

# 多元系炭素（マルチナリーカーボン）の開発

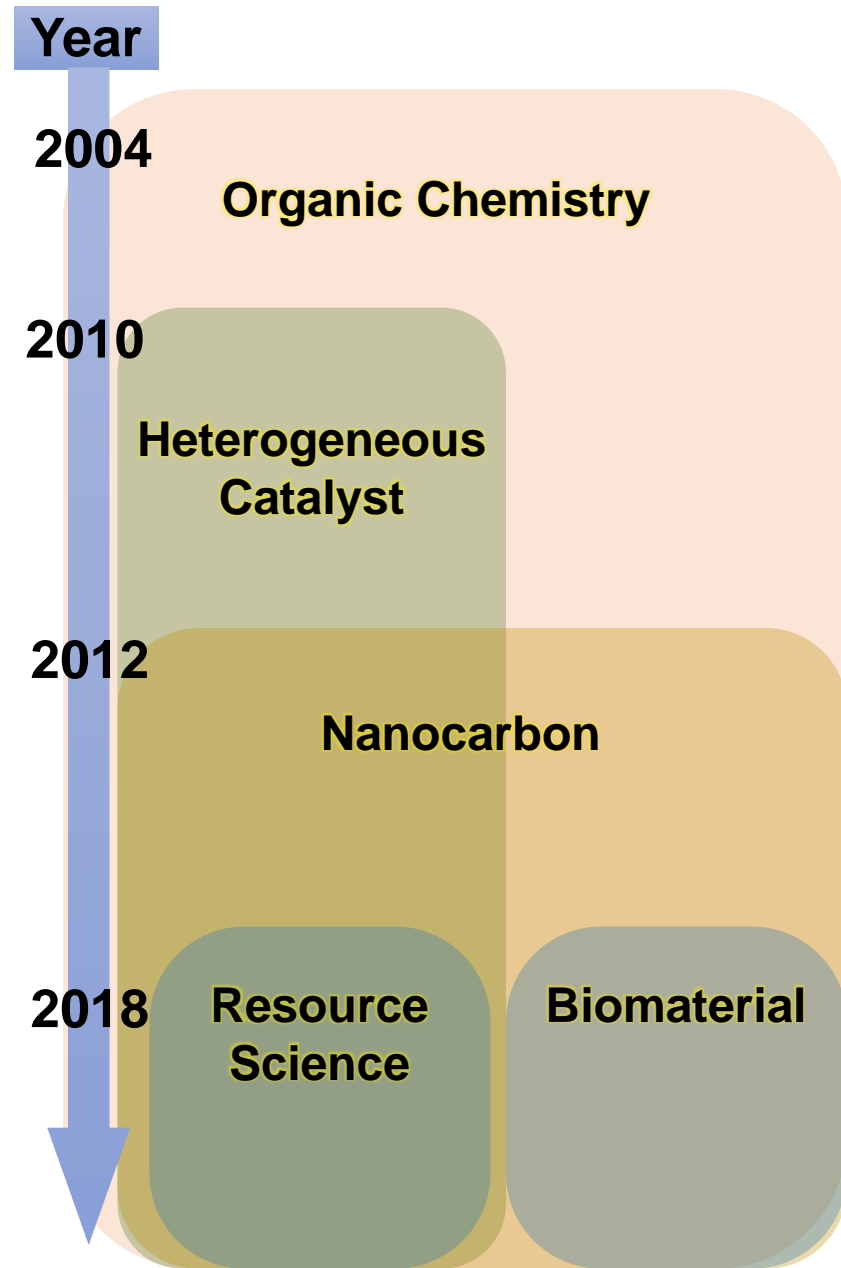
岡山大学 異分野基礎科学研究所

仁科 勇太

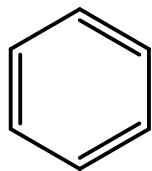
# 略歴



- 1984年 岡山県生まれ
- 2010年3月 岡山大学 博士（工学）取得  
【学位論文：有機金属錯体の合成と有機合成への応用】
- 2010年4月 岡山大学 異分野融合先端研究コア 特任助教  
【テニュアトラック，独立研究室】
- 2011年1月 フロリダ州立大学 客員研究員 兼任（～2011年2月）
- 2011年12月 南洋理工大学 客員教授 兼任（～2012年1月）
- 2012年11月 NiSiNa materials 代表取締役 兼任（～現在）
- 2013年10月 JSTさきがけ研究員 兼任（～2017年3月）
- 2014年4月 岡山大学 異分野融合先端研究コア 准教授
- 2017年4月 大阪大学産業科学研究所 招聘准教授，招聘教授 兼任
- 2018年10月 岡山大学 異分野融合先端研究コア 研究教授
- 2024年4月 岡山大学 異分野基礎科学研究所 教授
- 2025年1月 信州大学 アクア・リジェネレーション機構 特任教授



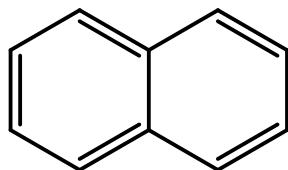
# 転換期：2012年 分子の価格のルール発見



ベンゼン

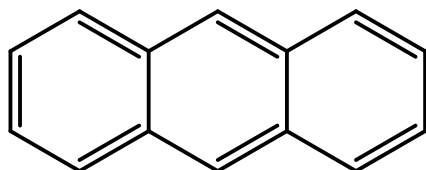
1gの価格

<¥1



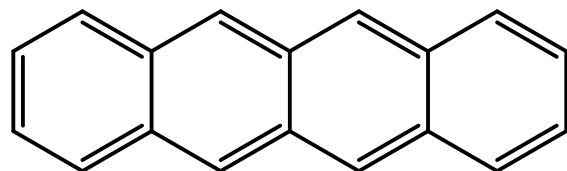
ナフタレン

¥5



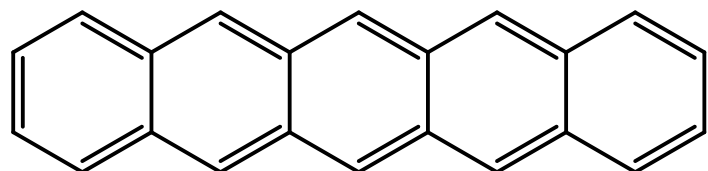
アントラセン

¥60



テトラセン

¥25,000

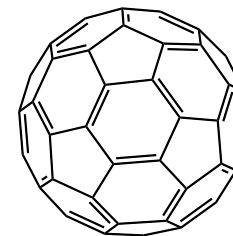


ペンタセン

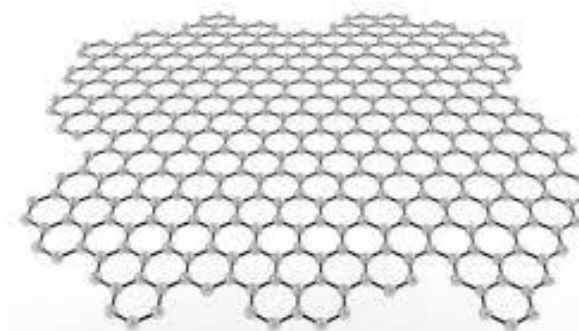
¥28,000



カーボンナノチューブ  
>¥100,000



フラーレン  
¥35,000

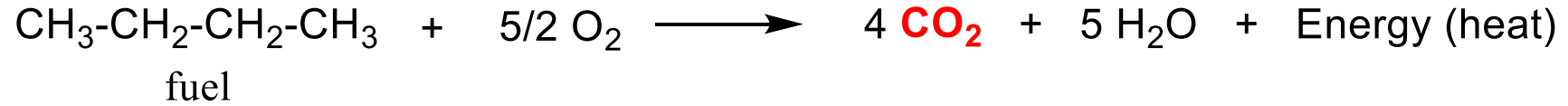


グラフェン  
>¥100,000,000

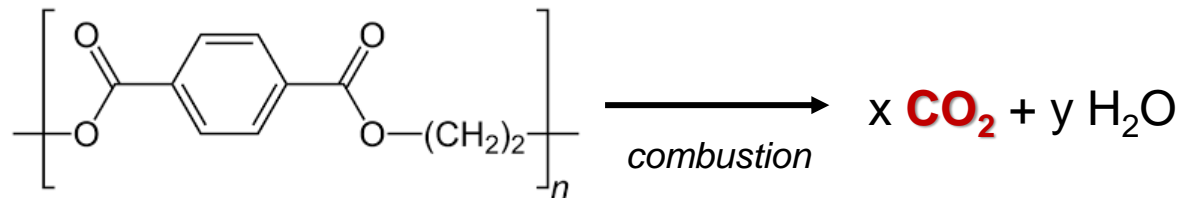
**化学の視点でカーボンの研究をしてみよう!**

# あらゆる有機物はCO<sub>2</sub>の発生源になる

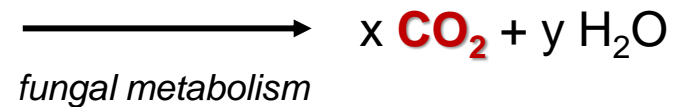
## 燃料の燃焼、火力発電



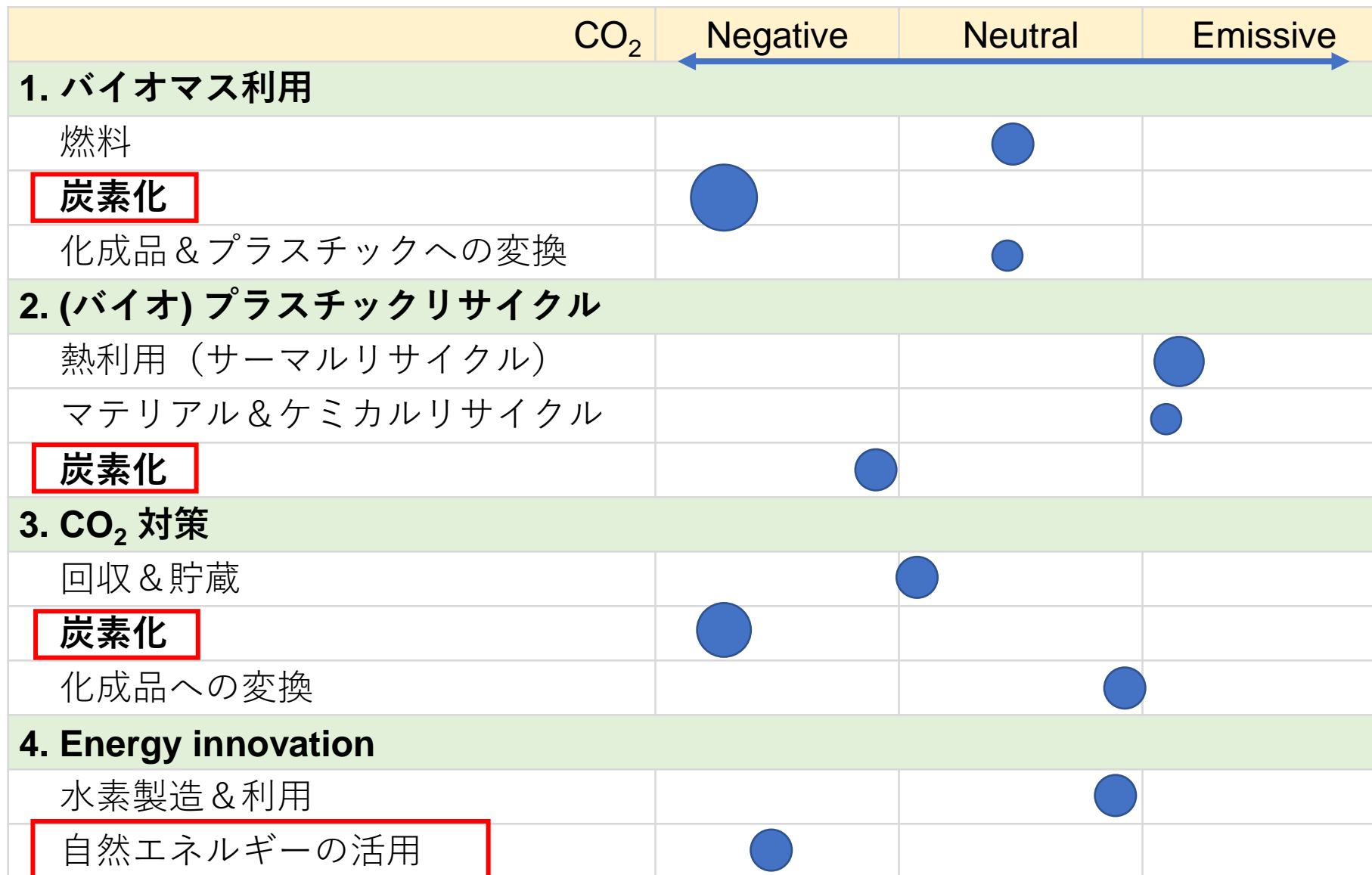
## 廃プラスチックの焼却



## 生物・植物の分解・腐敗



# CO2発生を抑制する技術



# CO2発生を抑制する技術

Organic materials + Oxygen → CO<sub>2</sub>

気体（大気中に拡散）  
温暖化効果  
安定



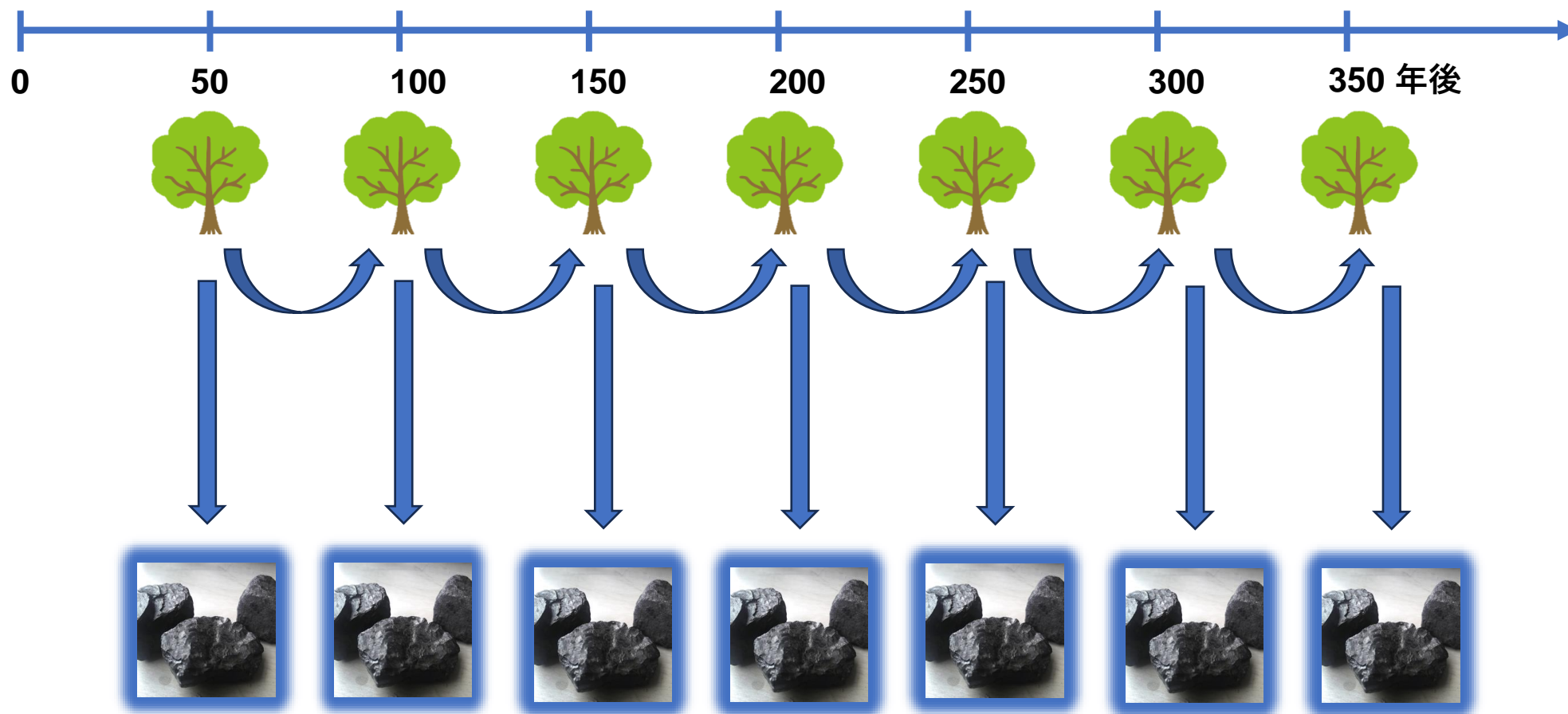
Organic materials →

C



固体（固定化）  
多機能（無限の同素体が存在）  
安定

# CO2発生を抑制する技術



炭素として固定化することで、真のCO2削減へ。

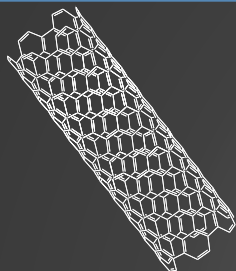
# カーボンの定義と研究の対象

0次元材料



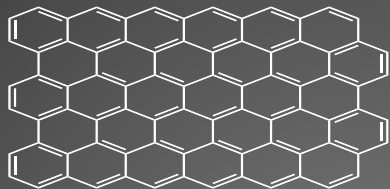
フラーレン

1次元材料



カーボン  
ナノチューブ

2次元材料

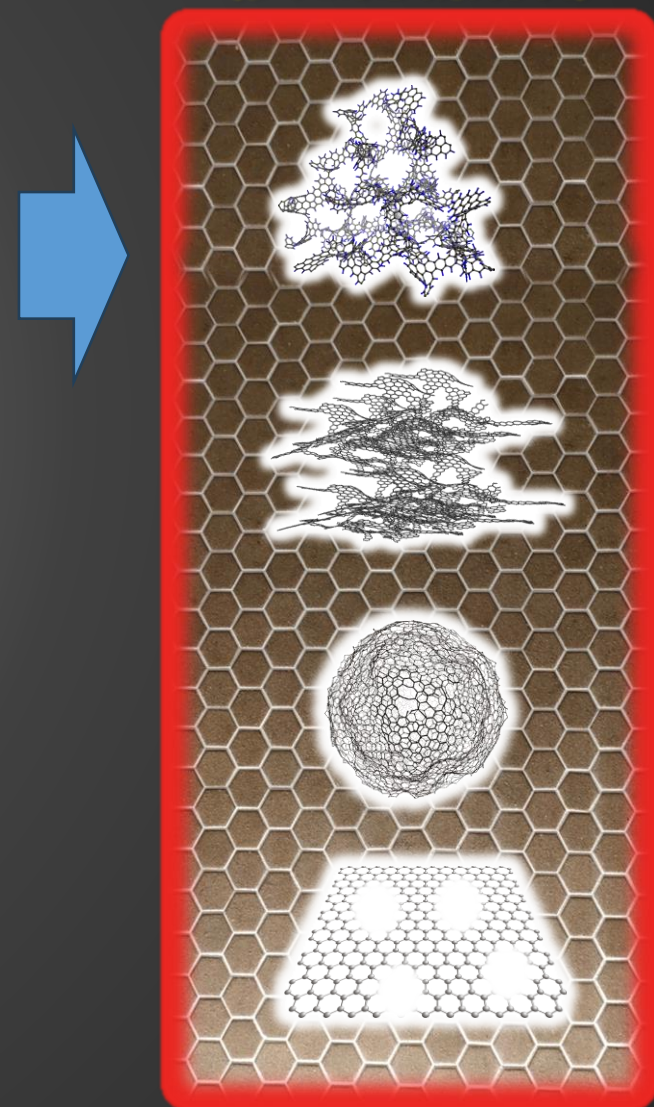


グラフェン

3次元材料

活性炭  
炭素繊維  
カーボンブラック  
黒鉛  
ダイヤモンド

従来の定義に留まらない  
“マルチナリーカーボン”  
(多元系炭素材料)



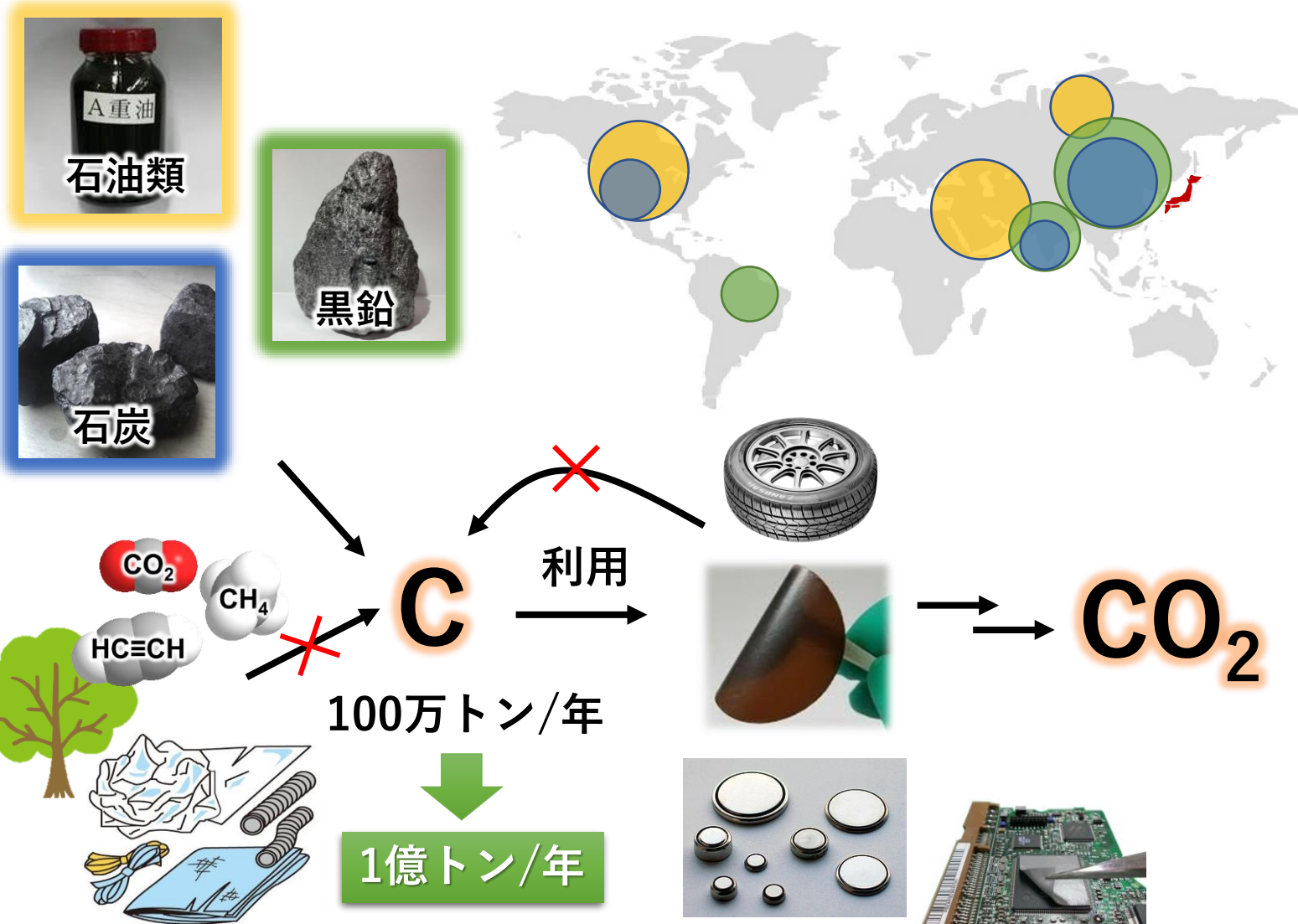
金属の代替となる可能性を秘めている

順位	導電率 (S/m)		表面積 (m <sup>2</sup> /g)		強度 (ヤング率 GPa)	
1	グラフェン	7.5 × 10 <sup>7</sup>	グラフェン	2,630	グラフェン	1,500
2	Ag	6.1 × 10 <sup>7</sup>	活性炭	1,000	ダイヤモンド	1,200
3	Au	4.5 × 10 <sup>7</sup>	ゼオライト	500	カーボン ナノチューブ	1,000



# カーボン資源について

【課題】 偏在する資源“カーボン”：国内での創製および循環プロセスが未確立



**【解決策】**  
未利用有機物から  
“カーボン”を創製

↓

- ・カーボンの国産資源化
- ・カーボン使用量の増大
- ・炭素循環プロセスの確立

# CO<sub>2</sub>削減に貢献する研究

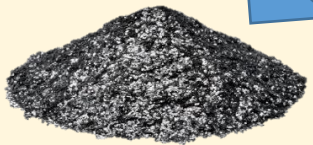
## ① カーボンブラックを代替する炭素材料の開発

CREST

### ② バイオマスの炭素化

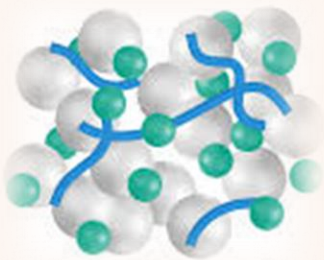


High temp.  
Microwave  
Catalyst



Crystalline carbon

導電助剤



潤滑添加剤



### ③ 有機物の炭素化



Catalytic  
carbonization



Carbon

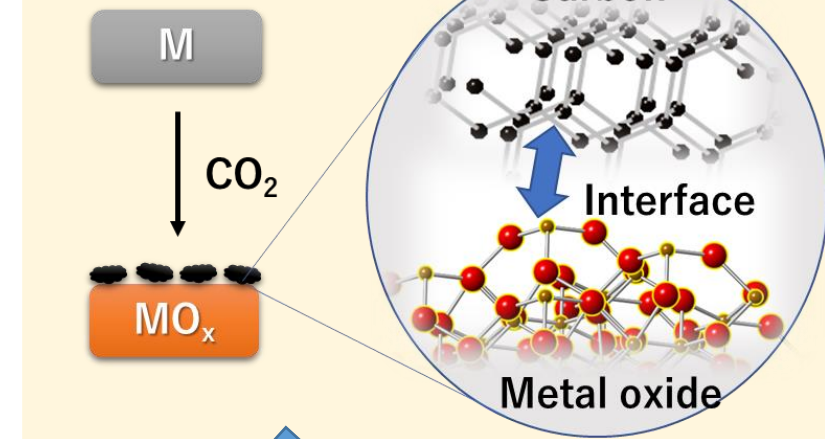
エネルギー貯蔵



科研費  
KAKENHI

NEDO

### ④ CO<sub>2</sub>の炭素化



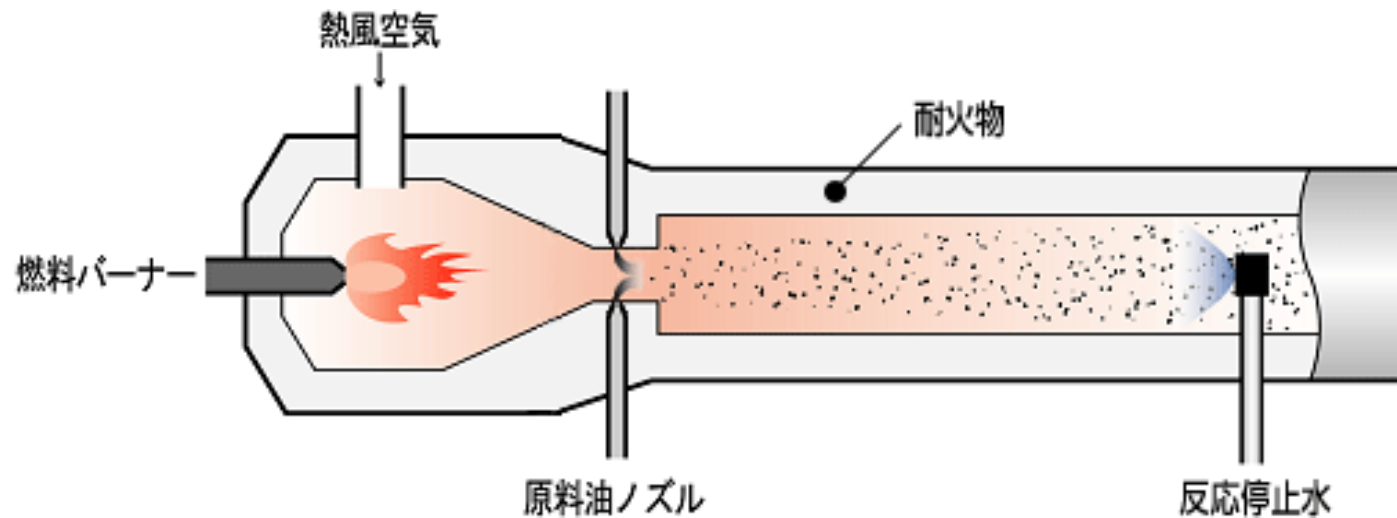
建材



水・土壌環境浄化

## ① カーボンブラックを代替する炭素材料の開発

# カーボンブラックの製法とその課題



燃料油は反応炉で完全燃焼させ高温の燃焼ガスを作り、そこへ原材料油を導入し不完全燃焼させることでカーボンブラックが作られる（60万t/年）。

**カーボンブラック1 t あたり、2.06 t のCO<sub>2</sub>を排出。**

**排出ガスには、CO・CO<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub> の合計濃度21.5wt%が含まれる。**

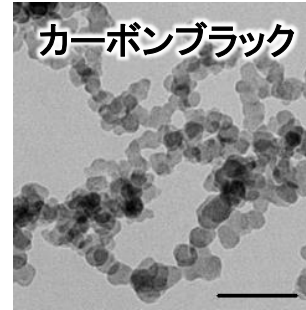
# CO<sub>2</sub>排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業

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  
(2017-2019年度)

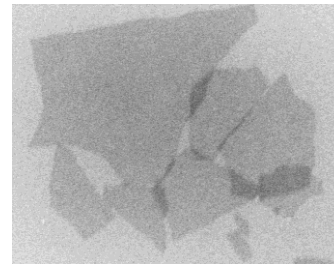
## 事業概要

### 【技術開発の概要・目的】

- ・カーボンブラックをグラフェンに代替  
⇒CO<sub>2</sub>排出削減 > 100万トン
- ・グラフェンの社会実装(電気自動車)  
⇒CO<sub>2</sub>削減 > 600万トン



カーボンブラック



グラフェン



電気自動車の普及によるCO<sub>2</sub>削減を目指す

### 本事業の対象



リチウムイオン電池



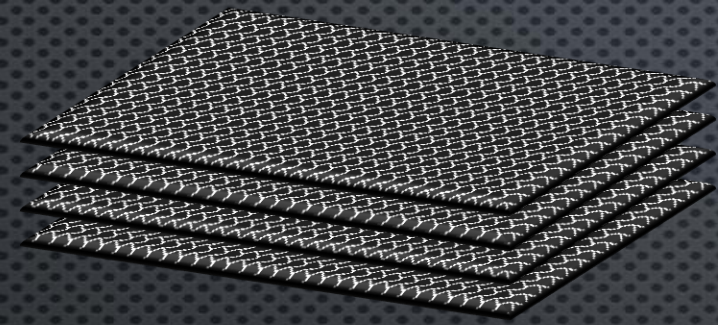
ゴム添加剤



潤滑添加剤

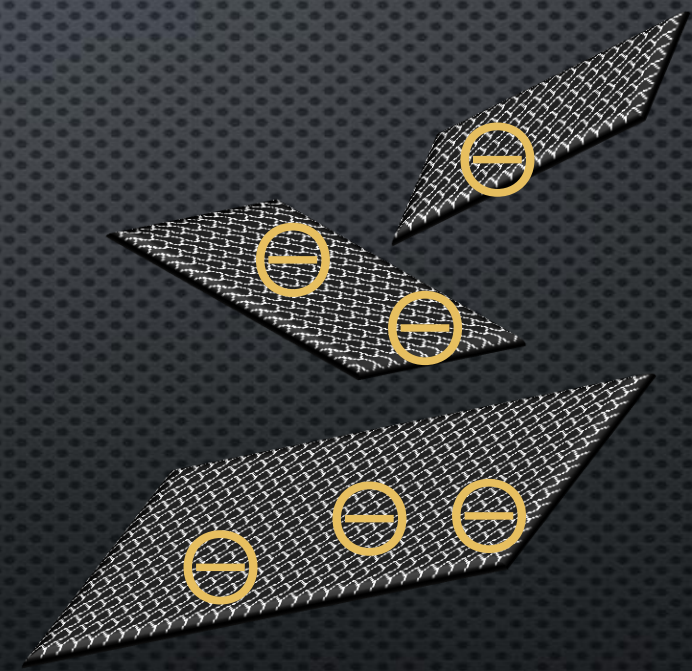
- ・グラフェンの年間生産5万トンが可能なプロセス開発(カーボンブラック:年間60万トン)
- ・リチウムイオン電池:容量を黒鉛の2倍(700 mAh/g)
- ・潤滑添加剤:摩擦係数0.07以下
- ・タイヤ:カーボンブラック同等の引張強度

# グラファイトを剥がす (CO2排出ゼロ)



黒鉛 (グラファイト)

剥離

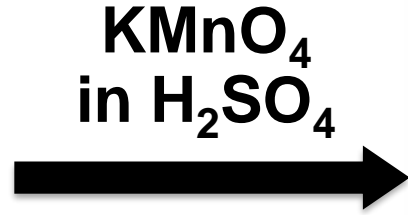


(酸化)グラフェン

- ・天然 or 人造の入手ソース
- ・安定かつ安価

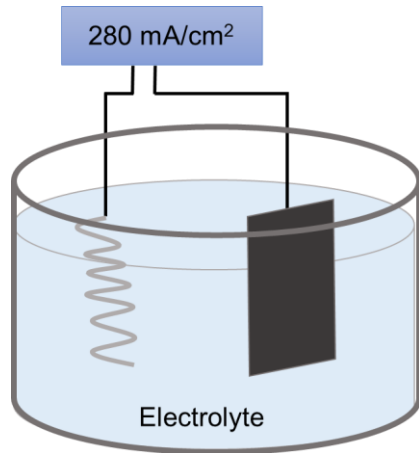
# 高効率でグラフェン類を作る

## 化学酸化・剥離



酸化グラフェン

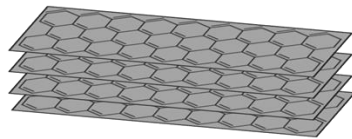
## 電気化学酸化・剥離



× 200 expansion  
→  
in  $\text{HBF}_4$ /Water



## 直接剥離



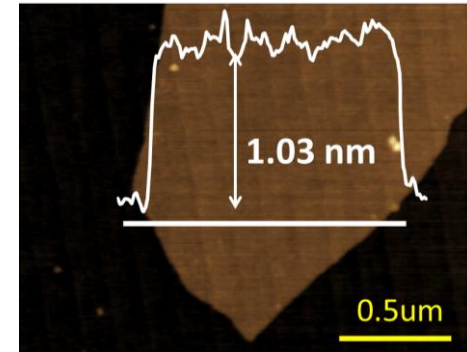
Bulk graphite



Ultrasound



dispersion



グラフェン

# 従来の酸化グラフェン製法の問題点

Hummers, et al. *J. Am. Chem. Soc.* **1958.**

3万回以上引用(ただし、ほとんどの場合一部改変されている)

黒鉛 (1g)



黒鉛の前処理

$H_2SO_4$  + 添加剤

$KMnO_4$  (3.0 ~ 7.5 g), 30 min ~ 5 days

$H_2O$

$H_2O_2$  aq.

精製

酸化グラフェン  
(GO)



酸化グラフェン形成の  
必要条件を明らかにしたい

- 添加剤の効果 ( $NaNO_3$ など)
- 酸化剤の量
- 反応時間
- 反応温度

*J. Am. Chem. Soc.*, **1958**, 80, 1339.

*Chem. Mater.*, **1999**, 11, 771–778.

*ACS Appl. Mater. Interfaces*. **2015**, 7, 21356–21363.

*J. Am. Chem. Soc.*, **2009**, 131, 898–899.

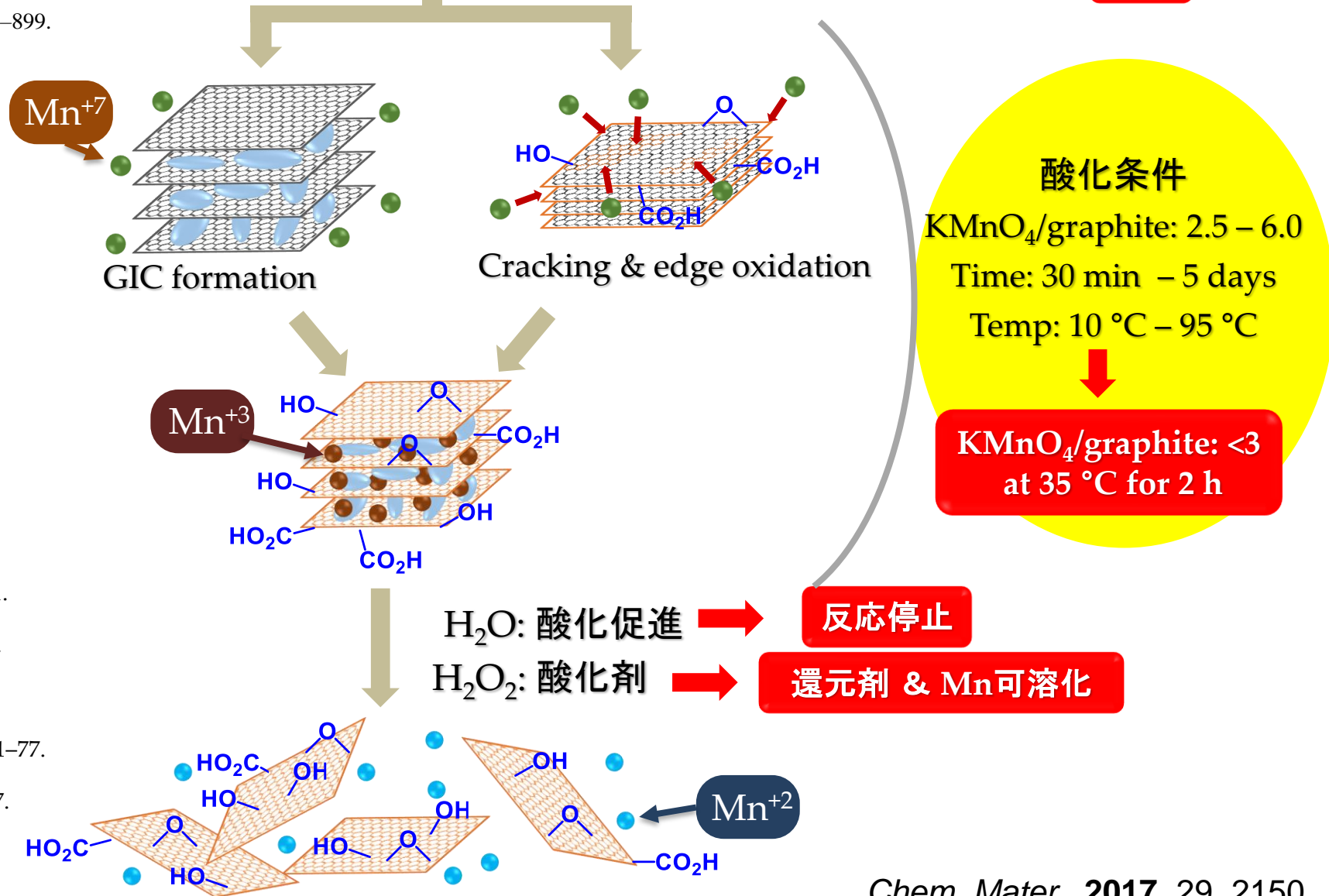
前处理:  $P_2O_5 + K_2S_2O_8, MnO_2$ , microwave

Graphite +  $H_2SO_4 + KMnO_4$

不要

添加剂:  $NaNO_3, H_3PO_4, H_2O$

不要



*ACS Nano*, **2010**, 4, 4806–4814.

*ACS Nano*, **2014**, 8, 3060–3068.

*Phys. Rev. Lett.*, **2006**, 96, 176101.

*RSC Adv.*, **2014**, 4, 15138–15145.

*Inorg. Mater.*, **2007**, 43, 822–826.

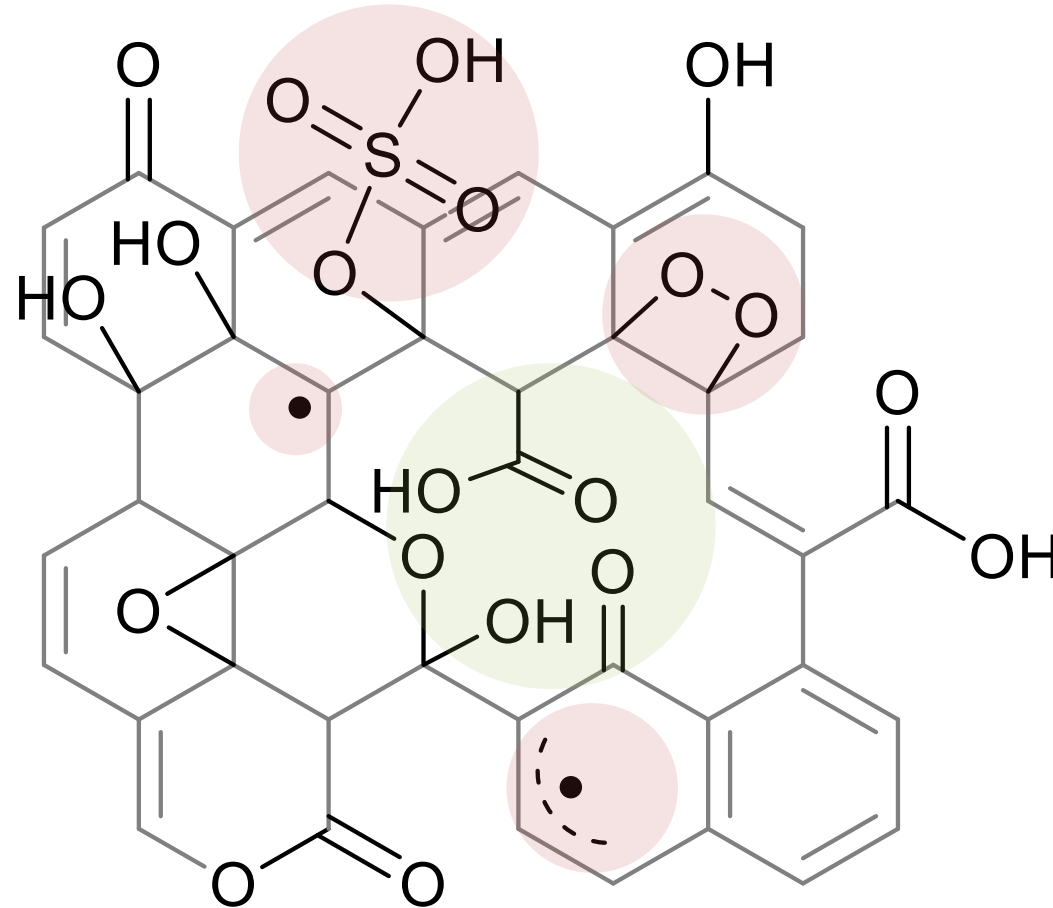
*Mater. Chem. Phys.*, **2015**, 164, 71–77.

*Adv. Mater.*, **2013**, 25, 3583–3587.

*Chem. Mater.*, **2017**, 29, 2150.



# 酸化グラフェンの構造について



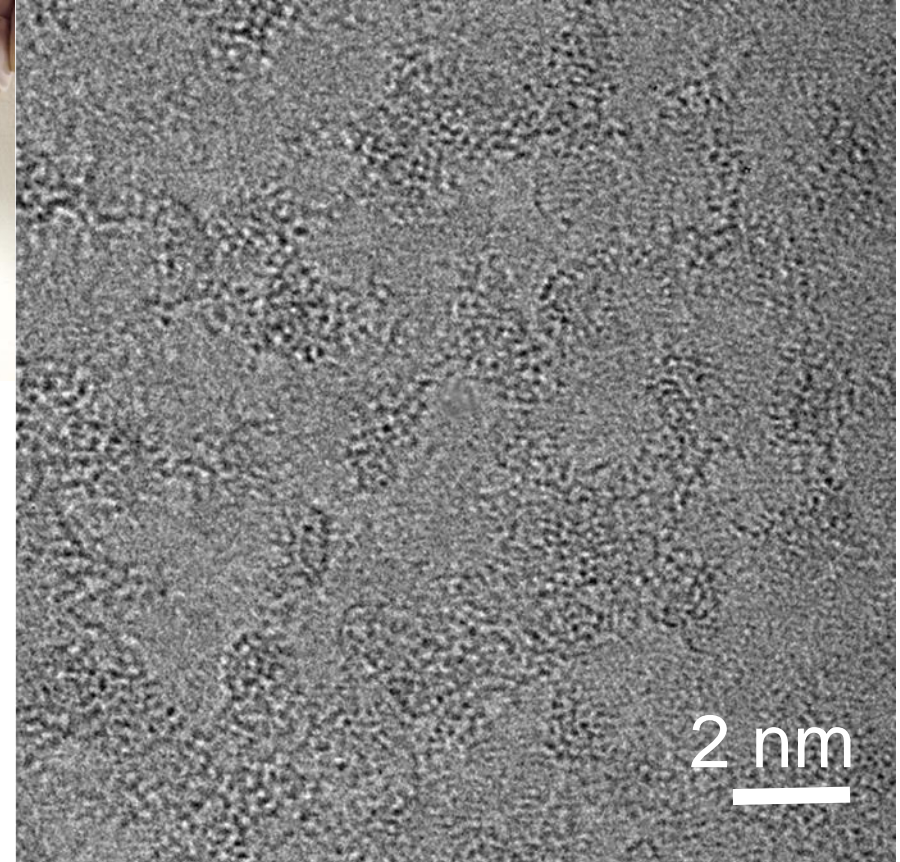
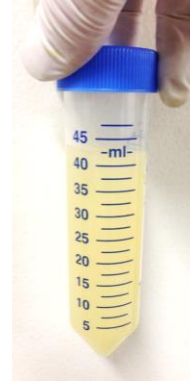
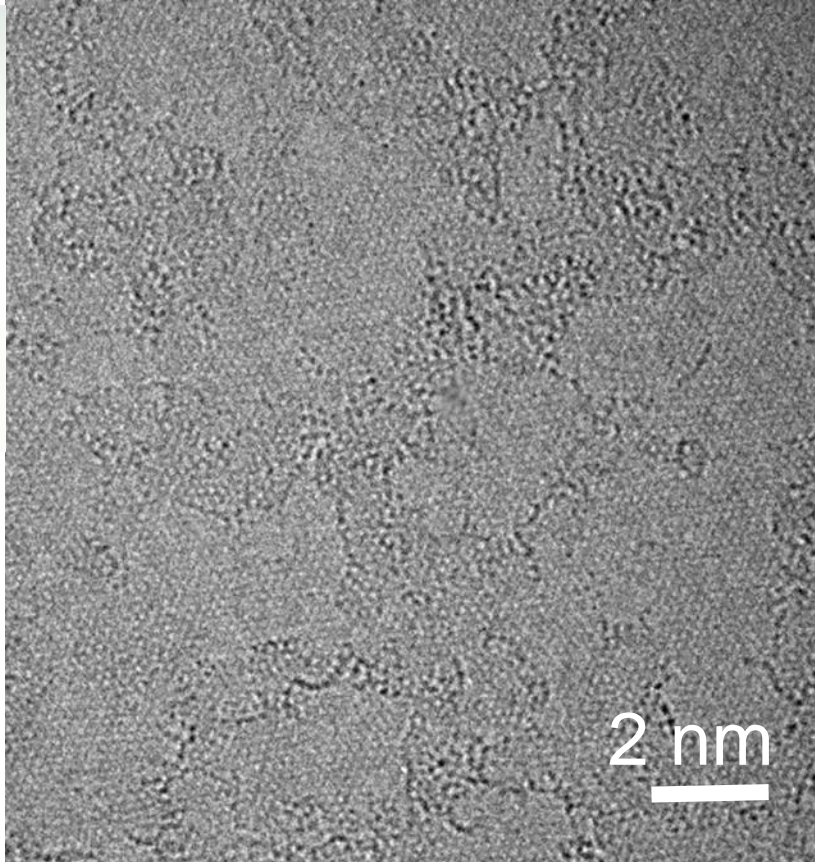
単純な酸素官能基だけでなく、  
スルホン酸、ラジカル、孔、過酸化物など、  
様々な官能基が存在する。

Y. Nishina, S. Eilger,  
*Nanoscale*, **2020**, 12, 12731.

# 酸化度の調節

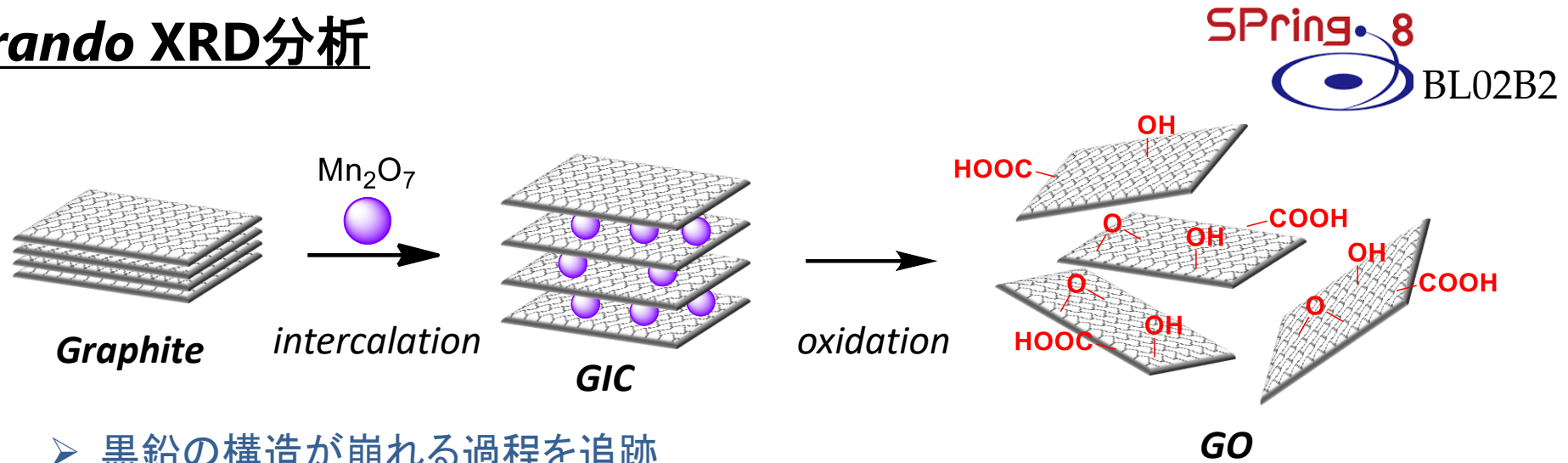
欠陥が少ない

欠陥が多い

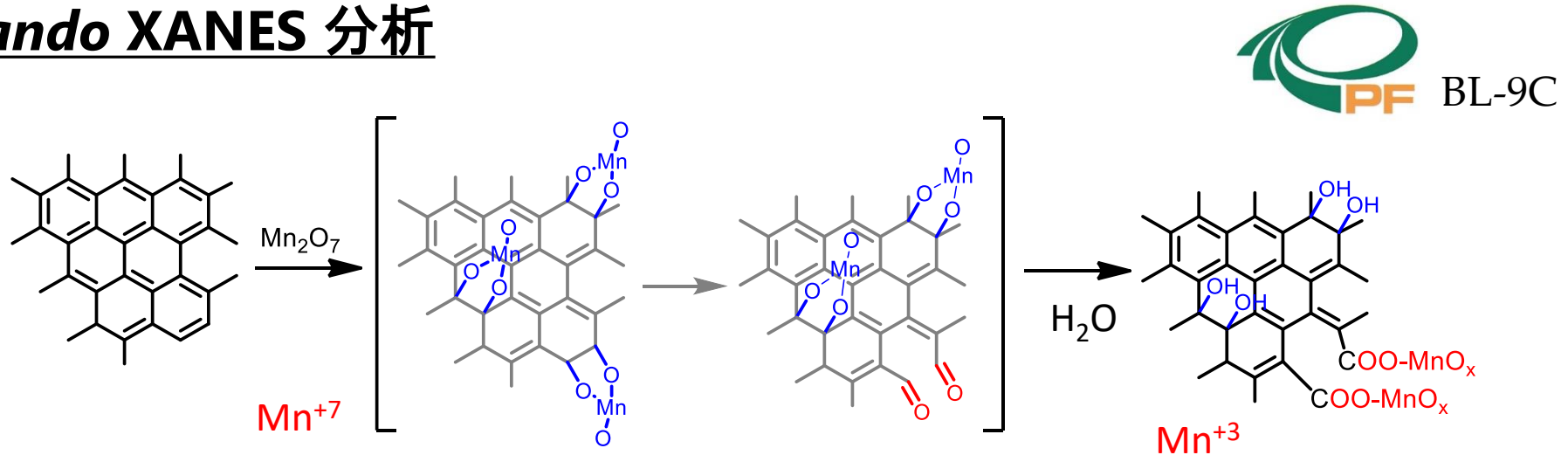


# メカニズムの理解

## Operando XRD分析



## Operando XANES 分析



# スケールアップ & 連続化



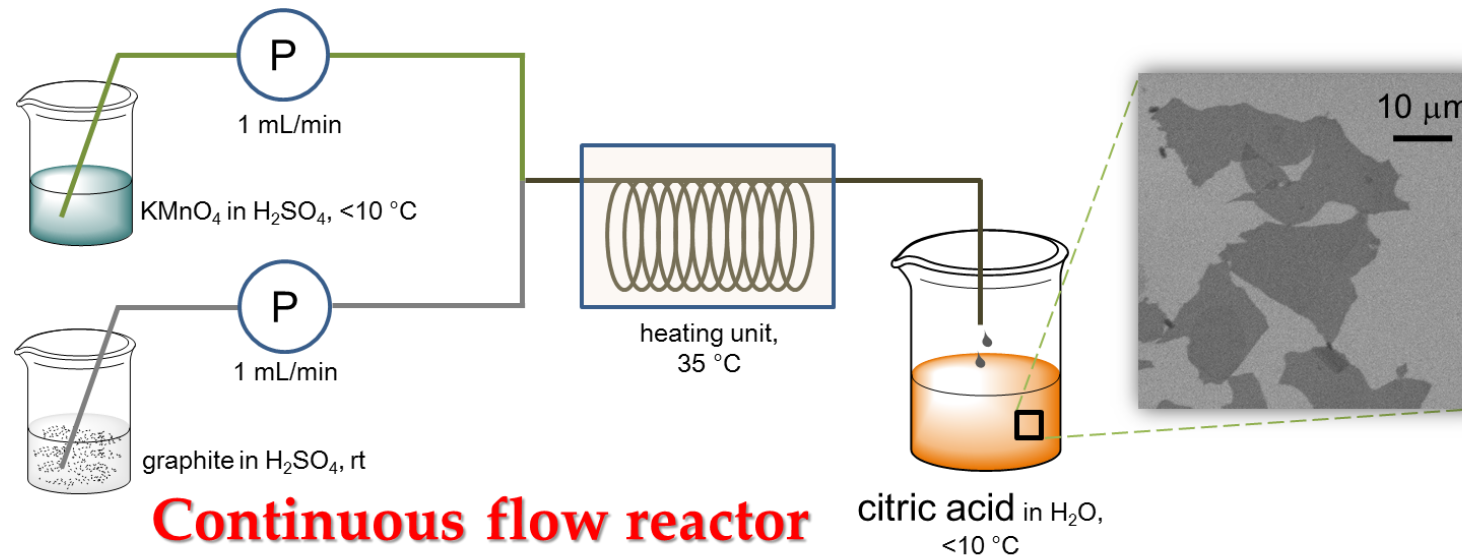
Reaction  
( $\text{H}_2\text{SO}_4$  13 L)



After reaction (ca. 30 L)



Continuous centrifugation  
(12 L)  
**>500 g / batch**



## 酸化グラフエンの合成

# 岡山大、5時間に半減

## 大量生産技術確立目指す

岡山大学の仁科勇太助教らは、酸化グラフエンの合成時間を従来の半分程度に短縮する方法を開発した。これまでは9時間かかっていたが、5時間で合成できる見込みだ。使う薬品の量はほぼ半減するため、製造コストの削減が見込める。酸化グラフエンは触媒や太陽電池、大型ディスプレイなどへの応用が期待されている。今後は企業など共同で、大量生産技術の確立を目指す。

酸化グラフエンは炭素原子が蜂の巣型に並んだシート状物質で、グラフアイト（黒鉛）を一層ずつはくした構造。電気伝導度が高い、表面積が大きい、物質と化学反応する部位が多いため、触媒の担体として使った場合、パラジウムなどの高価な触媒の使用量を10分の1程度に減らす。金属との複合体にすれば電極などへの応用も見込め、用途に合わせた多様な合成が可能だ。またグラフエンは水に溶けないが、酸化グラフエンにすると溶けるようになるため、取り扱いやすい。原料のグラフアイトにマイタロ液を当てて構造

を得るため、酸化されやすくなるようにした。従来はグラフアイトと硫酸など薬品を直接反応させていたため、反応しにくかった。これまで50%程度の反応率だったが、開発した方法では最大90%向上した。また実験では3分の酸化グラフエンを合成したが、量が増えれば酸化処理にかかる時間も変わらないという。酸化グラフエンは応用範囲が広いが、中国や韓国を海外を中心に注目がされている。仁科助教は「ポスト・グラフエン材料として日本発の新材料を担うこと、合成時間をさらに半分程度にするなどの改良を進め、実用化を目指す」。

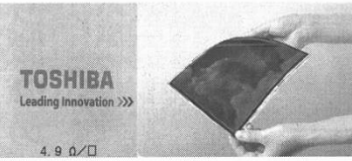
## 探訪

### 先端研究

シリコンに変わる次世代の電子デバイス材料として期待されているのが、炭素原子が蜂の巣型に並んだシート状の構造物「グラフエン」だ。このグラフエンに酸素原子や水素原子がついた「酸化グラフエン」を利用しようという研究が、じわじわと広がっている。その特徴は扱いやすさこそ、グラフエン実用化の切り札になるか。

(敢筆佐々恵)

## 酸化グラフエン



### 安い黒鉛使い扱いやすい

にれるので原料コストを抑えられる。また水に溶かすため扱いやすくなる。

### 透明導電フィルム開発

酸化グラフエンは高性能電池の電極のほか、触媒や水の浄化材、放熱材、樹脂補強材、潤滑剤など幅広い用途が見込まれている。

岡山大学の仁科勇太助教らは14日、高性能電池の電極などへの応用が期待される酸化グラフエンを効率よく作る技術を開発したと発表した。8時間で500μgを合成でき、従来の5倍にあたる。「1日にキログラム単位で試料を供給できるようになった。今後は企業と組んで用途開拓を進めた」と仁科助教は話している。

新合成法は黒鉛を硫酸に入れた後、酸化剤を加えて混ぜたり加熱したりする。温度をセ氏70度以上にすると爆発しやすい物質ができるため、従来は100μgを作るのが限界で、精製するまでに20時間ほどかかった。

研究グループは酸化剤の量や加えるタイミングなどを工夫し、合成効率を高める条件を見つけた。1日当たり2キログラムほど作ることも可能になったという。

## 酸化グラフエン 安全・効率に大量合成



反応器内の酸化グラフエン (岡山大提供)

限にとどめ、危険な酸化グラフエンの黒鉛から長時間で合成

岡山大学実分触媒先端研究センターの仁科勇太助教らの研究グループは、含有酸素5%刻み制御 既存工場設備で活用可能

岡山大学実分触媒先端研究センターの仁科勇太助教らは、含有酸素の量を制御しながら、酸化グラフエンを大量に合成する方法を開発した。技術的には従来約10倍の1μgまで合成でき、酸素の含有量によって電気伝導率や、流にくくるとか可能。高性能電池の電極や触媒、潤滑剤など用途に応じた最適な酸化グラフエンを合成できる。

仁科助教らは酸化グラフエンに成功し、気はほとんど流さないうちに酸化グラフエンを大量に合成する手法を開発した。5%刻みで酸素量を制御できる。酸化の割合を20%の確立によって、酸化グラフエンに対する酸化グラフエンの酸化流す性質も持たせられる。酸化グラフエンは黒鉛の量を20%と変えるだけで、電導率は50%程度で、電導率は黒鉛の100倍程度に向上する。

酸化剤の使用を最小限にとどめ、危険な酸化グラフエンの黒鉛から長時間で合成

酸化剤の黒鉛を最小限にとどめ、危険な酸化グラフエンの黒鉛から長時間で合成

## 含有酸素5%刻み制御 既存工場設備で活用可能

## 酸化グラフエン

## 生産効率5倍に

岡山大

# オープンイノベーションの成功例



chemical industry. For instance, a major Japanese company has yet to hold a contest for technology development or set up a website that invites outsiders to find solutions to specific industrial problems—steps that Western firms such as AkzoNobel, BASF, and Dow Chemical routinely take

Mitsubishi Chemical Holdings as an example, a conglomerate that includes the chemical producer Mitsubishi Chemical, the drug firm Mitsubishi Tanabe Pharma, the industrial gas maker Taiyo Nippon Sanso, and other subsidiaries. The firm has several partnerships with

In 2015, the METI-funded New Energy & Industrial Technology Development Organization started an innovation committee with 177 companies—including 40 chemical firms—and 41 universities. The goal is to promote networking, expose scientists to research in different areas,

## Japanese pairings Industry-academia collaborations yield an eclectic mix of research projects.

COMPANY NAME	ACADEMIC PARTNER	RESEARCH THEME
Asahi Kasei	Kyushu University	Refining of bamboo into raw materials for medicine and food
Asahi Kasei	University of Miyazaki	Chemical transformation of cellulose to create new molecules
Kaneka	Kansai University	Development of antifreezing protein derived from enoki mushrooms
Mitsubishi Chemical	University of Toyama	Technology to analyze the causes of sepsis
Nippon Shokubai	Okayama Univ.	Commercial production of graphene oxide
Sumitomo Chemical	Purdue University	Technology to optimize agrochemical use by analyzing photos of plant roots and leaves
Toray Industries	Waseda University affiliate	Thin films to prevent unwanted internal adhesion after surgery

now busy setting up alliances with other companies, academia, and government labs. Yoshiyuki Nakanishi, the chief executive officer of DIC, is among those backing the idea of open innovation, a method of conducting R&D in collaboration with outside partners including competitors, start-ups, universities, and research institutes. Not long after assuming his position in 2012, Nakanishi told his staff, "Don't stick to doing it all by ourselves." His support for collaboration with outsiders exemplifies

Japanese chemical industry benevolence. Customers, particularly in the electronics industry, often prefer to work with specialized materials suppliers that pursue their own unique technologies in isolation from competitors. Researchers at small and medium-sized Japanese chemical firms have amassed in-depth expertise in several niche performance materials. But times are changing. In recent years, Japanese electronic materials suppliers lost market share to emerging competitors

applications development, increasingly, firms are marketing not only materials but instead complete solutions that might consist of a mix of old and new products along with technologies for delivering them. "We are facing difficulty supplying value to our customers with the technology from just one material," acknowledges Ikuzo Ogawa, senior managing executive officer for R&D at Sumitomo Chemical. For now, open innovation is not nearly as developed in Japan as it is in the Western

CREDIT: SUMITOMO

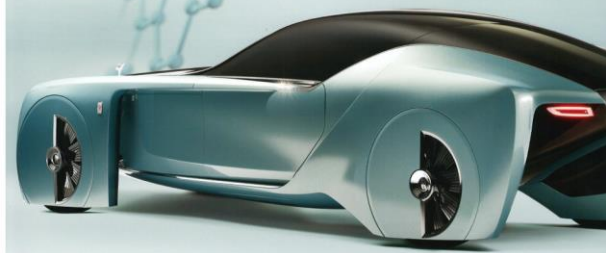
are convinced that open innovation is necessary to develop new products for the firm's information and electronics, environment and energy, and life sciences businesses. The company is also counting on collaboration with others to help it come up with new technologies for catalysts, precision machining, organic and inorganic chemicals, and polymers. Other firms are trying to move beyond garden-variety academic collaborations and into something more sweeping. Take

teus C&EN that western companies are more advanced in open innovation and that Japanese companies need to catch up. To that end, the government introduced a tax break two years ago that allows companies to deduct 30% of the expenses of joint research with academia, research institutes, and contract research firms. The 30% deduction also applies to the use of intellectual property from small and medium-sized firms. Firms already benefit from a 10% tax deduction on all R&D activities.

the science innovation Matching Forum to increase the frequency and depth of open innovation among Japanese industry, academia, and government research institutes. Like chemical companies, the government hopes the increased collaboration will help Japan keep up as a world-leading supplier of advanced materials. **Katsumori Matsuoka** has covered the chemical industry for Japan's Chemical Daily for the past four decades.

# 2030年に花開く 10大材料

次世代パワー素子から人工クモの糸まで



## 2030年までに社会実装

### 安い酸化グラフェンに注目

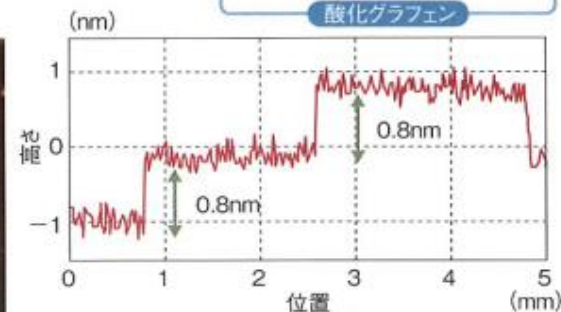
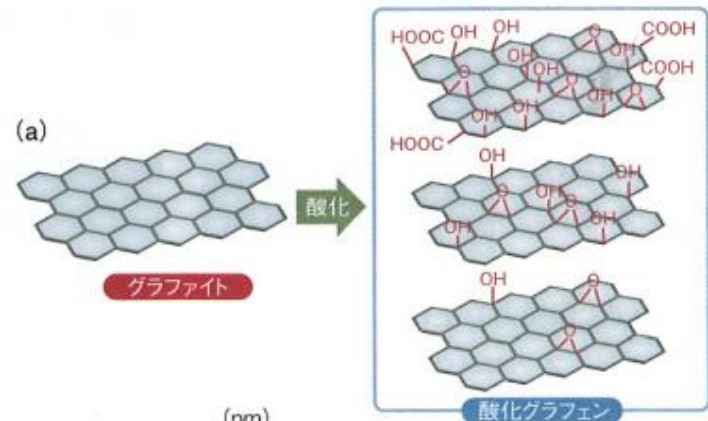
nm オーダーの炭素材料で、CNTと競い合う形で脚光を浴びる材料にグラフェンもある。6員環の炭素原子が並んだ構造はCNTと同じだが、円筒ではなくシート状のもの。シート1枚の単層グラフェンの理論的な電子移動度はSiの100倍と高く、トランジスタやセンサーに使うことが期待される。

ただし、現段階で安く量産する技術のメドが立っていない。自動車部品への採用はCNTに比べて時間がかかる。あるグラフェンの研究者は、「CNTに比べて5～6年遅れている」とする。

単層グラフェンの実用化には時間がかかるものの、最近、「安い疑似グラフェン」として産業界で注目を集める材料がある。酸化グラフェンだ(図4)。同材料を簡単に造りつつ、それなりの電子伝

図4 安価な酸化グラフェン

(a) グラファイトを酸化すると、薄く剥がれて、グラフェンのようになる。安価に造れて、グラフェンの代替品として注目が集まる。(b) 酸化グラフェンの写真と厚みを測った結果。写真中の白線部の高さを測ったのが右のグラフになる。グラフェン層の間隔は0.8nm程度。(出典：岡山大学准教授の仁科勇太氏)



導度や強度を実現する研究が進む。2020年頃に実用化するかもしれない。

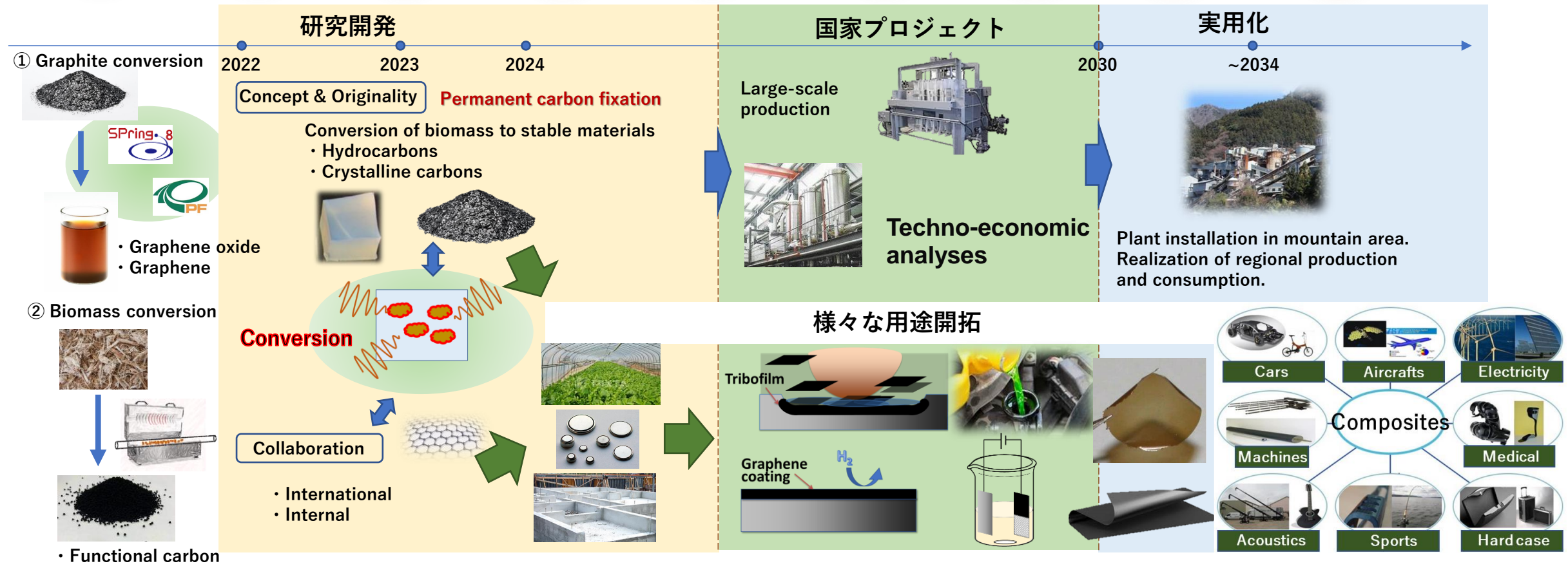
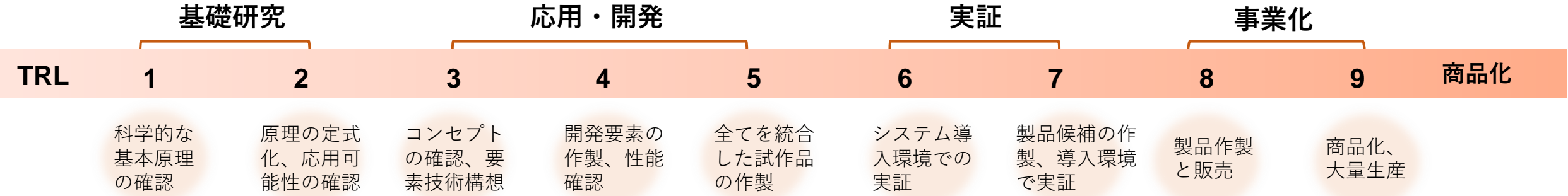
岡山大学准教授の仁科勇太氏が、酸化グラフェンの酸化量を制御する研究成果を発表した。同材料は、グラファイト(黒鉛)に過マンガン酸カリウムや硫酸を混ぜて酸化させて造る。酸化すると黒鉛が薄く剥がれて、数～十数層の多層の酸化グラフェンになる。

ただ炭素原子が完全に酸化すると、

電子移動度などの性能が下がる。仁科氏は、生産過程の条件を制御して酸化量を抑える手法を見いだした。適度な酸化量に抑えると、グラフェンに近い性能になる。同氏は、酸化量を制御しながら大量に生産する技術も研究する。

応用先で早そうなのが、エンジンなどに使う潤滑油である。同材料の表面は滑りやすく、歯車の摩擦抵抗を抑えられる。タイヤに使う研究も進んでいる。

# 産学連携・事業化の将来構想





# 実際のところ、実用化可能か？

Graphite (1 kg)



H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (**30 L**)

KMnO<sub>4</sub> (**3.0 kg**), 2 h

H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> aq.

**Centrifugation (> 500 L H<sub>2</sub>O)**

Graphene Oxide (GO)

課題：精製，廃液処理，安全性（法律）

# 酸化反応は制御が困難・危険性あり



## 第一類危険物(酸化性)固体

品名	性質(指定数量)	代表物質
塩素酸塩類	第一種酸化性 固体 (50 kg)	塩素酸カリウム、塩素酸ナトリウム
過塩素酸塩類		過塩素酸カリウム、過塩素酸ナトリウム
無機過酸化物		過酸化カリウム、過酸化ナトリウム
亜塩素酸塩類		亜塩素酸ナトリウム
臭素酸塩類		臭素酸カリウム
硝酸塩類		硝酸カリウム、硝酸ナトリウム
よう素酸塩類	第二種酸化性 固体 (300 kg)	よう素酸カリウム、よう素酸ナトリウム
過マンガン酸塩類		過マンガン酸カリウム、過マンガン酸ナトリウム



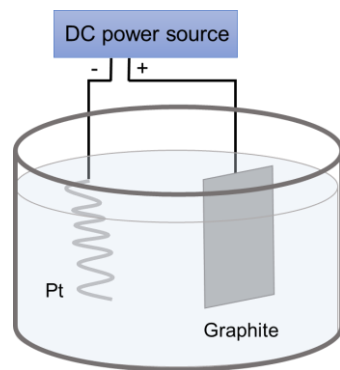
## 化学的酸化



$\text{KClO}_3$  or  $\text{KMnO}_4$   
in  $\text{H}_2\text{SO}_4$



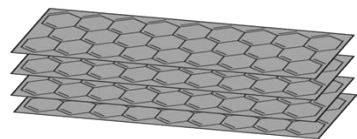
## 電気化学的酸化



アノード酸化



## 直接剥離



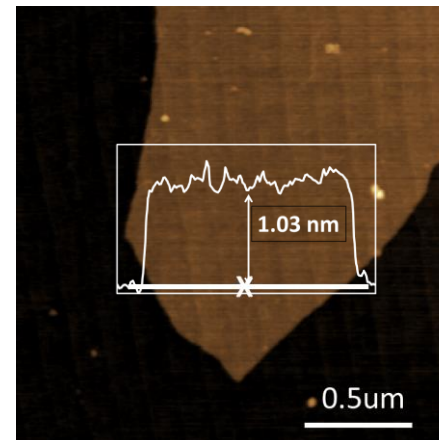
Bulk graphite



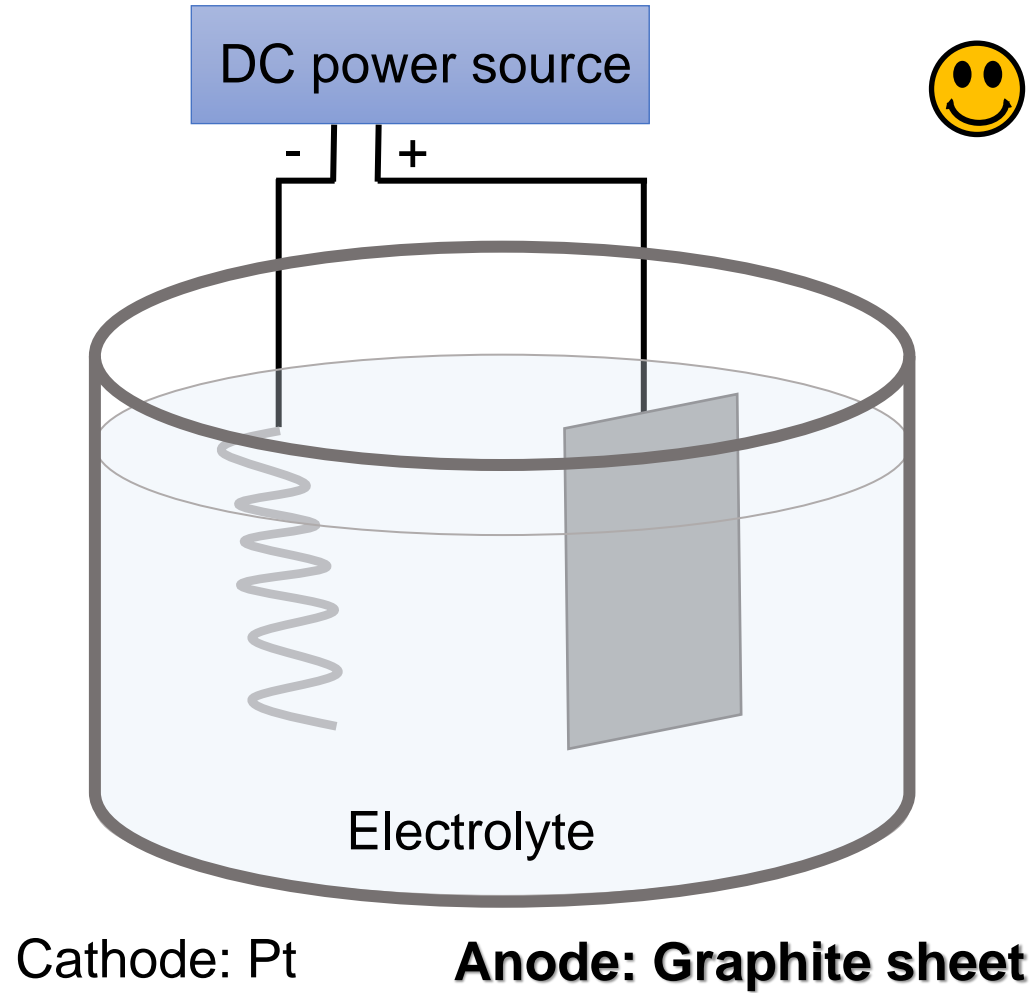
Ultrasound



dispersion



# 電気化学的に黒鉛を酸化する



水が酸素源。

濃硫酸,  $\text{KMnO}_4$  は不要。

これらのコンタミ無し。

# 黒鉛の電気化学酸化プロセス



0~1 V  
polarization



1.5 V  
intercalation



2 V  
H<sub>2</sub>O decomposition



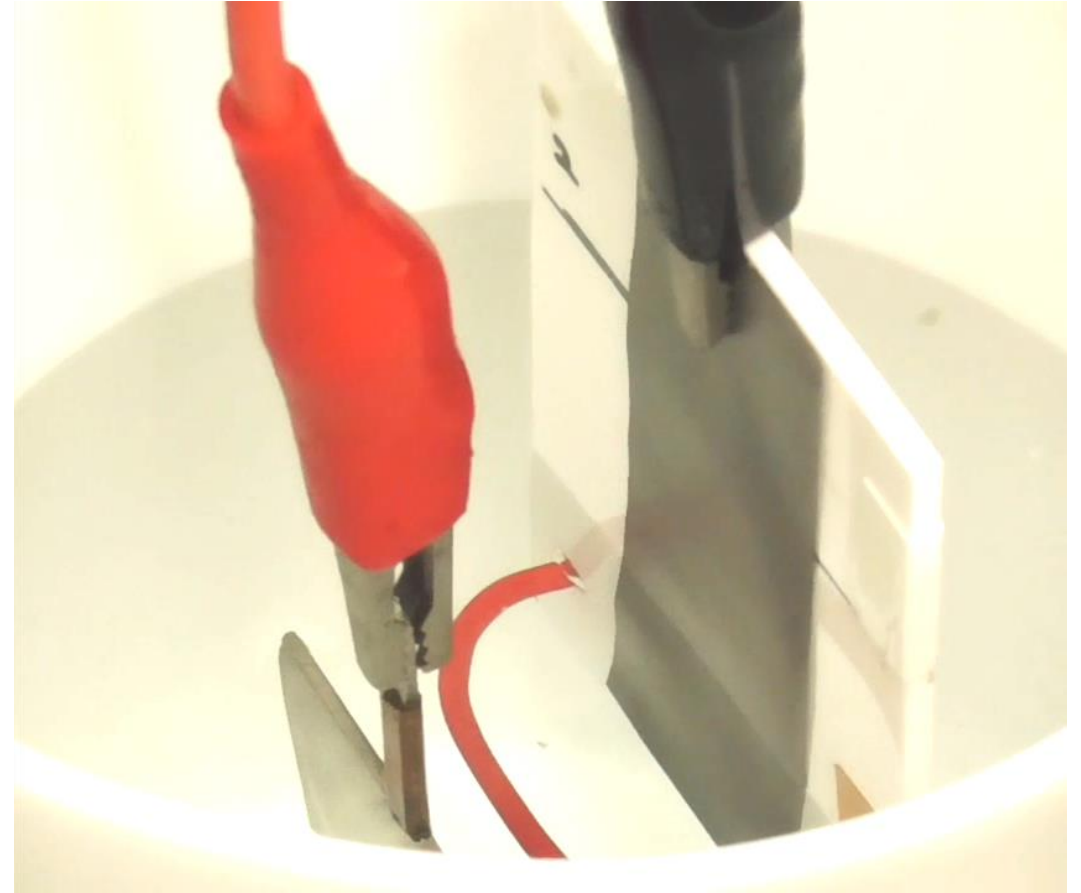
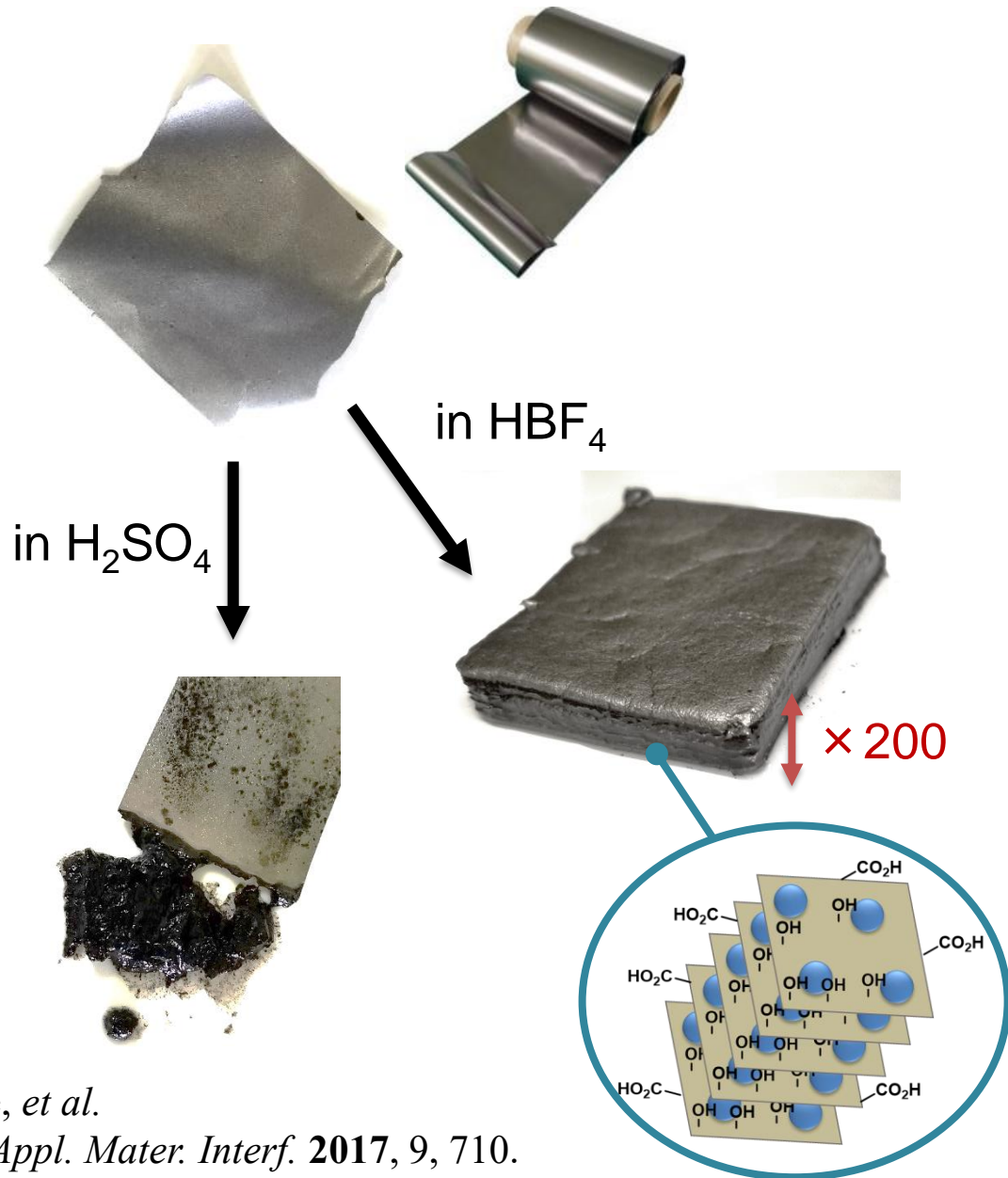
>4 V  
oxidation & expansion



side view

*Review:  
ACS Nano, 2024, in press.*

# 電解質が重要: $\text{SO}_4^{2-}$ と $\text{BF}_4^-$ の違い



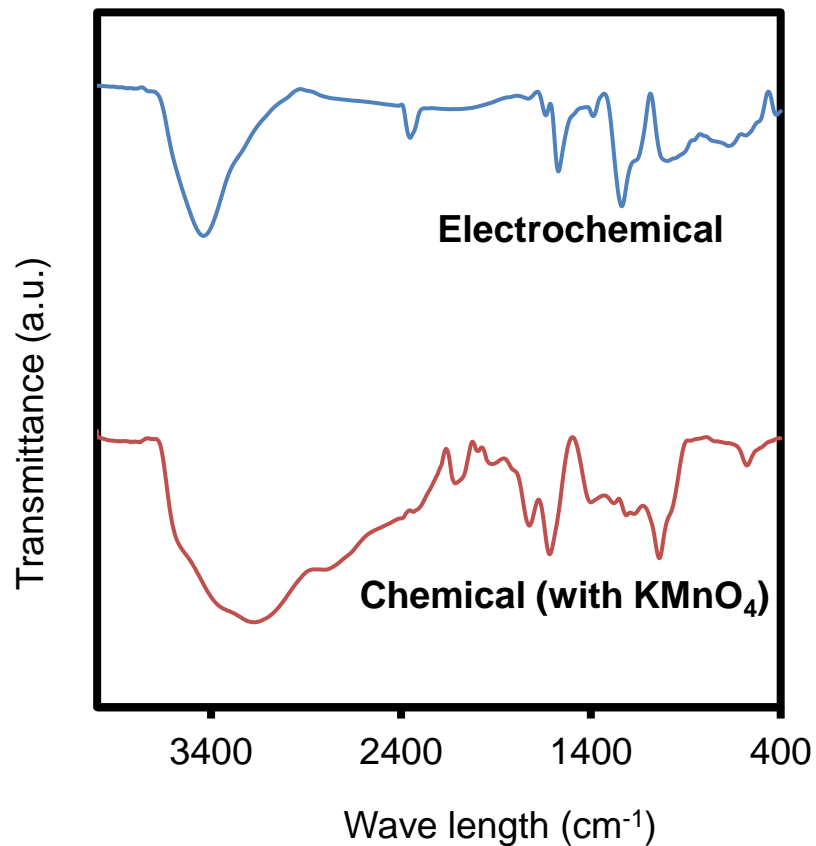
非常に高効率な黒鉛の電解酸化を実現

Dryfe, *et al.*  
*ACS Appl. Mater. Interf.* **2017**, 9, 710.

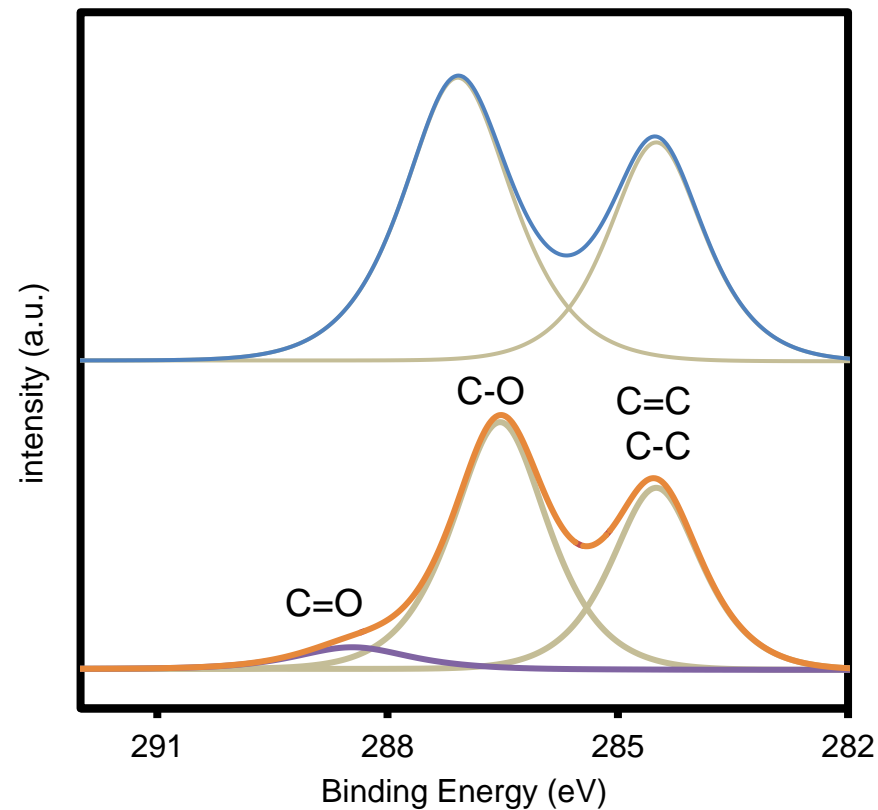
*Carbon*, **2020**, 158, 356.

# Structure of chemical and electrochemical GO

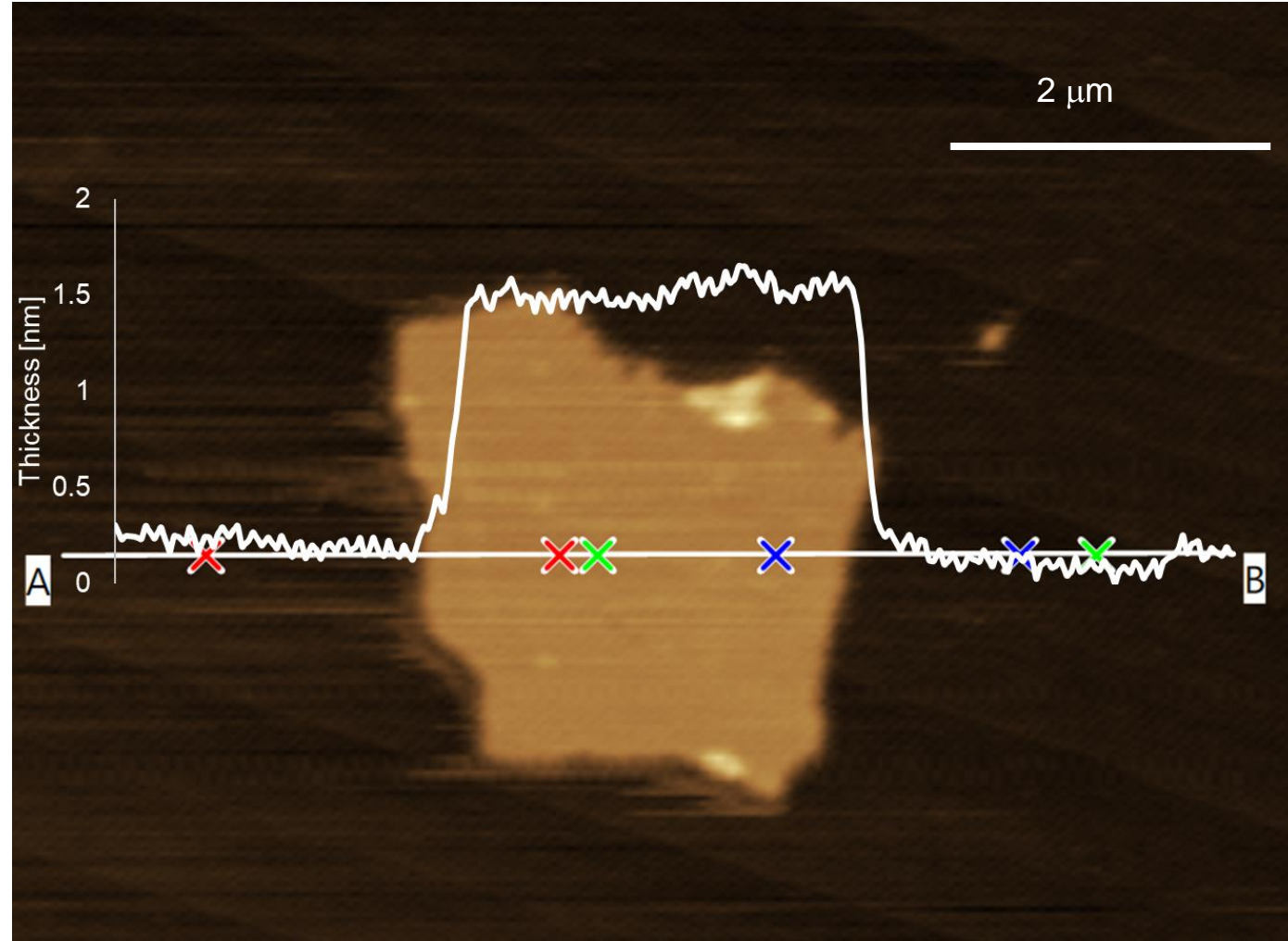
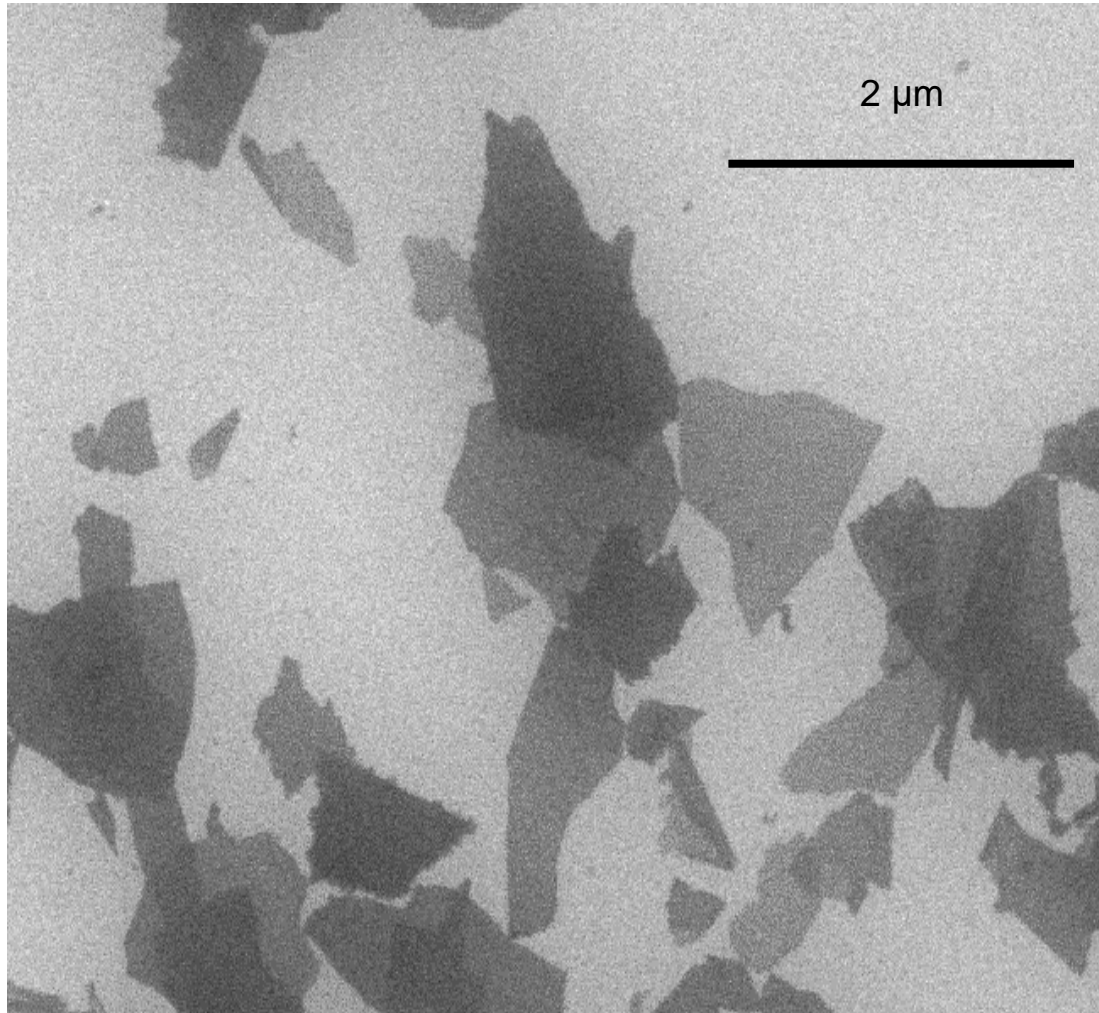
FT-IR



XPS (C1s)



# 2次元であることの確認

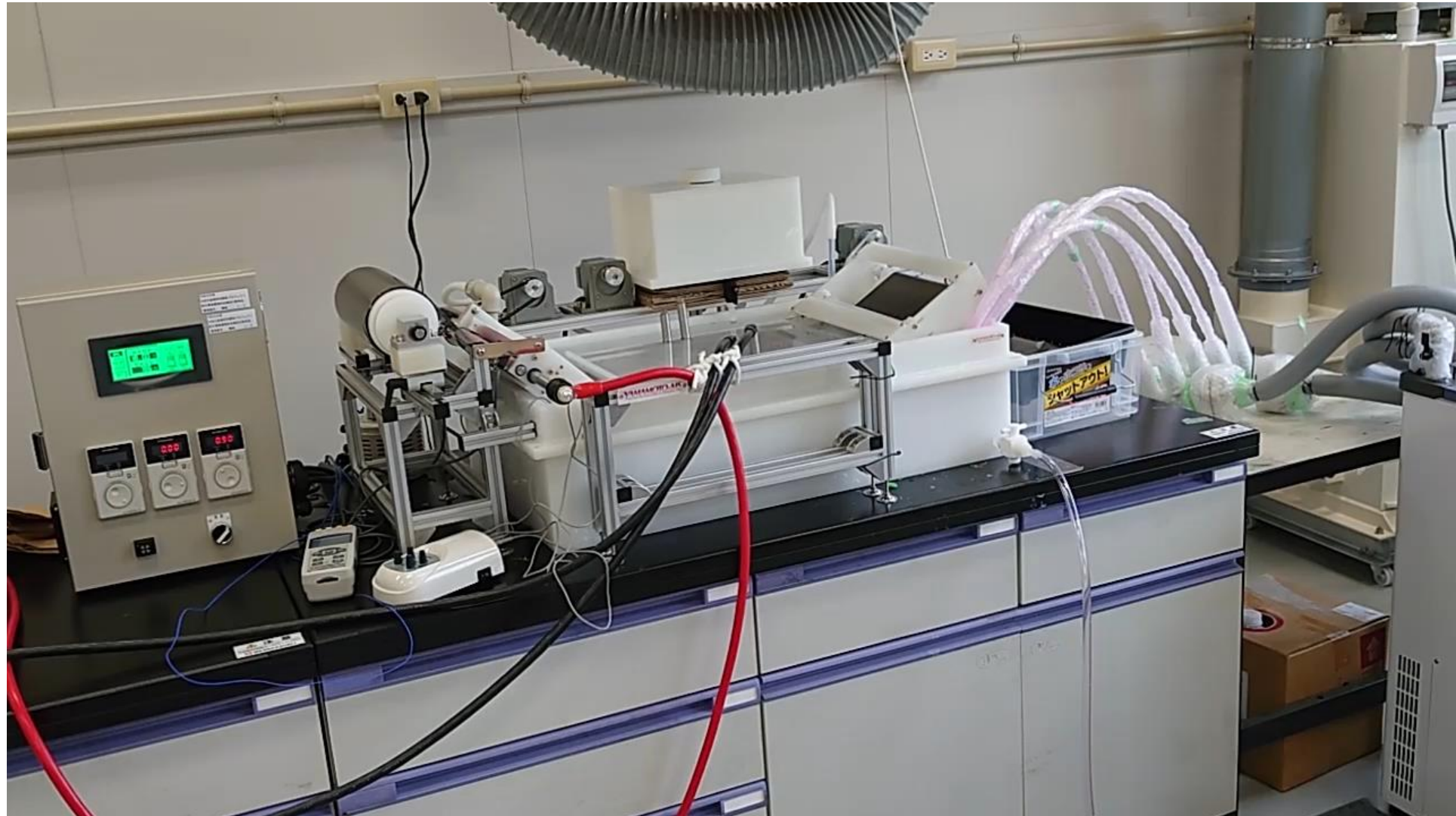




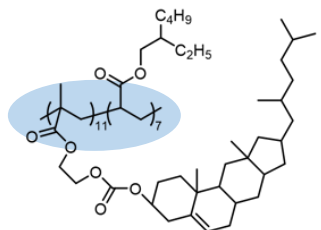
# スケールアップ



# スケールアップ

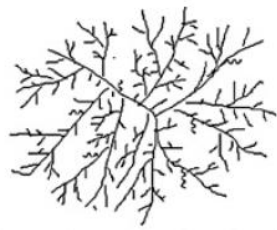


# 分散剤を用いて黒鉛を直接剥離する



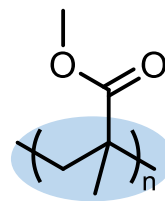
poly(CEM<sub>11</sub>-b-EHA<sub>7</sub>)  
in isooctane

A.A.Shboul, et al., *Nanoscale*, **2017**, 9, 9893



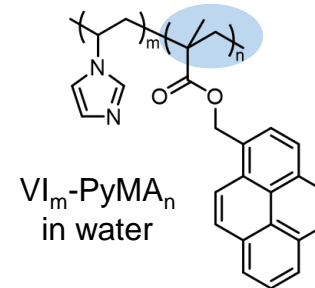
Hyperbranched polyethylene  
in THF

L.Xu, et al., *J. Phys. Chem. C*, **2013**, 117, 10730–10742



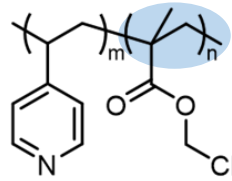
polymethylmethacrylate  
in acetone

S.Gentiluomo, et al., *Chem. Eur. J.* **2020**, 26, 6715–6725



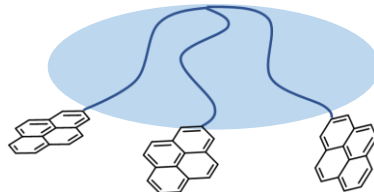
VI<sub>m</sub>-PyMA<sub>n</sub>  
in water

J.Cui, et al., *Carbon*, **2016**, 99, 249-260



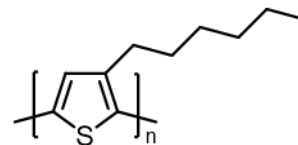
PTFEMA<sub>n</sub>-b-PVP<sub>m</sub>  
in MeOH

H.M.Lee, et al., *Polymers*, **2016**, 8, 101



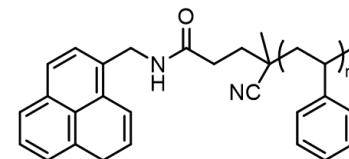
3-Arm [PMMA-Py]<sub>3</sub>  
in CHCl<sub>3</sub>

S.S.Gkempoura, et al., *Nanoscale*, **2019**, 11, 915–931



poly(3-hexylthiophene)  
in toluene

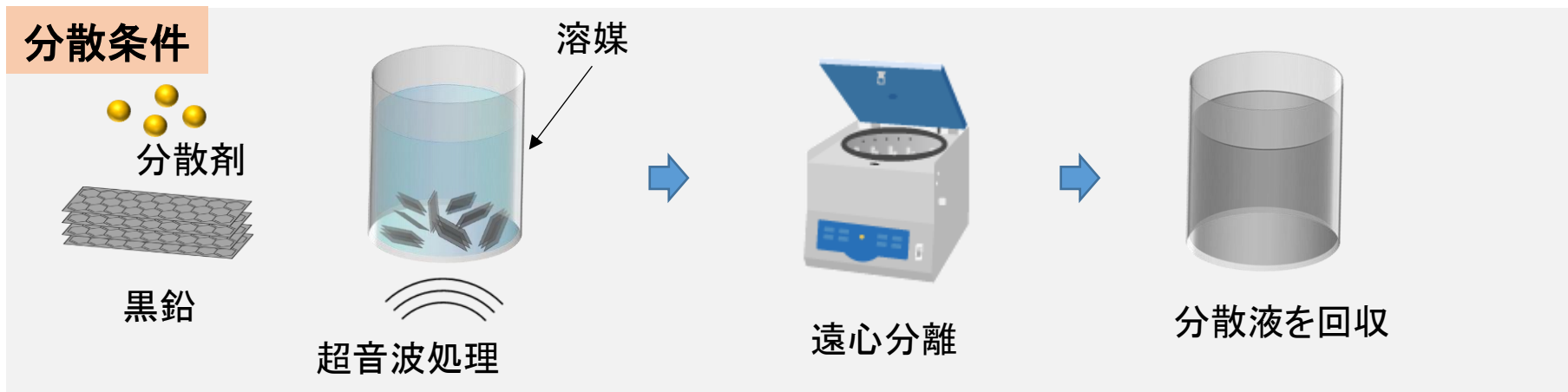
H.Iguchi, et al., *Sci Rep.* **2017**, 7, 39937



Py-PS  
in THF, CHCl<sub>3</sub>

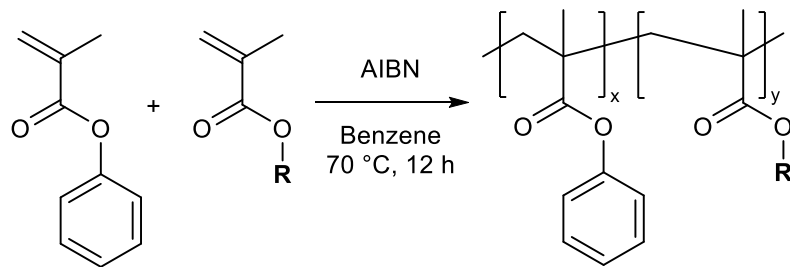
H.Wang, et al., *J. Polym. Sci. A Polym. Chem.* **2015**, 53, 2175–2185

✓ 低沸点溶媒中でのグラフェン分散剤として、**メタクリレート系ポリマー**に着目。



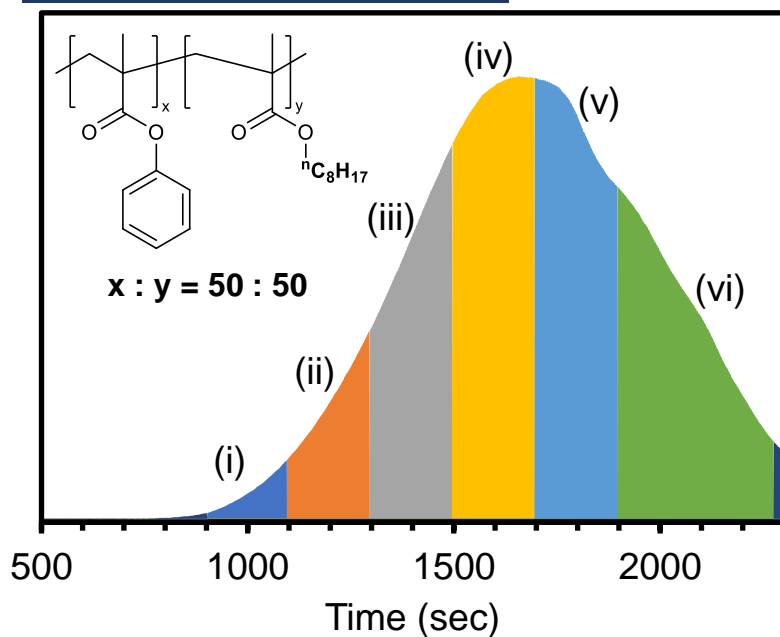
# ポリマー分散剤の合成

## Synthesis

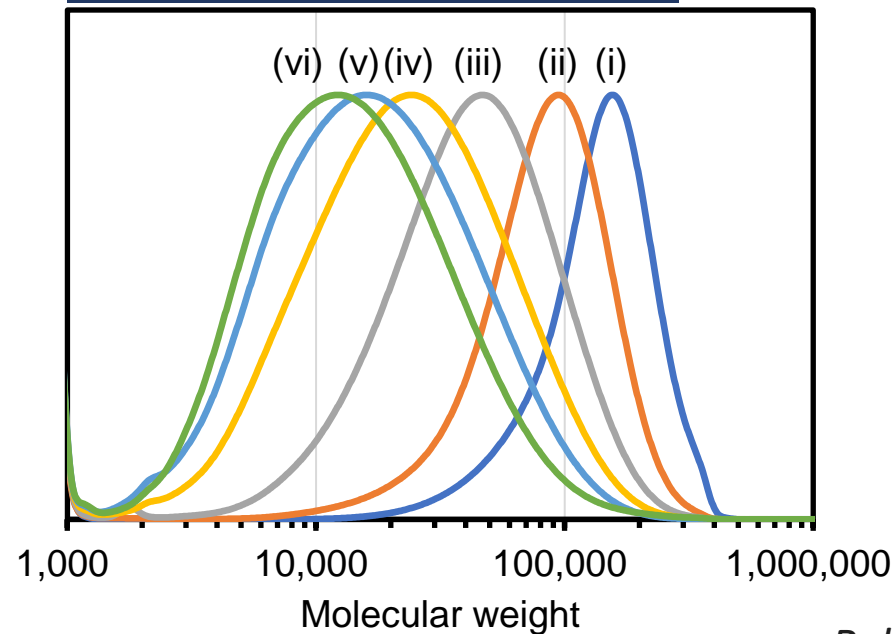


Entry	R	x : y <sup>a</sup>	Mp <sup>b</sup>	PDI <sup>b</sup>
1	<sup>n</sup> C <sub>8</sub> H <sub>17</sub>	76 : 24	22,041	2.61
2	<sup>n</sup> C <sub>8</sub> H <sub>17</sub>	50 : 50	18,400	2.96
3	<sup>n</sup> C <sub>8</sub> H <sub>17</sub>	25 : 75	38,532	3.07
4	<sup>n</sup> C <sub>16</sub> H <sub>33</sub>	75 : 25	10,634	3.09
5	<sup>n</sup> C <sub>16</sub> H <sub>33</sub>	51 : 49	24,639	2.69
6	<sup>n</sup> C <sub>16</sub> H <sub>33</sub>	25 : 75	16,170	3.89

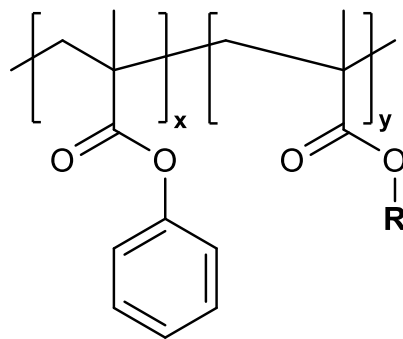
## Separation with GPC



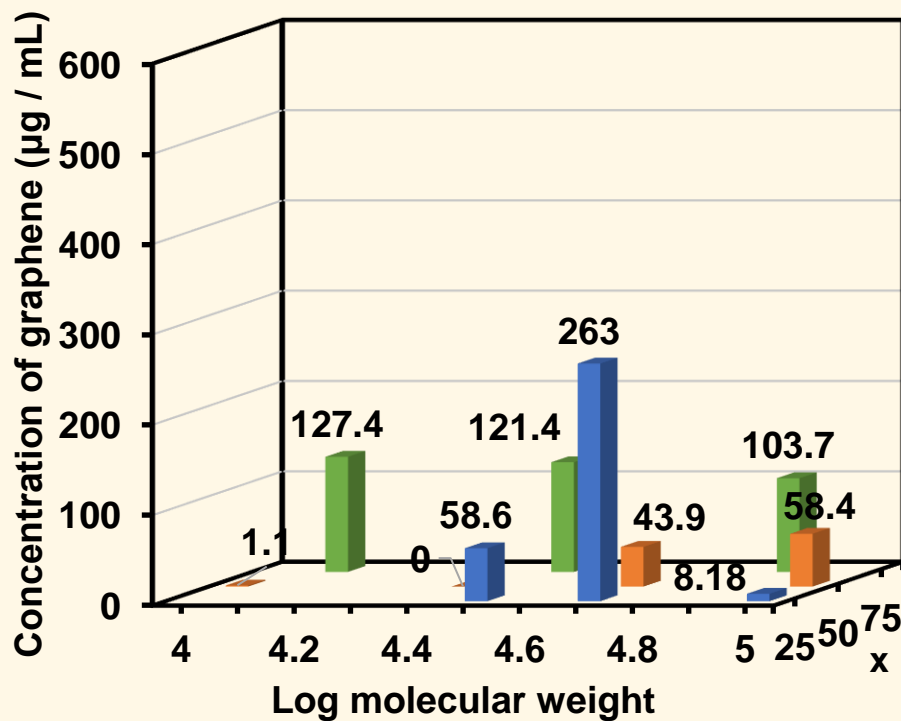
## Molecular weight analysis



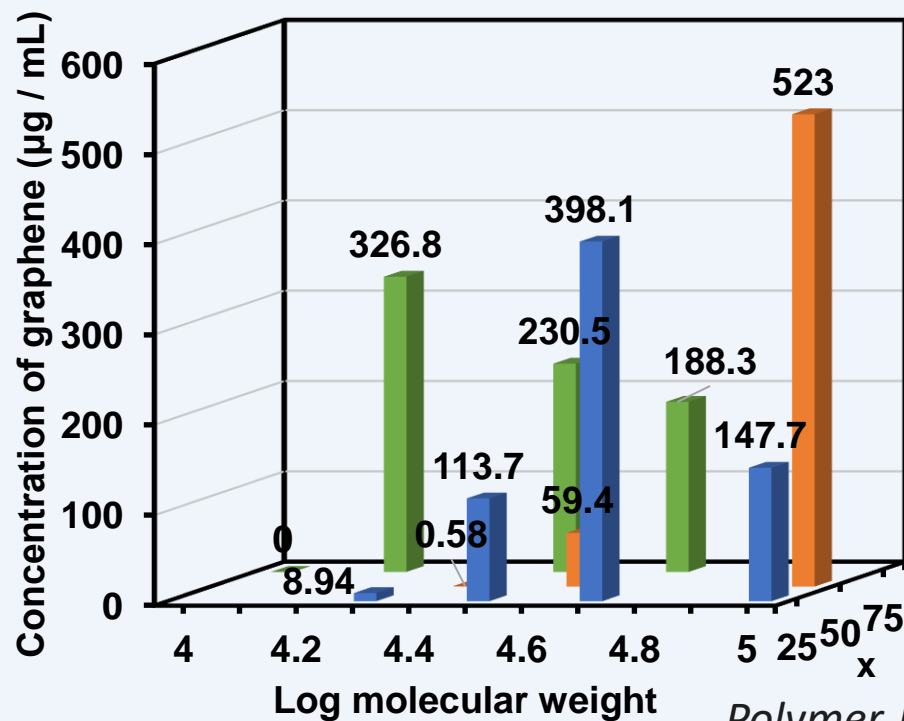
# グラフェン分散性の評価



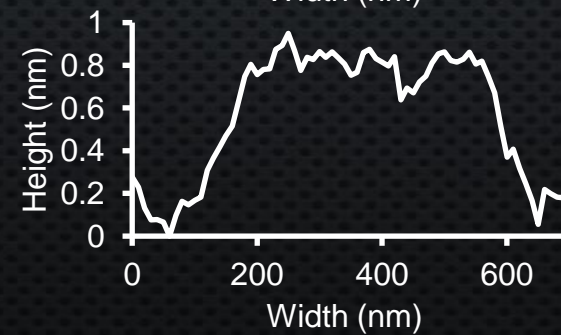
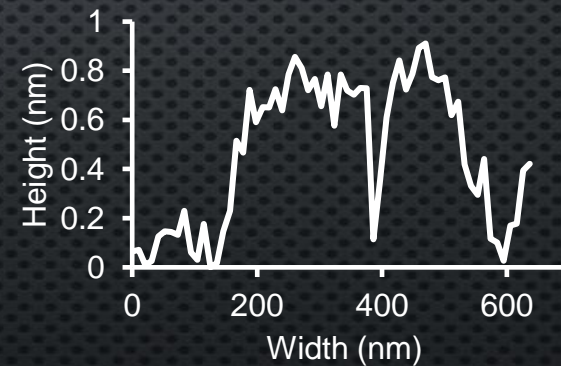
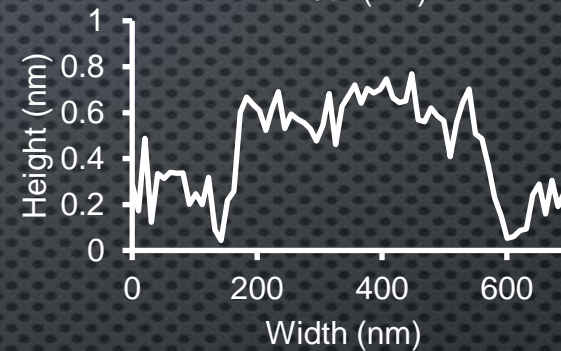
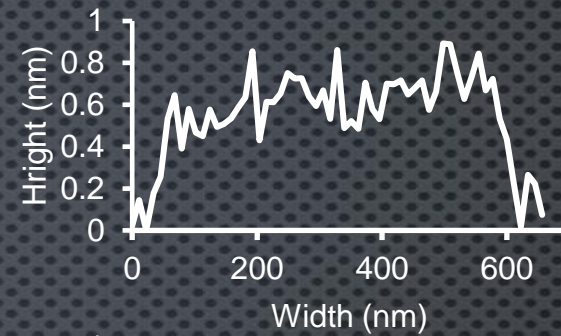
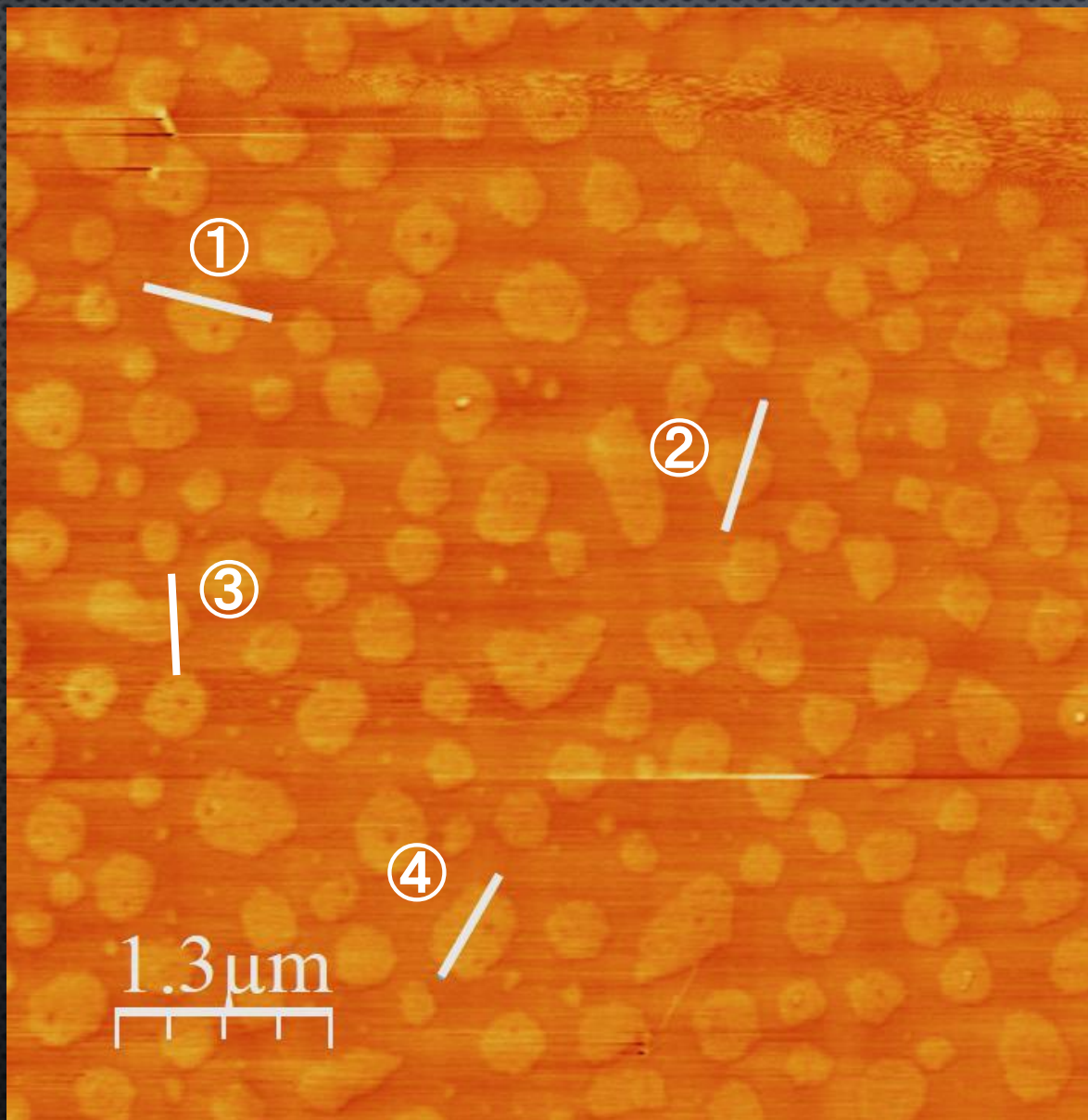
$R = nC_8H_{17}$



$R = nC_{16}H_{33}$

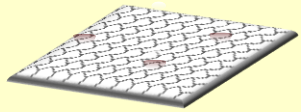


# 剥離したグラフェンのAFM像



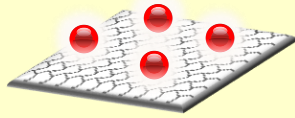
# カーボン構造体の構築と用途開拓

## Functional Nanomaterials



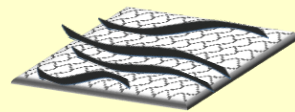
### 2D sheets

*Sci. Rep.* **2016**, 6, 25824.  
*ACS Mater. Lett.* **2022**, 4, 2590.  
*Adv. Mater.* **2023**, 2301506.



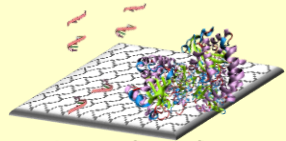
### Nanoparticles

*Commun. Chem.* **2021**, 4, 75.  
*Chem. Sci.* **2020**, 11, 5866.  
*ChemPlusChem* **2023**, 88, e202300328



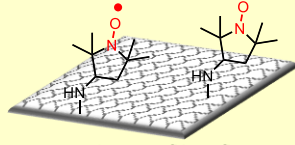
### Polymers

*J. Mat. Chem. A* **2021**, 8, 13718.  
*Macromol. Rap. Commun.* **2020**, 42, 2000577.  
*FlatChem* **2023**, 39, 100489.



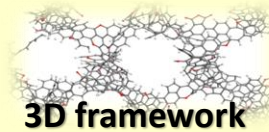
### Biomolecules

*Nanoscale* **2020**, 12, 21780.  
*Nanoscale* **2014**, 6, 6501.  
*Nature Commun* **2024**, in press.



### Organic radicals

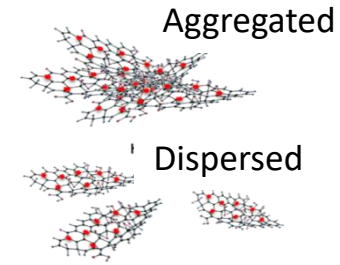
*Org. Lett.* **2019**, 21, 8164.  
*J. Catal.* **2018**, 365, 344.  
*Bull. Chem. Soc. Jpn* **2023**, 96, 581.



### 3D framework

*Biosens. Bioelectron.* **2021**, 189, 113357.  
*Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, 59, 1542.  
*Small* **2023**, 19, 2208227.

## Biomaterials



### Antibacterial property



## Electric Vehicles



LIBs

*ACS Polymers Au* **2023**, 3, 394.

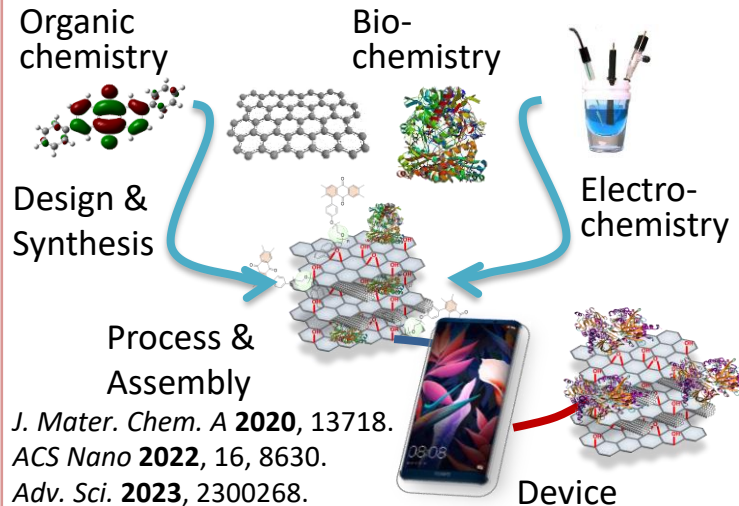


Tires



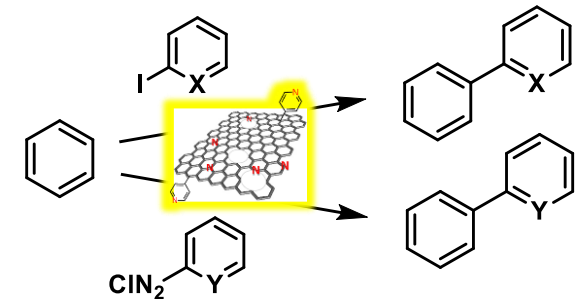
Greases

## Next-generation batteries



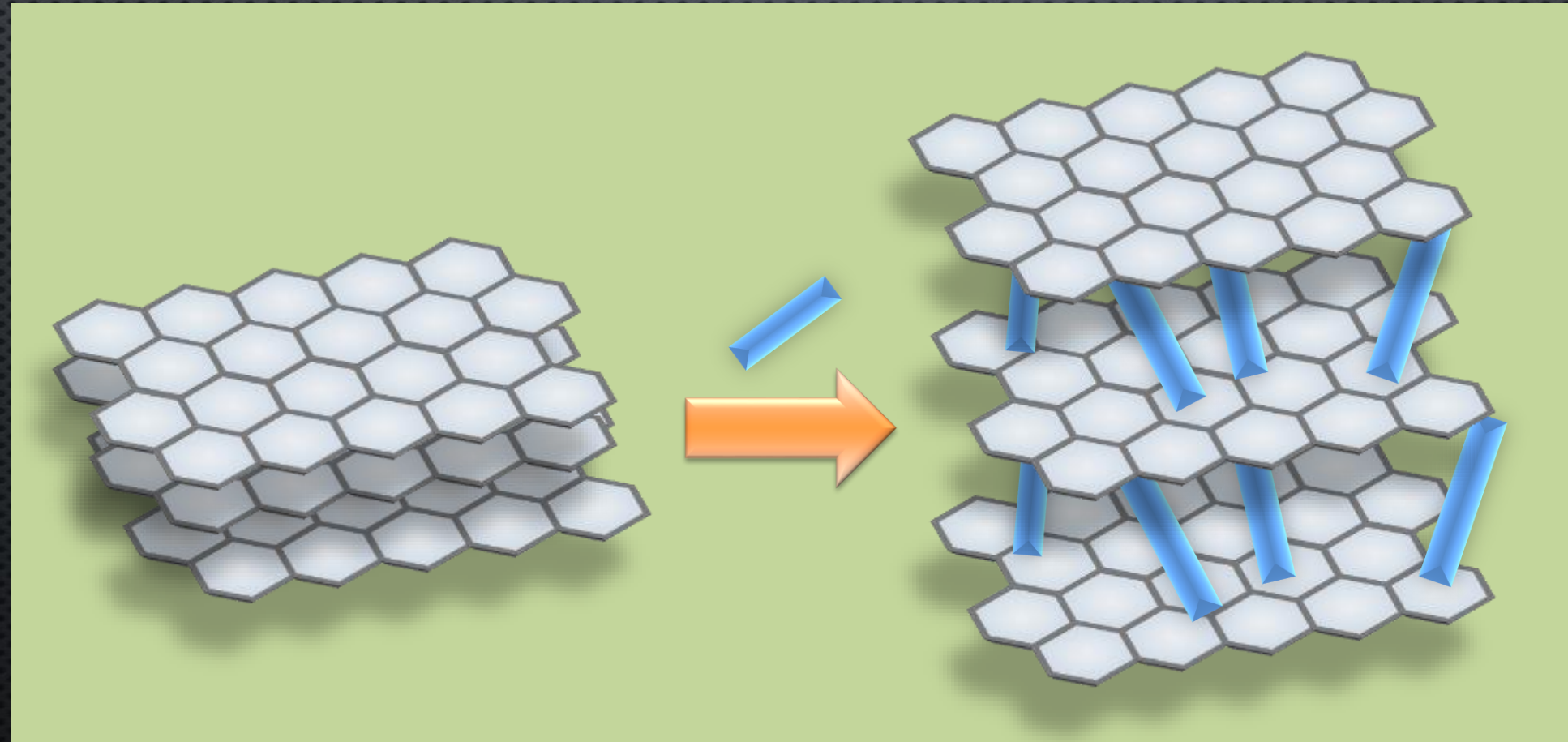
## Carbocatalysts

### Metal-free coupling



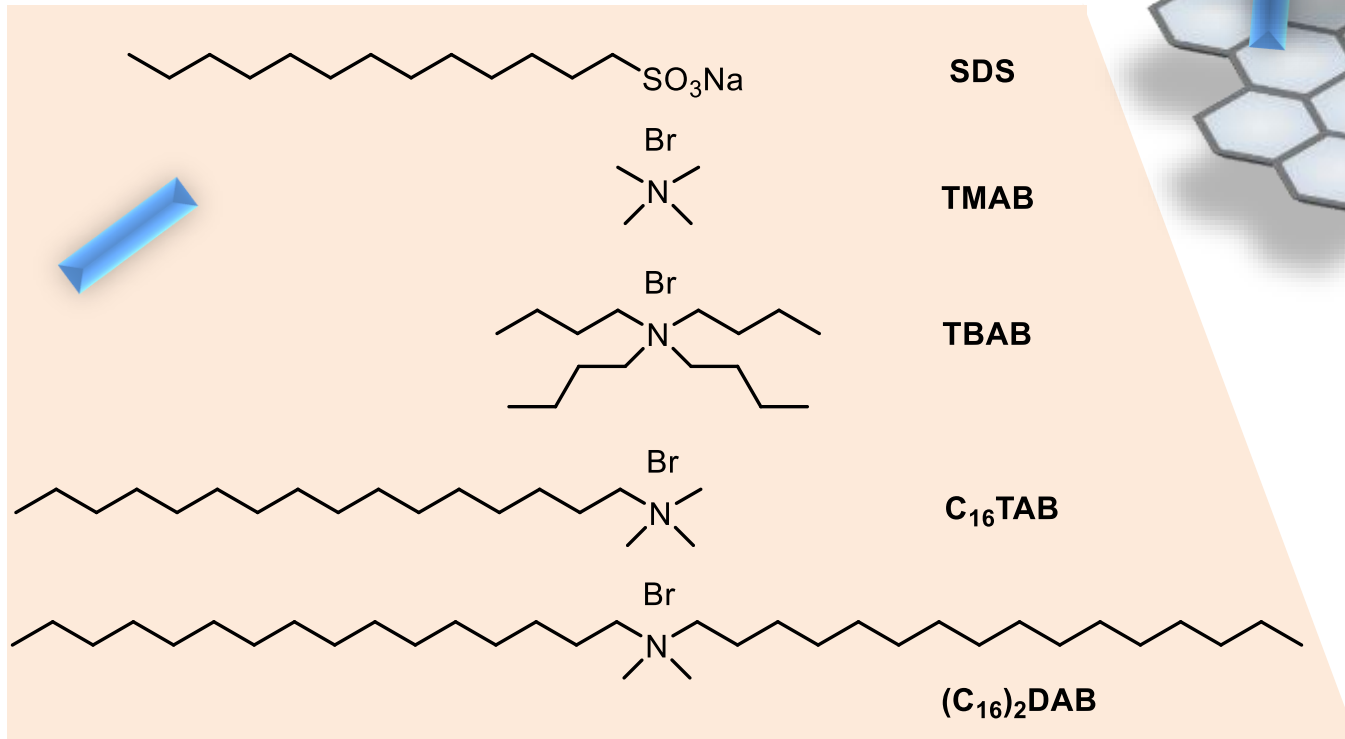
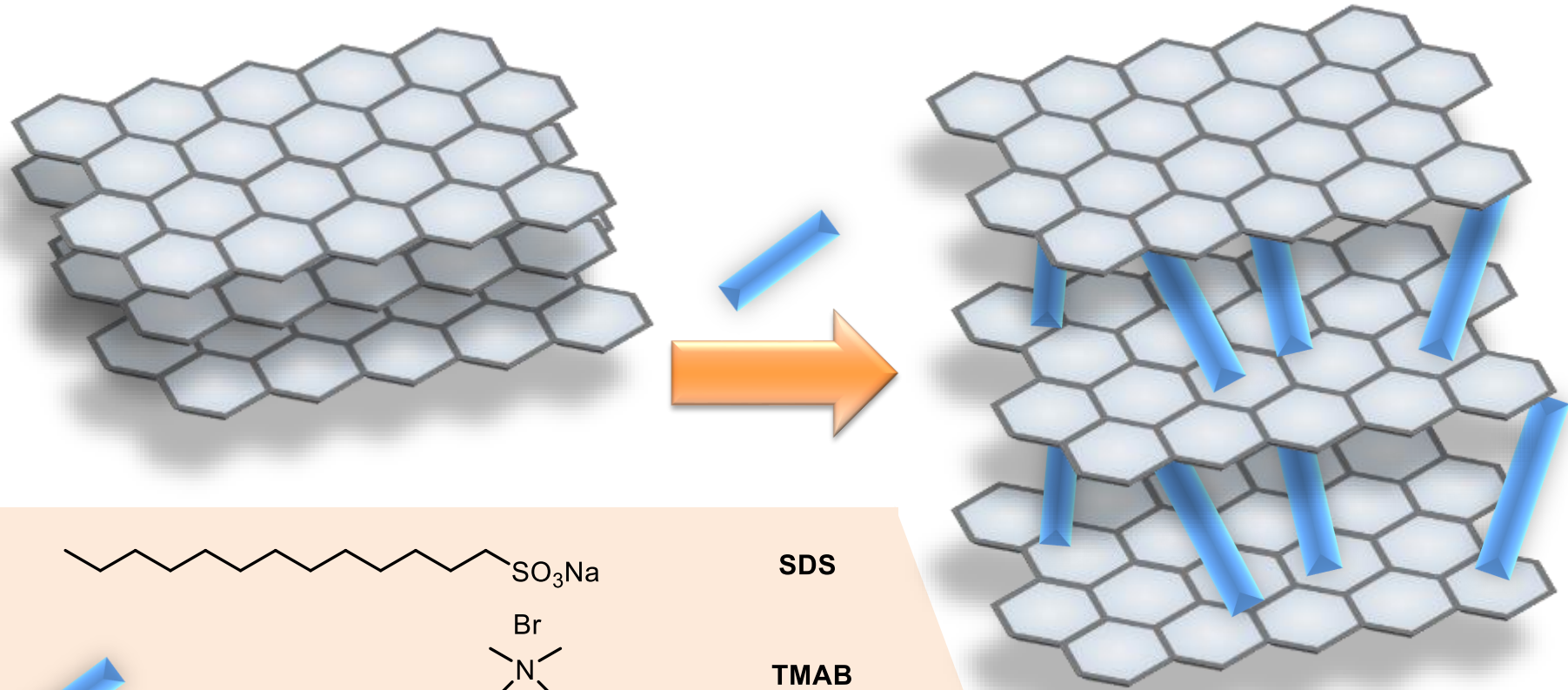
*Chem. Mater.* **2017**, 29, 2150.  
*ACS Nano* **2019**, 13, 10103.  
*Bull. Chem. Soc. Jpn.* **2023**,

# 3D構造をつくることができる



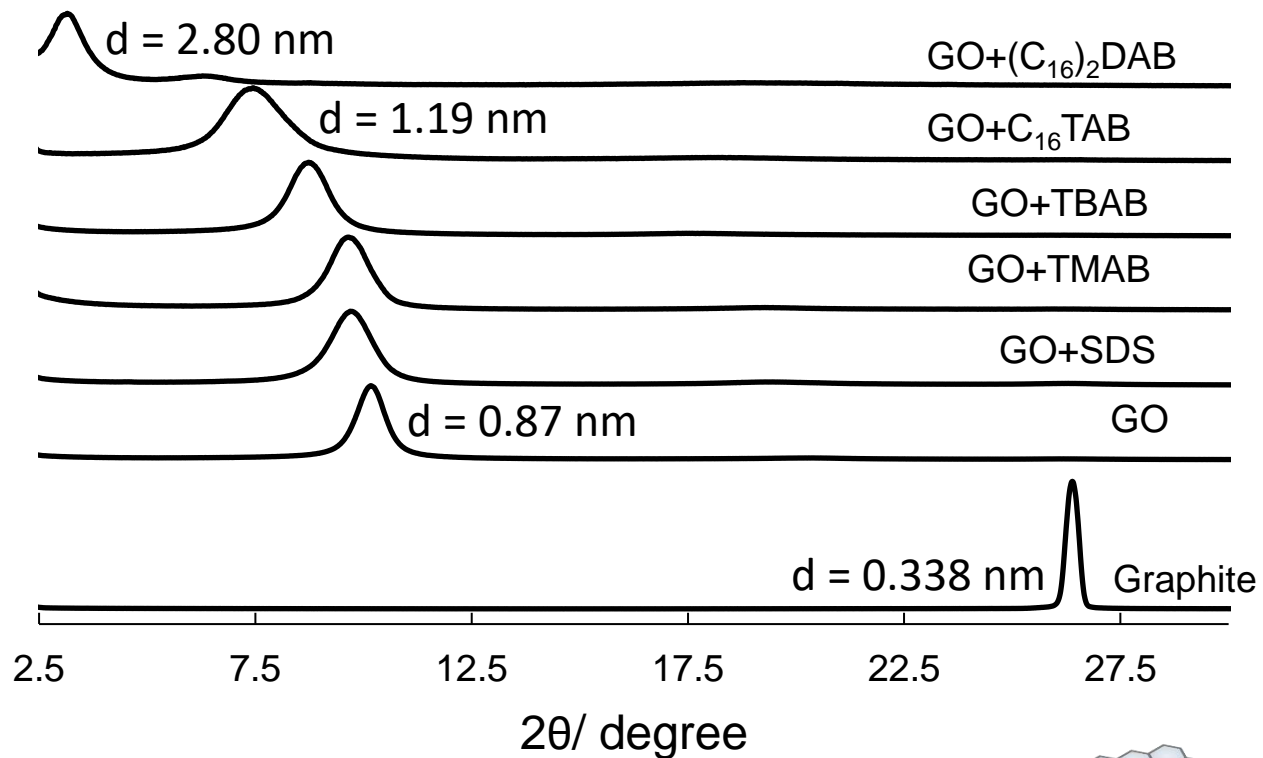


# 層間に分子を入れる



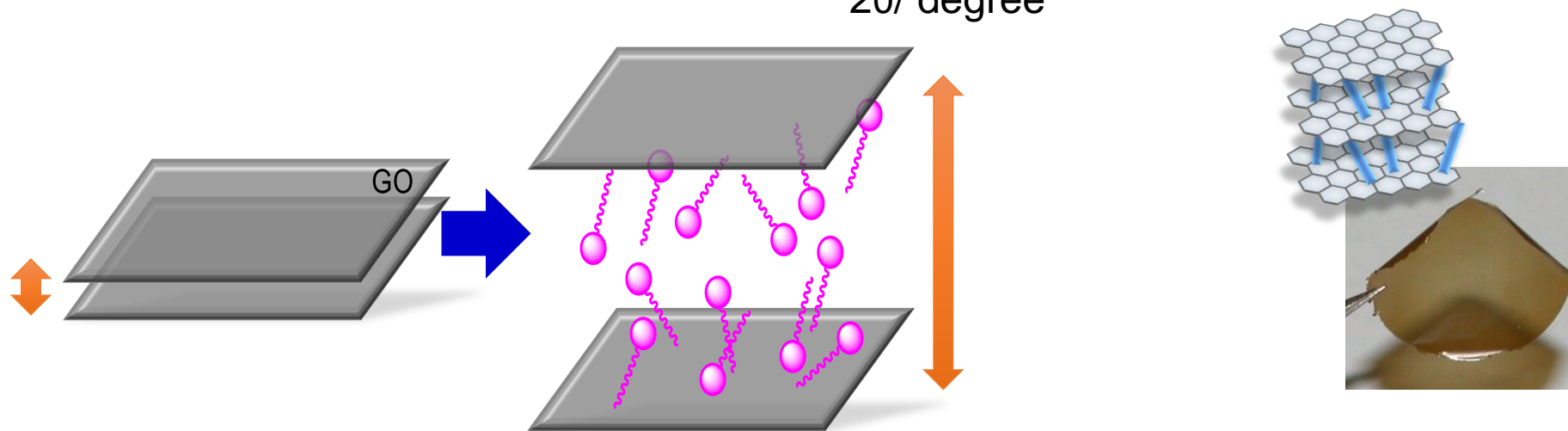
# 層間距離を制御する: 水の浄化

XRD



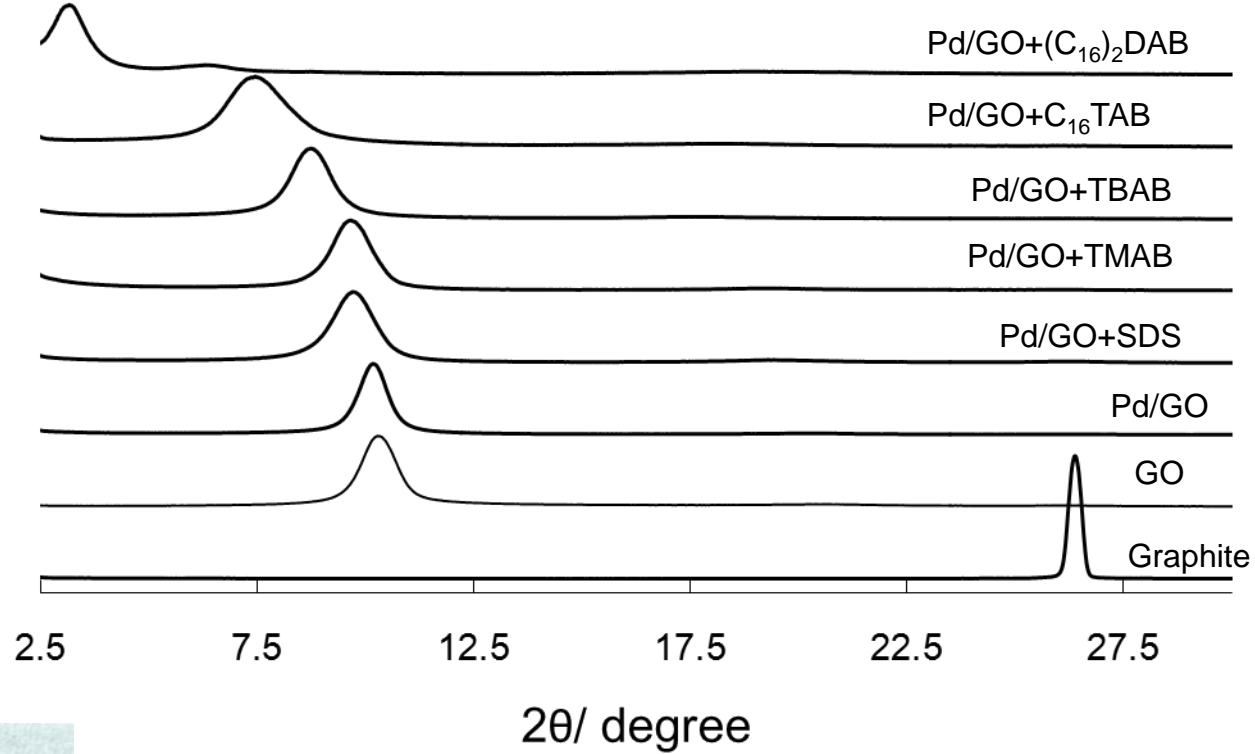
層間大

分子サイズ

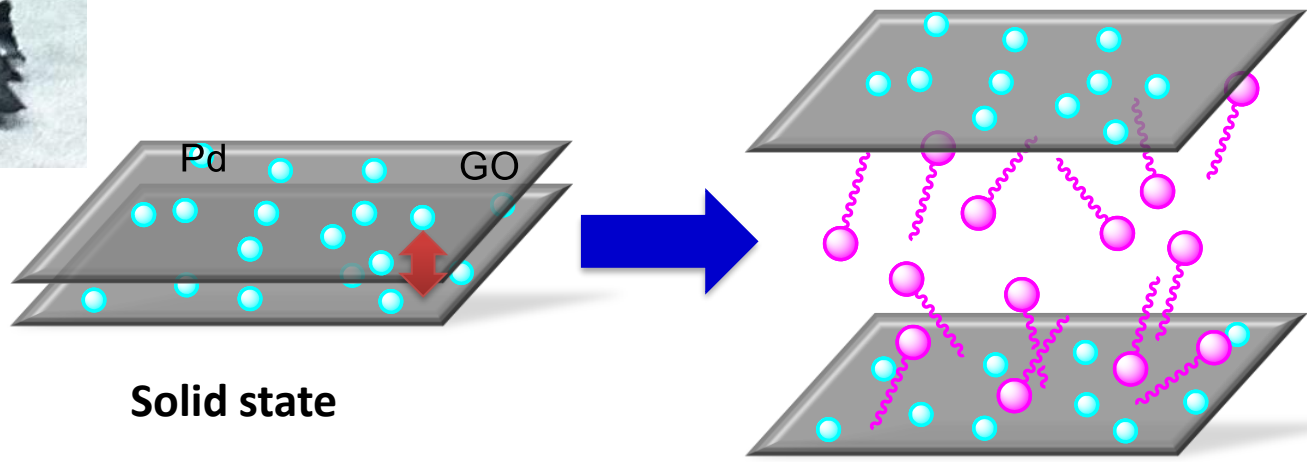


# 制御した層間を活用する：触媒

XRD



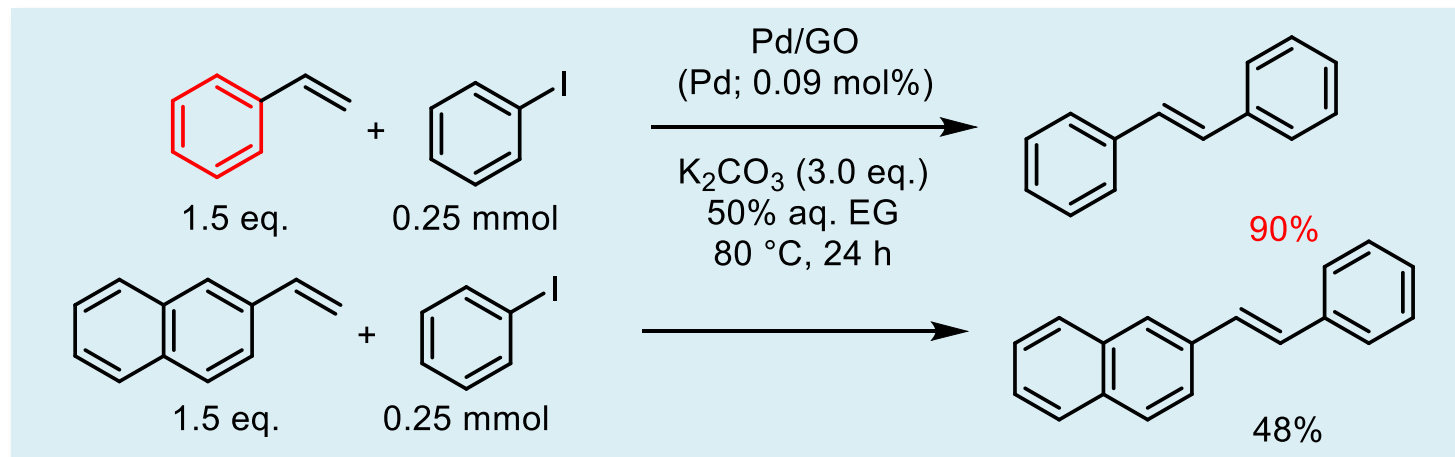
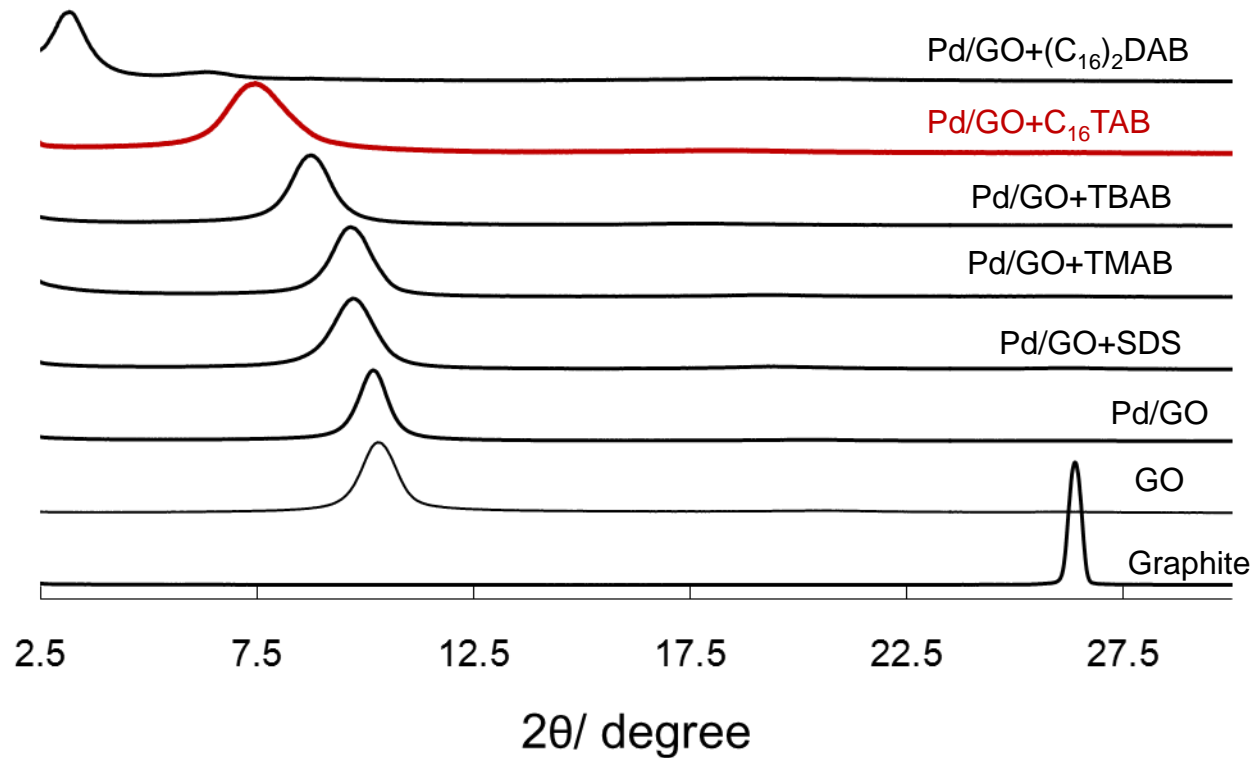
大  
↑  
界面活性剤の  
サイズ



↑  
↓

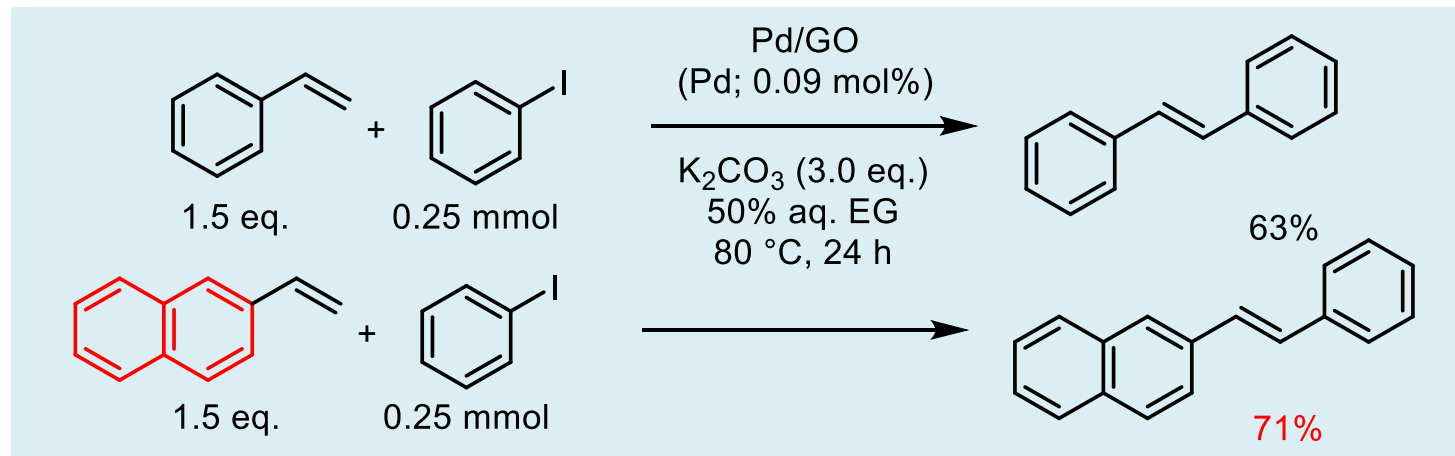
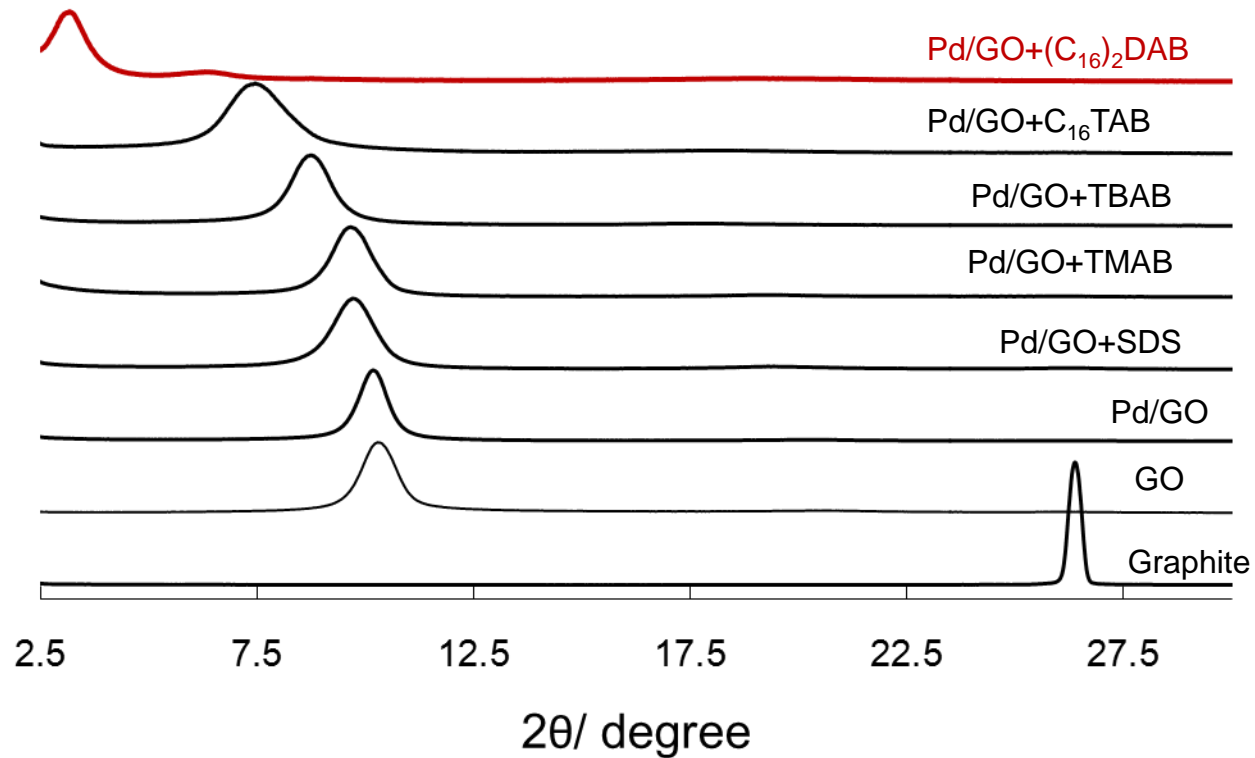
# 制御した層間を活用する：触媒

XRD



# 制御した層間を活用する：触媒

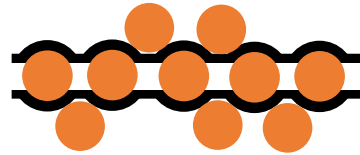
XRD



# 2次元 + ナノ粒子 = 3次元カーボン



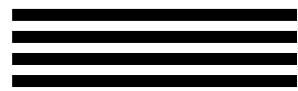
Feナノ粒子  
+  
乾燥



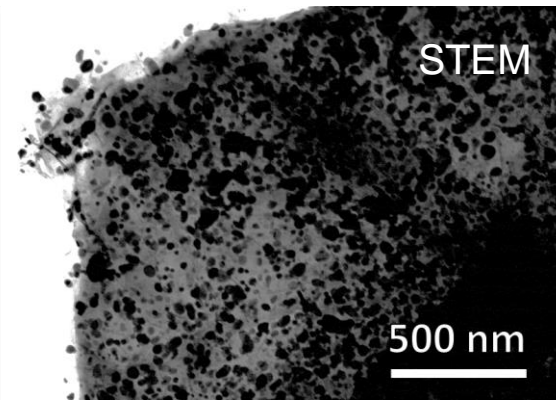
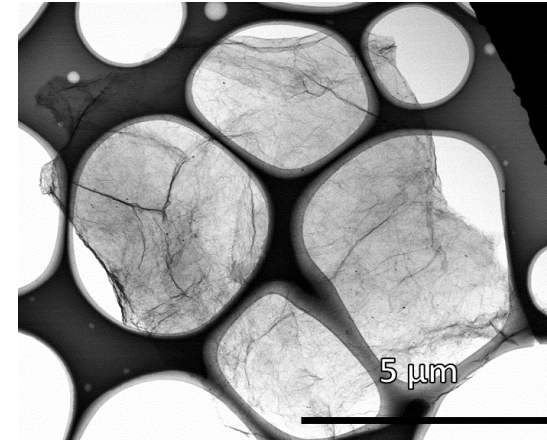
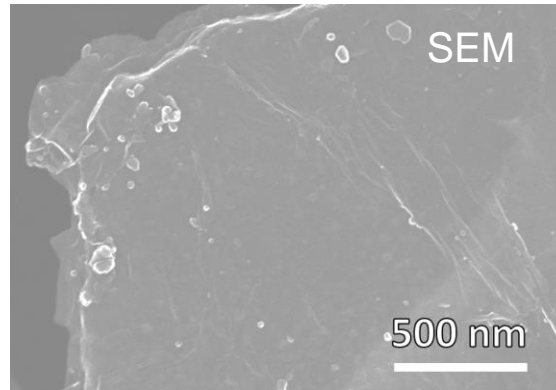
塩酸処理



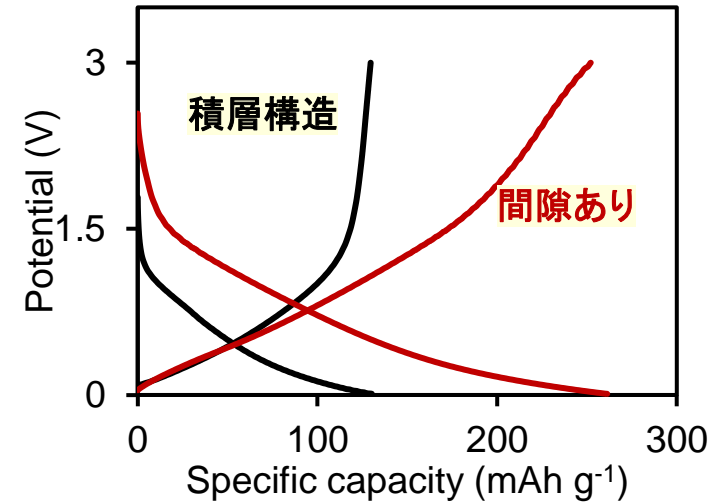
乾燥



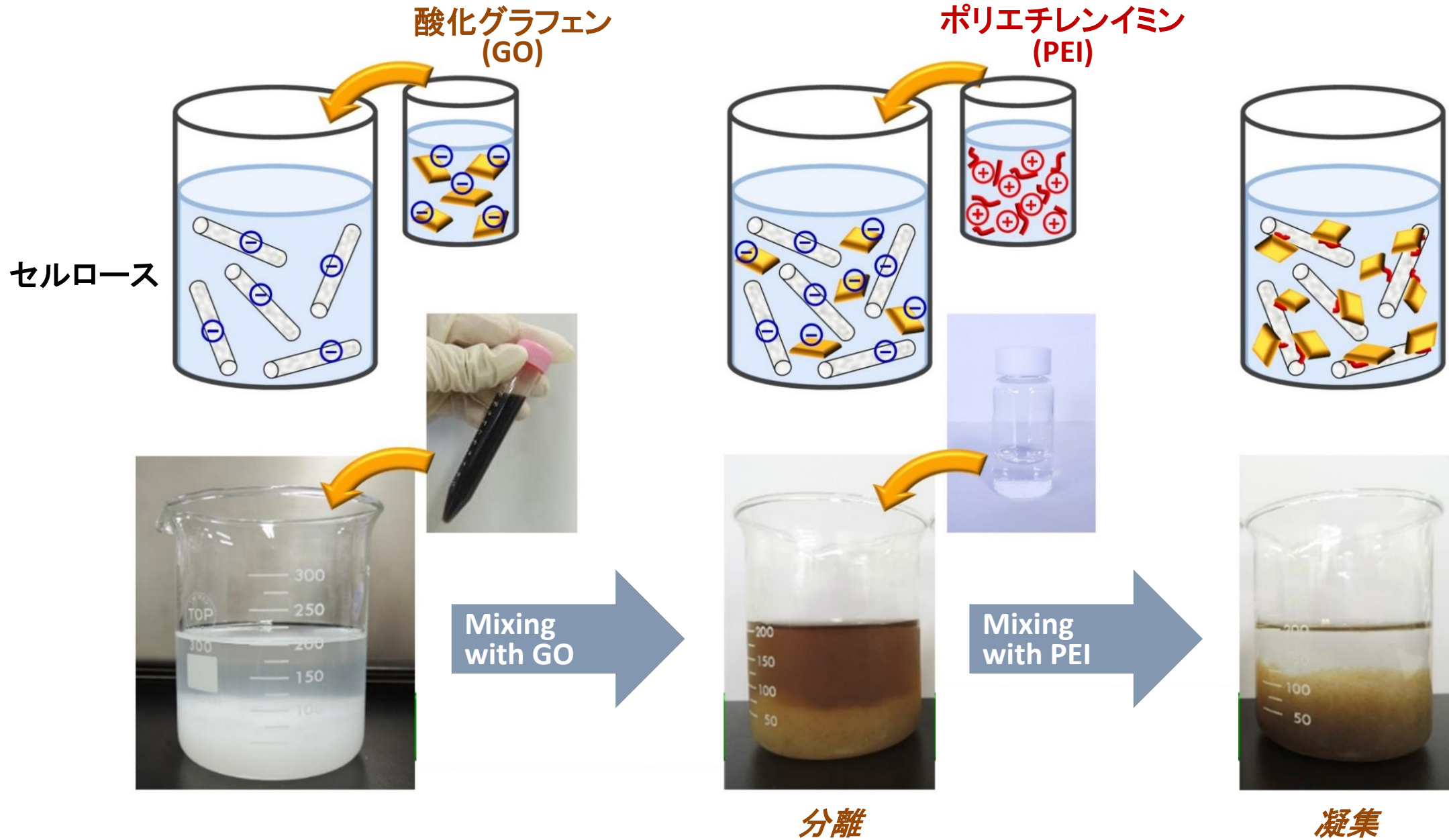
積層した構造



Naイオン電池負極性能評価 @ 0.02 A g<sup>-1</sup>



# 2次元 + セルロースファイバー = 3次元カーボン



# 光照射による導電性の付与

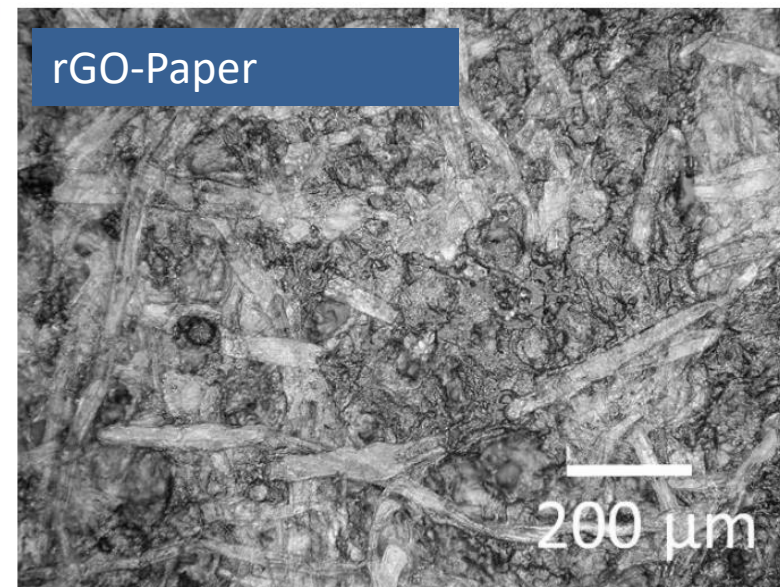
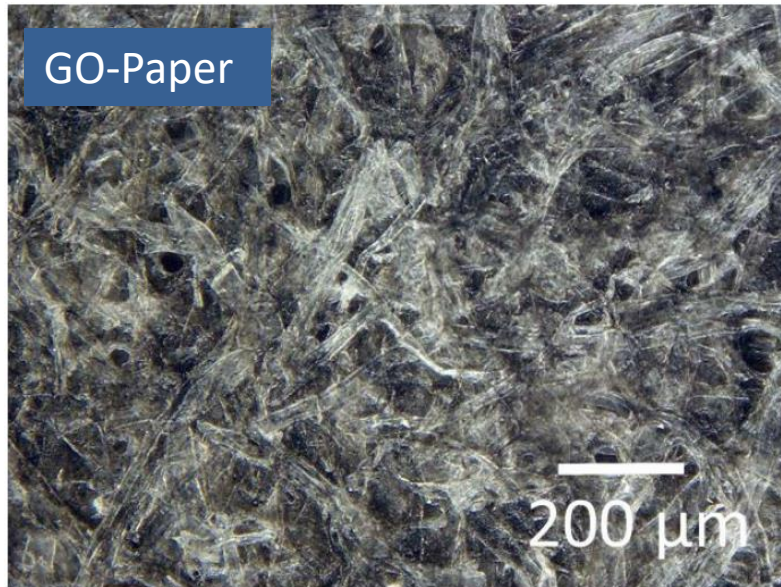
GO-Paper



ストロボ光の照射

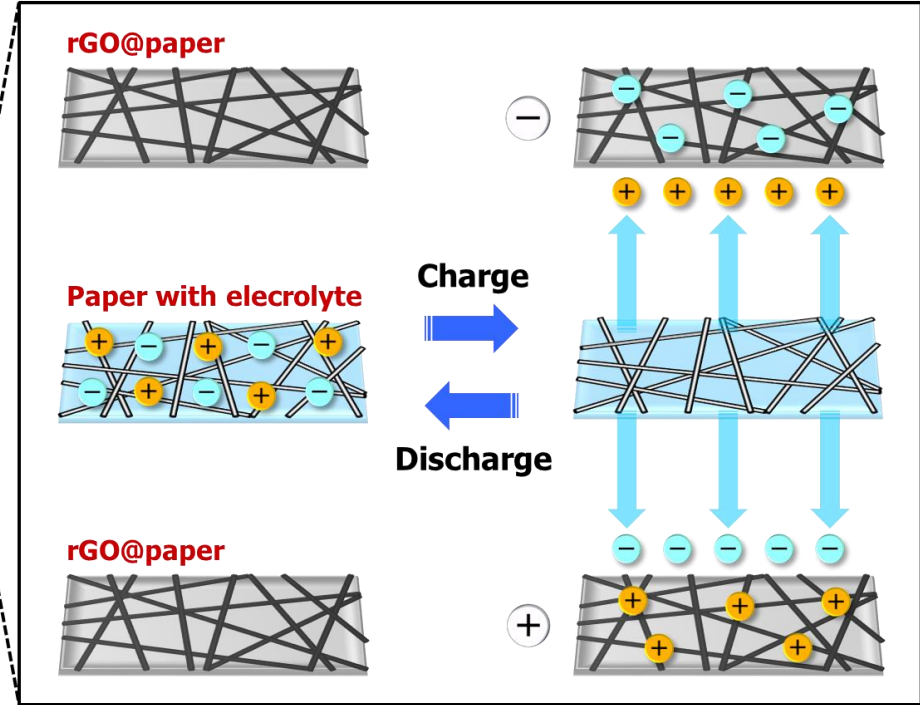
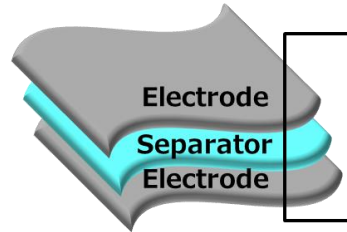
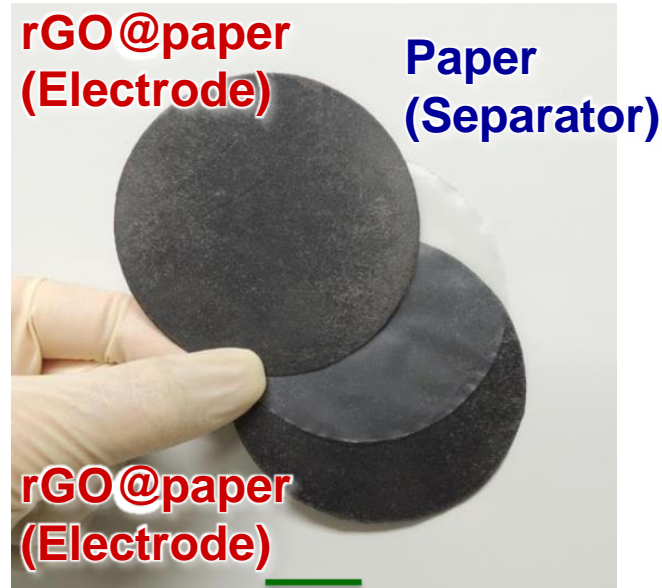
200 V, 1.0 J/cm<sup>2</sup>  
36 ms, room temp,  
under Air

Reduced GO (rGO)-Paper





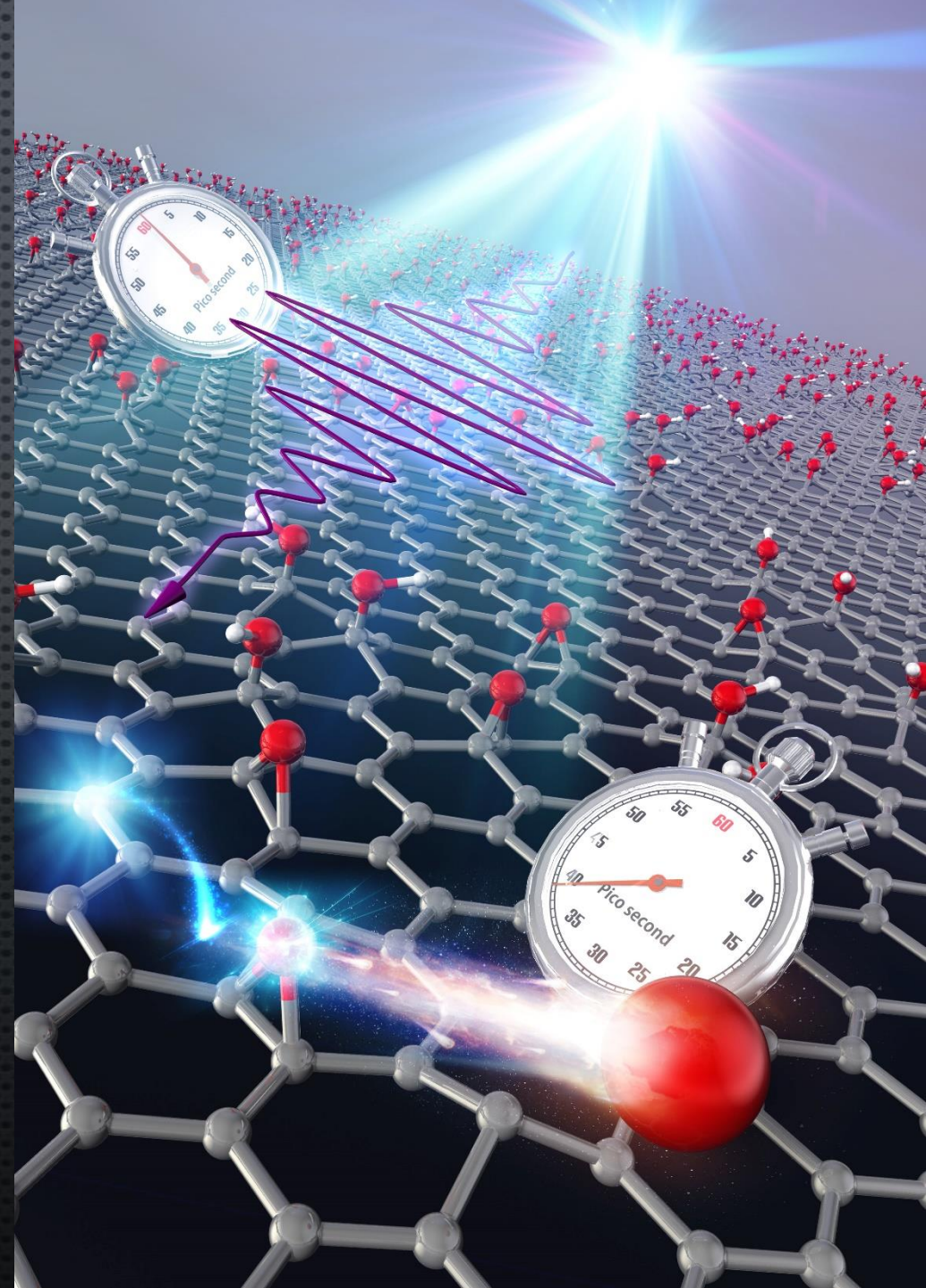
# フレキシブルスーパーキャパシタへの応用



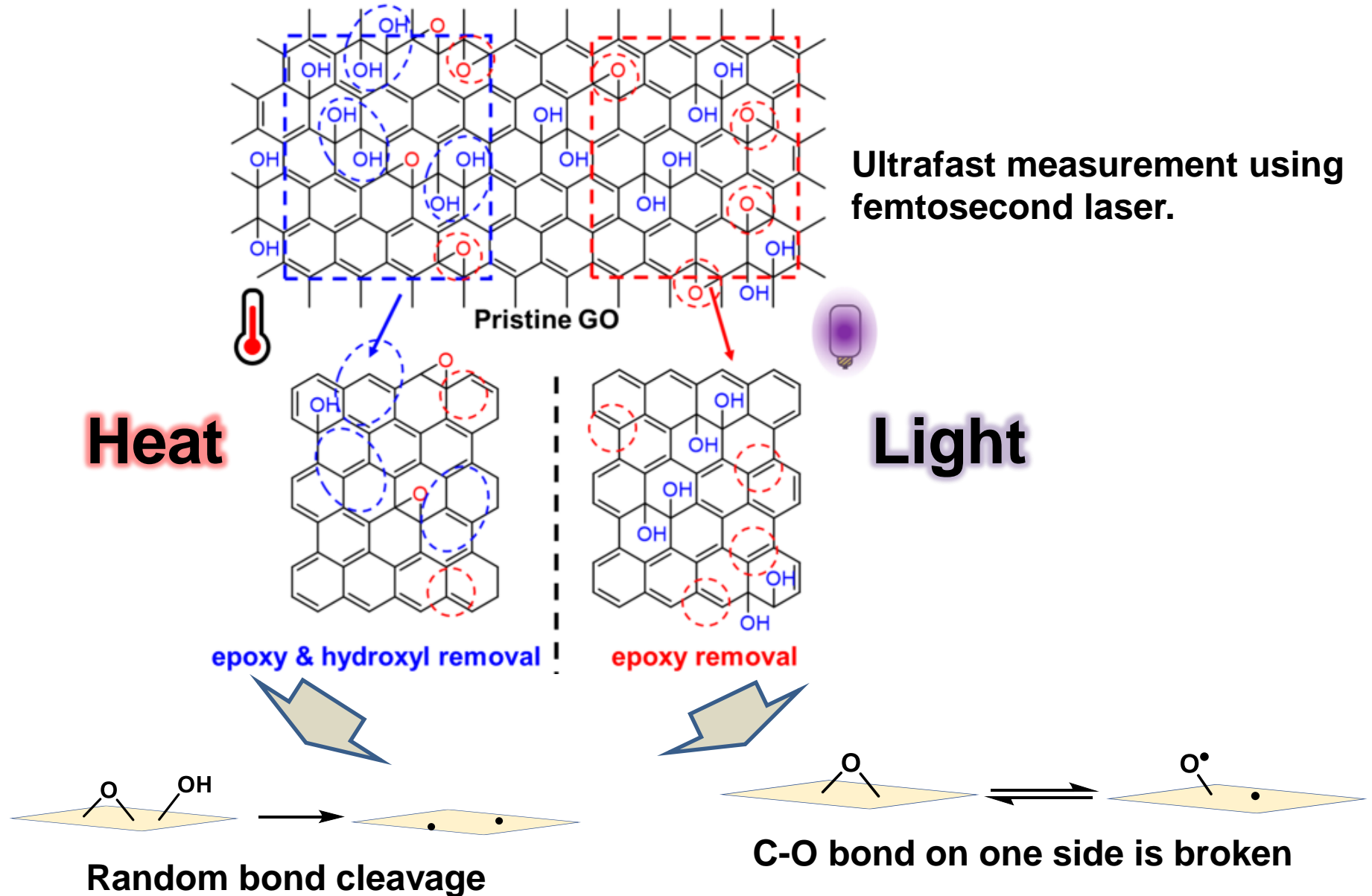
- 薄い
- 軽量
- 柔軟
- 貼り付け可能

Capacitance: 200 F/g

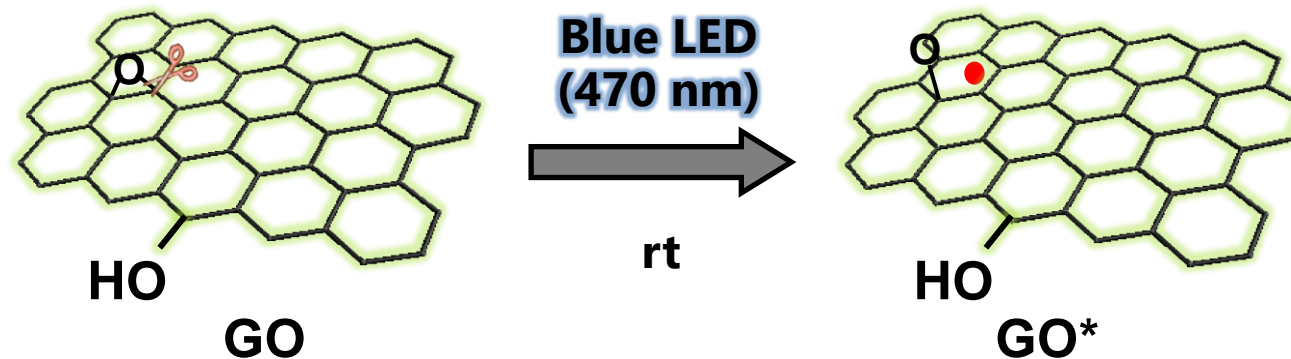
# GOは光に反応する



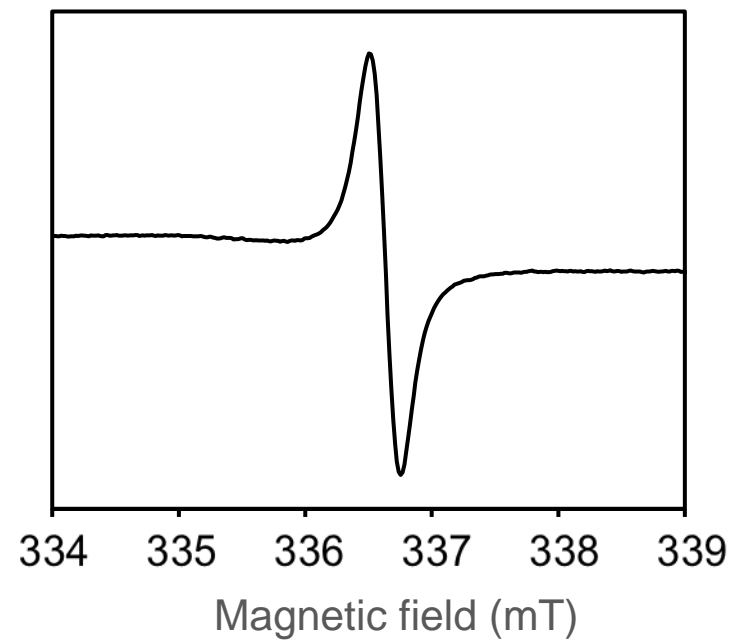
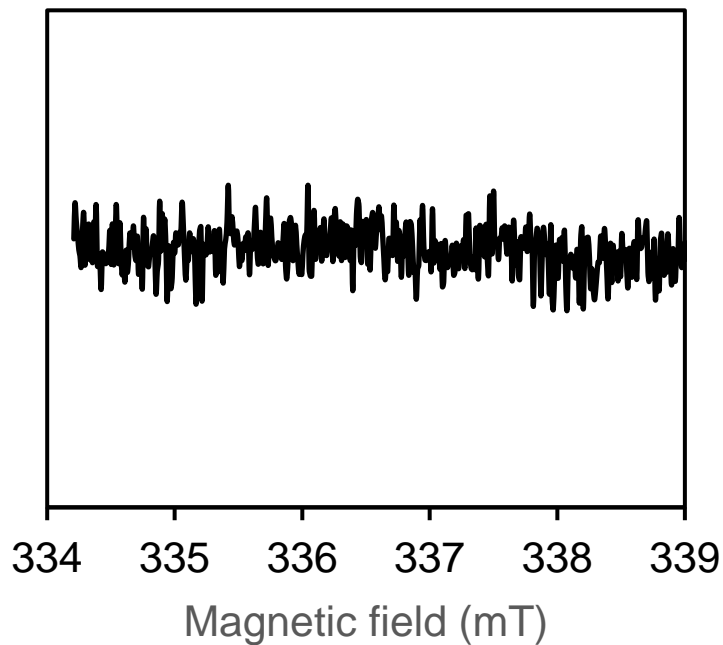
# 熱 or 光による結合の開裂



# 酸化グラフェンへの光照射

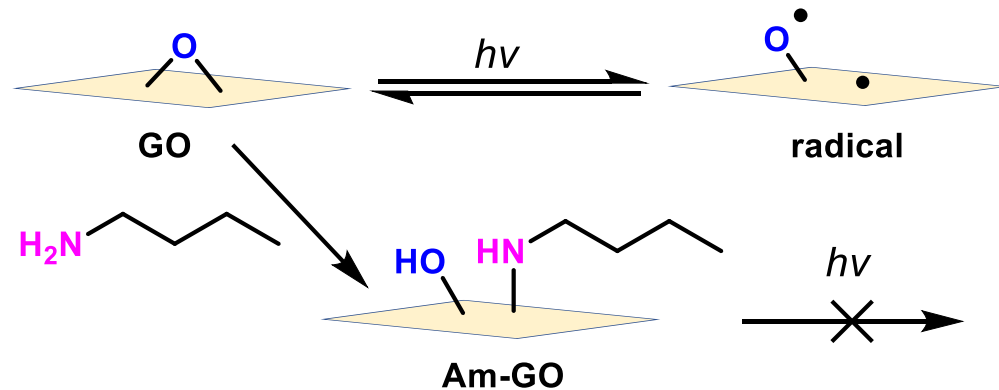
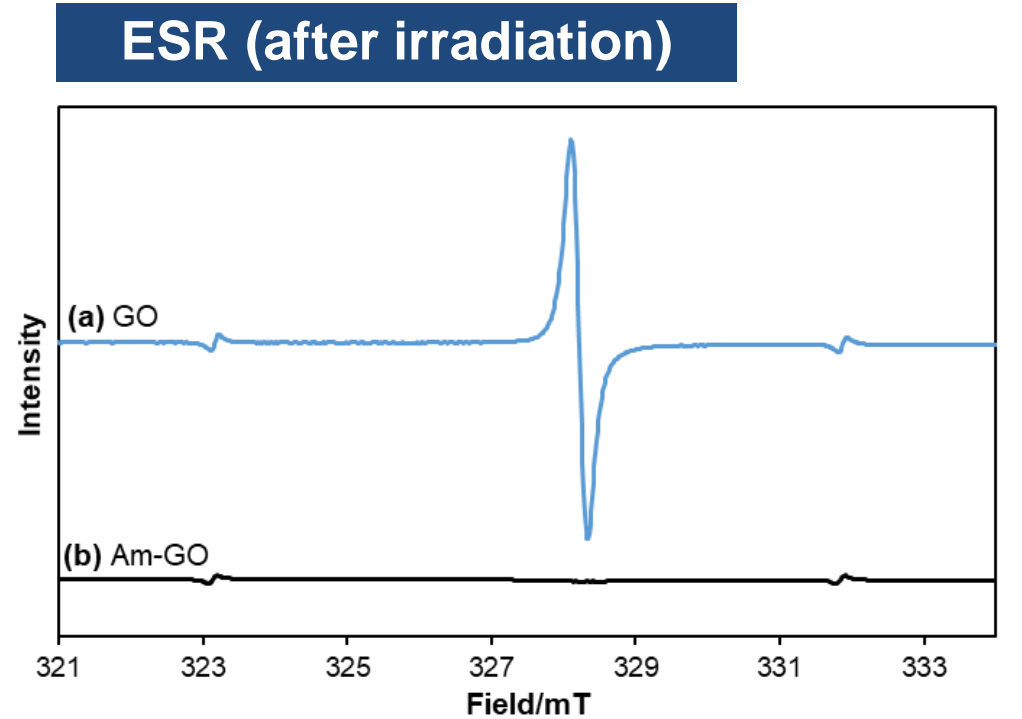
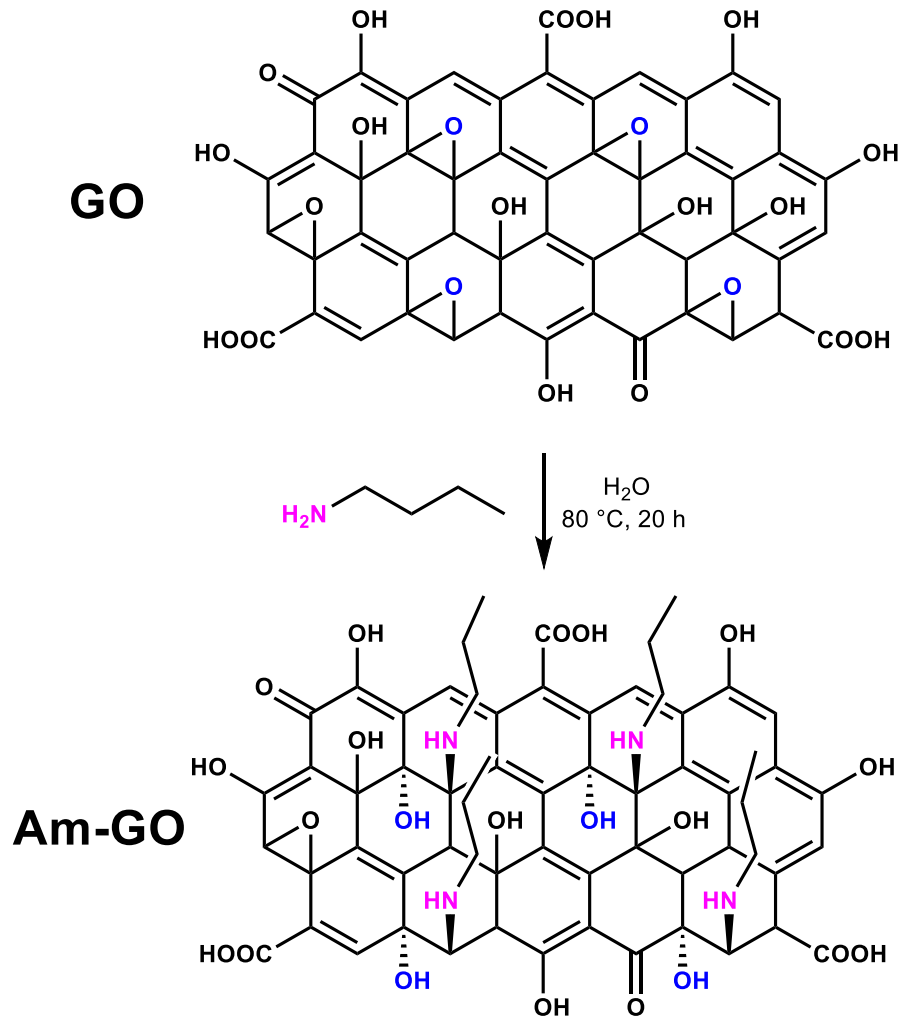


ESR



光照射により、ラジカルが発生

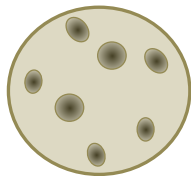
# ラジカル発生にはエポキシ基が重要



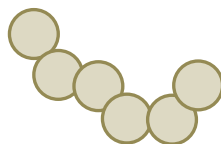
# GOが最もラジカルを発生



Graphene oxide  
(GO)



Ox. activated carbon  
(O-AC)



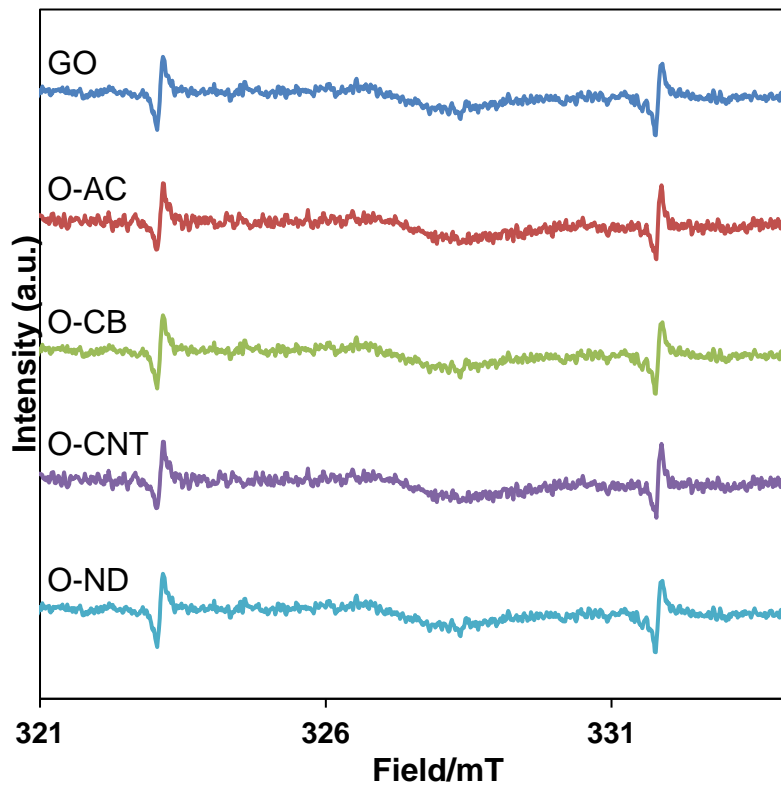
Ox. carbon black  
(O-CB)



Ox. carbon nanotube  
(O-CNT)

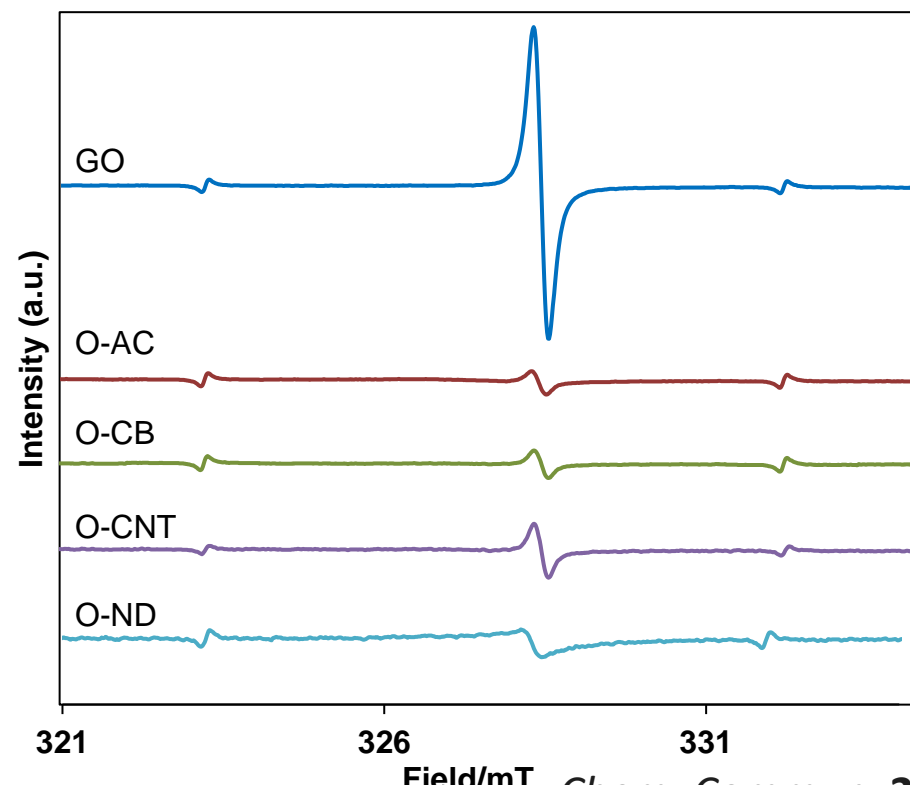


Ox. nanodiamond  
(O-ND)



ESR

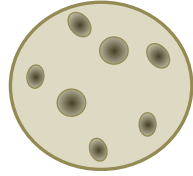
Blue LED  
(470 nm)



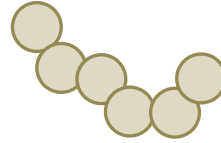
# GOが最もラジカルを発生：エポキシ基の効果



Graphene oxide  
(GO)



Ox. activated carbon  
(O-AC)



Ox. carbon black  
(O-CB)

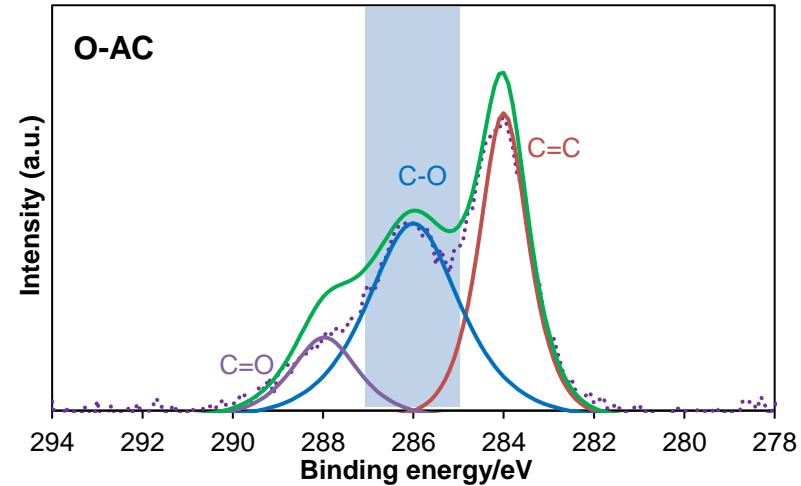
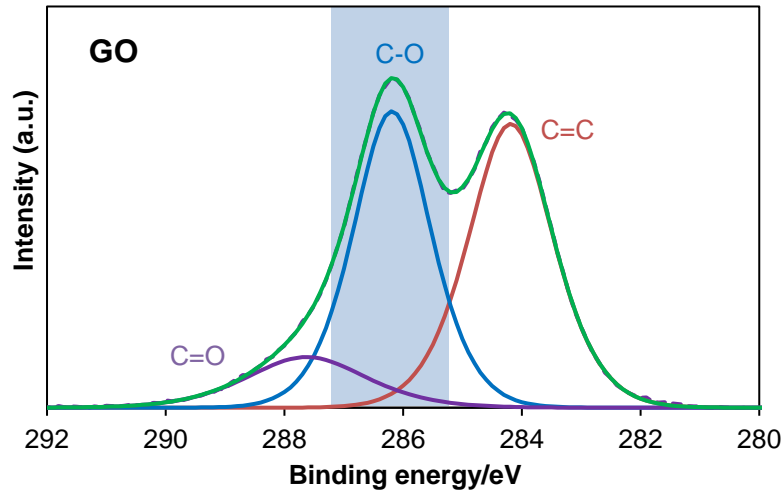


Ox. carbon nanotube  
(O-CNT)



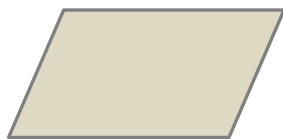
Ox. nanodiamond  
(O-ND)

## XPS (C1s)

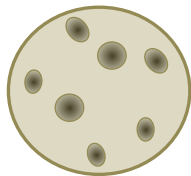


Epoxide plays an important role in radical generation.

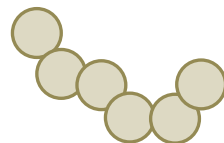
# GOが最もラジカルを発生



Graphene oxide  
(GO)



Ox. activated carbon  
(O-AC)



Ox. carbon black  
(O-CB)

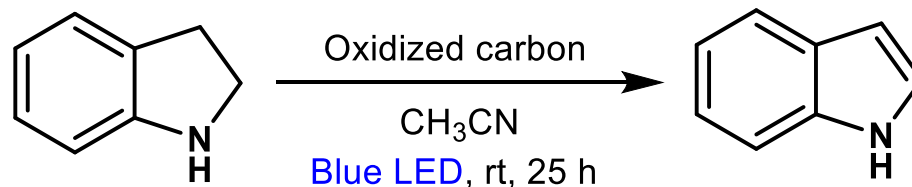


Ox. carbon nanotube  
(O-CNT)



Ox. nanodiamond  
(O-ND)

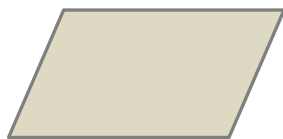
## Catalysis



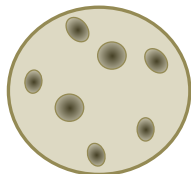
Entry	Oxidized carbon	Yield (%)
1	GO	85
2	O-AC	12
3	O-CB	10
4	O-CNT	7
5	O-ND	5
6	-	0



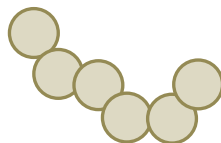
# GOが最もラジカルを発生



Graphene oxide  
(GO)



Ox. activated carbon  
(O-AC)



Ox. carbon black  
(O-CB)

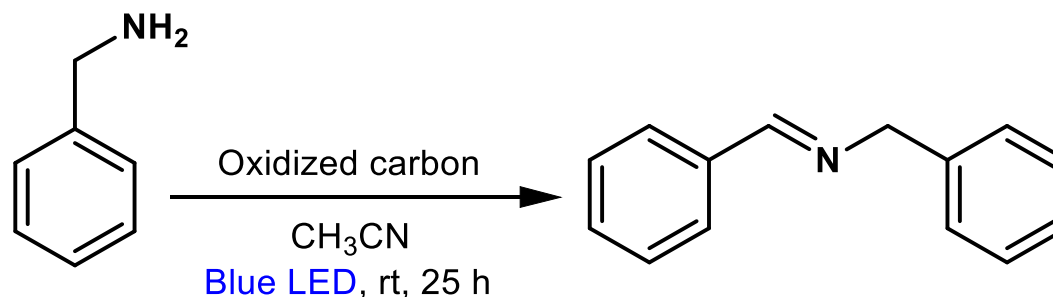


Ox. carbon nanotube  
(O-CNT)



Ox. nanodiamond  
(O-ND)

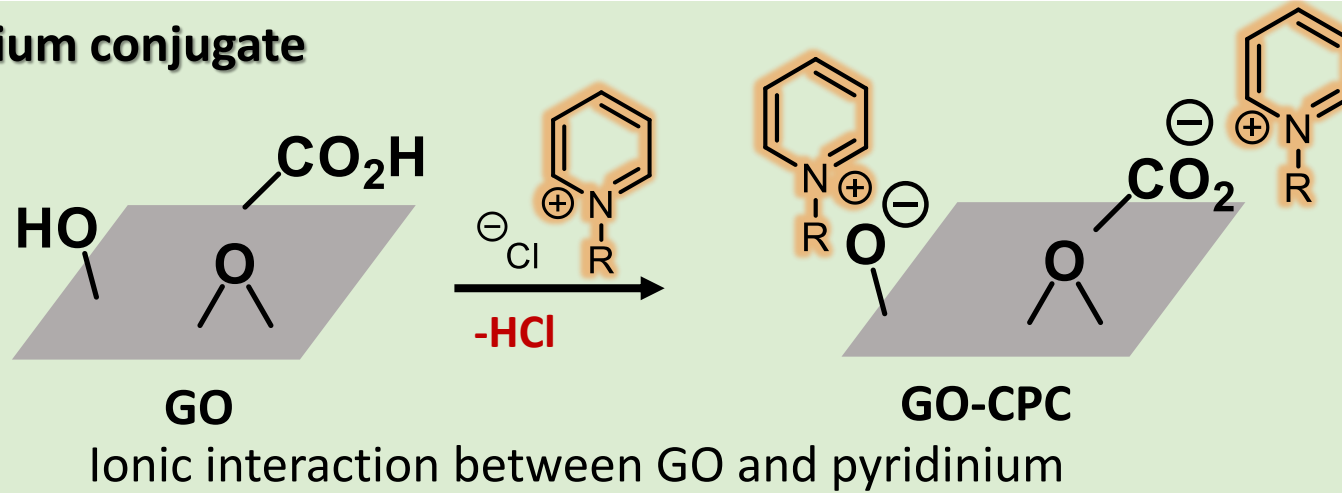
## Catalysis



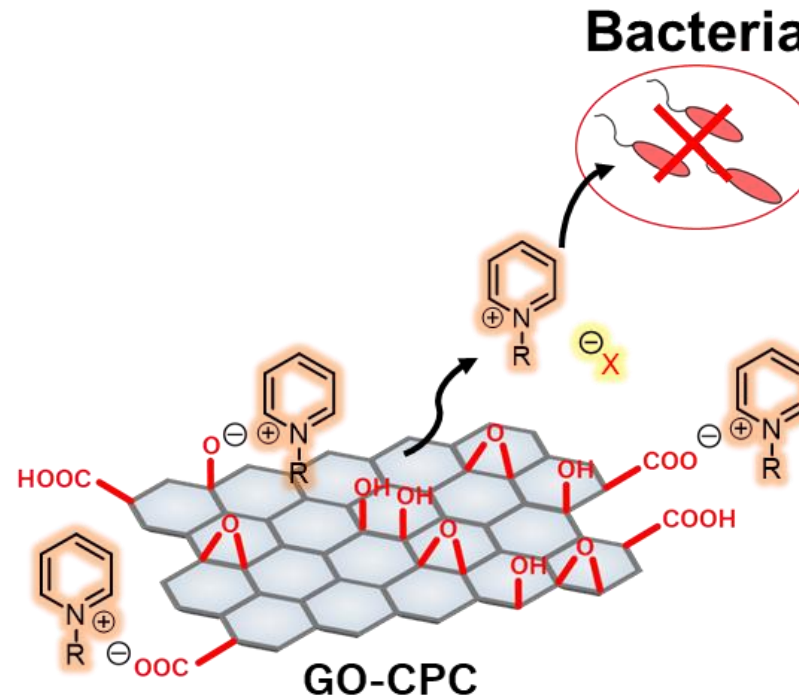
Entry	Oxidized carbon	Yield (%)
1	GO	90
2	O-AC	10
3	O-CB	5
4	O-CNT	7
5	O-ND	3
6	-	0

# 抗菌成分の固定化、光・熱による放出

GO-pyridinium conjugate

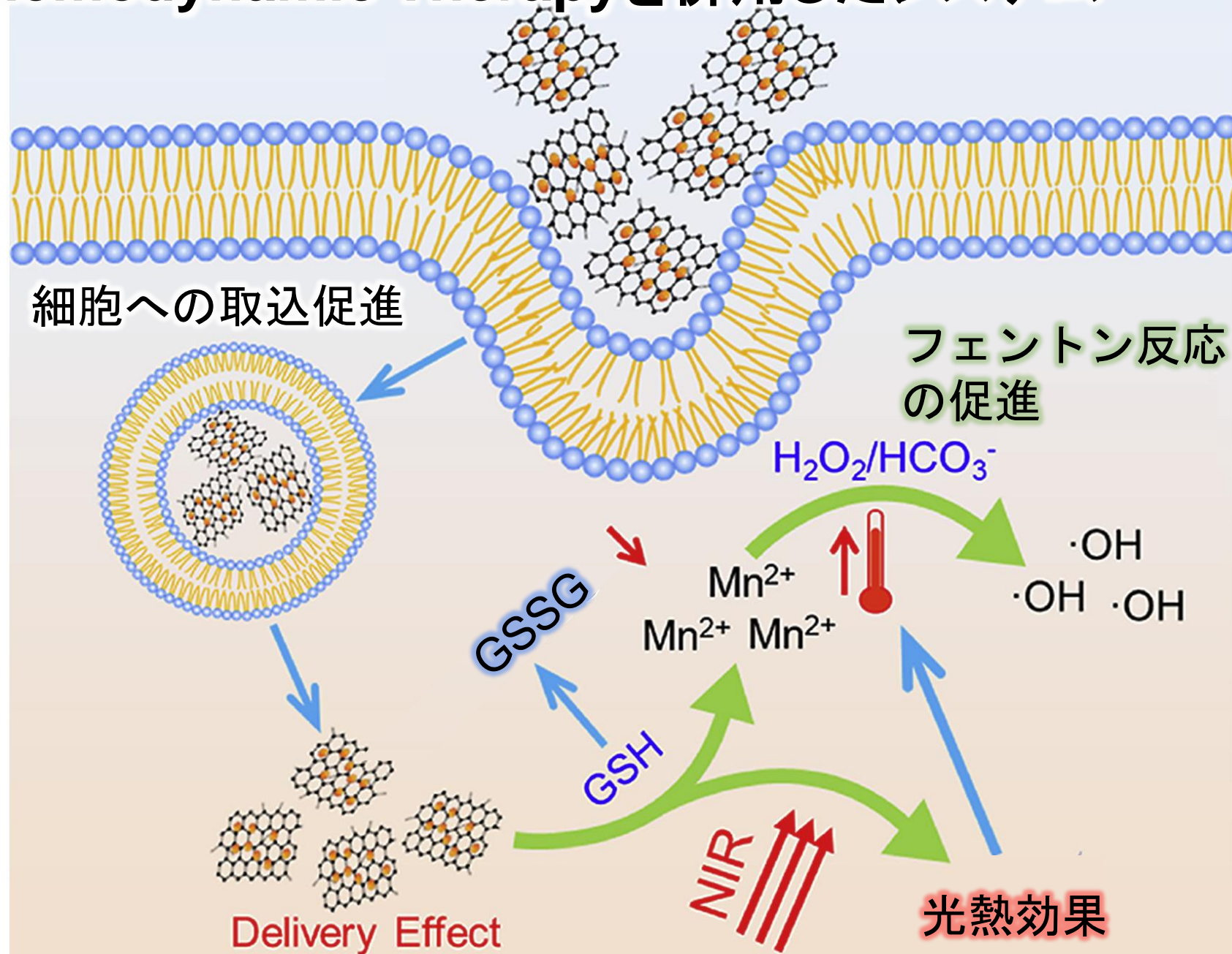
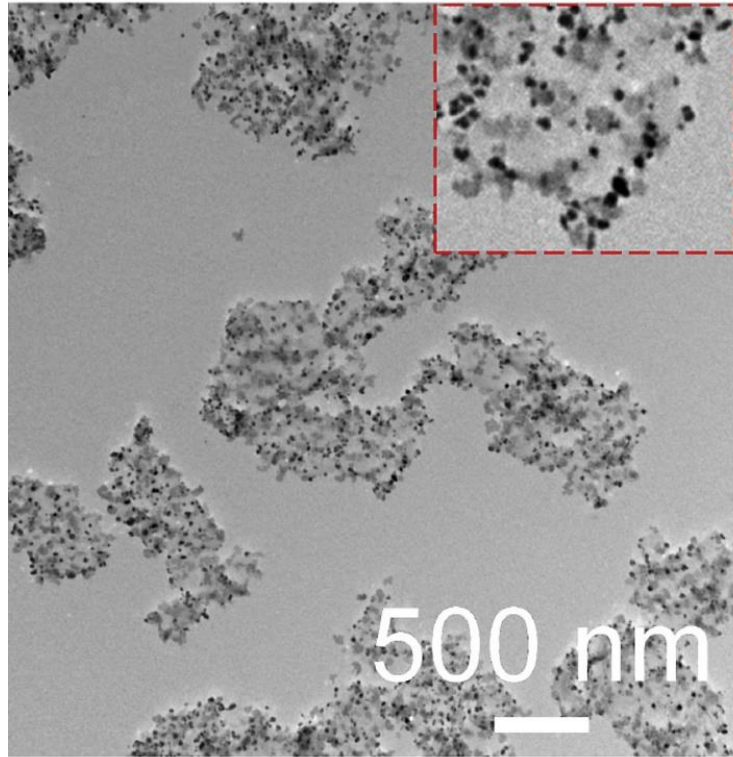


熱または光により、  
抗菌剤を放出

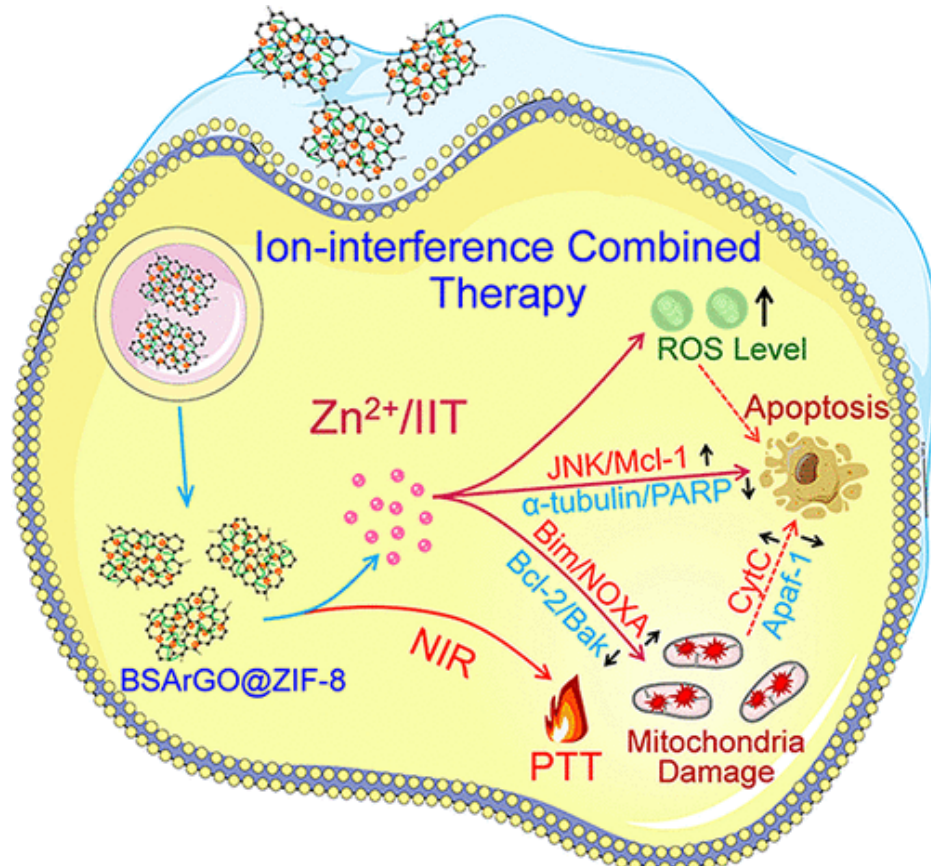
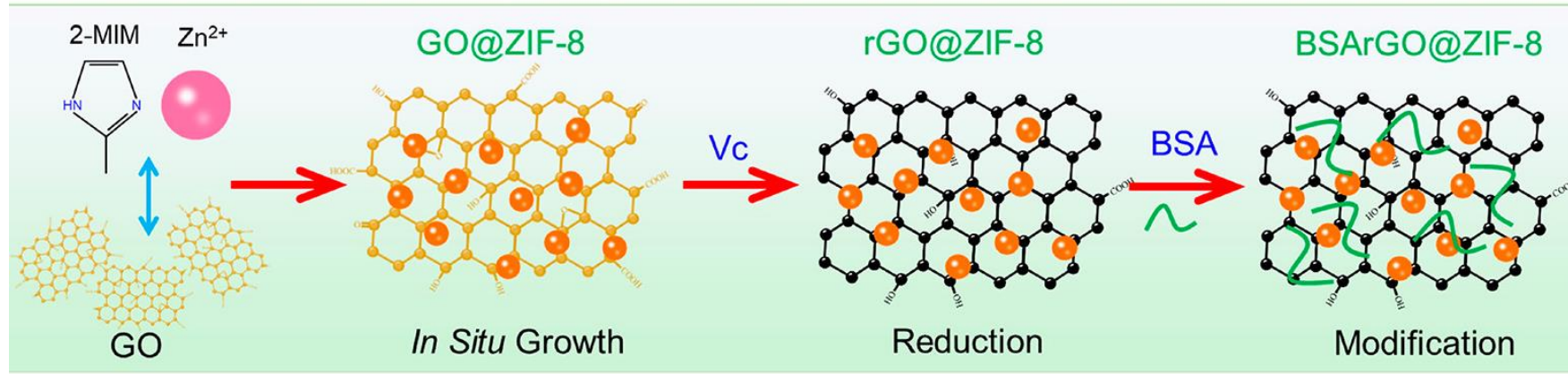


# Photothermal & Chemodynamic Therapyを併用したシステム

MnO<sub>2</sub>/GO composite



# Other Photo-therapy Materials

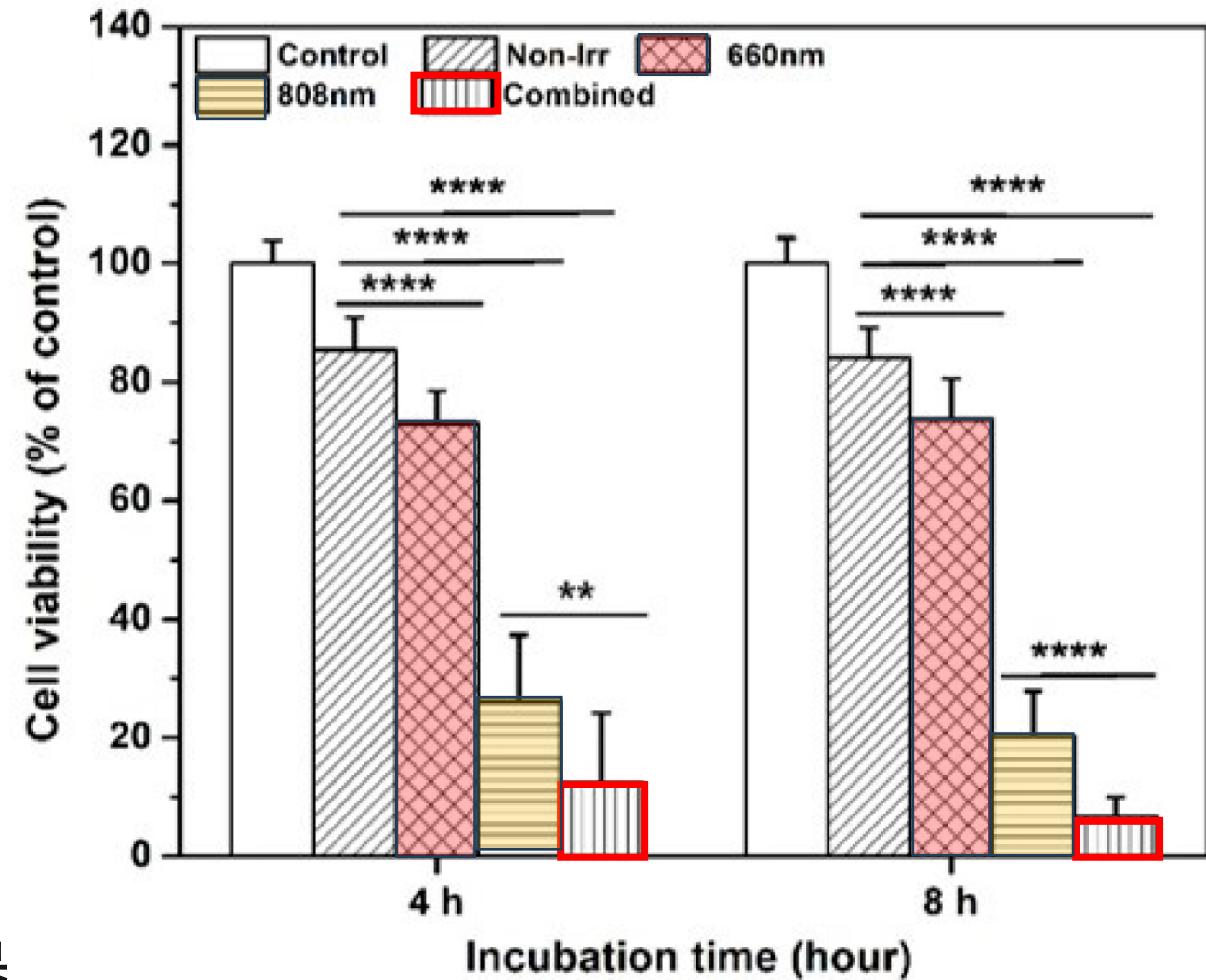
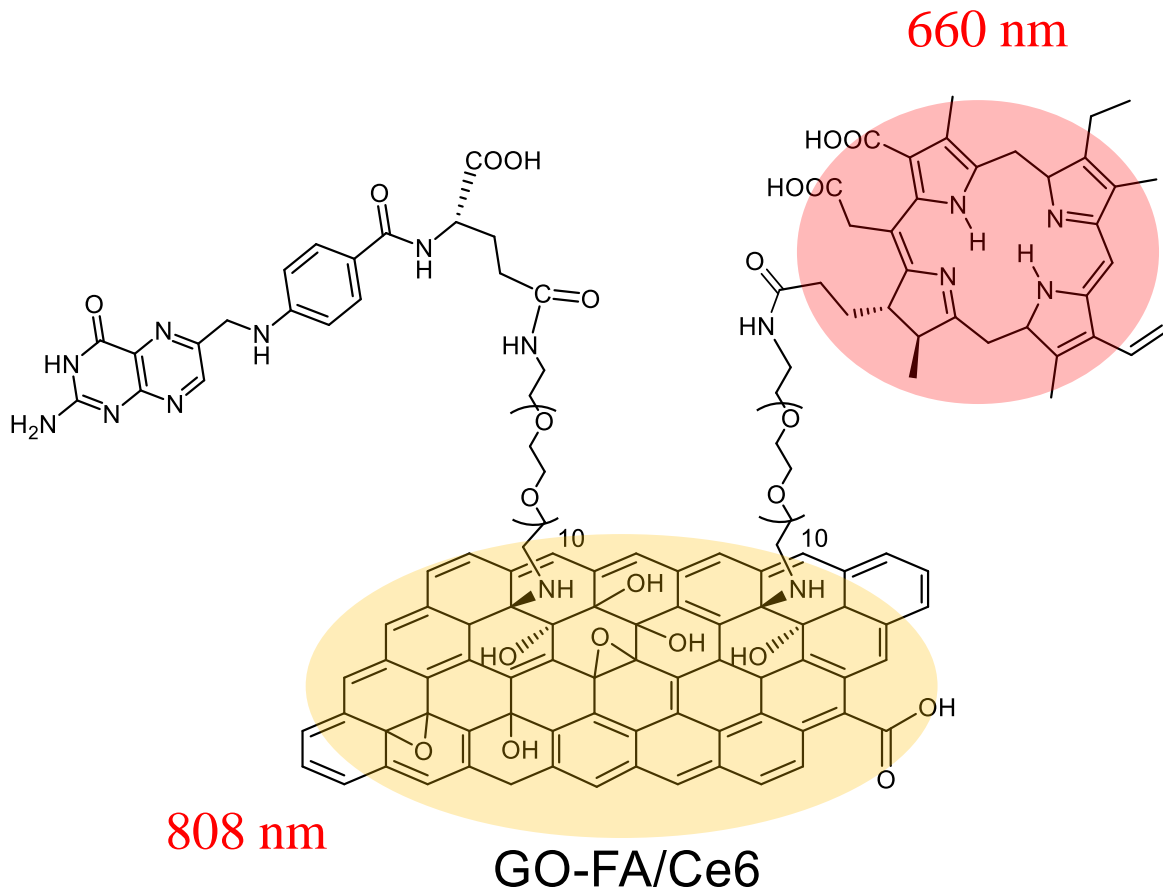


ウシ血清アルブミン(BSA)がコロイド安定性と生物学的適合性を向上。

$Zn^{2+}$ の放出によりイオン干渉効果が増強され、活性酸素種が生成。

NIR照射による光温熱効果。

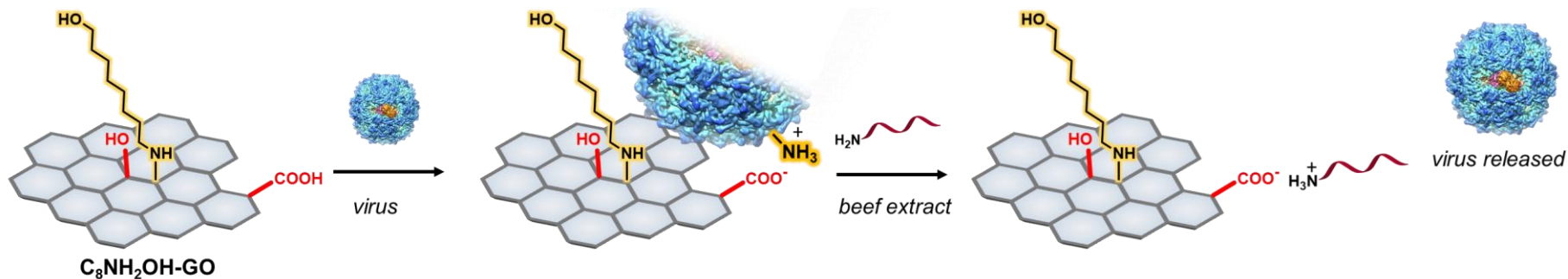
# Other Photo-therapy Materials



2つの波長の光を照射することによる増強効果

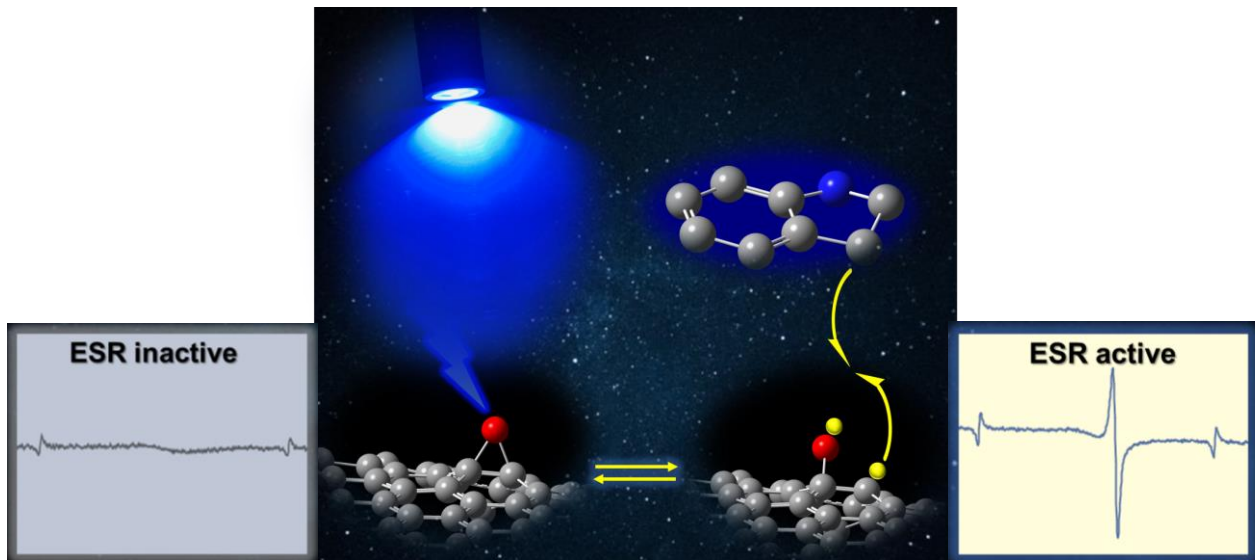
# 進行中の研究

## 1. ウイルス濃縮材

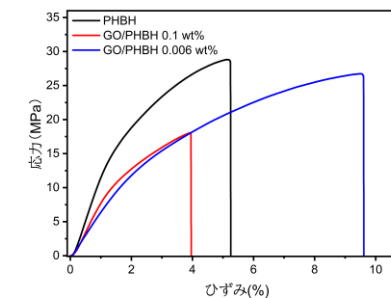
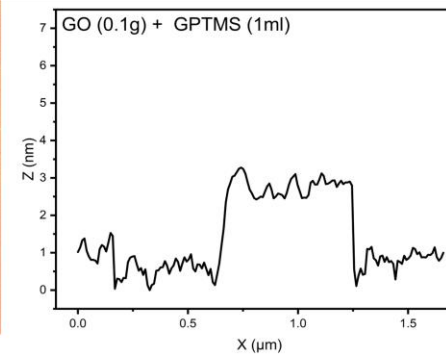
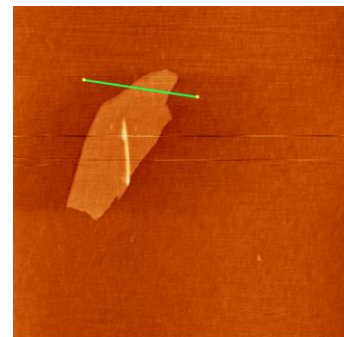


PCR detection from diluted sewage water

## 2. 光機能材料



## 3. 生分解性材料



# CO<sub>2</sub>削減に貢献する研究

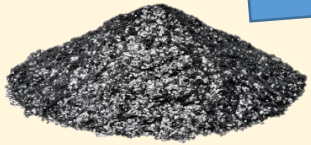
## ① カーボンブラックを代替する炭素材料の開発



### ② バイオマスの炭素化

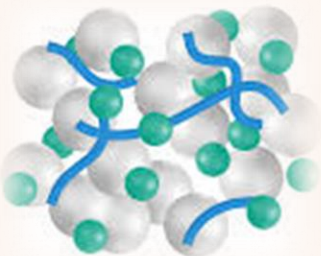


High temp.  
Microwave  
Catalyst



Crystalline carbon

導電助剤



潤滑添加剤



### ③ 有機物の炭素化

CREST



Catalytic  
carbonization



Carbon

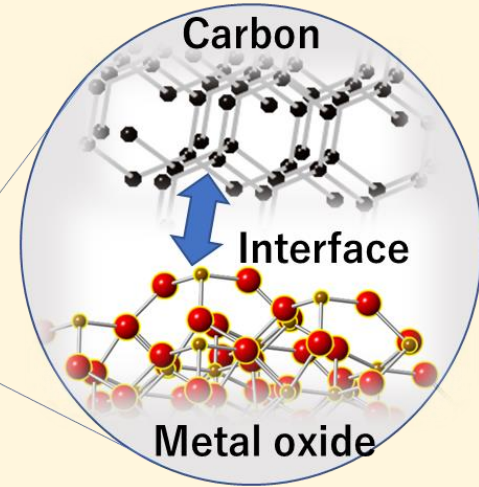
科研費  
KAKENHI

### ④ CO<sub>2</sub>の炭素化

M

CO<sub>2</sub>

MO<sub>x</sub>



エネルギー貯蔵



建材



水・土壌環境浄化

2024年10月～2030年3月



【材料創製と循環】材料創製および循環プロセスの革新的融合基盤技術の創出とその学際構築  
2024年11月2日 キックオフ会議

**未利用有機物の炭素化**  
資源循環のためのマルチナリーカーボンの創出

研究代表者  
仁科 勇太 (岡山大学・異分野基礎科学研究所・教授)

主たる共同研究者  
片岡 祥 (産業技術総合研究所・プロセス研究部門・グループ長)  
坂本 良太 (東北大学・大学院工学研究科・教授)  
神谷 和秀 (大阪大学・大学院工学研究科・准教授)

# 未利用“炭素化” 有機物の

資源循環のための  
マルチナリーカーボンの創出

研究の目的  
【課題】 備える資源“カーボン”：循環プロセスが未確立

未利用有機物の炭素化に関する  
研究提案について

まず、カーボン材料とその原料の炭素化について述べています。現在、これらほとんど輸入に依存しています。しかし、アジアなどの国では、カーボン回収が可能な場合があります。炭素回収の手続きは複雑ですが、カーボンはバイオマスや廃プラスチックなどの有機物から製造できる可能性があります。

本研究では、様々な未利用有機物を用いて、多量の炭素と高純度の炭素化有機物をマルチナリーカーボン（多層炭素）として、カーボンの供給源を確保します。

また、炭素材料を製造することで、カーボンの処理量を地元の環境負荷に拡大させ、資源循環を創出するアプローチとして提案することを目的とします。

この目標を達成するために、このグループで研究を進めます。私、片岡は、マルチナリーカーボンの創製と炭素化プロセスの確立を、研究の学際性を高めるため、全学を有門とする東京大学の新規創設、国際化と連携研究を有門とする大阪大学の学際連携と進めます。

【解決策】 未利用有機物から“マルチナリーカーボン”を創出  
→カーボンの産源資源化 →カーボン使用量の増大  
→炭素循環プロセスの確立

## 科学技術振興機構 CREST事業

2024年10月～2030年3月

01 | 炭素化グループ：材料創製 × 循環プロセス研究

炭素化グループでは、炭素資源の有効な利用と、CO<sub>2</sub>削減の両立を目指す。2030年までの炭素削減目標を達成し、2050年以降の炭素中立社会を実現するために、炭素資源の有効な利用と、CO<sub>2</sub>削減の両立を目指す。2030年までの炭素削減目標を達成し、2050年以降の炭素中立社会を実現するために、炭素資源の有効な利用と、CO<sub>2</sub>削減の両立を目指す。

02 | 分子モデル・メカニズム解析グループ

分子モデル・メカニズム解析グループでは、マルチナリーカーボンの構造と特性を明らかにするために、炭素資源の有効な利用と、CO<sub>2</sub>削減の両立を目指す。2030年までの炭素削減目標を達成し、2050年以降の炭素中立社会を実現するために、炭素資源の有効な利用と、CO<sub>2</sub>削減の両立を目指す。

03 | 構造・物性解析グループ

構造・物性解析グループでは、マルチナリーカーボンの構造と特性を明らかにするために、炭素資源の有効な利用と、CO<sub>2</sub>削減の両立を目指す。2030年までの炭素削減目標を達成し、2050年以降の炭素中立社会を実現するために、炭素資源の有効な利用と、CO<sub>2</sub>削減の両立を目指す。

## マルチナリーカーボンで持続可能な未来を目指す

RIIS 岡山大学 異分野基礎科学研究所

本研究は、カーボン資源の有効な利用と、CO<sub>2</sub>削減の両立を目指す。2030年までの炭素削減目標を達成し、2050年以降の炭素中立社会を実現するために、炭素資源の有効な利用と、CO<sub>2</sub>削減の両立を目指す。

マルチナリーカーボンの創出と炭素化プロセスの確立を、研究の学際性を高めるため、全学を有門とする東京大学の新規創設、国際化と連携研究を有門とする大阪大学の学際連携と進めます。



# カーボンの用途開拓

For billion tons of CO<sub>2</sub> reduction,  
produce and use billion tons of C.



## 水・土壌の浄化

- ☑ High surface area.
- ☑ High affinity with microorganisms.
- ☑ Strong interaction with metals (negative charge).

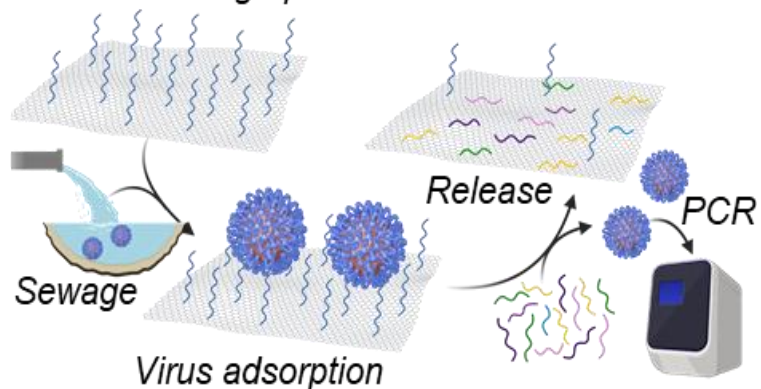


## エネルギー貯蔵

- ☑ High crystallinity.
- ☑ High electron conductivity.
- ☑ High stability.



## Functionalized graphene oxide



## 下水サーベイランス（ウイルス検出）

- ☑ Surface functionalization of graphene.
- ☑ High virus capture/release performance.
- ☑ Non-toxic & biodegradable.

# 目標: 炭素循環システムの構築

