



◆国内総代理店
(輸入販売元)

NTKインターナショナル株式会社 名古屋支店 先端素材チーム
〒450-0003 名古屋市中村区名駅南3-7-15 NTKビル
TEL: (052) 561-8121 / FAX: (052) 582-6376
Website: www.ntkinternational.com

◆製造元
(Made in USA)

Starfire Systems, Inc.
8 Sarnowski Drive, Glenville, New York 12302

Company Overview

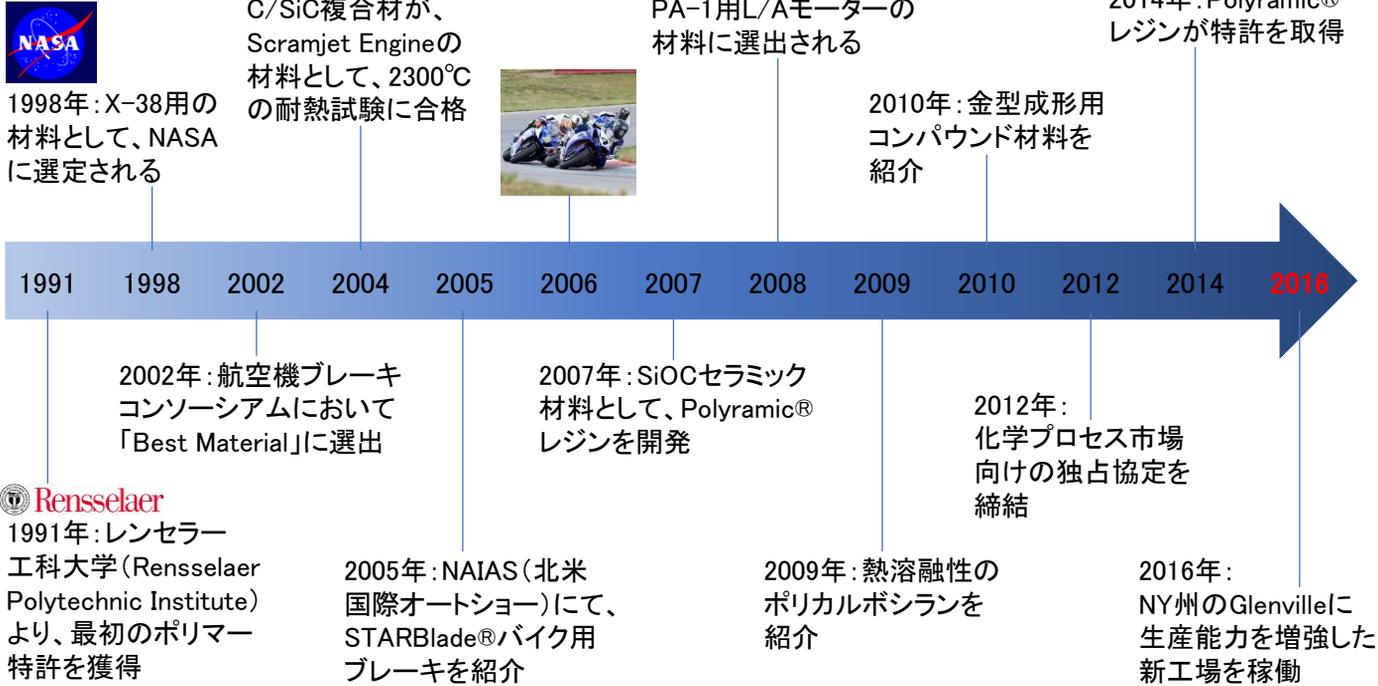
Starfire Systems社は、米国ニューヨーク州Glenvilleに立地する、ポリマー由来セラミックスと「Polymer-to-Ceramic™」技術に特化した特殊素材メーカーです。



Starfire社は、高分子マトリックス複合材料(PMC)や、酸化物系およびSiC系セラミックス基複合材料(CMC)の成形に適した、シリコンベースのプレセラミックポリマーやゾル・ゲル由来の酸化物成形材料の合成を基幹事業としています。

Starfire社の高耐熱素材は、耐久性と軽量性、高耐熱性のCMCが必要とされる用途に広くお使いいただけます。また、Starfire社は、半導体用のCVD前駆体やマトリックスの緻密化、薬剤合成のための高純度中間物といった、さまざまな特殊シラン化合物を開発しています。

◆ 沿革



◆ Starfire製品の応用分野

市場	用途	Starfire製品の利点
航空宇宙	<ul style="list-style-type: none"> 宇宙：ロケットノズル、スラスタブロック、アブレータ材 戦闘機：高温エンジン部材、レドーム、ブレーキ 民間機：内装部品、レドーム、ブレーキ、高温構造部材 	<ul style="list-style-type: none"> 軽量 強度と靱性の組合せ 熱的安定性
エレクトロニクス	<ul style="list-style-type: none"> プリント基板 ラミネート LED 	<ul style="list-style-type: none"> 耐熱・耐火性 設計・サイズの柔軟性 誘電性の改善
半導体	<ul style="list-style-type: none"> CVD前駆体 スピコート材料 	<ul style="list-style-type: none"> 低誘電率(Low k)コーティング SiC または SiOCコーティング
摺動材	<ul style="list-style-type: none"> ブレーキ・システム(自転車、バイク、自動車、電車、航空機) クラッチ 	<ul style="list-style-type: none"> 耐熱性、耐食性 強度と靱性の組合せ
ミリタリー	<ul style="list-style-type: none"> 軍隊・警察向け胴体防護具、車両装甲防護、肩打ち式ロケットランチャー 	<ul style="list-style-type: none"> 軽量 強度と靱性の組合せ
一般産業	<ul style="list-style-type: none"> エンジンブロック、排気フィルター 高圧ポンプシステム、保護用遮蔽材 	<ul style="list-style-type: none"> 耐熱性 耐食性

Products / Pre-Ceramic Polymer

ポリマー含浸焼成(Polymer Infiltration and Pyrolysis : PIP)法により、セラミックス基複合材料(Ceramic Matrix Composites : CMC)を製作するための前駆体ポリマー。真空条件で基材に含浸し、不活性雰囲気(窒素 または アルゴン)で焼成する。加熱時の昇温速度は「1℃/分」が推奨。PIP(含浸・焼成)サイクルは7~8回が目安。

◆ SiC前駆体ポリマー(ポリカルボシラン) / StarPCS™

- 200~400℃の硬化処理により、高強度のグリーン体を形成し、850℃以上の高温焼成でナノスケールの結晶粒度を持ったSiC(熱分解生成SiC)を形成
- 焼成後マトリックスの耐熱上限は2200℃ ※成形条件や使用環境により異なります。

代表製品 : SMP-10 / AHPCS (AllylHydridoPolyCarboSilane)

>> 主な特長 <<

- 溶剤を含まない液性ポリマー(琥珀透明の液体)
- 粘度は室温で40~100 cP
- 焼成時の収率は72~78 wt%(1000℃まで)
- Cl原子を含まないため、腐食性のある副生成物を発生しない
※熱分解の過程で、主に水素(H₂)とメタン(CH₄)が発生します。
- ほぼ化学量論比のSiCマトリックス(Si:C=1:1)を形成
- 熱処理の温度に依存して結晶構造と密度が変化
☞ 850℃(アモルファスSiC) → 1400~1600℃(β-SiC) → 1,800~2,000℃(α-SiC)

>> 主な用途 <<

- ポリマー含浸焼成(PIP)法による、SiC基繊維強化複合材料(CMC)の製作
☞ SiC繊維 または 炭素繊維との複合化
- SiC微粒子を充填してスラリー状にすることで、コーティング剤、接着剤に応用することも可能



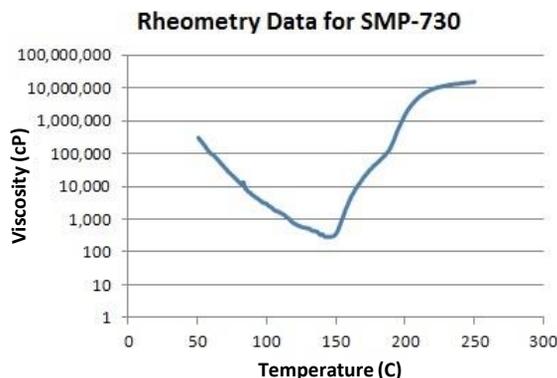
固体グレード : SMP-730 / Allylhydridophenylpolycarbosilane

>> 主な特長 <<

- 室温で固体、低温で溶融成形可能なSiC前駆体ポリマー
低温域では熱可塑性であり、100℃までは溶融成形が可能
- 高温で熱処理すると、熱硬化性となる
Gel Pointは190~200℃、300℃以上で硬化
- 焼成により、高密度でカーボンリッチなSiCを形成
- 焼成時の収率は65~67 wt%(1000℃での焼成時)
- 独自配合の耐熱フィラーを充填したオプションあり
(フィラー含有量 : 最大15 vol%)
- 充填剤入りレジンの収率は85~90 wt%

>> 主な用途 <<

- フィルム、プリプレグ、モールドイング・コンパウンド、CMCの製作
☞ SiC繊維 または 炭素繊維との複合化
- 金型を利用したニアネットシェイプ成形
- SMP-10との併用により、焼成後マトリックスの緻密化が可能



◆ SiOC前駆体ポリマー(ポリシロキサン) / Polyramic® Resin

- Si-O結合を主鎖とし、側鎖に有機官能基を持つポリマー
液状のレジンで、硬化処理(180~300°C)によりプラスチックライクなグリーン体を形成し、600°C以上の焼成によって、シリコンオキシカーバイド(SiOC)を形成する。
- 焼成後マトリックスの耐熱上限は1100°C ※成形条件や使用環境により異なります。
- ヒドロシリル化触媒(白金錯体)、または、フリーラジカル(有機過氧化物)を利用した硬化処理が有効

代表製品 : SPR-688 / Methylphenylvinylpolysiloxane

>> 主な特長 <<

- 粘度は300~2000 cP(450~800 cPが標準、無色透明~やや不透明の液体)
- 分子中に有機官能基(メチル基、フェニル基、ビニル基)を含む
 - ☞ 焼成時に遊離炭素が発生するため、高温環境下では酸化しやすい
- 180~300°Cの熱処理で硬化し、グリーン体を形成
 - ☞ 硬化後マトリックスは耐火性に優れる(難燃規格UL-94 V-0に適合)
- 850~1100°Cの焼成により、SiOCマトリックスを形成
- 焼成時の収率は62~80 wt%



>> 主な用途 <<

- 各種強化繊維(炭素繊維、ガラス繊維、アルミナ繊維)との複合化
 - ☞ 2Dラミネート 高分子マトリックス複合材料(PMC)の製作
 - ☞ SiOC基繊維強化複合材料の一次成形(Wet Layup、RTM)
- プリプレグの製作
- 光ラジカル重合開始剤を用いたUVキュアによるフィルム製作



代表製品 : SPR-212 / Vinylmethylpolysiloxane

>> 主な特長 <<

- 粘度は12~26 cP(無色透明~淡黄色の液体)
- 分子中に含まれる有機官能基が少ない
- 850~1100°Cの焼成により、SiOCマトリックスを形成
 - ☞ 高温焼成により耐酸化性に優れたマトリックスを形成
- 焼成時の収率は60~72 wt%
- 焼成後マトリックスの継続的な耐熱温度は最大で1100°C
 - ☞ 断続的には1400°Cの温度環境でも使用可能(1時間まで)

>> 主な用途 <<

- **マトリックスの緻密化(含浸・焼成)**
- フィラー(SiC微粒子)を充填してスラリー状にすることで、コーティング剤に応用することも可能

※ SiOC基繊維強化複合材料(CMC)を製作する際は、「SPR-688」と「SPR-212」を組み合わせで使用することが推奨されます。

- SPR-688 : 一次成形(グリーン体の製作)
- SPR-212 : マトリックスの緻密化(含浸・焼成)



STARBlade® PTCC Motorcyle Brake Rotor
SiOC基炭素繊維(長繊維)強化複合材料

Polymer-to-Ceramic™ Composite (PTCC)

◆炭素繊維強化複合材料の事例

Starfire Systems社のポリマー由来セラミックス複合材料(PTCC)は、耐久性と耐熱性に優れたセラミックス基繊維強化複合材料であり、さまざまなアプリケーションに使用いただけます。

Starfire Systems社のシリコンカーバイド(SiC)前駆体ポリマー「StarPCS™(ポリカルボシラン)」と、シリコンオキシカーバイド(SiOC)前駆体ポリマー「Polyramic® Resin(ポリシロキサン)」は、耐久性の高いセラミックス基複合材料(CMC)の製作に使用できます。

表1は、CMCの作製に使用される代表的なポリマーの初期特性を示したものです。

物性	SMP-10	SPR-688	SPR-212
形成されるマトリックス	SiC	SiOC	SiOC
粘度 (cP)	40~100	300~2000	12~26
収率 (wt%)	72~78	65~68	60~65
液体密度 (g/cm ³)	1.0	1.1	1.0
セラミック密度※ (g/cm ³)	2.20	1.99	1.95

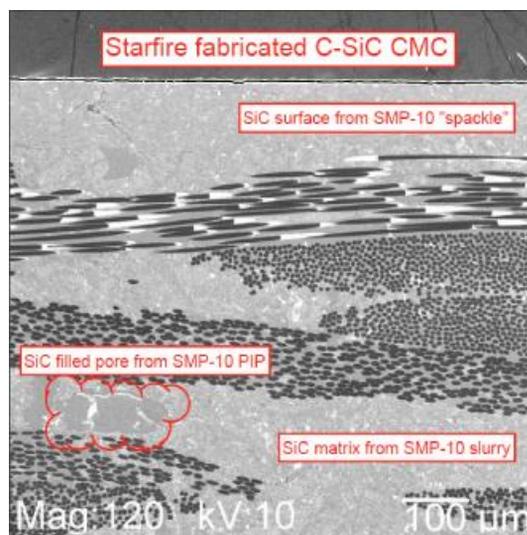
表1: CMC製造に使用される代表的なStarfireポリマーの特性

※850°C焼成時

表2は、6K 5HS炭素繊維クロスを0°/90°方向に積層した、典型的な6mm 2-D炭素繊維強化ラミネート(複合材料)の機械的特性と熱的特性を示しています。

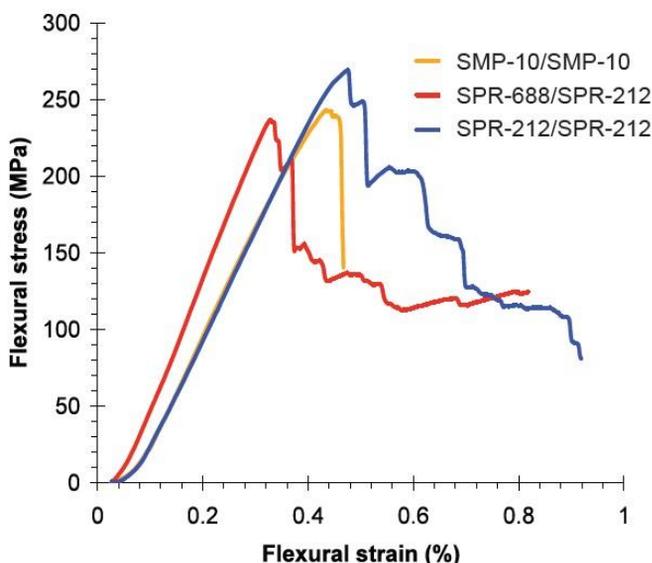
詳細	組成		
成形用ポリマー	SMP-10	SPR-688	SPR-212
含浸用ポリマー	SMP-10	SPR-212	SPR-212
強化繊維	炭素繊維	炭素繊維	炭素繊維
マトリックス	SiC	SiOC	SiOC
曲げ強度 (MPa)	249	240	255
曲げ弾性率 (GPa)	73.0	81.1	78.3
熱膨張率 (ppm/°C)	6 _Z 1.0 _{X-Y}	6 _Z 1.2 _{X-Y}	7 _Z 1.7 _{X-Y}
熱伝導率 (300°C) (W/m-K)	1.5 _Z	2.0 _Z	2.5 _Z

表2: 一般的なPolymer-to-Ceramic™複合材料の特性



高密度化したC/SiC Polymer-to-Ceramic™ (SiC基炭素繊維強化)複合材料のマイクロ構造

セラミック・マトリックスは、SMP-10ベースの複合材料がSiC基、SPR-688とSPR-212ベースの複合材料がSiOC基であり、すべての基材はポリマー含浸焼成(PIP)法を用いてStarfire Systems社で製作したものです。



◆ Polysilamide (ポリシラミド) SIL-1400 / Siloxane-immide Hybrid Material

>> 主な特長 <<

- **ポリイミドとシロキサンハイブリッドポリマー(エタノール溶液)**
※ SIL-1400の分子構造には、Si(ケイ素)、O(酸素)、C(炭素)以外に、N(窒素)が含まれます。
- 室温下では琥珀透明～黄褐色の液体
※ SIL-1400は、冷やすと白濁し、粘度が高くなる性質があります。白濁したポリマーを約60°Cで温めると、ポリマーの性能には影響を与えず、元の色と粘度に戻ります。
- 水、エタノールに可溶
- 高分子マトリックス複合材(Polymer Matrix Composites)の製作に適する
☞ E-Glass、S-2 Glassといった強化繊維との複合化が可能
- RTM(レジン・トランスファー・モールド)に適する
- プリプレグ製作にも応用可能
- 150～200°Cの熱処理で硬化(硬化時の収率は86～90 wt%)
- **硬化後マトリックスは、酸化性雰囲気において300～350°Cまで安定**
高温焼成すると、シリコンオキシカルボナイトライド(SiOCN)を形成(焼成時の収率は45～55 wt%)



>> 主な用途 <<

- 2D/3D PMC、熱遮蔽材料、プリント基板、電気絶縁部品、航空機内装部品、レドーム等

◆ 酸化物セラミックス材料 / Oxide Ceramics

- 酸化物セラミックス、または、酸化物系複合材料(Oxide/Oxide複合材)の成形材料
- 酸化物皮膜のコーティング材料

代表製品 : SL-411 / Alumina Forming Refractory Filled Slurry

- 酸化物微粒子(アルミナ、リン酸アルミニウム、ベーマイト)を混合したWater Basedスラリー
- 粘度は100～500 cP
- **酸化物系複合材料(アルミナ繊維強化アルミナ複合材料等)の成形に適する**
- プリプレグ製作にも応用可能
- 硬化温度は150～250°C(複合材料成形時は、真空バギングして硬化する)
- 焼成温度は600～900°C ☞ **焼成により α アルミナのマトリックスを形成**
- 焼成時の収率は70～80 wt%
- 不活性ガス不要(焼成温度が1,100°Cを超える場合は除く) / 溶剤や触媒は不要

代表製品 : IFC-508 / Ethanol Solution of Ethoxy Alumina Phosphate

- リン酸アルミニウムの薄膜を形成するコーティング剤
- 粘度は10 cP未満の無色透明の液体(エタノール溶液)
- スプレー、ディップ、ワイプなど、さまざまなコーティング方法が利用可能
- 基材の酸化および腐食防止に有効
- セラミックス基材に加え、**繊維やステンレススチール、チタン合金へのコーティングが可能**
- 300～600°Cの硬化処理で、薄く高密度なセラミック皮膜を形成
- 形成された皮膜は、約1,300°Cまでの使用環境に対応

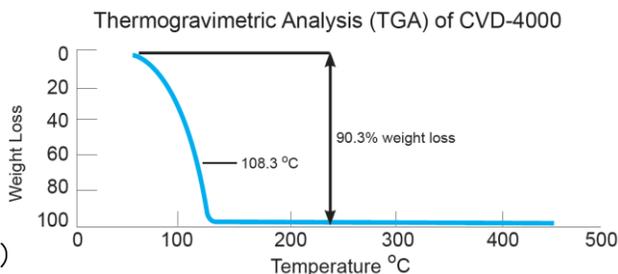
◆ CVD-SiC前駆体 / Starfire® CVD

- 化学蒸着法 (CVD: Chemical Vapor Deposition)を用いて、SiCを蒸着させるための前駆体

代表製品 CVD-4000 : 環状シラン

>> 主な特長 <<

- 分子構造は $[\text{SiH}_2\text{CH}_2]_n$ ($n=3-7$)
- 付属的反応物を必要としない一液性の材料
- ほぼ化学量論比のSiCマトリックス (Si:C=1:1)を形成**
- 常圧100°C、減圧(10 torr)40°Cから気化が進行
- 600°Cから析出が可能(700~900°Cでの析出が効果的)
- 700~900°Cの析出で、アモルファスSiCを形成
- 析出した皮膜を1100~1300°Cでアニールすることで、結晶成長が進み、 β -SiCを形成する
- 反応によって放出されるのは水素のみ※であり、塩化水素のような有毒ガスを発生しない**
※析出が不十分な場合、微量のシランが発生する場合があります。



☞ 人体や設備、環境への負荷が小さいため、CVD装置の高維持費やダウンタイムに起因する隠れたコストの大幅な削減に繋がります。

>> 主な用途 <<

- CVD-SiCコーティング
 - 化学気相浸透 (CVI) 法によるセラミックス基複合材の製作
- Starfire Systems社のCVD前駆体には、合成の過程で使用する試薬由来の微量金属が含まれますが、ご要望に応じて、蒸留による高純度化を行ってご提供することも可能です。詳しくは、お問合せください。

CVD-4000の利点: MTS(メチルトリクロロシラン)およびシランとの比較

材料	CVD-4000	MTS	シラン
前駆体	CVD-4000のみ	MTS + 水素	シラン + メタン(CH ₄)
危険性	引火性(引火点=9°C) 水分との反応: 140°C	腐食性、毒性、 引火性(引火点=3°C) 水分との反応: 20°C	自然発火性
SiC含有率	91% SiC (9% 水素)	27% SiC (71% 塩素、2% 水素)	シラン: 87% SiC (13% 水素) シラン + メタン: 83% SiC (17% 水素)
副生成物	水素	塩化水素(腐食性が高い)、 水素、シラン	水素
皮膜組成	1:1 ± 0.5%	1:1 ± 1.2% (+ 塩素、微量金属)	1:1
析出温度	600~900°C	1,000~1,400°C	200~500°C

◆ Specialty Organo-silane Chemistry

Starfire Systems社は、お客様の用途に応えるため、10年以上に渡って有機シラン化学の研究に特化してきました。カルボシラン、カルボシロキサン、そして関連化合物に関する豊富な研究を通して、SiCの薄膜を形成するCVD前駆体や薬剤合成用の高純度中間体、有機発光ダイオード(OLED)、触媒、シリコンや他の化学合成用の架橋剤・カップリング剤など、さまざまな種類のシラン化合物を開発しました。

その中でも特に、Starfire Systems社は、シラシクロブタンやペンタン、ヘキサンを含む複素環シランを製造するための、高効率の合成ルートを創出してきました。下記は一部の製品リストですが、ご要望により、この技術に基づいたさらなる化合物やより先進的な中間体を製造することも可能です。

Allyldimethylsilane	[3937-30-2]	Diallyldimethylsilane	[1113-12-8]
Allyltrimethylsilane	[762-72-1]	Diallyldiphenylsilane	[10519-88-7]
Alloxytrimethylsilane	[18146-00-4]	1,3-Diallyltetramethyldisiloxane	[17955-81-6]
Benzyltrimethylsilane	[1613-70-5]	1,1-Dichloro-1-silacyclobutane	[2351-33-9]
Benzyltrimethylsilane	[770-09-2]	1,1-Dichloro-1-silacyclopentane	[2406-33-9]
Bis(chloromethyl)tetramethyl-1,3-disiloxane	[2362-10-9]	1,1-Dichloro-1-silacyclohexane	[2406-34-0]
1,4-Bis(dimethylsilyl)benzene	[2488-01-9]	1,3-Diethoxy-1,3-dimethyl-1,3-disilacyclobutane	[1967-90-4]
1,4-Bis(trimethylsilyl)benzene	[13183-70-5]	1,3-Dimethyl-1,3-diphenyl-1,3-disilacyclobutane	[1628-03-1]
Bis(trimethylsilyl)methane	[2117-28-4]	1,1-Dimethyl-1-silacyclobutane	[2295-12-7]
t-Butyldimethylchlorosilane	[18162-48-6]	1,1-Dimethyl-1-silacyclopentane	[1072-54-4]
t-Butyldimethylsilane	[29681-57-0]	1,1-Dimethyl-1-silacyclohexane	[4040-74-8]
t-Butylmethyldichlorosilane	[18147-18-7]	1,1-Dimethoxy-1-silacyclobutane	[33446-84-3]
Chloromethyldimethylchlorosilane	[1719-57-9]	Dimethylisopropylsilane	[18209-61-5]
Chloromethyldimethylethoxysilane	[13508-53-7]	Diethylmethylsilane	[760-32-7]
Chloromethyldimethylmethoxysilane	[18143-33-4]	Diphenylsilane	[775-12-2]
Chloromethyldimethylisopropoxysilane	[18171-11-4]	1-Methyl-1-silacyclobutane	[765-33-3]
Chloromethyldimethylsilane	[3144-74-9]	1-Methyl-1-silacyclohexane	[765-62-8]
Chloromethyldimethylphenylsilane	[1833-51-8]	1-Methyl-1-silacyclopentane	[765-41-3]
1-Chloro-1-methyl-1-silacyclobutane	[2351-34-0]	1-Methyl-1-vinyl-1-silacyclobutane	[3514-67-8]
1-Chloro-1-methyl-1-silacyclopentane	[2406-31-7]	1-Methyl-1-vinyl-1-silacyclohexane	[19495-14-6]
1-Chloro-1-methyl-1-silacyclohexane	[18148-37-3]	1-Methyl-1-vinyl-1-silacyclopentane	[3944-18-1]
Chloromethylmethyldichlorosilane	[1558-33-4]	Phenyldimethylsilane	[766-77-8]
Chloromethyl(methyl)dimethoxysilane	[2212-11-5]	Phenylsilane	[694-53-1]
Chloromethylmethyldiethoxysilane	[2212-10-4]	Phenyltrimethylsilane	[768-32-1]
Chloromethylmethyldiisopropoxysilane	[2212-08-0]	1-Silacyclopentane	[288-06-2]
Chloromethyltrichlorosilane	[1558-25-4]	1-Silacyclohexane	[6576-79-0]
Chloromethyltrimethoxysilane	[5926-26-1]	1,1,3,3-tetrachloro-1,3-disilacyclobutane	[2146-97-6]
Chloromethyltriethoxysilane	[15267-95-5]	1,1,3,3-tetraethoxy-1,3-disilacyclobutane	[63238-93-7]
Chloromethyltriisopropoxysilane	[18162-82-8]	1,1,3,3-tetramethyl-1,3-disilacyclobutane	[1627-98-1]
Chloromethyltrimethylsilane	[2344-80-1]	2-(Trimethylsilyl)ethanol	[2916-68-9]
Chlorodiisopropylsilane	[2227-29-4]	Vinyltrimethylsilane	[754-05-2]
Diallylmethylsilane	[2043-08-5]		
(Dichloromethyl)methyldichlorosilane	[1558-31-2]		

本誌に掲載した以外にも、接着剤グレードのポリカルボシランやスピンコート用のポリカルボシランなど、複数の製品ラインナップがございます。

また、環状構造および線形構造のCVD-SiC前駆体をはじめ、SiOCの皮膜を形成するCVD前駆体や、上図にも記載の「**1,1,3,3-tetrachloro-1,3-disilacyclobutane**」のようなALD前駆体の用意もございます。

さらに、金型成形用のDry Molding Compound(ポリシロキサン/ポリカルボシランと耐熱微粒子を混合したドライパウダー)や、Bulk Molding Compound(ポリシロキサン/ポリカルボシランと耐熱微粒子、不連続の炭素繊維を混合したバルク成形化合物)等の取り扱いもあります。詳しくは、お気軽にお問合せください。