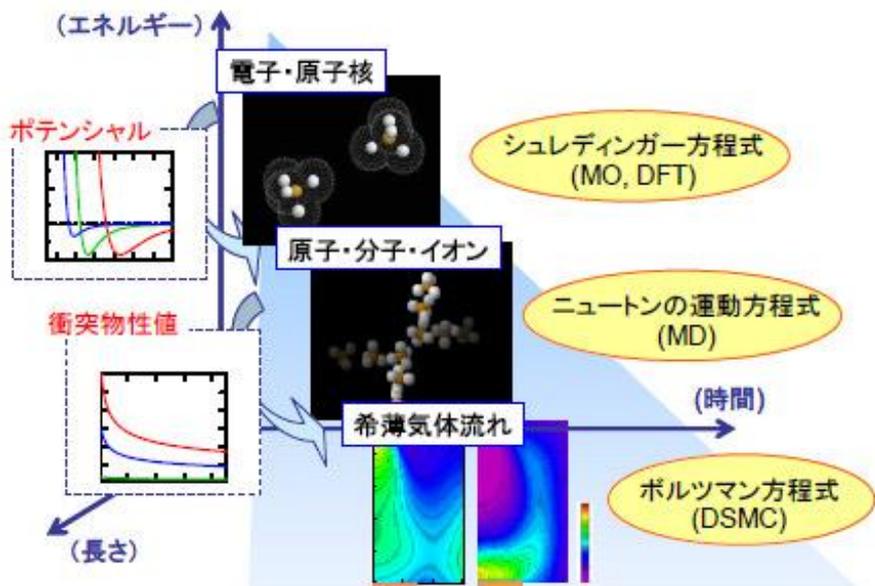
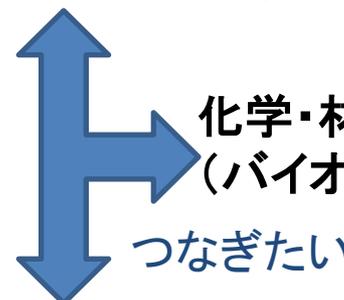


- 生物は極めて小さな脳や器官で省エネで知的活動に見える。
- 現在は人工的には再現できない。核となる共通基盤的な科学・技術の原理について現時点では見出されていない。
 - 自己組織化理論（生物法則）や鞭毛モーターなどの微小スケールでの作動機構（物理法則）と、人工的なエンジニアリングとのスケールギャップを越える方法論の検討。
 - 生物のゆらぎ（冗長性、確率的演算性）、非平衡性を材料、機械、システムにつなげる。
 - 生物の動態の多くは、通常何らかの反応（熱的変化や流れ）を伴って生じるため、これを物理・化学的に理解し、工学的応用につなげる



物理・生物物理、
応用数学、情報理論



化学・材料
(バイオミメティクス)

工学・ものづくり
(ロボット含む)

生物、
生命科学

出典：日本機会学会流体工学部門HPより

➡ これまでのバイオミメティクス研究とは一線を画す、生物機能情報を活用する方法論を構築することを指向することが求められる。

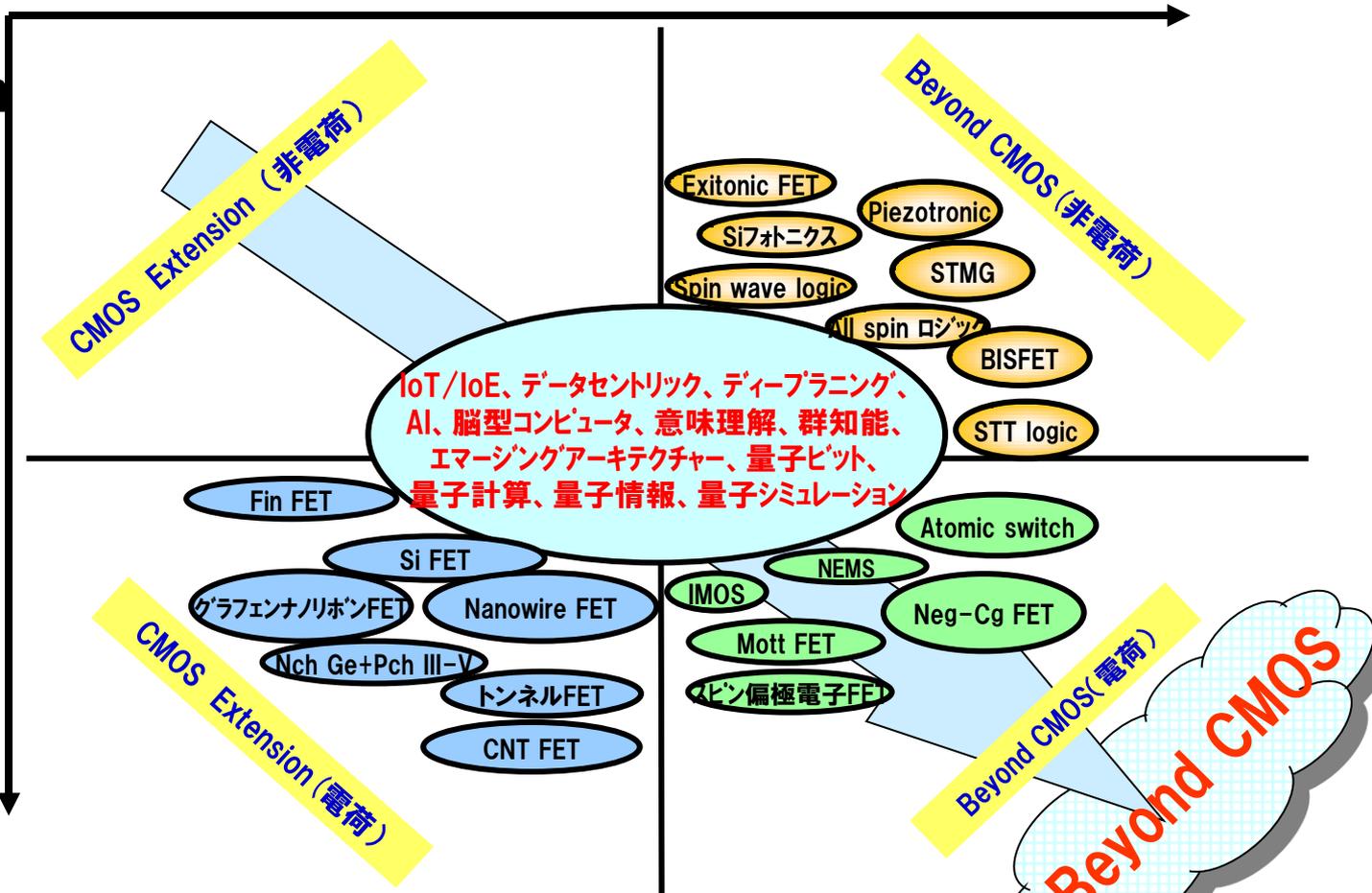
More than Moore: 多様化(異機能融合)

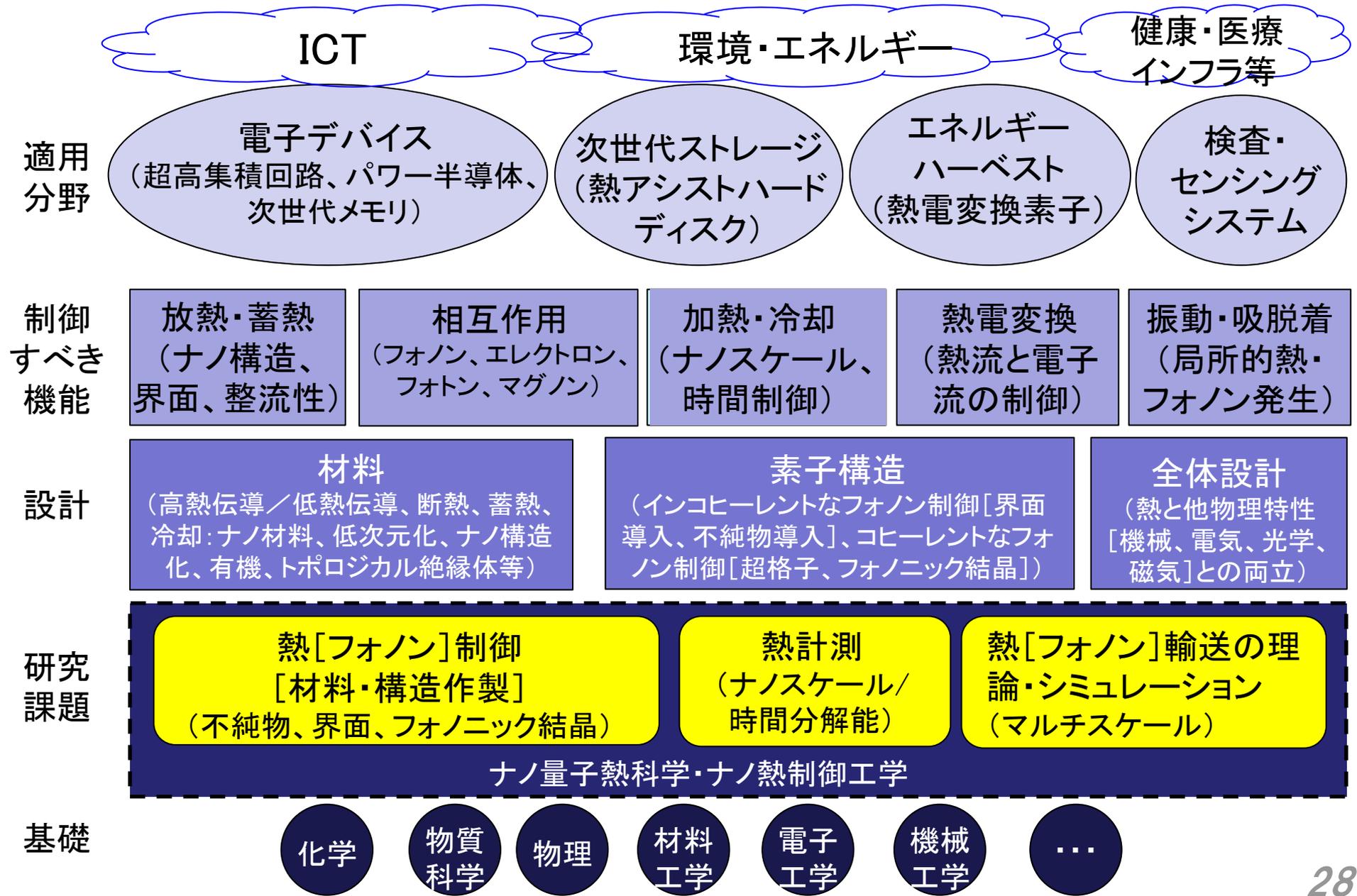
- アナログ/RF
- 受動素子
- パワーデバイス
- センサーアクチュエータ
- バイオ素子

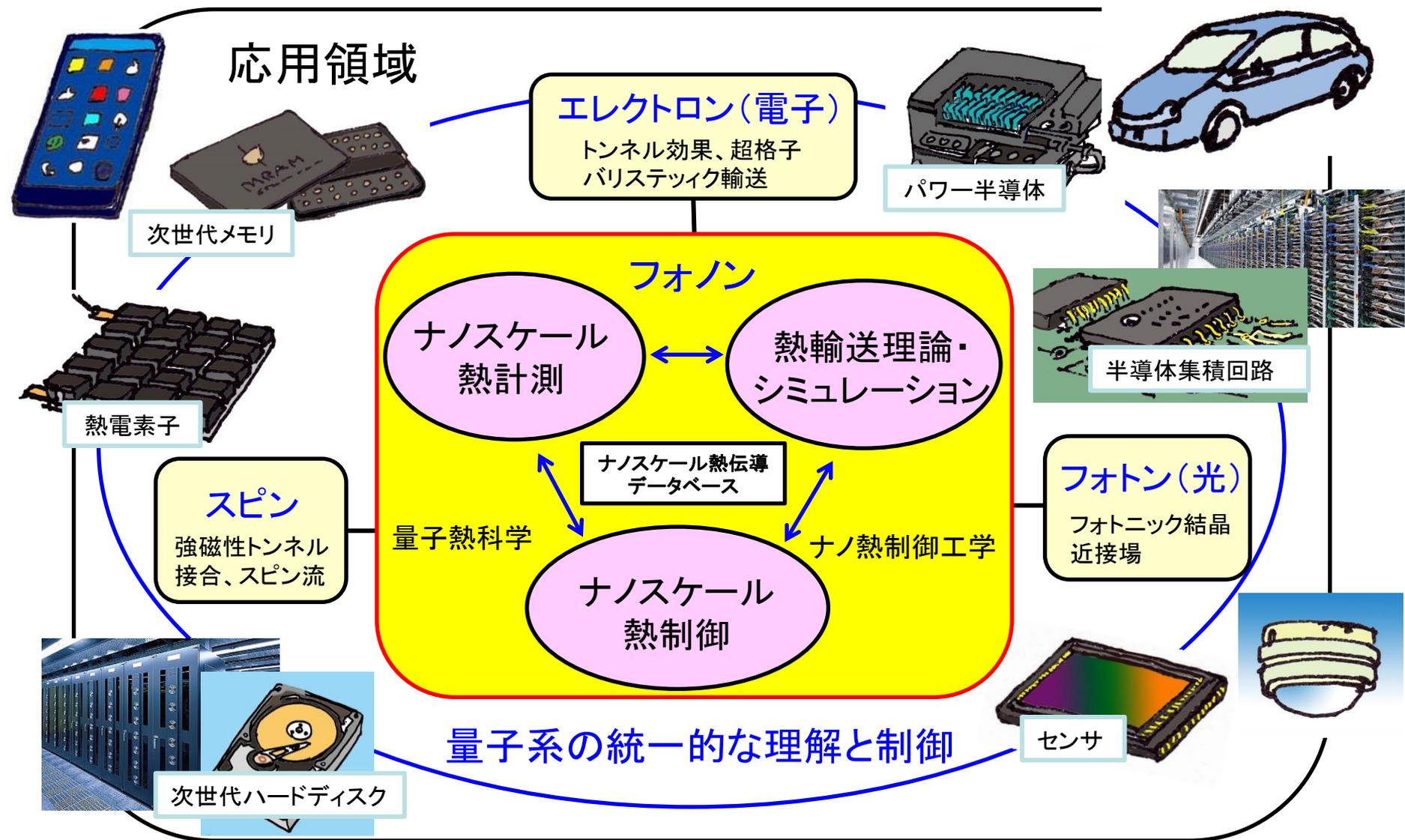
微細化の寸法

- 130nm
- 90nm
- 65nm
- 45nm
- 32nm
- 22nm
- 16nm
- 12nm
- 8nm
- ∴

More Moore: 微細化



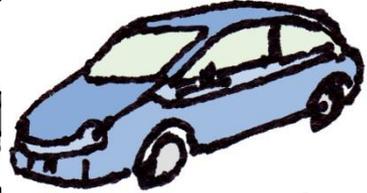




応用領域

エレクトロン(電子)
トンネル効果、超格子
パリストティック輸送

パワー半導体



次世代メモリ

スピン
強磁性トンネル
接合、スピン流

フォノン

ナノスケール熱計測 ↔ 熱輸送理論・シミュレーション

ナノスケール熱伝導データベース

量子熱科学 ↔ ナノ熱制御工学

ナノスケール熱制御



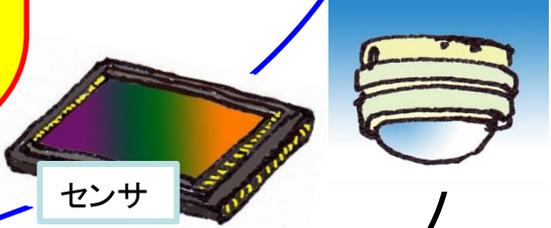
半導体集積回路

フォトン(光)
フォトニック結晶
近接場



次世代ハードディスク

量子系の統一的理解と制御



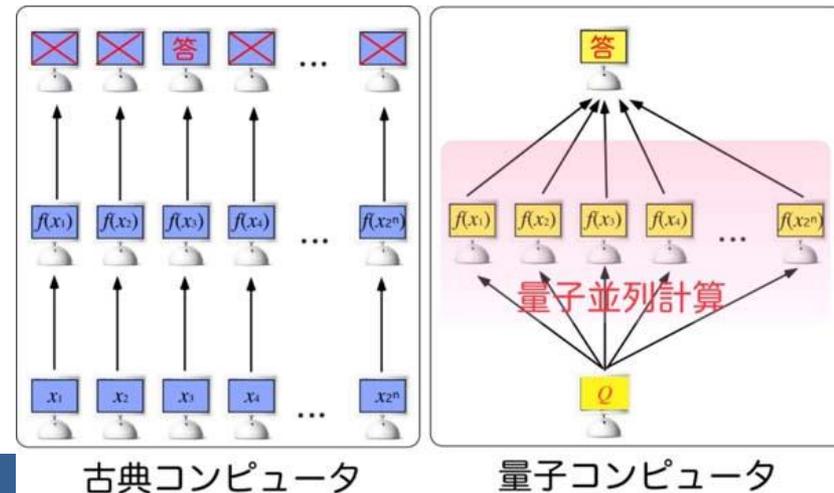
センサ

- ◆ 熱計測、理論・シミュレーション、熱制御(材料・構造作製)研究の一体的取り組み
- ◆ ナノスケールの熱伝導の知見を集めたデータベースの共有と活用
- ◆ デバイス高性能化へのフォノンとエレクトロン、フォトン、スピンとの統一的理解と制御

- トポロジカルな性質に代表される電子集団が創り出す新しい量子秩序状態が高い温度で発現可能になれば、極低温に限られていた演算やエネルギー的性質の自由度が増すとの期待
- 量子コンピュータがもたらす革新性、例えば組合せ最適化問題のような現在のスパコンでは有意の時間で解けない問題を一瞬で解くことや、飛躍的な機械学習の向上、人工知能への応用などへの期待
- 既存のアルゴリズムを超える新しい量子アルゴリズムの開発、多様な情報処理の可能性を提示

集団電子が創り出す新しい量子秩序の実現
・環境変化に極めて安定なトポロジカル秩序など
+
新しい量子アルゴリズムの開発

量子コヒーレンス時間の更なる向上
→(トポロジカル)量子コンピュータ
の実現



トポロジーとは、物質に切れ目を入れたり穴をうめたりせずに連続的に形を変えたときに、変形の前後で変わらない性質を議論する数学の分野。

日常生活で扱う大きさのものは、ニュートンの力学に従う。
電子は「量子力学」に従う。波動関数で表される。



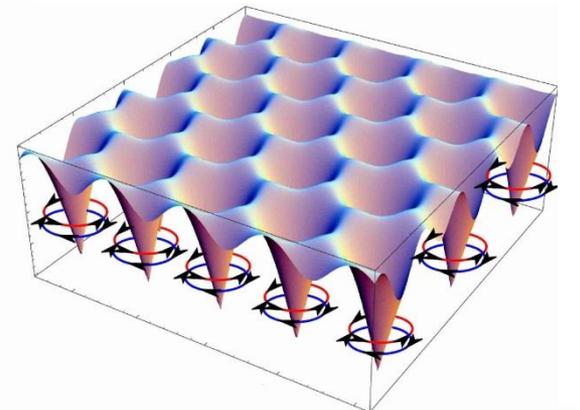
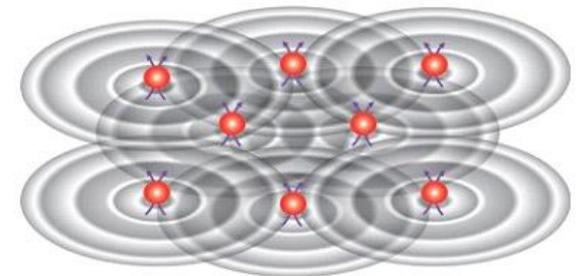
コーヒーカップ≡ドーナツ

ところが、新型の超伝導体や、新絶縁体、超流動体では、この波動関数の性質がすこし変わっているらしい。

物質の表面や端に「波動関数の性質がすこし変わった量子状態」が現れる

ex. 絶縁体なのに端の部分だけは金属のように電気を流す性質を持ったり、新しい超伝導体ではいつでも端のところに永久電流が流れたりする。

これらは、数学的に呼ぶところの「トポロジカル」な波動関数の仲間。 →新しい物質科学が拓きつつある



これらに特有に起きる新しいタイプの現象が「トポロジカル量子現象」

■ 室温でも量子効果が発現することを提示

- 2010年3月、東北大金研のグループが室温において電気信号をスピンの変換して絶縁体に注入し、絶縁体中を「スピン波」として伝送し、再び電気に変換することに世界で初めて成功
- 2015年11月、東大物性研のグループが世界で初めて反強磁性体(トポロジカル絶縁体)での異常量子ホール効果(室温以上の温度領域でも発現)を発見

■ 室温超伝導が実現可能であることを示唆

- 2015年9月、独マックス・プランク協会のグループが1500億Pa(大気圧の150万倍)の超高压下で、硫化水素が203K(-70°C)で超伝導状態になることを発見

■ トポロジー量子コンピュータが実現可能であることを示唆

- 2016年1月、東大のグループがトポロジカル絶縁体と超伝導体の接合において「トポロジーに保護された超伝導」に繋がる状態を観測することに成功

◆ 日米+カナダがこれまで研究を牽引

- 1980~1990 米国で量子コンピュータの概念提唱(ベニオフ、ファインマン、ドイッチェ)
- 1994 ショア(米)により素因数分解を超高速で行うアルゴリズム開発
「現在のRSA暗号が一瞬にして解読可能」 [学会、産業界が量子コンに注目](#)
- 1998 西森他(東工大)が[量子アニーリング理論](#)を提唱
- 1999 中村他(NEC)が超伝導回路で量子ゲート(1ビット)を実現
固体素子で量子ゲートが実現できることを実証、[集積化の可能性を提示](#)
- 2000~ *以降、量子コンピュータの基礎研究が継続(量子コヒーレント時間が劇的に増大)
- 2011 D-Wave System社(カナダ)が量子アニーリングに基づく[量子コンピュータ開発](#)
- 2013 D-Wave社が2号機をGoogle+NASA (Quantum AI Lab.)、ロッキードマーチン、ロスアラモス国研に納入

D-Wave 2X 量子コンピュータ

◆ 2つの方式で開発が進行

・量子ゲート回路方式

暗号解読、DB高速検索、新規化合物設計
高速性は保証されるが、まだ実験室レベル

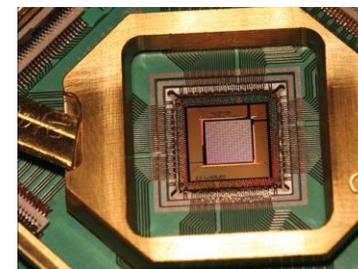
・量子アニーリング方式

最適化問題適用(組合せ問題、機械学習)
高速性は解く問題に依存、試作機レベル



低温冷却+電磁シールド、メンテ用
スペースが大きな容積を占める。

消費電力10kW程度のほとんどが冷却用
→ スケールアップしても消費電力は変わらない



心臓部のチップは1 cm四方程度

■ 米国

- IARPA関連のQuantum Enhanced OptimizationプログラムとLogical Qubitプログラムを2015年に開始。
- Microsoft社、Google社らが個別に量子計算・人工知能研究所を設置
- Google社とNASAはD-Wave社の量子コンピュータを購入

■ 欧州

- 英EPSRC Quantum Technologiesプログラムに5年間で£270Mを投入
- UK Quantum Technology Hubに£120Mを投入
- 蘭デルフト工科大QuTechに10年間で€135Mを投入。さらに、Intel社がシリコン量子コンピュータ開発のために\$50Mを投資

■ 中国

- 中国科学院にアリババ社が共同研究所を設立。量子計算・量子人工知能の製品化を目指した研究開発を加速

■ 日本

- 山本ImPACTで、量子シミュレーション、量子通信、量子回路方式量子計算を開発

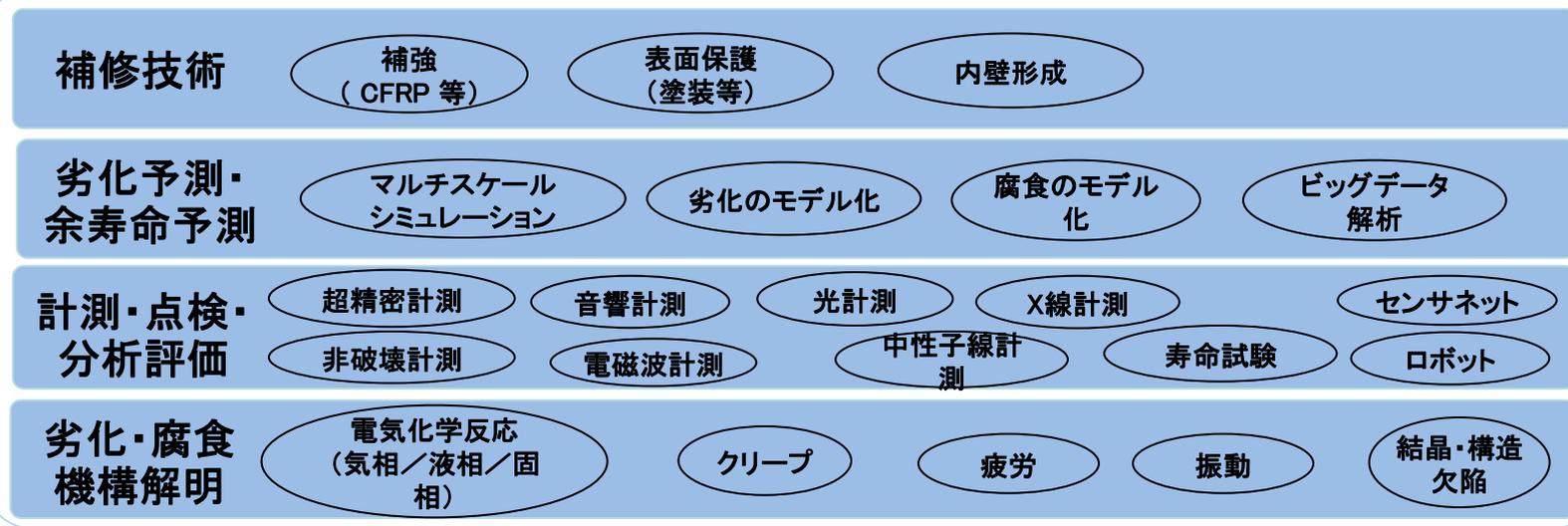
社会

社会インフラ維持管理

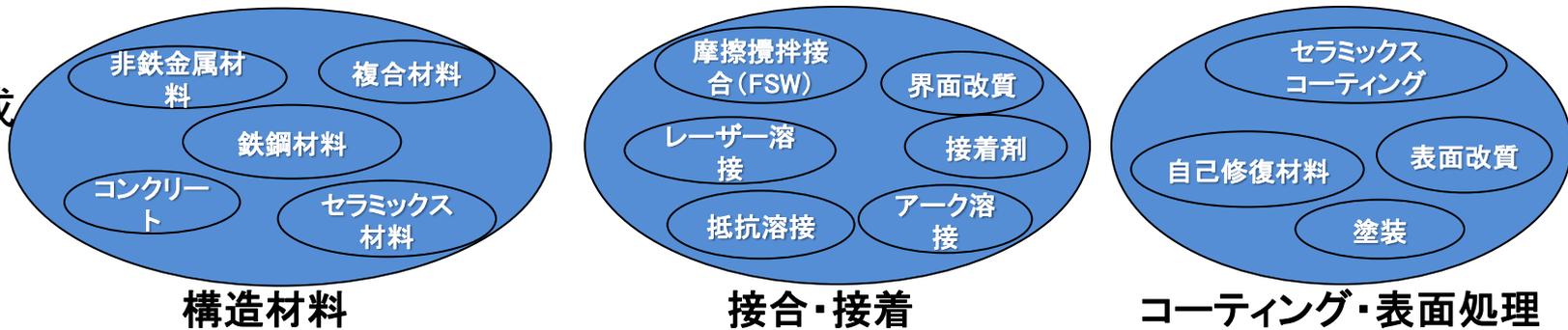
応用・システム

交通 ・道路 ・トンネル ・鉄橋	上下・水道 ・浄水場 ・下水処理場 ・上水管 ・下水管渠	電力 ・送電 ・発電所 ・変電所	ガス ・高圧ガス タンク ・ガス管	通信 ・基地局 ・通信ケーブル	* * * ・	* * * ・
----------------------------------	---	----------------------------------	-----------------------------------	------------------------------	------------	------------

点検・保守技術

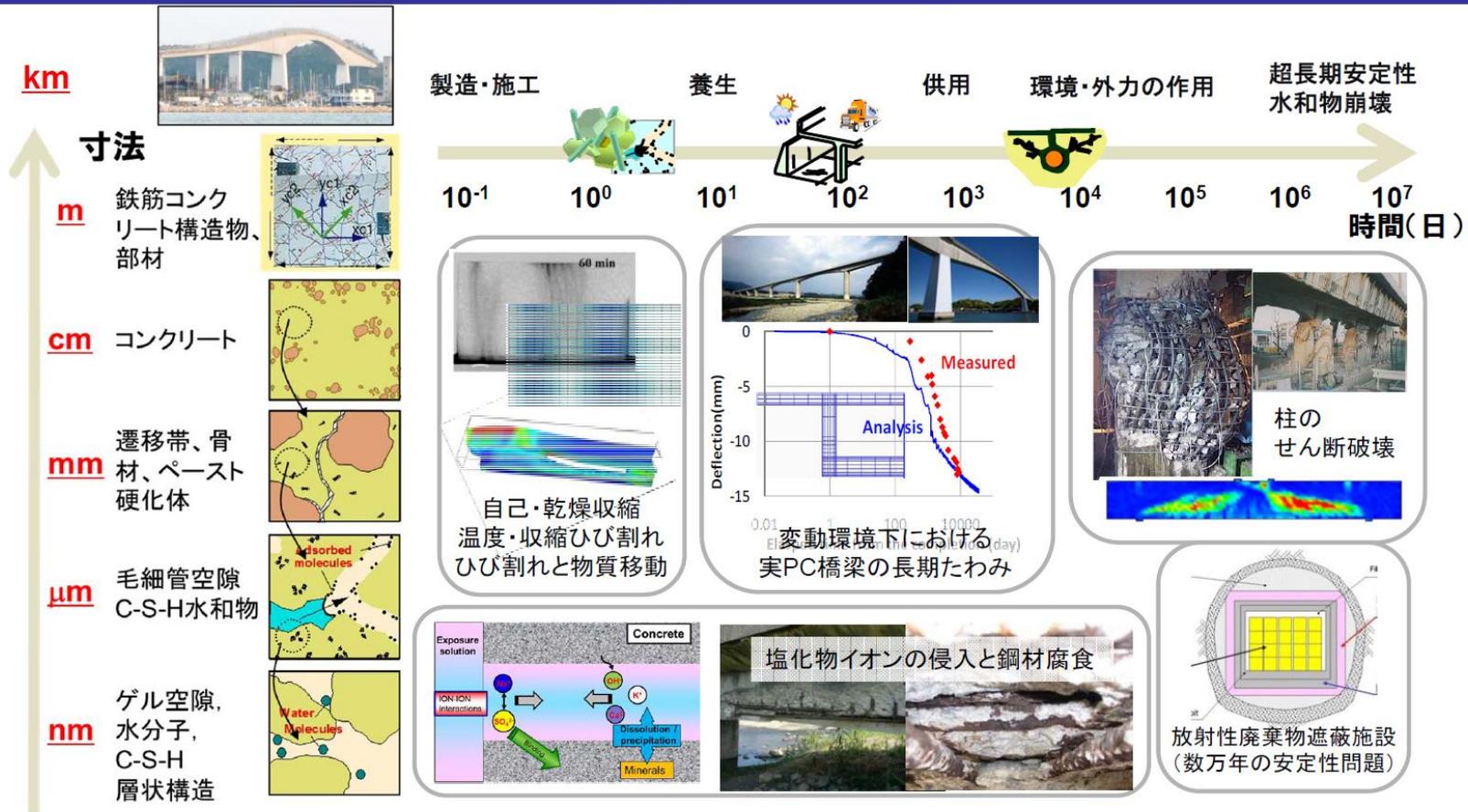


構造形成技術



インフラ材料劣化マルチスケールシミュレーション

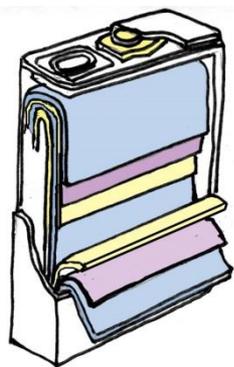
Multi-Scale & Multi-chemo-physics Modelingと統合解析手法の開発



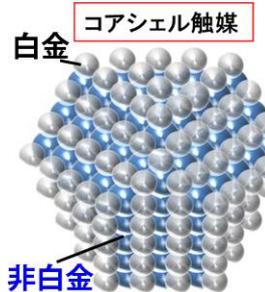
- 10⁻⁹メートルから10³メートルスケールをカバーする**20の支配方程式**、**400超のグローバル共有変数**、**数十の材料化学、熱力学、地球化学、力学モデルを連成解析**することで、若材齢固体形成から超長期の地圏環境を含むインフラ空間の性能予測を行う数値プラットフォームを構築 (FEM Program)
- 材料組成、構造諸元、施工条件を入れるのみで、時々刻々と変わる構造物の性能を予測可能。事前のパラメータフィッティングを必要としない一般化解析手法

- 劣化現象の科学的な理解や、複雑な劣化機構のモデリング・計測・評価、寿命予測、修復、さらに劣化し難い新材料、長寿命の接合・接着技術、耐蝕コーティング技術
- 劣化の要因である、疲労、クリープ、脆化、腐食、これらの状況を長期的に把握し、対策を採ることが不可欠
- 特に鉄鋼材料の腐食は電気化学反応によるが環境に大きく影響され複雑。いまだ腐食機構の理解ができておらず、予測もできていない
- 最先端評価手法による劣化の可視化と機構解明、**複雑に絡み合う諸反応のモデル化、同時シミュレーション技法**、データから**劣化と寿命の関係抽出**
- ナノ・マイクロからマクロ領域の空間スケールや時間スケールを統合的に扱える**マルチスケール・シミュレーション技術**
- **放射光や、深部まで評価可能な中性子線**。計算機パワーの増大で、従来では難しかった**溶接工程のシミュレーション**。**マテリアル・インフォマティクス**も活発化。技術基盤の進展が見られる
- 金属・高分子・複合材料との**接合・接着技術、耐久性**
- 社会インフラの補修・補強の長期計画策定へ。効率的な維持管理システム

- 生命科学やエネルギー・環境用途の材料において、水中や大気中、表面ナノ形状や異種界面の接合、摩擦の状態など、多様な環境場におけるオペランド計測へのニーズが増している
- この新しい計測技術の流れを通じて、蓄電池、触媒科学、トライボロジー、生命科学の発展のドライバーとなる



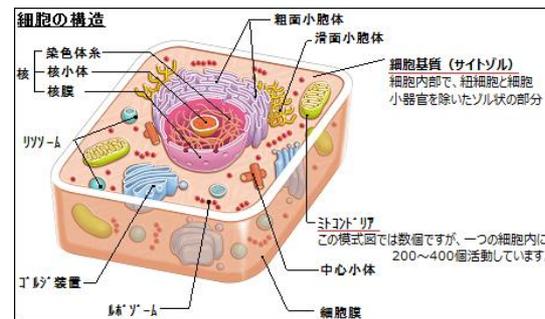
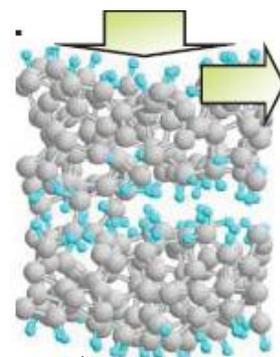
2次電池



触媒

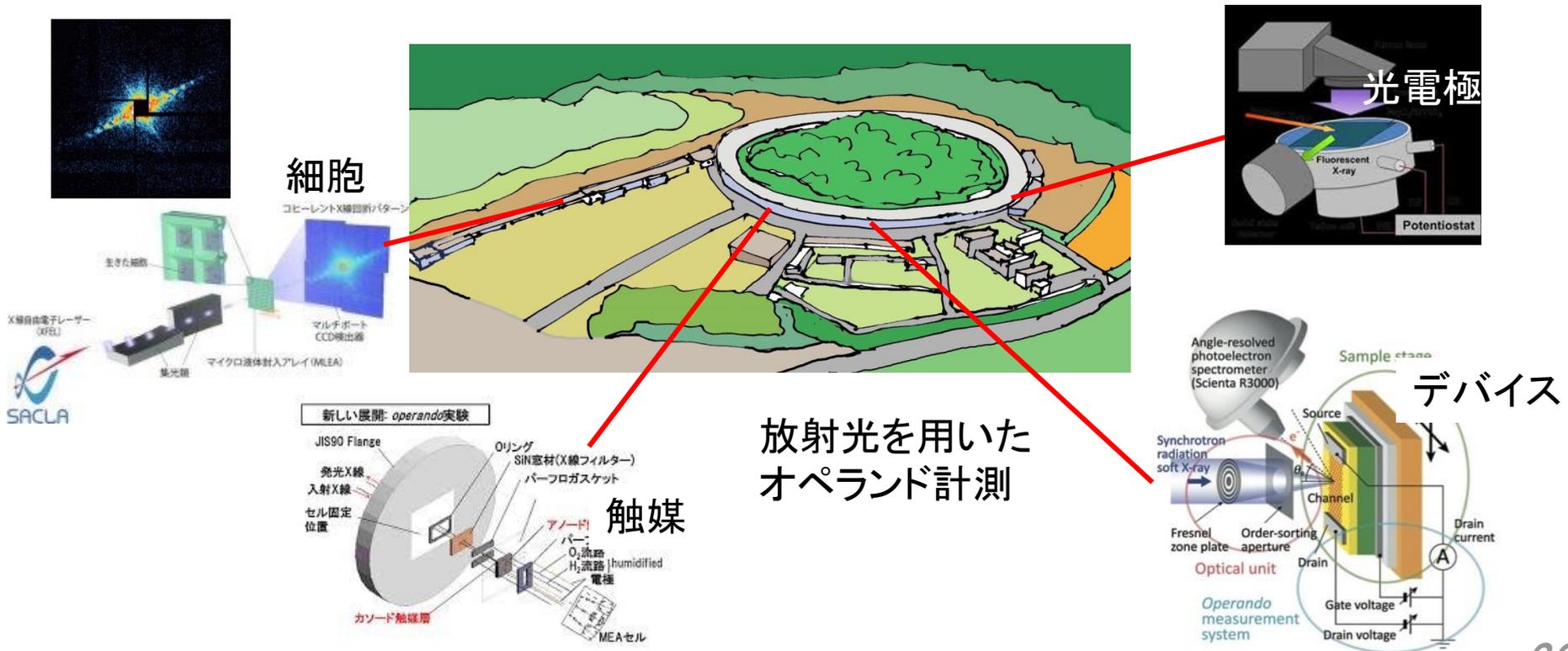


トライボロジー



生命科学

- 物質から生物にわたる広範囲の現象に対し、先端計測技術を用いたオペランド(実動作下・実環境)観測を適用し解析する。
- 新物質の探索、電池・触媒・デバイス等の開発、生命現象の解明を図るとともに、新材料創成、生物生産などにおけるイノベーションを目指す。



物質・材料研究は、従来の『様々な物質合成 → 様々な物性測定による解析』といったアプローチから、『“既存の物質のデータベース + 元素の制約条件” → DFTによる電子状態計算 → 物質合成』に変わりつつある。

今後、この流れをさらに一歩進める、第4の科学（データ科学）が大きな貢献

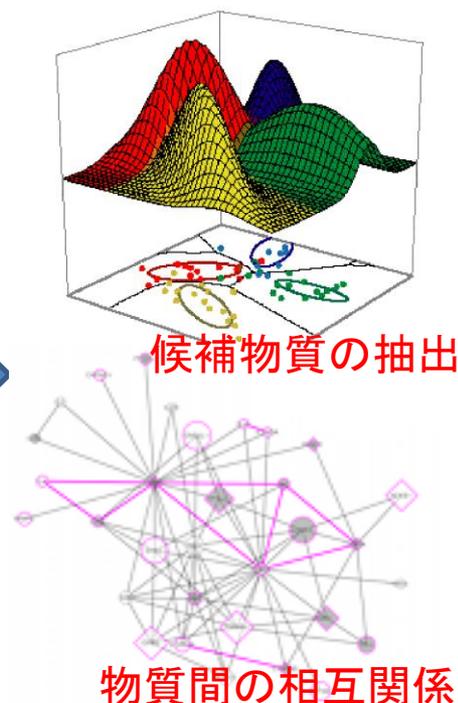
①データベースの構築



②データの収集・統合



③データマイニング、機械学習、モデリング



④可視化、バリデーション

ハイスループットな新規機能物質の発見

実験による検証
理論による理解

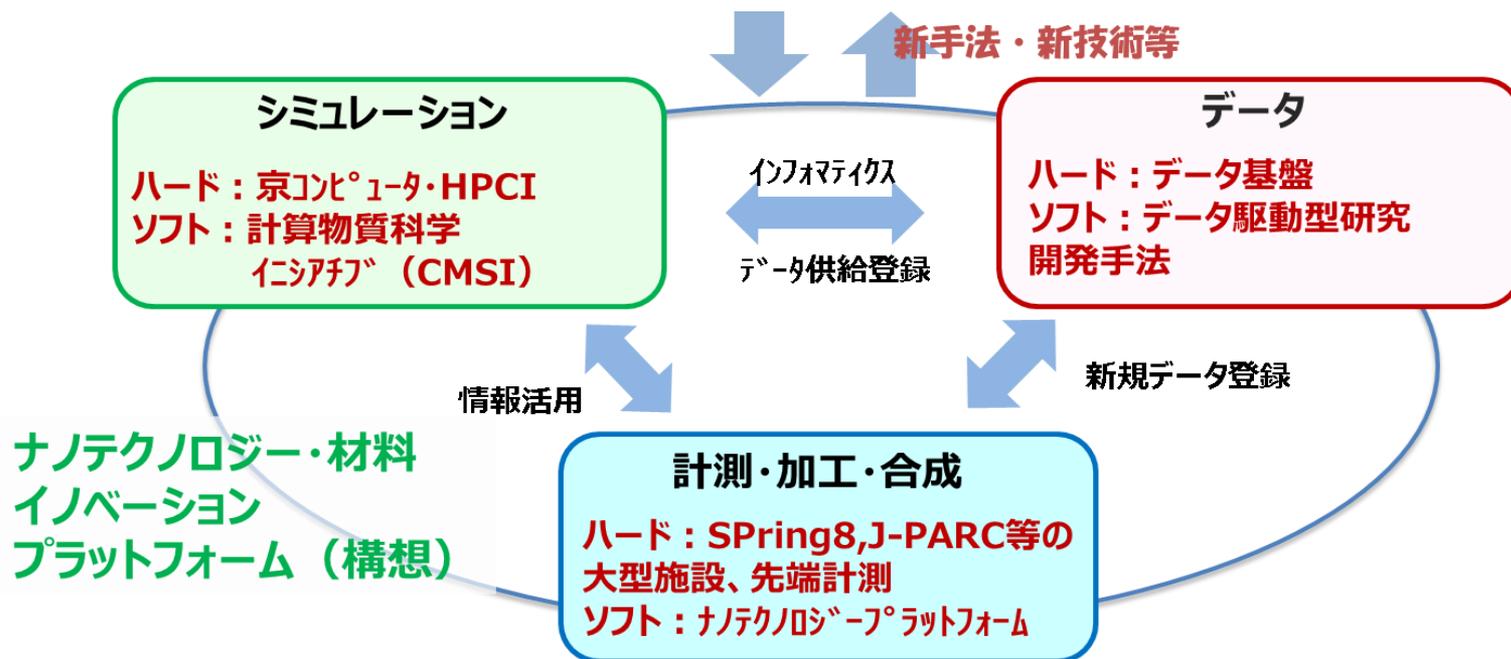
構造と物性のある法則の理解

日本全体をカバーする研究開発環境 イノベーションプラットフォームの確立

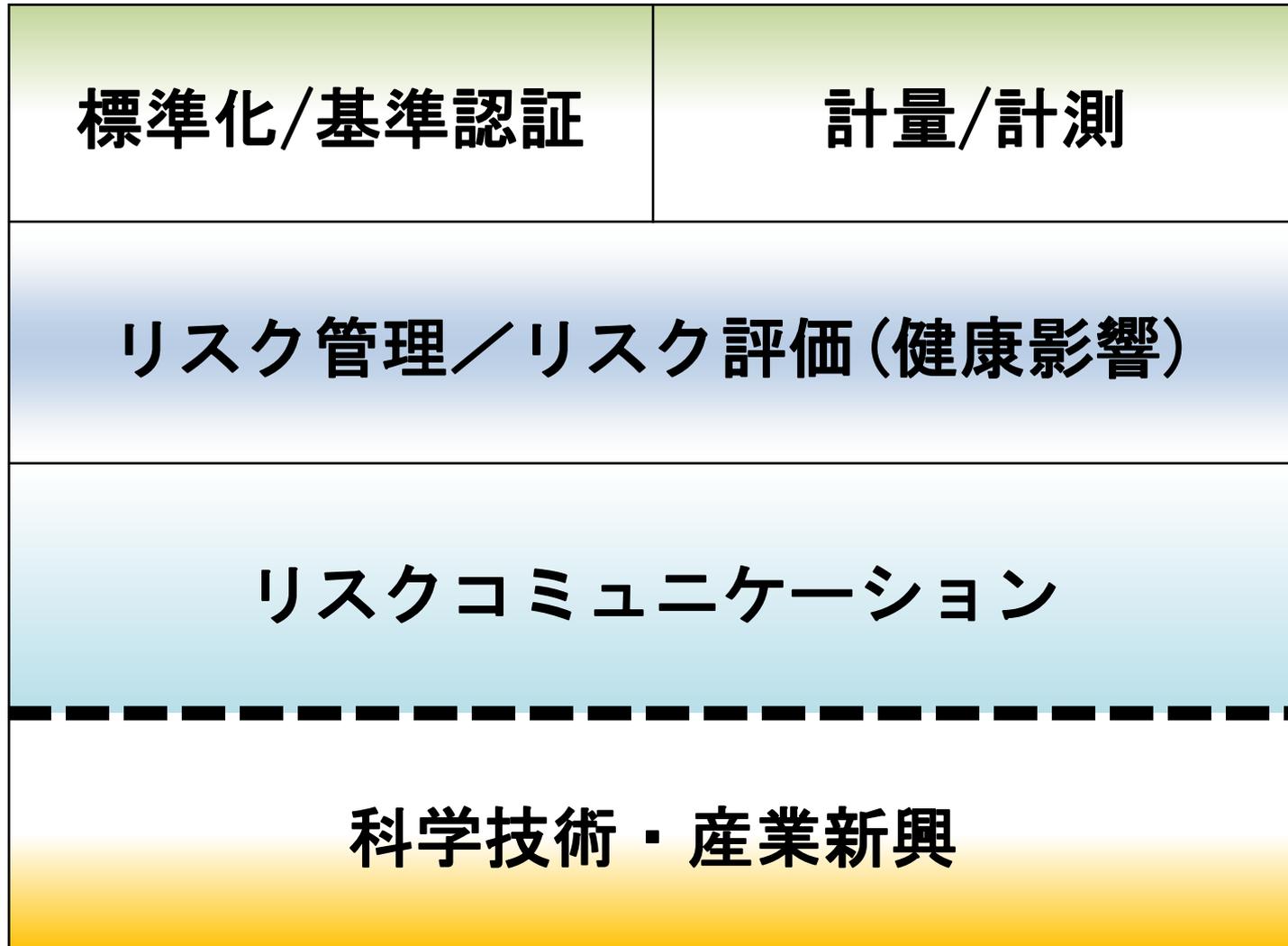
- サイエンスに立脚して戦える共通場の構築: 技術融合をドライブし、技術シーズの市場化へ産官学連携のナノテク・材料研究開発プラットフォームの構築
- ハブ拠点の整備と並行して日本全体をカバーするネットワークの構築が重要
- 研究開発の投資効率を最大化させ、基礎研究から産業化までのスピードを加速させるためには、多様な専門家集団が集結可能な、このような最先端設備・知識インフラを日本全体をカバーするプラットフォームとして整備し、持続的に発展させる仕組みを持つことが重要

出口を志向した広範なアカデミア、産業界の研究

“課題解決型プログラムでの活用 (ALCA、元素戦略、SIP、ImPACT等)”



課題: 材料データ拠点の構築、研究への技術支援強化、3拠点の密な連携



- ナノテク・材料研究開発において必須 ELSI/EHS側面への取組
- ★ ELSI : Ethical, Legal, and Societal Issues 倫理・法・社会関連課題
 - ★ EHS: Environmental, Health, and Safety 環境・健康・安全面

ヒアリングやこれまでの俯瞰調査・俯瞰ワークショップを通じて抜粋した課題項目

1 ナノマテリアルの毒性カテゴリー分類の難しさ／世界

- 1) 本質的な生物影響要素解明の難しさ(粒子性状・物性との相関)
- 2) 投与、体内動態での真の粒子性状把握難(実態はミクロン凝集体か)
- 3) 分散前処理標準化の難しさ(分散技術もナノテク)

2 リスク評価研究体制の不足／日本

- 1) 産官学の個々(点)の研究貢献大なるも広がり(面)が不足
- 2) 研究分野として欧米に比べ層が薄い(毒性研究者の不足)
- 3) 毒性研究－ナノ材料製造研究 などの分野間の協業が少ない
- 4) 産官学いずれもタテ割りの傾向、全体司令塔が不明瞭

3 新興技術としての戦略的取組み*の不足／日本(*別紙参照)

- 1) 産業はリスクに正面から取組みにくい(ベンチャーには負担大)
- 2) 規制、標準化を含めての包括的な産業振興戦略が欧米に比べ弱い
- 3) 社会受容 早期からの市民との対話、教育、コミュニティ形成が望まれる
- 4) 欧・米は確実に予算を確保(安全保障、災害対策..)

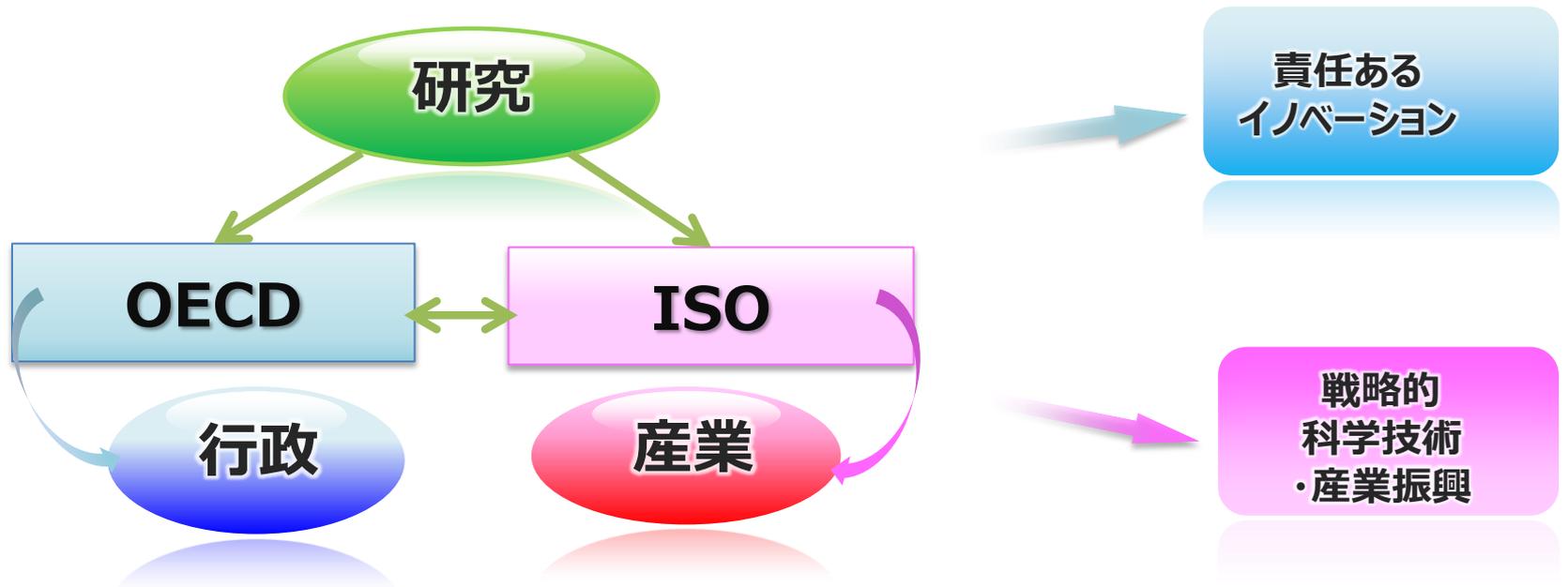
適切な推進・規制の在り方などを含めたルール整備や、コンセンサス形成の方策を、産学官民協力で。そのための府省横断検討会等の設置が求められる

日本企業・研究機関発の詳細なリスク評価データは各国当局へ提出するものの、国内には統一的に蓄積されていない現状。

今後期待される新たなナノ材料(ex. グラフェン、セルロースなど)をどう推進するか問われる。

研究初期から社会コンセンサスを考慮する「責任あるイノベーション」の体制構築は国際的にみて遅れている。

同時に、欧米のように独自の体制を設けることで、「戦略的な科学技術・産業振興」として組み込むことも重要である。各国の動向分析とコミュニケーションとともに、日本の戦略は必須



戦略的な科学技術・産業振興

- 1) 安全性評価での産官学共同研究への貢献を評価
- 2) REACH(TSCA)に見られるバリュー・チェーン規制
- 3) 化学物質および微細粉塵の安全保障上重視、材料毒性評価研究機関の充実

Lloyd Whitman, White House

<予算>

- ・NNIは連邦政府20省庁と関連機関が関与。2001年からの総額は\$22Bに上る。過去4年は概ね安定して毎年\$1.5Bを確保。
- ・NNI予算は、保健福祉省(HHS、大部分がNIH)が31%で最大、次いでNSFとDOE、この3機関で全体の80%を占める。残りはDOD、NISTと続き、これら5つで全体の96%を占める。

<経済効果>

- ・ナノテクに関する商業分野の世界的収益は2010年の\$339Bから2012年は\$731Bまで成長、2018年までには\$4.4Tに達すると予測。(Lux Research社)
- ・これまでの商品化の成功例は、ナノ粒子添加剤コーティングなど。NNIから商品化に成功している例は多数。
- ・成功例からもわかるように、ナノテクは広範な分野で様々な形で使われる。政策立案者は、これらの多様性を十分に考慮する必要がある。

<今後の課題>

- ・技術を商業化していくために、NNIを取り巻く環境を再び活気あるものにしていくことが課題。NNIを取り巻くあらゆる分野の団結のために成すべき事として、国民への参加と周知、教育、研究開発、及び環境問題や、これらの物質の商品の健康や安全に対するリスク、倫理的、法的、社会的問題点を広く知らせることによって、商業化を促進し、それにより国民は経済的な恩恵を得ることができる。

Create a new type of computer that can proactively interpret and learn from data, solve unfamiliar problems using what it has learned, and operate with the energy efficiency of the human brain

- Announced on 10-20-15 by the WH Office of Science and Technology Policy
- **Moving beyond conventional (von Neumann) computing architectures** to make computers that can solve problems faster than conventional computers and require much less energy

- 米粒よりも小さなコンピュータデバイスを、配線・メンテナンス無しで10年稼働できるようにし、IoTに革命を与える。
- 低消費電力で100倍高速のコンピュータを実現する。
- 原子レベルの精度で材料を製造し、アルミニウムの50倍の強度と、半分の軽量化を、従来と同じコストで実現する。
- 海水淡水化のコストを4分の1にする。
- ナノ物質の環境影響、健康影響、安全性評価を判定可能にする。