

該当テーマ名：② 生活様式を変える**革新的省エネ・エコ社会**の実現「地球との共生」

# 無充電で長期間使用できる究極のエコIT機器の実現

## プログラム成果報告

### - 目指したものと革新的な技術成果のポイント -

元プログラム・マネージャー

東北大学 名誉教授

東北大学 大学院工学研究科 研究企画センター 特任教授

佐 橋 政 司

# 本ImPACTプログラムの取り組み方針

- ビッグデータやモノのインターネット、人工知能などの新たな情報通信技術の進展により大きな技術変革期にあるコンピュータエレクトロニクス今後の展開とエネルギー消費量の増大、地球環境との共存を注視
- 昨今の我が国半導体エレクトロニクス産業の状況を鑑み、エネルギー消費量を根本的原理から桁違いに削減可能でかつ我が国のエレクトロニクス産業の再興に資する突破口、起爆剤となり得る圧倒的差別化技術の創生
- 革新的スピントロニクスシーズイノベーションの創出と社会変革への応用展開に挑む取り組みを重視した実施計画を遂行



## 2019F Top 15 Semiconductor Sales Leaders (\$M, Including Foundries)

| 2019F Rank   | 2018 Rank | Company            | Headquarters | 2018 Total IC | 2018 Total O-S-D | 2018 Total Semi | 2019F Total IC | 2019F Total O-S-D | 2019F Total Semi | 2019/2018 % Change |
|--------------|-----------|--------------------|--------------|---------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------|------------------|--------------------|
| 1            | 2         | Intel              | U.S.         | 69,880        | 0                | 69,880          | 69,832         | 0                 | 69,832           | 0%                 |
| 2            | 1         | Samsung            | South Korea  | 75,698        | 2,843            | 78,541          | 51,750         | 3,860             | 55,610           | -29%               |
| 3            | 4         | TSMC (1)           | Taiwan       | 34,208        | 0                | 34,208          | 34,503         | 0                 | 34,503           | 1%                 |
| 4            | 3         | SK Hynix           | South Korea  | 36,200        | 567              | 36,767          | 22,291         | 595               | 22,886           | -38%               |
| 5            | 5         | Micron             | U.S.         | 30,930        | 0                | 30,930          | 19,960         | 0                 | 19,960           | -35%               |
| 6            | 6         | Broadcom Inc. (2)  | U.S.         | 16,454        | 1,735            | 18,189          | 15,917         | 1,789             | 17,706           | -3%                |
| 7            | 7         | Qualcomm (2)       | U.S.         | 16,385        | 0                | 16,385          | 14,300         | 0                 | 14,300           | -13%               |
| 8            | 8         | TI                 | U.S.         | 13,908        | 946              | 14,854          | 12,705         | 842               | 13,547           | -9%                |
| 9            | 9         | Toshiba/Kioxia (3) | Japan        | 12,293        | 1,508            | 13,801          | 9,839          | 1,437             | 11,276           | -18%               |
| 10           | 10        | Nvidia (2)         | U.S.         | 11,951        | 0                | 11,951          | 10,514         | 0                 | 10,514           | -12%               |
| 11           | 15        | Sony               | Japan        | 627           | 7,088            | 7,715           | 878            | 8,674             | 9,552            | 24%                |
| 12           | 11        | ST                 | Europe       | 6,628         | 2,991            | 9,619           | 7,241          | 2,215             | 9,456            | -2%                |
| 13           | 13        | Infineon           | Europe       | 5,465         | 3,745            | 9,210           | 5,366          | 3,580             | 8,946            | -3%                |
| 14           | 12        | NXP                | Europe       | 8,429         | 978              | 9,407           | 7,969          | 888               | 8,857            | -6%                |
| 15           | 14        | MediaTek (2)       | Taiwan       | 7,891         | 0                | 7,891           | 7,948          | 0                 | 7,948            | 1%                 |
| Top-15 Total |           |                    |              | 346,947       | 22,401           | 369,348         | 291,013        | 23,880            | 314,893          | -15%               |

(1) Foundry (2) Fabless

(3) Formerly Toshiba Memory

Source: Company reports, IC Insights' Strategic Reviews database

31兆円

特筆すべきは、CMOSイメージセンサのソニーの成長率が一位であること。

NANDフラッシュの東芝、サムソン、SK Hynix、マイクロンの成長率は、いずれも大幅マイナスであること。

## 2019F Top 15 Semiconductor Sales Leaders Ranked by Growth Rate (\$M, Including Foundries)

| 2019F Rank | Company            | Headquarters | 2018 Total IC | 2018 Total O-S-D | 2018 Total Semi | 2019F Total IC | 2019F Total O-S-D | 2019F Total Semi | 2019/2018 % Change |
|------------|--------------------|--------------|---------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------|------------------|--------------------|
| 1          | Sony               | Japan        | 627           | 7,088            | 7,715           | 878            | 8,674             | 9,552            | 24%                |
| 2          | TSMC (1)           | Taiwan       | 34,208        | 0                | 34,208          | 34,503         | 0                 | 34,503           | 1%                 |
| 3          | MediaTek (2)       | Taiwan       | 7,891         | 0                | 7,891           | 7,948          | 0                 | 7,948            | 1%                 |
| 4          | Intel              | U.S.         | 69,880        | 0                | 69,880          | 69,832         | 0                 | 69,832           | 0%                 |
| 5          | ST                 | Europe       | 6,628         | 2,991            | 9,619           | 7,241          | 2,215             | 9,456            | -2%                |
| 6          | Broadcom Inc. (2)  | U.S.         | 16,454        | 1,735            | 18,189          | 15,917         | 1,789             | 17,706           | -3%                |
| 7          | Infineon           | Europe       | 5,465         | 3,745            | 9,210           | 5,366          | 3,580             | 8,946            | -3%                |
| 8          | NXP                | Europe       | 8,429         | 978              | 9,407           | 7,969          | 888               | 8,857            | -6%                |
| 9          | TI                 | U.S.         | 13,908        | 946              | 14,854          | 12,705         | 842               | 13,547           | -9%                |
| 10         | Nvidia (2)         | U.S.         | 11,951        | 0                | 11,951          | 10,514         | 0                 | 10,514           | -12%               |
| 11         | Qualcomm (2)       | U.S.         | 16,385        | 0                | 16,385          | 14,300         | 0                 | 14,300           | -13%               |
| 12         | Toshiba/Kioxia (3) | Japan        | 12,293        | 1,508            | 13,801          | 9,839          | 1,437             | 11,276           | -18%               |
| 13         | Samsung            | South Korea  | 75,698        | 2,843            | 78,541          | 51,750         | 3,860             | 55,610           | -29%               |
| 14         | Micron             | U.S.         | 30,930        | 0                | 30,930          | 19,960         | 0                 | 19,960           | -35%               |
| 15         | SK Hynix           | South Korea  | 36,200        | 567              | 36,767          | 22,291         | 595               | 22,886           | -38%               |

(1) Foundry

(2) Fabless

(3) Formerly Toshiba Memory

Source: Company reports, IC Insights' Strategic Reviews database

O-S-D:

オプト・センサ・個別半導体

## Record-Breaking Sales by Product Categories in 2018

| Market                             | Product Category            | 2018 Growth | New Sales Record      | Previous Record (Year)       |
|------------------------------------|-----------------------------|-------------|-----------------------|------------------------------|
| Optoelectronics                    | Lamp Devices (mostly LEDs)  | 11%         | \$14.7 billion        | \$14.3 billion (2015)        |
|                                    | CMOS Image Sensors          | 14%         | \$14.2 billion        | \$12.5 billion (2017)        |
|                                    | <b>Total Image Sensors</b>  | <b>12%</b>  | <b>\$15.7 billion</b> | <b>\$14.1 billion (2017)</b> |
|                                    | Laser Transmitters          | 8%          | \$1.7 billion         | \$1.6 billion (2017)         |
|                                    | Light Sensors               | 26%         | \$837 million         | \$662 million (2017)         |
|                                    | Infrared Devices            | 22%         | \$1.1 billion         | \$916 million (2017)         |
|                                    | Couplers & Optical Switches | 8%          | \$1.9 billion         | \$1.8 billion (2017)         |
| Sensors & Actuators                | Pressure Sensors            | 13%         | \$3.3 billion         | \$2.9 billion (2017)         |
|                                    | Accelerometers/Gyroscopes   | 4%          | \$3.4 billion         | \$3.2 billion (2017)         |
|                                    | Magnetic-Field Sensors      | 4%          | \$2.0 billion*        | \$2.0 billion* (2017)        |
|                                    | <b>Total Sensors</b>        | <b>8%</b>   | <b>\$9.1 billion</b>  | <b>\$8.5 billion (2017)</b>  |
|                                    | Actuators                   | 4%          | \$5.5 billion         | \$5.3 billion (2017)         |
| Discretes                          | Power Transistors           | 14%         | \$16.3 billion        | \$14.3 billion (2017)        |
|                                    | Diodes                      | 7%          | \$3.4 billion         | \$3.2 billion (2017)         |
|                                    | Rectifiers                  | 6%          | \$3.9 billion         | \$3.7 billion (2017)         |
| <b>MEMS-Based Semiconductors**</b> |                             | <b>6%</b>   | <b>\$12.2 billion</b> | <b>\$11.5 billion (2017)</b> |

\*New high record of \$2.04 billion was set in 2018 after \$1.96 billion was achieved in 2017.

\*\*MEMS total primarily covers pressure sensors, acceleration/yaw sensors, and actuator products.

Source: IC Insights

IC Insightsのトップ15ランキングには専業ファウンドリ(TSMC)が含まれているが、このTSMCを除外すると、中国に本拠を置くHuaweiのファブレス子会社HiSiliconが15位にランクインする。同社もソニー同様24%増という成長率を達成する見通し(売上高は75億ドル)であるという。



## 佐橋政司 PM PMによる産業や社会の変革



東北大学 教授  
リサーチプロフェッサー  
名誉教授  
(45.27億円)

我が国が世界を先導するスピントロニクス技術を用いた磁気メモリ(MRAM)により、メインメモリのみならずLSIの演算処理部までを不揮発化し、超低消費電力化が可能な究極のエコIT機器を実現する。そして、IoTやAI等の進展により爆発的に増大する情報の処理、増大する機器の消費電力の抑制等の社会的課題の解決を図る。【関連する経済活動規模(推計)約6,700億円(約10年後)】

ImPACTが目指す未来  
究極の“不揮発性”エコIT機器  
(電源オフ時でも記憶を保持、動作時消費電力 $\leq 1\text{fJ/bit}$ )  
モバイルITは無充電で長時間使用  
センサーネットワークの電池交換を一切



## PMによるチャレンジ

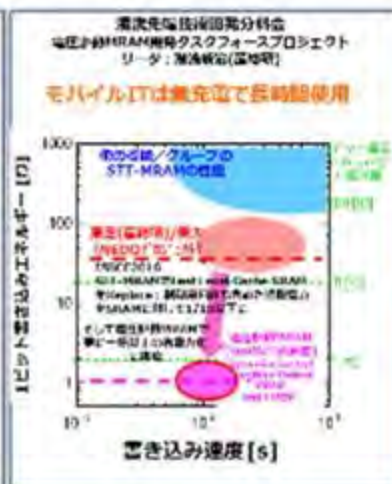
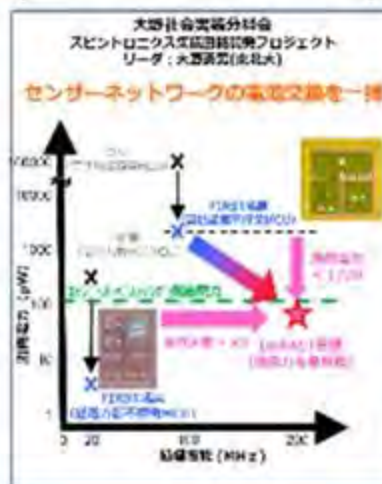
### 【チャレンジングな技術開発のポイント】

#### ・スピントロニクス集積回路プロジェクト

STTおよび新方式のスピントロニクス軌道トルク(SOT)素子により、屋内光等の微弱なエネルギー(100 $\mu\text{W}$ 以下)でも駆動し、高速演算可能(100~200MHz)な不揮発性マイコンの開発。

#### ・電圧駆動MRAM開発プロジェクト

電圧パルス制御を用いた新たな電圧駆動方式(書込み電力:1ビット当たり数フェムトジュール以下)を開発。ギガビット級の大容量と数ナノ秒の高速書込み性能、 $10^{14}$ 回以上の書込み耐性を合わせ持ったキャッシュメモリ、メインメモリ等記憶装置へ応用展開。





## ・主な成果

### スピントロニクス集積回路プロジェクトの成果



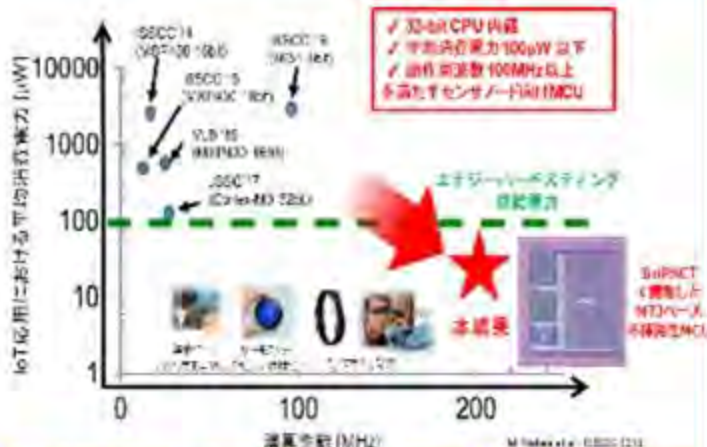
PL: 大野英男  
東北大 総長



PI: 遠藤哲哉  
東北大 教授  
国際先進エレクトロニクス  
研究開発センター長

① **新方式のスピントラックトルク(SOT)素子**を用い、SOT磁化反転特有のパルス幅依存性を世界で初めて実験検証、450psパルスで100%の磁化反転を実証。加えて、この成果をベースに、300nm CMOS ウエハとの集積化でSOT-MRAMを試作、350psの高速動作を実証、世界最高峰の電子デバイス国際会議(IEDM 2019)にて発表

② **不揮発性マイコンを実現**するため、内部メモリの回路設計と動作タイミングを「内蔵する要素ブロックレベル」にまで検討し、無駄な待機電力を極限まで低減するよう設計。通常の200分の1の駆動電力(100 $\mu$ W以下)で動作することを確認、世界最高峰の集積回路国際会議(ISSCC2019)にて発表。SIP第2期にてシステム側でのIoT/AIチップ開発を推進。大学発スタートアップベンチャーによるスピントロニクス/CMOS Hybrid 技術を軸にしたLSI設計・試作事業を推進。



世界に先駆けて 200MHz に達して 50 $\mu$ W 以下の動作を実現し、これまでのシリコンテクノロジーが抱えていた高周波動作と低消費電力のトレードオフを大幅に改善した。

### 電圧駆動MRAM開発プロジェクトの成果



PL: 遠藤哲哉  
産総研スピントロ  
ニクスセンター長

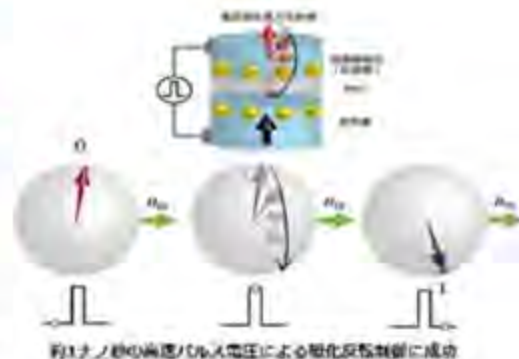


PI: 堀田博明  
東芝エレクトロニクス  
研究開発センター 技術

① Cr 下地やIr界面層により**磁気異方性電圧効果(VCMA)**を、当初より10倍以上に向上。**実用レベル(〜400fJ/Vm)を達成。**

② パルス幅1nsで $4 \times 10^{-6}$ の書き込みエラー率を実証し、安定な電圧駆動磁化反転を実現。また、回路設計技術からのブレークスルーにより、**逆バイアスを印加して電圧書き込みの安定性を制御する手法を確立**、世界最高峰の電子デバイス国際会議(IEDM2018)にて発表。ソニーとの共同研究、NEDO事業(実用化プロジェクト)へと進展を図る。

③ 書き込み方式からのブレークスルーにより**新規メモリ(VoCSM)を開発**し、高速型と大容量型のコンセプト検証を完了、世界最高峰の電子デバイス国際会議(IEDM2018)にて発表。また、集積回路機能実証試作については、アプリを想定した設計開発及び評価を開始し、ImPACT発スタートアップベンチャーによるチップ開発の推進を図る。



# ImPACT後の成果の展開

## 大野社会実装分科会 スピントロニクス集積回路プロジェクト

超省電力・高演算性能不揮発性  
マイコンとその基盤技術

高速性に優れる新方式 (Xタイプ)  
スピン軌道トルク(SOT)-MRAM  
の基礎技術  
(世界最高速書込み：200ps)

### 内閣府

「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第2期」(NEDO)

「フィジカル空間デジタルデータ処理基盤

研究サブテーマII. 超低消費電力IoTデバイス・革新的センサ技術」

「超低消費電力MTJ/CMOS Hybrid IoTデバイス基盤技術の研究開発」

研究代表者：東北大学 遠藤哲郎

### 東北大学発ベンチャー「パワースピン株式会社」PSI

スピントロニクス/CMOS Hybrid 技術による STT-MRAM などの磁気メモリ、IoT デバイスや AI チップ等の各種ロジック LSI とそのモジュールの設計事業、試作事業、知財・各種回路IP/PDKの販売・ライセンス事業等



代表取締役社長 政岡 徹

取締役 CTO 遠藤 哲郎 (東北大学 教授)

## 湯浅先端技術開発分科会 電圧駆動MRAM開発タスクフォースプロジェクト

独自の電圧駆動MRAM技術：  
磁化ダイナミクス制御電圧駆動  
(電圧トルク)MRAMの基礎技術  
(世界最高速書込み：200ps+超省  
電力書込み：<1fJ/bit)

### 産総研-ソニー共同研究開発

NEDO事業 実用化プロジェクトへと展開 (申請中)

電圧トルクMRAMの特殊用途開発

研究代表者：湯浅新治

(いずれも拠点は、産総研つくば)

ImPACT発新概念メモリ：  
VoCSM (Voltage Control  
Spintronics Memory)  
2ns高速書込み+高書き換え耐性  
(信頼性)

Kioxia(東芝)のStorage  
Class Memory狙いの  
研究は継続

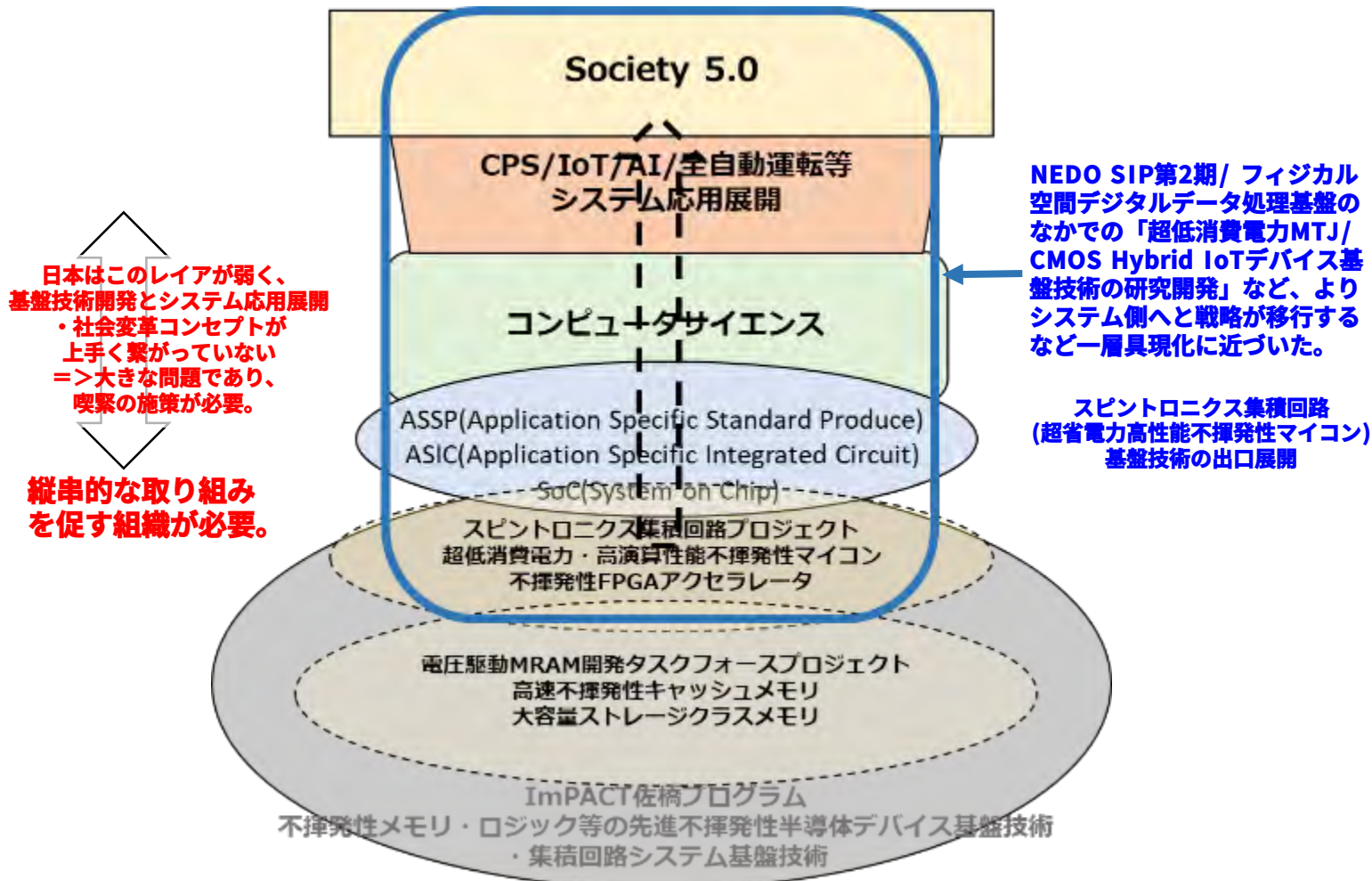
### ImPACT発ベンチャー

「Spin Orbitronics Technologies 株式会社」

VoCSMをはじめとする新概念混載メモリ・ロジックの開発と製造事業  
CEO兼CTO 與田博明

Chief Advisor 佐橋政司 (東北大学 名誉教授)

2017年のGoogle Prasad Sabadaの主張(ISS, California)等やAI, IoT, Big Dataの進展は、ムーアの法則はもはや、新しいクラウドサービスの高まるニーズに対応することが出来ないことや**エッジ側での新しい分散システムが求められていることを意味しており、プロセッサやメモリ、インターコネクト、パッケージングなどの分野において、さまざまなイノベーションが求められている。**





## 研究開発概要

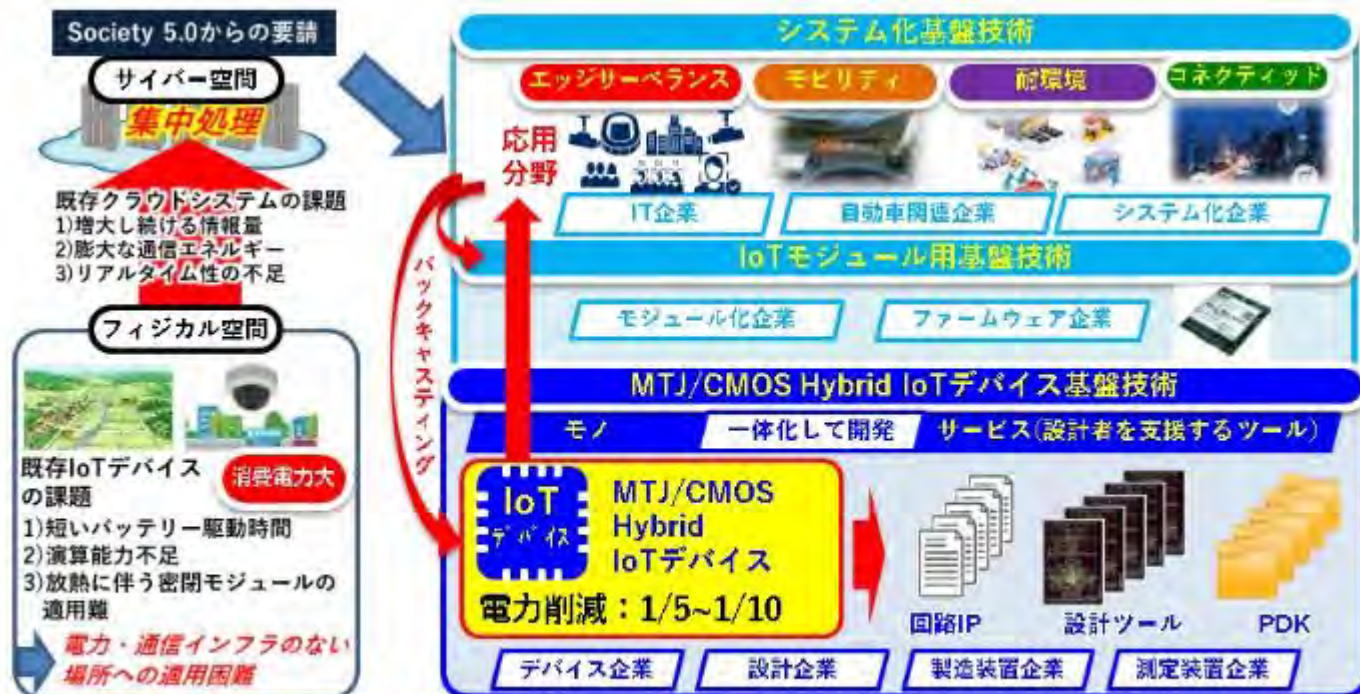
内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期」

「フィジカル空間デジタルデータ処理基盤

研究サブテーマII. 超低消費電力IoTデバイス・革新的センサ技術」

「超低消費電力MTJ/CMOS Hybrid IoTデバイス基盤技術の研究開発」

研究代表者：東北大学 遠藤哲郎



定めた応用分野でのシステム開発からのバックキャストにより、革新的省エネルギー性能を実現するMTJ/CMOS Hybrid IoTデバイスの基盤技術と社会実装を促進するシステム化技術を開発。

サイバー空間と実世界の結合で、生活および社会的環境が大きく変化。  
-エッジ側での問題解決が求められている (メンテナンスフリーのエッジデバイス)-

## サイバー空間とフィジカル空間の高度な融合

フィジカル (現実) 空間から**センサー**と**IoT**を通じてあらゆる情報が集積 (**ビッグデータ**)  
**人工知能 (AI)** がビッグデータを解析し、高付加価値を**現実空間**にフィードバック

これまでの情報社会(4.0)

サイバー空間

クラウド

人がアクセスして情報を入手・分析



人がナビで  
検索して運転



人が情報を分析・提案



人の操作により  
ロボットが生産

フィジカル空間

Society 5.0

サイバー空間

ビッグデータ

解析 AI 人工知能

センサー情報

環境情報、機器の稼働情報、  
人の情報などを収集

高付加価値な情報、  
提案、機器への指示など



自動走行車で  
自動走行



AIが人に提案



工場で自動的に  
ロボットが生産

フィジカル空間

エッジ側での問題解決も必要

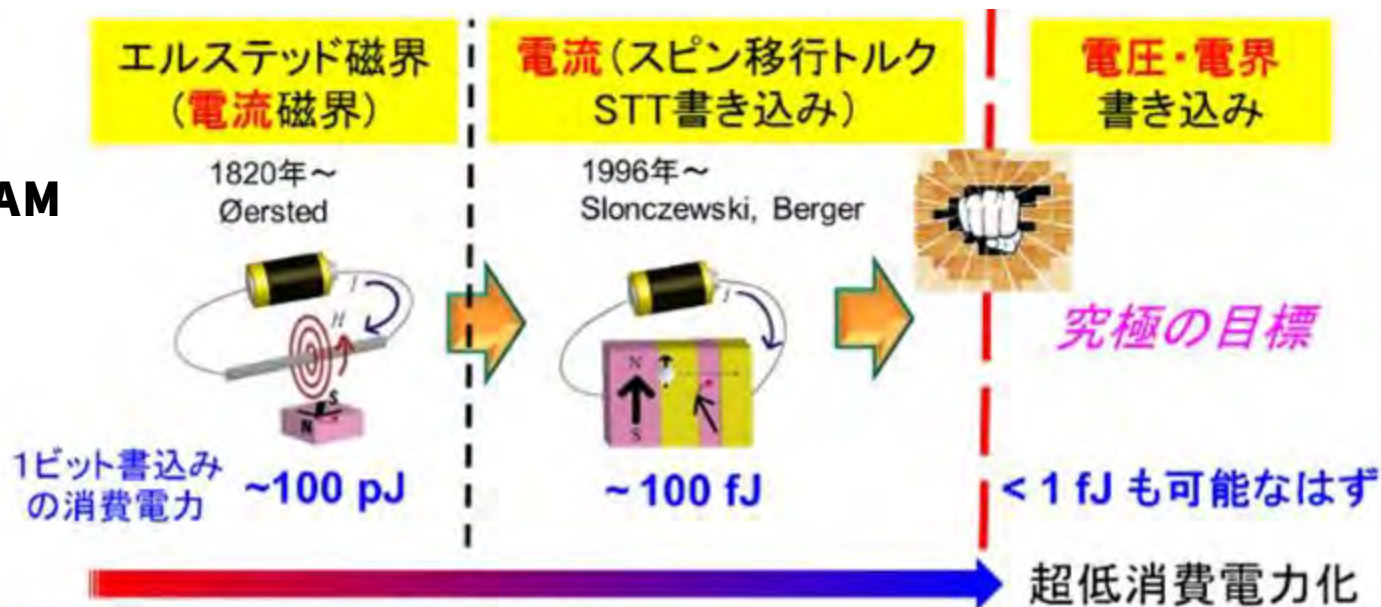
データ量の壁  
実時間対応  
自律適応

エッジコンピュータ  
エッジデバイス  
分散ITシステム

メンテナンスフリーを可能  
とするエッジデバイスの  
超省電力化

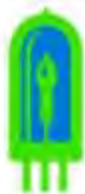
# 電圧書込みが実現されれば1ビット書込みの消費電力が 1fJ以下の高速書込み(200ps)が可能に

## MRAM

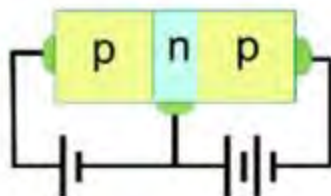


## エレクトロニクス分野との対比

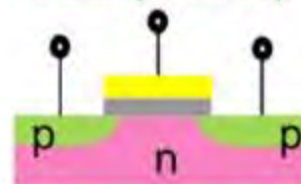
### 真空管



### バイポーラトランジスタ

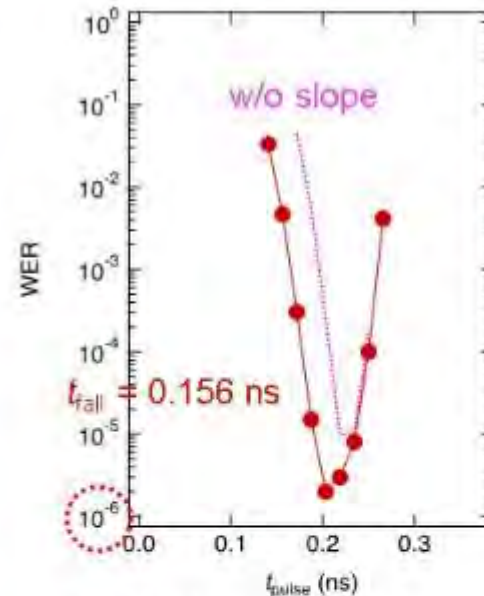
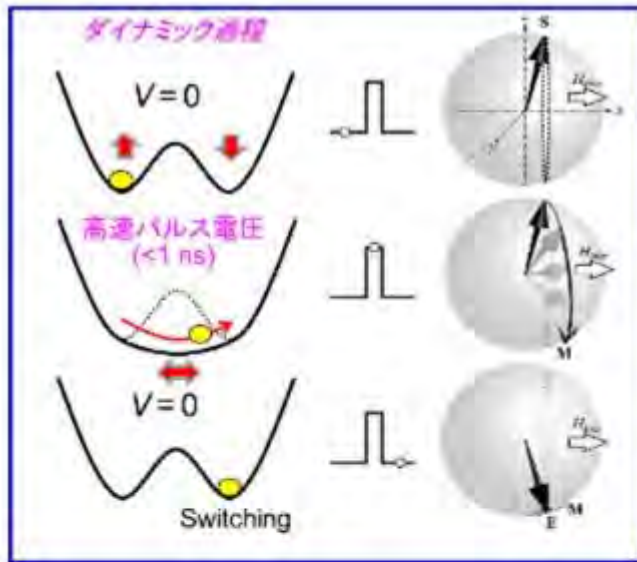


### FET (CMOS)

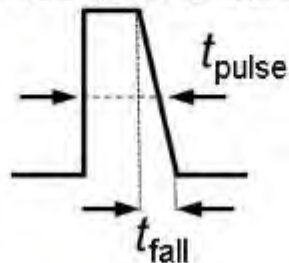




# 電圧パルス形状の工夫による書込みエラー率(WER)の低減



書き込みパルスの立ち下がりをもたらし、  
エラー率が改善することを発見



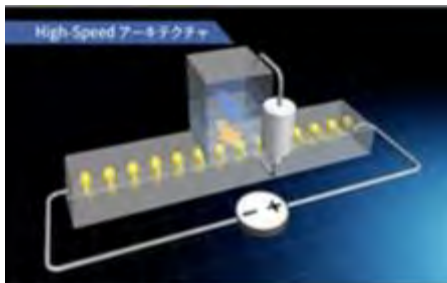
**WER =  $2 \times 10^{-6}$  を達成**

WER =  $1 \times 10^{-5}$

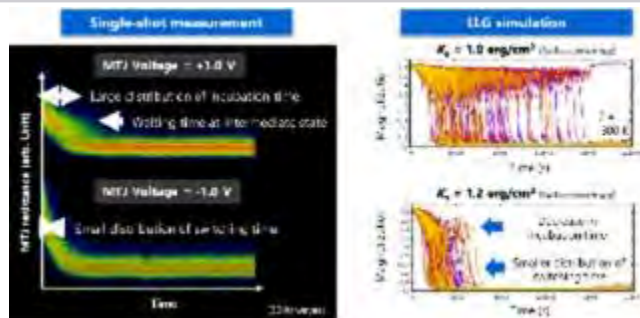
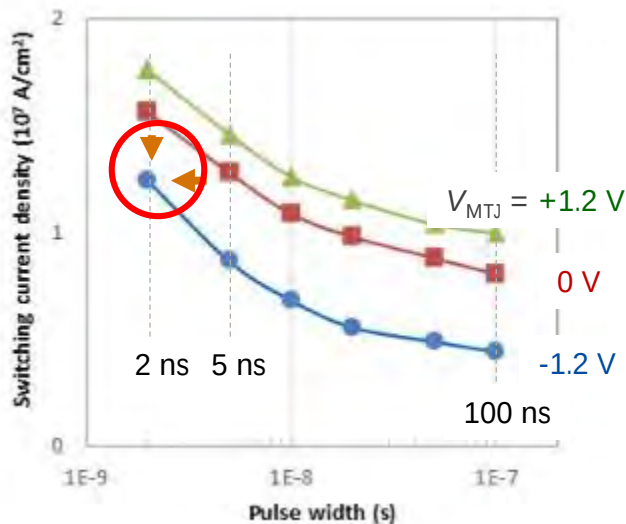
**WER =  $2 \times 10^{-6}$**

1回のエラー訂正により、  
実用に求められる WER  $< 10^{-10}$  が実現可能  
⇒ 10 ns以下の高速書き込みが可能に

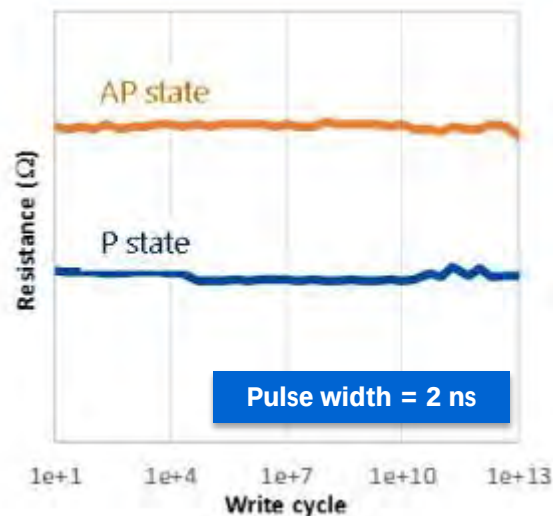
# Advantages of VoCSM



Pulse width dependence



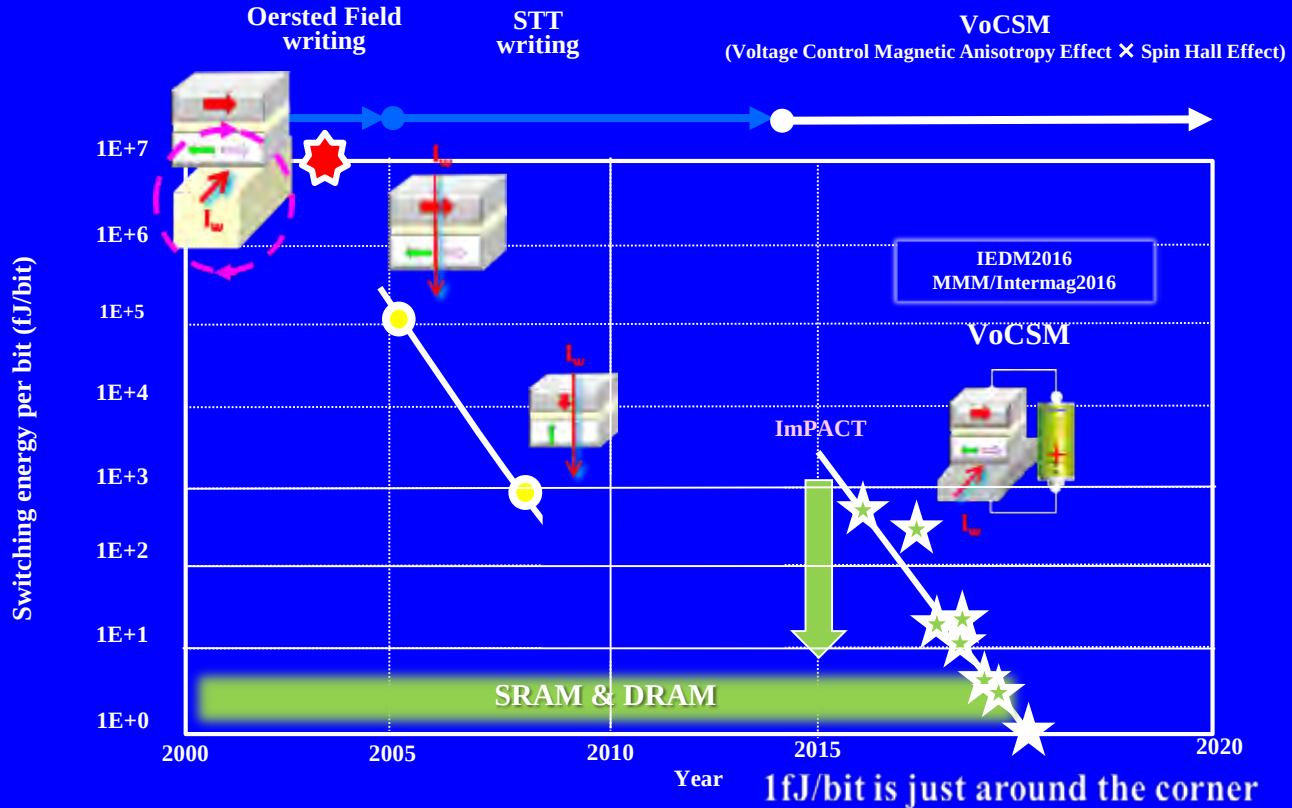
Endurance



VoCSM realizes fast and highly reliable magnetization switching

# Reduction trend of Writing Energy per bit when talking into account the endurance, including new concept memory; VoCSM

-Critical switching energy of 1fJ/bit comparable to DRAM/SRAM is not a dream!! -





# MRAM(磁気メモリ)の技術世代 (既存技術の最新世代まで)

| 世代   | 磁気記録方式 | 書き込み方式                     | 製造技術世代         | 製品の記憶容量       | 名称                         |
|------|--------|----------------------------|----------------|---------------|----------------------------|
| 第1世代 | 面内磁気記録 | 磁界<br>電流                   | 130nm/90nm以上   | 最大<br>16Mbit  | 磁界書き込みMRAM<br>(Field MRAM) |
| 第2世代 | 面内磁気記録 | スピン注入<br>(移行)<br>トルク<br>電流 | 65nm/40nm以上    | 最大<br>256Mbit | iSTT-MRAM                  |
| 第3世代 | 垂直磁気記録 | スピン注入<br>(移行)<br>トルク<br>電流 | 28nm/22nm/16nm | 256Mbit以上     | pSTT-MRAM                  |

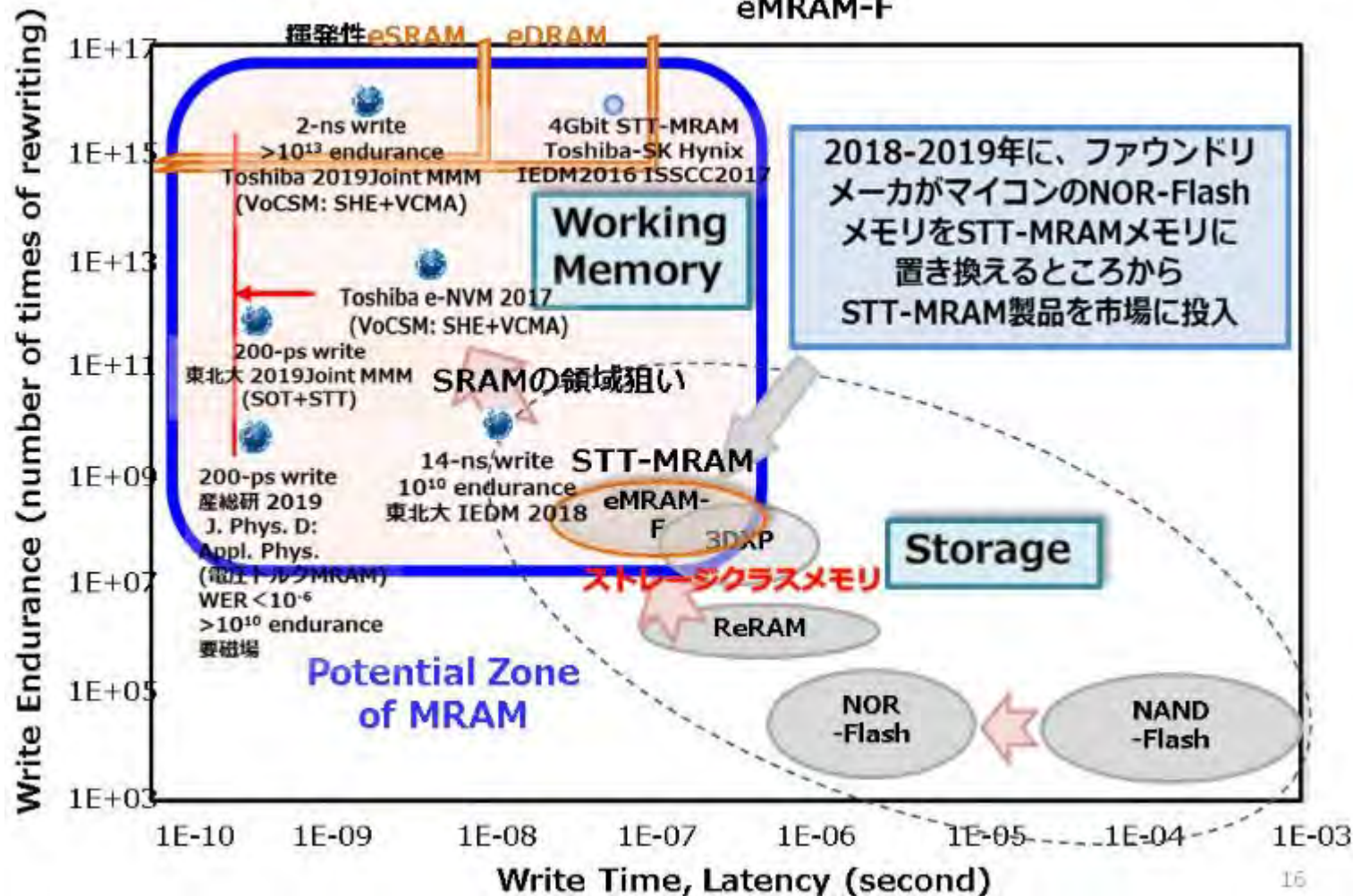


2018 Copyright by Akira Fukuda

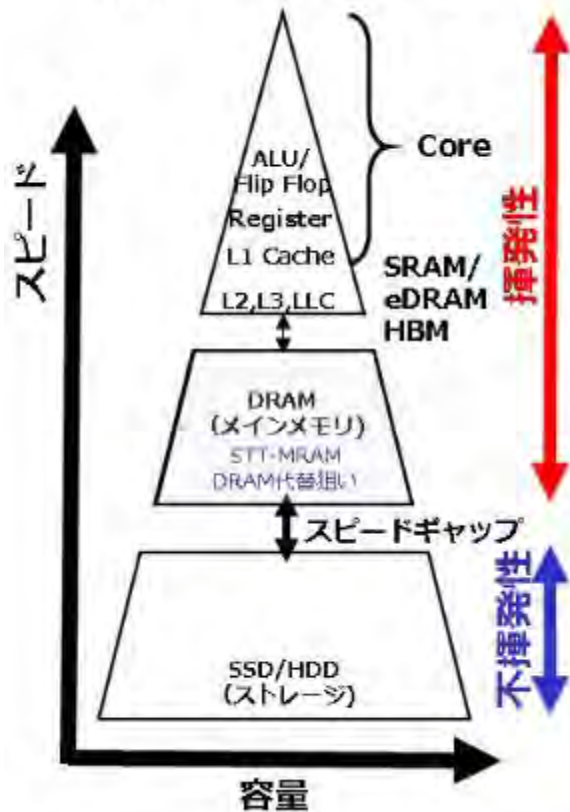
## STT-MRAMと次世代(第4世代):ImPACT開発の新規なSOT-MRAM、VoCSMの比較

|                       | 第3世代pSTT-MRAM<br>(SRAM代替用の改良版)<br>電流 | スピン軌道トルク<br>(SOT)-MRAM<br>電流 | VoCSM<br>(電圧制御)<br>スピントロニクスメモリ  |
|-----------------------|--------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| メモリセルの構成              | 2個のトランジスタと<br>2個のMTJ                 | 2個のトランジスタと<br>1個のMTJ         | 2個のトランジスタと<br>数個~十数個の<br>MTJアレイ |
| メモリセルの大きさ<br>(F2間換算値) | 80F2前後                               | 40F2前後                       | 8F2~4F2                         |
| ビット書き換えの<br>消費エネルギー   | 数百fJ(フェムトジュール)                       | STT-MRAMの20分の1<br>以下         | SOT-MRAMの3分の1<br>程度             |
| データ書き込み時間             | 10ns程度                               | 1ns以下                        | 2ns程度                           |
| データ書き換えの<br>サイクル寿命    | 10の12乗回<br>(SRAMよりも短い)               | 10の15乗回以上<br>(SRAMと同等)       | 10の15乗回以上<br>(SRAMと同等)          |
| 研究開発の進行度              | メモリセルの試作<br>と動作確認                    | 記憶素子の試作<br>と動作確認             | 記憶素子(8個のMTJ<br>アレイ)の試作と動作確認     |

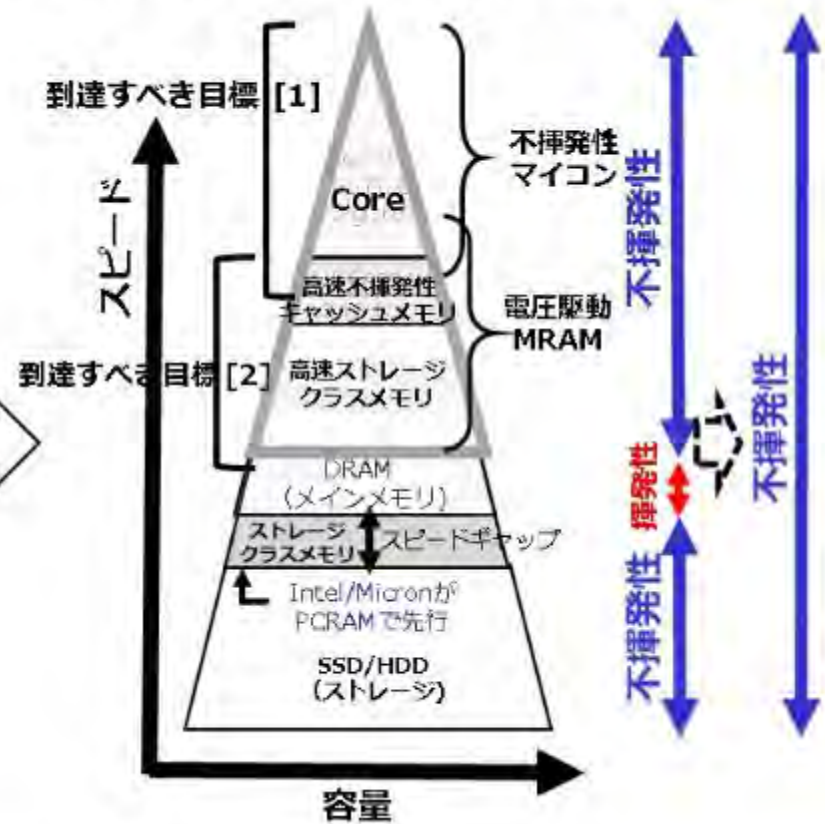
# 不揮発性スピントロニクスメモリ(MRAM)の ポテンシャルゾーン: 混載STT-MRAMの量産近し



## ImPACT前 (現行)



-まずは、エッジ側でのメモリ階層を変革-



**到達すべき目標 [1]** 低電力消費と高速処理性能(高い演算性能)を合わせ持った不揮発性マイコン

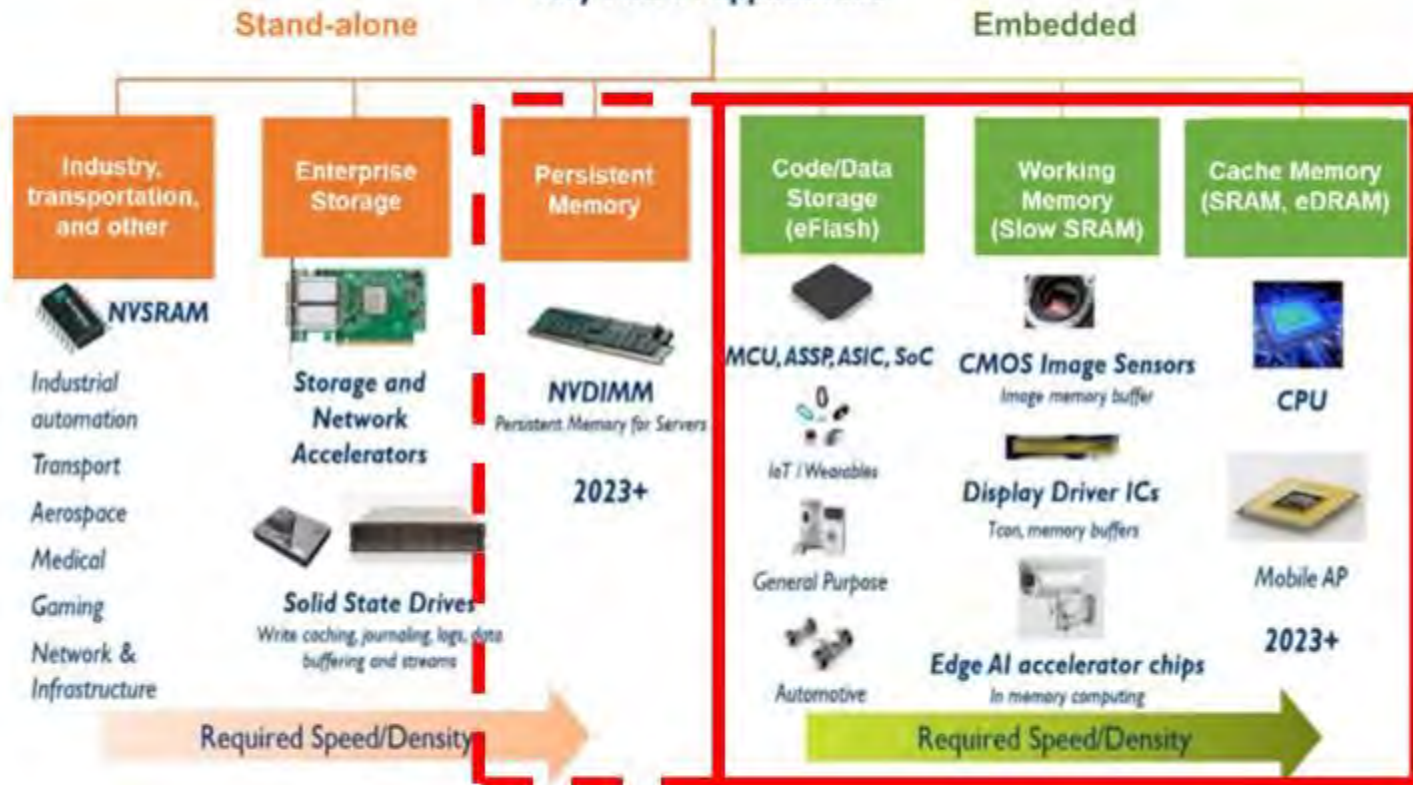
**[2]** 待機電力ゼロに加えて1ビット書込みに必要なエネルギーを究極まで低減可能とする電圧駆動の磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)(キャッシュ/メイン)



本ImPACTによって、Embedded用途のほぼ全域  
をカバー可能なMRAMの開発に道筋が付いた

(Source: MRAM Technology and Business 2019, Yole Development, July 2019)

Key MRAM applications



最近のYoleレポートから引用したMRAMのキーアプリケーション。  
- Stand-alone用途とEmbedded(混載)用途。 -

## MRAM promises life beyond eFlash: the embedded MRAM market is taking off and is expected to reach \$1.2B(1200億円) by 2024.

### Description of three stand-alone and three embedded (STT-)MRAM applications

#### Stand-alone:

industrial, transportation, defense and other applications requiring low-density memory chips  
enterprise storage, including accelerators and SSD caching persistent memory such as NVDIMM

#### Embedded:

code/data storage memory, as an eFlash replacement  
working memory, or "slow" SRAM, for ASSPs/ASICs such as AI edge accelerators  
last-level cache memory, as eDRAM/SRAM replacements, in CPUs and mobile processors

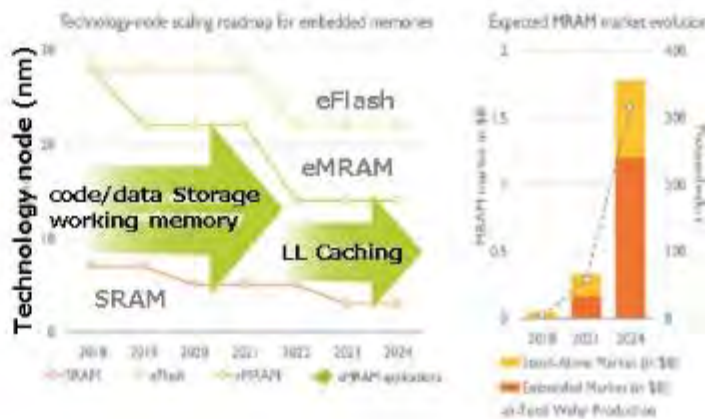
### Evolution of the emerging non-volatile memory market breakdown by technology for stand-alone and embedded memories

(Source: Emerging Non-Volatile Memory 2018 report, iYole Development, November 2018)



### Embedded memory technology trends & MRAM market evolution

(Source: MRAM Technology and Business 2019, iYole Development, August 2019)



## Ø 国の大型プロジェクトに対する所感、提言

### p 【所感と提言】

リスクは大きい、成功・完成の暁には社会に大きなインパクトを与える研究開発に果敢に挑むこと、基礎研究からイノベーションを生み出す取り組みを推奨することを骨子とする今回のImPACTプログラムの趣旨と思い切ったPM制度の導入には大賛成であり、私が確信をもって信念としている「大きな目的を持って取り組む重要な基礎研究は、未だ全体像を描き切れない基礎研究の段階から思い切って研究開発投資を行なう、またそのための研究戦略を可能な限り描き切る」と言った信条と合致していた。ただ、以下の4点で本ImPACTプログラムの試みは中途半端であり、極めて残念に思う。

①中途半端なPM制度の導入 => FIRST的な方が、すっきりしていたのでは！

②中途半端な研究開発期間(短か過ぎる)と研究開発費

=> 10年、100億円規模のプロジェクトがあっても良いのでは！

③国家戦略との関係

=> 取り組むプロジェクトは、きちんと国家戦略と言った位置づけにした方が良い！

④産業界との相互理解 => 産業界も本気で取り組まなければ意味がない！

## Ø ImPACT制度に対して、良かった点、改善点などの提言(教訓)

### p 良かった点

- ・ 何人かの若手研究者が、社会貢献に資する「難しい課題」に果敢に取り組み、大きく成長したこと。
- ・ 有識者レビュー会、PM指揮のもと、一つのテーマを深掘した、徹底的した開発を推進できたこと。

### p 改善点(教訓)

- ・ 最初のシナリオ作成(研究戦略の練り上げ)に、もっと時間をかけるべきであった。



**ご清聴ありがとうございました。**

# Impact Factor 10相当以上の学術論文誌への掲載

NPG Asia Materials IF: 10.118(2014), 9.772(2015), 9.157(2016), 7.208(2017/2018)  
 ACS Applied Materials & Interface IF: 6.723(2014), 7.145(2015), 7.504(2016), 8.097(2017/2018)  
 Physical Review X IF: 9.043(2014), 8.791(2015), 12.789(2016), 14.385(2017/2018)

赤番号 大野分科会/プロジェクト  
 青番号 深渡分科会/プロジェクト  
 緑番号 両分科会以外のプロジェクト

|    | 著者名                                                                                                                                                                                                                                                                       | タイトル                                                                                                                                                  | 投稿先                               | IF     | Vol No pp                       | 掲載日                                    |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------|---------------------------------|----------------------------------------|
| 1  | S. DuttaGupta, S. Fukami, C. Zhang, H. Sato, M. Yamanouchi, F. Matsukura, and H. Ohno                                                                                                                                                                                     | Adiabatic spin transfer torque induced domain wall creep in a magnetic metal                                                                          | Nature Physics                    | 16.791 | 12, pages 333–336 (2016)        | 2015/12/14                             |
| 2  | S. Fukami, C. Zhang, S. DuttaGupta, A. Kurenkov, and H. Ohno                                                                                                                                                                                                              | Magnetization switching by spin-orbit torque in an antiferromagnet/ferromagnet bilayer system                                                         | Nature Materials                  | 38.891 | 15, pages 535–541 (2016)        | 2016/02/15                             |
| 3  | Z. Wang, M. Saito, K. P. McKenna, S. Fukami, H. Sato, S. Ikeda, H. Ohno, and Y. Ikuhara                                                                                                                                                                                   | Atomic-Scale Structure and Local Chemistry of CoFeB–MgO Magnetic Tunnel Junctions                                                                     | Nano Letters                      | 13.779 | 11, pages 621–625 (2016)        | 2016/02/23                             |
| 4  | S. Fukami, T. Anekawa, C. Zhang, and H. Ohno                                                                                                                                                                                                                              | A Spin-orbit torque switching scheme with collinear magnetic easy axis and current configuration                                                      | Nature Nanotech.                  | 35.267 | 11, pages 621–625 (2016)        | 2016/03/21                             |
| 5  | S. Miwa, M. Suzuki, M. Tsujikawa, K. Matsuda, T. Nozaki, K. Tanaka, T. Tsukahara, K. Nawaoka, M. Goto, Y. Kotani, T. Ohkubo, F. Bonell, E. Tamura, K. Hono, T. Nakamura, M. Shirai, S. Yuasa, and Y. Suzuki                                                               | Voltage controlled interfacial magnetism through platinum orbits                                                                                      | Nature Commun.                    | 12.124 | 8, Article number: 15848 (2017) | 23 June 2017                           |
| 6  | S. Miwa, J. Fujimoto, P. Risius, K. Nawaoka, M. Goto, and Y. Suzuki                                                                                                                                                                                                       | Strong bias effect on voltage-driven torque at epitaxial Fe MgO interface                                                                             | Physical Review X                 | 14.385 | 7, 031018, 2017                 | 2017/07/26                             |
| 7  | Takayuki Nozaki, Anna Koziol-Rachwał, Masahito Tsujikawa, Yoichi Shiota, Xiandong Xu, Takakatsu Ohkubo, Takuya Tsukahara, Shinji Miwa, Motohiro Suzuki, Shingo Tamaru, Hitoshi Kubota, Akio Fukushima, Kazuhiro Hono, Masafumi Shirai, Yoshishige Suzuki and Shinji Yuasa | Highly efficient voltage control of spin and enhanced interfacial perpendicular magnetic anisotropy in iridium-doped Fe/MgO magnetic tunnel junctions | NPG Asia Materials                | 7.208  | Vol. 9, e451 December 5, 2017   | 2017/12/5                              |
| 8  | K. Watanabe, B. Jinnal, S. Fukami, H. Sato, and H. Ohno                                                                                                                                                                                                                   | Shape anisotropy revisited in single-digit nanometer magnetic tunnel junctions                                                                        | Nature Commun.                    | 12.124 | Vol. 9, 663, February 14, 2018  | 2018/02/14                             |
| 9  | Kazuya Z. Suzuki, Shojiro Kimura, Hitoshi Kubota, and Shigemi Mizukami                                                                                                                                                                                                    | Magnetic tunnel junctions with a nearly zero moment manganese nanolayer with perpendicular magnetic anisotropy                                        | ACS Applied Materials & Interface | 8.097  | 10 (30), pp 43305–43310, 2018   | 2018/12/6                              |
| 10 | Minori Goto, Yosuke Wakatake, Ugwumsinachi Kalu Oji, Shinji Miwa, Nikita Strelkov, Bernard Dieny, Hitoshi Kubota, Kay Yakushiji, Akio Fukushima, Shinji Yuasa and Yoshishige Suzuki                                                                                       | Microwave amplification in a magnetic tunnel junction induced by heat-to-spin conversion at the nano-scale                                            | Nature Nanotech                   | 35.267 | DOI: 10.1038/s41563-018-0306-9  | 2018/11/26 (英国時間)<br>オンライン掲載日 2019/1/4 |
| 11 | Q. N. Meier, M. Fechner, T. Nozaki, M. Sahashi, Z. Salman, T. Prokscha, A. Suter, P. Schoenher, M. Lilienblum, P. Borisov, I. E. Dzyaloshinskii, M. Freibig, H. Luetkens, and N. A. Spaldin                                                                               | Search for the magnetic monopole at a magnetoelectric surface                                                                                         | Physical Review X                 | 14.385 | 9, 011011 (2019)                | 2019/01/18                             |

# 佐橋プログラム プレスリリース一覧 内閣府、JSTとの共同発表

|            |                    |                                                                                     |
|------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 2015.12.10 | 産総研                | 電圧書き込み方式不揮発性メモリーの安定動作の実証と書き込みエラー率評価                                                 |
| 2016.02.16 | 東北大学               | 反強磁性体の新しい物理と応用を開拓～スピン・軌道相互作用を用いた磁化の制御に成功～                                           |
| 2016.03.22 | 東北大学               | 新構造磁気メモリ素子を開発～スピン軌道トルク磁化反転の第3の方式の動作を実証～                                             |
| 2016.07.26 | 東北大学、東京大学、京都工業繊維大学 | マンガン系合金ナノ薄膜を用いたMRAM記憶素子の開発に成功 ～大容量の不揮発性磁気抵抗メモリ(MRAM)の開発に寄与～                         |
| 2016.09.20 | 産総研                | 世界最高性能の半導体系トンネル磁気抵抗素子を開発 一待機電力ゼロのトランジスタ実現へ道を拓く～                                     |
| 2016.12.04 | 東芝、産総研             | 不揮発性磁気メモリのための新たな電圧駆動書き込み方式を開発 ～超低消費電力・高速メモリ「電圧トルクMRAM」の実現に道筋～                       |
| 2016.12.04 | 東芝                 | 電圧制御磁化反転を使った不揮発性磁気メモリに新たな書き込み方式を提案 ～究極の省電力・大容量メモリの実現を目指して、書き込み確率の大幅改善を実証～           |
| 2017.2.28  | 産総研                | 不揮発性磁気メモリ—MRAMのための高性能参照層を開発 ～大容量MRAMの開発を加速～                                         |
| 2017.5.16  | 産総研                | 不揮発性磁気メモリ—MRAMの3次元積層プロセスを開発～新世代半結晶MRAM製造の可能性～                                       |
| 2017.6.1   | 東北大学               | 反強磁性体スピンの反転に必要な電圧を大幅低減 ～交換結合ヘテロ構造電圧書き込み磁気記録デバイスに道筋～                                 |
| 2017.6.23  | 大阪大学、東北大学、産総研      | 原子の影を映えて超省エネ磁気メモリ ～大型放射光施設SPring-8で電圧磁気効果の新原理解明～                                    |
| 2017.7.12  | 産総研                | 電圧書き込み方式不揮発性メモリーの書き込みエラー率を飛躍的に低減 ～超低消費電力な電圧書き込み型MRAMの開発を加速～                         |
| 2017.12.1  | 産総研                | 高効率な電圧スピン制御を実現する新材料を開発 ～超省電力な電圧トルクMRAMの実用化に前進～                                      |
| 2018.2.14  | 東北大学               | 磁気トンネル接合素子、未踏の一桁ナノメートル領域で動作実現 ～超大容量・低消費電力・高性能不揮発性メモリの実現に道筋～                         |
| 2018.10.12 | 東北大学、高輝度光科学研究センター  | クロム酸化物反強磁性体薄膜の微弱磁化を自在に制御する技術を開発 ～従来不可能だった数ナノメートル厚の反強磁性スピンの電圧反転も視野に～                 |
| 2018.12.3  | 大阪大学、産総研           | 熱による高速・高効率な磁気制御 ～MRAMとAIハードウェアの低消費電力化の実現へ向けて～                                       |
| 2018.12.7  | 東北大学               | 磁気のない金属からナノ薄膜磁石を作ること成功 ～超高集積不揮発性磁気メモリ—を実現するための材料開発に新しい視点～                           |
| 2019.2.19  | 東北大学               | スピントロニクス集積回路技術を用いて、高性能(動作周波数 200MHz)と超低消費電力(平均電力 50 $\mu$ W以下)を両立する不揮発マイコンを世界で初めて実証 |



# 特許出願件数

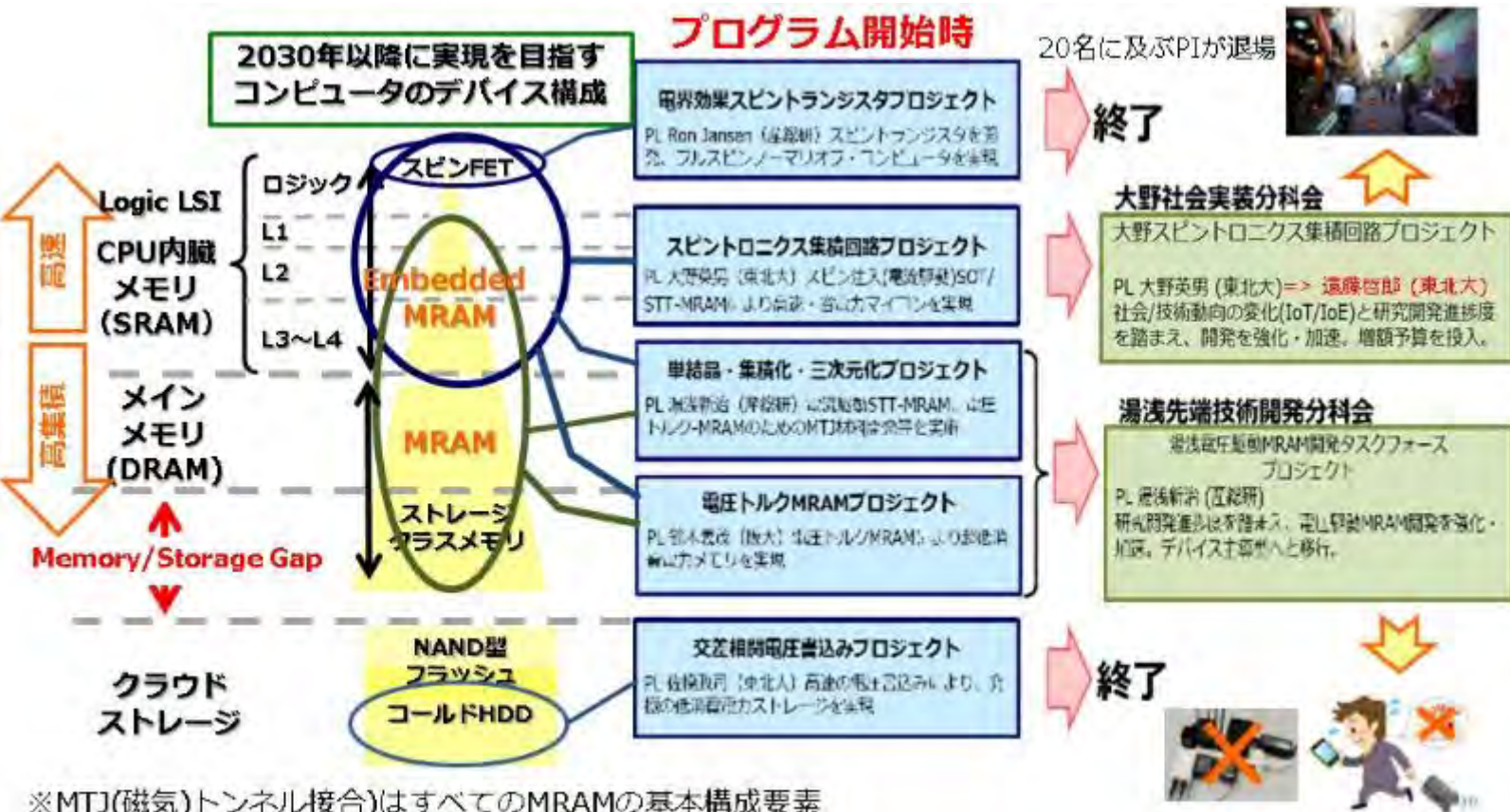
| 特許出願<br>件数 | 目標値   | 26年度 | 27年度 | 28年度 | 29年度 | 30年度 | 31年度 |
|------------|-------|------|------|------|------|------|------|
| 国内         | —     | 2    | 20   | 38   | 35   | 19   | —    |
| 海外         | —     | 1    | 2    | 33   | 35   | 21   | 10   |
| 合計         | 100以上 | 3    | 22   | 71   | 70   | 40   | 10   |

**US特許登録を中心に、海外特許登録件数は、50件**

# 研究開発プロジェクト体制 (プログラム開始時と平成28年度以降の見直し後)

研究開発フェーズおよびその研究開発成果と市場洞察を踏まえ、

**いち早く社会実装に近づけるため、ステージゲートを一年前倒してプロジェクトを統廃合**



**社会を変える情報インフラ機器の革新に注力**

(研究開発フェーズおよびその成果と市場洞察を踏まえて)

世界に先駆け、200MHzで50 $\mu$ W以下の高性能・低消費電力スピントロニクス不揮発マイコンを実証  
2019年2月19日 11:00 | プレスリリース

## ISSCCに採択



SESSION 12

Tuesday February 19<sup>th</sup>, 8:30 AM

### Emerging Technologies

Session Chair: *Wim Dehaene*, Kuleuven-MICAS, Leuven, Belgium

Associate Chair: *Sriram Vangal*, Intel, Hillsboro, OR

8:30 AM

#### 12.1 An FPGA-Accelerated Fully Nonvolatile Microcontroller Unit for Sensor-Node Applications in 40nm CMOS/MTJ-Hybrid Technology Achieving 47.14 $\mu$ W Operation at 200MHz

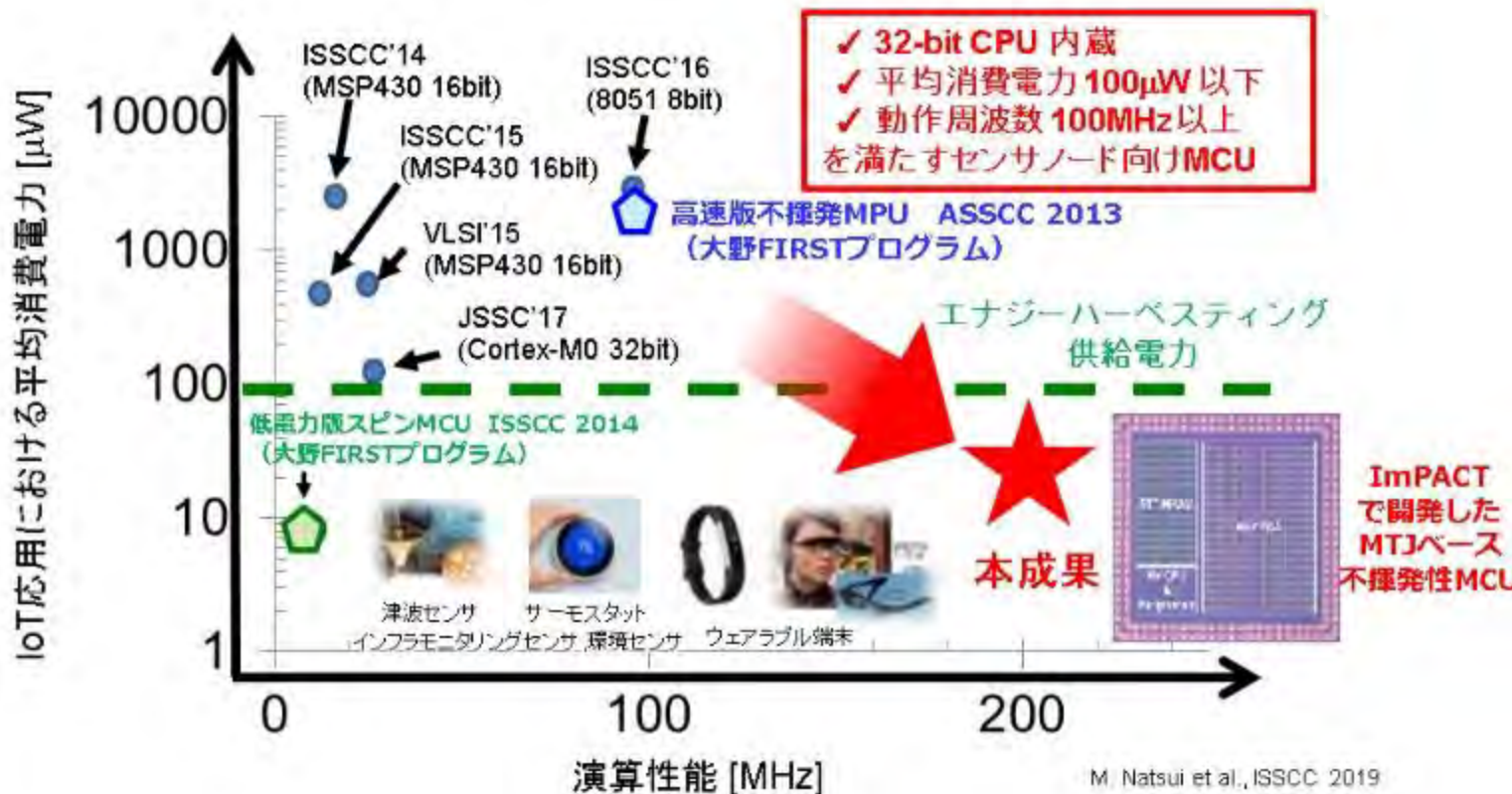
*M. Natsui<sup>1</sup>, D. Suzuki<sup>1</sup>, A. Tamakoshi<sup>1</sup>, T. Watanabe<sup>1,2</sup>, H. Honjo<sup>1,2</sup>, H. Koike<sup>1,2</sup>, T. Nasuno<sup>1,2</sup>, Y. Ma<sup>1</sup>, T. Tanigawa<sup>1,2</sup>, Y. Noguchi<sup>1,2</sup>, M. Yasuhira<sup>1,2</sup>, H. Sato<sup>1</sup>, S. Ikeda<sup>1,2</sup>, H. Ohno<sup>1</sup>, T. Endoh<sup>1,2</sup>, T. Hanyu<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Tohoku University, Miyagi, Japan

<sup>2</sup>JST/ACCEL, Tokyo, Japan

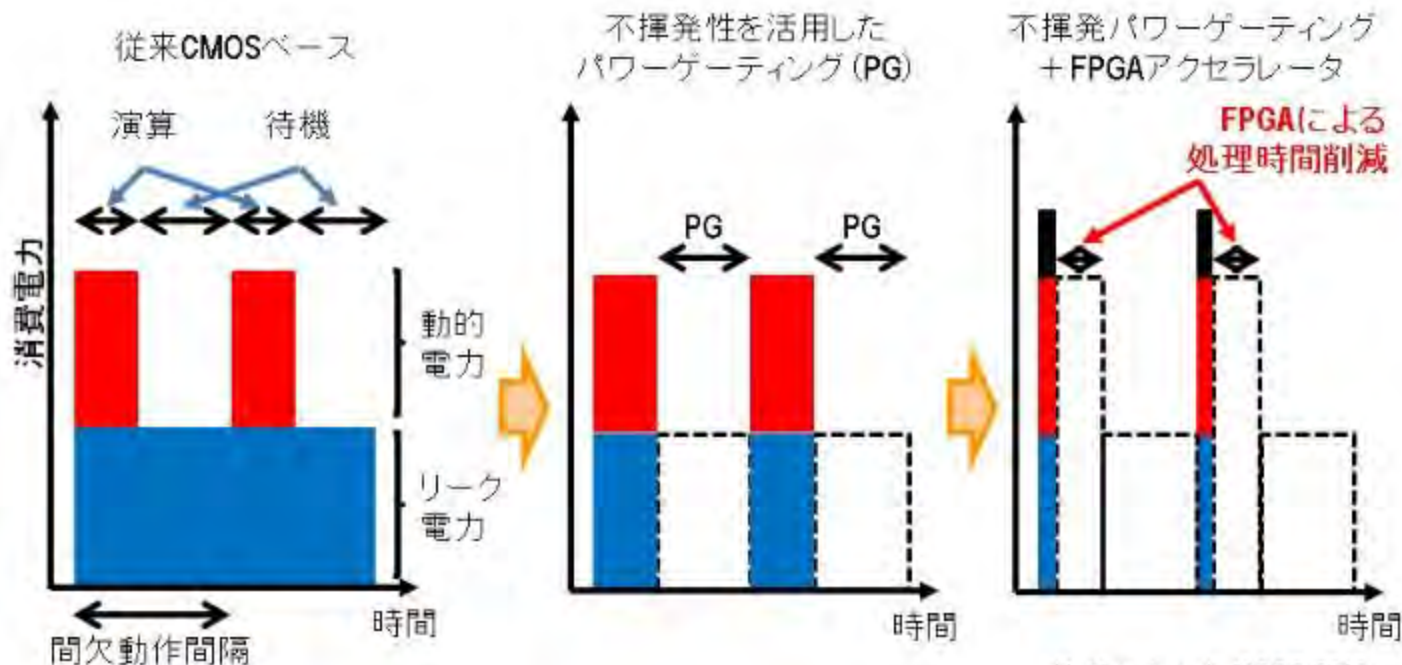


# 開発した不揮発マイコンチップの位置づけ



世界に先駆けて200MHzにおいて50 $\mu\text{W}$ 以下での動作を実証し、これまでのシリコンテクノロジーが抱えていた演算性能と低消費電力のトレードオフを2桁以上のインパクトで解決

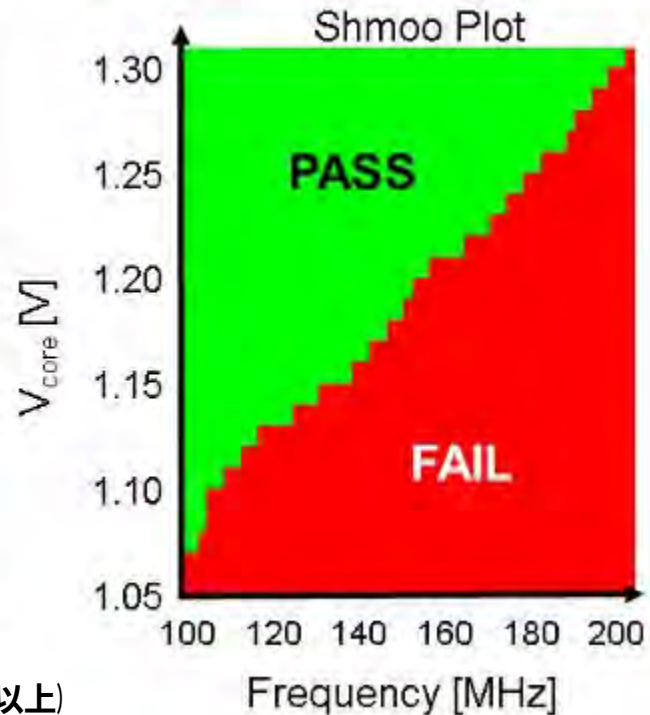
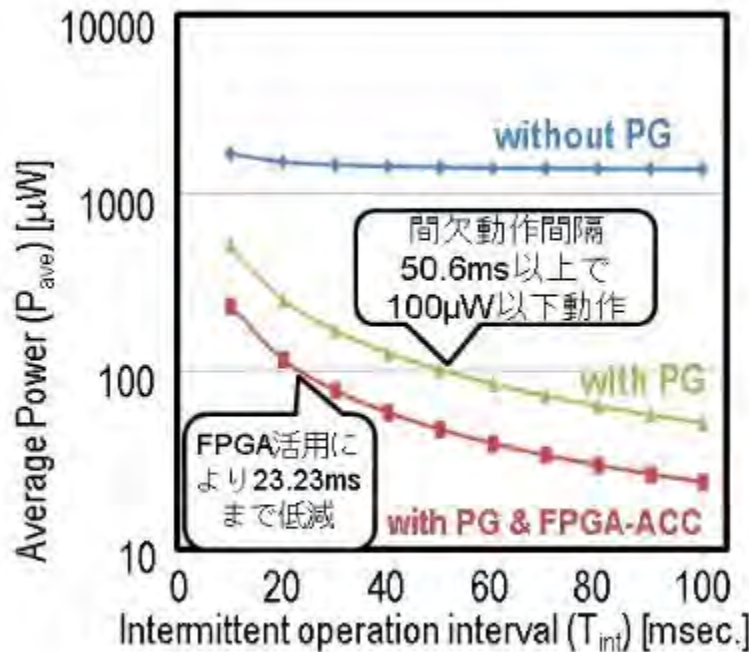
# 開発MTJベース不揮発性マイコンのデザインコンセプト



M. Natsui et al., ISSCC 2019.

- ① 全モジュールの**完全不揮発化**により非稼働部の無駄な電力 (リーク電力) を徹底削減
- ② CPUによる逐次処理を**FPGAによる並列処理**に置き換えることにより計算効率・エネルギー効率を向上

# 目標の電力消費100 $\mu$ Wを大きく下回る50 $\mu$ W以下での200MHz演算動作を実証



- 平均電力消費100 $\mu$ W以下 (間欠動作間隔23.23ms以上) による動作を確認。間欠動作間隔50msで47.14 $\mu$ W。
- IoT用途としては頻繁に動作する50msec毎に動作させた場合、 $10^{10}$ 回以上の書換耐性を有しているので、稼働可能期間は10年以上となり、書換回数無限大を少なくとも研究開発フェーズとしては達成。

動作周波数100MHz以上  
(100MHz@1.1V, 200MHz@1.3V)  
による動作を確認。

M. Natsui et al., ISSCC 2019.



**VoCSMが持つ特徴：2ナノ秒の高速磁化反転と実質無限回の書換え耐性  
(高い信頼性)の両立をアピール、かつ低消費電力 —MRAMとしては世界初—**

2019 Joint MMM-Intermag Conference

ISSI-18

**Real-Time Observation of  
Fast and Highly Reliable  
Magnetization Switching  
in Voltage-Control Spintronics Memory (VoCSM)**

T. Imakubo, H. Yoda, K. Ito, N. Minemura, Y. Ohtsuka, Y. Sato, S. Masuda, M. Maruyama,  
H. Sugiyama, Y. Okawa, R. Yamaguchi, and A. Kurobe

2019.01.18  
Corporate R&D Center, Toshiba Corporation

This work was partly supported by the JSPS/T-Prize of the Special AP Science, Technology,  
and Innovation (Catalyst Office) Grant-in-Aid of JSPS

**TOSHIBA**



2019 Joint MMM-Intermag  
Conference, Washington D.C.  
に採択され、口頭発表

出口展開

**Startup Ventureも視野**に入れた  
Global Open Innovation Strategy

**VoCSMを使った新規な高速不揮発ロギングメモリの性能と  
そのIoTからクラウドまでの応用展開をアピール**

**TOSHIBA**



**Novel High-Speed Nonvolatile  
Logging Memory using  
Voltage Control Spintronics Memory for  
IoT Edge to Cloud Servers**

Seiji Takiya, Kazutaka Inagami, Susumu Taketa, Shinobu Nishio,  
Tomonori Inokuchi, Naoharu Shimomura, Hiroaki Yoda, and  
Atsushi Kurobe

Toshiba Corporation

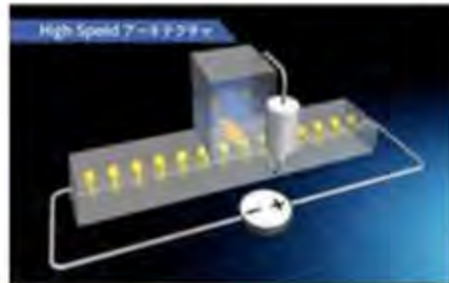
出口展開

事業領域とのマッチング重視  
Closed Strategy

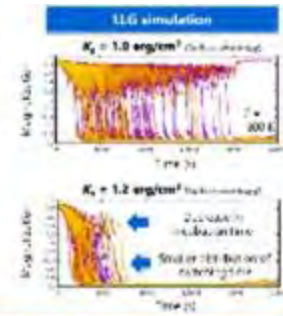
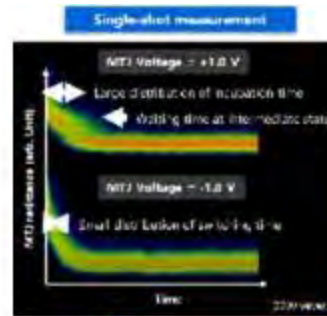
**実用化開発に向けてのKPI：  
電圧効果の更なる向上(>1000fJ/Vm)**



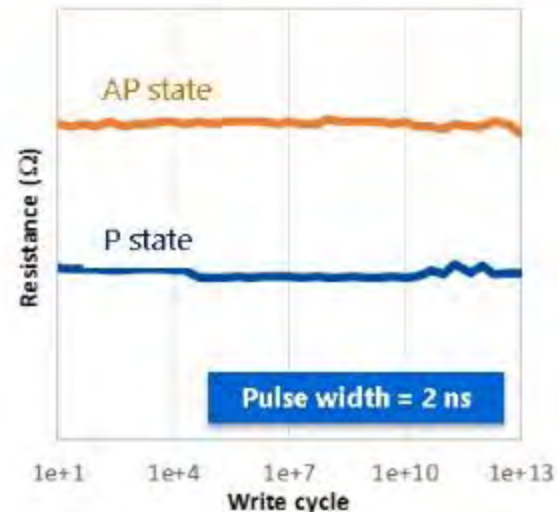
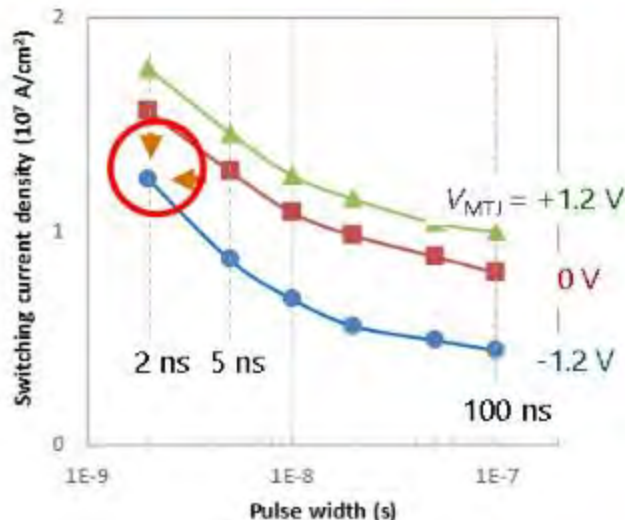
# Advantages of VoCSM



Pulse width dependence

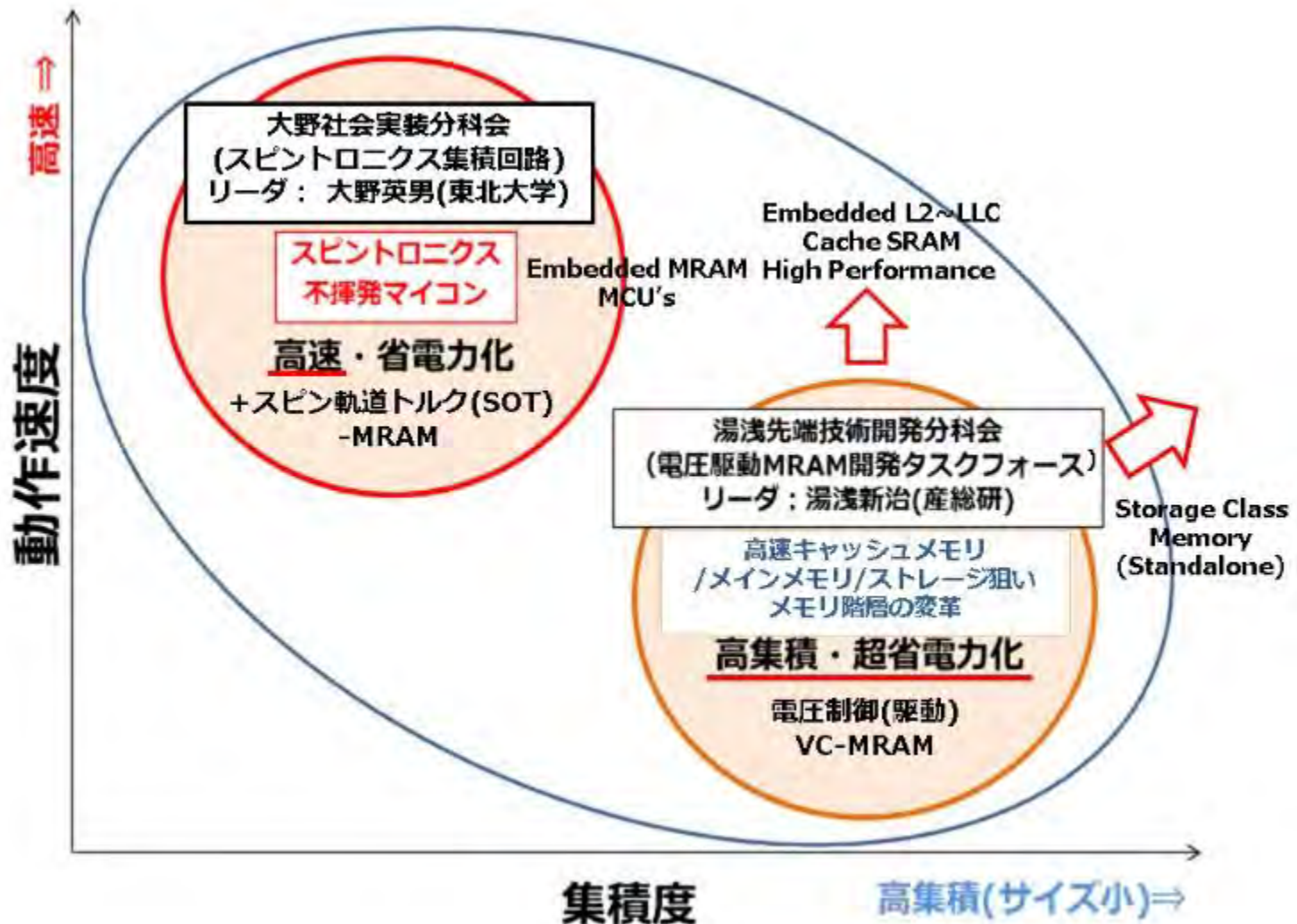


Endurance



VoCSM realizes fast and highly reliable magnetization switching

# ImPACT佐橋プログラムの研究開発戦略





# 出口目標とImPACT期間終了時の達成目標と見直し

平成29年2月16日 内閣府革新的研究開発推進プログラム有識者会議資料

| プログラム承認時                                                                                                            | 平成28年度以降                                                                                                                                                    | 変更理由                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| ü メモリ事業やマイコン事業など五つの各プロジェクトが指向するマーケットで、先導的かつ圧倒的差別化技術の創生により市場を席卷し、生活様式を一変し得る起爆剤的研究開発成果を創出、その組み合わせで究極のエコIT機器実現への道筋をつける | <div>ü 世界初の省電力マイコンを目指して、300mmウエハ試作による「1nsを切る高速動作スピン軌道トルク(SOT)-MRAMの機能実証」とその不揮発性マイコンへの展開</div> <div>ü 選択的雙方向制御を含む電圧駆動MRAM集積回路設計開発の完了とそのメモリ/ストレージへの応用展開</div> | ü 市場動向、技術開発動向の洞察に基づき、出口目標を省電力不揮発マイコンと不揮発メモリ/ストレージ産業分野に絞り込み、リソースを重点特化。 |

## ○大野社会実装分科会・スピントロニクス集積回路プロジェクト

情報の高速書込み/読出しが可能な**独自構造の電流駆動MRAM(SOT-MRAM)**を、LSI内部メモリに適用：**200MHz演算性能の不揮発性マイコンの実現**に向け、**Embedded STT-MRAMマイコン(100MHz)**と**SOT-MRAMの機能実証**を行う。**Embedded SOT/STT MRAMマイコンの200MHz演算性能実証はシミュレーションにてデモを行う。**

## ○湯浅先端技術開発分科会・電圧駆動MRAM開発タスクフォースプロジェクト

**新たに書込み速度とEndurance(書換え耐性)の両立を研究開発軸に加え、低消費電力高速・大容量AIメモリ**などの実現と**SRAM代替**、ストレージクラスメモリへの応用展開を目指し、**独自の電圧駆動MRAM技術である磁化ダイナミクス制御電圧駆動MRAMとImPACT発新概念メモリであるVoCSM\***の基礎技術を確立：**バラつきを考慮したデバイス回路設計をもとにGbクラスMRAMメモリ全トランジスタ回路設計(コア20nm,周辺28nm設計ルール)を行ない、機能実証デモ等インパクトのある成果を発信**

\*VoCSM: Voltage Control Spintronics Memory (二つのスピントロニクス物理、VCMAとSHEを利用)

ImPACT発の新概念メモリ＆ロジックの応用開発と社会実装展開

- Feature of VoCSM
  - ① Ultra Low Power Writing
  - ② Rewriting of the infinite number of times
  - ③ Good WER

&lt;STT-MRAM0110

>1E+15

 $1E-8$ 

High Speed

**High Speed** — Two types of Architecture — **High Density**

Hint: Density

### High Speed Writing

Realization of low-power wiring, even in a short voltage-pulse-width (a few ns)

A diagram of a balanced seesaw. A horizontal beam is supported by a central pivot point. On the left side, a weight labeled '20' is placed at a distance of '2' units from the pivot. On the right side, a weight labeled '10' is placed at a distance of '4' units from the pivot. The beam is horizontal, indicating it is in equilibrium.

### Selective Writing by Voltage Application

AI/DL Chip  
Embedded HBW Memory

(c)SRAM  
Replacement in MCU

L2, L3  
Cache Memory

### In Memory Computing

**ImPACT<sup>®</sup>**  
**Startup Venture**  
Spin Orbitronics Technologies, Inc.

9F<sup>2</sup> STT-MRAM  
Toshiba-SKHynixJD  
=>Kioxia

Gb Class Logging Memory (SCM-M) => **SCM-S**

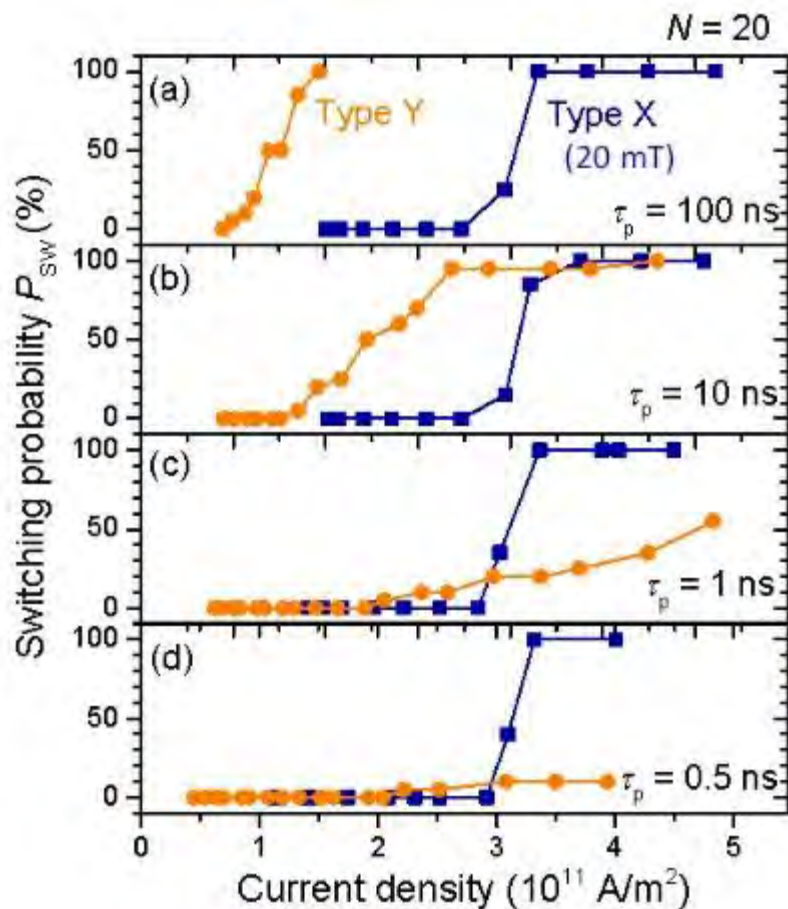
$6F^2 \text{ VoCSM} \Rightarrow 4F^2 \Rightarrow 2.5F^2$  Replacement of DRAN

## 高密度版VoCSM

東芝メモリ株式会社の事業領域とマッチング (Closed)

# Pulse width dependence of magnetization reversal threshold current density

S. Fukami *et al.*, Symp. VLSI Tech, T06-05 (2016).



**新方式 (Type X) は  
超高速動作に有望！**

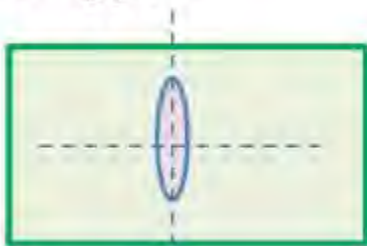
From Ohno/Fukami Lab., RIEC, Tohoku University

Source: S. Fukami *et al.*, IEEE Symposium on VLSI Technology 2016, T06-05 (2016) DOI:10.1109/vlsit.2016.7573379



# Pulse width dependence

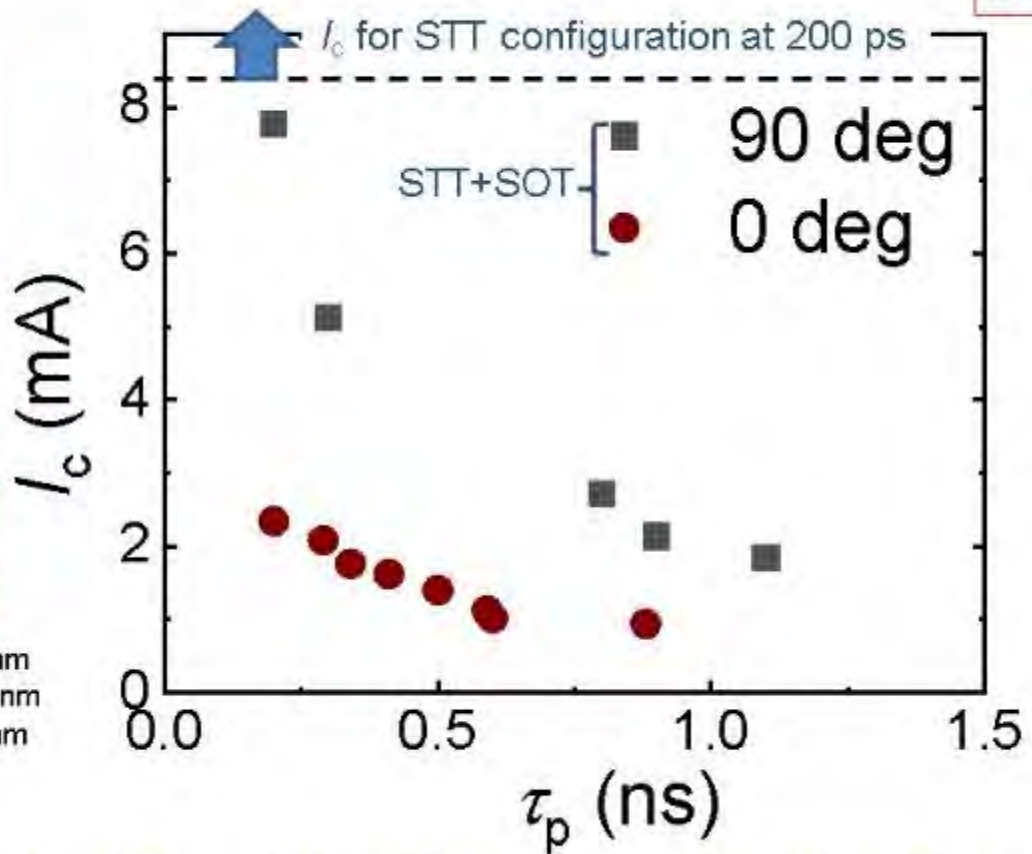
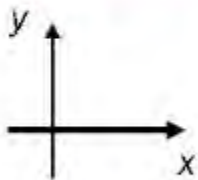
## ➤ Type Y



## ➤ Type X



$W_{CH} = 560 \text{ nm}$   
 $W_{MTJ} = 100 \text{ nm}$   
 $L_{MTJ} = 400 \text{ nm}$



At  $\tau_p = 200 \text{ ps}$ ,  $I_c$  of Type X is 1/4-times smaller than Type Y

## Key partnerships\* within the embedded MRAM ecosystems

(Source: MRAM Technology and Business 2019, Yole Développement, August 2019)

| Foundry /<br>IDM                      |  |  |  |                          |  | To be<br>announced |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| (STT-) MRAM<br>players                |  |  |  | <br>Avalanche Technology |  | Partnership        |
| Technology<br>process                 | CMOS bulk<br>22nm<br>planar<br>(sampling)                                         | FD-SOI<br>22nm<br>planar<br>(sampling)                                            | FD-SOI<br>28nm<br>planar<br>(in mass<br>production)                               | CMOS bulk<br>28/22nm<br>planar<br>(in<br>development)                                                      | CMOS<br>22nm<br>FinFET<br>(sampling)                                                | 28/22nm            |
| Expected<br>short-term<br>application | "Slow"<br>SRAM                                                                    | eFlash                                                                            | "Slow"<br>SRAM                                                                    | eFlash<br>"Slow"<br>SRAM                                                                                   | eFlash<br>"Slow"<br>SRAM                                                            | "Slow"<br>SRAM     |

\*Non-exhaustive list of companies