ISSN 1348-5350
独立行政法人
新エネルギー・産業技術総合開発機構
〒212-8554
神奈川県川崎市幸区大宮町1310
ミューザ川崎セントラルタワー
http://www.nedo.go.jp

2009.6.3 BIWEEKLY 1045

NEDO 海外レポート

Ⅰ. テーマ特集　ナノテクノロジー特集

1. 欧州地域におけるナノテクノロジーに関する動向　1
2. 中国・韓国・台湾におけるナノテクノロジーに関する動向　5
3. インド・東南アジアにおけるナノテクノロジーに関する動向　10
4. グラフェンに関する最近の研究事例（ドイツ）　17
5. 英国におけるナノテク研究トピックス　21
6. 米国（西海岸）におけるナノテク関連情報　26
7. バクテリア・モーターの可能性（イタリア）　30
8. 10 テラビット高密度メモリーのための自己集合化 (米国)　34
9. 水分解技術を促進するナノ構造半導体(米国)　38

Ⅱ. 一般記事

1.　エネルギー
DOE が 2010 会計年度予算 264 億ドルを要求（米国）　40

2.　環境
EU ETS 参加企業の温室効果ガス排出量は前年対比 3%減少　42
EU が気候変動・エネルギー包括法案を正式採択　47

URL：http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/report/

《本誌の一層の充実のため、掲載ご希望のテーマ、ご意見、ご要望など下記宛お寄せ下さい。》
NEDO 技術開発機構　研究評価広報部　E-mail：q-nkr@nedo.go.jp　Tel.044－520－5150　Fax.044－520－5162
NEDO 技術開発機構は、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構の略称です。

Copyright by the New Energy and Industrial Technology Development Organization. All rights reserved.

【ナノテクノロジー特集】政策

欧州地域におけるナノテクノロジーに関する動向

目次

1.　欧州地域のナノテクノロジー
2.　国別の状況
2.1　ドイツ
2.2　ベルギー
2.3　フランス
2.4　オランダ
2.5　デンマーク
2.6　イタリア
2.7　英国

１．欧州地域のナノテクノロジー

2007 年 9 月 17 日付の PublicTechnology.net の記事[注1]によれば、ヨーロッパ内におけるナノテクノロジー向けの全公的資金の 3 分の 1 は、欧州委員会の第 6 次研究開発フレームワーク計画（FP6）に計上されている。

今まで欧州委員会は、ナノ科学とナノ技術のフィールドに対して 14 億ユーロ（550 プロジェクト）を割り当てている。さらに、2007～2013 年をカバーする第 7 次研究開発フレームワーク計画（FP7）では欧州内のナノ技術とナノ科学の資金は大幅に増加し、年平均の資金調達は、FP6 の配分の 2 倍以上になることが予想されている。

さらに、Project on Emerging Nanotechnologies の分析[注2]によればナノ技術の潜在的リスクについて取り組むことを第一義的な目的とした研究については、ヨーロッパ諸国は、米国の 2 倍近くの投資していることが確認された。米国の国家ナノ技術イニシアティブ（NNI:the National Nanotechnology Initiative）が 2006 会計年度について行った評価によれば、リスク可能性の高いプロジェクトへの投資は、米国では 1,300 万ドルであったが、欧州諸国では、2,400 万ドルであった。

ナノ技術研究開発に対する国家予算について、もっとも総合的な統計情報は、2005 年 12 月に欧州委員会が発表した「ヨーロッパと地域外（Beyond）におけるナノ技術 R&D の総額」[注3]に掲載されている。この文書の 5 ページでは、2004 年の、世界におけるナノ技術研究開発への公的資金投入の状況が表に示されている。欧州での研究活動についての公約に加え、最近の欧州諸国における国家予算の割り当ても確認することができる。

[注1] http://www.publictechnology.net/print.php?sid=11493
[注2] http://sciencedaily.com/releases/2008/04/080421072206.htm
[注3] http://cordis.europa.eu.int/nanotechnology

2. 国別の状況

2.1 ドイツ

あらゆる社会的側面を考慮したナノテクノロジーの開発へのドイツの取り組みについては、「ナノイニシアティブアクション計画 2010」[注4]という資料に明確に示されている。その計画によれば、ドイツ内のナノ技術研究への毎年の公的資金投入は、最近では 3 億～3 億 3,000 万ユーロであり、ドイツが、ナノ技術の研究開発に対して欧州の中で最も多くの資金を使っていることを明確に示している。その資金は主に、フラウンホーファー、マックスプランクおよびライプニッツといった研究機関の国内ネットワークや大学を通じて分配される。

2.2　ベルギー

2008 年 12 月にモスクワで開かれた Rus ナノテク 2008 博覧会での報告によれば、ベルギーでのナノ技術への研究開発の公的資金は、2007 年合計で 7 千万ユーロである[注5]。戦略的・基礎的ナノ技術研究と開発の両方が含まれている。

2.3　フランス

近年、フランスが取り組んできたのは、ナノ技術の研究をコーデネートし構築することであり、また、フランスの科学コミュニティのための施設の近代的なネットワークを確立することであった。

例えば、マイクローナノレベル技術の先端的で統合されたプロセスを開発することを目指す 5 つの主要な技術センターの国内ネットワークを作りだした。国家ネットワークに加えて、7 つの地方施設が構築された。また、C’Nanos と呼ばれる 6 つのナノ科学の能力センターが確立され、公的研究組織を構築している。フランスのナノ科学とナノ技術分野では、180 の研究所で 2 千人以上の研究員が働いており、年間予算は 1 億 5 千万ユーロ以上になる[注6]。

2.4　オランダ

オランダのナノ技術研究開発のイニシアティブである NanoNed は、産業界および科学界の 9 つのパートナーで構成され、その中にはフィリップスと TNO も含まれている。

これはオランダのナノ技術についての専門知識を結集したもので、これにより様々な技術の国家ネットワークを可能にしている。NanoNed 計画の予算総額は、2 億 5 千万ユーロにのぼり、オランダ経済活動省が配賦している。

[注4]“ Nano-Initiative – Action Plan 2010”。Federal Ministry of Education and Research 発行。
(http://www.bmbf.de/pub/nano_initiative_action_plan_2010.pdf)

[注5] http://www.belspo.be

[注6] http://www.nanomicro.recherche.gouv.fr/
さらに詳細は、
http://www.invest-in-france.org/uploads/files-en/07-06-25_150657_pub_20050316_en_nanotechnologies_in_france.pdf

NanoNed プログラムは、11 の独立プログラムおよび主力分野(flagships)から組織されている。それぞれは、地方の研究開発の強みと産業との関連性を基にしている。主力製品であるナノスケール計測器具では、ナノメーター精度で動く、科学用および産業用の装置の開発を目標としている。

TNO がこの主力製品をリードしており、ナノ技術の計測機器の研究を Delft 工科大学などと共に進めている。TNO はまた、8,500 万ユーロを最先端ナノ技術基盤に投資する「ナノラボ NL」を主催している。ナノラボ NL は NanoNed に提供されるもので、全オランダの研究者にアクセスできることになっている。

2.5　デンマーク

デンマーク科学・技術・革新省、(Ministeriet for Videnskab, Teknologi og Utvikling)は、デンマーク内のナノ技術の R&D 政策の総合的な責任を持っている。とはいえ、ナノテク研究を目的とした財源を計上しているわけではない。

ナノテク研究開発に対する資金拠出組織の主なものは、6 つの異なるデンマーク研究委員会とデンマーク国立研究財団である。6 つの研究委員会のうち 4 つがナノテク研究開発との関係がある。デンマーク自然研究委員会、デンマーク技術研究委員会、デンマーク医学研究委員会およびデンマーク農業・獣医学研究委員会である。

2.6　イタリア

イタリア工業研究協会により 2006 年に実施された、第 2 回ナノテク IT 調査は、イタリア内でナノ技術の研究開発に関与している 185 の民間企業、協会および研究センターを特定した。それらの団体の 60%は公的研究グループであり、40%が民間企業であった。ナノ技術開発への国の資金拠出は、2007 年だけで 7 千万ユーロに達すると予測された。

技術プログラムを持っている大半の大学と国立研究所は、ナノ技術と関連がある研究開発に積極的に関与している。そして、他の工業国の成功アプローチを参考とし、多くの「中核的研究拠点」がイタリア大学・研究省によって幾つかの大学に創設された[注7]。

2.7　英国

英国通商・投資省の公報 2008 年更新版で、ナノ技術研究開発への英国のアプローチの概略が示されている[注8]。英国政府公報によれば、英国政府は英国ナノテク産業の発展を支える上で大きな足跡を残してきた。例えば、技術戦略委員会（革新・大学・技能省が支援する執行機関）は、ナノ技術の研究開発、製造施設と商業化について、6 年間で 9 千万ポンドのプログラムを現在実施している。

技術戦略委員会はまた、ナノ技術知識移転ネットワークを設立し、マイクロおよびナノスケールの技術の開拓と商業化を、情報提供、接続および供給者とユーザー間の技術革新と共同の促進によって支援している。

[注7] http://www.nsti.org/news/item.html?id=247
[注8] https://www.uktradeinvest.gov.uk/

編集・翻訳：NEDO 研究評価広報部

出典：SRI Consulting Business Intelligence Explorer Program

【ナノテクノロジー特集】政策

中国・韓国・台湾におけるナノテクノロジーに関する動向

目次

1. アジア太平洋地域のナノテクノロジー
2. 中国
3. 韓国
4. 台湾

1. アジア太平洋地域のナノテクノロジー

アジア太平洋地域の各国政府のうち､ナノテクノロジーに対する出資額の上位 5 ヵ国は､これまで日本、中国、韓国、台湾、シンガポールであった。これらの国々では、ナノテクノロジーは最優先分野とされており、新材料の商業化がひっきりなしに続いている。アジア太平洋地域では、ナノテクノロジーに 20 億米ドル以上の資金が投入されているが、そのうちの大部分が中国、韓国、台湾などといった主要国によるものである。

2. 中国

ナノテクノロジーへの支出という意味では中国政府よりも日本政府の方が多い可能性もあるが、経済協力開発機構(Organization for Economic Cooperation and Development : OECD)の報告書によれば､ナノテク分野の研究開発費の合計額では､2006 年に中国が日本を上回ったという（2006 年 12 月 5 日に PhysicsToday.org に掲載された「China overtakes Japan in R&D spending」を参照[注1]）。ラックスリサーチ社[注2]による 2007 年の報告書「Profiting from International Nanotechnology」を執筆した同社の上級アナリスト Michael Holman 博士は次のように言う。「米国、日本、ドイツ、韓国は依然として主導国であるものの、中国ではナノテクノロジー関連の支出や研究発表の数、さらには特許取得数までもが伸びており、ナノテク分野でトップレベルに到達しつつある」（2007 年 3 月 12 日に NanoChina に掲載された「Top nanotech nations see their leads erode」を参照[注3]）。また、カリフォルニア大学サンタバーバラ校「社会におけるナノテクノロジーセンター(University of California, Santa Barbara : UCSB)」の Richard Applebaum 博士と Rachel Parker によれば、中国におけるナノテクノロジーの状況について調査した結果､「中国がナノテク分野で米国を追い越そうと試みている」ことがわかったという（2008 年 4 月 15 日の Daily Nexus に掲載された「UCSB Researchers Study

[注1] http://blogs.physicstoday.org/newspicks/2006/12/china-overtakes-japan-in-rd-sp.html
[注2] Lux Research. 米国とオランダにオフィスを持つ技術関連の独立系調査会社。
http://www.luxresearchinc.com/
[注3] http://www.nano.org.uk/nanochina/english/index.php?option=com_content&task=view&id=761&Itemid=402

Nanotechnology Development in China」を参照[注4])。

米国の国家ナノテクノロジー・イニシアティブ(National Nanotechnology Initiative : NNI)の Web サイトに掲載されている最新の情報によれば、中国がナノテク研究開発に投入してきた金額は 2.5 億米ドル強であるという。Applebaum 博士と Parker もまた、2007 年に、中国政府がナノテクノロジーに 2.49 億米ドルの資金を投入したことを確認している。しかし、Lux Research 社によれば、購買力平価(PPP)[注5]を加味して算定すると、中国政府によるナノテクノロジーへの投資は 9.06 億米ドル以上に相当するという。これは米国についで世界第 2 位の数字となる。中国のナノテク製品およびナノテクシステム市場の市場価格は、2005 年には 54 億米ドルであったが、2010 年までに 314 億米ドルに、2015 年までには 1,449 億米ドルに成長することが予想されている。また、世界市場における中国のシェアは、2010 年までに 6%を超え、2015 年までには 16%を超える見込みだという（2008 年 12 月に BrightHub に掲載された「Nanotechnology in China」を参照[注6])。

中国におけるナノテクノロジーの取り組みは、主に、民間資本ではなく中央政府や地方自治体の資金によって進められている。中国政府は現在、ナノテクノロジー分野における技術開発やイノベーション・クラスター[注7]、研究開発力などの強化、生産能力の向上、およびナノテクノロジーのコンサルティング体制の構築に取り組む International Nanotech Innovation Park という計画に資金を投入している。同パーク内にはすでに 14 の新しいナノテク企業が誕生しており、当初 200 人であった雇用者数も、数年以内に 700 人以上に増えることが期待されている（2008 年 11 月 11 日に Micronarc に掲載された「China pours billions into nanotechnology」を参照[注8])。

中国国務院(State Council)は「National Medium- and Long-term Science and Technology Development Plan (2006–20)」という科学技術開発計画の中で、ナノテクノロジーが優先性の高い分野であり、重要な先端技術であるという考えを示している。中国は、ナノサイエンス関連の問題の解決や、ナノテクノロジーの商業化による中国経済の発展、ナノ材料の設計・生成に関する研究、ナノシステムを構築するための新しい理論と手法の構築、ナノエレクトロニクス、ナノエレクトロニクス装置およびナノバイオロジーに対する取り組みなどを強化することを目指している。

[注4] http://www.dailynexus.com/article.php?a=16415

[注5] purchasing power parity. 同一の商品やサービスの価格が各国で同じになる（購買力が等しくなる）ように算定した通貨換算レートのことであり、各国の物価水準の差を修正し、実質的な比較をする際などに利用される。

[注6] http://www.brighthub.com/engineering/mechanical/articles/21353.aspx

[注7] クラスター : cluster. 元来は果実の房（ふさ）や魚の群れなどを指す言葉であるが、ここでは、技術・生産・研究などを提供する複数の組織がブドウの房状に連結・集積している地域のことを指す産業・経済用語として用いられている。

[注8] http://www.micronarc.ch/f/news/shownews.php?newsid=1040

3. 韓国

韓国は、予算15億米ドルの10年間のプログラム「Korea Nanotechnology Initiative」を2001年に開始した。このプログラムでは、韓国のナノテクノロジー技術を強化するとともに、同国をナノテク分野で世界のリーダーに押し上げることを目指している。韓国政府は、このプログラムの下で、Center for Tera-Level Nanodevices、Center for Nanostructured Materials、Center for Nanoscale Mechatronics and Manufacturing を設立した。プログラムの第1フェーズを通して、韓国はナノテクノロジー主要国と並ぶまでに成長し、今では米国、日本、ドイツと比べても遜色ないレベルに達している。韓国では、ナノテクノロジー分野における雇用や、大学のナノテク関連学科、また同分野の論文発表などの数が増加している（2007年にMechanical Engineeringに掲載された「Korea's nano future」を参照[注9]）。

同プログラムは現在第2フェーズが進行中であり、ロボット工学、ユビキタス装置、食糧・医療科学、代替エネルギーといった分野に焦点を定めた取り組みが進められている。2008年の初頭、韓国科学技術省(Ministry of Science and Technology : MOST)は、2020年までに韓国政府がナノテクノロジー助成の支出で世界3位以内に入ることを目指すナノテクノロジー・ロードマップを発表した。「このロードマップでは、ナノテクノロジーをナノエレメント、ナノ製造技術、ナノバイオ、ナノエネルギー・環境技術という4分野に分けている」という（2008年1月15日にKorea Timesに掲載された「Nanotechnology Roadmap Unveiled」を参照[注10]）。同省はまた、韓国企業の年間収益が2005年までに2,600億米ドル、2020年までに5,000億米ドル（世界市場におけるシェアの20%）に増加することを期待している。

韓国におけるナノテクノロジーの開発および商業化を促進している最も重要な組織は、ナノ技術集積センター(National Center for Nanomaterials Technology : NCNT)である。NCNTでは、ナノテク分野の研究開発クラスターの構築、製造装置や材料の研究開発に対する支援、国際協力、専門家の育成などを行っており、電子材料、フレキシブル・ディスプレイ材料、マルチスケールMEMS[注11]、LIGA[注12]、ナノスケール解析などの分野に照準を合わせていく予定だという[注13]。2000年以降、韓国政府は、ナノテク分野の産業に14億米ドル、研究開発に9.5億米ドル、インフラ整備に325万米ドル、個人を対象とした教育・育成プログラムに7,456万米ドルの資金を投入している（2008年12月23日にAZoNanoに掲載された「S Korea Government Announce Plans to be Global Leader in Nanotechnology」を参照[注14]）。

[注9] http://memagazine.org/backissues/membersonly/aug07/features/koreanan/koreanan.html
[注10] http://www.koreatimes.co.kr/www/news/tech/tech_view.asp?newsIdx=17333&categoryCode=129
[注11] microelectromechanical systems. 微小電気機械システム。
[注12] lithography, electroplating, and molding. リソグラフィ、電鋳、成形。
[注13] Chung, Jinyong 著「National Center for Nanomaterials Technology (NCNT), Korea」を参照。
[注14] http://www.azonano.com/news.asp?newsID=9270

4. 台湾

台湾では、国家科学委員会(National Science Council : NSC)が科学技術関連のすべての問題を管理している。2002 年、同委員会は「奈米国家型科技計画（Taiwan National Science and Technology Program for Nanoscience and Nanotechnology)」というプログラムを承認し、2003～2008 年には、6.2 億米ドルの資金を得てこのプログラムの第 1 フェーズが実施された。NSC の負担額は全体の 21.8%に過ぎず、資金の大半(71.9%)は経済部(Ministry of Economic Affairs : MOEA)によって拠出された。残りの 6.3%は、教育部(Ministry of Education : MOE)、原子力委員会(Atomic Energy Council : AEC)、環境保護局(Environmental Protection Administration : EPA)、衛生局(Department of Health : DOH)、労働委員会(Council of Labor Affairs : CLA)によって提供された。資金助成の内訳と、助成された資金の行方については、図 1 と図 2 を参照。

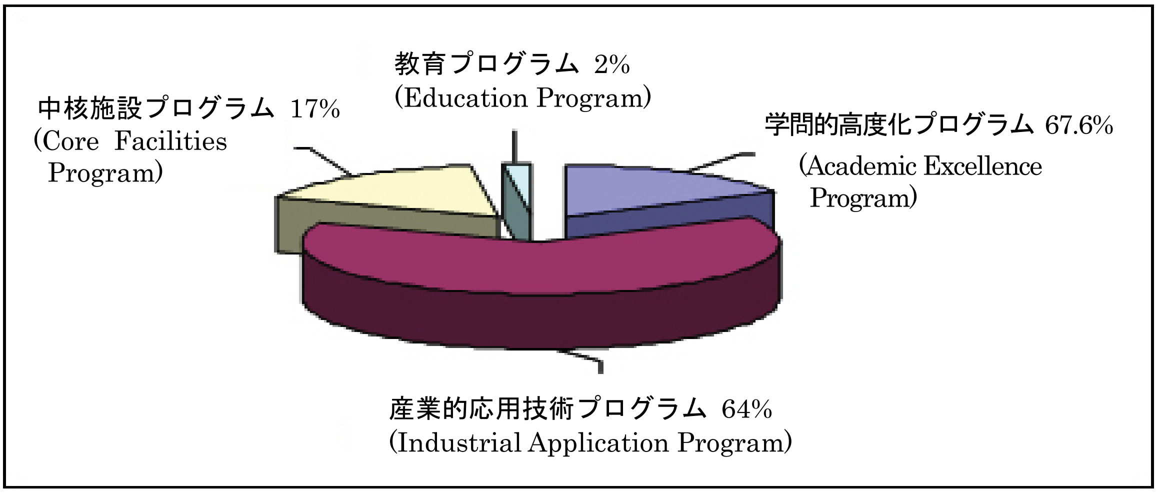


図１　ナノテクノロジー助成資金の内訳（資金拠出組織）
（出所： http://nano-taiwan.sinica.edu.tw/index.php?eng=T&lid=49）

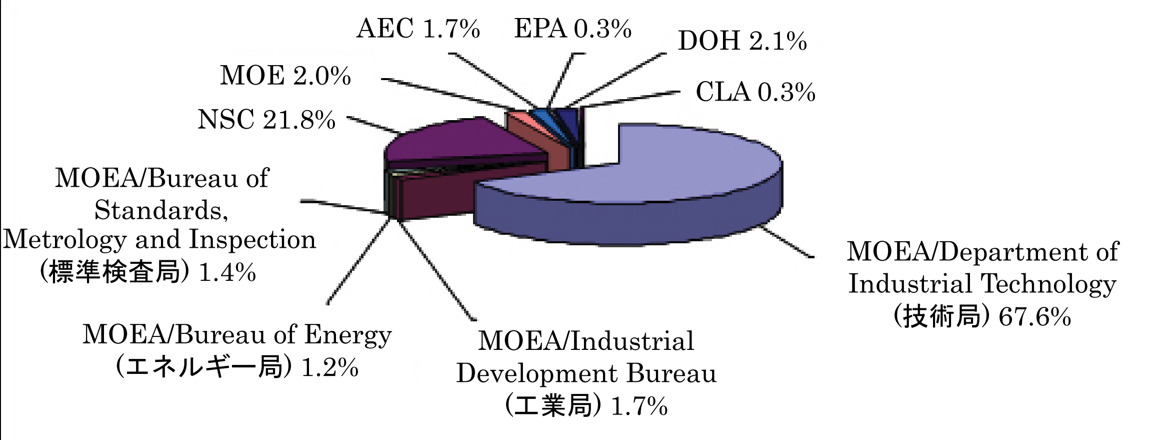


図２　助成資金の行方
（出所： http://nano-taiwan.sinica.edu.tw/index.php?eng=T&lid=49）

台湾はすでに半導体や集積回路製品の分野で高い競争力を持っているが、政府はナノテクノロジーに注目し、国際的な競争力のさらなる強化を目指している。台湾ではDRAM[注15]、MRAM[注16]、OUM[注17]、CMOS[注18]有機エレクトロニクスなどといったナノエレクトロニクス技術の開発が進められている。政府はまた、奈米国家型科技計画に対する資金拠出のほかにも、ナノテクノロジーの技術力をさらに発展させるために、10億米ドルの資金を投入することを予定している（2008年10月にThomson Reutersに掲載された「The Taiwan Model For Patenting Nanotechnology」を参照[注19]）。台湾工業技術研究院(Industrial Technology Research Institute)によれば、台湾におけるナノテク製品の生産高は、2008年には10億米ドルを超えたという。

2009年3月、台湾の国立成功大学(National Cheng Kung University)は、ナノテクノロジーを医薬品や病気治療に用いることで生じる可能性のある健康被害について調査することを発表した。過去に実施された幾つかのプロジェクトの中で、ナノテクノロジーが健康に害を及ぼす可能性が認められており、今回のプロジェクトによってナノ物質と生体分子間の相互反応に対する新たな知見が得られることが期待されている（2009年3月19日にFox Businessに掲載された「NCKU Launches Biomedical and Nanotechnology Integration Project」を参照[注20]）。

「日本や韓国、台湾、中国、インド、さらにその他の地域にも、世界的な経済危機による大きな打撃が及んでいる」（2009年3月2日にGlobal Postに掲載された「Technology: The Asian tigers meow」を参照[注21]）。しかし、経済危機による深い影響を受けながらも、アジア太平洋地域の主要な技術生産国は、ナノテクノロジーおよびナノサイエンスに対して引き続き多くの資金を投入している。

翻訳：桑原 未知子

（出典：SRI Consulting Business Intelligence Explorer Program）

[注15] dynamic random-access memory. コンピューターの記憶装置などに利用される半導体素子の一種。コンデンサに電荷を蓄えることによって情報を記憶するため、電力供給がなくなると記憶された情報も失われる（揮発性メモリ）。

[注16] magnetoresistive random-access memory（磁気抵抗メモリ）. 磁気を利用して情報を記憶する半導体メモリであり、電源供給がなくなっても記憶された情報が維持される（不揮発性メモリ）。

[注17] ovonic unified memory. 相変化材料と呼ばれる特殊な合金を用いた半導体メモリであり、電源供給がなくなっても記憶された情報が維持される（不揮発性メモリ）。

[注18] complementary metal-oxide–semiconductor. 金属酸化膜半導体素子(MOSFET)を相補型に配置した集積回路の構造。

[注19] http://science.thomsonreuters.com/news/2008-10/8482269/

[注20] http://www.foxbusiness.com/story/markets/industries/technology/ncku-launches-biomedical-nanotechnology-integration-project/

[注21] http://www.globalpost.com/dispatch/technology/090302/technology-the-asian-tigers-meow

【ナノテクノロジー特集】政策

インド・東南アジアにおけるナノテクノロジーに関する動向

目次

1. アジア太平洋地域のナノテクノロジー
2. インド
3. シンガポール
4. マレーシア
5. タイ
6. ベトナム

1. アジア太平洋地域のナノテクノロジー

現在、ナノテクノロジーには世界全体で 135 億ドルを超える資金が投入されている（2009 年 2 月 4 日付けのオンライン誌バイオスペクトラム(BioSpectrum)に掲載された「Nanobiotech initiatives intensify」を参照[注1]）。ナノテクノロジー市場は、2014 年までに 2.6 兆ドルの規模に成長すると推定されている。ナノテクノロジーのプログラムをまだ設けていない国は現在新しいイニシアティブの策定に取りかかっており、すでにプログラムを開始している国では、研究開発に対する予算をさらに増やしている。インド、中国、日本、シンガポール、韓国、台湾など、アジア太平洋地域のいくつかの国では、ナノテクノロジーを重要な科学技術分野だと見なしている。同地域で過去 2 年間にナノテクノロジーに投入された資金の合計は 20 億ドルを超えており、この数字は今後さらに伸びることが予想されている。また、同地域のいくつかの国では、この分野で注目に値する技術開発やイニシアティブが実施されている。

2. インド

インド政府は、新しいナノ材料を開拓し、新たなビジネスを形成する取り組みを強化してきた。ナノサイエンス・ナノテクノロジー分野においてインドは後発国であるため、同国発の技術は今のところ商業化には至っていない。2007 年 5 月、インド政府は、ナノサイエンスとナノテクノロジーを普及させる目的で、「ナノミッション(Nano Mission)」と名付けられた 5 年間の資金助成イニシアティブに 100 億ルピー（当時のレートで約 2.55 億米ドル）を投じることを発表した。ナノミッションの主な対象分野は、分子クラスター、低次元構造、量子ドット、ナノエレクトロニクス、ナノフォトニクス、ナノコーティング、ナノデバイスを使ったセンサーや診断キット、薬剤送達、ナノ蛍光体を用いたディスプレイ機器などである（インド科学技術省科学産業研究局(DSIR)が 2008 年 3 月に発行したニュースレター「R&D India」を参照[注2]）。ナノミッションの下では、すでに全国で多数の教

[注1] http://biospectrumindia.ciol.com/content/CoverStory/10902042.asp
[注2] http://www.rndindia.info/newslet/newsletter_8.htm#Nanotechnology%20Initiatives%20by%20GoI

育プログラムが開始されているほか、バンガロール(Bangalore)、コルカタ(Kolkata)、およびモーハーリー(Mohali)にナノサイエンスとナノテクノロジーの研究所を設置することも合意されている。現在、バンガロールとムンバイでは、ナノテクノロジーの中核的研究拠点(Center of Excellence)の設立が進められている。また 2008 年には、バンガロールに総面積 14 エーカー（約 56,660m^2）のナノテクノロジー研究センターが開設された。

ナノミッションによるこれらの取り組みの推進力となっているのは、先行して発足した「ナノサイエンス・テクノロジー・イニシアティブ(Nano Science and Technology Initiative : NSTI)の成功である。NSTI は、インド全土における科学技術活動の計画、調整、実施を担当しているインド科学技術省科学技術局(Department of Science & Technology : DST)によって実施されているプログラムである。2007 年 5 月にナノミッションが開始される以前に、DST は NSTI を通して、ナノサイエンス分野で博士課程の研究を行う 450 人の学生に対して研究資金を提供していた。DST はまた、ナノミッションの開始以降、ナノテクノロジーの新規事業に対して特別な助成金として 500 万ルピー（約 10 万米ドル）を提供している。

DST では、ナノファブリケーション、ナノリソグラフィ、DNA チップ、ナノコンポジット、分子エレクトロニクス、ナノセンサー、薬剤送達、カーボンナノチューブ、ナノワイヤーなどといった技術に特に重点を置いて、いくつかのナノバイオテクノロジー・プロジェクトに対して資金助成を行っている。フロスト＆サリバン社[注3]のシニアアナリストである Bhuvaneashwar Subramanian は、ナノ材料およびナノバイオテクノロジーについて次のように述べている。「インドでナノバイオテクノロジーの成長が促進されている要因は、ほかの国々とほとんど変わらない。世界中で一致しているいくつかの主要な傾向としては、ナノ材料の性質を利用した薬剤送達の新技術の開発」などのほか、「患者の遺伝子構造に基づいた治療方法の設計に対する高い関心などがある」（2009 年 2 月 4 日付けで BioSpectrum に掲載された「Nanobiotech initiatives intensify」を参照[注4]）。インドには、バイオテクノロジー、医薬品、情報技術(IT)などの産業に大きな変革をもたらす潜在的な可能性がある。

DST はナノ材料、特にカーボンナノチューブとナノ粒子に関する研究を奨励している。インドと米国はジョイントフォーラムを開催し、ナノ材料の分野で連携を進める意思を明らかにしている。インドはまた、マイクロシステムやスマートシステム[注5]、ナノサイエンスネットワークなどの構築を目指したプログラムも開始している。国家的なナノテクノロジー戦略を構築するために、産学の研究者を集結させたもうひとつのイニシアティブに、「Vision Group」がある。インドには現在、ナノテクノロジーに関する明確な国家戦略が

[注3] Frost & Sullivan. 国際マーケティング、市場調査、コンサルティングなどを行う米国企業。
[注4] http://biospectrumindia.ciol.com/content/CoverStory/10902042.asp
[注5] センサー機能やアクチュエータ機能、自己判断、自己制御、自己修復などの機能を持つシステム。「インテリジェントシステム」などとも呼ばれる。

ない。また、融通の利かない組織制度や投資資金の不足が、インドにおけるナノサイエンス・ナノテクノロジーの成長の妨げとなる可能性もある。インドには革新的な技術が育つ潜在的な可能性があるにもかかわらず、組織的なまとまりのなさや、官民の協力の欠如などが原因で、ナノテクノロジー分野で十分な影響力を発揮できなくなる恐れもある（2007年に Demos [注6]が発表した報告書「India: The uneven innovator」を参照[注7]）。

3. シンガポール

シンガポールは、電子工学、バイオテクノロジー、エネルギー、化学の各分野で優れた成果を上げており、ナノテクノロジー分野における新技術の開発や、既存技術の強化を実現しやすい状況となっている。経済開発評議会(Economic Development Board：EDB)は、シンガポールの技術力を発展させる上で、ナノテクノロジーが戦略的に重要な分野であると見ている（2009 年 3 月 4 日に発表された、ロシア-シンガポール・ナノテクノロジー会議に関する EDB のプレスリリースを参照[注8]）。シンガポールでは、ナノテクノロジーが将来の技術開発の鍵になると期待されており、貿易産業省(Ministry of Trade and Industry)が発表した「科学技術計画 2010(Science and Technology Plan 2010)」の中では、「ナノテクノロジー」という言葉が 13 回も繰り返し使われ、強調されている（2007 年 6 月 6 日の Nanowerk に掲載された「Special issue on nanotechnology in Singapore」を参照[注9]）。シンガポール政府は、ナノテクノロジー関連分野の発展と人材強化のために、年間 2,000 万米ドル程度の資金を投入している。現在シンガポールでは、1,000 人を超える研究者がナノテクノロジー関連のプロジェクトに参加している。

2008 年 3 月、シンガポール国立研究財団(National Research Foundation : NRF)は、初期段階にあるベンチャー事業に対して資金助成を行う「Early Stage Venture Funding Scheme」というプログラムを発足させた。この助成プログラムにより、6,000 万シンガポールドル（約 4,000 万米ドル）のプログラムの下で、Nanostart Asia Pte 社（ドイツ、フランクフルトに所在する Nanostart AG 社の子会社）に 1,000 万シンガポールドルの資金が助成された。この助成金は、設立まもないナノテクノロジー企業を支援し、それらの企業におけるシンガポール国内での発展を後押しするために利用される。Nanostart AG 社の最高経営責任者(CEO)である Marco Beckmann は次のように言う。「シンガポールには、最先端のナノテクノロジー研究開発インフラと世界トップレベルの研究センターがあり、モチベーションが高く才能のある人材も揃っている。さらに、政府もまた、ナノテクノロジーの研究や商業化を強力に支援している」（2008 年 7 月 31 日の Nanovip に掲載された「Singapore's National Research Foundation invests 10 mn SGD in Nanostart Singapore Early Stage Venture Fund I」を参照[注10]）。

[注6] 英国の独立系シンクタンク。http://www.demos.co.uk
[注7] http://www.demos.co.uk/publications/atlasindia
[注8] http://www.edb.gov.sg/edb/sg/en_uk/index/news/articles/russia-singapore_nanotechnology.html
[注9] http://www.nanowerk.com/news/newsid=2044.php
[注10] http://www.nanovip.com/node/53351

シンガポールにおけるナノテクノロジー研究の主要組織として、Nanotechnology Cluster (NanoCluster)プログラムを実施している Nanyang Technological University と、Nanoscience and Nanotechnology Initiative (NUSNNI)プログラムを実施している National University of Singapore の 2 つを挙げることができる。NanoCluster は、ナノファブリケーションやナノ計測、またナノテクノロジーの応用方法の開拓などに取り組む研究センター間を結ぶネットワークである。NUSNNI は、ナノテクノロジー、ナノマグネティクス、スピントロニクス、ナノ・マイクロ加工、ナノフォトニクス、持続可能なエネルギー材料・エネルギーシステム、健康と環境に対するナノ材料の影響などに関する、長期的なナノサイエンスと工学研究に照準を合わせたプログラムである。

SPRING シンガポール[注11]は、企業の発展を支援する機関であり、革新的な企業の成長を支援し、シンガポール国内に競争力のある中小企業部門を構築することを目指している。SPRING は、NRF や政府の科学技術関連の主要助成機関である A*STAR (Agency for Science, Technology and Research)と連携しており、多機能材料や複合技術、ナノ・マイクロエレクトロニクス、フォトニクス、マグネティクス、量子・分子モデル技術などのほか、さらなる技術開発を可能にする機器やシステムのシミュレーション技術などの分野に目を向けている。

4. マレーシア

マレーシアは、ナノテクノロジーの研究開発への取り組みを 2001 年に開始した。マレーシア国内で実施されているナノテクノロジー関連の研究開発は科学技術革新省(Ministry of Science, Technology, and Innovation : MOSTI)によって管理されており、同省は特に、ナノテクノロジー分野における方針、イニシアティブ、戦略計画の開発に重点を置いている。マレーシアのナノテクノロジー開発計画の概要は、同国の 15 年間（2006～20 年）の経済成長戦略を示す見取り図である「第 3 次産業基本計画(Third Industrial Master Plan)」の中で述べられている。2006 年に MOSTI が研究開発に投入した資金は 6 億 8,600 万リンギット（約 2 億 8,500 万米ドル）であり、そのうちの一部がナノテクノロジーに割り当てられた。2005 年に第 8 次マレーシア計画(Eighth Malaysia Plan)[注12]が終了したのち、ナノテクノロジー分野は、約 1 億 6,000 万リンギット（約 4,200 万米ドル）の資金を受け取った。ナノサイエンスおよびナノテクノロジーに従事するいくつかの研究センターは、現在、ナノ材料、ナノエレクトロニクス、コンピュータ技術、ライフサイエンス、医療と健康などの分野に取り組んでいる。

第 9 次マレーシア計画の中で、MOSTI はナノテクノロジーを優先分野として位置付けており、国立ナノテクノロジーセンター(National Nanotechnology Centre : NNC)の設立

[注11] SPRING Singapore. シンガポール貿易産業省の下位機関。
[注12] 2001～2005 年を対象とした経済成長計画。2006 年からは、2010 年までを対象とした第 9 次マレーシア計画に引き継がれている。

を計画している。NNC では、短期・中期・長期の 3 段階に分けて、次のような取り組みが実施される予定である。

・短期（5 年）
　既存のナノテクノロジー研究センターの中から、国立ナノテクノロジー研究センター(National Nanotechnology Research Centre : NNRC)に移行させるものを特定する。戦略的な研究を開始する。技術と人材のインフラを統合する。

・中期（5～15 年）
　国立ナノテクノロジー研究所(National Nanotechnology Laboratory)を設立する。ナノテクノロジー研究を強化する。革新的な技術に対して確実に規制や管理を行えるように、ナノテクノロジーの枠組みを見直す。ナノテクノロジーに対する国民の理解を育成する。

・長期（16 年以上）
ナノテクノロジーをマレーシアの文化に溶け込ませる。ナノテクノロジーの商業化および産業化を進める。マレーシアのナノテクノロジー研究開発を先進国レベルに引き上げる。

　マレーシアにおいてナノテクノロジーは前途有望な分野であるが、その一方で、同国はまた多くの障壁にも直面している。たとえば、中心的な役割を果たす施設が存在しないことや、ナノテクノロジーに対する国民の理解が進んでいないこと、ナノテクノロジー関連産業を発展させるための具体的な計画や、研究開発のロードマップが欠如しているなどの問題がある（2009 年に UniMAP(Universiti Malaysia Perlis)が発表した報告書「Nanotechnology development status in Malaysia: industrialization strategy and practices」を参照[注13]）。この分野に取り組むアジア太平洋地域のほかの国々と比べると控えめではあるものの、マレーシアにおいてもまた、ナノテクノロジーはゆっくりと成長している。

5. タイ

　タイ科学技術省(National Science and Technology Department Agency : NSTDA)は、科学技術の諸問題に取り組む研究者や科学者、専門家らの活動をつなぐ中心的な役割を果たしている。2003 年、NSTDA の傘下に国立ナノテクノロジーセンター(National Nanotechnology Center : NANOTEC)が設立された。NANOTEC の主な目標は、ナノテクノロジーの技術を利用して、特定分野の製品やそれらの生産方法を創出することである（タイにおけるナノテクノロジー関連の取り組みについて簡潔かつ包括的な情報を得るには「Nanotechnology in Thailand」を参照[注14]）。

[注13] http://publicweb.unimap.edu.my/~ijneam/images/IJNeaM_2_1_119-134.pdf
[注14] http://www.who.int/ifcs/documents/forums/forum6/ppt_nano_thailand.pdf

2007 年、タイ内閣(Council of Ministers of Thailand)は 2007～2013 年の期間を対象とした「国家ナノテクノロジー基本計画(National Nanotechnology Master Plan)」を承認した。この計画は、「国際社会におけるタイの競争力強化を目指して、国内のナノテクノロジーを発展させるための枠組みとして生み出された」という（2008 年 1 月 8 日に「The Nation」に掲載された「Six-year strategy to develop nanotech」を参照[注15]）。NANOTEC は、センサー、ナノエレクトロニクスデバイス、薬剤送達システム、ナノコーティング、ナノ化合物などの分野を対象に、タイ国内で 29 億米ドル相当のナノテクノロジー製品を生産することを目指している。ナノコンポジットを使った食品包装材、水処理用のナノクレイ[注16]膜、クルクミノイド[注17]・ナノリポソーム[注18]を使ったフェイスクリームなどが、すでに製品化され、販売されている。また、ナノアルミナドープセラミックス人工宝石や、ナノキトサン[注19]を使って薬剤の持続的な放出を可能にする薬剤送達技術、ナノコンポジットを使った有機発光ダイオード(organic light-emitting diodes : OLED)、ナノ粒子を使った色素増感太陽電池などが、現在開発中である。

タイ当局はまた、2005 年時点で 234 人であった国内のナノテクノロジー研究者の数を、2,000 人に増員したいと考えている。この基本計画は、ナノテクノロジー製品・サービスの開発、研究者の育成、研究開発に対する投資の奨励、ナノテクノロジー関連設備の建設、国民理解の向上、という 5 つの主要な戦略によって構成されている。この計画では、2013 年までにナノテクノロジー研究開発費を 100 億バーツ(約 2.8 億米ドル)に増やすこと、また、そのうち約 30%を民間部門からの投資で賄うことを目指している。

6. ベトナム

ベトナムは現在発展途上にあり、科学技術インフラの構築が進められている最中である。このような取り組みの中には、ハイテク産業の創出も含まれている。ベトナムでナノサイエンスとナノテクノロジーの研究開発に対する資金助成を行っている主な組織には、科学技術省(Ministry of Science and Technology : MoST)、ベトナム科学アカデミー(Vietnamese Academy of Science and Technology : VAST)、教育訓練省(Ministry of Education and Training)がある。MoST はベトナムの主要な政策決定機関であり、科学技術開発に関する国家計画の構築、優先度の高い研究開発に対する資金配分、研究所の設立などを担当している組織である（「Nanoscience and Nanotechnology in Vietnam」を参照[注20]）。MoST の始動予算は 50 億ドン(VND)（約 35 万米ドル）であった。

[注15] http://www.nationmultimedia.com/2008/01/08/technology/technology_30061449.php
[注16] 粘土鉱物のナノ粒子。
[注17] ウコンなどに含まれる色素の一種。
[注18] リポソーム：生体膜の主成分であるリン脂質によって作られる、カプセル状の構造を持つ人工膜。ナノリポソームは、ナノサイズのリポソームのこと。
[注19] 多糖類の一種で、医用材料や食品、化粧品などさまざまな用途に利用されている。ナノキトサンはナノサイズのキトサン微粒子のこと。
[注20] http://www.asia-anf.org/CountryHome.php?CN=12

ベトナムでこれまでに進められてきたナノテクノロジー関連の取り組みには、次のようなものがある。

- ホーチミン市国立大学(Ho Chi Minh National University)にナノテクノロジー試験室(nanotechnology laboratory)が建設された。
- ハノイ国立大学の工学大学(University of Technology, Hanoi National University)では、ナノ磁性材料の開発が進められている。
- VAST の下で、ハノイ国立大学工学大学と Biotech Institute の研究者らが、ナノテクノロジーを利用して H5N1 ウイルス（鳥インフルエンザ）を破壊する技術の研究に取り組んでいる（「A new direction for Vietnamese science and technology」を参照[注21]）。

ベトナムのナノテクノロジー産業は、今後成長し、アジア太平洋地域においてより強い影響力を持つようになることが見込まれている。

アジア太平洋地域では特に、多くの国が、ナノテクノロジーの技術や、より高度な技術を使った製品加工方法、研究人材、インフラ、国民の理解などの強化に取り組んでいる。しかし、世界的な不況は、ナノテクノロジーへの資本投下や投資にも影響を与えており、現在実施中のプロジェクトや今後実施予定のプロジェクトに弊害が出ている。

翻訳：桑原 未知子

（出典：SRI Consulting Business Intelligence Explorer Program）

[注21] http://english.vietnamnet.vn/reports/2008/02/767614/

【ナノテクノロジー特集】 グラフェン

グラフェンに関する最近の研究事例（ドイツ）

はじめに

グラフェン(graphene)とは、炭素 6 個と水素 6 個からなるベンゼン環を 2 次元平面に敷き詰めた 6 員環シートのことである。これが筒状になるとカーボンナノチューブとなり、複数枚積み重なるとグラファイトとなる(出典 1)。以前は、実際に存在し得ないと考えられていたグラフェンだが、2004 年、アンドレ・ゲイムおよびコスチャ・ノヴォセロフの両氏が率いる英マンチェスター大学の研究者チームがはじめて、その製造に成功した。グラフェン内部では、電子があたかも重さのない粒子であるかのような振る舞いを見せるため、トランジスタや集積回路を構成する半導体デバイスにおいて主として使用されているシリコン結晶と比較した場合、1 桁以上高い電子輸送特性を示すとされる(出典 2)。また、シリコンの場合のように不純物を加えることなく、グラフェンシートの一部に電圧を加えるのみで電気的特性を調節し半導体として用いることが可能となることからも(出典 3)､今後のデバイスの製造において大きな可能性が期待されている。これ以外にも様々な特筆すべき性質が観察されていることから、「驚異の物質」として物理学や材質化学の分野で非常に大きな関心を集めており、NEDO 海外レポートでも、ナノエレクトロニクス関連の技術動向を取り上げた第 1022 号(2008 年)や第 1033 号(2008 年)などで、海外の研究事例が紹介されている(出典 4.5)。以下、グラフェンに関する最近の研究事例に簡単に触れたうえで、ドイツのライプニッツ素材研究所ほかによるグラフェンの物理的性質に関する研究事例について紹介する。

最近のグラフェン関連研究事例

グラフェンの発見者である英マンチェスター大の研究チームは、グラフェンに水素原子を加えることにより、グラファン(graphane)という新たな物質が生成されることを発見した。この新物質は、グラフェンを利用したデバイスにおける絶縁体としての用途が想定されるほか、水素自動車での利用を念頭に置いた水素貯蔵媒体としての活用も期待されるという。これまでは、水素分子を水素原子に分解するのに必要とされる高熱により、グラフェンの結晶構造が破壊されるという問題があったが、同大研究チームは今回、放電を用いて水素ガスから水素原子を取り出す方法により、グラフェンの炭素原子と水素原子を結合させた。分子構造を検討したところ、それぞれの炭素原子に水素原子がひとつ結合しているのが確認された。炭素原子の上方に水素原子が結合する場合と下方に結合する場合が交互に見られることから、グラファンは、ダイヤモンド結晶を思い起こさせるような、より厚い構造を呈しており、電気的にも、ダイヤモンドと同様に絶縁体となることが確認された。グラフェンと水素原子からグラファンが生成される反応は可逆的であり、熱を加えることで水素を分離することが可能であるという(出典 3)。

米ラトガース大の研究チームは、グラフェンとポリスチレンからなる新たな半導体薄膜

材料の製造に成功した。この複合体は、通常のプラスティック加工技術を用いて作られたもので、印刷による低価格デバイスの製造に大きなメリットをもたらしうるとされる。ありふれた安価なプラスティックを主成分とする素材から薄膜トランジスタを製造することができた点、グラフェンと何らかの物質を加工して何らかのデバイスを製造するのに、特別な方法を開発する必要はないという点がポイントとして指摘されている。今回はじめて、グラフェンをもとにした複合体が半導体としての性質を持つことが示された。この複合体はまた、グラフェン同様に、静電的に電子をドーピングすることが可能で、電界効果移動度は、最良の有機薄膜トランジスタでの値に匹敵するという(出典 6)。

ルーマニア国立マイクロ技術研究所ほかの共同研究チームは、厚さ 500μm の半絶縁性のケイ素製基盤上に金製の共平面導波路を設け、さらにその上にグラフェンシートを配置することでマイクロ波 NEMS スイッチを試作した。グラフェンへ直流電圧を印加した結果、グラフェンの薄片が 50GHz までの電磁波の伝播を可能にしたり妨げたりすることが明らかになった。切替時間は 1 ナノ秒未満と非常に短く、同種のデバイスのなかでも最速の部類に入るという。インターネットや携帯電話などの通信機器に幅広く使用されているスイッチに対する安価な代替品としての利用が可能であるとされている(出典 7)。

米ケンブリッジ大ほかの共同研究チームは、ジュール加熱を用いることにより、グラファイトのナノリボンのエッジ部分を原子レベルで効果的に再構築することに成功した。グラフェンのナノリボンは、エッジ部分の原子構造がどのようなものであるかにより、ほぼ金属のような振る舞いを見せたり、半導体のような性質を示したりすることから、実用化にあたっては、エッジ部分の形態と結晶化度をコントロールすることが重要であった。今回、ジュール加熱および電子ビーム照射を実施することにより、炭素原子が気化したのち、エッジ部分はジグザグ状あるいは肘掛け椅子（armchair）状を示すようになることが確認されたという(出典 8.9)。

ライプニッツ素材研究所ほかによる研究

ライプニッツ新素材研究所（ザールブリュッケン）主任研究員兼マギル大学（モントリオール）非常勤教授のローランド・ベンネヴィッツ氏が率いる同研究所、同大学およびローレンス・バークレー国立研究所、エルランゲン・ニュルンベルグ大学、マックスプランク研究所（ベルリン）の共同研究チームは、Physical Review Letters 誌に発表した論文において、グラフェンの性質に関し、以下のような知見を報告した。すなわち、炭素原子 1 個あるいは 2 個からなる層で物体をコーティングすることにより、表面が極めて滑りやすくなると同時に、強固になること、その際、炭素原子 1 個による層は、2 個の層に比べて摩擦がより大きくなるということである。層の厚さによるこのような差は、振動する炭素原子と周囲の電子との相互作用のあり方の違いに起因するものだという。また、グラフェンは、ダイヤモンドに比べてもさらに硬いということも確認された(出典 10.11)。

研究チームはまず、単結晶の炭化ケイ素を注意深く熱することにより、炭素原子を炭化ケイ素の表面へ移動させた。こうすることで、炭化ケイ素の両面に、平らなテラス状のものが生成されるが、これは炭素 1 原子層あるいは 2 原子層のテラスである。次に、以上の

ような処理を施した炭化ケイ素を、超高真空チャンバー内に設置し、原子間力顕微鏡（AFM）を用いてその表面の性質を検討した。その際、用いられた方法は、大きさがナノメーター単位の AFM の先端部を、炭化ケイ素の表面で引きずることにより、摩擦を計測するという単純なものである。摩擦の測定は、1 層および 2 層のグラフェンが表面に形成された炭化ケイ素と、グラフェン層のない炭化ケイ素の双方で実施された。

その結果、グラフェン層のない炭化ケイ素に比べ、1 層のグラフェン層がある場合も、2 層のグラフェン層がある場合も、はるかに滑りやすくなるということが観察された。たとえば、通常の 100 nN の力で AFM の先端部を表面に押し付けると、観察された摩擦力は、グラフェン層 1 層の場合で 0.62 nN、2 層の場合で 0.2 nN だったのに対し、グラフェン層なしの場合は 8 nN であった。

ベンネヴィッツ氏は、通常の範囲内でさまざまに力を変えてみても、2 層のグラフェン層の方が 1 層の場合に比べて有意により滑りやすかったという点には「驚いた」とコメントしている。この現象について氏らは、量子化された炭素原子の振動、すなわちフォノンが、グラフェン内の電子とどのように相互作用するかという点に関係したものであると考えた（この場合の相互作用とは、AFM の先端部を滑らせることにより生じる熱を放散するプロセスであると考えられる）。この考えが正しいかどうかを確認するために、角度分解光電子分光法（APRES）を用いて検討を行ったところ、電子・フォノン結合が、1 層のグラフェン層の場合、2 層のグラフェン層に比べてはるかに強いということが確認された。

複数の層からなるより厚いコーティング層でも、摩擦を計測したところ、2 層の場合より、わずかに滑りにくくなることが観察された。これは、先端部が、多重の層にめりこみ引っかかることが原因となって生じるものと考えられ、2 層の場合にはそのような現象は見られない。

研究チームは最後に、ダイヤモンドでコーティングされた AFM の先端部を用いてグラフェンのコーティング層へ傷をつける実験を行ったが、上手くいかなかった。これは、グラフェン層が、滑りやすいだけでなく、耐磨耗性が高いことを示唆するものである。グラフェンの硬度については、コロンビア大の研究チームにより、今まで知られている物質の中では一番高いことが昨年 7 月報告されており、今回の結果はそれを裏付けるものとなった(出典 12.13)。

カルフォルニア大学バークレー校のロヤ・マバウディアン教授は、今回の発見について、「技術的観点から見てエキサイティング」と形容しつつ、ナノマシーンおよびマイクロマシーンの信頼性を向上させる契機となりうるとコメントしている。

出典：

(1)ThecOn「旬な材料　グラフェン」
http://techon.nikkeibp.co.jp/article/WORD/20080401/149797/
(2)「シリコン基板上のグラフェン薄膜作製に初めて成功」科学技術振興機構，プレスリリ

ース, 2008.6.24
http://www.jst.go.jp/pr/announce/20080624/index.html
(3)Belle Dumé, “Graphane makes its debut”, nanotechweb, 2009.1.30
http://nanotechweb.org/cws/article/tech/37586
(4)「米国と欧州のナノエレクトロニクス技術の最近の商業化動向」NEDO 海外レポート NO.1022, 2008.5.21
http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/report/1022/1022-07.pdf
(5)「米国と欧州のナノエレクトロニクス技術商業化の動向」NEDO海外レポートNO.1033, 2008.11.19
http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/report/1033/1033-08.pdf
(6)Belle Dumé, “Graphene-polymer composites promising for electronics”, nanotechweb, 2009.2.6
http://nanotechweb.org/cws/article/tech/37670
(7)Belle Dumé, “Graphene makes good microwave switch”, nanotechweb , 2009.3.19
http://nanotechweb.org/cws/article/tech/38279
(8) Xiaoting Jia, et al, “Controlled Formation of Sharp Zigzag and Armchair Edges in Graphitic Nanoribbons (abstract)” Science, 2009.3.27, Vol. 323. no. 5922, pp. 1701 - 1705
http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/323/5922/1701
(9)Belle Dumé, “Smoothing out graphene ribbon edges”, nanotechweb , 2009.3.27
http://nanotechweb.org/cws/article/tech/38413
(10)T. Filleter, et al, “Friction and Dissipation in Epitaxial Graphene Films”, Physical Review Letters, 2009, Vol. 102, issue. 8
http://scitation.aip.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=PRLTAO000102000008086102000001&idtype=cvips&gifs=yes
(11)Hamish Johnston, ”Double graphene coat is slippery stuff”, physicsworld, 2009.3.10
http://physicsworld.com/cws/article/news/38173
(12)Changgu Lee, et al, “Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene (abstract)”, Science, 2008.7.18, Vol. 321. no. 5887, pp. 385 - 388
http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/321/5887/385
(13)Belle Dumé, “Graphene has record-breaking strength”, nanotechweb, 2008.7.18
http://nanotechweb.org/cws/article/tech/35061

【ナノテクノロジー特集】カーボンナノチューブ

英国におけるナノテク研究トピックス

はじめに

英国に限るわけではないが、カーボンナノチューブはナノテクノロジー研究の主要なターゲットである。

1985 年に、炭素原子 60 個が集まってできたサッカーボール型の構造を有するフラーレンが発見された。当初、このフラーレンは炭素電極をアーク放電で蒸発させた時に、陽極側に堆積した「すす」の中から回収されていた。フラーレンの研究が世界中でブームになっていた 1991 年に、飯島澄男博士が陰極側の「すす」の中から発見したのが、球状のフラーレンとはまったく異なるカーボンナノチューブである。

カーボンナノチューブ[注1] は炭素原子が 6 角形に配置されたグラファイトシートを筒状に巻いた形をしているが、巻き方や大きさ、重なり方で様々な性質をしめす。細くて強く、構造により良導体にも半導体にもなり、熱伝導性に優れ、ガスを良く吸着するなどの性質を利用し、多くの応用が検討されている。その適用分野はナノ材料や環境、エネルギー、バイオ、医療、エレクトロニクスなどに広がる。近いうちに飯島博士がノーベル賞に輝く可能性もある。

本レポートでは、英国におけるナノテク関連応用研究のトピックスを、カーボンナノチューブを中心に報告する。とても全貌を述べることにはならないが、動向を知る一端にでもなればと思う。

カーボンナノチューブを用いて、自覚症状の無い肺癌の治療

ロンドン大学[注2] 薬学部で実施されたカーボンナノチューブを用いたドラッグ・デリバリー・システム[注3] の新しい研究は、これからの肺がん治療に重要な影響を与えるかもしれないと、同大学からのニュース・リリースで発表された[注4]。

同大学ドラッグ・デリバリー研究センターのナノ医療研究室は、イタリアのトリエステ大学[注5] のマウリツィオ・プラートおよびフランスのストラスブールにあるフランス国立科学研究センター[注6] のアルベルト・ビアンコとの共同研究により、カーボンナノチューブを使用すれば、人間の肺の中の悪性腫瘍の治療遺伝子を制御することができ、ひいては癌腫

[注1] http://app2.infoc.nedo.go.jp/kaisetsu/nan/na05/index.html。

[注2] 1836 年に創立された英国の公立大学で、ロンドン大学連合の一部を構成している。伊藤博文や夏目漱石が留学している。http://www.lon.ac.uk/。

[注3] Drug Delivery System（DDS）。必要な薬物を必要な時間に、必要な部位で作用させるためのシステム。

[注4] http://www.nanoforum.org/nf06~modul~showmore~folder~99999~scc~news~scid~3850~.html?action=longview&。

[注5] 学生数はおよそ 23,000 名で、12 学部を有する中規模総合大学。80 年前に創立された、イタリアの大学の中では比較的若い大学である。http://en.wikipedia.org/wiki/University_of_Trieste。

[注6] CNRS。1939 年に設立されたフランス最大の国立基礎研究機関。研究部門には、数学、物理学、宇宙科学、化学、生命科学、人文および社会科学、環境科学、情報科学、工学などの分野がある。2006 年時点の総人員は 26,000 人で、予算はおよそ 27 億ユーロである。

瘍体積の大幅な抑制、腫瘍の破壊をはじめ、腫瘍を持った生物の長期生存につながることを示した。

この治療結果は、カーボンナノチューブを使用して、低分子干渉リボ核酸（siRNA）[注7] を腫瘤に直接デリバリーすることで達成された。現在進行中の臨床試験は、様々な病気の不必要な遺伝子を抑制する、すなわち「スイッチを切る」という siRNA の治療効果を調査するためのものである。これらの試験のほとんどは、「はだか」の siRNA、つまりデリバリー・システムのない状態で実施されている。その結果では、異常細胞による siRNA の取り込みは効率が低く、効果的なデリバリー・システムの開発が最重要となっている。本研究では、遺伝子のスイッチを切り、がん細胞の死を引き起こす siRNA を使用しているが、その際に 2 つの siRNA デリバリー・システム、すなわちカーボンナノチューブとリポソーム[注8] の性能を比較している。

ナノテクノロジー・ジャーナルの Small 誌[注9] に、オンライン報告として発表された現在の研究では、カーボンナノチューブを使用したがん細胞への週 1 回の siRNA 注入によって治療効果を誘発したことが示されている。ロンドン大学薬学部ナノ医療研究室主任のコスタレロス教授は、「治療効果を上げたのはほんの数例であるとは言え、薬を効果的に望んだ所に輸送するために用いたナノシステムには高い期待を寄せている。カーボンナノチューブが、siRNA などの強力な治療薬を効果的にデリバリーするための選択肢であり、これを用いた結果、ヒト肺癌細胞を保持する動物の長期生存へつながるのが分かってうれしい。カーボンナノチューブを用いたデリバリー・システムの効果が確認され、長期生存への疾患モデルに至るのはこれが初めてではないか。本研究はまだは初期段階であり、がんに対する新規ナノ材料の使用に由来する問題はもっとある」と語った。

カーボンナノチューブとは、優れた特性を持つナノスケールの黒鉛炭素のチューブである。カーボンナノチューブは、これまで知られた物質の中では最大の剛性を持ち強度も最高の繊維で、長さと直径の比は 28,000,000：1 となり得る。カーボンナノチューブは体内に薬を運ぶための容器として使用でき、病巣部に照準をあてて分配することで、副作用と必要な薬剤投与量を減らすことが可能である。リポソームは水に満たされた小さな泡状物質で、細胞膜と同じ材料で作られているが、そのデリバリー性能を改善するため、抗がん剤をカプセル化するのに使用されている。リポソームは最も成功したナノスケールのデリバリー・システムの一つで、今日では多くの病気、特に癌治療に対して、半ダースもの製品が臨床的に使用されている。

報じられた結果は、多くの消耗性疾患を克服する目的で、治療標的細胞へ siRNA をデリバリーするカーボンナノチューブの治療効果を検討するための、さらなる研究推進力となると考えられている。

[注7] 低分子干渉リボ核酸（RNA）は、蛋白質に翻訳され得る塩基配列情報と構造を持った伝令 RNA の破壊によって配列特異的に遺伝子の発現を抑制する。この現象は、ウィルス感染などに対する生体防御機構の一環として進化してきたものと考えられている（http://ja.wikipedia.org/wiki/SiRNA）。

[注8] あらゆる生物の細胞内に存在する構造体で、mRNA の遺伝情報を読み取って蛋白質へと変換する機構である「翻訳」が行われる場である。

[注9] 学際的な論文を掲載するジャーナル。ミクロあるいはナノスケールの科学および技術を、情報交換やレビュー、コンセプト、ハイライト、小論文、全論文の形で年間 12 回出版する。

この研究は、英国生物化学研究委員会[注10]および欧州委員会の FP6 のプログラムなど、さまざまな研究資金の提供を受けている。

ナノ粒子は粘着力を 2 倍にする

ウォーリック大学[注11]のプレス・リリース[注12]によれば、同大学の化学研究者は 2009 年 2 月 13 日発行の Physical Review Letters 誌[注13]に発表した論文において、「極微ナノ粒子が 2 つの非混合液体表面を、以前考えられたよりも 2 倍の強さで接着することを発見した」と述べている。これにより、ナノ粒子の用途として、生きた細胞、高分子複合材料、ハイテク発泡体、ゲル、塗料などへの新たな可能性の範囲を拡げたことになる。研究チームはさらに、この新たに発見された接着粉の性能向上に取り組んでいる。

「ナノ粒子の理想的な液体間表面との相互作用[注14]」と題した Physical Review Letters 誌に掲載された要約を見てみよう。

＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋

電荷を持たないナノ粒子と、理想的な液体同士の界面との相互作用を、分子シミュレーション手法を用いて研究した。ナノ粒子と界面間の距離の関数として自由エネルギー分布を計算すると、その形状は Wang-Landau サンプリングで決定されることが分かった。シミュレーション結果とマクロ理論を比較すると、マクロ理論は自由エネルギー分布をうまく説明していないことが分かる。特にマクロ理論では、粒子の径が増すにつれてその乖離は減少するものの、粒子と界面間の相互作用の範囲と強さを過小評価している。溶剤の化学ポテンシャルが増加するに従い、界面張力が増加し、その結果として界面幅が減少するために、相互作用の強度が増加し、相互作用の範囲が減少する。

＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋

研究者は、分子シミュレーションによると、極微小のナノ粒子（1～2 ナノメータ）は標準モデルで計算されていたよりもはるかに接着力があることを発見して驚いた。研究結果では、最小粒径の場合には、液・液界面から粒子を取り除くには、予想よりも 50%も多いエネルギーを要することが分かった。しかし、粒子の径が大きくなるにつれて、標準モデルからの乖離は小さくなる。

研究担当のイル・ステファン・ボン博士とデビッド・チャン博士は、それ以前のモデルでは、液体と液体の界面におけるナノ粒子の挙動を記述する際に「表面張力波[注15]」を考

[注10] Biotechnology and Biological Science Research Council（BBSRC）。貿易産業省（Department of Trade and Industry）に属する科学技術庁(Office of Science and Technology)の下部組織。http://www.bbsrc.ac.uk/。

[注11] 1965 年にコヴェントリー市に設立された国立大学。人文学、社会科学、自然科学、医学分野の学部を抱える総合大学である。比較的歴史は浅いが、英国ではトップクラスの高い評価を受けている。

[注12] http://www2.warwick.ac.uk/newsandevents/pressreleases/nanoparticles_double_their。

[注13] 米国物理学会が発刊し、世界でも最も権威がある自然科学ジャーナルの一つである Physical Review 誌の速報版。

[注14] Interaction of nanoparticles with ideal liquid-liquid surfaces。
http://scitation.aip.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=PRLTAO000102000006066103000001&idtype=cvips&gifs=Yes

[注15] 表面張力を復元力とする水面を伝わる短波長の波で、「さざ波」とも言う。

慮していなかったためではないかと考えている。イル・ステファン・ボン博士は、「ナノスケールの世界におけるこの新しい知見によって、ハイテク複合材料を用いた製品の設計や量子ドットの利用、細胞生化学、強い高分子塗料粒子の製造、などがもっと自由にできる。」と語っている。

研究者たちは今、この新たに見つかったナノ粒子の天然粘着性を基礎に、親水性と疎水性の相反する表面を持った高分子ナノ粒子を設計することにより、油/水のような液体の界面をさらに強く結合する方法の研究に取り組んでいる。

この研究には、政府の物理化学研究員会[注16] が資金を提供している。

電子エミッタとしてのカーボンナノチューブ

2009 年 4 月 7 日付けのサリー大学[注17] からのニュース・リリース[注18] によれば、サリー大学の先端技術研究所（ATI）とダブリンのトリニティカレッジの理学部の研究者の共同チームは、高分子に埋め込まれたカーボンナノチューブ複合材料は、電子エミッタ材料として優れた性能を持っている事を発見した。

高電圧の下でこれらの電子を蛍光体に衝突させ、通常の赤、緑、および青を発光させて高効率の大面積電界放出ディスプレーとして利用する可能性や、低消費電力の液晶テレビのバックライトユニットとして利用する可能性を開いた。

本研究の結果の詳細は科学ジャーナルの Small 誌[注19]に報告されているが、カーボンナノチューブはシート状の炭素原子を直径が数十億分の 1 メートルに巻き上げられた形状のもので、わずか 1%のカーボンナノチューブを水溶性ポリマーに添加して埋め込む。上記ジャーナルに掲載された要約を見てみる。

＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋

溶解処理で製造された、高分子と単層カーボンナノチューブの機能性複合材料からの電子の電界放出特性を調べた。およそ 0.7%の体積率のカーボンナノチューブを高分子材に添加した時、優れた電界放出特性が得られた。さらに、ナノチューブ濃度と高分子材料を調整すると、複合材を通した電荷移動が改善された。溶解処理でよく分散されて不規則に並んだナノチューブ・高分子複合材料によって、カーボンナノチューブをベースにした大面積カソードを開発する道が開かれた。複合材料の電気伝導度に対して、カソードの電界放出特性の相対的強度が（論文中では）示される。

＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋

ナノチューブの添加濃度を制御することにより、複合表面からの電子の効率的な電界放出が可能であり、その時の材料の損耗は無視できる。ポリマーの選択とナノチューブの化

[注16] Engineering and Physical Science Research Council（EPSRC）。貿易産業省（Department of Trade and Industry）に属する科学技術庁(Office of Science and Technology)の下部組織。http://www.epsrc.ac.uk/。

[注17] 1966 年に、前身のバタシー工科カレッジから総合大学になった。サリー州ギルフォード市にある。教育学、生物・生命科学、電気・コンピューター数学、技術工学、健康医学、人文科学、言語学・法学・国際学、サービス業についての経営学、芸術学、物理化学などの全部で 12 の学部がある。

[注18] http://www2.surrey.ac.uk/mediacentre/press/2009/3810_carbon_nanotube_polymer_nanocomposites_for_field_emission_cathodes.htm。

[注19] 第 5 巻第 7 号（2009 年 4 月 6 日）。http://dx.doi.org/10.1002/smll.200801094。

学処理を正しく調整することで、透明プラスチックで作られた電子機器など、カーボンナノチューブをベースにした大面積エレクトロニクスの可能性が開かれた。

サリー大学研究グループのリーダーであるデビッド・キャリー博士は、「カーボンナノチューブをベースにしたディスプレー技術エレクトロニクスの開拓に成功したのは、学際的共同研究の重要性を示している。サリー大学とダブリンのトリニティカレッジの研究は、ナノスケール物質の変化がバルク素材の性質へ影響を与え、大面積エレクトロニクスの開発へつなぐことができることを明らかにした。」と語った。

先端技術研究所の所長であるラヴィ・シルバ教授は、「ナノサイエンス研究が工学技術をもたらすこの種の高度な研究は、高強度電界放出電子源を必要とする多くの実用的な応用につながる可能性がある。サリー大学先端技術研究所はこの分野で多くの専門経験を有しているので、カーボンナノチューブの応用をさらに進めて行きたい。」とコメントした。

おわりに

一般的に欧州は基礎研究に強く、応用研究や実用化研究に弱いといわれている。そのために、科学研究の成果を製品化に結びつける面で、わが国や米国に遅れを取っていることは事実である。

しかし近年は、欧州連合の「研究枠組み計画」などでも、明確に実用化研究を目指す方向が打ち出され、その成果も着々と上がっている。本レポートに述べた医療、化学およびエレクトロニクス関連の 3 件のナノテク研究では、基礎研究の成果を実用化に結び付けようという意図がはっきりしている。成功するかどうかは次の段階の展開にかかっているが、その推移を見守る必要があろう。それと同時に、わが国も「基礎研究ただ乗り論」を打ち破り、常に基礎研究から実用化研究へ、という流れを作っていくべきではなかろうか。

【ナノテクノロジー特集】 太陽電池　量子ドット　ベンチャー

米国（西海岸）におけるナノテク関連情報

まえがき

カリフォルニア州を中心として、米国西海岸はナノテク関連技術開発の中心地の一つである。この地域での最近の開発関連トピックスを記述する。技術の研究開発はもちろんであるが、それにまつわる投資やベンチャー企業の動きなどにも触れてみたい。

研究開発

太陽光で直接駆動するナノボート

MIT [注1] が発行する 2009 年 4 月 1 日付け「Technology Review 誌[注2] 」によれば、ナノ構造物質で作成された超小型ボートを、太陽光で（電力への変換なしで）直接駆動できたという。太陽電池や太陽光・太陽熱発電などをはじめとして、バイオ燃料や水分解などで太陽光はエネルギーに変換されている。しかしこれらの技術では、太陽光エネルギーを直接の「仕事」として利用するためには、太陽光を何らかの形でエネルギーに変換する中間段階や物質が必要である。

カリフォルニア大学バークレー校[注3] およびローレンス・バークレー国立研究所[注4] の研究者は、太陽光を「仕事」に変換するための極小デバイスを作成した。太陽光を推進力源とするアイデアは決して新規ではなく、NASA では「ソーラーセイル[注5] 」を適用した衛星の試作を進めている。しかしバークレーの研究者によれば、NASA の方式は「光子（フォトン）の運動量」を推進力に変換しているのに対し、バークレー方式では「光子のエネルギー」を推進力にしているので、そのエネルギーは格段に大きいとしている。

2009 年 3 月 27 日号の米国化学会誌（電子版）[注6] に発表された論文では、液体表面に浮かぶ物体に移動力を与える能力を有するナノ構造物質を作成したとしている。この物質に太陽光を集光すると、太陽光は物質に局所的に吸収され、表面張力に勾配を作りだし、その結果として駆動力を生み出している。うまく制御された直線運動や、回転運動を実現できた。この運動システムは大きさには依存せず、ミリグラムから数十グラムの範囲の物質を遠隔で照射し制御できたという。

[注1] マサチューセッツ工科大学。1861 年に米国マサチューセッツ州ケンブリッジ市に創立された私立大学。

[注2] http://www.technologyreview.com/blog/editors/23281/?nlid=1910。

[注3] カリフォルニア州立大学の本校で、1868 年に同州バークレー市に設立された。

[注4] 米国カリフォルニア州にあるエネルギー省の研究所で、もともとは粒子加速器や放射線科学の研究を進めていた。現在はエネルギー技術、環境・安全、ライフサイエンス、材料科学、生物物理、コンピュータ科学など、幅広い分野をカバーしている。カリフォルニア大学が委託運営している。

[注5] 「太陽帆（タイヨウホ）」と和訳されることもある。薄膜鏡を巨大な帆として、太陽や恒星から発せられる光を反射する（運動量を利用する）ことで宇宙船の推力に変える。

[注6] http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja900130n。

量子ドットが太陽電池の効率を向上

SLAC [注7] とパルス超高速エネルギー科学研究所[注8] の合同チームが、太陽電池の変換効率をこれまでの予想された限界を遥かに超える高さに向上させる方策を発見した。

環境負荷が小さいエネルギー源の開発は、21 世紀の最大の課題であり、太陽光発電はその中でも最も有望な方式である。太陽光発電はエネルギー源が自由に利用でき、太陽電池は発電に際して温室効果ガスを発生せず、さらに世界のどの地域でも発電できるという利点を有している。しかしながら、太陽光発電の効率は未だに低く、その結果、従来方式の発電単価に比べて高いのが現状である。

これを解決する兆しを見出だしたのが、SLAC とパルス超高速エネルギー科学研究所の合同チームの研究成果である[注9] 。「この研究は、太陽光電池の変換効率を向上させる第一歩である。この発見によって、現在市場に出回っている商品と将来製品との間に格段の差があることを示している。」とパルス研究所のケリー・ガフニー博士が語っている。パルス研究所の最近の研究は、太陽光の 1 個の光子が 1 個以上の電子を発生させていることを発見したロス・アラモス国立研究所[注10] の研究結果を再確認しようとしていた。これまでの科学では、1 個の光子は厳密に 1 個の電子を励起させるのが可能であるが、これが太陽電池の理論限界効率であると見なされていた。

双方の研究はいわゆる「量子ドット」と呼ばれる現象を利用している。数十億分の 1cm 程度の物質には数千個の原子しか存在しないが、この大きさになると、物質の性質はバルクの時とはまったく違った振る舞いを見せる。主に半導体において、結晶成長や微細加工によって原子の持つド・ブロイ波長（数 nm～20nm、1nm は 1×10^{-9}m）の粒状の構造を作ると、その領域に閉じ込められた電子の状態密度は離散化される[注11] 。すなわち、特定のエネルギーに状態が集中する。その特異な電気的性質により、単電子トランジスターや量子ドットレーザ、量子コンピュータへの応用が期待されている。

過去 5 年間、ロス・アラモス研究所の発見を、いくつかの研究グループが量子ドットを用いて再現しようと試みていたが、成功しなかった。ケリー・ガフニー博士は「この多重励起現象が本当に起こるのか、ということに関し多くの議論がなされてきた。誰も納得していないが、現実に起こっているのである。」と語っている。ケリー・ガフニー博士は、パルス研究所やスタンフォード大学、ローレンス・バークレー研究所の研究者と共同で、これまでとは若干異なる実験方法を用いて、量子ドットの中では 1 個の光子が 1 個以上の電子を励起することが可能であることを確認しようと試みた。その結果、太陽電池にこれま

[注7] Stanford Linear Accelerator Lab.：スタンフォード直線加速器研究所。米国エネルギー省の管轄する国立研究所の一つで、スタンフォード大学が委託運営している。

[注8] PULSE Institute for Ultrafast Energy Science。http://pulse.slac.stanford.edu/。SLAC と米国エネルギー省が設立した研究所。組織図上では SLAC の一部門として活動している。極超短パルス X 線源（自由電子レーザ）をツールとして用いて、超高速現象を主要な研究テーマとしている。

[注9] http://today.slac.stanford.edu/feature/2009/pulse-quantum-dots.asp

[注10] 第二次大戦中の 1943 年に、ニューメキシコ州ロス・アラモスに設立された研究所で、エネルギー省が管轄し、カリフォルニア大学ほかの連合体が委託運営している。当初はマンハッタン計画の中で核兵器開発を担当したが、現在では生命科学やナノテクノロジー、コンピュータ科学、加速器科学、中性子科学、安全保障技術などを担当する総合研究所である。

[注11] http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8F%E5%AD%90%E3%83%89%E3%83%83%E3%83%88

でのようなバルクの固体物質を用いる代わりに量子ドットを用いれば、これまで考えられていたよりも 3 倍[注12] も効率を向上できることが分かった。バルク物質の場合は、1 個の光子が 1 個の電子を励起するという 1 対 1 の関係は保持するが、それ以外の余分なエネルギーは熱としての放射で失われる。これに対し、量子ドットを用いた場合の比率は、太陽光の色（波長）に依存するが、1 対 1 から 1 対 3 の間の値をとる。
高効率の太陽光発電に関する次の段階は、この効率を実現するための量子ドットを用いた太陽電池の製作である。ケリー・ガフニー博士は、「これはまだ誰もやったことが無い。まだ研究は始まったばかりだ。これは大変困難な科学技術の問題であるが、可能性は十分ある。」と語っている。

投資・企業誘致・ベンチャー

グーグルがナノテク開発ベンチャーへ投資

ラリー・ペイジ氏とセルゲイ・ブリン氏によって、1998 年に米国カリフォルニア州において創業されたグーグルは、現在では知らない者はいないほど有名になったオンライン検索エンジンである。Google は数学用語である Googol（10 の 100 乗）にちなんで名づけられた造語であるという[注13] 。

さて、2009 年 4 月 1 日付けのワシントン・ポスト紙[注14] によれば、そのグーグルがベンチャーキャピタル部門を発足させ、資金を必要とする新技術ベンチャーへ投資することになった。ベンチャーキャピタル部門のビル・マリス氏によれば、初年度（2009 年）は 1 億ドルを用意し、主として若い企業へ投資するという。消費者向けインターネット企業、健康産業、ロボット、ナノテクノロジーのような分野へ投資する予定だとのこと。同じベンチャーキャピタル部門のリッチ・マイナー氏は、グーグルの本来のビジネスへ利益をもたらすような技術開発を支援することも視野に入れている、と語っている。

全米ベンチャーキャピタル協会によれば、米国における産業部門へのベンチャー投資は、最近の四半期では 71％も落ち込んでいる中で、この発表は朗報である。この発表が市場で評価されたのか、株価は数％上昇した（4 月 1 日時点）。

産業界はナノテクに期待する

THE SUN 紙[注15]　によると、カリフォルニア州サンバナディーノ市のナノ・センターが、第 1 回のナノテク会議を開催し、4 月 2 日に閉幕した[注16] 。この会議は、この地域へのハイテク投資という、大きな利益をもたらした。会議初日には、主としてカリフォルニア州内からではあるが、80 名を超える出席者があり、熱心に討議に参加した。

カリフォルニア大学リバーサイド校やサンタ・クララ大学、それに地元企業からの発表

[注12] 原文は“could be as much as one third more efficient than previously thought”とあり、「30％も効率が向上する」とも解釈できる。しかしこの後で「量子ドットの場合は光子による電子励起が 1 対 3 になることもある」という文章が出てくるため、この報告では「3 倍」と解釈した。

[注13] http://ja.wikipedia.org/wiki/Google。

[注14] http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2009/03/31/AR2009033103641.html。

[注15] カリフォルニア州サンバナディーノ市に本拠を置く地方紙。

[注16] http://www.sbsun.com/business/ci_12060359

と議論は、「ナノテクによって生活を変えられる」という印象を参加者に与えた。ナノ・センター主任研究者で、サンバナディーノ地域カレッジ学区の応用技術訓練センター所長であるマニアオル氏は「我々はこの新興の高度成長産業に必要な労働者を訓練し、いつでも提供できるように準備したいと考えている。もし我々が熟練労動力を確保できれば、我々はここにナノテク関連製造企業を誘致できるかもしれない。」と期待を述べている。ナノテク関連研究は世界の研究界に波紋を投じているが、その延長線上には、来る 20 年～30 年にわたって怒涛のような経済効果が期待できる。この会議の講演者で、NASA エイムズ研究センター[注17] の主任研究者メイヤ・メイヤパン博士は「世界のすべての工業国はナノテクが 21 世紀の重要産業であることを理解している。明らかに米国は一歩を踏み出した。しかしながら現時点では競争が激化し、米国が他国よりも進んでいると言うことは困難である。最近、ナノ・センターが労働省から獲得した 2 百万ドルの助成金は、シリコンヴァレーの研究者を吸引する力になるであろう。すべての地域社会はリーダシップの役目を取らなければならないが、サンバナディーノ市は他のコミュニティーに比べて進んでいる。」と語っている。

上記の助成金は 6 種のナノテク訓練コースに分配されるが、そのコースは受講生に製造やエンジニアリング、その他業務における入門レベルの技能者か専門職となるべく準備されたものである。企業はセンターに受講生を送り込み、ナノテク技術の訓練を受けさせることができる。この訓練には受講生一人当たり 4,400 ドルの費用が必要であるが、雇用者が資格を満たしていれば、助成金から支払われることになる。センターでは年間 100 名の訓練をすることになろう。

「もしナノテク産業がホットになるならば、上記のナノ・センター職業訓練コースの卒業生を専門職として雇用する用意がある」、と地元レッドランドの中堅企業の一つである Advatec Pacific Inc.の経営者は語っている。この企業には現在は 70 名の従業員がいるが、主として米国西海岸地域の空軍研究施設に向けて、エンジニアリングや研究開発に従事している。会議の別の講演者で、Advatec Pacific Inc.の副社長兼統括マネージャであるトム・キスター氏は、「ナノテク技術によって軽くて強いものを作ることができ、その結果として宇宙船や航空機の重量を 1 ポンド削減できるならば、それはコストをかけてもお釣りがくる。」と話している。

あとがき

総花的な報告となったが、それだけナノテク関連の情報は氾濫しているというのが現状である。今回の報告では、単に技術開発だけではなく、米国的なベンチャー企業への投資や地場産業育成の話もまとめてみた。少しでも参考になれば幸いである。

なお、全世界のナノテク関連のニュースは　http://www.nanotech-now.com/news.htm に掲載されるので、常時ウォッチしておくと便利である。

[注17] NASA の研究施設（フィールドセンター）の一つ。エイムズ研究センターの研究分野は、航空工学や生物学、宇宙科学、宇宙開発に関連する情報工学、機械工学、人工知能などである。

【ナノテクノロジー特集】 バクテリア・モーター

バクテリア・モーターの可能性（イタリア）

はじめに

生物界には、例えば、筋肉の収縮を引き起こすミオシンや、神経伝達物質の詰まった細胞を神経軸索内で輸送しているキネシンなどのように、化学エネルギーを力学エネルギーに変換する働きを持つタンパク質が少なからず存在している(出典 1)。生物分子モーターと呼ばれるこれらの物質が生み出す運動エネルギーや、あるいはそれらの働きで鞭毛等を動かして動き回る微小なバクテリアの運動を利用して微細なモーターを作成し、体内埋め込み用の微小機械やその他のマイクロデバイス、ナノデバイスの動力源としての応用を図ろうとの試みが近年、ナノバイオテクノロジー領域において行われている。

この種のモーターが実現した際には、そのサイズの小ささに加え、化学エネルギーを力学エネルギーに変換する際の効率が高い点、サルコメア（筋原繊維を構成する収縮単位のこと）の場合やバクテリアおよび真核生物の鞭毛などの場合のように、より大きな構造を自ら形成する可能性がある点など、人工のモーターに見られないユニークな利点が数多く存在するとも想定されている(出典 2)。

先行研究事例

2006 年には、産業技術総合研究所の研究チームが世界に先駆けて、Mycoplasma mobile を用いた微小モーターの開発に成功している。Mycoplasma は宿主の細胞からはなれることなく滑走運動を示すことが知られており、その滑走スピードは、肺炎菌の Mycoplasma pneumoniae で、毎秒 0.4－1 ミクロン、Mycoplasma mobile で毎秒 2－4.5 ミクロンに及ぶとされる。産総研チームは、細胞の表面タンパク質へ化学的にビオチンを付加した Mycoplasma mobile を円形のパターン上に誘導し周回運動させたうえで、ストレプトアビジンというタンパク質で表面を覆った直径 20µm の微小ローターを乗せたところ、ビオチンとストレプトアビジンとの強い親和性により両者が結合し、ローターが約 2 rpm で回転するのを観察したという(出典 1.3)。

2007 年、米ドレクセル大の研究チームは、ありふれたバクテリアである Serratia marcescens を用い、エポキシ製シートを動かす実験を行った。このバクテリアは、非常に速く運動すること、紫外線をあてると運動をやめることが知られている。寒天培地で培養したバクテリアの塊りの表面を、バクテリアの運動を速める働きを示す栄養液（運動バッファー）の薄い層で覆ったうえで、幅 50μm、厚さ 10μm の三角形のエポキシ製シートをこの栄養液中に浸し、寒天培地上を移動するバクテリアの「波」の先端部に留まるようにしたところ、9μm/秒のスピードで、このシートがバクテリアにより輸送されることが確認されたという。紫外線を照射したところ、シートも動きが止まったが、照射を止めると、再びバクテリアもシートも 9μm/秒で移動することが観察された。また、回転する

渦を形成しているバクテリアの塊に、同様にシートを乗せたところ、1 ラジアン/秒で回転するのが観察された。最後にシートを、表面にバクテリアが付着した状態を保ったかたちで寒天培地からはがし、運動バッファーのみを含むトレーに置いたところ、バクテリアの運動によりシートも回転し、紫外線を照射すると回転は止まったが、照射をやめると再び始まったという(出典 4)。

材料物理学研究所ほかによる研究

物理学情報サイト Physicsworld の 2008 年 12 月 18 日付け記事およびイタリア学術研究会議=材料物理学研究所(Istituto Nazinoale Fisica della Materia)の 2 月 2 日付けプレスリリースによると、ルカ・アンジェリーニ氏の率いる同研究所およびローマ・ラ・サピエンツァ大の共同研究チームが、「バクテリア・モーター」に関し、コンピューター・シミュレーションの結果、産総研による研究のようにバクテリアと何らかの部品を固定する必要が必ずしもないとする結果が得られたと発表した(出典 5.6.7)。それによると、バクテリアを含む溶液内へ、しかるべき形態の非対称の歯車を浸けるだけで、自発的に歯車が回りだす可能性があるのだという。

材料物理学研究所は、産総研の研究においては微小な歯車と遺伝子組み換えをおこなったバクテリア(注)を生化学的な「接着剤」とともに用いたためにコストが非常に高くつきながらモーターとしての効率が悪かったのに対し、今回の方法によるとそれらのコストをゼロにできるうえ、効率も大きく向上させることができると指摘。通常の電球 1 個を点灯させるには、バクテリアで一杯の $1m^3$ の溶液が必要との計算結果があることから、これをエネルギー源として用いることがとうてい実現不能な機器もある一方、医用機器、測定機器など多くの機器での利用は十分に想定することが可能であり、将来のマイクロデバイスへのエネルギー供給源としての新たな展望が開けたと紹介している。

今回の研究において同チームは、大腸菌 E coli の集団と鋸状の歯を持つ歯車との間の相互作用についてモデル化を行った。それぞれの大腸菌は長さが 3μm で、本体後部にある鞭毛が一群の回転モーターによって駆動されることにより液体中を移動するが、アンジェリーニ氏らは、大腸菌がひっくり返ることで運動方向が逆転する場合、および隣の大腸菌と直接接触する場合には運動が阻害されるという点を想定に入れつつ、理想化した大腸菌の運動をモデル化した。その際、2 つの因子、すなわち、ブラウン運動、および隣接する大腸菌の引き起こす水流は、重大ではないとして無視した。

つぎに、鋸状の歯を持つ 50μm の歯車へ大腸菌の集団が与える力の正味の方向について検討を行った。これは、それぞれの歯の長い方のエッジ部分に大腸菌集団がぶつかることで与えられる力、すなわち時計回りに歯車を回転させようとする力と、それぞれの歯の短い方のエッジ部にぶつかることで与えられる力、すなわち反時計回りに歯車を回転させようとする力を比較することで得られる。検討の結果、大腸菌の集団が歯車に与える正味の効果は、全体としてみれば 1 分間に反時計回りに歯車を 2 回転させるものであった。また、その際のスピードは歯車の回転に伴い変動することが観察された。

共同研究者のディ・レオナルド氏は、熱平衡状態にある原子あるいは分子のプールへ同

様の非対称な歯車を浸しても、今回のような結果は観察されないはずだとしている。そしてこの違いは、バクテリアの示す自走運動が、単に歯車にぶつかって跳ね返るというよりも、歯車を押し出すように働く点に起因するものと説明している。また、この現象を理解するには、エントロピーも考慮に入れる必要があるという。バクテリアが化学エネルギーを力学エネルギーへ持続的に変換していくと、その系内におけるエントロピーの持続的な上昇が生じるが、このエントロピーの上昇があってこそ、その系が時間反転の対称性を崩すこと、すなわち、反時計回りの回転という特定の方向へ変化を見せることが可能になるのだという。この点に関し,氏は以下のようにコメントしている。「バクテリアの運動は、非可逆的な動的方程式（irreversible dynamic equation）によって支配されており、それゆえにバクテリアは、非対称的な形状を持つ物体を動かすことができる。」

ディ・レオナルド氏は、今回の研究によって、統計力学の基本的な問題に関する議論を活性化し、その範囲を生物に見られる非均衡的な世界にまで広げることができれば好ましいとしつつ、ミクロンレベルでの物質の輸送や推進、機械操作にバクテリアを利用することの可能性を示したことから、この研究成果をさまざまな技術分野へ応用することも考えられるとしている。

共同研究グループは今後、数十ミクロン程度の鋸状の歯を持つ歯車やその他の物体を作製し、コンピュータ上で行ったシミュレーション結果を現実の世界で確認することを計画しているという。これに関し、米ハーバード大の生物物理学者で大腸菌の運動についての研究を行っているハワード・バーグ氏は、今回のシミュレーションが過度に単純化されたものである点を否定しきれないとしつつ、物体表面ではバクテリアが複雑な振る舞いを見せる点、大腸菌は物体の表面と平行になるかたちで螺旋軌道に従って泳ぐ傾向が見られる点を挙げ、次のステップへ実験を進めることが重要とコメントしている。

おわりに

自然が生み出した運動機械としての生物分子モーターや微生物と、人間の手によるナノデバイスを結び付けようとの研究は、まだまだ緒についたばかりとの感が否めない。また、遺伝子組み換えに伴うバイオハザードの問題も当然ながら指摘されている。しかしながら、Physicsworld に紹介されているディ・レオナルド氏の以下のコメントを読むと、このテーマが今後もつであろう広がりの大きさには、瞠目せざるを得ないのも事実である。

「マイクロスケールの世界では、我々は産業革命以前の人類のような状態にいる。すなわち、効率的に稼動する微小なエンジンがないために、動力源を生物に頼らざるを得ない。」

出典：
(1)「バクテリアで駆動する微小モーター」産業技術総合研究所ホームページ資料, 2006.9.11
http://www.aist.go.jp/aist_j/new_research/nr20060911/nr20060911.html
(2)Y.Hiratuska, et al., “A microrotary motor powered by bacteria”, Proceedings of the

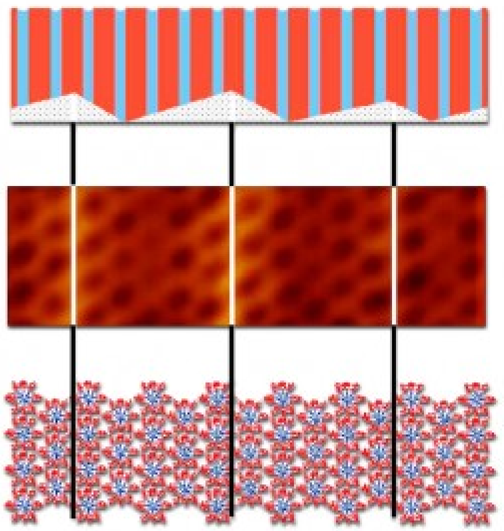
National Academy of Sciences, 2006.9.1
http://www.pnas.org/content/103/37/13618.full#ref-1
(3)「新しいバクテリア細胞運動の装置を発見」科学技術振興機構ホームページ資料, 2008.11.20
http://www.jst.go.jp/pr/announce/20071120-2/index.html
(4)Hamish Johnston, "Tiny organisms move microstructures", Physicsworld 2007.7.10
http://physicsworld.com/cws/article/news/30513
(5)Edwin Cartlidge, "Random motion of bacteria could drive micromotors", Physicsworld 2008.12.18
http://physicsworld.com/cws/article/news/37113
(6)"Arriva il motore a batteri", 材料物理学研究所プレスリリース, 2009.2.2
http://www.infm.it//images/COMUNICATI/2009/CS03_2009.pdf
(7)Luca Angelani, et al., "Self-Starting Micromotors in a Bacterial Bath (abstract)", Physical Review Letters, Vol.102, No.4, 2009.1.30
http://link.aps.org/abstract/PRL/v102/e048104

（注）元論文では"we used a mutant strain of M. mobile that harbors a missense mutation in its gli521 gene"と記述されている。

【ナノテクノロジー特集】ナノメモリーチップ

10 テラビット高密度メモリーのための自己集合化（米国）

2 つの化学的に異なるポリマーの結合によって作られた、自己集合化によるブロック共重合体は、ナノ構造化材料の特性および製造工程を大きく向上させる可能性を持っている。米国立ローレンス・バークレー研究所の研究者たちは、テンプレートとして結晶を使用して、数平方センチメーター以上にまで拡張できるナノ領域のブロック共重合体構造の完全な配列を形成させた（図 1)。



上から見た図(下)は、周辺ポリマー(赤)に結合した中心ポリマー(青)から構成されている円柱状のブロック共重合体構造を示す。
原子間力顕微鏡の画像(中)は、高密度に詰められた円柱を示す。中心が暗く、その下部の底面の高さが変化し、交互に明暗する縞のように見えている。
側面から見た図(上)は、円柱が結晶面の尾根に沿ってどのように自己配列しているかを示している。

(Credit : Lawrence Berkeley National Laboratory)

図 1: ナノ領域のブロック共重合体構造の配列

今日のコンピューター・ハードディスク・ドライブの情報ビットをコード化する磁気ドメインは、最小寸法が直径 20～30 ナノメーターである。各々が直径僅か 3 ナノメーターのビット配列を想像してみよう、それは、1 平方インチあたり 10 テラビット(10TBit)で、高密度に詰めこまれ、完ぺきな状態で整列している配列である。

ローレンス・バークレー米国立研究所材料科学部門(MSD)のティン・スーとマサチューセッツ大学アマースト校のトム・ラッセルが、このような大規模なナノメーター規模の配列を秩序化するという重要な方法を考えついた。ラッセルとスーが考案したこの方法は、ラッセルのグループによってその後実証されており、10 テラビット(10 兆ビット)の共重合体構造は、ほとんど自己集合化で作られている。研究者たちは、この研究について「サイエンス誌」2009 年 2 月 20 日号に発表している[注1]。

[注1] "Macroscopic 10-terabit-per-square-inch arrays from block copolymers with lateral order," by Soojin

「トム・ラッセルの実験室では、20 年間、ポリマー基盤の自己集合化現象を研究してきている。最近の 10 年間は、この分野の大きな問題の 1 つである遠距離秩序の問題に専念している。遠距離秩序は、各々の要素がアドレス可能で 2～3 平方センチメートル以上の範囲をカバー可能なパターン化ナノ要素の超高密度配列が可能となることを意味している」と MSD の所属研究者であり、またカリフォルニア大学バークレー校化学・材料科学工学部のスー助教授は語った。

自己集合化は高度な並列性を持ち、非常に用途が広く、実行が容易であるので、ポリマーの自己集合化は、ナノ構造化材料の特性および製造工程を大きく改善する見込みがある。特に有望なのは、お互いに結合された 2 つの化学的に異なるポリマーによって形成される、ブロック共重合体として知られている新しい化合物である。

案内指示パターン化配列は、電子ビームリソグラフ技術あるいはナノインプリントリソグラフを使用して作られる。しかし、これらの方法は骨の折れる技術で、まだ広い範囲にわたり完全な表面を作ることはできていない。

「トムと私は、これまで試みた多くのことについて議論をしてきた。そして、我々は、光リソグラフを使用してこの小さな形状を作ることは、不可能ではないにしても非常に困難であることを知っていた」とスーは、彼らの議論を思い出して語った。「ある時の議論で、あることが閃いた。結晶は、当然原子的に秩序だっている。そして、大きな単結晶は、シリコンやサファイアを含んで多くの材料が商業的に利用可能である。我々は、これらの単結晶の再配列表面がファセットを作ることを知っていた。言いかえると、それは基礎をなす結晶の長い区間にわたり記録された鋸歯状の立体パターンである」と語った。

原子レベルの単結晶の規則性を数 10 ナノメーター規模のブロック共重合体集合へ転送するために、この現象が使用可能かどうかを、彼らは議論した。

最初の第一歩は簡単であった。ポスドク研究員のスージン・パークによって指導されるラッセル・グループの研究者は、特別な結晶平面で切断されたサファイアの大きな単結晶を選択した。特徴のないカットされたその結晶は、その後、1300℃から 1500℃へと非常に高い温度に加熱され、その後 24 時間アニーリングされた。

加熱とアニーリングの間に、結晶の表面は、米国西部の盆地と山脈の微視的な規模に似た鋸歯状地形の一連の並列な尾根のように、それ自体を再配列するという結果をもたらす。すなわち、クロスカット面の両端の間の露出している原子は、格子中で自己再配置をする。

Park, Dong Hyun Lee, Ji Xu, Bokyung Kim, Sung Woo Hong, Unyong Jeong, Ting Xu, and Thomas P. Russell, appears in the 20 February 2009 issue of Science and is available online to subscribers, http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/323/5917/1030.

この鋸歯状の表面においては、ブロック共重合体薄膜は、サファイアの表面から直立しているナノ規模の円柱に自己集合化することが可能であった。顕微鏡画像では、この円柱は、サファイアの並列の尾根によってまさに指定された配置の6角形に詰めこまれたドットとして現われる。それぞれの円柱配列は、直径僅か3ナノメーターである。しかし、この配列は、事前のリソグラフパターンによる案内指示無しで、数平方センチメートル以上にわたって欠陥なしで拡張できた（**図2**)。

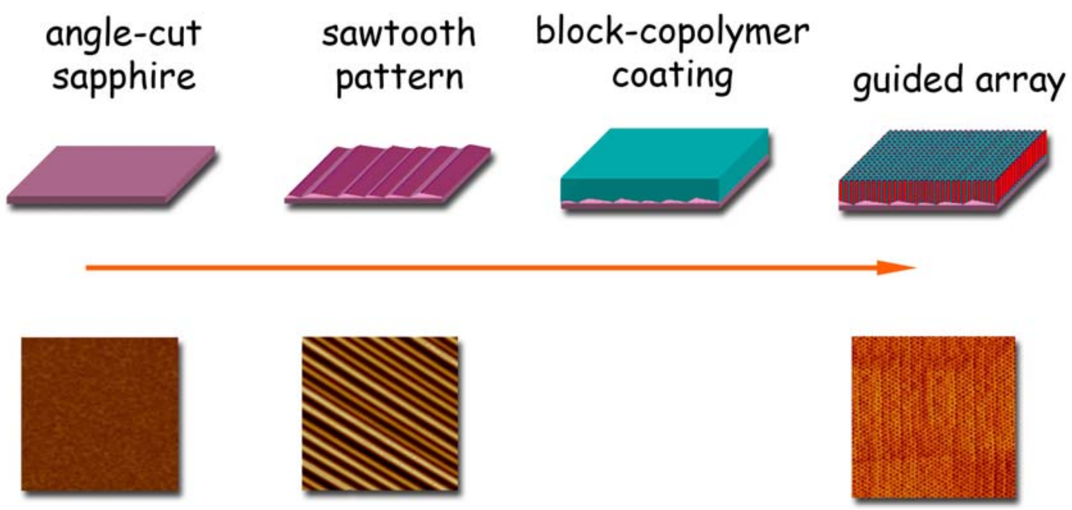


図2:サファイア単結晶のアニーリングによる大規模配列の形成

(Credit : Lawrence Berkeley National Laboratory)

高密度に詰められた円柱ドメインの大規模配列を作成するために、研究者は、結晶面のある角度でカットされたサファイア単結晶から開始した。並列ファセット鋸歯状パターンを形成するために、カットされた結晶は、1300℃以上に加熱され、24時間空気中でアニーリングされる。ブロック共重合体の薄膜が表面に作られ、化学的焼きなましは、結晶の数平方センチメートルにわたって広がる、高い秩序の、高密度に詰められた円柱状のドメイン配列を作る。下図は、表面および共重合体配列の原子間力顕微鏡画像の異なる段階を示している。

この構造は、バークレー研究所の先進光源ビーム・ライン 7.3.3 上で機能している、原子間力顕微鏡と直入射微小角Ｘ線散乱(GISAXS)によって分析された。巨視的な距離以上にわたるナノ寸法規模の秩序を評価するために、GISAXSが計測を提供したという初めての実証である。

「最初は、サファイア基板の欠陥が、配列の規則性を破壊するかもしれないと、我々は懸念していた。我々が見つけたのは、まったくその逆であった。アニーリングされた結晶

の表面には、多くの転位が確かにあったが、共重合体の自己集合化薄膜は、その完全な 6 角形構成を保持して、数平方センチメートルの領域をカバーしていた」とスーは語る。

結晶格子の原子構造から、センチメートル規模の配列におけるナノメーター規模の共重合体構造まで、大きな距離にわたり、最終的に、何桁にもわたる完全性を保持している。

「問題は、多くの寸法規模にわたり、材料と対話することである。理想的なシナリオは、箱の中に必要なすべての特性を持ったナノメーター寸法のレゴの束を投げこみ、かき回すことであろう。そして、あらゆる複雑な化学反応や処理無しで機能ユニットへ分子レゴを自己集合化させることである。バークレー研究所での私のグループの取り組みは、複合システムの階層的自己集合化を理解することであり、そして理想的にはそれを制御することである」とスーは語った。

自然界において、ペプチドとタンパク質は、分子結合によってつなぎ合わされたアミノ酸から自己集合化した複雑な機能ユニットである。自然なモデルからヒントを得て、スーのグループは、斬新な電子特性やフォトニック特性さらに生物学的特性を持つように設計された分子に基づいた新しい機能材料を構築するために、ブロック共重合体やナノ粒子と同様に、合成ペプチドや人工タンパク質も研究している。

その一方で、方向性を持った結晶面の上に、シングル・ステップで形成された、ブロック共重合体の 10 テラビット配列の達成は、すぐに現実となる可能性がある。溶媒でポリマー構造薄膜を処理することによって、各円柱の中心にある芯のポリマーは容易に削除される。出来上がった薄膜は、エレクトロニクスや他の装置で使用するための、データ保存やナノワイヤーあるいは他の秩序だったナノ規模構造用のテンプレートとして使用することが可能な、ある種のナノメーター寸法のふるいとなる。

「すべての部品が、この方法で一体化しそして動作した。この方法は、市場化されるであろう」とスーは語った。

（出典：http://newscenter.lbl.gov/feature-%20stories/2009/02/19/ten-trillion-bits/）

【ナノテクノロジー特集】ナノ半導体

水分解技術を促進するナノ構造半導体（米国）

ボストン・カレッジの研究者たちは、クリーンエネルギー技術に対する重要な電気伝導度の問題を打開したことにより、表面積を拡大して電子輸送で著しく大きな効率を示すチタン・ヘテロナノ構造を開発した。

この電気伝導度の問題は、太陽光を吸収するには十分厚く、一方、最小のエネルギー損失で電子を収集し輸送するには十分に薄い太陽電池を追求する研究者を手こずらせてきた。また、比較的新しい水分解の科学で必要とされるのは、水素を生成するために半導体材料内にエネルギーを取り込み、その後、最終的に水素製造に使用される電荷を効率的に輸送することである。

ボストン・カレッジの化学助教授であるダンベイ・ワンと彼の研究室のメンバーは、2つのチタン基盤半導体をナノスケール構造へ組み入れることで、エネルギー収集作用の効率がおよそ33パーセント向上したことを発見し、米国化学会誌オンライン版で発表した。

紫外線下で16.7パーセントのピーク変換効率を達成したことを、チームは報告している。二酸化チタン(TiO_2)のみで構成された構造は、効率12パーセントであった。可視光に対する変換効率は0.83パーセントが得られている。もし、太陽光の全スペクトルに対して10パーセントの効率が達成されたら、日中8時間として1平方メーターあたり150リットルの水素生産が可能となる。

この斬新な材料による効率向上は、いわゆる水分解に役立つことができ、そこでは半導体触媒が水素ガスと酸素ガスを分離し格納することが示されている、とワンは語る。「水分解の現在の問題は、いかに最適に半導体材料内に光子を捕らえて、水素を生成するために、それらを輸送するかが関係している。実用的な水分解では、酸素と水素を別々に生成することが必要である。このためには電子を酸素生成領域に集め、それらを水素生成容器へ輸送することが必要であるので、よい電気伝導度は特に重要である」とワンは説明する。

エネルギー捕捉と輸送のプロセスに重要な材料である、2つの結晶半導体を使用して、研究者たちは、人間の目にはほとんど見えない人造の構造中に、新しい好結果の輸送メカニズムを発見した、とワンは語った。

二酸化チタンは、その優れた触媒能力のために、初期の水分解研究に重要な役割を果たしてきた。しかしながら、この材料は光の吸収は紫外線だけに限定されており、また比較的電気伝導度の小さい導体である。

ワンと彼の研究者たちは、太陽光を吸収できる半導体で、光子吸収には不可欠な大きな表面積を持った頑丈な構造を提供できる材料である、チタンジシリサイド($TiSi_2$)で作られたナノ構造を成長させることから研究を開始した。その触媒能力がなお必要されたので、その構造を覆うために二酸化チタンが使用された、とワンは語る。

結果として作られた網状のナノ構造は、効率的に電荷を分離し、チタンジシリサイドで電子を収集し、それらを輸送する。また、この構造は、化学反応材料の二酸化チタン領域へ正電荷を移動させている。水分解においては、水素を生成するために、潜在的にこれらの電荷を使用することができるであろう。

米国化学会誌のこの論文は、
"TiO2/TiSi2 Heterostructures for High-Efficiency Photoelectrochemical H2O Splitting",
J. Am. Chem. Soc., 2009, 131 (8), pp 2772-2773 ,
http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja808426h
ワン教授の研究室に関する詳細は：http://www2.bc.edu/~dwang/

(出典：Credit: Boston College,
http://www.bc.edu/bc_org/rvp/pubaf/09/WangNanostructureMar09.pdf　)

【エネルギー】　予算　再生可能エネルギー　省エネルギー

DOE が 2010 会計年度予算 264 億ドルを要求（米国）
－エネルギー効率、再生可能エネルギー向けは 23 億ドル－

バラク・オバマ大統領は 5 月 7 日、2010 会計年度(FY2010)のエネルギー省(Department of Energy: DOE)の予算として 264 億ドル要求したことを明らかにした。これには、同省エネルギー効率および再生可能エネルギー局(Energy Efficiency and Renewable Energy: EERE)向けの 23 億ドルが含まれる。この予算は、再生可能エネルギー源の利用を大幅に拡大する一方で、送電インフラを改善することを目的としている。また、ハイブリッド車やプラグインハイブリッド車、スマートグリッド技術、科学研究・革新に対する大規模な投資を行うとしている。EERE 向けの予算要求は、議会承認された FY 2009 予算に比べ 6.4%の増額になっており、アメリカ再生・再投資法の下で提供される資金とは別のものである。

大統領の予算案は、EERE で実施されている数多くのプログラム用に大幅な増額を求めるもので、その内訳は、太陽エネルギー82.9%増、風力エネルギー36.4%増、自動車技術 22%増、建築技術 69.8%増、連邦エネルギー管理プログラム 46.7%増となっている。また、この予算はプログラムの管理・運営資金をほぼ倍増し、プログラム支援資金を 5 倍以上に増額することを求めている。通常、大統領の予算案提出により議会での予算承認プロセスが始まる。詳細については、DOE のプレスリリース[注1]と、DOE の予算および実績ウェブページ[注2]からアクセスできる DOE の予算ハイライト[注3]の 24~31 ページを参照されたい。

DOE の予算案は、領域横断的な 8 つの「エネルギー革新ハブ」（それぞれのハブが、ある特定のエネルギー関連の課題に重点的に取り組んでいる）への資金 2 億 8,000 万ドルを含んでいる。ハブは、エネルギー科学技術の極めて有望な領域で、研究の初期段階から、商業化できるほどリスクのレベルが低くなるところまで技術を進展させることを目指している。8 つのハブのうち 2 つは EERE の予算で賄われる。一つはスマート材料、設計およびシステムを建物に適用して省エネを促進すること、もう一つは太陽エネルギーを電力に変換するのに必要な新コンセプトや材料を設計、開発することに重点を置いている。別の 2 つのハブには DOE 科学局の予算が充てられる。一つはエネルギー貯蔵の先進的方法を考案すること、もう一つは植物や微生物を使わずに太陽光から直接燃料を生産すること、という問題に取り組む。5 つ目のハブは、電力網が変化する条件に対応できるようにするためのスマート機器を開発することである。残り 3 つのハブは、原子力エネルギー、炭素

[注1] Secretary Chu: President's Energy Budget Creates Jobs, Restores America's Scientific Leadership and Puts Nation on the Path to Energy Independence, 7 May 2009 (http://www.energy.gov/news2009/7387.htm)

[注2] http://www.energy.gov/about/budget.htm

[注3] http://www.cfo.doe.gov/budget/10budget/Content/Highlights/FY2010Highlights.pdf

回収・貯蔵に関連する問題に取り組む。詳細については、DOE の予算ハイライトの 1~2 ページおよび 6~7 ページを参照されたい。

翻訳：吉野　晴美

出典：DOE Requests $2.3 Billion for Efficiency, Renewable Energy in FY 2010
（http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/news_detail.html?news_id=12509）

【環境】　排出量取引

EU ETS 参加企業の温室効果ガス排出量は前年対比 3%減少(EU)

欧州連合(EU)各加盟国のレジストリー注1から提供された情報によれば、EU 排出量取引制度(EU Emissions Trading System: EU ETS)に参加する欧州企業からの温室効果ガスの排出量は、2008 年には前年対比で 3.06%減少した。欧州委員会が第 2 取引期間（2008 年～2012 年）用に確保した排出量アローワンス注2が 6.5%減少したことで、EU ETS は 2008 年に真に変化をもたらし始めたといえる。2008 年は、第 2 取引期間の 1 年目である。

欧州委員会の Stavros Dimas 環境担当委員は次のように述べた。「3%排出量が減少した一因は、景気後退前に高値で推移していた炭素価格への対策として企業が温室効果ガス排出を削減したことで説明できる。これにより、EU にはきちんと機能する排出量取引制度があることが確認された。この制度では、しっかりした上限注3が設けられており、価格形成が透明で、市場が流動的であるため、加盟国が費用効果的に排出量を削減するのに役立つ。EU ETS は、他の国が似たようなキャップ・アンド・トレード方式の国内システムを導入するのを促進する一助になるであろう。我々は、そうしたシステムが EU ETS とリンクして、より強力な国際炭素市場が形成されることを期待している。」

2008 年の排出実績

EU ETS に参加する全ての施設注4から排出された、2008 年の温室効果ガスの確認済み排出量は、二酸化炭素(CO_2)換算で合計 21 億 1, 800 万トンであった。2008 年の排出量は、2007 年対比で 3.06%少なかった（ただし、2007 年のデータが、不完全、あるいは入手できないブルガリア、リヒテンシュタイン、ノルウェーを除く）。EU 27 ヵ国の GDP は、2008 年に前年対比 0.8%成長したにもかかわらず、排出量は減少したのである。

EU ETS の対象となる部門が景気後退の影響を強く受けたことも要因であると考えられるが、その一方で、現在の景気後退前に高止まりしていた炭素価格に対処するため、対象施設が排出削減対策を講じたことも排出量減少の要因であるとみられる。

注1 加盟国政府が設置する電子登記簿のこと。取引を行うすべての企業は、レジストリーに口座を開設しなければならない。これにより、EU ETS による取引が記録される。(出典：社団法人　日本機械工業連合会、EU の環境政策と産業　1. EU の環境政策（4）環境に関わる EU の最新動向（http://www.jmf.or.jp/japanese/world/eu/kankyou/eu2_1_4_1.html）

注2 アローワンスとは対象施設に交付される排出量の枠。ここでは個別施設へのアローワンスを合計した総排出量のこと。

注3 EU ETS は、取引を行う各施設に対して排出量の上限(Cap)を設定していることから、キャップ・アンド・トレード方式と呼ばれる。

注4 EU ETS 指令 2003/87/EC Annex 1 に規定された、特にエネルギー消費量の多いセクター（出力 20 メガワット以上の燃焼施設（火力発電所）、石油精製、コークス炉、鉄鋼生産、セメント・ガラス・石灰・煉瓦・セラミクス生産、パルプ・製紙など）の大型施設。

以前 EU ETS は CO_2 の排出のみを対象としていたが、2008 年からはオランダおよびノルウェーでの硝酸生産時に発生する亜酸化窒素の排出も対象に含まれるようになった。

対象施設は減少、しかし対象範囲は拡大

レジストリーに口座を開設している（EU ETS に参加している）施設数は、2008 年に 11,359 ヵ所で、2007 年より 213 ヵ所減少した。これは、多くの小規模施設をシステムの対象から除外するルールを適用したことが原因である。

他方、対象となる活動の定義の解釈について加盟国間で協調が更に進んだことや、さらに、アイスランド、リヒテンシュタイン、およびノルウェーが 2008 年に EU ETS に参加した（現時点では、アイスランドに対象となる施設は存在しない）ために、EU ETS の対象となる排出量の算定基礎数は、昨年、CO_2 換算で約 5,000 万トン相当分増加した。

高水準のコンプライアンス達成

昨年 EU ETS に参加した全ての施設の内、2009 年 5 月 1 日の期限までに必要なアローワンス返却義務[注5]を果たすことができなかった施設は 0.9%のみであった。これらの施設は、一般的に小規模で、全施設を合わせても EU における全排出アローワンスの 0.5%以下を占めるにすぎない。

2.2%の施設（EU における全排出アローワンスの 0.1%を占める）は、2009 年 5 月 1 日の期限までに、2008 年分の確認済み排出量のデータを提出することができなかった。

クレジットの活用は限定的

昨年から、対象施設は京都議定書のメカニズムを通じて発生した排出クレジットを利用して、自己の排出アローワンスの一部を返却できるようになった[注6]。クリーン開発メカニズム(Clean Development Mechanism: CDM [注7])で発行されるクレジットである CER（Certified Emission Reduction）による返却は全返却分の 3.9%で、その内訳は 41%が中国、31%がインド、15%が韓国、7%がブラジル、残りの 5%はその他 14 ヵ国での CDM 実施によるものである。

[注5] 各暦年終了後、ETS 対象施設はその年の確認済み CO_2 排出量と等量の排出枠を加盟国政府に返却する。この排出枠は消却され再び使用することはできない。排出枠を残した施設はそれを売却するか将来の使用に備えて貯蓄することができる。排出量をカバーするだけの排出枠を返却できない施設は CO_2 排出量の超過トン数に対して、2005 年から 2007 年の間は 1 トン当たり 40 ユーロ、2008 年からは 1 トン当たり 100 ユーロの罰金が課せられている。あるいは市場から排出枠を購入して政府に返却しなければばならない。

[注6] EU-ETS は、対象施設の排出量の目標達成にあたって、一定比率に限定してクレジットの利用を認めている。このうち、CER は 2005 年から、ERU は 2008 年から利用することができる。

[注7] 先進国が資金的技術的支援を行って、途上国で温室効果ガス削減事業または二酸化炭素吸収促進事業を実施した場合、排出削減量の一部をその先進国の排出削減量としてカウントできる制度。

共同実施（Joint Implementation: JI 注8）メカニズムから発生するクレジットである ERU(Emission Reduction Units)の活用は全返却分のほんの 0.002%にすぎなかった。2008 年の CER と ERU を活用した返却を合計しても、2008 年～2012 年の取引期間で活用することが認められた約 14 億クレジットの 6%程度にしかならない（**表 1**）。

返却されたアローワンスの 92%は、施設に対して無償で割り当てられたアローワンスで、残りの 4.1%の返却は、入札で購入したアローワンスか、2009 年分として割り当てられた無償アローワンスであった。

表 1　2008 年の総返却数の内訳

2008 年の総返却数	**2, 075,245,163**	**100.0%**
CER と ERU の合計	81, 717,146	3.9%
2008 年分の無償アローワンス	1,908, 402,867	92.0%
2009 年分のアローワンス、または入札で購入したアローワンス	85,125,150	4.1%

背景

EU ETS の第 2 取引期間は、2008 年 1 月 1 日に始まり、2012 年 12 月 31 日までの 5 年間である。この期間は、先進諸国が京都議定書の排出目標を達成しなければならない期間に一致している。EU ETS は、第 3 取引期間（2013 年 1 月 1 日から 2020 年まで）に向け大幅に修正されると考えられる。2009 年 4 月 23 日に、EU 気候変動およびエネルギーパッケージの一環として、排出量取引指令を修正する法律が採択された注9。

EU ETS の下では、施設は毎年、加盟国のレジストリーに確認済み排出量のデータを提出しなければならない。2008 年のデータに関しては、2009 年 4 月 1 日に、共同体独立取引ログ（Community Independent Transactions Log: CITL）注10のホームページから閲覧可能になった。5 月 15 日からは、CITL は遵守状況に関するデータ、すなわち各施設が前年の確認済み排出量に匹敵するアローワンスを返却する義務を遵守したか否かについての情報を公表する。

注8 JI は、先進国どうしが、温室効果ガス(GHG)削減プロジェクトを共同で実施し、生じた削減分を、投資国が新たに排出枠として獲得できる仕組み。

注9 Commission welcomes adoption of climate and energy package、IP/09/628 (http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/09/628&format=HTML&aged=0&language=EN&guiLanguage=en)

注10 各国のレジストリーは、欧州委員会が管理している CITL と連動しており、全取引を記録している。

別表　各加盟国の 2008 年の実績

国名	2008 年分のアロケーション[1]	確認済み排出量[2]		対象設備数	
		2007 年	2008 年	2007 年[3]	2008 年
オーストリア	30,135,352	31,751,177	32,003,648	210	216
ベルギー	55,183,716	52,795,333	55,463,954	309	302
キプロス[4]	4,815,089	5,396,164	5,604,915	13	13
チェコ共和国	85,517,435	87,834,764	80,075,385	406	401
デンマーク	23,983,428	29,407,370	26,545,260	383	378
エストニア	11,678,257	15,329,934	13,545,577	47	50
フィンランド	36,235,533	42,541,353	36,161,200	607	600
フランス	129,568,044	126,634,815	123,442,083	1094	1016
ドイツ	388,759,381	487,145,916	472,599,758	1915	1668
ギリシャ	63,685,092	72,717,011	69,853,893	153	139
ハンガリー	25,026,920	26,836,758	27,245,046	245	237
アイルランド	19,970,084	21,246,120	20,381,698	113	105
イタリア	211,683,433	226,388,058	220,661,994	1009	1048
ラトビア	2,910,074	2,849,210	2,743,538	93	86
リトアニア	7,509,636	5,998,744	6,103,720	101	111
ルクセンブルク	2,488,229	2,567,231	2,098,895	15	15
マルタ[4]	2,107,837	2,027,364	2,018,585	2	2
オランダ	76,756,732	79,874,659	83,511,680	213	375
ポーランド	200,940,137	209,618,357	204,107,419	869	858
ポルトガル	30,360,675	31,229,226	29,914,270	260	213
ルーマニア	70,652,726	69,616,155	63,556,167	244	252
スロバキア	32,154,494	24,516,834	25,488,101	169	179
スロベニア	8,214,360	9,048,634	8,860,105	98	91
スペイン	154,045,898	186,573,449	163,456,374	1052	1039
スウェーデン	20,774,672	19,040,566	20,007,104	755	770
英国[5]	213,561,991	256,581,340	265,031,078	1057	952
小計	**1,908,719,225**	**2,125,566,542**	**2,060,481,447**	**11,432**	**11,116**
ブルガリア[6]	n.a.	39,181,984	38,300,733	140	128
リヒテンシュタイン	21,102	0	19,883	n.a.	2
ノルウェー	7,529,474	n.a.	19,342,240	n.a.	113
総計	1,916,269,801	2,164,748,526	2,118,144,303	11,572	11,359

[1] 2009 年 5 月 11 日までに、施設に割り当てられた無償アロケーション（新規参加施設を含む)。
[2] CITL に開設または閉鎖された口座を持つ全ての施設に関する確認済み排出量 (新規参加の施設と閉鎖された施設を含む)。CITL は常に情報を受け取ることから（確認済み排出量の修正データ、

新規参加施設や閉鎖施設の情報を含む)、2009 年 4 月 30 日以降の総量は、現行の数字と食い違う可能性がある。
[3] 2008 年 5 月 8 日現在（ただし、推計値のブルガリアを除く）。
[4] 2007 年分の無償アローワンスおよび 2008 年の確認済み排出量のデータは、CITL からではなく、各加盟国に対して聞き取りしたデータである。
[5] CITL で公表されている EU ETS の排出データによれば、英国は 2005 年～2008 年の間におよそ 2,000 万トン増加した。これは、それ以前には EU ETS から免除されていた施設が、システムの対象になったことによる。
[6] ブルガリアの 2007 年の確認済み排出量データはまだ完全なものではない。従って、比較の基礎データとして使用してはならない。

詳細については以下のサイトを参照されたい。

①CITL のホームページ→ http://ec.europa.eu/environment/ets/

②欧州委員会環境総局のレジストリーのホームページ
http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/citl_en.htm

③修正 ETS および QAF（よくある質問）について
http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/ets_post2012_en.htm

翻訳：吉野　晴美

出典：Emissions trading: EU ETS emissions fall 3 % in 2008
(http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/09/794&format=HTML&aged=0&language=EN&guiLanguage=en)

【エネルギー・環境】 温室効果ガス削減 再生可能エネルギー目標

EU が気候変動・エネルギー包括法案を正式採択

2009 年 4 月 23 日、EU（欧州連合）の「気候変動・エネルギー包括法案」が正式に採択された。2008 年 12 月に合意[注1]されたこの政策は、着実に欧州を低炭素経済への道に歩ませるとともに、欧州のエネルギー安全保障を向上させることになるだろう。同法案は法的拘束力がある 2020 年までの目標として、①温室効果ガスを 1990 年比で少なくとも 20%削減すること、②再生可能エネルギーの比率を 20%に増加させることを目指す。同法は、2020 年までにエネルギー効率を 20%向上させる EU 目標の達成にも寄与する。この包括法によって欧州は、法的拘束力がある遠大な気候変動・エネルギー関連目標を、世界で初めて実施することになる。同法は、12 月に開催される国連の気候変動枠組条約締約国会議において、壮大な国際的目標の合意に達する上で、重要な貢献を果たす。

欧州委員会のバローゾ委員長は次のように話す。「本日私達は、欧州委員会の最優先課題の一つについて、合意に達した。この気候変動・エネルギー包括法は、欧州市民の便益に取り組む欧州の能力を測る試金石といえる。昨日の EU 域内のエネルギー市場強化に関する合意と併せて、私達はエネルギー効率の改善とエネルギー安全保障の向上に向けた重要な一歩を踏み出した。今年 12 月に予定されている、気候変動に関する新たな国際的合意に向け、欧州の地位を強められる。」

気候変動・エネルギー包括法は、2020 年までに、①温室効果ガスの排出量を 1990 年比で少なくとも 20%まで削減、②再生可能資源由来のエネルギー消費量の比率の増加、を EU 加盟国に対して義務付けている。さらに同法は、エネルギー効率を 20%向上させる目標にも貢献している。

この包括法は、EU 以外の先進国および発展途上国が、世界の排出量制限のために相応の貢献をするという気候変動に関する十分な国際的合意がなされる場合には、EU の排出量の削減比率を 20%から 30%に増加させることをベースとしている。国際的な合意については、12 月にコペンハーゲンで開催される国連の気候変動会議で結論が出される。

気候変動・エネルギー包括法は以下の 4 つの法令で構成されている。

・EU の排出量取引制度(EU ETS: EU Emissions Trading System)の改訂に関する指令。（EU の温室効果ガス排出量の約 40%が対象となる。）

・EU ETS の非対象部門からの排出量について、法的拘束力のある国別目標の設定を行う、共同分担(Effort sharing)の決定(Decision)。（附則参照）

[注1]（参照）NEDO 海外レポート 1037 号「欧州委員会は気候変動・エネルギーパッケージの採択を歓迎」
http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/report/1037/1037-11.pdf

・欧州のエネルギー構成における再生可能エネルギー源の比率を増加させるために、法的拘束力のある国別目標を設定した指令(Directive)。（附則参照）

・安全で環境に優しい CO_2 回収・貯留(CCS)技術利用のための、法的枠組みの策定に関する指令。

この包括法は、同時に承認された以下の二つの法令により補完されている。
・新車から排出される CO_2 量の削減を定めた規則(Regulation)：2012 年～2015 年に CO_2 の排出を平均 120g／km にまで段階的に削減し、2020 年までに 95g／km とする。（この施策だけで、ETS の非対象部門で求められている CO_2 排出削減量のうち、3 分の 1 以上を達成できる見込み。）

・燃料品質指令(Fuel Quality Directive)の改正：燃料供給者に対して、燃料生産チェーン[注2]における温室効果ガス排出量を 2020 年までに 6%削減することが求められている。

<u>今後の予定</u>

これら 6 件の法令は 2009 年 5 月の官報掲載から 20 日後に発効する。

＜参照文献＞

包括法案と補完する法令の詳細は、IP/08/1998[注3]、および以下を参照されたい。
・EU ETS について：MEMO/08/796[注4]
・共同分担について：MEMO/08/797[注5]
・再生可能エネルギー・気候変動包括法案について：MEMO/08/33[注6]
・CCS 技術について：MEMO/08/798[注7]
・乗用車からの CO_2 について：MEMO/08/799[注8]
・燃料品質指令について：MEMO/08/800[注9]
・欧州委員会の気候変動に関する取組みについてのウェブサイト：http://ec.europa.eu/climateaction

---

[注2] サプライチェーンとも言う。原料・資材調達、生産、物流、販売など供給の連鎖構造のこと。ガソリン、軽油などの化石燃料の生産段階での省エネルギーだけで達成することは極めて困難であり、事実上、一定比率以上のバイオ燃料の混合を促進するもの。

[注3] http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/08/1998&format=HTML&aged=0&language=EN&guiLanguage=en

[注4] http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=MEMO/08/796&format=HTML&aged=0&language=EN&guiLanguage=en

[注5] http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=MEMO/08/796&format=HTML&aged=0&language=EN&guiLanguage=en

[注6] http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=MEMO/08/33&format=HTML&aged=1&language=EN&guiLanguage=en

[注7] http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=MEMO/08/798&format=HTML&aged=0&language=EN&guiLanguage=en

[注8] http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=MEMO/08/799&format=HTML&aged=0&language=EN&guiLanguage=en

[注9] http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=MEMO/08/800&format=HTML&aged=0&language=EN&guiLanguage=en

＜附則＞

法的拘束力がある 2020 年までの国別目標		
	EU ETS 制度の非対象部門における CO_2 排出量の変化（2005 年比）	最終エネルギーの需要における再生可能エネルギー源の比率目標(2020 年)
オーストリア	-16.0%	34%
ベルギー	-15.0%	13%
ブルガリア	20.0%	16%
キプロス	-5.0%	13%
チェコ	9.0%	13%
デンマーク	-20.0%	30%
エストニア	11.0%	25%
フィンランド	-16.0%	38%
フランス	-14.0%	23%
ドイツ	-14.0%	18%
ギリシャ	-4.0%	18%
ハンガリー	10.0%	13%
アイルランド	-20.0%	16%
イタリア	-13.0%	17%
ラトビア	17.0%	40%
リトアニア	15.0%	23%
ルクセンブルグ	-20.0%	11%
マルタ	5.0%	10%
オランダ	-16.0%	14%
ポーランド	14.0%	15%
ポルトガル	1.0%	31%
ルーマニア	19.0%	24%
スロバキア	13.0%	14%
スロベニア	4.0%	25%
スペイン	-10.0%	20%
スウェーデン	-17.0%	49%
英国	-16.0%	15%

翻訳：NEDO 研究評価広報部

出典：http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/09/628&format=HTML&aged=0&language=EN&guiLanguage=en