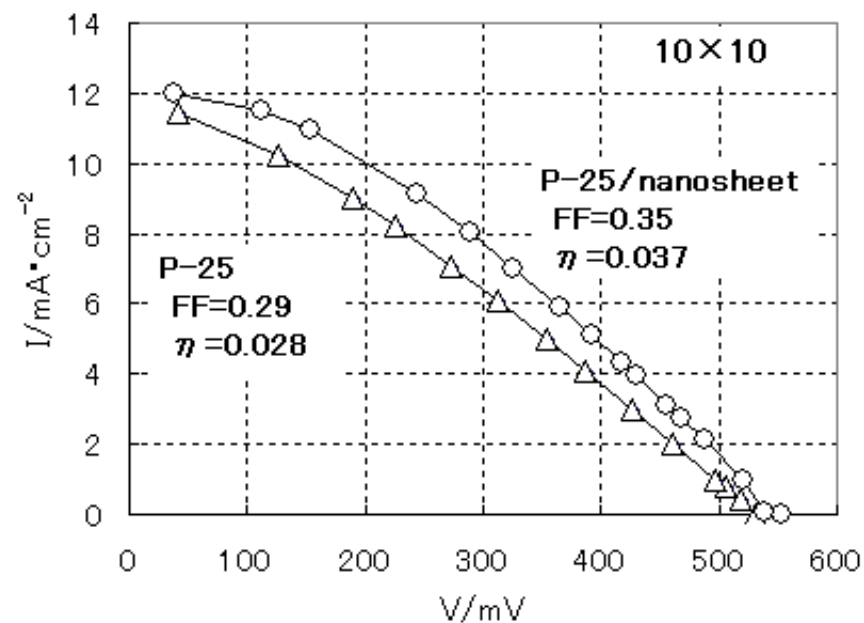
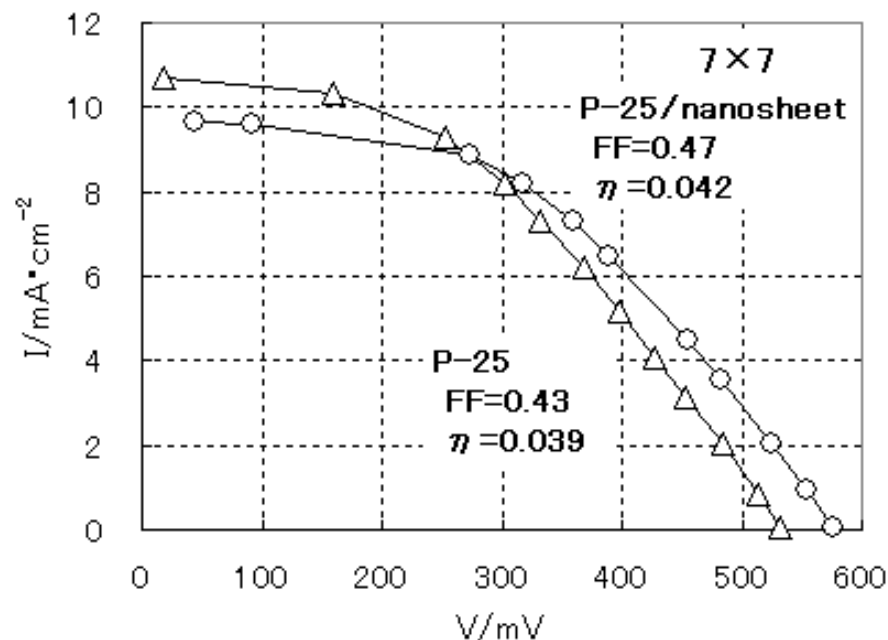
Sintered TiO₂/ TiO₂ nanosheet/ FTO hybrid electrode



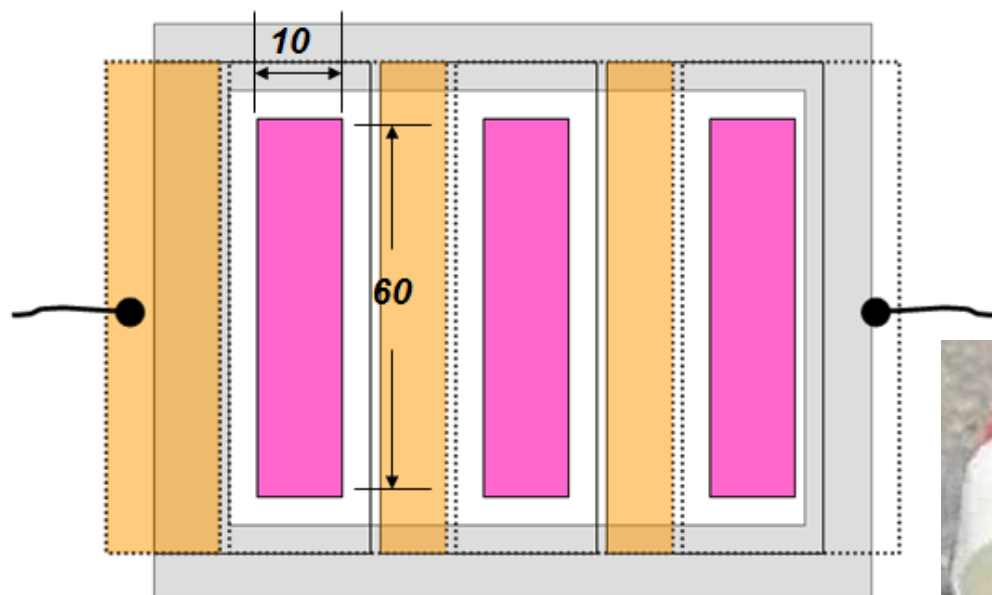
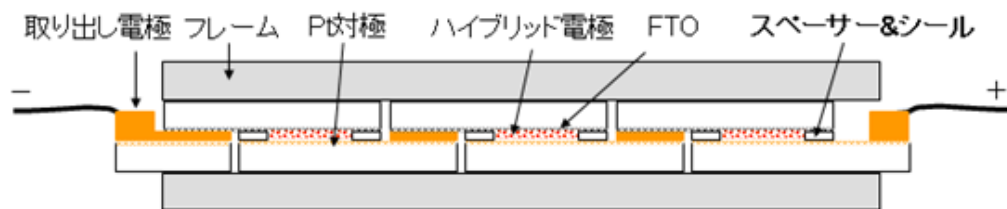
P-25 (アナターゼ:ルチル=80:20)は20～30 nmの粒径であり、比表面積(～50m²・g⁻¹)が大きく、色素の吸着量が多いとされている。(特許庁標準技術集「色素増感型太陽電池」より)

ハイブリッド電極とP-25のみからの電極のI-V特性

電極面積が大きい場合に明らかにハイブリッド電極でFFと η は増加した。



デモ用セルの試作



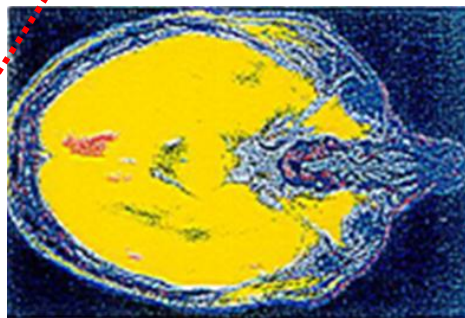
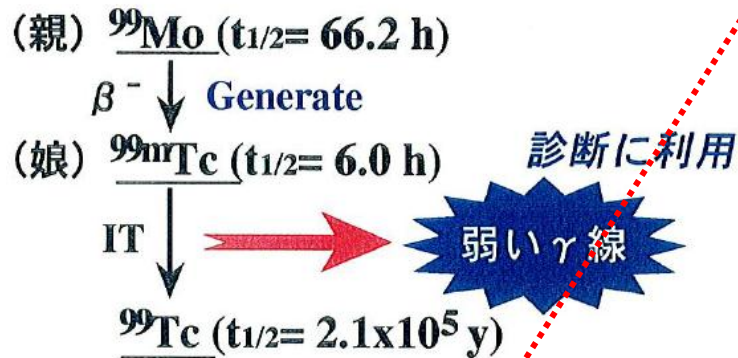
概念設計

試作セルの屋外での試験風景

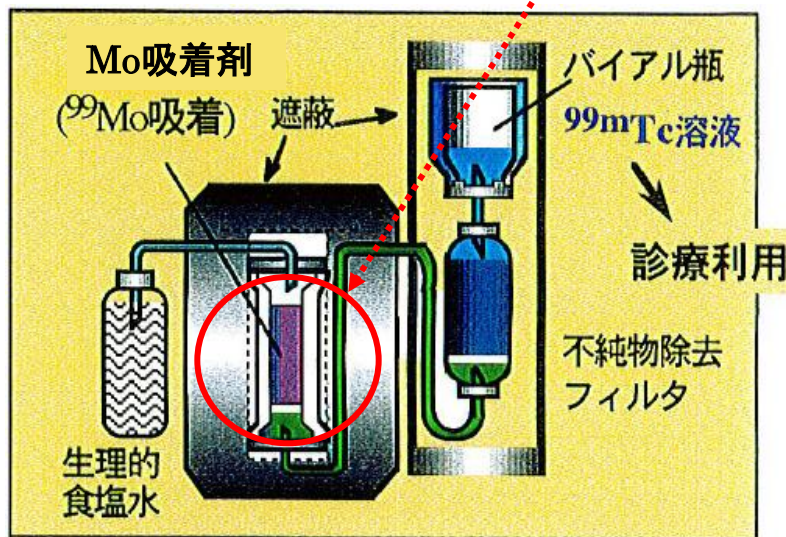


(3) ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ジェネレータ用Mo吸着剤

^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ジェネレータとは ^{99}Mo を吸着させた吸着剤から $^{99\text{m}}\text{Tc}$ のみを溶離する装置で、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を癌などの診断薬として利用する。**Mo吸着剤**はジェネレータの心臓部である。



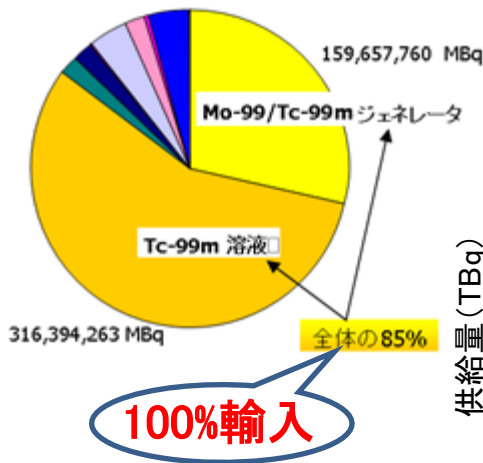
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 標識化合物で描出されたヒトの脳内



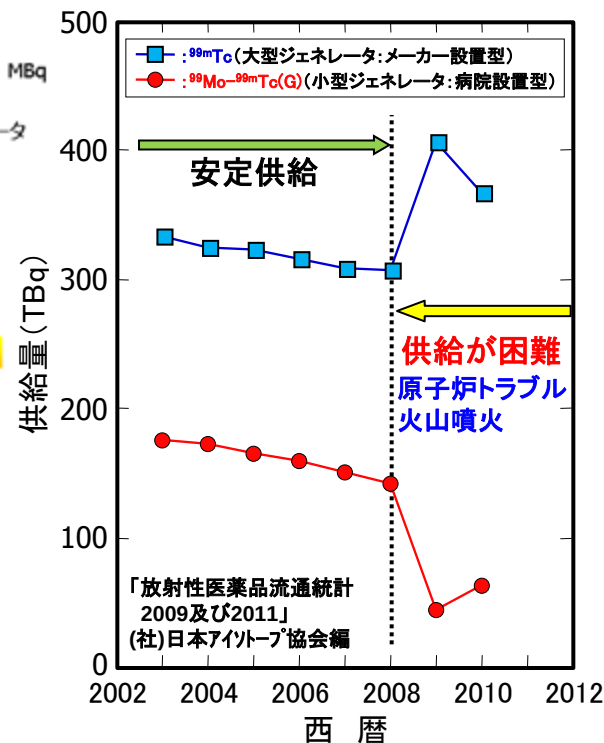
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 小型ジェネレータ構成

概寸: 250(幅)×400(高)×300(奥) [mm]

主な医療用放射性同位元素の推移 (日本)

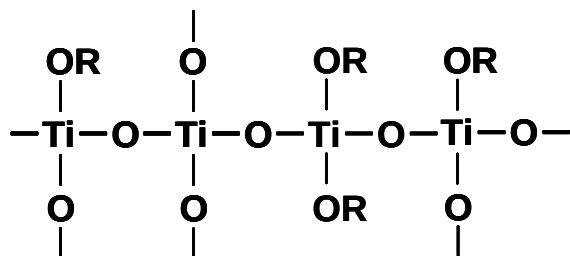


- | | |
|-----------------|--------|
| Mo-99/Tc-99m(G) | I-123 |
| Tc-99m | I-131 |
| F-18 | Xe-133 |
| Cr-51 | Tl-201 |
| Ga-67 | Fe-59 |
| Rb-81/Kr-81m(G) | I-125 |
| In-111 | |

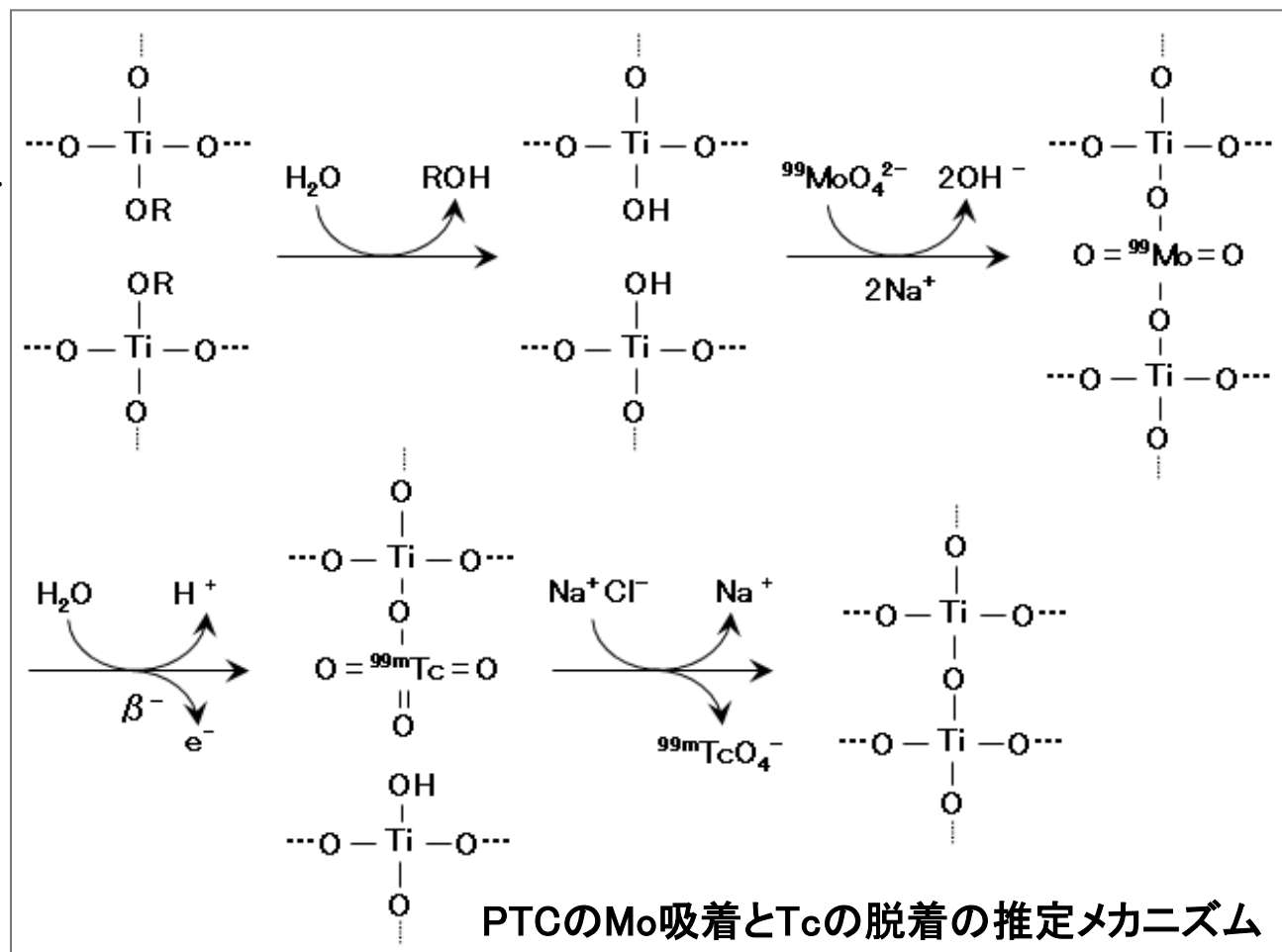


下記の構造を有するポリチタノキサン(PTC)は、1gあたり200mg以上のMoを吸着することができ、従来のジルコノキサン系Mo吸着剤(PZC)と同様、(n, γ)法⁹⁹Mo*を利用する^{99m}Tcジェネレータ用吸着剤として大きな期待を集めている。

(n, γ)法⁹⁹Mo* : ²³⁵Uの核分裂反応を利用しない放射化法⁹⁹Moで、100%輸入に頼っている⁹⁹Moの国産化が可能。



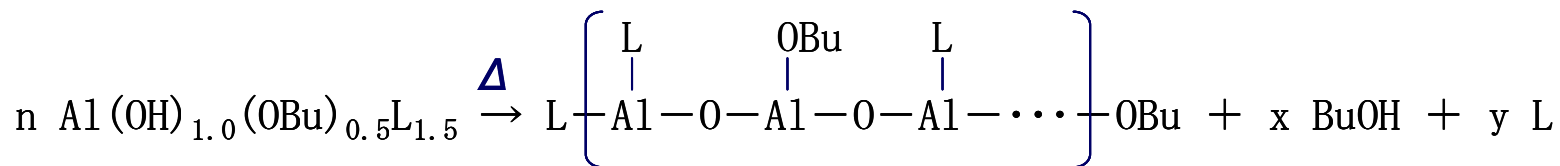
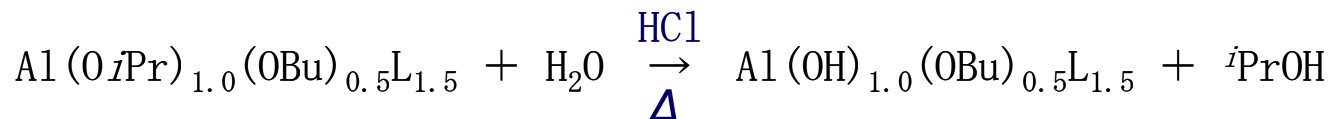
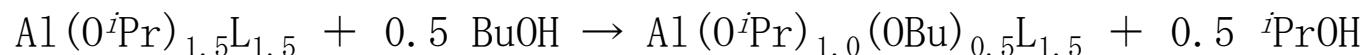
PTCの推定構造



2. ポリアルミノキサン

2.1 合成方法

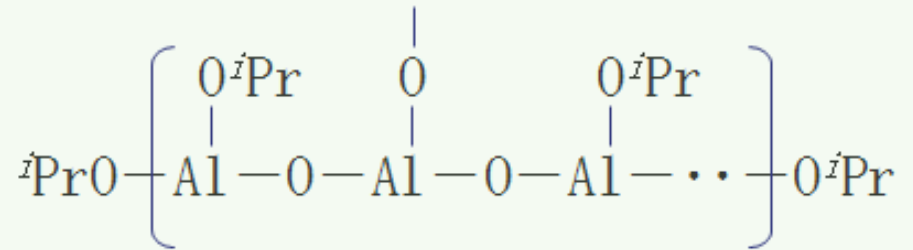
ポリアルミノキサンはAl-O結合を主鎖骨格とする無機高分子である。合成は、アルミニウムアルコキシドを原料に用い、塩酸などの酸触媒を用いて加水分解速度を制御しながら縮合させ、高分子化する。しかしながらアルコキシドは加水分解速度が極めて大きく、まず、原料金属アルコキシドをキレート剤により部分的にキレート化し、加水分解速度を遅くする必要がある。アルミニウムの場合、あらかじめ一部キレート化されたアルミニウムエチルアセトアセテート・ジイソプロピレート、 $\text{Al}(\text{O}i\text{C}_3\text{H}_7)_2(\text{CH}_3\text{COCH}_2\text{COOC}_2\text{H}_4)_2$ が入手できる。



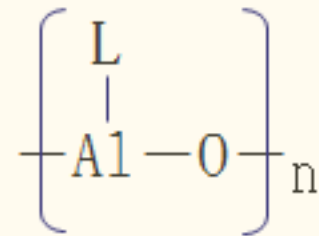
ポリアルミノキサン

2.2 構造

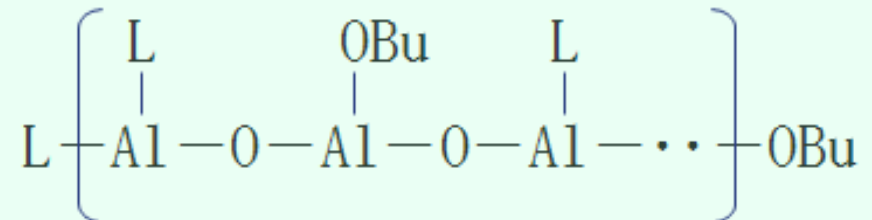
原料にアルコキシドを用いるとアルコキシ基を置換基として有する。したがって一般的なイソプロポキシでは加水分解速度は速く、分子中には分岐構造が多くなる。繊維やナノシートなどの前駆体としては適さない。



あらかじめ一部キレート化されたアルミニウムエチルアセトアセテート・ジイソプロピレート为原料にして合成すると、置換基は耐加水分解性に優れた配位子となり、鎖状構造に制御しやすい。曳索性に優れ、ナノシート化しやすくなるが、反面、加水分解しにくく、いわゆるゾルーゲル転移が起こり難くなり、形態を維持したままセラミック化するにはきわめて長時間を要するゲル化過程が必要となる。



そこで、中間の加水分解性をもたせるために、ブトキシ基のようなイソプロポキシ基よりも耐加水分解性に優れるけれどもβ-ジケトンなどの配位子よりは加水分解しやすいアルコキシ基を導入して加水分解性を制御する。

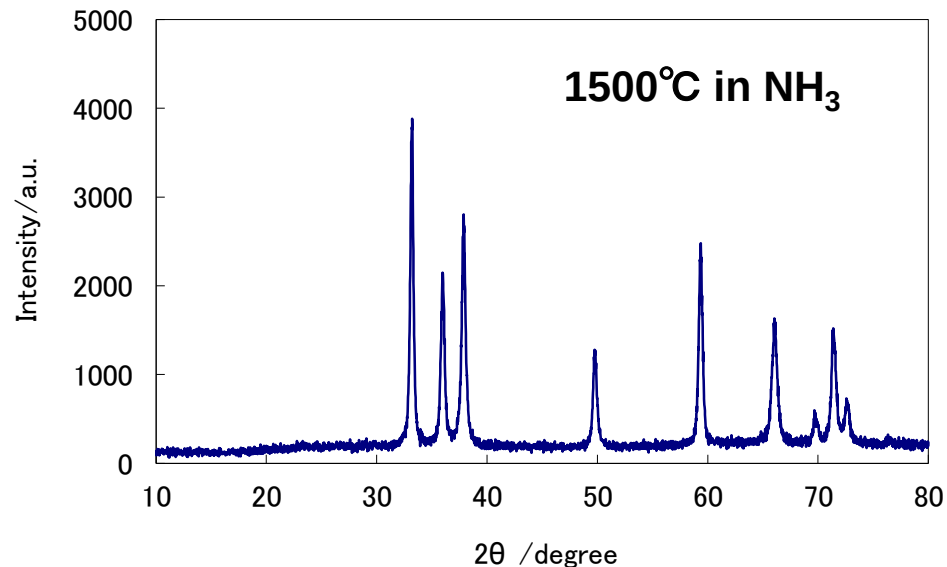
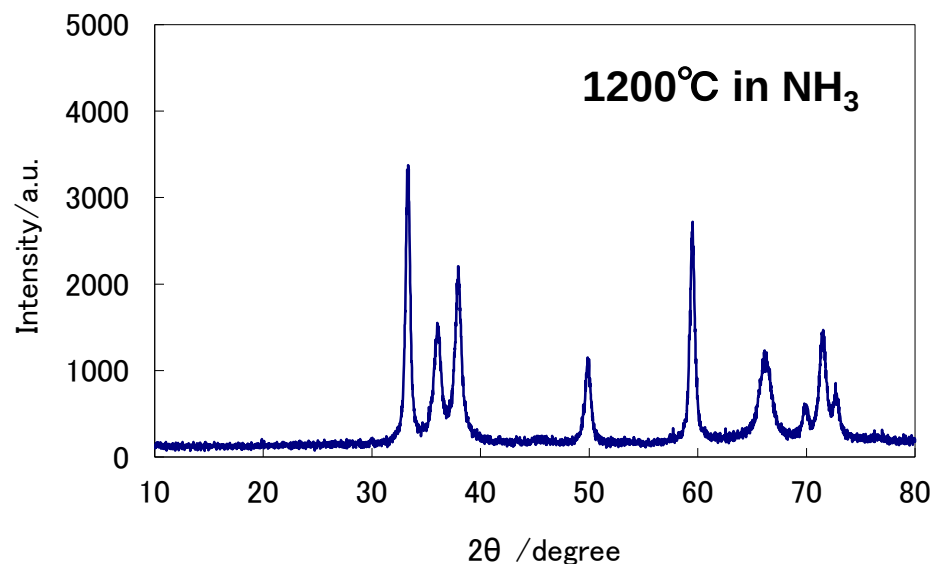


2.3 ゲル化過程・熱分解過程

Al-O結合を主鎖骨格とするポリアルミノキサン（ポリアルミノキサン）のゲル化過程もポリチタノキサンと同様で、側鎖アルコキシ基や有機配位子が加水分解により生成するAl-OHと縮合しながら起こる三次元的な無機骨格の成長である。繊維、ナノシートなどの形態でゲル化後、酸化性雰囲気中で熱分解することにより酸化物繊維、ナノシートへと転換させることができる。また、アンモニア中での熱分解では窒化アルミニウムへと転換する。

2.4 熱分解で得られるセラミックス

ポリアルミノキサンから得られる代表的なセラミックスはアルミナである。酸素雰囲気や大気中で焼成することにより得られる。図に示すように、焼成雰囲気をアンモニアにすることにより1200℃の焼成温度で窒化アルミニウム、AlN、を得ることができる。さらに、1500℃まで焼成することによりその結晶性を増大させることができた。



2.5 ポリアルミノキサンから得られるセラミックスの応用

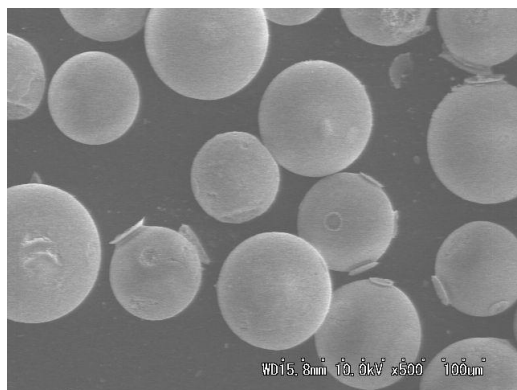
アルミナ、 Al_2O_3 、は融点 2000°C 以上の耐熱性を有し、化学的にも安定である。また、 SiO_2 などの複合酸化物としても期待されており、例えばムライト系繊維、ナノシート、球状多孔質体の合成が試みられている。

最近の応用例

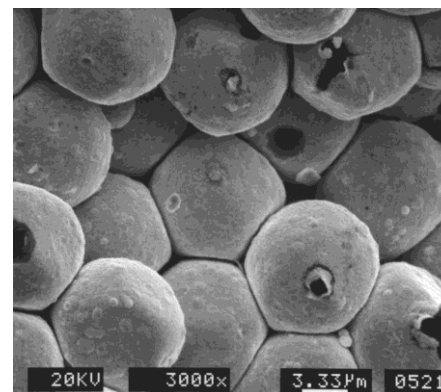
ポリアルミノキサンから得られる球状多孔質体の窒化による AlN 球状多孔質体が高熱伝導性材料として検討された。

(平成17～19年度いばらき研究開発推進事業「ハイブリッドマイクロセル構造を有する高熱伝導率放熱材料の研究開発」)

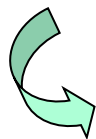
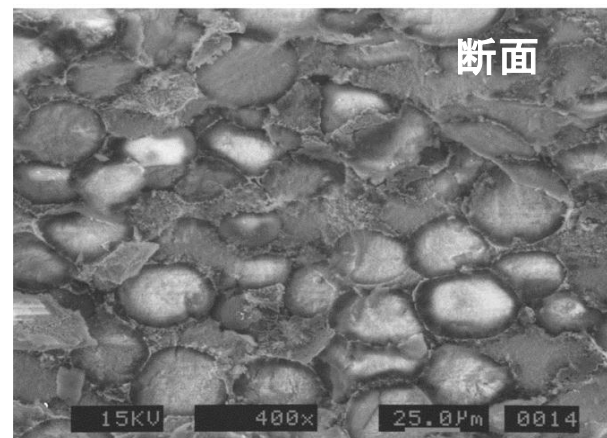
AlN 球状粒子



成型
(放電プラズマ焼結
した AlN 球状粒子)



断面



Cu-AlN 球状粒子
(表面に無電解 Cu メッキ
した AlN 球状粒子)



3. ポリシロキサン

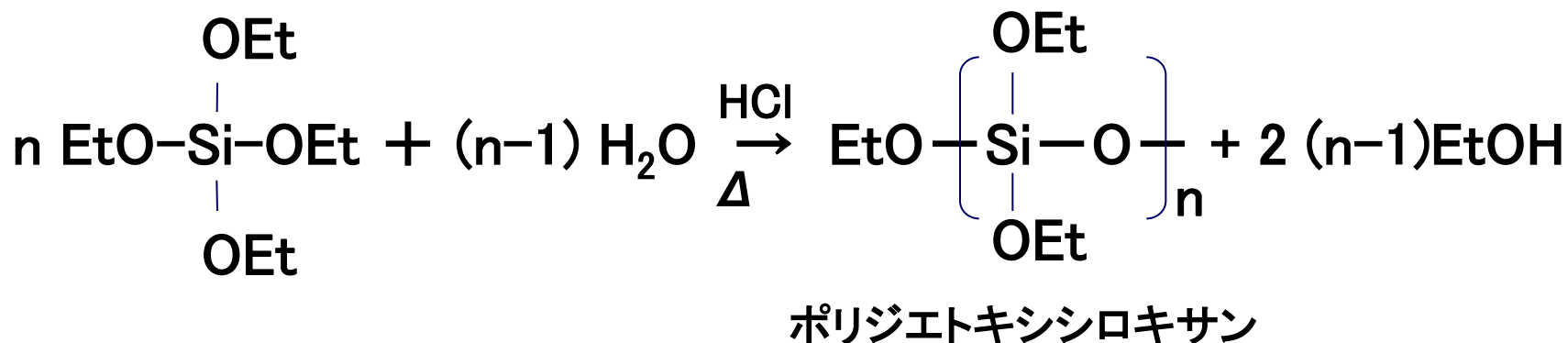
3.1 合成方法

ポリシロキサンはSi-O結合を主鎖骨格とする無機高分子である。その合成には、多彩な原料、求める機能に応じて数えきれないくらい多くの方法が提案されている。

ここでは、テトラエトキシシラン(TEOS)を原料として、繊維、ナノシート、球状多孔質体製造用前駆体としての合成法を紹介する。TEOSはチタノキサンやアルミノキサンの原料と比べるとはるかに加水分解しにくく、したがって高分子量ポリシロキサンの合成は難しい。従来行っていたアルコキシドの加水分解を抑制するための部分キレート化は行わず、塩酸を触媒として、加える水の量と加水分解縮合温度をできるだけ高温にすることによって、例えば、紡糸可能な固体ポリシロキサンを得ることができる。

3.2 構造

シロキサン結合の側鎖有機基は下記反応式の場合エトキシ基のみである。すなわちセラミックス(シリカ)前駆体ポリシロキサンの構造は、理想的にはポリジエトキシシロキサンである。



3.3 ゲル化過程・熱分解過程

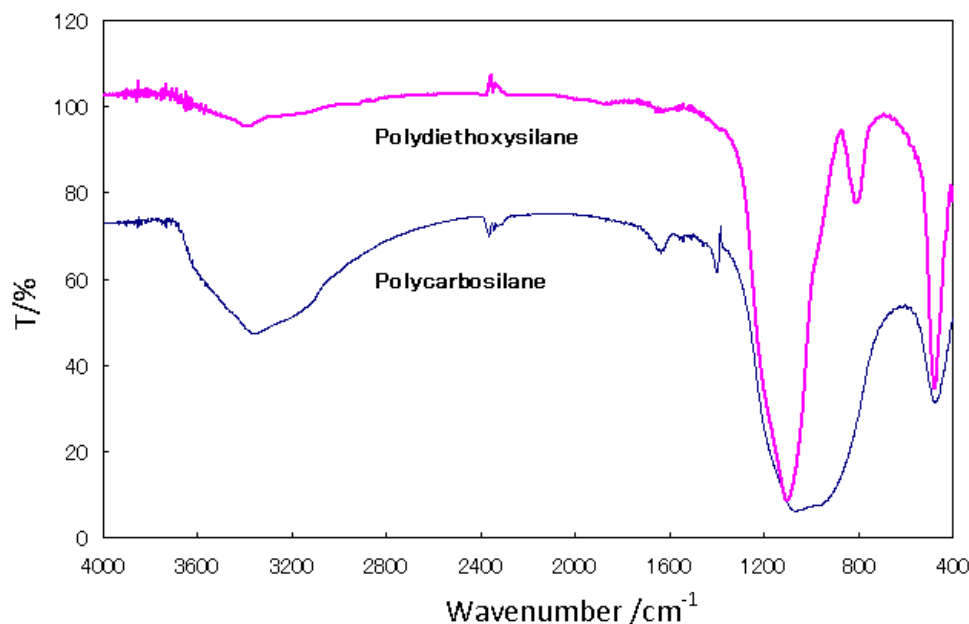
ポリジエトキシシロキサンは短時間では加水分解しない。すでに紹介した流動界面ゾルーゲル法で、ポリジエトキシシロキサンナノシートを流れる水面上で数秒以内でゲル化させようとしても、ゲル化しない。したがって流動界面ゾルーゲル法ではプロセスのケミカルデザイン、すなわち水のpHを制御することによりゲル化を促進させる。水にアルカリ、例えば水酸化ナトリウム、を添加し、pHを9程度とし、さらに、酢酸アンモニウムを $3\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 程度加え、pHを7にして、 40°C 前後の水温で流動界面ゾルーゲル法を実施すると、安定してシリ化前駆体ゲルナノシートを得ることができる。すなわちポリシロキサンはアルカリにより促進され、シロキサン結合による架橋の発達でゲル化する。

繊維では、高分子量ポリジエトキシシロキサンを繊維化し、水蒸気雰囲気中で加熱することによりゲル化する。

ゲル化物は、水、あるいは酸素存在下で焼成すればシリカに転換する。

3.4 熱分解で得られるセラミックス

ポリシロキサンから得られる代表的なセラミックスはシリカ(SiO_2)である。酸素雰囲気や大気中で焼成することにより得られる。焼成雰囲気をアンモニアにしても、FT-IRスペクトル測定から明らかなように、 900cm^{-1} 付近にSi-N結合の生成を示すピークは現れず、窒化は起こらない。これは、ポリカルボシランなどと異なりSiにCが直接結合していないことに起因する。



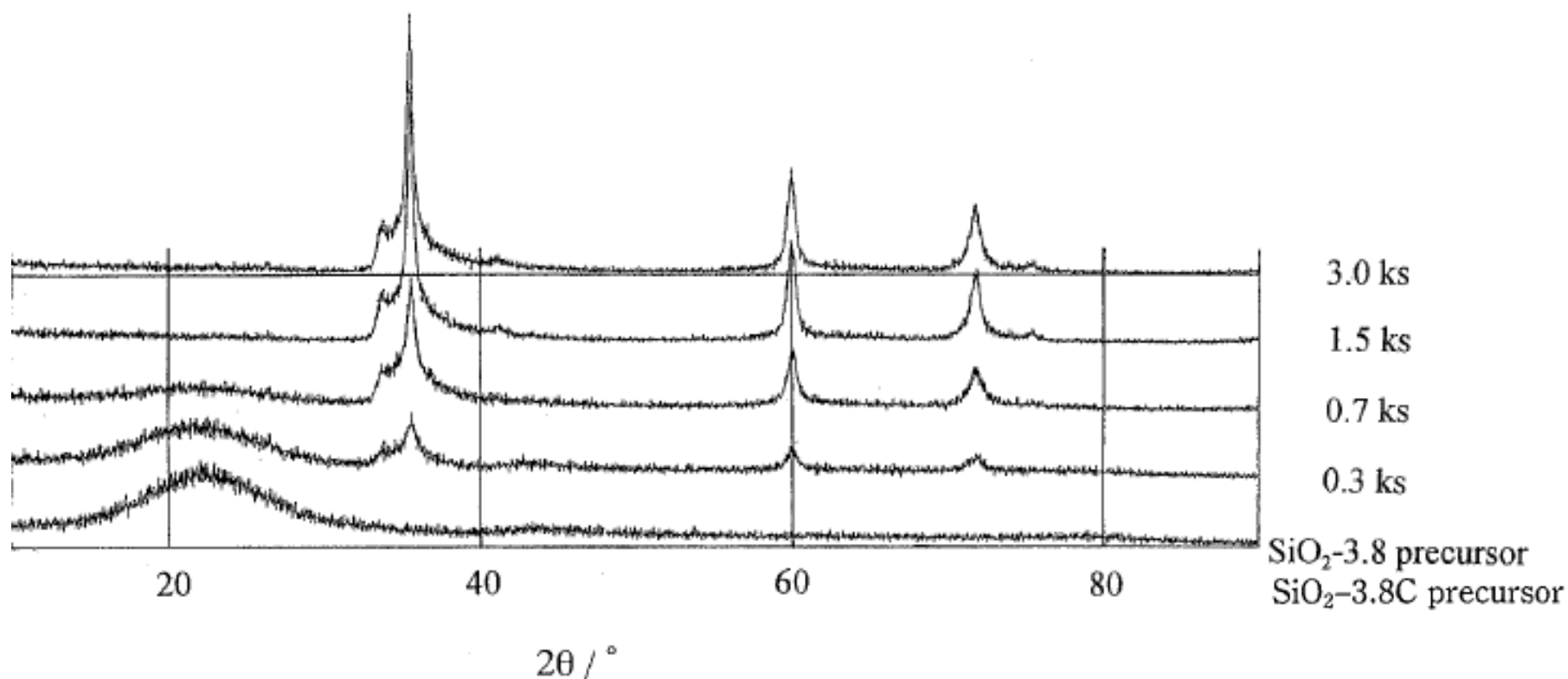
ポリカルボシランとポリジエトキシシランを紡糸しアンモニア中 1300°C で処理した繊維のFT-IRスペクトル

シリカ源としてのポリシロキサン

ポリジエトキシシロキサンのようなポリシロキサンを非酸化性雰囲気である窒素やアルゴンガス中で熱分解すると、 SiO_2 とアルコキシ基由来の炭素(C)の混合物が得られる。

1000～1400℃程度の温度範囲では非晶質シリカと非晶質炭素の混合物であり、それ以上の温度になるとクリストバライトの結晶相が現れ、1600℃程度の熱分解で熱炭素還元反応によりSiCが生成する。この熱処理を真空中で行うと1500℃程度で同様の反応が起こる。

この熱炭素還元反応を利用し、 SiO_2 とCの量を最適化した、例えばポリシロキサン-フェノール樹脂ハイブリッド前駆体から高収率でSiCナノ粒子を合成することができる。



XRD patterns of the powders synthesized from the SiO_2 -3.8C precursor at various heating periods at 1873 K.

(M. NARISAWA, *et.al.*, *Journal of the Ceramic Society of Japan* 107 [3] 285-289 (1999))

3.5 ポリシロキサンから得られるセラミックスの応用

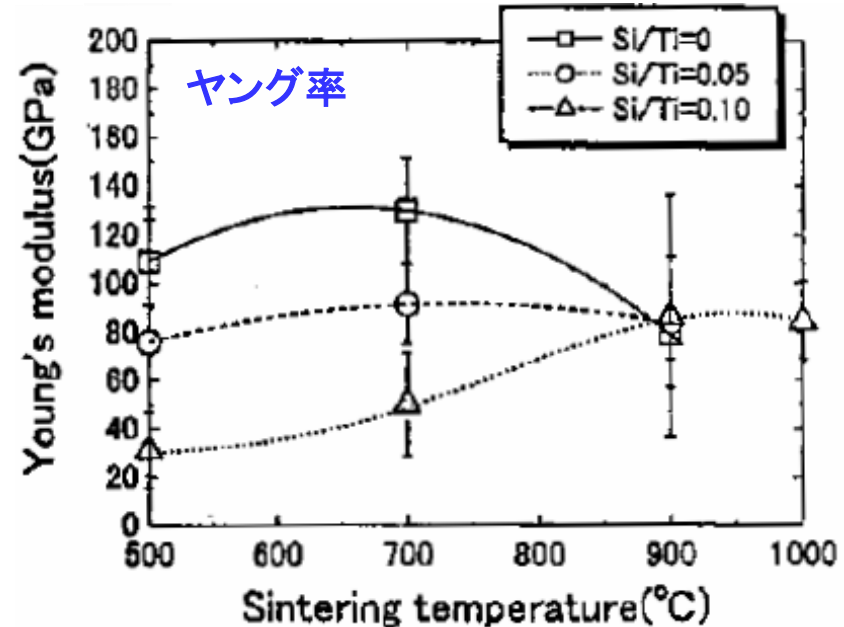
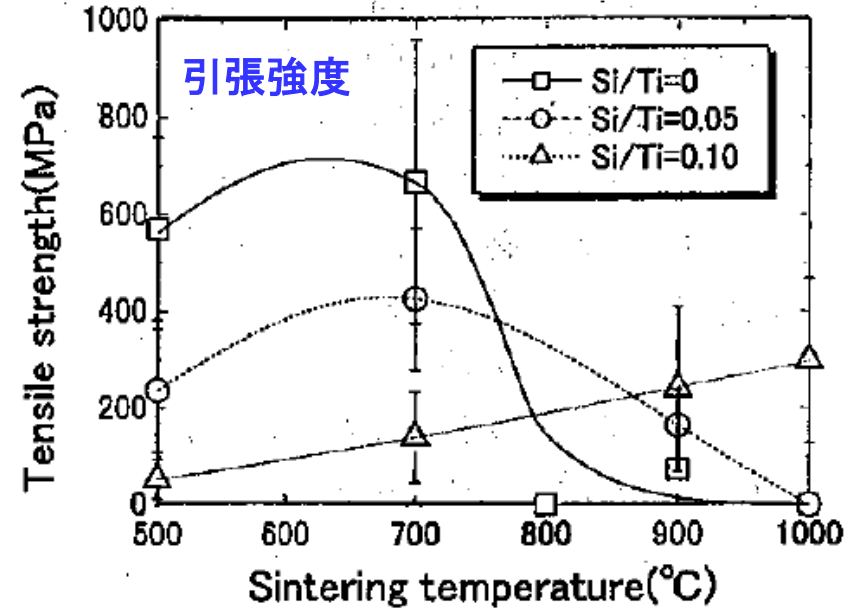
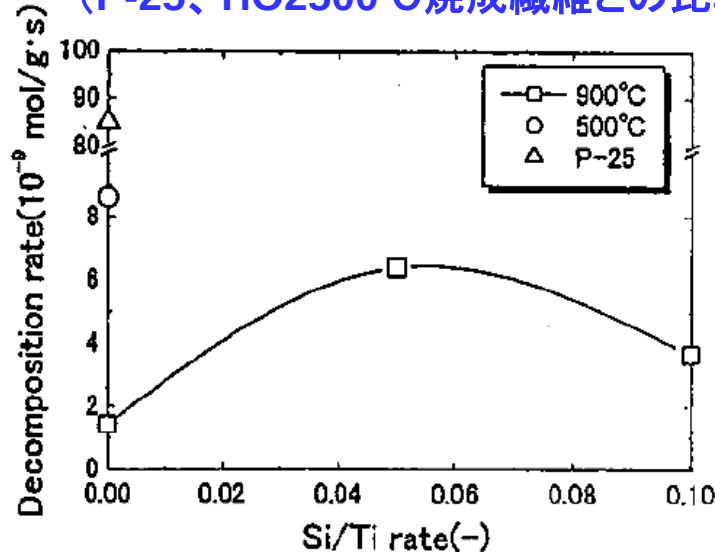
無機高分子としてのメリットはやはりセラミックスの形態制御ができること、組成を他の酸化物前駆体との分子レベルでの均一な混合によるハイブリッド体ができることである。

酸化物繊維の物性に及ぼす影響

テトライソプロポキシチタンとテトラエトキシシランを図中の割合で混合し同時加水分解縮合で合成した前駆体から得られた $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 繊維の物性は SiO_2 をわずかに加えただけで劇的に変化する。

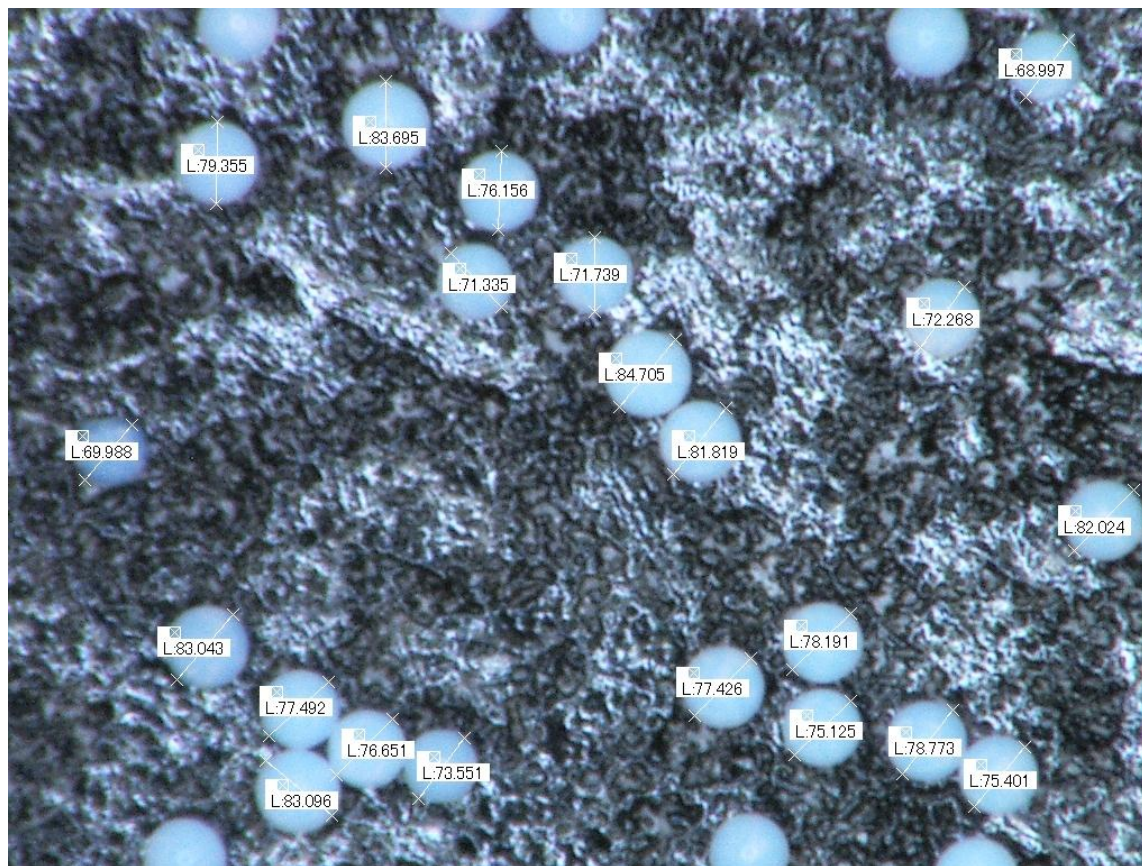
この変化は光触媒活性にも明らかに影響を与える。

トリクロロエチレンに対する分解活性の比較 (P-25、 TiO_2 500°C焼成繊維との比較)



最近の応用例

有機-無機ハイブリッド法で直径を20～500 μ m程度の範囲で制御して球状多孔質体を作製できるようになった。



粒径を80 μ mに制御したSiO₂球状多孔質体

4. その他のポリメタロキサン

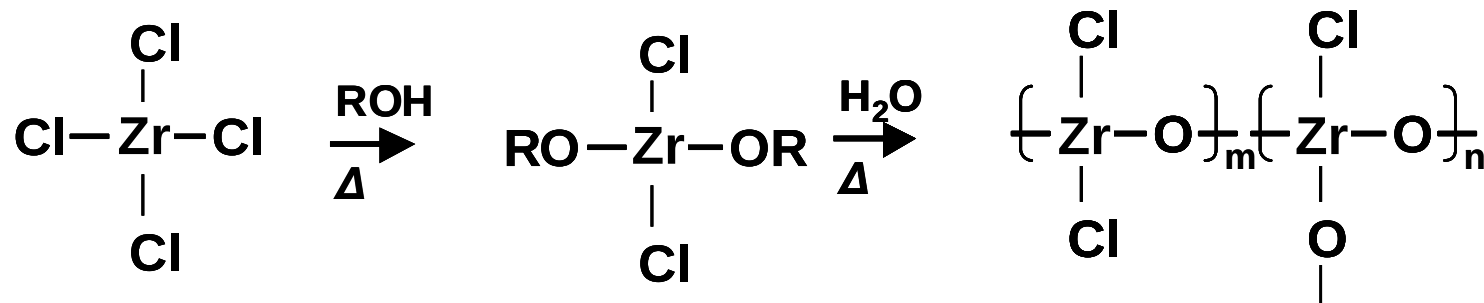
4.1 ポリジルコノキサン

ジルコニウムアルコキシドを原料とする場合は他のポリメタロキサンと同様の合成方法で一般的に合成される。このポリジルコノキサンを前駆体として合成されるジルコニアは融点が2700℃と高く、耐熱性セラミックスとして期待されている。

Mo吸着剤

特殊な合成方法として、四塩化ジルコニウムを出発物質とし、ジルコニウム原子上に塩素を置換基として残す、1gあたり250mg以上のMoを吸着するジルコノキサン系Mo吸着剤(PZC)がある。ポリチタノキサン(PTC)と同様、(n, γ)法⁹⁹Moを利用する^{99m}Tcジェネレータ用吸着剤として大きな期待を集めている(Mo吸着剤の説明は1.ポリチタノキサン参照)。

四塩化ジルコニウムを出発物質とするポリジルコノキサンの合成方法



四塩化ジルコニウム

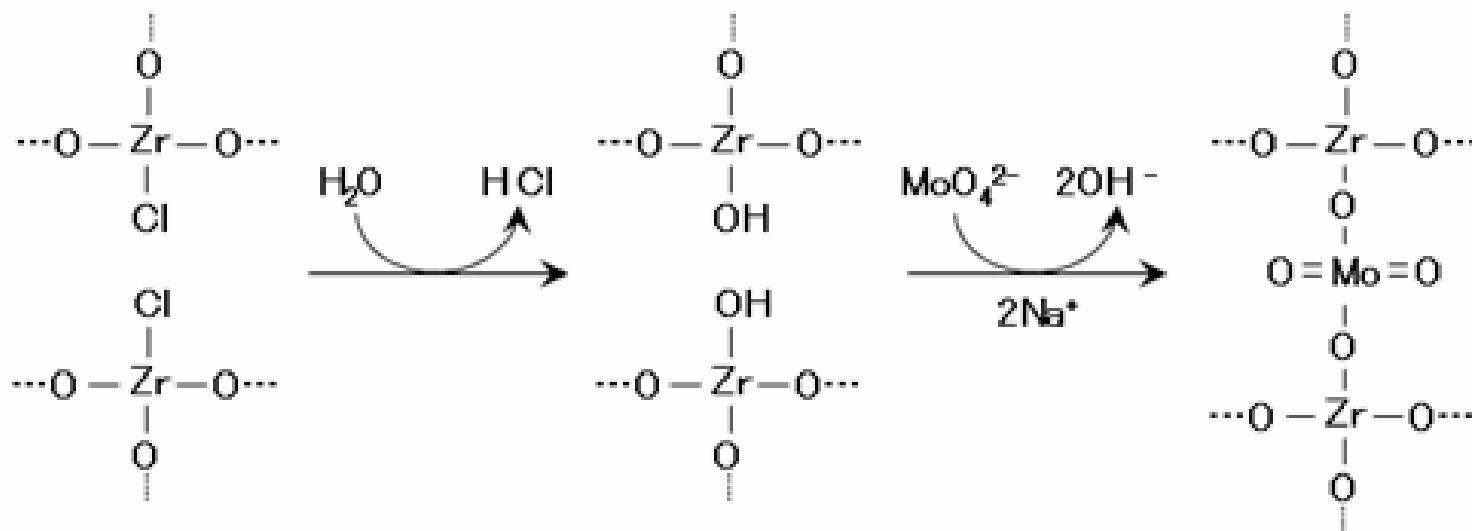
Zr原子上に塩素を置換基として有する
ポリジルコノキサン

(Mo吸着剤の場合PZC(Polyzirconium compound)
と呼ばれている)

ジルコニウム原子上に塩素を置換基として有するPZCのMo吸着メカニズムは以下のように推定されている。

アルコキシドを出発物質とするポリジルコノキサンでも同様にMoを吸着すると考えられるが、実際には1/2以下の吸着量しか示さない。したがって、より多くのMoを吸着させるためには、構造中により多くの塩素原子を残す必要があるが、水中でのPZCの安定性を考慮すると、今のところ、 $\text{Cl/Zr} \doteq 0.8$ と考えられている。

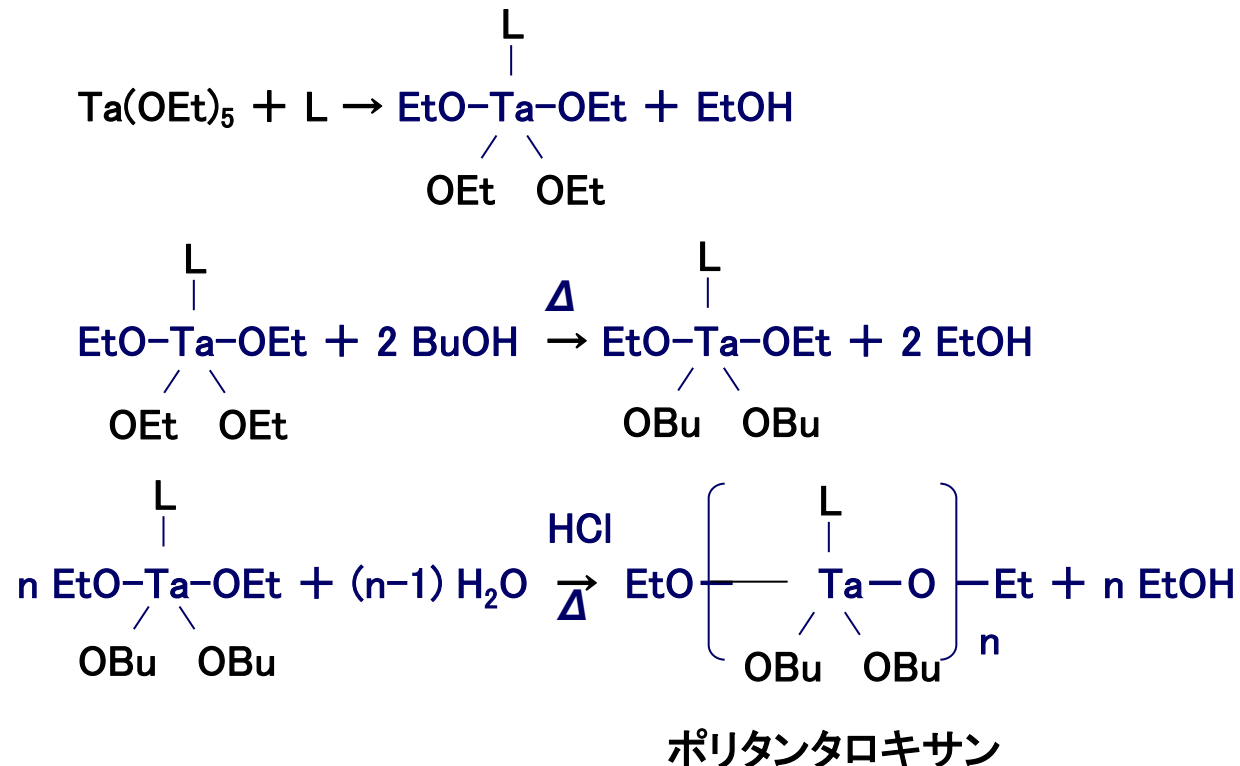
四塩化ジルコニウムを出発物質とするポリジルコノキサンのMo吸着メカニズム



4.2 ポリタントロキサン

ポリタントロキサンは、タンタルのアルコキシドを原料にして合成することができる。ペンタエトキシタンタルは液体で使用しやすい原料である。ポリタントロキサンの合成方法を以下に示す。五酸化タンタルのナノシートを流動界面ゾルーゲル法で作製するために分子設計された方法である。

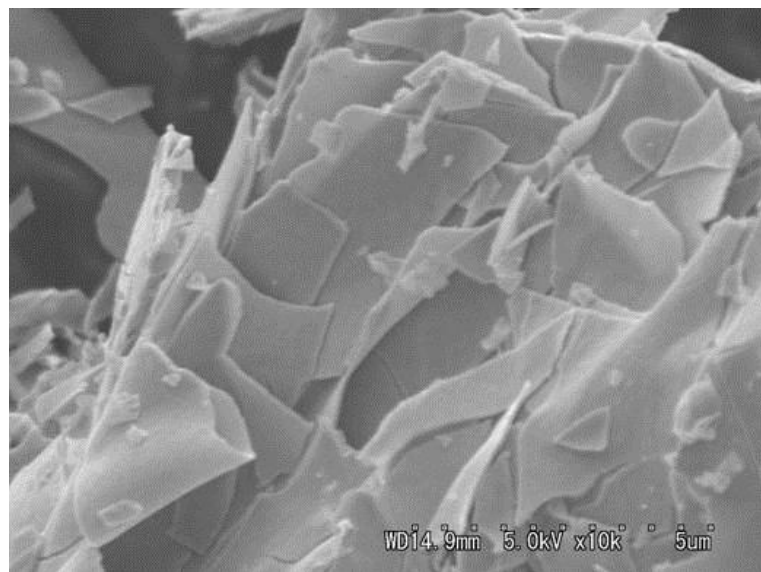
ペンタエトキシタンタルを出発物質とするポリタントロキサンの合成方法



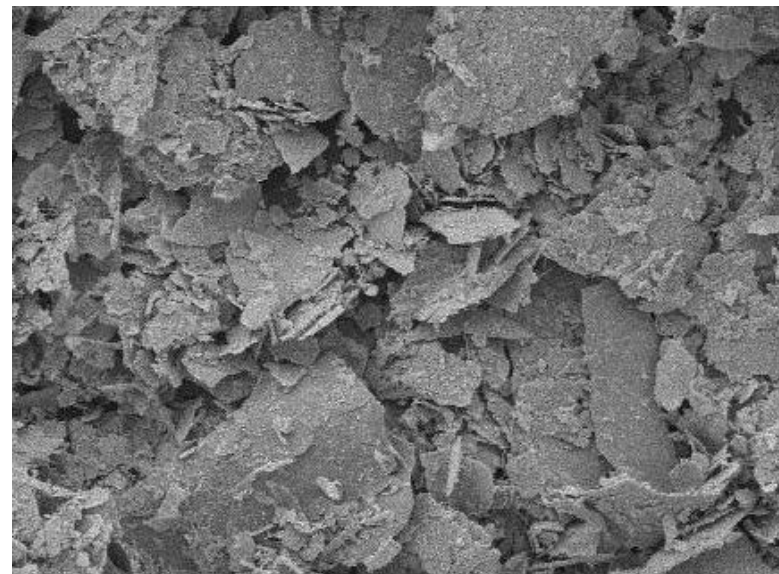
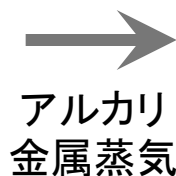
酸化物以外のナノシートへの転換

流動界面ゾルゲル法で作製したゲルナノシートを大気中で焼成し合成した五酸化タantalのナノシートを、アルカリ金属の蒸気で還元して金属タantalのナノシートを合成することができる。

また、五酸化タantalナノシート(無色)をアンモニア雰囲気中で熱処理すると朱色の窒化タantalナノシートへと転換する。



Ta_2O_5 ナノシート



Taナノシート

4.3 複合系ポリメタロキサン

複数の金属元素を含むメタロキサンである。2元系のみならず3元系あるいはそれ以上の複合系の合成が可能である。すでにナノシート化したチタン酸バリウム、繊維状シリカ-チタニアについては紹介した。複合系の特徴は、得られるセラミックスが単にそれぞれの金属成分の酸化物の混合体ではなく、酸素原子を介して原子、分子レベルで均一な混合系が生成する温度領域があり、ガラスから結晶性酸化物まで種々の組成、構造を有する材料合成の可能性を有している点である。

ポリメタロキサンの構造解析は難しく、したがって非晶質から結晶質への移行過程の解析も困難であるが、その分新しい機能性材料が生まれる可能性が大きな魅力的な研究分野である。

