

# 未利用熱エネルギーを有効活用する 柔軟な自立型電源

茨城県産業技術センター 技術支援部  
フード・ケミカルグループ 主任 安藤 亮

2021年11月25日

# 熱電変換技術と熱電素子

# 未利用熱の有効活用

一次エネルギーの内、**6割程度**が環境中に放出されている<sup>1)</sup>

未利用熱：有効利用されていない廃熱

- 産業における廃熱の多くは**200°C以下の中低温排熱**<sup>2)</sup>
- 発生地と需要地の距離が離れている(環境中の未利用熱)



地球を暖め続けるほどの  
大量の未利用エネルギー

ゲームチェンジ

膨大な  
再生可能エネルギーへ



広く、薄く分布している未利用熱を有効活用する技術を  
確立することは急務の課題である

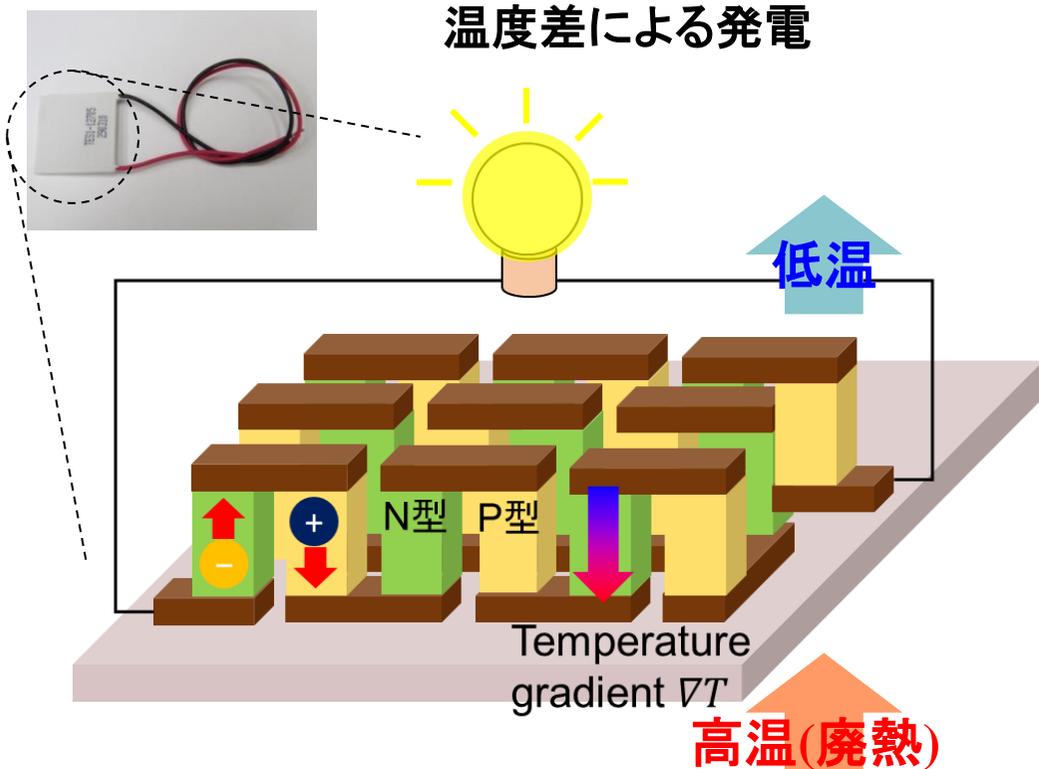
1) 舟橋良次, 小原晴彦:サーマルデバイス, NTS, p. 15 (2019).

2) NEDO, "15業種の工場設備の排熱実態調査報告書", [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101074.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101074.html), (2019.8.22).

# 熱電変換技術

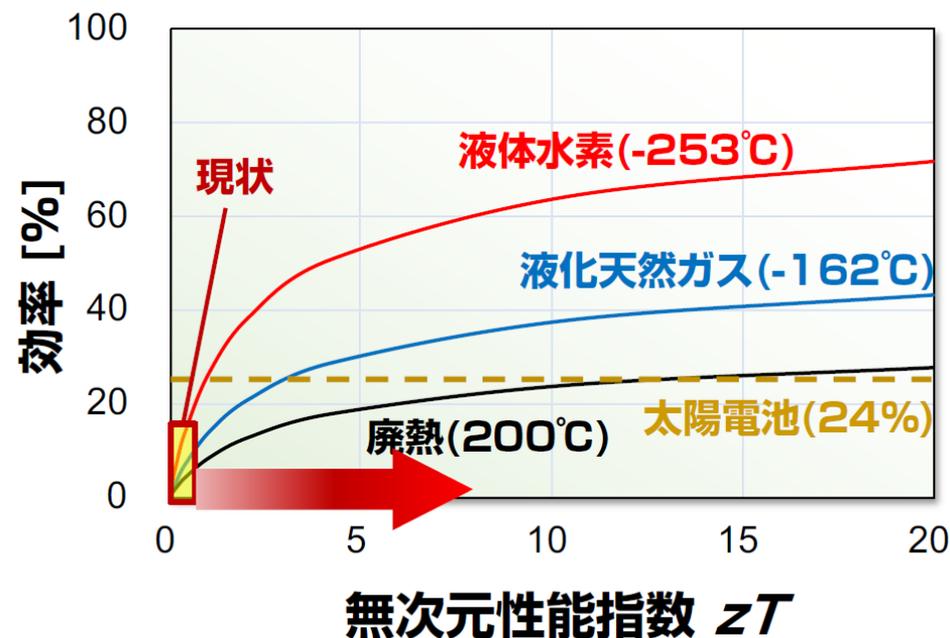
## 従来型熱電変換素子(ゼーベック発電)

温度差による発電



$$zT = \frac{S^2}{\rho\kappa} T$$

$S$ : ゼーベック係数[V/K]  
 $\rho$ : 抵抗率[Ωm]  
 $\kappa$ : 熱伝導率[W/mK]  
 $T$ : 絶対温度[K]

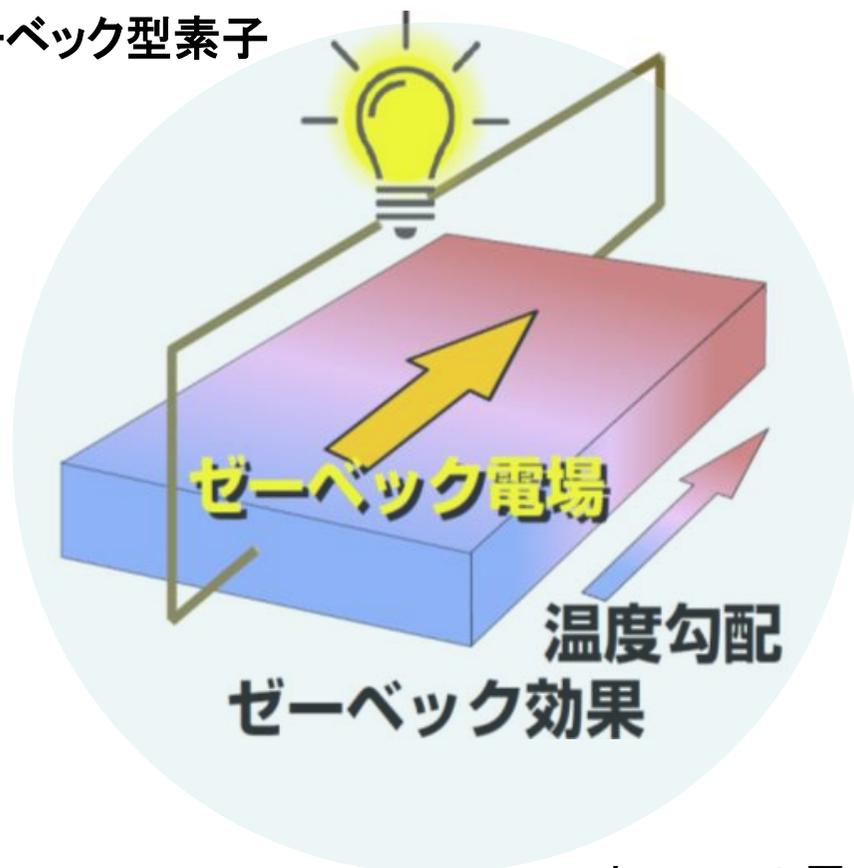


性能指数の向上が課題

- キャリアの異なる半導体を組み合わせた構造
- 温度差によって発電する(熱から電気への直接変換)
- 駆動部が不要(メンテナンスフリー)

# 熱電効果

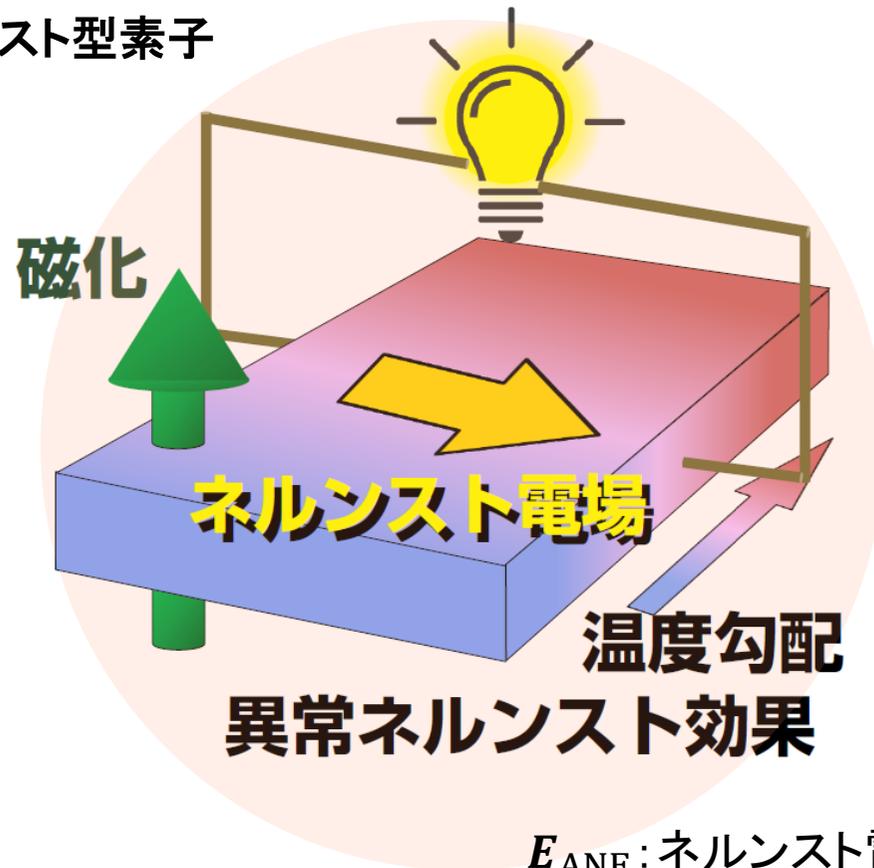
ゼーベック型素子



$$E_{SE} = S \nabla T$$

$E_{SE}$ : ネルンスト電場  
 $S$ : ゼーベック係数

ネルンスト型素子



$$E_{ANE} = NM \times \nabla T$$

$E_{ANE}$ : ネルンスト電場  
 $N$ : ネルンスト係数  
 $M$ : 磁化

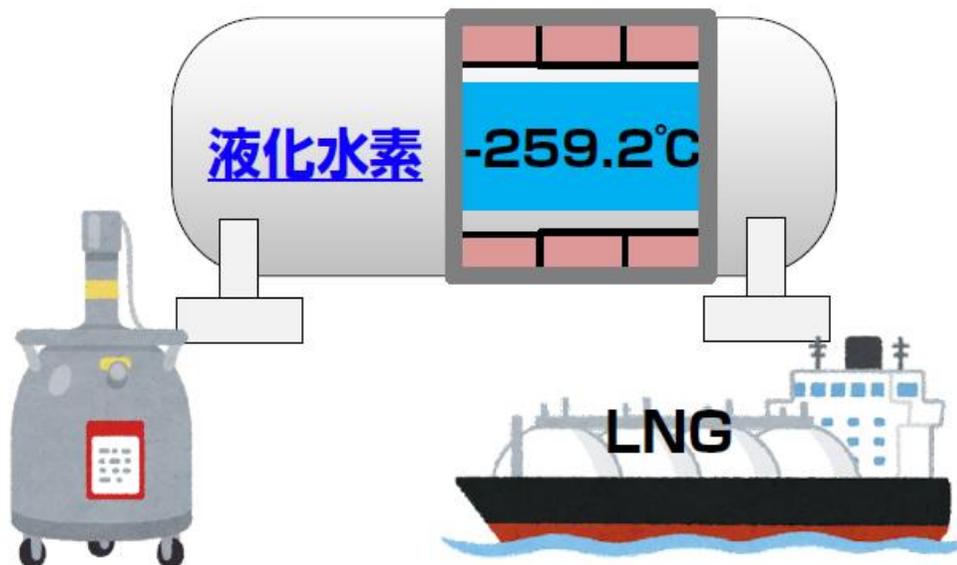
- ネルンスト効果では、**磁化と温度勾配の外積方向にネルンスト電場を生じる**
- **磁性体の内部磁化**を利用することで、外部磁場を必要としない素子作製が可能である

# 想定される用途

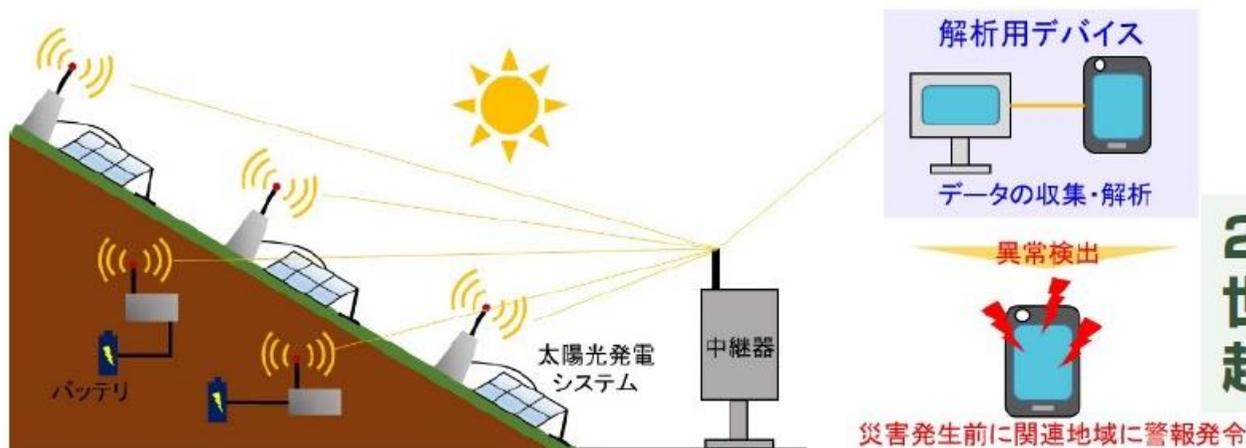
家庭・工場用廃熱回収，地熱回収



LNG気化器，水素システムの冷熱回収



自然エネルギー利用によるセンサーネットワーク



2030年のCO<sub>2</sub>削減効果は  
世界中で2,000万t/年を  
超える可能性

# IoTセンサネットワークの電力源

## Society5.0を構築するための自然エネルギー利用



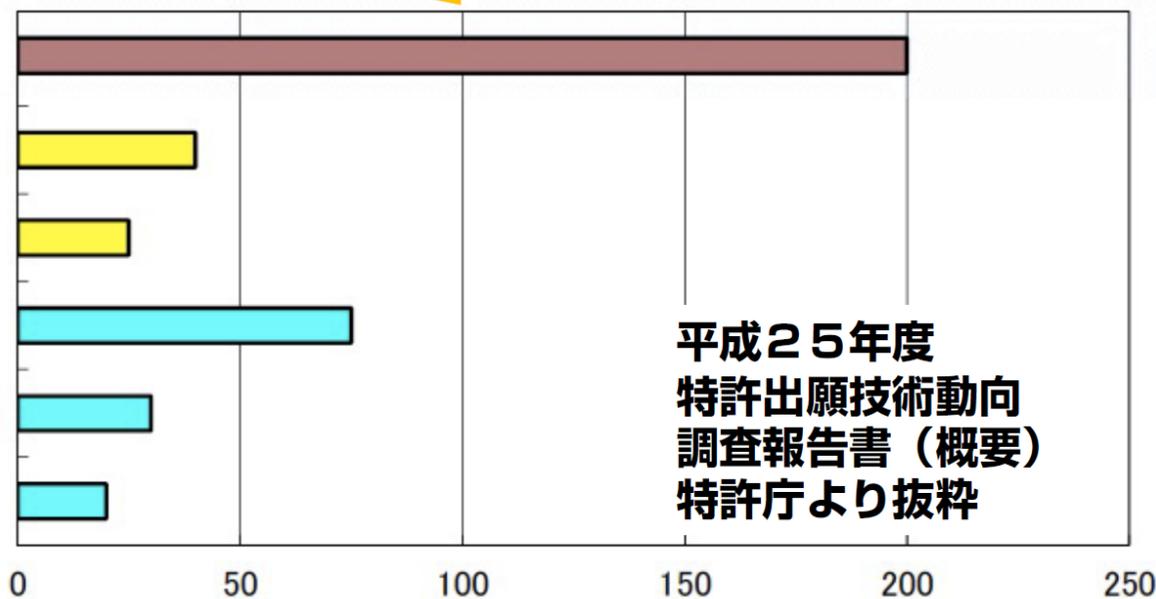
センサーネットワーク  
市場規模 数十兆円(予測)

本提案(温度差100°C)

本提案による効率向上と低コスト化

熱電(温度差100°C)

太陽光  
風力  
水力  
原子力  
火力



平成25年度  
特許出願技術動向  
調査報告書(概要)  
特許庁より抜粋

システムのコスト (万円/kW)

# 自然災害予測検知システム

センサネットワークを活用して環境中の様々なデータをモニタして災害の兆候を捉えることで被害の軽減を図る

センサ電源として太陽光発電, バッテリ, 複合的な電源供給を想定

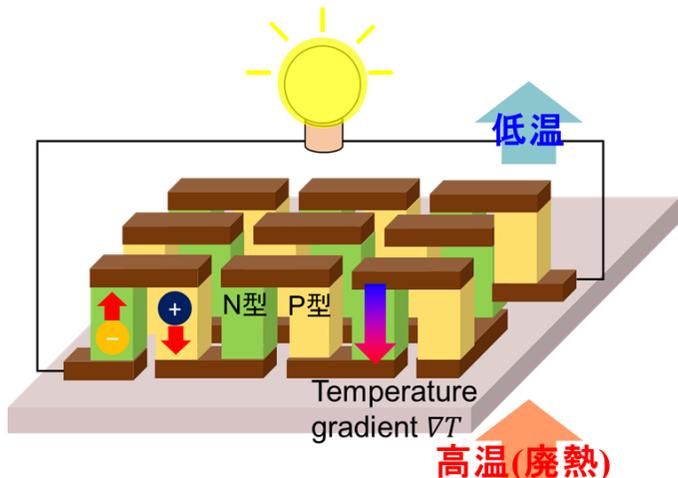


十分な光が得られない, 或いは, 電源のメンテナンスが困難な地域が存在する (山間部, 海底etc...)

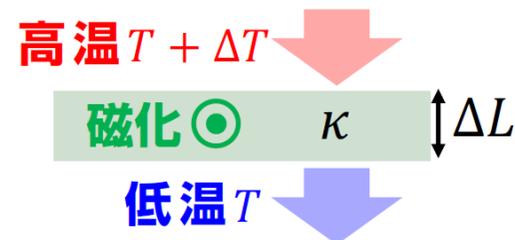
温度差を電気に直接変換でき, 可動部不要(メンテナンスフリー)の熱電変換技術による新たな自立・分散型電源への期待

# 従来の熱電変換素子

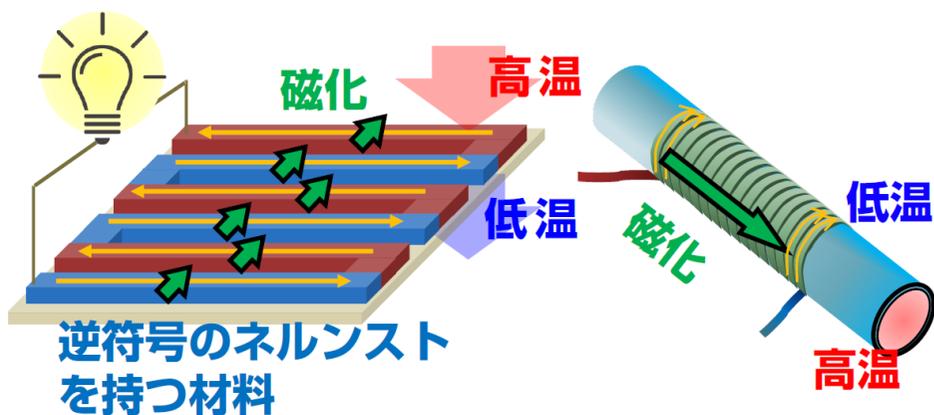
## ゼーベック型発電素子



- 電圧を大きくするためには素子の集積化が必須となり、素子構造は複雑化する
- 温度差方向に電圧が生じることに加えて柔軟性に乏しいため、設計の自由度が低い



## 提案されているネルンスト型発電素子



直列に電圧を増強

巻き線の長さで電圧を増強

$$q = -\kappa \nabla T$$

$q$ : 熱流束密度 [W/m<sup>2</sup>]  
 $\kappa$ : 熱伝導率 [W/mK]  
 $T$ : 絶対温度 [K]

$$q = \kappa \frac{\Delta T}{\Delta L}$$

$\Delta T$ : 温度差 [K]  
 $\Delta L$ : 素子長さ [m]

$$q = \kappa \frac{\Delta T}{\Delta L} \sim 0.1 \text{ MW/m}^2$$

$\kappa = 1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $\Delta L = 1 \text{ mm}$ ,  
 $\Delta T = 100 \text{ K}$

- ネルンスト係数や磁化を制御することでシンプルな構造で電圧を増強できる
- 小さな熱流束では温度差が得られない

# 提案する熱電素子

# ネルンスト型熱電素子の課題

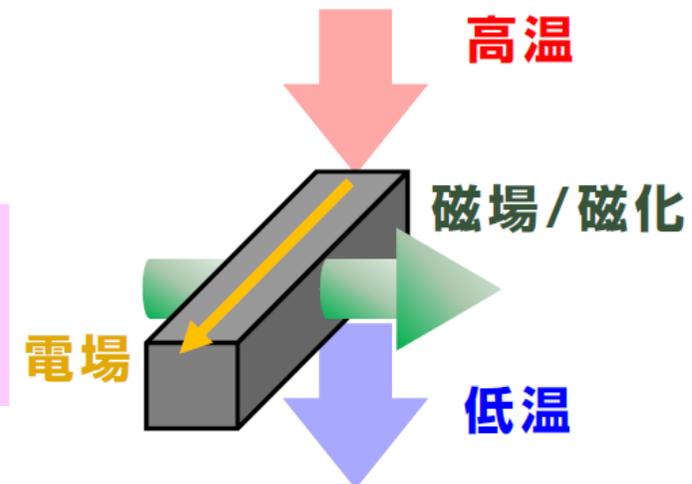
## メリット

- 磁化を制御することで単一材料で実現できるため、構造がシンプルである
- 材料性能により、高い効率が得られる可能性がある
- 磁化を制御することで電圧が生じる方向を制御できる

## 課題

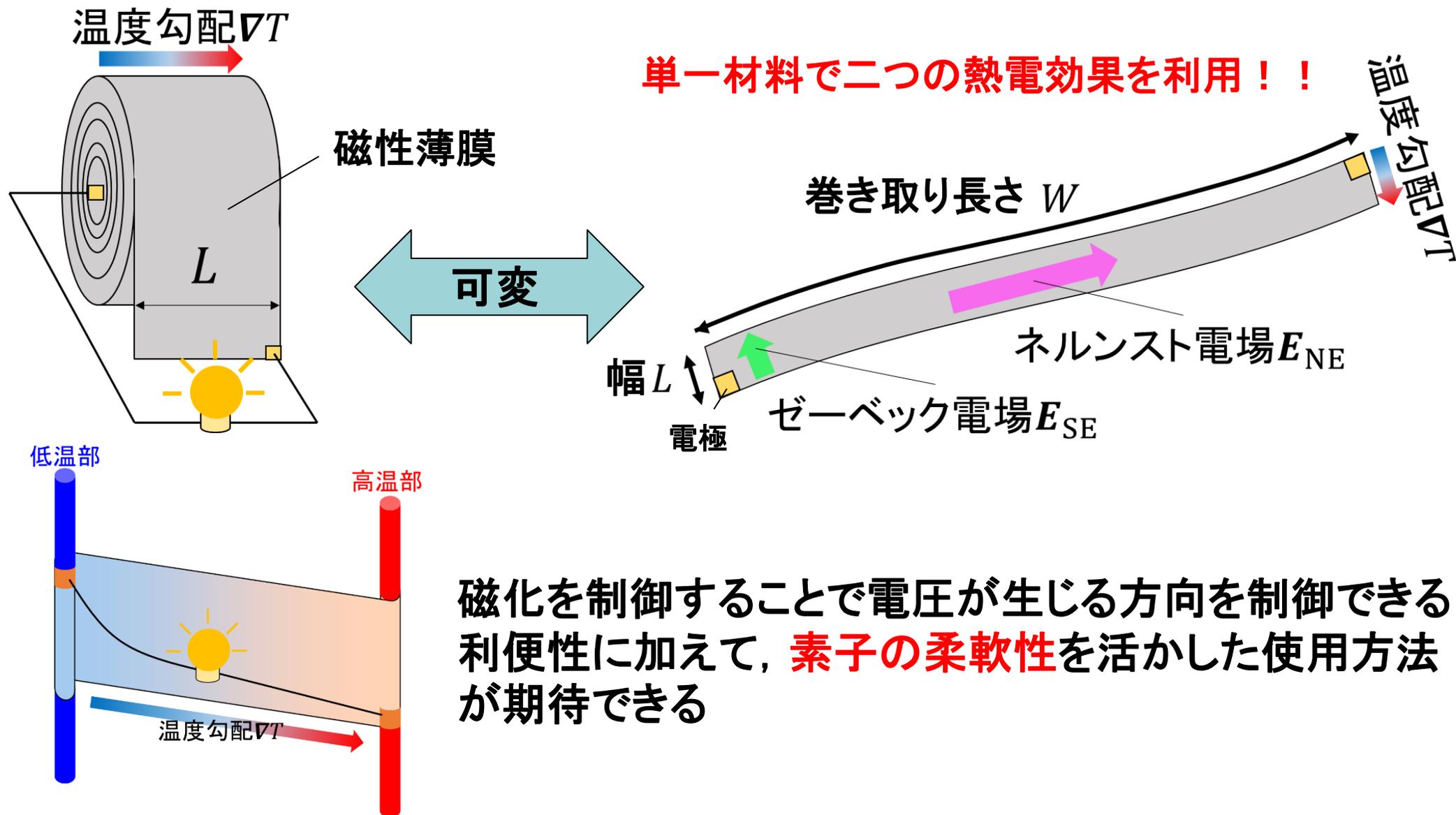
- 垂直磁化を有することが望ましい(材料)
- 材料に依存するネルンスト電圧が小さい(材料)
- 温度差ができにくい(素子設計)

環境中で得られる現実的な温度差で発電する素子構造と材料構成を提案する

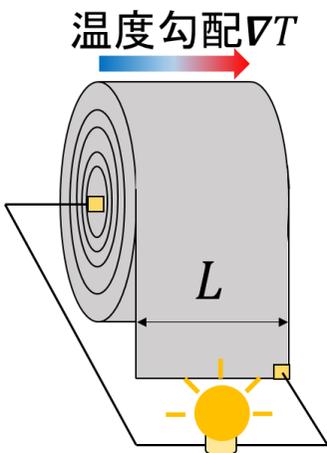


# ロール型熱電素子の構造

磁性薄膜を樹脂フィルム上に積層した柔軟な構造



# ロール型熱電素子の性能

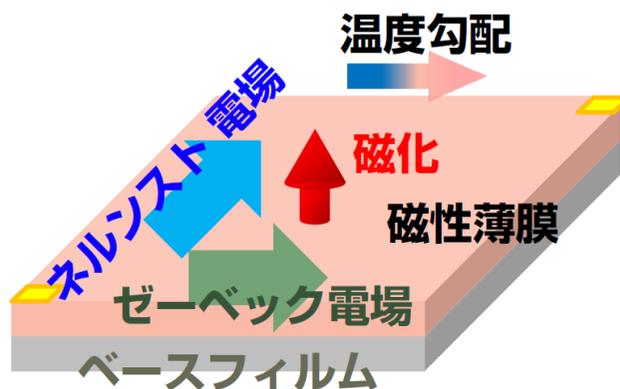


$$S_{eff} \cong N \frac{W}{L} + S$$

$N$ : ネルンスト係数  
 $S$ : ゼーベック係数

巻き数に依存する

巻き数を増やすことで実効的  
ネルンスト係数を増強



$$(zT)_N = \frac{S_{eff}^2}{\rho K_{eff}} T$$

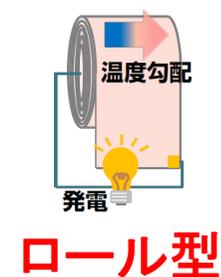
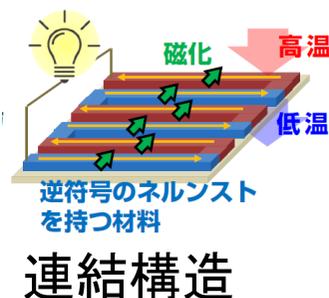
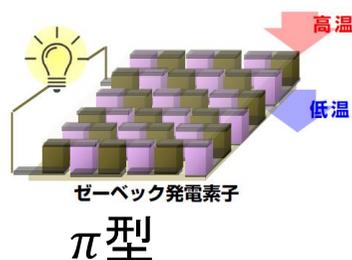
$S_{eff}$ : 実効ネルンスト熱電係数 [V/K]  
 $\rho$ : 抵抗率 [ $\Omega m$ ]  
 $K_{eff}$ : 実効熱伝導率 [W/mK]  
 $T$ : 絶対温度 [K]

磁性薄膜を樹脂フィルム上に積層。  
(実効的熱伝導率  $\kappa_{eff}$  低減)

小さな廃熱・環境熱等によって生み出される  
温度差でも電圧増強が見込まれる

# 従来型の熱電素子との比較

タイプ	材料	形状	温度差/ 熱流	電圧増強	磁場/磁化
ゼーベック型	性能が同じN型とP型のペア	$\pi$ 型	-	温度勾配, ペア数	-
ネルンスト型	ネルンスト係数の符号が異なる磁性薄膜のペア	連結構造	$\times$ 面直方向	ペア数	$\bigcirc$ 面内磁化
ネルンスト型	単一の磁性材料	渦巻き型	$\times$ 動径方向	巻数(長さ)	$\times$ 要外部磁場
ネルンスト型	単一磁性材料	ロール型	$\bigcirc$ 幅方向	ロール巻き 数(長さ)	$\bigcirc$ 垂直磁化



# 実用化のための検討

**新技術実用化のために**

- 1. 垂直磁化膜材料の検討**
  - 2. 電極構造と素子寸法の見積もり**
- を行った。**

# 試料作製と評価システム構築

## ■ 成膜条件

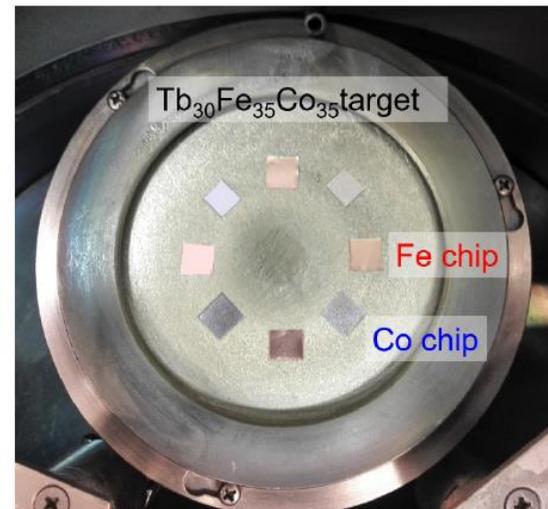
装置: RFマグネトロンスパッタリング装置

到達真空度:  $2.0 \times 10^{-4}$  Pa

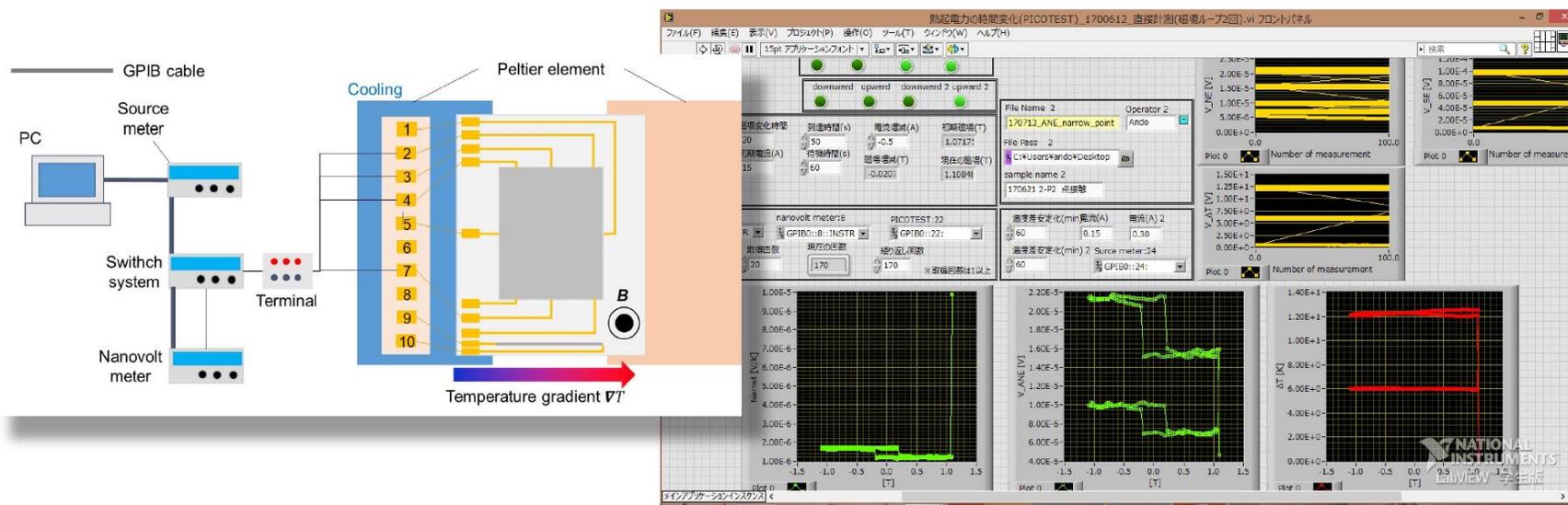
ターゲット:  $Tb_{30}Fe_{35}Co_{35}$  (3N, 4"  $\Phi$ ) + Fe, Co chip

薄膜構造: ガラス基板/AIN/TbFeCo/AIN

金属チップを使うことで試料の組成を制御

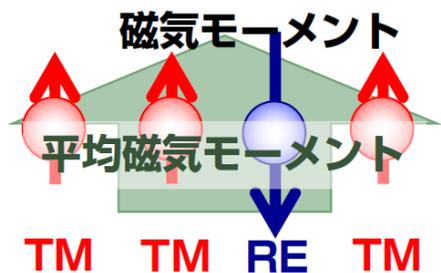


## ■ LabVIEWによる異常ネルンスト効果の自動測定システム構築

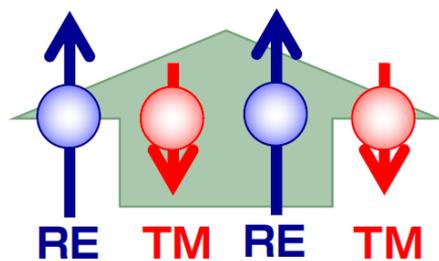


# フェリ磁性薄膜TbFeCoの検討

フェリ磁性体：希土類(RE)-遷移金属合金(TM)で垂直磁気異方性を示す



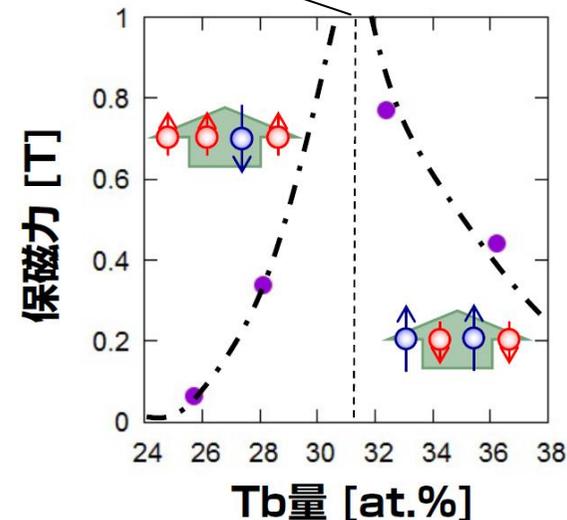
TMが多い場合



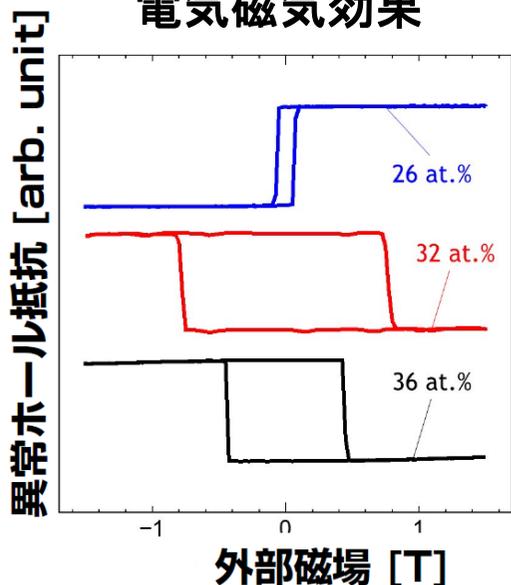
REが多い場合

平均磁気モーメントの  
向きは組成に依存する。

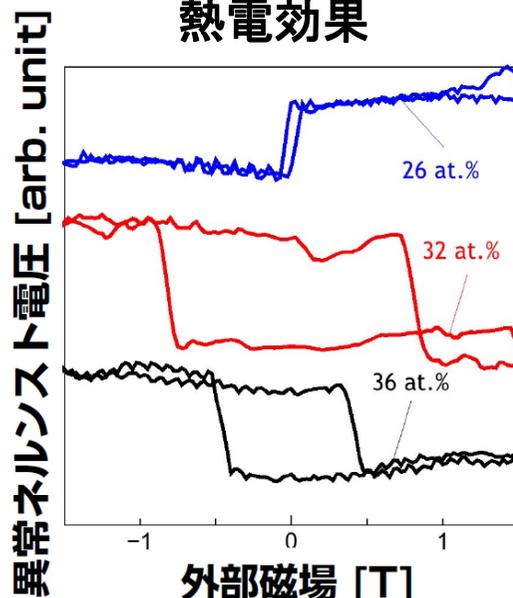
補償組成



電気磁気効果



熱電効果

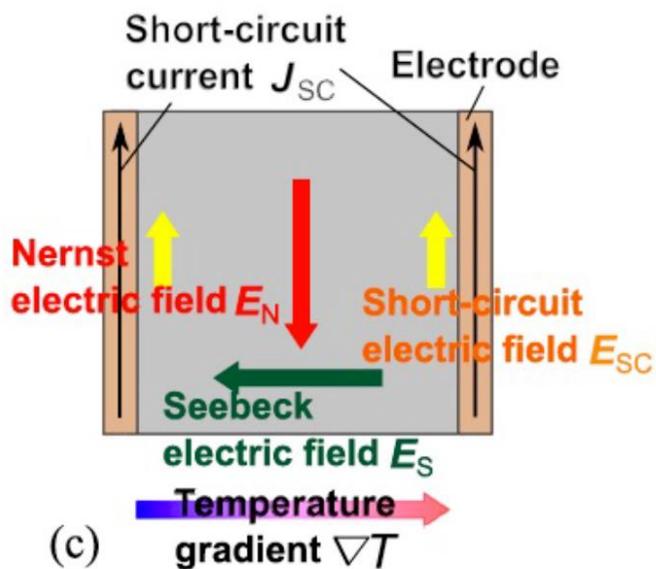
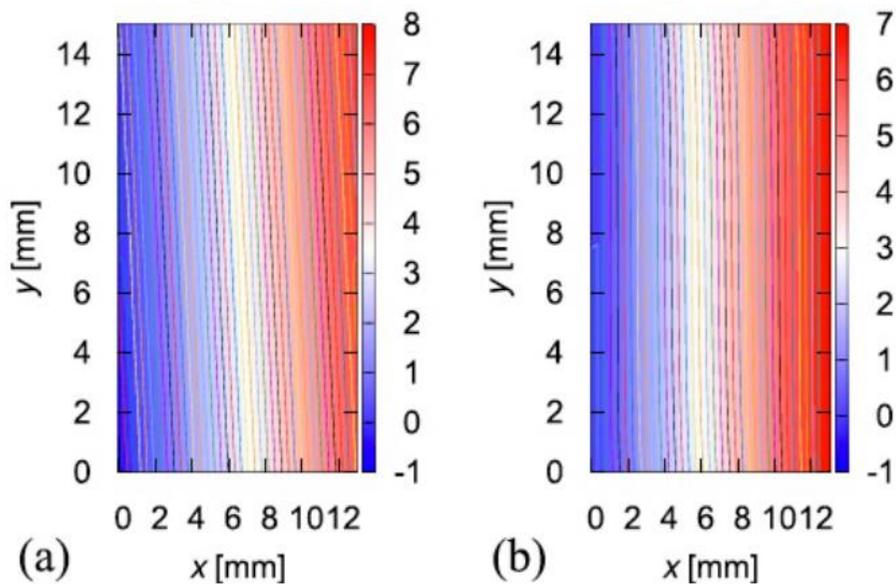


- フェリ磁性体のネルンスト効果を観測
- 垂直磁気異方性により外部磁場が不要
- ネルンスト効果と異常ホール効果の符号一致

二つの効果の関連性を解明することで、  
材料性能向上の指針を探索

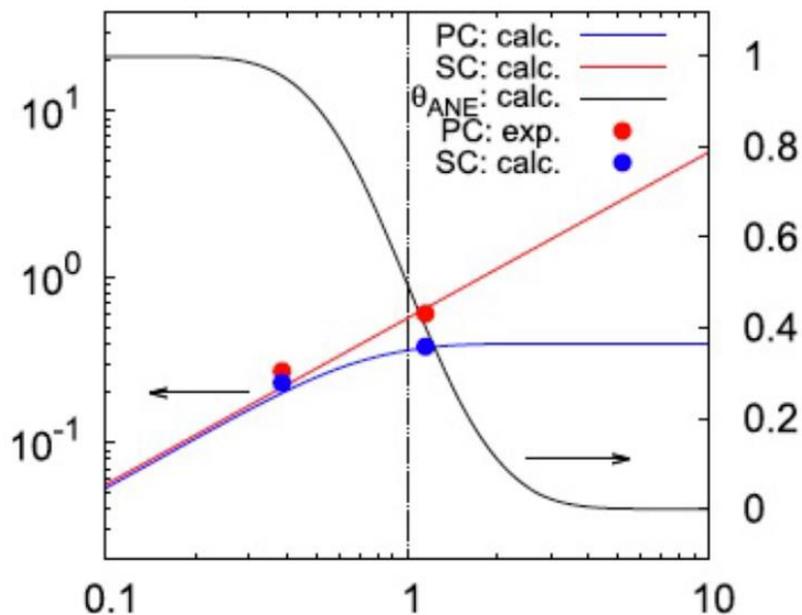
- R. Ando, T. Komine, Y. Hasegawa, J. Electron. Mater. 45(7), pp. 3570-3575, 2016.
- R. Ando, T. Komine, *et al.*, AIP advances 8, 056316, 2018.

# 素子形状の検討



(c) 電極配置についての数値解析事例

異常ネルンスト効果 [ $\mu V/K$ ]



異常ネルンスト角

アスペクト比  $W/L$



素子の電極配置を点接触とし、アスペクト比を上げることでネルンスト電圧が増強

# 企業への期待

## Benefit

- 革新的熱電素子創出，カーボンニュートラルへの寄与

## Difference

- 熱電材料探索の新たな視点を提案

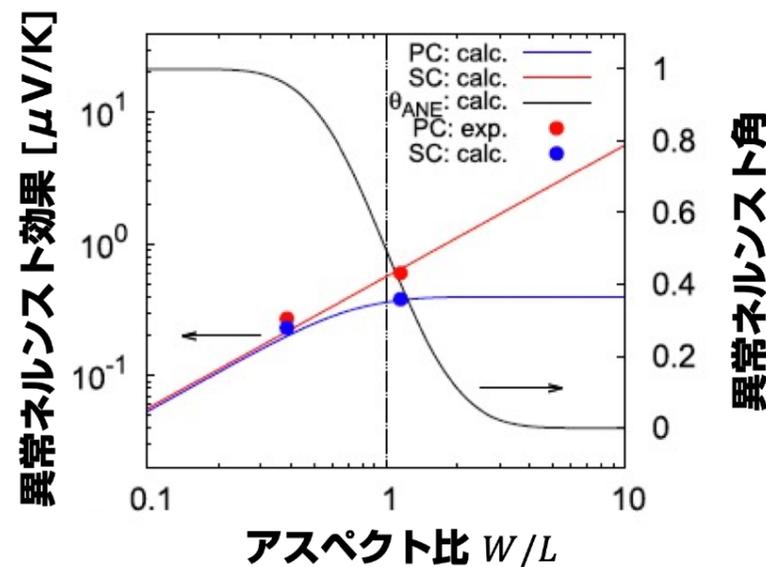
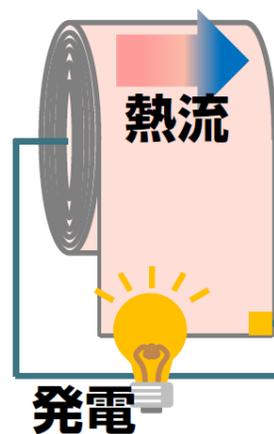
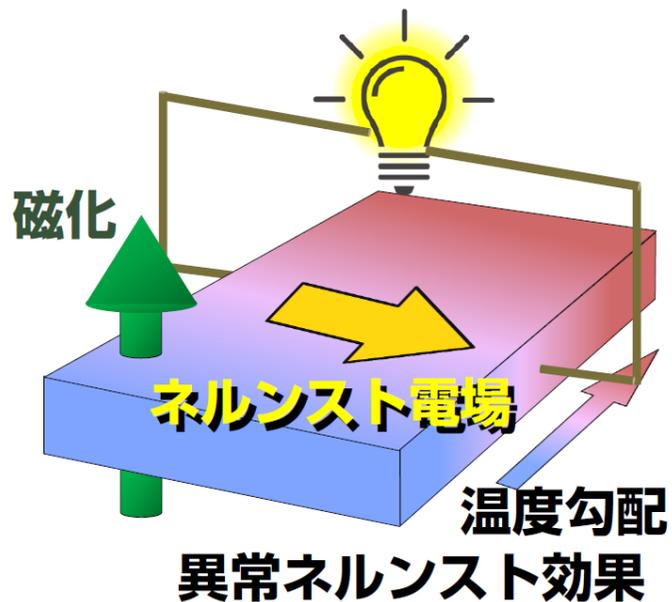
## Ask

- 腰を据えた材料探索と素子技術の育成
- 有望な材料が見出された際の知財取得

材料・素子・製造技術開発には、研究機関と企業の共同研究が不可欠である

# 実用化に向けた課題

- ホール角の大きなフェリ磁性体のネルンスト効果を明らかにしたが、垂直磁化，かつ，大きな異常ネルンスト効果を有する材料のさらなる探索が必要である
- ロール型素子を提案したが，素子構造を実現するための，ベースフィルム，巻き取り型成膜装置を確立する必要がある
- 垂直磁化を有し，かつ，大きな異常ネルンスト効果を有する材料の設計が鍵となり，継続して研究する予定である



# 本提案に関する知的財産

**発明の名称：熱電変換装置、熱電変換方法**

**出願番号：特願 2018-236300**

**公開番号：特開 2020-098860**

**発明者：小峰 啓史、安藤 亮**

# お問い合わせ先

茨城県産業技術イノベーションセンター  
産業連携グループ

TEL 029-293-7213

FAX 029-293-8029

e-mail [renkei2@itic.pref.ibaraki.ac.jp](mailto:renkei2@itic.pref.ibaraki.ac.jp)