

最先端研究開発支援プログラム（FIRST）中間評価に係るヒアリング
（量子情報処理プロジェクト）

1. 日時 平成24年9月19日（水）15:00～15:50

2. 場所 中央合同庁舎4号館12階 共用1214会議室

3. 出席者

相澤 益男 総合科学技術会議議員

奥村 直樹 総合科学技術会議議員

今榮東洋子 総合科学技術会議議員

青木 玲子 総合科学技術会議議員

大西 隆 総合科学技術会議議員

西尾章治郎 大阪大学情報科学研究科教授（外部有識者）

秋永 広幸 産業技術総合研究所ナノデバイスセンター長（外部有識者）

今井 浩 東京大学情報理工学研究科教授（外部有識者）

國枝 秀世 名古屋大学大学院理学研究科教授（外部有識者）

黒部 篤 株式会社東芝セミコンダクター&ストレージ社半導体研究開発センター長
（外部有識者）

久間 和生 三菱電機株式会社常任顧問（外部有識者）

中野 節 大臣官房審議官（科学技術政策・イノベーション担当）

川本 憲一 政策統括官（科学技術政策・イノベーション担当）付参事官（最先端研究
開発支援プログラム担当）

4. 説明者

山本 喜久 国立情報学研究所教授（中心研究者）

蔡 兆申 理化学研究所巨視的量子コヒーレンス研究チームチームリーダー

都倉 康弘 筑波大学数理物質系教授

高橋 義朗 京都大学理学研究科教授

仙場 浩一 国立情報学研究所特任教授（研究支援統括者）

5. 議事

【事務局】

それでは、皆さんおそろいですので、これより研究課題「量子情報処理プロジェクト」の中間評価に係るヒアリングを始めさせていただきますと思います。

本日の出席者はお手元の座席表のとおりでございますが、中心研究者である山本先生をはじめ、研究課題側からはお忙しい中をご参集いただきましてありがとうございます。

本日の配付資料の一覧についてはお手元のとおりでございますが、ご確認をいただければと思います。

このヒアリングは非公開で行いますが、後日、今後の研究発表あるいは知的財産検討に支障が生じないことを確認した上で、議事概要を公表させていただきます。

時間配分は研究課題側からの説明を15分、質疑応答35分ということにさせていただきます。説明に当たっては時間厳守をお願いいたします。

説明に当たってはあらかじめお願いをしておりますが、課題全体の研究の進捗度合いと目標の達成見通しについて、国際的な優位性、あるいはサブテーマの役割、相互関係を含めて簡潔で明瞭なご説明をお願いしたいと思います。

説明では、終了5分前に予鈴、終了時間に本鈴を鳴らさせていただきますので、時間が来ましたら説明の途中であっても、そこで中断をしていただければと思います。

質疑応答では、終了3分前に予鈴を鳴らさせていただきます。

それでは、説明のほうをよろしく願いいたします。

【説明者】

量子情報処理プロジェクトの研究経過についてご説明させていただきます。私は中心研究者を務めさせていただいております山本喜久と申します。

まず研究のねらいですが、新しい科学フロンティアということについて述べます。量子情報科学は、量子物理学と情報科学が100年という歳月の間に32のノーベル賞を輩出しながらたどり着いた融合領域であります。例えば量子コンピュータの基盤となるスピン量子ビット、超伝導量子ビット、トラップイオン量子ビット、冷却原子量子ビットの動作原理はこの時期に発明されました。

これらの量子ビットの初期化、操作、検出に関わる周辺技術の基本原理を含めると、実に3年に一度というペースで量子物理学の分野にノーベル賞が出されてきたこととなります。

このような融合領域はフォトリクスやナノテクノロジーといった現代技術の最前線を横断的に統合して物理、化学、生物学、遺伝学、生命科学、薬学、医学などの分野でのパラダイムシフトを引き起こし、新しい科学フロンティアである量子情報科学というものを形成すると期待されています。

次にもう1つの研究のねらい、21世紀の社会インフラということについて述べます。ここにはこのプロジェクトで研究しています4つのシステムの大きさと開発に至るまでの期間及び出口のイメージを示してあります。

1ビットでシステムが完結する量子標準や量子計測は最も実用化に近く、ブロードバンド光通信やGPSのクロック情報を与えるばかりでなく、重力波検出や物理定数の恒常性など、基礎科学のテストにも使えると期待されています。

次に実用化が近いと目されている量子ビットが100ビットから1,000ビットでシステムが完結する量子シミュレータは新材料開発や生命現象、気象予測といった多体系、複雑系のふるまいを解明するものと期待されています。

量子ビット数が1,000から1万というオーダーが必要とされる量子中継は長距離の量子暗号通信を可能にするものでして、絶対に安全な電子投票や電子商取引へ道を開くものと期待されています。

最後に最も大規模なシステムとなる量子コンピュータは、ここに示しましたように蛋白質の構造解析でありますとか、マイクロプロセッサの回路設計あるいは移動体通信の周波数割り当てなどの組み合わせ最適化問題を効率的に解くというふうに期待されています。

このプロジェクトは8つのサブテーマに38の研究グループ、約500名の研究者、うち外国人研究者約120名という体制で行われています。私が率いる量子情報システムは4つのシステムのアーキテクチャを担当しております。蔡、樽茶、高橋、井元、香取、山西が率いる6つの実験サブテーマはそれぞれのハードウェア技術の開発に従事しています。最後に都倉が率いる理論グループが全体の理論サポートをするという体制になっています。

研究支援体制ですが、国立情報学研究所内に研究分野と事務部門を担当する2つのサポート体制がありまして、研究支援統括者である仙場の下に研究推進を担当する堀切と人材育成を担当する宇都宮という技術参事が配置されております。

このような大がかりな研究体制を敷いてきた理由を次に述べます。このスライドは現在米国における量子コンピュータの大型研究開発プロジェクトの研究テーマと研究チームの構成をまとめたものです。基礎研究サイドはDARPAにより、開発サイドはIARPAによりサポー

トされています。2つの機関を合わせますと都合130余りの研究グループが5年間の研究予算約240億円という研究費の規模で活動を行っています。

ここにリストアップしたのは量子通信でありますとか、あるいは量子標準、量子計測といった他の2つの分野を含んでおりませんので、量子情報技術全体の予算の約3分の1と目されます。更によく知られていますように、DARPA、IARPAの場合には開発に非常に近いところでは研究内容や成果が全く公表されないクラシファイされたプロジェクトが進行しておりますので、米国政府全体としての量子情報技術のプロジェクトは更に大きなスケールのものになると考えられております。

このような体制を米国政府が敷いている理由は次の2つに要約されると思います。量子情報処理はいまだ本命技術が登場せず、いつどこでブレークスルーが起こるか分からない状況ですので、できるだけ広く網を張って成功確率を上げておきたいということと、実用化に至る長い道のりを乗り切るための人材育成が将来の技術開発を決めるため、できるだけ多くの研究教育機関に研究グループを設置して、高いレベルを維持しておきたいという2点だと思います。我々のプロジェクトもほぼ同様の考えに沿って運営されてまいりました。

この量子情報処理の分野では、実は現在の世界の研究の潮流を構成しているのは、日本発のオリジナルな技術です。例えば量子コンピュータの基盤である超伝導量子ビットや半導体スピン量子ビット、NP完全問題を解くと期待されている注入同期レーザーネットワーク、あるいは複雑系、多体系の解明に有効だと目される冷却原子や励起子ポラリトンを用いた量子シミュレータ、あるいは次世代の秒の標準となると目される光格子時計などはこれらの研究者の発明によるものです。

これらのオリジナル技術は今日広く世界で認知され、それゆえに欧米の研究グループの激しい追い上げにあっている状況でして、リソースの限られた日本の研究グループでは非常に戦略的な研究開発の方針をとらないといけない、そういう状況に置かれているという現状であります。

前置きが長くなりましたが、次に研究内容についてご説明します。このFIRSTのプロジェクトが始まる以前には量子コンピュータの最終的な姿がどういうものになるかは必ずしも明らかではなくて、世界中の多く実験家は1ビット、2ビット、3ビットと量子ビット技術を積み上げていけば、いずれ量子コンピュータにたどり着くという楽観的な考え方を持っていたわけですが、我々はまず最初に開発すべきシステムの全体像を明らかにするところから始めました。ここに提案した誤り耐性量子コンピュータのアーキテクチャとは、量子ビットの実

装、量子ゲート操作を行う物理層、系統的なエラーの除去を行うバーチャル層、量子ビットのデコヒーレンスやゲート誤りを検出して訂正する量子誤り訂正層、ユニバーサルな量子計算を実行できるプラットフォームを提供する論理層、量子アルゴリズムを実行し、ユーザーとのインターフェースを図る応用層の5層、からなる階層構造をとっています。

このようなアーキテクチャが明らかになったことによって、意味のある量子計算を行うために必要なリソースというものを正確に見積もることができました。その結果はゲート誤りが0.1%以下、量子ビット数は $10^8 \sim 10^9$ 、計算時間は大体1日から10日というものでした。

このように深刻な数値を世界に先がけて手に入れたということは、プロジェクトにとって非常に大きなメリットでして、このことによって1チップの中に $10^8 \sim 10^9$ という量子ビットを集積化できない冷却原子やトラップイオンを用いた手法を開発目標から外すこと、固体量子ビットに基づく系の研究開発目標を高フィデリティ化と大規模集積化に絞り込むということを決めることができました。

1つの有望な固体量子ビットに基づく方式は超伝導量子コンピュータでして、 10^8 という量子ビットを1チップに集積化できる大規模集積化と99.9%というゲートフィデリティを可能にする二次元の回路方式というものが新たに出てきて、研究が順調に進んでいます。この分野の研究は世界的にはUCサンタバーバラ校やエール大学、D-Waveとの激しい競争にさらされているというのが現状であります。

もう1つの量子コンピュータの研究の柱は、半導体スピン量子ビットに基づくものでして、こちらも大規模集積化と高フィデリティの実現ということに道が開かれつつあるという現状です。こちらは国際的に見ますとハーバード大学、デルフト大学、ウィスコンシン大学などと激しく競争を行っているというのが現状です。

大規模な量子コンピュータの開発に至る前に適当な中間目標を設定することの重要性はいうまでもありませんが、我々は量子中継というシステムにその役割を担わせることを考えました。

量子中継システムというのは、10 kmから100 km離れた2点間に量子もつれ状態をまず配信し、その後、ベル測定を行うことによって遠く離れた2点間に量子もつれ状態を配信するというものです。これによって長距離の例えば国際量子暗号通信システムなどが可能になります。

このような量子もつれ状態の配信は、2つの量子ビットから識別できない単一光子を同時に発生して同時に検出することによって生成することができます。最近、我々は半導体量子ドット内の単一電子スピンと通信波長帯の間で量子もつれ生成に成功し、量子中継の第1段階を世界に先がけて達成することができました。

同様の試みで超伝導量子ビットとダイヤモンドNVセンターを使ったものも順調に研究が進んでおりまして、現時点ではメリーランド大学、ハーバード大学、ETH、フランスのサクレール研究所などを一歩リードしている、そういう状況であります。

次にコヒーレント・コンピュータという新しい概念についてご説明します。現在の計算機科学における計算量はP、NP、NP完全、NP困難という順に困難さが増していくと考えられていました。しかし、このNP完全問題の1つでも多項式時間で解ければすべてのNP問題は多項式時間で解けることになり、PとNPの境界がなくなるということになります。我々は量子コンピュータを超える性能を持った新しい計算機概念を導出することによってこれに挑戦したいと考えました。

ここに示しましたのは、多数のレーザーからなるネットワークにNP困難問題の1つである三次元のイジングモデルをマッピングして、レーザーの量子相転移を使って問題を一気に解くという考え方です。これまでのところ、少数の比較的小さい問題のサイズに対する数値シミュレーションの結果によれば、この新しい方式による計算時間は現代のコンピュータや量子コンピュータの計算時間に比べて低く抑えられており有望だと考えています。

このように量子コンピュータの原理を超える新しい量子計算のあり方を模索する動きはMITやロスアラモス国立研究所、マックスプランク研究所でも現在進行しておりまして、具体的なシステムの提案に至っているという点で我々のプロジェクトは一歩リードしていると考えています。

次に最後のテーマですが、量子シミュレータについてご説明します。高温超伝導の発現機構がその発明から25年を経た今日もおいても解明されずに、また超伝導の転移温度がこの10年間全く改善されていない原因の1つに、このような複雑な量子多体系の問題を現在のデジタル計算機では十分効率よくシミュレーションすることができないという問題が考えられます。

そこでターゲットとなるモデルのハミルトニアンを制御しやすい別の物理系にマッピングして、この物理系で模擬実験をすることによって答えを引き出すという、量子シミュレーションという考え方が我々の分野でしばらく前から出ています。私たちのプロジェクトでは冷却原子を光格子に閉じ込めた系と励起子ポラリトンを半導体チップに閉じ込めた系という、全く異なった系で量子シミュレータを開発して、それを使ってこのような複雑、多体問題を解こうと考えています。

この研究も世界的には非常に激しい競争の中に置かれているわけですが、日本が伝統的に強い磁性や強相関電子系の研究者と協力することによって、この分野でも世界を一歩先んじる成

果が得られつつあるという現状であります。

最後になりましたが、このプロジェクトで比較的力を入れて取り組んできたアウトリーチ活動についてご紹介させていただきます。量子情報処理は息の長い研究テーマでありまして、実用化に至る長い道のりで世界との競争に勝ち残るためには将来を見据えた地道な人材育成が欠かせません。我々は毎年プロジェクト内の若手 50 名を 10 日間集めて量子情報科学の基礎から先端技術に至るまで一気に教えるというサマースクールを開講してまいりました。関東と関西には約 100 名の若手研究員からなる学生チャプターが置かれていまして、自分たちの独立の研究会を運営しています。

時間がまいりましたので以下省略しますが、次世代の理系トップランナーの育成に対する取り組み、あるいはニュースレターを四半期ごとに発刊して、全国 2,500 か所に配布して広範な人々に研究活動を知っていただくということも併せて行っております。

駆け足になりましたが、発表は以上で終わらせていただきます。ありがとうございました。

【事務局】

どうもありがとうございました。それでは、これより質疑応答に移りたいと思います。ここからの進行については相澤先生のほうでよろしくお願いいたします。

【有識者議員】

本日体系的な説明をしていただいたので、プロジェクト全体の姿が明確になったのではないかと思います。ありがとうございました。

昨年は特に 500 人ぐらいの規模でこのプロジェクトを運営されているので、科研費の寄せ集めではないかという声もあったぐらいに、全体の姿がなかなかとらえにくいということでした。そこで本日は量子コンピュータに特化して、そのところの国際的な比較で、今一歩先を出たというふうに言われたと理解してよろしいのでしょうか。

【説明者】

今日お話した量子コンピュータと、それに関連した技術、4つ5つほどお話したのですが、超伝導量子コンピュータと半導体スピン量子コンピュータの分野では、もともとのアイデアは日本から出てきたものですが、今や欧米の研究グループが非常に活発に研究していて、激しく競争しているという状況ではないかと思います。決して遅れているわけではないですが、

一歩リードしていると楽観できるような状況ではありません。

小型の量子コンピュータとして今日量子中継という話をさせていただきました。あるいは新しい考え方としてコヒーレント・コンピュータという話をさせていただきました。あるいはもう少し違う切り口で量子シミュレーションという、量子コンピュータに関連した話として3つご紹介させていただきました。この辺は現在日本が非常に強いところで、世界に比べて一歩リードしていると考えられています。

【有識者議員】

その4つのうちのここで量子コンピュータという形で表現されている、この部分については、これは今までの世界の研究状況も具体的なところまではなかなかいっていないと。そこを今回山本プロジェクトで明確なものを出した。それがスライドの7ページでしょうか。この論文がそれに対応するものだと。

【説明者】

そうですね。開発すべきシステムの全体像が明らかになったのはこれが初めてだと思います。この論文がトリガーになって超伝導量子コンピュータの開発では世界で1、2を争うグループであるUCサンタバーバラ校のグループがこの誤り耐性の量子コンピュータのアーキテクチャを自分たちのハードウェアの上に乗せてどうなるかを今検討していると聞いています。

もう1つの柱である、アメリカはイオントラップの量子コンピュータというのに非常に大きなリソースが掛けられています。そちらはMITとデューク大学のグループがやはりこの階層構造のアーキテクチャを使ったらどういう形のものなるかということを検討開始したと聞いています。いずれ論文がそれぞれ出てきて、この辺の数値がより難しい方向に行くのか、あるいは良い方向に行くのかが分かるかと思っています。

【有識者議員】

どうぞ。

【有識者議員】

昨年伺ったときから比べて、今もご指摘のあった、この7ページ目の開発すべきシステムの全体像を今回ご提示いただいたことは大きな進歩ではないか。つまりこれまで量子コンピュー

タ、量子コンピュータと話は聞いていますが、何が足りないからできないのかということのお話は一度も伺ったことがない。これも量子コンピュータに関係あります。これも量子コンピュータに関係があります、と。個々の研究は関係するでしょうけれども、量子コンピュータというのは1つの技術の体系になりますから、あと何が足りないからある機能のものができないと、それを言っていたかかないといけないので、今回そういう意味では7ページ目は1つの大きなステップを超えたかなという感じは持っています。

一方、今日ご提出いただいたこの中間評価、自己評価表の中を見ますと、リソースの配分だけから見ますと3つのグループがほぼ5億円でイーブンにお金を使っておられて、その他3機関ぐらいは2億前後というような構成になっています。今回のこの7ページのような成果を踏まえると、今後残り1年半しかありませんけれども、量子コンピュータの実現を加速させるという目的があるなら、今のチーム構成のリソース配分を含めて再編されるお考えがあるのかなのか。あるのであれば、どういうふうにされようとされるのか。もしお考えがあれば伺いたい。

【説明者】

実はリソースが今お話しいただきましたように大きく配分されている超伝導量子コンピュータのサブグループと半導体スピン量子コンピュータのサブグループは今ここをアタックしています。ここがようやく見えてきてバーチャル層の技術を立ち上げる、この2つを実験グループが担っていて、ここが基盤ですので、ここを外すわけにはいかないと考えています。

もう1つの大きなグループは私が率っていて、この階層構造全体をバランス良く見ているのですが、この上側の3つの層はいわゆる理論グループが担当する領域で、数字の上からはリソースの配分は少ないのですけれども、人としては優秀な人が張りついでいて、この上の3層は今の体制で十分ではないかと考えています。

この7ページの階層アーキテクチャに関連するグループ以外の研究グループを整理統合したとしても、大してお金が出てこないということと、最初に申しましたけれどもこういう考え方と全く違うところから本格的なブレークスルーが出てこないとも限らないという点で、少ないリソースですけれども全国津々浦々のというところまでいかないですが、38ある研究グループにある程度の機会を与えておくことのほうが後々になって、「しまった、穴があいていた」ということにならないのではないか。リソースの配分としてはそれほど重荷になっていないといえますか。

【有識者議員】

なぜそういうことを申し上げているかといいますと、これはほかのプロジェクトの方にも申し上げているのですが、1つのテーマにこれだけの多額のリソースをかけるというのは前例がないわけです、国際的に見ても、このFIRSTのプロジェクトは。したがってこの資金の規模で初めて達成可能なことをやっていただきたい。先ほども事例が出ましたけれども科研費の100チームを集めたような仕事でなくて、これだけのリソースが集まったからこそ初めてできるという質的に違うことをやっていただきたい。そういう思いが我々のほうにあります。そういう視点から見てある程度研究開発の方向、量子コンピュータを筆頭に上げればある種の開発の構造が見えてきたこの時期にある意味では再編されるほうがこのプログラムの趣旨に合っているのではないかと、こう思いまして、先生のお考えをお伺いしたというところです。

【説明者】

正直、まだそこまで踏みこんで考えていませんで、おっしゃることはよく分かります。必ずしも今の体制が最適解ではない部分は確かにあるかと思えます。少し検討させていただきたいと思えます。

【有識者議員】

ほかには。

【有識者議員】

ありがとうございました。いただいた自己評価資料の中で目的が量子コンピュータ、シミュレータ、通信網を開発する道筋を明らかにすると書かれています。この道筋というのはやや曖昧な表現で、先ほどのようなアーキテクチャが示されたというのでも道筋とも言えるし、より製品に近いところまで到達すると、最終製品ですね、というのでも道筋で、少し幅がある概念だと思います。今の奥村議員とのやりとりを伺っていると、何かターゲットの道筋が定かになって、更にそれを具体化するために絞り込んでいるというよりも、何となくまだはっきり道筋が見えないので戦線を広くとって、いろいろな研究者から適切なアイデアを出してもらっているという段階とも伺えるんですね。むしろFIRSTのプロジェクトは前者のほうで、目標に向かって資源を集中して成果を出すというところに1つのねらいがあると思うので、この道筋

という概念をもう少し絞ってお話しいただけたらと思います。

【説明者】

最初に述べました米国における現在の量子コンピュータの研究開発の状況を見ていますと、日本よりも更に網が広く、DARPAはもちろんインターネットやGPSを開発したところですから多くの知恵が中にある研究機関ですけれども、それでも絞りきれないというのが現在のこの分野の現状でして、そういう世界的な状況から見れば、このFIRSTはある程度の絞り込みはできていて、一応やるものというのはこの1ビットをベースにしたものと、それからもう少し大きな量子シミュレータ、量子中継、量子コンピュータですが、これらのところに割かれているリソースは決して最終目標に到達するときに多分無駄にならないリソースのかけ方なのではないか。

コンセプトがもう固まっていて、あとは集積化する、材料技術を改善するというところでゴールに行き着くというフェーズにはないので、先ほど申しましたようにリソースの大半はここに今いるわけですが、ある程度のリソースを3つの異なったところに残しておくことによってクロスファティライゼーションといいますか、こういうところから上がってくる知恵を吸収して新たな飛躍をするということが起こらないとは限らないと思います。

【有識者議員】

分かりました。国際競争のところで1つひとつの領域についてライバルというか、有力な研究機関が何をどういう状態にあるか整理されたスライドがあったと思います。日本の中では先生のグループにすべてが包摂されているということなのか。日本の他の研究グループは出てこなかったと思うんです。その点については。

【説明者】

このプロジェクトの外におそらく倍ぐらいの研究グループがあると思います。拾いきれなかった研究グループは科研費やJSTのさまざまなプロジェクトでサポートされている。そういう意味ではこのプロジェクトが一番大きくて中心ですが、その周辺には更にもう少し間口を広げた量子情報科学の研究グループが倍ぐらいいます。先ほど言いましたアウトリーチ活動みたいなものというのはこのプロジェクトの外側にいて、あるいは周辺にいる人たちと一緒に実は行っているという状況です。今井先生の研究室の大学院生の方やポスドクの方も基本的には

中心になって活躍していただいている、そういう意味ではオールジャパンが全部網羅されているという研究体制には実はなっていません。

【有識者議員】

1つだけ。最後ですが。日本の他の研究グループは、これは国際的なベンチマークとの比較と書いてあるので外国の研究チームだけを取り上げたのですが。それともここに入っていないという。

【説明者】

おそらく量子コンピュータ実験分野は多分に設備産業に近いところがあって、大きな実験グループを抱えていないと参入できないので、多分この中に全ての有力グループが入っていると思いますが、理論研究はいろいろなレベルで研究できるので、必ずしも入っていないと思います。むしろ量子情報科学の理論の分野はここに入っていない研究グループのほうが圧倒的にマジョリティだと思います。今日は国際ベンチマークとの比較というのはすべて実験技術に対して行いましたので。

【外部有識者】

私も誤り耐性を持った量子コンピュータの全体像を出した、これは非常に大きな成果だと思っています。だからこそ1つお聞きしたいとかコメントさせていただきたいのですが、例えば第1層の物理層、つまりデバイスをつくるところのご研究をされているということだったわけですが、例えば先ほど奥村先生からもお話がありましたようにこういった研究、例えば量子もつれを制御できるようになりましたという、そういう要素技術的な発表が例えばサイエンス、ネイチャーを騒がしていた時代があって、その一歩上をいったのだということであれば、例えば第2層のバーチャル層から見たときに第1層のデバイス構造はこうあるべきだという、例えば指針が出たので第1層の開発をこのようにしました。例えばそういった見せ方ができれば、この第1層から第5層をきちんとカテゴリライズして全体像を見せたというところが、まさに道のりをきちんと見えるようにしたのだよという、そういった成果の1つとして出せるのではないかと思うわけです。つまり1から5でなくて、5のほうから1に向かってどういった成果が出ているのか。もしくは指示を出しているのかということはこの評価資料の中で出させていただくと、このプロジェクトの特色が出てくるのではないかと、そういったことも今後ご検討

いただきたいなと思っていますので、よろしくお願いします。

あともう1つ私のコメントは、もしかしたら今日のメインテーマではないのかもしれないのですが、量子シミュレータの成果が面白いなと思って見させていただきました。どういう見方をしているかというところ、今日ご紹介いただいたところはもしかすると山本先生のプロジェクトの中で興味があるところ、もしくはやりたいところをやってしまったところがあるのではないかと考えています。私がこの量子シミュレータに興味を持っているのは、例えば電子相関が強い系に対してこの量子シミュレータがあるといろいろな解が出せるよ。これは今回の評価資料の中にも書いていただいているところですが、この電子相関を扱っているというプロジェクトがFIRSTの中にほかにもあります。この数物のところにもありますし、ほかの領域にもあります。例えばそこでボトルネックになっているような問題が多々あるのですが、それを先生の開発している量子シミュレータの系、例えば励起子ポラリトンでもいいと思いますが、これを使って解決できたぞ、例えばそういうことができれば、これは非常にFIRST全体としてもいいのではないかと考えて、これはもしかしたら先生にお伝えするのではなくて、内閣府の方にお伝えするべきなのかもしれないのですが、そういったことができるといいかなと思っていますので、これに関してはもうちょっと横を見ていただくといいのではないかと考えています。今後ご検討いただければと考えております。

【説明者】

実は高橋先生のところの冷却原子のシミュレータも私のところの励起子ポラリトンの量子シミュレータもようやくいろいろなことができるようなレベルになってきて、それでこの夏ぐらいいから強相関電子系の人たちとディスカッションをするようになっていきます。11月に本格的なワークショップを共同で開催することになっています。

どういう問題を取り上げれば材料科学から見たときに価値のあるものなのかという知恵をいただきたいということで、実はワークショップを企画しています。

【外部有識者】

分かりました。期待しています。

【外部有識者】

このプロジェクトの最初の目標は、量子コンピュータに関しては小規模システムでの実証、

それから通信ではプロトコルの確立ということで、小規模といえでもシステムでの実証を目標に立てましたね。しかし、現段階では素子レベルの原理実証にとどまっている。システム実証の困難なところ、また、何をブレークスルーすれば解決できるのかを明確にするべきだと思います。それから、残り1年半で本当に所期の目標を目指すのがよいのか、あるいは素子レベルの技術をしっかりと確立するのがよいのか。そういったところの見直しも含めて、山本先生のお考えを聞かせて下さい。

【説明者】

この量子コンピュータの研究はこのプロジェクトが始まるまでは先ほど申しましたように1ビット、2ビット、3ビットという多ビット技術を積み上げていけばいずれ量子コンピュータに結びつくというふうに考えていたところがあります。そのときに何に的を絞って開発するかというと、コヒーレンス時間の長い量子ビットをつくるということに研究者の関心があって開発を行っていたのですが、先ほどのシステムのいわゆるバーチャル層、量子誤り訂正層から下を見たときに、今このプロジェクトの主力部隊がかかっているこの第1層と第2層に必要なものはコヒーレンス時間が長い量子ビットでは決してなくて、ゲートの精度が高い、ゲートエラーが小さい制御技術と大規模集積化ができる、それもワンチップにのるようなものでないといけないということが分かったのが大きいと思います。

それで、無理やり外界から系を孤立させてうちの量子ビットでは何マイクロ秒に寿命が延びましたとか、10マイクロ秒に延びましたというような記録を競い合っても意味がなくて、大きなシステムがつかれるということと、その1つひとつがかなり正確に制御できるということがむしろ大事なのだということは分かってきた。大規模なシステムに集積ができて、しかもゲートの精度を上げられるようなシステムというのは、この2層でできるシステムはこれなんだということはこれからの1年半で出せば自分たちとしては成功したというふうに言えるのではないかと。

【外部有識者】

そうですね。だから、超伝導素子とスピン量子素子のどちらが、最近、先生が提案されているコヒーレントと相性がいいかは、第1層、第2層のハードウェアの集積ができるかどうかにかかっていると思います。奥村先生からもリソース配分の絞込みの話がありましたが、今は同じ配分だけでも、どの段階で何が実証されたらリソース配分をこっちに集中するとか、そうい

った指標と計画の作成が必要と思います。

【外部有識者】

量子コンピュータに関する対外的に大きなインパクトのある成果ということを考えてときに、やはり計算機科学の分野ですとPとNPの問題というのがあります。この問題に対して、本プログラムにおいて世界をリードするどのような具体的な成果得られているのかを再度説明していただけるでしょうか。

【説明者】

これまでNP問題やNP完全問題を多項式時間で解けるような、いわゆる量子コンピュータのもう1つ先をいくようなものをつくりたいという試みはMITの量子断熱計算に始まると思いますが、研究を行って、ほぼ10年近くになりますが、いまだに指数発散するという問題が解決されていません。ロスアラモスの研究所でも別の方法で量子アニーリングという方法でやはり研究されているのですけれども、計算時間の指数発散という、この問題が実は解決されていません。

それで我々のところではこういう量子断熱計算とか量子アニーリングという今の量子計算の考え方を一歩進めていまして、それは量子計算の基本的な概念というのは量子ビットを閉じた系の中に閉じ込めて外界から遮断して、ユニタリーな時間発展、ベクトルの回転だけで計算をするという、すごく窮屈な概念で計算を行おうとしています。それが非常に自然に反する考え方で、その系を外界に対してオープンにして、むしろデコヒーレンスといいますか、ディシペーションといいますか、そういうことを計算のリソースに組み込むということをしたらもっといいものができるのではないかというのがこの考え方です。

ところが、やってみるとPとNPは違うのだという壁はなかなか突破できない。ここで出てきた考え方というのは、クーリングといいますか、アニーリングというのは実はクーリングですが、正の温度の領域にあるものを絶対零度に向かって冷やしていくということをするとは必ず冷やしていく過程でローカルミニマムというところにトラップされて計算がうまくいかないということなので、逆に温度の概念を正の領域から負の領域に拡張して、マイナス無限大の温度からマイナス零度の温度に向かって逆に系の温度を上げていくことをすれば、というのがアイデアです。

これは系のエネルギーとかロス縦軸に、横軸にコンフィギュレーションスペースといいま

すか、2のn乗個ある解の候補ですが、書いたものですが、高いところの温度からこのグラ
ンドステートに向かって系を冷やしていこうとしますと、必ずこういうところから途中トラッ
プされて、そのトラップの数が問題のサイズに対して指数的に増加するのでうまくいかないわ
けです。それを回避するために正の温度で冷やすのをやめて、負の温度で温めるという方向に
問題を変えようというのがこのレーザーネットワークの考え方です。

というのはどういうものかという、結局、ゲイン媒質を入れて、下からゲインを上げてい
って、最初にぶつかるのがこのグランドステートですので、その時点でグランドステートだけ
が発振するというので解を見つけるという、そういう考え方です。

【外部有識者】

その結果は、論文として公表されているのでしょうか。

【説明者】

論文は外に出ています、先ほど述べましたように計算機科学の人たちが納得できるよう
な問題のサイズまで数値シミュレーションがまだ進んでいなくて、これを見ていただくと分か
りますが、問題のサイズが20というオーダーですので、計算機科学の人たちに最低数百は問
題のサイズがほしいと言われると、現在の我々の計算機能力では追いつかないということにな
って、さてこれからどうしたものかという状況です。

【外部有識者】

レイヤーを示していただくと1層と2層の話がどうしても中心になってしまって、上の層が
ないのではないかというコメントがこちらのデスク側から必ず行ってしまうということだと思
います。多数の方が関わられているということですので、時間がないのは非常に分かりますの
で、そこをご説明いただくと、また違ったコメントが出てくるのかなという気がいたします。

今日私のほうから聞かせていただきたいのは、最初ノーベル物理学賞から始めてサイエンス
としての量子情報、量子コンピュータをずっと突き詰めていただきましたので、一方で今日は
新聞ネタで恐縮ですが、数学のほうでABC予想なるものが京大の教授が解いたと大ニュース
で流れていました。実はこの量子断熱計算とか数学のほうですとフィールズ賞を取ったフリ
ードマンが2000年の頃は参画して、いろいろなモデルを提案していたとか、そういったこと
があったように思います。ですので、他のプロジェクト等でもやはり数学との関係ということ

も言われておられたプロジェクトもおありのようですので、上の層にいけばいくほど、一番極端には、今日ABC予想とこれが関係あるなんていうと、それこそお前はばかかと言われてしまいますけれども、実はそういった力が必要なのではないかという気が、今日たまたまそういったニュースからするのですが、裏を返せば実はノーベル物理学賞等を通してそのサイエンスをされているという理解をさせていただいてもよろしいんですかね。

【説明者】

プロジェクト全体としては実験家を中心にプロジェクトが組まれていますので、特に量子誤り訂正コードを考える数学の部分が抜けています。それで、これだけ大規模なシステムになるのは一にかかって性能の良い、これは現在までに提案されたものの中で最も実験家から見て実現性が高いというトポロジカルサーフェスコードを組み入れています。それを凌駕するような量子誤り訂正コードが発見されれば量子コンピュータの開発のシナリオは一変するので、数学家がコントリビュートできる部分はものすごく大きいので、その部分はこのプロジェクトの中で増強すべきだと思います。量子誤り訂正コードは、1997年に発見されて、既に15年たつてたどり着いた最も良いものがここに使われているわけですが、そこに革命的な何か良いものが出てくると分野の状況は確かに一変する。そういう意味で先生がおっしゃられるように数学家がこのプロジェクトの中に入っていないくて物理屋ばかりが入っているというのはある意味で最初の私のミスだったのかもしれないと思います。

【外部有識者】

ただ、下の2つのHW層の技術をもっと徹底的にブレークスルーしないと、誤り訂正をやってもだめですね。

【説明者】

そうですね。ただ、ここにドンと構えているものが、このバーチャル層と物理層でどういうことをしないといけないかということを決めていますので、そこに革命的なアイデアが出てくると実験サイドの負担はうんと軽くなるというのは事実です。

【有識者議員】

時間になりましたが、先ほど来続いている議論は、昨年まで山本プロジェクトの行き着くと

ころは何なのかというところが非常に分かりにくいということなので何とか今回の中間評価までにはそこを明確にということで、今日ご説明いただいたのはこの誤り耐性量子コンピュータのシステム全体としての成果がまとまってきた。この段階まで来たので、そこで今度はこれを本格的に進めるために今のようなコメントも参考にさせていただいて、今後このプロジェクトの終了までの、具体的な進め方をもう一度考えていただいたほうがよろしいのではないかと思います。その結果としてほかのサブグループのところをどの程度にするのかということも出てくるのではないかと思います。いきなりほかのグループも先ほどの資源配分を先に考えるというよりは、とにかくこの本命のところをいかに残りの期間で達成するかということに集中していただければと思います。

【事務局】

どうもありがとうございました。それではこれでヒアリングを終了させていただきたいと思います。それで、秋永委員から資料の7ページの関係でご指摘があった点については26日までに事務局のほうに電子メールで回答していただければと思います。

【説明者】

それに対して回答させてください。秋永さんが言った上の層から見たポイントというのはそこに2つ書いてあります。高フィデリティと量子ビットの大規模集積化。更に二次元配列というのが量子誤り訂正で非常に得だということが分かりまして、超伝導量子ビットが二次元配列できて、小型になってという提案を初めてして、それも高速なのでスリーナインのフィデリティは出ますよという結合方式の提案をしております。そういう意味で上のほうから見たアーキテクチャ、アーキテクチャから見たデバイスを今考えて進めているところです。

【事務局】

どういたしますか。それはそれとして紙で出させていただきますか。

【外部有識者】

一応出していただいて。

【事務局】

今ご説明のあったことも含めて紙でまたその考え方をお示しいただければと思います。先ほど申し上げましたように 26 日までに事務局のほうにメールでご提出をお願いいたします。

では、これで終了させていただきます。どうもありがとうございました。