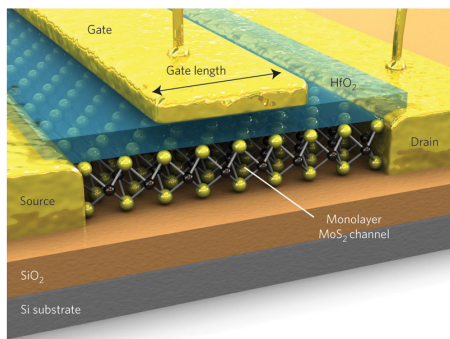
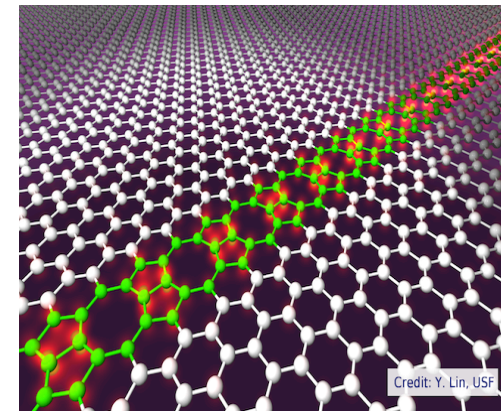


「原子層科学」



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

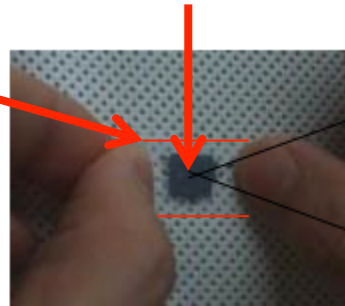
グラフェン = グラファイト(黒鉛)の1原子層



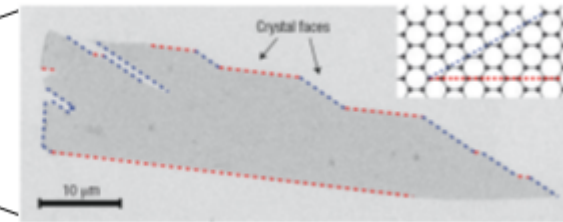
ガイムとノボセロフ



粘着テープ



“はく離”
で1原子層



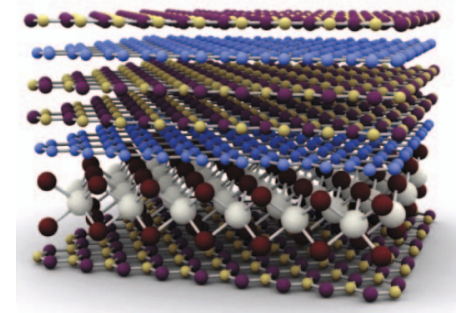
光学顕微鏡で層数決定
(1層光吸収2%)

原子層のもつ驚異的な性質(次頁以降) → 次世代物質

h-BN, MoS₂, RuO₂ 原子層の出現 → 複合原子層の設計

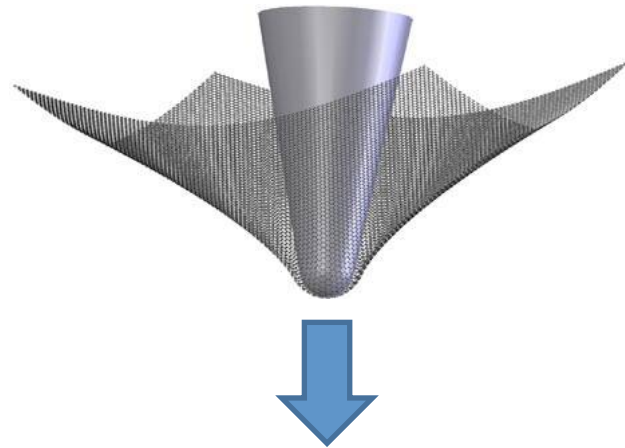
総合力・チームワークが重要

→ 原子層科学の必要性

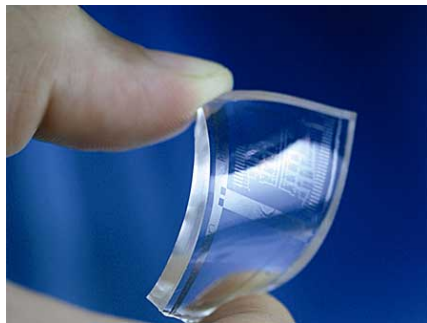


グラフェン： 原子層がもつ究極の性質と応用

- 強靱で柔軟

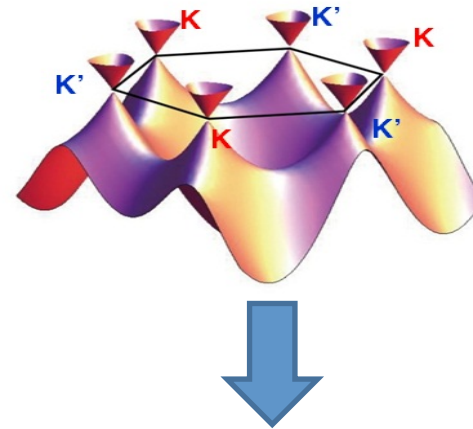


- フレキシブル透明導電体

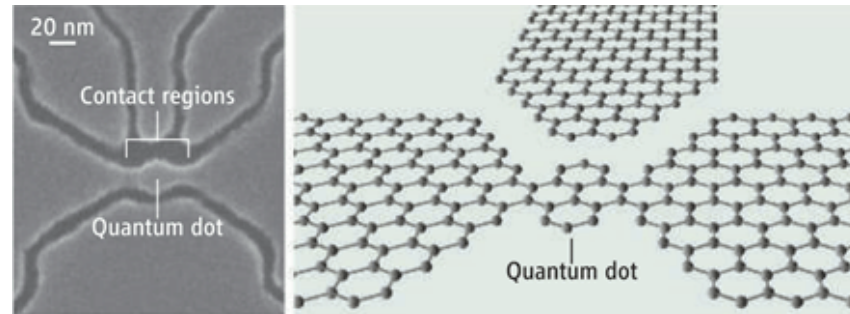


平面構造・熱的安定性

- 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

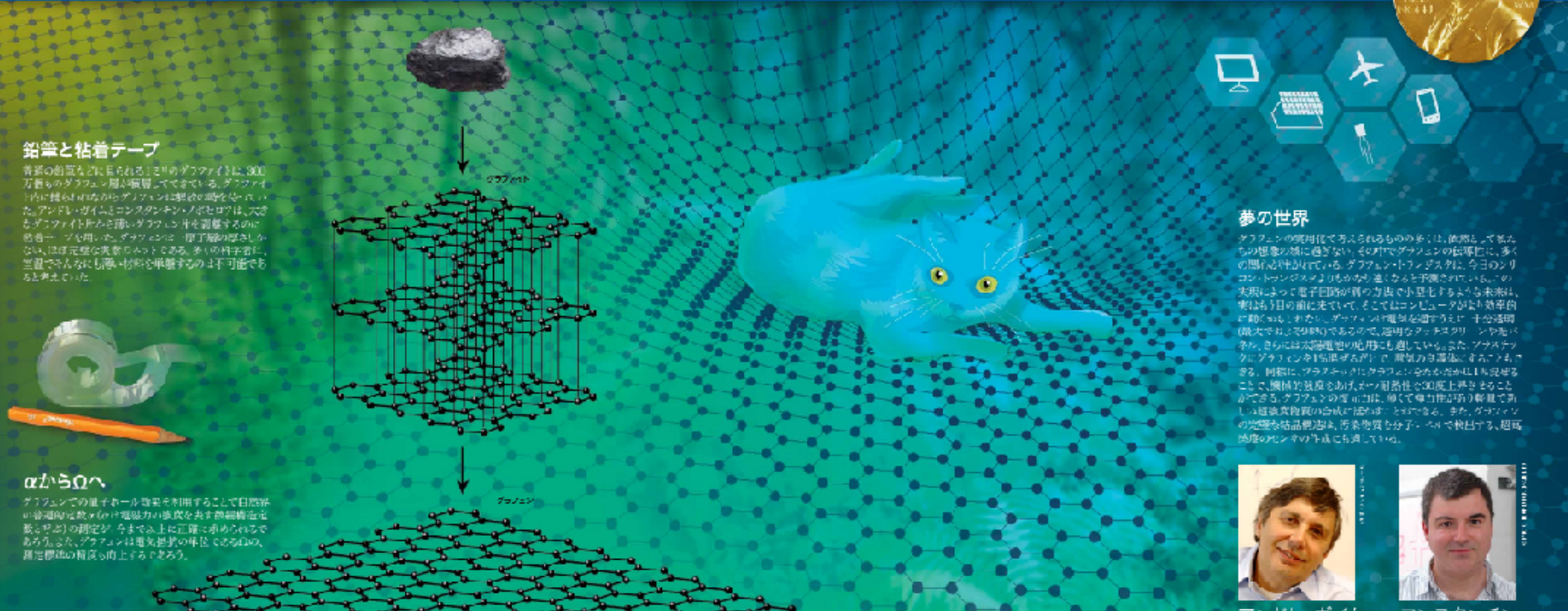
ノーベル物理学賞 (2010) 研究の始まりに過ぎない



The Nobel Prize 2010 in Physics

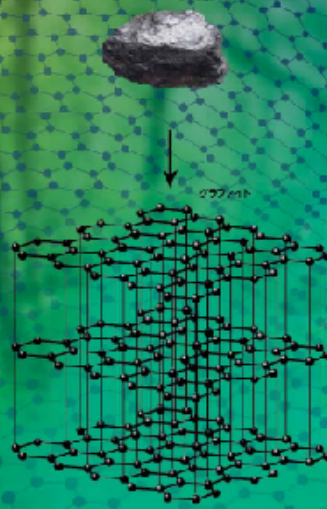


スウェーデン立科学アカデミーは「決定地獄賞」ラッセンに贈る形銀的賞金により、アンドレ・ガイムとコンスタンティン・ノボシロフに2010年のノーベル物理学賞を授与することを決定した。



鉛筆と粘着テープ

青銅の創造力にもられる「魔力のダフアイン」は、300万箇ものダフアイン層が積層してきている。ダフアイン1層に積層するのはダフアインは極めて薄いシートである。アンドレ・ガイムとコンスタンチン・ノボシロフは、巨大なダフアインシートと薄く剥いたダフアインシートを剥離するに粘着テープを用いた。ダフアインは「原子層の厚さしかない」とは完璧な実体シートである。多くの科学者に、想像できなかった材料が簡単に準備可能であると考えた。



αからΩへ

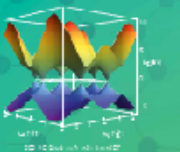
ダフアインでの量子ホール効果を利用して自然界の途端な変換(α)は電磁場の変化を共鳴共振状態(α)の測定が今まで以上に正確に求められるであろう。ダフアインは電圧調整の単位であるΩの、量子状態の精鋭に向かうであろう。

グラフェン - 完璧な原子格子

グラフェンは炭素の一形態で、初見としては全く新しい（今までで最も薄いばかりでなく最も強い）性質を持つ。電気伝導物質としては既に匹敵し、熱伝導物質としては銀や銅などの良い熱伝導金属を凌駕する。ほぼ完全に透明な物質でありながら、最小の気体分子をも通さないほど緻密な格子をもつ。また、グラフェンを用いて、鋼のひげほどの重さしかない面積1㎡のハンモックを作れば、その強度ゆえに破れることなく、普通の大きさの僕の体重を支えてであろう。

パラドクスの世界

アンドレ・ガイムとコンスタンチン・ノボシロフは、従来の方法よりも薄いダフアインを使用してグラフェンの異なる性質を調査し、最も薄い材料である。グラフェンが持つ性質は、原子の厚さから始まり、1000nmの、完全な透明なシートである。これによって、大規模な量子力学を扱うことができる。現実と理想の間、より多くのスケールで研究できることを示した。また、これによって理論上の議論とより多くの実験結果は、量子力学の両面に渡ってダフアインに。



量子の物理法則が成り立たない。それはどう見ても1Dとして、1929年にスティーヴン・ポインティングによって定式化された(2D)の理論と異なる。直した物質が成り立つ場合の「エネルギー効果では、高エネルギーがよいほど粒子が電荷を運び始める。しかし、電子の「エネルギー」は、通常の物質と異なり、電子が速度を帯びると同時に質量も増える。これは、粒子が速度を増すにつれて、その質量が増えるというパラドックスである。

ポインティングの理論が、電子が速度を増すと同時に質量も増えるというパラドックスを説明するものである。



夢の世界

ダフアインの応用で考えられるものは、例として炭素の極端な強さに過ぎない。その中でダフアインの厚さに、多くの層が重なった。ダフアインは「原子層の厚さしかない」とは完璧な実体シートである。多くの科学者に、想像できなかった材料が簡単に準備可能であると考えた。ダフアインは電圧調整の単位であるΩの、量子状態の精鋭に向かうであろう。



アンドレ・ガイム
ロシアの物理学者、1958年、ロシアのモスクワ生まれ。1980年にモスクワ大学で物理学の博士号を取得し、その後、オランダの理論物理学研究所で博士号を取得。その後、ロシアのモスクワ大学で物理学の教授を務める。

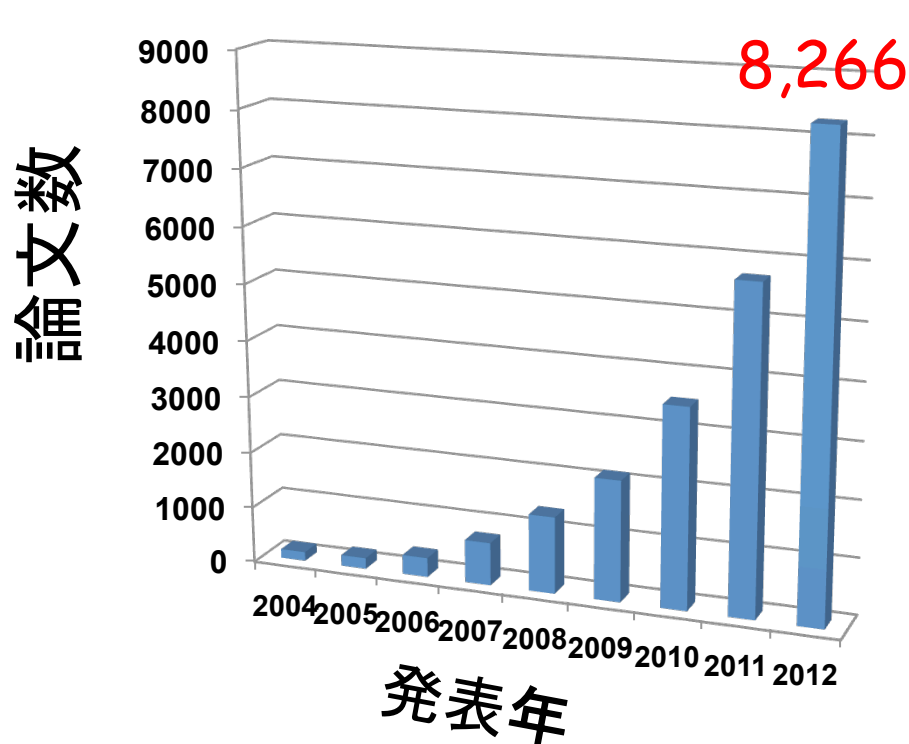


コンスタンチン・ノボシロフ
ロシアの物理学者、1974年、ロシアのモスクワ生まれ。1997年にモスクワ大学で物理学の博士号を取得し、その後、オランダの理論物理学研究所で博士号を取得。その後、ロシアのモスクワ大学で物理学の教授を務める。

遊び心を持つ2人の共同研究者

コンスタンチン・ノボシロフはオランダで博士号の取得者として、ポインティングの理論のトビゴトから、後にガイムとともにも関わった。二人はロシアで物理学者としてスタートし、現在はともにマンチェスター大学の物理学者である。彼らの最初のトビゴトは、炭素の層を剥がる。炭素の層を剥がることで、炭素の層が薄くなる。炭素の層が薄くなることで、炭素の層が薄くなる。炭素の層が薄くなることで、炭素の層が薄くなる。

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

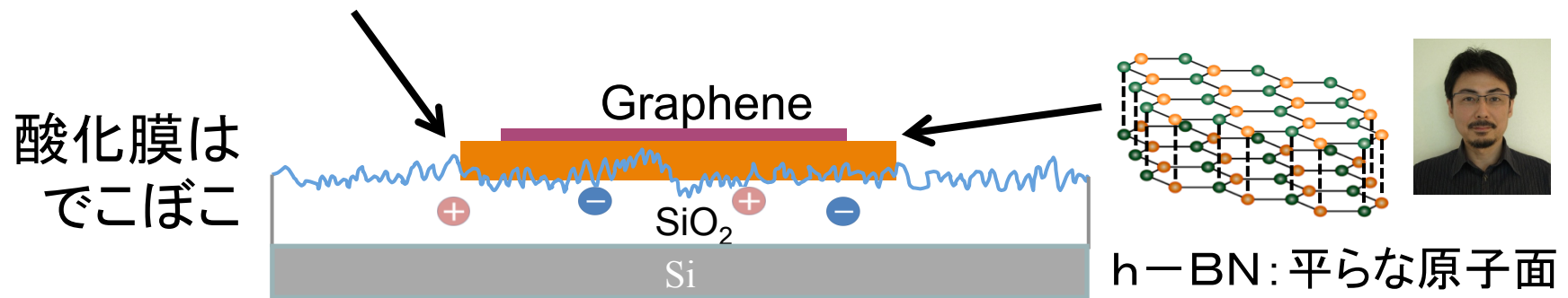
2012 年の発表論文 (Web of Science)

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

グラフェンの最先端は、日本の試料、技術

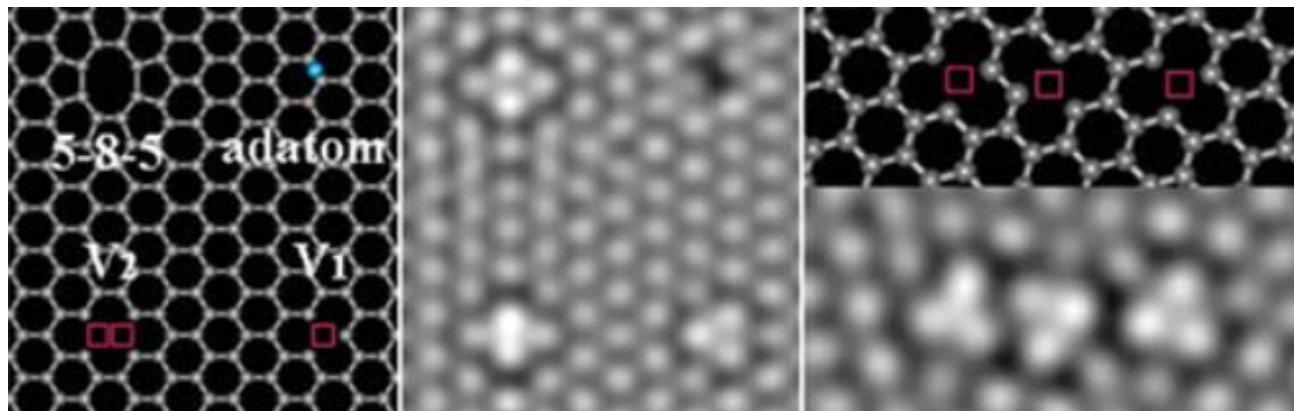
- 半導体で重要な**大きな電子移動度**を達成 (USA, UK)

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



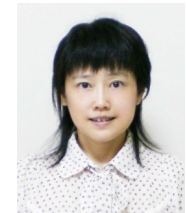
- 欠陥の原子像・単原子分光に成功。究極の評価法

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

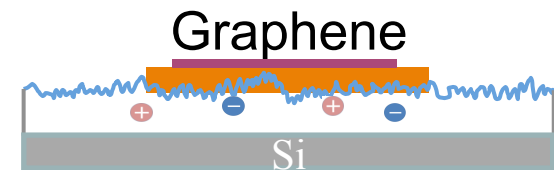


原子層科学の日本における現状

・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

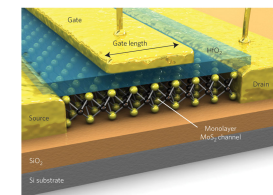
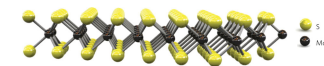
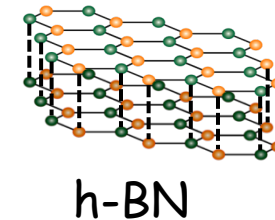
→ 横断プロジェクトの強化



・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



MoS₂ 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



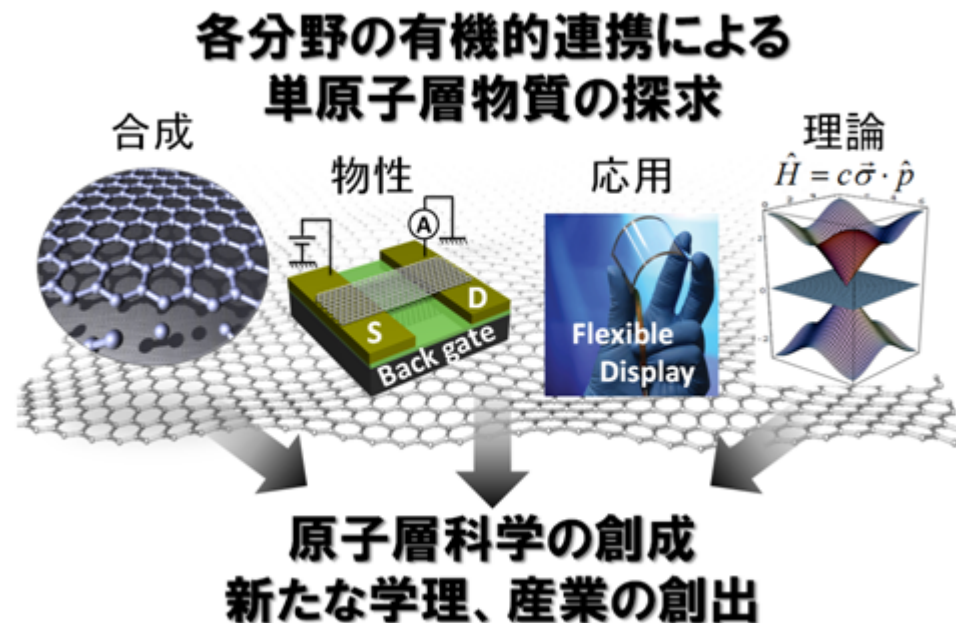
EU グラフェン
ラグシップ

(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



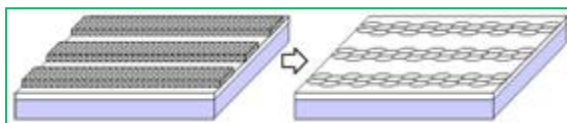
日本の研究体制のコア

公募研究(総予算の20%)
開かれた領域!



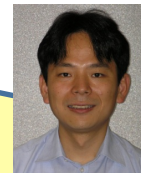
確実にできること A01: 合成

10nm~10cm
連携・新手法



1cm

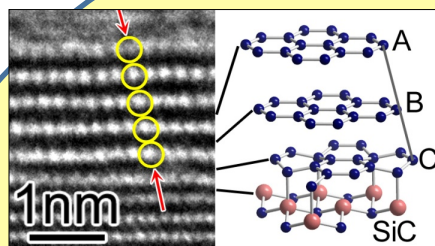
デバイス応用



パターン実装

●エッチング析出法

10cm

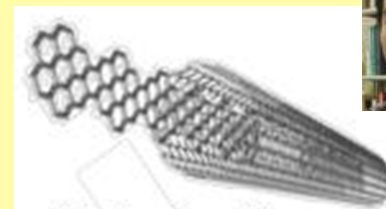


●SiC 熱分解

高品質
大面積

基盤上
実装

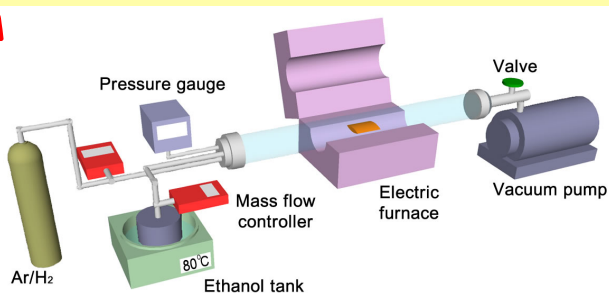
材料 分子設計 化学
大量合成



1μm

●CNT内重合

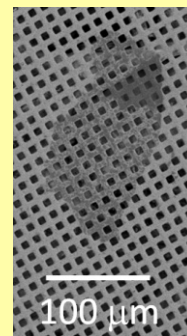
1mm



●アルコール分解(CVD)

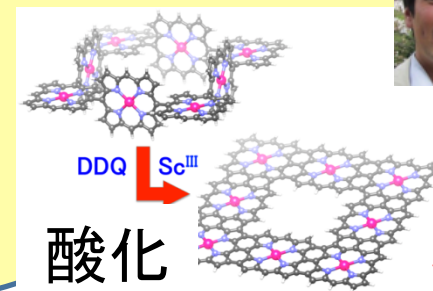
大面積・高品質化

100μm



●還元・化学剥離 化学の方法

●有機合成



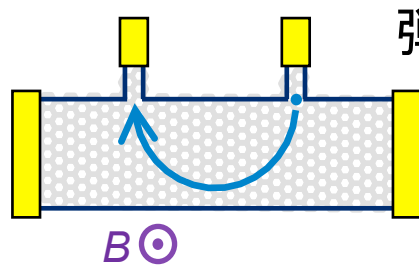
酸化

10nm

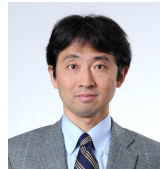




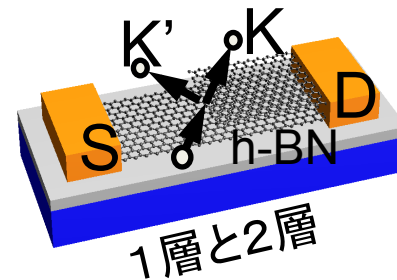
● 究極の物性探索 h-BN・グラフェン



弾道伝導



室温で
 $150,000 \text{cm}^2/\text{Vs}$

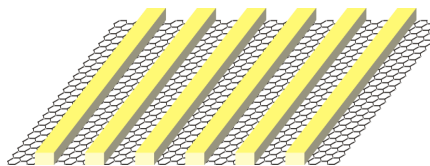


擬スピン
フィルター

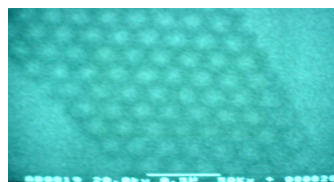


● 新しい構造と物理の開拓

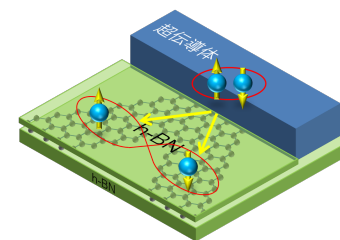
平面超格子



細孔素子



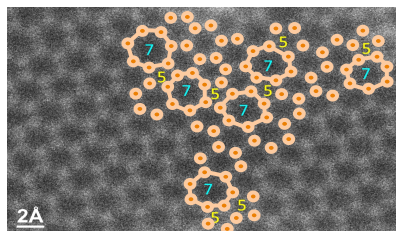
超伝導素子



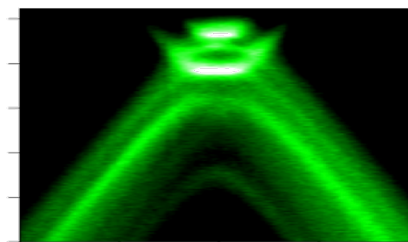
クーパー
対分離



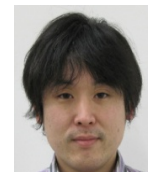
● 電子顕微鏡 (TEM)、角度分解光電子分光 (ARPES)



欠陥直視
(5-7員環)

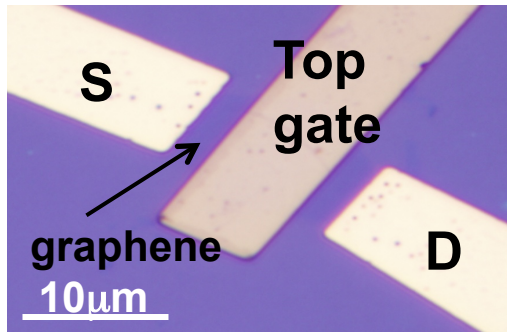


スピン分解
エネルギー
分解能 meV



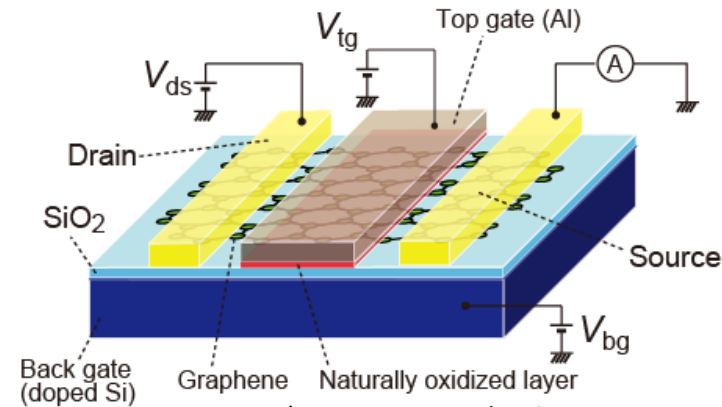


● 原子層ゲート電極



量子容量

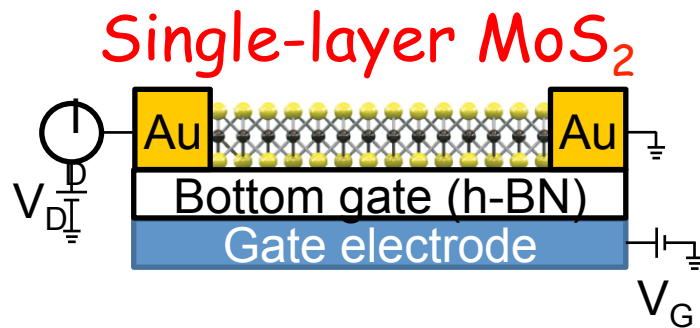
● 原子層回路設計



2層グラフェンデバイス

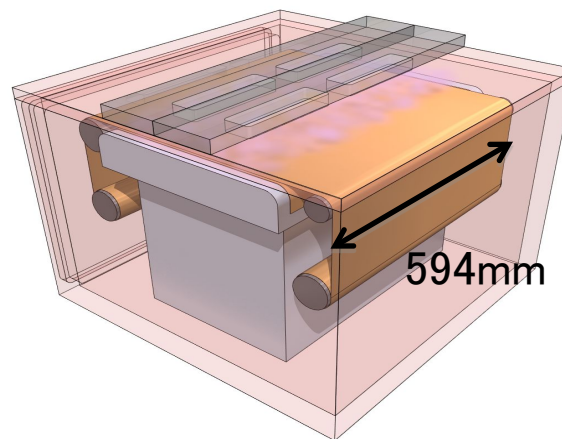
$I_{on/off}$ 増大

● MoS₂素子応用



半導体原子層デバイス

● グラフェン大面積合成



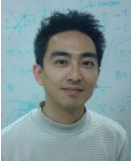
成膜エリア: 700mm x 300mm



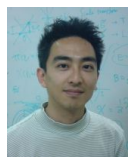
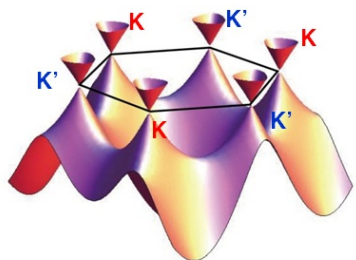
BNとの複層化



タッチパネル

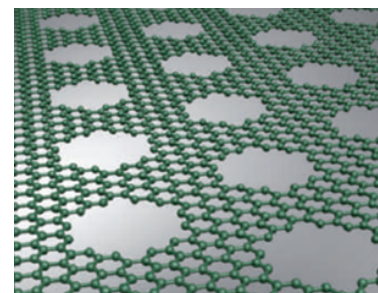


● 電子状態・輸送(物性・応用)



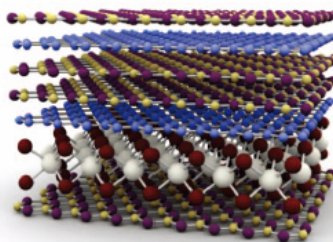
電気伝導、磁場効果

● 磁性・超伝導(物性)



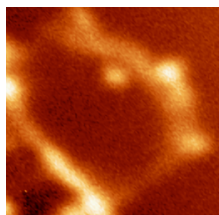
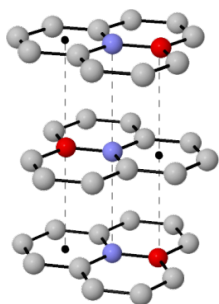
エキゾチック物性

● 物質設計(合成)



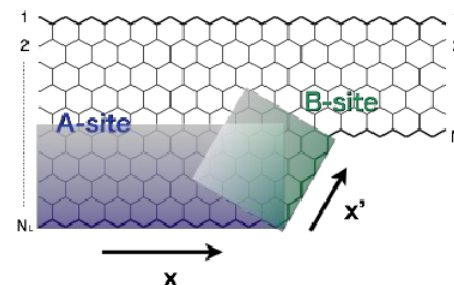
第一原理計算
新原子層設計

● ラマン分光(合成)



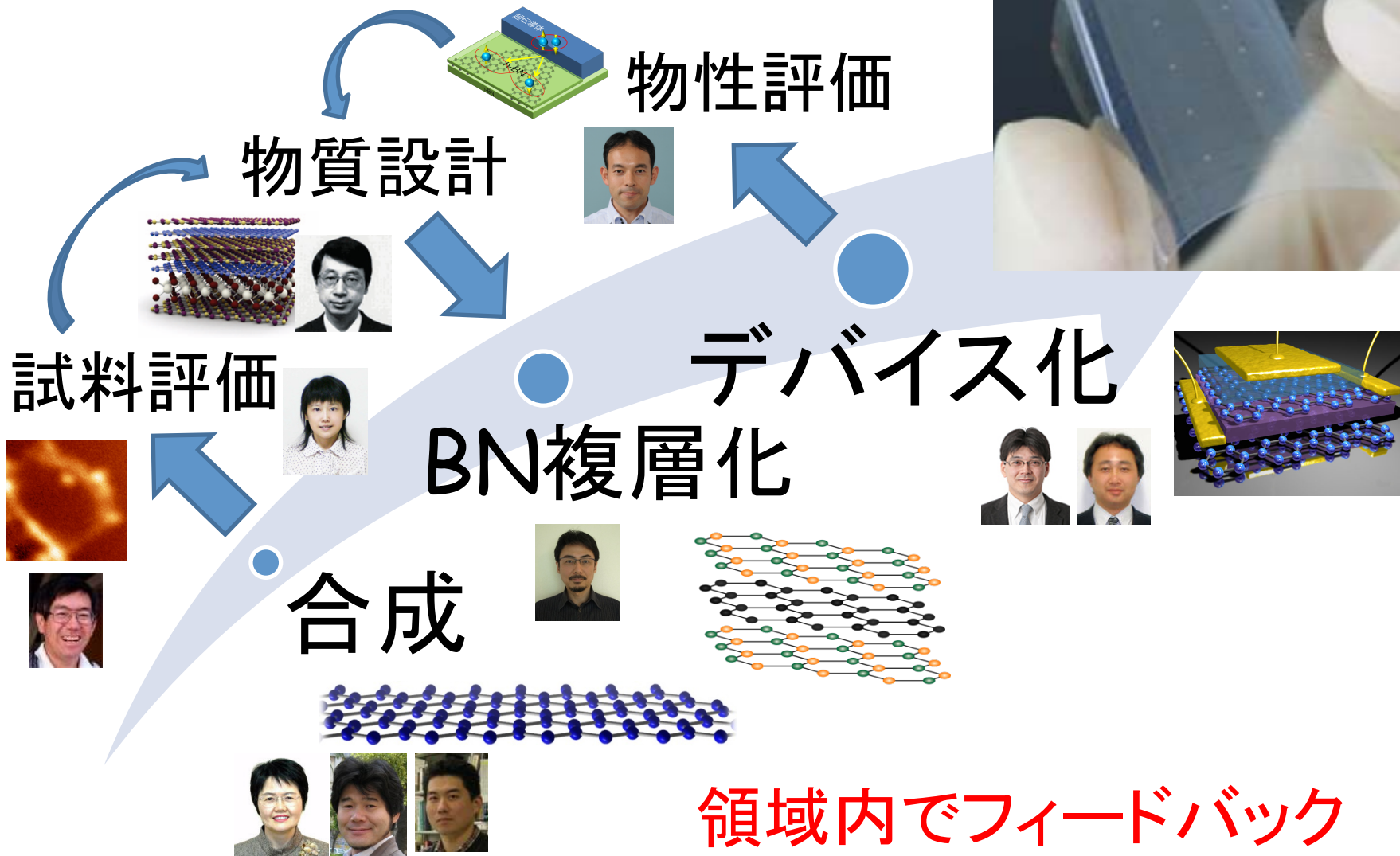
ラマン分光解析・評価

● ナノ構造(応用)



デバイス設計

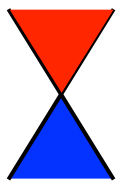
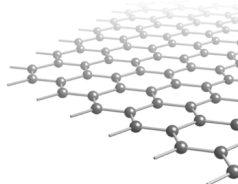
例: 原子層フレキシブル回路




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

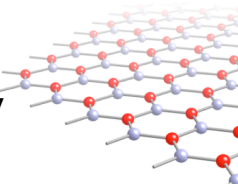
Graphene: 金属


h-BN: 絶縁体



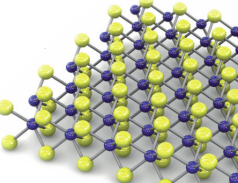
~5.9 eV



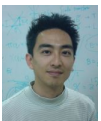
MoS₂: 半導体



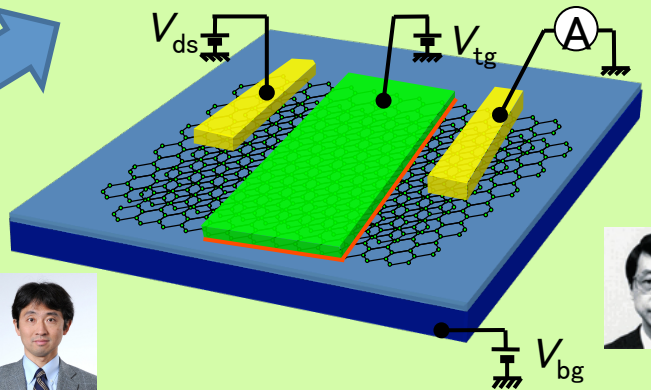
1.8eV



合成班・理論班

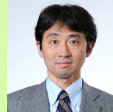








原子層・複層化



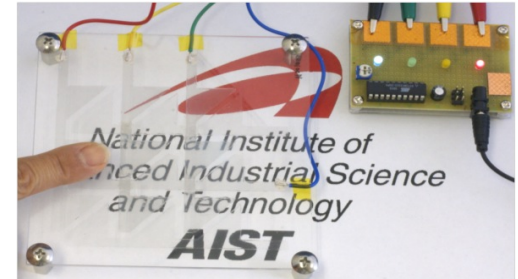
よい試料
⇒ 物性測定
接触抵抗
量子効果
理論解析

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

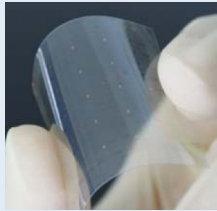
数年で加速度的な技術進歩が予想

2013

2014-2015

2016-2017

トランジスタ



透明導電膜



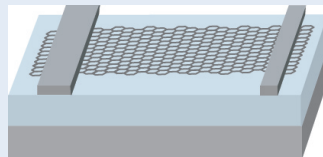
量子伝導



FM NM FM

試料提供・複層化技術の確立

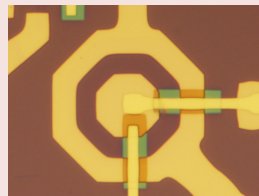
ドライ環境



CVD合成

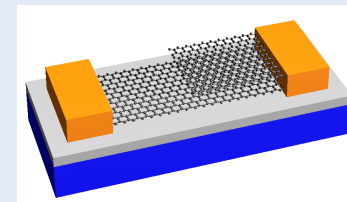


素子作成

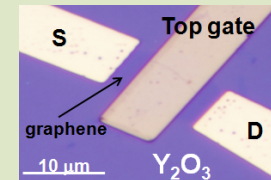


複層原子層膜の合成・評価

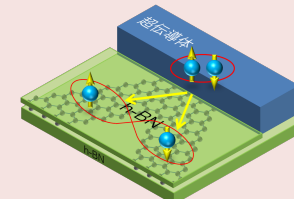
伝導特性評価



金属との相互作用



新規物性探索

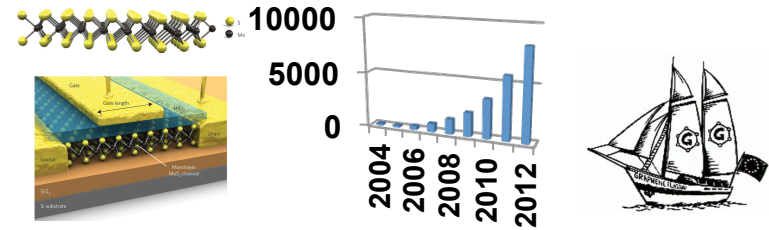


複層原子層膜の応用展開

まとめ：新学術領域「原子層科学」

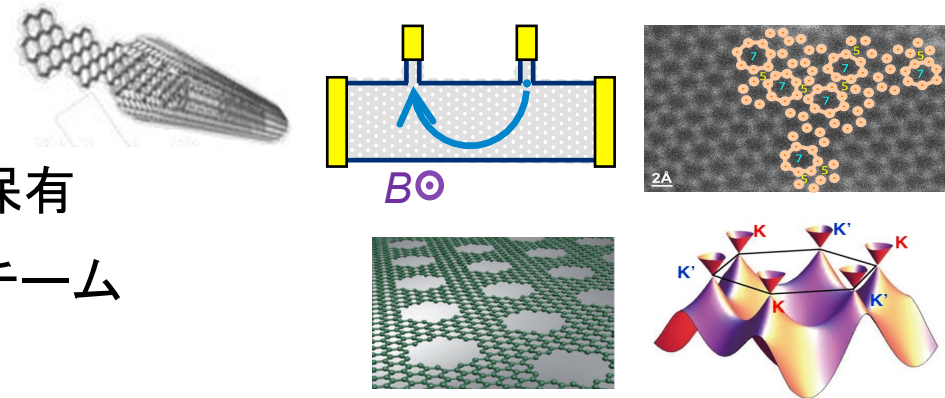
1. 原子層に関する横断プロジェクト

- 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

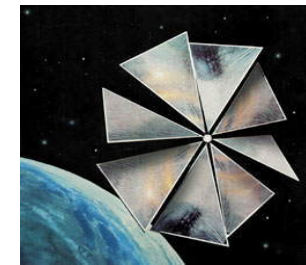


3. 本学術領域の到達目標

- 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

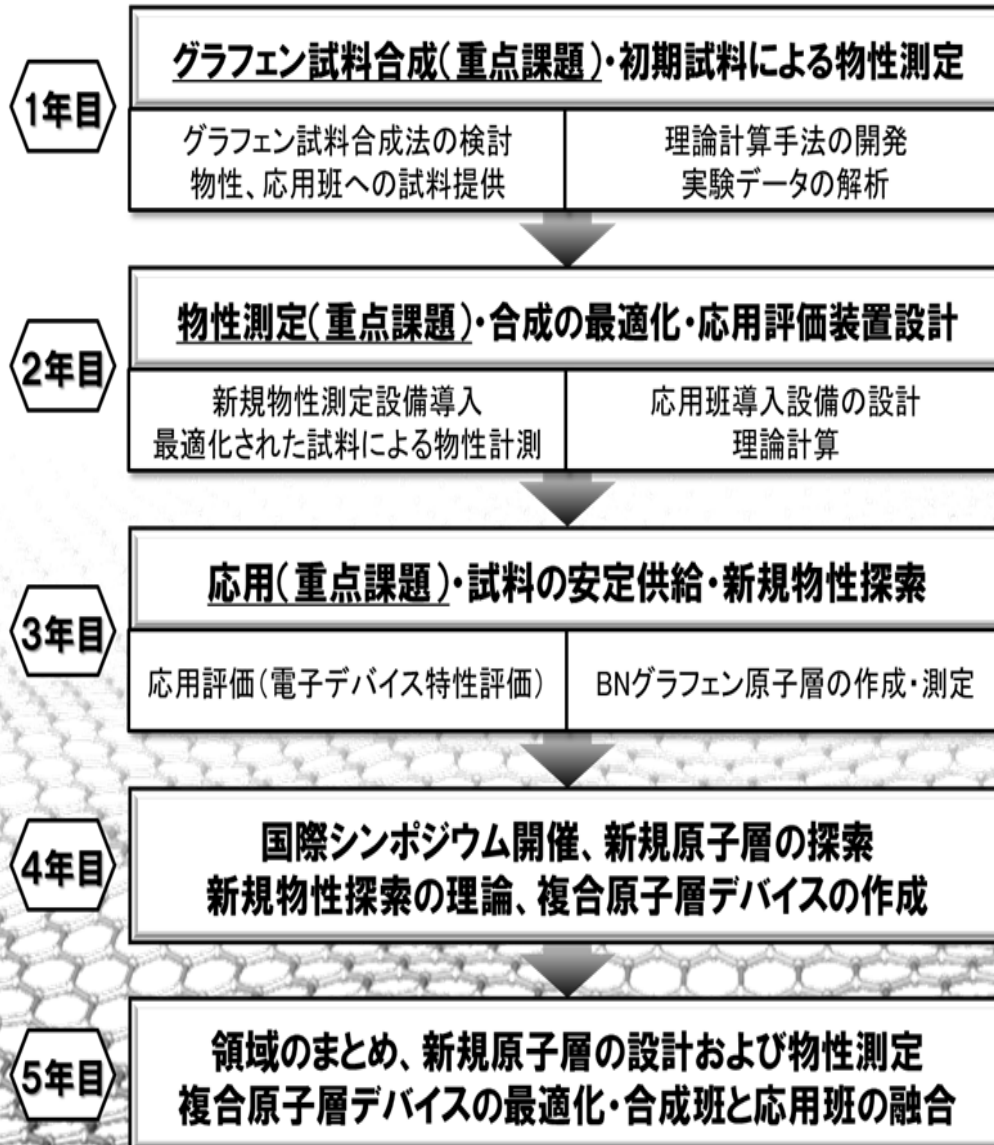
公募研究の強化
(総予算の20%)

計画研究間の連携

若手研究者の採用

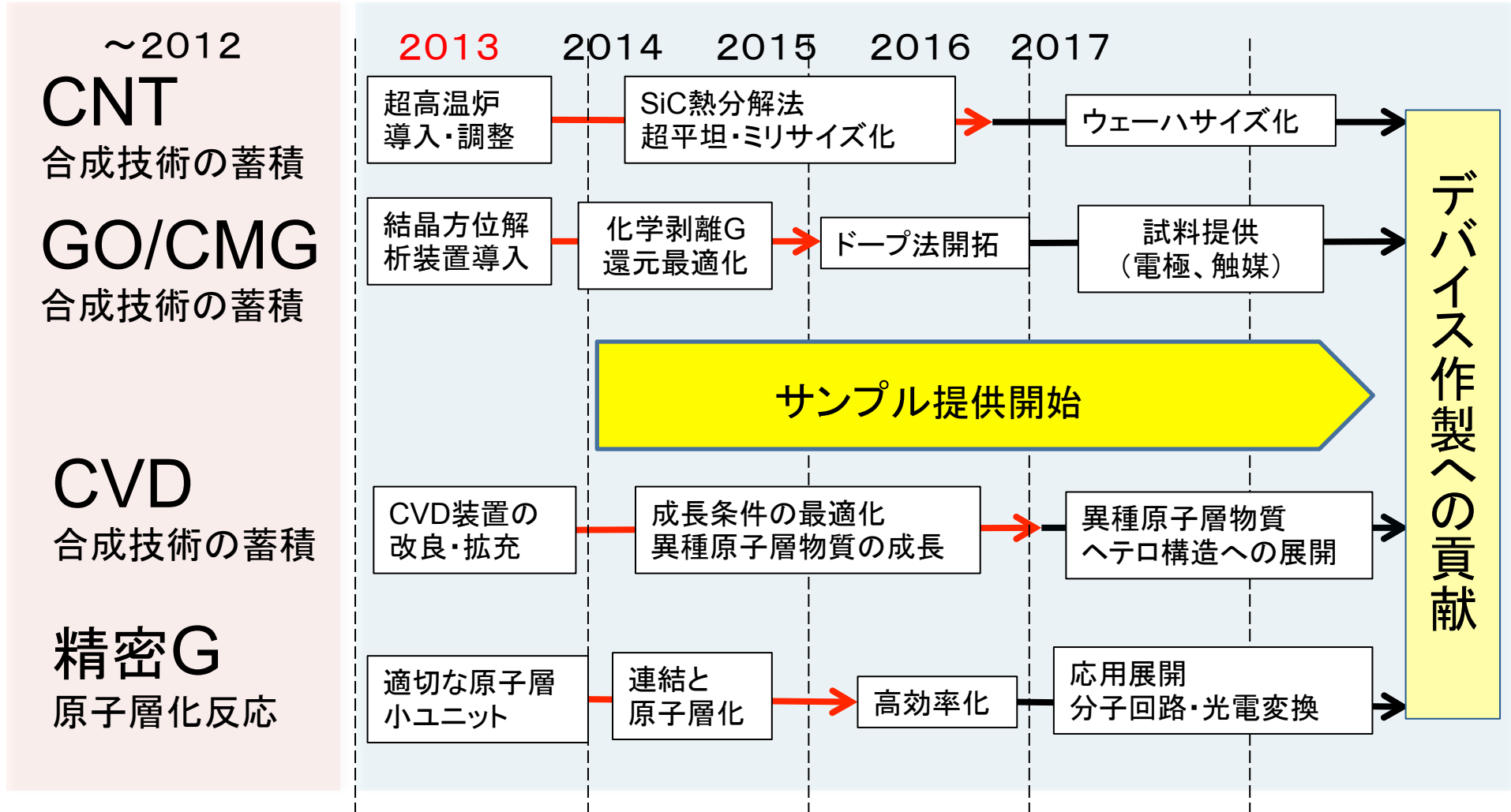
総括班によるPD確保

国内外社会への貢献



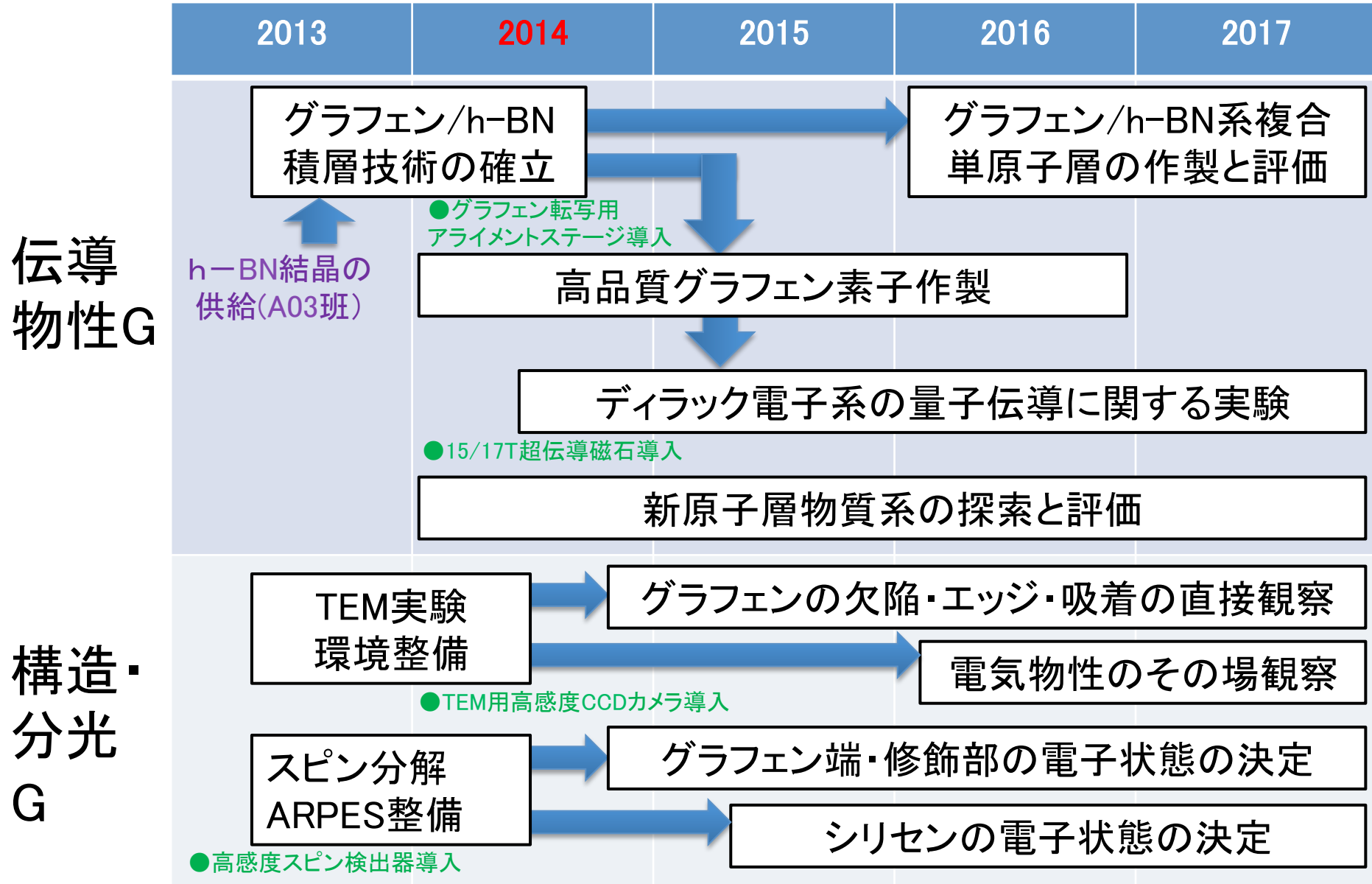
参考資料：合成班の年次計画

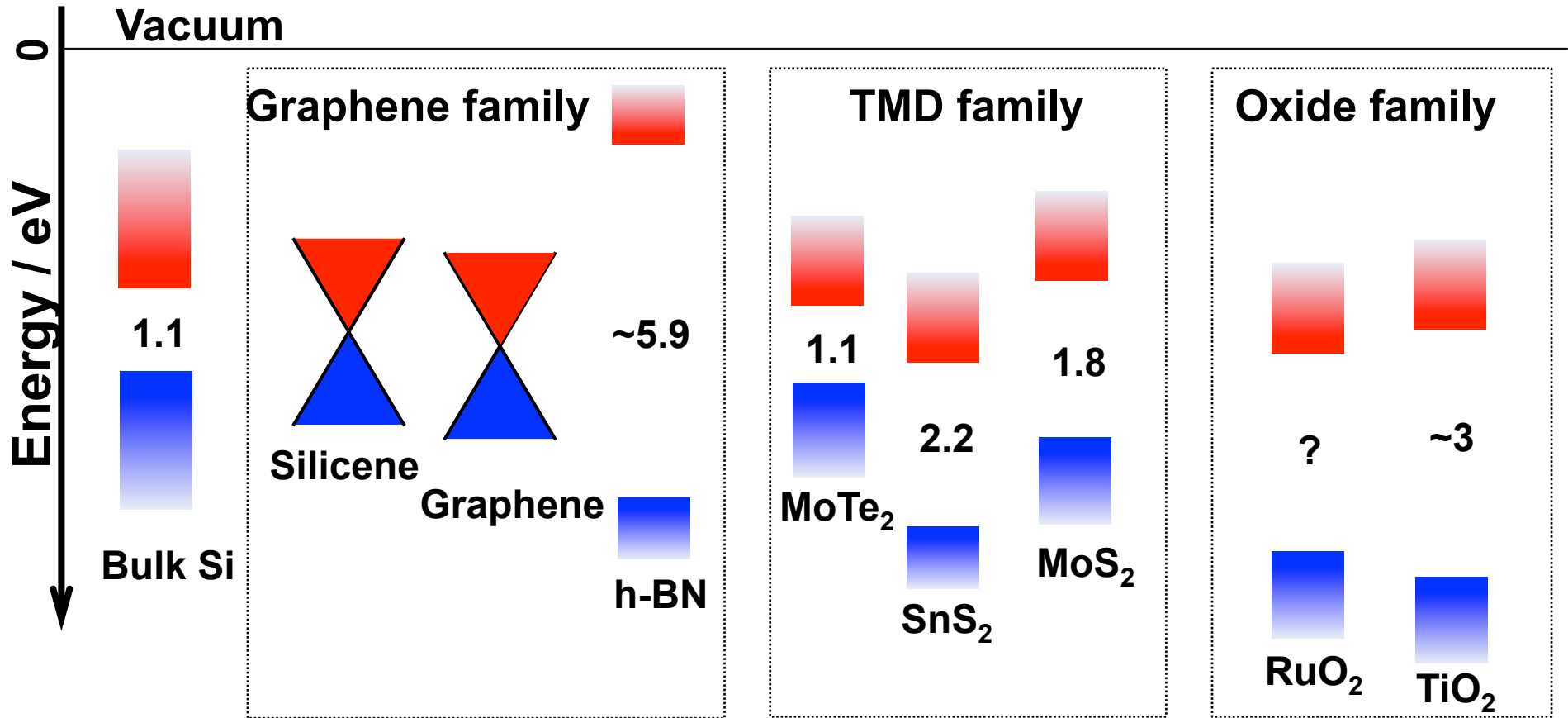
進行スケジュール



赤字の年度は重点課題

参考資料：物性班の年次計画





共有結合型

遷移金属
カルコゲナイド型

酸化物型

NbSe₂, MoSe₂, GaSe, InSe