

**【課題名】グラフェンの合成技術開発とエネルギーデバイスへの応用によるCO<sub>2</sub>削減への貢献(委託and補助)**

**【代表者】岡山大学 異分野融合先端研究コア 仁科勇太**

**【実施年度】平成29～31年度**

**(1)課題概要**

**①【課題の概要・目的】**

グラフェンでカーボンブラックを代替することによるCO<sub>2</sub>排出削減(年間24万トン)と、グラフェンの社会実装によるCO<sub>2</sub>削減(860万トン以上)の検討を同時に進め、グラフェンの社会実装による大幅なCO<sub>2</sub>削減を実現する。

**②【技術開発の内容】**

○重要な開発要素

A1	黒鉛をグラフェン化する条件の確立	必要最低限の酸化剤と還元剤を用いて、高性能(電気伝導率>2,000S/m)のグラフェンを得る。
A2	グラフェンのリチウムイオン電池材料への応用	本技術開発・実証事業で量産化するグラフェンを用いて、700mAh/gの容量を達成する。
A3	グラフェンのタイヤへの応用	タイヤにグラフェンを混合し、カーボンブラックと同等以上のグリップ性や摩擦性を有することを確認する。
A4	グラフェンの潤滑添加剤への応用	軸受けに用いるグリースにグラフェンを加えることで、摩擦係数を0.07以下にする。

B,C: 開発要素のシステム統合と、その実証

用途別に、企業と協力して、システム統合および実証を進める。

**【リチウムイオン電池】**

電池メーカーと共に平成31年度に大型セルの試作を行う。技術的に試作が可能であることは確認済みであり、企業連携して電池の実証を行っている段階である。

**【潤滑添加剤】**

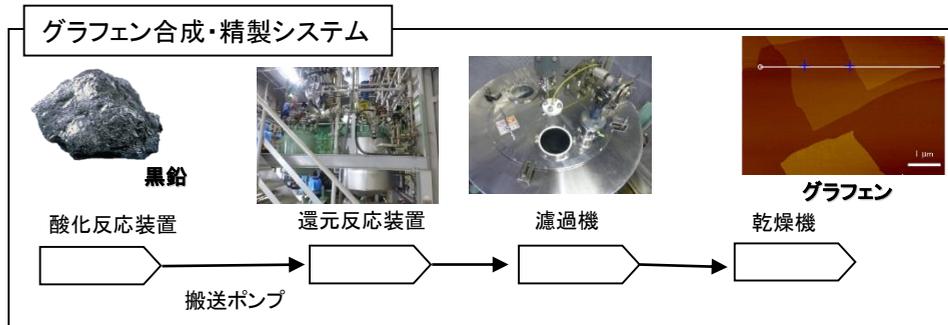
潤滑剤メーカーと共に平成31年度にグリースの試作を行う。そのグリースを実機に搭載して試験評価が可能かどうか、自動車メーカーと交渉中。

**【タイヤ】**

タイヤメーカーと共に平成31年度にタイヤの試作・評価を行う。

各用途で用いるグラフェンは、日本触媒が量産したのものを用いる。リチウムイオン電池には100g、グリースには500g、タイヤには5kgが必要であるが、対応可能である。

**③【システム構成】**



**④【技術開発の目標・リスク】**

○想定ユーザ・利用価値: 電気自動車メーカー。高機能化による電気自動車普及促進。  
 ○目標となる仕様及び性能: カーボンブラックの50%をグラフェンで代替し、電気自動車部材(リチウムイオン電池, 潤滑添加剤, タイヤ)を開発することで、CO<sub>2</sub>排出を700万トン/年以上抑制する。

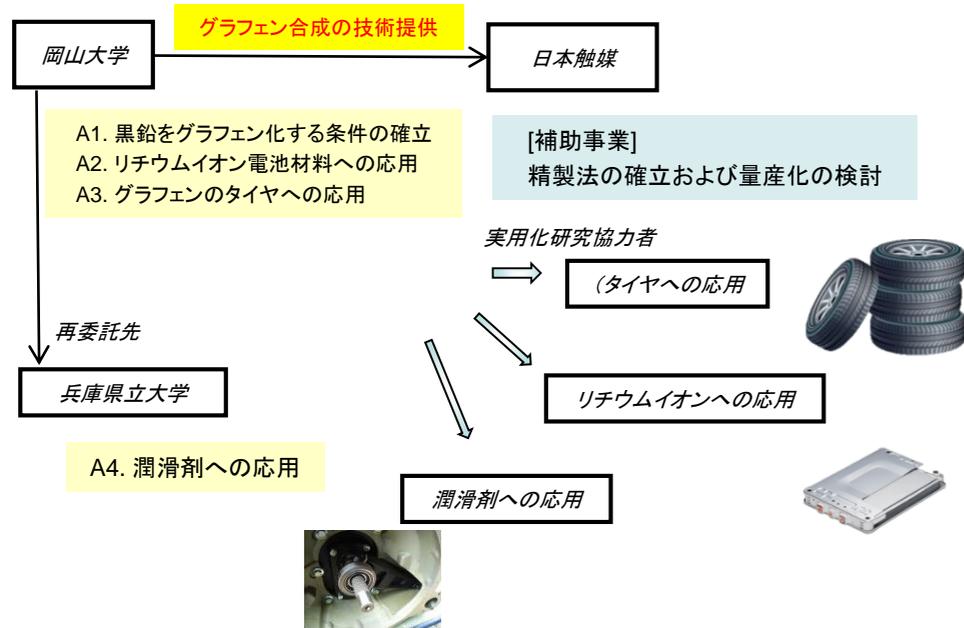
○開発工程のリスク・対応策:

- ・グラフェンのコストが高く、合成法に革新が必要
- ・用途によって求められるグラフェンの質が異なるため、複数のラインナップが必要
- ・ナノ材料のため、生体安全性を考慮する必要がある

## (2)実施計画等

### ①【実施体制】

技術開発代表者



### ②【実施スケジュール】

		2017年度	2018年度	2019年度
A1. 黒鉛をグラフェン化する条件の確立	①各スペックのグラフェン製造	17,980千円 ← 11,000千円	20,000千円 11,000千円	20,000千円(補助) 11,000千円 →
	②セル組み、充放電試験	← 5,000千円	7,000千円	5,000千円 →
A2. グラフェンのリチウムイオン電池材料への応用	①グラフェン複合体の作製	← 3,000千円	4,000千円	3,000千円 →
	②大型セル試作			← 5,520千円 →
	③グリースへの添加		← 5,000千円	5,000千円 →
A3. グラフェンのタイヤへの応用	①グラフェンの親油化	← 3,500千円	6,000千円	3,000千円 →
	②ゴムへの添加、強度試験	← 5,000千円	6,000千円	6,000千円 →
	③タイヤの試作			← 2,000千円 →
A4. グラフェンの潤滑添加剤への応用	①グラフェンの親油化	← 3,000千円	6,000千円	2,000千円 →
	②グリースへの添加		← 5,000千円	5,000千円 →
	③グリースの試作			← 2,000千円 →
合計(千円)		49,480	65,000	64,520

### ③【事業化・普及の見込み】

#### ○事業化計画

事業化を担う主たる事業者	日本触媒
--------------	------

- ・2020年：システム全体の低コスト化、高効率化及び性能の実証。
- ・2022年：協力企業による商品生産・販売開始。
- ・2030年：カーボンブラックの30%をグラフェンで代替。  
合成と用途において700万トン以上のCO<sub>2</sub>削減効果を得る。

#### ○事業展開における普及の見込み

- ・自社生産段階コスト目標：5万円/kg(2025年)、1万円/kg(2030年)
- ・自社生産段階単純償却年：5年程度(新規プラントの建設費)

#### ○年度別販売見込み

##### 【提案時当初計画】

年度	2022	2025	2030
グラフェンの目標販売量(t)	5万t	10万t	30万t
目標販売価格(円/kg)	10万円	5万円	1万円

##### 【現時点見込み】

年度	2020	2022	2030	2050
グラフェンの目標販売量(t)	5t	5万t	30万t	70万t
目標販売価格(円/kg)	50万円	10万円	1万円	1万円

#### ○普及におけるリスク(課題・障害)

- ・グラフェンのコストが未だ高く、量産化や合成法に革新が必要。2020年になってから、革新的な方法を発見し、低コスト化の見通しが既に立った。この方法で作製したグラフェンの性能評価を進め、これまでと同等の性能を発揮することを早急に確認しなければならない。
- ・用途によって求められるグラフェンの質が異なり、その都度最適化が必要。
- ・メーカーからは長期安定性(～20年)の評価を求められており、実用化と並行して実施しなければならない。

### (3)技術開発成果

#### ①【これまでの成果】

- [A1]・数十万円/kgでの酸化グラフェンの大量合成に成功。  
・kgスケールでの酸化グラフェン合成法の確立。
- [A2]・大量合成したグラフェンを用いて700 mAh/gの容量を達成。  
・シリコンと複合化することにより1300 mAh/g以上の容量を達成し、サイクル特性の向上にも成功。  
・フルセルとラミネートセルを製し、評価。
- [A3]・タイヤに適したグラフェンの化学修飾法を見出した。  
・上記材料の大量合成法開発、カーボンブラックを超える引張強度達成。  
・協力企業に材料を提供し、実際にタイヤを試作。
- [A4]・潤滑油に適した酸化グラフェンの疎水化成功、摩擦係数0.07以下達成。

#### ②【エネルギー起源CO<sub>2</sub>削減効果】

##### 【提案時当初計画】

開発品搭載の電気自動車による単年度CO <sub>2</sub> 削減量 (t-CO <sub>2</sub> /年・台)	7.6			
車載用電池の法定耐用年数	6年			
年度	2020	2025	2030	2050
単年度CO <sub>2</sub> 削減量 (万t-CO <sub>2</sub> /年)	0	37	110	144
累積CO <sub>2</sub> 削減量 (万t-CO <sub>2</sub> )	0	37	618	2354
CO <sub>2</sub> 削減コスト (円/t-CO <sub>2</sub> )	-	677,500	677,500	677,500

##### 【現時点見込み】

リチウムイオン電池搭載車による単年度CO <sub>2</sub> 削減量 (t-CO <sub>2</sub> /年)	7.6			
車載用電池の法定耐用年数	6年			
年度	2020	2022	2030	2050
単年度CO <sub>2</sub> 削減量 (万t-CO <sub>2</sub> /年)	7.6	38.2	158	459
累積CO <sub>2</sub> 削減量 (万t-CO <sub>2</sub> )	7.6	68.8	912	5483
CO <sub>2</sub> 削減コスト (円/t-CO <sub>2</sub> )	677,500	677,500	677,500	677,500

#### ③【成果発表状況】

研究の取り組みについて、代表的なものを以下にあげる。

岡山大学

1. “Optimization, Mass-production and Application of Carbon Nanosheets” EU-JAPANグラフェンアプリシンポジウム (2018年11月22日, 東京都千代田区)
2. “溶液中で造る2次元ナノシートとその用途開拓” 2019年度 第2回プリンテッドエレクトロニクス研究会 (2019年7月19日, 大阪府大阪市)

兵庫県立大学

3. “酸化グラフェンと木材由来酸化ナノカーボンの潤滑添加剤としての展開” 第121回黒鉛化合物研究会 (2017年5月18日, 大阪) 他多数。

#### ④【技術開発終了後の事業展開】

##### ○量産化・販売計画

- ・2020年：システム全体の低コスト化、高効率化及び性能の実証。
- ・2022年：協力企業による商品生産・販売開始。
- ・2030年：カーボンブラックの30%をグラフェンで代替。

##### ○事業拡大シナリオ

年度	2020	2022	2025	2030 (最終目標)
酸化グラフェンの大量合成	システムの低コスト化	協力企業による生産販売開始	生産量増加によるさらなる低コスト化	販売量30万t 1万円/kg 達成
リチウムイオン電池	フルセル・ラミネートセルによる評価	材料の最適化による高容量化と長期安定性実現	車載用への実用化実現	674万台普及による620(万t-CO <sub>2</sub> /年)削減
タイヤ	タイヤ作製による評価	実際の車への利用テスト	協力企業による生産販売開始	カーボンブラックの30%代替
潤滑添加剤	試作品の作製	協力企業による生産販売開始	低価格化の実現による5%シェアの獲得	ガソリン車やその他分野にも応用し、幅広くCO <sub>2</sub> 削減に貢献する

##### ○シナリオ実現上の課題

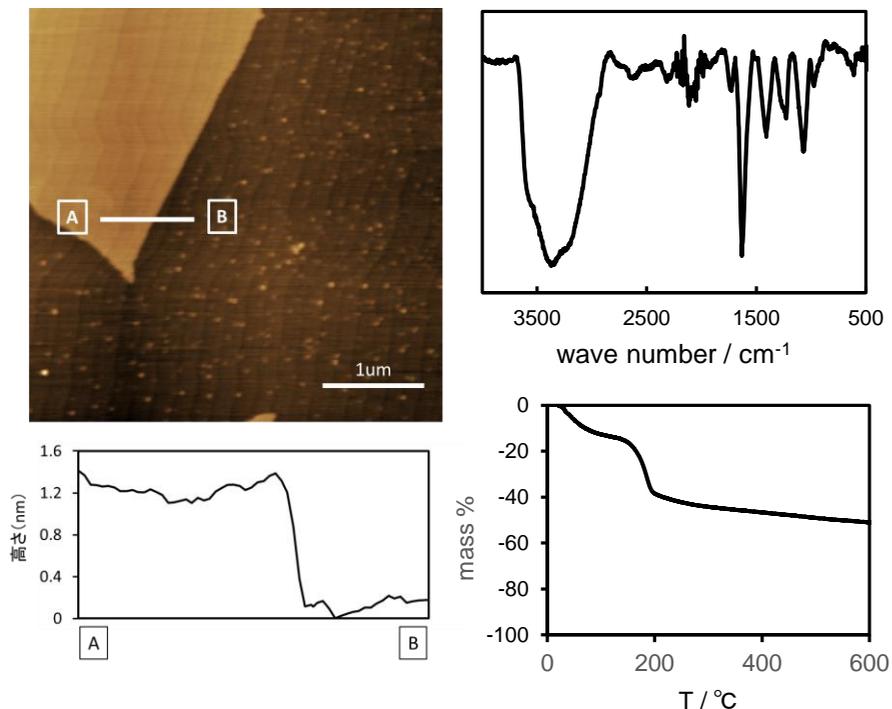
- ・本課題での実証により、グラフェンの製造コストが大きく下がったが、未だに高く、合成法・精製法にさらなる改良が求められる。
- ・それぞれの応用に関して、グラフェンの修飾等が必要であり、その修飾法も含めた大量合成法の最適化が必要となる。

## ○参考資料1 補助業務実施者との協力体制

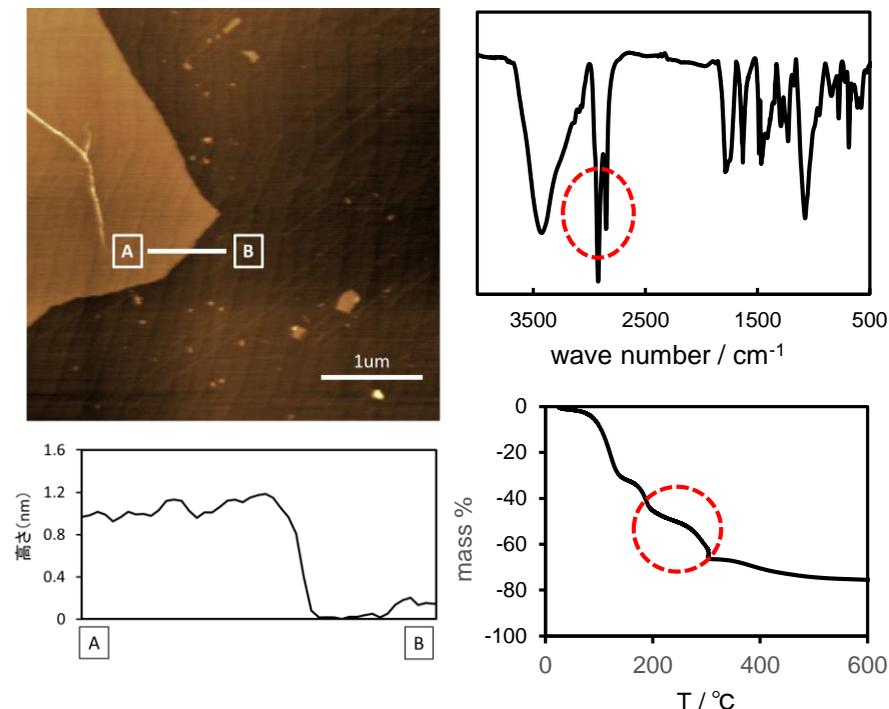
・日本触媒が新たな精製プロセスを適用したベンチプラントで酸化グラフェンの製造を行った。従来は不可能であった濾過による精製が可能になり、大きな低コスト化につながる。この酸化グラフェンの構造は従来の酸化グラフェンに似ているが、疎水性が高いなど、物性に違いがある。疎水性は、ゴムやグリースに添加する際には好ましい。

・岡山大学では、さらに効率的なグラフェン作製方法の開発を検討している。この方法が実施可能かどうかについては、2～3か月に1度、岡山大学と日本触媒の間のクローズドなミーティングを開催した。日本触媒から各工程の担当者4名が参加し、コスト・安全性・量産化に関して毎回3～4時間議論した。

【従来の酸化グラフェン(岡山大作)】



【量産型酸化グラフェン(日本触媒作)】



## ○参考資料2 事業化について

本事業によって、これまで数千万円/kgであった酸化グラフェンの製造コストを50万円/kgに下げることが可能になった。リチウムイオン電池やゴムへの混練、潤滑油への添加といった用途においては、完全に単層のグラフェンが必要でないと想定しており、さらなるコストの低減が可能という目途も立っている。これにより、グラフェンを実用化できる可能性が出てきた。以下では、本事業で行った、リチウムイオン電池、タイヤ用ゴム、潤滑添加剤の応用ごとに現状のコストとグラフェンを使用した場合のコストを比較し、社会実装可能性について考察する。

### リチウムイオン電池

現在リチウムイオン電池の負極に使用されているグラファイトのコストは300-1800円/kgである[1](1ドル=100円のレートで計算)。グラフェンの価格は、今後大量生産が可能になれば1万円/kgまで減少させることは可能と想定される。リチウムイオン電池のコスト全体に対して、負極活物質の占める割合は13%[2]である。本事業によって、単位質量当たりの電池容量を2倍以上にすることに成功している。そのため、既存のリチウムイオン電池の負極活物質をグラフェン類で置き換えた場合のリチウムイオン電池の価格は、グラフェンのコストをグラファイトの10倍(15,000円~18,000円)とすると、

$$10 \times (13 \div 2) + 0.87 = 1.52$$

となり1.5倍程度ということになる。この計算は、負極活物質以外の材料は同一量使用すると仮定している。しかし、単位質量あたりの容量が大きいグラフェン類に置き換えることで、他の部材の量も削減可能であると考えられ、グラファイトを代替することの可能性に期待している。

[1] 平成29年度鉱物資源開発の推進のための探査等事業

鉱物資源基盤整備調査事業(鉱物資源確保戦略策定に係る基礎調査)報告書

株式会社三菱総研研究所[https://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/H29FY/000278.pdf](https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H29FY/000278.pdf)

[2] 電気自動車(EV)・天然ガス自動車普及の課題、燃料需給への影響 JOGMEC

[https://oilgas-info.jogmec.go.jp/\\_res/projects/default\\_project/\\_project\\_/pdf/8/8085/180125\\_b\\_d\\_j\\_EV.pdf](https://oilgas-info.jogmec.go.jp/_res/projects/default_project/_project_/pdf/8/8085/180125_b_d_j_EV.pdf)

### タイヤ用ゴム

ゴムに添加されているカーボンブラックの価格は100円/kg程度であり、グラフェンのコストが想定通り低下したとしてもそのまま代替することは困難である。しかし、本事業によって明らかになったように、グラフェンを混練することで強度が最高40%向上し、摩耗性能も向上することが確認された。これにより、高強度・長寿命のタイヤの作製が可能になる。また、グラフェンを添加したタイヤでは、燃費性能指標が向上するという結果も得られている。その結果、価格競争的には不利であったとしても、一定数存在する高強度や長寿命の高機能タイヤにおけるシェアを獲得できると想定される。

### 潤滑油

現在、潤滑油の市場価格は数千円/Lである。本事業によって、1 wt%程度のグラフェンを添加することで、十分な性能向上が可能であることがわかっている。つまり、1 Lあたりに添加するグラフェンの重量は10 g程度である。上述したように、将来的にはグラフェンの生産コストは1万円/kgまで下がる見通しである。そのため、グラフェンを添加することによるコストの上昇は、潤滑油1 Lあたり100円、つまり10%以下の価格上昇で性能向上が見込め、価格競争力はあると考えている。

## ○参考資料3 補助事業の実施状況

年度	目標	技術開発内容
2017年度	濾過・遠心分離・遠心濾過・デカンテーション等の方法から、実用化時に採用可能な精製法を決定する。 また、実用化時に採用可能な分散(剥離)装置を決定する	各精製方法の実験検討や調査を行い、精製の効率(時間や廃液量)等を比較する。 各種分散装置を用いた実験検討および試作(数kg/バッチ)を行う。
2018年度	精製工程に掛かる時間を従来の2/3以下まで抑制し、製造コストを50万円/kg以下に低減できるプロセスを確立する。	実験検討によって生成の条件を最適化し、試作(数kg/バッチ)を実施して最適化した条件の実証を行う。
2019年度	量産化に適した精製方法・条件を決定し、100kg/バッチ以上のグラフェンを合成可能なプロセスを決定する。	実験検討による精製方法・条件のさらなる最適化(高効率化)を行ったうえで試作(~100kg/バッチ)の実施により、精製法と技術開発項目1(注:黒鉛をグラフェン化する条件の確立)で決定された条件を実証する。
最終目標	製造コストを抑え、収量を高め、導電性に優れたグラフェンを得る方法を開発する。目標は1万円/kg以下とする。	

- ・2017年度目標の精製法決定、および分散(剥離)装置決定は、いずれも達成できた。当該年度の技術開発内容もすべて実施することができた。
- ・2018年度目標の精製時間短縮および製造コスト50万円/kg以下も達成できた。当該年度の技術開発内容に記載の事項も実施できた。2018年度には、当初予定にはなかった溶剤分散型の開発にも成功しており、当初想定したよりも大きな成果をあげることができた。
- ・2019年度目標の量産化プロセスの決定も達成できたと考える。当該年度の技術開発内容記載の100kg/バッチスケールでの試作は、検討を進める途中で新規設備の建設が必要と判明したため実施するには至らなかったが、設備建設には多額の費用と数年の期間が必要になるため、やむを得ないことである。試作実施の代わりに、研究部門で設計したプロセスをもとに、生産技術部門、設備設計部門、生産部門等の製造設備建設関連の諸部門にも参画してもらい、綿密な設備設計と生産効率検討を実施した。また営業部門、企画開発部門、物流部門を含めた検討で、物流や価格面を含めた実現可能性の検討を行い、これらの面からも実現可能であることを確認できた。以上の状況より、100kg/バッチスケールでの試作実施には至らなかったものの、2019年度目標の量産化プロセス決定は達成できた。
- ・本事業終了後の最終目標について、達成状況を述べる。前段の「製造コストを抑え、収量を高め、導電性に優れたグラフェンを得る方法を開発」については、前段で報告した通り、実証はまだであるものの原理的には達成済みである。後段の「1万円/kg以下」の目標については、現時点では達成できていない。あと一段のブレイクスルーを達成し、最終目標の1万円/kgを目指した研究開発を継続する。

# CO<sub>2</sub>排出削減対策技術評価委員会による終了課題事後評価の結果

## ・ 評価点 6.2 点 (10点満点中)

## ・ 評価コメント

### 【評価される点】

- kgスケールでのグラフェンの大量合成に成功し、生成条件の最適化によって製造コストも100万円/kgから数万円/kg程度を見通せるところまで低減できたことは評価できる。
- 3種の利用方法(リチウムイオン電池、自動車用タイヤ、潤滑グリース)における試作品を作成し、リチウムイオン電池の高容量化やカーボンブラック添加のゴムを超える引張強度の達成等の所期の技術開発目標を達成した点は評価できる。
- リチウムイオン電池やタイヤ等へのグラフェンの適用が本格的に進めば、石油・石炭系原料のカーボンブラックを代替でき、社会全体での大幅なCO<sub>2</sub>削減効果が見込まれる点は評価できる。

### 【今後の課題】

- 本事業を通じて一定の低コスト化は達成できたものの、最終目標である2030年度時点の製造コスト(1万円/kg)を達成するには事業規模生産における更なる低コスト化が必要である。合成法や精製法のさらなる改良、用途に応じた品質・性能の確保など、引き続き解決に向けて注力することを望む。
- グラフェンのリチウムイオン電池、タイヤ、潤滑油への添加について、実施期間においては実用化協力者の具体的な関与が低かった。実用化・社会実装に向けて量産化の目途を立てるため、早期に大量生産体制を組む事業化パートナーとの関係を獲得し、生産・販売に向けた道筋を明確化することが望まれる。

### 【その他特記事項】

- グラフェンをリチウムイオン電池に適用した場合のCO<sub>2</sub>削減量評価には、ガソリン車からEVへの転換によるCO<sub>2</sub>削減効果も含んでいるため、同じEVにおいて既存のリチウムイオン電池から本事業のグラフェン利用のリチウムイオン電池に置き換えた場合の効果で評価されるべきと思われる。また、タイヤへの適用におけるCO<sub>2</sub>削減効果の評価についてはグラフェン製造時の消費電力についても考慮すべきと思われる。