



技術戦略研究センターレポート

# TSC Foresight

Vol. **1**

## ナノカーボン材料分野の 技術戦略策定に向けて

2015年10月

<b>1</b> 章	ナノカーボン材料技術の概要	2
1-1	ナノカーボン全般の概要	2
1-2	ナノカーボン種類ごとの概要	2
<b>2</b> 章	ナノカーボン材料技術の置かれた状況	3
2-1	技術開発の動向(国内、海外)	3
2-2	我が国のナノカーボン研究の置かれた状況	9
2-3	ナノカーボンの産業競争力(諸外国との比較)	21
2-4	CNT/グラフェン用途先の世界市場予測	27
2-5	ナノカーボンの実用化の促進	27
2-6	ナノカーボンの安全性評価手法の開発	27
<b>3</b> 章	ナノカーボン材料分野の技術課題	28
3-1	単層CNT	28
3-2	グラフェン	29
<b>4</b> 章	おわりに	31

TSCとはTechnology Strategy Center(技術戦略研究センター)の略称です。

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## 1 章 ナノカーボン材料技術の概要

### 1 -1 ナノカーボン全般の概要

CNT（カーボンナノチューブ）、グラフェン、フラーレン等のナノカーボン材料は、その発見、又は、その後の研究の進展に日本の研究者が大きく貢献し、日本が世界トップレベルにある材料である。これらナノカーボン材料は、非常に軽量であることから構造部材への応用、電気や熱の伝導率が高いことから導電材料や放熱部材への応用、電子的特性が高いことから高速トランジスタへの応用などに期待されており、市場への波及効果が大きい。また、我が国では確保が難しい金属資源を代替でき、無尽蔵である炭素を利用して、材料産業を活性化することが国益に大きく貢献すると考えられる。以上のことから、ナノカーボン材料技術分野は、最も重要な研究開発分野の一つである。特に、単層CNTにおいては、国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下、産総研）等における先駆的な研究により、日本が世界でもトップクラスの技術を有している。

特許分析によると、2000～2012年の特許出願総数では日本のシェアは25%とトップであるが、出願件数の推移を見ると年々減少しており、代わって中国、韓国の躍進が顕著になっている。応用分野は、特に電気・電子分野やエネルギー分野が中心である。また、これらの分野の中でも、注目される機器や部材は年々変化しており、近年は太陽電池、半導体・メモリやトランジスタ等に注目が集まっている状況にある。

ナノカーボン材料の産業化を阻害する要因に生産コストの課題がある。ナノカーボン材料の現在の価格は単層CNTで1,000万円/kg程度、比較的合成が容易な多層CNTでも2～3万円/kgのオーダーであり、既存のカーボン製品（3,000円/kg程度）との価格差、コスト/性能比（C/P比）の開きが大きい。実用化のためには、競合品と代替可能なレベルまで価格を下げ得る生産技術の革新が必要である。

ナノカーボン材料の用途開発研究への意欲は世界中で依然として旺盛である。ナノカーボン材料の優れた特徴（例えば、単層CNTでは比重はアルミニウムの約半分、機械強度は鉄鋼の約20倍、電子移動度はシリコンの約10倍、電流密度耐性は銅の1,000倍以上、熱伝導性は銅の5倍以上）をいかした用途は、構造材料、放熱材料、

高電流密度電線材料、透明導電膜、高性能トランジスタ等の多方面にわたり、それらの市場は今後も拡大していくと予想される。このため、ナノカーボン材料の実用化を加速することで、我が国の川上・川下産業の活性化が期待できる。

### 1 -2 ナノカーボン種類ごとの概要

ナノカーボンの種類ごとの材料市場の予測を表1に示す。ナノカーボン材料自体の市場規模は、全ての種類を合わせても2030年で2千億円程度（予測）に過ぎず、決して大きなものではないが、これらの材料の用途は多岐にわたるため、応用製品の市場規模全体は、その数十倍になるものと考えられる。

表1 ナノカーボン材料の市場予測

ナノカーボン種類	2013年市場規模	2030年市場予測
CNT	32億円	660億円*
グラフェン	13億円	1,000億円
フラーレン	29億円	70億円

出所:平成26年度 日本企業の国際競争ポジションに関する情報収集 (NEDO,2014)。ただし、※は平成23年度 特許出願動向調査報告書 (特許庁) よりNEDO 技術戦略研究センター算出。

#### ①多層CNT

多層CNTは、比較的生産が容易であることから、国内においても年数百tレベルで生産されており、リチウムイオン電池電極の導電補助材等への実用化が推進されているが、用途が期待されたほど広がらず、また他国の追い上げが激しく、すでに低価格競争の領域に入っている。課題としては、CNTの優れた性能を生かせる新しい用途の開拓や低コスト化製造技術などが挙げられる。

#### ②単層CNT

単層CNTは、多層CNTに比べて電気伝導性や熱伝導性に優れている。我が国はスーパーグロース法（SG法）や流動気相成長法（eDIPS法）など世界に誇れる製造技術を保有しており、eDIPS法は名城ナノカーボンにて、スーパーグロース法は日本ゼオンにて量産開始が間近となりつつある。これらの技術を更に発展させつつ、材料の用途先の実用化を進めることができれば、我が国の優位性を発揮することが可能である。課題としては、より低コストでの製造技術のみならず、チューブ結合状態の違いから発現する半導体性/金属性を

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

より高純度に分離する技術、性能向上及び用途拡大のための長尺化製造技術を確立することなどが挙げられる。

### ③ グラフェン

グラフェンは数年前から世界中で研究が活性化しており、CNTと同様の分野で実用化を目指している。諸外国においては、国家レベルでの研究開発投資が急激に拡大している。最も注目されている特徴としては、電子移動度の速さ(理論上はシリコンの約100倍)であり、高速トランジスタへの応用を念頭に置いた研究が盛んである。また、原子層厚の透明性を生かした透明導電膜への応用研究も活発化しており、世界規模でグラフェンの大型化・大量生産への開発競争も繰り広げられている。

単結晶グラフェンを成膜する技術の成果は多く発表されているが、本来得られるべき特性は十分に得られていない。課題としては、低欠陥成膜技術、界面制御技術、大面積でありながら本来の特性を発揮できる膜の作製技術などが挙げられる。

グラフェンの製造方法については、上述の薄膜を合成する方法の他に、黒鉛などのグラファイト状態の塊を剥離分散させて作成する方法なども開発されている。この方法によって得られる薄膜は、(数層～数十層の)厳密には原子層ではない場合が多いが、グラフェンに近い

諸物性を得ることができ、更に、分散液による塗膜化、樹脂と複合化して使用できる等の特徴がある。

### ④ フラーレン

フラーレンに関しては、現在実用化されている用途としては化粧品や潤滑油の添加剤などであり、電子的な特性利用の面では有機薄膜太陽電池材料や蓄電材料等としての応用が有望視されている。

## 2章 ナノカーボン材料技術の置かれた状況

### 2-1 技術開発の動向(国内、海外)

#### (1) 特許・論文分析

##### ① 出願人国籍別の特許出願件数推移・比率

日本の出願件数は2004年をピークに徐々に減少している。2008年以降は中国と韓国の出願数が顕著に増加し、日本を上回る状況である。このため、2000～2012年の総出願件数において日本の特許出願

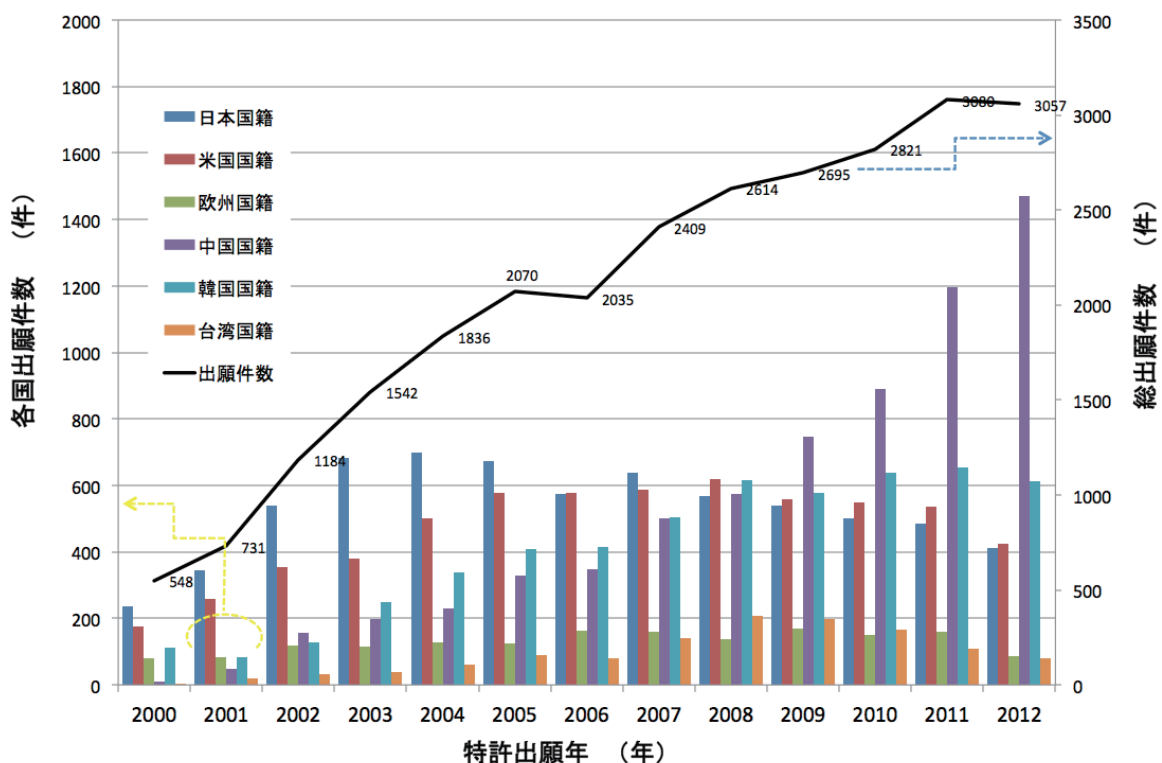


図1 ナノカーボンに関する出願人国籍別の特許出願件数推移

出所: ナノカーボンに関する出願状況調査 (NEDO, 2014)

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

件数の割合は25%となっており、2000～2009年の29%から低下した。  
(図1、図2)

国別の上位出願人を示した表2を見ると、欧州のST Microelectronicsの出願件数が飛び抜けて多いことがわかる。台湾では鴻海精密工

業、韓国ではサムスングループからの出願が多い。日本及び米国においては、各出願人の出願件数は多くはなく、上位出願人間の出願件数の差は小さい。また、中国は、精華大学、鴻富錦精密工業、鴻海精密工業(台湾資本)が多くの特許を出願している。

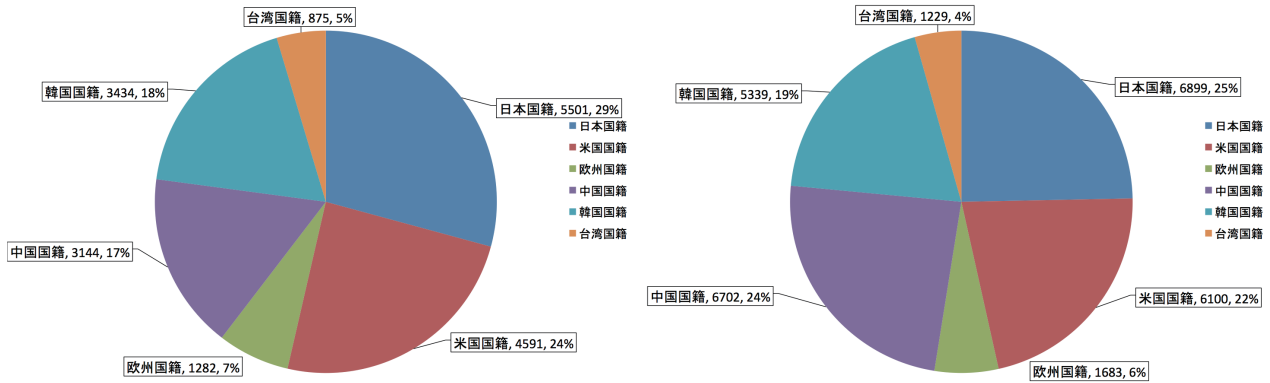


図2 ナノカーボンに関する出願人国籍別の特許出願件数・比率 (左図:2000～2009年、右図:2000～2012年)  
出所:ナノカーボンに関する出願状況調査 (NEDO, 2014)

表2 ナノカーボンに関する出願人国籍別及び出願人別の特許出願件数ランキング (2000～2012年)

国	順位	上位出願人	件数
日本	1	パナソニック	298
	2	産業技術総合研究所	283
	3	東レ	236
米国	1	IBM	177
	2	DU PONT	101
	3	XEROX CORP	123
中国	1	UNIV TSINGHUA	787
	2	HONGFUJIN PRECISION IND SHENZHEN CO LTD	749
	3	HON HAI PREC IND CO LTD	694
韓国	1	SAMSUNG ELECTRONICS CO LTD	586
	2	SAMSUNG SDI CO	502
	3	KOREA ADVANCED INST SCI AND TECH	298
台湾	1	HON HAI PREC IND CO LTD	502
	2	IND TECH RES INST	158
	3	NAT UNIV TSINGHUA	45
欧州	1	ST MICROELECTRONICS	1580
	2	COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE	69
	3	SIEMENS AG	68

出所:ナノカーボンに関する出願状況調査 (NEDO, 2014)



# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## ②技術区分別の特許出願動向

技術区分別の出願傾向は各国とも同様であり、ナノ炭素材料自体

の特許出願をはじめ、製法や特性の向上、加工・改質方法、材料の成形・接合などの出願件数が多い。(図3)

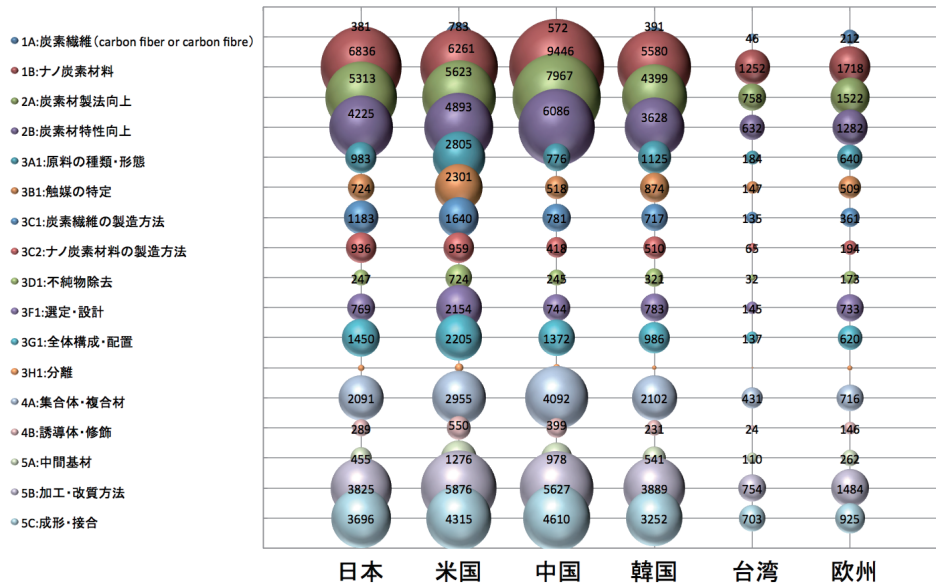


図3 ナノカーボンに関する特許出願における出願人国籍別及び技術区分別の出願件数 (2000～2012年)

出所: ナノカーボンに関する出願状況調査 (NEDO, 2014)

## ③製造方法別の特許出願動向

製造方法別の出願数を見ると、日本はアーク放電法、プラズマ法 (プラズマCVDを含む)、燃焼法、気相 (CVD):接触分解法、水添加CVD法の出願割合が高く、他国に比べるとアルコールCVD法

の出願が少ないことがわかる。米国はプラズマ法の出願が最も多く、他の主要な製造方法に関する出願はほぼ均等である。一方、中国はアーク放電法と水添加CVD法に関する出願割合が高い傾向にある。(図4)

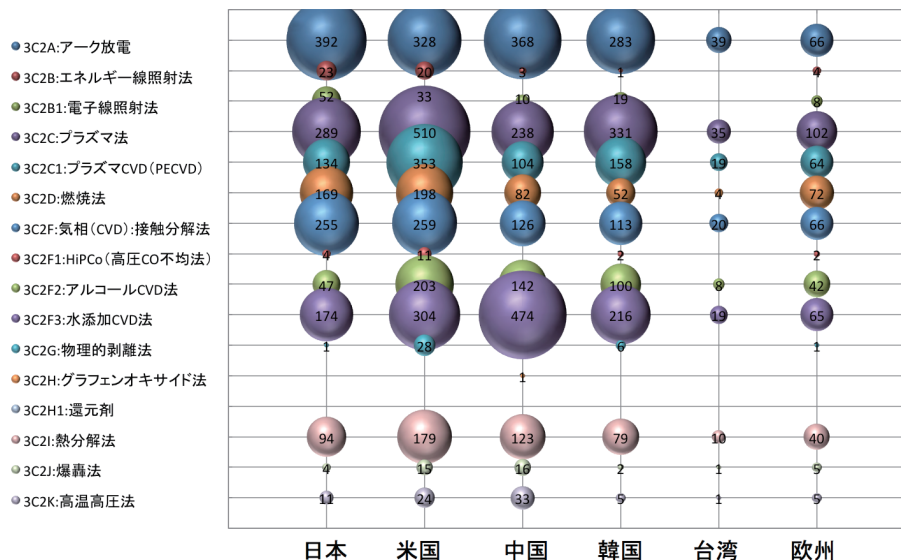


図4 ナノカーボンに関する特許出願における出願人国籍別及び製造方法別の出願件数 (2000～2012年)

出所: ナノカーボンに関する出願状況調査 (NEDO, 2014)

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## ④ 応用分野別の特許出願動向

応用分野別の出願動向（図5上図：中分類）からは、各国とも電気・電子分野への応用に関する出願件数が特に多く、次いでエネルギー分野が続くことがわかる。また、これらの内訳（図5下図：小分類）を見ると、電気・電子分野では電子放出素子、センサ、半導体製造装置

部材の比率が高く、エネルギー分野では二次電池、燃料電池、太陽電池など電池材料用途が主であることがわかる。また、米国及び中国では医薬・医療・バイオ分野への応用に関する出願件数が日本よりも多く、エネルギー分野と同程度の件数となっている。（図5）

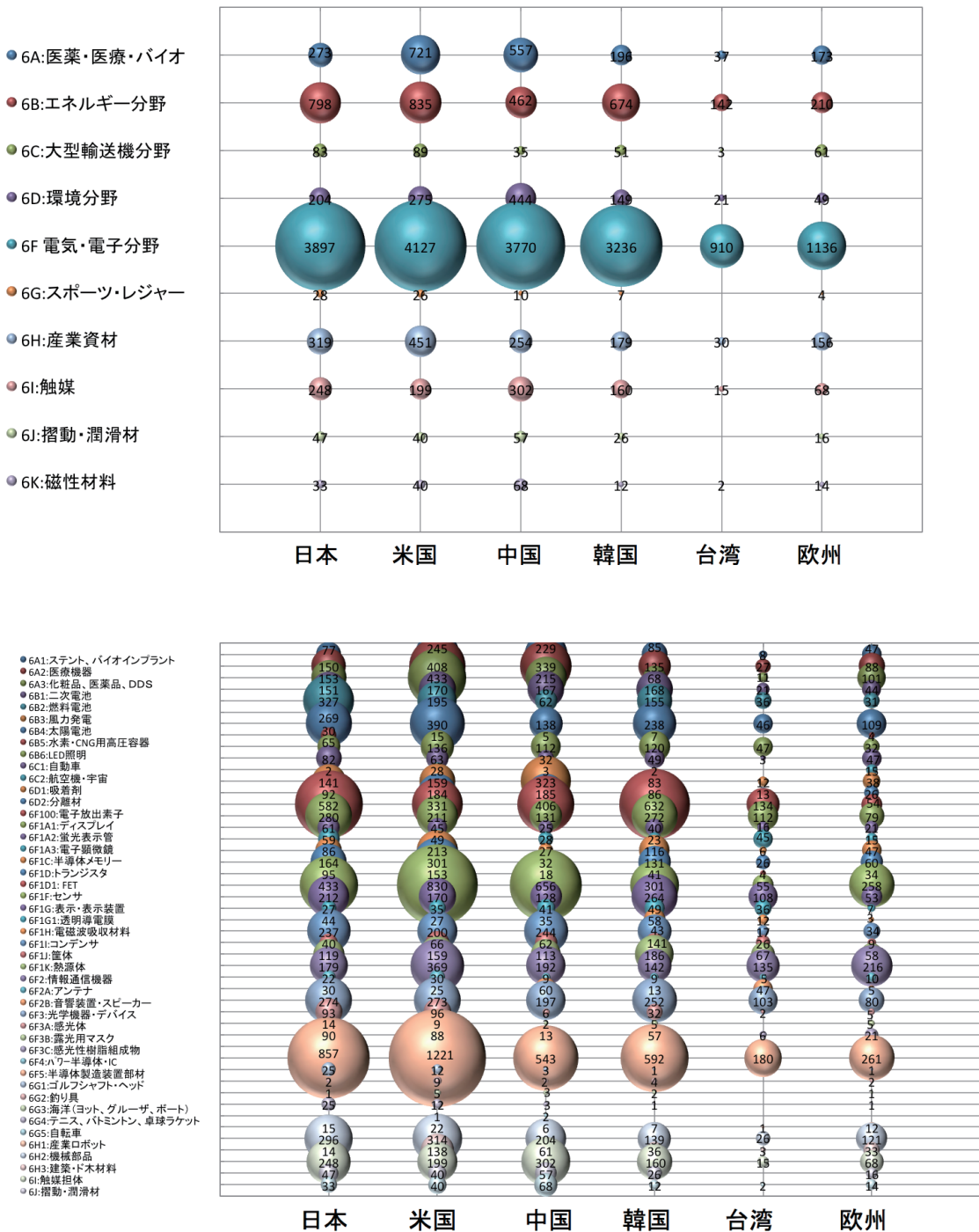


図5 ナノカーボンに関する特許出願における出願人国籍別及び応用分野別の出願件数（上図：中分類、下図：小分類）（2000～2012年）  
 出所：ナノカーボンに関する出願状況調査（NEDO, 2014）

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## ⑤発表者国籍別の論文発表件数比率・推移

日本からの論文発表件数は2004年からの伸びが鈍い一方、欧州、米国、中国の伸びが大きく、相対的に日本の論文件数比率が低下し

ている傾向にある。ただし、2000～2014年の総発表件数の比率は依然日本が1位である。(図6、図7)

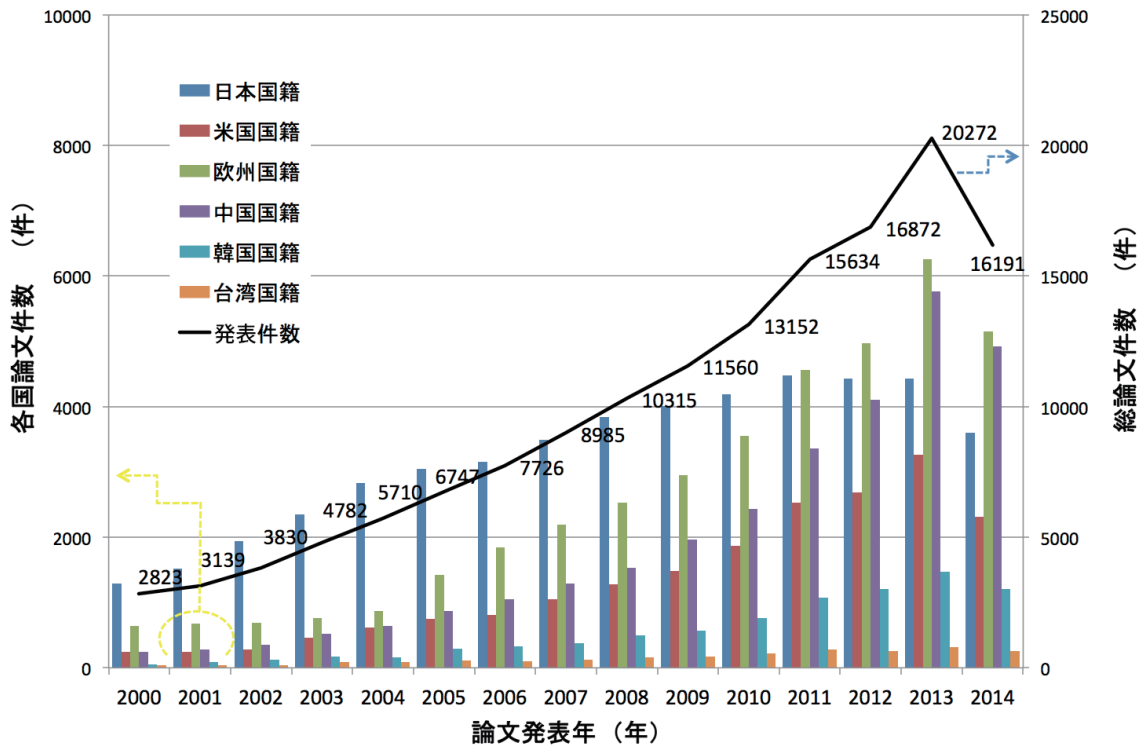


図6 ナノカーボンに関する発表者国籍別の論文発表件数推移 出所: ナノカーボンに関する出願状況調査 (NEDO, 2014)

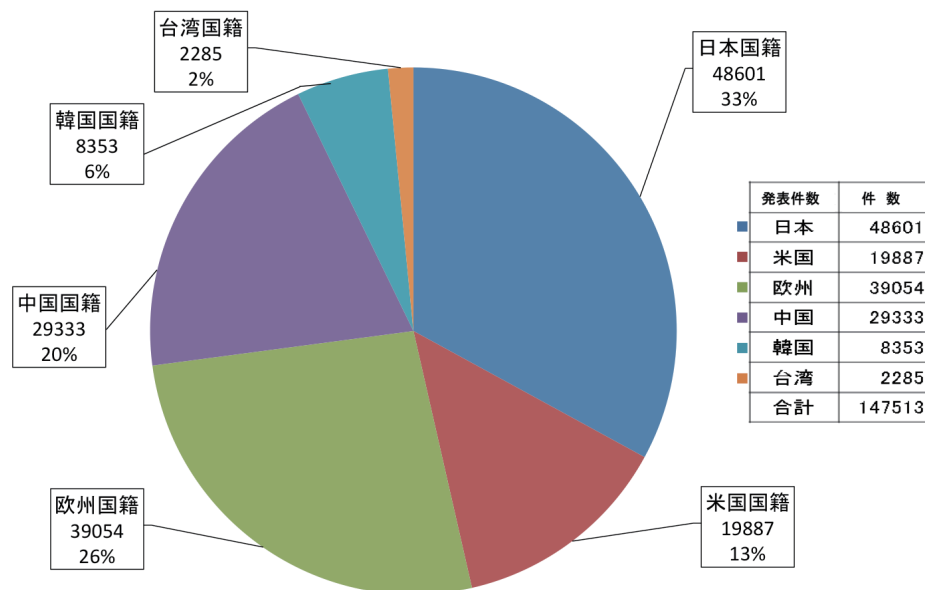


図7 ナノカーボンに関する発表者国籍別の論文発表件数・比率 (2000～2014年)

出所: ナノカーボンに関する出願状況調査 (NEDO, 2014)

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

また、研究機関ごとの論文発表件数を見ると、発表件数の多い研究機関の上位を日本が占めており、日本の基礎研究力が非常に強いことがわかる。(表3)

表3 ナノカーボンに関する機関別論文発表件数ランキング (2000～2014年)

順位	国	研究機関	発表件数
1	日本	科学技術振興機構	4,859
2	日本	東京大学	4,260
3	日本	東北大学	4,075
4	日本	大阪大学	3,526
5	日本	産業技術総合研究所	3,142
6	日本	名古屋大学	2,759
7	日本	京都大学	2,581
8	日本	九州大学	2,196
9	中国	Tsinghua Univ	1,482
10	米国	Univ California	1,386
11	中国	Peking Univ	1,203
12	日本	東京理科大学	1,069
13	日本	物質・材料研究機構	1,065
14	韓国	Seoul National Univ	910
15	中国	Zhejiang Univ	907
16	韓国	Sungkyunkwan Univ	904
17	米国	Massachusetts Inst. Technol	711
18	中国	Fudan Univ	707
19	韓国	Korea Univ	688
20	米国	Univ Texas	655

出所:ナノカーボンに関する出願状況調査 (NEDO, 2014)

## (2) 諸外国の技術開発動向

米国や欧州ではCNTやグラフェンなどの各材料に特化した研究拠点が形成されており、基礎研究を牽引している。(表4)

表4 諸外国の技術開発動向の特徴

米国	CNT研究で実績を挙げている大学(ライス大学、MIT など)が牽引。IBMはCNT製トランジスタを使い、世界で初めて基本的な動作を可能に。CNTの純度を99.99%に高める技術も開発済みで、10nmまで微細化できることを実証済。基礎研究とアプリケーションを睨んだ開発が同時に進行。
欧州	グラフェン研究のフロンティアとして基礎研究に強み。各国の拠点的研究機関と連携し(ドイツ:マックスプランク研究所、オランダ:デルフト工科大学など)、活発な研究が展開されている。
韓国	研究拠点(KAIST、POSTEC、成均館大)が官・学に形成され、産業界とも連携して研究が急速に進展。電子デバイス応用に向けた材料研究も盛ん。CVD法により大面積のグラフェンを作製し透明導電膜を目標に見据えたグラフェン応用研究が盛ん(サムスン)。
中国	研究者数、論文数は飛躍的に増加。量的観点から見れば世界的な一極を占めている。中国科学アカデミー(CAS)、精華大学などが拠点となり、裾野も広がっている。

出所:CRDS「ナノテクノロジー・材料分野 科学技術・研究開発の国際比較2011年版」を基にNEDO 技術戦略研究センター作成 (2014)

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## (3) 諸外国の公的支援

諸外国及び日本のナノカーボン研究への公的支援の状況を表5に示す。欧州、韓国、英国及びシンガポールではグラフェンのみへの研究開発支援が行われている。我が国の支援額は必ずしも多くはないが、支援対象となる研究テーマはグラフェンよりもCNTに関する内容が多い傾向にある。

表5 諸外国の公的支援

国・地域	プロジェクト名、又は団体名	研究開発費	ナノカーボン種類
欧州	Graphene Flagship	約1400億円	グラフェン
米国	ナノテク国家戦略に基づいて、DOD/DOE等が各種研究開発を実施	詳細不明	CNTとグラフェンを含むナノ材料
韓国	Graphene Mat. And Comp. Commercialization Projectなど	約510億円以上	グラフェン
日本	低炭素社会を実現する革新的CNT複合材料開発Project/ナノ炭素材料実用化Project	約120億円	CNTとグラフェン
	新学術領域研究/原子層科学	約10億円	グラフェン
	CREST/次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する革新材料・プロセス研究	1課題あたり0.3～1億円	CNTとグラフェンを含むナノ材料
英国	Graphene Hubなど	約103億円	グラフェン
シンガポール	特別な名称は無し	約80億円	グラフェン
ドイツ	The Innovation Alliance Carbon Nanotubes	約70億円	CNT
中国	国家重点基礎研究発展計画(973計画)	非公開	グラフェンとCNT

出所：各所公表資料を基に、NEDO技術戦略研究センター作成（2014）

## 2 -2 我が国のナノカーボン研究の置かれた状況

### (1) ナノカーボン研究の状況

我が国は、ナノカーボン研究のうち、eDIPs法やSG法などの合成技術をはじめとする単層CNTの製造技術力が高く、また国内メーカーによる量産化の準備が進んでいる。しかし、近年は諸外国も研究開発を活性化しており、今後の競争はますます激化していく状況にあるため、我が国の製造技術力を引き続き保つことが必要である。

諸外国では、特にグラフェンに対する公的資金の投入が大きく（欧州のGraphene Flagshipなど）、大きな成果が報告されている。現状のままでは我が国は海外勢に対して遅れをとる可能性があり、将来、産業化が進展した場合、特に、大きな市場である透明電極やエレクトロニクス関連等のマーケットを失うことが懸念される。

ここではナノカーボン材料のうち、単層CNTとグラフェンについて、更に詳細な調査を行った結果を示す。



# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## (2) 単層CNT

### ①単層CNTに関する出願人国籍別の特許出願動向

世界全体での出願件数は2006年をピークに減少している。一方で、韓国及び中国は出願件数が増加傾向にある。国籍別出願比率

では、米国の出願が圧倒的に多い。我が国は出願件数では米国に及ばないものの、産総研によるeDIPS法やSG法などの製造方法に関する強力な特許を有していることが強みである。(図8、図9)

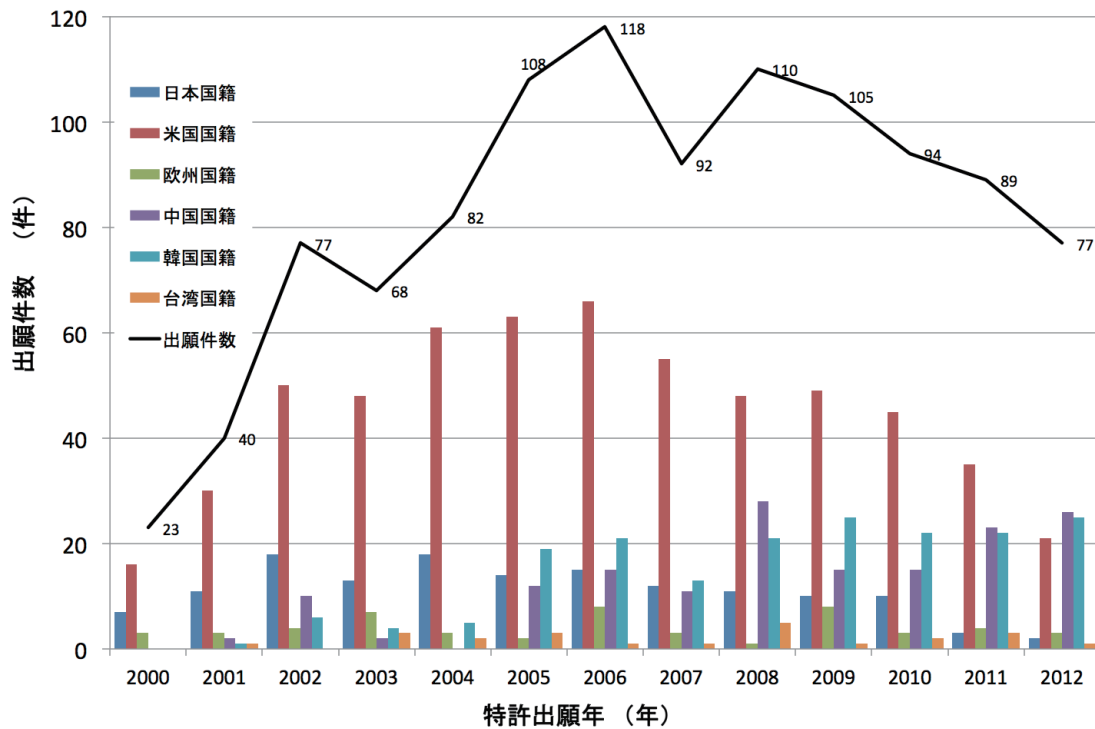


図8 単層CNTに関する出願人国籍別の特許出願件数推移

出所: 単層CNTに関する出願状況調査 (NEDO, 2014)

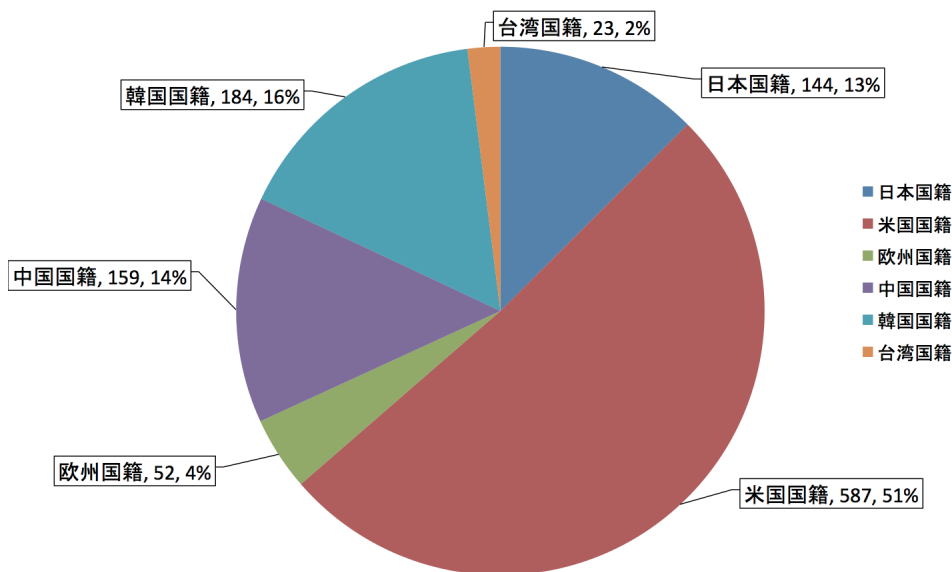


図9 単層CNTに関する出願人国籍別の出願件数・比率 (2000～2012年)

出所: 単層CNTに関する出願状況調査 (NEDO, 2014)

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

我が国における単層CNTの出願人別特許出願件数は産総研が突出している。これは前述のように同所がSG法やeDIPS法などの製造方法に関する特許を有することによるものと考えられる。科学技術振興機構の出願件数がこれに続いており、表5と合すると我が国の公的支援による研究開発の知財化が有効に機能していることが推測される。米国ではライス大学が突出しており、同国における単層CNTの中心的な研究機関であることがうかがえる。(図10)

単層CNTに関する技術区分別の出願数を見ると、米国は出願分

野が幅広く、件数も多い。また各国とも、ナノカーボン全体の出願傾向と同様に、ナノ炭素材料、製法や特性の向上、加工・改質方法及び成形・接合の出願割合が高い傾向にある。(図11)

製造方法別の出願数については、米国はアーク放電法とプラズマ法を中心に多岐に渡る製造技術に多くの出願がある一方で、日本はプラズマ法、接触分解法に比較的強みがある。中国はアーク放電法以外の出願は極めて少ない。欧州は、製造方法の出願が全体的に少ない。(図12)

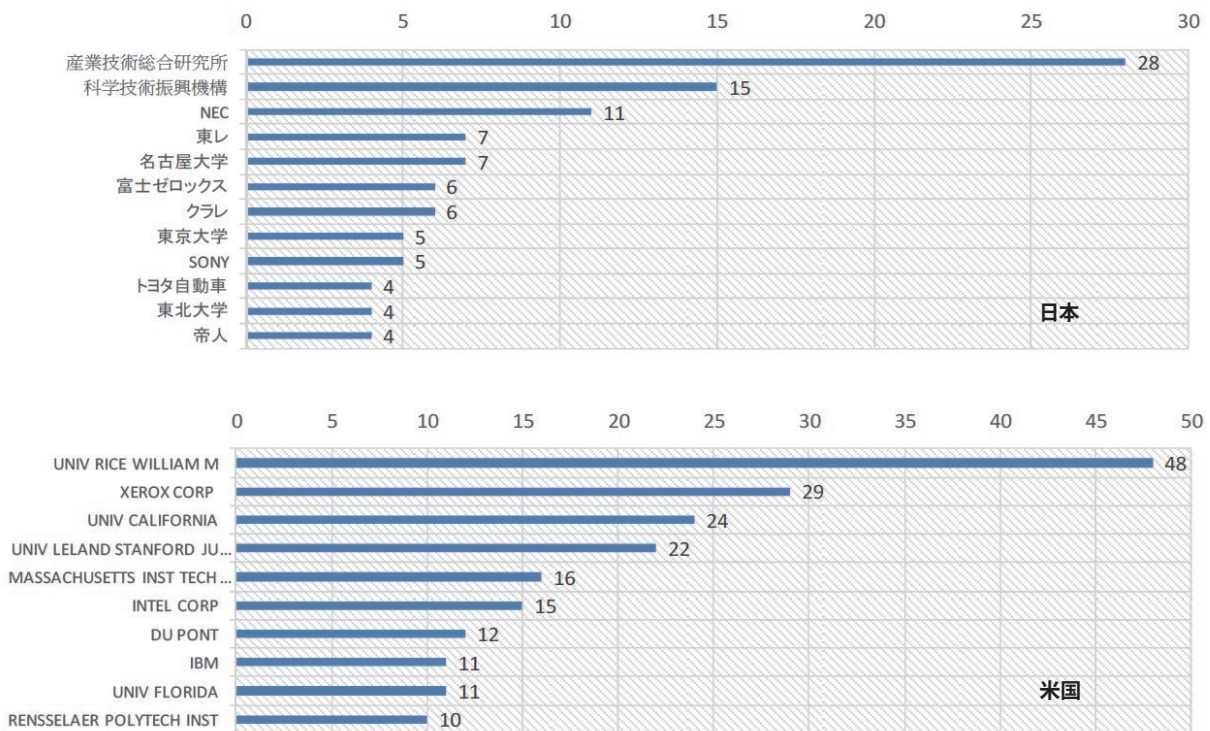


図10 単層CNTに関する日本国籍及び米国籍の出願人別出願件数ランキング (2000～2012年) (上図：日本、下図：米国)  
出所：単層CNTに関する出願状況調査 (NEDO, 2014)

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

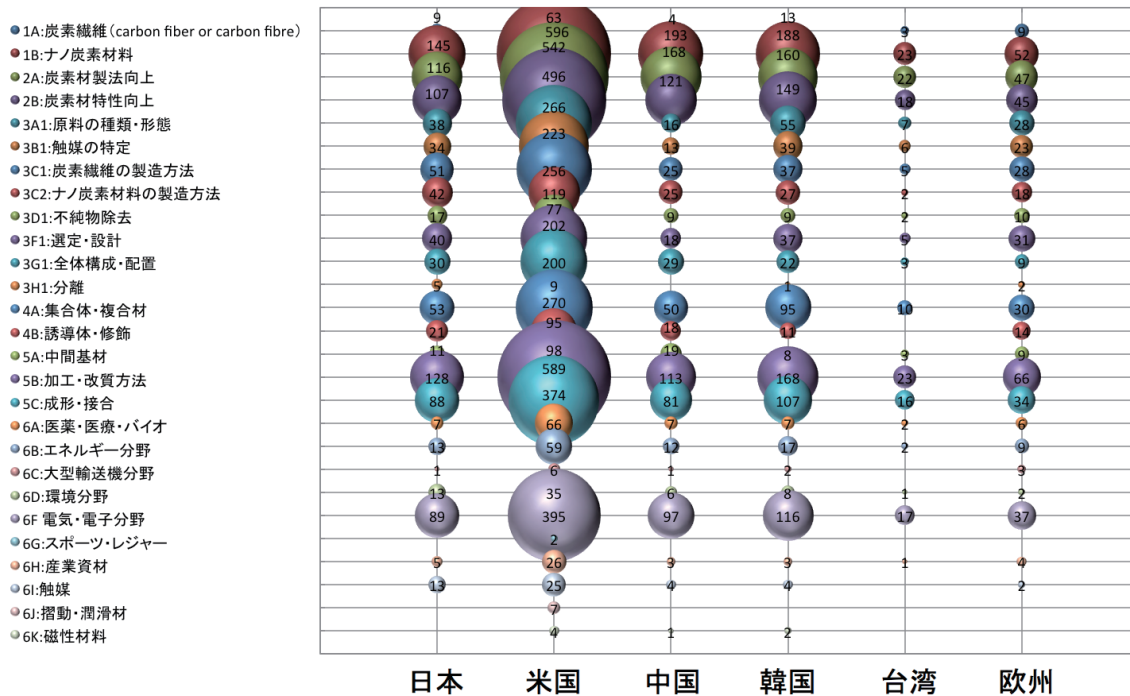


図11 単層CNTに関する特許出願における出願人国籍別及び技術区分別の出願件数 (2000～2012年)  
出所: 単層CNTに関する出願状況調査 (NEDO, 2014)

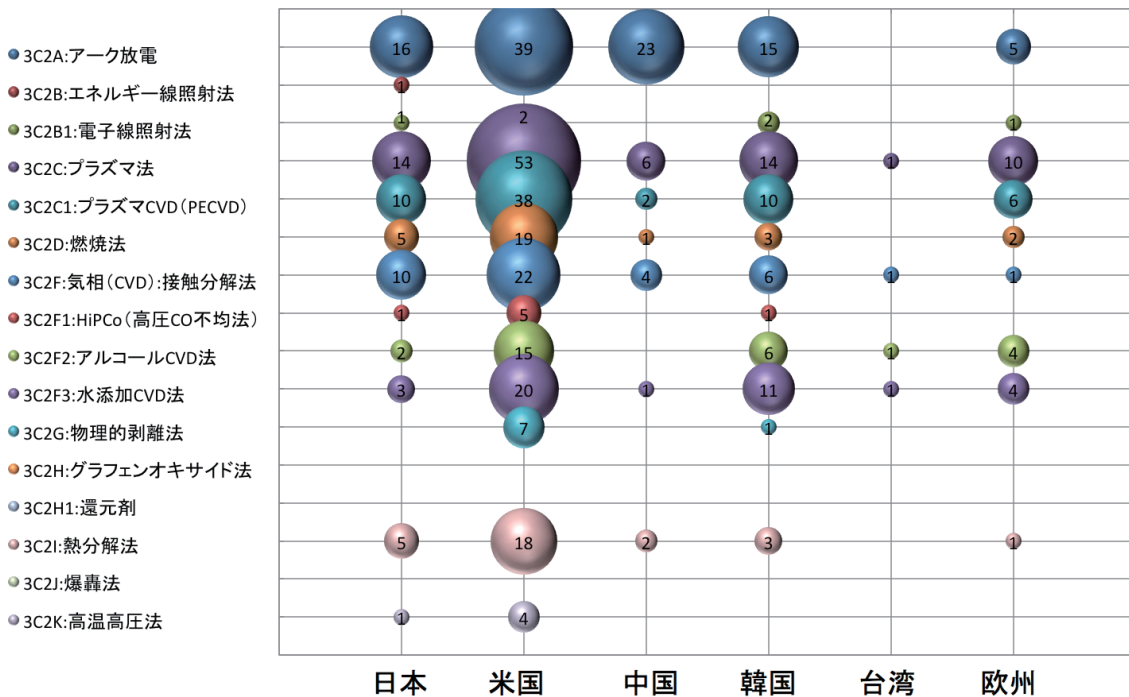


図12 単層CNTに関する特許出願における出願人国籍別及び製造方法別の出願件数 (2000～2012年)  
出所: 単層CNTに関する出願状況調査 (NEDO, 2014)

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## ②単層CNTに関する発表者国籍別の論文発表動向

発表者国籍別の論文発表件数総数は、2009年をピークに減少しており、日本からの発表件数の減少傾向を反映している。ただし、2000～2014年の日本からの発表件数総数は依然一位であり、特に、科学技術振興機構、産業技術総合研究所など国の研究機関からの発表件数が多いことから、これらの機関への公的資金の効果が

大きいことがうかがえる。米国では、前述のように特許出願件数は他国より圧倒的に多いが、論文発表件数は3位（4位の中国とほぼ同等）であり、単層CNTに関しては基礎研究よりも産業応用が主となっているものと考えられる。欧州、中国からの発表件数は、わずかながら年々増加傾向にある。（図13、図14、図15）

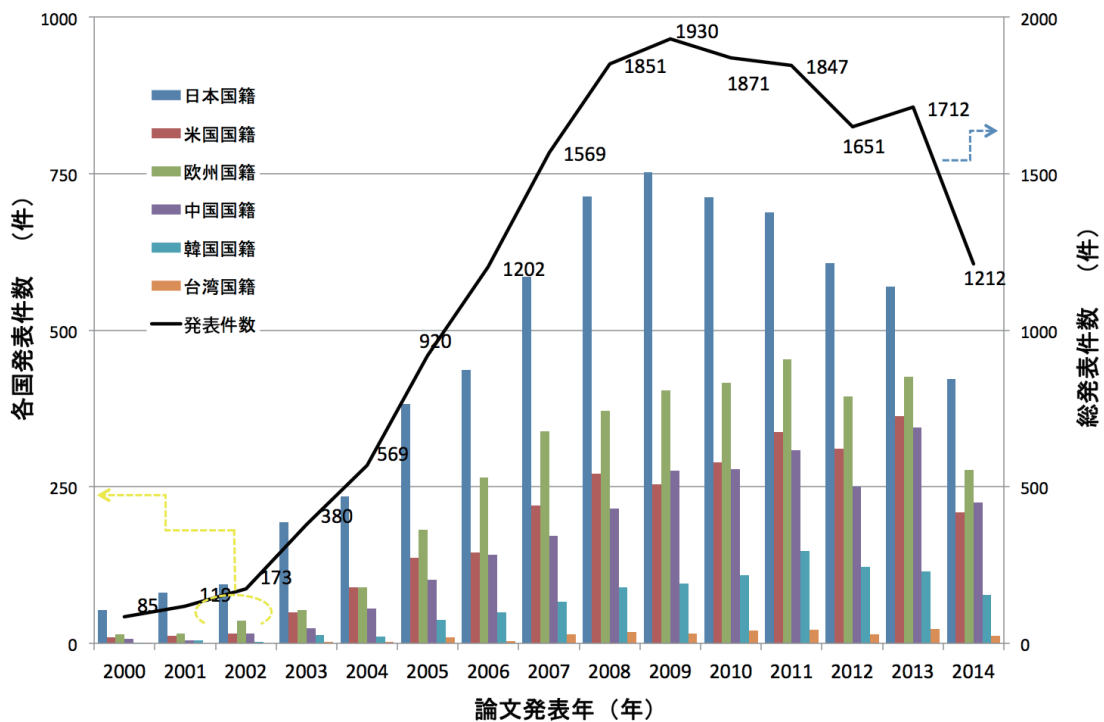


図13 単層CNTに関する発表者国籍別の論文発表件数推移

出所: 単層CNTに関する出願状況調査 (NEDO, 2014)

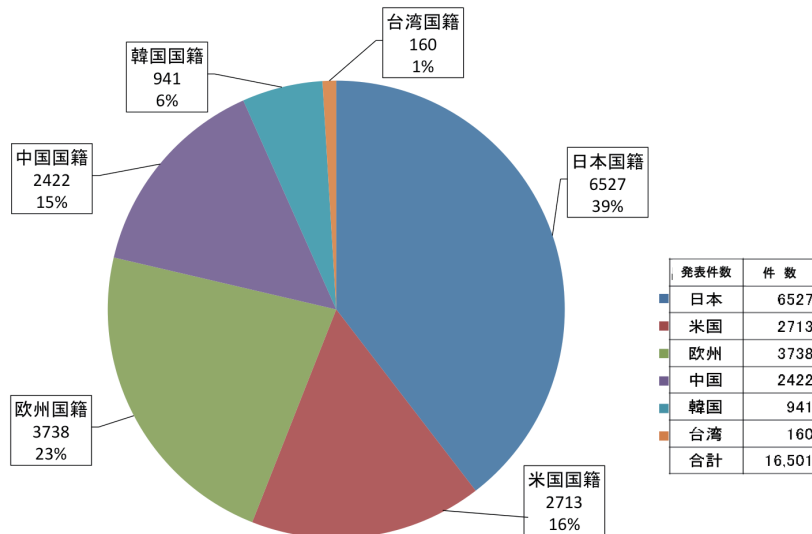


図14 単層CNTに関する発表者国籍別の論文発表件数・比率 (2000～2014年)

出所: 単層CNTに関する出願状況調査 (NEDO, 2014)



# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

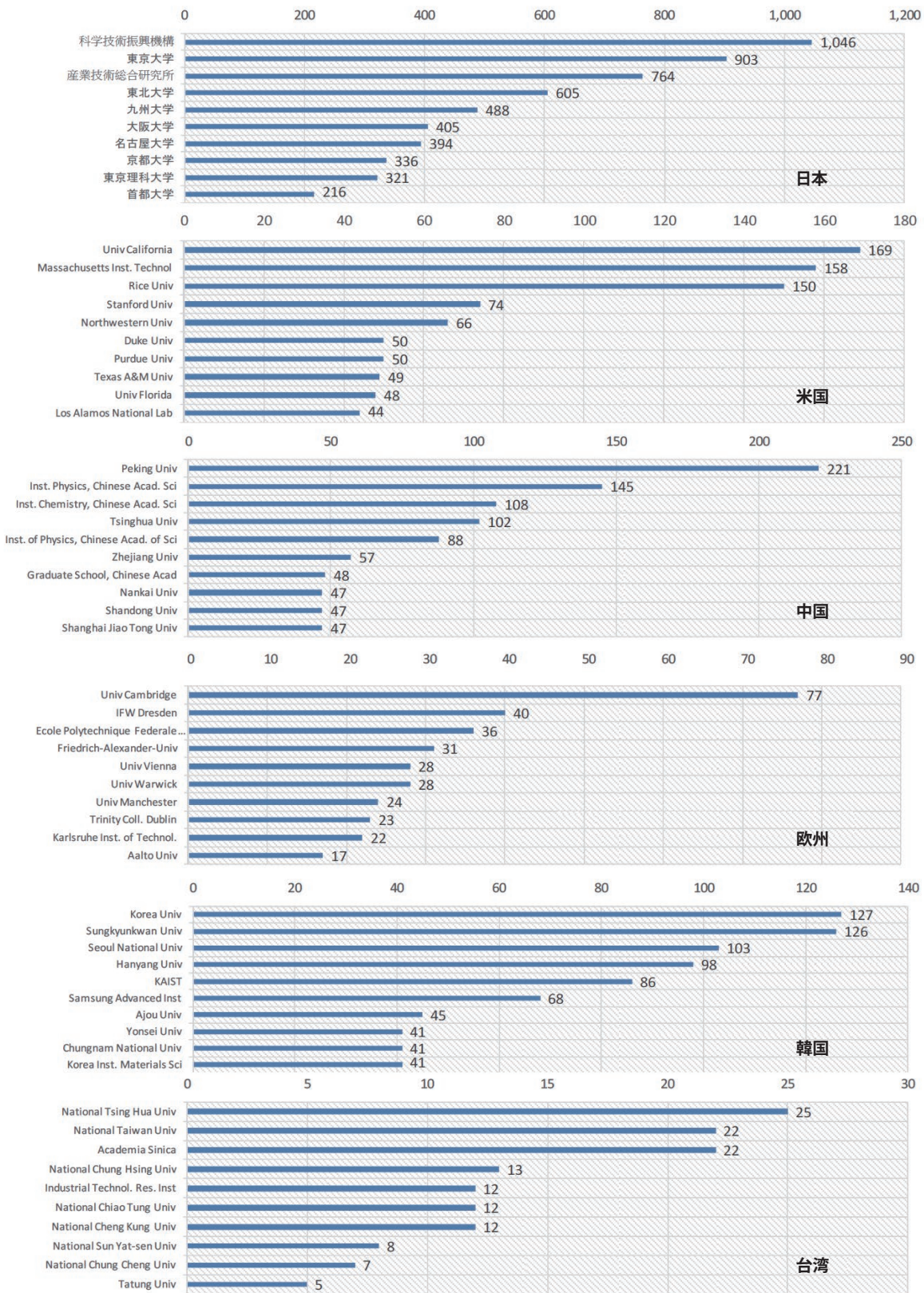


図 15 単層CNTに関する発表者国籍別及び機関別の論文発表件数ランキング (2000～2014年)  
出所: CNTに関する出願状況調査 (NEDO, 2014)



# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## (3) グラフェン

### ① グラフェンに関する出願人国籍別の特許出願動向

2010年以降、中国からの特許出願件数が急激に増加している。その結果、2012年時点で中国は2000年以降の特許出願総数が1位となった。重要特許がどれくらいの割合で存在するかまでの分析

は困難であるが、今後の脅威となる可能性が高い。出願総数は中国の次に米国、日本、韓国と続く。欧州は公的資金の投入が多いにもかかわらず、特許出願件数は少ない。日本、米国ともに出願人別出願件数の上位には、電子デバイスメーカーや研究機関が並ぶ(図16、図17、図18)。

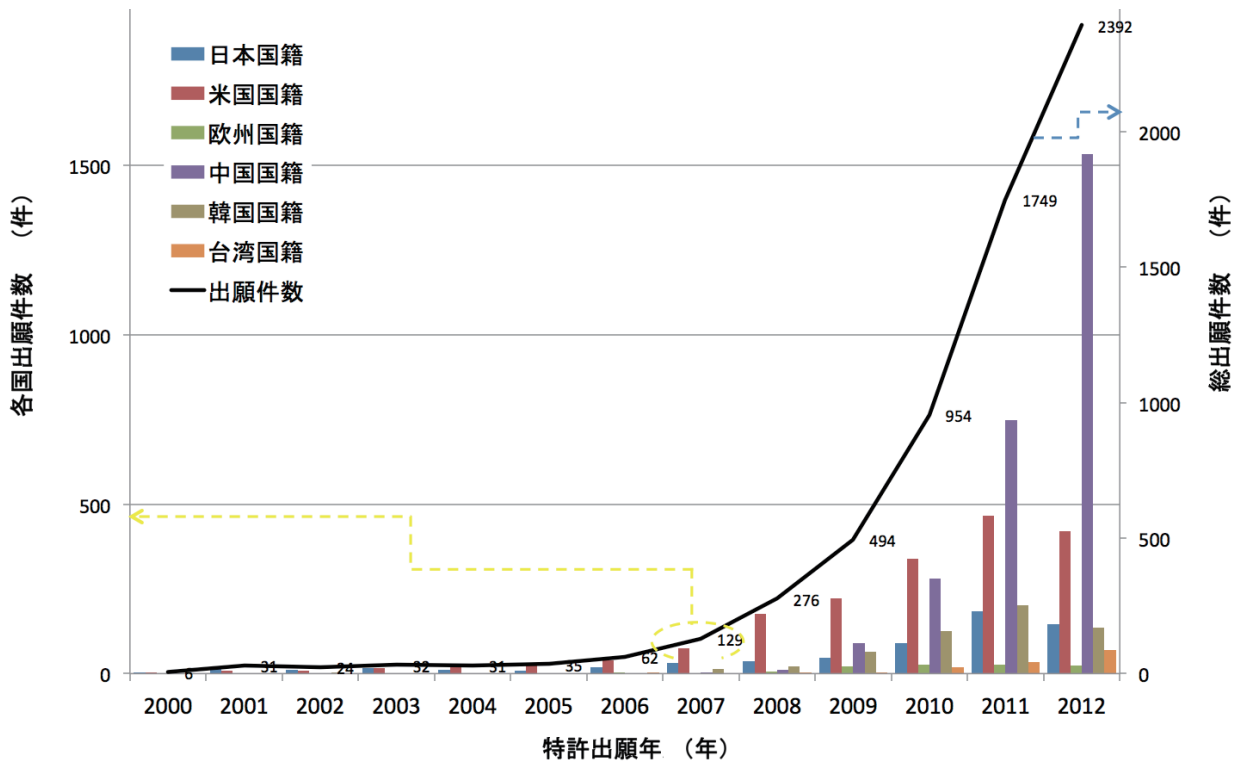


図16 グラフェンに関する出願人国籍別の特許出願件数推移

出所: ナノカーボン(グラフェン)に関する出願状況調査(NEDO, 2014)

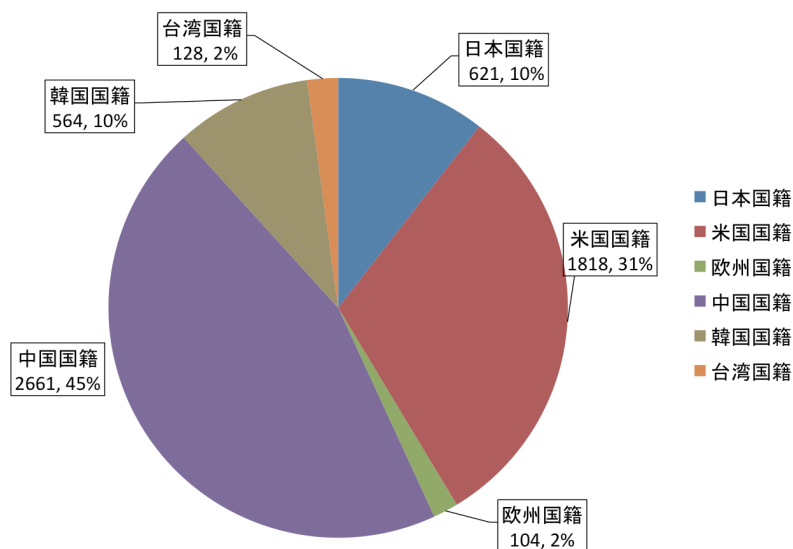


図17 グラフェンに関する出願人国籍別の出願件数・比率(2000～2012年)

出所: ナノカーボン(グラフェン)に関する出願状況調査(NEDO, 2014)

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

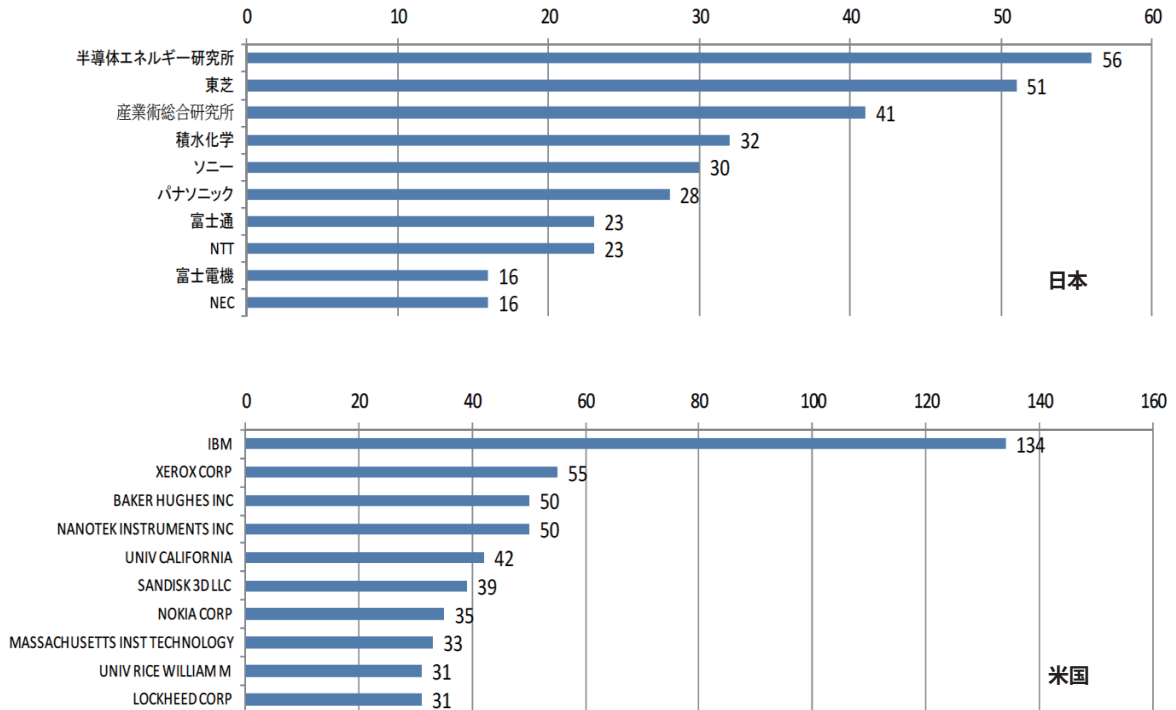


図18 グラフェンに関する日本国籍及び米国籍の出願人別出願件数ランキング (2000～2012年) (上図：日本、下図：米国)  
出所：ナノカーボン（グラフェン）に関する出願状況調査（NEDO, 2014）

出願総数が圧倒的に多い中国の技術区分別の出願数は、製法向上、特性向上、加工・改質方法、成形・接合に関するものが多い。米国も同様の技術区分への出願が比較的多いが、中国よりも広い範囲で出願されている。日本や欧州も米国と同様の傾向にあるが、出願数自体が少ない。(図19)

製造方法別の出願については、日本は主にアーク放電、プラズマ法、気相（CVD）・接触分解法に集中している。中国は、全体の出願数は少ないが、高温高压法に関する出願数の割合が他国に比べて高いことが特徴である。欧州は製造方法に関する出願自体が非常に少ない。(図20)

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

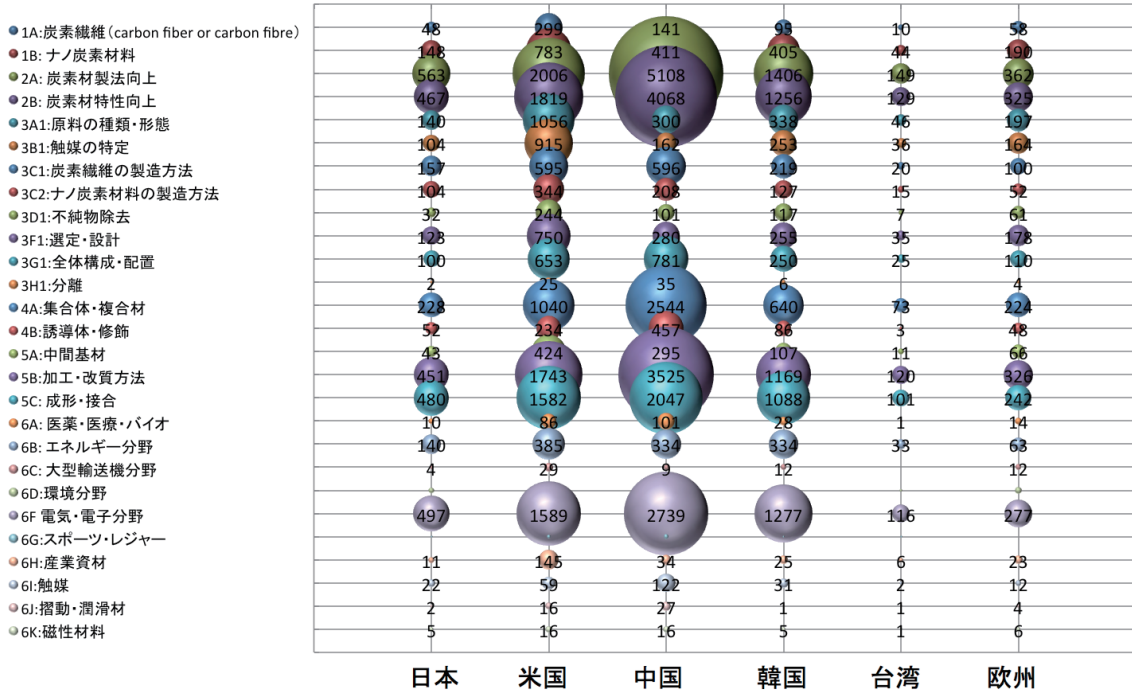


図19 グラフェンに関する特許出願における出願人国籍別及び技術区分別の出願件数 (2000～2012年)  
出所:ナノカーボン(グラフェン)に関する出願状況調査(NEDO, 2014)

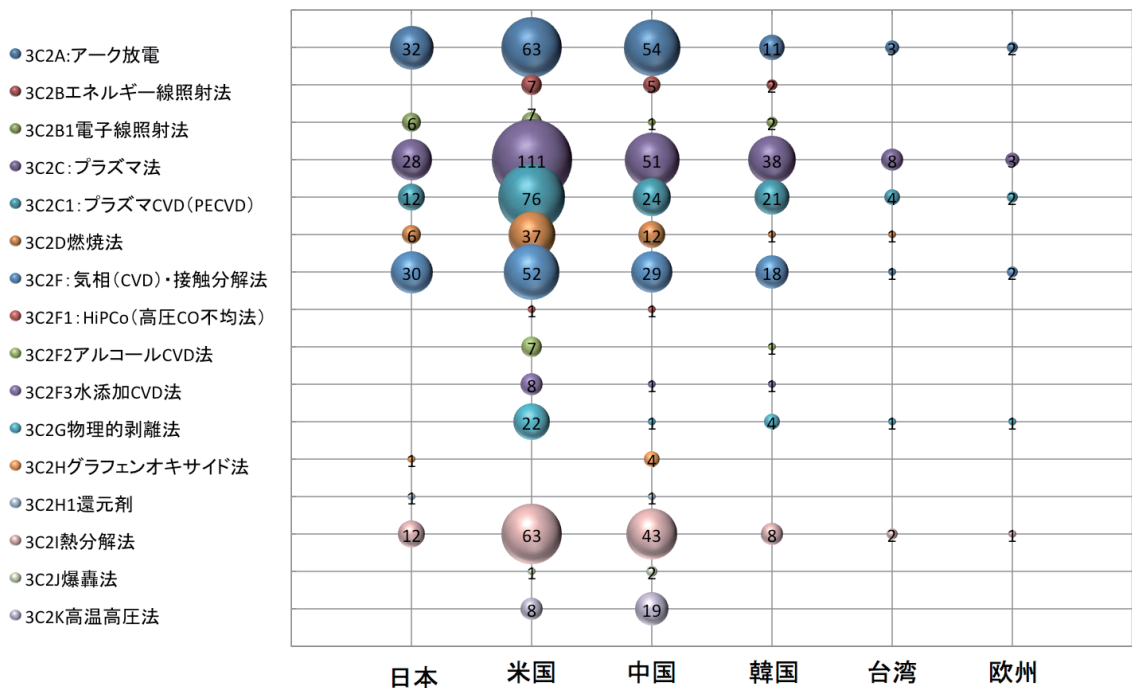


図20 グラフェンに関する特許出願における出願人国籍別及び製造方法別の出願件数 (2000～2012年)  
出所:ナノカーボン(グラフェン)に関する出願状況調査(NEDO, 2014)

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## ②グラフェンの発表者国籍別の論文発表動向

特許出願件数の動向と同様に2010年以降、中国からの論文発表件数が急激に増加しており、総論文数の増大に寄与している。(図21)

日本は公的資金の投入が少ないにもかかわらず、総論文数は中国、欧州に次いで3番目の位置につけている。欧州では公的資金の多くが基礎研究に費やされていると推測され、特許件数が少ないこと

とは対照的に、総論文数は中国とほぼ互角である。研究開発力は非常に高いが、産業化の推進における弱点があるのではないかと考えられる。また、米国の総論文数は多くはないが、早い時期から欧州と同等数の論文が発表されていることから、基礎的かつ重要度の高い論文が多いと推測される。(図22)

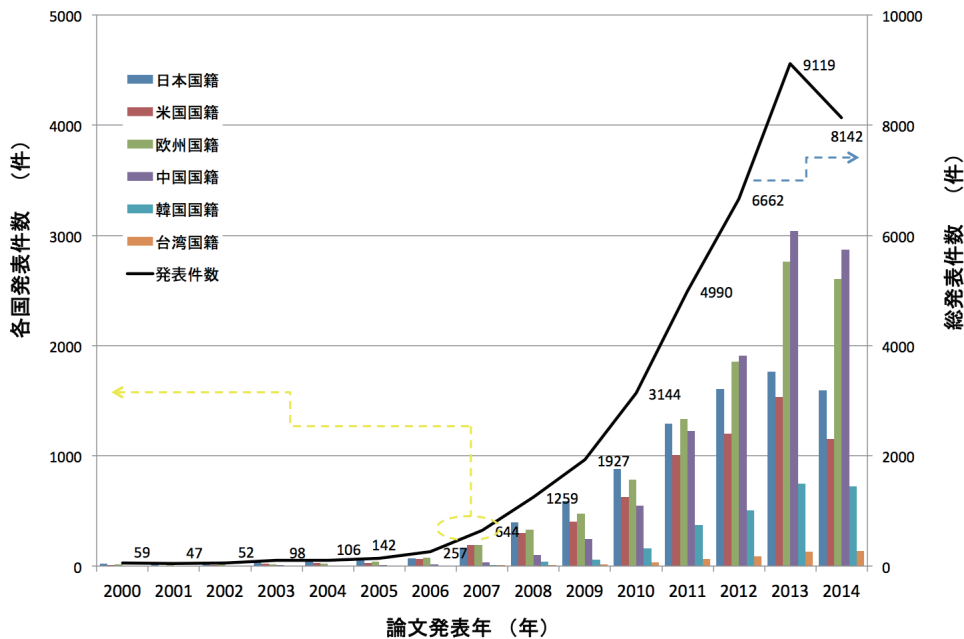


図21 グラフェンに関する発表者国籍別の論文発表件数推移

出所: ナノカーボン(グラフェン)に関する出願状況調査(NEDO, 2014)

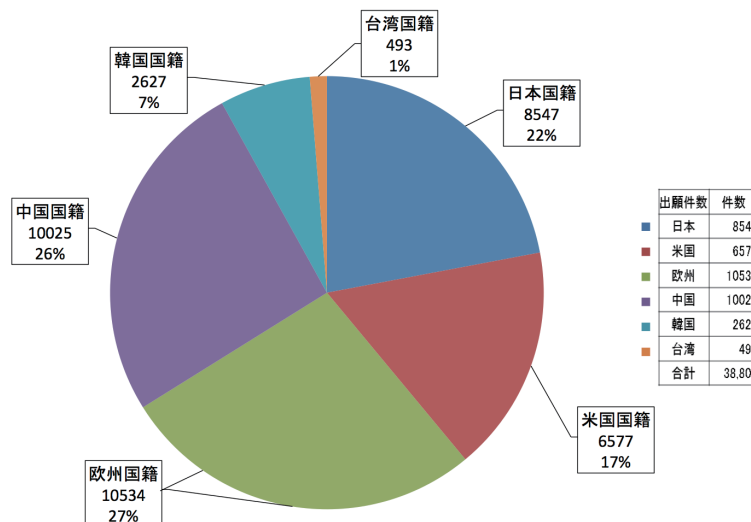


図22 グラフェンに関する発表者国籍別の論文発表件数・比率

出所: ナノカーボン(グラフェン)に関する出願状況調査(NEDO, 2014)



# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

論文発表件数の多い研究機関は、日本、米国、中国においては特定の機関に集中している（日本は東京大学、米国はカリフォルニア

大学とテキサス大学、中国は北京大学）のに対し、欧州においては多くの機関に分散している傾向がある。（図23）

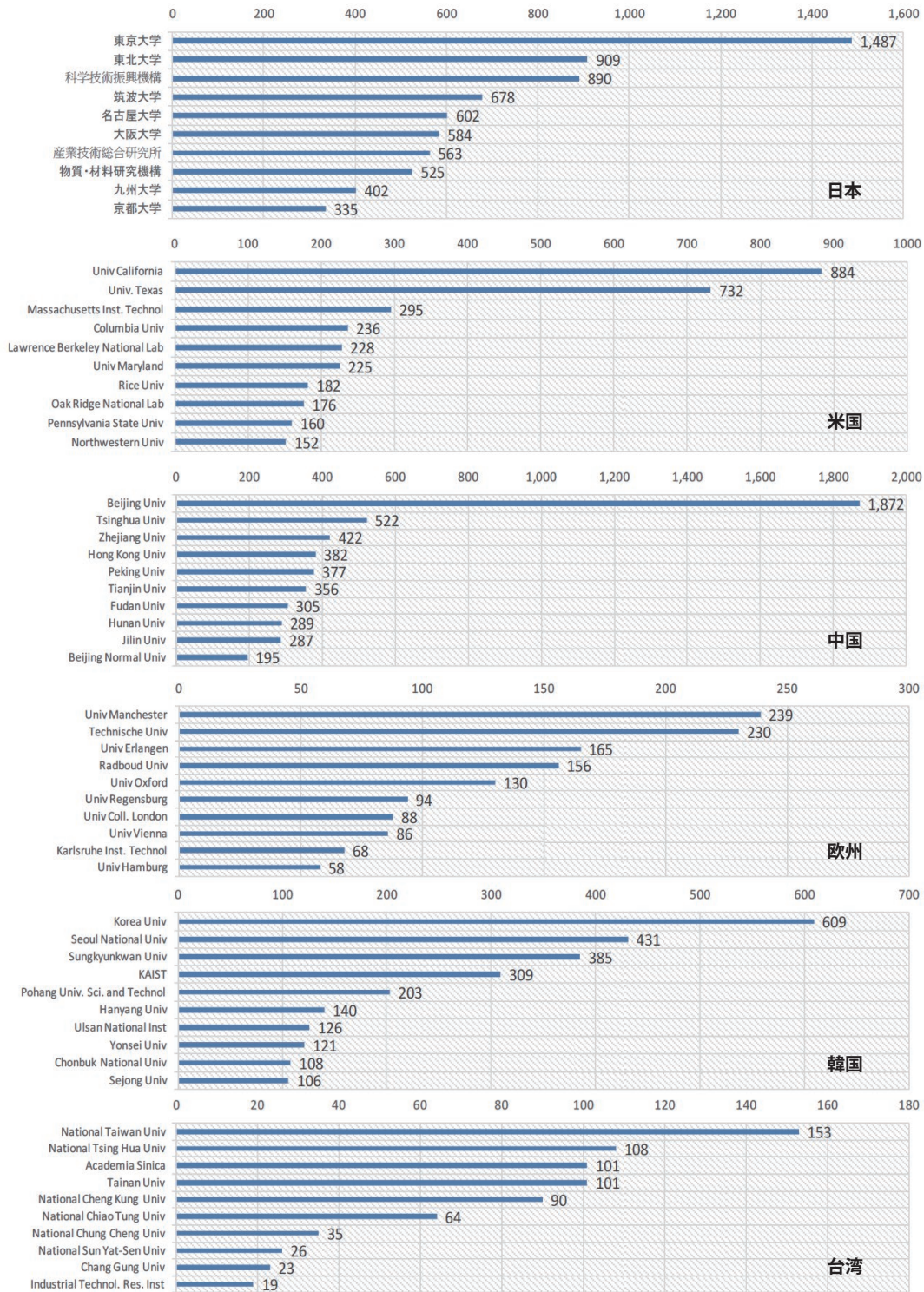


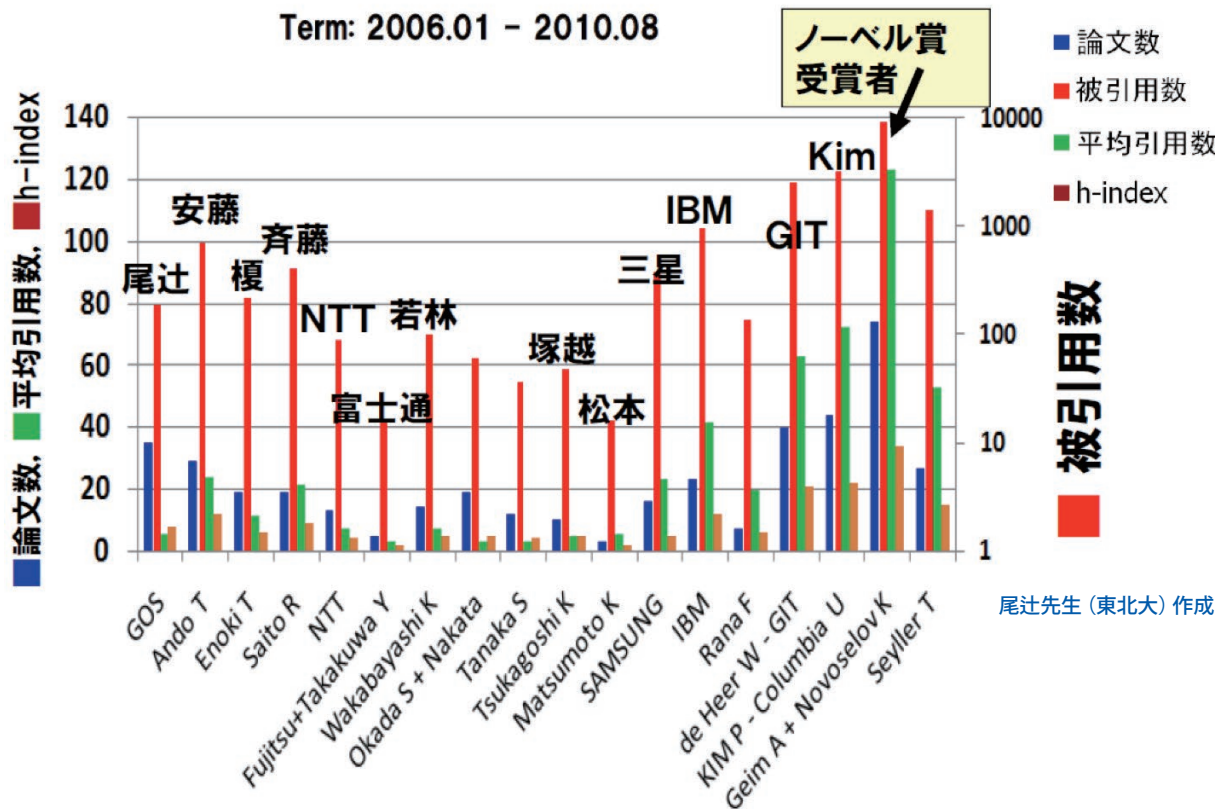
図23 グラフェンに関する発表者国籍別及び機関別の論文発表件数ランキング（2000～2014年）  
出所：ナノカーボン（グラフェン）に関する出願状況調査（NEDO, 2014）



# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## ③ グラフェン研究の状況

我が国のグラフェン研究に対する公的資金の投入額はCNTに比べて少ないものの、図24に示すように日本人研究者の論文数や被引用数は非常に多いことから、我が国のグラフェンに対する研究開発力は決して劣っていないと考えられる。



尾辻先生 (東北大) 作成

図24 グラフェン研究者又は研究機関の論文発表件数及び重要度の比較

出所:平成24年 総合科学技術会議 科学技術イノベーション政策推進専門調査会  
ナノテクノロジー・材料共通基盤技術 検討ワーキンググループ (第7回) 資料3-9

※ Ando T.:安藤恒也 (東工大) 文科省科学研究費補助金 (文部科学省基盤研究) グラフェン系の光応答と電気伝導:2010-2012年度 (代表:安藤恒也)  
グラフェン系の特異な量子輸送現象:2007-2009年度 (代表:安藤恒也)  
※ Saito R.:斎藤理一郎 (東北大) 原子層科学:平成25-29年度 ((文部科学省新領域研究)  
※ GOS:尾辻泰一 (東北大) グラフェン・オン・シリコン材料・デバイス技術の開発  
平成19-25年 (科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST)  
※ h-index: 研究者の発表論文を被引用数の多い順に並べて順位付けし、その順位>被引用数となるとき順位をh-indexと定義。

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## 2 -3 ナノカーボンの産業競争力 (諸外国との比較)

我が国におけるCNT及びグラフェンの産業競争力を把握・予測するために、プレイヤー、市場規模、用途等について調査を行った結果を示す。

### (1) CNT

#### ①プレイヤー

主なCNT製造企業を表6に示す。製造規模の大きな企業はCNano Technology (米国)、昭和電工 (日本) であり、多層CNTを市場に供給している。CNano Technologyは中国で生産することにより、コストを低減している。また、海外では、多層CNTを製造する企業が単層CNTの製造も手がける傾向にある一方、日本企業は単層CNT、多層CNTいずれかの専業となる傾向にある。

表6 主なCNT製造企業

地域	企業名(国)	CNT種類	生産能力(千/年)	備考
日本	名城ナノカーボン	単層	2	名城大ベンチャー。産総研と共同研究でeDIPS法の工業生産プラントを設立。
	日本ゼオン	単層		山口県徳山工場内にSG法の製造プラント建設を決定。2015年下期に量産開始予定。
	宇部興産	多層	20	2011年11月販売開始。
	昭和電工	多層	400	直径150nm。炭素含有率99%以上。生産拠点は川崎。
	保土谷化学工業	多層	—	生産拠点は郡山。
	JFEエンジニアリング	多層	—	アーク放電法による製造。
北米	SouthWest NanoTechnologies (米国)	単層	—	CVD法による製造。粒径制御、プリント用インク等の用途。
	CNano Technology (米国)	多層	500	生産拠点は中国。市場平均価格の1/2~1/3で販売。丸紅情報システムズと用途共同開発。\$100/kg、純度95%。
	Hyperion Catalysis International (米国)	多層	40	1984年の物質特許の他、製法、応用の特許を取得。CNT単体でなくマスターバッチ、コンパウンドにて販売。
	Nanographite Materials (米国)	多層	—	直径60-80nm。日本ではGSIクレオスが供給元。カーボンナノファイバも販売。
	BuckyUSA (米国)	単層・多層	—	多層CNT:直径5-15nm、単層CNT:直径0.7-2.5nm。フラーレンも販売。
	Carbon Nanotechnologies (米国)	単層・多層	—	High Pressure Carbon Monoxide (HiPco) プロセス。純度95%以上。
	Unidym (米国)	単層・多層	10	CNTベンチャー。High Pressure Carbon Monoxide (HiPco) プロセス。
	Cheap Tubes (米国)	単層・2層・多層	—	グラフェンも販売。
	Nanoresearch (カナダ)	単層	—	旧名称はSES Research。フラーレンも販売。
欧州	Thomas Swan (英国)	単層・多層	(6kg/月)	インキュベーション事業。
	Bayer MaterialScience (ドイツ)	多層・単層	260	「Baytubes」の商品名で販売。純度99%以上。
	Nanocyl (ベルギー)	多層・単層	40	工業向け用途の他、研究用試料も販売。
アジア	成都有機化学 (中国)	単層	—	Chinese Acad. Inst. Chemistryの技術を採用。
	Sun Nanotech (中国)	単層・多層	—	CVD法による製造。純度80%以上(通常品)と90%以上(高純度品)の両方を販売。
	Shenzhen Nanotech Port (中国)	単層・多層	—	純度90%。

出所:平成23年度 特許出願技術動向調査報告書(炭素材料及びその応用技術)(特許庁)等を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2014)

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## ②世界市場規模推移及び予測

2014年のCNTの世界市場は約34億円となっているが、図25に示すように、今後は海外市場を中心に、2020年に約290億円、2030年に約660億円規模へと急激な拡大が予測される。その要因として、後述するようにCNTの用途先市場の拡大が挙げられる。

中でも、表10に示すように、大きな伸び率が予想される電気二重層キャパシタやリチウムイオン電池 (LiB) 負極材等の電極用途の他、もともと市場の大きな自動車用ケーブルへの適用も期待される。

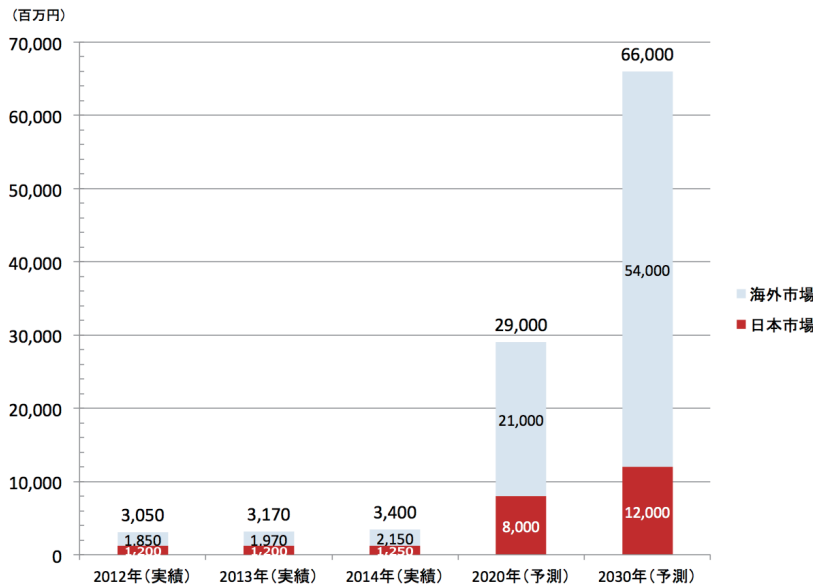
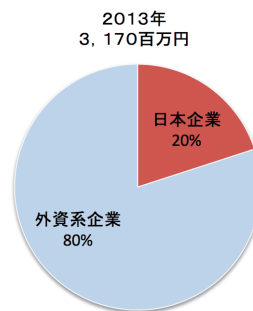


図25 CNTの世界市場規模推移及び予測

出所:平成23年度 特許出願動向調査報告書(特許庁)よりNEDO技術戦略研究センター算出(NEDO, 2014)

## ③日本企業シェア及び優位性

昭和電工が直径150nm程度の多層CNTを製造しており、リチウムイオン電池(LiB)電極材としての高い評価を受けているなど、外資系企業に比べて日本企業は材料性能面での優位性がある。一方、外資系企業は、早期に搬送用トレーなどに用いる樹脂の添加剤用CNTの大量合成に対応しており、また大規模プラントの建設実績があるなど、価格面での優位性がある。(図26)



日系企業の優位性	外資系企業の優位性
<ul style="list-style-type: none"> <li>・昭和電工は、150nm近辺の径を有し、市場では電池の負極や粒子径の大きい正極材料向けとしての評価が高い。</li> <li>・昭和電工等、日本企業は、負極向けの導電助剤用を中心とした材料面の技術面(導電性機能等)の優位性がある。</li> <li>・課題は、材料としては外資系企業と比較して優位性があるが、大量合成ができないため、応用開発が進んでいない点があげられる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・外資系企業は搬送用トレー、自動車等の樹脂添加用途に関する技術面と大量合成への対応が早い点で優位性がある。</li> <li>・なお、外資系企業は、参入当初から価格を下げるため大規模なプラント建設を実施した経緯がある。</li> </ul>

図26 CNTの日本企業シェア及び優位性

出所:平成26年度 日本企業の国際競争ポジションに関する情報収集(NEDO, 2014)

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## ④分野別用途

想定されるCNTの応用分野と用途は、CNTの高強度、軽量、高熱伝導、高電流密度といった特性、及び電気・電子的な特性がそれぞれ多方面で優位性を発揮できるため、図27のように多岐にわたる。

既存用途には、主に帯電防止用のトレイ、リチウムイオン電池(LiB)の負極材、自動車用燃料チューブ等がある。(表7)

現在、各社が新しい用途を模索しており、欧州ではプラスチックコンパウンドやセメント等への応用なども検討されている。また、高容量の電池やキャパシタ用途などで評価されれば、当該市場の拡大につながる。また、研究開発段階の想定用途としては、主に電池分野の合金系の負極材、シリコン代替半導体回路、フレキシブル電気回路、高性能熱交換器等がある。

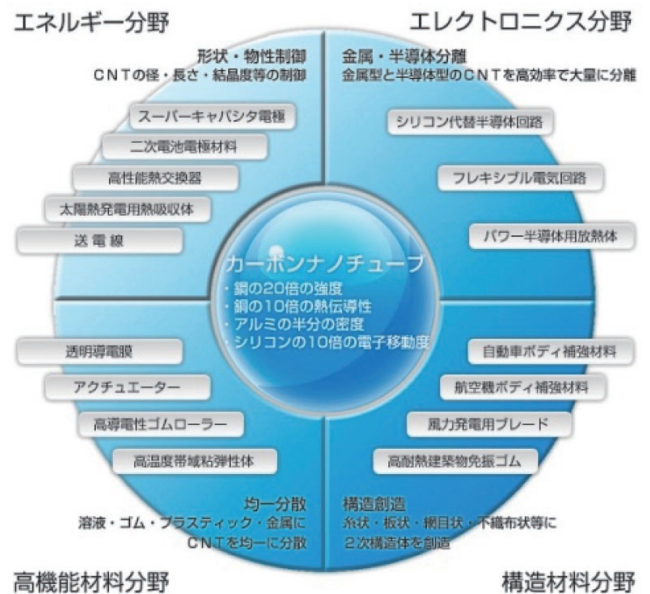


図27 CNTの応用分野と用途  
出所:産業技術総合研究所  
ナノチューブ応用研究センター  
WEBサイト (2014)

表7 CNTの分野別用途

分野	具体的用途例	備考 (動向等)
エレクトロニクス	・透明導電フィルム ・半導体微細構造の金属配線やビア配線 ・平面型ディスプレイ等のための電界放出電子源	・中国ではカーボンナノチューブを使用した透明導電フィルムを使用したスマートフォン用のタッチパネルが製造されるなど商業化が進んでいる。 ・東レは、世界で初めて2層カーボンナノチューブを使った透明導電フィルムの量産技術を確立している。
構造材料	・スポーツ用筐体 ・強化用コンパウンド、セメント ・宇宙用エレベータ(建造時のロープの素材)	・東欧地域では、プラスチックコンパウンドやセメントに添加する事で、着色(黒色)と強度アップ(10%程度)になる事から採用されている。 ・スポーツ用の強化材料は中国やその他アジア地域での需要が多い。
エネルギー	・LiB 用導電助剤(負極材用、LFP(リン酸鉄リチウム)正極材用) ・電気二重層キャパシタ ・燃料電池電極(電極触媒担体) ・太陽電池電極 他	・電池向けでは、もともと球状黒鉛負極などの導電助剤向けに利用されてきたが、コストダウンの方向性から削減の方向にある。一方、Si やスズなどを添加したハイブリッド系負極用の助剤に採用されており、又、LFP の正極材料向けにも採用されている。これは中国で市場が先行している。
高機能材料	・搬送用トレイ(HGAトレイ) ・自動車(燃料チューブ、フューエルポンプ、静電塗料用)	・搬送用トレイ等の帯電防止用途は中国やその他アジア地域(大半が中国)での数量が多い。 ・欧米では主に自動車に利用されており、燃料チューブやフューエルポンプ、静電塗料用の外板(バンパー、フェンダー)に応用されている。日本でも一部、燃料チューブなどでの適用事例がある。

出所:平成26年度 日本企業の国際競争ポジションに関する情報収集 (NEDO, 2014)

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## (2) グラフェン

### ① プレイヤー

主なグラフェン製造企業を表8に示す。先行して市場に参入したのは欧米企業であり、各国の主要企業は、XG Sciences(米国)、Graphenea(スペイン)、Applied Graphene Materials(英国)などである。最近では韓国、マレーシア、中国等のアジア企業の参入が増えている。特に、鉄鋼業大手のポスコ(韓国)が数年前にXG Sciencesの筆頭株主となり、韓国内にグラフェン工場を設立する動きがある。日本企業では、グラフェンプラットフォーム、インキュベーション・アライアンス、

仁科マテリアル等のベンチャー企業が販売を開始している。

なお、現在の主要参入企業は、主にパウダー状のグラフェンを製造しているが、Graphenea(スペイン)、Graphene Master(オランダ)など、膜状のグラフェンを製造する企業も現れてきている。

その他、グラフェンとグラファイトの間に近い材料である高分子焼成グラファイトがパナソニックとカネカの2社で開発されており、スマートフォンなどの放熱シートとして実用化に成功している。この材料は日本独自のものであり、グラフェン数百層の厚みがあるものの、グラフェンに近い優れた熱伝導特性を生かした製品のひとつである。

表8 主なグラフェン製造企業

地域	企業名 (国名)	備考
日本	グラフェンプラットフォーム	グラフェンインク。東工大横浜ベンチャープラザ内R&Dセンター。
	インキュベーション・アライアンス	グラフェンフラワー。高速CVDプロセスの開発に成功。
	仁科マテリアル	機能付酸化グラフェン、有機溶媒分散型酸化グラフェン等作成。
	アイテック	iGurafen- $\alpha$ 、複層構造のグラフェンコンポジットシート。
北米	XG Sciences (米国)	鱗片状グラフェン粉末、ポスコ(韓国)の傘下。
	Nanoltegris (米国)	ナノグラフェン水溶液。MONO(1~2層)、QUATTRO(3~4層)。
	Graphene Laboratory (米国)	3Dプリント用などの開発。
	American Graphite Technologies (米国)	3Dプリント用などの開発。
	Lomiko Metals (カナダ)	グラファイト、グラフェン、3Dプリント用などの開発。
欧州	Graphenea (スペイン)	酸化グラフェン、CVDによるグラフェン単層膜を販売。
	Graphene Nanotech (スペイン)	化学的剥離法による単層グラフェンなど。
	Graphos (イタリア)	酸化グラフェン。300 $\mu$ mサイズまで製造可能。
	Graphene Master (オランダ)	単結晶グラフェン膜。CVDによる高面積成長。
	Hqgraphene (オランダ)	2次元材料結晶を販売、剥離グラフェンも取り扱い材料の一つ。
	Applied Graphene Materials (英国)	ボトムアッププロセスによるグラフェンパウダー製造。
	Haydale Graphene Industries (英国)	低温プラズマ法によるグラフェン。CNTも製造。
アジア	Cientifica (英国)	—
	Graphene NanoChem (マレーシア)	—
	The Sixth Element (Changzhou) Materials Technology (中国)	酸化グラフェン、グラフェンパウダー販売。生産能力100t/年。
	Ninbo Morsh Technology (中国)	2013年に300 t /年のグラフェン製造ラインを構築。
Samsung Techwin (韓国)	30インチグラフェン膜(透明電極用)をソウル国立大と共同研究。	

出所:NEDO 技術戦略研究センター作成 (2014)



# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## ②世界市場規模推移及び予測

現在のグラフェン市場は、世界的に研究開発需要によって支えられている。主に次世代の高速、高周波トランジスタなどの半導体やITO (Indium Tin Oxide:インジウムスズ酸化物) に代わる透明電極などのエレクトロニクス分野を中心に、リチウムイオン電池、燃料電池、太陽電池用途などのエネルギー分野、また、塗料やフィルム、樹脂成形品などの複合材産業分野における実用化、量産化に向けた研究開発が進められている。

今後、ウェアラブルデバイスへの応用をはじめとして、様々な応用分野の市場が本格的に立ち上がり、2030年には1,000億円の市場規模になると予測されている。(図28)

なお、CNTと比較して、表裏で電子を貯められるキャパシタ用途として、2次元的な広がりによるセンサー用途としての市場拡大が見込まれる。

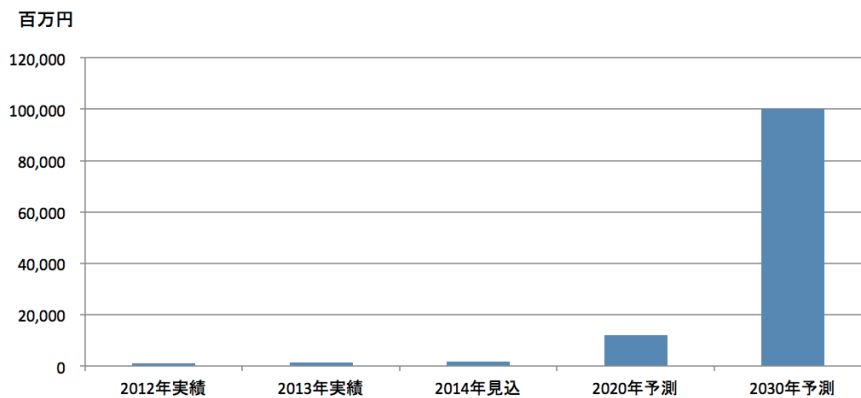


図28 グラフェンの世界市場規模推移及び予測  
出所:平成26年度 日本企業の国際競争ポジションに関する情報収集 (NEDO, 2014)

## ③日本企業のシェア及び優位性

日本企業の優位性としては、世界トップレベルの材料研究開発力、高い解析・評価技術力、半導体技術開発で養われたプロセス技術力などが挙げられる。一方で、外資系企業は、大型の公的支援プロジェクトや巨額投資による資金力をもつ。(図29)

なお、現時点でのグラフェン市場は、剥離グラフェンが主流であり、原子層グラフェンはまだ研究開発段階である。

日系企業の優位性	外資系企業の優位性
<ul style="list-style-type: none"> <li>・材料研究開発では世界トップレベル</li> <li>・高レベルでの基礎物理と理論解析</li> <li>・CNT 以来の高品質成膜技術</li> <li>・高い膜質評価技術</li> <li>・半導体で培われた高い技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大型の公的支援プロジェクト</li> <li>・研究者層の厚み、困り込み</li> <li>・巨額投資</li> <li>・基本技術、特許の取得</li> <li>・中国での参入ラッシュ</li> </ul>

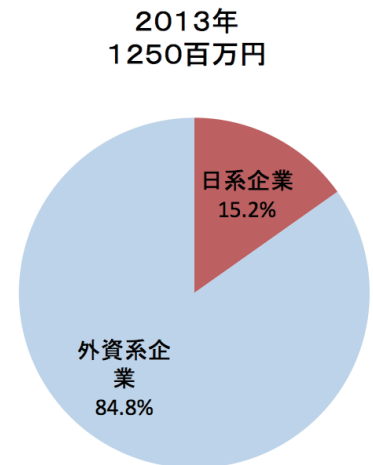


図29 グラフェンの日本企業シェア及び優位性  
出所:平成26年度 日本企業の国際競争ポジションに関する情報収集 (NEDO, 2014)

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## ④分野別用途

グラフェンの用途としては、CNTと同様に、エレクトロニクス、エネルギー（電池）、構造材料など、非常に幅広い分野への応用が想定されており、これらの実用化を目指した研究開発が進められている。

これまでは、主に導電性材料や放熱材用途への製品化開発が進められてきたが、近年、樹脂成形品、塗料、導電インクなど添加材用途としても注目されつつある。グラフェンを用いることで、CNTやカーボンブラックよりもカーボン材料の添加割合を低減できるうえ、成形品では強度改善などの効果も期待できる。エレクトロニクス用途への展開においては、特に透明電極や高性能センサ、高速トランジスタ等の実現が期待されており、そのためには優れた特性を有する原子層グラフェン膜の開発が課題である。

表9 グラフェンの分野別用途

分野	具体的用途例	備考(動向等)
エレクトロニクス	トランジスタ、IC	高周波、高速トランジスタの開発、スピントロニクスへの応用
	センサ	バイオセンサ、イオンセンサ、赤外線センサの開発
	コンデンサ	高い導電性を生かし電気二重層キャパシタの電極材
	RFID タグ	グラフェンインクによるアンテナの印刷
	フレキシブルデバイス	グラフェンインクによるポリイミドフィルムへの電極形成
	LED	ガラス基板上にグラフェン層を挿入して LED 化
	透明電極	ITO代替としてタッチパネル、太陽電池、有機 EL 等への応用
構造材料	樹脂成形品	強度や帯電防止、抗菌性を生かし筐体、ギア、ボトルなどへの応用
エネルギー	リチウムイオン電池	負極材としての研究、開発
	太陽電池	透明電極や中間電極材として研究、開発
	燃料電池	電極触媒として Pt 触媒代替
高機能材料	導電インク	タッチパネルやプリントエレクトロニクスへの応用
	塗料	静電塗装用プライマーなどへの応用
	3D プリント材料	3D プリント材料の 1 つとして研究開発
その他	放熱シート	スマートフォン用にモバイルヒートシンクとして製品化
	ヒートスプレッタ	半導体用としても開発
	光変調器	グラフェン導波路変調器の研究開発

出所：平成26年度 日本企業の国際競争ポジションに関する情報収集（NEDO, 2014）

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## 2-4 CNT/グラフェン用途先の世界市場予測

各用途先の市場予測（表10）によると、CNTについては自動車用ケーブル、ゴム・樹脂複合材料の市場の伸びが大きいことがわかる。特に自動車用ケーブルについては、電気自動車などの普及により、今後、電装部品配線の使用量が増大すると見込まれており、重量低減及び高い電流密度特性による電力消費量低減の効果が得られるナノカーボン電線材料としての応用が期待される。

グラフェンは圧力センサなど、優れた電氣的、機械的特性を活用した高機能センサーへの応用に対する期待が大きい。透明導電性フィルムは現在のITOからの置き換えが中心となるため、市場の伸びは大きくはないが、ITOから全て置き換わる可能性もあり、また、フレキシブル性を利用した新たな用途拡大も見込まれる。

RFトランジスタは、CNTとグラフェンの両方の応用先として期待されている。実現すれば、自動車用ケーブルと同等の極めて大きな市場を獲得することにつながるため、本分野の研究は活発である。しかし、いずれの用途先への応用もハードルの高い技術課題の解決が必要である。

表10 CNT/グラフェン用途先の世界市場予測

用途先	2013年 市場規模	2030年 市場予測	主な ナノカーボン材料
自動車用ケーブル	24,500 億円	48,000 億円	CNT
PAN系炭素繊維	1,344 億円	3,200 億円	CNT
ゴム・樹脂複合	580 億円	2,980 億円	CNT
圧力センサ	2,928 億円	10,800 億円	グラフェン
透明導電性フィルム	994 億円	1,500 億円	グラフェン
RFトランジスタ	14,600 億円	41,000 億円	CNT・グラフェン
電気二重層 キャパシタ	168 億円	2,000 億円	CNT・グラフェン
LiB負極材	480 億円	1,180 億円	CNT・グラフェン

出所：平成26年度 日本企業の国際競争ポジションに関する情報収集（NEDO, 2014）

## 2-5 ナノカーボンの実用化の促進

ナノカーボンの応用範囲は多岐にわたり、様々な提案がなされている。実用化を促進させるためには、研究開発と並行して、素材をより多くの企業に活用してもらい、応用製品を積極的に提案してもらうことが必要である。

その一環として、「技術研究組合単層CNT融合新材料研究開発機構（TASC）」は、様々なスペックのCNTサンプルを企業に提供する活動を平成22年より始めており、これまでにいくつかの試作例が

発表されている。表11は、TASCが提供しているCNTサンプルの一覧である。グラフェンに関しては、産総研が中心となり、グラフェンコンソーシアムが設立されたところであり、今後、CNTと同様の活動に繋がる可能性がある。

表11 TASC提供のCNTサンプル一覧

提供可能サンプル内容		
番号	名称	スペック
1	eDIPS-CNT	1~2nmの範囲で希望に合わせて応相談
2	CNT粘弾性体(SG-CNT)	-196℃~1000℃で粘弾性を示す、1センチ角
3	分散性に優れたCNT(SG-CNT)	0.1~0.3重量%の分散液
4	CNT不織布(SG-CNT)	導電率 ~50S/cm、比表面積 500~1000m <sup>2</sup> /g
5	金属CNT(eDIPS-CNT)	純度95%以上
6	半導体CNT(eDIPS-CNT)	純度95%以上
7	高伝熱ゴム(SG-CNT)	熱伝導性 20w/mk以上
8	低添加導電性大面積ゴム(SG-CNT)	CNT充填率1wt%未満 体積導電率 1S/cm以下
9	CNT複合材料 (樹脂・ゴム・フィルム)	体積導電率1S/cm以上のゴム、樹脂 ゴム：NBR、SBR、フッ素、シリコン等 樹脂：アクリル系、スチレン系等 形状：任意(要相談)
10	CNT・金属複合体	熱伝導率750W/mk以上、引張強度約70MPa 材料内の熱伝導経路の設計要相談 アルミニウムマトリクス以外は要相談

出所：材料の未来を変えるCNT  
(技術研究組合単層CNT融合新材料研究開発機構（TASC），2012）

## 2-6 ナノカーボンの安全性評価手法の開発

産業技術総合研究所安全科学研究部門は、2011年にNEDOプロジェクトにおいて「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」の成果として「ナノ材料リスク評価書」を作成した。

また、2013年にTASCと共同で、「カーボンナノチューブの作業環境計測の手引き」、「カーボンナノチューブの安全性試験のための試料調製と計測、および細胞を用いたインビトロ試験の手順」を作成した。これらの文書では、主にCNTに関して、安全性・有害性評価及び暴露評価結果を示すことにより、統一的な計測方法及び安全管理方法の確立を目指した。

今後グラフェンに関しても同様のリスク評価を行い、安全指針や評価基準の策定を行っていく必要がある。

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## 3章 ナノカーボン材料分野の技術課題

### 3-1 単層CNT

単層CNTについて、技術課題及びロードマップが示された例を図30に示す。

単層CNTにおいては、商業プラントが立ち上がり始めた段階であるため、現状ではまだ高コストであるが、用途先の拡大に伴って材料としての普及が進めば、量産効果によりおよそ1万円/kgになると見

込まれている。ただし、単層CNTの品質を向上させるためには、技術的なブレイクスルーが必要である。例えば、炭素繊維補強材料としては力学的特性の改善、CNT配線としては繊維化技術、基幹素材（電子デバイス等）としては高結晶化技術の確立等である。これらの技術課題が解決できれば、2030年以降には高品質な単層CNTが数千円/kgとなると予測されている。その結果、単層CNTはあらゆるところで用いられる基幹材料として、国内産業の下支えになることが期待できる。したがって、単層CNTについては各用途先への利用に繋がる応用技術開発を強力に推進し、低コスト化と高品質化を加速させることが望ましい。

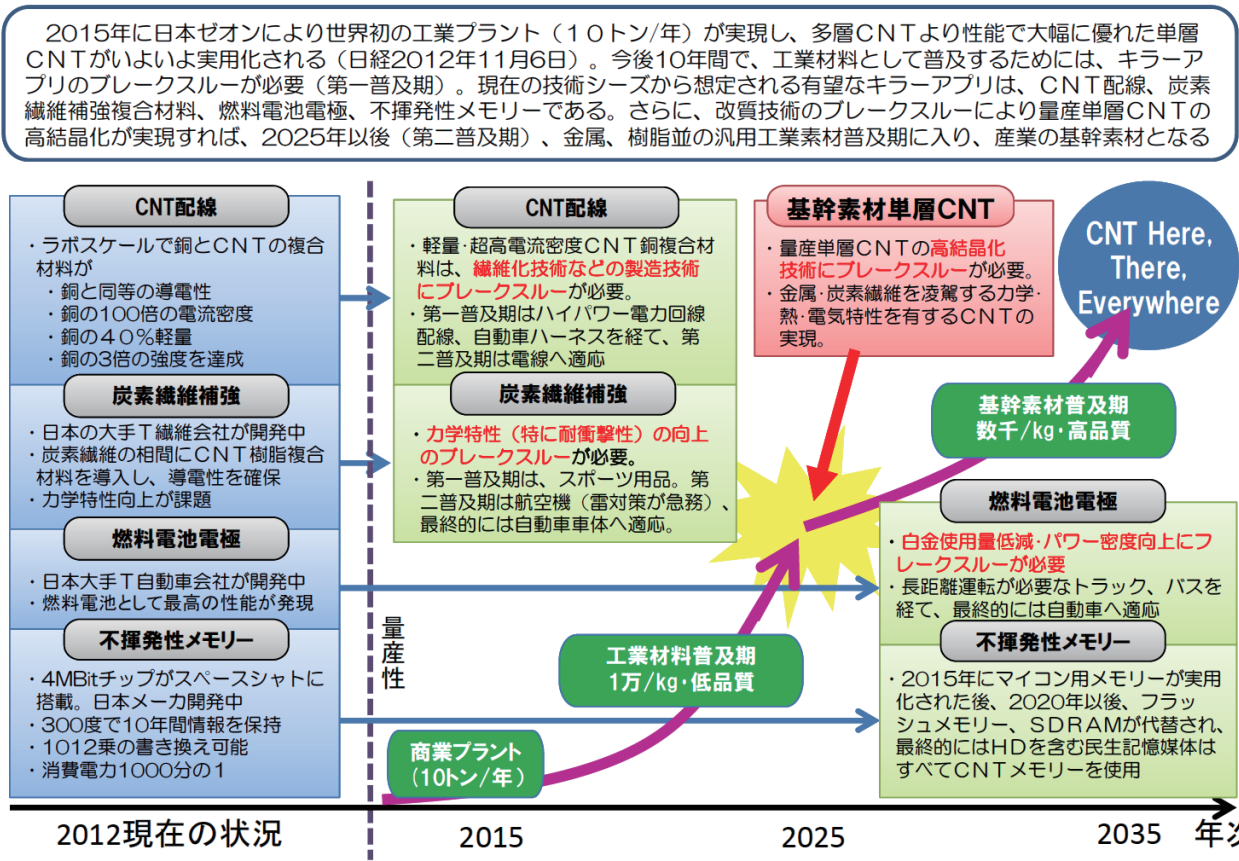


図30 単層CNTの本格的普及期から産業の基幹素材へのロードマップ

出所：平成24年 総合科学技術会議 科学技術イノベーション政策推進専門調査会 ナノテクノロジー・材料共通基盤技術 検討ワーキンググループ（第8回） 参考資料1



# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

## 3-2 グラフェン

グラフェンについて、技術課題及びロードマップが示された例を図31に示す。グラフェンにおいては、薄膜合成による原子層グラフェンと、バルクから焼成する剥離グラフェンとでその製造方法が大きく異なるため、その技術課題も大きく異なる。原子層グラフェンは、面状の薄膜として用いられるため、電子デバイスなどの製造プロセス技術が適用できる用途が適していると考えられる。剥離グラフェンはその形状から、CNTと同様な分散、異種材料複合化による利用が主となる。

図31のロードマップでは、主に原子層グラフェンに関する用途先と技術課題が述べられている。

原子層グラフェンに関する技術課題としては主に、成膜方法（高品質化）、加工・修飾方法、ヘテロ構造形成方法が挙げられている。用途としては主に、透明電極、トランジスタ・テラヘルツデバイス、センサーが挙げられている。グラフェン材料によりこれらの電子デバイスが高性能化することで、従来のシリコンデバイスの代替だけでなく、新たなデバイス市場が創出される可能性もある。

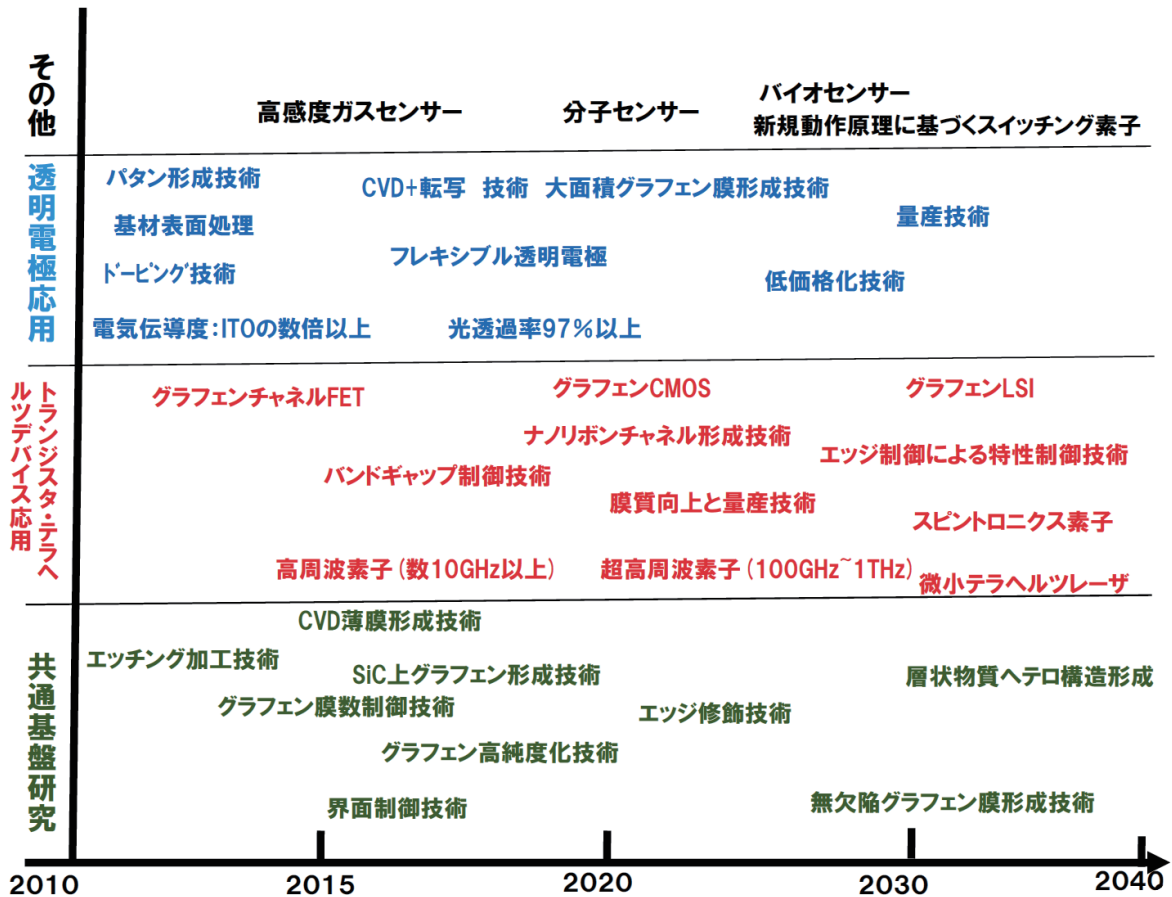


図31 グラフェン応用開発ロードマップ

出所:平成24年 総合科学技術会議 科学技術イノベーション政策推進専門調査会 ナノテクノロジー・材料共通基盤技術 検討ワーキンググループ (第8回) 参考資料2より抜粋

# ナノカーボン材料分野の技術戦略策定に向けて

グラフェンのもつ二次元形状と非常に優れた物性を産業化へと繋げるためには、用途先ごとに異なるブレイクスルーが必要となる。グラフェンの結晶サイズと原子層数を座標軸として、応用が期待される各用途先をプロットしたものが図32である。この中で市場への波及効果が最も大きいと推定される透明電極、センサ、フォトニクス、スピントロニクスなどのデバイス関連分野では、幅広い結晶サイズの数原子層グラフェンを合成する技術が必要である。

また、透明電極の製品で必要となる導電膜の各用途における、価格と性能（電気特性）についての到達目標をKPI (Key Performance Indicator) として指数化した図33に示すように、グラフェンを基幹材料として実用化するためには、量産化技術及び高結晶化技術のブレイクスルーにより、現状よりも2～3桁のコストダウンと性能向上が必要となることわかる。

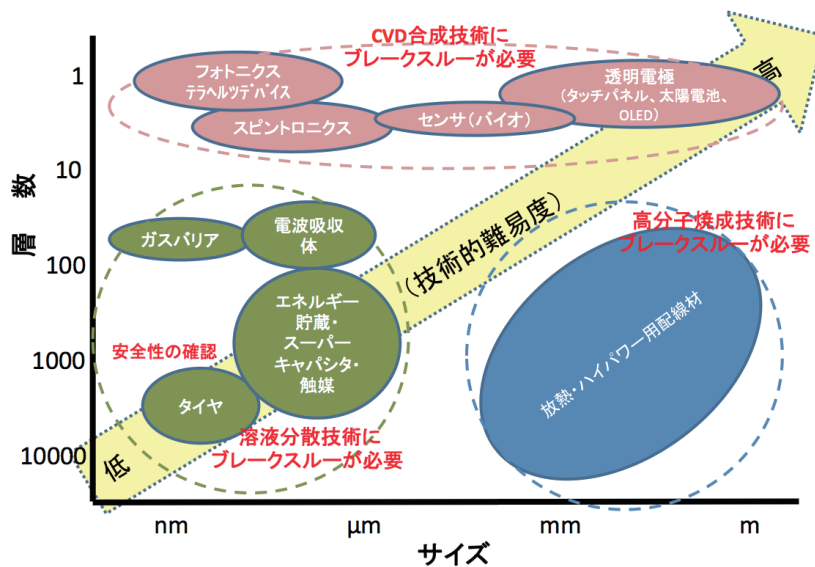


図32 各用途先に求められるグラフェンのサイズと層数及びブレイクスルー要素  
 出所:平成24年 総合科学技術会議 科学技術イノベーション政策推進専門調査会ナノテクノロジー・材料共通基盤技術 検討ワーキンググループ (第8回) 参考資料1を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2014)

- 理論的性能達成には、**高結晶化技術**にブレイクスルーが必要。(金属・炭素材料を凌駕する力学・熱・電気特性)
- 基幹材料化には、**量産化技術**にブレイクスルーが必要。(価格を一万分の一)

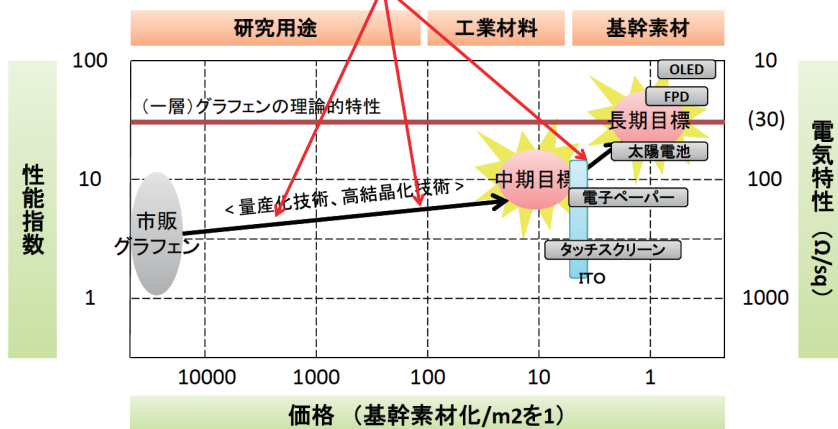


図33 グラフェンの導電膜利用におけるKPI  
 出所:平成24年 総合科学技術会議 科学技術イノベーション政策推進専門調査会ナノテクノロジー・材料共通基盤技術 検討ワーキンググループ (第8回) 参考資料1より抜粋

## 4章 おわりに

これまで述べてきたように、単層CNTの製造に関して我が国は世界トップレベルの技術力を保持している。例えば、eDIPS法やスーパーグロース法(SG法)など、優れた技術による工業的量産が開始されつつある。今後はその優位性を拡大していくために、低コスト化、高品質化などの合成技術の課題解決を進めるとともに、これらを応用開発に生かし、製品の実用化を推進していく必要がある。

グラフェンにおいても、我が国の世界的な学術研究レベルは非常に高いが、EUや他の諸外国に比べ研究開発投資が少ない環境にある。今後、グラフェン産業を牽引していくためには、技術課題を俯瞰した上で、日本の優位性を調査、抽出、分析し、効率的な資本投下を行い、諸外国を上回る研究成果を生み出していくことが必要である。具体的には、現在の主な技術課題として挙げられる高品質膜合成技術におけるブレイクスルーを生み出すとともに、用途先開発の推進が必要である。