

ImPACT Program 量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現



ImPACT Program Manager
山本 喜久 Yoshihisa YAMAMOTO

1978年 東京大学大学院博士課程修了（工学博士）
 1978～1992年 NTT（現在 R&Dフェロー）
 1992年～2014年 スタンフォード大学 教授（現在 名誉教授）
 2003年～2014年 国立情報学研究所 教授
 2013年～2014年 理化学研究所 グループディレクター
 2014年～ImPACT プログラム・マネージャー

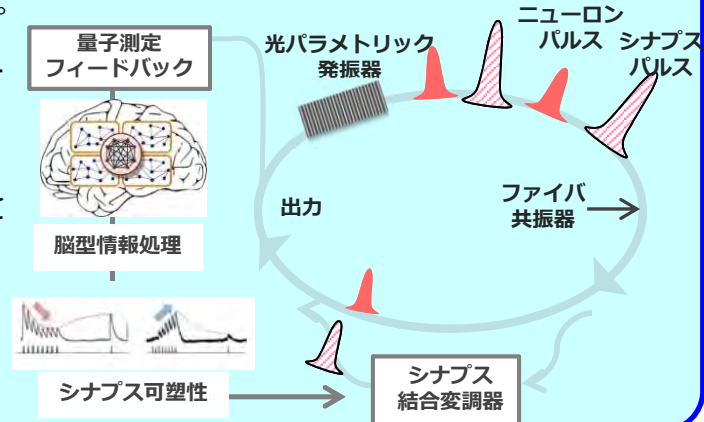
量子情報通信技術の研究グループをNTT基礎研究所内に設立し、以後30年以上にわたって、世界の量子情報通信研究の最先端を切り拓く。日本国内および米国内の大型国家プロジェクトを多数指揮。2009～2014年内閣府・最先端研究開発支援（FIRST）プログラム中心研究者。

＜研究開発プログラムの概要＞

脳型情報処理を量子コンピュータに取り込んだ量子人工脳を開発し、これを絶対に盗聴を許さない量子セキュアネットワークで結んだ高度知識社会の基盤を確立する。

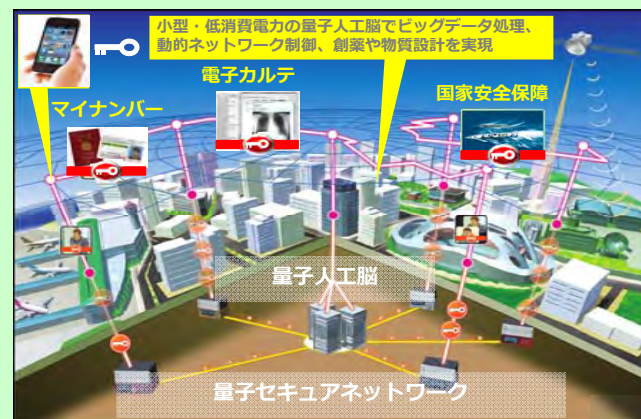
＜非連続イノベーションのポイント＞

ファイバリング・パラメトリック発振器に同時に生成される1～100万の光パルスをニューロンと見立て、これらを量子測定フィードバック回路で相互結合し、大規模シナプスネットワークを実現し、組み合わせ最適化問題を高速で解くイジングマシンとする。



＜期待される産業や社会へのインパクト＞

将来のデータセンターやロボット・衛星に搭載可能な革新的な量子人工脳が誕生し、その恩恵を安全性脅威に怯えることなく享受できる高度情報社会の基盤技術を確認する。



研究開発プログラムのシナリオ

解決すべき社会的課題等

- 現代社会の様々な分野（創薬、生命科学、無線通信、ナビゲーション、機械学習、ソーシャルネットワーク、…）に現われる組み合わせ最適化問題はNP完全・NP困難クラスに属しており、現代コンピュータでこれを効率よく解くことはできない。組み合わせ最適化問題に特化した新型量子コンピュータ（コヒーレントイジングマシン）が開発されれば、上記諸分野における我が国の国際競争力に大きく貢献するはずである。
- 現代暗号は、将来盗聴される、あるいは既に盗聴されている危険性を内包しており、常に改訂や変更を繰り返す必要がある複雑なシステムである。また、重要暗号通信ではプロトコルそのものが公開されておらず、このことが暗号通信網の相互接続を著しく困難にしている。物理層で量子鍵配送を実現し、one-time-pad方式を採用すれば、絶対安全性を保障する暗号通信が、平文と暗号鍵の単純な論理和で実現でき、異なった暗号通信網を組織の壁を越えてシームレスにつなげるはずである。
- 新物質探索はこれまで材料研究者の直感に頼る形で発展を遂げてきた。その理由の一つは、物質内の電子の振る舞いを記述する量子力学モデルは、現代コンピュータでは効率よくシミュレーションできなかったからである。代わって、制御性のよい量子系（冷却原子、超伝導量子回路、光半導体素子）に、これらのモデルを実装し、模擬実験によりこれを解く量子シミュレータが開発されれば、新物質探索に新たなツールを提供できることになり、新材料開発における我が国の国際競争力の強化に資するものと期待される。

研究開発プログラムのシナリオ

解決のためのアイデア

- 組み合わせ最適化問題の答は、イジングハミルトニアン基底状態から知ることができ、これを、下から上へ向かって探索する加熱マシンを、パラメトリック発振器ネットワークで実現する。このコヒーレントイジングマシンは室温・標準量子限界で動作する上に、様々な脳型情報処理プロトコルを取り入れ、量子人工脳と呼べるシステムにすることができる。
- 通常のレーザー光源が使える量子鍵配送システムとして、Decoy-BB84という世界標準のプロトコルに加え、我が国発の雑音に強いRR-DPSプロトコル、長距離化に有利な適応的物理レイア暗号技術を並行して開発する。
- 冷却原子、超伝導量子回路、光半導体素子を利用した3つの量子シミュレータを同時に開発し、相互の比較から量子シミュレーションの有効性を明らかにする。

達成目標

達成目標（プログラム終了時の具体的アウトプット）

- サイト数5000~10,000のコヒーレントイジングマシーンを、光ファイバーパラメトリック発振器とFPGA量子フィードバック回路により実現する。このマシーンに脳型情報処理を導入して、様々なNP完全・NP困難問題への適用性を実証する。
- 将来技術でも解読できない安全性と高い相互接続性を持つ量子セキュアネットワークを都市圏に構築し潜在ユーザへのサービス運用を実現する。高雑音耐性化に向けたRR-DPS方式とグローバルネットワーク化に向けた適応的物理レイヤ暗号技術の原理を実証し、衛星通信・移動体通信分野へ用途を拡大する。
- 強相関物性理論と材料開発に有用な量子シミュレータを、冷却原子、超伝導量子回路、光半導体素子という3つの実験系を用いて開発し、現代コンピュータを用いた大規模科学計算に対する優位性を示す。

具体的達成目標の実現に向けた戦略・シナリオ

- NP困難MAX-CUT問題を用いて、現代コンピュータに載る精度保証付近似解法の中で最も優れたSemi-Definite Programming (SDP)に計算精度で圧倒的優位を持つこと、現代コンピュータに載る精度保証なし近似解法の中で最も優れたSimulated Annealing (SA)に計算時間で圧倒的優位を持つこと、を示す。
- どんな盗聴でも検知する機能と解読不可能な暗号鍵の供給機能を物理層に実装し、都市圏の様々な拠点間で自在に鍵交換を行う鍵配送網技術を確立する。通信路特性に応じて、誤り訂正符号と秘匿ランダム化の比重を適応的に制御することで秘匿伝送性能を抜本的に改善する新世代技術のプロトタイプを構築する。
- 横磁場イジング模型、ハイゼンベルク模型、ボーズハバード模型、フェルミオンハバード模型という4つの強相関量子多体系標準モデルハミルトニアンを量子シミュレータによって実装し、系を支配するパラメータを制御しつつそれらの非平衡開放系実時間量子ダイナミクスを、現代最先端の古典大型コンピュータでは到達できない空間および時間スケールにおいて明らかにすることで、その優位性を示す。

プログラム構想・全体像の明確化

戦略・シナリオを克服すべき課題へブレークダウン

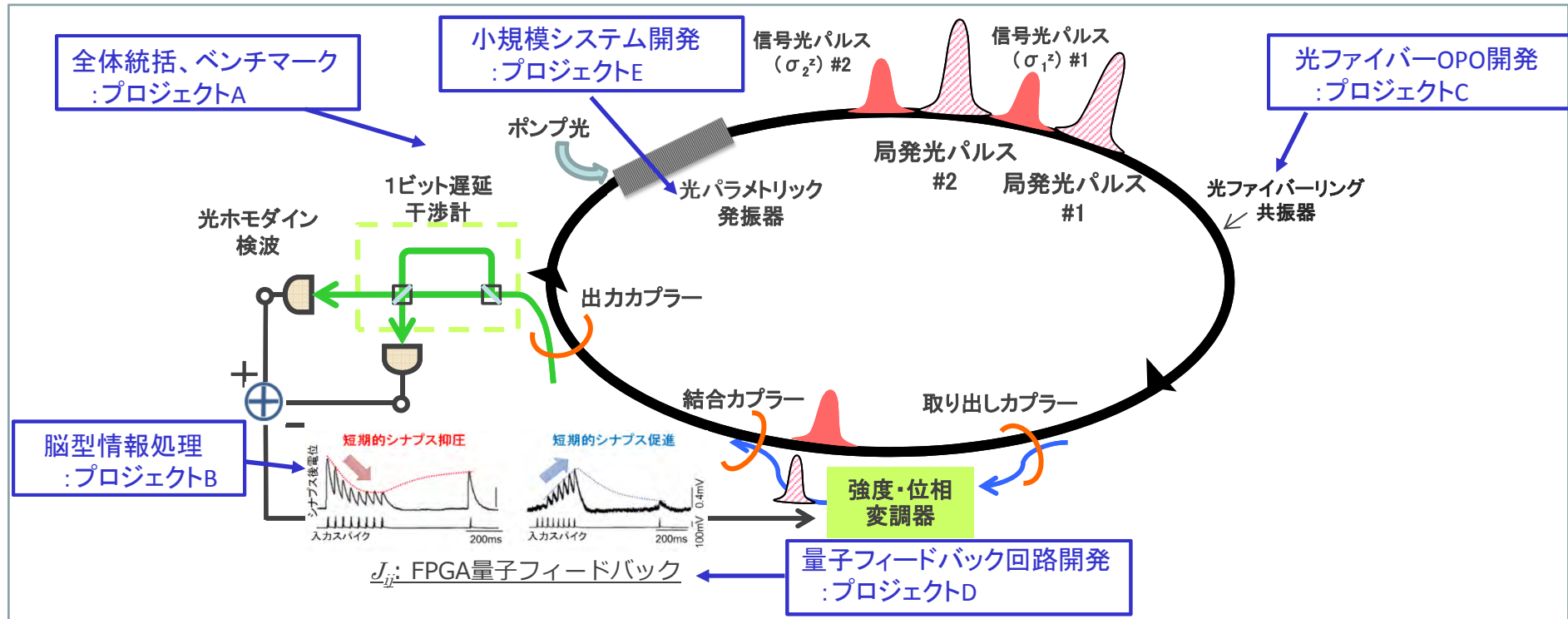
- クロック周波数1GHz、周回時間5マイクロ秒、サイト（OPOパルス）数5000、のコヒーレントイジングマシンの実装技術とこれを制御するFPGA量子フィードバック回路技術、更にこのFPGA回路へのシナプス可塑性の実装方法の開拓。
- 商用ファイバー環境での量子鍵配送の長期安定化、様々なアプリケーションを支える鍵供給インターフェースと大規模鍵管理システムの実現、システム全体の安全性評価技術の確立。広い動作領域をカバーする変復調回路、誤り訂正符号、及び秘匿ランダム化関数を収納し高速駆動する専用基板の開発。
- 精密に制御されたパラメータによって特徴づけられた標準モデルをシミュレートする量子系を、超伝導量子回路・半導体量子ドットでは10サイト以上の、冷却原子では10000個以上の十分大きなサイズで実装。上記3者の物理系においては、粒子数、相互作用の強さ、格子形、量子統計性、など個別には研究の蓄積で良く理解されており、これらの知見の上に、目標の量子シミュレータを総合的に設計・試作する。

プログラム構想・全体像の明確化

克服すべき課題目標の達成アプローチ

- コヒーレントイジングマシンの実装技術：
NTTとスタンフォード大学で独自の手法で実現を目指す（競争的環境）。
FPGA量子回路の開発：スタンフォード大学は小規模・自作ソフトで対応、阪大は大規模・外注ソフトで実現を目指す（競争的環境）。
シナプス可塑性：NIIと東大生研がOPO量子論と脳型情報処理数理モデルを持ち寄って協力して開発を目指す（協力的環境）。
- NICTがネットワーク・鍵管理を基本設計、NEC、東芝などの企業が量子鍵配送装置・アプリケーションインターフェースを開発、東大・NTTなどの大学・企業連合で新理論・安全性評価技術を開発、東北大学などでデジタルコヒーレント光通信技術を積極的に導入し高速化。全チーム連携でネットワーク構築。
- 冷却原子系：京都大学でイッテルビウム原子の捕獲数の増大と、量子縮退温度以下の超低温冷却技術、光格子形を開発。
超伝導回路：理研で、量子ビット同士の結合回路や、量子ビットと共振回路や伝送線路との結合回路を集積化し、エアブリッジ構造作製プロセスを確立。
半導体量子ドット：理研で1、2次元列量子ドットのスピン量子回路を作製し、各ドットの電荷状態、ドット間スピン結合の制御法、基底・励起状態の検出法を開発。ウルツブルグ大学でポラリトン凝縮制御に最適な半導体量子構造を作製。
これらの3者で強相関電子系の標準モデルを実装し、模擬実験によりその非平衡実時間量子ダイナミクスを解く量子シミュレータを開発。

研究開発プログラム全体構成：量子人工脳



各克服すべき課題の実施時期

	H26	H27	H28	H29	H30
A. 全体総括、ベンチマーク	SDPIに対する優位性(理論)	コヒーレントイジングマシン量子論	古典アニーリングに対する優位性(理論)	SDP、古典アニーリングに対する優位性(実験)	
B. 脳型情報処理	分岐理論の導入	シナプス可塑性の導入		量子人工脳概念	ディープラーニングの応用
C. 光ファイバーOPO開発	1GHz、5000サイトマシン		10GHz、50,000サイトマシン		40GHz、500,000サイトマシン
D. 量子フィードバック回路開発	基本設計	1GHz、5000サイト用FPGA開発	評価、新規設計	10GHz、5000サイト用FPGA開発	評価
E. 小規模システム開発	100MHz、100サイトマシンとFPGA開発	ベンチマーク	1GHz、1000サイトマシンとFPGA開発	ベンチマーク	2.5GHz、5000サイトマシンとFPGA開発

課題の達成アプローチに応じた実施機関の考え方

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクトA: 全体統括、ベンチマーク
量子人工脳のハードとソフトの開発をバランス良く進め、プロジェクト終了時に最終目標が達成されるよう各グループの進捗に責任を持つ。SDPや古典アニーリングに対する優位性を実証する。



選定に至る考え方・理由

◆ 選定方法: 非公募指名、研究機関: 国立情報学研究所(宇都宮)
量子人工脳(コヒーレントイジングマシン)が発明され、基本特許、関連特許5件を有する。光パラメトリック発振器の量子論を持ち、繰り返し1GHz、16サイト(パルス)の空間伝搬型光パラメトリック発振器を有する国内唯一の研究機関である。この小型マシンは、コヒーレントイジングマシンの動作原理実証に適している。様々なNP問題に対する数値シミュレーションによるベンチマークに関して実績を持つ。国立情報学研究所は、長年スタンフォード大学との共同研究の実績を持ち、東大生研、NTT、阪大グループを束ねて量子人工脳プロジェクトの全体統括を行なう上で最適な機関であり、指名する。

プロジェクトB: 脳型情報処理
OPO相転移に伴う分岐理論、シナプス可塑性のモデル導入によるコヒーレントイジングマシンの性能向上に貢献。ディープラーニングの応用にむけた多層型学習構造を量子人工脳に導入する。



◆ 選定方法: 非公募指名、研究機関: 東大生研(合原)
脳における情報処理数理モデルにおいて研究実績があるのは、国内では東大生研、理研BSI、京大、CiNetなどをはじめとする研究機関が知られている。しかし、量子人工脳の実現のために最も重要な側面は、シナプス可塑性の導入であり、この知見と電子回路への実装経験を持つのは東大生研のみである。また、当該機関は、コヒーレントイジングマシンの相転移物理、ディープラーニングの研究にも着手しており、最も適した機関であり、指名する。

プロジェクトC: 光ファイバーOPO開発
PPLN導波路デバイスと1~2kmの光ファイバーからなる大規模光ファイバーOPO装置の開発に責任を持つ。高速化と多パルス化の限界に挑戦する。



◆ 選定方法: 非公募指名、研究機関: NTT(武居)
多重パルス・ファイバーパラメトリック発振器を構成するファイバービッグテール付LiNbO₃反転分極導波路デバイス、光ファイバーリング共振器、超高速光変復調技術を全て有する研究機関は、日本電信電話株式会社のみであり、既に独自開発したサイト数(パルス数)5000~10,000の大型ファイバー・パラメトリック発振器を稼働させている上に、関連特許を2件有している。多重パルス・ファイバーパラメトリック発振器を開発する上で最適な機関として、日本電信電話株式会社を指名する。

課題の達成アプローチに応じた実施機関の考え方

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクトD: 量子フィードバック回路開発
光ファイバーOPO装置を制御するFPGA回路の開発に責任を持つ。第1世代(1GHz)、第2世代(2.5GHz)のシステムを開発し、NTTマシーンに実装する。

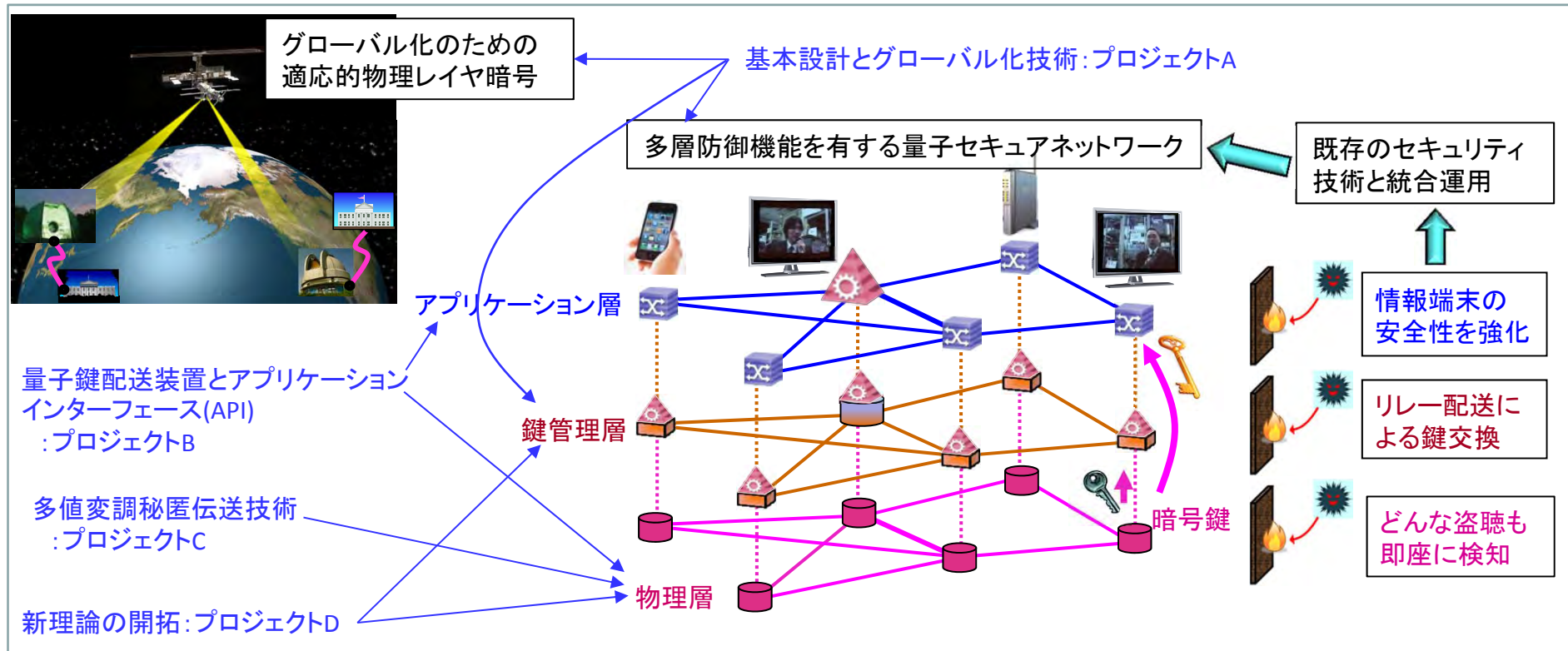
プロジェクトE: 小規模システム開発
プロジェクト全体の水先案内の役割を担う。自作による小規模システムで原理実証、ベンチマークを行ないながら、大規模システム開発の方針決定に寄与する。

選定に至る考え方・理由

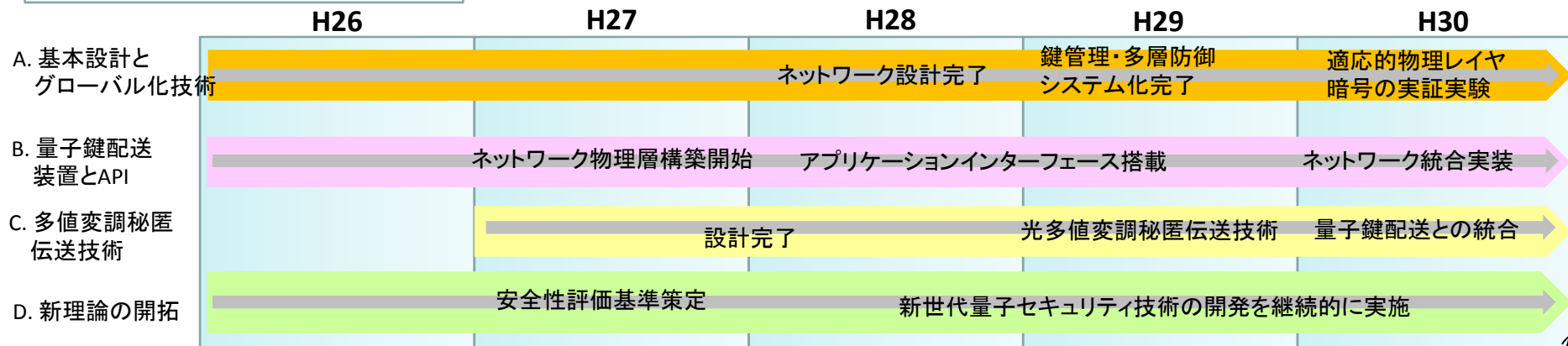
◆ 選定方法: 非公募指名、研究機関: 阪大(井上)
FPGA制御回路が多重パルス・ファイバーパラメトリック発振器に接続できれば、量子人工脳ハードウェアは実現できる。デジタルコヒーレント光通信において、FPGA回路を用いて位相雑音や帯域制限による信号歪を除去する技術を有する機関としては、2企業、2大学がある。しかし、ファイバーパラメトリック発振器の動作と量子光学基礎に精通し、これとの接続技術、設計能力を持つ機関は阪大のみである。

◆ 選定方法: 非公募指名
研究機関: スタンフォード大 (Byer, Fejer, Mabuchi)
当該機関は、LiNbO₃分極反転導波路デバイス、多重パルス・パラメトリック発振器、量子フィードバック制御回路の研究開発で過去20年間にわたり世界をリードしてきた機関である。世界中のこれらの光部品の製造メーカーはほとんど当該研究機関で教育・訓練された研究者の手によりスタートしている。この世界のトップレベルの技術と知識をImPACTプロジェクトに水先案内人として取り込むことにより、研究開発は加速され、結果として我が国の産業競争力の発展に資すると判断する。

研究開発プログラム全体構成：量子セキュアネットワーク



各克服すべき課題の実施時期



課題の達成アプローチに応じた実施機関の考え方

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクトA: 基本設計とグローバル化技術
量子鍵配送のみならず従来のセキュリティ技術にも精通し、実用的な量子セキュアネットワークの設計が行えること。グローバル化に向けた革新的技術開発ができること。各グループの進捗管理、連携調整能力を有すること。

プロジェクトB: 量子鍵配送装置とアプリケーションインターフェース
世界最高速の量子鍵配送装置の開発能力を有すること。あるいは現代暗号のトップ技術を有し量子鍵配送との統合による新しいセキュリティ技術の開拓ができること。

プロジェクトC: 多値変調秘匿伝送技術
世界最先端のデジタルコヒーレント光通信技術を有する機関とコヒーレント光通信技術に基づく量子鍵配送技術を有する機関の連携により、単一光子検出器に依存せず安価な光通信機器を使って、高秘匿伝送システムを実装するための技術開発を推進する。

選定に至る考え方・理由

◆ 選定方法: 非公募指名、研究機関: 情報通信研究機構
長年、産学官連携プロジェクトを運営し世界最高性能の量子鍵配送テストベッド(Tokyo QKD Network)の開発と運用実績を有する国内唯一の研究機関である。また、ネットワークのセキュリティー技術、最先端の光子検出技術や衛星光通信技術を有し、グローバル化に向けた研究で世界をリードしている。以上の観点から、量子セキュアネットワークチームの全体統括をする機関として指名する。

◆ 選定方法: 非公募指名、研究機関: 日本電気株式会社、株式会社東芝、三菱電機株式会社
Decoy BB-84方式量子鍵配送装置の開発で伝送速度と伝送距離の性能において世界トップレベルの技術を有するとともに、現代暗号でも一般市場から国家安全保障用途までカバーする競争力の高い技術を有するのは、この3社であり、最も適した機関として指名する。

◆ 選定方法: 非公募指名、研究機関: 東北大学、学習院大学
東北大学は世界最先端(特に多値化において)のデジタルコヒーレント光通信技術を有する。学習院大学はコヒーレント光通信技術に基づく量子鍵配送技術を長年研究してきた国内唯一の機関である。この両者が共同すれば、多値変調秘匿伝送技術の開発に最も適したチームとなるので指名する。

課題の達成アプローチに応じた実施機関の考え方

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

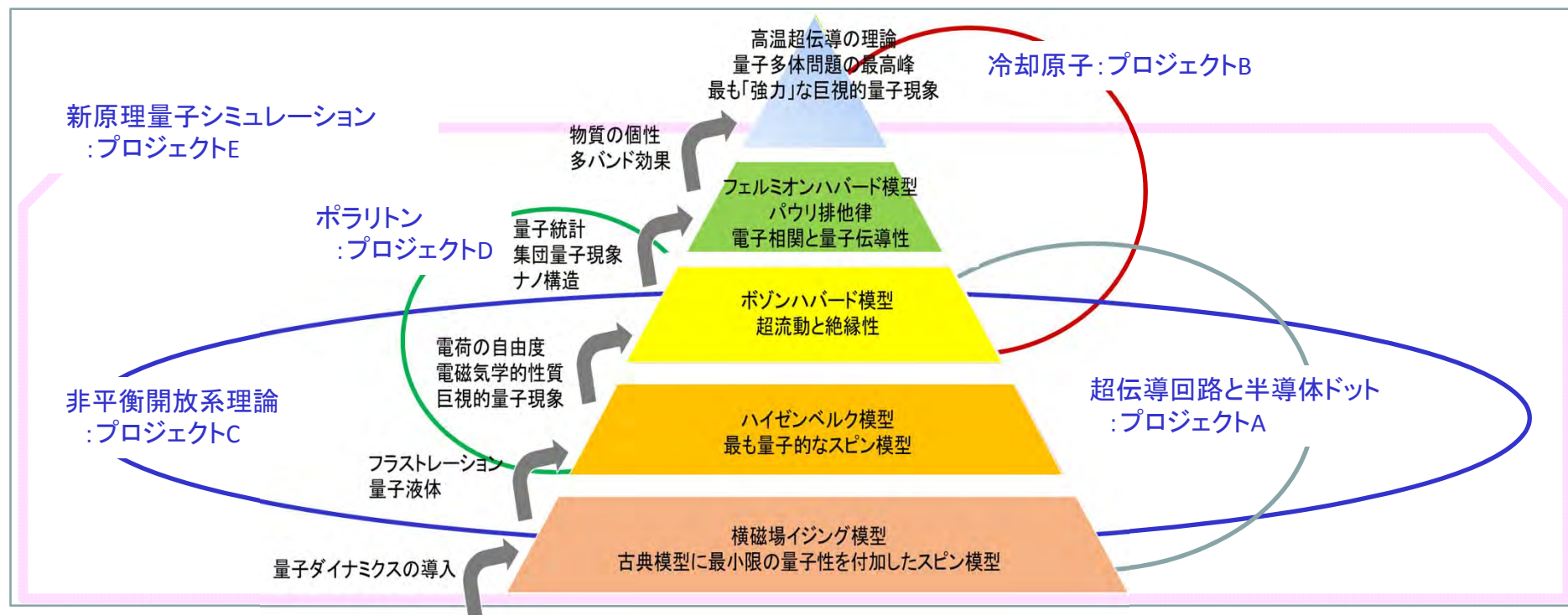
プロジェクトD:新理論の開拓
量子鍵配送の安全性証明や有限符号長での安全性解析で実績のある研究機関、及び情報理論や誤り訂正符号化技術でリードする研究機関の連携により、新原理に基づくセキュリティ技術の開拓を推進する。



選定に至る考え方・理由

◆ 選定方法: 非公募指名、研究機関: 東京大学、日本電気株式会社、北海道大学、東京工業大学
日本電気と北海道大学は、量子鍵配送の安全性証明や有限符号長での安全性解析で世界をリードしている研究グループである。情報理論や誤り訂正符号化技術でも世界トップレベルの技術を有する。東京大学は、雑音に強い量子暗号の新原理の発見に成功し(Nature 2014)、東工大は長距離化に適した適応的物理レイヤ秘匿通信プロトコルを提唱している。これら4グループが共同して新原理の開拓に当たることにより、大きな成果が期待できる。

研究開発プログラム全体構成：量子シミュレーション



各克服すべき課題の実施時期

	H26	H27	H28	H29	H30
A. 強相関量子系	到達目標設定(理論)	超伝導回路設計・試作	半導体ドット量子スピン格子の作成	ボゾン系・スピン系非平衡実時間観測	
B. 冷却原子系	多原子の捕獲	光格子系の作成	ボゾン系非平衡実時間測定	フェルミオン系非平衡実時間測定	
C. 開放量子系理論	量子コヒーレンスの理論	開放系時空間ダイナミクスの理論		高次相関関数の理論	
D. 開放量子系実験	ポラリトン量子ドット系の作成	励起・発光スペクトルの計測手法	ポラリトンの量子凝縮相の非平衡ダイナミクス観測		
E. 新原理	公募グループ採択	新原理量子シミュレーションの提案(理論)	新原理量子シミュレータの設計と試作(実験)	新規量子シミュレーション・シミュレータの実装とベンチマーク	

課題の達成アプローチに応じた実施機関の考え方

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクトA: 強相関量子シミュレータ開発
量子シミュレーションの応用分野開拓と半導体ナノ構造と超伝導量子回路を用いた量子シミュレータの開発を担う。

プロジェクトB: 冷却原子量子シミュレータ開発
冷却原子を用いてボーズ/フェルミハバードモデル量子シミュレータの開発を担う。

プロジェクトC: 非平衡開放系量子シミュレーション理論
光を用いた非平衡開放系量子シミュレータの理論開発を担う。

選定に至る考え方・理由

◆ 選定方法: 非公募指名、研究機関: 理化学研究所
量子シミュレータの出口の最有力候補は、材料物性科学、特に強相関物性であるが、当該研究機関はこの分野の国内第一人者が結集した研究機関であり、強相物性理論、半導体量子ドットスピンを用いた量子情報処理実験、超伝導量子回路を用いた量子情報処理実験で世界的レベルにある、国内唯一・世界有数の研究組織である。特に、量子デバイス製造技術、極低温・高磁場下でのデバイス評価技術、強相関量子論を有する。量子シミュレーションの研究開発チームを全体統括するのに最も適した機関であり、指名する。

◆ 選定方法: 非公募指名、研究機関: 京都大学
冷却原子、特にYb原子の7つのアイソトープ系を用いた量子シミュレーションの実験的研究で我が国トップの研究グループであり、その制御性を追求している点でも最も量子シミュレータの実現に近いグループである。特に、単一サイトの観測手段を有し、ボゾン-フェルミオン混合系を実現する技術を有する。

◆ 選定方法: 非公募指名、研究機関: 大阪大学
開放系の半導体レーザーやポラリトン凝縮相の理論で我が国の研究をリードしている研究グループである。非平衡開放系の理論的ツールが揃っており、実験グループの理論サイドからのサポートに欠かせない。

課題の達成アプローチに応じた実施機関の考え方

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクトD: 非平衡開放系量子シミュレーション実験
ポラリトン・ボーズハバード量子シミュレータの開発を担う。



選定に至る考え方・理由

◆ 選定方法: 非公募指名、研究機関: ウルツブルグ大学
当該研究機関は、III-V族化合物半導体を用いた量子井戸マイクロキャビティに形成される励起子ポラリトンの横方向閉じ込め機能を付加したデバイスを作製する技術において、世界トップレベルにある。同レベルの技術を持つ他のグループとして、フランスCNRSのJ. Blochのグループがあるが、量子シミュレータに適した電流注入型プレーナ構造を作製できるのは当該機関のみである。このブレークスルーは、昨年Nature誌に掲載された。当該機関のデバイスを用いて量子シミュレーションの原理確認実験を行なうことは、我が国の産業競争力に直接的インパクトはないが、長期的に科学的知見を我が国に蓄積することを通して、量子シミュレータ開発の道筋を明らかにし、よって国際競争力に資すると判断する。

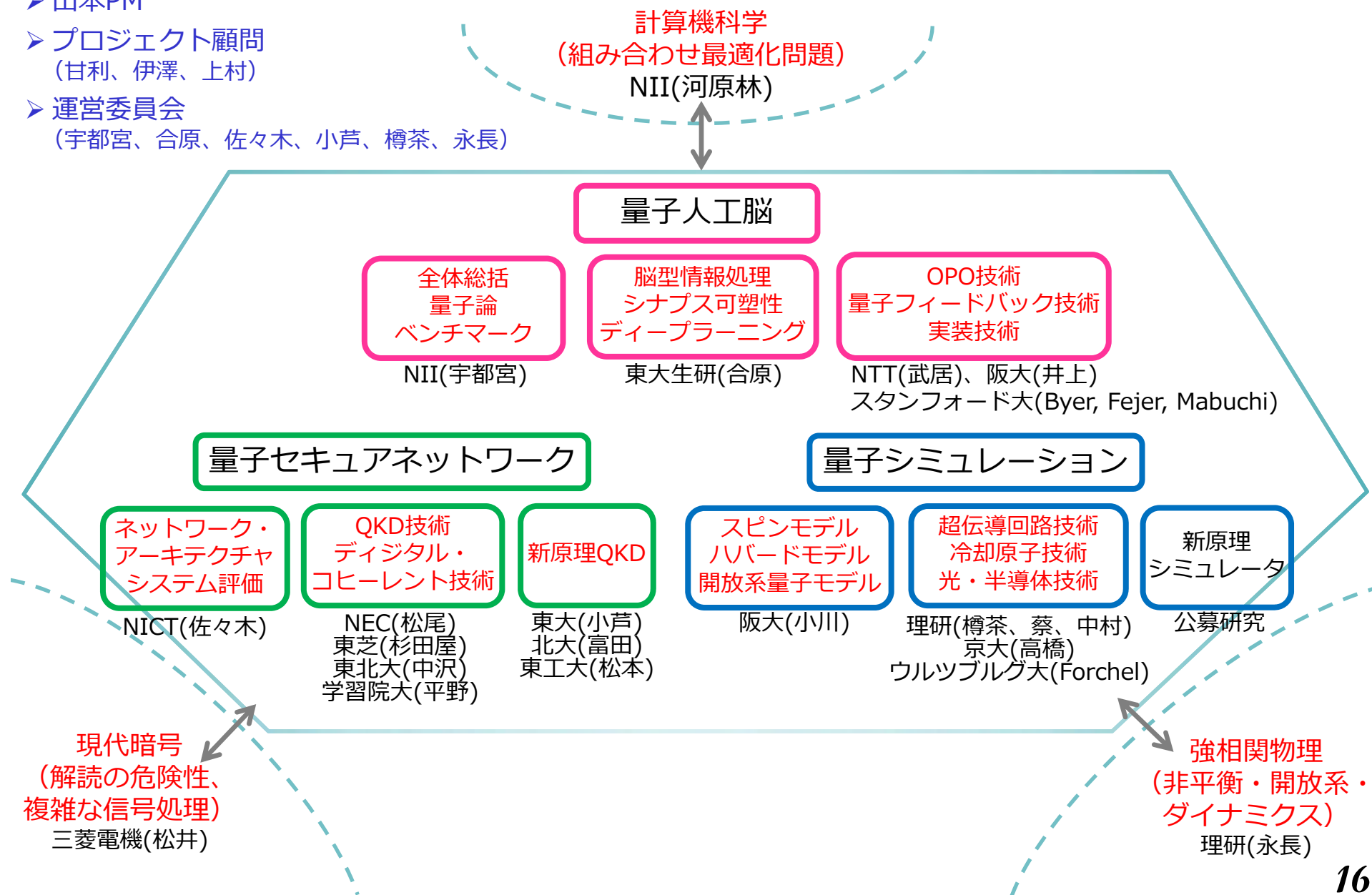
プロジェクトE: 新原理量子シミュレーションの探索
新型量子シミュレータの提案および開発(実験)、量子情報理論的、着想に基づく数値シミュレーション・アルゴリズムの開発(理論)、量子シミュレーションの新規応用分野の開拓(理論)を行う。



◆ 選定方法: 公募
新しい優れたアイデアを提案でき、かつそれを裏づけする実績と実験・計算技術を有する研究グループを採択する。提案書に基づき、研究開発力と競争能力を精査する。

研究開発プログラム全体の体制図

- 山本PM
- プロジェクト顧問
(甘利、伊澤、上村)
- 運営委員会
(宇都宮、合原、佐々木、小芦、樽茶、永長)



研究開発プログラム予算(予定)

