

ライフラインコアモニタリングシステムの研究開発

Development of Utility Infrastructure Core Monitoring System (UCoMS)

研究開発の目的

- **都市インフラ（ライフライン）**は、経験にもとづく目視・聴音点検が主体であり、近年各種の遠隔管理システムが進化しているとはいえ、普及については緒に就いたばかり。
- 病院、地域エネルギー供給施設等のインフラはその公共性も高く、その中核となる発電機、**ボイラ、ポンプ等の回転機器をコア**としたシステムの保全が都市機能の安定化・安全化に重要な役割を担う。
- 本研究開発では、ライフラインのコア設備の早期異常検知、健全性確保が行える、低コストの常時モニタリングシステムの開発を目的とする。

現状と課題

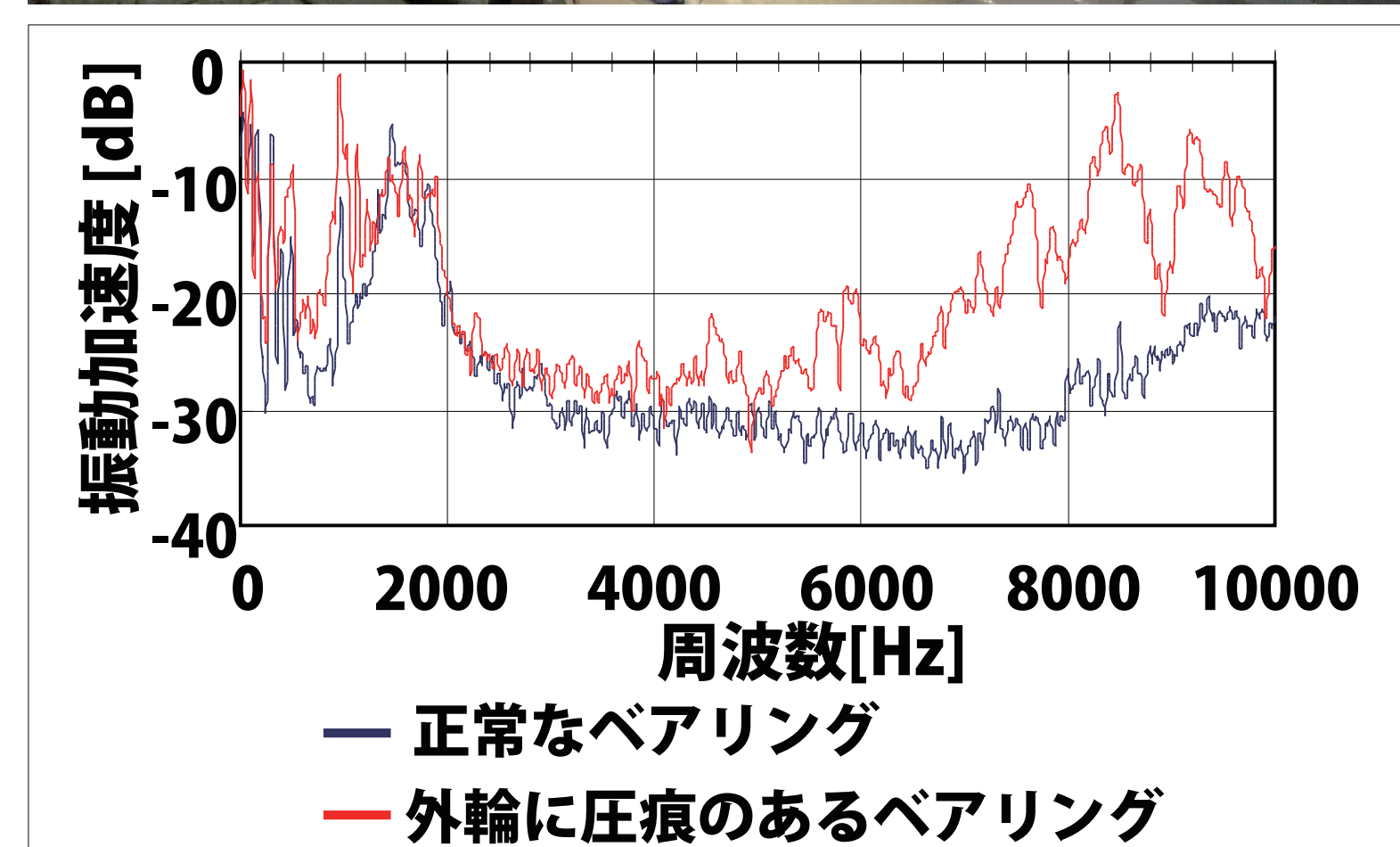
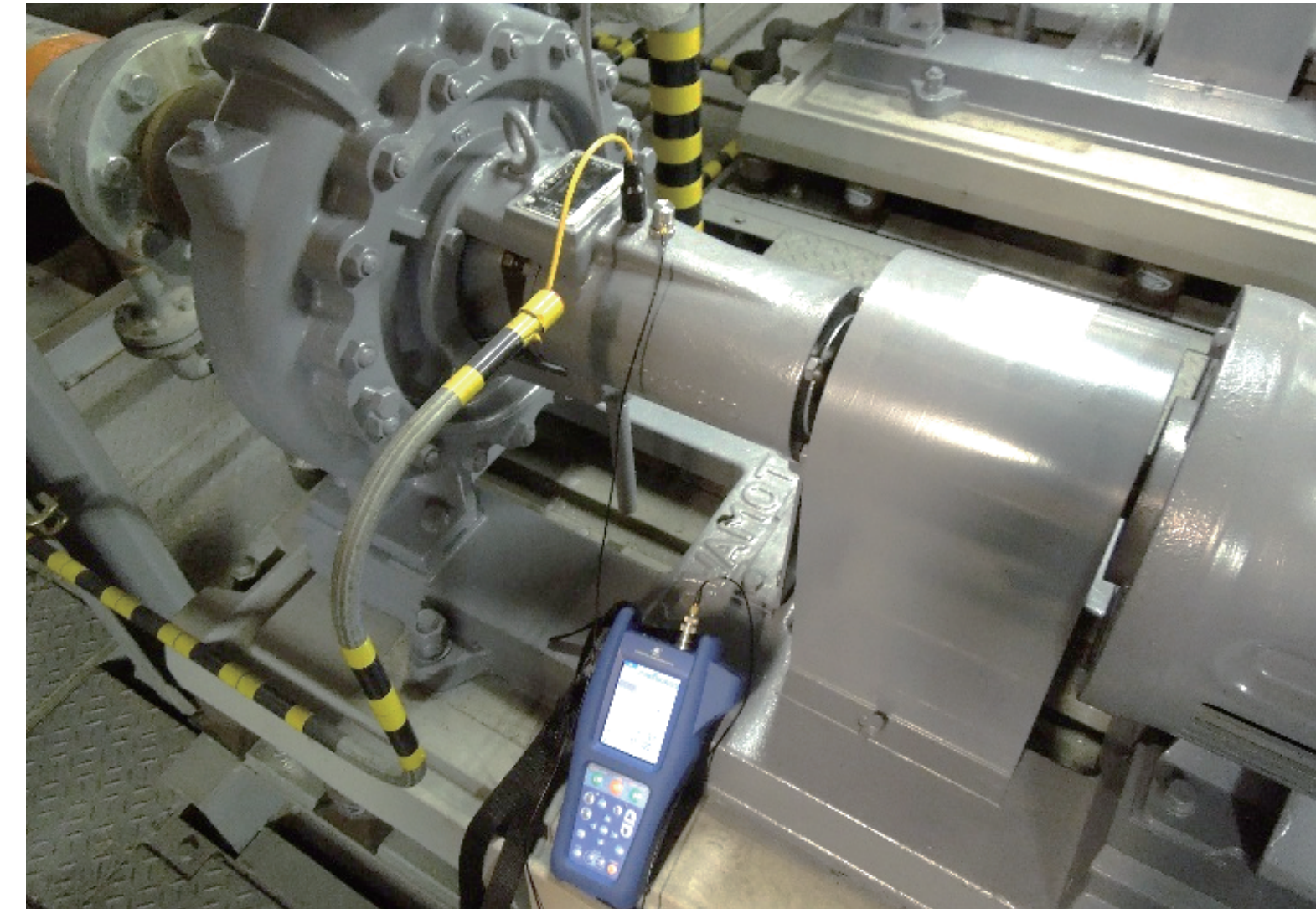
- エネルギー供給施設の心臓部にあたる回転機器は、月1回の定期点検、年2回の精密検査、日常は保守員が振動音や機器温度を確認
- 振動値の傾向管理、周波数解析による異常原因推定
- 有線モニタリングシステムの課題：敷設コストを含め100点程度のモニタリングシステムで1000～2000万円
- 無線ネットワークシステムの課題：センサ端末の電池交換によるメンテナンスコスト増大、遮蔽物・電磁波発生環境での通信性能の低下

課題解決のための取り組みと研究開発項目

- 限られたデータ量でモニタリングを可能にする技術
- 限られた発電量で自立動作する低コスト端末の開発
- 低コスト・低消費電力の高信頼性無線ネットワークシステム
- 低周波数域振動発電センサデバイス、鹿威し方式自立発電センシング
- 振動発電センサデバイスの低コスト化・量産技術
- 耐振性端末実装構造、低コスト設置方法、信頼性試験方法の開発
- 時刻同期型の省電力通信方式、再送を伴わない衝突回避制御方式
- 圧電振動発電センサデバイスを用いた監視技術、シームレスに処理するモニタリングシステムの開発

UCoMSの開発推進体制

- 研究開発コンソーシアムである**コアモニタリング研究体**で推進（研究体長：東京大学 新領域創成科学研究科 伊藤寿浩教授）
- センシング・発電デバイスの開発（担当：産業技術総合研究所）
- AIN圧電デバイスのウエハレベルパッケージ技術の開発（担当：マイクロマシンセンター）
- コアモニタリング用センサ端末の開発（担当：明星電気）
- コアモニタリング用ネットワークシステムの開発（担当：沖電気工業）
- コアモニタリングシステムの開発（担当：高砂熱学工業）
- コアモニタリングシステムの構築と実証実験（担当：高砂熱学工業）



コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発

研究のポイント：Point

- 回転機器からの微弱な振動を効率よく電力に変換する圧電MEMS振動発電センサデバイス
- 得られた電力を蓄電し端末を駆動する“鹿威し”方式超低消費電力アナログ回路技術

背景と目的：Background & Purpose

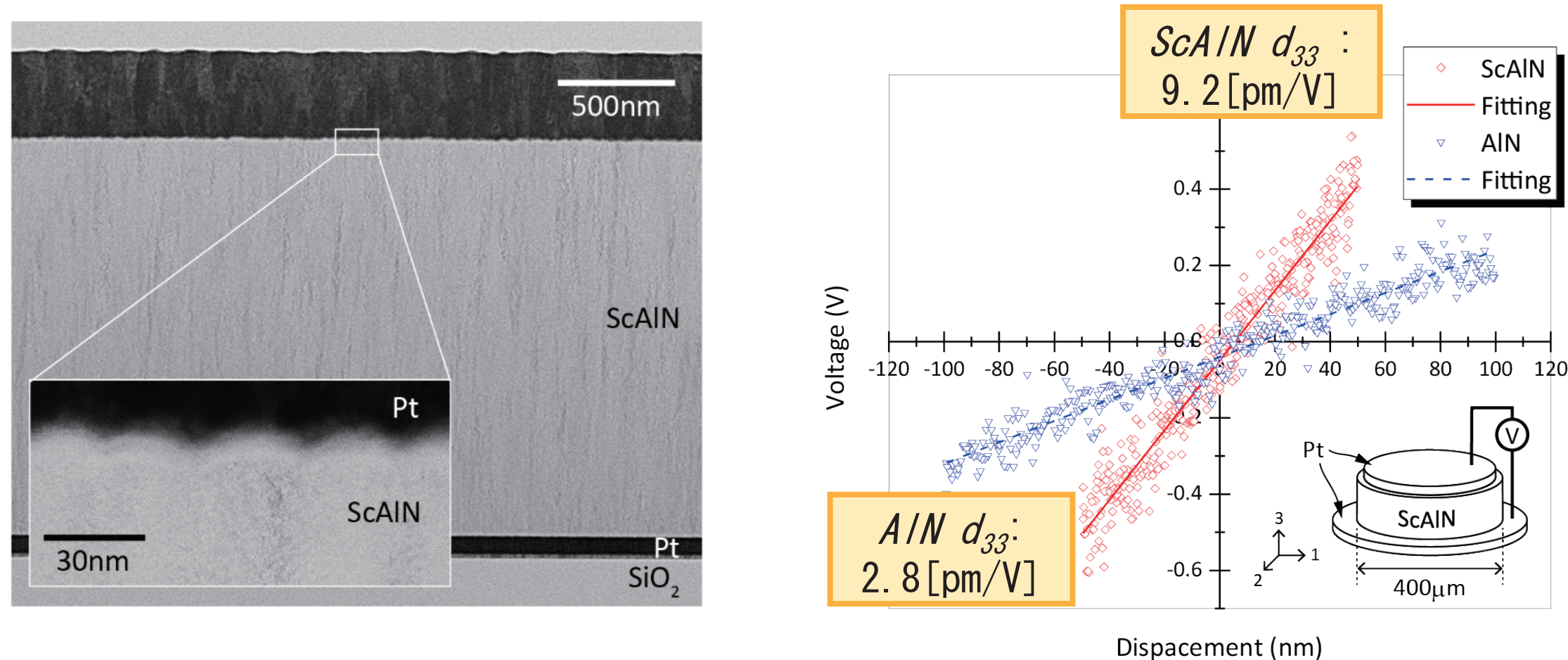
- 回転機器の振動をメンテナンスフリー(電池レス)で常時モニタリングする小型無線振動センサ端末を開発し、異常検知を自動化することで、保守費用の削減を行う。
- 振動発電による電池レス動作のためには、振動発電の高効率化と端末の低消費電力化の両立が必要。
- **目的**：高効率圧電MEMS振動発電デバイスの開発と鹿威し回路の低消費電力化を行い、電池レスの小型無線振動センサ端末を開発する。

研究の内容：Summary

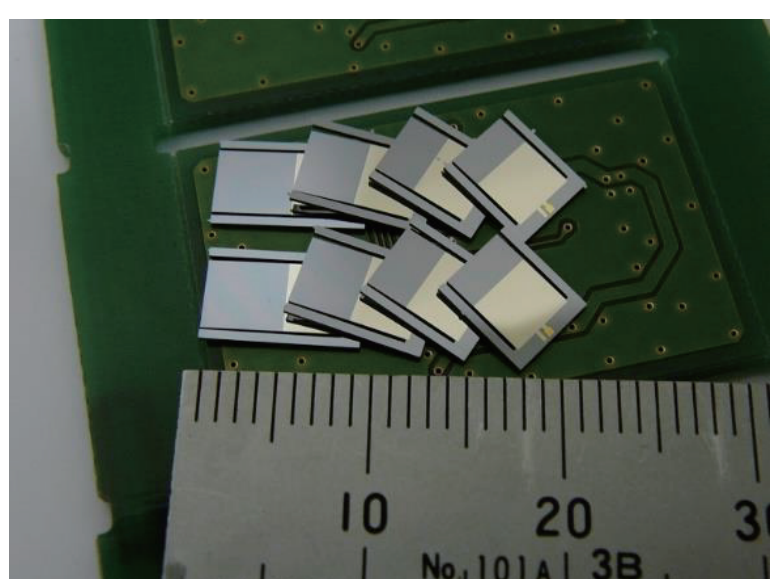
- 高効率圧電MEMS振動発電デバイスの開発
 - ・・・ScAlN圧電薄膜、低損失整流回路
- 鹿威し回路の低電力化
 - ・・・超低消費電力コンパレータと参照電圧生成回路
- **目標**
 - ・・・発電量@ $0.5\text{m/s}^2 > \text{消費電力}$

実験及び実証のデータ：DATA

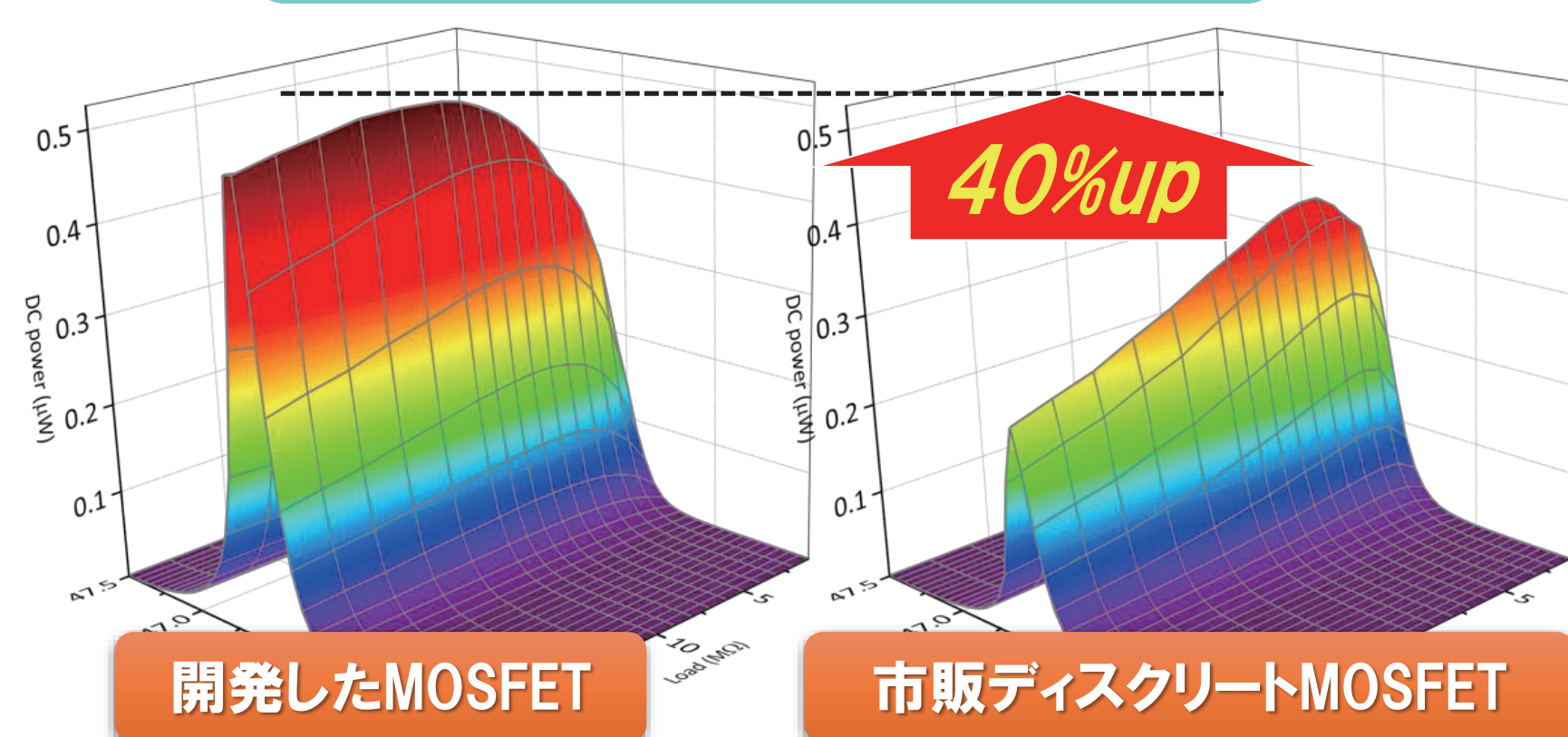
ScAlN薄膜：断面TEM像(左)、圧電定数測定結果(右)



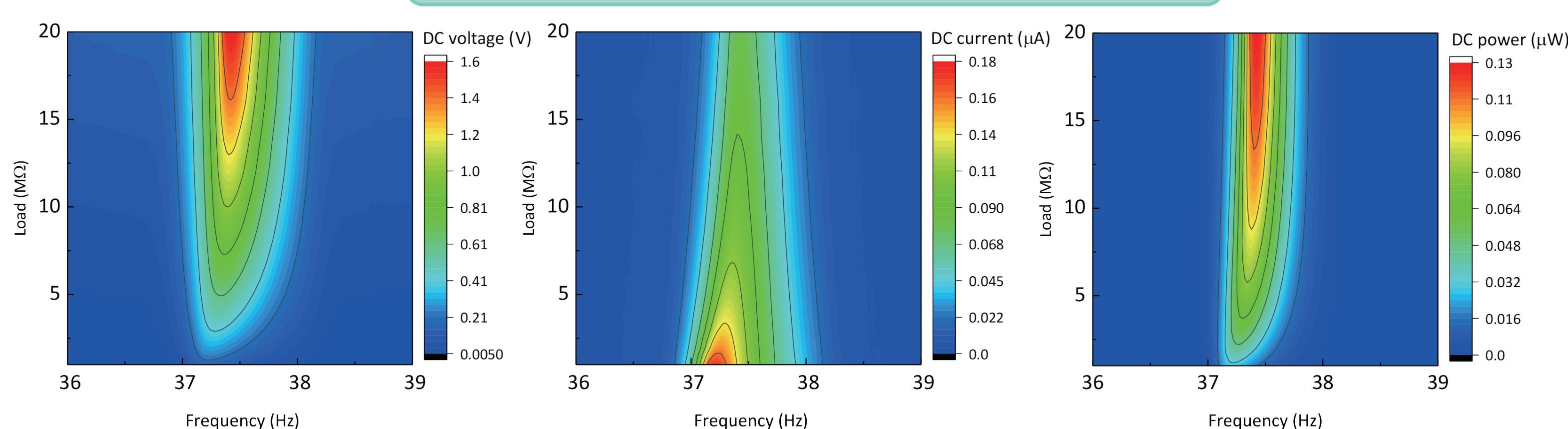
圧電MEMSプロセス技術：
試作されたデバイス



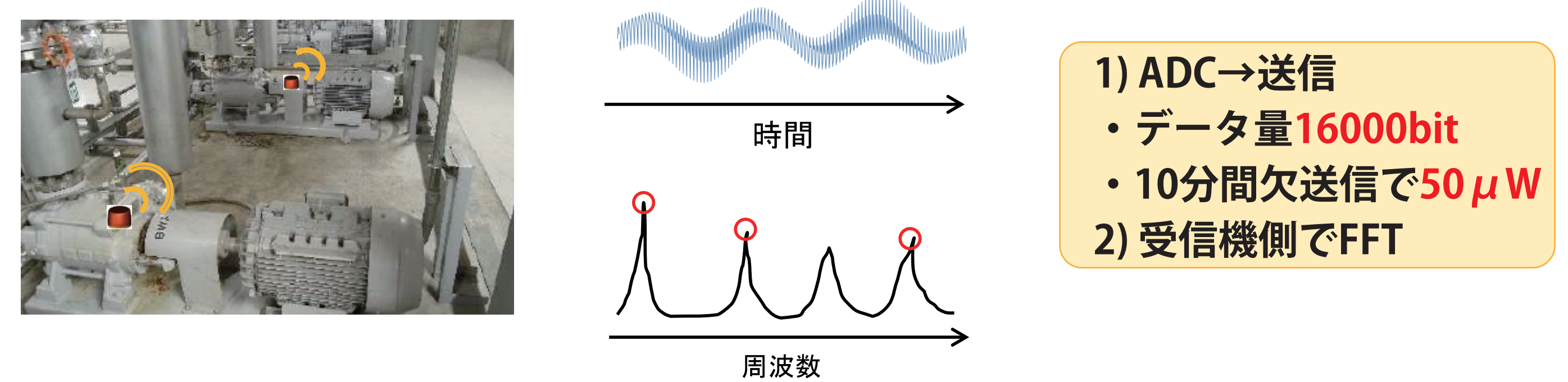
低損失整流回路：発電量比較



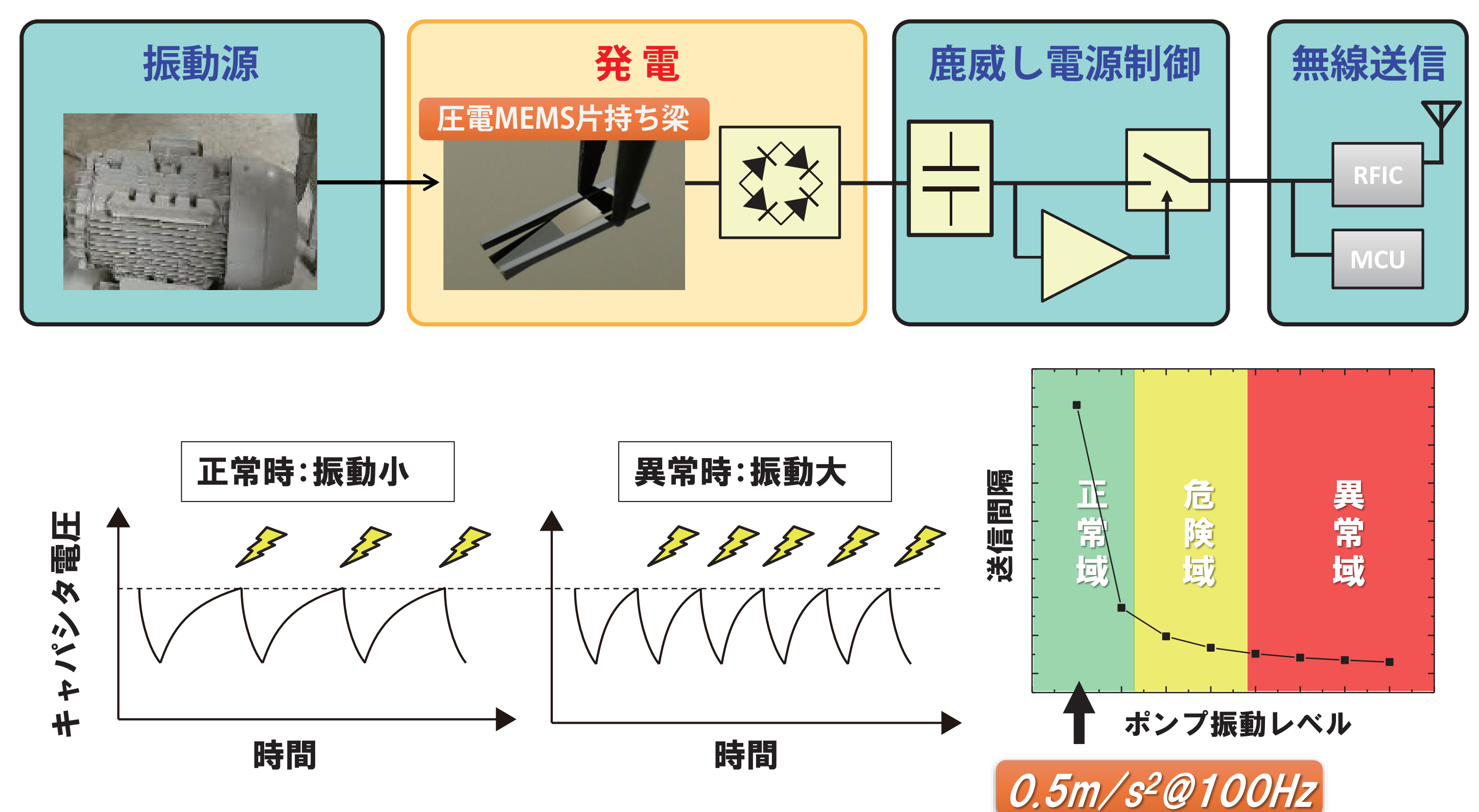
振動発電：電圧(左)、電流(中)、電力(右)



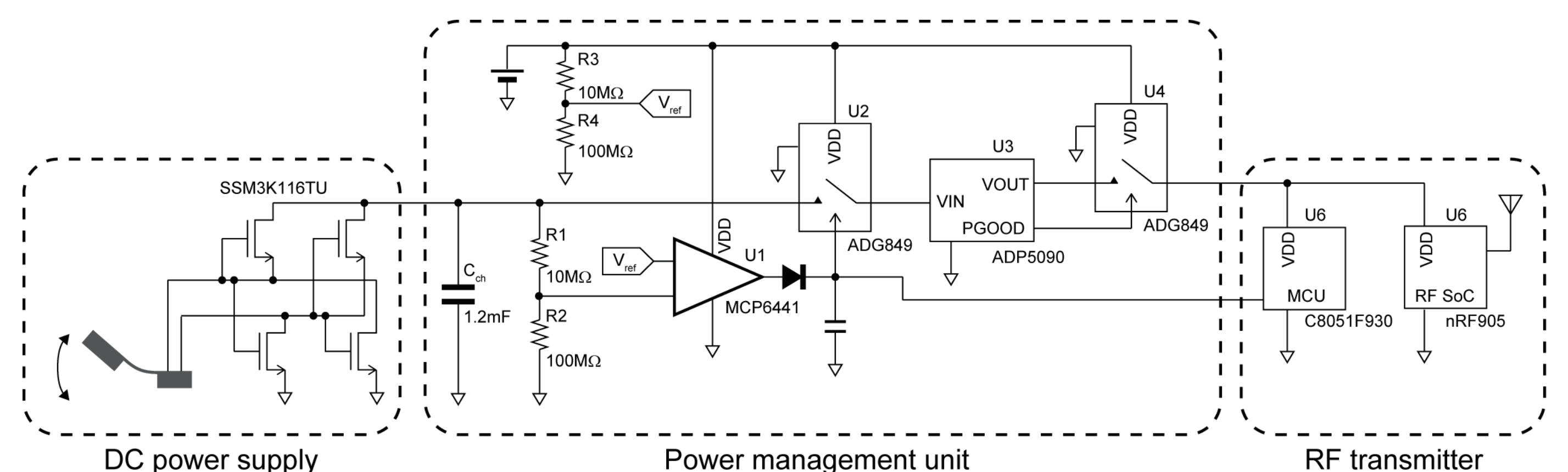
一般的な振動モニタリング



鹿威し方式(本研究開発)



端末全体の回路図と消費電力

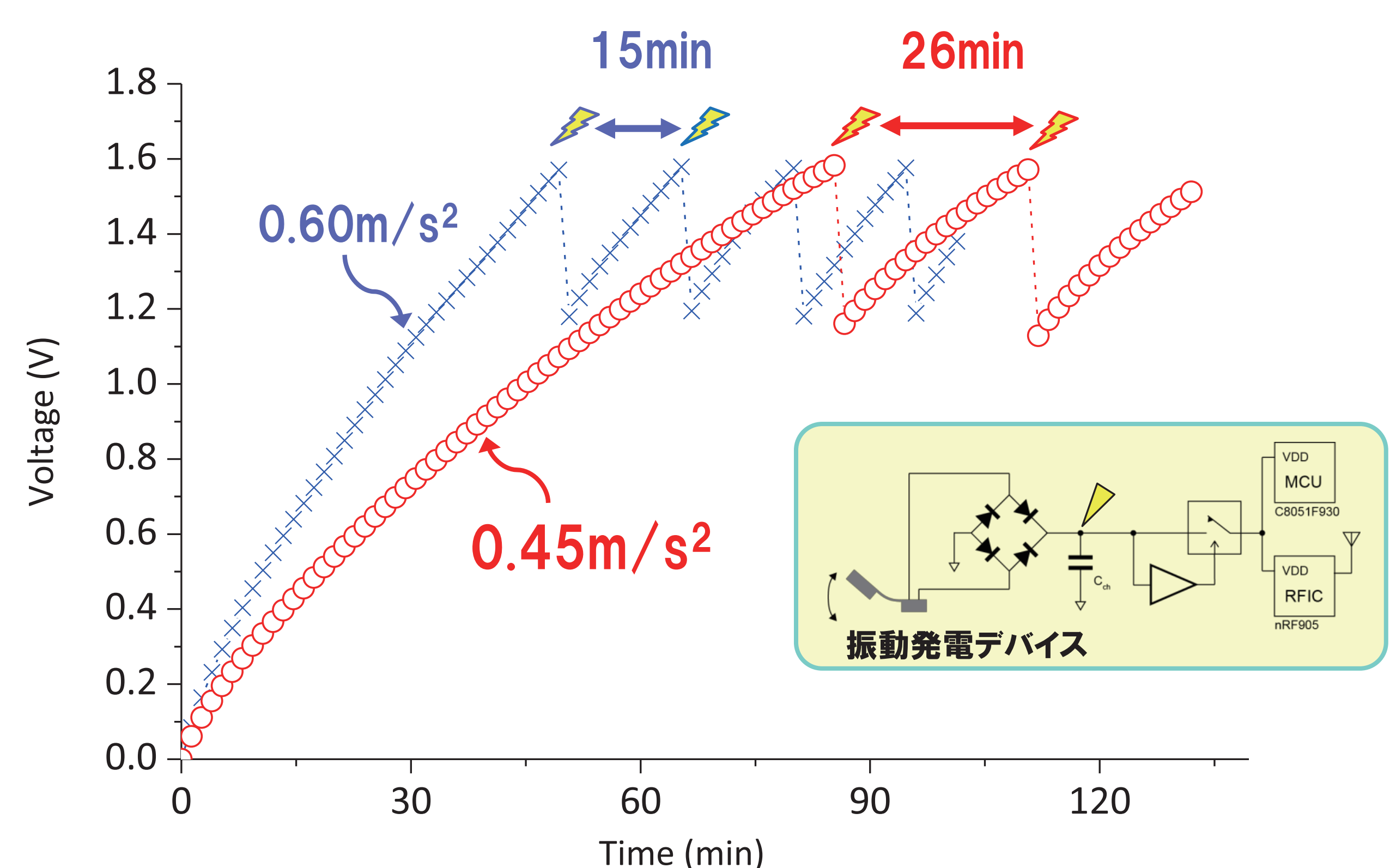


鹿威し回路消費電力 (μW)

部品	開発品	従来品
コンパレータ	0.021	0.18
BGR	0.072	2.0
その他	0.026	0.026
鹿威し消費電力	0.12	2.2

超低消費電力コンパレータと参照電圧発生回路(BGR)を開発
・バイアス電流の削減
・ $0.18\mu\text{m}$ プロセス

端末動作実証



入力振動レベルに依存して送信頻度が変化⇒端末実証に成功

コアモニタリング用 AlN 圧電デバイスの ウエハレベルパッケージ技術の開発

研究のポイント：Point

- コアモニタリング用 AlN/ScAlN 圧電デバイス量産プロセス及び低コスト・高信頼性ウエハレベルパッケージプロセスの開発

背景と目的：Background & Purpose

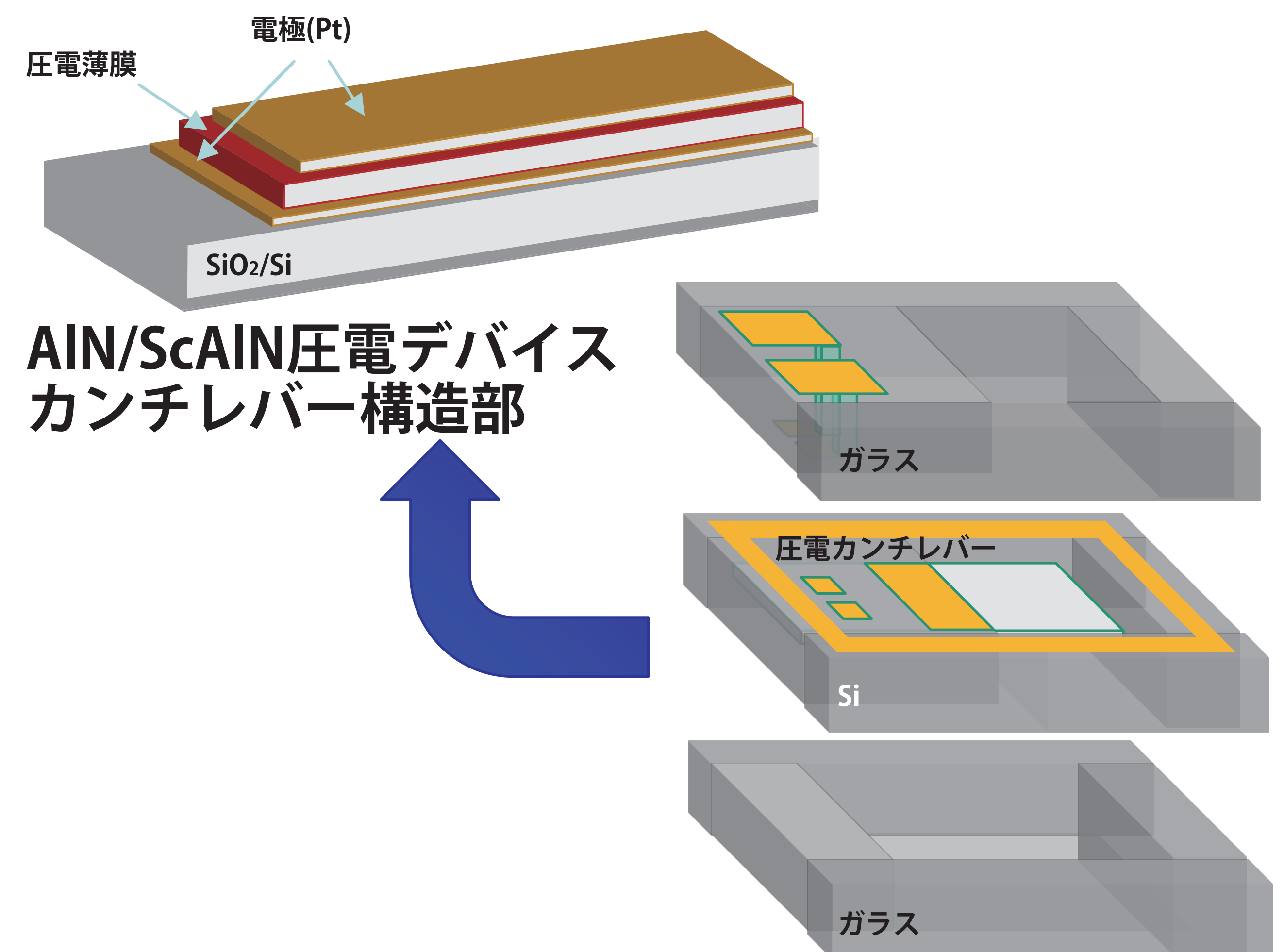
- 産総研設計担当の AlN 及び ScAlN 圧電振動センサ素子、発電素子をこれらの AlN 圧電デバイスを 8 インチ Si 基板に一括して製造する低コスト量産プロセスの開発
- P 型端末に AlN 圧電振動デバイスを搭載するために、ウエハレベルで封止する低コスト、高信頼性パッケージプロセスの開発

研究の内容：Summary

- 8 インチ試作ラインにて、カンチレバー構造の AlN/ScAlN 圧電デバイスの試作を実施
- 電極取り出し構造と封止構造を同時接合プロセスで可能にするウエハレベルパッケージプロセスを開発し、パッケージされた圧電デバイスを実証用端末に提供

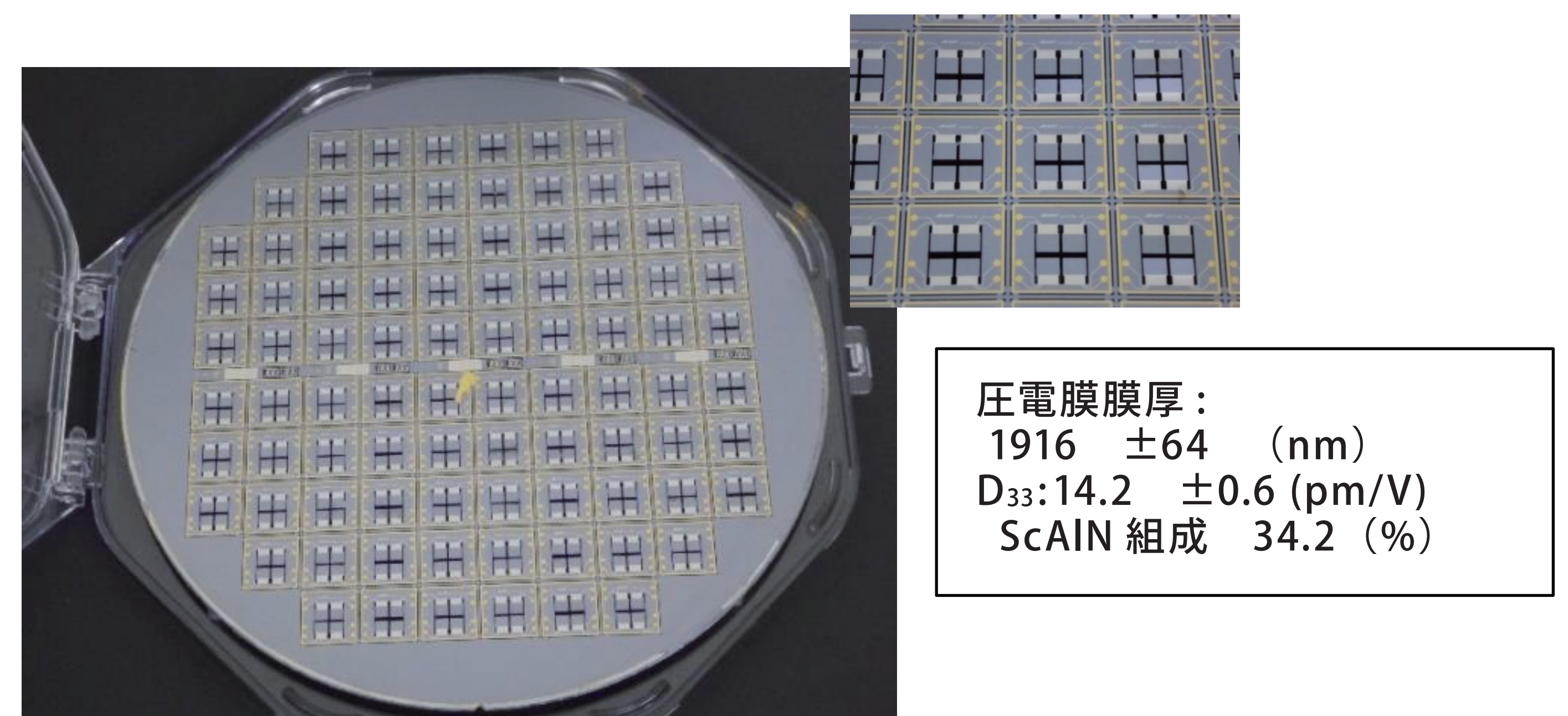
実験及び実証のデータ：DATA

- AlN/ScAlN 圧電デバイス量産プロセスの開発
 - ・ 8 インチ Si ウエハを用いた、AlN/ScAlN 圧電デバイス加工プロセスを開発
 - 圧電薄膜成膜技術：スパッタ成膜条件を調整し、配向特性、積層膜の内部応力を調整
 - 圧電カンチレバー形状加工技術：Ar+Cl 系ガスによる AlN/Pt 電極構造のドライエッチング技術を開発
 - ・ 発電/振動圧電デバイスを試作し、目標とする圧電特性、振動特性を確認
 - 発電デバイス 共振周波数 35～120Hz
 - 振動デバイス 共振周波数 1～8KHz
- ウエハレベルパッケージプロセスの開発
 - ・ 封止構造と TGV 信号取出し構造を有する圧電デバイスのパッケージ技術を開発
 - ・ Au-Au 低温活性化接合で良好な電気特性、高い接合強度を得られることを確認
 - ・ 実証用端末政策担当へ実装デバイスを提供開始。



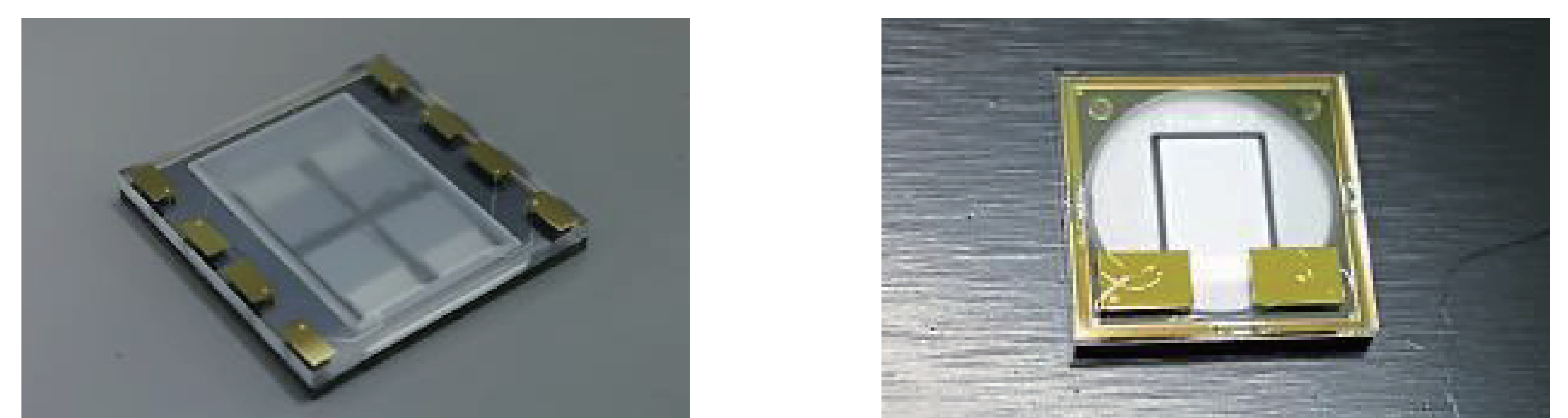
AlN/ScAlN 圧電デバイス
カンチレバー構造部

圧電デバイスのパッケージ構造



ScAlN 圧電デバイス試作 8 インチウエハ

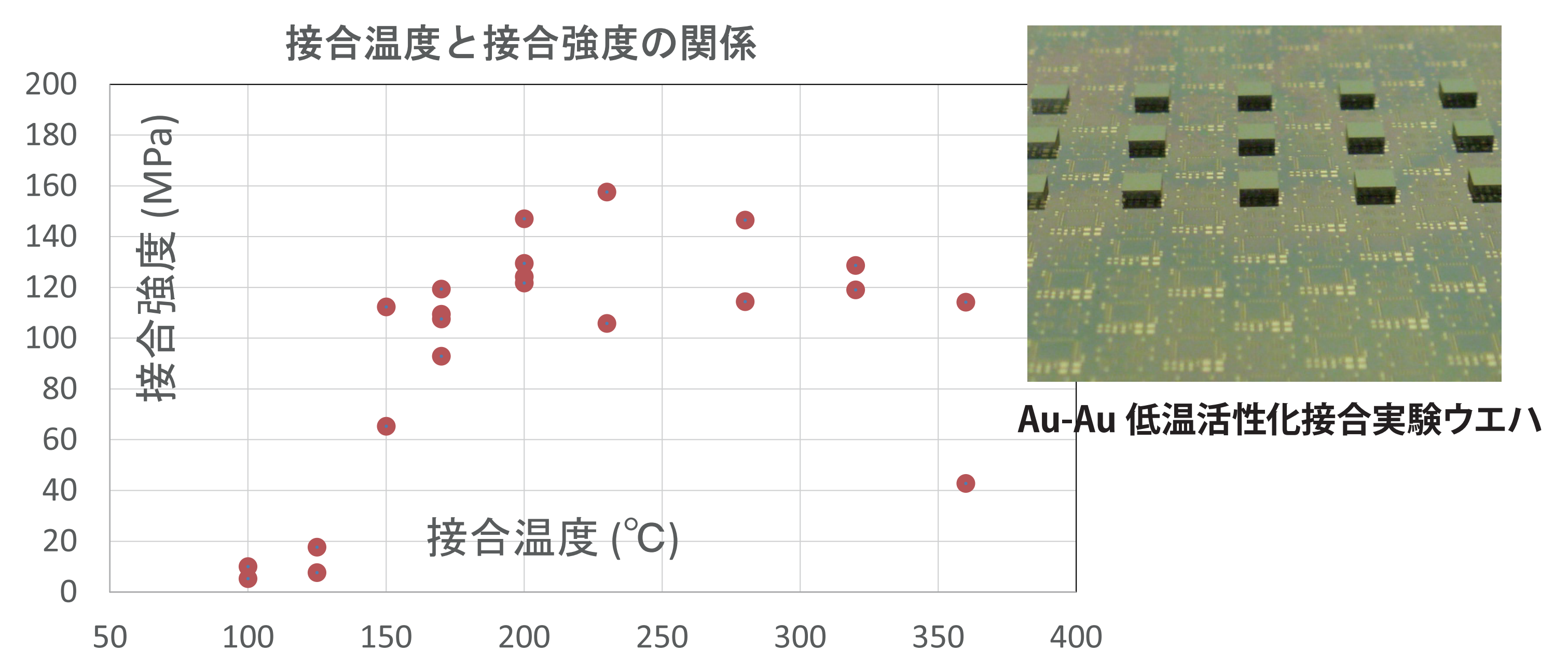
ScAlN カンチレバー試作ウエハ・デバイス例



発電デバイス
(15mm□)

振動圧電デバイス
(10mm□)

発電デバイス、振動デバイスパッケージング例



Au-Au 低温活性化接合結果

(低温活性化条件例)
プラズマ活性化処理：Ar:20sccm, 100W, 60Pa, 1min
Au-Au 接合時間：5 分、圧力 60Mpa

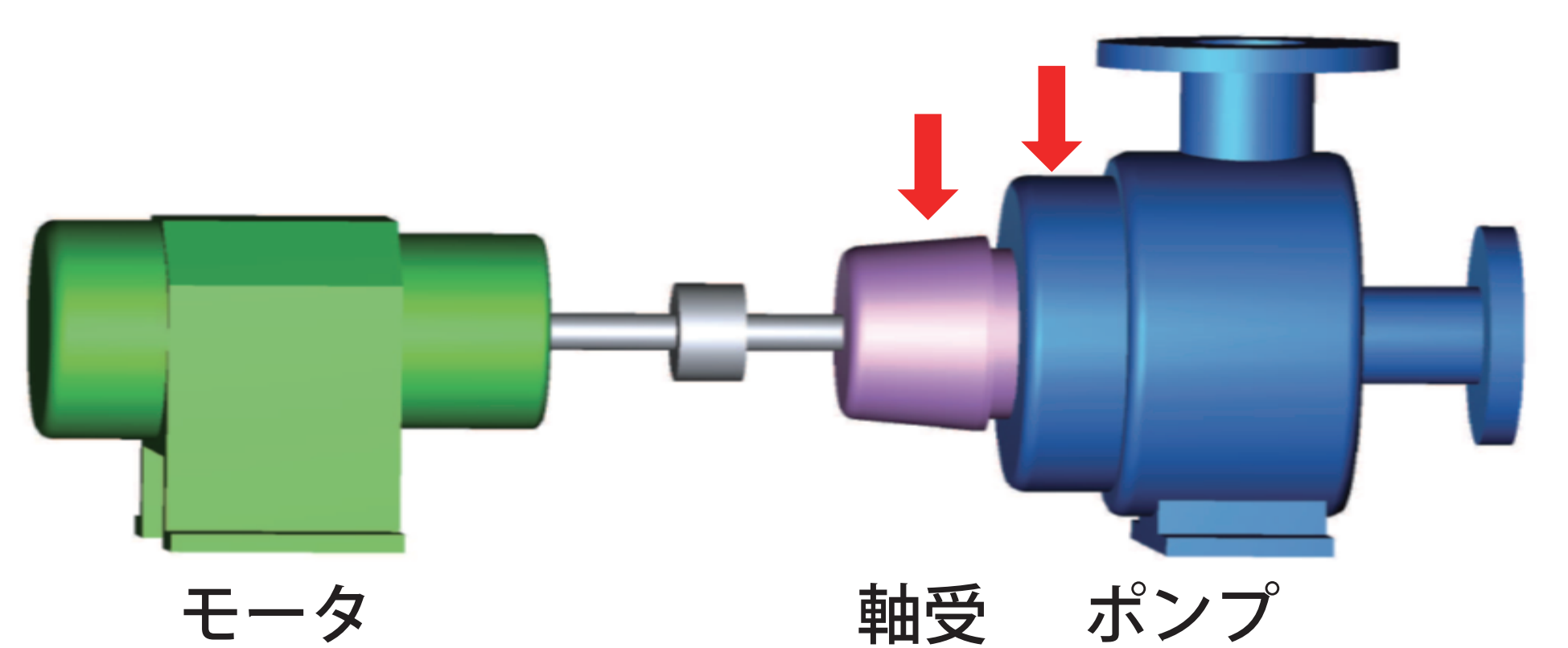
振動センサ デバイス、無線、制御回路の 小型パッケージと回転機への固定部の開発

研究のポイント：Point

- 振動デバイスへの振動伝達性、センサ小型化とセンサ固定方法の確立

背景と目的：Background & Purpose

- 回転機器 予知保全モニタのための、振動計測、表面温度計測
- 安価なシステムアップを目指すための、長期メンテナンスフリー、無線化
- センサ設置性向上のための、固定方法と小型形状

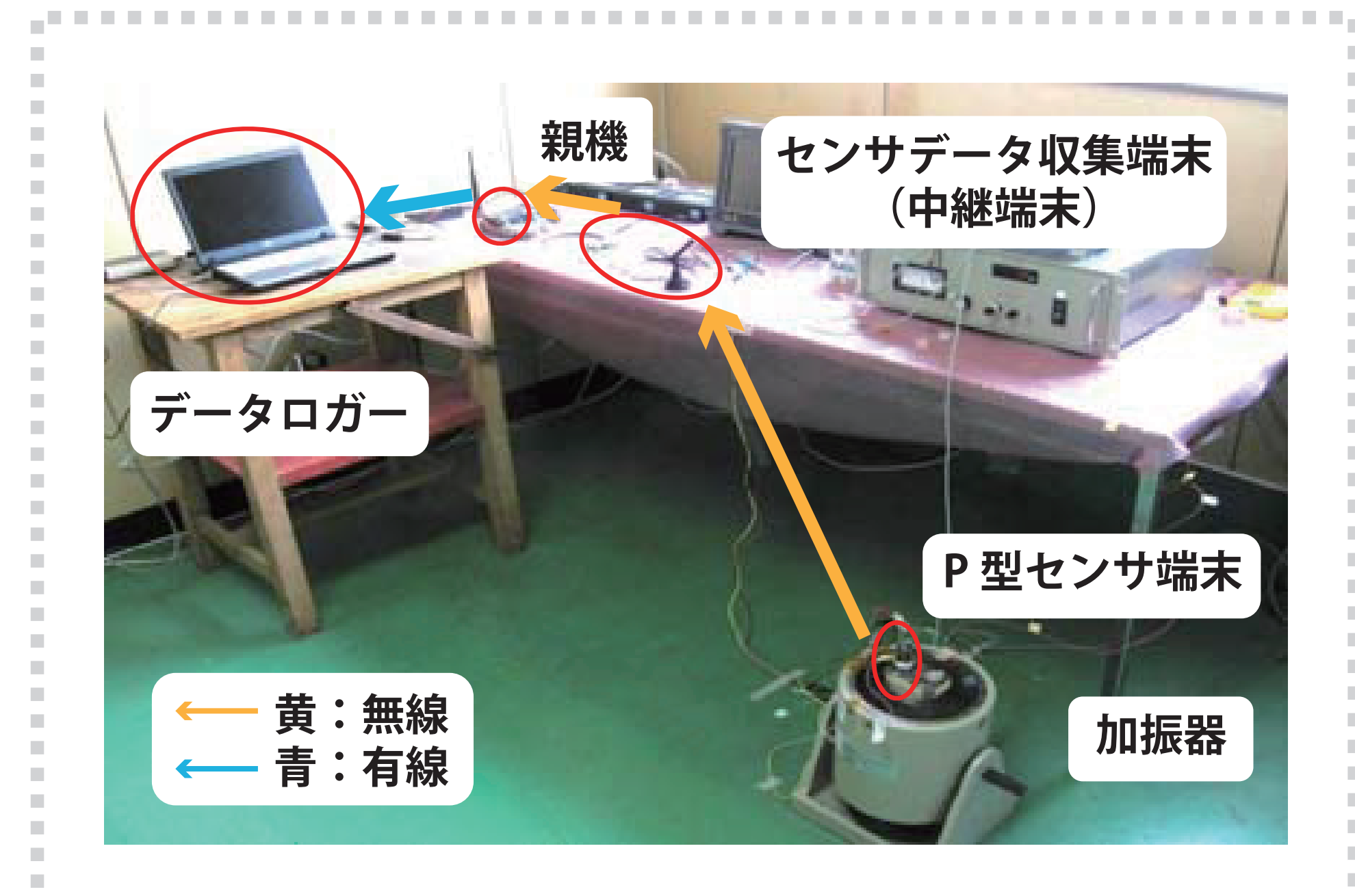


回転機器への端末取付イメージ

研究の内容：Summary

- 目標値
 - ・ 無線センサ端末の10年間の耐振動性
 - ・ 無線センサ端末のサイズの小型化検討
 - ・ 無線センサ端末固定部の10年間耐久性の実証

実験及び実証のデータ：DATA

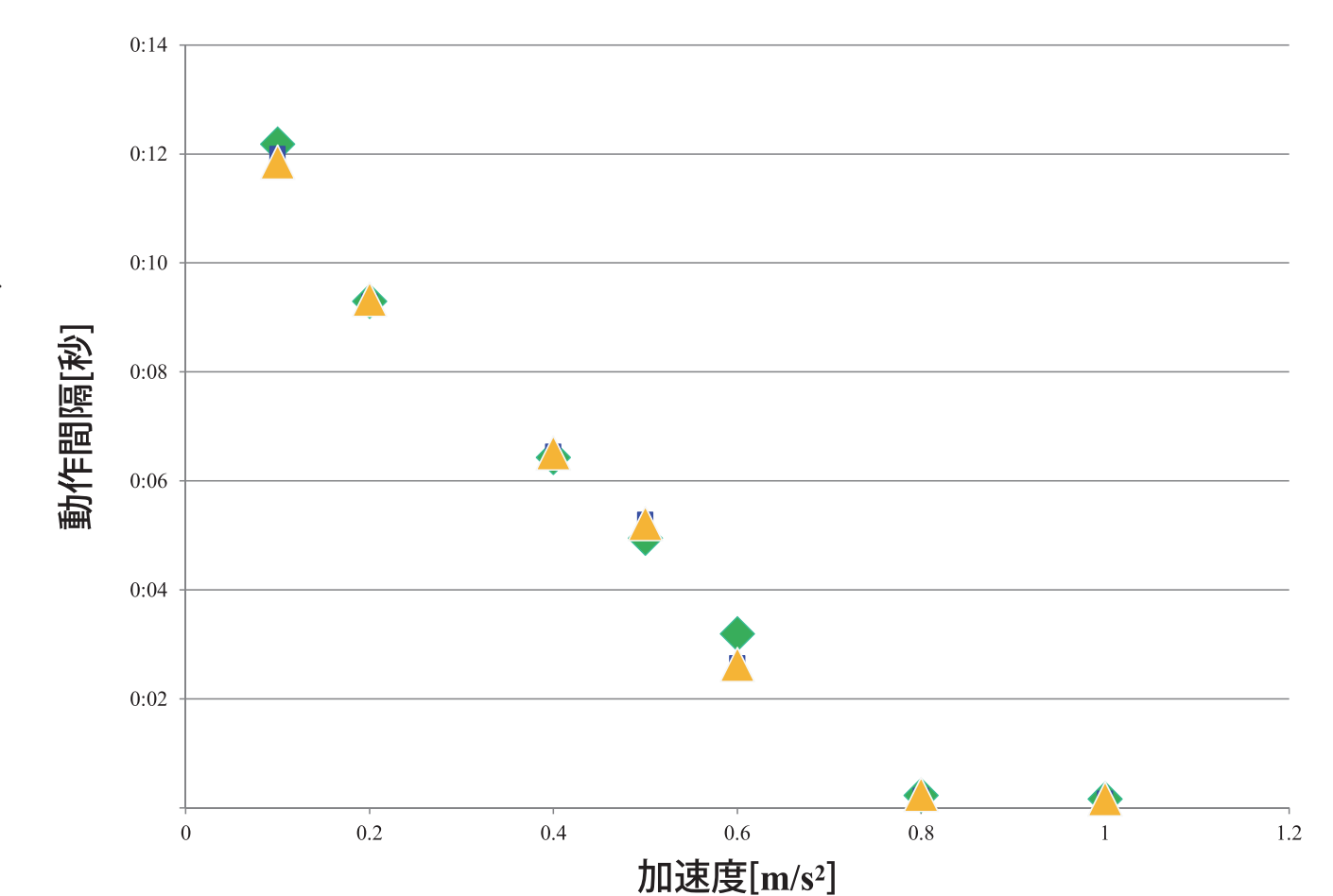


振動発電特性 試験構成

実験データ

低周波振動デバイス
振動発電特性試験

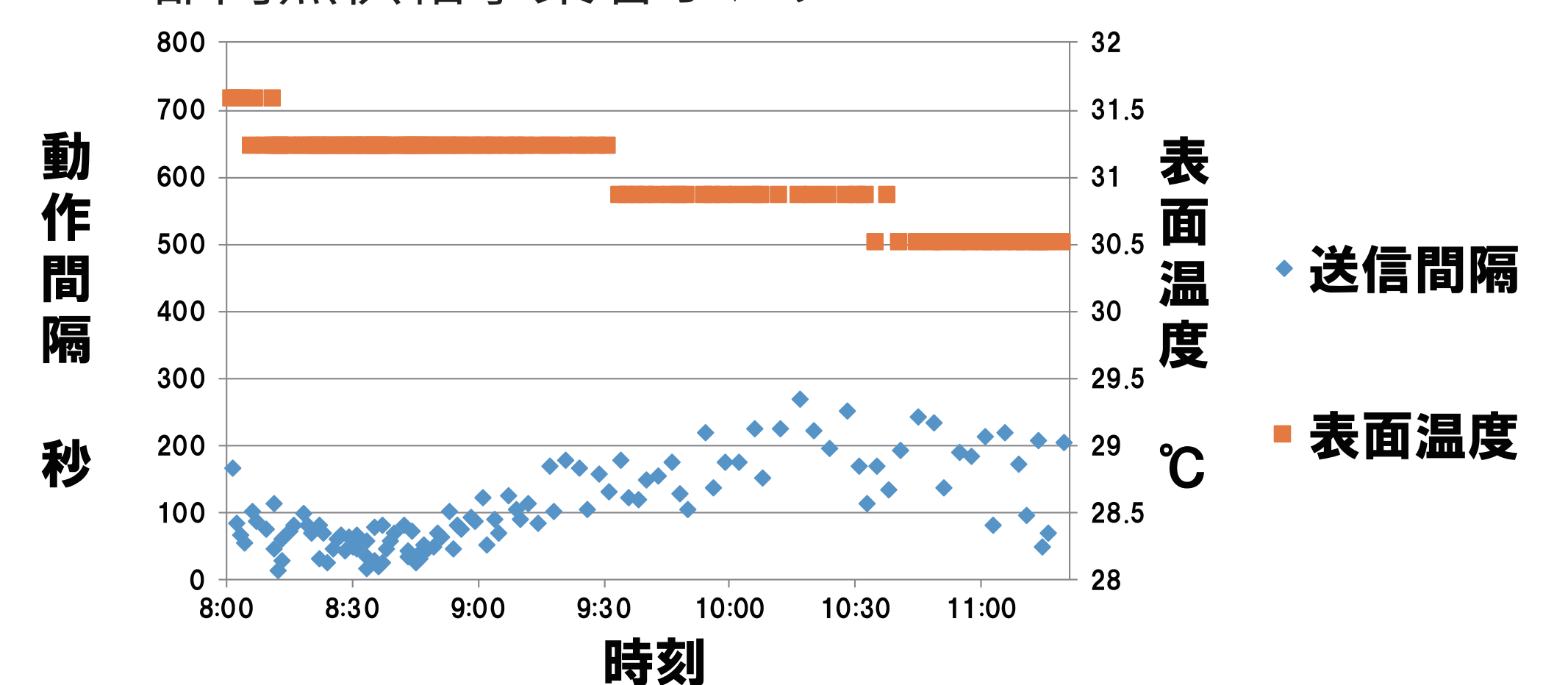
加振器振動加速度-
動作間隔特性



センサを取り付けた回転機器の振動から振動発電
センサデバイスの発電トリガでP型センサ端末を動作させる。
動作間隔のデータより取付個所の振動加速度が想定できる

実証データ

都内熱供給事業者ポンプ 11月14日 ID3



■ センサデータ収集端末 [中継端末] (試作)



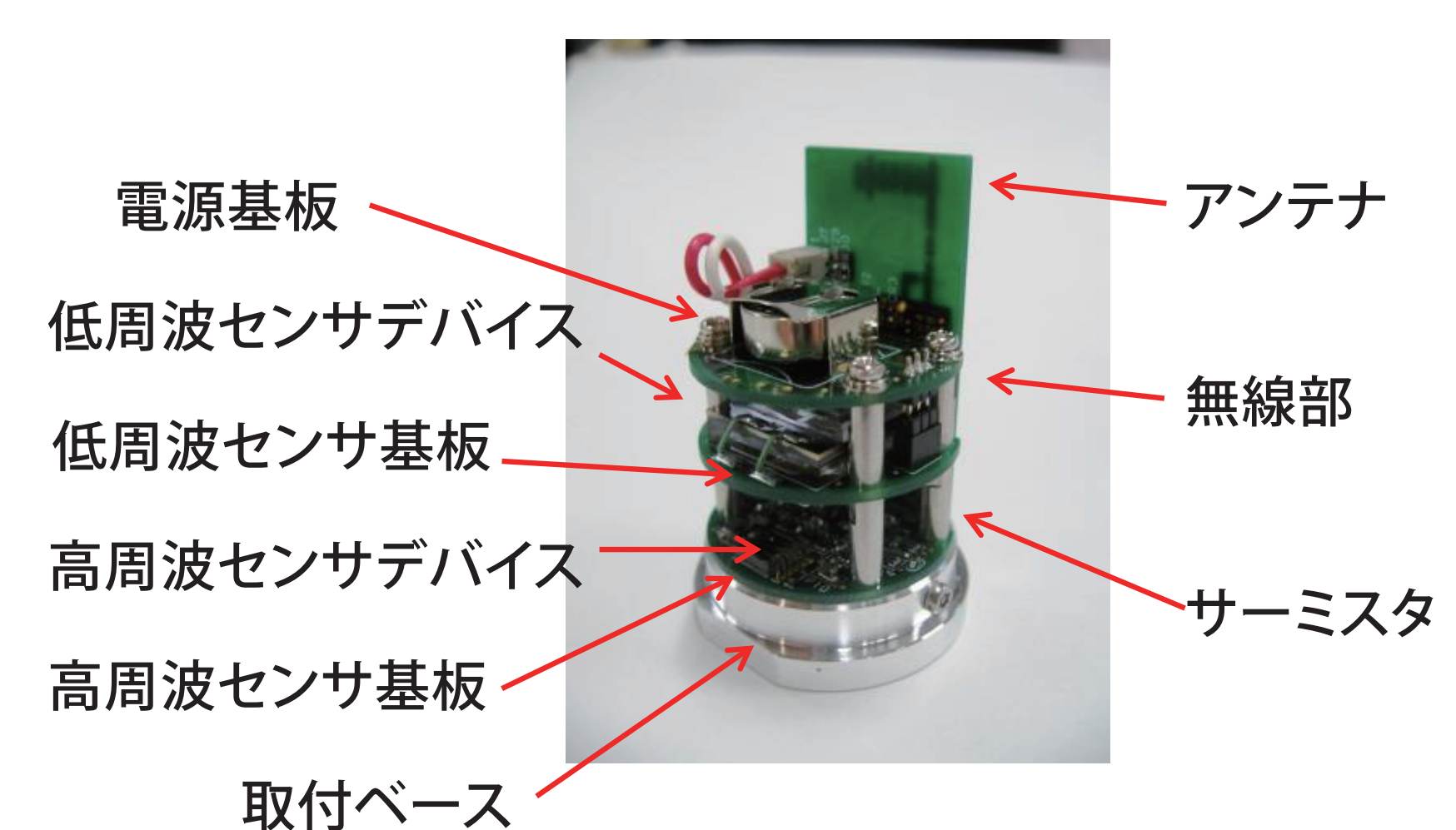
項 目	0次試作仕様	1次試作仕様
無線通信	920MHz帯	920MHz帯
電源	AC電源アダプタ	AC電源アダプタ バックアップ電池
外形寸法	90×60×50mm	105×70×50mm

■ P型センサ端末 (試作)

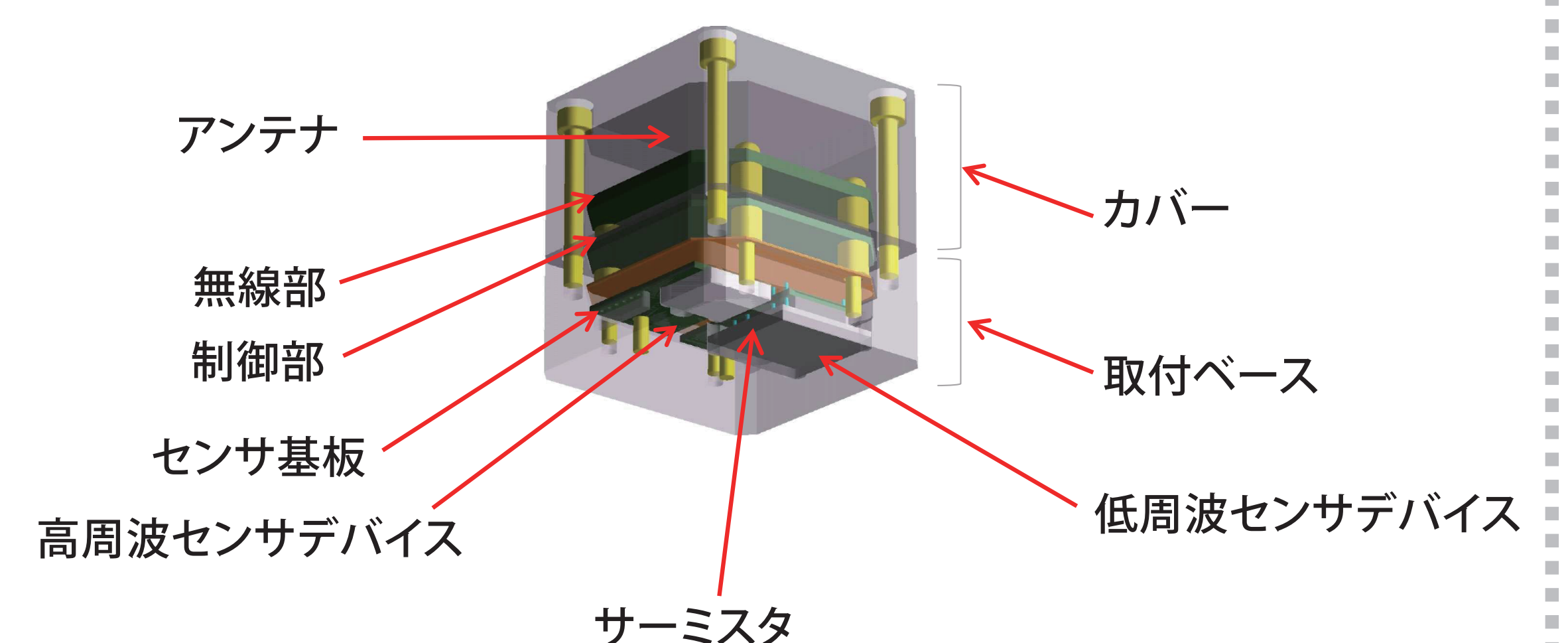


項 目	0次試作 端末仕様	1次試作 端末仕様
無線通信	920MHz帯	920MHz帯
通信距離	30m以上	30m以上
送信データ	振動 表面温度	振動 表面温度
電源	振動発電 + 補助電池	振動発電 + 補助電池
外形寸法	30φ, 46mm (突起部除く)	40mm□, 35mm (突起部除く)

■ P型センサ端末 (内部構造)



P型センサ 0次試作端末



P型センサ 1次試作端末

コアモニタリング用ネットワークシステムの開発

研究のポイント：Point

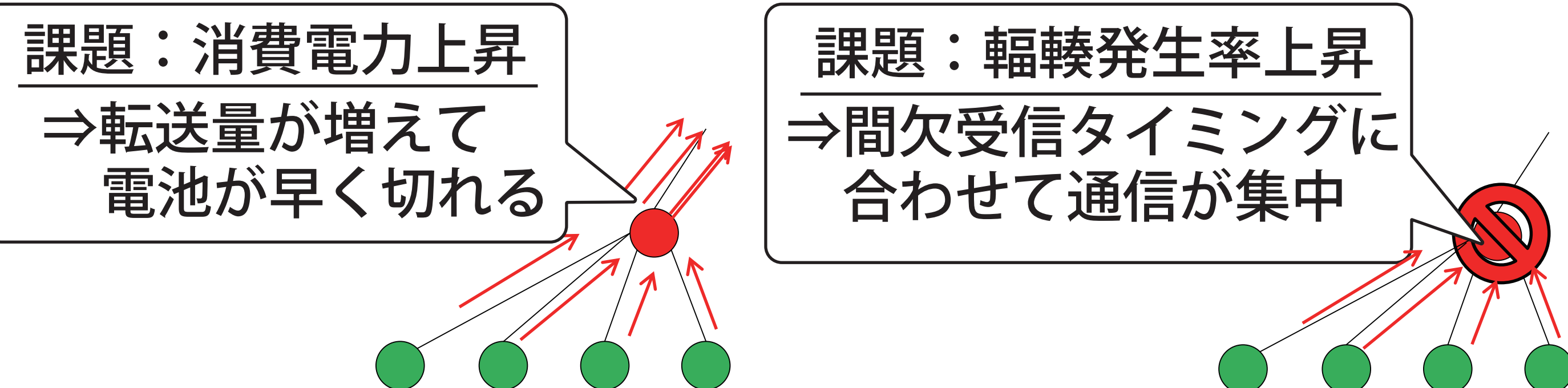
- ライフラインコアモニタリングシステム実現のための省電力な無線マルチホップ通信システムの開発

背景と目的：Background & Purpose

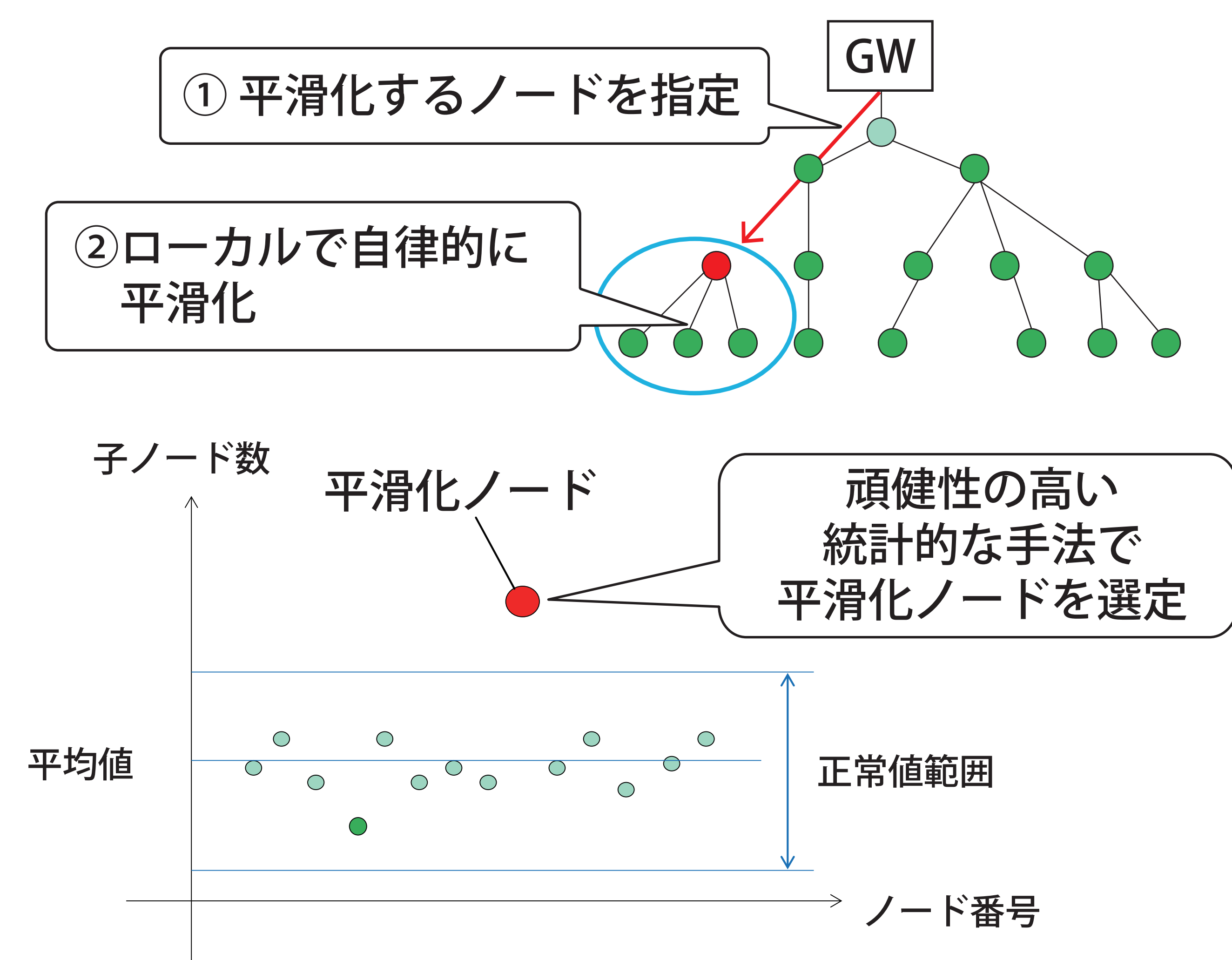
- インフラコアモニタリングシステム完全無線化のメリット
 - ・ 通信や電源配線の敷設コスト不要
 - ・ センサ設置が容易となり工事コスト削減
- インフラコアモニタリングシステム無線化の課題
 - ・ 自立電源で動作可能な省電力無線通信技術の確立
 - ・ 構造的に複雑で多くの遮蔽物が存在する環境での、無線ネットワークの信頼性確保
- 省電力無線モジュールによるマルチホップ通信ネットワークの実現を目指す

研究の内容：Summary

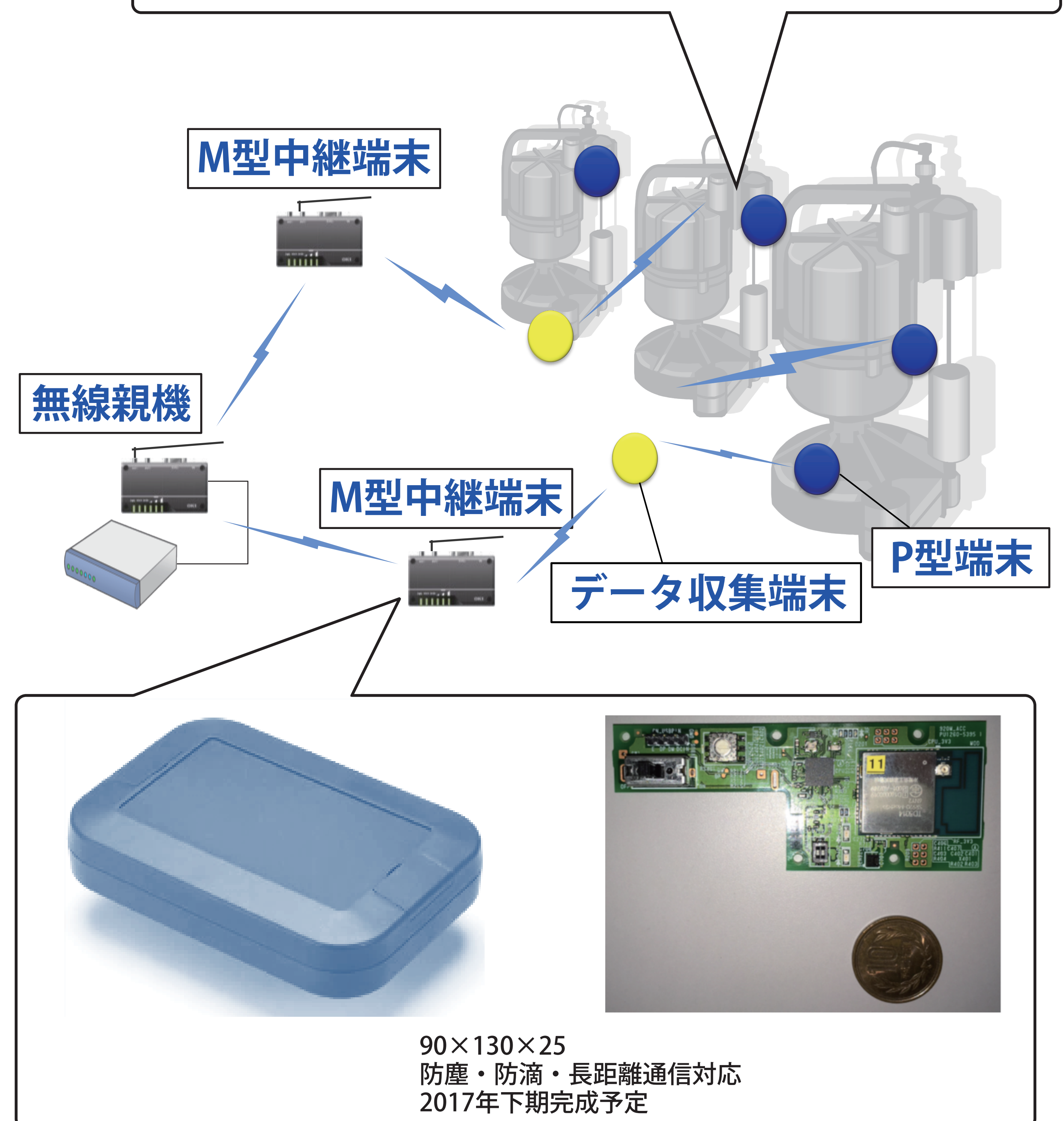
- 目標値：2018年度に2500mAhで10年間連続動作可能なマルチホップ無線通信環境を構築する
- 課題：特定のノードへトラフィックが偏る
 - ・ ノードの消費電力上昇
 - ・ 輻輳発生率上昇→再送により消費電力増大



- 対策：子ノード数を平滑化→トラフィックの偏りを修正
- 実現方法：GWで平滑化ノード決定、その後ローカルで調整

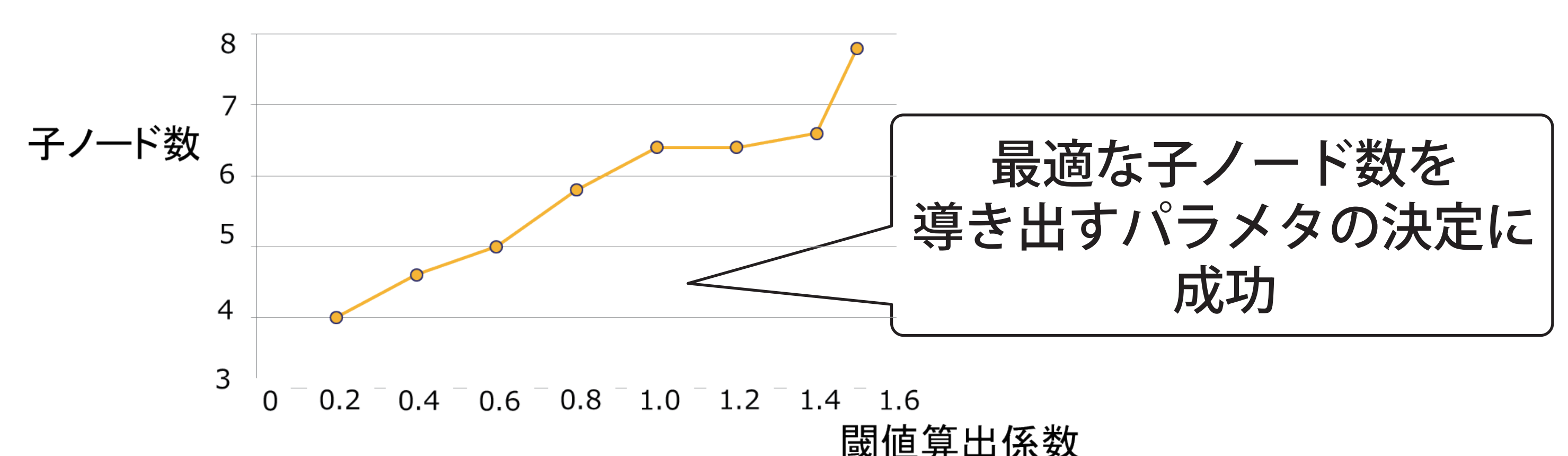
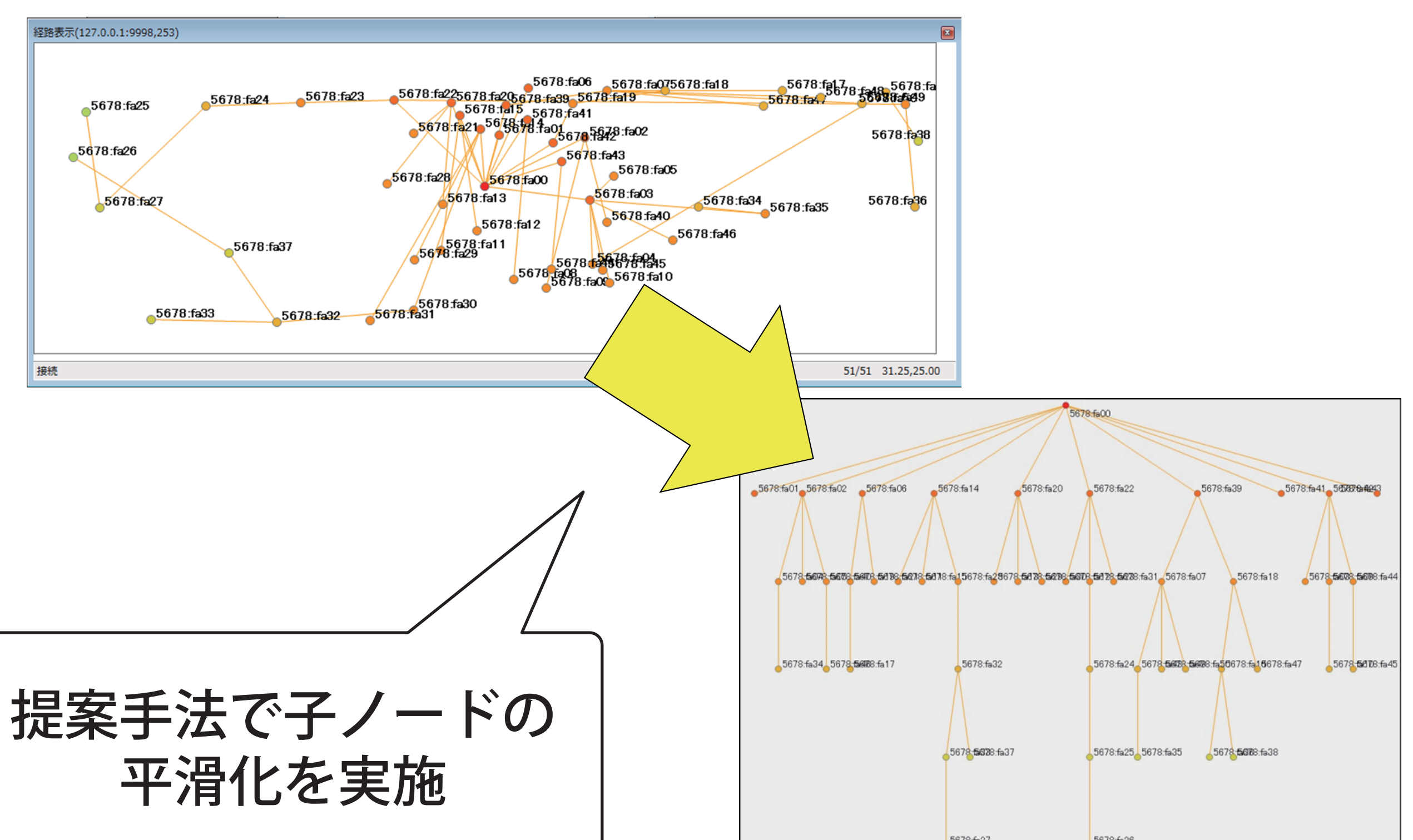


マルチホップ通信(多段通信)を採用することで、無線化しながら信頼性を確保



実験及び実証のデータ：DATA

- 50台規模での実機実証実験
 - 頑健性の高い統計的手法（箱ひげ図法）で平滑化を実施→実施できることを確認
 - ⇒手法のパラメタ調整で更に効果が大きい



コアモニタリングシステムの開発

研究のポイント：Point

- 熱エネルギーの供給拠点、災害時の防災拠点となる施設の心臓部であるポンプの状態監視
- 鹿威し方式の不連続なデータから異常兆候の高確度検知、保全時期の実務精度予測

背景と目的：Background & Purpose

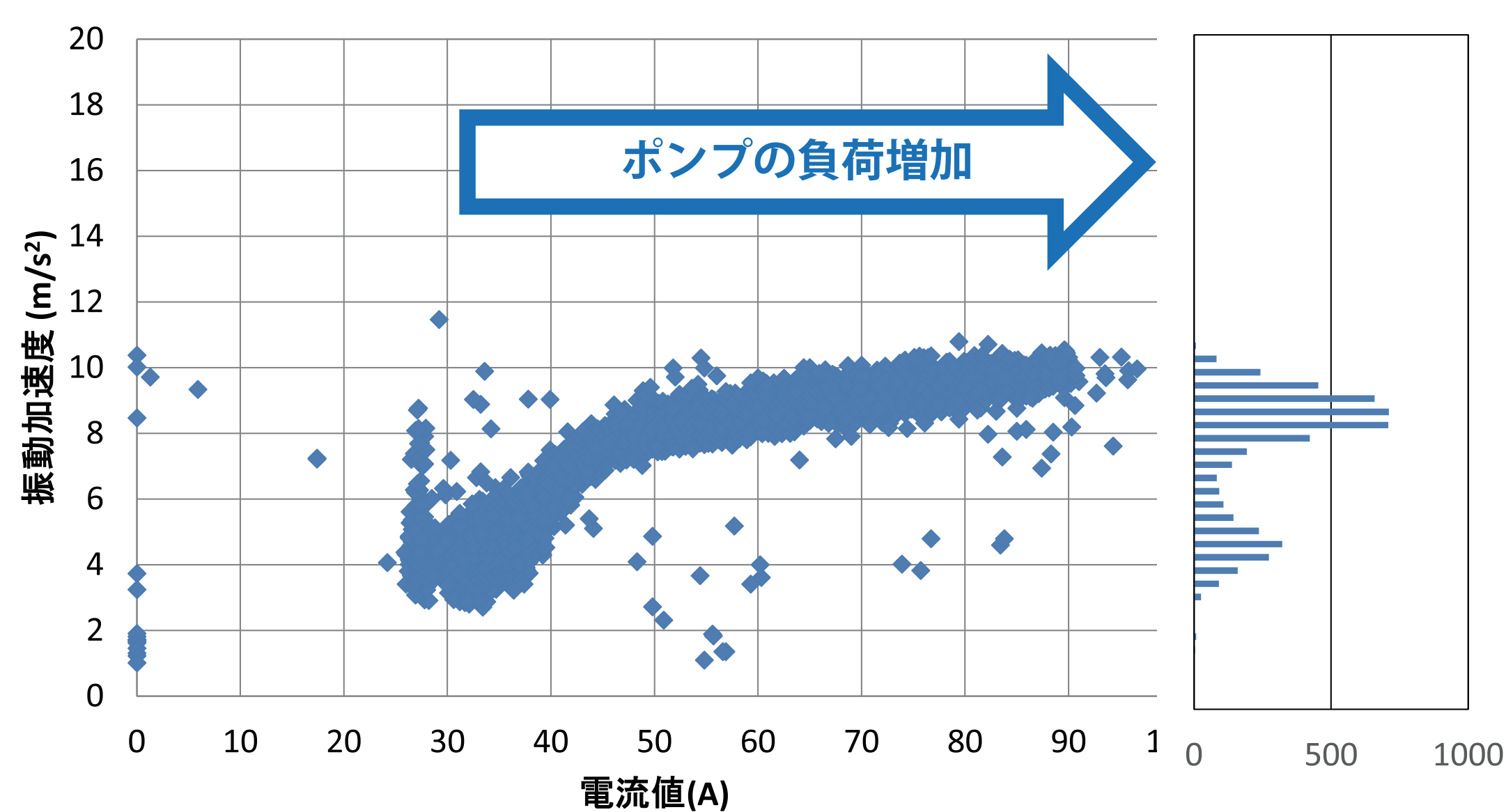
- 施設設備のセンサシステムで常時・継続モニタリングしたい事象として、振動加速度、表面温度への要望が大多数
- ポンプの軸受など回転部位の損傷は、傷端部のバリと鈍りが繰り返しながら進行する非定常現象
- 監視の信頼性向上には、非定常現象を確実に検知し、かつ特殊な技能がなくても判定ができるマンマシンインタフェースを開発

研究の内容：Summary

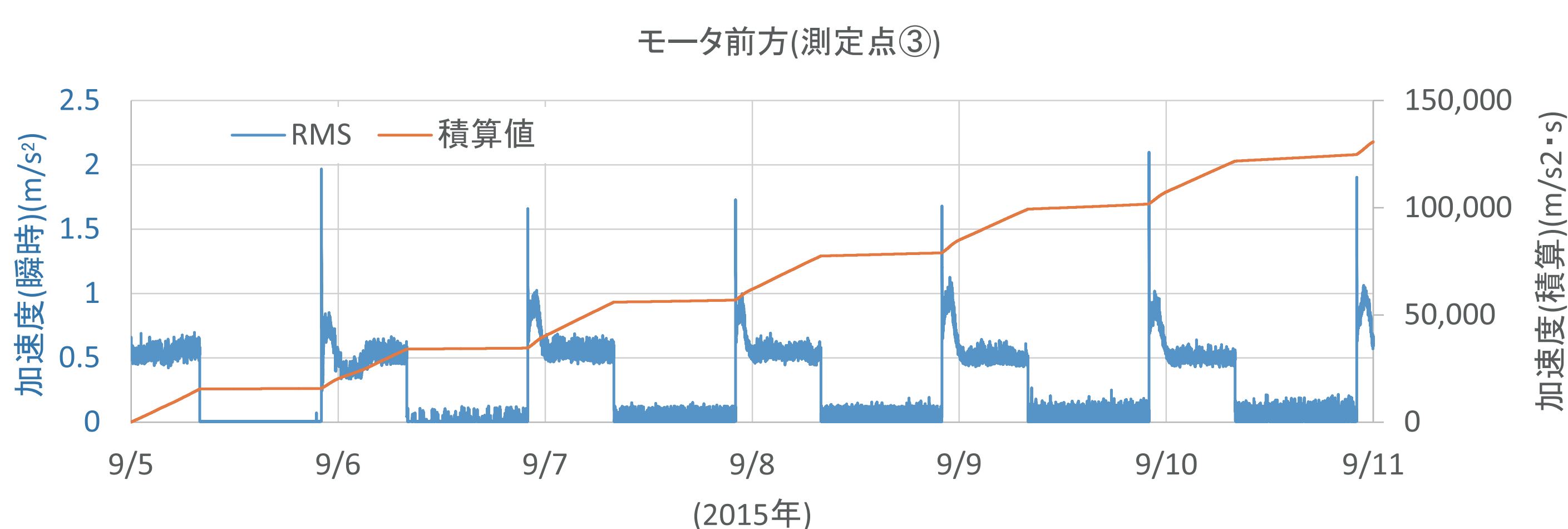
- 研究開発フェーズ（平成26年度～平成28年度）
コアモニタリングシステムの要素技術である「振動データのフィルタリング機能」「運転モード別の異常検知手法」「保全までの余裕時間予測手法」を開発
【平成28年度】
◆ 鹿威し方式データのモニタリング要素技術の開発
☞ 振動加速度ピックアップにて把握したポンプの振動特性から、鹿威し方式データでの異常検知ロジック、余裕時間の予測手法を特定し、モニタリングシステムの試行版を開発
- 実証フェーズ（平成29年度～平成30年度）
要素技術を統合したモニタリングシステムを構築

実験及び実証のデータ：DATA

- ポンプの負荷変動と振動加速度の相関



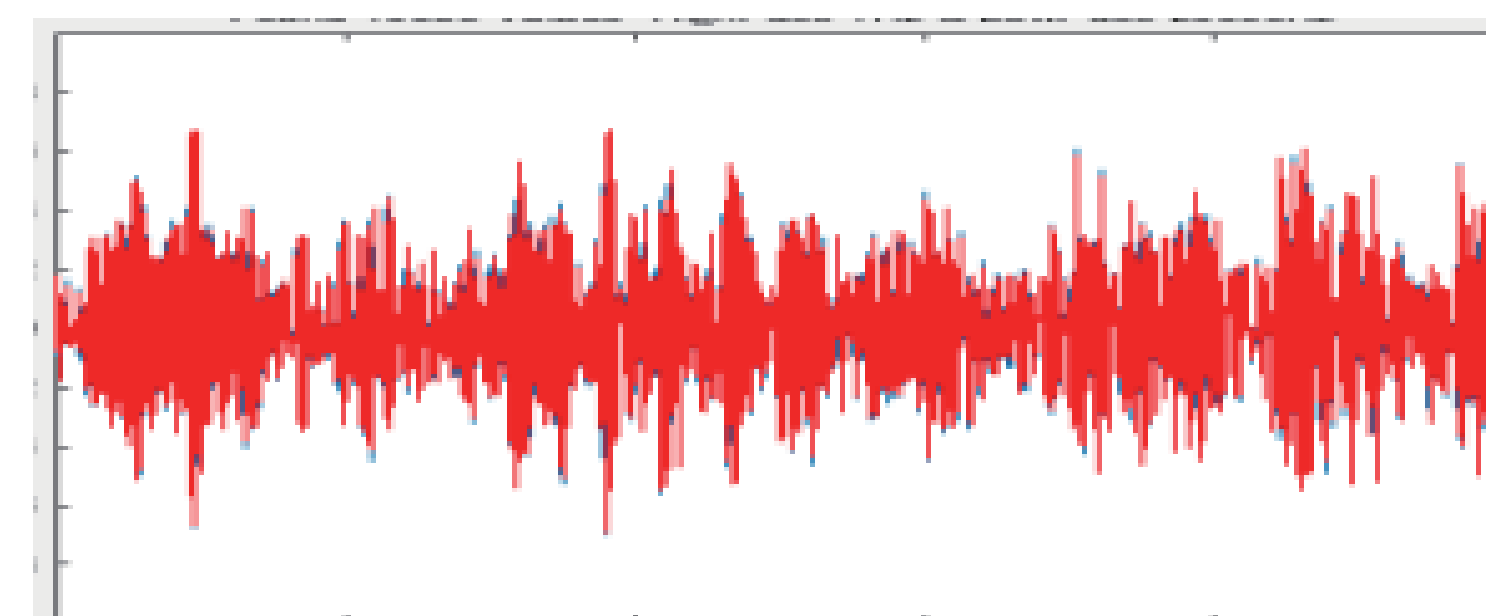
- ポンプの起動により振動加速度が急増



横型ポンプ

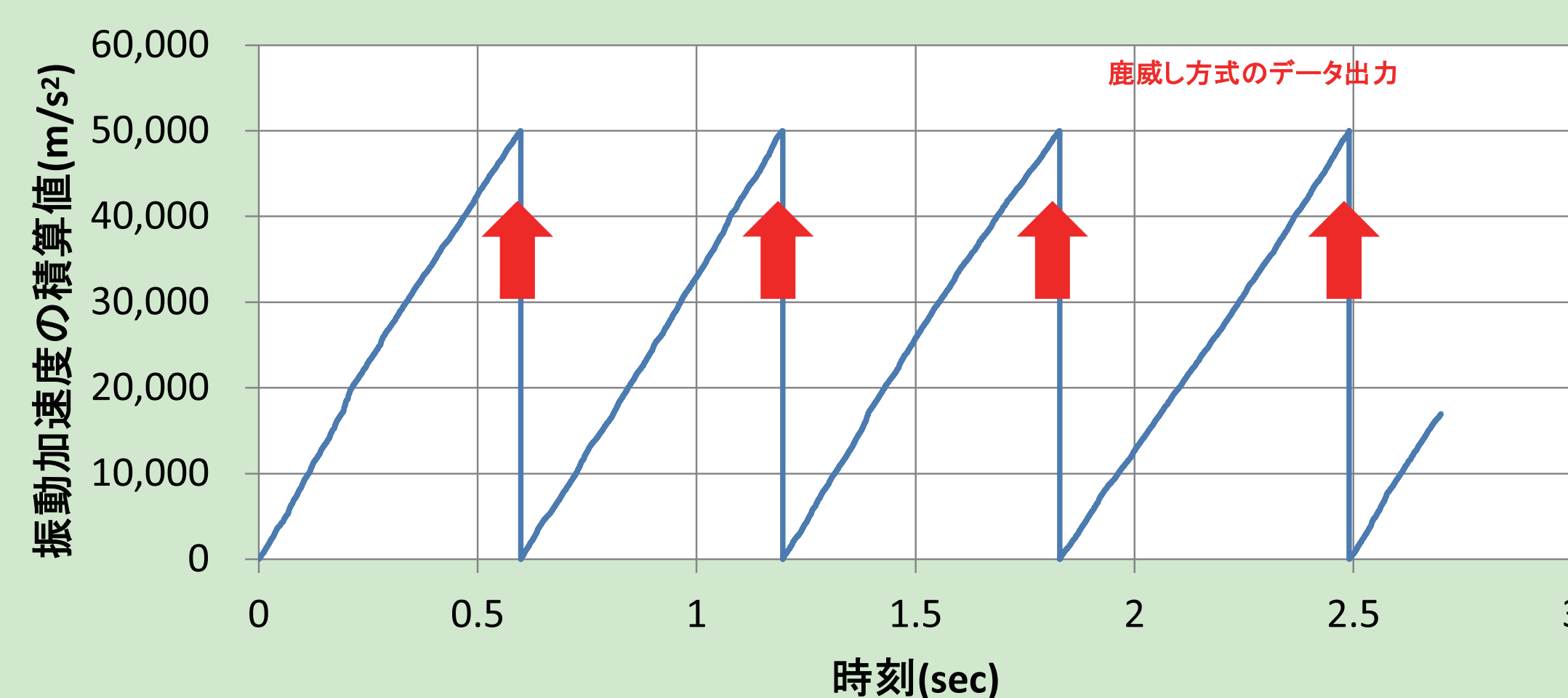


立型ポンプ



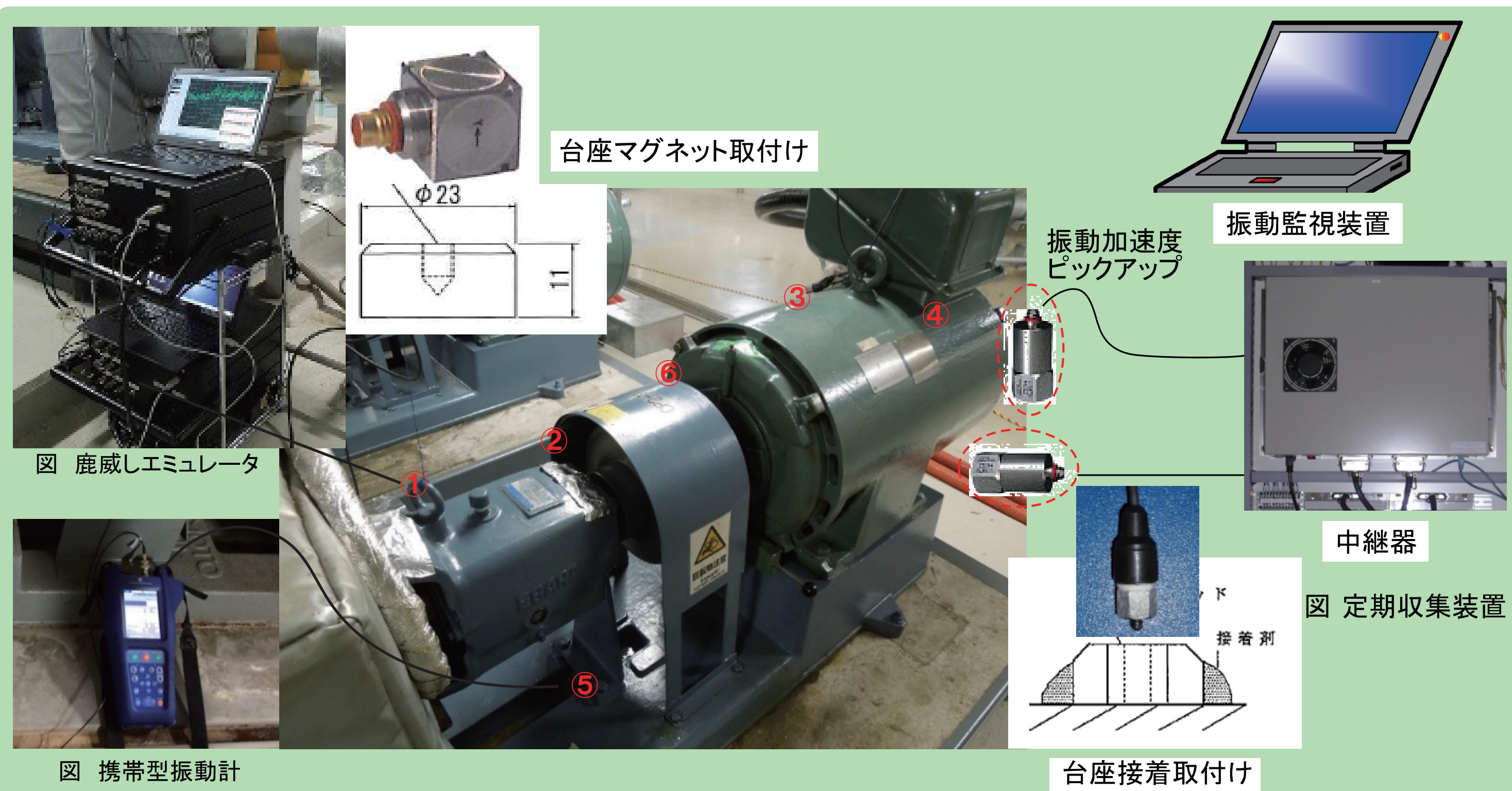
従来データ：振動加速度の時間波形

開発データ：鹿威し方式の振動データ



フォルトディクショナリによる異常原因の特定

異常原因	原因 1	原因 2	原因 3
異常診断			
センサ温度	—	F	N
鹿威し間隔 Δt	F	F	F
振動センサ1	N	N	N
振動センサ2	—	N	F



【既存振動加速度ピックアップを用いた振動特性の獲得】

コアモニタリングシステムの構築と実証

研究のポイント：Point

- 施設BCP(Business Continuity Plan事業継続計画)対応に合致
- 都市インフラ(熱エネルギー供給施設、病院施設)の安全な維持管理を実現

背景と目的：Background & Purpose

- 設備全体における劣化発生頻度の高い機器
1位：回転機器37%、2位：配管17%、3位：制御機器9%
- 熱エネルギーの安定供給が求められる病院施設、地域熱供給施設を特定
- 熱エネルギー供給の重要機器（ポンプ）、配管を対象として、広く設備に普及展開可能で安価な監視システムを提供
- クラウド利用型のネットワークシステムを用いた遠隔での群管理システムを実証

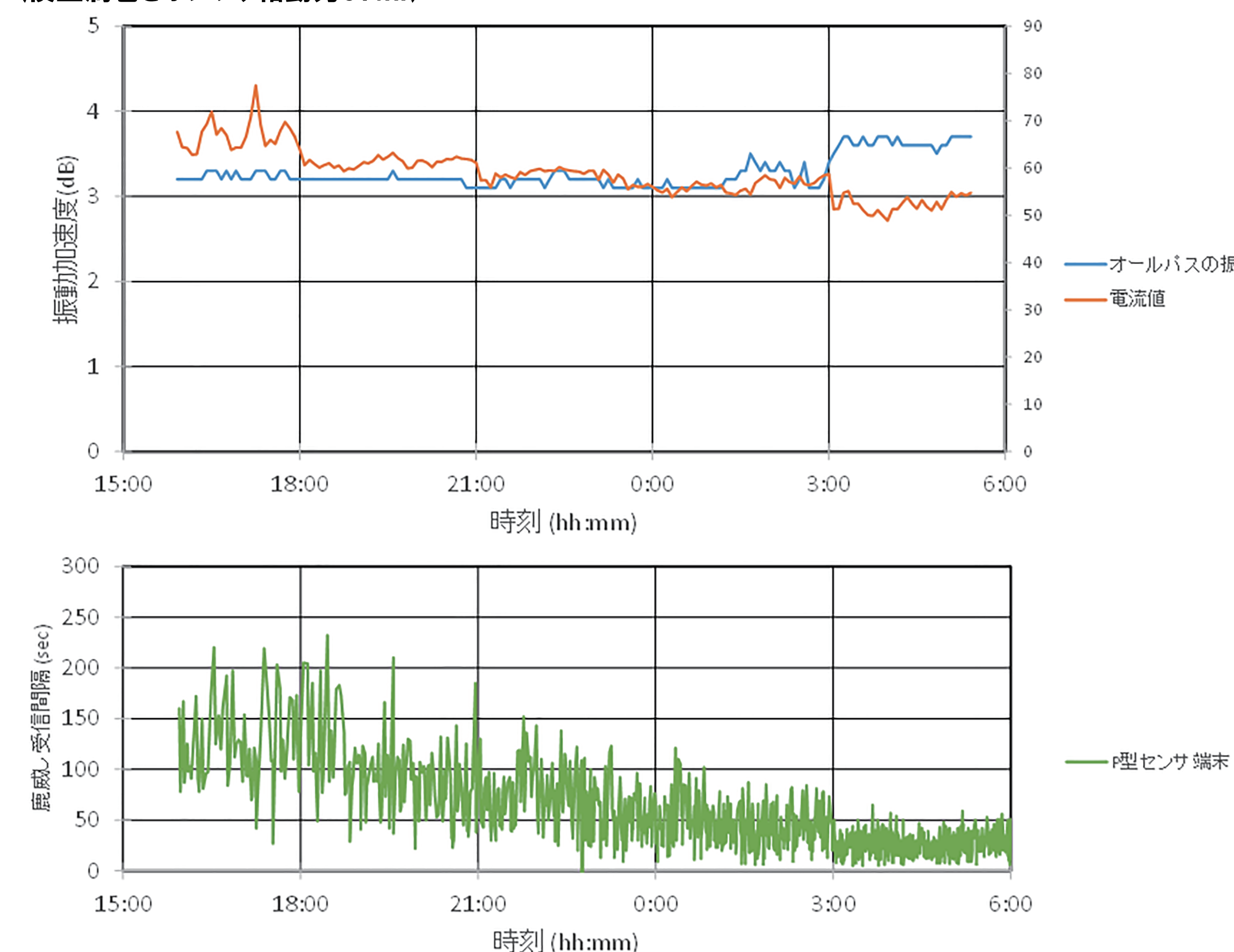
研究の内容：Summary

- 研究開発フェーズ（平成26年度～平成28年度）
実証現場におけるセンサ端末仕様、設置方法、ネットワークシステム構築上の課題抽出、汎用振動加速度センサを用いた遠隔でのモニタリングを実証
【平成28年度】
 - ◆ 病院施設、地域熱供給施設で実証
 - ☞ 地域熱供給施設(所在地:東京都)、病院施設(所在地:神奈川県)でモニタリングシステムの試験機を稼動。
 - ◆ 機械室内にネットワークを構築し、モニタリングシステムを稼動
 - ☞ P型センサ端末機のローカルネットワークを構築。
- 実証フェーズ（平成29年度～平成30年度）
鹿威しセンサデバイスを用いたモニタリングシステムを実設備に構築し、設備群の遠隔モニタリングを実証

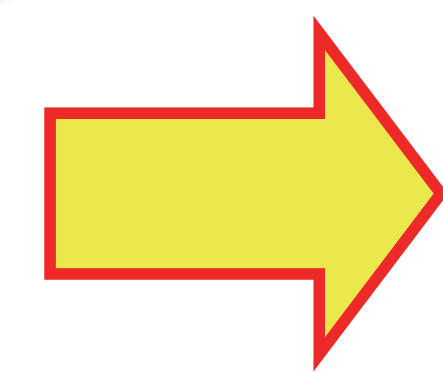
実験及び実証のデータ：DATA

P型センサ端末での監視事例

(横型渦巻きポンプ、軸動力37kW)

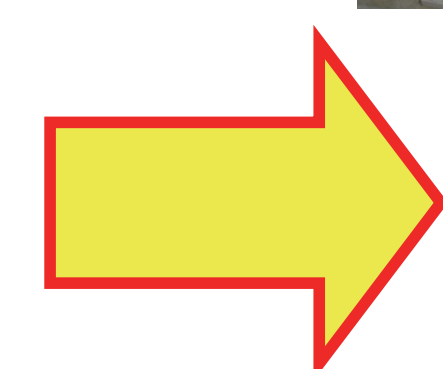
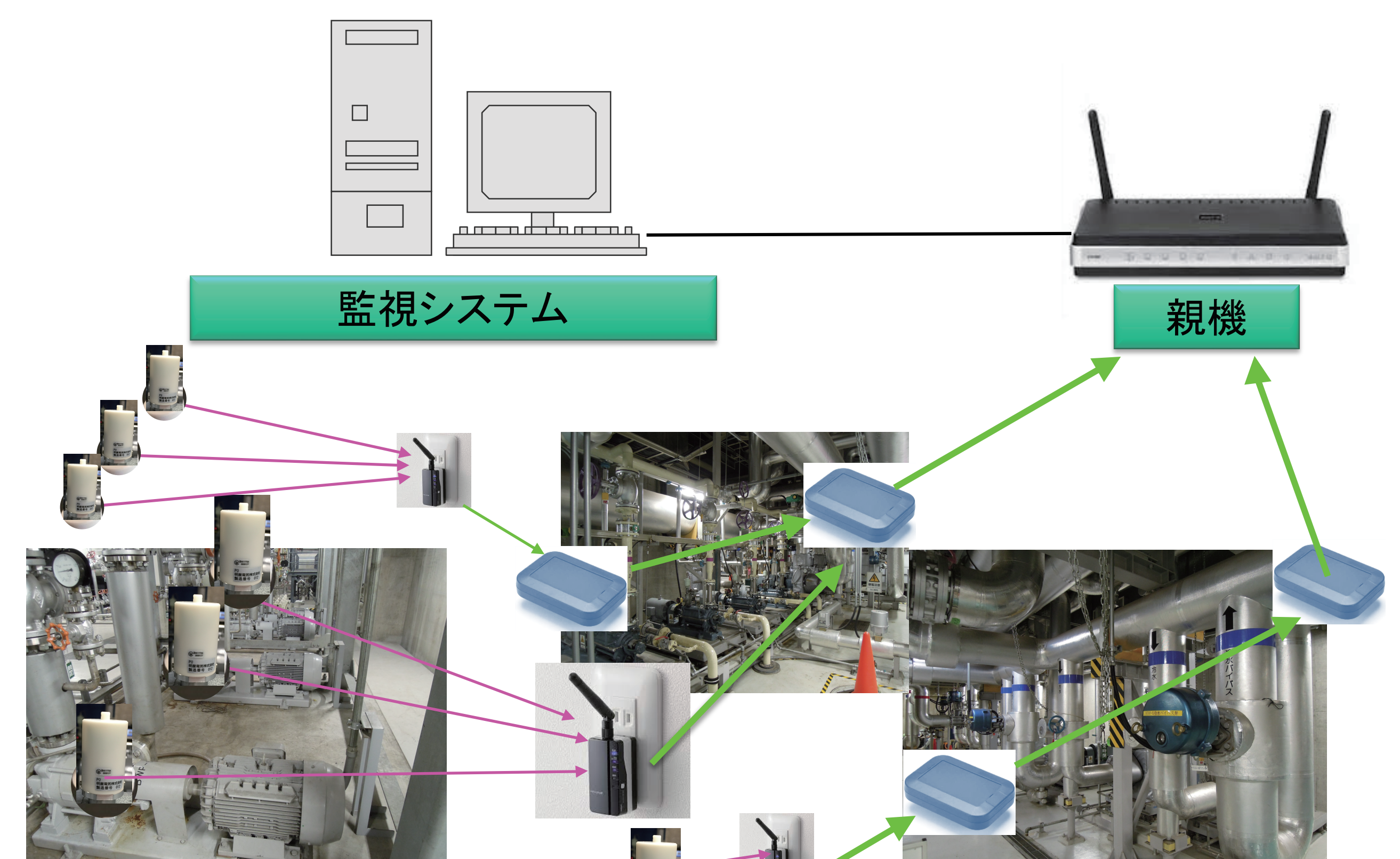


【振動加速度ピックアップとP型センサ端末の出力比較】

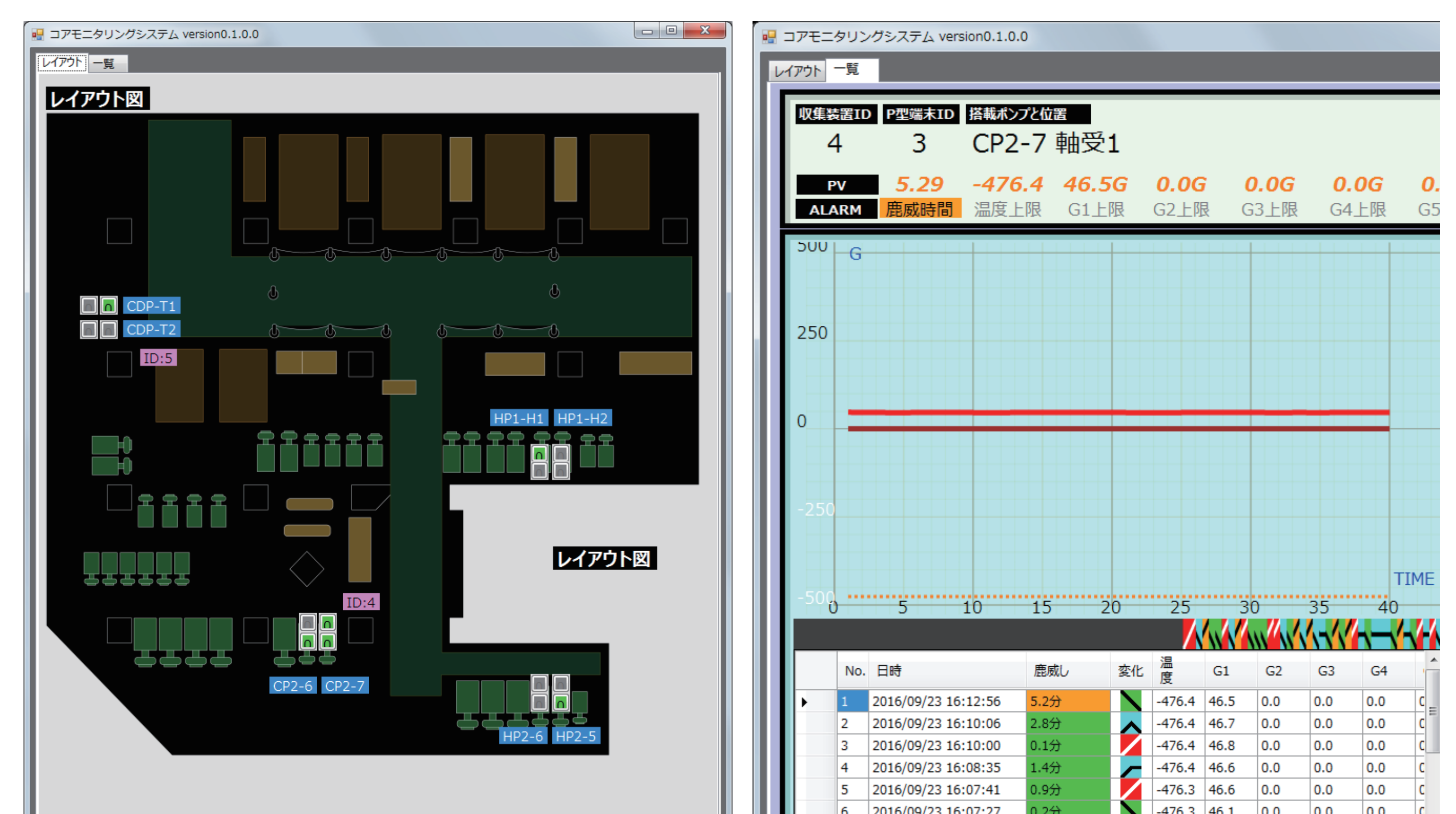
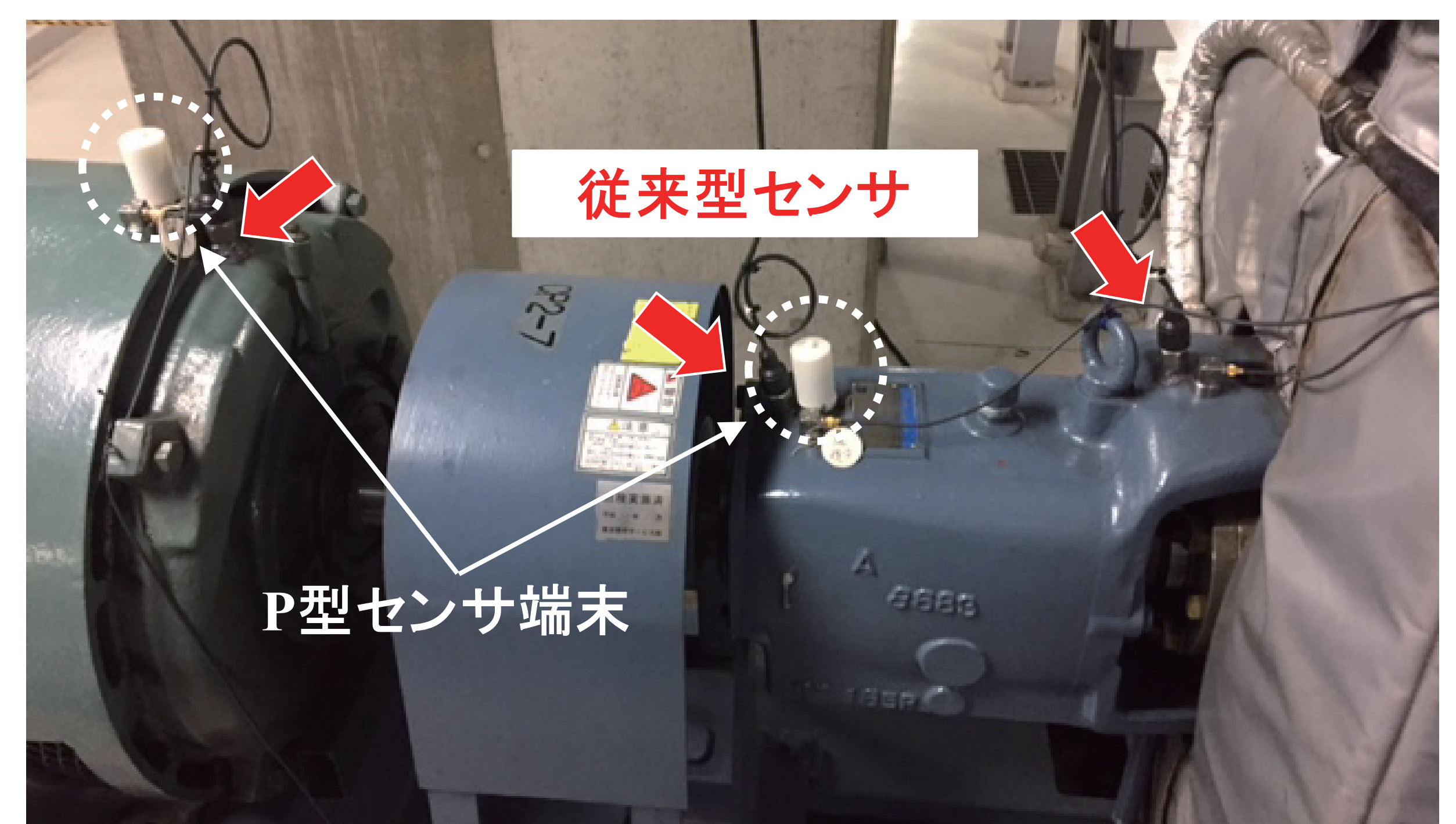


【病院施設】

【熱供給会社が運営する複数の地域冷暖房施設】



【オンサイトでのデータ収集装置】



【独自の傾向監視で診断結果の見える化】