



超伝導低温システムへの 機械学習の導入

核融合科学研究所
超伝導・低温工学ユニット

尾花 哲浩

発表内容

1. 研究ビジョン

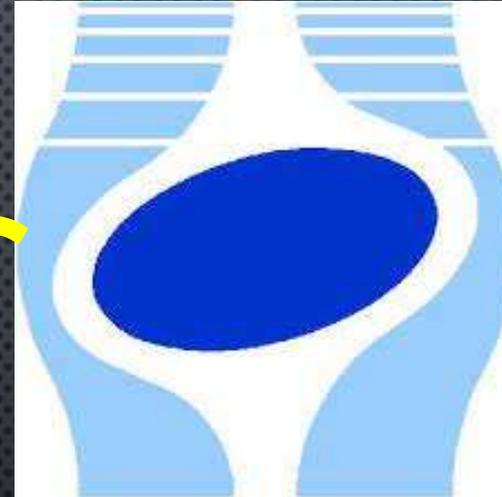
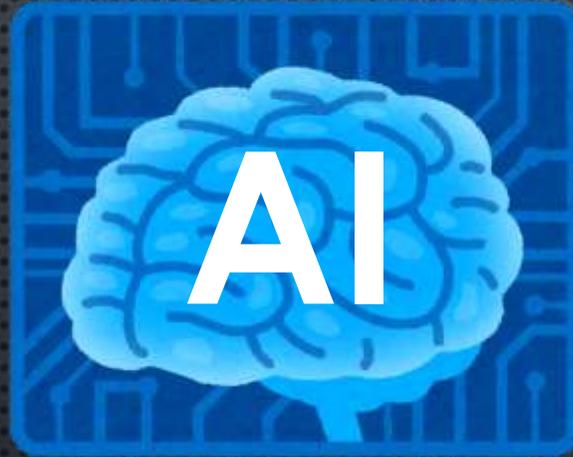
2. 研究内容

3. 今後の研究計画

研究ビジョン

AI技術

- ・ 機械学習
- ・ 深層学習

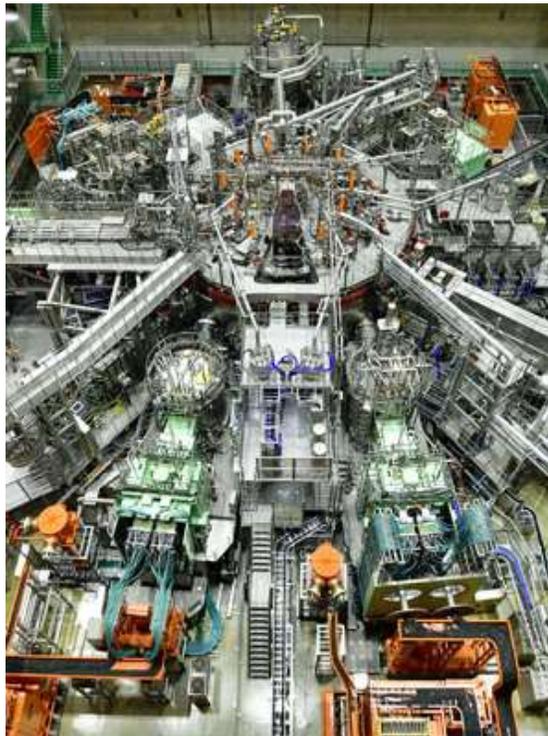


超伝導工学・ 低温工学

- ➡ 超伝導・低温機器の信頼性向上をめざす
- ➡ 超伝導・低温工学における新たな分野
(データ駆動型研究)を開拓する

核融合研における超伝導・低温に関するビッグデータ

■ 核融合研には、これまでの装置運用と研究活動によって、超伝導・低温機器に関するビッグデータを蓄積している。



プラズマ実験装置用大型超伝導・低温システム



超伝導コイル試験装置



超伝導導体試験装置

蓄積したデータを基に、AI技術を活用した研究活動に取り組むことができる。

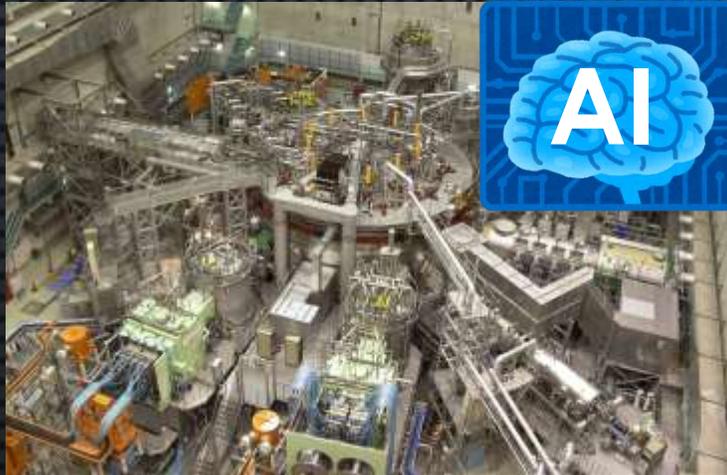
AI技術を活用した研究テーマ

■ システム状態監視 「計測パラメーターの次元削減」

「計測パラメーターの一元化」

■ システム仮想計測 「センサーの冗長化」

超伝導・低温機器の
高信頼性を実現



- ・ 超伝導ポロイダルコイル
- ・ 超伝導ヘリカルコイル
- ・ 超伝導バスライン



- ・ ヘリウム膨張タービン
- ・ 低温排気圧縮機



- ・ ヘリウム圧縮機

研究対象：超伝導・低温システムの中核機器

状態監視 「計測パラメータの次元削減」

■ 多数の計測パラメータの監視を必要とする装置について、**主成分分析**を活用し、装置の状態監視を**簡素化**する

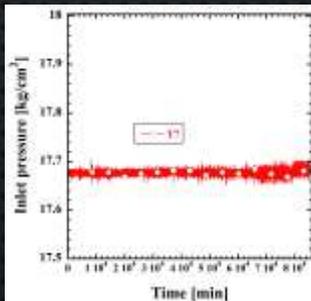
対象となる超伝導・低温機器

- ・ ヘリウム膨張タービン
- ・ 超伝導ポロイダルコイル
- ・ 超伝導バスライン
- ・ 低温排気圧縮機
- ・ ヘリウム圧縮機

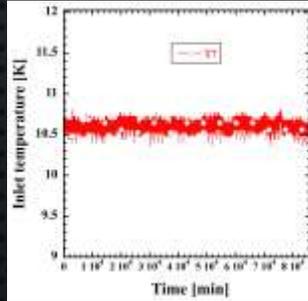
【ヘリウム膨張タービン】

■ タービン運転時、タービン1台あたり**7変数**を常時監視する

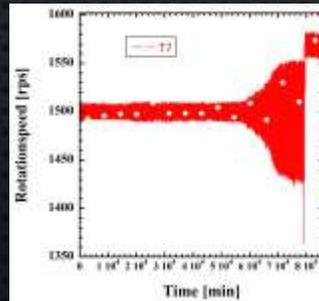
入口圧力



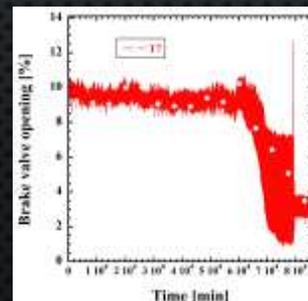
入口温度



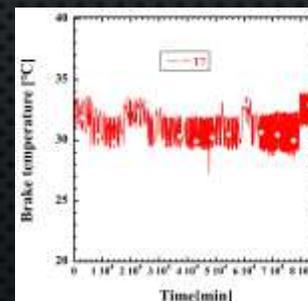
回転数



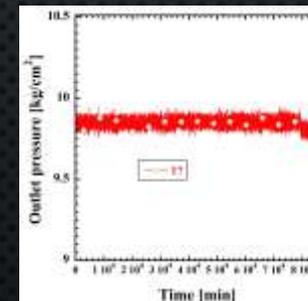
ブレーキ開度



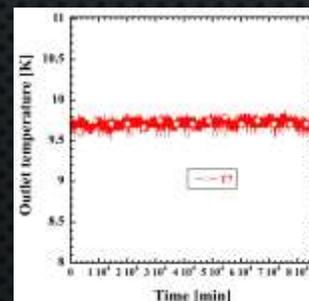
ブレーキ温度



出口圧力



出口温度



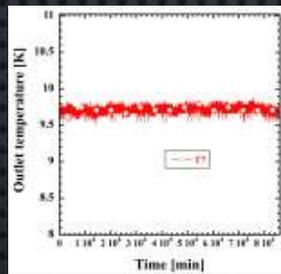
主成分分析による状態監視

- 主成分分析を用いて、ヘリウム膨張タービンを2変数で監視する

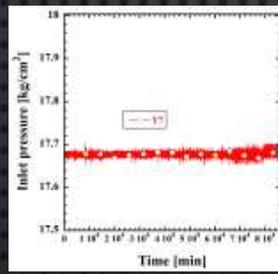
高次元データ (変数: 7)

低次元データ (変数: 2)

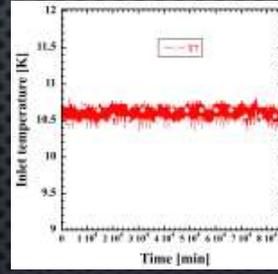
出口温度



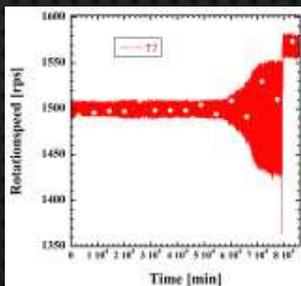
入口圧力



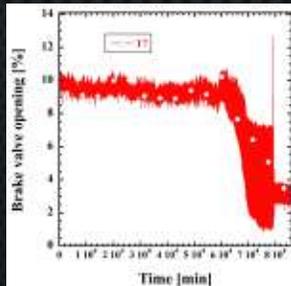
入口温度



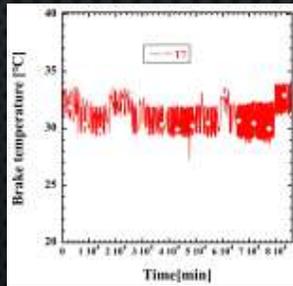
回転数



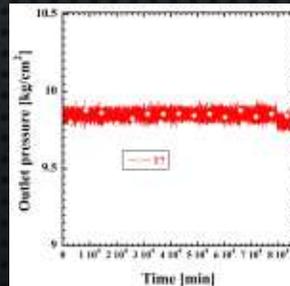
ブレーキ開度



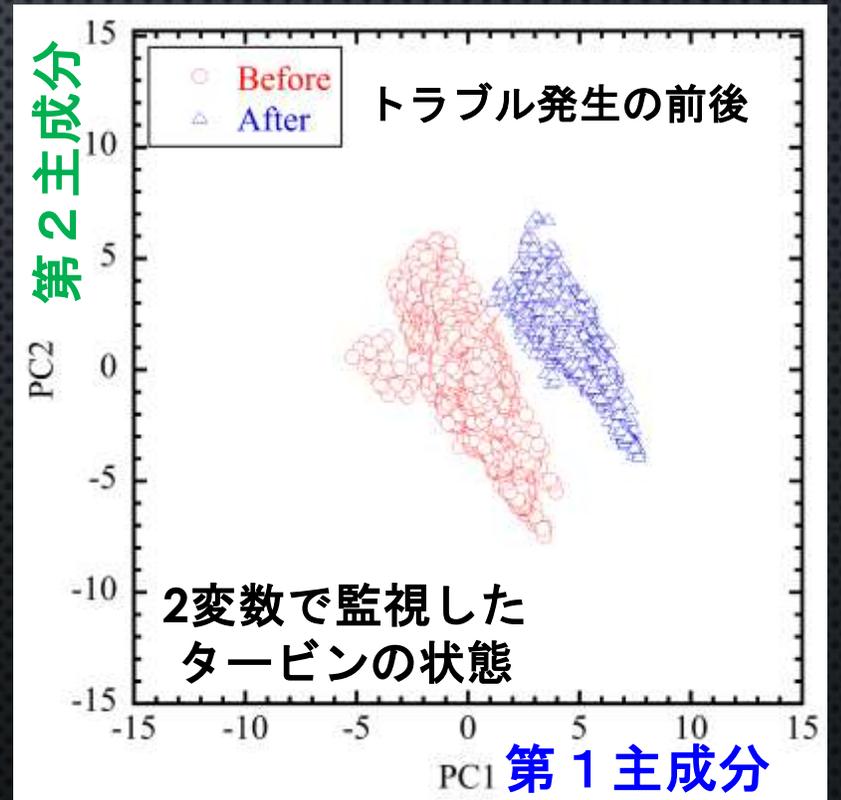
ブレーキ温度



出口圧力



次元削減



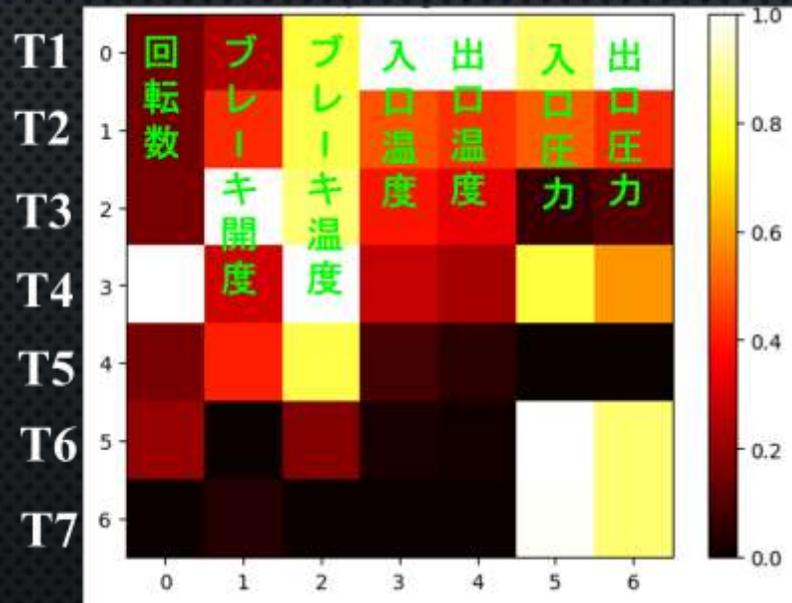
状態監視 「計測パラメーターの一元化」

■ 多数の計測パラメーターの監視を必要とする装置について、**深層学習**を活用し、装置の状態監視を**更に簡素化**する

【ヘリウム膨張タービン】

■ **7台**のタービンの**全変数(合計:49)**を、**1つの画像ファイル**で評価することにより、タービン全体の状態監視を行う

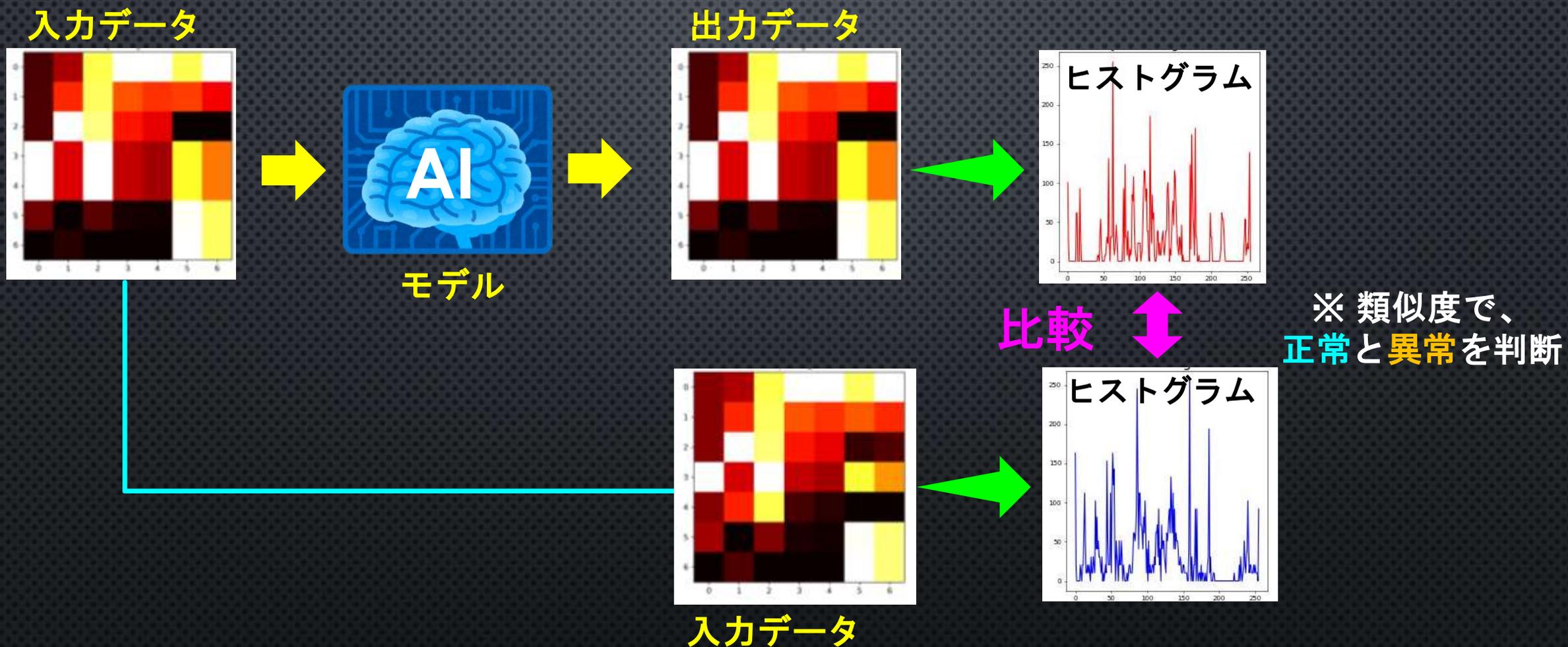
タービン全体の状態を示した
画像ファイル(Heat map)



状態監視モデル開発



オートエンコーダーによる状態監視システム

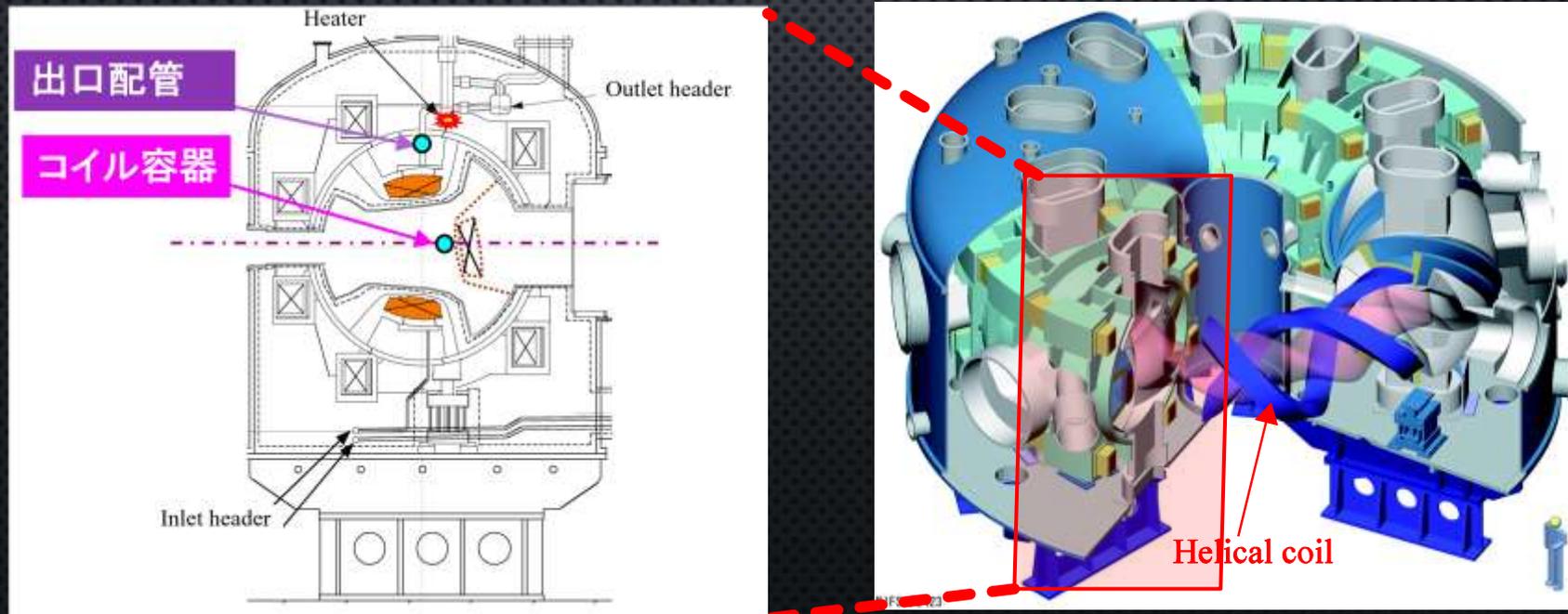


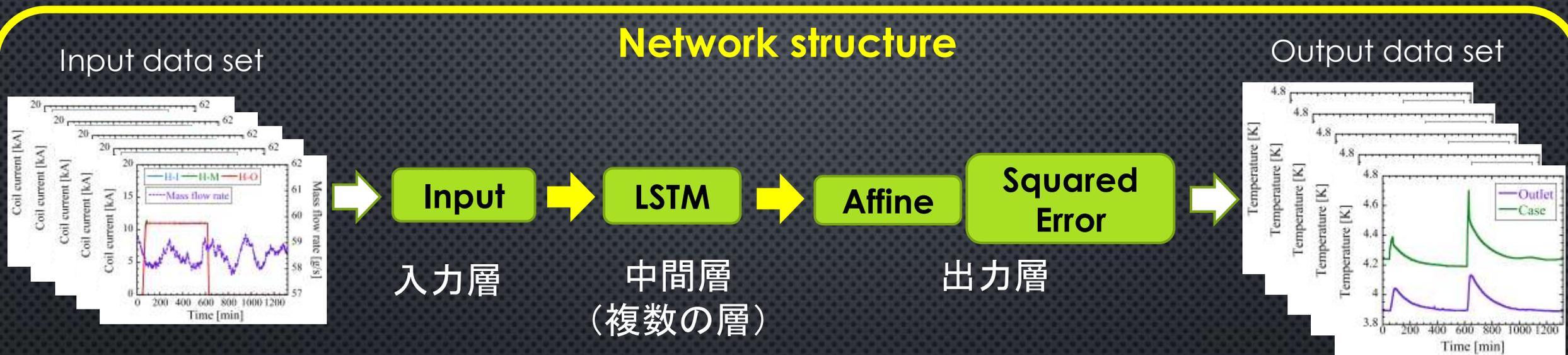
仮想計測 「センサーの冗長化」

- 実計測で使用する計測センサーを模擬した ソフトセンサ（仮想計測）を活用することで、センサーを冗長化する 『深層学習モデル』

【超伝導ヘリカルコイルの仮想計測】

出口配管とコイル容器の温度を、温度計を使用せず、ソフトセンサで計測(予測)する





※ LSTM (長・短期記憶)

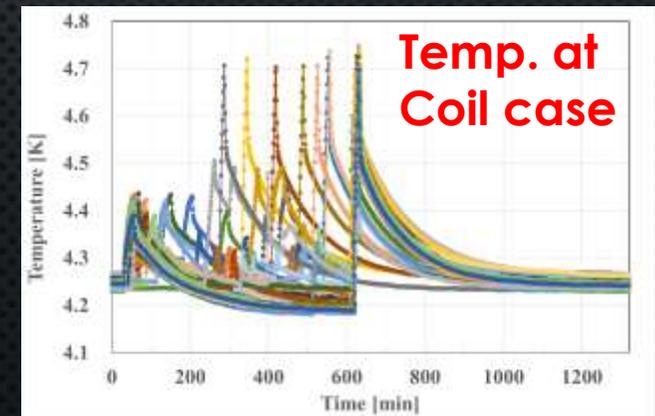
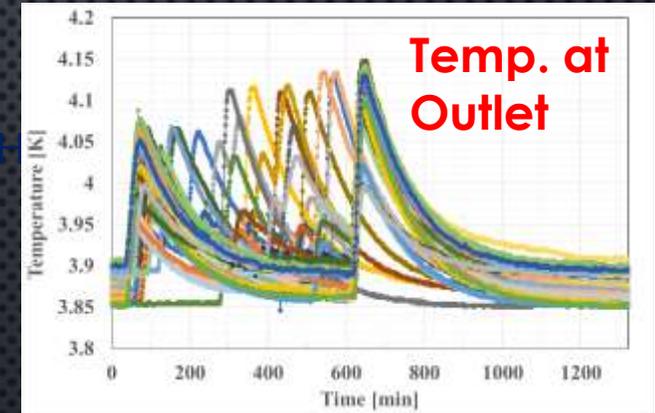
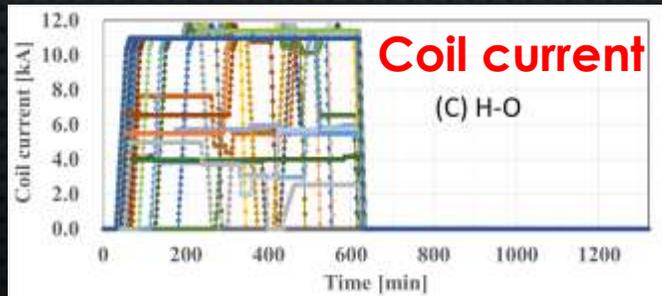
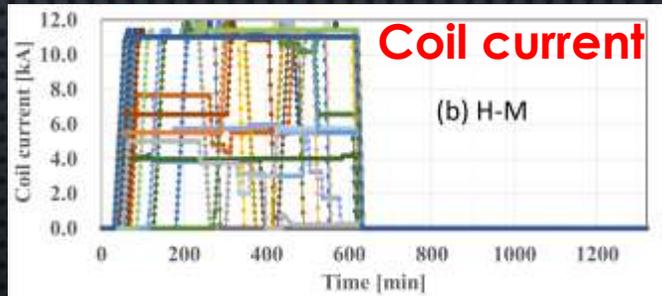
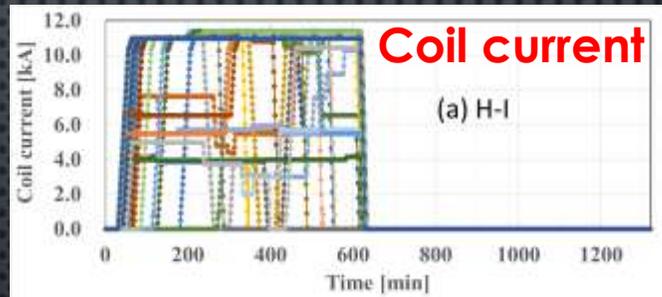
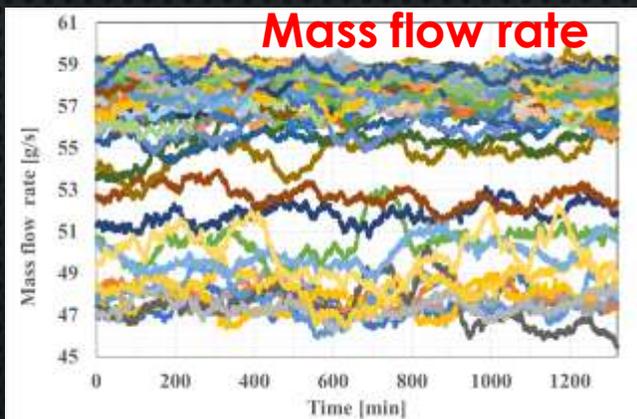
非線形特性を有する時系列データの予測を可能にする深層学習アルゴリズム

- 👉 **入力データ**: 冷媒質量流量, ヘリカルコイル電流値 (H-I, H-M, H-O)
- 👉 **出力データ**: 出口配管温度, コイル容器温度

学習データ

- LHDプラズマ実験の20・21サイクル（73日間）で得られた測定結果を学習データとして使用した。
- 学習データは、冷媒質量流量、ヘリカルコイル電流値、温度(出口配管&コイル容器)で構成される。

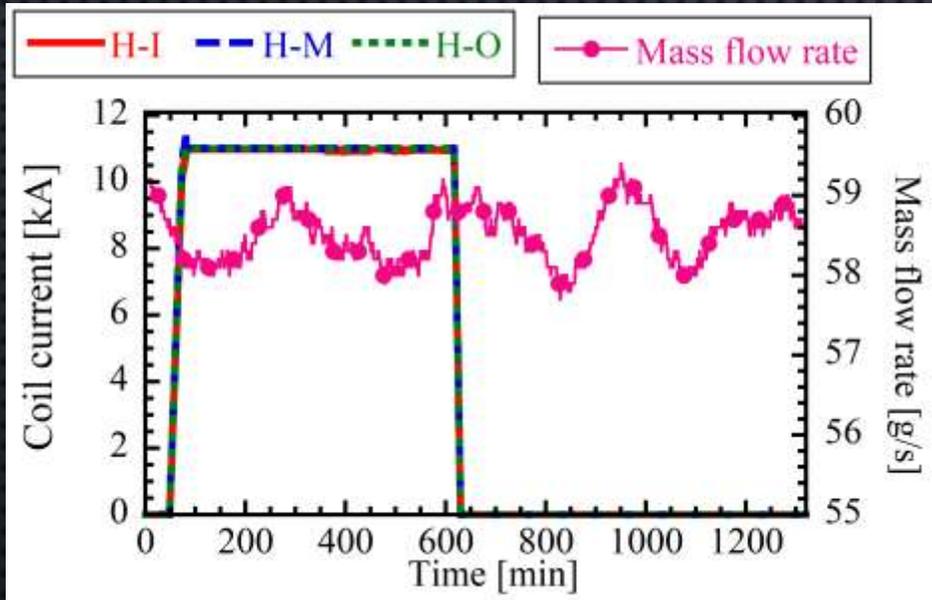
| Campaign | Year | Month | Day |
|----------|------|-------|--|
| 20 | 2018 | Oct. | 23, 24, 25, 30, 31 |
| | | Nov. | 1, 6, 7, 8, 13, 14, 15, 20, 21, 27, 28, 29 |
| | | Dec. | 4, 5, 6, 11, 12, 13, 18, 19, 20, 25 |
| | 2019 | Jan. | 8, 9, 10, 16, 17, 22, 23, 24, 29, 30 |
| | | Feb. | 5, 6, 7, 13, 14, 19, 20 |
| 21 | | Oct. | 9 |
| | | Nov. | 14, 19, 20, 21 |
| | | Dec. | 3, 4, 5, 11, 17, 18, 19, 20, 24, 25, 26 |
| | | 2020 | Jan. |
| | | Feb. | 4, 5 |



仮想計測と実測の比較①

■ ヘリカルコイル通電時における出口配管温度とコイル容器温度の仮想計測値と実測値を比較した

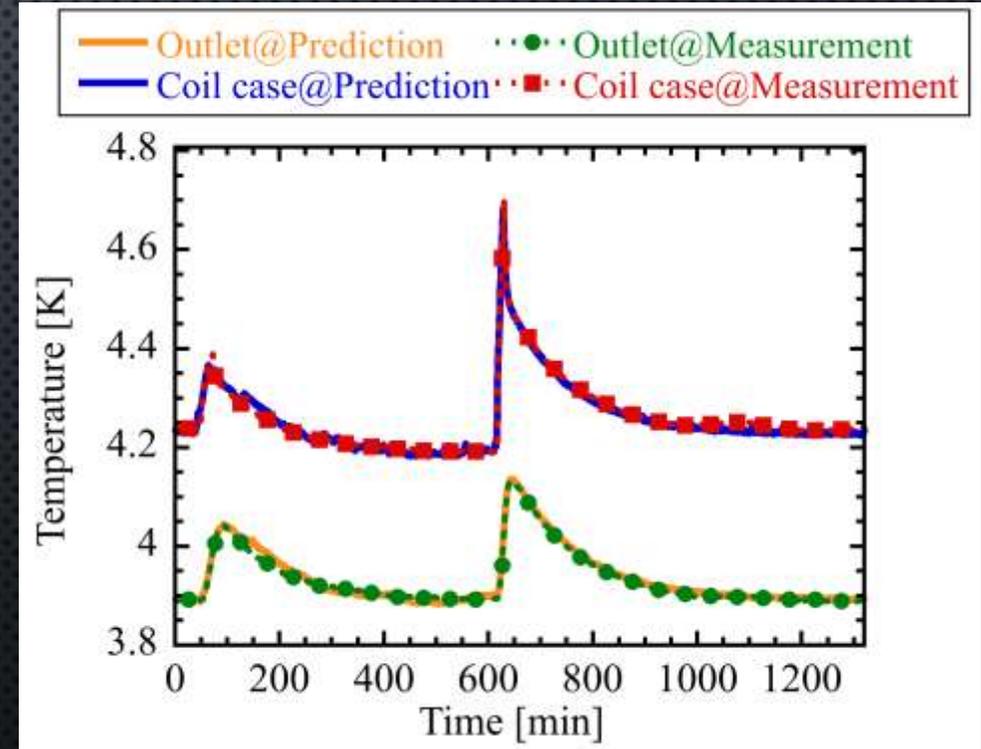
入力データ



ソフトセンサ
(仮想計測)



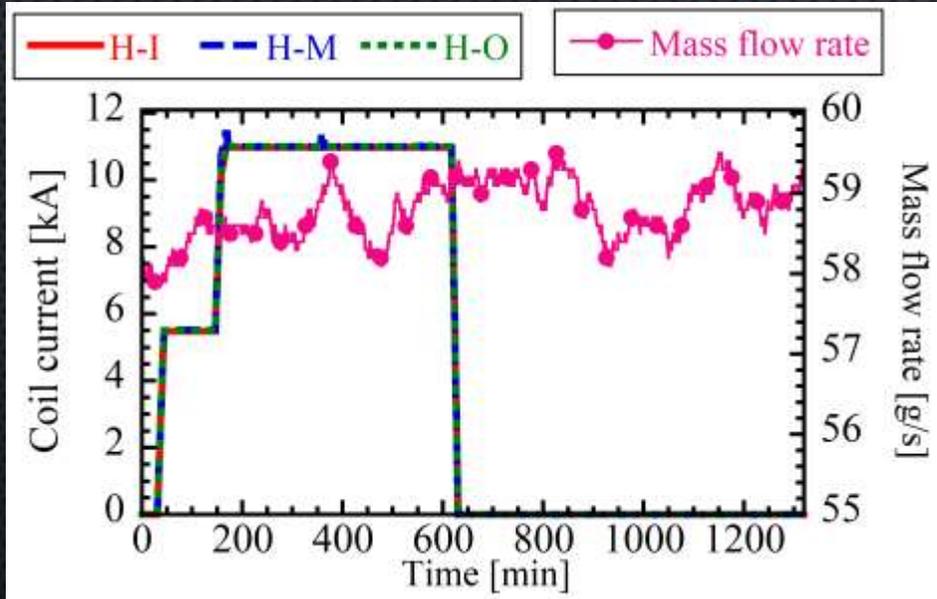
仮想計測値と実測値の比較



仮想計測と実測の比較②

■ ヘリカルコイル通電時における出口配管温度とコイル容器温度の仮想計測値と実測値を比較した

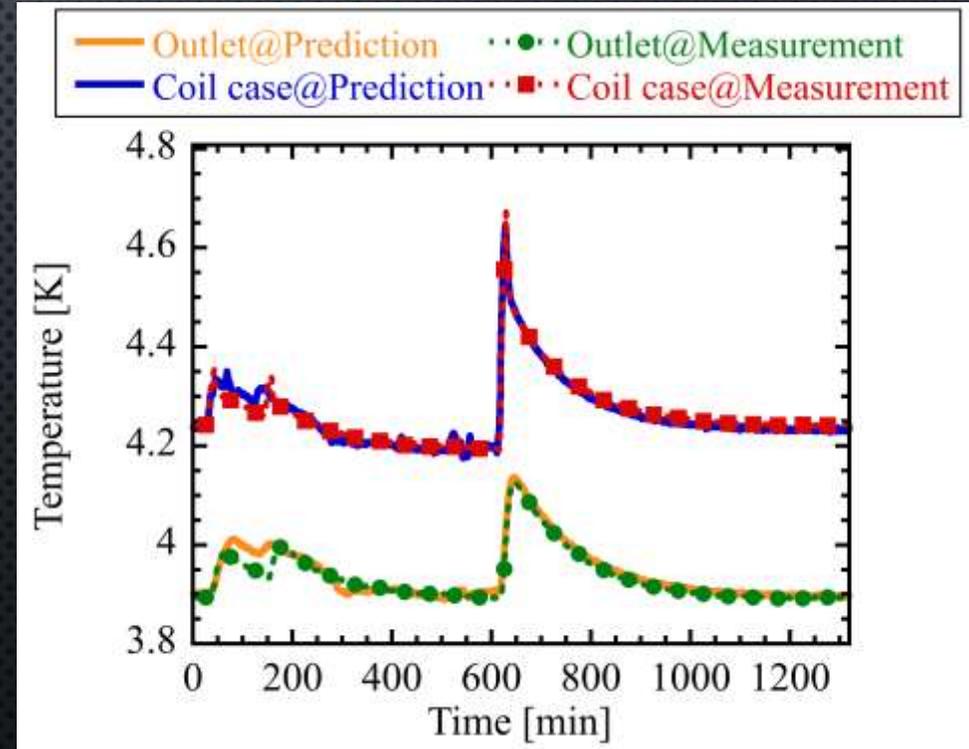
入力データ



ソフトセンサ
(仮想計測)

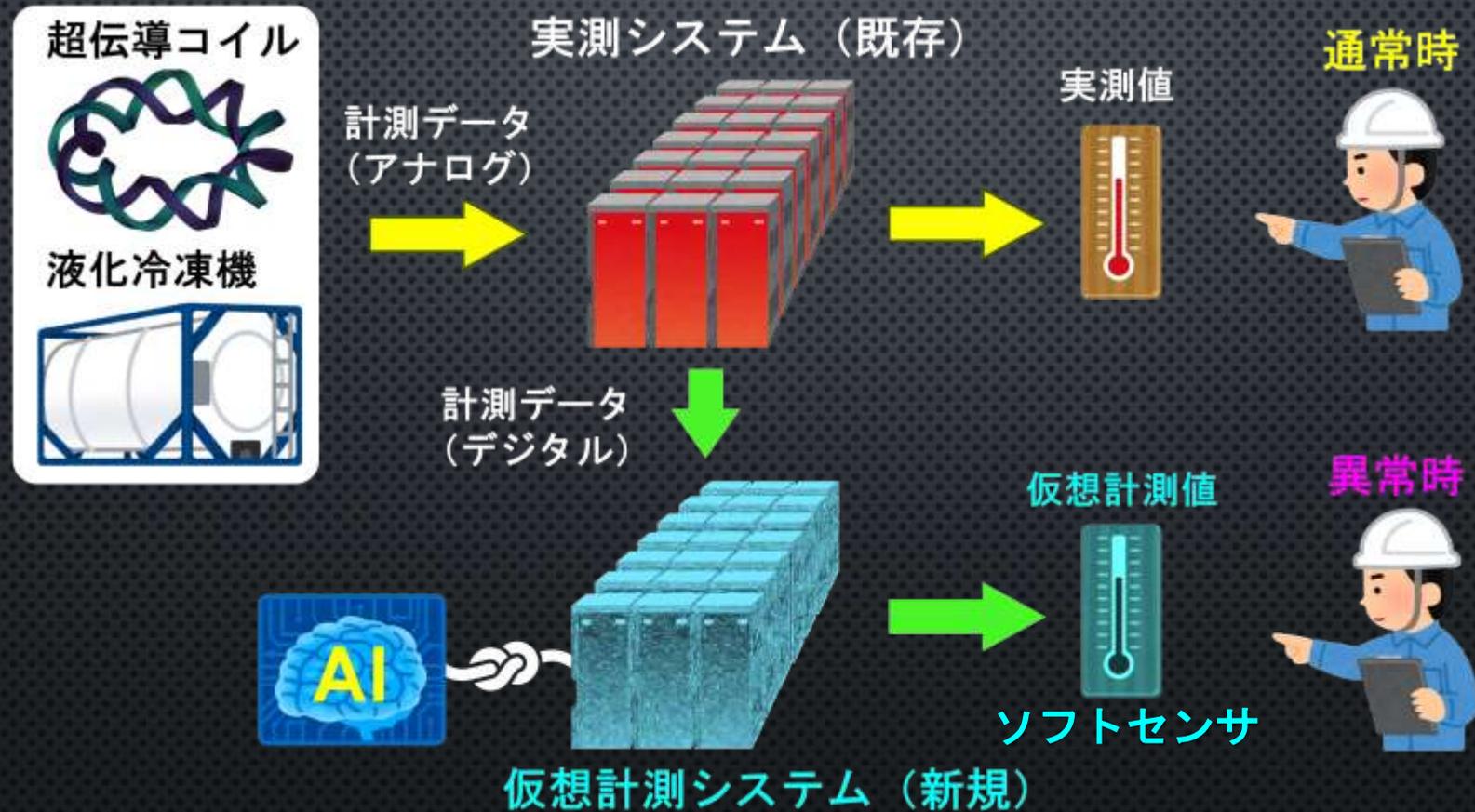


仮想計測値と実測値の比較



仮想計測システム化構想

- ソフトセンサを活用した仮想計測システムの構築を進めている



👉 仮想計測システムを併用することで、超伝導・低温機器の高信頼性を実現する

LHD (2024年度～2025年度)



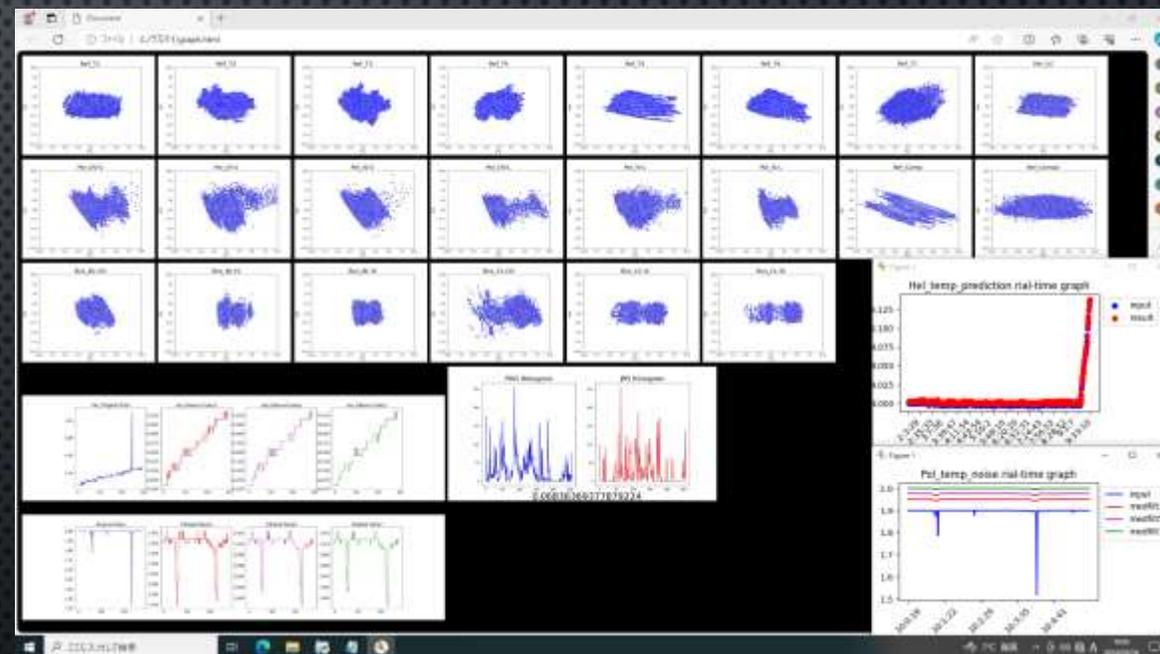
■超伝導低温システムのための様々なAIモデルを、**リアルタイムで実行する**システムを構築する

現在、**AIシステムの試験運用中**



ヘリウム液化冷凍機制御室

AIシステム用モニター画像



👉 今回のLHD実験サイクル：2024年3月～6月

👉 次回**(最後)**のLHD実験サイクル：2025年10月～12月

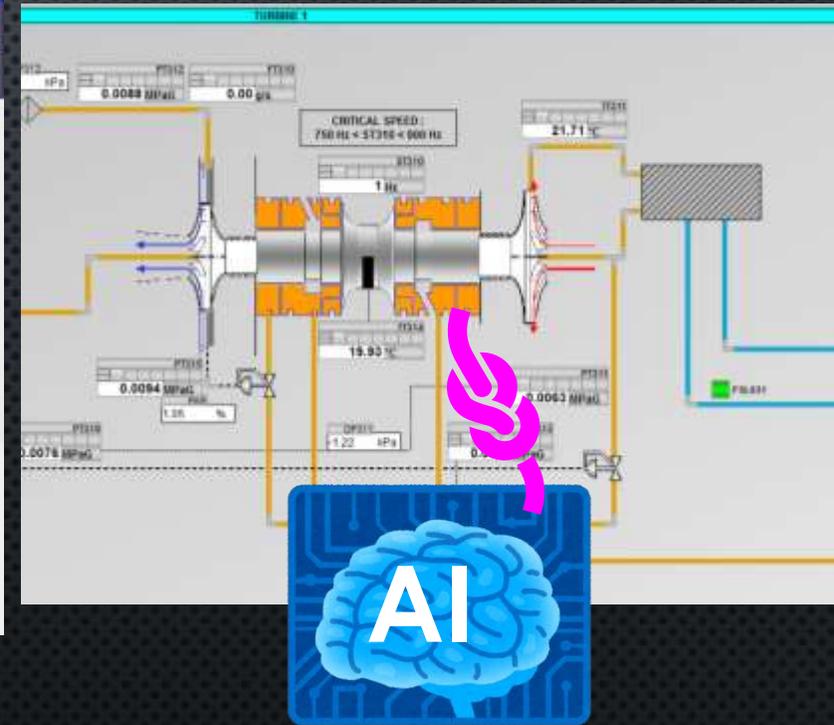
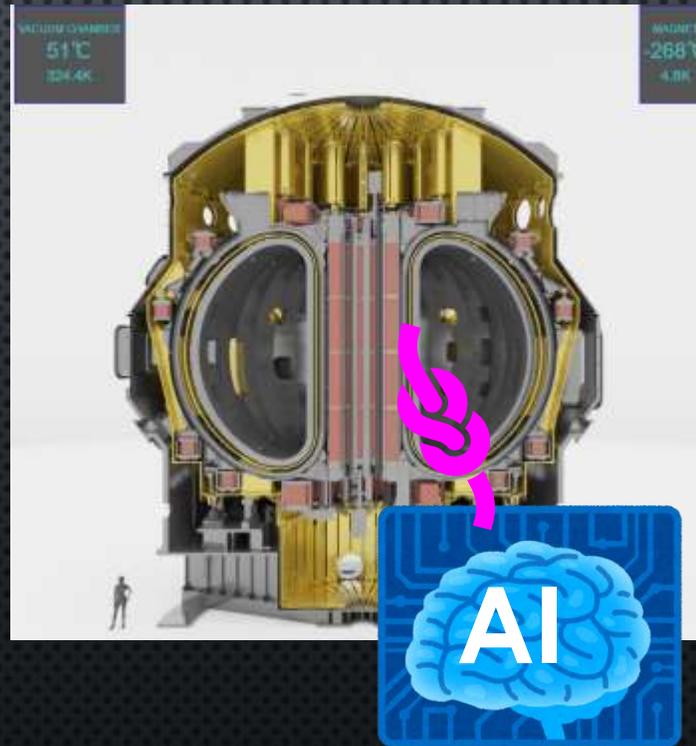
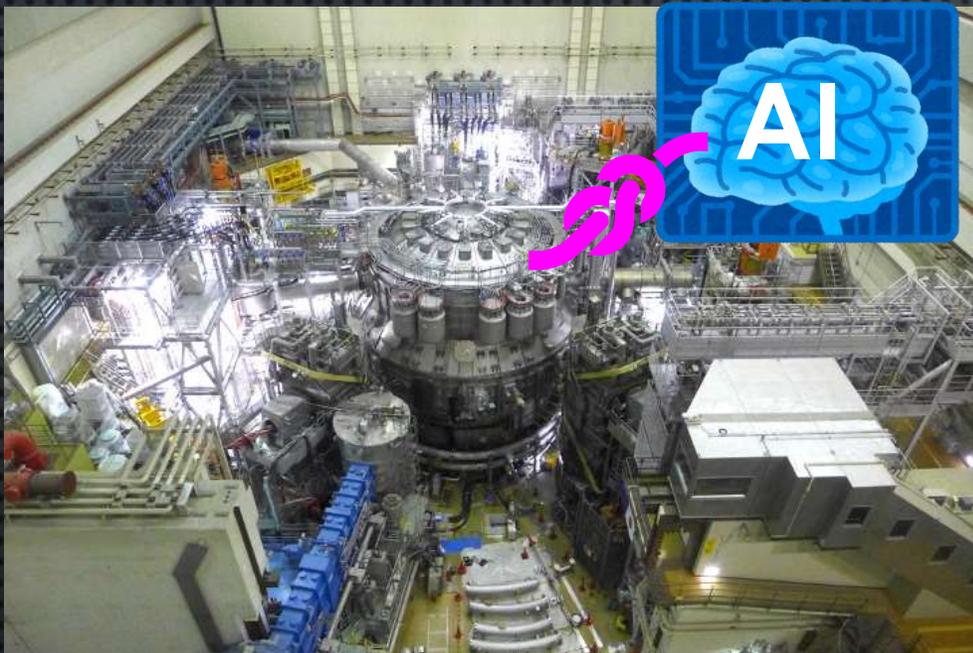
残された期間は、**あと5ヶ月程**

JT-60SA (2026年度~)



■ 核融合研でのAIモデル・システム開発のノウハウと成果を、JT-60SA (トカマク) へ技術移転

【トカマク炉心プラズマ共同研究】
2022年度から開始



👉 次回のJT-60SA実験サイクル：2026年から

喫緊の課題@JT-60SA



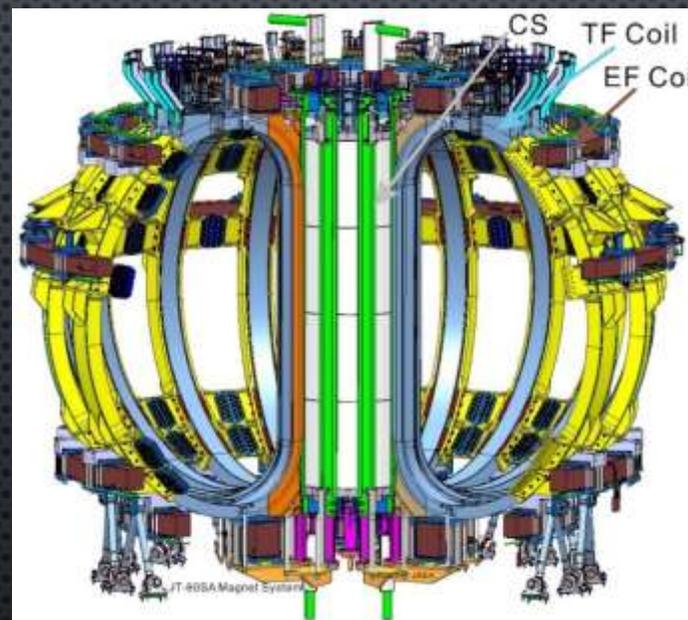
■CS・EFコイルの通電中, TFコイルのクエンチ検出用電圧で著しいノイズが発生する



EF coil



CS coil



TF coil



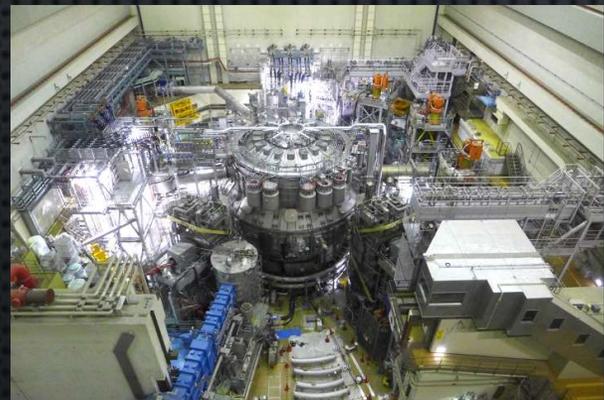
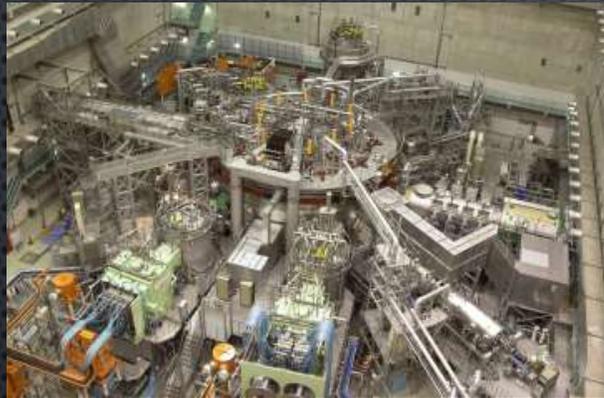
ノイズを除去しないと、CS・EFコイルの定格運転ができない！

👉 TFコイルのクエンチ検出(ノイズ除去)用AIモデルを早急に開発する

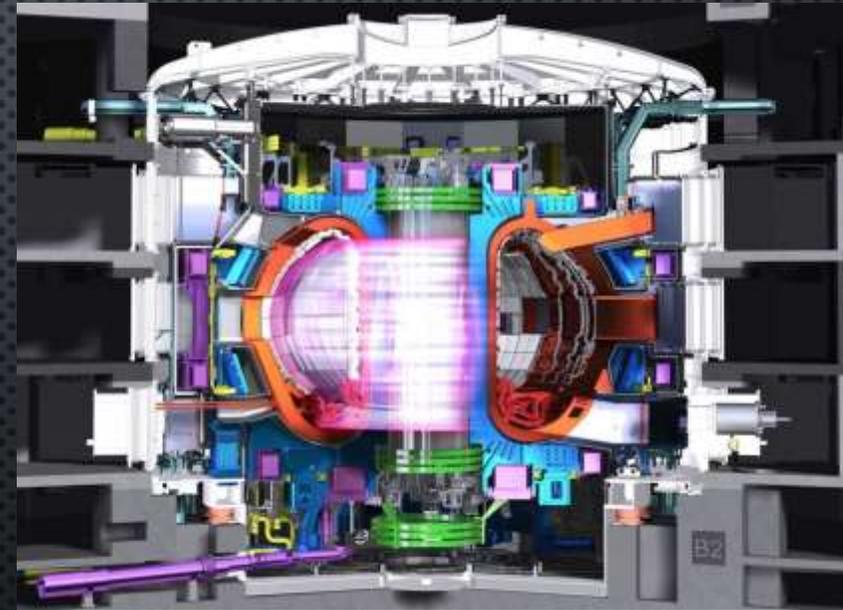
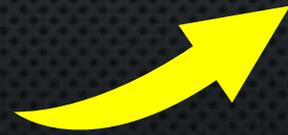
ITER (202X年度~)



■ LHDとJT-60SAでのAIモデル・システム開発のノウハウと成果を、ITERへ技術移転



技術移転

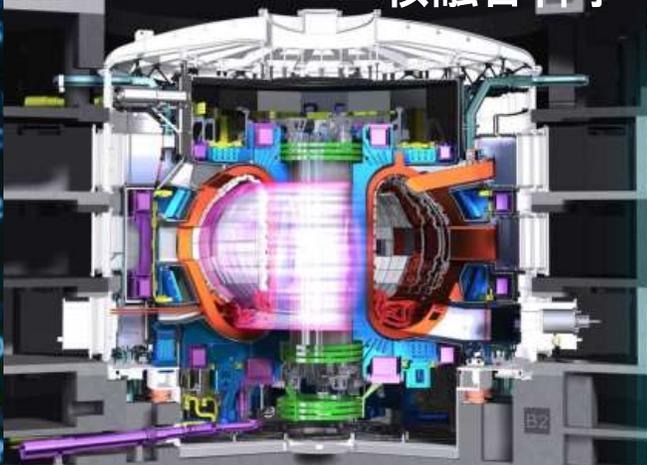


👉 共同研究を行うために、ITERとNIFSの関係を構築する

長期的なビジョン 「AI技術の学際化」



核融合科学



<https://www.iter.org/proj/inafewlines>

航空科学

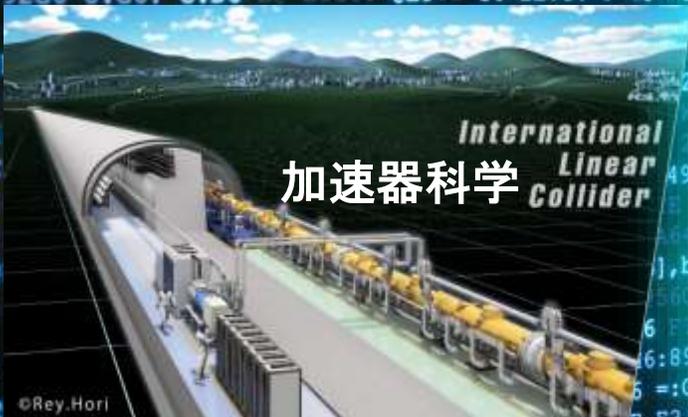


<https://www.sankei.com/article/20240318RIE03CVW2FLKJAKKWG2SMOG2LA/>

自律型

AI

加速器科学



<https://www.iwate-ilc.jp/>
<https://www.iwate-ilc.jp/eng/what-is-the-ilm/>

月面科学



<https://www.sankei.com/article/20240318RIE03CVW2FLKJAKKWG2SMOG2LA/>

ビッグサイエンス（核融合・加速器分野）及び、月面基地・産業機器
ための次世代型（自律型）超伝導・低温システムの基盤技術構築

まとめ

■ 超伝導・低温機器の信頼性の向上、及び超伝導・低温工学におけるデータ駆動型研究分野を開拓するために、超伝導低温システムへの機械学習の導入を進めている。

■ 超伝導・低温システムの中核機器に関する状態監視・仮想計測のモデル・システム開発に取り組んでいる。

■ 長期的なビジョンとして、核融合科学（超伝導・低温ユニット）で蓄積したAI技術の学際化をめざす。