

# J-PARC RCSにおける機械学習を用いた ペイントバンブ電源用任意波形の生成

○杉田萌 野村昌弘 植野智晶 栗山靖敏  
堀野光喜 高柳智弘 篠崎信一

日本原子力研究開発機構 J-PARCセンター

# J-PARC RCSのペイントバンブ電磁石

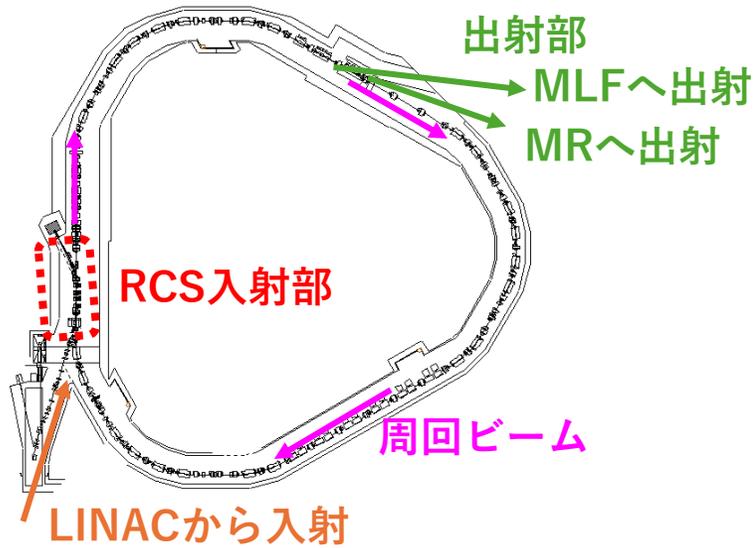
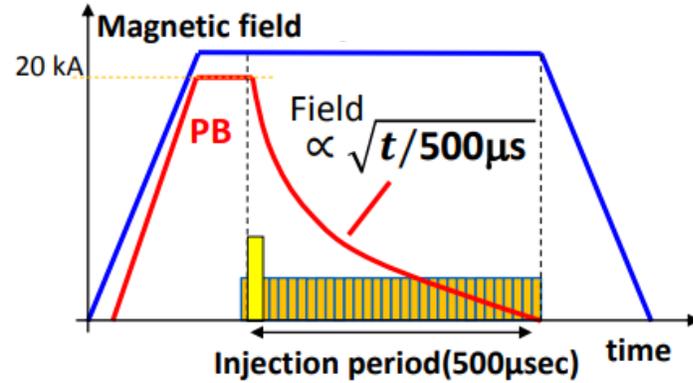


図. J-PARC RCSの概略図



入射時間500μsで減衰する電流を出力

## ペイントバンブ電磁石

- 500 μsの時間内に入射ビームを先に周回していた周回ビームに合流  
⇒ 電流密度の大きい大強度ビームを生成
- ビームの周回軌道を制御し1MWの大強度ビームを生成  
⇒ ペインティング入射
- 水平ペイントバンブ電磁石 4台  
垂直ペイントバンブ電磁石 2台

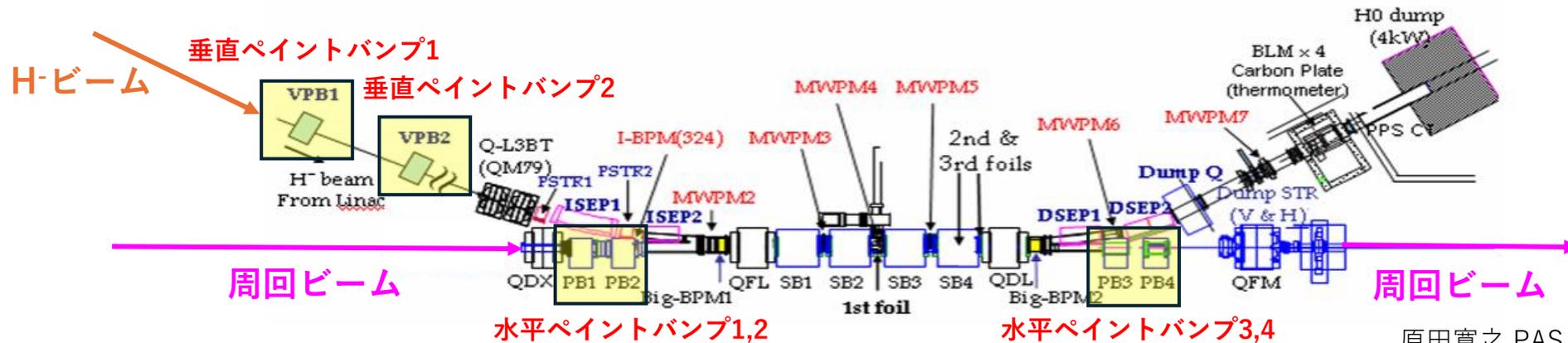


図. RCS入射部の機器配置

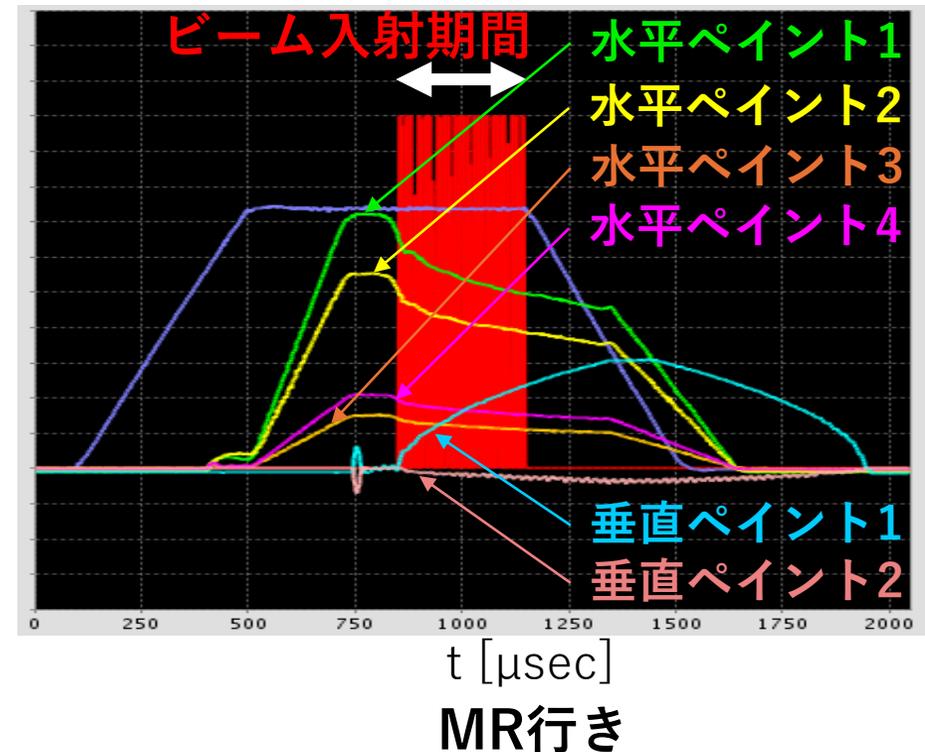
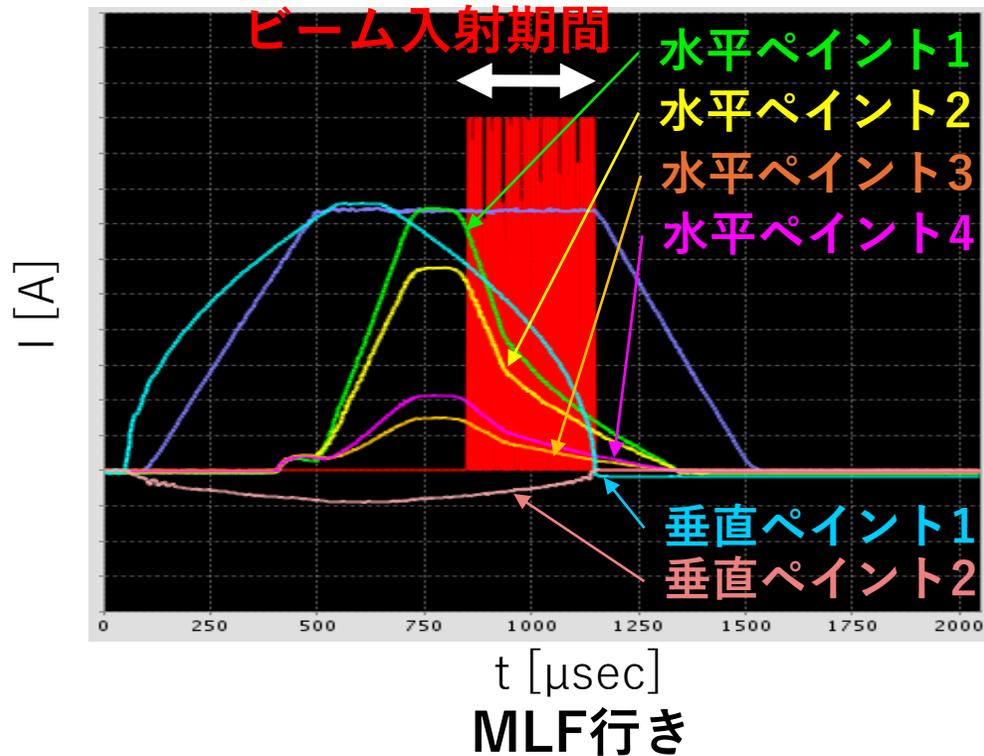
原田寛之 PASJ2008 p349-351

# ペイントバンブ電磁石の特徴

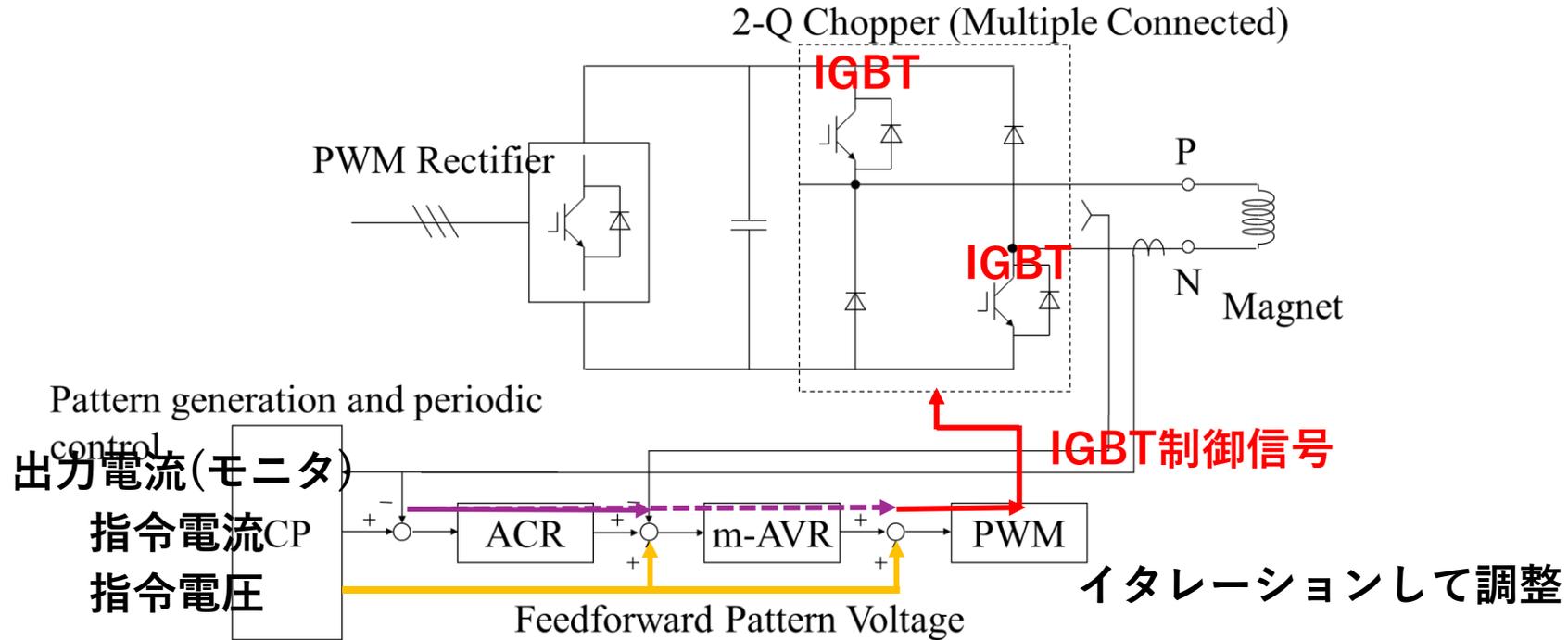
- ビーム試験で使用する台形波形やペインティング入射で使用する減衰波形など任意波形を出力可能
- MLF用とMR用に各々異なる出力パターンを25 Hz のパルスショット毎に変更可能
- 実際に使用する波形の種類
  - (台形波形5種 × 6台) + {減衰波形5種 × (MLF + MR) × 6台} = 90パターン

位相空間上の広がり

位相空間上の広がり



# ペイントバンブ電磁石電源の基本構成



- ペイントバンブ電源
  - スwitchのON/OFF高速切替え (54kHz × 12多重並列 = 648 kHz)  
⇒ 電圧を制御することで電流波形を形成する
- IGBT制御信号の形成が制御の核心
  - 指令電流 (Feed back) → 目標波形
  - 指令電圧 (Feed forward) → 調整波形
- 指令電流と出力電流の偏差 ±1.0%

# 本研究の背景

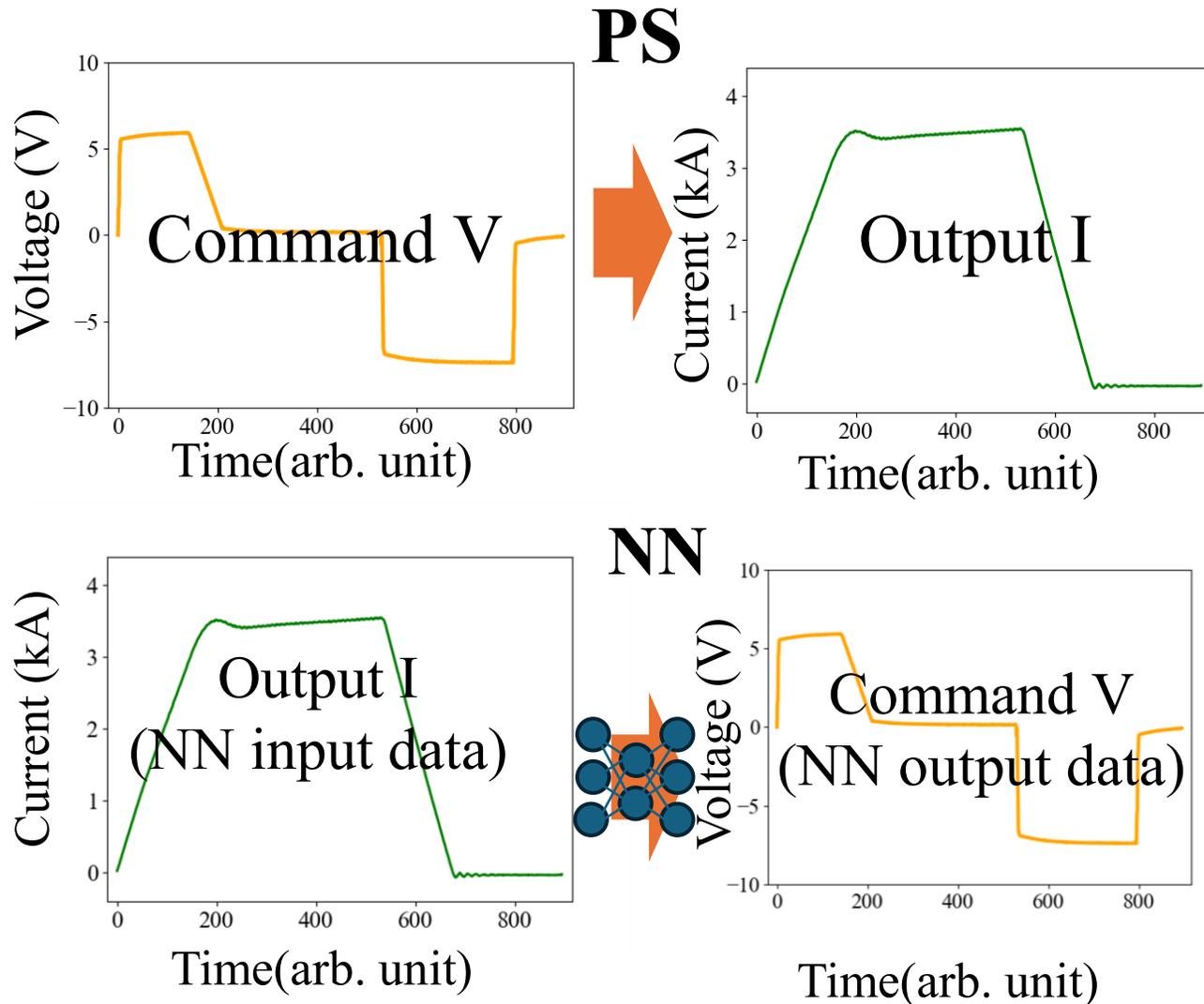
## ◆課題

- **1つの波形パターン調整に1時間程度**
  - ⇒パターン調整の時間短縮
  - ⇒時間が限られるビーム試験の効率化
- **パターン調整はエキスパート(ペイントバンブ担当者)に限られる**
  - ⇒未経験者もパターン調整可能
  - ⇒様々な波形パターン調整可能

## ◆目的

- **指令電圧波形と出力電流波形における非線形の関係性をニューラルネットワーク(NN)で記述**
- **目標電流波形を出力できる指令電圧波形を瞬時に予測**

# ペイントバンブ電源波形(台形)の学習



## 学習

- ① ペイントバンブ電源に**指令電圧波形**を入力し**出力電流波形**を測定  
→学習データを作成する
- ② 測定した**出力電流波形**をNNに入力し**指令電圧波形**を出力できるように学習させる

※今回は試験用のペイントバンブ電源を用いて実施

# 学習過程(台形)

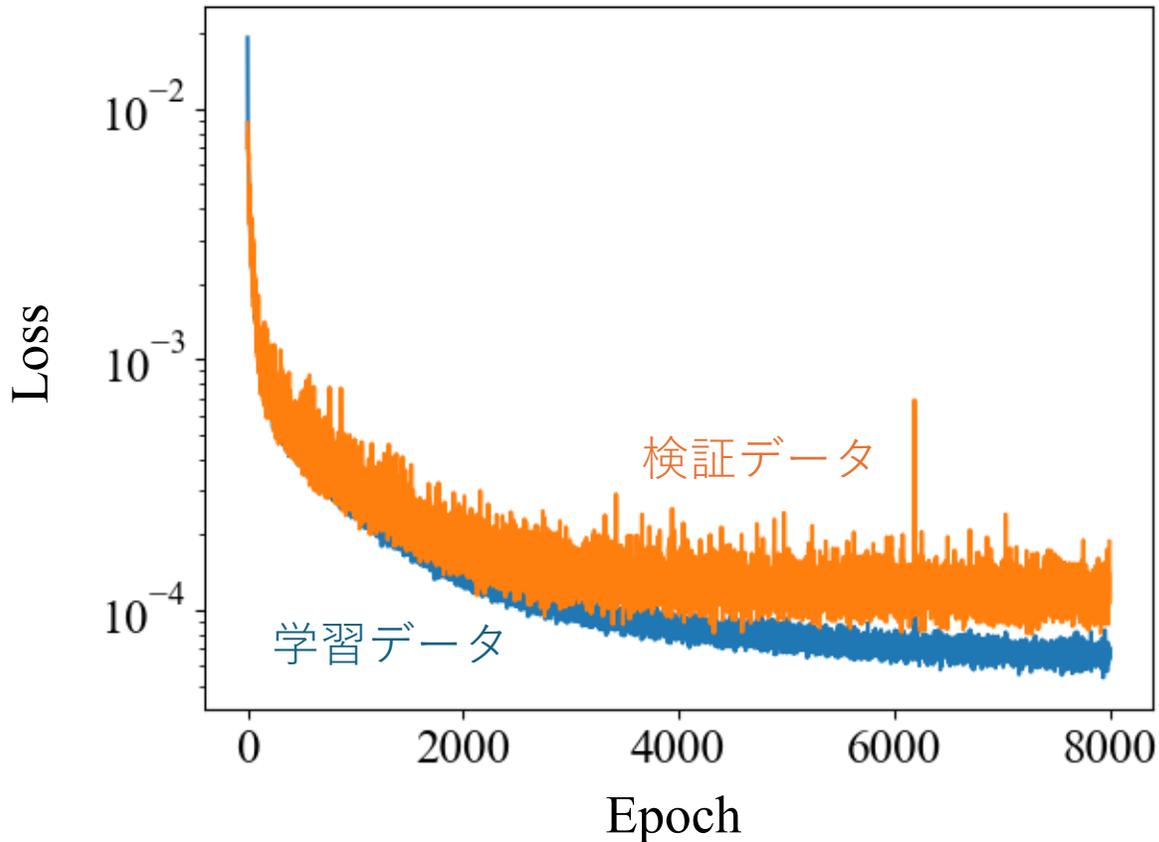


図: 台形波形の学習過程

損失関数(平均二乗誤差)

$$Loss_{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2$$

$\hat{y}$ : 予測データ

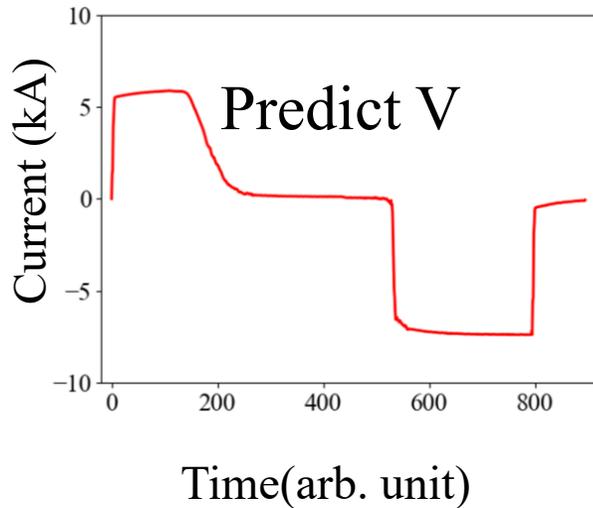
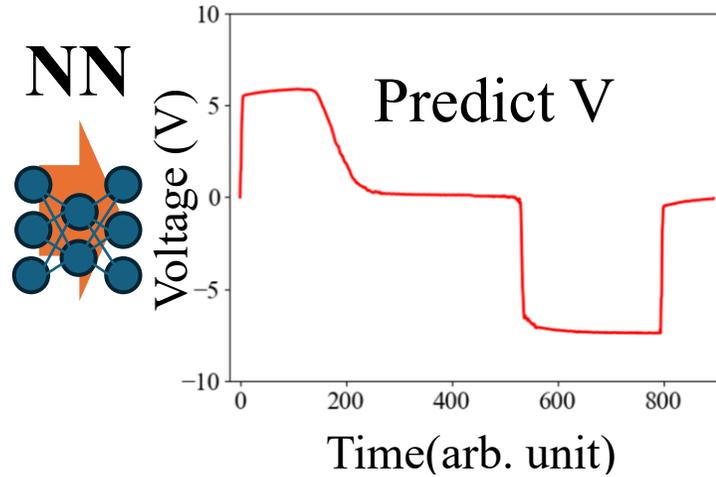
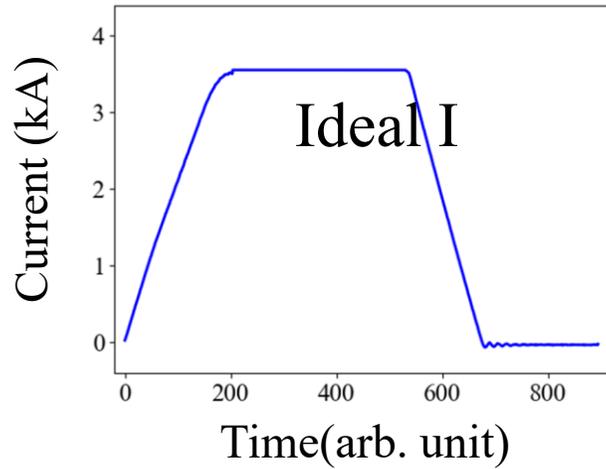
$y$ : 教師データ(正解)

$n$ : データセット数

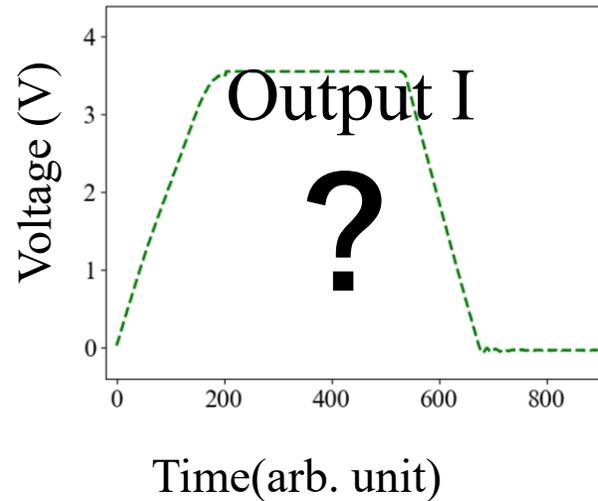
学習回数を重ねることでLossが減少  
⇒ 予測データと教師データが一致

非線形の関数をNNで表現できた

# ペイントバンブ電源波形(台形)の確認



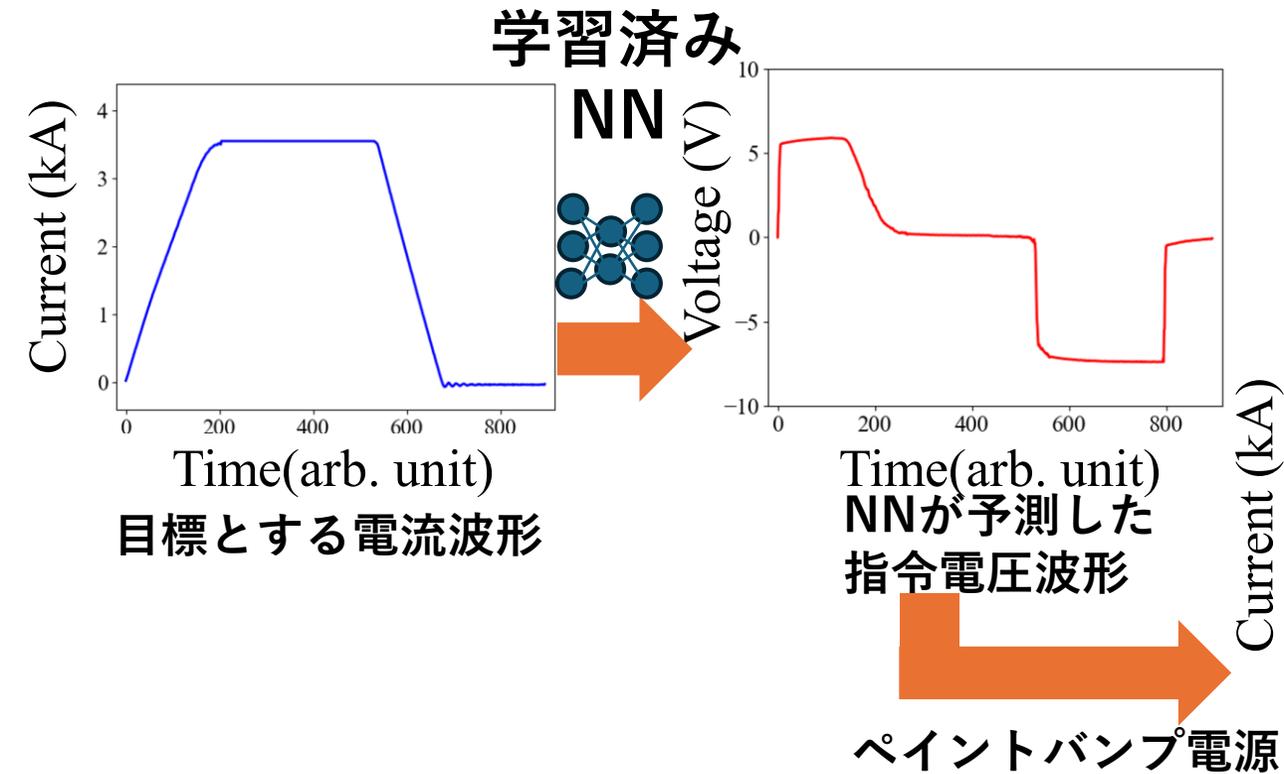
PS



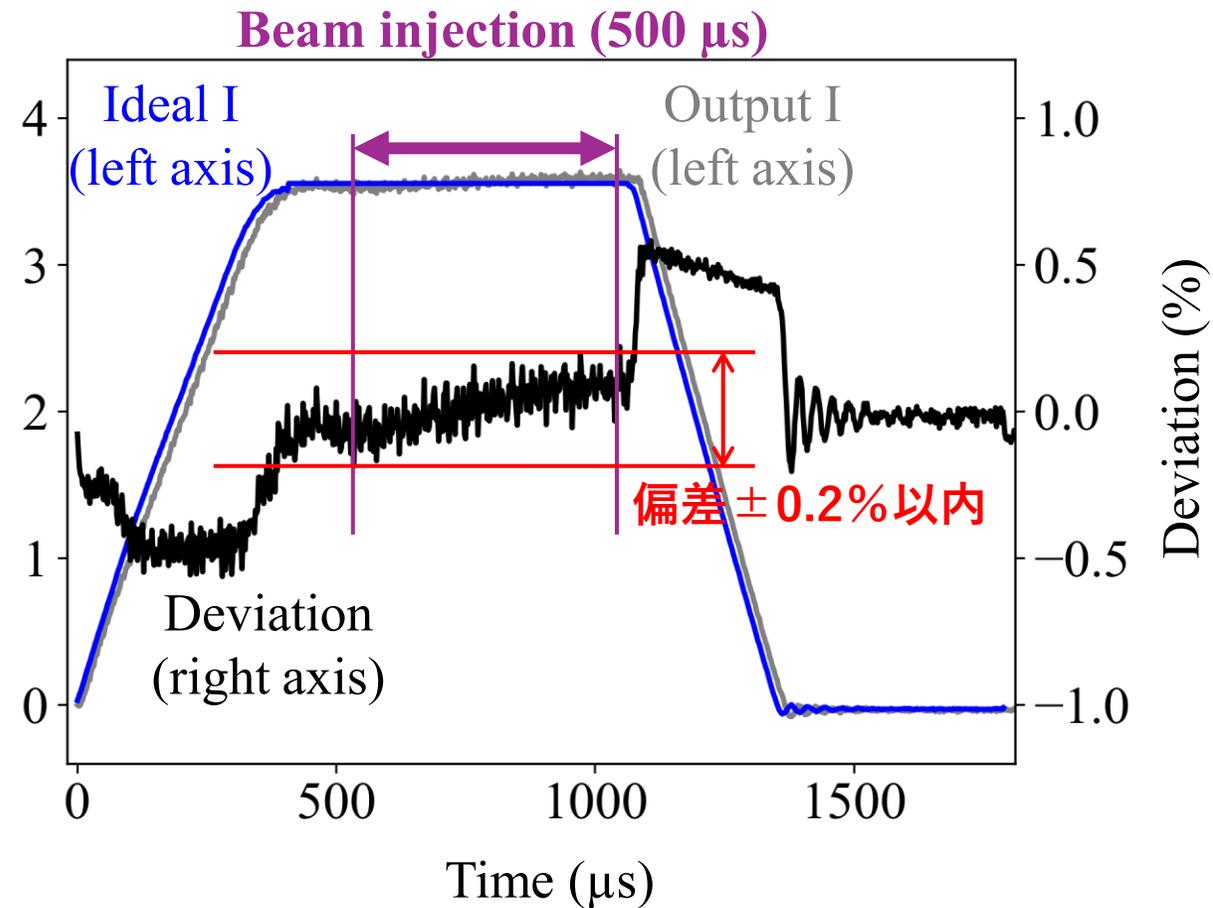
## 確認

- ① 学習済みNNに**目標とする電流波形**を入力し、**指令電圧波形**を予測させる
- ② 予測された**指令電圧波形**をペイントバンブ電源に実際に入力し、**出力電流波形**を確認する

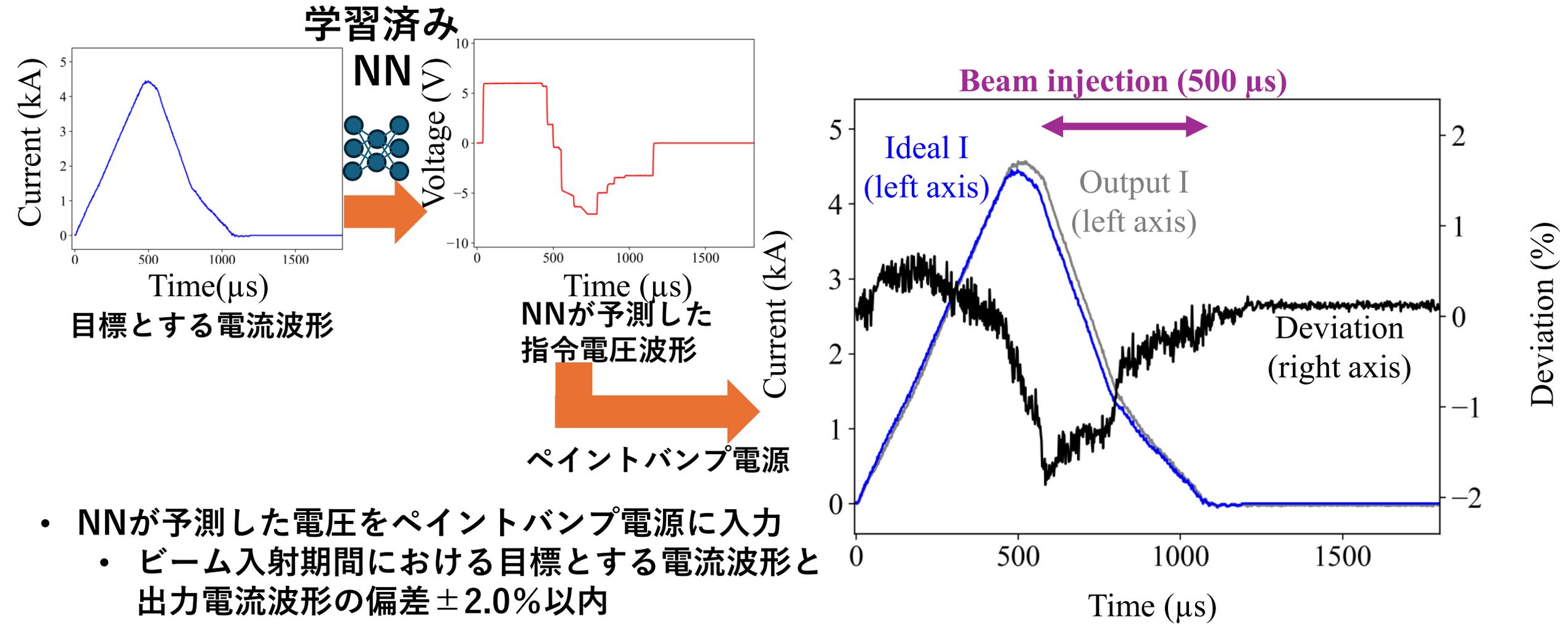
# 予測電圧波形の確認(台形)



- 予測に要した時間は数秒
- NNが予測した電圧をペイントバンプ電源に入力
  - ビーム入射期間における欲しい電流波形と出力電流波形の偏差  $\pm 0.2\%$  以内
  - ⇒ 要求精度を達成



# 予測電圧波形の確認(減衰)



# 減衰波形の結果に対する考察

	指令電圧	出力電流
データ1	Command	Output
データ2	Predict	Ideal

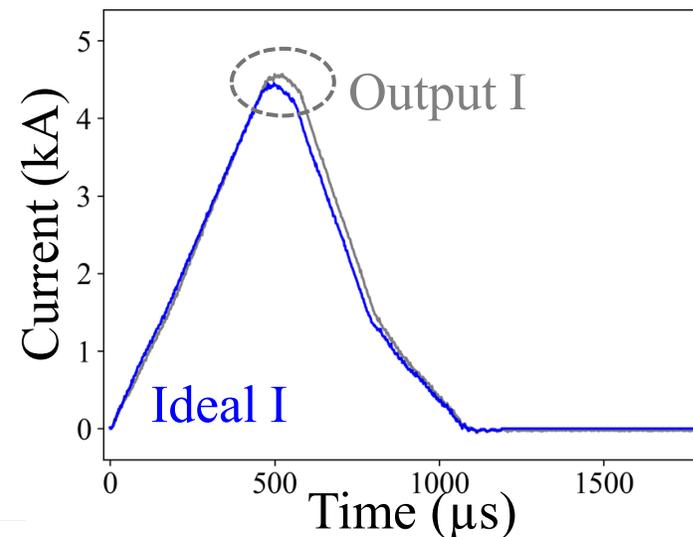
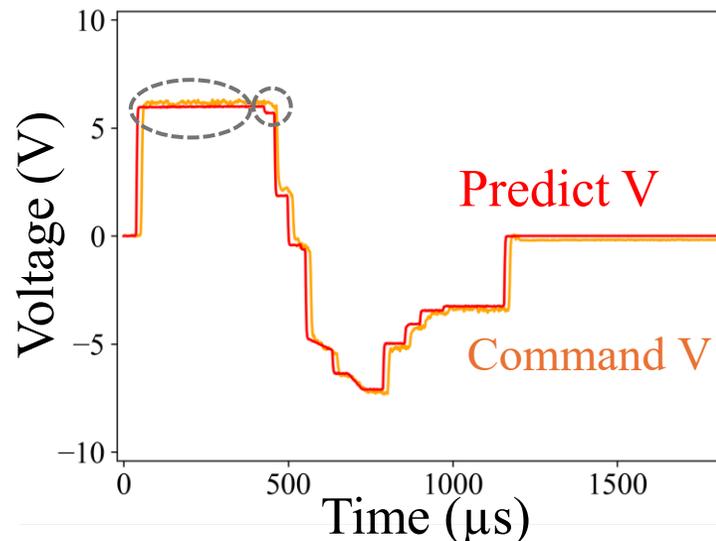


図:NNが予測した指令電圧波形(Predict V)と目標とする電流波形を実際に出力する際に必要な電圧波形(Command V)

図:目標とする電流波形(Ideal I)とNNが予測した指令電圧波形をペイントバンプ電源に実際に入力した場合の出力電流波形(Output I)

## ◆ 原因

- 電圧値を比較
    - 立ち上がり直後の電圧値が低い
    - 500μs付近の電圧立下りが再現できず
- ⇒ 500μs以降の電流値が低下

## ◆ 改善案

- データセットの増加
  - 現在約500個を使用。倍程度に増やす
- 学習パターンの種類
  - 500μs付近の電圧立下りについて複数パターン学習させる

# まとめと今後の展望

## ◆まとめ

- ニューラルネットワークによって電圧と電流の相関関係(モデル)を学習することで、電流波形から指令電圧波形を予測することが可能
  - ビーム試験で使用する台形波形
    - 調整時間が1時間から数秒へ
    - 要求精度 $\pm 1.0\%$ 以内に対して $\pm 0.2\%$ を達成

## ◆今後の展望

- ペインティング入射で使用する減衰波形
  - データセット数の増加
  - 学習パターンの種類
- 実機のペイントバンパ電源を用いて同様の検証を行う
- ペイントバンパ波形とビームの情報を併せて学習させ、より最適化されたペイントバンパ波形を予測する