

熱電モジュール評価技術

－測定原理から応用まで－

天谷 康孝（あまがい やすたか）

物理計測標準研究部門

応用電気標準研究グループ付

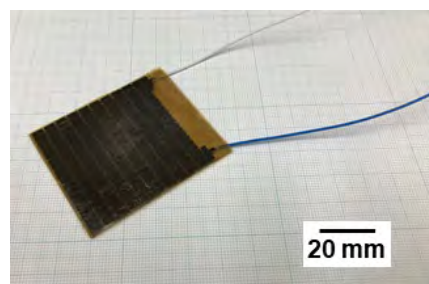
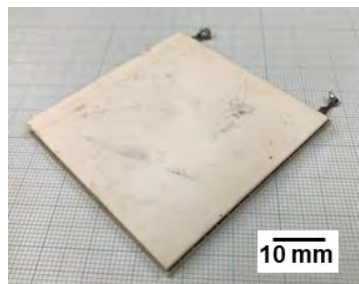
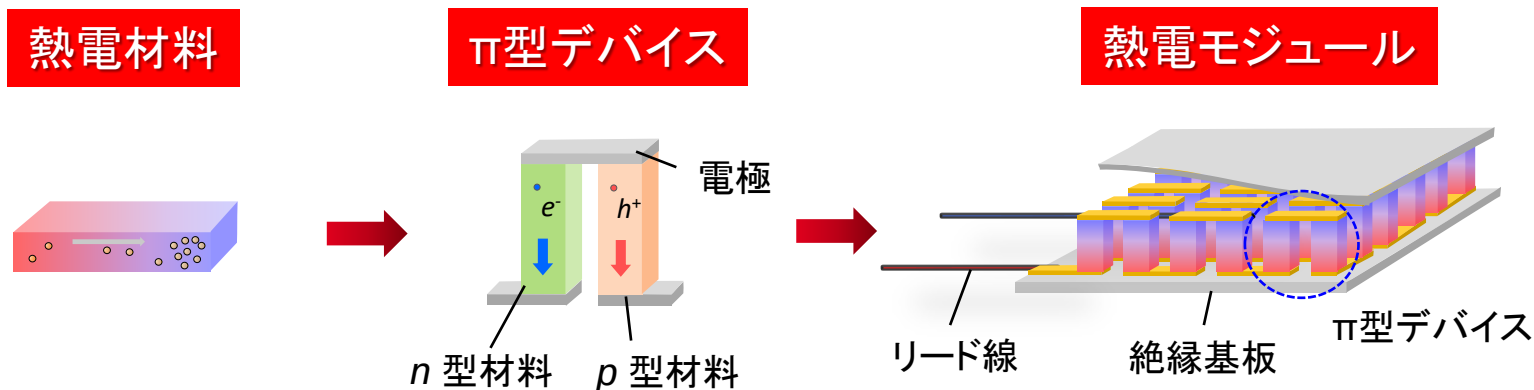
2025年4月22日（火）14:00

日本熱電学会講習会

NATIONAL INSTITUTE OF
ADVANCED
INDUSTRIAL
SCIENCE &
TECHNOLOGY

1. 熱電モジュールの基礎
2. 電気特性と熱特性の評価方法
3. 評価装置の構成
4. 国際標準・計量標準の取組み
5. 熱電モジュールの応用例
6. まとめ
7. 参考資料

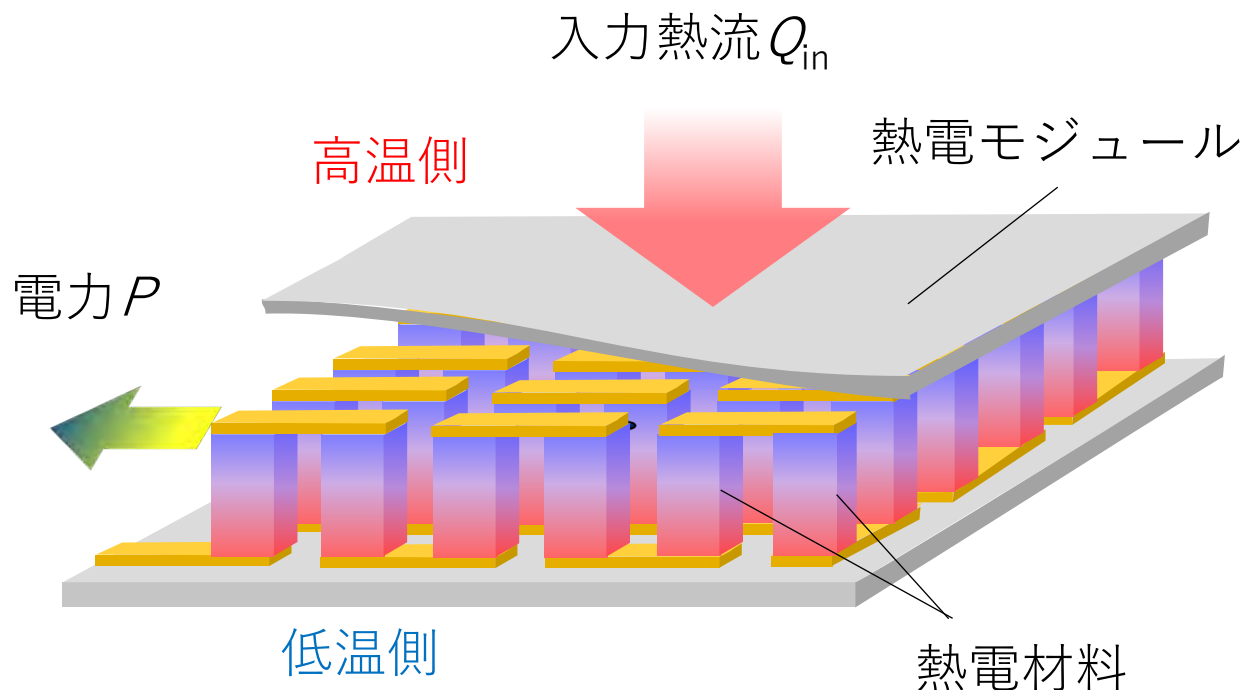
- ・ 温度差から電気を生み出す「発電型電子部品」
- ・ 熱電発電システムを構成する最も基本的な部品・単位
- ・ ゼーベック効果：温度差を電圧へ変換する作用を利用



市販されている熱電モジュール(発電・冷却)

【測定項目】

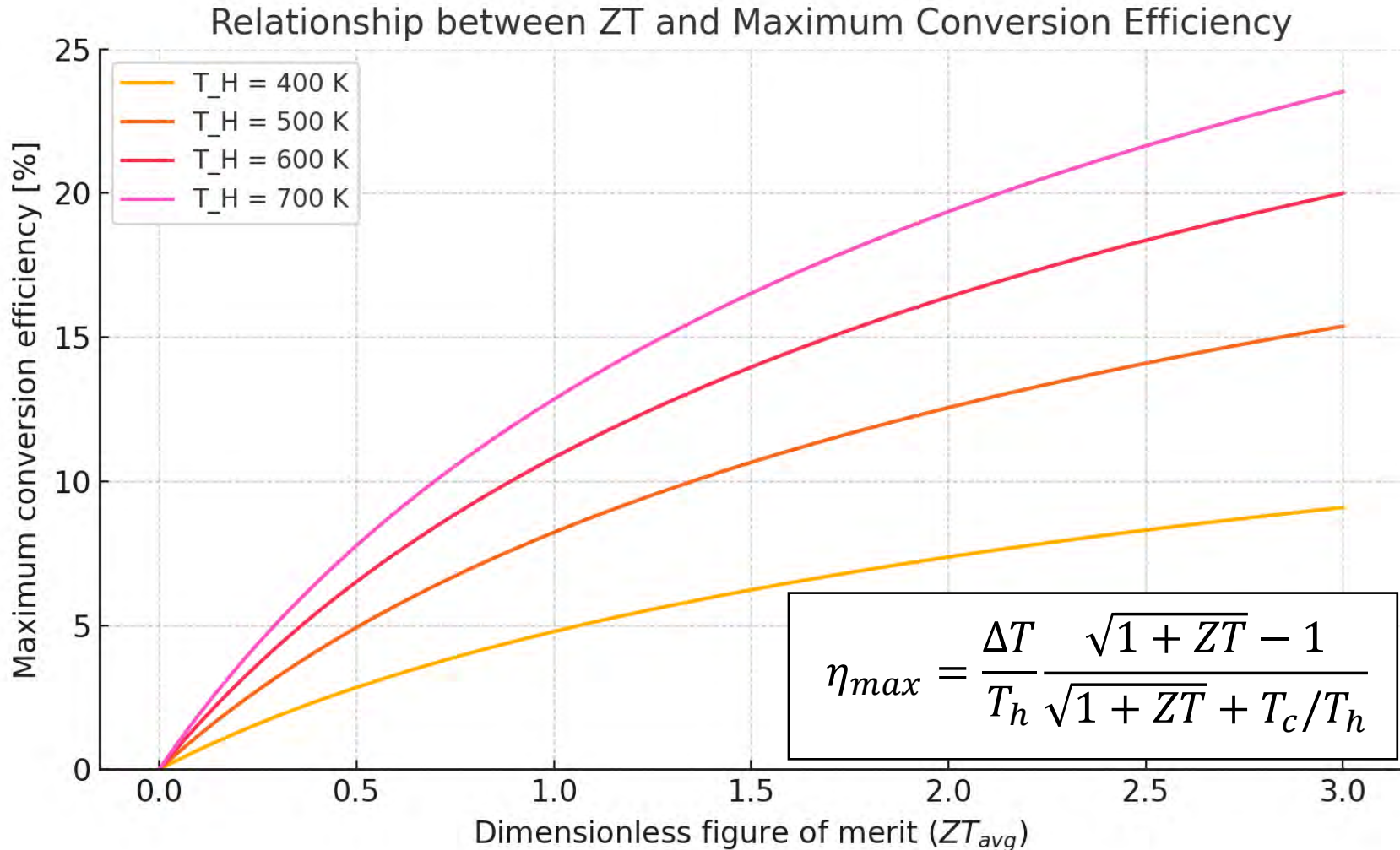
- ・ 負荷曲線（最大出力）、熱流、変換効率、デバイスの信頼性（内部抵抗変化） 機械的特性、極限環境耐久性、加速寿命試験など



変換効率の定義

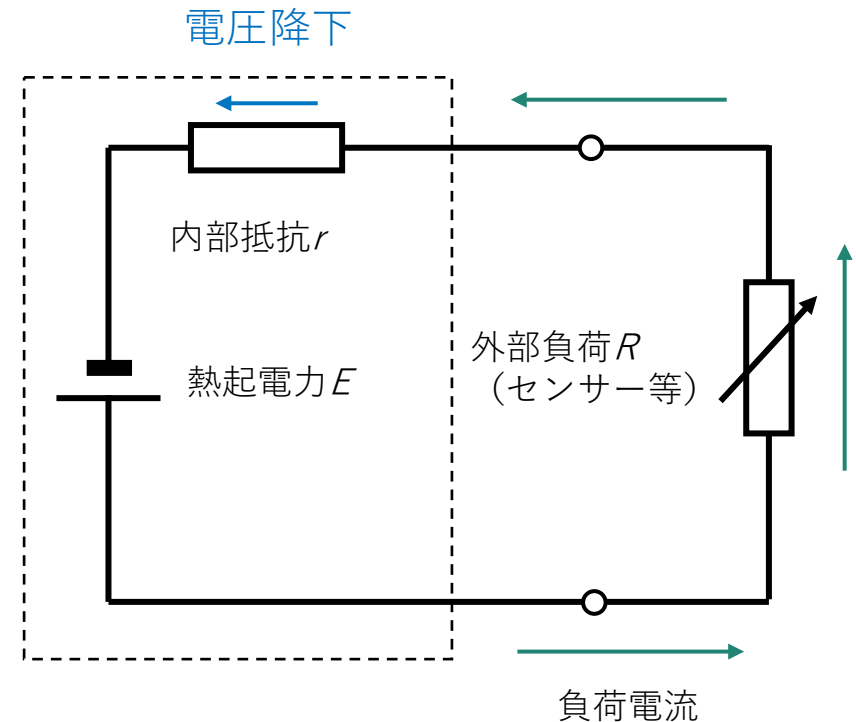
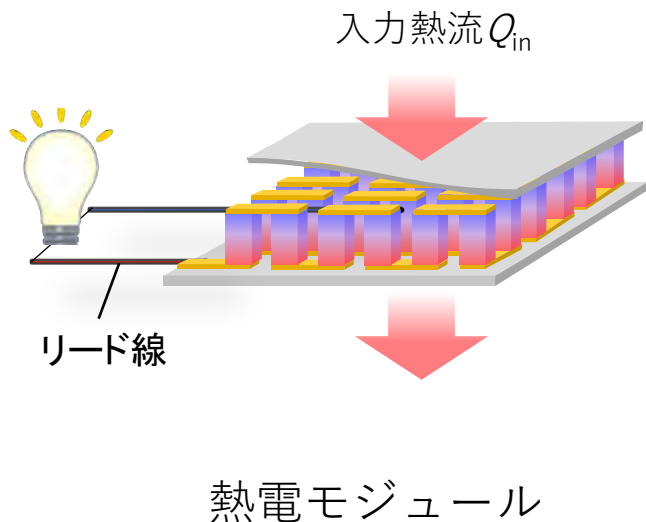
$$\eta \equiv \frac{P}{Q_{in}}$$

- 熱力学を基礎とした材料性能とモジュールの変換効率の関係を説明する理論が確立されています。



等価回路と外部の負荷に対する応答①

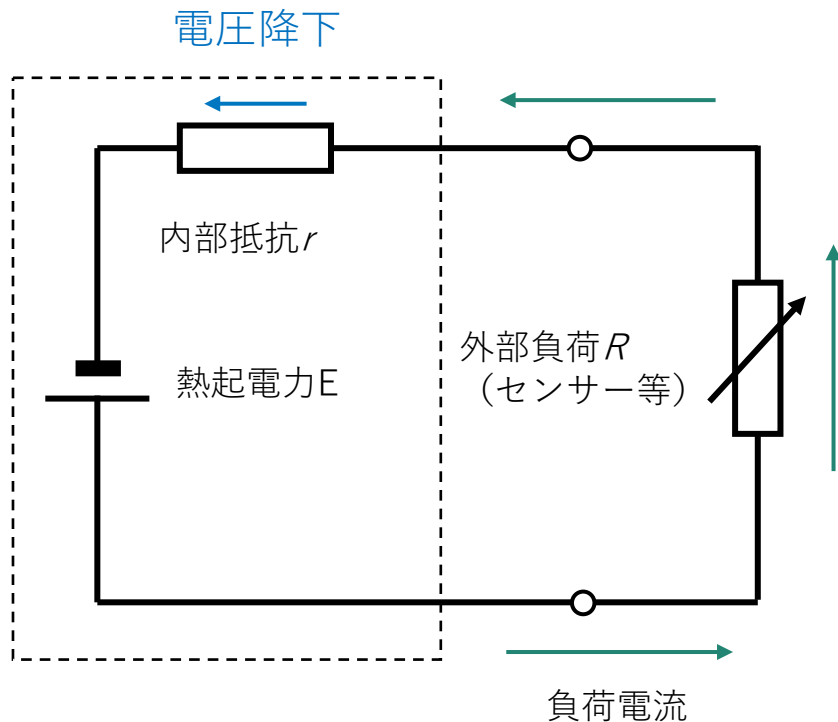
- 直流電圧源と直列に接続した抵抗でモデル化できます。
- 不適切な負荷条件では、変換効率が著しく低下し、モジュール本来の性能を発揮できません。
- 外部負荷抵抗が変化すると電力はどう変わるのでしょうか？



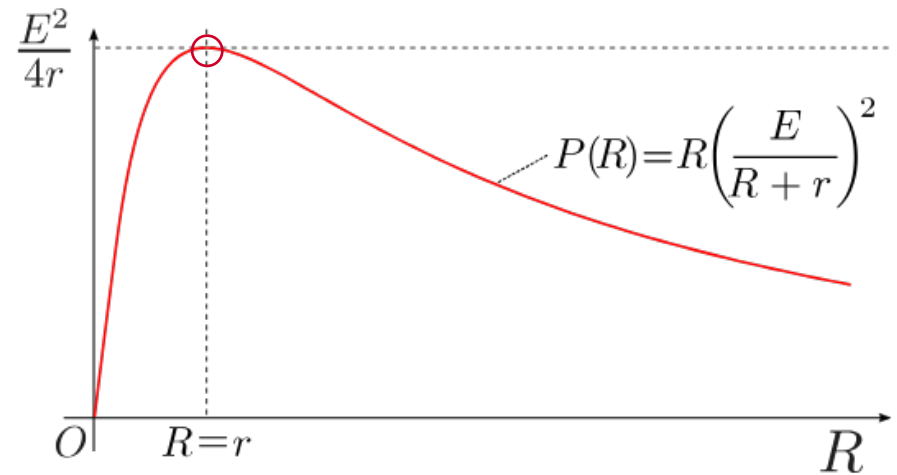
最も単純に近似した等価回路

等価回路と外部の負荷に対する応答②

- グラフ：負荷抵抗 vs 出力電力
ポイント：負荷が軽すぎる／重すぎると電力が低下します。
出力が最大となる負荷抵抗値が存在します ($R = r$)
- モジュールの性能評価においては、適切な負荷条件下での特性測定が必要です。

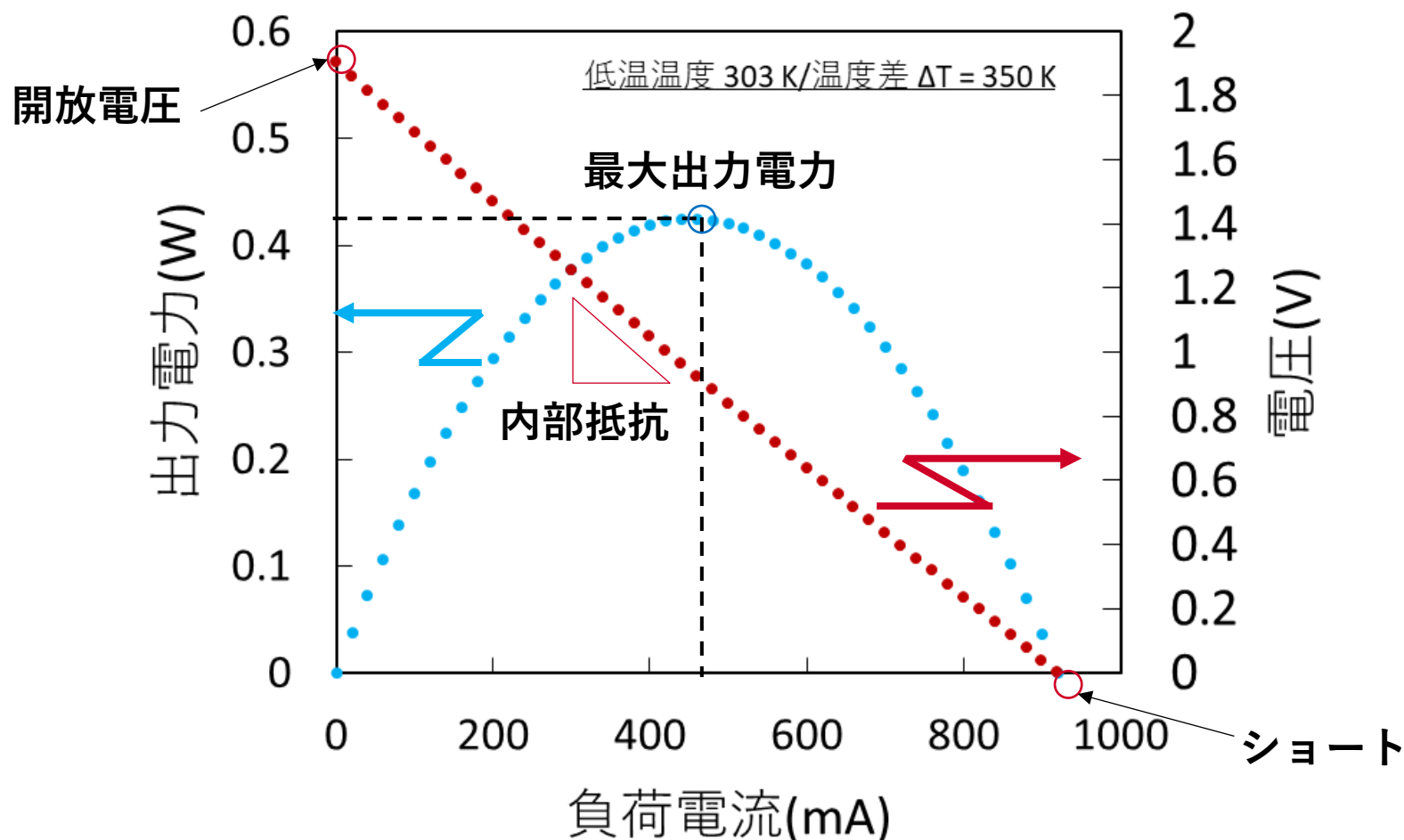


熱電モジュールの等価回路



外部負荷と電力の関係

抵抗負荷（電子負荷・可変抵抗器）を変えつつ電圧・電流を測定し、出力電力 $P = V \times I$ 、ピーク値から最大出力を取得します。I-Vカーブを取得して内部抵抗を評価【注意点】熱平衡の確保と安定したデータ取得



・熱と電気の性質の共通点は何でしょうか？違いはどこにあるのでしょうか？



電気回路



熱回路



電位差 ΔV [V]

温度差 ΔT [K]

電流 I [A]

熱流 Q [W]

電気抵抗 R [Ω]

熱抵抗 R_{th} [K/W]

$$R = V / I$$

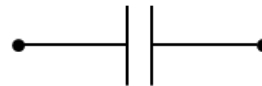


$$R_{th} = \Delta T / Q$$

キャパシタンス C [F]

熱容量 C_{th} [J/K]

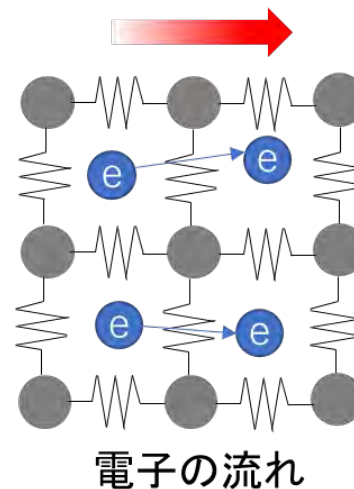
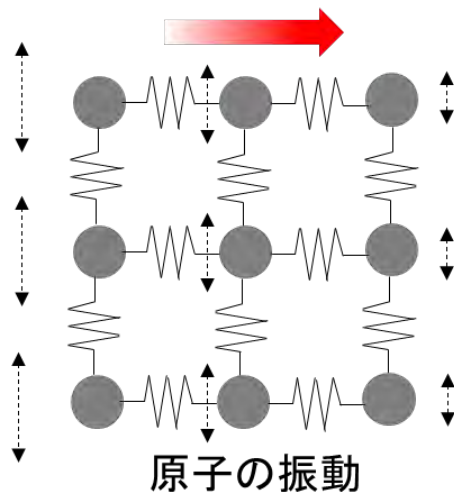
$$I = C \frac{dV}{dt}$$



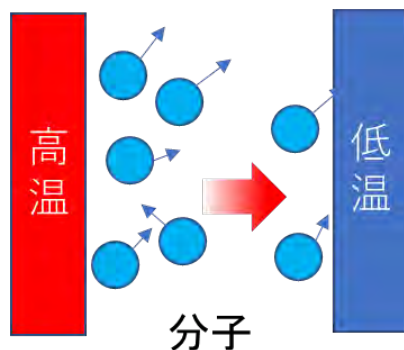
$$Q = C_{th} \frac{dT}{dt}$$

- 熱流の測定は電流の測定と比べ、どうして難しいのでしょうか？
- 放射・伝導・対流…いろんな形で勝手に広がります。

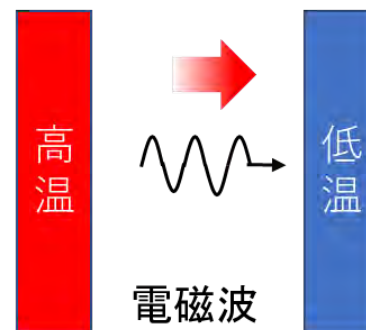
熱伝導(固体)



対流(気体・液体)



熱輻射(空間)

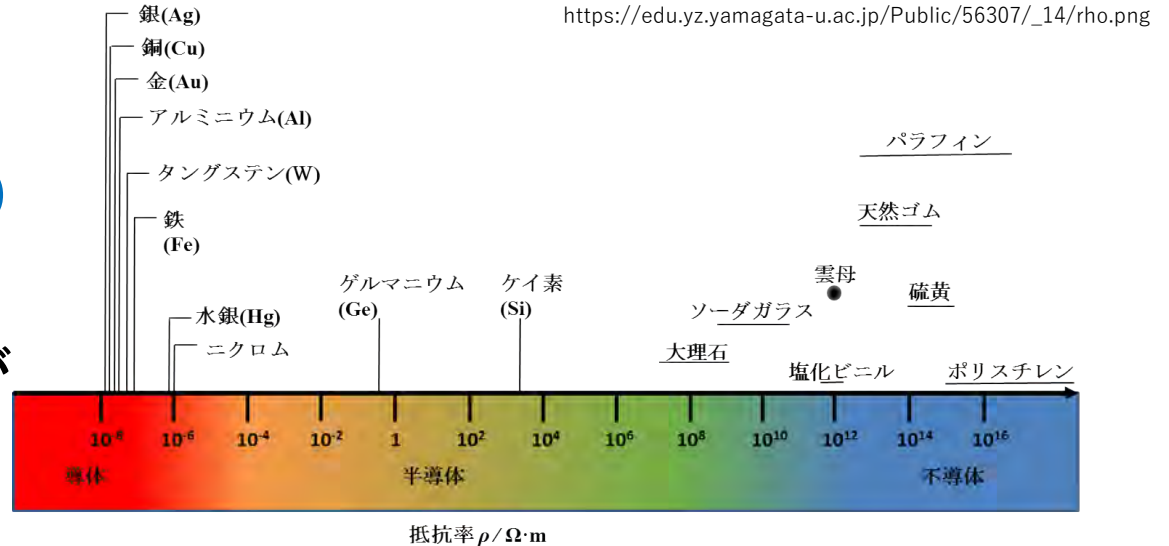


電気抵抗率

24桁程度

(測定精度8桁程度)

電気は回路に閉込めて、好きな方向に流すことができます。

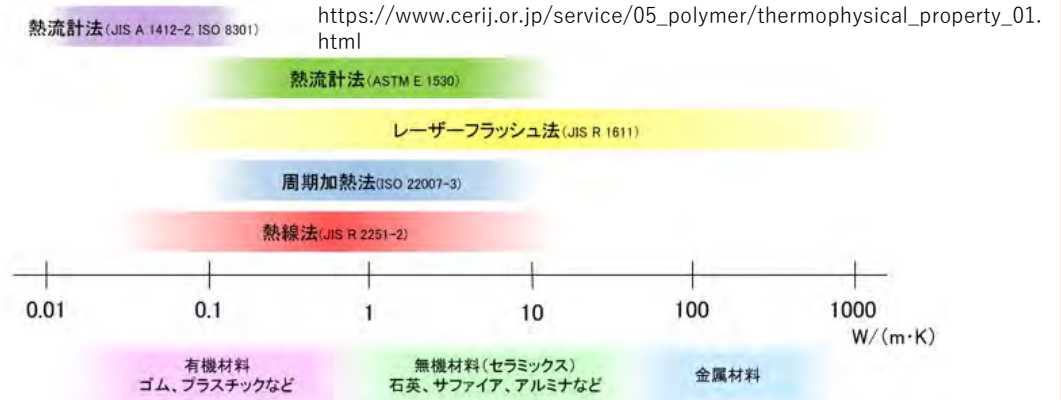


熱伝導率

5桁程度

(測定精度 3 桁程度)

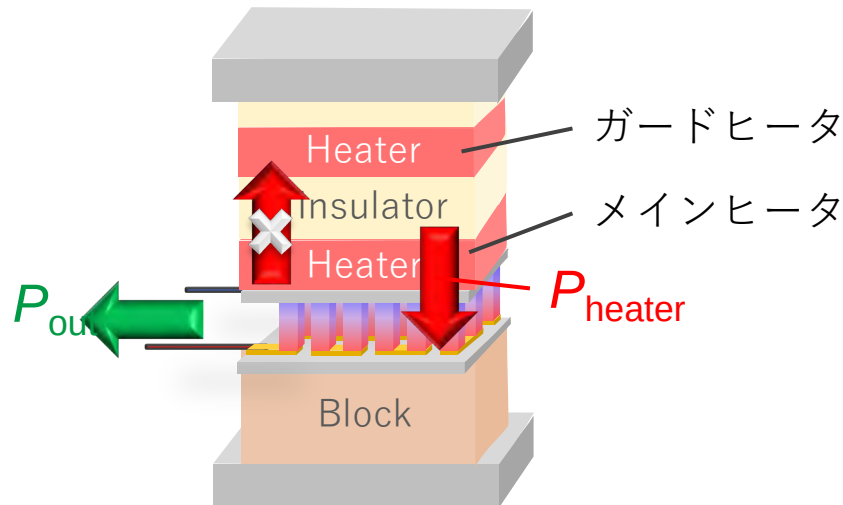
熱流を回路に簡単に閉込めることはできません。



H. Wang, *et al.*, *J. Electron Mater.* **43**, 2274 (2014).

ガードヒータ法

ガードヒータを用いて電力測定により投入熱量を測定する。定義に忠実。

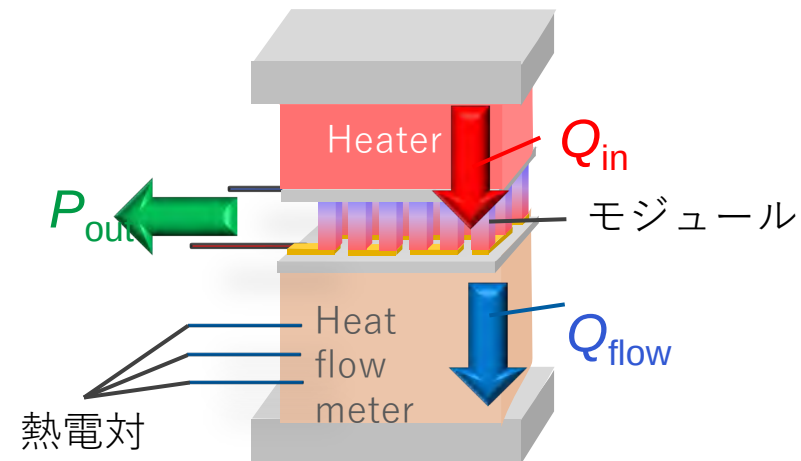


$$Q_{in} = P_{heater}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{heater}}$$

熱流計測法

熱流計によりモジュールへの投入熱量を測定する。

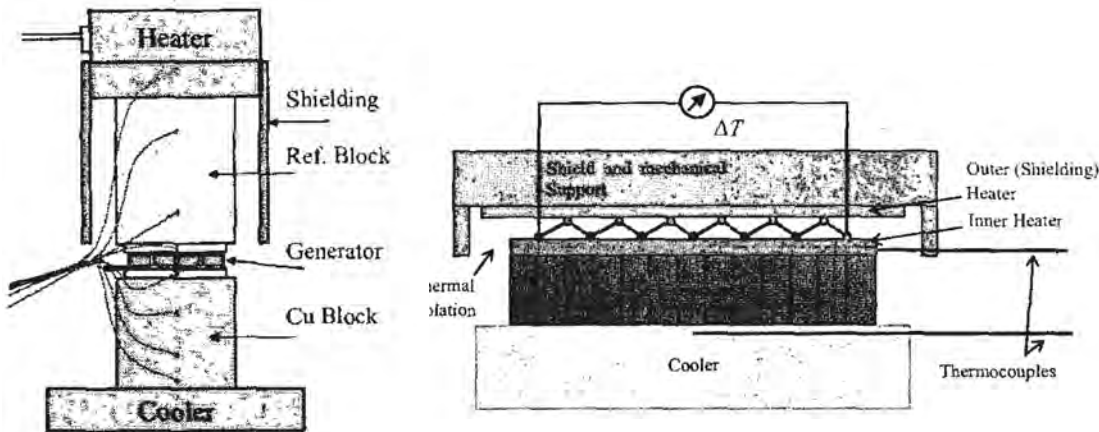


$$Q_{in} = Q_{flow} + P_{out}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{Q_{flow} + P_{out}}$$

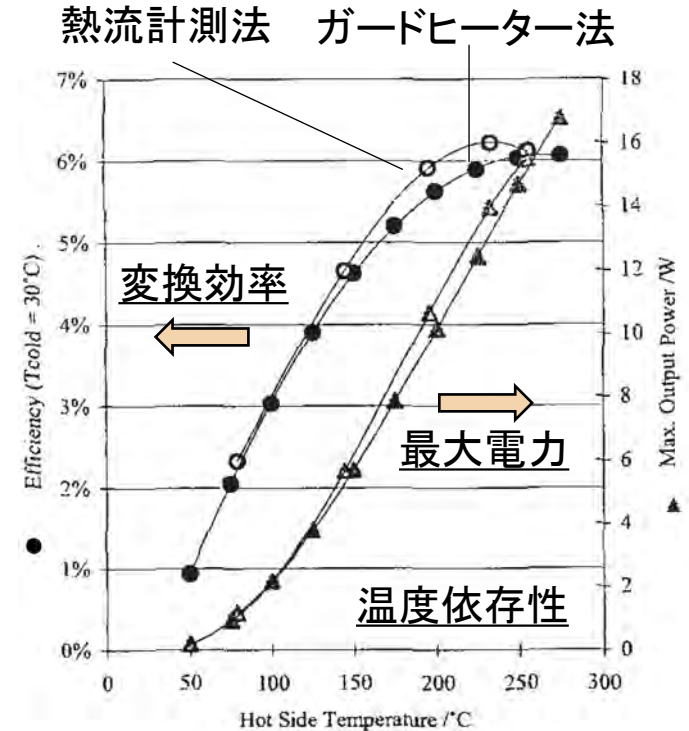
- 過去に異種原理の精密な相互比較実験が報告されています。
- 両者の変換効率値は、特に高温領域で完全に一致しません。

熱流計測法とガードヒータ法の比較



L. Rauscher *et al.*, in *22nd ICT*. pp. 508 (2003).

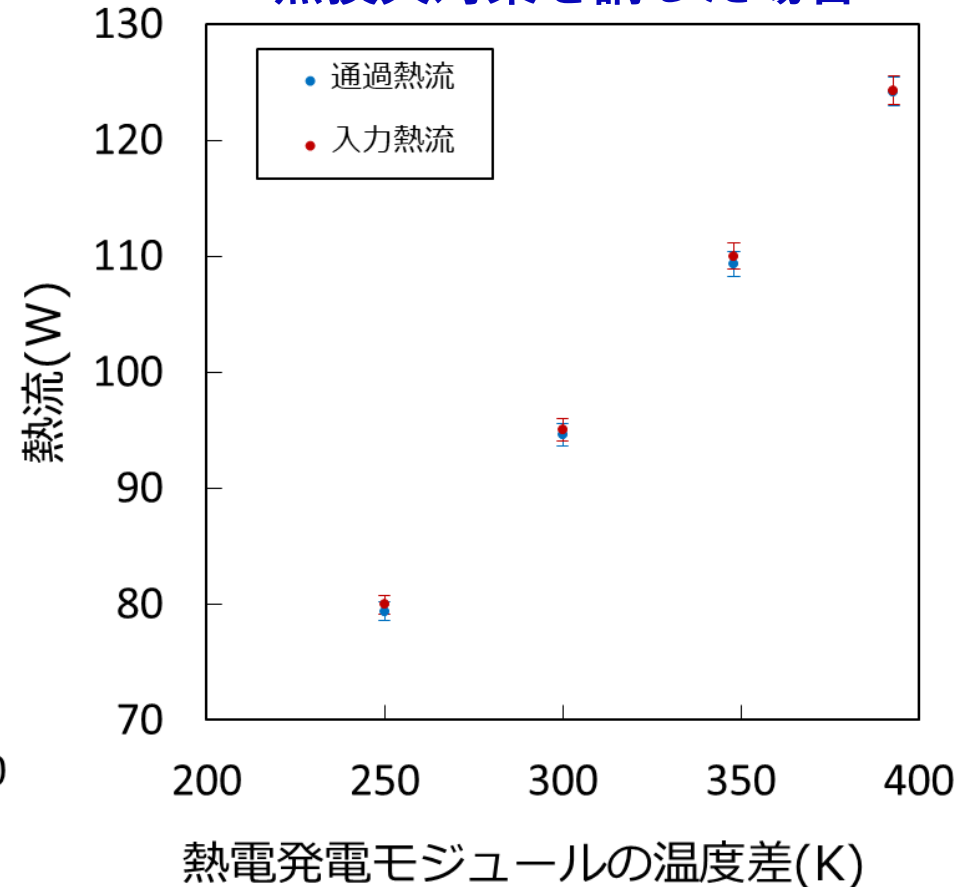
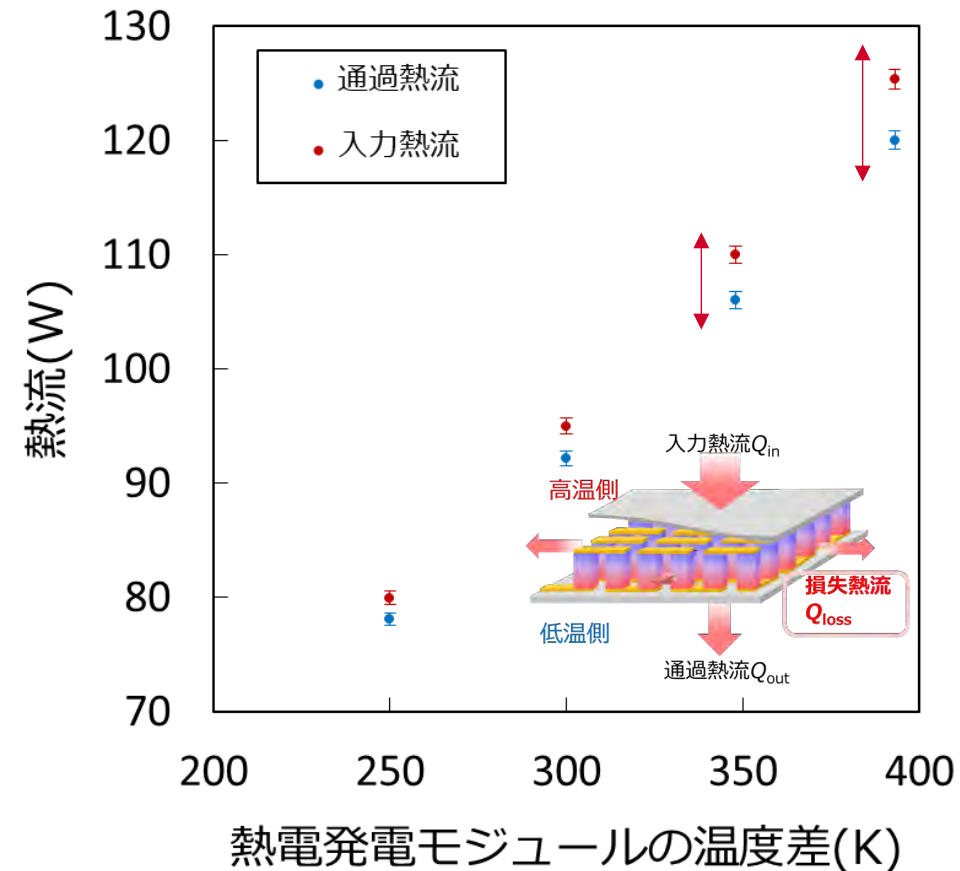
H. Takazawa *et al.*, in *25th ICT*. pp. 189 (2006).



熱流評価事例：ガードヒータ法と熱流計測法の比較

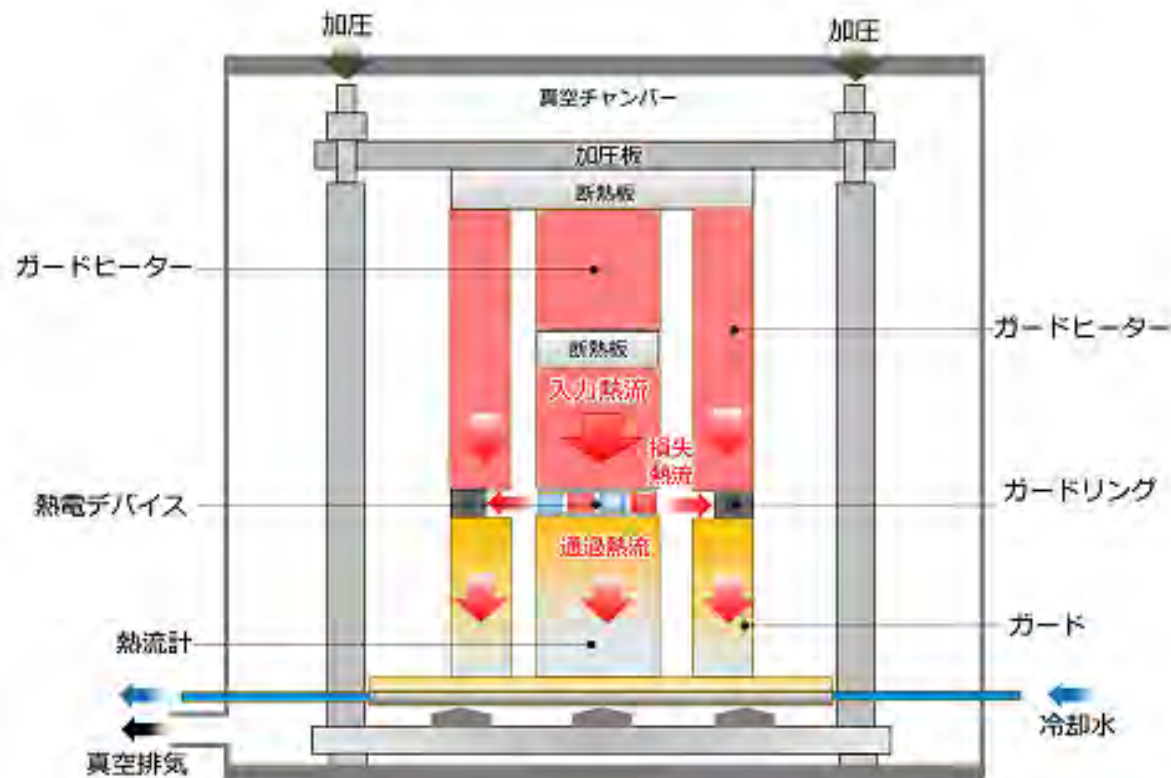
- モジュールに入力する熱流と通過する熱流を測定しました。
- 通過熱流と入力熱流の乖離が高温で目立ち始めています。

熱損失対策を講じた場合



【主要構成要素】

- ・ 加熱ユニット（ヒーター、定電力源）
- ・ 冷却ユニット（ヒートシンク、ファン、恒温槽など）
- ・ 温度センサ（熱電対、RTDなど）
- ・ 電圧・電流測定器（マルチメータ、データロガー）
- ・ 制御・記録用PCソフトウェア（LabView/Pythonなど）



様々なタイプの評価装置

【市販装置の特徴】

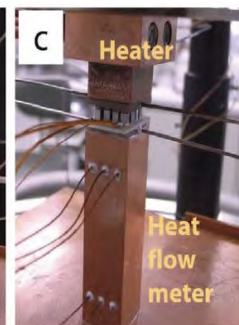
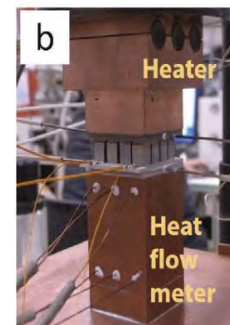
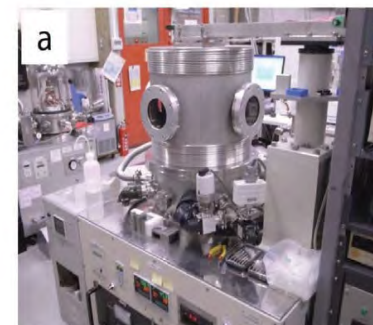
- ・ 操作性が高く、高い再現性、迅速
- ・ 熱電材料開発にも有効活用（単セル測定）

【自作システムの利点】

- ・ 自由度が高く、さまざまな改造が可能
- ・ コストを抑えながら柔軟な評価が可能
- ・ 原理が明快にわかる（ブラックボックスではない）

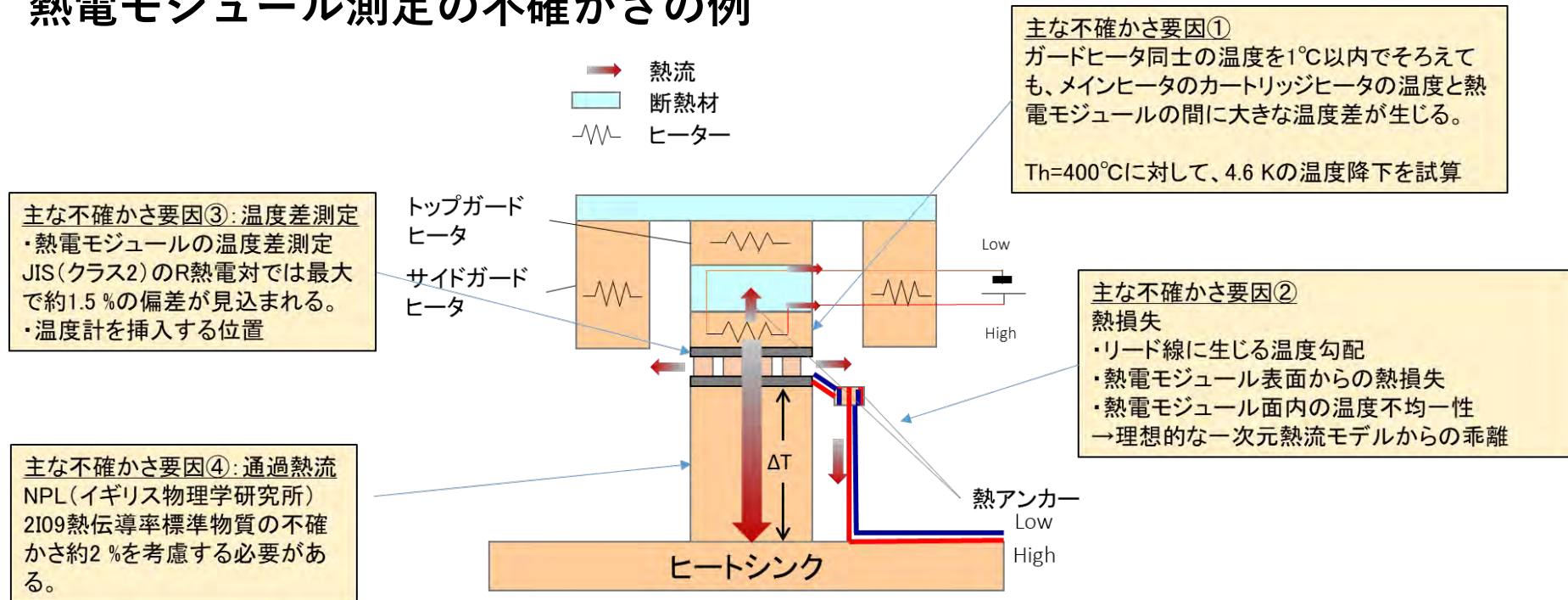
P. Ziolkowski, *et al.*, *Measurement* **167**, 108273 (2021).

M. Ohta, *et al.*, *Adv. Energy Mater.* **9**, 1801304 (2019).



- ・測定は「これで終わり」ではなく、不確かさ（エラーバー）を評価してはじめて完了します。
- ・不確かさは、その測定値がどれくらい信頼できるかを表す指標です。
- ・ISOでもガイドラインが出ているように、測定値を議論するときは、不確かさもセットで考えるのが基本です。

熱電モジュール測定の不確かさの例



**モジュールの変換効率の不確かさは良くても5%から10%程度
(性能指数は20%程度: JM, Nat. Mat.)**

【熱的な観点】

- ・ 温度分布の均一化（一次元熱流モデルが大前提）
- ・ 熱接触抵抗の最小化（グリス、サーマルシート、加圧機構）
- ・ 熱的なノイズ対策（対流抑制、ふく射抑制）
- ・ 温度センサ位置と適切な時間応答の管理
- ・ 温度センサの挿入方法（グリースの利用）
- ・ リード線や温度計からの熱損失

【電気的な観点】

- ・ 電氣的ノイズ対策（電源安定化、シールド、ケーブル）

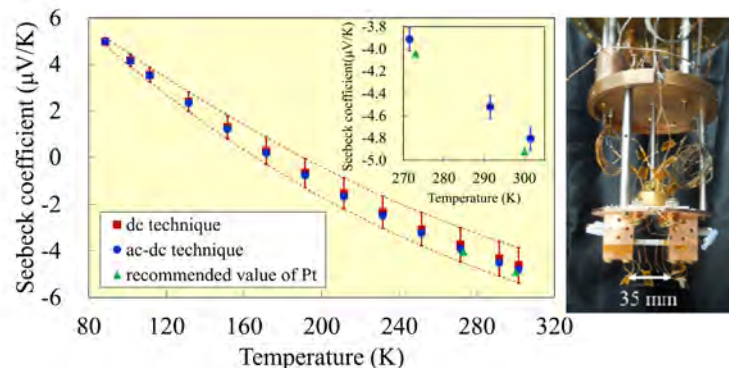
【総合的な観点】

- ・ 基本的な熱・電気設計に基づく装置開発、利用
- ・ 測定環境の管理と計量トレーサビリティの確保
- ・ 標準物質／校正を活用した測定結果の妥当性検証

計測技術

- 2002年 JIS規格(ゼーベック係数, 抵抗率, 熱伝導率) JIS R 1650
- 2013年 熱電物性測定に関する国際ラウンドロビンテストの実施
- 2017年 IEC/TC47/WG7 熱電モジュール 標準化WG発足
- 2022年 VDI 2018 熱電モジュールの測定規格
- 2023年 ISO 24687:2023 ゼーベック係数等の測定規格(ZEM3準拠)

AISTにおける ゼーベック係数の絶対測定技術の開発

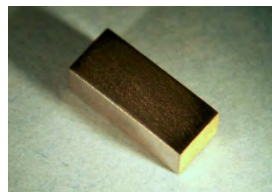


標準物質

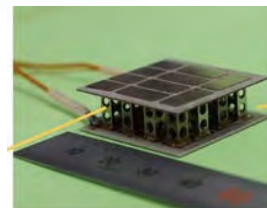
- 2009年 NIST (米) ゼーベック係数計測の標準物質の供給を開始 (10 K-390 K)
- 2013年 PTB (独) ゼーベック係数計測の標準物質の供給を開始 (300 K-850 K)



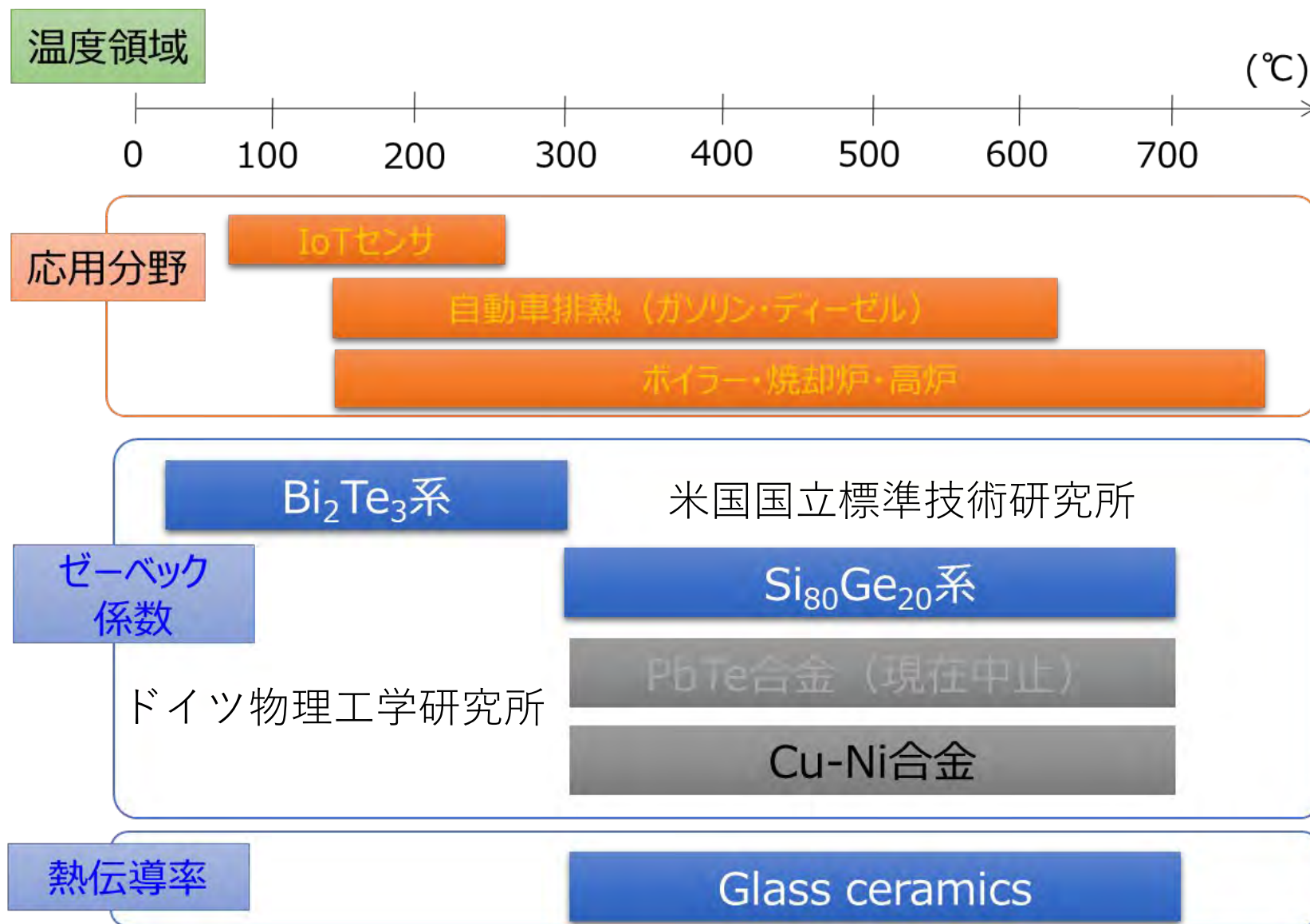
国内ではモジュール・材料とも未整備の状況 産総研ゼロエミッション国際共同研究センター (2020-)



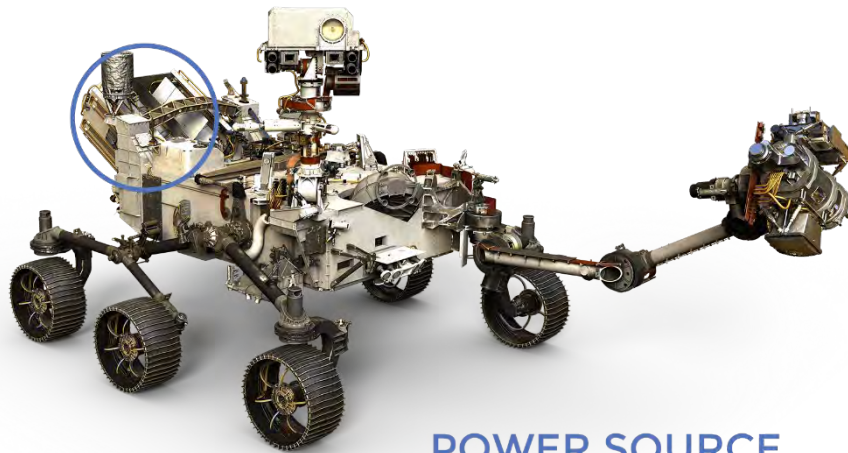
NIST標準物質 SRM3451
 Bi_2Te_3 (10 K-390 K)



参照用熱電モジュールの開発
DLR(独航空宇宙センター)との比較測定を実施



火星探査機 (Perseverance)



Multi-Mission Radioisotope
Thermoelectric Generator
(MMRTG)

NASA HP

<https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/rover/electrical-power/>

温泉・地熱利用



<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000005.000033324.html>

ウェアラブル・腕時計

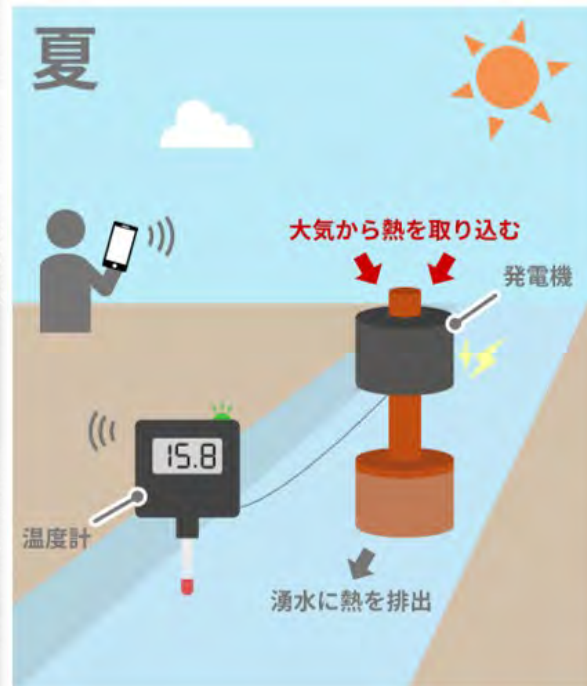


J. A. Paradiso and T. Starner,
IEEE Pervasive Computing (2005)



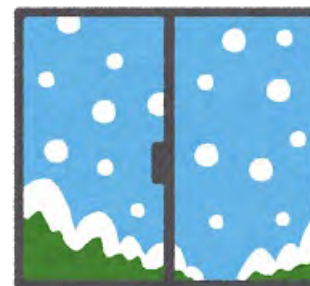
<https://japan.cnet.com/article/35111751/2/>

- ・ネイチャーポジティブ：湧水のさらなる利活用
- ・水路に置くだけでいつでも発電することが可能です。
- ・湧水（15°Cで一定）の熱エネルギーを使って発電します。



https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2024/pr20240610/pr20240610.html
Energy Conversion and Management, Volume 313 (2024)

太陽光が届かない日陰、夜間、冬も発電できる



流れや落差のない水路でも、発電することができる

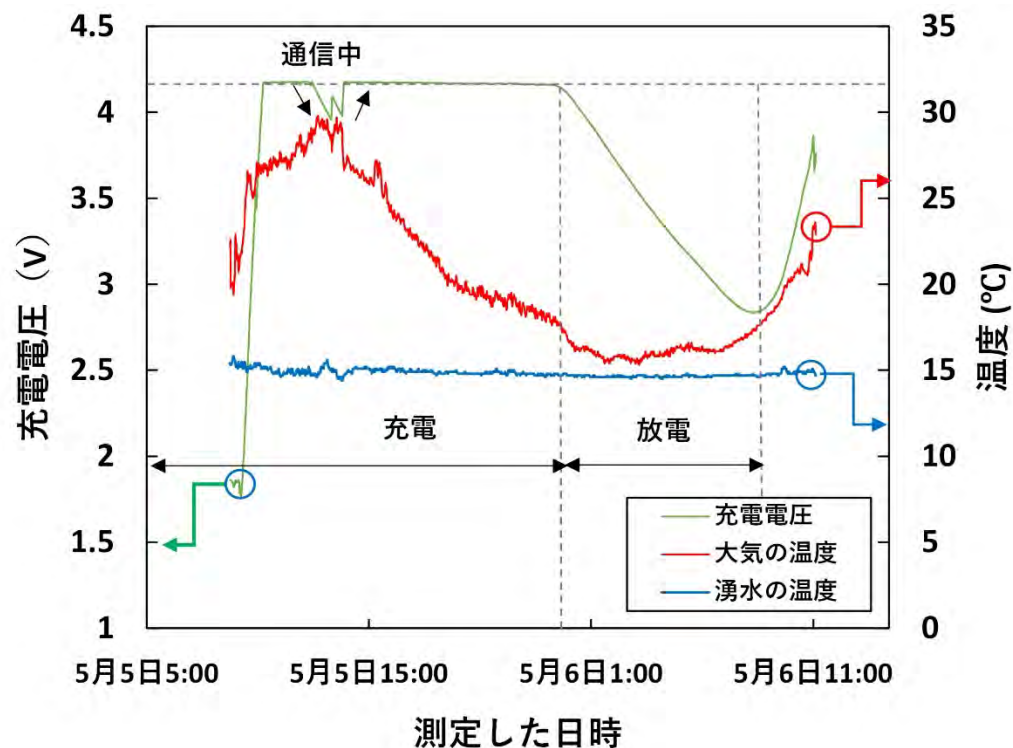
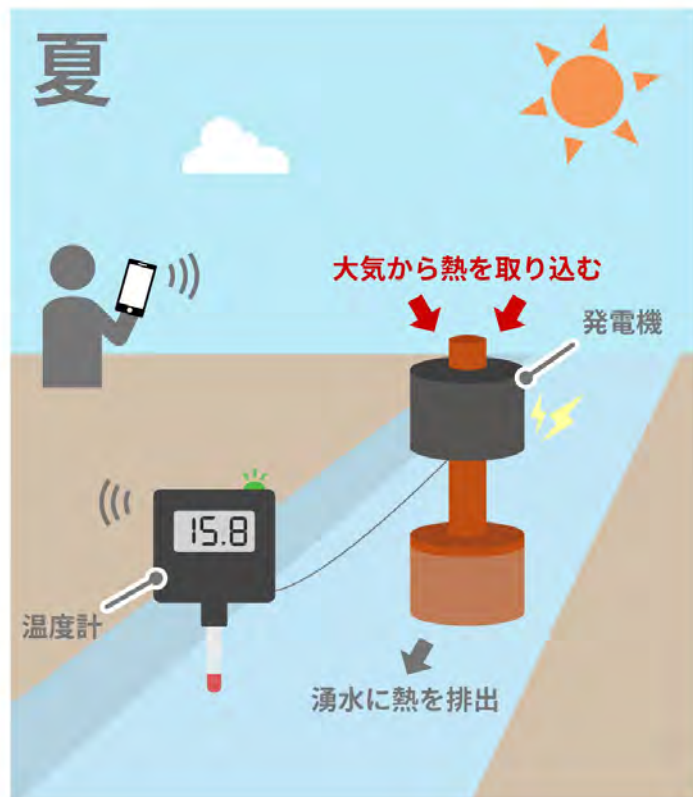


出展：日刊工業新聞（小水力発電）



出展：相反転方式差型小水力発電機

ワイヤレス温度記録計のデータを**ワイヤレス通信**するために必要な電力を共有することもできます。



出展：産総研プレスリリース
湧水に浸すと発電できる「湧水温度差発電」

- ・ 熱電モジュールは、温度差を利用して発電や冷却を行う電子部品であり、ゼーベック係数・電気抵抗・熱伝導率のバランスや熱設計が性能を決定づけます。
- ・ 性能指標 ZT の向上は変換効率の向上につながりますが、測定には温度・電圧・熱流などの高精度な計測、熱抵抗値などの様々なシステム設計値の評価、統合的な不確かさの評価が重要です。
- ・ 測定手法や装置構成、さらには国際標準への対応も含めて、信頼性のあるデータ取得と比較可能性の確保を心がけることが大切です。

- 熱電半導体とその応用、日刊工業新聞(1998)
- 熱電変換工学—基礎と応用、リアライズ理工センター（2001）
- 新版 熱電変換システム技術総覧、リアライズ理工センター（2004）
- 熱電学総論【新装版】(熱電学シリーズ1) S&T出版(2009)
- 熱電変換システム設計のための解析: ペルチェ冷却・ゼ-ベック発電、森北出版（1998）
- 熱電発電技術と設計法-小型化・高効率化の実現-、科学情報出版(2019)
- 熱電材料の物質科学: 熱力学・物性物理学・ナノ科学、内田老鶴圃（2017）
- HJG, Introduction to Thermoelectricity, Springer (2016)
- DKC, Thermoelectricity: An Introduction to the Principles, Dover (1957)