

IoT用電源を志向した 超軽量・長寿命有機熱電発電素子

神戸大学 大学院工学研究科 応用化学専攻
准教授 堀家 匠平

2025年3月11日

IoT

あらゆる情報をWEBで収集、AIで最適解を提示



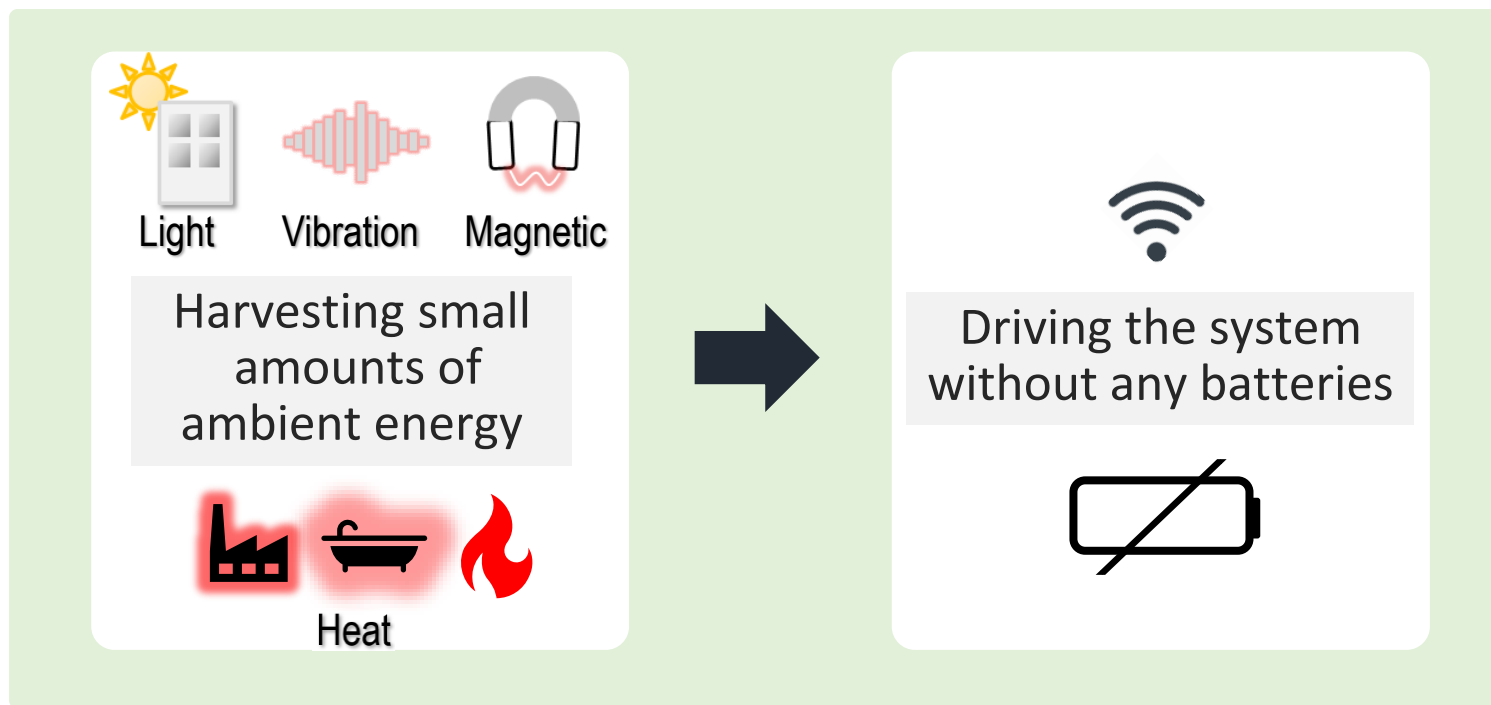
IoTで得られる省エネ効果:「原油1263万kL/年相当」=「電力1358億kWh/年相当」

- ・スマートファクトリ(製造状況に応じた最適なエネルギー管理):67万kL
- ・スマートオフィス・スマートハウス(電力供給状況に応じた最適なエネルギー管理):414万kL
- ・スマート自動車、交通網(交通状況に応じた最適運転):52万kL
- ・調光デバイスや高効率空調向けデバイス:730万kL

※資源エネルギー庁「総合資源エネルギー調査会」資料より

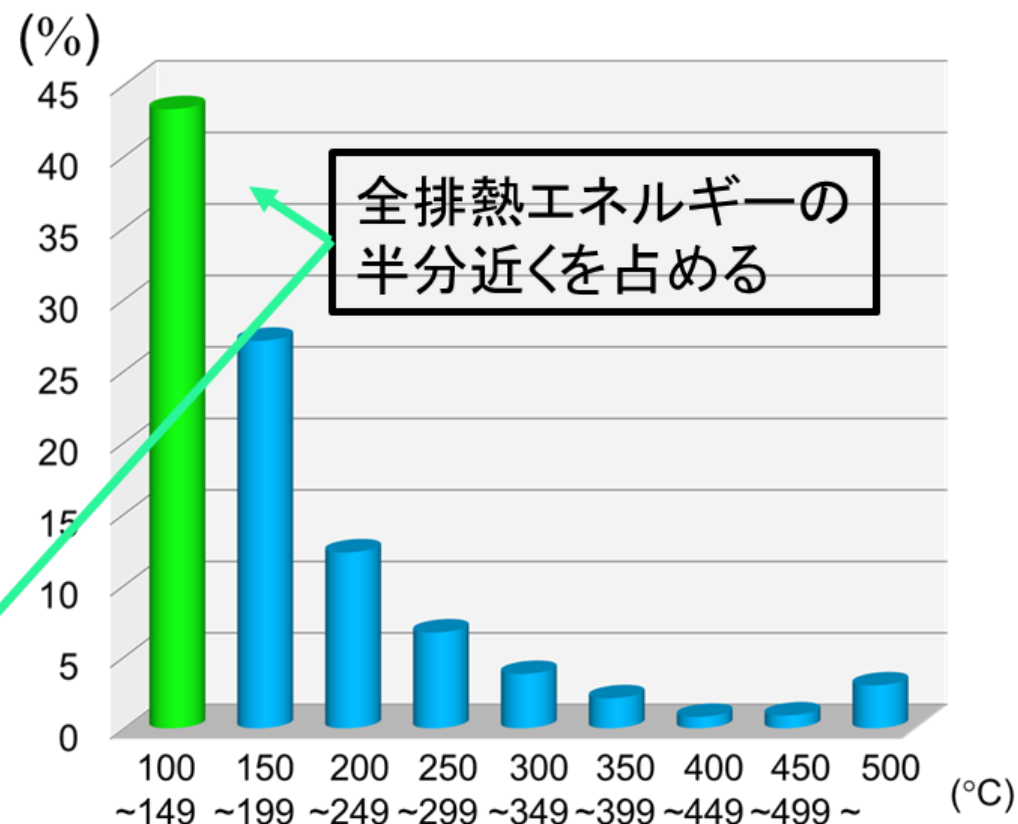
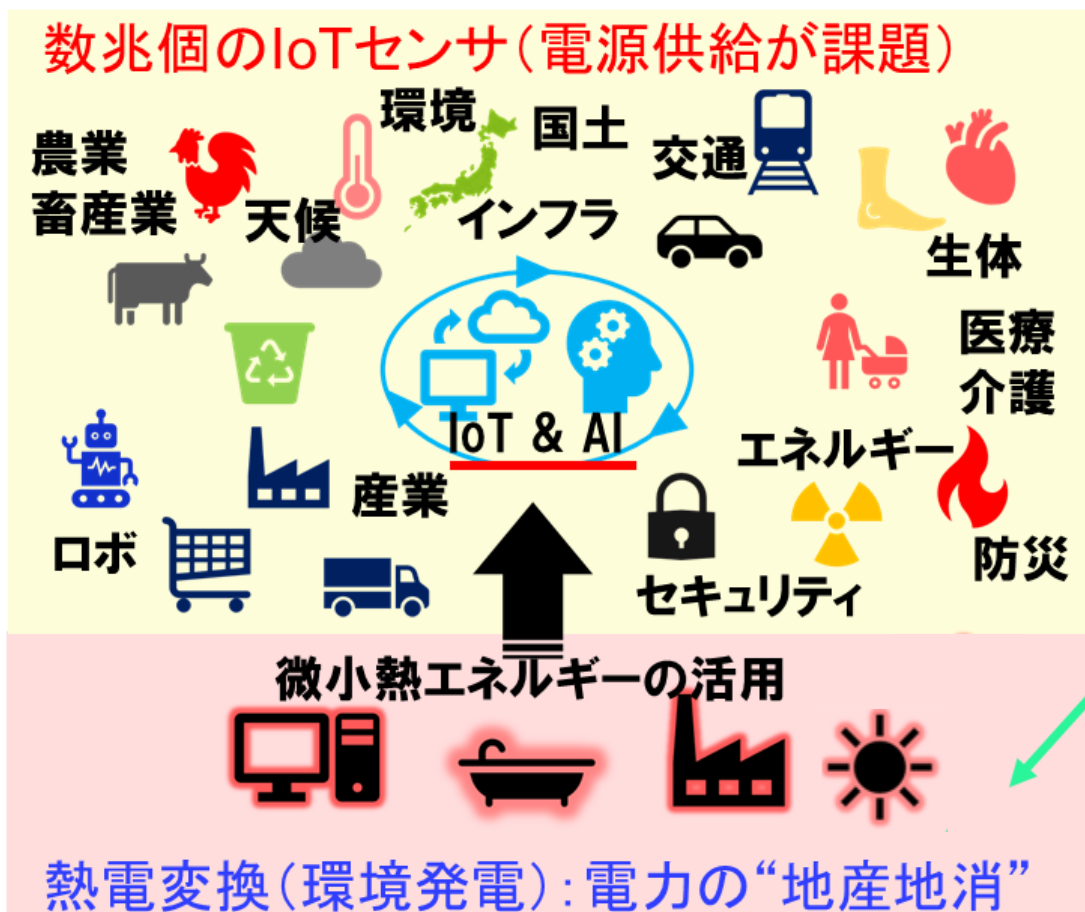
環境発電

数兆個の無線センサの電源をいかに確保するか？

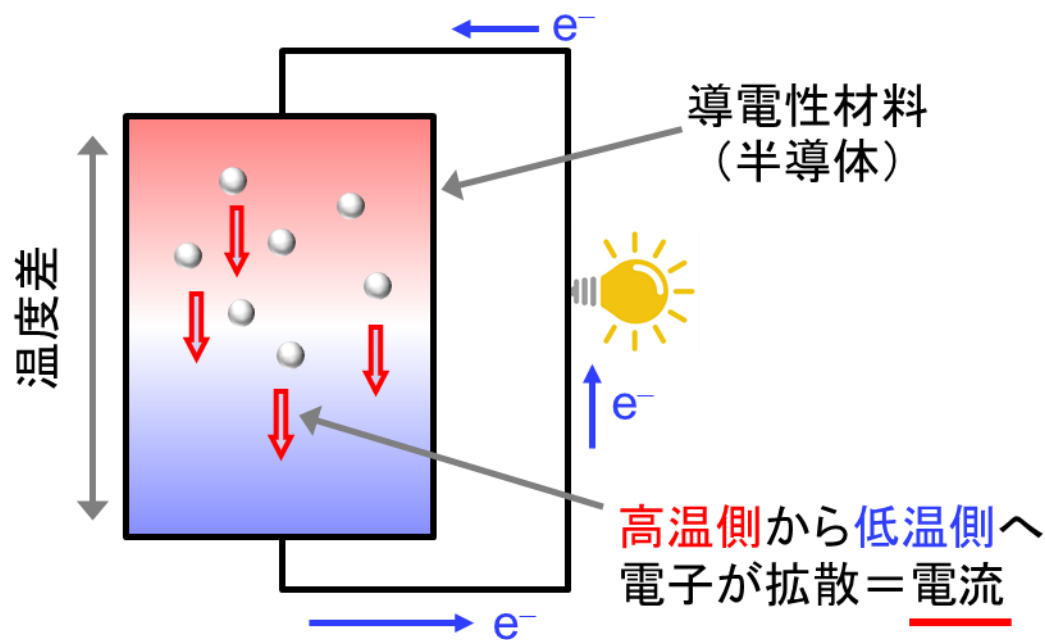


熱電発電

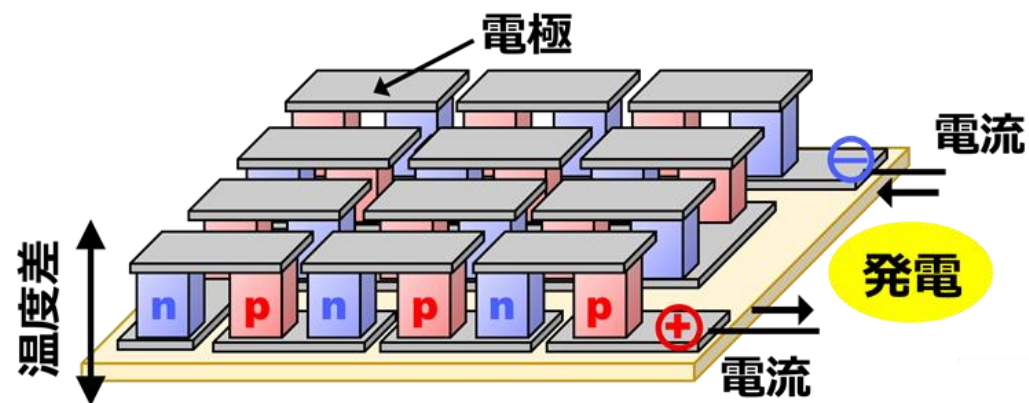
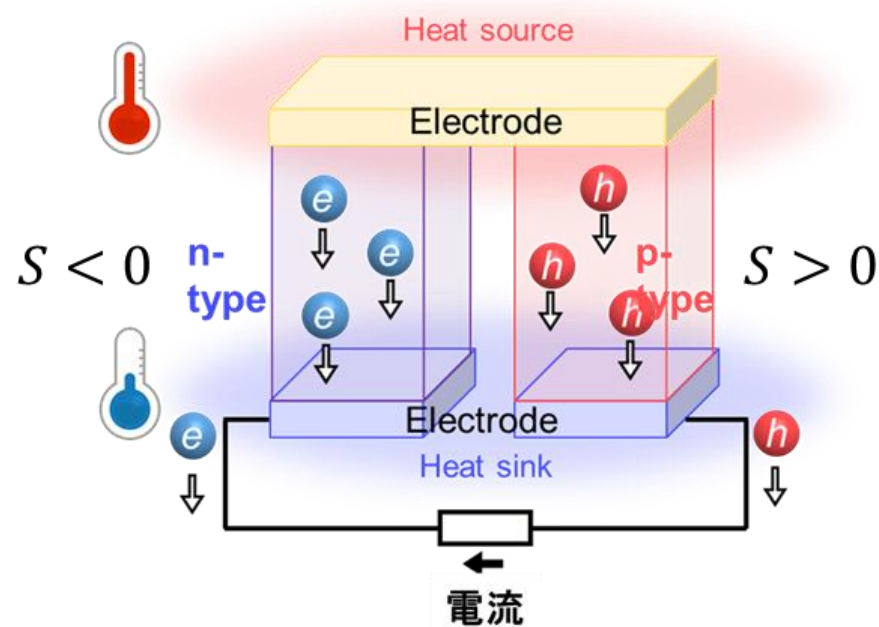
身の回りの微小熱源から電気を生み出す



熱電素子



p型とn型双方の材料が必要



従来技術とその問題点

既に実用化されているものには、ビスマステルライド素子を用いた熱電素子があるが、

レアメタル・毒性元素を使用

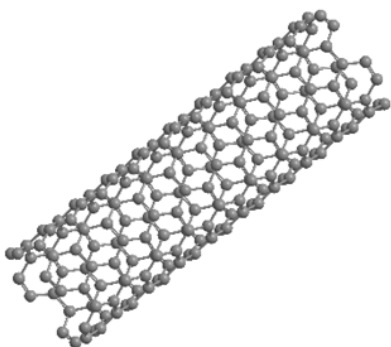
無機物は高密度のため、重量がかさむ

自然放熱で駆動するために大型のヒートシンクを使用

等の問題があり、広く利用されるまでには至っていない。

カーボンナノチューブ (CNT)

最近注目の有機熱電材料



ゼーベック係数

$$S = -\frac{\Delta V}{\Delta T}$$

p型: 正
n型: 負

σ : 導電率
 κ : 熱伝導率
 T : 温度

熱電材料の性能評価指数

パワーファクタ

無次元性能指数

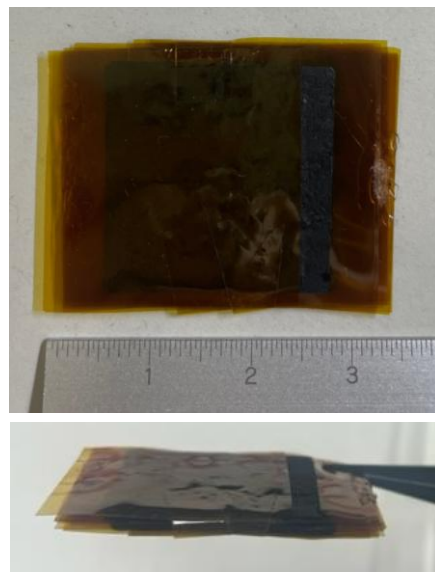
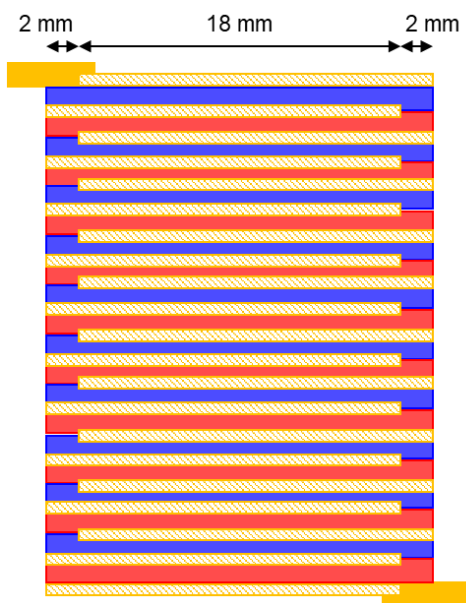
$$P = S^2 \sigma$$

$$ZT = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} T$$

	S	σ	P	軽量&柔軟	κ
CNT	○ (p/n制御可)	○	○	○	△
導電性高分子	△ (p/n制御困難)	○	△	○	○
無機材料	○ (p/n制御可)	○	○	△	○

新技術の特徴・従来技術との比較

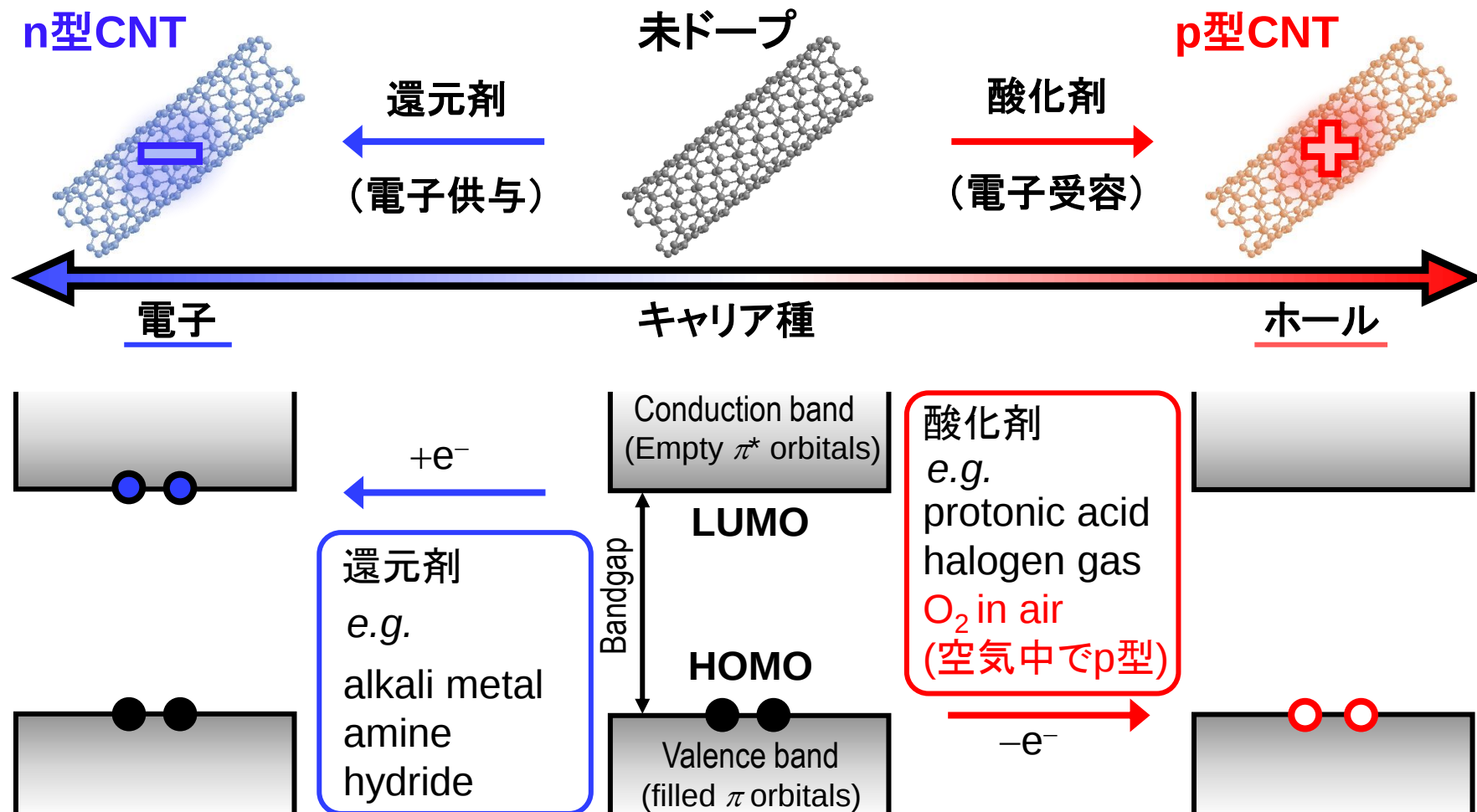
- 1 g以下の軽量・小型でありながら、自然放熱で発電する有機熱電発電素子。
- レアメタルを使用しないため、数百円/個の低コスト化が期待される。
- 有機熱電におけるボトルネックであった、n型CNTの空气中高温下安定性を向上することに成功。
- p型/n型CNTの直接接合により $10^4 \mu\Omega \text{ cm}^2$ オーダーの低接触抵抗率を達成。熱電素子全体の低抵抗化を実現。



< 1 gram

< $3 \times 3 \times 0.1 \text{ cm}^3$

CNTのドーピング (p/n作り分け)



【開発課題: n型ドーブ状態の耐熱性】

- ・熱電素子: 常時熱源に設置して使用
- ・論理回路: 電流印加により発熱^a
- ・太陽電池、光センサ: 受光により発熱^b

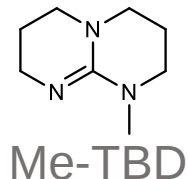
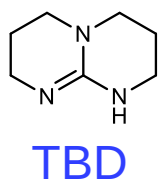
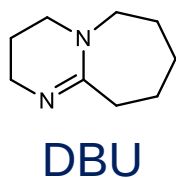
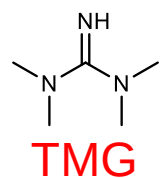


室温付近での保存安定性だけでなく、
“**高温下ドーブ状態の保持特性**”も
材料開発上の指針として重要

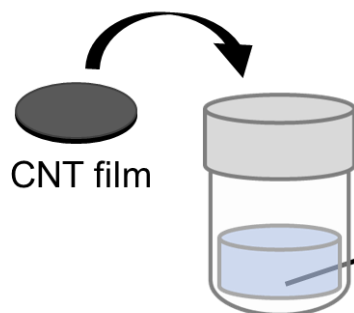
^aWei et al., Heat Transf Eng (2008)

^bRoyne et al., Sol. Energy Mater. Sol Cells (2005)

有機超塩基ドーピング



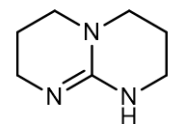
immersing (5 min) & drying



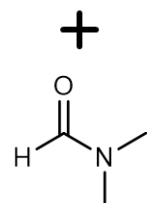
CNT film

0.7–710 mM

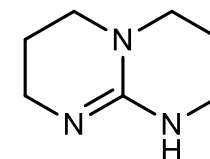
Dopant solution



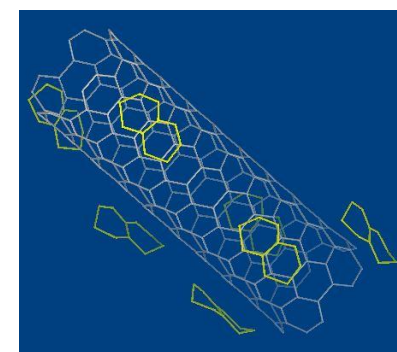
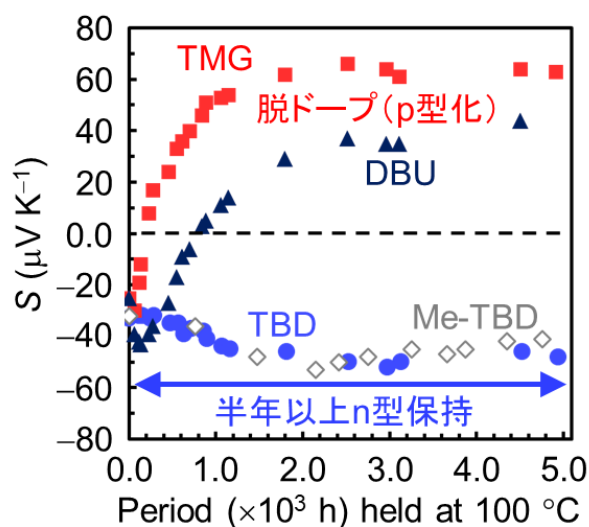
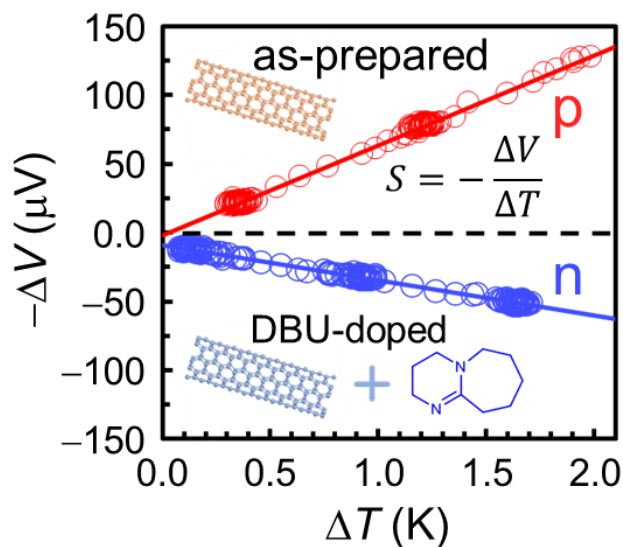
Base



DMF
(solvent)



TBD



TBDの平面的な分子構造：
CNT表面への吸着安定化

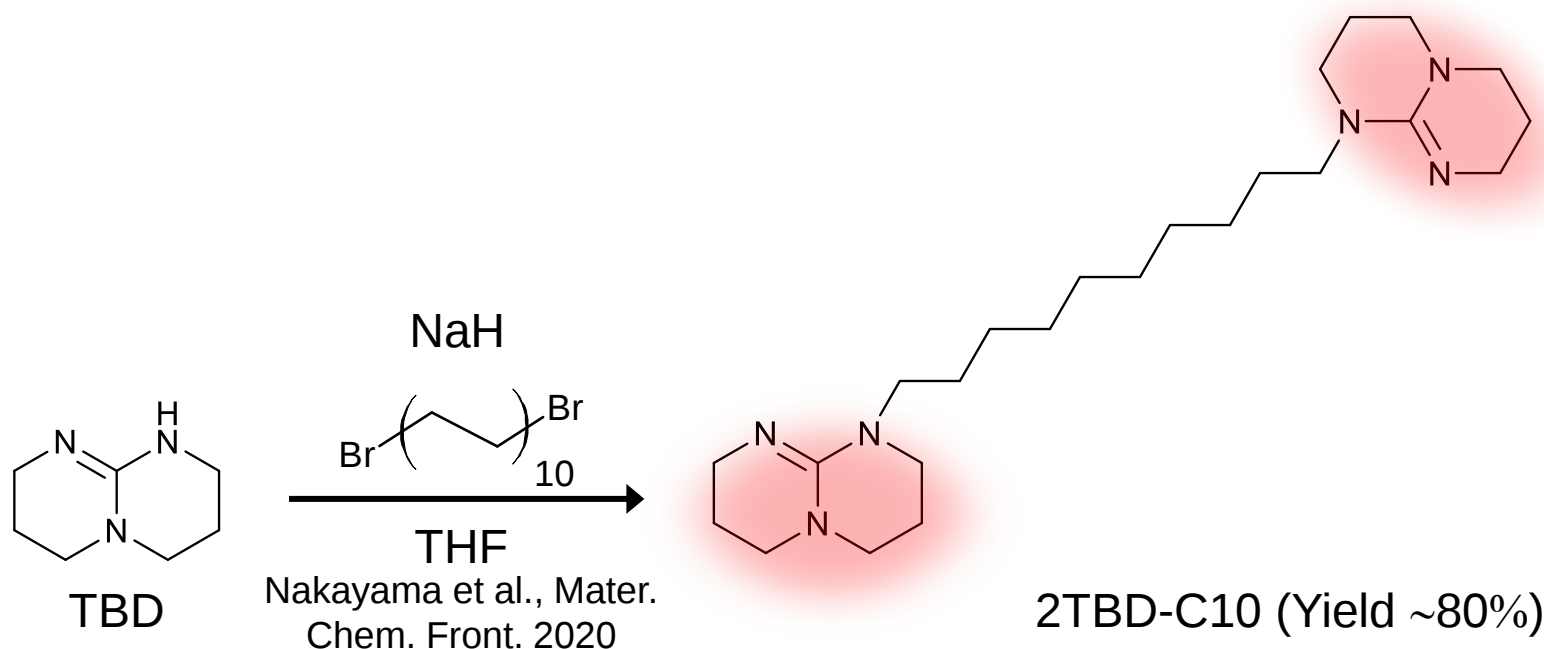
Horike et al., Nature Communications 13, 3517 (2022)

Nishinaka, Horike et al., Carbon 218, 118667 (2024)

堀家, 『応用物理』 93, 683 (2024)

有機超塩基の構造拡張

さらなる安定性の向上に向けたドーピング剤の化学構造改良



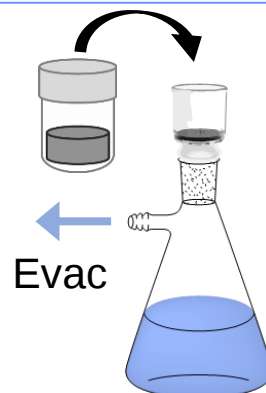
- | | | |
|----------------|---|----------|
| (1) 複数のTBDユニット | ➡ | 多点吸着 |
| (2) 分子量の増加 | ➡ | 揮発性の抑制 |
| (3) 疎水性アルキル基導入 | ➡ | 水分子の吸着抑制 |

CNT膜形成

i) CNT aqueous dispersion



ii) Vacuum filtration



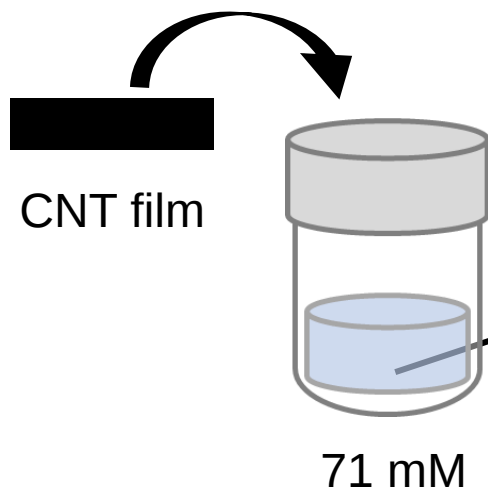
iii) Detached from filter, rinsed & dried



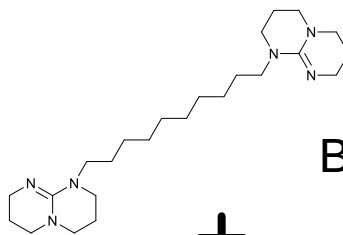
Self-standing parent CNT wafer:
 $\phi \sim 7$ cm / 30 μ m in thick

■ Doping

immersing (5 min) & drying

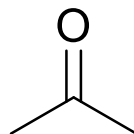


Dopant solution



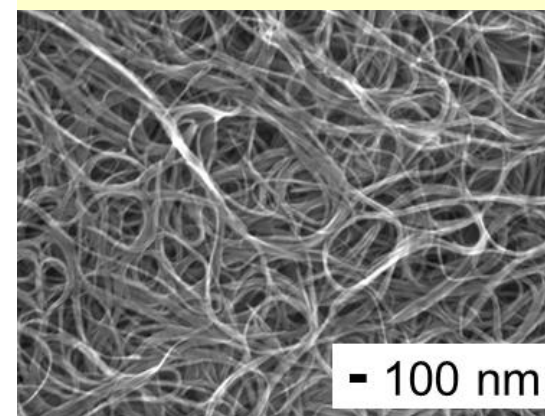
Base

+



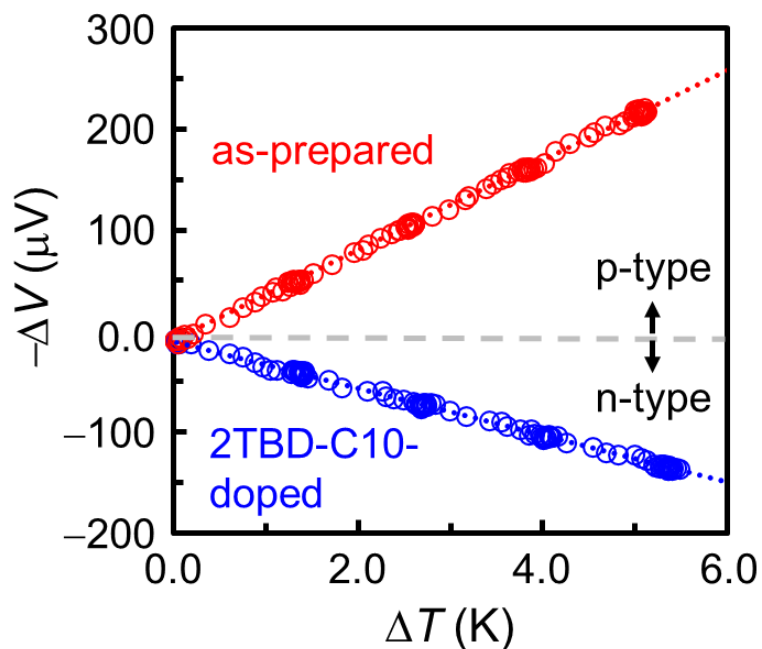
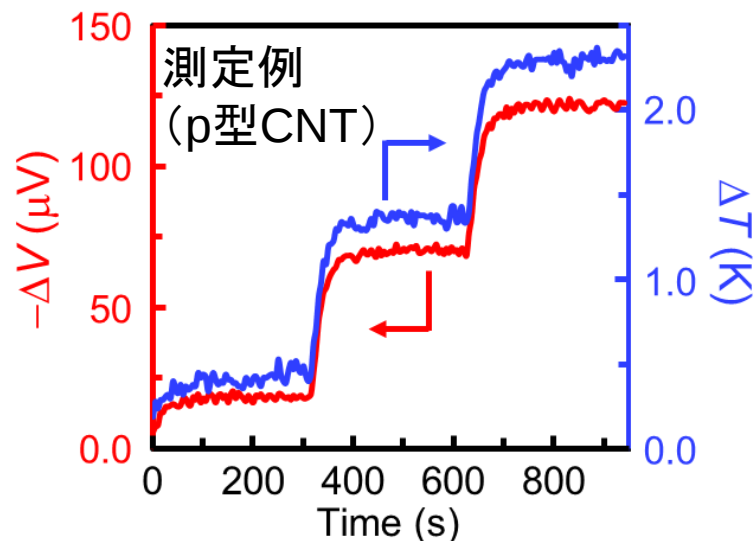
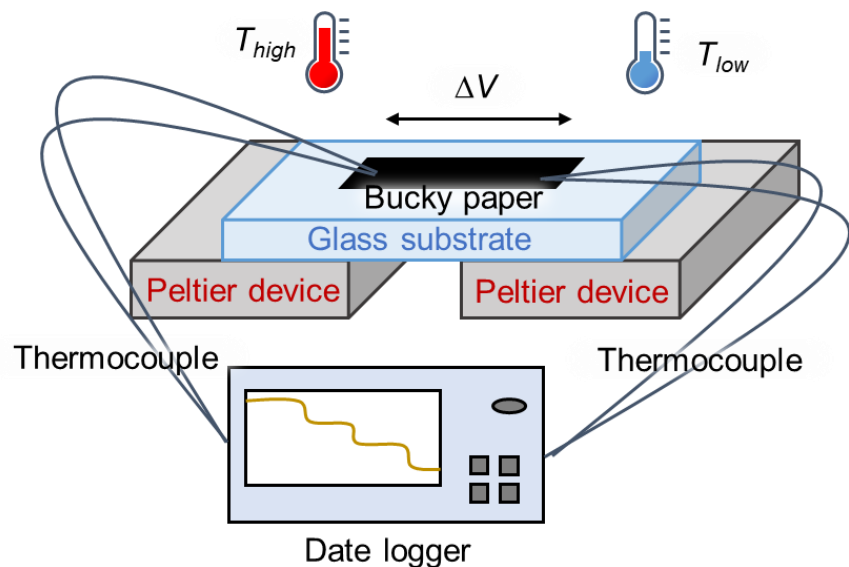
Acetone
(solvent)

SEM image



直径40 nm程度のバンドル

ゼーベック係数による極性判定

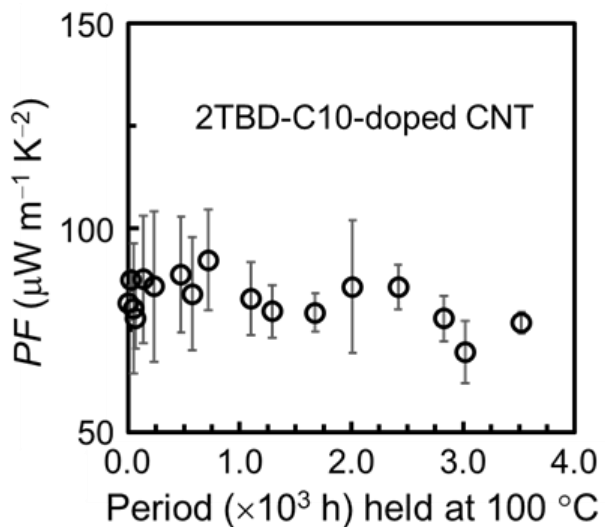
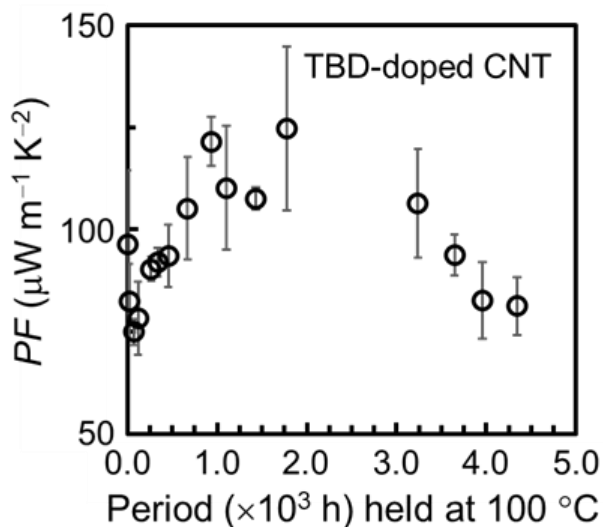
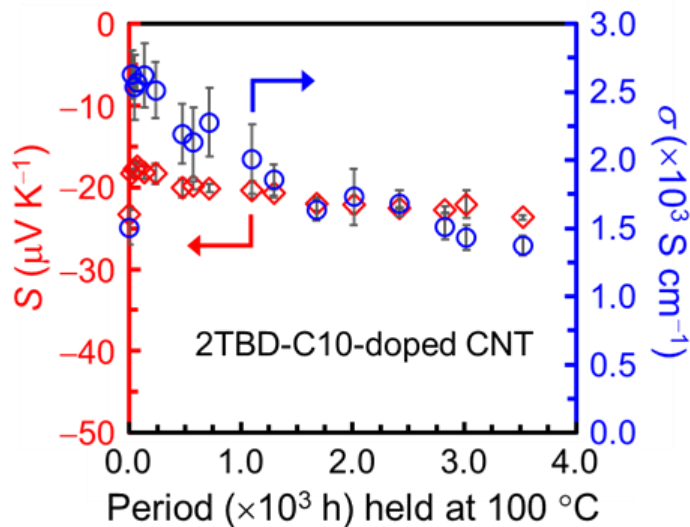
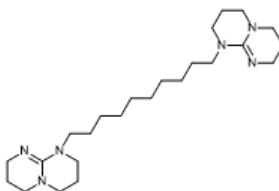
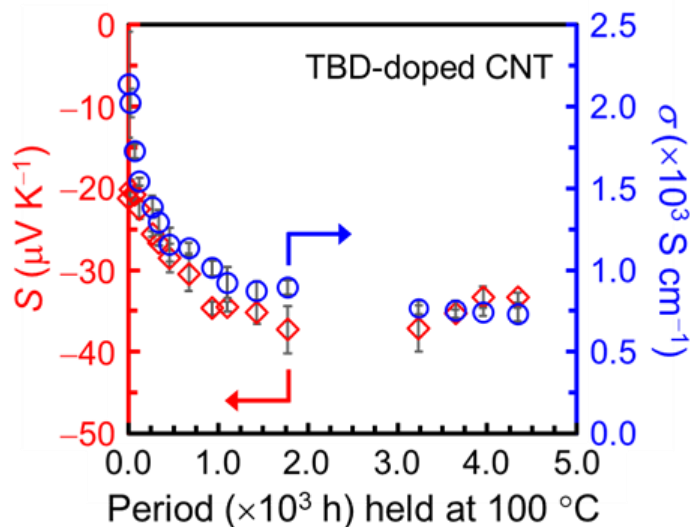
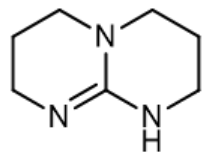


Sample	S ($\mu V K^{-1}$)	σ^* ($S cm^{-1}$)
As-prepared	+46 (p)	1300
Doped	-20 (n)	1510

*四探針法

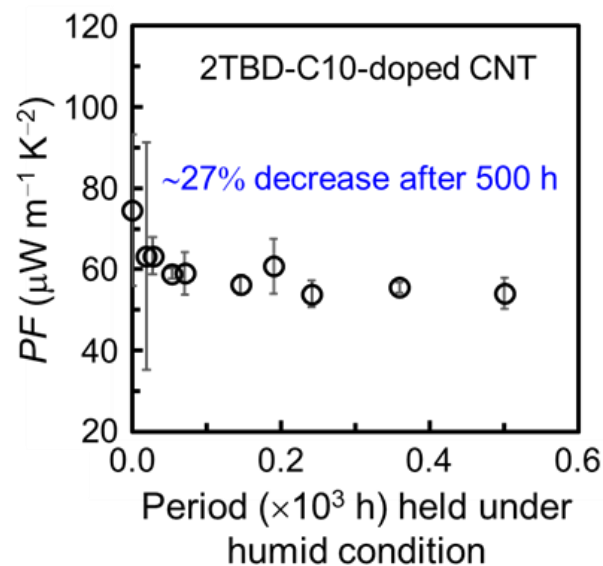
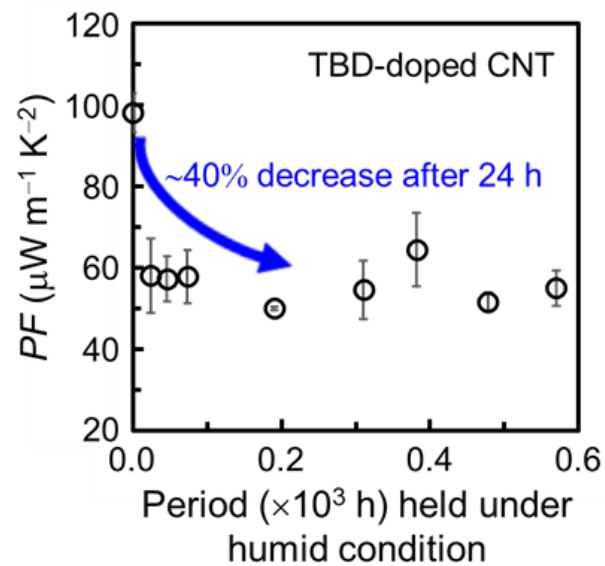
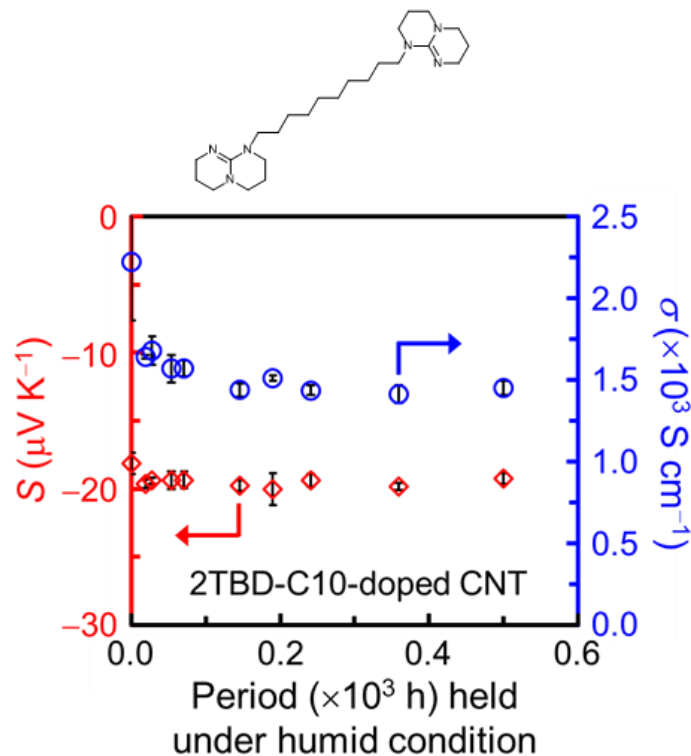
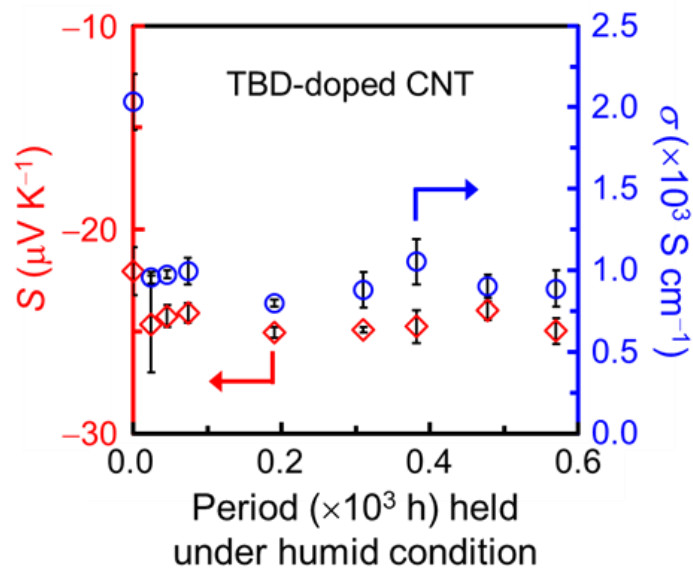
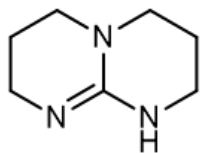
- ・わずか5分の浸漬処理でCNTがn型化
- ・ S の絶対値減少、 σ の増加: キャリア密度に対するトレードオフの関係

耐熱性評価@空气中100°C



- ・既存のドーパント(PEI)より安定
- ・TBDを上回る耐熱性

耐水性評価@空气中、湿度>80%



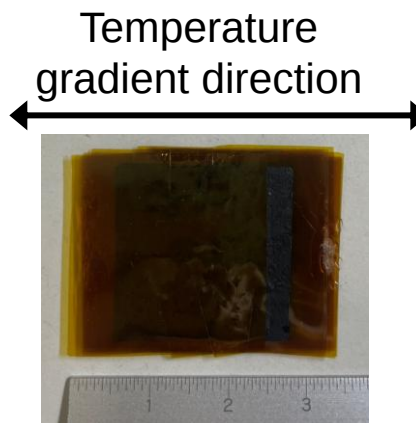
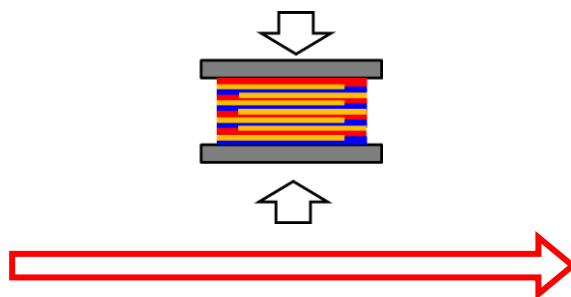
TBDを上回る耐水性

オールCNT熱電モジュール

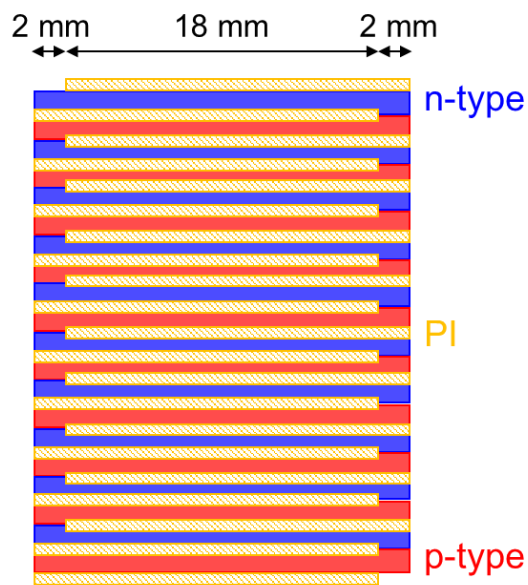
$\Phi \sim 7$ cm



Parent CNT wafer

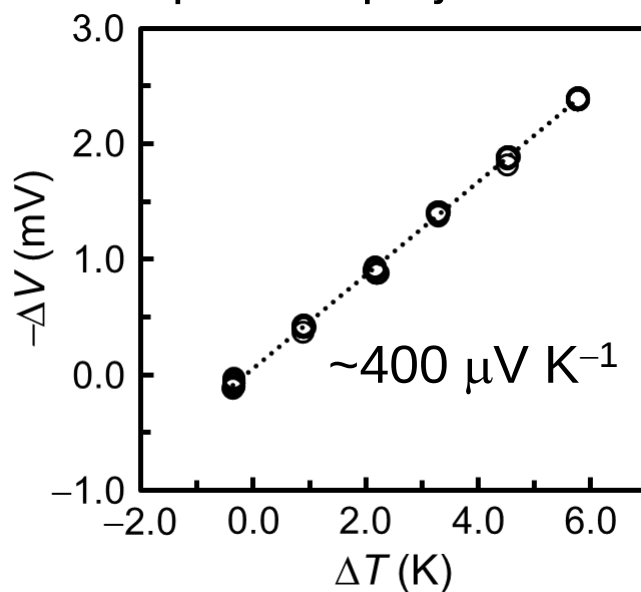


Stacked TE module

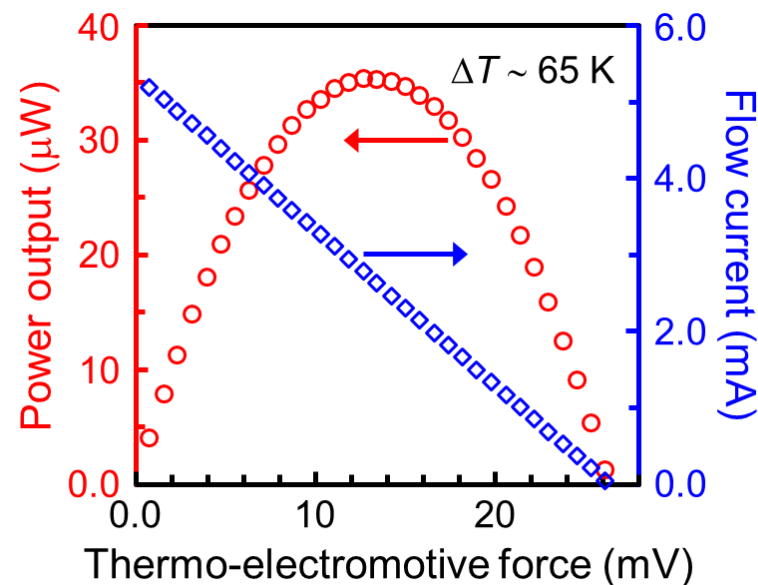


Cross-sectional view

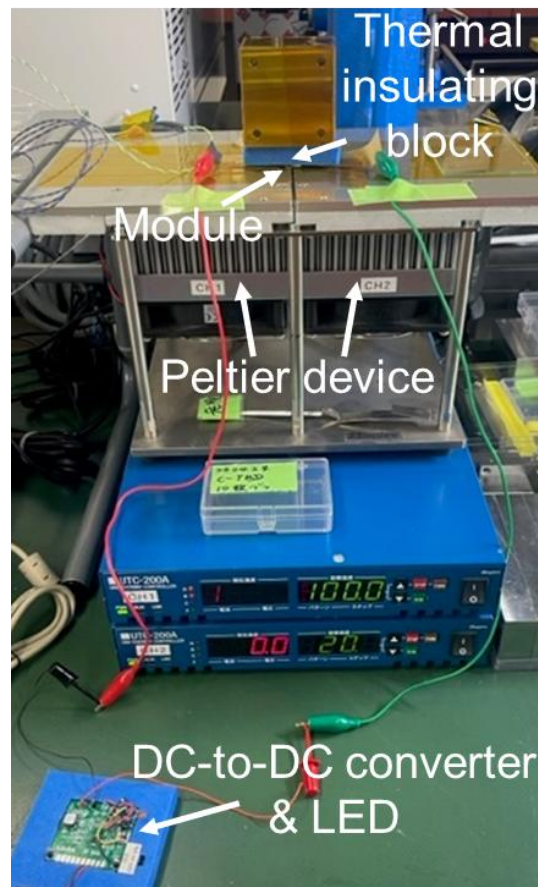
10 pairs of pn junction



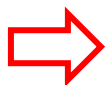
最大電力 $\sim 35 \mu\text{W}$ (~ 12.7 mV, ~ 2.8 mA)



オールCNT熱電モジュール



- ・出力密度: $41 \mu\text{W/g}$
- ・重量: 0.85 g

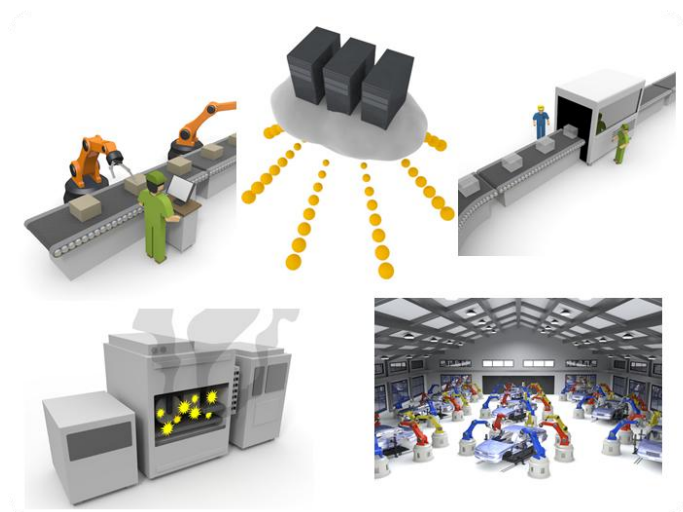


- ・リチウムイオン電池CR2450、CR1616よりも軽量
- ・ $50 \mu\text{W}$ 出力を1年以上持続できれば、
(連続使用期間の意味で)CR2450の能力も上回る

メンテナンスしづらい箇所に設置されたセンサや、
そもそも電池を使用できない箇所での普及に期待

想定される用途

- 工場排熱を利用した発電➡スマートファクトリ向けセンサ駆動
- エンジンやモータ排熱を利用した発電➡車載センサ駆動
- ガス配管の排熱を利用した発電➡ガス検知器の駆動
- 住宅壁面への施工・屋内外の温度差による発電
➡スマートウィンドウ用センサの駆動
- その他、太陽電池の使用が困難な場面での環境発電



実用化に向けた課題

- 現在、安定なドーピング技術まで開発済み。
しかし、CNTフィルムならびに積層素子の
量産化が未解決である。
- 実用化に向けて、フィルム積層の精度を向
上できるように精密な位置合わせ技術を確立
する必要もあり。

企業への期待

- 有機フィルムの製造・積層技術を持つ企業、デバイスメーカーとの共同研究を希望。
- IoT機器メーカー、環境発電分野への参入を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

企業への貢献、PRポイント

- 小型・軽量・長寿命な熱電素子によるばらまき型の自立電源。
- 既存の無線センサへの後付け施工。
- 本格導入にあたっての技術指導・試作品提供・ライセンス契約

本技術に関する知的財産権

特許①

- 発明の名称 : 熱安定性に優れた n 型ドーピング剤およびナノカーボン材料の n 型ドーピング方法
- 出願番号 : 特願2022-6460
- 出願人 : 産業技術総合研究所
- 発明者 : 堀家 匠平、桐原 和大、向田 雅一、衛 慶碩、加藤 雄一、物部 浩達、杉野 卓司

特許②

- 発明の名称 : 熱電変換モジュールおよび熱電変換モジュールの作製方法
- 出願番号 : 特願2022-32469
- 出願人 : 産業技術総合研究所
- 発明者 : 向田雅一、衛慶碩

産学連携の経歴

- 2019年-2023年 JSTさきがけ事業に採択
- 2023年- JST A-STEP事業に採択

お問い合わせ先

神戸大学
産官学連携本部

T E L 0 7 8 - 8 0 3 - 5 9 4 5

e-mail oacis-sodan@office.kobe-u.ac.jp