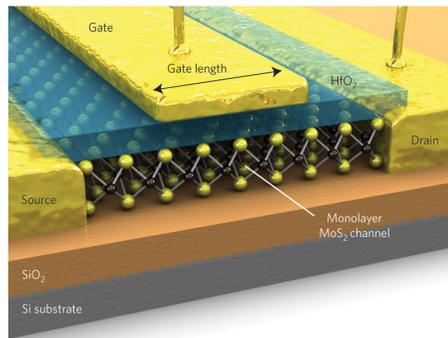
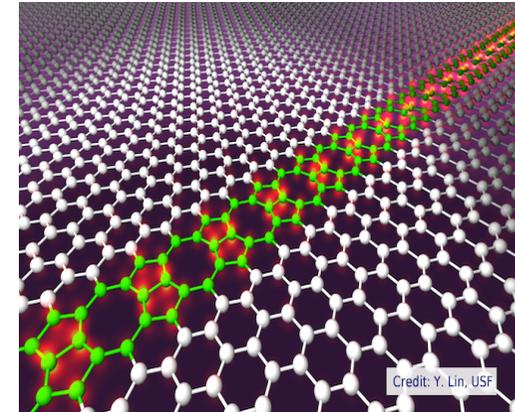


## 「原子層科学」



齋藤 理一郎  
東北大学理学研究科



1. 原子層とは？ : 原子層の魅力と可能性
2. なぜ今か？ : 世界の動向、領域の重要性・緊急性
3. めざすもの : 本学術領域の目的
4. 確実にできること: 計画研究、シナジー(相乗)効果
5. 到達目標 : 目標までの道のり、まとめ

# 原子層とは？： 原子一層でできた最も薄い物質

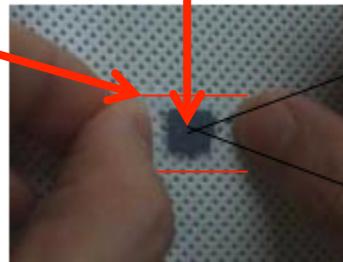
グラフェン = グラファイト(黒鉛)の1原子層



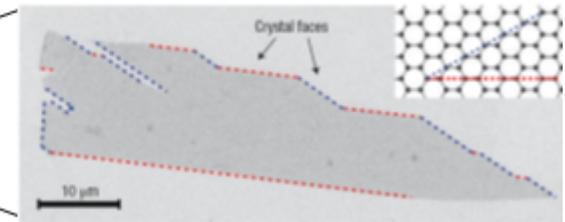
ガイムとノボセロフ



粘着テープ



“はく離”  
で1原子層



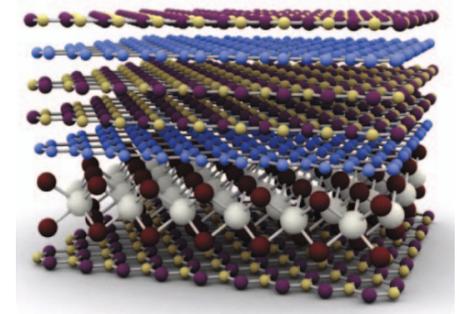
光学顕微鏡で層数決定  
(1層光吸収2%)

原子層のもつ驚異的な性質(次頁以降) → 次世代物質

h-BN, MoS<sub>2</sub>, RuO<sub>2</sub> 原子層の出現 → 複合原子層の設計

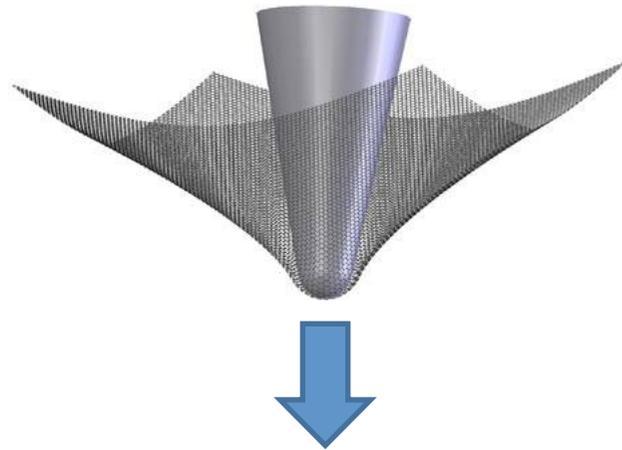
総合力・チームワークが重要

→ 原子層科学の必要性

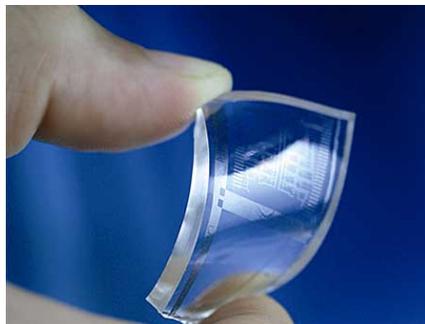


# グラフェン： 原子層がもつ究極の性質と応用

- 強靱で柔軟

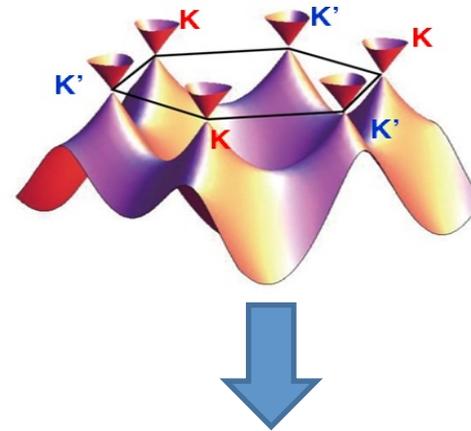


- フレキシブル透明導電体

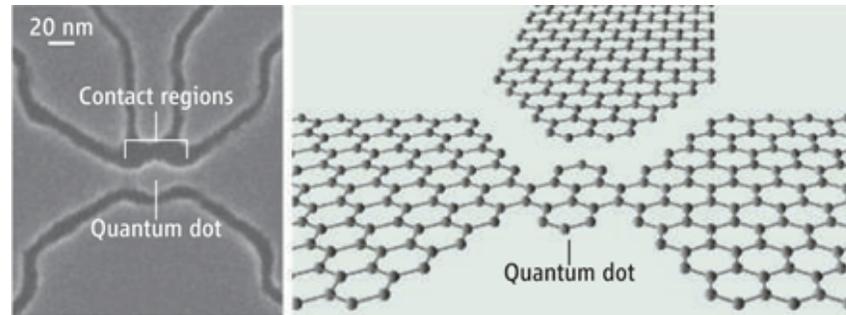


平面構造・熱的安定性

- 桁違いの電気伝導性(室温)  
→ 質量ゼロの電子: 秒速1000km



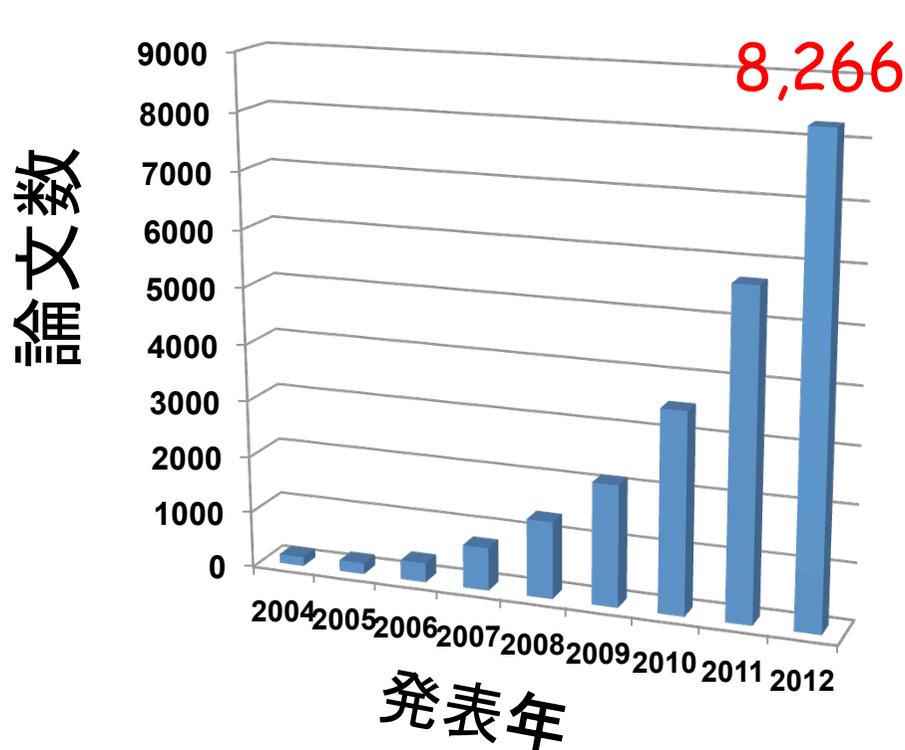
- 原子層高速デバイス



止まらない電子



# なぜ今か？： グラフェンに関する論文数



加速度的に発展中

要因：

1. 新規材料への期待
2. 新規原子層の出現
3. 巨大プロジェクト

予算投入の適時

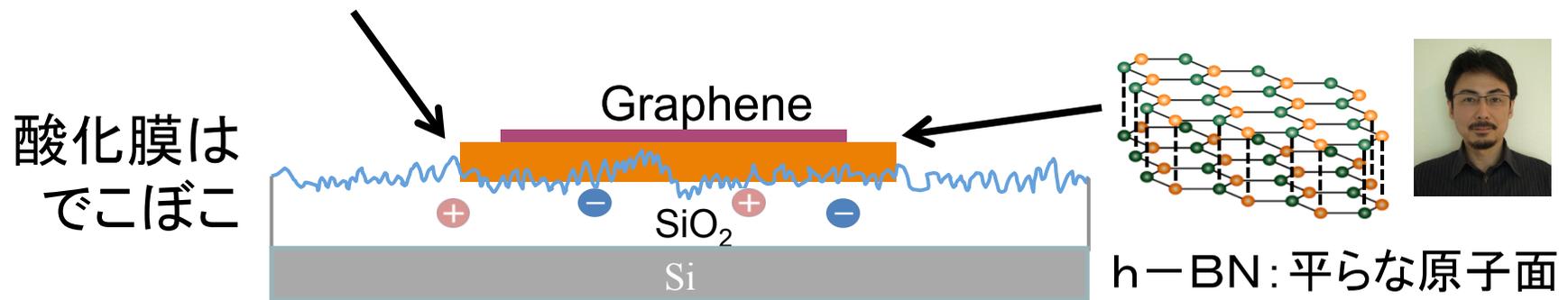
2012 年の発表論文 (Web of Science)

$$\frac{\text{グラフェンの論文数： } 8,266}{\text{(材料科学+物理+化学+工学)： } 429,046} \sim \text{約 } 2\%$$

# グラフェンの最先端は、日本の試料、技術

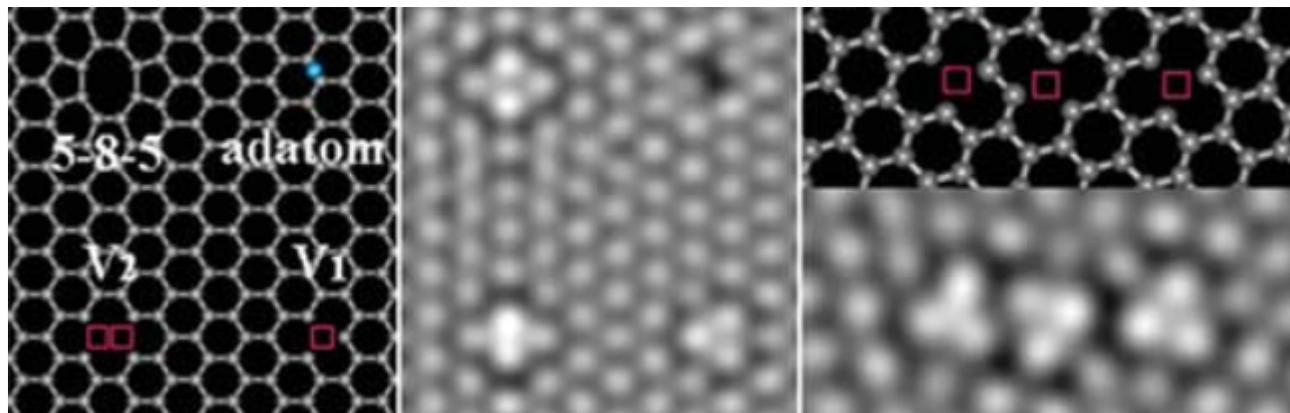
- 半導体で重要な**大きな電子移動度**を達成 (USA, UK)

日本が**h-BN 原子層**を提供 (長谷川、渡邊、**本領域チーム**)



- 欠陥の原子像・単原子分光に成功。究極の評価法

日本のチームだけ (劉、末永、**本領域チーム**)



欠陥のモデル

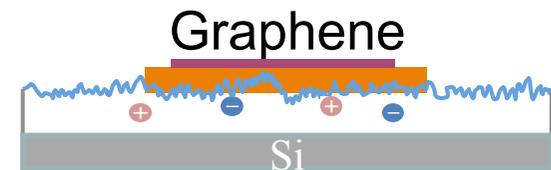
電子顕微鏡像

# 原子層科学の日本における現状

## ・研究室レベルでは、日本は世界をリード

複数の学会が関連する境界領域

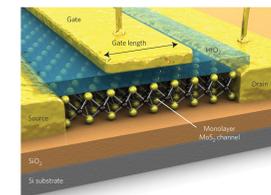
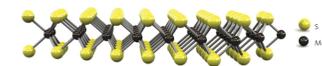
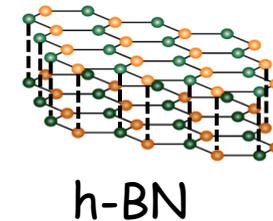
→ 横断プロジェクトの強化



## ・グラフェン以外の原子層も対象

新規原子層がぞくぞく出現

→ 組織的な協力体制が必要



MoS<sub>2</sub> 複合系

## ・世界で巨大プロジェクトがスタート

日本はグラフェン・プロジェクトが無い

→ 強いリーダーシップが必要



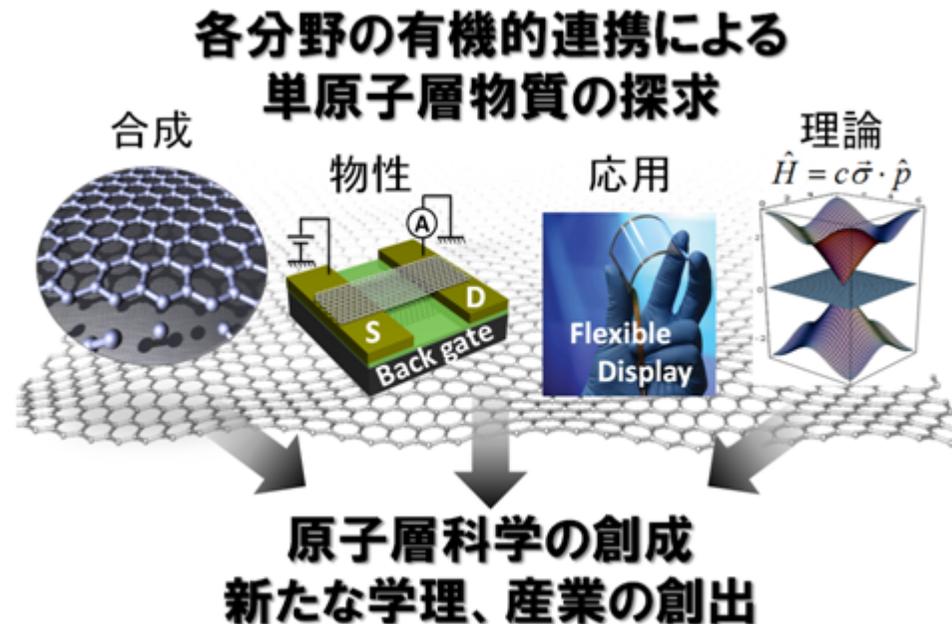
EU グラフェン  
ラグシップ

(参考: EU:1000億/10年、韓国100億/10年・英国:300億/5年、  
米国:50億、シンガポール:100億、中国・ブラジル:10億 )

# 新学術領域研究「原子層科学」の目的

グラフェンや新規原子層による、原子層複合系の総合的探究

- A01: 試料**合成**法の開拓、複合原子層の合成
- A02: 合成試料の**物性**評価、新規物性の発見
- A03: 合成試料によるデバイス**応用**設計
- A04: 原子層科学の**理論**的体系を確立



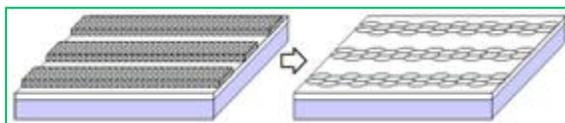
日本の研究体制のコア

公募研究(総予算の20%)  
開かれた領域!



# 確実にできること A01: 合成

10nm~10cm  
連携・新手法



1cm

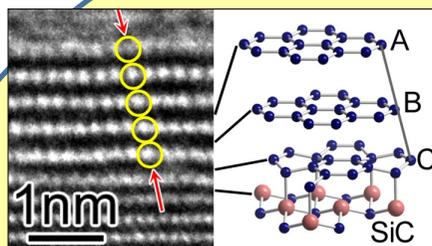
デバイス応用



パターン実装

●エッチング析出法

10cm



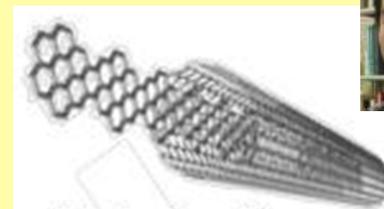
●SiC 熱分解

高品質  
大面積

基盤上  
実装

材料 分子設計 化学  
大量合成

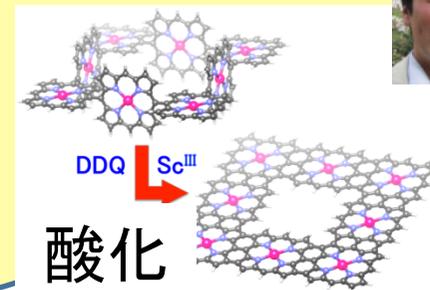
応用



1μm

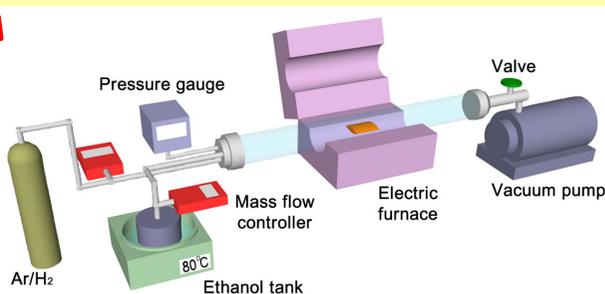
●CNT内重合

●有機合成



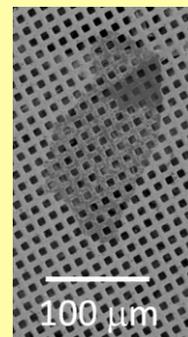
10nm

1mm



●アルコール分解(CVD)

100μm



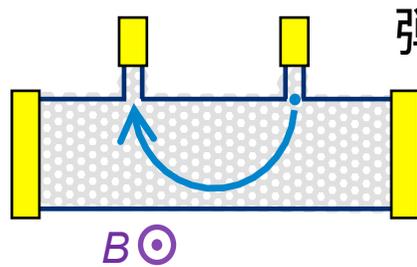
大面積・高品質化



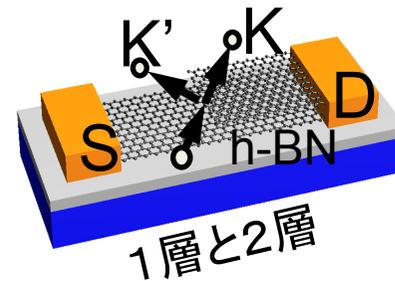
●還元・化学剥離 化学の方法



## ● 究極の物性探索 h-BN・グラフェン

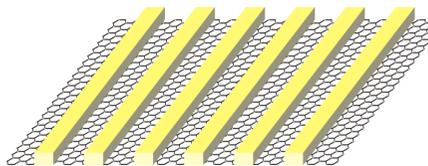


室温で  
 $150,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$



## ● 新しい構造と物理の開拓

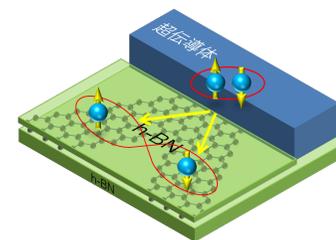
平面超格子



細孔素子



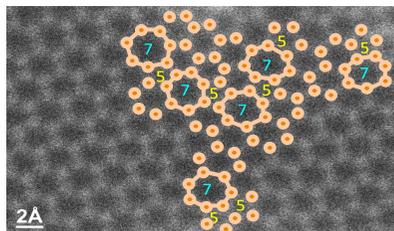
超伝導素子



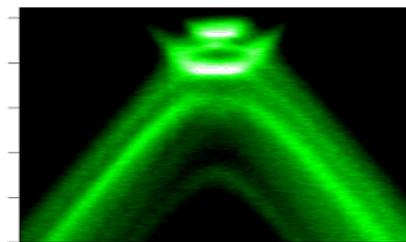
クーパー  
対分離



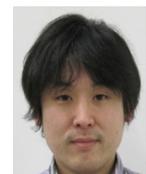
## ● 電子顕微鏡 (TEM)、角度分解光電子分光 (ARPES)



欠陥直視  
(5-7員環)

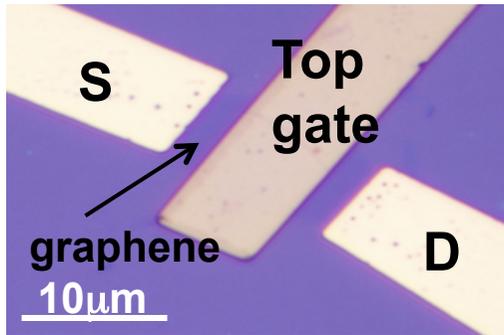


スピン分解  
エネルギー  
分解能 meV



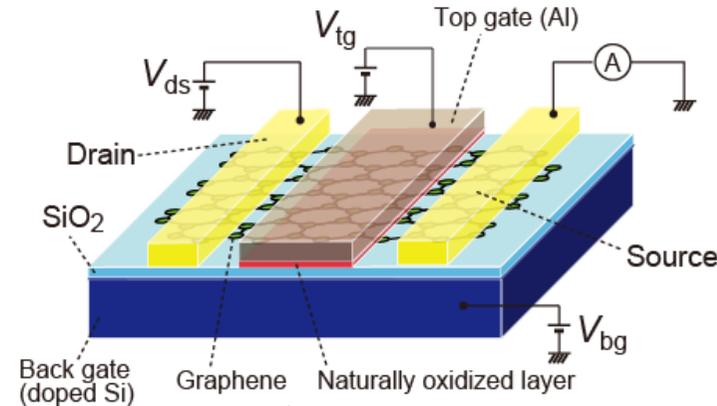


## ● 原子層ゲート電極



量子容量

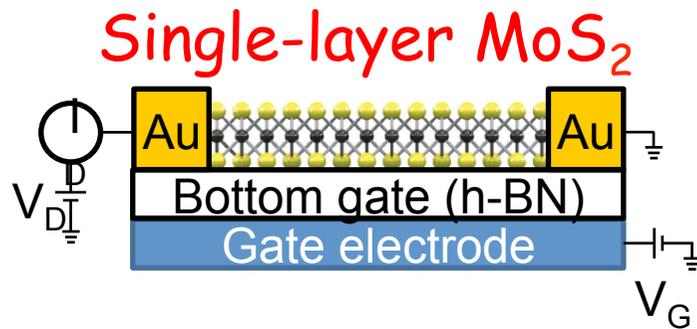
## ● 原子層回路設計



2層グラフェンデバイス

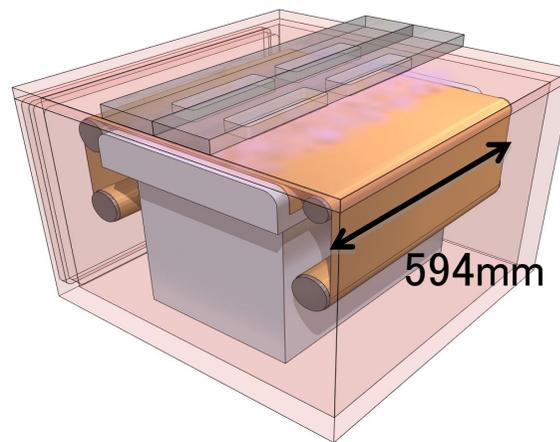
$I_{on/off}$  増大

## ● MoS<sub>2</sub>素子応用



半導体原子層デバイス

## ● グラフェン大面積合成



成膜エリア: 700mm x 300mm

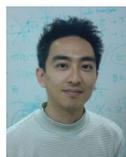
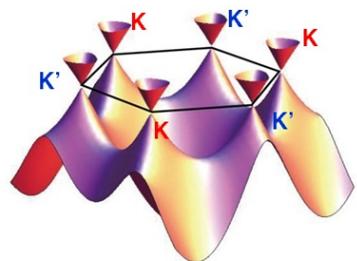
BNとの複層化



タッチパネル

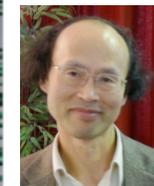
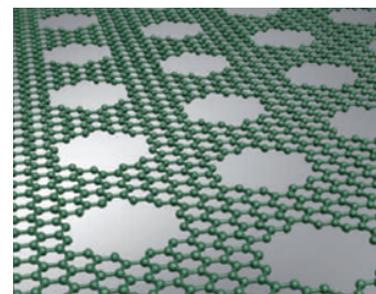


## ● 電子状態・輸送(物性・応用)



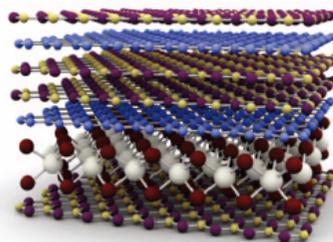
電気伝導、磁場効果

## ● 磁性・超伝導(物性)



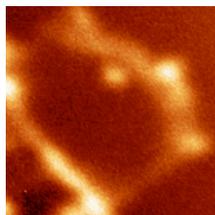
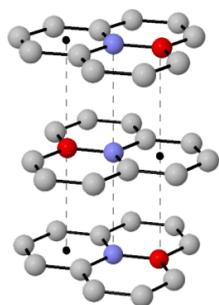
エキゾチック物性

## ● 物質設計(合成)



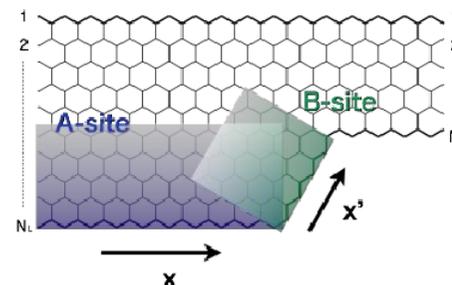
第一原理計算  
新原子層設計

## ● ラマン分光(合成)



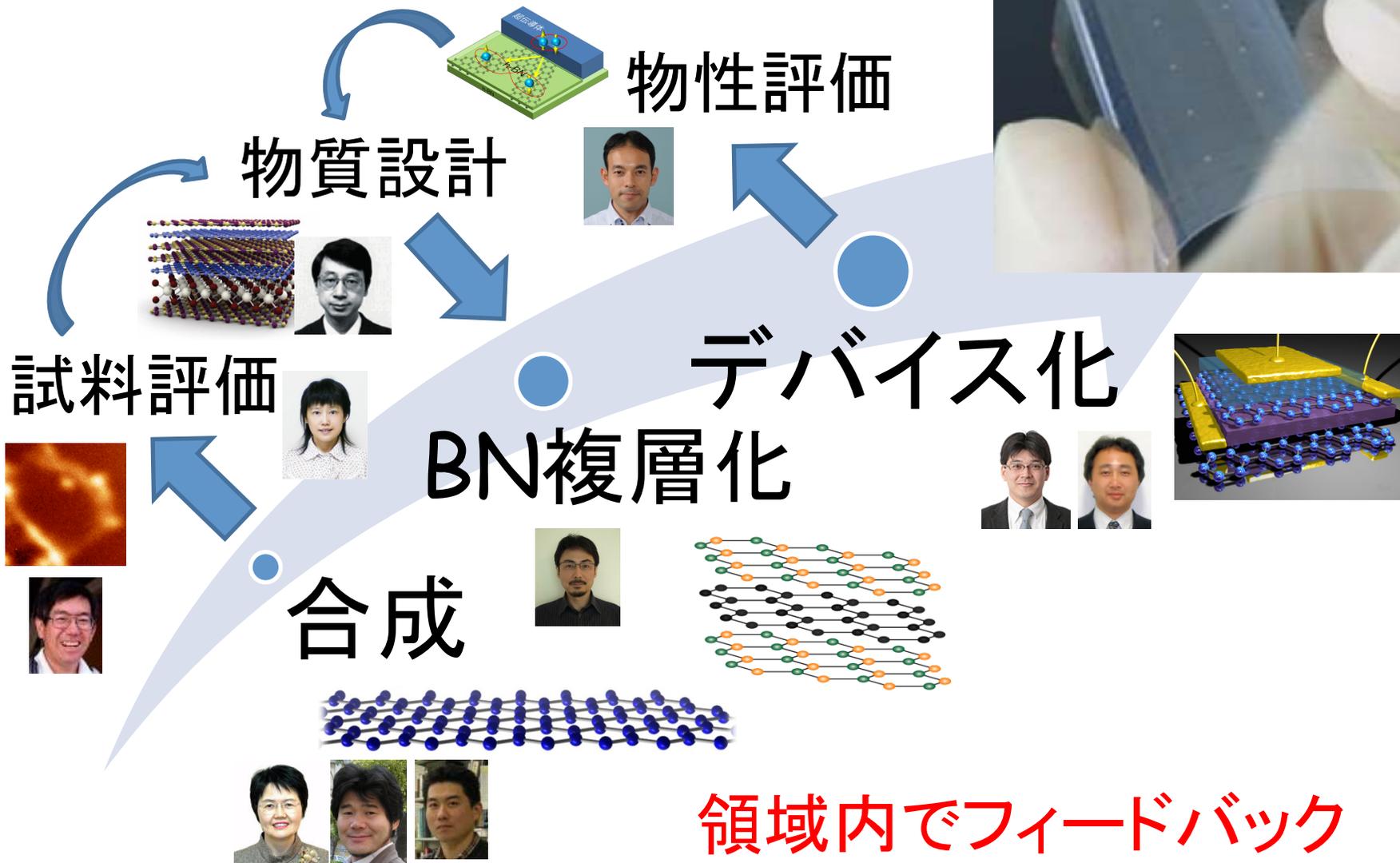
ラマン分光解析・評価

## ● ナノ構造(応用)



デバイス設計

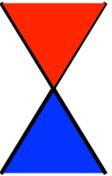
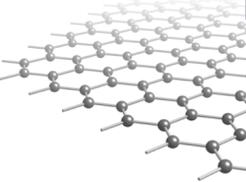
## 例: 原子層フレキシブル回路



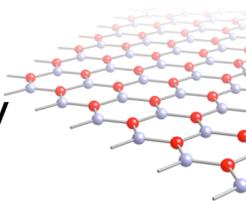
# 原子層科学のシナジー(相乗)効果 (例2)

## 例: 複合原子層構造設計

Graphene: 金属

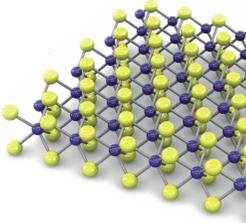

h-BN: 絶縁体

~5.9 eV



MoS<sub>2</sub>: 半導体

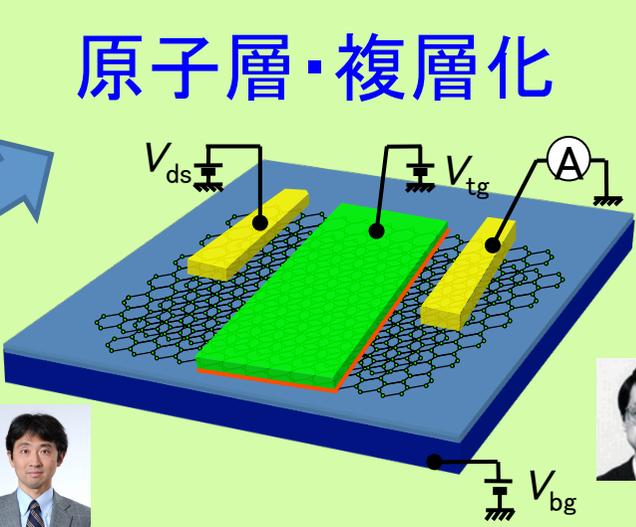
1.8eV



合成班・理論班



### 原子層・複層化



よい試料  
⇒ 物性測定  
接触抵抗  
量子効果  
理論解析



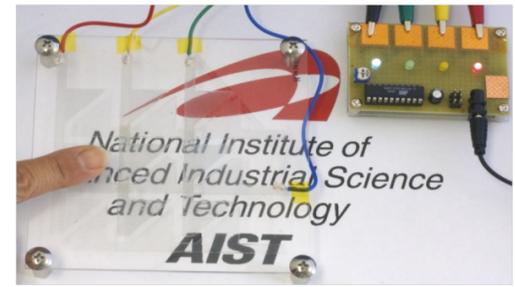





物性班・理論班

独自の複層化技術

## 応用展開



透明導電膜  
トランジスタ  
太陽電池



応用班



産学連携を視野

# 到達目標： 原子層の平面性を生かした素子・物性

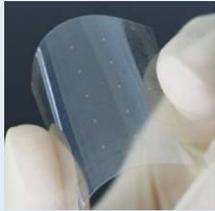
数年で加速度的な技術進歩が予想

2013

2014-2015

2016-2017

トランジスタ



透明導電膜



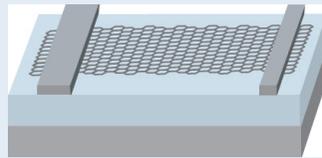
量子伝導



FM NM FM

試料提供・複層化技術の確立

ドライ環境



CVD合成

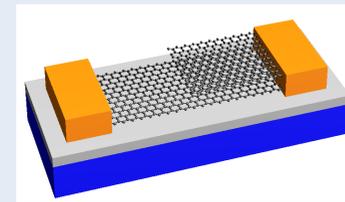


素子作成

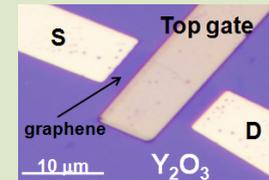


複層原子層膜の合成・評価

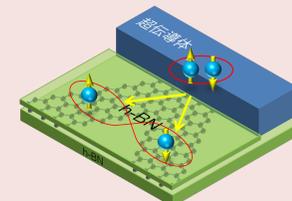
伝導特性評価



金属との相互作用



新規物性探索

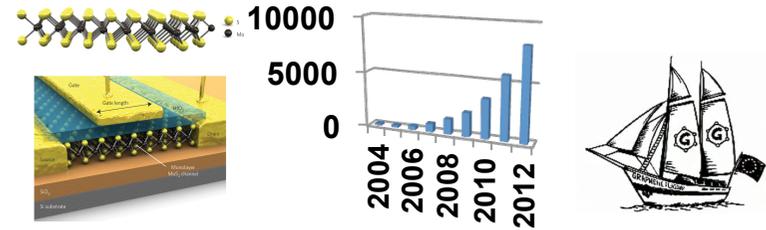


複層原子層膜の応用展開

# まとめ：新学術領域「原子層科学」

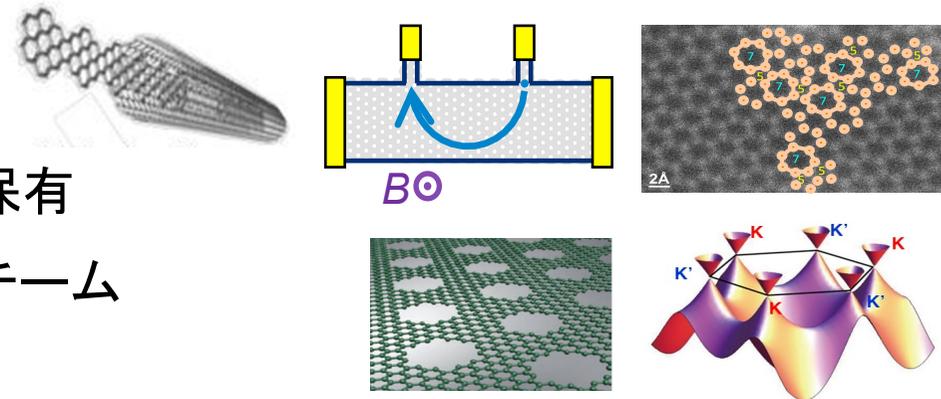
## 1. 原子層に関する横断プロジェクト

- 原子層の優位性 → 究極物性
- 複合原子層設計 → 協力体制



## 2. プロジェクトの特徴

- 最先端の日本発の試料・技術を保有
- 理論から応用からまで含む一体チーム

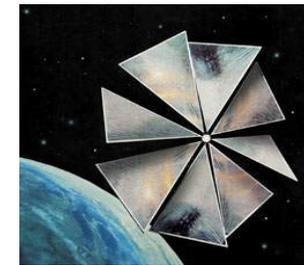


## 3. 本学術領域の到達目標

- 優位性を生かした素子設計・応用
- 10年後の技術進展の基盤を確立
- 究極物性の探索・学術体系の確立



フレキシブル電子ペーパー(概念図)



宇宙ヨット(概念図)

# 参考資料：重点課題と総括班年次計画

年度ごとの重点課題

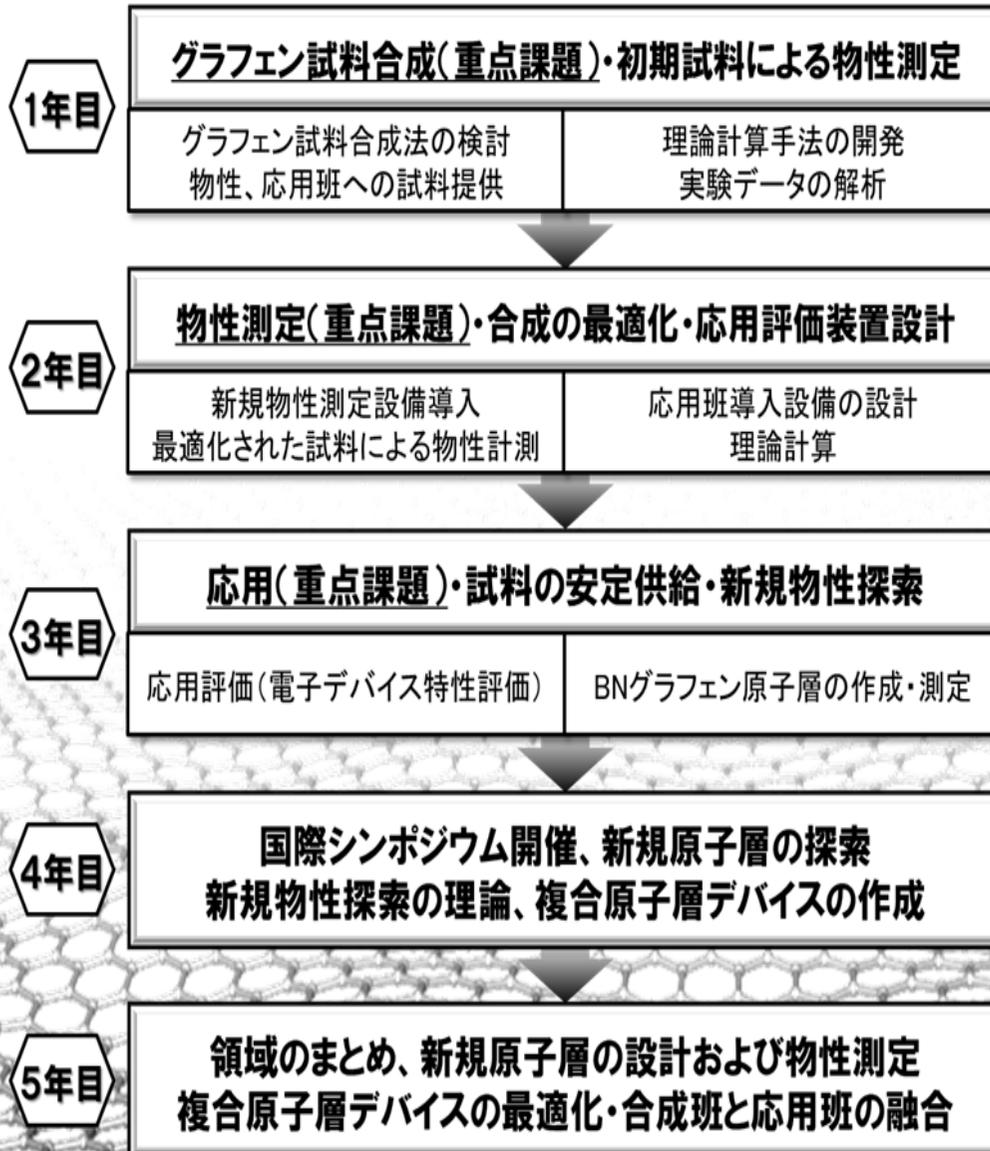
公募研究の強化  
(総予算の20%)

計画研究間の連携

若手研究者の採用

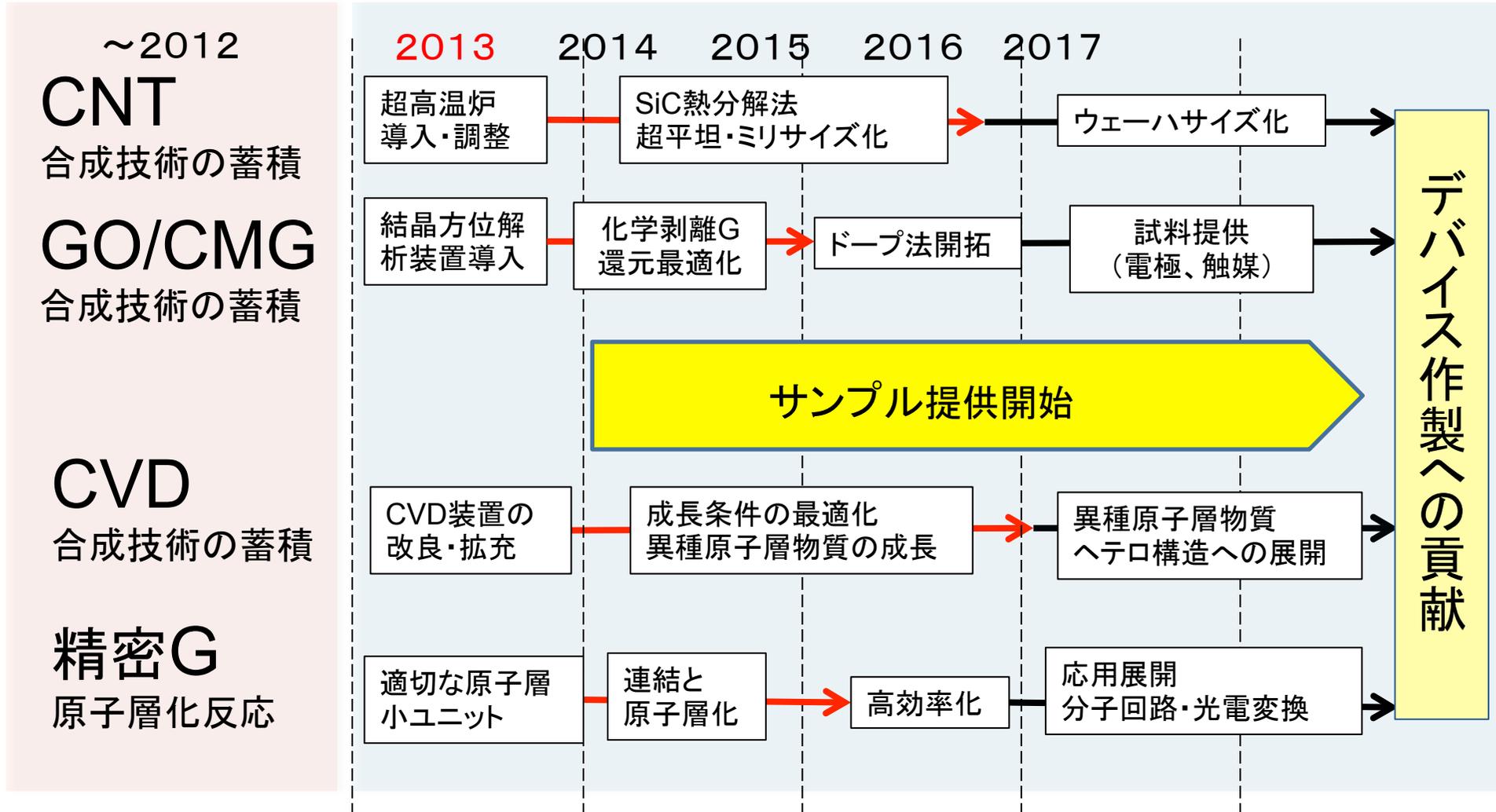
総括班によるPD確保

国内外社会への貢献



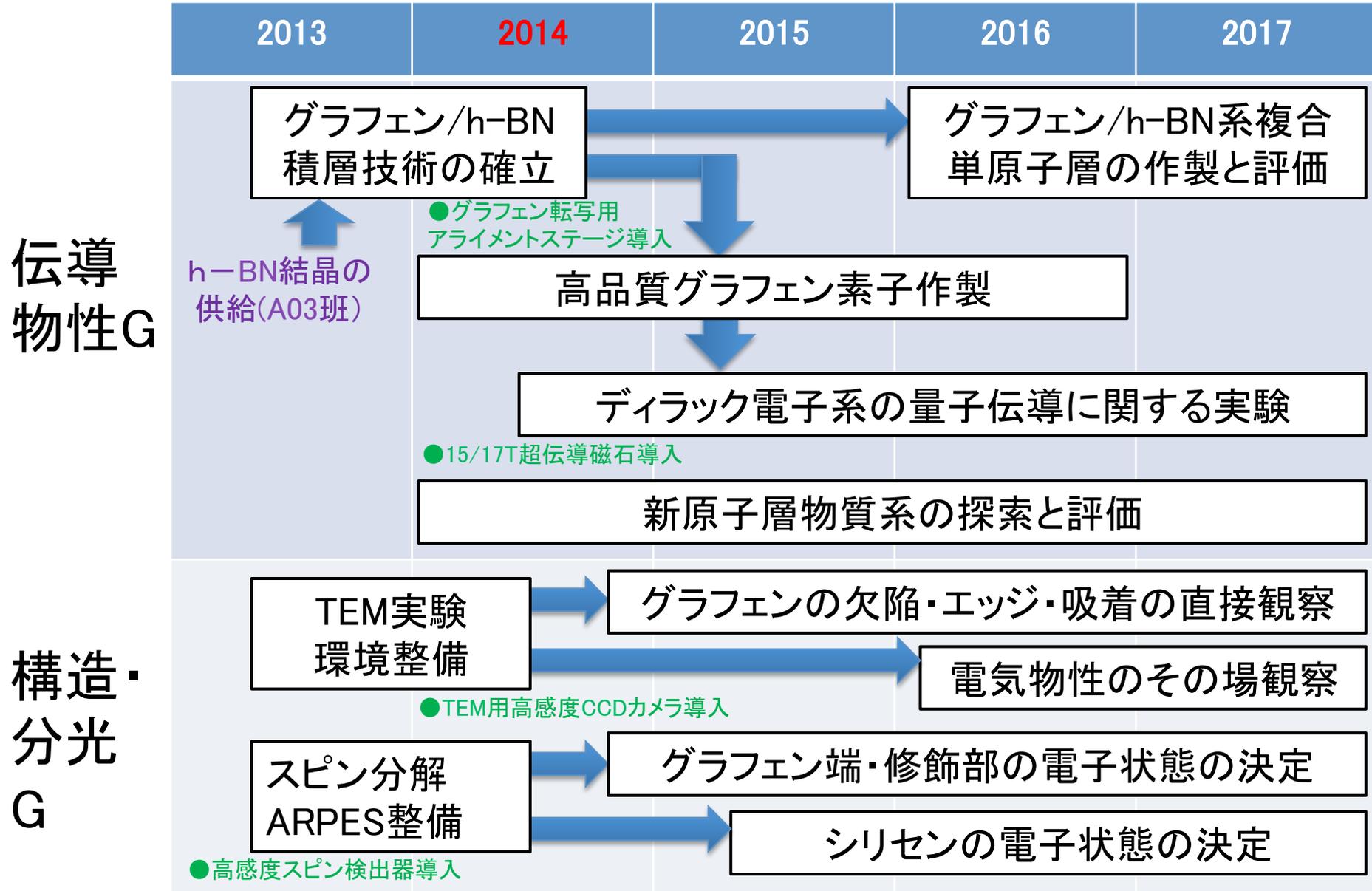
# 参考資料：合成班の年次計画

## 進行スケジュール

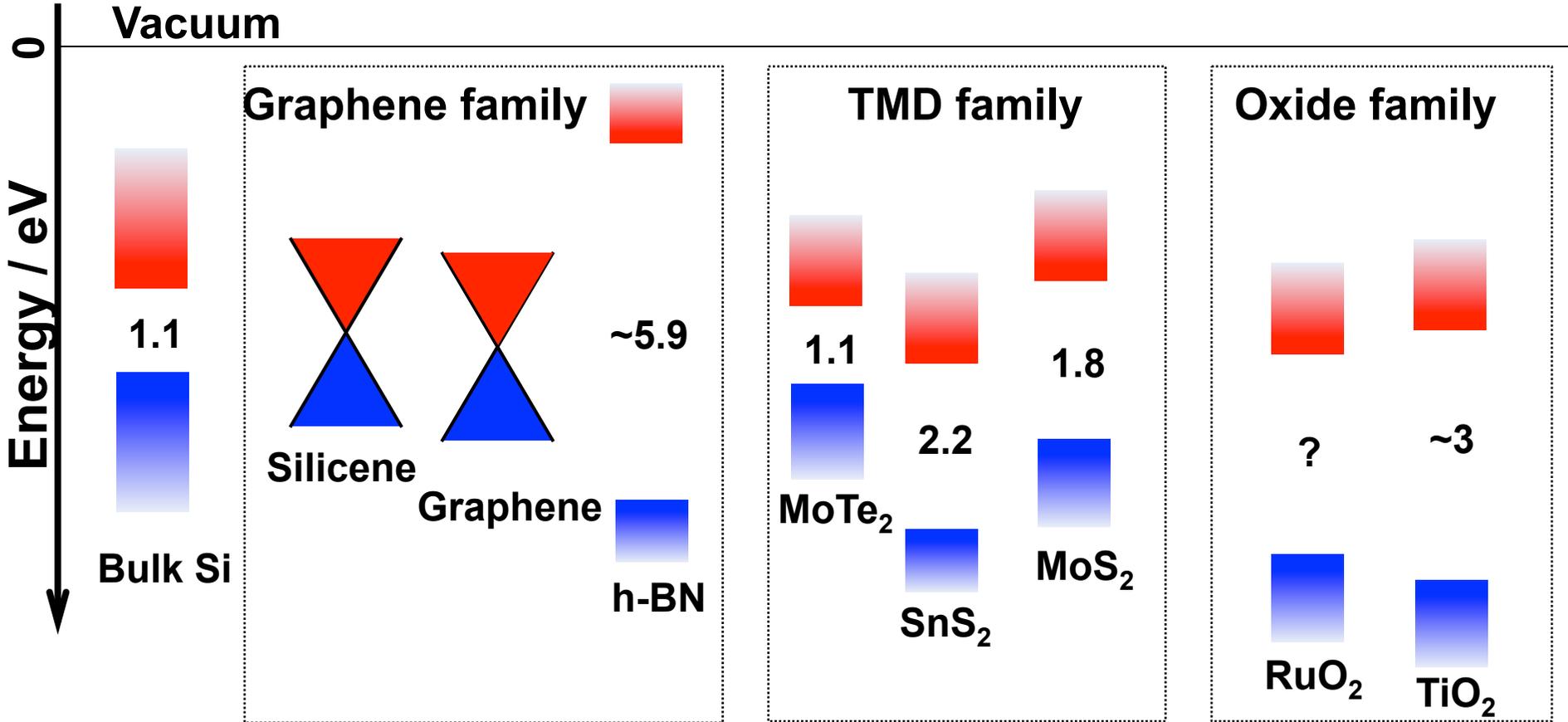


赤字の年度は重点課題

# 参考資料：物性班の年次計画



# 参考資料：新規原子層の種類



共有結合型

遷移金属  
カルコゲナイド型

酸化物型

NbSe<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub>, GaSe, InSe