

発表No.A1-7

燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業/水素利用等高度化先端技術開発/交流磁場誘起レーザー変位計を用いた金属異物非接触マイクロ断層検出システムの開発

佐伯 壮一
名城大学
2024年7月18日

連絡先：名城大学 佐伯壮一
E-mail: saeki@meijo-u.ac.jp
TEL: 052-838-2587

事業概要

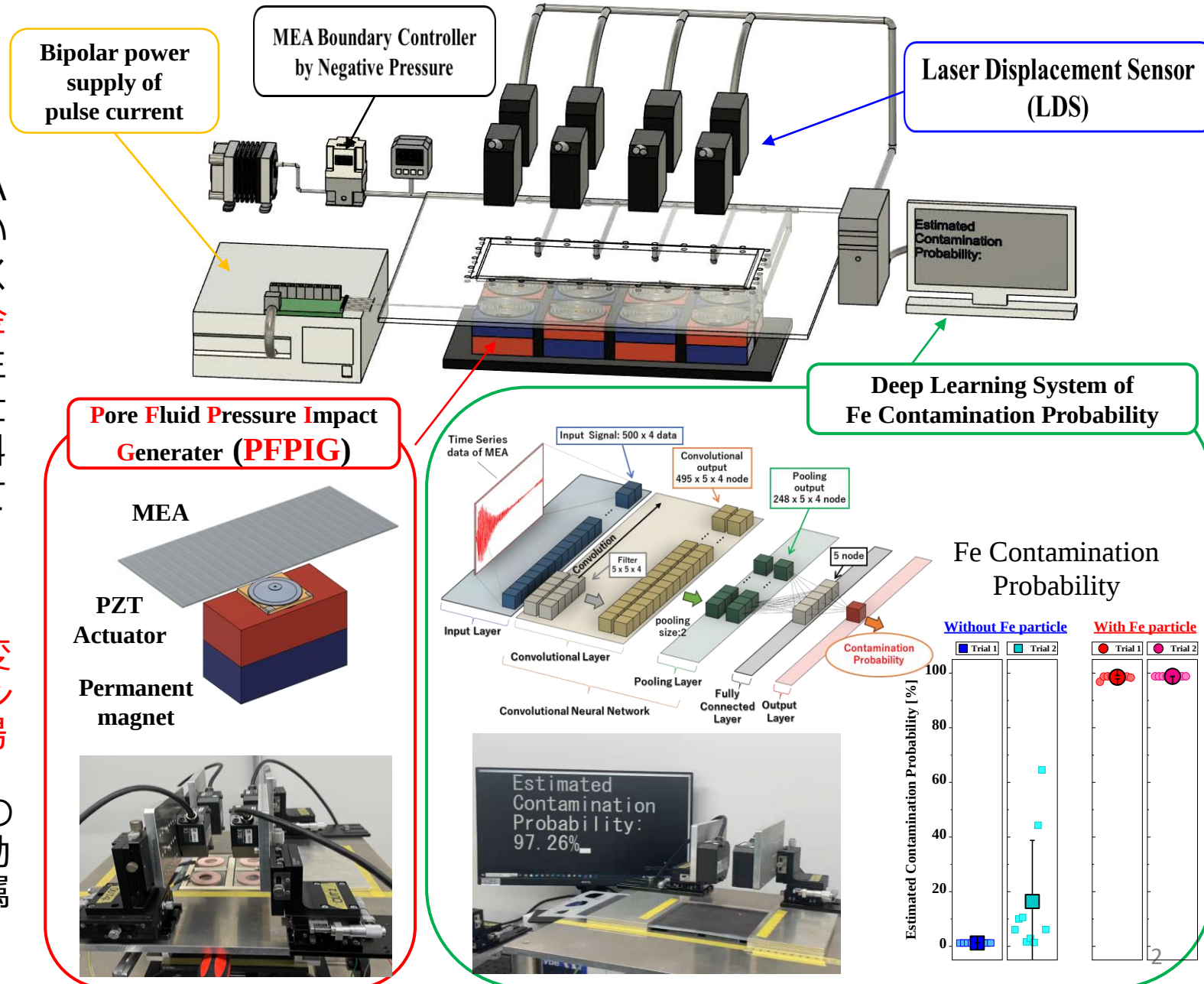
1. 期間：2020年10月～2025年3月

2. 研究開発目標

燃料電池自動車における膜電極接合体（MEA）の生産プロセスでは**金属コンタミ**が比較的高い頻度で発生する。これは燃料電池の性能を著しく低下させ、その品質保証の根幹に関わるため、**金属コンタミの検出**を低コスト・高効率に実現し、生産ライン上での実装を目標とする。これにより、世界に先駆けて市場導入を開始した我が国の燃料電池技術の競争力を強化し、世界市場において確固たる地位を確立することが可能となる。

3. 成果・進捗概要

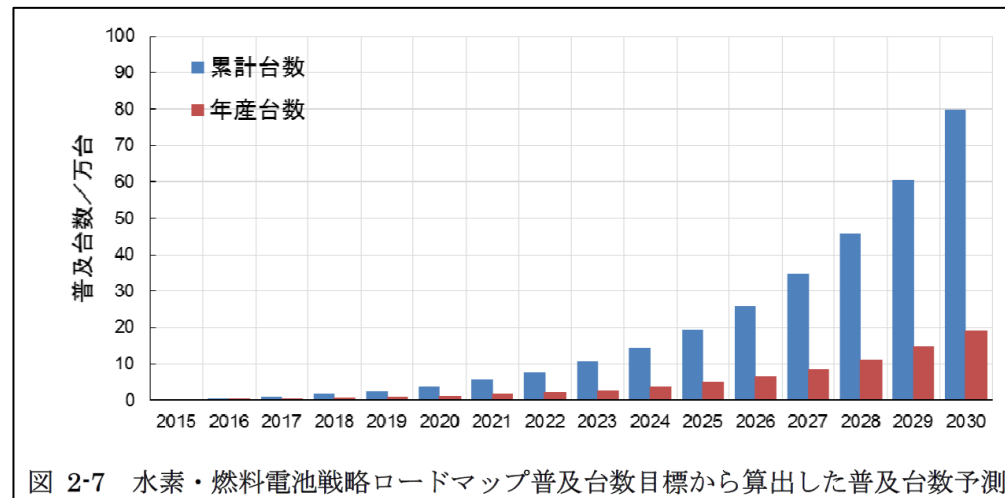
本研究では、**レーザ変位計（LDS）**等の微小変位検出機能を備え、電磁もしくは間隙流体圧インパクト発生器（PFPIG）をユニット化した「**磁場誘起振動レーザ変位計**」を開発する。MEAに間隙流体圧を負荷し、MEAの導電率と金属異物の磁化率に応じた運動応答（せん断波）から振動振幅および位相に基づく振動変化によって、金属異物の有無を非接触検出するシステムである。



1. 事業の位置付け・必要性

○開発目標が最新（直近）の産業界等のニーズ、他社の開発状況等も踏まえた位置づけ

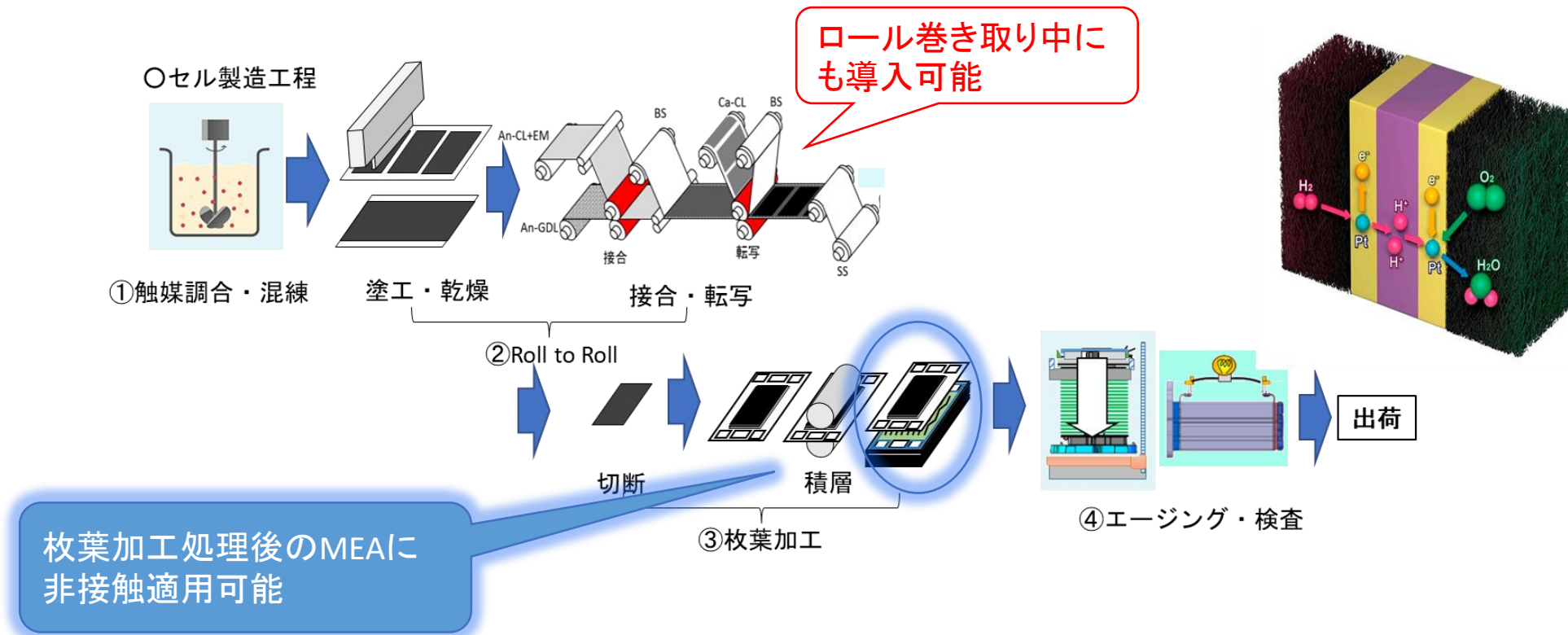
- 水素・燃料電池戦略ロードマップを鑑みると、**2025年に累計20万台**、**2030年に累計80万台**、6年間で60万台の生産が必要であり、2030年には 20万台/年 の生産能力が要求されていると考えられる。1日の生産台数 833台/日 と試算すると、1台に搭載セル数(250~280cell/台)、生産ライン稼働時間(16Hr/日稼働)を考慮すると、多く見積もると 3.6~4cell/sec の生産速度が要求されている。開始から2年たった現在においても、他社の開発状況に変化は無く、産業界のニーズを維持している。
- このように、普及台数予測から生産速度の試算として、**1cell/sec 程度**の生産速度が要求されていることから、MEA生産ラインに導入する異物金属検査システムの構築は、産業界ニーズとの合致している。



1. 事業の位置付け・必要性

● 産業界ニーズとの貢献度

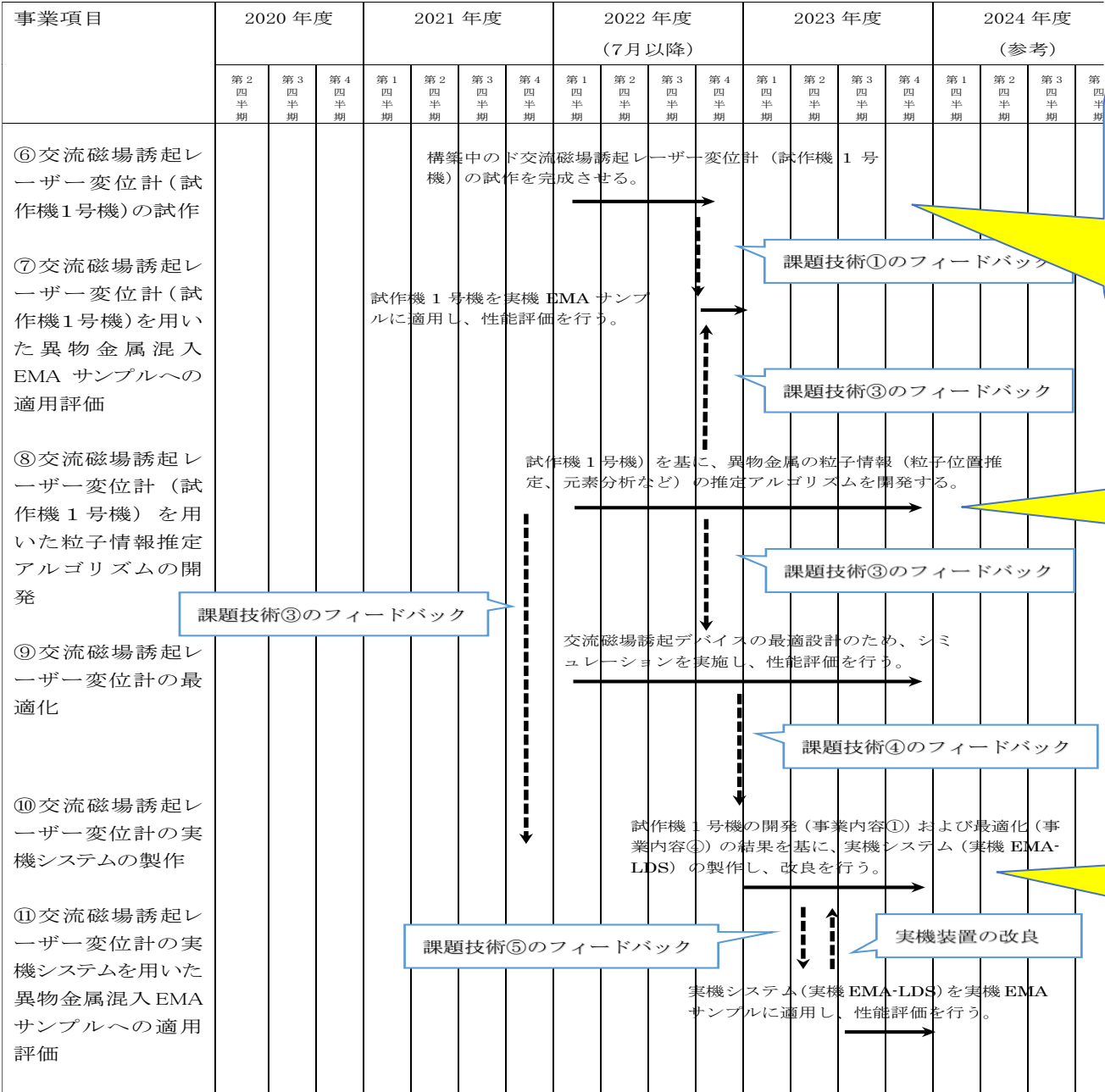
- ❑ 下記のMEA生産ラインに導入する異物金属検査システムとしては、現状ではX線投影装置で行っているが、その分解能は100マイクロより悪いと考えられる。
- ❑ コイル動磁場もしくは間隙流体圧と永久磁石によるMEA振動誘起デバイスとレーザー変位計で構成される「磁場誘起振動レーザー変位計」は、検出感度だけでなく、検査速度、コスト低減、生産ライン導入の簡易化、全てに貢献可能であり、産業界ニーズを満足している。



2. 研究開発マネジメントについて（研究開発の目標と目標設定の考え方）

- 現状では、高解像度レントゲン（X線）装置2台を生産ラインに導入し、0.15 cell/sec 程度にて異物検査が実施されている。実際には、ロボットマニピュレータを用いたX線装置へのサンプル移動時間も加わるため、更に検査時間は要している。また、X線装置の異物金属粒子の検出空間分解能は100マイクロを限界とされており、X線装置2台のコストは約8000万円とされている。すなわち、実用化を見据えた上で最終目標の位置づけを以下としており、産業界等のニーズとして、研究開発目標レベルは高く維持していると考える。
 - ① 検出粒子径を100マイクロ以下
 - ② 検出時間を1cell/sec 程度
 - ③ コストをX線検査装置の10分の1
- 提案する磁場誘起振動レーザ変位計は、安価かつ高速検査および生産ラインへの導入を鑑みた簡易システム（コイル動磁場もしくは間隙流体圧と永久磁石によるMEA振動誘起デバイスとレーザ変位計で構成）であり、その開発目標となる仕様は以下の項目の通り、関心表明企業においても魅力的な値となっている。
 - 異物（径100マイクロ）混入有無を検出可能
 - パルス磁場印可から50～100ミリ秒（50mm×50mm）にて検出可能（8ユニットで0.4秒Z達成）
 - レーザ変位計による多点計測で 100mm×200mm の実機MEAの領域検査が可能
 - 永久磁石とコイル動磁場によるパルス磁場誘起デバイスは安価に構築できる。
 - レーザ変位計プローブ15本のシステム構成であってもコストは500万円程度（単価）まで抑えられる。
 - X線検査装置と異なり、実機MEAの生産工程（ロール工程など）にそのまま導入可能であり、ロボットマニピュレータなどの導入は不必要なため、さらに検査時間の短縮が可能。
 - X線検査装置と異なり、他金属による偽陽性（FP）等の回避可能

2. 研究開発マネジメントについて（研究開発のスケジュール）



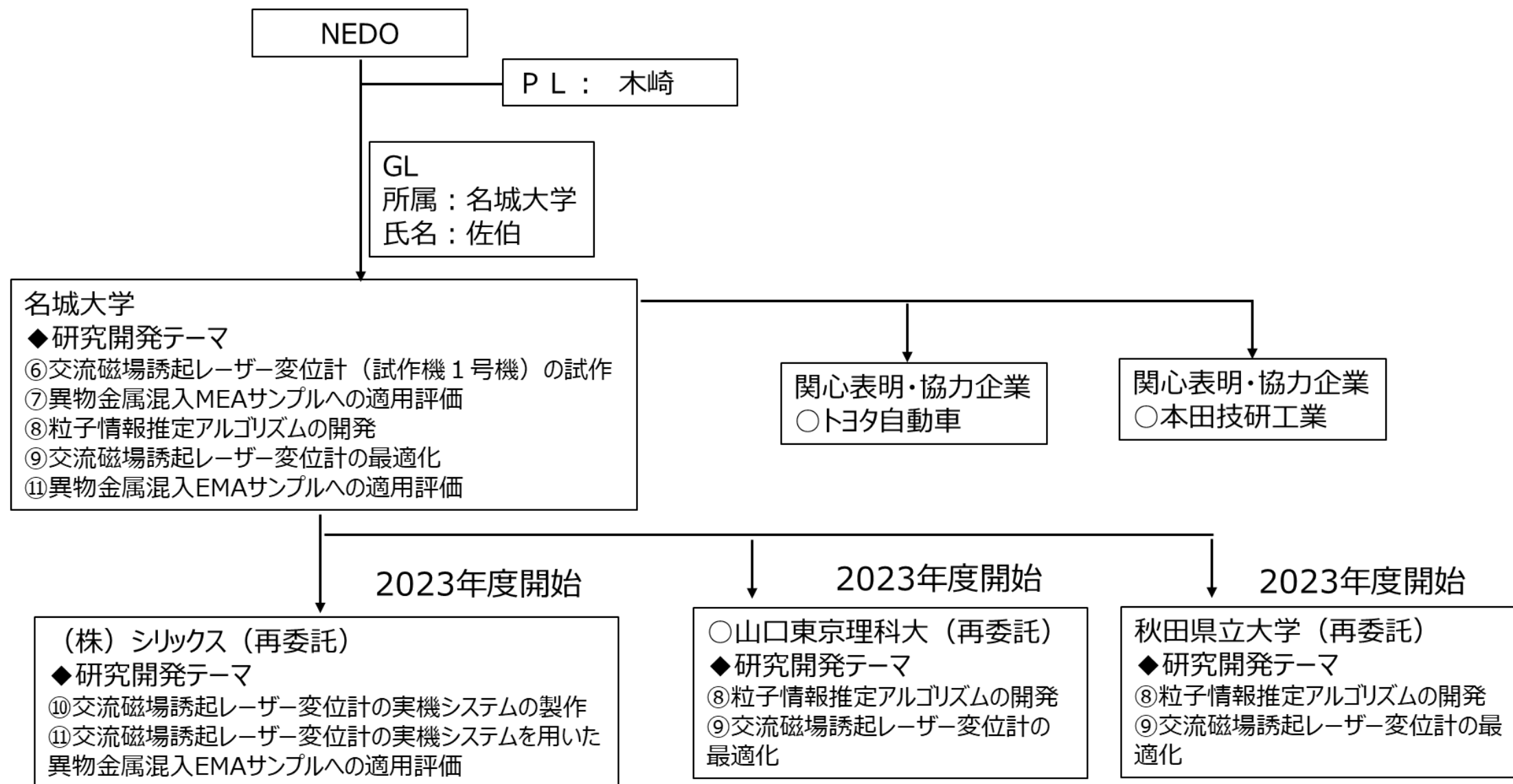
深層学習システムの性能向上を目標として、実験データの再現性を向上させるため、試作機1号機の装置改善

- LDSの設置位置完全固定
- サンプル磁石間距離（サンプルたわみ考慮）
- サンプル固定（吸引口周辺部材改善）

深層学習システム（1D-CNN + BiLSTM + AM）の改良。本システムに基づき、粒子有無だけでなく、粒子存在ユニット（粒子位置）＆粒子元素の推定を可能にする。

試作機1号機の装置改善と深層学習システム（1D-CNN + BiLSTM + EM）の構築に基づき、実機試作を進める。

2. 研究開発マネジメントについて（研究開発の実施体制）

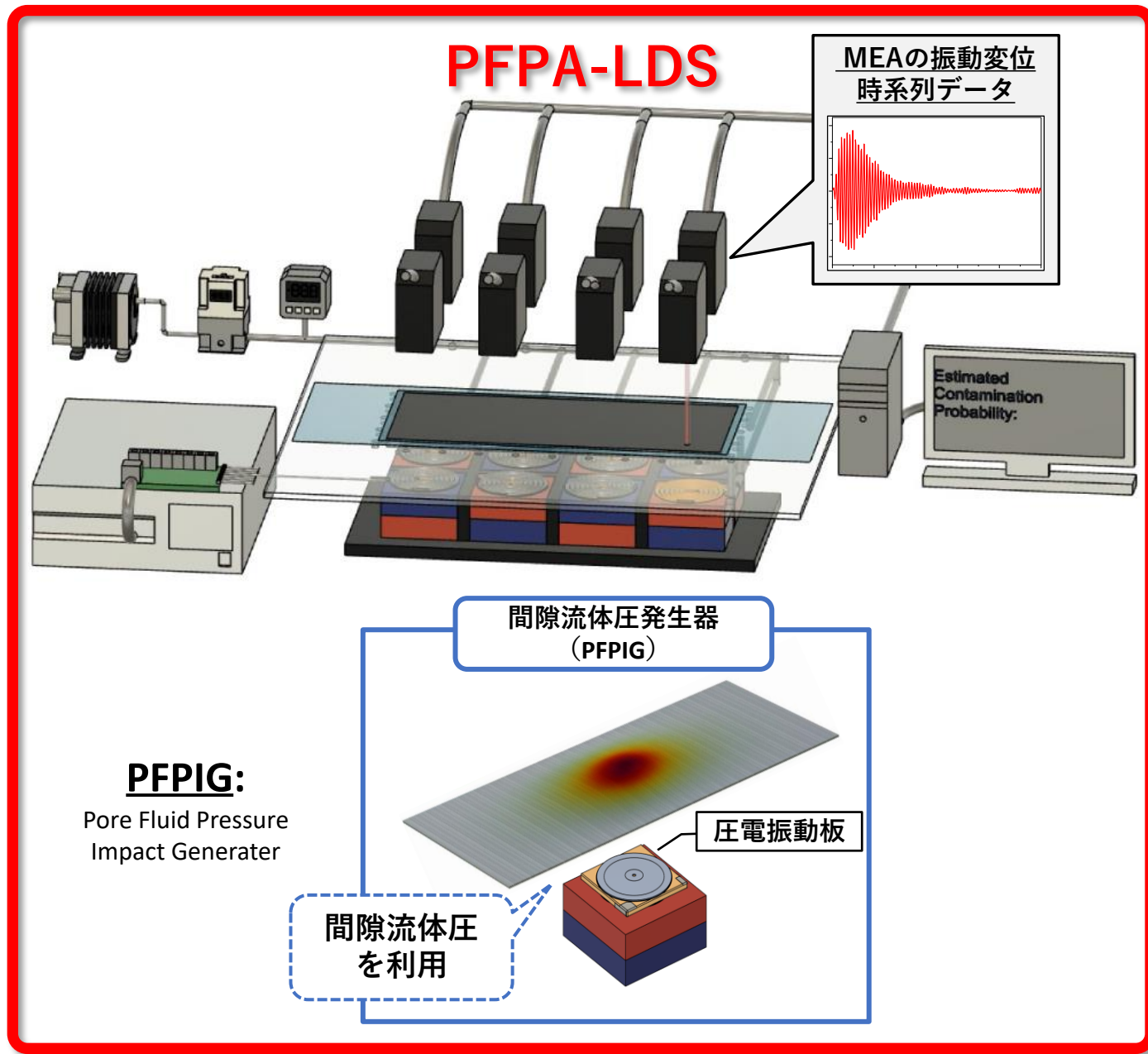


2. 研究開発マネジメントについて（知的財産戦略）

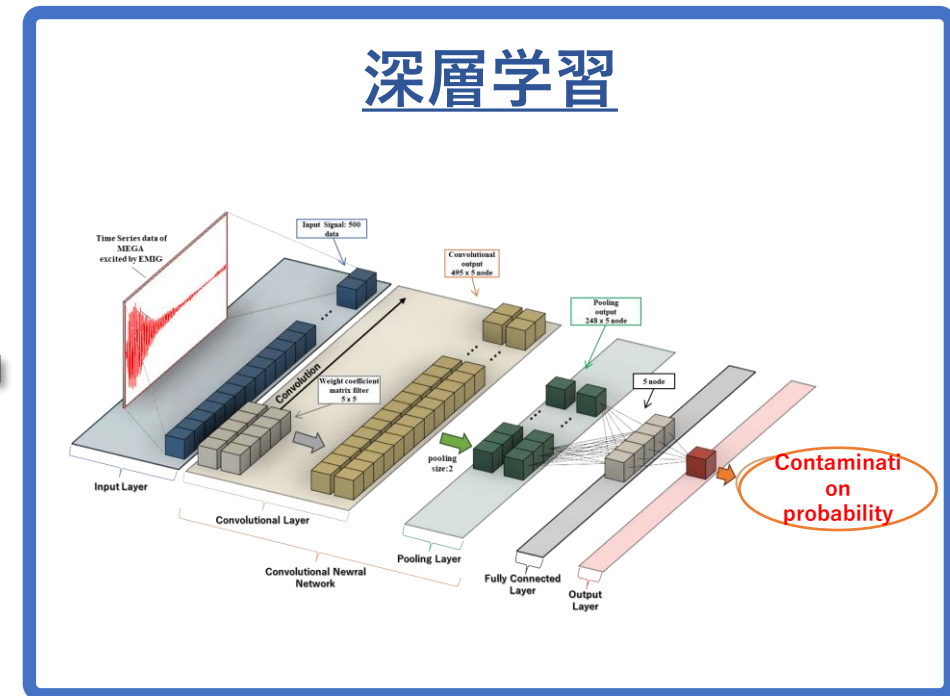
- システムの改案に加え，理論説明と実施例の追加のため時間を要したが，Fe粒子有無とFe粒子位置の検出までの知的財産に関しては，特許申請（国内）を6月頭に完了した。
- ただし，知財の漏れを埋めるために（誘起流，境界把持システム），国内優先 & PCT出願時に追加修正を加えた。特に，電磁場誘起ユニットにおけるコイル変形によって発生する誘起流も，MEAの振動に影響していることが実験的に確認されたため，誘起流による振動励起も含めた特許を構築する必要がある。この場合，パルス電流バイポーラ電源を省くことが可能である。このため，更にシステムを簡素化・低コスト化可能であり，優位性があるため国内優先にて追加修正が必要である。
- これらを踏まえて，JST（PCT出願）支援制度に応募し採択され，5月31日にPCT出願を完了した。

○特許出願件数・予定件数について：上記の出願済み1件に加え，別途（2件）の申請を予定している。

3. 研究開発成果について（研究開発成果）



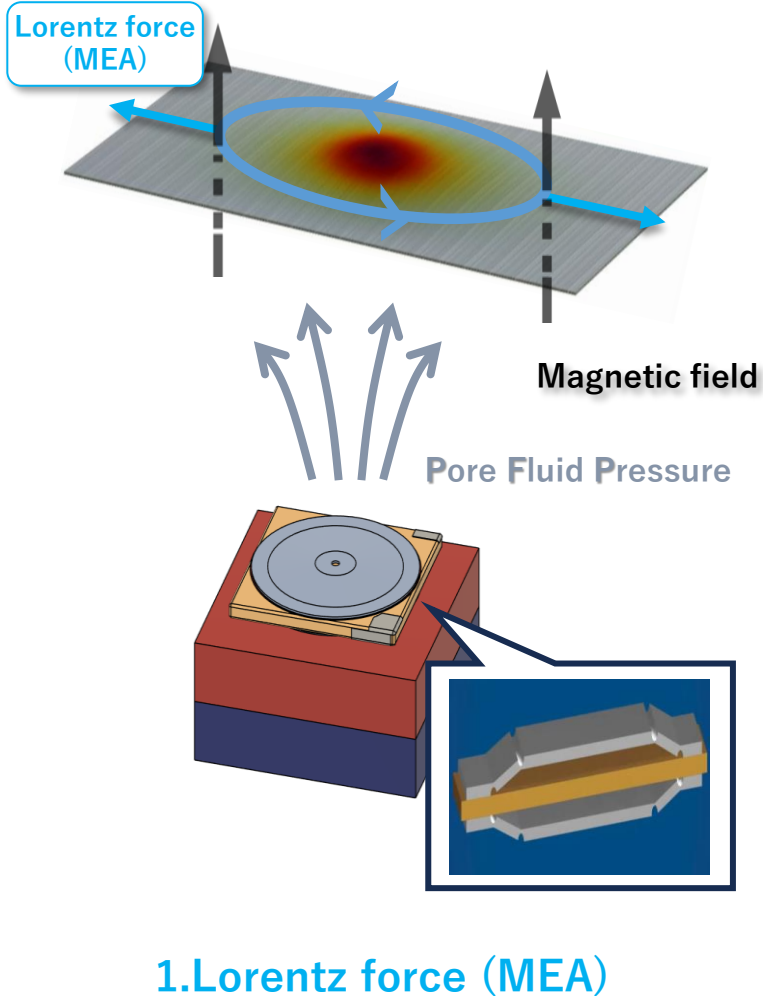
+



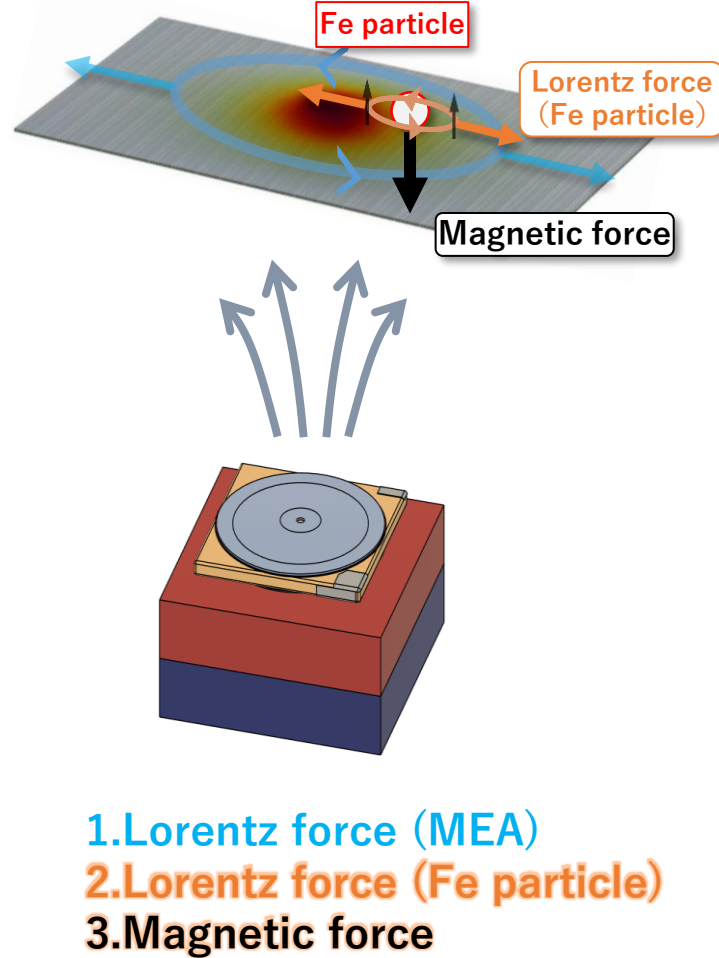
コスト ○
検査時間 ○
装置サイズ ○
検出可能異物径 ○

3. 研究開発成果について（研究開発成果）

MEA **without** a buried Fe particle



MEA **with** a buried Fe particle



圧電振動板をステップ電圧により駆動

間隙流体によるパルス圧力波発生

サンプルに固有振動誘起

異物が存在する場合

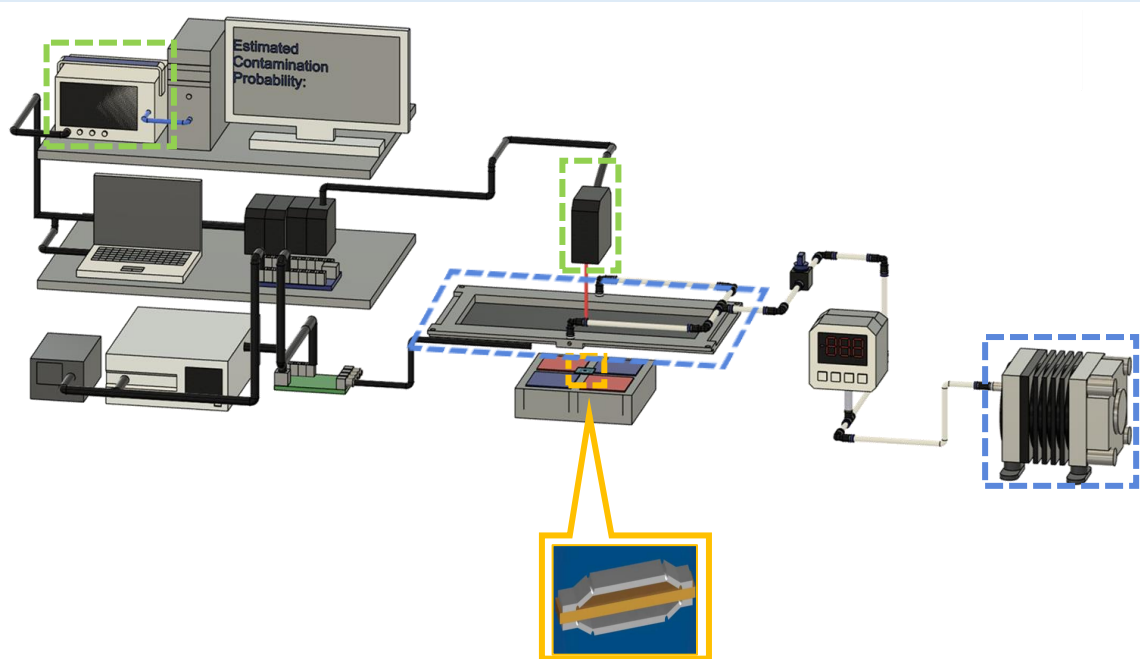
金属異物の
導電率・透磁率に依存した
ローレンツ力・磁力発生

振動の振幅や位相が変化

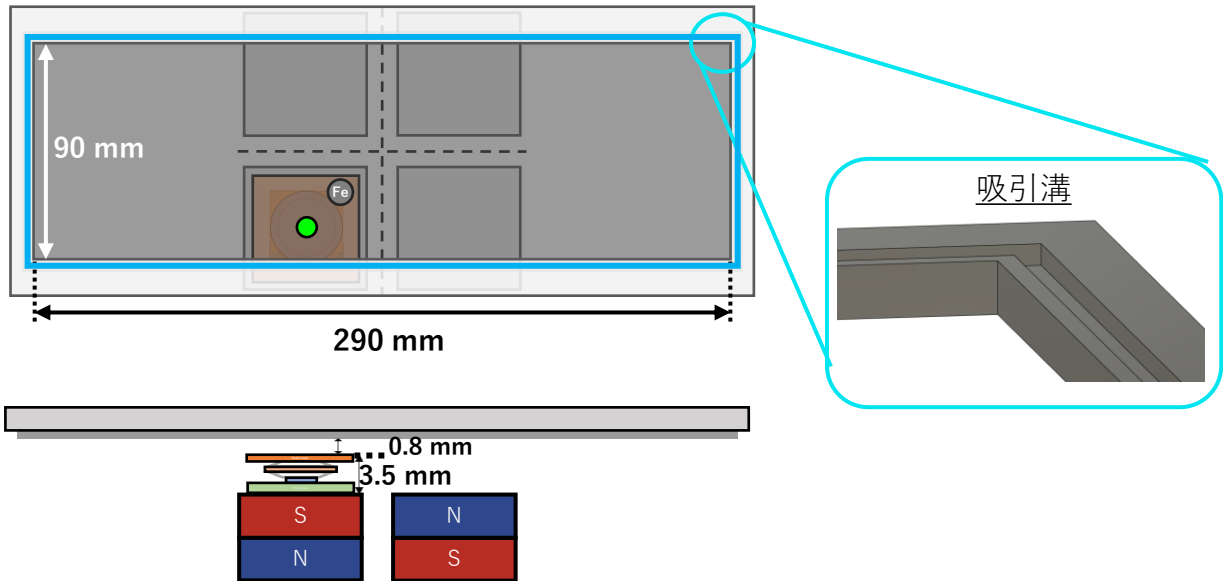
金属異物検出

3. 研究開発成果について（研究開発成果）

PFPA-LDS system



テストセクション



圧電振動板 駆動条件

パラメータ	値
信号種別	ステップ
電圧	110 [V]
時間幅	110 [ms]

吸引拘束条件

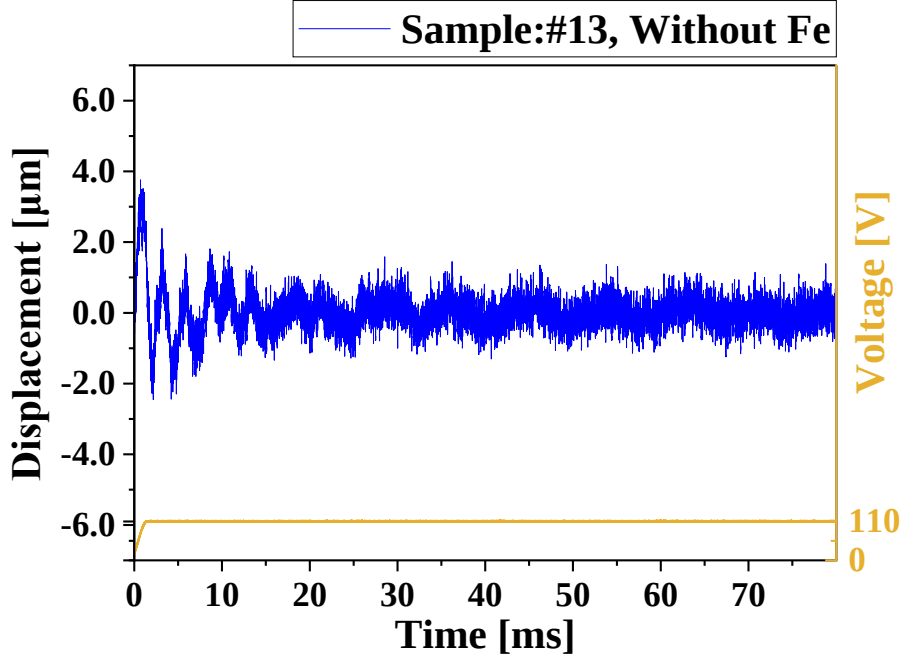
パラメータ	値
吸引溝 幅	1 [mm]
負圧	-32 [kPa]
吸気量	74 [L/min]

計測条件

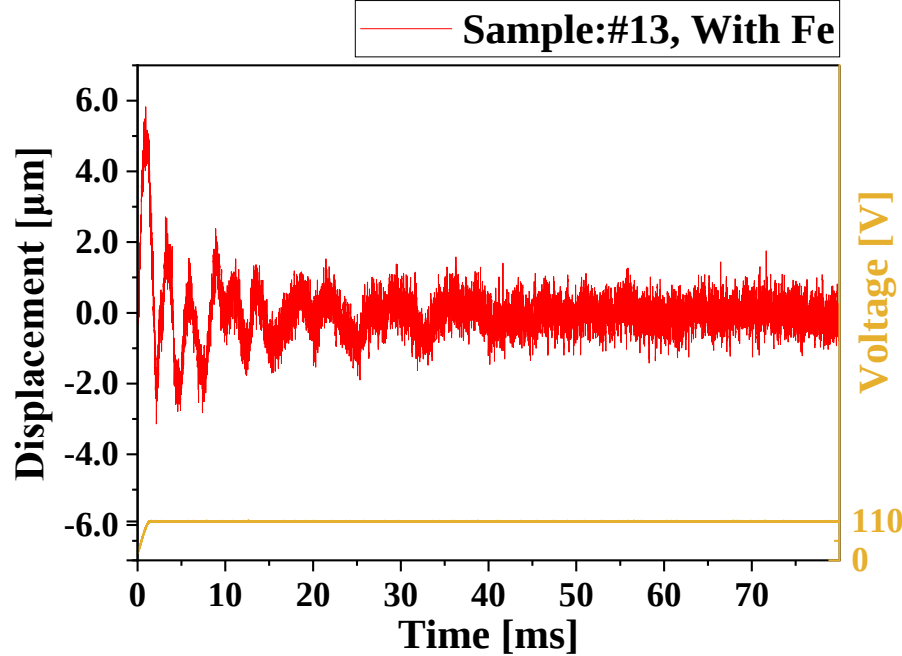
パラメータ	値
計測ユニット	中央左下
サンプリングレート	125000 [Hz]
時間分解能	4 [μs]

3. 研究開発成果について（研究開発成果）

異物無し（# 1）



異物有り（# 2）



サンプル条件

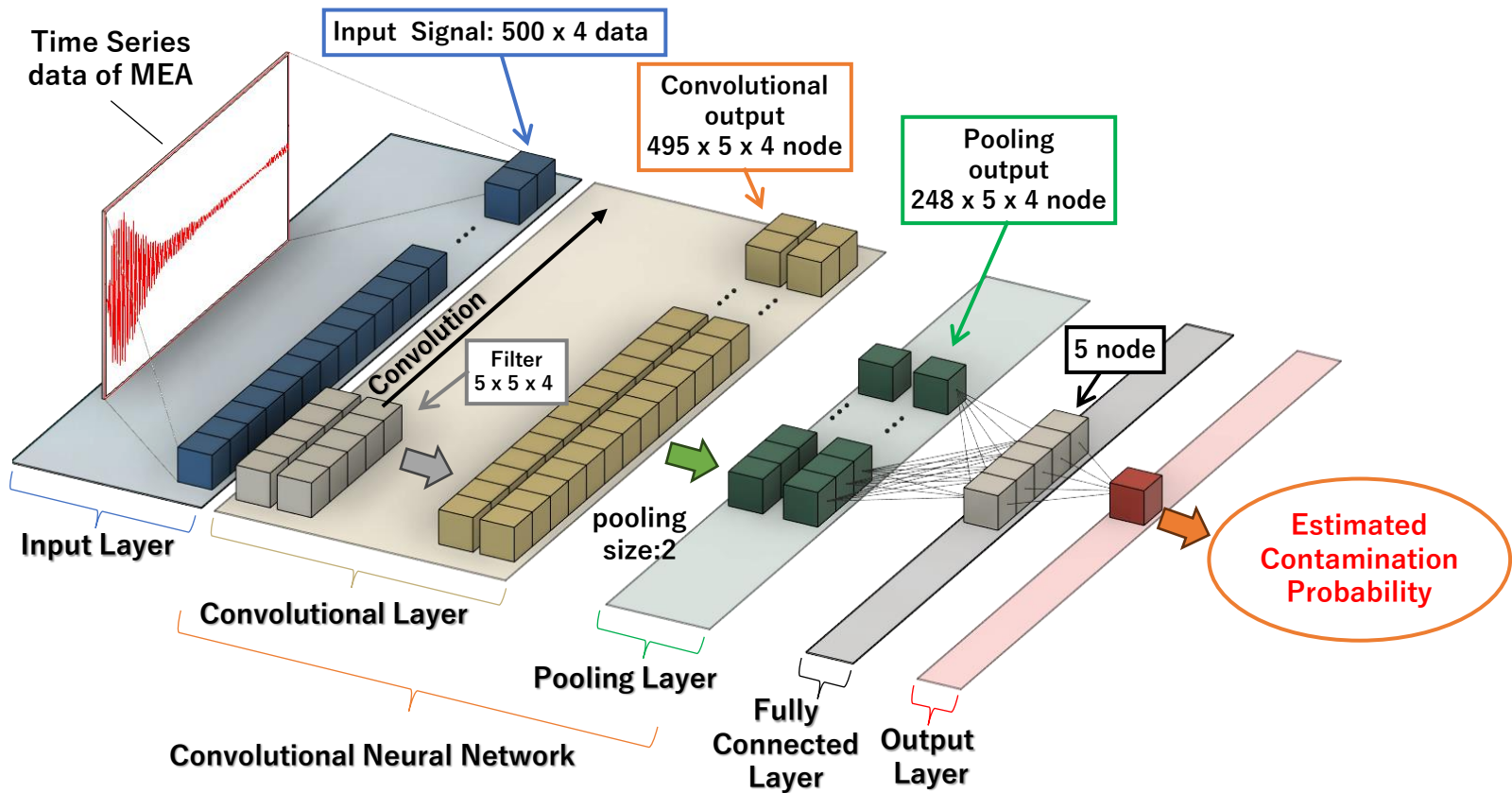
通し 番号	サンプル 番号	詳細	異物径 [μm]
1	#13	異物無し	—
2	#13	異物有り	350

計測条件

パラメータ	値
計測ユニット	中央左下
サンプリング レート	125000 [Hz]
時間分解能	4 [μs]
取得データ長	50000 [point]

パルス圧力波によりサンプルに固有振動を励起 ➡ 減衰

3. 研究開発成果について（研究開発成果）



教師データ

サンプル	詳細	データセット数	真値
#2	異物無し	実験 1 回 × 7 データ	0 [%]
#2	異物有り	実験 1 回 × 7 データ	100 [%]
#14	異物無し	実験 1 回 × 7 データ	0 [%]
#14	異物有り	実験 1 回 × 7 データ	100 [%]

テストデータ

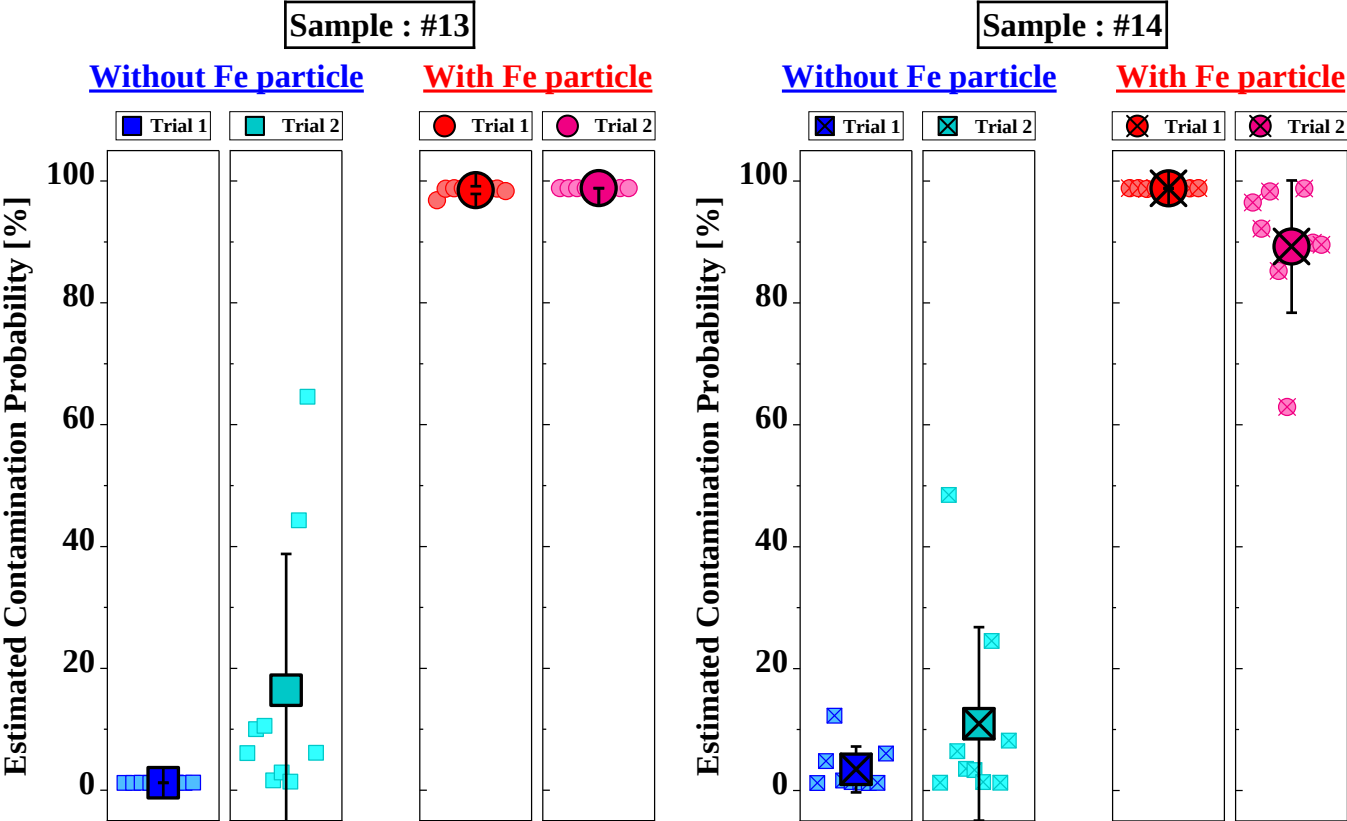
サンプル	詳細	データセット数	真値
#2	異物無し	実験 2 回 × 7 データ	0 [%]
#2	異物有り	実験 2 回 × 7 データ	100 [%]
#14	異物無し	実験 2 回 × 7 データ	0 [%]
#14	異物有り	実験 2 回 × 7 データ	100 [%]
#13	異物無し	実験 2 回 × 7 データ	0 [%]
#13	異物有り	実験 2 回 × 7 データ	100 [%]
#9	異物無し	実験 2 回 × 7 データ	0 [%]
#9	異物有り	実験 2 回 × 7 データ	100 [%]

CNN 構築条件

パラメータ	値
学習率	0.1
重み初期値	乱数 (0.0 ~ 1.0)
学習アルゴリズム	誤差逆伝播法
活性化関数	Sigmoid 関数
学習回数(Epoch数)	10000 回

3. 研究開発成果について（研究開発成果）

- ・ CNNに異物有無サンプルのデータを入力→出力値された推定異物存在確率をプロット
- ・ 異物有り・無し各2サンプルをテスト



テストデータ

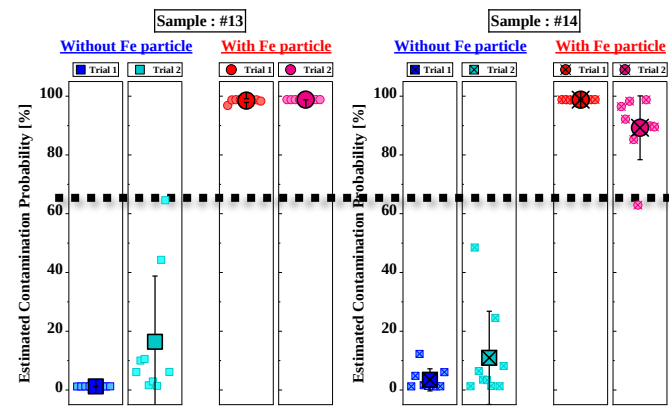
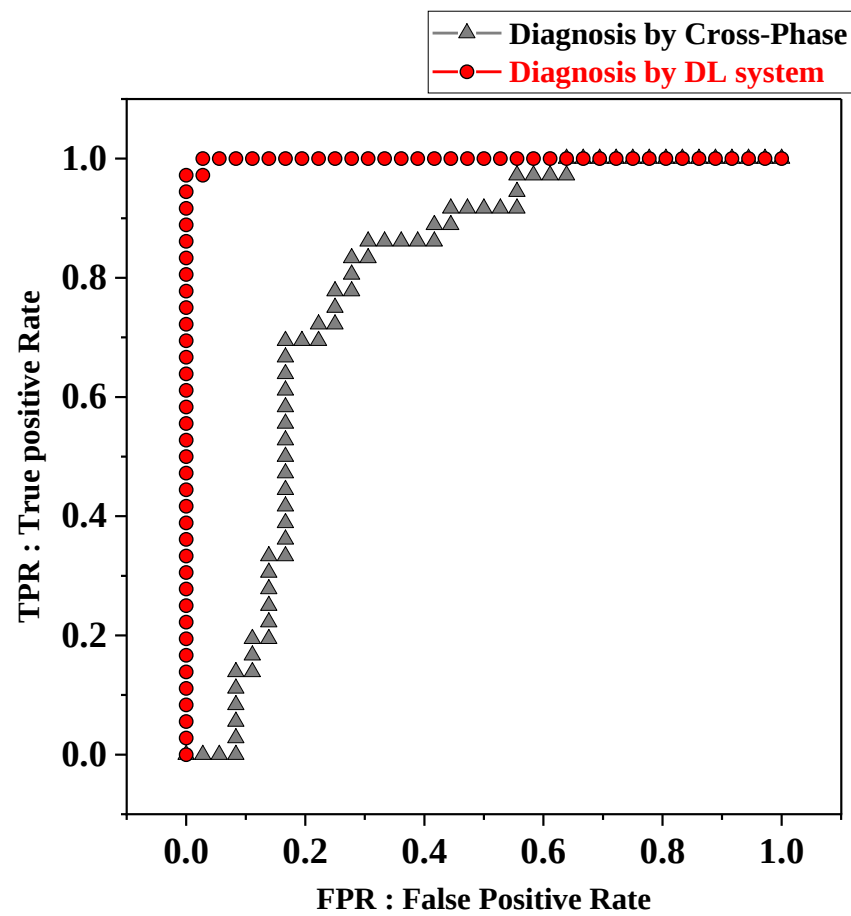
詳細	データセット数	真値
異物無し	2 サンプル × 2 回実験 × 7 データ	0 [%]
異物有り	2 サンプル × 2 回実験 × 7 データ	100 [%]

サンプルの内訳

サンプル 番号	詳細	異物径 [μm]
#13	異物無し	—
#13	異物有り	350
#14	異物無し	—
#14	異物有り	350

3. 研究開発成果について（研究開発成果）

・ CNNとクロス位相の結果をもとにROC曲線を作成



閾値を設定し
推定値を判定
(閾値は推定値をもとに設定)

例：閾値を64%にした
場合の判定結果

		真値	
		粒子有り	粒子無し
推定結果	粒子有り	真陽性 (True Positive) TP = 35	偽陽性 (False Positive) FP = 0
	粒子無し	偽陰性 (False Negative) FN = 1	真陰性 (True Negative) TN = 36

感度：

$$\text{TPR} = \frac{\text{TP}(\varphi)}{(\text{TP}(\varphi) + \text{FN}(\varphi))}$$

= 0.97

特異度：

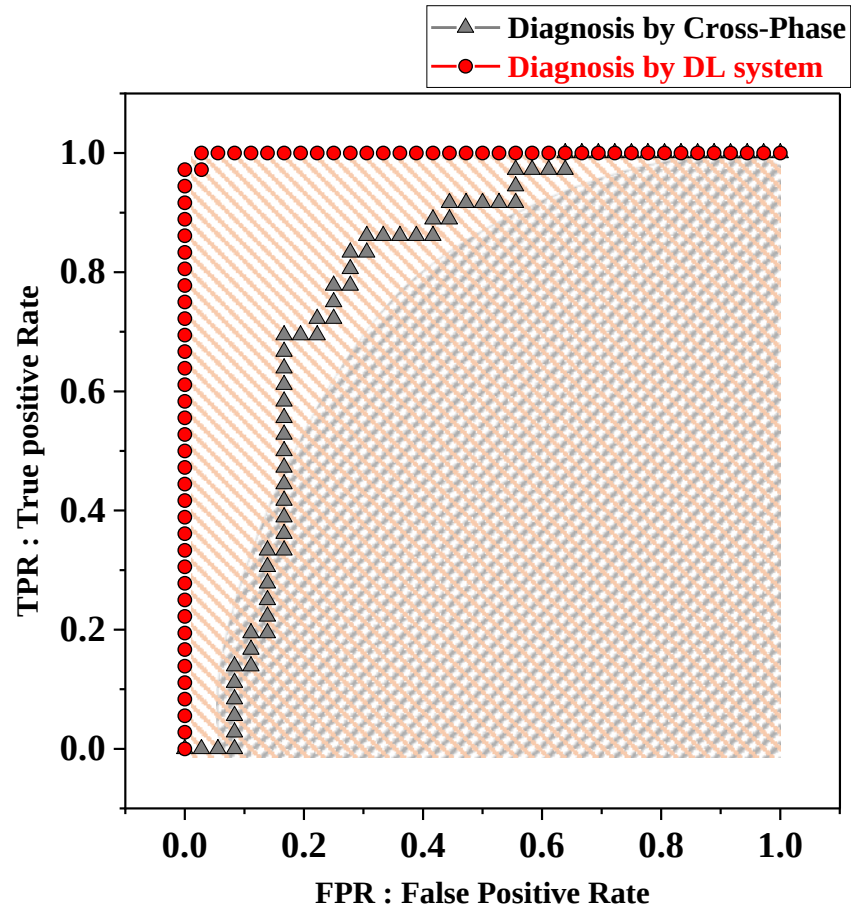
$$\text{FPR} = \frac{\text{FP}(\varphi)}{(\text{FP}(\varphi) + \text{TN}(\varphi))}$$

= 0.02

→ 閾値を変更しFPR & TPRをプロット

3. 研究開発成果について（研究開発成果）

- ・ CNNとクロス位相の結果をもとにROC曲線を作成
- ・ AUCを算出して評価を実施



AUC (Area Under Curve) : ROC曲線の下面積

→AUCが1.0に近いほど検出能が高い

クロス位相による検査 : AUC = 0.78

CNNによる検査 : AUC = 0.99

深層学習システムを用いることで従来手法と
比較してAUCならびに検出能が向上

3. 研究開発成果について（特許，論文，学会発表，広報等）

(1) 研究発表・講演（口頭発表も含む）

- ① 佐伯壮一，他3名，名城大学，“電磁場誘起振動を用いた燃料電池膜電極接合体における微小金属異物検出システムの開発 検出メカニズムの実験的検討”，日本機械学会2023年度年次大会，2023/09/06.
- ② 佐伯壮一，他3名，名城大学，“電磁場誘起振動を用いた燃料電池膜電極接合体における微小金属異物検出システムの開発 機械学習に基づく自動検出システム”，日本機械学会2023年度年次大会，2023/09/06.
- ③ 佐伯壮一，他3名，名城大学，“電磁場誘起振動を用いた燃料電池膜電極接合体における微小金属異物検出システムの開発 全面検査に向けたラスタ走査の実験的検討”，日本機械学会生産システム部門研究発表講演会2024，2023/03/05.
- ④ 佐伯壮一，他3名，名城大学，“電磁場誘起振動を用いた燃料電池膜電極接合体における微小金属異物検出システムの開発 機械学習に基づく自動検出システム”，日本機械学会生産システム部門研究発表講演会2024，2023/03/05.

(2) 論文

- ① Takumi Hibi, et al., Meijo University, “Experimental study on diagnosis of metallic micro-particles buried into fuel cell using magnetic field excited oscillation”, 2023 Society of Experimental Mechanics (SEM) Annual Conference, #16000(PDF), June 5-8, 2023.

(3) 特許等

- ① 佐伯壮一，特願2023-091507，国内，：令和5年6月2日，出願，異物検査システム

(4) 成果普及の努力（プレス発表等）

- ① 佐伯壮一，名城大学，“電磁場誘起振動を用いた微小異物金属リアルタイム検査システム EMIG-LDS”，名城大学リサーチフェア2023，2024/03.

4. 今後の見通しについて（実用化・事業化に向けた取り組み）

○関心表明企業との連携、開発体制

- 関心表明企業の自動車メーカーにおけるMEA生産ラインの見学，および課題の共有・成果報告・意見交換を月1回行っている。
- 実機構築（再委託企業：シリックス）へは，実機製作を実施しており，月1回の打合せを実施している。
- 開発検査システムの定量的な評価のために，自動車メーカーからの実機MEAの供給も重要ではあるが，標準サンプルの確立は急務である。現在は，AFCとの秘密保持契約の基に，標準サンプルの製作として自作GDLサンプルの構築を実施している。これにより，構築システムの性能評価の定量化だけでなく，深層学習（AI）の教師データとしての利用が可能となる。

○実用化に向けた課題の整理、対応と計画

- 自動車メーカ生産ラインへの導入を早めるために，テスト導入による検査性能を2026年度には計画したい。
- テスト導入のためにも，2024年度～2025年度には，検査検証と再設計・再製作のPDCAサイクルを回す計画である。

