

戦略プロポーザル

みんなの量子コンピューター

-情報・数理・電子工学と拓く新しい量子アプリ-

JST CRDS

システム・情報科学技術ユニット

嶋田義皓

In collaboration with

木村康則¹⁾、辻真博²⁾、津田憂子³⁾、日江井純一郎⁴⁾、福島俊一¹⁾、的場正憲¹⁾、宮下哲⁵⁾、鹿島泰介⁶⁾、永井諭子⁷⁾、藤田維明⁸⁾

¹⁾CRDSシステム・情報科学技術ユニット, ²⁾CRDSライフサイエンス・臨床医学ユニット, ³⁾CRDS海外動向ユニット, ⁴⁾CRDS科学技術イノベーション政策ユニット, ⁵⁾CRDSナノテクノロジー・材料ユニット, ⁶⁾未来創造研究開発推進部, ⁷⁾研究プロジェクト推進部, ⁸⁾監査・法務部

戦略プロポーザルのポイント

背景：ポストムーア×IoT・ビッグデータ・人工知能＝新計算原理

微細化によるコンピュータの性能向上は限界を迎えている反面、Society5.0実現・SDGsなどIoT・ビッグデータ・人工知能関連の計算要求は高まるばかり。次世代のコンピュータの基礎となる新しい計算パラダイム・計算機システム実現技術として近年注目されているのが「量子コンピュータ」である。

現状・課題：ハードウェアとアルゴリズム間のギャップ

Shorの因数分解やGrover検索などの量子アルゴリズムには1~100万qubit必要。しかし、今後10数年で提供可能となるハードウェア（100~1000qubit程度、エラー率も課題）との間には大きな隔たりがある。

解決策（提案）：ソフトウェア・アーキテクチャ研究の充実

このギャップを埋めるには、以下に挙げるソフトウェア・アーキテクチャの研究開発の充実が必須である。

- (1) 古典・量子ハイブリッドアルゴリズムの開発・実装・実証
- (2) 量子ソフトウェア開発環境の整備
- (3) 量子誤り訂正符号に基づくアーキテクチャー設計

推進方法：分野融合・企業参画・国際連携

- (1) 量子コンピュータ研究開発ネットワークとハブ拠点
- (2) コミュニティ・エコシステムの醸成
- (3) 量子コンピュータ教育・訓練

応用のトレンド・技術のトレンド

応用のトレンド

Society5.0

SDGs

革新的 コンピューティング

ビッグデータ解析 機械学習 特徴量抽出 画像・メディア処理 組合せ最適化 暗号処理 符号化・復号

量子キラアプリ？

フォン・ノイマン型 (プログラム方式)	近似計算	ニューラルネット (深層学習)	ニューロモルフィック	イジングモデル	量子計算
2D実装	2.5D・3D実装	近接場結合	光配線	液冷、低温動作	
デジタル回路 (CPU、GPU)		布線論理回路 (FPGA、DRP)	アナログ回路	超伝導SFQ、光回路	
CMOS シリコン	TFET メモリスタ	原子スイッチ、強誘電体素子、抵抗変化素子		超伝導素子、ナノフォトニクス素子、NVセンター	

ムーアの法則の終焉 技術のトレンド

40 Years of Microprocessor Trend Data

IEEE **rebooting** COMPUTING

Goal: Rethink Everything: Turing & Von Neumann to now

Why IEEE? Pre-competitive, Inclusive, Worldwide

新デバイス、 非フォンノイマン

量子技術2.0 ～量子もつれの積極利用～ 量子ICT?

量子技術2.0
量子状態の
精密制御

量子技術1.0
量子力学に従う
電子の制御

不確定性原理

バンド構造

トンネル効果

エネルギー準位

半導体技術

量子干渉

EPR相関

量子もつれ

マクロ量子現象

ベル不等式

複製不可能定理

ホログラフィー原理

量子テレポーテーション

猫状態

相補性

量子センサー

**量子暗号・
量子通信**

**量子コン
ピューター**

**量子シミュ
レーション**



光通信

ICT

量子技術2.0 政策動向

*1 量子制御

*2 SIP「光・量子技術基盤分野」で研究開発項目として含まれる

*3 極短パルスレーザー、次世代レーザー加工

政策動向	内容・予算規模	量子技術分野					
		Sens	Comm	Comp	Sim	Etc.	
アメリカ	<p>国家科学技術会議（NSTC）下のWGがレポート発表（2016.7）。米国の科学的リーダーシップ、国家安全保障、経済的競争性を構成する重要技術として特定。2018年9月には、「量子情報科学の国家戦略概要」を発表した。</p>	<p>>1400億円/5年</p> <ul style="list-style-type: none"> 量子コンピューティング研究法（コンソ設立） 国家量子イニシアティブプログラム（グラント、研究センター新設など） 	●	●	●	●	
欧州	<p>欧州委員会の求めに応じ、ロードマップ「Quantum Manifesto」を産官学でとりまとめた（2016.5）。長期の富の創出、安全保障、産業創出の観点で重要と位置づけた。</p>	<p>>1250億円/10年</p> <ul style="list-style-type: none"> Quantum Technology Flagship プロジェクトを2019年より開始予定。 	●	●	●	●	
イギリス	<p>EPSRCが「National Quantum Technologies Programme」を開始（2014.12）。この投資により、量子技術分野での主導的地位を確実にし、通信、医療、安全保障などの世界市場の形成を目指す。</p>	<p>>450億円/5年</p> <ul style="list-style-type: none"> 4つの拠点大学でそれぞれ研究開発を推進。ハブ整備のために、1.2億ポンド/5年の資金投入（上記に含まれる） 	●	●	●	●	
ドイツ	<p>連邦教育研究省（BMBF）が「量子技術—基本から市場へ」を公表（2018.9）。政府主導により量子技術の開発を促進し、応用・市場化で第二の量子革命を目指す。</p>	<p>>860億円/4年</p> <ul style="list-style-type: none"> フレームワークプログラムにより2022年までに、グラント、研究ネットワーク形成、フラッグシップPJ確立、セキュリティ確保などを措置する。 	●	●	●	●	
中国	<p>科学技術イノベーション第13次五カ年計画（2016）の重点分野として量子技術を指定。重大科学技術プロジェクト、基礎研究強化などにそれぞれ位置づけた。</p>	<p>>1200億円/5年</p> <ul style="list-style-type: none"> 「量子情報科学国家実験室」を合肥市に建設中。2020年完成予定。約70億元（～1190億円）。 「国家重点研究計画」で量子制御・量子情報の大規模グラント実施中（>3億円・5年/チーム）。 CAS-Alibaba Quantum Computing Laboratoryを設立。3,000万元/年（～5億円/年）の投資。 	●	●	●		● ^{*1}
日本	<p>文部科学省 量子科学技術委員会が「量子科学技術（光・量子技術）の新たな推進方策」を発表（2017.8）。超スマート社会における新価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術として重視。</p>	<p>>50億円/年</p> <ul style="list-style-type: none"> 「光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）」（3～4億円/年 x 最大10年・6PJ）。 SIP第2期「光・量子技術基盤分野」（25億円/年） CREST「量子技術」（3億円/5年 x 約15PJ） さきがけ「量子機能」（3000万円/3年 x 約30PJ） 	●	○ ^{*2}	●	●	● ^{*3}

“量子コンピューター”の種類

エラー耐性 量子コンピューター

因数分解や検索など量子プログラムの実行により様々な用途に利用可能な汎用デジタルコンピューター。量子加速がある。

TRL 3~4

量子誤り訂正の実装オーバーヘッドのため、実現には100万～数億量子ビットの集積化が必要。

NISQ量子コンピューター

限定的エラー耐性・小中規模のハードウェアによるアナログ計算機。量子加速のあるアルゴリズムは研究途上。

TRL 3~4

エラー率0.1%、50量子ビット、20ステップ程度の限定的な計算能力で意味のある結果を出せる問題設定の探索が必要。古典・量子アルゴリズム開発が重要。

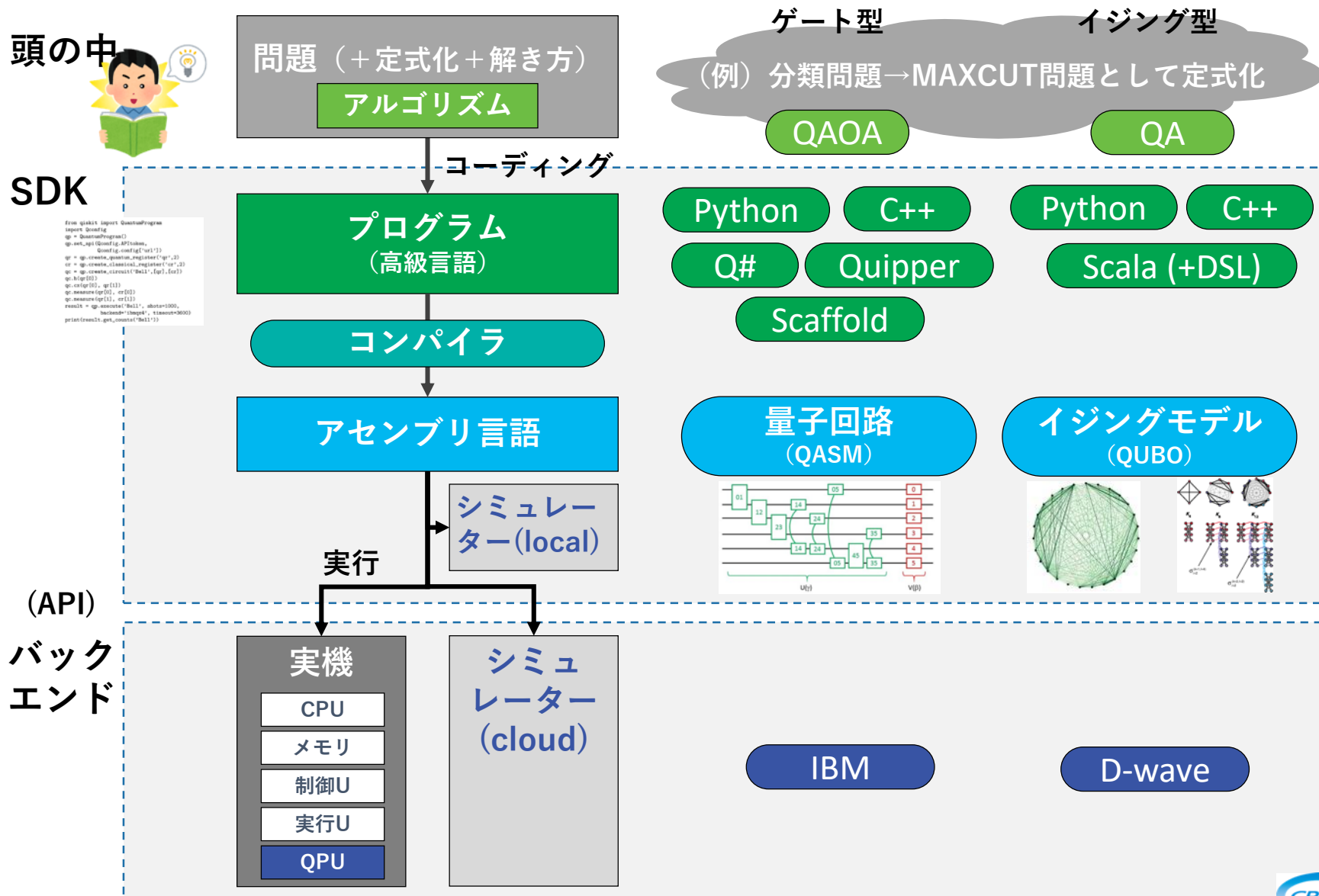
量子アニーラー

エラー訂正のないアナログ計算機。組合せ最適化問題を解くヒューリスティックス。現状、量子加速はない。

TRL 8~9

非量子系でのエミュレーションや実用的な問題設定での応用探索が進む。量子シミュレータ、サンプリングマシンなどの方向性もある。量子的現象と計算速度の関係性は非自明。

ユーザーから見た量子コンピューティングの今



QUBO: Quadratic unconstrained binary optimization (2次形式・制約なし・2値変数最適化)

第2次量子コンピューターフィーバー

1. 「いかに作るか？」 「何に使うか？」

- 理論・実験ともに、工学的チャレンジに。
- 米国IT企業が投資拡大 (Google, IBM, MS, Intel etc.)

2. 非従来型プレイヤーの参加

- スタートアップ多数 (Rigetti, IonQ, 1Qbit etc.)
- 応用ドメイン (量子化学、機械学習、金融 etc.)
- 今後、EE, CS分野の参画が拡大 (してほしい)
- オンラインコースで裾野拡大 (MIT, TU Delft, Keio)

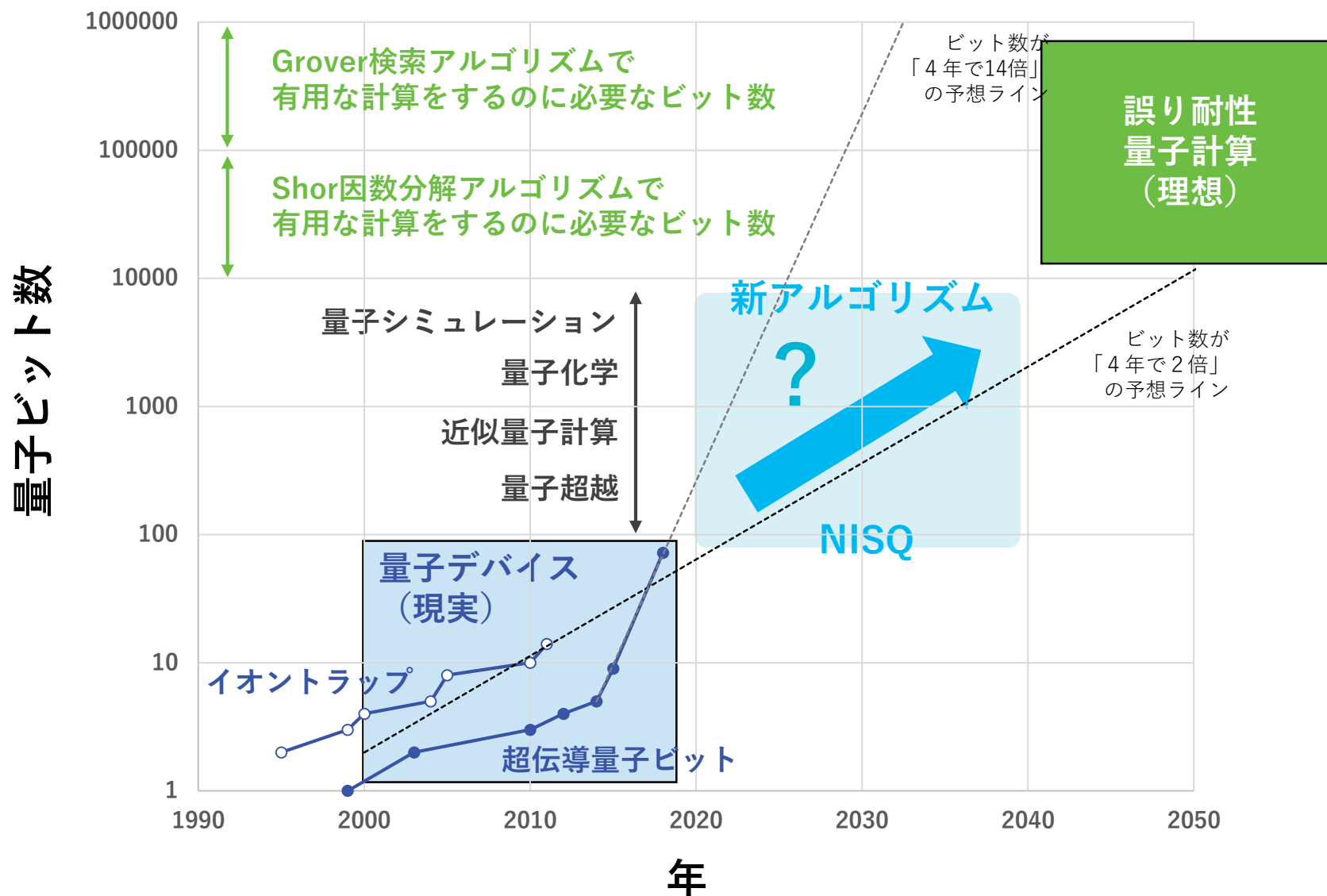
3. アーキ・ソフトの重要性

- ツール充実中 (Microsoft QDK, IBM QISKit, etc.)
- Quantum Software Manifesto (欧州)
- ソフト・アーキ関連PJ (QuSoft, EPiQC, STAQ)
- ISCA, MICROでチュートリアル講演

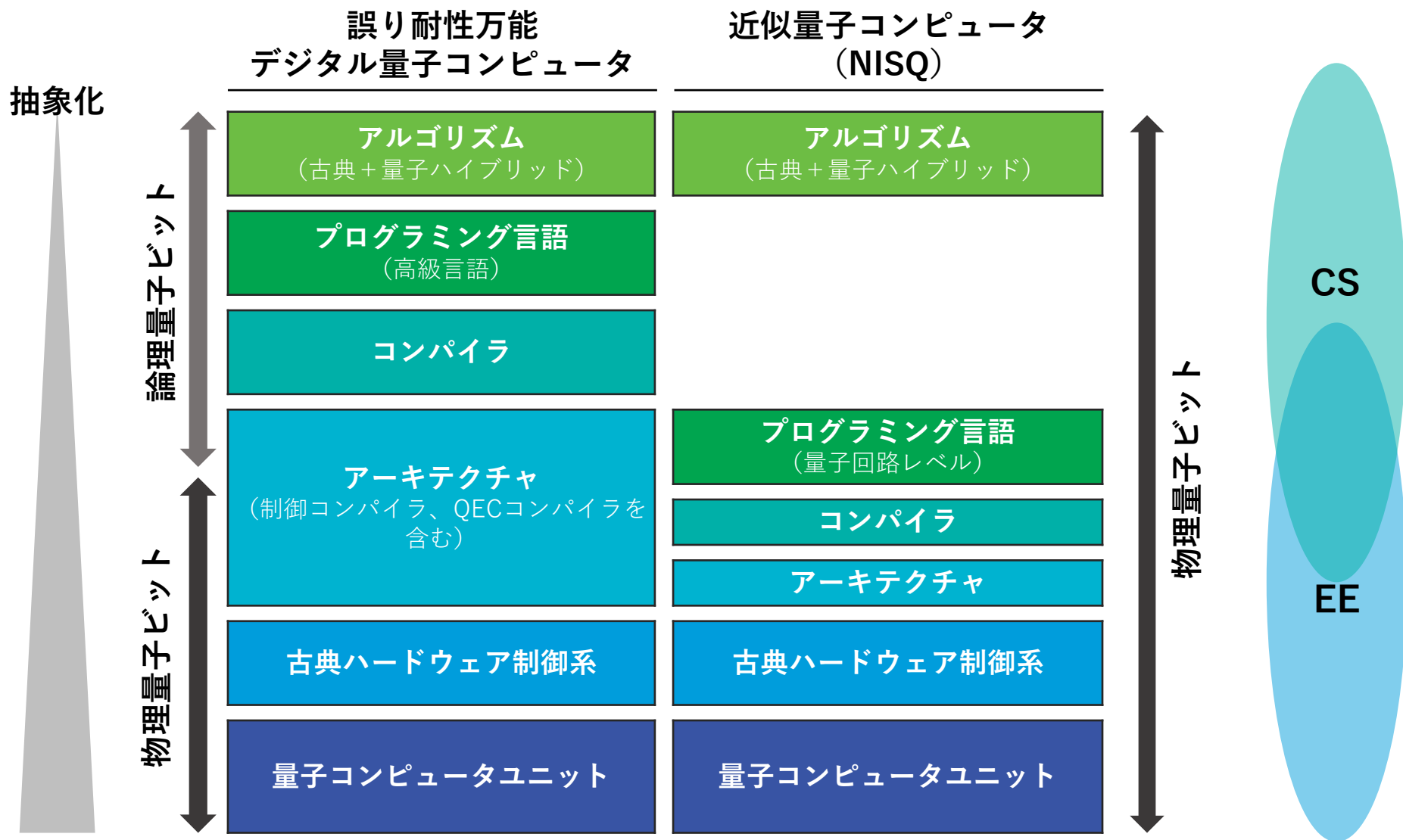


**計算機としてPracticalなものを作るには、
CS・EEの視点で考えるのが重要ではないか？**

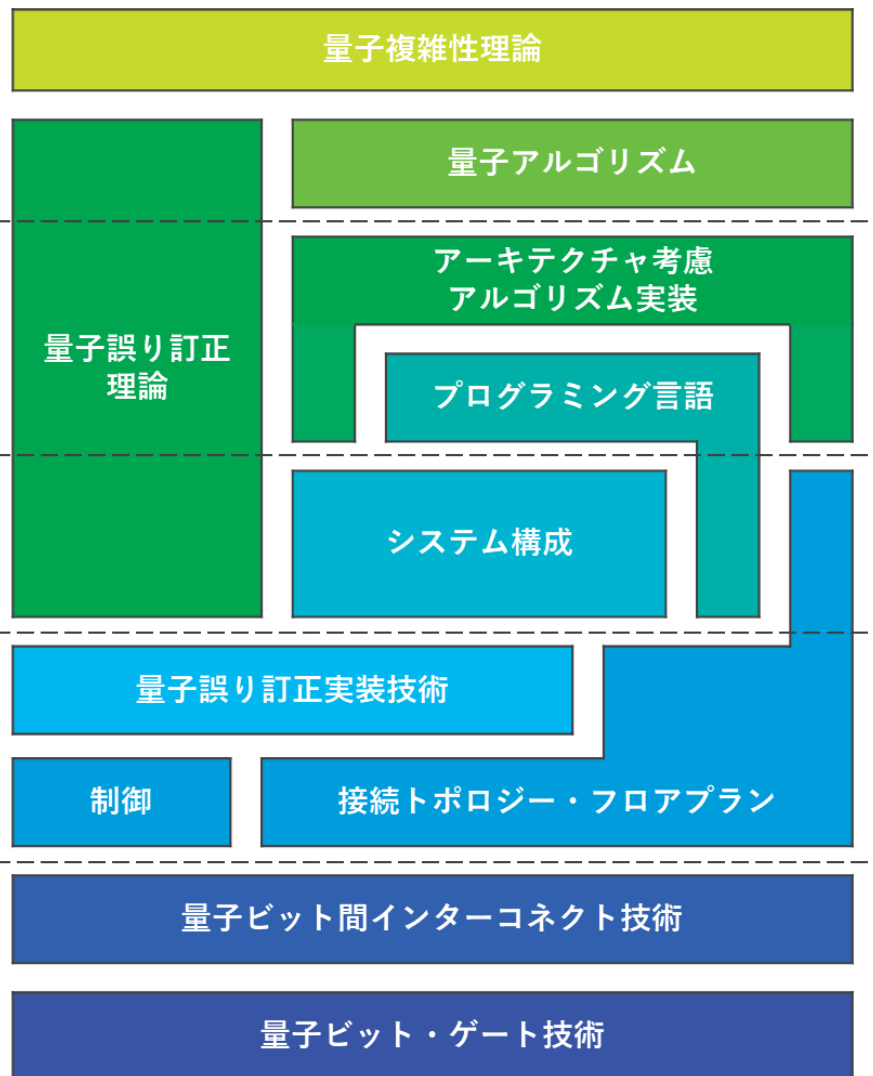
ハードウェアとアルゴリズムのギャップ



現代のコンピュータから見たQC技術レイヤ俯瞰



具体的な研究開発課題



① 量子・古典ハイブリッドアルゴリズムの開発・実装・実証

- 量子多体系の計算
- 最適化、機械学習、検索、グラフ、ゲーム
- キラーアプリ探索

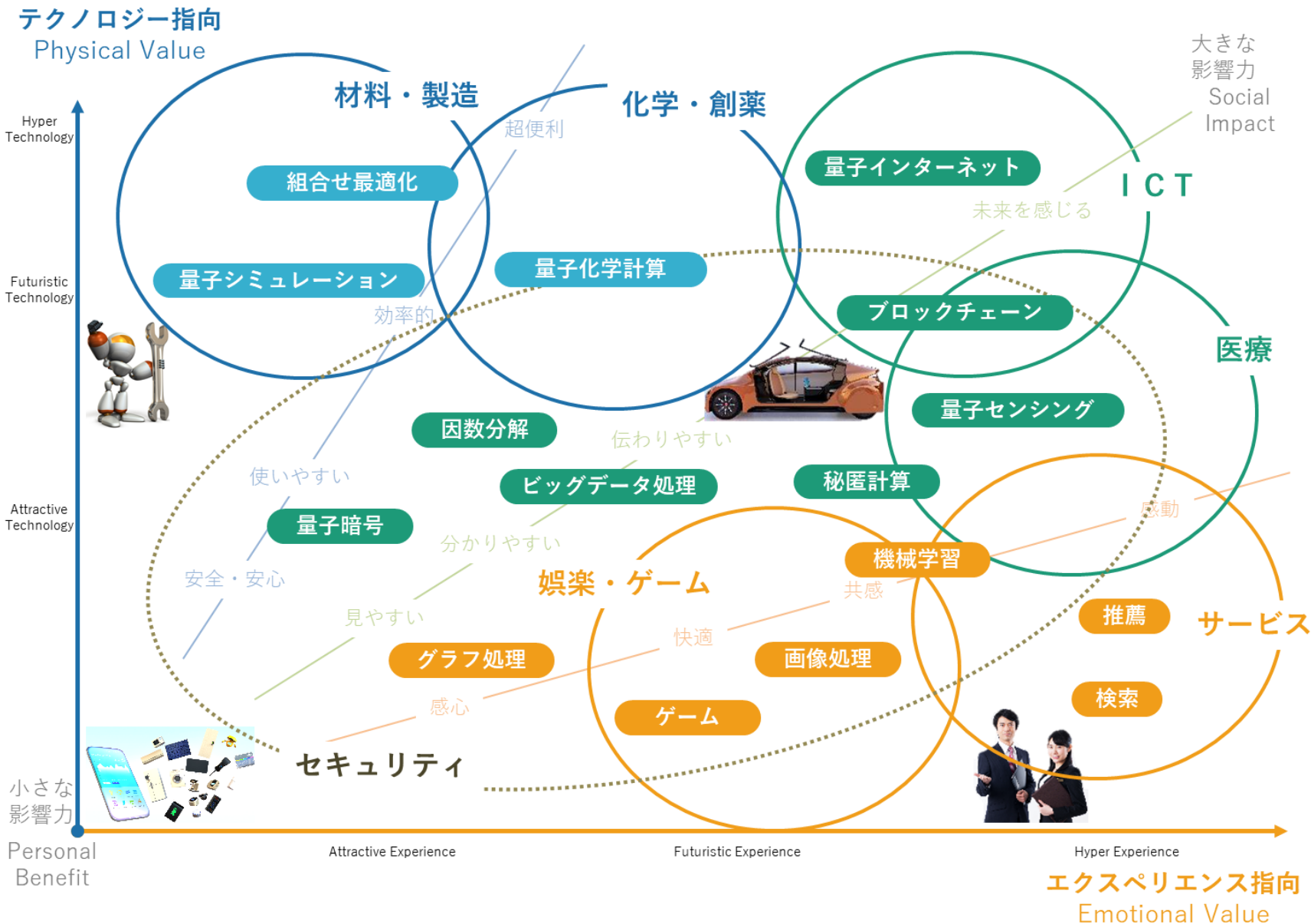
② 量子ソフトウェア開発環境の整備

- 量子SDK
- 高性能NISQシミュレーター
- 量子情報機器との複合化

③ 誤り訂正符号に基づくアーキテクチャ設計

- 量子誤り訂正符号
- ゲート分解・量子回路最適化 (コンパイラ・デバッグ)
- 量子・古典マイクロアーキテクチャ

(キラ) アプリケーションの探索



分野融合・企業参画・国際連携

1. 量子コンピューター研究開発ネットワークとハブ拠点の構築

ハブとなる研究拠点の設置＋ネットワーク連携でフルスタック用意。

2. コミュニティー・エコシステムの醸成

インフラ・プラットフォーム用意・共用施設・オープンソース

3. 量子コンピューター教育・訓練

裾野を拡大する量子CSのトレーニングプログラム

