

研究開発成果報告 ー最近のトピックスー

スピントロニクスへの原子力への応用

平成25年11月26日

独立行政法人日本原子力研究開発機構

先端基礎研究センター長 前川 禎通

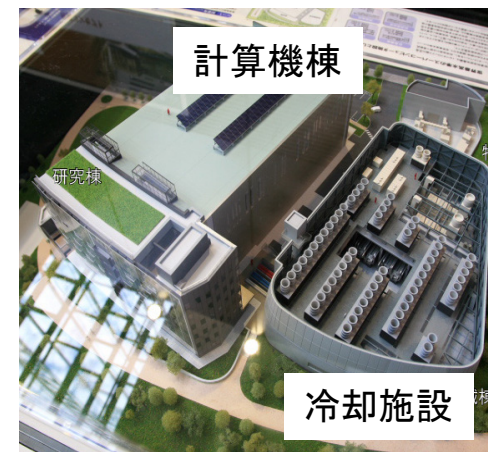
熱

エネルギーの基本、
人類の味方であり敵。

21世紀の課題：熱の克服・利用

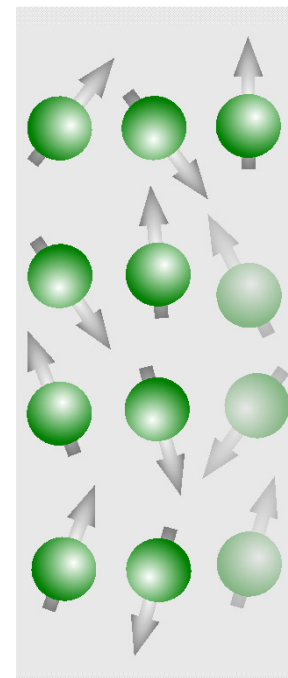
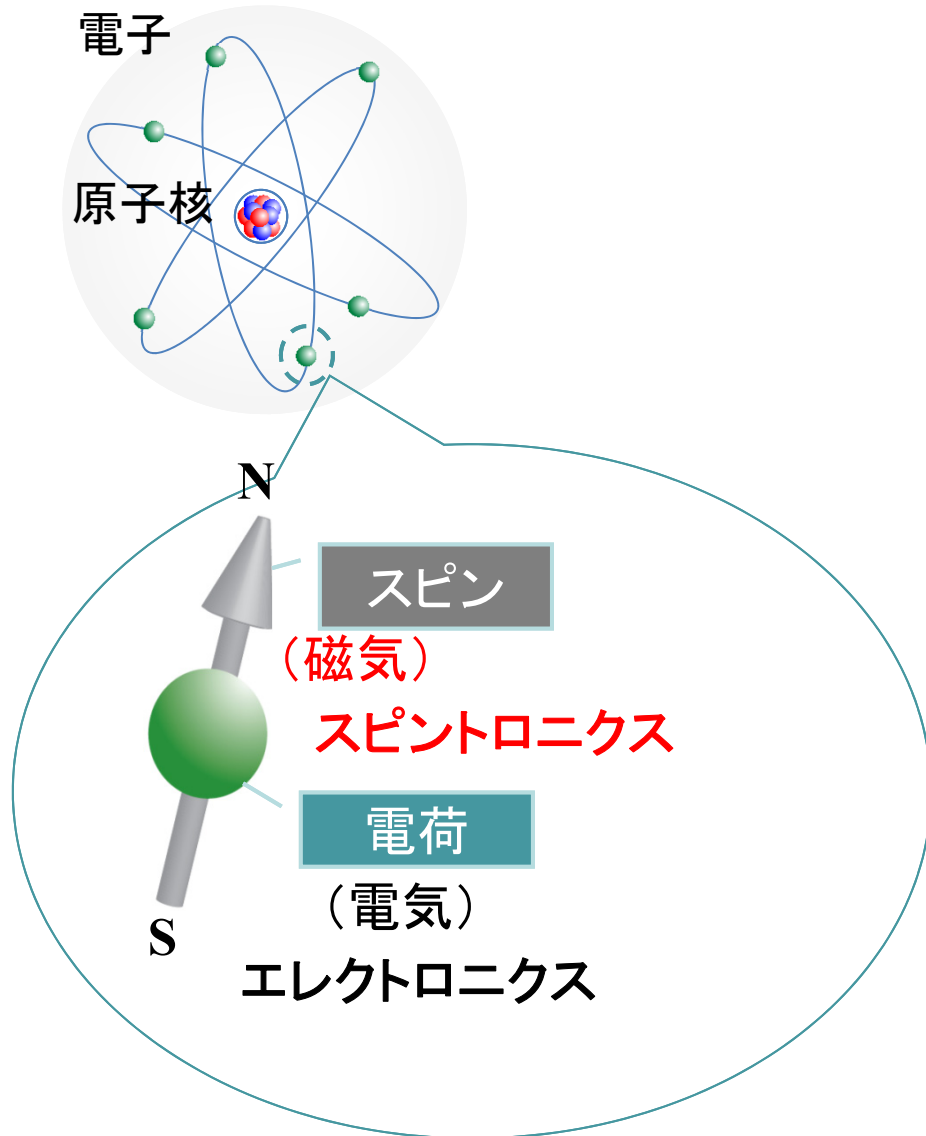
熱はエレクトロニクスの敵

計算機と同じサイズの
冷却施設が必要

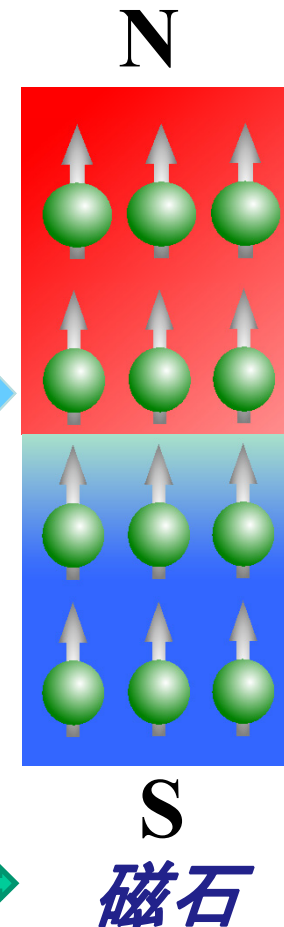
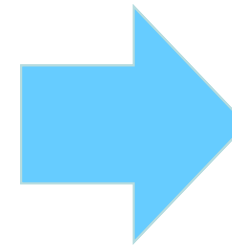


スピントロニクスは、計算機などの
熱問題の解決手段として有望。

電子、スピン、磁性



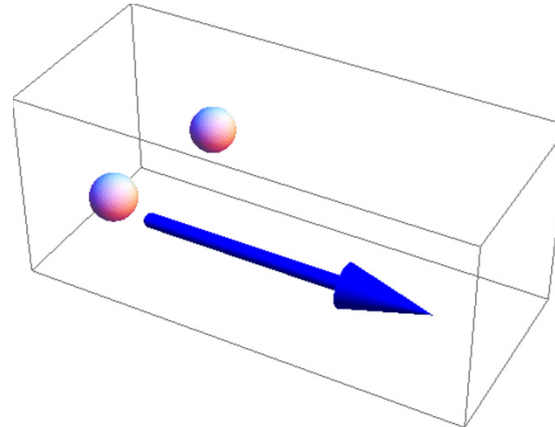
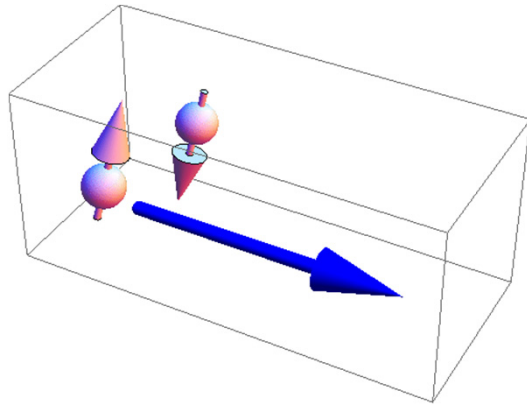
固体中の電子の
スピンの揃うと、



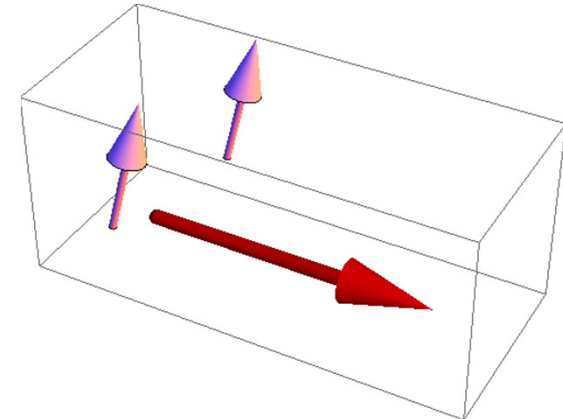
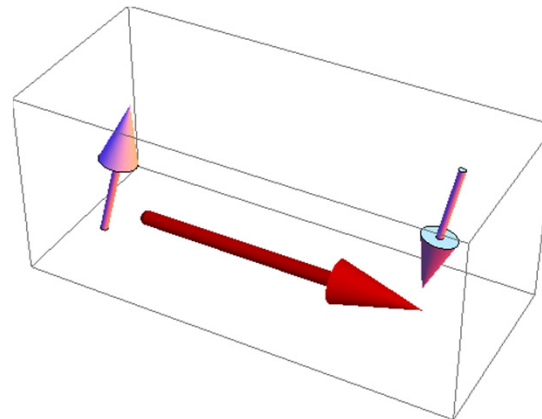
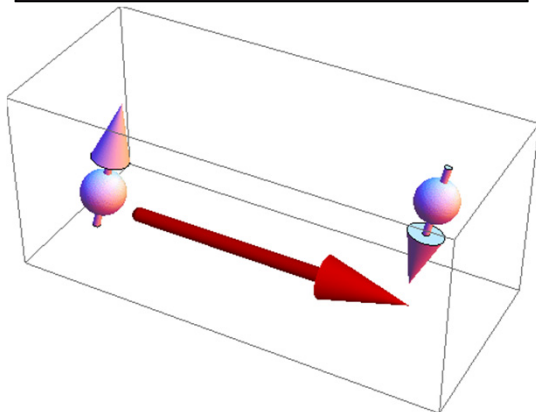
スピントロニクス

電流の代わりに**スピン流**を！
→ →

電流：電荷の流れ



スピン流：スピンの流れ



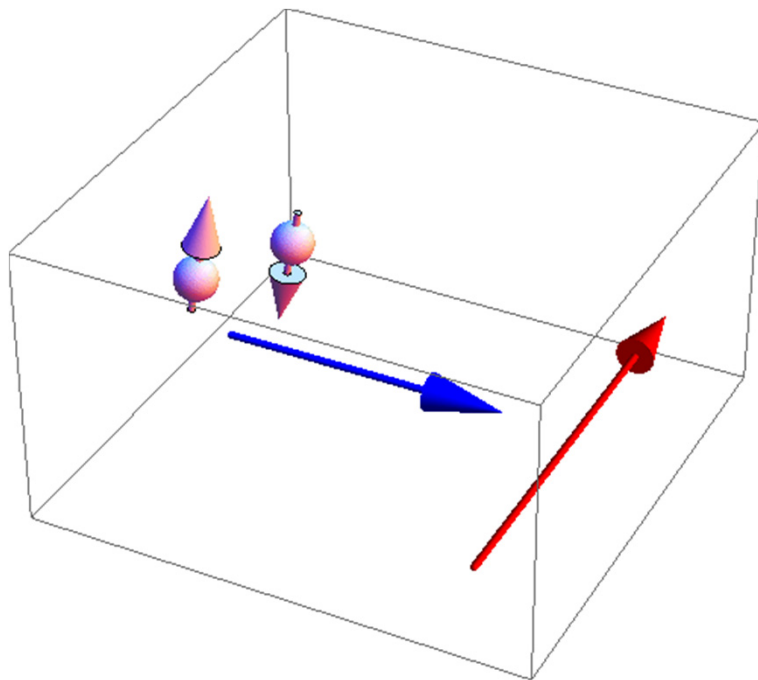
スピン流はジュール熱がない！！

⇒省エネデバイス開発、エレクトロニクスの熱問題の解決。

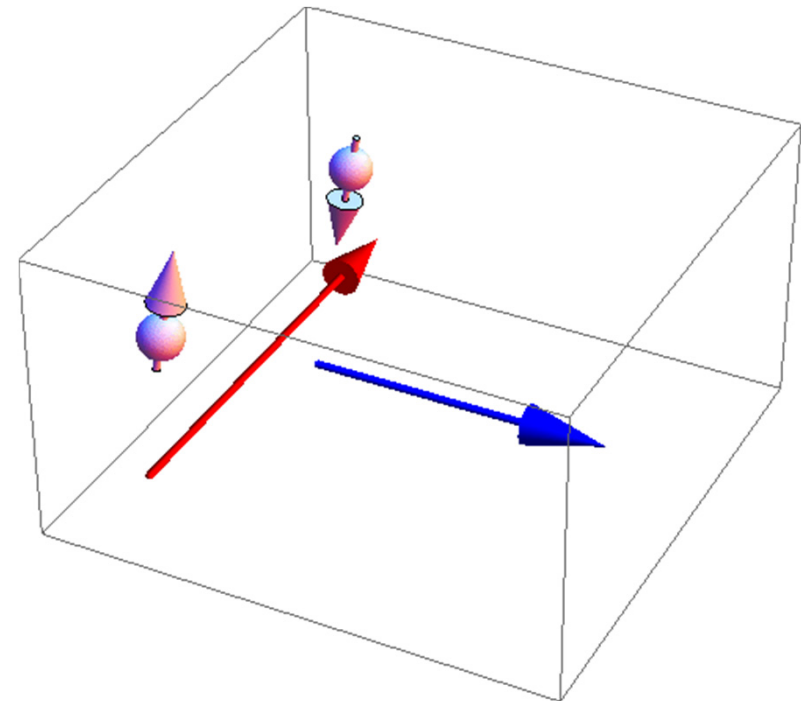
スピンホール効果(SHE)

電流とスピン流の相互変換
(スピン軌道相互作用による)

重元素による散乱



電流
→スピン流

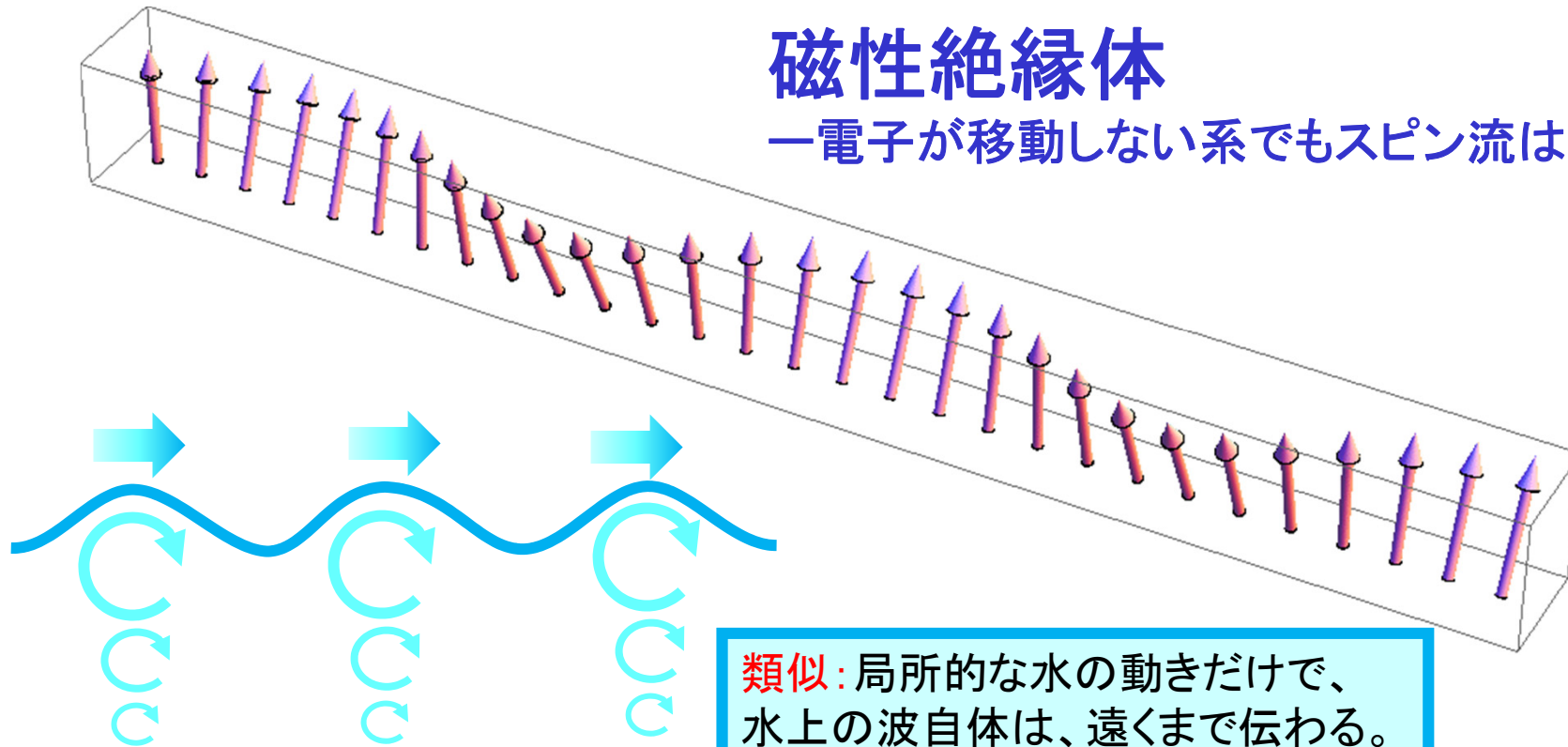


スピン流
→電流

スピン波の運ぶスピン流

磁性絶縁体

—電子が移動しない系でもスピン流は伝わる



実験でも実証 *Nature* (2010)

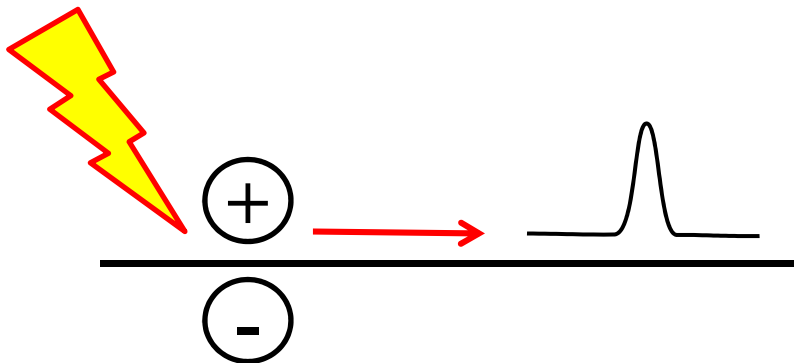
Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator

Y. Kajiwara, ★K. Harii, S. Takahashi, ★J. Ohe, K. Uchida, M. Mizuguchi, H. Umezawa, H. Kawai, K. Ando, K. Takanishi, ★S. Maekawa & ★E. Saitoh (★:原子力機構 前川チームの研究者)

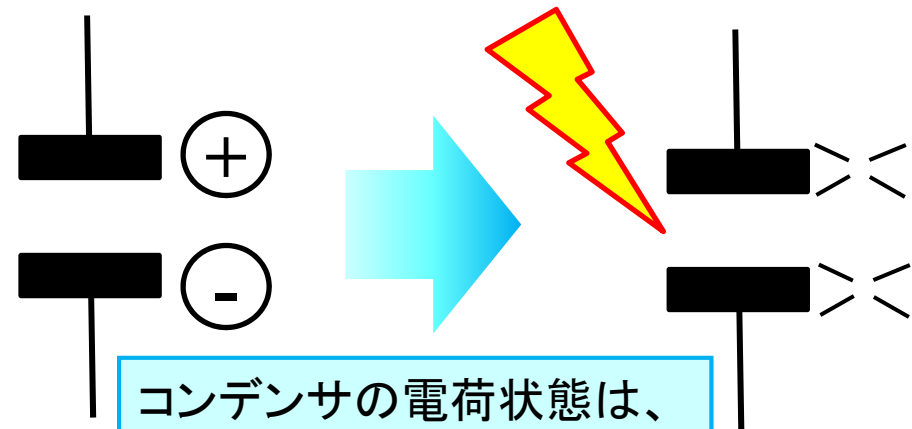
放射線に強いスピントロニクス素子

電荷を用いる普通のエレクトロニクス素子は、電離放射線に弱く、誤動作しやすい。

これ自体が電荷を生み出す



放射線によってノイズが生じる。

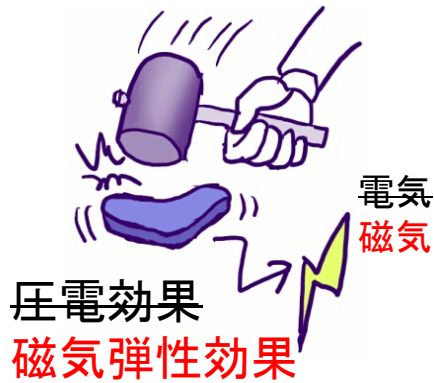


コンデンサの電荷状態は、放射線によって失われる。

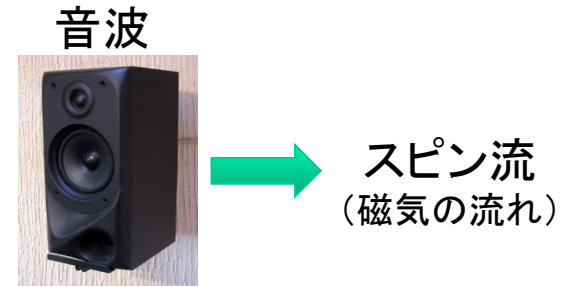
宇宙空間での利用(宇宙放射線)、集積度の高い半導体(素材に含まれる放射性物質)などの他、空間線量の高い場所での集積回路利用に影響。

スピントロニクス素子は、原理的に放射線に強く、これらの場所での活用が期待される。

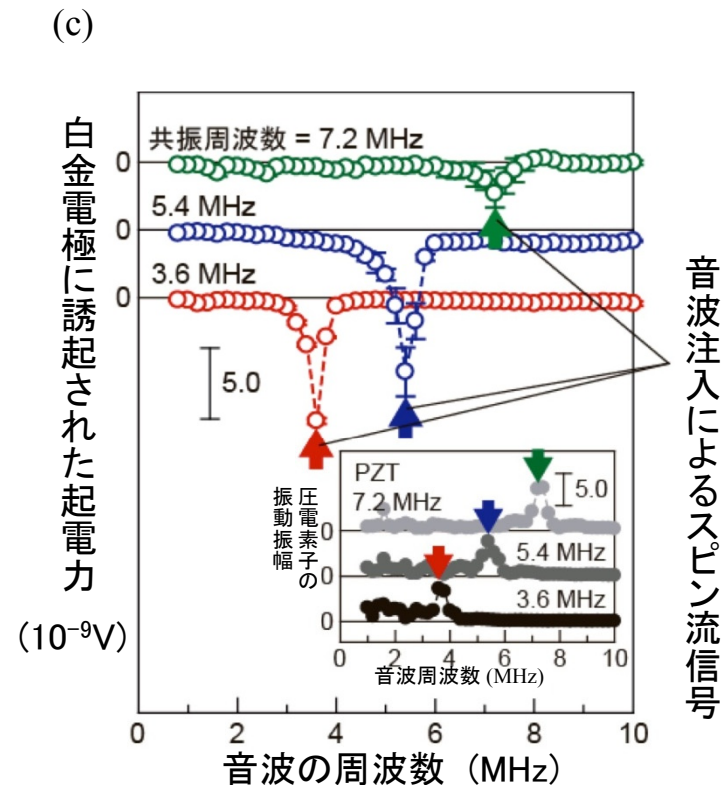
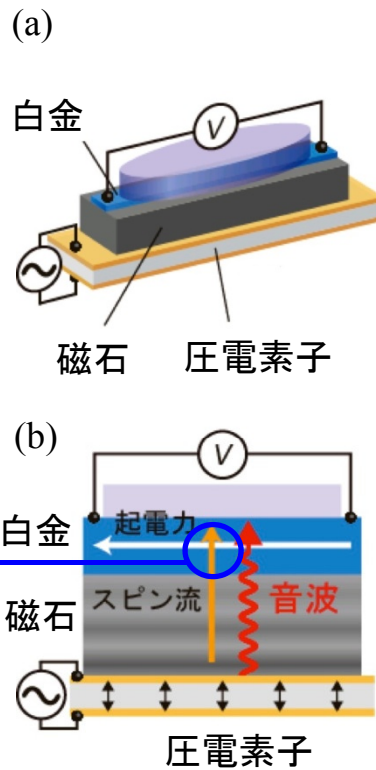
音波（振動）と電子スピン



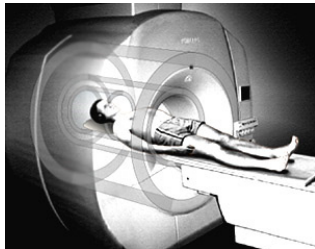
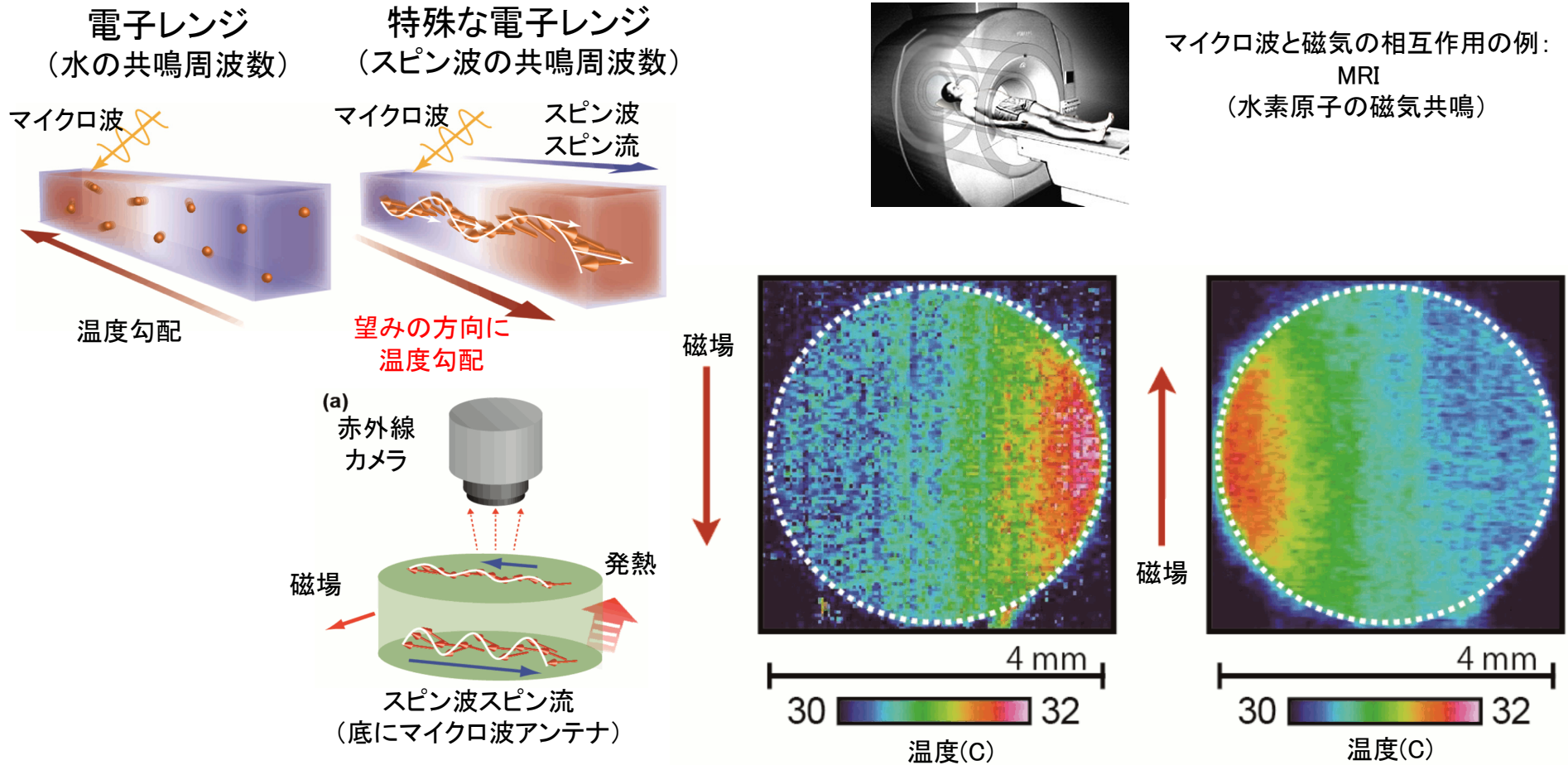
固体のひずみと磁気の相互作用
(磁気弾性効果)をつみあげて



スピンホール効果
白金に注入された
スピン流は、
横方向の**電流**に
変換される。



熱と電子スピン



マイクロ波と磁気相互作用の例:
MRI
(水素原子の磁気共鳴)

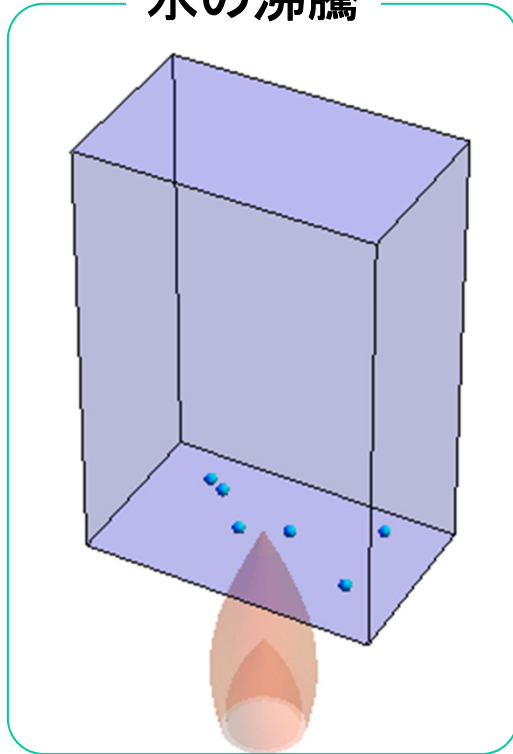
マイクロ波と磁気相互作用を利用して、スピン波スピン流による「方向制御」熱輸送

振動でもできたスピン流駆動を熱でも！？
電流に変換すれば、**スピン熱発電**！？

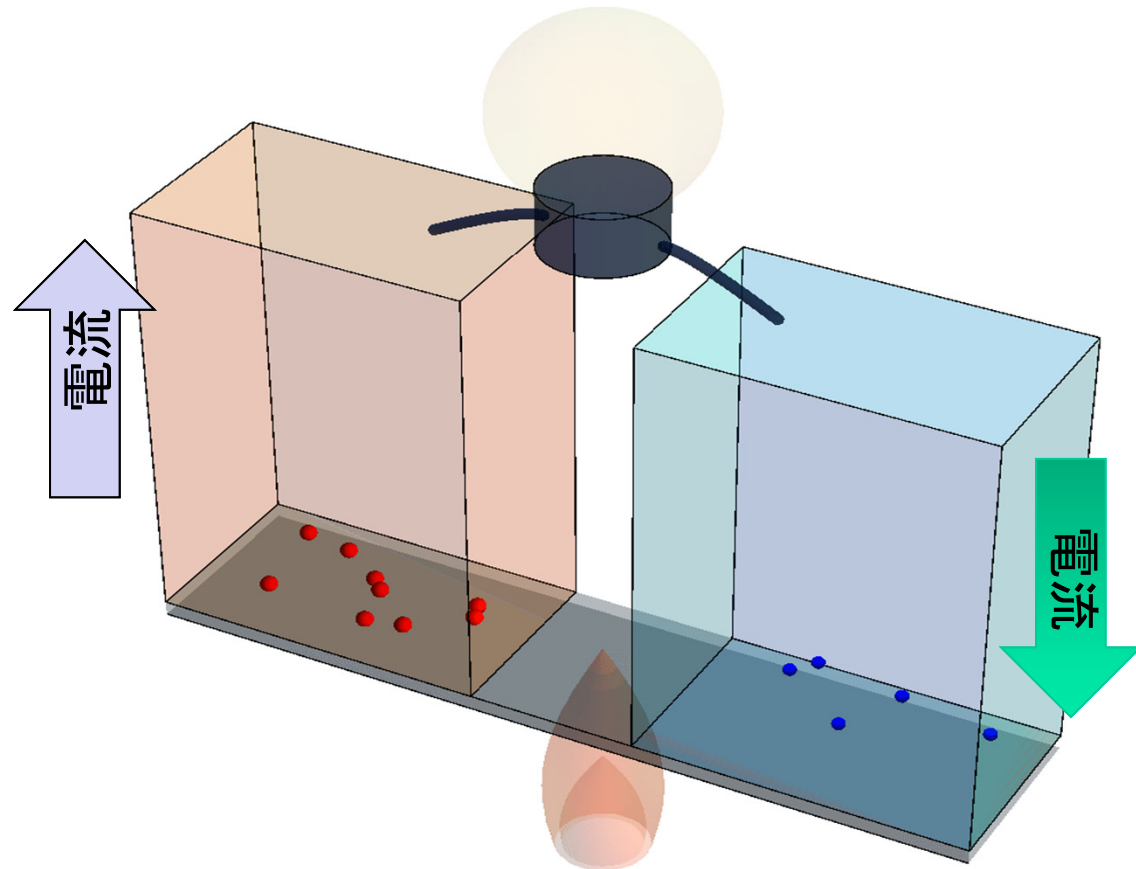
ゼーベック効果

熱電変換(ゼーベック効果)
(1821年に発見)

水の沸騰



電子の沸騰
(ゼーベック効果)



ジュール熱の発生！！
電流とともに熱も流れてしまう！！

スピントロニクスによる熱利用

直接、熱から電力を

熱電発電

ゼーベック効果(熱電変換)
(1821年の発明)

スピントロニクス

熱の発生抑制

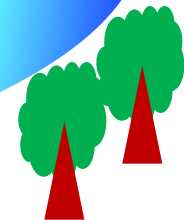
熱の活用

スピンゼーベック効果

Nature (2008)

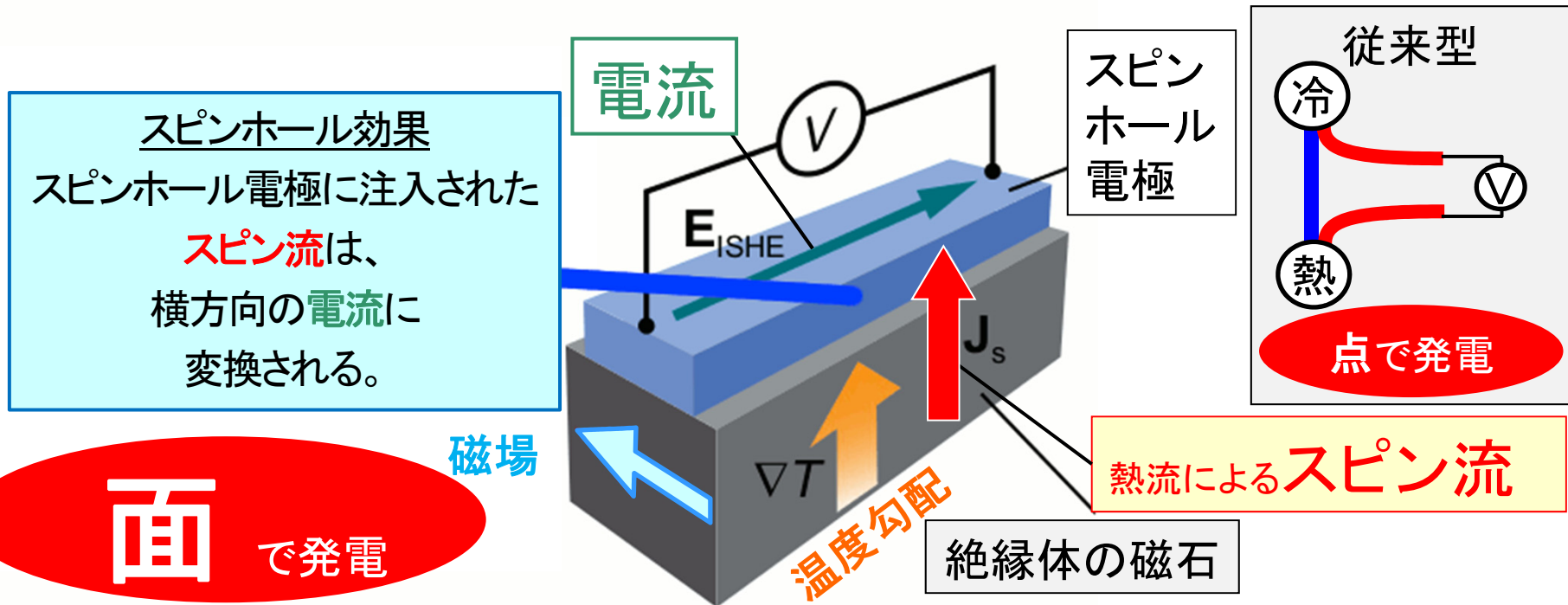
*K. Uchida, S. Takahashi, ★K. Harii, ★J. Ieda, W. Koshibae,
K. Ando, ★S. Maekawa and ★E. Saitoh*

★:原子力機構 前川チームの研究者



スピンゼーベック効果

スピン流による熱輸送の逆も可能: **熱流によるスピン流の駆動**。 そうすると...

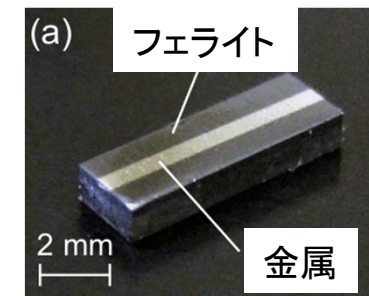


Uchida et al., Nature (2008); Nature Materials (2010)

★Adachi et al., Appl. Phys. Lett. (2010)

★Maekawa et al., Oxford Univ. Press (2012); J. Phys. Soc. Jpn. (2013)

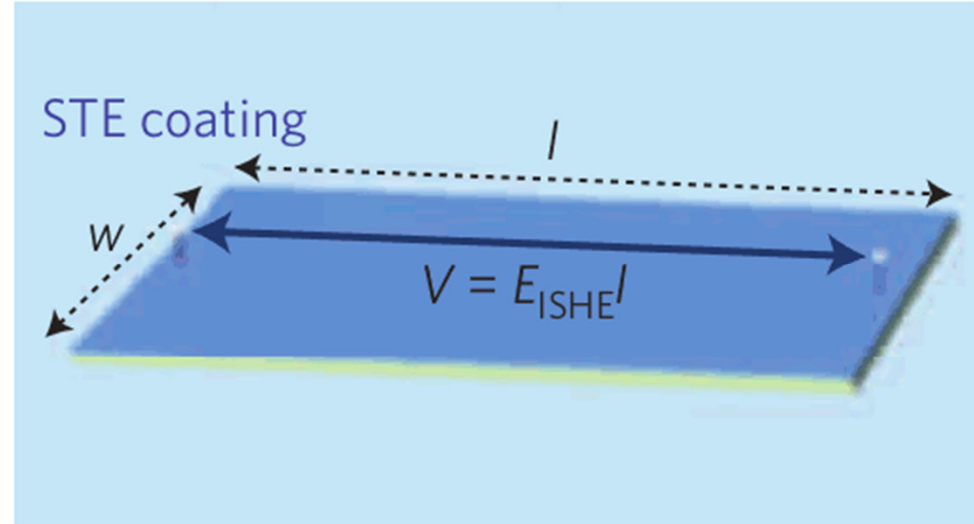
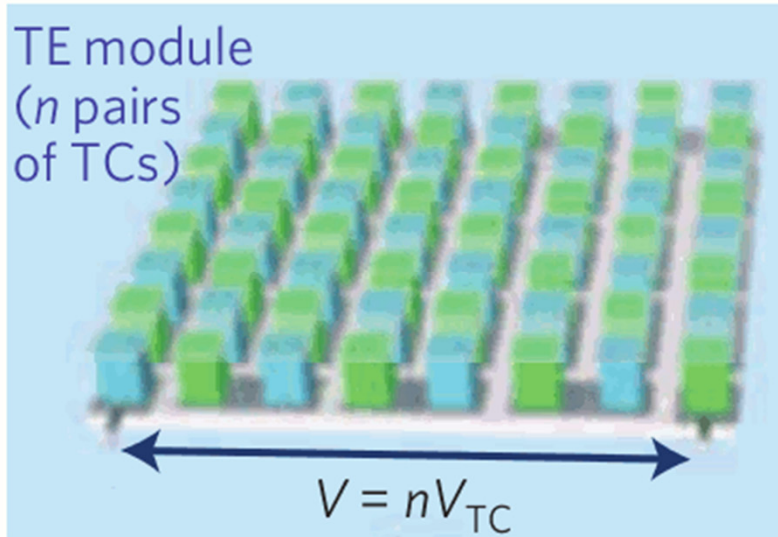
★:原子力機構 前川チームの研究者



面で発電するため、出力増が容易

スピナーゼーベック素子

(東北大・金研、NEC、原子力機構・先端研)



従来型熱電素子:

多数の熱電対作成必要
→コスト高・集積化困難

センチメートルにわたる温度勾配必要
→薄膜化困難

スピン(ゼーベック)熱電素子:

多数の熱電対作成不要
→コスト減・究極の集積化

ナノスケールの温度勾配で十分
→薄膜化可能

大面積、低コストの熱電発電素子

熱電発電の利点と実用化への取り組み

(グリーンイノベーションの重要課題の一つ)

利
点

高信頼性(動く部分がない)
小型化が容易(低品位の熱も使える)
環境にやさしい

考えられている応用例の一部

宇宙開発



NASA火星探査機
(Curiosity)

地熱発電



草津温泉での発電モデル事業
東芝広報誌より

自動車廃熱



トヨタ, BMW, etc.

深宇宙では、太陽光弱く、太陽電池が使えない。

熱電変換効率、20%が目標
→ スピンゼーベック効果(新しい概念)

発電素子には更なる改善が必要

従来の熱電素子:なかなか、大規模な応用に結びつかないのは、

素材が**高価**である(レアメタルを利用)。
発電**効率**が低い。
素子が**小さい**。

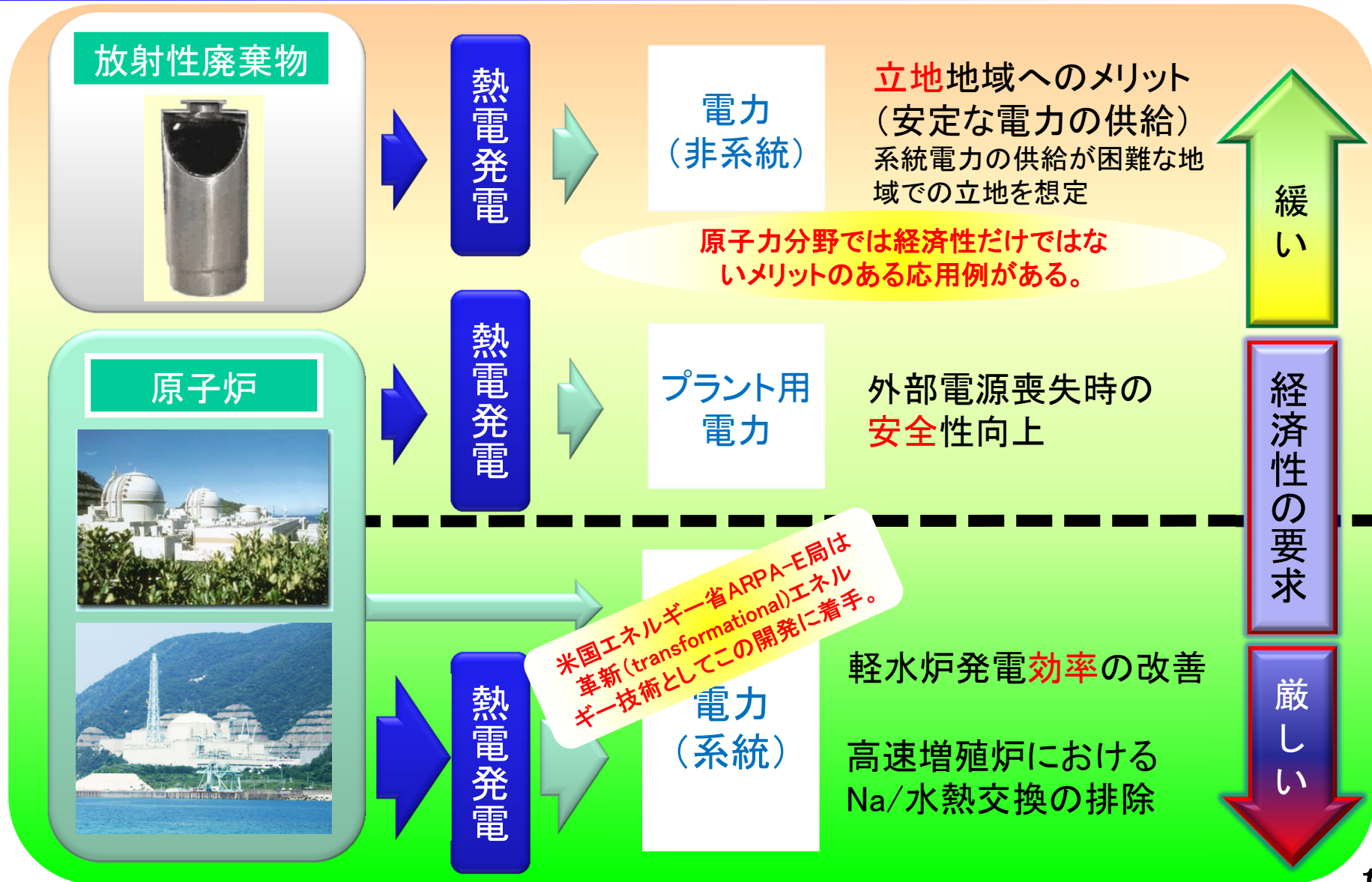
従来型のままで、改善の努力
・入手容易な元素を用いた素子の開発。
・性能指数の高い素子の開発。

・新しい原理に基づく素子の開発
→**スピン・ゼーベック素子**

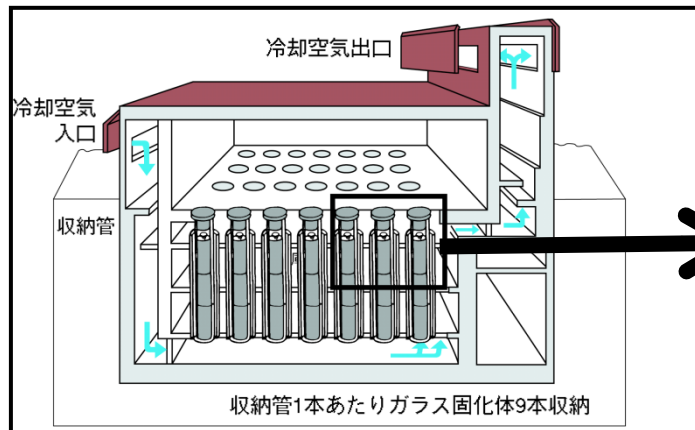
**革新的な、
スピンゼーベック
発電素子**

素子構造が極めて簡単になり、**大面積の素子**の開発が容易に。
原子力のような重厚長大熱源に親和性が高い。

原子力分野での熱電発電の利用



ガラス固化体 ガンマ線と熱の比較



ガラス固化体 中間貯蔵施設
1440体 / 1施設

放射性廃棄物のガンマ線で水素を作ろうという取り組みはこれまでもなされている。

ガラス固化体単体 : 発熱量 $\sim 2\text{kWt}$
(いずれも初期の値) 表面線量率 $\sim 1500\text{Sv/h}$

極めて高いと言われているこの線量率は、
エネルギー量で表すと 0.42W/kg

品位の低い熱を利用できる手段があれば、熱こそ利用すべきもの。

中間貯蔵施設 ガラス固化体1,440体 / 1施設
(六ヶ所 中間保管施設の例)
固化体の平均発熱量を 1.5kWt/体 と見積もると、
施設あたりの発熱総量は、 $\sim 2\text{MWt}$

何とかこれを活用したい。

熱

**エネルギーの基本、
人類の味方であり敵。**

21世紀の課題：熱の克服・利用

**スピンゼーベック効果：“ジュール熱を伴わないスピン流”
(2008年～) による熱電発電！！**



- 近年進捗の著しいスピントロニクス技術により、大幅な省エネ計算機が期待されるのみならず、耐放射線性の高い素子の開発にもつながる。
- スピントロニクスは、スピンゼーベック効果を活用することで画期的な熱利用が可能になる。スピンゼーベック熱電素子は重厚長大熱源に親和性が高く、原子力の様々な熱に対して利用が期待される。