

ナノテクノロジー・材料基盤技術 世界の研究トレンドと日本の課題

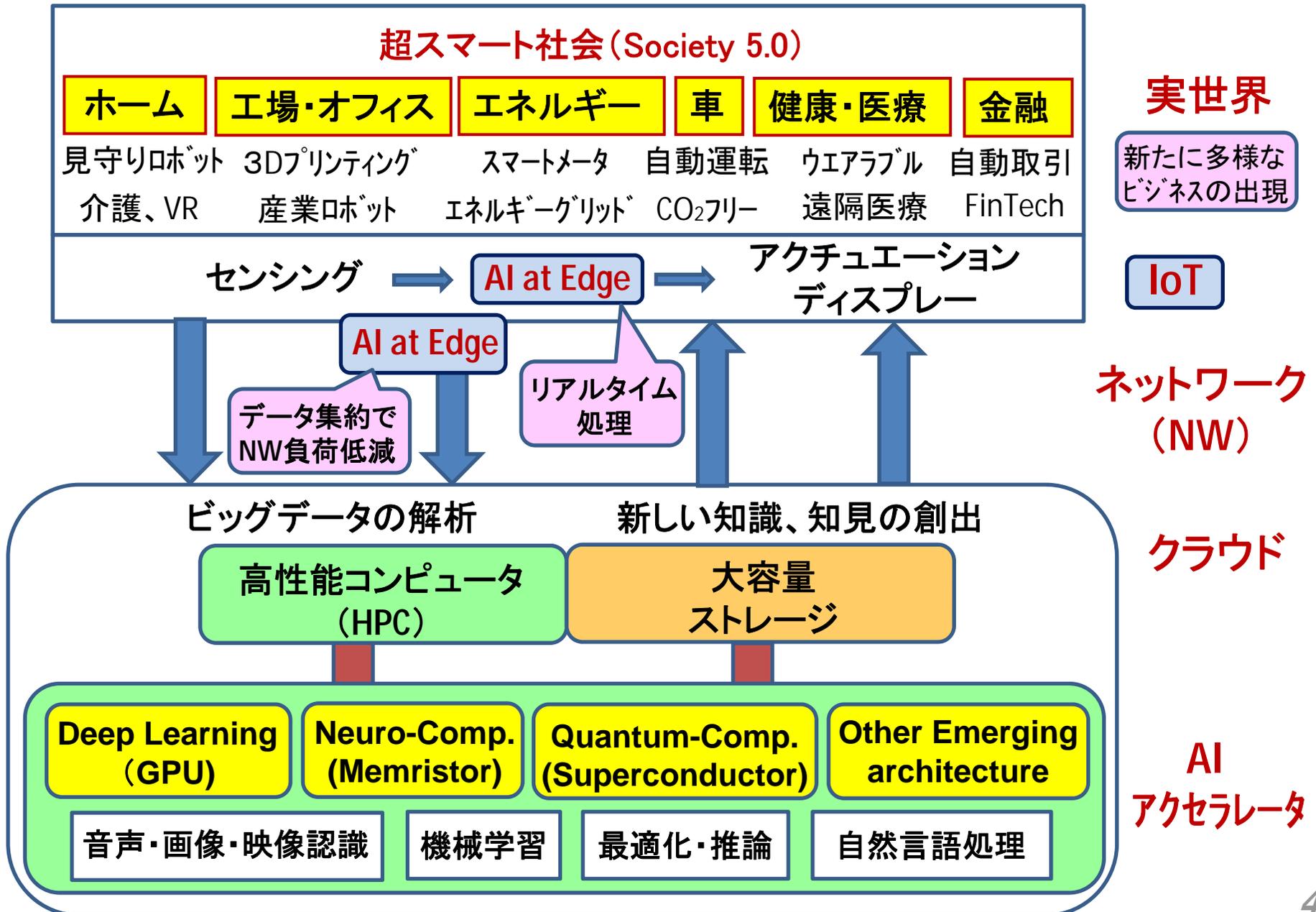
永野智己
CRDSナノテクノロジー・材料ユニット

本内容は2017年3月発行予定のCRDS研究開発の俯瞰報告書
ナノテクノロジー・材料分野(2017年版)にもとづく



<p>技術革新の世界的潮流</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 来たるIoT/AI時代に活躍するデバイスおよび構成素材は先端ナノテクノロジーの塊になる ✓ AIチップ、IoTセンサ、クラウド、自動車・輸送機器、ロボット、モバイル、エネ変換デバイス、診断・治療・計測デバイスなど、ハード側は先端ナノテクが競争を左右 ✓ 新コンピューティング／新アーキテクチャへの挑戦 ✓ これらに使われる新素材は、データドリブンの材料設計(マテリアルズ・インフォマティクス)から生み出そうとする大きな流れ。しかし勝者はまだ不在 ✓ 過去15年間あまりで蓄積された個々のナノ要素技術が、融合し、製品・システム化され市場へ浸透していく ✓ ナノテクで実現された製品(nano enabled products)市場は1.6兆ドルに成長 (2012-14年で2倍, LuxResearch社2014年)
<p>日本の位置づけ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 元素戦略、分子(制御)技術、蓄電池材料、電子材料、パワー半導体、先端構造材料など、物質創製・材料設計技術に日本の歴史的特徴にもとづく強み ✓ そこで用いられる計測評価・分析・品質管理も強い ✓ これらが生きるかたちで省エネ・低環境負荷技術にアドバンテージ ✓ 一方、弱点は、計算・データ科学、ソフト・標準化・規制戦略、医療応用や、水平連携・産学連携、ナノテク特有のELSI・EHS、K-12教育・コミュニケーション、に大きな課題あり
<p>挑戦課題</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 異分野融合／深みのある研究開発と水平・垂直連携の両立 ✓ 府省連携・産学連携／研究開発フェーズや時間ギャップの解消 → 先端研究開発と事業化トライアルのエコシステム形成(ex,アジアのR&Dを吸引) ✓ 10の具体的挑戦課題(後述)

1章	目的と構成
2章	俯瞰対象(ナノテクノロジー・材料)分野の全体像 (=100ページ相当)
2.1	分野の範囲と構造
2.1.1	ナノテクノロジー・材料の定義と分野の特徴
2.1.2	ナノテクノロジー・材料への社会的期待と実現への課題
2.1.3	ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰図
2.2	分野の歴史、現状、及び今後の方向性
2.2.1	分野の変遷 ～国際動向と日本～
2.2.1.1	ナノテクノロジー・材料の進化
2.2.1.2	主要国の基本政策と代表的な研究開発プログラム・プロジェクト
2.2.1.3	研究コミュニティと研究者の動向
2.2.1.4	世界の研究開発の動向
2.2.1.5	産業動向
2.2.1.6	世界のR&Dイノベーション促進方策
2.2.2	今後の展望と日本の課題
2.2.2.1	ナノテクノロジー・材料の今後の方向性と挑戦課題
3章	研究開発領域 →37の主要研究領域の最新動向を詳述 (=400ページ相当)



新しい技術の登場と社会課題の顕在化によって ナノテク・材料の3つの技術世代は重層的且つ階層的に進化する



先鋭化	融合化	システム化
<p>要素技術のナノスケールの極限性能追求・実現</p>	<p>極限まで先鋭化された要素技術同士の学際的な研究を通じ異分野融合を惹起。他技術と結合して新機能を有する新しい融合ナノテクに進化</p>	<p>課題解決に資する高度な機能を提供する部品・装置・システム。先鋭化した諸々の要素技術が融合して新しく生まれた融合ナノ・材料技術を、価値創出システムへと統合構成する</p>
<p>ex. 計測技術 対象がマクロスケールのバルク結晶から、原子・分子個々の分解能の走査型プローブ顕微鏡や収差補正電子顕微鏡、単分子分光技術等へ進化。これらにより初めて明らかになった構造は、新しい材料設計アイデアの創出へつながる</p>	<p>ex. 環境・エネルギー応用 キーデバイスとしての太陽電池、燃料電池、蓄電池、さらには人工光合成、ガス分離などへの期待。特に素材のイノベーションが要求され、デバイスを構成する電極・電解質材料など個々の材料の性能追求ではなく、デバイス全体としての性能向上に向けた構成要素材料群の最適化が必要であり、融合化技術が不可欠</p>	<p>ex. ライフ・ヘルスケア応用 生命科学の膨大な知の集積と最先端半導体技術、電子・光技術との融合から生まれるイノベーション。マイクロ流路など人工ナノデバイス上でDNAや単一細胞・分子の検出・同定を行う。ナノ粒子をDDSの輸送物質として活用したり、足場材料を導入する事でiPS細胞を固定し所望の組織に分化誘導するなど、診断・治療の革新を目指す</p>
<p>ex. 微細加工 10nm以下の領域へ突入する素子の微細化技術、リソグラフィを始め、製造に関わる全ての要素技術の革新が求められている。先鋭化の過程は新しい概念も登場させながら、不断の研究開発が必須</p>	<p>ex. エレクトロニクス応用 微細化に伴い、ゲート絶縁膜の薄膜化が要求、既存のSiO₂膜では素子性能の向上は期待できず、高誘電体材料の開発、新規ゲート電極材料の開発が不可欠。微細化技術の追求とそれに伴う新材料の導入・開発を合体させた融合化技術の登場が、LSIの性能向上には必須条件</p>	<p>ex. エレクトロニクス応用 メモリ、演算、通信、センシング、イメージング、エネルギー供給といった多様な機能を複数チップで実現、それらを3次元的にヘテロ集積した一体化システムを実現する期待が高まっている。小型のAIを搭載したロボットや、生活を支援してくれるナビゲータのようなシステムが可能になる</p>

エコ・安全・快適な移動を実現するナノテク・材料 (システム化ナノテクノロジー)



高強度軽量複合材料 (車体、水素ボンベ)

- ・カーボン複合材料

排ガス浄化触媒 (NO_x, CO, HC)

- ・低コスト・ナノ触媒
- ・MOF、超分子触媒

フレキシブル ディスプレイ

- ・有機機能材料
- ・OLED

自動運転制御

- ・大容量3Dマップ
- ・高精度ジャイロ
- ・超高速CPU(実時間処理)
- ・車間、車/道路間通信



監視・測長センサー

- ・ミリ波レーダー
- ・レーザーライダー(Lidar)
(Light Detection & Ranging)
- ・高出力レーザーヘッドライト



超小型電力素子

- ・GaN デバイス
- ・SiCデバイス

高性能バッテリー 高出力耐高温モータ

- ・正極/負極材料
- ・電解質膜
- ・高イオン伝導材料
- ・高性能磁石

モニタリング

- ・イメージセンサー
(可視光、赤外光)
- ・ドライブレコーダー用
大容量不揮発メモリ

- 自動運転技術
- エネ・環境技術

ナノテクノロジー・材料分野の研究開発俯瞰図（2017年版）



社会実装

システム化 量産化 高機能/コスト 信頼性 環境負荷 安全性 省エネ・省資源プロセス リサイクル

デバイス・部材

環境・エネルギー

太陽電池
人工光合成、光触媒
燃料電池
熱電変換
蓄電デバイス(電池、キャパシタ)
パワー半導体
グリーン触媒
分離材料・分離工学
エネルギーキャリア
超電導送電、バイオマス

ライフ・ヘルスケア

生体材料(バイオマテリアル)
再生医療材料
ナノ薬物送達システム(DDS)
バイオ計測・診断デバイス
脳・神経計測
バイオイメージング

社会インフラ

構造材料(金属、複合材料、マルチマテリアル)
非破壊検査
腐食試験法
劣化センシング技術
劣化予測・シミュレーション
接合・接着・コーティング

ICT・エレクトロニクス

超低消費電力 IoT/AIチップ
スピントロニクス
二次元機能性原子薄膜
フォトニクス
有機エレクトロニクス
MEMS・センシングデバイス
エネルギーハーベスト
三次元ヘテロ集積
量子コンピューティング
ロボット基盤技術

共通支援策

産学官連携・オープンイノベーションの方策
国際連携・グローバル戦略
府省連携
異分野融合の促進策

物質・機能

機能と物質の設計・制御

機能設計・制御

超分子 分子マシン ナノ熱制御 ナノライポロジー マイクロ・ナノフルイディクス
量子ドット バイオ・人工物界面 ナノ界面・ナノ空間制御 バイオミメティクス 金属有機構造体(MOF)

物質設計・制御

元素戦略 分子技術 マテリアルズ・インフォマティクス トポロジカル絶縁体 ナノカーボン
メタマテリアル 低次元物質 ハイブリッド材料 ナノ粒子・クラスター

先端研究インフラPF

ELSI・EHS
中長期の人材育成・教育施策
国際標準化・規制戦略
知的財産の蓄積・活用策

基盤技術

共通基盤科学技術

製造・加工・合成

フォトリソグラフィ ナノインプリント ビーム加工 インクジェット
自己組織化 結晶成長 薄膜、コーティング 付加製造(積層造形)

計測・解析・評価

電子顕微鏡 走査型プローブ顕微鏡 X線・放射光計測 中性子線計測

理論・計算

第一原理計算 分子軌道法
モンテカルロ法 フェーズ・フィールド法
分子動力学法 有限要素法

科学

ナノサイエンス

物質科学、量子科学、光科学、生命科学、情報科学、数理科学

社会実装

7つの区分で構成

環境・エネルギー

ライフ・ヘルスケア

社会インフラ

ICT・エレクトロニクス

共通支援策

デバイス・部素材

①

②

③

④

機能と物質の設計・制御

物質・機能

⑤

⑦

共通基盤科学技術

基盤技術

⑥

科学

37 の主要研究開発領域 (報告書第3章に詳細動向を掲載)



俯瞰区分	研究開発領域
環境・エネルギー 応用	太陽電池
	人工光合成
	燃料電池
	熱電変換
	蓄電デバイス
	パワー半導体
	グリーン触媒
	分離技術
	ライフ・ヘルスケア 応用
再生医療材料	
ナノ薬物送達システム(DDS)	
計測・診断デバイス	
脳・神経計測	
バイオイメーjing	

俯瞰区分	研究開発領域
機能設計・ 制御	空間空隙設計制御
	バイオミメティクス
	分子技術
	元素戦略・希少元素代替
	マテリアルズ・インフォマティクス
	フォノンエンジニアリング

俯瞰区分	研究開発領域
ICT・エレクトロニクス 応用	超低消費電力(ナノエレクトロニクスデバイス)
	スピントロニクス
	二次元機能性原子薄膜
	フォトニクス
	有機エレクトロニクス
	MEMS・センシングデバイス
	エネルギーハーベスティング
	三次元ヘテロ集積
	量子コンピューティング
	ロボット基盤技術
社会インフラ 応用	構造材料(金属、複合材料)
	非破壊検査・劣化予測
	接合・接着・コーティング

俯瞰区分	研究開発領域	
共通基盤 科学技術	加工・プロセス	加工・プロセス技術
	計測・分析	ナノ・オペランド計測技術 (SPM、TEM、放射光・X線、分光、etc)
	理論・計算	物質・材料シミュレーション
共通支援 策	ELSI・EHS	ナノテクノロジーのELSI/EHS、国際標準

次世代パワー半導体

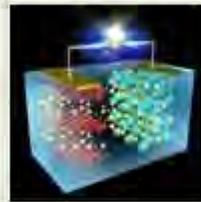
早期実用化を目指すSiCやGaNなどのワイドギャップ半導体基板・素子開発が活発化



SiCウェハとSiCデバイス (産総研)

次世代蓄電デバイス

全固体型、多価カチオン型、金属-空気電池、Li-硫黄など、次世代の高性能電池に期待が集まる。



ナリウムイオン電池のプロトタイプ (東京大学発表より)

バイオフィブリケーション

バイオマテリアルや細胞を自在配置するバイオ3Dプリントが出現。組織・臓器構築、創薬、再生医療への応用が期待される。



1細胞分解能3Dプリント (大阪大学)

脳計測

脳を電氣的・光学的に計測する技術が目覚ましい進展により脳機能・情報処理の仕組み解明が期待される。



<http://cml.harvard.edu/>

IoT×人工知能デバイス

人工知能やディープラーニング技術に基づくIoT/AIスマート社会の到来に期待が集まる。



(北海道大学発表より)

量子コンピュータ

量子力学で演算を超高速化。「量子ゲート方式」と「量子アニーリング方式」がある。人工知能への応用が期待される。



<http://technology.mit.edu/technologies/18087>

多孔性構造体 (PCP/MOF/COF)

規則的なナノ空間を有し、高選択的な吸脱着場や電子・イオン伝導性、特異反応空間としての革新機能に期待。



<http://yaghi.berkeley.edu/>

データ駆動型材料設計

材料DBと機械学習など情報科学的手法を併用することで物質探索・設計手法を革新。開発期間を極端に短縮するマテリアルズ・インフォマティクス



<http://www.titech.ac.jp/news>

トポロジカル絶縁体

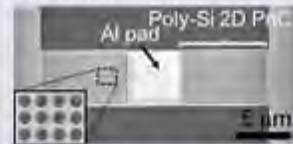
物質の境界(3次元系では表面、2次元系ではエッジ)に内部(絶縁体)と異なる特殊な金属状態が自発的に現れ、無散逸な電流が流れる。次世代電子デバイスの候補として期待。



3次元トポロジカル絶縁体の表面を流れる無散逸電流

フォノンエンジニアリング

ナノスケールの熱をフォノンとして理解し、熱を発生起源から制御する新材料・デバイス創出の研究が活発化。



フォノン結晶の例 (東大)

オペランド計測

物質から生物にわたる広範囲の対象に対してオペランド(実動作下)計測への期待が増し、技術開発が活発化



世界も注目する代表的な日本の研究開発成果例 (直近10年程度)



有機無機ペロブスカイト太陽電池: 宮坂 (桐蔭横浜大)

$CH_3NH_3PbI_3$

○ ハロゲン
● CH_3NH_3
● Pb

超イオン伝導体で高出力・大容量全固体セラミックス電池: 菅野 (東工大)

超イオン伝導体の結晶構造

イオン伝導経路 (東工大発表より)

生体分子の超微量・高速解析を実現するナノバイオデバイス (名大・阪大)

ナノポア
ナノワイヤ・ナノピラー

ナノポア・ナノワイヤ等を融合したナノバイオデバイス

標的細胞に薬剤を的確に送達するナノデリバリーシステムの開発: 片岡 (東大)

高強度・高ビーム品質フォトニック結晶レーザーの開発: 野田 (京大)

フォトニック結晶レーザーの構造
レンズフリーによる紙の脱脂実験の様子

磁性絶縁体がスピンドルを介して電気を通す: 齊藤 (東北大)

スピンドル・ベック効果

次世代有機EL用の発光新材料: 安達 (九大)

有機半導体分子の励起子挙動制御

柔らかい有機電子回路の開発: 染谷 (東大)

大きく変形させたり、指に巻いた状態でも正確に測定できる多点の圧カセンサシート

アンモニア合成触媒の開発: 細野 (東工大)

カルシウムアミドにルテニウムを固定した新アンモニア合成触媒の電子顕微鏡画像

多孔性材料(金属有機構造体)開発: 北川進 (京大)

アセチレンを吸着するMOF/CPL-1(京大)

多数の金属元素の組み合わせを原子レベルで固溶化: 北川宏 (京大)

新規Pd-Ru固溶体ナノ合金触媒 (京大HPより)

人工光合成を実現する光触媒: 堂免 (東大)

2種類の光触媒を用いた混合粉末型光触媒シート

秒の再定義の有力候補となる光格子時計の開発: 香取 (東大)

光格子の模式図 (東大HPより)

単層CNTの大量合成法: 島 (産総研)、日本ゼオン

スーパーグローブ法 開発初期の単層CNT

(参考) エネルギー分野の研究開発俯瞰図 (2017年版)



定義

「安定供給」、「経済効率性の向上」による低コストでのエネルギー供給および需給バランス調整を実現し、同時に「環境への適合」を図る、いわゆる「3E+S」を同時に克服するための研究開発

構成技術

エネルギー供給 (資源開発/エネルギー・物質変換)

化石 高効率火力発電 ・全負荷帯高効率化 ・高温材料 燃料電池発電 ・SOFC耐久性/効率向上 ・IGFC発電 低品位炭改質 ・乾燥/脱水 ・改質 CCUS ・CO2分離・貯留 ・CO2利用技術	原子力 安全技術 原子炉技術 ・新型原子炉 燃料管理・処分技術 ・バックエンド 資源開発 ・海底資源探鉱/採掘 ・メタンハイドレイド	再生可能 太陽光 ・光電池材料 ・集光型 ・人工光合成 風力 ・洋上発電 ・調整力向上技術 地熱 ・バイナリ発電 ・EGS発電 水力 海洋エネルギー バイオマス ・藻類バイオマス燃料 ・バイオリファイナリー
---	---	---

エネルギー利用 (高効率利用/高度利用)

産業 新規プロセス技術 ・中低温作動電解質反応 ・高付加価値化 天然ガスの高効率利用 ・トリジェネレーション ・LNG冷熱利用 石油の高度利用 ・重油の化学品利用 ・バイオ混合利用 製鉄技術 ・水素利用 ・省エネ技術	運輸 次世代自動車 ・パワートレイン ・軽量化 ・蓄電池 ・燃料電池 次世代輸送機器 (自動車以外) ・軽量化 ・排気対応 (航空機/船舶) 次世代交通運輸システム ・自動運転 (自動車) ・高度地図情報 ・ITS	民生 熱利用機器 ・コージェネ：燃料電池 ・ヒートポンプ ・空調 ・太陽熱/地中熱利用 ・蓄熱技術 断熱・遮熱・調光技術 ・断熱技術 ・調光窓 ・固体照明 建物・地域の統合的高効率化 ・HEMS/BEMS/CEMS ・ZEH/ZEB ・センシング
---	--	---

電気 エネルギーネットワーク (発電電・エネルギー配送/配電・熱供給/需要家内)

出力調整技術 ・在来型電源の出力調整 ・変動電源の出力調整 電力系統運用技術 ・最適運用モデル ・PV/風力発電予測技術	送配電 ・高圧直流送電 ・超伝導ケーブル ・潮流安定化技術 (FACTS) 広域監視・制御技術	配電/家屋内 ・直流化 ・デジタル化、パケット化 パワエレ・応用機器 ・PCS ・FACTS	蓄エネルギー ・蓄電池 (キャパシタ含む) ・蓄電 (蓄電池以外) ・CAES/フライホイール/揚水 ・蓄熱	熱・燃料キャリア エネルギーキャリア ・水素 ・アンモニア ・有機ハイドライド	分散協調型EMS ・デマンドレスポンス ・EVとの連携 ・階層的システム制御 エネルギーシステム予測・評価 ・最適化モデル ・需要予測モデル
---	---	--	---	--	--

社会技術 ・評価法 (コベネフィットなど)、制度設計、方法論 (トラジションマネジメントなど)、行動科学など

共通要素技術

基盤技術：製造 (鍛造・鋳造、冶金、粉体、接合、精密加工等)、材料、構造・強度、機械、燃焼、伝熱、流体、振動、化学、電気など

エネルギー材料 (ナノ材料) ・光電池 ・固体イオニクス材料 ・蓄電材料・パワー半導体材料 ・調光素子 ・超伝導材料 ・固体照明素子 ・断熱材料 ・軽量材料 ・耐熱材料 ・分離膜	反応制御技術 ・光反応触媒 ・固体触媒 ・電気化学触媒 ・反応速度解析/熱力学解析	製造プロセス技術 ・ナノ材料製造技術 ・デバイス製造技術 計測技術 ・In-Situ分析 ・衛星観測	数理モデル ・流体拡散/反応シミュレーション ・構造解析シミュレーション ・複雑系ネットワーク理論 ・最適化 ・制御理論	計算科学 ・第一原理計算 ・分子動力学法 ICT/ビッグデータ活用 ・センシングデータ処理技術 ・大規模データ解析技術 ・サイバーセキュリティ	システム技術 ・システム設計 ・システム制御技術 ・建物/都市システム設計 ・システム最適化評価 ・エンジニアリング
--	--	---	--	---	--

学術研究

【社会科学】社会学、政治学 (政策論、国際関係論)、エネルギー経済学、環境経済学 等
 【応用科学】熱機関工学、機械工学、化学工学、プラント工学、材料工学、原子力工学、資源工学、電気電子工学、土木工学、建築工学、環境学 等
 【基礎科学】熱力学、燃焼学、伝熱学、流体力学、電磁気学、電気化学、触媒化学、原子核物理学、地球物理学、生態学 等
 【基礎】物理学、統計力学、化学、生物学、情報学、計算科学 等

主要国のナノテク・材料基本政策・国家戦略



日本	第5期基本計画では、Society5.0の実現へ向けた11のシステムの一つとして「統合型材料開発システム」を特定。「素材・ナノテクノロジー」は新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術の一つ。	
米国	National Nanotechnology Initiative (2001-) - 第6次NNI戦略プラン(2016-) 省庁横断テーマ NSI (Nanotechnology Signature Initiative) を更新 - National Strategic Computing Initiative やBRAIN Initiativeと連携し、新コンピューティング開発	
	Materials Genome Initiative(2011-) - 実験ツール、計算機、データの連携により、研究室での新材料の発見から製造までの時間を半減	
欧州	EU Horizon 2020 (2014-) - Key Enabling Technologies (KETs)として、ナノテクノロジー、先進材料、マイクロ・ナノエレクトロニクス、フォトンクス、バイオテクノロジー、先進製造を選定。 - FET (Future and Emerging Technologies) プロジェクトの一つ、Graphene Flagshipを開始	
	独 Action Plan Nanotechnology 2020 を開始(2016-) - 新ハイテク戦略の一環としてBMBFを中心に7省が連携して策定	
	英	UK Nanotechnologies Strategy (2010-) - BISが中心となった省庁横断の国家ナノテクノロジー戦略
		UK COMPOSITES STRATEGY(2009-) - BISを中心に航空機、自動車向けの耐久性が高く軽量かつ高性能な複合材料の開発
仏	France Europe 2020(2013-) - 先進材料、ナノエ、ナノマテリアル、マイクロ・ナノ流体工学が優先領域	
中国	国家中長期科学技術発展計画綱要(2006-2020) - 先端技術8分野の一つに「新材料技術」、重大科学研究4分野の一つに「ナノ研究」 - 第13次5か年計画 2030年を見据えた15の重大科学技術プロジェクトに「重点的新材料」「量子通信・量子コンピュータ」「スマート製造・ロボット」「航空エンジン・ガスタービン」等を指定	
韓国	第三次科学技術基本計画(2013-2017) - 30重点国家戦略技術の一つに「先端素材技術(無機、有機、炭素等)」 Korea Nanotechnology Initiative (2001-) は第4期目に(2016-2025) - 製造業のリーディング技術開発、ナノテク産業のグローバルリーダー	

(参考) 米国ナノテクイニシアティブNNIの予算構造の変化

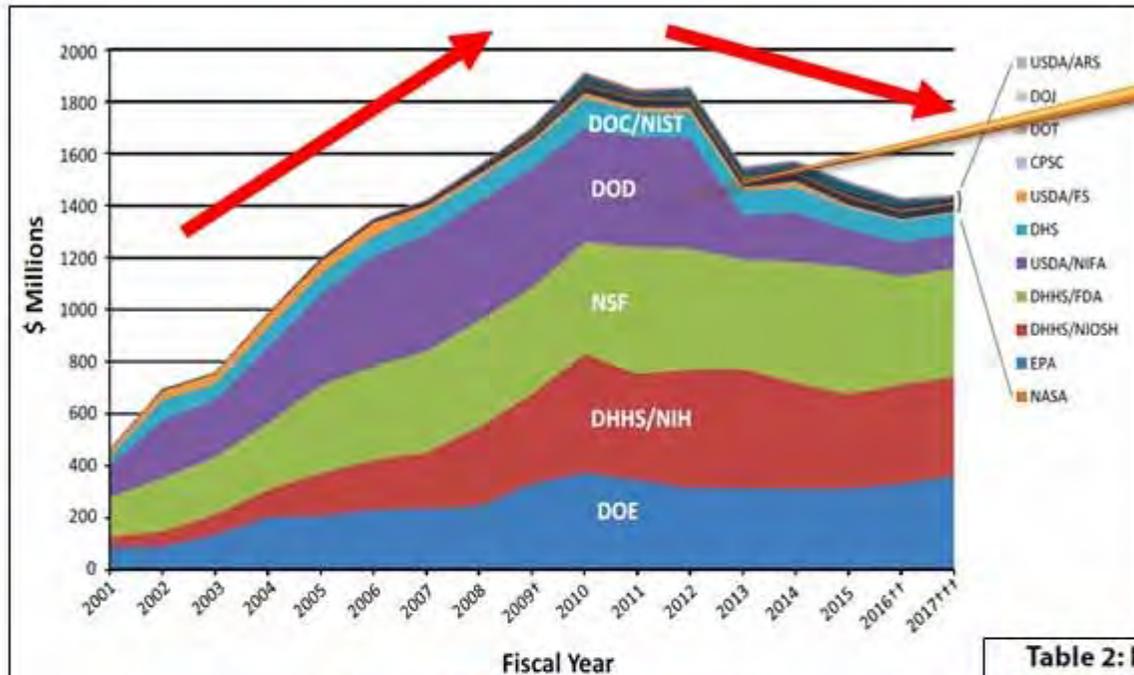


Figure 1. NNI Funding by Agency, 2001–2017.

[†] 2009 figures do not include American Recovery and Reinvestment Act funds for DOE (\$293 million), NSF (\$101 million), NIH (\$73 million), and NIST (\$43 million)
^{**} 2016 estimated funding is based on 2016 enacted levels and may shift as operating plans are finalized.
^{***} 2017 Budget.

減少部分の多くは DOD

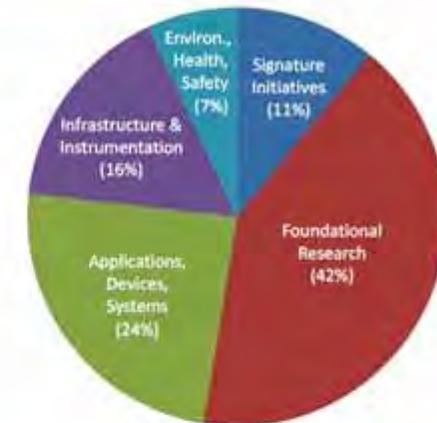


Figure 2. Breakout of NNI Funding by Program Component Area in the 2017 Budget.

Table 2: Program Component Areas Defined for Fiscal Year 2015

1. Nanotechnology Signature Initiatives (NSIs)

- Nanotechnology for Solar Energy Collection and Conversion
- Sustainable Nanomanufacturing
- Nanoelectronics for 2020 and Beyond
- Nanotechnology Knowledge Infrastructure (NKI)
- Nanotechnology for Sensors and Sensors for Nanotechnology

2. Foundational Research

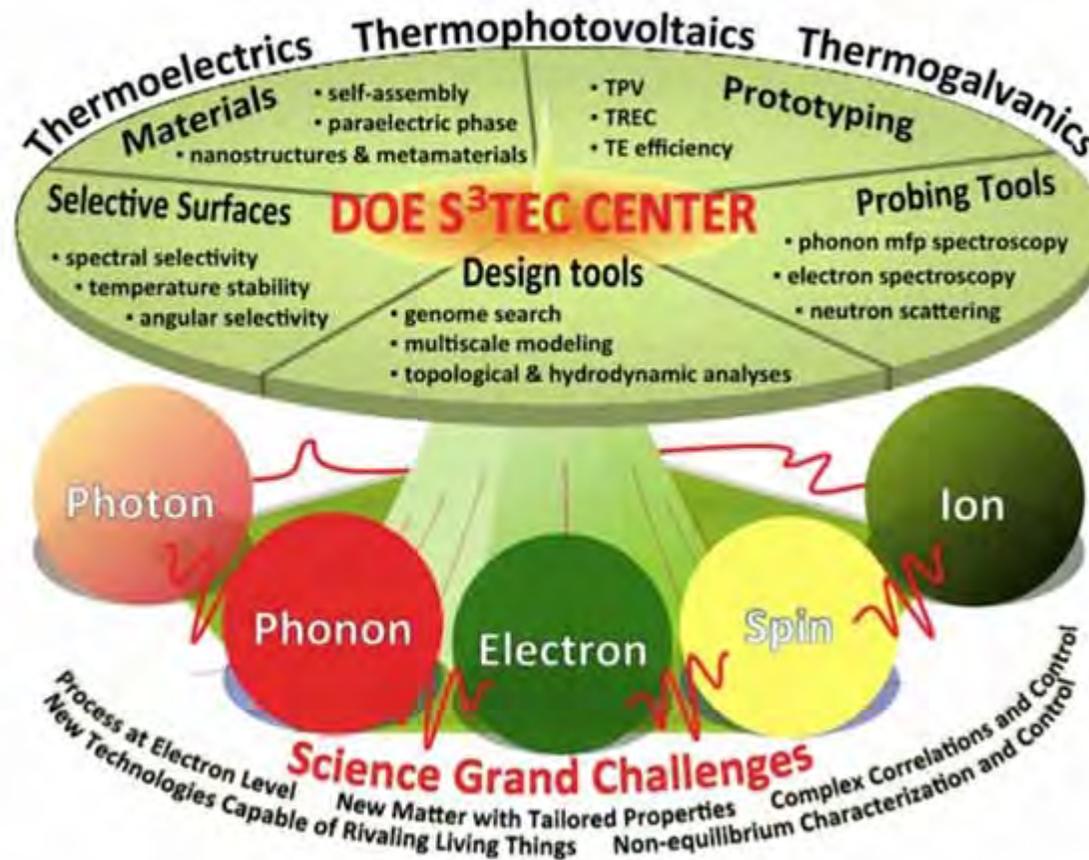
3. Nanotechnology-Enabled Applications, Devices, and Systems

4. Research Infrastructure and Instrumentation

5. Environment, Health, and Safety

6つ目のNSIとして Water Sustainability through Nanotechnology: Nanoscale Solutions for a Global-Scale Challenge を2017年開始

The Solid-State Solar-Thermal Energy Conversion Center (S³TEC)



- ・熱エネルギー利用に関する基礎科学の開発プロジェクト: 5年・20億円規模(2009-) 2014からさらに5年継続。DOE-EFRCの1つ。

文部科学省

- 元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>
- 統合型材料開発プロジェクト
- ナノテクノロジープラットフォーム
- 革新的材料開発力強化プログラム（H29年度新新規）
- 省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発
- 光・量子融合連携研究開発プログラム
- 最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム

経済産業省

- 超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト
- 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開発
- 革新的新構造材料等技術開発プロジェクト
- 革新的水素エネルギー貯蔵・輸送等技術開発
- IoT推進のための横断技術開発プロジェクト
- 次世代人工知能・ロボット中核技術開発
- 輸送機器の抜本的な軽量化に資する新構造材料等の技術開発事業
- 省エネ型化学品製造プロセス技術の開発事業

ナノテク・材料分野の研究開発 10のグランドチャレンジ



持続性／安全安心／競争力

社会実装

デバイス・部材

物質・機能

基礎技術

科学

“分離工学イノベーション”
物質分離の科学技術

分離技術
“ガス分離、化学プロセス、水素社会”、“浄化”、“医薬分離”

生体／人工物間のナノレベルの相互作用を可視化・解析

生体／人工物間相互作用制御バイオ材料・デバイス
“生体・人工物界面制御、3次元組織・細胞分析・制御デバイス”

ナノスケール動力学からの機能材料創出

ナノ動力学制御のスーパー複合材料開発
“物質と力の関係から新材料を。自己修復、アグュータ、接着”

革新コンピューティング、ナノシステム・新アーキテクチャ

IoT/AIチップ革新
“センシング、コンピューティング、ネットワーク、新アーキテクチャ”

“ナノ・IT・メカ統合スマートロボット”

Nano-Manufacturing
“Smart Robotics、Bio Inspired 設計製造”

“トポロジカル量子制御”
量子コンピューティング、スピントロクス

量子系の統合設計・制御
“電子、光子、スピン、フォノン統合、トポロジカル量子”

“時空間分解スペクトロスコーピー”

オペランド計測
“実環境・超解像・時空間分解”

データ駆動型新材料設計

ナノスケール熱制御によるデバイス革新

ナノELSI/EHS産学官国際戦略対応

マテリアルズ・インフォマティクス

世界の知を吸引するR&D拠点・プラットフォーム形成、技術専門人材の長期確保

ナノテク・材料分野の研究開発のグランドチャレンジ



社会の期待や産業的要請の観点に加え、R&Dの世界動向における新しい展開・科学的発見・イノベティブな新技術の可能性(芽)が見えつつあるホット領域を抽出

分離技術 (分離工学イノベーション)
“温暖化ガス分離、化学プロセス、水素社会”、“浄化”、“医薬物質分離”

化学プロセス分離工程の省エネ化、環境汚染物質除去、来たる水素社会に向けたガス分離・吸蔵、鉱物資源分離、医療など広範な分野における分離・吸着機能材料・システムの研究開発。近年の新材料・ナノ構造制御技術や、計測・シミュレーションの進展を最大限活用し、実現へ向かう

**生体/人工物間相互作用制御バ
イオ材料・デバイス** “生体・人工物界
面制御、組織・細胞分析・制御”

生体内における材料と生体分子、細胞の間に働くナノレベルの相互作用を可視化・解析。半導体チップ、マイクロ流路上に細胞、タンパク質、DNAを搭載、分子レベルの相互作用を制御、診断・創薬スクリーニングに応用。日本が蓄積してきた先端半導体微細加工技術やイメージング技術を、新規バイオ材料・デバイスの開発に繋げ、ヘルスケア領域のニーズへ展開。

**ナノ動力学制御のスーパー複合材料
開発** “物質と力の関係から新材料を”

マクロな機械的応力に対するナノサイズの分子集合体の挙動に関する、新しい知見を積み上げ、新たな発展の基盤を構築～ソフトマテリアルの応力集中現象、レオロジー、機能性分子の力学挙動などナノ領域の力学挙動を研究する

IoT/AIチップ革新
“センシング、コンピューティング、ネットワーク、新
アーキテクチャデバイス”

センシング、次世代コンピューティング(ニューロ、量子)、ネットワーク等の機能を、超小型・低コスト半導体チップに集積し、安全・安心・福祉領域や健康管理・心身機能強化、新サービスの可能性を拓けるデバイスへと発展させる。近年のナノシステムデバイス研究が鍵となる

ナノ IT-功統合 Manufacturing
“Bio - Inspired 製造・プロセス、
Smart Robotics ”

生物が低エネルギーで実現している構造や機能、プロセス・駆動機構に学び、人工的に再構築。3Dプリンティングなどを使ったバイオ・インスパイアード技術や、小型・軽量・高出力の自律・協調動作ロボットを実現する。生物機構のモデリング技術や新ソフト材料が登場し、世界的な注目領域になりつつある

量子系の統合設計・制御技術
“電子、光子、スピン、フォノン統合、ト
ポロジカル量子”

・電子、光子、スピンのに加え、熱の起源「フォノン」を量子力学的に統合した統合制御技術を構築。ICTの進歩に伴い避けられなくなってきた発熱問題を、熱の起源から制御。
・トポロジカル量子状態を人為的に制御する新技術・新材料の登場で、量子コンピュータの実現が期待

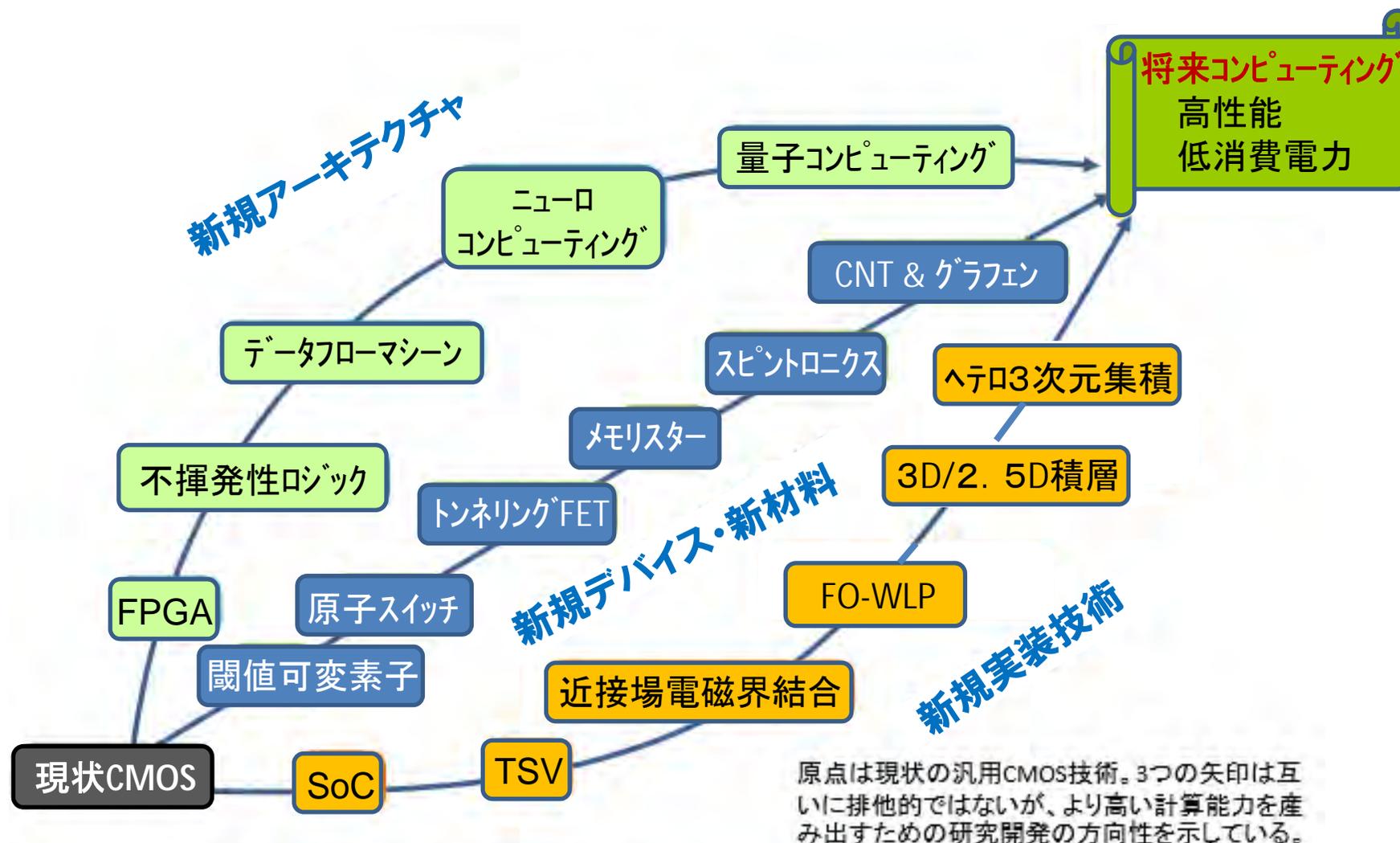
オペランド計測
“実環境・超解像・時空間分解”

物質から生物にわたる広範囲の対象に対し、先端計測技術を用いたオペランド(実動作下)観測を適用し、解析することによって、新物質の探索、電池・触媒・デバイス等の開発、生物現象の解明を図る。新材料創成や医薬品・生物生産向上におけるイノベーションへの期待。

データ駆動型新材料設計
Materials Informatics

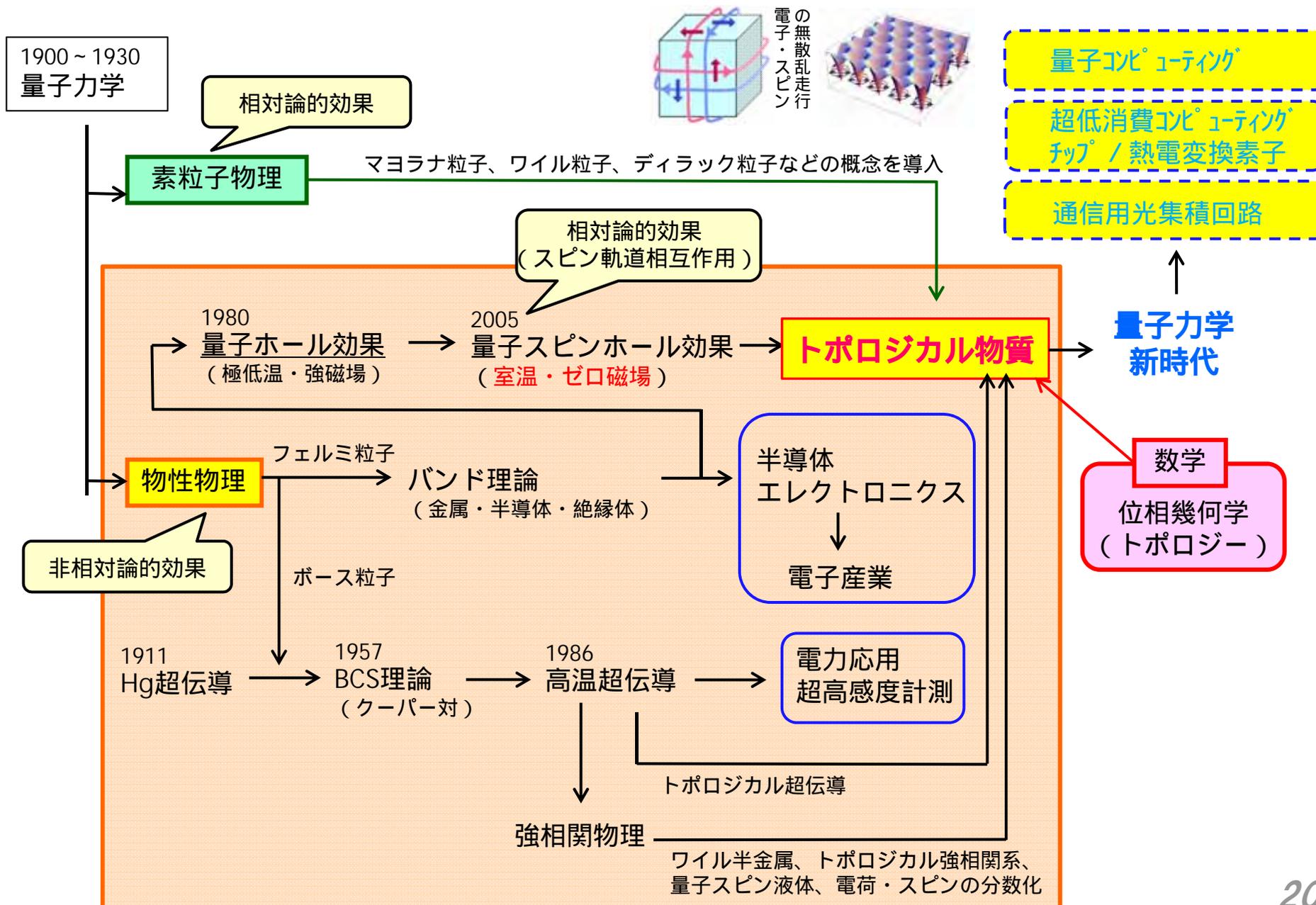
発見から実用化までに30年かかるとされる材料開発のコストと時間を短縮する。データ科学を徹底活用した新材料探索・設計アプローチ。より複雑化・多元化する高機能材料への期待を、データ科学、人工知能(AI)、機械学習と連携した新アプローチによって克服する

将来のコンピューティング技術に向けた技術潮流

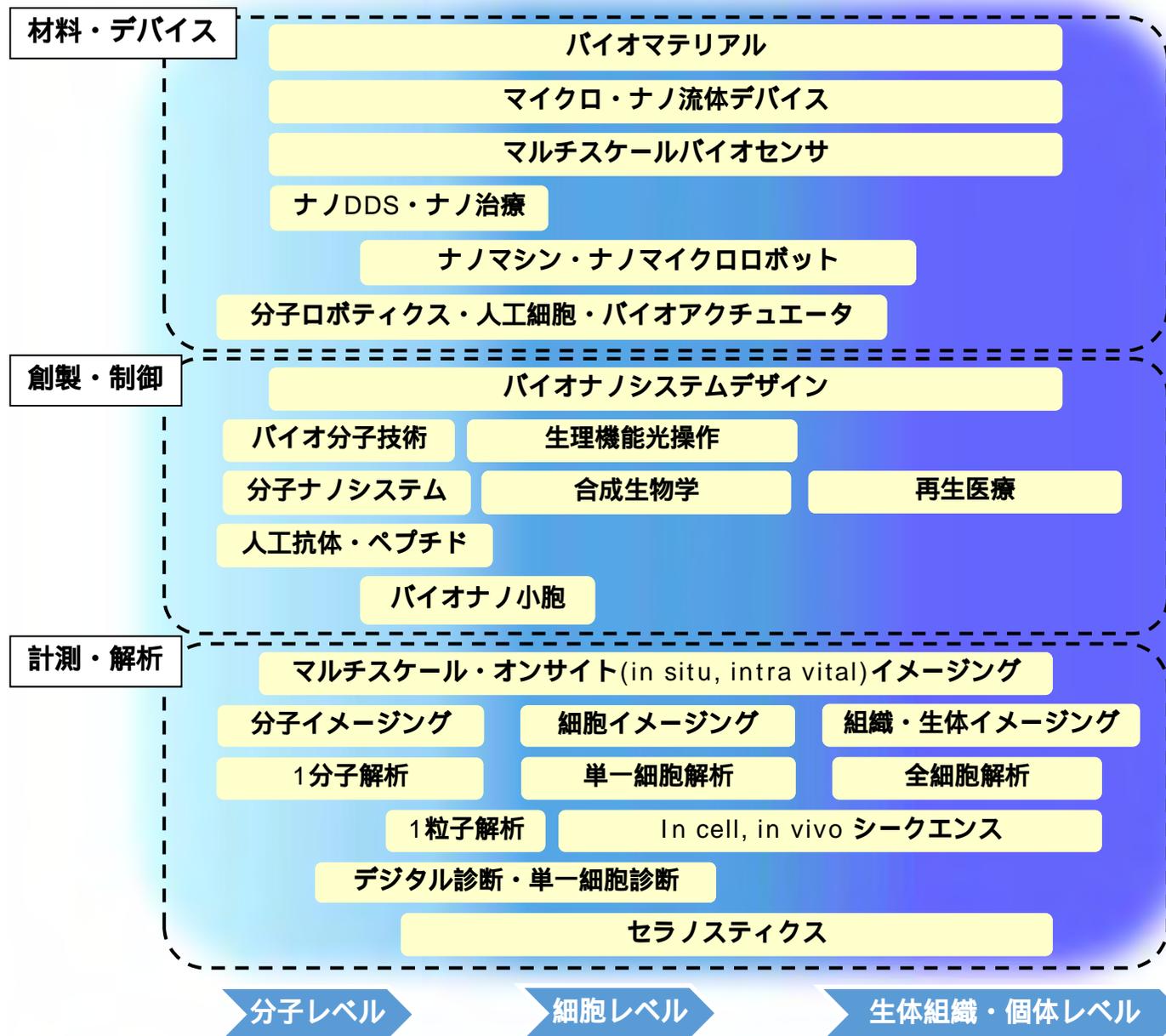


FPGA: Field Programmable Gate Array, FET: Field Effect Transistor, SoC: Silicon on Chip, TSV: Through Silicon Via, FO-WLP: Fan-Out Wafer Level Package

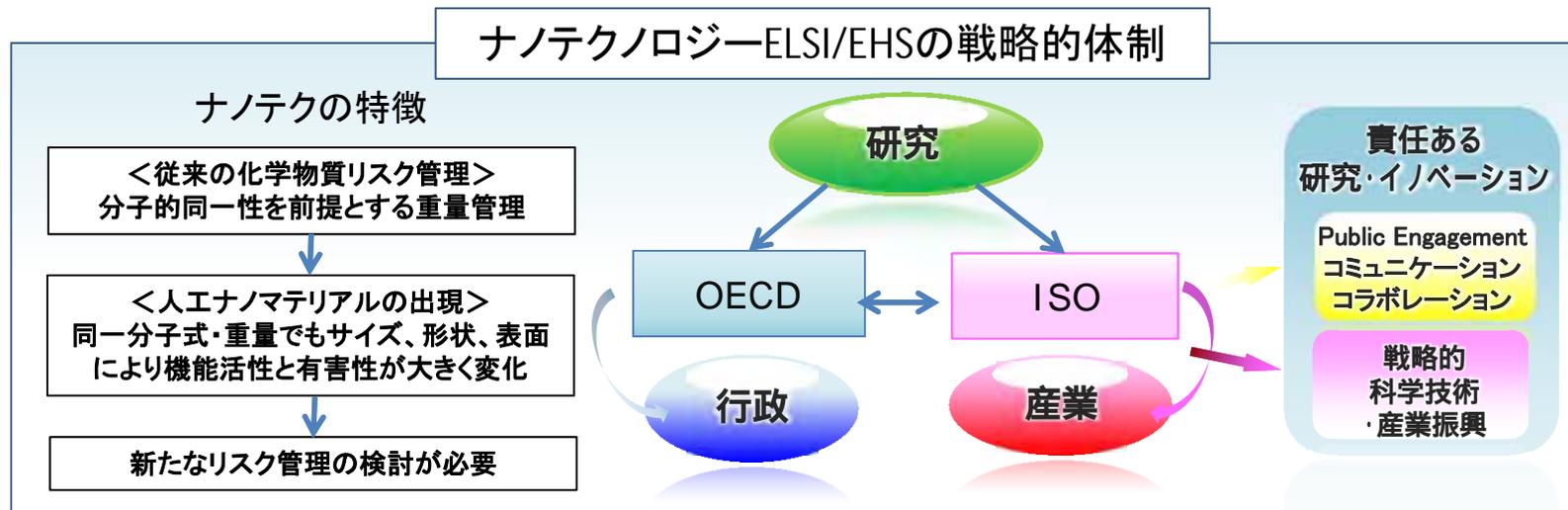
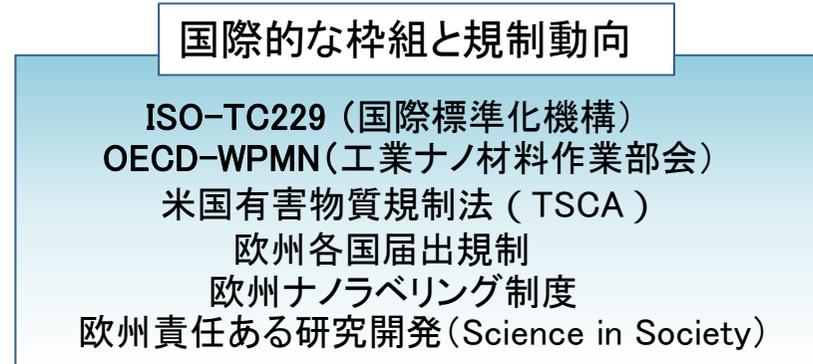
トポロジカル量子物質が拓くデバイスイノベーション



「バイオ・ライフ」と「ナノテク・材料」の融合研究領域



ナノテクノロジー-ELSI/EHS の戦略的取組課題



● 施策および施策間連携における問題

- ・共通研究開発インフラ・装置の長期的な視点での維持・更新管理が困難
- ・施策を策定する行政官の任期が短く、長期的な責任体制が担保されない
- ・新しい施策や物珍しいものが予算獲得に有利になり、真に重要な施策が発展しない
- ・研究プロジェクトの失敗や戦略変更を考慮した仕組みが欠如
- ・インセンティブの無い状況では現場の連携促進は困難、むしろ疲弊
- ・組織間連携を進めるための研究以外のマネジメントの欠如、先導する人材が希少
- ・ナノテクノロジー・材料全体を俯瞰し関係府省・機関間で議論する継続的な場の欠如

方向性

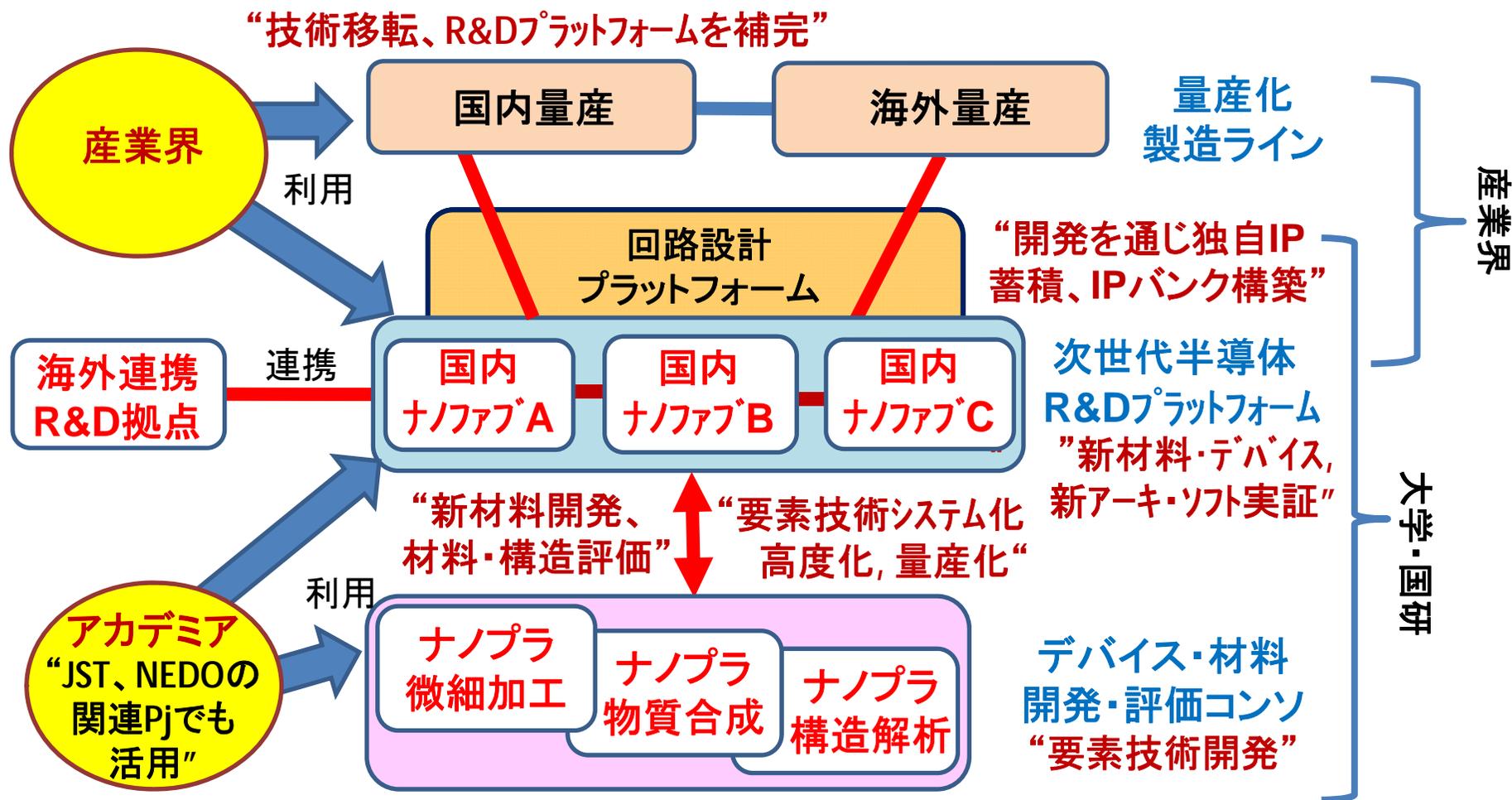
☆ 先端研究開発インフラの将来戦略、成長する研究開発施設・拠点の在り方

- ・関連分野を俯瞰した戦略づくりと、関係府省が共同して大きな施策を構築していくシステムティックな仕組み作り
- ・行政官が入れ替わっても、責任を継承し施策・拠点を発展させる仕組み
- ・将来を考慮した、施設・設備の更新戦略やプロジェクト立案、柔軟な戦略変更
- ・大型研究施設・研究拠点の運営における、上位視点での方針策定と、関係者間の共有

☆ 施策間連携、機関間連携、府省間連携、現場の連携

- ・CSTIが司令塔となり、長期的な視点で、関係省庁が意見交換・議論して戦略を構築・実現していく場の継続
- ・府省間の連携を実質的なものにするため、現場では大学、国研、企業の研究者がアンダーワンループの形で参画し、一体的にマネジメントする仕組み
- ・研究現場での実質的な連携を促進するための共通ゴールの設定、連携のモチベーション・インセンティブの設計・付与

オープンイノベーション研究開発体制のエコシステム (IoT/AIチップ革新を目指す次世代半導体デバイスの例)



- ◆ 基礎研究レベルの成果が市場化までつながるエコシステムを形成
 - ◆ 成果が蓄積され、再利用できるR&Dの循環システムの構築
- “新材料・デバイス、新アーキ・ソフトのアイデアをチップで具現化、回路設計IPを資産化する場”

謝 辞

本報告書作成の過程で、総勢240名の産学官の専門家より、俯瞰ワークショップ参加・インタビュー・情報提供等多大なご協力をいただきました。改めて深く感謝申し上げます。

本報告書記載内容の文責は、CRDSナノテクノロジー・材料ユニットにあります。