

令和5年度第2回 新潟大学研究シーズプレゼンテーション

# 「熱電変換材料のしくみと可能性」

2024.01.26 (15:05～)

新潟大学 工学部 材料科学プログラム  
中野智仁

# 「熱電変換材料のしくみと可能性」

## Contents

1. はじめに

2. 熱電変換材料, ゼーベック効果とは

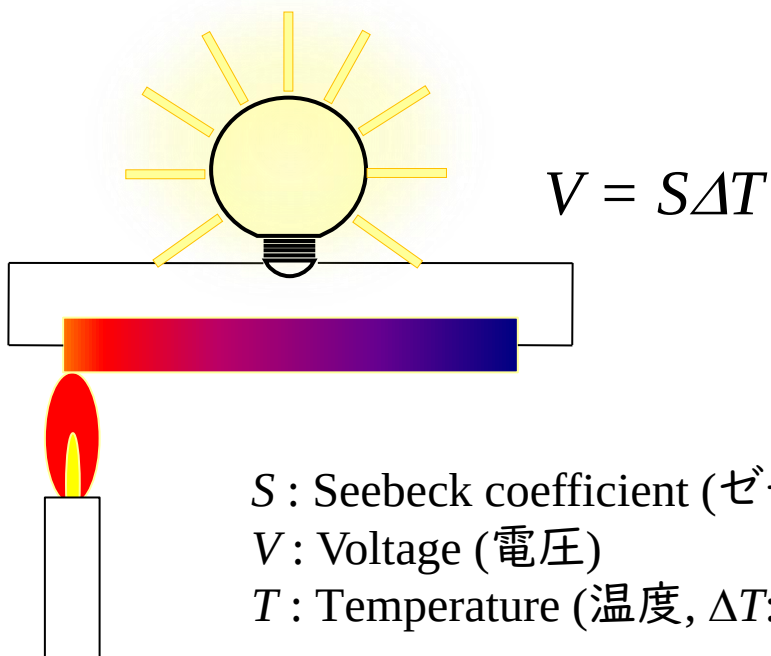
3. 熱電変換(ゼーベック効果)のしくみ

4. 熱電変換(発電)の可能性

5. まとめ

# 熱電材料 (Thermoelectric Material)

熱と電気を直接変換する材料



$S$ : Seebeck coefficient (ゼーベック係数)

$V$ : Voltage (電圧)

$T$ : Temperature (温度,  $\Delta T$ : 温度差)

ゼーベック効果

温度”差”があると電圧が発生

ゼーベック係数: 物質固有の物理量



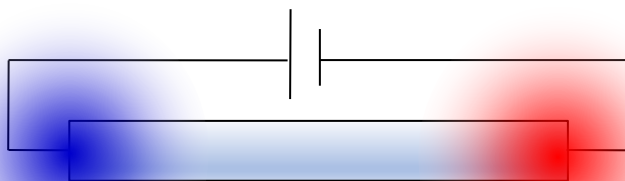
1822年

Thomas Johann Seebeck

[https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas\\_Johann\\_Seebeck](https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Johann_Seebeck)

# 熱電材料 (Thermoelectric Material)

熱と電気を直接変換する材料



吸熱

発熱

$$Q = \Pi I$$

$\Pi$  : Peltier coefficient (ペルチェ係数)

## ペルチェ効果

電気を流すと温度差ができる

素子に電気を流すだけで冷却が可能

コンパクトで静かな冷凍機

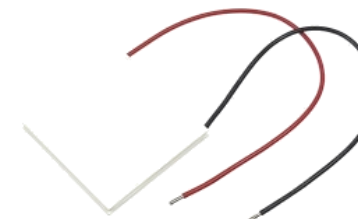


1840年

Jean Charles Athanase Peltier

[https://en.wikipedia.org/wiki/Jean\\_Charles\\_Athanase\\_Peltier](https://en.wikipedia.org/wiki/Jean_Charles_Athanase_Peltier)

ペルチェ素子



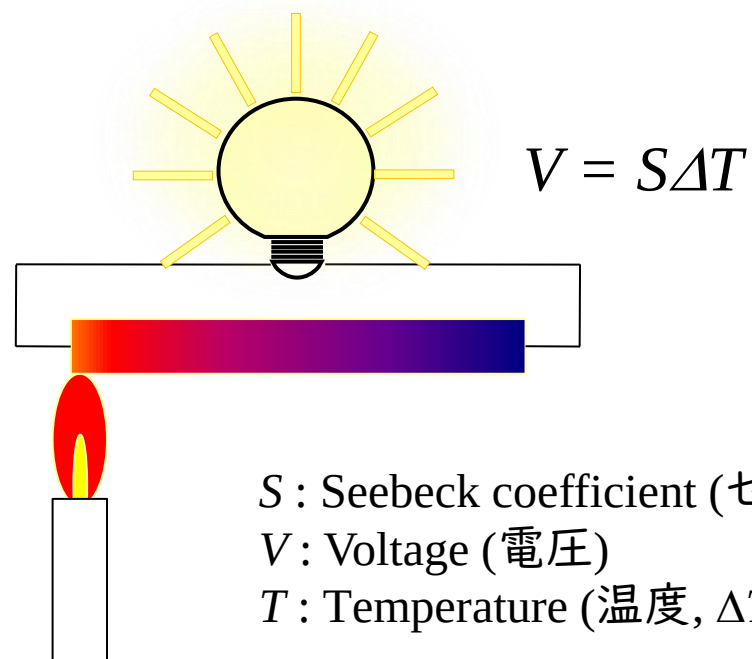
ペルチェ素子 6.3A 40×40mm TET  
C1-12706-T100-SS-TF01-A  
LO: パーツ一般 秋月電子通商・電子部品・ネット通  
販 ([akizukidenshi.com](http://akizukidenshi.com))

ペルチェ冷蔵庫



製品一覧 | ペルチェ方式 電子冷蔵庫 | 三菱電  
機エンジニアリング株式会社 ([mee.co.jp](http://mee.co.jp))

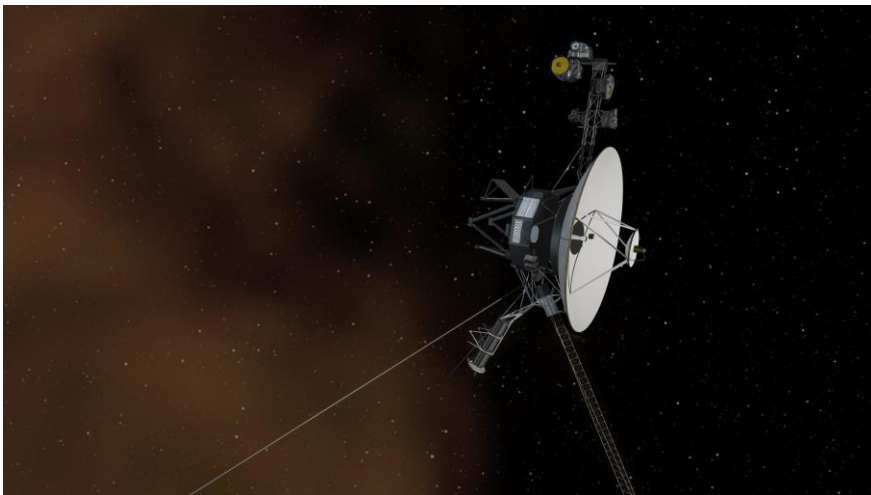
# 大きく分けて三つの使い道(ゼーベック効果)



$S$  : Seebeck coefficient (ゼーベック係数)  
 $V$  : Voltage (電圧)  
 $T$  : Temperature (温度,  $\Delta T$ :温度差)

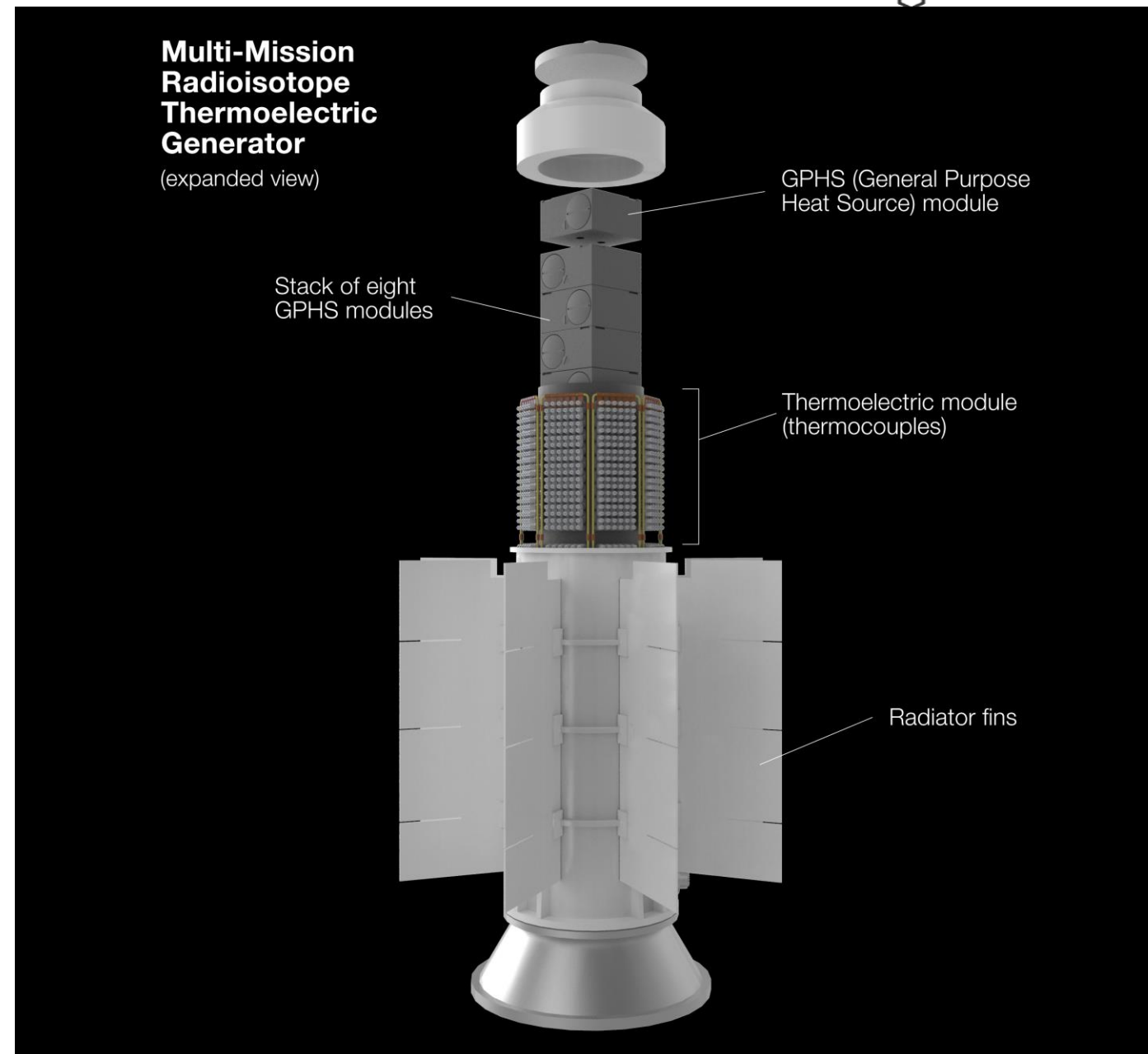
1. 電圧が発生する → 発電
2. 温度差に応じて電圧が発生：センサー
3. 発電原理：物性研究

## NASA ホームページより

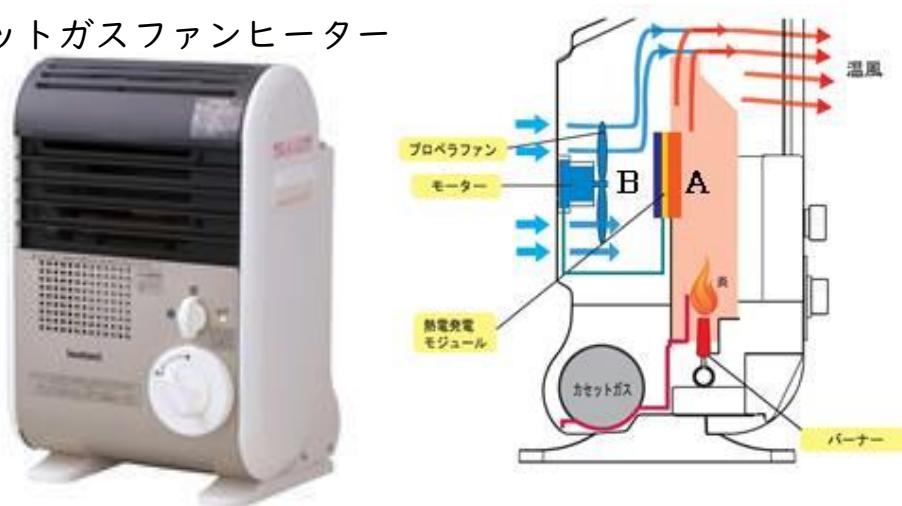


voyager

[Voyager - Galleries - Illustrations \(nasa.gov\)](https://www.nasa.gov/galleries/illustrations)



## カセットガスファンヒーター



カセットガスファンヒーター“風暖”(KAZEDAN) | 岩谷産業 (iwatani.co.jp)

## Lumir C



LUMIR (ルミール) 炎で灯すLEDライト - Just MyShop/

## 温泉で発電システム

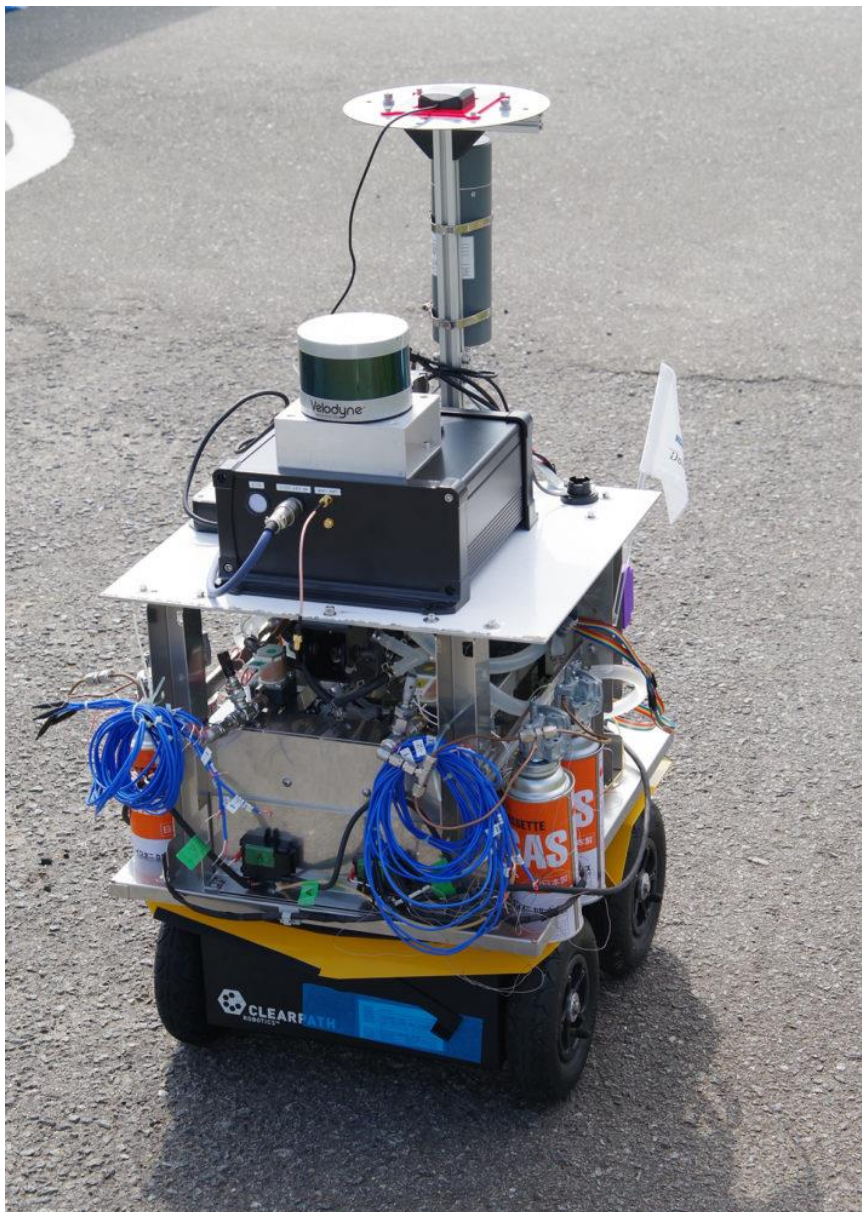


東芝レビュー2008年2月 (global.toshiba)

## Smartwatch Powered by You -MATRIX PowerWatch



充電不要のPowerWatchシリーズの最上位モデルが登場！ 200M防水と着信通知機能が追加された「Matrix PowerWatch X」(マトリックス パワーウォッチ エックス) - +Styleショッピング (plusstyle.jp)



## 自律ロボットの概要

- カセットボンベを燃料とし、触媒燃焼を用いた高効率熱電発電システムによって発電。その電力を用いて自律ロボットを走行。
- 自律ロボットには位置情報センサーやカメラを搭載し、あらかじめプログラムされたルートに沿って無人で走行。線量計により、ロボット周囲の放射線量を計測。
- 静音、一酸化炭素や窒素酸化物の排出ゼロ。
- 本体サイズ、重量（それぞれ熱電発電システム含む）：幅45cm×奥行52cm×高さ52cm、約30kg
- 発電量：70W（可搬型の熱電発電システムとして日本最高レベルの発電量です）
- 実地走行テスト時点での駆動時間（カッコ内は9月のシステム改良時の見込み駆動時間）

[日本初※となる「熱電発電システムを用いた自律ロボット」を開発、実地走行テストを行いました。| ニュース | ダイニチ工業株式会社 - Dainichi \(\[dainichi-net.co.jp\]\(http://dainichi-net.co.jp\)\)](#)

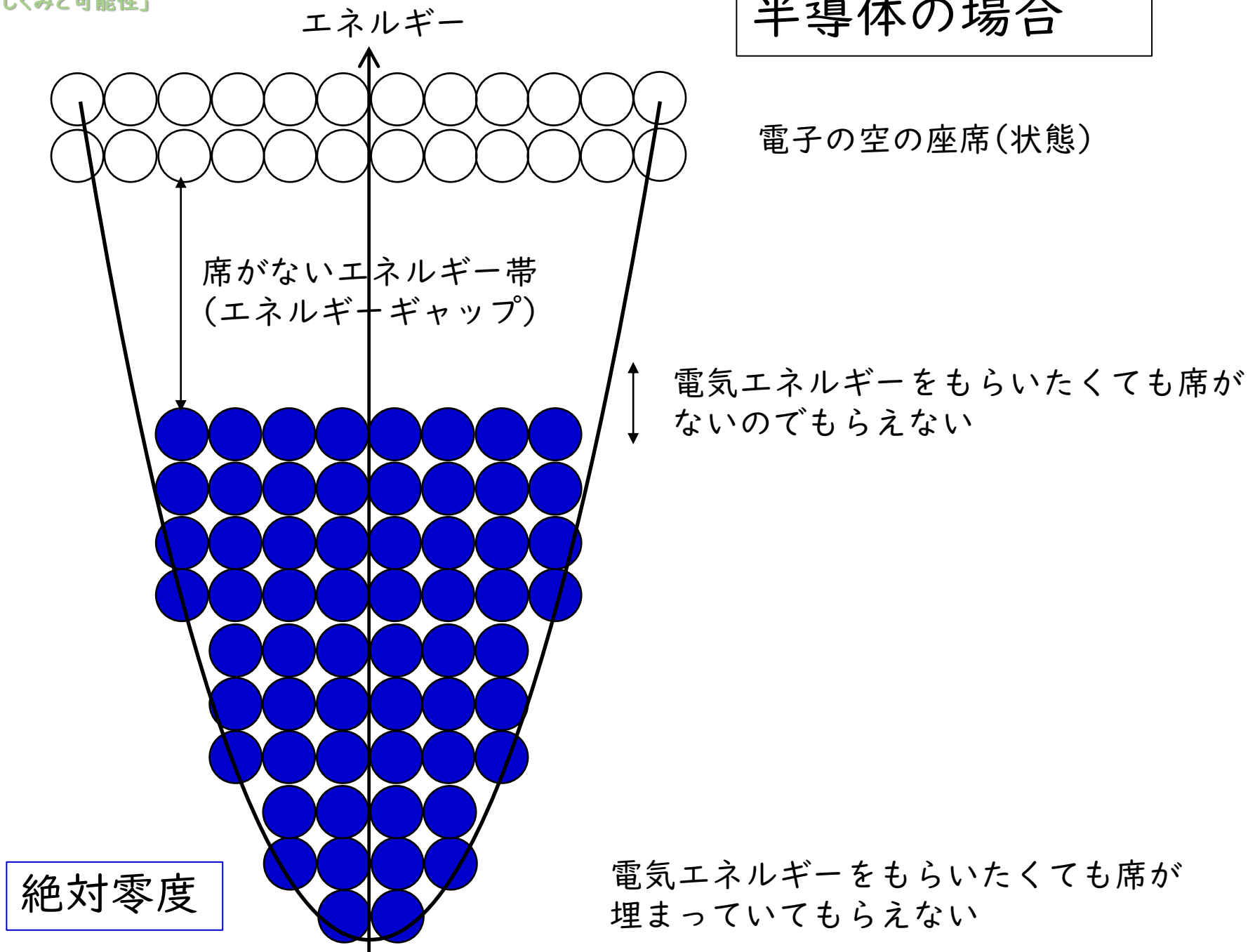
ダイニチ工業株式会社，東京大学，産総研，KELKの共同研究

# 「熱電変換材料のしくみと可能性」

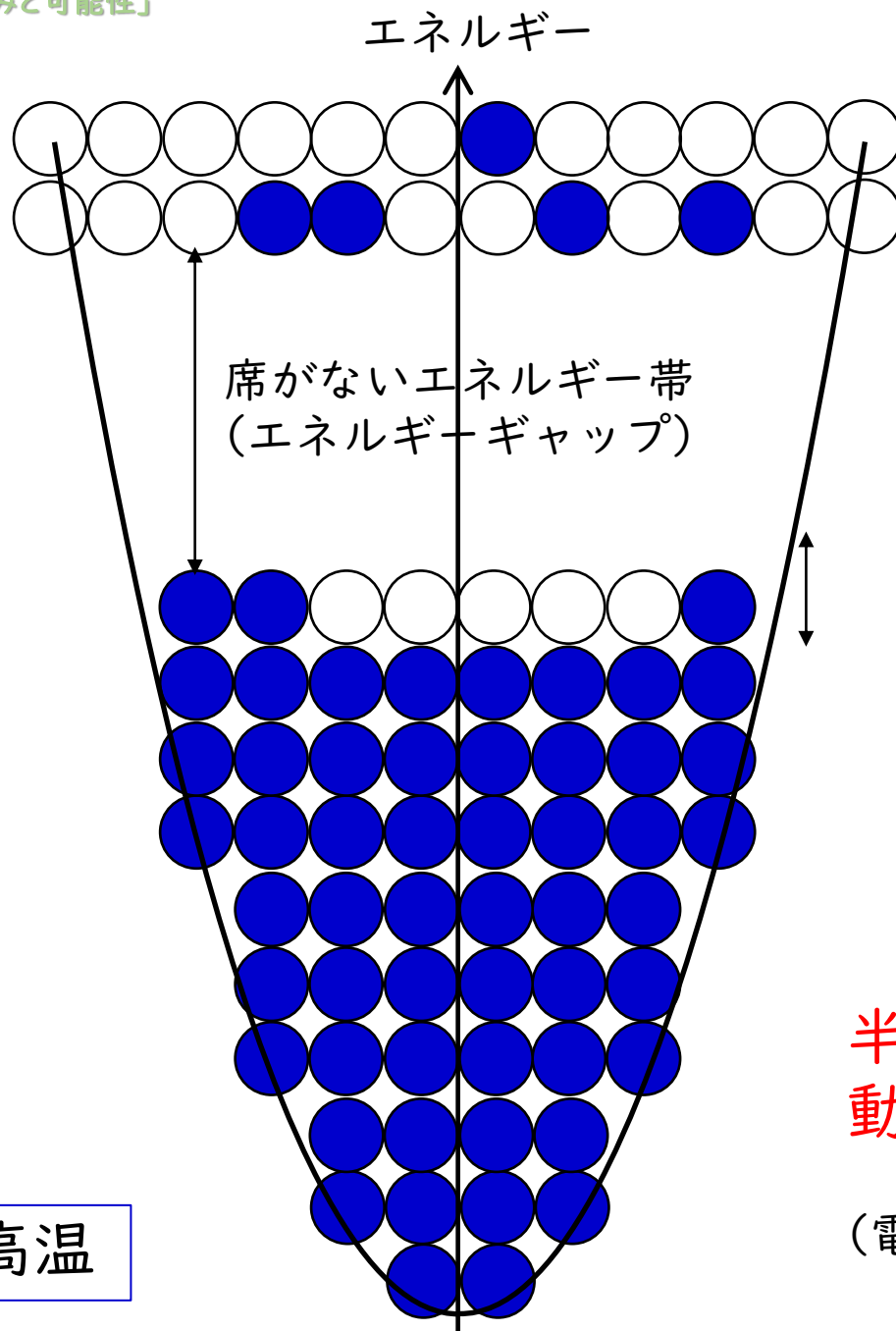
## Contents

1. はじめに
2. 熱電変換材料, ゼーベック効果とは
3. 熱電変換(ゼーベック効果)のしくみ
4. 熱電変換(発電)の可能性
5. まとめ

## 半導体の場合



## 半導体の場合



いくつかの電子は高いエネルギー状態

電気エネルギーをもらって動くことができる。

半導体の場合は温度を上げると、  
動ける電子が増える。

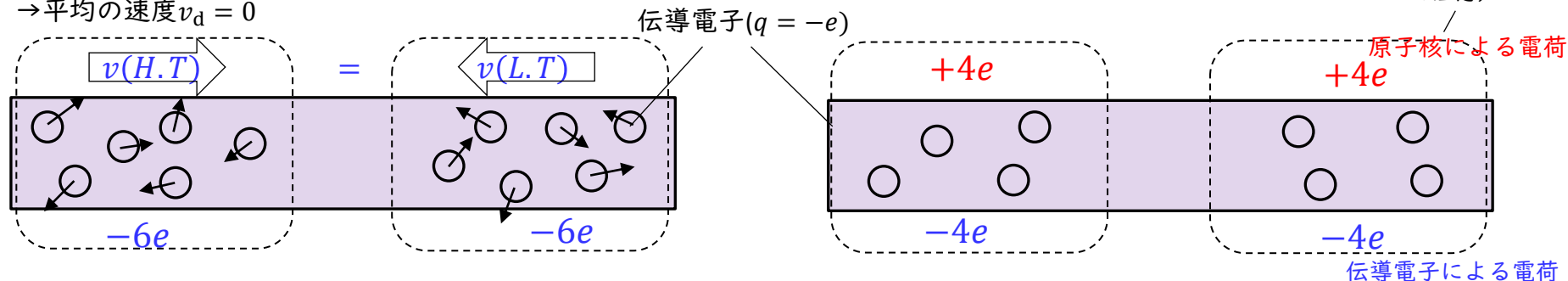
(電気抵抗が小さくなる)

## 温度差がない状態: $\Delta T = 0$

電子は同じ速さでいろんな方向へ運動している  
→ 平均の速度  $v_d = 0$

動ける電子(伝導電子)の数は同じ

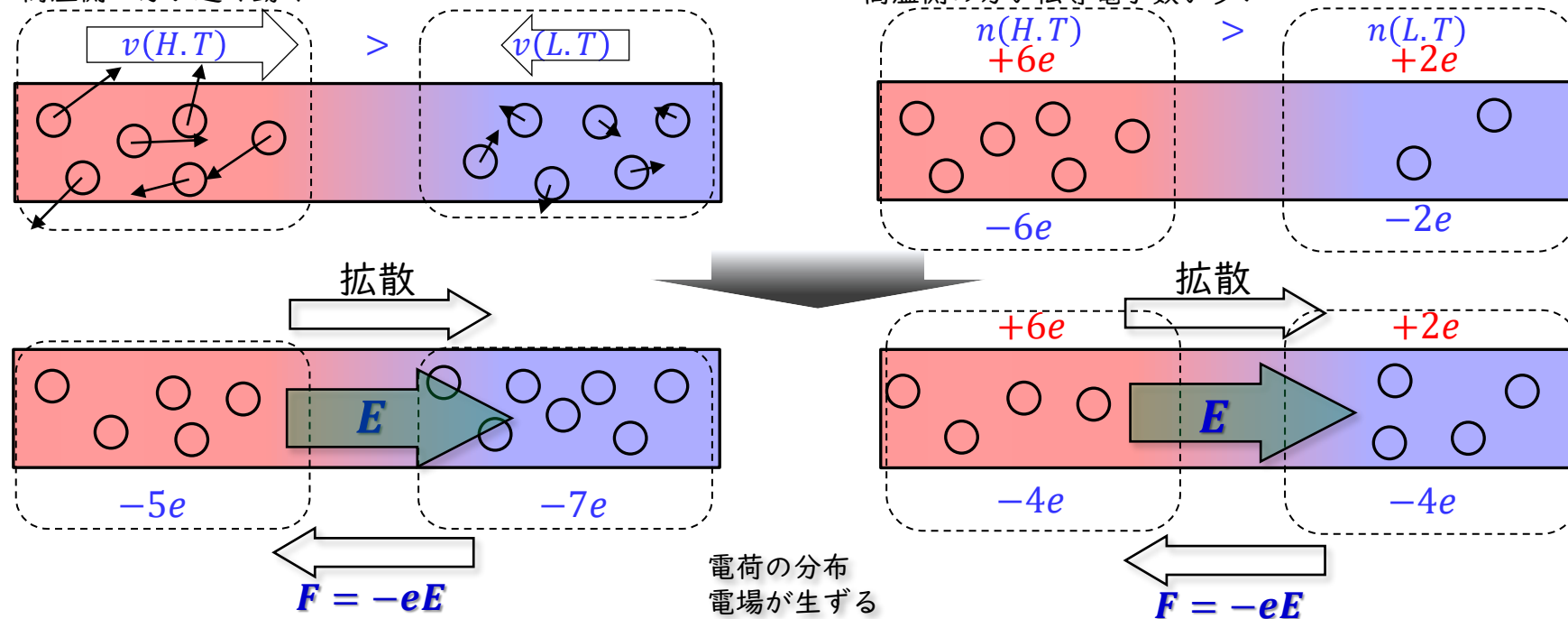
※ 伝導電子に対応する分(総量ではないので注意)



## 温度差がある状態: $\Delta T$

高温側の方が速く動く

高温側の方が伝導電子数が多い

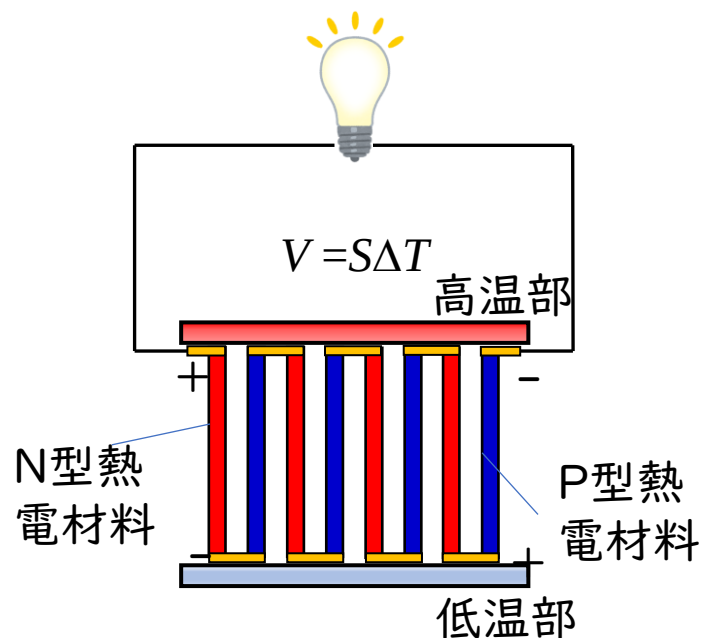


金属的な考え方

電子の拡散と釣り合ったところで定常状態

半導体的な考え方

# 熱電材料の特徴付ける物理量は？



$\Delta T$  : 温度差は付いた方が良い  
低い熱伝導率  $K$

$V$  : 出力は大きい方が良い  
高いゼーベック係数  $S$

$R$  : 電気として仕事をする : 回路を形成  
低い電気抵抗率  $\rho = R \times S/L$

無次元性能指数  $ZT \geq 1$  が実用の目安

$$ZT = \frac{S^2}{\rho K} \times T$$

開発にはゼーベック係数, 電気抵抗率, 熱伝導率の測定が必要

# 金属の熱と電気伝導～ヴィーデマンフランツ則

## 熱の伝導



$$J_Q = -K_e \frac{dT}{dx}$$

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

$J_Q$ : 単位面積を通過する熱量

## 電気の伝導



$$J_e = -\sigma \frac{dV}{dx}$$

$$\Delta V = V_1 - V_2$$

$J_e$ : 単位面積を通過する電荷

## ヴィーデマンフランツ則

$$\frac{K_e}{\sigma} = \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{k_B^2}{e} \right)^2 T = LT$$

$L$ : ローレンツ数 $=2.44 \times 10^{-8} \text{ (W}\Omega\text{K}^{-2}\text{)}$

$K_e$ : 電子の熱伝導率

$\sigma$ : 電気伝導率

$L$ : Ag 2.31, Au: 2.35, Cu 2.33 など

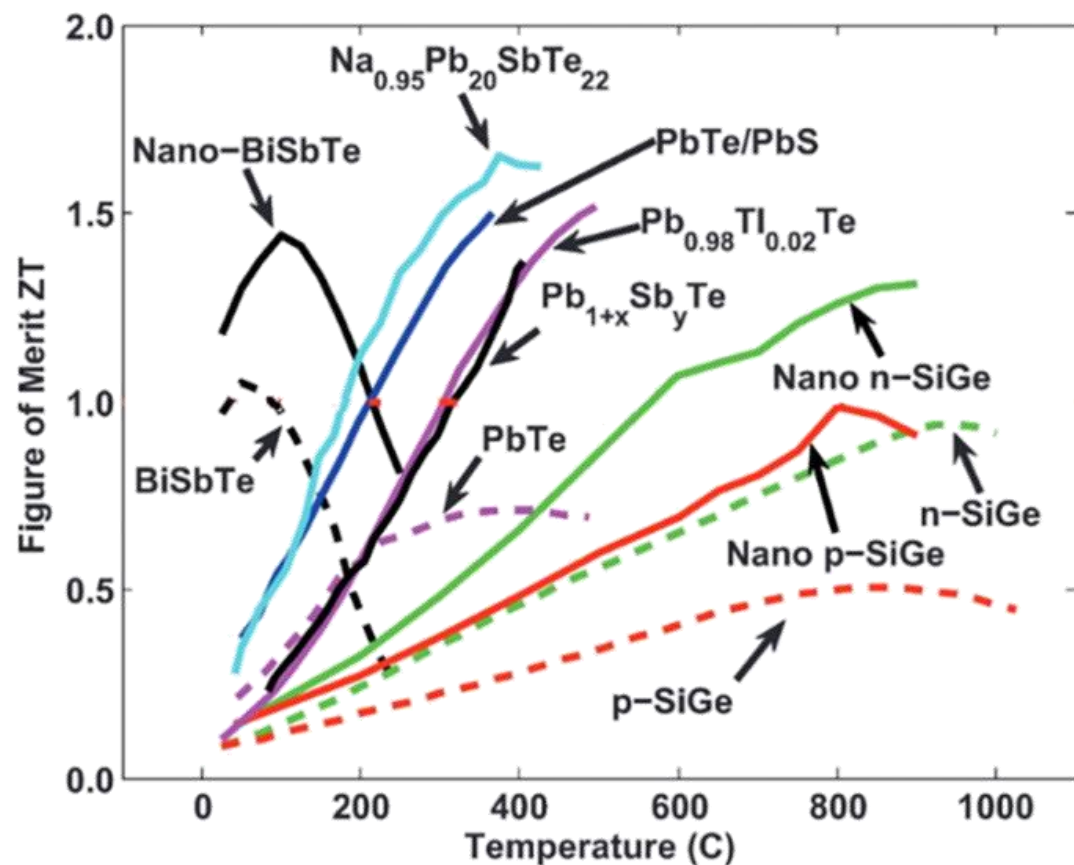
(実験値とよく一致)

電子が熱と電気を運んでいる！

電気がよく流れると熱もよく流れる

金属は熱伝導が良い

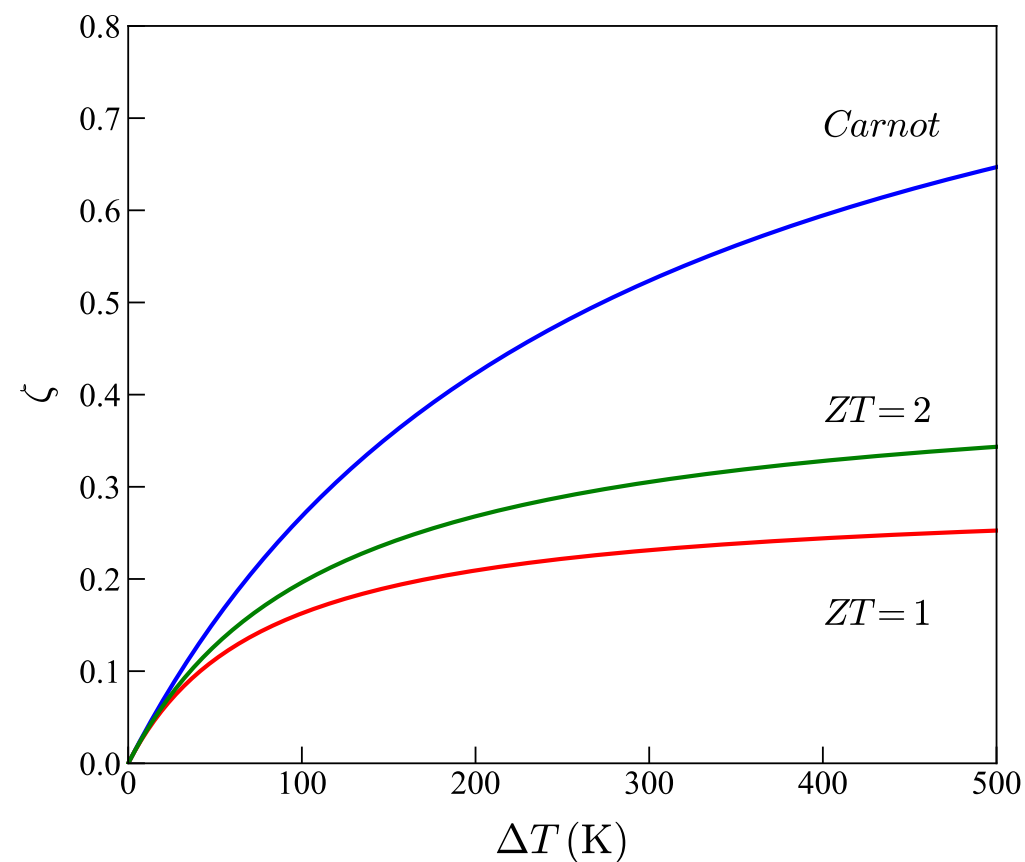
## Figure of merit (無次元性能指数) ZT



**Fig. 3.** Thermoelectric figure of merit  $zT$  as a function of temperature for thermoelectric materials. The solid lines refer to bulk materials. The dotted lines refer to nanostructured materials [24].

D. Zabek and F. Morini, *Therma Science and Engineering Progress*, 9, 245, 2019  
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.11.011>

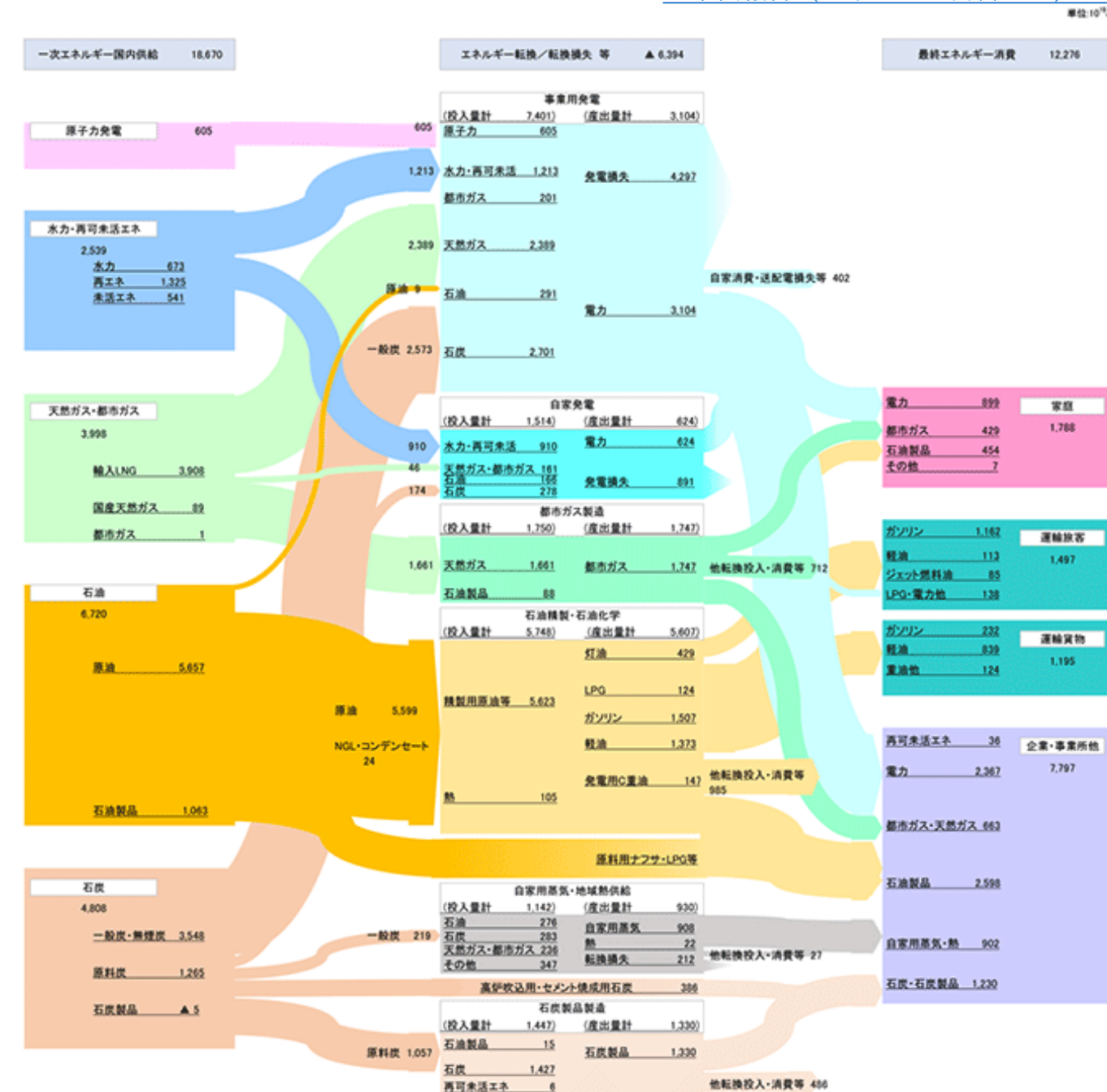
$$\zeta = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right) \left(\frac{\sqrt{1 + ZT} + 1}{\sqrt{1 + ZT} - \frac{T_L}{T_H}}\right)$$



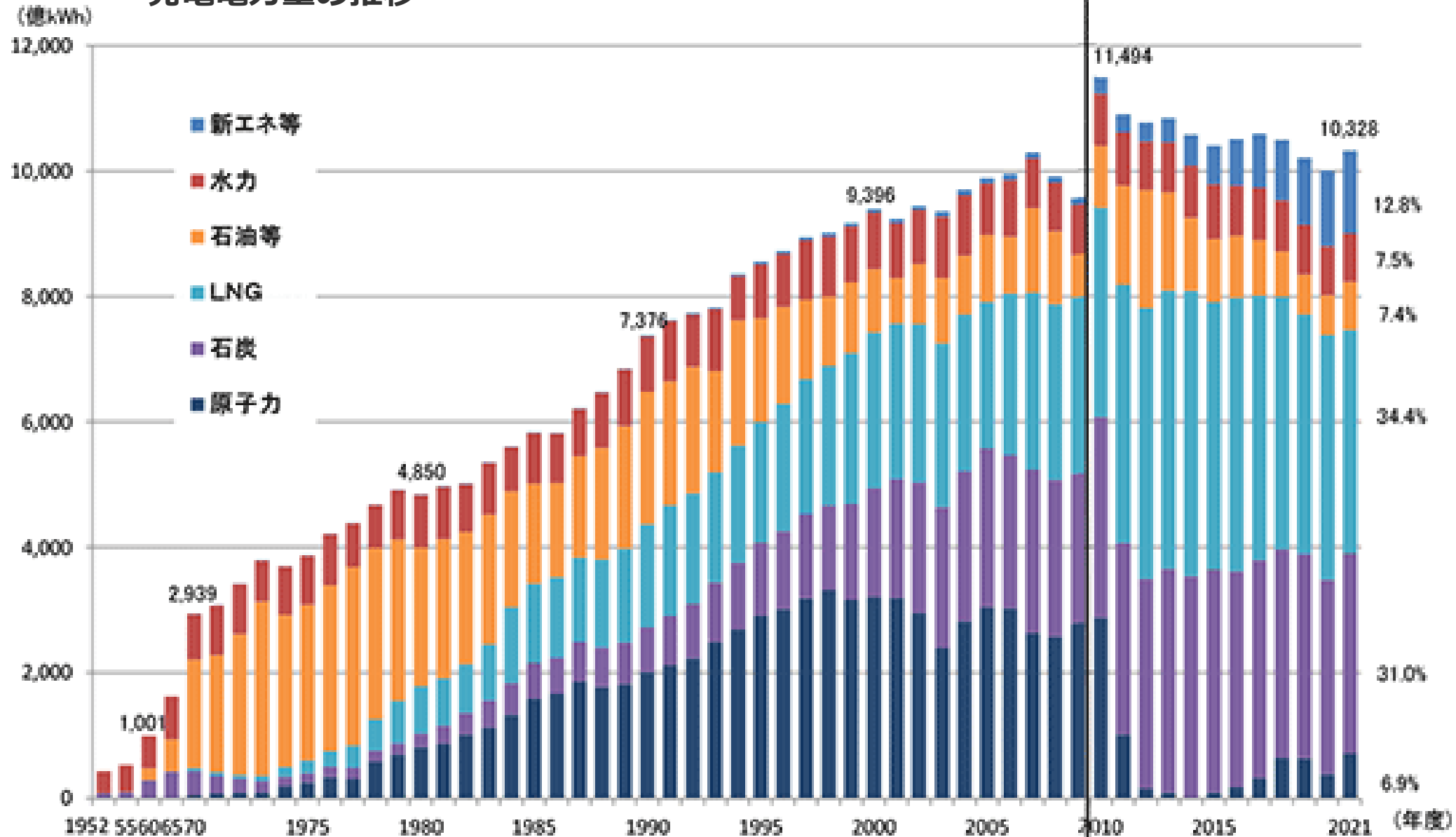
# 「熱電変換材料のしくみと可能性」

## Contents

1. はじめに
2. 熱電変換材料, ゼーベック効果とは
3. 熱電変換(ゼーベック効果)のしくみ
4. 熱電変換(発電)の可能性
5. まとめ

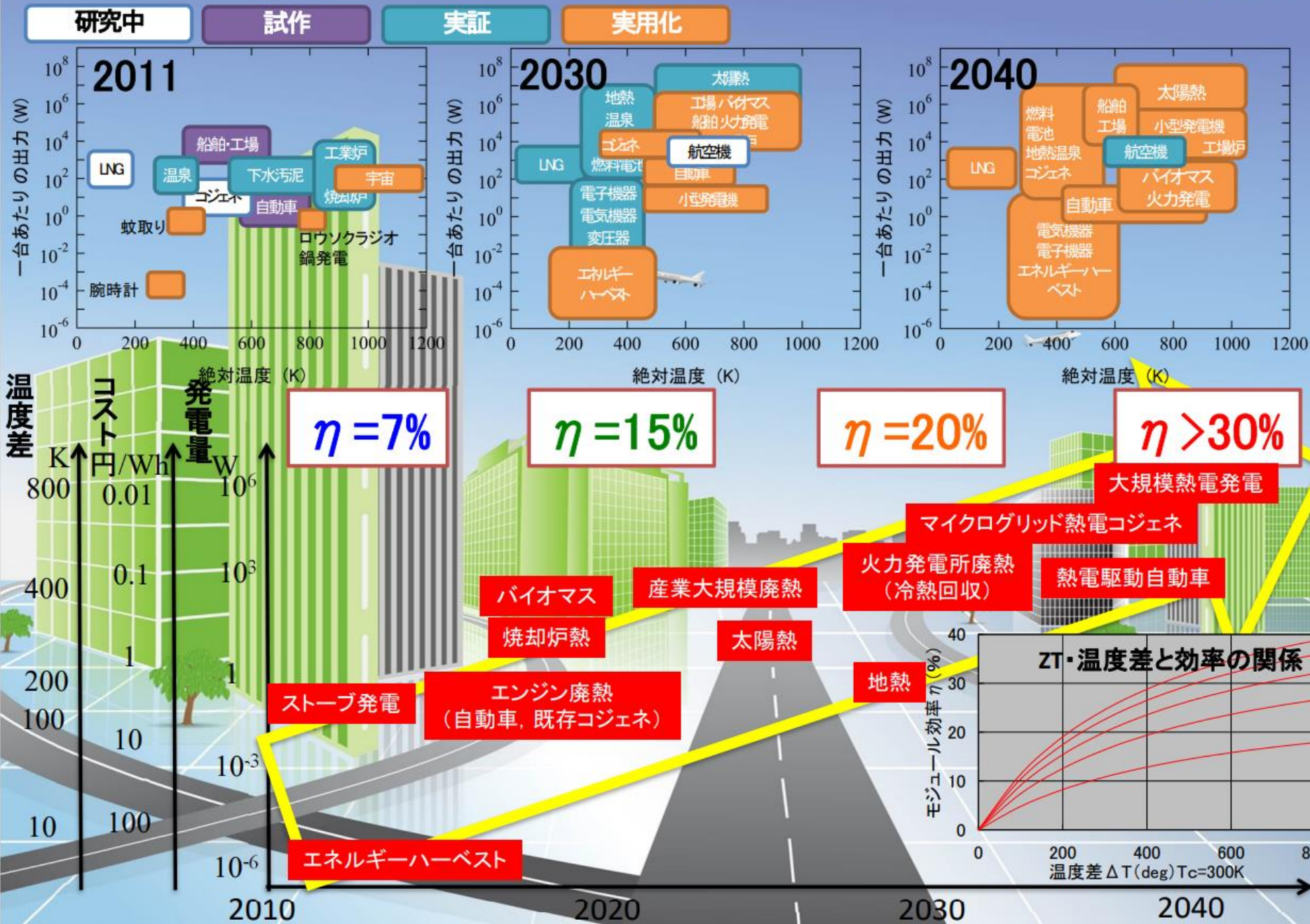


## 発電電力量の推移

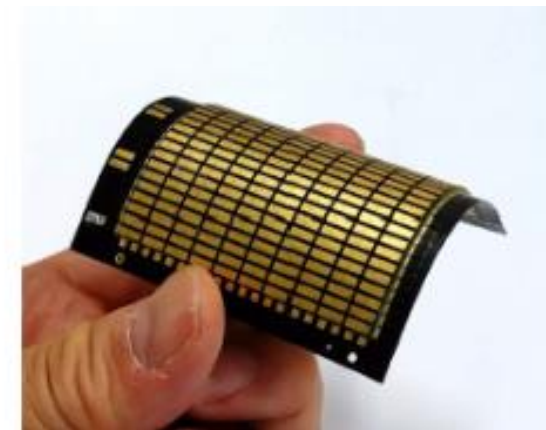
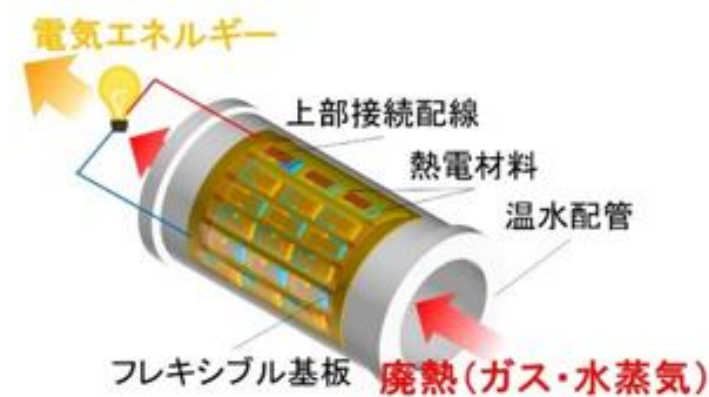
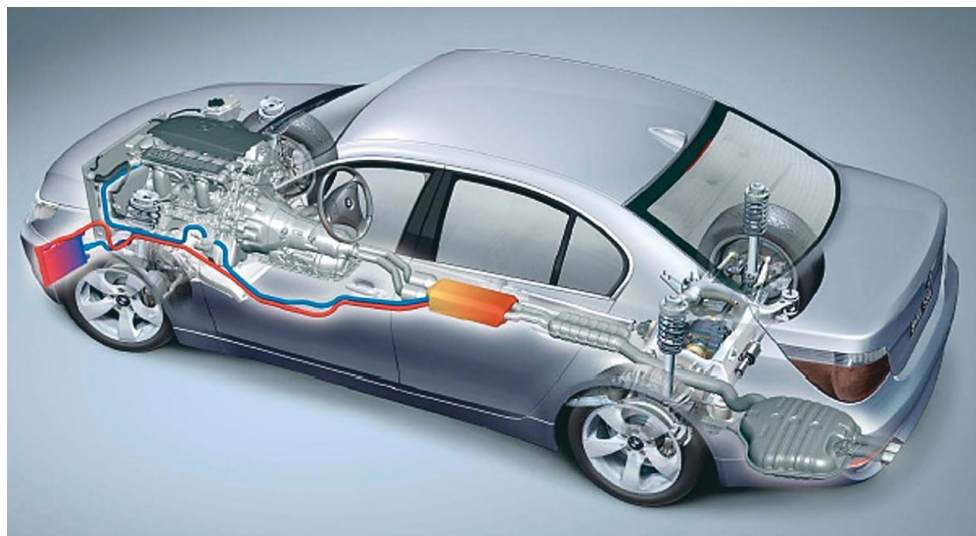


# 熱電アカデミックロードマップ 熱電発電実用化

© 一般社団法人  
日本熱電学会



ロードマップ | 一般社団法人  
日本熱電学会 TSJ  
([thermoelectrics.jp](http://thermoelectrics.jp))



[産総研：高出力フレキシブル熱電モジュールの開発 \(aist.go.jp\)](https://aist.go.jp)

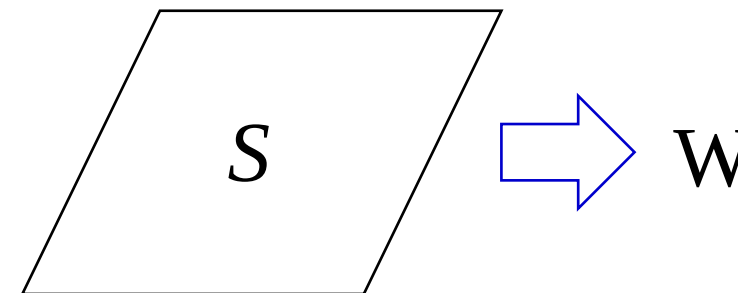


[内燃機関超基礎講座 | 熱を電気エネルギーに変換する：  
熱電変換の技術 | Motor-FanTECH\[モーターファンテック\]](#)

[ヤンマーが熱電発電ユニット、排熱利用で発電コスト19円/kWh |  
日経クロステック \(xTECH\) \(nikkei.com\)](#)

# エネルギー密度という考え方

エネルギー密度：面積あたりの発電量



## 太陽光発電

太陽光のエネルギー：1kW/m<sup>2</sup>

変換効率20%で計算すると 200 W/m<sup>2</sup>

### ■ 堺太陽光発電所

太陽光発電用パネルは、青枠のエリアに設置

|         |                    |
|---------|--------------------|
| 面積      | 約21万m <sup>2</sup> |
| 設備容量    | 1万kW               |
| 発電電力量※4 | 約1,100万kWh/年       |



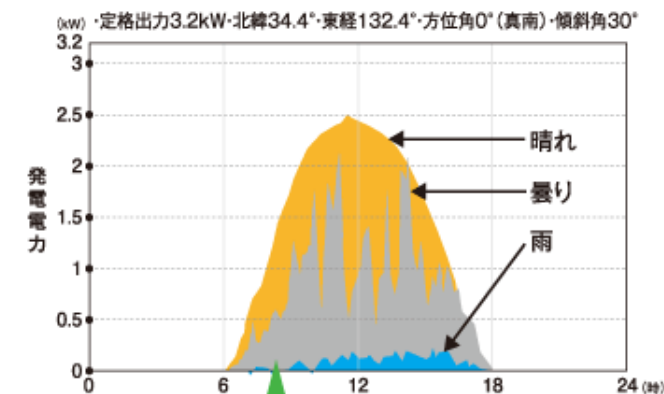
### ■ 堺港発電所

発電用設備は、堺太陽光発電所の約2分の1のエリアに設置

|         |                       |
|---------|-----------------------|
| 面積      | 約10万m <sup>2</sup> ※3 |
| 設備容量    | 200万kW (40万kW×5台)     |
| 発電電力量※4 | 約140億kWh/年            |



### 太陽光発電の出力変動例(春季)



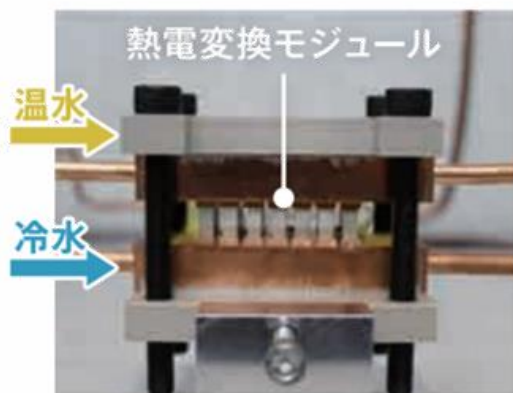
太陽光発電は時間帯と天気で  
発電量が変わる

電気事業連合会  
「原子力・エネルギー」図面集 2013 をもとに作成

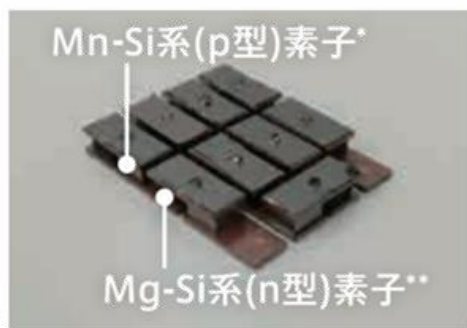
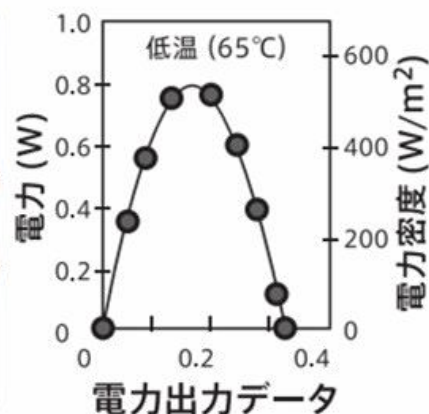
# 熱電変換材料

エネルギー源：様々

材料によって得る温度が異なる



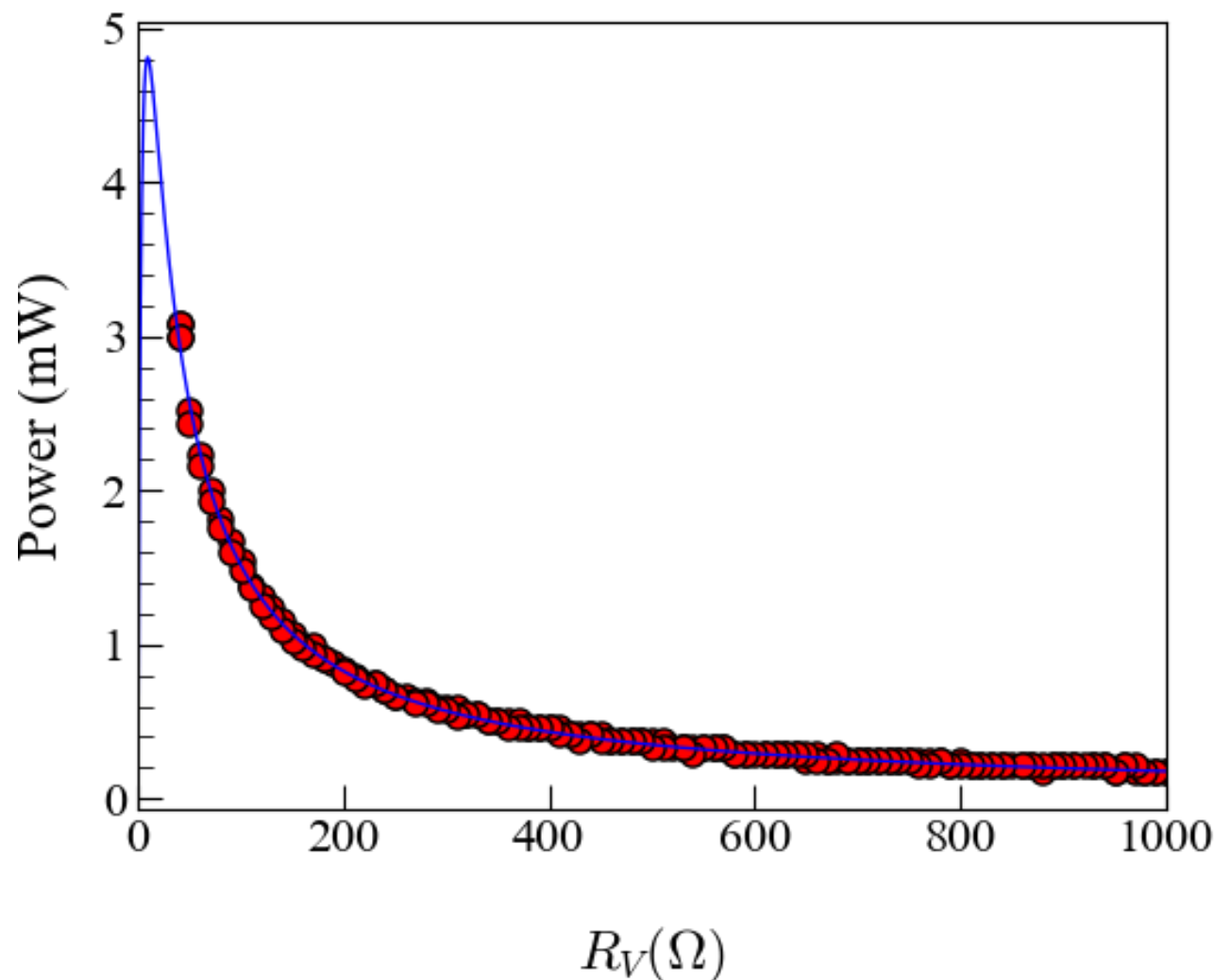
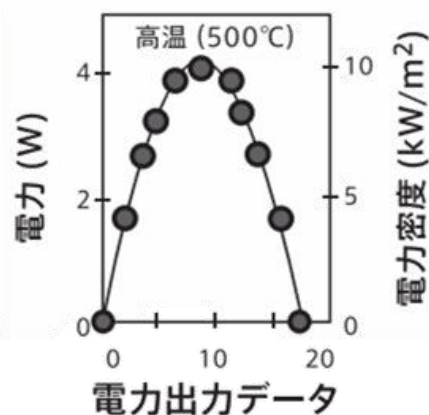
熱電変換ユニット



熱電変換モジュール

\* 東北大学との共同開発品、

\*\* (株) 安永開発品



$$\Delta T = 20 \text{ K}$$
$$3 \sim 38 \text{ W/m}^2$$

# まとめとして

## 熱電応用ロードマップ

熱電発電の利用拡大への課題と熱電発電が生み出す未来

### 克服すべき課題

| コストの低減                            | 性能の向上                                        | 用途の拡大                           | 要素技術の確立                      |
|-----------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 安価で安全な材料<br>簡便な製造プロセス<br>長寿命化     | 材料性能<br>素子性能<br>システム性能                       | 大規模発電<br>局所発電・微小発電<br>移動体・農業・海上 | 放熱・蓄熱<br>伝熱・断熱<br>接合・カスケード化  |
| 熱源の多様化                            | 社会的意義の創出                                     | 産業発展への貢献                        | 利用環境の整備                      |
| 環境熱・太陽熱<br>生体熱・地熱<br>廃熱 家庭・工場・発電所 | カーボンニュートラル<br>ゼロエミッション<br>省エネルギー<br>IoTセンサー網 | 先端技術・特許<br>海外市場の開拓<br>多様な業種の参入  | 信頼性・安全性<br>インフラの整備<br>認知度の増大 |

### 産業創出・日本発の世界標準化



### 多彩な人材を輩出（研究者、技術者、教育者）



### SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALSへの貢献



2021年度版  
一般社団法人 日本熱電学会

### 未利用熱利用, コージェネレーション利用



### 微小発電 (エネルギーハーベスティング, IoT電源) から大規模発電へ



### 発電コストの低減（目標値）と用途の拡大

