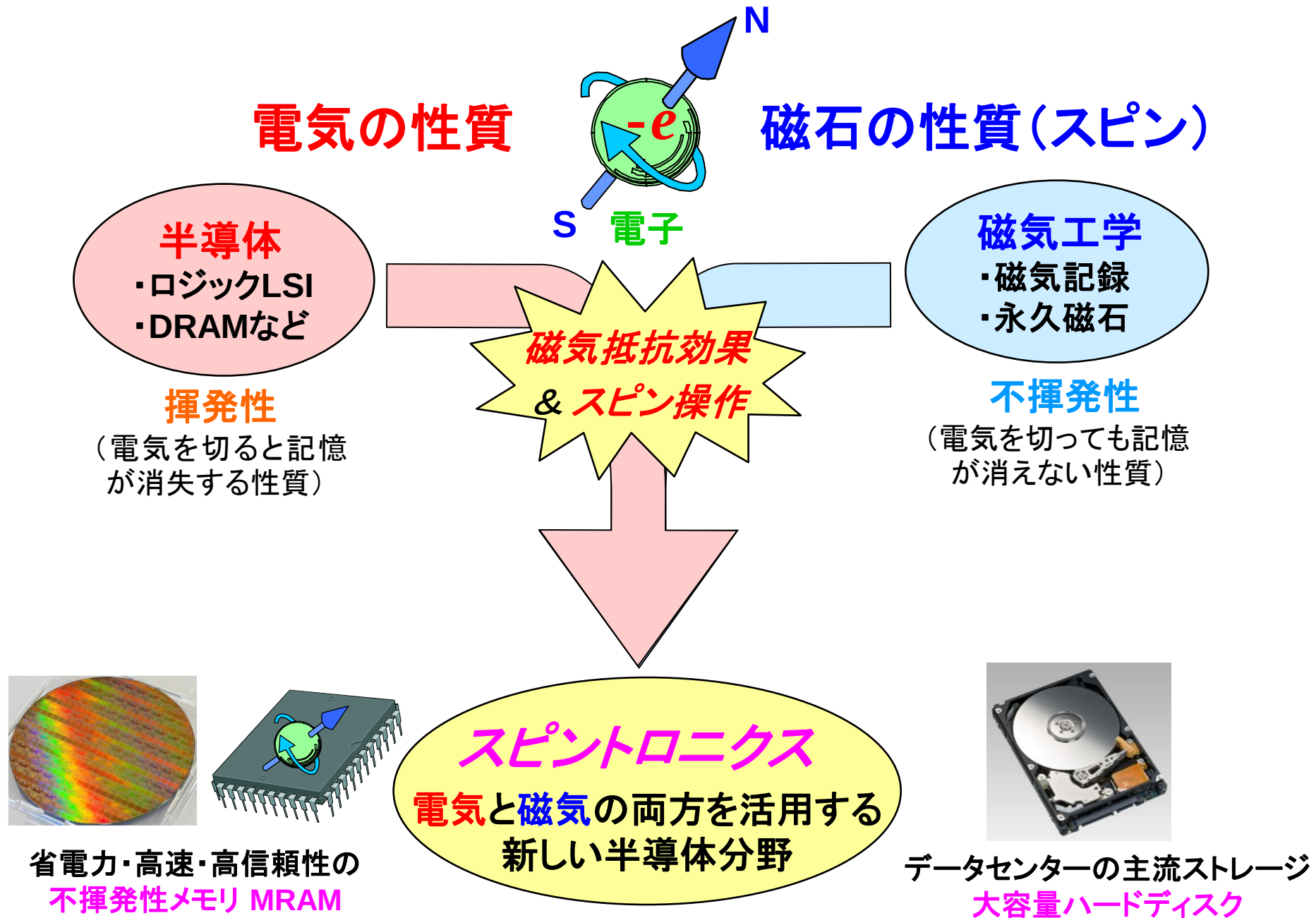


酸化マグネシウム系磁気トンネル接合の 基礎と応用

湯浅 新治



スピントロニクスとは



本日の内容

1. はじめに

- 磁気抵抗効果とスピントロニクス
- 磁気トンネル接合(MTJ)のトンネル磁気抵抗効果(TMR効果)
- アモルファルAl-Oトンネル障壁のTMR効果、その応用と限界

2. 結晶MgOトンネル障壁の巨大TMR効果

- エピタキシャルMgO(001)トンネル障壁
- CoFeB/MgO/CoFeB構造のMTJ

3. ハードディスク(HDD)

4. 不揮発性メモリ STT-MRAM

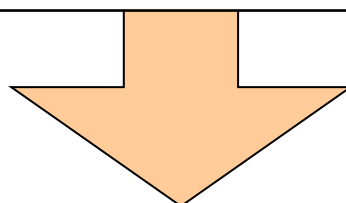
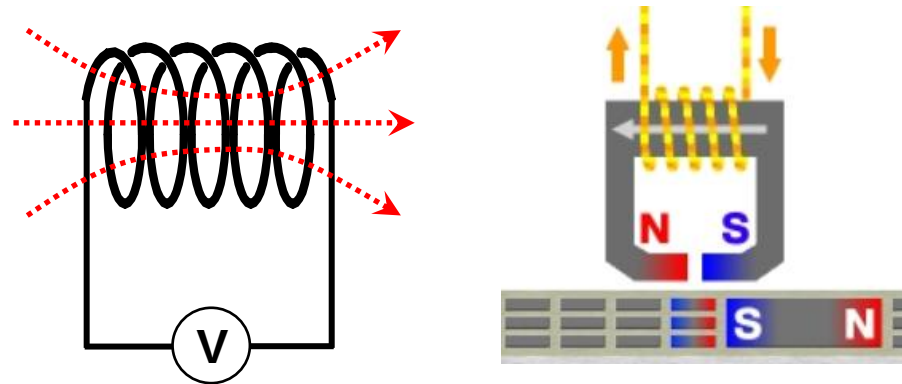
- スピン転移トルク(STT)
- 垂直磁化STT-MRAM

5. まとめ、今後の課題

磁気工学

アンペールの法則やファラデーの電磁誘導の法則を用いて、電気と磁気を結合

エネルギー効率や感度が低い

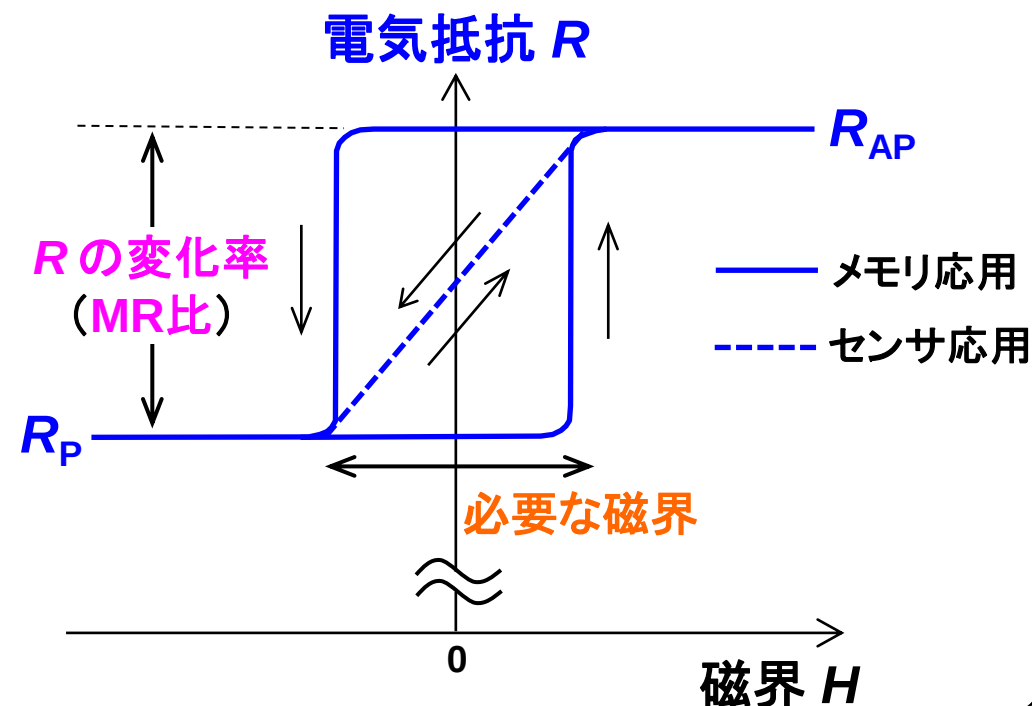


スピントロニクスが始まり

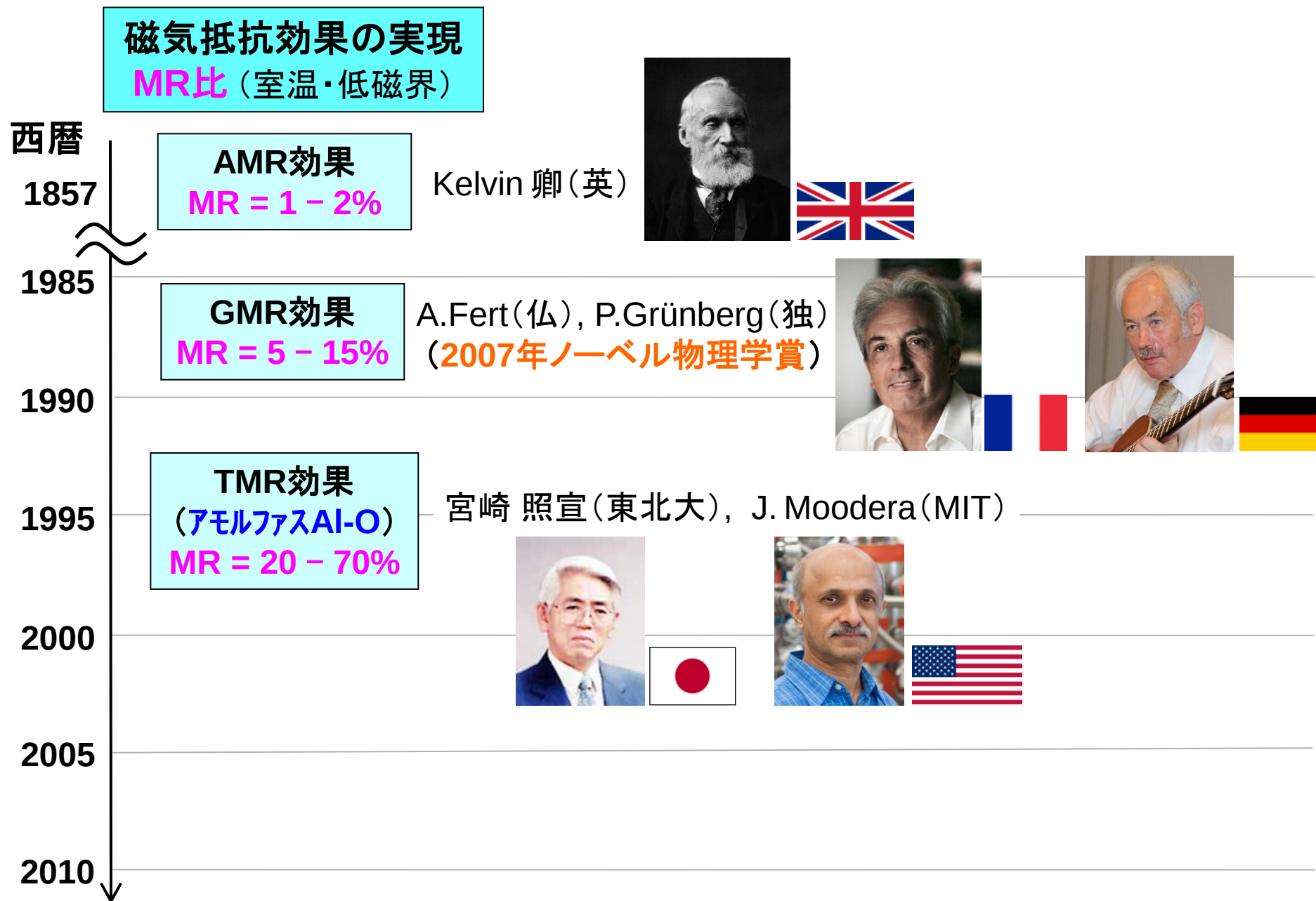
磁気抵抗効果 (Magnetoresistance: MR) を用いて、磁界信号を電気信号に変換

量子力学的な効果であるため、エネルギー効率や感度が高い

産業応用のためには、室温かつ低磁界において大きなMR比が必要



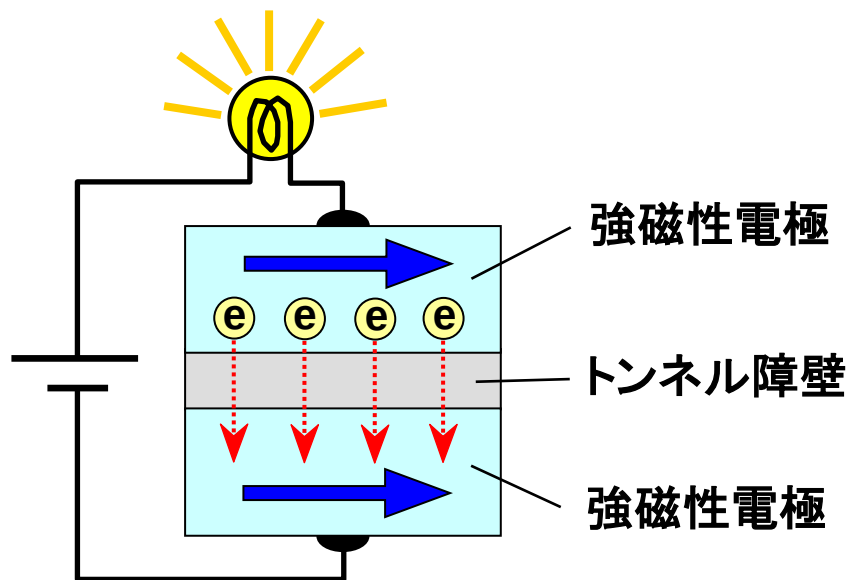
磁気抵抗効果の歴史



磁気トンネル接合 (MTJ) のトンネル磁気抵抗 (TMR) 効果

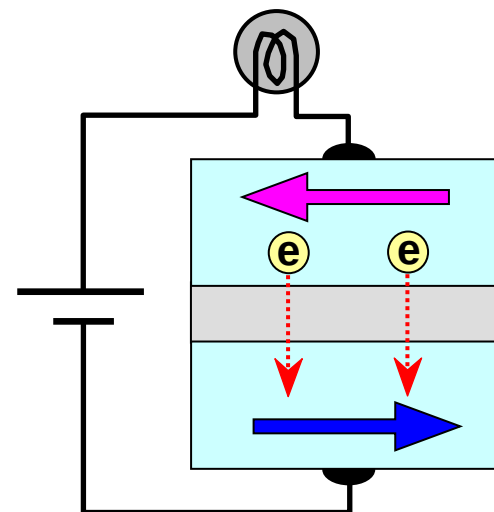
MTJ : Magnetic Tunnel Junction

TMR : Tunnel Magneto-Resistance



平行磁化(P)状態

トンネル抵抗 R_P : 低い

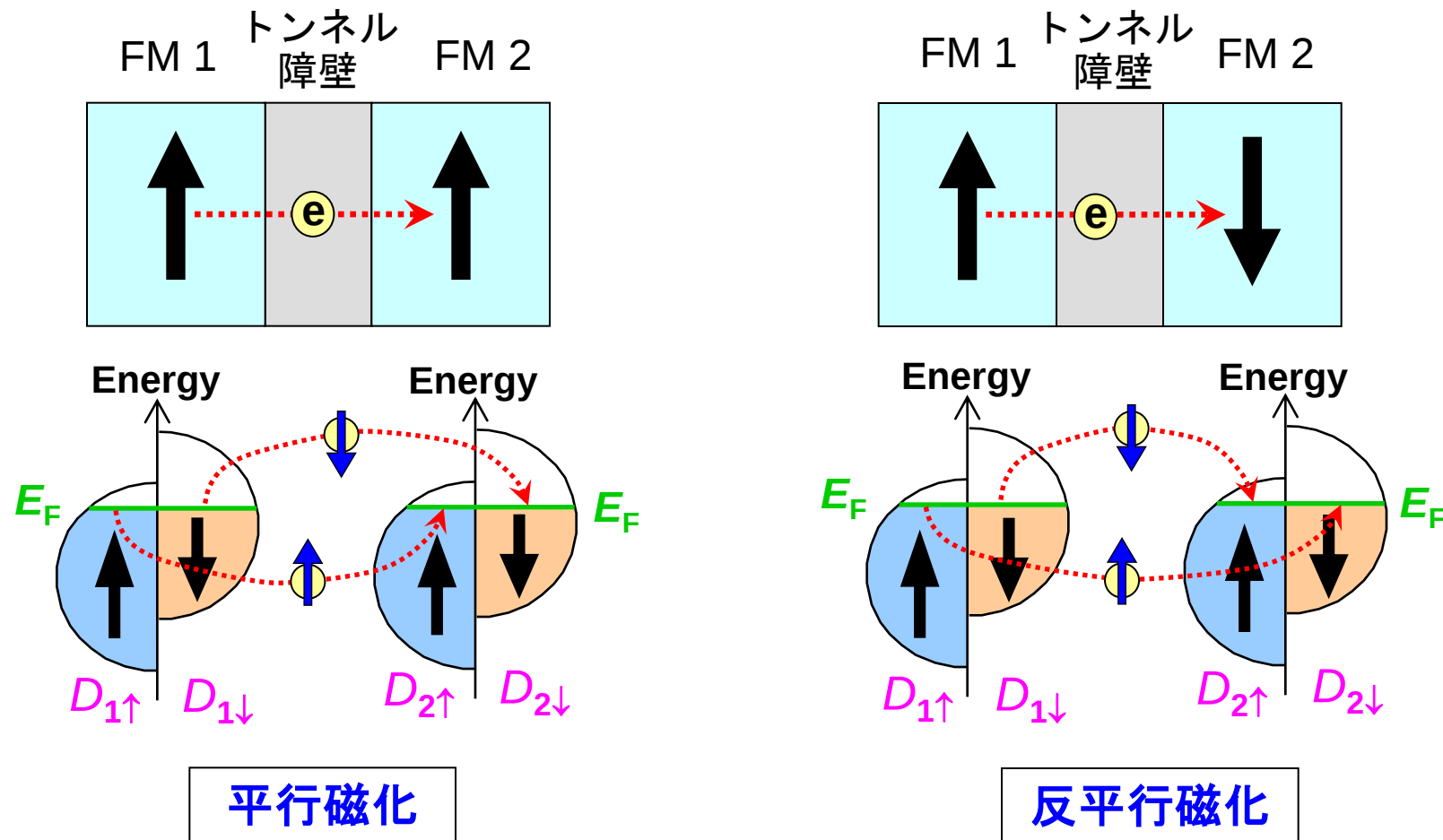


反平行磁化(AP)状態

トンネル抵抗 R_{AP} : 高い

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

TMR効果の現象論的モデル（Julliereモデル）



$$MR = 2P_1P_2 / (1 - P_1P_2), \quad P_\alpha = \frac{(D_{\alpha\uparrow}(E_F) - D_{\alpha\downarrow}(E_F))}{(D_{\alpha\uparrow}(E_F) + D_{\alpha\downarrow}(E_F))}, \quad \alpha = 1, 2.$$

スピン分極率 P

TMR効果の先駆的な研究

Fe/Ge-O/Co接合

PHYSICS LETTERS Volume 54A, number 3 8 September 1975

TUNNELING BETWEEN FERROMAGNETIC FILMS

M. JULLIERE

Institut National des Sciences Appliquées, 35031 Rennes Cedex, France

Received 25 June 1975

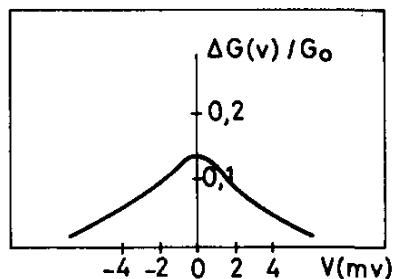


Fig. 2. Relative conductance $(\Delta G/G)_{V=0}$ of Fe-Ge-Co junctions at 4.2 K. ΔG is the difference between the two conductance values corresponding to parallel and antiparallel magnetizations of the two ferromagnetic films.

Ni/Ni-O/Co接合

IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. MAG-18, NO. 2, MARCH 1982 707

Electron Tunneling Between Ferromagnetic Films

S. MAEKAWA AND U. GAFVERT

Manuscript received June 1, 1980.

S. Maekawa is with the IBM Thomas J. Watson Research Center, Yorktown Heights, NY 10598, on leave from The Research Institute for Iron, Steel and Other Metals, Tohoku University, Sendai 980, Japan.

U. Gafvert is with the IBM Thomas J. Watson Research Center, Yorktown Heights, NY 10598.

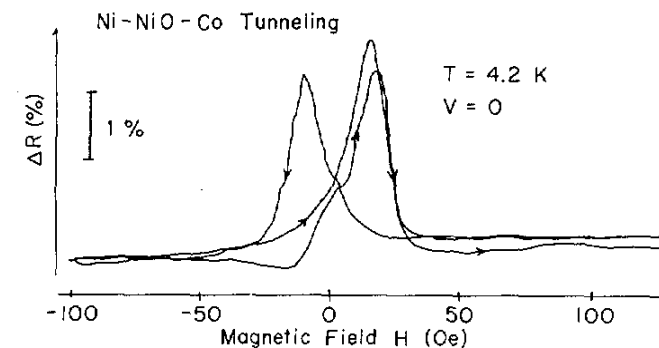
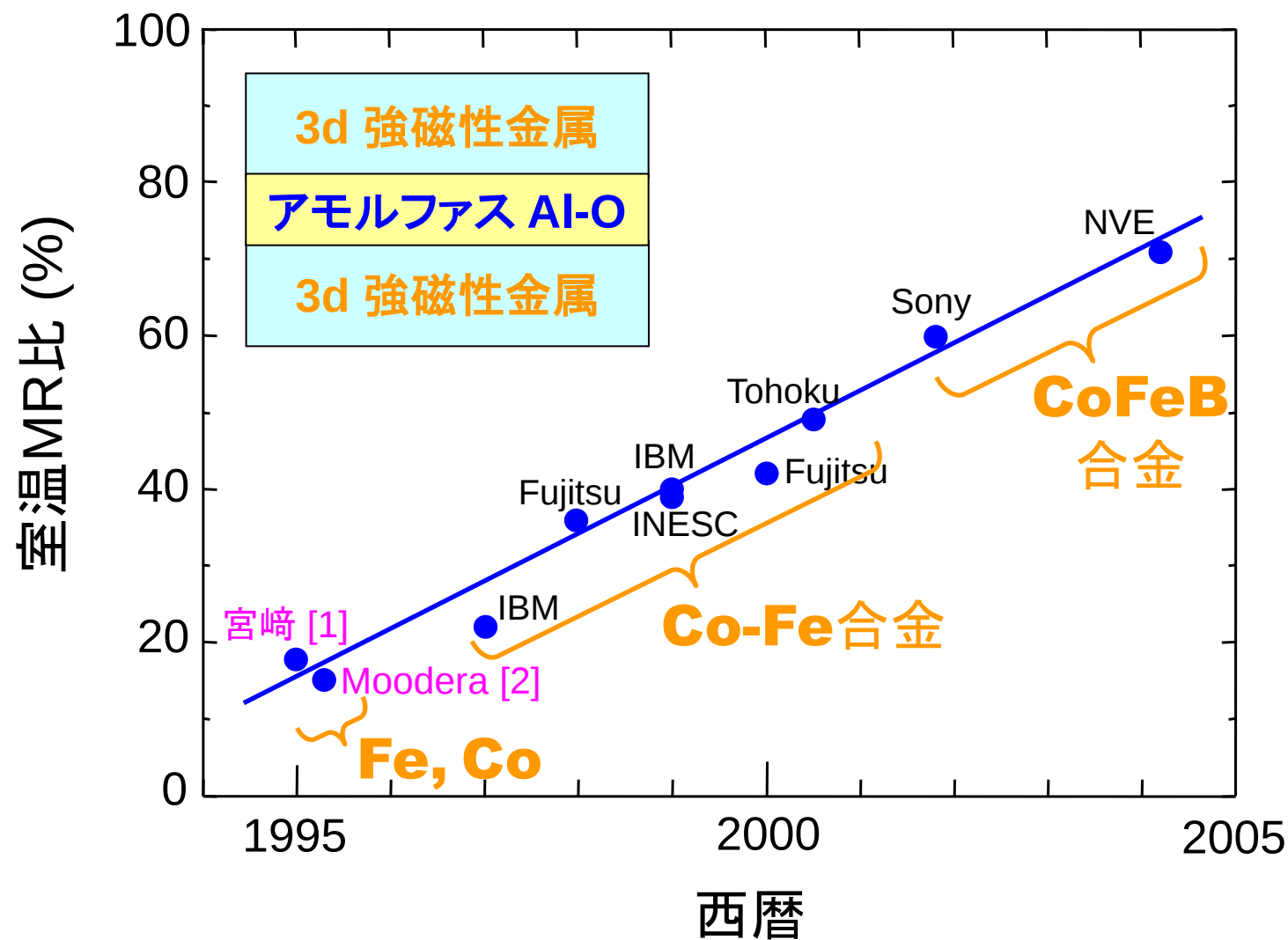


Fig. 1. Magnetic field H dependence of the resistance R at $V = 0$ and at 4.2 K normalized by that at $H = 0$ in a Ni-NiO-Co junction.

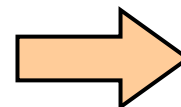
低温で小さなTMR効果が観測されたが、室温では観測されなかったため、その後あまり注目されず。

室温TMR効果の実現と発展



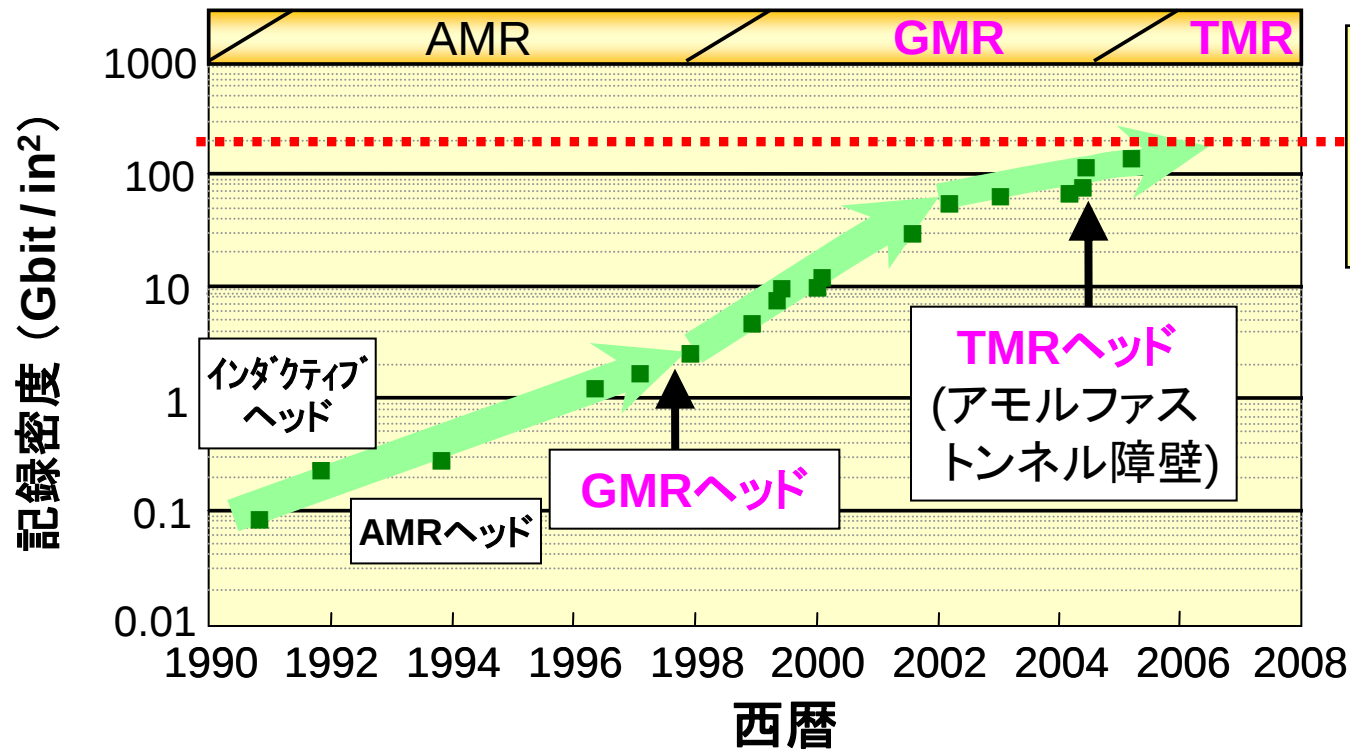
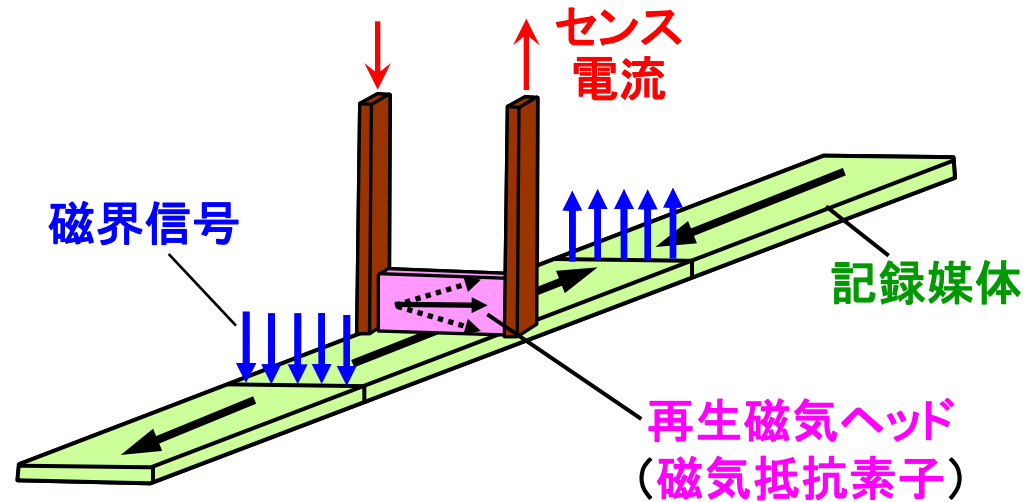
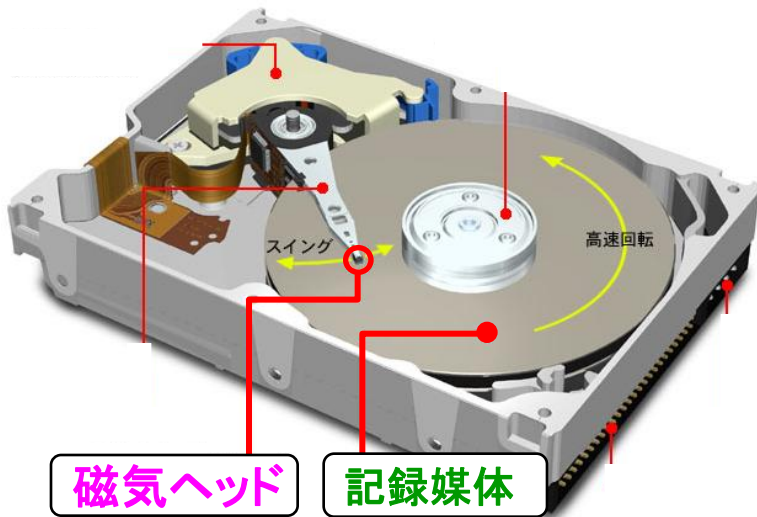
AI-Oトンネル障壁
の作製技術

AIの自然酸化



AIのプラズマ酸化

ハードディスク(HDD)の再生磁気ヘッドへの応用



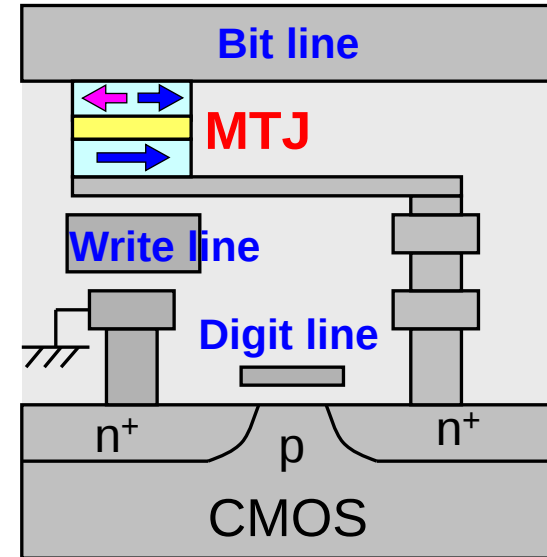
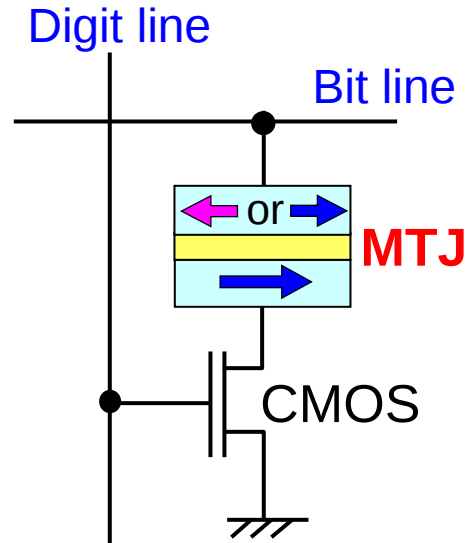
200 Gbit/in² を越えるには、さらに大きなMR比が必要不可欠

第一世代の不揮発性メモリ：トグルMRAM

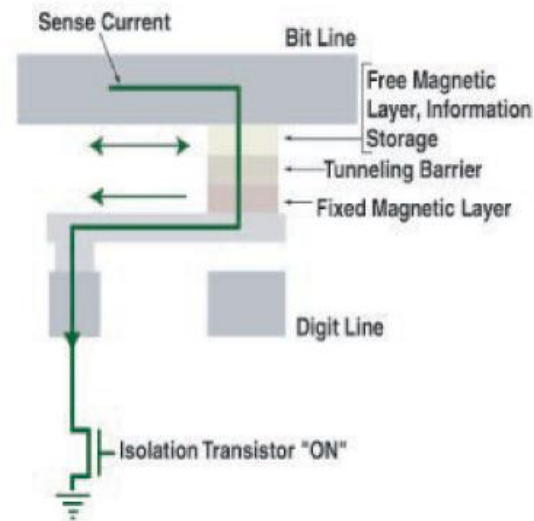
平行磁化：“0”

反平行磁化：“1”

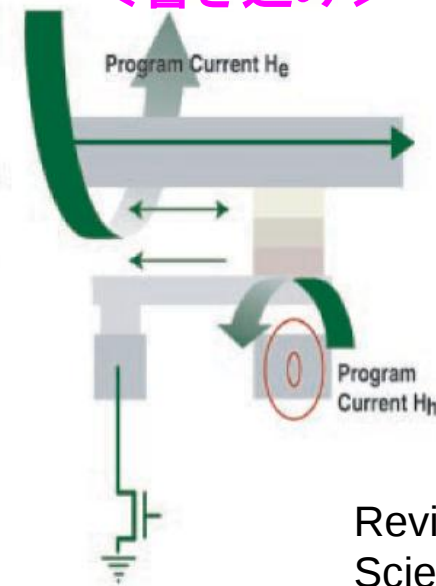
磁気記録のため、
不揮発かつ高信頼



<読み出し>

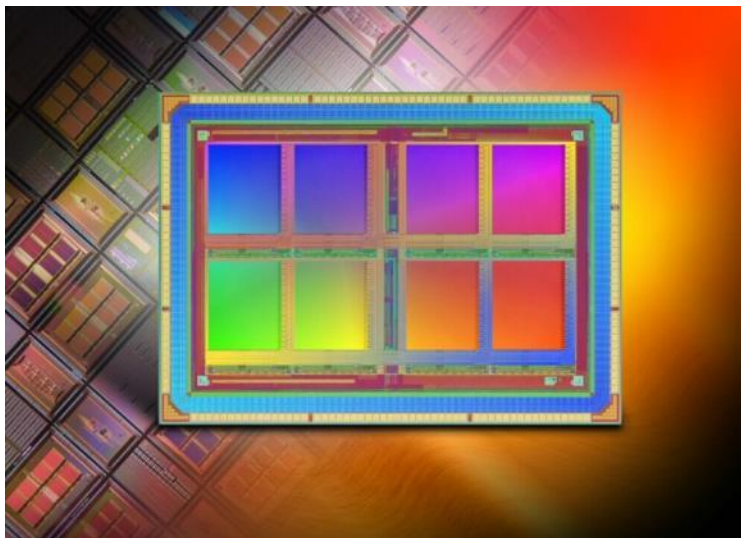


<書き込み>



Review:
Science **294**, 1488 (2001).

2006年に製品化された Mbit 級のトグルMRAM



米国フリースケール社(現 Everspin社)の MRAM(1 Mb – 16 Mb)

<理想的な特性>

不揮発性, 高速動作, 書き換え回数無制限

高温動作, 放射線耐性, *etc.*

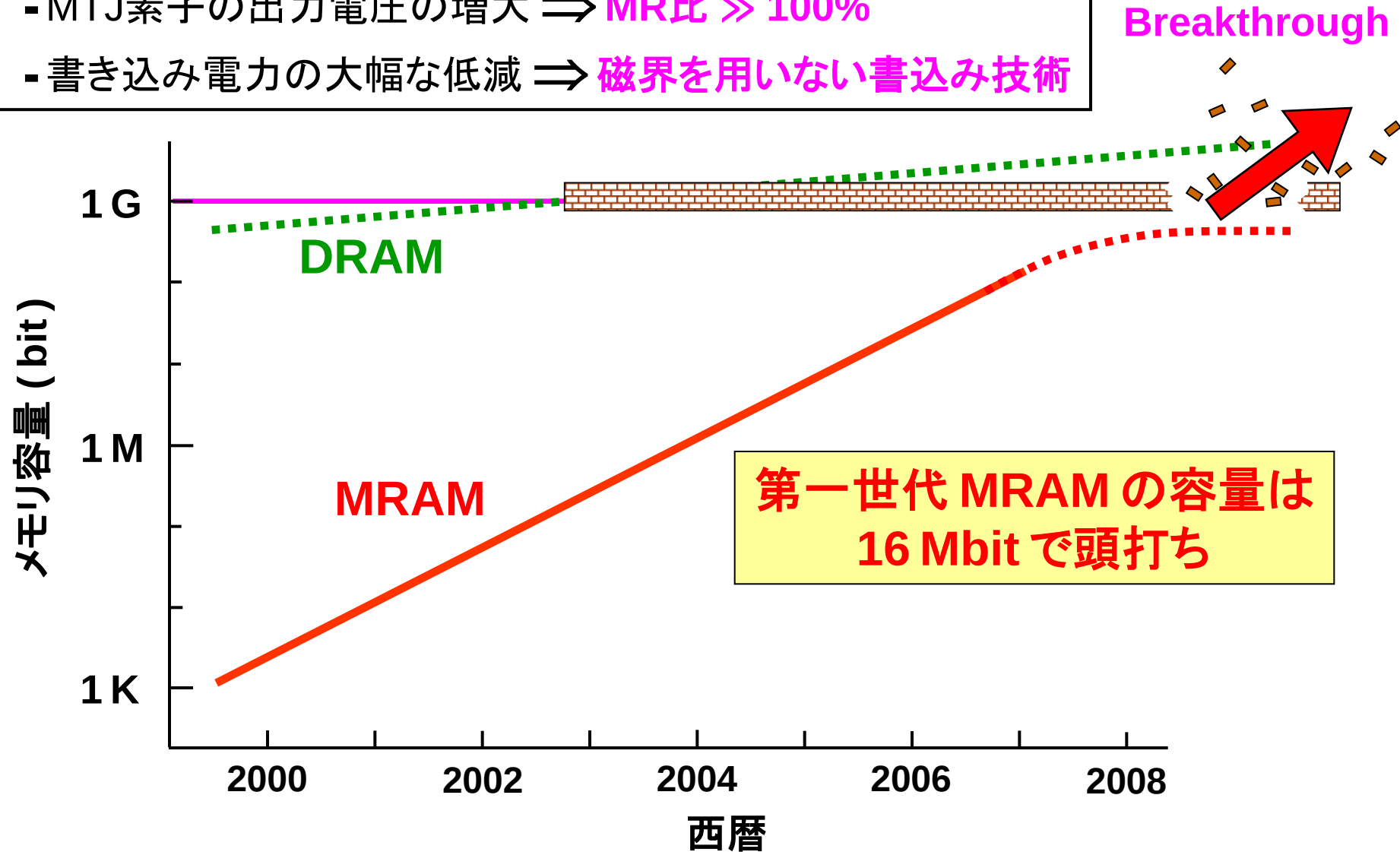
<課題>

高集積化 が 困難

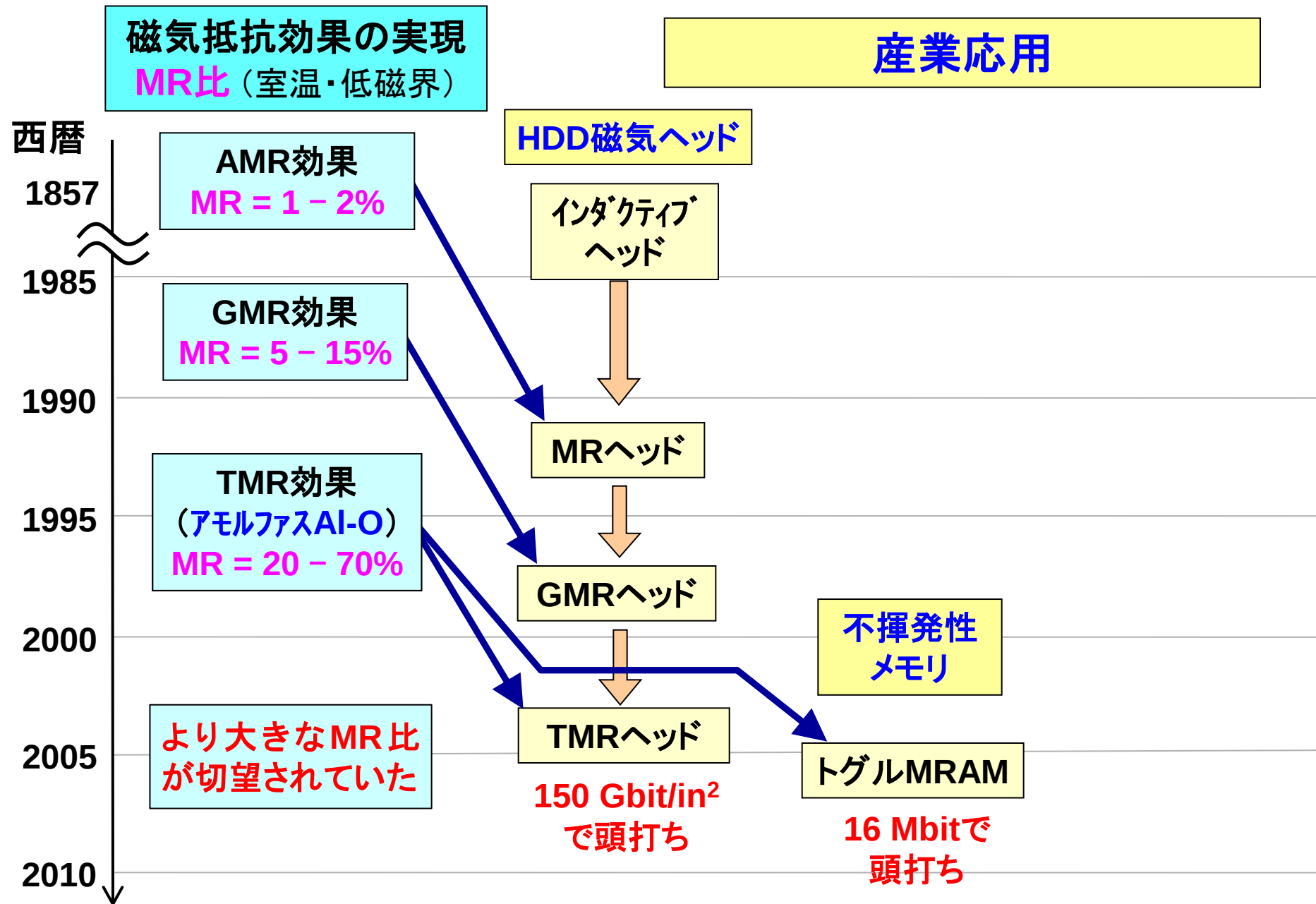
Gbit級の高集積 MRAM を実現するには？

Gbit級MRAM開発のための課題

- MTJ素子の出力電圧の増大 $\Rightarrow$ MR比 $\gg 100\%$
- 書き込み電力の大幅な低減 $\Rightarrow$ 磁界を用いない書き込み技術



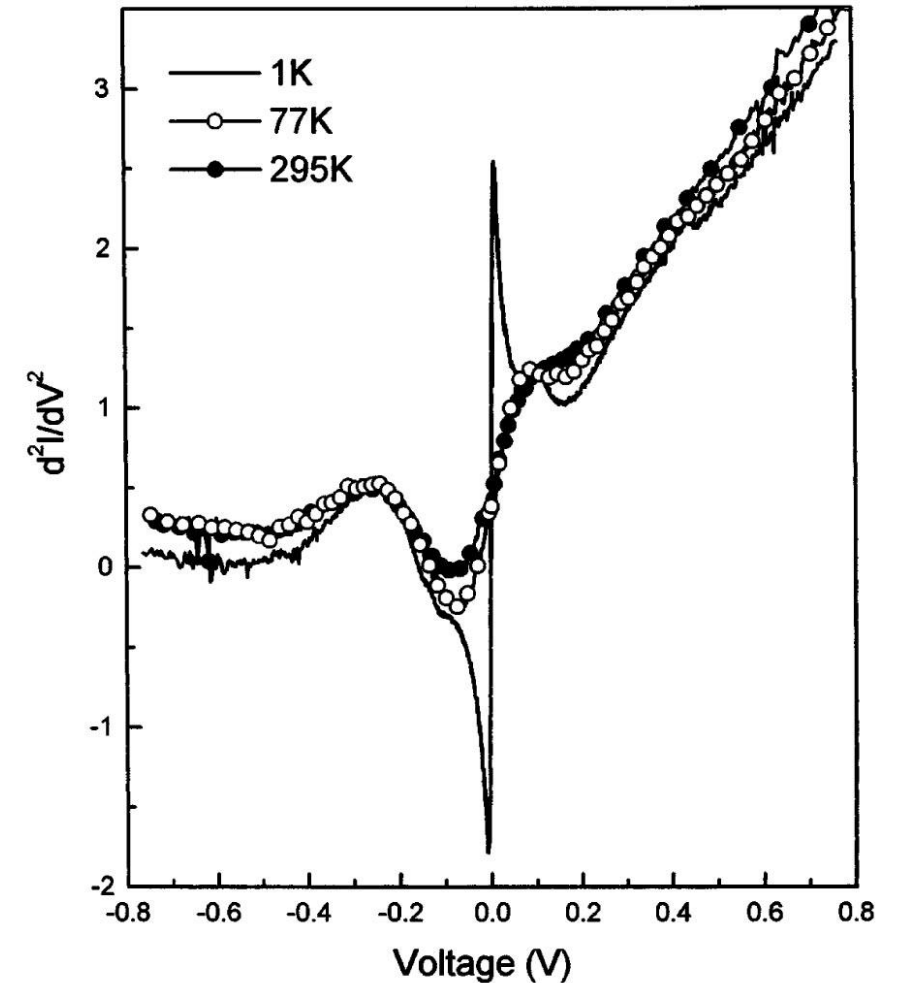
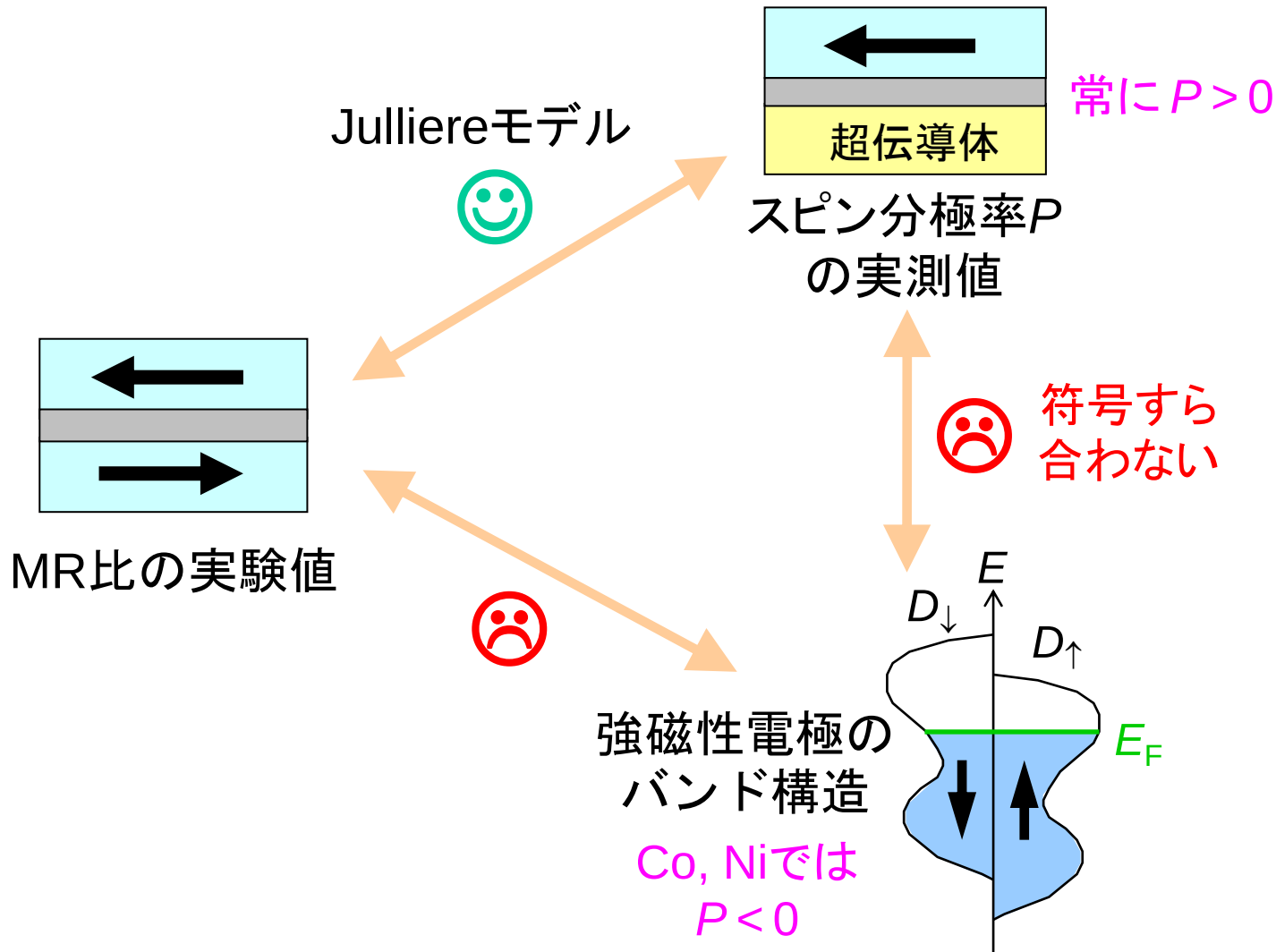
磁気抵抗効果の歴史



TMR効果の物理がさっぱり分からない！

Juliereモデルの問題点

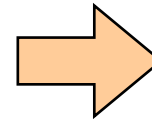
トンネル分光にDOSの特徴が現れない



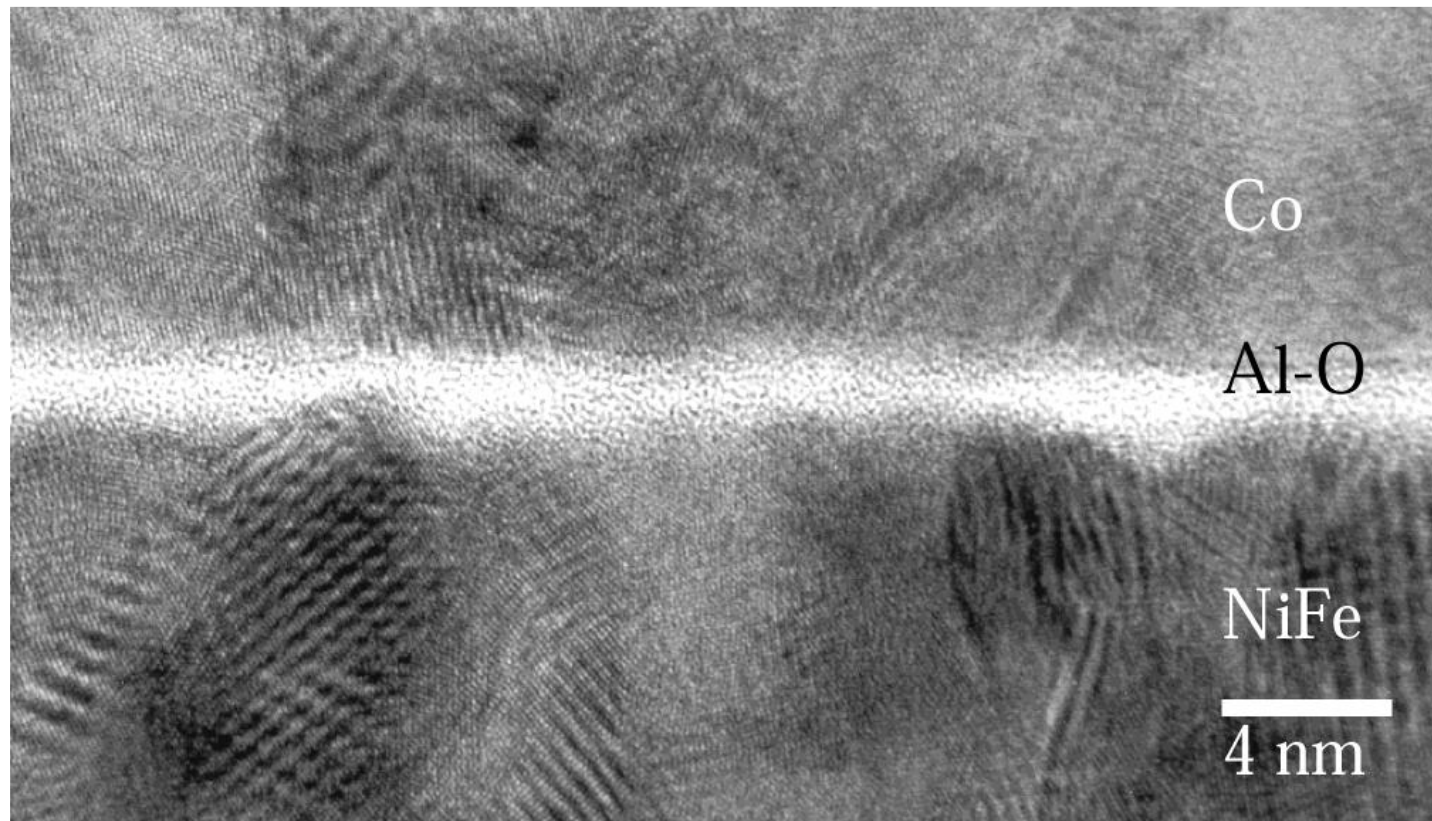
Moodera et al., *PRL* **80**, 2941 (1998).

Al-O障壁MTJの問題点（基礎研究面）

- トンネル障壁：アモルファスAl-O
- 上下の電極層：低配向の多結晶
- 界面：～nmスケールの凹凸あり



詳細な物理の研究は困難



A.C.C.Yu *et al.*,
JJAP **40**, 5058 (2001).

本日の内容

1. はじめに

- 磁気抵抗効果とスピントロニクス
- 磁気トンネル接合(MTJ)のトンネル磁気抵抗効果(TMR効果)
- アモルファルAl-Oトンネル障壁のTMR効果、その応用と限界

2. 結晶MgOトンネル障壁の巨大TMR効果

- エピタキシャルMgO(001)トンネル障壁
- CoFeB/MgO/CoFeB構造のMTJ

3. ハードディスク(HDD)

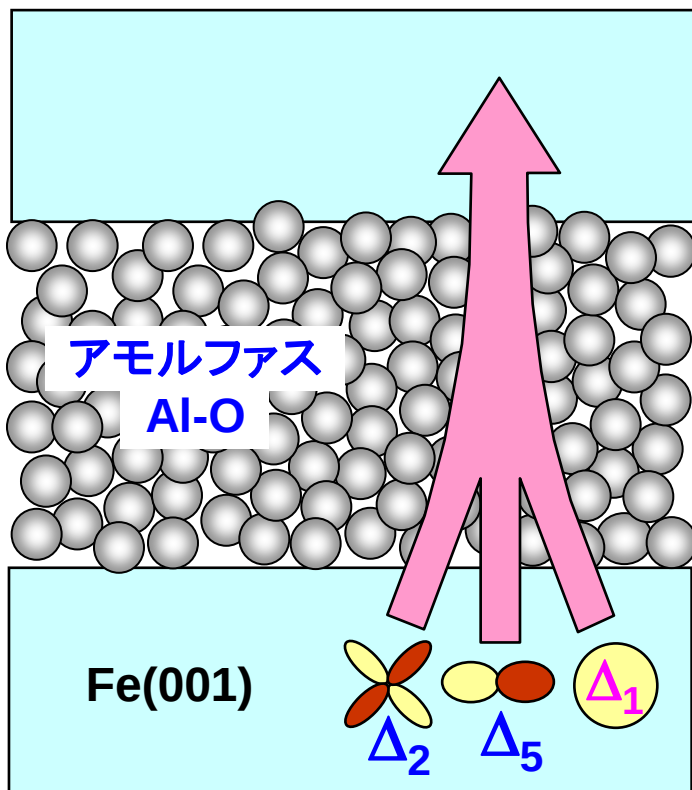
4. 不揮発性メモリ STT-MRAM

- スピン転移トルク(STT)
- 垂直磁化STT-MRAM

5. まとめ、今後の課題

アモルファス Al-O と 結晶 MgO(001)

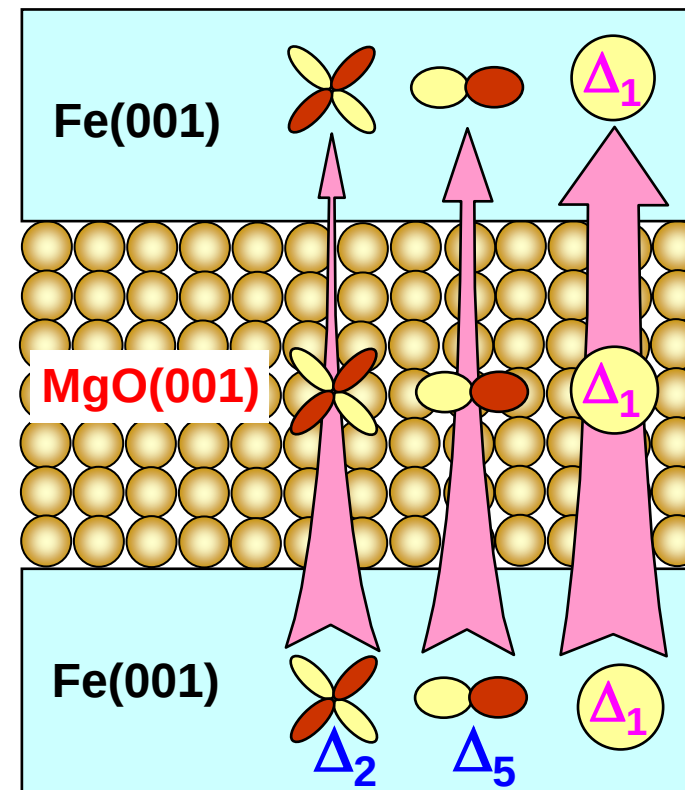
アモルファス Al-O トンネル障壁



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

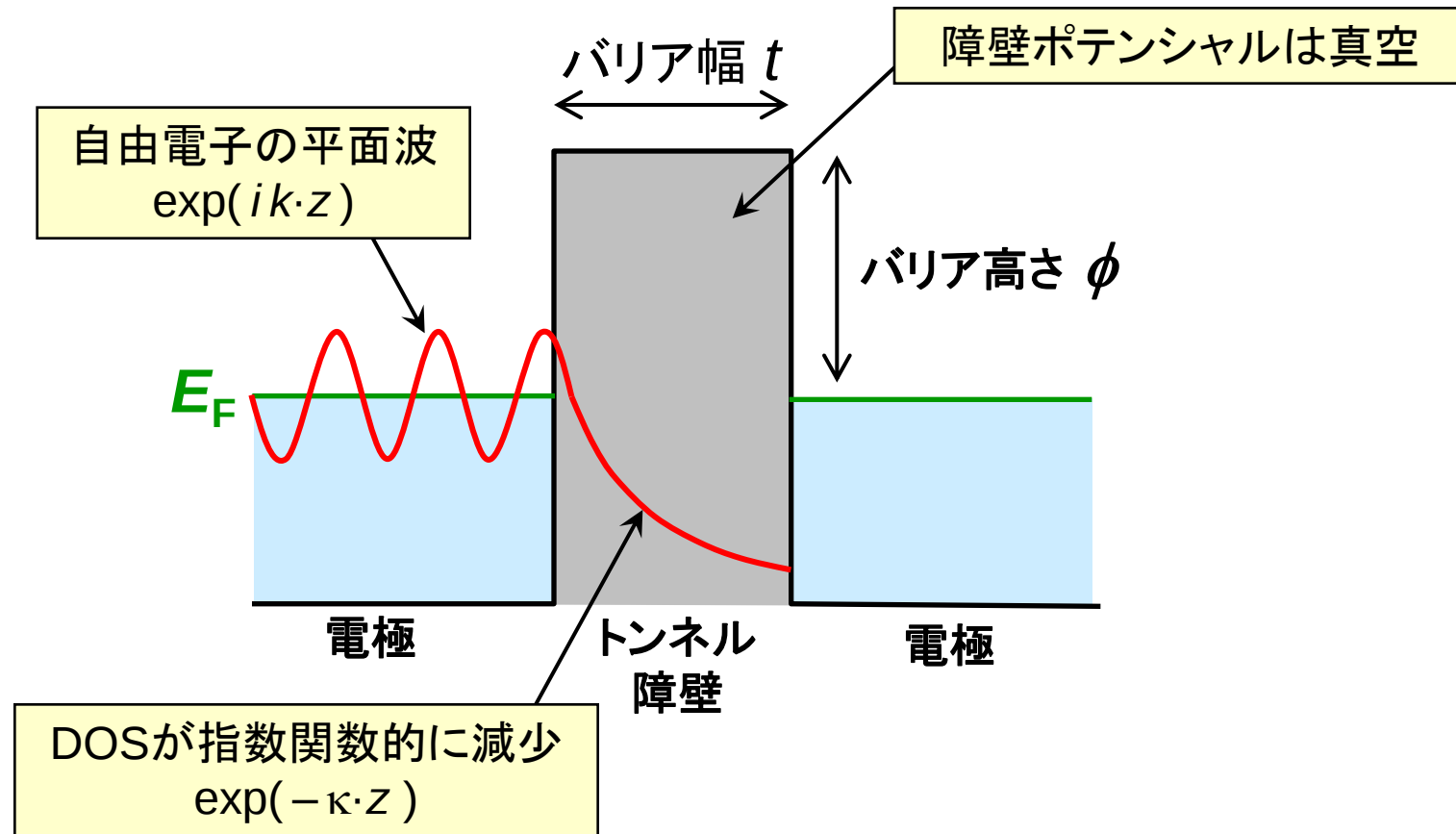


Δ_1 状態が支配的にトンネル伝導に寄与する

➡ MR比 $\gg$ 1000%(第一原理計算)

Bulter et al. 2001; Mathon et al. 2001.

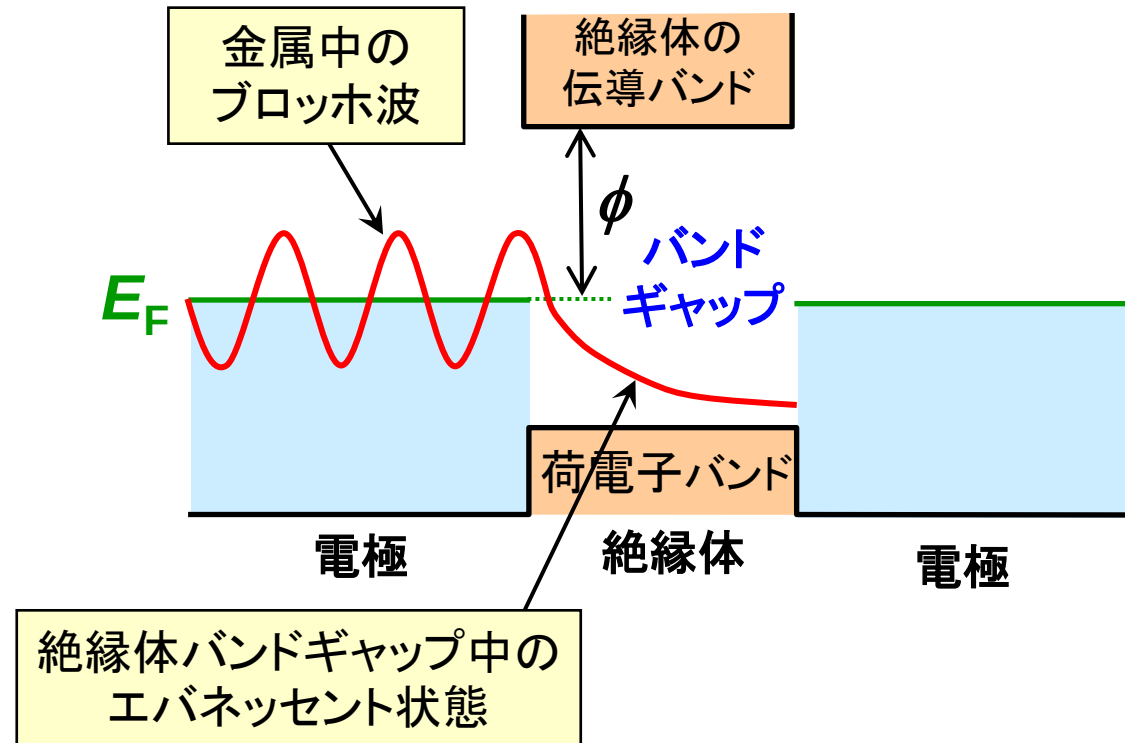
量子力学の授業で習うトンネル効果 の描像



トンネル障壁幅 t を厚くすると、トンネル透過率 T は指数関数的に減少する

$$T \propto \exp\left(-\sqrt{8m\phi/\hbar^2} \times t\right) \quad m: \text{電子の有効質量}$$

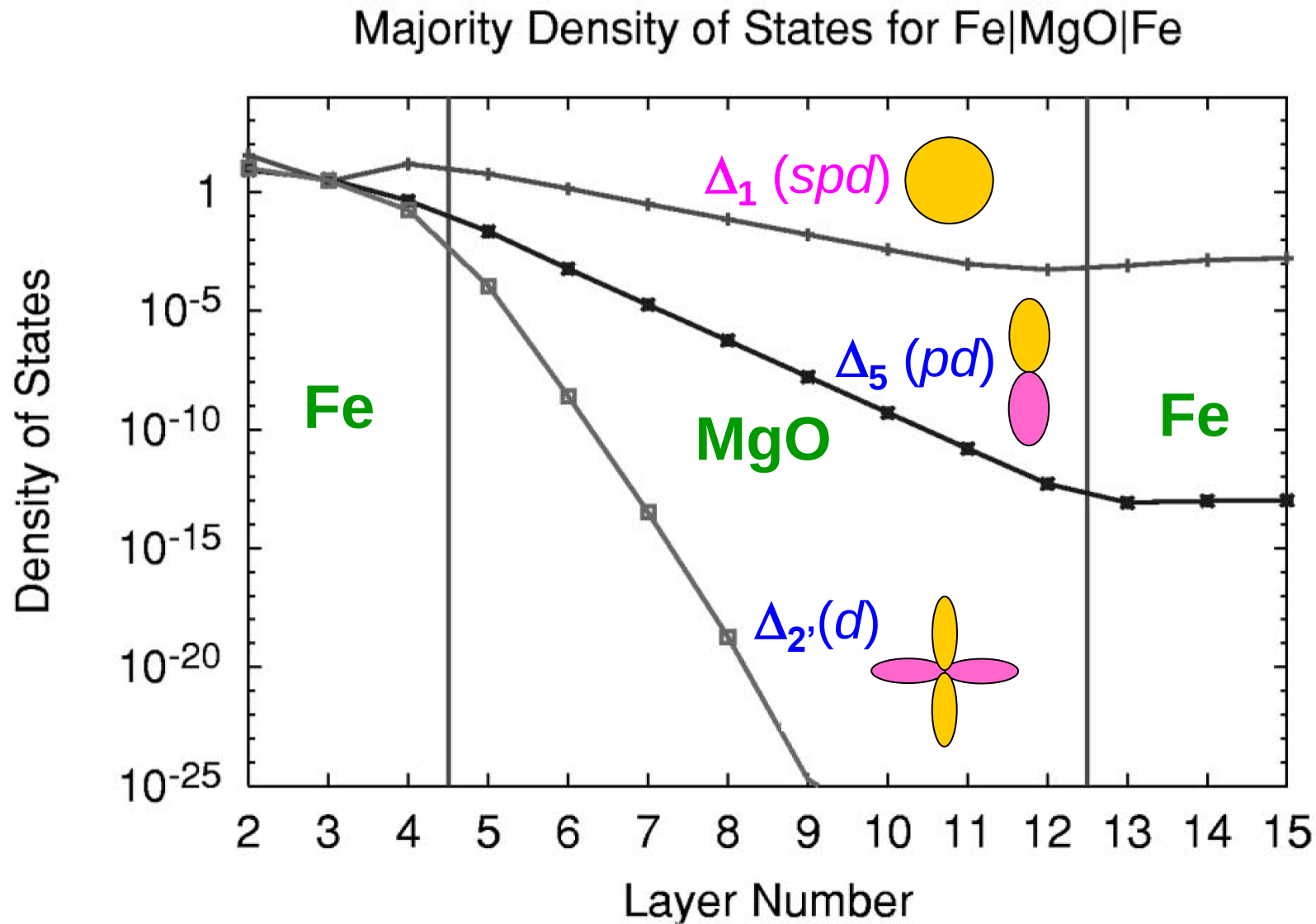
現実の絶縁体トンネル障壁のトンネル現象



ブロッホ状態 や エヴァネッセント状態は、
(i) 特有の波動関数の軌道対称性 と (ii) 特有のバンド分散 を持っている

ブロッホ状態とエバネッセント状態が、界面でどのように接続するか？

MgO中のエヴァネッセント状態のDOSの減衰

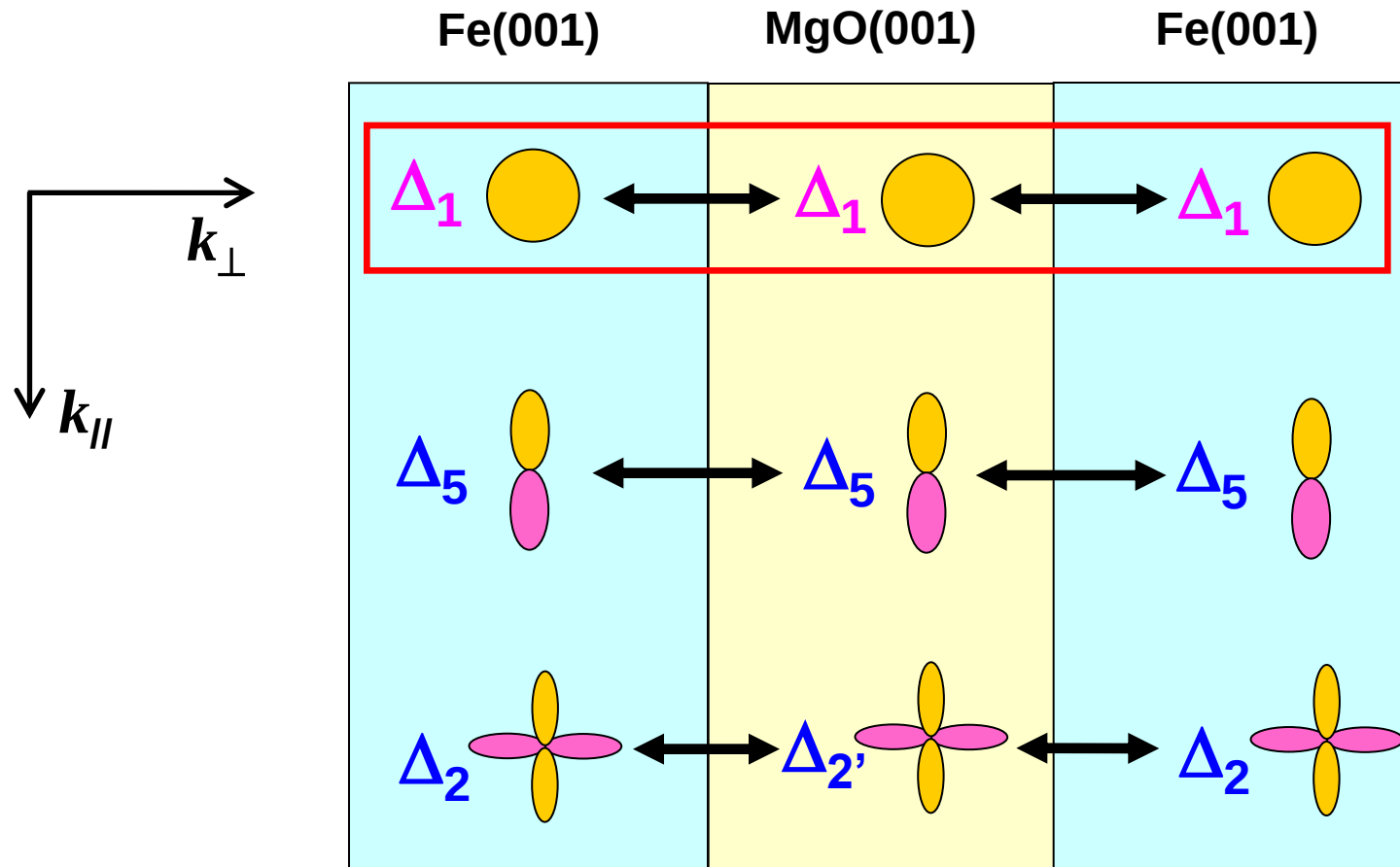


$$\Delta_1 : s + p_z + d_{2z^2 - x^2 - y^2}$$

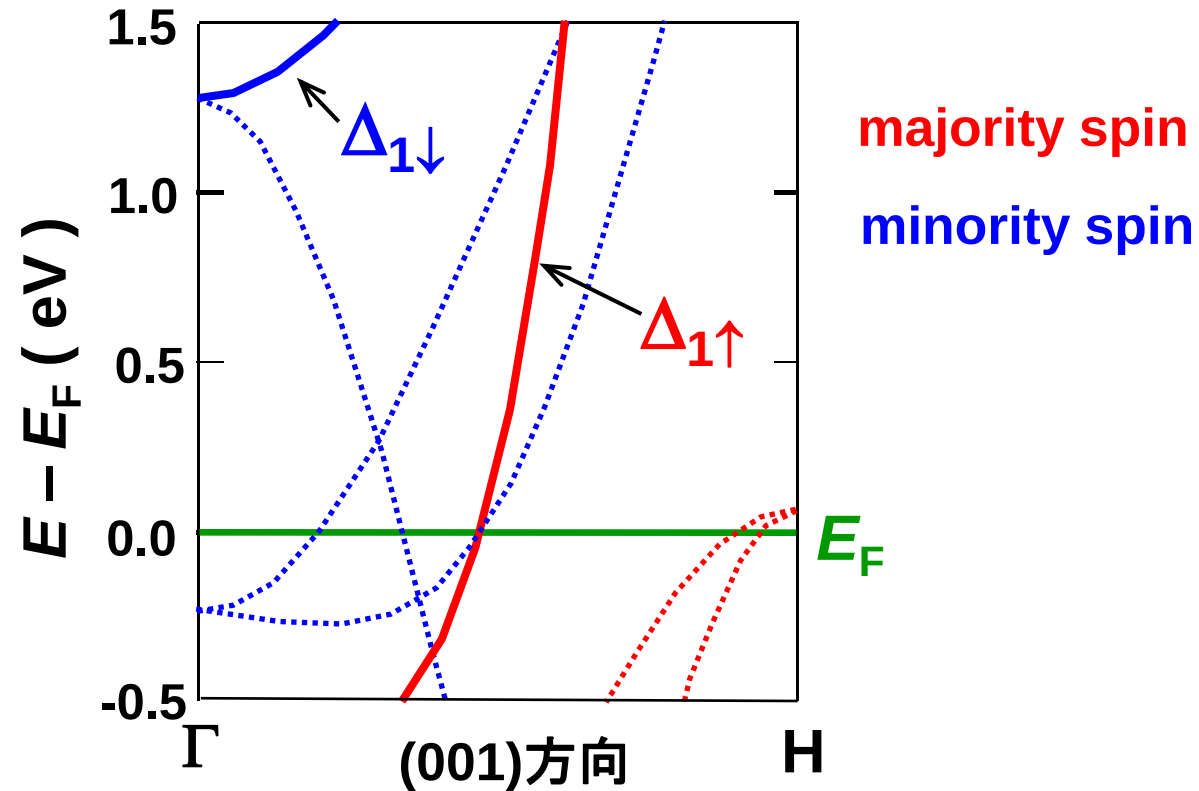
Butler (2001).

ブロッホ状態 と エヴァネッセント状態 の 波動関数の接続

波動関数の対称性が保存される理想的な(コヒーレントな)トンネルの場合



E_F 上で完全にスピン分極した**bcc Fe(001)** の Δ_1 バンド ($k_{||}=0$ 方向)



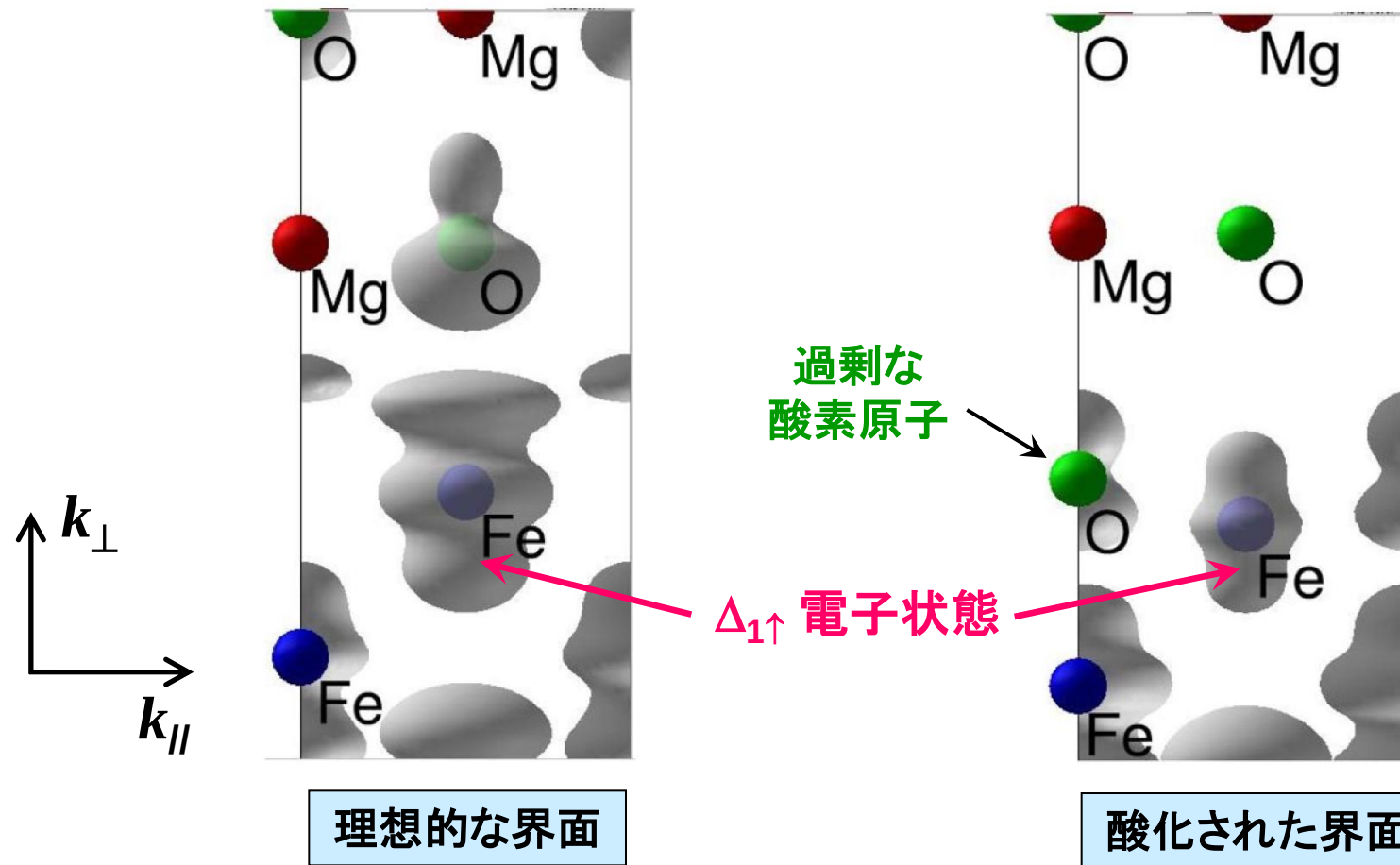
E_F 上で完全スピン分極した Δ_1 バンド ($|P|=1$)

$\Rightarrow$ 巨大なMR比が理論的に期待される

bcc Feだけでなく、FeやCoをベースにしたbcc構造の合金は完全スピン分極した Δ_1 バンドを持つ。
(例: bcc Fe-Co, 幾つかのホイスラー合金)

界面構造と波動関数の接続

(理論計算) Zhang *et al.*, *Phys. Rev. B* **68**, 092402 (2003).



Fe- $\Delta_{1\uparrow}$ 状態は $k_{\parallel} = 0$ 方向で
MgO- Δ_1 に接続

MR 比 $\gg 1000\%$

Fe- $\Delta_{1\uparrow}$ は $k_{\parallel} = 0$ 方向で
MgO- Δ_1 に接続できない

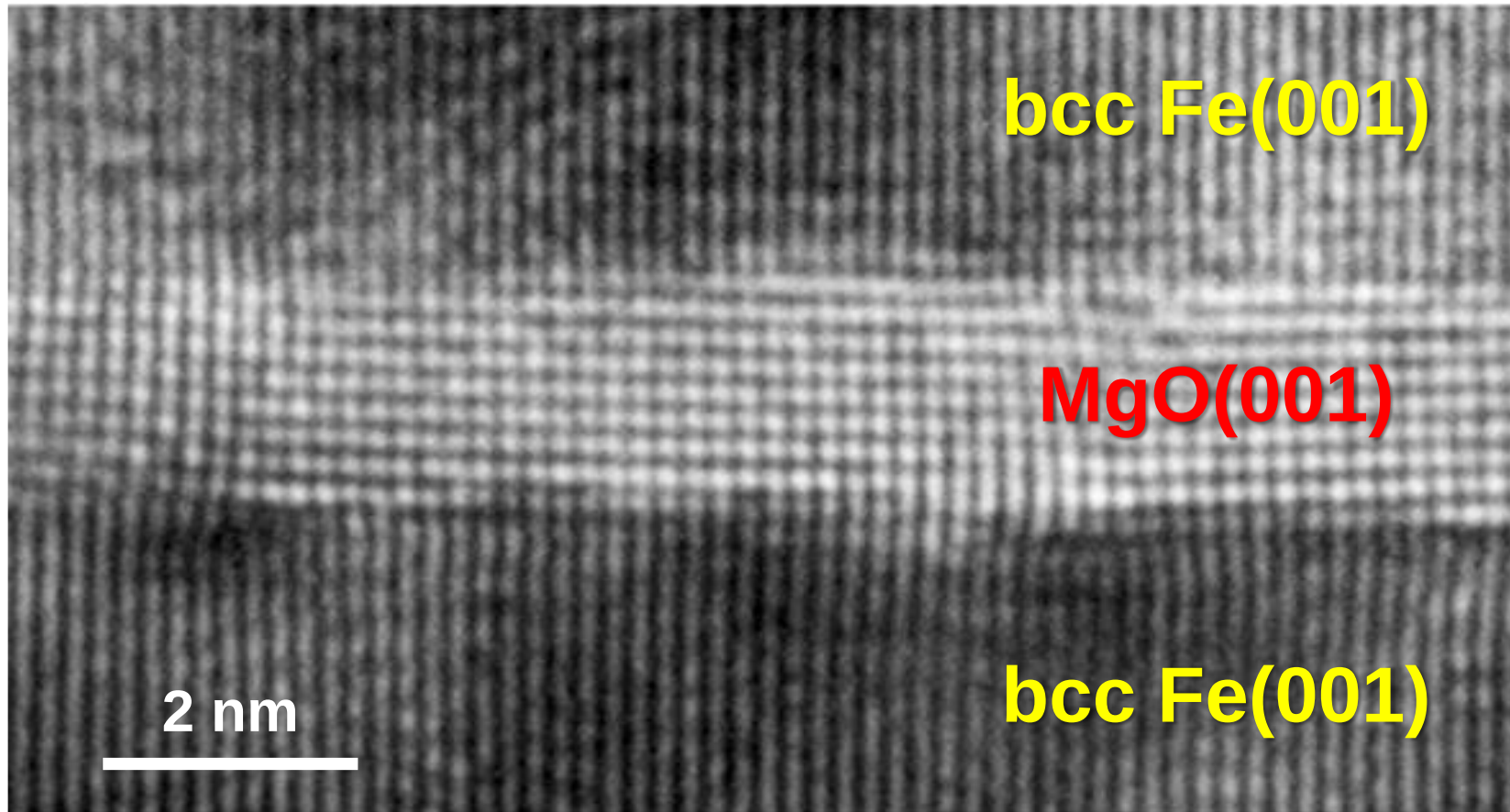
MR 比 $< 100\%$

全エピタキシャル **Fe/MgO/Fe(001)** – MTJ を作製

産総研・JSTさきがけ

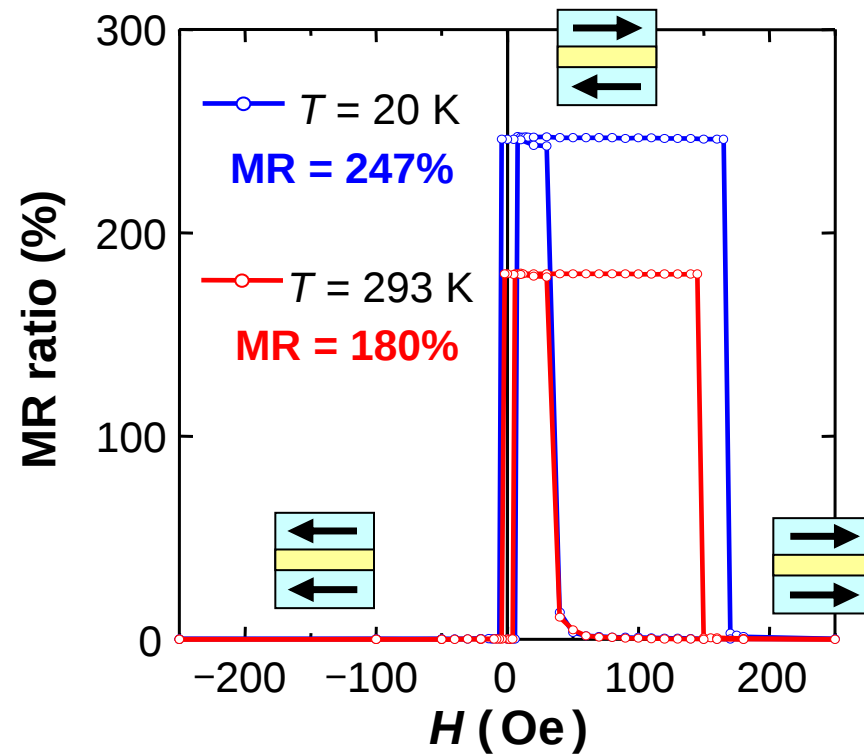
S. Yuasa *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, L558 (2004).

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



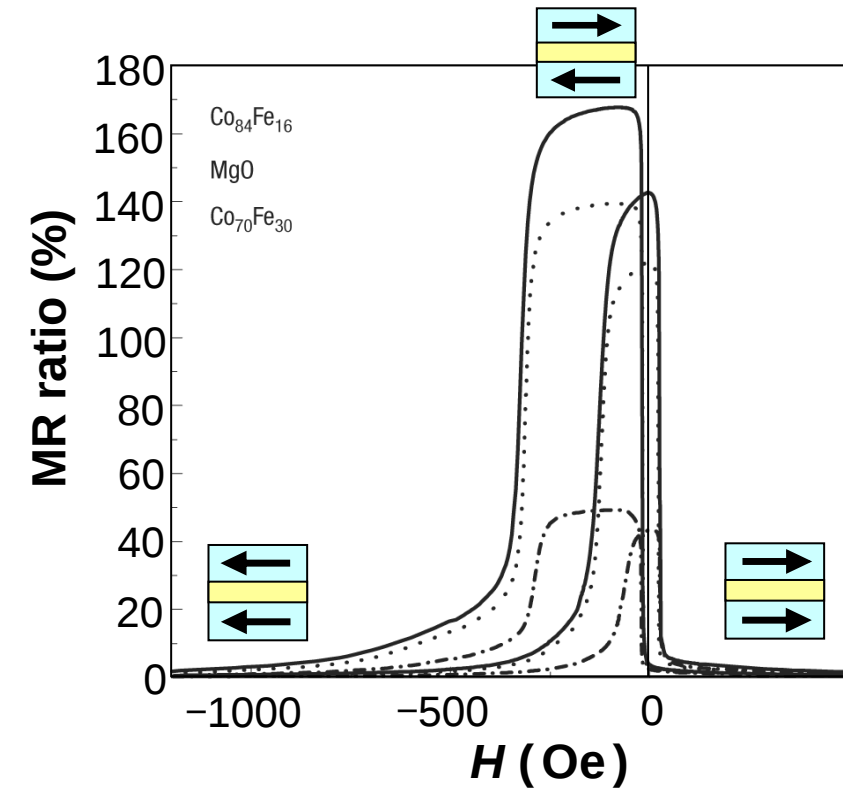
室温で巨大なMR比を実現

単結晶 MgO(001) 障壁

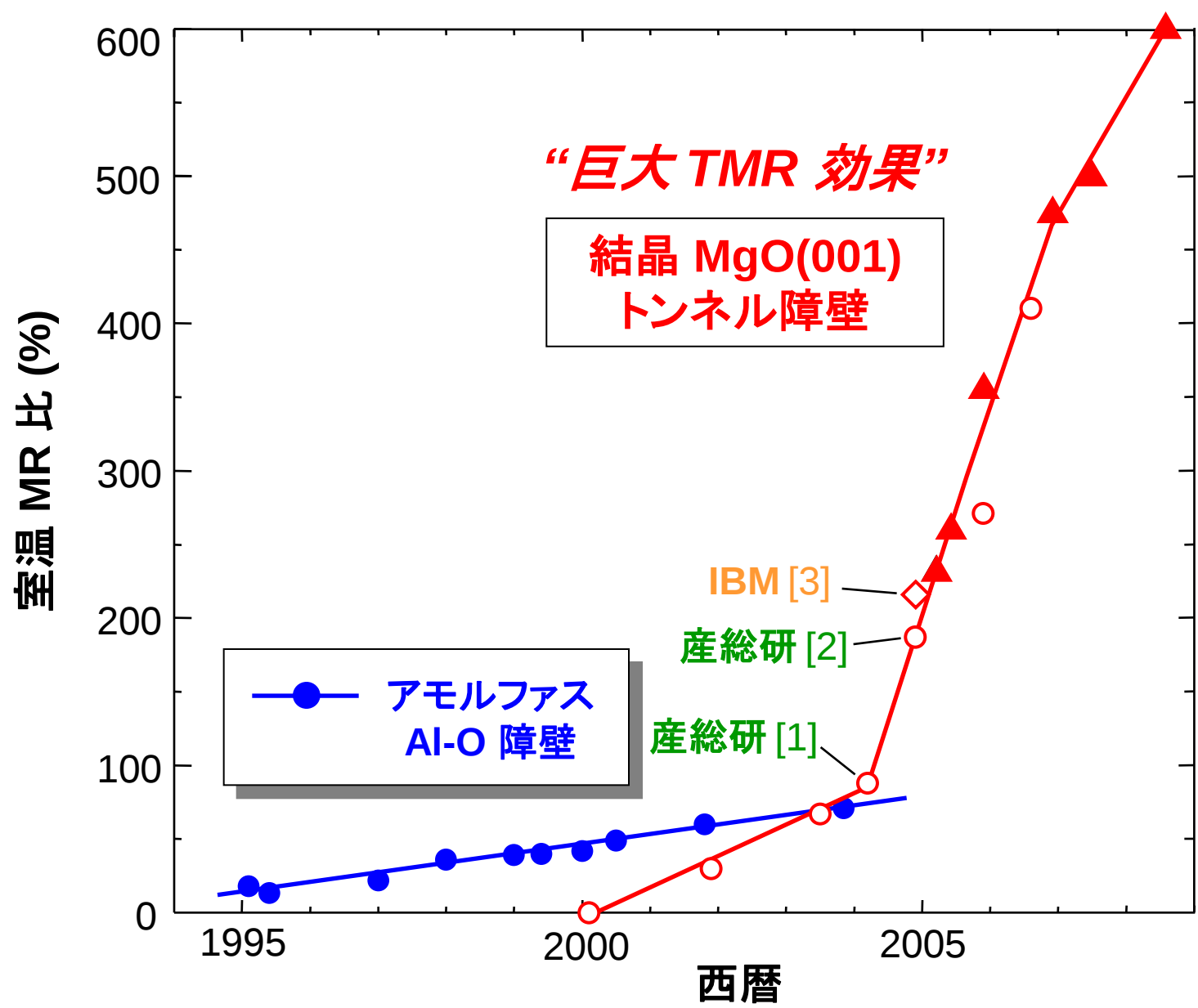


S. Yuasa *et al.*, *Nature Mater.* **3**, 868 (2004).

配向性多結晶 MgO(001) 障壁



S.S.P. Parkin *et al.*, *Nature Mater.* **3**, 862 (2004).



[1] Yuasa, *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, L558 (2004). [2] Yuasa, *Nature Mater.* **3**, 868 (2004).
[3] Parkin, *Nature Mater.* **3**, 862 (2004).

本日の内容

1. はじめに

- 磁気抵抗効果とスピントロニクス
- 磁気トンネル接合(MTJ)のトンネル磁気抵抗効果(TMR効果)
- アモルファルAl-Oトンネル障壁のTMR効果、その応用と限界

2. 結晶MgOトンネル障壁の巨大TMR効果

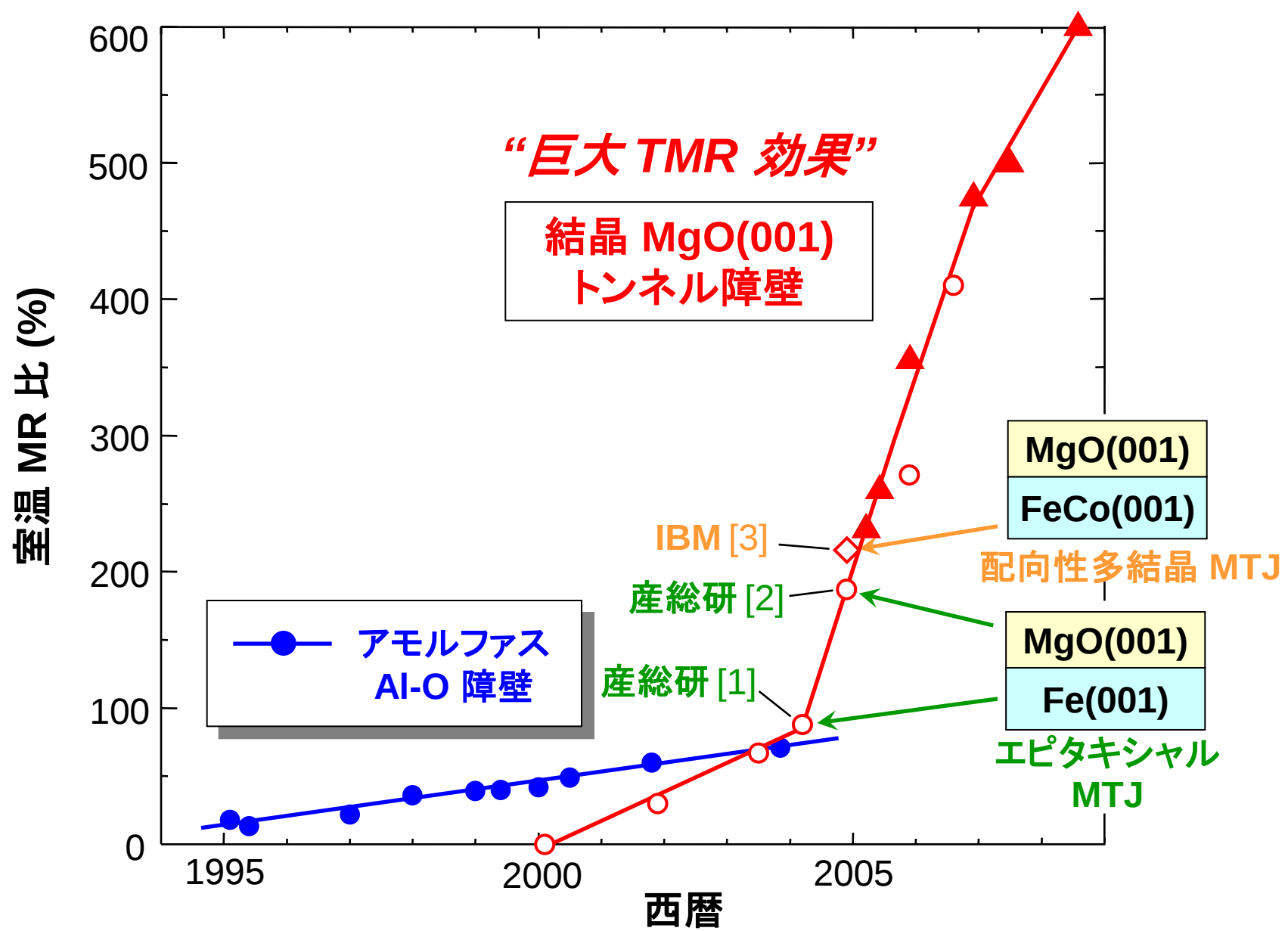
- エピタキシャルMgO(001)トンネル障壁
- **CoFeB/MgO/CoFeB構造のMTJ**

3. ハードディスク(HDD)

4. 不揮発性メモリ STT-MRAM

- スピン転移トルク(STT)
- 垂直磁化STT-MRAM

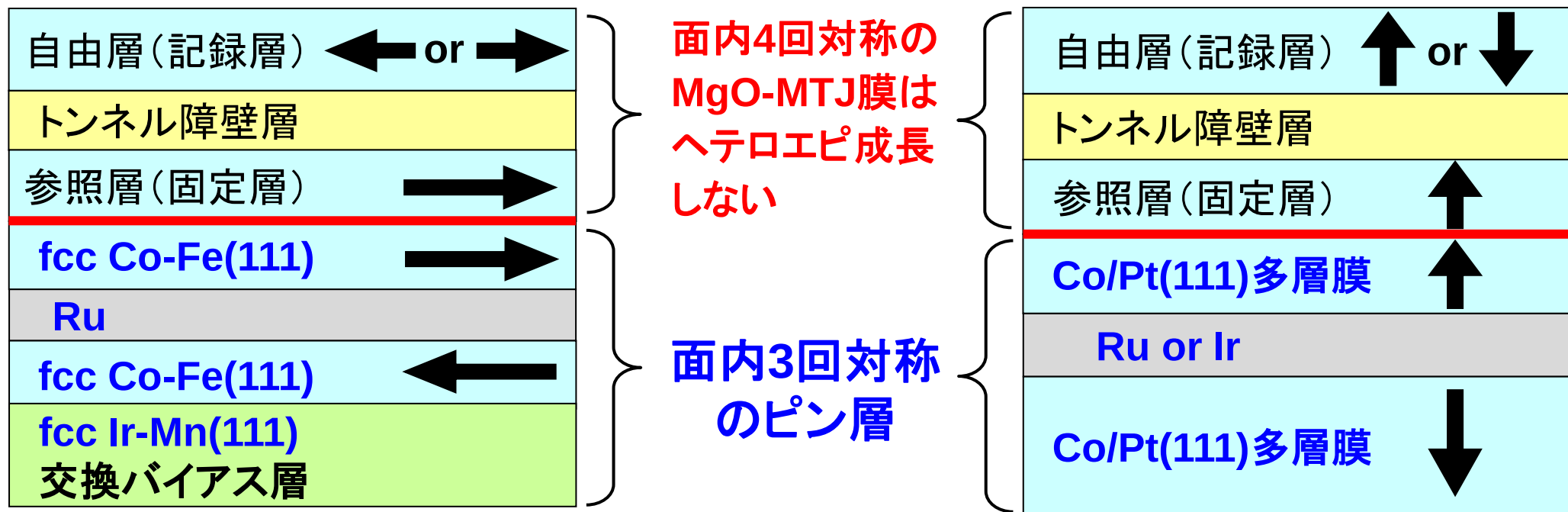
5. まとめ、今後の課題



[1] Yuasa, *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, L558 (2004). [2] Yuasa, *Nature Mater.* **3**, 868 (2004).
 [3] Parkin, *Nature Mater.* **3**, 862 (2004).

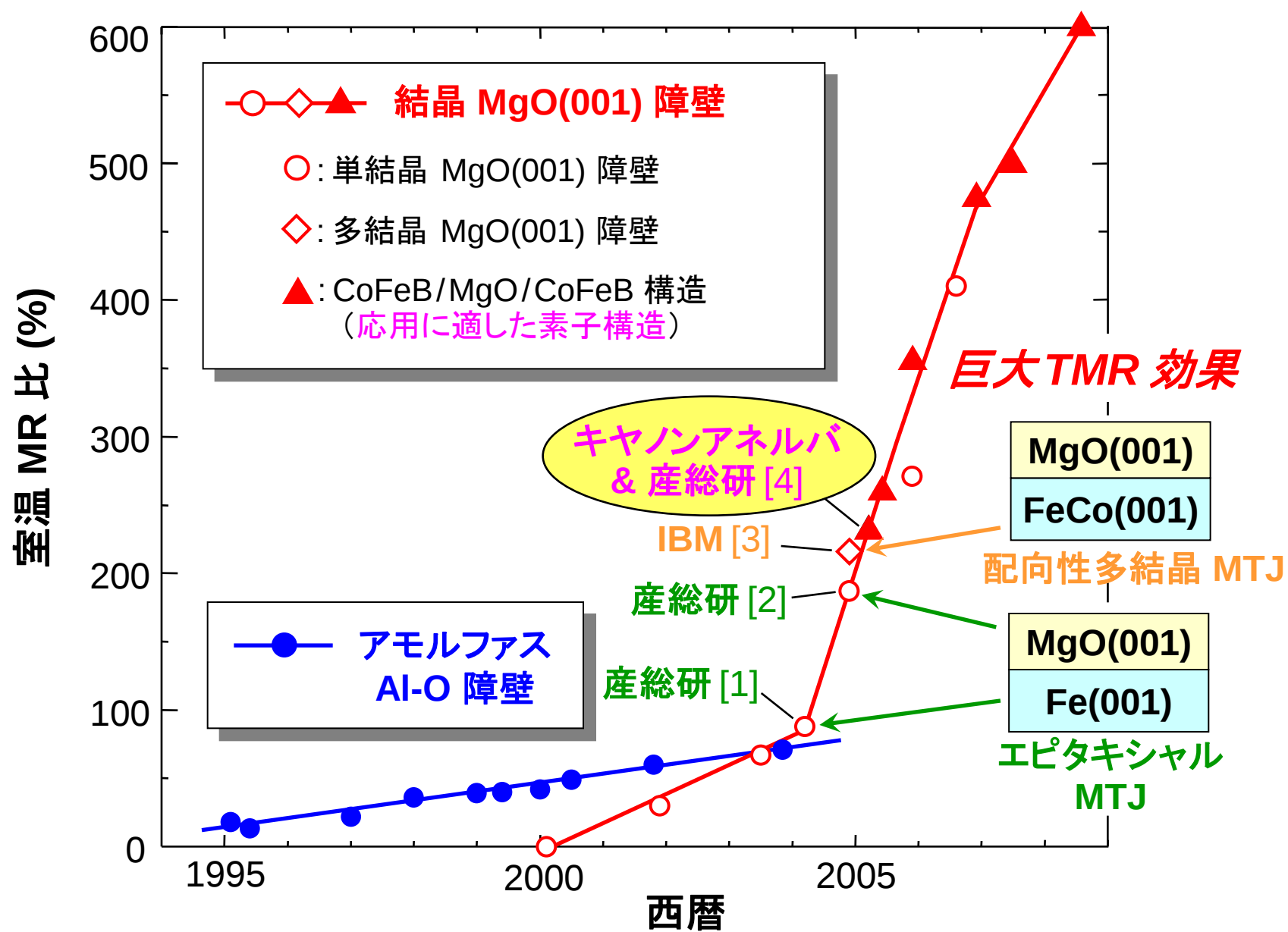
MgO-MTJのデバイス応用を阻む“結晶成長”の問題

- **MgO(001)**障壁および**bcc(001)**電極は**面内4回対称**構造を持つため、信頼性のある**fcc(111)**ピン層（**面内3回対称**）の上に作製することは困難



MTJ（面内磁化）
（HDD磁気ヘッド用）

MTJ（垂直磁化）
（STT-MRAM用）

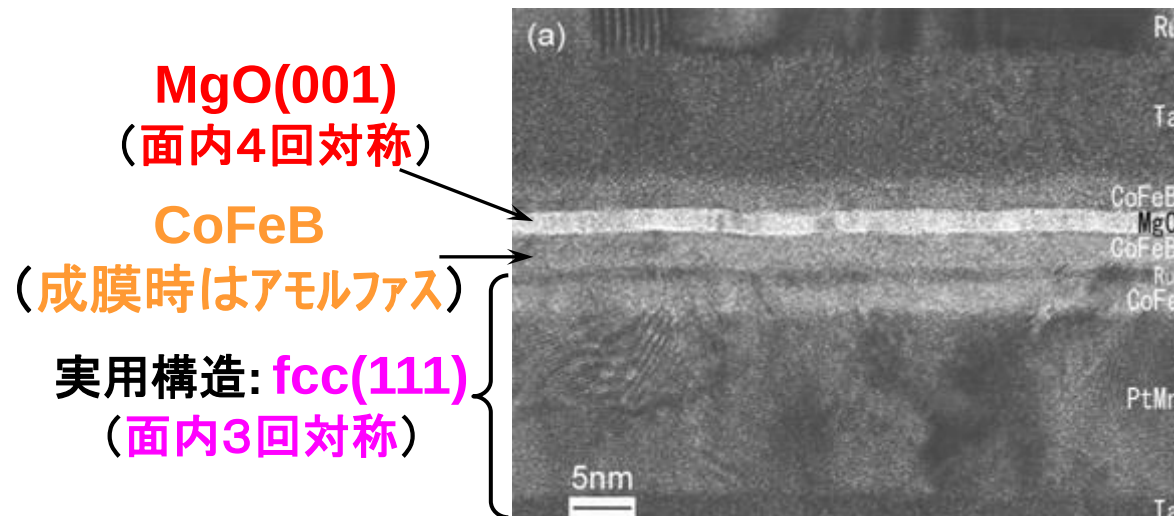
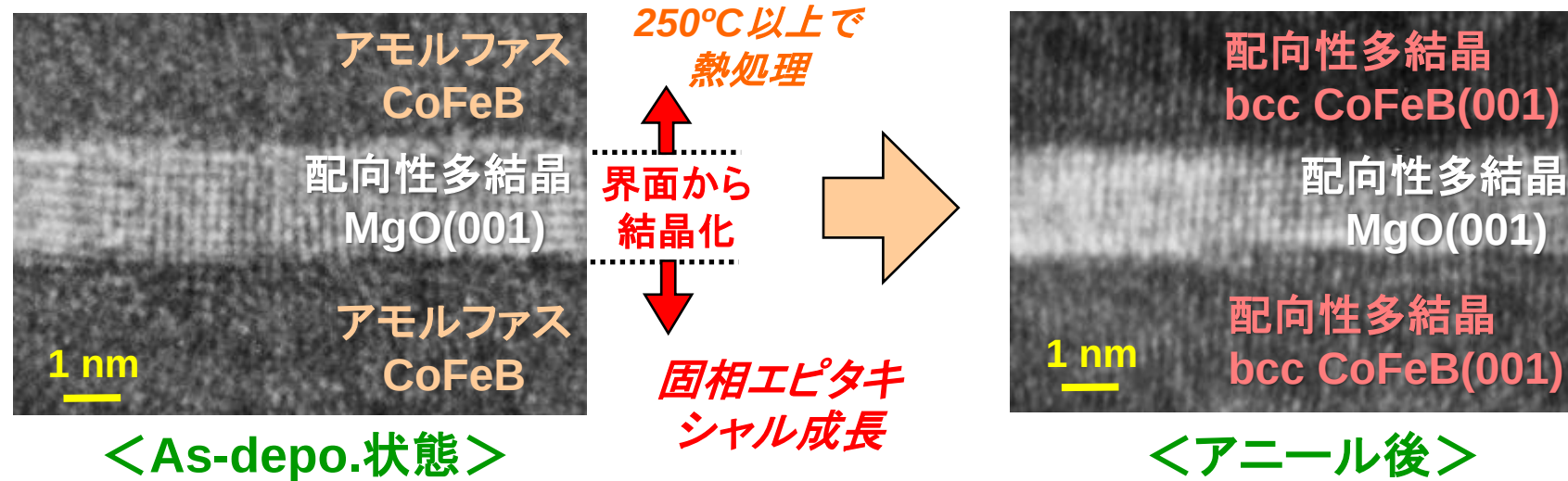


- [1] Yuasa, *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, L558 (2004). [2] Yuasa, *Nature Mater.* **3**, 868 (2004).
 [3] Parkin, *Nature Mater.* **3**, 862 (2004). [4] Djayaprawira, SY, *APL* **86**, 092502 (2005).

デバイス応用を可能とする **CoFeB/MgO/CoFeB** 構造を開発

キヤノンアネルバ & 産総研

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

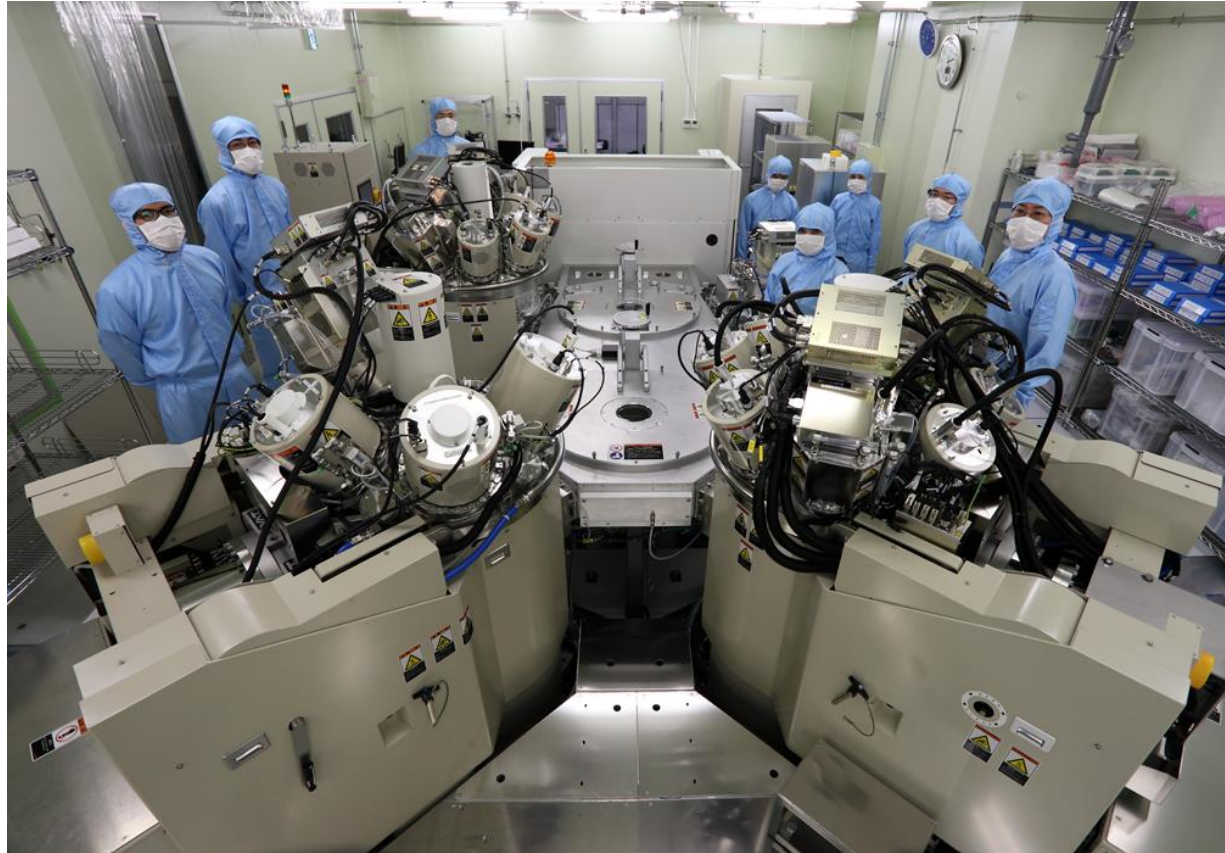


産業応用の中核技術

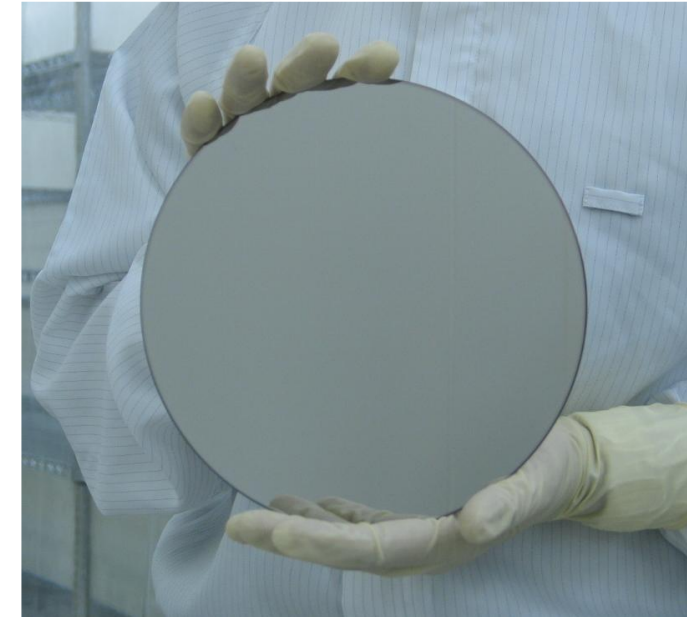
世界中のデバイスメーカーが
CoFeB/MgO/CoFeBを用いて
製品開発を開始

CoFeB/MgO/CoFeB – MTJの量産プロセスを開発

キヤノンアネルバ & 産総研



産業用の大型スパッタ成膜装置



φ200 – 300 mmウェーハ上に
大量生産が可能

世界中のデバイスメーカーがCoFeB/MgO/CoFeBを用いた製品開発を開始

キャップ層の影響

Ta or Ru(キャップ層)
CoFeB 自由層
MgO(001) 障壁層
CoFeB 参照層
Ru スペース層

標準的な構造

MR ratio > 200%

Ni-Fe(パーマロイ)
CoFeB 自由層
MgO(001) 障壁層
CoFeB 参照層
Ru スペース層

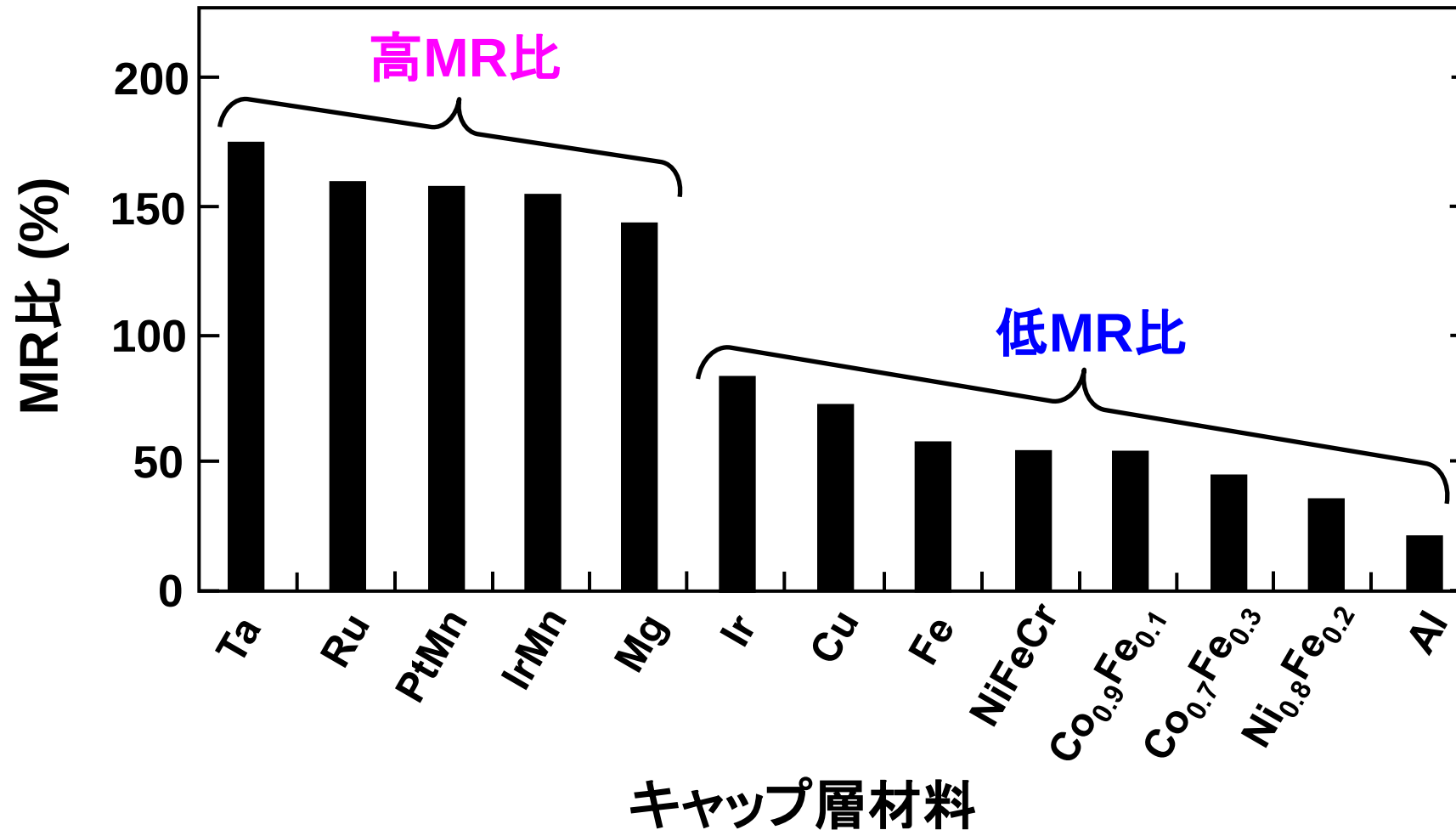
Ni-Feキャップ層

MR ratio < 50%

なぜ？

キャップ層の影響

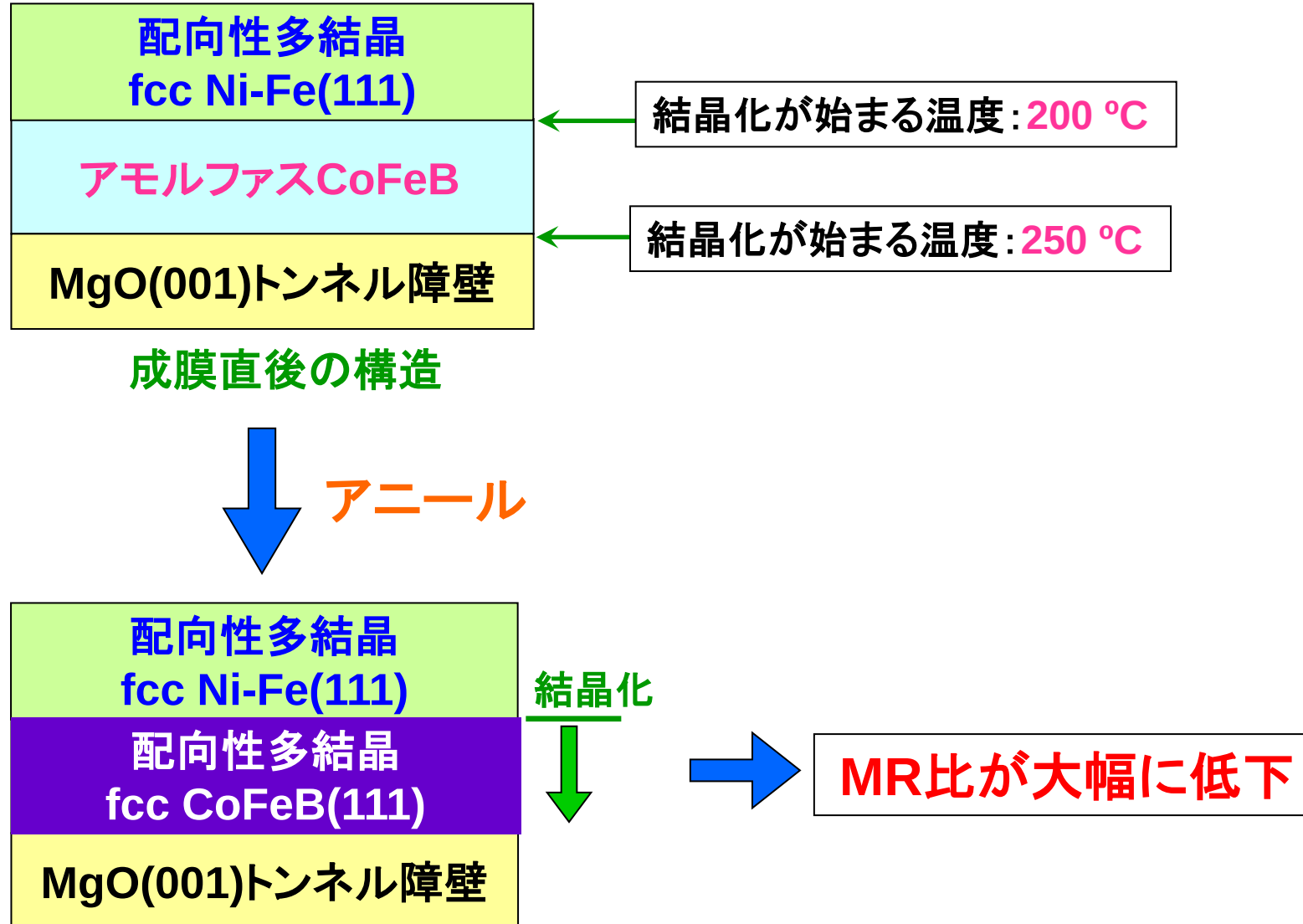
K. Tsunekawa et al., *Intermag 2005*, HP-08.
 Yuasa and Djayaprawira, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, R337 (2007).



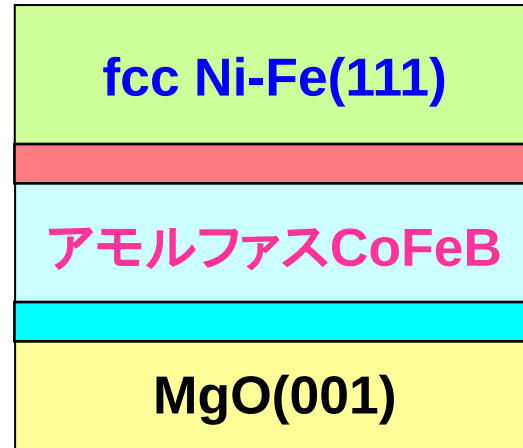
なぜ？

CoFeBの結晶化

Yuasa et al., *Appl. Phys. Lett.* **87**, 242503 (2005).
Yuasa and Djayaprawira, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, R337 (2007).



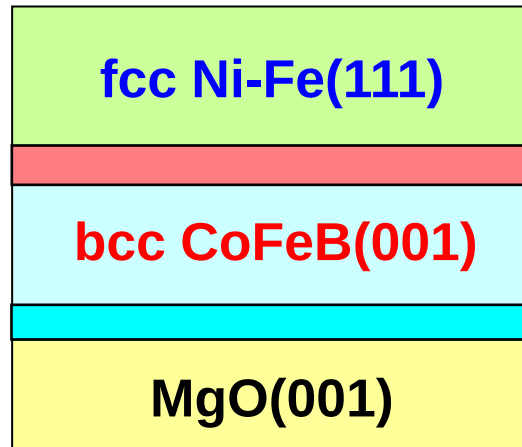
磁気ヘッド応用のためのMTJ積層構造



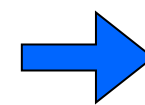
成膜直後の構造

超薄Ta層がNi-Fe側からの結晶化を阻害

低B濃度CoFe(B)層がMgO側からの結晶化を促進

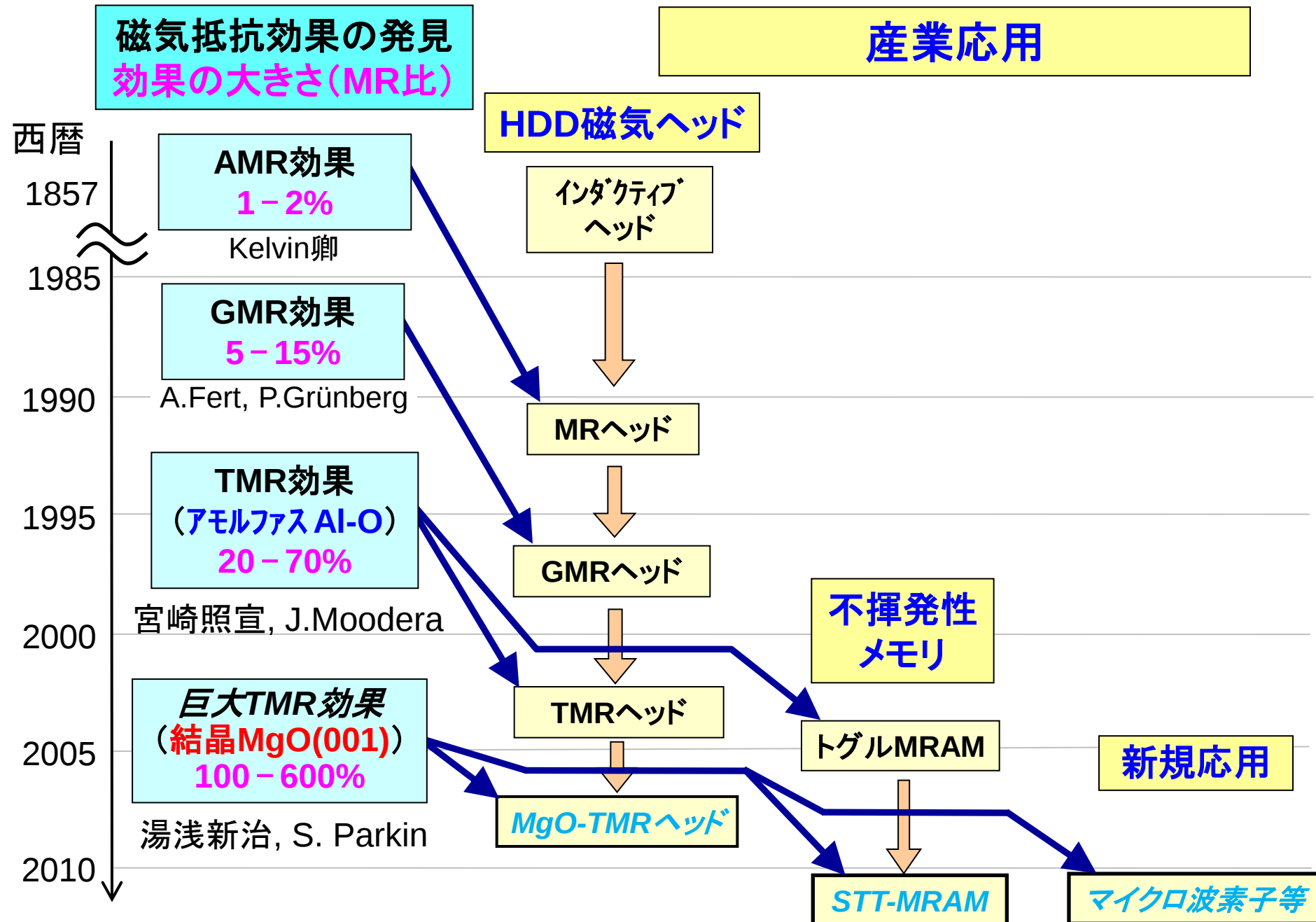


↑
結晶化



巨大なMR比

磁気抵抗効果の歴史



本日の内容

1. はじめに

- 磁気抵抗効果とスピントロニクス
- 磁気トンネル接合(MTJ)のトンネル磁気抵抗効果(TMR効果)
- アモルファルAl-Oトンネル障壁のTMR効果、その応用と限界

2. 結晶MgOトンネル障壁の巨大TMR効果

- エピタキシャルMgO(001)トンネル障壁
- CoFeB/MgO/CoFeB構造のMTJ

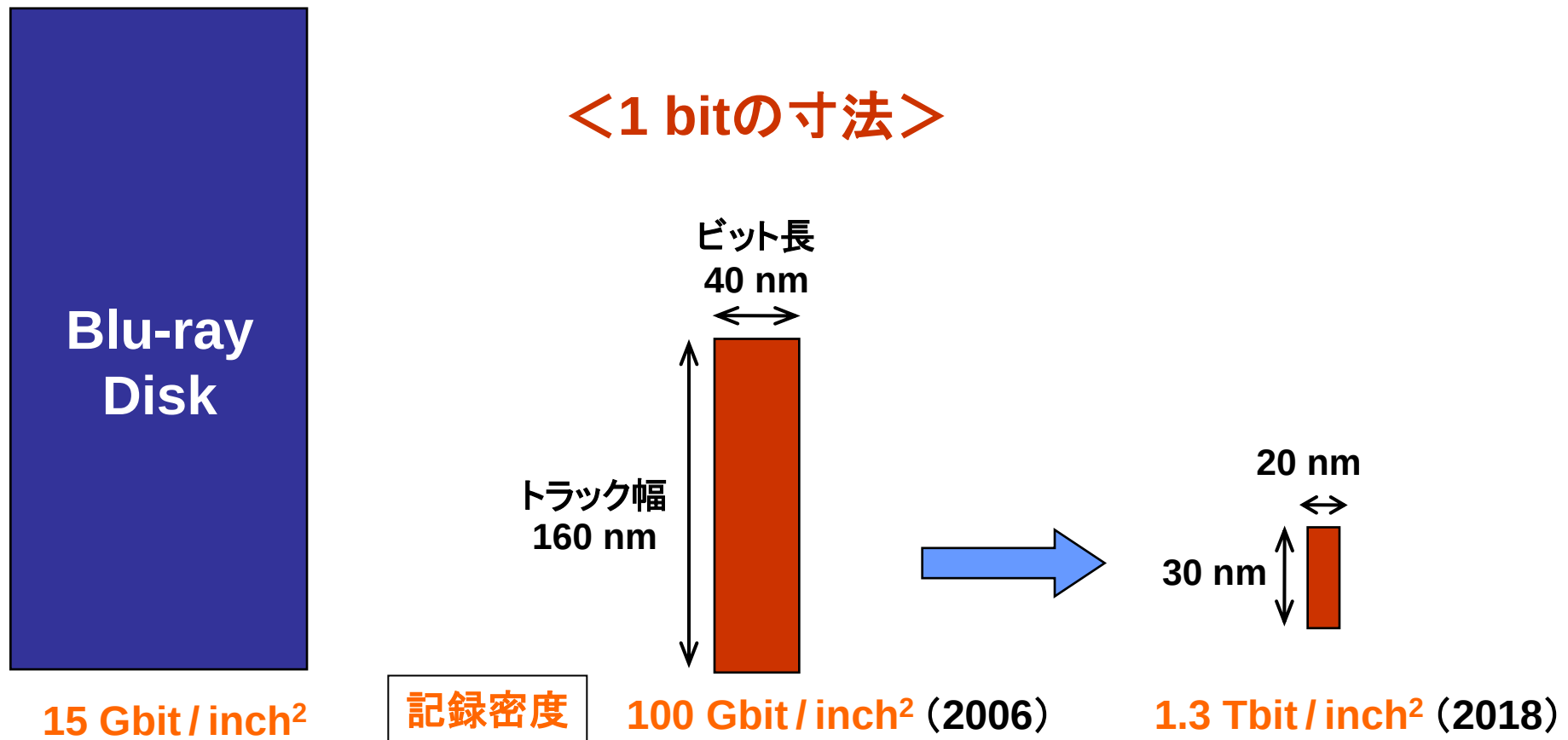
3. ハードディスク(HDD)

4. 不揮発性メモリ STT-MRAM

- スピン転移トルク(STT)
- 垂直磁化STT-MRAM

5. まとめ、今後の課題

HDD記録ビットのサイズ

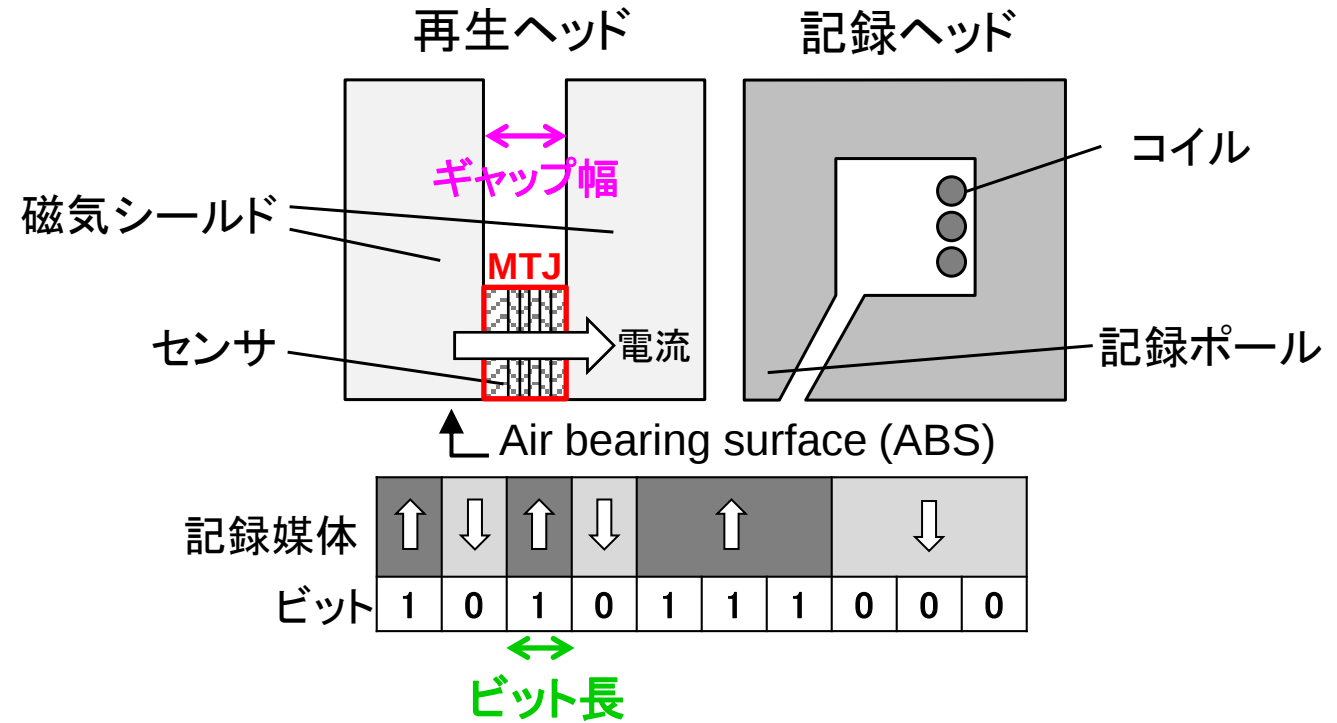
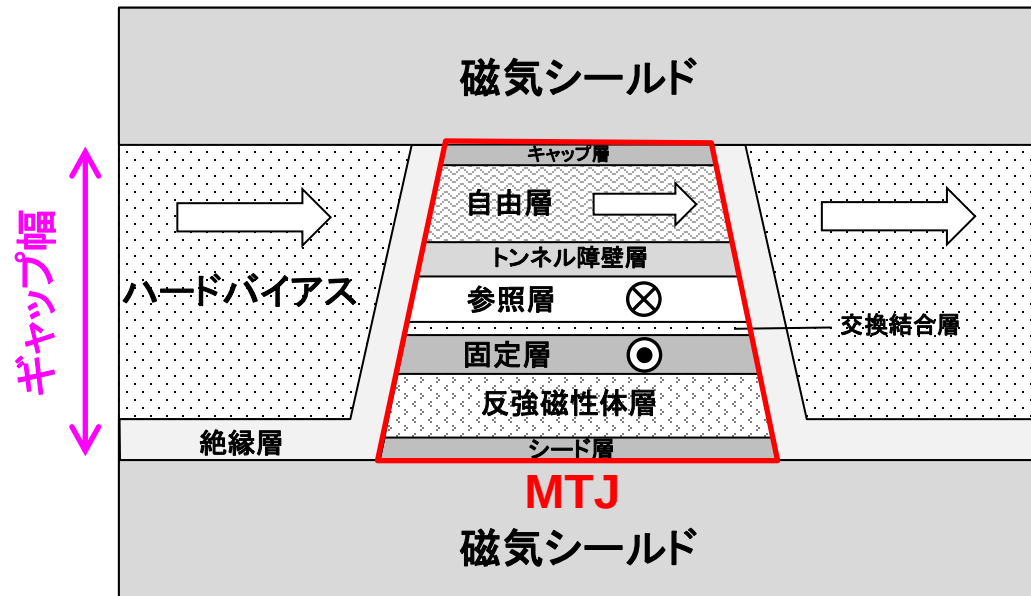


MTJへの要求: (1) S/N比向上のための**大きなMR比**

(2) インピーダンス整合(高速読み出し)のための**低いトンネル抵抗(低いRA値)**

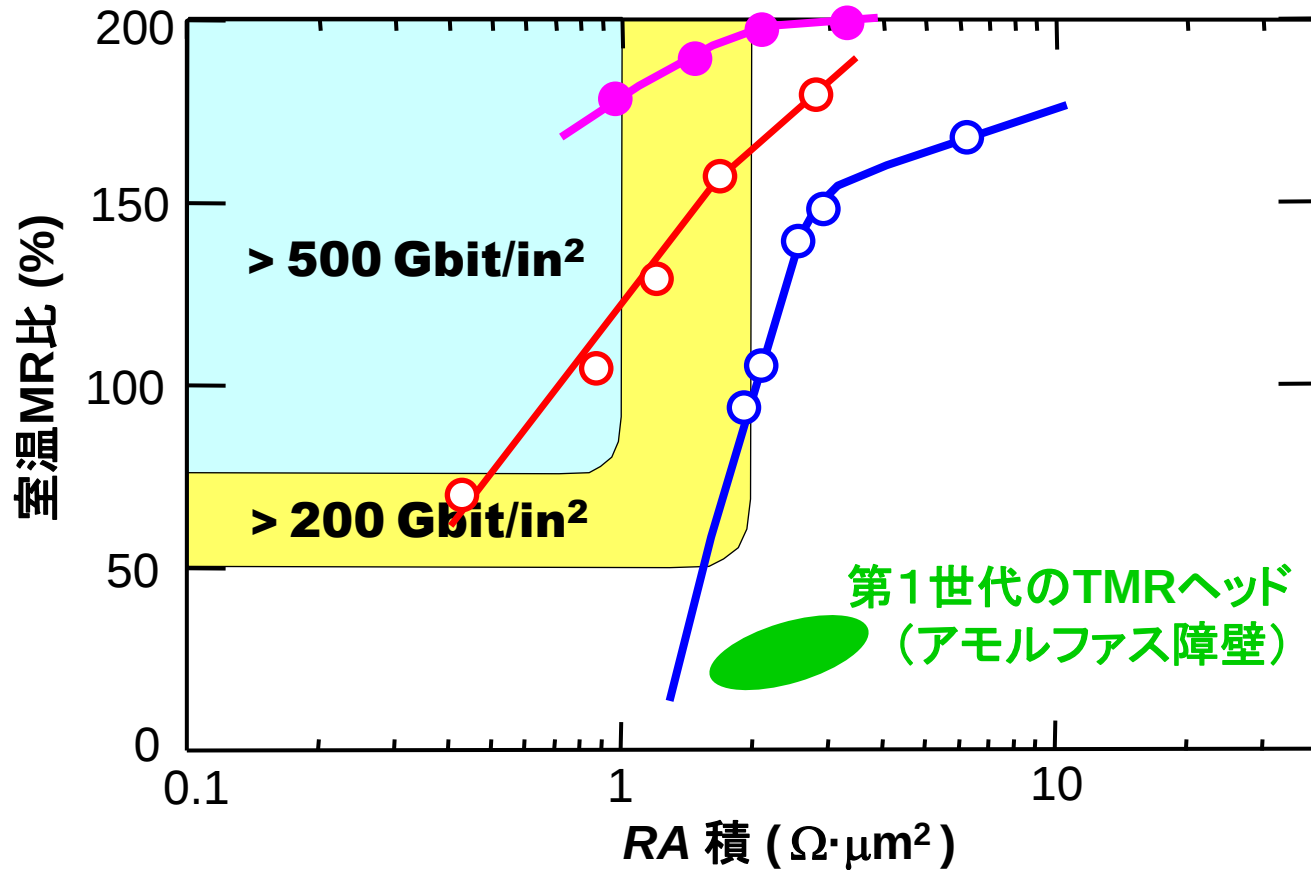
(3) シールドのギャップ内に収まる**磁気抵抗多層膜の厚さ**

HDD磁気ヘッドの基本構造

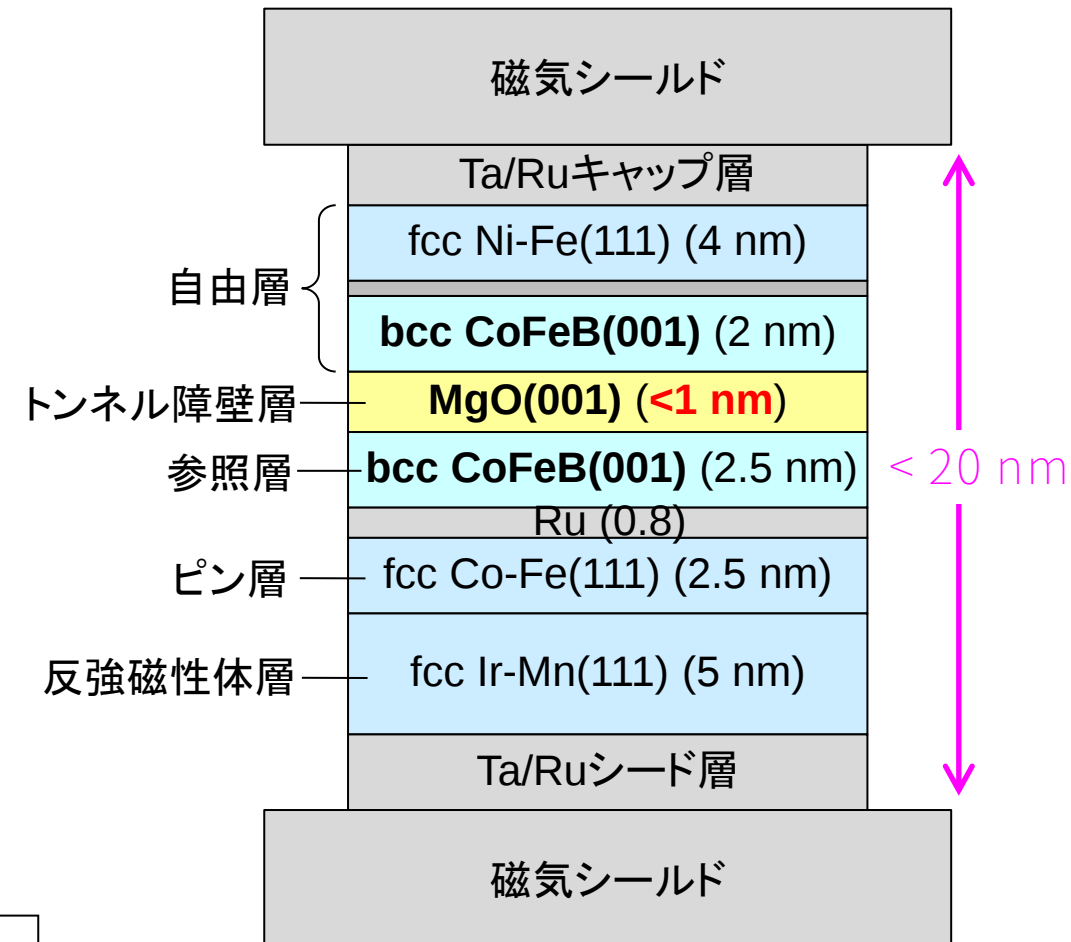


磁気抵抗多層膜の厚さ < ギャップ幅 ≒ ビット長 (~ 20 nm)

MgO(001)トンネル障壁で超低RAと高MR比を両立

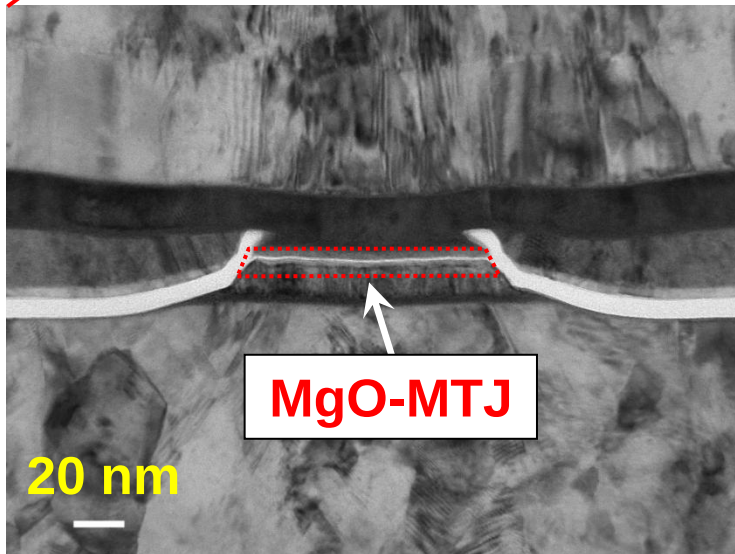


- K. Tsunekawa, SY, YS et al., *Appl. Phys. Lett.* **87**, 072503 (2005).
- Y. Nagamine, SY et al., *Appl. Phys. Lett.* **89**, 162507 (2006).
- H. Maehara, SY et al., *Appl. Phys. Express* **4**, 033002 (2011).

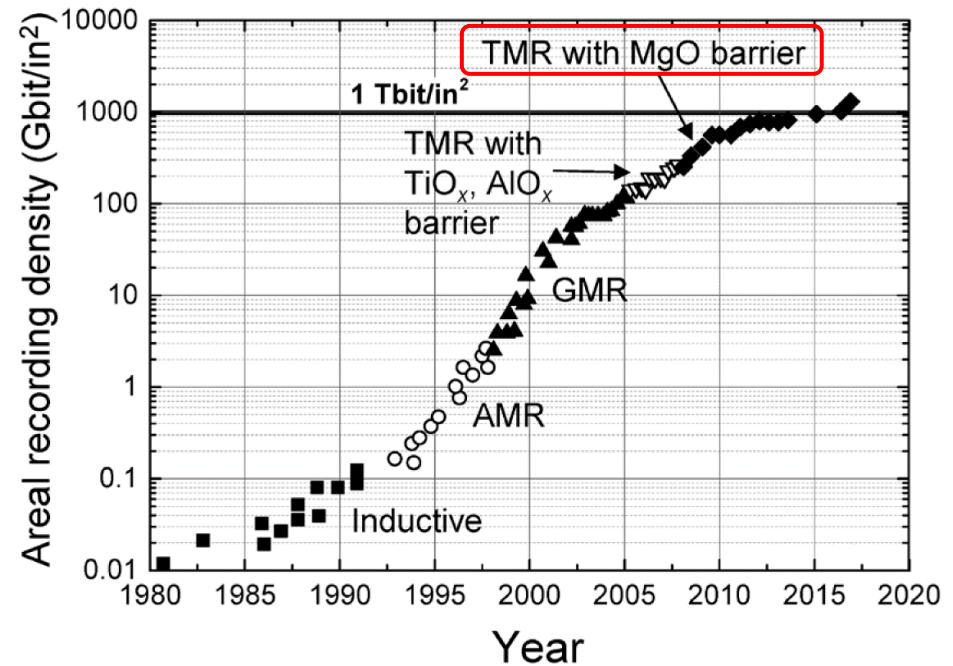


MgO-TMRヘッドの典型的な積層構造

MgO-TMRヘッドを用いたハードディスク(HDD)



断面TEM写真



HDDの面記録密度と磁気ヘッド技術の変遷
(中谷友也、まぐね14巻5号(2019).)

- 2007年から現在まで**HDDに搭載**
- 面記録密度 **1.5 Tbit / in²**(従来の**10倍**)
- HDDは**データセンターの主流ストレージ**として全デジタル情報の**7割**を保存
- HDDは**約3兆円／年**の市場規模を維持

HDD技術の今後

- 記録密度 ~ 3 Tbit/inch² までは、現行のMgO-TMRヘッド技術で十分対応可能
- ここ数年、HDDの記録密度は約1.5 Tbit/inch² で頭打ちになっていたが、最近米国シーゲイト社が熱アシスト磁気記録 (HAMR) の製品化に成功したため、今後、記録密度の大幅な増大が期待される
- もし記録密度が 3 Tbit/inch² を大きく超えるようになれば、新規の再生磁気ヘッドが必要になる(かもしれない)が、次世代の本命技術はまだ見えていない
⇒ 再び基礎研究の出番あり
- 当面、データセンターの主流ストレージはHDD、それ以外の市場はSSD、という棲み分けが続くだろうが、うかうかしているとデータセンター市場もSSDに侵食される。そうならないために、HDDのさらなる高密度化が必要

本日の内容

1. はじめに

- 磁気抵抗効果とスピントロニクス
- 磁気トンネル接合(MTJ)のトンネル磁気抵抗効果(TMR効果)
- アモルファルAl-Oトンネル障壁のTMR効果、その応用と限界

2. 結晶MgOトンネル障壁の巨大TMR効果

- エピタキシャルMgO(001)トンネル障壁
- CoFeB/MgO/CoFeB構造のMTJ

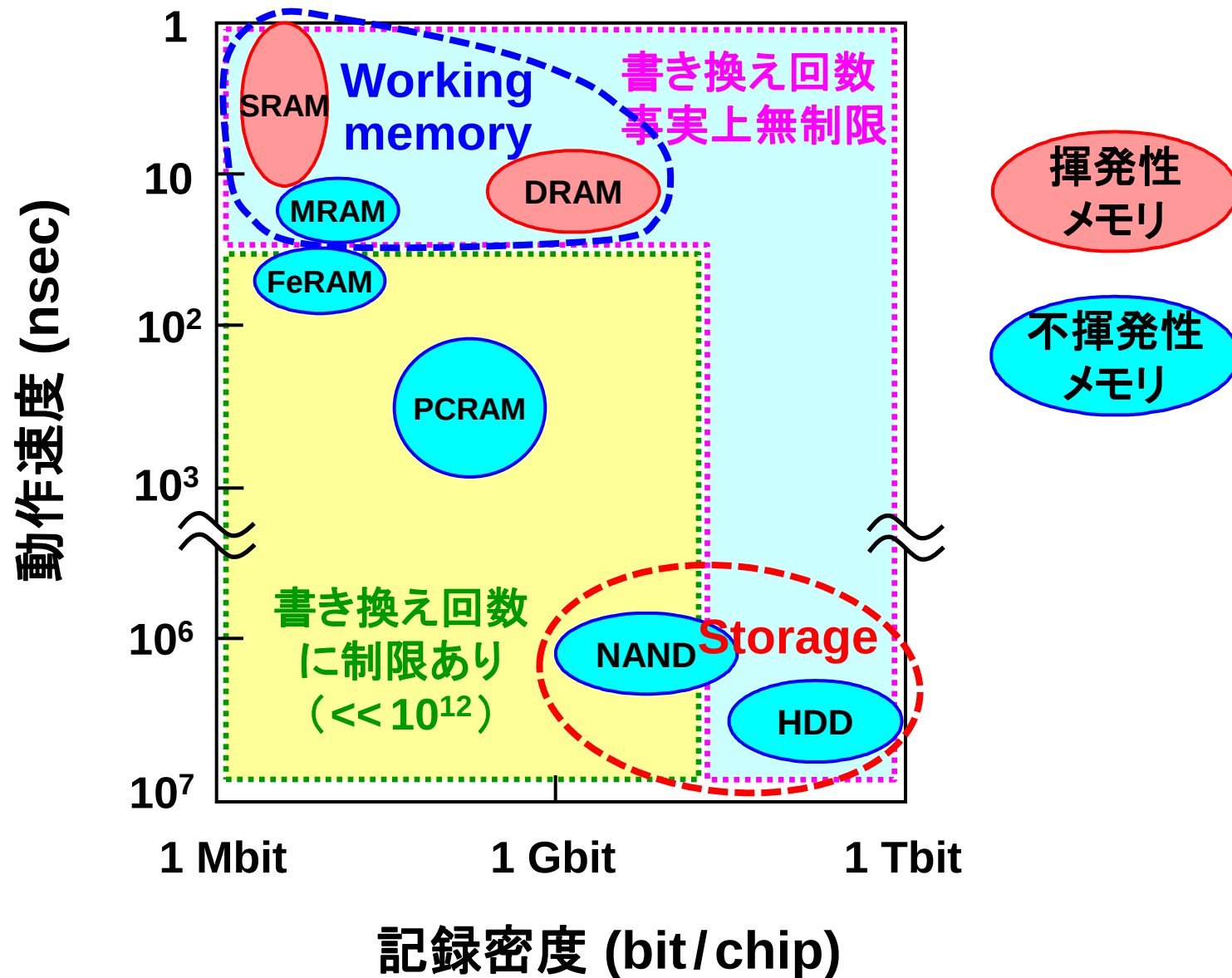
3. ハードディスク(HDD)

4. 不揮発性メモリ STT-MRAM

- スピン転移トルク(STT)
- 垂直磁化STT-MRAM

5. まとめ、今後の課題

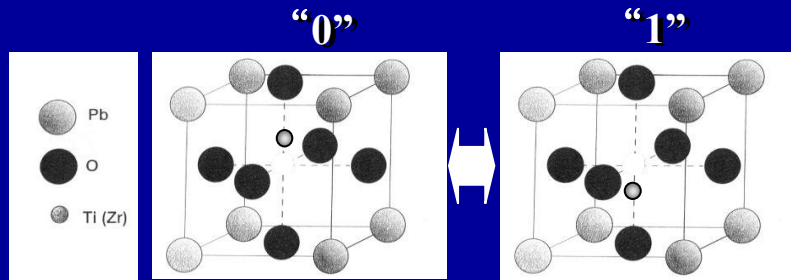
メモリに要求される3つの重要特性：動作速度、記録密度、書き換え耐性



不揮発メモリの 記憶メカニズムと書き換え耐性

FeRAM

原子変位あり

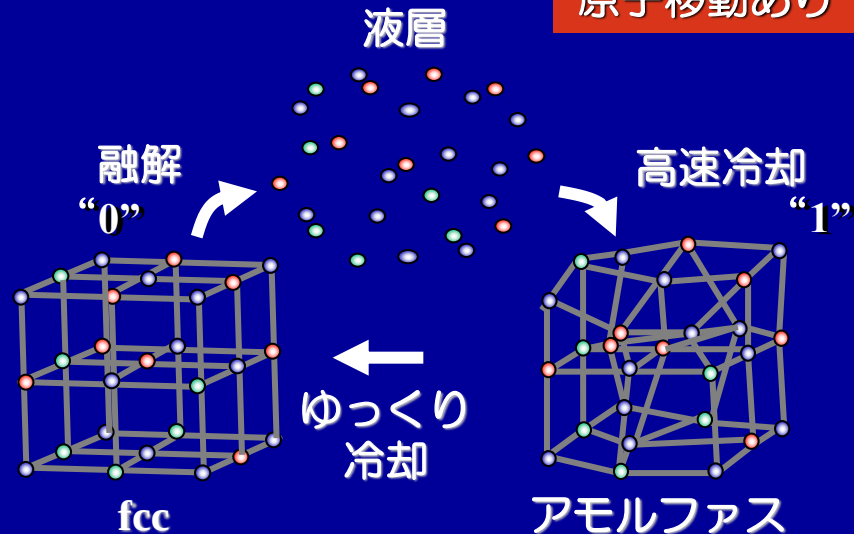


電気分極の反転

問題点: 書き換え回数に制限有り

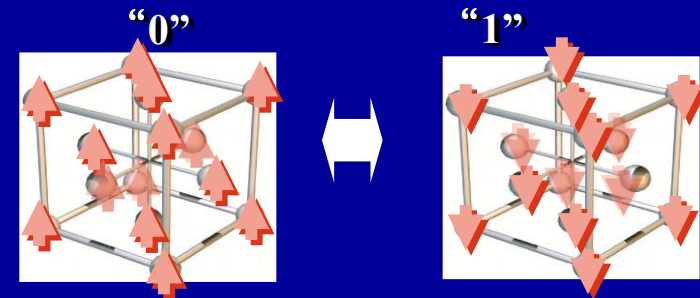
PRAM

原子移動あり

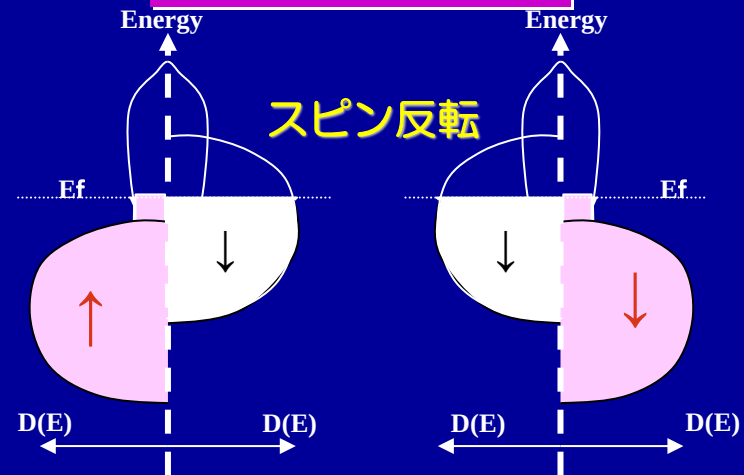


問題点: 書き換え回数に制限有り

MRAM



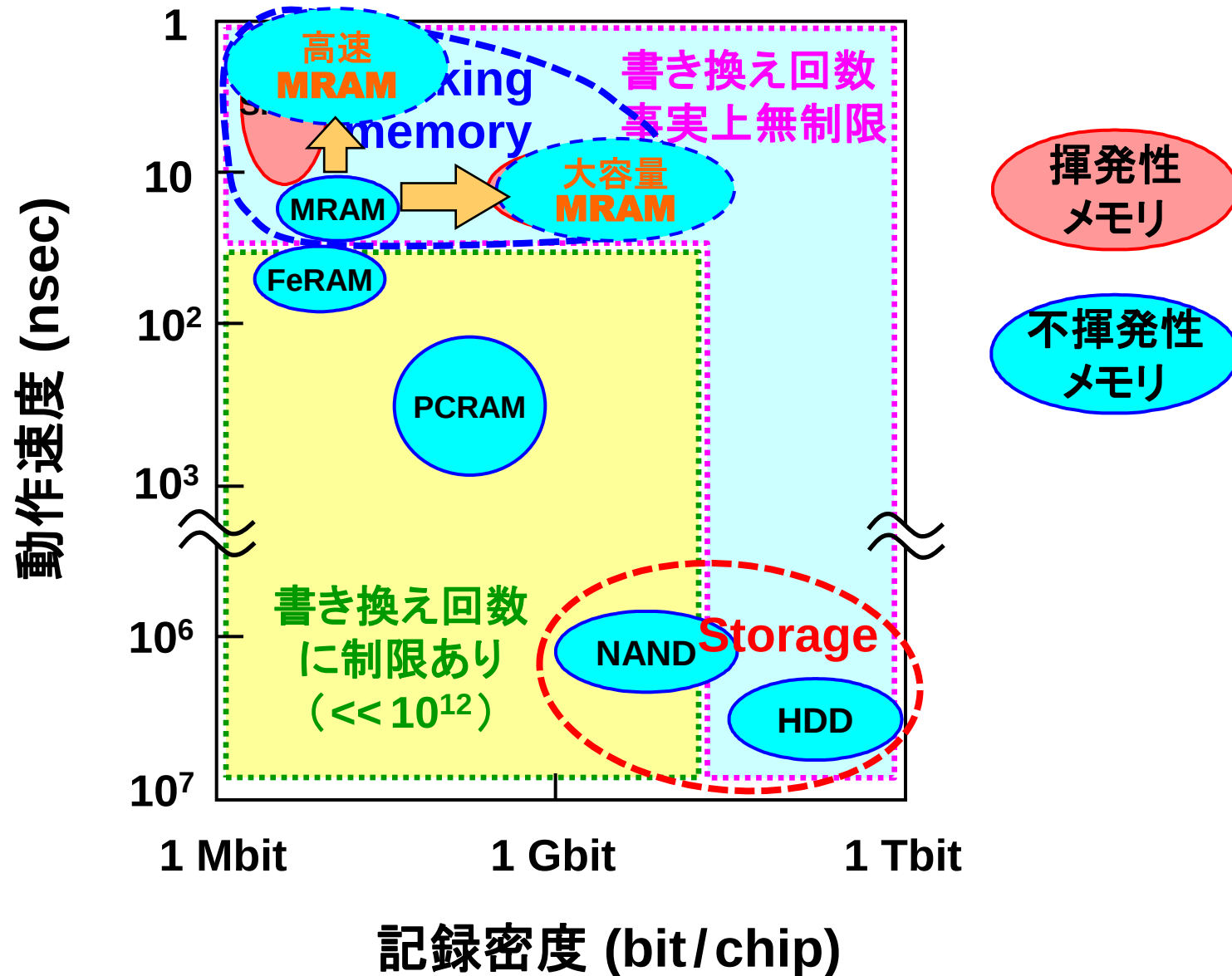
原子移動なし



書き換え回数が無制限

DRAM、SRAMを置き換えるポテンシャルあり

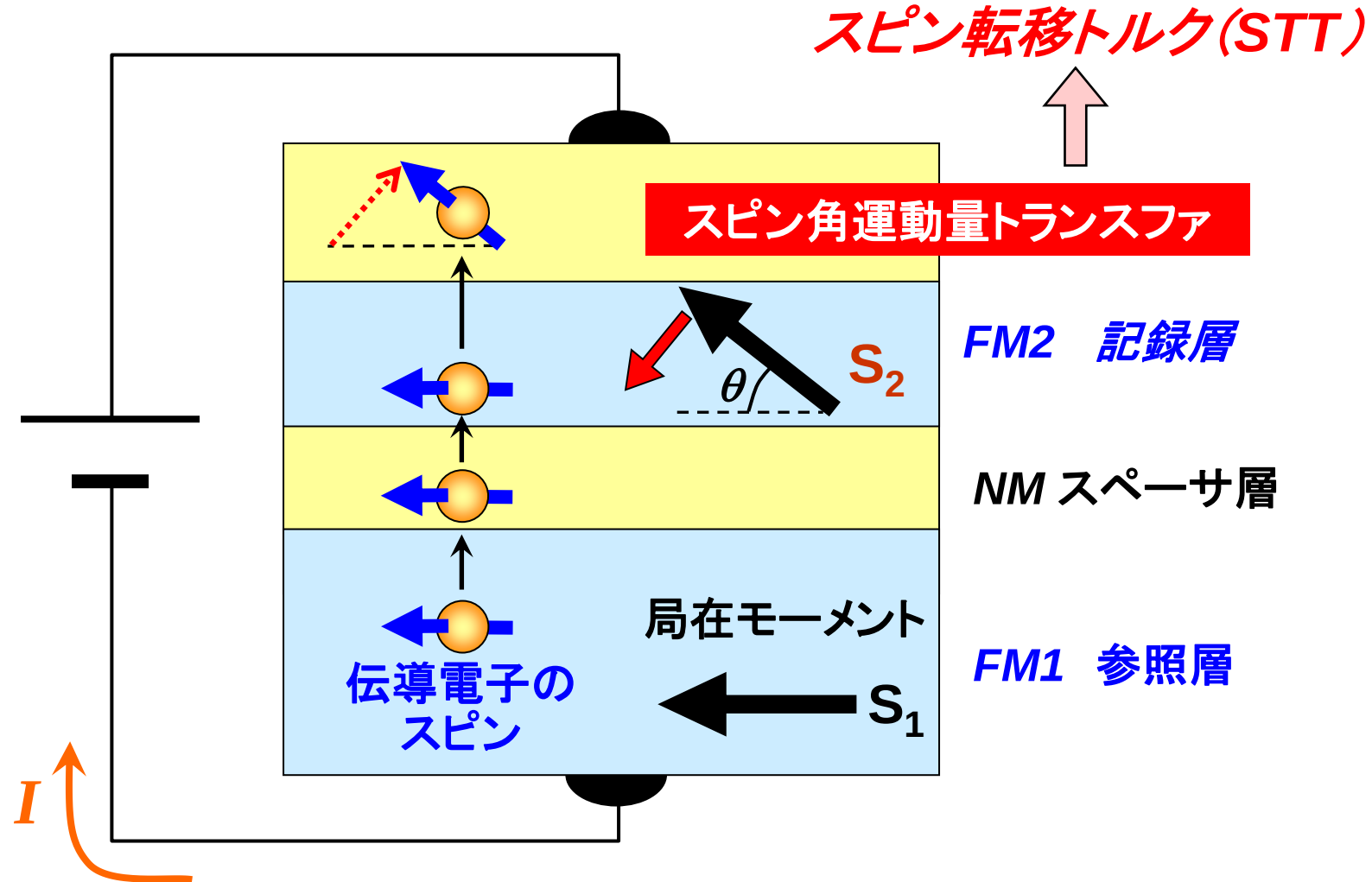
メモリに要求される3つの重要特性：動作速度、記録密度、書き換え耐性



スピン転移トルク (Spin-Transfer Torque: STT)

J. Slonczewski, *J. Magn. Magn. Mater.* **159**, L1 (1996).

L. Berger, *Phys. Rev. B* **54**, 9353 (1996).



STTの理論

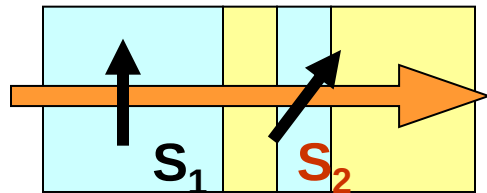
J. Slonczewski, *J. Magn. Magn. Mater.* **159**, L1 (1996).

L. Berger, *Phys. Rev. B* **54**, 9353 (1996).

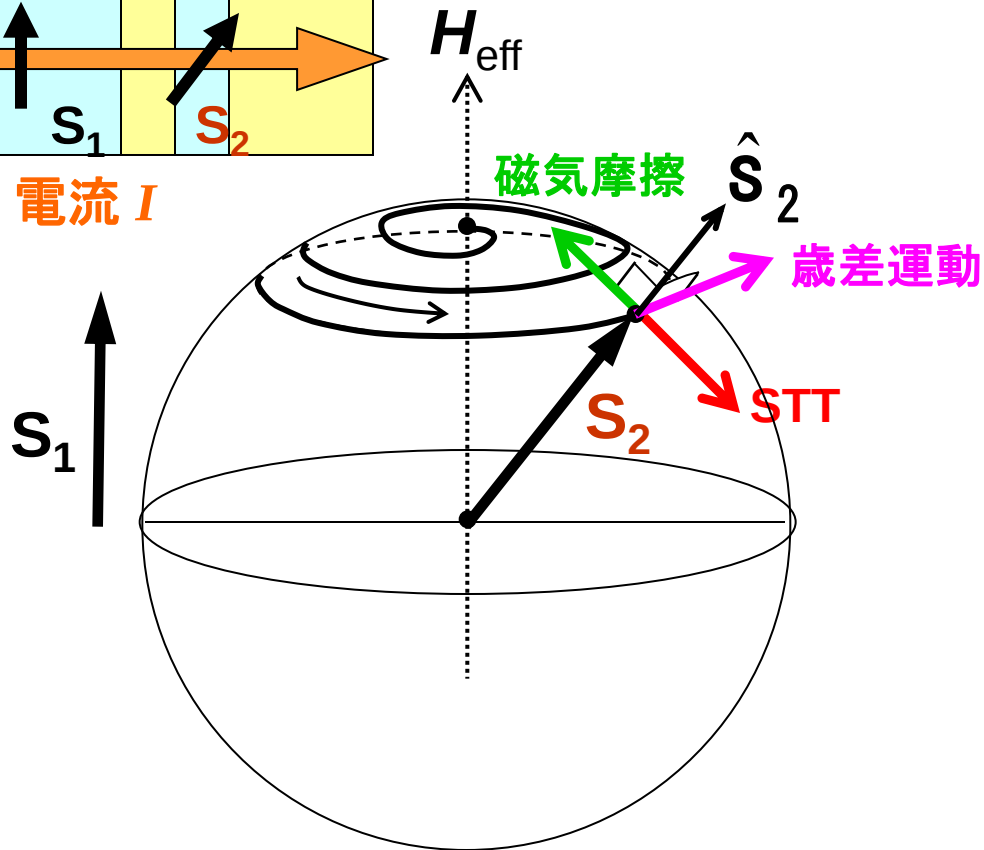
STTの大きさと方向
は電流に比例

$$\dot{\mathbf{S}}_2 = \underbrace{\gamma \mathbf{S}_2 \times \mathbf{H}_{\text{eff}}}_{\text{歳差運動}} - \underbrace{\alpha \hat{\mathbf{S}}_2 \times \dot{\mathbf{S}}_2}_{\text{磁気摩擦}} + \underbrace{\gamma \beta_{\text{STT}} I \hat{\mathbf{s}}_2 \times (\hat{\mathbf{s}}_2 \times \hat{\mathbf{s}}_1)}_{\text{STT}}$$

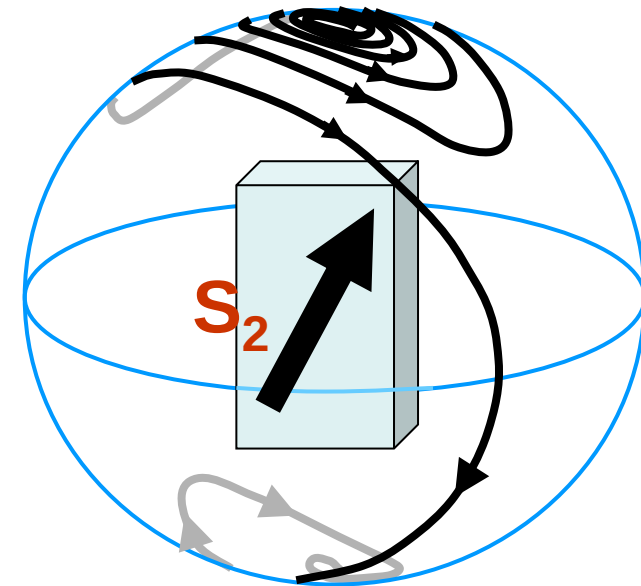
磁化固定層 記録層



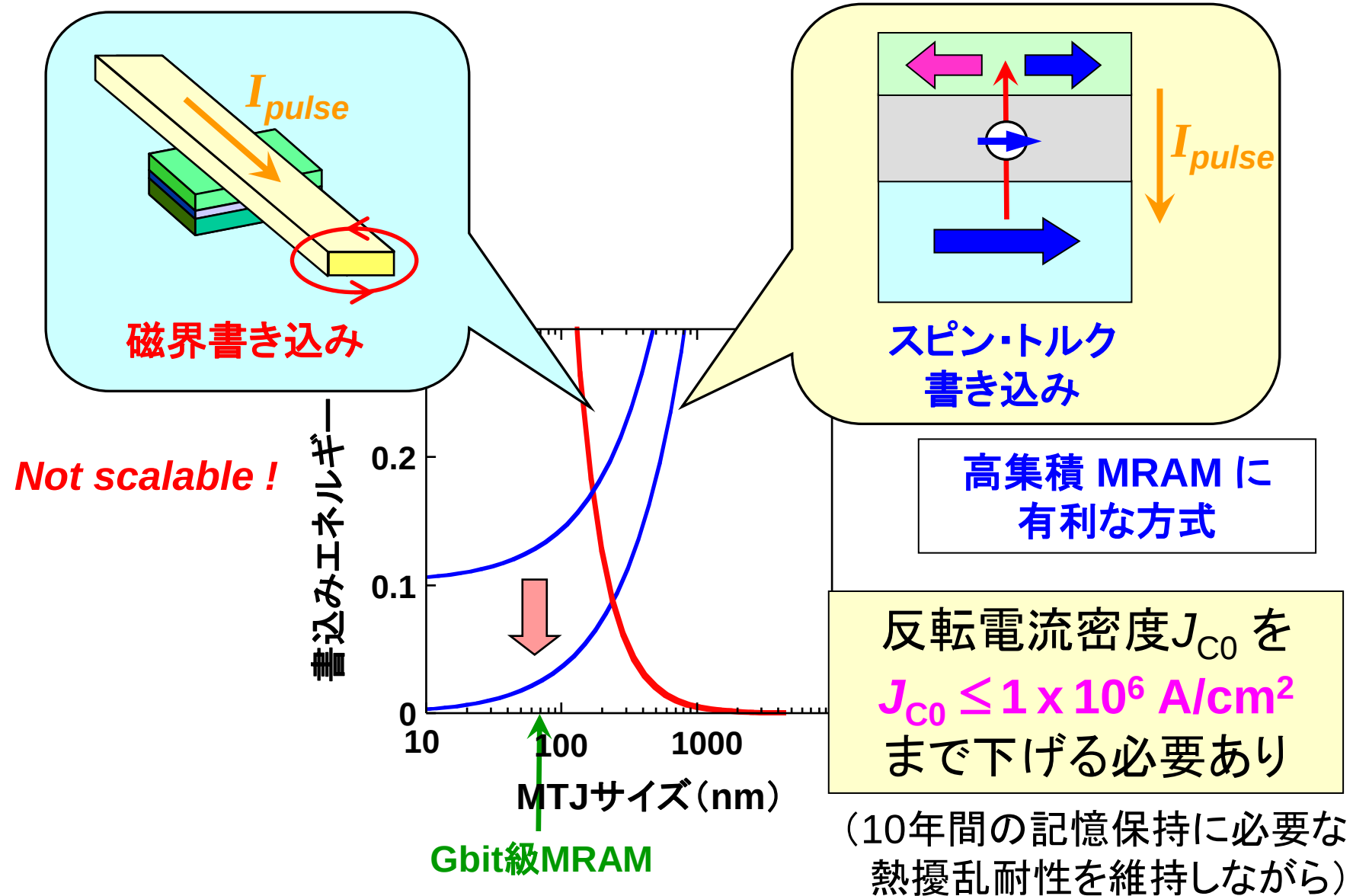
電流 I



STT > **磁気摩擦** のとき ($I > I_{c0}$)、記録層の磁気モーメント ($\mathbf{S}_2$) の歳差運動の振幅が増幅され、磁化反転 (スイッチング) に至る



電流磁界書き込み vs. スピン・トルク書き込み



本日の内容

1. はじめに

- 磁気抵抗効果とスピントロニクス
- 磁気トンネル接合(MTJ)のトンネル磁気抵抗効果(TMR効果)
- アモルファルAl-Oトンネル障壁のTMR効果、その応用と限界

2. 結晶MgOトンネル障壁の巨大TMR効果

- エピタキシャルMgO(001)トンネル障壁
- CoFeB/MgO/CoFeB構造のMTJ

3. ハードディスク(HDD)

4. 不揮発性メモリ STT-MRAM

- スピン転移トルク(STT)
- 垂直磁化STT-MRAM

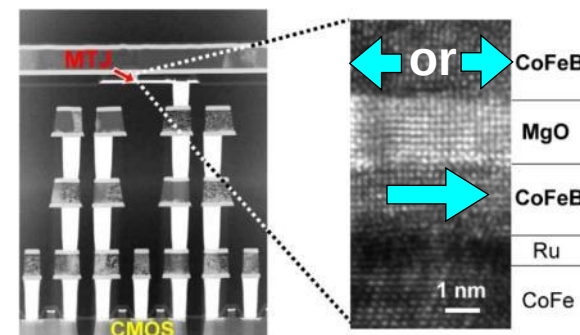
5. まとめ、今後の課題

第二世代の不揮発性メモリ STT-MRAM の研究開発

2005 ソニー (M. Hosomi *et al.*, *IEDM* 2005.)

- 面内磁化 **CoFeB/MgO/CoFeB**

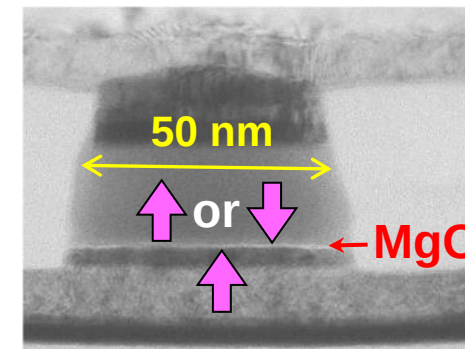
世界初のSTT-MRAM(面内磁化)



2008 東芝-産総研,他(T. Kishi *et al.*, *IEDM* 2008.)

- 垂直磁化 **MgO-MTJ**

世界初の垂直磁化STT-MRAM

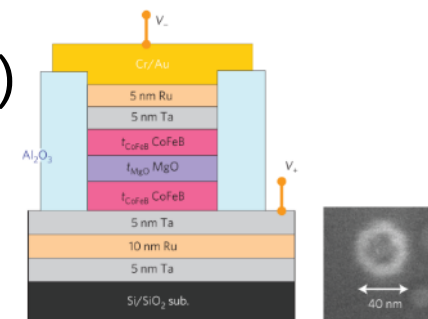


優れた記憶保持特性と低電流・高速書き込みを実証

2010 東北大・大野グループ (S. Ikeda *et al.*, *Nat. Mater.* 2010.)

- 垂直磁化 **CoFeB電極**

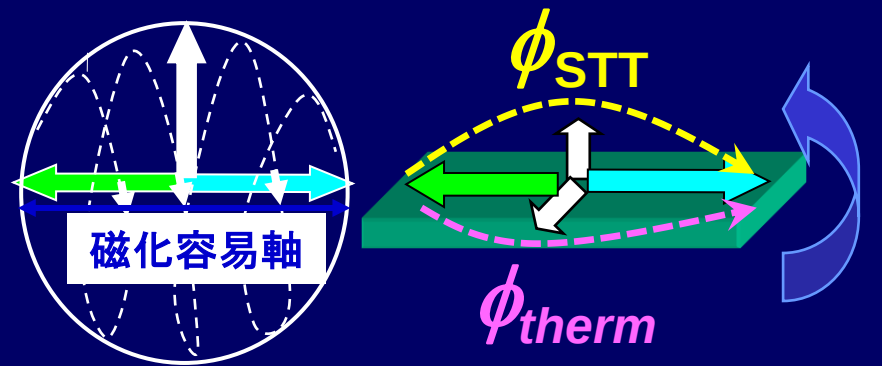
作製が容易な単層のCoFeBで垂直磁化を実現



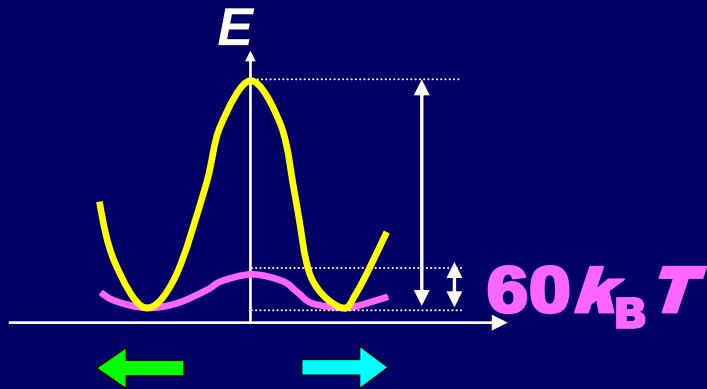
垂直磁化MTJは原理的に書き込み電流密度の低減に有利

面内磁化

$$I_C = \frac{2e}{\hbar} \frac{\alpha_{damp}}{g(\theta)} \left[2\Delta_{therm} k_B T + 2\pi M_s^2 t F^2 \right]$$

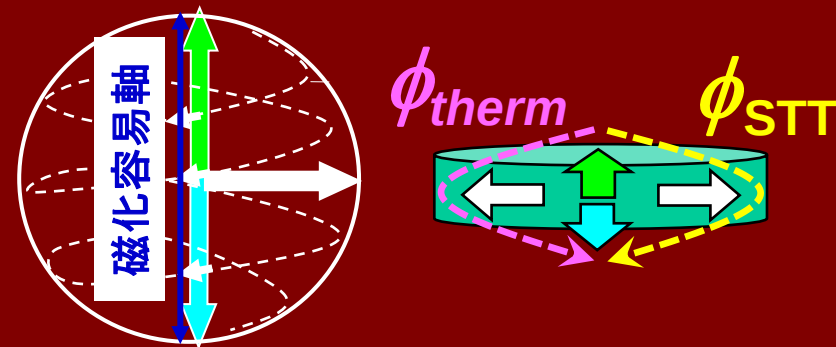


$$\phi_{STT} \sim 30 \phi_{therm}$$

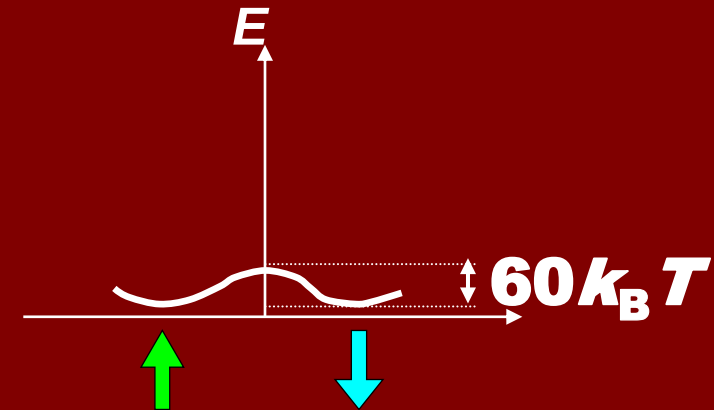


垂直磁化

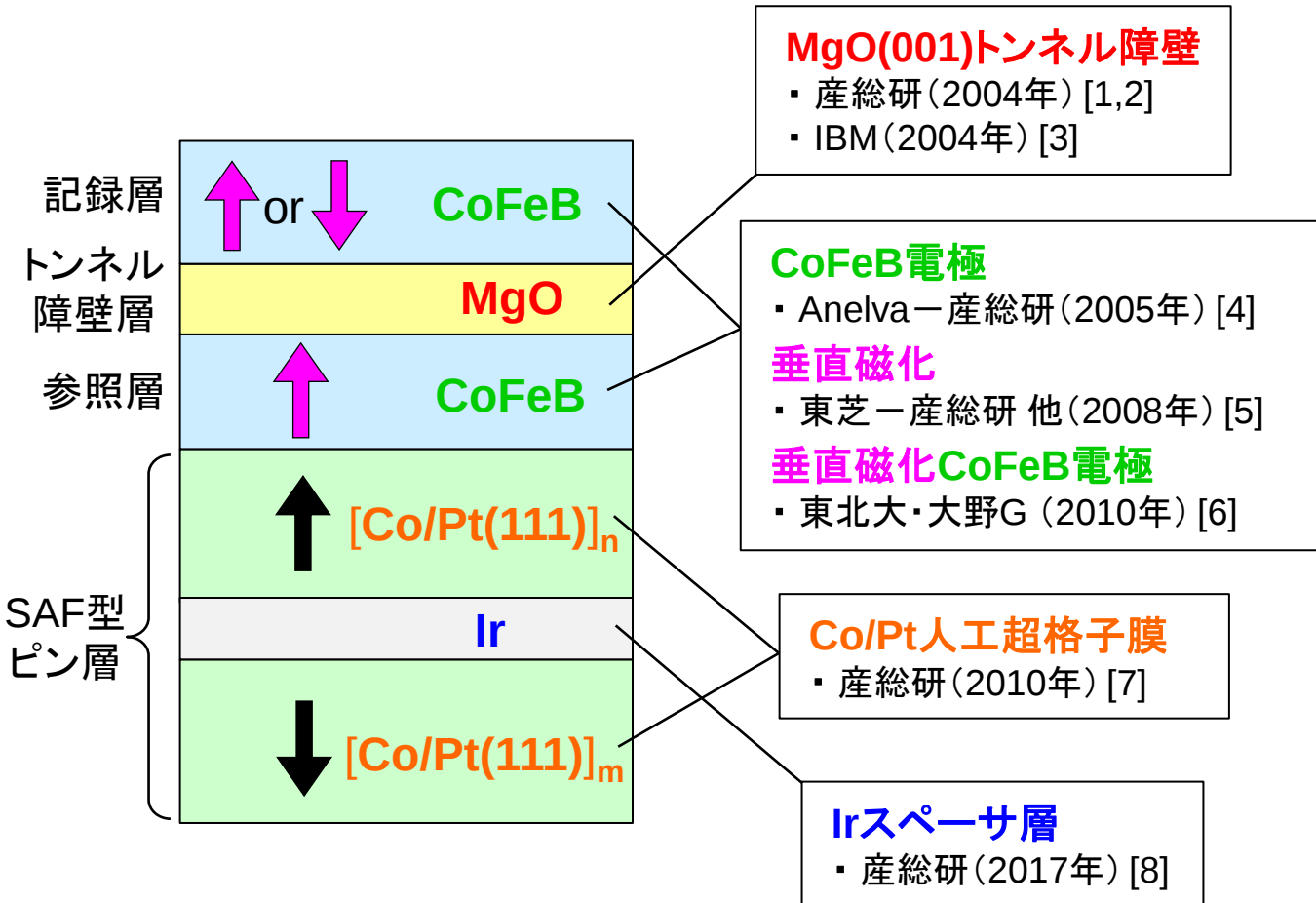
$$I_C = \frac{2e}{\hbar} \frac{\alpha_{damp}}{g(\theta)} \left[2\Delta_{therm} k_B T \right]$$



$$\phi_{STT} = \phi_{therm}$$



STT-MRAMのMTJの基本構造と先駆的論文



先駆的論文と被引用回数

	被引用回数
[1] S. Yuasa <i>et al.</i> , JJAP 43 , L558 (2004).	423
[2] S. Yuasa <i>et al.</i> , Nature Mater. 3 , 868 (2004).	4175
[3] S. Parkin <i>et al.</i> , Nature Mater. 3 , 862 (2004).	4129
[4] D. Djayaprawira <i>et al.</i> , APL 86 , 092502 (2005).	1265
[5] T. Kishi <i>et al.</i> , IEDM Tech. Dig. 12.6 (2008).	299
[6] S. Ikeda <i>et al.</i> , Nature Mater. 9 , 721 (2010).	4228
[7] K. Yakushiji <i>et al.</i> , APL 97 , 232508 (2010).	303
[8] K. Yakushiji <i>et al.</i> , APL 110 , 092406 (2017).	100

STT-MRAMの製品開発

STT-MRAMの詳しくレビュー: D. C. Worledge & G. Hu, Nature Reviews Electrical Engineering **1**, 730 (2024).

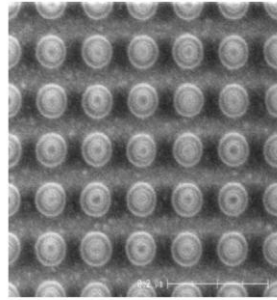


Fig. 2. Top view SEM image of MTJ array. Extremely tight pitched MTJ array was formed by patterning process.

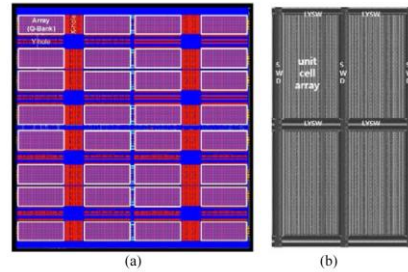


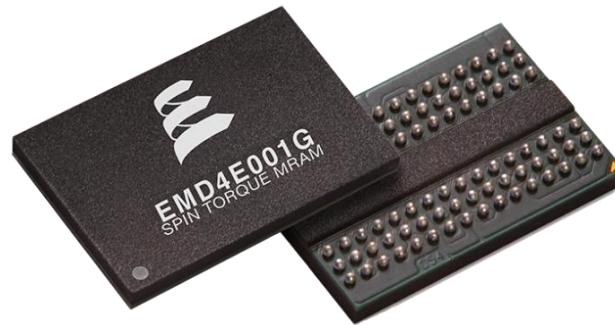
Fig. 3. (a) 4Gb STT-MRAM chip floor plan, and (b) symmetric unit cell array blocks.

東芝ーハイニクス

4 Gbit STT-MRAMを試作

(IEDM 2016, ISSCC 2017)

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



米国 Everspin Technologies 社

1 Gbit STT-MRAMを製造・販売

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

Samsung、TSMC、GF 混載STT-MRAMの**ファウンドリサービスを開始**

ソニーはイメージセンサ混載用STT-MRAMを開発

MRAMの現状と課題

- 現在のSTT-MRAMの主な用途は、演算チップに混載する不揮発性メモリ。従来技術のe-Flashが微細化限界に達したため、STT-MRAM や ReRAM に置き換え

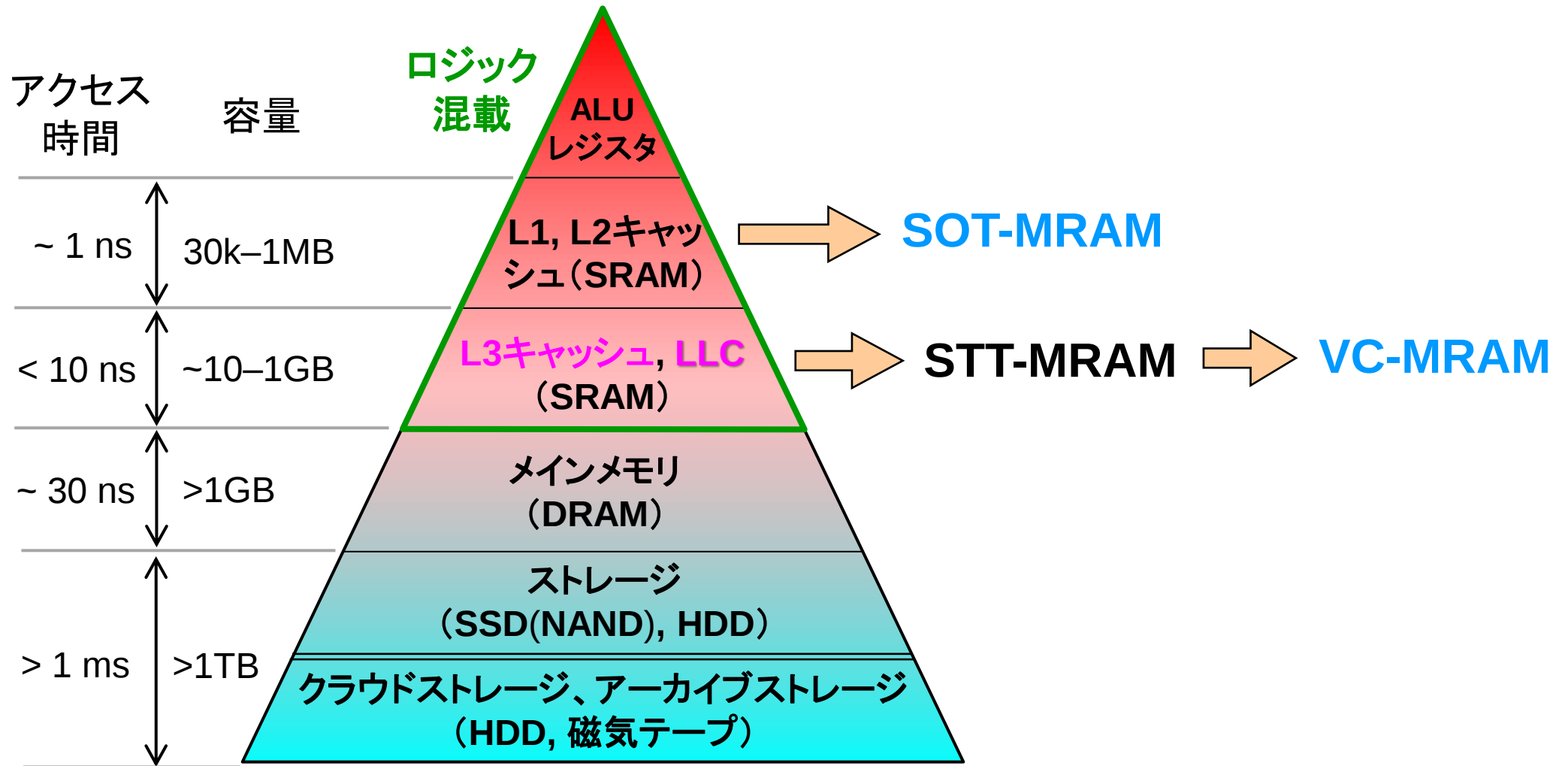
【課題】市場規模が小さい。MRAMの書換え耐性の良さを活かしきれない。
ReRAMに比べて製造コストが高い。

- キャッシュメモリ(演算チップ上に混載する高速メモリ)に使われているSRAMをSTT-MRAMで置き換えられれば、キャッシュメモリの高集積化(=低コスト化)と待機電力の大幅な削減が可能となるとともに、大きな市場が見込まれる。

【課題】「高速書き込み」と「書き換え耐性」の両立が、未解決の課題

- 次世代MRAM(VC-MRAM, SOT-MRAM)の開発も重要

メモリ階層とMRAMによる置き換え（希望的観測）



本日の内容

1. はじめに

- 磁気抵抗効果とスピントロニクス
- 磁気トンネル接合(MTJ)のトンネル磁気抵抗効果(TMR効果)
- アモルファルAl-Oトンネル障壁のTMR効果、その応用と限界

2. 結晶MgOトンネル障壁の巨大TMR効果

- エピタキシャルMgO(001)トンネル障壁
- CoFeB/MgO/CoFeB構造のMTJ

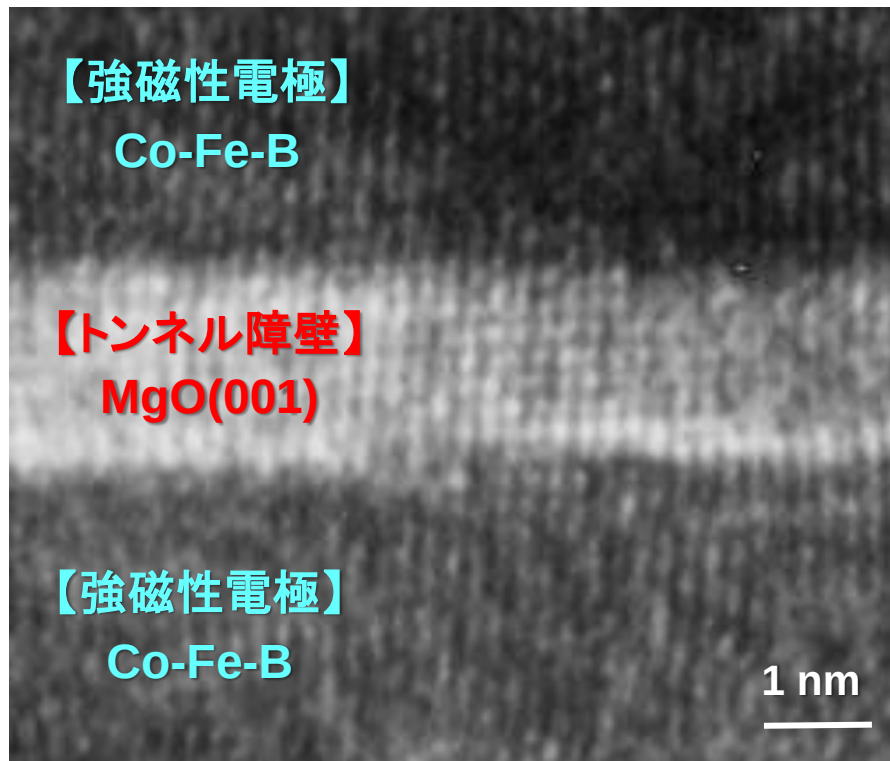
3. ハードディスク(HDD)

4. 不揮発性メモリ STT-MRAM

- スピン転移トルク(STT)
- 垂直磁化STT-MRAM

5. まとめ、今後の課題

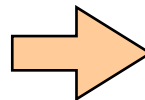
スピントロニクスの大3応用



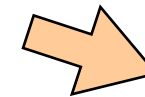
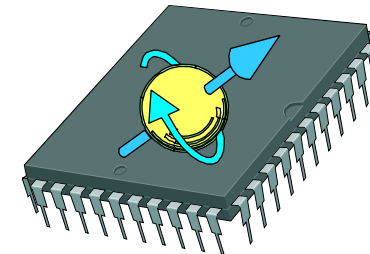
磁気トンネル接合 (MTJ)



IT社会を支えるデータセンターの主流ストレージ
ハードディスク (HDD)
の再生磁気ヘッド



LSIの省電力化
を実現する
不揮発性メモリ
STT-MRAM



磁気計測や位置・回転検出用の
TMR磁気センサー

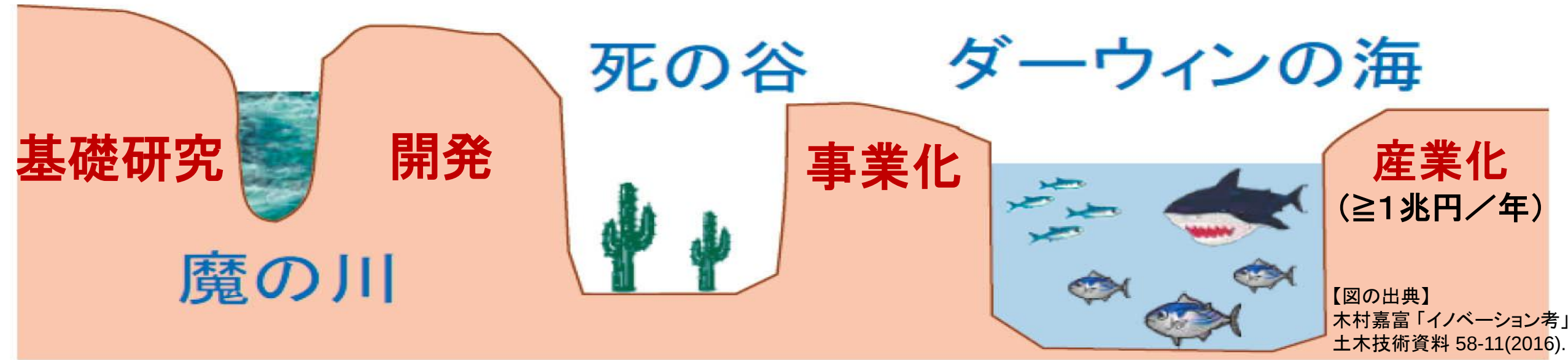
市場規模 (/年)
(\$1=¥150換算)

～3兆円
(うち磁気ヘッド
～5000億円)
頭打ち

～1000億円
拡大中

数100億円
拡大中

スピントロニクス技術の分類



- スキルミオン
- オービトロニクス
- マグノニクス
- マルチフェロイクス
- スピнкаロトロニクス
- 半導体スピントロニクス
- 反強磁性スピントロニクス
- 非ノイマン型コンピューティング
- その他いろいろ

- SOT-MRAM
- VC-MRAM
- TMR磁気センサー
(生体磁気計測)
- レーストラック
メモリ

- STT-MRAM
- TMR磁気センサー
(汎用)

- HDD

過去、ダーウィンの海で
淘汰された磁気記録

- コアメモリ、ワイヤメモリ
- 磁気バブルメモリ
- 光磁気ディスク



スピントロニクス今後の課題

1. スピントロニクスの既存応用の存続・拡大

- HDDの延命 ⇐ HAMRとTMRヘッドの改良による高記録密度化が重要
- STT-MRAMの市場拡大 ⇐ キャッシュ用SRAMの置き換えが特に重要
- TMR磁気センサーの応用範囲の拡大 ⇐ 生体磁気計測、dc電流計測など

2. MTJの新規応用の実用化

- 次世代MRAM (SOT-MRAM、VC-MRAM)
- MTJを用いた非ノイマン型コンピューティングなど

産業界が主導

アカデミア-産業界連携

当面 アカデミアが主導

3. MTJ以外のスピントロニクス技術の応用の開拓