

Oral presentation | III. Fission Energy Engineering : 303-1 Reactor Instrumentation, Instrumentation System, Reactor Control / 303-2 Remote Control, Robotics, Image Processing

📅 Fri. Mar 14, 2025 10:15 AM - 11:55 AM JST | Fri. Mar 14, 2025 1:15 AM - 2:55 AM UTC 🏠 Room D(Zoom room 4)

[3D01-06] Nuclear Reactor Sensing and Robotics Technologies

Chair:Akio Gofuku(Okayama Prefectural Univ.)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[3D01]

Early detection of in-core abnormalities in Na-cooled fast reactors based on data-driven acoustic diagnosis

(1) General outline

*Yoshitaka Ueki¹, Kosuke Aizawa² (1. TUS, 2. JAEA)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[3D02]

Early detection of in-core abnormalities in Na-cooled fast reactors based on data-driven acoustic diagnosis

(2) Investigation of boiling detection technique

*Riku Shibasaki¹, Yoshitaka Ueki¹, Kosuke Aizawa² (1. TUS, 2. JAEA)

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[3D03]

Early detection of in-core abnormalities in Na-cooled fast reactors based on data-driven acoustic diagnosis

(3) Visual explanation of identification basis

*Koya Watanabe¹, Yoshitaka Ueki¹, Kosuke Aizawa² (1. TUS, 2. JAEA)

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

[3D04]

Early detection of in-core abnormalities in Na-cooled fast reactors based on data-driven acoustic diagnosis

(4) Feasibility study

*Kosuke Aizawa¹, Yoshitaka Ueki² (1. JAEA, 2. TUS)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[3D05]

Acoustic anomaly detection of gas leakage in liquid based on unsupervised learning

*Nao Mikami¹, Kosuke Aizawa¹, Akikazu Kurihara¹, Yoshitaka Ueki² (1. JAEA, 2. TUS)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[3D06]

Attempt to Add a Holding Force Sensing Function to a Manipulator for Hot Cells

*Akihiko Nishimura^{1,2}, Tsugio Ide³, Nobuyuki Ishihara³, Kenyu Urata⁴ (1. JAEA, 2. Univ. of Fukui, 3. deltafiber.jp, 4. J-Tech)

11:45 AM - 11:55 AM JST | 2:45 AM - 2:55 AM UTC

Time reserved for Chair

データ駆動型音響診断を基盤とした Na 冷却高速炉の炉内異常の早期検知の検討

(1) 全体概要

Early detection of in-core abnormalities in Na-cooled fast reactors based on data-driven acoustic diagnosis

(1) General outline

*植木 祥高¹, 相澤 康介²

¹東京理科大学, ²JAEA

「データ駆動型音響診断手法」の液体金属冷却高速炉への適用を目指した基礎研究を進めている。一連の研究のねらい、目的及び、満たすべき要件を概括する。

キーワード：Na 冷却炉、音響手法、異常早期検知、深層学習

1. 緒言

Na 冷却高速炉は、高出力密度でなおかつ稠密な炉心構造を有しており、何らかの原因により炉心内に異物が混入した際に流路局所閉塞が懸念される。局所閉塞の発生時には冷却材の流量減少が生じ、炉心の冷却不十分に続く燃料の過熱を招き、冷却材沸騰の発生が予測される。発生の防止等の措置が図られている一方、仮に発生した場合の早期検知による事象の拡大防止への期待がされている。沸騰時に発生する音圧を異常の早期検知に活用する「データ駆動型音響診断手法」の Na 冷却高速炉への適用を目指した基礎研究を進めており、本報にて研究のねらい、目的、満たすべき要件について述べる。

2. ねらい・目的

現在までに局所閉塞に起因した温度場や流れ場の変化を捉えようとする検討がなされているが、閉塞から沸騰発生に至る局所的な事象進展を直接捕捉することは原理上困難である。かかる課題に対応すべく本研究は、沸騰に固有の特徴を有する音響信号を計測し、従来の信号処理手法では困難であった識別能、検知能力の向上を図るべく、深層学習手法を援用したシステムを構築し検知手法（図1）の基本成立性を検証、有効性を示すことを目指している。

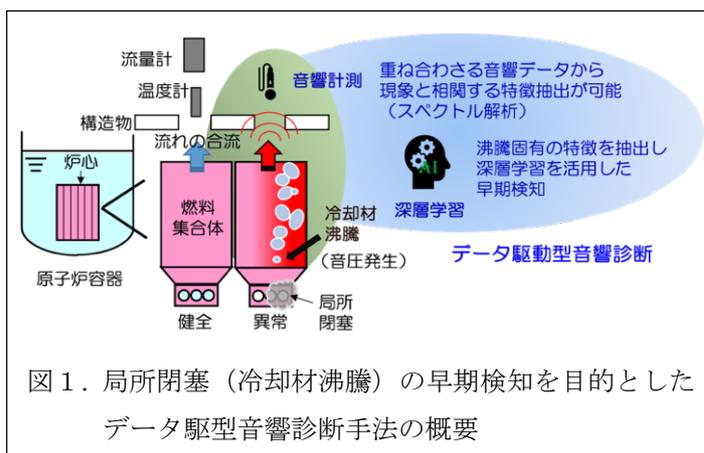


図1. 局所閉塞（冷却材沸騰）の早期検知を目的としたデータ駆動型音響診断手法の概要

3. 満たすべき要件

実機実装を目指した基礎研究として満たすべき要点としては以下の通りである。

- ① 音響診断の前提となる検知すべき沸騰現象の把握により、音源の特定と音圧発生メカニズムの理解を把握し、深層学習に課すべき特徴量を明らかにする。
- ② 音響計測信号から特徴量の抽出手法を検討し、沸騰を可視化・検知するアルゴリズムを構築する。
- ③ 沸騰検知を可能とする技術の基礎知見を取得整備するとともに、その基本成立性を示す。
- ④ 本研究実施後の実用に至る開発展開案を提案する。

4. 結言

これまで実施した可視化と現象に応じた音圧変化の時刻歴応答の関係の把握と分析から、沸騰現象の発現を検知する深層学習モデルが着目すべき音響特徴量は、沸騰初期に発生する蒸気泡の生成消滅による急峻な圧力変化であると想定される。これら音響特徴を内包する時間-周波数表現データを入力とする深層学習モデルの構築と妥当性評価を進めている。本発表は文部科学省原子力システム研究開発事業 (JPMXD0223813040) の成果、科研費 (23K03713) の助成による成果を含む。

*Yoshitaka Ueki¹ and Kosuke Aizawa²

¹TUS, ²JAEA

データ駆動型音響診断を基盤とした Na 冷却高速炉の炉心異常の早期検知の検討

(2) 沸騰検知技術の検討

Early detection of in-core abnormalities in Na-cooled fast reactors based on data-driven acoustic diagnosis

(2) Investigation of boiling detection technique

*柴崎 陸¹, 植木 祥高¹, 相澤 康介²

¹東京理科大学, ²JAEA

「データ駆動型音響診断手法」の液体金属冷却高速炉への適用を目指した基礎研究を進めている。本シリーズ報告(1)で示した深層学習に課すべきとした沸騰現象の特徴を踏まえて、沸騰現象の発現を検知するアルゴリズムを構築することを目標に、音響識別によるサブクール沸騰の発生検知に適合する深層学習活用手法の構築及び検知精度向上手法の検証を行った。

キーワード: 異常検知、音響診断、沸騰、深層学習、畳み込みニューラルネットワーク、回帰分析、アンサンブル学習、ROC 曲線

1. 結言

沸騰現象の発現を検知するアルゴリズムを構築することを目標に、サブクール沸騰時に生じる音圧データから抽出した時間-周波数表現の特徴量を学習させた回帰分析型の畳み込みニューラルネットワークモデルによる沸騰熱流束の予測に基づく検知手法の構築を行った。また、アンサンブル学習による検知精度向上手法の検証を行なった。

2. 深層学習を用いたアンサンブルモデルによる沸騰検知

可視化と現象に応じた音圧変化の時刻歴応答の関係の把握と分析に基づく特徴量抽出のため、作動流体として超純水（電気伝導率: 0.066 mS/m）を用いた。電極間に水平に張った白金細線（直径 0.3 mm）を通電加熱し、サブクールプール沸騰時に発生する音圧の時刻歴応答をマイクロフォンにより収録した。音響特徴量の抽出には、時間-周波数表現手法の一種である短時間フーリエ変換を用いた。深層学習モデルには AlexNet、VGG-16、ResNet-50 の 3 種の畳み込みニューラルネットワークアーキテクチャを採用し、アンサンブル学習による検知精度向上を図った。アンサンブル学習の効果検証のため、背景ノイズの一例として配管内水流動音の強度を段階的に変化させ、沸騰時の発生音圧データに付加して用いた。畳み込みニューラルネットワークモデルに時間-周波数表現の沸騰音響データを入力し沸騰熱流束を予測させ、事前把握した核沸騰開始点の熱流束から沸騰発生の 100%検知を与える沸騰熱流束の範囲を評価した。また、沸騰検知の性能を受信者動作特性（ROC）曲線に基づき評価した。

回帰分析による沸騰熱流束予測の結果、相対的に背景ノイズの強度が高い信号対雑音比（SNR）=-20においてもアンサンブル学習活用時に最良の決定係数 0.911 ± 0.002 を示した。沸騰発生の検知下限を評価した結果、沸騰熱流束が 0.421 ± 0.016 MW/m² を超える領域において 100%検知を与えることが分かった。また、ROC 曲線による評価結果は 0.917 ± 0.003 となった。

3. 結言

沸騰検知のアルゴリズム構築を試行した結果、識別の有効性を確認し今後の手法開発に備える知見を得た。アンサンブル学習の活用により外乱との識別能の改善が期待される。

本発表は文部科学省原子力システム研究開発事業（JPMXD0223813040）の成果、科研費（23K03713）の助成による成果を含む。

*Riku Shibasaki¹, Yoshitaka Ueki¹ and Kosuke Aizawa²

¹TUS, ²JAEA

データ駆動型音響診断を基盤とした Na 冷却高速炉の炉内異常の早期検知の検討

(3) 識別根拠の可視化

Early detection of in-core abnormalities in Na-cooled fast reactors based on data-driven acoustic diagnosis

(3) Visual explanation of identification basis

*渡辺 晃也¹, 植木 祥高¹, 相澤 康介²

¹東京理科大学, ²JAEA

「データ駆動型音響診断手法」の液体金属冷却高速炉への適用を目指した基礎研究を進めている。本シリーズ報告(1)で示した深層学習に課すべきとした沸騰現象の特徴を踏まえて、音響計測信号から特徴量の抽出手法を検討し、沸騰現象の発現を可視化・検知するアルゴリズムを構築することを目標に、音響識別によるサブクール沸騰の発生検知及び推移把握に適合する深層学習の手法構築および妥当性評価を行った。

キーワード：異常検知、音響診断、沸騰、深層学習、畳み込みニューラルネットワーク、説明可能 AI

1. 緒言

沸騰現象の発現を可視化・検知するアルゴリズムを構築することを目標に、サブクール沸騰時に生じる音圧データから抽出した時間-周波数表現の特徴量を学習させたラベル分類型の畳み込みニューラルネットワークの深層学習モデルを構築し、分類精度の比較から妥当性評価を行なった。また、深層学習モデルの識別根拠の可視化 (Guided Grad-CAM) に通じ、重要度の高い沸騰固有の特徴量を高解像度にて抽出を行った。

2. 深層学習による沸騰検知・識別根拠の可視化

可視化と現象に応じた音圧変化の時刻歴応答の関係の把握と分析に基づく特徴量の抽出のため、作動流体として超純水（電気伝導率: 0.066 mS/m）を用いた。電極間に水平に張った白金細線（直径 0.3 mm）を通电加熱し、サブクール沸騰時に発生する音圧の時刻歴応答をハイドロフォンにより収録した。

音響特徴量の抽出には、時間-周波数分解能に優れたシンクロスライズドウェーブレット変換 (SWT) を用いた。時間-周波数表現の二次元音響

特徴量データを訓練させた深層学習モデルを構築した。深層学習モデルには AlexNet、VGG-16、ResNet-50 の 3 種の畳み込みニューラルネットワークアーキテクチャを採用した。本研究において SWT により抽出した時間-周波数表現の音響特徴量データを AlexNet に適用した場合が最良の正答率 (99±0.4 %) を示した。図 1 (左) は SWT により抽出した、核沸騰開始点近傍領域にて単一蒸気泡が生成消滅する際に発生した急峻な音圧の時間-周波数表現を表す。図 1 (右) は、訓練が完了した AlexNet モデルの識別結果に対し、Guided Grad-CAM による識別根拠の可視化を行った例を示す。これらの結果から AlexNet モデルが核沸騰開始点近傍の離散的な沸騰音を捉え、判断根拠として提示していることがわかる。

3. 結言

沸騰検知を特徴付ける音響情報として挙げた沸騰気泡の生成消滅に起因する音圧発生の把握は妥当である。また、この情報は沸騰に固有で有り、外乱との識別の有効性が期待される。本発表は文部科学省原子力システム研究開発事業 (JPMXD0223813040) の成果、科研費 (23K03713) の助成による成果を含む。

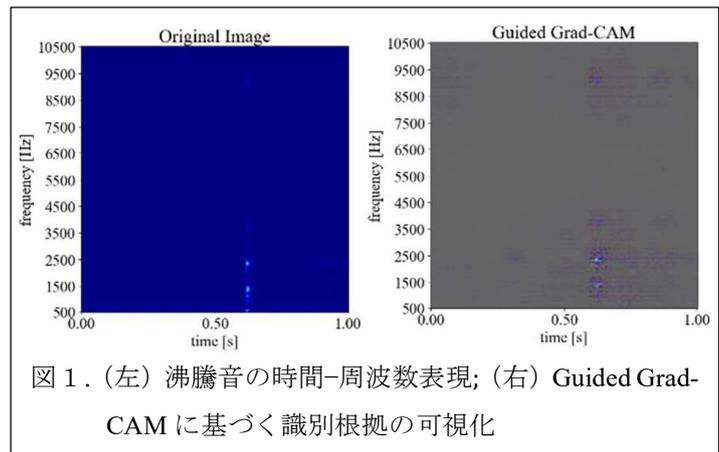


図 1. (左) 沸騰音の時間-周波数表現; (右) Guided Grad-CAM に基づく識別根拠の可視化

*Koya Watanabe¹, Yoshitaka Ueki¹ and Kosuke Aizawa²

¹TUS, ²JAEA

データ駆動型音響診断を基盤とした Na 冷却高速炉の炉内異常の早期検知の検討

(4) 適用性の評価

Early detection of in-core abnormalities in Na-cooled fast reactors based on data-driven acoustic diagnosis

(4) Feasibility study

*相澤 康介¹, 植木 祥高²

¹JAEA, ²東京理科大

「データ駆動型音響診断手法」の液体金属冷却高速炉への適用を目指した基礎研究を進めている。手法の研究とともに、炉システム適用の視点から手法開発への要求を整理した。

キーワード : Na 冷却炉、音響手法、異常早期検知、適用性

1. 緒言

液体金属冷却高速炉の炉心局所閉塞事象は、過去の事故（米国フェルミ炉^[1]）の教訓から、発生の防止（燃料集合体内といった狭隘流路への異物混入の物理的制限等）等の措置が図られている一方、仮に発生した場合の早期検知による事象の拡大防止への期待がある。これまでに、温度場や流れ場の変化を捉えようとする検討がなされているが、閉塞から沸騰発生に至る局所的な事象進展を直接捕捉することは原理上困難であり、かかる課題に対応すべく本研究は、沸騰初期に発生する蒸気泡の生成消滅による急峻な圧力変化及びその推移と相関性（特徴量）を有する音響信号を計測し、従来の信号処理手法では困難であった識別能、検知能力の向上を図るべく機械学習手法を援用したシステムの構築及びその有効性を示すことを目指している。

2. 炉システムへの適用要件の検討

実プラントへの装荷を想定して、その要件の抽出及び関連既往知見を基に適用性に関する検討を行った。主要な結果は以下の通りである。

① 音響計測手法の高速炉環境への適用性

高温（炉の定格運転条件で 550°C 程度）、高放射線等への耐環境性を有する超音波センサが開発されており応用が可能である。特に、高い耐熱性を有することから従来の課題であった冷却が不要となり、シンプル且つロバストなシステムの構成の実現が期待できる。

② 液体金属ナトリウムの耐性・共存性

これまでの液体金属中音響計測技術開発により、アルカリ液体金属ナトリウムと共存性を有する圧電素子（超音波センサ）等の接液材料の知見、液体金属ナトリウム中の音響伝播特性並びに接液に際する音響結合に関する知見など炉内適用に関する必要な知見が得られている。また、プロセス計装としての流量計等の実用化開発適用の実績も活用できる。

③ 炉内への装荷性

先行炉において、炉心上部への計測センサの装荷及び交換のための装置が開発適用されており応用が可能である。また、センサ以外にシステム化に必要な炉内環境に耐えうる MI ケーブルが実用化されている。

これらの状況から、計測機器等のハードウェア開発実績を活用できる状況にある。今回の検討結果を基に、応用対象とした計測機器に関する性能や特性を境界（取合）条件として、報告者らが提唱する「データ駆動型音響診断手法」の研究開発に取り込み研究を進めるとともに、手法研究から計測機器に対する要求を明かにしてその後のシステム化検討に資する予定である。

3. 結言

実機実装の視点から要件を検討し、手法開発で考慮すべき事項を整理した。今後手法研究の成果を踏まえて実機適用性を評価する予定である。本発表は文部科学省原子力システム研究開発事業(JPMXD0223813040)の成果である。

参考文献 [1] H.A. Wagner, E. Alexanderson, Fermi-I: New Age for Nuclear Power, American Nuclear Society (1979).

*Kosuke Aizawa¹ and Yoshitaka Ueki²

¹JAEA, ²TUS

教師なし学習に基づく液中ガスリークの音響異常検知

Acoustic Anomaly Detection of Gas Leakage in Liquid Based on Unsupervised Learning

*三上 奈生¹, 相澤 康介¹, 栗原 成計¹, 植木 祥高²

¹JAEA, ²東京理科大

ナトリウム冷却高速炉における蒸気発生器伝熱管水リークの早期検出を目的として、教師なし学習に基づく音響計の基本的成立性を検証した。累積分布を仮定した受信者動作特性曲線の推定および曲線下面積の算出を行った結果、曲線下面積は良好な値を示し、教師なし学習に基づく音響計の有用性が十分に示された。

キーワード：気液二相流，音響計，機械学習，教師なし学習

1. 緒言

ナトリウム冷却高速炉では、ナトリウム-水反応による伝熱管破損伝播を防止する観点から、蒸気発生器伝熱管からの水リークを早期に検出することが重要である。応答性に優れた音響計は、ノイズ音とリーク音の分離が主要課題とされている。この課題に対し、本研究では異常データの事前取得を必要としない教師なし学習に着目し、その一手法であるオートエンコーダを援用した音響計の基本的成立性を検証する。

2. 研究方法

短時間フーリエ変換 (STFT) , 連続ウェーブレット変換 (CWT) , シンクロスクイズドウェーブレット変換 (SWT) を用いてノイズ模擬音・リーク模擬音の時間周波数表現を作成し^[1], オートエンコーダの学習を行った。また、検査値の累積分布に正規分布・ベキ正規分布を仮定して受信者動作特性 (ROC) 曲線の推定を行い^[2], オートエンコーダの性能評価指標となる ROC 曲線の曲線下面積 (AUC) を算出した。

3. 主たる結果と結言

信号対ノイズ比 (SNR) を 0, -4, -8, -12, -16, -20 dB と変化させた場合について、オートエンコーダの性能評価を行った。検査値の累積分布に最も適合したベキ正規分布を用いて ROC 曲線を推定し、AUC を算出した結果を Fig. 1 に示す。各条件において、SWT に基づく時間周波数表現を入力とするオートエンコーダが最も高い AUC を示した。また、SNR = 0, -4, -8, -12 dB では AUC > 0.9, SNR = -16 dB では AUC > 0.8, SNR = -20 dB では AUC > 0.6 となり、全条件において一般的に識別が成功したとされる AUC (= 0.6)^[3]以上の値を示した。この結果から、異常データの事前取得を必要としない教師なし学習に基づく音響計により、SNR = 0 ~ -20 dB のノイズレベルにおいて液中ガスリークの異常を検知できる見通しを得た。

謝辞

本研究は、経済産業省からの受託事業である「令和3年度高速炉に係る共通基盤のための技術開発」の一環として実施した成果および日本原子力研究開発機構のスーパーコンピュータ「HPE SGI8600」を利用して得られた成果を含むものである。

参考文献

- [1] N. Mikami et al., *International Journal of Multiphase Flow* 171 (2024) 104688.
 [2] 下川敏雄, 後藤昌司, *計算機統計学* 23 (1) (2010) 1-23.
 [3] B. J. Wolf et al., *Arthritis & Rheumatology* 68 (8) (2016) 1955-1963.

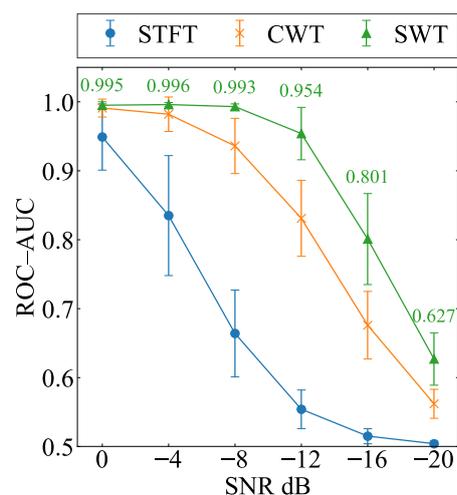


Fig. 1 Comparison of ROC-AUC.

*Nao Mikami¹, Kosuke Aizawa¹, Akikazu Kurihara¹ and Yoshitaka Ueki²

¹Japan Atomic Energy Agency, ²Tokyo University of Science

ホットセル使用マニピュレータへの保持力感応機能の付与の試み

Attempt to Add a Holding Force Sensing Function to a Manipulator for Hot Cells

*西村昭彦^{1,2}, 井出次男³, 石原信之³, 浦田健勇⁴

¹JAEA, ²福井大, ³deltafiber.jp, ⁴ジェイテック

ピコ秒レーザー精密加工で製作した耐熱 FBG センサの原子力応用として、ホットセル内で取り扱う放射性物質の保持力計測のため、マスタースレーブマニピュレータへの FBG センサの実装を行った。

キーワード: マニピュレータ, 保持力計測, 遠隔歪計測

1. 緒言

ピコ秒レーザー精密加工で製作した耐熱 FBG センサの原子力応用を進めている。これまでナトリウム循環ループの熱膨張計測を始点として、原子炉高温配管を対象とした遠隔歪監視を提案してきた[1]。さらなる FBG センサの展開は、高放射線環境下での活用である。ホットセルでは放射性物質の取扱いに際して、マスタースレーブマニピュレータ (MSM) が多用されている[2]。この MSM の把持機構に保持力計測が可能な機能を付与することで、操作者に扱いやすい MSM に改善することを目的とした。

2. 実験

高線量の放射性物質取扱いを行うホットセルに不可欠な装備品が MSM である。先端部分は 2 つの把持が並行に移動して対象物を挟み込む構造である。一般に感圧機能は有していない。ホットセル内の作業では、放射性物質収納容器の開閉、放射性物質の取り出し、分析装置の取扱いなど対象物を扱う際に「触覚」が使えることが作業効率向上やリスクの低減に役立つことが多いが、もっぱら鉛ガラスを通した「視覚」のみに頼っている。もし、「触覚」が活用できれば、現在の作業マニュアルも改定され、リスクが低減できる。ここでは耐放射線 FBG センサを活用することで、従来の MSM に感圧機能を付与した。具体的には、試作した荷重ひずみ測定装置を基盤として、特製の爪を製作し、これを MSM 把持部分に実装して、各種の形状と重量のサンプルの取扱い試験を実施した。図 1 に実施の様子を示す MSM 把持機構の左右の爪にはそれぞれロバーバル型の感応機構を設けてあり、鉛ブロックを保持し 90 度回転させることで左右の爪への荷重の不均衡から重量を求める。また、保持力をかけすぎると変形するものや壊れやすいもの等の取扱いに役立つ。ここでは最大 3 kg の鉛ブロックの持上げと回転に成功した。



図 1 保持力感応 MSM によるデモ実験

MSM に保持力感応機能の付与を行った。光ファイバと MSM の取り回しや感応機構の高度化に取り組む。

3. 結論

MSM に保持力感応機能の付与を行った。光ファイバと MSM の取り回しや感応機構の高度化に取り組む。

参考文献

[1] A. Nishimura, et al., LSSE4-03(Invited), OPIC-LSSE2024 [2] <https://www.j-tech66.co.jp/>,

*Akihiko Nishimura^{1,2}, Tsugio Ide³, Nobuyuki Ishihara³ and Kenyu Urata⁴

¹JAEA, ²Fukui Univ., ³deltafiber.jp, ⁴J-tech