



図 1. シリコン基板上に光集積回路を実現し、チャンネル辺り 12.5Gbps 動作、6.6Tbps/cm<sup>2</sup> の伝送密度を実証

## (2) 課題及び留意点等

中心研究者は、FIRST 終了後の研究成果の社会還元 of 構想を有しており、オンチップサーバーの開発を目標とする未来開拓型研究開発プロジェクト「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発（平成 24 年 8 月～平成 34 年 経済産業省）」に採択されていることから、本研究課題の成果を将来の事業化へつなげるための円滑な移行を実施し、成果の社会還元を強力に推進されることが期待される。

## 3. 研究推進体制・研究支援体制の状況

### (1) 全体の推進・支援状況

研究推進体制としては、中心研究者が所属する東京大学、共同研究機関である技術研究組合光電子融合基盤技術研究所（PETRA）及び産業技術総合研究所を中心に、委託研究機関として 3 大学が参画している。

プロジェクト全体の進捗状況の把握と推進のために、月 2 回開催される課題全体の運営会議及びサブテーマを構成する研究グループごとの会議等が設置されている。また、研究推進等についての意見や助言を受けるために、アドバイザリーボードが設置されている。

研究支援体制として、研究支援担当機関である PETRA を中心に、中心研究者が所属する東京大学及び産業技術総合研究所に支援組織（PETRA：専任 6 名、兼任 7 名、東京大学：専任 4 名、兼任 4 名、産業技術総合研究所：専任 4 名、兼任 3 名）が設置され、研究支援が行われている。

## (2) 課題及び留意点等

多種多様な研究成果が期待される内容、進捗状況であるにも関わらず、海外への累積特許件数が4件と少ない。国際標準を狙うのであれば一層の努力が望まれる。

## 4. 総合判断

本研究課題では研究目標として、LSI との間で  $10\text{Tbps}/\text{cm}^2$  の伝送密度（データ転送速度(/ch)/占有光素子面積(/ch)）を有する光集積回路の実現を掲げており、現時点では、世界各国の競合研究機関に対して、研究目標は国際的優位を確保できる可能性は高い。

平成24年度前半に光集積回路の実証で  $6.6\text{Tbps}/\text{cm}^2$  の伝送密度を達成していることから研究開発は順調に進捗しており、また、前倒しで所期の研究目標（ $10\text{Tbps}/\text{cm}^2$  の伝送密度）を達成する見込みである。

プロジェクト終了時までさらに高い成果を創出していくための残された技術的課題（光集積回路における光源熱に起因した消費電力問題）も明確になっており、中心研究者の強いリーダーシップの下、研究をダイナミックに展開されたい。

一方で、本プロジェクト終了時に世界トップ水準の成果が見込まれる可能性が高いものの、本研究分野は国際競争が激しいことから、世界の競合する研究機関の研究動向を常に踏まえた戦略的な活動展開が求められる。さらに、研究成果の社会還元の観点から、研究成果の応用先である情報通信産業等と連携して、研究成果の社会での具体化に向けた検討を加速することが望まれる。

以上を総合的に勘案して、本研究課題については以下の取扱いとする。

プロジェクトを継続とする。

|           |                            |
|-----------|----------------------------|
| 研究課題名     | 省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発 |
| 中心研究者名    | 大野 英男                      |
| 研究支援担当機関名 | 東北大学                       |

## 1. 研究課題の概要

本研究課題は、高速・高書換え耐性・微細化可能でかつ配線層に埋め込むことができる不揮発性スピントロニクス素子を半導体集積回路と融合させて、従来の論理集積回路より遥かに高性能で省エネルギーのスピントロニクス論理集積回路を実現することを目指している。

本研究課題では、スピントロニクス材料開発、デバイス開発、集積プロセス開発、回路 IP 開発、設計手法ツール開発を一貫して行うとしており、サブテーマは設定していないが、以下の7つの研究開発項目を設定して研究開発を推進している。

- [1] スピントロニクス材料開発
- [2] スピントロニクスデバイス開発
- [3] 革新的スピントロニクス材料・デバイス研究開発
- [4] スピントロニクス集積プロセス開発
- [5] スピントロニクス論理集積回路動作検証・IP 開発
- [6] スピントロニクス論理集積回路設計手法・設計ツール開発
- [7] スピントロニクス論理集積回路実証・拠点形成

上記の研究開発による統合成果として、スピントロニクス論理集積回路の統合実証チップを試作し、同一デザインルールの CMOS チップと比較して、面積比×性能（遅延時間）比×消費電力比で 1/64 以下に基本性能が向上することの実証を研究課題全体の所期の目標としている。

## 2. 研究課題の進捗状況

### (1) 全体の進捗状況

中心研究者が所属する中核拠点の東北大学及び動作実証チップ試作を行う TIA（つくばイノベーションアリーナ）において東日本大震災に起因する様々な困難によって、3ヶ月程度の計画遅れが生じていたが、最先端研究開発戦略的強化事業により導入した微細 MTJ（磁気トンネル接合）素子製造設備等を活かした参加研究者らの健闘によって、現在では当初計画通りの進捗にまで挽回していることは特筆に値する。

また、これまでの研究進捗において、

- ・スピントロニクス材料開発においては、Ta/CoFeB/MgO 積層構造で垂直磁気異方性が発現することを発見し、40nm 世代の MTJ 素子材料と有望であることを実証

- ・スピントロニクス論理集積回路動作実証・IP 開発高速動作技術においては、MTJ/CMOS 混成の不揮発性ラッチ回路を設計・試作し、世界最高速の 600MHz での正常動作を確認。また、トランジスタと MTJ 素子から構成した不揮発 TCAM (Ternary Content-Addressable Memory)、及び、不揮発リコンフィギュラプロセッサ FPGA (field-programmable gate array) においてもテストチップの設計・試作により基本性能を確認
  - ・スピントロニクス論理集積回路設計手法・ツール開発においては、遅延ライブラリ生成ツール  $\beta$  版リリースと MTJ モデル組込み SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) シミュレータを開発し、回路・IP 設計に適用
  - ・スピントロニクス集積プロセス開発においては、東北大学において開発した材料、デバイス技術を基に、TIA に整備した 300mm ウェハ実証ラインを用いて、90nm 世代ルールで製造した CMOS 回路上に 100nm 幅のスピン注入 MTJ 素子を試作
- といった研究成果が得られている。これらの FIRST で得られた研究成果の国際ベンチマークとして、2012 VLSI Symposia (採択率が 25~35%と厳しく、IEDM、ISSCC とあわせて半導体分野の 3 大国際会議と言われている) における 6 件の採択実績が示されている。これは世界の有力大学の全発表件数と比肩する件数であり、またスピントロニクス関連発表数の過半数を超えるものであり、スピントロニクス分野を世界的にリードする研究成果が得られていることの証左として認められる。

以上の研究進捗状況から、半導体スピントロニクス分野を切り拓き、先導してきた中心研究者のリーダーシップが十分に発揮され、プロセス・回路設計等のエキスパートである参加研究者も研究課題全体の所期の目標達成に向けて密に連携し、一体的に研究開発が推進されていると判断され、研究課題全体として、順調に進捗していると判断される。

## (2) 課題及び留意点等

一方、本技術の適用先である半導体分野は国際競争が極めて厳しく、本研究課題においても実用化に向けた戦略的な取組みが求められる。スピントロニクスデバイスの特長を十分に活かす具体的用途の検討、実用化を行う企業とのさらに強力な連携構築、実用化に必要なスペック(目標性能、デザインルール等)の詳細検討などについても、関連企業も含めて検討を加速させることが期待される。

## 3. 研究の推進・支援体制の状況

### (1) 全体の推進・支援状況

研究推進体制については、中心研究者が所属する東北大学と共同研究機関である日本電気(株)を中心として委託研究機関 4 機関(2 大学、1 独立行政法人、1 企業)と、協力研究機関としてクリーンルームを提供する産業技術総合研究所ほか 5 機関が

参画している。

プロジェクト全体の進捗状況の把握と推進のために、週1回開催される全体の運営会議（センター運営委員会）のほか、年1回開催される研究推進等についての意見や助言を受けるために外部有識者によるアドバイザリーボードが設置されている。

研究支援体制については、本プロジェクト開始時に、東北大学内組織として「省エネルギー・スピントロニクス集積化システムセンター」を設置するとともに、センター長に中心研究者を配置して、中心研究者の意向を最大限に発揮する支援体制を設けているほか、同センター支援室（専任5名）を設けて研究支援が行われている。

知的財産権に関する取り組みについては、同センター支援室による出願期間の短縮やパテントマップ作成などの取り組みの強化が図られた結果、特許出願は平成22年度の4件から、平成23年度には約20件と大幅に増加している。

## （2） 課題又は留意点等

知的財産権に関する取り組みについて強化が図られていることは評価されるものの、本研究課題の応用先である半導体分野は国際競争が極めて厳しく、国際出願の強化、及び、基本特許、周辺重要特許、規格特許といった出願戦略をさらに充実させた取り組みが期待される。

国際標準化に関わる活動については、世界を先導する研究を行っている現況を背景にしてデファクト標準を狙う内容とデジュール標準を狙う内容とを仕分けして戦略的に進められることが期待される。

## 4. 総合判断

本研究課題は、これまでの研究進捗において、その独創性と高度な実証能力が国際的にも評価されており、研究課題終了時においても世界をリードするトップ水準の成果が得られると見込まれる。また、中心研究者の掲げる魅力的な研究課題全体の目標に向けて、複雑な半導体プロセスの各要素技術フェーズにおけるエキスパートが結集し実効的な研究開発が展開されており、短期集中投資であるFIRSTプログラムの特徴をうまく活かした研究課題であると位置づけられる。

なお、半導体分野は国際競争が極めて厳しい分野であるため、残る研究期間において国際出願のさらなる強化が望まれる。また国際標準化等を含めた実用化に向けた取り組みについても、検討を加速させることが期待される。

目標の達成見通しについては、学術的にインパクトの高いMTJ素子等の成果についてはさらに深耕し技術完成度を高めるとともに、LSIプロセスとスピントロニクスデバイスとの融合プロセス関連技術の技術展開についてはシステム構築部門を含めて半導体関連企業のニーズを一層取り込み、実用化までの道筋をさらに盤石化できれば、目標の達成は可能と見込まれる。

以上を総合的に勘案して、本研究課題については以下の取り扱いとする。  
プロジェクトを継続とする。

|           |  |
|-----------|--|
| 研究課題名     | 超巨大データベース時代に向けた最高速データベースエンジンの開発と当該エンジンを核とする戦略的サービスの実証・評価 |
| 中心研究者名    | 喜連川 優  |
| 研究支援担当機関名 | 東京大学   |

## 1. 研究課題の概要

本研究課題は、将来、爆発的に増える膨大な情報を処理することが可能な非順序型と呼ばれる実行原理に基づき、平成 25 年度末までに従来比 800 倍程度の処理能力を持つ非順序型最高速データベースエンジンの開発を目指している（日立製の旧来の商用データベースソフトウェア及びオープンソースウェアを比較基準としている）。

本研究課題は、[1]超巨大データベース時代に向けた最高速データベースエンジンの開発及び[2]超巨大サイバーフィジカルシステム基盤のための情報創発技術とその戦略的社会的展開をサブテーマとしている。

### [1] 超巨大データベース時代に向けた最高速データベースエンジンの開発

- ・ 超大量非同期入出力の発行、ストレージ駆動型非順序型の実行、実行時動的入出カスケジュールの処理

### [2] 超巨大サイバーフィジカルシステム基盤のための情報創発技術とその戦略的社会的展開

- ・ サーバー情報とセンサー情報を融合した大規模データからの潜在情報の抽出、サイバーフィジカルシステムの実現・実証

## 2. 研究課題の進捗状況

### (1) 全体の進捗状況

研究課題全体としては、データベースエンジンの開発で、従来比 300 倍を超える高速性を実証し、研究は順調に進捗している。

高速データベースエンジンの開発及びそれを利用した社会応用のための基礎技術の実証研究が順調に進捗しており、研究目標を達成するために 2 つのサブテーマは有効に機能していると認められる。

特筆すべき点として、平成 23 年度内に、従来技術と比較して、データベース処理能力が 300 倍を超える高性能データベースエンジンの開発をしたことがあげられる。なお、中心研究者は、本研究課題終了時には所期の目標を上回る従来比 1000 倍程度のデータベースエンジンを開発することを視野に入れている。

## (2) 課題及び留意点等

サブテーマ2のサイバーフィジカルシステムの実証・評価の対象となる応用分野については、データの獲得が容易ではないことは想定されるものの、広く社会に貢献するインパクトの大きな対象を今後も選択し、継続的に研究成果を創出することを期待する。

## 3. 研究の推進・支援体制の状況

### (1) 全体の推進・支援状況

研究推進体制としては、中心研究者の所属する東京大学や共同研究機関である国立情報学研究所を中心に、委託研究機関として9機関（6大学、1独立行政法人、2企業）が参画している。

プロジェクト全体の進捗状況の把握と推進のために、課題全体の運営会議（合同研究会）及びサブテーマ単位の会議（ステアリング会議、定例会議、技術分科会、特許戦略会議等）が設置されている。

研究支援体制として、研究支援担当機関である東京大学内に支援組織（専任2人、兼任12人）、共同研究機関である国立情報学研究所内に支援要員2人が置かれ、支援活動が行われている。

本研究は国際競争が激しいことから、研究の推進に関して客観的な判断をする観点で、国際的なアドバイザリーボードを設置して、プロジェクト外からの評価・助言を得ている。

## 4. 総合判断

本研究課題の研究目標である従来比800倍の商用データベースエンジンの実証については、商用ソフトウェアの性能ベンチマーク結果の開示が、ソフトウェアライセンスにより禁止されていることを踏まえたとしても、国際的優位を確保できる可能性は高い。

このような状況において、本研究課題は、平成23年度に従来比300倍を超える高性能データベースエンジンの実証やこれまでの研究成果を基にした製品化が実現されていることから、研究開発は順調に進捗しており、所期の研究目標（従来比800倍の処理能力）の達成は可能であると判断できる。

さらに、プロジェクト終了時までには研究目標の前倒しの達成が可能な程の進捗状況であり、その実現も含めて、高性能データベースエンジンの一層の性能強化を目指し、中心研究者の強いリーダーシップの下、研究を推進されたい。



一方で、FIRST の成果として、本研究課題終了時の商用データベースエンジンの達成性能値（800 倍～1000 倍）を利用し、何に焦点をあて、社会展開していくかを国民に明確に発信していくことが求められる。

以上を総合的に勘案して、本研究課題については以下の取扱いとする。  
プロジェクトを継続とする。

|           |              |
|-----------|--------------|
| 研究課題名     | 強相関量子科学      |
| 中心研究者名    | 十倉 好紀        |
| 研究支援担当機関名 | 独立行政法人理化学研究所 |

## 1. 研究課題の概要

本研究課題は、強相関電子（固体中で強く相互作用する多電子系）のもつ多自由度の絡み合いと、「波動」の持つ非局所性・剛性・敏感性を、よくデザインされた「電子の感じる時空構造」の中で巧みに生かすことによって、省エネルギー・創エネルギー・送エネルギーに関係した夢の極限的機能、すなわち、超低消費電力エレクトロニクス、超低損失エネルギー輸送、超高効率エネルギー変換等の実現への道程を学術的に明らかにすることを目指している。

本研究課題は、以下の3つのサブテーマから構成されており、それぞれのサブテーマにおいては以下のような研究開発を行うとしている。

### [1] モットロニクス基礎

光・電場制御モット転移、強相関光発電、電界誘起超伝導を到達目標として、強相関電子系の金属-絶縁体相転移（モット転移）を高速の状態変数スイッチとして活用する電子技術学理を構築する

### [2] 強相関創発物性

新原理熱電材料、巨大電気磁気効果、電荷・軌動秩序の動的機能を到達目標として、強相関電子の多自由度（電荷、スピン、軌道）による創発性によって、電気-磁気-熱-光の作用と応答の相関を巨大化するための物質学理を構築する

### [3] エネルギー非散逸性電子技術原理

トポロジカル電流機能、量子多重秩序の完全解析、超構造超伝導を到達目標として、散逸を伴わないトポロジカルカレント（スピン流、分極流）に基づく量子状態操作の原理を構築する

## 2. 研究課題の進捗状況

### (1) 全体の進捗状況

本研究課題では、物性物理分野を先導してきた中心研究者らの理論・実験両面からのアプローチによって、新原理・新現象の予測・解明、実証・観測といった飛躍知を創出する研究開発に取り組んでおり、これまでの研究進捗において、

- ・VO<sub>2</sub>（二酸化バナジウム）を用いた電気二重層電界効果トランジスタを作製し、1Vの電圧でモット転移を誘起し、室温で2桁の抵抗変化を実現（図1）
- ・マルチフェロイック物質（強磁性体と強誘電体の性質を合わせ持つ物質）としてジスプロシウム・テルビウム・フェライト（Dy<sub>0.7</sub>Tb<sub>0.3</sub>FeO<sub>3</sub>）単結晶試料を作製し、極