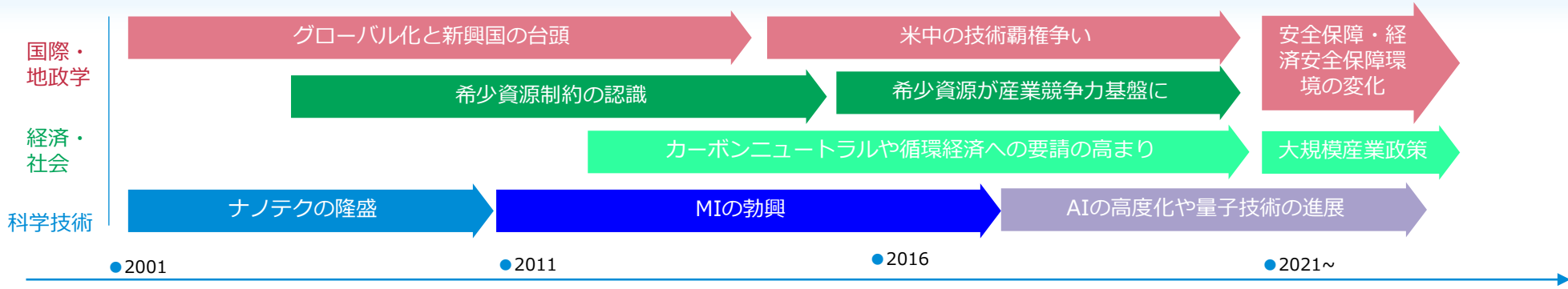


# ナノテクノロジー・材料の研究開発動向と 今後の課題・論点

2023年12月1日  
JST 研究開発戦略センター



# マテリアル（ナノテクノロジー・材料）に関連したの内外政策の大きな流れ



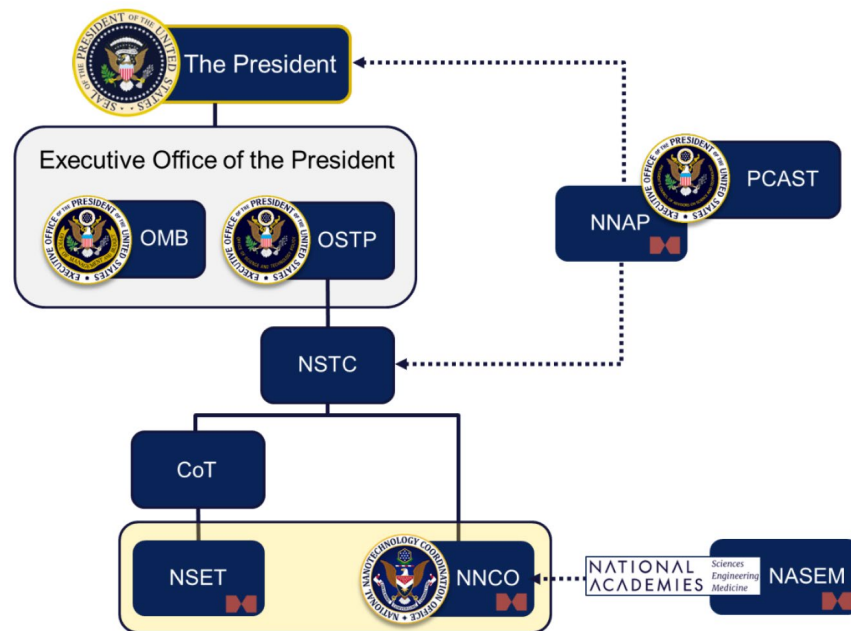
	●2001	●2011	●2016	●2021~
<b>米国</b>	<p><b>'01 NNI開始</b> 省庁横断的なナノテクへの取り組み</p> <p>'04 ナノテク基盤ネットワークの運用 →NNIN</p>	<p><b>'11 マテリアル"ガムニシアチブ" (MGI) 開始</b></p> <p><b>'11 希少資源戦略[DOE]</b> →NNCI</p>	<p><b>'17 希少資源対策の強化/大統領</b></p> <p><b>'18 量子イニシアチブ</b></p>	<p><b>'21 サプライチェーンレビュー</b></p> <p><b>'22 インフレ抑制法</b> NNI第7次評価→次の枠組みへ</p>
<b>日本</b>	<p><b>'01 第2期・第3期基本計画で重点分野化</b></p> <p>'02ナノ支援 '07ナノネット</p>	<p><b>'11 第4期以降は横断的基盤技術に</b></p> <p>'12 ナノプラ...</p> <p><b>'07 元素戦略府省連携PJ開始→'12拠点形成型</b></p>	<p><b>'15 MI2I拠点開始</b> マテリアルズ・イノベティクス関連施策の開始</p> <p><b>'20 量子技術イノベ戦略</b></p>	<p><b>'21 マテリアル革新力強化戦略</b> <b>マテリアルDX-PFの構築</b> ARIM、DxMT、データ中核拠点、MPI</p> <p><b>'21 GI基金、半導体戦略、蓄電池戦略</b></p>
<b>欧州</b>	<p><b>'04 欧州ナノテク戦略</b></p> <p>'06 (独) ハイテク戦略 拠点整備推進(IMEC MINATEC)</p> <p><b>'07 REACH規則公布</b> 規制・標準戦略の礎</p>	<p><b>'11 (独) インダストリー4.0</b> 製造業の自動化・データ化</p>	<p><b>'14 Horizon2020の開始</b> 研究開発のミッション志向化</p> <p><b>'15 欧州循環経済パッケージ</b></p> <p><b>'16 量子マニフェスト</b></p>	<p><b>'20 GAIA-X (産業データ基盤) 構想</b></p> <p>'23欧州バッテリー規則、PFAS規制提出</p>
<b>中国</b>	<p><b>'01国家ナノテクノロジー発展綱要</b></p> <p><b>'06中長期科学技術発展規画綱要</b> 先端材料・製造等が重点分野指定</p>		<p><b>'15 中国製造2025</b> 製造業への大きな産業政策</p> <p><b>'15 中国版MGI</b> 上海大学に研究センターを設立</p>	<p>'23欧州AMI2030</p> <p><b>'23半導体材料輸出規制</b></p>

# 米大統領科学諮問会議(PCAST)による 国家ナノテクノロジーイニシアティブ 第7次評価 (概略)

## 概要

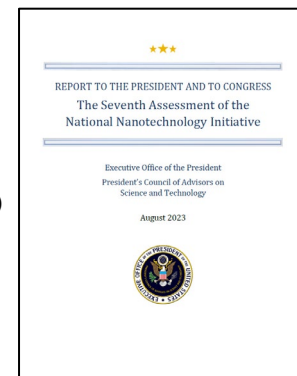
- 米国家ナノテクノロジーイニシアティブ (NNI) は、クリントン元大統領が2000年に発表後、「21世紀ナノテクノロジー研究開発法」のもと国家計画として実施。5年毎に戦略計画を更新し、NNI開始から20年が経過。
- 本法は科学技術政策局 (OSTP) における国家科学技術会議 (NSTC) の技術委員会の下に、**ナノスケール科学・工学・技術 (NSET) 小委員会**、及び**国家ナノテクノロジー調整局 (NNCO)** 並びに**国家ナノテクノロジー諮問委員会 (NNAP)** の設置を定めている。NNAPは、NNIを定期的に見直す目的でPCAST内に設置された評価委員会。さらにNNCOは、全米科学・工学・医学アカデミー (NASEM) にも評価を委託しており、NNIの開始以来、計12回 (内、PCAST-NNAPが6回、NASEMが6回) の評価を実施している。現在では、それぞれ4年毎に評価を公表している。
- 今回、PCAST-NNAPはNNIの評価を行い、評価結果およびNNIの今後へ向けた提言を公表した。提言項目は以下の3つ

- |             |  |
|-------------|--|
| <b>提言 1</b> | PCASTは、21世紀ナノテクノロジー研究開発法の廃止または大幅な改正をするために、大統領と議会が協力することを提言                                     |
| <b>提言 2</b> | PCASTは、OSTP長官がNSTC事務局長と協力して、NSET小委員会にナノテクノロジー戦略計画、実施、アウトリーチの連邦内調整のためのリーダーシップを継続するよう指示することを提言   |
| <b>提言 3</b> | PCASTは、NSET小委員会に対し、ナノテクノロジーや他の先端技術に必要とされる協調的・学際的な労働力を創出するため、学生・科学者のナノテクノロジーに関する体験学習プログラムの強化を提言 |

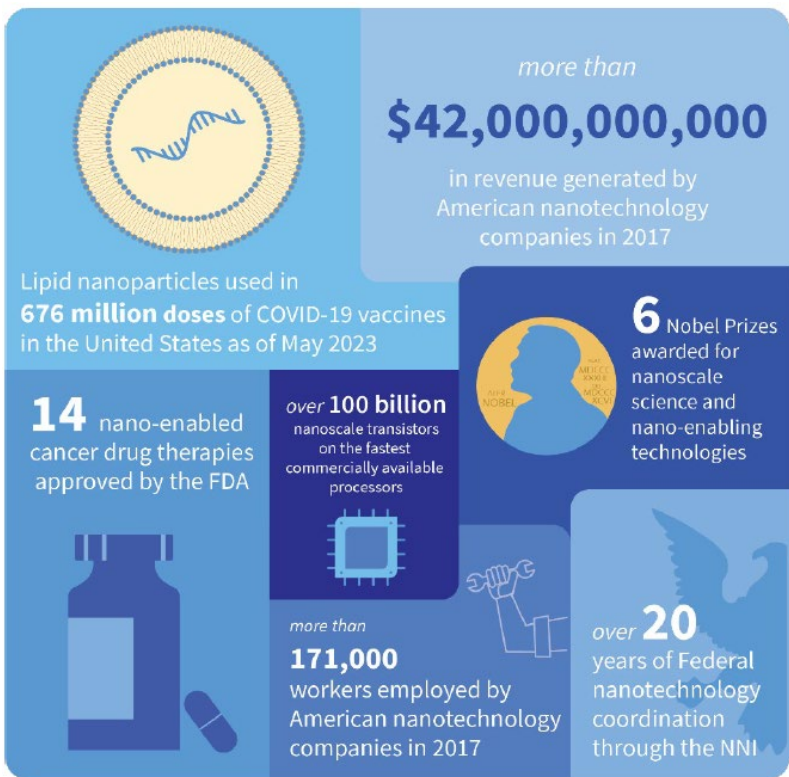


## 米国NNIの組織図

- 行政管理予算局 (OMB)
- 科学技術政策局 (OSTP)
- 国家科学技術会議 (NSTC)
- 技術委員会 (CoT)
- ナノスケール科学・工学・技術小委員会 (NSET)
- 国家ナノテクノロジー調整局 (NNCO)
- 国家ナノテクノロジー諮問委員会 (NNAP)
- 全米科学・工学・医学アカデミー (NASEM)



# 米国家ナノテクノロジーイニシアティブ（NNI）が達成した成果（第7次評価）



## NNIが達成した成果認識

- 米国は30年以上にわたり、国内の大学、民間企業、連邦政府機関、国立研究所にまたがる無数の科学者やエンジニアの総力を結集し、ナノスケールでの物質に対する理解と制御能力を拡大するナノスケール研究の道を切り開いてきた。
- こうした取り組みは、現代の差し迫った課題に対応しており、ナノテクは太陽エネルギー利用のコストを劇的に削減し、EV用バッテリーの性能を向上させるなど、米国が2050年までにカーボンニュートラルを実現する道を加速させた。
- COVID-19ワクチンを実現した脂質ナノ粒子や、ナノテクを用いたがん治療など、救命治療に採用されている。また、ナノスケール微粒子研究は、ナノマテリアルを含む製品を使用する労働者や消費者を保護する安全基準に反映されている。
- これら**広範な技術成果は、米国の経済成長を促進し、米国民へ研究投資に対する大きな見返りをもたらしている。**
- 2017年には、**ナノテクノロジー企業と認定された3,700以上の企業が、171,000人以上の労働者を雇用し、420億ドルの収益を計上した。これらの企業の製品は、他の多くの産業を支え、可能にしている。**

図 ナノテクノロジー研究の成果

- CDC COVIDデータトラッカー：米国におけるCOVID-19ワクチン接種（2023）
- NNIが米国経済に与える影響：1年間で少なくとも420億ドル(2022)
- ナノテクノロジーによって実現したがん治療
- 6つのノーベル賞、2007、2010、2014物理学賞、1996、2014、2016化学賞は、ナノスケール研究に直接関連するものとして、専門家レビューを通じ特定された

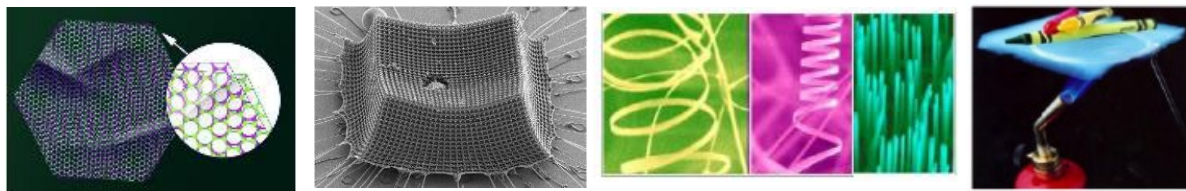
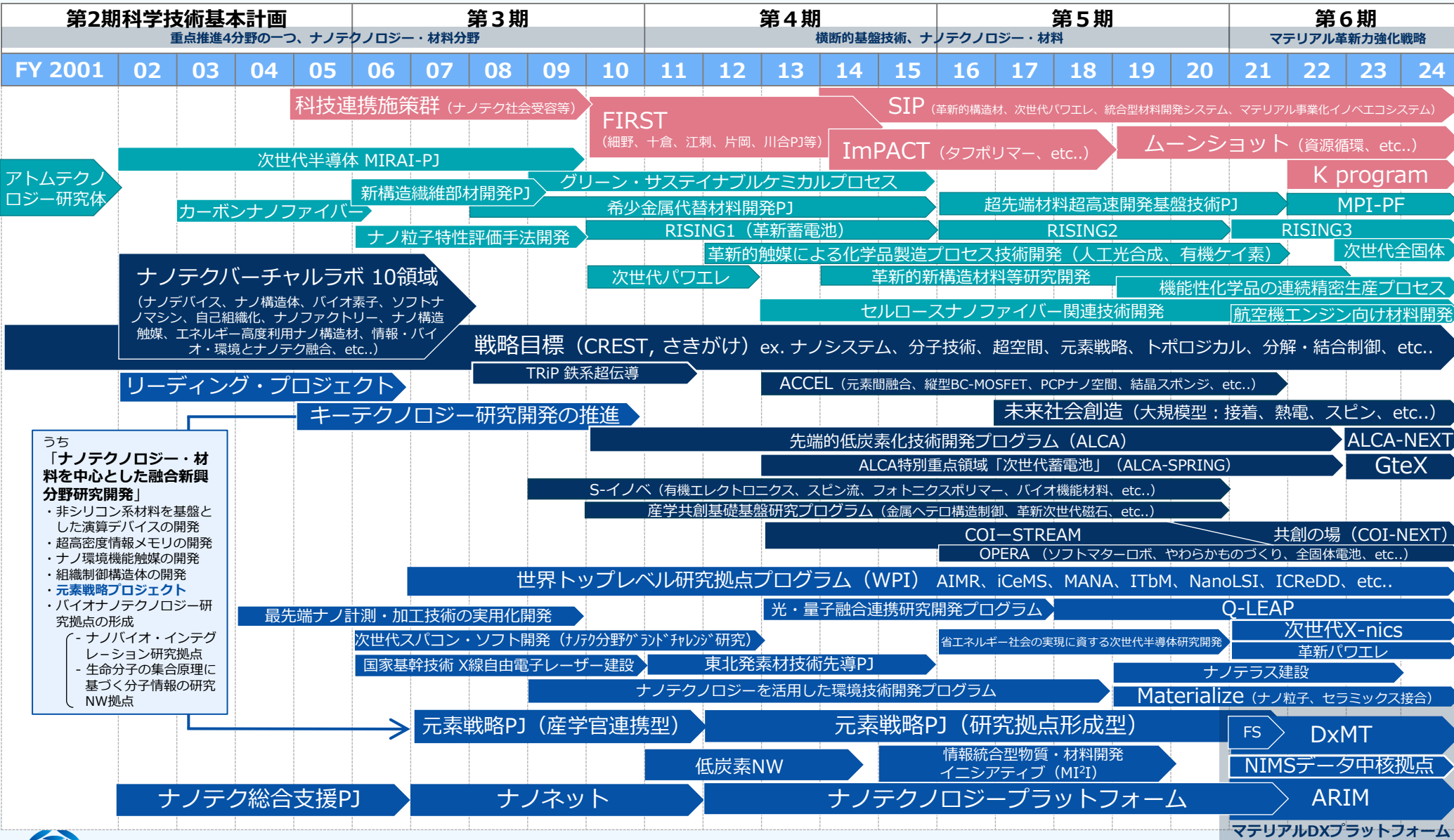


図 ナノスケールで生じる新しい材料特性の例

- 左：二層グラフェンのツイストはツイストロニクスによる新規デバイスに発展
- 中左：ポディアーマーテクノロジーによる、弾道・耐衝撃性材料開発
- 中右：同じ化学組成のナノスケール材料でも、形状によって電気的特性が変化
- 右：ナノ材料複合体は極端な熱に対して高い耐性を示す



# 日本のマテリアル関連主要施策の流れ



うち  
「ナノテクノロジー・材料を中心とした融合新興分野研究開発」

- ・非シリコン系材料を基盤とした演算デバイスの開発
- ・超高密度情報メモリの開発
- ・ナノ環境機能触媒の開発
- ・組織制御構造体の開発
- ・**元素戦略プロジェクト**
- ・バイオナノテクノロジー研究拠点の形成

- ナノバイオ・インテグレーション研究拠点  
 - 生命分子の集合原理に基づく分子情報の研究NW拠点



# 日本のマテリアル研究成果事例

**PCP/MOF**  
1997 北川進(京都大学)

有機配位子  
金属イオン  
直線 (2 配位) 例: Ag<sup>+</sup>, Cu<sup>+</sup>  
四角形 (4 配位) 例: Cu<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>  
正四面体 (4 配位) 例: Zn<sup>2+</sup>  
正八面体 (6 配位) 例: Co<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>

ハニカム構造のPCP/MOF  
四角格子構造のPCP/MOF

JST ERATO

**DDS**  
2006 片岡 一則(東京大学)

生体の異物認識を  
発するステルス機能を  
持った外殻

薬剤などを搭載し  
狙った場所で放出

MEXT キーテック

**元素間融合**  
2010 北川宏 (京都大学)

ルテニウムとパラジウムでロジウムに似た合金を作製

合金粒子  
Pd原子 Ru原子

JST-CREST, ACCEL

**DyフリーNd磁石**  
2016 宝野和博(NIMS)

~60nm  
400nm x  
保磁力=16kOe  
400nm x  
保磁力=20kOe

JST-CREST, 元素戦略拠点型

**スピン物理/スピントロニクス**  
2004 湯浅新治(AIST)  
2007 齊藤英治(東京大学) 内田健一(NIMS)

MR比 (%)  
電流  $i$  (Oe)

強磁性体  
スピン  
電流  
磁化

JST-PRESTO,  
CREST, ERATO

**超イオン伝導体(LGPS)**  
2011 菅野了次 (東京工業大学)

JSPS, ALCA-SPRING

**IGZO TFT**  
2004 細野秀雄(東京工業大学)

InGaO<sub>3</sub>(ZnO)<sub>m</sub> 単結晶薄膜

ITO ITO  
InGaO<sub>3</sub>(ZnO)<sub>m</sub>  
single crystalline film  
YSZ(111)

JST-ERATO

**CNT量産/スーパーグロース**  
2004 畠賢治(AIST)

■スーパーグロース法のイメージ

微量の水分を含んだガス  
加熱炉  
アルゴンガス  
化学反応  
ガス出口  
基板  
金属触媒  
スーパーグロース法  
カーボン  
ナノチューブ

NEDOプロジェクト

**ペロブスカイト太陽電池**  
2009 宮坂力(桐蔭横浜大)

$\text{NH}_3\text{CH}_3^+$   
 $\text{Br}$  or  $\text{I}^-$   
 $\text{Pb}^{2+}$

Photo current density / mA cm<sup>-2</sup>  
Voltage / V

$J_{sc}$  22.4 mA/cm<sup>2</sup>  
 $V_{oc}$  1.16 V  
FF 0.83  
PCE 21.6%

JSPS-科研費, JST-ALCA

**タフポリマー**  
2017 伊藤耕三(東京大学)

Double Network gel  
1<sup>st</sup> network  
2<sup>nd</sup> network

JST-IMPACT

# これまでナノテク・材委員会が取りまとめてきた研究開発推進方策（2002-現在）

文部科学省  
ナノテクノロジー・  
材料科学技術委員会  
設置



ナノテクノロジー・  
材料に関する研究開  
発の推進方策  
【第2期に向けて】

物質・材料研究に関して「5つの  
重点領域」を、ナノテクノロジー  
に関して「20年後までの実用化、  
産業化を展望した研究に係る25  
課題」を選定

ナノ材委員会主査: 澤岡 昭  
物質・材料WG主査: 北澤 宏一  
ナノテクWG主査: 岸 輝雄



ナノテクノロジー・  
材料に関する研究開  
発の推進方策  
【第3期に向けて】

「ナノエレクトロニクス」「ナ  
ノバイオテクノロジー」「材  
料」「基盤技術」「ナノサイ  
エンス・物質科学」の5つの重点  
領域について、推進すべき研究  
課題を選定

ナノ材委員会主査: 北澤 宏一



ナノテクノロジー・  
材料に関する研究開  
発の推進方策  
【第4期に向けて】

課題解決を起点とした研究開発  
課題の戦略的重点化「環境・エ  
ネルギー」「医療・健康・介  
護」「科学技術基盤」「震災か  
らの復興、再生および安全性の  
向上」

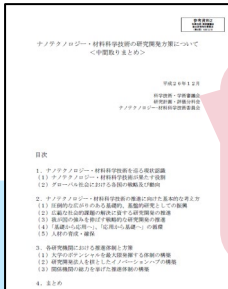
ナノ材委員会主査: 川合 知二

2001

2002

2006

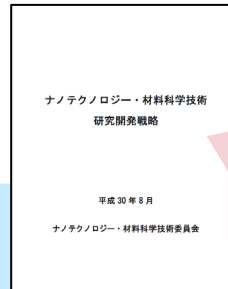
2011



ナノテクノロジー・  
材料科学技術の研究  
開発方策について  
＜中間取りまとめ＞  
【第5期に向けて】

ナノテク・材料を横断的基盤技術と  
位置づけ、基礎と応用の循環型研究  
の重要性を提言。データ駆動型材料  
開発の強化を提言

ナノ材委員会主査: 川合 知二



ナノテクノロジー・  
材料科学技術研究開  
発戦略  
【第6期に向けて】

「マテリアル革命」による社会課  
題解決を提唱。マテリアル革新力  
強化戦略の基盤となる

ナノ材委員会主査: 三島 良直  
研究開発戦略検討部会主査: 中山 智弘

2014

2018

2021

内閣府統合イノベー  
ション戦略  
「マテリアル革新力強  
化戦略」

# 2000年代前半から推進した日本のナノテク・材料政策

- ナノテク・材料は、第2期科技基本計画で**重点4分野**の1つ、第3期で**重点推進4分野**の1つとして位置づけ。
- 課題解決を掲げた第4期・第5期**では**横断的基盤技術**として、さらに**第6期開始の「マテリアル革新力強化戦略」**として、かたちを変え強化してきた。
- 文部科学省は2001年にナノテク・材料委員会を設置し、2002年の報告書「ナノテクノロジー・材料に関する研究開発の推進方策について」を皮切りに施策を開始、以降数年おきに研究開発推進方策を適時に取りまとめ、政策に活用・展開してきた。
- 2001-2002年の検討において、20年後の実用化を展望した研究課題が掲げられたが、現に20年を経過した今振り返ってみると、現在に通じる様々な見解もみえてくる。CRDSではこれらについて一定数の識者へインタビュー調査等を実施し、以下のような見解を得ている。

## インタビューからの概略

### ◆ 研究開発の実施

- 異分野融合・連携を促進した施策**（例：元素戦略やナノプラ）や、個々の領域を力強く推進したものの（例：電池、エレクトロニクス）など、**多彩な施策**が推進されてきた。
- 結果、この20年間で日本が強みを持つ部素材産業の**技術的基盤**となる**合成・加工プロセス技術、計測・解析技術、シミュレーション技術**とそれらを担う人材が育まれた。いずれも**中長期的な施策展開が重要であった**。
- 基礎・基盤領域の成果**が、他の応用領域に**発展・展開**していったものがあり、開始段階でこれらを予測することは**困難**。**裾野の広がり**が重要であったといえる。（例：自己組織化⇒量子ドット、単一電子トランジスタ⇒超電導量子ビット/スピン量子ビット）
- 重点分野化の初期には未成熟だった研究概念「元素戦略」「ナノバイオ」「マテリアルズ・インフォマティクス」などの潮流や、グラフェン、ペロブスカイトPVなど、**新材料の登場**が**研究開発の流れを形成**してきた。

### ◆ 今後への示唆

- 国際情勢や社会の変化は常に起こるなか、特定テーマへフォーカスする「重要研究課題」の判断や「基礎研究の成果がどのような応用へ展開するか」などを**予測することは極めて困難**。変化が起きても対応できるだけの、**フレキシブル且つ広がり**と**厚みのある研究開発の基盤的土壌**が重要。
- 今後も進展が予想される様々な技術に関する適切なベンチマークと、関係者間での**チャレンジングな目標の共有**が重要。
- 日本が蓄積・優位性を有するマテリアル技術の深掘りや、他分野・産業界との連携および国際連携による活用・応用領域の拡大、**柔軟で強固な科学技術と人材の基盤**を築いていくことが極めて重要。

III ナノテクノロジー研究開発の推進に関する考え方	22
1. ナノテクノロジーを語る現状認識及び推進にあたっての基本的な考え方	23
2. 施策の推進方策	28
3. 具体的な課題の抽出 - 20年後までの実用化、産業化を展望した研究開発の推進に関する考え方	33
(1) 次世代通信用ナノデバイス	35
(2) 超集積システム・高機能材料の開発	38
(3) 単一分子量子集積	42
(4) テラビット級ナノメモリの原理・素材・方式	46
(5) 新原理・量子デバイスの探索的研究	48
(6) 次世代フォトニクス基盤	50
(7) 光子分子デバイス	54
(8) 超高度感度のセンサ技術	57
(9) IT化医療：ドラッグデリバリー・ナノマシン	60
(10) ナノソフトマシン	65
(11) ナノ機能性生体分子膜・電機材料	68
(12) ナノ構造制御機械	72
(13) ナノ空間材料	75
(14) 超分子制御	78
(15) ナノチューブ・フラーレン	84
(16) ナノラミネート・ナノ配列	88
(17) ナノコンジョイント構造材料	90
(18) ナノ組織制御・機能材料	100
(19) ナノ制御高機能表面界面材料	105
(20) 有機・無機融合ナノ構造体構築	110
(21) ナノスケルエレクトロニクス	115
(22) ナノ成形	119
(23) プログラム自己組織化	123
(24) ナノ新計測	127
(25) ナノシミュレーション	131

## 25の研究課題

文部科学省「ナノテクノロジー・材料に関する研究開発の推進方策について」（2002年）では、20年後の実用化を展望した研究課題を25テーマ掲げた



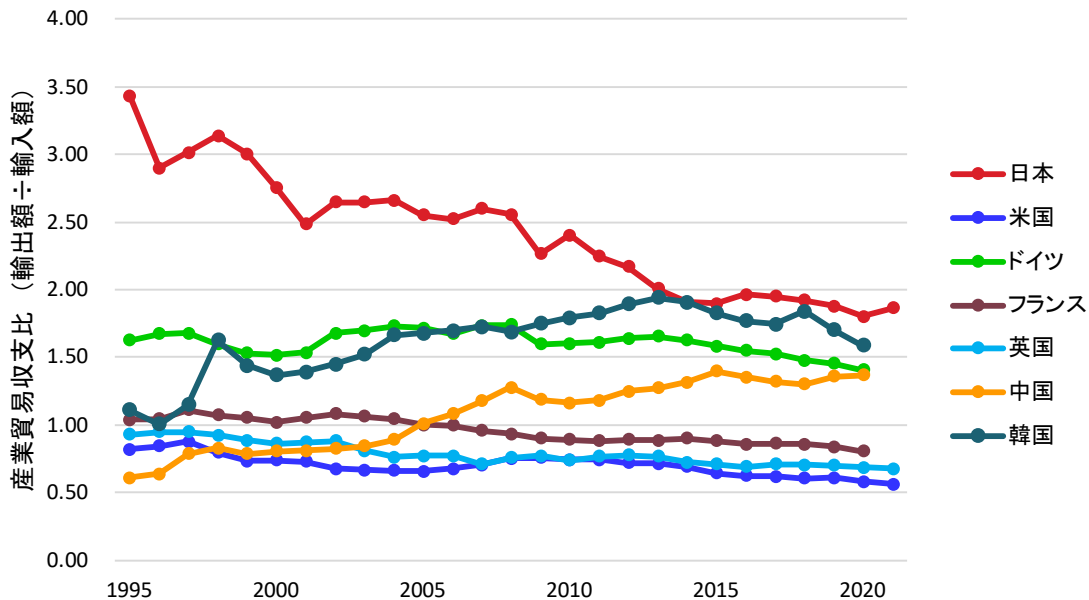
# マテリアルを取り巻く環境・世界情勢

- 不安定な国際情勢に起因するマテリアル・サプライチェーンの再構築
  - 経済安全保障の観点から、半導体、電池などの戦略物資を自国や友好地域内での製造する能力を確保する動きが顕在化
  - 特定国への依存度の高い資源の使用量削減/新供給国探索/代替などの検討が進む
- 各国の先端的マテリアル研究開発への投資強化
  - 現行の産業技術基盤だけではなく、各国が将来の技術優位性確保を考慮した戦略
  - 特に、量子、先端半導体、次世代電池、水素などに関して積極的な投資が行われている
- SDGsの実現に欠かせない基盤技術としてのマテリアルへの期待
  - 発電、蓄電、エネルギー変換などに用いられるマテリアルの新規開発・イノベーション創出に各国が注力
  - 国際協力の元、リサイクル・資源循環や化学物質の評価・データ共有・規制方法の検討が進む

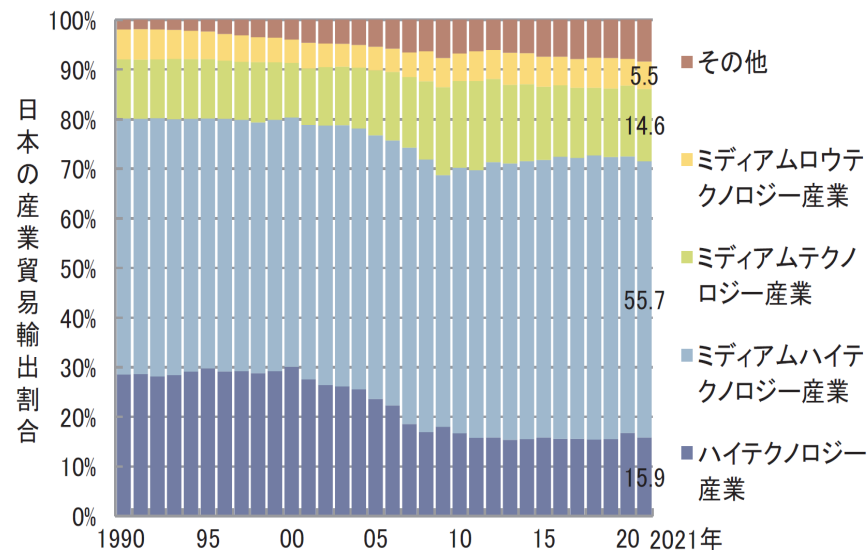
# マテリアル関連産業（部素材・デバイス等）の貿易動向

## 各国の産業貿易収支比

ミディウムハイテクノロジー産業と電子機器産業の合計



## 日本の産業貿易輸出割合



ハイテクノロジー：  
ミディウムハイテクノロジー：

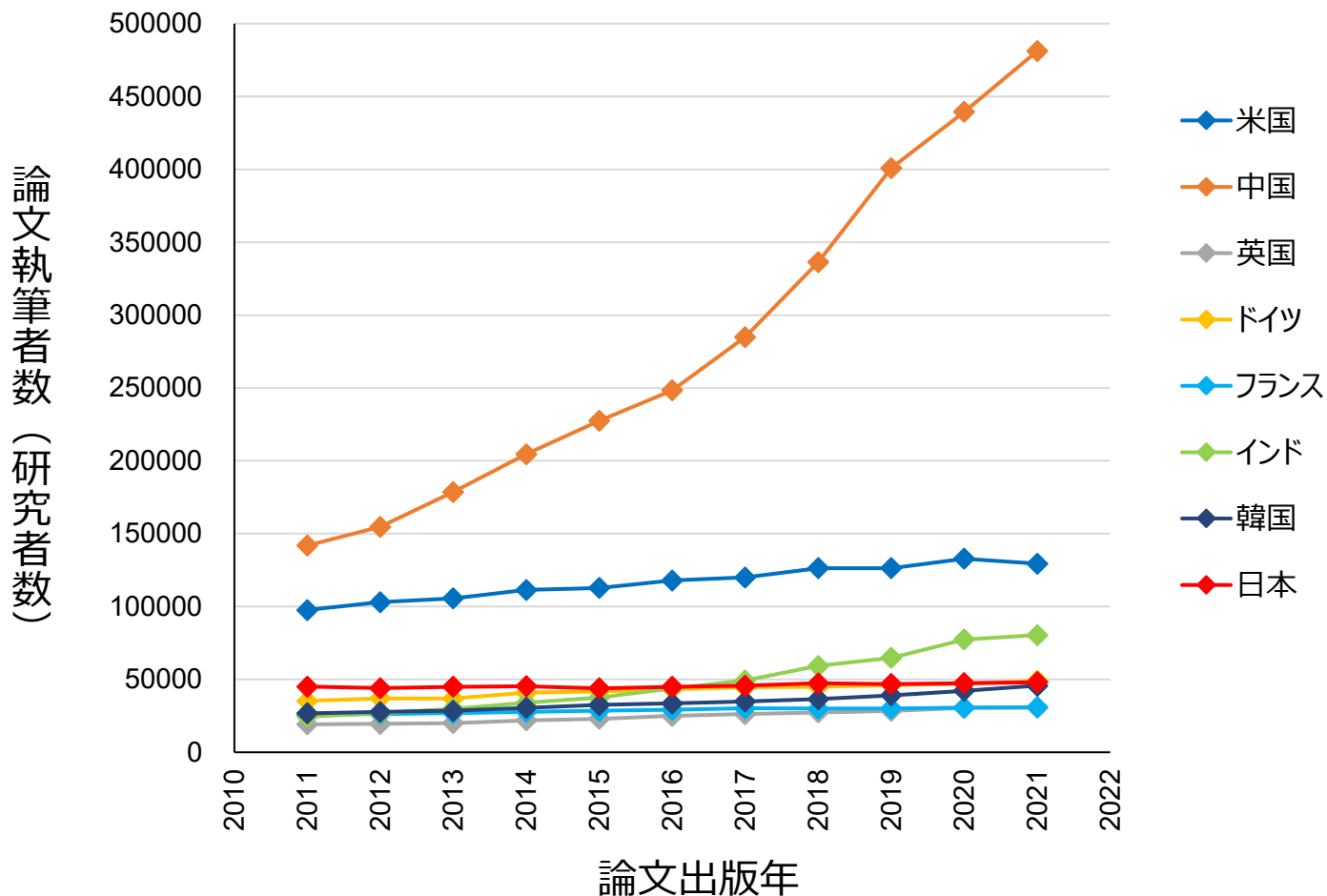
「医薬品」「電子機器」「航空・宇宙」  
「化学品と化学製品」「電気機器」「機械器具」「自動車」「その他輸送」  
「その他（磁気・光学メディア、医療及び歯科用機器・備品など）」

# マテリアル（ナノテクノロジー・材料）に関連する日本の状況

- 日本経済を支える貿易収支の柱となっている
  - ・ ミディアムハイテクノロジーが輸出の半分を占めている。
  - ・ 現時点では、これらの産業に相当するほどの外貨をもたらす産業はない。
- 国の重点施策
  - ・ 半導体、量子、電池などの経済安全保障に関わる国の施策が急速に立ち上がっている。
  - ・ マテリアル革新力強化戦略が実行フェーズに入っている。
  - ・ 環境・エネルギー分野でもカーボンニュートラル実現に向け多面的な大規模投資がなされている。
- 新興国の経済および技術力の向上に伴う国際的プレゼンスの低下
  - ・ ミディアムハイテクノロジー分野の輸出規模は縮小してはいないが、世界全体の輸出が成長しており、世界市場に占める割合は低下している。
  - ・ 日本の貿易収支に占めるミディアムハイテクノロジーの割合は漸減している。日本に変わって割合を増加させているのが、韓国や中国などの新興国。
- 相対的な研究開発力の低下
  - ・ 研究開発力の長期低落傾向が言われ始めて久しい。論文数もTop 10%論文数も以前と比べて減ってはいないが、他国の著しい進展の陰で相対的な地位が低下している。
  - ・ 学会員の微減など研究コミュニティの弱体化の兆しが見えている。

ハイテクノロジー:	「医薬品」「電子機器」「航空・宇宙」
ミディアムハイテクノロジー:	「化学品と化学製品」「電気機器」「機械器具」「自動車」「その他輸送」「その他（磁気・光学メディア、医療及び歯科用機器・備品など）」

# ナノテクノロジー・材料分野の論文指標（論文執筆者数）



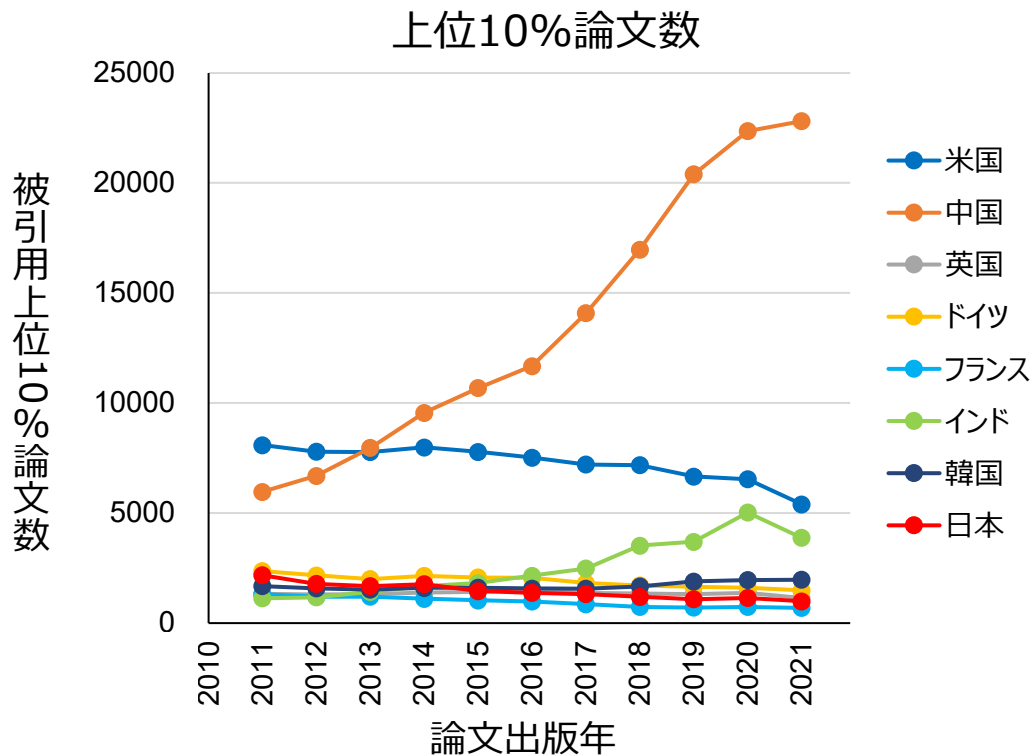
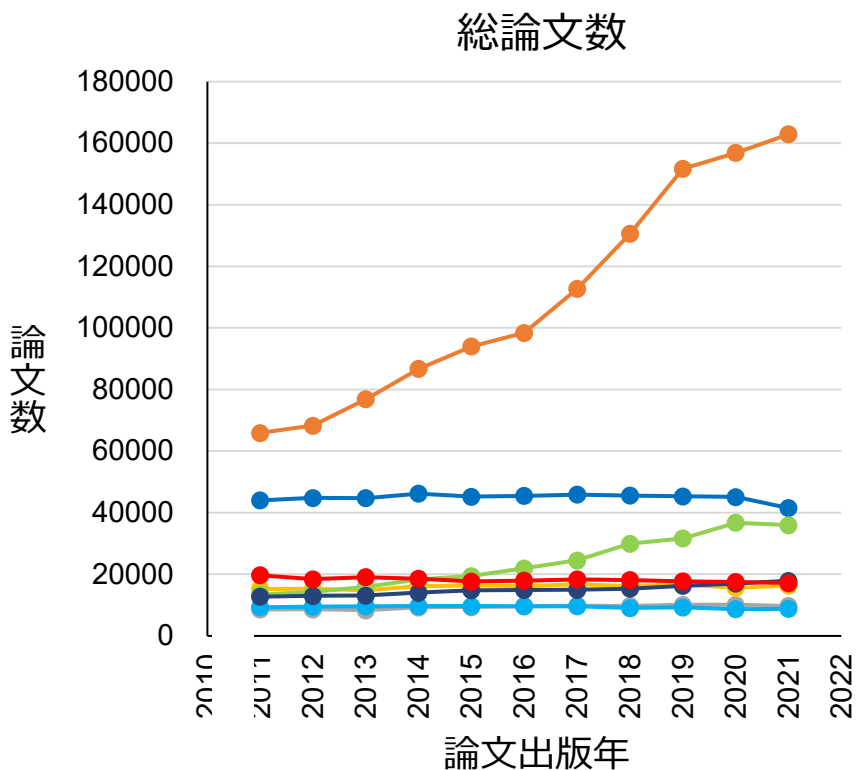
出典：エルゼビア社のScopusデータを基に、同社・JST-CRDSが作成。

論文検索式には、“Z. Wang, et al., *J. Nanopart. Res.* **21**, 199 (2019).”で報告されているナノサイエンス・ナノテクノロジー分野を定義する検索式に、Scopusの「材料科学」分野を加えたものを使用。

2021年はデータ最終年のためデータ数が少なくなっている。



# ナノテクノロジー・材料分野の論文指標（総論文数、トップ10被引用度論文数）



出典：エルゼビア社のScopusデータを基に、同社・JST-CRDSが作成。

論文検索式には、“Z. Wang, et al., *J. Nanopart. Res.* **21**, 199 (2019).”で報告されているナノサイエンス・ナノテクノロジー分野を定義する検索式に、Scopusの「材料科学」分野を加えたものを使用。

2021年はデータ最終年のためデータ数が少なくなっている。

# マテリアル革新力強化戦略

## 目指すべき姿

**マテリアル革新力を高め、経済発展と社会課題解決が両立した、持続可能な社会への転換に世界の先頭に立って取り組み、世界に貢献**

## アクションプラン

### ○ 革新的マテリアルの開発と迅速な社会実装

- バリューチェーンの上・下流／業種横断的／産官学からなる**社会課題解決型プラットフォーム**推進
- スタートアップ等が保有する未活用・埋没技術の活用促進**
- 重要なマテリアル技術・実装領域での**戦略的研究開発**の推進 等

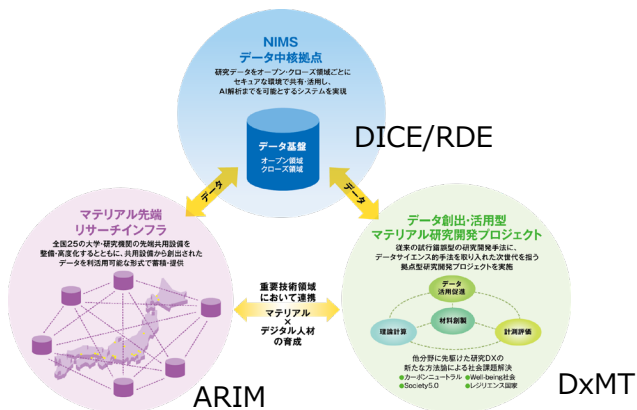
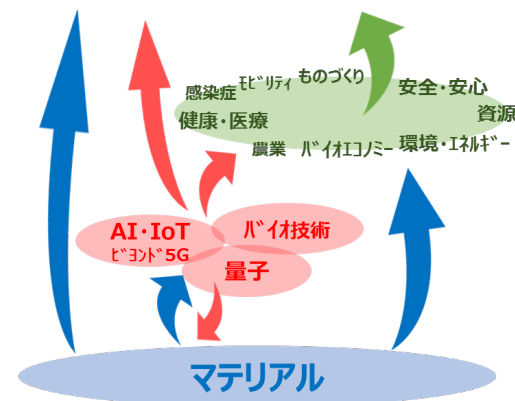
### ○ マテリアルデータと製造技術を活用したデータ駆動型研究開発の促進

- 良質なマテリアルの実データ、ノウハウ、未利用データの収集・蓄積、利活用促進（**マテリアルDXプラットフォームの整備**）
- 製造技術とデータサイエンスの融合、革新的製造プロセス技術**の開発（プロセス・イノベーション・プラットフォームの構築）

### ○ 国際競争力の持続的強化

- 資源制約の克服に向け、**希少金属等の戦略的なサプライチェーン全体の強靱化（供給源の多角化・技術開発・設備導入支援等）**
- サーキュラーエコノミーの実現に向けた制度整備と技術開発・実装**（プラ資源：2035年までに使用済プラ100%リユース・リサイクル等）
- 産学官協調での**人材育成**（マテリアル分野の魅力向上、優秀な人材の確保、出口人材・データ人材の育成等）
- 国際協力**の戦略的展開（国際ネットワークの戦略的構築、戦略的な標準化の推進等）

・ Society5.0の実現  
 ・ 世界一低環境負荷な社会システムの実現  
 ・ 世界最高レベルの研究環境の確立と迅速な社会実装による国際競争力強化

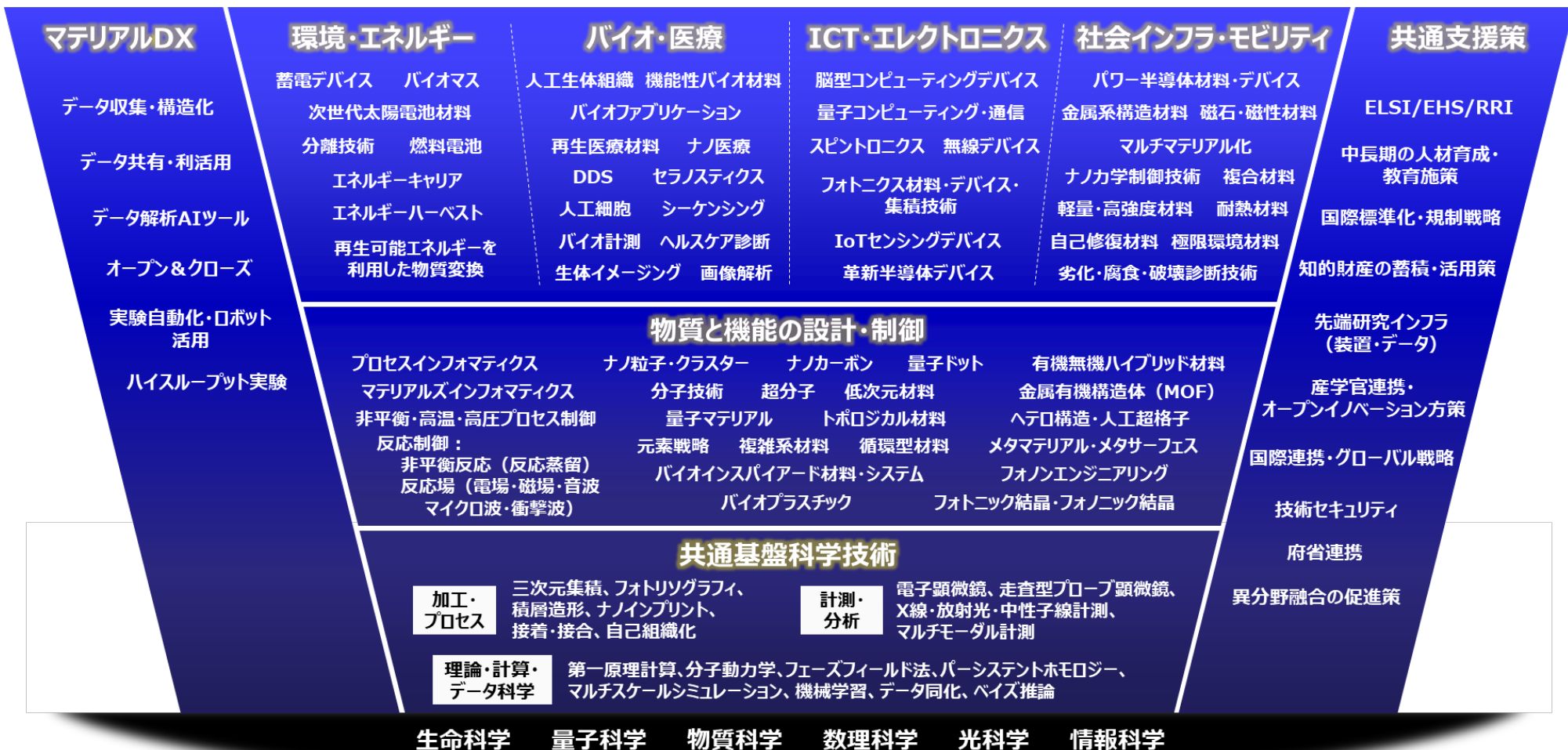


マテリアルDXプラットフォーム実現のための取り組み

出典：ARIM ホームページ  
<https://nanonet.mext.go.jp/page/page000006.html>

出典：内閣府科学技術・イノベーション事務局参事官（マテリアル担当）資料をもとに作成

# マテリアル研究開発の俯瞰的構造 (CRDS研究開発の俯瞰報告書2023年)



# 世界的なマテリアル研究開発のトレンド・技術開発の潮流

(CRDS研究開発の俯瞰報告書2023年)

## 蓄電デバイス

LIBの着実な高性能化が進む中、全固体型、金属-空気などの次世代LIBが進展。またNaイオン、多価イオン、Li-Sなどの革新電池の研究にも進展。



全固体電池 (LIBTEC)

## 再生可能エネルギーによる物質変換

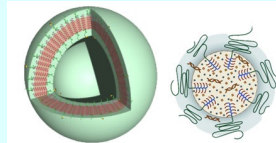
再生可能エネルギーを駆動力とした水素等の燃料・化成品合成技術が発展。高効率プロセスのための触媒、電解質探索が加速。



大型水電解システム (旭化成)

## mRNAナノ医薬

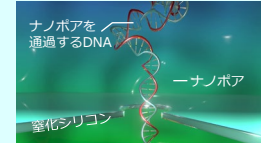
COVID-19 mRNAワクチンの成功を受け、様々な感染症に対するmRNAワクチンや、ワクチン以外の医療目的（がん免疫療法、ゲノム編集治療など）に向けたmRNAナノ医薬の開発が加速している。



多様な医薬ナノ粒子 (東大)

## 生体分子シーケンス

DNAやRNAの配列に加え、タンパク質の配列や分子の高次構造・修飾などを検出する技術が発展。特に、ナノテクを駆使した1細胞・1分子レベルでの検出技術に期待。



ナノポアDNAセンサー (阪大)

## 先端半導体

従来のCMOSを超える新構造・新動作原理のデバイスを開発し、超高速・超低消費電力でデータ処理する集積システムの実現をめざす研究開発に期待。Si系以外の新材料チャネルの登場も視野に。



FETの構造

## 脳型AIチップ

高エネルギー効率でAI処理を行う脳型AIチップ開発で、デジタル・アナログNN回路、コンピュータインメモリ、ニューロモルフィック、リザバーコンピューティングが発展。



DNN推論アクセラレータ (東工大)

## 量子コンピューティング

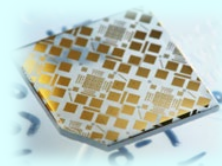
超伝導量子ビット数拡大、周辺エレクトロニクス、古典とのハイブリッド等、実用的な計算での量子優位性実現に向けた開発が活発。超伝導方式以外も進展。



量子コンピュータ  
(© RIKEN Center for Quantum Computing)

## 次世代パワー半導体

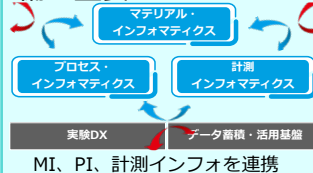
SiC、GaNの実用化が進み、Siとともにデバイス高性能化、ウェハの大口徑化へ。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>などウルトラワイドバンドギャップ半導体の開発が活発化。



Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>トランジスタチップ (NICT)

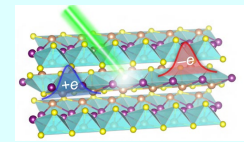
## データ駆動型材料設計・創製

データ科学と実験科学・計算科学・理論科学の連携により物質設計・創製を革新。ハイスループット実験、自律的最適化手法やデータ蓄積・活用基盤の整備も重要。



## 低次元・トポロジカル材料

低次元性やトポロジに起因する特徴的な電子状態を活かした次世代の電子デバイスやエネルギー変換デバイスの候補として、低次元材料やトポロジカル材料に注目。



トポロジカル光電流発生 (理研)



# 今後重要な研究開発の方向性（例示）

（CRDS研究開発の俯瞰報告書2023年）

取り巻く環境、日本の状況、世界的研究開発動向の観点を踏まえ、CRDSが複数回のワークショップ等を含む調査分析を経て同定した12のテーマ・方向性の例示

（※詳細は研究開発の俯瞰報告書中で解説）

テーマ・方向性	キーワード	社会の変化がもたらす新たな科学技術への要請	科学技術の新たな潮流出現に伴う戦略的投資の必要性	日本の産業競争力と安全保障の観点で重要な技術確保
1. 先進半導体材料・デバイス技術	低次元材料、3次元集積、先端プロセス適応	○	○	○
2. 量子特有の性質の操作、制御、活用	量子コンピューティング、古典インターフェース、トポロジカル材料、スピントロニクス		○	○
3. 電気-物質エネルギー高度変換技術	蓄電デバイス、水素製造、燃料電池	○	○	○
4. マルチスケール熱制御技術	フォノンエンジニアリング、熱-量子カップリング、IC放熱、断熱・蓄熱材料	○		○
5. 資源循環と炭素循環を両立する材料技術	元素戦略、LCA（CFP、マテリアルフロー）	○		○
6. 生体適合性の拡張的理解と制御	細胞力学応答の検出と制御、ウェアラブル/埋め込みデバイス	○	○	
7. 生物機能を活かすハイブリッド材料	生体物質表面修飾、細胞センサー、微生物内含治療薬、微生物融合自己修復建材	○	○	○
8. ナノスケール高機能材料	ナノカーボン、二次元材料、MOF、超分子、有機無機ペロブスカイト、準安定材料	○	○	
9. 極限環境下の高信頼性材料	高温耐性（航空・プラント）、超軽量（航空、車載）、AM	○		○
10. マテリアルDX基盤技術	計算物質科学、データ科学、ハイスループット実験、データ共用ルールデザイン		○	○
11. オペランド・マルチモーダル計測	オペランド計測、マルチスケール計測、マルチモーダル計測、非破壊計測		○	
12. 新物質・新材料の戦略的ガバナンス	リスクマネジメント・ELSI/RRI/国際標準	○	○	○

# わが国におけるマテリアル研究開発検討の論点・課題提示

## 日本の科学技術全般に共通する論点・課題

### 1. 研究力：研究の国際的な存在感の低下

- 主要国のなかで、注目論文を創出する割合は低下
  - 国際共著・引用のネットワークに十分入ることができていない
- 国際学会の招待講演や論文誌の編集者の数が少ない
  - 海外からの認知度が高い研究者数が減少

### 2. イノベーション：研究成果を産業競争力へ転換できていない

- テクノロジー・エンジニアリング・インテグレーション力不足
  - 基礎研究の強みから産業の強みへと繋がられていない
  - 産業上は重要な基盤研究であっても、論文になりにくい領域が敬遠される傾向

### 3. 人口減少時代における研究開発人材

- 学生にとって理工系や研究開発職の魅力・インセンティブが不足
  - 将来のキャリアパス・処遇への不安
- 海外からの人材は日本より他の先進国を選ぶ
  - 研究環境が国際的にみて相対的に劣後

### 4. 選択と集中の陰で失われる学問体系、連携・融合の不足

- 重点化により学問分野の淘汰が加速
- 流行分野の過密と成熟分野の過疎
  - 「かつては強かったが現在の産業構造の中では大きくない分野」「先端の開発が重要であるにも関わらず十分に成熟しつくしたと見なされる分野」などを支えるアカデミア研究が減少

## マテリアル研究における状況

- 論文総数のシェアおよび高被引用度数論文比率ともに低下傾向
- 他分野と比較してもマテリアルの高被引用度数論文割合は低い
- 国際学会の招待やエディターの数は低下、新領域開拓の存在感低下

- 産業界の求めに対しアカデミアからの人材供給・受給ギャップは顕著
- マテリアルスタートアップの難しさ
- 「（領域によっては）論文が出にくい」「新しさが少ない」などの理由で産業上重要な材料の研究が未充足

- AI等他分野に比べ進路希望者が低下、マテリアル系を選ぶ学生は減少
- 産業の強みや重要性、魅力を伝えられていない
- 内外の優秀な研究人材を惹き付けられる十分な研究環境・拠点や職環境、生活環境、処遇等条件を提示できていない。変革が遅い

- 例えば鋳業・金属精錬、石油化学・化学工学などの研究室は減少
- 伝統分野を、異分野の連携・融合、新規研究手法の導入によって再生・再定義することができていない
- 例：半導体戦略で表出した人材不足

## 以下参考

# 論文数データ 全分野と材料科学分野の対比

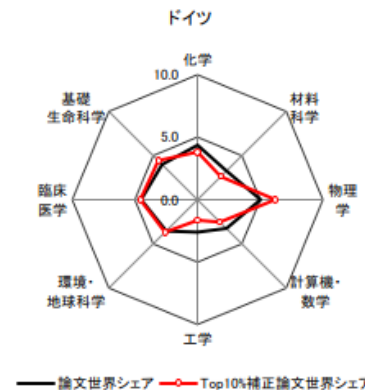
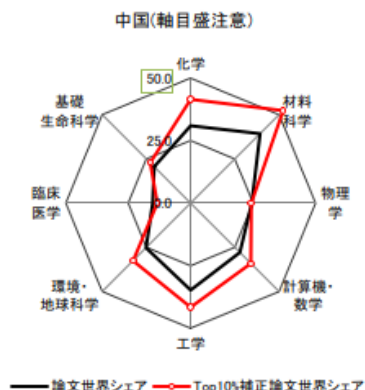
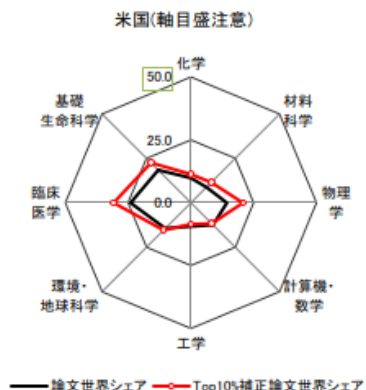
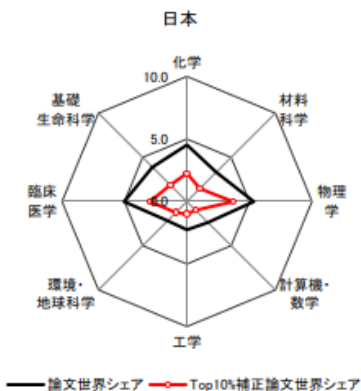
## 全論文

国名	論文シェア	Top 10 %シェア	Top 10% 割合
日本	3.8	2.0	0.53
米国	16.1	19.2	1.19
中国	24.6	28.9	1.17
ドイツ	3.9	3.8	0.97
英国	3.6	4.7	1.31

## 材料科学分野

国名	論文シェア	Top 10 %シェア	Top 10% 割合
日本	3.3	1.5	0.45
米国	8.8	11.5	1.31
中国	39.3	52.3	1.33
ドイツ	3.3	2.6	0.79
英国	2.1	2.1	1.00

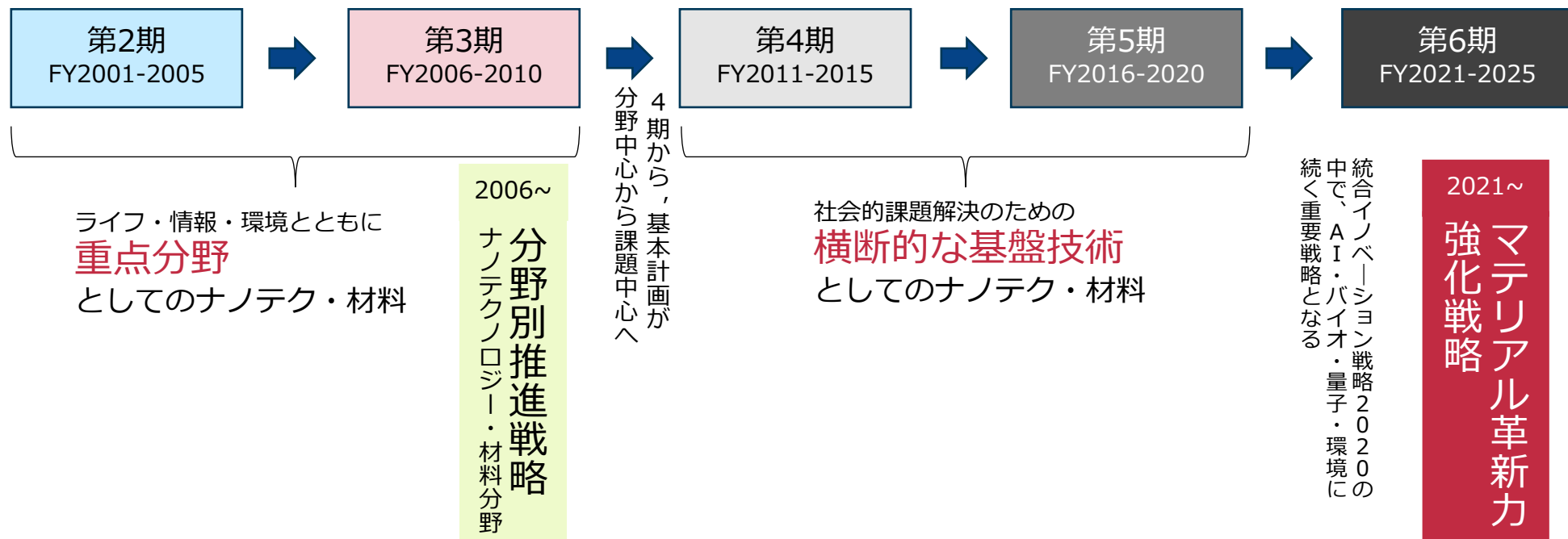
NISTEP科学技術指標2023のデータ集の値を利用  
2019-2021年、分数カウントデータの値を使用  
Top 1%割合は、Top 1%シェアを論文シェアで割ったもの



(出典)文部科学省 科学技術・学術政策研究所「科学技術指標2023」



# 政府戦略におけるマテリアルの位置づけ



- 第3期科学技術基本計画までは、ライフ、情報、環境と共に、重点推進分野としてナノテク・材料は指定。2006年に総合科学技術会議が分野別推進戦略(ナノテクノロジー材料分野)を策定。
- 第4期からは、科学技術基本計画が分野別戦略から、社会課題解決型に変わり、同時にナノテク・材料は横断的基盤技術としての位置づけとなった。
- 統合イノベーション戦略において、AI,バイオ,量子,グリーンに並ぶ基盤戦略として、2021年にマテリアル革新力強化戦略を策定

# 文部科学省 戦略目標

※ナノテク・材料関係を抜粋

年度	戦略目標	研究領域 ※(さ)：さきがけ領域	研究総括
2002	情報処理・通信における集積・機能限界の克服実現のためのナノデバイス・材料・システムの創製	新しい物理現象や動作原理に基づくナノデバイス・システムの創製	梶村 皓二
		超高速・超省電力高性能ナノデバイス・システムの創製	榊 裕之
		高度情報処理・通信の実現に向けたナノファクトリーとプロセス観測	蒲生 健次
		高度情報処理・通信の実現に向けたナノ構造体材料の制御と利用	福山 秀敏
		情報、バイオ、環境とナノテクノロジーの融合による革新的技術の創製(さ) (H14目標「ナノバイオ」、「ナノ材料」にも紐付く)	潮田 資勝
	非侵襲性医療システムの実現のためのナノバイオテクノロジーを活用した機能性材料・システムの創製	ソフトナノマシン等の高次機能構造体の構築と利用	宝谷 紘一
		医療に向けた自己組織化等の分子配列制御による機能性材料・システムの創製	茅幸二
		医療に向けた化学・生物系分子を利用したバイオ素子・システムの創製	相澤 益男
環境負荷を最大限に低減する環境保全・エネルギー高度利用の実現のためのナノ材料・システムの創製	環境保全のためのナノ構造制御触媒と新材料の創製	御園生 誠	
エネルギーの高度利用に向けたナノ構造材料・システムの創製	藤嶋 昭		
2004	新たな手法の開発等を通じた先端的な計測・分析機器の実現に向けた基盤技術の創出	物質現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術	田中 通義
2005	プログラムされたビルドアップ型ナノ構造の構築と機能の探索	構造制御と機能(さ)	寺部 茂
2006	異種材料・異種物質状態間の高機能接合界面を実現する革新的ナノ界面技術の創出とその応用	ナノ界面技術の基盤構築	新海 征治
		界面の構造と制御(さ)	川合 真紀
	ナノデバイスやナノ材料の高効率製造及びナノスケール科学による製造技術の革新に関する基盤の構築	ナノ科学を基盤とした革新的製造技術の創成	堀池 靖浩
		ナノ製造技術の探索と展開(さ)	横山 直樹
2007	新原理・新機能・新構造デバイス実現のための材料開拓とナノプロセス開発	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	渡辺 久恒
		革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス(さ)	佐藤 勝昭
2008	プロセスインテグレーションによる次世代ナノシステムの創製	プロセスインテグレーションによる機能発現ナノシステムの創製	曾根 純一
		プロセスインテグレーションに向けた高機能ナノ構造体の創出	入江 正浩
		ナノシステムと機能創発(さ)	長田 義仁
2009	異分野融合による自然光エネルギー変換材料及び利用基盤技術の創出	太陽光を利用した独創的クリーンエネルギー生成技術の創出	山口 真史
		太陽光と光電変換機能(さ)	早瀬 修二
		光エネルギーと物質変換(さ)	井上 晴夫
2010	レアメタルフリー材料の実用化及び超高保磁力・超高靱性等の新規目的機能を目指した原子配列制御等のナノスケール物質構造制御技術による物質・材料の革新的機能の創出	元素戦略を基軸とする物質・材料の革新的機能の創出	玉尾 皓平
		新物質科学と元素戦略(さ)	細野 秀雄
2012	環境・エネルギー材料や電子材料、健康・医療用材料に革新をもたらす分子の自在設計『分子技術』の構築	新機能創出を目指した分子技術の構築	山本 尚
		分子技術と新機能創出(さ)	加藤 隆史
2013	情報デバイスの超低消費電力化や多機能化の実現に向けた、素材技術・デバイス技術・ナノシステム最適化技術等の融合による革新的基盤技術の創成	素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成	桜井 貴康 横山 直樹
		選択的物質貯蔵・輸送・分離・変換等を実現する物質中の微細な空間空隙構造制御技術による新機能材料の創製	超空間制御に基づく高度な特性を有する革新的機能素材等の創製

# 文部科学省 戦略目標

※ナノテク・材料関係を抜粋

年度	戦略目標	研究領域 ※(さ)：さきがけ領域	研究総括
2014	二次元機能性原子・分子薄膜による革新的部素材・デバイスの創製と応用展開	二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出	黒部 篤
2015	多様な天然炭素資源を活用する革新的触媒の創製	多様な天然炭素資源の活用による革新的触媒と創出技術	上田 渉
		革新的触媒の科学と創製(さ)	北川 宏
2015		理論・実験・計算科学とデータ科学が連携・融合した先進的マテリアルズインフォマティクスのための基盤技術の構築(さ) (H25目標「ナノエレ」、「ビッグデータ」、H24目標「分子技術」にも紐付く)	常行 真司
2016	材料研究をはじめとする最先端研究における計測技術と高度情報処理の融合	計測技術と高度情報処理の融合によるインテリジェント計測・解析手法の開発と応用	雨宮 慶幸 北川 源四郎
2017	ナノスケール熱動態の理解と制御技術による革新的材料・デバイス技術の開発	ナノスケール・サーマルマネジメント基盤技術の創出	丸山 茂夫
	実験とデータ科学等の融合による革新的材料開発手法の構築	熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御(さ)	花村 克悟
2018	トポロジカル材料科学の構築による革新的材料・デバイスの創出	実験と理論・計算・データ科学を融合した材料開発の革新	細野 秀雄
	持続可能な社会の実現に資する新たな生産プロセス構築のための革新的反応技術の創出	トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出	上田 正仁
2018		トポロジカル材料科学と革新的機能創出(さ)	村上 修一
		新たな生産プロセス構築のための電子やイオン等の能動的制御による革新的反応技術の創出	吉田 潤一
2019	ナノスケール動的挙動の理解に基づく力学特性発現機構の解明	電子やイオン等の能動的制御と反応(さ)	関根 泰
	最先端光科学技術を駆使した革新的基盤技術の創成	革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明	伊藤 耕三
2020	情報担体と新デバイス	力学機能のナノエンジニアリング(さ)	北村 隆行
	自在配列と機能	独創的原理に基づく革新的光科学技術の創成	河田 聡
2021	元素戦略を基軸とした未踏の多元素・複合・準安定物質探索空間の開拓	革新的光科学技術を駆使した最先端科学の創出(さ)	田中 耕一郎
	資源循環の実現に向けた結合・分解の精密制御	情報担体を活用した集積デバイス・システム	平本 俊郎
2022	社会課題解決を志向した計測・解析プロセスの革新	情報担体とその集積のための材料・デバイス・システム(さ)	若林 整
	量子情報と量子物性の融合による革新的量子制御技術の創成	原子・分子の自在配列・配向技術と分子システム機能	君塚 信夫
2023	新たな半導体デバイス構造に向けた低次元マテリアルの活用基盤技術	原子・分子の自在配列と特性・機能(さ)	西原 寛
	社会課題解決を志向した計測・解析プロセスの革新	未踏探索空間における革新的物質の開発	北川 宏
2023		物質探索空間の拡大による未来材料の創製(さ)	陰山 洋
		分解・劣化・安定化の精密材料科学	高原 淳
2023		持続可能な材料設計に向けた確実な結合とやさしい分解(さ)	岩田 忠久
		社会課題解決を志向した革新的計測・解析システムの創出	鷲尾 隆
2023		物質と情報の量子協奏(さ)	小林 研介
		ナノ物質を用いた半導体デバイス構造の活用基盤技術	齋藤 理一郎
2023		新原理デバイス創成のためのナノマテリアル(さ)	岩佐 義宏
		計測・解析プロセス革新のための基盤の構築(さ)	田中 功

## ■リーディング・プロジェクト 2002-2006年度 全19課題

- ・ ナノテクノロジーを活用した新しい原理のデバイス開発
- ・ 極端紫外（EUV）光源開発等の先進半導体製造技術の実用化
- ・ ナノテクノロジーを活用した人工臓器・人工感覚器の開発
- ・ 次世代型燃料電池プロジェクト
- ・ エネルギー起源CO<sub>2</sub>削減のための超耐熱材料イニシアティブ
- ・ 次世代の科学技術をリードする計測・分析・評価機器の開発

## ■キーテクノロジー研究開発の推進「ナノテクノロジー・材料を中心とした融合新興分野研究開発」2005-2010年度

	開始年度	研究課題
産学官連携型	2005	非シリコン系材料を基盤とした演算デバイスの開発
	2005	超高密度情報メモリの開発
	2006	ナノ環境機能触媒の開発
	2006	組織制御構造体の開発
	2007	元素戦略プロジェクト
研究拠点形成型	2005	ライフ・環境・情報通信分野に役立つバイオナノテクノロジー研究拠点の形成

## ■世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）2007年度-

採択年度	研究拠点	
2007	東北大学 材料科学高等研究所（AIMR）	WPIアカデミー
	京都大学 物質-細胞統合システム拠点（iCeMS）	
	物質・材料研究機構（NIMS） 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点（MANA）	
	東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU）	
2010	九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所（I2CNER）	
2012	名古屋大学 トランスフォーマティブ生命分子研究所（ITbM）	
2017	金沢大学ナノ生命科学研究所（NanoLSI）	
2018	北海道大学 化学反応創成研究拠点（ICReDD）	
2021	高エネルギー加速器研究機構（KEK） 量子場計測システム国際拠点（QUP）	
2022	広島大学 持続可能性に寄与するキラルノット超物質拠点（SKCM <sup>2</sup> ）	



## ■センターオブイノベーション (COI) プログラム 2013-2021年度

ビジョン	拠点名	中核機関
少子高齢化先進国としての持続性確保	さりげないセンシングと日常人間ドックで実現する自助と共助の社会創生拠点	東北大学
	自分で守る健康社会拠点	東京大学
	スマートライフケア社会への変革を先導するものづくりオープンイノベーション拠点	川崎市産業振興財団
	活力ある生涯のためのLast 5Xイノベーション拠点	京都大学
豊かな生活環境の構築 (繁栄し、尊敬される国へ)	『サイレントボイスとの共感』地球インクルーシブセンシング研究拠点	東京工業大学
活気ある持続可能な社会の構築	フロンティア有機システムイノベーション拠点	山形大学
	コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点	東京大学
	革新材料による次世代インフラシステムの構築拠点	金沢工業大学
	世界の豊かな生活環境と地球規模の持続可能性に貢献するアクア・イノベーション拠点	信州大学
	持続的共進化地域創成拠点	九州大学

## ■共創の場形成支援プログラム (COI-NEXT) 2020年度-

分野	採択年度	拠点名称	代表機関	
共創分野 (本格型)	2021	再生可能多糖類植物由来プラスチックによる資源循環社会共創拠点	金沢大学	
	2022	セキュアでユビキタスな資源・エネルギー共創拠点	名古屋大学	
	2022	「ビヨンド・“ゼロカーボン”を目指す“Co-JUNKAN”プラットフォーム」研究拠点	東京大学	
	2022	フォトニクス生命工学研究開発拠点	大阪大学	
政策重点分野 (本格型)	量子技術 分野	2020	量子ソフトウェア研究拠点	大阪大学
		2020	量子航法科学技術拠点	東京工業大学
		2022	量子ソフトウェアとHPC・シミュレーション技術の共創によるサステイナブルAI研究拠点	東京大学
	環境工ネ ルギー分野	2020	先進蓄電池研究開発拠点	物質・材料研究機構
		バイオ分野	2020	つくば型デジタルバイオエコノミー社会形成の国際拠点
	2020		世界モデルとなる自律成長型人材・技術を育む総合健康産業都市拠点	国立循環器病研究センター

## ■ACCEL 2013-2021年度

採択年度	研究開発課題	研究代表者
2013	縦型BC-MOSFET による三次元集積工学と応用展開	遠藤 哲郎
	P C P ナノ空間による分子制御科学と応用展開	北川 進
	フォトニック結晶レーザーの高輝度・高出力化	野田 進
	自己組織化技術に立脚した革新的分子構造解析	藤田 誠
	エレクトライドの物質科学と応用展開	細野 秀雄
2014	P S D 法によるフレキシブル窒化物半導体デバイスの開発	藤岡 洋
	超活性固定化触媒開発に立脚した基幹化学プロセスの徹底効率化	魚住 泰広
	ダイヤモンド電極の物質科学と応用展開	栄長 泰明
2015	元素間融合を基軸とする物質開発と応用展開	北川 宏
	近接場結合集積技術による革新的情報処理システムの実現と応用展開	黒田 忠広
	濃厚ポリマーブラシのレジリエンシー強化とトライボロジー応用	辻井 敬亘
2016	スローライト構造体を利用した非機械式ハイレゾ光レーダーの開発	馬場 俊彦
2017	スーパーバイオイメージャーの開発	染谷 隆夫
	半導体を基軸としたテラヘルツ光科学と応用展開	田中 耕一郎

## ■戦略的イノベーション創出推進プログラム (S-イノベ) 2009-2020年度

設定年度	研究開発テーマ	プログラムオフィサー
2009	有機材料を基礎とした新規エレクトロニクス技術の開発	谷口 彬雄
	フォトニクスポリマーによる先進情報通信技術の開発	宮田 清藏
	超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出	佐藤 謙一
2011	スピン流を用いた新機能デバイス実現に向けた技術開発	安藤 功兒
2012	革新的医療を実現するためのバイオ機能材料の創製	岩田 博夫

## ■産学共創基礎基盤研究プログラム 2010-2020年度

設定年度	技術テーマ名	プログラムオフィサー
2010	テラヘルツ波新時代を切り拓く革新的基盤技術の創出	伊藤 弘昌
	革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築	加藤 雅治
2011	ヒト生体イメージングを目指した革新的バイオフォトンクス技術の構築	高松 哲郎
	革新的次世代高性能磁石創製の指針構築	福永 博俊

## ■産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (OPERA) 2016年度-

	採択年度	プロジェクト名	領域統括
共創プラットフォーム型	2016	有機材料の極限機能創出と社会システム化をする基盤技術の構築及びソフトマターロボティクスへの展開	大場 好弘
	2017	生理学的データ統合システムの構築による生体埋込型・装着型デバイス開発基盤の創出	齋藤 直人
		安全・安心・スマートな長寿社会実現のための高度な量子アプリケーション技術の創出	中野 貴志
共創プラットフォーム育成型	2018	物理・化学情報をミクロンレベルで可視化するマルチモーダルセンシング技術の創出	澤田 和明
オープンイノベーション機構連携型	2018	マテリアル×プロセスイノベーションによる革新的ソフト3D界面の創製とやわらかものづくり革命への展開	古川 英光
		地域資源活用型エネルギーエコシステムを構築するための基盤技術の創出	北 英紀
		超スマート社会実現のカギを握る革新的半導体技術を基盤としたエネルギーイノベーションの創出	木本 恒暢
	2019	目的指向型材料科学による全固体電池技術の創出	菅野 了次
		安全な酸化剤による革新的な酸化反応活性化制御技術の創出	井上 豪

## ■未来社会創造事業 2017年度-

探索加速型	重点公募テーマ
「超スマート社会の実現」領域 運営統括：前田 章（元日立製作所）	<ul style="list-style-type: none"> <li>•多種・多様なコンポーネントを連携・協調させ、新たなサービスの創生を可能とするサービスプラットフォームの構築（2017年度-）</li> <li>•サイバー世界とフィジカル世界を結ぶモデリングとAI（2018年度-）</li> <li>•サイバーとフィジカルの高度な融合に向けたAI技術の革新（2019年度-）</li> <li>•異分野共創型のAI・シミュレーション技術を駆使した健全な社会の構築（2020年度-）</li> </ul>
「持続可能な社会の実現」領域 運営統括：國枝 秀世（あいちシンクロトロン光センター）	<ul style="list-style-type: none"> <li>•新たな資源循環サイクルを可能とするものづくりプロセスの革新（2017年度-）</li> <li>•労働人口減少を克服する"社会活動寿命"の延伸と人の生産性を高める「知」の拡張の実現（2017年度-）</li> <li>•将来の環境変化に対応する革新的な食料生産技術の創出（2018年度-）</li> <li>•モノの寿命の解明と延伸による使い続けられるものづくり（2019年度-）</li> <li>•社会の持続的発展を実現する新品種導出技術の確立（2020年度-）</li> </ul>
「世界一の安全・安心社会の実現」領域 運営統括：田中 健一（三菱電機）	<ul style="list-style-type: none"> <li>•ひとりひとりに届く危機対応ナビゲーターの構築（2017年度-）</li> <li>•ヒューメインなサービスインダストリーの創出（2017年度-）</li> <li>•生活環境に潜む微量な危険物から解放された安全・安心・快適なまちの実現（2018年度-）</li> <li>•食・運動・睡眠等日常行動の作用機序解明に基づくセルフマネジメント（2019年度-）</li> <li>•心理状態の客観的把握とフィードバック手法の確立による生きがい・働きがいのある社会の実現（2020年度-）</li> </ul>
「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域 運営統括：魚崎 浩平（NIMS）	<ul style="list-style-type: none"> <li>•「ゲームチェンジングテクノロジー」による低炭素社会の実現（2017年度-）</li> </ul>
「共通基盤」領域 運営統括：長我部 信行（日立製作所）	<ul style="list-style-type: none"> <li>•革新的な知や製品を創出する共通基盤システム・装置の実現（2018年度-）</li> </ul>
大規模プロジェクト型	技術テーマ
運営統括：大石 善啓（三菱総研）	<ul style="list-style-type: none"> <li>•粒子加速器の革新的な小型化及び高エネルギー化につながるレーザープラズマ加速技術（2017年度-）</li> <li>•エネルギー損失の革新的な低減化につながる高温超電導線材接合技術（2017年度-）</li> <li>•自己位置推定機器の革新的な高精度化及び小型化につながる量子慣性センサー技術（2017年度-）</li> <li>•通信・タイムビジネスの市場獲得等につながる超高精度時間計測（2018年度-）</li> <li>•Society5.0の実現をもたらす革新的接着技術の開発（2018年度-）</li> <li>•未来社会に必要な革新的水素液化技術（2018年度-）</li> <li>•センサ用独立電源として活用可能な革新的熱電変換技術（2019年度-）</li> <li>•トリリオンセンサ時代の超高速情報処理を実現する革新的デバイス技術（2020年度-）</li> <li>•安全・安心かつスマートな社会の実現につながる革新的マイクロ波計測技術（2021年度-）</li> </ul>

事業期間	事業名
1993-2001年度	原子・分子極限操作技術（アトムテクノロジー）
2001-2010年度	次世代半導体材料・プロセス基盤（MIRAI）プロジェクト
2003-2005年度	カーボンナノファイバー複合材料プロジェクト
2006-2010年度	ナノ粒子特性評価手法の研究開発
2006-2010年度	先端機能発現型新構造繊維部材基盤技術の開発
2007-2011年度	次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発
2008-2015年度	希少金属代替省エネ材料開発プロジェクト
2009-2015年度	革新型蓄電池先端科学基礎研究事業（RISING）
2009-2012年度	低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト
2009-2015年度	グリーン・サステナブルケミカルプロセス基盤技術開発
2009-2019年度	低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト
2010-2016年度	低炭素社会を実現するナノ炭素材料実用化プロジェクト
2010-2014年度	次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト
2012-2016年度	リチウムイオン電池応用・実用化先端技術開発事業
2012-2021年度	革新的触媒による化学品製造プロセス技術開発
2013-2019年度	高機能リグノセルロースナノファイバーの一貫製造プロセスと部材化技術の開発事業
2013-2021年度	超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発

事業期間	事業名
2014-2021年度	次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発
2014-2022年度	革新的新構造材料等研究開発
2016-2020年度	革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発（RISING2）
2016-2022年度	超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト
2016-2027年度	高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発
2018-2022年度	AIチップ開発加速のためのイノベーション推進事業
2018-2023年度	次世代人工知能・ロボットの中核となるインテグレート技術開発
2019-2024年度	IoT社会実現のための革新的センシング技術開発
2019-2025年度	機能性化学品の連続精密生産プロセス技術の開発
2020-2024年度	次世代複合材創製・成形技術開発プロジェクト
2020-2024年度	炭素循環社会に貢献するセルロースナノファイバー関連技術開発
2021-2025年度	電気自動車用革新型蓄電池開発（RISING3）
2021-2025年度	省エネエレクトロニクスの製造基盤強化に向けた技術開発事業
2021-2025年度	マテリアル革新技術先導研究プログラム
2021年度-	グリーンイノベーション基金事業
2022-2026年度	次世代ファインセラミックス製造プロセスの基盤構築・応用開発

# 総合科学技術・イノベーション会議 (旧 総合科学技術会議)

※ナノテク・材料関係を抜粋

## ■ 科学技術連携施策群 2005-2009年度 全9テーマ

- ・ 次世代ロボット – 共通プラットフォーム技術の確立 –
- ・ バイオマス利活用
- ・ 水素利用/燃料電池
- ・ ナノバイオテクノロジー
- ・ ナノテクノロジーの研究開発推進と社会受容に関する基盤開発 (2007-2009年度)

## ■ 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 2014年度-

期	課題	プログラムディレクター
第1期 2014-2018年度	革新的燃焼技術	杉山 雅則 (トヨタ自動車)
	次世代パワーエレクトロニクス	大森 達夫 (三菱電機)
	インフラ維持管理・更新・マネジメント技術	藤野 陽三 (横国大)
	革新的構造材料	岸 輝雄 (ISMA)
	革新的設計生産技術	佐々木 直哉 (日立製作所)
第2期 2018-2022年度	フィジカル空間デジタルデータ処理基盤	佐相 秀幸 (富士通)
	統合型材料開発システムによるマテリアル革命	三島 良直 (AMED)
	光・量子を活用したSociety 5.0実現化技術	西田 直人 (東芝)
第3期 2023年度-	マテリアル事業化イノベーション・育成エコシステムの構築	木場 祥介 (UMI)

## ■ 経済安全保障重要技術育成プログラム (K program) 2022年度-

研究開発構想	研究開発構想名	プログラム・オフィサー/実施体制
プロジェクト型	超音速・極超音速輸送機システムの高度化に係る要素技術開発	大林 茂 (東北大)
個別研究型	生体分子シークエンサー等の先端研究分析機器・技術	杉山 弘 (京大)
	高感度小型多波長赤外線センサ技術の開発	株式会社 ジェネシア ほか
	航空機エンジン向け先進材料技術の開発・実証	株式会社 IHI、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構、UBE 株式会社
	ハイパワーを要するモビリティ等に搭載可能な次世代蓄電池技術の開発・実証	株式会社 東芝



# 総合科学技術・イノベーション会議 (旧 総合科学技術会議)

※ナノテク・材料関係を抜粋

## ■最先端研究開発支援プログラム (FIRST) 2010-2014年度

中心研究者名	中心研究者の所属及び役職	研究課題名
安達 千波矢	九州大学未来化学創造センター 教授	スーパー有機ELデバイスとその革新的材料への挑戦
荒川 泰彦	東京大学生産技術研究所 教授	フォトリソ・エレクトロニクス融合システム基盤技術開発
江刺 正喜	東北大学原子分子材料科学高等研究機構 教授	マイクロシステム融合研究開発
大野 英男	東北大学電気通信研究所 教授	省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発
片岡 一則	東京大学大学院工学系研究科 教授	ナノバイオテクノロジーが先導する診断・治療イノベーション
川合 知二	大阪大学産業科学研究所 教授	1分子解析技術を基盤とした革新ナノバイオデバイスの開発研究 —超高速単分子DNA シークエンシング、超低濃度ウイルス検知、極限生体分子モニタリングの実現—
木本 恒暢	京都大学大学院工学系研究科 教授	低炭素社会創成へ向けた炭化珪素 (SiC) 革新パワーエレクトロニクスの研究開発
小池 康博	慶應義塾大学理工学部 教授	世界最速プラスチック光ファイバーと高精細・大画面ディスプレイのためのフォトリソポリマーが築く Face-to-Faceコミュニケーション産業の創出
瀬川 浩司	東京大学先端科学技術研究センター 教授	低炭素社会に資する有機系太陽電池の開発～複数の産業群の連携による次世代太陽電池技術開発と新産業創成～
十倉 好紀	東京大学大学院工学系研究科 教授	強相関量子科学
外村 彰	(株)日立製作所 フェロー	原子分解能・ホログラフィー電子顕微鏡の開発とその応用
細野 秀雄	東京工業大学フロンティア研究センター 教授	新超電導および関連機能物質の探索と産業用超電導線材の応用
水野 哲孝	東京大学大学院工学系研究科 教授	高性能蓄電デバイス創製に向けた革新的基盤研究
横山 直樹	(株)富士通研究所 フェロー	グリーン・ナノエレクトロニクスのコア技術開発

## ■革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) 2014-2018年度

プログラム・マネージャー	研究開発プログラム
伊藤 耕三	超薄膜化・強靱化「しなやかなタフポリマー」の実現
佐橋 政司	無充電で長期間使用できる究極のエコIT機器の実現
鈴木 隆領	超高機能構造タンパク質による素材産業革命
宮田 令子	進化を超える極微量物質の超迅速多項目センシングシステム

# 関連する戦略 カーボンニュートラル、量子技術

## ◆ カーボンニュートラル

### ■ 「2050年カーボンニュートラルに伴う グリーン成長戦略」

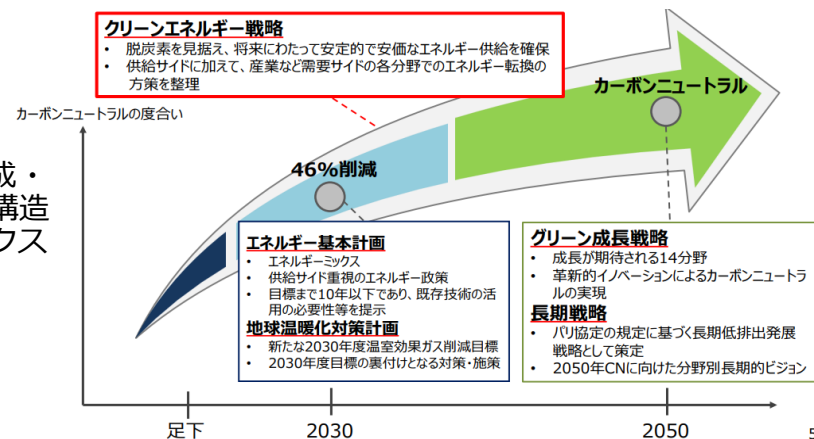
- 2021年6月
- グリーンイノベーション (GI) 基金：2兆円。2021年～
  - ・ 次世代太陽電池。水素製造（水電解）、水素製鉄、アンモニア合成・利用、CO2利用（機能性材料・燃料）、蓄電池、モーター、軽量構造材料（風力発電・航空機）パワー半導体、光電融合エレクトロニクス

### ■ 「クリーンエネルギー戦略」：策定中

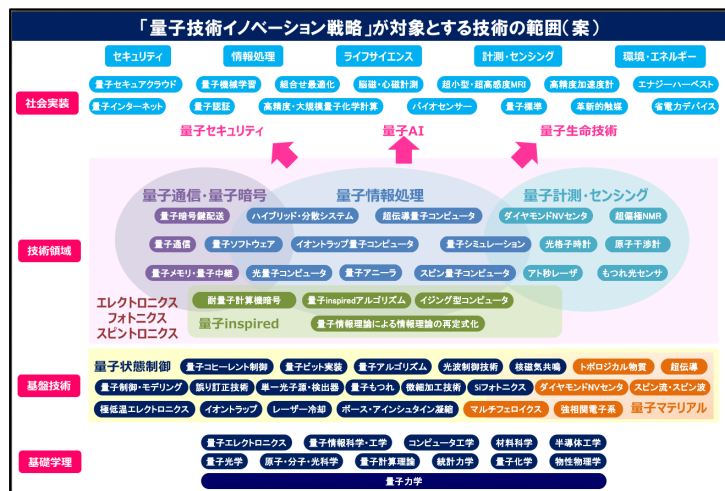
### ■ 革新的GX技術創出事業(GteX)：500億円/5年。2023年～

- ・ 3領域：蓄電池、水素・燃料電池、バイオものづくり

### ■ 先端的脱炭素化技術開発(ALCA-NEXT) 10億/年。2023年～



出展：クリーンエネルギー戦略 中間整理。経産省。2022.5  
[https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/carbon\\_neutral/report\\_20220519\\_01.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/carbon_neutral/report_20220519_01.pdf)



## ◆ 量子技術関連

### ■ 「量子技術イノベーション戦略」

- 2020年1月 ⇒ 「見直し検討」2021年10月開始
- 4領域：量子コンピュータ・量子シミュレーション、量子計測・センシング、量子通信・暗号、量子マテリアル（量子物性・材料）

### ■ 「量子未来社会ビジョン」 2022年4月

### ■ 「量子未来産業創出戦略」 2023年4月

出展：量子技術イノベーション有識者会議 2019.11  
<https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/6kai/siry01-3.pdf>

# 関連する戦略 半導体

## ■ 「半導体・デジタル産業戦略」 (経済産業省)

➤ 2021年6月策定 ⇒ 2023年6月改訂

- 経済安全保障リスクへの対応がより大きく・現実的な課題に
- 生成系AIの登場と量子コンピュータやAIコンピュータ等の情報処理の飛躍
- エッジ領域における分散情報処理の拡大と消費電力の削減
- ものづくり産業の競争力にとっても絶好機かつ取り残されると死活問題。
- 世界各国・地域も重要性を認識し、異次元の支援策を実施。

➤ 4分野 + a : 半導体 / 情報処理 / 高度情報通信インフラ / 蓄電池

➤ 半導体分野

◆ 先端ロジック半導体、先端メモリー半導体、産業用スペシャリティ半導体

➤ 先端半導体の製造基盤確保

✓ TSMC/JASM(熊本)、KIOXIA/Western Digital(広島)、Micron(四日市、

➤ 次世代半導体

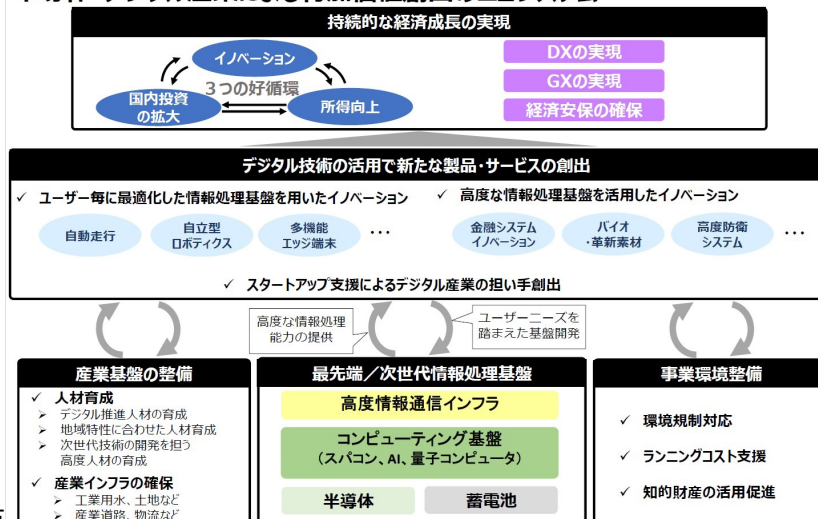
✓ 研究開発拠点 : LSTC 設立 (Leading-edge Semiconductor Technology Center)

✓ 量産製造拠点 : Rapidus (株) (IBM、imecと連携)

◆ 先端パッケージ

◆ 製造装置、部・素材

### 半導体・デジタル産業による付加価値創出のエコシステム



出展：経済産業省 半導体・デジタル産業戦略 2023.6  
[https://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/jo-ho/conference/semicon\\_digital/kaitei\\_senryaku.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/jo-ho/conference/semicon_digital/kaitei_senryaku.pdf)

## ■ 他に、以下も進行中

- グリーンイノベーション基金：パワー半導体開発
- X-nics：人材育成を行い拠点事業が進行中

# マテリアルの環境・エネルギー応用に関する諸動向

## ●資源・環境制約の克服

### 蓄電デバイス

- ・ **非リチウムキャリア**の研究活発化  
-Naイオン、Kaイオン等の非Liイオン電池研究の活性化
- ・ Li-硫黄電池等の**次世代Liイオン**電池の技術革新
- Li-S系の劣化を抑制する電解液の開発、固体電解質の利用

### 太陽電池

- ・ **ペロブスカイト太陽電池**による設置制約の克服
- タンデム構造による高性能化
- ・ 非鉛系ペロブスカイト材料での高性能化



## ●資源循環・リサイクル技術の発展

### 太陽電池

- ・ 廃棄モジュールの**再利用**
- 回収したSiからウエハ製造により20%超の変換効率
- ・ CIS系などの複雑な材料のリサイクル技術への展開

### 水素製造・エネルギーキャリア

- ・ **卑金属利用**を可能にする反応環境の実現
- ・ 高圧合成などエネルギー貯蔵と接続性の高い変換手法の探索
- ・ 電解反応の**適用範囲の拡大**  
-CO<sub>2</sub>電解、アンモニア電解合成

### CO<sub>2</sub>分離・回収

- ・ ナノレベルの厚みの**分離膜**
- ・ 分離と物質変換を同時に達成するプロセスの開発
- ・ **電気化学的な分離プロセス**の開発

### 蓄電デバイス

- ・ **LIBのリサイクル**事業の急速な立ち上がり（湿式、電析）
- ・ 電気パルス法による正極材料等の**物質分離**

# マテリアルの社会インフラ・モビリティ応用に関する諸動向

- カーボンニュートラル： 軽量・高強度化、エネルギー効率up
- 経済安全保障： 希少・偏在元素への対応
- DX： データ駆動型アプローチ

## 金属系構造材料

- 水素脆性
  - ✓ 鉄鋼、ステンレス、Ni合金、Al合金
- ハイエントロピー合金
  - ✓ 低水素脆化感受性へ
  - ✓ 鋼管などへの被覆材への応用も
- Additive Manufacturing (積層造形)
  - ✓ 外形制御から組織構造制御へ

## 構造材料 (複合材料)

- 炭素繊維強化プラスチック (CFRP)
- セラミックス複合材料 (CMC)
- セルローズナノファイバー複合材料
  - ✓ データ駆動型材料開発の動き

- 接着
  - ✓ しなやかさ、自己修復性、易解体性、バイオベース が今後の方向性
  - ✓ エポキシに易分解性付与。CFRP再利用

## ナノ力学制御技術

- 摩擦・摩耗
  - ✓ ナノでの科学的知見とマクロな制御技術には未だ乖離
  - ✓ 今後、摩擦界面の自己治癒技術

## 磁石・磁性材料

- 永久磁石用硬磁性材料
  - ✓ Nd-Fe-B系、非希土類磁石および省Nd磁石 (Ce置換)
  - ✓ 有限温度の磁気特性シミュレーション。データ駆動も。
- コイル、モータなど磁心用軟磁性材料
  - ✓ 透磁率増大よりも高周波対応にシフト。組織制御が焦点

## パワー半導体・デバイス

- デバイス
  - ✓ SiC-MOSFET系：小型化、軽量化
- シリコン：大口径ウェハ量産技術
- SiC：大電力対応。高品質結晶成長条件最適化
- GaN：高周波対応。小型化が可能。USB充電器等
- Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>：バルク単結晶融液成長技術

- 自己修復
  - ✓ ポリマー：新たなメカニズムも
  - ✓ セラミック：使用済み部材の再利用





# マテリアルのバイオ・医療応用に関する諸動向

## 人工組織・機能性バイオ材料

創 制

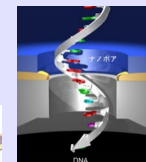
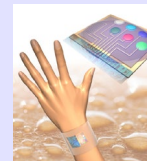
- ・バイオマテリアル、再生医療材料
  - ✓ウェアラブル・埋め込みデバイス
  - ✓メカノバイオロジーとマテリアル
  - ✓免疫寛容
- ・ハイブリッド-living material



## バイオセンシング

計

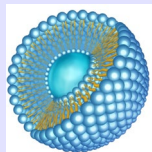
- ・一分子・一細胞オミクス解析
  - ✓ペプチドシーケンシング
- ・マイクロ流路assay
  - ✓細胞の力学特性の評価
- ・ソフトバイオセンサ
- ・生体情報センシング



## 生体関連ナノ・高分子システム

制

- ・ナノ医療 (含DDS)
  - ✓ワクチン以外のmRNA利用
- ・機能性造影剤
  - ✓コンパニオン診断造影剤
- ・ナノロボット、人工細胞
  - ✓分子デバイスの統合と応用展開

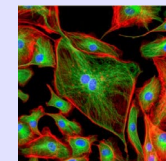


## 生体イメージング

計

制

- ・光学イメージング (蛍光・発光・無標識)
  - ✓生体深部イメージング
- ・AI画像解析
- ・質量イメージング
- ・RIイメージング
  - ✓画像データの標準化・オープン化



### 細胞・生体由来成分と人工材料のハイブリッド

- ・全細胞・酵素センサー
- ・微生物を内含した治療剤
- ・微生物と融合したエレクトロニクス診断
- ・生体由来膜成分を利用した医用ナノ粒子

生物機能を活かし制御する  
材料・デバイス

### IoT技術と融合したウェアラブルな治療・診断デバイス

- ・携帯型人工透析機
- ・埋め込み型自動投与DDS
- ・“皮膚パッチ”による汗のセンシング
- ・皮下中血糖値のモニタリング

生体内・外で適合性を持つ  
材料・デバイス

### メカノバイオロジーとナノテク・材料

- ・培養基材による幹細胞の分化・機能制御
- ・材料メタ構造で実現する力学的生体適合性
- ・MEMSによる細胞の力学特性評価
- ・細胞の粘弾性イメージング

生体力学応答の  
計測・制御・創製の技術

### データの標準化・オープン化

- ・医用バイオマテリアルのデータベース構築
- ・ナノ医薬のデータベース構築
- ・生体イメージングデータの規格・標準化
- ・国際的な画像データ共有システムの構築

データ共用に基づいた  
新たなサイエンスへ

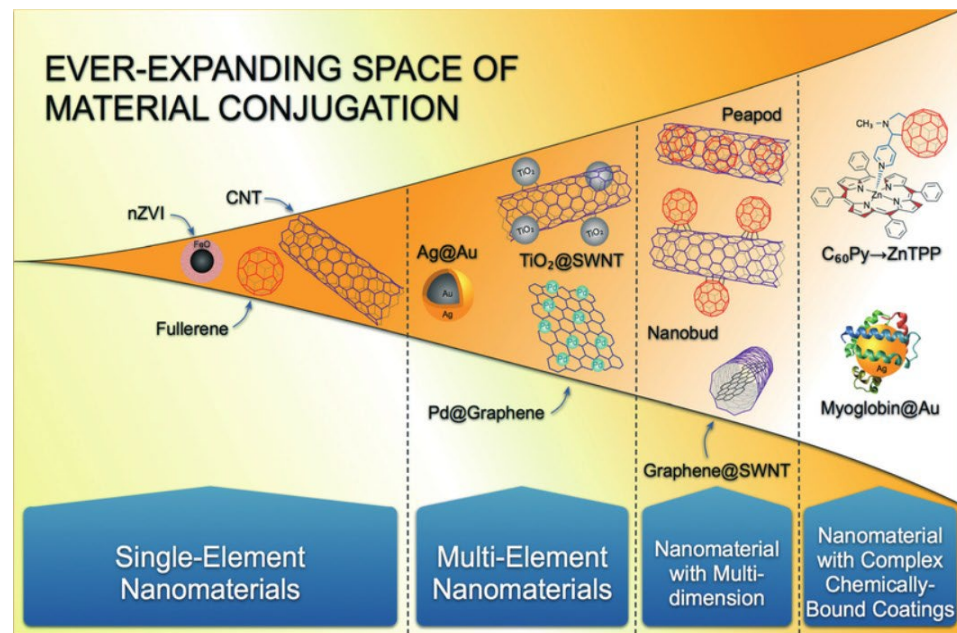
# ナノテク・新奇マテリアルのELSI/RRI/国際標準

新物質や新製品の健康・環境への影響、倫理面の扱い、リスク評価・管理、標準化：

ナノテクに代表される新興技術・新奇マテリアルは、従来と異なる新物性を持つことから、適切な評価や管理が必要。近年特に評価・管理に関する科学的再現性の担保や、医学・疫学的評価、評価結果の知識基盤整備、社会への情報提供とコミュニケーション構築、産業界や社会における情報の活用、合意形成と意思決定の在り方など、RRIの観点から多様な課題が存在。ナノマテリアルの実用化の進展や、海洋マイクロ・ナノプラスチックなどに対し、各国・地域単位で規制・制度面の整備が顕在化

## 「新物質・新材料の戦略的ガバナンス」に関する論点・動き

- 欧州やOECDを中心に、先端ナノマテリアル等の安全性確保に係るアプローチや規制枠組に関する整備が進む。日本を含む域外からの事業者はビジネス展開にあたって特に影響を受ける**
- ECにおいてナノマテリアルの定義が10年ぶりに改訂（2022）**  
 日本を含む各国は、海外ビジネス展開に必要な評価や製造・管理方法等の対応に迫られている
- アドバンストナノマテリアルズ**  
 EUプロジェクトは、ナノマテリアルを4世代に分類。CNTやCNFが第1世代にあたり、第4世代はアドバンストナノマテリアルと呼ぶカテゴリとした。  
 →現行の評価ツールやモデル等が、第2世代以降に対応できていないことを指摘。評価ツール等の開発よりも材料開発のスピードが速く、開発早期から有害性や機能を特定しようとする“Safe and Sustainable by Design (SSbD)”の考え方が広がってきている
- マイクロプラスチックの定義策定と動き（欧州化学品庁ECHA）**  
 純粋なプラ製品だけではなく、表面が高分子で被覆された無機物質や固体高分子を1wt%以上含有する物質にまで規制対象範囲が拡大された。日欧の産業界は、表面被覆した無機物はマイクロプラスチック規制の対象外とすることなどを主張している



図：ナノマテリアルの世代分類例（EU-PJ ProSafeより）

取り巻く環境、日本の状況、世界的研究開発動向の観点を踏まえ、CRDSが複数回のワークショップ等を含む調査分析を経て同定した12のテーマ・方向性の例示

（※詳細は研究開発の俯瞰報告書中で解説）

### 1. 先進半導体材料・デバイス技術

低次元材料、3次元集積、先端プロセス適応

- ポスト5Gの通信機器、大規模データを高速に処理するIT/AI機器など、従来よりも格段に高速・大容量・低消費電力に動作する半導体デバイスの実現ため、新しい材料や回路アーキテクチャー、チップ構成技術を開発。

図出典：CRDS戦略プロポーザル「半導体デバイス革新に向けた材料開発戦略 ～2次元半導体材料の新規導入～」

### 2. 量子特有の性質の操作、制御、活用

量子コンピューティング、古典インターフェース、トポロジカル材料、スピントロニクス

- 「状態の重ね合わせ」や「量子もつれ」など、量子特有の性質を動作原理とした量子コンピューティング、量子暗号・通信、量子センシングなどを高性能化。性質の顕在化や操作・制御・活用のため、トポロジカル材料や周辺の高周波/低温技術の開発も重要。

図出典：量子イノベーション戦略（内閣府）

### 3. 電気-物質エネルギー高度変換技術

蓄電デバイス、水素製造、燃料電池

- 再生可能エネルギー最大限有効活用するため、リチウムイオン電池をはじめとする次世代の蓄電デバイスを開発。電力と物質の化学エネルギーの相互変換技術として、水電解・燃料電池や、電力を介した二酸化炭素や窒素からの化学合成にも注目。

図出典：CRDS戦略プロポーザル「電気-物質エネルギー変換技術の革新 ～再生可能エネルギーの大量導入に向けた多様な反応場の実現～」

### 4. マルチスケール熱制御技術

フォノンエンジニアリング、熱-量子カップリング、IC放熱、断熱・蓄熱材料

- デバイスの使用で生じる低温排熱の有効利用や蓄熱などの観点から、熱を精密に制御する技術が重要。特に、従来のナノスケールでの熱制御を図る方法論をメソ～マクロスケールまで拡張させ、マルチスケールに熱流を制御する技術を開発。

図出典：CRDS戦略プロポーザル「ナノスケール熱制御によるデバイス革新 - フォノンエンジニアリング -」



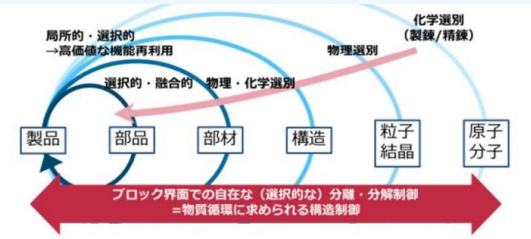
取り巻く環境、日本の状況、世界的研究開発動向の観点を踏まえ、CRDSが複数回のワークショップ等を含む調査分析を経て同定した12のテーマ・方向性の例示

（※詳細は研究開発の俯瞰報告書中で解説）

## 5. 資源循環と炭素循環を両立する材料技術

元素戦略、LCA（カーボンフットプリント、マテリアルフロー）

- 希少資源の代替/使用量削減/分離・回収に関する技術、ならびにその基礎としての易分解材料、固・液・気相での分離技術などを開発。
- また、Life Cycle Assessmentの視点から、製品ライフサイクル全体での環境負荷を定量的に評価する手法を確立。

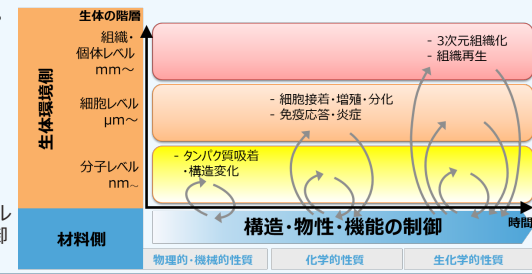


図出典：CRDS戦略プロポーザル「未来材料開拓イニシアチブⅡ～高機能材料の創製・分離・循環を実現する階層構造の自在制御～」

## 6. 生体適合性の拡張的理解と制御

免疫回避から免疫寛容へ、細胞力学応答の検出と制御、ウェアラブル/埋め込みデバイス

- 医療・ヘルスケアに利用される材料・デバイス用途の多様化、ならびに新規な材料-生体相互作用の発見により、材料の「生体適合性」を多面的かつマルチスケールに捉えることが重要。特に、生体の力学的応答も踏まえた材料・デバイス設計を展開。

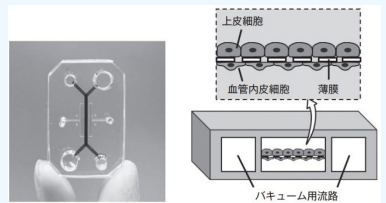


図出典：CRDS戦略プロポーザル「生体との相互作用を自在制御するバイオ材料工学」

## 7. 生物機能を活かすハイブリッド材料

生体物質表面修飾、細胞センサー、微生物内含治療薬、微生物融合自己修復建材

- 非生物起源の材料と生物由来材料を組み合わせ、生物機能を具備あるいは効率的に引き出した機能性材料を創出。高度な生体適合性や環境応答性を付与した医用材料・治療薬、生物を利用したエネルギー生産技術や自己修復性構造材料など、多様な応用に期待。



Drug Delivery System 34 - 4, 2019 268

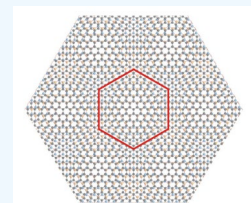


Journal of Environmental Biotechnology Vol. 23, No. 1, 23-27, 2023

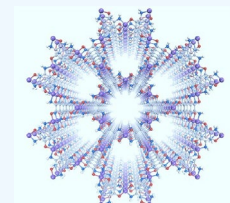
## 8. ナノスケール高機能材料

ナノカーボン、二次元材料、MOF、超分子、有機無機ペロブスカイト、準安定材料

- 原子・分子からボトムアップ的に形成したナノスケール構造を有する物質は、バルク材料にない特異な性質を示し、物質の吸着・分離やエネルギー変換などへ応用可能。ナノチューブなどを含むナノカーボン、二次元物質、MOF、超分子、ナノ粒子など。



表面と真空 Vol. 61, No. 11, pp.706, 2018



J. Am. Chem. Soc. 2020, 142, 43, 18346-

# 今後重要な研究開発の方向性（例示） 3/3

（CRDS研究開発の俯瞰報告書2023年）

取り巻く環境、日本の状況、世界的研究開発動向の観点を踏まえ、CRDSが複数回のワークショップ等を含む調査分析を経て同定した12のテーマ・方向性の例示

（※詳細は研究開発の俯瞰報告書中で解説）

## 9. 極限環境下の高信頼性材料

高温耐性（航空・プラント）、超軽量（航空、車載）、対放射線

- 航空・宇宙用途の高強度材料、耐腐食性・耐放射性材料など。新しいエネルギーインフラの登場や、社会インフラの長寿命化、安全保障の観点からも重要性および材料面での改善の要請が高まる。

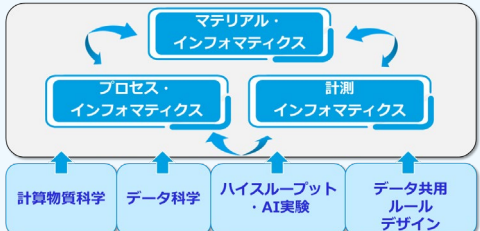


図出典：JAXA

## 10. マテリアルDX基盤技術

計算物質科学、データ科学、ハイスループット・AI実験、データ共有ルールデザイン

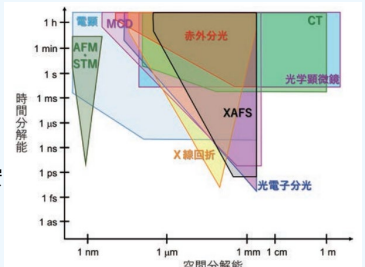
- 膨大なマテリアルデータの活用により、材料開発のスピードアップおよびマテリアル産業の競争力を底上げ。マテリアルに特化したデータ科学/計算科学手法およびハイスループット・AI実験技術を開発。データの管理方法・共有ルールの確立も必須。



## 11. オペランド・マルチモーダル計測

オペランド計測、マルチスケール計測、マルチモーダル計測、非破壊計測

- デバイスの動作中や生物が生きた状態で観測を行うオペランド計測の要請が高まる。電子や光など複数のプローブで同時計測し情報量を増やすマルチモーダル計測にも注目。計測ハードウェアに加え、データ処理手法の開発も重要。



計測プローブ・手法ごとの時間・空間分解能の目安

図出典：CRDS戦略プロポーザル「機能解明を目指す環境下動的計測の革新～次世代オペランド計測～」

## 12. 新物質・新材料の戦略的ガバナンス

リスクマネジメント・ELSI/RRI/国際標準

- ナノマテリアルの安全性確保に係るツール開発や規制構築などが欧州を中心に進展。国際的ビジネス展開に必要な知識の獲得および安全性評価研究が必要。戦略的な国際標準化提案や審議には、産学官の協調が重要。

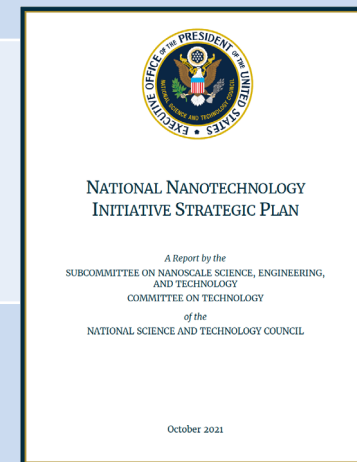


図出典：CRDS戦略プロポーザル「科学技術・イノベーションの土壌づくりとしてのELSI/RRI 戦略的な科学技術ガバナンスの実現に向けて」



# 米NNI 戦略計画2021/5つのゴール

No.	項目
<b>ゴール1.</b> <b>研究開発において世界トップの座を維持</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>世界レベルのナノテクノロジーR&amp;Dを実現し進展させる</li> <li>NNI 参加機関の間のターゲットを絞った協働を通じて共通の関心分野を進展させる</li> <li>連邦政府の既存及び新規の優先事項・イニシアティブとNNIのつながりを強化する</li> <li>ナノテックが世界的問題に対処することができる分野に取り組みを集中させる</li> <li>共通の関心分野における国際的協働とコミュニケーションを推進する。</li> </ul>
<b>ゴール2.</b> <b>R&amp;Dの商業化促進</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ナノテック起業家コミュニティの訓練及び強化、支援を行う</li> <li>国内のあらゆる地域においてナノテックの商業化を支援するために、地域イノベーションエコシステムと協働し、つながりを強化する</li> <li>技術開発経路の後半を支える連邦政府の活動に対する認識を高め、調整を行う（ロードマップを作成する「タイガーチーム」を設置）</li> <li>ターゲット分野における官民パートナーシップを構築・拡大する</li> </ul>
<b>ゴール3.</b> <b>研究、開発、実用化を持続的に支援する研究インフラの提供</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ナノテックR&amp;Dインフラを支援する連邦政府の取り組みを調整する</li> <li>重要なナノテックインフラの開発と入手性を支援する</li> <li>米国全土において全ての米国人のためにナノテック研究開発インフラへのアクセスを促進する</li> <li>データベースの相互運用性とベストプラクティスを推進することでデータの共有を促す</li> <li>研究インフラからプロトタイピング・試験・製造リソースへの移行に対する認識を高め、経路を支援する</li> <li>ターゲットとする技術分野においてテストベッドとプロトタイピング施設を整備する</li> <li>特殊なナノテックインフラを活用した教育及び訓練、人材開発の機会を提供・促進する</li> </ul>
<b>ゴール4.</b> <b>パブリック・エンゲージメントを求め、ナノテック人材を拡大</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ナノテックを用いて、科学・技術・工学・数学の学位及びキャリアパスを追求する学生を増やす</li> <li>教員訓練を提供し、ナノテック教育リソースへのアクセスを促す</li> <li>学生の研究及びインターンシップ、交流、国際経験の機会を促進・拡大する</li> <li>特殊なナノテックインフラを活用した教育及び訓練、労働力開発を提供・推進する</li> <li>労働者を、ナノテックを活用した新技術に関する高度な仕事に備えさせる</li> <li>ナノテック人材を拡大・多様化する</li> <li>ナノテックの科学及び用途、影響に関連する問題について一般市民に情報を提供し、参画を求める</li> </ul>
<b>ゴール5.</b> <b>責任ある開発を保証</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ナノテックの責任ある開発に関連する連邦政府の活動の調整を行う</li> <li>ナノEHSに関する科学的理解を進展させ、幅広く共有する</li> <li>ナノテック活用製品及びナノマテリアルの研究、商業化における責任ある開発の原則の採用を支援する</li> <li>教育・訓練プログラムにおける責任ある開発の原則の採用を奨励する</li> <li>ナノテックの責任ある開発を支援するために国際的エンゲージメントを強化する</li> </ul>

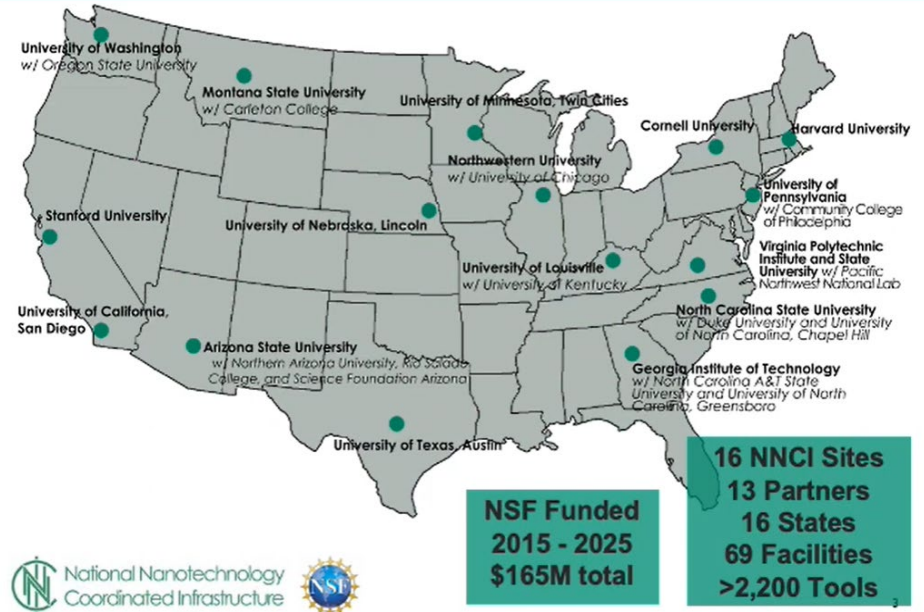


# 全米にわたる広範な先端ナノテクノロジー研究インフラ（第7次評価）

## 研究インフラ

- 連邦政府機関は、ナノテク研究開発を推進するための広範な研究インフラを構築した。NNIの参画省庁・研究機関は、ナノテクノロジーに特化した研究資金と、応用に特化した研究資金との両方を通じて、研究投資をおこなった。
- NNI参画機関は、連邦政府、学術機関、および民間の研究者がナノスケール研究に必要な先端設備と専門知識を利用できるようにする研究センターと研究所ネットワーク（研究インフラネットワーク）を設立した。
- 2022年度には、NSFの国家ナノテクノロジー・コーディネテッド・インフラストラクチャー（NNCI）の16主要拠点で、約100万時間の研究施設利用を記録、このうちNNCI外の利用者が25%を占めた。
- これらの基盤のもと、NNIを通じ米国はナノテクの世界的リーダーとしての地位を確立した。
- 米国はナノテクに関する国家イニシアチブを創設した最初の国のひとつであり、2011年までに49カ国以上がこれに続いた。
- 米国の研究機関や企業の科学者たちは、引用度の高い論文や特許で世界をリードする一方、連邦政府は、国際協力やナノテクのリスクと利点の共通理解、ナノテク活用製品やサービスの世界市場を実現する枠組みを確立した。

## NNCI Network



# 米国のナノテクノロジーを未来に向けて位置づける（第7次評価）

- 現在のナノテックは、NNI開始時とは異なる連邦政府調整が必要。今日、各省の研究公募は、ナノテックの特定側面に関する研究募集よりも、ナノテックが解決策のひとつとなりうる各省の目標に取り組む研究を要求する傾向が強まっている
- 研究者はより広範な文脈で、ナノスケールの特性や材料を研究したり、異なる分野や技術と統合する傾向がある

- 次世代ナノマテリアル・技術は、半導体の性能を向上させ、国内製造能力を強化する。希少重要鉱物を補い代替することで、米国経済と国家安全保障を強化する

- 例えば、ナノマテリアルの基礎研究は現在、量子コンピュータの部品や宇宙船の軽量ヒートシールドを開発するために行われている。また、分子やタンパク質間の相互作用に関する知識は、生化学プロセスの理解を深め、医薬品開発を最適化することに利用されている

- 20年間の連邦政府の累積投資額は407億ドル。2008年以降は毎年15億ドル超**
- 新興技術にふさわしく、2001～2010年度にかけ5億ドルから18億ドルへと急増し、その後は成熟技術にふさわしく、2019～2022年度にかけては18～19億ドルで頭打ちとなった**

- 各省はNSETとNNCOの取り組みが、ナノテックの成熟に不可欠であることを確認し、省庁間の協力を促進するメカニズムとしてのNNIの有用性を指摘**

- 調査結果は、2000年代に新興技術としてのナノテクノロジーに有効であった連邦組織構造が、成熟分野としての文脈で再考されるべきであることを示している
- 連邦政府の支援構造を現在の科学技術要件に合わせて進化させることで、米国のナノテックが未来を見据え、機敏で革新的であり続けることが保証される

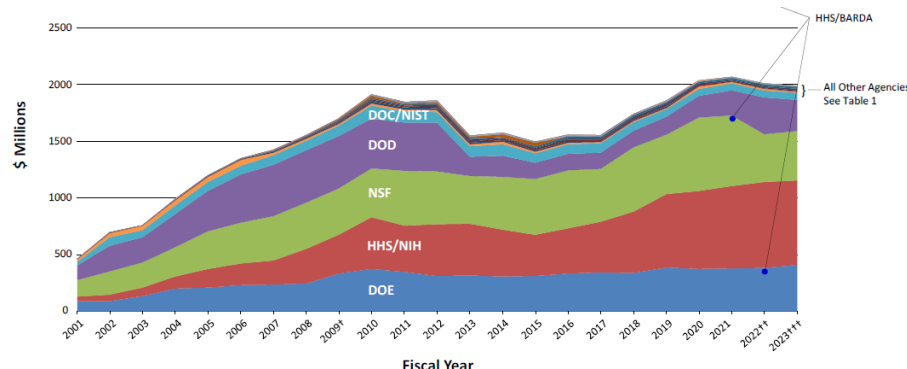


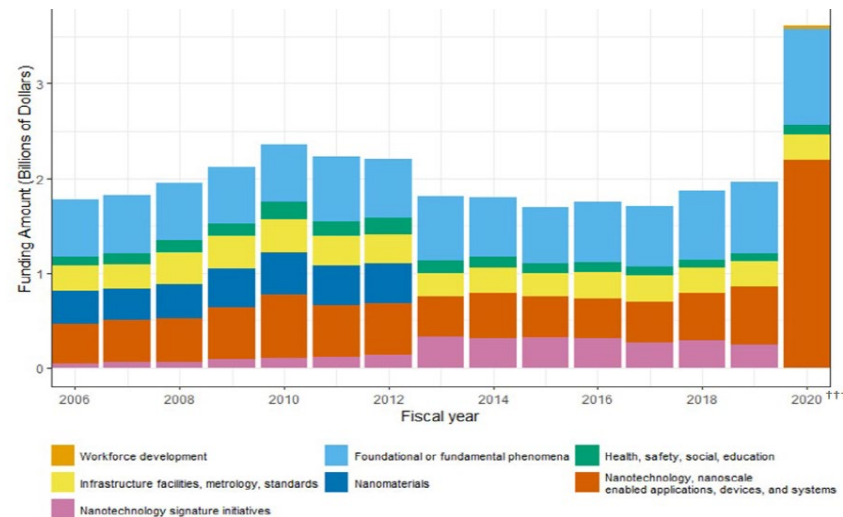
Figure 1. NNI Funding by Agency, 2001-2023.\*

\* 2021 figures include supplemental funding. BARDA investments (blue dots) not included in line graph totals.

† 2009 figures do not include American Recovery and Reinvestment Act funds for DOE, NSF, NIH, and NIST.

†† 2022 numbers are based on appropriated levels.

††† 2023 Budget.



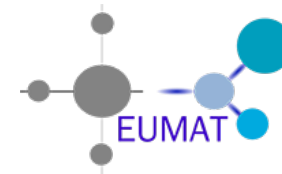


# Advanced Materials 2030 Initiative



循環経済に向けた安全で持続可能な先端材料の設計、開発、導入のための多部門アクセラレーター課題への迅速かつスケーラブルで効率的な対応を提供し、現在および将来の欧州の社会、経済、環境にとってのチャンスに変える。ソリューション指向の次世代先端材料を開発するためには、システムティックなアプローチが必要である。この目的のため、AMI2030は、欧州の先端材料エコシステムのすべての利害関係者を巻き込むことにより、共同行動やプロジェクトを調整し、その影響を最大化するためのオープンで包括的なフォーラムを提供する。

2030年までに、強力で包括的な欧州の素材エコシステムは、グリーンとデジタルの2つの移行を可能にし、欧州市民の利益のために、循環的でより強靱な経済と安全で持続可能な欧州社会に貢献することになる。



マテリアルズ2030マニフェスト署名者と欧州委員会の支援を得て、EMIRI、EUMAT、SUSCHEM、MANUFUTUREは、先端材料2030イニシアチブを運営している。