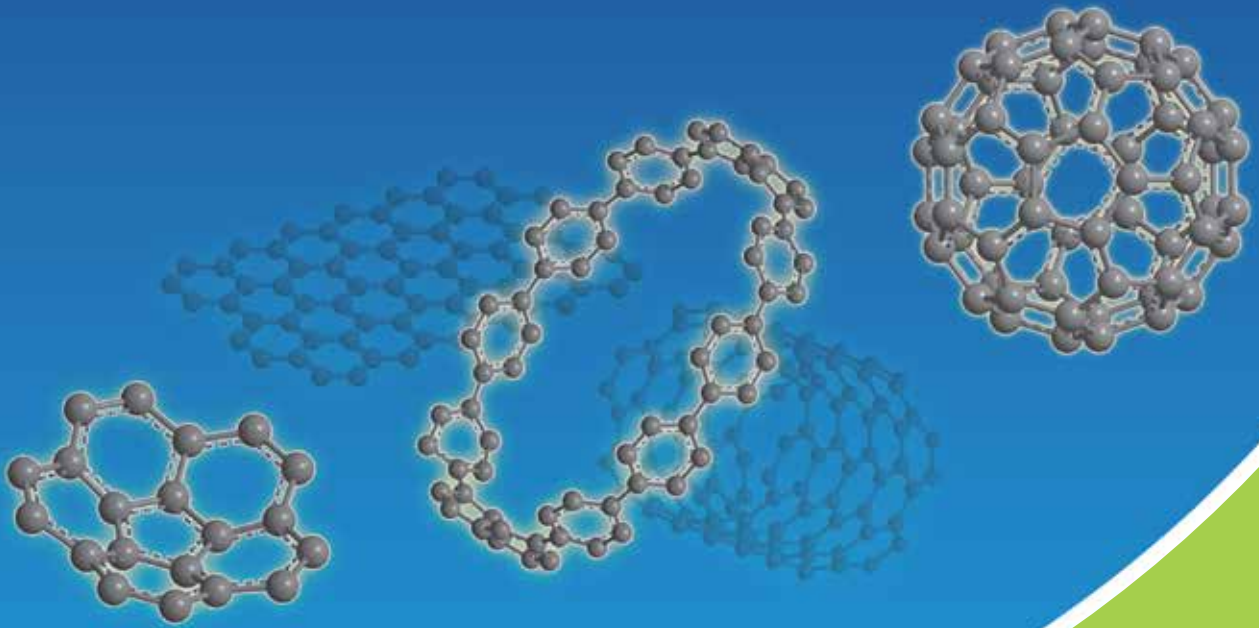


# ナノカーボン材料

Nanocarbon Materials



フラーレン

カーボンナノチューブ (CNTs)

カーボンナノファイバー (CNFs)

グラフェンおよび酸化グラフェン (GOs)

ナノダイヤモンド (NDs)

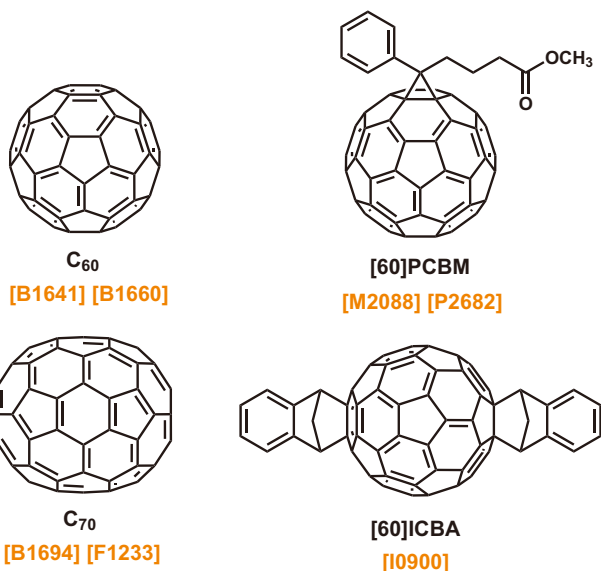
ナノカーボン部分構造

# ナノカーボン材料

## 1. フラーレン

フルーレンは炭素原子が球状の構造を成している化合物の総称で、ダイヤモンドや黒鉛、カーボンナノチューブと同様に炭素の同素体です。フルーレンは、分子性の単一の化学種として単離することが可能な炭素化合物で、 $C_{60}$ 、 $C_{70}$ 、 $C_{84}$ などが知られています。フルーレンを代表する化合物は $C_{60}$ で、60個の炭素原子が12個の五員環と20個の六員環を構成しており、Kroto、Smalley、Smalleyらにより発見されました<sup>1)</sup>。この功績により、Kroto、Smalley、Smalleyは1996年にノーベル化学賞を受賞しています。一方、フルーレンの発見より以前の1970年、大澤はフルーレンの存在を予想したことで知られています<sup>2)</sup>。

フルーレンの最も特筆すべき点は、フルーレンが優れた電子受容体であるということにあります。フルーレンはn型半導体の性質を持っており、電子をキャリアとする有機エレクトロニクス材料として幅広く研究されています。ルビジウムやセシウムをドープしたフルーレンは電子をキャリアとする超伝導体となり、30K以上で超伝導転移を起こすことが報告されています<sup>3,4)</sup>。



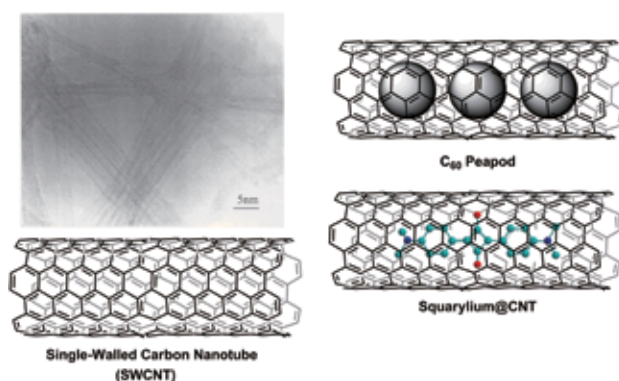
分子性炭素化合物であるフルーレンは、付加反応などの化学修飾により容易に誘導体を合成し、精密な構造解析をすることができます。フルーレンも他のナノカーボン材料と同様、溶解度が低いことが問題点として挙げられますが、これに溶解度の高い官能基を付加させることで、溶液処理が可能な電子材料へ誘導することができます。メタノフルーレンの一種であるフェニル $C_{61}$ 酪酸メチルエステル ([60]PCBM[M2088]) やインデンを付加したフルーレン誘導体 ([60]ICBA[I0900]) は、溶液塗布による電子デバイスの作成に有用な有機半導体です<sup>5,6)</sup>。これらのフルーレン誘導体は、p型共役ポリマーと混合溶解して有機太陽電池 (OPV) を作成するのによく使われるn型有機半導体です<sup>7)</sup>。また、フルーレン誘導体の有機トランジスタ材料としての利用例も報

告されています<sup>9)</sup>。フルーレンは有機アミン (テトラキスジメチルアミノエチレン (TDAE) [T1221]) と電荷移動錯体 TDAE- $C_{60}$ を形成し、低温で有機強磁性体になります<sup>9)</sup>。

## 2. カーボンナノチューブ

カーボンナノチューブ (CNT) の直径はナノメートル単位で、平面のグラフェンシートを丸めて円筒状にした構造を持っています。CNTはフルーレンと同様に $sp^2$ 混成炭素で構成される物質で、1991年に飯島により初めて発見されました<sup>10)</sup>。チューブの長さ、太さ、螺旋の状態、層の数などにより多様なCNTが知られており、これらの化学構造の違いによりバンド構造が変化し、金属や半導体の電気的性質を示します<sup>11,12)</sup>。また、CNTは高い物理的耐久性を持ちながらも、軽量で柔軟性があり、電気・熱伝導に優れた性質があります。したがって、CNTはその優れた特性を活かすことで、電界効果トランジスタ (FET)、ナノスケール配線材料、電子放出源、通信用光スイッチ、化学センサー、高強度複合材、熱デバイスなどのいろいろな応用が期待されています<sup>13-15)</sup>。

円筒状の構造を有するCNTは、その内部空間にナノサイズの分子・原子の閉じ込めが可能です。例えば、CNTは同様に $sp^2$ 炭素材料であるフルーレンを内部に閉じ込めたピーポッドを生成することが知られています<sup>16)</sup>。また、CNTの内部には金属や水、酸素なども内包でき、内包された物質の性質は、外界 (バルク) での性質とは異なることが分かっています<sup>17,18)</sup>。さらに、スクアリウムなどの有機色素も溶液中での処理により、容易にCNTに内包させることが可能です。この場合、スクアリウム色素に光が吸収されると、CNTへエネルギーが移動する (増感される) ことが分かっています<sup>19)</sup>。CNTの水素貯蔵についても注目されており、これは燃料電池に向けた研究開発に役立っています<sup>20)</sup>。



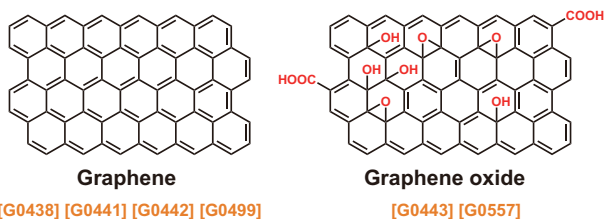
## 3. グラフェン、酸化グラフェン

グラフェンはナノカーボン材料に分類される2次元シート状の物質であり、 $sp^2$ 炭素による六員環で敷き詰められた構造をしています。2004年、Geim、Novoselovらは、高配向性の無水グラファイト (Highly Oriented Pyrolytic Graphite, HOPG) の表面を粘着テープで剥離し、剥離したものを基板の上に貼り付けるという単純な方法でグラフェンの薄片を取り出すことに成功しました。この報告以降<sup>21)</sup>、グラフェンの電子物性、機械的物性、化学的性質に驚異的な特徴があるこ

とが判明し、世界中でグラフェンの研究が盛んに行われています。Geim、Novoselovはグラフェンの研究功績により、2010年にノーベル物理学賞を受賞しています。

グラフェンの最も注目すべき点は、その電気的性質にあると言えます。グラフェン中の電子の移動度はシリコンの100倍で<sup>22)</sup>、非常に高速・低消費電力のトランジスタが実現できると示唆され、グラフェンはLSI（大規模集積回路）の次世代チャンネル材料として期待されています。さらに、グラフェンは鉄の100倍の強度を持ち、銅をはるかに凌駕する電流密度耐性を持っており、大電流を流せる電気配線にも利用できると考えられます<sup>23)</sup>。

グラフェン内の電子は、ニュートリノと同じく質量がないディラックフェルミ粒子として振る舞い<sup>24)</sup>、室温でも量子ホール効果を示すなど物理的に興味深い性質があります<sup>25)</sup>。また、グラフェンはスピン軌道相互作用が小さく、炭素の核磁気モーメントが無視できることからスピントロニクス of 理想的な材料と考えられています。磁石の機能をもつ材料（強磁性体）と融合することで、電子のスピンを利用した新しい情報処理素子（スピントロニクス素子）の研究開発も盛んになっています<sup>26)</sup>。

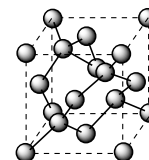


グラフェンの作製方法はHOPGからの剥離の他、CVDな[G0499]の気相法<sup>27)</sup>や酸化グラフェン(GO)の還元<sup>28)</sup>による方法も研究されています。GOは様々な合成法があり、その酸化度によって性能や用途が異なります。GOは一般的にグラフェンシートに水酸基、エポキシ基、カルボキシル基を持った構造をとっており、水やいくつかの極性溶媒に対する分散性を示します。したがって、GOは塗布によって基板上に成膜することが可能です。GOを還元することでグラフェンに近い状態まで還元することは可能ですが、完全には還元することはできず、わずかな酸素と欠陥を持つ還元された酸化グラフェン(rGO)になります。GOにはsp<sup>3</sup>炭素が含まれるため絶縁体の性質を示しますが、rGOは伝導性を持つことが知られており、電極材料への用途が期待されています。GOの水分散液は、金属の摩擦を低減する潤滑剤としての報告例があります<sup>29)</sup>。GOは金属を担持することができ、これを触媒とするクロスカップリング反応や水素化反応などの報告例もあります<sup>30,31)</sup>。また、GOには酸素官能基があるため、化学的に官能基を新たに導入することができ、発光材料やバイオセンサーなどの研究も行われています<sup>32,33)</sup>。

#### 4. ナノダイヤモンド

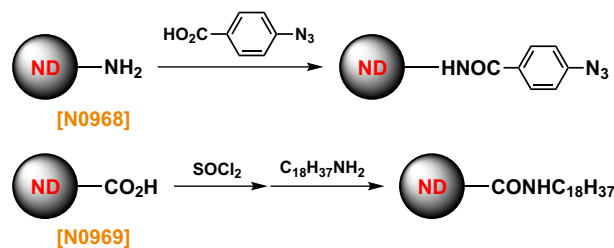
ダイヤモンドは硬度、摩擦係数、熱伝導性、絶縁性、屈折率などにおいて優れた性質を有する炭素の同素体の一つです。サイズが大きく純度の高いダイヤモンドは宝飾品として重宝されています。また、ダイヤモンドの硬さは広く知られており、天然では最も硬い物質であることから、工業的には研磨や切削などの用途に利用されています。しかしながら、

その硬さゆえに加工性には乏しく、大きいサイズのダイヤモンドは工業的には用途が限られているのが現状です。ナノダイヤモンド(ND)はダイヤモンドの結晶構造を有するナノ粒子であり、ダイヤモンドの優れた性質を維持しています。NDは人工ダイヤモンドの一種であり、研磨剤やエンジンオイルの添加剤などに利用されています。



Nanodiamond (ND)

一方、NDは表面をカルボン酸やアミノ基で修飾することが可能であり、これらの置換基をさらに化学的に変換することで、ND粒子を官能基化することができます<sup>34-36)</sup>。修飾していないNDは水への親和性が高いため、水中では良く分散しますが、有機溶媒中では凝集しやすいことが知られています。一方、アルキル基などで官能基化したNDは有機溶媒中でも分散しやすくなります。NDをシランカップリング剤で官能基化すると、ガラス表面などをNDで修飾できるようになります<sup>37)</sup>。



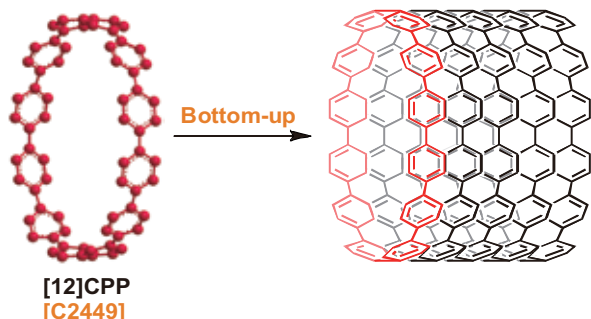
また、ナノダイヤモンドは生体に対して無害なナノ粒子であることから、生物や医療の分野にもその応用が広がりつつあります<sup>38,39)</sup>。結晶中に窒素原子(N)と空孔(V)からなる複合欠陥(NV)を持つダイヤモンドは蛍光を示すことより<sup>40)</sup>、これを生体分子に対する蛍光標識剤とすることで、生体分子の動きや構造変化を顕微鏡で観察することができます<sup>41-43)</sup>。また、ナノダイヤモンドは化学的に極めて安定であることから、生体内の複雑な環境においても安定的に蛍光挙動を観察できることが分かっています。一方、NV欠陥を作らなくても、NDを官能基化するだけで蛍光を示す例も報告されています<sup>44)</sup>。また、NDの生体分子への親和性を高める目的で、タンパク質やビオチンを固定したNDも報告されています<sup>45,46)</sup>。このような修飾NDは、ドラッグデリバリーに応用できるものと期待されています。

#### 5. ナノカーボン部分構造

##### シクロパラフェニレン(CPP)

カーボンナノチューブ(CNT)は化学、材料科学、生命科学など、様々な分野で研究されているナノカーボン材料です。CNTは通常、アーク放電法、レーザーファネス法、化学気相成長法などの物理的手法によって合成されます。しかし、これらの物理的手法には、様々な直径を持つCNTが生成し、均一なCNTを合成できないという欠点があります。

シクロパラフェニレン (CPP) はベンゼン環をパラ位で環状につなげた化合物であり、カーボンナノリングとも呼ばれます。この構造はCNTの最小構成単位に相当する分子であり、基礎化学のみならず材料科学などの応用分野からも注目されています。実際、伊丹らはこのCPPをテンプレートとし、炭素骨格をつなげていくことで、均一な直径を持つCNTをボトムアップで合成できることを見出しました<sup>47)</sup>。

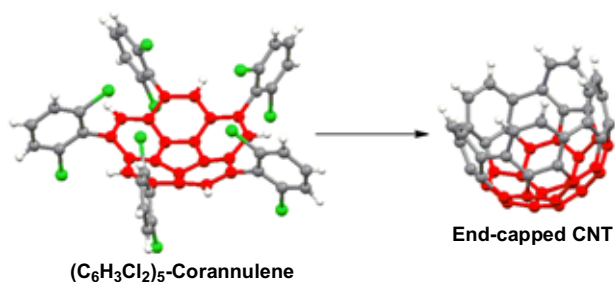


さらに最近では、より大きな歪みを持った小さいサイズのCPPの合成が行われています。山子<sup>48)</sup>およびJasti<sup>49)</sup>らのグループは、これまでに知られる最小のCPPである[5]CPP[C2931]を、それぞれ独自の合成手法で報告しています。[5]CPPをテンプレートとすることで、最小の直径を有するCNTが合成できると期待されます。また、[5]CPPはC<sub>60</sub>フラレンの部分構造でもあり、その電子状態や物性に関しても興味を持たれます。特定のサイズのCPPが、フラレンを包接することも報告されています<sup>50)</sup>。

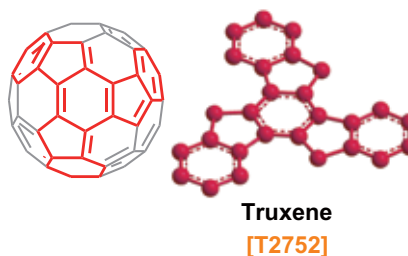
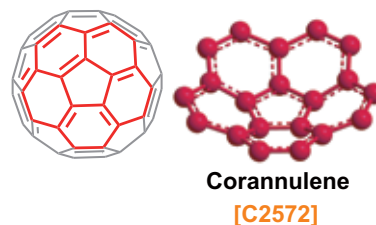
### コランヌレン、トルキセン

コランヌレンは[5]サーキュレンとも呼ばれる多環芳香族化合物の一種で、5つのベンゼン環がリング状に縮環した形状をしています。1960年代にコランヌレンが初めて合成され<sup>51)</sup>、そのお椀型の構造が明らかにされています<sup>52)</sup>。コランヌレンはC<sub>60</sub>フラレンの部分構造としても知られており、ナノカーボン材料の一つとして注目されています。

Scottらはコランヌレンを出発原料とし、気相熱分解法 (FVP) によるポリアレン化合物の合成を報告しています。このポリアレン化合物はエンドキャップされたCNTに相当するため、このポリアレン化合物をテンプレートとしてチューブを伸長させることにより、CNTの化学合成が可能になるものと期待されています<sup>53)</sup>。伊丹、Scottらは歪んだコランヌレンの特殊構造を活かし、コランヌレンを出発原料とする湾曲したナノグラフェン化合物の合成を報告しています<sup>54)</sup>。

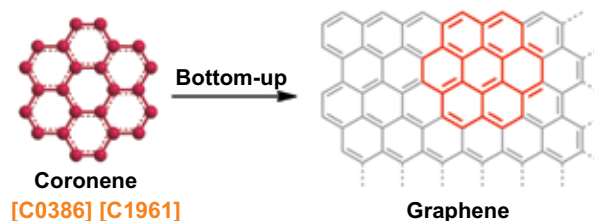


トルキセンは特異な星形構造を有する化合物で、剛直な平面構造を持っています。トルキセンもC<sub>60</sub>フラレンの部分構造と考えられます。トルキセン誘導体はアモルファス構造を作りやすいことから、有機EL素子の材料として有用です<sup>55)</sup>。フラレンを化学合成する試みとして、トルキセンを出発原料とするC<sub>60</sub>フラレンの合成も行われています。Oteroらは、トルキセンから3工程で前駆体となるC<sub>60</sub>H<sub>30</sub>ポリアレンを合成し、これを白金表面上で加熱処理することにより、C<sub>60</sub>に全て変換されることを見出しました<sup>56)</sup>。



### コロネン




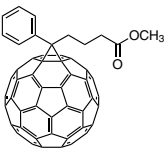
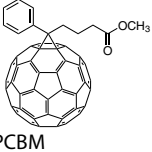
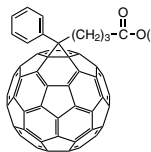
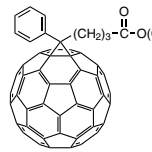
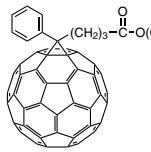
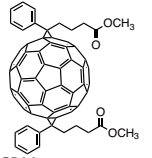
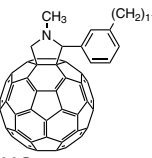
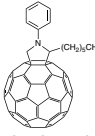
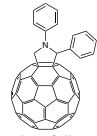


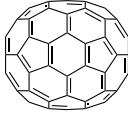
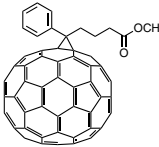

コロネンは[6]サーキュレンとも呼ばれる多環芳香族炭化水素の一種で、ベンゼン環が環状に6個つながった構造を持つ平面分子として良く知られています。グラフェンよりもサイズが小さく、ナノスケールの分子性化合物であるコロネンはナノグラフェンの代表的な化合物でもあり、注目が集まり始めている分子です。コロネンはグラフェンとは異なり、バンドギャップを持っているナノグラフェン化合物であることから有機トランジスタの材料としても研究されています<sup>57)</sup>。また、グラフェンナノ構造をコロネンからボトムアップ的に作製する研究も行われています<sup>58)</sup>。久保園らによるアルカリ金属をドープしたピセンの超伝導の発見以降<sup>59)</sup>、多環芳香族炭化水素を用いた有機超伝導体の研究が盛んになってきています<sup>60,61)</sup>。近年、コロネンにアルカリ金属をドープすることで超伝導体になることが報告されています<sup>62)</sup>。



## 文 献

- 1) H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl, R. E. Smalley, *Nature* **1985**, 318, 162.
- 2) 大澤映二, 化学 **1970**, 25, 854.
- 3) K. Tanigaki, T. W. Ebbesen, S. Saito, J. Mizuki, J. S. Tsai, Y. Kubo, S. Kuroshima, *Nature* **1991**, 352, 222.
- 4) A. Y. Ganin, Y. Takabayashi, Y. Z. Khimyak, S. Margadonna, A. Tamai, M. J. Rosseinsky, K. Prassides, *Nat. Mater.* **2008**, 7, 367.
- 5) J. C. Hummelen, B. W. Knight, F. LePeq, F. Wudl, J. Yao, C. L. Wilkins, *J. Org. Chem.* **1995**, 60, 532.
- 6) Y. He, H.-Y. Chen, J. Hou, Y. Li, *J. Am. Chem. Soc.* **2010**, 132, 1377.
- 7) Review: S. Günes, H. Neugebauer, N. S. Sariciftci, *Chem. Rev.* **2007**, 107, 1324.
- 8) T.-W. Lee, Y. Byun, B.-W. Koo, I.-N. Kang, Y.-Y. Lyu, C. H. Lee, L. Pu, S. Y. Lee, *Adv. Mater.* **2005**, 17, 2180.
- 9) B. Narymbetov, A. Omerzu, V. V. Kabanov, M. Tokumoto, H. Kobayashi, D. Mihailovic, *Nature* **2000**, 407, 883.
- 10) S. Iijima, *Nature* **1991**, 354, 56.
- 11) J. Kim, A. J. Page, S. Irle, K. Morokuma, *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, 134, 9311.
- 12) Review: Y. Miyato, *J. MMIJ* **2011**, 127, 61.
- 13) Review: K. Balasubramanian, E. J. H. Lee, R. T. Weitz, M. Burghard, K. Kern, *Phys. Status Solidi A* **2008**, 205, 633.
- 14) J. Park, Y. Kim, G.-T. Kim, J. S. Ha, *Adv. Funct. Mater.* **2011**, 21, 4159.
- 15) N. J. Kybert, M. B. Lerner, J. S. Yodh, G. Preti, A. T. C. Johnson, *ACS Nano* **2013**, 7, 2800.
- 16) J. H. Warner, A. A. R. Watt, L. Ge, K. Porfyrakis, T. Akachi, H. Okimoto, Y. Ito, A. Ardavan, B. Montanari, J. H. Jefferson, N. M. Harrison, H. Shinohara, G. A. D. Briggs, *Nano Lett.* **2008**, 8, 1005.
- 17) H. Kyakuno, K. Matsuda, H. Yahiro, Y. Inami, T. Fukuoka, Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa, H. Kataura, T. Saito, M. Yumura, S. Iijima, *J. Chem. Phys.* **2011**, 134, 244501.
- 18) J. M. H. Kroes, F. Pietrucci, A. Curioni, R. Jaafar, O. Gröning, W. Andreoni, *J. Phys. Chem. C* **2013**, 117, 1948.
- 19) K. Yanagi, K. Iakoubovskii, H. Matsui, H. Matsuzaki, H. Okamoto, Y. Miyata, Y. Maniwa, S. Kazaoui, N. Minami, H. Kataura *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, 129, 4992.
- 20) E. Tylianakis, G. K. Dimitrakakis, F. J. Martin-Martinez, S. Melchor, J. A. Dobado, E. Klontzas, G. E. Froudakis, *Int. J. Hydrogen Energy* **2014**, 39, 9825.
- 21) K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, *Science* **2004**, 306, 666.
- 22) K. I. Bolotin, K. J. Sikes, Z. Jiang, M. Klima, G. Fudenberg, J. Hone, P. Kim, H. L. Stormer, *Solid State Commun.* **2008**, 146, 351.
- 23) A. K. Geim, *Science* **2009**, 324, 1530.
- 24) K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos, A. A. Firsov, *Nature* **2005**, 438, 197.
- 25) Y. Zhang, Y.-W. Tan, H. L. Stormer, P. Kim, *Nature* **2005**, 438, 201.
- 26) D. Pesin, A. H. MacDonald, *Nat. Mater.* **2012**, 11, 409.
- 27) X. Zhang, L. Wang, J. Xin, B. I. Yakobson, F. Ding, *J. Am. Chem. Soc.* **2014**, 136, 3040.
- 28) C. K. Chua, M. Pumera, *Chem. Soc. Rev.* **2014**, 43, 291.
- 29) H. Kinoshita, Y. Nishina, A. A. Alias, M. Fujii, *Carbon* **2014**, 66, 720.
- 30) S. Yamamoto, H. Kinoshita, H. Hashimoto, Y. Nishina, *Nanoscale* **2014**, 6, 6501.
- 31) N. Morimoto, S. Yamamoto, Y. Takeuchi, Y. Nishina, *RSC Adv.* **2013**, 3, 15608.
- 32) K. Furukawa, Y. Ueno, E. Tamechika, H. Hibino, *J. Mater. Chem. B* **2013**, 1, 1119.
- 33) G. Gou, R. Ren, S. Li, S. Guo, Z. Dong, M. Xie, J. Ma, *New J. Chem.* **2013**, 37, 3861.
- 34) B. T. Branson, P. S. Beauchamp, J. C. Beam, C. M. Lukehart, J. L. Davidson, *ACS Nano* **2013**, 7, 3183.
- 35) V. N. Mochalin, Y. Gogotsi, *J. Am. Chem. Soc.* **2009**, 131, 4594.
- 36) A. Barras, S. Szunerits, L. Marcon, N. Monfiliotte-Dupont, R. Boukherroub, *Langmuir* **2010**, 26, 13168.
- 37) Y. Liu, V. N. Khabashesku, N. J. Halas, *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, 127, 3712.
- 38) Review: V. K. A. Sreenivasan, A. V. Zvyagin, E. M. Goldys, *J. Phys.: Condens. Matter* **2013**, 25, 194101.
- 39) Review: A. Krueger, *Chem. Eur. J.* **2008**, 14, 1382.
- 40) Review: A. Krueger, *J. Mater. Chem.* **2011**, 21, 12571.
- 41) S.-J. Yu, M.-W. Kang, H.-C. Chang, K.-M. Chen, Y.-C. Yu, *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, 127, 17604.
- 42) T.-J. Wu, Y.-K. Tzeng, W.-W. Chang, C.-A. Cheng, Y. Kuo, C.-H. Chien, H.-C. Chang, J. Yu, *Nat. Nanotechnol.* **2013**, 8, 682.
- 43) L. P. McGuinness, Y. Yan, A. Stacey, D. A. Simpson, L. T. Hall, D. Maclaurin, S. Prawer, P. Mulvaney, J. Wrachtrup, F. Caruso, R. E. Scholten, L. C. L. Hollenberg, *Nat. Nanotechnol.* **2011**, 6, 358.
- 44) V. N. Mochalin, O. Shenderova, D. Ho, Y. Gogotsi, *Nat. Nanotechnol.* **2012**, 7, 11.
- 45) L.-C. L. Huang, H.-C. Chang, *Langmuir* **2004**, 20, 5879.
- 46) A. Krueger, J. Stegk, Y. Liang, L. Lu, G. Jarre, *Langmuir* **2008**, 24, 4200.
- 47) H. Omachi, T. Nakayama, E. Takahashi, Y. Segawa, K. Itami, *Nat. Chem.* **2013**, 5, 572.
- 48) E. Kayahara, V. K. Patel, S. Yamago, *J. Am. Chem. Soc.* **2014**, 136, 2284.
- 49) P. J. Evans, E. R. Darzi, R. Jasti, *Nat. Chem.* **2014**, 6, 404.
- 50) T. Iwamoto, Y. Watanabe, T. Sadahiro, T. Haino, S. Yamago, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, 50, 8342.
- 51) W. E. Barth, R. G. Lawton, *J. Am. Chem. Soc.* **1966**, 88, 380.
- 52) J. C. Hanson, C. E. Nordman, *Acta Cryst.* **1976**, B32, 1147.
- 53) L. T. Scott, E. A. Jackson, Q. Zhang, B. D. Steinberg, M. Bancu, B. Li, *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, 134, 107.
- 54) K. Kawasumi, Q. Zhang, Y. Segawa, L. T. Scott, K. Itami, *Nat. Chem.* **2013**, 5, 739.
- 55) Z. Yang, B. Xu, J. He, L. Xue, Q. Guo, H. Xia, W. Tian, *Org. Electron.* **2009**, 10, 954.
- 56) G. Otero, G. Biddau, C. Sánchez-Sánchez, R. Caillard, M. F. López, C. Rogero, F. J. Palomares, N. Cabello, M. A. Basanta, J. Ortega, J. Méndez, A. M. Echavarren, R. Pérez, B. Gómez-Lor, J. A. Martín-Gago, *Nature* **2008**, 454, 865.
- 57) I. Diez-Perez, Z. Li, J. Hihath, J. Li, C. Zhang, X. Yang, L. Zang, Y. Dai, X. Feng, K. Muellen, N. Tao, *Nat. Commun.* **2010**, 1, 1.
- 58) X. Wan, K. Chen, D. Liu, J. Chen, Q. Miao, J. Xu, *Chem. Mater.* **2012**, 24, 3906.
- 59) R. Mitsuhashi, Y. Suzuki, Y. Yamanari, H. Mitamura, T. Kambe, N. Ikeda, H. Okamoto, A. Fujiwara, M. Yamaji, N. Kawasaki, Y. Maniwa, Y. Kubozono, *Nature* **2010**, 464, 76.
- 60) X. F. Wang, R. H. Liu, Z. Gui, Y. L. Xie, Y. J. Yan, J. J. Ying, X. G. Luo, X. H. Chen, *Nat. Commun.* **2011**, 2, 1513/1.
- 61) M. Xue, T. Cao, D. Wang, Y. Wu, H. Yang, X. Dong, J. He, F. Li, G. F. Chen, *Sci. Rep.* **2012**, 2, srep00389.
- 62) Y. Kubozono, H. Mitamura, X. Lee, X. He, Y. Yamanari, H. Takahashi, Y. Suzuki, Y. Kaji, R. Eguchi, K. Akaike, T. Kambe, H. Okamoto, A. Fujiwara, T. Kato, T. Kosugi, H. Aoki, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2011**, 13, 16476.

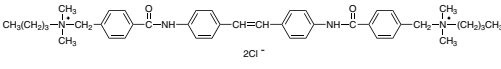
## フラーレン

		<b>B1660</b> 100mg 1g  Fullerene C <sub>60</sub> CAS RN: 99685-96-8	<b>B1641</b> 100mg 500mg 1g  Fullerene C <sub>60</sub> (pure) CAS RN: 99685-96-8	<b>F1232</b> 100mg  Fullerene C <sub>60</sub> (purified by sublimation) [for organic electronics] CAS RN: 99685-96-8
<b>M2088</b> 100mg  [60]PCBM CAS RN: 160848-22-6	<b>P2682</b> 100mg  [60]PCBM [for organic electronics] CAS RN: 160848-22-6	<b>P2013</b> 100mg  PCBB CAS RN: 571177-66-7	<b>P2014</b> 100mg  PCBO CAS RN: 571177-68-9	<b>P2015</b> 100mg  [60]PCB-C <sub>12</sub> CAS RN: 571177-69-0
<b>B4576</b> 50mg  Bis-PCBM (mixture of isomers) CAS RN: 1048679-01-1	<b>C2415</b> 100mg  C <sub>60</sub> MC <sub>12</sub> CAS RN: 403483-19-2	<b>P2744</b> 100mg  N-Phenyl-2-hexyl[60]-fulleropyrrolidine CAS RN: 1426332-00-4	<b>D5757</b> 100mg  N,2-Diphenyl[60]fulleropyrrolidine (contains 5% Hexane at maximum) CAS RN: 1373934-14-5	<b>I0900</b> 50mg  ICBA CAS RN: 1207461-57-1
<b>B1694</b> 100mg  Fullerene C <sub>70</sub> CAS RN: 115383-22-7	<b>F1233</b> 100mg  Fullerene C <sub>70</sub> [for organic electronics] CAS RN: 115383-22-7	<b>M2550</b> 50mg  [70]PCBM (mixture of isomers) CAS RN: 609771-63-3	<b>P2683</b> 100mg  [70]PCBM (mixture of isomers) [for organic electronics] CAS RN: 609771-63-3	

## カーボンナノチューブ (CNTs)

<b>C3133</b> 200mg Carbon Nanotube Single-walled (>85%) below 3nm(Average diam.), over 5μm(Average length) CAS RN: 308068-56-6	<b>C2150</b> 1g 5g Carbon Nanotube Multi-walled 10-20nm(diam.), 5-15μm(length) CAS RN: 308068-56-6	<b>C2155</b> 1g Carbon Nanotube Multi-walled 20-40nm(diam.), 1-2μm(length) CAS RN: 308068-56-6
<b>C2154</b> 1g 5g Carbon Nanotube Multi-walled 20-40nm(diam.), 5-15μm(length) CAS RN: 308068-56-6	<b>C2157</b> 1g Carbon Nanotube Multi-walled 40-60nm(diam.), 1-2μm(length) CAS RN: 308068-56-6	<b>C2156</b> 1g 5g Carbon Nanotube Multi-walled 40-60nm(diam.), 5-15μm(length) CAS RN: 308068-56-6
<b>C2158</b> 1g 5g Carbon Nanotube Multi-walled 60-100nm(diam.), 5-15μm(length) CAS RN: 308068-56-6	<b>G0620</b> 100mg 500mg Graphene/CNT Nanocomposite	

## カーボンナノチューブ (CNT) 分散剤

<b>E1127</b> 1g  4,4'-[1,2-Ethenediylbis(4,1-phenyleneiminocarbonyl)]-bis(N-butyl-N,N-dimethylbenzenemethanaminium) Dichloride CAS RN: 1296211-78-3
---

## カーボンナノファイバー (CNFs)

<b>C3766</b> 25g Carbon Nanofibers [for reinforcement]	<b>C3767</b> 25g Carbon Nanofibers [for conductivity]
--	---

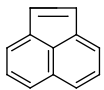
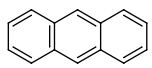
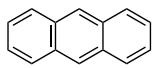
## グラフェンおよび酸化グラフェン (GOs)

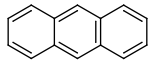
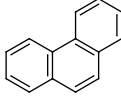
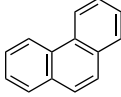
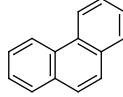
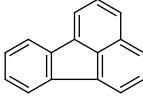
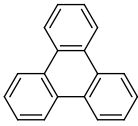
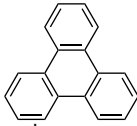
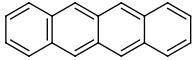
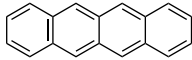
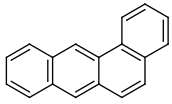
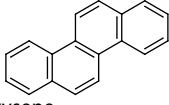
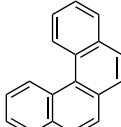
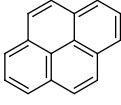
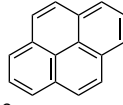
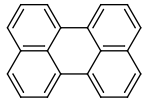
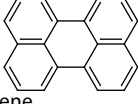
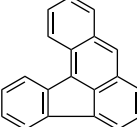
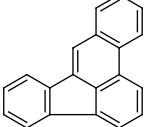
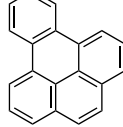
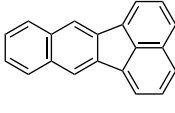
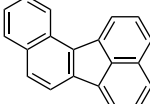
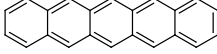
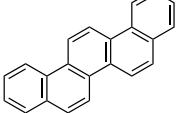
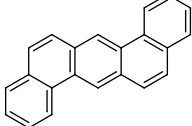
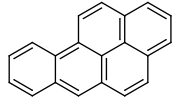
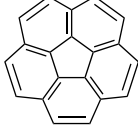
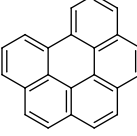
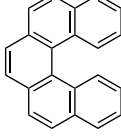
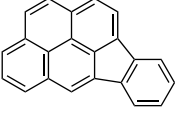
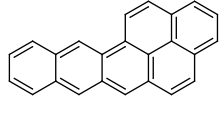
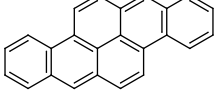
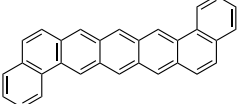
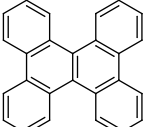
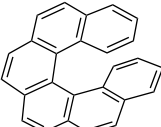
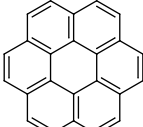
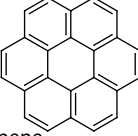
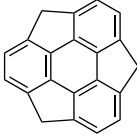
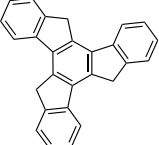
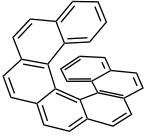
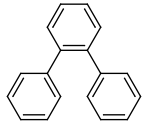
<p><b>G0438</b> 5g 25g</p> <p>Graphene Nanoplatelets 6-8nm(thick), 25µm(wide)</p> <p>CAS RN: 1034343-98-0</p>		<p><b>G0499</b> 1g 5g</p> <p>Graphene Nanoplatelets 2-10nm(thick), 5µm(wide)</p> <p>CAS RN: 1034343-98-0</p>		<p><b>G0441</b> 5g 25g</p> <p>Graphene Nanoplatelets 6-8nm(thick), 5µm(wide)</p> <p>CAS RN: 1034343-98-0</p>		<p><b>G0442</b> 5g 25g</p> <p>Graphene Nanoplatelets 6-8nm(thick), 15µm(wide)</p> <p>CAS RN: 1034343-98-0</p>			
		<p><b>G0670</b> 5g 25g</p> <p>Graphene Nanoplatelets 3nm(thick), 800m<sup>2</sup>/ g(surface area), 1.5µm(diameter)</p> <p>CAS RN: 1034343-98-0</p>		<p><b>G0671</b> 5g 25g</p> <p>Graphene Nanoplatelets 5nm(thick), 135m<sup>2</sup>/ g(surface area), 7µm(diameter)</p> <p>CAS RN: 1034343-98-0</p>		<p><b>G0672</b> 5g 25g</p> <p>Graphene Nanoplatelets 5nm(thick), 135m<sup>2</sup>/ g(surface area), 18µm(diameter)</p> <p>CAS RN: 1034343-98-0</p>		<p><b>G0673</b> 5g 25g</p> <p>Graphene Nanoplatelets 5nm(thick), 135m<sup>2</sup>/ g(surface area), 30µm(diameter)</p> <p>CAS RN: 1034343-98-0</p>	
<p><b>G0674</b> 5g 25g</p> <p>Graphene Nanoplatelets 5nm(thick), 170m<sup>2</sup>/ g(surface area), 7µm(diameter)</p> <p>CAS RN: 1034343-98-0</p>		<p><b>G0675</b> 5g 25g</p> <p>Graphene Nanoplatelets 5nm(thick), 170m<sup>2</sup>/ g(surface area), 18µm(diameter)</p> <p>CAS RN: 1034343-98-0</p>		<p><b>G0676</b> 5g 25g</p> <p>Graphene Nanoplatelets 5nm(thick), 170m<sup>2</sup>/ g(surface area), 30µm(diameter)</p> <p>CAS RN: 1034343-98-0</p>		<p><b>G0500</b> 5g 25g</p> <p>Graphene Nanoplatelets Aggregates (sub-micron particles, surface area 300m<sup>2</sup>/g)</p> <p>CAS RN: 1034343-98-0</p>		<p><b>G0501</b> 5g 25g</p> <p>Graphene Nanoplatelets Aggregates (sub-micron particles, surface area 500m<sup>2</sup>/g)</p> <p>CAS RN: 1034343-98-0</p>	
<p><b>G0502</b> 5g 25g</p> <p>Graphene Nanoplatelets Aggregates (sub-micron particles, surface area 750m<sup>2</sup>/g)</p> <p>CAS RN: 1034343-98-0</p>		<p><b>N1233</b> 100mg 500mg</p> <p>Nitrogen-doped Graphene</p>		<p><b>N1234</b> 100mg 500mg</p> <p>Nitrogen/Sulfur Co- doped Graphene</p>		<p><b>G0443</b> 100mg</p> <p>Graphene Oxide</p> <p>CAS RN: 2640657-49-2</p>		<p><b>G0557</b> 5mL 25mL 100mL</p> <p>Graphene Oxide (10mg/mL, Dispersion in Water)</p> <p>CAS RN: 2640657-49-2</p>	
<p><b>R0254</b> 100mg</p> <p>Reduced Graphene Oxide</p>		<p><b>G0539</b> 200mg</p> <p>Graphitic Carbon Nitride</p> <p>CAS RN: 143334-20-7</p>		<p><b>G0651</b> 1g 5g</p> <p>Graphitic Carbon Nitride (particle Size: 1-10µM)</p> <p>CAS RN: 143334-20-7</p>		<p><b>G0620</b> 100mg 500mg</p> <p>Graphene/CNT Nanocomposite</p>			

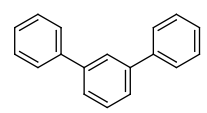
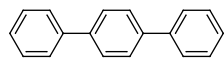
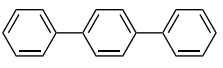
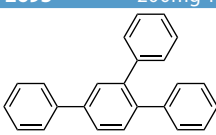
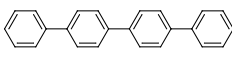
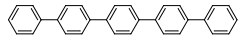
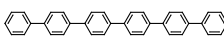
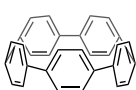

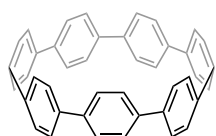
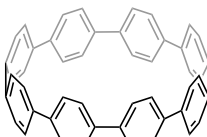
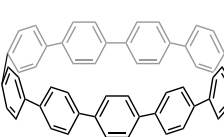
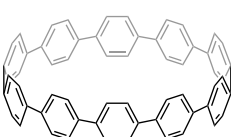
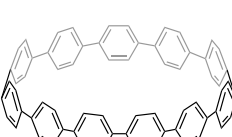
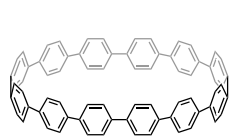
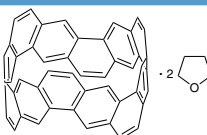
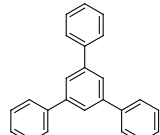
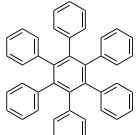
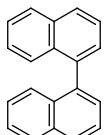
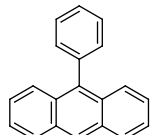
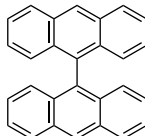
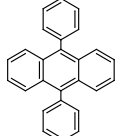
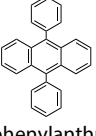
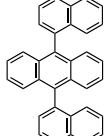
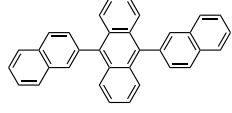
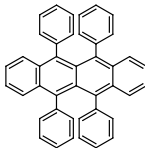

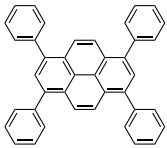
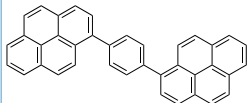
## ナノダイヤモンド (NDs)

<p><b>N1083</b> 5g 25g</p> <p>Nanodiamond (particle size : &lt;10nm) (Amine-modified) (3%, Dispersion in Ethylene Glycol)</p>		<p><b>N0962</b> 1g 5g</p> <p>Nanodiamond (particle size : &lt;10nm)</p> <p>CAS RN: 7782-40-3</p>		<p><b>N1057</b> 1g</p> <p>Nanodiamond (particle size : &lt;10nm) (Hydrogen-terminated)</p>		<p><b>N0968</b> 1g</p> <p>Nanodiamond (particle size : &lt;10nm) (Amine-modified)</p>	
		<p><b>N0969</b> 1g</p> <p>Nanodiamond (particle size : &lt;10nm) (Carboxyl-modified)</p>		<p><b>N1194</b> 5g</p> <p>Nanodiamond (Carboxyl-modified) (5%, Dispersion in Water)</p>			

## ナノカーボン部分構造

<p><b>A0005</b> 5g 25g</p>  <p>Acenaphthylene CAS RN: 208-96-8</p>		<p><b>A0495</b> 25g 100g 500g</p>  <p>Anthracene (&gt;97.0%) CAS RN: 120-12-7</p>		<p><b>A3437</b> 5g 25g</p>  <p>Anthracene (purified by sublimation) CAS RN: 120-12-7</p>	
---	--	--	--	---	--

<p><b>A0405</b> 1sample</p>  <p>Anthracene Zone Refined (number of passes:30) CAS RN: 120-12-7</p>	<p><b>P0079</b> 25g 500g</p>  <p>Phenanthrene (&gt;97.0%) CAS RN: 85-01-8</p>	<p><b>P2877</b> 5g 25g</p>  <p>Phenanthrene (purified by sublimation) CAS RN: 85-01-8</p>	<p><b>P0331</b> 1sample</p>  <p>Phenanthrene Zone Refined (number of passes:30) CAS RN: 85-01-8</p>	<p><b>F0016</b> 25g 100g 500g</p>  <p>Fluoranthene CAS RN: 206-44-0</p>
<p><b>T0513</b> 100mg 1g</p>  <p>Triphenylene CAS RN: 217-59-4</p>	<p><b>T3267</b> 200mg 1g</p>  <p>Triphenylene (purified by sublimation) CAS RN: 217-59-4</p>	<p><b>N0001</b> 100mg 1g 5g</p>  <p>Naphthacene CAS RN: 92-24-0</p>	<p><b>N0951</b> 200mg 1g</p>  <p>Naphthacene (purified by sublimation) CAS RN: 92-24-0</p>	<p><b>B0017</b> 1g 5g 25g</p>  <p>Tetraphene CAS RN: 56-55-3</p>
<p><b>C0339</b> 100mg 1g</p>  <p>Chrysene (purified by sublimation) CAS RN: 218-01-9</p>	<p><b>B6541</b> 200mg 1g</p>  <p>Benzo[c]phenanthrene CAS RN: 195-19-7</p>	<p><b>P1104</b> 25g 100g 500g</p>  <p>Pyrene CAS RN: 129-00-0</p>	<p><b>P2072</b> 1g</p>  <p>Pyrene (purified by sublimation) CAS RN: 129-00-0</p>	<p><b>P0078</b> 1g 5g 25g</p>  <p>Perylene CAS RN: 198-55-0</p>
<p><b>P1629</b> 1g</p>  <p>Perylene (purified by sublimation) CAS RN: 198-55-0</p>	<p><b>B6973</b> 100mg 500mg</p>  <p>Benzo[a]aceanthrylene CAS RN: 203-33-8</p>	<p><b>B2982</b> 100mg</p>  <p>Benzo[b]fluoranthene CAS RN: 205-99-2</p>	<p><b>B0086</b> 50mg 250mg</p>  <p>Benzo[e]pyrene CAS RN: 192-97-2</p>	<p><b>B6317</b> 100mg 500mg</p>  <p>Benzo[k]fluoranthene CAS RN: 207-08-9</p>
<p><b>B6424</b> 100mg 500mg</p>  <p>Benzo[j]fluoranthene CAS RN: 205-82-3</p>	<p><b>P0030</b> 100mg 1g</p>  <p>Pentacene (purified by sublimation) CAS RN: 135-48-8</p>	<p><b>P2207</b> 100mg 500mg</p>  <p>Picene (purified by sublimation) (&gt;99.9%) CAS RN: 213-46-7</p>	<p><b>D0145</b> 100mg</p>  <p>Dibenz[a,h]anthracene CAS RN: 53-70-3</p>	<p><b>B0085</b> 100mg 1g</p>  <p>3,4-Benzopyrene (purified by sublimation) CAS RN: 50-32-8</p>
<p><b>C2572</b> 20mg 100mg</p>  <p>Corannulene CAS RN: 5821-51-2</p>	<p><b>B2983</b> 100mg</p>  <p>Benzo[ghi]perylene CAS RN: 191-24-2</p>	<p><b>H1892</b> 100mg</p>  <p>[5]Helicene CAS RN: 188-52-3</p>	<p><b>I1177</b> 100mg 500mg</p>  <p>Indeno[1,2,3-cd]pyrene CAS RN: 193-39-5</p>	<p><b>N0599</b> 100mg</p>  <p>Naphtho[2,3-a]pyrene CAS RN: 196-42-9</p>
<p><b>D1005</b> 100mg</p>  <p>Dibenzo[a,h]pyrene CAS RN: 189-64-0</p>	<p><b>D5488</b> 100mg</p>  <p>Dibenzo[a,l]pentacene CAS RN: 227-09-8</p>	<p><b>D3736</b> 200mg 1g</p>  <p>Dibenzo[g,p]chrysene CAS RN: 191-68-4</p>	<p><b>H1894</b> 20mg 100mg</p>  <p>Hexahelicene CAS RN: 187-83-7</p>	<p><b>C0386</b> 1g 5g</p>  <p>Coronene CAS RN: 191-07-1</p>
<p><b>C1961</b> 100mg</p>  <p>Coronene (purified by sublimation) CAS RN: 191-07-1</p>	<p><b>S0888</b> 20mg 100mg</p>  <p>Sumanene CAS RN: 151253-59-7</p>	<p><b>T2752</b> 100mg 1g</p>  <p>Truxene CAS RN: 548-35-6</p>	<p><b>H1911</b> 10mg</p>  <p>Heptahelicene CAS RN: 16914-68-4</p>	<p><b>T0019</b> 25g 100g 500g</p>  <p>o-Terphenyl CAS RN: 84-15-1</p>

<p><b>T0018</b> 5g 25g 100g</p>  <p><i>m</i>-Terphenyl CAS RN: 92-06-8</p>	<p><b>T0020</b> 25g 100g 500g</p>  <p><i>p</i>-Terphenyl CAS RN: 92-94-4</p>	<p><b>T3263</b> 5g 25g</p>  <p><i>p</i>-Terphenyl (purified by sublimation) CAS RN: 92-94-4</p>	<p><b>P2693</b> 200mg 1g</p>  <p>1,2,4-Triphenylbenzene CAS RN: 1165-53-3</p>	<p><b>Q0001</b> 1g 5g 25g</p>  <p><i>p</i>-Quaterphenyl CAS RN: 135-70-6</p>
<p><b>Q0018</b> 100mg 1g</p>  <p><i>p</i>-Quinquephenyl CAS RN: 3073-05-0</p>	<p><b>S0220</b> 100mg 1g</p>  <p><i>p</i>-Sexiphenyl CAS RN: 4499-83-6</p>	<p><b>C2931</b> 20mg 100mg</p>  <p>[5]Cycloparaphenylene CAS RN: 96100-94-6</p>	<p><b>C3386</b> 20mg</p>  <p>[6]Cycloparaphenylene CAS RN: 156980-13-1</p>	<p><b>C3571</b> 10mg</p>  <p>[7]Cycloparaphenylene CAS RN: 1222105-42-1</p>
<p><b>C3544</b> 20mg</p>  <p>[8]Cycloparaphenylene CAS RN: 1217269-85-6</p>	<p><b>C3465</b> 20mg</p>  <p>[9]Cycloparaphenylene CAS RN: 1092522-74-1</p>	<p><b>C3493</b> 20mg</p>  <p>[10]Cycloparaphenylene CAS RN: 1222105-46-5</p>	<p><b>C3536</b> 10mg</p>  <p>[11]Cycloparaphenylene CAS RN: 1222105-48-7</p>	<p><b>C2449</b> 10mg</p>  <p>[12]Cycloparaphenylene CAS RN: 1092522-75-2</p>
<p><b>I1078</b> 10mg</p>  <p>(6,6)Carbon Nanobelt Bis(tetrahydrofuran) Adduct CAS RN: 2245104-25-8</p>	<p><b>T0509</b> 25g</p>  <p>1,3,5-Triphenylbenzene CAS RN: 612-71-5</p>	<p><b>H1412</b> 1g 5g</p>  <p>Hexaphenylbenzene CAS RN: 992-04-1</p>	<p><b>B0805</b> 1g 5g</p>  <p>1,1'-Binaphthyl CAS RN: 604-53-5</p>	<p><b>P0138</b> 1g 5g 25g</p>  <p>9-Phenylanthracene CAS RN: 602-55-1</p>
<p><b>B4095</b> 1g 5g</p>  <p>9,9'-Bianthryl CAS RN: 1055-23-8</p>	<p><b>D1689</b> 1g 25g</p>  <p>9,10-Diphenylanthracene CAS RN: 1499-10-1</p>	<p><b>D4401</b> 1g</p>  <p>9,10-Diphenylanthracene (purified by sublimation) CAS RN: 1499-10-1</p>	<p><b>D3975</b> 1g 5g</p>  <p>9,10-Di(1-naphthyl)anthracene CAS RN: 26979-27-1</p>	<p><b>D4127</b> 1g</p>  <p>9,10-Di(2-naphthyl)anthracene CAS RN: 122648-99-1</p>
<p><b>T0561</b> 100mg 1g</p>  <p>Rubrene CAS RN: 517-51-1</p>	<p><b>T2233</b> 250mg 1g</p>  <p>Rubrene (purified by sublimation) CAS RN: 517-51-1</p>	<p><b>T3042</b> 50mg 200mg</p>  <p>1,3,6,8-Tetraphenylpyrene CAS RN: 13638-82-9</p>	<p><b>D4922</b> 200mg 1g</p>  <p>1,4-Di(1-pyrenyl)benzene CAS RN: 475460-77-6</p>	

## 東京化成工業株式会社

### 試薬製品について

■本社営業部 〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町 16-12 T-PLUS 日本橋小伝馬町8階  
Tel: 03-3668-0489 Fax: 03-3668-0520 E-mail: Sales-JP@TCIchemicals.com

■大阪営業部 〒541-0041 大阪府大阪市中央区北浜1-1-21 第2中井ビル1階  
Tel: 06-6228-1155 Fax: 06-6228-1158 E-mail: osaka-s@TCIchemicals.com

### スケールアップ、受託サービス(合成・開発・製造)について

□化成品営業部 〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町 16-12 T-PLUS 日本橋小伝馬町8階  
Tel: 03-5651-5171 Fax: 03-5640-8021 E-mail: finechemicals@TCIchemicals.com

### 弊社製品取扱店

本誌掲載の化学品は試験・研究用にのみ使用するものです。化学知識のある専門家以外の方のご使用はお避けください。品目や製品情報等、掲載内容の変更を予告なく行う場合があります。内容の一部または全部の無断転載・複製はご遠慮ください。