

資料1-2
科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会
第10期ナノテクノロジー・材料科学技術委員会
(第4回)

2019.09.19

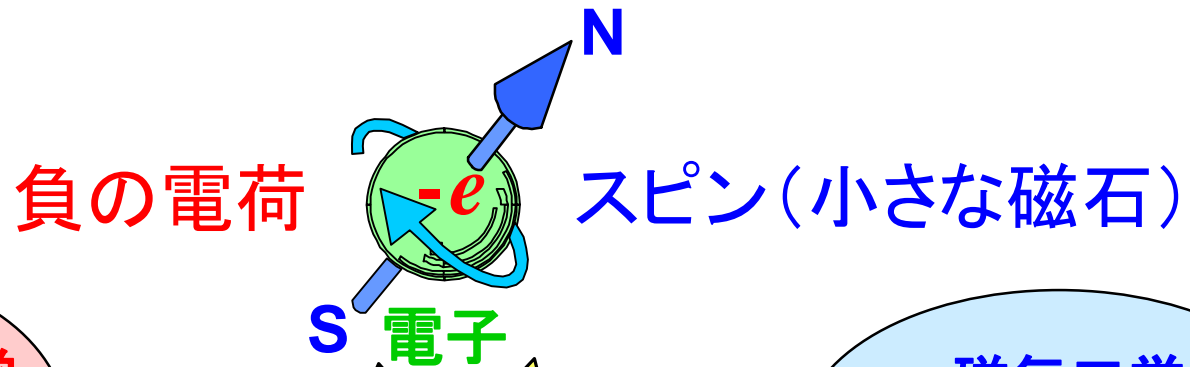
磁気トンネル接合 (MTJ) の開発と実用化



国立研究開発法人
産業技術総合研究所

スピントロニクス研究センター

研究センター長 湯浅 新治



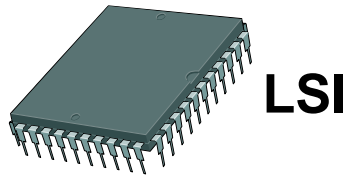
半導体工学

- ・トランジスタ
- ・レーザー

磁気工学

- ・磁気記録
- ・永久磁石

**磁気抵抗効果
& スピントルク**

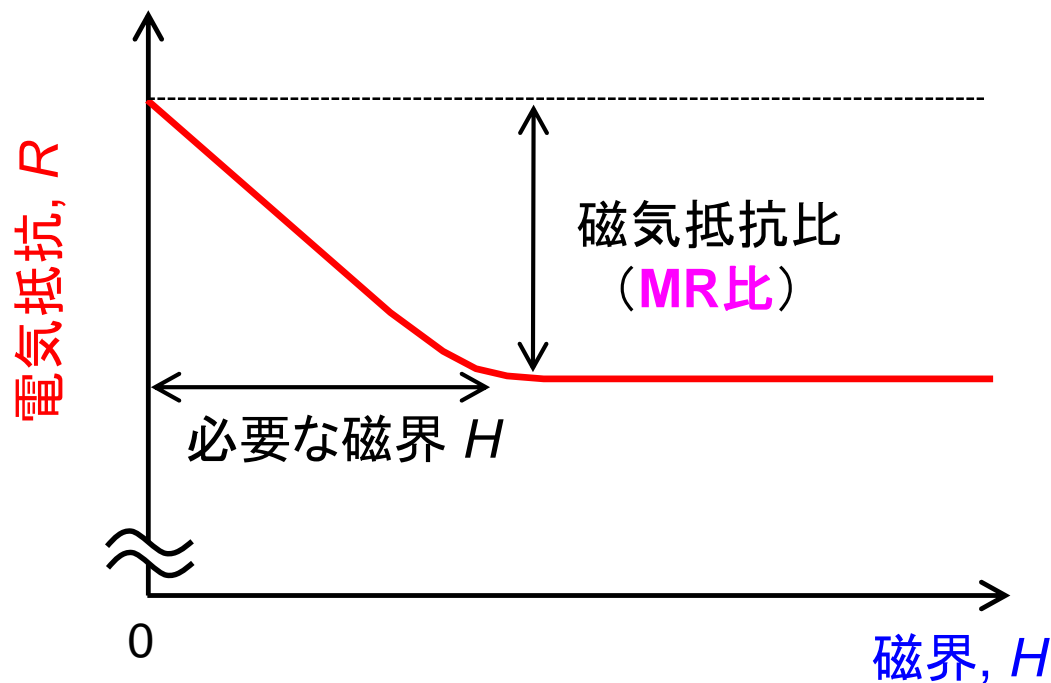


増幅・演算機能
ただし揮発性

不揮発記憶機能

スピントロニクス
電荷とスピンを量子力学的に
結合して新機能を創出

磁界の印加によって、固体・素子の電気抵抗が変化する現象



磁気抵抗効果を用いれば、磁気情報を電気情報に変換できる

(スピントルクを用いれば、電気情報を磁気情報に変換できる)

室温・低磁界 (~mT) における MR比 が応用上重要

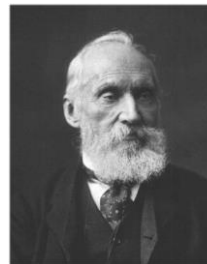
磁気抵抗効果の発見
MR比 (室温・低磁界)

西暦

1857

AMR効果
1-2%

Kelvin 卿 (英)



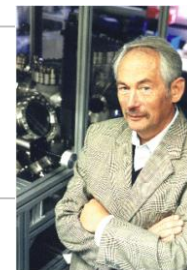
1985



GMR効果
5-15%

A.Fert (仏), P.Grünberg (独)

2007年ノーベル物理学賞



1990

TMR効果
(アモルファス AI-O)
20-70%

宮崎 照宣 (東北大)

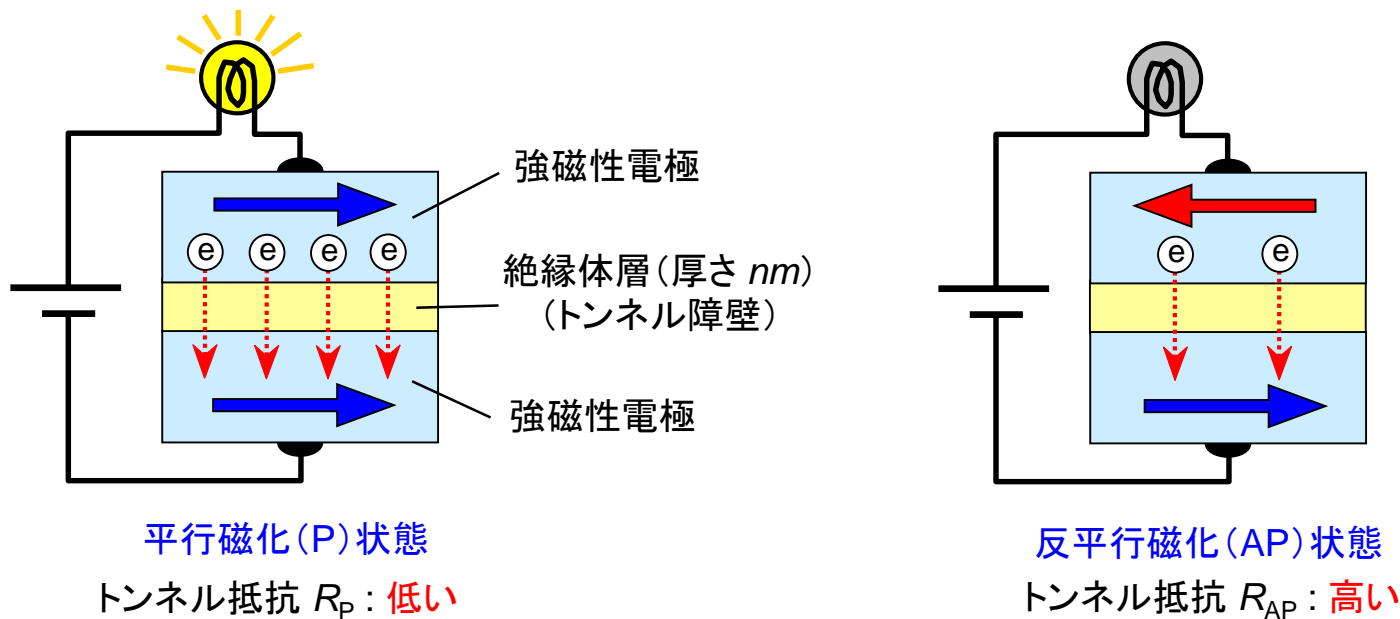


2000

2005

2010





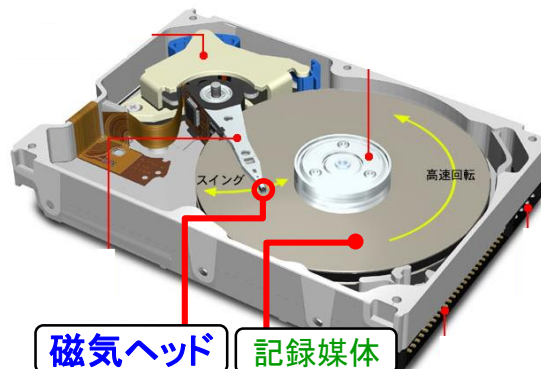
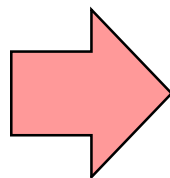
$$MR \text{ 比} \equiv (R_{AP} - R_P) / R_P \times 100\% \text{ (性能指数)}$$

MTJ素子は、HDD磁気ヘッドや不揮発性メモリMRAMの記憶素子として実用化

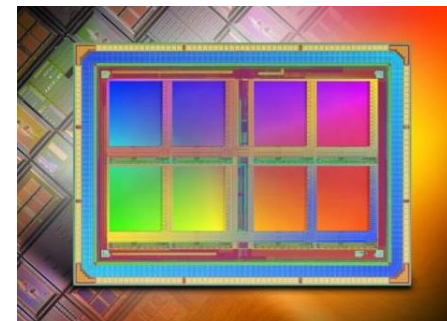
Fe, Coなど
アモルファス AI-O
Fe, Coなど

1995年 宮崎ら

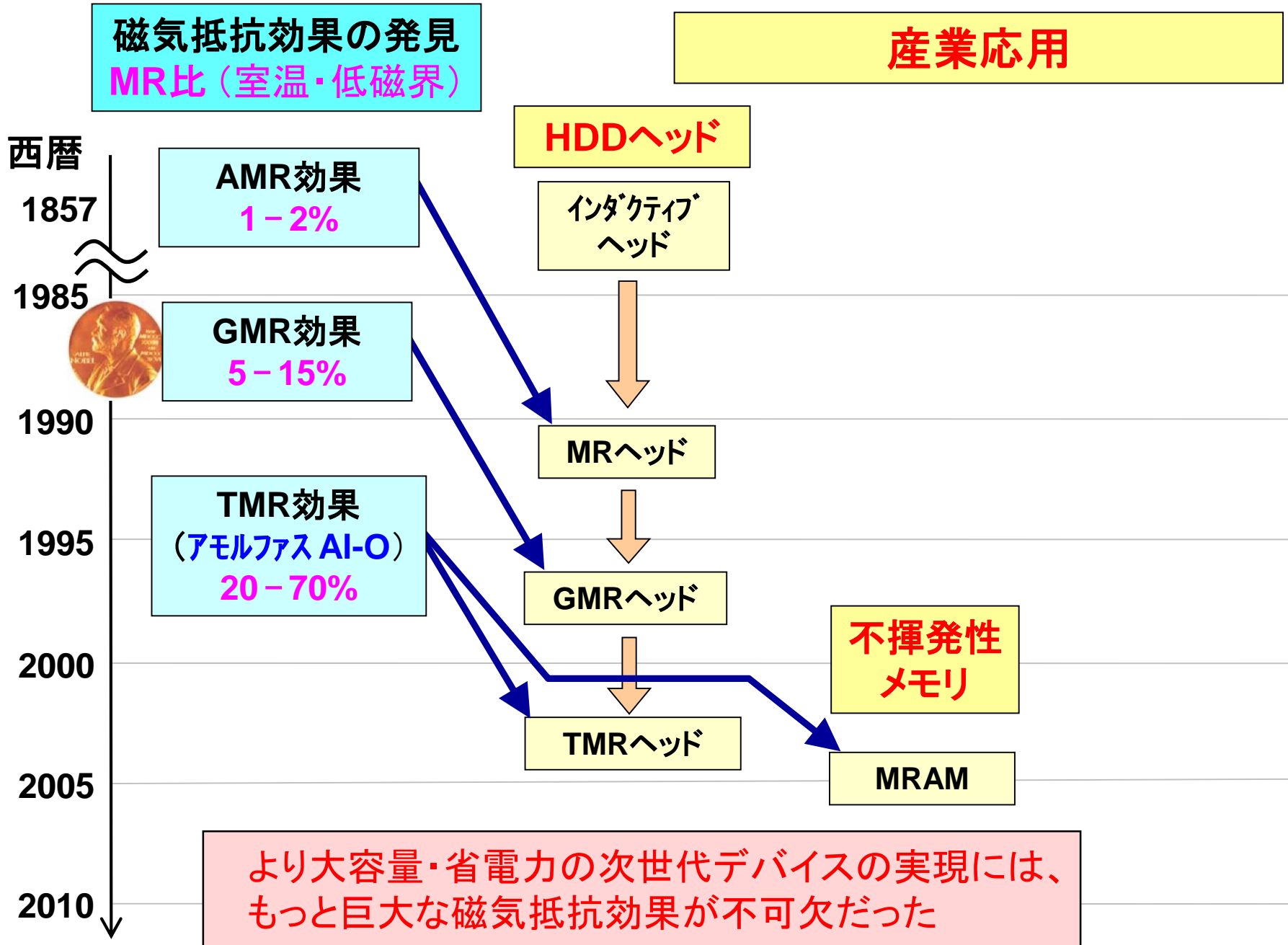
MR比 = 20~70%



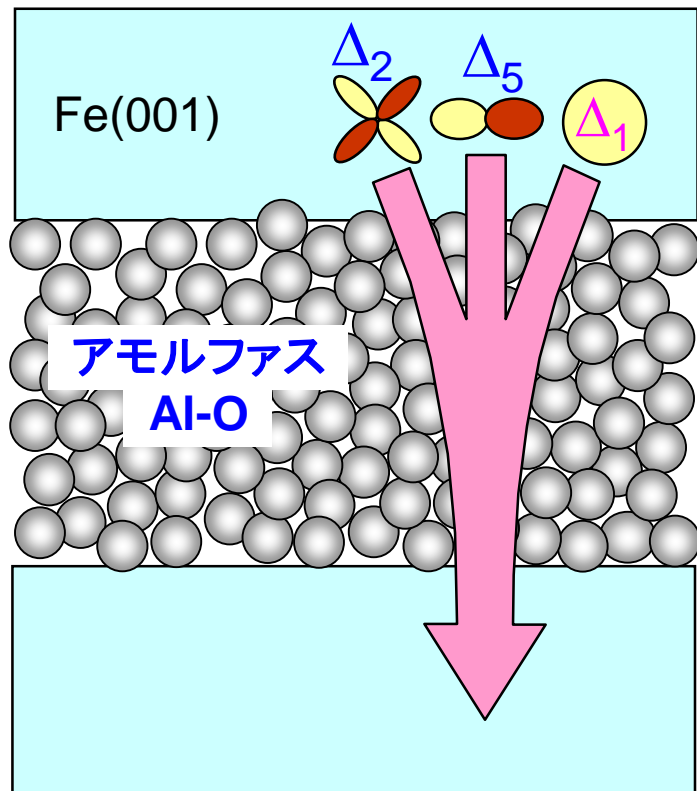
ハードディスク (HDD)



第一世代のMRAM (~16 Mbit)



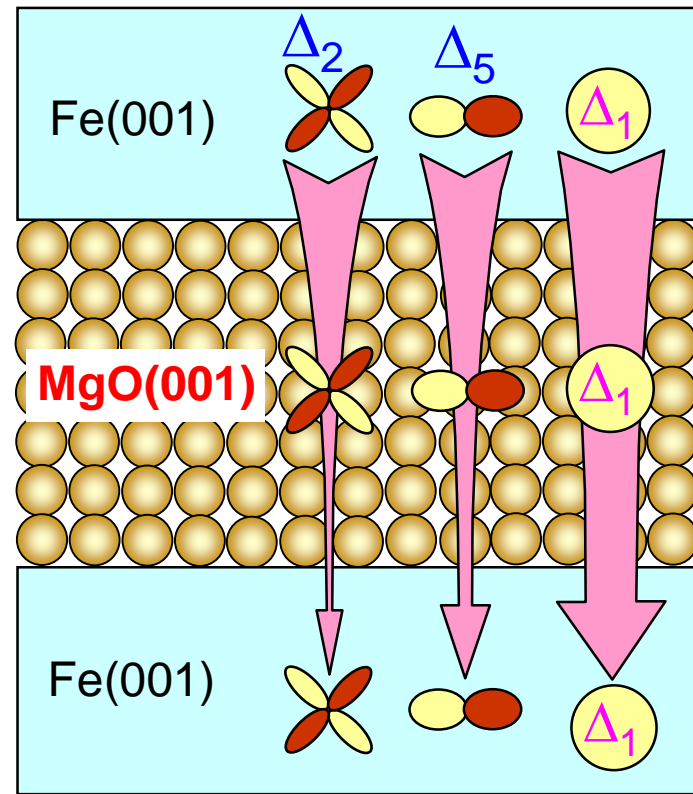
アモルファス Al-O トンネル障壁



電極中の種々のブロッホ状態が混ざり合ってトンネルしてしまう

➡ MR比が100%を越えられない

結晶 MgO(001) トンネル障壁



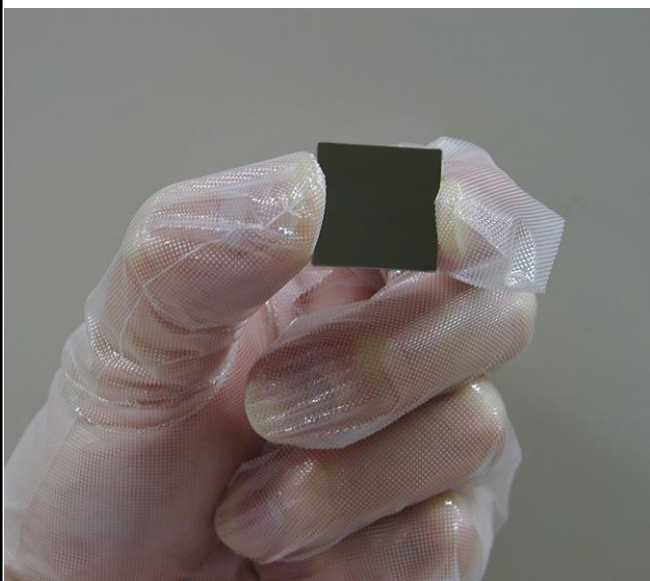
完全スピン分極の Δ_1 ブロッホ状態が支配的にトンネル伝導する

➡ MR比 > 1000% (第一原理計算)

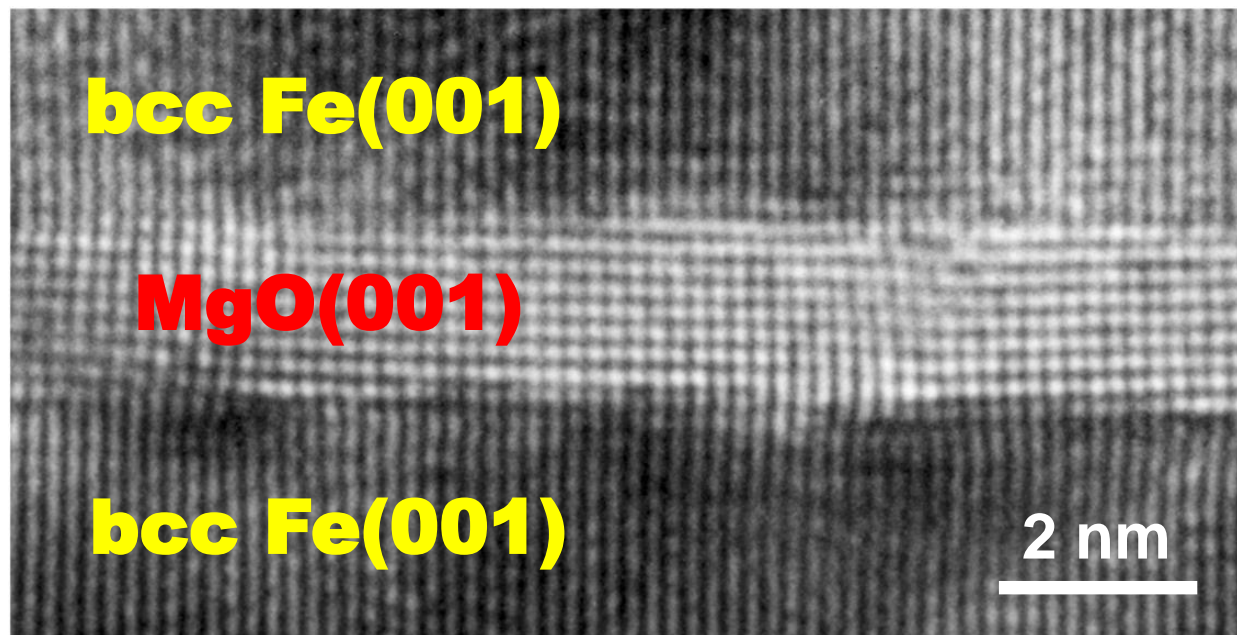
産総研・JSTさきがけ (個人研究)

S. Yuasa *et al.*, *Nature Materials* **3**, 868 (2004).

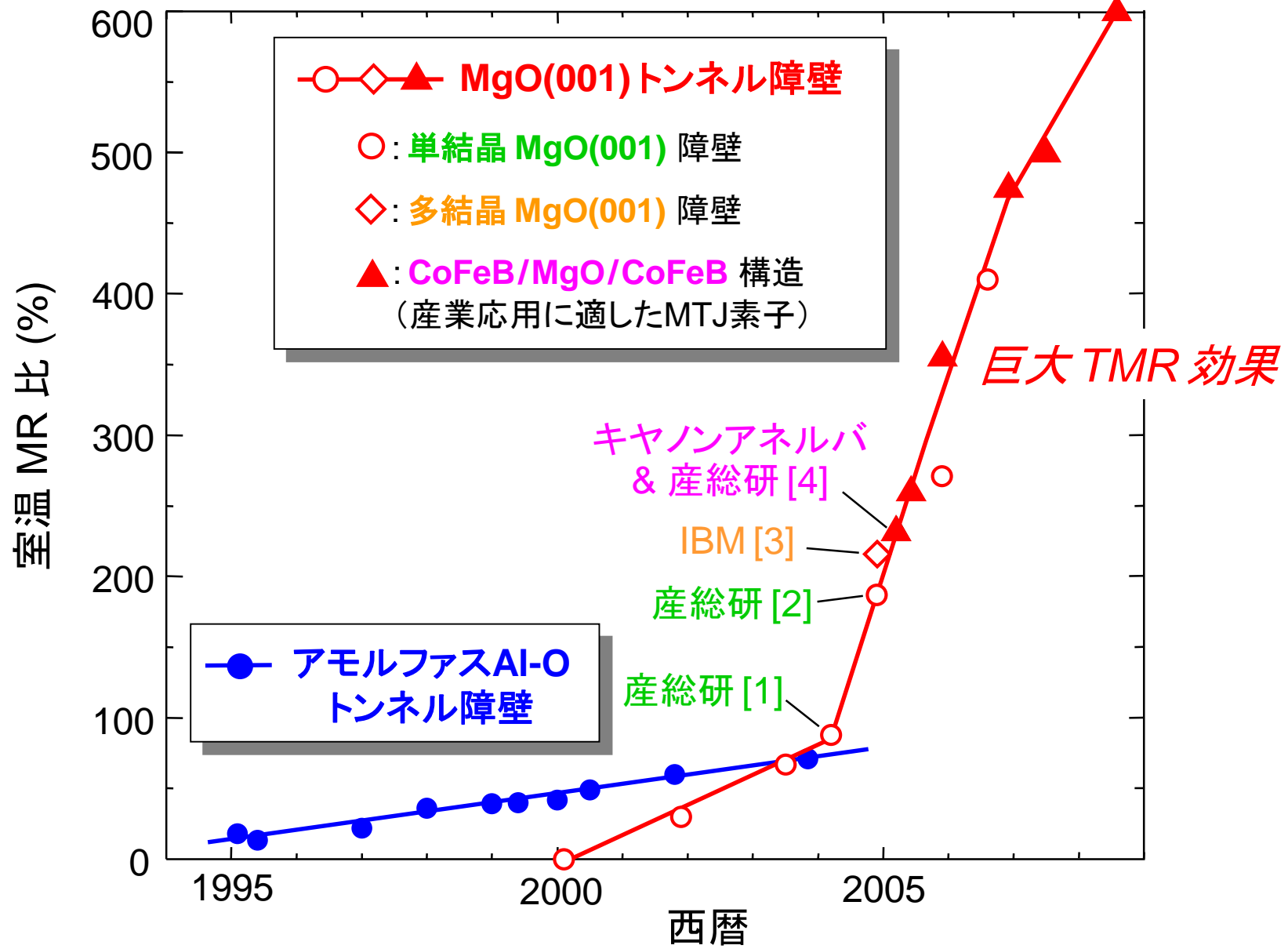
単結晶 $\text{MgO}(001)$ トンネル障壁をエピタキシャル成長



特殊な基板の上にMBE成長
(基礎研究の手法)



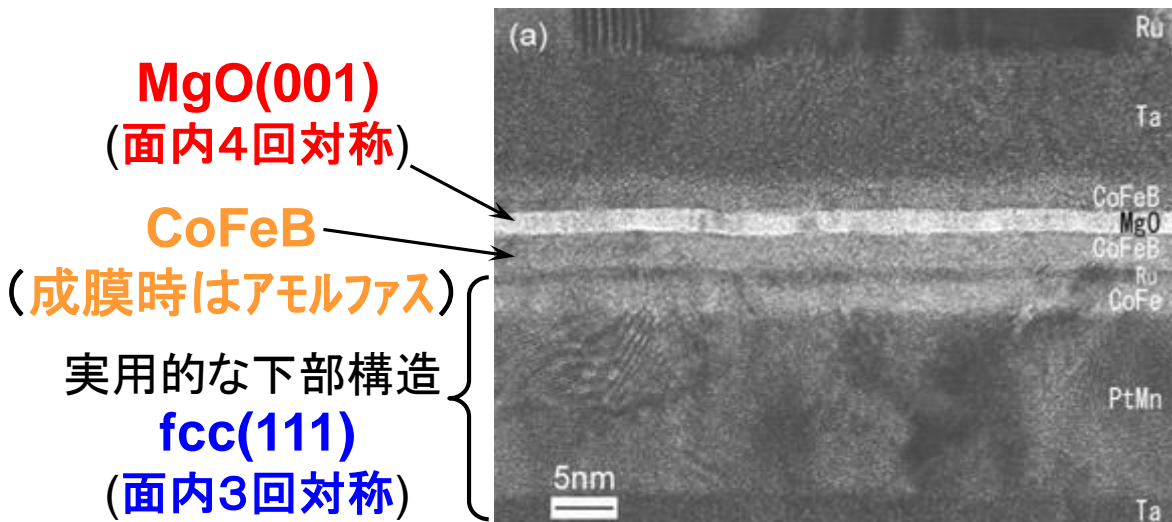
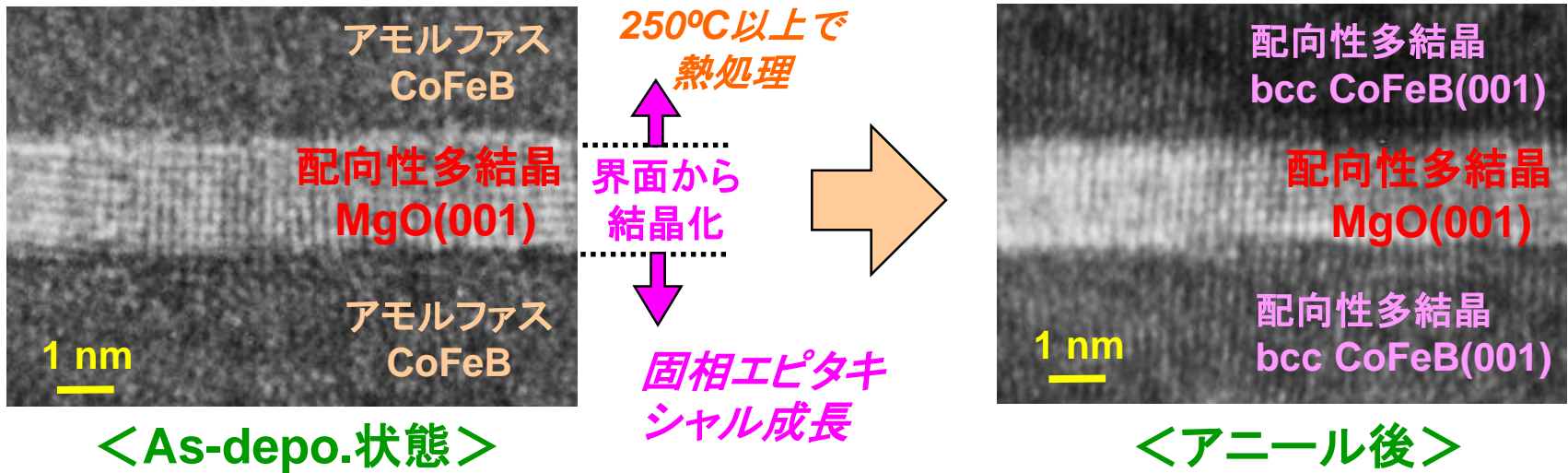
断面TEM写真



[1] Yuasa, *Jpn. J. Appl. Phys.* 43, L558 (2004). [2] Yuasa, *Nature Mater.* 3, 868 (2004).
[3] Parkin, *Nature Mater.* 3, 862 (2004). [4] Djayaprawira, Yuasa, *APL* 86, 092502 (2005).

キヤノンアネルバ & 産総研

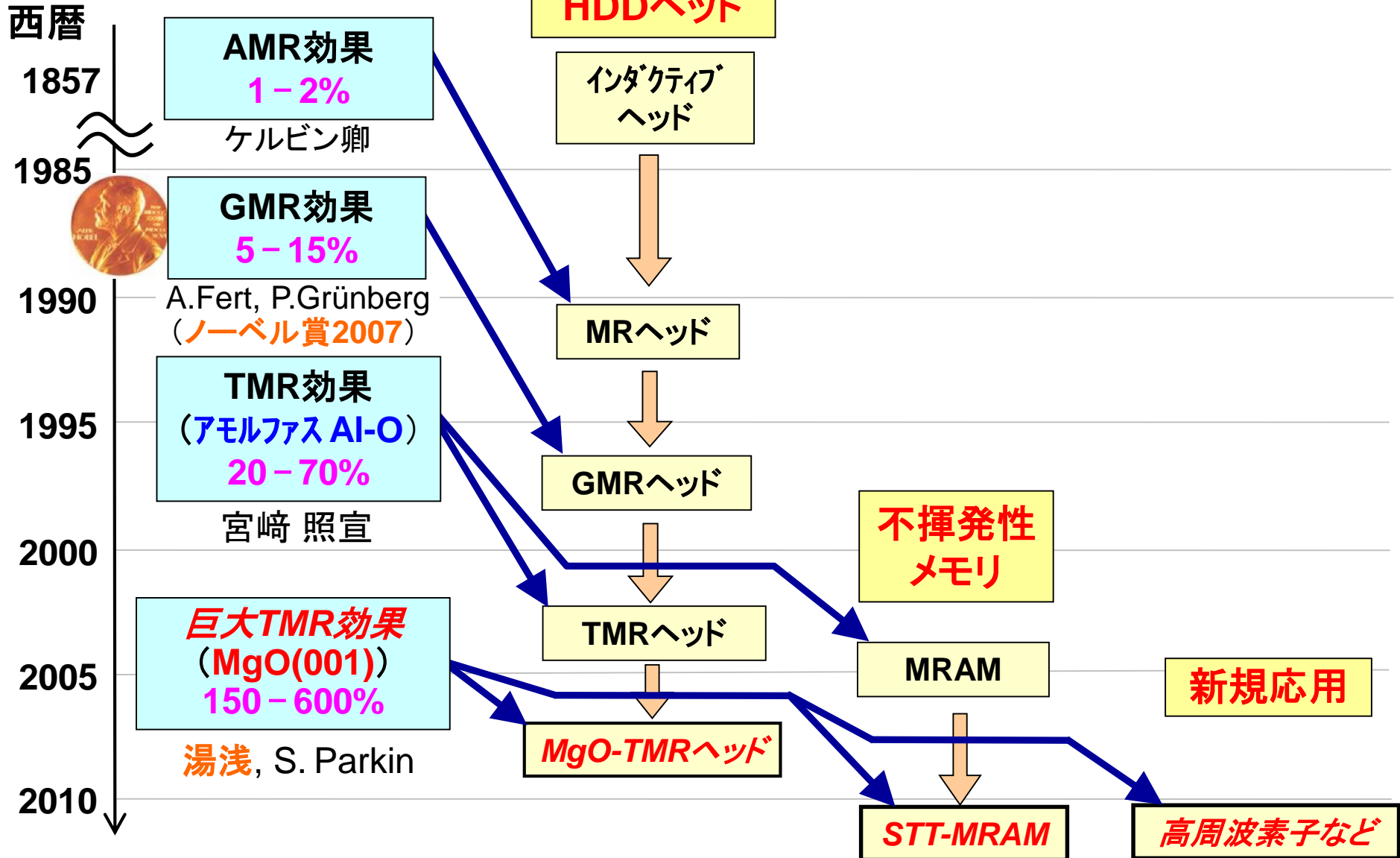
Djayaprawira, SY et al., *Appl. Phys. Lett.* **86**, 092502 (2005).

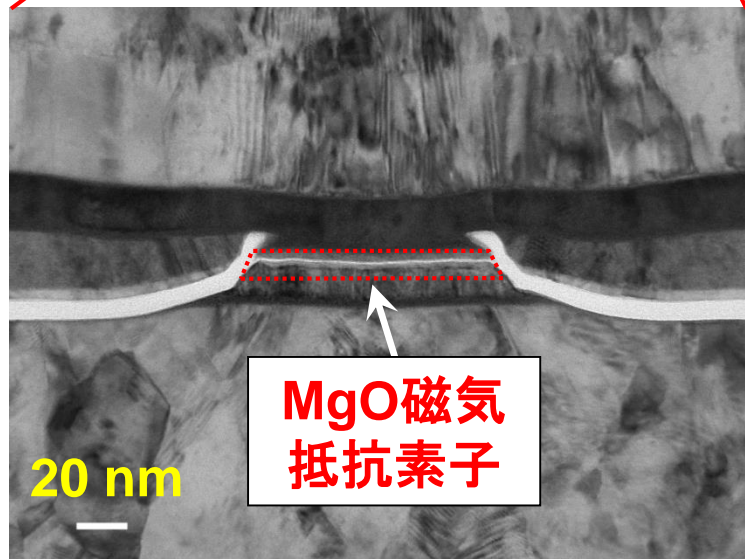


- 任意の基板の上に室温スパッタ成膜（量産技術）で作製可能
- 磁気センサやMRAM等のデバイス応用の中核技術
- 基礎研究でも重宝される

磁気抵抗効果の発見
MR比 (室温・低磁界)

産業応用





断面TEM写真(富士通ご提供)

- ◆ 現在、**全てのHDDに搭載**
- ◆ HDDの記憶容量が 1.3 Tbit/inch² (従来の**10倍超**)まで増大
- ◆ HDDはITクラウド社会を支える**データセンターの主流ストレージ**であり、2兆円市場

- 朝日賞
- 産学官連携功労者表彰
内閣総理大臣賞
- 井上春成賞
- 日本学術振興会賞
- 文部科学大臣表彰
- IBM科学賞
- IEEE表彰
- 丸文学術賞
- 市村学術賞
- 東京テクノフォーラム21
ゴールド・メダル賞
- つくば賞
- など

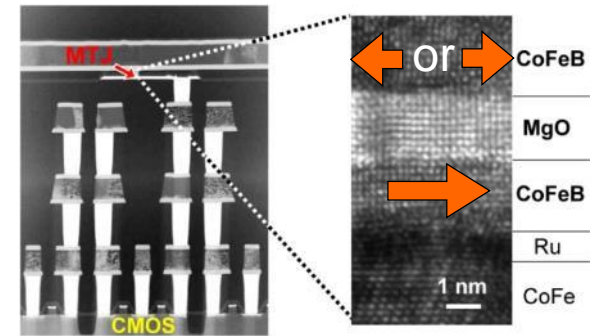


朝日賞 授賞式

2005 ソニー (IEDM 2005)

- **面内磁化 CoFeB/MgO/CoFeB**

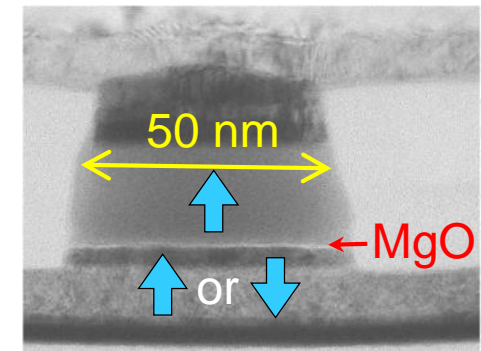
世界初のSTT-MRAM



2008 東芝、産総研 (NEDO-Pj) (IEDM 2008)

- **垂直磁化 MgO-MTJ**

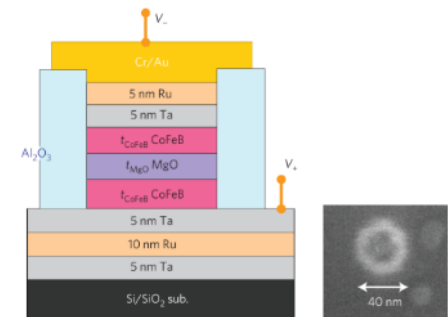
世界初の垂直磁化STT-MRAM

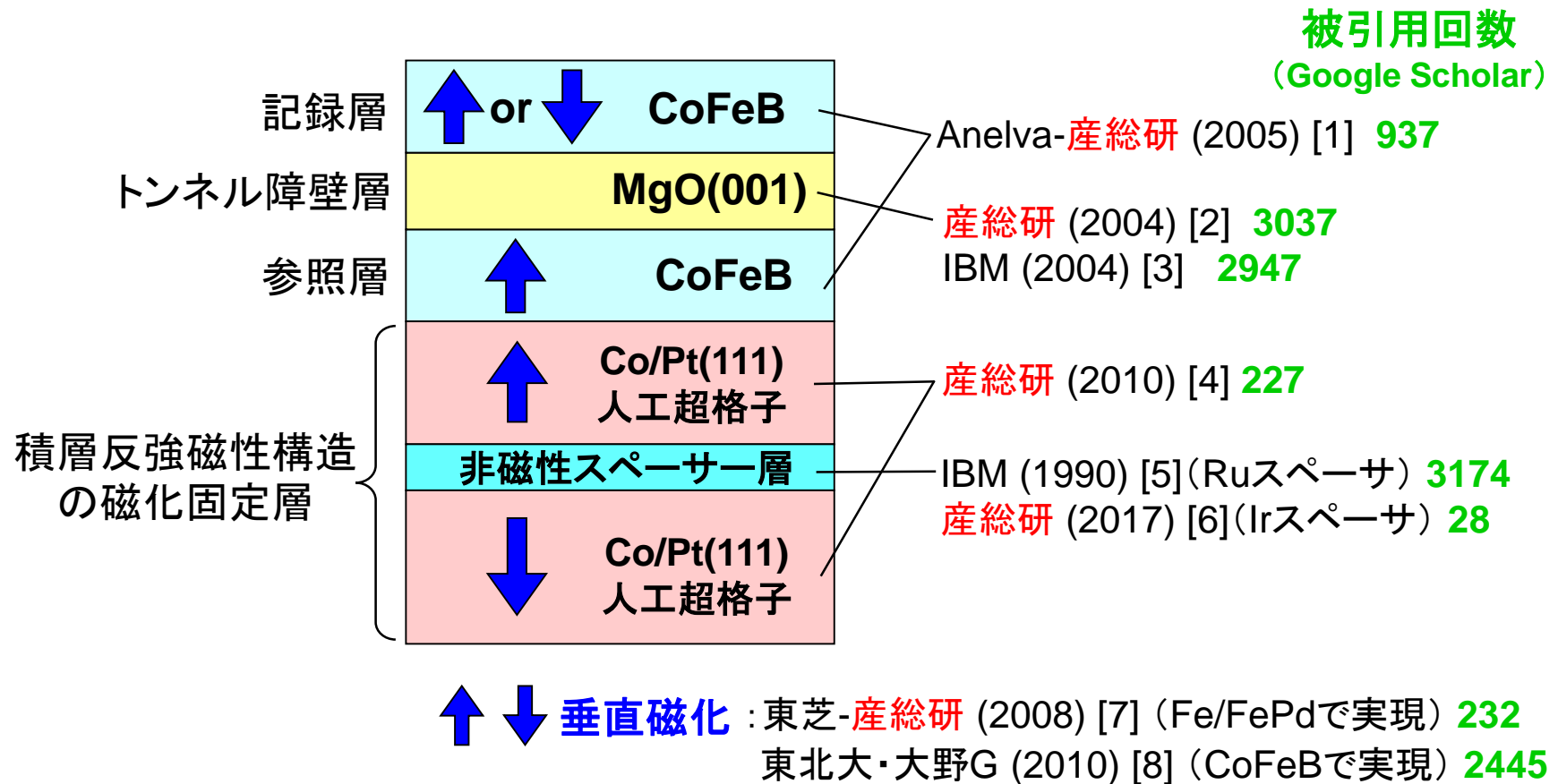


2010 東北大・大野グループ (Nature Mater.)

- **垂直磁化 CoFeB電極**

作製が容易なCoFeBで垂直磁化を実現





- [1] Djayaprawira *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 092502 (2005). [2] Yuasa *et al.*, *Nature Mater.* **3**, 868 (2004).
 [3] Parkin *et al.*, *Nature Mater.* **3**, 862 (2004). [4] Yakushiji *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 232508 (2010).
 [5] Parkin *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 2304 (1990). [6] Yakushiji *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **110**, 092406 (2017).
 [7] Kishi *et al.*, *IEDM Tech. Dig.* 12.6 (2008). [8] Ikeda *et al.*, *Nature Mater.* **9**, 721 (2010).

全ての要素技術において、**日本が先駆的な貢献**

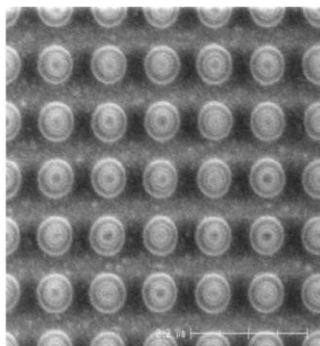


Fig. 2. Top view SEM image of MTJ array. Extremely tight pitched MTJ array was formed by patterning process.

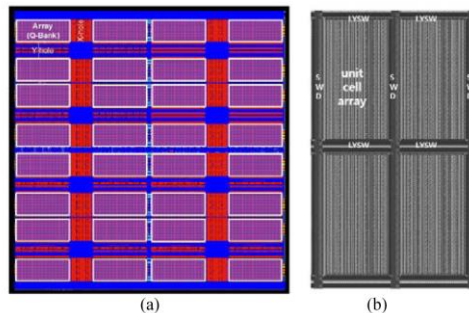


Fig. 3. (a) 4Gb STT-MRAM chip floor plan, and (b) symmetric unit cell array blocks.

東芝－ハイニクス 4 Gbit STT-MRAMを**試作**

IEDM (2016); ISSCC (2017).

この時点では**世界を圧倒的にリード**
しかし、**未だに事業化されず**



米国 Everspin 社 1 Gbit STT-MRAM を**販売開始**

<https://www.everspin.com/>

Samsung、システムLSI混載**STT-MRAM**を**量産開始** (2019.3)

Intel、**TSMC**も事業化準備中

2024年の市場予測は 1800億円 (Yoleレポート)

産総研 スピントロニクス研究センター



2017年5月に設立

↓
研究員
参加

TEL-産総研 連携研究室

- ◆ 300 mmファブを活用して、STT-MRAMの生産技術を開発
- ◆ MRAM製造装置の開発を技術的にサポート

↑
研究員
出向↑
300 mm
後工程産総研 TIA スーパークリーンルーム
(300mmファブ)

東京エレクトロン事業部

- 研究開発の成果を国内産業の強化に結びつけるのは、簡単ではない。
⇒ 日本の雇用や税収に結びつくなら、外資とも積極的に連携すべきでは？

- ハイリスク・ハイリターンの挑戦的な研究をもっと推奨すべき。
そのためには、もっと大勢の若手研究者に裁量権と中規模資金（JSTさきがけ、科研費・基盤Aクラス）を与えるべき。失敗を恐れない年齢層と資金規模。
巨大プロジェクトでは、若手研究者は裁量権のない労働力として使われがち。
“本当に挑戦的な研究は、上司に言われてやるものではなく、むしろ上司の反対を押し切ってやるもの”

- 若手向けの中小規模プロジェクトには、過度に“応用”を要求すべきではない。
伊能忠敬は、なぜ蝦夷地を目指したのか？
(湯浅はなぜMgO-MTJを研究したのか？)