

【1次提案書受理番号】 ~~141N007~~

契約管理番号 14102921-0

「トリリオンセンサ社会を支える 高効率MEMS振動発電デバイスの研究」

【PM】 東京大学 藤田博之

【代表連絡先機関】 技術研究組合NMEMS技術研究機構

【研究開発責任者】 東京大学 年吉 洋

【連名提案者】

技術研究組合NMEMS技術研究機構

静岡大学電子工学研究所 橋口 原

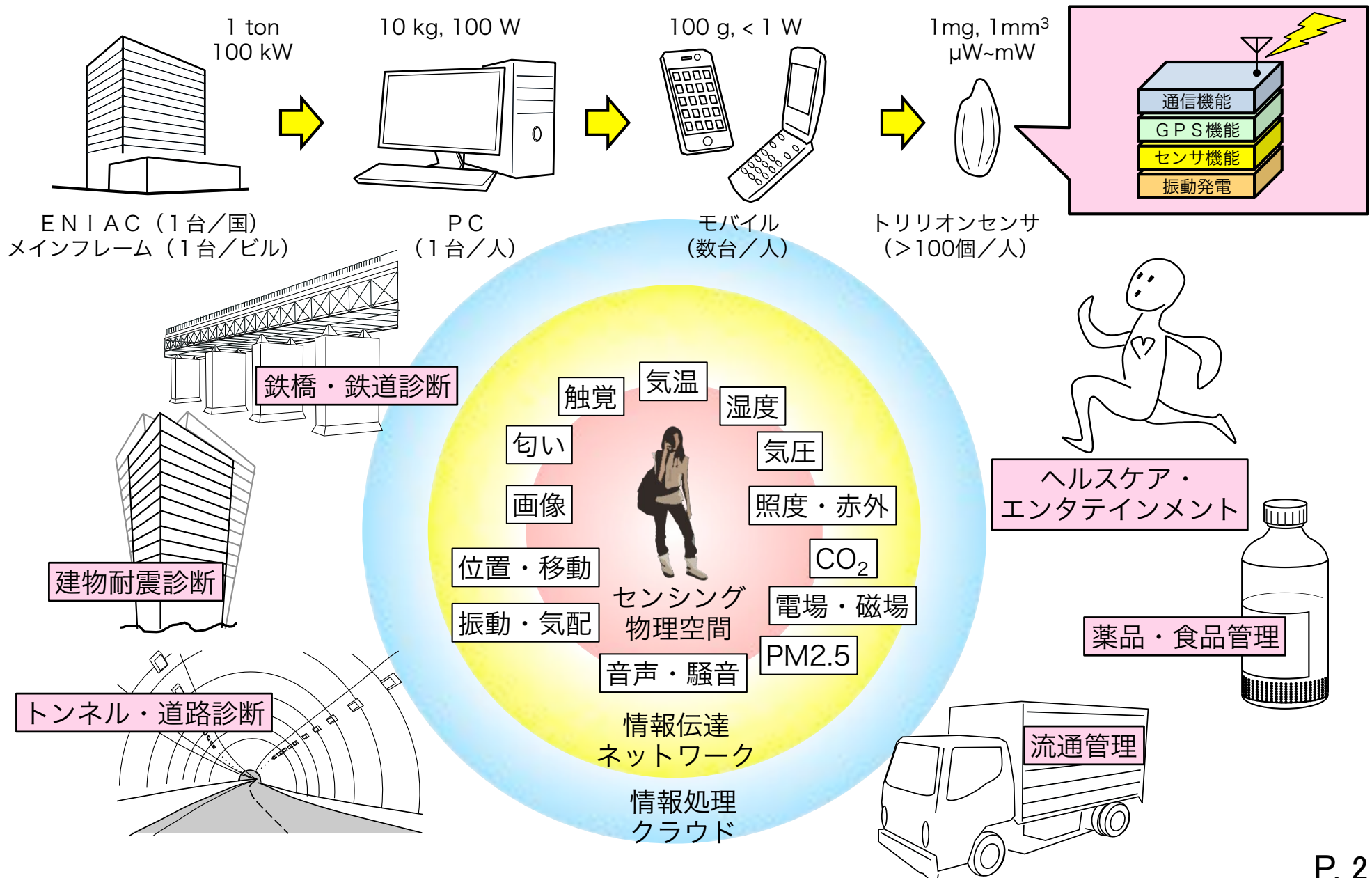
株式会社鷺宮製作所R&Dセンター 三屋裕幸

一般財団法人マイクロマシンセンター

【再委託先】 東京大学生産技術研究所

2. 研究開発コンセプト (1) 研究開発の内容

来たるトリリオン・センサ時代に必要不可欠な「振動発電型の自立電源」を開発



予備資料： エナジー・ハーベスタの性能目標

Tokyo State

Area Total: 2,200 km²

Population: 13 Million

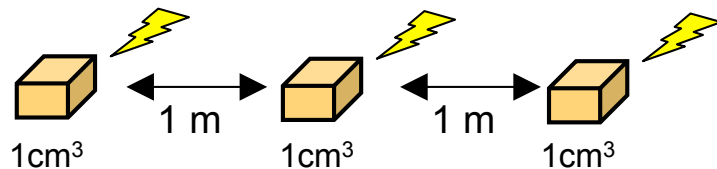
→ Sensors = 13M x 150 = 2 Billion / year

→ Average Spacing = 1 m

10 mW x 1 Trillion (Simultaneously)

→ 1000 万kW (10M kW)

→ Equiv. to 10 Nuclear Power Stations / Year / Earth



Bluetooth Class-3 (1mW)

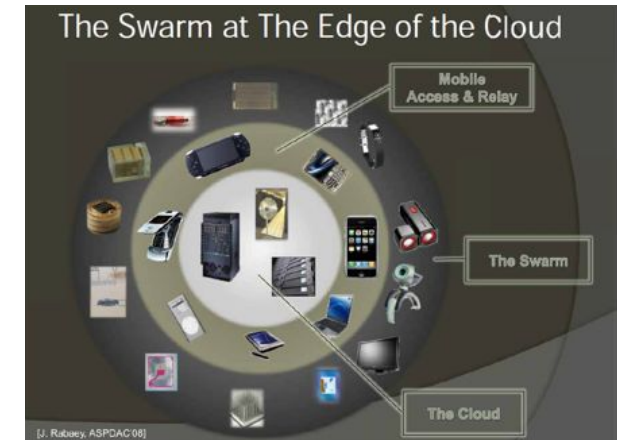
Functions Needed

- Energy Harvester-type Power Supply
- Sensing
- Time & Location by GPS
- Wireless Signal-out

予備資料： 省エネ効果

1. 本格的トリリオン・センサ時代に必要な膨大な電力を供給

- 10mWセンサ × 1兆個 = 1000万kW
- さらに通信・データ処理の電力
- センサ・通信・解析が新たに要求する電力は、原子力発電所10基分以上の未利用電力に相当



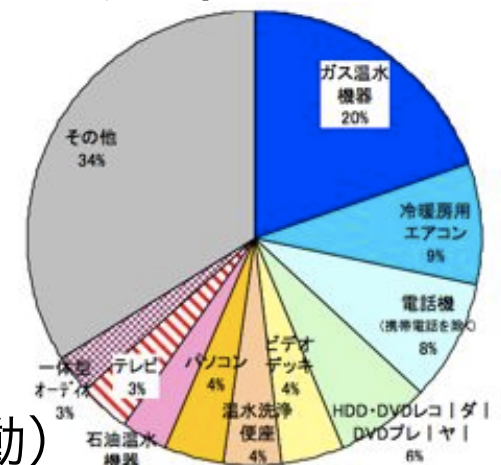
J. Rabaey APSDAC08

2. 家電製品の待機電力（228 kWh／年・世帯、¥5,000）の削減

- ガス温水機 (内訳：19%)
- テレビ (内訳：10%)
- エアコン (内訳：8%)

省エネルギーセンター平成24年度エネルギー使用合理化
促進整備事業（待機時消費電力調査）報告書

- 振動検出型のWakeUpセンサとして利用
- エナジーハーベストのマルチモーダル化（光＋振動）
- 主電源オフで現状から26～42%の削減効果



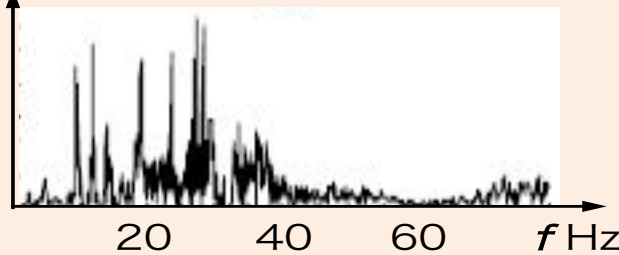
2. 研究開発コンセプト (1) 研究開発の内容 発電方式の比較

方式	環境振動			太陽光	熱	電磁波	風
	静電 (本研究)	圧電	電磁石				
エネルギー密度 W/cm ²	中 10 ⁻³			中～大 10 ⁻⁴ 10 ⁻¹	小 10 ⁻⁵ (～室温)	小 10 ⁻⁶	中 10 ⁻³
暗所・夜間の利用	○			×	○	○	○
封止の適合性	○ 完全封止			× 入射窓 要清掃	○ 完全封止	○ 完全封止	× 汚染による 劣化
組立の必要性	○ モノリシック	○ モノリシック	× 永久磁石 組立	○ モノリシック	× ペルチェ素 子組立	× コイル 組立	× 振動板 組立
適用周波数	低～高	高	高	—	—	—	—
備考	バネと電極を独立で設計可能。低周波数に対応可能。 機械歪による発電は低周波数では電圧を取り出せない。			低周波数 ↓ $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ 剛性低い ↓ h ↓ 薄い 歪小さい ↓ ϵ			

予備資料： 振動発電方式の比較

Accel m/s²

0.3
0.2
0.1



低周波数・微小Gな環境振動スペクトルへの対応？

低周波数

f_0

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

剛性
低く
質量
重く

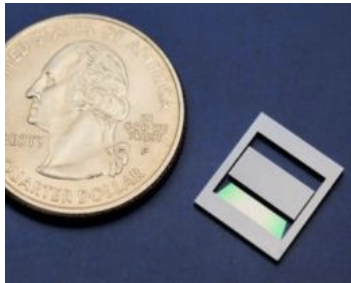
微小
加速度

$$F = m \cdot a$$

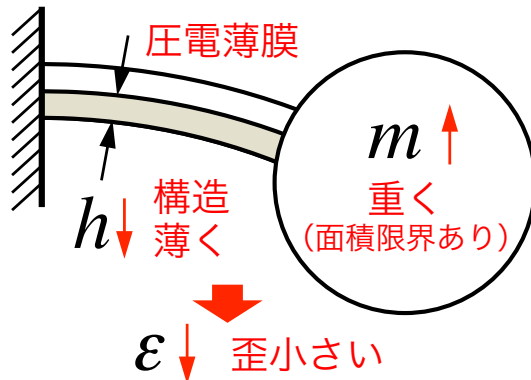
質量
重く

圧電方式

圧電膜の歪で発電



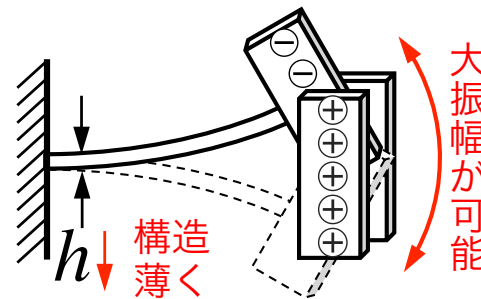
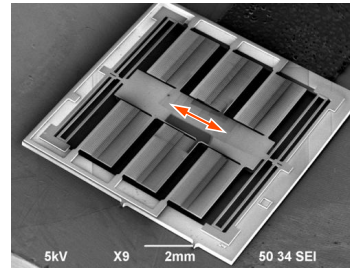
MicroGen System
50μW, 15V
100Hz, 0.1G
 $\Delta f < 2\text{Hz}$
15 mm x 15 mm



- 薄い梁では歪が小さく、圧電発電は不向き
- 発電量が面積に比例するため、小型化に不向き

静電方式

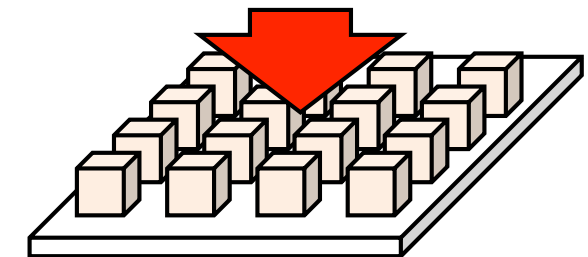
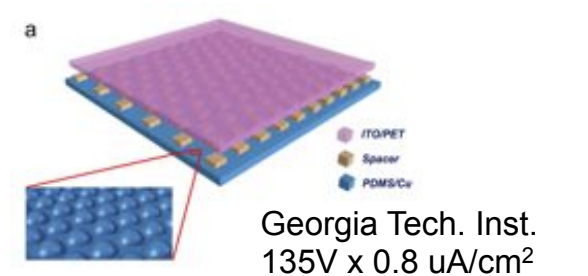
電極の相対的動きで発電



- 薄い梁で電極を大きく振ることにより、効率よく発電
- 微細化による電極数・表面積拡大で、小型でも容量大

摩擦発電

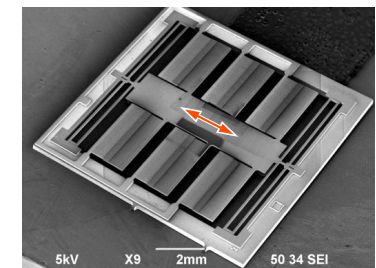
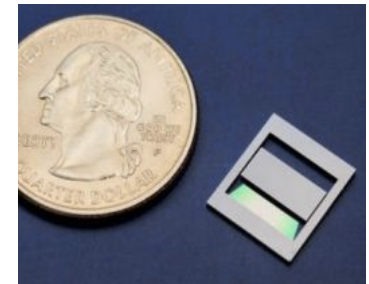
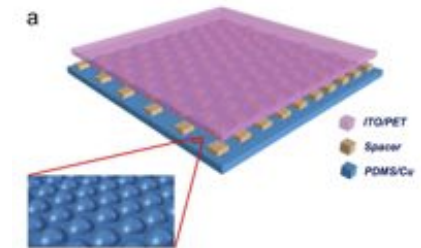
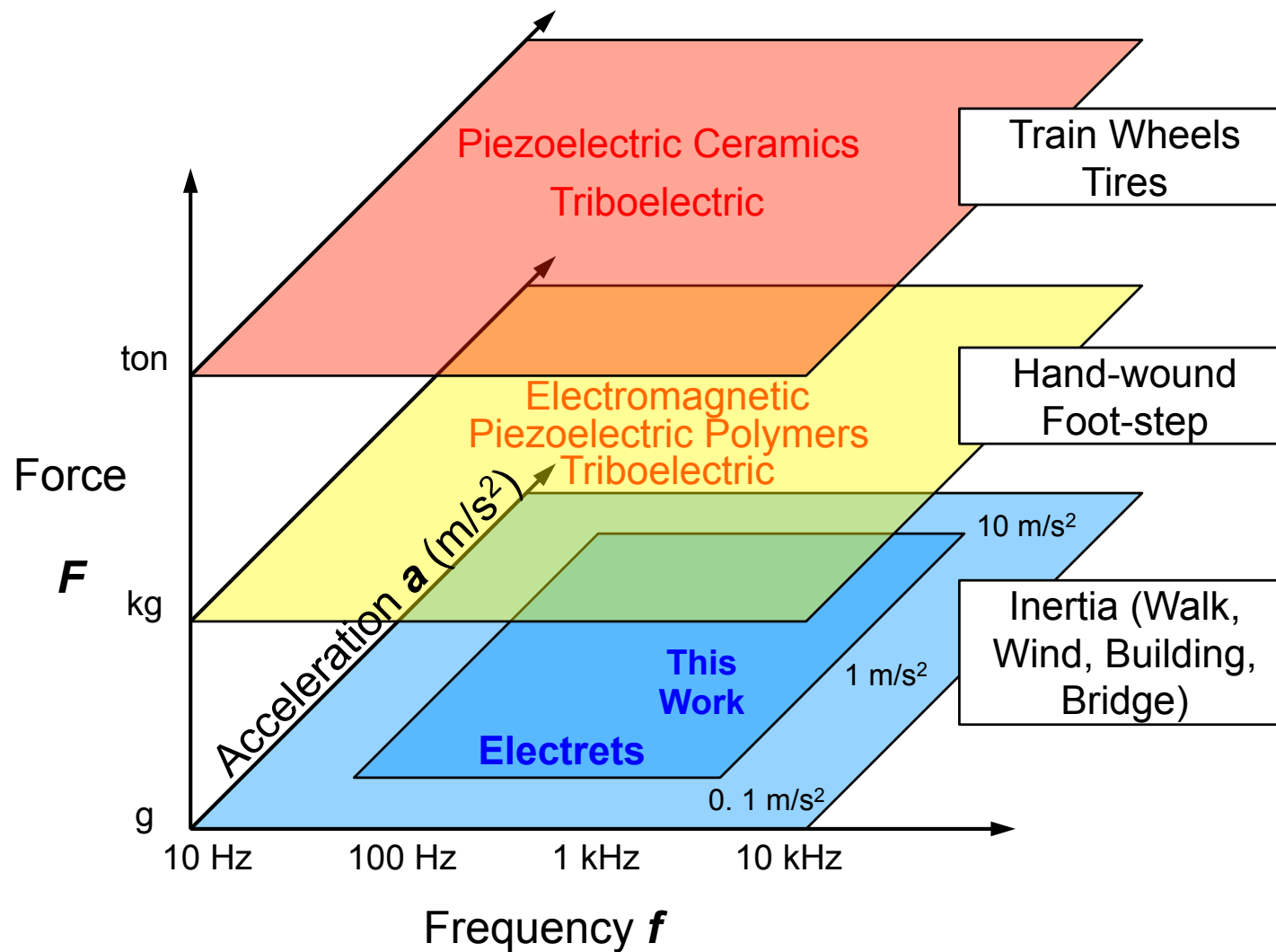
摩擦起電力で発電



PDMS $E = 1.5\text{MPa}$
 $\varepsilon = 10\% \rightarrow 1.5\text{ kg/cm}^2$

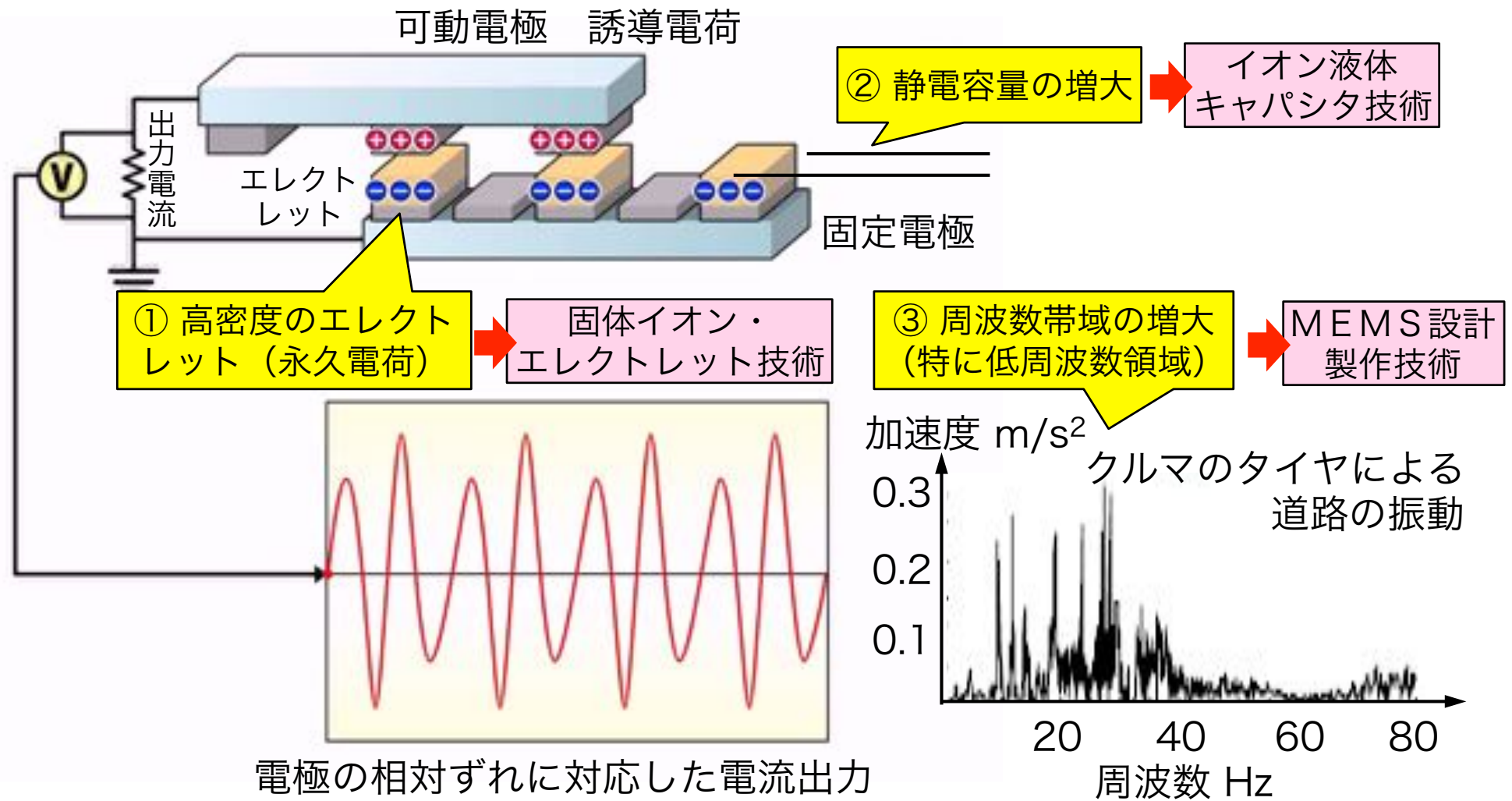
- 大きな電圧が出ているが、実は強い力で押している
- 環境振動発電には不向き

予備資料： 振動発電の比較(「力」の大きさを考慮)



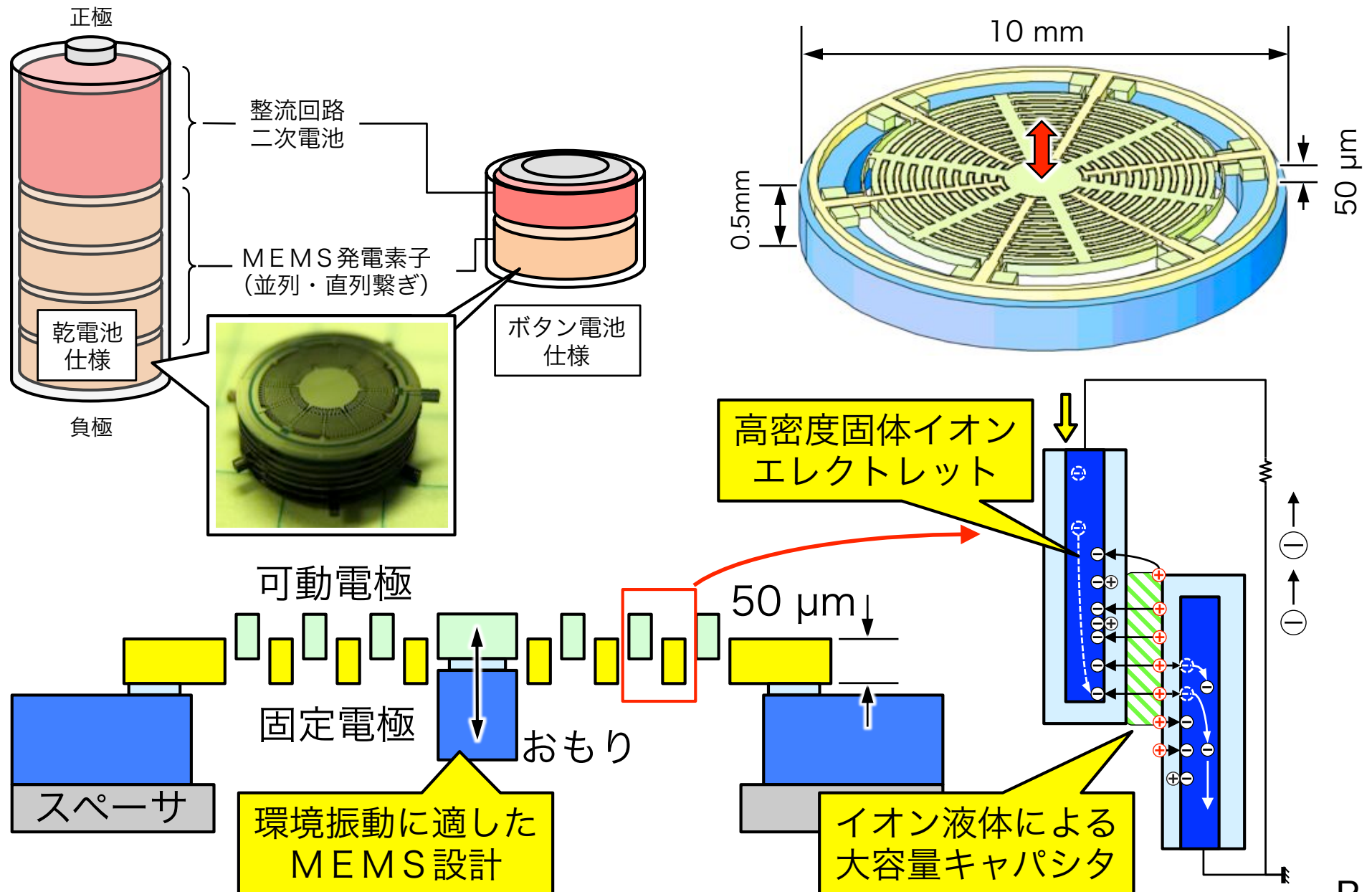
2. 研究開発コンセプト (2) 技術的課題・解決手段

小型振動発電素子の特性を現在の μW から 10mW に飛躍的に改善する技術を追究



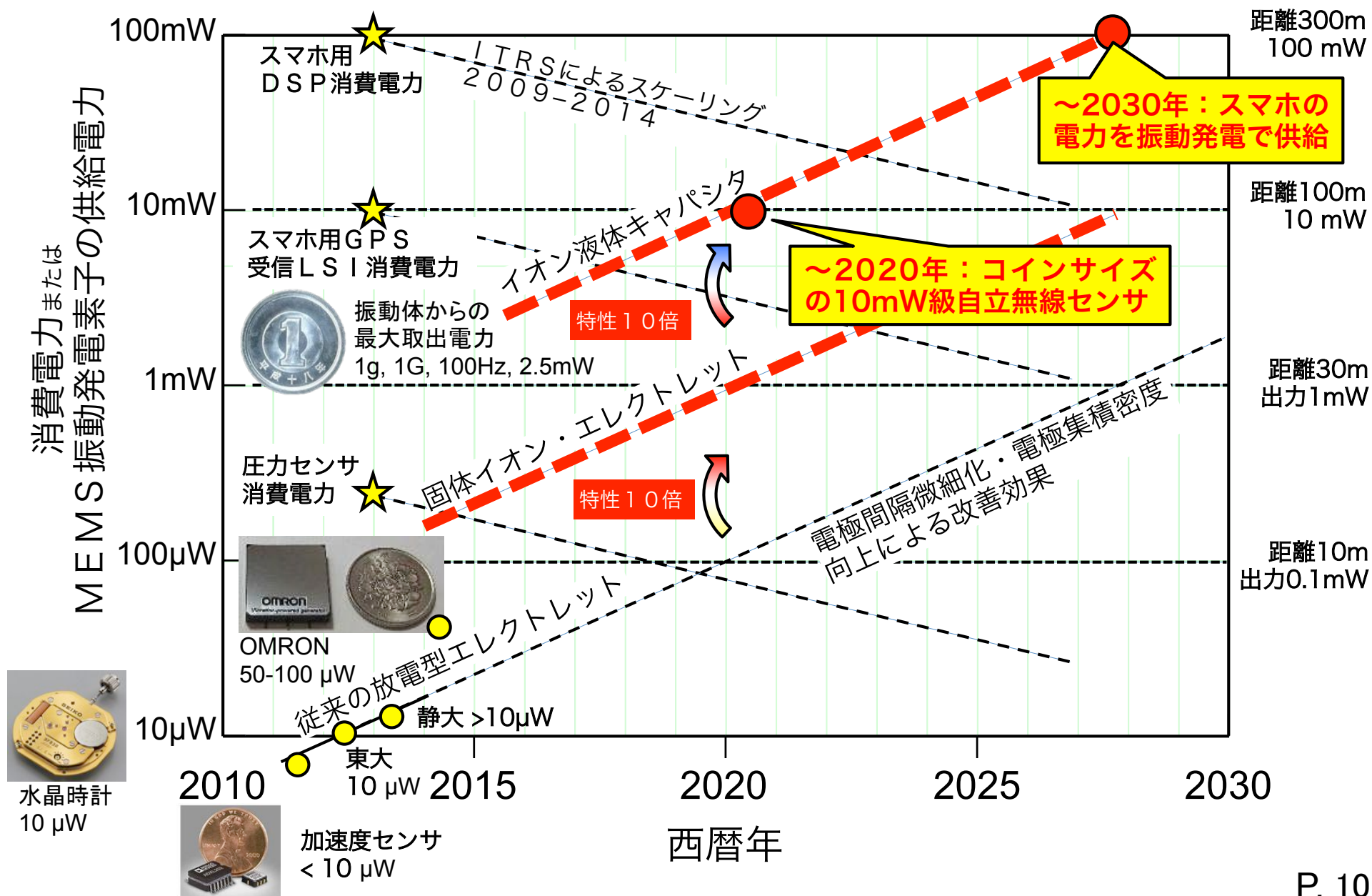
2. 研究開発コンセプト (3) 実用化イメージ

MEMS型振動発電素子 (10mW~100mW) で、従来の乾電池を置き換える



2. 研究開発コンセプト (4) インパクト

環境振動発電で2020年に10mW(無線センサ)、2030年に100mW(スマホ)を実現



予備資料： 櫛歯電極による発電効果

SOI Height

DRIE Rate

$$H_{\text{SOI}} \Big|_{\text{Const Cost}} \propto R_{\text{DRIE}}$$

Electrode Width (Top)

Width (Bottom)

$$W_{\text{ELEC}} = 2H_{\text{SOI}} \sin(\theta - \pi / 2) + W_{\text{CORE}}$$

Verticalness

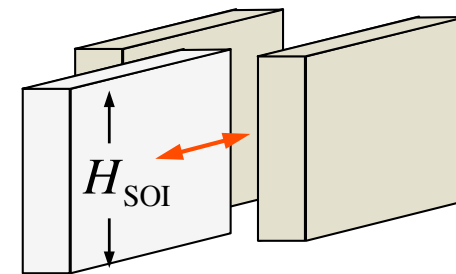
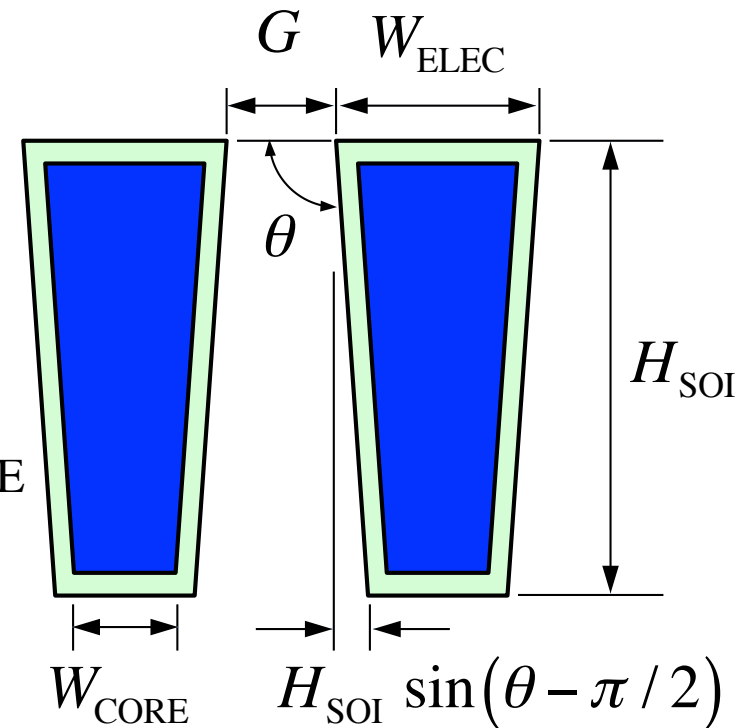
Number of Electrodes

$$N \propto \frac{1}{G + W_{\text{ELEC}}}$$

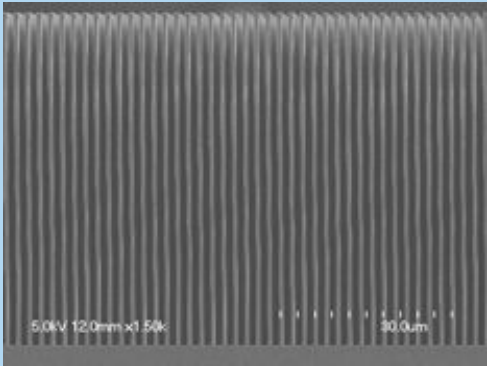
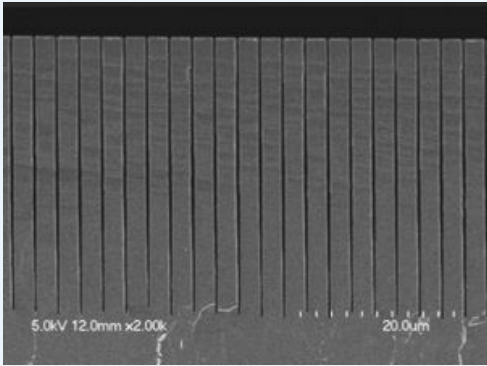
Gap

Output Power in Given Device Area

$$P \propto \frac{N \cdot H_{\text{SOI}}}{G} \propto \frac{H_{\text{SOI}}}{\{G + 2H_{\text{SOI}} \sin(\theta - \pi / 2) + W_{\text{CORE}}\} \cdot G}$$

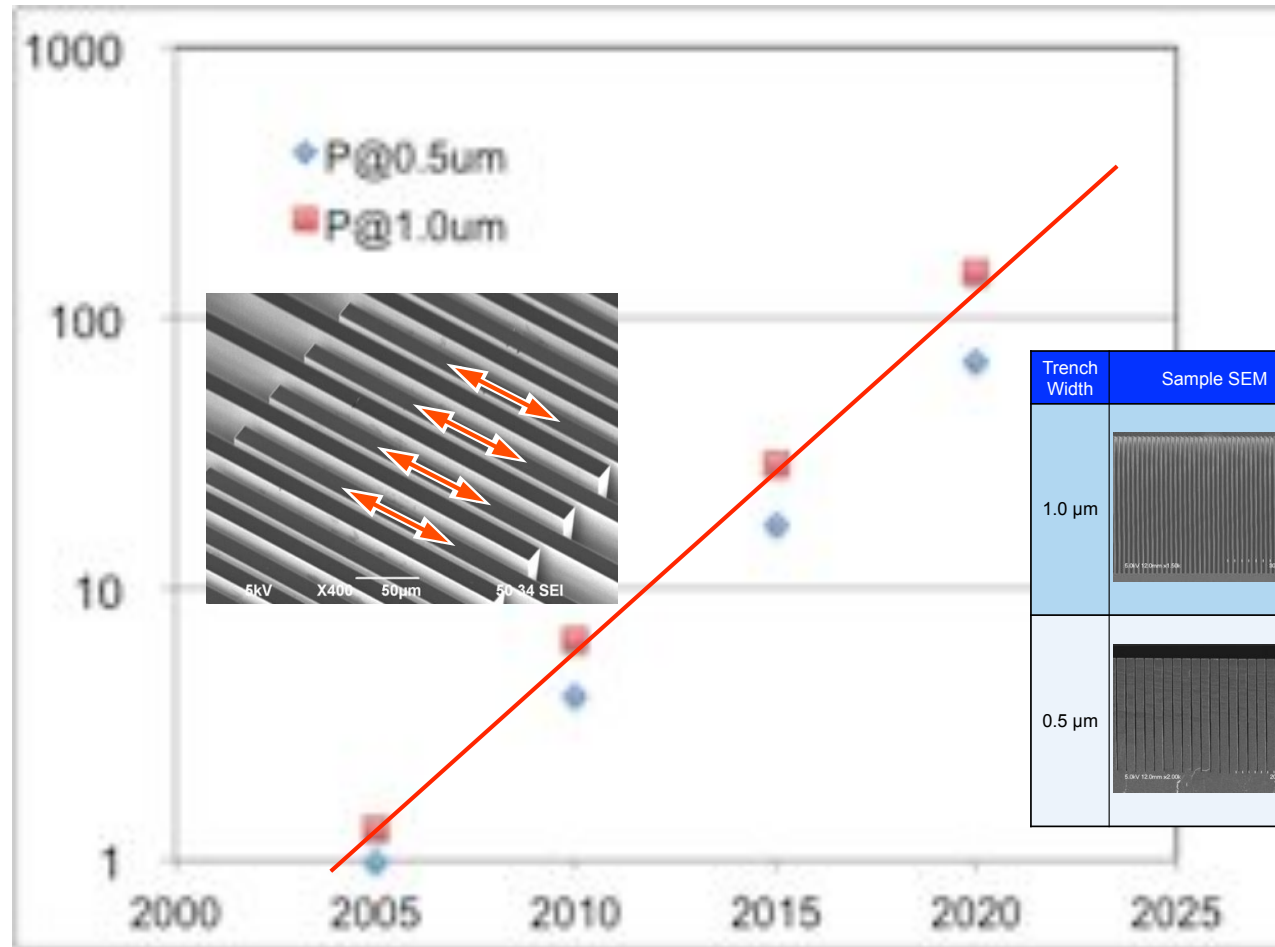


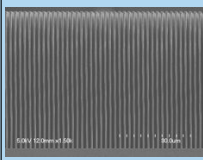
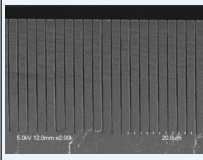
Data Courtesy: SPP Technologies Co., Ltd

Trench Width	Sample SEM	Parameter	2010	2015	2020
1.0 μm		Depth	50 μm	100 μm	130 μm
		Aspect Ratio	50	100	130
		Etch Rate	> 2.0 $\mu\text{m}/\text{min}$	> 1.2 $\mu\text{m}/\text{min}$	> 1.0 $\mu\text{m}/\text{min}$
		Angle	90 $\pm$ 0.2°	90 $\pm$ 0.2°	90 $\pm$ 0.2°
0.5 μm		Depth	30 μm	60 μm	75 μm
		Aspect Ratio	30	120	150
		Etch Rate	> 0.8 $\mu\text{m}/\text{min}$	> 0.7 $\mu\text{m}/\text{min}$	> 0.6 $\mu\text{m}/\text{min}$
		Angle	90 $\pm$ 0.2°	90 $\pm$ 0.2°	90 $\pm$ 0.2°

予備資料： DRIE性能ロードマップからの予測

15年で100倍の発電性能向上

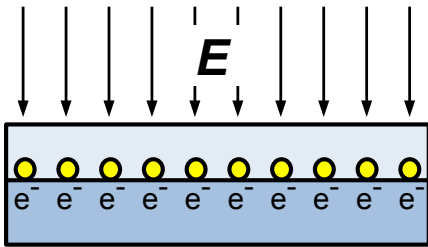
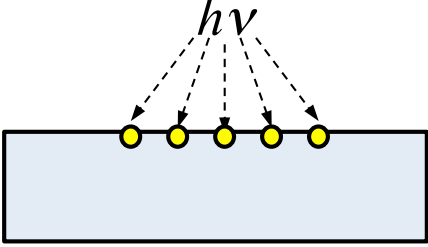
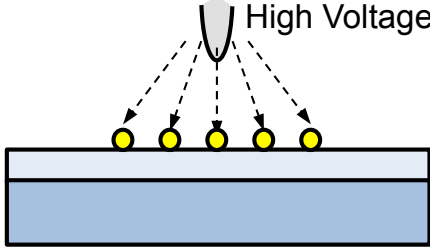


Trench Width	Sample SEM	Parameter	2010	2015	2020
1.0 μm		Depth	50 μm	100 μm	130 μm
		Aspect Ratio	50	100	130
		Etch Rate	> 2.0 μm/min	> 1.2 μm/min	> 1.0 μm/min
		Angle	90±0.2°	90±0.2°	90±0.2°
0.5 μm		Depth	30 μm	60 μm	75 μm
		Aspect Ratio	30	120	150
		Etch Rate	> 0.8 μm/min	> 0.7 μm/min	> 0.6 μm/min
		Angle	90±0.2°	90±0.2°	90±0.2°

SPT

$$P \propto \frac{H_{\text{SOI}}}{\left\{ G + 2H_{\text{SOI}} \sin(\theta - \pi / 2) + W_{\text{CORE}} \right\} \cdot G}$$

3. 実施計画 — (1) 実施計画の概要 エレクトレット比較

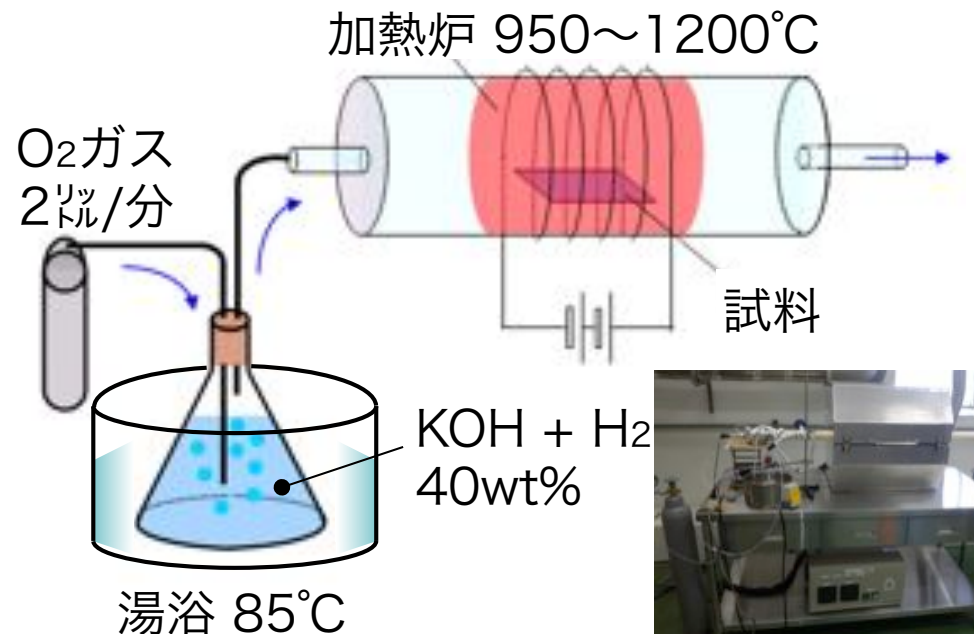
エレクトレット方式	固体イオンエレクトレット (本研究)	軟X線法 (NHK放送技研)	コロナ放電法 (旭硝子、他)
デバイス形成原理	 固体イオンの分極処理	 X線による電子剥奪	 電荷注入・表面吸着
面電荷密度	10 mC /m ²	0.1~1 mC /m ²	0.1~1 mC /m ²
側壁への形成	可能 全表面・側面に帯電可	中程度 表面近傍のみ	中程度 広ギャップのみ
ナノギャップ・高アスペクト化	優良 ナノ化により特性改善	中程度 側壁に有機膜塗布	困難 狭ギャップで放電せず
製造コスト	安価 高スループット	高価 X線源・真空装置	中程度
ウエハ均一性	優良 熱酸化膜の均一性 <1%	困難 側壁に有機膜塗布	困難 放電イオン密度不均一
荷電電圧の設計自由度	優良 部位・電圧制御可	中程度 可能だが試作例なし	不可 一括形成、単一電圧
MEMSプロセス整合性	優良 完全封止可能	中程度 封止可能	不可 組立工程不可避

3. 実施計画 — (1)実施計画の概要 研究項目A

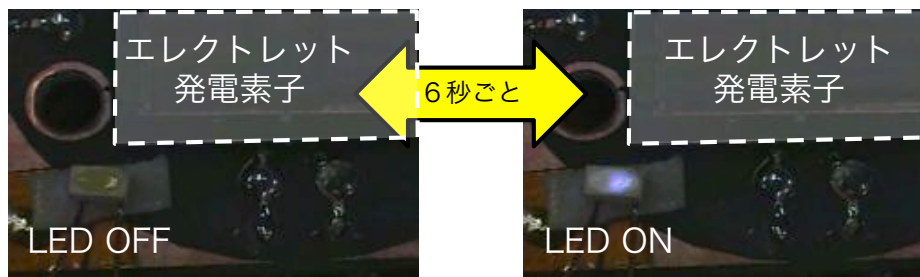
研究項目A. 高密度固体イオンエレクトレットのエネルギーハーベスタ应用

研究担当 静岡大学 電子工学研究所 橋口 原

A-1. 高電荷密度シリコンエレクトレットの形成 (1年目)



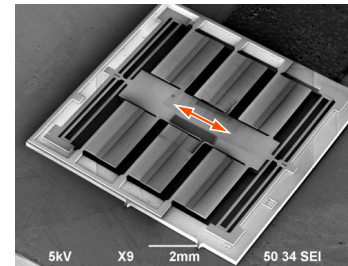
熱酸化膜への不純物ドーピングによるエレクトレット形成



振動発電でLED点灯 (定常1 μ W、瞬間100 μ W)

A-2. エレクトレット振動発電素子のパッケージ技術と信頼性評価 (おもに2年目)

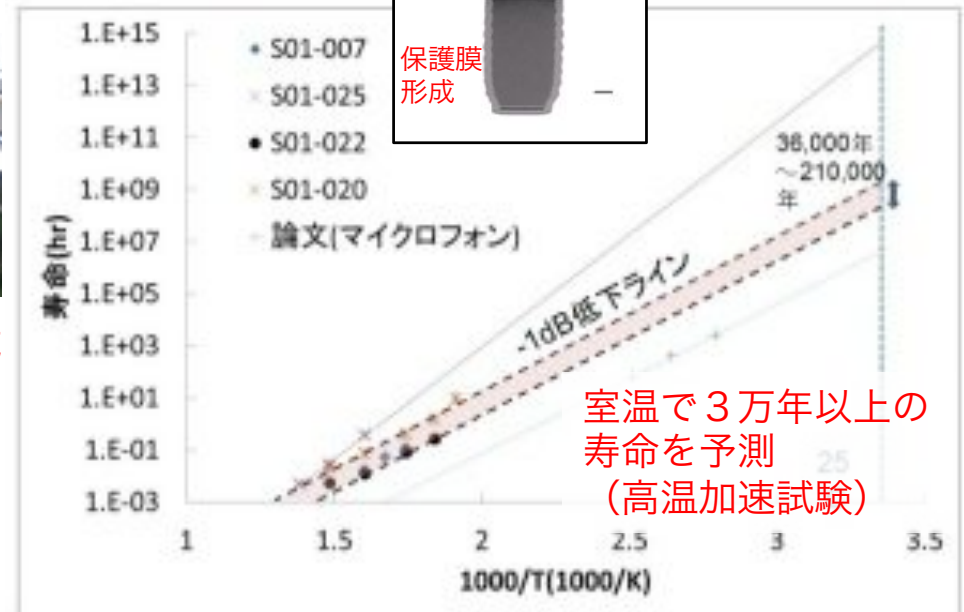
発電素子・試作版



エレクトレット表面をALD膜でパッシベーション

シリコン電極

保護膜形成



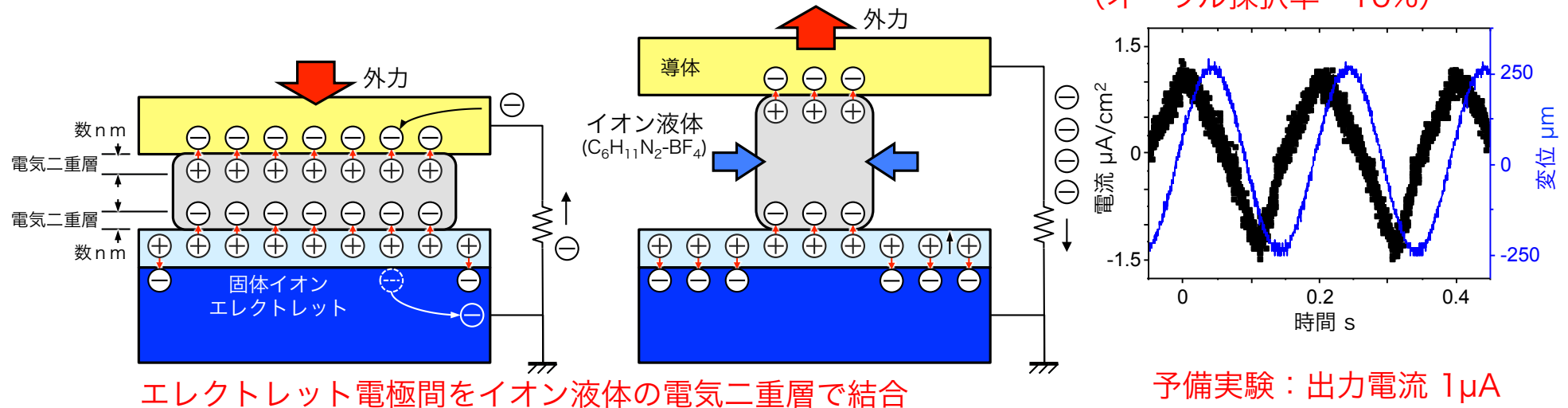
3. 実施計画 — (1)実施計画の概要 研究項目B

研究項目B. 大容量イオン液体可変キャパシタ技術のエネルギーハーベスタ応用

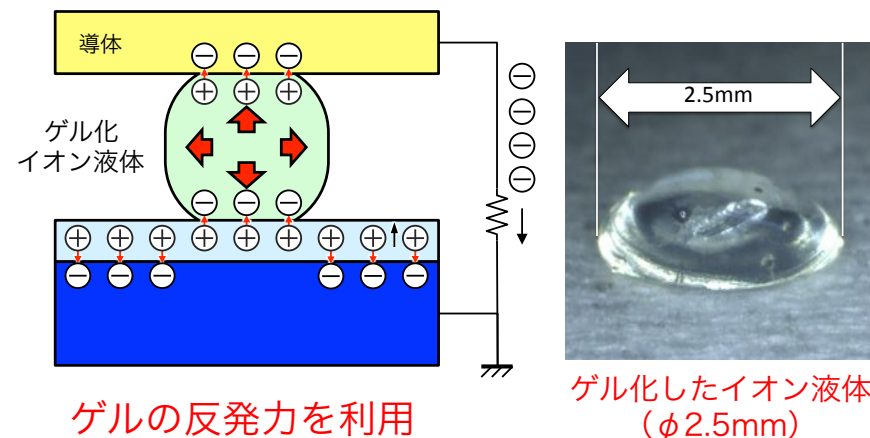
研究担当 鷺宮製作所 R&Dセンター 三屋裕幸

B-1. イオン液体のエネルギーハーベスタ応用検討 (1年目)

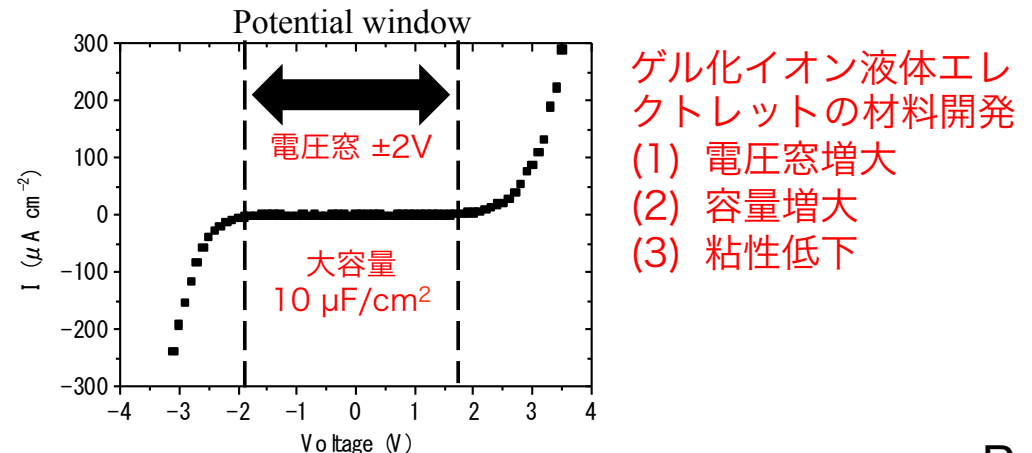
国際会議MEMS15論文採択決定
(オーラル採択率~10%)



B-2. イオン液体ゲル化の検討 (1年目)



B-3. ゲル化したイオン液体のエレクトレット化 (2年目)

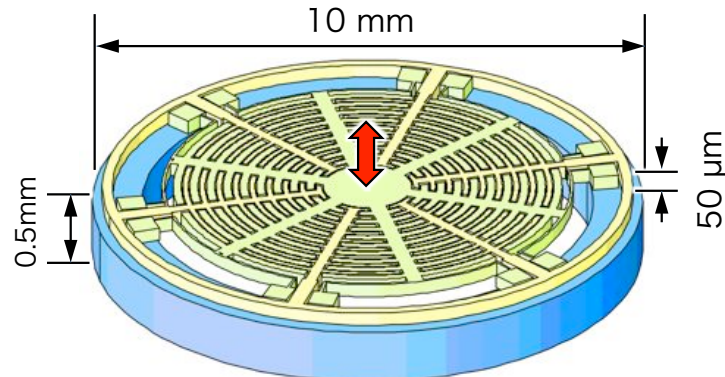


3. 実施計画 — (1)実施計画の概要 研究項目C

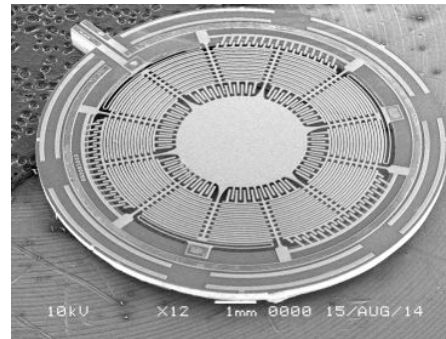
研究項目C. 高効率エネルギーハーベスタの開発

研究担当 鷺宮製作所 → 再委託 東京大学生産研 年吉 洋

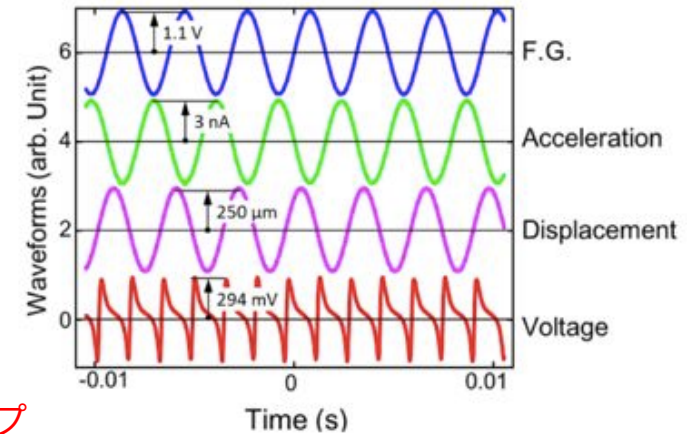
C-1. エネルギーハーベスタの設計 (1年目)



環境振動(10-40Hz)に適した
バネ-マス系の設計

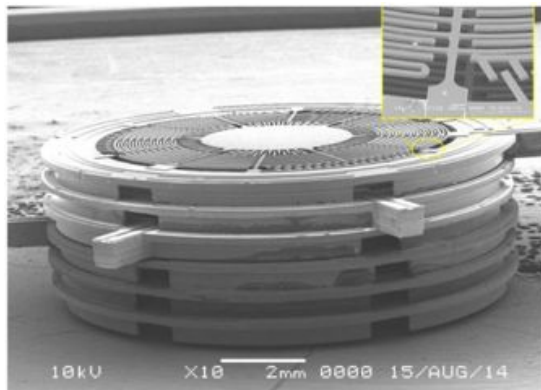
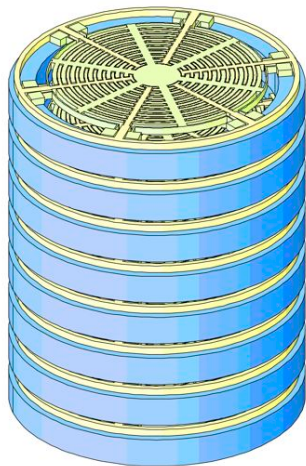


DRIEによるサブミクロン・ギャップ
チップあたり電極数の増大



等価回路モデル検証済

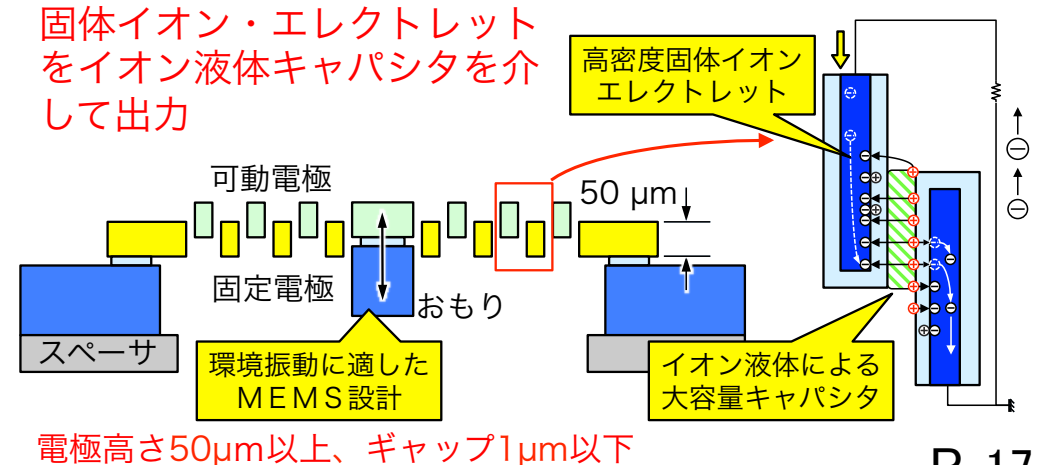
C-2. エネルギーハーベスタの製作 (1-2年目)



積層化による出力増大

C-3. エネルギーハーベスタの評価 (2年目)

固体イオン・エレクトレット
をイオン液体キャパシタを介
して出力

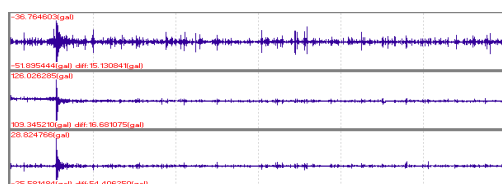


電極高さ50μm以上、ギャップ1μm以下

3. 実施計画 - (1) 実施計画の概要 研究項目D～F

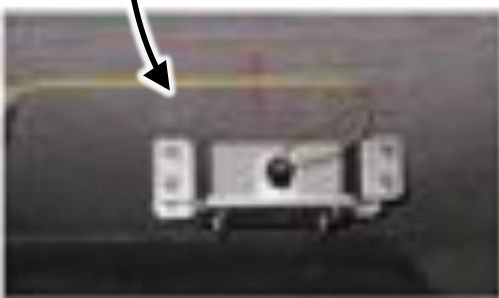
D. 交通インフラでの振動発電デバイスの導入開発（オムロン）

D-1. 交通インフラにおけるターゲット振動の調査と活用仮説立案（1～2年目）



社会インフラ振動源の探索と振動データ計測

D-2. 屋外長期動作におけるエネルギーハーベスタの活用例の提言（2年目）



既存の無線センサに振動発電エネルギーハーベスタ素子を搭載してシステム評価

E. オフィス・工場等での環境発電デバイスの活用例提言（ダイキン工業）

E-1. センサネットワーク用の端末の仕様抽出とアプリケーション開発（1年目）



ウェアラブルセンサ端末用の振動発電素子

オフィス・工場の快適環境実現

E-2. 待機電力の削減に向けたエネルギーハーベスタの活用例の提言（2年目）



環境振動、空気の流れ等を利用したマルチモーダル型発電・人感センサ



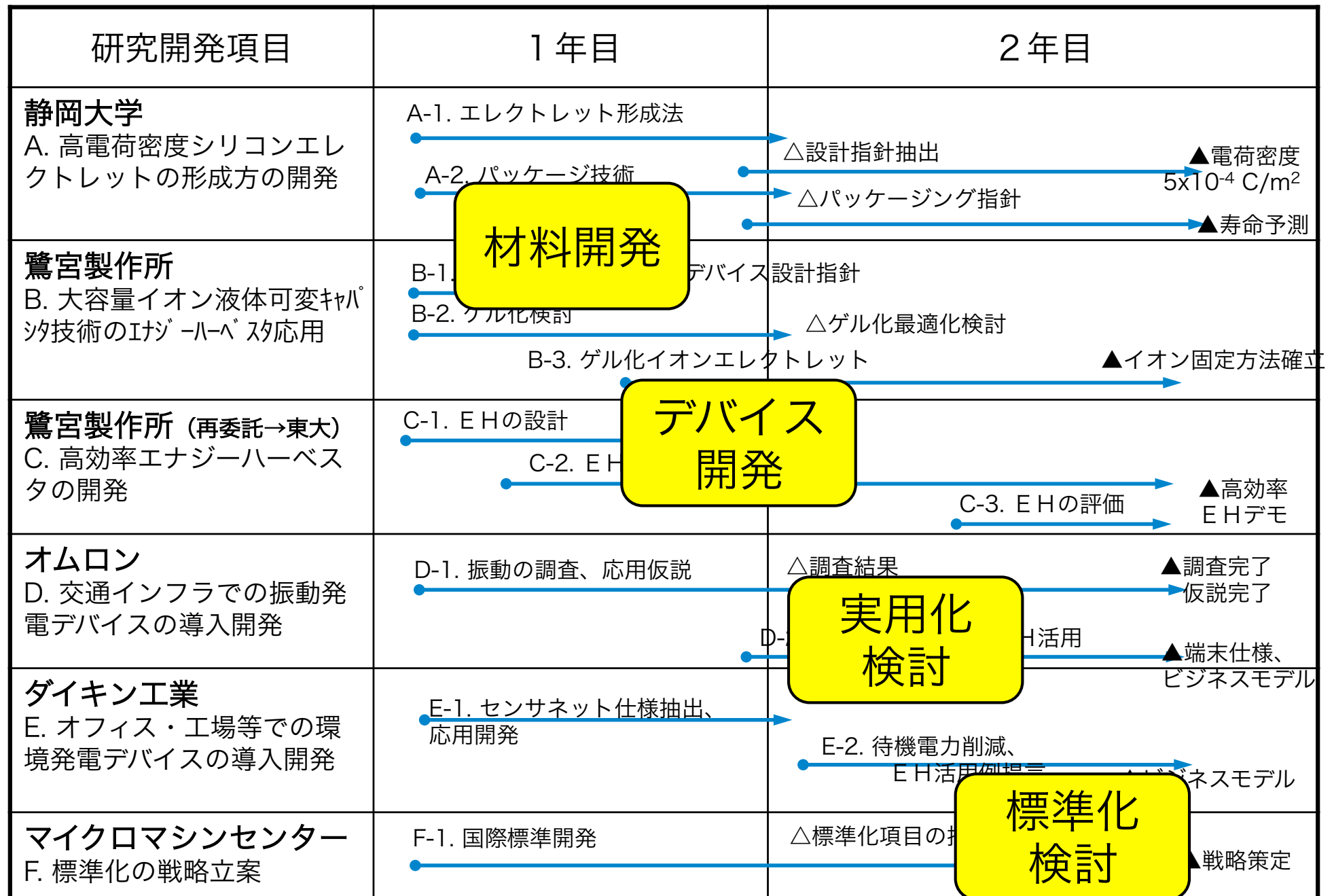
F. 標準化の戦略立案（マイクロマシンセンター）

F-1. 標準化の戦略立案（1～2年目）

特性測定項目、測定方法の標準化
IEC国際標準化会議での情報収集・意見交換
IEC/SC47Fへの提言
エネルギーハーベスタ認証制度によるイニシアチブ



3. 実施計画 — (1)実施計画の概要 全体像



3. 実施計画 — (2) 研究実施体制・責任者等

