

量子コンパイラ基盤 と 量子計算を体感するプレゼンテーション

2021. 02. 11

担当PM： 徳永PM
担当TA： 鈴木TA

メンバ： 山崎 清仁 (代表者)
今村 謙之
加藤 拓己
新里 祐教

プロジェクトメンバーのご紹介

山崎 清仁※2※3※4（やまざき きよひと）（代表者）

量子コンピュータに興味がある人たちが集うOSSコミュニティ「OpenQL プロジェクト」を主催し、コミュニティ・メンバーとともに量子コンピュータを利用するためのライブラリを開発する活動を進めております。



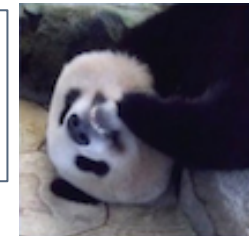
今村 謙之※1※3※4（いまむら のりつな）

「高周波制御プログラミング」のプロフェッショナルであると自負しており、2019年未踏ターゲット事業に採択された開発では、量子ファームウェアの設計や開発も行いました。また、OSSコミュニティの運営実績も長く、本提案をOSSとして公開するのにも適しています。



加藤 拓己※4（かとう たくみ）

現在は、量子コンピュータ関連ベンチャーに在籍し、Python製の量子プログラミングライブラリ「Blueqat」を自ら開発し、OSSとして公開しております。2019年度採択内容を拡張する本提案を他の3名と練ることができたため、追加メンバーとして新たに提案に参画しました。



新里 祐教※3※4（にいさと ひろたか）

ハードウェアの設計開発から超巨大にスケールするシステム、Web・アプリケーション開発まで幅広いレイヤーでの設計開発経験、表現方法の提案などの能力があります。ハードウェアを開発してアート作品の制作を行い、技術を使った色々な表現方法を広めて国内外のMaker Faireにて展示を行っています。



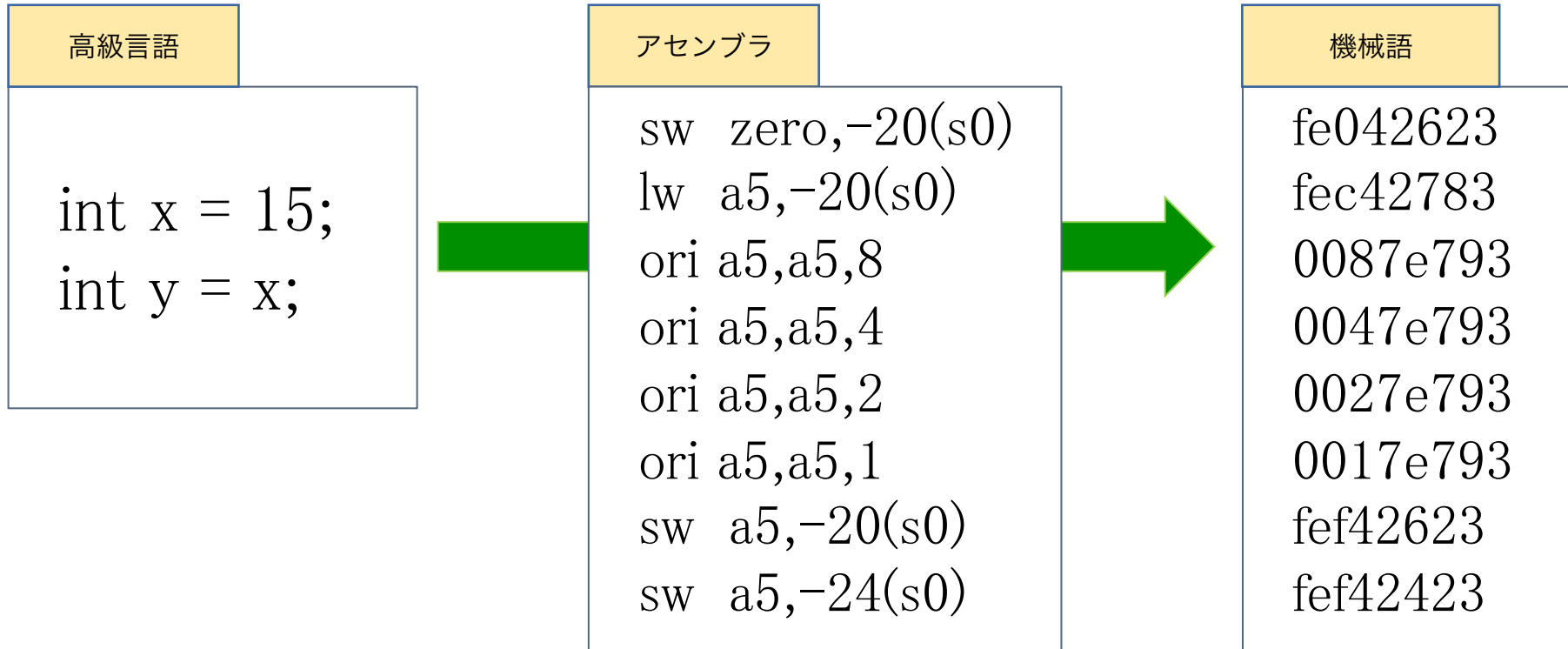
※1) 2006年度上期未踏本体採択者。

※2) 2018年度未踏ターゲット事業（アニメーリング部門）採択者、ステージI修了。

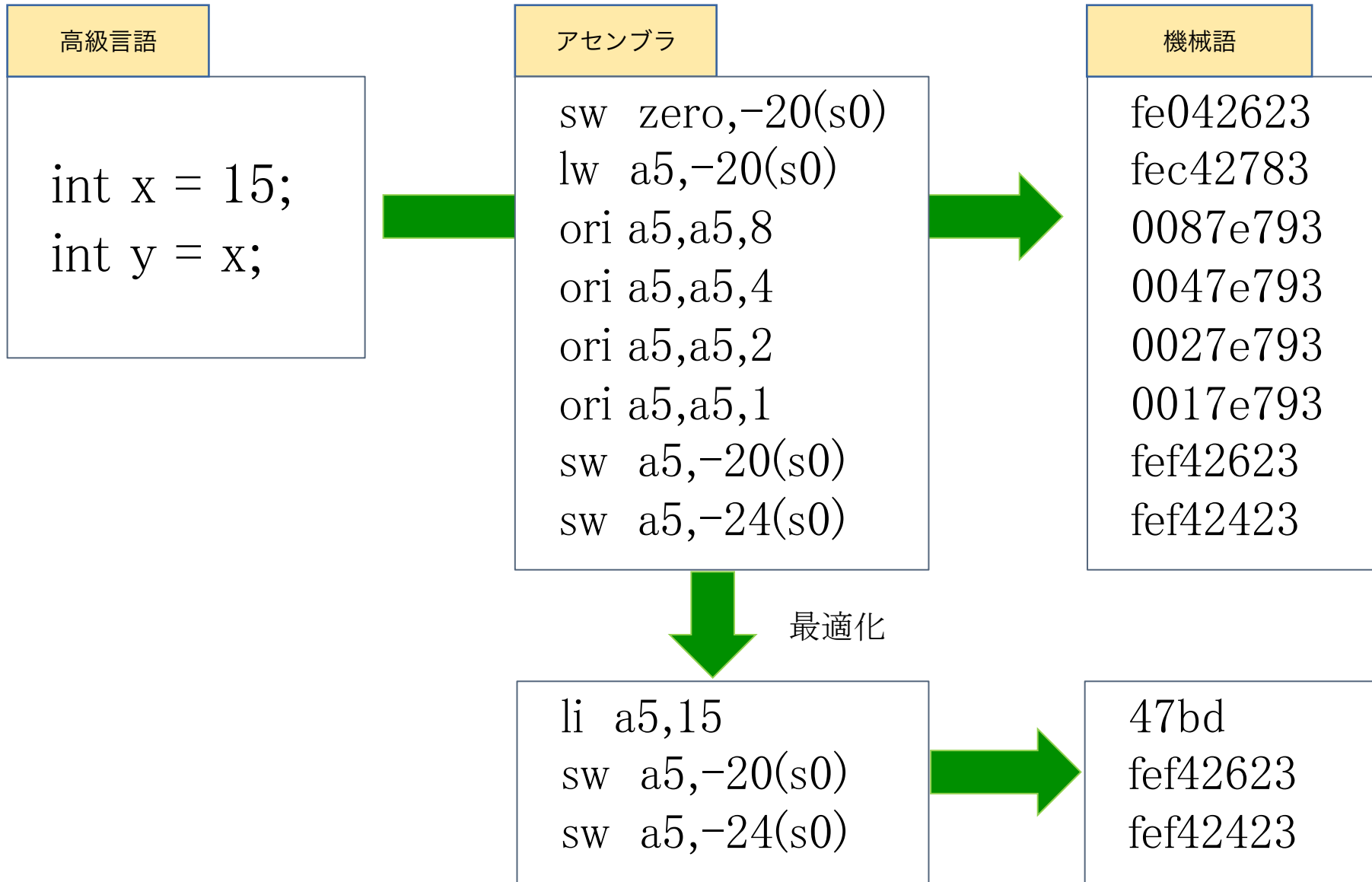
※3) 2019年度未踏ターゲット事業（【区分2】ゲート式量子コンピュータ向けソフトウェア開発）採択者。

※4) 2020年度未踏ターゲット事業（【区分2】ゲート式量子コンピュータ向けソフトウェア開発、応用・実用化枠）採択者。

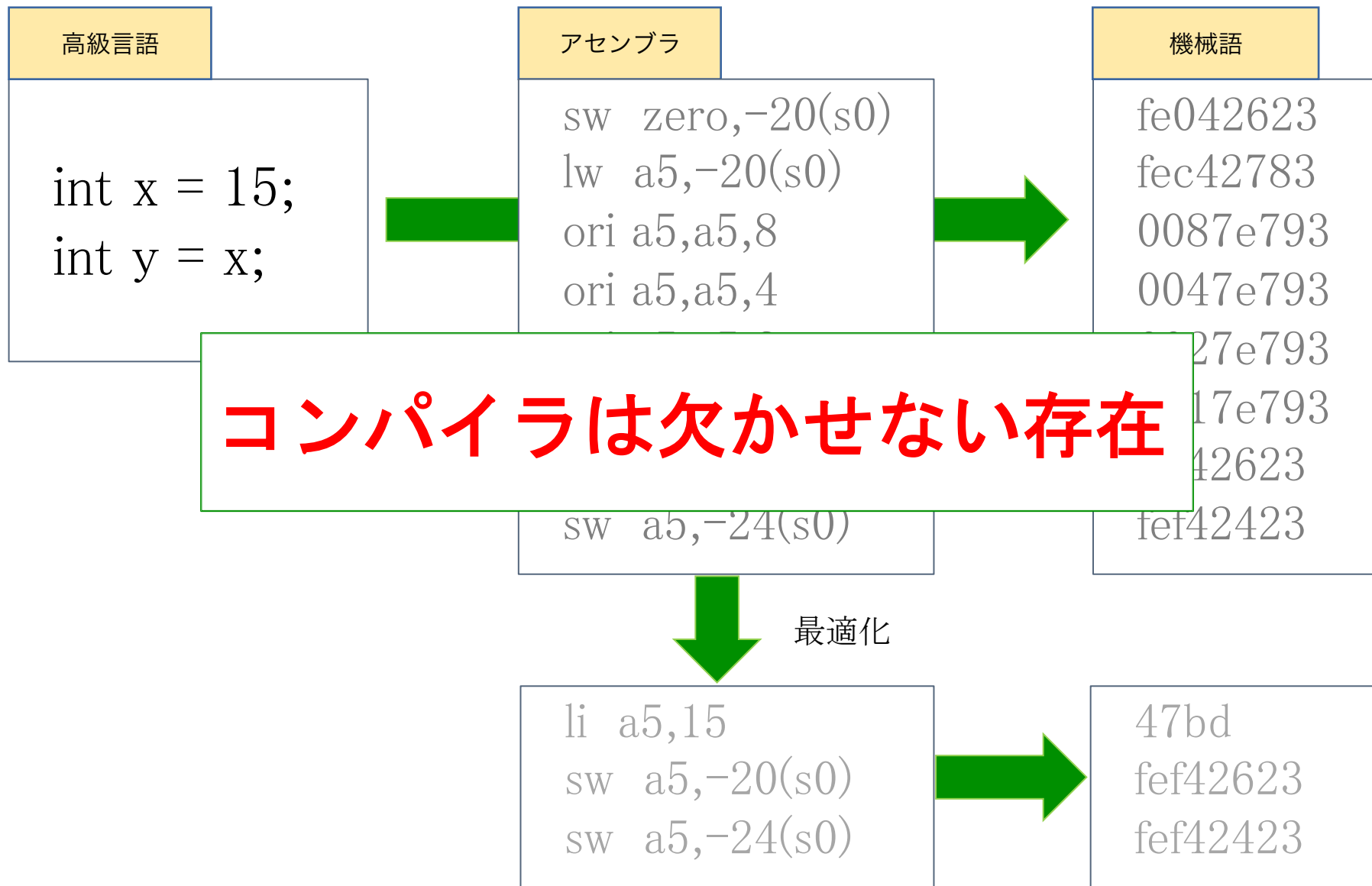
古典計算のプログラムとコンパイラ



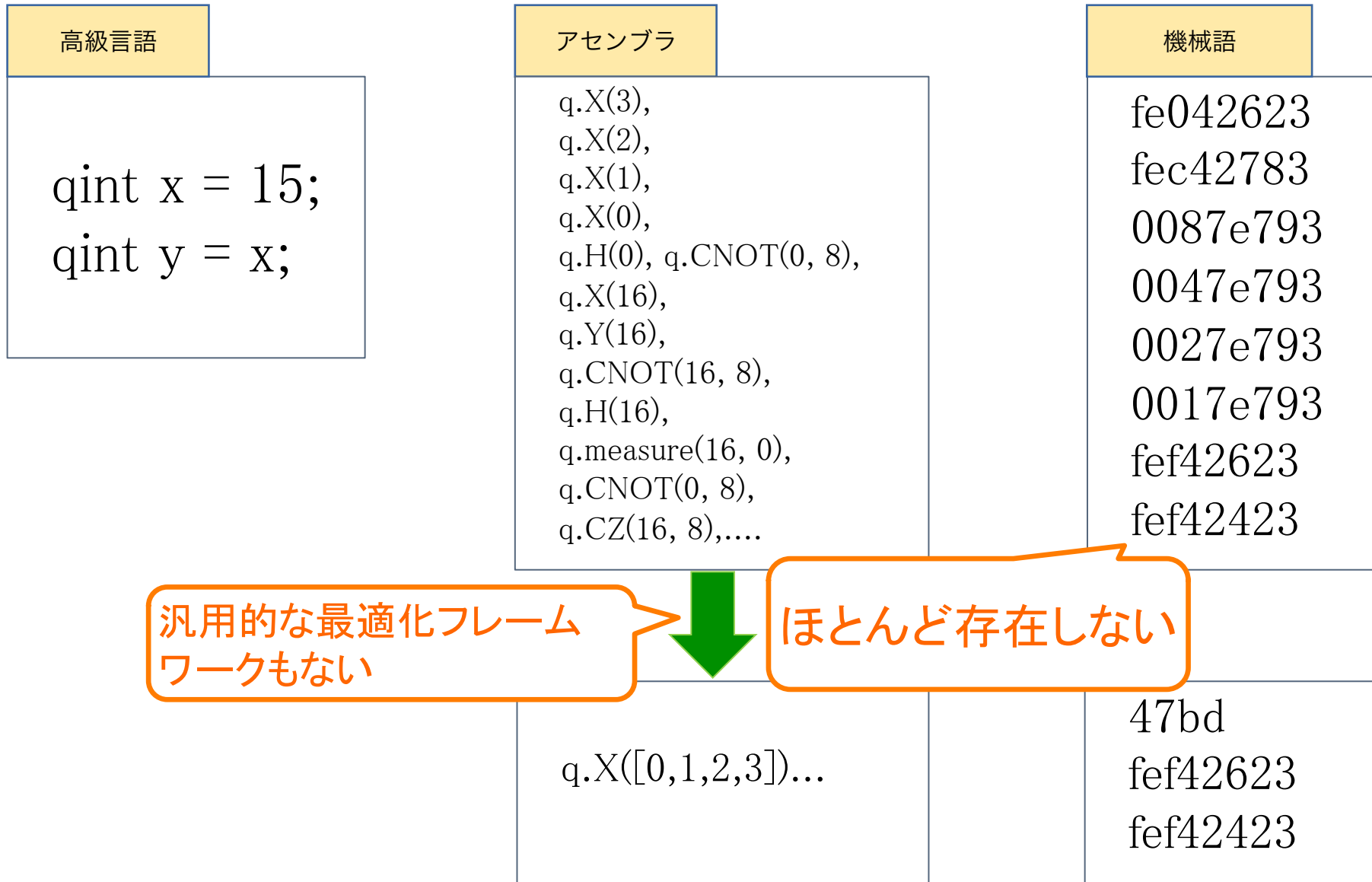
古典計算のプログラムとコンパイラ



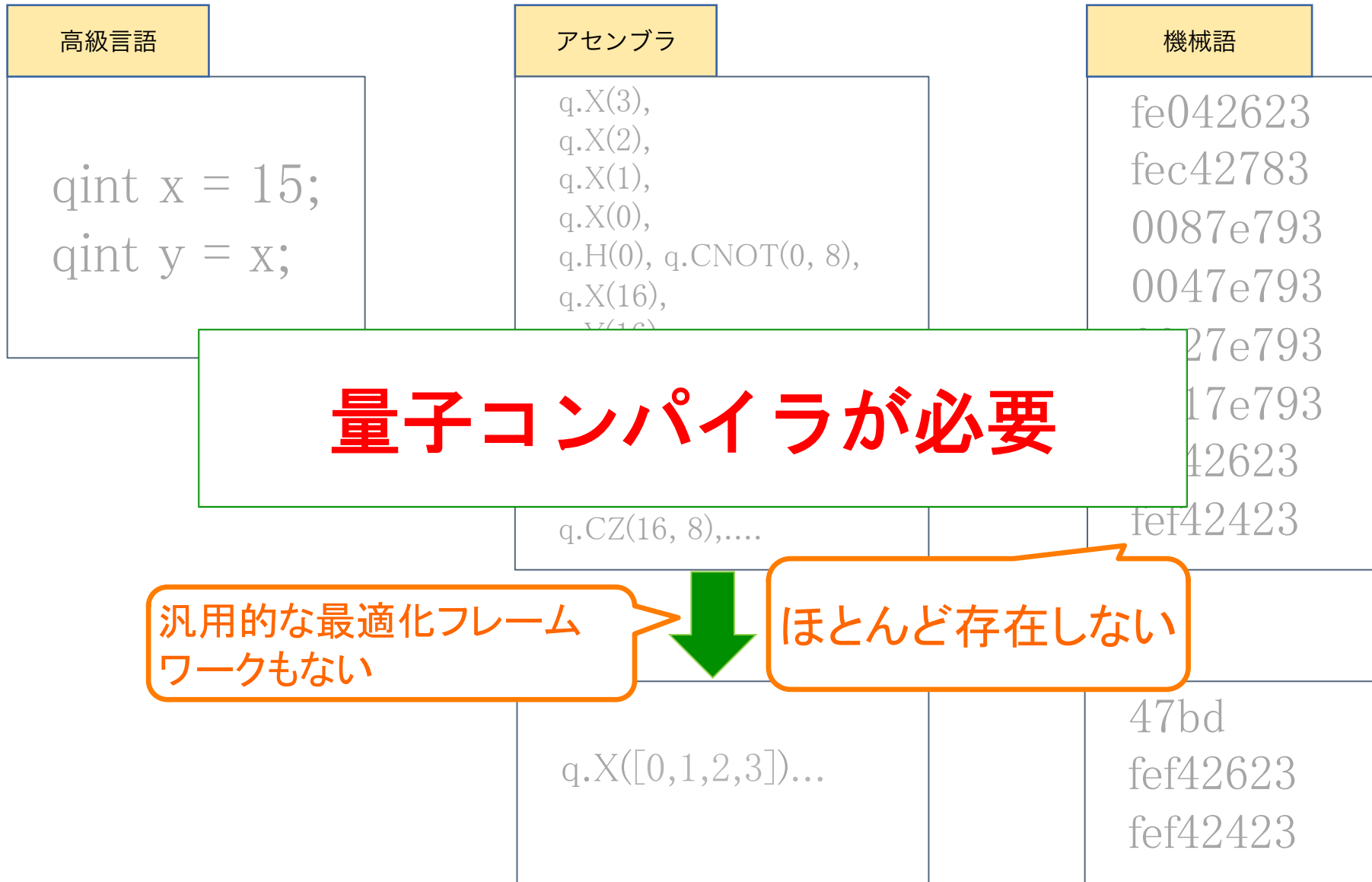
古典計算のプログラムとコンパイラ



量子計算のプログラムの現状



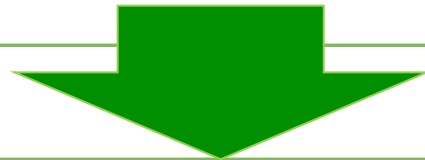
量子計算のプログラムの現状



本プロジェクト(2020年度)の我々の挑戦

2019年度

量子計算機のための全く新しい仕組みを1から構築するのではなく、
今まで莫大な蓄積がある古典計算機のプログラミング開発基盤や
マイクロ波制御の枠組みを、量子へ拡張することによって
量子計算機の開発環境を作ること。

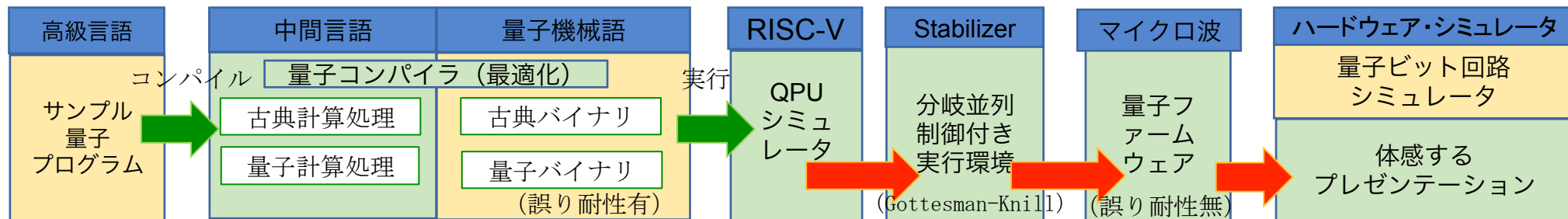


2020年度

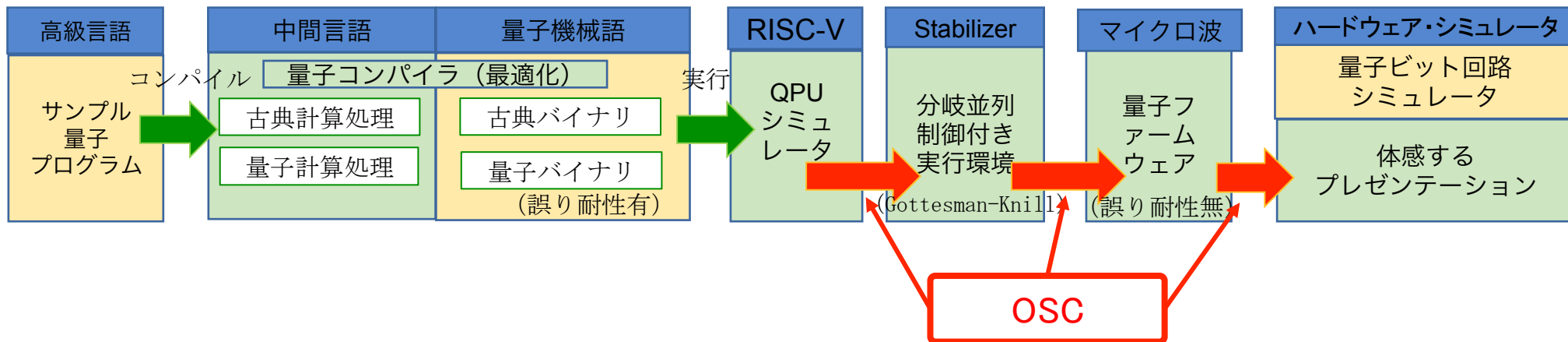
- ・2019年版では満たせなかった基盤の開発を進める。
量子誤り耐性の前後の繋ぎで一貫性を確保し、
量子ファームウェアの実用的な開発への道を開く
- ・具体的な利用例を示すことで、この開発環境を使う人を増やしたい。
教育的な利用を想定したプレゼンテーション
量子回路の最適化の実験例

※本資料では、2020年度の取り組みについては **2020** のマークで示します。

開発したアプリケーション(全体像)と内部通信



開発したアプリケーション(全体像)と内部通信

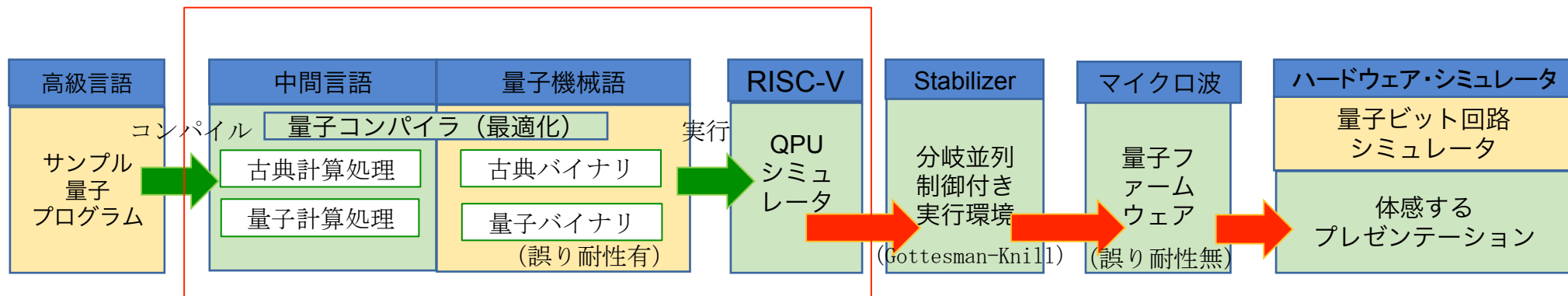


本PJで開発している各コンポーネント間は、OSC (Open Sound Control) プロトコルでインターフェースを共通化した設計です。

<p>【FROM QPU】</p> <ul style="list-style-type: none"> INIT : /Init w:Init32 h:Init32 Flash : /Barrier 測定 : /Mz r:Init32 q:Init32 1 qubit初期化 : /InitZero r:Init32 q:Init32 1 qubit演算 : /U r:Init32 q:Init32 (U は演算の種類による…………… /X, /Y, /Z, /H, /S, /Sdg, /T, /Tdg) Multi-CNOT演算 : /CX cw:Init32 ch:Init32 targets:Array paths:Array (arrayは2の倍数個で(w, h)の配列、pathsは2の倍数個でパスのリスト配列) <p>【TO QPU】</p> <ul style="list-style-type: none"> 測定結果 : /Mz res:Init32 f:Float 	<p>INIT, Flash の新設</p> <p>2020</p> <p>multi-Target Controlled-X に変更 surface code 用paths の追加</p> <p>2020</p>
--	---

※OSCは、オープンなマルチ言語対応の軽量な汎用的な通信仕様です。

全体像の連携イメージ ～量子コンパイラ～



2020年度の挑戦

- ・2019年版では満たせなかった基盤の開発を進める。
量子誤り耐性の前後の繋ぎで一貫性を確保し、
量子ファームウェアの実用的な開発への道を開く
- ・具体的な利用例を示すことで、この開発環境を使う人を増やしたい。
教育的な利用を想定したプレゼンテーション
量子回路の最適化の実験例

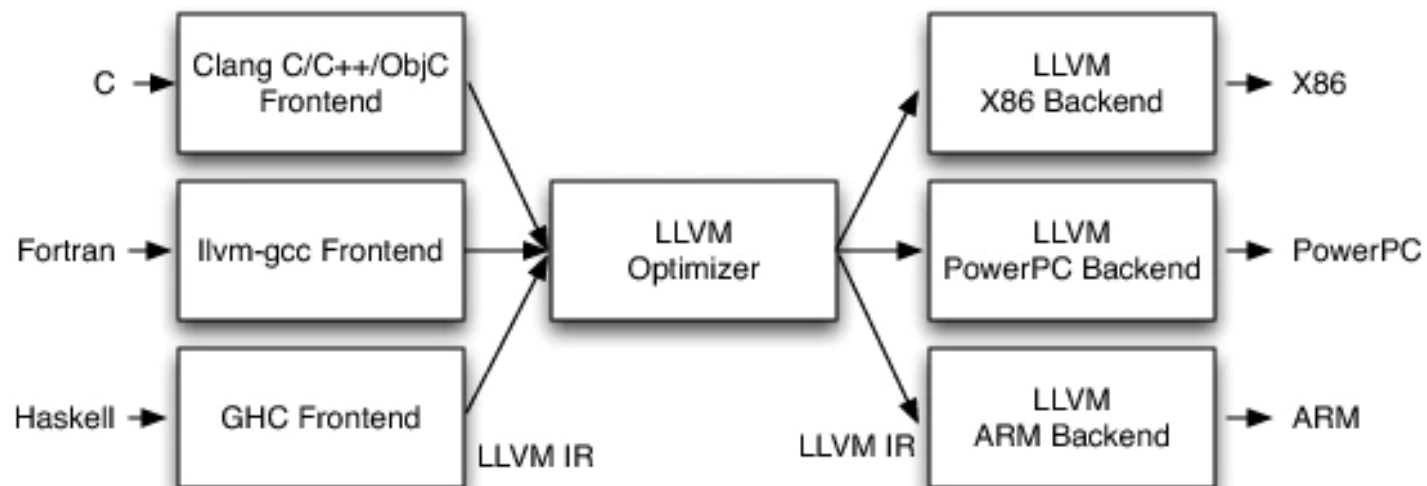
今まで莫大な蓄積がある古典計算機のプログラミング開発基盤

The LLVM Compiler Infrastructure

LLVM Overview

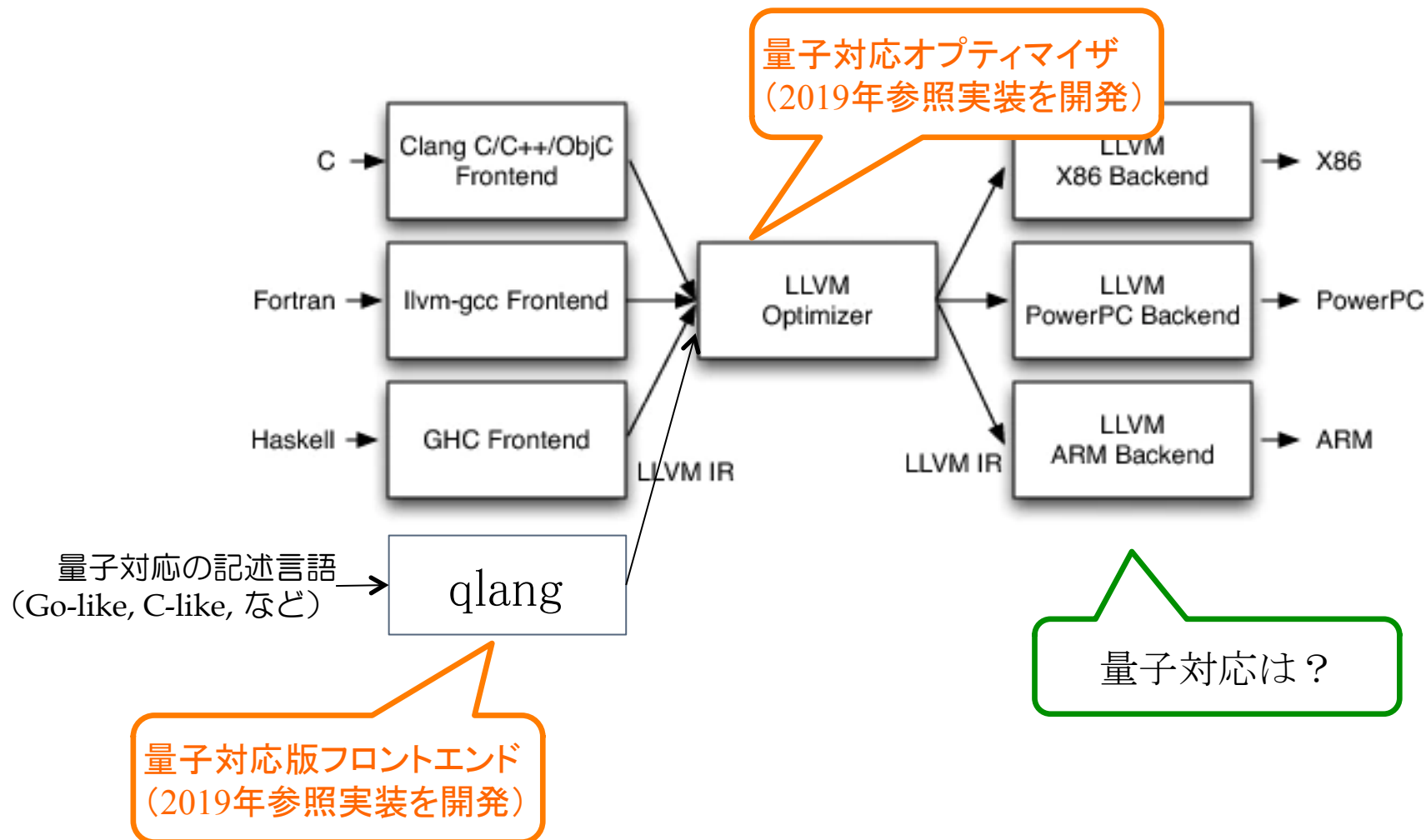
The LLVM Project is a collection of modular and reusable compiler and toolchain technologies. Despite its name, LLVM has little to do with traditional virtual machines. The name "LLVM" itself is not an acronym; it is the full name of the project. LLVM began as a research project at the University of Illinois, with the goal of providing a modern, SSA-based compilation strategy capable of supporting both static and dynamic compilation of arbitrary programming languages. Since then, LLVM has grown to be an umbrella project consisting of a number of subprojects, many of which are being used in production by a wide variety of commercial and open source projects as well as being widely used in academic research. Code in the LLVM project is licensed under the "Apache 2.0 License with LLVM exceptions"

(llvm.org より)



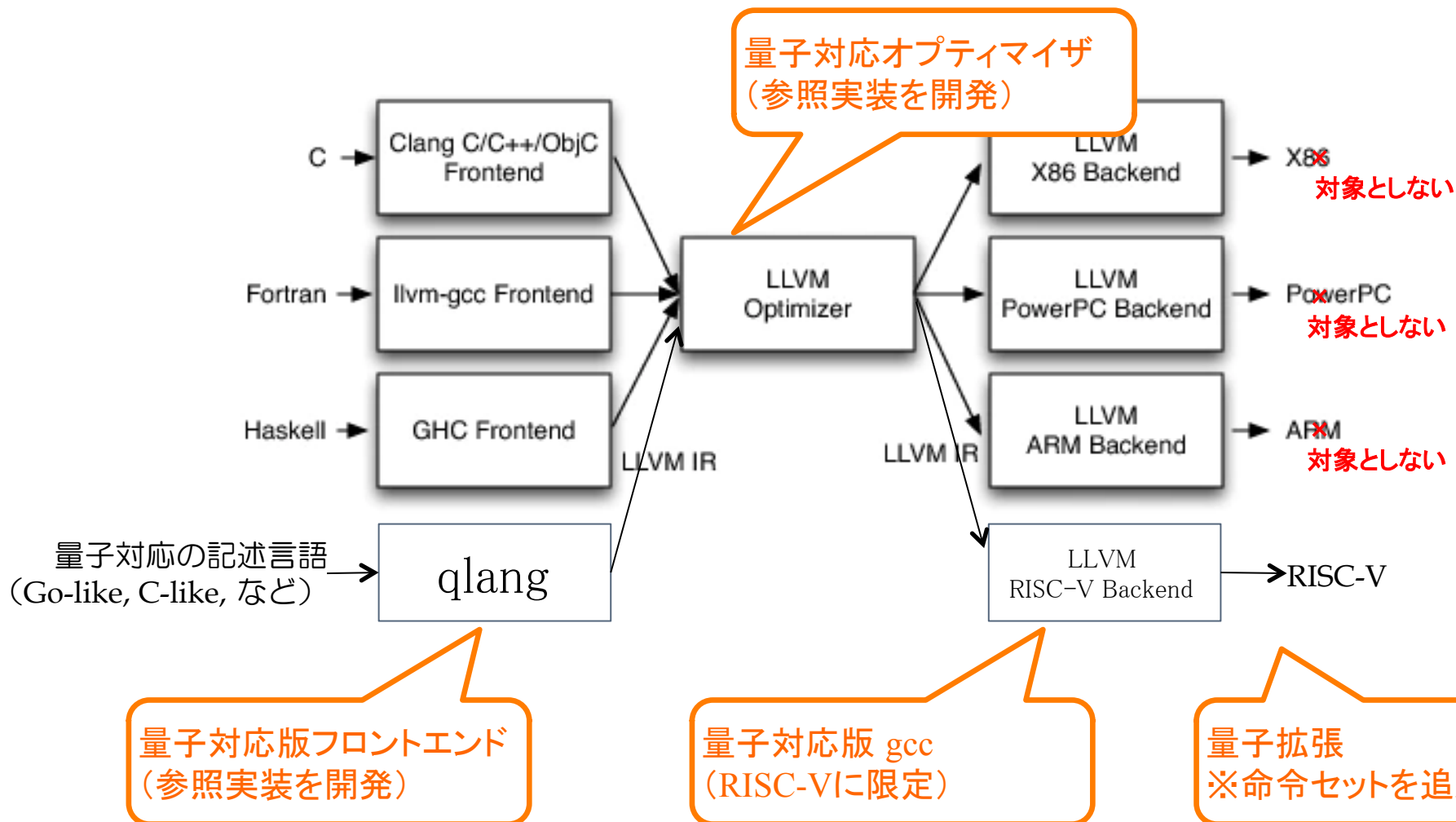
量子へ拡張した

The LLVM Compiler Infrastructure



2019年度に開発した量子プログラム基盤

The LLVM Compiler Infrastructure

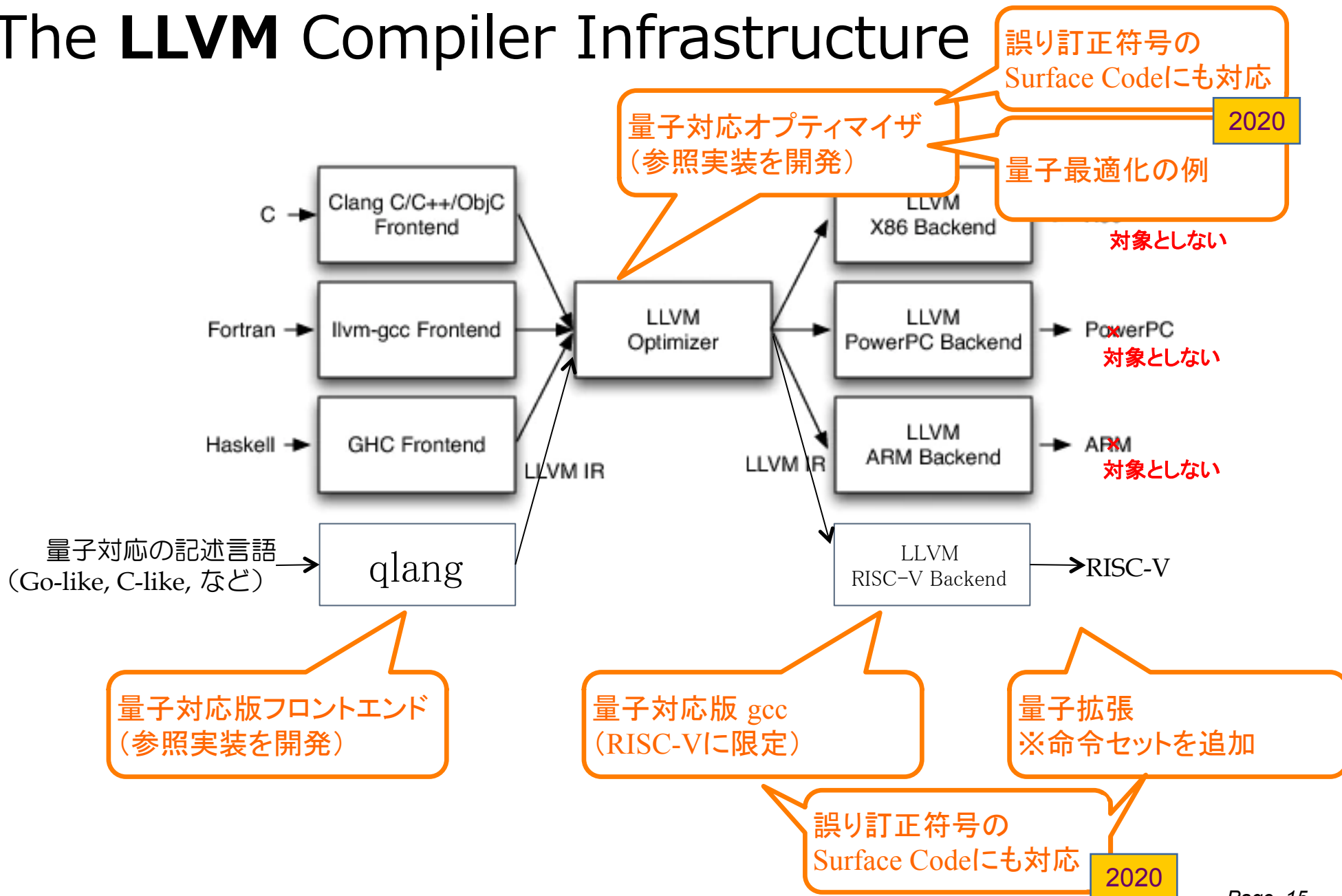


誤り訂正符号にも対応



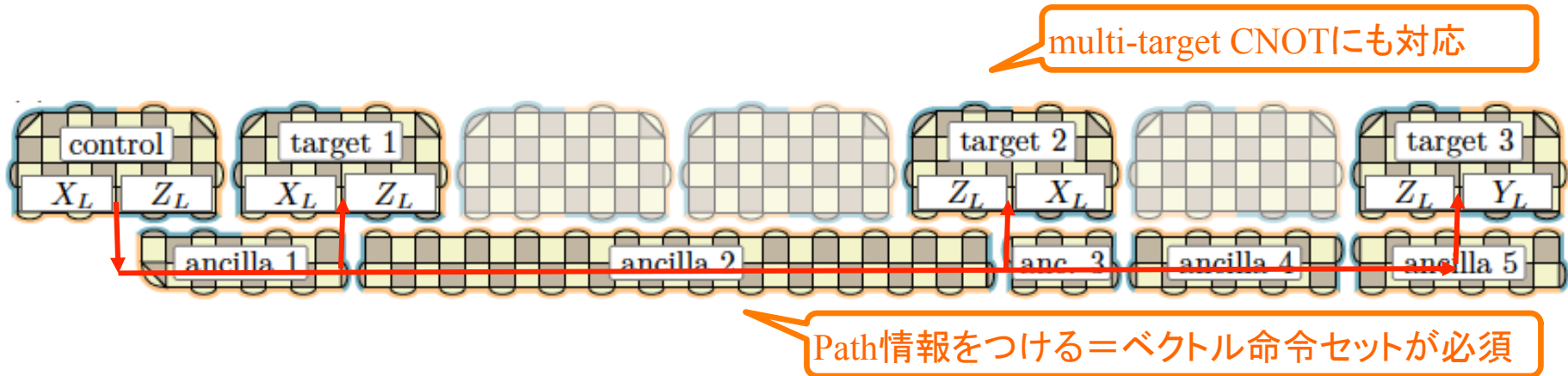
「量子誤り訂正を含む量子回路の最適化や量子命令セットのアーキテクチャを検討する人」にも利用を広げたい

The LLVM Compiler Infrastructure



表面符号

下層の表面符号を lattice surgery^(※) を想定して開発を進めました。



(図は、arXiv:1709.02318 Lattice Surgery with a Twist:
Simplifying Clifford Gates of Surface Codes より)

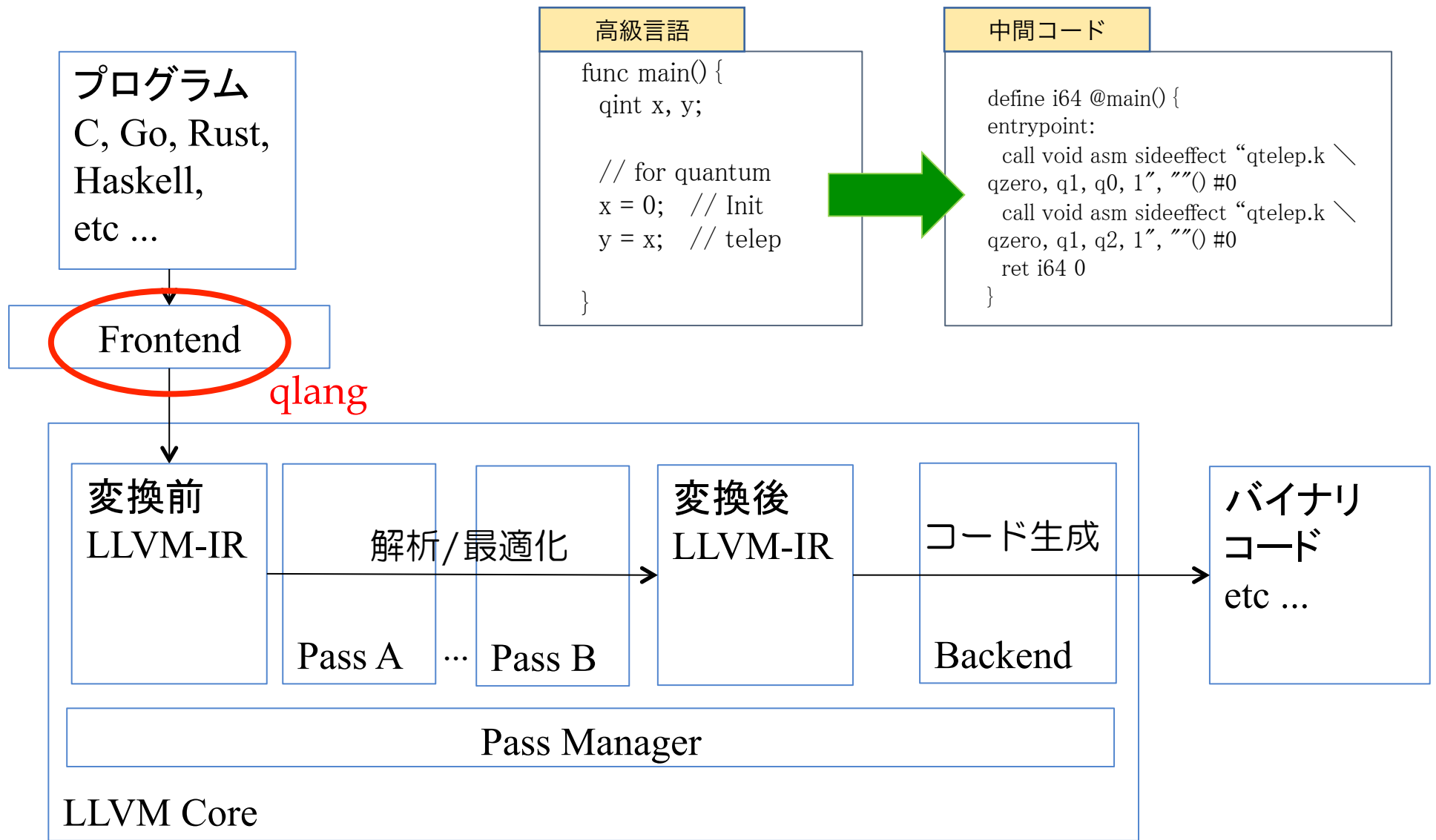
改良点

- CNOT演算である“qtocx.k”の仕様は、同一レジスタ内ではオーバーラップしない範囲で、複数のCNOT演算は同時にできる方がよい。(改善)
- **multi-target CNOT 演算**である命令を追加した方がよい。(追加)
- ある程度の期間のゲート演算(列)をバッファリングして、まとめて処理指示できるようなフラッシュ用の命令を追加した方がよい。(追加)
- multi-target CNOT 演算には、**Path情報**をつける。(改善)
- Path情報の付加のため、**ベクトル命令セット**が必須となる。(前提条件の追加)

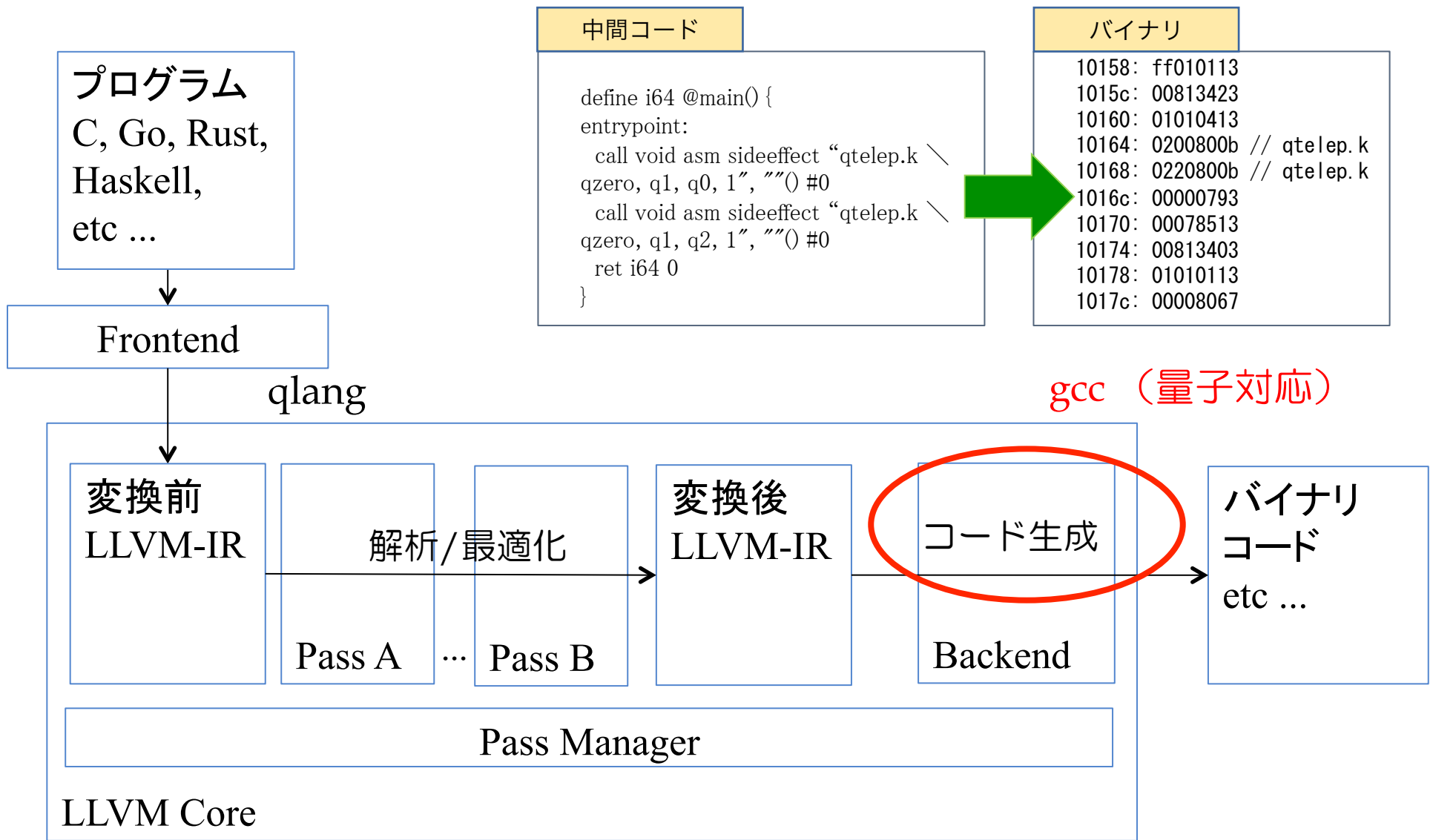
(※) lattice surgery 選択の理由

- 分岐並列制御処理(実行環境)の実装負担を考慮した。(Hadamardの実装に負担が大きく異なる等)
- 「CNOT, multi-target CNOTの配置と量子ビットの配置問題」に関しては、フレームワークとして準備すべき機能は変わらない。(最適化の結果は異なる)

量子コンパイラにおける Frontend



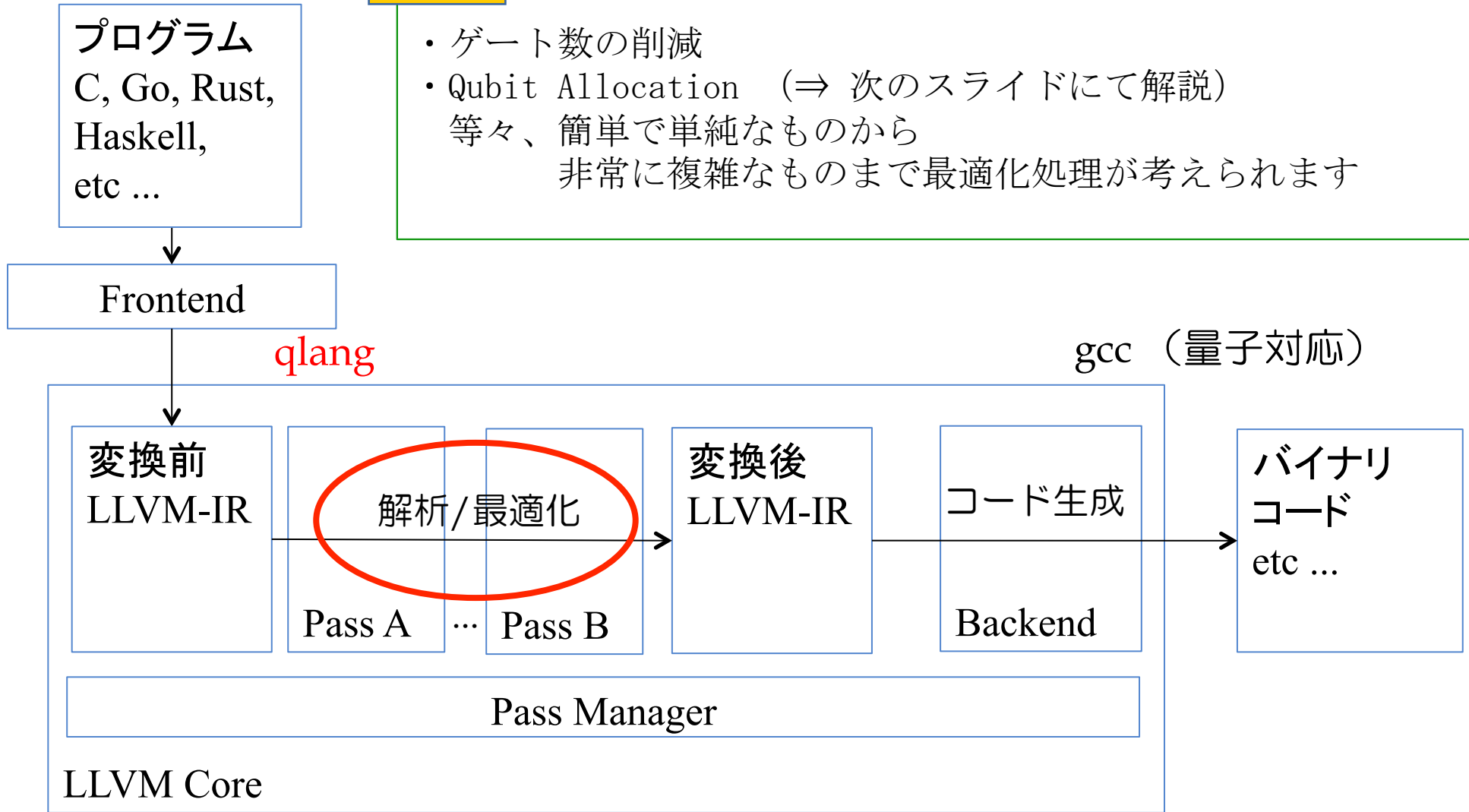
量子コンパイラにおける Backend (QEXEの生成)



量子コンパイラにおける Pass

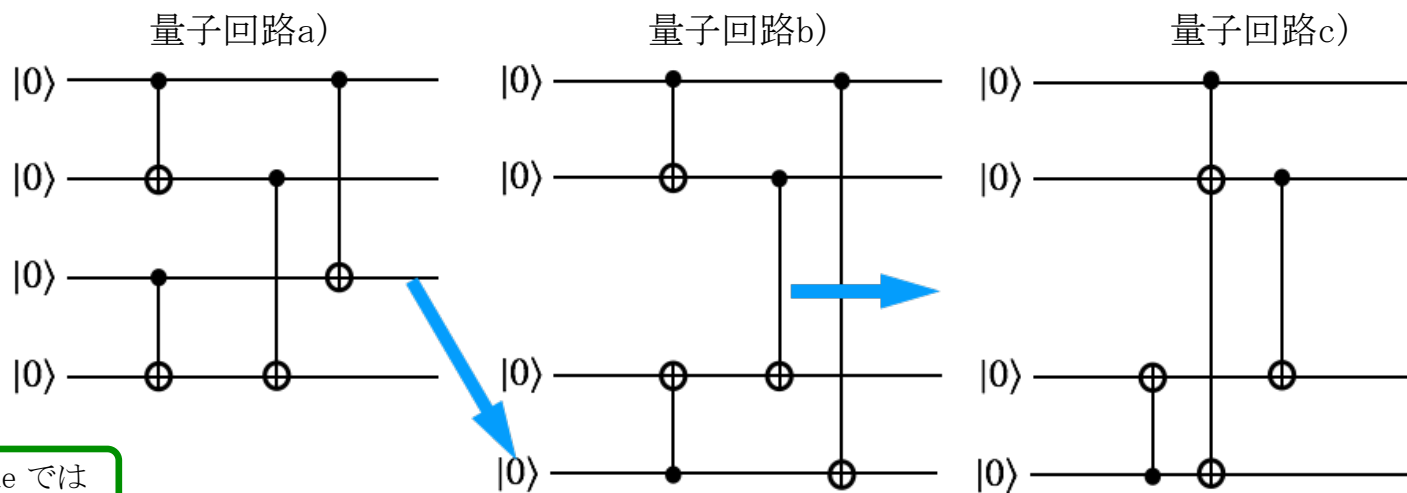
2020

- ゲート数の削減
- Qubit Allocation (⇒ 次のスライドにて解説)
等々、簡単で単純なものから
非常に複雑なものまで最適化処理が考えられます



量子最適化の例題: Qubit Allocation

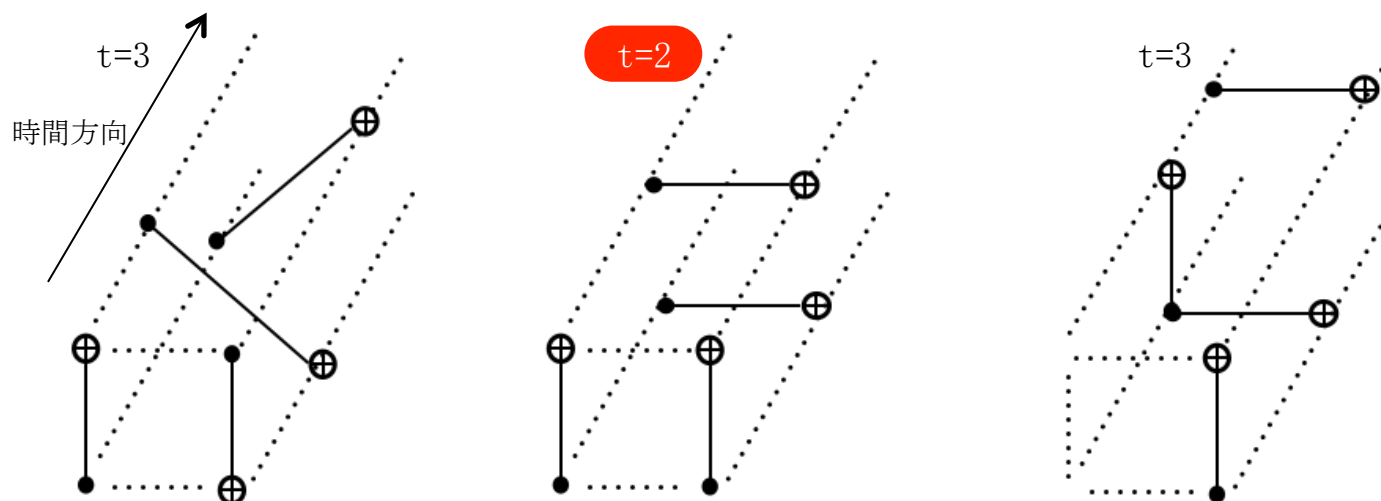
Surface Code (lattice surgery) を前提として、CNOT, multi-target CNOTの配置と量子ビットの配置を変えて、実行ステップ数を短くする問題



同じ量子回路

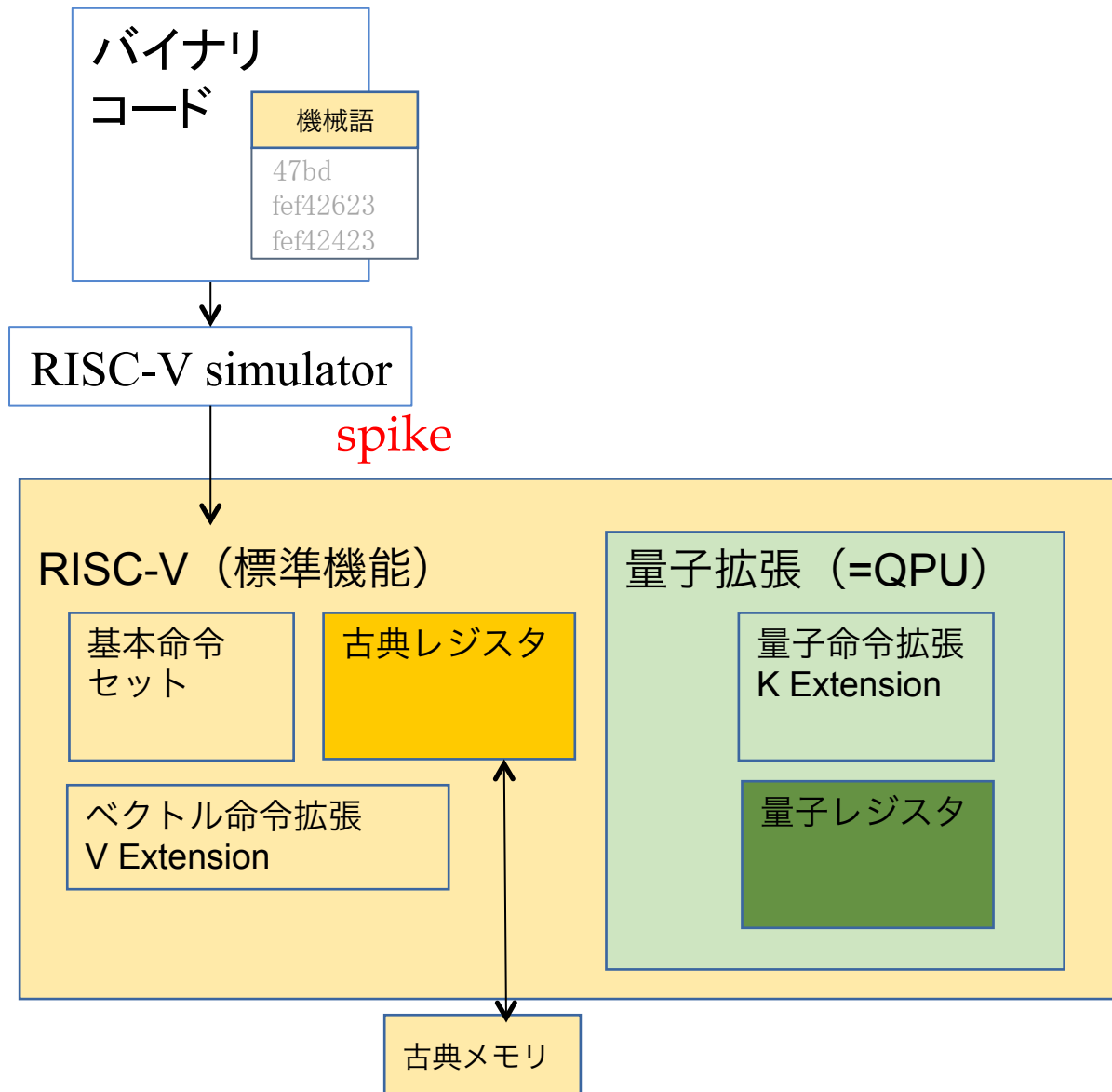
Surface Code では

t: Logical CNOTの実行ステップ数



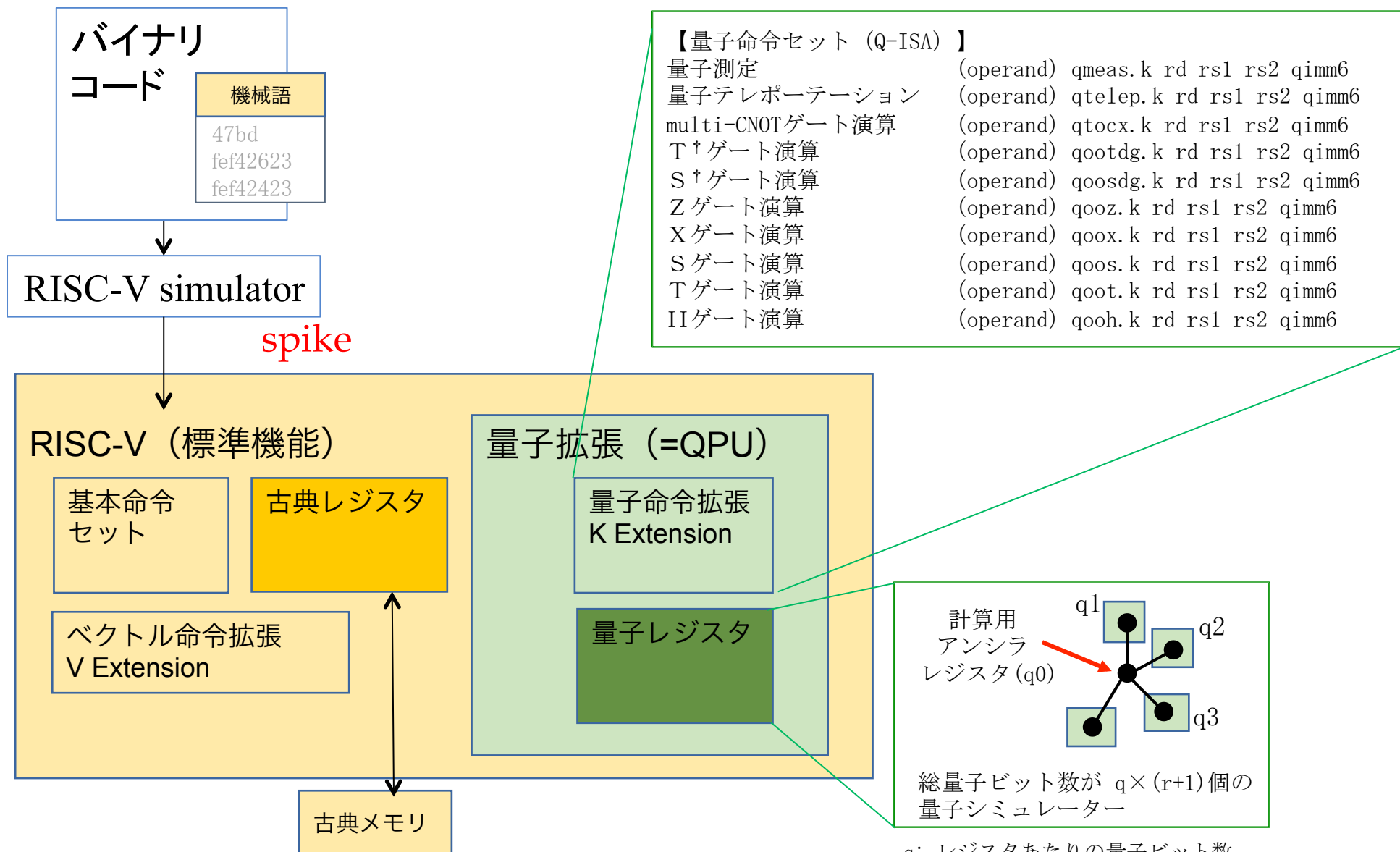
QEXEの実行環境(量子シミュレータ)

RISC-V謹製のCPUシミュレータを改造して、量子拡張された量子プロセッサを仮想マシン(Virtual Machine, VM)として開発しました。



QEXEの実行環境(量子シミュレータ)

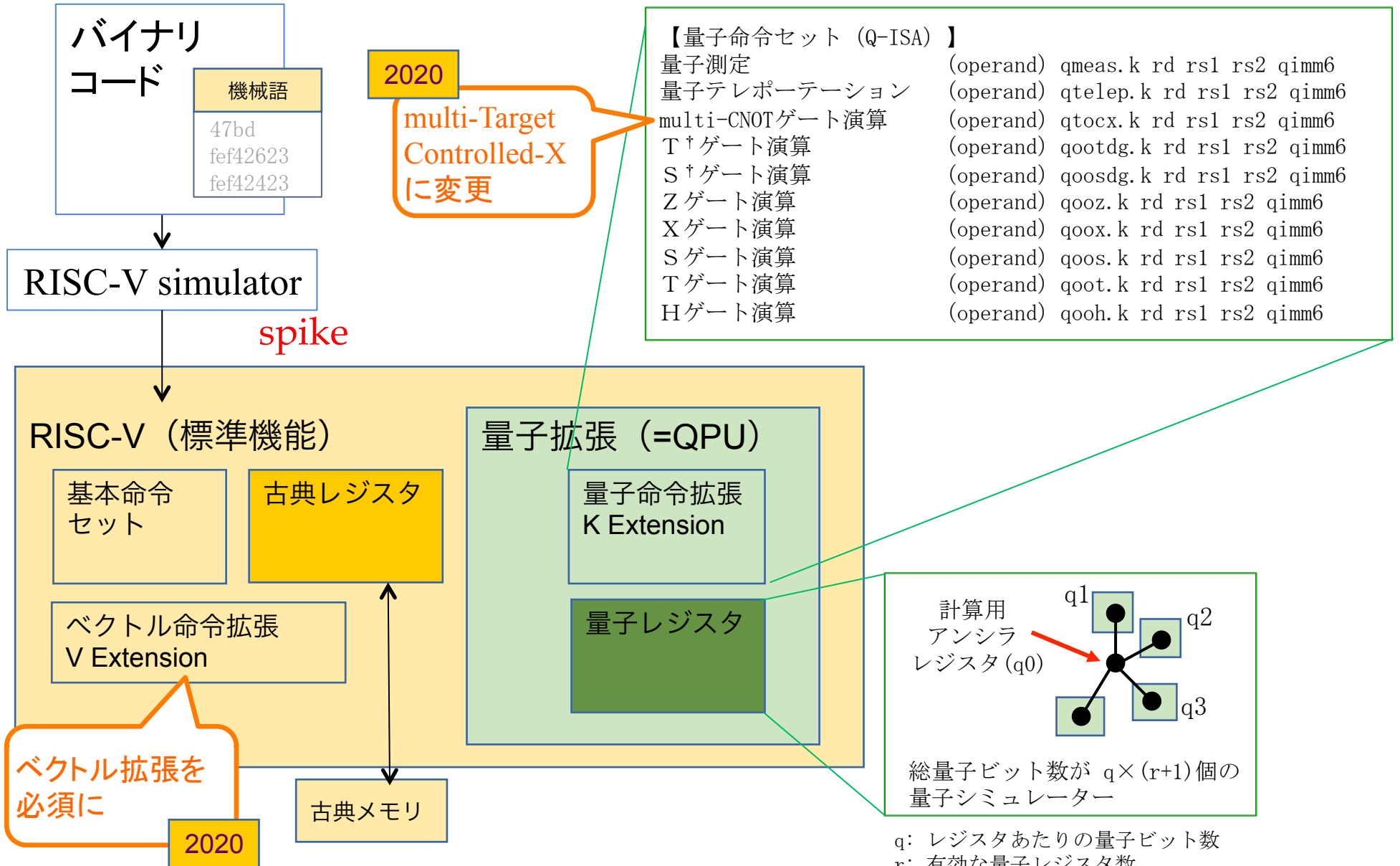
RISC-V謹製のCPUシミュレータを改造して、量子拡張された量子プロセッサを仮想マシン(Virtual Machine, VM)として開発しました。



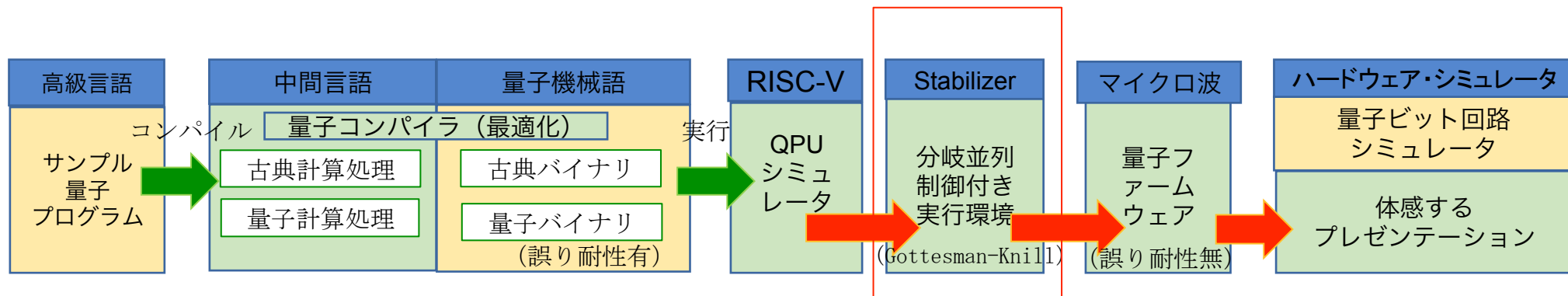
q: レジスタあたりの量子ビット数
r: 有効な量子レジスタ数

QEXEの実行環境(量子シミュレータ)

RISC-V謹製のCPUシミュレータを改造して、量子拡張された量子プロセッサを仮想マシン(Virtual Machine, VM)として開発しました。



全体像の連携イメージ ～分岐並列制御処理実行環境～

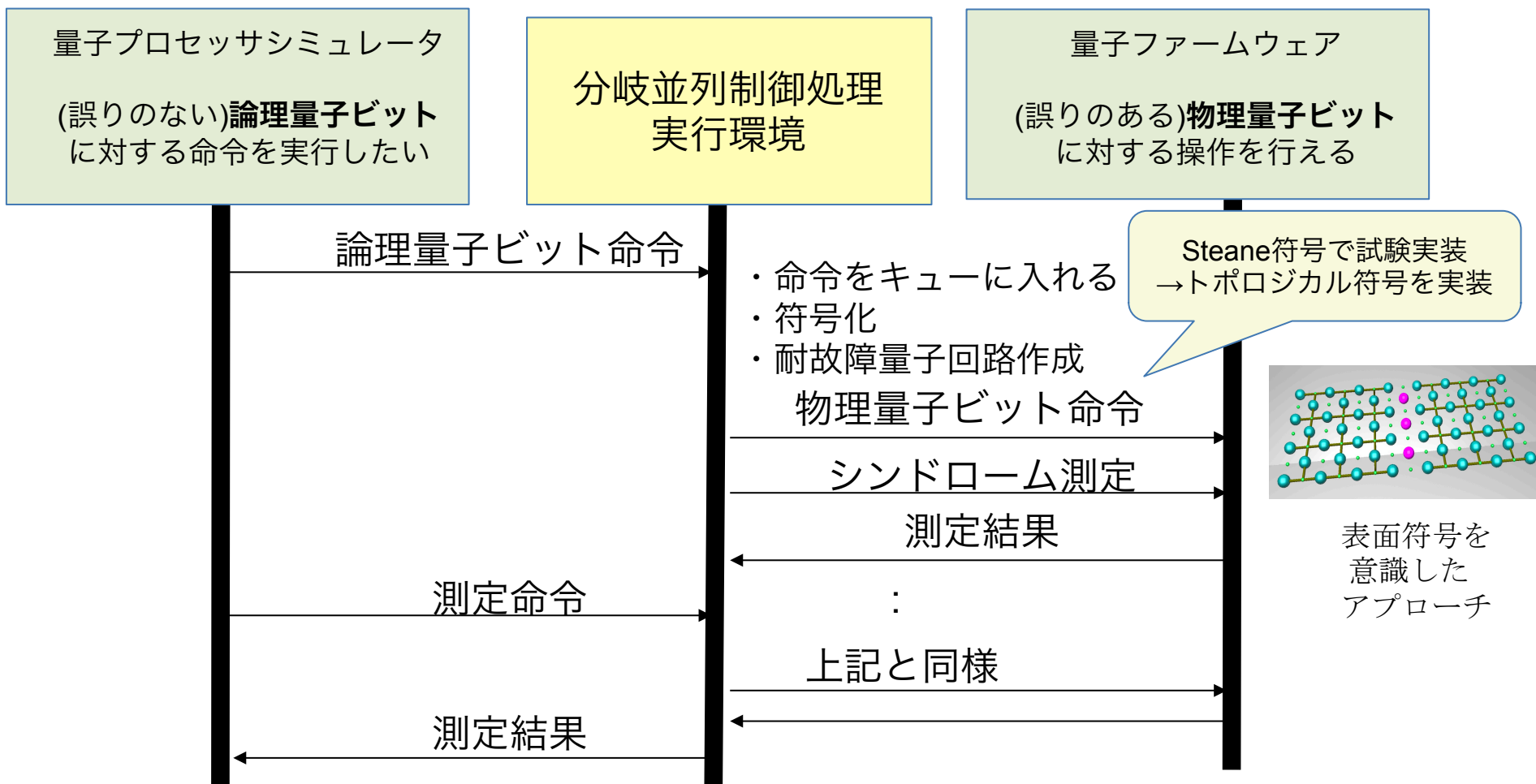


2020年度の挑戦

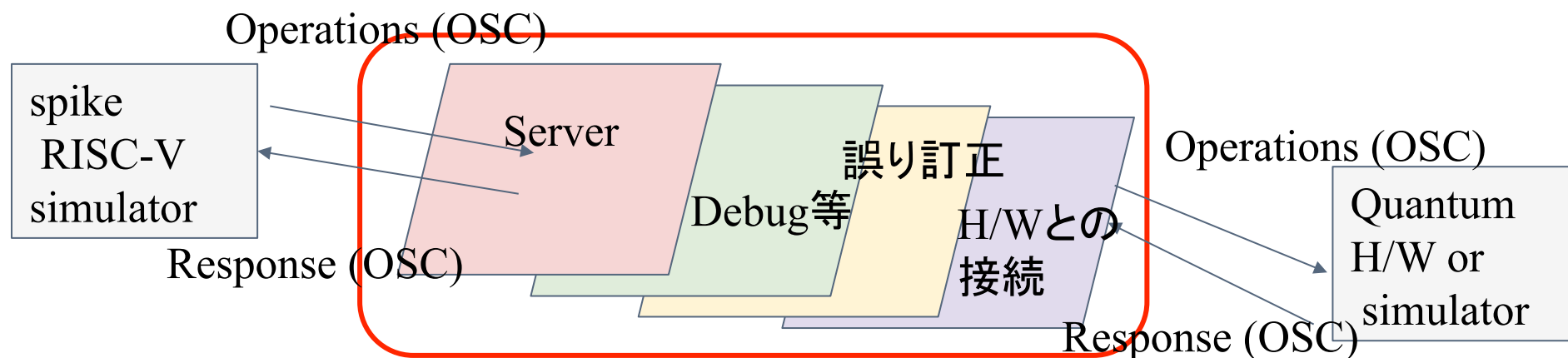
- ・2019年版では満たせなかった基盤の開発を進める。
量子誤り耐性の前後の繋ぎで一貫性を確保し、
量子ファームウェアの実用的な開発への道を開く
- ・具体的な利用例を示すことで、この開発環境を使う人を増やしたい。
教育的な利用を想定したプレゼンテーション
量子回路の最適化の実験例

分岐並列(非同期)制御のある実行環境の開発

論理量子ビットが前提の量子プロセッサ・シミュレータと、
物理量子ビットが前提の量子ファームウェアとをつなぎ合わせる



実行環境の特徴と意義



「層」をイメージし、量子コンピューティングのためのインタフェースを新規設計

- ★ 誤り訂正などをアプリケーションとハードウェア、シミュレータの間に挟み込む
- ★ システムプログラミング言語Rustのtrait (Javaでいうinterface)として定義
- ★ 本環境単体でも、量子コンピューティングのフレームワークとして利用可能
 - 他のハードウェア、シミュレータ、誤り訂正、通信プロトコルも、層として実装を行うことで既にある層と結合させることができる

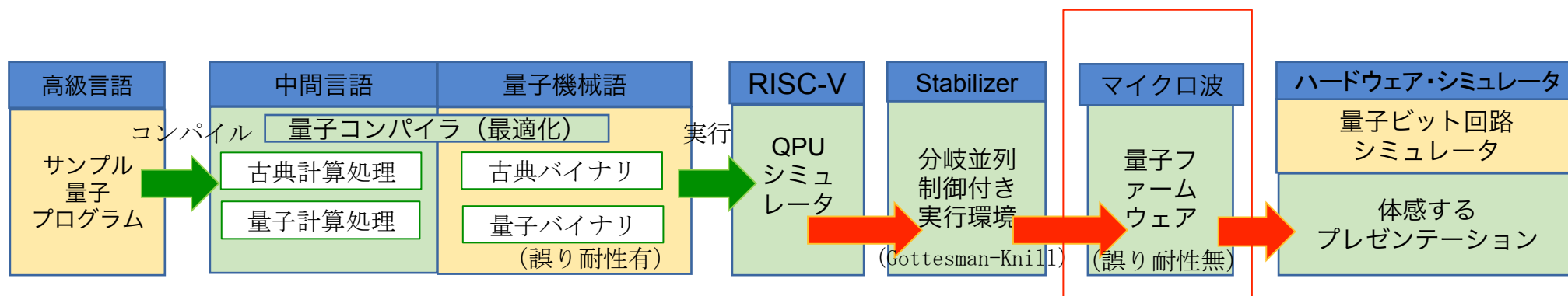
上位レイヤと下位レイヤを繋げるために、以下を実装した

- ★ Steane符号を用いた論理操作を物理操作に翻訳する層(表面符号は実装中)
- ★ 既存Pythonシミュレータを動かす層, Gottesman-Knill定理を利用したシミュレータ層
- ★ 上位レイヤ、下位レイヤと通信を行う層

コンパイラから誤り訂正、マイクロ波生成までの一気通貫した実装を示した

- ★ これを用いて、基本的な性能評価を行ったり、より複雑な設計の土台とできる

全体像の連携イメージ ～量子ファームウェア～

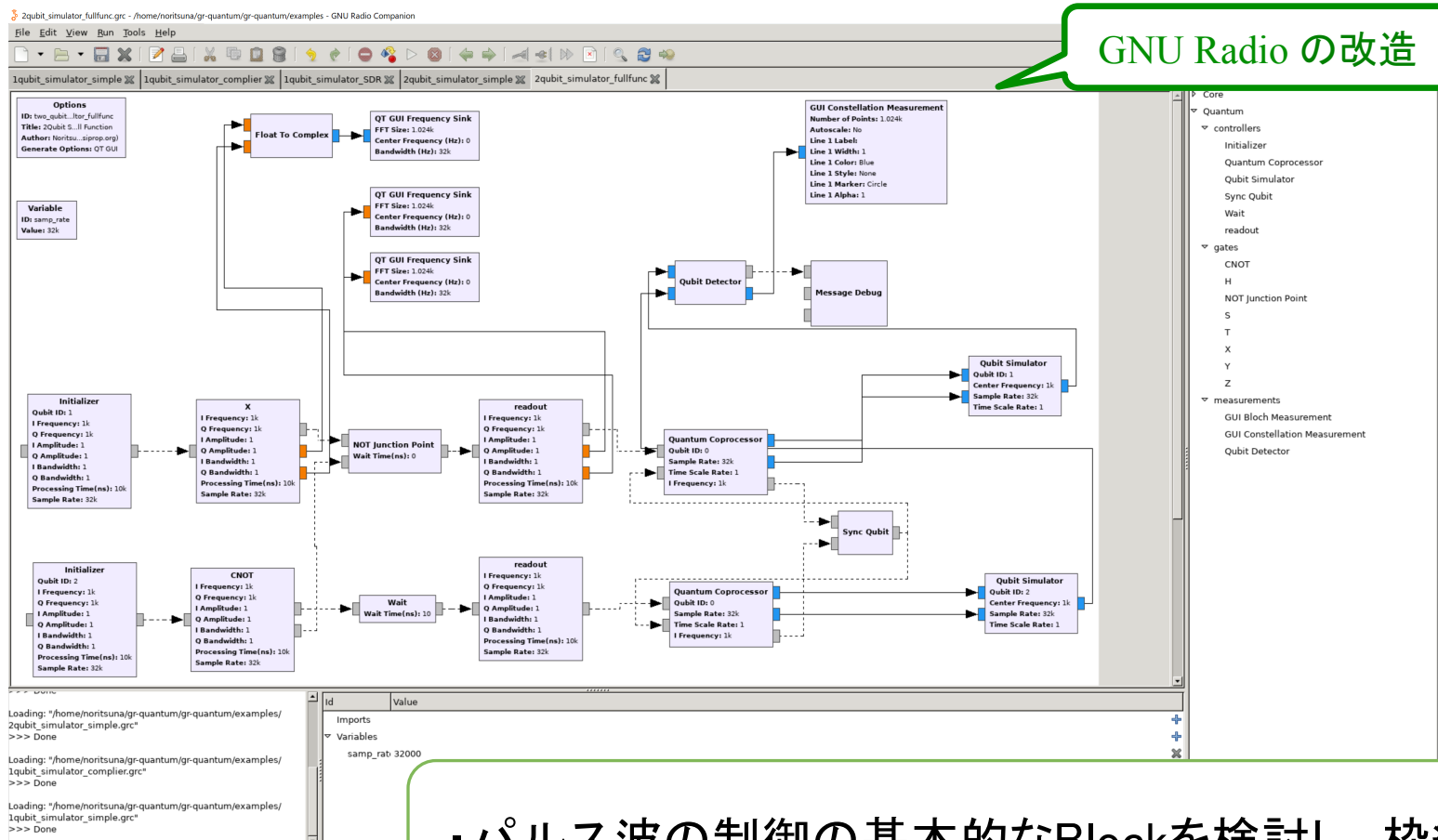


2020年度の挑戦

- ・2019年版では満たせなかった基盤の開発を進める。
量子誤り耐性の前後の繋ぎで一貫性を確保し、
量子ファームウェアの実用的な開発への道を開く
- ・具体的な利用例を示すことで、この開発環境を使う人を増やしたい。
教育的な利用を想定したプレゼンテーション
量子回路の最適化の実験例

量子ファームウェア(開発した画面)

SDR(Software Defined Radio)を用いることにより、ソフトウェアで定義可能なマイクロ波を制御する量子ファームウェア(読み出し、1量子ビット操作)を開発しました。



- ・パルス波の制御の基本的なBlockを検討し、枠組みを開発。
- ・QuTipシミュレーターとの接続部分を実装。

量子ファームウェアの量子研究者・技術者向け機能(開発中)

2019年度では「無線技術者」に量子世界へ足を踏み入れてもらうという目的があったため、「無線技術者」にとって理解しやすい「周波数ベース」で量子ファームウェアを開発しました。

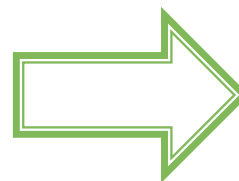
しかし、「量子研究者や技術者」にとって分かりにくい形となってしまった。そこで、本年度では「量子研究者や技術者」にも使っていたただくために「時間ベース」でパルス波を生成する OpenPulse をベースとした形での入力&出力可能な機能拡張を行うこととした。

GNURadio(ソフトウェア)上で入力

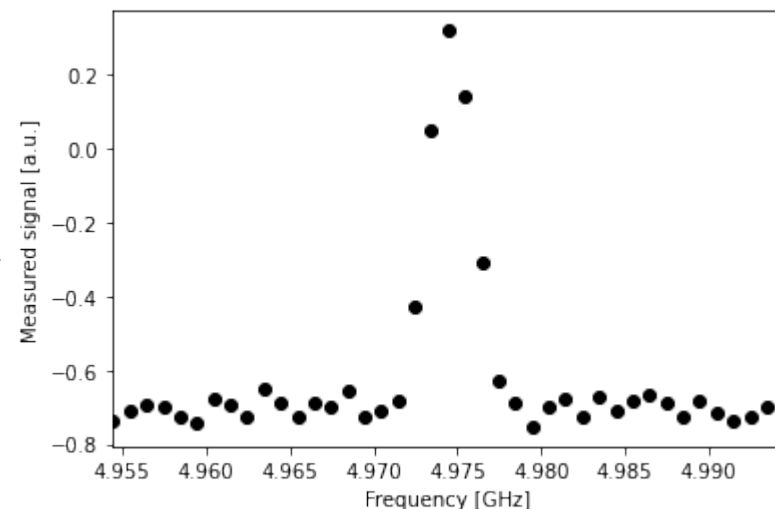
Example JSON - Pulse Library

```
[
  {"name": "pulse1", "samples": [[0.1,0.0],[0.2,0.0],
    [0.1,0.0],[0.0,0.0],[-0.1,0.0],[-0.2,0.0],
    [0.1,0.0],[0.1,0.0],[0.05,0.0]]},
  {"name": "drag_pulse", "samples": [[0.004,0.009],
    [0.029,0.05],[0.135,0.18],[0.41,0.365],[0.8,0.355],
    [1.0,0.0],[0.8,-0.355],[0.41,-0.365],[0.135,-0.18],
    [0.029,-0.05],[0.004,-0.009]]},
  {"name": "square_pulse", "samples": [[0.1,0.0],
    [0.1,0.0],[0.1,0.0],[0.1,0.0],[0.1,0.0]]}
]
```

※一部のみ抜粋

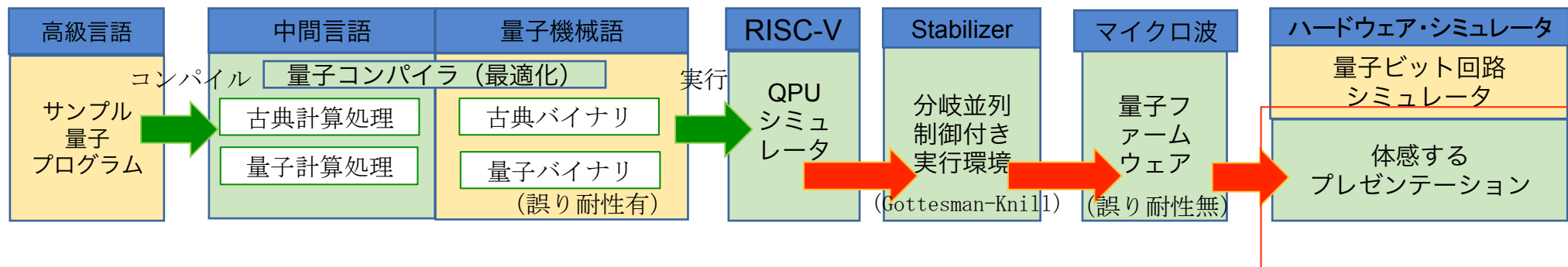


SDRから実電波として出力



- ・内部的なパルス波の変換・処理部分の検討・実装は完了
- ・UIの部分を現在開発中

全体像の連携イメージ ～量子計算を体感するアプリケーション～



2020年度の挑戦

- ・2019年版では満たせなかった基盤の開発を進める。
量子誤り耐性の前後の繋ぎで一貫性を確保し、
量子ファームウェアの実用的な開発への道を開く
- ・具体的な利用例を示すことで、この開発環境を使う人を増やしたい。
教育的な利用を想定したプレゼンテーション
量子回路の最適化の実験例

量子計算を体感するアプリケーションの実装(1)

- 古典コンピュータから量子コンピュータを使った表現へ
 - ・ 古典コンピュータを使った作品・メディアアートなどの表現は沢山ある。
 - ・ 量子コンピュータを使った表現・作品も今後は出てくる(はず)。

古典コンピュータを使った作品・展示



CPU: ATmega328P、心拍センサ、粘性流体
Exploratorium, San Francisco



CPU : x86 Intel Core i7、LED、ステッパ、サーボ、Kincet...etc
サントミュージゼ(上田市交流文化芸術センター・上田市美術館)

量子コンピュータを使った作品・展示 ???

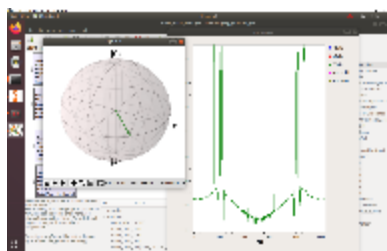
量子計算を体感するアプリケーションの実装(2)

■ 量子ファームウェアを利用したアプリケーションの制作

- 量子ファームウェアGNU RadioのSDR マイクロ波(パルス波)を利用
- 量子計算で利用する技術を利用した作品

■ ターゲット利用者

- 量子計算を知らないひと(子供~大人)全員
- 体験から興味を持ってもらう・色々な人に関心を持ってもらう



左がブロッホ球表示、
右がパルス波表示の画面



表現上のパラメータとして利用

- パルスをAMPで落として音に変換

粒子によるクラドニ図形でを利用した
動いて見て楽しめる表現へ



量子計算を体感するアプリケーションの実装(3)

■ 主な制作物の概要

- 振動子(スピーカ・鉄板切削・筐体は3Dプリンタで制作) x 8台
- SDR(パルスの送信用・受信用) x 16台
- Raspberry Pi 4(GNU Radioのパルス生成・音波への変換) x 16台
- 増幅用アンプ x 8台

量子計算を体感するアプリケーションのデモ動画

量子計算を体感するアプリケーションの展示など

■ Maker Faire Tokyo 2020での展示

コロナ禍のなかでビックサイトで実イベントとして開催(2020/10/3-4)

凄まじいほどの子供・大人が来場



量子計算を体感するアプリケーションの展示など

■ AELTM(Clusterバーチャル上でのイベント)

- ・ 振動子を普通に調達すると高いので、ジャンクスピーカを利用したVCM (Voice Coil Motor) として再生した話

想を眩こう！ イベントハッシュタグ #AELTM でツイート！ 発表者への質問や感想を眩こう！

全体図

パルス
ダウン
コンパート

量子演算 クラドニダイラタンシー

発表者：Hiroataka Niisato @hirotakaster
テーマ：ジャンク・スピーカを漁る日々

ツイート！ 発表者への質問や感想を眩こう！

直近1ヶ月でバラしたスピーカー一覧

スピーカ	型番	ジャンク価
SB-PM510(Panasonic)	SB-PM510MD	500円
SB-PM77(Panasonic) x2	SC-PM77MD	1円、500円
LS-SH3-L(KENWOOD)	AVINO(らしい?)	500円
SS-P11(SONY)	FH-P11(らしい?)	500円
SB-PM710(Panasonic) x 3	SC-PM710SD-K	500円x3
SB-PM70(Panasonic)	SC-PM70MD-S	500円
Creative Inspire 5.1(CREATIVE)		700円

発表者：Hiroataka Niisato @hirotakaster
テーマ：ジャンク・スピーカを漁る日々

イベントハッシュタグ #AELTM でツイート！

500円から生み出される価値(パーツ取り)

300円

1,280円

1,280円

発表者：Hiroataka Niisato @hirotakaster
テーマ：ジャンク・スピーカを漁る日々

発表者：Hiroataka Niisato @hirotakaster
テーマ：ジャンク・スピーカを漁る日々

量子計算を体感するアプリケーションの展示など

■ Ogaki Mini Maker Faireで登壇
IAMAS (情報科学芸術大学院大学) で
2020/12/05-06にて開催

■ ラズパイコンテストで受賞
Raspberry Piを利用したことから
応募して受賞

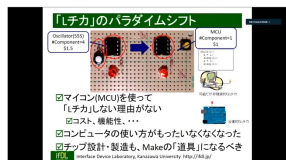
オンライン会場の様子 (抜粋)



および
43 新卒採用 / 42 3DモデルBARU / 34 2名〜人まで (9) プ
がプラットフォーム / 44 MakeLab / アナログデジタル機器 / 中
の電子



ばるーんさつと (仮) に関して
いきなりCube-SatやCan-satは数が多い事
大きい目的のため一歩としての参加希望
観望者必らずシミュレーション/実機/実機に
絞って、よりある一歩を踏み出す事を目的とした報告
です。一歩ははじめての発表であることを期待して
【知識だけで終わらせない】
- プログラムも多量に、並行しての物を活用するよう
- 作るだけでなく、実際に打ち上げまで体験出来るよう
にしなさい
- プログラムの基礎や、電気回路の基礎を学べる
- Can-SatやCube-Satへ応用できる知識を得る用にし
なさい



Event Report

17



量子計算を体感するアプリケーションの今後

■ 展示やイベントを通して

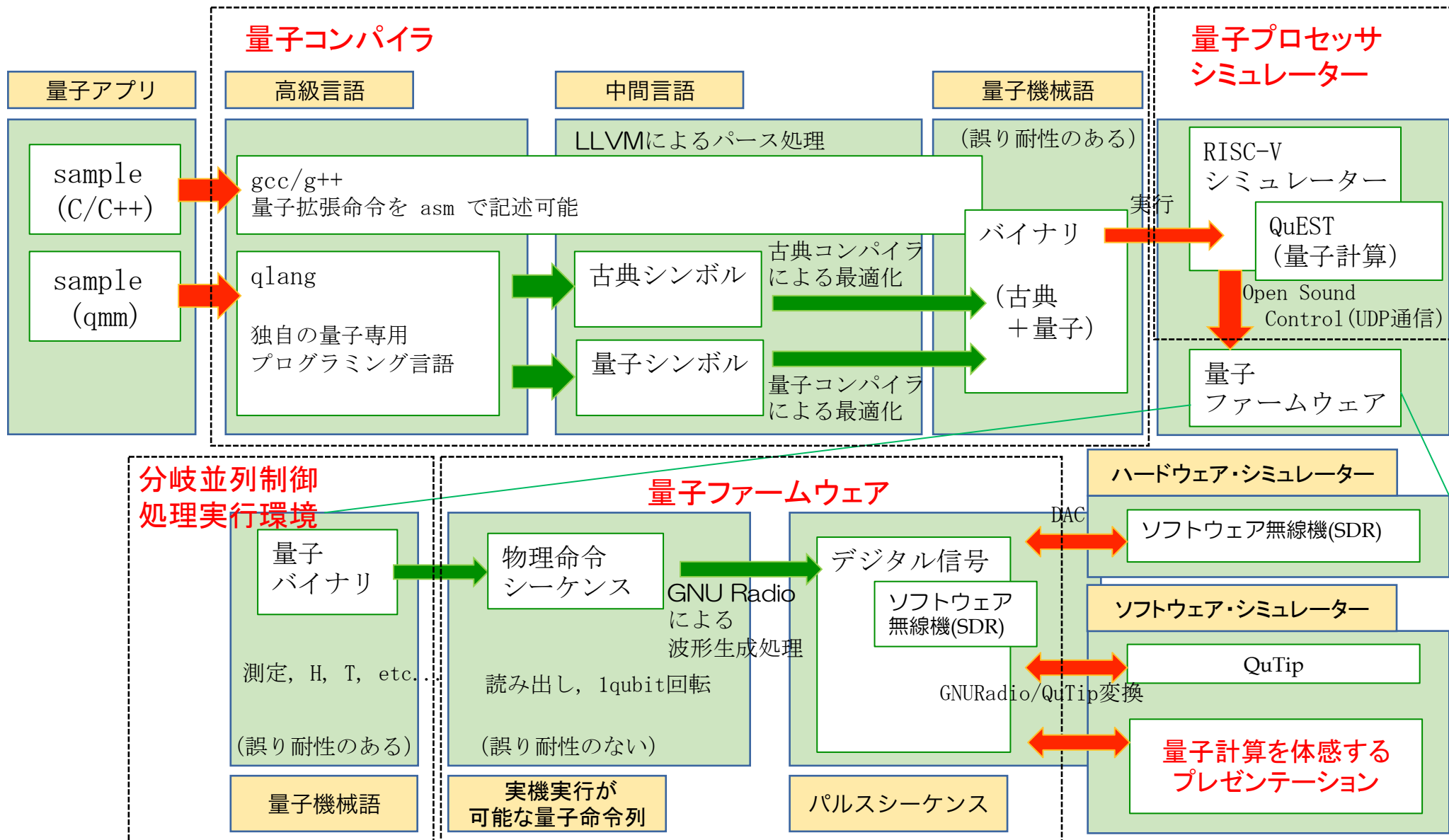
- ・興味を持って貰えるか不安だったが、子供ウケした。
- ・全体構成が大きくなり、準備・設営・移動が大変になった。

小規模(4個くらい)で展示を行うようにする

■ 今後(2021～)

- ・コロナ禍ながら、リアル展示イベントにエントリー中
通ったら展示をしてくる
- ・作品コンテストも追加で応募中

開発したアプリケーション(全体像)



本プロジェクトの効果

新規性

計算機をスケールした際に高い性能を発揮することは歴史的に見て非常に困難な課題。本プロジェクトで改造するオープンソースのアーキテクチャは、そのような競争を生き抜いたものである。

そのアーキテクチャを踏襲しつつ、量子に拡張することは、
量子計算機のアーキテクチャとして提案する上でも有力な方法の1つである。

期待される効果

非量子な技術者（既存の計算機のコンパイラ、マイクロ波制御の技術者）
にとって**理解しやすく**、量子分野への参入や開発がしやすくなる**ことが期待できる**。

コンパイラ最適化などの、**古典における既存の効率化の技術を**
具体的案実装を通し量子へ活用できることを実証した。

公開情報

Maker Fair Tokyo 2020 に出展した展示物が記事になりました。

レポート #5 - 量子ビットの操作を可視化した「8bit Quantum Computer」
https://makezine.jp/blog/2020/11/mft2020_8bit-quantum-computer.html

開発ブログなど

※開発の進捗や技術情報を随時 Blog に公開しました

<https://quantum.siprop.org/>

ソース公開

※ソースコードを公開しております。

<https://github.com/openql-org/>

コミュニティ

(Slack) <https://openql.slack.com/>

(登録者数260名 ※招待制)

(勉強会) <https://openql.connpass.com/>

(登録者数880名)