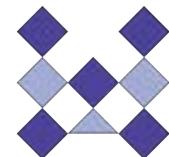




事業項目③: 量子・スパコン連携スケジューラ および量子・HPC連携ソフトウェアの カップリング技術の研究開発



Wisteria
BDEC-01



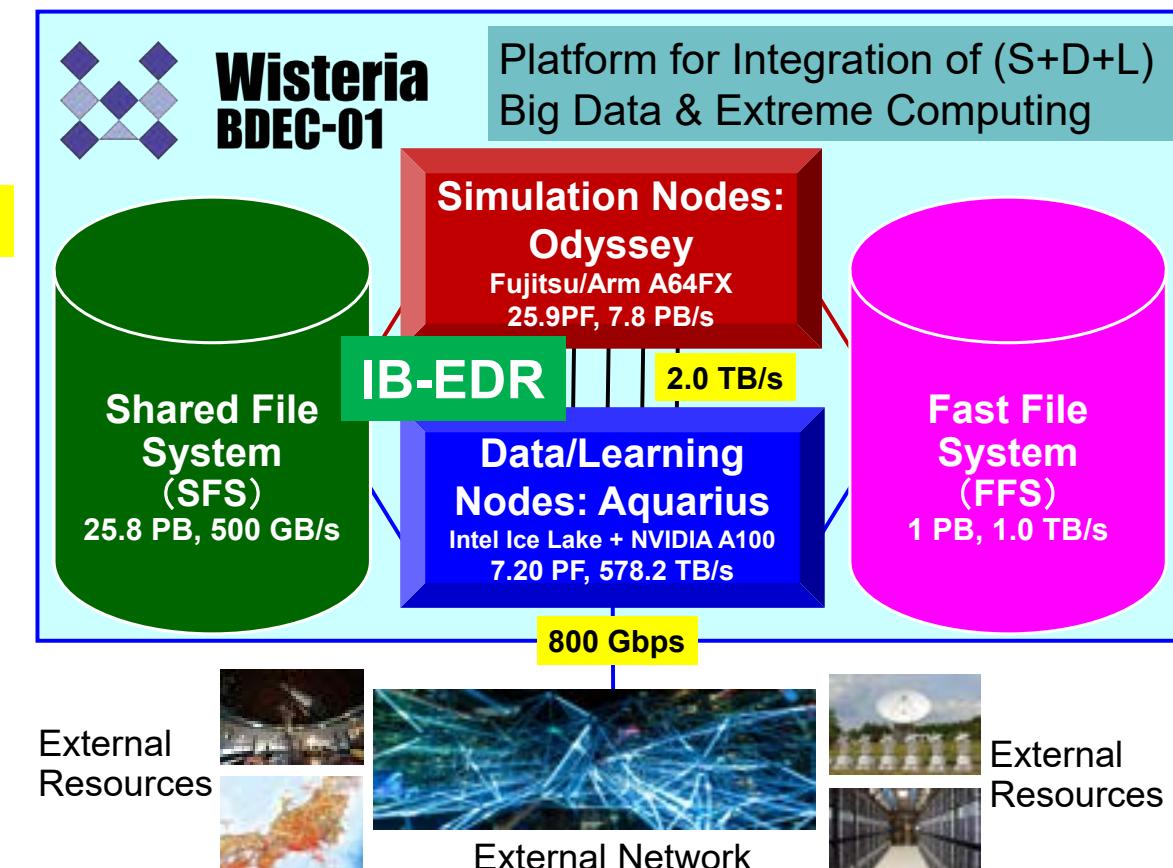
中島 研吾
東京大学情報基盤センター

2025年12月12日

ヘテロジニアスなシステムを利用した 「計算・データ・学習」融合(S+D+L)



- Wisteria/BDEC-01(2021年5月～)
 - Odyssey: 計算ノード群(A64FX) (7,680)
 - Aquarius: データ／学習ノード群(NVIDIA A100) (360)
 - 計算資源の78%はOdyssey(CPU)
- Miyabi (2025年1月～) JCAHPC
 - Miyabi-G with NVIDIA GH200(1,120)
 - Miyabi-C with Intel Xeon Max (190)
 - 計算機資源の98%はMiyabi-G (GPU)
- h3-Open-BDEC (2019年6月～2023年3月)



ヘテロジニアスなシステムを利用した 「計算・データ・学習」融合(S+D+L)

IB-NDR(400Gbps)

IB-NDR200(200)

IB-HDR(200)

Miyabi-G

NVIDIA GH200 1,120
78.2 PF, 5.07 PB/sec

Miyabi-C

Intel Xeon Max
(HBM2e) 2 x 190
1.3 PF, 608 TB/sec

File System

DDN EXA Scaler
11.3 PB, 1.0TB/sec
All Flash Storage

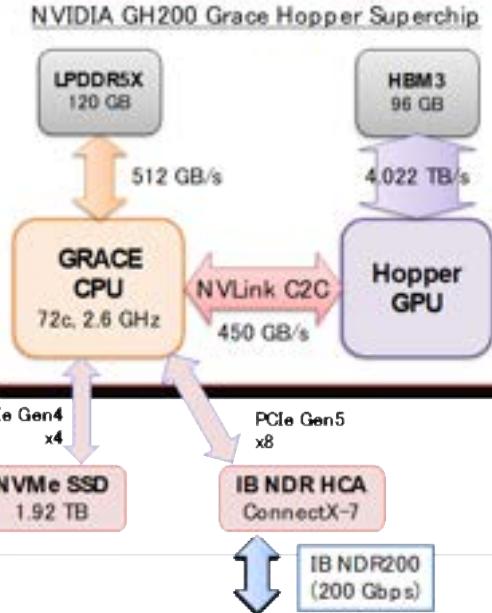
FUJITSU

ddn

SUPERMICRO

intel

NVIDIA



- **Miyabi (2025年1月～) JCAHPC**

- Miyabi-G with NVIDIA GH200(1,120)
- Miyabi-C with Intel Xeon Max (190)

– 計算機資源の98%はMiyabi-G (GPU)

JCAHPC

筑波大学
University of Tsukuba

東京大学
The University of Tokyo

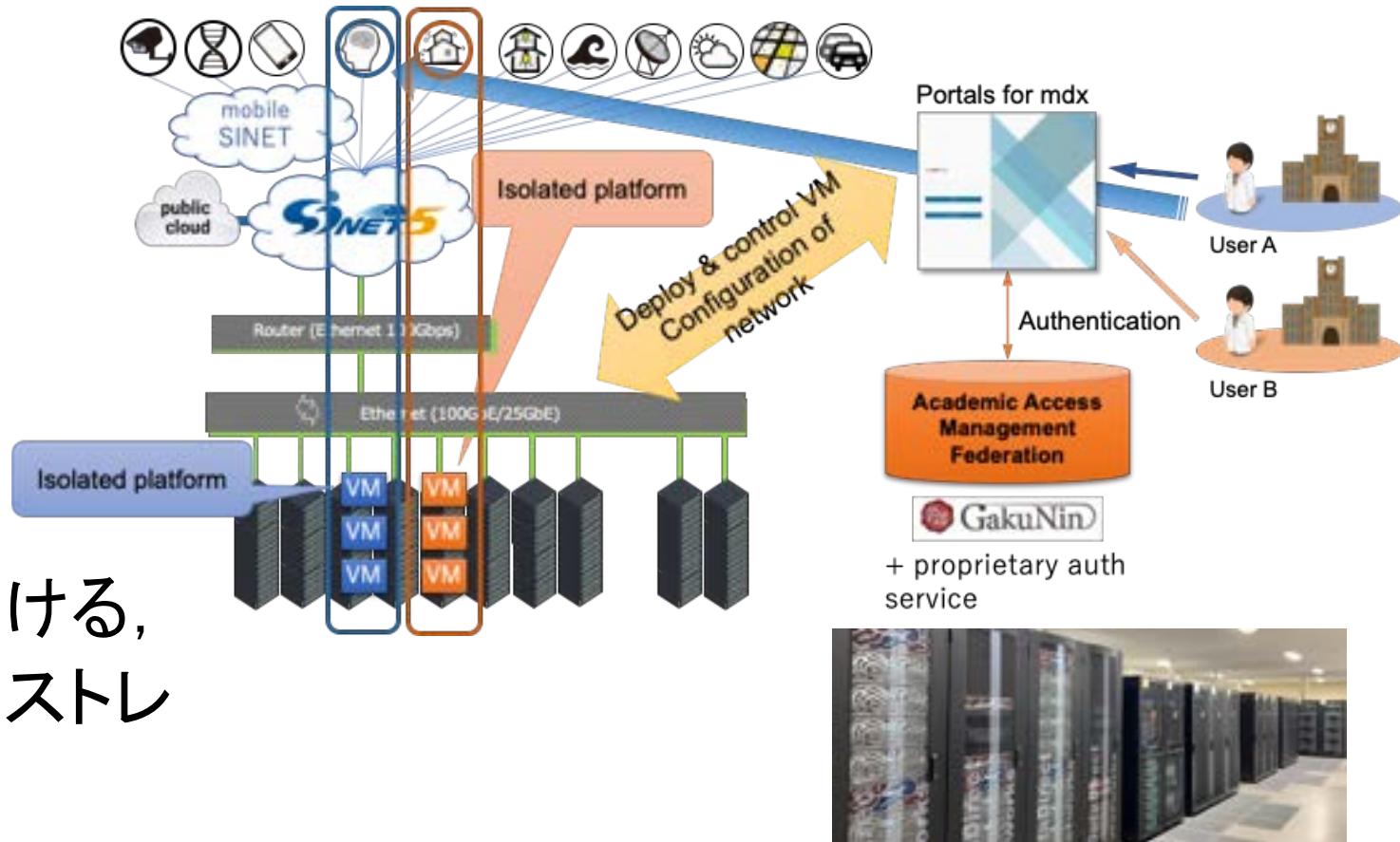
miyabi

- h3-Open-BDEC (2019年6月～2023年3月)

wdx : データ社会創成プラットフォーム

9大学, 2研究機関で共同運営

- ・ スーパーコンピュータと同じ HWを使用し、「クラウド」並みのセキュリティでデータ活用に重点を置いた高性能仮想化環境
- ・ QC-HPCハイブリッド環境における、ワークフローサーバー, オーケストレーションサーバーとして活用

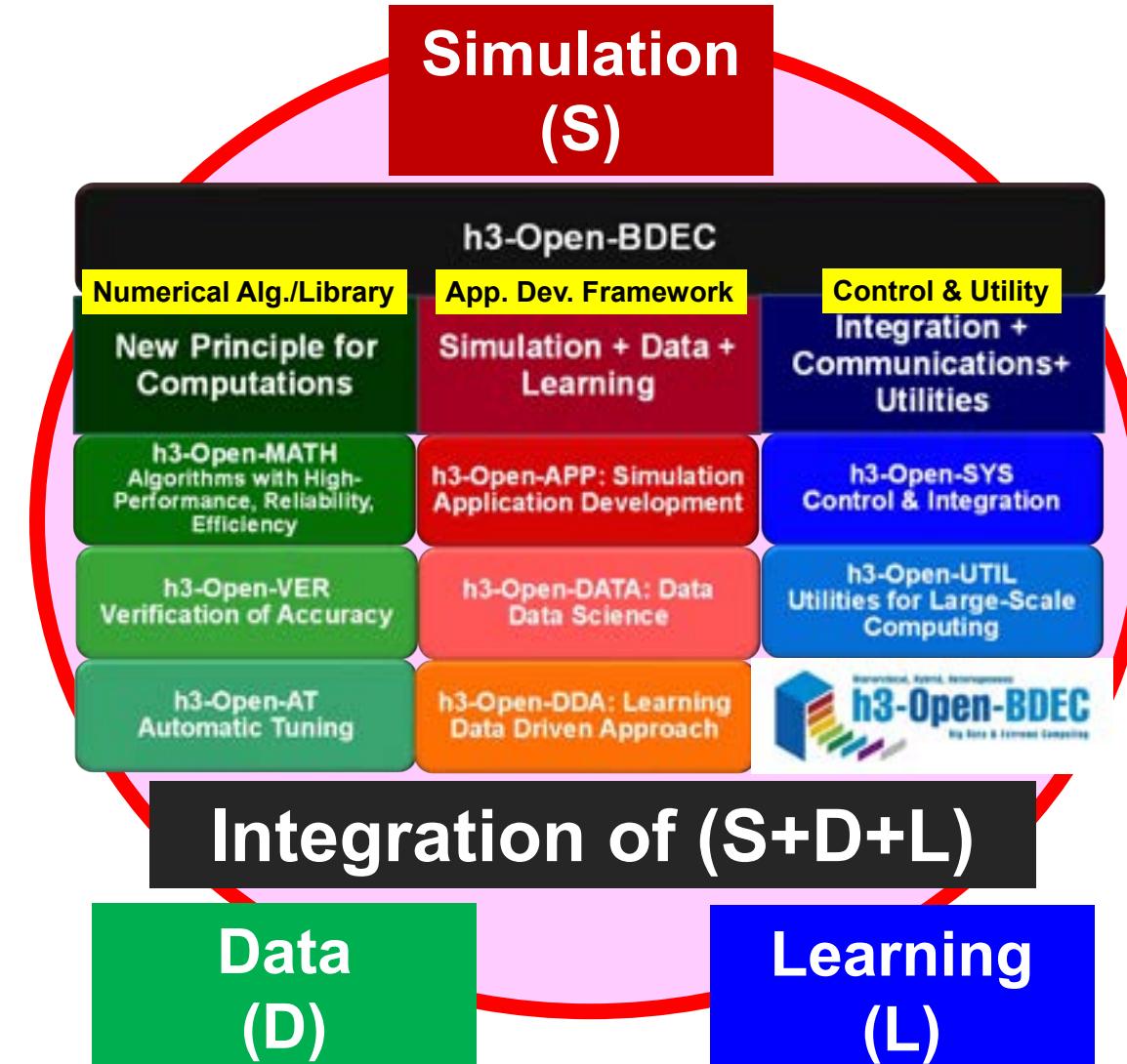


h3-Open-BDEC

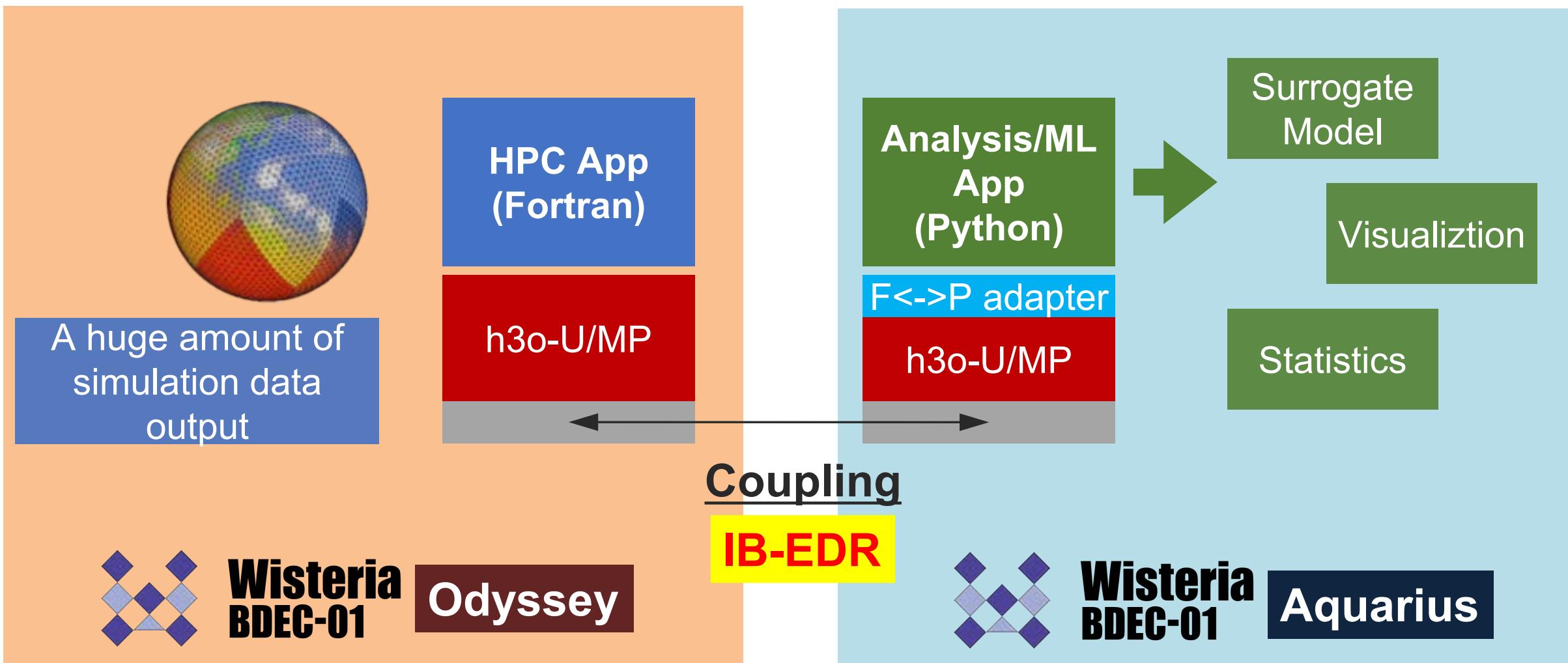
「計算+データ+学習」融合を実現する革新的ソフトウェア基盤
科研費基盤研究(S)(2019年度～23年度, 代表: 中島研吾)

<https://h3-open-bdec.cc.u-tokyo.ac.jp/>

- ① 変動精度演算・精度保証・自動チューニングによる新計算原理に基づく革新的数値解法
- ② 階層型データ駆動アプローチ等に基づく革新的機械学習手法
- ③ ヘテロジニアス環境(e.g. Wisteria/BDEC-01)におけるソフトウェア, ユーティリティ群



h3-Open-UTIL/MP (h3o-U/MP) 計算・機械学習ワークフローを連成

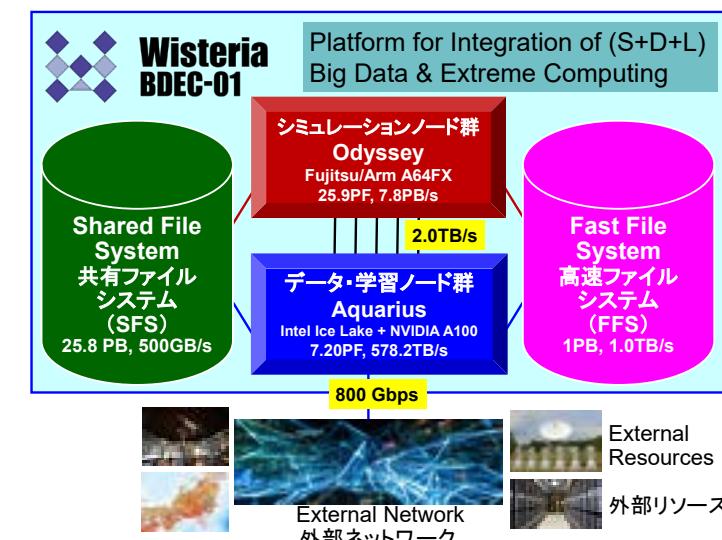
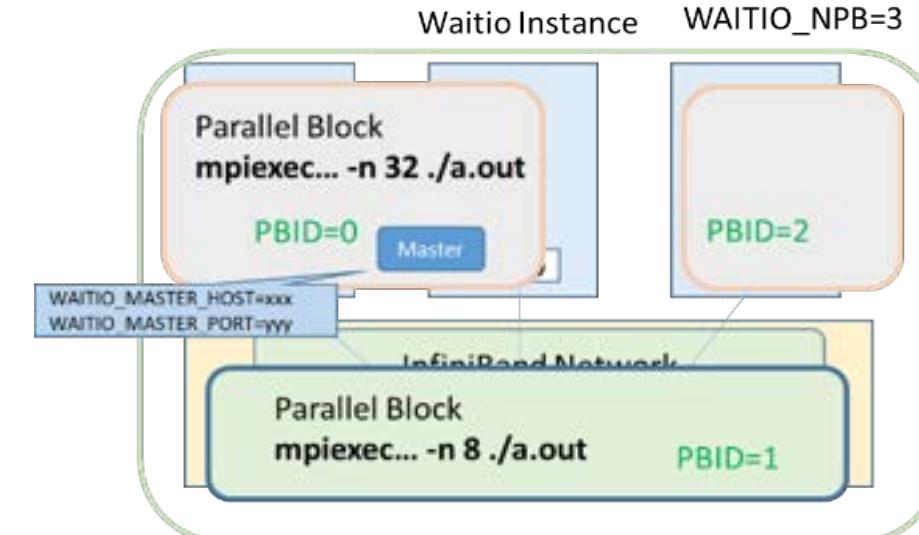


h3-Open-SYS/WaitIO-Socket(WaitIO)

[住元他 2021]

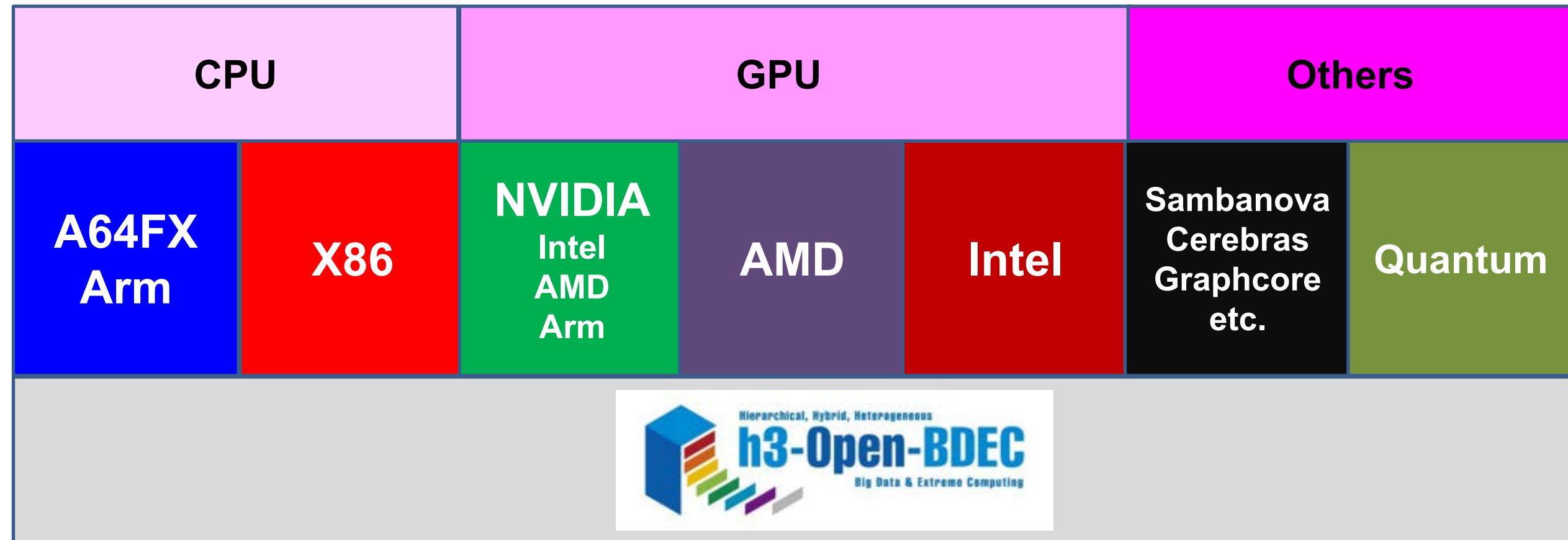
Odyssey-Aquarius間IB-EDR(2.0TB/sec)/FFS(1.0TB/sec)経由通信を
MPIライクなインターフェースで実現:Fortran, C/C++から呼び出し可能

WaitIO API	Description
waitio_isend	Non-Blocking Send
waitio_irecv	Non-Blocking Receive
waitio_wait	Termination of waitio_isend/irecv
waitio_init	Initialization of WaitIO
waitio_get_nprocs	Process # for each PB (Parallel Block)
waitio_create_group	Creating communication groups
waitio_create_group_wranks	among PB's
waitio_group_rank	Rank ID in the Group
waitio_group_size	Size of Each Group
waitio_pb_size	Size of the Entire PB
waitio_pb_rank	Rank ID of the Entire PB



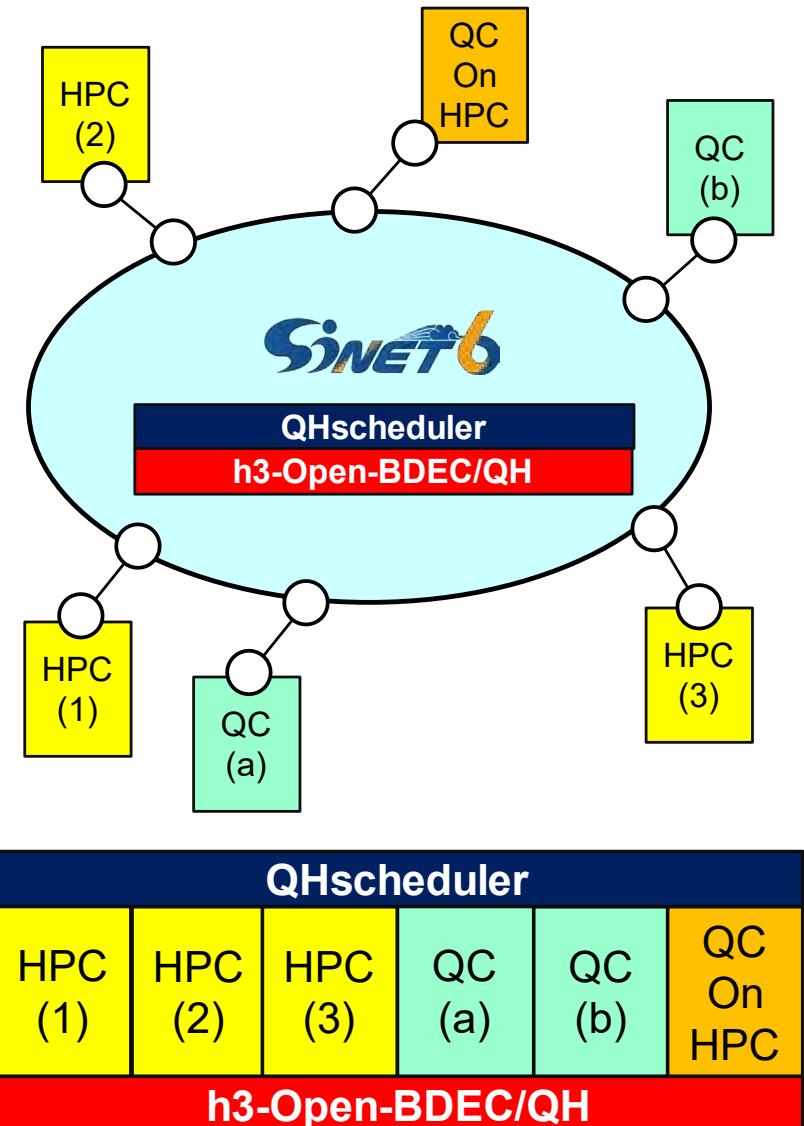
Anything is possible with h3-Open-BDEC (WaitIO and Coupler)

8



事業項目③:量子・スパコン連携スケジューラおよび量子・HPC連携ソフトウェアのカップリング技術の研究開発(1/2)

- A) 量子コンピュータ(QC)・スーパーコンピュータ(HPC)連携を効率的に実施するためのジョブスケジューラ(QHScheduler)の研究開発, 整備
- B) 複数の量子コンピュータ・スパコン間でアプリケーションを連携するためのソフトウェア(h3-Open-BDEC/QH)を開発
- 複数のコンポーネントを協調させ, 効率的にデータ転送等を実施するカプラー
 - 異なるアーキテクチャのシステム間の通信・データ転送を実施するライブラリ



事業項目③:量子・スパコン連携スケジューラおよび量子・HPC連携ソフトウェアのカップリング技術の研究開発(2/2)

C) 量子・スパコン連携アプリケーションのデータ入出力, 通信を模擬するスケルトン型アプリケーションを整備する(HPCコード用量子API「SQC」の拡張)

- 事業項目④と連携
- 実機(超伝導型, Ion-Trap型)と同じインターフェースを有するシミュレータを整備
- スパコン側のプログラムがC/C++及びFortranの場合に対応

• メンバー

- | | |
|--------|------------------------------------|
| – 中島研吾 | 全体統括 |
| – 住元真司 | B) 連携ソフトウェア(h3-Open-BDEC/QH) |
| – 胡 曜 | A) スケジューラ(QHScheduler), 本プロジェクトで雇用 |
| – 山崎一哉 | C) HPCコード用量子API「SQC」の拡張 |

全体計画と展望(1/2)

- 事業項目(①, ②)とは密に連携する
- 2025年度末まで
 - Wistereia/BDEC-01, Miyabi上での「疑似QC-HPCハイブリッド」環境
 - ソフトウェアのプロトタイプの作成
 - h3-Open-BDECの拡張
 - CUDA-Qを量子コンピュータ(QC)とみなす
 - 2025年度後半から、「Miyabi」-「ibm_kobe/黎明」連携に着手, 2026年度以降に「QC+複数HPC」連携の予定であった
 - 予定を前倒しして, 2025年度中に「Miyabi」-「ibm_kobe/黎明」連携を実現
 - 2025年度は下記を並行して実施
 - 「Miyabi」-「ibm_kobe/黎明」をとりあえずつなぐ
 - 2026年度以降の「QC+複数HPC」連携を見通した研究開発



IB-NDR(400Gbps)	IB-NDR200(200)	IB-HDR(200)
Miyabi-G NVIDIA GH200 1,120 78.2 PF, 5.07 PB/sec	Miyabi-C Intel Xeon Max (HBM2e) 2 x 190 1.3 PF, 608 TB/sec	File System DDN EXA Scaler 11.3 PB, 1.0TB/sec All Flash Storage

Variational Quantum Eigensolver (VQE)

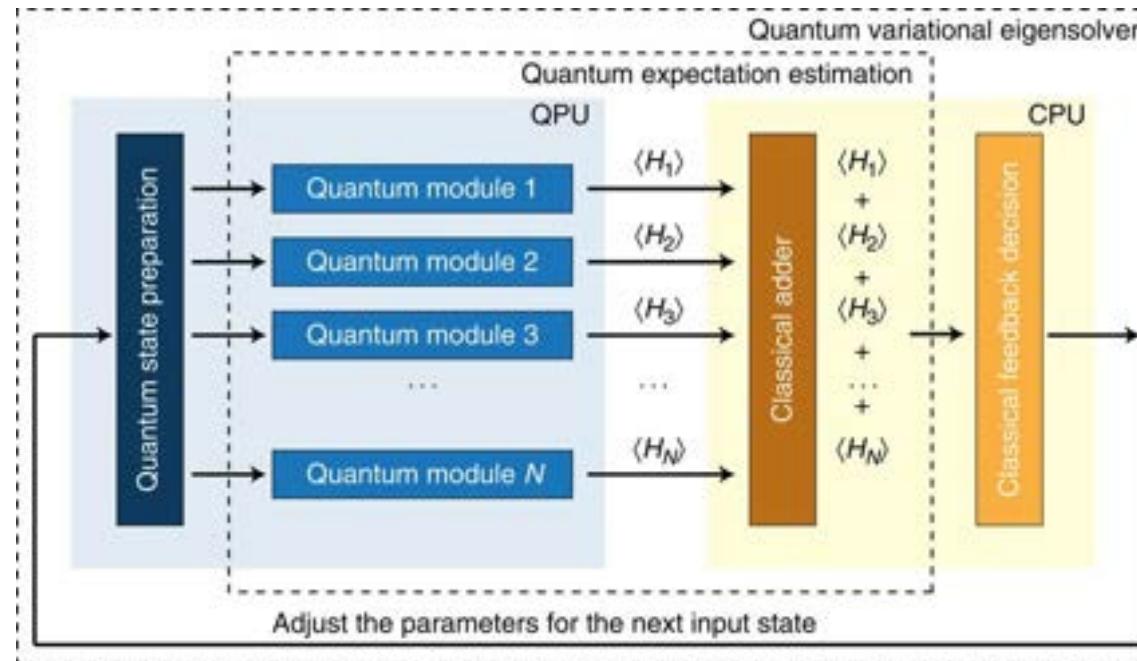
Ground State (Minimum Energy) = Minimum Eigenvalue

- Compute the minimum eigenvalue and its eigenvector for a matrix $H = \sum_i H_i = \sum_i a_i P_i$
 P_i : Pauli matrix (sparse matrix)

Miyabi-G



CUDA-Q: QPU-agnostic platform for accelerated quantum supercomputing



Expectation value $\langle H \rangle_{\psi(\theta)}$

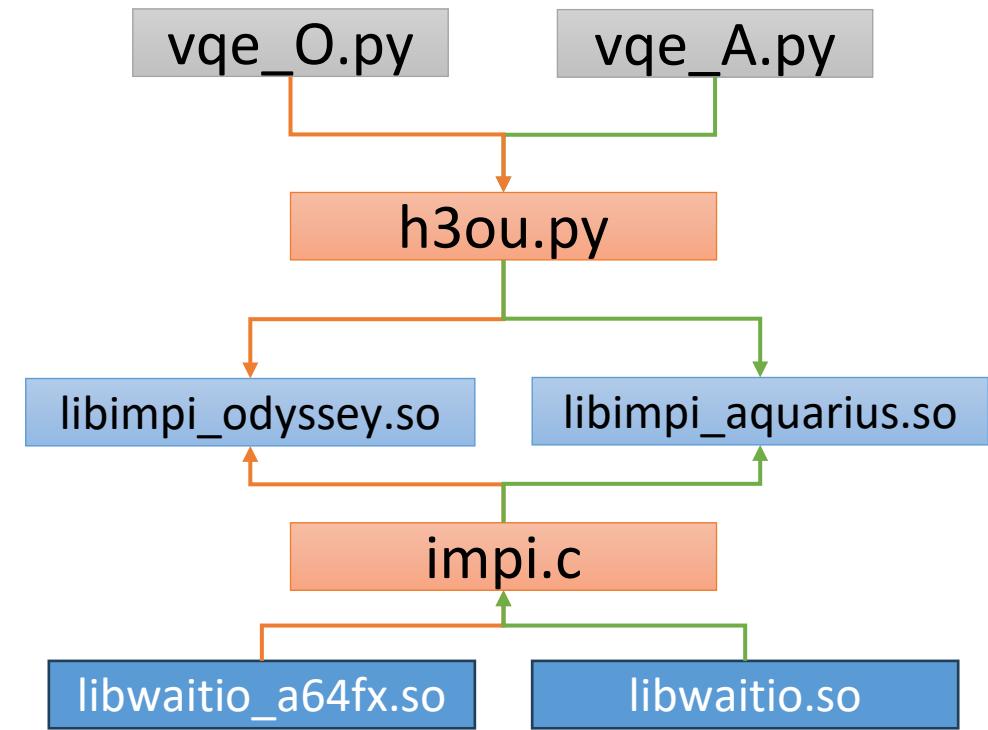
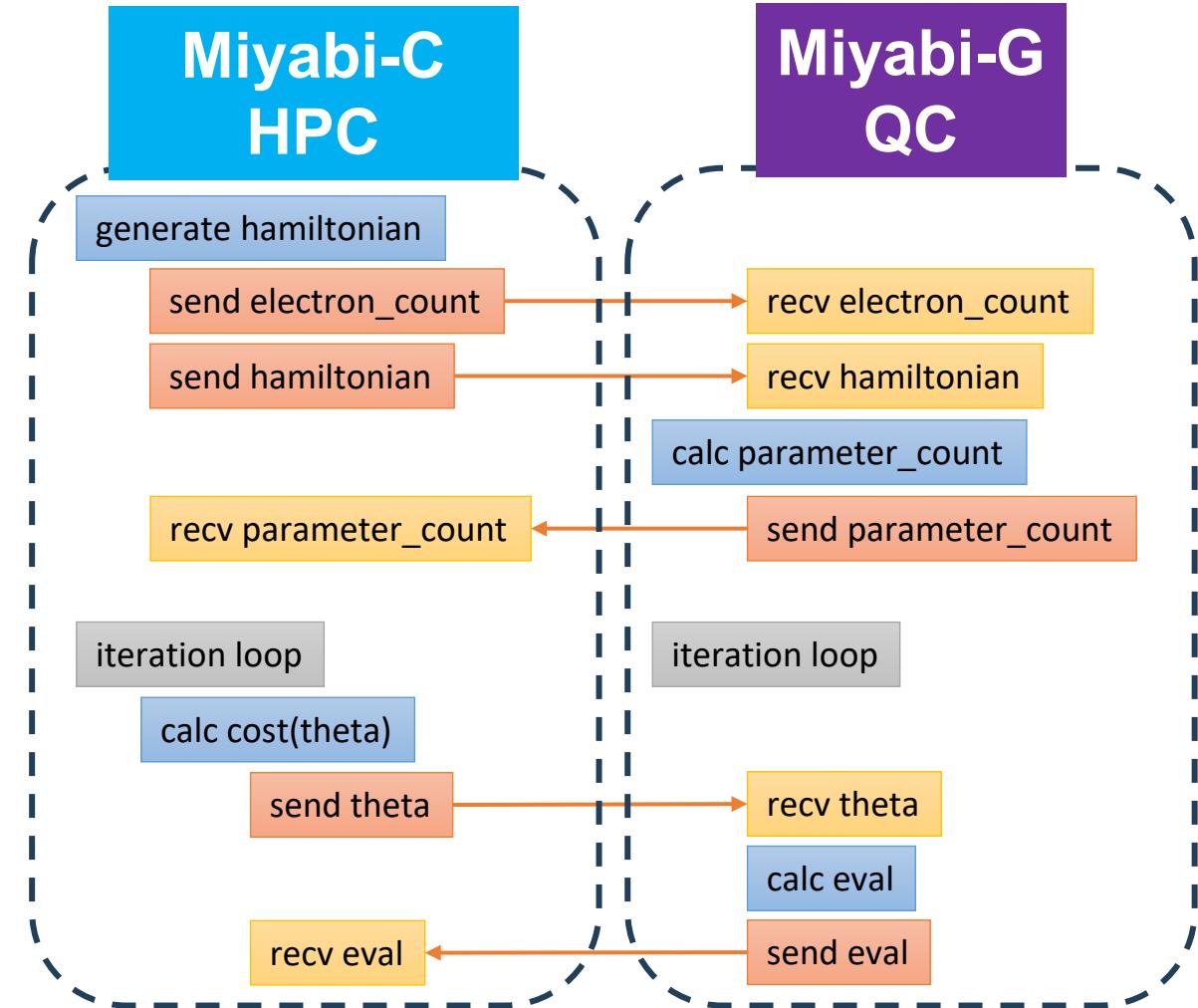
Miyabi-C



SciPy: `scipy.optimize` for adjust the parameters

QC-HPC Hybrid on Miyabi

- Miyabi-C: HPC + Miyabi-G: QC
- Codes are written in Python, WaitIO with Python Interface



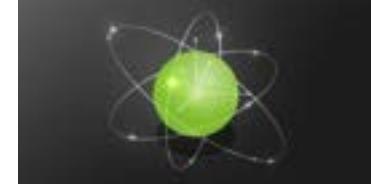
『CUDA-Q+Miyabi』で 『量子・HPCハイブリッド』を体験してみよう！

14



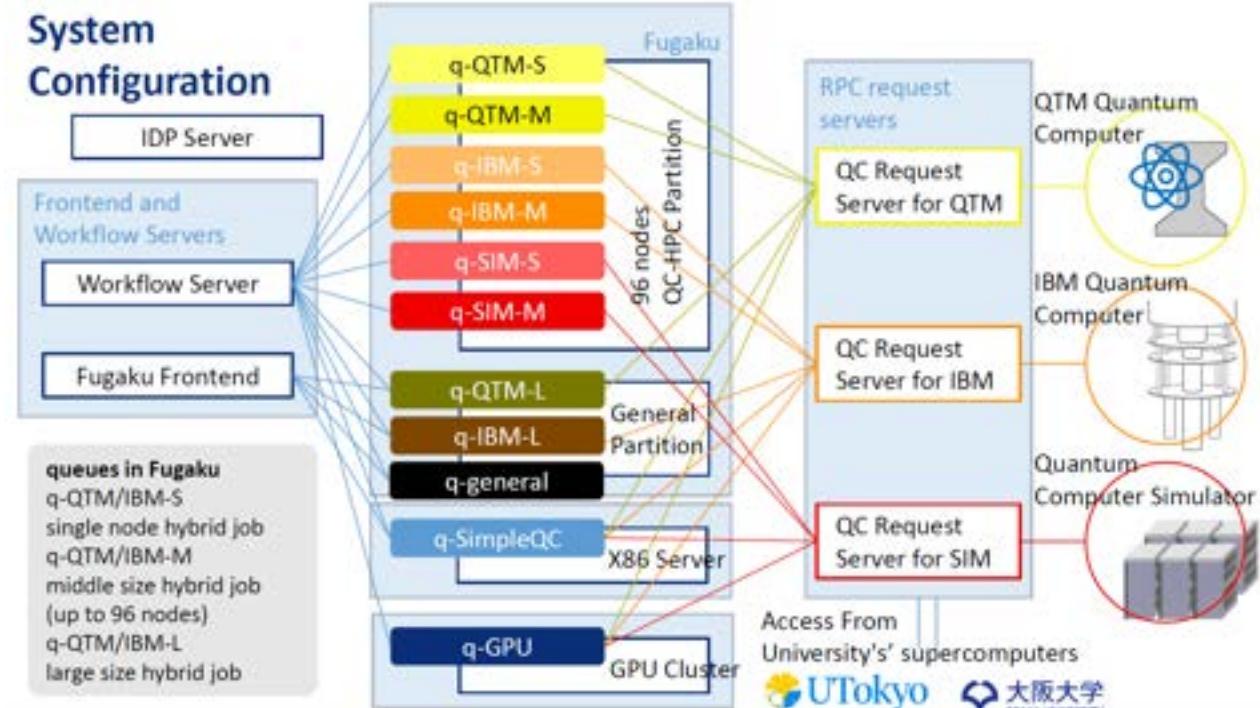
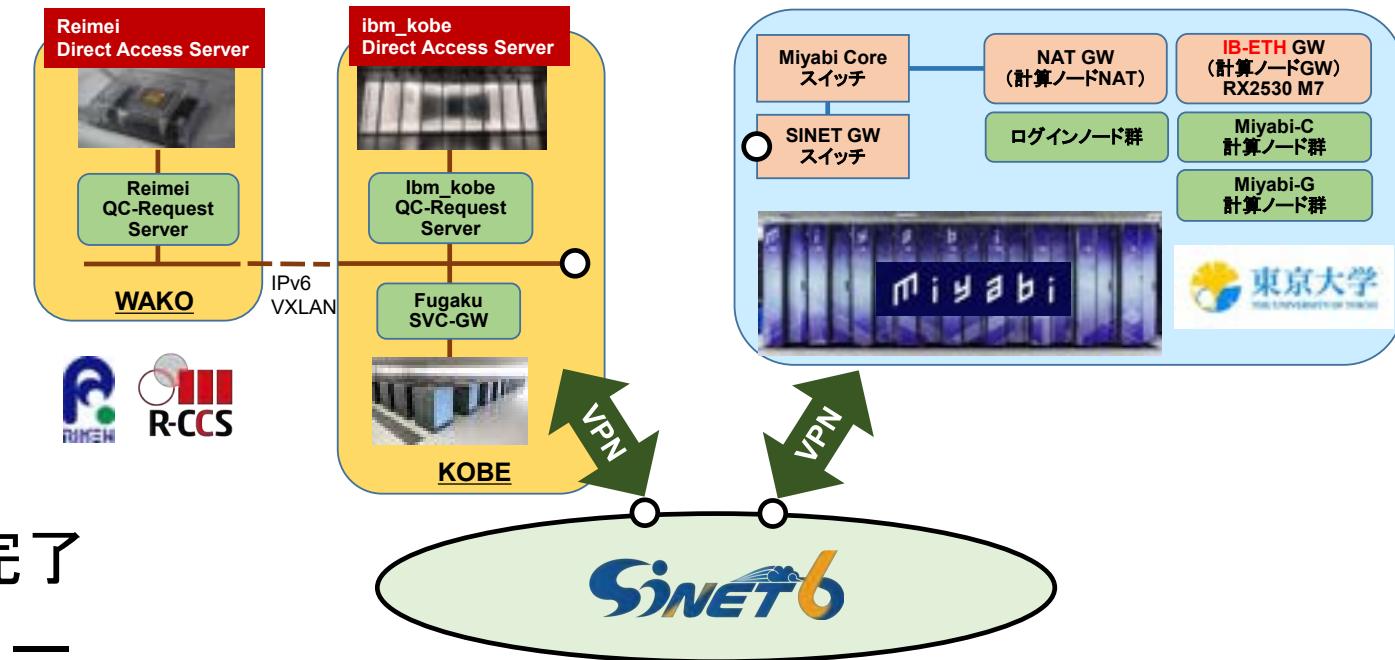
- 2025年5月26日 : Miyabi (Miyabi-G, Miyabi-C)
 - 疑似「量子・HPCハイブリッド環境」でVQE (Variational Quantum Eigensolver) を体験
 - 12月22日に第2回を実施

10:00-10:10	挨拶 + 趣旨背景
10:10-10:30	NVIDIA Quantum の紹介 (座学)
10:30 - 12:00	CUDA-Q 入門 (座学 + 演習) ログイン, すごく簡単な例
13:00 - 14:30	発展的な利用例 (座学 + 演習) 入門の続き, VQE の話し
15:00 - 17:00	量子・HPCハイブリッド環境 (座学 + 演習)
17:00 - 17:30	Miyabi 見学



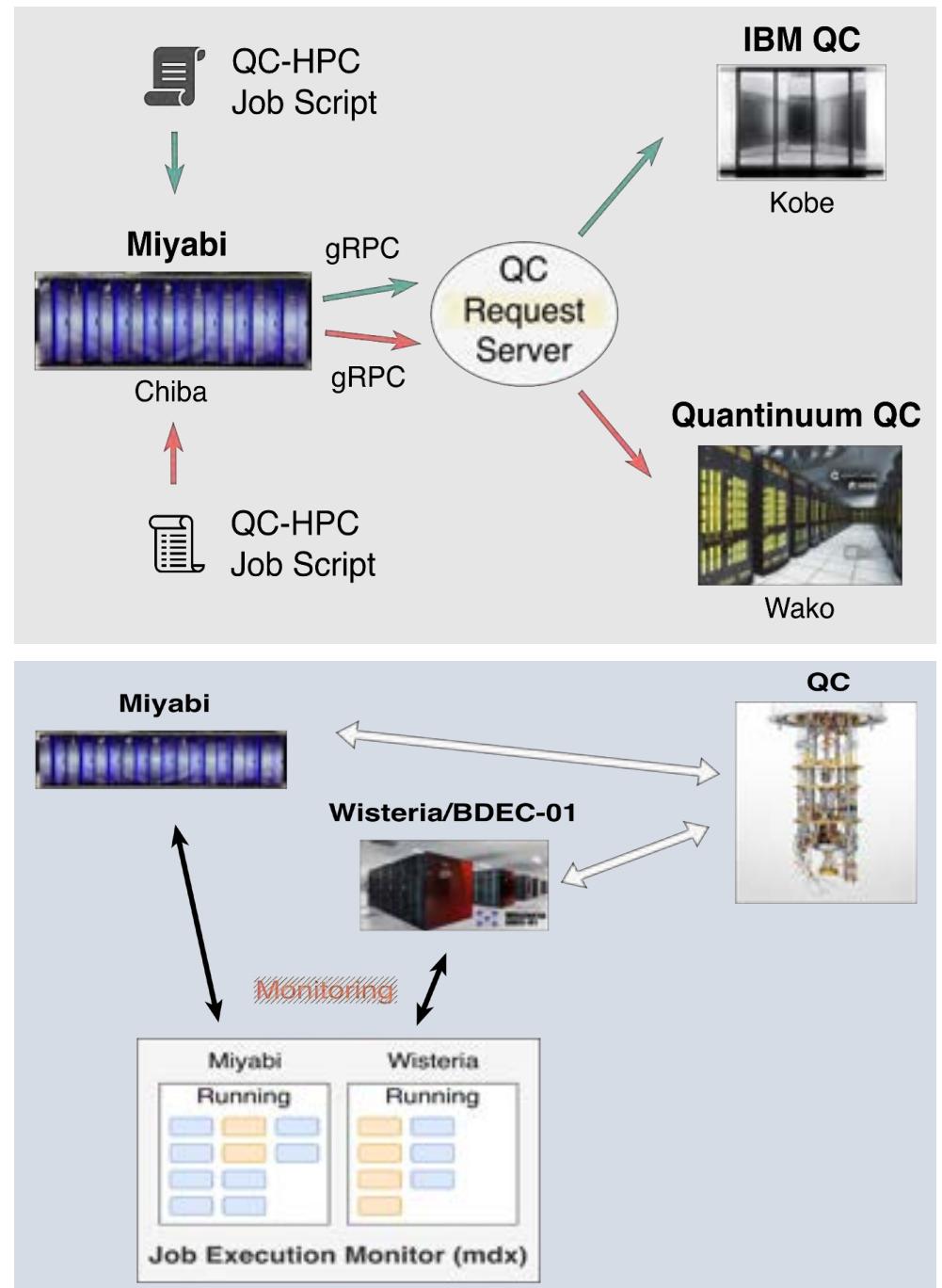
Kobe-Miyabi連携

- R-CCS – Miyabi間 VPN接続
 - SiNET L2VPN接続完了
- 富岳-QC連携ソフトウェア移植
 - QCセマフォサーバへの接続確認完了
 - Miyabi ジョブスケジューラへのキュー設定・拡張モジュール組込み完了
 - QC Request Server経由のジョブ実行移植作業実施中
- 2025年度中にQC-Miyabi連携確認, テスト実行
- 2026年度
 - マルチHPCサイト QC-HPC Hybrid対応のスケジューラ設計



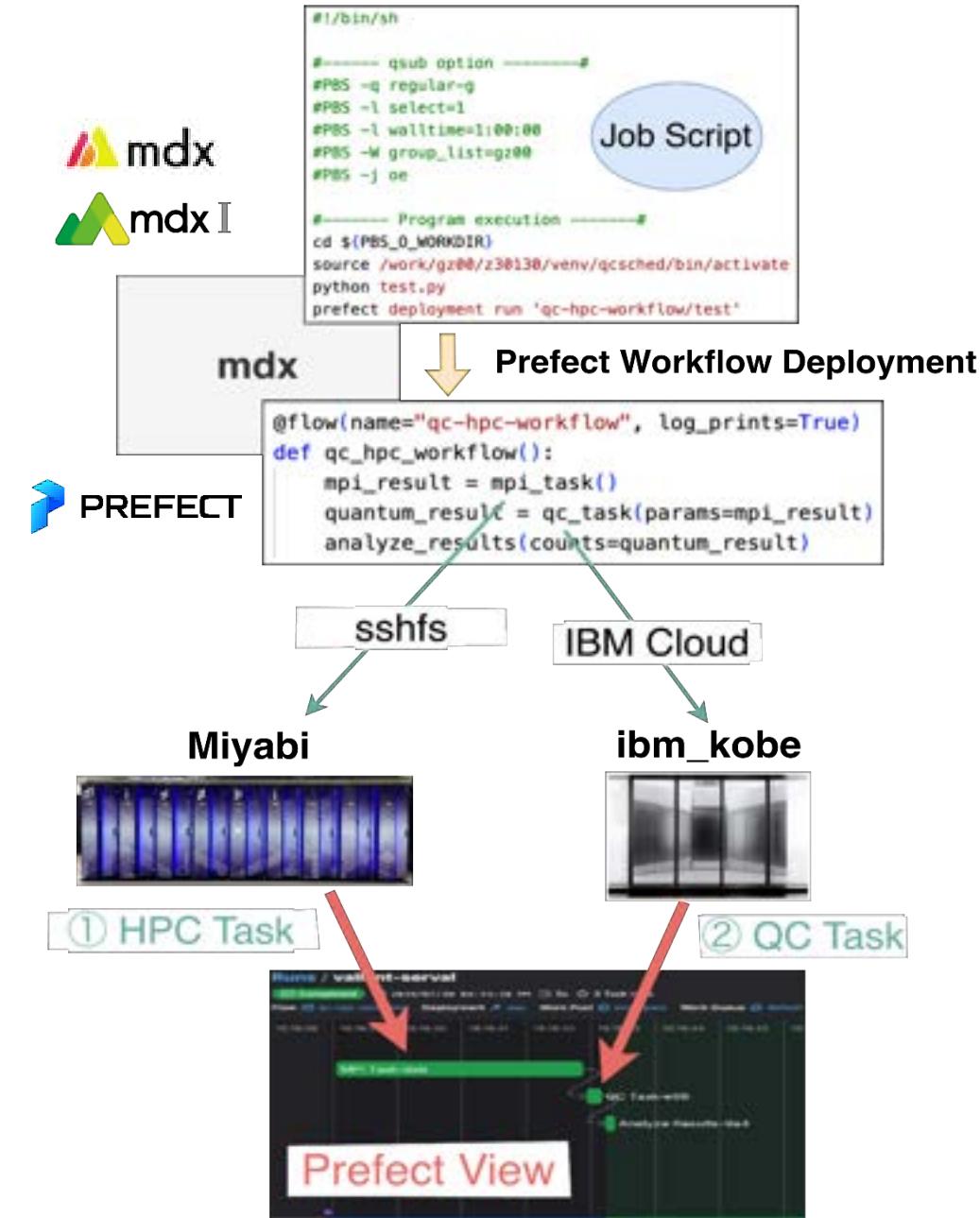
項目A):スケジューラ

- (A-1) QC-Miyabi連携
 - MiyabiからQC-HPCハイブリッドジョブを実行
 - スパコン:専用Queueを想定
 - ハイブリッドジョブのHPC部分をMiyabi, QC部分をIBM(ibm-kobe)で実行できることを制御した(PREFECT, Cloud経由)
- (A-2) QC-複数HPC連携向け取り組み
 - スパコン側のジョブ実行状況のモニタリングをmdx上で実施, 実行開始予定時間を予測
 - スパコン:一般Queue
 - MiyabiとWisteriaで実行中・実行待ちジョブ情報を取得, 解析, スケジュールマップ作成
 - 投入ジョブの指定ノード数と実行時間制限値などに基づき, 将来の実行開始予定時間を予測する機能を実装している



項目A-1): スケジューラ: QC-Miyabi連携

- mdxからPrefectを利用
 - mdxを経由せずにPrefect Cloudを利用して、QCとHPCのWorkflowを制御可能
 - QCへの接続はCloud経由(実際は使われない)
- HPC(Miyabi)で得られた計算結果をQC(ibm_kobe)へ渡し、後続の量子計算を実行
 - HPC計算で求めたパラメータ(phi、theta)を量子回路に適用し、量子状態を操作して測定することで古典値を得る一連の処理を実現
- QC計算部分はDirect Access方式に切り替えた後も制御が可能と考えられる



項目A-2):スケジューラ:モニタリング

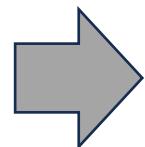
(例) スパコンのジョブ実行状況のモニタリング

- 11-22 23:02:24時点でMiyabi-Gで取得したジョブ情報

JOB_ID	JOB_NAME	STATUS	PROJECT	QUEUE	START_DATE	ELAPSE	ELAPSE_LIN	TOKEN	NODE	MSG	COMMENT
412384	*****	HELD	*****	smal1-g	--0--	--1--	--000:00	*****	1	- Net Running	PBS Errnr: job held
412389	*****	HELD	*****	short-g	--0--	--1--	--000:00	*****	1	- Net Running	PBS Errnr: job held
461179	*****	HELD	*****	secure-g	--0--	--1--	--000:00	*****	1	- Net Running	PBS Errnr: job held
461175	*****	HELD	*****	secure-g	--0--	--1--	--000:00	*****	1	- Net Running	PBS Errnr: job held
542564	*****	HELD	*****	debug-g	--0--	--1--	--000:00	*****	1	- Net Running	PBS Errnr: job held
831384	*****	QUEUED	*****	smal1-g	--0--	--1--	--000:00	*****	1	- Net Running	Inufficient amount
831386	*****	QUEUED	*****	smal1-g	--0--	--1--	--000:00	*****	1	- Net Running	Inufficient amount
867377	*****	HELD	*****	smal1-g	--0--	--1--	--000:00	*****	1	- Net Running	PBS Errnr: job held
867481	*****	HELD	*****	smal1-g	--0--	--1--	--000:00	*****	1	- Net Running	PBS Errnr: job held
867549	*****	HELD	*****	smal1-g	--0--	--1--	--000:00	*****	1	- Net Running	PBS Errnr: job held
944993	*****	HELD	*****	miyabi1-test-g	--0--	--1--	--000:00	*****	1	- Net Running	PBS Errnr: job held
933649	*****	HELD	*****	smal1-c	(18/36 29:43:34)	--1--	--000:00	*****	1	- Net Running	PBS Errnr: Taken Ls
933555	*****	HELD	*****	smal1-c	(18/37 01:38:54)	--1--	--000:00	*****	1	- Net Running	PBS Errnr: Taken Ls
949533	*****	HELD	*****	smal1-g	(18/25 18:03:26)	--1--	--000:00	*****	1	- Net Running	PBS Errnr: job held
13961986	*****	QUEUED	*****	smal1-g	(13/28 22:09:00)	--1--	--000:00	*****	1	- Net Running	would exceed group
13961989	*****	QUEUED	*****	smal1-g	(13/28 22:09:00)	--1--	--000:00	*****	1	- Net Running	would exceed group

解析

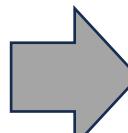
(rscgroup: regular-g)



- 11-22 22:50:44 時点で **Aquarius** で取得したジョブ情報

解析

(rscgroup: regular-a)



占有ノード数 : 256

実行時間制限値 : 24h

ジョブ投入

HPC Schedule Map (regular-g)
2025-11-22 23:02:24

実行中ジョブ

sliding window

実行開始時間 を予測できる

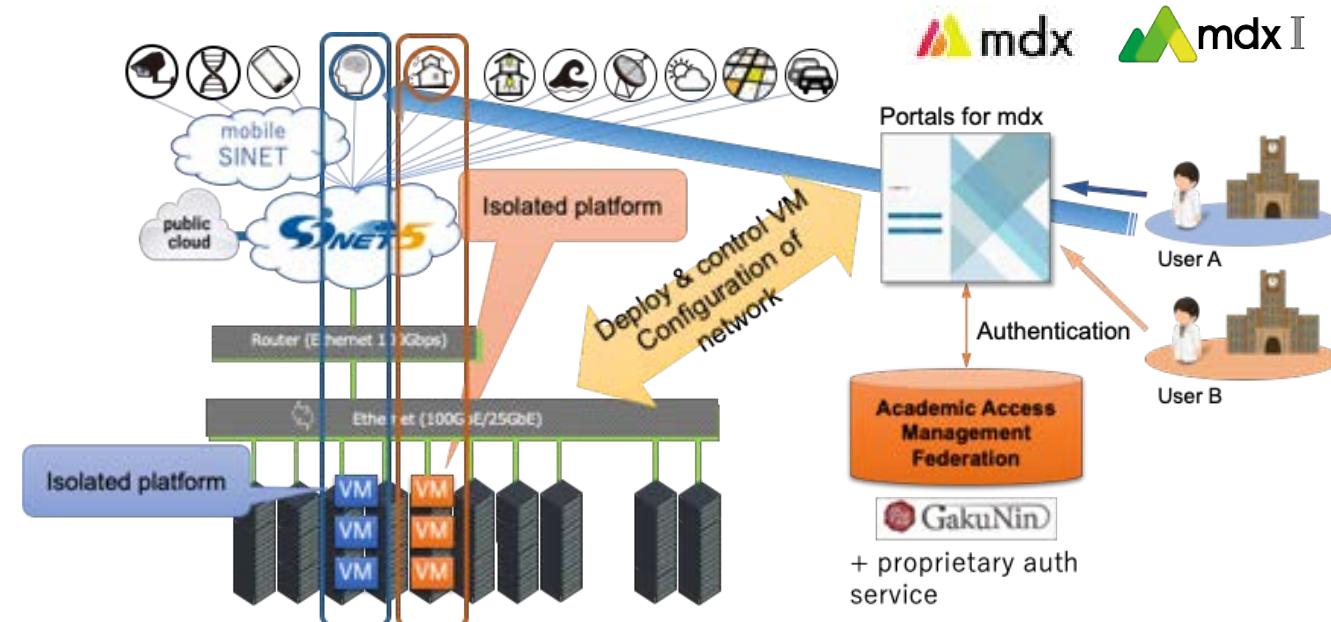
→ 実行待ちジョブ

スケジュールマップ：

これから48時間内のノード占有状況

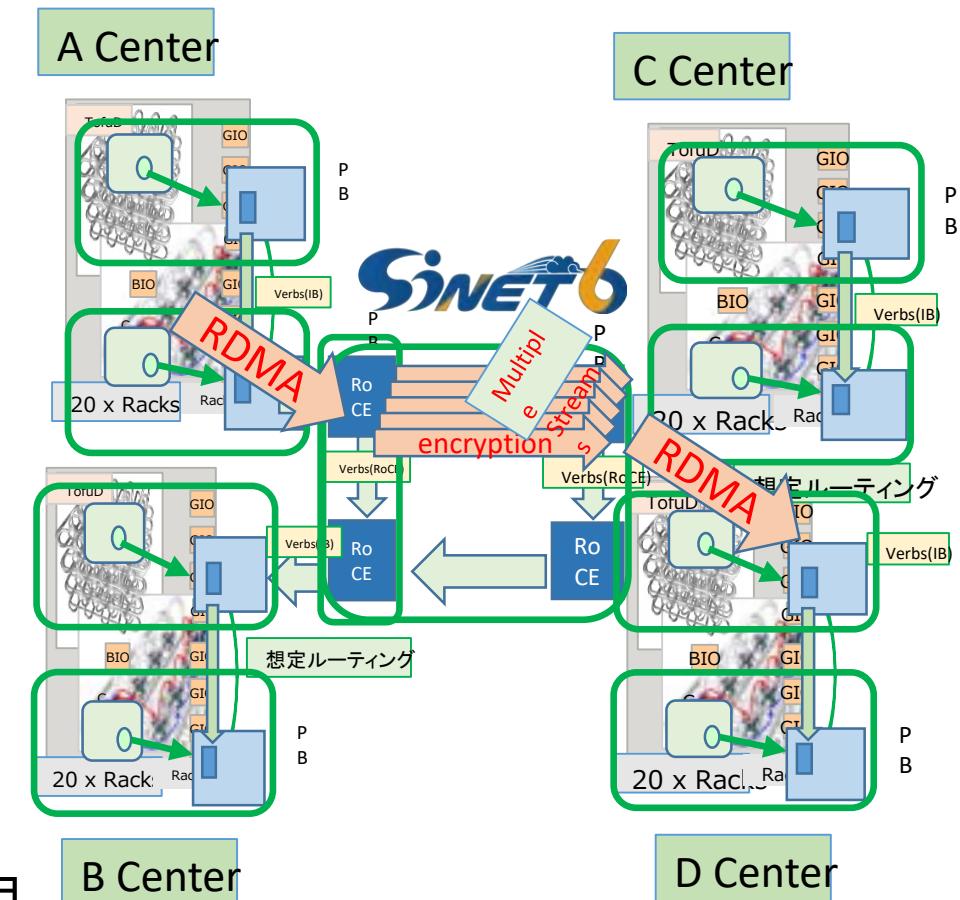
項目A):スケジューラ:2026年度

- (A-1) QC-Miyabi連携
 - 富岳-QC連携ソフトウェア移植完了
 - mdxからPrefect Workflowを用いて QC-HPCハイブリッドジョブを実行する
 - gRPCインターフェースに加え、ブラウザや外部システムから容易に利用できる、RESTfullに近いHTTP/JSONインターフェースを提供する
- (A-2) QC-複数HPC連携向け取り組み(モニタリング)
 - mdxにおいてHPCジョブ情報を定期的に取得
 - 取得したジョブ情報に基づき、ジョブの優先度関係を考慮した実行開始予定期間を予測
 - セマフォサーバと連携し、QC側のジョブ実行状況をモニタリング



項目B):連携ソフトウェア

- QC-HPC間の通信とデータ転送をオンラインおよびリアルタイムで効率的に実装および統合
- (B-1) WaitIO/Router
 - 課題:
 - ソケット通信(WaitIO-Socket)の高性能化
 - 長距離センター間通信高速化とセキュリティ強化
 - 設計と実装:
 - センター内: RDMA とゼロコピールーティングを使用した高性能通信
 - WaitIO-Verbs、WaitIO-Tofu: RDMA通信
 - WaitIO-Router: ゼロコピールーティング対応
 - センター間: 単一ストリームを複数ストリーム変換
 - パフォーマンス: RDMA(RoCE) と複数ソケットストリーム+圧縮活用で高速化
 - セキュリティ強化: 暗号化とスクランブルパケット使用
- (B-2) QC-HPCカッププリング

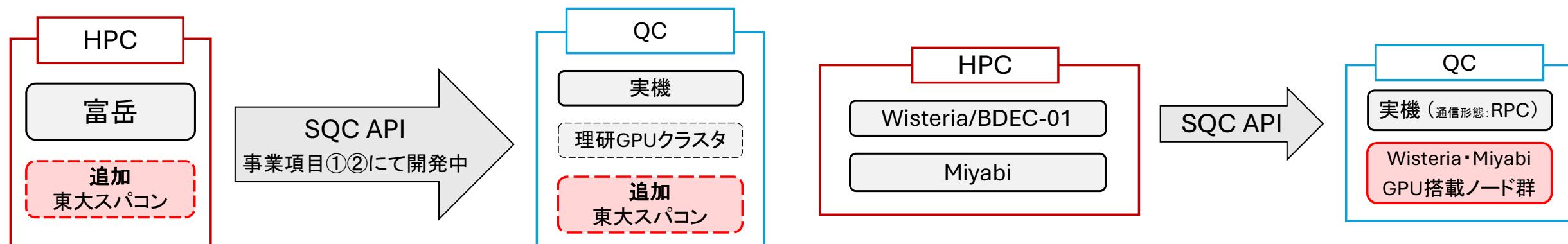


項目B-1):連携ソフトウェア:WaitIO/Router

- 2025年度
 - Odyssey上の2つのジョブ間, Odyssey-Aquariusの独立した2つのジョブ間での WaitIO-Routerによるジョブ間通信を達成
 - Full RDMA通信により, 対WaitIO-Socketで1/3遅延, 19倍の通信バンド幅向上達成
 - センター間通信WaitIO-Socket/MultiStream設計
 - 暗号化と圧縮を統合した実装アーキテクチャ検討実施中
- 2026年度
 - WaitIO-Router:
 - RDMAによるアプリケーション高速化の評価 on Wisteria/BDEC-01, Miyabi(2026)
 - Miyabi-Wisteria/BDEC-01(2026-)
 - WaitIO-Socket/MultiStream:
 - プロトタイプ実装と通信性能評価 on Miyabi, Miyabi-Wisteria/BDEC-01間
 - 柔軟な高性能中継アーキテクチャ設計
 - RDMA中継Router増強 on Miyabi(2026)
 - 富岳-Miyabi連携(2026-)

項目C): HPCコード用量子API「SQC」の拡張(1/2)

- SQC(事業項目①②)を拡張, 東大スパコンからQCエミュレータ呼び出し
- 2025年度
 - 東大スパコンで, HPC・QCエミュレーションを実行するSQCバックエンドを作成
 - GPU搭載ノード群をQCエミュレータとして利用, GPU上での量子計算はQiskit Aerを使用
 - 既存のライブラリWaitIOを通信に利用して開発コストを削減
 - QCエミュレータ側でRPCサーバーを構築する必要がない
 - WaitIOは異種システムを結合可能, Intel CPU上のHPCコードとGH200上のQCエミュレータも容易に連携可能



項目C): HPCコード用量子API「SQC」の拡張(2/2)

- 2026年度以降
 - SQCのバージョンアップに合わせて、東大スパコン用WaitIOバックエンドも更新
 - 複数QC(エミュレータ)の同時利用について検討を進める
 - プロトタイプを作成済み、SQC本流への反映法を検討中
 - Fortran版APIの整備
 - WaitIO/Routerによるセンター間通信が実現後は、SQCのWaitIOバックエンドがセンターを跨いで利用可能になると想定される
 - HPC側・QCエミュレータ側がそれぞれ世界のどこで流れても、同時にジョブが流れていってWaitIOで接続できれば、WaitIOバックエンドを利用可能

全体計画と展望(2/2)

- 2026年度以降
 - 複数QC, 複数HPCの連携可能
 - 複数QC=1-リアルQC+シミュレータ
- その他
 - HPCI, JHPCN(学際大規模情報基盤共同利用共同研究拠点)等, 全国のスパコンの共同利用の枠組みでの利用
 - 2027年度利用開始を目指して制度整備
 - 2026年度はQII(量子イノベーションイニシアティブ協議会)ユーザー向けに, ibm_kobe-Miyabi連携サービスを検討中
 - QIIが運用するibm_kawasaki(IBM Heron, 156 Qbit)とMiyabiは連携済み, 2025年12月中には試験的サービス開始予定



QII **HPCI** High Performance Computing Infrastructure