



量子技術の実用化推進WG 第四回

量子ソフトウェア産業の課題や今後の産業振興方策について

2022年12月8日

QunaSys CEO 楊天任

本日、発表させて頂く内容



1. ソフトウェア開発のための量子コンピュータ利用開発環境の整備について
2. ソフトウェア民間事業者の育成・振興の方策について
3. ユーザ産業の拡大・振興の方策について

本日、発表させて頂く内容



- 1. ソフトウェア開発のための量子コンピュータ利用開発環境の整備について**
2. ソフトウェア民間事業者の育成・振興の方策について
3. ユーザ産業の拡大・振興の方策について

産業化に向けてアルゴリズム研究は重要



Google AI Quantum and Collaborators.
Quantum supremacy using a programmable
superconducting processor.
Nature (2019).

この開発によって（量子超越を示したチップの開発のこと）、量子コンピュータはただの研究トピックの域を越え、不可能であった計算を可能にするテクノロジーの領域に達した。

価値のあるアプリケーションにたどり着くまでに、1つ足りないものは創造的なアルゴリズムだ。

As a result of these developments, quantum computing is transitioning from a research topic to a technology that unlocks new computational capabilities.

We are only one creative algorithm away from valuable near-term applications.

現状は全ての量子コンピュータ実機を 同じ計算コードで実行できない

実機/プラットフォームごとにプログラミング言語や
ソフトウェアのライブラリが異なる場合がある

※詳細はP19を参照ください



**自分が開発したアルゴリズムが
どのハードウェアで最も効果的かを検証する際に
非効率なプロセスが発生してしまう**

オープンソース量子計算ライブラリを開発・公開

Chemistry	<ul style="list-style-type: none">• Molecule• Hamiltonian / other observables	↑↓
Quantum algorithms	<ul style="list-style-type: none">• VQE• Ansatz / Optimizer / ...	↑↓
State and operators	<ul style="list-style-type: none">• State• Operator• Expectation value	↑↓
Circuits	<ul style="list-style-type: none">• Circuit• Noise / Error mitigation	↑↓
Device/ simulators	<ul style="list-style-type: none">• Qiskit / Braket / Qulacs / ...	↑↓

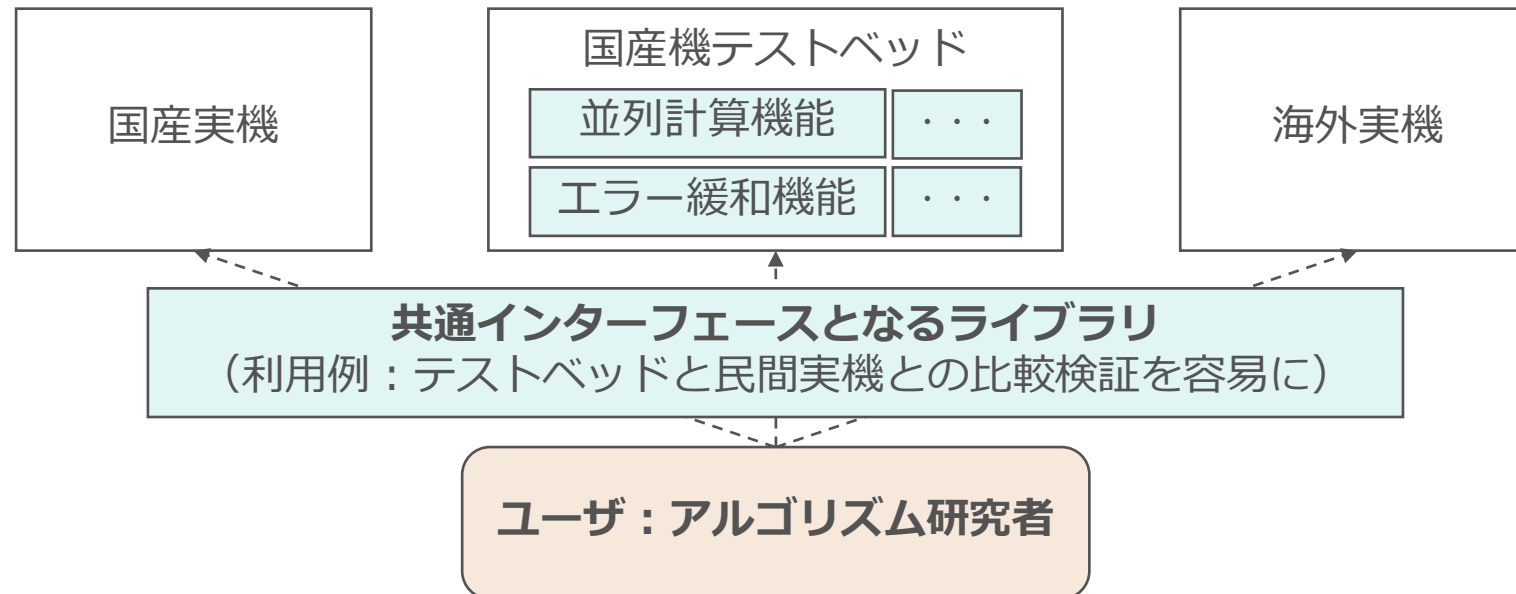
QURI Parts

- モジュール性と拡張性
- プラットフォーム非依存
- 高パフォーマンス

※詳細はP20を参照ください。あるいは
<https://qunasys.com/news/posts/quri-parts>

テストベッドと民間実機を共通のインターフェースで動作させることができる基盤整備が必要では？

民間実機・テストベッドの比較検証を進め、実機全体の利用促進を実現する



方策実行のためスタートアップの公的な活動を国としても支援頂けるとありがたい
テストベッドとオープンソースの接続・ライブラリ拡充・テストベッドの機能開発など

本日、発表させて頂く内容



1. ソフトウェア開発のための量子コンピュータ利用開発環境の整備について
- 2. ソフトウェア民間事業者の育成・振興の方策について**
3. ユーザ産業の拡大・振興の方策について

産業化を進めるための人材が不足

- QunaSysにおいても、量子技術の素養を持ちつつ、アルゴリズムを研究する人材、ソフトウェアを開発運営する人材、事業を支える人材など多様な人材が必要
- さらに、ユーザ企業においても量子コンピュータ研究を行う人材は不足（高い専門性が必要になるため。そもそも計算人材が不足しているという声も多い）

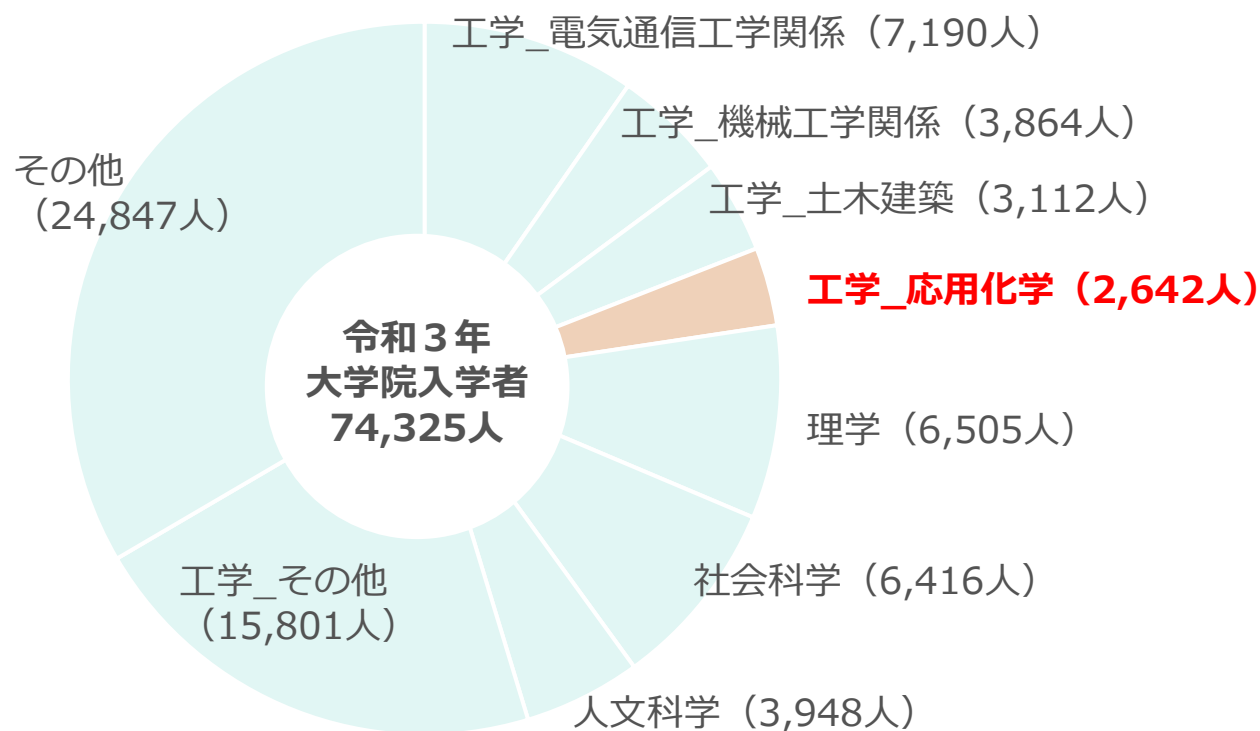


**ソフトウェア事業の立場で産業化を進める人材や
ユーザの立場で実機やソフトウェアを使いこなす人材を
教育機関から産業界へ輩出する施策が必要では？**

量子人材育成の課題についてはP22をご参照ください

量子人材育成の現状

例えば、**応用化学系**では年間で**2600人**の大学院生が入学
ただし、**量子コンピュータ教育**は教員の時間やノウハウ・ソフト環境の点で実施しづらい状況も。
一方、**学生は機会があれば活用したいという声も聞かれている**



文科省 令和3年度学校基本調査より

量子コン教育についてのヒアリング抜粋 (応用化学系)



学生において量子コンピュータはよくわからないけど難しいものという印象がある。そのハードルを下げる必要があると感じる。ただし、忙しすぎて教育に手が回らない。教育のための予算の問題もある。
(量子計算領域の先生のお声)

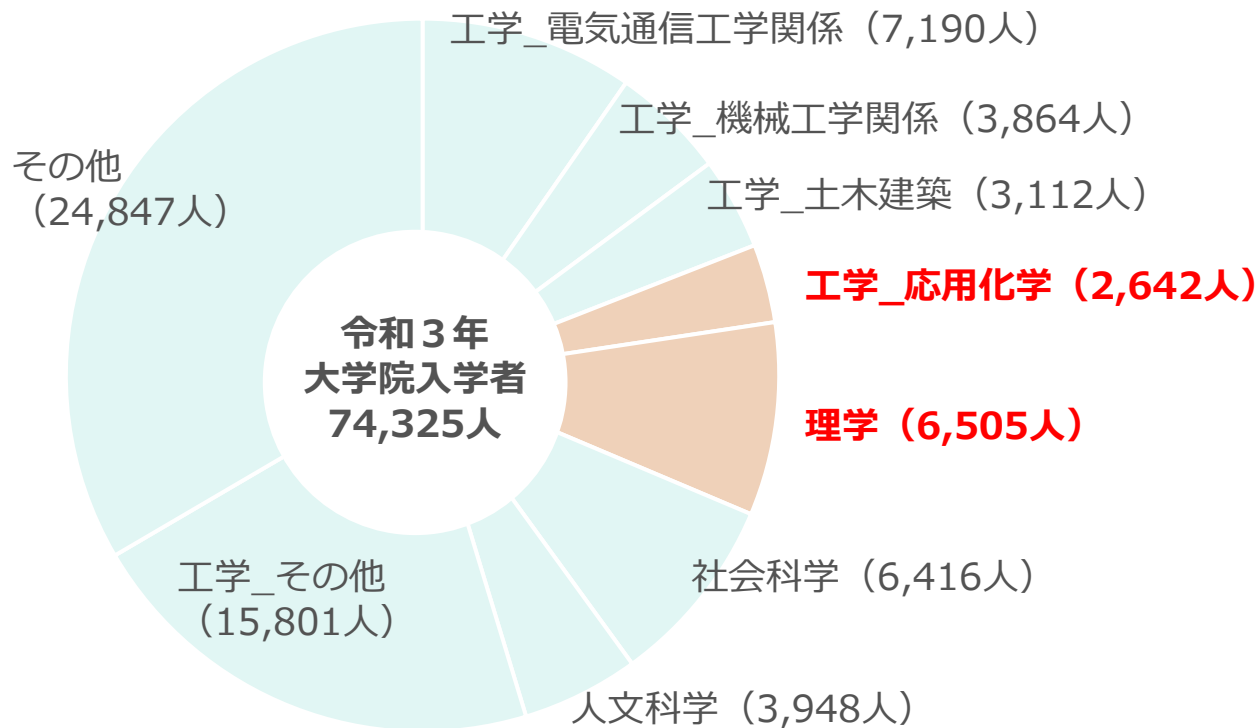


化学系のバックグラウンドから量子コンピュータの活用可能性やその実情を伝えることが難しい。計算化学の一部のような位置づけで演習を行いたい、そこに環境構築などのリソースを割くことが難しい。
(化学系バックグラウンドの先生のお声)



所属しているプログラムからは9割が企業に就職する。自分は実験系だが、計算のリテラシーもつけておきたい。量子コンピュータを少し触って心理的なハードルを下げおきたい学生は多いと感じる。
(材料系卓越大学院プログラムの学生からのお声)

幅広い大学で量子ネイティブを育成するための国費投入が必要では？ (教育機関への量子ソフトウェア補助金の設置)



文科省 令和3年度学校基本調査より

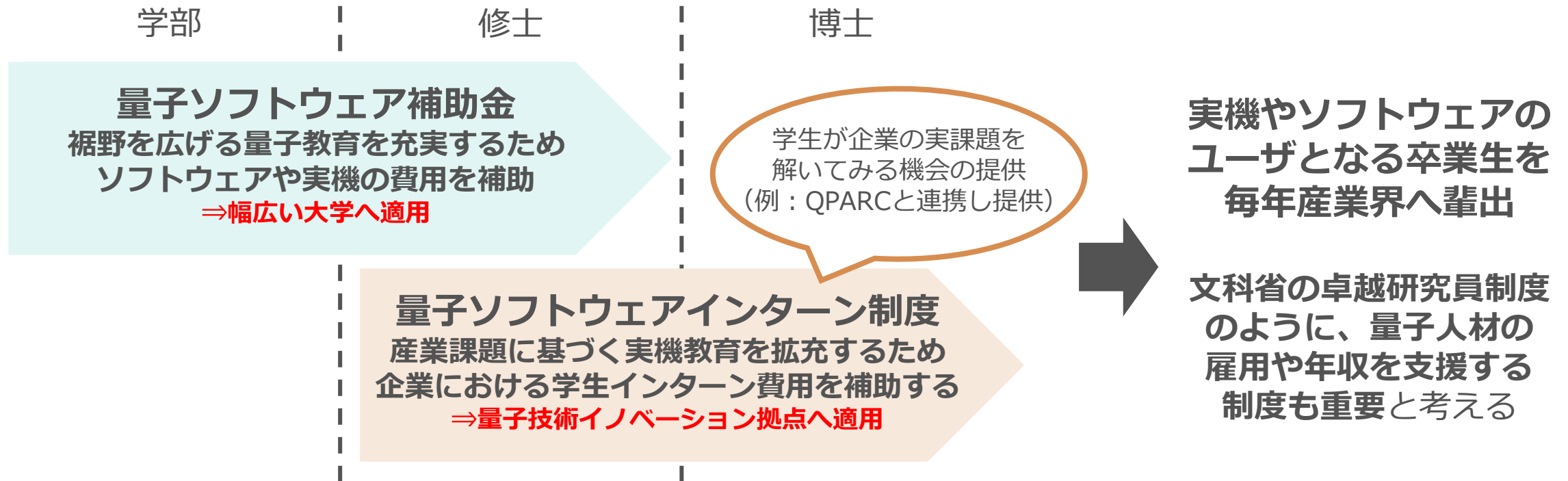
量子人材の卵：約9000人

- 全員が量子コンピュータに触れる教育の機会をつくるべきでは？
⇒ 10年で9万人の量子人材を輩出（理学と応用化学の大学院生だけを対象とした場合でも）

量子ソフトウェア補助金

- 教育にかかるソフトウェア費用を国として補助すべきでは？（何を選ぶかは自由）
（1人1万円としても年間9000万円）
- 例えば、その中からスタートアップが生まれ、数社でも資金調達すれば、国費を投資した以上の経済価値に繋がるのでは？

量子拠点において産業課題に基づいた実機教育を拡充するため 産業課題に取り組むインターン機会を支援する制度が有効では？



制度終了後は、ユーザ企業からの寄付講座などで政府援助がなくても自走できる準備を行う（そのために産業コンソーシアムで幅広いユーザ企業の課題に取り組むインターンが有効と考える）。また、本提言の方策の実施期間は中長期的に産業育成にインパクトある目標設定を踏まえて検討が必要と考える（例：10年で9万人のユーザ育成など）。

本日、発表させて頂く内容

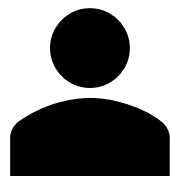


1. ソフトウェア開発のための量子コンピュータ利用開発環境の整備について
2. ソフトウェア民間事業者の育成・振興の方策について
- 3. ユーザ産業の拡大・振興の方策について**

ユーザ企業にとっては、まだ実用が先の技術であり、 技術適用タイミングを見極める指標や 中長期的に研究を続ける意味付けも検討する必要がある

数年、実機研究を続けてきて、
今は技術watchのフェーズ

**アルゴリズム研究の進展を評価する
指標があれば、本格研究開始の判断
ができるのに！**



海外のエネルギー系ユーザ企業

可能性を感じるが、ユーザ企業の立場
で研究を続けていくために

**量子コンの研究をしていると、株価
が上がる仕組みがあればよいのに！**

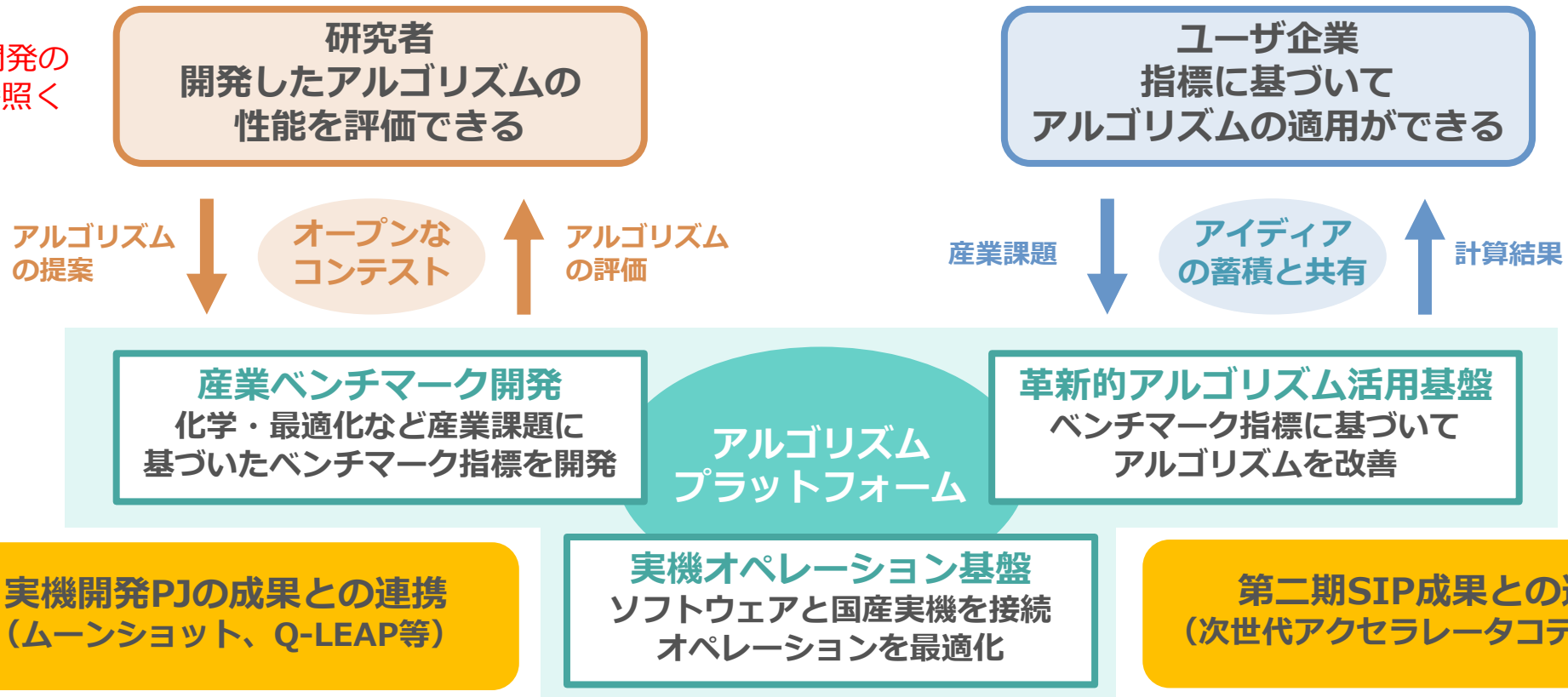


QPARCのパネルディスカッションより

ユーザ企業がアルゴリズム進展を評価できる アルゴリズムプラットフォームを官民連携で構築

ベンチマーク開発・アルゴリズム開発・実機との接続・ベンチマーク標準化を進める

ベンチマーク開発の
意義はP26を参照く
ださい



量子コンピュータの脱炭素化への貢献を整理し 各省庁さまのESG関連の投資枠組みと連携させて頂き ユーザ企業が研究しやすい枠組みを作れないか？



**Sustainable
Development
by
Quantum
Advantages**

トランジション・ファイナンス (経産省さま)

脱炭素社会の実現に向けて長期的な戦略に則り、
着実なGHG削減の取組を行う企業に対し、
研究開発を支援するファイナンス手法

チャレンジ・ゼロ (経団連さま・環境省さま)

脱炭素社会に向けたイノベーションを目指す企業
へのESG投資の呼び込みや、イノベーション創出に
向けた産学官の連携を進めるイニシアティブ

ユーザ企業の経営層へ
中長期的な研究の
必要性と可能性を発信

将来的に
SDQs研究基金や
SDQs研究所の設置

産業プレイヤー一体となって量子技術の脱炭素への貢献の指標化とその浸透を進めていくことが重要と考えている。その重要性を周知し後援いただけるとありがたい

【提言 1】ソフトウェア開発のための量子コンピュータ利用開発環境の整備

- **テストベッドと民間実機を共通のインターフェースで動作させる基盤整備**を官民プロジェクトで推進すべきでは？（アルゴリズム研究者のコード資産を有効活用するため）

【提言 2】ソフトウェア民間事業者の育成・振興の方策

- 幅広い大学に対して、量子人材を育成する**教育機関への量子ソフトウェア補助金**が必要では？（量子ソフトウェアの教育市場を創出するため）
- 量子拠点に対して、産業課題を踏まえた実機教育の場を拡充するため、民間企業が学生を受け入れる費用を補助する**量子ソフトウェアインターン制度**が有効では？（将来の量子ソフトウェアのユーザやエンジニアを産業界へ輩出するため）
- 【提言 2】に関する方策は、**産業育成へのインパクトを見据えた目標を定め補助期間を検討**すべき（例：10年間で9万人の量子ユーザを産業界に輩出など）

【提言 3】ユーザ産業の拡大・振興の方策

- **アルゴリズムプラットフォーム**を官民連携で構築すべきでは？（各研究者のアルゴリズム性能を指標化し、ユーザ企業が本格研究を進める判断材料を提供するため）
- **各省庁のESG投資枠組みと連携し、産業界の経営陣にSDQsを発信**する枠組みを構築できないか？（ユーザ企業が中長期的に研究に取り組む目標づくりのため）

Appendix

【提言 1】の補足資料

量子ソフトウェアの開発における問題

コードの再利用性：量子回路シミュレータや実際の量子コンピュータなど、複数の異なるプラットフォームでアルゴリズムをテストすることがしばしば必要になりますが、プラットフォームごとに対応するSDKが異なるため、SDKごとにアルゴリズムを書き換える必要があります。

補足：それによって、以下のような場合において非効率なプロセスが発生します。

- 一つのハードで実験したけど精度が悪いためより高精度な他の実機を使いたい場合
- 自分が開発したアルゴリズムがどのハードウェアで最も効果的かを検証したい場合
- なんらかの使うはずだった実機が突如利用不可となり別の実機で検証を行いたい場合

計算パフォーマンス：高速な量子回路シミュレータを使う場合でも、シミュレーション前後の古典的な計算（オブジェクト変換、データ準備、後処理など）のオーバーヘッドによって、計算全体の速度が遅くなってしまうことがあります。

多すぎる依存ライブラリ：メジャーな量子計算用SDKの多くは、多数の外部ライブラリに依存していますが、そのほとんどは限られたユースケースでのみ必要になるものです。このような不要な依存関係は、開発の様々なステップにかかる時間を増加させ、トラブルの原因となる場合があります。

【提言 1】 の補足資料

QURI Parts : モジュールで効率的なオープンソース量子計算ライブラリ

モジュール性と拡張性 : ライブラリの各コンポーネントは、標準的なインターフェースに沿って設計された小さな部品として提供されており、簡単に入れ替えて使うことができます。また、各コンポーネントは、対象分野ごとにモジュール分けしてパッケージされているので、不要な依存関係なしに必要なものだけをインストールすることができます。標準インターフェースに準拠したコンポーネントを独自に実装し、QURI Partsで提供される他のコンポーネントと組み合わせて使用することも容易です。

プラットフォーム非依存 : QURI Partsの標準インターフェースは、プラットフォームに依存しないコードを簡単に書けるように考慮して設計されています。メインのアルゴリズムのコードを一度書けば、あとは数行追加するだけで、様々なシミュレーターやプラットフォームに対応できます。また、どのシミュレータやプラットフォームを使用するかを実行時に選択するようなコードを書くことも可能です。

パフォーマンス : QURI Partsの設計では、特にシミュレータの計算性能を重視しています。世界最速クラスの量子回路シミュレータであるQulacsをQURI Partsで利用するモジュールでは、Qulacsの性能を損なわないよう、可能な限りオーバーヘッドを減らすことに重点を置いています。回路実行前の回路変換のオーバーヘッドを最小限に抑えているので、他のライブラリやシミュレータよりも高速に動作します。一方で、性能向上の余地はまだ残っており、今後のバージョンアップで対応していく予定です。また、シミュレータのオーバーヘッド以外に、古典的な前処理・後処理（たとえばサンプリング結果からパウリ演算子の期待値を計算するなど）の性能にも注意を払っています。

【提言 1】の補足資料

実機ユーザ視点で感じる利用環境の改善案

実機利用金額を事前に知りたい・上限金額を設定したい

- 量子化学計算に量子コンピュータを用いる場合、通常は何度も繰り返して量子回路を実行する。従って、実機利用にかかる金額は膨大になりがちである。
- また、現在主流の量子アルゴリズムの一つであるVQEは、収束するまで（量子回路実行結果が変化しなくなるまで）量子回路実行を繰り返すが、いつ収束するかは事前に分からない。
- 実機利用金額の見積もり機能で予め金額の目安が分かったり、上限金額に達すると自動で計算が終了する機能があればよい。ただし、途中終了した場合に、それまでの計算結果を取得できる機能は必要と感じる。

エラー緩和（error mitigation）がやりづらい

- エラー緩和は、量子コンピュータ実機のノイズを低減して計算する手法。
- 実機やプラットフォームによっては、仕様上、ユーザーが指定した量子回路が、理論上は等価だが異なる回路に自動で変換されたりする（例：最も品質の高い量子ビットが自動で使われる等）。これにより、ユーザーが意図したものと少し異なる量子回路が実行される場合がある。
- エラー緩和では、ユーザーが意図した量子ビットや量子回路を変換せずにそのまま使いたい。
- 回路の自動変換をオフにしたり、計算に用いる量子ビットをユーザーが直接選択できる機能が必要（Amazon Braketなどは一部これに対応している）
- 究極的には、上記の事情を考慮せずとも自動でエラー緩和が実行されるのが理想。

多数の計算を並列的に処理したい

- 量子化学計算を量子コンピュータで行う場合、多数の量子回路実行を必要とするが、それらを1つずつ順番に実行していると膨大な時間がかかる。
- 一方、必ずしも全ての回路を順番に実行する必要はなく、並列実行も原理的には可能である。
- スパコンの並列計算と同様、複数の量子コンピュータに並列に量子回路実行命令を出し、それらを統合する枠組みは必要である。
- なお、（複数ではなく）単一の量子コンピュータ実機を複数の部分に分割し、それぞれで異なる量子回路を同時実行することで実行時間を削減する手法も提案されている。これを簡便に行える機能もあると便利かもしれない。

【提言2】の補足資料 量子人材育成の必要性

量子コン产学連携における課題

有益な投資のためにも量子技術人材の供給源、キャリアパス問題がボトルネック

- 各セクターにおいて人材不足が世界的に認識（ある種の人材育成競争）。
- 実機の存在や開発環境(qiskit, cirq, pennylane etc)の整備は間口を広げユーザー層(使える人)を増やすのに大きく貢献（例：IBM Quantum Challenge, Xanadu QHACK etc）
- 0から1の(中身の)アイデアを出せる人、そのような人を育てる人を今後増やさないといけない。(大学で教育できる量子技術教員数・研究室数が圧倒的に少ない)
→自然と増える構造が必要
- 直近では、他分野からの参入、企業における研究開発者のトレーニング(大学は教育機関、人とエフォートをもっと出してもらえばwin-win)

野球にたとえると…

スポンサー

チームオーナー

監督 審判

コーチ

プロ野球選手→MBL

高校球児

ファン

サポーター・健全な批判者

PL、PM、AD

PI・教育者・企業研究開発者

若手研究者・開発者・実践者

インターン(実践)・他分野からの参入

学生(学部教育・研究室)

ビギナー ←

ここが手薄


ここを増やす
ことが最優先

ここは国際協調できる

大阪大学藤井先生ご発表資料

量子技術イノベーション戦略
戦略見直し検討ワーキンググループ
(第3回)より

【提言3】の補足資料 海外ユーザ企業のコメント



4年ほど前から実機研究を始め、VQEの改良などを行った。今年から量子の研究は止めて、技術watchingフェーズに入った（良心的にマネジメント層を説得続けられなかった）。

ただし、まだwatchingの方法は模索中。なので、自分たちにとって興味近い指標があれば、それを追ったりするだけで研究マネジメントが楽で良さそう。VQEの改良を行った経験から、どの辺のブレイクスルーが来たら自社の研究を再開すべきかの感覚はある。

【参考】10月～11月にかけて、QPARC参加企業についても個別インタビューを実施（30社以上）。インタビューでも、将来技術と向き合っていく上で、どのタイミングで本格研究を進めるかを見極める指標は有効との声が多く聞かれた。

【提言3】の補足資料 アルゴリズムプラットフォームの位置づけ

量子未来社会ビジョンにおける量子ソフトウェア領域の取組
「量子コンピュータの利用環境の整備」「ソフトウェア研究開発の抜本的な強化」

量子未来社会ビジョンを踏まえたテーマ提案
(Google論文を踏まえた産業化に向けたアルゴリズム研究の重要性)

提案：『アルゴリズムプラットフォーム』機能を備えた実機利用拠点の構築

- 世界中の研究者が多様かつ革新的なアルゴリズム研究を切磋琢磨できる拠点
⇒産業化に向けて、アルゴリズム研究を抜本的に強化する
- 産業ユーザが最先端のアルゴリズムを活用し事業アイデアを試せる拠点
⇒産業化に向けて、産学連携とオープンイノベーションを支える
- 将来の量子人材が、研究者や産業ユーザの事例を踏まえて学べる拠点
⇒産業化に向けて、量子ネイティブの裾野を増やす
- 多様なユーザが様々な実機を活用しつつ、上記の活動を加速できる拠点

【提言3】の補足資料 アルゴリズムプラットフォーム構築に向けた研究課題



1. 産業ベンチマークの開発

機械学習やロボット研究は、統一的なデータセットやチャレンジを定義し、世界中の研究者たちが同じ課題を追いかけ競う形で発展してきた。一方、量子ソフトウェア領域のベンチマークはBMW社等の個社の限定的な指標に留まっている。産業コンソーシアム参加企業50社を巻き込みながら量子コンピュータを使うことが有用な問題群を定義し、**量子コンピュータの有用な計算問題群と根本的ボトルネックを同定し、実用化研究を加速するための産業ベンチマークを開発**する。

2. 革新的アルゴリズムの開発

提案者らが開発してきた化学計算・最適化領域におけるアルゴリズムも1のベンチマークで再評価し、実用化を阻む問題を根本的に解決する改善を進める。加えて、化学計算領域では**NISQ・Pre-FTQC・FTQCと実機発展の段階に応じたアルゴリズム研究や、構造設計領域へのFTQCを見据えたアルゴリズム研究、最適化領域ではアニーリングとゲート型を併用したアルゴリズム開発**など多様な応用を見据えたアルゴリズム研究を推進する。

3. 最適な実機オペレーティングシステムの開発

2の開発を、シミュレータ上で有効なアルゴリズムだけではなく、**実機へ実装すべく、実機を利用する際のオペレーティングシステムを設計するとともに、実機開発PJ（ムーンショット、Q-LEAP等）で開発される実機と連携することで、オペレーティングシステム全体の最適化を推し進める。**

4. 国際標準化

取組内容を基に量子人材教育プログラムを提供する海外団体や機関を巻き込んだ**コンテスト型研究やグランドチャレンジを実施し、1や3の国際標準化を進めると同時に実用アイデアを発掘する仕組みを構築**する。

【提言3】の補足資料 ベンチマークとコンテストのイメージ

アルゴリズム研究の
切磋琢磨を支えるコンテスト

量子コンの研究者

アルゴリズム
の提案



オープンな
コンテスト
(例: ImageNet)



アルゴリズム
の評価

産業ベンチマーク開発
化学・最適化など産業課題に
基づいたベンチマーク指標を開発

ベンチマークの例: Quantaggle

さまざまな量子アルゴリズムの組み合わせを比較検証し
その結果をまとめたベンチマークサイト
(共通のベンチマーク指標と結果一覧)

Dataset

LiH, BeH2, H2O etc...

Evaluation Index

$$I = \frac{1}{N} \sum_m \left(\frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} \frac{|E_{QC}^m(R_i^m) - \delta_m| - E_{FCT}^m(R_i^m)}{|E_{FCT}^m(R_i^m) - E_{FCT, min}^m|} \right)$$

$$\delta_m = E_{QC}^m(R_{min}^m) - E_{FCT, min}^m$$

Current result

Case 1: Expectation value

Rank	Author	Method	Score
1	QunaSys	UCCSD, BFGS, jordan-wigner	0.010024
2	QunaSys	UCCSD, Powell, jordan-wigner	0.136484
3	QunaSys	UCCSD, BFGS, bravyi-kitaev	0.415436
4	QunaSys	UCCSD, SMO, bravyi-kitaev	0.419400
5	QunaSys	UCCSD, Powell, bravyi-kitaev	0.423440

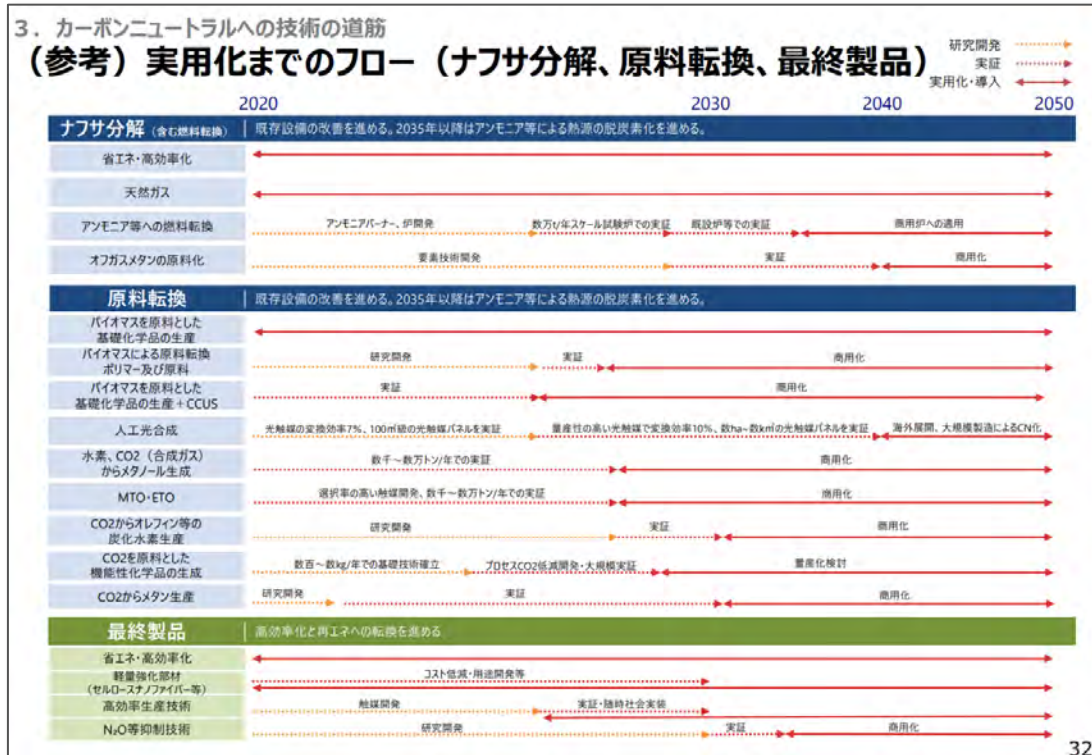
機械学習やロボット開発の歴史では、統一的なデータセットやチャレンジを定義し、それを研究者が競う形で発展してきた。それら他分野の事例を踏まえ、共通のアルゴリズムベンチマークと産業課題を基に、産業化に向けたアルゴリズム研究を加速させる。

【提言3】の補足資料 トランジション・ファイナンス



提示されている技術ロードマップの事例

採択されたモデル事業の事例



【参考】トランジション・ファイナンス モデル事業採択事例一覧

● モデル事業では2022年3月時点、12件の事業をモデル事例として採択

#	資金調達者	手法	金額	年限	時期	ポイント
1	日本郵船	トランジション・ボンド (資金使途特定)	100億円 100億円	5年 7年	2021年7月	✓ 船舶ポートフォリオで事業の脱炭素化への移行の道筋あり ✓ 資金使途は重油からLNG燃料船へのリプレイス、将来的にはゼロエミッション船導入により、カーボンニュートラルに繋がる
2	商船三井	トランジション・ローン (資金使途特定)	262億円	-	2021年9月	✓ 総合海運会社として最初に2050年CNを宣言する等、先進的に野心的度の高い目標及び戦略を構築 ✓ 内航LNG船が対象であり、国内のCO2排出削減にも貢献
3	川崎汽船	トランジション・リンク・ローン (資金使途不特定)	1,100億円	-	2021年9月	✓ 目標の前倒し・見直し等、気候変動対応に戦略的に取組 ✓ 特に、代替燃料技術や船上CO2回収技術等、新技術の開発、投資にも積極的に取組むなど具体的な戦略あり
4	JFEホールディングス	トランジション・ボンド (資金使途特定)	300億円	未定	2022年6月 (予定)	✓ 技術的に最大限の低炭素化を考慮し、鉄鋼ロードマップとも整合した2050年CNに向けた戦略、目標を設定 ✓ 資金使途には革新的技術開発も含まれ、戦略とも合致
5	日本航空	トランジション・ボンド (資金使途特定)	100億円 100億円	5年 10年	2022年3月 2022年4月以降	✓ 長期目標は野心的、中期目標は引上げも推奨されるが、国際的なシナリオと遜色ない水準。国土省の工程表とも整合 ✓ 資金使途の機材はSAFを活用でき、ロックイン懸念少ない
6	住友化学	トランジション・ローン (資金使途特定)	180億円	-	2022年3月以降	✓ 戦略、目標は化学ロードマップに整合、SBTI取得 ✓ 資金使途のLNG火力への転換は、水素等への将来的な転換を視野に入れた設備であり、ロックイン懸念も少ない

※今後調達予定の事例は市況等に応じて、金額、年限、調達時期は変更の可能性あり。

10

<https://www.jsda.or.jp/sdgs/files/roadmap1material.pdf>

https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/transition/transition_finance_case_study_ihi_jpn.pdf

技術ロードマップは7分野（化学・紙パルプ・石油・ガス・鉄鋼・電力・セメント）で2050年まで作成されている。それらの具体的な研究課題に対して、量子コンピュータの貢献可能性を整理し発信していくことで、産業界一体となって量子コンピュータの研究を加速させていくことが重要ではないか。

