

ICORP「量子スピン情報プロジェクト」 追跡評価報告書

総合所見

ICORP「量子スピン情報プロジェクト」は、半導体量子ドット中の単一電子スピンを情報の担体とする究極の量子コンピュータ実現に向けた挑戦的な研究プロジェクトであった。量子コンピュータは遠大なプロジェクトであり本プロジェクトのみで終わるものではないが、その基盤となる技術の開発と関連する物理現象の発見・解明に多大な成果を挙げたと評価できる。

プロジェクト終了後も研究総括は我が国の当該研究分野の第一人者として研究を牽引している。そのことは最先端研究開発支援プログラム（FIRST）（2009–2013年）、科研費基盤研究（S）（2007–2011年）、さらに直近では革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）（2014–2018年）などの大型プロジェクトへの採択や理研創発物性科学研究センターにおける新たな部門（量子情報エレクトロニクス部門）（2013年）の立ち上げを見るだけで十分理解できる。

本プロジェクトの主要な成果は、量子ドットとその結合構造の電子状態制御技術、ナノ磁石による傾斜磁場を用いた単一電子スピンの操作など汎用性の高い量子スピンビット制御技術などに関するものであったが、プロジェクト終了後、それらの技術を有効に活用し、研究を発展させている。具体的には、2量子ビットのスピン操作と交換の実現、量子光通信との融合のための光電子変換に関する研究、量子情報の移送を目的とした表面弹性波を用いた単一電子の量子ドット間輸送の実現などであり、いずれも世界トップレベルの研究成果である。シリコンを用いた量子ビット研究においても、近年では本プロジェクトで開発したスピノン量子ビット制御技術が適用されている。

本プロジェクトの海外研究統括の Kouwenhoven 教授は現在ヨーロッパでの量子拠点の Q-Tech センター長を務め、Loss 教授は樽茶研究総括と同じ理研創発科学研究センターの理論研究チームリーダーとして共同研究を進めている。共に世界の量子ビット研究をリードする第一線で活躍しており、本プロジェクトでの連携の効果がその後も十分発揮されている。

本プロジェクトの主要な研究メンバーはそれぞれ、例えば、日本においては FIRST, ImPACT の研究に参画し、アカデミア分野で活躍の場を得ており、人材育成という視点からも、本プロジェクトは大きな役割を果たした。

現在、量子ビット研究の世界的動向として、多ビット化、集積化による機能実証のフェーズに入りつつある。海外では企業からの大型投資による研究も始まっており、厳しい競争状態にある。本プロジェクトを中心に発展した半導体量子ビットの研究をさらに推進し、さらに多くの優れた基礎研究成果の創出と小規模システムの動作実証につなげることを期待する。

1. 研究成果の発展状況や活用状況

(1) プロジェクト終了後の研究の継続、発展

研究総括は本プロジェクト終了後も、FIRST、科研費基盤研究(S)、さらに直近では ImPACT などの大型競争的資金を獲得し研究を継続し、コンスタントに高度な成果を挙げ続けている。また組織においても、大学及び NTT の研究室から、理研創発科学研究センターに新たな部門(量子情報エレクトロニクス部門)を立ち上げ、我が国の半導体量子情報処理の研究分野をさらに強力に牽引することになった。本プロジェクト終了後も、研究総括のチームが世界トップレベルの研究を維持している点を高く評価したい。

研究内容では、量子ビットの集積化や量子光通信との融合のための基盤技術の研究に移行し、順調に研究が発展している。ナノ磁石によるスピン制御は本プロジェクトの代表的成果であるが、この技術をベースに行われた 2 量子ビットの SWAP 演算は、半導体量子計算の進展に関する総説論文においても特に注目すべき成果として挙げられている。またナノ磁石や電極の最適化によって得られた極めて忠実度の高いスピン制御は半導体量子情報処理の実現可能性を強く印象づけるに十分である。表面弹性波による单電子輸送はスケーラビリティの壁に対するブレークスルーとなる可能性がある。また光・スピン量子変換においても光から電子スピンへの角運動量転写の実証に成功している。採用しているデバイス構造についても、初の人工原子として研究総括が開発し量子ドット研究の先駆けとなった GaAs 縱型量子ドットをベースとしたものと、現在主流となりつつある平面型量子ドット、さらにはシリコン量子ドットをその長短を十分検討しながらバランス良く並行して取り組み、量子ドットの基盤技術を着実に高めることに貢献している。現在進行中のプロジェクトでは量子中継デバイスや量子シミュレーションの実現をプロジェクトの目標としているが、この目標にそつて着実に研究が進んでいると思われる。

(2) 相手国チームとの交流の効果

本プロジェクトでは、ヨーロッパにおける量子・ナノテクノロジーの拠点であるデルフト工科大学の Kouwenhoven 教授グループと、量子ドットによるスピン量子ビットを提案した理論家として有名なバーゼル大学の理論チームの Loss 教授との連携で研究が進められた。前者は連携とともに切磋琢磨する存在であったと想像されるが、それがハイレベルの研究の成果の創出につながった。本プロジェクト終了後も、交流の効果は良好な結果を生み続けているといえる。特に、Loss 教授は現在研究総括と同じ理研創発科学研究センターに在籍し、理論研究チームのチームリーダーとして共同して研究を行う関係にある。Kouwenhoven 教授は、オランダの Q-Tech センターの所長として、ヨーロッパの量子情報処理研究を牽引する存在であり、米国の複数の大手企業から多額の資金を得て量子計算に関するプロジェクトを推進している。本プロジェクトで培われた関係が有効に働いたものと考えられ、今後の研究にも活用されることを期待する。

2. 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

(1) 研究成果の科学技術の進歩への貢献

量子コンピュータ実現までの長い道のりを考えると、本プロジェクトのみに限定してその成果を議論・評価することは必ずしも適切ではないが、ナノ磁石による傾斜磁場を用いた単一電子スピンの操作は本プロジェクトで生み出された特筆すべき成果といってよい。量子ドットを用いたスピン量子ビットにおけるスピン操作には、マイクロ波の振動磁場を用いる方法や半導体におけるスピン軌道相互作用を用いる手法などがあるが、それぞれ、デバイス構造・設計が複雑であったり、スピン軌道相互作用が小さい材料に適用が困難などの欠点がある。本プロジェクトで開発した手法は、スピン軌道相互作用の小さい半導体材料にも適用できる汎用性の高い方法である。前節に記したように本プロジェクト終了後の多量子ビット操作や高忠実度量子操作の実現はこの手法無しには考えられない成果である。

本プロジェクトは GaAs を用いた量子ドットを中心に進められたが、その後、オーストラリアや米国を中心にシリコン量子ビットの研究が活性化している。これらシリコン分野への波及を可能としたベースとなる量子ドット技術、スピン量子ビット制御技術も、本プロジェクトなどを含む GaAs 量子ドットの分野で培われ、蓄積されてきたものである。

また、量子コンピュータの舞台となる物理系における量子物理学の解明についても重要な成果を得ている。本プロジェクト期間中に手がけられあるいは発見された量子ドット中の少数電子が引き起こす相互作用、すなわち、核スピンとの相互作用、スピン軌道相互作用、近藤効果、超伝導現象との関係の論文は注目度が高く、被引用件数も多い。特に、総説論文の引用回数915回は別格としても、ナノ磁石法による電気的なスピン制御の論文で187回など、半導体量子情報分野の研究者数を考慮すると非常に注目度の高い論文であると考えられる。プロジェクト終了後も卓越した研究水準にあることからスピンの関与する基礎物理や多体強相関物理の解明に大きな貢献をしている。

本プロジェクト期間中およびプロジェクト終了後の研究は、量子力学的な性質がより顕著に現れる 1 電子スピンや 1 光子などのミクロスコピックな系を自由に制御することによって現れる、新しい量子力学的現象を実現して解明することで、科学技術のフロンティアを切り拓くことにも大きく貢献したと考える。

(2) 研究成果の応用に向けての発展

本プロジェクトが究極の目標としていた量子コンピュータの実現を含む量子科学技術の発展は、20 世紀における電子工学の発展がもたらしたと同様な、大きな社会的変化や経済的需要を引き出す可能性が非常に高い。しかし、極めて挑戦的な課題である万能量子コンピュータの開発は、世界中で過去約 20 年にわたって研究が活発に進められているものの、未だ実用化の目処はたっておらず、今後も継続した研究が必要である。その中で理研創発科学研究センター量子情報エレクトロニクス部門という組織ができたことは、ImPACT プロジェクトのスタートと併せて、喜ばしい発展である。

現在、量子ビットの研究の動向としては、多ビット化、集積化のフェーズに移行し、技術の社会的有用性を実証する段階に入りつつある。本プロジェクトの成果であるナノ磁石を用いたスピン操作の手法は、シリコンを用いたスピン量子ビットに適用可能であり、集積化に適したシリコンを用いた量子ビットの多ビット化への展開に期待したい。このナノ磁石の特許に関しては、傾斜磁場を使った電場によるスピン制御の技術の進歩から当該特許の有効性が高まっていると考えられる。また、光電子変換技術は、量子中継器の実現につながるものであり、量子暗号通信などの秘匿性の高い通信ネットワーク形成に有用である。早期の動作実証に期待したい。

ただし、ヨーロッパおよび米国では、公費の他、米国の複数の大手企業による多額の投資を受けて量子コンピュータの実現に向けた研究が進められつつあり、カナダの企業が量子アニーリングに基づく量子コンピュータを商品化するなど、研究は厳しい競争にさらされている。その中でも、是非優位性を保って研究を推進していくことを期待する。

なお、量子情報処理の研究の進展に期待する一方で、目指すべきシステムが何かについては、システム・回路研究者との連携を密にして多角的にかつ慎重に検討をしていただきたい。例えば、最適化問題への適用については古典的システムを用いた実現可能性もあるため、量子システムの優位性は必ずしも自明ではない。量子系の長所が最大限に生かせるようなシステムの創成をぜひ日本発で実現すること期待する。

(3) 参加研究者の活動状況

研究総括は引き続きこの分野を牽引し第一線で活躍されている。プロジェクトに参画したメンバーについては、グループリーダー3名のうち、現在2名が国立大学教授、1名が助教のポストを獲得している。研究員についても、准教授、助教、研究所研究員となるなどして、キャリアアップが図られている。競争的資金等についても、プロジェクト終了後に、FIRST、科研費基盤研究(S)など大型の研究資金を得て着実に研究を進めている。若手研究者の育成・キャリアアップに関して本プロジェクトが果たした意義も大きいと考える。

3. その他

ICORP 事業の全般についての意見を記す。

- ・ICORP のような国際共同研究を推進する場合、相補的にお互いが持っている技術を組み合わせるスタイルが一般的であり、成功している例も多々あるとは思うが、そのようなタイプの場合、連携の度合いが浅いままで研究が独立に進み、プロジェクトが終わってしまうリスクもあり得る。本プロジェクトにおいては、相補的な技術提供だけではなく、競合や切磋琢磨をするような要素を含んだ共同研究であったのではないかと思われる。研究ターゲットの切り分けや技術・ノウハウの共有範囲など、どのようなマネージメントが行われていたかを分析し、今後の JST の国際共同研究支援に活かして頂きたい。国際競争力が問われる昨今では、共通の目的を持ち競合関係にある世界のトップレベルの研究チームと情報

交換をし、時には競争し、時には連携し、互いに力を高めていくことが重要である。国際競争力のある研究者の育成のためには、そのような視点に立った国際共同研究の促進も今後重要になるであろう。

- ・世界各国の研究現場では、理論研究・実験研究の垣根を超えて国内外の研究グループが互いに協力して影響を及ぼし合い、互いに恩恵を受けながら強力に研究を進めるケースが多くなっている。ICORPは、このような「世界スタンダード」になりつつある研究スタイルに合致した研究支援制度である。今後とも、若いうちから世界的な視野に立ち、世界的なネットワークの中で研究を発展させることによって、科学技術のフロンティア開拓に貢献するという科学者マインドを養っていって欲しいと考える。研究総括の研究を引き継いで、本プロジェクトから次世代の世界的な研究リーダーが生まれることを期待する。