

プラズマシミュレータを利用した LHDプラズマのデジタルツイン制御

森下侑哉

京都大学大学院工学研究科

京大 : 村上定義

核融合研 : 鈕持尚輝, 舟場久芳, 長壁正樹, 本島巖, 横山雅之, 坂本隆一 他

統計数理研 : 上野玄太, 奥野彰文

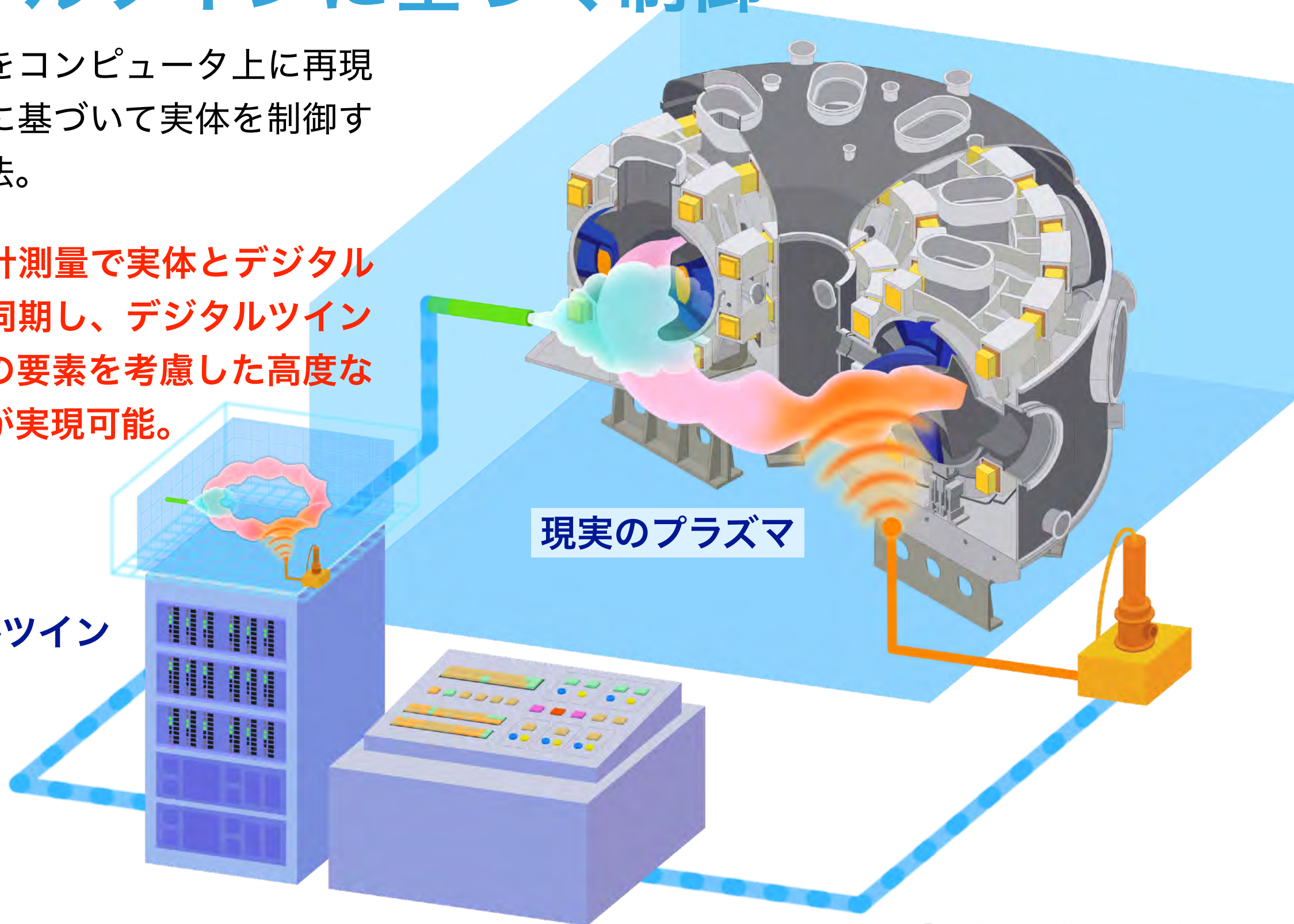


デジタルツインに基づく制御

- ▶ 制御対象をコンピュータ上に再現し、それに基づいて実体を制御する制御手法。
- ▶ 限られた計測量で実体とデジタルツインを同期し、デジタルツイン上で多くの要素を考慮した高度な総合制御が実現可能。

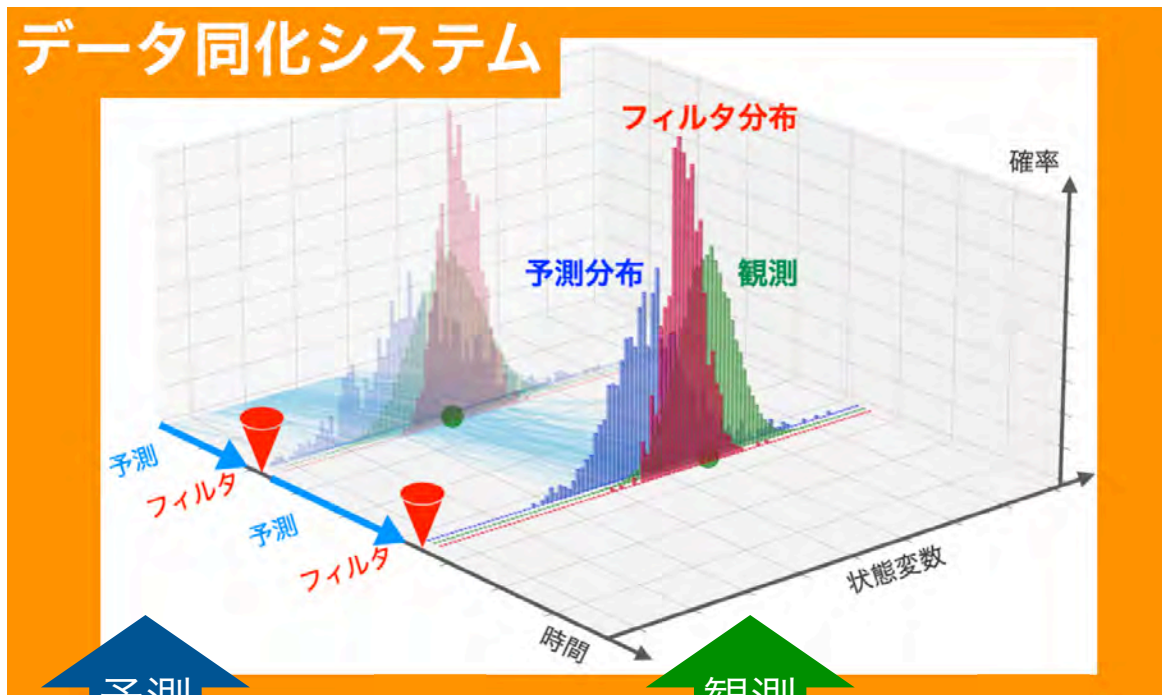
デジタルツイン

現実のプラズマ



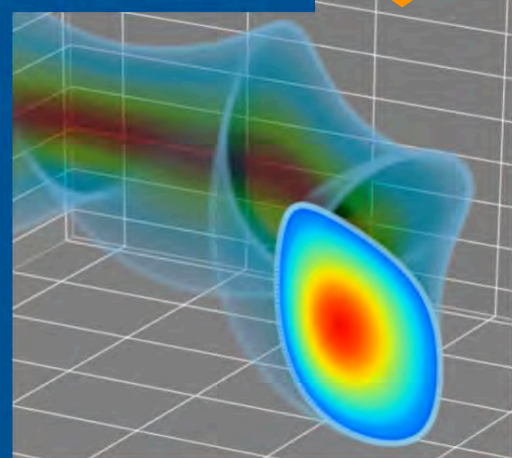
ASTI (Assimilation System for Toroidal plasma Integrated simulation)

データ同化システム



数値空間

最適化



デジタルツイン

実空間

制御



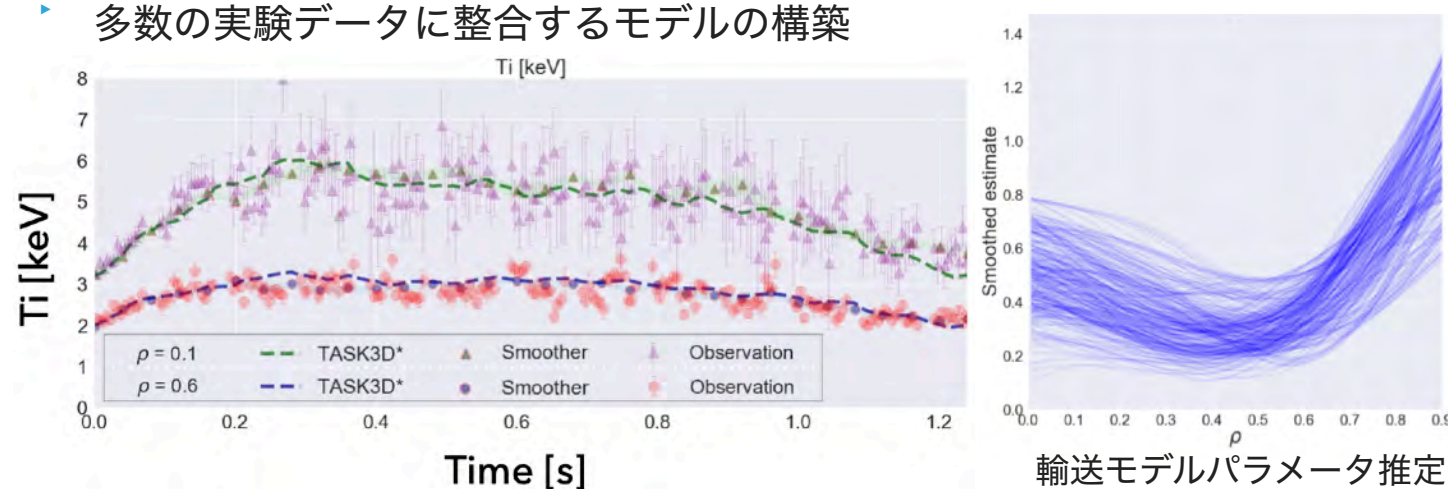
核融合プラズマ

解析システム として

[Morishita+, Nuclear Fusion, 2020]

[Morishita+, Comput. Phys. Commun., 2022]

- 観測できない変数, 観測時系列データを再現するモデルパラメータの推定
- モデル比較
- 多数の実験データに整合するモデルの構築

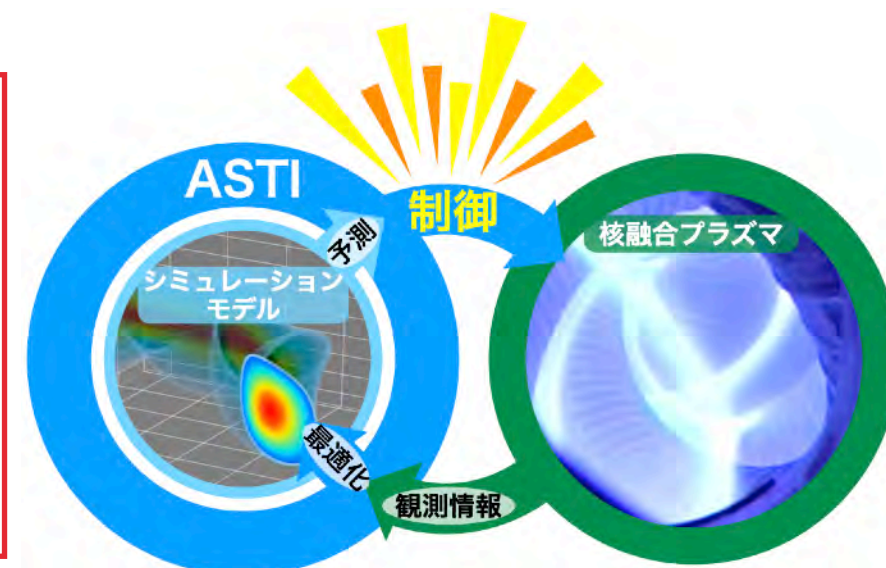
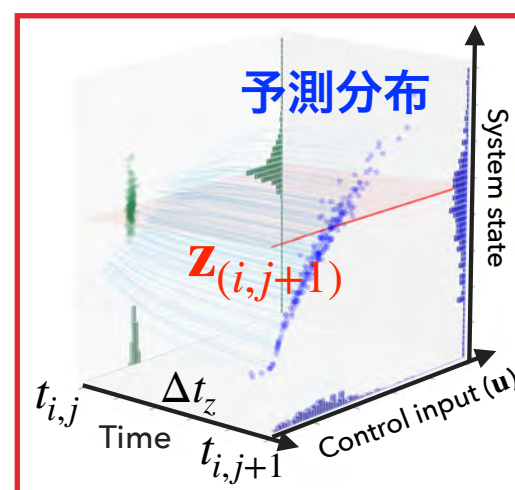


制御システム として

[Morishita+, J. Comput. Sci., 2023]

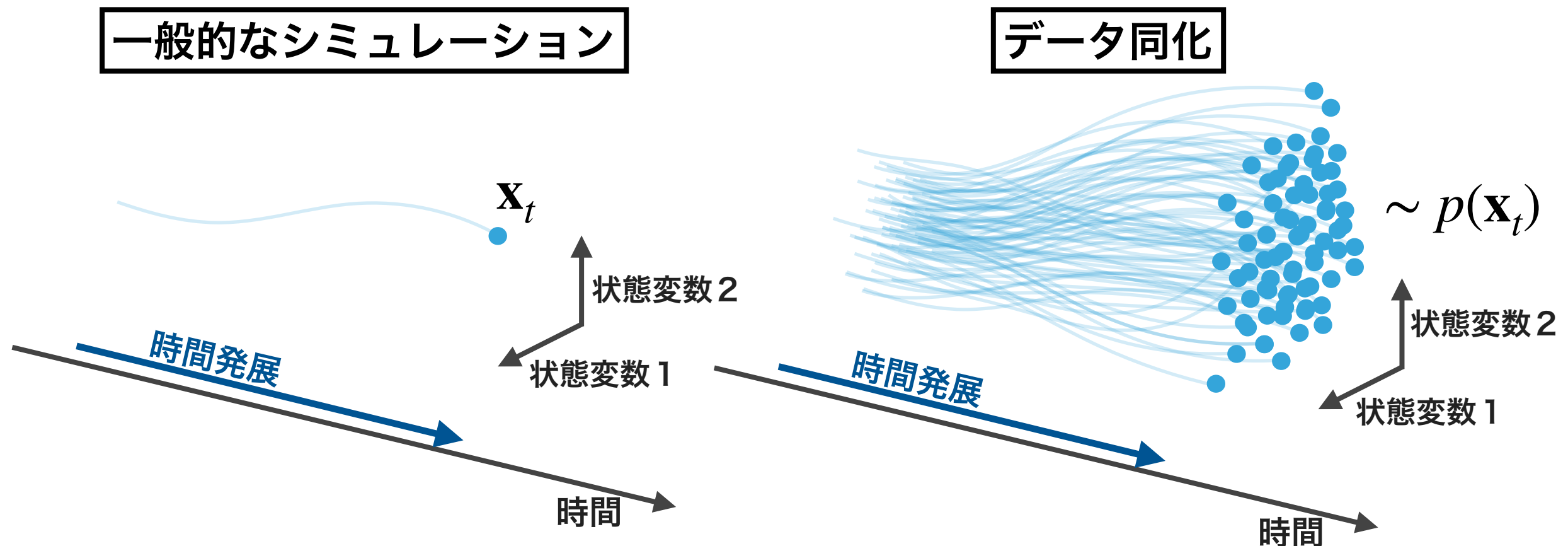
[Morishita+, Sci. Rep., 2024]

[Morishita+, PFR, 2025]



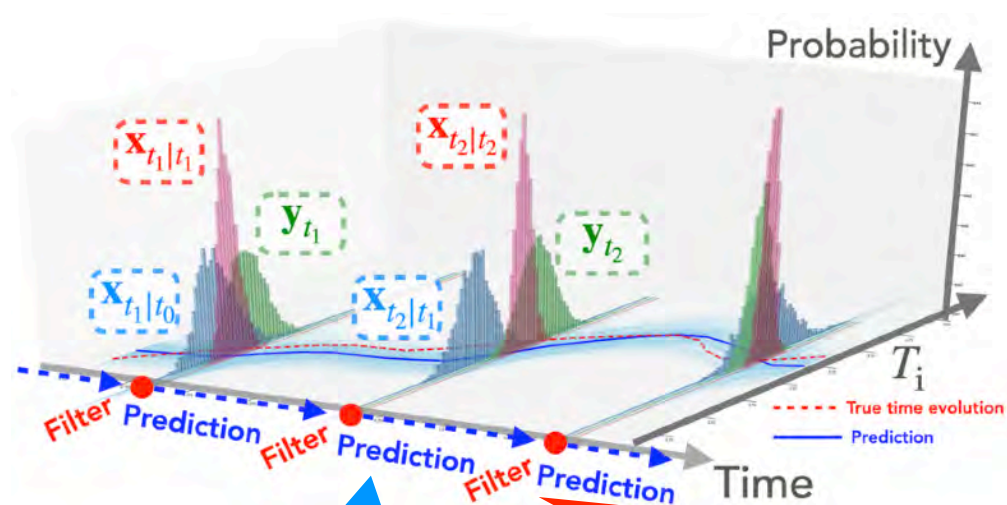
データ同化を実現する方法

- ▶ データ同化では、状態変数の確率分布（状態分布）を考える。
- ▶ 確率分布の複雑な時間発展および最適化（同化）計算を実現するには工夫が必要。
- ▶ 確率分布を多数の並列したシミュレーションで近似（アンサンブル近似）する。



アンサンブル近似に基づくデータ同化手法

状態変数の不確実性を表現する確率分布（状態分布）をアンサンブルにより近似し，各アンサンブルメンバーに対して予測とフィルタを施すことで逐次ベイズフィルタを実現する。

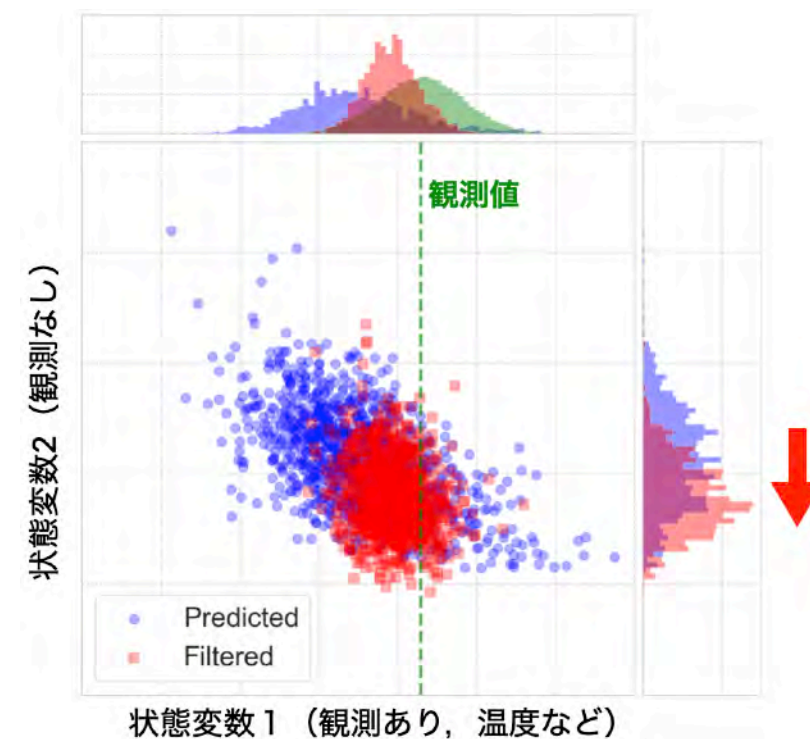
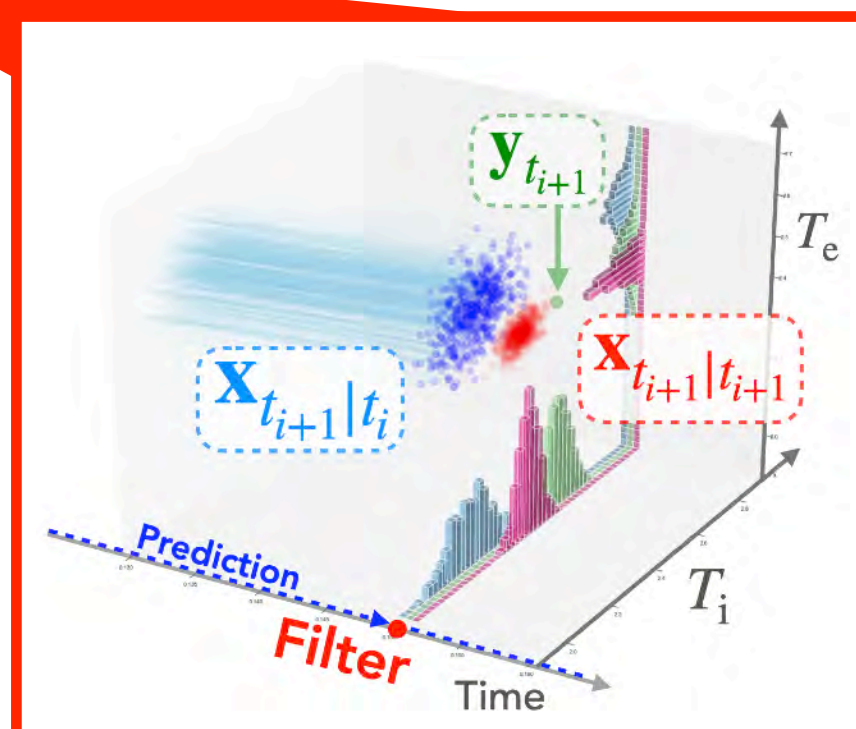
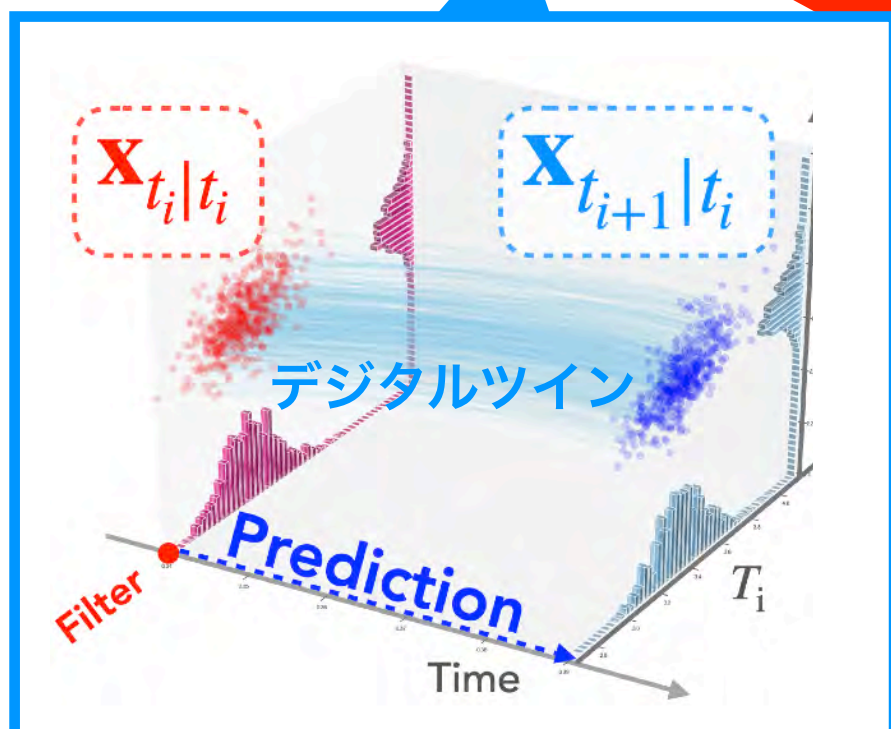


Ensemble Kalman Filter (EnKF)

確率分布としてガウス分布を仮定することでフィルタ計算を軽量化。少数のアンサンブルメンバーでも比較的に安定に実行可能。

Particle Filter (PF)

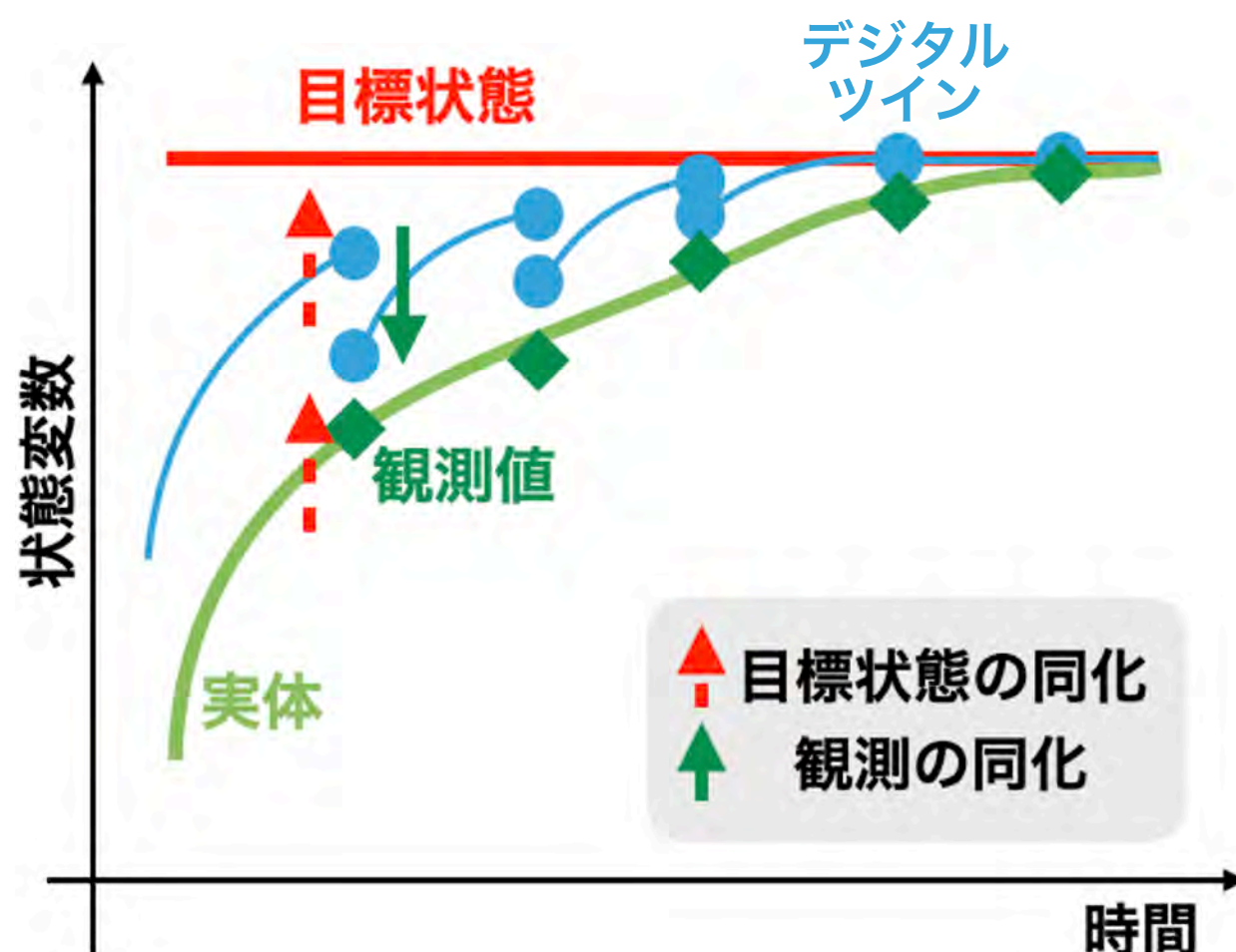
任意の確率分布形状に対するフィルタをアンサンブルメンバーの復元抽出を利用して実現。多数のアンサンブルメンバーが必要。



DACS (Data Assimilation and Control System)

[Morishita+, J. Comput. Sci., 2023]

- 従来のデータ同化の枠組みを拡張し、適応的予測制御のための枠組み**DACS**を開発した。
- デジタルツインの挙動を実体に近づけつつ、精度が高い状態のデジタルツインに基づいて制御推定を行うことができる。



一般的な DA
+
制御

Prediction

Δt 先の状態分布をデジタルツインを用いて予測する。

$$p(\mathbf{x}_i | \mathbf{y}_{0:i-1}, \mathbf{u}_{0:i}^*) \rightarrow p(\mathbf{x}_{i+1} | \mathbf{y}_{0:i-1}, \mathbf{u}_{0:i}^*)$$

y-filter

適応 (同期)

実時間に逐次的に得られる観測 $\mathbf{y}_i$ を最新の状態分布に反映させて、デジタルツインを最適化する。

$$p(\mathbf{x}_{i+1} | \mathbf{y}_{0:i-1}, \mathbf{u}_{0:i}^*) \rightarrow p(\mathbf{x}_{i+1} | \mathbf{y}_{0:i}, \mathbf{u}_{0:i}^*)$$

z-filter

制御推定

目標状態 $\mathbf{z}_{i+1}$ を実現するための制御 $\mathbf{u}^*$ を推定する。

$$p(\mathbf{x}_{i+1} | \mathbf{y}_{0:i}, \mathbf{u}_{0:i}^*) \rightarrow p(\mathbf{u}_{i+1} | \mathbf{y}_{0:i}, \mathbf{u}_{0:i}^*, \mathbf{z}_{i+1})$$

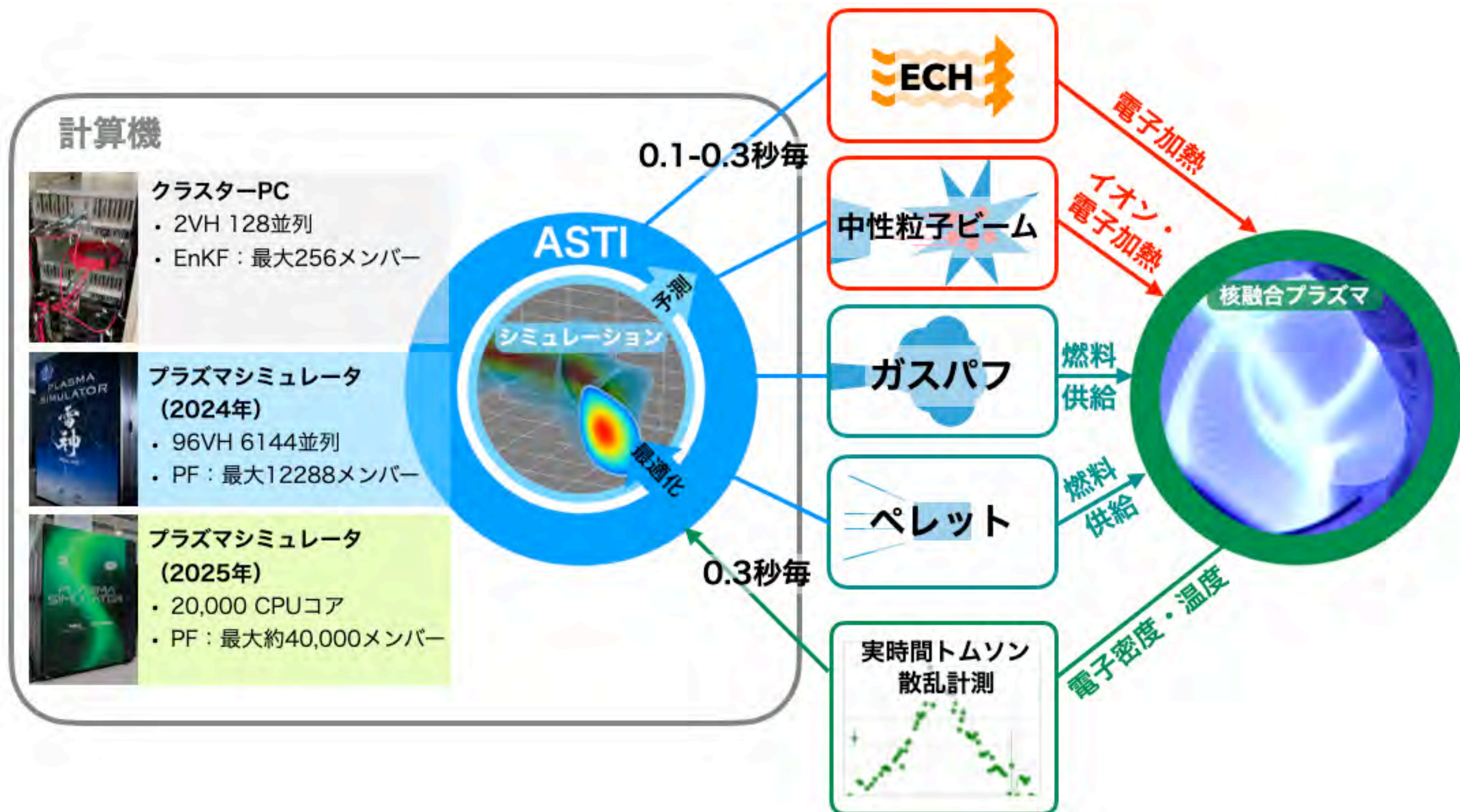
u-filter / prediction

制御入力 $\mathbf{u}^*$ を行った場合の状態分布を予測する。

$$\rightarrow p(\mathbf{x}_{i+1} | \mathbf{y}_{0:i}, \mathbf{u}_{0:i+1}^*)$$

LHDにおけるデジタルツイン制御システム

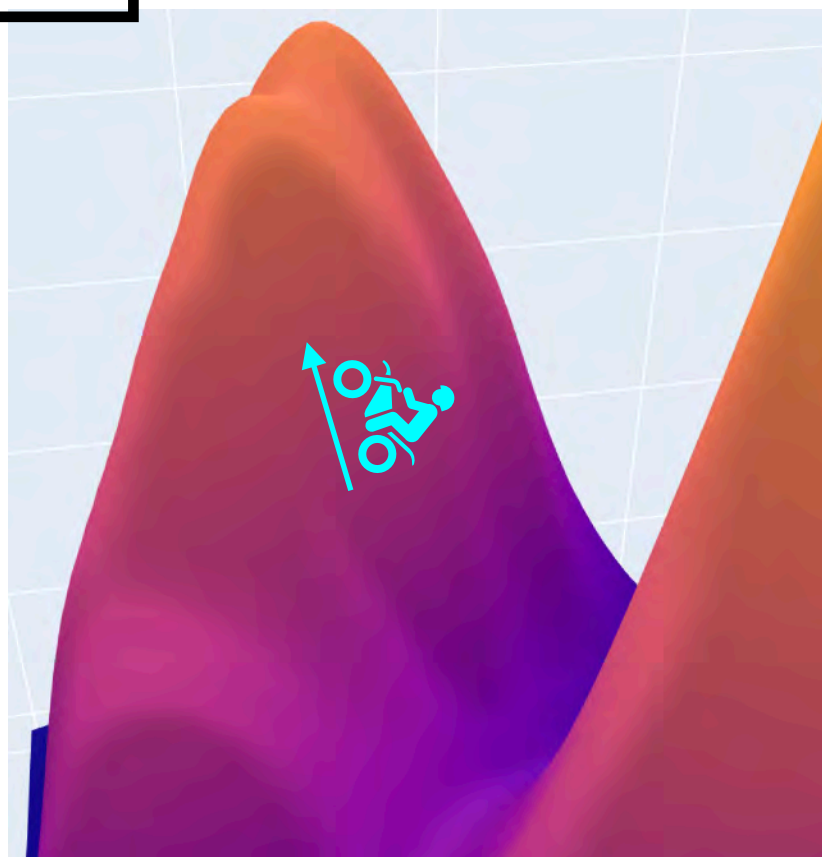
ASTIを中心とした適応的予測制御システムをLHDにおいて構築している。



同化計算

EnKF

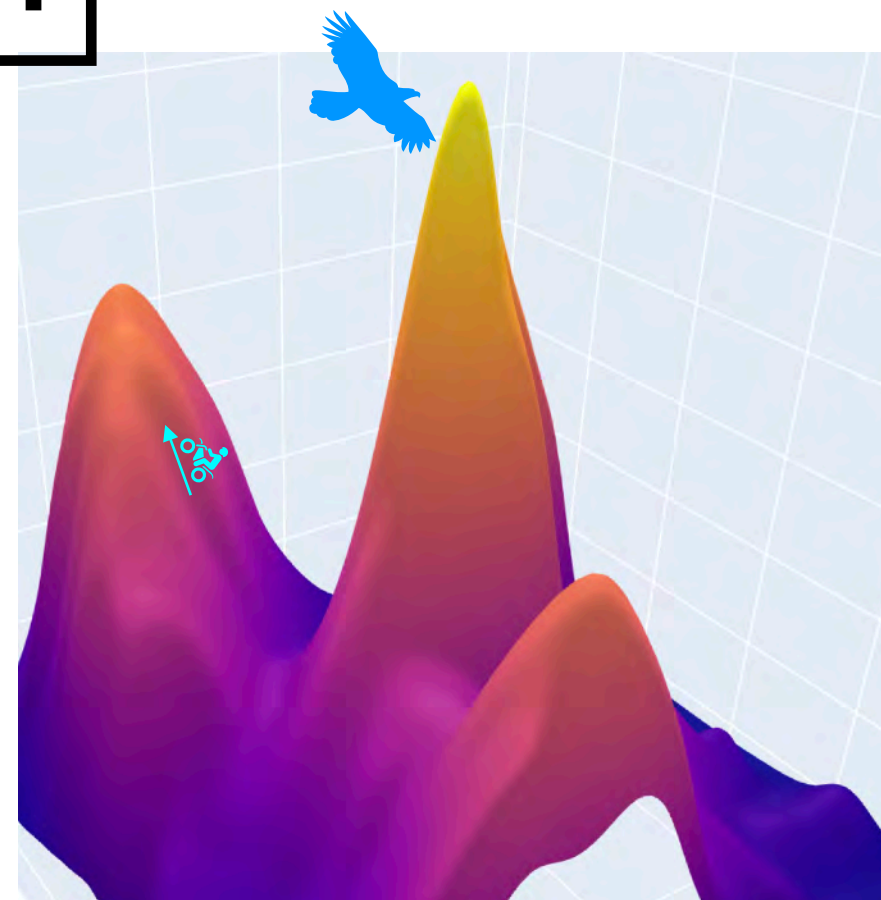
Ensemble Kalman Filter



状態分布をガウス分布で近似してフィルタ計算を行う。 変数間の線形な関係性を抽出して、推定を進めて行くため、変数間の関係性の非線形性が強い場合には推定精度が落ちる。制御入力の連続的な調整には強い。

PF

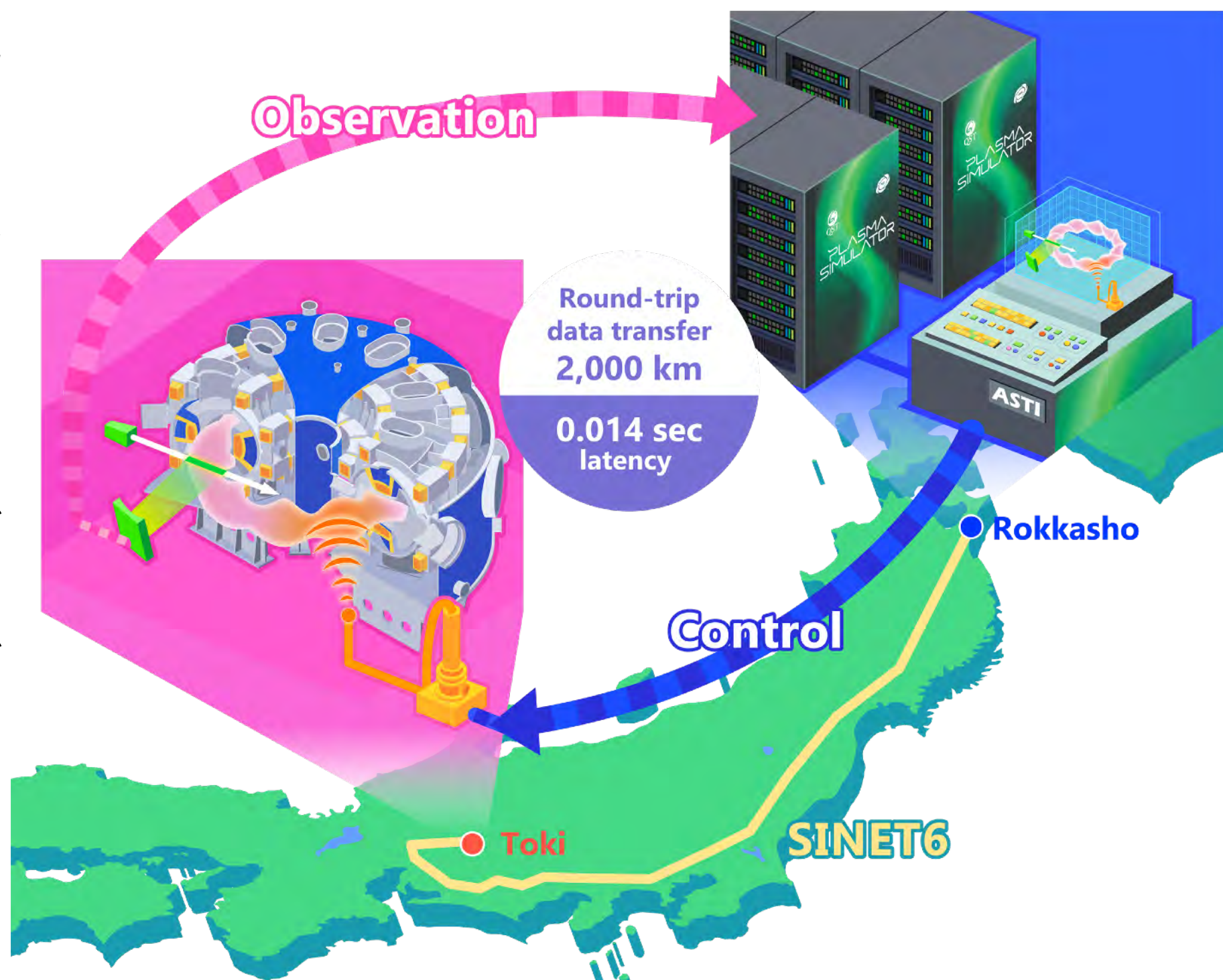
Particle Filter



アンサンブルメンバーの復元抽出によりフィルタを計算するため、状態分布に一切の仮定を置かない一方で、多数のアンサンブルメンバーが必要となる。 変数間の複雑な関係性や制御入力のジャンプにも対応できる。

新プラズマシミュレータによるLHDプラズマの遠隔制御

- ▶ PFを用いたより制御を実現するため、LHDと青森県六ヶ所村に設置されている**新プラズマシミュレータ**とを接続し、制御実証実験を行った。
- ▶ 2者間の通信にかかる時間は**0.014秒**であり、約1000km離れた実体とデジタルツインとを実時間で同期することができる。
- ▶ 今期のLHD実験では、プラズマシミュレータの計算資源のうち、**20000CPUコア**を実験のために占有し、状態分布の近似に用いている。

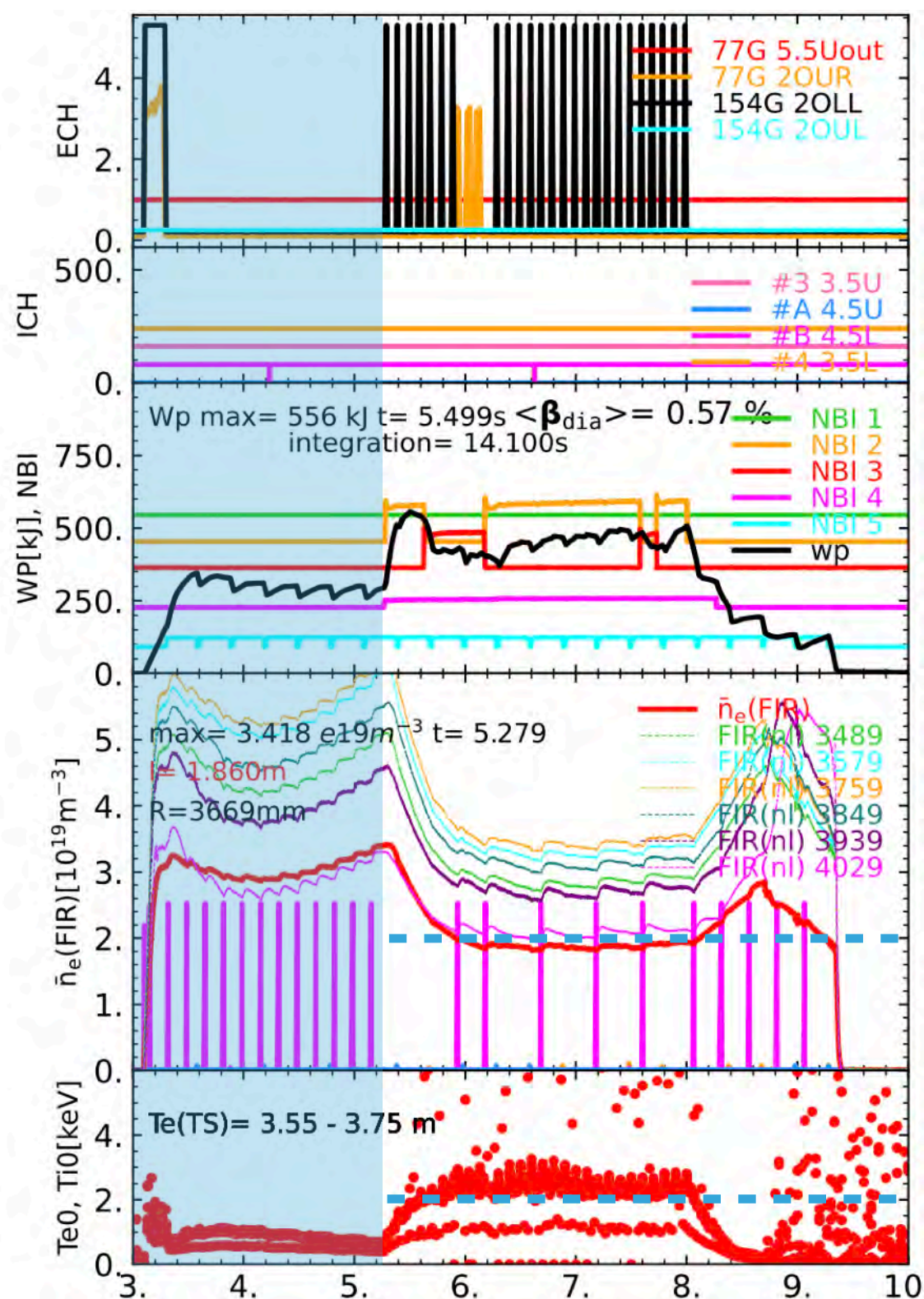


制御実証実験

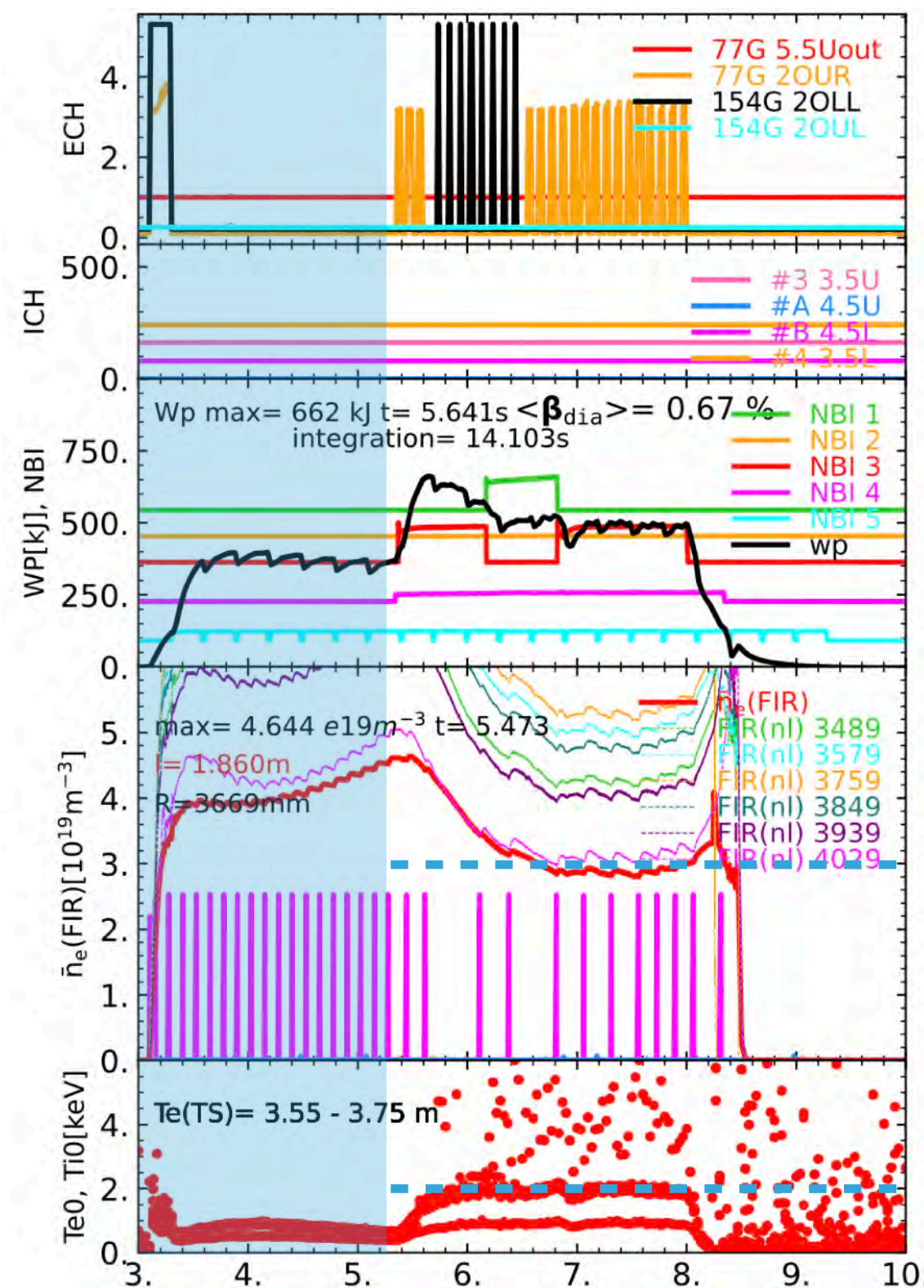
- ▶ ECH、ガスパフ、NBをアクチュエータとして、電子温度・電子密度・イオン温度の多変量制御を行った。
- ▶ 10000アンサンブルメンバー
- ▶ 300 msおきにリアルタイムトムソンからの電子温度・密度を受け取り、同化する。
- ▶ 目標状態として、電子温度・電子密度・イオン温度それぞれの中心 ($\rho = 0$) での値を取った。

状態変数		Dim	
T_e	電子温度	11	観測, 目標
T_i	イオン温度	11	目標
n_e	電子密度	11	観測, 目標
C_e	電子熱拡散係数に掛かる因子	11	
C_i	イオン熱拡散係数に掛かる因子	11	
D	粒子拡散係数に掛かる因子	11	
V	粒子対流速度	10	
g	ガスパフモデルパラメータ	2	
P_{ECH}	ECH パワー	1	アクチュエータ
f_{GP}	パルスガスパフの周波数	1	アクチュエータ
P_{NBI}	NBI加熱パワー	2	アクチュエータ

#199814 ターゲット : (ne, Te, Ti) = (2,2,2)

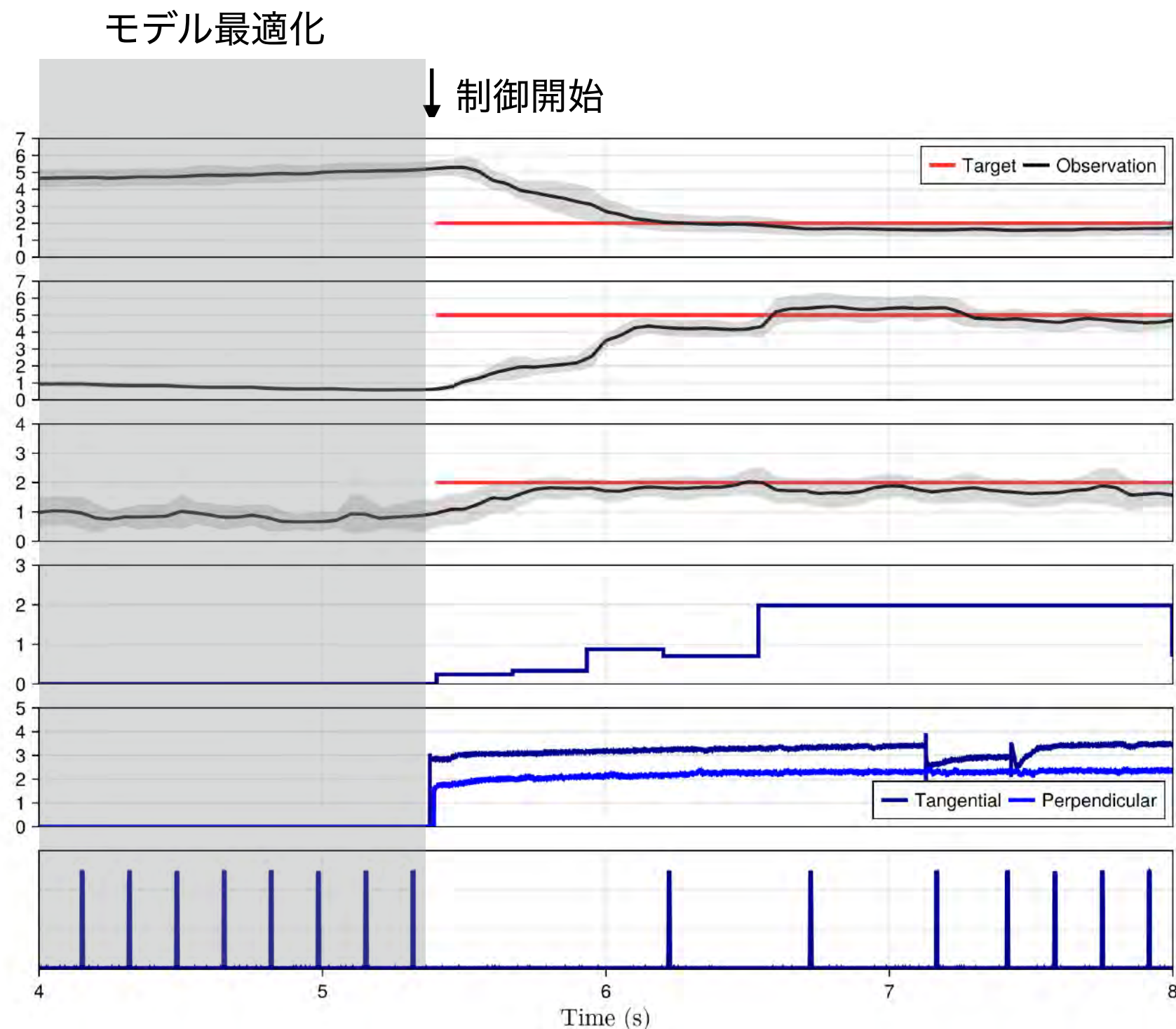


#199828 ターゲット : $(n_e, T_e, T_i) = (3, 2, 2)$



実験結果例

- ▶ 目標状態(n_e , T_e , T_i) = $(2 \times 10^{19}, 5, 2)$
- ▶ 10000アンサンブルメンバー
- ▶ モデルパラメータの逐次最適化が進みながら、ECH, NBI, ガスパフの制御が機能しているのが分かる。
- ▶ 観測のない T_i について、目標温度付近で維持できている。



制御誤差

- ▶ 制御入力を変化させて作り出すことができる状態をデジタルツインにより予測。
- ▶ 目標状態を作り出せる制御入力の組み合わせを確率的に推定。
- ▶ 最適値推定には事後分布のモードシーキングを使用。
- ▶ 制御推定後の事後分布はターゲット状態周辺に集まっているが、実体の値とずれている場合がある。
- ▶ 実体とデジタルツインのズレは、主に輸送モデルの最適化が不十分であることが原因と考えられる。
- ▶ デジタルツイン内で状態変数間を密に関係づけておくことが予測・制御精度向上の鍵。

まとめ

- ▶ データ同化の技術を応用することで、核融合プラズマのデジタルツイン制御を行うことができるシステム**ASTI**を開発している。
- ▶ LHDおよびプラズマシミュレータを用いた実験により、**データ同化を用いたデジタルツイン制御（適応型予測制御）**の電子温度、イオン温度、電子密度に関する多変量制御の実証に成功した。
- ▶ この制御技術は、これまでは難しかった多変量制御や、直接計測していない量の制御にも適用できるため、**核融合炉全体を制御するための基盤技術となることが期待される。**
- ▶ 加熱・燃料供給モデルおよび輸送モデルの改良を進めるとともに、システム全体の計算コスト低減を行う。
- ▶ **CHD, HSX, JT-60SA**などの他の装置への拡張を進めている。