

イノベーションを牽引する ナノテク・材料研究の挑戦

2017年8月31日

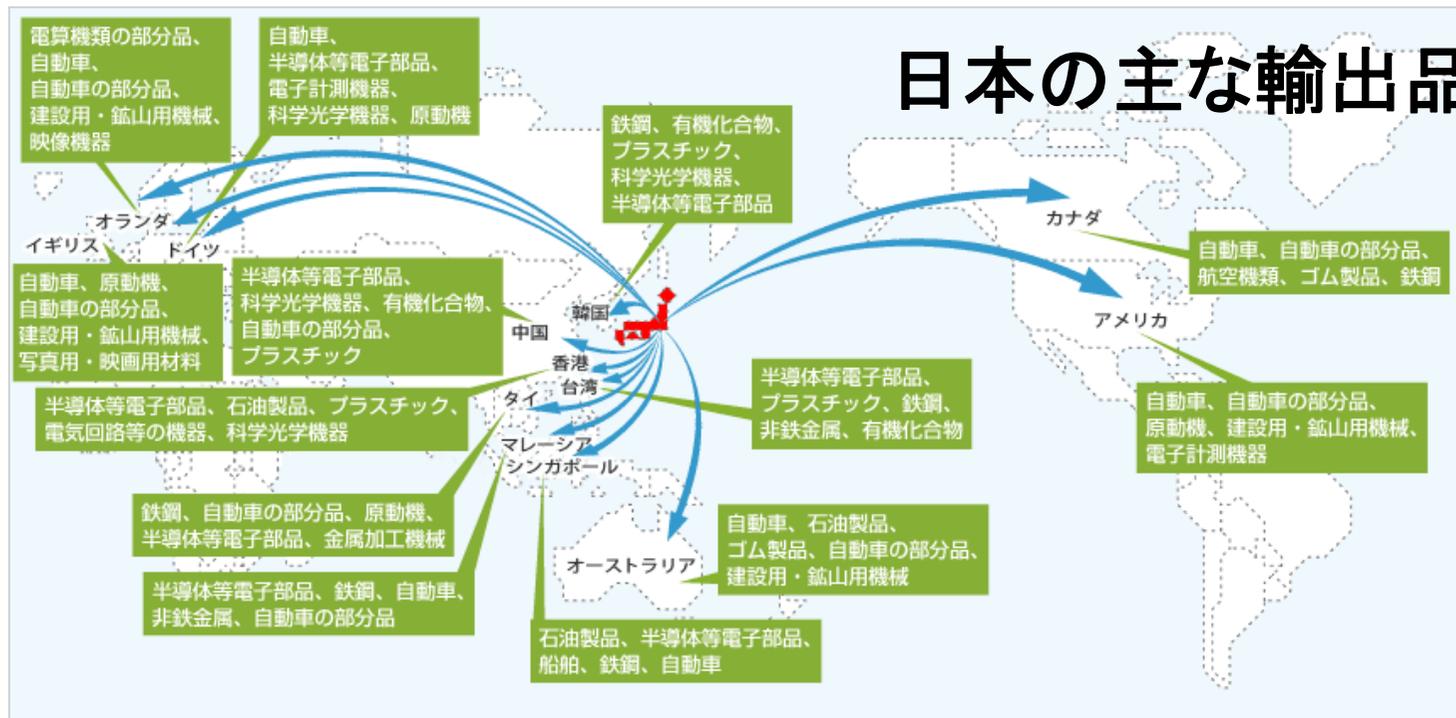
CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット

永野智己



国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

日本の主な輸出品と輸出先



次を担う素材を欠くという選択肢はない

日本の輸出上位10品目／15年間の変化

順位	2000年		2015年	
	品目	割合	品目	割合
1	自動車	13.4%	自動車	15.9%
2	半導体等電子部品	8.9%	半導体等電子部品	5.2%
3	事務用機器	6.0%	鉄鋼	4.9%
4	科学光学機器	5.1%	自動車の部分品	4.6%
5	自動車の部分品	3.6%	原動機	3.4%
6	原動機	3.2%	プラスチック	3.2%
7	鉄鋼	3.1%	科学光学機器	3.1%
8	映像機器	2.7%	有機化合物	2.8%
9	有機化合物	2.3%	電気回路等の機器	2.5%
10	プラスチック	2.0%	電気計測機器	1.9%

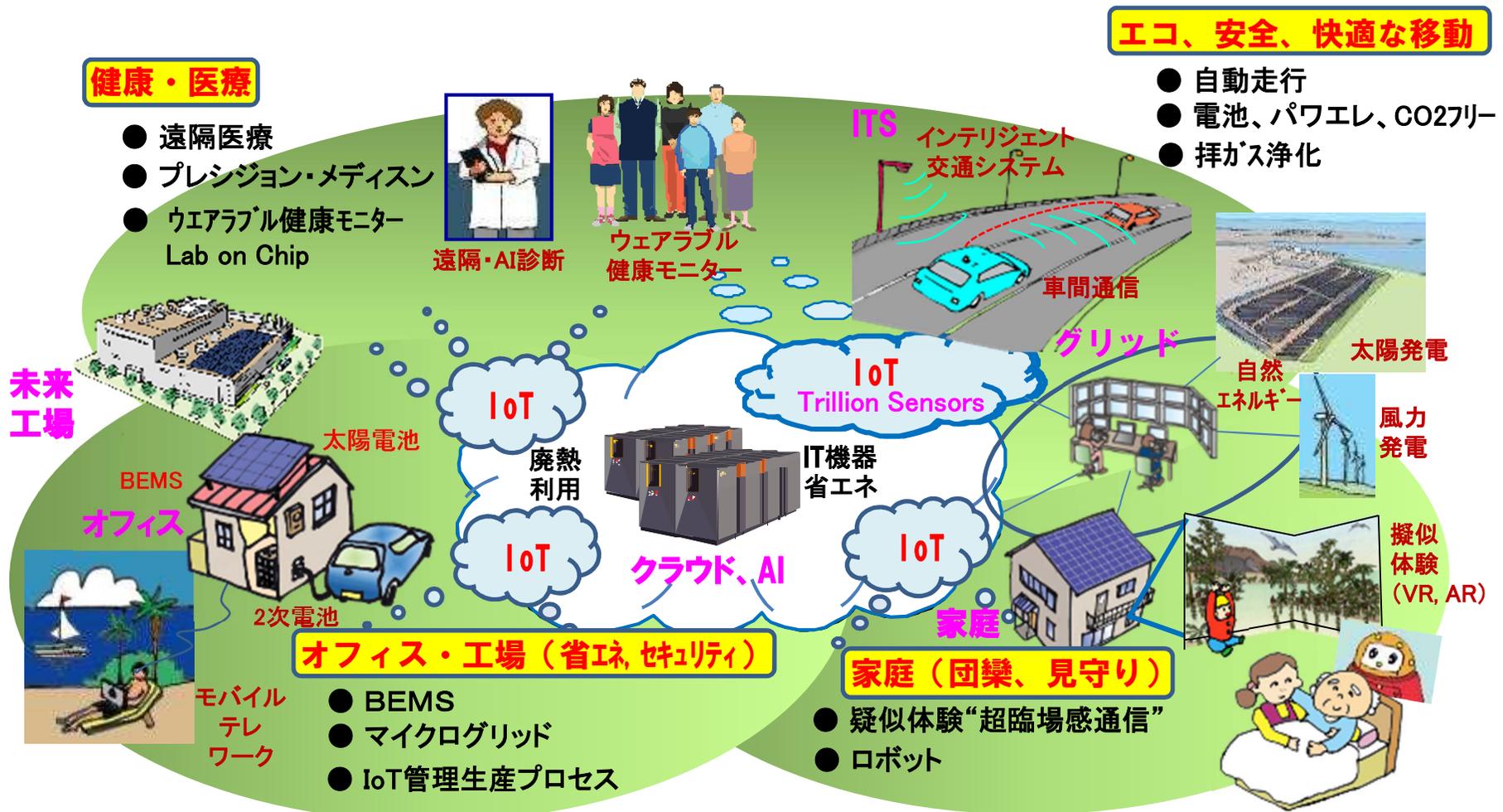
3.7兆円
2.5兆円
2.1兆円
8.3兆円

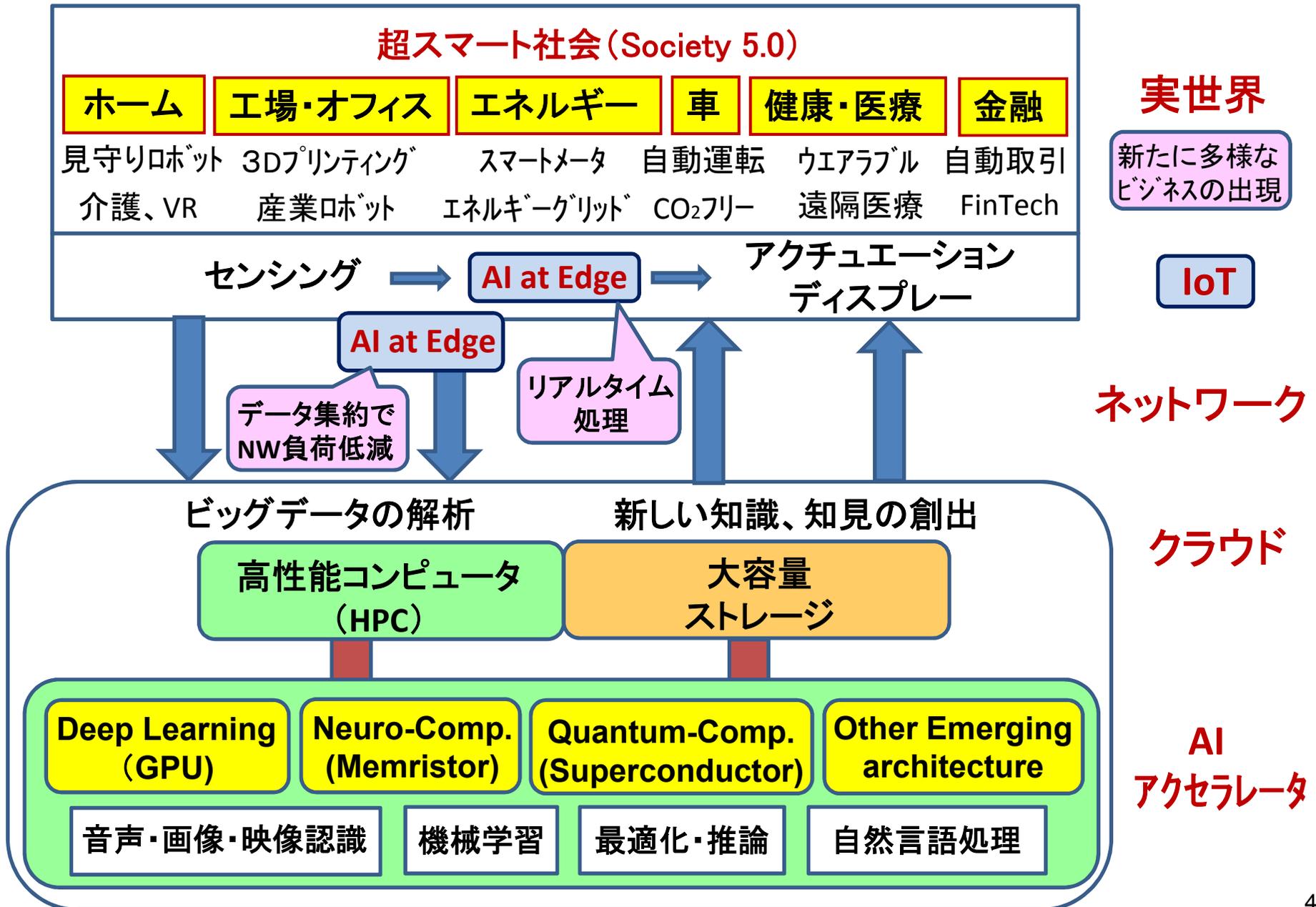
出典：財務省統計および一般社団法人日本貿易会 資料
http://www.jftc.or.jp/kids/kids_news/japan/item.html

Society5.0を支えるナノテクノロジー・材料技術



- ✓ 膨大な情報の処理, 蓄積, 伝送を可能にするナノエレ, スピントロニクス, フォトニクス
- ✓ 周囲の情報を収集し, 必要な情報を配信する多様なIoT(センサ, ネットワーク)
- ✓ 機能性材料(新素材)が実現するアプリ・デバイス革新





ナノテクノロジー・材料の研究開発俯瞰図



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
---------	---	--	---	--	--

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

共通基盤科学技術

製造・加工・合成 フォトリソグラフィ 自己組織化 ナノインプリント 結晶成長 ビーム加工 薄膜、コーティング インクジェット 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 モンテカルロ法 分子動力学法 フェーズ・フィールド法 分子軌道法 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

産学官連携・オープンイノベーション方策

国際連携・グローバル戦略

府省連携

異分野融合の促進策

先端研究インフラPF

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

ELSI・EHS

主要研究開発領域(37領域)



俯瞰区分	研究開発領域
環境・エネルギー	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	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)
	計測・診断デバイス
	脳・神経計測
バイオイメーjing	

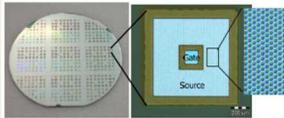
俯瞰区分	研究開発領域
機能設計・制御	空間空隙設計制御
	バイオミメティクス
	分子技術
	元素戦略・希少元素代替
	マテリアルズ・インフォマティクス
	フォノンエンジニアリング

俯瞰区分	研究開発領域
ICT・エレクトロニクス	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	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

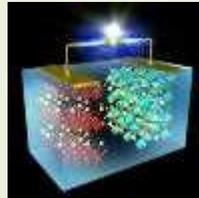
早期実用化を目指すSiCやGaNなどのワイドギャップ半導体基板・素子開発が活発化



SiCウェハとSiCデバイス
(産総研)

次世代蓄電デバイス

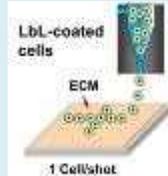
全固体型、多価カチオン型、金属-空気電池、Li硫黄など、次世代の高性能電池に期待が集まる。



ナト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の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

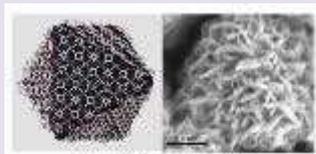
量子力学で演算を超高速化。「量子ゲート方式」と「量子アニーリング方式」がある。人工知能への応用が期待される。



<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

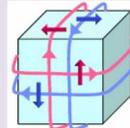
材料DBと機械学習など情報科学的手法を併用することで物質探索・設計手法を革新。開発期間を極端に短縮するマテリアルズ・インフォマティクス



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

トポロジカル絶縁体

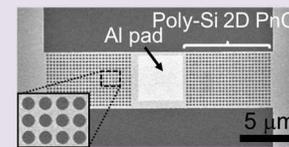
物質の境界(3次元系では表面、2次元系ではエッジ)に内部(絶縁体)と異なる特殊な金属状態が自発的に現れ、無散逸な電流が流れる。次世代電子デバイスの候補として期待。



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



- ✓ 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
- ✓ エッジ/クラウドAI、IoTセンサ、自動運転、ロボット、モバイル、エネ変換デバイス、診断・治療デバイスなど、ハード側は先端ナノテクが競争を左右
- ✓ 革新コンピューティング／新アーキテクチャへの挑戦
- ✓ これらに関する新素材は、データドリブンのマテリアルズ・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)

CRDSナノテク・材料研究開発の展望



日本の位置づけ

- ✓ 元素戦略・機能発現、分子(制御)技術、蓄電池材料、電子材料、パワー半導体、構造材料など、**物質創製・材料設計技術**に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
- ✓ これらが活きる省エネ・低環境負荷技術にアドバンテージ
- ✓ 一方**弱みは**、計算・データ科学、ソフト・標準化・規制戦略、医療応用、水平連携・産学連携、ナノ・新物質のELSI・EHS、K-12教育・コミュニケーションに課題

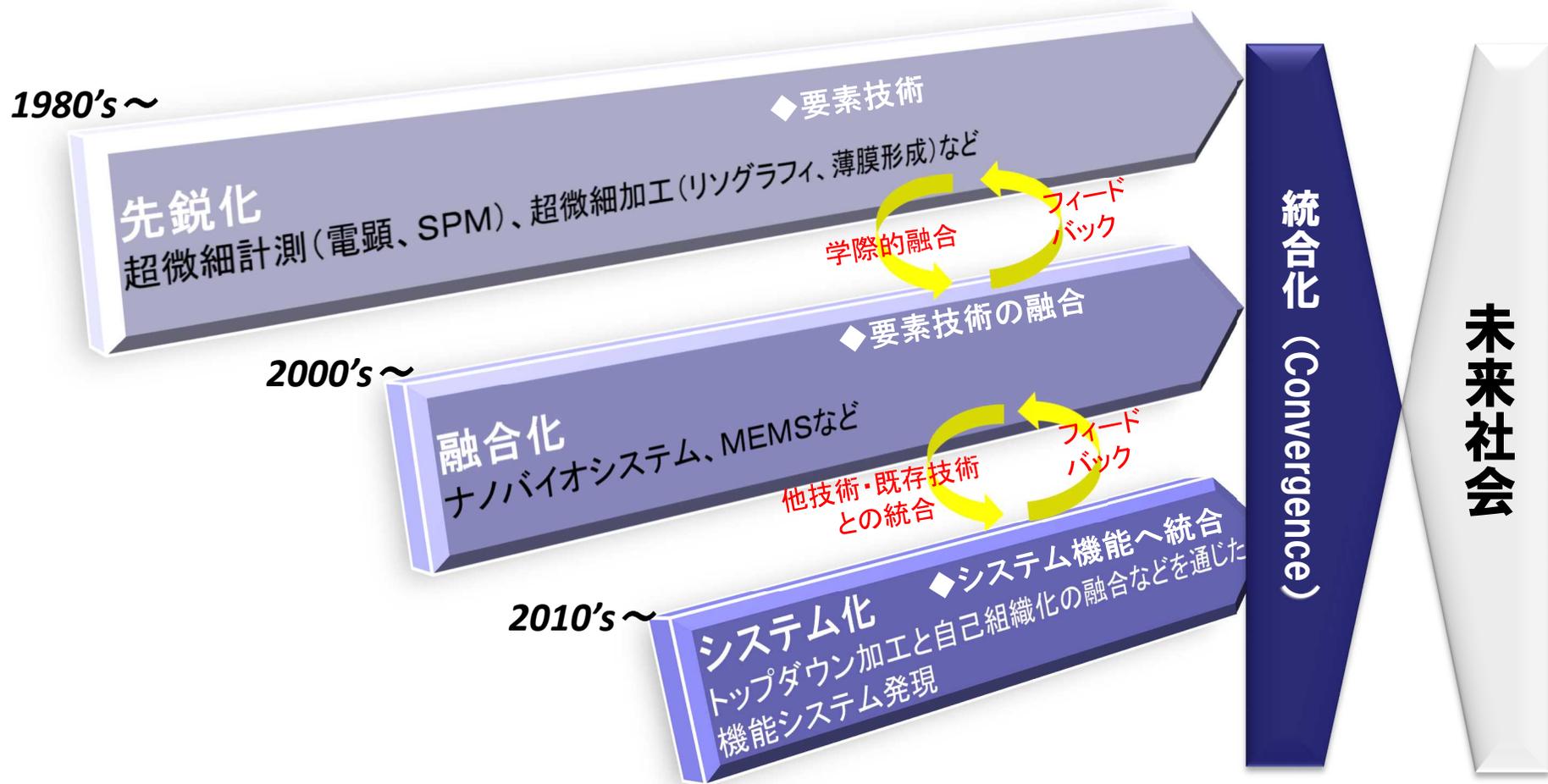
挑戦課題

- ✓ 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のギャップ解消 → 先端研究開発と事業化トライアルのエコシステム形成
- ✓ **10の挑戦課題(グランドチャレンジ)**

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
要素技術のナノスケール 極限性能追求・実現	要素技術同士の異分野融合。結 合して新機能を有する新しい融 合ナノテクに進化	高度な機能を提供する部品・装 置・システム。融合技術を、価値創 出システムへと統合



主要国のナノテク・材料政策・国家戦略



国	ナノテクおよび材料の基本政策	
日本	◆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」 「素材・ナノテク」は新たな価値創出のコアのとなる強みを有する基盤技術の一つ。	
米国	◆National Nanotechnology Initiative (2001-) <ul style="list-style-type: none"> -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-) <ul style="list-style-type: none"> -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、フォトニクス、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-) <ul style="list-style-type: none"> -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-) <ul style="list-style-type: none"> -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-) <ul style="list-style-type: none"> -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-) <ul style="list-style-type: none"> -先進材料、ナノエレ、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) <ul style="list-style-type: none"> -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) <ul style="list-style-type: none"> -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) <ul style="list-style-type: none"> -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に 	

(参考) 欧州 (Horizon 2020) → FP9へ

3つのプライオリティ

1. 卓越した科学
2. 産業界のリーダーシップ確保
3. 社会的な課題への取り組み

1. 卓越した科学

- FETs (Future and Emerging Technologies) として、新しくかつ有望な分野の連携研究を支援
- FET Flagshipsへ大規模投資 **€10億/10y/1テーマ**
「ブレイン」「グラフェン」につづき、「量子技術」を2018開始予定

2. Key Enabling Technologies (KETs)

- 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
- フォトニクス
- バイオテクノロジー
- 先進製造

ナノテクと先端材料の合計で €29億/7y



3. 6つの社会的課題

1. 保健、人口構造の変化および福祉
 2. 食糧安全保障、持続可能な農業およびバイオエコノミー等
 3. 安全かつクリーンで、効率的なエネルギー
 4. スマート、環境配慮型かつ統合された交通・輸送
 5. 気候への対処、資源効率および原材料
 6. 包括的、イノベティブかつ安全な社会
- EU各国・産業界”NanoSafety Cluster”を形成**

Program Component Areas

1. Nanotechnology Signature Initiatives (NSIs)

(1) Sustainable Nanomanufacturing

(2) Nanoelectronics for 2020 and Beyond

(3) Nanotechnology Knowledge Infrastructure(NKI)

(4) Nanotechnology for Sensors and Sensors for Nanotechnology

(2017 new) Water Sustainability through Nanotechnology

2. Foundational Research

3. Nanotechnology-Enabled Applications, Devices, and Systems

4. Research Infrastructure and Instrumentation

5. Environment, Health, and Safety

1.(2)と連動した Nanotechnology Grand Challenge

→ Create a new type of computerを設定

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

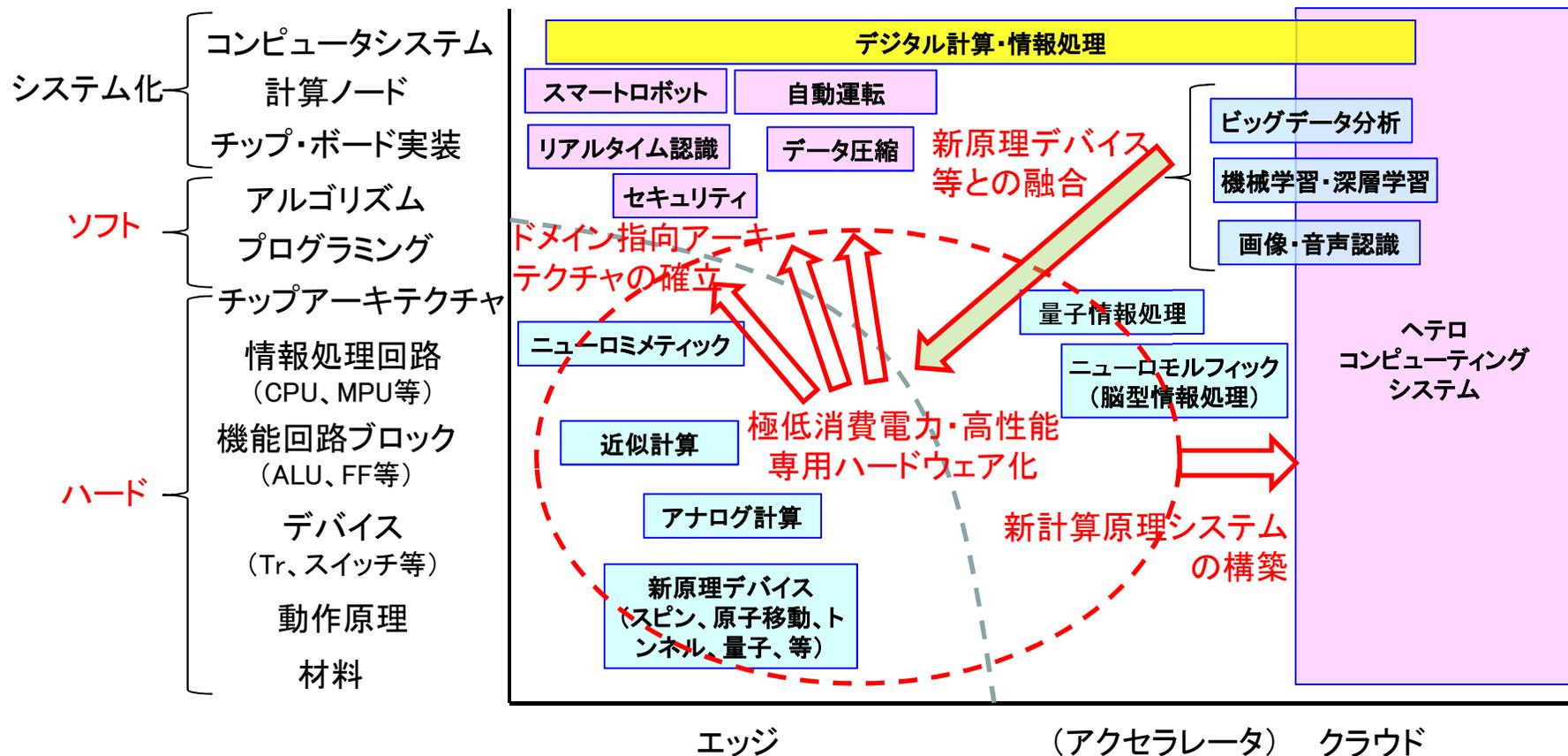
- ・イメージセンサー
(可視光、赤外光)
- ・ドライブレコーダー用
大容量不揮発メモリ

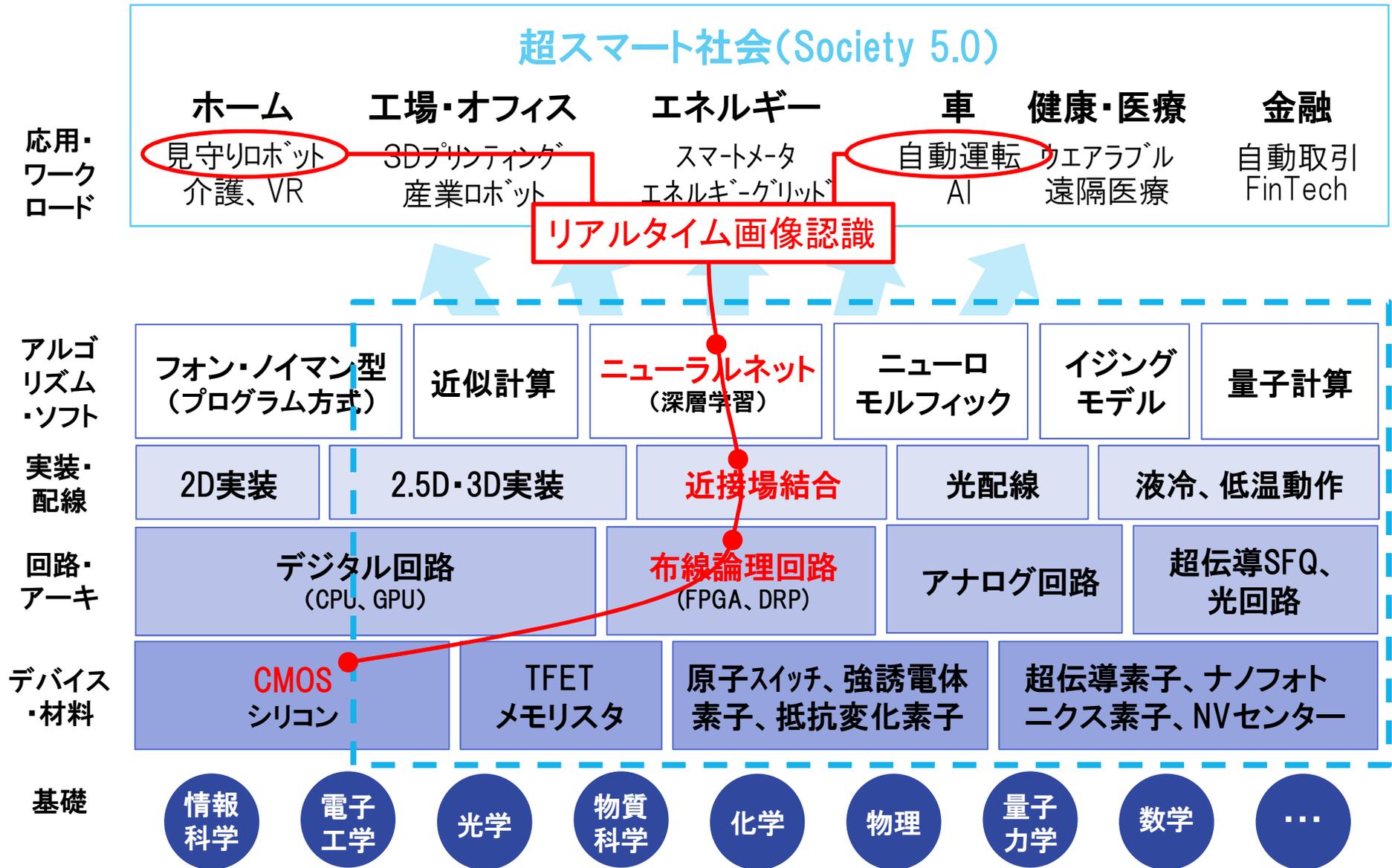
- 自動運転技術
- エネ・環境技術

求められる革新的コンピューティングのチャレンジ領域



- ・クラウド上でソフト的に行われている高度な情報処理を新原理デバイス等との融合により極低消費電力・高性能な専用ハードウェア化
- ・ドメイン指向アーキテクチャの確立によるエッジコンピューティングへの適用
- ・新計算原理システムの構築によるクラウドサーバーの低消費電力化・高性能化





社会的課題の解決に向けて、エッジやクラウドにおけるコンピューティングの**ワークロード***を明確化し、**日本の強い技術**を活かした研究開発を

自動走行車	産業ロボット	監視カメラ	インフラ管理	工場管理	...
ドメイン1: 自律的な制御					
ドメイン2: リアルタイム画像処理					
		ドメイン3: 診断・予測			



(1) 応用のワークロードに対するソフト・ハードの垂直統合技術開発と性能検証

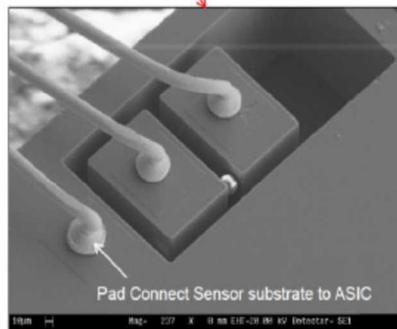
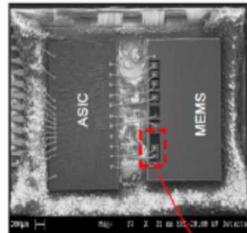
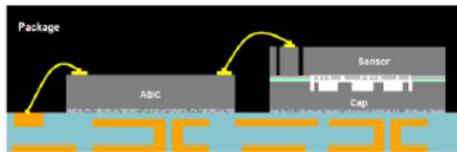
- エッジ用のドメインスペシフィックな技術開発
- クラウド用のアクセラレータ技術開発

(2) 各技術レイヤーの共通基盤技術の確立

- 新たなコンピューティングアルゴリズムとソフトの創出
- 新たなアーキテクチャとそれを実現する実装技術の開発
- 新たなコンピューティングの実行に適するデバイス・材料の開発

*) ワークロード: 稼働中のITシステムにかかる負荷またはその度合いを表す。CPUやメモリの占有率などで測る。ここでは、「浮動小数点演算」「データベース処理」「画像処理」など、アプリケーションごとに重要となる様々な処理のタイプを指す。

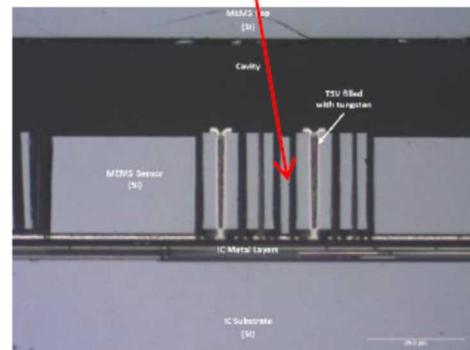
2012



TSV Trench to connect with wirebonding from MEMS to ASIC

Yole Development
2013, 2014

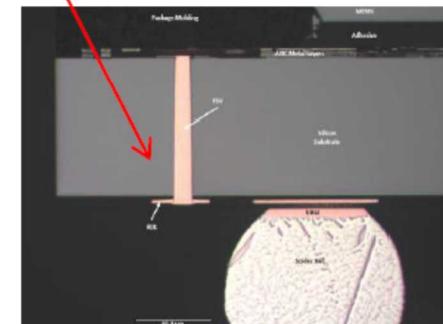
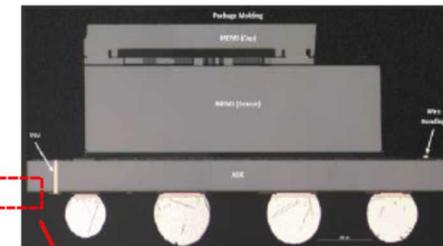
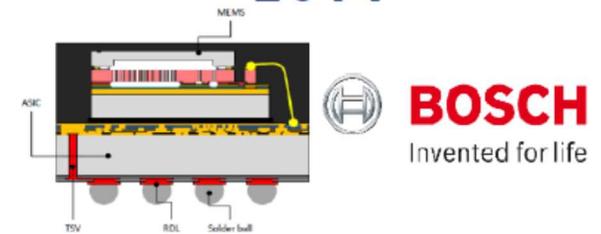
2013



W TSV-like with 3:30 (AR = 10:1) connecting MEMS to IC metal layers (fusion bonding)

mCube 1 mm × 1 mm (2015)

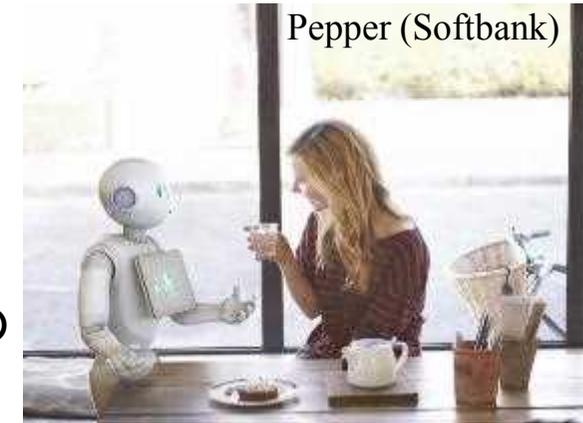
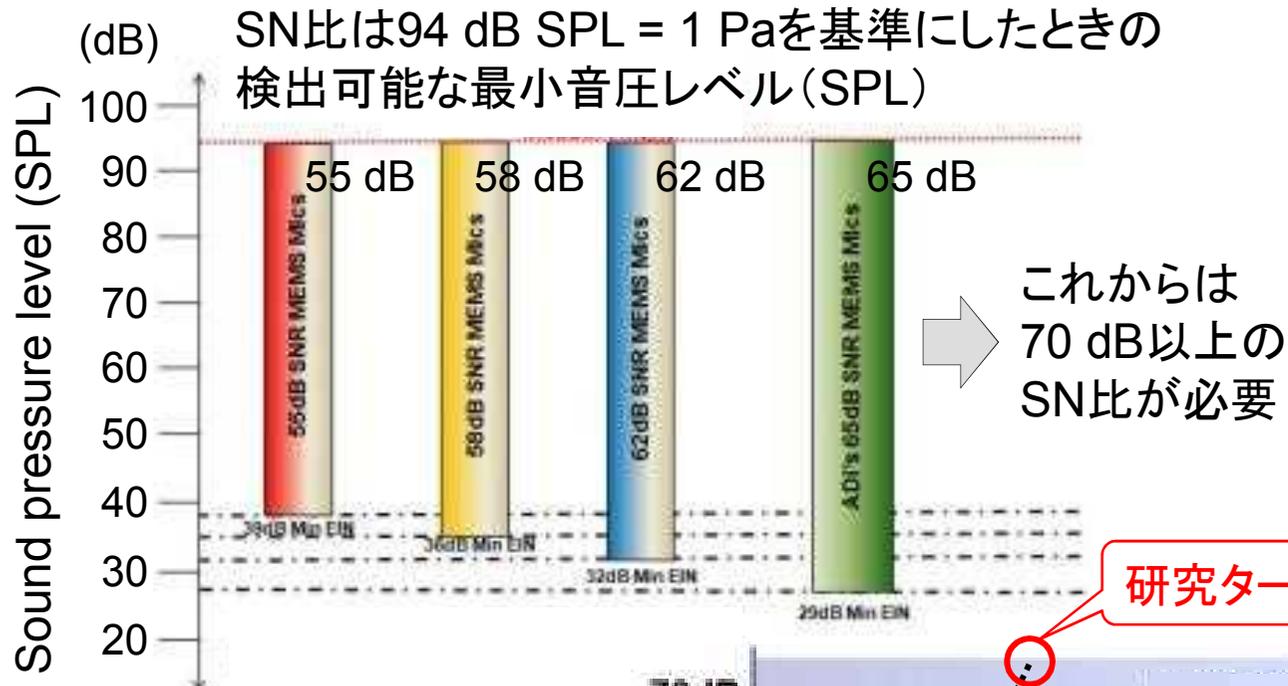
2014



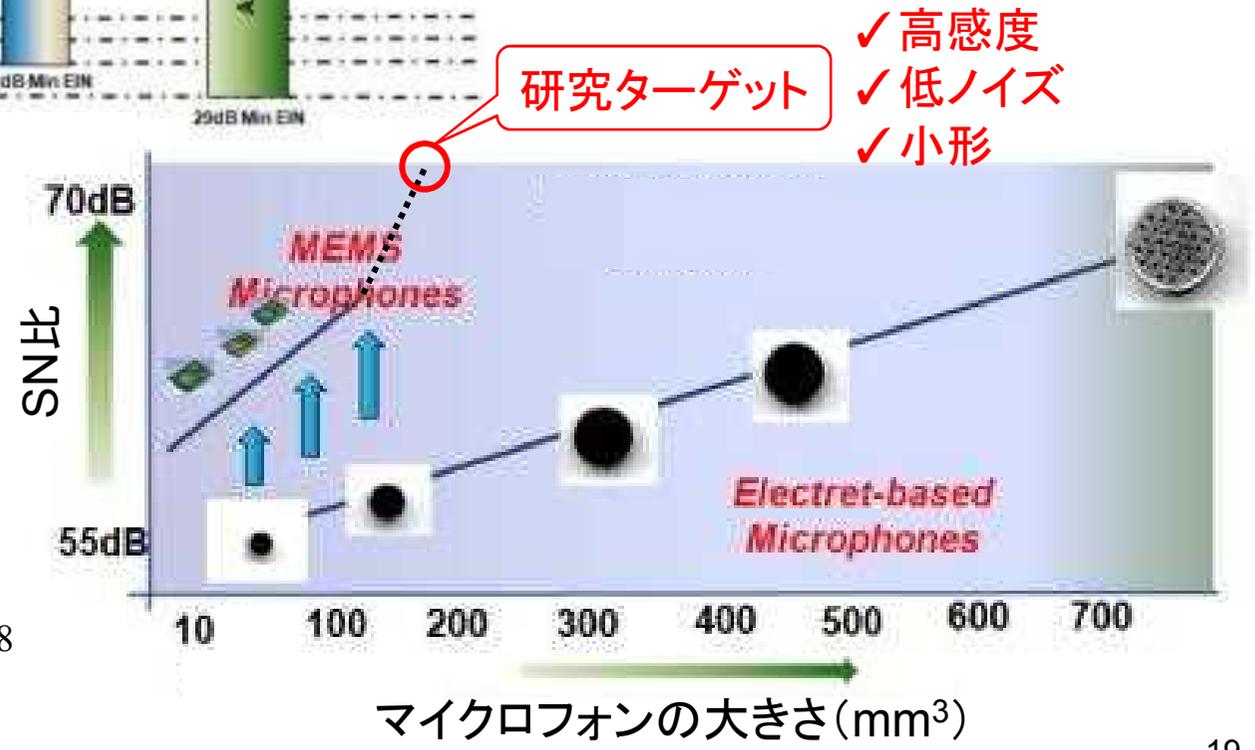
**Cu TSV in ASIC
TSVs of 10:100 (AR=10:1)
(temporary bonding)**

Bosch accelerometer (2014)
1.8 mm², 0.8 mm t
Cu TSV of AR10 in ASIC

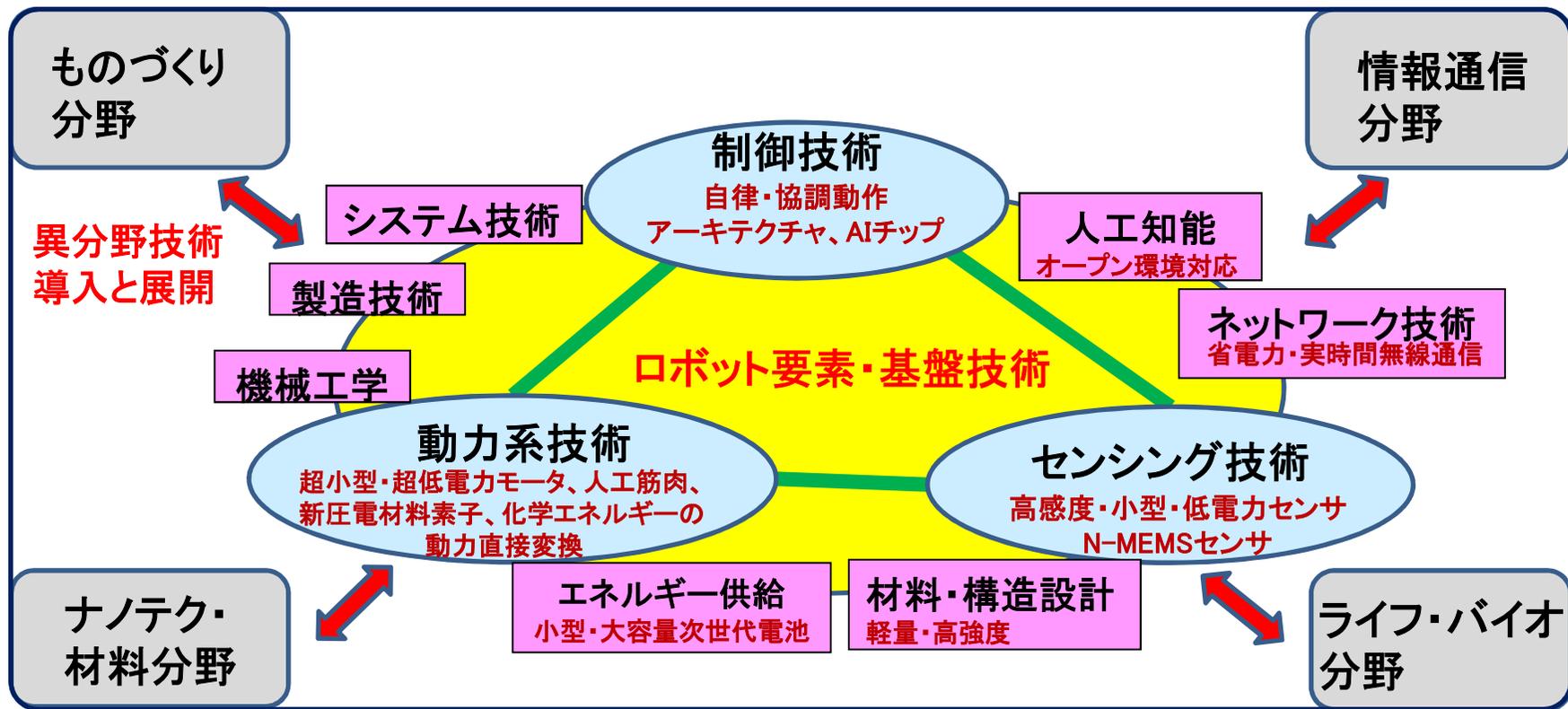
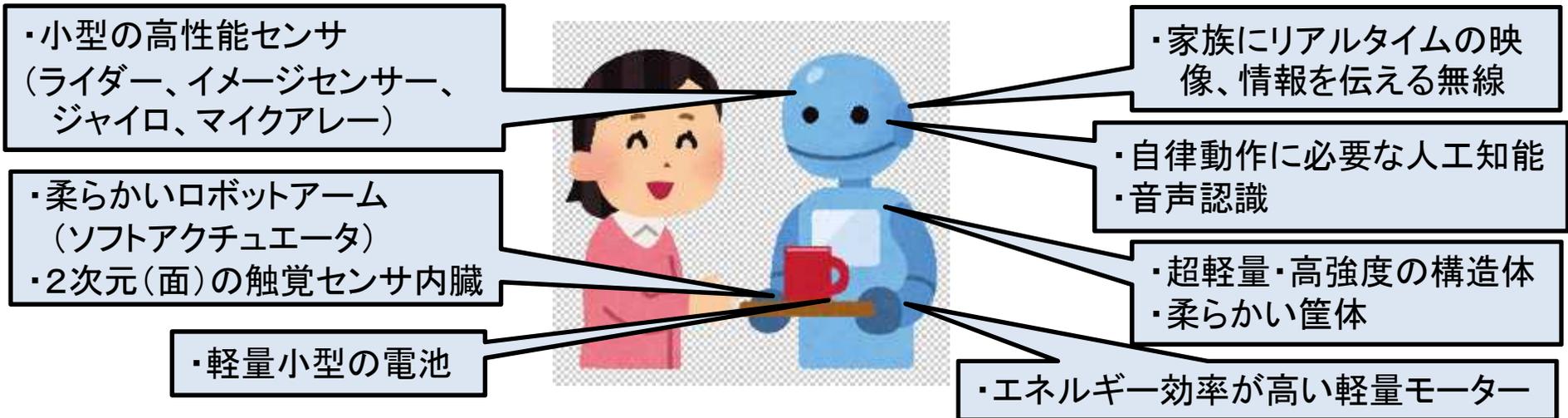
IoTセンサ/MEMSマイクロフォンのSN比向上ニーズ



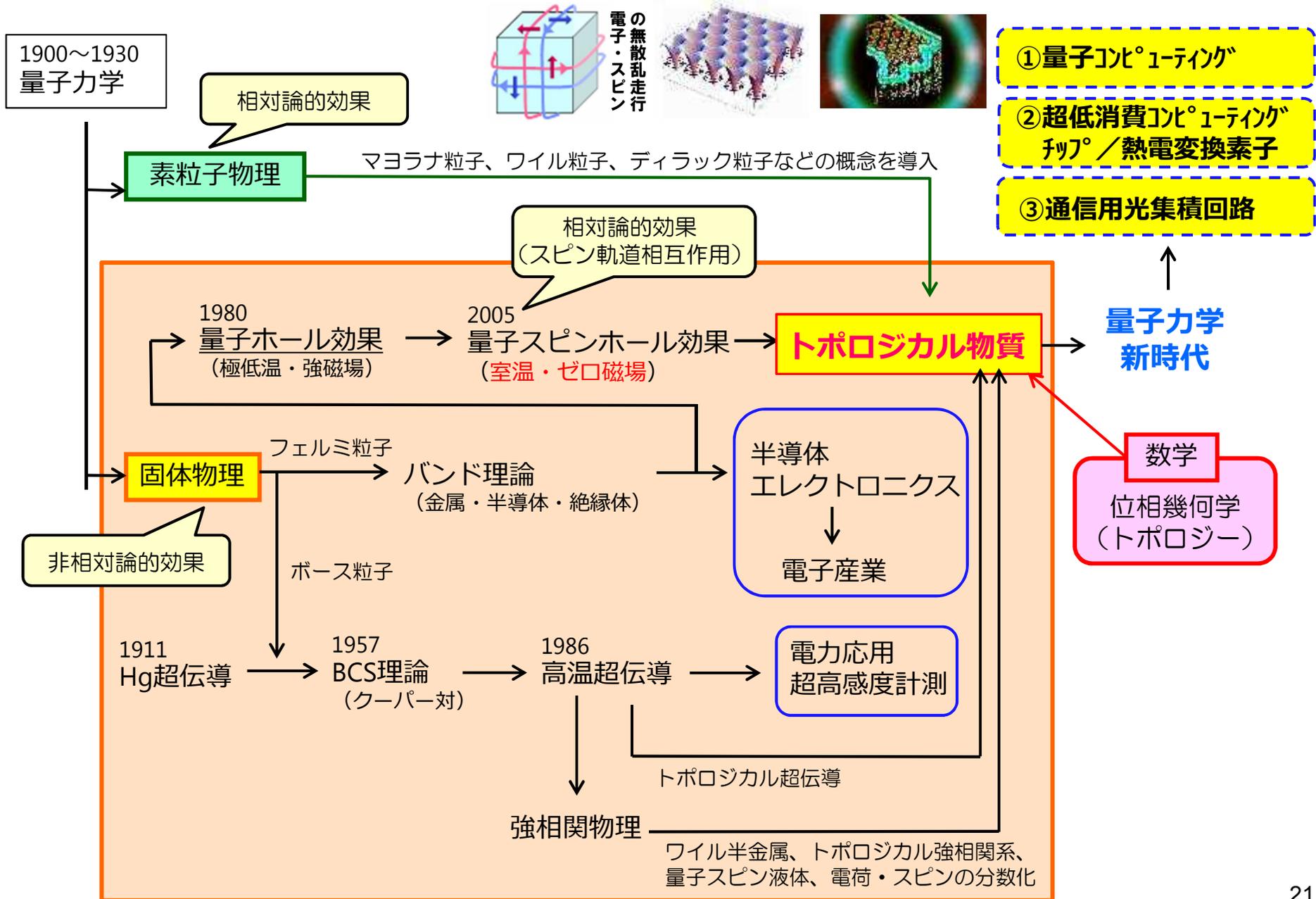
Jerad Lewis, Paul Schreier
(Analog Devices), EETimes, 2012.11.28



スマートロボット基盤技術研究開発



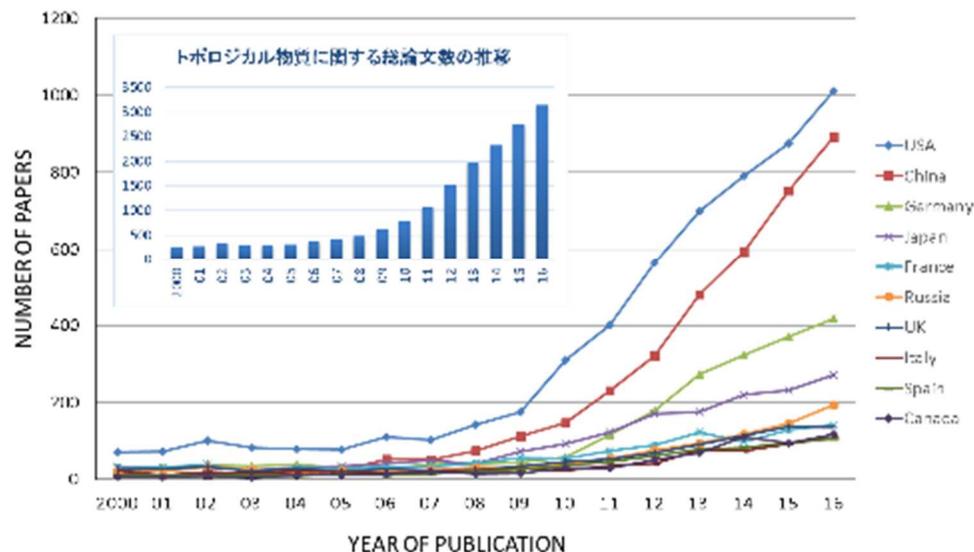
トポロジカル量子物質が拓くデバイスイノベーションへ



トポロジカル物質の論文動向



トポロジカル物質に関する国別論文数の推移

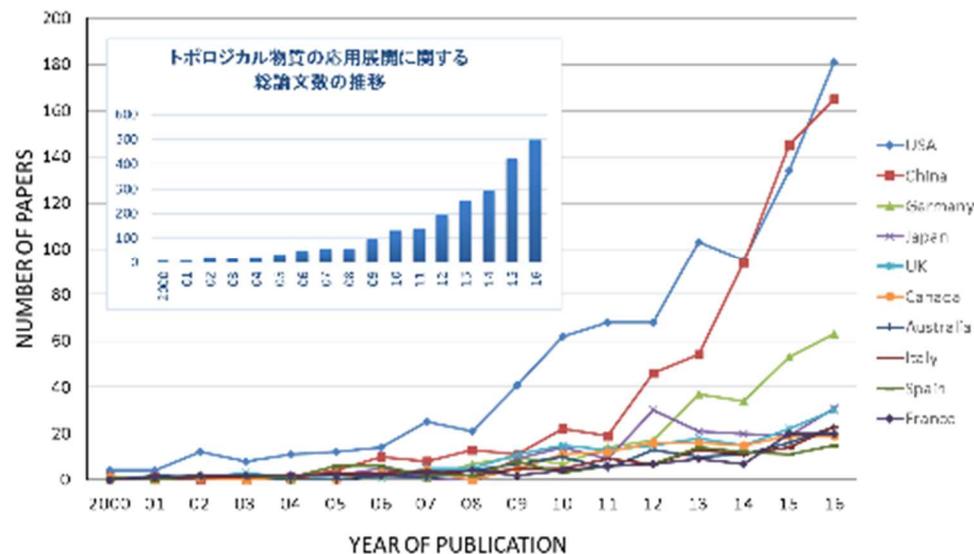


Web of Science, 2017.2.23時点

検索項目: トピック: (topological AND (material* OR insulator* OR superconduct* OR semimetal* OR skyrmion* OR "strongly correlated" OR "spin liquid*"))

- 2008年頃から論文数急増
- 2016年時点で、米、中、独、日の順
- 日本は超伝導、強相関係の物質開発、薄膜化技術などに強み

トポロジカル物質の応用展開に関する国別論文数の推移



Web of Science, 2017.2.23時点

検索項目: トピック: (topological AND ("quantum comput*" OR spintronics OR photonic*))

- 2014～2015年にかけて論文数1.5倍
- 2016年時点で、米、中、独、日の順

工学

新しい技術的枠組みによるデバイス革新

- ◆ トポロジカルスピントロニクス(超小型/超高速磁気メモリ/センサ)
- ◆ トポロジカル量子計算(擾乱に頑健な演算)
- ◆ トポロジカルフォトンクス(ボード間・チップ間的高速・大容量化)
- ◆ フォノンクス、メカニクス、化学反応などへの応用展開

数学

新しい物質相の創出・制御

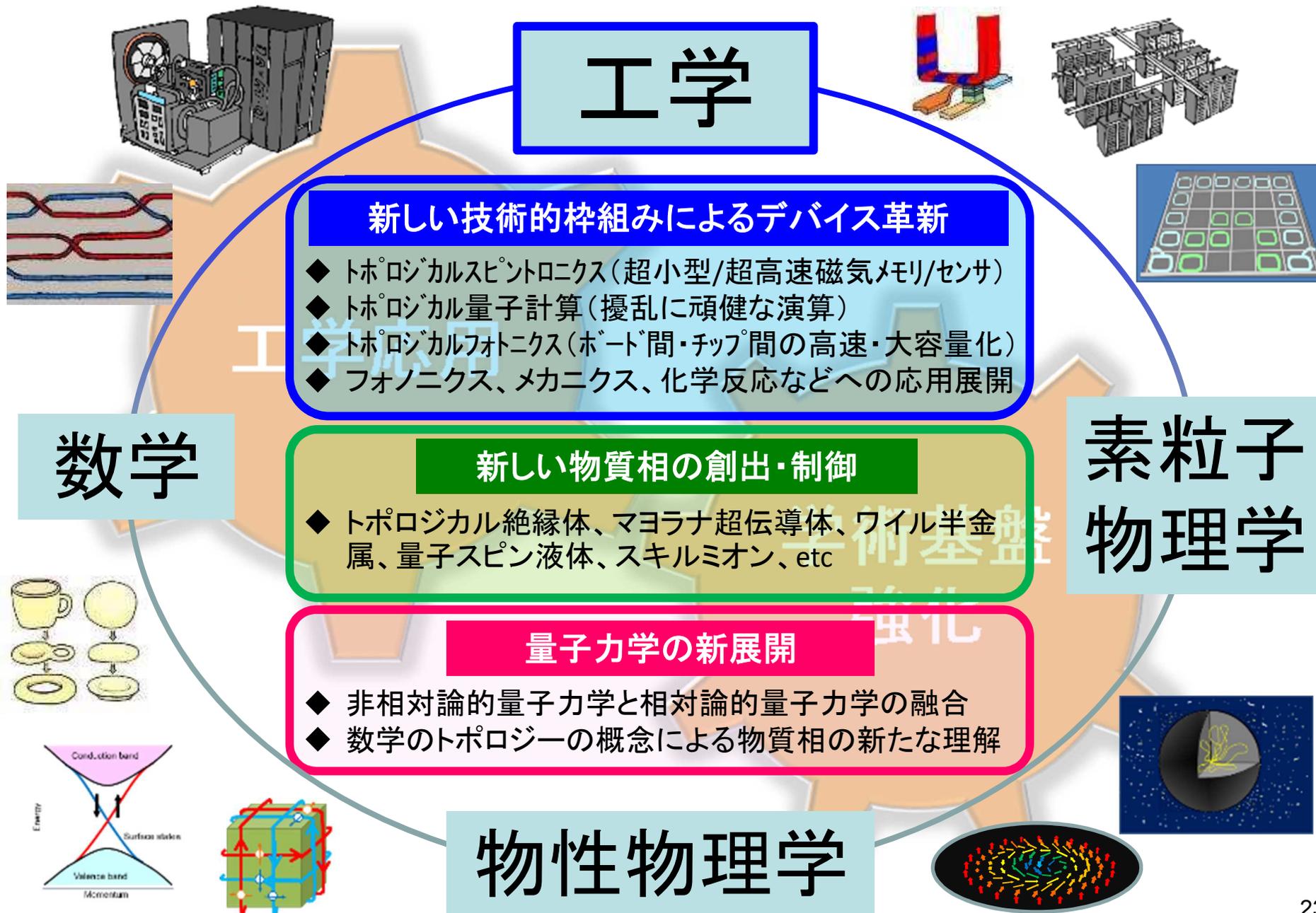
- ◆ トポロジカル絶縁体、マヨラナ超伝導体、ワイル半金属、量子スピン液体、スキルミオン、etc

量子力学の新展開

- ◆ 非相対論的量子力学と相対論的量子力学の融合
- ◆ 数学のトポロジーの概念による物質相の新たな理解

物性物理学

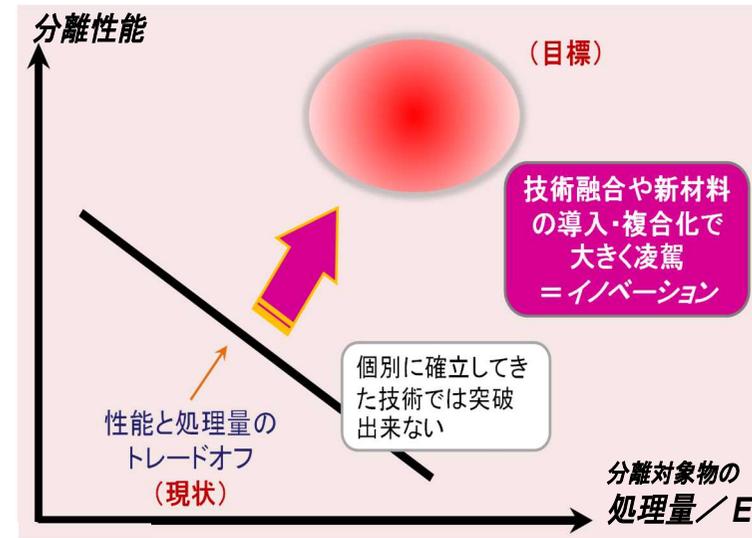
素粒子物理学



分離工学イノベーション



- H_2/CO_2 、 CO_2/CH_4 、 CO_2/O_2 、 CO_2/N_2 、 O_2/N_2 、 He/CH_4 、レアメタル、特定細胞・タンパク、細胞外小胞(エクソソーム)の精密分離等
- 気/気、気/液、液/液、固/液、固/固の多様な混合状態。分離の基礎理論や基盤技術は相互に共通項あり



3大分離ニーズ



石油化学産業におけるエネルギー消費は、全産業分野の約15%に相当、その内約40%が蒸留操作に伴う分離・精製

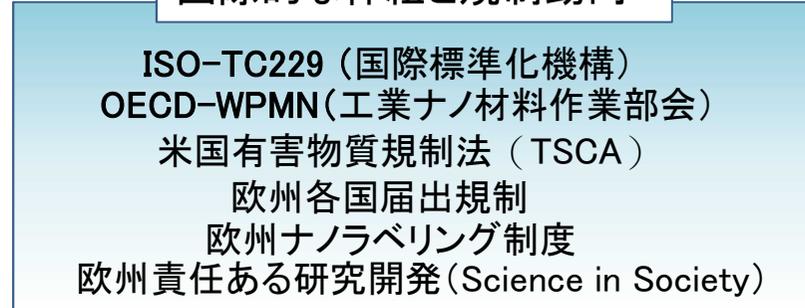
ナノテクノロジー-ELSI/EHS の戦略的取組課題



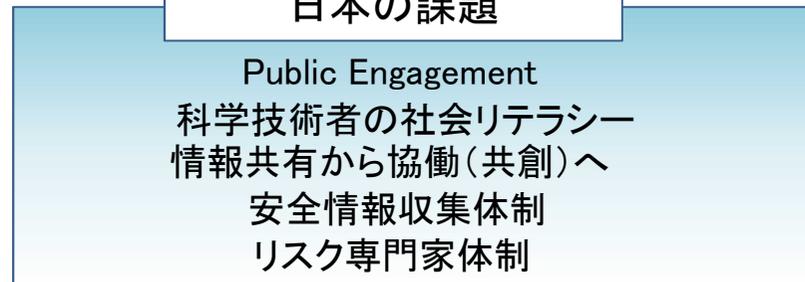
関連分野・項目



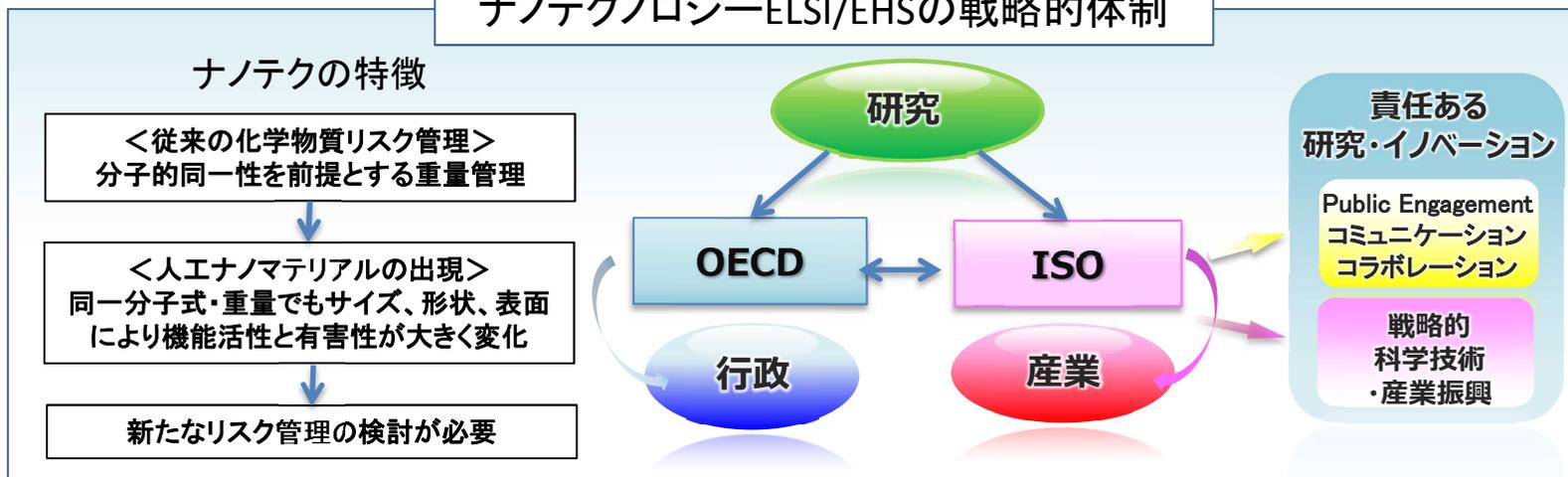
国際的な枠組と規制動向



日本の課題



ナノテクノロジー-ELSI/EHSの戦略的体制



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

基盤技術

科学

“分離工学イノベーション”
物質分離の科学技術

生体／人工物間のナノレベルの相互作用を可視化・解析

ナノスケール動力学からの機能材料創出

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

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、アクチュエータ、接着”

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”

“トポロジカル量子制御”
量子コンピューティング、スピントロニクス

“時空間分解スペクトロスコーピー”

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

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”

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

共通基盤科学技術

製造・加工・合成
フォトリソグラフィ 自己組織化

ナノスケール熱制御によるデバイス革新

マテリアルズ・インフォマティクス

ナノELSI/EHS産学官国際戦略対応

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

物質科学、量子科学、光科学、生命科学、情報科学、数理科学