JACI テキスト　GSC 賞を受賞した社会的実践事例から学ぶ

GSC 入門

Green and
Sustainable
Chemistry

No.3

第 13 回 GSC 賞経済産業大臣賞受賞（2013 年度）

航空機の軽量化を可能とする炭素繊維複合材料の開発

東レ株式会社

東レ株式会社が開発した炭素繊維複合材料の一つである炭素繊維強化樹脂（Carbon Fiber Reinforced Plastic: CFRP）は、航空機の機体の軽量化を実現しました。航空機が軽量化されると、その分たくさんの人や貨物を乗せ、より遠くまで飛行できます。エネルギーを節約し、二酸化炭素の排出量を抑えることができるので、地球温暖化の原因となる温室効果ガスの削減に貢献します。

GSC 賞と受賞企業のプロフィール

GSC 賞は、グリーン・サステイナブルケミストリー（GSC）の推進に貢献した優れた業績を上げた個人、団体に贈るもので、毎年数件の業績が表彰されます。その中で、経済産業大臣賞は産業技術の発展への貢献に、文部科学大臣賞は学術の発展・普及への貢献に、環境大臣賞は総合的な環境負荷削減への貢献に、そしてスモールビジネス賞（2015 年度新設）は中小規模の事業体を対象に産業技術の発展への貢献に対して贈ります。さらに、奨励賞を将来の展開が期待できる業績に贈ります。

東レ株式会社は、1926 年に創業した総合化学企業（本社は東京都中央区）で、合成繊維や合成樹脂をはじめとする化学製品や情報関連素材を取り扱っています。

このテキストシリーズのねらい

世界規模で、資源やエネルギー、地球温暖化、水や食糧などの課題がますます深刻になり、複雑になっています。それらの課題を解決し、社会の持続可能な発展に向けて、環境保全と経済発展を両立させるイノベーションが求められており、GSC への期待は高まる一方です。このテキストシリーズでは「GSC とは何か」を理解し、私たちみんなが持続可能な社会の担い手になることをめざして、GSC の推進に貢献したすぐれた業績に贈る GSC 賞を受賞した技術や製品を解説します。

※巻末の東京宣言 2015 をご参照ください。

GSC とは

名称：グリーン・サステイナブル ケミストリー
(Green and Sustainable Chemistry)

GSC の定義

人と環境にやさしく、持続可能な社会の発展を支える化学

GSC 活動の指針

- 化学は、社会の持続可能な発展のために、未来に向けた研究・教育、および環境に配慮したシステム・プロセス・製品の開発に取り組んできました。
- とりわけ、1992 年の地球環境サミット、リオデジャネイロ宣言を受けて、化学は、産・学・官一体となり、化学製品の設計から、原料の選択、製造過程、使用形態、リサイクル・廃棄までの製品の全サイクルにおいて、環境との共生の下、社会の要求に従い、経済合理性をもって環境、安全、健康に配慮した取り組みを進めるべく GSC を立ち上げ、活動を行ってきました。
- 全地球規模で、資源･エネルギー、地球温暖化、水･食糧、人口問題などの長期的課題が深刻化・複雑化する今世紀において、これらの課題解決を図り、より健康で豊かな社会の持続的発展をもたらす牽引役として、化学を基盤とするイノベーションへの期待は、益々大きくなっています。
- 化学は、産・学・官・民・国等の枠組みを超えたグローバルな連携・協調によって GSC を強力に推進し、これらの期待にこたえていきます。

GSC の事例

―大分類は、目的とする社会的貢献とその達成手段との組合せで表現しています。そして、それらの取組対象において、製造時あるいは使用時から社会的課題、さらに長期的難課題へと順次、取り組み対象を広げたものとし、また共通・基盤的項目も設けています―

低環境負荷生産に向けた
資源消費最小化・反応プロセス高効率化

1. 副生成物の発生量を低減する化学技術および製品
2. CO_2 等の温室効果ガスや汚染物質の発生量を抑え、環境負荷を低減する分離・精製・リサイクル
3. CO_2 等の温室効果ガスの発生量、環境への放出量を低減する化学技術および製品
4. 省資源・省エネを実現する触媒および反応プロセス

安全・安心な生活環境に資する化学物質のリスク低減

5. 廃棄物の発生量を低減する化学技術、製品およびシステム
6. 有害・汚染物質の発生と排出を抑止する化学技術、製品およびシステム

エネルギー・資源・食糧・水問題の解決へ向けた取組み

7. 低品位の熱源や非在来型資源などを利活用するための化学技術、製品およびシステム
8. 未利用エネルギー・資源を有効なエネルギーに転換して貯蔵・輸送する化学技術、製品およびシステム
9. 枯渇資源（化石資源･希少資源）への依存度を低減する、または再生可能エネルギー・資源への転換・貯蔵を促進する化学技術、製品およびシステム
10. 3R（リデュース・リユース・リサイクル）に貢献する化学技術、製品およびシステム
11. 食料の生産・供給過程の高効率化、水資源の有効活用に資する化学技術、製品およびシステム

安全・安心・豊かで持続可能な社会実現のための
長期的課題に対する先駆的取組み

12. 社会的課題の解決（エネルギー･資源、食糧･水、防災･インフラ整備、運輸・物流、医療・ヘルスケア、教育･福祉等）のための、ICT 等を活用した新しい社会システムの導入に貢献する、化学技術・新製品、および新形態のサービス
13. 環境への負荷を抑止しつつ社会や人の快適性の向上に寄与する化学・化学技術、新製品、および新形態のサービス

GSC の体系化・普及啓発・教育および
GSC の評価方法の確立・普及

14. GSC の体系化
15. GSC の普及啓発・教育
16. GSC に関する評価方法、ライフサイクルアセスメントの確立と普及

（JACI GSC ネットワーク会議の定義より http://www.jaci.or.jp/gscn/page_01.html）

世代を超えた連携と強い信念でついに実現 炭素繊維複合材料を使った航空機の軽量化

東レ株式会社

第 13 回 GSC 賞経済産業大臣賞(2013 年度)は東レ株式会社の「航空機の軽量化を可能とする炭素繊維複合材料の開発」が受賞しました。40 年以上にわたる研究開発期間を経て開発された同社の炭素繊維強化樹脂は、軽量で柔軟でありながら高い靭性(材料の粘り強さ)を持つことが特徴です。この高靭性炭素繊維強化樹脂（高靭性 CFRP）は、燃費の向上に有効な航空機の軽量化を実現し、環境負荷の低減に大きく貢献しています。

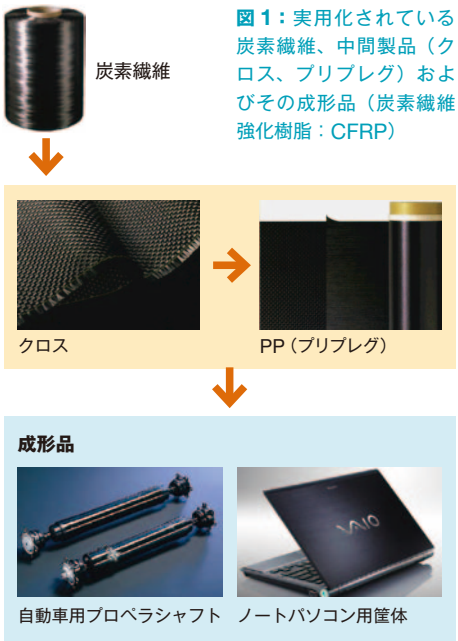


図 1：実用化されている炭素繊維、中間製品（クロス、プリプレグ）およびその成形品（炭素繊維強化樹脂：CFRP）

1 産業技術シーズの開発に至るまで

（オープン・イノベーション*1 の第1段階）

社会の持続可能な発展の実現に向けて、どのような意志のもとで基礎的研究が始まり、どのように技術課題を乗り越えたのでしょうか。

炭素は、主に共有結合によって原子が次々につながることでいろいろな形の物質をつくります。ダイヤモンドやグラファイト（黒鉛）など炭素からできた炭素材料はさまざまな産業に使われ、応用分野は広がるばかりです（コラム①）。

炭素繊維もそのような炭素材料の１つです 。鋼と比較して炭素繊維の比重が4分の1と軽いために、単位比重あたりで考えると強度は約 10 倍、変形のしにくさ（弾性率）*2 は約7倍です。「鉄より強くアルミより軽い」と評され、腐食することも材料疲労することも極めて起こりにくいものです。炭素繊維はそのまま使われることはなく、通常は、プラスチックやゴム、金属、コンクリートの中に混ぜて、「炭素繊維複合材料」として使われます。炭素繊維を混ぜることで、元の素材の強度や電気伝導性、耐熱性などを改善することができます。例えば、図 1 に示す成形品以外にもゴルフクラブや釣り竿のシャフト、鉄筋コンクリートの耐震や耐火のための補強などに使われています（図 1）。中でも注目されるのが、ボーイング社の中型旅客機「ボーイング 787」の機体の材料に採用され、機体の軽量化を実現した高靭性 CFRP です。

繊維状の炭素材料の歴史は古く、例えば 19 世紀にエジソンが実用化した電球には竹を原料とした炭素材料がフィラメントとして使われていました。その後、電球のフィラメントはタングステンにとって代わられてしまいましたが、1950 年代にロケット噴射口の材料として使われて再び炭素繊維が再び注目されるようになりました。

当時、炭素やグラファイトからなる製品は電極な

＊1
オープンイノベーション：『オープンイノベーション』とは、広く他社や大学・研究機関など外部が持つ技術やアイデアなどを取り込み自社のものと組み合わせて、典型的には新製品を開発するような、革新的な価値を生み出すための、ビジネスモデル

＊2
弾性・弾性率：物体に力を加えているときに生じた変形が、力を除くともとに戻る性質が弾性。このときの変形（ひずみ）に対して抵抗する力の割合を弾性率といい、それが高いほど変形しにくい。

＊3
ポリアクリロニトリル：アクリロニトリルが重合したもので、アクリル繊維の主要成分。アクリル繊維はアクリロニトリルに酢酸ビニルなどを共重合させもので、羊毛に似た肌触りをもつ。

どの成形品、あるいは活性炭やカーボンブラックなどの粉末状のものに限られ、繊維状のグラファイトは製造が難しいと考えられていました。しかし、1956 年に米国のユニオン・カーバイド社が、レーヨンを原料として用いることにより、世界初の炭素繊維の開発に成功しました。

ちょうどそのころ、工業技術院大阪工業技術試験所（現在の産業技術総合研究所関西センター）の炭素研究室に所属する研究者、進藤昭男氏（1952 年入所）は「社会の役に立ちたい」という思いの下、新しい炭素材料を探索していました。その過程で進藤氏は、黒鉛フェルトなどに関する炭素繊維の新聞記事に出合いました。「これはイノベーションにつながる」と見抜き、炭素繊維の工業化に狙いを定めた研究を早々に開始しました。

炭素繊維を効率よく得るには、形態が繊維状で、加熱処理をしても繊維の形態を保持したまま成分が炭素だけになる原材料をみつけることが必要です。もし、炭素そのものを出発原料として、融解や延伸などの加工で炭素繊維にしようとすると、強い結合力をもつ炭素原子間の共有結合を切断・再形成しなければなりません。それには、大きなエネルギーを要し、現実的ではありませんでした。一方、当時、すでに実用化されていた合成繊維は、炭素原子を主な構成要素とする繊維ですから、炭素繊維の原材料として適しています。

そこで、様々な合成繊維を原料として炭素繊維への変換を試みました。しかし、加熱処理すると雲散霧消したり、融けてから炭化したりと、なかなか炭素繊維にはなりませんでした。ある時、進藤氏は、合成繊維の性質を示す一覧表に、多くの繊維は分解や溶融すると記述されているのに対し、ポリアクリロニトリル（PAN）＊3 繊維だけは「235 ℃で粘る」と記述されていることに気付きました。これは PAN 繊維に耐熱性があり、繊維状のまま炭化できる可能性があることを意味します。

PAN 繊維を手に入れ、実験を重ねる中で、ついに折れることなく指に巻き付けることのできるほど可撓性のある PAN 系炭素繊維ができました。さらに、安定的にまとまった量を作るための加熱処理の温度や酸化性雰囲気の条件、原料繊維の保持方法などを繰り返し検討しました。セレンディピティ（偶然の発見）にも恵まれ、1961 年、ついにその成果を論文にまとめて発表しました。同時に、後の産業化の基盤となる基本特許（1959 年出願）も取得しました。

その後、成果が世界に知られる中で、ある研究者の「比弾性率の高い繊維が複合材料の強化繊維として有望だ」という見解をきっかけに、構造用材料としての研究開発や樹脂との複合材料（CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic）化の研究開発を進めることになりました（コラム②）。

PAN 繊維は、熱処理すると分子間の結合が変化し、強固な黒鉛結晶構造をもつ炭素繊維になります（図 2、3）。PAN 系炭素繊維は、先に発表されたレーヨン系炭素繊維とは異なり、縮合したベンゼン環が繊維軸の方向に規則正しく配向し、高い強度と弾性率を備えています（コラム③）。

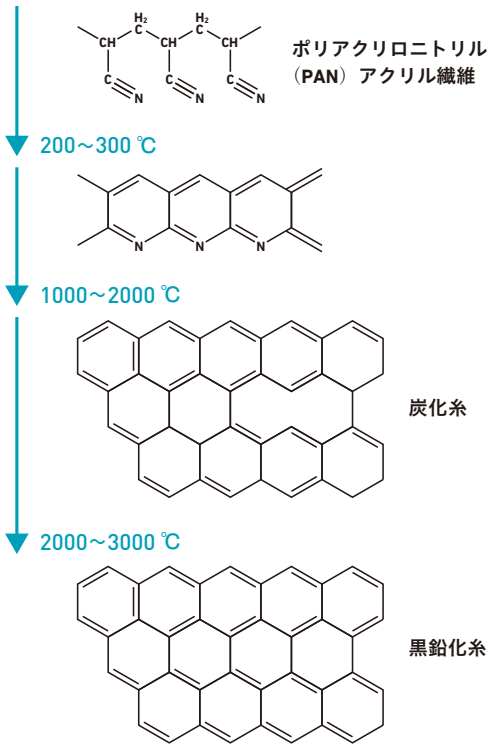


図 2：ポリアクリロニトリルから炭素繊維ができるまで
ポリアクリロニトリルを加熱処理すると 200 ～ 300 ℃で環状の構造が形成され、それを 1000 ～ 2000 ℃に昇温すると、炭素以外の元素が取り除かれて強い炭素繊維ができる。さらに 2000 ～ 3000 ℃では黒鉛化が進行する（9 ページの「もっとくわしく」を参照）。

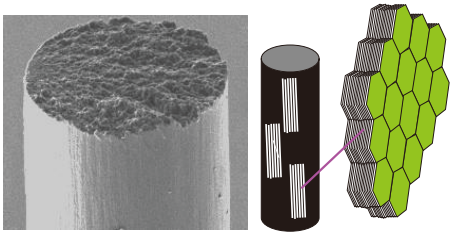


図 3：炭素繊維の構造

2 技術シーズの産業化課題の解決に向けて

（オープン・イノベーションの第 2 段階）

どのような技術課題が生じ、解決方法をあみ出したのでしょうか。

＊4
耐炎化処理：原料の繊維を酸素を含む雰囲気中で加熱しておき、炭素化したときに融解しないようにすること。

＊5
靭性：材料の粘り強さ。外力によって破壊されにくい性質。

炭素繊維の工業生産に成功　（1970 年代～）

PAN 系繊維による炭素繊維の製造法が発明され、多くの企業が炭素繊維の開発を始めましたが、製造には時間がかかり、高コストなことから工業生産にはなかなか至りませんでした。東レ株式会社（以下、東レ）も炭素繊維に着目した企業の一つで、当初は繊維メーカーであるため、炭素繊維用の PAN 繊維の研究を中心に進めていました。

一方、東レの基礎研究所ではナイロン生産の研究を進める中、PAN 繊維の原料であるアクリロニトリルと似た構造を持つヒドロキシエチルアクリロニトリル（HEN）という化合物を開発していました。この新規化合物 HEN には PAN 繊維の耐炎化[＊4]を促進する効果があり、また PAN 繊維に混ぜると機械強度のすぐれた炭素繊維ができることがわかりました。

これをきっかけに東レは、自社での炭素繊維の製造をめざしてプロジェクトをスタートさせました。1970 年には PAN を使った炭素繊維製造法の基本特許使用の許諾を得て、本格的に工業化を進めましたが、東レには PAN 繊維を大量に焼く（加熱処理）技術はありません。そこで、ユニオン・カーバイド社と技術交換し、糸を焼くというノウハウを獲得しました。

こうして、1971 年に炭素繊維の商業生産を開始し、その後、日本企業が欧米の企業に対して PAN 系炭素繊維の生産で大きなリードをとる第一歩となりました。しかし当時は、まだ炭素繊維の用途は定まらず、伸びゆく市場もありませんでした。

東レでは、炭素繊維で強化した樹脂との複合材料（CFRP）の強度や弾性率が高いことから、当初から、炭素繊維を航空機の機体に使うことをめざしていましたが、航空機メーカーによる認証にはかなりの時間を要することが分かりました。

そこで、少しでも炭素繊維の用途が広がるように、手探りで市場を開拓しました。CFRP を使った釣り竿が従来のガラス繊維を使ったものより軽量化されたことで好評を博し、ゴルフクラブのシャフト、テニスのラケットと、高性能であれば高価格でも許容されやすいスポーツ用品へ用途を広げていきました。

これと平行して、炭素繊維の性能の改良も進めました。炭素繊維の普及とともに、東レの炭素繊維は「軽くて強い」と広く認められるようになり、1978 年、ついにボーイング社から航空機の材料として認定されました。

航空機を炭素繊維でより軽く丈夫にするために　（1990 年代～）

航空機の構造の安全性を保証するために、一般に、新規な材料はリスクの小さい部材（非構造材）から始めて使用実績を積み上げた後で初めて、構造体の骨格として荷重を支える部材（構造材）に使用されることになります。

CFRP も同じような経過をたどりました。内装材などの非構造材から構造材へ、構造材の中でも舵面などの二次的な部材から主翼・胴体などの一次的部材へという経路です。そして、1986 年にはボーイング社から、機体の強度を担う一次構造材として認定されるための要求仕様が提示されました。

従来の機体の基本構造は、アルミニウム合金で作られていました。アルミニウム合金の加工性・靭性[＊5]・強度・軽量性・耐食性などの特性と材料コストなどが、一次構造材として適していたためです。さらに軽量化するためには、革新的な材料が求められていました。そのために、飛躍的軽くて強度も高く（図 4）、腐食の心配がない、CFRP が一次構造材として期待されたのです。

CFRP に形状と靭性を付与する樹脂を母材、強度を付与する炭素繊維を強化材と呼びます。

強化材になる炭素繊維は緻密な要因分析に基づいて設計され、高強度で高弾性率を有する炭素繊維を開発しました。

なお、炭素繊維を用いて航空機の構造体を作るためには、中間製品であるプリプレグ（図 1）を出発素材として用います。プリプレグは、炭素繊維を一方向に揃えて熱硬化性樹脂をしみこませたシート状のものです。これを何枚も重ねて必要な形にして窯（オートクレーブ）の中で、圧力と熱を加えて

＊6
エポキシ樹脂の主剤と添加剤：最もよく知られるビスフェノールA型エポキシ樹脂は、主剤としてビスフェノールA、硬化剤としてのエピクロロヒドリンを混合し、重合させるが、さらに種々の添加剤によってこのエポキシ樹脂の性質を変えることができる。主剤と硬化剤の組み合わせも種々存在する。

樹脂を硬化させて、航空機の機体構造に仕上げます。

強化材の炭素繊維を一方向に並べたCFRPは、繊維軸方向に強いのですが、繊維軸に垂直な方向には弱くなります。そのため、図1に示したようなシート状のプリプレグを外力のかかり具合に対して最適な方向に組み合わせて積層して構造体を作ることになります。積層した構造体は平面方向にはどの方向にも強くできますが、積層されたシート間の剥離破壊に対する対応が課題となりました。そのためには、材料の靱性の改善が必要です。

飛行中の機体は常に過酷な条件にさらされています。寒いところで大粒の雹が機体に当たれば、現行のアルミ合金でもそこに損傷が発生するくらいの強い衝撃を受けます。また、離着陸時には砂や小石が当たります。CFRPでは、先に述べたように典型的な損傷としてシート間に亀裂が発生することがあり、これらの衝撃に対する損傷は、設計上許容される程度に抑えなければなりません。

複合材料では、強化材の炭素繊維のみならず母材の設計が重要になります。CFRPの母材に使われるエポキシ樹脂は接着性や化学薬品耐性に優れており、主剤と組み合わせる添加剤によってもさまざまに性質を変化させることができます。シートとシートの接合は母材同士の間で行われるため、シート間の剥離破壊に対する靱性の改善の課題は、まさに母材としてのエポキシ樹脂[*6]の課題になりました。

母材としてのエポキシ樹脂自身の靱性を高めるための研究を重ねる中でぶつかった壁は、母材の靱性を改良すると強度特性が下がるという二律背反でした。この問題をなんとか解決しなければ、航空機構造用材料としてボーイング社が提示した目標値を達成できません。

ブレークスルーになったのは、母材全部を一律に改良するのではなく、破壊が起こる箇所だけを改良するというアイデアでした。CFRPの強度をエポキシ樹脂で確保しつつ、熱可塑性樹脂の粒子を破壊が起こるシート間に配列させて必要なところに靱性を付与します（図4）。すると、CFRPの表面に衝撃が加わった時に、熱可塑性樹脂の粒子が変形し、さらにはその一部が破壊してエネルギーを吸収するので、亀裂の進展を食い止められるというわけです。

このアイデアを実現するため、独自の熱可塑性樹脂粒子を開発しました。開発に携わった同社複合材料研究所長の遠藤真氏は当時を振り返り、次のように語っています。

「このようなイノベーションを生み出せたのは、対象が複合材料であるため、物理学や有機化学、材料力学、高分子化学などさまざまな分野の専門家が集まったチームだったからです。いったん、お互いの異なる視点を理解し合うと、その刺激で思いがけない発想につながるのです」。

こうして、1990年にボーイング777の尾翼や客室桁材などの一次構造材として東レの高靭性CFRPが認定されました。

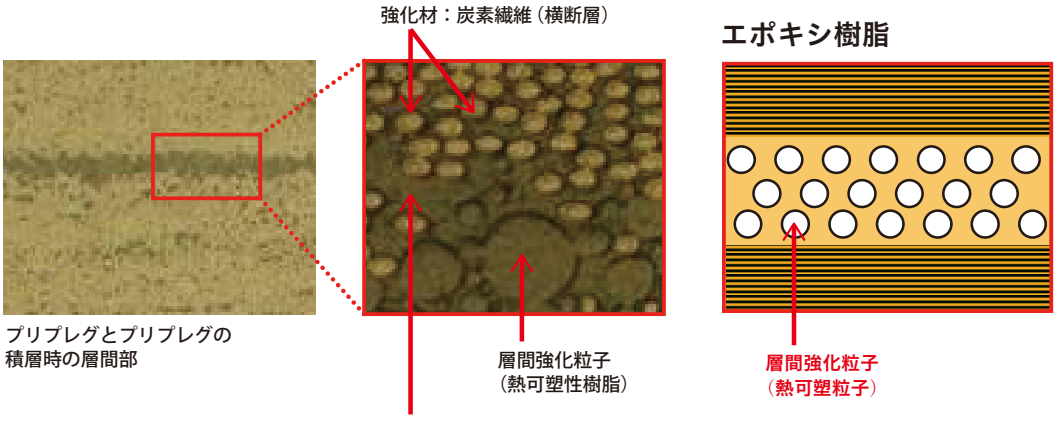


図4：プリプレグ積層体の断面写真

＊7
紡糸：化学繊維を製造するため原料を液体にして紡糸口金（ノズル）から押し出して繊維にする工程で、汎用繊維を作る製法には、「溶融」、「乾式」、「湿式」の３つの方法がある。
溶融は、原料を熱で溶かした状態で口金から押し出して繊維状にした後、冷やして固める方法。湿式は、原料を多数の穴から凝固液の中に押し出して糸にする方法。乾式は、原料を多数の穴から押し出し、溶剤を気化させて固める方法。なお、最終の PAN 系炭素繊維は、一般的に直径５～７マイクロメートル（μ m）の長繊維（フィラメント）の集合体になる。

大量生産に向けて　（2000 年代～）

材料が社会に普及し、大量に使用されるためには、製造コストを下げることが必要です。CFRP 用炭素繊維においてもコストを下げるため、生産性向上による大量生産に向けた取り組みが始まりました。それまでの生産方法は工程が多く、手間がかかるプロセスで大量生産には向いていませんでした。そこで、原料になる糸の合成工程をはじめ、全工程を徹底的に見直し、基本を変えずに工程数を減らしました。

紡糸＊7 の方法の見直しでは、低コストの湿式と品質の高い乾式の両方を組み合わせた乾湿式紡糸法を開発し、高速化を実現しました。これは材料を押し出す口金と凝固剤を溜める浴の液面に隙間を設けることでその隙間で材料を変形させながら、凝固剤の中に押し出して糸にします。

新たな紡糸法で高速化を実現し、さらに、１回に製造できる本数を１万 2000 本から２万 4000 本に倍増させても均一に繊維化できる技術により生産性を高めました。細い多数の繊維を整然と生産するには非常に高い生産技術を必要とします。東レには紡糸をコントロールする技術があったので、この方法を開発することができたのです。

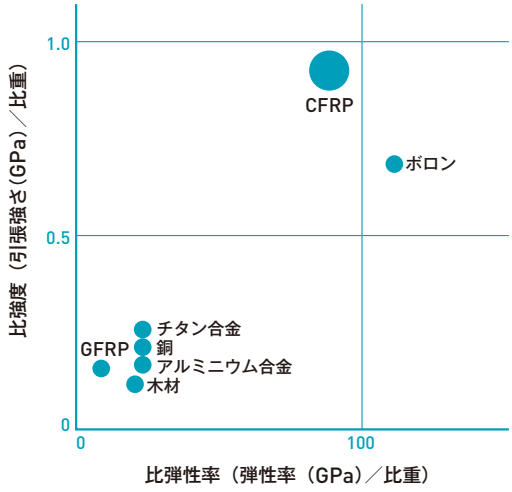


図 5：CFRP と金属材料等の他材料との比強度＊8 と比弾性率＊9 の比較
（北野彰彦、化学と教育、59 (4)、228 (2010)
CFRP は他材料にくらべて比強度、比弾性率とも優れている。

3 社会への貢献

新しい技術は社会にどんな価値をもたらしたでしょうか。

炭素繊維は、旧大阪工業試験所の進藤氏の下で基礎研究が始まってから約 60 年の歳月がたち、日本企業が生産量で世界市場のおよそ 80%をカバーする産業に成長しています。東レの炭素繊維の世界シェアはおよそ 50%です。

航空機分野で最初に炭素繊維が使われたのは 1975 年のことでした。そのときは、ボーイング 737 の内部部品だけでした。1983 年にはじめて機体の一部に使われ、1992 年にボーイング 777 でやっと尾翼と主翼の一部に使われました。このときの１機あたりの炭素繊維使用量は７トンほど。さらに 2003 年には、ボーイング 787 の主翼と胴体に高靭性 CFRP が全面的に採用されることになりました（図 5）。2006 年にはボーイング 787 の生産が開始され、ついに「黒い飛行機」が実現したのです。

ボーイング 787 では１機あたりの炭素繊維使用量は 35 トンほどになり、従来機に比べて機体重量が 20% 軽量化するとされています。

炭素繊維は、その製法から、単位重量あたりの素材製造エネルギーが鉄鋼など金属に比べて大きいと言われています。そこで LCA の観点が重要となります。LCA は、資源の採取、製品の製造・使用・リサイクル・廃棄などに関するライフサイクル全般にわたって総合的に環境負荷を評価する手法の１つです（GSC 教材シリーズ No.1 参照）。炭素繊維協会による二酸化炭素排出量に着目した試算では、次のように排出量の大きな削減効果が示されています。

ボーイング 787 では機体構造重量 の 50%に CFRP が使用されていますが、これと同じ CFRP 構成比率を既存機体（アルミニウム合金使用）であるボーイング 767 に適用してモデル計算すると、10 年間の運用で機体１機あたり 7%、ライフサイクル全体で排出される二酸化炭素の量が削減されます。ボーイング 767 クラスの航空機の場合、機体素材の製造から機体の廃棄に至るまで、標準的国内運行の総二酸化炭素排出量のうち、運用中に排出される割合が 99% にのぼるため、軽量化による燃費向上は直接的な効果になります。

＊8
比強度：単位比重あたりの強度

＊9
比弾性率：弾性率を比重で割った値。単位比重当たりの弾性率（＊２を参照）。軽量性と高弾性率との両立に優れる材料はこの値が高くなる。比強度は強度を比重で割った値。単位比重当たりの強度。ＰＡＮ系炭素繊維の比重は、一般的に 1.74 ～ 1.95。

世界中が炭素繊維に注目し、たくさんの企業がチャレンジしたもののそのほとんどが去っていきました。それでも、辛抱強く開発を続けることができたのは、炭素繊維のような優れた性質をもつ材料はほかにはなく、将来性があるという確信があったからこそですし、さらに黒い炭素繊維による「黒い飛行機を飛ばしたい」という開発に携わった人々の強い思いがあったからでしょう。

炭素繊維というイノベーションの成功は、官（産業技術シーズ）と民（技術シーズの産業化）の連携、素材メーカーや航空機メーカーとの連携、さらに研究チーム内の専門分野をこえた連携がカギになりました。素材メーカーは部品メーカーと連携することはありますが、航空機メーカーと連携することは通常はありませんでした。

「新しい材料での前例がないので、ボーイング社も私たちもどう使えばいいのかよくわからなかったのです。そこでずいぶん議論を重ねました。もちろん部品メーカーとも連携し、加工技術を開発しました。材料の革新と加工技術の革新が並行して起こったといえます」と遠藤氏は話します。

遠藤氏は、今後も、さらに航空機の軽量化をめざすと言います 。ボーイング 787 よりさらに大型の 777X ができる予定ですが、一方で小型機に炭素繊維を使うのはまだこれからです。小型機に適用するためには、さらにコストを下げる必要があります。

「これまでは、“より強く、よりかたく” を目標に開発してきましたが、これからはユーザーの用途に合わせてトータルな開発を進めていきたい」と遠藤氏は言います。現在では、航空機以外にも船舶、土木建築、さらには自動車にもと炭素繊維の用途が広がりつつあります。用途が広がれば、エネルギーの節約や環境負荷の低減につながることが期待されます。

シート数：200/250/300
燃費効率：同クラス比 20% 改善
航続距離：6,500-16,000km
速度：マッハ 0.85
就航：2011 年
CFRP：約 35t/ 機

■ CFRP
■ CFRP（サンドイッチ構造）
■ GFRP
■ アルミ
■ その他金属

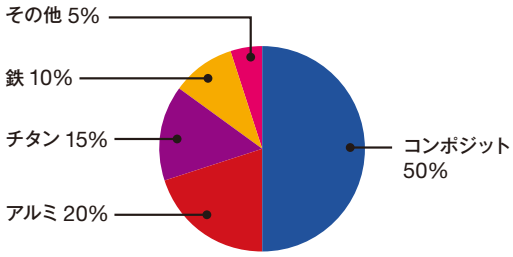


図 6：ボーイング 787 での CFRP 使用部位
（ボーイングジャパン）
ボーイングの一次構造材料用途に認定されている炭素繊維およびプリプレグは、東レの製品のみ

コラム 1 炭素材料

炭素は、原子番号 6 の元素で共有結合によって原子が次々につながることでいろいろな形の物質をます。同じ元素の単体でできているが性質が異なる物質を同素体といい、炭素の同素体には、ダイヤモンドと黒鉛（グラファイト）、木炭やすす、コークスなどが古くから知られています。黒鉛やダイヤモンドは、規則的な配列の結晶構造をしており、木炭やすすなどははっきりした結晶構造をもたない無定形炭素です。

炭素材料は古くから燃料などとして使われてきましたが、20 世紀の終わりごろからフラーレンやグラフェン、カーボンナノチューブなどのナノカーボン（炭素からなる直径 10^{-9}m ほどの物質）が相次いで見つかりました。これら炭素の同素体は形によって、巨視的には、点状のフラーレン、直線状のカーボンナノチューブ、平面状のグラフェンなどに分類できます。

基礎的研究において 1996 年のノーベル化学賞（フラーレン）、2010 年のノーベル物理学賞（グラフェン）のテーマになったナノカーボンは、軽量、高強度、電気伝導度がよいなどの理由から化学、エネルギー、エレクトロニクスなど様々な分野で産業に応用されることが期待されています。

コラム 2 国家規模のイノベーションモデルとして

現在、産業技術総合研究所（産総研）では、この事例を、イノベーションモデルの成功事例と位置付けています。産総研は、基礎研究から製品化への一貫した本格研究や基本特許をベースとした国内産業界の独自研究開発の促進、さらに繊維の機械強度計測の標準化を通じて、日本企業の生産量が世界市場のおよそ 80% を占める産業に成長するまでの橋渡しをすることに成功しました。この成功をもたらした要因には、研究者の明確な目的意識と精力的な研究、セレンディピティ、組織による研究者サポート、産業界の旺盛な新事業開拓意欲がタイムリーに組み合わさったことがあります。

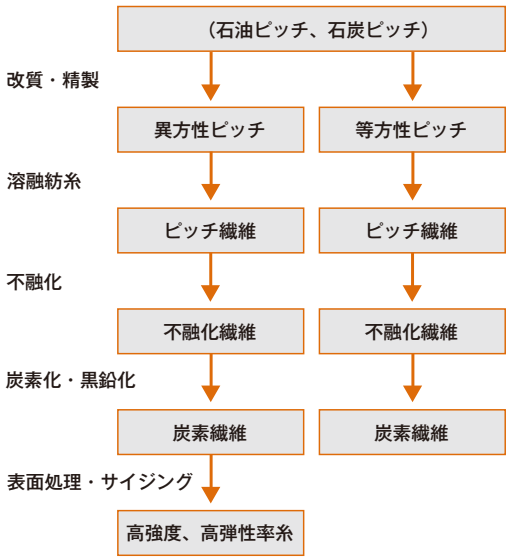
コラム 3 PAN 系炭素繊維とピッチ系炭素繊維

炭素繊維にはアクリル繊維を原料とする PAN 系炭素繊維と石油の精製時に残る副産物であるピッチを原料とするピッチ系炭素繊維の 2 種類があります。市場の約 9 割は PAN 系炭素繊維が占めています。なお、レーヨンを使った炭素繊維は現在ほとんど使われていません。

ピッチ系炭素繊維の発展は 1963 年の群馬大学の大谷杉郎教授の開発と共に始まりました。ピッチ系炭素繊維には、光学的特性から光学的等方性ピッチと光学的異方性ピッチ（メソフェースピッチ）があり、それぞれ製法が違います。ピッチ系炭素繊維は、原料を精製、加熱溶融し、多数の細孔があいた口金から押し出して作ります。

このピッチ系炭素繊維を空気中で加熱処理し、高温でも融解しない不融化繊維にします。続いて酸素のない状態で加熱処理すると、炭素繊維になります。ピッチ系炭素は弾性率の低いものから高いものまで作れます。高弾性率炭素繊維（黒鉛化繊維）を作る場合、異方性ピッチを原料にし、さらに酸素のない状態で加熱処理します。どちらかというと、PAN 系炭素繊維は高強度、ピッチ系炭素繊維は弾性率が高いところが特長で、それぞれ用途が異なります。

図 7：ピッチ系炭素繊維の製造プロセス
（出典　炭素繊維協会）



コラム 4 炭素繊維が軽くて強いわけ

炭素繊維は、黒鉛の結晶構造をもちます。黒鉛結晶は、炭素原子 6 個からできた平面 6 角形のベンゼン環が縮環した平面シートをもち、さらにこのシートが積み重なった構造をしています。平面シート内の炭素原子どうしは強固な共有結合（σ結合およびπ結合）でつながっており、平面方向の強度は非常に大きくなります。一方、平面シート間は共有結合よりはるかに弱いファンデルワールス力で結合しているため、隙間が大きく、はがれやすくなります。炭素繊維が強いのは、この平面シートの方向が繊維の方向に一致しているためです。

炭素間のπ結合を構成している電子はシート内を動くことができ（非局在化）、金属の自由電子のようなはたらきをして導電性が生じます。

炭素繊維が金属材料と比べて軽いのは、炭素の原子量が金属元素よりも小さいためです。また、黒鉛結晶構造中の平面シート間の隙間が大きいことも密度を小さくしています。

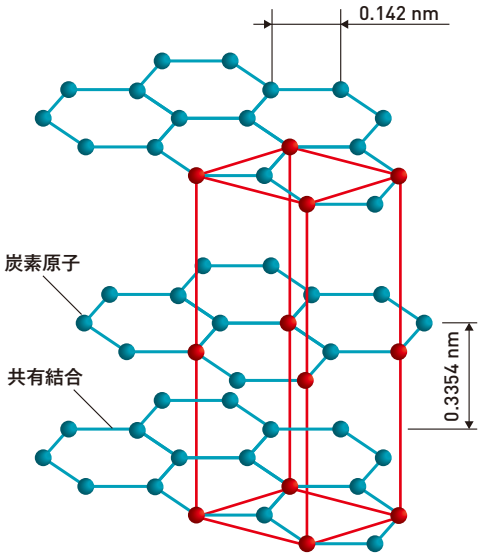


図 8：黒鉛の結晶構造

もっとくわしく

PAN 系炭素繊維の製造

PAN 系炭素繊維は以下の工程で連続的に製造します。各工程で処理条件を変えることで、様々な品質を持つ製品を作ることができます。

❶ PAN 繊維合成：アクリロニトリルを溶媒に溶かし、重合触媒などを添加し、加熱することにより、高分子のポリアクリロニトリル（PAN）[*3] にする。紡糸工程では、PAN を多数の細孔のあいた口金から押し出して繊維状にし、次いで水洗や 1 次延伸をし、油剤付着と乾燥処理を行い、さらに 2 次延伸を行う。

❷ 耐炎化：200 ～ 300 ℃の空気中で酸化する（不融化、安定化ともいう）。環化反応が起こり、窒素原子を含む 6 員環が連なったはしご型の構造になる。炎に入れてもほとんど燃えない耐炎化繊維になる。

❸ 炭素化：1000 ～ 2000 ℃の窒素などの不活性ガス中で加熱する。はしご型の分子同士が反応して窒素分子などを放出し、シート状に広がった一部窒素原子を含む黒鉛網面構造に変換され、炭素原子の組成が 90% 以上の炭素繊維となる。窒素原子や水素原子がガス化合物となって繊維から放出されるため、単位長さ当たりの繊維の重量が減少する。

❹ 黒鉛化：2000 ～ 3000 ℃の窒素などの不活性ガス中で加熱する。黒鉛化により高弾性の炭素繊維を製造できる。高弾性率を目的としない汎用の炭素繊維の製造には含まれない工程。処理温度によって黒鉛化度は異なり、処理温度を高くして黒鉛化が進行すると強度は落ち、弾性率が高くなる。高温には加熱処理で黒鉛化した炭素繊維を黒鉛繊維と呼び、汎用の炭素繊維と区別する場合もある。

❺ 表面処理・サイジング：様々な手法が用いられるが、一般的には電解質溶液中での電解酸化が行われることが多い。また表面をコーティング剤（サイジング剤）などで処理し、その後の加工工程での取り扱い性を向上させることをサイジングと呼ぶ。

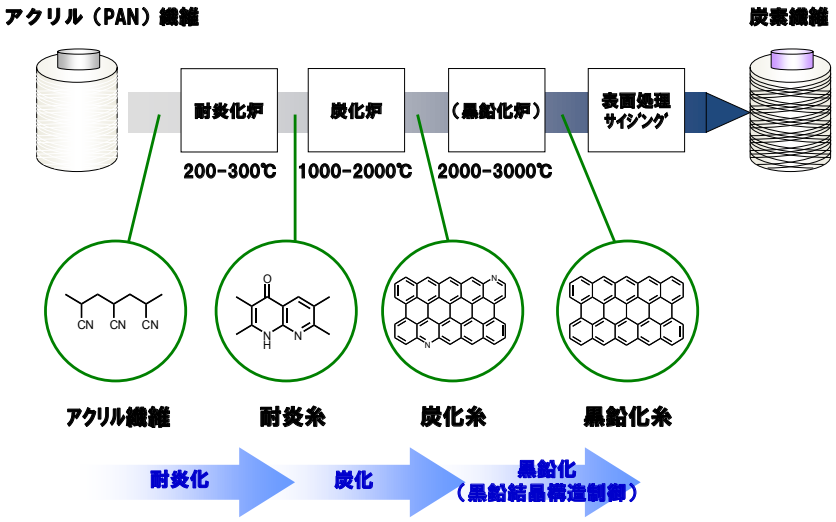


図 9：PAN 系炭素繊維の製造工程

設問　理解を深めるために

この事例を通して、GSC の観点から以下の問いについて考えてみましょう。

Q1　本教材の技術・製品は GSC の事例のどれに最もよく当てはまるか、その理由と共に討議してください。

Q2　社会に実装されて初めて GSC は完結します。そのためには、3 要素、すなわち環境性・社会性・経済性の要求を同時に満たす必要があります。例えば、本教材の技術・製品の事例で環境性・社会性のみならず経済性を満たすためにどのような方策を講じたか整理して下さい。

Q3　本事例では、萌芽的技術から幅広い分野への展開が期待される産業化へとおよそ半世紀に及ぶ取り組みが示されています。これを成功させた連携にはどのようなものがあったか整理して下さい。

Q4　ポリアクリロニトリルが原料合成繊維として好適であった理由を考えて下さい。

Q5　炭素繊維材料は他のどのような分野で用いられているでしょうか。また、炭素材料はどのような分野で用いられているかについても調べてみましょう。

Q6　周期律表では炭素の下にケイ素があります。炭素とケイ素にはどのような類似点や相違点があるでしょうか。ケイ素材料としてはどのようなものがあるでしょうか。

文献紹介　こんな資料を活用しよう

進藤昭男、化学、65（1）、22（2010）
D. Hull and T.W.Clyne（宮入裕夫、池上皓三、金原勲 訳）「複合材料入門（改訂版）」（培風館）
大谷杉郎、奥田謙介、松田滋「炭素繊維」（近代編集社）
森田健一「炭素繊維産業」（近代編集社）
柴田充弘「基本高分子化学」（三共出版）
北野彰彦、化学と教育、59（4）、226（2011）
小田切信之、日本複合材料学会誌、21、（4）、152（1995）
日本化学繊維協会　炭素繊維協会委員会　http://www.carbonfiber.gr.jp/

2015 年に 12 年ぶりに東京で開催された第 7 回 Green and Sustainable Chemistry 国際会議では、
世界で連携して GSC に取り組むことを表明した「東京宣言 2015」が採択されました。

（JACI ホームページ参照：http://www.jaci.or.jp /images/The_statemant_2015_final_20151118.pdf）

The Statement 2015

We, the participants of the 7th International GSC Conference Tokyo（GSC-7）and 4th JACI/GSC Symposium make the following declaration to promote "Green and Sustainable Chemistry（GSC）" as a key initiative in the ongoing efforts to achieve global sustainable development.

The global chemistry community has been addressing future-oriented research, innovation, education, and development towards environmentally-benign systems, processes, and products for the sustainable development of society.

In response to the Rio Declaration at the Earth Summit in 1992 and subsequent global Declarations, the global chemistry community has been working on challenges in a unified manner linking academia, industry, and government with a common focus to advance the adoption and uptake of Green and Sustainable Chemistry. The outcomes include the pursuance of co-existence with the global environment, the satisfaction of society' s needs, and economic rationality. These goals should be pursued with consideration for improved quality, performance, and job creation as well as health, safety, the environment across the life cycles of chemical products, their design, selection of raw materials, processing, use, recycling, and final disposal towards a Circular Economy.

Long-term global issues, in areas such as food and water security of supply, energy generation and consumption, resource efficiency, emerging markets, and technological advances and responsible industrial practices have increasingly become major and complicated societal concerns requiring serious attention and innovative solutions within a tight timeline. Therefore, expectations are growing for innovations, based on the chemical sciences and technologies, as driving forces to solve such issues and to achieve the sustainable development of society with enhanced quality of life and well-being.

These significant global issues will best be addressed through promotion of the interdisciplinary understanding of Green and Sustainable Chemistry throughout the discussion of " Toward New Developments in GSC. "

The global chemistry community will advance Green and Sustainable Chemistry through global partnership and collaboration and by bridging the boundaries that traditionally separate disciplines, academia, industries, consumers, governments, and nations.

July 8, 2015
Kyohei Takahashi
on behalf of Organizing Committee
Milton Hearn AM, David Constable,
Sir Martyn Poliakoff, Masahiko Matsukata
on behalf of International Advisory Board
of 7th International GSC Conference Tokyo（GSC-7）,
Japan July 5-8, 2015

東京宣言 2015

我々、「第 4 回 JACI/GSC シンポジウム・第 7 回 GSC 東京国際会議」の参加者は、世界の持続可能な発展のために各界の弛みない努力が進められている中で、その基盤をなすイニシアチブとして「グリーン･サステイナブル ケミストリー（GSC）」の推進を次のように宣言します。

我々、世界の化学に携わる者は、社会の持続可能な発展のために、未来にむけた研究・イノベーション・教育、および環境に配慮したシステム・プロセス・製品を志向する開発に取り組んできました。

1992 年の地球サミットにおけるリオ宣言及びそれに続く諸条約を受けて、世界の化学に携わる者は、産・学・官一体となり共通の目的意識をもって、グリーン・サステイナブル ケミストリーの採用と活用を前進させるために、困難な課題に取り組んできました。その成果としては、地球環境との共生、社会的要請への充足、および経済の合理性を同時に達成することを求めてきました。またその最終目標としては、化学製品の設計から原料の選択、製造過程、使用形態、リサイクル、廃棄までの製品の全サイクルにおいて、より良い健康、安全、環境とともに、品質、性能、および雇用創出へも配慮した循環型経済をめざして取り組みを続けてまいりました。

昨今、長期的・全地球規模での問題、すなわち食糧と水供給の確保、エネルギー創出と消費、資源効率、新興市場、および技術の進歩とその責任ある工業的実施などの課題が大きくかつ複雑な社会的懸念として注視されるようになり、またこれらの解決には、時間的に余裕のない状況の中で革新的な解決と本問題を真剣に注視することが必要とされています。それゆえに、これらの課題解決を図り、より健康で豊かな社会の持続可能な発展をもたらす牽引役として化学に関わる科学と技術を基盤とするイノベーションへの期待は益々大きくなっています。

これらの地球規模の課題解決に向けては「グリーン・サステイナブル ケミストリーの新たな発展へ」の討議全体を通じたグリーン・サステイナブル ケミストリーへの理解を、他分野との連携にまで広げることによって、今後十分に取り組んでいく必要があります。

そのためにも、我々世界の化学に携わる者はグローバルな連携と協調によって、また学問分野や、学、産、消費者、官、および国を隔ててきた従来の壁を乗り越えて、グリーン・サステイナブル ケミストリーを強力に推進していきます。

注：採択された東京宣言は英文であり、この和訳は参考資料となります。

JACI テキスト ：GSC 入門～ GSC 賞を受賞した社会的実践事例から学ぶ GSC
2017 年 3 月発行

企画・編集　公益社団法人新化学技術推進協会 GSCN 普及・啓発グループ教材ワーキンググループ
発行　公益社団法人 新化学技術推進協会
〒 102-0075　東京都千代田区三番町 2　三番町 KS ビル 2 階
電話：03-6272-6880　FAX：03-5211-5920
URL：http://www.jaci.or.jp/
技術内容協力　東レ株式会社、 国立研究開発法人産業総合技術研究所
制作　有限会社サイテック・コミュニケーションズ
〒 101-0052　東京都千代田区神田小川町 3-14-3 イルサ 202

GSC : Green and Sustainable Chemistry

人と環境にやさしく、持続可能な社会の発展を支える化学

シリーズGSC入門

GSC賞を受賞した社会的実践事例から学ぶ

世界規模で、資源やエネルギー、地球温暖化、水や食糧などの課題がますます深刻になり、複雑になっています。それらの課題を解決し、社会の持続可能な発展に向けて、環境保全と社会・経済発展を両立させるイノベーションが求められており、GSCへの期待は高まる一方です。このテキストシリーズでは「GSCとは何か」を理解し、私たちみんなが持続可能な社会の担い手になることをめざして、GSCの推進に貢献したすぐれた業績に贈るGSC賞を受賞した技術や製品を解説します。

SP

SDGs入門 （GSCはSDGsのけん引役）

SDGsとは、国際連合が採択した世界共通のゴールで、持続可能な開発を達成するために経済と社会、環境の三要素を調和させることが不可欠だとしています。この考え方は、社会の持続可能な発展に向けて、環境保全と経済発展の両立をめざすGSCと共通しています。このテキストは特別号として、SDGs をGSC の視点で解説し、みなさんに考え、実践してもらうことをめざします。

1

サステイナブル社会を先駆けた新しいお洗濯提案

花王株式会社

花王株式会社は、持続可能な社会を目指してLCAの観点から洗剤をとらえ、製品をコンパクト化するとともに、すすぎ回数を従来の２回から１回ですむ洗剤を開発。すすぎ１回を通じて、消費者とともに環境負荷を低減する新たな洗濯スタイル「いっしょにエコ」を提案しました。

2

副生CO_2を原料とする新規な非ホスゲン法ポリカーボネート製プロセス

旭化成株式会社

旭化成です。株式会社は、これまで大気中に排出していた副生成物の二酸化炭素を原料として、ポリカーボネート樹脂を製造することに成功しました。この製法では、原料にホスゲンなど有毒物質を使わず、排水や廃棄物の発生を抑制しました。これは、環境性、社会性、経済性に優れた画期的プロセス

3

航空機の軽量化を可能とする炭素繊維複合材料の開発

東レ株式会社

旭化成株式会社は、これまで大気中に排出していた副生成物の二酸化炭素を原料として、ポリカーボネート樹脂を製造することに成功しました。この製法では、原料にホスゲンなど有毒物質を使わず、排水や廃棄物の発生を抑制しました。これは、環境性、社会性、経済性に優れた画期的プロセスです。

4

植物由来原料を用いた高機能透明プラスチックの開発と商業化

三菱化学株式会社(現 三菱ケミカル株式会社)

三菱化学株式会社（現 三菱ケミカル株式会社）は、再生可能資源から作られるイソソルバイドを主原料とした透明エンジニアリングプラスチックを開発し、商業化に成功しました。再生可能資源を利用した独自のプロセスにより環境負荷を低減しただけでなく、耐衝撃性や耐候性に優れるなど製品の性能を画期的に向上させています。

5

世界の水問題解決に貢献する高機能性逆浸透膜の開発

東レ株式会社

東レ株式会社は、透水性や除去性、耐汚れ性に優れた高機能性逆浸透膜を開発しました。省エネと高水質の両方の機能を兼ね備えた膜は、世界の水問題の解決に貢献する画期的な技術として注目されています。

6

高充電性・高耐久性を両立した低環境負荷アイドリングストップ車用バッテリの開発

日立化成株式会社（現 エナジーウィズ株式会社）、株式会社日立製作所

日立化成株式会社（現 エナジーウィズ株式会社）が開発したアイドリングストップ車用バッテリは、高耐久性を実現し、また短い時間で充電できる高充電性を備えています。このバッテリを搭載した自動車は燃費がよくなり、地球温暖化の原因のひとつである二酸化炭素の削減に貢献しています。

7

インクジェット用水性インクによる軟包装フィルムへの印刷の実現

花王株式会社

花王株式会社は、日用品や食品の包装で使われるプラスチックフィルム印刷向けの「インクジェット用水性インク」を開発しました。高画質でありながらも、揮発性有機化合物がほとんど排出されないため、環境負荷を低減させることができました。

8

クメンを循環利用するプロピレンオキサイド新製法の開発と工業化

住友化学株式会社

住友化学株式会社は、ポリウレタンなどの原料として使われるプロピレンオキサイドの新しい製造法を開発しました。プロピレンオキサイドだけを効率よく生産できるとともに環境負荷の低減を実現しました。

9

次世代の太陽電池として期待されるペロブスカイト太陽電池

京都大学 若宮 淳志、金光 義彦、株式会社エネコートテクノロジーズ

ペロブスカイト太陽電池は、低温で材料を塗るだけで簡単に製造できるうえ、薄くて軽い次世代の太陽電池として期待されています。京都大学の若宮教授らは、この技術に注目し、材料化学の観点から研究開発を進め、この電池の高性能化に成功しました。京都大学発ベンチャーとして設立された株式会社エネコートテクノロジーズは、この成果をもとに、ペロブスカイト太陽電池の実用化と社会実装にむけて取り組んでいます。