

「スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト」
事後評価報告書

平成23年11月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

研究評価委員会

平成23年11月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
理事長 古川 一夫 殿

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会 委員長 西村 吉雄

NEDO技術委員・技術委員会等規程第32条の規定に基づき、別添のとおり
評価結果について報告します。

目 次

はじめに	1
分科会委員名簿	2
審議経過	3
評価概要	4
研究評価委員会におけるコメント	7
研究評価委員会委員名簿	8
第1章 評価	
1. プロジェクト全体に関する評価結果	1-1
1. 1 総論	
1. 2 各論	
2. 個別テーマに関する評価結果	1-19
2. 1 スピンRAM基盤技術	
2. 2 スピン新機能素子設計技術	
3. 評点結果	1-31
第2章 評価対象プロジェクト	
1. 事業原簿	2-1
2. 分科会における説明資料	2-2
参考資料1 評価の実施方法	参考資料 1-1
参考資料2 評価に係る被評価者意見	参考資料 2-1

はじめに

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される研究評価分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト」の事後評価報告書であり、第28回研究評価委員会において設置された「スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト」(事後評価)研究評価分科会において評価報告書案を策定し、第30回研究評価委員会(平成23年11月24日)に諮り、確定されたものである。

平成23年11月
独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

「次世代輸送系システム設計基盤技術開発」

事後評価分科会委員名簿

(平成23年7月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	まつやま きみひで 松山 公秀	九州大学大学院 システム情報科学研究所 情報エレクトロニクス部門 教授
分科会長 代理	いのうえじゅんいちろう 井上 順一郎	名古屋大学大学院 工学研究科 マテリアル 理工学専攻 応用物理分野 教授
委員	いとう こうへい 伊藤 公平	慶応義塾大学 理工学部 物理情報工学科 教授
	くろだ しんじ 黒田 眞司	筑波大学大学院 数理物質科学研究科 教授
	たなか まさあき 田中 雅明	東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学 専攻 教授
	はなわ けんぞう 埴 健三	昭和電工株式会社 研究開発本部 技術戦略室 担当部長
	よう かんじ 陽 完治	北海道大学 量子集積エレクトロニクス 研究センター 教授

敬称略、五十音順

審議経過

● 第1回 分科会（平成23年7月21日）

公開セッション

1. 開会、分科会の設置、資料の確認
2. 分科会の公開について
3. 評価の実施方法と評価報告書の構成について
4. プロジェクトの概要説明

非公開セッション

5. プロジェクトの詳細説明
6. 全体を通しての質疑

公開セッション

7. まとめ・講評
8. 今後の予定、その他
9. 閉会

● 第30回研究評価委員会（平成23年11月24日）

評価概要

1. 総論

1) 総合評価

本プロジェクトは、電子が持つスピンとしての機能を活用した革新的なデバイス基盤技術を開発することにより、電子情報機器の低消費電力化と高機能化を目指したものであり、エレクトロニクス分野における日本の産業競争力向上と、高度 IT 化に伴うエネルギー消費の大幅低減に資するものとして高く評価できる。プロジェクトリーダーの強力なリーダーシップのもと、相当頻度での定期的技術討議会等を通して産学官の緊密な連携を図ることにより、材料科学から製造プロセスに至る複合的な技術開発が効果的に推進され、スピン RAM やスピン新機能素子の実用化に繋がる基盤技術が確立された。設定された目標は十分に達成され、さらに不揮発性メモリおよび高速メモリのプロトタイプ作製、並びに機能実証が行なわれており、本プロジェクトは成功したと判断される。特に、スピン RAM 基盤技術については、すべての数値目標を達成し、事業化につながる独自技術を開発したことはすばらしい成果であり、高く評価すべきである。

また、競合技術（抵抗型メモリ、相転移型メモリなど）に対して、性能、生産コストなどの面において定量的に優位な立場にあることを示す事が、今後の発展に重要である。

2) 今後に対する提言

本プロジェクトの推進により、従来技術では同時充足が困難であった高速性、高集積性、不揮発性を備えたユニバーサルメモリの実用化が現実的なものとなってきた。一方では、今後、半導体分野で高い技術力を有する外国企業の追い上げも予測される。回路技術、ソフトウェア技術、システム化技術等とも連携して、スピントロニクス不揮発性機能を最大限に活用できるアプリケーション分野への早期導入を図るなど、本事業成果の社会還元と新しい産業応用の開拓に向けた組織的取り組みが望まれる。また、本研究開発の対象となった不揮発性メモリや高速メモリは、既存の技術と競合するものであり、数年後には本プロジェクトで達成された目標では不十分となる可能性もある。IT 技術の進展を見定めつつ、さらなる基盤技術の展開や実用化事業へのサポートが必要であろう。

2. 各論

1) 事業の位置付け・必要性について

本プロジェクトが実現・実用化を目指すスピン RAM 及びスピン新機能素子は、原子オーダーで制御された異種物質の複合化とナノメートルオーダーの構造付与により、情報機器の極限的な低消費電力化と高機能化を図るものであり、ナノテク・部材イノベーションプログラム及び IT イノベーションプログラムの目標達成にも多大な寄与をなすものと評価される。また、不揮発性機能を有する RAM は、市場規模が急速に成長しつつあるモバイル情報機器の飛躍的な低消費電力化と高機能化を図るものであり、一般エンドユーザの利便性を高めると共に、当該分野の産業競争力に多大な効果が見込まれる等、公益性も高いことから、NEDO の事業として極めて適切である。他国における同種のプロジェクトに一步先んじてスタートしたことも誠にタイミングが良く、実用化に向けての世界的競争を制することに繋がる判断であると高く評価される。

2) 研究開発マネジメントについて

材料科学、物性・物理、プロセス技術、計算機シミュレーション等、スピントロニクス基盤技術開発に不可欠な各専門分野の研究者・技術者により産学官共同の研究体制が組織され、各機関が個別に有する力がプロジェクトリーダーの統率と NEDO のマネジメントのもと有機的に結集された。内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定され、具体的かつ明確な開発目標を定量的に設定している。目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されている。また、世界情勢の変化から加速資金の追加を行なったこと、実用化を見通して一部の研究課題の中止を行なったことなど、研究見直しは適切に行なわれている。

3) 研究開発成果について

本プロジェクトの主要開発項目であるスピン RAM 基盤技術、スピン新機能素子設計技術（磁壁 RAM）の両技術分野において、Gbit 以上の集積度実現に必須となる垂直磁化方式の開発に世界に先駆けて取り組み、世界最高水準の最終目標達成に成功している点は、プロジェクト成果として高く評価されると共に、成果は市場の拡大或いは市場の創造につながる事が期待される。さらに、特許数は 200（うち国際特許 125）を越えており、知的財産権取得にも積極的に取り組まれている。また、プロジェクト期間内に 85 件の論文発表、114 件の招待講演が行なわれており、成果の学術的意義と注目度の高さが窺われる。

一方、目標とした成果は十分得られているものの、それを設定した応用対象

以外へ展開させるといった観点プロジェクトには欠けている。他の競合技術が強力である現時点では、そのような観点も必要と考える。

4) 実用化、事業化の見通しについて

本プロジェクトの成果の実用化対象は、不揮発性メモリまたは高速混載メモリであり、産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）ができています。スピン RAM については、本事業の成果により目標とされたデバイス実現のための課題は基本的にクリアされたと見られる。さらに実際の集積化デバイスについても、実現までの道筋が立てられており、製品化・事業化の見通しは高いと期待できる。また、本事業の成果を継承するかたちで NEDO の新プロジェクト「ノーマリーオフコンピューティング基盤技術開発」が始動するとともに、本プロジェクトの成果の一部が文科省最先端研究開発支援プログラム「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」においても活用されるなど、学術、技術両面での関連分野へも大きな波及効果が生じている。

本プロジェクトで開発されたプロトタイプ素子が死の谷を越えて製品化されるか否かは今後の企業の意志と実行力にかかっている。

研究評価委員会におけるコメント

第30回研究評価委員会（平成23年11月24日開催）に諮り、本評価報告書は確定された。研究評価委員会からのコメントは特になし。

研究評価委員会

委員名簿（敬称略、五十音順）

職 位	氏 名	所 属、役 職
委員長	西村 吉雄	学校法人早稲田大学大学院 政治学研究科 (科学技術ジャーナリスト養成プログラム) 客員教授
委員長 代理	吉原 一紘	オミクロンナノテクノロジージャパン株式会社 最高顧問
委員	安宅 龍明	一般社団法人ナノテクノロジービジネス推進協議会 企画運営推進会議 (オリンパス株式会社 未来創造研 究所) 副議長 (コーディネーター)
	五十嵐 哲	工学院大学 応用化学科 教授
	伊東 弘一	学校法人早稲田大学 理工学術院総合研究所 客員教授 (専任)
	稲葉 陽二	日本大学 法学部 教授
	尾形 仁士	三菱電機エンジニアリング株式会社 相談役
	小林 直人	学校法人早稲田大学 研究戦略センター 教授
	佐久間一郎	国立大学法人東京大学大学院 工学系研究科 精密機械工学専攻 教授
	佐藤 了平	大阪大学大学院 マテリアル生産科学専攻 (システムデザイン領域担当) 教授
	菅野 純夫	国立大学法人東京大学大学院 新領域創成科学研究科 メディカルゲノム専攻 教授
	架谷 昌信	愛知工業大学 工学部機械学科 教授・総合技術研究所所長
	宮島 篤	国立大学法人東京大学 分子細胞生物学研究所 教授

第1章 評価

この章では、分科会の総意である評価結果を枠内に掲載している。なお、枠の下の「○」「●」「・」が付された箇条書きは、評価委員のコメントを原文のまま、参考として掲載したものである。

1. プロジェクト全体に関する評価結果

1. 1 総論

1) 総合評価

本プロジェクトは、電子が持つスピンとしての機能を活用した革新的なデバイス基盤技術を開発することにより、電子情報機器の低消費電力化と高機能化を目指したものであり、エレクトロニクス分野における日本の産業競争力向上と、高度 IT 化に伴うエネルギー消費の大幅低減に資するものとして高く評価できる。プロジェクトリーダーの強力なリーダーシップのもと、相当頻度での定期的技術討議会等を通して産学官の緊密な連携を図ることにより、材料科学から製造プロセス至る複合的な技術開発が効果的に推進され、スピン RAM やスピン新機能素子の実用化に繋がる基盤技術が確立された。設定された目標は十分に達成され、さらに不揮発性メモリおよび高速メモリのプロトタイプ作製、並びに機能実証が行なわれており、本プロジェクトは成功したと判断される。

特に、スピン RAM 基盤技術については、すべての数値目標を達成し、事業化につながる独自技術を開発したことはすばらしい成果であり、高く評価すべきである。

また、競合技術（抵抗型メモリ、相転移型メモリなど）に対して、性能、生産コストなどの面において定量的に優位な立場にあることを示す事が、今後の発展に重要である。

〈肯定的意見〉

- 現在のインフォメーションテクノロジー、特にその基盤となるコンピューター技術において問題となりつつある低消費電力化を実現させることを目的として、不揮発性メモリの基盤技術の確立を目指したプロジェクトである。設定された目標は十分に達成され、さらに不揮発性メモリおよび高速メモリのプロトタイプが作製・機能実証が行なわれており、本プロジェクトは成功したと判断される。
- 本事業は、電子が持つスピンとしての機能を活用した革新的なデバイス基盤技術を開発することにより、電子情報機器の低消費電力化と高機能化を目指したものであり、その推進と最終目標の達成は、エレクトロニクス分野における日本の産業競争力向上と、高度 IT 化に伴うエネルギー消費の大幅低減に資するものとして高く評価できる。
- プロジェクトリーダーの強力なリーダーシップのもと、相当頻度での定期的技術討議会等を通して産学官の緊密な連携を図ることにより、材料科学

から製造プロセス至る複合的な技術開発が効果的に推進され、スピン RAM やスピン新機能素子の実用化に繋がる基盤技術が確立された。

- 諸外国における当該技術分野の開発状況や技術動向についての調査分析に基づき、開発テーマの選択・集中や研究加速資金導入等が適切に行なわれ、研究開発が弾力的かつ重点的に推進された。これにより、スピン RAM については、省電性、高速性、集積度等の主要評価項目において世界最高水準の成果が達成された。
- スピン機能素子については、磁壁メモリ、スピン能動素子等の新規デバイスの実現可能性が実証される等、高速不揮発メモリや不揮発性ロジック等、各種情報システムの技術革新に繋がる有望な成果が得られている。
- スピントロニクス素子開発という観点から世界トップの薄膜作製技術を有する産業技術総合研究所が中心となり、社会のニーズを的確に把握している企業と、世界トップのスピントロニクス科学を進める大学をまとめあげることにより、これまでは不可能と思われた垂直磁気記録方式のスピン RAM および磁壁移動型メモリの集積回路の開発に成功した。また能動素子として室温動作スピントランジスタの開発にも成功した。これらはシリコンメモリの一部を置き換える低消費電力素子として理論的には期待を集めてきたが、本プロジェクトによりプロトタイプの作製が世界にさきがけて実現し、このことにより製品化への期待が一気に高まった。世界初の技術と工夫を組み合わせたイノベーションである。
- スピントロニクスを利用した新デバイスの実現に向けた取り組みとして、全体として素晴らしい成果を出しており、本事業の意義は高く評価できる。
- 実用化に向けた基盤技術の確立に関して、スピン RAM の研究開発は動作実証のためのメモリサイズのスケールに関しては、プロジェクトの目標以上を達成したと言える。
- 磁壁メモリに関しても機能実証の目的は達成されたと言える。
- 全般的に優れた成果が挙げられている。特に Spin RAM 基盤技術については、すべての数値目標を達成し、事業化につながる独自技術を開発したことは素晴らしい成果であり、高く評価すべきである。
- 学問的内容、事業化を目指した技術的内容とも挑戦的な目標を掲げ、それを達成するという素晴らしい結果になっていると思う。予想よりも優れた結果をよく見直すと裏づけとなっている理論が実は不十分であってできないのではないかと考えていたことを運よく通過したという気がする。そうだとするとせっかくよい結果がでたのですから、その理論を見直す方向にもっていくのは波及効果としては大きいのではないかと思う。すなわち基礎⇒応用⇒事業化と一般に順番付けますが、思っていたよりも良い結

果がでる裏には思っていた根拠となる理論が不十分であったということもあるので、理論を強化するのに結果をフィードバックするというのが必要かと思う。

〈問題点・改善すべき点〉

- 競合技術（抵抗型メモリ、相転移型メモリなど）に対して、性能、生産コストなどの面において定量的に優位な立場にあることを示す事が、今後の発展に重要である。
- 能動素子は、もう少し具体的な見通しの段階に達していて欲しかった。

〈その他の意見〉

- ・ NEDO 側の研究者へのサポートも適切になされたようである。状況に応じて研究費使途の柔軟性と機動性を確保し、必要以上の事務的負担を研究者にかけないよう、研究そのものを有効に支援するための適切な支援を今後も続けてほしい。
- ・ インフォメーションテクノロジー技術の進展は非常に早い。本プロジェクトで確立された技術を早急に実用化する必要があると思われる。具体的応用については企業機密のため言及されなかったが、実用化・商品化を期待したい。

2) 今後に対する提言

本プロジェクトの推進により、従来技術では同時充足が困難であった高速性、高集積性、不揮発性を備えたユニバーサルメモリの実用化が現実的なものとなってきた。一方では、今後、半導体分野で高い技術力を有する外国企業の追い上げも予測される。回路技術、ソフトウェア技術、システム化技術等とも連携して、スピントロニクス不揮発性機能を最大限に活用できるアプリケーション分野への早期導入を図るなど、本事業成果の社会還元と新しい産業応用の開拓に向けた組織的取り組みが望まれる。また、本研究開発の対象となった不揮発性メモリや高速メモリは、既存の技術と競合するものであり、数年後には本プロジェクトで達成された目標では不十分となる可能性もある。IT技術の進展を見定めつつ、さらなる基盤技術の展開や実用化事業へのサポートが必要であろう。

〈今後に対する提言〉

- ・ スピンRAMの実用化に向けてのハードルをクリアするにはおそらくまた材料の基礎に立ち返った再検討も必要となることもあろうかと予測される。そのときのために失敗事例も含めてこれまでの検討結果をデータ化して整理しておくことも役に立つと思われる。
- ・ これまでの成果をとりまとめ国際電気電子デバイス会議 (IEDM) などでの成果を公表し、国際的な評価を受けるべきである。
- ・ 本プロジェクトで研究開発の対象となった不揮発性メモリや高速メモリは、既存の技術と競合するものである。したがって、それらの実用化は他技術の進展に左右される。数年後には本プロジェクトで達成された目標では不十分となる可能性もある。IT技術の進展を見定めつつ、さらなる基盤技術の展開や実用化事業へのサポートが必要かもしれない。
- ・ スピンRAMおよび磁壁移動型メモリを集積回路として実用化して行くためには、生産ラインと人材の配置等も含めて十分な投資を行える余裕が企業に必要となる。そのような予算を国策として投資することが重要だと考える。このとき、最終的な生産ラインを国内に限るなどの規制は可能な限り排除することが望ましい。あらゆる面において我が国の企業が世界をフィールドに活躍し、世界的なシェアを獲得する方向で国策を練るべきである。
- ・ 本事業のような日本発の技術シーズを実用化につなげるようなプロジェクトに、今後も積極的に取り組んでいただきたい。
- ・ 量産段階では歩留まり向上がコスト低減に向けた重要課題になっていくと推察される。これまでの半導体メモリの開発経緯からも、歩留まりを確

保しつつ数年周期で微細化を進めていくという、非常に厳しい開発スケジュールが想定される。特に強磁性金属の微細加工については、製造装置メーカーとも連携して、加工反応の素過程にまで踏み込んだ技術向上を図る必要がある。

- ・ 従来の様々なデバイス開発においても、集積デバイスの問題点・課題は、大規模集積化して始めて顕在化している。実用規模でのプロトタイプ試作・評価、課題の抽出、対応技術開発など、製品レベルでの評価・改善サイクルが早期に起動されることを期待する。
- ・ 本事業の推進により、従来技術では同時充足が困難であった高速性、高集積性、不揮発性を備えたユニバーサルメモリの実用化が現実的なものとなってきた。一方では、今後、半導体分野で高い技術力を有する外国企業の追い上げも予測される。回路技術、ソフトウェア技術、システム化技術等とも連携して、スピントロニクス不揮発性機能を最大限に活用できるアプリケーション分野への早期導入を図るなど、本事業成果の社会還元と新しい産業応用の開拓に向けた組織的取り組みが望まれる。
- ・ **Spin RAM** 基盤技術については、日本発の戦略的な基幹技術として、ビジネスとしても成功するような何らかの支援があるとよい。技術開発と初期の市場開拓で先行しながら、後で外国にシェアを奪われた半導体、液晶、太陽電池などの二の舞になってはならない。
- ・ ここまで来たのですから製品にして売り出し、其の製品が世の中を風靡するように工夫することは当然期待する。しかし半導体の分野で製品を出すためには巨額な投資が必要であり、市場の成熟度、その企業が市場に占める位置、もっている他の製品群など複雑に関係してくるので、企業に任せるしかないのではないか。今回の結果は基礎物性の測定方法の開発、から基本概念の明確化など学問領域の進歩も含んでいるが、まだ技術的成功に対して理論的な説明が追いついていないように思います。今回の結果を元に基礎学問をより進化させるようなプロジェクトを興せれば非常に面白いと思う。

〈その他の意見〉

- ・ 中間評価の結果を踏まえて中止された課題においても、基礎的研究内容において十分な成果があると思われる。すでに発表された論文に加えて、これらの成果を今後の研究に生かせるよう十分な配慮が必要であろう。
- ・ スピン機能素子基盤技術については、やや先物で基礎研究の段階であるが、研究費は相対的に少なくとも継続的な研究を行い、将来の芽を育てることが大切である。

- スピン RAM、磁壁メモリにおいては、集積度、動作電力、高速性等の点で実用レベルの性能が達成されており、今後、種々の応用システムの中で有用性が試されることになると思われる。不揮発性を謳う競合デバイスの開発も進行していることから、各応用システムにおける性能要求を詳細に分析し、その中から当該デバイスの特長を最も効果的に発揮できる分野をターゲットとして戦略的に実用化を図ることが重要と思われる。

1. 2 各論

1) 事業の位置付け・必要性について

本プロジェクトが実現・実用化を目指すスピン RAM 及びスピン新機能素子は、原子オーダーで制御された異種物質の複合化とナノメートルオーダーの構造付与により、情報機器の極限的な低消費電力化と高機能化を図るものであり、ナノテク・部材イノベーションプログラム及び IT イノベーションプログラムの目標達成にも多大な寄与をなすものと評価される。また、不揮発性機能を有する RAM は、市場規模が急速に成長しつつあるモバイル情報機器の飛躍的な低消費電力化と高機能化を図るものであり、一般エンドユーザの利便性を高めると共に、当該分野の産業競争力に多大な効果が見込まれる等、公益性も高いことから、NEDO の事業として極めて適切である。他国における同種のプロジェクトに一步先んじてスタートしたことも誠にタイミングが良く、実用化に向けての世界的競争を制することに繋がる判断であると高く評価される。

〈肯定的意見〉

- スピン RAM などスピン利用の新デバイスは、特に低消費電力化の観点から社会的要請が高く、かつこれまでの基礎研究の成果より実現が十分に見込まれるものの、巨大な開発コストなどの点で一企業が単独で開発するにはリスクが過大であると考えられる。その点で、国の補助による本事業の実施は必要かつ適切なものであったと言える。他国における同種のプロジェクトに一步先んじてスタートしたことも誠にタイミングが良く、実用化に向けての世界的競争を制することに繋がる判断であると高く評価される。
- NEDO の事業としての妥当性および事業目的の妥当性の回答はいずれも Yes である。本プロジェクトの効果は事業化後の成功にかかっているが、今後の投資と市場開拓によりビジネスとしても成功に導いてもらいたい。
- エレクトロニクス分野の伸びはあまり期待できなくなったが依然として日本にとって非常に重要な市場であり、日本がどのような役割を担うかは常に十分な検討が必要である。スピントロニクスのように実用化で日本の企業が先行した分野ではその地位をいかに拡大するかについて今回のプロジェクトの位置づけはマトを得ていると思う。
- 産官学の協力で達成できた点は NEDO の事業として行われた功績が大きい。
- 高度 IT 応用技術の発展途上国への普及に伴い、情報記憶や処理に要するエネルギーが地球規模での新たなエネルギー消費の増大要因となっていくことが懸念される。本事業が目指すスピントロニクスの活用による電子

情報機器の革新的な低消費電力化は、上記問題への解決に大きく貢献するものであり、その公共性からも NEDO の事業として妥当である。

- スピンの物理に関しては学術的にも未解明の点が多く、実用レベルでのデバイス機能にまで昇華させるためには、産学官に点在する研究シーズや技術力の結集が不可欠であり NEDO の関与が必要である。
- 本プロジェクトが実現・実用化を目指すスピン RAM 及びスピン新機能素子は、原子オーダーで制御された異種物質の複合化とナノメートルオーダーの構造付与により、情報機器の極限的な低消費電力化と高機能化を図るものであり、ナノテク・部材イノベーションプログラム及び IT イノベーションプログラムの目標達成にも多大な寄与をなすものと評価される。
- 不揮発性機能を有する RAM は、市場規模が急速に成長しつつあるモバイル情報機器の飛躍的な低消費電力化と高機能化を図るものであり、一般エンドユーザの利便性を高めると共に、当該分野の産業競争力に多大な効果が見込まれる等、公益性も高いと判断される。
- 不揮発性メモリは IT における革新的技術であり、本プロジェクトの成果により、その実現性が大きく高まったと言える。アカデミック分野の専門家と民間企業との協同研究・開発が機能的に推進され、設定された目標は十分に達成されている。現時点での費用対効果は十分と言える。
- 低消費電力で動作する素子開発は NEDO の事業として極めて適切である。市場ニーズを把握している企業と、基礎技術を有する独立行政法人の研究機関と大学がお互いの長所を持ち寄るという点において国費により援助するのに相応しいプロジェクトである。IT イノベーションプログラムおよびナノテク・部材イノベーションプログラムの目標達成に向けた寄与も大きい。低消費電力素子の今後の市場規模に対して、投じられた予算ははるかに少ないため、この点においても投資資金の回収が期待できる効率的なプロジェクトである。スピントロニクスに基づく低消費電力素子開発という点において世界をリードする素晴らしい成果を残した。

〈問題点・改善すべき点〉

- 国費を投じた以上、本プロジェクトで開発された技術が我が国の産業の発展に繋がることを求められる。そのための特許戦略や生産拠点の選定など総合的な戦略設定が望まれる。この点において、今回参加した企業の今後の発展を切に期待する。また、スピントロニクス以外の低消費電力メモリ素子（抵抗型メモリ、相転移型メモリなど）との比較が明確に示されるとよい。

〈その他の意見〉

- ・ 世界情勢等を踏まえて妥当な事業目的が設定されているが、本成果の実用化・商品化は、他の I T 技術の進展に左右される。他技術の進展によっては費用対効果が薄れる可能性もある。アカデミックにおける基礎研究と民間における事業開発へのフォローアップが今後も必要であろう。

2) 研究開発マネジメントについて

材料科学、物性・物理、プロセス技術、計算機シミュレーション等、スピントロニクス基盤技術開発に不可欠な各専門分野の研究者・技術者により産学官共同の研究体制が組織され、各機関が個別に有する力がプロジェクトリーダーの統率と NEDO のマネジメントのもと有機的に結集された。内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定され、具体的かつ明確な開発目標を定量的に設定している。目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されている。また、世界情勢の変化から加速資金の追加を行なったこと、実用化を見通して一部の研究課題の中止を行なったことなど、研究見直しは適切に行なわれている。

〈肯定的意見〉

- IT分野において競合する他技術の開発状況、各国での開発状況を踏まえて定量的目標が設定されている。目標は十二分に達成されており、研究成果は高く評価されるものである。
- 不揮発性メモリの開発（スピンRAM基盤技術）は、「半導体アプリケーションチッププロジェクト」の成果を踏まえ、スピントルク方式を用いてさらに発展させるプロジェクト内容である。これに加え、この方式を用いた磁壁メモリの基盤技術確立の二つが本プロジェクトの主な研究開発課題とされている。これらの課題に新機能デバイス開発のテーマが加えられている。各個別テーマは、共通となる研究内容はあるものの、やや並列して研究が遂行されているが、各々の研究成果は十分なものである。
- これらのテーマは、2つの民間企業と大学・研究所により協同で実施されている。企業間の連携は十分とは言えない可能性があるが、大学・研究所グループ間の情報交換は頻繁に行なわれていると判断されること、適切なプロジェクトリーダーが専任されていることなど、実施体制は適切なものと判断される。
- 世界情勢の変化から加速資金の追加を行なったこと、実用化を見通して研究課題の中止を行なったことなど、研究見直しは適切に行なわれている。
- 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定され、具体的かつ明確な開発目標を定量的に設定している。目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されている。
- 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっている。目標達成に必要な要素技術を取り上げている。研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切である。
- 材料科学、物性・物理、プロセス技術、計算機シミュレーション等、スピ

ントロニクス基盤技術開発に不可欠な各専門分野の研究者・技術者により産学官共同の研究体制が組織され、各機関が個別に有する力がプロジェクトリーダーの統率と NEDO のマネジメントのもと有機的に結集されたことにより、卓越した研究成果に繋がったものと評価される。

- 動作電流、動作速度、集積度等の主要な性能仕様について、実用化を志向、した具体的数値目標を中間期、最終期の各フェーズ毎に設定したことで、実用化に至る達成度が時系列に沿って明確化された。これにより加速資金の効果的導入や研究計画の適切な見直しが行われた点も、最終目標達成要因の一つと考えられる。
- 事業期間中、特に中期以降に米国、韓国での関連プロジェクトが動き始めている。これに応じるように当プロジェクトのスピンドラム RAM 基盤技術に重点的予算配分が行われている。この結果、世界に先駆けて垂直磁化スピンドラム RAM の高密度集積、低電力動作、高出力読み出しに成功しており、状況を見極めた適切なマネジメントが行われたものと評価できる。
- プロジェクト全体及び各サブ WG 毎の定例会議開催や、他機関への研究者派遣等により参画各機関間の緊密な連携強化が図られている。
- 全体を統括するプロジェクトリーダーが選任され、プロジェクトリーダーの柔軟かつ的確な判断力のもとに資金配分等も柔軟に調整され、独立行政法人である研究所・企業・大学間の分担と協調が極めて円滑かつ妥当に調整された。具体的には以下のとおりの理想的な協調が行われた。
- スピンドラム RAM 開発において極めて適切な研究開発チームが構成された。垂直磁化方式の基盤は東芝が築き、素子間のばらつきを低減するための成膜プロセスを AIST が開発し、その素子の高速実時間評価とモデル化を大阪大学が行い、磁化膜を厳密に評価するシステムを東北大が開発し、不揮発性のメカニズムを電通大がシミュレーションで解明する事から東芝を中心とした最終目標達成を強力に支援した。
- 世の中に新しく提案された概念で物理的な意味づけがまだ明確ではない分野に試作設備にせよ大きな投資をすることは一企業の判断では難しい。理論の不明確な点を学が埋め、技術の未熟な部分を官が応援し、管理維持が大変な大型設備は経験がある産に行うという、産官学の連携がうまくいった例だと思われる。
- 開発目標や開発、実施体制は問題ない。見直しも適切に行われていた。
- 磁壁メモリに関しても極めて適切な研究開発が構成された。NEC が開発の中心となり、京都大学が磁壁移動のメカニズムの解明にもとづく素子開発の支援、電通大が磁気ダイナミクスシミュレーションに基づき素子設計を支援した。

- 能動素子に関しては大阪大学と東北大学がそれぞれ基礎研究を適切に実施した。
- 本プロジェクトでは将来が有望なプロトタイプ素子が数々開発された。成果の実用化につなげる戦略はこれからの課題である。
- 本事業開始時点での目標設定は、当時の状況からはやや過大にも見えたが、垂直磁化方式の採用により目標をすべて達成したという点で高く評価される。研究開発のチーム構成は、それぞれ特色ある研究グループ間の連携により各々のポテンシャルが十分に発揮され、また大学、国研と企業との連携により基礎研究とデバイス開発とがバランスよく進められてきたと見受けられる。中間評価後の研究テーマの選択・集中も、事業化の観点からは適切であったと思われる。マネジメントについても特に問題は見当たらない。
- プロジェクトリーダーを中心に適切なマネジメントが行われていたと評価される。

〈問題点・改善すべき点〉

- 研究開発を独りよがりにならないためには、情勢変化、技術動向に機敏に対応することが大切である。この点に関し、特に **ReRAM** や **PRAM** といった他の有力な競合新技術の進展が著しいなかでそれらの技術動向との比較、それを上回る目標設定をもっと明確にすべきである。
- プロジェクトスタート時点では不可能に思われた数値目標をすべて達成し、プロトタイプ素子を作製したという点において問題点は見当たらない。強いてあげれば製造ラインに進めるかどうかがこのからの問題なので、その発展を心から祈念する。

〈その他の意見〉

- ・ IT分野における他の競合する既存技術の進展によって、本プロジェクト成果の事業化が左右されるという状況にある。事業化へ向けた戦略は明確であるものの、事業化には企業におけるさらなる努力と敏速性が必要であろう。

3) 研究開発成果について

本プロジェクトの主要開発項目であるスピン RAM 基盤技術、スピン新機能素子設計技術（磁壁 RAM）の両技術分野において、Gbit 以上の集積度実現に必須となる垂直磁化方式の開発に世界に先駆けて取り組み、世界最高水準の最終目標達成に成功している点は、プロジェクト成果として高く評価されると共に、成果は市場の拡大或いは市場の創造につながる事が期待される。さらに、特許数は 200（うち国際特許 125）を越えており、知的財産権取得にも積極的に取り組まれている。また、プロジェクト期間内に 85 件の論文発表、114 件の招待講演が行なわれており、成果の学術的意義と注目度の高さが窺われる。

一方、目標とした成果は十分得られているものの、それを設定した応用対象以外へ展開させるといった観点プロジェクトには欠けている。他の競合技術が強力である現時点では、そのような観点も必要と考える。

〈肯定的意見〉

- スピン RAM に関してはすべての項目において目標以上の成果を上げている。具体的な目標と成果は以下のとおり。 垂直磁化膜という新方式を用いて、素子単体として目標 TMR 比 200%以上に対して 202%、反転電流 $20 \mu A$ 以下に対して $7 \mu A$ 、10 年のデータ保持 ($K \mu V > 60kBT$) に対して 107 kBT、 $< 50ns$ での高速読み書きに対して 3ns を達成した。書き込みの確実性では 30ns での 2×10^6 回の繰り返し書き込み動作を実証した。CMOS 回路との整合をとった $0.005 \mu m^2$ 微細 TMR 集積アレイの作製目標に対して $0.002 \mu m^2$ 微細 TMR 素子を用いた 64Mbit アレイの作製に成功した。
- 磁壁メモリに関しては、磁壁移動電流密度の目標 $< 1 \times 10^8 A/cm^2$ に対して $0.3 \times 10^8 A/cm^2$ を達成、磁壁移動速度 100m/s に対して $> 100m/s$ を達成したうえで、アレイ形式のデバイス作製という目標においては当初は 4kb 程度を目標としたが、加速予算などを上手に利用しながら 16Mb のアレイ作製を達成した。
- 本事業の主要開発項目であるスピン RAM 基盤技術、スピン新機能素子設計技術（磁壁 RAM）の両技術分野において、Gbit 以上の集積度実現に必須となる垂直磁化方式の開発に世界に先駆けて取り組み、世界最高水準の最終目標達成に成功している点は、当該技術分野における日本の技術的優位性を顕示した成果として高く評価される。
- 本事業で達成されたスピン RAM、磁壁 RAM の性能仕様は、集積性、高速性において、各々、代替を狙う DRAM、混載 RAM と同等以上の水準に達しており、不揮発性という新たな価値が相乗されることで、電子情報

機器の省電性、利便性の大幅な向上に資するものと評価される。

- 本事業による特許数は 200（うち国際特許 125）を越えており。知的財産権取得にも積極的に取り組まれている。また、事業期間内に 85 件の論文発表、114 件の招待講演が行なわれており、成果の学術的意義と注目度の高さが窺われる。
- 能動素子に関しては、室温で増幅度を有しファンアウト 2 以上のスピントルク方式スピントランジスタの実現という目標に対し、室温で電力増幅度 130、ファンアウト 5 の素子の作製に成功した。ハーフメタル電極方式スピントランジスタに関しては 1000%以上の TMR と 1000 以上の電流 On/Off 比を目標とし、いずれも達成した。ハーフメタル方式に関するこれらの成果は 6K という低温で得られたが、室温動作に向けた改善点も明らかにされた。
- スピン RAM、MRAM に関する ITRS ロードマップに対して 2024 年以降の目標値となる反転電流と MR 比をすでに達成した。セルサイズはまだ大きく、64Mb しかできていない。これを 1Gb にしていきたい。
- 磁壁移動メモリに関しては 16Mb アレイ素子の作製まで進めた事が多いに評価できる。能動素子に関しても室温動作も含めて大きな進展が得られた。
- 目標値は十分に達成されている。成果のなかには世界初のものもかなりある。目標達成度は非常に高い。
- 新たな市場開発に繋がることは期待されるものの、DRAM技術と比較して、現時点ではDRAMをスピンRAMに置き換えることには至っていない。他技術に対して全面的に優位性が主張できる段階ではないが、他技術にない特性を実現させたことは高く評価される。
- 特許申請件数、論文発表件数、招待講演数ともに十分と判断される。
- 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながる事が期待され、多くの世界初そして世界最高水準が達成された。これらの成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できる。
- 知的財産権等の取扱に関しても国内外に適切に行われている。
- 学術的な寄与として論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われている。
- すべての目標設定において、研究成果は目標を達成しており、成果は申し分ないものであると言える。
- 本プログラム自身の目標はクリアしていると考ええる。

〈問題点・改善すべき点〉

- スピン RAM に関してはセルサイズがまだ大きく 64Mb しかできていない。

これを 1Gb にしていきたい。能動素子に関しては一部の素子が 6K という低温動作に限定されているため、これを室温動作に展開したい。

- 他の競合技術（特に PRAM、 ReRAM）との比較が不十分である。
- 目標とした成果は十分得られているものの、それを設定した応用対象以外へ展開させるといった観点がプロジェクトには欠けているように思える。他の競合技術が強力である現時点では、そのような観点も必要ではないだろうか。

〈その他の意見〉

- ・ 事業化はその企業の市場での存在位置、もっている製品群などが大きくかわり、一般的な新しい技術の投入としての判断とは必ずしも一致しない。大きく見れば研究成果は人類全体で共有されるべきであり、またどのような技術も完璧ではなく弱点はあるので公開することによりいろいろな人がいろいろな見方で検討することが結局は其の技術の普及を促進するのが一般的である。どのような形で公開していくかを考えた方がよいと思う。
- ・ 中止となった研究課題に関するまとめとその公表が必要ではないだろうか。その分野の研究において同じことが繰り返される可能性もある。
- ・ 成果の普及については、企業の開発的研究、特に Spin RAM 基盤技術のように、現時点で広く成果の普及を行うことにそぐわないものもあり、注意を要する。本研究の場合には、Spin RAM 基盤技術、スピン機能素子基盤技術ともに、成果発表が適切に行われたと思われる。

4) 実用化、事業化の見通しについて

本プロジェクトの成果の実用化対象は、不揮発性メモリまたは高速混載メモリであり、産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）ができています。スピン RAM については、本事業の成果により目標とされたデバイス実現のための課題は基本的にクリアされたと見られる。さらに実際の集積化デバイスについても、実現までの道筋が立てられており、製品化・事業化の見通しは高いと期待できる。また、本事業の成果を継承するかたちで NEDO の新プロジェクト「ノーマリーオフコンピューティング基盤技術開発」が始動するとともに、本プロジェクトの成果の一部が文科省最先端研究開発支援プログラム「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」においても活用されるなど、学術、技術両面での関連分野へも大きな波及効果が生じている。

本プロジェクトで開発されたプロトタイプ素子が死の谷を越えて製品化されるか否かは今後の企業の意志と実行力にかかっている。

〈肯定的意見〉

- 十分ではないが、スピン RAM の場合 64Mbit また磁壁移動メモリの場合は 16Mbit の実証実験まで漕ぎ着けたことは大いに評価できる。
- 本プロジェクトの成果の実用化対象は、不揮発性メモリまたは高速混載メモリと明確にされている。これらの実用化が現実のものとなればその経済的波及効果は大きなものである。
- 本プロジェクトには、多数の若手研究・技術者が参加している。この意味で本プロジェクトは人材育成の大きな役割を果たしたと言えよう。
- 能動素子の研究開発については、想定された実用化に向けて必要な特性を実現させた段階であり、応用研究としては十分な成果である。
- 産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）がはっきりしている。実用化に向けては、スピン RAM に関しては素子間のばらつきの排除や、歩留まり向上を含めたプロセスコストの低減が課題である。磁壁移動メモリに関しても微細化限界をさらに伸ばすこととばらつき問題への対応が重要となる。能動素子に関しては集積化・パッケージ化への対応が重要となり、これらの取り組むべき問題が明確にされている。
- スピン RAM、磁壁 RAM については、各々、DRAM、混載 RAM 等、代替を狙う既存デバイスのトレンドを実用化予定時期まで外挿した高い目標設定がなされている。また、いずれも大容量集積アレイにおいてその目標達成に成功しており、新規産業技術としての実現性が明確化されている。
- 本事業の成果を継承するかたちで NEDO の新プロジェクト「ノーマリーオフ

「フロンティアコンピューティング基盤技術開発」が始動するとともに、本プロジェクトの成果の一部が文科省最先端研究開発支援プログラム「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」においても活用されるなど、学術、技術両面での関連分野へも大きな波及効果が生じている。

- スピン RAM については、本事業の成果により目標とされたデバイス実現のための課題は基本的にクリアされたと見られる。さらに実際の集積化デバイスについても、実現までの道筋が立てられており、製品化・事業化の見通しは高いと期待できる。
- Spin RAM 基盤技術について、(1)と(3)の回答はすべて Yes である。スピン機能素子基盤技術については、相対的に実用からは遠いが、基盤技術としての可能性を追求する価値はあると思われる。

〈問題点・改善すべき点〉

- スピン新機能素子については、スピン RAM に比べると実用化までにはまだまだクリアすべき課題が多く、今後も地道な研究が必要と考えられる。
- その不良解析結果が明確に提示されていないため、今後のギガビットあるいはその先のテラビットへの道筋を示すには至っていない。今後、本技術特有の不良モードの同定とその根絶の可能性を追求することから事業化への見通しを立てることが必要。
- 具体的事業化にむけた課題整理は、企業機密との関わりのため明確に言及されてはいないが、十分に行なわれていると判断している。
- 能動素子の実用化に向けた今後の研究は、開発研究として実施するよりも基礎研究と並行して行なわれるのがより有効と思われる。
- 本プロジェクトで開発されたプロトタイプ素子が死の谷を越えて製品化されるか否かは今後の企業の意志と実行力にかかっている。ベンチャーキャピタル、銀行、政府機関、経済産業省らによる資金援助も必須であり積極的な投資が期待される。

〈その他の意見〉

- ・ (2)事業化までのシナリオについては、今後の経済環境に依存するので、予断を許さないが、事業化の成功とそれに伴う経済効果が得られることが十分期待できると思われる。
- ・ このプロジェクトで開発された技術を使わないとできないデバイスを作りその市場をつくり出すセグメンテーションがもっとも重要だと思う。それは企業の製品として世の中に出すわけであるから、企業におまかせする

しかないのではないか。

- 本事業により基盤技術が確立された磁性体 **RAM** は、40 年に及ぶ技術世代更新を経てきた半導体メモリの物理的限界点から本格的実用化がスタートすることになる。継続的な市場確保には、磁性体 **RAM** においても世代更新が不可避であるため、本事業のような産学官の協力による組織的開発研究の推進が望まれる。
- 具体的事業化に関しては、やはり他の競合技術との関わりが問題であろう。IT の普及化に伴い、新たな応用分野の可能性を探る必要もあろう。

2. 個別テーマに関する評価結果

2. 1 スピンRAM基盤技術

1) 成果に関する評価

垂直磁化方式が持つ高密度集積性に着目し、新規材料系開発やスピン注入磁化反転機構の解明など、産学官の連携を強化し、研究開発を総合的に推進したことにより、大容量集積化アレイでの高速読み書き動作の実証に世界に先駆けて成功している。垂直磁化膜を用いたTMR素子に対してスピントルク法を適用することにより、低電流密度、高TMR比、64Mbit スピンRAMの実現という世界初の技術が確立されるなど、目標以上のレベルが達成され、本テーマの研究開発成果は高く評価できる。

また、垂直磁化TMR素子の低電力スピン反転等、世界に先駆けて実現された重要成果を著名な国際会議や学術雑誌に数多く発表する等、情報発信・成果普及にも積極的に取り組まれている。

競争技術との比較および優位性の明確化が、機能性、集積度、信頼性等の観点から十分にはなされていないので、今後はこれらに関する検討が望まれる。

〈肯定的意見〉

- 目標は達成している。この点は大いに評価している。MRAM 関連技術という領域では高い水準の成果である。
- 垂直磁化膜を用いたTMR素子に対してスピントルク法を適用することにより、低電流密度、高TMR比、64Mbit スピンRAMの実現という世界初の技術が確立されるなど、目標以上のレベルが達成され、本テーマの研究開発成果は高く評価できる。
- 本成果が期待通り実用化されれば、大きな市場創造、新技術の開発に繋がることが期待される。
- 知的財産権の取得、論文公表等は十分になされている。
- チーム編成、目標達成度、特許の取り扱い等、申し分ない。世界トップの成果が出された。
- 垂直磁化方式を採用し、新材料の開発により磁気抵抗比、反転電流密度などの数値目標を大幅にクリアしており、成果は申し分ない。
- 垂直磁化方式が持つ高密度集積性に着目し、新規材料系開発やスピン注入磁化反転機構の解明など、産学官の連携を強化し、研究開発を総合的に推進したことにより、大容量集積化アレイでの高速読み書き動作の実証に世界に先駆けて成功している。これにより、市場規模の大きなDRAMの代替が現実的なものとなったことは本事業の実用的成果として高く評価できる。

- 垂直磁化記憶層材料、下地層材料を始めとする重要基盤技術について、外国特許 63 件を含む 128 件の特許が出願されており、知的財産権取得についての十分な取り組みがなされている。
- 垂直磁化 TMR 素子の低電力スピン反転等、世界に先駆けて実現された重要成果を著名な国際会議や学術雑誌に数多く発表する等、情報発信・成果普及にも積極的に取り組まれている。
- 垂直磁化膜を用いた Spin RAM という今のところ他に追従を許さない独自技術を開発し、事業化への見通しをつけた点は高く評価される。
- 量産設備に近い設備を使って 64Mbit のデモンストレーションまだ行っているため、実用化がみえるすばらしい成果であることに間違いはない。

〈問題点・改善すべき点〉

- 競合技術（特に PRAM、ReRAM）との比較および優位性が、機能性、集積度、信頼性も考慮して十分なされてはいないので、今後はこの点の評価が望まれる。
- 本成果は、今後一般社会人が日常使用する器機に応用される可能性が高い。しかし、一般人からは目に見えないところでの使用である。我が国の技術力の高さ等を一般人に知ってもらうためには、論文発表という専門家向け以外の、なんらかの啓蒙的活動が必要ではないだろうか。

〈その他の意見〉

- ・ Spin RAM 基盤技術のように、現時点で広く成果の普及を行うことにそぐわないものもあり、注意を要する。
- ・ 本成果の実用化については、他技術（DRAM）との競合が問題となる。この問題がクリアされない可能性もあり、実用化に関しては適切な適用分野の検討が必要であろう。すでに検討済みかもしれないが、企業機密ということでは言及されなかった。

2) 実用化、事業化の見通しに関する評価

参画企業は、半導体メモリ、および磁性体ストレージ分野における世界有数の企業であり、各メモリ技術の実用化研究や事業化経験に基づく適切な課題設定、経済効果見通しがなされている。また、スピン RAM の応用に好適なデバイス分野を特定し、実用化に必要な諸性能が世界最高レベルの水準で達成されている。

〈肯定的意見〉

- 報告者の言うとおりの「スピン RAM の実現を10年はやめた成果」であるとおもう。「スピン RAM しかできないキラーアプリを探索中」ということであるので、よい用途が見つかることを祈念する。
- 参画各企業は、DRAM、フラッシュメモリ、ハードディスク等の半導体メモリ、および磁性体ストレージ分野における世界有数の企業であり、上記各メモリ技術の実用化研究や事業化経験に基づく適切な課題設定、経済効果見通しがなされている。
- スピン RAM の応用に好適なデバイス分野を特定し、実用化に必要な諸性能が世界最高レベルの水準で達成されていることから、事業化の可能性は高いと判断される。
- 現時点では、経済性の検討、競合技術との比較は十分なされており、期待とおりの進めば社会的・経済的波及効果は大きい。
- 本事業における研究開発の成果により、本事業における研究開発の成果により、Gbit 級集積回路の実現に向けた基本的課題はクリアされていると見られ、実用化の見通しは高いと期待できる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 推進者側の指摘にあった通り、Gbit 級の集積回路を実現する上では、素子のバラツキをいかに抑制するかが大きな課題となる。実際の集積回路作製においてプロセス改善などの手法でバラツキを抑制することも重要であるが、バラツキの発生となる原因の究明とその対処法についての基礎的な研究にももっと取り組む必要があるのではないかと思われる。
- 製品化に向けて十分な資金援助が得られることが必要である。
- 歩留まり向上のため不良解析を進めることが必要。

〈その他の意見〉

- ・ 推進者側より本事業終了後の Gbit 級集積回路実現の道筋が示されていたが、その研究開発の場として後継となるプロジェクトがあるのか、それと

も企業単独で製品化までの研究開発を行うのかが(資料を見る限りは)はっきりしない。可能であれば、今後の研究開発においても何らかのサポートがなされるべきではないかと考える。

- ギガビットメモリに必要な要素は確保されたと言えようが、実際に 1Gbit メモリを作製するには、まだ道のりが長いように思える。現時点での成果をもとに適切な分野での事業化を期待したい。
- 今後の経済環境に依存するので、予断を許さないが、事業化の成功とそれに伴う経済効果が得られることが十分期待できると思われる。

3) 今後に対する提言

本事業の成果を十分に生かして、近い将来に製品化が実現することを期待する。また、数 10nm サイズの極微磁性ドットを情報担体とする超 G ビット級スピન RAM の実現には、垂直磁化 TMR 素子のさらなる高度化が不可欠である。新規材料系の探索、原子オーダーでの表面・界面の構造解析や磁気物性制御など、技術のステップアップに向けた基礎研究の拡充が望まれる。さらに、他競合技術の進展に伴う情勢変化に対応できるフォローアップと、現時点の成果を適切な分野において早急に事業化することを期待したい。

〈今後に対する提言〉

- ・ 低消費電力メモリという切口では他にも競合する技術がある。抵抗型メモリ、相転移型メモリ、そして本プロジェクトの磁壁移動型メモリなどである。それら競合技術に対する優位性を保ちながら世界シェアという舞台上で勝負する事が望まれる。
- ・ 数 10nm サイズの極微磁性ドットを情報担体とする超 G ビット級スピン RAM の実現には、垂直磁化 TMR 素子のさらなる高度化が不可欠である。新規材料系の探索、原子オーダーでの表面・界面の構造解析や磁気物性制御など、技術のステップアップに向けた基礎研究の拡充が望まれる。
- ・ 他競合技術の進展に伴う情勢変化に対応できるフォローアップと、現時点の成果を適切な分野において早急に事業化することを期待したい。
- ・ 低消費電力メモリという切口では他にも競合する技術がある。抵抗型メモリ、相転移型メモリ、そして本プロジェクトの磁壁移動型メモリなどである。それら競合技術に対する優位性を保ちながら世界シェアという舞台上で勝負する事が望まれる。
- ・ 本事業の成果を十分に生かして、近い将来に製品化が実現することを期待する。個人的には、その際、やはり日本企業が主体となって開発を行い、日本発の製品として世に出ることを強く希望する。
- ・ 国際電気電子デバイス会議 (IEDM) などでその成果を公表し、国際的な評価を受けるべきである。
- ・ ぜひ、事業化の成功に向けて努力してほしい。日本発の戦略的な基幹技術として、ビジネスとしても成功するような何らかの支援があるとよい。
- ・ 製品として生産し、利益を出すことが最重要であることは間違いないが、優れた技術であるので、波及効果を最大限に持っていく工夫も重要であると思う。いずれ特許で公開されるわけであるが、特許は必ずしも分かりやすく整理されているわけではない。基礎学問領域に対してもいろいろな興味深い問題を投げかけているので学会内でも議論を巻き起こすような工

夫ができないものか。

〈その他の意見〉

- ・ 素子微細化に伴い、情報安定性確保と書込み電流低減の同時充足が困難化することが予測される。ハードディスク分野において有望技術と考えられているエネルギーアシスト方式等も視野に入れた将来技術開発への早期着手も必要と思われる。

2. 2 スピン新機能素子設計技術

1) 成果に関する評価

磁壁メモリに関しては、垂直磁化膜を使用することにより、書き込み電流と熱安定性を独立に制御することに成功したことは高く評価できる。目標は十分に達成されており、磁壁移動メモリ素子の実証にも成功している。また、知的財産権の取得、論文公表、招待講演数も十分である。

一方、スピン能動素子については、強磁性金属を用いたいくつかの異なる原理のデバイスを試作しており、今後の方向性を示しているが、半導体論理回路に比した優位性や整合性もより明瞭にする（できれば実証も含めて）とよいのではないかと。

〈肯定的意見〉

- 磁気記録において磁化を安定化させようとして保磁力をあげると反転に大きいエネルギーを必要とし、その両立が限界に達している。本研究の磁壁の移動では保磁力をあげても移動に必要な電流量が変わらないという夢のような結果になっており、そのような材料を見つけたことは非常に興味深い。
- 磁壁メモリに関しては、垂直磁化膜を使用することにより、書き込み電流と熱安定性を独立に制御することに成功したことは高く評価できる。目標は十分に達成されており、磁壁移動メモリ素子の実証にも成功している。
- 知的財産権の取得、論文公表、招待講演数も十分である。
- 金属系スピントランジスタによるスピン能動素子の開発については、スピントランジスタとして最小必要要件を満たすところまで研究が進んでいる。これは世界初のものであり、応用研究として高く評価できる。
- 素晴らしい成果と、目標値の達成が得られた。学術的にも大変優れた成果である。
- 基礎研究としては、どのテーマの研究もそれなりの成果を挙げていると言える。磁壁メモリについては、垂直磁化方式の採用により、16Mb 集積回路の試作と動作確認に成功しており、実用化に向けた十分な成果が挙げられている。
- 本事業の当初においては、磁壁ストレージ、スピン光メモリ等を含む多様な研究テーマが設定されたが、実用的観点から磁壁メモリに重点的に研究資金が投入された。これにより、集積性に優れた垂直磁気材料系において、不揮発性と高速性を兼備した磁壁RAMという特色あるデバイス実現への道が拓かれた点は高く評価される。
- 計算機システム機能の中核を担う能動素子の不揮発化は、計算機アーキテ

クチャに革新的変化をもたらす可能性を有している。新規システム応用、デバイスパラダイムを創出する可能性が高い。ファンアウト、オンオフ比等の数値目標も達成されており、今後の実用化に繋がる成果が得られている。また、電圧トルクという新しいスピンの制御技術についても基本動作が実現されており、将来技術として今後の展開に期待が持たれる。

- 成果はほぼ目標を達成していると思われる。スピンRAM基盤技術と比べて、スピン新機能素子設計技術は基礎研究の段階にあるが、基礎研究としては優れた成果であり、特に磁壁移動メモリデバイスの試作と実証は高く評価される。

〈問題点・改善すべき点〉

- スピン能動素子設計技術については、強磁性金属を用いたいくつかの異なる原理のデバイスを試作しており、今後の方向性を示しているが、半導体論理回路に比した優位性や整合性もより明瞭にする（できれば実証も含めて）とよいのではないかと。
- ハーフメタル電極方式のスピントランジスタについては、本来の動作原理に基づく磁気電流比が出ておらず、他グループの類似の研究に比べてその優位性が必ずしも明確ではないように見受けられる。

2) 実用化、事業化の見通しに関する評価

磁壁メモリについては、混載 MRAM への応用が可能な 200MHz 以上の高速動作性能が達成されており高い実用性が実証された。企業への技術移管も視野に入れた実用化への具体的取り組みが進んでいる。但し、電流密度がまだ高く、その低減のための更なるブレークスルーが必要であろう。スピンRAM同様に他の競合技術があり、これに勝る性能を実現するには、さらなる高速化が必要であろう。

〈肯定的意見〉

- 磁壁移動メモリデバイスについては、Yes である。スピン能動素子設計技術については、必ずしも明確でないが Yes である。
- 磁壁メモリについては、混載 MRAM への応用が可能な 200MHz 以上の高速動作性能が達成されており高い実用性が実証された。企業への技術移管も視野に入れた実用化への具体的取り組みが進んでいる。
- 既存 CMOS 論理デバイスの技術的成熟・飽和状況からみて、新たな付加価値としての不揮発性実現を目指すスピン能動素子の意義・必要性は極めて高いと判断される。2 端子素子における基本動作の実証、3 端子化に向けた設計・試作等、の顕著な研究開発成果からも実用化の可能性は高いと思われる。
- 磁壁メモリについては、技術移管もされており、事業化に向けた開発研究も進められており、実用化も期待される。
- 磁壁メモリについては、試作された集積回路で基本動作を確認しており、実用化の可能性も高いと考えられる。但し、電流密度がまだ高く、その低減のための更なるブレークスルーが必要であろう。また、今後スピン RAM の更なる高速化が達成された場合には、それとの棲み分けについても検討する必要があると思われる。

〈問題点・改善すべき点〉

- スピントルク方式トランジスタについては、目標通りの動作確認に成功したという点で評価すべきであるが、他の動作原理に基づくスピントルクスタとの利害得失を評価し、どのような場での応用が可能か、さらに検討する必要があると思われる。
- 磁壁メモリは、スピンRAM同様に他の競合技術があり、これに勝る性能を実現するには、さらなる高速化が必要であろう。原理的には可能であることが言及されているものの、実現に向けた道筋はそれほど明確ではないように思える。

- 製品化に向けて十分な資金援助が得られることが必要である。
- スピン能動素子設計技術については、どのような回路で使うとメリットがあるのか、示せるとよい。
- 波及効果を議論する前に競合技術との正確な比較が前提。

〈その他の意見〉

- ・ この原理でないと特性がだせない特別の用途を見つけ出すことが何よりも重要だと思う。すでにあるものをコストが安いとか、省エネルギーであるとか、すこし早いとかということで置き換えを狙っても最終製品の性能は同じですから一般の人には利益がないことになっています。研究成果としてはすばらしい結果ですから、ぜひともキラーアプリを見つけるための議論を巻き起こしてほしいと思う。
- ・ スピン能動素子については、今後基礎研究と並行して応用・実用化に向けた研究を進めるのが有効と思われる。

3) 今後に対する提言

磁壁移動メモリデバイスについては、プロジェクト終了後も、残る技術的課題をクリアし、実用化につなげてほしい。また、磁壁メモリについては適切な応用を検討することが必要であろう。スピン能動素子設計技術については、現状では基礎研究の段階にあると判断するが、将来技術としては重要であるので、材料やデバイス構造の検討と最適化も含め、さらに研究を続け発展させてほしい。

低消費電力メモリという切口では他にも競合する技術がある。抵抗型メモリ、相転移型メモリ、そして本プロジェクトのスピン RAM などである。それら競合技術に対する優位性を保ちながら世界シェアという舞台上で勝負する事が望まれる。

〈今後に対する提言〉

- ・ 成果を製品として売りだして利益を得ることがもっとも重要なことは確かですが、基礎学問としてみても非常に面白い、あたらしい物理現象を見つけ出しているのではないかと思う。ただ学問の進歩として定着させるためにはまだまだ議論が必要なように思う。基礎学問の進歩にも貢献するようにするためには、製品化を妨げることなく、結果を公開して研究の輪を広げて行くよい方法をぜひとも考えていただきたいと思う。
- ・ 磁壁 RAM の高速化については、磁壁速度の向上に加え、磁壁移動距離の短縮も有効に思われる。磁壁移動層の微細化プロセス開発や、素子構造の最適化による動作速度の向上により、高速不揮発 RAM としての市場及び応用分野の拡大が望まれる。
- ・ 磁壁メモリについては適切な応用を検討することが必要であろう。スピン能動素子の実現については、さらなる飛躍にむけて基礎的研究を遂行することが適切と思われる。
- ・ 低消費電力メモリという切口では他にも競合する技術がある。抵抗型メモリ、相転移型メモリ、そして本プロジェクトのスピン RAM などである。それら競合技術に対する優位性を保ちながら世界シェアという舞台上で勝負する事が望まれる。
- ・ 磁壁移動を利用した論理素子の開発も計画されているということで、ユニークな発想に基づくデバイスが何らかの形で実用化されることを期待したい。
- ・ 磁壁移動メモリデバイスについては、プロジェクト終了後も、残る技術的課題をクリアし、実用化につなげてほしい。スピン能動素子設計技術については、現状では基礎研究の段階にあると判断するが、将来技術としては

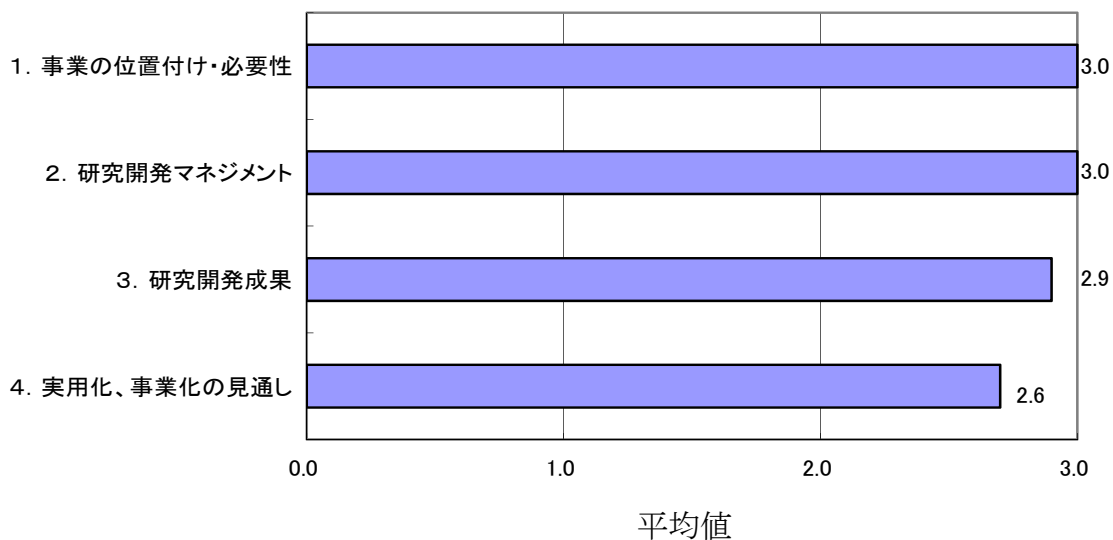
重要であるので、材料やデバイス構造の検討と最適化も含め、さらに研究を続け発展させてほしい。

〈その他の意見〉

- ・ 磁壁の並進移動を基本動作とする磁壁 RAM は、高速性と不揮発性を兼備しうる独創的デバイスであるが、素子の微細化に伴い磁壁動作の不均一性が顕在化する懸念もある。磁性層成膜プロセスや磁性細線加工プロセスの最適化による磁壁動作の均一性向上が重要になると思われる。

3. 評点結果

3. 1 プロジェクト全体



評価項目	平均値	素点 (注)							
		A	A	A	A	A	A	B	B
1. 事業の位置付け・必要性について	3.0	A	A	A	A	A	A	A	A
2. 研究開発マネジメントについて	3.0	A	A	A	A	A	A	A	A
3. 研究開発成果について	2.9	A	A	A	A	A	A	B	A
4. 実用化、事業化の見通しについて	2.6	A	B	A	A	A	A	B	B

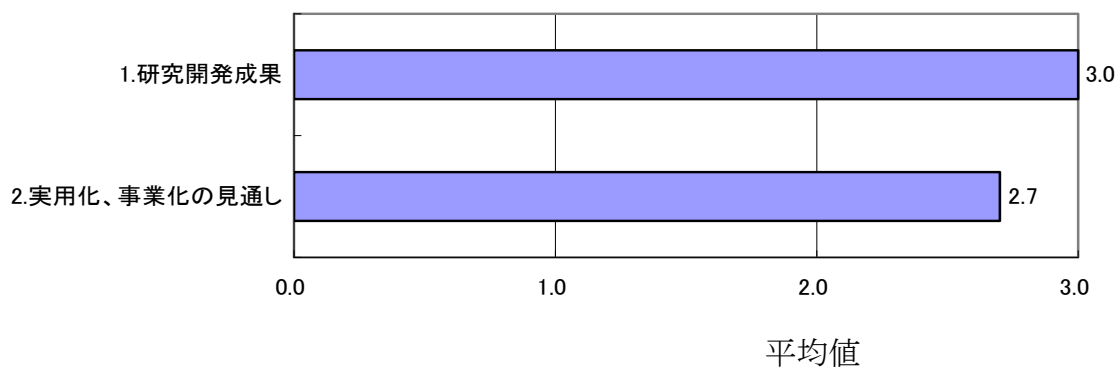
(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

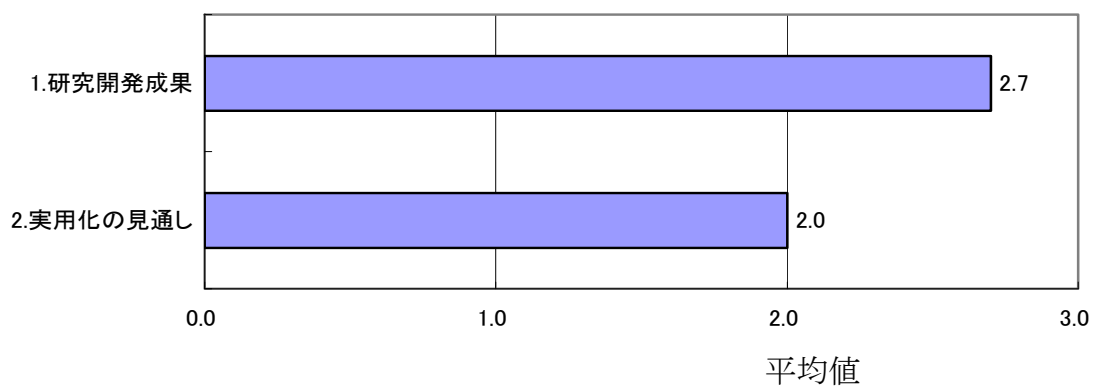
1. 事業の位置付け・必要性について	3. 研究開発成果について
・非常に重要 →A	・非常によい →A
・重要 →B	・よい →B
・概ね妥当 →C	・概ね妥当 →C
・妥当性がない、又は失われた →D	・妥当とはいえない →D
2. 研究開発マネジメントについて	4. 実用化、事業化の見通しについて
・非常によい →A	・明確 →A
・よい →B	・妥当 →B
・概ね適切 →C	・概ね妥当であるが、課題あり →C
・適切とはいえない →D	・見通しが不明 →D

3. 2 個別テーマ

3. 2. 1 スピンRAM基盤技術



3. 2. 2 スピン新機能素子設計研究



個別テーマ名と評価項目	平均値	素点 (注)							
3. 2. 1 スピンRAM基盤技術									
1. 研究開発成果について	3.0	A	A	A	A	A	A	A	A
2. 実用化、事業化の見通しについて	2.7	A	A	A	A	A	A	B	B
3. 2. 2 スピン新機能素子設計研究									
1. 研究開発成果について	2.7	A	A	A	A	A	B	B	
2. 実用化の見通しについて	2.0	B	B	B	B	B	B	B	B

(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

1. 研究開発成果について

2. 実用化、事業化の見通しについて

- | | | | |
|-----------|----|----------------|----|
| ・非常によい | →A | ・明確 | →A |
| ・よい | →B | ・妥当 | →B |
| ・概ね適切 | →C | ・概ね妥当であるが、課題あり | →C |
| ・適切とはいえない | →D | ・見通しが不明 | →D |

第2章 評価対象プロジェクト

1. 事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

「スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト」

事業原簿

【公開版】

担当部	独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 電子・材料・ナノテクノロジー部
-----	---

－ 目次 －

概 要

プロジェクト基本計画

プログラム基本計画

プロジェクト用語集

I. 事業の位置付け・必要性について

1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性	1
1.1 スピントロニクス技術の革新性	1
1.2 事業の政策上の位置付け	1
1.3 NEDOが関与することの意義	3
1.4 実施の効果(費用対効果)	3
2. 事業の背景・目的・位置づけ	4
2.1 事業の背景	4
2.2 事業の目的	6
2.3 事業の必要性と意義	8
2.4 事業の指針	8

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標	9
2. 事業の計画内容	11
2.1 研究開発の内容	11
2.2 研究開発の実施体制	18
2.3 研究開発の運営管理	23
3. 情勢変化への対応	27
4. 中間評価結果への対応	31
5. 評価に関する事項	33

III. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果	34
1.1 プロジェクトの概要	34
1.2 各研究開発項目毎の成果の概要	
1.2-①-(1)「スピンRAM基盤技術」(低消費電力磁化反転TMR素子)	
.....	36

1. 2-②-(1)「スピン新機能能動素子設計技術」(新ストレージ・メモリデバイス設計技術)	41
1. 2-②-(2)「スピン新機能能動素子設計技術」(不揮発性スピン光機能素子設計技術)	49
1. 2-②-(3)「スピン新機能能動素子設計技術」(スピン能動素子設計技術)	51

別紙1: 特許、論文等

別紙2: 平成 21 年度革新的技術推進費の実施について

概要

		作成日	平成23年6月29日				
プログラム名	IT イノベーションプログラム、ナノテク・部材イノベーションプログラム						
プロジェクト名	スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト	プロジェクト番号	PO6016				
担当推進部／担当者	電子・情報技術開発部／水野絃一 秋山純一 電子・材料・ナノテクノロジー部／島津高行 万田純一						
0. 事業の概要	強磁性金属のナノ構造体を基本とし、超高集積で高速な不揮発性メモリとして期待されるスピン RAM 実現のための基盤技術、および新ストレージ・メモリデバイス、不揮発性スピン光機能素子、スピン能動素子等の新しい動作原理によるスピン新機能素子の実現のための基盤技術を確立する。また、これらスピントロニクス技術を応用したデバイスを高度化する磁性材料の開発を行う。						
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>スピントロニクス技術は現在のエレクトロニクスを覆す潜在能力を持つ新技術として期待されており、今後の研究開発により将来の中核的な基盤技術に育っていく可能性が高い。この技術を用いたデバイスに関しては、NEDO が平成 16 年度に作成した「技術戦略マップ(技術ロードマップ)」のストレージ・メモリ分野および半導体分野においてその重要性が指摘されている。</p> <p>本プロジェクトでは、スピントロニクス技術の最大の特長である磁気ヒステリシス効果を用いる不揮発性機能により、超ギガビット級の究極の不揮発性メモリであるスピン RAM から、現行ハードディスクの限界を超える新ストレージデバイス、そして電子情報機器の革命的な超低消費電力化を可能とするスピントランジスタなどの多種多様なスピン不揮発性デバイス実現のための基盤技術を確立する。これにより、我が国半導体産業の競争力強化、及び情報通信機器の低消費電力化に資することを目的とする。</p>						
II. 研究開発マネジメントについて							
事業の目標	平成 22 年度までに、超高集積で高速な不揮発性メモリとして期待されるスピン RAM のための基盤技術を確立する。また、新ストレージ・メモリデバイス、不揮発性スピン光機能素子、スピン能動素子等の新しい動作原理によるスピン新機能素子の実現のための基盤技術を確立する。						
事業の計画内容	主な実施項目	H18fy	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	
	①スピン RAM 基盤技術 (1)低電力磁化反転 TMR 素子技術	→					
	②スピン新機能素子設計技術 (1)新ストレージ・メモリデバイス設計技術	→					
	②スピン新機能素子設計技術 (2)不揮発性スピン光機能素子設計技術	→					
	②スピン新機能素子設計技術 (3)スピン能動素子設計技術	→					
	③スピントロニクス不揮発性機能技術に係わる調査研究	→					
開発予算(百万円)	会計・勘定	H18fy	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	総計
	一般会計	1184	742	570	1021	304	3821
	特別会計	—	—	—	—	—	—
	総予算額	1184	742	570	1021	304	3821
開発体制	経済産業省原課	商務情報政策局 情報通信機器課					

	プロジェクトリーダー	安藤功兒 (独立行政法人 産業技術総合研究所 フェロー)
	委託先(*委託先が管理法人の場合は参加企業数も記載)	株式会社東芝 日本電気株式会社 独立行政法人産業技術総合研究所 国立大学法人東北大学 国立大学法人大阪大学 国立大学法人京都大学 財団法人新機能素子研究開発協会 富士通株式会社(~平成20年)
情勢変化への対応	<p><u>(1) 実施計画の前倒し(前倒し加速) (平成18年9月~12月)</u> 当初計画では、各研究開発テーマにおける技術開発のマイルストーンを時系列に設定しており、確実性の高い計画としていた。一方、スピントロニクス技術分野においては、開発競争の進展が早く、他研究グループに先行して研究開発を推進するためには、同時に複数の研究開発課題に取り組み、開発効率を高めるべきであると判断された。これにより平成19年度に計画されていた設備導入を含む研究開発内容を前倒して実施し、TMR材料の開発と共に並行して、TMR素子構造となる積層構造の検討を進めた。また、新ストレージ・メモリデバイス設計技術においても、素子の細線化を前倒して早期に着手した。 対象とした研究開発項目： <u>①スピンRAM基盤技術(1)低電力磁化反転TMR素子技術</u> <u>②スピン新機能素子設計技術(1)新ストレージ・メモリデバイス設計技術</u></p> <p><u>(2) 実施内容追加(研究加速資金投入) (平成19年11月及び平成20年2月)</u> <u>実施計画の前倒し(研究加速資金投入、補正予算) (平成20年11月及び平成21年9月)</u> 平成19年春から夏にかけて、RAMを最終目的としたTMR素子開発が相次いで明らかになり、また、平成20年に入り、韓国の半導体メモリーメーカーがスピンRAM開発開始を正式に発表した。スピン注入型MRAMの開発において、世界的な競争が激化したため、手遅れにならないよう、加速資金を投入し、スピンRAM実用化時の基盤技術である特性ばらつき低減に関する研究開発を強力に推進した。 対象とした研究開発項目： <u>①スピンRAM基盤技術(1)低電力磁化反転TMR素子技術</u> <u>②スピン新機能素子設計技術(1)新ストレージ・メモリデバイス設計技術</u></p>	
中間評価結果への対応	<p><u>①スピンRAM基盤技術開発(1):</u>「スピンRAM基盤技術については、めざましい成果を挙げているが、外国勢の激しい追い上げが始まっているので、資金を追加するなど思い切った研究開発の加速を図るべきである。」という指摘に対し、積極的な資金配分を実施した。 <u>②スピン新機能素子設計技術(1)新ストレージデバイス設計技術:</u>「磁壁応用デバイスに関しては、不揮発デバイスとしての基本特性の評価結果にしたがって研究開発方針を柔軟に見直すべきである。」という指摘に対し、新メモリデバイス設計技術については、実用化を目指した研究開発フェーズへ移行し、新ストレージデバイス設計技術については、平成20年度をもって終了することとした。 <u>②スピン新機能素子設計技術(2)不揮発性スピノ光機能素子設計技術:</u>「光機能素子は、基礎研究段階にとどまっており、十分な成果を期待できないので、今後の進め方についての検討が必要である。」という指摘に対し、平成20年度末で中止とした。</p>	
評価に関する事項	事前評価	平成17年度実施(担当部:電子・情報技術開発部)
	中間評価	平成20年度 中間評価実施
	事後評価	平成23年度 事後評価実施

<p>III. 研究開発成果について</p>	<p>①スピンのRAM基盤技術(1)低電力磁化反転TMR素子技術 CMOS回路との整合をとった垂直磁化膜TMR素子において20μAの反転電流と200%超のTMR比を示し、また、30nsecというDRAM並みの高速動作において安定した書き込みおよび読み出し動作を示すことが分かり、DRAM並みの高速読み書きを安定して行うという目標を達成している。また、CMOS回路と整合を取った0.002μm²微細TMR素子を用いた64Mbitアレイを作製し、メモリとしての動作を実証しており、CMOS回路との整合をとった0.005μm²微細TMR素子集積アレイによるスピンのRAMの動作を実証するという目標をより微細なTMR素子を用いて十分に達成している。 本プロジェクトの最終目標を大幅に上回る達成度となっている。</p> <p>②スピンの新機能素子設計技術(1)新ストレージ・メモリデバイス設計技術(新メモリデバイス) 垂直磁化方式の導入と、これを実現するCo/Ni積層垂直磁化膜の開発と磁壁移動素子への適用により、1\times10⁷A/cm²台での低電流動作と、100m/sを超える磁壁の移動速度に相当する磁化反転を確認した。4キロビットの集積アレイを試作評価し、CMOS回路からの書き込み電流方向に対応した磁壁移動による情報書き込みを、MTJの抵抗変化として読み出すことでメモリ動作を確認した。さらに、16メガビットの集積アレイの試作評価を行い、回路動作を確認した。以上の結果、本プロジェクトの最終目標が達成された。 (新ストレージデバイス) NiFe強磁性金属細線を用いて数〜数百ナノ秒オーダーのスピンの偏極電流を用いた磁壁移動現象の評価を行い、スピンの偏極電流の電流密度やパルス幅と磁壁移動挙動との関係を明らかにすることが出来た。また段差形状による磁壁トラップポテンシャル構造を用いた評価を行い、磁気細線形状と磁壁トラップ現象との関係を見出す事が出来た。低電流密度で高速の磁壁移動を実現すると共に、複数磁壁の形成や同時移動の静的確認を行うとともに、細線上に形成したTMR再生素子において、磁壁移動検出に十分な出力が得られることを確認した。</p> <p>②スピンの新機能素子設計技術(2)不揮発性スピンの光機能素子設計技術 素子作製プロセス、情報読み出し技術、情報書き込み技術のいずれにおいても基本計画の目標を達成した。これにより、高速不揮発性光メモリの基本動作が確認できた。</p> <p>②スピンの新機能素子設計技術(3)スピンの能動素子設計技術(スピントルク方式スピントランジスタ設計技術) スピントルクダイオードにおける2端子微分負性抵抗の発見とこれを用いた室温における増幅作用の実証を行い。さらに、電流トルク型スピントランジスタの作製と増幅率の測定に基づいたその設計手法の確立を行った。さらに、磁界トルク型スピントランジスタを作製し、室温でファンアウト5を実証した。さらに、電圧トルク型のスピントランジスタについても検討を行った。最後にこれらの素子のスケール特性を評価しそれぞれのスケールにおける素子の優位性を明らかにした。以上の結果により、本研究課題の最終目標は完全に達成された。 (ハーフメタル電極方式スピントランジスタ設計技術) 目標とするTMR比1000%、および、トランジスタ素子において最大2920の非常に大きな電流On/Off比が得られた。このことで、計画当初の目標であった、ハーフメタル方式スピントランジスタが秘める潜在能力を明確化することができた。また、室温においても、磁気電流比は小さいが、大きな電流On/Off比が得られ、室温動作の可能性を示すことができた。</p> <table border="1" data-bbox="592 1664 1406 1809"> <tr> <td>投稿論文</td> <td>85件</td> </tr> <tr> <td>学会発表 (含技術講演)</td> <td>学会等招待講演 139件</td> </tr> <tr> <td>特許</td> <td>出願済: 202件(うち国際出願 125件)</td> </tr> </table>	投稿論文	85件	学会発表 (含技術講演)	学会等招待講演 139件	特許	出願済: 202件(うち国際出願 125件)
投稿論文	85件						
学会発表 (含技術講演)	学会等招待講演 139件						
特許	出願済: 202件(うち国際出願 125件)						
<p>IV. 実用化・事業化の見通しについて</p>	<p>(非公開情報) 非公開情報につき、公開版では記載しない。</p>						
<p>V. 基本計画に関する事項</p>	<table border="1"> <tr> <td>作成時期</td> <td>平成18年3月制定</td> </tr> </table>	作成時期	平成18年3月制定				
作成時期	平成18年3月制定						

変更履歴	<p>平成 20 年 7 月改訂（研究開発項目①「スピンRAM基盤技術」の最終目標と研究開発項目②「スピン新機能素子設計技術」(2) 不揮発性スピン光機能素子設計技術の中間目標ならびに最終目標」の記載を改訂)</p> <p>平成 21 年 3 月改訂（研究開発項目②「スピン新機能素子設計技術」(1) 新ストレージ・メモリデバイス設計技術の最終目標の記載を改訂)</p>
------	---

(IT イノベーションプログラム・ナノテク・部材イノベーションプログラム)
「スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト」基本計画

電子・情報技術開発部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

21 世紀の革新的技術として、情報通信、環境、エネルギー、医療等の広範な分野の基盤技術である材料技術を根底から変貌させる可能性を持つナノテクノロジー（物質の構造を超微細に制御することにより、機能・特性上の向上や新機能の発現を図る材料技術）が期待されている。なかでも、スピントロニクス技術（電子の電荷自由度のみならず、電子の自転＝「スピン」自由度をも利用する全く新しいエレクトロニクス技術）は、将来のエレクトロニクスの中核的な基盤技術として、また、我が国の産業競争力を維持するためにも、重要な技術である。本プロジェクトは、「IT イノベーションプログラム及びナノテク・部材イノベーションプログラム」の一環として実施する。

近年、強磁性体からなるナノ構造体中のスピン自由度を利用する新しいエレクトロニクス技術が急速な進歩を示している。本分野からは、すでに超高密度ハードディスクや数メガビット級の不揮発性磁気メモリ MRAM(Magnetoresistive Random Access Memory)などが市場に送り出されているが、現在のエレクトロニクスを覆す潜在能力を持つ新技術としても期待されている。そのため、今後の研究開発により、スピントロニクス技術は将来のエレクトロニクスの中核的な基盤技術に育っていく可能性が高い。なかでも、スピンの最大の特長である磁気ヒステリシス効果を用いる不揮発性機能には、期待が高く、超ギガビット級の究極の不揮発性メモリであるスピン RAM から、現行ハードディスクの限界を超える新ストレージデバイス、そして電子情報機器の革命的な超低消費電力化を可能とするスピントランジスタなどの多種多様なスピン不揮発性デバイスの実現が望まれている。このようなスピントロニクス技術に対する期待は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO 技術開発機

構」という。)が平成 16 年度に作成した「技術戦略マップ(技術ロードマップ)」でも複数の箇所で指摘されている。すなわち、ストレージ・メモリ分野において、スピン注入技術を用いた超ギガビット不揮発メモリや新ストレージデバイス、不揮発性ロジックの開発の重要性が指摘されている。また半導体分野においては、将来デバイスとしてスピントランジスタの重要性が指摘されている。幸いにして、このスピントロニクス技術分野においては、材料技術面を中心にわが国の研究機関が世界的な優位性を保っている。

本プロジェクトでは、スピントロニクス技術が秘める不揮発性機能をはじめとする情報通信分野における革新的諸機能を実現するための基盤技術の確立、並びに、実用化に向けたスピン不揮発性デバイス技術の研究開発を行う。具体的には、スピン制御技術、新材料の探索、デバイスの最適構造、およびナノ構造の作製技術等の基盤技術開発を基に、スピン RAM 及びスピン新機能素子の実現のための研究開発を行う。

本技術の確立により、我が国半導体産業の競争力強化、及び情報通信機器の低消費電力化に資する。

(2) 研究開発の目標

平成 22 年度までに、超高集積で高速な不揮発性メモリとして期待されるスピン RAM のための基盤技術を確立する。また、新ストレージ・メモリデバイス、不揮発性スピン光機能素子、スピン能動素子等の新しい動作原理によるスピン新機能素子の実現のための基盤技術を確立する。

(3) 研究開発内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

- ① スピン RAM 基盤技術
- ② スピン新機能素子設計技術

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDO 技術開発機構が、単独ないし複数の原則、本邦の企業、研究組合、公益法人等の研究機関(原則、国内に研究拠点を有していること。ただし、国外企業の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点からの国外企業との連携が必要な場合はこの限りではない。)から公募によって研究開発実施者を選定し、委託して実施する。

研究に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、NEDO 技術開発機構が委託先決定後に指名する研究開発責任者(プロジェクトリーダー)を置き、その下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。

(2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO 技術開発機構は、経済産業省及び研究開発責任者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。また、必要に応じて、NEDO 技術開発機構に設置する委員会及び技術検討会等、外部有識者の意見を運営管理に反映させる。

3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、平成 18 年度から平成 22 年度までの 5 年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDO 技術開発機構は、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成 20 年度、事後評価を平成 23 年度に実施する。また、中間評価の結果を踏まえて必要に応じてプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

5. その他の重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

① 成果の普及

本プロジェクトで開発される基盤技術に係る研究開発成果については、実施者は NEDO 技術開発機構と連携して、広く実用化の促進を図ることとする。

② 知的基盤整備事業又は標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備または標準化等との連携を図るため、データベースへのデータの提供、標準情報 (TR) 制度への提案等を積極的に行う。

③ 知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー・産業技術業務方法書」第 25 条の規定等に基づき、原則として、すべて受託先に帰属させることとする。

(2) 基本計画の変更

NEDO 技術開発機構は、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法 (平成 14 年法律第 145 号) 第 15 条第 1 項第 2 号に基づき実施する。

(4) その他

「IT イノベーションプログラム及びナノテク・部材イノベーションプログラム」で実施される他のプロジェクトと連携を図りつつ実施することとする。

6. 基本計画の改訂履歴

- (1)平成 18 年 3 月、制定。
- (2)平成 20 年 7 月、イノベーションプログラム基本計画の制定により、「1. (1) 研究開発の目的と5. (4)その他」の記載を改訂。
- (3)平成 21 年 3 月、研究開発の進捗状況ならびに中間評価の結果を受け、「(別紙)研究開発計画、研究開発項目①「スピンRAM基盤技術」の最終目標」と「(別紙)研究開発計画、研究開発項目②「スピン新機能素子設計技術」(2)不揮発性スピン光機能素子設計技術の中間目標ならびに最終目標」の記載を改訂。
- (4)平成 21 年 3 月、一部の委託先企業における実施体制変更に伴い基本計画を見直し、「(別紙)研究開発計画、研究開発項目②「スピン新機能素子設計技術」(1)新ストレージ・メモリデバイス設計技術の最終目標」の記載を改訂。

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目①「スピンRAM基盤技術」

1. 研究開発の必要性

大容量で高速な不揮発性メモリとして期待される磁気メモリ MRAM であるが、既存の磁界を用いる磁化反転情報書込方式のアーキテクチャは、スケーラビリティに大きな問題を抱えている。この問題の解決のためには、スピン注入磁化反転情報書込方式を用いる次世代アーキテクチャ(スピン RAM)に移行する必要があるが、その成否はスピン RAM の心臓部である TMR 素子の高性能化にかかっている。すなわち、高い TMR 比、適切な素子抵抗値、低い磁化反転電力、高速動作、安定した読み書き動作、長期にわたるデータ保持、多数の書き換え耐性など多くの要求条件を満たす低電力磁化反転 TMR 素子技術の開発が求められている。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 低電力磁化反転 TMR 素子技術

MgO をトンネル障壁とする TMR 素子を対象として、高 TMR 比発生機構の解明による高 TMR 比と最適素子抵抗値を併せ持つ素子の設計技術、スピン注入磁化反転機構の解明による高速低電力スピン注入磁化反転技術、薄膜構成・材料および素子形状の最適化による安定動作技術を実現することにより、ギガビット級スピン RAM の可能性を実証する。

3. 達成目標

(1) 低電力磁化反転 TMR 素子技術

中間目標： 500%のTMR比を有するTMR素子^(注)の抵抗値制御技術の開発、スピン注入磁化反転機構の解明による電流の低電流化を実現する。これらの技術を用いて、 $5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ の電流密度によるスピン注入磁化反転技術を実現する。

^(注)面内磁化TMR素子

最終目標： 200%以上のTMR比を有する垂直磁化TMR素子技術を開発する。

これを用いて、スピン注入磁化反転によりDRAM並みの高速読み書きを安定して行うことができるTMR素子技術を開発し、CMOS回路との整合をとった $0.005 \mu\text{m}^2$ 微細TMR素子集積アレイによるスピンRAMの動作を実証する。

研究開発項目②「スピン新機能素子設計技術」

1. 研究開発の必要性

これまで、GMR 素子、TMR 素子とその有用性を示してきたスピントロニクス技術には、さらに新しい革新的なデバイスを生み出すことが期待されている。最近になって、ノーマリー・オフ・コンピュータなど超低消費電力である情報通信機器の実現につながるスピントランジスタや新方式のストレージ・メモリデバイス、さらには不揮発性スピン光機能素子などの実現可能性も検討されるようになってきた。しかしながら、これらスピン新機能素子はいずれも従来技術の延長によっては実現不可能なものである。その実現には、新たな発想に基づくスピンと電子・光との間の相互作用に起因する種々のスピントロニクス現象の解明とその制御性に関する技術開発を通して、素子の設計技術を開拓することが必要である。

2. 具体的研究内容

(1) 新ストレージ・メモリデバイス設計技術

強磁性金属ナノ構造中の磁壁をスピン偏極電流で移動させる技術を開発するとともに、これらの技術を用いた新しいストレージ・メモリデバイス構造を提案し、既存デバイスに対するその優位性を明らかにする。

(2) 不揮発性スピン光機能素子設計技術

光導波路中に埋め込まれた強磁性金属ナノ構造のスピン情報を導波路光を用いて制御・利用する技術を開発するとともに、これらの技術を用いた不揮発性機能を有する光機能素子を提案し、既存デバイスに対するその優位性を明らかにする。

(3) スピン能動素子設計技術

強磁性金属ナノ構造を用いた三端子構造を対象として、スピン偏極注入電流により発生するスピントルクを利用した電力増幅技術、ならびに、ハーフメタル電極の高スピン偏極度を利用した電流スイッチ技術を開発するとともに、これらの技術を用いた不揮発性機能を有するトランジスタ構造(スピントランジスタ)を提案し、不揮発性能動素子としての優位性を明らかにする。

3. 達成目標

(1) 新ストレージ・メモリデバイス設計技術

中間目標：強磁性金属細線を対象に、スピン偏極電流による磁壁移動現象のナノ秒領域ダイナミクスを明らかにする。また、この現象を利用した新ストレージデバイスおよび新メモリデバイスの可能性と課題を明らかにするために、それぞれ、TMR効果を用いた読み取り部と組み合わせた素子における複数磁壁の一斉移動の確認と、メモリに適したセル構造における単一磁壁の移動と安定性の検討ならびにメモリへの情報書込・読取動作の確認を行う。

最終目標：単一磁壁で100m/sの移動速度を低電流で実現する技術を開発するとともに、集積アレイによる新機能メモリの動作の実証を行う。

新ストレージデバイスについては、研究開発体制の変更に伴い基本計画の見直しを行った結果、当該研究開発は平成20年度をもって終了することとした。

(2) 不揮発性スピン光機能素子設計技術

最終目標：強磁性金属ナノ構造を含む光導波路における光・スピン相互作用を用いたスピン情報の制御技術を開発し、これを用いた高速不揮発性光メモリの基本動作を確認し課題を明らかにする。

なお、光機能素子の実用化に際しては書き込み電流値の低減が必須であり、基礎的な研究開発が必要と判断されたため、NEDO技術開発機構の事業としては平成20年度末までの成果をもって終了する。これに伴い、平成18年3月に定めた中間目標を最終目標に変更し、同じく平成18年3月に定めた最終目標「10ps幅の単一光パルスの読み書きが可能な不揮発性光メモリ機能を実証する」は削除する。

(3) スピン能動素子設計技術

中間目標：スピン注入によるスピントルクダイオード効果を利用する新增幅素子を提案・試作し、その基本動作を確認し課題を明らかにする。また1000%以上のTMR比に相当する高スピン偏極ハーフメタル材料を実

現するとともに、これを用いたスイッチング機能を持つ三端子構造を提案・試作し、その基本動作を確認し課題を明らかにする。

最終目標：不揮発性情報記憶機能と増幅・スイッチング機能を併せ持つスピントランジスタの実用可能性を実証するために、スピントルクを用いたスピントランジスタにおいては室温において2以上のファンアウトの実現、ハーフメタルを用いたスピントランジスタにおいては2Kにおいて1000以上の磁化による電流On/Off比の実現とその室温動作のための条件の明確化を行う。

ITイノベーションプログラム基本計画

1. 目的

我が国が目指す高度情報通信ネットワーク社会の構築に向け、経済成長戦略大綱、IT新改革戦略、科学技術基本計画及び技術戦略マップ等に基づき、情報化の進展に伴うエネルギー消費量の増大等の課題にも考慮しつつ、その基盤となる情報通信機器・デバイス等の情報通信技術を開発し、実社会への利用を促進する。また、情報システム・ソフトウェアについて品質、信頼性及び生産性の向上を推進し、組込みソフトウェア産業強化、オープンソースソフトウェアを安心して活用するための環境整備、独創的な人材の発掘等、我が国産業競争力強化のための必要な基盤整備を実施することによって、ITの利活用の深化・拡大を図り、より豊かな国民生活を実現するとともに、我が国の経済活力の向上を図ることを目的とする。

2. 政策的位置付け

- 「経済成長戦略大綱」（2006年7月財政・経済一体改革会議。2007年6月改訂・経済財政諮問会議報告、2008年6月改訂・経済財政諮問会議報告）

IT革新による競争力強化、IT革新を支える産業・基盤の強化に必要な研究開発の推進に対応

- 「第3期科学技術基本計画」（2006年3月閣議決定）

国家的・社会的課題に対応した研究開発の重点推進4分野である情報通信分野、分野別推進戦略（2006年3月総合科学技術会議）における重点分野である情報通信分野に位置づけられるもの。

- 「IT新改革戦略」（2006年1月高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部）
次世代のIT社会の基礎となる研究開発の推進等に対応。「ITによる地域活性化等緊急プログラム」（2008年2月）、「IT政策ロードマップ」（2008年6月）、「重点計画ー2008（2008年8月）」等を策定。

3. 達成目標

- (1) 情報経済社会を形成する上で必要不可欠な基盤技術である情報通信機器・デバイス等に関しては、「革新的な技術の確立」と「その開発成果の普及促進」を図る。

【目標】

- ・情報通信機器・デバイス産業の付加価値額を、2020年度において、2008年度比で、約50%増加させる。
- ・半導体の微細化に係る革新的基盤技術の開発（テクノロジーノード45nm以細）
- ・革新的な大型ディスプレイ技術の開発（消費電力を現状機器と比較して約50%以下）

・革新的なネットワーク機器技術の開発（消費電力を現状機器と比較して60%以下）

(2) 経済社会システムの信頼性確保に大きく寄与する情報システム・ソフトウェアに関しては、品質、信頼性及び生産性の向上や産学官の開発リソースの連携強化により、「人材育成」と「ソフトウェア工学の開発」等を積極的に推進する。

【目標】

・情報サービス・ソフトウェア産業の付加価値額を、2015年度において、2004年度比で、約25%増加させる。

・組み込みシステム等の不具合発生率（2011年度までに2006年度比50%減）

4. 研究開発内容

[プロジェクト]

I. ITコア技術の革新

[i] 世界最先端デバイスの先導開発

(中略)

(6) スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト（運営費交付金）（再掲）

①概要

将来のエレクトロニクスにおいて中核的な基盤技術となり得るスピントロニクス技術（電子の電荷ではなく、電子の自転＝「スピン」を利用する全く新しいエレクトロニクス技術）を確立するため、強磁性体ナノ構造体におけるスピンの制御・利用基盤技術を開発し、我が国が世界に誇るシーズ技術を核として、産学官の共同研究体制を構築し、将来の中核的エレクトロニクス技術における我が国の優位性の確保を図る。

②技術目標及び達成時期

2010年度までに、超高集積で高速な不揮発性メモリとして期待されるスピンメモリのための基盤技術を確立する。また、新ストレージ・メモリデバイス、不揮発性スピン光機能素子、スピン能動素子等の新しい動作原理によるスピン新機能素子の実現のための基盤技術を確立する。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

(中略)

6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

7. 改訂履歴

- (1) 平成12年12月28日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画を制定。
- (2) 平成14年2月28日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画を制定。情報通信基盤高度化プログラム基本計画（平成12・12・27工総第12号）は廃止。
- (3) 平成15年1月31日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画を制定。情報通信基盤高度化プログラム基本計画（平成14・02・25産局第17号）及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成14・02・25産局第18号）は、廃止。
- (4) 平成15年3月10日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画、次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画、次世代ディスプレイ技術開発プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。情報通信基盤高度化プログラム基本計画（平成15・01・29産局第1号）及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成15・01・29産局第2号）は、廃止。
なお、情報通信機器高度化プログラム基本計画（平成15・01・29産局第1号）及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成15・01・29産局第2号）の一部は、次世代ディスプレイ技術開発プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画へ移行。
- (5) 平成16年2月3日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。情報通信機器高度化プログラム基本計画（平成15・03・07産局第14号）、次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成15・03・07産局第7号）、次世代ディスプレイ技術開発プログラム基本計画（平成15・03・07産局第4号）は、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画に統合することとし、廃止。また、情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成15・03・07産局第14号）は、廃止。
- (6) 平成17年3月25日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画を制定。高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画（平成16・02・03産局第1号）は廃止。また、平成17年3月31日付け、情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成16・02・03産局第2号）は廃止。
- (7) 平成18年3月31日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画（平成17・03・25産局第7号）及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成17・03・25産局第6号）は廃止。
- (8) 平成19年4月2日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画及び情

報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画（平成18・03・31産局第4号）及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成18・03・31産局第5号）は廃止。

- (9) 平成20年4月1日付け、ITイノベーションプログラム基本計画を制定。情報通信機器高度化・デバイス基盤プログラム基本計画（平成19・03・12産局第7号）及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成19・03・12産局第8号）は、本プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (9) 平成21年4月1日付け、ITイノベーションプログラム基本計画を制定。ITイノベーションプログラム基本計画（平成20・03・27産局第1号）は、廃止。

ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画

1. 目的

このプログラムは、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、あらゆる分野に対して高度化あるいは不連続な革新（ジャンプアップ）をもたらすナノテクノロジー及び革新的部材技術を確立するとともに、その実用化や市場化を促進することで、我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服等を可能とすることを目的とする。

2. 政策的位置付け

○第 3 期科学技術基本計画（2006 年 3 月閣議決定）

- ・「ナノテクノロジー・材料分野」は、特に重点的に研究開発を推進すべき分野（重点推進 4 分野）の一つに指定、優先的に資源配分することとされている。
- ・我が国の材料技術は、基礎研究から応用研究、素材、部材の実用化に至るまでの全ての段階において世界のトップレベルを堅持しており、我が国製造業の国際競争力の源泉となっている。

○「イノベーション 25」（2007 年 6 月閣議決定）

- ・「ナノテクノロジー・材料分野」は、中長期的に取り組むべき課題として、「1. 生涯健康な社会形成」、「2. 安全・安心な社会形成」、「4. 世界的課題解決に貢献する社会形成」、及び「5. 世界に開かれた社会形成」の分野に位置付けられている。
- ・所要の措置を講じていくことが必要である事項として以下の点が指摘されている。
 - ・学際領域・融合領域における教育等人材育成、拠点形成
 - ・社会受容を促すための積極的な取り組み
 - ・知的財産確保のための戦略的な取り組み

○「経済成長戦略大綱」（2006 年 7 月財政・経済一体改革会議）

- ・「我が国の国際競争力の強化」の取り組みとして、高度な部品・材料産業やモノ作り中小企業の強化が掲げられている。
- ・「技術戦略マップ」の活用等により、ユーザー企業との垂直連携による研究開発を推進することを通して、我が国経済発展の基盤である高品質、高性能な部品・材料産業の強化を図ることが今後の取組として記載されている。

○「新産業創造戦略 2005」（2005 年 6 月経済産業省）

- ・部材分野は、新産業群の創出を支える共通基盤技術として位置づけられている。
- ・「高度部材・基盤産業」の集積を形成していることが、「ものづくり」に不可欠な基盤技術のネットワーク化を通じた現場レベルでの迅速かつ高度な摺り合わせを可能としており、我が国「ものづくり」の強みの源泉となっていると記載されている。

3. 達成目標

- ・世界に先駆けて、ナノテクノロジーを活用した不連続な技術革新を実現する。

- ・我が国部材産業の強みを更に強化することで、他国の追随を許さない競争優位を確保するとともに部材産業の付加価値の増大を図る。
- ・ナノテクノロジーや高機能部材の革新を先導することで、これら部材を活用した情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどの幅広い産業の付加価値の増大を図る。
- ・希少金属などの資源制約の打破、圧倒的な省エネルギー社会の実現など、解決困難な社会的課題の克服を目指す。

4. 研究開発内容

[プロジェクト]

I. ナノテクノロジーの加速化領域

ナノテクノロジーを活用した不連続な技術革新を加速・促進する。

(中略)

II. 情報通信領域

ナノテクノロジーや革新的部材開発技術を駆使して既存技術の微細化の壁を突破し、電子デバイス・光デバイスで世界をリードするとともに、高度化された製造技術の開発を行う。

(中略)

(2) スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト (運営費交付金)

①概要

将来のエレクトロニクスにおいて中核的な基盤技術となり得るスピントロニクス技術(電子の電荷ではなく、電子の自転＝「スピン」を利用する全く新しいエレクトロニクス技術)を確立するため、強磁性体ナノ構造体におけるスピンの制御・利用基盤技術を開発し、我が国が世界に誇るシーズ技術を核として、産学官の共同研究体制を構築し、将来の中核的エレクトロニクス技術における我が国の優位性の確保を図る。

②技術目標及び達成時期

2010年度までに、超高集積で高速な不揮発性メモリとして期待されるスピンメモリのための基盤技術を確立する。また、新ストレージ・メモリデバイス、不揮発性スピン光機能素子、スピン能動素子等の新しい動作原理によるスピン新機能素子の実現のための基盤技術を確立する。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

(中略)

6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業に（運営費交付金）と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

7. 改訂履歴

- (1) 平成12年12月28日付け制定。
- (2) 平成14年2月28日付け制定。材料ナノテクノロジープログラム基本計画（平成12・12・27工総第16号）は、廃止。
- (3) 平成15年3月10日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成14・02・25産局第8号）は、廃止。
- (4) 平成16年2月3日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成15・03・07産局第1号）は、廃止。
- (5) 平成17年3月31日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成16・02・03産局第7号）は、廃止。
- (6) 平成18年3月31日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成17・03・25産局第4号）は、廃止。
- (7) 平成19年4月2日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成18・03・31産局第13号）は、廃止。
- (8) 平成14年2月28日付け制定。
- (9) 平成15年3月10日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成14・02・25産局第9号）は、廃止。
- (10) 平成16年3月7日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成15・03・07産局第5号）は、廃止。
- (11) 平成17年3月31日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成16・03・07産局第5号）は、廃止。
- (12) 平成18年3月31日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成17・03・25産局第3号）は、廃止。
- (13) 平成19年4月2日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成18・03・31産局第14号）は、廃止。
- (14) 平成20年4月1日付け、ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成19・03・20産局第1号）および革新的部材プログラム基本計画（平成19・03・19産局第4号）は、本イノベーションプログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (15) 平成21年4月1日付け制定。ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画（平成20・03・24産局第1号）は、廃止。

プロジェクト用語集

(アルファベット順、あいうえお順)

用語	説明
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor: p型半導体チャネルとn型半導体チャネルのMOSFETを、相補的に接続した集積回路
dB	デシベル。電力や光の信号強度を示す無次元の単位。基準量に対する比率として表す。
DRAM	Dynamic Random Access Memory: キャパシターとトランジスタを用いてデータを記憶するRAM。1秒間に数回程度の記憶保持動作(リフレッシュ動作)が必要。
Endurance	書き換え耐性。DRAMやSRAMのようなワークメモリでは、 10^{15} 回以上が必要とされる。
F ²	半導体リソグラフィ技術の最小加工寸法(F)を基準としたデバイス面積の表記方法。
GMR効果	giant magnetoresistive effect: 巨大磁気抵抗効果。スピン状態のちがいにより抵抗値が大きく変化する。
Mach-Zehnder 干渉計	2分割した光ビームを異なる光路長伝播させた後に合波させる原理の干渉計。
MRAM	Magnetic Force Microscopy: 磁気力顕微鏡。走査型プローブ顕微鏡のひとつで、カンチレバーにパーマロイやコバルト系の磁性材料を用いる。
MgO	酸化マグネシウム。TMR素子のトンネル障壁として用いる。
MRAM	Magnetoresistive Random Access Memory: スピン状態(向き)を利用した記憶素子であり、スピン状態の制御(書き込み)方法により、磁界書き込み型、スピン注入型がある。
RAM	Random Access Memory: 随時書き込み読み出しできるコンピュータの主記憶装置。
S/N 比	Signal to noise ratio: 信号と雑音の比率
SRAM	Static Random Access Memory: フリップフロップ等の順序回路を用いてデータを記憶するRAM。DRAMのようなリフレッシュ動作は必要ない。
TMR 効果	Tunnel Magnetoresistive effect: トンネル磁気抵抗効果。電子が量子力学的なトンネル現象により流れるトンネル素子において、トンネル素子の抵抗値が磁化の方向により異なる効果。
Waveguide	信号を伝搬させる導波路。電磁波を伝搬させる場合の導波管、光通信に利用される光ファイバーなど。
インスタント・オン・コンピュータ	電源を入れてすぐに使用可能になるコンピュータ。高速大容量不揮発性メモリのキラーアプリケーションの一つとされる。
書き込み電流磁界のシーケンシャル印加	細線中に複数の磁壁を生成するために、磁界をある手順に従って印加すること。
磁化固定層	TMR素子において磁化方向(スピンの方向)が固定されており、変化しない(させない)層。参照層ともよばれる。

磁化反転	磁性体における磁化状態が、何らかの力で反転すること。
磁化反転シミュレーション	磁化反転現象を動力学的に解析するシミュレーション。
磁化反転ダイナミクス	スピンの働く力と、その運動の関係を扱う動力学。スピン状態が反転するの時間的变化などを解析する。
磁壁	磁性体中で磁化方向が異なる領域の境界
磁壁移動	磁性体中の磁区を隔てる磁壁が移動すること。
磁壁移動ストレージデバイス	複数の磁区(磁壁)を並べ、外部から磁区(磁壁)の位置を制御することにより大容量の情報を蓄えるメモリ(ストレージメモリ)を構成するもの。本事業では、微細な細線上に複数の磁区(磁壁)を書き込み、スピン偏極電流によりその位置を制御する。
磁壁移動の閾値磁界	外部磁界により、磁性材料中の局所安定点にある磁壁を移動させる際に必要な最小磁界。
磁壁移動メモリデバイス	外部から磁区(磁壁)の位置を制御することによりメモリ素子となる部分のスピン状態(向き)を変え、論理素子のワークメモリを構成するもの。本事業では、スピン偏極電流によりその位置を制御する。
垂直磁化	磁化方向が磁性薄膜の膜面に垂直になること。
スピン歳差運動	磁性体中のスピンの方向が、有効磁場の周りを独楽のように回転すること。
スピン注入	スピン状態(方向)の揃った電子による電流を流すこと。
スピン注入磁化反転	一方向に磁化した磁性体中に、スピン偏極した電子を注入することにより、磁性体中の磁化が逆方向に反転すること。スピン偏極した電子の注入量が多くなるに従い、スピン歳差運動によるスピンの傾きが大きくなり、ある値を超えると逆向きの方がエネルギー的に安定になるため、磁化の反転が起こる。
スピントルク	一方向に磁化した磁性体中に、スピン偏極した電子を注入することにより、磁性体中の磁化にかかる回転力。
スピントルクダイオード効果	スピントルクにより引き起こされるスピン歳差運動が、TMR素子を介して直流電圧として観測される効果。
スピン偏極電流	電子のスピンがある方向に揃った電流。
デピンニング磁界	ピンニングとは、磁気的な局所安定点に磁壁(あるいは磁束)が留まる状態を指す。外部磁界により、磁性材料中の局所安定点にある磁束(磁壁)を移動させる際に必要な最小磁界。
テラビット	メモリなどの容量を表す単位。テラは 10^{12} を表す接頭語。
トラップポテンシャル	磁性体中の磁気的な局所安定点の強さ。トラップポテンシャルが大きいと、磁束、あるいは磁壁が強く拘束されることを意味する。
トンネル障壁	(導線性材料/絶縁性材料/導電性材料)のような導電性材料を絶縁性材料で隔てた積層構造において、絶縁性材料を数ナノメートル程度以下に薄くすると、ふたつの導電性材料間に電流が流れるようになる(電子のトンネル現象)。この時の絶縁性材料をトンネル障壁と呼ぶ。
熱擾乱耐性	磁性記録ビットがナノサイズ化することにより、室温の熱エネルギーの擾乱により、記録状態を保持することが困難になる。熱

	エネルギー擾乱に対抗して、記録を保持する能力。
ノーマリー・オフ・コンピュータ	使用していない瞬間瞬間に電源を切ることにより、見かけ上動いているが、殆どの間電源が入っていないコンピュータ。不揮発性機能を応用するコンピュータの究極の形態。
ハーフメタル	スピン状態(スピンの向き)の違いにより、金属的な振る舞いをする電子と半導体(あるいは絶縁体)的な振る舞いをする電子が共存する物質。理想的な完全スピン偏極度を持つ。
パーマロイ	Fe と Ni の合金で、透磁率が大きな合金。
反転電流	スピン注入磁化反転がおきる電流値
光導波路	光信号を低損失で伝搬することができる構造体。
光バッファメモリ	光通信の伝搬信号を、一次的に蓄積し必要なときに取り出すメモリ。
光メモリ	光通信における情報を蓄えるメモリ
ファンアウト	トランジスタを使ったスイッチング素子(回路)における後段素子(回路)の駆動能力。スイッチング素子において、入力に対して2倍の出力が得られれば、後段で2個の素子をスイッチすることができる(ファンアウトとしては2)。増幅素子における増幅度の指標のひとつ。
不揮発メモリ	電源を切っても情報が消えないメモリ。
ホイスラー合金	ホイスラーにより見いだされた合金で、大きなスピン分極率が得られ、現実的なハーフメタル材料として期待されている磁性材料。結晶構造および組成によりいくつかの候補が開発されている。
摩擦係数	スピン歳差運動が減衰する割合。減衰定数とも呼ばれる。
マルチドメイン	磁性体中のある領域に、複数の磁区(磁壁)が存在する状態。
面内磁化	磁化方向が磁性薄膜の膜面に平行になること。

I. 事業の位置付け・必要性について

1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性

1.1 スピントロニクス技術の革新性

スピントロニクス技術は、電子のスピン自由度を利用する新しいエレクトロニクス技術である。この技術では、電子のスピン状態を他の電子により制御、あるいは検出することが可能であり、特に強磁性材料の最大の特長である磁気ヒステリシス効果を活用して、以下のような不揮発性機能をもつデバイスが期待されている。

- ・ 高速性、ギガビットクラスの大容量性、高い書き換え耐性を同時に満たす究極の不揮発性メモリ(スピン RAM)
- ・ 現行ハードディスクの限界を超える大容量、かつ機械的な回転機構をもたない新ストレージデバイス
- ・ SRAM 並の高速動作が可能な不揮発性メモリ
- ・ 光・スピン相互作用を用いた高速、不揮発性光メモリ
- ・ 電源を切っても状態を保持する不揮発性スピントランジスタ

これら不揮発性機能を持つデバイスは、現在の CMOS－LSI 中心の情報通信機器を飛躍的に低消費電力化する可能性を秘めており、そのデバイスを実現するスピントロニクス技術は、21 世紀のエレクトロニクス分野、特に高度情報通信ネットワークを支える情報通信機器、機能部品における中核的・革新的技術となる可能性が高い。従ってスピントロニクス技術を用いた新規不揮発性デバイスのための基盤技術の確立は、我が国エレクトロニクス産業の優位性の確保と情報化社会の推進にとって大きな意義を持つものである。

一方、この分野は新しい技術開発領域であり、しかも革新的であるために、最適な磁性材料の開発、ナノスケールでの素子構造の開発、スピントロニクスデバイスのための製造プロセス技術開発、さらに磁気特性評価技術開発等、非常に広範囲かつ高度な技術開発が必要とされる。さらに、強磁性体からなるナノ構造体中のスピン挙動を説明する、物理現象の解明にまで踏み込んだ研究が必要となっている。すなわち非常に高度な技術開発を必要とし、現状では民間企業単独で行うにはリスクが大きい。

この技術の革新性については、世界各国でも認識するところであり、とりわけスピン RAM 開発の重要性に着目した米国、及び韓国では、公的資金を用いた技術開発を開始するなどグローバルな技術開発競争が激化している状況である。

1.2 事業の政策上の位置付け

スピントロニクス技術の中で重要な役割を果たすトンネル磁気抵抗素子 (Tunnel Magnetoresistive (TMR) 素子) は日本が世界に先駆けて開発した技術であり、この分野における日本の技術開発力は世界で首位にある。従って、この分野で日本は、世界最高のイノベーションセンターとして国際競争力のある新製品や、サービスを次々と生み出し、新しい価値を世界に発信することが可能である。また、スピントロニクス不揮発性機能の技術開発(本事業)は、半導体分野における理想的なメモリ(ユニバーサルメモリ)であるスピン RAM 開発、磁壁移動現象を利用した新ストレージデバイスおよび新メモリデバイス、スピンと光の相互作用を利用した不揮発性

スピン光機能素子、さらに情報通信社会にパラダイムシフトを起こす可能性のある不揮発性スピン能動素子の開発を対象とする。これらは市場からの要求に正面から取り組み、さらに加えて大きな技術革新を提供しようとするものである。これらのことより、本事業は、平成 18 年制定の経済成長戦略大綱の目的、

- ・ ユーザー企業との垂直連携による研究開発を推進することを通して、我が国経済発展の基盤である高品質、高性能な部品・材料産業群の強化を図る。

に合致するものである。また、科学技術基本計画の重点四分野において、「情報通信分野」、「ナノテクノロジー・材料分野」に該当する。

さらに、スピントロニクス技術は強磁性ナノ構造を利用しており、さらにその革新性のために様々な産業分野に波及効果を及ぼすと考えらる。このことより、経済産業省において平成 12 年に制定され、平成 20 年にイノベーションプログラム基本計画に統合されたナノテクノロジープログラム基本計画(平成 12 年に材料ナノテクノロジー基本計画として制定、平成 14 年よりナノテクノロジープログラム基本計画として制定)に定められた目的、

- ・ 情報通信、環境、エネルギー、医療等の様々な産業分野に革新的な進歩をもたらすナノテクノロジーの基盤技術を構築し、産業技術に展開を図ることで、産業競争力の更なる強化を図る。

に合致するものである。

また、スピントロニクス技術の特長である不揮発性機能は、情報通信機器・デバイスの画期的な低消費電力化を実現するものであり、経済産業省において平成 20 年に制定されたイノベーションプログラム基本計画の内、IT イノベーション基本計画の目的、

- ・ 情報化の進展に伴うエネルギー消費量の増大等の課題にも考慮しつつ、その基盤となる情報通信機器・デバイス等の情報通信技術を開発し、実社会への利用を促進する。

に合致する。

同じく、本事業で対象とする強磁性ナノ構造を利用した TMR 素子は、日本発の技術であり、また種々のエレクトロニクスデバイスに不揮発性を与え、将来のエレクトロニクス分野に不連続な革新をもたらさう技術である。このことより、上記イノベーションプログラム基本計画の内、ナノテク・部材イノベーション基本計画の目的、

- ・ 情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、あらゆる分野に対して高度化あるいは不連続な革新(ジャンプアップ)をもたらすナノテクノロジー及び革新的部材技術を確立するとともに、その実用化や市場化を促進することで、我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服等を可能とする

に合致するものである。

なお、スピントロニクス技術を用いたデバイスに関しては、NEDO が平成 16 年度に作成した「技術戦略マップ(技術ロードマップ)」のストレージ・メモリ分野および半導体分野においてその重要性が指摘されている。

1.3 NEDO が関与することの意義

以上述べたように、スピントロニクス不揮発性機能の技術開発(本事業)は、将来の情報通信分野における中核的・革新的技術であり、我が国エレクトロニクス産業の優位性の確保と情報化社会の推進にとって大きな意義を持つものである。また、経済産業省により定められた政策上のプログラムにも合致する。その一方で、非常に高度な技術開発を必要とし、現状では民間企業単独で行うにはリスクが大きい。このことから本事業は、国の関与の下、産学官の共同研究体制を構築して、開発を行っていくことが必要である。また米韓の開発状況から、イコールフットイングの観点からも国が推進すべき事業である。また本事業の中で、特に研究開発項目①「スピン RAM 基盤技術」は国内産業の競争力強化につながるスピン RAM 実用化に必須の技術開発であり、NEDO の中期目標である以下の点にも大きく寄与する内容である。

- ・ 高度な情報通信(IT)社会の実現
- ・ 我が国経済の牽引役としての産業発展の促進

これらのことより、本事業は NEDO 技術開発機構が関与すべき事業である。

1.4 実施の効果(費用対効果)

(1) 新市場創出効果

最先端の研究開発分野であるスピントロニクス技術からは、高速性、大容量性、高い書き換え耐性を同時に満たす不揮発性メモリ(スピン RAM)や、電源を切っても状態を保持するスピントランジスタ等、従来にない革新的デバイスの実現が期待される。ここではスピントロニクスによる市場創出効果を、最も早く実用化が期待されるスピン RAM の市場規模として推測する。

スピン RAM 実用化時の最も可能性の高い応用分野は、低消費電力が要求される携帯電話、スマートフォン、タブレット端末等のモバイル端末用の不揮発性メモリと想定される。モバイル端末用 DRAM は、2022 年に 50%が置換されると仮定すると、約 4000 億円の市場が期待される。さらに、パソコン用 DRAM 市場1兆円の 50%が置換されると仮定すると、モバイル端末用 DRAM と合わせて約 9000 億円の市場が期待される。

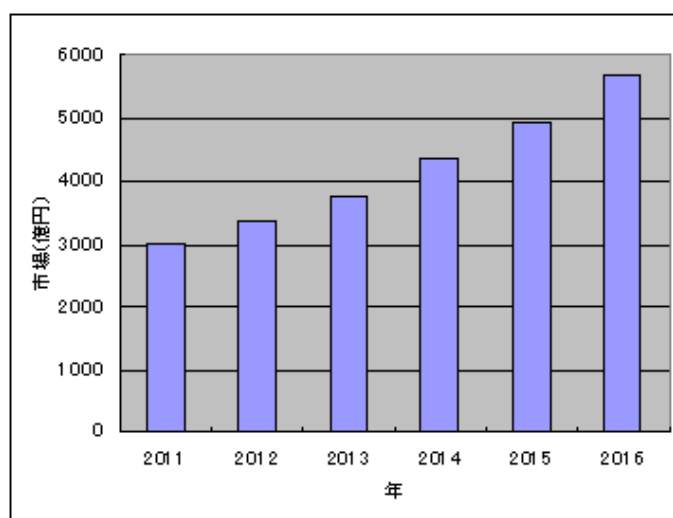


図 I -1 モバイル端末向け DRAM の市場

(2) 省エネルギー効果

スピントロニクス技術が可能にする不揮発性機能は、大きな省エネ効果を秘めている。現在のコンピュータでは、DRAM、SRAM、CPU、そしてインターフェース(ディスプレイなど)が不揮発性機能を持たない。よって電源を遮断したときに情報が失われてしまうため、再度電源を入れて使用可能となるためには数分間オーダーの時間がかかってしまう。そのために、実際には、コンピュータは常に電源を入れて使われるのが通常である。コンピュータの情報処理能力自身はきわめて高速であることを考えると、本来目的とする作業のために実際コンピュータが動作しなければならない時間は、全電力投入時間の数百分の1から数千分の1程度のほんの一部に過ぎないことを意味している。コンピュータの設置台数は膨大であり、テレビなども実際にはコンピュータ化されていく最近の技術動向を考慮すると、不揮発性機能を利用して一部だけでも無駄な電力を削減することの省エネ効果は膨大になると見込まれる。

不揮発性機能によるコンピュータの省エネ化は、大きく2段階で進むものと想定される。第一段階は、DRAMの不揮発化が可能にする、インスタント・オン・コンピュータである。電源投入時にHDDからDRAMへのデータコピーが不要になるため、起動時間が1〜2秒程度以下となり、電力をまめに切ることに対する心理的抵抗が大幅に減少する。これに加えて、SRAM、CPU、インターフェースが不揮発化された場合には、1秒間に1000回以上の電源 On/Off が可能になる。人間の応答時間は30ms程度であるので、ユーザーには動いているように見えても、実は殆ど電源が切れている超省エネコンピュータ(ノーマリー・オフ・コンピュータ)が実現される。この対比でいえば、現在のコンピュータは、ノーマリ・オン・コンピュータである。

インスタント・オン・コンピュータの実現には、本プロジェクトの「①スピン RAM 基盤技術」で開発中のスピン RAM が必要であり、2013年頃からは市場への投入が開始されるものと考えられる。この時点では、利便性の向上が製品の最大訴求点ではあるが、膨大な数のPCやTVを考えるとその省エネ効果も大きい。

ノーマリー・オフ・コンピュータの実現には、SRAM、CPU など本プロジェクトの「②スピン新機能素子設計技術」で開発中の技術に加え、ディスプレイの不揮発化なども必要になるが、順調に行けば、2020年ごろには実現可能となると見込まれる。

2. 事業の背景・目的・位置づけ

2.1 事業の背景

(1) 産業的基盤

現在モバイル情報機器の発展に伴って、不揮発性メモリへの性能向上、すなわち高速の書き込み性能、実用的に無限の書き換え回数、メモリ容量の大容量化等に対する要求が急速に高まっている。これら性能要求をすべて満たす、次世代不揮発性メモリの最有力候補がスピントロニクス技術を用いたスピン RAM である(例えば不揮発性メモリとして比較されるフラッシュメモリ、強誘電メモリ(FeRAM)は書き換え可能回数で市場要求を満たさない)。また、スピントロニクス技術を用いた不揮発性トランジスタの開発により、電源を切ってもその情報を保持し続ける革新的なプロセッサの実現が期待でき、この技術は半導体プロセッサ、ロジック市場のパラダイムを変えるような潜在力を持つと考えられる。

このようにスピントロニクス技術は将来のエレクトロニクスの中核的な基盤技術として、その波及効果は極めて大きい。このスピントロニクス技術に対する期待の大きさは、総合科学技術会議(平成 20 年 5 月 19 日)の「革新的技術戦略」において、革新的技術に選定されたことから窺える。

(2) 技術的基盤

スピントロニクス技術において大きな意味を持つ発見は以下である。

1. 巨大磁気抵抗効果(GMR effect: Giant Magnetoresistive effect)の発見(1986: Gruenberg(独ユーリッヒ研究所)、Fert(Paris-Sud 大学))
2. トンネル磁気抵抗効果(TMR effect: Tunnel Magnetoresistive effect)の発見(1994: 宮崎照宣(東北大学))
3. 実用的 TMR 素子開発(2004: アネルバ・湯浅新治(産業技術総合研究所))

これらにより、GMR 効果や TMR 効果を利用した磁気ヘッドが開発され、ハードディスクの飛躍的な大容量化が進展し、大きな経済的効果を上げた。また、実用的な TMR 素子を利用した数メガビット級の不揮発性磁気メモリ(MRAM: Magnetoresistive Random Access Memory)も市場に送り出され、スピントロニクス技術の大きな可能性が認識されるようになった。このうち、GMR 効果を発見した Gruenberg と Fert は 2008 年のノーベル物理学賞を受賞したことから、スピントロニクス技術の重要性がわかる。

一方、TMR 効果とその実用的な素子開発を行ったのは、東北大学の宮崎教授と産総研の研究開発グループであり、この点で日本のスピントロニクス技術は世界トップクラスと言える。また歴史的に見て日本の磁性材料の開発力は非常に高く、その実用化においても多くの成功を収めている。これらのことから、スピントロニクス技術は日本の実力を発揮できる分野であり、また日本の産業競争力を高める絶好の分野である。

(3) スピントロニクス技術開発の世界動向

平成 20 年から平成 21 年初頭にかけて、本プロジェクトが垂直磁化型 TMR 素子を用いて $0.3 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ という低電流密度での磁化反転を実現し、さらに 64Mbit の垂直磁化型スピン RAM を試作して、ギガビット(Gbit)級スピン RAM 実現への可能性を具体的に示して以来(ISSCC-2010)、スピン RAM への期待が一挙に高まり、世界的な大手ファブドリー企業の参入や大手企業同士の提携、大手半導体企業やベンチャー企業からの研究開発計画の発表等が相次いでいる。

垂直磁化方式を使った Gbit 級の大容量スピン RAM メモリ技術に具体的な目処をつけた企業は現在のところまだ東芝一社だけであり、今のところ 1、2 年の優位性を保っていると思われるが、Samsung(韓)や Ever Spin(米)、Hynix(韓)、ベンチャー企業の Grandis(米)、日立等は間もなく追いついて来る情勢にある。Ever Spin と Grandis が 65 nm 技術で 1 Gbit のスピン RAM に目処をつけたとの発表をしており(福田昭のセミコン業界最前線 2010-09-14)、また、日立も 2015 年には 1Gbit のスピン RAM を製品化する計画を発表している(EE-Times 2010-10-06)。2005 年から 2010 年までの学術文献に発表されたスピン RAM におけるスピン注入磁化反転電流の推移を図 I -2 に示す。

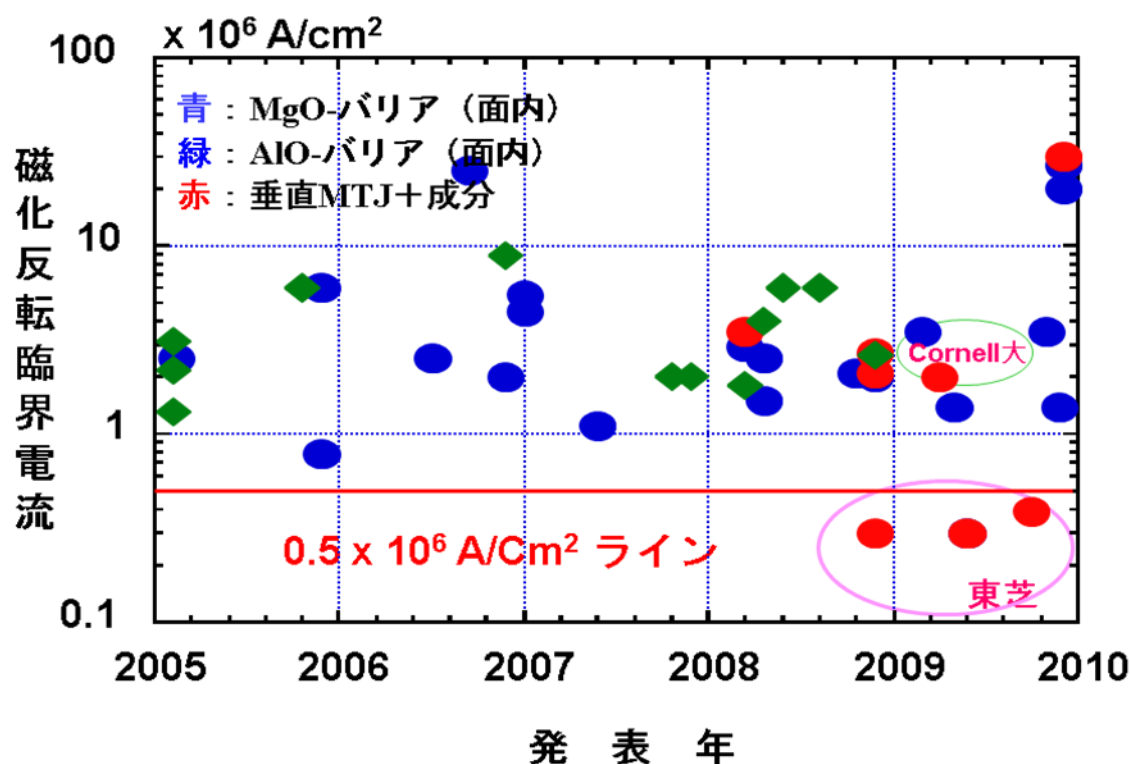


図 I - 2 スピン RAM の磁化反転臨界電流の推移

2.2 事業の目的

本プロジェクトでは、スピントロニクス技術による不揮発性機能を利用し、革新的諸機能を実現するための基盤技術の確立、並びに、実用化に向けたデバイス技術の研究開発を行う。具体的には、スピン制御技術、新材料の探索、デバイスの最適構造、スピン RAM 及びスピン新機能素子の実現のための研究開発を行う。本技術の確立により、我が国半導体産業の競争力強化、及び情報通信機器の低消費電力化に資する。

この目的のため、本事業ではギガビットクラスのスピン RAM 実現のための TMR 素子技術の開発に取り組み、これを実用化に向けた基盤技術の研究開発テーマとして位置付ける。この他、この分野における先進的な取り組みとしてスピン新機能素子(磁壁移動型ストレージ・メモリ、スピントランジスタ、スピン光素子など)に関する取り組みを行う。

このうちスピン RAM に関連する技術開発として、平成 15 年度から 17 年度にかけて「不揮発性磁気メモリ MRAM 実用化技術の開発」(助成事業)を実施した。このプロジェクトでは、磁界書き込み型で 16 メガビットの MRAM 動作の実証に成功している。しかしながら磁界書き込み型の MRAM は、素子を微細化にすると書き込み電流を増加させなくてはならないという本質的な課題がある。本プロジェクトでは、この課題を解決するスピン注入磁化反転方式を用いたスピン RAM により、ギガビット級の大容量不揮発性メモリを目的とした基盤技術の開発を行う。また、磁壁移動型メモリデバイスについては、SRAM と同等のサイズおよび性能を持ち、かつ不揮発性をもつワークメモリとしての応用を目指す。また、磁壁移動ストレージデバイスについては、回転機構のないストレージデバイスとして HDD と同等の大容量ストレージデバイスを目指す。

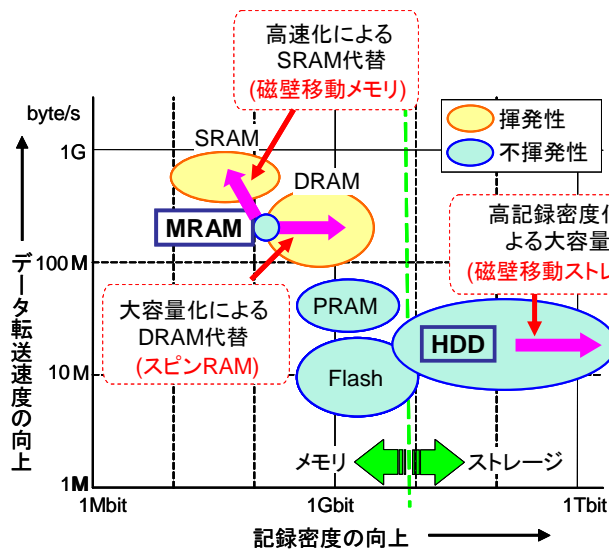


図 I - 3 スピン RAM、磁壁移動
ストレージ・メモリデバイスの実用化
を目指す領域

2.3 事業の必要性と意義

スピントロニクス技術分野からは、すでに超高密度ハードディスクや数メガビット級の不揮発性磁気メモリ MRAM(Magneto-resistive Random Access Memory)などが市場に送り出されているが、現在のエレクトロニクスを覆す潜在能力を持つ新技術としても期待されている。そのため、今後の研究開発により、スピントロニクス技術は将来のエレクトロニクスの中核的な基盤技術に育っていく可能性が高い。

なかでも、スピンの最大の特長である磁気ヒステリシス効果を用いる不揮発性機能には期待が高く、超ギガビット級の究極の不揮発性メモリであるスピン RAM から、現行ハードディスクの限界を超える新ストレージデバイス、そして電子情報機器の革命的な超低消費電力化を可能とするスピントランジスタなどの多種多様なスピン不揮発性デバイスの実現が望まれている。例えば、ストレージ・メモリ分野において、スピン注入技術を用いた超ギガビット不揮発メモリや新ストレージデバイス、不揮発性ロジックの開発や、将来デバイスとしてスピントランジスタが開発されれば、現在の情報通信分野の機器に革命的な変化をもたらす可能性があり、パラダイムシフトを起こす潜在力を秘めている。

幸いにして、このスピントロニクス技術分野においては、材料技術を中心にわが国の研究機関が世界的な優位性を保っており、その技術開発を世界に先駆けて推進することには大きな意義がある。

2.4 事業の指針

本プロジェクトでは、以上の背景および意義を踏まえ、以下の項目を事業推進の指針とする。

1. 国際競争における我が国産業の競争力強化に成果を迅速に役立てると共に、共通基盤技術の蓄積と将来産業への普及に努める。
2. 実用化に向けた基盤技術の確立を目標とする研究開発テーマを推進すると共に、先進的でありながら 21 世紀エレクトロニクス分野における中核的・革新的技術となりうる研究開発テーマについても取り組む。
3. ①「スピンRAM基盤技術」は、実用化に向けた基盤技術の確立を行う。
4. ②「スピン新機能素子設計技術」は、実用化に向けた基盤技術の確立と、新原理によるデバイスの機能実証の両面の視点から開発を進める。
5. スピントロニクス技術全般に関する動向調査、ならびにスピン能動素子のアプリケーション応用に関する調査を目的とし③「スピントロニクス不揮発性機能技術に係わる調査研究」を実施する。
6. 実用化に向けた基盤技術の確立に関わる研究開発テーマは、事業化への意欲をもち責任をもって取り組む企業を中心に据え、優れた科学的知見を有する大学あるいは産業技術総合研究所との連携により、研究開発を効率的に推進する。
7. 新原理によるデバイスの機能実証のみに関わる研究開発テーマは、大学あるいは産業技術総合研究所を中心に推進し、その成果を持って実用化に取り組む企業との連携を早期に確立するように努める。

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

本プロジェクトの目標は、平成 22 年度までに、超高集積で高速な不揮発性メモリとして期待されるスピン RAM のための基盤技術を確立することである。また、新ストレージ・メモリデバイス、不揮発性スピン光機能素子、スピン能動素子等の新しい動作原理によるスピン新機能素子の実現のための基盤技術を確立することである。以下に、各研究開発項目の達成目標とその目標の根拠をまとめる。

(1) 研究開発項目①「スピン RAM 基盤技術」

①－(1) 低電力磁化反転 TMR 素子技術

MgO をトンネル障壁とする TMR 素子を対象として、高 TMR 比発生機構の解明による高 TMR 比と最適素子抵抗値を併せ持つ素子の設計技術、スピン注入磁化反転機構の解明による高速低電力スピン注入磁化反転技術、薄膜構成・材料および素子形状の最適化による安定動作技術を実現することにより、ギガビット級スピン RAM の可能性を実証する。達成目標とその根拠を以下に示す。

< 達成目標 >

中間目標： 500% の TMR 比を有する TMR 素子の抵抗値制御技術の開発、スピン注入磁化反転機構の解明による電流の低電流化を実現する。これらの技術を用いて、 $5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ の電流密度によるスピン注入磁化反転技術を実現する。

最終目標： 200% 以上の TMR 比を有する垂直磁化 TMR 素子技術を開発する。これを用いて、スピン注入磁化反転により DRAM 並みの高速読み書きを安定して行うことができる TMR 素子技術を開発し、CMOS 回路との整合をとった $0.005 \mu \text{ m}^2$ 微細 TMR 素子集積アレイによるスピン RAM の動作を実証する。

< 目標の根拠 >

ギガビット級スピン RAM 開発における最大の課題は書き込み電流値の低減である。具体的には、書き込み電流値を CMOS トランジスタで駆動できる電流値以下にする必要がある。駆動電流の値は CMOS 構造などに依存するが、60-70nm 世代の Low stand-by CMOS の駆動電流 $34\text{-}35 \mu \text{ A}$ がよい目安であり、マージンを $10 \mu \text{ A}$ とすれば目標は $25 \mu \text{ A}$ となる。この世代の TMR 素子面積 ($50\text{nm} \times 100\text{nm} = 0.005 \mu \text{ m}^2$) で割れば目標の書き込み電流密度は $5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ となる。一方、情報読み込みにかかわる TMR 比に関しては、現在市販されているメガビット級の MRAM は 30% 程度の抵抗変化率があれば十分動作する。ギガビット級に大容量化しても常識的なバラツキを仮定すれば、150-200% 程度の抵抗変化率で十分であると見込まれるが、技術的な極限追求という意味で本プロジェクトでは目標を 500% としている。

(2) 研究開発項目②「スピン新機能素子設計技術」

②－(1) 新ストレージ・メモリデバイス設計技術

強磁性金属ナノ構造中の磁壁をスピン偏極電流で移動させる技術を開発するとともに、これらの技術を用いた新しいストレージ・メモリデバイス構造を提案し、既存デバイスに対するその優位

性を明らかにする。達成目標とその根拠を以下に示す。

<達成目標>

中間目標:強磁性金属細線を対象に、スピン偏極電流による磁壁移動現象のナノ秒領域ダイナミクスを明らかにする。また、この現象を利用した新ストレージデバイスおよび新メモリデバイスの可能性と課題を明らかにするために、それぞれ、TMR 効果を用いた読み取り部と組み合わせた素子における複数磁壁の一斉移動の確認と、メモリに適したセル構造における単一磁壁の移動と安定性の検討ならびにメモリへの情報書込・読取動作の確認を行う。

最終目標:単一磁壁で 100m/s、複数磁壁で 50m/s の移動速度を低電流で実現する技術を開発するとともに、集積アレイによる新機能メモリの動作の実証を行う。

新ストレージデバイスについては、研究開発体制の変更に伴い基本計画の見直しを行った結果、当該研究開発は平成 20 年度をもって終了することとした。

<目標の根拠>

スピン偏極電流による磁壁移動現象のストレージ・メモリへの応用は新しい試みであることから、中間目標として、その現象解明とそれを利用した新ストレージ・メモリデバイスの実現可能性の見極めを行うこととした。具体的には、新ストレージデバイスにおいては複数磁壁を用いたシフトレジスタ機能の確認、新メモリデバイスにおいては単一磁壁を用いたメモリ素子機能の確認を行う。最終目標では、実用化時のデバイス仕様を想定し、SRAM と同程度のセルサイズで駆動可能な電流で 100m/s の磁壁移動速度を得ることにより 200MHz 以上の高速動作を実現するデバイス設計技術を確立することとした。

②- (2) 不揮発性スピン光機能素子設計技術

光導波路中に埋め込まれた強磁性金属ナノ構造のスピン情報を導波路光を用いて制御・利用する技術を開発するとともに、これらの技術を用いた不揮発性機能を有する光機能素子を提案し、既存デバイスに対するその優位性を明らかにする。達成目標とその根拠を以下に示す。

<達成目標>

最終目標:強磁性金属ナノ構造を含む光導波路における光・スピン相互作用を用いたスピン情報の制御技術を開発し、これを用いた高速不揮発性光メモリの基本動作を確認し課題を明らかにする。

なお、光機能素子の実用化に際しては書き込み電流値の低減が必須であり、基礎的な研究開発が必要と判断されたため、NEDO 技術開発機構の事業としては平成20年度末までの成果をもって終了する。これに伴い、平成 18 年 3 月に定めた中間目標を最終目標に変更し、同じく平成 18 年 3 月に定めた最終目標「10ps幅の単一光パルスの読み書きが可能な不揮発性光メモリ機能を実証する」は削除する。

<目標の根拠>

スピントロニクス技術によって高速不揮発性光メモリを実現しようとする試みは全くの新規技術

であるため、中間目標として光・スピン相互作用による情報読み出しおよび書き込み技術の実現可能性の確認を行うこととした。

②－(3) スピン能動素子設計技術

強磁性金属ナノ構造を用いた三端子構造を対象として、スピン偏極注入電流により発生するスピントルクを利用した電力増幅技術、ならびに、ハーフメタル電極の高スピン偏極度を利用した電流スイッチ技術を開発するとともに、これらの技術を用いた不揮発性機能を有するトランジスタ構造(スピントランジスタ)を提案し、不揮発性能動素子としての優位性を明らかにする。達成目標とその根拠を以下に示す。

<達成目標>

中間目標:スピン注入によるスピントルクダイオード効果を利用する新增幅素子を提案・試作し、その基本動作を確認し課題を明らかにする。また1000%以上のTMR比に相当する高スピン偏極ハーフメタル材料を実現するとともに、これを用いたスイッチング機能を持つ三端子構造を提案・試作し、その基本動作を確認し課題を明らかにする。

最終目標:不揮発性情報記憶機能と増幅・スイッチング機能を併せ持つスピン能動素子の実用可能性を実証するために、スピントルクを用いたスピントランジスタにおいては室温において2以上のファンアウトの実現、ハーフメタルを用いたスピントランジスタにおいては2Kにおいて1000以上の磁化による電流 On/Off 比の実現とその室温動作のための条件の明確化を行う。

<目標の根拠>

スピントロニクス技術によって不揮発性機能を有する能動素子を実現しようとする試みは全くの新規技術であるため、中間目標としては、その実現可能性の確認を行うこととした。実用化の観点から、スピンRAMに用いられるのと同じ強磁性金属材料からなる素子構造を対象とし、これらの素子構造による増幅機能発現と高TMR比の実現を実証する。最終目標においては、スピントランジスタにおいては複数素子を駆動することが可能な2以上のファンアウトを室温で実現する。ハーフメタル方式においては、1000以上のOn/Off比を低温で実現してその潜在的能力を示すと共に、室温動作への道筋を明確化することとした。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

(1) 概要

本技術開発では平成22年度までに、超高集積で高速な不揮発性メモリとして期待されるスピンRAMのための基盤技術を確立する。また、新ストレージ・メモリデバイス、不揮発性スピン光機能素子、スピン能動素子等の新しい動作原理によるスピン新機能素子の実現のための基盤技術を確立する。そのために、以下の研究開発項目を実施する。

① スピンRAM基盤技術

①－(1) 低電力磁化反転TMR素子技術

MgOをトンネル障壁とするTMR素子を対象として、高TMR比発生機構の解明による高TMR比と最適素子抵抗値を併せ持つ素子の設計技術、スピン注入磁化反転機構の解明による高速低電力スピン注入磁化反転技術、薄膜構成・材料および素子形状の最適化による安定動作技術を実現することにより、ギガビット級スピンRAMの可能性を実証する。

② スピン新機能素子設計技術

②- (1) 新ストレージ・メモリデバイス設計技術

強磁性金属ナノ構造中の磁壁をスピン偏極電流で移動させる技術を開発するとともに、これらの技術を用いた新しいストレージ・メモリデバイス構造を提案し、既存デバイスに対するその優位性を明らかにする。

②- (2) 不揮発性スピン光機能素子設計技術

光導波路中に埋め込まれた強磁性金属ナノ構造のスピン情報を導波路光を用いて制御・利用する技術を開発するとともに、これらの技術を用いた不揮発性機能を有する光機能素子を提案し、既存デバイスに対するその優位性を明らかにする。

②- (3) スピン能動素子設計技術

強磁性金属ナノ構造を用いた三端子構造を対象として、スピン偏極注入電流により発生するスピントルクを利用した電力増幅技術、ならびに、ハーフメタル電極の高スピン偏極度を利用した電流スイッチ技術を開発するとともに、これらの技術を用いた不揮発性機能を有するトランジスタ構造(スピントランジスタ)を提案し、不揮発性能動素子としての優位性を明らかにする。

(2) 事業全体のスケジュール及び年度別予算

研究開発サブテーマにおける研究開発スケジュールと年度別予算を示す。

表Ⅱ-1 ① スピンRAM基盤技術

(百万円)

①-(1)低電力磁化反転 TMR 素子技術


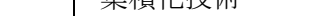




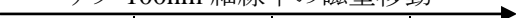

研究開発項目	18年度	19年度	20年度	21年度	22年度	合計
①記憶層材料の探索・ TMR素子構造の最適化	(東芝) 実用化に向けた材料・構造の最適化 →					
	(産総研) 低書込電流用新材料・新構造の探索 →					
	(東北大学) 低減衰定数新材料の探索 →					
② 高性能 MgO 障壁作 製法の研究	(産総研) →					
③スピン注入磁化反転ダイ ナミクスの研究	(産総研) 素子の高速応答性評価 →					
	(東北大学) 減衰定数の評価 →					
	(大阪大学) スピントルク現象の解明 →					
④高速読み書きに適した TMR素子の研究	(産総研) →					
	(大阪大学) →					

⑤CMOS 回路と整合をとった TMR 素子の開発			(東芝) (東北大学) 記憶層の減衰定数評価および解析	→		
⑥記憶層・参照層材料の高度化			(東芝) (産総研)	→		
⑦1Mbit アレイの試作による TMR 素子の開発			(東芝)	→		
⑧64Mbit アレイの試作による TMR 素子の開発			(東芝)	→		
予算額	510.2	314.0	258.1	509.5	254.9	1846.7
加速資金	159.9	126.8	32.0	300.3	—	619.0

表Ⅱ-2 (1/3) ② スピン新機能素子設計技術

(百万円)

(1) 新ストレージ・メモリデバイス設計技術

研究開発項目	18年度	19年度	20年度	21年度	22年度	合計
①新メモリデバイス	(日本電気)					
	メモリセル技術  集積化技術 					
②新ストレージデバイス	(富士通)					
	低電流密度での磁壁移動の実現 					
	磁壁移動の高速化 					
	コヒーレントなマルチドメインの移動の実証 					
③磁壁ダイナミクス	(京都大学)					
	磁壁ダイナミクスの研究 					
	サブ 100nm 細線中の磁壁移動 					
シミュレーション 						
予算額	197.3	172.3	150.5	132.0	24.0	676.1
加速資金	193.4	—	20.0	—	—	213.4

表Ⅱ-2 (2/3) ② スピン新機能素子設計技術

(百万円)

(2) 不揮発性スピン光機能素子設計技術

研究開発項目	平成 18 年度	平成 19 年度	平成 20 年度	合計
不揮発性スピン光機能素子技術	(産総研)			
	素子作製プロセス			
	情報読み出し技術			
予算額	27.9	37.7	28.0	94.0

表Ⅱ-2 (3/3) ② スピン新機能素子設計技術

(百万円)

(3) スピン能動素子設計技術

研究開発項目	18 年度	19 年度	20 年度	21 年	22 年	合計
①スピントルク方式トランジスタ素子	(大阪大学)					
	素子作製技術の研究開発					
	動作解析技術の研究開発					
②ハーフメタル方式トランジスタ素子	(産総研)					
	高性能薄膜作製技術の研究開発					
	高性能ハーフメタル材料の開発					
予算額	87.2	77.9	71.9	71.2	20.0	328.2

表Ⅱ-3 ③ スピントロニクス不揮発性機能技術に係わる調査研究

(百万円)

研究開発項目	18年度	19年度	20年度	21年度	22年度	合計
①スピントロニクス不揮発性機能技術調査委員会	(素子協)					
	国内外の技術動向の調査					
	→					
②スピントロニクス新機能素子技術の調査	→					
②スピントロニクス不揮発性機能技術に係わる標準化に向けた調査	→					
予算額	8.7	12.8	9.9	7.6	5.3	44.3

表Ⅱ-4 平成18年度～22年度 予算額推移

		18年度	19年度	20年度	21年度	22年度	合計
① 「スピンRAM基盤技術」	予算額	510.2	314.0	258.1	509.5	254.9	1846.7
	加速資金	159.9	126.8	32.0	300.3	—	619.0
② 「スピン新機能素子設計技術」	予算額	321.1	300.7	260.3	210.8	49.3	1142.2
	加速資金	193.4	—	20.0	—	—	213.4

2.2 研究開発の実施体制

(1) 基本体制

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO 技術開発機構は、経済産業省及び研究開発責任者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。また、必要に応じて、NEDO 技術開発機構に設置する委員会及び技術検討会等、外部有識者の意見を運営管理に反映させるほか、研究開発実施者からプロジェクトの進捗について年 2 回程度の報告を受けること等を行う。

さらに本プロジェクトでは、研究に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、独立行政法人産業技術総合研究所フェロー 安藤 功兒をプロジェクトリーダーとし、その下で効果的な研究開発を実施する。

(2) 運営の基本

本研究開発におけるプロジェクトリーダーの指名に際し、NEDO 技術開発機構はプロジェクトリーダーと「了解事項メモ」を取り交わし、運営の基本を定めている。ここでは、プロジェクトリーダーは、目標の達成に向けて、各実施者が行う研究開発の総合調整を行い、必要な限度において各研究開発項目のプロジェクトサブリーダーおよび各実施者に対して指示を行うとともに、研究員への技術的助言を行うこととした。また、研究開発の進捗状況及び研究成果の実用化見通し並びに国内外の技術・市場動向等を把握し、NEDO 電子・情報技術開発部長(現 NEDO 電子・材料・ナノテクノロジー部長)に対し、目標達成に向けた必要な措置について提案するものとした。

一方、NEDO 技術開発機構は、目標の達成に向けて研究開発の進捗及び同成果の実用化見通しを把握し、基本計画、研究開発テーマ等の策定・変更、実施体制の構築、予算及びその予算配分の決定等、研究開発の推進に必要な措置を講ずるものとした。

また、研究開発予算の配分については、プロジェクトリーダーが、研究開発の進捗状況、成果等を踏まえ、必要な予算及びその配分案を NEDO 技術開発機構に提示することとし、NEDO 技術開発機構は、研究開発の進捗状況、政策的重要性等を勘案しつつ、プロジェクトリーダーの意見を参考にして、予算総額及び配分額を決定するものとした。

さらに、本研究開発を実施する上での留意事項として、各研究開発項目の運営方針を定めた。すなわち、研究開発項目①「低消費電力磁化反転 TMR 素子技術」および研究開発項目②「新ストレージ・メモリデバイス設計技術」のうちの新メモリデバイスについては、スピントロニクス技術を用いたメモリデバイスとしての基盤技術確立を行い、その成果の実用化を意識した運営を行うこととした。さらに、研究開発項目②である「新ストレージ・メモリデバイス設計技術」、「不揮発性スピン光機能素子設計技術」、「スピン能動素子設計技術」については、中間評価の結果に基づいて、その後の進め方を柔軟に判断することにした。

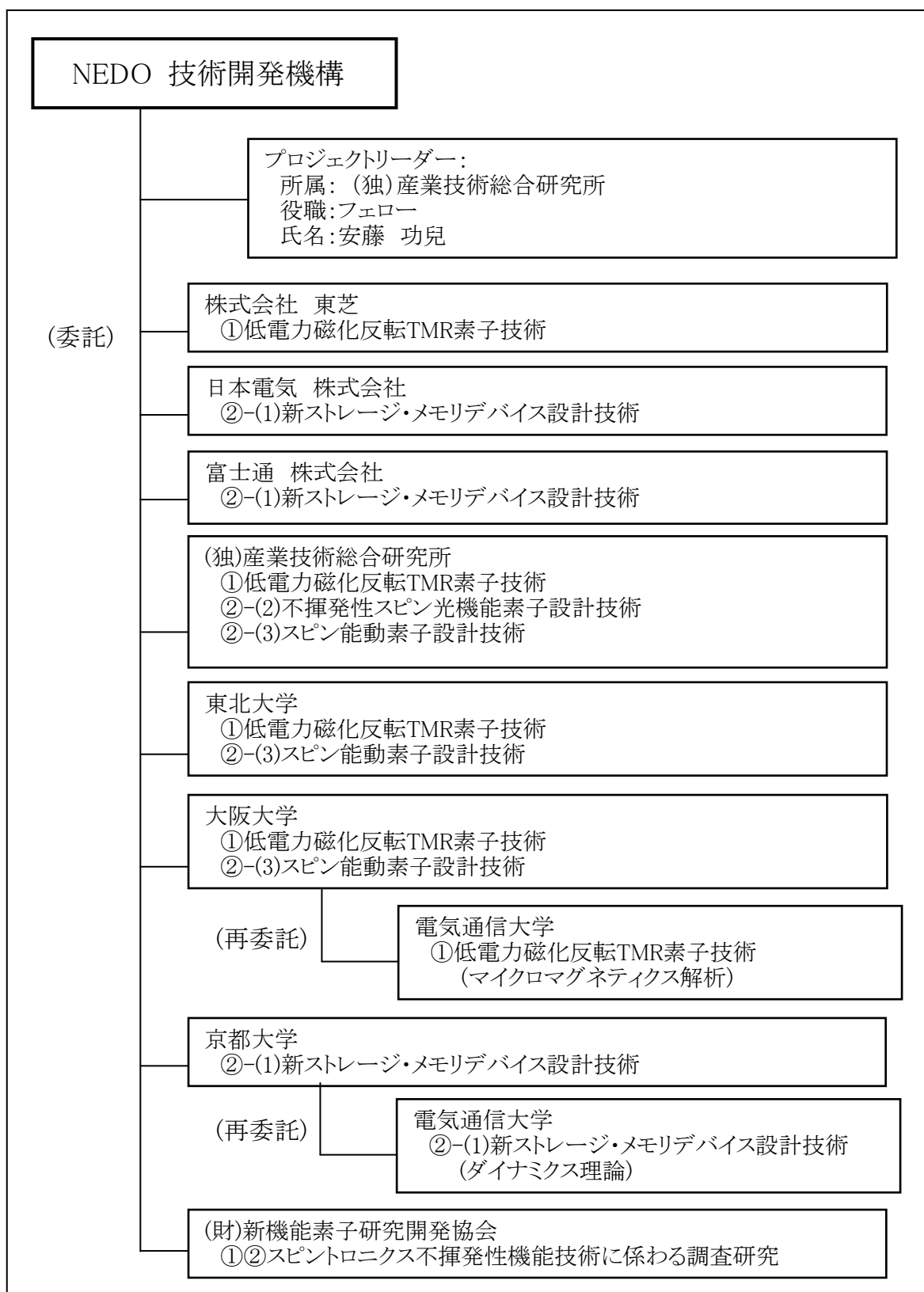
(3) 実施体制

本プロジェクトは、下記の研究開発項目を含み、安藤 PL のもと複数の企業、研究機関および協会により実施される。各実施者はそれぞれ関係する研究開発テーマにおいて分担をもち、か

つ相互に連携しながら事業を推進するが、NEDO 技術開発機構は各実施者と直接委託契約を締結し推進を行う。また、研究開発項目①、②実施者間の相互連携を円滑に進める目的のため、基本計画には記述されていないが、スピントロニクス全般に関わる技術動向調査、スピン能動素子のアプリケーション応用探索に関わる調査、ならびに、外部有識者を招聘したスピントロニクスに関わる委員会の主催を実施する(研究開発項目③)。

表 II - 5 研究開発項目、サブテーマおよび担当者

研究開発項目	サブテーマ	担当機関
① スピン RAM 基盤技術	① - (1) 低電力磁化反転 TMR 素子技術	株式会社 東芝 産業技術総合研究所 東北大学 大阪大学
② スピン新機能素子設計技術	② - (1) 新ストレージ・メモリデバイス設計技術	日本電気株式会社 富士通株式会社 京都大学
	② - (2) 不揮発性スピン光機能素子設計技術	産業技術総合研究所
	② - (3) スピン能動素子設計技術	大阪大学 東北大学 産業技術総合研究所
③ スピントロニクス不揮発性機能技術に係わる調査研究	—	新機能素子研究開発協会



図Ⅱ-1 「スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト」実施体制

(4) 事業体制の役割について

図に、それぞれの研究機関(サブリーダー)と研究開発テーマの関連を示した。全体を安藤 PL が取りまとめ、東北大学の宮崎教授と大阪大学の鈴木教授が運営のアドバイスをする体制である。

<(PL)安藤功兒 (産業技術総合研究所 フェロー)>

産総研におけるスピントロニクス技術の研究開発リーダーである。産総研グループは MgO 障壁を用いた TMR 素子の開発および、それを用いたスピン注入磁化反転の実現に、世界で初めて成功した実績を持つ。これらは本プロジェクトの全テーマに共通的な基盤技術である。応用物理学学会フェロー。

<宮崎照宣 (東北大学 教授)>

室温における TMR を発見し、その後のスピントロニクス技術開発を先導した日本におけるスピントロニクス技術の大家である。平成 19 年度朝日賞受賞。

<鈴木義茂 (大阪大学 教授)>

スピントルクを用いたスピン RAM の実現可能性を我国で最初に指摘した先見性を持つとともに、スピントルクの定量的評価法の開発とそれを応用した新機能素子開発の研究で世界的に有名。2008 年産学官連携功労者表彰内閣総理大臣賞受賞。

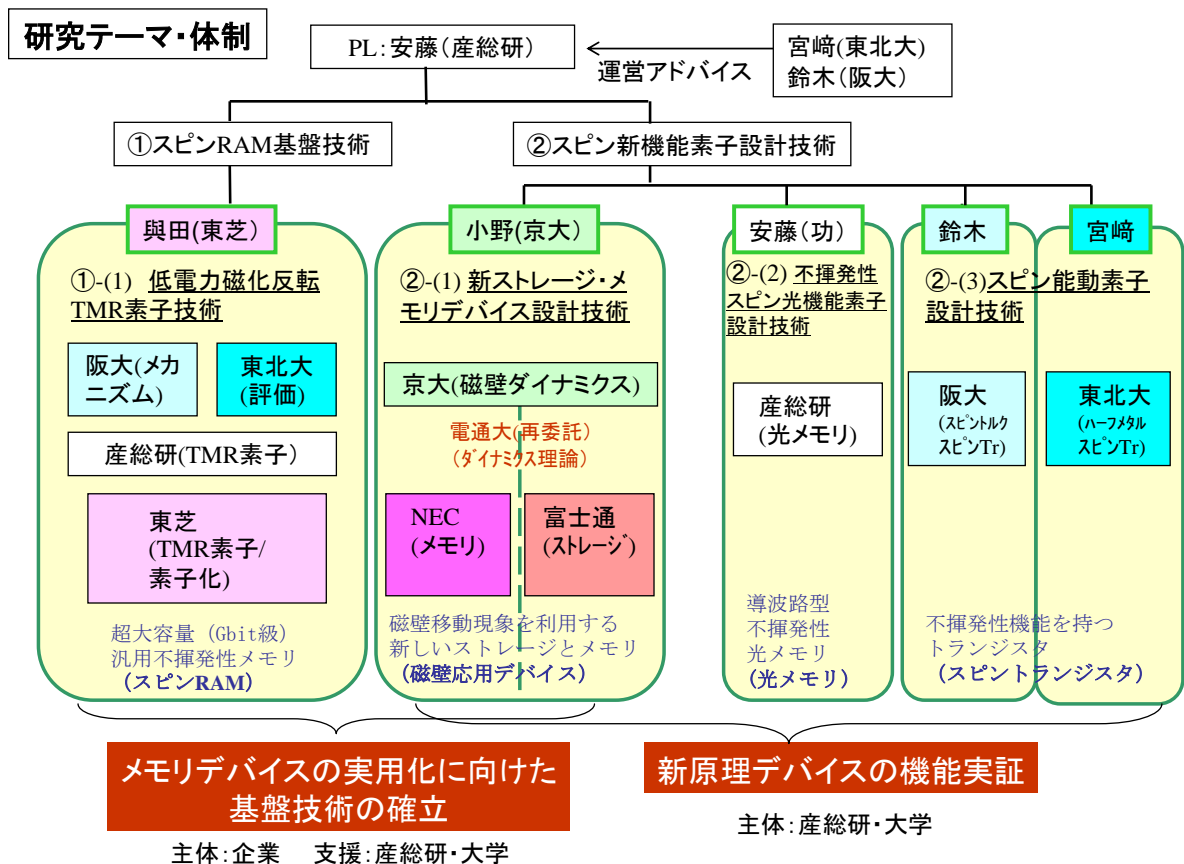


図 II - 2 研究テーマごとの体制(前期:平成 18 年度～平成 20 年度)

以下に図Ⅱ-2を用いて各研究機関の実施内容を説明する。

研究開発項目①「スピンRAM基盤技術」

①- (1) 低電力磁化反転 TMR 素子技術(東芝、産総研、東北大学、大阪大学)

本サブテーマは、「スピンRAMサブWG」を設置し、サブリーダー(東芝 與田博明)の指導のもと、東芝、産総研、東北大学、大阪大学、電気通信大学(大阪大学から再委託)の共同研究開発体制によって実施している。東芝は事業として大容量スピンRAMの実用化を目指しており、その鍵となる磁性材料の開発とTMR素子化技術を担当している。また、微細CMOSプロセスを社内に有し、大容量スピンRAMの実用化に世界でもっとも近い企業である。一方産総研は磁性材料開発とTMR素子化技術に優れ、磁性材料を系統的に調べると共に、TMR素子の高性能化を図り、その技術(成果)を東芝に提供する立場である。東北大学は材料の磁気特性評価に優れ、東芝あるいは産総研で開発した磁性膜の磁気特性を評価している。大阪大学は、このサブテーマにおいてスピン注入磁化反転現象の解明を担当している。

<サブリーダー>

與田博明(東芝 研究主幹)は、スピントロニクスの一分野であるGMRヘッド開発において市村産業賞、全国発明表彰を受賞し、また同主要分野である磁界書き込み方式MRAMの開発では世界最大容量となる16Mbit MRAM開発の東芝リーダーとして活躍。スピントロニクスデバイス分野において突出した知識・経験を有する。

研究開発項目②「スピン新機能素子設計技術」

②- (1) 新ストレージ・メモリデバイス設計技術(日本電気、富士通、京都大学)

(前期:平成18年度～平成20年度)

本サブテーマは、「磁壁移動サブWG」を設置し、サブリーダー(京都大学 小野輝男)の指導のもと、日本電気、富士通それぞれが、京都大学、電気通信大学(京都大学から再委託)との共同研究開発体制によって実施した。日本電気はSoC混載の高速メモリ(SRAMの代替)あるいはSRAMに不揮発性を持たせることを目指した。富士通は大容量であり、かつ回転駆動機構のないストレージデバイスを目指した。ここで開発されるデバイスは、いずれもスピン偏極電流による磁壁移動を原理とするものであり、小野は磁壁移動のダイナミクスの解明を行うことにより、これらデバイス設計に対する技術的指針を与えている。

<サブリーダー>

小野輝男(京都大学教授)は、ナノ磁性細線における磁壁の電流駆動現象を初めて実験的に実証した電流駆動磁壁移動研究の第一人者である。

(後期:平成21年度～22年度)

「磁壁メモリサブWG」、サブリーダー(日本電気 石綿延行)とし、日本電気が、京都大学、電気通信大学(京都大学から再委託)との共同研究開発体制によって実施した。

②- (2) 不揮発性スピン光機能素子設計技術(産総研)

本サブテーマは、産総研の保有技術である高性能 TMR 素子を光導波路と組み合わせ、光信号処理回路におけるバッファメモリを実現しようとする意欲的なテーマである。なお、先進的な取り組みのため、サブテーマのメンバーに企業が含まれないが、早期に光による磁気情報の読みとり、書き込みの原理実証を行い、企業との連携を目指す位置付けである。

②-(3) スピン能動素子設計技術(東北大学、大阪大学、産総研)

本サブテーマは、大阪大学が実施しているスピントルク方式のスピン能動素子開発と、東北大学で実施しているハーフメタル方式のスピン能動素子開発の二つを含む。スピントルク方式のスピン能動素子とハーフメタル方式のスピン能動素子は、いずれも増幅度をもつ不揮発性三端子デバイスの実証を目標としており、非常に意欲的なテーマである。なお、先進的な取り組みのため、サブテーマのメンバーに企業が含まれないが、早期に原理実証を行い、企業との連携を目指す位置付けである。

なお、産総研は保有する強磁性材料技術及び高性能 TMR 素子を大阪大学の研究開発に提供している。

2.3 研究開発の運営管理

(1) 研究開発の一体的運営

研究実施体制の一体的運営を保証し、研究テーマ間の相互協力、情報共有、連絡調整を目的として、月 1 回を目処に基本的に全参画研究者出席の定例の研究会議を実施し、研究活動の進捗報告、今後の進め方等を実質的に論議した。その結果を基に、PL の指導のもと、個別改題の推進方法を決めて研究開発を行った。運営は素子協が担当した。

(2) 相互連携

スピン RAM サブ WG においては、毎月 1 回定例の会議を開き各分担組織における研究進捗状況を紹介するとともに、サブリーダーの指示の下に研究の方針を決定した。東芝が作製した試料の評価のため、東芝は産総研、阪大、東北大に度々職員を派遣して実験を行っている。

磁壁移動サブ WG においては、毎月 1 回(日本電気と富士通は交代参加)定例の会議を開き各分担組織における研究進捗状況を紹介するとともに、サブリーダーの指示の下に研究の方針を決定した。日本電気と富士通は素子の加工と評価のため京大に度々職員を派遣して実験を行っている。

スピン光素子とスピン能動素子のテーマでは、必要に応じて会合を持ち、その研究内容を把握した。

上記の会合には、常に、安藤(PL)、宮崎(東北大)、鈴木(阪大)が参加して、研究プロジェクト全体の進捗を把握して研究方針を示した。また必要に応じて、各サブテーマ間の調整も行った。

(3) 委員会の運営

① NEDO 技術開発機構における委員会

プロジェクト実施に先立ち基本計画検討委員会を実施したが、それ以外に設置した委員会はない。

② (財)新機能素子研究開発協会(素子協)における委員会

②-1 「スピントロニクス不揮発性機能技術調査委員会」

素子協が組織し、国際学会等を中心に海外におけるスピントロニクス技術開発状況の調査活動の調査活動とそれらの情報分析を実施した。

(概要)

委員長: 宮崎照宣教授(東北大学)

委員会メンバー: プロジェクト実施機関代表者および国内有識者(表Ⅱ-6)

委員会事務局: 新機能素子研究開発協会

実施内容:

- ・ 国際学会等を中心に海外におけるスピントロニクス技術開発状況の調査活動
- ・ 海外におけるスピントロニクス技術開発体制の調査活動
- ・ 調査結果報告会(毎年一回)

②-2 「新機能トランジスタに関する調査委員会」

本プロジェクトで進めている不揮発性機能素子に期待される機能と性能や新しい利用形態をニーズ側から明らかにすることを目的に素子協の独自活動として実施した。

(概要)

委員長: 安藤功児 PL(産総研)

委員会メンバー: 国内有識者(企業技術者4名含む)(表Ⅱ-7)

委員会事務局: 新機能素子研究開発協会

実施内容:

- ・ 委員会活動(年4回程度)
- ・ 外部有識者(他分野の研究者)による講演会

表Ⅱ-6 スピントロニクス不揮発性機能技術調査委員会 登録委員（平成22年度）

氏名	所属・役職
宮崎 照宣	東北大学原子分子材料科学高等研究機構教授
安藤 功兒	産業技術総合研究所フェロー
大野 英男	東北大学電気通信研究所教授
猪俣 浩一郎	物質・材料研究機構フェロー
林 和彦	ソニー（株）情報技術研究所固体メモリ研究部統括部長
古川 泰助	三菱電機先端技術総合研究所 専任
松岡 秀行	（株）日立製作所基礎研究所ラボ長
鈴木 義茂	大阪大学大学院基礎工学研究科教授
安藤 康夫	東北大学大学院工学研究科教授
小野 輝男	京都大学化学研究所教授
仲谷 栄伸	電気通信大学情報工学科教授
與田 博明	東芝研究開発センターLSI基盤技術ラボラトリー研究主幹
石綿 延行	NECシステムデバイス研究所主幹研究員
吹譯 正憲	新機能素子研究開発協会研究開発部統括部長

表Ⅱ-7 新機能トランジスタに関する調査委員会 登録委員（平成22年度）

氏名	所属・役職
安藤 功兒	産業技術総合研究所フェロー
安藤 康夫	東北大学大学院工学研究科教授
鈴木 義茂	大阪大学大学院基礎工学研究科教授
伊藤 公平	慶応義塾大学理工学部物理情報工学科教授
大野 裕三	東北大学電気通信研究所准教授
小倉 基次	パナソニック(株)半導体社プロセス開発センター参事
鹿野 博司	ソニー(株)情報技術研究所固体メモリ研究部メモリ2グループ統括課長
酒井 滋樹	産業技術総合研究所エレクトロニクス研究部門 フロンティアデバイスグループ グループリーダー
白石 誠司	大阪大学大学院基礎工学研究科准教授
菅原 聡	東京工業大学大学院理工学研究科准教授
田中 雅明	東京大学大学院工学系研究科教授
徳光 永輔	東京工業大学精密工学研究所准教授
羽生 貴弘	東北大学電気通信研究所教授
湯浅 新治	産業技術総合研究所エレクトロニクス研究部門 スピントロニクスグループ グループリーダー
伊藤 顕知	(株)日立製作所基礎研究所 主任研究員
中村 志保	(株)東芝研究開発センター 記憶材料・デバイスラボラトリー研究主幹
吹譚 正憲	新機能素子研究開発協会研究開発部統括部長
片山 利一	新機能素子研究開発協会研究開発部主幹研究員

3. 情勢変化への対応

本プロジェクトでは、研究開発の進捗と外部の情勢変化とを照らし合わせ、実施計画の変更を行った。

(1) 実施計画の前倒し(前倒し加速) (平成 18 年 9 月～12 月)

<概要>

大容量スピン RAM 開発や磁壁移動型メモリ開発は、本プロジェクト以外にも多数の主要なデバイスメーカーや研究機関が研究開発を進めており、開発競争の進展が急である。本プロジェクトにおいてこれらに関するテーマは①－(1)低電力磁化反転 TMR 素子技術と、②－(1)新ストレージ・メモリデバイス設計技術のふたつである。

当初計画において、低電力磁化反転 TMR 素子技術の開発は、まず実用化に向くと考えられる TMR 材料の最適化を行った後に、その材料をベースとして TMR 素子の積層構造の最適化を行うこととしていた。これらは時系列に設定されたマイルストーンであり、TMR 材料の開発完了後に、次のフェーズに進む計画であったため、確実性は高いが開発競争の進展には時間を要する。このことより他研究グループに比べ優位にある本プロジェクトの技術優位性を失う事が懸念された。また、米国 Freescale 社の磁界書き込み型 MRAM 量産開始(2006/7)を契機に、世界各地で、磁界書き込み型 MRAM より大容量化が可能なスピン注入磁化反転型 MRAM(スピン RAM)に対する開発意欲が高まり、同時にスピントロニクス技術全体に対する関心も高まった。

上記情勢変化に対応すべく、平成 19 年度に計画されていた設備導入を含む研究開発内容を前倒して実施し、TMR 材料の開発と共に並行して、TMR 素子構造となる積層構造の検討を進めるべきであると判断した。なお、これには CMOS 回路が劣化しない範囲内の温度条件において、高性能の TMR 素子を作製する製造方法を含むものである。同時に、TMR 材料自体の開発についても、特性評価装置を前倒して導入し評価の効率(評価試料数のスループット)を上げることにより研究の進捗を早めるべきであると判断された。

一方、新ストレージ・メモリデバイス設計技術においても、素子の細線化に早期に着手し、磁壁移動現象の細線化におけるスケールリング性を確認すると共に、細線構造における磁壁移動を直接観察し、シミュレーション技術の精度検証を行うことが必要と判断された。

<内容>

上記判断の下、平成 19 年度に計画していた研究開発内容を前倒し実施した。具体的内容は、以下の通りである。

①－(1)低電力磁化反転 TMR 素子技術

- ・ トンネル伝導評価装置の導入(ウェハ状態で TMR 素子特性評価実施可能)
- ・ 磁気緩和定数評価装置の導入(TMR 素子の磁化状態を動的に評価可能)
- ・ 磁場中熱処理炉の導入

②－(1) 新ストレージ・メモリデバイス設計技術

- ・ 電子線描画装置の導入
- ・ 磁気力顕微鏡(MFM)を導入

<成果>

上記研究開発計画の前倒しにより、平成 18 年度末には以下のような成果が得られた。また、ここで確立した評価技術や微細加工技術はその後の研究開発においても活用され、効率的に事業推進の強力なツールとなっている。

①－(1)低電力磁化反転 TMR 素子技術

- ・ トンネル伝導評価装置を導入することで、ウェハ状態で素子特性評価が可能となり、特性評価時間を大幅に短縮した。これにより開発効率を向上した。
- ・ 磁場中熱処理炉の導入により、磁性薄膜の積層構造を最適化し、TMR 素子の特性を向上した。
- ・ 磁気緩和定数評価装置の導入により、TMR 素子の磁化状態を動的に評価し、素子の反転電流低減に向けた指針を得た。

②－(1) 新ストレージ・メモリデバイス設計技術

- ・ 電子線描画装置の導入により、磁性材料をサブ 100nm に細線化する技術開発を行い、サブ 100nm スケールの磁壁構造を作製することに成功した。
- ・ 磁気力顕微鏡を導入し、サブ 100nm スケールの磁壁の挙動を観測することに成功した。

(2) 実施内容追加(研究加速資金投入)(平成 19 年 11 月及び平成 20 年 2 月)

実施計画の前倒し(研究加速資金投入、補正予算)(平成 20 年 11 月及び平成 21 年 9 月)

<概要>

平成 19 年春から夏にかけて、RAM を最終目的とした TMR 素子開発計画が相次いで明らかになった。また、平成 20 年に入り、韓国 Samsung 社がスピン RAM 開発開始を正式に発表した。このようにスピン注入型 MRAM 開発に関する世界的な新たな研究動向が明らかになり、競争が激化し始めたため、手遅れにならないよう、本プロジェクト成果である新 TMR 素子の技術優位性を確保するため、加速資金を投入し、スピン RAM 実用化時の基盤技術である特性ばらつき低減に関する研究開発を強力に推進した。以下に明らかになった外部の技術開発状況を示す。

- ・ 米国 IBM 社と(株)TDK が共同開発を開始し、4 年間で 65nm プロセスでのスピン注入型 MRAM 開発を目指すプレス発表(2007/8)。
- ・ すでにルネサス社と 65nm プロセスでのスピン注入型 MRAM の共同開発の合意がある米国 GRANDIS 社が、90nm 以降の TMR 素子メモリの作製に使える開発施設を稼働したとプレス発表(2007/5)。なお、ルネサス社は 2010 年頃 65nm プロセス製品への MRAM 搭載を計画している。
(注:両共同開発ともにコア技術は米社が有している。)
- ・ 2008 年 1 月に、Samsung と Hynix が不揮発性メモリの共同研究を開始し、韓国の公的資金も活用しながらスピン RAM を含む不揮発性メモリの開発を行うとの報道がなされた。報道によれば、韓国政府は 2012 年に不揮発性メモリ分野で

40%の世界シェアを目標とし、そのために総額 31 億円の国費を投じるプログラムを実施、Samsung、Hynix はこれに参加する形で、両者合わせて 2008、2009 年で総額約 10 億円を投資するとする。論旨から Samsung、Hynix グループもスピン RAM の市場へ 2010～2011 頃から参入すると思われ、韓国勢、特に Samsung の参入は大きな脅威である。

<内容>

平成 19 年 11 月と平成 20 年 2 月に実施した研究加速は以下の通りである。

①-(1) 低電力磁化反転 TMR 素子技術

- ・ TMR 素子のスピン RAM 化に向け、メモリアレイの開発を加速する。メモリアレイでは、その特性ばらつきが課題であり、特性ばらつきのデータを収集するために MBE(分子線エピタキシー)法により 500 個の新 TMR 素子を作成し、これらの特性ばらつき評価を行う。
- ・ 同様に、量産用のスパッタ法における基板加熱装置を導入し、ばらつきを抑えた低コスト化プロセスにおいて、記録層用強磁性材料の技術開発を実施する。
- ・ 同じく、TMR 素子の特性ばらつき低減のために、下地層の検討を実施する。

平成 20 年 11 月と平成 21 年 9 月に実施した研究加速は以下の通りである。

①-(1) 低電力磁化反転 TMR 素子技術

- ・ 光学的磁気緩和測定システムの試作前処理装置を導入し、記録層材料の特性評価精度を向上する。
- ・ TMR 素子ばらつき検討のために複数ロットの試作を実施する。
- ・ TMR 素子の記録層を成膜する高性能成膜装置(MBE)を導入し、TMR 素子用積層膜を同一真空中で開発する。

②-(1) 新ストレージ・メモリデバイス設計技術

- ・ アレイ化した素子の試作を実施し、動作実証を行う。

<成果>

平成 19 年度期初の実施方針変更ならびに平成 19 年 11 月と平成 20 年 2 月に実施した研究加速による成果は以下の通りである。

①-(1) 低電力磁化反転 TMR 素子技術

- ・ 測定範囲を拡大したダンピング定数測定装置を活用し、TMR 記憶層材料の最適化を行い、 $0.3 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ の低電流密度で磁化反転する記憶層母材を開発した。

- これを用いて TMR 素子アレイを試作し、素子特性のばらつきとその主因を把握した。
- また、TMR 積層構造の検討等を加速し 1Gb レベルでの信頼性確保を達成し、特性ばらつきを低減する成膜技術を確立した。
- メカニズム解明の成果としては、実験結果と整合する熱擾乱耐性(記憶エネルギー、△)のシミュレート手法を構築し、△を下げず、反転電流を低減する新規積層構造を見出した。

平成 20 年 11 月と平成 21 年 9 月に実施した研究加速により、TMR 素子の 300mm 対応技術の見極めを前倒しで完了することができた。また、磁壁移動メモリ素子アレイの動作実証を他に先駆けて実施し、技術開発の優位性を確立できた。

表 II—8 に、資金の追加投入の推移を示す。

(百万円)

	18 年度	19 年度	20 年度	21 年度	22 年度	合計
① スピン RAM	510.2	314.0	258.1	509.5	254.9	1846.7
加速・補正	159.9	126.8	32.0	*300.3		619.0
②-1 新ストレージ・メモリ	197.3	172.3	150.5	132.0	24.0	676.1
加速	193.4		20.0			213.4
②-2 光素子	27.9	37.7	28.0			94.0
②-3 能動素子	87.2	77.9	71.9	71.2	20.0	328.2
③ 調査研究	8.7	12.8	9.9	7.6	5.3	44.3
合計	1184.6	741.5	570.4	1020.6	304.2	3821.3
うち加速・補正合計	353.3	126.8	52.0	300.3		832.4

表 II—8 資金の投入(加速資金、*補正予算)

以上のように、平成 18 年度から平成 21 年度にかけて、スピン RAM 実用化の基盤技術である低電力磁化反転 TMR 素子技術開発に集中的にリソースを配分し、事業を精力的に進めた。これにより本技術開発は、世界の研究開発競争下において技術優位性を持ち続けている。

また、上記 NEDO 予算に加え、内閣府総合科学技術会議による革新的技術推進費 3.3 億円が、平成 21 年に、別途投入されている。

4. 中間評価結果への対応

平成 20 年度に中間評価が行われた。その概要を以下に記す。

[総合評価]

- ・本事業は、スピントロニクスを利用した情報機器の低消費電力化を目指すものであり、その意義は極めて大きく、成果の長期的かつ広範な応用分野への社会還元にも資するものとして高く評価できる。
- ・特に、「スピン RAM 基盤技術」については、 $3 \times 10^5 \text{A/cm}^2$ という低電流密度での磁化反転の達成をはじめ、世界トップレベルのめざましい成果を挙げており、高く評価できる
- ・プロジェクトリーダーの強力なリーダーシップのもと、多数回の定期的技術討議会等により産学官の緊密な連携協力が図られ、産学官が各々の特長に応じた適切な分担体制をとることにより研究開発が極めて効率的に推進され、高い水準の中間目標がほぼ達成されたことは極めて高く評価される。
- ・「スピン新機能素子設計技術」については、いくつかの新しい技術的進展が見られ、所期の成果を達成したと評価できる。
- ・光機能素子・能動素子等の一部のテーマには実用化への方向性が不明確なものもある。また、競合技術に対する利点が不明確な部分が見受けられた。
- ・今後、半導体集積回路技術の進展によりデバイスサイズの縮小が予想され、新たなフェーズの問題点が出る可能性があるため、早めの検討が望まれる。
- ・世界のライバル(米国、韓国)が追随して来ているので、テクノロジー及び開発スピード面で、世界 No.1 の地位を維持できるように今後の開発を期待する。

[今後に対する提言]

- ・「スピン RAM 基盤技術」については、めざましい成果を挙げているが、米国や韓国など外国勢の激しい追い上げが始まっているので、資金を追加するなど十分な手当を行い、本技術が産業的にデファクトスタンダードをとるところまで、思い切った研究開発の加速を図るべきである
- ・最小加工寸法は 70nm 世代への適用が開発ターゲットになっているが、45nm 世代、32nm 世代への微細化を視野に入れた戦略が必要である。
- ・「スピン新機能素子設計技術」については、本事業成果を萌芽としたスピントロニクスの新たなパラダイム創出にも期待が持たれ、「スピン RAM 基盤技術」開発研究に寄与する部分も多々あると考えられる。
- ・学術的にも新規性の高い未踏技術分野であることから、高度の研究設備が必要となるうえに開発リスクも高く、公的資金投入による研究推進が必要と考えられるため、引き続き研究の発展・拡大を期待する。
- ・磁壁応用デバイスに関しては、不揮発デバイスとしての基本特性(データ保持特性、書き換え回数等)の評価を充実させ、評価結果にしたがって研究開発方針を柔軟に見直すべきである。

- ・光機能素子は基礎研究段階にとどまっており、このままでは十分な成果が期待できないので、今後の進め方についての検討が必要である。
- ・日本製品が海外製品と戦って行く上で、インスタント・オン・コンピュータは重要武器・キーワードになる。世界初のインスタント・オン・コンピュータ製品が実現されるように、スピン RAM の実用化を加速する取組みが必要と考える。

この中間評価を受けて、以下の対応をとった。

(1) スピン RAM 基盤技術

スピン RAM 基盤技術開発では、世界最高性能のメモリ素子開発に成功し実用化に最も近い位置にある。このため、積極的な資金配分を考慮しつつ研究開発を継続する。

積極的な資金配分の実績については、3. 情勢変化への対応に記載した通りである。

(2) 新ストレージ・メモリデバイス設計技術

新メモリデバイスについては、基本動作の確認を完了し、基礎的な磁壁移動現象の解明を行う研究フェーズから実用化を目指した研究開発フェーズへ移行する。

新ストレージデバイスについては、中間評価後、実用化を目指した研究開発フェーズへ移行する方向で実施方針の検討を進めたが、実施先のひとつである富士通(株)から、平成21年度以降の委託業務を遂行できない旨の報告を受け、再公募を検討した結果、下記の理由により当該研究開発は平成20年度をもって終了することとした。

(検討内容)

基盤技術の開発は完了する一方で、ストレージデバイスとしてトラック当たりの磁壁数の増大、それら複数磁壁の時間的な安定性等、検討すべき課題が明確になってきた。これら課題の解決には、一旦基礎に立ち戻った検討が必要であり、プロジェクトとして実用化を目指した研究開発フェーズに移行する段階において、公募により新たに委託先を加え、その後の2年間を使ってこれら課題に取り組むことはリソースの効率的運用の観点から適当でないと判断。

(3) スピン能動素子設計技術

スピン能動素子(スピントランジスタ)として検討しているふたつの方式は、スピン RAM、磁壁移動メモリに次いで実用化が想定され、情報通信機器の画期的な低消費電力化に有効な「ノーマリー・オフ・コンピュータ」の要素デバイスである。また、それぞれの実現可能性が拮抗しており、また、いずれの方式も異なる他の用途でそれぞれ有益な技術開発テーマであるため、どちらか一方への絞り込みは行わない。

(4) 不揮発性スピン光機能素子設計技術

不揮発性スピン光機能素子は、提案したデバイス構造において H20 年度内に基本動作を確認し、強磁性体ナノ構造体における光を利用したスピン制御技術として一定の成果が得られる一方で、最終目標に定めた「10ps幅の単一光パルス」による安定な書き込み動作が困難と予想される。これは、この短パルスで得られるスピン偏極電流量で安定に書き込み動作を実現するには、ナノ構造体界面を通して磁性体に効率的に電流を注入する必要があり、現時点ではこの注入効率が低いためである。この課題を解決するには、より基礎的なナノ構造体界面制御技術の開発が不可欠である。不揮発性スピン光機能素子テーマの技術開発フェーズ、

および実用化を見通した研究開発の優先度を考慮し、平成20年度末で中止とした。

5. 評価に関する事項

NEDO 技術開発機構は、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成 20 年度に実施した。また、事後評価を平成 23 年度に実施する。

Ⅲ. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

1.1 プロジェクトの概要

本プロジェクトでは、スピントロニクス技術の最大の特長である磁気ヒステリシス効果を用いる不揮発性機能により、多種多様なスピン不揮発性デバイス実現のための基盤技術を確立することを目的とした。



開発項目は大きく、「①スピン RAM 基盤技術」と「②スピン新機能素子設計技術」の二つに分類されている。①は実用化指向の性格の開発であり、②は基礎的・基盤的な性格の開拓である。

「①スピン RAM 基盤技術」では、DRAM を不揮発性メモリ(スピン RAM)で置き換えることを目指し、スピン RAM の心臓部である低電力磁化反転 TMR 素子技術を開発した。既存の MRAM の容量が本質的に100Mビット程度で頭打ちである問題を解決するために、TMR 素子に流す電流で直接情報(磁化方向)を書き込むスピン注入磁化反転技術を開発して、ギガビット級の大容量と DRAM 並みの高速動作を可能とすることを目指した。その実用化可能性の高さ、期待される市場規模の大きさ、そして国際的な競争の激化を考慮して、開発予算の約65%が投資された。

「②スピン新機能素子設計技術」では、より挑戦的な各種不揮発性機能デバイスの開発を狙い、新たな発想に基づくスピンと電子・光との間の相互作用に起因する種々のスピントロニクス現象の解明とその制御性に関する技術開発を通して、素子の設計技術を開拓することを目指した。

②－(1)磁壁移動メモリデバイス設計技術(磁壁メモリ)は、強磁性細線を流れるスピン偏極電流により磁壁が移動する現象を利用して、SRAM 並みの高速動作が可能な不揮発性メモリを実現することを目指した。②の中ではもっとも出口イメージが明確なこのテーマには、開発予算の約20%が投入された。

②－(1)磁壁移動ストレージデバイス設計技術(磁壁ストレージ)は、磁壁メモリと同様にスピン偏極電流による磁壁移動現象を利用するもので、これにより磁気ハードディスクのような機械的回

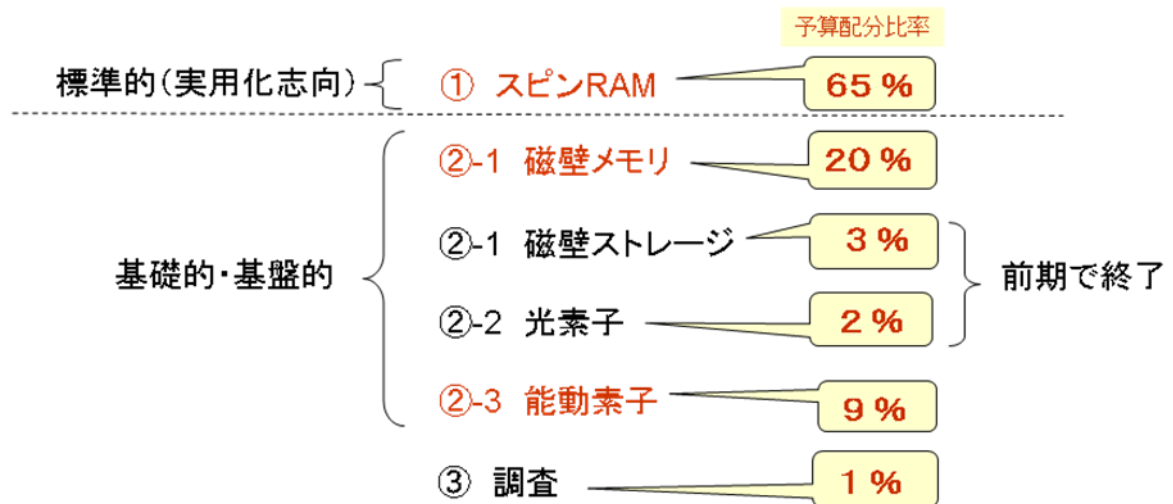
転機構がない、磁気ストレージの可能性を実証することを目指していた。本テーマは、委託先企業における開発体制の変更に伴い、平成 20 年度をもって開発を終了した。

②－(2) 不揮発性スピン光機能素子設計技術は、磁性スピンと半導体光導波路光の相互作用を利用する新しいタイプの不揮発性光メモリの可能性を実証することを目指した。中間評価分科会において、研究費配分が少なく、このまま継続しては十分な成果が期待できないのではないかとの指摘を受けたことから、平成 20 年度をもって開発を終了した。ただし、その後も継続的に、多くの国際会議における招待講演を受けるなど、その成果は、基礎的ながらもオリジナリティーの高いものとして注目されている。

②－(3) スピン能動素子設計技術は、不揮発機能を有する三端子電子素子(スピントランジス)の可能性を実証することにより、より高機能な不揮発性素子の可能性を探ることを目指した。スピントルク現象を利用するスピントランジスタと、ハーフメタル電極を用いるスピントランジスタの二つの方式で開発を行った。開発予算の約9%が投入された。

また、開発予算の約1%を用いて、国内外の研究動向調査、スピントランジスタ等の将来における応用市場の調査、ならびに標準化に関する調査を行い、研究指針の機動的な見直しに役立った。

NEDO予算 : 約38億円(内加速分8億円)



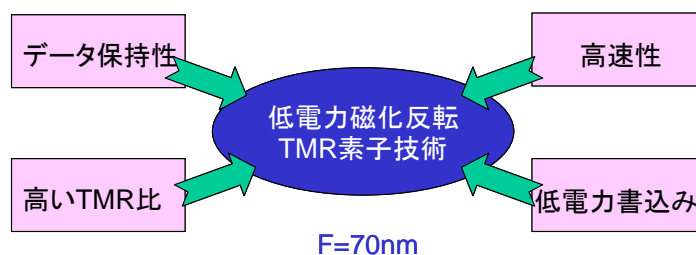
なお、海外の研究開発動向や競争の激化を背景に、本プロジェクトのさらなる開発の加速を行う必要性が内閣府総合科学技術会議により認定され、平成 21 年度には革新的技術費(3.3億円)が投入された。これにより、①スピンRAM 開発においては垂直磁化薄膜材料の高度化のためのスパッタ装置の導入、②－1磁壁メモリ開発においてはメガビット規模での試作評価が実施された(別添参照)。

1.2 各研究開発項目の成果の概要

1.2-①-(1) 「スピンRAM基盤技術」(低電力磁化反転 TMR 素子技術)

ギガビット級の次世代 MRAM として期待されるスピン注入磁化反転技術を用いるスピン RAM を実現するためには、書き込みに関する技術と読み出しに関する技術とともに新たに開発する必要がある。中でも、その心臓部である TMR 素子の高度化が不可欠であり、本サブテーマでは、そのための材料・素子技術の開発を行うことを目的としている。読み出し技術に関しては、高い TMR 比の実現が DRAM 並みの高速動作のために不可欠である。一方、情報書き込み電流値の低減は最大の課題である。すなわち、1ギガビットのメモリ容量に相当する微細($\leq 0.005 \mu\text{m}^2$)な TMR 素子においても、10年間以上のデータ保持が可能な大きな記憶保持エネルギー Δ を持つ TMR 素子を作製し、その情報記憶層の磁化方向を微小な CMOS トランジスタで駆動できる電流(I_d)以下の電流値で反転させることのできる低電力書き込み技術の開発が必要である。これらの、時として相反する各特性を併せ持つ低電力磁化反転 TMR 素子を、単なる個別技術の観点ではなく、スピン RAM の実用化の観点からバランスよく開発することが求められている。

必要な記憶保持エネルギーの大きさはエラー訂正回路などに、また利用可能な I_d の値は CMOS 構造などに依存するが、 $\Delta \geq 60 k_B T$ で、かつ 60-70nm 世代の Low stand-by CMOS の駆動電流($I_d=30-35 \mu\text{A}$)以下の I_c で書き込める技術の開発が目安となる。TMR 素子は反平行磁化配列の場合、平行磁化配列の抵抗値の3倍程度の大きな抵抗値をとるため、利用可能な I_d が小さい。よって、実際の目標は初期状態、反平行磁化配列から平行磁化配列への反転電流値($I_{c_{AP-P}}$)を I_d 以下($25 \mu\text{A}$ 程度)とすることとなる。



本サブテーマは、サブリーダー(東芝 與田博明)の指導のもと、東芝、産総研、東北大学、大阪大学、電気通信大学(大阪大学から再委託)の共同研究開発体制によって実施した。

1.2-①-(1)-1 基本計画の目標

MgO をトンネル障壁とする TMR 素子を対象として、高 TMR 比発生機構の解明による高 TMR 比と最適素子抵抗値を併せ持つ素子の設計技術、スピン注入磁化反転機構の解明による高速低電力スピン注入磁化反転技術、薄膜構成・材料および素子形状の最適化による安定動作技術を実現することにより、ギガビット級スピン RAM の可能性を実証する。

最終目標

200%以上の TMR 比を有する垂直磁化 TMR 素子技術を開発する。これを用いて、スピン注入磁化反転により DRAM 並みの高速読み書きを安定して行うことができる TMR 素子技術を開発し、CMOS 回路との整合をとった $0.005 \mu\text{m}^2$ 微細 TMR 素子集積アレイによるスピン RAM の動作を実証する。

1. 2-①-(1)-2 成果の要約と意義

(開発成果の要約)

前期3年間は、(i)記憶層材料の探索・TMR 素子積層構造の最適化、(ii)高性能 MgO 障壁作製法、(iii)スピン注入磁化反転ダイナミクスの3テーマの開発を行い、後期2年間にはさらに(iv) 高速読み書きに適した TMR 素子の開発、(v)CMOS 回路と整合する TMR 素子の開発、(vi) 記憶層・参照層材料の高度化技術の開発、(vii) 1Mbit アレイの試作による TMR 素子の開発、(viii) 64Mbit アレイの試作による TMR 素子の開発を行った。以下関連項目ごとにまとめて成果を報告する。

(i)記憶層材料の探索・TMR 素子積層構造の最適化、(ii)高性能 MgO 障壁作製法、(vi) 記憶層・参照層材料の高度化技術の開発

本プロジェクト開始時点では、スピン RAM 用のスピン注入磁化反転現象としては、CoFeB/MgO/CoFeB 構造の面内磁化 TMR 素子を用いたもののみが報告されていた。この CoFeB 系 TMR 素子は、大きな TMR 比の実績があるため、信号読み出しには有利である一方で、本質的に磁気異方性が小さいために、これをギガビット級に対応する微小サイズまで微細化したときのデータ保持特性には大きな不安がもたれていた。一方、垂直磁化材料は大きな磁気異方性を有するため、これを記憶層として用いる TMR 素子でスピン注入磁化反転が実現できれば、データ保持の問題は解決可能である。しかしプロジェクト開始時点では、垂直磁化 TMR 素子を用いたスピン注入磁化反転の実験的報告は皆無であり、低電流スピン注入磁化反転や大きな TMR 比を実現する目処は全く立っていなかった。そこで、本プロジェクトにおいては、垂直磁化 TMR 素子において低電流スピン注入磁化反転および大きな TMR 比を実現できる目処を立てることを最初に取り組んだ。

低電流スピン注入磁化反転のために、記憶層材料の薄膜化と減衰定数(磁化反転の摩擦係数) α_{damp} の低減を両立する記憶層材料・成膜プロセスを工夫した。減衰定数 α_{damp} はその値が小さいほど、スピン注入磁化反転に必要なスピントルク、すなわち反転電流値が小さくなる。そのため、種々の記憶層候補材料の減衰定数の系統的な評価を行った。並行して、減衰定数の評価手法として、外部磁界印加強度(角度)を変化させて測定する強磁性共鳴法の手法を開発した。また、世界でも類をみない Pump-probe 法の光学系を構築することに成功し、低減衰定数を有する垂直磁化膜材料系の開発に使用した。その結果、垂直磁化膜において従来材料に比べ、減衰定数が 1/5 以下の材料を見出した。また、TMR 比増大のためには、TMR 積層膜の平滑化中心に検討し、下地材料を工夫することにより、その平滑性などを大幅に向上させることに成功した。その結果、平成 20 年度の時点で Fe 系新垂直磁化記憶層材料(組成非公開)が有望であることを見出し、 $3 \times 10^5 \text{A/cm}^2$ のスピン注入磁化反転電流値と 110% の TMR 比を実現した。このスピン注入磁化反転電流の値は、この時点までに報告されている値に比べ 1 桁小さな世界最高性能の値であり、また TMR 比の値も垂直磁化 TMR 素子の値としては世界最高性能である。1G ビットスピン RAM を

実現するためには、その集積度に対応する CMOS の駆動可能電流 $25 \mu\text{A}$ で磁化反転する必要があり、直径 50nm の垂直磁化 TMR 素子を用いる場合は、約 $1.25 \times 10^6 \text{A/cm}^2$ の反転電流密度より小さい必要がある。すなわち我々は、 1G ビットスピン RAM を実現するための実質目標値の $1/4$ もの低い電流密度を達成したことになる。この世界的に突き抜けた成果が持つ優位性を確実にするため、 50nm 直径 TMR 素子からなる 1k ビットアレイを作製し、スピン注入磁化反転電流のバラツキの評価を行うとともに、その作製プロセスの改善により、バラツキを低減することに成功した。さらに、トンネル障壁の形成プロセスを工夫し、垂直磁化 TMR 膜で世界最高の 202% の高 TMR 比 を実現した。

TMR 素子のトンネル障壁層に用いられる MgO 層の高品質化は、高い TMR 比を実現することと、情報読み書きのための電界負荷耐性を向上するために不可欠である。そのため、MgO 層の作製手法の検討を行い、TMR 比の向上を目指すとともに、10 年間の連続動作に耐えうることを確認を行った。まず、MgO トンネル障壁層を、直接スパッタ法、ラジカル酸化法、プラズマ酸化法で作製した TMR 素子の特性を調べた。その結果、直接スパッタ法が最適であることが分かった。

次に積層構造を最適化と成膜プロセスの改善により、電圧加速により MgO トンネル障壁の寿命を測定し、スピン RAM の実使用電界印加条件下で 1Gbit 中のワーストビットが 10 年間の寿命を持つことを確認した。また実際に繰り返し Read/ Write 測定を行い、Endurance を測定した結果、 3.6×10^{12} 回以上の繰り返し耐性を持つことを実証した。これ以上の測定は時間的制約から無理であり、実際には無限回の書き換え耐性があることが推定された。

(iii) スピン注入磁化反転ダイナミクス、(iv) 高速読み書きに適した TMR 素子の開発

反転電流値の低減、そのバラツキ低減、および磁化反転の高速化などのスピン RAM の設計指針の確立のため、スピン注入磁化反転機構の解明および正確な理解をするための検討を行った。スピン注入磁化反転は、スピン偏極電子によるスピントルクが摩擦力よりも大きくなったときに起こる。よって、スピントルクと摩擦力を分離して把握するための、評価方法を開発し、得られた知見をもって、記憶層材料の探索・高性能 MgO 障壁の研究等にフィードバックをかけた。

スピン注入磁化反転現象の機構解明にも世界的に大きな寄与をすることができた。本プロジェクトでは、電圧バイアス下におけるスピントルクの定量的評価をするために、スピントルクダイオード効果に基づく独自の評価手法を開発した。その結果、CoFeB 系 TMR 素子を用いて、そのスピントルクの複雑な電圧バイアス依存性を世界で初めて明らかにすることに成功した。この成果は 2008 年の Nature Physics に報告され、スピン注入磁化反転の謎を初めて解いたものとして世界的に高く評価されている。このスピントルク評価法は、低電流でスピン注入磁化反転が可能な TMR 素子の開発に大きく寄与した。

また、スピン RAM の高速動作限界を決めるスピン注入による磁化反転の実時間測定も行った。その結果、比較的低い電流を通電した場合、スピン注入磁化反転は通電開始からある待ち時間の後に突然起こり、熱励起過程が支配的であることを見出した。待ち時間は、たとえば 1nsec から 10nsec まで広く分布するが、反転時間そのものは 1nsec 程度と非常に短いことを直接確認した。この発見に基づき、その詳細な検討を行い、低電流かつ高速な磁化反転を実現するための設計指針を得た。

これらの知見を基に垂直磁化膜の反転時間の解析的なモデル式を導出し、総合的な設計法を確立し、この式が妥当であることを確認した。垂直磁化膜のダイナミクスに対する参照層などの磁化ダイナミクスの影響をマイクロマグネティクスシミュレーションにより評価し、参照層の異方性を増大させることにより、安定な書き込みができることを明確化した。さらには、30nsec パルス書き込みにおいて、「0」書き込み、「1」書き込みの両方で反転確率 100%になる磁化反転を確認し、安定した書き込みを実証した。また、リードディスタープをシミュレーションにより評価する手法を確立し、安定した読み出しのための設計指針を得た。これらにより、DRAM 並みの高速書き込み・読み出しが安定してできるような設計マージンが確保できることを確認した。

(v) CMOS 回路と整合する TMR 素子の開発、(vii) 1Mbit アレイの試作による TMR 素子の開発、(viii) 64Mbit アレイの試作による TMR 素子の開発

CMOS 回路と整合する TMR 素子の開発として、低抵抗化、TMR 比向上、シフト補正層付与、素子の微細化等、各パラメータを適切なものとする開発を行った。上記で開発した TMR 素子において低抵抗化を行い、 $RA < 20 \Omega \mu m^2$ の低抵抗で 200% の TMR 比を達成し、さらに反転電流が約 $20 \mu A$ と低電流でスピン注入反転できることを確認した。次にビットの安定化のためのシフト補正層膜を開発、TMR 素子に積層形成する技術を構築し、シフト補正層を付与した素子で $0.002 \mu m^2$ (50nm 直径) 微細 TMR 素子の作製を行った。さらに、パターン形成方法とエッチング方法の調整により、直径約 30nm の微細加工までも実現した。これら技術を統合し、1Mbit アレイおよび 64Mbit アレイの試作し、動作実証を行なった。また、これら大規模アレイを用いて TMR 素子の開発にフィードバックをかけ、統計的なデータ解析に基づく作製プロセス改善により、抵抗分布の改善、保持力ばらつき改善を実現した。

(最終目標の達成度)

本プロジェクトの最終目標は、スピン注入磁化反転により DRAM 並みの高速読み書きを安定して行うことができる TMR 素子技術を開発し、CMOS 回路との整合をとった $0.005 \mu m^2$ 微細 TMR 素子集積アレイによるスピン RAM の動作を実証することであった。

今回得られた結果は、CMOS 回路との整合をとった垂直磁化膜 TMR 素子において $20 \mu A$ の反転電流と 200% 超の TMR 比を示し、また、30nsec という DRAM 並みの高速動作において安定した書き込みおよび読み出し動作を示すことが分かり、DRAM 並みの高速読み書きを安定して行うという目標を達成している。また、CMOS 回路と整合を取った $0.002 \mu m^2$ 微細 TMR 素子を用いた 64Mbit アレイを作製し、メモリとしての動作を実証しており、CMOS 回路との整合をとった $0.005 \mu m^2$ 微細 TMR 素子集積アレイによるスピン RAM の動作を実証するという目標をより微細な TMR 素子を用いて十分に達成している。

以上示したように、本プロジェクトの最終目標を大幅に上回る達成度となっている。

(成果の意義)

本プロジェクトを開始した平成 16 年時点では、スピン RAM の実現可能性に対する懐疑的な見方が支配的であった。そのため、本プロジェクトは、スピン RAM に関する本格的な国家プロジェクト

としては世界初のものとなっている。困難な課題を解決するために、本プロジェクトでは、16MbitのMRAM 試作実績を持つ東芝、今や世界の標準となった CoFeB/MgO/CoFeB-TMR 素子を世界で初めて開発した産総研、TMR 素子の世界初の開発者である東北大、スピントルク現象の定量的評価手法を世界で初めて開発した大阪大学からなる強力なチームに加えて、磁化反転シミュレーションで世界的に知られる電通大を再委託先とする強力な研究開発体制を編成した。

その結果、世界初のスピントルクの定量的理解などの多くの先端的な成果を誇ることができているが、中でも低電流書き込みと高 TMR 比を両立する垂直磁化 TMR 素子を開発し、ギガビット級スピン RAM の基盤技術を確立し、その実現可能性を世界に広く認識させたことは特に強調されるべき成果である。これらの成果に刺激されて IBM, Freescale, Qimanda, Samsung, Hynix などの代表的半導体メモリーメーカーに我々を追従する動きが出てきており、2008 年に韓国と米国 DARPA が急遽スピン RAM 開発の国家プロジェクトを開始する動きに繋がった。これにより、その後のスピン RAM 開発競争は激化したが、現時点で本プロジェクトが有する優位性は保たれており、今後はこの優位性を保ちながら事業化へ向けた開発が加速されるものと期待される。

1. 2-①-(1)-3 特許等の取得

国内特許 65 件、外国特許 63 件

現状、スピン RAM 実用化に障害のある特許は存在しない。また、東芝は低電力磁化反転を実現する上で必須な垂直磁化記憶層材料の特許をはじめ、下地材料などの材料特許網を構築している。

1. 2-①-(1)-4 成果の普及

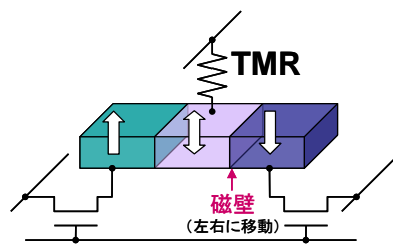
論文 37 件、学会発表 238 件（内、招待講演 83 件）

MMM2007 で世界初の垂直磁化 TMR 素子による低電流スピ注入磁化反転について発表、ひきつづく Intermag2008 では信頼性の高い垂直磁化材料を用いたスピ注入技術について招待講演を行った。これらの発表により上述のように欧米、韓国の代表的半導体メモリーメーカーが我々に追従する動きが出てきた。2008 年に韓国と米国 DARPA は急遽スピン RAM 開発の国家プロジェクトを開始する動きに繋がっている。また、ISSCC2010 では、64Mbit-スピン RAM アレイの発表を行い、集積度でも世界トップレベルであることをアピール。さらに Intermag2011 では、スピン RAM の基盤技術として垂直磁化方式の TMR 素子技術を確立したことをアピールした。

1. 2-②-(1) 「スピン新機能素子設計技術」(新ストレージ・メモリデバイス設計技術)

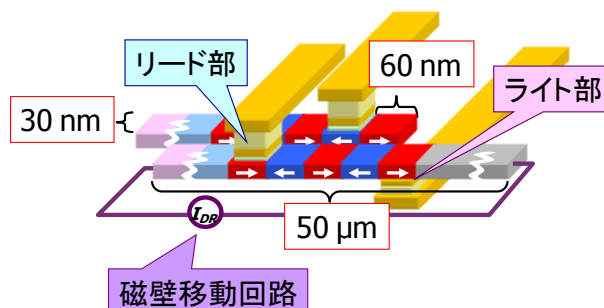
強磁性金属ナノ構造中の磁壁をスピン偏極電流で移動させる技術を開発するとともに、これらの技術を用いた新しいストレージ・メモリデバイス構造を提案し、既存デバイスに対するその優位性を明らかにすることを目的とした。

磁壁移動メモリデバイス設計技術は、200MHz程度で動作するSRAMの高速性を備えた混載高速不揮発 RAM 技術の開発を狙った。メモリの動作速度は周辺回路の応答特性に大きく依存することが知られている。通常のMRAM やスピンRAM では、1個のTMR素子と1個のトランジスタを組み合わせて実現されるが、日本電気は1個のTMR素子と2個のトランジスタの組み合わせにより、SRAM相当の高速動作が可能であることを、既に磁界書き込み方式のTMR素子を用いて示している。しかしながら、磁界書き込み方式のTMR素子は素子サイズの縮小が困難である。一方、スピン偏極電流による磁壁移動素子は原理的に素子サイズの縮小にスケールラブルな特徴を持つ。よって、スピン偏極電流駆動磁壁移動現象と2個のトランジスタの組み合わせによる、スケールラブルな混載高速不揮発RAM技術を開発することを目標とした。



磁壁移動メモリデバイスの基本構造。単一の磁壁をスピン偏極電流で左右に移動させ情報を書き込み、中央部の磁化の向き(情報)をTMR素子で読み出す。

磁壁移動ストレージデバイス設計技術は、現在の磁気ハードディスクのような機械的な可動部(ディスク、アーム)が無い新しい磁気ストレージ技術の開発を狙った。磁気細線(30 nm×50 μm)に多数の磁壁を詰め込むとともに多層積層することにより、1チップで160Gビット、十数チップでテラビットオーダーの磁気ストレージが可能になる。



磁壁移動ストレージデバイスの基本構造。ライト部で書き込んだ情報(磁壁)を、スピン偏極電流で一斉移動させシフトレジスタとする。リード部のTMR素子で情報を読み出す。

磁壁移動メモリ、磁壁移動ストレージともに、その実現の成否は、低電力でかつ高速なスピン偏極電流による磁壁移動の実現である。そのためスピン偏極電流による磁壁移動のダイナミクスを解明するとともに、その知見を用いて書込、移動、読取の各機能を一体化したデバイスを試作し、その機能を実証することがポイントとなる。

前期(H18年度～H20年度)は、サブリーダー(京都大学 小野輝男)の指導の下に、磁壁移動メモリデバイス設計技術の開発を日本電気が、磁壁移動ストレージデバイス設計技術の開発を富士通が担当した。また、これらデバイスの実現に共通して必要となる磁壁移動ダイナミクスの解明と制御は京都大学(一部を電気通信大学に再委託)が担当した。この体制により、京都大学(電気通信大学を含む)は、日本電気および富士通と一体的な研究開発を行い基盤的知識を共有すると同時に、企業間の秘密情報の管理も可能とした。

磁壁移動ストレージデバイス設計技術の開発は、平成20年度で終了させた。これに伴い、後期(H21年度～H22年度)においては、日本電気の石綿延行をサブリーダーとして、磁壁移動メモリデバイス設計技術と磁壁移動ダイナミクスの解明と制御の開発を一体的に実施した。

以下に、磁壁移動メモリデバイス設計技術と磁壁移動ストレージデバイス設計技術の二つに分けてその成果の概要を述べる。磁壁移動ダイナミクスの解明と制御に関する成果は、その性格上独立でないため、各項目の一部として記述されている。

1. 2-②-(1)-1-1 基本計画の目標(磁壁移動メモリデバイス設計技術)

強磁性金属ナノ構造中の磁壁をスピン偏極電流で移動させる技術を開発するとともに、これらの技術を用いた新しいメモリデバイス構造を提案し、既存デバイスに対するその優位性を明らかにする。

最終目標 (平成22年度):

単一磁壁で 100m/s の移動速度を低電流で実現する技術を開発するとともに、書込、移動、読取の各機能を一体化した素子からなる集積アレイによる新機能メモリの動作の実証を行う。

1. 2-②-(1)-1-2 成果の要約と意義(磁壁移動メモリデバイス設計技術)

(開発成果の要約)

SRAM 代替の最終製品として想定する 200 MHz 以上の動作速度、 $70F^2$ 程度のセルサイズ、駆動電流 0.7 mA 以下という仕様要求は、壁移動速度 100 m/s、駆動電流密度 10^7 A/cm² 台に相当する。よって、本プロジェクトの最終目標は、電流誘起磁壁移動技術において、「単一磁壁で 100 m/s の移動速度を低電流で実現する技術を開発するとともに、集積アレイによる新機能メモリの動作の実証を行う。」とした。

この目標を達成するために、①磁壁移動を低電流で実現する技術の開発、②単一磁壁で 100 m/s の移動速度の確認、③集積アレイによる新機能メモリの動作の、3つのステップを実施した。この内、①については、世界に先駆けた垂直磁化方式の提案と、これを実現する Co/Ni 積層垂直磁化膜の開発と磁壁移動素子への適用により、低電流化の目安である 1×10^7 A/cm² 台での動作を実現した。②については、磁壁移動距離が 200 nm の素子の試作評価を行い、2 ns 以下での磁壁移動による磁化反転を確認した。これは、磁壁移動速度の換算で 100 m/s を超える速度に相当する。また、③については、4 キロビットの集積アレイを試作評価し、CMOS からの書き込み電流方向に対応した磁壁移動による情報書き込みを MTJ の抵抗変化として検出することでメモリ動作を確認した。さらに、16 メガビットの集積アレイの試作評価を行い、回路動作を確認した。以上の結果、本プロジェクトの最終目標が達成された。以下にその技術内容を述べる。

「単一磁壁で 100 m/s の移動速度を低電流で実現する技術の開発」においては、まず、スピントルクによる磁壁移動の効率を向上させることによる書き込み電流密度の低減を、マイクロマグネティクスシミュレーションを用いて検討した。その結果、垂直磁化方式を用いることで電流低減が可能なことを明らかにした。この垂直磁化方式を実現するために、磁壁移動に適した Co/Ni 積層垂直磁化膜を開発し、これを用いた磁壁移動型メモリ素子を試作評価した。すなわち、シリコンの表面に酸化層を形成したウエハを基板として使い、この上に磁性体膜をスパッタ法により形成した。この磁性体膜上に所望の形状に加工したマスクを形成し、イオンビームエッチングにより磁性体膜を加工した。また、磁性体に電流を流すための電極を形成した。単一磁壁構造を形成するために、Co/Ni 磁壁移動層の端部に、

垂直磁気異方性の大きい Co/Pt 積層垂直磁化膜を磁化固定部として配置した。

以上の磁壁移動素子において、素子幅を変化させた素子での書き込み電流の測定を行った。その結果、素子幅を 100 nm 以下とすることで 0.2 mA 以下の書き込み電流を確認した。このときの電流密度は 3×10^7 A/cm² であった。さらに、磁壁移動長 200 nm の素子で 2 ナノ秒以下での書き込み動作を確認した。磁壁移動速度で 100 m/s 以上と換算された。以上のように、Co/Ni 積層垂直磁化膜を用いた磁壁移動素子の試作評価により、単一磁壁で 100 m/s の移動速度を低電流で実現する技術の開発に成功した。

「集積アレイによる新機能メモリの動作の実証」では、200 mm のシリコン基板上に CMOS 回路を形成した基板を用いて、4 キロビットの集積メモリアレイを試作した。メモリ素子の磁壁移動部には Co/Ni 積層垂直磁化膜を用いた。また、Co/Ni 磁壁移動層の左右の端部に、垂直磁気異方性の大きい Co/Pt 積層膜を磁化固定層として配置した。さらに、Co/Ni 磁壁移動層の磁化反転を検出するための MgO トンネルバリアを用いた MTJ 層を設けた。以上の集積メモリアレイにおいて、外部磁場による初期化で所望の単一磁壁構造を持つ初期磁化構造を確認した。すなわち、左右の固定層の磁化反転磁場の差を Co/Pt 積層膜の磁気特性差によって設けた。外部磁場により、左右の固定層および中央のデータ領域の磁化を一方向に揃えた状態から、外部磁場を反転することで、データ領域が磁化反転した状態を経て、一方の固定層が磁化反転することで単一磁壁磁化構造を実現した。

基板上の回路から素子に供給される双方向の極性の書き込み電流に従って、高抵抗と低抵抗を MTJ により読み出せることを確認した。すなわち、書き込み電流として 010101… のデータに対応した繰り返し書き込み電流、さらには、0000…、1111…、0000111100001111… などに対応した繰り返し書き込み電流の極性に対応した MTJ の抵抗変化を検出することでメモリ動作を確認した。

さらに、メガビット規模のメモリに向けての素子試作プロセスの構築、および、CMOS の設計を行なった。デバイス試作のためのレチクルの作製を行い、素子試作プロセス評価の結果、電氣的なショートや接続不良のない素子の正常な電氣的接続、および、正常な磁気抵抗効果と素子抵抗を確認した。以上の結果をもとに、作製したレチクルを用いての CMOS 基板の作製、さらにはその後の MRAM 工程を実施し、16 メガビットの集積アレイの試作評価を行い、回路動作を確認した。

以上、本プロジェクトの最終目標である「単一磁壁で 100 m/s の移動速度を低電流で実現する技術を開発するとともに、集積アレイによる新機能メモリの動作の実証を行う。」に対して、①低電流で実現する技術の開発、②単一磁壁で 100 m/s の移動速度の確認、③集積アレイによる新機能メモリの動作の実証に取り組んだ。垂直磁化方式の導入と、これを実現する Co/Ni 積層垂直磁化膜の開発と磁壁移動素子への適用により、 1×10^7 A/cm² 台での低電流動作と、100 m/s を超える磁壁の移動速度に相当する磁化反転を確認した。4 キロビットの集積アレイを試作評価し、CMOS 回路からの書き込み電流方向に対応した磁壁移動による情報書き込みを、MTJ の抵抗変化として読み出すことでメモリ動作を確認した。さらに、16 メガビットの集積アレイの試作評価を行い、回路動作を確認した。

(最終目標の達成度)

本プロジェクトの最終目標である「単一磁壁で 100 m/s の移動速度を低電流で実現する技術を開発するとともに、集積アレイによる新機能メモリの動作の実証を行う。」に対して、①低電流で実現する技術の開発、②単一磁壁で 100 m/s の移動速度の確認、③集積アレイによる新機能メモリの動作の実証に取り組んだ。垂直磁化方式の導入と、これを実現する Co/Ni 積層垂直磁化膜の開発と磁壁移動素子への適用により、 1×10^7 A/cm² 台での低電流動作と、100 m/s を超える磁壁の移動速度に相当する磁化反転を確認した。4 キロビットの集積アレイを試作評価し、CMOS 回路からの書き込み電流方向に対応した磁壁移動による情報書き込みを、MTJ の抵抗変化として読み出すことでメモリ動作を確認した。さらに、16 メガビットの集積アレイの試作評価を行い、回路動作を確認した。以上の結果、本プロジェクトの最終目標が達成された。

(成果の意義)

スピン偏極電流による磁壁移動現象の確認は本プロジェクト参加メンバーの小野によって最初になされたものであるが、本プロジェクトの開始時点までには、IBM がその詳細な検討とデバイス応用の試みにおいて先行する情勢となっていた。しかしながら、本プロジェクトにおける初期の検討により、IBM が開発していた面内磁化膜を用いるデバイスでは、安定な磁壁移動が困難であることがわかってきた。そのため、本プロジェクトでは、垂直磁化膜を用いる磁壁移動デバイスを世界に先駆けて提案し、その開発に取り組んだ。その結果、垂直磁化方式の利点を理想的に実現する Co/Ni 積層垂直磁化膜を世界に先駆けて開発し、スピン偏極電流による磁壁移動現象をメモリとして応用できることを実証した。現時点では、IBM も垂直磁化方式の開発を始めている。

本プロジェクトにより、スピン偏極電流による磁壁移動現象が、実際に SRAM 代替の混載高速不揮発 RAM に適用可能であることが明らかにされた。磁壁移動細線と 2 個のトランジスタを組み合わせるスケラブルな混載高速不揮発 RAM を実現するアイデアは、日本電気のオリジナルなものであるため、これを実際に市場に出していくことの意義は大きい。本プロジェクトで得た成果はその実現のための大きな一歩といえる。

1. 2-②-(1)-1-3 特許等の取得(磁壁移動メモリデバイス設計技術)

特許出願件数 合計 60 件

上記に先行する他社出願は散在するものの単発的であり、実用化に障害がある強い基本特許および特許網は存在しない。特許網を形成する活動は本プロジェクトが先行しており、スピン偏極電流による磁壁移動技術を用いた三端子 MRAM 素子構造、垂直磁化を用いた素子構造などの重要な特許を中心に戦略的に出願している。

1. 2-②-(1)-1-4 成果の普及(磁壁移動メモリデバイス設計技術)

投稿論文 23 件

学会発表 90 件

招待講演(国際) 22 件、招待講演(国内) 10 件
一般講演(国際) 15 件、一般講演(国内) 43 件

その他特記事項：受賞 7 件、プレスリリース・業界誌・など 11 件
(※計数は NEC と京大の合計数)

世界に先駆けて磁壁電流駆動という新しい技術領域を開拓し、混載メモリ応用への有用性を示したことのインパクトが、受賞や国内外からの招待講演、業界誌からの招待寄稿というかたちで現れた。特に垂直磁化膜における電流駆動磁壁移動の優位性を実証し、メモリ動作を実証したことのインパクトが大きい。

1. 2-②-(1)-2-1 基本計画の目標(磁壁移動ストレージデバイス設計技術)

本開発テーマについては、委託先企業における実施体制変更に伴い、平成20年度の間目標の達成をもって開発を終了した。

強磁性金属ナノ構造中の磁壁をスピン偏極電流で移動させる技術を開発するとともに、これらの技術を用いた新しいストレージデバイス構造を提案し、既存デバイスに対するその優位性を明らかにする。

中間目標 (平成20年度):

強磁性金属細線を対象に、スピン偏極電流による磁壁移動現象を利用した新ストレージデバイスの可能性と課題を明らかにするために、TMR 効果を用いた読み取り部と組み合わせた素子における複数磁壁の一斉移動の確認を行う。

1. 2-②-(1)-2-2 成果の要約と意義(磁壁移動ストレージデバイス設計技術)

(開発成果の要約)

る磁壁移動ストレージには、小型、軽量、耐衝撃性に加えて、現状の2.5インチ HDD と比較して、より速い転送速度と、大幅な低消費電力化を期待している。この仕様要求は、磁壁移動速度 50m/s と駆動電流密度 10^6 A/cm² 台に相当する。そのため、壁移動速度 30m/s、駆動電流密度 5×10^7 A/cm² の数値を目安として、実際に磁壁移動現象がこの目的のために使用できるものかどうかを調べることを目的に開発を行った。

(i) 低電流密度での磁壁移動の実現

細線の長さ方向に周期的な段差構造のトラップポテンシャル構造を提案し、その形成、及び評価を行った。その結果、形成した段差位置にて磁壁をトラップ出来ることと、そのトラップの強さ(デピニング磁界)はその段差深さにより制御可能であることを確認した。さらに、この段差トラップポテンシャル構造を付加した NiFe 磁性細線に電流を流すことで所望の方向に磁壁を移動出来ることを確認した。電流密度は 3×10^7 A/cm² であり、低電流密度で磁壁移動を確認することが出来た。

(ii) 磁壁移動の高速化

磁壁トラップポテンシャル構造の無い NiFe 磁性細線を用いて磁壁移動速度を実測し、最大で 38 m/s の値を得ることができた。

(iii) コヒーレントなマルチドメインの移動の実証

段差トラップポテンシャル構造付 NiFe 磁性細線において書込電流磁界のシーケンシャル印加により複数磁壁を形成し、磁性細線への駆動電流印加により複数磁壁の同一方向への同時移動を MFM による静的磁壁移動観察により確認した。また移動磁壁の読取部に関しては TMR 効果を用いた読取部を形成し、磁壁移動検知素子として十分な再生感度を確認した。

(iv) 磁壁の熱安定性の評価

高発熱効率基板の適用や、Waveguide 構造付素子での電流短パルス化による素子発熱の影響排除を検討した。京都大学の評価では 50 ns 以下の短パルス電流適用にて発熱影響のない磁壁移動挙動を確認し、熱不安定性を排除する磁壁移動デバイスの設計指針として得ることが出来た。

(中間目標の達成度)

NiFe 強磁性金属細線を用いて数～数百ナノ秒オーダーのスピンの偏極電流を用いた磁壁移動現象の評価を行い、スピン偏極電流の電流密度やパルス幅と磁壁移動挙動との関係を明らかにすることが出来た。また段差形状による磁壁トラップポテンシャル構造を用いた評価を行い、磁気細線形状と磁壁トラップ現象との関係を見出す事が出来た。低電流密度で高速の磁壁移動を実現すると共に、複数磁壁の形成や同時移動の静的確認を行うとともに、細線上に形成したTMR再生素子において、磁壁移動検出に十分な出力が得られることを確認し、中間目標を達成した。

(成果の意義)

IBM グループでは先駆的に磁壁移動型ストレージデバイスを視野に入れた磁壁移動技術の開発に取り組んでおり、2008 年 4 月には Science 誌に最新の開発成果を報告している。その中では 150 m/s の高速な磁壁移動速度、アシスト磁場無での磁壁駆動、及び複数磁壁移動のシーケンシャル制御等、優れた開発成果が報告されている。しかしながら、我々は、これらの技術の単純な延長では実際のストレージデバイスとしての実用化は難しいと考えている。この観点から、本プロジェクトでは安定動作可能な新材料の開発(低飽和磁化材料、垂直磁気異方性材料)、磁壁(ビット)移動長制御技術、読取感度向上等、実用化のための課題解決の視点から研究開発を行った。スピン偏極電流駆動磁壁移動現象をストレージデバイスに応用することを目指した研究開発の開始では、IBM に先行されたものの、本プロジェクトのこれまでの実施により、デバイス化の観点からは、全体としてはほぼ互角のレベルに到達できたと考えている。このように本プロジェクトでの開発により磁壁移動の基礎現象を解明し、磁壁移動を用いたメモリ・ストレージや他分野への応用に重要な知見を得ることが出来た。また低消費電力、高速転送が可能なストレージデバイスの実現可能性を示唆することができた。

1. 2-②-(1)-2-3 特許等の取得(磁壁移動ストレージデバイス設計技術)

国内特許 5 件、 外国特許 0 件

1. 2-②-(1)-2-4 成果の普及(磁壁移動ストレージデバイス設計技術)

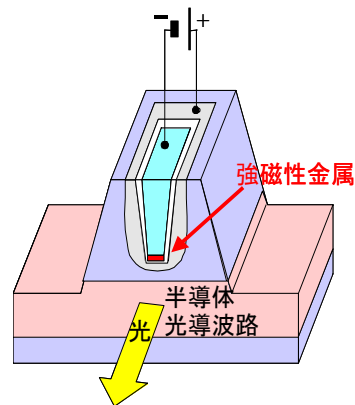
一般講演(国際)1件

1. 2-②-(2) 「スピン新機能素子設計技術」(不揮発性スピン光機能素子設計技術)

中間評価の結果にもとづき、本サブテーマは平成20年度で終了した。

スピントロニクス技術による不揮発性機能を光デバイスにも付与するためには、不揮発性機能に優れた強磁性金属と、光機能に優れる化合物半導体光導波路のハイブリッド構造におけるスピン情報と光情報との間の相互情報変換技術が必要である。この目的のため、半導体光導波路とハイブリッド化された強磁性金属ナノ構造のスピン情報を光で読出・書込する技術の開発を行った。

図は不揮発性光メモリの構造例である。情報の不揮発的な記憶は、光導波路に埋め込まれた強磁性金属の磁化(スピン)の向きによって行われる。情報の光読み出しは、光導波路特性が磁気光学効果によって磁化の向きに依存する効果を用いて行う。一方、情報の書込みは、導波光による熱書込みまたは、導波光により励起されたスピン偏極電子を利用して強磁性体の磁化を反転させることにより行う。スピン情報の読み書きは原理的には高速であるため、この技術が完成すれば、不揮発性の光バッファメモリの実現に道が開けるはずである。



不揮発性光メモリの構造例

本サブテーマの開発は、産業技術総合研究所が担当した。

1. 2-②-(2)-1 基本計画の目標(不揮発性スピン光機能素子設計技術)

光導波路中に埋め込まれた強磁性金属ナノ構造のスピン情報を導波路光を用いて制御・利用する技術を開発するとともに、これらの技術を用いた不揮発性機能を有する光機能素子を提案し、既存デバイスに対するその優位性を明らかにする。

最終目標 (平成20年度):

強磁性金属ナノ構造を含む光導波路における光・スピン相互作用を用いたスピン情報の制御技術を開発し、これを用いた高速不揮発性光メモリの基本動作を確認し課題を明らかにする。

1. 2-②-(2)-2 成果の要約と意義(不揮発性スピン光機能素子設計技術)

(開発成果の要約)

導波路中を伝播する光の偏光状態を制御して発生させたスピン偏極光電流による強磁性金属の磁化反転現象を用いた情報書込み、ならびに導波路を用いた強磁性金属層の磁化方向の読出し技術を想定し、素子作製プロセス技術、情報読み出し技術、情報書込み技術の開発を行い、

高速不揮発性光メモリの基本動作を確認することを目指した。

100nm角の強磁性体金属 Fe ナノピラーを(Al,Ga)As 半導体光導波路上に形成し、GaAs と Fe の界面抵抗を低減させる素子作製プロセスを開発した。また、Fe ナノピラーを埋め込んだ(Al,Ga)As 光導波路において、TM 導波モード光の光伝送損失が Fe ナノピラーの磁化に依存する現象を用いて、 $3 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ の Fe ナノピラーの磁化を 5.3dB の SN 比で読み出すことに成功した。さらに、偏光状態を高速に制御するための手法として、Mach-Zehnder 干渉計方式により、直交する直線偏光を有する 350fs 間隔の 230fs 幅光パルス列からなるデータパルスとクロックパルスを $\lambda/20$ 以下の精度で合成して光パルスの偏光状態を自由に制御する技術を開発した。この技術を用いて 450fs 間隔のハルス列の中から、選択的に一つのパルスを円偏光状態にして、GaAs に照射し、生成される電子のスピン偏極を測定したところ、隣接するパルスに影響されることなくスピン偏極状態が生成されることが分かった。これにより原理的には、2.2Tbit/sec 程度の光メモリの高速動作が可能なのことがわかった。

(最終目標の達成度)

素子作製プロセス、情報読み出し技術、情報書き込み技術のいずれにおいても基本計画の目標を達成した。これにより、高速不揮発性光メモリの基本動作が確認できた。

(成果の意義)

導波路光による強磁性金属ピラーの磁化状態の読み出しと書き込みの試みは従来まったく行われていなかった。本サブテーマで、実際に情報の読み出しを行うことが出来ることを示したことの意義は大きい。不揮発性光バッファメモリの実現にむけた大きな手がかりである。

1. 2-②-(2)-3 特許等の取得(不揮発性スピン光機能素子設計技術)

国内特許 2 件、 国際特許 2 件(PCT 出願)

本サブテーマで開発を狙っている不揮発性光メモリの基本特許は、産総研が保持している(特許番号4096100、特願2004-197964、米国特許 7171096)。

1. 2-②-(2)-4 成果の普及(不揮発性スピン光機能素子設計技術)

投稿論文 4件

学会発表 招待講演(国際) 6 件、 招待講演(国内) 1 件

一般講演(国際) 6 件、 一般講演(国内) 0 件

本サブテーマで開発を狙っている不揮発性光メモリはオリジナリティーの高い新概念のデバイスであるため、多くの招待講演を受けるなど、注目されている。

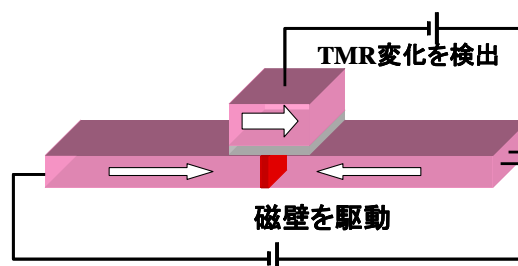
1. 2-②-(3) 「スピン新機能素子設計技術」(スピン能動素子設計技術)

これまで、GMR 素子、TMR 素子とその有用性を示してきたスピントロニクス技術には、さらに新しい革新的なデバイスを生み出すことが期待されている。最近になって、ノーマリー・オフ・コンピュータなど超低消費電力である情報通信機器の実現につながるスピントランジスタの実現可能性にも大きな期待が集まってきた。しかしながら、これらスピントランジスタに代表されるスピン能動素子は従来技術の延長によっては実現不可能なものである。その実現には、新たな発想に基づくスピンと電子との間の相互作用に起因する種々のスピントロニクス現象の解明とその制御性に関する技術開発を通して、素子の設計技術を開拓することが必要である。

本サブテーマでは、強磁性金属ナノ構造を用いた三端子構造を対象として、スピン偏極注入電流などにより発生するスピントルクを利用した電力増幅技術、ならびに、ハーフメタル電極の高スピン偏極度を利用した電流スイッチ技術を開発するとともに、これらの技術を用いた不揮発性機能を有するトランジスタ構造(スピントランジスタ)を提案し、不揮発性能動素子としての優位性を明らかにすることを目的としている。

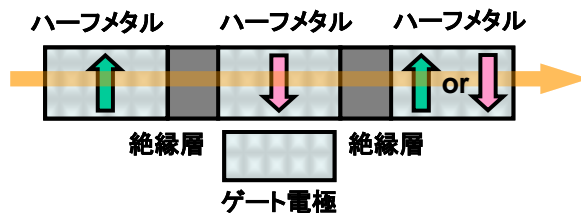
スピントランジスタにおいては、大きなスピン機能効果(磁気電流比)、大きな増幅度、そして室温動作が必要となる。しかし、従来の研究では、数 K の低温でも大きなスピン機能効果(磁気電流比)が見られず、ましてや室温における増幅度は全く実現されていなかった。この問題を解決するために、本サブテーマでは、(i) スピントルク方式スピントランジスタ設計技術と、(ii) ハーフメタル電極方式スピントランジスタ設計技術の二つの手法による開発を行った。スピントルク方式スピントランジスタの開発では、強磁性金属をベースとする構造を用いて、室温で増幅度を実現することを主目的とした。ハーフメタル電極方式スピントランジスタの開発では、最近開発された理想的なスピン偏極材料であるハーフメタルを用いた構造が秘める潜在能力を明確化することを主目的とした。

スピントルク方式スピントランジスタは、すでに MRAM・スピン RAM および磁壁メモリに使用されている磁化駆動の原理の応用範囲を広げて、アクティブデバイスを実現しようとするものである。



スピントルク方式スピントランジスタの構造例
スピン偏極電流が作るスピントルクで磁壁を移動させ、それによる TMR 比の変化を検出する。

ハーフメタル電極方式スピントランジスタは、ほぼ完全なスピン偏極度という特異な特徴を持つハーフメタルを電極として用いる三端子構造によって、不揮発性機能を有するトランジスタを創出しようとするものである。



ハーフメタル電極方式スピントランジスタの基本構造
ゲート電圧で電流をOn/Offするとともに、電極の磁化の向きでトランジスタ特性を変化させる。

スピントルク方式スピントランジスタの開発は大阪大学と産総研が、ハーフメタル電極方式スピントランジスタの開発は東北大学が担当した。

1. 2-②-(3)-1 基本計画の目標(スピン能動素子設計技術)

強磁性金属ナノ構造を用いた三端子構造を対象として、スピン偏極注入電流により発生するスピントルクを利用した電力増幅技術、ならびに、ハーフメタル電極の高スピン偏極度を利用した電流スイッチ技術を開発するとともに、これらの技術を用いた不揮発性機能を有するトランジスタ構造(スピントランジスタ)を提案し、不揮発性能動素子としての優位性を明らかにする。

最終目標 (平成22年度):

不揮発性情報記憶機能と増幅・スイッチング機能を併せ持つスピン能動素子の実用可能性を実証するために、スピントルクを用いたスピントランジスタにおいては室温において2以上のファンアウトの実現、ハーフメタルを用いたスピントランジスタにおいては2Kにおいて1000以上の磁化による電流 On/Off 比の実現とその室温動作のための条件の明確化を行う。

1. 2-②-(3)-2 成果の要約と意義(スピン能動素子設計技術)

(開発成果の要約)

(i) スピントルク方式スピントランジスタ設計技術

従来、強磁性金属ベースの素子がアクティブデバイスに使用された例はない。よって、本サブテーマでは、前期3年間で、実用的な強磁性金属薄膜からなるスピントロニクス素子において、室温で増幅度を出すことができることを実証することにより、スピントランジスタの可能性を探ることとした。そして、さらにその発展を図り、最終年度までに、三端子構造においてファンアウト2を室温で得ることを目標とした。

この目的のため、最初に電流注入スピントルクを用いた増幅作用の実証に取り組んだ。スピンRAMの項で述べたように、スピン偏極電流により発生するスピン移行トルクは磁化に作用して磁化

反転を生じる。この現象は電流がスピン歳差運動を誘起することを意味している。スピン歳差運動により磁化の平均の角度が変化すれば、TMR 素子構造では素子抵抗が変化する。このことは電流の変化に再び結びつくため、一般に、非線形応答が期待される。そこで、まず単純な 2 端子素子についてマクロスピンモデルを用いた計算機シミュレーションを行った。その結果、低抵抗・高磁気抵抗比を示す高性能トンネル磁気抵抗素子を用いれば、適当な条件下でこの素子が微分負性抵抗を示すことを見出した。そこで、実際に低抵抗の CoFeB/MgO/CoFeB-TMR 素子を作製し、その電流－電圧特性を測定した。その結果、TMR 素子に外部から印加する磁場と電圧を適当に選ぶことにより、負性抵抗の出現を確認した。さらに本素子に適当な負荷抵抗を直列につなぎ、直流印加電圧に微小な交流信号を重畳させて、負荷抵抗両端に現れる交流電圧を測定した。その結果、出力電圧は入力電圧より大きくなり、最大で電圧および電力増幅率 1.2 を室温で得た。電流トルクにより室温で増幅率が 1 を超えることを示した例は世界的に見ても今まで皆無であり、特筆すべき快挙といえる。

次に、この増幅作用を 3 素子において実現するために磁壁移動を用いた電流トルク型スピントランジスタ構造の検討を行った。具体的には Vortex 型の磁壁の共鳴運動を電流で駆動し、この結果生じる磁化の角度変化をトンネル磁気抵抗素子で検出する構造を作製した。この素子に高周波交流電流を印加した時に生じるホモダイン検波出力を測定することにより、磁壁の運動幅を実験的に求めた。この結果から 3 端子電圧増幅率を計算したところ実験に用いた直径 1 μ m の素子では 0.1 であるが、直径を 100nm 程度とすることにより 10 を超える電圧増幅率が室温で得られる事が見出された。作製可能なスピントロニクス 3 端子素子が室温で増幅作用を持つことを実験的に示した例は他にない。また、この結果を用いることにより電流トルク型スピントランジスタのゲインおよびファンアウトの理論的見積もり・設計が可能となった。

上記の実験およびシミュレーションを行う過程で電流磁界がスピンに及ぼすトルクを用いることにより中程度の大きさの素子においてより大きな増幅率が得られる可能性があることが分かった。そこで、トンネル磁気抵抗素子とコプレーナウエーブガイドをインテグレートした磁界トルク型スピントランジスタを作製した。その結果、室温で電力増幅率 5.6 を達成することに成功した。さらに、この素子の最適化および交流磁場によるアシスト効果を用いることにより電力増幅率 130、電流増幅率 4.9、ファンアウト 5 を室温で実証した。解析の結果、磁界トルク型のスピントランジスタは数 100nm 程度の大きさのときそのファンアウトが最大となること、有効保持力を数 Oe 程度にすれば熱安定化定数を 60 程度に保ったままでもファンアウトが最大 100 程度とれることを見出した。以上の成果は室温で実用可能な不揮発性スピントランジスタが実現可能であることを初めて示したものである。

最後に、電圧印加による磁気異方性変化を利用した電圧トルク型スピントランジスタについて検討した。実験から 0.5nm 程度の膜厚の強磁性層を用いることにより 0.5V/nm 程度の電界で磁化反転が可能であることを見出された。この結果を用いて、3 端子素子が実現できた場合の増幅率とファンアウトを検討した。

磁界トルク型スピントランジスタは素子サイズが大きくなると寄生抵抗のためにゲインが下がりファンアウトが取れなくなる。また、この素子は素子サイズが小さくなると電流駆動力が小さくなるが、磁化反転のためには一定の磁界を必要とするためファンアウトが得られなくなる。そのため、素子サイズに最適値が存在し、数 100nm 程度でファンアウトは最大となる。電流トルク型スピントランジスタも

素子サイズが大きくなると寄生抵抗の影響によりファンアウトを失う。この素子は小さくなると電流駆動力が下がるが、磁化反転に必要な電流も下がるため、素子が小さくなくても一定のファンアウトを維持する特徴がある。最後に、電圧印加による磁気異方性の変化に起因するトルクを用いた素子では、素子駆動に電流を必要とせず、わずかな静電容量の充電のための変位電流のみを必要とする。この電流は素子サイズが小さくなると比例して小さくなる。素子の電流駆動力も素子が小さくなると比例して小さくなるため、小さな素子のファンアウトは素子サイズによらず一定となり、10000を超える大きな値となることが期待される。一方この素子は動作層の膜厚が非常に小さいためベース抵抗が高く、素子が大きくなると急速に性能が劣化し100nm以上ではファンアウトを持たないと予想される。

以上、本プロジェクトでは室温で大きなゲインを持ち、ファンアウトが2を超えるスピントランジスタを実証した。本素子は高速動作可能かつ不揮発であることから不揮発論理素子を構成する際に優位性を持つと考えられる。また、電流トルク型スピントランジスタは100nm以下のサイズにおいて磁界トルク型スピントランジスタより大きなゲインとファンアウトを示し、優位性を示すことを明らかにした。さらに、電圧トルク型スピントランジスタについても検討し、50nm程度以下のサイズにおいて顕著な優位性を示す可能性があることを明らかにした。

(ii) ハーフメタル電極方式スピントランジスタ設計技術

従来、良質なハーフメタル薄膜は作製困難であったため、ハーフメタルを使用する三端子デバイスの検討は全くされていない。よって、本サブテーマでは、前期3年間で、低温において、1000%以上のTMR比に相当する高品質ハーフメタル材料を用いる三端子構造において、スイッチング機能を実証することにより、スピントランジスタの可能性を探ることとした。その実証に成功した場合には、さらにその改良を加え、最終年度までに、2Kにおいて1000以上の磁化による電流On/Off比を実現するとともに、その室温動作のための条件の明確化を行うことを目標とした。

この目的のために、最初に、高性能ハーフメタル材料の開発を行った。ホイスラー合金の組成および結晶方位を系統的に変化させて検討を行うことにより、 Co_2MnSi ホイスラー合金とMgO絶縁層を組み合わせたトンネル接合において低温で最大753%、室温で217%のTMR比を観測した。また、このような巨大なTMR比の出現機構を調べ、高TMR比には、MgO障壁層によるコヒーレントトンネリング効果と電極のハーフメタル性とがともに寄与している可能性があることが分かった。さらに、最終目標である1000%のTMR比を実現するために、 $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}$ 界面状態の改善に取り組んだ。 Co_2MnSi とMgOの界面に極薄の強磁性体薄膜を挿入し、スピン分極率を減少させる界面準位の形成を抑制することを検討した。CoFe、CoFeB、Coなどの種々の強磁性体薄膜の膜厚を系統的に変化させて界面挿入を行なった結果、2原子層程度の極薄CoFeを挿入した、 $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{CoFe}(0.5\text{ nm})/\text{MgO}/\text{CoFe}(0.5\text{ nm})/\text{Co}_2\text{MnSi}$ 接合で、2Kにおいて1275%の磁気抵抗比を観測し、最終目標を達成した。さらに、 $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{CoFe}(0.5\text{ nm})/\text{MgO}/\text{CoFe}$ 接合においては、室温においても350%の大きな磁気抵抗比を観測することに成功し、界面挿入が磁気抵抗比の改善に非常に有効であることを明らかにした。

次に、ハーフメタル材料を用いる三端子構造を作製し、その伝導特性を調べることにより、スピントランジスタの可能性を探った。 $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}/\text{Co}_2\text{MnSi}$ 構造の単障壁トンネル接合多層膜を微

細加工によって二重障壁のトンネル接合に形状加工するとともに、ソース、ゲート、ドレイン電極を付与するプロセスを開発し、最小 50×500nm サイズの三端子構造を作製した。作製したトランジスタ素子においてゲート電圧印加に伴うソースドレイン間の抵抗の変化を調べた結果、80 V 以上のゲート電圧印加で電流値が増大するとともに、その増大度はハーフメタル電極の相対的な磁化配列状態に依存することが分かった。しかし、この構造では、ゲートコンデンサーからのリーク電流が信号電流と同等程度の大きさであり、考案した動作原理とは異なる要因による伝導特性の変化が支配的であると判断した。これらの結果をもとに、ゲート電極構造を改良し、リーク電流が低減可能な素子構造を考案した。新規構造は、下部ホイスラー合金電極の下にゲート絶縁層およびゲート電極を設けることで、ゲート絶縁層の膜厚および面積制御によりゲート電圧を効率的に印加可能にした。新規構造における TMR 比は、単障壁のトンネル接合の特性には及ばないが、6K において 200%を超える高い値が観測できた。また、トンネルコンダクタンス特性を評価した結果、ハーフメタルギャップに起因する特性が得られ、Co₂MnSi 電極がハーフメタルとして機能していることが分かった。作製した素子について、トランジスタの動作特性を評価した。印加するゲート電圧をパルス形状とし、オシロスコープにより出力の過渡応答を評価した。ゲート電圧入力後、ゲートキャパシタンスに電荷をチャージするために電流が流れ、その後緩和していく様子が観測された。重要な点は、ゲート電圧印加前後で、大きく電流値が変化し、電流 On/Off 比が大きい点と、磁化平行状態、反平行状態で On/Off 比が変化している点である。最大の電流 On/Off 比は平行状態で 969、反平行状態で 2920 であり、最終目標である On/Off 比 1000 を達成した。また、平行状態と反平行状態の電流比を MC(Magneto-current)比とすると、約 200%と大きい値が得られた。これらのことから、当初目標としていた、大きな電流 On/Off 比と大きな磁気電流比を兼ね備えた素子ができたといえる。さらに、室温においても、磁化反平行状態で 970 倍の大きな電流 On/Off 比を観測することに成功しており、開発したスピントランジスタが、室温でも動作可能であることを示した。

(目標の達成度)

(i) スピントルク方式スピントランジスタ設計技術

まず、スピントルクダイオードにおける 2 端子微分負性抵抗の発見とこれを用いた室温における増幅作用の実証を行い。さらに、電流トルク型スピントランジスタの作製と増幅率の測定に基づいたその設計手法の確立を行った。さらに、磁界トルク型スピントランジスタを作製し、室温でファンアウト 5 を実証した。さらに、電圧トルク型のスピントランジスタについても検討を行った。最後にこれらの素子のスケールリング特性を評価しそれぞれのスケールにおける素子の優位性を明らかにした。以上の結果により、本研究課題の最終目標は完全に達成された。

(ii) ハーフメタル電極方式スピントランジスタ設計技術

目標とする TMR 比 1000%、および、トランジスタ素子において最大 2920 の非常に大きな電流 On/Off 比が得られた。このことで、計画当初の目標であった、ハーフメタル方式スピントランジスタが秘める潜在能力を明確化することができた。また、室温においても、磁気電流比は小さいが、大きな電流 On/Off 比が得られ、室温動作の可能性を示すことができた。

(成果の意義)

(i) スピントルク方式スピントランジスタ設計技術

従来からスピントランジスタに対する学会の関心は高く、すでにスピバルブトランジスタ、拡散型スピントランジスタ、共鳴トンネルスピントランジスタなど種々の方式のスピントランジスタが提案・試作されてきた。しかしながら、これまでは室温で増幅度を得た成功例は皆無であり、そのためスピントランジスタの実用可能性は全く不明とみなされていた。これに対して、本プロジェクトでは、二端子構造のスピントルクダイオードにおいて室温で 1 を超える増幅率をまず実証しインパクトを与えた。ついで、電流トルク型スピントランジスタおよび磁界トルク型スピントランジスタを作製し、その特性を明らかにするとともに後者においてが室温で 2 を超えるファンアウトを実証した。このことはスピントルクトランジスタが室温で動作する論理回路を構成できることを世界で初めて実証したものであり、今後の省エネルギー回路技術の発展にとって重要な一歩と言える。

(ii) ハーフメタル電極方式スピントランジスタ設計技術

全く新しい動作原理に基づく、ハーフメタル電極方式のトランジスタ構造を作製し、その動作を実証したことは非常に大きな成功といえる。また、目標とする TMR 比 1000% を、ハーフメタルホイスラー合金と MgO 絶縁層界面に極薄の強磁性金属を挿入することで達成した。さらに、トランジスタ構造の最適化により、パルスゲート電圧印加時の過渡応答特性において、MTJ の磁化が反平行状態のときに、6 K において最大 2920 倍の非常に大きな電流 On/Off 比が得られた。また、磁化平行、反平行状態による磁気電流比も、200% 以上と大きかった。これらの結果は、提案時の目標を超えるものである。さらに、室温においても、969 倍の大きな電流 On/Off 比を観測することに成功しており、開発したスピントランジスタが、室温動作可能であることを示した。これらの成果をもとに、将来的にスピントランジスタが実現し、情報通信機器の革命的な省エネルギー化、および、ユビキタス社会における待機電力の問題が解決されると期待できる。

1. 2-②-(3)-3 特許等の取得(スピン能動素子設計技術)

(i) スピントルク方式スピントランジスタ設計技術

国内出願 2件。

スピントルク方式トランジスタの基本特許は出願済である（特願 2006-241984、特開 2008-66479）。また、電圧による新しいスピントルクを用いる方法も提案し特許の出願をした(特願 2008-120614)。

(ii) ハーフメタル電極方式スピントランジスタ設計技術

国内出願 3件

ハーフメタル電極方式トランジスタの基本原理については、本プロジェクト提案時に特許出願を行なった。また、磁性材料について、産総研グループと共同出願した。さらに、トランジスタの過渡応答特性について特許出願を行なった。

1. 2-②-(3)-4 成果の普及(スピンの能動素子設計技術)

(i) スピントルク方式スピントランジスタ設計技術

論文 7件、招待講演(国際) 6件、一般講演 22件

国際会議の招待講演などで、室温における増幅度の実現を報告し、大きな反響を得ている。

(ii) ハーフメタル電極方式スピントランジスタ設計技術

論文 14件、招待講演 11件、一般講演 19件

論文や招待講演などにより、本プロジェクトが有する、極めて高品位な試料および素子作製技術についてアピールした。また、トランジスタの出力特性の成果に関しても、国際学会等で幅広く発信した。

別紙：特許、論文等

①スピンドRAM基盤技術

(1) 低電力磁化反転TMR素子技術

株式会社東芝

(a) 投稿論文 (5件)

平成19年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2007.6.11	Proceedings of 2007 IRPS	Effect of Interface buffer Layer on the Reliability of Ultra-Thin MgO junctions for Spin Transfer Switching MRAM	K.Hosotani, et. al.
2	2007.5.10	J. Appl. Phys. 101, 09A511 (2007)	Estimation of spin transfer torque effect and thermal effect of magnetization reversal in CoFeB/MgO/CoFeB magnetoresistive tunneling junctions	M. Yoshikawa, et. al.
3	2007.5.10	J. Appl. Phys. 101, 092504 (2007)	Temperature dependence of tunnel resistance for CoFeB/MgO/CoFeB magnetoresistive tunneling junctions: the role of magnon	S. Ikegawa, et. al.
4	2008.2.13	J. Appl. Phys. 103, 07A710 (2008)	Spin transfer switching in TbCoFe/CoFeB/MgO/CoFeB/TbCoFe magnetiv tunneling junctions with perpendicular magnetic anisotropy	M. Nakayama, et. al.
5	2008.3.12	J. Appl. Phys. 103, 07A720 (2008)	Reduction of switching current distribution in spin transfer magnetic random access	M. Iwayama, et. al.

(b) 学会発表 (51件)

平成18年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2007.1.8	10th Joint MMM/Intermag Conference	Estimation of spin transfer torque effect and thermal effect of magnetization reversal in CoFeB/MgO/CoFeB magnetoresistive tunneling	吉川将寿、他
2	2007.1.9	10th Joint MMM/Intermag Conference	Temperature dependence of tunneling resistance for CoFeB/MgO/CoFeB magnetoresistive tunneling	池川純夫、他

平成19年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2007.4.16	2007 IEEE International Reliability Physics Symposium	Effect of Interface buffer layer on the Reliability of Ultra-Thin MgO Tunnel Junctions for Spin Transfer	細谷啓司、他
2	2007.6.21	Spintech IV	Effect of Joule heating on estimating thermal stability factor	相川尚徳、他
3	2007.9.5	7 th International Workshop on Future Information Processing Technology	(招待講演) Potential pf MRAM for High speed & High Density Application	與田博明、他
4	2007.10.16	6 th International Symposium on Metallic Multilayer	Pulse duration dependence and effective energy barrier for current-induced magnetization	池川純夫、他

			switching in MgO-based tunnel junctions	
5	2007.11.6	52 nd Conference on Magnetism and Magnetic Materials	Spin transfer switching in TbCoFe/CoFeB/MgO/CoFeB/TbCoFe magnetic tunneling junctions with perpendicular magnetic anisotropy	中山昌彦、他
6	2007.11.7	52 nd Conference on Magnetism and Magnetic Materials	Reduction of switching current distribution in spin transfer MRAMs	岩山昌由、與田博明、他
7	2008.3.10	2008 American Physical Society March Meeting	Spin transfer torque switching in perpendicular magnetic tunnel junctions with Co based multilayer	永瀬俊彦、他
8	2008.3.27	第55回応用物理学関係連合会講演会	高集積MRAMを目指した垂直磁化磁気抵抗効果素子へのスピ注入書き込みの検討(シンポジウム招待講演)	與田博明、他
9	2008.3.28	第55回応用物理学関係連合会講演会	Co _x Fe _{1-x} 多層膜を用いた垂直磁化GMR素子のスピ注入磁化反転	西山勝哉、他

*独立行政法人産業技術総合研究所との共同発表(1件:該当欄にも記載)を含む

平成20年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2008.4.1	2008 IEEE International Reliability Physics Symposium	Resistance Drift of MgO Magnetic Tunneling Junctions by Degradation of Coherent Tunneling and Trapping	細谷啓司、他
2	2008.5.4	Intermag Europe International Magnetism Conference 2008	(招待講演) Spin Torque Transfer Switching of Perpendicular Magnetoresistive elements for High Density MRAMs	與田博明、他
3	2008.5.4	Intermag Europe International Magnetism Conference 2008	Tunnel Magnetoresistance over 100% in MgO based magnetic tunnel junction films with perpendicular magnetic L10-FePt electrodes	吉川将寿、他
4	2008.9	IDEMA 研究会	Lower-current and Fast switching of A Perpendicular TMR for High Speed and High density Spin-Transfer-Torque MRAM	與田博明、他
5	2008.9	International Technology Roadmap for Semiconductor Workshop on STT-RAM	Spin Torque Transfer MRAMs with Perpendicular MTJs	與田 博明
6	2008.9.15	第32回日本磁気学会学術講演会	垂直磁化方式スピ注入MRAMのスケラビリティ	甲斐 正、他
7	2008.9.15	第32回日本磁気学会学術講演会	垂直磁化MTJにおけるコヒーレントなスピ注入反転	中山 昌彦、他
8	2008.10	Pacific Rim Meetin on Electorchemical and solid state science 2008	Study of a spin torque transfer MRAM with perpendicular magnetization TMR elements as a high density non-volatile memory	與田 博明、他
9	2008.10	Nanotechnology Materials and Devices Conference 2008	Tunnel magnetoresistance over 100% in MgO based magnetic tunnel junction films with perpendicular magnetic L10-FePt electrodes	與田 博明、他
10	2008.10	文科省・NEDO-Pj合同講演会、スピントロニクス	スピNRAM基盤技術の開発	與田 博明、他
11	2008.10	応用電子物性分科会・ス	Efficient spin transfer torque writing of perpendicular MTJ	與田 博明、他

		ピントロニクス研究会 共同主催研究会「スピ ントロニクスの基礎と応 用—高密度・熱安定スピ ン材料・デバイスと集積 回路技術」		
12	2008.11.12	MMM2008 (53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials)	Advantage of Perpendicular MRAM using Spin Transfer Torque Switching for a high density non-volatile memory	甲斐 正、他
13	2008.11.13	MMM2008 (53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials)	Stable Spin transfer switching in magnetic tunnel junctions with perpendicular magnetic anisotropy	中山 昌彦、他
14	2008.11.14	MMM2008 (53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials)	L10 ordered FePtB thin films with small distribution of perpendicular magnetic anisotropy	北川 英二、他
15	2008.12	Asian Magnetics Conference 2008	Study of a spin torque transfer MRAM with perpendicular magnetization TMR elements as a high density non-volatile memory	與田 博明、他
16	2008.12.16	2008 IEEE International Electron Devices Meeting	Lower-Current And Fast Switching Of A Perpendicular TMR For High Speed And High Density Spin-Transfer-Torque MRAM	岸 達也、他
17	2009.1.16	日本磁気学会、第24回 スピントロニクス専門 委員会「垂直磁化とスピ ンエレクトロニクス」(招待講演)	垂直磁化方式スピン注入MRAMと そのスケラビリティ	與田 博明、他
18	2009.3.31	第56回応用物理学関係 連合講演会 (Japan-Korea Session 招待講演)	Spin Torque Transfer Switching of perpendicular MTJ	與田博明、他

平成 21 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2009.7.24	2009 International Symposium on Tera-bit-Level Non-volatile Memories	Review of technologies for high density MRAMs focusing on spin torque transfer writing(招待講演)	與田博明
2	2009.9.8	第70回 応用物理学会 学術講演会	垂直磁化方式TMR素子の高TMR 化	西山勝哉、他
3	2009.9.10	第70回応用物理学会学 術講演会	L10-Fe系合金を用いた垂直MTJ における低電流磁化反転	北川英二、他
4	2009.9.14	第33回日本磁気学会学 術講演会	垂直磁化L10-FePd記憶層のスピ ン注入磁化反転	吉川将寿、他
5	2009.9.14	第33回日本磁気学会学 術講演会	Fe系L10規則合金を用いた垂直磁 化MTJの 低ダンピング定数	中山昌彦、他
6	2009.9.14	第33回日本磁気学会学 術講演会	高TMR比、垂直磁化方式トンネル 接合	永瀬俊彦、他
7	2009.9.9	The Fifth Taiwan International Conference on Spintronics	Review of technologies for high density MRAMs focusing on spin torque transfer writing(招待講演)	與田博明
8	2009.10.9	SSDM 2009	Advancements and Future Challenges of Spin Torque Transfer MRAM(招待講演)	與田博明

9	2009.10.23	IDEMA Quartary Seminar	Scalable Perpendicular MTJs for high density MRAMs(招待講演)	與田博明
10	2009/11/2	日本磁気学会第168回研究会第26回スピエレクトロニクス専門研究会	高集積MRAMに向けた、良好なスケラビリティをもつ垂直磁化方式MTJの開発(招待講演)	與田博明
11	2009/11/17	Taiwan New Non-Volatile Memory Workshop 2009	Scalable Perpendicular MTJs for high density MRAMs(招待講演)	與田博明
12	2009/12/4	Semicon Japan 2010	高集積MRAM実現に向けた垂直磁化方式Magnetic Tunnel Junction 素子の開発(招待講演)	與田博明
13	2010/1/19	11th Joint MM-intermag Conference 2010	High Efficient Spin Torque Transfer Writing on Perpendicular Magnetic Tunnel Junctions For High Density MRAMs(招待講演)	與田博明
14	2010/1/20	The 11th Joint MMM/Intermag Conference	Spin transfer torque switching in Magnetic Tunnel Junctions using L10-ordered Fe based alloys for Ferromagnetic Electrodes.	大坊忠臣、他
15	2010/1/21	2010 11th Joint MMM-Intermag Conference	Large tunnel magnetoresistance of over 200% in MgO-based magnetic tunnel junction with perpendicular magnetic anisotropy	西山勝哉、他
16	2010/2/9	2010 International Solid-State Circuits Conference	A 64Mb MRAM with Clamped-Reference and Adequate-Reference Schemes	土田賢二、他
17	2010/3/18	日本応用物理学会春季第57回 応用物理学関係連合講演会	高集積MRAM(招待講演)	與田博明、他

平成 22 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2010.7	The 2nd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications 2010 “STT MRAM with perpendicular MTJs”	High Efficiency and Dependable Spin Transfer Torque Writing on Perpendicular MTJs (招待講演)	與田博明
2	2010.8	2010年度日本物理学会 科学セミナー 「スピントロニクス- 最先端の物理と技術」	スピンと次世代メモリ(MRAM) (招待講演)	與田博明
3	2010.12	2010年度日本応用物理学会「第9回スピントロニクス入門セミナー」	スピンデバイス (招待講演)	與田博明
4	2010.12	日本学術振興会 薄膜第131委員会 第253回研究会	MRAMの最新動向 (招待講演)	與田博明
5	2011.2	The 1st CSIS International Symposium on Spintronics-based VLSIs	High Efficient and Back Hopping Free STT Writing On Perpendicular MTJ (招待講演)	與田博明

(c) 表彰等

(記載事項無し)

(d) その他特記事項

(1) 成果普及の努力 (プレス発表等)

- ・ 2007/11/06 「ギガビット級の大容量化に向けた新型 MRAM 素子の開発について」 プレスリリース
- ・ 2009/9/28 日刊工業新聞 p18-19 全面広告
- ・ 2009/9/29 Fuji Sankei Business i. p24-25 全面広告
- ・ 2011/7/4 「東芝が G ビット級のスピン注入型 MRAM の基盤技術を確立」
Tech-On : <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20110630/193009/?ref=ML>

(e) 特許

(国内特許)

平成 18 年度

出願済み : 8 件

平成 19 年度

出願済み : 13 件

平成 20 年度

出願済み : 15 件

平成 21 年度

出願済み : 14 件

登録 : 2 件

平成 22 年度

出願済み : 9 件

登録 : 4 件

(国際特許)

平成 19 年度

出願済み : 15 件

平成 20 年度

出願済み : 22 件

平成 21 年度

出願済み : 14 件

登録 : 5 件

平成 22 年度

出願済み : 9 件

登録 : 5 件

産業技術総合研究所

(a) 投稿論文 (16 件)

平成 18 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2007.3.5	日本物理学会誌, vol.62, no.3, 156 (2007).	結晶MgOトンネル障壁のコヒーレントなスピン依存トンネル伝導と巨大TMR効果	湯浅新治、D. D. Djayaprawira
2	2007.1.10	表面化学、第28巻第1号、p.15 (2007).	MgO(001)トンネル障壁のトンネル磁気抵抗効果と界面状態	湯浅新治、片山利一

平成 19 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2007.06.27	Applied Physics Letters	Oscillation of giant tunneling magnetoresistance with respect to tunneling barrier thickness in fully epitaxial Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions	R. Matsumoto, A. Fukushima, T. Nagahama, Y. Suzuki, K. Ando and S. Yuasa
2	2007.10.19	Journal of Physics D: Applied Physics	Giant tunnel magnetoresistance in magnetic tunnel junctions with a crystalline MgO(001) barrier	S. Yuasa and D. D. Djayaprawira
3	2007.11.25	Nature Physics	Quantitative measurement of voltage dependence of spin-transfer torque in MgO-based magnetic tunnel junctions	H. Kubota, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nagahama, S. Yuasa, K. Ando, H. Maehara, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe and Y. Suzuki
4	2008.2.4	Journal of applied Physics	Dependence of switching current distribution on current pulse width of current-induced magnetization switching in MgO-based magnetic tunnel junction	M. Morota, A. Fukushima, H. Kubota, K. Yakushiji, S. Yuasa, and K. Ando
5	2008.03.10	Journal of Physical Society of Japan	Giant Tunneling Magnetoresistance in MgO-based Magnetic Tunnel Junctions	S. Yuasa
6	2008.03.10	Journal of Physical Society of Japan	Spin-torque diode effect and its application	Yoshishige Suzuki and Hitoshi Kubota

*国立大学法人大阪大学との共著 (1 件 : 該当欄にも記載) を含む

平成 20 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2008.4	Applied Physics Express	Spin-Transfer Switching and Thermal Stability in an FePt/Au/FePt Nanopillar Prepared by Alternate Monatomic Layer Deposition	K. Yakushiji, S. Yuasa, A. Fukushima, H. Kubota, T. Nagahama, T. Katayama and K. Ando
2	2008.6.1	まぐね (磁気学会誌)	L10型垂直磁化膜におけるスピン注入磁化反転とスピンRAMへの応用可能性	薬師寺啓, 湯浅新治, 久保田均, 福島章雄, 長浜太郎, 片山利一, 安藤功兒
3	2008.05.21 (採択日)	J. Magn. Soc. Jpn. Vol32, pp455-457	Method of evaluating the thermal stability parameter by distribution of the switching current in spin-torque switching in nano-magnet	A. Fukushima, H. Kubota, K. Yakushiji, S. Yuasa, K. Ando
4	2009.3.30	Applied Physics Letters Volume 94, Issue 13	High-speed switching of spin polarization for proposed spin-photon memory	V. Zayets, K. Ando

平成 21 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
--	-----	------	--------	-----

1	2009.05.29	Phys. Rev. B, vol.79, no.17, 174436 (2009)	Spin-dependent tunneling in epitaxial Fe/Cr/MgO/Fe magnetic tunnel junctions with an ultrathin Cr(001) spacer layer	R. Matsumoto, A. Fukushima, K. Yakushiji, S. Nishioka, T. Nagahama, T. Katayama, Y. Suzuki, K. Ando, and S. Yuasa
2	2009.11.12	Phys. Rev. B, vol.80, no.17, 174405 (2009).	Spin-torque-induced switching and precession in fully epitaxial Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions	R. Matsumoto, A. Fukushima, K. Yakushiji, S. Yakata, T. Nagahama, H. Kubota, T. Katayama, Y. Suzuki, K. Ando, S. Yuasa, B. Georges, V. Cros, J. Grollier, and A. Fert
3	2009.12.16	APPLIED PHYSICS LETTERS vol. 95, pp. 242504 (2009).	Thermal stability and spin-transfer switchings in MgO-based magnetic tunnel junctions with ferromagnetically and antiferromagnetically coupled synthetic free layers	Satoshi Yakata, Hitoshi Kubota, Toru Sugano, Takayuki Seki, Kay Yakushiji, Akio Fukushima, Shinji Yuasa, and Koji Ando

*国立大学法人大阪大学との共著（2件：該当欄にも記載）を含む

平成 22 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2010.11.12	電気情報通信学会誌, 94巻, 3号, 232頁 (2010)	スピンを用いた物理乱数発生器「スピンドアイス」	福島章雄、関貴之、薬師寺啓、久保田均、湯浅新治、安藤功兒

(b) 学会発表 (120 件)

平成 18 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2007.2.15	The 2nd RIEC International Workshop on Spintronic, Sendai (Japan)	(招待講演) Recent progress on fully epitaxial MgO-based MTJs	S. Yuasa, R. Matsumoto, A. Fukushima, T. Nagahama, H. Kubota, K. Yakushiji, Y. Suzuki, and K. Ando
2	2007.1.9	10th Joint MMM / Intermag conference, Baltimore (USA)	(招待講演) An oscillation of tunneling magnetoresistance with respect to tunneling barrier thickness in MgO-based fully epitaxial magnetic tunnel junctions	R. Matsumoto, A. Fukushima, Y. Suzuki, K. Ando and S. Yuasa
3	2007.1.9	10th Joint MMM / Intermag conference, Baltimore (USA)	(招待講演) Defect-mediated properties of magnetic tunnel junctions	E. Velez, K. D. Belashchenko, M. Y. Zhuravlev, S. S. Jaswal, E. Y. Tsymbal, T. Katayama and S. Yuasa
4	2006.10.30	Japan - Germany Joint Workshop 2006 Nano-Electronics, Tokyo, 30 Oct. 2006.	(招待講演) Giant tunneling magnetoresistance in MgO-based magnetic tunnel junctions and its applications	S. Yuasa
5	2006.10.23	IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC), Gyeongju (Korea)	(招待講演) Giant tunneling magnetoresistance in MgO-based magnetic tunnel junctions and its industrial applications	S. Yuasa, R. Matsumoto, A. Fukushima, H. Kubota, T. Nagahama, D. D. Djayaprawira, K. Tsunekawa, H. Maehara, Y. Nagamine, M. Nagai, S. Yamagata, Y. Suzuki, M. Mizuguchi, A. M. Deac and K. Ando
6	2006.10.5	IX International Conference Laser and Laser-Information Technologies: Fundamental Problems and Applications	(招待講演) Spintronics for optical devices	K. Ando, V. Zyets, and M. Debnath
7	2006.9.24	日本物理学会 2006年秋季大会	(招待講演) MgO(001)トンネル障壁のスピン依存トンネルの理論予測と巨大	湯浅新治

			TMR効果の実現	
8	2006.8.23	International Conference on Magnetism (ICM), Kyoto (Japan)	(招待講演) Giant tunneling magnetoresistance in MgO-based magnetic tunnel junctions	S. Yuasa, A. Fukushima, H. Kubota, T. Nagahama, T. Katayama, D. D. Djayaprawira, K. Tsunekawa, H. Maehara, Y. Nagamine, M. Nagai, S. Yamagata, Y. Suzuki, M. Mizuguchi, A. Deac and K. Ando
9	2006.8.22	International Conference on Magnetism (ICM), Kyoto (Japan)	(招待講演) Spin-torque diode effect in magnetic nano-pillars	Y. Suzuki, A. Tulapurkar, A. Fukushima, H. Kubota, S. Yuasa, M. Mizuguchi, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, and N. Watanabe
10	2006.8.17	19th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS), Sendai (Japan)	(招待講演) Spin-torque diode as a new spintronics device	Y. Suzuki, A. Tulapurkar, A. Fukushima, H. Kubota, S. Yuasa, M. Mizuguchi, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, and S. Watanabe
11	2006.6.6	International conference on modern materials and technologies, Acireale (Italy)	(招待講演) Magnetization reversal by spin-polarized current in magnetic tunnel junctions with MgO barriers	H. Kubota, A. Fukushima, Y. Otani, S. Yuasa, K. Ando, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe, Y. Suzuki

平成 19 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2007.05.22	ICDNR2007 International conference on Nanospinronic Design and Realization 2007	(招待講演) Giant tunneling magnetoresistance in magnetic tunnel junctions with MgO(001)	長浜 太郎 湯浅 新治 松本利映 福島 章雄 久保田 均 薬師寺 啓 鈴木 義茂 安藤 功児
2	2007.05.24	Workshop NANOSPINTRONICS Flagship	(招待講演) Giant tunneling magnetoresistance in MgO-MTJs and its industrial applications	長浜 太郎 湯浅 新治 松本利映 福島 章雄 久保田 均 薬師寺 啓 鈴木 義茂 安藤 功児
3	2007.05.29	1st international Symposium on Advanced Magnetic Materials	(招待講演) Recent progress on MgO-based magnetic tunnel junctions	A. Fukushima, R. Matsumoto, T. Nagahama, H. Kubota, and S. Yuasa
4	2007.07.03	17th International Vacuum Congress (IVC)	(招待講演) Giant tunneling magnetoresistance in MgO-based magnetic tunnel junctions and its applications to spintronic devices	S. Yuasa, H. Kubota, A. Fukushima, T. Nagahama, K. Yakushiji, R. Matsumoto, D. D. Djayaprawira, K. Tsunekawa, H. Maehara, Y. Suzuki, K. Ando
5	2007.07.12	1st NIMS Conference on Recent Breakthroughs in Materials Science and Technology	(招待講演) Giant TMR effect in MgO-based magnetic tunnel junctions and its industrial applications	S. Yuasa, H. Kubota, A. Fukushima, T. Nagahama, K. Yakushiji, R. Matsumoto, D. D. Djayaprawira, K. Tsunekawa, H. Maehara, Y. Suzuki, K. Ando
6	2007.08.20	第45回 茅コンファレンス -最近のスピン科学とスピン技術-	(招待講演) 金属系スピントロニクスにおけるスピン依存トンネル効果	湯浅新治、久保田均、福島章雄、長浜太郎、薬師寺啓、松本利映、David D. Djayaprawira、恒川孝二、前原大樹、鈴木義茂、安藤功児
7	2007.08.28	3rd Seeheim Conference on Magnetism, Frankfurt (Germany)	(招待講演) Giant TMR effect and spin-transfer phenomena in MgO-based magnetic tunnel junctions	S Yuasa, H. Kubota, A. Fukushima, T. Nagahama, K. Yakushiji, R. Matsumoto, D. D. Djayaprawira, K. Tsunekawa, H. Maehara, Y. Suzuki, K. Ando
8	2007.09.06	第68回応用物理学会学術講演会	(招待講演) ホイスラー合金の磁性とそれを用いたトンネル接合における磁気抵抗効果	大兼幹彦, 桜庭裕弥, Resul Yilgin, 服部正志, 村上修一, 久保田均, 安藤康夫, 高梨弘毅, 宮崎照宣

9	2007.09.06	第68回応用物理学会学術講演会	(招待講演) 結晶 MgO 障壁のコヒーレントなスピン依存トンネル伝導と TMR 振動現象	湯浅新治, 松本利映, 福島章雄, 長浜太郎, 久保田均, 薬師寺啓, 鈴木義茂, 安藤功兒
10	2007.09.7	第68回応用物理学会学術講演会	スピン注入磁化反転による乱数発生器	福島章雄、久保田均、薬師寺啓、湯浅新治、安藤功兒
11	2007.09.07	第68回応用物理学会学術講演会	エピタキシャルFePt/Au/FePtにおけるスピン注入磁化反転と熱擾乱耐性制御	薬師寺啓、湯浅新治、長浜太郎、福島章雄、久保田均、片山利一、安藤功兒
12	2007.09.07	第68回応用物理学会学術講演会	スピントルクのバイアス電圧依存性	久保田均, 福島章雄, 薬師寺啓, 長浜太郎, 湯浅新治, 安藤功兒, 鈴木義茂
13	2007.09.7	第68回応用物理学会学術講演会	MgO-MTJ素子における熱安定性パラメータのパルス幅依存性	諸田美砂子、福島章雄、久保田均、薬師寺啓、湯浅新治、安藤功兒
14	2007.09.13	第31回日本応用磁気学会学術講演会	スピン注入磁化反転を用いた乱数発生器	福島章雄、久保田均、薬師寺啓、湯浅新治、安藤功兒
15	2007.09.14	第31回日本応用磁気学会学術講演会	MgO-MTJ素子における熱安定性指数の評価	諸田美砂子、福島章雄、久保田均、薬師寺啓、湯浅新治、安藤功兒
16	2007.09.14	日本応用磁気学会	非磁性金属添加 CoFeB 合金薄膜の磁気緩和定数	大兼幹彦, 渡邊美穂, 家形諭, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣
17	2007.09.14	日本応用磁気学会	高周波振幅変調法によるスピントルクの測定	久保田均, 福島章雄, 薬師寺啓, 長浜太郎, 湯浅新治, 安藤功兒, 鈴木義茂
18	2007.09.14	日本応用磁気学会	非磁性金属添加CoFeB合金薄膜の磁気緩和定数	大兼幹彦, 渡邊美穂, 家形諭, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣
19	2007.09.14	日本応用磁気学会	高周波振幅変調法によるスピントルクの測定	久保田均, 福島章雄, 薬師寺啓, 長浜太郎, 湯浅新治, 安藤功兒, 鈴木義茂
20	2007.09.14	日本応用磁気学会	FePt を用いた垂直磁化 CPP-GMR におけるスピン注入磁化反転と熱擾乱耐性の制御	薬師寺啓、湯浅新治、長浜太郎、福島章雄、久保田均、片山利一、安藤功兒
21	2007.09.22.	日本物理学会第 62 回年次大会	(招待講演) 結晶性 MgO トンネルバリアの精密構造制御 とコヒーレントスピントンネル	長浜 太郎
22	2007.10.16	IEEE - Magnetic Multilayers Symposium (MML 2007)	(招待講演) Giant tunneling magnetoresistance in epitaxial MTJs with a single-crystal MgO(001) barrier	S. Yuasa, R. Matsumoto, A. Fukushima, T. Nagahama, H. Kubota, Y. Suzuki, K. Yakushiji, and K. Ando
23	2007.10.16	IEEE - Magnetic Multilayers Symposium (MML 2007)	(招待講演) Spin-dependent tunneling in fully epitaxial Fe/Cr/MgO/Fe MTJs	R. Matsumoto, A. Fukushima, K. Yakushiji, S. Nishioka, T. Katayama, Y. Suzuki, K. Ando, and S. Yuasa
24	2007.10.16	IEEE - Magnetic Multilayers Symposium (MML 2007)	Magnetoresistance in full epitaxial magnetic tunnel junctions with ultrathin MgO(001) tunnel barrier	A. Fukushima, S. Yuasa, H. Kubota, T. Nagahama, Y. Suzuki, and K. Ando
25	2007.10.16	IEEE - Magnetic Multilayers Symposium (MML 2007)	(招待講演) Angle and voltage dependence of spin torque in MgO-based magnetic	H. Kubota, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nagahama, S. Yuasa, K. Ando, H. Maehara, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe, and Y. Suzuki
26	2007.10.16	IEEE - Magnetic Multilayers Symposium (MML 2007)	(招待講演) High frequency properties of MgO based tunnel junctions –Interplay between a giant TMR effect and spintorque-	Y. Suzuki, H. Kubota, H. Maehara, A. Deac, M. Mizuguchi, A. Fukushima, S. Yuasa, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, and N. Watanabe

27	2007.10.17	IEEE - Magnetic Multilayers Symposium (MML 2007)	Spin-transfer switching and thermal stability in an FePt/Au/FePt nanopillar prepared by alternate monatomic deposition	薬師寺啓、湯浅新治、長浜太郎、福島章雄、久保田均、片山利一、安藤功兒
28	2007.10.25	3rd International Conference on Electronics and Applied Physic	(招待講演) Magneto-optical properties of ferromagnetic metal / semiconductor hybrid devices for optical isolator and optical memory application	Vadym Zayets、安藤功兒、Mukul C. Debnath
29	2007.11.05	52th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials	Magnetic Damping Constants in (CoFeB) _{1-x} Cr _x and (CoFeB) _{1-x} V _x Alloy Thin Films	M. Oogane, M. Watanabe, S. Yakata, H. Kubota, Y. Ando and T. Miyazaki
30	2007.11.05	52th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials	Measurement of spin torque in a wide range of DC bias using spin-torque diode effect	H. Kubota, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nagahama, S. Yuasa, K. Ando and Y. Suzuki
31	2007.11.07	6th International Symposium on Magnetic Multilayers	Spin-transfer switching and thermal stability in an epitaxial FePt/Au/FePt with perpendicular anisotropy	薬師寺啓、湯浅新治、長浜太郎、福島章雄、久保田均、片山利一、安藤功兒
32	2007.11.8	52nd annual conference on magnetism and magnetic materials	Magnetic random number generator by current induced magnetization switching	A. Fukushima, H. Kubota, K. Yakushiji, S. Yuasa, and K. Ando
33	2007.11.9	52nd annual conference on magnetism and magnetic materials	Dependence of switching current distribution on current-induced magnetization switching in MgO-based MTJ	M. Morota, A. Fukushima, H. Kubota, K. Yakushiji, S. Yuasa, and K. Ando
34	2007.11.13	9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-9)	(招待講演) Giant Tunneling Magnetoresistance in MgO-based Magnetic Tunnel Junctions and Its Applications to Spintronic Devices	S. Yuasa, H. Kubota, A. Fukushima, T. Nagahama, K. Yakushiji, R. Matsumoto, D. D. Djayaprawira, K. Tsunekawa, H. Maehara, Y. Suzuki, K. Ando
35	2008.01.14	35th Conference on the Physics and Chemistry of Semiconductor Interface (PCSI)	(招待講演) Giant tunneling magnetoresistance in MgO-based magnetic tunnel junctions and its device applications	S. Yuasa, H. Kubota, A. Fukushima, T. Nagahama, K. Yakushiji, R. Matsumoto, D. D. Djayaprawira, K. Tsunekawa, H. Maehara, Y. Suzuki, K. Ando
36	2008.02.15	第6回ナノテクノロジー総合シンポジウム	(招待講演) トンネル磁気抵抗素子の開発とデバイス応用	湯浅新治、久保田均、福島章雄、長浜太郎、薬師寺啓、松本利映、David D. Djayaprawira、恒川孝二、前原大樹、鈴木義茂、安藤功兒
37	2008.02.19	International Workshop on Spin Currents	(招待講演) Spin-dependent tunneling in epitaxial Fe/Cr/MgO/Fe magnetic tunnel junctions	S. Yuasa, H. Kubota, A. Fukushima, T. Nagahama, K. Yakushiji, R. Matsumoto, D. D. Djayaprawira, K. Tsunekawa, H. Maehara, Y. Suzuki, K. Ando
38	2008.02.28	German Physical Society (DPG) 72nd Annual Meeting	(招待講演) Physics and applications of tunneling magnetoresistance effect	S. Yuasa, H. Kubota, A. Fukushima, T. Nagahama, K. Yakushiji, R. Matsumoto, D. D. Djayaprawira, K. Tsunekawa, H. Maehara, Y. Suzuki, K. Ando
39	2008.03.14	第70回情報処理学会全国大会	スピン注入磁化反転を用いた乱数発生器	福島章雄、久保田均、薬師寺啓、湯浅新治、安藤功兒
40	2008.03.22	日本物理学会	(招待講演) トンネル磁気抵抗素子に加わるスピントルクのバイアス電圧依存性	久保田均、鈴木義茂、福島章雄、薬師寺啓、湯浅新治、安藤功兒
41	2008.03.27	第55回春季応用物理学関係連合講演会	(招待講演) トンネル磁気抵抗素子におけるスピントルク	久保田均、前原大樹、福島章雄、鈴木義茂、薬師寺啓、長浜太郎、湯浅新治、安藤功兒、長嶺佳紀、恒川孝二、Djayaprawira David,

				渡辺直樹
42	2008.03.29	第55回春季応用物理学関係連合講演会	CoFeXB (X=Cr,V)フリー層を用いたMTJにおけるスピン注入磁化反転	久保田均, 薬師寺啓, 福島章雄, 湯浅新治, 安藤功兒, 大兼幹彦, 家形論, 安藤康夫, 宮崎照宣
43	2008.03.29	第55回春季応用物理学関係連合講演会	CoFeB/MgO/CoFeB接合のスピン注入磁化反転における実時間測定	富田博之, 小西克典, 野崎隆行, 白石誠司, 久保田均, 福島章雄, 湯浅新治, 鈴木義茂
44	2008.03.29	第55回春季応用物理学関係連合講演会	トンネル磁気抵抗効果を介した電流誘起磁壁移動現象の実時間観測	野崎隆行, 前川裕昭, 久保田均, 湯浅新治, 野内亮, 白石誠司, 新庄輝也, 鈴木義茂
45	2008.03.29	第55回春季応用物理学関係連合講演会	FePt/Au/FePt におけるスピン注入磁化反転電流および熱擾乱耐性の外部磁場依存性	薬師寺啓, 湯浅新治, 長浜太郎, 福島章雄, 久保田均, 片山利一, 安藤功兒
46	2008.03.29	第55回春季応用物理学関係連合講演会	CoXFe1-X多層膜を用いた垂直磁化GMR素子のスピン注入磁化反転	西山勝哉, 永瀬俊彦, 甲斐正, 相川尚徳, 中山昌彦, 天野実, 高橋茂樹, 岸達也, 奥田博明, 薬師寺啓, 福島章雄, 湯浅新治, 安藤功兒, 金国天, 安藤康夫
47	2008.03.30	第55回春季応用物理学関係連合講演会	スピン注入磁化反転を用いた乱数発生器(2)	福島章雄, 久保田均, 薬師寺啓, 湯浅新治, 安藤功兒

*国立大学法人大阪大学との共同発表(1件:該当欄にも記載)を含む

*株式会社東芝との共同発表(1件:該当欄にも記載)を含む

平成20年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2008.4.22	シリコンナノエレクトロニクスの新展開	スピントロニクス技術の現状と展望(招待講演)	湯浅新治, 福島章雄, 長浜太郎, 久保田均, 薬師寺啓, 松本利映, 鈴木義茂, 安藤功兒
2	2008.4.23	Nordic Workshop on Spintronics and Nanomagnetism	Physics and applications of tunnel magnetoresistance(招待講演)	S.Yuasa, A.Fukushima, T.Nagahama, H.Kubota, K.Yakushiji, R.Matsumoto, Y.Suzuki, K.Ando
3	2008.9.23	Gordon Research Conference (GRC) on magnetic nanostructure	Oscillatory TMR effect in fully epitaxial MgO-based magnetic tunnel junctions	S.Yuasa, A.Fukushima, T.Nagahama, H.Kubota, K.Yakushiji, R.Matsumoto, Y.Suzuki, K.Ando
4	2008.10.22	IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC 2008)	Recent Progress on Tunnel Magnetoresistance and Its Applications(基調講演)	S.Yuasa, A.Fukushima, T.Nagahama, H.Kubota, K.Yakushiji, R.Matsumoto, Y.Suzuki, K.Ando
5	2008.10.28	The 23rd Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop -Spin Transport in Condensed Matter-	Spin-Dependent Tunneling through a Crystalline MgO(001) Barrier -Physics and Applications-(招待講演)	S.Yuasa, A.Fukushima, T.Nagahama, H.Kubota, K.Yakushiji, R.Matsumoto, Y.Suzuki, K.Ando
6	2008.11.14	日本表面科学会学術講演会	MgO(001)トンネル障壁のトンネル磁気抵抗効果と界面状態(招待講演)	湯浅新治, 片山利一
7	2008.12.9	Symposium -Twenty Years of Spintronics: Retrospective and Perspective-	Giant TMR effect in MgO-based magnetic tunnel junctions(招待講演)	S.Yuasa, A.Fukushima, T.Nagahama, H.Kubota, K.Yakushiji, R.Matsumoto, Y.Suzuki, K.Ando
8	2009.2.13	Spin Caloritronics	Device Applications of Spins and Heat(招待講演)	S.Yuasa, A.Fukushima, T.Nagahama, H.Kubota, K.Yakushiji, R.Matsumoto,

				Y.Suzuki, K.Ando
9	2009.3.7	AIST-RIKEN Joint WS on "Emergent Phenomena of Correlated Materials"	Giant Tunnel Magnetoresistance in MgO-based Magnetic Tunnel Junctions	S.Yuasa, A.Fukushima, T.Nagahama, H.Kubota, K.Yakushiji, R.Matsumoto, Y.Suzuki, K.Ando
10	2009.3.17	応物学会シリコンテクノロジー分科会 第98回研究集会「Siナノテクノロジーとスピントロニクス」	Giant Tunnel Magnetoresistance in MgO-based Magnetic Tunnel Junctions (依頼講演)	湯浅新治, 福島章雄, 長浜太郎, 久保田均, 薬師寺啓, 松本利映, 鈴木義茂, 安藤功兒
11	2008.5.7	Intermag2008	Transport properties of fully epitaxial magnetic tunnel transistor with a MgO barrier	T. Nagahama, H. Saito, S. Yuasa
12	2008.11.13	53rd Annual conference on magnetism and magnetic materials (MMM)	Hot electron transport in fully epitaxial magnetic tunnel transistor with a MgO barrier	T. Nagahama, H. Saito, S. Yuasa
13	2008.5.7	The 2008 International Magnetism	High Thermal stability and low switching current in a perpendicular-CPP-GMR with an ultrathin FePt free layer (口頭発表)	K.Yakushiji, S.Yuasa, A.Fukushima, H.Kubota, T.Nagahama, T.Katayama and K.Ando
14	2008.10.28	第49回真空に関する連合講演会	MgOバリアを用いた高性能磁気抵抗素子の開発とその応用 (招待講演)	薬師寺啓, 湯浅新治, 久保田均, 福島章雄, 長浜太郎, 片山利一, 安藤功兒
15	2009.4.1	第56回応用物理学関係連合講演会	fccベースCoPt薄膜の成膜と垂直MTJの作製 (口頭発表)	薬師寺啓, 久保田均, 福島章雄, 長浜太郎, 湯浅新治, 安藤功兒
16	2008.05.08	Intermag2008	Random number generation by current induced magnetization switching in a MgO magnetic tunnel junction	A. Fukushima, H. Kubota, K. Yakushiji, S. Yuasa, K. Ando
17	2008.12.04	応用物理学会東北支部大会	MgO-MTJ素子を乱数発生に用いる条件の最適化	関貴之, 福島章雄, 久保田均, 薬師寺啓, 湯浅新治, 安藤功兒
18	2009.03.02	筑波大学学際物質科学戦略イニシアティブ研究会	スピンドアイススピン注入磁化反転を用いた乱数発生器	福島章雄, 久保田均, 薬師寺啓, 湯浅新治, 安藤功兒
19	2009.04.01	第56回応用物理学関係連合講演会	Spin dice用MTJ素子の作成	福島章雄, 関貴之, 久保田均, 薬師寺啓, 湯浅新治, 安藤功兒
20	2009.04.01	第56回応用物理学関係連合講演会	物理乱数発生器Spin diceプロトタイプを試作	関貴之, 福島章雄, 久保田均, 薬師寺啓, 湯浅新治, 安藤功兒
21	2008.09.04	第56回応用物理学関係連合講演会	反平行結合フリー層を有するMTJにおけるスピン注入磁化反転	家形論, 久保田均, 菅野利, 福島章雄, 薬師寺啓, 湯浅新治, 安藤功兒
22	2008.09.04	第56回応用物理学関係連合講演会	CoFeB/MgO/CoFeB接合におけるスピン注入磁化反転の外部磁場方位依存性	富田博之, 野崎隆行, 久保田均, 福島章雄, 薬師寺啓, 湯浅新治, 仲谷栄伸, 鈴木義茂
23	2008.09.04	第56回応用物理学関係連合講演会	垂直磁場中におけるスピントルクダイオードスペクトルの測定	家形論, 久保田均, 鈴木義茂, 福島章雄, 薬師寺啓, 湯浅新治, 25安藤功兒
24	2008.09.15	第32回日本磁気学会学術講演会	CoFeB/MgO/CoFeBトンネル接合における垂直磁場中スピントルクダイオードスペクトル	家形論, 久保田均, 鈴木義茂, 福島章雄, 薬師寺啓, 湯浅新治, 安藤功兒
25	2008.09.15	第32回日本磁気学会学術講演会	3端子構造を利用した電流誘起Vortex core共振現象の検出	野崎隆行, 久保田均, 白石誠司, 湯浅新治, 新庄輝也, 鈴木義茂
26	2008.09.15	第32回日本磁気学会学術講演会	CoFeB/MgO/CoFeB接合におけるスピン注入磁化反転の実時間測定	富田博之, 野崎隆行, 久保田均, 福島章雄, 薬師寺啓, 湯浅新治, 仲谷栄伸, 鈴木義茂
27	2008.09.15	第32回日本磁気学会学術講演会	CoFeB/Ru/CoFeBフリー層を有するMTJにおけるスピン注入磁	家形論, 久保田均, 菅野利, 福島章雄, 湯浅新治, 安藤功兒

			化反転電流密度および熱擾乱耐性	
28	2008.11.11	MMM 53rd Conference on Magnetism and Magnetic Materials	Detection of current-induced resonance of magnetic vortices using tunnel magnetoresistance.	T. Nozaki, H. Kubota, S.Yuasa, M. Shiraiishi, T. Shinjo and Y. Suzuki
29	2008.11.11	MMM 53rd Conference on Magnetism and Magnetic Materials	Reduction of spin-transfer switching current in MgO-based magnetic tunnel junctions using Co-Fe-(Cr, V)-B free layer having low saturation magnetization	H. Kubota, A. Fukushima, K.Yakushiji, S.Yuasa, K. Ando, M. Oogane, S.Yakata, Y. Ando and T. Miyazaki
30	2008.11.14	MMM 53rd Conference on Magnetism and Magnetic Materials	Spin-torque diode spectra under a perpendicular-to-plane magnetic field	S. Yakata, H. Kubota, A. Fukushima, K.Yakushiji, S.Yuasa, K. Ando and Y. Suzuki
31	2008.09.26	Solid State Devices and Materials (SSDM)	Spin Dynamics in Magnetic Tunnel Junctions and Related Devices (招待講演)	H. Kubota, A. Fukushima, S. Yakata, K. Yakushiji, S. Yuasa, K. Ando, H. Maehara, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe and Y. Suzuki
32	2009.03.02	筑波大学学際物質科学戦略イニシアティブ研究会	スピン注入トルク (依頼講演)	久保田均
33	2009.3.4	2009 WPI-AIMR Annual Workshop	Spintronics and Semiconductors (招待講演)	K. Ando, H. Saito, V. Zayets, T. Nagahama, and S. Yuasa
34	2008.12.12	13th Advanced Heterostructures and Nanostructures Workshop	Spintronics for Nonvolatile Functionalities (招待講演)	K.Ando, Yoda, Kishi, Kai, Nagase, Kitagawa, Yoshikawa, Nishiyama, Daibou, Nagamine, Amano, Takahashi, Nakayama, Shimomura, Aikawa, Ikegawa, Ishiwata, Ohshima, Fukami, Suzuki, Tanaka, Nagasaka, Ashida, Ochiai, Yuasa, Kubota, Fukushima, Yakushiji, Nagahama, Zayets, Miyazaki, Ando, Ogane, Mizukami, Watanabe, Suzuki, Nozaki, Ono, Kasai, Koyama, Yamada, Tanigawa, Nakatani

平成 21 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2009.7.22	20th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces	Perpendicular-MgO-MTJs with hcp-c-plane oriented [Co/Pt] _n superlattice	K.Yakushiji, H.Kubota, A.Fukushima, T.Nagahama, S.Yuasa, K.Ando
2	2009.07.23	20th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces	Epitaxial Fe/Cr/MgO/Fe magnetic tunnel junctions with an ultrathin Cr(001) layer (招待講演)	S. Yuasa, R. Matsumoto, A. Fukushima, H. Kubota, K. Yakushiji, T. Nagahama, K. Ando, and Y. Suzuki
3	2009.07.20-24	International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces ICMFS 2009	MAGNETORESISTANCE AND SPIN-TRANSFER SWITCHING IN CoFe/Ru/CoFeB CPP-GMR NANOPILARS	H. Kubota, A. Fukushima, K. Yakushiji, S. Yakata, S. Yuasa, K. Ando
4	2009.07.26-31	International Conference on Magnetism ICM 2009	Spin-transfer switching in Co-Fe/Ru/Co-Fe-B sandwich structures	Hitoshi Kubota, Akio Fukushima, Kay Yakushiji, Satoshi Yakata, Shinji Yuasa and Koji Ando
5	2009.7.29	International Conference on Magnetism 2009	Random Number Generator Based on Current Induced Magnetization Switching	A. Fukushima, T. Seki, K. Yakushiji, H. Kubota, S. Yuasa and K. Ando
6	2009.09.08	第70回応用物理学会学術講演会	PtMn/CoFe/Ru/CoFeB CPP-GMR素子におけるスピン注入磁化反転	久保田均, 福島章雄, 薬師寺啓, 家形 諭, 湯浅新治, 安藤功兒
7	2009.9.10	第70回応用物理学会学術講演会	NiまたはV添加によるCo/Pt人工格子の磁化およびダンピングの制	薬師寺啓, 水上成美, 久保田均, 福島章雄, 長浜太郎, 湯浅新治,

			御	安藤功兒, 宮崎照宣
8	2009.9.13	第33回日本磁気学会学術講演会	スピン注入磁化反転を用いた乱数発生器(2)	福島章雄, 関貴之, 薬師寺啓, 久保田均, 湯浅新治, 安藤功兒
9	2009.9.14	第33回日本磁気学会学術講演会	強磁性結合CoFeB/Ru/CoFeB積層フリー層を有するMTJのスイッチング電流密度および熱擾乱耐性	家形 諭, 久保田均, 菅野利, 福島章雄, 薬師寺啓, 湯浅新治, 安藤功兒
10	2009.9.14	第33回日本磁気学会学術講演会	CoFeB/Ru界面のスピントルクとスピン注入磁化反転	久保田均, 福島章雄, 薬師寺啓, 家形 諭, 湯浅新治, 安藤功兒
11	2009.9.15	第33回日本磁気学会学術講演会	Spin-RAM用Co/Pt人工格子の成膜と垂直MTJの作製	薬師寺啓, 水上成美, 久保田均, 福島章雄, 長浜太郎, 湯浅新治, 安藤功兒, 宮崎照宣
12	2009.10.9	2009 International Conference on Solid State Devices and Materials	Perpendicular-MgO-MTJs with fcc(111)-oriented CoPt superlattices	K.Yakushiji, H.Kubota, A.Fukushima, T.Nagahama, S.Yuasa, K.Ando
13	2009.10.9	SSDM	Spin-transfer switching and enhanced thermal stability of magnetic tunnel junctions with CoFeB/Ru/CoFeB ferromagnetically-coupled free layer	H. Kubota, S. Yakata, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Seki, S. Yuasa, K. Ando
14	2009.12.07	応用物理学会 スピントロニクス研究会主催研究会	MgOトンネル障壁の界面散乱と巨大TMR効果(招待講演)	湯浅新治, 松本利映, 福島章雄, 久保田均, 長浜太郎, 薬師寺啓, 安藤功兒, 鈴木義茂
15	2010.1.20	2010年暗号と情報セキュリティシンポジウム	スピンドイス:トンネル磁気抵抗素子を用いた物理乱数発生器	福島章雄, 関貴之, 薬師寺啓, 久保田均, 湯浅新治, 安藤功兒
16	2010.1.20	MMM/Intermag	Comparison of thermal stability and switching currents between ferromagnetically and antiferromagnetically coupled synthetic free layers in MgO-based magnetic tunnel junctions	H. Kubota, S. Yakata, T. Seki, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa and K. Ando
17	2010.1.20	MMM/Intermag	Enhancement of thermal stability using a ferromagnetically coupled synthetic free layer in MgO-based magnetic tunnel junction	S. Yakata, H. Kubota, T. Seki, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa and K. Ando
18	2010.1.17	2010年暗号と情報セキュリティシンポジウム論文集	スピンドイス:トンネル磁気抵抗素子を用いた物理乱数発生器	福島章雄, 関貴之, 薬師寺啓, 久保田均, 湯浅新治, 安藤功兒
19	2010.1.21	The 11th Joint Magnetism and Magnetic Materials (MMM)/Intermag Conference	A 1.2-nm-thick ultrathin CoPt layer for a magnetic tunnel junction with perpendicular anisotropy	K.Yakushiji, H.Kubota, A.Fukushima, T.Nagahama, S.Yuasa, K.Ando
20	2010.02.06	6th RIEC International Workshop on Spintronics	Quantitative analysis of coherent and incoherent tunneling currents in MgO-based epitaxial magnetic tunnel junctions (招待講演)	S. Yuasa, R. Matsumoto, A. Fukushima, H. Kubota, K. Yakushiji, T. Nagahama, K. Ando, and Y. Suzuki
21	2010.02.10	4 th International Workshop on Spin Currents	Spin-transfer switching of coupled free layers (招待講演)	Hitoshi Kubota, Satoshi Yakata, Takayuki Seki, Akio Fukushima, Kay Yakushiji, Shinji Yuasa and Koji Ando
22	2010.3.12	統計数理研究所共同研究集会	スピンドイスースピン注入磁化反転を利用した新しい物理乱数発生器	福島章雄
23	2010.03.18	第57回応用物理学関係連合講演会	FeB膜を用いた積層膜の層間交換結合	猿谷武史, 久保田均, 家形諭, 野間賢二, 薬師寺啓, 福島章雄, 湯

				浅新治, 安藤功兒
24	2010.3.19	第57回応用物理学関係 連合講演会	低RA高MRを示す垂直型 MgO-MTJの作製	薬師寺啓, 野間賢二, 久保田均, 福島章雄, 猿谷武史, 長浜太郎, 湯浅新治, 安藤功兒,
25	2010.03.19	第57回応用物理学関係 連合講演会	平行結合CoFeB/Ru/CoFeB積層 フリー層における熱擾乱耐性と反 転電流密度	家形論, 久保田均, 関貴之, 薬師 寺啓, 福島章夫, 湯浅新治, 安藤 功兒

平成 22 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2010.7.13	ISSAMMA2010	Drift of switching probability of spin-transfer switching in MgO-MTJ	T. Seki, A. Fukushima, H. Kubota, K. Yakushiji, S. Yuasa, K. Ando
2	2010.11.18	55 th MMM conference	Drift of probability of spin-torque switching in MgO-MTJs	A. Fukushima, T. Seki, H. Kubota, K. Yakushiji, S. Yuasa, K. Ando
3	2010.11.2	応用物理学会スピントロ ニクス研究会	スピンドライブ:スピントルク磁化反 転を用いた物理乱数発生器	福島章雄, 関貴之, 薬師寺啓, 久 保田均, 湯浅新治, 安藤功兒

(c) 表彰等

平成 19 年度

	発表日	内容	タイトル等	受賞者等
1	2007.11.20	日本IBM科学賞	トンネル磁気抵抗効果とその応用 に関する研究	湯浅新治
2	2008.1.1	朝日賞	トンネル磁気抵抗効果(TMR)の 発展と応用に関する研究	宮崎照宣, 湯浅新治
3	2008.11.13	日本表面科学会 会誌 賞	MgO(001)トンネル障壁のトンネル 磁気抵抗効果と界面状態	湯浅新治, 片山利一
4	2009.11.20	つくば賞	MgOトンネル素子の巨大トンネル 磁気抵抗効果の実現と産業応用	湯浅新治, 鈴木義茂
5	2010.3.1	日本学術振興会賞	高性能磁気トンネル接合素子の開 発と実用化	湯浅新治
6	2010.4.1	市村学術賞	トンネル磁気抵抗素子におけるス ピンドイナミクスの解明と制御	鈴木義茂, 福島章雄, 久保田均

(d) その他特記事項

(1) 成果普及の努力 (プレス発表等)

	発表日	内容	タイトル等	発表者等
1	2007.11.30	プレス発表	スピン注入トルクの直接観測に 成功 一次世代スピンRAMの実 現に大きく前進	産総研, 大阪大学
2	2007.3	EETimes記事掲載	スピンRAMの研究開発に関して	産総研
3	2010.1.14	日経産業新聞, 日刊工 業新聞掲載	スピンRAM (MRAM) の大容量化に つながる新構造のMTJ素子 一 情報記憶の安定化と省電力化を 両立	産総研
4	2009.11.4	日経産業新聞掲載	スピントロニクス技術における 高速物理乱数発生器 スピンド ライブ	産総研
5	2010.5.13	プレス発表	スピンRAM (MRAM) の大容量 化を可能にする垂直磁化TMR素 子	産総研

6	2009.10.15-16	産総研オープンラボ	スピントロニクス技術における高速物理乱数発生器 スピンダイス	産総研
7	2009.12.2-4	セミコンジャパン 2009	Spin dice スピン注入磁化反転を用いた物理乱数発生器	産総研
8	2009.5.13-15	情報セキュリティ EXP02009	スピントロニクス技術における高速物理乱数発生器 スピンダイス	産総研
9	2009.10.5-9	シーテックジャパン 2010	スピンドイス:スピントロニクス技術で作る 物理乱数発生器	産総研

(e) 特許

(国内特許)

平成 19 年度

出願済み： 5 件

平成 20 年度

出願済み： 1 件

平成 21 年度

出願済み： 2 件

平成 22 年度

出願済み： 2 件

登録： 1 件

(国際特許)

平成 19 年度

出願済み： 2 件

成 20 年度

出願済み： 3 件

平成 21 年度

出願済み： 1 件

平成 22 年度

出願済み： 1 件

大阪大学

(a) 投稿論文 (5 件)

平成 19 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2007.11.25	Nature Physics VOL.4, pp.37-41	(スピン能動素子にも関係する 成果のため②にも記載済み) “Quantitative measurement of voltage dependence of spin-transfer torque in MgO-based magnetic tunnel junctions”	H.KUBOTA, A.FUKUSHIMA, K. YAKUSHIJI, T. NAGAHAMA, S.YUASA, K.ANDO, H. MAEHARA, Y.NAGAMINE, K.TSUNEKAWA, D.D. DJAYAPRAWIRA, N.WATANABE Y.SUZUKI,

*独立行政法人産業技術総合研究所との共著 (1 件 : 該当欄にも記載) を含む

平成 20 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2008.5.30	Appl. Phys. Exp. 1, 6, 61303-1-3 (2008)	"Single-shot measurements of spin-transfer switching in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions"	H. Tomita, K. Konishi, T. Nozaki, H. Kubota, A. Fukushima, K. Yakushiji, S. Yuasa, Y. Nakatani, T. Shinjo, M. Shiraishi and Y. Suzuki
2	2008.9.26	Appl. Phys. Lett. 93, 122511 (2008)	"Spin dependent tunneling spectroscopy in single crystalline bcc-Co/MgO/bcc-Co(001) junctions"	Shingo Nishioka, Rie Matsumoto, Hiroyuki Tomita, Takayuki Nozaki, Yoshishige Suzuki, Hiroyoshi Itoh, and Shinji Yuasa

平成 21 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2009.5.29	Phys. Rev. B 79, 174436-1-8 (2009)	"Spin-dependent tunneling in epitaxial Fe/Cr/MgO/Fe magnetic tunnel junctions with an ultrathin Cr(001) spacer layer"	R. Matsumoto, A. Fukushima, K. Yakushiji, S. Nishioka, Y. Nagahama, T. Katayama, T. Suzuki, K. Ando, and S. Yuasa
2	2009.11.12	Phys. Rev. B 80, 174405-1-8 (2009)	"Spin-torque-induced switching and precession in fully epitaxial Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions"	R. Matsumoto, A. Fukushima, K. Yakushiji, S. Yakata, T. Nagahama, H. Kubota, T. Katayama, Y. Suzuki, K. Ando, S. Yuasa, B. Georges, V. Cros, J. Grollier, and A. Fert

*独立行政法人産業技術総合研究所との共著 (2 件 : 該当欄にも記載) を含む

(b) 学会発表 (27 件)

平成 18 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2006.10.2	International Workshop on Spin Transfer 2006, (Nancy, France).	(招待講演) : (スピン能動素子にも関係する 成果のため②にも記載済み) Spin-torque diode effect and other properties of magnetic nano-pillars	Y. Suzuki, M. Mizuguchi, A. Deac, A. Fukushima, Y. Otani, H. Kubota, S. Yuasa, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, and N. Watanabe
2	2007.3.27	第63回日本物理学会年 次大会,近畿大学.	“トンネル磁気抵抗素子に 加わるスピントルクのバイアス電圧 依存性”	久保田均, 鈴木義茂, 福島章雄, 薬師寺啓, 湯浅新治, 安藤功兒
3	2007.3.27	2008年春季 第55回応用 物理学関係連合講演会	“トンネル磁気抵抗素子にお けるスピントルク”	久保田均, 前原大樹, 福島章雄, 鈴木義茂, 薬師寺啓, 長浜太郎, 湯浅新治, 安藤功兒, 長嶺佳紀, 恒川孝二, David Djayaprawira,

				渡辺直樹
4	2007.3.27	2008年春季 第55回応用物理学関係連合講演会	“CoFeB/MgO/CoFeB 接合のスピ ン注入磁化反転における実時間測定”	富田 博之, 小西 克典, 野崎 隆行, 白石 誠司, 久保田 均, 福島章雄, 湯浅 新治, 鈴木 義茂

平成 19 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2007.10.15	IEEE/MML international conference, Perth Australia	(招待講演) : (スピン能動素子にも関係する成果のため②にも記載済み) “High frequency properties of MgO based tunnel junctions -Interplay between a giant TMR effect and a spin torque “	Y.Suzuki, H.Kubota, H.Maehara, A.Deac, M.Mizuguchi, A.Fukushima, K.Yakushiji, S.Yuasa, K.Tsunekawa, D.D.Djayaprawira, N.Watanabe

*独立行政法人産業技術総合研究所との共同発表 (1件: 該当欄にも記載) を含む

平成 20 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2008.4.17	2008 Annual Meeting of The Korean Physical Society	Role of the spin-torque in the MgO based magnetic tunnel junction	<u>Y.Suzuki</u> , H.Kubota, A.Fukushima, T.Nozaki, K.Yakushiji, T.Nagahama, S.Yuasa, K.Ando
2	2008.5.5	INTERMAG2008	Real Time Measurements of Spin-Transfer Switching in CoFeB/MgO/CoFeB Magnetic Tunnel Junctions	<u>H.Tomita</u> , K.Konishi, T.Nozaki, H.Kubota, A.Fukushima, S.Yuasa, M.Shiraishi, Y.Suzuki,
3	2008.5.6	INTERMAG2008	Magnetotransport properties of MgO-based epitaxial magnetic tunnel junctions with a nonmagnetic electrode	<u>R. Matsumoto</u> , A. Fukushima, T. Nagahama, Y. Suzuki, K. Ando, S. Yuasa
4	2008.5.7	INTERMAG2008	Giant Spin Hall Effect in Perpendicularly Spin-Polarized FePt/Au Devices	<u>T. Seki</u> , Y. Hasegawa, S. Mitani, K. Takahashi, S. Takahashi, S. Maekawa, H. Imamura, J. Nitta
5	2008.9.4	第69回応用物理学会学術講演会	CoFeB/MgO/CoFeB接合におけるスピ ン注入磁化反転の外部磁場方位依存性	富田博之, 野崎隆行, 久保田均, 福島章雄, 薬師寺啓, 湯浅新治, 仲谷栄伸, 鈴木義茂
6	2008.9.15	第32回日本磁気学会学術講演会	CoFeB/MgO/CoFeB接合におけるスピ ン注入磁化反転の実時間測定	富田博之, 野崎隆行, 久保田均, 福島章雄, 薬師寺啓, 湯浅新治, 仲谷栄伸, 鈴木義茂
7	2008.10.21	The IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference 2008	Kondo effect in CoFeB/MgO/CoFe magnetic tunnel junctions	Do Bang, T. Nozaki, Y. Suzuki, M. Shiraishi, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa
8	2008.10.27	STCM(Spin Transport in Condensed Matter)	RF properties of the magnetic tunnel junctions-Negative resistance and amplification effect-	<u>Yoshishige Suzuki</u>
9	2008.11.11	MMM 2008	Voltage induced large magnetic anisotropy change in ultrathin Fe/MgO/Polyimide/ITO junctions	<u>T. Maruyama</u> , K. Ohta, T. Nozaki, T. Shinjo, M. Shiraishi, S. Mizukami, Y. Ando & Y. Suzuki

平成 21 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2009.5.7	INTERMAG2009	Spin-torque-induced switching and precession in	<u>R. Matsumoto</u> , A. Fukushima, K.Yakushiji, T. Nagahama, H.

			fully-epitaxial Fe/MgO/Fe(001) magnetic tunnel junctions	Kubota, T. Katayama, Y. Suzuki, K. Ando, S. Yuasa, B. Georges, V. Cros, J. Grollier and A. Fert
2	2009.7.20	ICMFS2009	Spin-torque-induced precession in fully-epitaxial Fe/MgO/Fe(001) magnetic tunnel junctions	<u>R. Matsumoto</u> , A. Fukushima, K. Yakushiji, S. Yakata, T. Nagahama, H. Kubota, T. Katayama, Y. Suzuki, K. Ando, S. Yuasa, B. Georges, V. Cros, J. Grollier, and A. Fert
3	2009.7.31	ICM2009	Study of Kondo effect in MgO-based magnetic tunnel junctions by electron tunneling spectroscopy	<u>Do Bang</u> , T. Nozaki and Y. Suzuki, K. Rhie, T. -S. Kim, A. Fukushima and S. Yuasa, E. Minamitani, H. Nakanishi and H. Kasai
4	2009.9.8	第70回応用物理学会学術講演会	エピタキシャル Fe/MgO/Fe(001)-MTJにおけるスピントルクダイオード効果	松本利映, 家形論, 福島章雄, 薬師寺啓, 長浜太郎, 久保田均, 片山利一, 鈴木義茂, 安藤功兒, 湯浅新治
5	2009.9.8	第70回応用物理学会学術講演会	低温におけるトンネル磁気抵抗素子のスピントルクダイオード測定	<u>S. Ishibashi</u> , T. Yamane, T. Seki, T. Nozaki, Y. Suzuki, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa, H. Maehara, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D. D. Dyayaprawir, N. Watanabe
6	2009.9.14	第33回日本磁気学会学術講演会	CoFeB/MgO/CoFeB接合におけるナノ秒領域のスピントルクダイオード反転特性評価	富田博之, 野崎隆行, 久保田均, 福島章雄, 薬師寺啓, 湯浅新治, 前原大樹, 永峰佳紀, 恒川孝二, D. Djayaprawira, 渡辺直樹, 鈴木義茂
7	2009.9.28	Royal Society Discussion Meeting The spin on electronics	Spin control by application of electric current and voltage	<u>Yoshishige SUZUKI</u>
8	2009.12.9	ICAMD2009	Thermal effect of spin-transfer switching in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions	<u>H. Tomita</u> , T. Nozaki, H. Kubota, A. Fukushima, K. Yakushiji, S. Yuasa, Y. Suzuki
9	2010.3.4	文部科学省「最先端・高性能汎用スーパーコンピュータの開発利用」プロジェクト次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開発公開シンポジウム	電流および電圧による磁化の操作	鈴木義茂
10	2010.3.17	第57回応用物理学連合講演会	強磁性トンネル接合素子におけるスピントルクダイオード電圧の磁場角度依存性	<u>石橋翔太</u> , 関剛斎, 野崎隆行, 鈴木義茂, 久保田均, 福島章雄, 湯浅新治, 前原大樹, 永峰佳紀, 恒川孝二, D. D. Djayaprawira, 渡辺直樹
11	2010.3.19	第57回応用物理学連合講演会	垂直磁化GMR素子の高速スピントルクダイオード反転	富田博之, 野崎隆行, 関剛斎, 永瀬俊彦, 西山勝哉, 北川英二, 吉川将寿, 大坊忠臣, 長嶺真, 岸達也, 池川純夫, 下村尚治, 奥田博明, 鈴木義茂

平成 22 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2010.9.24	SSDM2010	High speed spin-transfer switching in GMR nanopillars with perpendicular anisotropy	Hiroyuki Tomita, <u>Takayuki Nozaki</u> , Takeshi Seki, Toshihiko Nagase, Eiji Kitagawa, Yoshikawa Masatoshi, Tadaomi Daibou, Makoto Nagamine, Sumio Ikegawa, Naoharu Shimomura, Hiroaki Yoda and Yoshishige Suzuki
2	2010.10.16	IVESC2010& NANOCarbon2010	Spin-torque FMR and large rectification sensitivity in Fe-rich CoFeB-MgO magnetic tunnel junctions	<u>Yoshishige Suzuki</u> , Shota Ishibashi, Hitoshi Kubota, Takayuki Nozaki, Akio Fukushima, Shinji Yuasa, Hiroki Maehara, Koji Tsunekawa, D. D. Djayaprawira

(c) 表彰等

(記載事項無し)

(e) 特許

(国内特許)

(記載事項無し)

(国際特許)

(記載事項無し)

東北大学

(a) 投稿論文 (8件)

平成20年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2008.4.28	Appl. Phys. Lett., 92 (2008) 172502-1-3	Tunneling magnetoresistance of magnetic tunnel junctions using perpendicular magnetization $L1_0$ -CoPt electrodes	G. Kim, Y. Sakuraba, M. Oogane, Y. Ando and T. Miyazaki
2	2008.5.1	まぐね3、212-218 (2008)	TMR効果の歴史と展望	宮崎照宣
3	2008.11.21	Appl. Phys. Express, 1, 121301 (2008)	Gilbert damping for various $Ni_{80}Fe_{20}$ thin films investigated using all-optical pump-probe detection and ferromagnetic resonance	S. Mizukami, H. Abe, D. Watanabe, M. Oogane, Y. Ando, and T. Miyazaki
4	2009.1.20	Jpn. J. of Appl. Phys. 48, 013001 (2009)	Boron Composition Dependence of Spin-Transfer Switching in Magnetic Tunnel Junctions with CoFeB Free Layers	D. Watanabe, M. Oogane, S. Mizukami, Y. Ando, and T. Miyazaki
5	2009.2.1	まぐね, 4 73-81 (2009)	スピンプンピングによるスピン流の創出と物理現象	安藤康夫, 水上成美, 家形諭, 谷口知大, 今村裕志, 大兼幹彦, 宮崎照宣

平成21年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2010.2.	J. Physics Conference Series, 200, 052011 (2010)	Magnetoresistance of Perpendicularly Magnetized Tunnel Junction Using $L1_0$ -CoNiPt with Low Saturation Magnetization	G. Kim, T. Hiratsuka, H. Naganuma, M. Oogane, and Y. Ando

平成22年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2010.4.1	まぐね 5, 164 (2010)	磁気メモリ総論	宮崎照宣、水上成美、渡邊大輔、フェンウ
2	2011.1.17	Appl. Phys. Express 4, 013005 (2011)	Gilbert Damping in Ni/Co Multilayer Films Exhibiting Large Perpendicular Magnetic Anisotropy	S. Mizukami, X. Zhang, T. Kubota, H. Naganuma, M. Oogane, Y. Ando, and T. Miyazaki

(b) 学会発表 (24件)

平成18年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2006.9.11	第30回日本応用磁気学会	pump-probe法による反平行結合膜の磁気緩和定数の測定	阿部浩之, 大兼幹彦, 安藤康夫, 宮崎照宣
2	2006.12.7	第61回応用物理学会東北支部	pump-probe法による反平行結合膜の磁化ダイナミクスの測定	阿部浩之, 大兼幹彦, 安藤康夫, 宮崎照宣
3	2007.3.27	第54回春季応用物理学会学術講演会	MgO障壁を有する強磁性トンネル接合のナノ秒領域パルスによるスピン注入磁化反	青木達也, 渡邊大輔, 安藤康夫, 大兼幹彦, 宮崎照宣

平成19年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2007.6.6	粉体粉末冶金協会学術講演会	スピントロニクスの形成と発展	宮崎照宣

2	2007.9.5	第68回応用物理学会学術講演会	L10-CoNiPtエピタキシャル薄膜の作製とその磁気特性	金 国天, 桜庭裕弥, 大兼幹彦, 安藤康夫, 宮崎照宣
3	2007.9.11	第31回日本磁気学会学術講演会	L10-CoPtを用いた強磁性トンネル接合の作製と評価	金 国天, 桜庭裕弥, 大兼幹彦, 安藤康夫, 宮崎照宣
4	2007.9.14	第31回日本磁気学会学術講演会	非磁性金属添加CoFeB合金薄膜の磁気緩和定数	大兼幹彦, 渡邊美穂, 家形諭, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣
5	2007.11.6	52nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials	Magnetic Damping Constants in (CoFeB) _{1-x} Cr _x and (CoFeB) _{1-x} V _x Alloy Thin Films	M. Oogane, M. Watanabe, S. Yakata, H. Kubota, Y. Ando and T. Miyazaki
6	2007.11.6	52nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials	Perpendicularly magnetized tunnel junctions with L10-CoPt epitaxial films	G. Kim, M. Oogane, Y. Ando and T. Miyazaki
7	2007.12.6	第62回応用物理学会東北支部	L10-CoNiPtを用いた強磁性トンネル接合の作製と評価	金国天, 桜庭裕弥, 大兼幹彦, 安藤康夫, 宮崎照宣
8	2007.12.6	第62回応用物理学会東北支部	Pump-Probe法による高速磁化ダイナミクス測定	阿部浩之, 金国天, 大兼幹彦, 安藤康夫, 宮崎照宣
9	2008.3.27	第55回応用物理学関係連合講演会	高磁気異方性L10-CoNiPtエピタキシャル薄膜の作製	金 国天, 桜庭裕弥, 大兼幹彦, 安藤康夫, 宮崎照宣
10	2008.3.29	第55回応用物理学関係連合講演会	CoFeXB (X=Cr,V) フリー層を用いたMTJにおけるスピン注入磁化反転	久保田 均, 薬師寺啓, 福島章雄, 湯浅新治, 安藤功兒, 大兼幹彦, 家形 諭, 安藤康夫, 宮崎照宣

平成 20 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2008.9.5	第69回応用物理学会学術講演会	磁性薄膜におけるスピンドイナミクスの全光学的検出	水上成美, 渡邊大輔, 阿部浩之, 大兼幹彦, 安藤康夫, 宮崎照宣
2	2008.9.15	第32回日本磁気学会学術講演会	磁性薄膜におけるスピンドイナミクスの全光学的検出	水上成美, 渡邊大輔, 阿部浩之, 大兼幹彦, 安藤康夫, 宮崎照宣
3	2008.12.19	第1回界面科学研究会	強磁性トンネル接合における磁気抵抗効果と界面制御(招待講演)	安藤康夫
4	2009.3.13	日本磁気学会第165回研究会	スピントルク磁化反転におけるスピンドイナミクス	安藤康夫, 青木達也, 玉川聖, 渡邊大輔, 水上成美, 家形諭, 谷口知大, 今村裕志, 永沼博, 大兼幹彦, 宮崎照宣,

平成 21 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2009.7.3	日本磁気学会光機能性磁気デバイス・磁性材料専門研究会, 電気学会熱と磁気によるナノ領域スピン制御ストレージ技術調査専門委員会共催	フェムト秒レーザーを用いた垂直磁化膜のスピンドイナミクスの評価(招待講演)	水上成美他
2	2009.7.22	20th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces	Fabrication of magnetic tunnel junction using L ₁₀ -CoNiPt, with low saturation magnetization	G. Kim, M. Oogane, H. Naganuma, and Y. Ando
3	2009.7.27	International Conference on Magnetism 2009	Fabrication of Thin L ₁₀ -CoNiPt Film with Low Saturation Magnetization	G. Kim, M. Oogane, H. Naganuma, and Y. Ando
4	2009.9.8	第70回応用物理学会学術講演会	垂直磁化Fe系合金薄膜のダンピング定数の光学的評価	水上成美, 甲斐正, E.P.Sajitha, 渡邊大輔, F.Wu, 永沼博, 大兼幹彦, 與田博明, 安藤康夫, 宮崎照宣
5	2009.9.10	第70回応用物理学会学術講演会	磁性発振器CPP-GMR素子の作製およびその高周波発振特性	河田祐紀, 永沼博, 大兼幹彦, 安藤康夫

6	2009.9.14	第33回日本磁気学会学術講演会	Fe系垂直磁化膜のスピンダイナミクス	水上成美, 甲斐正, E. P. Sajitha, 渡邊大輔, F. Wu, 永沼博, 大兼幹彦, 興田博明, 安藤康夫, 宮崎照宣
---	-----------	-----------------	--------------------	--

平成 22 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2011.3	第71回応用物理学会学術講演会	垂直磁化Ni/Co多層膜のスピンオ差運動の光学的検出	水上成美, 永沼博, 大兼幹彦, 安藤康夫, 宮崎照宣

(c) 表彰等

- 宮崎照宣, 応用磁気学会出版賞、平成 18 年 9 月 12 日.
- 桜庭裕弥, 財団法人青葉工学振興会、第 12 回研究奨励賞、平成 18 年 12 月 10 日.
- 宮崎照宣, 応用物理学会フェロー表彰、平成19年6月19日.
- 大兼幹彦, 日本応用磁気学会学術奨励賞、平成19年8月8日.
- 宮崎照宣, 2007年度朝日賞、平成20年1月1日.
- 宮崎照宣, 越生町町民栄誉賞、平成 20 年 11 月.
- 宮崎照宣, Oliver E. Buckley 賞(アメリカ物理学会、固体物理分野)、平成 21 年 3 月.
- 宮崎照宣, 第9回応用物理学会業績賞(研究業績賞)、平成 21 年 3 月.

(d) その他特記事項

(1) 成果普及の努力 (プレス発表等)

- 2006 年 11 月 13 日付夕刊読売新聞、「記録計振り切る”記憶力」の表題で掲載
- 2007年10月29日付朝日新聞、「記録高密度化、日本で発展 トンネル磁気抵抗効果」の表題で掲載

下記セミナーを行い、本プロジェクトで開発を進めている将来的に非常に期待の大きいスピン注入方式のMRAM の原理、有用性および研究成果を紹介した。

- 2006 年 12 月 1 日に富士通長野工場において、宮崎照宣教授が「TMR の歴史とやさしい原理」と題してセミナーを実施
- 安藤康夫, “MRAM の研究開発動向”, 次世代不揮発メモリのデバイス原理と研究開発動向 (2007 年 4 月 26 日)
- 宮崎照宣, “スピントロニクス”, 日本大学特別講義, 日本大学工学部 (2007 年 7 月 11 日)
- 安藤康夫, “スピンエレクトロニクス技術の現状と将来展望”, 富士電機デバイステクノロジー (株) 技術講演会 (2007 年 10 月 10 日)
- 宮崎照宣, “磁性薄膜の基礎とスピントロニクス”, 富士電機連続講座, 富士電機松本 (2007 年 10 月 13 日, 11 月 3,10 日, 12 月 1,15 日)
- G. Kim, Y. Sakuraba, M. Oogane, Y. Ando and T. Miyazaki, Recent progress of TMR effect in magnetic tunnel junctions with perpendicularly magnetized films, 4th Summer school of MAINZ and 7th International Symposium on New Materials with High Spin

Polarization (Mainz, August 2008)

- T. Miyazaki, Recent Progress of Large Tunnel Magnetoresistance Junctions and their Applications [Innovation research and philosophy of science] (2008年9月18日, The Palace Hotel, San Francisco) (招待講演)
- S. Mizukami, D. Watanabe, F. Wu, and T. Miyazaki, "Material design and development for Spin-RAM", "Mini-workshop "spintronics devices", WPI-AIMR Annual workshop, Zao, March 5, 2009.
- T. Miyazaki, S. Mizukami, D. Watanabe, F. Wu, M. Oogane, and Y. Ando, "Root of Tunnel Magnetoresistance and its Development", WPI-AIMR Annual workshop, Zao, March 5, 2009.
- S. Mizukami, "Pump-probe investigation of spin dynamics in magnetic thin films", Special WPI-Joint Seminar, Tohoku University, February 5, 2009.
- 宮崎照宣, アメリカ物理学会で Oliver E. Buckley 賞受賞記念講演 (2009年3月) (招待講演)
- 宮崎照宣, “磁性の基礎”, 8回スピントロニクス入門セミナー, 仙台, 2009年11月25日.
- Terunobu Miyazaki, Development of tunnel magnetoresistance effect, Jilin University, August 20, Changchun, 2010 (Invited seminar).
- 大兼幹彦, “不揮発性メモリの最前線★徹底解説 MRAM の現状と将来展望”, 電子ジャーナル講演, 東京, 2010年10月13日.

(e) 特許

(国内特許)

平成 19 年度

出願済み： 1 件

*独立行政法人産業技術総合研究所との共願 (1 件) を含む

(国際特許)

(記載事項無し)

②スピン新機能素子設計技術

(1) 新ストレージ・メモリデバイス設計技術

日本電気株式会社：磁壁メモリ

(a) 投稿論文

平成 19 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2008.1.31	Journal of Applied Physics	Micromagnetic Analysis of the Current Driven Domain Wall Motion in Nano-strips with Perpendicular Magnetic Anisotropy	日本電気株式会社
2	2008.2.4	Journal of Applied Physics	Reduction of Critical Current Density for Domain Wall Motion in U-shaped Magnetic Patterns	日本電気株式会社
3	2008.4.24	Journal of Applied Physics	Analysis of current-driven domain wall motion from pinning sites in nano-strips with perpendicular magnetic anisotropy	日本電気株式会社
4	2008.5.4	IEEE Trans. On Magn.	Current-driven Domain Wall motion, Nucleation and Propagation in a Co/Pt Multilayer Wire with a Stepped Structure	日本電気株式会社
5	2008.6.11	Journal of Applied Physics	Analysis of Current Driven Domain Wall Motion from Pinning Sites in Nano-strips with Perpendicular Magnetic Anisotropy	日本電気株式会社
6	2008.6.11	IEEE Trans. On Magn.	Intrinsic Threshold Current Density of Domain Wall Motion in Nano-strips with Perpendicular Magnetic Anisotropy for Use in Low-write-current MRAMs	日本電気株式会社
8	2008.10.15	Japanese Journal of Applied Physics (APEX)	Analysis of Shape-varying MRAM Cell with Low Write-current Switching	日本電気株式会社

平成 20 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2010.1.31	Applied Physics Letters (APL)	Relation Between Critical Current of Domain Wall Motion and Wire Dimension in Perpendicularly Magnetized Co/Ni Nanowires	日本電気株式会社

平成 21 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2010.4.1	日本磁気学会誌	電流誘起磁壁移動現象の高速 MRAMへの応用	日本電気株式会社
2	2010.4.21	Journal of Applied Physics	Magnetic configuration of submicron-sized magnetic patterns in domain wall motion memory	日本電気株式会社
3	2010.12.1	応用物理学会誌	垂直磁化MRAMの可能性とシステム応用	日本電気株式会社
4	2010.12.18	Japanese Journal of Applied Physics (APEX)	Stack structure dependence of Co/Ni multilayer for current induced domain wall motion	日本電気株式会社

5	2010.12.31	Applied Physics Letters (APL)	Large thermal stability independent of critical current of domain wall motion in Co/Ni nanowires with step pinning sites	日本電気株式会社
---	------------	-------------------------------	--	----------

(b) 学会発表

平成 19 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2007.6.14	Symp on VLSI Technology	MRAM Cell Technology Utilizing Domain Wall Motion by Spin Current Injection	日本電気株式会社
2	2007.7.23	日本磁気学会	高速MRAMを目指した磁壁移動メモリ技術	日本電気株式会社
3	2007.9.11	日本磁気学会	U字形磁性体に形成された磁壁の電流駆動	日本電気株式会社
4	2007.9.11	日本磁気学会	XMCD-PEEMによるU字形磁性体の磁区観察	日本電気株式会社
5	2007.11.5	Conf on Magnetism & Magnetic Materials (MMM)	Micromagnetic Analysis of the Current Driven Domain Wall Motion in Nano-strips with Perpendicular Magnetic Anisotropy	日本電気株式会社
6	2007.11.7	Conf on Magnetism & Magnetic Materials (MMM)	Reduction of Critical Current Density for Domain Wall Motion in U-shaped Magnetic Patterns	日本電気株式会社
7	2007.11.19	Int Workshop on New Non-Volatile Memory	(招待講演) Domain Wall Motion Cell for High-speed MRAM	日本電気株式会社

平成 20 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2008.5.8	Intermag 2008, Madrid, Spain	Current-driven Domain Wall Motion, Nucleation, and Propagation in a Co/Pt Multi-layer Strip with a Stepped Structure	日本電気株式会社
2	2008.5.8	Intermag 2008, Madrid, Spain	Intrinsic Threshold Current Density of Domain Wall Motion in Nano-Strips with Perpendicular Magnetic Anisotropy for Use in Low-Write-Current MRAMs	日本電気株式会社
3	2008.9.2	応用物理学会	XMCD-PEEMを用いたサブミクロン磁性パターンの磁区構造観察	日本電気株式会社
4	2008.10.12	PRiME(Pacific RIM Meeting on Electrochemical & Solid-State Science) Joint Int Meeting	High-speed MRAM for Embedding in SoC	日本電気株式会社
5	2009.1.16	日本応用磁気学会 スピンエレクトロニクス専門研究会	(招待講演) 垂直磁化膜における磁壁電流駆動とMRAMへの応用	日本電気株式会社
6	2009.3.30	応用物理学会	垂直磁化膜を用いた磁壁電流駆動のメモリ動作検討	日本電気株式会社

平成 21 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2009.5.4	Intermag 2009, Sacramento California	Evaluation of Scalability for Current-driven Domain Wall Motion in a Co/Ni Multi-layer Strip for Memory Application by Using Domain Wall Resistance Measurement	日本電気株式会社
2	2009.5.22	日本磁気学会研究会	(招待講演) 省電力に貢献する次世代不揮発メモリーMRAM	日本電気株式会社
3	2009.6.15	Symp. on VLSI Technology	Low Current Perpendicular Domain Wall Motion Cell for Scalable High-Speed MRAM	日本電気株式会社
4	2009.7.16	電子情報通信学会 シリコン材料・デバイス研究会 (SDM)	(招待講演) 垂直磁化磁壁移動セルを用いた高速低電流MRAM	日本電気株式会社
5	2009.9.8	応用物理学会	Co/Ni磁壁移動層を用いた磁気トンネル接合膜の検討	日本電気株式会社
6	2009.9.8	応用物理学会	Co/Ni垂直磁化膜を用いた磁壁移動型メモリの電気特性	日本電気株式会社
7	2009.9.12	日本磁気学会	垂直磁化細線と面内MTJを用いた磁壁移動型MRAM	日本電気株式会社
8	2009.10.7	SSDM 2009	(招待講演) High-speed Magnetic Memory based on Spin-Torque Domain Wall Motion	日本電気株式会社
9	2009.10.25	Annual Non-Volatile Memory Technology Symp (NVMTS)	(招待講演) Embedded MRAM with Three-Terminal Cell Architectures	日本電気株式会社
10	2009.11.2	日本磁気学会 スピンエレクトロニクス研究会	(招待講演) SoC混載に適した垂直磁化磁壁移動型MRAM	日本電気株式会社
11	2010.1.18	11th Joint MMM/Intermag Conference Washington, DC	(招待講演) Current-induced Domain Wall Motion MRAM	日本電気株式会社
12	2010.3.17	応用物理学会	(招待講演) スピントルク磁壁移動と高速MRAMへの応用	日本電気株式会社

平成 22 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2010.7.12	ISAMMA 2010	(招待講演) High-speed MRAM based on Spin-Torque Domain Wall Motion	日本電気株式会社
2	2010.9.22	SSDM 2010	(招待講演) Current Status and Future Challenge of embedded high-speed MRAM	日本電気株式会社
3	2010.7.8	電気化学会第74回半導体・集積回路技術シンポジウム	(招待講演) スピン移行トルク磁壁移動を用いた高速磁気ランダムアクセスメモリ	日本電気株式会社
4	2010.11.14	MMM Conference 2010 Atlanta, Georgia	Displacement and retention characteristics of domain wall trapped at step pinning site in Co/Ni nanowire: critical current, critical field, and thermal stability	日本電気株式会社

5	2011.1.6	スピン流の創出と制御	(招待講演) High-speed MRAM Based on Spin-Torqu Domain Wall Motion	日本電気株式会社
---	----------	------------	---	----------

(c) 表彰等

平成 19 年度

	発表日	内容	タイトル等	受賞者等
1	2008.2.20	2007 SEMIテクノロジーシンポジウムAward	SoC混載に適したMRAM技術	日本電気株式会社

(d) その他特記事項

平成 19 年度

	発表日	内容	タイトル等	発表者等
1	2007.7.3	プレス発表 日本産業新聞 (朝刊)	次世代不揮発メモリー	日本電気株式会社
2	2007.12.5	SEMIテクノロジーシンポジウム	(招待講演) SoC混載に適したMRAM技術	日本電気株式会社
3	2007.12.11	日本学術振興会第147委員会	(招待講演) 高速MRAMを目指した磁壁移動メモリ技術 —DW Seesawの提案と基礎動作実証—	日本電気株式会社
4	2008.2.29	SPring-8 重点産業利用 課題成果報告会	XMCD-PEEMによる次世代 MRAM素子の磁壁移動観察	日本電気株式会社

平成 20 年度

	発表日	内容	タイトル等	発表者等
1	2008.5.15	SEMI News	(招待寄稿) SoC混載に適したMRAM技術	日本電気株式会社
2	2008.12.3	STS Award受賞記念講演	(招待講演) SoC混載に適したMRAM技術	日本電気株式会社

平成 21 年度

	発表日	内容	タイトル等	発表者等
1	2009.5.4	日経エレクトロニクス	(招待寄稿) MRAMで論理回路を不揮発化	日本電気株式会社
2	2009.6.17	プレスリリース	システムLSIに適した微細化が 容易な高速MRAM技術を開発	日本電気株式会社
3	2009.10.20	SRC/A-STAR/NSF Forum on Future Memory Technologies	(招待講演) MRAM: Materials and Devices	日本電気株式会社

平成 22 年度

	発表日	内容	タイトル等	発表者等
1	2010.9.10	国際高等研『ナノ物質量子相の科学』に関する研究開発専門委員会	(招待講演) 磁壁電流駆動現象のメモリ応用	日本電気株式会社

2	2010.10.30	ITRS ワークショップ	(招待講演) Low power and ultra-fast MRAM	日本電気株式会社
---	------------	--------------	---	----------

(e) 特許

(国内特許)

平成 18 年度

出願済み： 7 件

平成 19 年度

出願済み： 26 件

平成 20 年度

出願済み： 18 件

平成 21 年度

出願済み： 8 件

平成 22 年度

出願済み： 1 件

(国際特許) ※PCT 出願により出願国が確定した時点で計上

平成 18 年度

出願済み： 3 件

平成 19 年度

出願済み： 12 件

平成 20 年度

出願済み： 10 件

平成 21 年度

出願済み： 2 件

平成 22 年度

出願済み： 1 件

富士通株式会社：磁壁ストレージ

(a) 投稿論文

(記載事項無し)

(b) 学会発表

平成 20 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2008.5.8	INTERMAG2008	Current induced domain wall motion with step structure	芦田 裕

(c) 表彰等

(記載事項無し)

(d) その他特記事項

(記載事項無し)

(e) 特許

(国内特許)

平成 19 年度

出願済み： 2 件

平成 20 年度

出願済み： 3 件

(国際特許)

(記載事項無し)

京都大学：磁壁移動ダイナミクス

(a) 投稿論文

平成 19 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2008.1.	Appl. Phys. Express1 (2008) 01130	Current-Driven Domain Wall Motion in CoCrPt Wires with Perpendicular Magnetic Anisotropy	H. Tanigawa, K. Kondou, T. Koyama, K. Nakano, S. Kasai, N. Ohshima1, S. Fukami, N. Ishiwata, and T. Ono
2	2008.1.	J. Appl. Phys. 103, 07E703 (2008)	Domain wall ratchet effect in a magnetic wire with asymmetric notches	A. Himeno, K. Kondo, H. Tanigawa, S. Kasai, and T. Ono

平成 20 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2008.5.23	Appl. Phys. Express1 (2008) 061302	Single Shot Detection of the Magnetic Domain Wall Motion by Using Tunnel Magnetoresistance Effect	K. Kondou, N. Ohsima, S. Kasai, Y. Nakatani, and T. Ono
2	2008.10.19	Appl. Phys. Express1 (2008) 101303	Control of Domain Wall Position by Electrical Current in Structured Co/Ni Wire with Perpendicular Magnetic Anisotropy	Tomohiro Koyama, Gen Yamada, Hironobu Tanigawa, Shinya Kasai, Norikazu Ohshima, Shunsuke Fukami, Nobuyuki Ishiwata, Yoshinobu Nakatani, and Teruo Ono
3	2008.11.12	Phys. Rev. Lett.	Dynamical Pinning of a Domain Wall in a Magnetic Nanowire Induced by Walker Breakdown	Hironobu Tanigawa, Tomohiro Koyama, Maciej Bartkowiak, Shinya Kasai, Kensuke Kobayashi, Teruo Ono, Yoshinobu Nakatani

平成 21 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2009.4.24	Appl. Phys. Express2 (2009) 053002	Domain Wall Motion Induced by Electric Current in a Perpendicularly Magnetized Co/Ni Nano-Wire	Hironobu Tanigawa, Tomohiro Koyama, Gen Yamada, Daichi Chiba, Shinya Kasai, Shunsuke Fukami, Tetsuhiro Suzuki, Norikazu Ohshima, Nobuyuki Ishiwata, Yoshinobu Nakatani, and Teruo Ono

平成 22 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2010.7.2	Appl. Phys. Express3 (2010) 073004	Control of Multiple Magnetic Domain Walls by Current in a Co/Ni Nano-Wire	Daichi Chiba, Gen Yamada, Tomohiro Koyama, Kohei Ueda, Hironobu Tanigawa, Shunsuke Fukami, Tetsuhiro Suzuki, Norikazu Ohshima, Nobuyuki Ishiwata, Yoshinobu Nakatani, and Teruo Ono
2	2011.2.20	Nature Materials 10 (2011)194	Observation of the intrinsic pinning of a magnetic domain wall in a ferromagnetic nanowire	T. Koyama, D. Chiba, K. Ueda, K. Kondou, H. Tanigawa, S. Fukami, T. Suzuki, N. Ohshima, N. Ishiwata, Y. Nakatani, K. Kobayashi & T. Ono
3	2011.5.12	Appl. Phys. Lett., 98, (2011) 192509	Magnetic field insensitivity of magnetic domain wall velocity induced by electrical current in Co/Ni nanowire	T. Koyama, D. Chiba, K. Ueda, H. Tanigawa, S. Fukami, T. Suzuki, N. Ohshima, N. Ishiwata, Y. Nakatani, and T. Ono

(b) 学会発表

平成 18 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2006.8.15	International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces	(招待講演) Current driven domain wall motion	小野輝男
2	2006.8.22	International Conference on Magnetism	(招待講演) Excitation of nano-spin-structure by spin-polarized current	小野輝男
3	2006.10.23	International Wilhelm and Else Heraeus Seminar -Spin Torque in Magnetic Nanostructures-	(招待講演) Excitation of spin-structure in nano-magnet by electrical current	小野輝男
4	2006.9.23	日本物理学会	電流誘起磁壁移動現象におけるしきい電流密度とピニングポテンシャルの相関	矢野邦明、葛西伸哉、小野輝男、他2名
5	2006.9.23	日本物理学会	TMR構造をもつサブミクロン磁性細線における単一磁壁のダイナミクス	姫野敦史、葛西伸哉、小野輝男、他1名
6	2007.3.18	日本物理学会	電流誘起磁壁移動現象におけるピニングポテンシャル	矢野邦明、葛西伸哉、小野輝男、他2名
7	2007.3.18	日本物理学会	TMR構造をもつサブミクロン磁性細線における単一磁壁のダイナミクスII	姫野敦史、葛西伸哉、小野輝男、他1名
8	2007.3.18	日本物理学会	ナノ秒パルスによる磁壁電流駆動の直接観察	矢野邦明、葛西伸哉、小野輝男、他2名
9	2007.1.8	MMM-Intermag conference	AC current induced domain wall motion	仲谷栄伸、小野輝男

平成 19 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2007.5.23	International Conference on Nanospintronics Design and Realization	(招待講演) Excitation of nano-spin-structure by electric current	小野輝男
2	2007.6.31	International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications	(招待講演) Electrical Manipulation of Magnetization in Nanomagnet	小野輝男
3	2007.12.14	The 5th International Conference on Advanced Materials and Devices	(招待講演) Electrical Manipulation of Magnetization in Nanomagnet	小野輝男
4	2007.5.31	International Symposium on Advanced Magnetic Materials	Direct Observation of DW Motion Induced Nano-second Current Pulse	谷川博信、葛西伸哉、小野輝男、他2名
5	2007.11.7	52th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials	Domain Wall Motion Induced by a Pulsed-Current under an External Magnetic Field	谷川博信、近藤浩太、葛西伸哉、小野輝男
6	2007.9.22	日本物理学会	外部磁場下におけるパルス電流誘起磁壁電流駆動	谷川博信、近藤浩太、葛西伸哉、小野輝男
7	2007.9.22	日本物理学会	MR構造をもつ磁性細線における単一磁壁のダイナミクス	近藤浩太、葛西伸哉、小野輝男、他4名
8	2007.11.8	52th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials	Domain Wall Ratchet Effect in a Magnetic Wire with Asymmetric Notches	仲谷栄伸、小野輝男、他3名
9	2008.3.22	日本物理学会	垂直磁気異方性を有する強磁性細線中の磁壁電流駆動における細線幅依存性	小山知弘、小野輝男、他6名

10	2008.3.22	日本物理学会	垂直磁気異方性を持つCoPtCr細線中の磁壁電流駆動	谷川博信、小野輝男、他7名
11	2008.3.22	日本物理学会	TMR効果を用いた磁気渦ダイナミクスの電氣的検出	中野邦裕、小野輝男、他4名
12	2008.3.22	日本物理学会	磁気渦ダイナミクスの実時間・実空間分解測定	葛西伸哉、小野輝男、他6名
13	2008.3.22	日本物理学会	単一磁壁ダイナミクスの実時間観測	近藤浩太、小野輝男、他5名
14	2008.3.28	日本応用物理学会	交流電流励起による磁気渦ダイナミクスの時間分解測定	葛西伸哉、小野輝男、他6名

平成 20 年度

1	2008.5.8	Intermag 2008, Madrid, Spain	Current-driven Domain Wall Motion in CoCrPt Wires with Perpendicular Magnetic Anisotropy	H. Tanigawa, K. Kondou, T. Koyama, K. Nakano, S. Kasai, N. Ohshima, S. Fukami, N. Ishiwata, and T. Ono
2	2008.5.8	Intermag 2008, Madrid, Spain	Shingle Shot Detection of the Magnetic Domain Wall Motion by Using the TMR Effect	N. Ohshima, S. Kasai, Y. Nakatani, and T. Ono
3	2008.4.17	The spring semi-annual meeting of Korean Physical Society, Daejeon, Korea	(招待講演) Current-induced magnetization dynamics in nanomagnet	小野輝男
4	2008.6.18	The 5th International Workshop on Surface, Interface, and Thin Film Physics, Shanghai, China	(招待講演) Current-induced magnetization dynamics in nanomagnet	小野輝男
5	2008.10.3	The 4th Taiwan International Conference on Spintronics, Taipei, Taiwan	(招待講演) Current-induced magnetization dynamics in nanomagnet: Domain wall and magnetic vortex	小野輝男
6	2008.10.17	The 5th Asia Forum on Magnetism, Beijing, China	(招待講演) Current-induced magnetization dynamics in nanomagnet	小野輝男
7	2009.1.21	JST-DFG workshop on Nanoelectronics, Kyoto, Japan	(招待講演) Current-induced magnetization dynamics in nano-magnet: fundamental to applications	小野輝男
8	2009.1.29	Symposium on Surface and Nano Science, Shizuokaishi, Japan	(招待講演) Control of Magnetization in Nano-Magnet by Electric Current	小野輝男
9	2008.9.20	日本物理学会	磁壁の磁場駆動における確率的ピニング効果	谷川博信、小野輝男、他4名
10	2008.9.21	日本物理学会	垂直磁気異方性を有する強磁性細線中の磁壁電流駆動	小山知弘、小野輝男、他6名
11	2008.9.21	日本物理学会	単一磁壁の動的ダイナミクス	近藤浩太、小野輝男、他5名
12	2009.3.27	日本物理学会	単一磁壁の動的ダイナミクスの実時間測定	近藤浩太、小野輝男、他5名
13	2009.3.27	日本物理学会	垂直磁気異方性を有するCo/Ni細線中の磁壁電流駆動	小山知弘、小野輝男、他6名
14	2009.3.28	日本物理学会	垂直磁気異方性を有するCo/Ni細線中の磁壁電流駆動現象	谷川博信、小野輝男、他7名
15	2009.3.28	日本物理学会	垂直磁気異方性を有するCo/Ni細線への単一磁壁導入	山田元、小野輝男、他8名
16	2009.3.31	日本応用物理学会	垂直磁気異方性を有するCo/Ni細線における電流注入磁壁移動	千葉大地、小野輝男、他8名

平成 21 年度

1	2009.5.5	I IEEE International Magnetism Conference,	(招待講演) High DW velocity in Co/Ni with	小野輝男
---	----------	--	--	------

		Sacramento, USA	perpendicular anisotropy	
2	2009.6.23	20th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, Berlin, Germany	(招待講演) Current-induced Domain Wall Motion in Perpendicularly Magnetized Co/Ni Wires	小野輝男
3	2009.8.2	SPIE, NanoScience + Engineering, San Diego, USA	(招待講演) Current-induced domain wall motion in perpendicularly magnetized Co/Ni wires	小野輝男
4	2009.9.3	5th Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium, Osaka, Japan	(招待講演) Current-induced magnetization dynamics - Domain wall motion & Vortex core switching -	小野輝男
5	2009.11.30	International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology, Hawaii, USA	(招待講演) Current-induced magnetization dynamics of nano-magnets - Domain wall motion & Vortex core switching -	小野輝男
6	2010.2.6	6th RIEC International Workshop on Spintronics, Sendai, Japan	(招待講演) Current-induced domain wall motion against magnetic field	小野輝男
7	2009.9.25	日本物理学会	垂直磁気異方性を有するCo/Ni細線の磁気異方性定数の決定	上田浩平、小野輝男、他10名
8	2009.9.25	日本物理学会	垂直磁気異方性を有するCo/Ni細線における複数磁壁電流駆動	山田元、小野輝男、他8名
9	2009.9.27	日本物理学会	外部磁場下におけるCo/Ni細線中の磁壁電流駆動	小山知弘、小野輝男、他9名
10	2009.9.8	日本応用物理学会	垂直磁気異方性を有するCo/Ni細線における電流注入磁壁移動	千葉大地、小野輝男、他9名
11	2009.9.15	日本磁気学会	電流駆動磁壁移動における外部磁場効果	仲谷栄伸、小野輝男、他1名
12	2010.3.20	日本物理学会	細線形状制御による磁壁駆動電流密度の低減	小山知弘、小野輝男、他9名
13	2010.3.20	日本物理学会	外部磁場によるCo/Ni細線中の磁壁伝搬観測	山田啓介、小野輝男、他10名
14	2010.3.20	日本物理学会	垂直磁気異方性を有するCo/Ni細線における複数磁壁電流駆動I	山田元、小野輝男、他9名
15	2010.3.19	日本応用物理学会	垂直磁気異方性を有するCo/Ni細線における電流注入磁壁移動	千葉大地、小野輝男、他9名

平成 22 年度

1	2010.5.31	Third International Conference on Nanospintronics Design and Realization, Osaka, Japan	(招待講演) Current-induced Domain Wall Motion against Magnetic Field	小野輝男
2	2010.6.4	Progress in Spintronics and Graphene Research, Beijing, China	(招待講演) Spin torque effects in nanomagnets	小野輝男
3	2010.9.21	7th International Symposium on Metallic Multilayers, Berkley, USA	(招待講演) Current-induced domain wall motion against magnetic field	小野輝男
4	2010.12.6	International Conference of AUMS, Jeju, Korea	(招待講演) Experimental Evidence for Intrinsic Pinning Mechanism in Current-induced Domain Wall Motion	小野輝男
5	2010.9.24	日本物理学会	磁壁電流駆動における閾電流密度に対する外部磁場の影響	小山知弘、小野輝男、他9名

6	2010.9.25	日本物理学会	Co/Ni細線における磁壁電流駆動の温度依存性	上田浩平、小野輝男、他9名
7	2010.9.16	日本応用物理学会	垂直磁気異方性を有するCo/Ni細線における電流注入磁壁移動	小山知弘、小野輝男、他8名
8	2010.9.6	日本磁気学会	垂直磁気異方性を有するCo/Ni細線の磁壁電流駆動現象における積層膜厚および膜厚比率依存性	上田浩平、小野輝男、他8名

(c) 表彰等

平成 19 年度

	発表日	内容	タイトル等	受賞者等
1	2007.4.27	市村学術貢献賞	「微細加工磁性体におけるナノスピ構造制御の開拓的研究」	小野輝男
2	2007.9.12	日本応用磁気学会優秀研究賞	「電流駆動による磁壁移動ダイナミックスの研究」	小野輝男

平成 20 年度

	発表日	内容	タイトル等	受賞者等
1	2008.4.19	船井情報科学振興財団振興賞	「電流による磁化制御技術の開発」	小野輝男
2	2008.11.19	サー・マーティン・ウッド賞	「電流によるナノ磁性体の磁化制御」	小野輝男
3	2008.11.26	日本IBM科学賞	「スピン分極電流を用いた磁化制御に関する研究」	小野輝男

平成 21 年度

	発表日	内容	タイトル等	受賞者等
1	2009.11.2	大阪科学賞	「電流による磁化制御に関する先駆的研究」	小野輝男

(d) その他特記事項

(記載事項無し)

(e) 特許

(国内特許)

(記載事項無し)

(国際特許)

(記載事項無し)

(2) 不揮発性スピン光機能素子設計技術

産業技術総合研究所

(a) 投稿論文

平成 20 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2009.3.24	Appl. Phys. Lett., 94, 121104 (2009)	High- speed switching of spin polarization for proposed spin-photon memory	V. Zayets and K. Ando

平成 21 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2010.3.19	Optics Letters 35, 931 (2010)	Magnetization-dependent loss in (Al,Ga)As Optical Waveguide with a Embedded Fe micromagnet	V. Zayets, H. Saito, S. Yuasa and K. Ando
2	2010.1.1	Bulletin of Topical Symposium of the Magnetic Society of Japan Vol. 170, pp. 19-27	Proposed spin-photon memory as an optical buffer memory for high-speed networks	V. Zayets, J. C. Le Breton, H. Saito, S. Yuasa, and K. Ando

平成 22 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2011.3.28	MRS Proceedings (2011), vol. 1291: mrsf10-1291-j05-06	Magneto-optics in Diluted Magnetic Semiconductors and in Ferromagnetic-Metal/Semiconductor or Hybrids	V.Zayets, M. C Debnath, H. Saito, S. Yuasa, and K. Ando

(b) 学会発表

平成 18 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2006.10.5	Laser and Laser-Information Technologies: Fundamental Problems and Applications (ILLA2006)	(招待講演) "Spintronics for optical devices"	Koji Ando, Vadym Zayets, Mukul C. Debnath

平成 19 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2007.10.	III INTERNATIONAL CONFERENCE "ELECTRONICS AND APPLIED PHYSICS", Kiev, Ukraine,	(招待講演) " MAGNETO-OPTICAL PROPERTIES OF FERROMAGNETIC METAL/ SEMICONDUCTOR HYBRID OPTICAL DEVICES FOR OPTICAL ISOLATOR AND OPTICAL MEMORY APPLICATIONS"	V.Zayets, M.Debnath and K.Ando

平成 20 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2008.5.	CLEO/QELS 2008, San Jose, USA	"Study of Magneto-Optical Effect in (Al,Ga) Optical Waveguide with Embedded Micro-Sized Fe Pillar for Non-Volatile Optical Memory Applications"	V.Zayets and K. Ando

平成 21 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2009.6.	Magnetics and Optics Research International Symposium for New Storage Technology (MORIS 2009) Hyogo, Japan	(招待講演) " Spin Polarization Switching at 2.2 TBit/sec for Proposed Spin-Photon Memory "	V. Zayets, J. C. Le Breton, H. Saito, S. Yuasa, and K.Ando
2	2009.7.	Spintech 5, Cracow, Poland	(招待講演) " Magneto-optical devices "	V. Zayets
3	2009.6.	Magnetics and Optics Research International Symposium for New Storage Technology (MORIS 2009) Hyogo, Japan	"Influence of resistance-area product on time response of spin-photon memory"	V. Zayets, J. C. Le Breton, H. Saito, S. Yuasa, and K.Ando
4	2009.6.	29th Conference on Lasers and Electro Optics and the 27th International Quantum Electronics Conference, Baltimore, USA	"Demonstration of Spin Polarization Switching at 2.2 TBit/sec for Proposed Spin-Photon Memory"	V.Zayets and K. Ando

平成 22 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2010.9.	第34回日本磁気学会学術講演会、つくば	(招待講演) " High-speed non-volatile optical memory s"	V. Zayets, H. Saito, S. Yuasa, and K. Ando
2	2010.12.	Material Research Society (MRS) Fall Meeting 2010, Boston	(招待講演) " Magneto-optics in Diluted Magnetic Semiconductors and in Ferromagnetic-Metal/Semiconductor Hybrids "	V.Zayets, H. Saito, S. Yuasa, and K. Ando
3	2010.9.	International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2010), Tokyo	" Operational Conditions of Proposed Spin-Photon Memory "	V.Zayets, H. Saito, S. Yuasa, and K. Ando
4	2010.8.	International Conference on the Physics and Application of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VI), Tokyo,	"Optimizing operational conditions for proposed high-speed non-volatile optical memory "	V. Zayets, H. Saito, S. Yuasa and K. Ando

平成 23 年度 (確定した予定)

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2011.8.	Moscow International Symposium on Magnetism (MISM), Moscow, Russia	(招待講演) " Spin-Photonics Devices for High-Speed Optical Networks "	V. Zayets, H. Saito, S. Yuasa and K. Ando

(c) 表彰等

(記載事項無し)

(d) その他特記事項

平成 21 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
--	-----	------	--------	-----

1	2010.2.1	書籍の1章を執筆分担 “Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics” ISBN 978-953-7619-82-4, Edited by Bishnu Pal	Magneto-optical devices for optical integrated circuits	V. Zayets and K. Ando
---	----------	---	---	-----------------------

(e) 特許

(国内特許)

平成 19 年度

出願済み： 1 件

平成 21 年度

出願済み： 1 件

(国際特許) 注：PCT 出願は国内特許にも記載

平成 19 年度

出願済み： 1 件

平成 22 年度

出願済み： 1 件

(3) スピン能動素子設計技術

大阪大学：スピントルク方式トランジスタ

(a) 投稿論文

平成 19 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2007.10.29	Appl. Phys. Lett., 91, 082502 (2007)	Substantial reduction in the depinning field of vortex domain walls triggered by spin-transfer induced resonance	T.Nozaki, H.Maekawa, M.Mizuguchi, M.Shiraishi, T.Shinjo, and Y.Suzuki, H.Maehara, S.Kasai, T.Ono
2	2007.11.25	Nature Physics VOL.4, pp.37-41(2008)	“ Quantitative measurement of voltage dependence of spin-transfer torque in MgO-based magnetic tunnel junctions” (スピンRAMにも関係する成果のため①にも記載済み)	H.KUBOTA, A.FUKUSHIMA, K. YAKUSHIJI, T. NAGAHAMA, S.YUASA, K.ANDO, H. MAEHARA, Y.NAGAMINE, K.TSUNEKAWA, D.D. DJAYAPRAWIRA, N.WATANABE Y.SUZUKI,
3	2007.12.14	Phys.stat.sol.(a), 204, pp.3987–3990(2007)	Detection of current-driven magnetic domain wall deformation using anisotropic magnetoresistance effect	H. Maekawa , T. Nozaki, S. Kasai, M. Mizuguchi, M. Shiraishi , T. Ono , Y. Suzuki
4	2008.3	J. Phys. Soc. Jpn., Vol.77, No.3, p.031002 (2008)	”Spin-Torque Diode Effect and Its Application”. (スピンRAMにも関係する成果のため①にも記載済み)	Y. Suzuki and H. Kubota

平成 21 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2009.5.1	Appl. Phys. Exp., Vol.2, 063004 (2009)	Current-Field Driven “Spin Transistor”	K. Konishi, T. Nozaki, H.kubota, A. Fukushima, S. Yuasa, M. Shiraishi, Y. Suzuki
2	2009.6.23	Appl. Phys. Lett. 95, 022513 (2009)	rf amplification in a three-terminal magnetic tunnel junction with a magnetic vortex structure	T. Nozaki, H. Kubota, S. Yuasa, M. Shiraishi, T. Shinjo, Y. Suzuki

平成 22 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2011	Phil. Trans. A, accepted.	Spin control by application of electric current and voltage in FeCo/MgO junctions (スピン RAM にも関係する成果のため①にも記載済み)	Yoshishige SUZUKI, Hitoshi KUBOTA, Ashwin TULAPURKAR , and Takayuki NOZAKI

(b) 学会発表

平成 18 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2006.10.2	International Workshop on Spin Transfer 2006, (Nancy, France).	(招待講演) : (スピンRAMにも関係する成果のため①にも記載済み) Spin-torque diode effect and other properties of magnetic nano-pillars	Y. Suzuki, M. Mizuguchi, A. Deac, A. Fukushima, Y. Otani, H. Kubota, S. Yuasa, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayapawira, and N. Watanabe
2	2007.9.1	2006年秋季 第67回応用物理学学会学術講演会, 立命館大学	強磁性体の形状による磁壁の駆動制御の試み	前川裕昭, 戸田順之, 太田健太, 野崎隆行, 水口将輝, 白石誠司, 新庄輝也, 鈴木義茂
3	2007.3.18	日本物理学会春の分科会, 鹿児島大学	スピントルクダイオード効果を用いた電流駆動磁壁共鳴現象の観測	野崎隆行, 前川裕昭, 水口将輝, 白石誠司, 鈴木義茂, 前原大樹, 葛西伸哉, 小野輝男, 新庄輝也
4	2007.3.27	第54回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学 相模原	高周波電流誘起磁壁共鳴の磁化反転過程に与える影響	野崎隆行, 前川裕昭, 水口将輝, 白石誠司, 鈴木義茂, 前原大樹, 葛西伸哉, 小野輝男, 新庄輝也
5	2007.3.27	第54回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学 相模原	電気抵抗を用いた磁壁の電流駆動の解析	前川裕昭, 野崎隆行, 前原大樹, 葛西伸哉, 水口将輝, 白石誠司, 小野輝男, 鈴木義茂

平成 19 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2007.10.15	IEEE/MML international conference, Perth Australia	(招待講演) : (スピンRAMにも関係する成果のため①にも記載済み) High frequency properties of MgO based tunnel junctions -Interplay between a giant TMR effect and a spintorque	Y.Suzuki, H.Kubota, H.Maehara, A.Deac, M.Mizuguchi, A.Fukushima, K.Yakushiji, S.Yuasa, K.Tsunekawa, D.D.Djayapawira,N.Watanabe
2	2007.5.28	ISAMMA, (International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications), Jeju Korea	Detection of Current-Driven Magnetic Domain Wall Deformation using Anisotropic Magnetoresistance Effect	H. Maekawa, T. Nozaki, S. Kasai, M. Mizuguchi, M. Shiraishi, T. Ono and Y. Suzuki,
3	2007.11.5	The 57th MMM Conference in Tampa Florida	Spin-transfer-induced DW resonance and its influence on the depinning field	T. Nozaki, H. Maekawa, M. Mizuguchi, M. Shiraishi, T. Shinjo, Y. Suzuki, S. Kasai, and T. Ono
4	2007.9.4	第68回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道工業大学	異方性磁気抵抗効果を用いた直流電流パルスによる磁壁駆動/変形現象の測定	前川 裕昭, 野崎 隆行, 野内 亮, 白石 誠司, 新庄 輝也, 鈴木 義茂
5	2007.9.4	第68回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道工業大学	トンネル磁気抵抗効果を介した電流駆動磁壁移動現象の観測	野崎隆行, 前川裕昭, 野内亮, 白石誠司, 鈴木義茂
6	2007.9.11	第31回日本磁気学会学術講演会, 学習院大	スピントランスファー誘起共鳴による磁壁デピンニング磁場の減少	野崎 隆行, 前川 裕昭, 前原大樹, 葛西 伸哉, 水口 将輝, 白石誠司, 小野 輝男, 新庄輝也, 鈴木 義茂
7	2008.3.27	2008年春季 第55回応用物理学関係連合講演会, 日本大学理工学部	トンネル磁気抵抗効果を介した電流誘起磁壁移動現象の実時間観測	野崎 隆行, 前川 裕昭, 野内亮, 白石 誠司, 久保田均, 湯浅新治, 新庄輝也, 鈴木 義茂

平成 20 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2008.4.17	2008 Annual Meeting of	(招待講演) :	Y.Suzuki, H.Kubota, A.Fukushima,

		The Korean Physical Society	Role of the spin-torque in the MgO based magnetic tunnel junction	T.Nozaki, K.Yakushiji, T.Nagahama, S.Yuasa, K.Ando
2	2008.5.5	Intermag 2008, Madrid, Spain	Voltage control of the in-plane magnetic hysteresis in Fe/Au/Fe(001) and Fe (001) ultrathin films grown on GaAs (001) surface	K. Ohta, Y. Suzuki, T. Maruyama, T. Nozaki, T. Shinjo, M. Shiraishi, S. Ha, C. -Y. You, and W. Van Roy
3	2008.5.6	Intermag 2008, Madrid, Spain	Voltage Control of Magnetic Anisotropy in an Ultrathin Fe Film	T. Maruyama, K. Ohta, N. Toda, T. Nozaki, T. Shinjo, M. Shiraishi, and Y. Suzuki
4	2008.9.12.	日本物理学会 2008 年秋季大会	電圧印加による超薄膜 Fe 層の磁気異方性制御	野崎 隆行, 丸山拓人, 白石誠司, 新庄輝也, 鈴木義茂
5	2008.9.15.	第 32 回日本磁気学会学術講演会	3 端子構造を利用した電流誘起 Vortex core 共振現象の検出	野崎隆行, 久保田均, 白石誠司, 湯浅新治, 新庄輝也, 鈴木義茂
6	2008.10.27	STCM(Spin Transport in Condensed Matter)	(招待講演) : RF properties of the magnetic tunnel junctions-Negative resistance and amplification effect-	Yoshishige Suzuki
7	2008.11.11	MMM 2008	(招待講演) : Voltage induced large magnetic anisotropy	T. Maruyama, K. Ohta, T. Nozaki, T. Shinjo, M. Shiraishi, S. Mizukami, Y. Ando, Y. Suzuki

平成 21 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2009.4.1.	第 56 回応用物理学関係連合講演会	電流磁場駆動型スピントランジスタ	小西克典、野崎隆行、久保田均、福島章雄、湯浅新治、白石誠司、鈴木義茂
2	2009.7.22	ICMFS2009	Current-field driven spin transistor	K. Konishi, T. Nozaki, H.kubota, A. Fukushima, S. Yuasa, M. Shiraishi, Y. Suzuki
3	2009.9.28	Royal Society Discussion Meeting The spin on electronics	(招待講演) : Spin control by application of electric current and voltage	Yoshishige SUZUKI
4	2009.9.13	第 33 回磁気学会学術講演会	電流磁場駆動型スピントランジスタ	小西克典、野崎隆行、久保田均、福島章雄、湯浅新治、白石誠司、鈴木義茂
5	2010.3.4	文部科学省「最先端・高性能汎用スーパーコンピュータの開発利用」プロジェクト	(招待講演) : 電流および電圧による磁化の操作	鈴木義茂

		ロジェクト 次世代ナノ統合シミュ レーションソフトウェ アの研究開発公開シン ポジウム		
--	--	---	--	--

平成 22 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2010.9.7	第 34 回日本磁気学会学 術講演会,	電流磁場駆動型スピントランジ スタにおけるファンアウト値	小西克典, 野崎隆行, 久保田均, 福島章雄, 湯浅新治, 白石誠司, 鈴木義茂
2	2010.9.23	SSDM2010	Fan-out Value in a Current-Field Driven Spin Transistor	Katsunori Konishi, Takayuki Nozaki, Hitoshi Kubota, Akio Fukushima, Shinji Yuasa, Masashi Shiraishi and Yoshishige Suzuki
3	2010.12.6	ICAUMS2010	Fan-out Value in a Current-Field Driven Spin Transistor with an Assisting AC Magnetic Field	Katsunori Konishi, Takayuki Nozaki, Hitoshi Kubota, Akio Fukushima, Shinji Yuasa, Masashi Shiraishi, and Yoshishige Suzuki

(c) 表彰等

(記載事項無し)

(d) その他特記事項

(記載事項無し)

(e) 特許

(国内特許)

平成 18 年度

出願済み： 1 件

平成 20 年度

出願済み： 1 件

(国際特許)

(記載事項無し)

東北大学：ハーフメタル電極方式トランジスタ

(a) 投稿論文

平成 19 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2008.2.1	Applied Physics Express, vol. 1, 021301 (2008).	Tunnel Magnetoresistance Effect in Magnetic Tunnel Junctions Using a Co_2MnSi (110) Electrode	M. Hattori, Y. Sakuraba, M. Oogane, Y. Ando, T. Miyazaki
2	2008.3.	Magnetics Jpn., vol. 3, 109 (2008).	History and Future Prospect of Tunnel Magnetoresistance Research	T. Miyazaki

平成 20 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2009.1.20	Jpn. J. of Appl. Phys. 48, 013001 (2009).	(スピンRAMにも関係する成果) Boron Composition Dependence of Spin-Transfer Switching in Magnetic Tunnel Junctions with CoFeB Free Layers	D. Watanabe, M. Oogane, S. Mizukami, Y. Ando, and T. Miyazaki
2	2009.1.30	J. Appl. Phys., 105 07C903 (2009)	Tunnel magneto-resistance effect in magnetic tunnel junctions using epitaxial Co_2FeSi Heusler alloy electrode	M. Oogane, M. Shinano, Y. Sakuraba and Y. Ando
3	2009.2.9	J. Appl. Phys. 105, 07D306 (2009).	Low damping constant for Co_2FeAl Heusler alloy films and its correlation with density of states	S. Mizukami, Y. Miura, M. Shirai, D. Watanabe, M. Oogane, Y. Ando, and T. Miyazaki
4	2009.2.19	J. Appl. Phys., 105, 07C920 (2009).	Tunnel magnetoresistance effect in double magnetic tunnel junctions using half-metallic Heusler alloy electrodes	Y. Ohdaira, M. Oogane, Y. Ando
5	2009.3.24	Appl. Phys. Lett., 94, 122504 (2009).	Half-metallicity and Gilbert Damping Constant in $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Si}$ Heusler Alloys Depending on the Film Composition	T. Kubota, S. Tsunegi, M. Oogane, S. Mizukami, T. Miyazaki, H. Naganuma, and Y. Ando

平成 21 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2009.5.21	日本磁気学会誌, 33, 262 (2009).	Co_2MnSi を電極とする微小二重トンネル接合の作製と評価	大平祐介、大兼幹彦、安藤康夫
2	2009.5.21	日本磁気学会誌, 33, 270 (2009).	Co_2FeMnSi ホイスラー合金の磁気緩和定数	M. Oogane, M. Shinano, Y. Sakuraba and Y. Ando
3	2009.5.21	J. Appl. Phys. 105, 07D306 (2009).	Low damping constant for Co_2FeAl Heusler alloy films and its correlation with density of states	大兼幹彦、窪田崇秀、廣瀬直紀、安藤康夫
4	2009.12.2	J. Appl. Phys. 106, 113907 (2009).	Structure, exchange stiffness, and magnetic anisotropy of $\text{Co}_2\text{MnAl}_x\text{Si}_{1-x}$ Heusler compounds	Takahide Kubota, Jaroslav Hamrle, Yuya Sakuraba, Oksana Gaier, Mikihiro Oogane, Akimasa Sakuma, Burkard Hillebrands, Koki Takanashi, and Yasuo Ando
5	2009.5.1	まぐね, 4 229-235 (2009).	Fe-Co-Ni および Co 基フルホイスラー合金薄膜における磁気緩和	水上成美, 大兼幹彦, 窪田崇秀, 渡邊大輔, 永沼博, 安藤康夫, 宮崎照宣

平成 22 年度

	発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2010.5.1	Journal of Physics Conference series 200, 052019 (2011).	Spin transistor based on double tunnel junctions using half-metallic Co_2MnSi electrodes	Y. Ohdaira, M. Oogane, H. Naganuma, Y. Ando

2	2011.1.12	Phil. Trans. R. Soc. A (2011), accepted	Tunnel magnetoresistance effect and magnetic damping in half-metallic Heusler alloys	M. Oogane, S. Mizukami
---	-----------	---	--	------------------------

(b) 学会発表

平成 19 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2007.9.6	第68回応用物理学会学術講演会	(招待講演) ホイスラー合金の磁性とそれを用いたトンネル接合における磁気抵抗効果	大兼幹彦, 桜庭裕弥, Resul Yilgin, 服部正志, 村上修一, 久保田均, 安藤康夫, 高梨弘毅, 宮崎照宣
2	2007.12.6	第62回応用物理学会東北支部	Co ₂ MnSiを電極とする微小二重トンネル接合の作製	大平祐介, 新関智彦, 桜庭裕弥, 大兼幹彦, 安藤康夫
3	2008.3.29	第55回応用物理学関係連合講演会	Co ₂ MnSiを電極とする微小二重トンネル接合の磁気伝導特性	大平祐介, 桜庭裕弥, 新関智彦, 大兼幹彦, 安藤康夫

平成 20 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2008.9.4	第69回応用物理学会学術講演会	フルホイスラー合金の磁気緩和定数測定	大兼幹彦, 窪田崇秀, 廣瀬直紀, 桜庭裕弥, 高梨弘毅, 安藤康夫
2	2008.9.13	第32回日本磁気学会学術講演会	Co ₂ MnSiを電極とする二重トンネル接合の作製と評価	大平祐介, 大兼幹彦, 安藤康夫
3	2008.9.14	第32回日本磁気学会学術講演会	ホイスラー合金薄膜の磁気異方性と磁気緩和	大兼幹彦, 窪田崇秀, 廣瀬直紀, 桜庭裕弥, 高梨弘毅, 安藤康夫
4	2008.11.12	53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials	Large tunnel magnetoresistance effect in double magnetic tunnel junctions using half-metallic Heusler alloy electrodes	Yusuke Ohdaira, Mikihiko Oogane, Yasuo Ando
5	2008.11.13	53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials	Low damping constant for Co ₂ FeAl Heusler alloy films and its correlation with density of states	S. Mizukami, D. Watanabe, M. Oogane, Y. Ando, Y. Miura, M. Shirai, and T. Miyazaki
6	2008.12.2	MRS2008 conference	(招待講演) Tunnel Magneto-resistance Effect in Magnetic Tunnel Junctions using Half-metallic Heusler Alloy Electrodes and a MgO Tunneling Barrier	M. Oogane, S. Tsunegi, T. Kubota, Y. Sakuraba, K. Takanashi, Y. Ando
7	2008.12.4	第63回応用物理学会東北支部学術講演会	ハーフメタルスピントランジスタのための微小二重トンネル接合	大平祐介, 大兼幹彦, 安藤康夫

平成 21 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2009.7.22	20th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces	SPINTRANSFER SWITCHING IN MAGNETIC TUNNEL JUNCTIONS WITH AHLF-METALLIC HEUSLER ALLOY ELECTRODE	M. Oogane, S. Hida, S. Tsunegi, H. Naganuma, N. Inami, and Y. Ando
2	2009.7.23	International Conference on Magnetism 2009	Magnetic Damping Constants for Half-metallic Heusler Alloy Thin Films	M. Oogane, T. Kubota, S. Tsunegi, J. Sato, H. Naganuma, S. Mizukami, Y. Ando
3	2009.7.30	International Conference on Magnetism 2009	Spin transistor with structure consisting of tow tunnel junctions using Co ₂ MnSi electrodes	Y. Ohdaira, M. Oogane, H. Naganuma, Y. Ando
4	2009.8.2	International Workshop and Seminar on Magnonics: From Fundamentals to Applications 2009	(招待講演) Magnetic damping of half-metallic Heusler alloys	M. Oogane, T. Kubota, S. Tsunegi, J. Sato, H. Naganuma, S. Mizukami, Y. Ando

5	2009.9.8	第70回応用物理学学会学術講演会	ホイスラー合金電極トンネル接合におけるスピン注入磁化反転	大兼幹彦, 飛田智史, 常木澄人, 西村真之, 井波暢人, 永沼博, 安藤康夫
6	2009.9.12	第33回日本磁気学会学術講演会	$\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Si}$ および $\text{Co}_2\text{MnAl}_x\text{Si}_{1-x}$ ホイスラー合金の磁気緩和定数	大兼幹彦, 窪田崇秀, 常木澄人, 佐藤丈, 水上成美, 永沼博, 安藤康夫
7	2009.9.13	第33回日本磁気学会学術講演会	Co_2MnSi 電極を用いたスピントランジスタの作製と評価	大平祐介, 大兼幹彦, 永沼博, 安藤康夫
8	2010.3.19	第57回 応用物理学関係連合講演会	Co_2MnSi 電極強磁性トンネル接合からなるスピントランジスタ構造の作製	大平祐介, 大兼幹彦, 永沼博, 安藤康夫
9	2010.3.19	the 2010 March Meeting of the American Physical Society	Gilbert Damping Mechanisms in Half-metallic Heusler Alloys	S. Mizukami

平成 22 年度

	発表日	学会名	発表タイトル	発表者
1	2010.6.24	特定領域研究「スピン流の創出と制御」平成22年度研究会	Co_2MnSi 電極を用いた三端子素子の過渡応答特性	大平 祐介, 大兼 幹彦, 永沼 博, 安藤 康夫
2	2010.7.13	The 2nd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications	Fabrication of spin-transistor structure with MTJs using Co_2MnSi electrode	Yusuke Ohdaira, Mikihiko Oogane, Hiroshi Naganuma, and Yasuo Ando
3	2011.3.24	第58 回応用物理学関係連合講演会	Co_2MnSi 電極強磁性トンネル接合を用いたスピントランジスタの電流-電圧特性	大平 祐介, 大兼 幹彦, 永沼 博, 安藤 康夫

(c) 表彰等

平成 20 年度

	授賞日	賞名	授賞内容	発表者
1	2008.9.14	日本磁気学会論文賞	Co_2MnSi を用いた強磁性トンネル接合における極高スピン分極率の実現	桜庭 裕弥, 服部 正志, 大兼 幹彦, 久保田 均, 安藤 康夫, 佐久間 昭正, N. D. Telling, P. Keatley, G. van der Laan, E. Arenholz, R. J. Hicken, 宮崎 照宣

(d) その他特記事項

	発表日	内容	タイトル等	発表者等
1	2006.8.5	JST研究開発センターセミナー	(招待講演) 高速化デバイス記録とスイッチ機能を持つトランジスタの可能性と課題	宮崎照宣
2	2007.1.24	JEITA講演	(招待講演) 二, 三のホイスラー合金薄膜のスピントロニクス特性	宮崎照宣
3	2007.10.10	富士電機デバイステクノロジー(株)技術講演会	(招待講演) スピンエレクトロニクス技術の現状と将来展望	安藤康夫
4	2007.10.13, 11.3, 11.10, 12.1, 12.15	富士電機連続講座	磁性薄膜の基礎とスピントロニクス	宮崎照宣
5	2008.9.18	Innovation research and philosophy of science	(招待講演) Recent Progress of Large Tunnel	T. Miyazaki

			Magnetoresistance Junctions and their Applications	
6	2009.1.19	Tohoku-York Research Seminar	(招待講演) Perspective of High Tunnel Magnetoresistance in Magnetic Tunnel Junctions with Heusler Alloy Electrodes and MgO Barrier	Y. Ando, S. Tsunegi, T. Kubota, G. Kim, T. Hiratsuka, Y. Sakuraba, M. Oogane, K. Takanashi, S. Mizukami, T. Miyazaki
7	2009.3.16	Siテクノロジー研究会	ホイスラー合金を用いた強磁性トンネル接合の磁気抵抗効果と界面制御	安藤康夫
8	2009.8.8	Engineering Conferences International, Advances in Magnetic Nanostructures,	Heusler alloy electrode tunnel junctions	T. Miyazaki
9	2010.3.22	2010 DPG spring meeting	(招待講演) Heusler alloy films for spintronics	T. Miyazaki
10	2010.2.10	the 4th International Workshop on Spin Current and the 2nd International Workshop on Spin Caloritronics	(招待講演) Spin dynamics for Heusler alloy films	S. Mizukami
11	2010.8.19	Chinese Academy of Science Seminar	(招待講演) Heusler Alloy Films for Spintronics Materials	T. Miyazaki

(国内特許)

平成 18 年度

出願済み： 1 件

平成 19 年度

出願済み： 1 件

平成 22 年度

出願済み： 1 件

(国際特許)

(記載事項無し)

別紙 2 :

平成 21 年度革新的技術推進費の実施について

平成 21 年 5 月 28 日に、総合科学技術会議有識者議員によって「革新的技術推進費に関する研究計画の公募の基本方針」が決定され、日本の研究開発レベルが世界トップレベルにある「革新的技術」のうち 5 つの技術を選定して、これに対して機動的な資金の投入により、①当初計画の前倒し、②（当初計画期間内で）当初計画より先進的・高度な成果の創出により、研究開発の加速・挺入れを行うこととされた。スピントロニクス技術は、対象となる 5 つの「革新的技術」の一つに選定された。

この公募の趣旨に沿って、NEDO「スピントロニクス不揮発性機能技術開発」と文部科学省「高機能・超低消費電力コンピューティングのためのデバイス・システム基盤技術開発」が連携して、各プロジェクトの加速を行うとともに、より先進的な成果を得ることを目的とした「不揮発性論理回路の高度化に関する研究」と題する提案を行った。産業技術総合研究所、日本電気、東北大学の共同提案であり、実施責任者は NEDO プロジェクトのプロジェクトリーダーとした。その後、審査の過程で、実施内容を NEDO プロジェクトで開発中の不揮発性メモリ技術の加速・挺入れに絞ることとされ、開発タイトルも「不揮発性メモリの高度化に関する研究」と変更された。実施者は NEDO プロジェクトを実施中の産業技術総合研究所および日本電気となった。ただし、その波及効果として、NEDO プロジェクトと文部科学省プロジェクトの連携基盤の構築を行うことも求められた。

配分資金は、約 3 億 3 千万円であり、産業技術総合研究所が実施した「①高度 TMR 素子技術の高度化」に 2 億 5 千万円、日本電気が実施した「②スピン偏極電流駆動磁壁移動技術の高度化」に 8 千万円が使用された。

①高度 TMR 素子技術の高度化

スピン RAM 開発の世界的な競争激化に対応するために、スピン RAM の心臓部である垂直磁化 TMR 素子の高度化を可能とするスパッタ装置の整備が行なわれた。

②スピン偏極電流駆動磁壁移動技術の高度化

NEDO プロジェクトの最終目標である「単一磁壁で 100 m/s の移動速度」の確認を半年前倒して実現するとともに、メモリアレイのメガビット規模での試作評価が実現された。

NEDO プロジェクトと文部科学省プロジェクトの連携基盤の構築

文部科学省プロジェクトが平成 21 年度に最先端研究開発支援プログラム「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：大野英夫東北大学教授）に発展改組されたことに伴い、NEDO プロジェクトが世界に先駆けて開発してきたオリジナルな技術である垂直磁化スピン注入磁化反転技術ならびにスピン偏極電流駆動磁壁移動技術の

最先端プログラムへの橋渡しを図った。具体的には、最先端プログラムに参画することとなった日本電気が両技術の最先端プログラムへの展開を図ることとし、垂直磁化スピン注入磁化反転技術に関しては当該技術を開発してきた産業技術総合研究所と共同で薄膜作製と磁化反転の実証を行った。スピン偏極電流駆動磁壁移動技術は、日本電気が元々有している。

以上の実施内容に関して、平成 23 年 1 月に総合科学技術会議有識者議員により成果報告ヒアリングが行われた。その結果、下記のように大変高い評価を得ることができた。

評価コメント

○進捗状況（実施内容・実績）

NEDO のベースプロジェクトは本年度で終了する予定であるが、TMR 素子および磁壁移動の両方において、革新的技術推進費（以下、革新費）による研究環境の整備により半年前倒しが達成され、NEDO のベースプロジェクトにおいても当初の目標を上回る成果が得られる見込みである。また、NEDO のベースプロジェクトによる成果は、当初の計画通り東北大学で実施する最先端研究開発プログラムへ引き継がれる事となっており、両者の連携は適切であると言える。

○加速効果

革新費の投入によりスパッタ装置等の導入・改造が行われ、当初の目標どおり半年間の前倒しを達成することができ、また、その素子の特性も目標を上回る特性となっていることから、革新費投入による顕著な加速効果が得られたといえる。装置の改造により高性能な素子を形成することができたという事であるため、その改造手法が知財化できるものであるならば、その改良方法について特許の取得について検討することが必要と考える。

○今後の進め方

NEDO のベースプロジェクトは本年度で終了であることから、技術移転先でのプロセスの完成度の向上を早急に促進していくべきである。

総合評価

革新費の投入によって NEDO のベースプロジェクトの当初目標の半年前倒しに加えて、その目標を上回る成果が得られる見込みである。当該技術の商業化を検討する企業との密接な連携に基づき、顕著に加速しており、革新費による加速効果を高く評価できる。スピンを用いたメモリ技術の研究開発は、世界的にも競争が激化しているため、引き続き迅速な開発が必要である。

2. 分科会における説明資料

次ページより、プロジェクト推進・実施者が、分科会においてプロジェクトを説明する際に使用した資料を示す。

「スピントロニクス不揮発性機能技術」(事後評価)

(2006年度～2010年度 5年間)

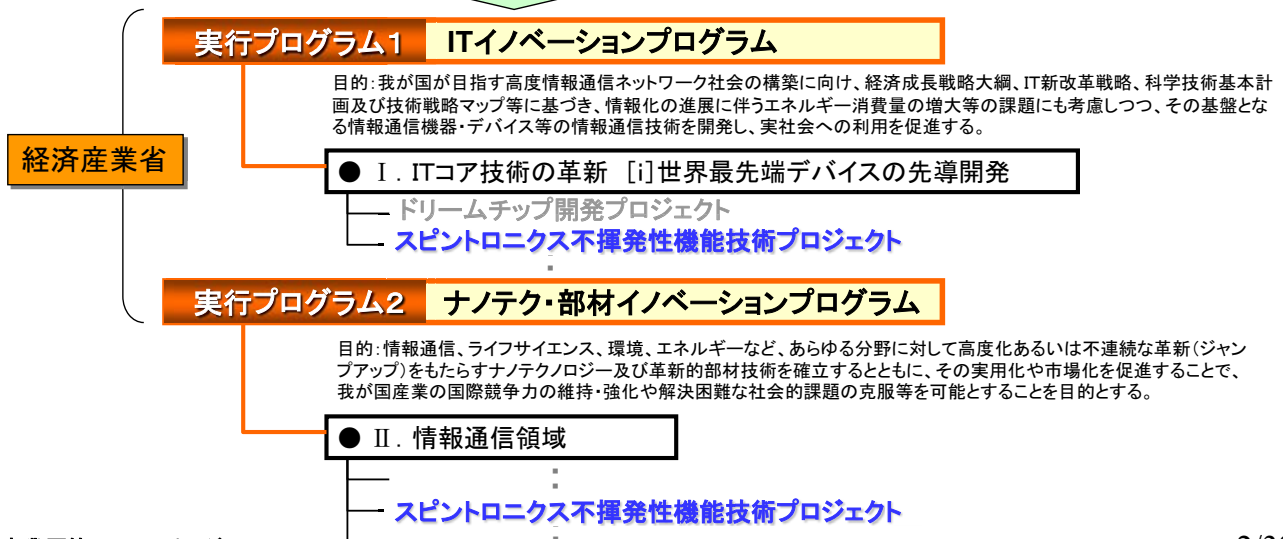
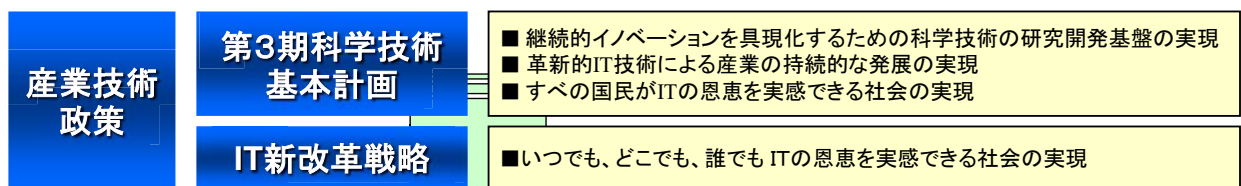
4. プロジェクトの概要説明資料

- 4.1 事業の位置づけ・必要性及び研究開発マネジメント(NEDO 中山、宮田)
- 4.2 研究開発成果及び実用化の見通し(PL 安藤)

事業の位置づけ・必要性

政策上の位置付け

経済産業省 研究開発プログラム「ITイノベーションプログラム」および「ナノテク・部材イノベーションプログラム」の1テーマとして実施



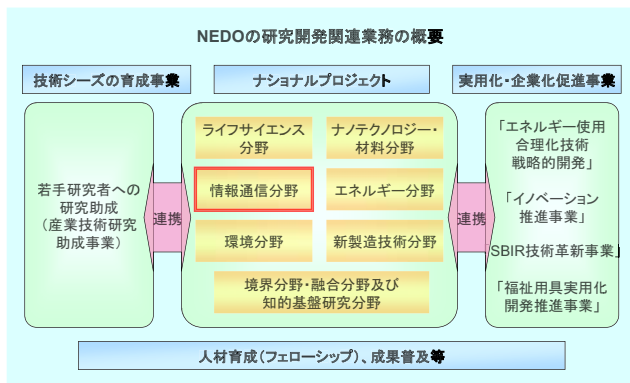
NEDO中期目標における位置付け

NEDO中期目標に掲げる「高度な情報通信社会の実現」のため、電子・情報技術開発分野のストレージ・メモリ技術の一環として実施。

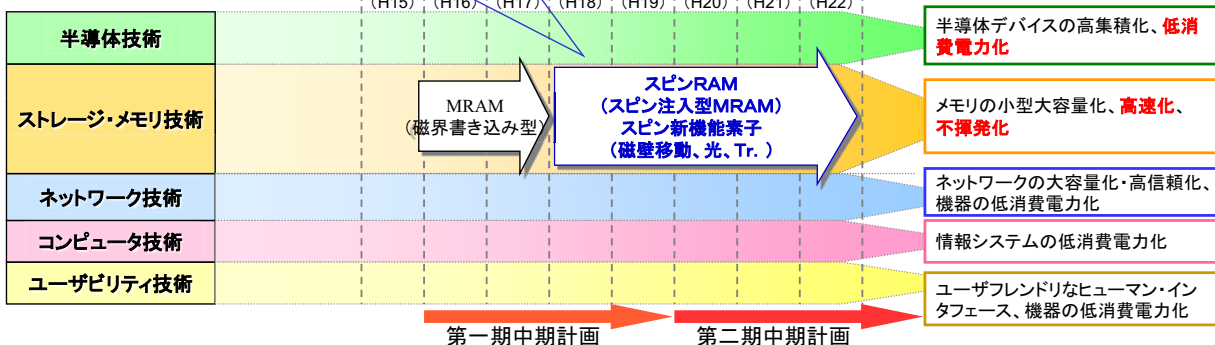
NEDO 中期目標

- 誰もが自由な情報の発信・共有を通じて、個々の能力を創造的かつ最大限に発揮することが可能となる高度な情報通信(IT)社会の実現
- 我が国経済の牽引役としての産業発展の促進

本プロジェクト 「スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト」

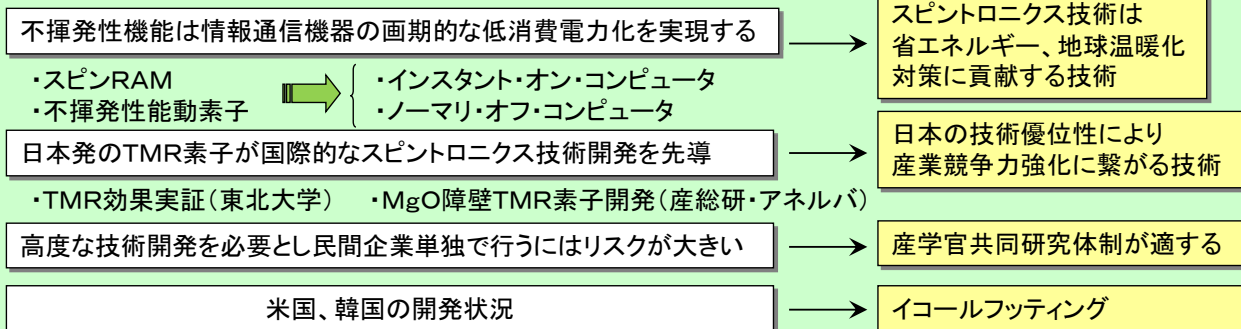


情報通信分野



開発背景と事業目的

事業目的: スピントロニクス技術を用い、不揮発性機能を活用した革新的素子を開発する。



NEDO技術開発機構が関与すべき事業

スピントロニクスと他技術の特長比較

- ・書き換え時間、書き換え回数で勝る
- ・フラッシュメモリ、DRAMの課題を克服する最有力候補

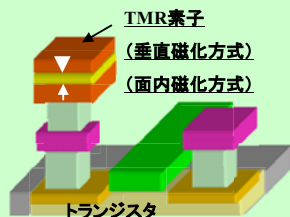
日本が存在感を回復しつつある半導体分野で、次世代の優位性を確実にするために必要な技術開発

	スピントロニクス RAM	ReRAM	PRAM	Flash	DRAM
サイズ	6F ²	4F ²	5F ²	7F ²	6F ²
読み出し時間 (ns)	5	10	10	70	10
書き換え時間 (ns)	5	30	50	10 ⁴	10
書き換え回数	>10 ¹⁵	>10 ⁶	>10 ¹²	10 ⁵	>10 ¹⁵

戦略的な目的設定

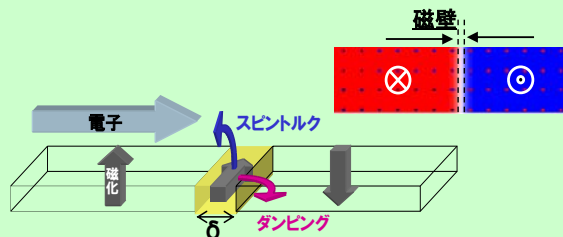
- ▶スピントロニクス技術による**不揮発性機能素子**の可能性を広く実証する。
- ▶材料は実用化の優位性の観点から、**強磁性金属に限定**。
- ▶技術開発レベルに応じたメリハリをつけて開発を実施。

① スピンRAM基盤技術 :
実用化を目指す



Gbit級MRAMの単位記憶セルの斜視図

② スピン新機能素子設計技術 :
先進的次世代素子の可能性実証



磁壁移動メモリ斜視図

NEDO予算 : 約38億円(内加速分8億円)

NEDO予算と別に内閣府総合科学技術会議
による**革新的技術推進費 3.3億円(H21)**

評価基準	研究開発項目
標準的研究開発	① スピンRAM
基礎・基盤的研究開発	②-1 磁壁メモリ、磁壁ストレージ(前期で終了) ②-2 光素子(前期で終了) ②-3 能動素子

開発課題と解決技術

・実用化に向けた**基盤技術の確立**を推進すると共に、21世紀エレクトロニクス分野における**中核的・革新的技術**となりうる**研究開発テーマ**についても取り組む。

指針	研究開発項目	内容	目的
実用化に向けた基盤技術の確立	① スピンRAM (ギガビット級スピンRAMの可能性実証)	・高TMR比発生機構及びスピン磁化反転機構の解明による高性能TMR素子の開発	・高TMR比、最適素子抵抗値、高速・低電力スピン注入磁化反転、安定動作、スケラビリティーを実現し、 ギガビット級スピンRAMの動作実証
新原理によるデバイスの機能実証 (従来技術の延長では実現不可能なもの)	②-1 磁壁メモリ (スピン偏極電流による磁壁移動技術)	・強磁性金属ナノ構造中の磁壁をスピン偏極電流で移動させる技術の開発	・スピン偏極電流による磁壁移動現象のダイナミックスの解明 ・新メモリデバイス構造の提案およびデバイス試作
	②-1 磁壁ストレージ (スピン偏極電流による磁壁移動技術) - 前期で終了 -	・強磁性金属ナノ構造中の磁壁をスピン偏極電流で移動させる技術の開発	・スピン偏極電流による磁壁移動現象のダイナミックスの解明
	②-2 光機能素子(光によるスピン情報の制御・利用) - 前期で終了 -	・導波路光を用いてスピン情報を制御・利用する技術の開発	・光・スピン相互作用による情報読み書き技術の実現可能性の確認
	②-3 能動素子 (不揮発性機能を有するトランジスタの提案)	・スピン偏極注入電流により発生するスピントルクを利用した電力増幅技術 ・ハーフメタル電極の高スピン偏極度を利用した電流スイッチ	・不揮発性情報記憶機能と増幅・スイッチング機能を併せ持つ三端子磁性金属構造の提案

予算額と期待される効果の比較

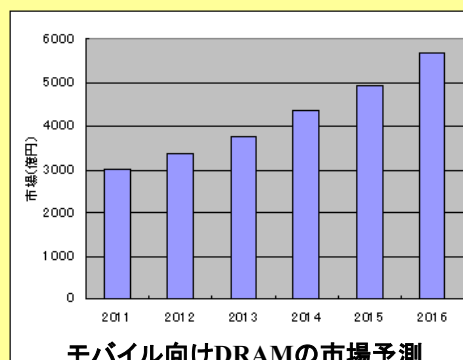
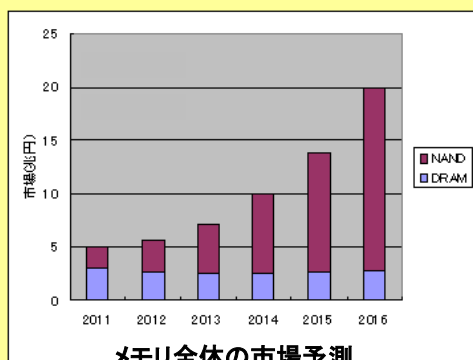
「スピンRAM基盤技術」 主にモバイル用DRAMの不揮発化

予算額25億円に対し、2022年で約9000億円の市場規模
(モバイル・PC向けDRAM市場)

事業予算 25億円(スピンRAM基盤技術予算) (プロジェクト全体予算は38億円)

携帯電話用メモリの市場(予測)

2022年; 約9000億円(50%が置換)(モバイルDRAMで4000億円、PC向けDRAMで5000億円)



基本計画における研究開発目標と根拠

研究開発項目	研究開発目標(最終目標)	根拠
①「スピンRAM基盤技術」 (1)低電力磁化反転TMR素子技術	<ul style="list-style-type: none"> • $5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$での磁化反転技術 • 200%のTMR比 • $0.005 \mu\text{m}^2$のTMR素子によるスピンRAM 	<ul style="list-style-type: none"> • 60-70nm世代のCMOSで駆動可能な磁化反転電流(25μA)と素子面積(50nm\times100nm)を想定し、磁化反転電流密度の目標値を設定。 • メガビット級のMRAM(TMR比30%)からギガビット級のスピンRAM動作に必要なTMR比を推定(200%)。さらに大容量メモリでは不可避の特性ばらつきのマージンを考慮して目標値を設定。
②「スピン新機能素子設計技術」(1)新ストレージ・メモリデバイス設計技術 ※新ストレージデバイスは、H20年度で終了	<p>(新メモリデバイス)</p> <ul style="list-style-type: none"> • SRAMと同程度のセルサイズで駆動可能な電流で100m/sの磁壁移動速度 <p>(新ストレージデバイス)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 複数磁壁で50m/sの磁壁移動速度 	<p>(新メモリデバイス)</p> <ul style="list-style-type: none"> • SoC混載メモリ(200Mz動作)を想定して磁壁移動速度の目標値を設定。 <p>(新ストレージデバイス)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 100MB/sの高速データ書き込み、読取が可能なストレージデバイスを想定し磁壁移動速度の目標値を設定。
②「スピン新機能素子設計技術」(2)不揮発性スピン光機能素子設計技術 ※H20年度で終了	<ul style="list-style-type: none"> • 基本動作を確認し課題を明らかにする。(※上記中間目標を最終目標に変更した) 	<ul style="list-style-type: none"> • 全くの新規技術であるため、光・スピン相互作用による情報読み出しおよび書き込み技術の実現可能性の確認を行うこととした。
②「スピン新機能素子設計技術」(3)スピン能動素子設計技術	<ul style="list-style-type: none"> • 2以上のファンアウト 等 	<ul style="list-style-type: none"> • スピン能動素子による演算回路の可能性を実証するために設定。

研究開発計画

初年度に資金を重点配分

(最上段は予算額:百万円)

	平成18年度	平成19年度	平成20年度	平成21年度	平成22年度
①スピRAM基盤技術 (1)低電力磁化反転 TMR素子技術 予算配分比率 65% 5年間通して資金を重点的に配分	510 160(加速) 低書き込み電流用材料開発 高TMR比素子開発 減衰定数評価 スピントルク現象解明	314 127(加速) TMR素子信頼性向上 TMR素子ばらつき解析	258 32(加速) 磁性材料最適化 ばらつき低減技術	510 300(補正) 255 TMR素子微細化 TMR素子アレイ化	「最終目標 「微細CMOSとの集積化」」
②スピン新機能素子設計技術 (1)新ストレージ・メモリデバイス設計技術 予算配分比率 メモリ 20% ストレージ 3%	197 193(加速) 磁壁移動素子サブミクロン細線化 磁気力顕微鏡による磁壁解析	172 磁壁移動ダイナミクス 磁壁移動素子化	151 20(加速) 磁壁移動ダイナミクス 磁壁移動素子動作実証	132 磁壁移動メモリ集積化 ※新ストレージデバイスについては、平成20年度をもって終了。 ※光機能素子については、平成20年度をもって終了。	24 「最終目標 「素子レベルでの動作実証」」
(2)不揮発性スピン光機能素子設計技術 予算配分比率 2%	28 素子作成技術	38 読み出し技術	28 書き込み技術		
(3)スピン能動素子設計技術 予算配分比率 9%	87 材料開発 素子作成技術	78 新素子構造提案、素子化	72 基本原理実証	71 能動素子開発	

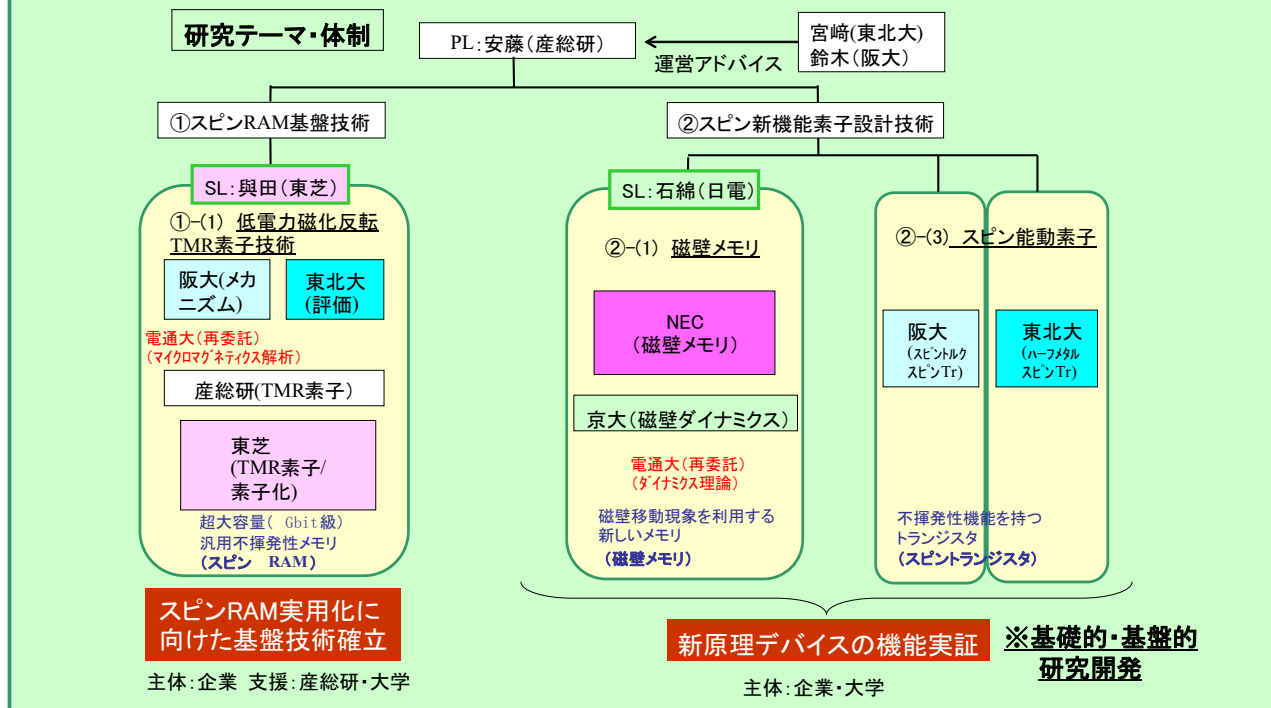
中間目標
「低電力磁化反転技術」

中間目標
「実現可能性の見極め」

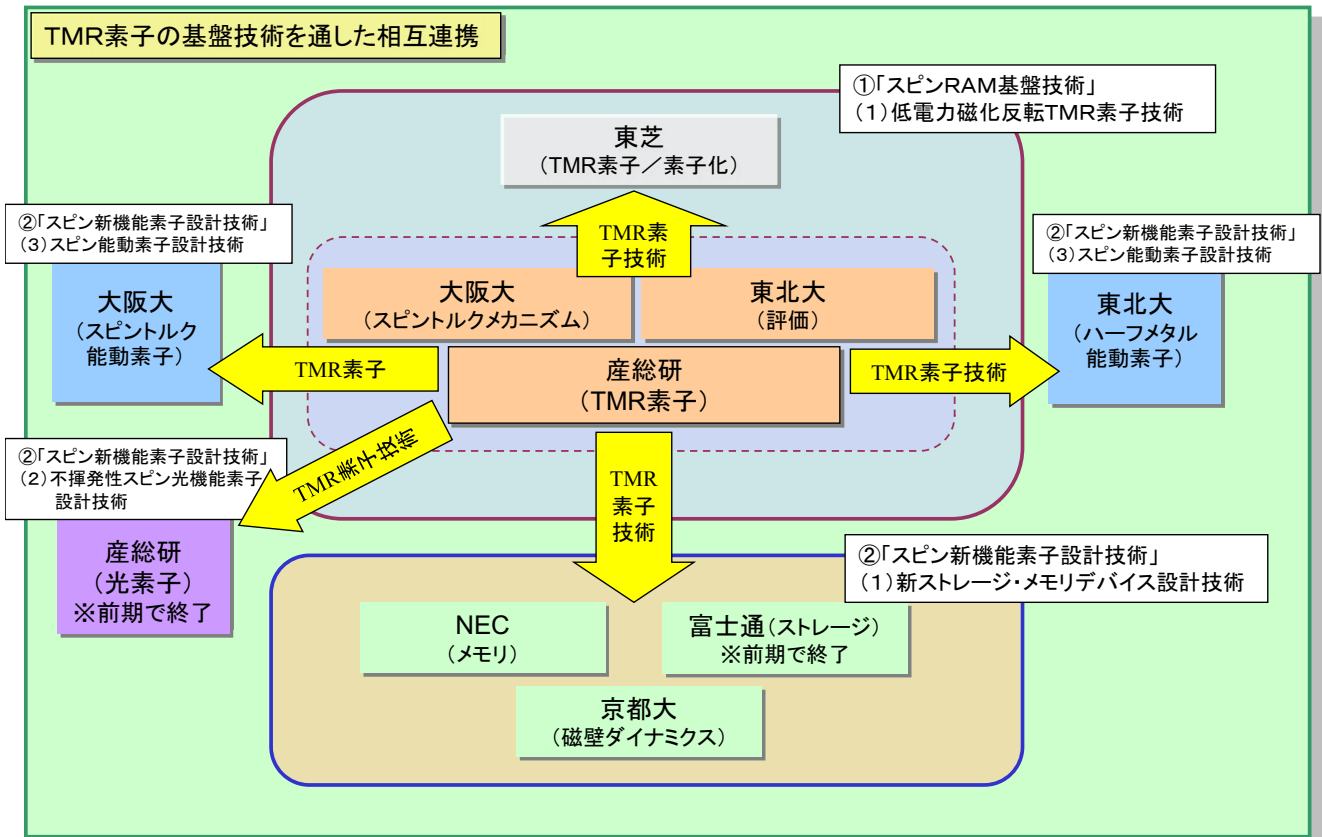
研究開発マネジメント

研究開発実施の事業体制

安藤PLが取りまとめ、東北大学の宮崎教授と大阪大学の鈴木教授が運営のアドバイスをを行う。毎月の定例打合せ



研究開発における相互連携



情勢変化への対応(1)

定期的なヒアリング

原則年2回、実施者から定期的なヒアリングを実施。

- 研究開発進捗状況の確認
- ベンチマークの検討
- 実用化見込みの検討
- 加速資金投入の検討

機動的な加速資金の投入

状況の変化などに対し、必要な加速資金を適切に投入し研究開発を加速。

◇加速4要件

- (i) 目覚ましい成果を上げ、国際競争上の優位性確立が期待できる。
- (ii) 新たな発見や研究動向への対応、「手遅れ」防止、
- (iii) 基本特許の取得、国際標準の確立が有望
- (iv) 社会的要請、研究環境の変化への対応

適時、適切な計画変更

必要に応じて、柔軟に適切な計画変更を行い、研究開発を推進。

- 新たな研究開発項目の追加等、必要に応じて基本計画の見直しを実行。

情勢変化への対応(2)

情勢変化に対応した機動的な加速資金の投入

(1) Freescale(米)が磁界書き込み型MRAMの量産を開始。「究極のメモリー」として注目され、スピントロニクス技術開発が活性化。(2006/07)

- ・GRANDIS(米)、IBMが本格的にスピンRAM開発を開始。(2007/05、2007/07)
- ・Samsung、Hynix(韓)がスピンRAMの共同開発を開始(2008/01)

↓

(1) 平成18年度下期(前倒し加速)
 内容: 平成19年度に導入予定の評価装置、加工装置を1年前倒しで導入。素子試作、特性評価の効率を向上。
 成果: (1) TMR素子用磁性材料の特性改善。
 (2) 磁壁デバイスにおいてサブミクロン幅の細線化を実現。

(2) 平成19~21年度(加速)
 内容: 米、韓の2012年実用化を目標とするスピンRAM開発計画に対して、実用化時期でも先行するため、ばらつき低減技術開発を追加推進。
 成果: (1) TMR素子の特性ばらつきの主因を把握。
 (2) 特性ばらつきを低減する成膜技術を確立し、1Gbレベルでの信頼性確保を達成。
 (3) 300mm対応技術の見極めを前倒しで完了できた。

	平成18年度	平成19年度	平成20年度	平成21年度
①スピンRAM基盤技術 (1)低電力磁化反転TMR素子技術	159.9百万円	126.8百万円	32.0百万円	300.3百万円
	内容: 評価装置、熱処理装置等導入	成膜装置等導入	ばらつき検討ロット試作 ばらつき低減技術開発	成膜装置モジュール等導入
②スピン新機能素子設計技術 (1)新ストレージ・メモリデバイス設計技術	193.4百万円		20.0百万円	
	内容: 細線用露光装置、磁気力顕微鏡導入	素子作成、評価解析効率向上、素子における細線構造実現	中間評価に対応した措置	磁壁移動メモリ素子アレイ試作 磁壁移動メモリ素子アレイの動作実証

中間評価結果への対応

「概ね現行通り実施して良い。」との評価。下記は、主な指摘事項に対する対応。

指摘	指摘	対応
1	「スピンRAM 基盤技術」については、めざましい成果を挙げているが、米国や韓国など外国勢の激しい追い上げが始まっているので、資金を追加するなど十分な手当を行い、思い切った研究開発の加速を図るべきである。	<p>スピンRAM基盤技術開発では、世界最高性能のメモリ素子開発に成功し実用化に最も近い位置にある。このため、積極的な資金配分を考慮しつつ研究開発を継続する。(平成20年度 本予算2億58百万円、加速資金32百万円、平成21年度 本予算5億10百万円、補正予算3億円、平成22年度 本予算2億55百万円)</p> <p>《スピンRAM予算/全体予算》 H20年度 51%、H21年度 79%、H22年度 84%</p>
2	磁壁応用デバイスに関しては、不揮発デバイスとしての基本特性(データ保持特性、書き換え回数等)の評価を充実させ、評価結果にしたがって研究開発方針を柔軟に見直すべきである。	<p>新メモリデバイスについては、基本動作の確認を完了し、基礎的な磁壁移動現象の解明を行う研究フェーズから実用化を目指した研究開発フェーズへ移行する。</p> <p>新ストレージデバイスについては、中間評価後、富士通(株)から、平成21年度以降の委託業務を遂行できない旨の報告を受け、再公募を検討した結果、当該研究開発は平成20年度をもって終了することとした。(検討内容)</p> <p>基盤技術の開発は完了する一方で、ストレージデバイスとしてトラック当たりの磁壁数の増大、それら複数磁壁の時間的な安定性等、検討すべき課題が明確になってきた。これら課題の解決には、一旦基礎に立ち戻った検討が必要であり、プロジェクトとして実用化を目指した研究開発フェーズに移行する段階において、公募により新たに委託先を加え、その後の2年間を使ってこれら課題に取り組むことはリソースの効率的運用の観点から適当でない判断。</p>
3	光機能素子は基礎研究段階にとどまっており、このままでは十分な成果が期待できないので、今後の進め方についての検討が必要である。	<p>不揮発性スピン光機能素子は、最終目標に定めた「10ps幅の単一光パルス」による安定な書き込み動作が困難と予想される。これは、この短パルスで得られるスピン偏極電流量で安定に書き込み動作を実現するには、ナノ構造体界面を通して磁性体に効率的に電流を注入する必要があり、現時点ではこの注入効率が高いためである。この課題を解決するには、より基礎的なナノ構造体界面制御技術の開発が不可欠である。不揮発性スピン光機能素子テーマの技術開発フェーズ、および実用化を見通した研究開発の優先度を考慮し、平成20年度末で中止とした。</p>

「スピントロニクス不揮発性機能技術」(事後評価)

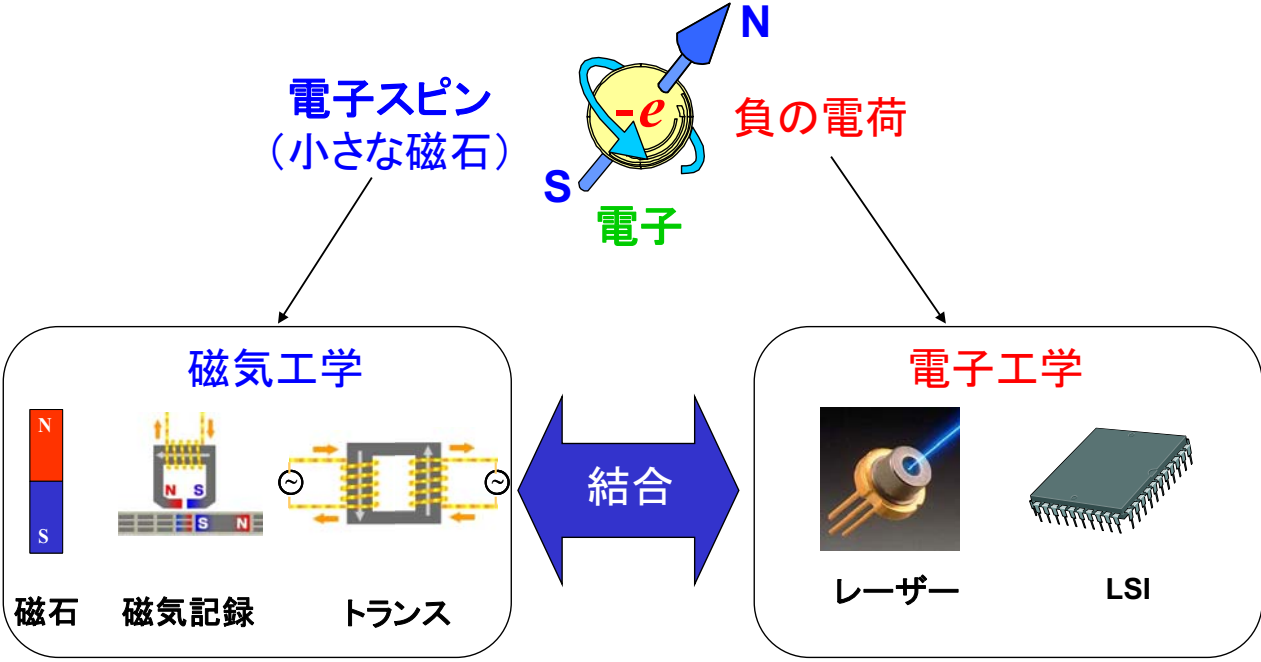
(2006年度～2010年度 5年間)

4. プロジェクトの概要説明資料

- 4. 1 事業の位置づけ・必要性及び研究開発マネジメント(NEDO 中山、宮田)
- 4. 2 研究開発成果及び実用化の見通し(PL 安藤)

プロジェクトの背景と実施体制

スピントロニクス (シーズ)



磁気工学 と 半導体工学 の結合で、新しい機能を実現！

なぜ今、スピントロニクスなのか？

従来の磁気工学

スピンと電荷の結合には、コイルで磁場を発生する電磁誘導を利用 (極めて低効率)

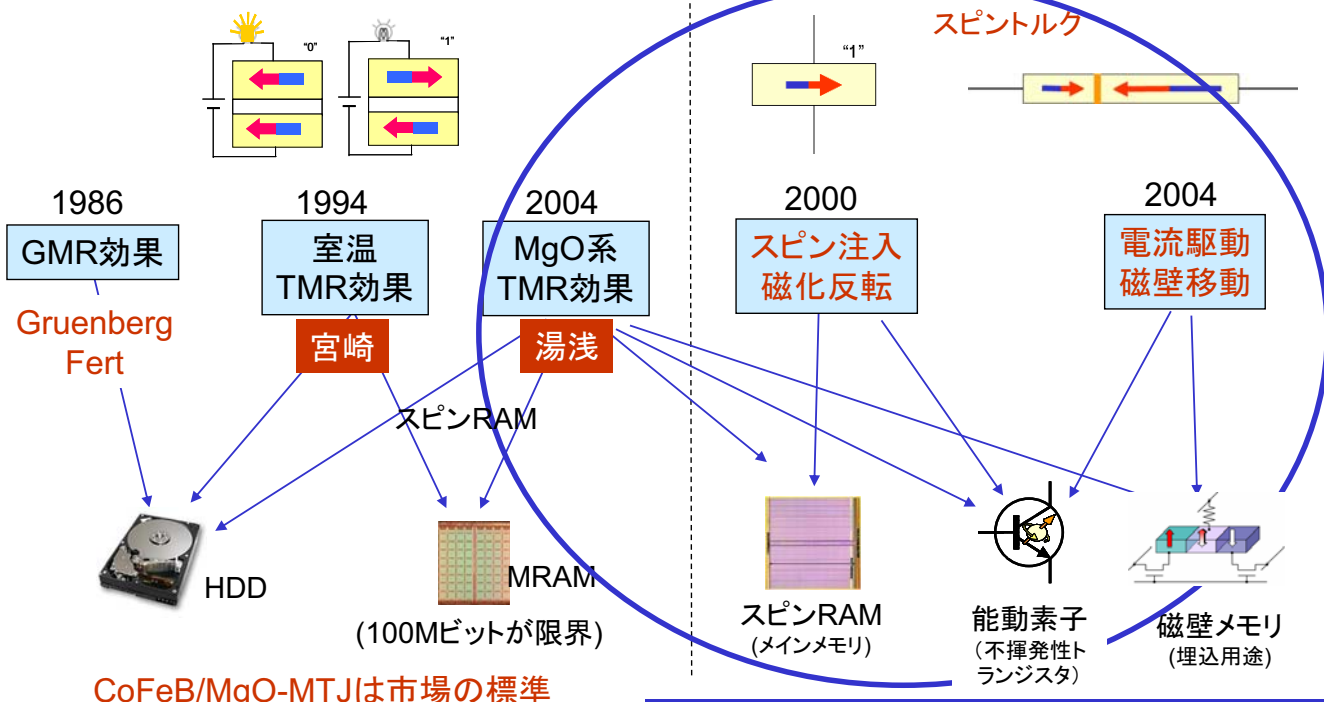
スピントロニクス

量子力学を用いてスピンと電荷の直接的結合が可能に (極めて高効率)

スピントロニクス：急展開する新エレクトロニクス技術

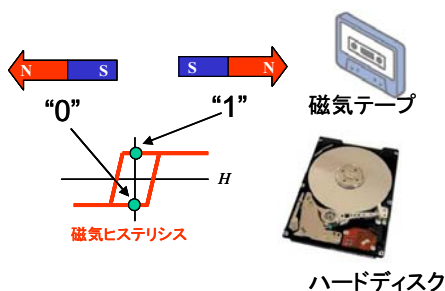
コイルフリーのスピン → 電荷情報変換 (実用化レベル)

コイルフリーのスピン ← 電荷情報変換 (未成熟レベル)



◆スピンと電荷の双方向情報変換技術の開発
◆スピントロニクス+不揮発性機能の全面展開

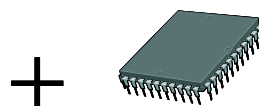
不揮発性機能 (ニーズ)



電気を切っても
情報が消えない!

不揮発性

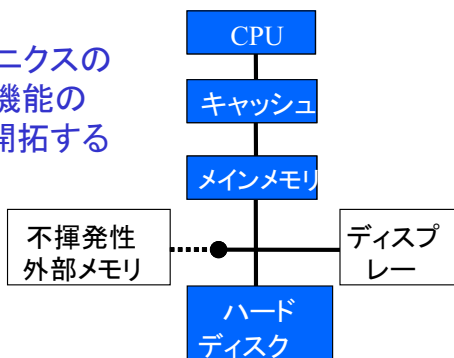
電気を切ると
情報が消える!



半導体LSI

半導体技術に
不揮発性機能を付加!

スピントロニクスの
不揮発性機能の
可能性を開拓する



➢低消費電力化
➢高速起動

スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト

国際競争

NEDOスピントロニクス不揮発性機能プロジェクト（2006年6月～2011年2月）
スピンドRAMおよび次世代スピントロニクス素子の開発
スピンの不揮発性機能に注目した世界でもユニークな国家プロジェクト

① スピンドRAM

米国DARPAプロジェクト（2008年～現在） Grandis
韓国STT-RAMプロジェクト(2008年～現在) サムスン、ハイニクス
米IBM・日TDK共同開発（2007年～現在）
米Qualcomm・台TSMC共同開発（2007年？～現在）
仏Crocus・露Rusnano(政府ファンド)共同開発（2011年報道）

②-1 磁壁メモリ

IBM, ITRIがストレージ応用のための磁壁移動デバイス(MRTM)を開発中
メモリー応用素子は、本Pjのみ

②-3 能動素子

半導体を用いた極低温におけるスピンの能動素子の研究のみで、
室温強磁性金属系の研究は本Pjのみ

世界が本プロジェクトのコンセプトと成果を追いかけている！

省エネ志向の政策動向を先取り

目標設定は最適だった

世界トップレベルのメンバー構成

① スピンドRAM（35名）：東芝、産総研、東北大、阪大、電通大

東芝： 16Mb-MRAM開発実績をベースに、ギガビット級スピンドRAMの実用化を狙う
世界有数のメモリーメーカー
産総研： MgO-TMR素子の開発(世界初)。スピンドルク機構解明の世界トップ。
東北大： 室温TMR素子の開発(世界初)。摩擦係数評価能力は世界トップ。
阪大： スピンドルク機構とダイナミクス解明で世界トップ(産総研を指導)
電通大： スピンドルクシミュレーションで世界トップ。

H21登録人員65名

ドリーム
チーム！

②-1 磁壁メモリ（11名）：日電、京大、電通大

日電： 2Tr-1MTJ高速メモリ開発実績をベースに、磁壁移動で高速磁壁メモリを開発
京大： 磁壁移動現象の実証(世界初)。現象解明で世界トップ。
電通大： 磁壁移動シミュレーションで世界トップ。

②-3 能動素子（16名）：阪大、産総研、東北大

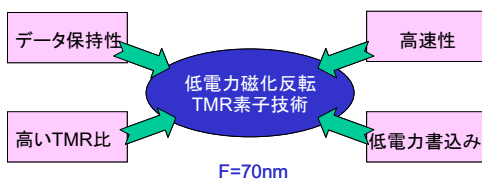
阪大： スピンドルク機能の解明における世界的優位性をベースに、利得のあるスピンの能動素子を狙う。
産総研： MgO-TMR素子技術を用いて、阪大のための薄膜を作製
東北大： ハーフメタル電極材料開発(世界トップ)の実績をベースに、ゲート機能を三端子素子を狙う。

③ 調査（3名）：素子協

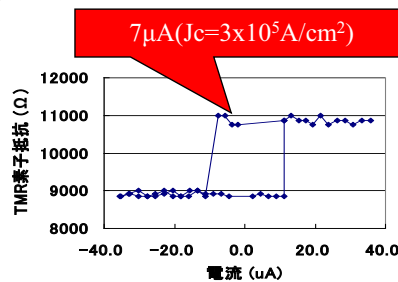
企業会員ベースの組織の特性を活かして、動向調査と将来の応用分野を調査し、PLを補佐する。

(5.3) 研究開発成果

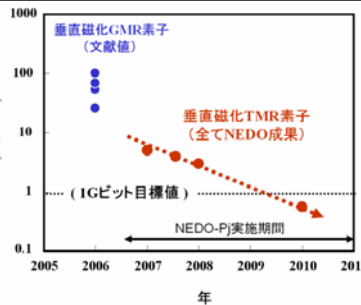
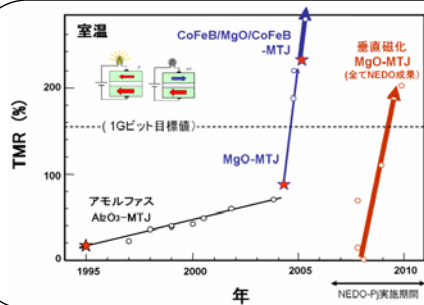
成果例：① スピンRAM基盤技術



垂直磁化方式スピンRAMの提唱
⇒世界初の開発に成功

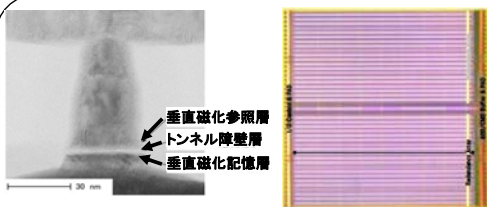


➢Gbitレベル達成
目標値: $5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$
(世界最小値)



不可能と言われていた、
垂直磁化TMR素子で、
高信号強度と低書込み
電流密度を達成

(世界初)

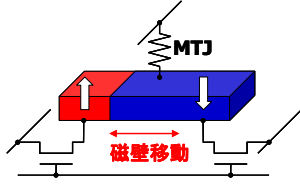


目標を大幅に超える、
30nm微細素子と、
64Mbitの垂直磁化
スピンRAM集積実証
(世界初)

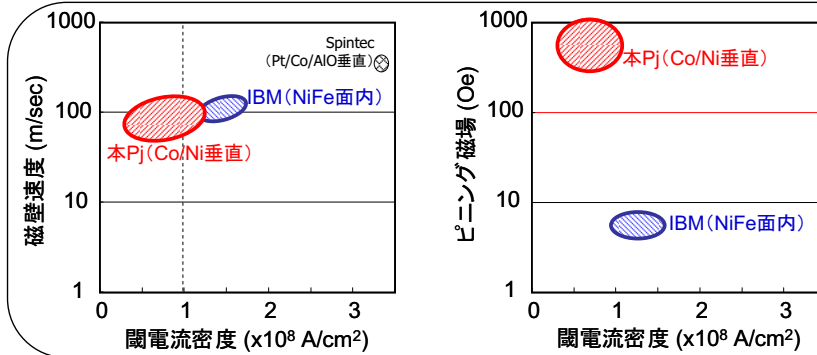
本PJ成果の公表で、
世界中のスピン
RAM開発は垂直
磁化方式に移行

成果例： ②-1 磁壁移動メモリデバイス設計技術

【スピントルクによる磁壁移動効果を使って高速メモリの可能性の実証を目指す】

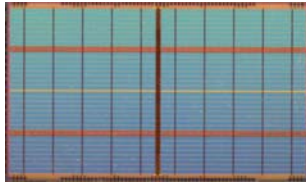


- 安定にかつ、低電流で磁壁移動ができるか？
- 高速動作が可能か？



Co/Ni垂直磁化膜の採用で、低電流密度、高速磁壁速度、安定動作(ピンニング磁場)を実現

(世界初)



垂直磁化16メガビットアレイチップを試作し回路動作を確認

(世界初)

スピントルク磁壁移動現象が、高速埋め込みメモリとして有用なことを実証した。

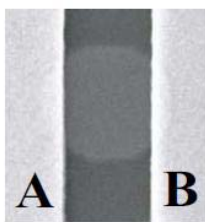
(世界初)

成果例： ②-3 スピン能動素子設計技術

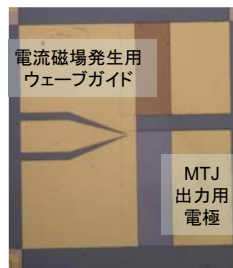
スピントルク方式スピントランジスタ設計技術

【新スピントロニクス素子の可能性の実証を目指す】

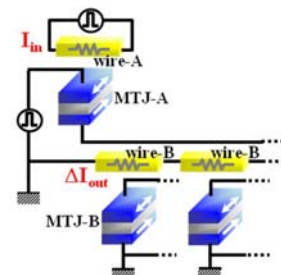
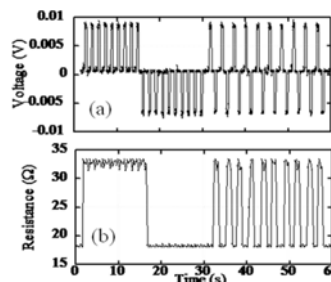
- スピントルクでアクティブ機能が出せるか？
- 三端子構造に発展可能か？



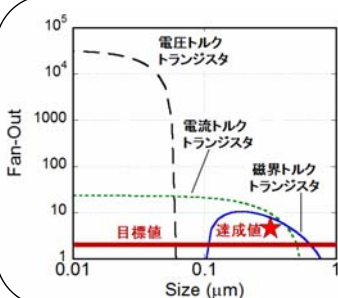
電流トルク型スピントランジスタの増幅機構を解明・設計可能とした



磁界トルク型スピントランジスタでファンアウト5を達成



不揮発論理回路の構成を可能にした



室温でファンアウト5、電力増幅度130を実証！

3方式を提案・検討

強磁性金属ベースのため高い実用性！

ヘッド、MRAM、スピンRAMに続く、新スピントロニクス素子として、スピントランジスタの可能性を実証した。(世界初)

最終目標達成度 : 完全達成

① スピンRAM

200%以上のTMR比の垂直磁化TMR素子 ⇒ **達成** (202%)
 DRAM並みの高速読み書きを安定して行うことができるTMR素子技術
 ⇒ **達成** (30ns、20μA動作)
 CMOS回路との整合をとった0.005μm²微細(70nm)TMR素子集積アレイ
 ⇒ **達成** (30nm微細素子と64Mbit集積化)

垂直磁化スピンRAMの提案・実証に世界で初めて成功(ダントツ)。
 世界の全ライバルが、垂直磁化系にシフトし、追いかけてきた！

②-1 磁壁メモリ

安定な磁壁移動 ⇒ **達成** (垂直磁化膜の導入)
 情報書込・読取動作 ⇒ **達成**
 100m/sの高速磁壁移動速度 ⇒ **達成** (2nsで200nm移動)
 低駆動電流 ⇒ **達成** (1×10^7 A/cm²台)
 集積アレイによる動作実証 ⇒ **達成** (4kb、16Mb試作評価)

磁壁移動メモリ(本Pjオリジナル提案)の実現可能性を実証できた

②-3 能動素子

スピントルクダイオードによる増幅素子 ⇒ **達成** (増幅度1.2@RT)
 スピントルクトランジスタのファンアウト>2 ⇒ **達成** (5@RT)
 1000%TMRハーフメタル新材料 ⇒ **達成** (1275%@2K)
 ハーフメタルトランジスタで電流On/Off比>1000@2K ⇒ **達成** (2920@6K)

強磁性金属スピントランジスタ(本Pjオリジナル提案)の実証に成功

特許・論文・招待講演

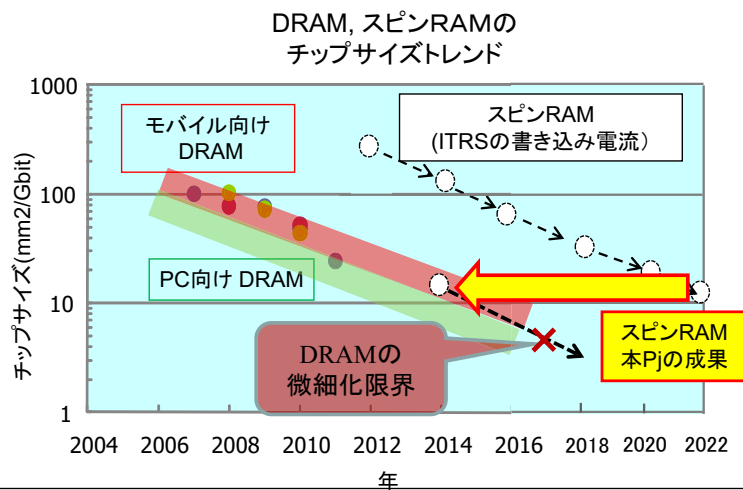
	特許(内国際)	論文	招待講演
① スピンRAM	128(63)	37	83
②-1 磁壁メモリ	60(60)	23	32
②-1 磁壁ストレージ	5(0)	0	0
②-2 光素子	4(2)	4	7
②-3 能動素子	5(0)	21	17

(5.4) 実用化、事業化の見通し

実用化可能性と事業化シナリオ

① スピンRAM

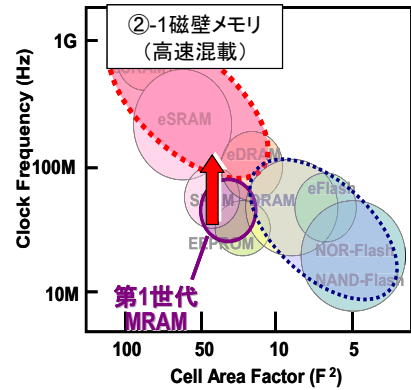
- 最難関であるDRAM置き換えも可能性あり。



実用化の見通し

②-1 磁壁メモリ

- 不揮発な高速混載RAM(eSRAM、eDRAM)への応用
- 200MHz(5ns)以上の動作、SRAM並セル面積(<0.7m²)
- 特許網の構築
- ルネサスエレクトロニクス(株)への技術移管(2010)
 - NEDOスピnPj参加のNECメンバー数名が移籍
 - 300mm用磁性スパッタ装置の導入
 - 300mmプロセスでの試作評価の開始
 - 狙いはSoC混載メモリ(不揮発RAM)

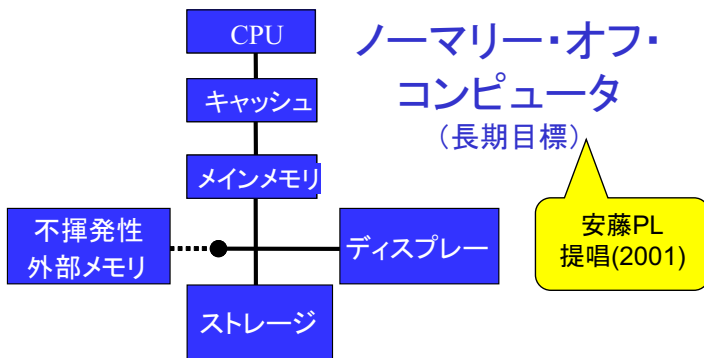


②-3 能動素子

- 不揮発性機能と増幅機能・スイッチ機能を併せ持つ三端子素子
- 高いファンアウト、電力増幅度、電流On・Off比の実証で、実用化イメージ・出口イメージが明確になった。
- 企業も能動素子に関心を持ち始めている。

波及効果

全部不揮発化



ノーマリー・オフ・コンピュータ
(長期目標)

何の役に立つのか？

- 劇的な低消費電力化
- モバイル機器の長時間動作
- 新しい応用(1年24時間動作)
- インフラ崩壊環境下の高性能PC
災害現場の通信
低開発国の人材育成

電源OFFを前提に、
必要なとき(<1ms)だけ電源ON

技術的・経済的・社会的な
波及効果は巨大

スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト

- NEDOノーマリー・オフ・コンピューティングPj(システム中心)に発展した
- 磁壁移動技術は最先端PGによる不揮発性論理回路開発へと展開
- ドリームチーム内の密接な相互作用 → 次世代の人材育成による日本の優位性確保
- 世界のスピントロニクス研究に方向性を提示

「スピントロニクス不揮発性機能技術」(事後評価)

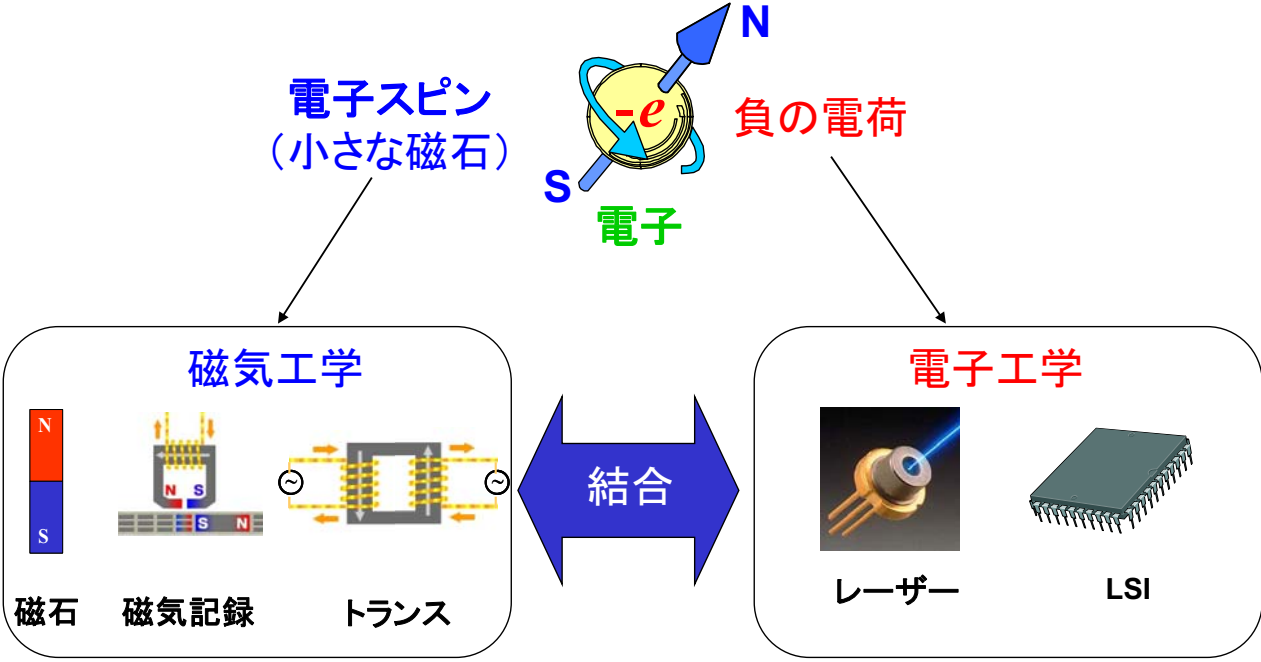
(2006年度～2010年度 5年間)

4. プロジェクトの概要説明資料

- 4. 1 事業の位置づけ・必要性及び研究開発マネジメント(NEDO 中山、宮田)
- 4. 2 研究開発成果及び実用化の見通し(PL 安藤)

プロジェクトの背景と実施体制

スピントロニクス (シーズ)



磁気工学 と 半導体工学 の結合で、新しい機能を実現！

なぜ今、スピントロニクスなのか？

従来の磁気工学

スピンと電荷の結合には、コイルで磁場を発生する電磁誘導を利用 (極めて低効率)

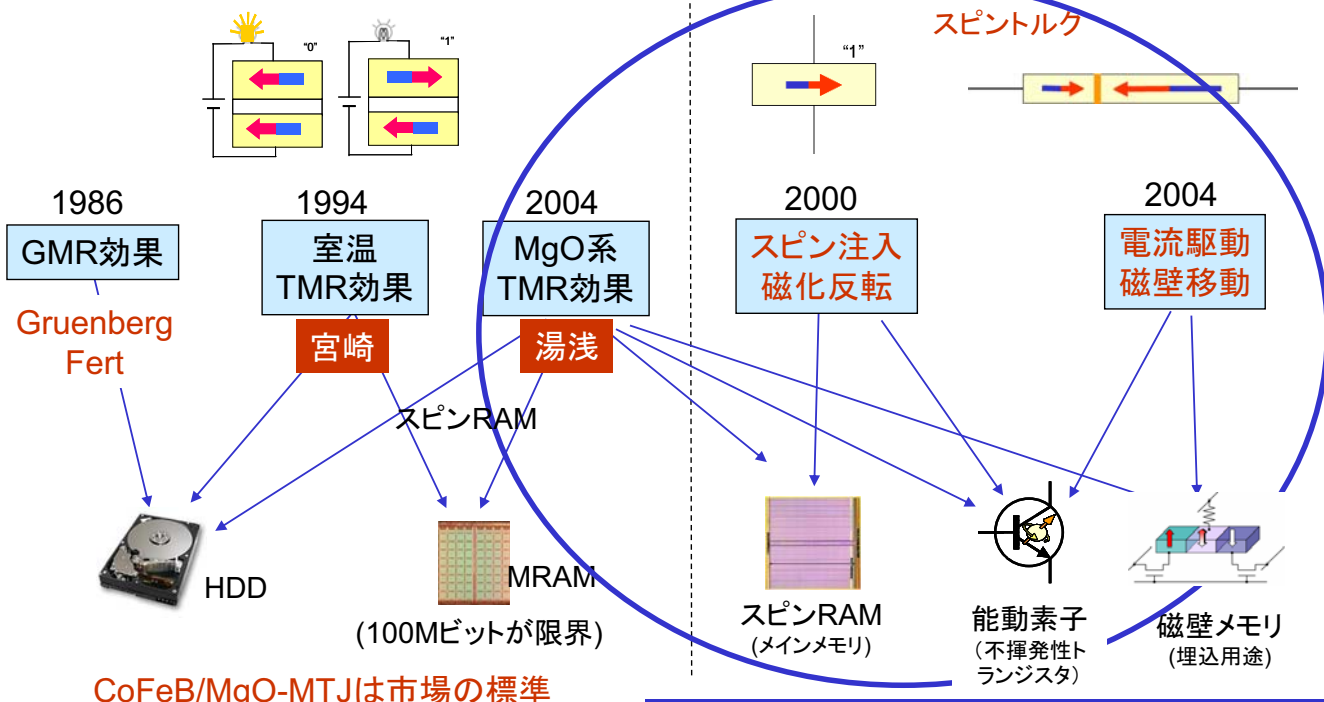
スピントロニクス

量子力学を用いてスピンと電荷の直接的結合が可能に (極めて高効率)

スピントロニクス：急展開する新エレクトロニクス技術

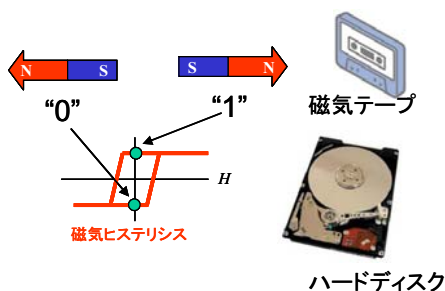
コイルフリーのスピン → 電荷情報変換 (実用化レベル)

コイルフリーのスピン ← 電荷情報変換 (未成熟レベル)



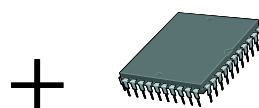
◆ スピンと電荷の双方向情報変換技術の開発
◆ スピントロニクス+不揮発性機能の全面展開

不揮発性機能 (ニーズ)



不揮発性

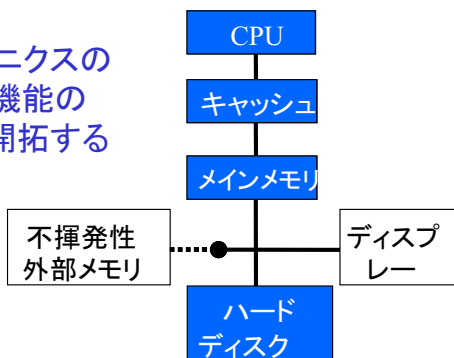
電気を切ると情報が消える!



半導体LSI

半導体技術に不揮発性機能を付加!

スピントロニクスの不揮発性機能の可能性を開拓する



➢ 低消費電力化
➢ 高速起動

スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト

国際競争

NEDOスピントロニクス不揮発性機能プロジェクト（2006年6月～2011年2月）
スピンドラムおよび次世代スピントロニクス素子の開発
スピンの不揮発性機能に注目した世界でもユニークな国家プロジェクト

① スピンドラム

米国DARPAプロジェクト（2008年～現在） Grandis
韓国STT-RAMプロジェクト(2008年～現在) サムスン、ハイニクス
米IBM・日TDK共同開発（2007年～現在）
米Qualcomm・台TSMC共同開発（2007年？～現在）
仏Crocus・露Rusnano(政府ファンド)共同開発（2011年報道）

②-1 磁壁メモリ

IBM, ITRIがストレージ応用のための磁壁移動デバイス(MRTM)を開発中
メモリ応用素子は、本Pjのみ

②-3 能動素子

半導体を用いた極低温におけるスピン能動素子の研究のみで、
室温強磁性金属系の研究は本Pjのみ

世界が本プロジェクトのコンセプトと成果を追いかけている！

省エネ志向の政策動向を先取り

目標設定は最適だった

世界トップレベルのメンバー構成

① スピンドラム（35名）： 東芝、産総研、東北大、阪大、電通大

東芝： 16Mb-MRAM開発実績をベースに、ギガビット級スピンドラムの実用化を狙う
世界有数のメモリーメーカー
産総研： MgO-TMR素子の開発(世界初)。スピンドラム機構解明の世界トップ。
東北大： 室温TMR素子の開発(世界初)。摩擦係数評価能力は世界トップ。
阪大： スピンドラム機構とダイナミクス解明で世界トップ(産総研を指導)
電通大： スピンドラムシミュレーションで世界トップ。

H21登録人員65名

ドリーム
チーム！

②-1 磁壁メモリ（11名）： 日電、京大、電通大

日電： 2Tr-1MTJ高速メモリ開発実績をベースに、磁壁移動で高速磁壁メモリを開発
京大： 磁壁移動現象の実証(世界初)。現象解明で世界トップ。
電通大： 磁壁移動シミュレーションで世界トップ。

②-3 能動素子（16名）： 阪大、産総研、東北大

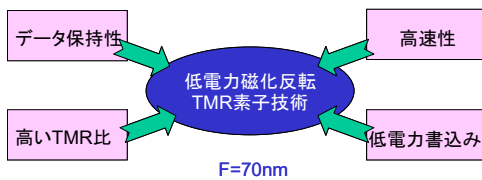
阪大： スピンドラム機能の解明における世界的優位性をベースに、利得のあるスピン能動素子を狙う。
産総研： MgO-TMR素子技術を用いて、阪大のための薄膜を作製
東北大： ハーフメタル電極材料開発(世界トップ)の実績をベースに、ゲート機能を三端子素子を狙う。

③ 調査（3名）： 素子協

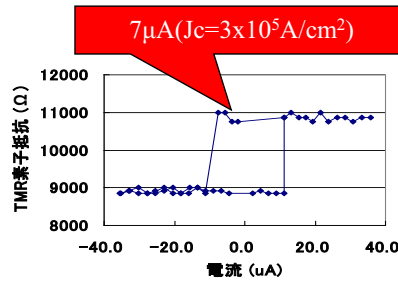
企業会員ベースの組織の特性を活かして、動向調査と将来の応用分野を調査し、PLを補佐する。

(5.3) 研究開発成果

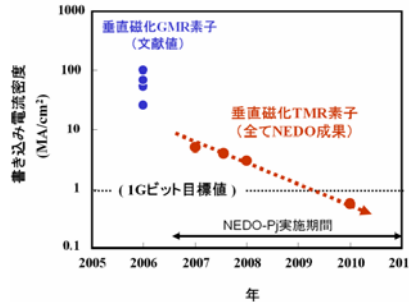
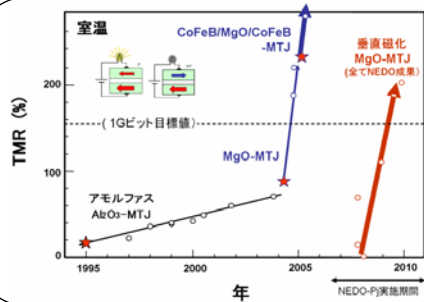
成果例：① スピンRAM基盤技術



垂直磁化方式スピンRAMの提唱
⇒世界初の開発に成功

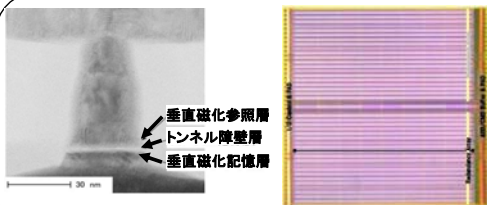


➢Gbitレベル達成
目標値: $5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$
(世界最小値)



不可能と言われていた、
垂直磁化TMR素子で、
高信号強度と低書込み
電流密度を達成

(世界初)

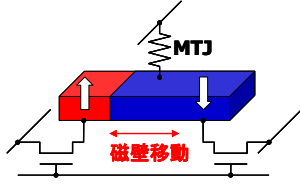


目標を大幅に超える、
30nm微細素子と、
64Mbitの垂直磁化
スピンRAM集積実証
(世界初)

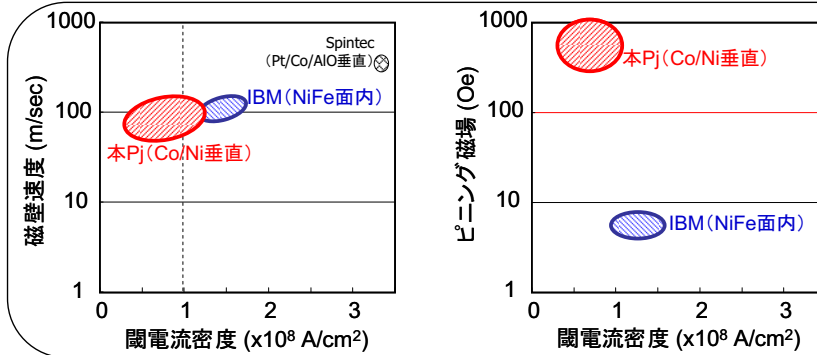
本PJ成果の公表で、
世界中のスピン
RAM開発は垂直
磁化方式に移行

成果例： ②-1 磁壁移動メモリデバイス設計技術

【スピントルクによる磁壁移動効果を使って高速メモリの可能性の実証を目指す】

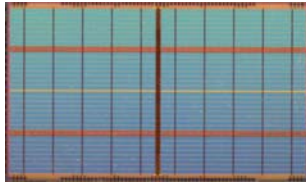


- 安定にかつ、低電流で磁壁移動ができるか？
- 高速動作が可能か？



Co/Ni垂直磁化膜の採用で、低電流密度、高速磁壁速度、安定動作(ピンニング磁場)を実現

(世界初)



垂直磁化16メガビットアレイチップを試作し回路動作を確認

(世界初)

スピントルク磁壁移動現象が、高速埋め込みメモリとして有用なことを実証した。

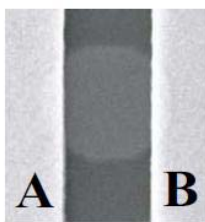
(世界初)

成果例： ②-3 スピン能動素子設計技術

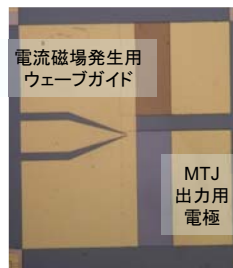
スピントルク方式スピントランジスタ設計技術

【新スピントロニクス素子の可能性の実証を目指す】

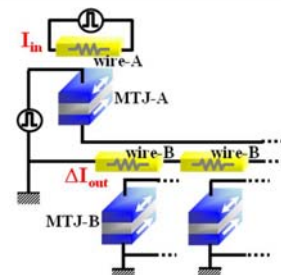
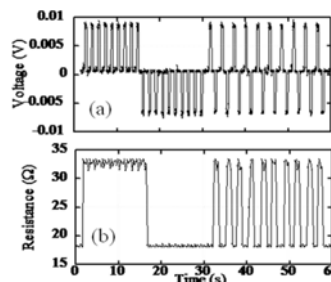
- スピントルクでアクティブ機能が出せるか？
- 三端子構造に発展可能か？



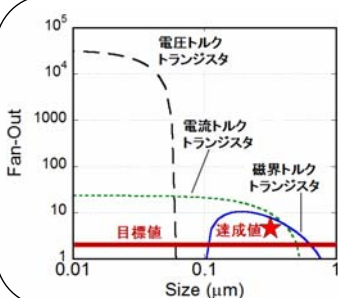
電流トルク型スピントランジスタの増幅機構を解明・設計可能とした



磁界トルク型スピントランジスタでファンアウト5を達成



不揮発論理回路の構成を可能にした



室温でファンアウト5、電力増幅度130を実証！

3方式を提案・検討

強磁性金属ベースのため高い実用性！

ヘッド、MRAM、スピンRAMに続く、新スピントロニクス素子として、スピントランジスタの可能性を実証した。(世界初)

最終目標達成度 : 完全達成

① スピンRAM

200%以上のTMR比の垂直磁化TMR素子 ⇒ **達成** (202%)
 DRAM並みの高速読み書きを安定して行うことができるTMR素子技術
 ⇒ **達成** (30ns、20μA動作)
 CMOS回路との整合をとった0.005μm²微細(70nm)TMR素子集積アレイ
 ⇒ **達成** (30nm微細素子と64Mbit集積化)

垂直磁化スピンRAMの提案・実証に世界で初めて成功(ダントツ)。
 世界の全ライバルが、垂直磁化系にシフトし、追いかけてきた!

②-1 磁壁メモリ

安定な磁壁移動 ⇒ **達成** (垂直磁化膜の導入)
 情報書込・読取動作 ⇒ **達成**
 100m/sの高速磁壁移動速度 ⇒ **達成** (2nsで200nm移動)
 低駆動電流 ⇒ **達成** (1×10^7 A/cm²台)
 集積アレイによる動作実証 ⇒ **達成** (4kb、16Mb試作評価)

磁壁移動メモリ(本Pjオリジナル提案)の実現可能性を実証できた

②-3 能動素子

スピントルクダイオードによる増幅素子 ⇒ **達成** (増幅度1.2@RT)
 スピントルクトランジスタのファンアウト>2 ⇒ **達成** (5@RT)
 1000%TMRハーフメタル新材料 ⇒ **達成** (1275%@2K)
 ハーフメタルトランジスタで電流On/Off比>1000@2K ⇒ **達成** (2920@6K)

強磁性金属スピントランジスタ(本Pjオリジナル提案)の実証に成功

特許・論文・招待講演

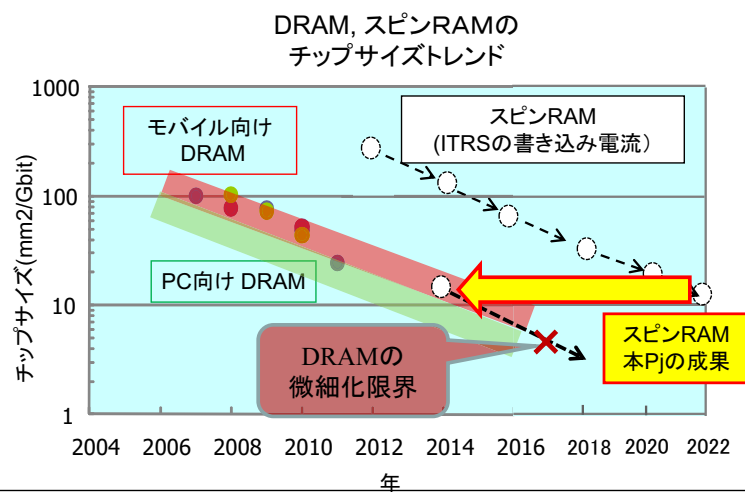
	特許(内国際)	論文	招待講演
① スピンRAM	128(63)	37	83
②-1 磁壁メモリ	60(60)	23	32
②-1 磁壁ストレージ	5(0)	0	0
②-2 光素子	4(2)	4	7
②-3 能動素子	5(0)	21	17

(5.4) 実用化、事業化の見通し

実用化可能性と事業化シナリオ

① スピンRAM

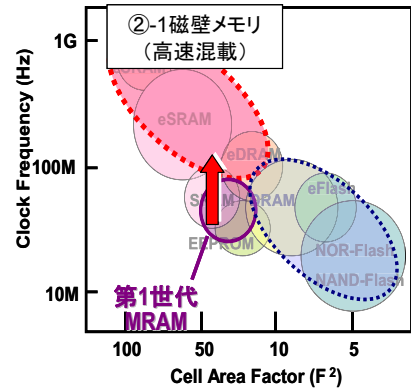
- 最難関であるDRAM置き換えも可能性あり。



実用化の見通し

②-1 磁壁メモリ

- 不揮発な高速混載RAM(eSRAM、eDRAM)への応用
- 200MHz(5ns)以上の動作、SRAM並セル面積(<0.7m²)
- 特許網の構築
- ルネサスエレクトロニクス(株)への技術移管(2010)
 - NEDOスピnPj参加のNECメンバー数名が移籍
 - 300mm用磁性スパッタ装置の導入
 - 300mmプロセスでの試作評価の開始
 - 狙いはSoC混載メモリ(不揮発RAM)

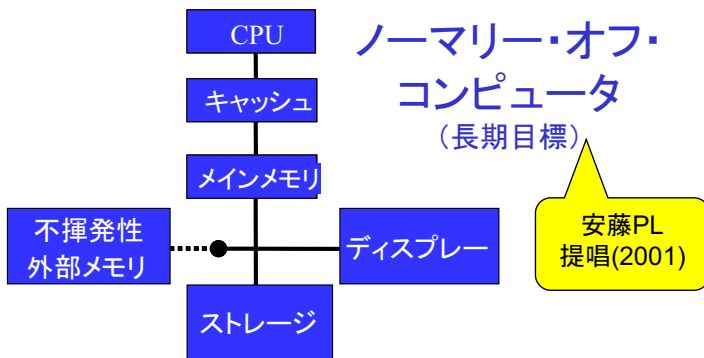


②-3 能動素子

- 不揮発性機能と増幅機能・スイッチ機能を併せ持つ三端子素子
- 高いファンアウト、電力増幅度、電流On・Off比の実証で、実用化イメージ・出口イメージが明確になった。
- 企業も能動素子に関心を持ち始めている。

波及効果

全部不揮発化



ノーマリー・オフ・コンピュータ
(長期目標)

何の役に立つのか？

- 劇的な低消費電力化
- モバイル機器の長時間動作
- 新しい応用(1年24時間動作)
- インフラ崩壊環境下の高性能PC
災害現場の通信
低開発国の人材育成

電源OFFを前提に、
必要なとき(<1ms)だけ電源ON

技術的・経済的・社会的な
波及効果は巨大

スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト

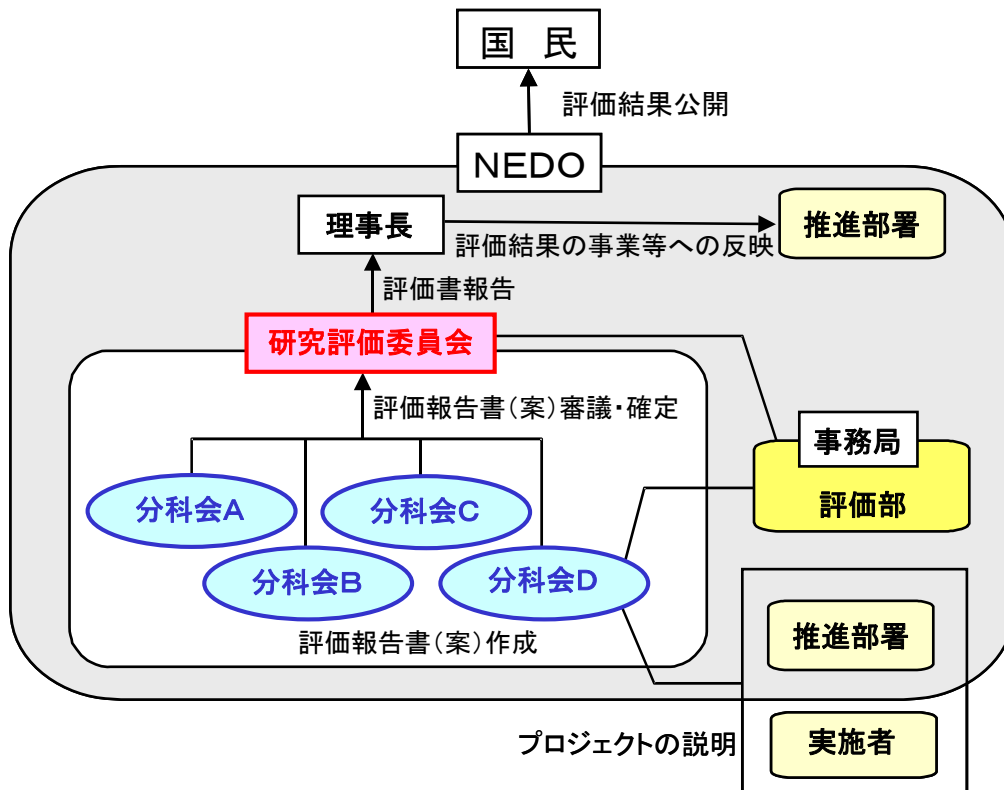
- NEDOノーマリー・オフ・コンピューティングPj(システム中心)に発展した
- 磁壁移動技術は最先端PGによる不揮発性論理回路開発へと展開
- ドリームチーム内の密接な相互作用 → 次世代の人材育成による日本の優位性確保
- 世界のスピントロニクス研究に方向性を提示

参考資料 1 評価の実施方法

本評価は、「技術評価実施規程」（平成 15 年 10 月制定）に基づいて研究評価を実施する。

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）における研究評価の手順は、以下のように被評価プロジェクトごとに分科会を設置し、同分科会にて研究評価を行い、評価報告書（案）を策定の上、研究評価委員会において確定している。

- 「NEDO 技術委員・技術委員会等規程」に基づき研究評価委員会を設置
- 研究評価委員会はその下に分科会を設置



1. 評価の目的

評価の目的は「技術評価実施規程」において。

- 業務の高度化等の自己改革を促進する
- 社会に対する説明責任を履行するとともに、
経済・社会ニーズを取り込む
- 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を
促進する

としている。

本評価においては、この趣旨を踏まえ、本事業の意義、研究開発目標・計画の妥当性、計画を比較した達成度、成果の意義、成果の実用化の可能性等について検討・評価した。

2. 評価者

技術評価実施規程に基づき、事業の目的や態様に即した外部の専門家、有識者からなる委員会方式により評価を行う。分科会委員選定に当たっては以下の事項に配慮して行う。

- 科学技術全般に知見のある専門家、有識者
- 当該研究開発の分野の知見を有する専門家
- 研究開発マネジメントの専門家、経済学、環境問題、国際標準、その他社会的ニーズ関連の専門家、有識者
- 産業界の専門家、有識者
- ジャーナリスト

また、評価に対する中立性確保の観点から事業の推進側関係者を選任対象から除外し、また、事前評価の妥当性を判断するとの側面にかんがみ、事前評価に関与していない者を主体とする。

これらに基づき、分科会委員名簿にある7名を選任した。

なお、本分科会の事務局については、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構評価部が担当した。

3. 評価対象

平成18年度に開始された「スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト」を評価対象とした。

なお、分科会においては、当該事業の推進部署から提出された事業原簿、プ

プロジェクトの内容、成果に関する資料をもって評価した。

4. 評価方法

分科会においては、当該事業の推進部署及び研究実施者からのヒアリングと、それを踏まえた分科会委員による評価コメント作成、評点法による評価及び実施者側等との議論等により評価作業を進めた。

なお、評価の透明性確保の観点から、知的財産保護の上で支障が生じると認められる場合等を除き、原則として分科会は公開とし、研究実施者と意見を交換する形で審議を行うこととした。

5. 評価項目・評価基準

分科会においては、次に掲げる「評価項目・評価基準」で評価を行った。これは、研究評価委員会による『各分科会における評価項目・評価基準は、被評価プロジェクトの性格、中間・事後評価の別等に応じて、各分科会において判断すべきものである。』との考え方に従い、第1回分科会において、事務局が、研究評価委員会により示された「標準的評価項目・評価基準」（参考資料1-7頁参照）をもとに改定案を提示し、承認されたものである。

プロジェクト全体に係わる評価においては、主に事業の目的、計画、運営、達成度、成果の意義や実用化への見通し等について評価した。各個別テーマに係る評価については、主にその目標に対する達成度等について評価した。

評価項目・評価基準

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ ITイノベーションプログラムおよびナノテク・部材イノベーションプログラムの目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携が十分に行われ

る体制となっているか。

- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

(4) 研究開発成果の実用化、事業化に向けたマネジメントの妥当性

- ・ 成果の実用化、事業化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化、事業化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。

(5) 情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

3. 研究開発成果について

(1) 目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2) 成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

(3) 知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。

(4) 成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

4. 実用化、事業化の見通しについて

(1) 成果の実用化可能性

- ・ 産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）ができているか。
- ・ 実用化に向けて課題が明確になっているか。課題解決の方針が明確になっているか。

(2) 事業化までのシナリオ

- ・ NEDO後継プロジェクト、NEDO実用化助成、企業内研究等、プロジェクト終了後の事業化までの道筋は明確か。
- ・ 市場の規模や成長性、コストダウン、競合技術との比較、導入普及、事業化までの期間、事業化とそれに伴う経済効果等の見通しは立っているか。

(3) 波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

※個別テーマ（1）『スピンRAM基盤技術』については上記の基準・視点に基づき評価する

※個別テーマ（2）『スピン新機能素子設計技術』については基礎的・基盤的研究開発に該当し、評価項目を「実用化の見通しについて」とし、以下の基準・視点について評価する

4. 実用化の見通しについて

(1) 成果の実用化可能性

- ・ 実用化イメージ・出口イメージが明確になっているか。
- ・ 実用化イメージ・出口イメージに基づき、開発の各段階でマイルストーンを明確にしているか。それを踏まえ、引き続き研究開発が行われる見通し

は立っているか。

(2)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

【事後評価 標準的評価項目・評価基準の位置付け（基本的考え方）】

標準的評価項目・評価基準は、第25回研究評価委員会（平成22年3月26日付）において以下のとおり定められている。（本文中の記載例による1・・・、2・・・、3・・・、4・・・が標準的評価項目、それぞれの項目中の(1)・・・、(2)・・・が標準的評価基準、それぞれの基準中の・・・が視点）

ただし、これらの標準的評価項目・評価基準は、研究開発プロジェクトの事後評価における標準的な評価の視点であり、各分科会における評価項目・評価基準は、被評価プロジェクトの性格等に応じて、各分科会において判断すべきものである。

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 特定の施策（プログラム）、制度の下で実施する事業の場合、当該施策・制度の目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 研究管理法人を経由する場合、研究管理法人が真に必要な役割を担っているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

(4) 研究開発成果の実用化、事業化に向けたマネジメントの妥当性

- ・ 成果の実用化、事業化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化、事業化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。

(5) 情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

3. 研究開発成果について

(1) 目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確

になっているか。

(2) 成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながる事が期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

(3) 知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4) 成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

4. 実用化、事業化の見通しについて

(1) 成果の実用化可能性

- ・ 産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）ができているか。
- ・ 実用化に向けて課題が明確になっているか。課題解決の方針が明確になっているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。

(2) 事業化までのシナリオ

- ・ NEDO後継プロジェクト、NEDO実用化助成、企業内研究等、プロジェクト終了後の事業化までの道筋は明確か。
- ・ 市場の規模や成長性、コストダウン、競合技術との比較、導入普及、事

業化までの期間、事業化とそれに伴う経済効果等の見通しは立っているか。

(3)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

※ 基礎的・基盤的研究及び知的基盤・標準整備等の研究開発の場合は、以下の項目・基準による。

* 基礎的・基盤的研究開発の場合

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 研究管理法人を経由する場合、研究管理法人が真に必要な役割を担っているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

(4) 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

- ・ 成果の実用化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。

(5) 情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

3. 研究開発成果について

(1) 目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2) 成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

(3) 知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4) 成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

4. 実用化の見通しについて

(1) 成果の実用化可能性

- ・ 実用化イメージ・出口イメージが明確になっているか。
- ・ 実用化イメージ・出口イメージに基づき、開発の各段階でマイルストーンを明確にしているか。それを踏まえ、引き続き研究開発が行われる見通しは立っているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。

(2) 波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

* 知的基盤・標準整備等の研究開発の場合

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。

- ・ 研究管理法人を経由する場合、研究管理法人が真に必要な役割を担っているか。
 - ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
 - ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
 - ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。
- (4) 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性
- ・ 成果の実用化につなげる戦略が明確になっているか。
 - ・ 成果の実用化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。
- (5) 情勢変化への対応等
- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
 - ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

3. 研究開発成果について

(1) 目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2) 成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることが期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は公開性が確保されているか。

(3) 知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 研究内容に新規性がある場合、知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4) 成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

4. 実用化の見通しについて

(1) 成果の実用化可能性

- ・ 整備した知的基盤についての利用は実際にあるか、その見通しが得られているか。
- ・ 公共財として知的基盤を供給、維持するための体制は整備されているか、その見込みはあるか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ J I S 化、標準整備に向けた見通しが得られているか。注）国内標準に限る
- ・ 一般向け広報は積極的になされているか。

(2) 波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

参考資料 2 評価に係る被評価者意見

研究評価委員会（分科会）は、評価結果を確定するにあたり、あらかじめ当該実施者に対して評価結果を示し、その内容が、事実関係から正確性を欠くなどの意見がある場合に、補足説明、反論などの意見を求めた。研究評価委員会（分科会）では、意見があったものに対し、必要に応じて評価結果を修正の上、最終的な評価結果を確定した。

評価結果に対する被評価者意見は全て反映された。

本研究評価委員会報告は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）評価部が委員会の事務局として編集しています。

平成23年11月

NEDO 評価部

部長 竹下 満

主幹 三上 勉

担当 土橋 誠

*研究評価委員会に関する情報は NEDO のホームページに掲載しています。

(http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_index.html)

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地

ミュージア川崎セントラルタワー20F

TEL 044-520-5161 FAX 044-520-5162