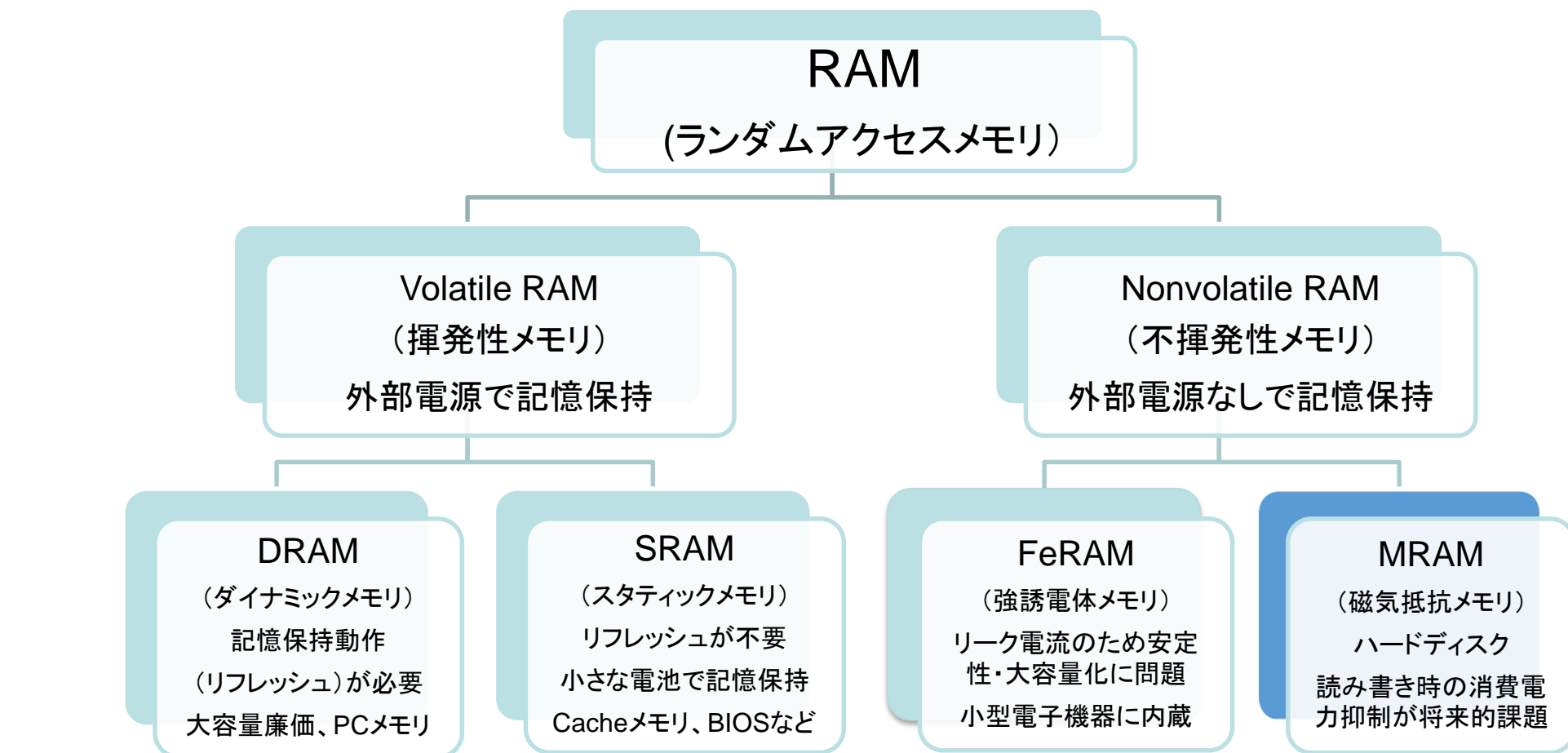


磁化のモノポール流の生成、検出と、 磁性体磁化の低消費電力制御

創発物性科学研究センター、開拓研究本部（理研）

小野田 繁樹

従来のメモリー素子



c.f., EEPROM (electrically erasable programmable ROM)

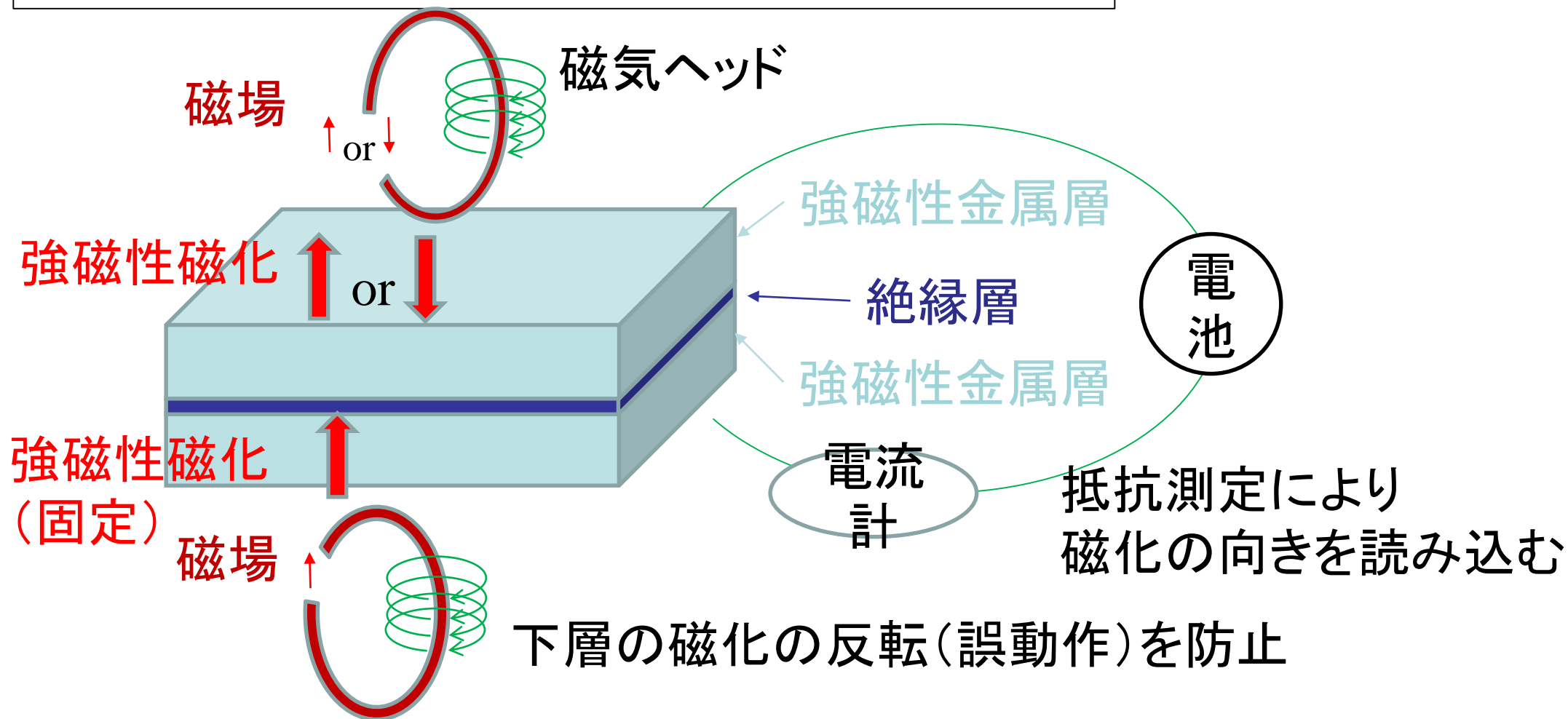
Flush memory: 半導体FET構造を利用した不揮発メモリ。高速・低消費電力・大容量化向きだが、
耐久性に問題(～数万回書き換え、～10年)。SSD、携帯電話端末など。

従来のMRAM

トンネル磁気抵抗 (TMR)

$R_{\uparrow\uparrow} \gg R_{\uparrow\downarrow}$: 上下強磁性層の磁化が平行か反平行かで抵抗変化 (読み込み)

電流コイルで発生させた磁場で磁化を反転 (書き込み)



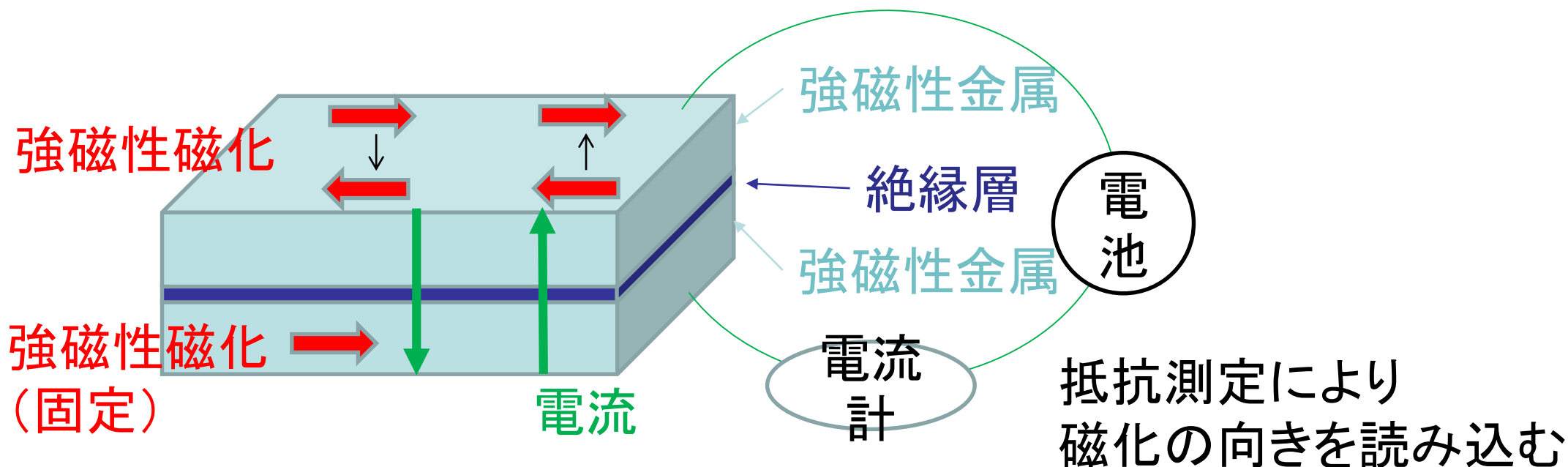
従来MRAM技術の利点・問題点

- 磁化の反転にコイル電流を通じて磁場を発生させる必要(磁気ヘッド)
 - 消費電力大
 - 発熱大
- 磁気ヘッドの空間が必要
 - 高集積化に限界
- 発熱下(室温以上)でも安定に動作する廉価(低付加価値)な材料が開発されている

次世代MRAM用スピントロニクス技術

電流によるスピン注入磁化反転

東北大学・日立製作所、産総研、...



閾値以上の電流を流す！

次世代MRAM用スピントロニクス技術の 利点・問題点

- 電流によるスピン注入磁化反転
 - 磁気ヘッドやディスクの回転不要
 - 高集積化に有利
 - 電力消費削減へ道筋
- 磁化反転のために接合を介した電流を流す必要
 - 電力消費・発熱 → 改善の余地
 - 磁化反転をもたらす閾値電流は要削減
→ 材料開発・磁気スカーミアン結晶物質？

そもそも電流は必要か？

新技術の特徴

従来・開発途上技術との比較

- 磁化のモノポール(N極・S極)超流動流に世界で初めて着眼、これを活用
 - 印加した電界に垂直にモノポール流を生成
 - 革新的な磁化制御
- 超低消費電力
 - 物性物理学の研究最先端の磁性絶縁体を活用
 - 電流を流さない(電気分極の生成)
- 従来程度の高集積化が原理的に可能

新技術の原理1: 量子スピニアイス物質と量子スピン液体

量子スピニアイス物質: $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, Ir_2O_4

モノポール(磁気モーメントのN極・S極)が仮想量子電磁気学に従って運動

Gaussの法則: $\text{div } \mathbf{B} = Q^m$ (モノポール磁荷)

\mathbf{B} : 仮想磁場(局所磁気モーメント)

Maxwell-Faradayの法則: $\text{curl } \mathbf{E} = \dot{\mathbf{B}} + \mathbf{j}^m$ (モノポール流)

\mathbf{E} : 仮想電場(磁気誘起電気双極子モーメント)

□ U(1)量子スピン液体相(磁気秩序が量子揺らぎで乱される)

モノポール磁荷を電荷に見立てた絶縁体

エネルギーギャップをもったボーズ統計に従うモノポール準粒子

□ (強)磁性秩序相

モノポールがボーズ凝縮 → モノポール超流動流

モノポール磁荷をクーパー対の電荷に見立てた際の超伝導体

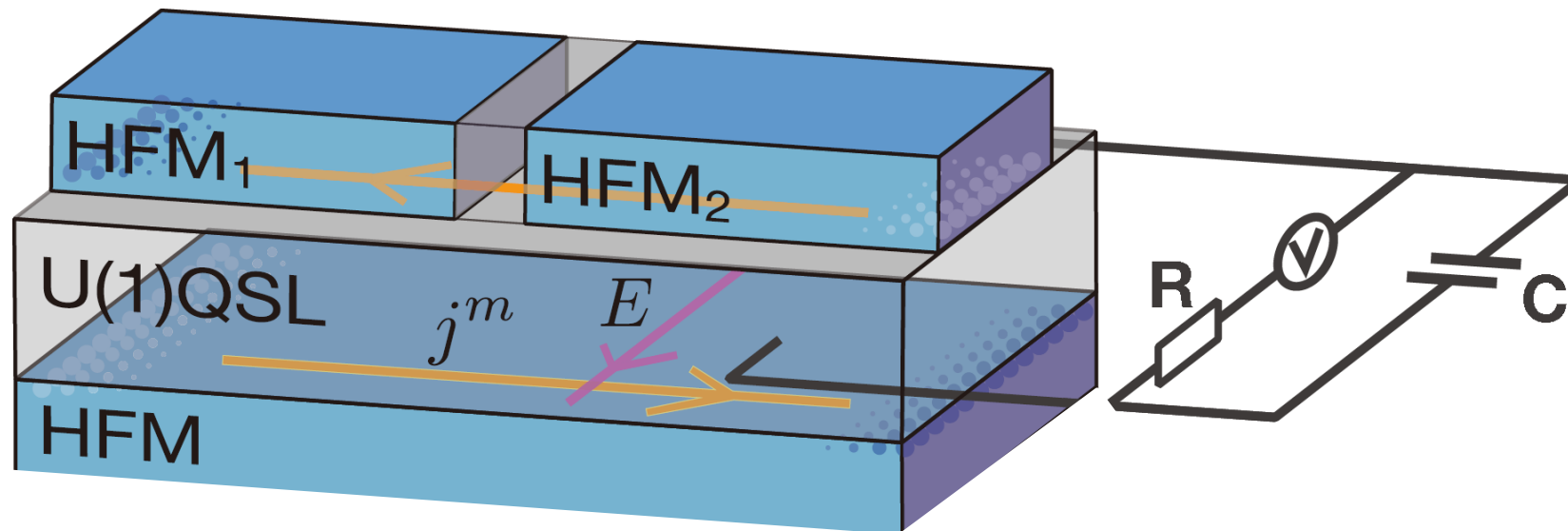
新技術の原理2: 量子スピニアイス接合・界面

□ Meissner効果の類似効果

強磁性(HFM)相の中で仮想電場が遮蔽されるよう、モノポール超流動流が界面に流れる！

□ Josephson効果の類似効果

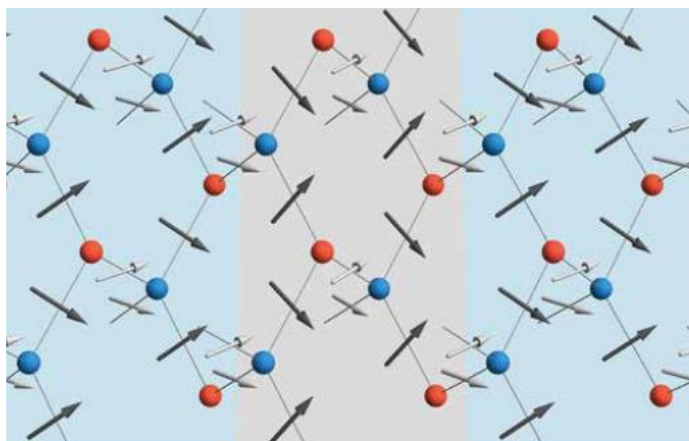
(仮想)電場中のU(1)量子スピン液体(QSL)層を介して、強磁性(HFM)層間にモノポール超流動流が流れる！



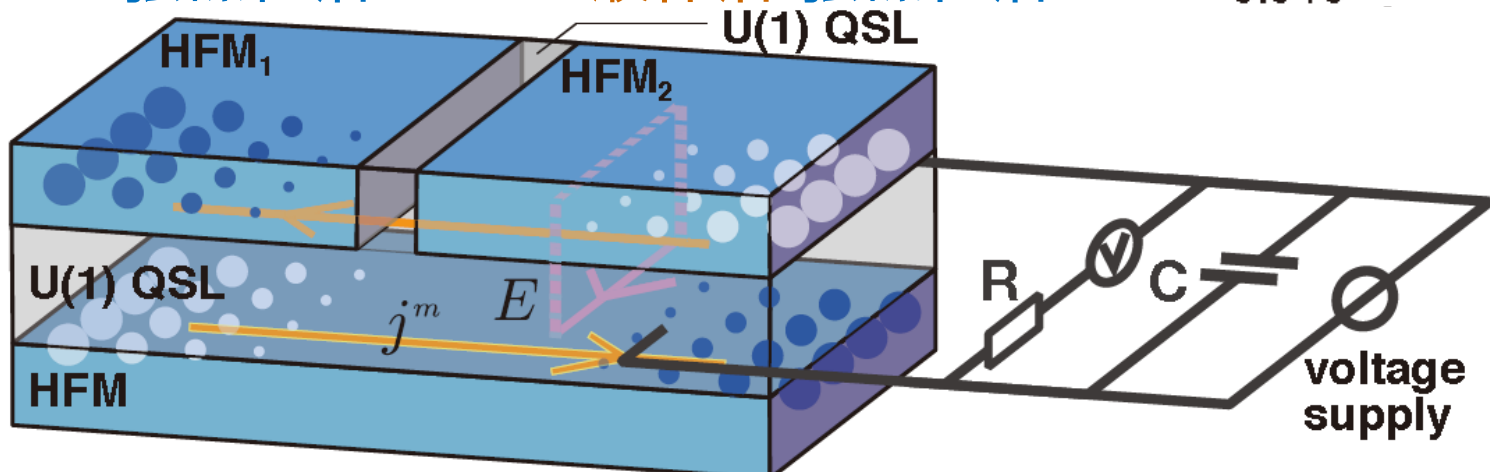
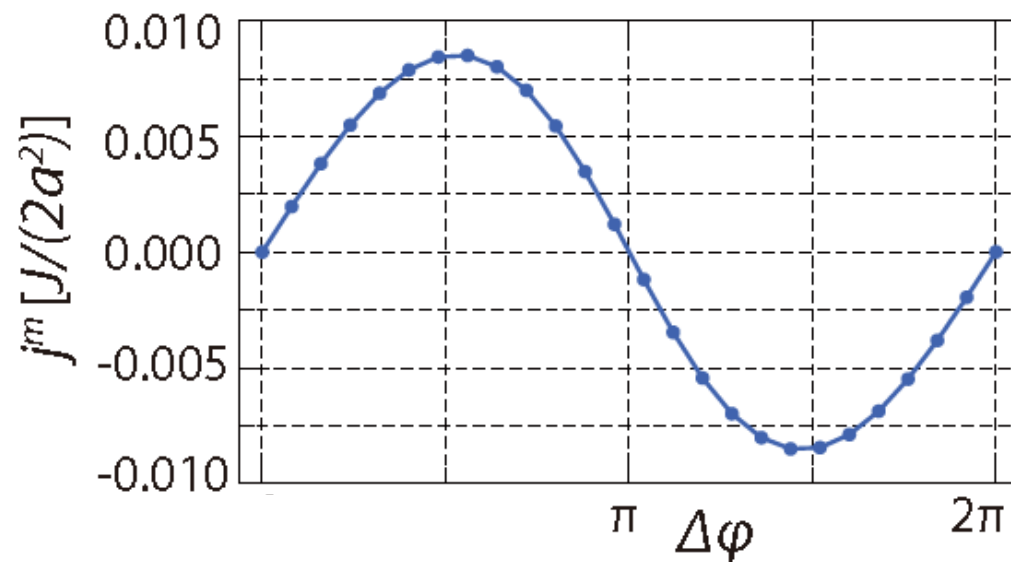
新技術の原理3: 数値シミュレーション

Josephson効果の類似効果の数値的検証

モノポール超流動流



強磁性層 スピン液体層 強磁性層



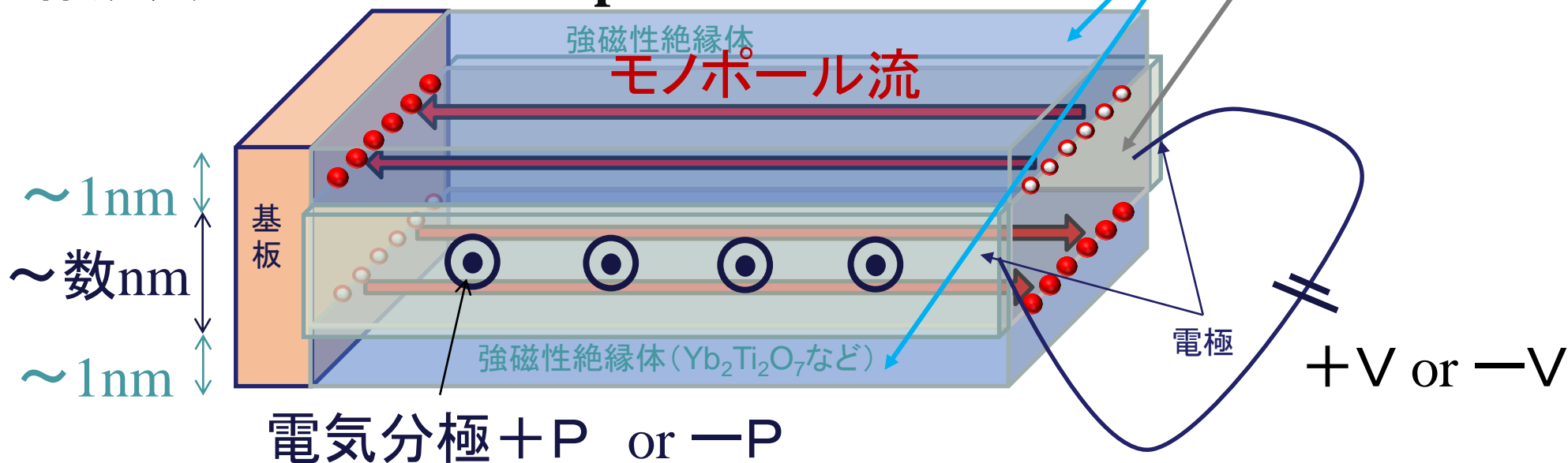
スピン液体層を跨ぐ
モノポール位相差
= 仮想電場 × 厚み
 \propto 印加電場

両端で逆符号のモノポール磁荷が蓄積 → 磁化の変化

新技術1:モノポール流の電氣的生成1

量子スピン液体(絶縁体)量子スピンアイス物質($\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ など)
強磁性絶縁体量子スピンアイス物質($\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ など)
の3層デバイス構造 (基板は $\text{Y}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ など)

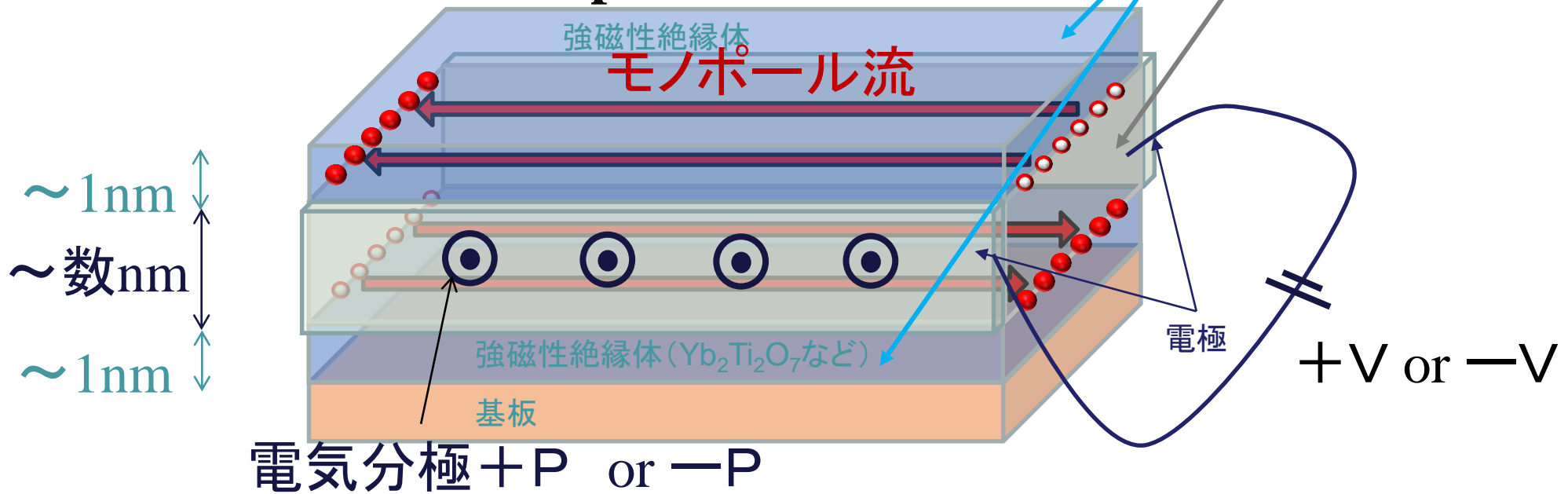
作成法:Pulsed laser deposition method



- ✓ 上部強磁性磁化の向き=ビット
- ✓ 電気分極生成→モノポール流生成→磁化反転=ビット書き換え

新技術1:モノポール流の電氣的生成2

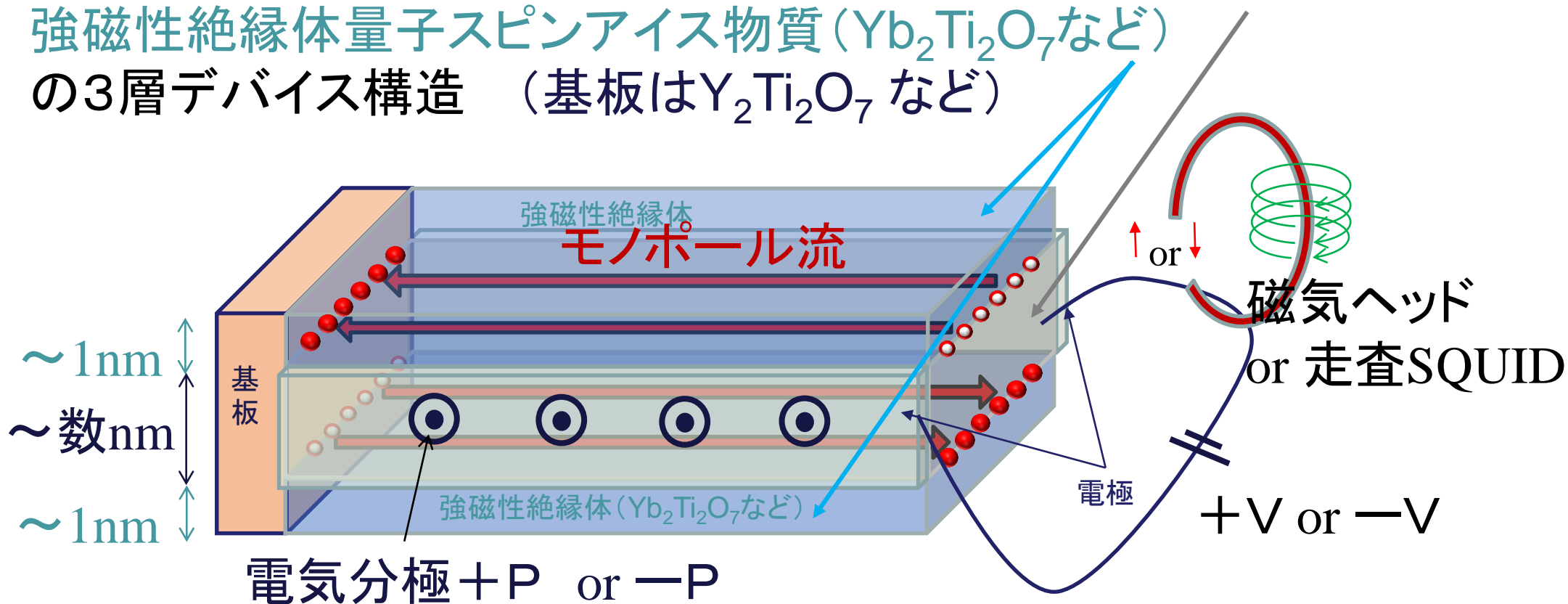
量子スピン液体(絶縁体)量子スピンアイス物質($\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ など)
強磁性絶縁体量子スピンアイス物質($\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ など)
の3層デバイス構造 (基板は $\text{Y}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ など)
作成法:Pulsed laser deposition method



- ✓ 上部強磁性磁化の向き=ビット
- ✓ 電気分極生成→モノポール流生成→磁化反転=ビット書き換え

新技術2-1:モノポール流の磁氣的測定

量子スピン液体(絶縁体)量子スピンアイス物質($\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ など)
強磁性絶縁体量子スピンアイス物質($\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ など)
の3層デバイス構造 (基板は $\text{Y}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ など)

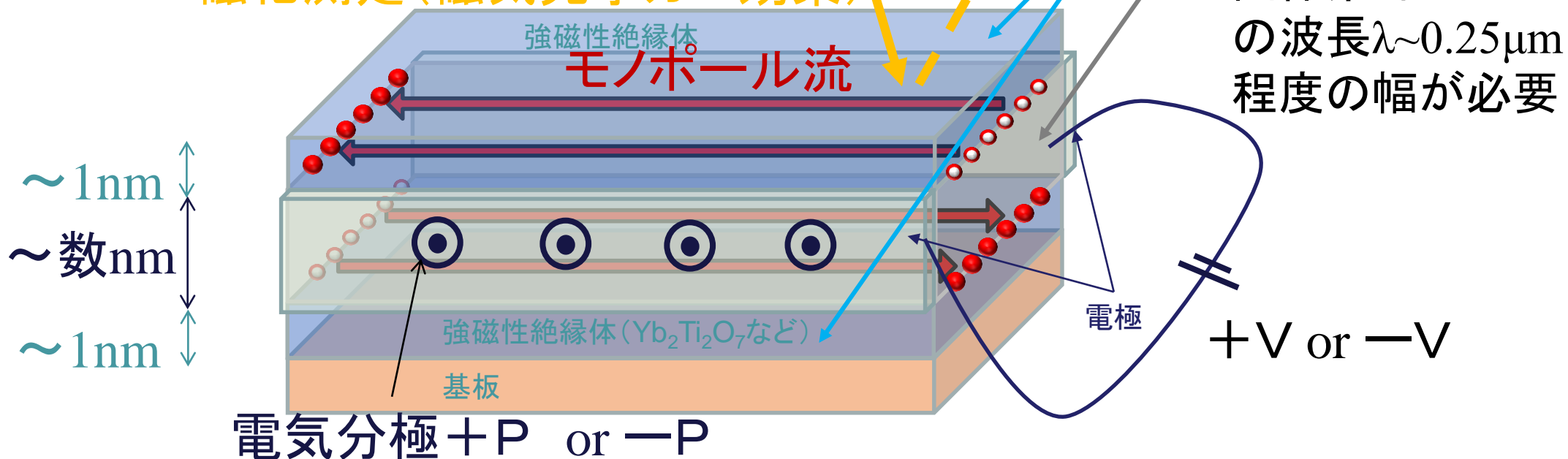


- ✓ 上部強磁性磁化の向き=ビット
- ✓ 磁化(外部磁場)測定(磁気ヘッド、走査SQUID)=ビット読み込み

新技術2-2:モノポール流の磁気光学測定

量子スピン液体(絶縁体)量子スピンアイス物質($\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ など)
強磁性絶縁体量子スピンアイス物質($\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ など)
の3層デバイス構造 (基板は $\text{Y}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ など)

磁化測定(磁気光学カー効果)



- ✓ 上部強磁性磁化の向き=ビット
- ✓ 磁化(磁気光学カー効果)測定=ビット読み込み

新技術の用途

- モノポール流生成(磁化制御)装置
- モノポール流(磁化変化)検出装置
- モノポール流を駆動原理とした超低消費電力磁気(光学)メモリ素子
- 従来、および、開発途上の技術に比べて、電力消費が圧倒的に抑制される
- 高集積化にも対応(潜在的には10nm程度まで)
- 近未来AI時代における大規模情報(ビット)の高速・省エネ処理を支える

実用化に向けた課題

- 現在、バルク量子スピニアイス材料を用いて、モノポール流の電界駆動についての最初の実験的検証を極低温で試みている段階。
- 今後、量子スピニアイスの薄膜・界面を作製し、新技術の根幹となる現象の効率を向上させるための材料研究開発が必要。
- さらに、実用化に向けて、室温付近で動作する新量子スピニアイス物質材料の開発が求められる。(室温スピニアイス物質候補の例: Ir_2O_4)

企業への期待

- 精密な薄膜作製は、非営利研究機関では困難なことがしばしば(バルク物質においても試料依存性の問題が存在)
- PLDなどによる精密な薄膜作製技術を持つ企業との**共同研究**を希望
- 本技術の共同研究にメリットがある対象企業
 - 開発次世代不揮発メモリを開発中の企業
 - 革新的省エネ不揮発メモリの研究開発に意欲的な企業

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : モノポール流の生成装置、検出装置、およびモノポール流を用いるメモリー素子
- 出願番号 : 特願2018-000344
- 出願人 : 理化学研究所
- 発明者 : 小野田 繁樹、中河西 翔

お問い合わせ先

国立研究開発法人理化学研究所
イノベーション事業本部 ライセンス
部

井門 孝治

Email : koji.ikado@riken.jp

TEL : 048-467-9729

FAX : 048-467-9962